

1. 특 별 강 연

집합조직과 소성가공

- 허무영 교수(고려대학교) -

2. 특 별 세 셴

정밀 소성가공 시뮬레이션 기술
(제 1 발표회장)

단조 시뮬레이터의 정확도에 관한 고찰

전만수^{1, #}

Consideration on Accuracy of Forging Simulation

M. S. Joun

Abstract

Accuracy of forging simulation is deliberated to give the insight on solution reliability to application engineers or researchers in this presentation. Major factors affecting results of forging simulation are introduced with proper applied examples, involving theory of plasticity, remeshing characteristics, numerical schemes, material properties, frictional conditions, thermal conditions and process conditions such as die motion. Many efforts to enhance solution accuracy and reliability which are being made or will be made in near future are also given together with some typical examples.

Key Words : Forging Simulation (단조 시뮬레이션), Solution Accuracy (해의 정확도), Theoretical Causes (이론 적 요인), Numerical Causes (수치적 요인)

1. 서 론

단조 시뮬레이션 기술은 단조 공정 설계와 엔지니어링 업무에 혁신을 불러 일으켜 왔으며, 개발 원가절감과 생산성 향상을 넘어 이제는 품질의 관리 영역에까지 이르고 있다. 다수의 단조품의 사용자가 제조자에게 단조 시뮬레이션 결과의 제시를 요구하고 있다.

특히 과거의 경험 기술과 수작업에 의존하던 공정 개발 과정이 CAD, CAM, CAE의 활용으로 급변하면서, 경험 기술의 상당 부분이 CAE 기술로 대체되고 있다. CAE 기술, 즉 단조 시뮬레이션 기술의 적용 초창기에는 예측결과들이 참고자료로 사용되었지만, 해석결과의 정확도의 향상과 함께 시뮬레이션 결과에 대한 의존도가 크게 증가하고 있다.

단조 시뮬레이션 결과를 좌우하는 요소에는 이론적 배경, 수치적 기법, 재료의 물성치, 마찰조건, 공정조건 등이 있다. 경험적으로 볼 때, 이러한 요소들에 대하여 전문적으로 고려하지 않아도 대부분의 덩어리 형태의 제품 단조공정

의 형상은 공학적으로 비교적 정확하게 예측되고 있다. 실제 단조회사에서 단조품의 형상의 예측이 매우 중요하다. 금형의 파손과 제품의 품질, 즉 단류선과 직결되기 때문이다. 이러한 거시적 결과는 사실상 비교적 잘 맞을 수밖에 없다. 단조 시뮬레이션은 질량, 운동량, 에너지의 세 가지 양의 보존법칙을 푸는 것인데, 삼각형 요소 및 사면체 요소의 경우 수치적으로는 약간의 문제가 있기는 하지만[1], 질량보존법칙을 맞추는 것은 어려운 일이 아니기 때문이다. 따라서 전반적인 형상이나 단류선으로 단조 시뮬레이션 결과의 정확도를 평가하는 단계를 다수의 사용자들이 벗어나고 있다.

형상 예측결과와는 달리, 성형하중, 국부적인 형상, 정형단조품의 치수 등이 다소 현실과 다른 결과를 예측하기도 한다. 구체적으로 예를 들면, 열간단조공정에 대한 예측결과에서 성형하중이 실제보다 상당히 큰 경우가 존재하며, 후방압출에서 선단면의 모양이나 전후방압출시의 파이핑 현상이 실제보다 뚜렷하지 않은 경우가 있다. 그리고 단조 시뮬레이션 결과에만 의존하여 베벨기어와 같은 정형 단조품의 공정설계가 용이하지 않다.

1. 경상대학교 대학원 기계공학과/㈜엠에프알씨
교신저자: E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

이러한 요소들에 대한 고신뢰성의 결과를 얻는 것에는 개발자나 사용자들의 노력이 필요하고, 상호 긴밀한 교류가 필수적이다.

선행연구 [2-7]에서 수치적 기법, 재료의 물성치, 마찰 및 공정 조건에 관한 연구 결과들이 소개되었다. 이 논문에서는, 비록 정확도를 정량적으로 분석하는 작업이 쉬운 일은 아니지만, 단조 시뮬레이터 사용자의 직관에 도움을 주고자 단조 시뮬레이션의 정확도에 미치는 이론적 요소를 중심으로 하되, 수치적 요인도 개괄적으로 고찰하고자 한다.

2. 단조 시뮬레이션 결과에 미치는 이론적 요소

이론적 배경에서 사용자 측면에서 신경을 써야 할 점은 탄성변형의 영향, 이방성 및 바우싱거 효과의 영향, 온도의 영향, 금형의 변형의 영향 등의 무시 여부이다.

탄성변형의 반영은 탄소성 유한요소법에 의하여 이루어지고 있으나, 이방성 및 바우싱거 효과 등의 영향을 체적소성가공 시뮬레이션 목적으로는 활용되지 않고 있다. 탄성변형의 무시의 영향은 강소성 유한요소해석과의 비교 검토를 통하여 어느 정도의 직관을 얻을 수가 있다. 스프링백의 영향이 제품의 품질에 영향을 미치지 않는 경우에는 탄성변형을 무시한 강소성 유한요소해석이 경우에 따라서 유리할 수가 있다. 기계가공을 실시하는 단조품이 대체적으로 여기에 속한다. Fig. 1은 강소성과 탄소성 유한요소법으로 해석한 인장시험의 결과를 비교하고 있다 [8]. 이 비교에서 알 수 있듯이, 두 결과의 차이는 상황에 따라 갖는 의미가 다를 수가 있다.

그러나 판재성형 및 판단조와 같이 스프링백이 큰 문제이거나 정형단조공정의 해석의 경우, 탄소성 유한요소법의 활용이 필수적이다. 그러나 탄소성 유한요소법은 전술한 장점도 있지만, 강소성 유한요소법에 비하여 수치적 문제에 더욱 노출되어 있기 때문에 사용함에 있어 유의가 필요하다. 즉, 기존의 강소성 유한요소법으로 해결이 불가능했던 문제부터 점진적으로 적용 범위를 확대하는 전략이 필요하다.

열간단조에서 온도는 재료의 유동응력과 마찰 및 마모와 직결되어 있다. 그러나 경험적으로 볼 때, 소재의 유동에 관심이 있을 때, 등온해석

은 충분한 공학적 가치를 가진 해석결과를 제공한다. 이것은 온도 하강이 큰 경계에서 증가한 유동응력의 영향, 즉 유동 방해를 마찰계수의 조절로 반영할 수 있기 때문이다.

실제, 열간단조의 경우, 이것 이외에도 유동응력의 복잡성과 부정확성 등의 변수가 많기 때문에 등온해석이라는 기준을 중시할 필요가 있다. 그러나 공학적으로 유의미한 금형의 마모수명과 소재의 재료학적 성질을 공학적으로 예측하기 위해서는 비등온해석 기반의 마모수명과 재료학적 성질에 관한 연구가 더 필요하다. Fig. 2는 등온해석 기능을 이용하여 획득된 제1세대 허브베어링 외륜의 단류선을 비교하고 있다 [3].

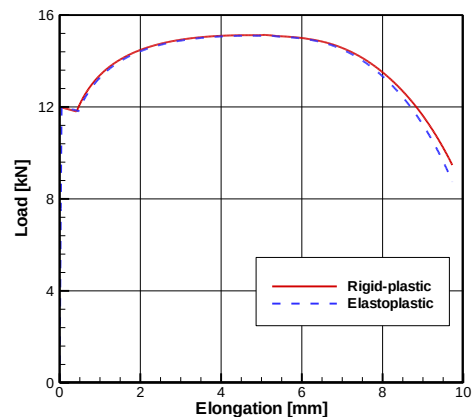


Fig. 1 Comparison of rigid-plastic and elastoplastic finite element analyses

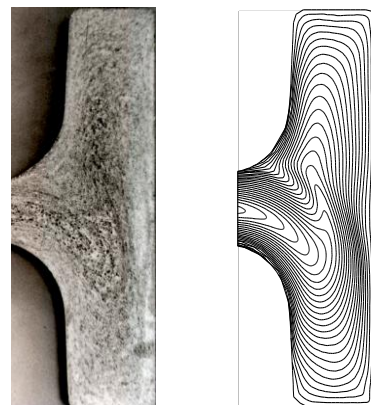


Fig. 2 Comparison between experiments and predictions obtained by isothermal analysis

금형의 변형을 고려하는 것은 이론적으로 어려운 일은 아니다. Saint Venant 원리에 의하며, 국부적인 탄성변형은 전체적인 금형의 형상 변형에 영향을 거의 미치지 않는다. 따라서 금형은 탄성역학 문제로 간주해도 무방하다. 이론과는 달리 금형변형을 고려한 해석은 수치적인 문제로 인하여 쉬운 일은 아니다. 쉬운 예로 요소 망재구성 등으로 하중의 이동이 불가피한데, 이러한 수치적 문제로 금형이 변형되므로 이러한 고질적 문제를 악화시키기 때문이다. 금형의 탄성 변형 고려 해석을 위해서는 시뮬레이션 기술의 수치적 고도화가 필수적이다.

열간단조의 경우, Fig. 3에서 보는 바와 같이, 과대한 성형하중 문제는 금형변형 고려 해석을 통하여 해소가 가능하게 되었다. 그리고 파이핑 현상의 미흡한 예측 문제도 금형의 탄성변형의 고려를 통하여 해결되었다 [9].

판재성형 공정 해석을 위하여 체적요소를 이용하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 판재를 체적요소로 해석할 경우, 높은 형상비로부터 발생하는 제약이 문제이다. 적절한 형상비의 요소로 분할하는 것은 현 시점에서 경제적인 방법이 아니다. 따라서 적절한 크기의 형상비를 가진 요소의 사용이 불가피하며, 그래도 역시 판재를 몇 층으로 분할할 것인지의 문제는 남는다. 많은 연구자들의 우려와는 달리 2 층의 적층만으로도 비교적 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있다[10]. Fig. 4 에 그 사례를 나타내었다.

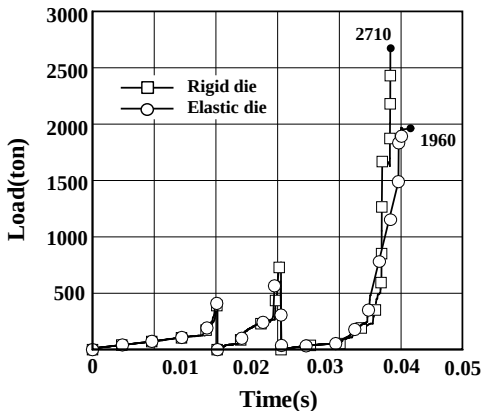


Fig. 3 Effect of die deformation on forming load in a hot forging process

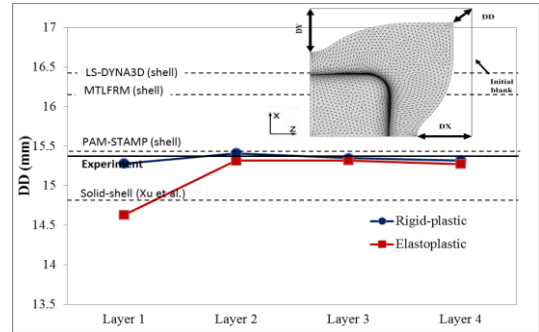


Fig. 4 Effect number of layers for sheet or plate forming processes

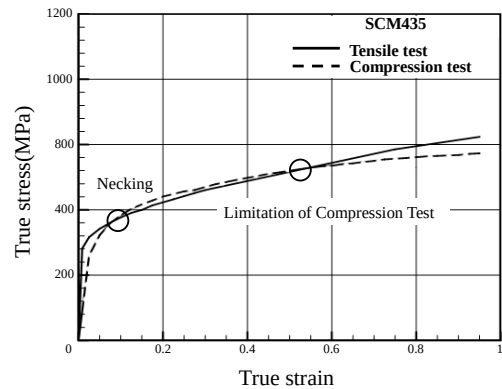


Fig. 5 Comparison of flow stresses of SCM435 obtained using tensile test and compression test

판재성형에서 중요한 요소 중의 하나는 이방성이다. 체적소성가공에서 이방성에 상응하는 것이 바우싱거 효과이다. 단조용 강으로 널리 사용되는 SCM435의 경우, 등방성경화의 가정은 공학적으로 유효하다고 판단된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 압축시험과 인장시험 결과로부터 획득된 유동응력 곡선이 유사하다. 물론 이것이 다른 소재에 적용이 되지 않을 수도 있다는 점을 강조해 둔다.

소성가공 중 소재의 변형은 단순히 압축이나 인장으로 이루어지지 않는다. 매우 복잡하게 나타난다. 특히 인장 후의 압축이나 압축 후의 인장은 바우싱거 효과로 인하여 항복강도가 크게 변한다. Fig. 6은 Fig. 5의 실험에 사용된 것과 동일한 SCM435의 소재에 대하여 압축시험을 통

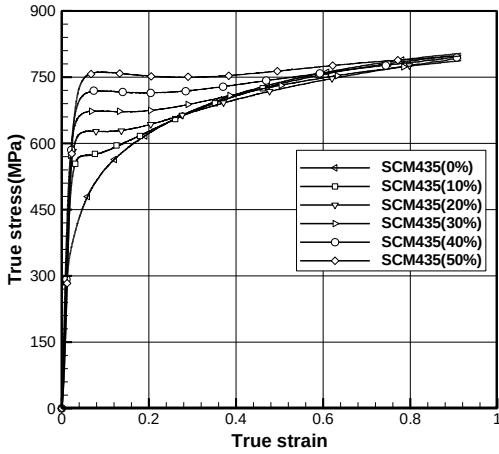


Fig. 6 Flow stresses of drawn wires of SCM435, obtained using compression test

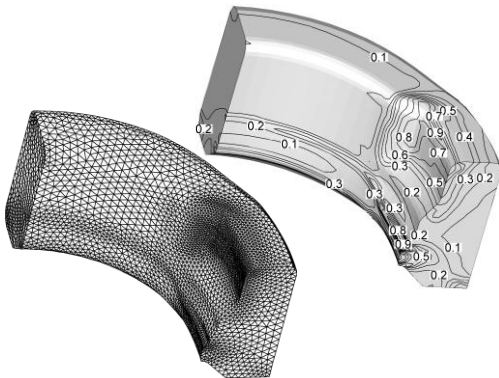


Fig. 7 Example of optimized tetrahedral mesh(left) which meets the required mesh density(right)

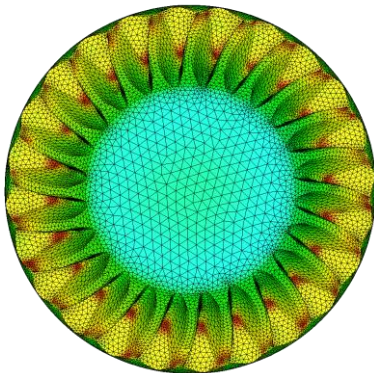


Fig. 8 Optimized mesh system for a spiral bevel gear forging

하여 획득된 유동응력 곡선을 나타낸 것으로 바우싱거 효과를 가시화한 것이다. 압축 시편은 인장 효과가 있는 인발공정을 거친 것으로 인발시의 단면감소율은 0-50%의 범위이다[7,11].

Fig. 6은 특히 냉간단조 공정의 해석에서 사용자가 소재의 특성을 지배하는 것이 얼마나 중요하지를 웅변하고 있다. 냉간단조 용 소재의 물성치, 즉 유동응력은 전처리에 매우 민감하므로 사용자의 관심이 필요하다. 개발자로서도 이러한 재료의 거시적 특성을 반영하기 위한 실용적 기법의 개발이 요구되고 있다.

이론과 직결되어 있는 수치적 기법에 기인하는 것은 요소의 차수, 자유도(절점 또는 요소에 비례)의 수, 요소의 직교성(절점의 위치) 등을 들 수 있다[12]. 고차의 요소는 체적소성가공 공정 해석 목적 측면에서 장점보다 단점이 더 많다. 가령, 프로그램 상의 복잡성은 물론이고, 절점마다 절점력과 절점응력이 1:1 대응 관계에 있지 않아 표면에서 절점응력이 중요한 소성가공 공정 해석에서 어려움을 야기시킨다.

일반적으로 유한요소해석에서 요소의 자유도가 높을수록 결과의 정확도가 개선되지만, 체적소성가공 공정의 해석에서는 예리한 모서리 주위에서의 요소망의 극심한 뒤틀림으로 잦은 요소망재구성을 유발하므로 적절한 정도를 넘어서면 유리함이 사라진다. 다시 말하면, 이것은 매우 예리한 모서리를 가진 문제에서 그 주위의 거동특성을 밝히는 데는 한계가 따른다.

일반적으로 경계에서의 요소의 품질은 내부 요소에 비하여 훨씬 중요하다. 특히 경계에서 금형과 상호작용을 통하여 미지의 변수들이 결정되는 소성가공에서 경계에 위치한 요소들의 품질은 매우 중요하다. 경계요소망의 직각도는 접촉응력의 수치적 진동을 최소화시키고 요소망재구성을 지연시키는 효과가 있다[12].

Fig. 7에 최적화된 요소망의 사례를 예시하였다[13]. 오른 쪽의 그림은 해석결과로 얻은 상태변수와 형상의 곡률을 이용하여 계산된 최적의 희망 요소밀도를 나타내고, 왼쪽 하단의 그림은 위상부의 희망 요소밀도를 만족시키도록 생성된 요소망을 나타내고 있다.

Fig. 8은 최적의 요소 수를 충족시키는 요소망이라고 할 수 있다. 요소 수를 줄일 경우, 기어 이빨을 표현하는데 문제가 발생할 수가 있고, 더 많게 할 경우, 모서리 부분의 심한 뒤틀림으

로 잦은 요소망재구성을 초래하여 결정의 정확도를 크게 떨어뜨리게 될 가능성이 크기 때문이다.

3. 결 론

단조 시뮬레이션 기술은 이제 장식에서 벗어나 설계 과정에서 거쳐야 할 필수 관문이 되고 있다. 그리고 컴퓨터의 발전으로 계산시간 문제 중심에서 정확도 중심으로 사용자의 인식 전환이 이루어지고 있다.

이 논문에서는 이론적 요인을 중심으로 해석의 결과에 미치는 요인들의 원인과 영향에 대하여 고찰하였으며, 특히 금형의 탄성변형과 소재에 대한 모델링의 중요성을 강조하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 중소기업청의 혁신기업기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음 (S2227173).

참 고 문 헌

- [1] M. C. Lee, S. H. Chung, S. M. Jang and M. S. Joun, 2009, "Three-dimensional simulation of forging using tetrahedral and hexahedral elements", *Finite Elem. Anal. Des.*, pp. 745~754.
- [2] 전만수, 2011, 유한요소법을 이용한 냉간단조에서 발생하는 주요 결함 사례 분석(1): 단조 시뮬레이션의 정확도에 미치는 주요 인자, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, 2011.10, pp. 223~227
- [3] M. S. Joun, H. K. Moon, R. Shivpuri, 1998, Automatic Simulation of a Hot-Forming Process by a Rigid-Thermo viscoplastic Finite Element, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 120, pp. 291~296.
- [4] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method. *Mech. Mater.* 40, pp. 586~593
- [5] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M.C. Lee, B.Y. Jun, 2009, Effects of friction laws on metal forming processes, *Tribology International* 42, pp. 311~319
- [6] M. S. Joun, J. G. Eom, Y. H. Son, S. W. Jeong, S. T. Ahn, S. M. Jang, D. J. Yoon, 2013, Effect of strain hardening capability on plastic deformation behaviors of material during metal forming, *Materials and Design*, Vol. 54, pp.1010~1018
- [7] H. T. Jin, M. H. Choi, M. S. Joun, 2015, Effect of flow stress, friction, temperature and velocity on finite element predictions of metal flow lines in forging, *ASPF 2015*, Gyeongju, Korea, pp.74~76.
- [8] J. G. Eom, W. J. Chung, M. S. Joun, 2014, Comparison of rigid-plastic and elastoplastic finite element predictions of a tensile test, *Metal Forming 2014*, Palermo, Italy, pp.611~616.
- [9] S. W. Jeong, M. S. Joun, 2016, Rigid-viscoplastic finite element analysis of an axi-symmetric hot forging process considering elastic deformation of dies', *Spring Meeting of KSTP*.
- [10] S. H. Chung, S. M. Hong, W. J. Chung, M. S. Joun, 2015, Elastoplastic finite element analyses of sheet metal forming by using solid elements, *13th ASPF*, Gyeongju, Korea, pp. 51~53.
- [11] M. S. Joun, S. T. Ahn, H. T. Jin, Y. H. Son, D. J. Yoon, 2016, Quantitative study of the Bauschinger effect in high-strength low-strain-hardening materials for metal forming applications, *Int. J. of Materials and Product Technology*
- [12] M. S. Joun, M. C. Lee, 1997, Quadrilateral finite-element generation and mesh quality control for metal forming simulation, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 40, No. 21, pp. 4059~4075.
- [13] M. C. Lee, M. S. Joun, J. K. Lee, 2007, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 42, No. 10, pp. 788~802.

금형 탄성변형을 고려한 축대칭 냉간단조 공정의 탄소성 유한요소해석

엄재근¹·정석환¹·정완진²·전만수[#]

Elastoplastic Finite Element Analysis of Axis-Symmetric Cold Forging Process Considering Elastic Deformation of Dies

J. G. Eom, S. H. Chung, W. J. Chung, M. S. Joun

Abstract

In this paper, elastoplastic finite element analysis of an axis-symmetric cold forging process is conducted considering elastic deformation of dies. Springback is also dealt with, which is calculated by releasing the traction exerted on the material by the dies at once. The predictions are compared with those obtained under the assumption that material is rigid-plastic and die material is rigid, revealing that the effect of assumptions about material behaviors on forming load or deformed shape is not greater than expected. The predictions are compared with experiments in terms of deformed shape, showing that they are qualitatively acceptable.

Key Words : Forging simulation(단조 시뮬레이션), Elastoplastic Material(탄소성 재료), Elastic Die(탄성 금형), Springback(스프링백)

1. 서 론

금형을 강체로 가정한 단조 시뮬레이션 기술이 널리 사용되고 있다. 이 기술은 하나의 안정적인 기준을 제공하는데 큰 의미가 있다. 열간 단조의 경우, 그 효과는 더욱 크다[1]. 그러나 냉간단조에서는 정밀도와 높은 하중으로 인한 금형의 변형 등을 고려해야 하는 현실적 문제가 있다. 이러한 점으로 인하여 적용의 한계에 노출되어 있는 문제가 다수 존재하는 것이 사실이다. 가령, Fig. 1에서 보는 바와 같은 일종의 판단조 공정에서 강체 금형의 가정 하에서 구한 표면력을 바탕으로 금형구조해석을 실시하면, 약 1.5 mm의 과도한 금형 변형과 응력이 예측될 수 밖에 없다[2]. 그럼에서 펀치의 우편에는 과도한 표면력이 작용하게 되고, 반대로 좌편에는 소재가 금형에 닿지 않을 수도 있기 때문이다. 실공정에서는 금형의 굽힘변형이 발생하여 금형의

좌측면과 소재가 부분적으로 접촉하기 때문에 전술한 문제가 발생하지 않는다. 이러한 해석결과와 실제 현상의 과도한 차이는 해석결과의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있는 요인이 되고 있다.

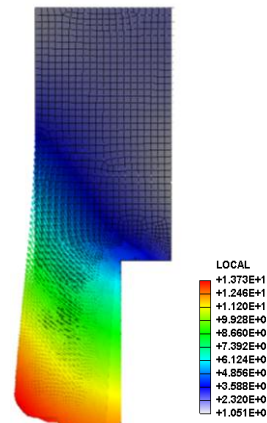


Fig. 1 Example of non-realistic assumption of rigid dies

1. ㈜엠에프알씨

2. 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부/㈜엠에프알씨

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

따라서 이러한 공정에 대한 금형의 탄성변형을 고려 단조공정 해석 기술은 매우 중요하다. 그러나 이 기술은 수치적 문제 즉, 성형 하중의 진동이 해석 결과에 크게 영향을 미치는 문제에 노출되어 있다. 따라서 정교한 수치적 기법이 필요하다. 가령, 요소망재구성 전후의 경계조건의 변화를 최소화함으로써 성형하중의 변화를 최소화해야 하며, 수치적인 요인으로 흔들리는 성형하중의 변화를 안정적으로 흡수하는 수치적 기법의 최적화가 필요하다.

2. 공정의 정의와 해석

Fig. 2은 이 연구에서 시험 목적으로 설계한 1단의 축대칭 냉간단조공정을 나타내고 있다. 이 공정의 특징은 두 개의 리브(rib)에 있으며, Fig. 1의 예제와 같이 두 리브 사이에서의 금형의 탄성변형이 비교적 크다.

Fig. 2의 공정에 대한 세 가지 해석, 즉, Case 1(금형을 강체로 가정하고 소재를 탄성체로 가정한 해석), Case 2(금형을 탄성체로 가정하고 소재를 강소성체로 가정한 해석), Case 3(금형을 탄성체로 가정하고 소재를 탄성체로 가정한 해석)을 실시하였다[3].

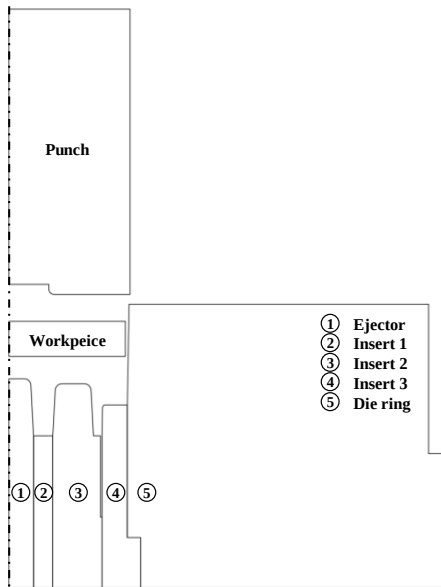


Fig. 2 Definition of test process

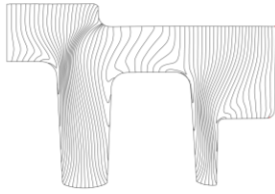
Table 1 Analysis information

소재의 유효응력	$\bar{\sigma} = Y_0 \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{b} \right)^a$ Yield strength: 260 MPa Strain hardening exponent(a): 0.22676 Strain reduction ratio(b): 0.01138
소재의 탄성계수	200.0 GPa
금형의 탄성계수	210.0 GPa
마찰법칙과 마찰계수	Law of Coulomb friction $\mu = 0.05$

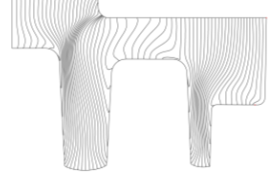
해석에 사용된 조건은 Table 1에서 보는 바와 같다. 소재는 속도 비의존적이므로 금형의 속도를 1.0 mm/s로 간주하였다. 금형에는 예압이 걸려 있으나, 예압이 걸린 상태에서 금형 내면(die insert)을 기계가공하였고 그 치수를 해석에 사용하였으므로, 선형탄성의 범위에서는 예압이 해석결과에는 영향을 미치지 않으므로 이 연구에서는 다루지 않았다. 이젝트핀(Fig. 1에서 부품 1)과 부품 2 사이 및 부품 3과 부품 4 사이에서 금형의 변형에 기인하는 접촉이 발생할 경우, 침투할 수 없는 조건이 부과되었다.

Fig. 3 ~ Fig. 6은 세 경우에 대한 해석결과를 비교하고 있다. 이 결과를 얻기 위하여 각 해석에서의 스트로크를 달리하였다(Fig. 5 참조). 스트로크 결정의 기준으로 중심축에서의 단조품의 두께가 동일하게 되도록 하였다. 형상은 스프링백이 적용이 된 이후의 것을 나타낸 것이다.

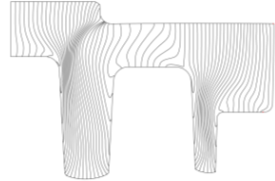
Fig. 3은 단류선을 비교하고 있다. 단류선은 세 가지 모두 공학적으로 유의미한 정도 이하의 차이를 보이고 있다. 즉, 단조품의 형상만을 관심 대상으로 한다면, 금형 및 소재의 탄성변형의 영향은 크지 않다. Fig. 4는 금형의 탄성변형량, 즉 절점에서의 변위벡터의 크기를 나타낸 것으로 최대 0.8 mm에 이른다. 이것은 펀치가 길기 때문에 실제 중요한 상대변위는 Fig. 5의 변위의 분포로부터 알 수 있듯이 상대적으로 크지 않다. 중심부와 최외곽부에서의 금형의 축방향 변위차는 각각 0.075 mm(탄소성, 탄성금형)와 0.097 mm(강소성, 탄성금형)로 예측되었다.



(1) Elastoplastic material – rigid die (case 1)

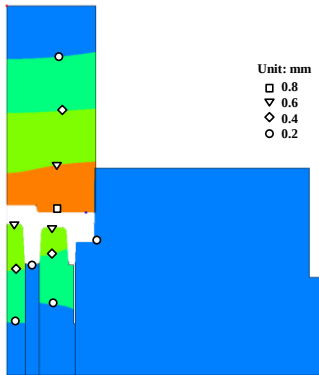


(b) Rigid plastic material – elastic die (case 2)

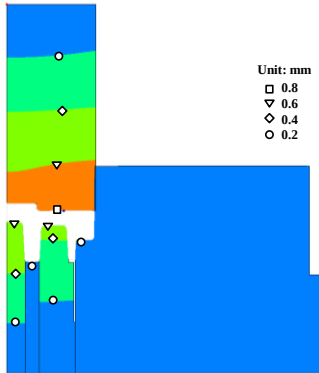


(c) Elastoplastic material – elastic die (case 3)

Fig. 3 Comparison of metal flow lines

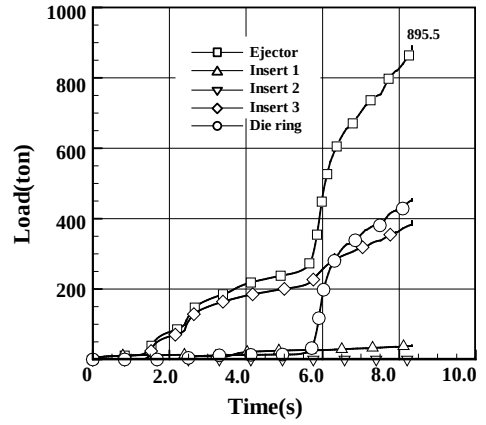


(a) Rigid-plastic material – elastic die (case 2)

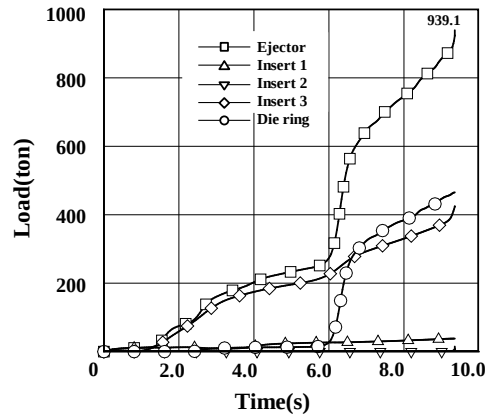


(b) Elastoplastic material – elastic die (case 3)

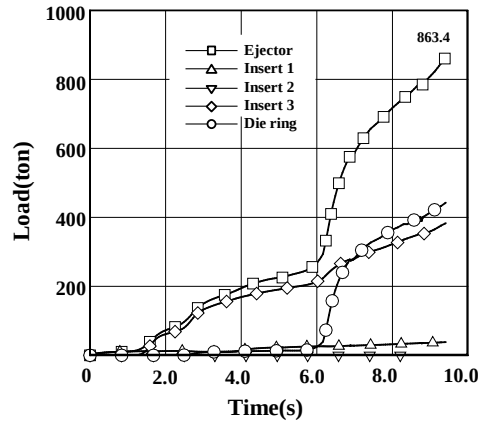
Fig. 4 Comparison of die displacement



(a) Elastoplastic material – rigid die (case 1)



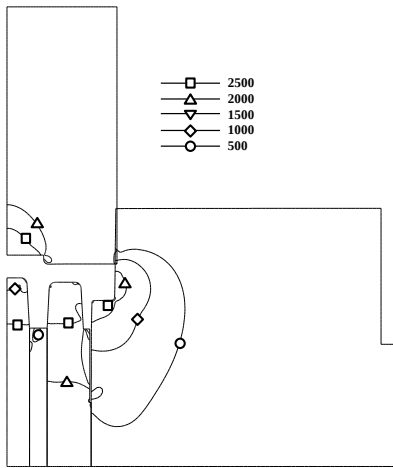
(b) Rigid-plastic material – elastic die (case 2)



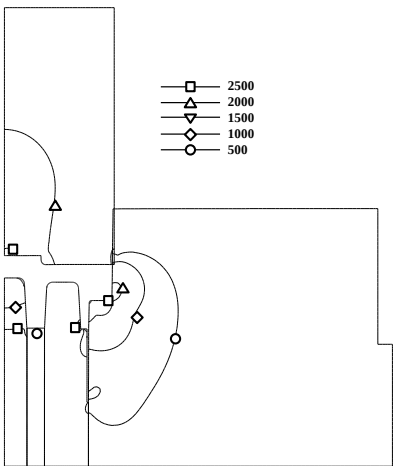
(c) Elastoplastic material – elastic die (case 3)

Fig. 5 Comparison of forming load

Fig. 5는 성형하중을 비교하고 있다. 하중은 대체적으로 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 강소성 해석결과가 탄소성 해석결과에 비하여 약 9% 정도 크게 나타났으며, 탄소성 유한요소법의 경우 금형의 탄성변형 고려 여부에 따라 약 3.5% 정도의 차이밖에 나타나지 않았다. 이것은 열간단조와는 다른 것으로 금형의 변형이 상대적으로 작고 최종 순간에도 자유표면이 있어 성형하중이 급격하게 증가하지 않기 때문이라고 판단된다. 전술한 성형하중의 특성은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 금형에 작용하는 응력의 분포에서도 나타나고 있다.



(a) Rigid-plastic material – elastic die (case 2)



(b) Elastoplastic material – elastic die (case 3)

Fig. 6 Comparison of die stress

3. 결 론

이 논문에서는 축대칭 냉간단조 공정을 대상으로 소재를 강소성체 또는 탄소성체로 가정하고, 금형을 강체 또는 탄성체로 가정한 3개의 조합에 대하여 유한요소해석을 실시하여, 특히 금형의 탄성변형의 영향을 중심으로 해석 결과를 비교 고찰하였다.

조사된 세 가지 경우, 즉 강소성 소재와 탄성 금형(Case 1), 탄소성 소재와 강체 금형(Case 2), 탄소성 소재와 탄성 금형(Case 3) 모두, 성형하중 및 금형에 작용하는 응력의 차이는 크지 않았다. 특히, Case 2와 Case 3의 차이, 즉 강소성 변형 특성 하에서의 결과도 탄소성 재료의 결과와 크게 다르지 않다. 내부 금형을 더 강한 소재로 변경할 경우, 그 차이는 더 줄어들 가능성이 있다.

물론, 강소성 변형 특성 하에서 근사적으로 계산된 잔류응력은 탄소성의 변형 특성의 가정 하에 획득된 잔류응력에 비하여 정도가 크게 떨어질 수밖에 없다. 최근들어 정형단조와 단조품의 잔류응력 상태에서 부품의 구조해석 및 수명 예측의 빈도가 증가하고 있다. 이 논문의 결과는 이런 시대의 변화에 대응하기 위한 것으로 활발한 적용 연구가 기대된다.

후 기

이 논문은 2014년도 중소기업청의 혁신기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음.(S2227173)

참 고 문 헌

- [1] M. S. Joun, H. K. Moon, R. Shivpuri, 1998, Automatic simulation of a hot-forming process by a rigid-thermoviscoplastic finite element, ASME, pp. 291~296.
- [2] M. S. Joun, M. C. Lee, J. M. Park, 2002, Finite element analysis of prestress die set in cold forging, Int. J. Mach. Tools Manu., pp. 1213~1222.
- [3] W. J. Chung, M. S. Joun, 2015, Development of elastoplastic module in AFDEX, ASPF, pp. 54~56.

금형 탄성변형을 고려한 축대칭 열간단조 공정의 강소성 유한요소해석

정승원¹ · 전만수[#]

Rigid-Viscoplastic Finite Element Analysis of an Axis-Symmetric Hot Forging Process Considering Elastic Deformation of Dies

S. W. Jeong, M. S. Joun

Abstract

In this paper, rigid-plastic finite element analysis of an axis-symmetric hot forging process is conducted to examine the effect of die deformation during hot forging especially on predicted forming load and die stress. It is revealed that the forming load predicted with die elastic deformation considered is lower than that obtained by conventional approach in which dies were assumed rigid by almost 30%. However, the macroscopic behavior of plastic deformation is not so large as to be essentially considered during simulation for the sake of conceptual process design.

Key Words : Hot forging(열간단조), Rigid-plastic FEM(강소성유한요소법), Die elastic deformation(금형탄성변형)

1. 서 론

건전한 단류선과 금형의 파손 방지가 무엇보다도 중요한 열간단조 공정의 설계에서 시뮬레이션 기술은 공정 개발의 혁신을 선도해 왔다[1].

단류선의 예측 결과는 질량보존법칙의 이론으로부터 실제의 현상을 잘 반영할 수밖에 없고, 경험적으로 볼 때도 대체적으로 인정되고 있다. 그러나 금형을 강체로 가정한 상태에서의 해석 결과에서 성형하중은 대체적으로 실제의 값보다 높게 예측된다는 것이 지적되어 왔다[2]. 그 결과, 대다수의 학술적 연구에서도 금형에 작용하는 응력이 다소 크게 나타나고 있다[3]. 따라서 단조 공정 해석 기술자들은 성형하중의 상대치를 중시하고 있으며, 특히 열간단조의 경우 최종 상태에서 급격한 성형하중의 증가가 예측되기 때문에 소재의 충전 상태를 보고 금형의 수명에 예측 결과의 간접적 활용에 만족해 왔다.

금형의 탄성변형 고려가 개념적으로는 어려운 문제가 아니지만, 수치적 복잡성과 성형하중의 수치적 진동에 민감하게 반응하는 문제 등으로 금형의 탄성변형 고려 해석 기술의 실용화 및 활용이 활성화되지 않았다.

이 논문에서는 축대칭 단조공정을 대상으로 금형의 탄성변형을 고려한 단조 시뮬레이션을 적용하고 그 효과를 성형하중 및 파이핑 효과를 중심으로 살펴보고자 한다.

2. 적용 대상 공정

Fig. 1은 3단의 허브 단조공정의 공정도와 금형 형상을 나타내고 있다. 이 공정의 문제는 두 가지로 요약된다. 금형을 강체로 가정하여 예측한 성형하중이 실제의 하중에 비하여 다소 높게 나타나는 점과 중심부의 파이핑 결함이 실험에 비하여 비교적 미세하게 나타나는 것이다.

1. (주)엠에프알씨

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부/(주)엠에프알씨

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

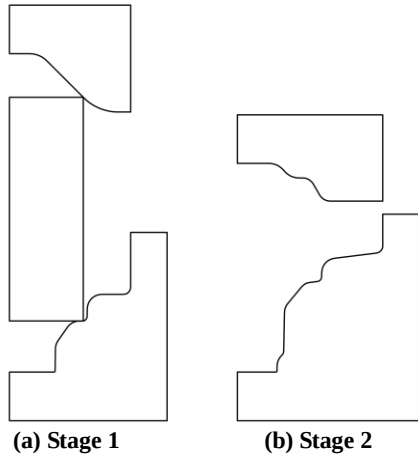


Fig. 1 Definition of test process

Fig. 1의 공정에 대한 두 가지 해석, 즉, 금형을 강체로 가정한 해석과 금형을 탄성체로 가정한 해석을 실시하여 그 결과를 비교한다. 해석에 사용된 조건은 다음과 같다.

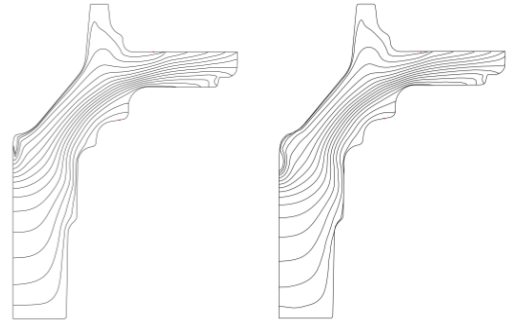
Table 1 Analysis information

소재의 유동응력	$\bar{\sigma} = C(\bar{\epsilon}, T) \dot{\bar{\epsilon}}^{m(\bar{\epsilon}, T)}$
금형의 탄성계수	210.0 GPa
마찰조건	Law of Hybrid friction
	$\mu = 0.2, m = 0.6$
프레스	JFP-2000

Fig. 2는 두 경우에 대한 단류선의 변화를 비교하고 있다. 흥미로운 것은 강체 금형을 사용한 경우, 예측된 단류선에서는 중심에서 파이핑 결함이 발생할 가능성을 말해주고 있지만, 실제로는 중심에서 파이핑 결함이 뚜렷하게 나타나지 않는 반면, 금형의 탄성변형을 고려했을 경우에는 예리한 파이핑 결함이 가시적으로 나타나고 있다. 후자가 실제의 현상에 가깝다.

그 원인을 조사해 보면, Fig. 3에서 보는 바와 같이 금형의 상부에서 반경방향으로 중점적으로 발생한 탄성변형이 성형하중이 급격하게 증가하는 시점에서 파이핑 결함이 유발되는 부분에서의 정수압을 떨어뜨리는 것에 그 원인이 있다고 판단된다.

물론 Fig. 2의 예측된 단류선은 전체적으로는 큰 차이가 없다. 단조 시뮬레이션이 개념설계의 목적이려면, 금형을 강체로 가정하여도 무방함을 암시하는 결과이다.



(a) Rigid die (b) Elastic die
Fig. 2 Comparison of metal flow lines

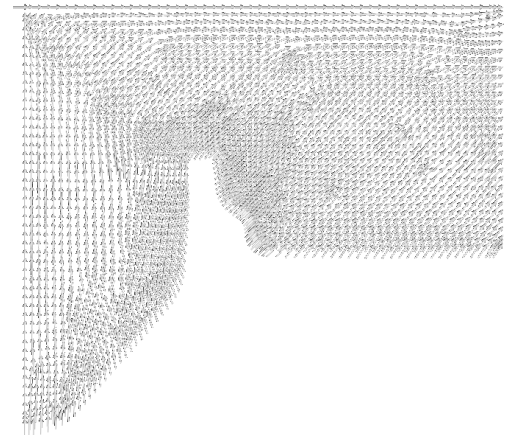


Fig. 3 Die elastic deformation at the final stroke

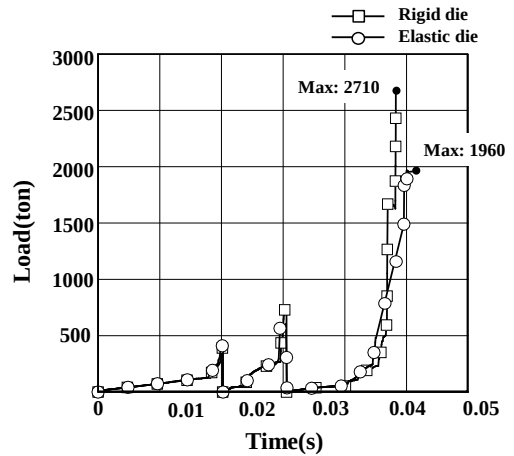
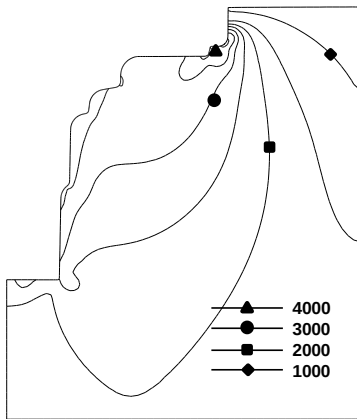
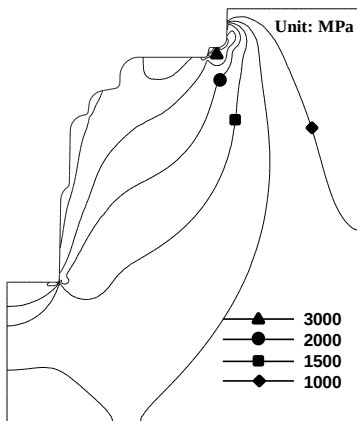


Fig. 4 Comparison of forming load



(a) Rigid die



(b) Elastic die

Fig. 5 Comparison of effective stresses of lower die

Fig. 4는 성형하중을 비교하고 있으며, Fig. 5는 3단의 하형(Lower die)의 응력을 비교하고 있다. 성형하중과 금형에 작용하는 유효응력에서도 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 상형의 상단과 하형의 하단의 이동 거리로 정의되는 스트로크가 동일할 때, 최종 스트로크에서 금형 탄성변형을 고려하여 획득한 성형하중이 강체 금형을 사용하여 예측한 성형하중의 약 70%이다. 이것은 성형하중의 예측 시에 탄성변형을 고려하거나 강체 금형 하에서 예측된 하중을 기준하중으로 간주하고 전술한 금형 탄성변형의 영향을 감안해야 함을 암시하고 있다.

3. 결 론

이 논문에서는 축대칭 열간단조 공정에서 금형의 탄성변형이 단류선 및 파이핑 결함의 예측에 미치는 영향과 성형하중에 미치는 영향을 고찰하였다.

금형의 탄성변형은 파이핑 결함과 같은 국부적인 소성유동 특성에 비교적 큰 영향을 주며, 성형하중에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 경우에 따라서는 금형의 탄성변형을 고려한 해석이 불가피하다.

물론 전반적으로 단류선 등에서는 큰 영향을 미치지 않는 못하므로 기준이 명확한 강체 금형 하에서 안정적인 해를 구하고 금형의 탄성변형의 영향을 반영하는 것으로부터 시작하여 점진적으로 금형의 탄성변형을 고려한 단조 시뮬레이션 기술의 적용 범위를 넓혀가는 것이 바람직하다. 금형의 탄성변형 고려 시, 예측된 성형하중의 수치적 진동은 해의 신뢰성을 떨어뜨릴 수도 있기 때문에 개발자와 사용자 모두 정교한 해석 기술의 확보가 선행되어야 한다.

후 기

본 연구는 2014년도 중소기업청의 혁신기업기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음.(S2227173)

참 고 문 헌

- [1] 전만수, 단조 시뮬레이션, 2013, 진샘미디어.
- [2] M. S. Joun, H. K. Moon, R. Shivpuri, 1998, Automatic simulation of a hot-forming process by a rigid-thermoviscoplastic finite element, ASME, pp. 291~296.
- [3] M. S. Joun, M. C. Lee, J. M. Park, 2002, Finite element analysis of prestress die set in cold forging, Int. J. Mach. Tools Manu., pp. 1213~1222.

금형 탄성변형을 고려한 베벨기어의 탄소성 유한요소해석

정석환¹ · 정완진² · 전만수[#]

Elastoplastic Finite Element Analysis of a Bevel Gear Considering Elastic Deformation of Dies

S. H. Chung, W. J. Chung, M. S. Joun

Abstract

In this paper, elastoplastic finite element analysis of a bevel gear cold forging process is conducted with emphasis on elastic deformation of dies to reveal on the importance of precision forging simulation for net-shape forging. Springback analysis is also carried out to predict final shape of forging with high accuracy. The predictions obtained with elastic deformation of dies considered are compared with those obtained

Key Words : Precision Forging Simulation(정밀 단조 시뮬레이션), Elastoplastic FEA(탄소성 유한요소해석), Bevel Gear(베벨기어), Cold forging(냉간단조)

1. 서론

정형단조의 요구가 점증하고 있다[1,2]. 그러나 경제적인 측면에서 해소해야 할 난제들이 많다. 개발비 감소 및 개발기간의 단축과 안정적인 품질의 확보가 그 중심에 있다. 개발비와 개발기간의 문제는 단조 시뮬레이션 기술과 관련이 크다. 실제 열간단조 및 일반 형단조, 자동다단단조 분야에서는 혁신이 이미 이루어졌다.

그러나 정형단조 분야에서는 여전히 많은 공학적 판단을 경험과 시행착오에 의존하고 있다. 그 원인은 정밀한 단조 시뮬레이션의 난해성에 있다. 재료의 거동특성, 금형변형, 스프링 백 등이 정밀 냉간단조 시뮬레이션을 저해하는 요소이다. 금형변형은 그 중에서도 매우 중요한 요소이다. 실제 냉간단조 중 금형의 변형이 허용 공차에 비하여 훨씬 크기 때문이다.

금형변형 고려 단조 시뮬레이션 기술은 오래전부터 연구되었으나, 수치적 문제로 실공정 적용 측면에서 한계를 가지고 있었다. 가장 큰 문제는 특히 3차원 문제에서 성형하중이 수치적으로 진동하는 것이다. 이 수치적 진동이 금형의 비현실적인 인위적 변형을 야기시키기 때문에 정교하지 않은 해석 기법은 오히려 해석 결과의 신뢰성을 떨어뜨리게 된다.

이 연구에서는 정형 단조품인 베벨기어의 냉간단조 공정에 대해서 금형 탄성변형 고려 해석 기법을 적용하여 그 결과를 분석함으로써 그 적용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 공정의 정의와 유한요소 해석

Fig. 1은 이 연구에서 분석 대상으로 선택한 냉간 베벨기어의 형상과 2단의 베벨기어 냉간단조공정에 사용된 금형의 형상을 나타내고 있다[3].

1. (주)엠에프알씨

2. 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부/(주)엠에프알씨

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr



(a) Bevel gear to be cold forged

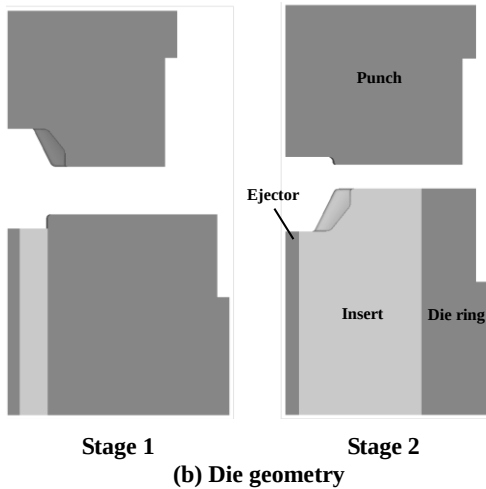


Fig. 1 Definition of test process

Fig. 1의 단조공정에 대한 세 가지 종류의 해석, 즉, 금형을 탄성체로 가정하고 소재를 강소성체로 가정한 해석(Case 1), 금형을 강체로 가정하고 소재를 탄성체로 가정한 해석 (Case 2), 금형을 탄성체로 가정하고 소재를 탄성체로 가정한 해석(Case 3)을 실시하였다.

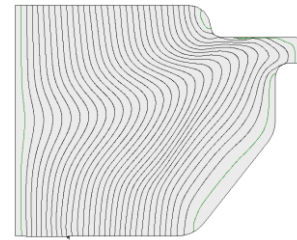
해석에 사용된 조건은 Table 1에서 보는 바와 같다. 소재는 속도 비의존적이므로 금형의 속도를 1.0 mm/s로 간주하였다. 금형에는 예압이 걸려 있으나, 예압이 걸린 상태에서 금형 내면(Die insert)을 기계가공하였고 그 치수를 해석에 사용하였으므로, 선형탄성의 범위에서는 예압이 소재의 변형 해석 결과에는 영향을 미치지 않으므로 이 연구에서는 다루지 않았다. 금형 소재는 모두 금형강이며, Table 1의 재료상수를 사용하였다.

Fig. 2는 세 경우에 대한 단류선의 변화를 비교하고 있는데, 전반적으로 단류선의 형태는 유사하다. 단조 덧살의 양은 Case 1이 가장 크다.

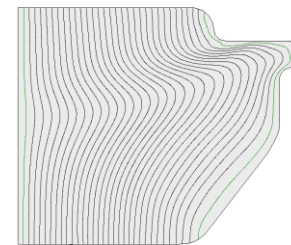
이것은 사용된 소재가 강소성체로 부피변화가 최하이기 때문이다. 스프링백 해석을 하기 이전의 각 경우별 부피변화율은 0.16%(Case 1), 1.7%(Case 2), 1.5%(Case 3)이다.

Table 1 Analysis information

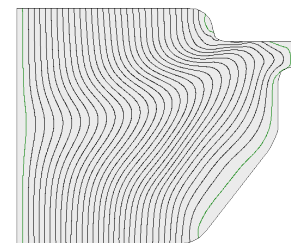
소재의 유동응력	$\bar{\sigma} = \max(a\bar{\epsilon}^b, a\bar{\epsilon}_{\min}^b)$
	Strength coefficient(a): 92.9
	Strain hardening exponent(b): 0.131
	Minimum yield strain: 0.001
소재의 탄성계수	204.0 GPa
금형의 탄성계수	210.0 GPa
마찰법칙과 마찰계수	Law of Coulomb friction $\mu = 0.1$



(a) Rigid-plastic material – elastic die (Case 1)

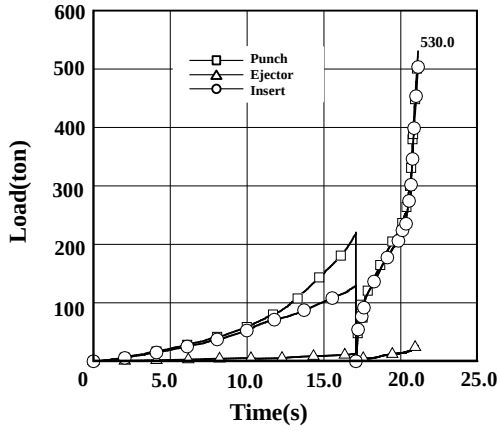


(b) Elastoplastic material – rigid die (Case 2)

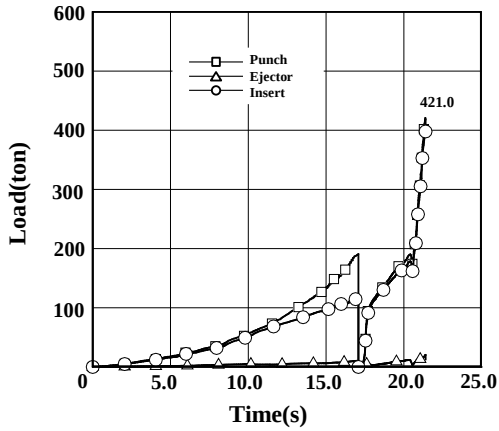


(c) Elastoplastic material – elastic die (Case 3)

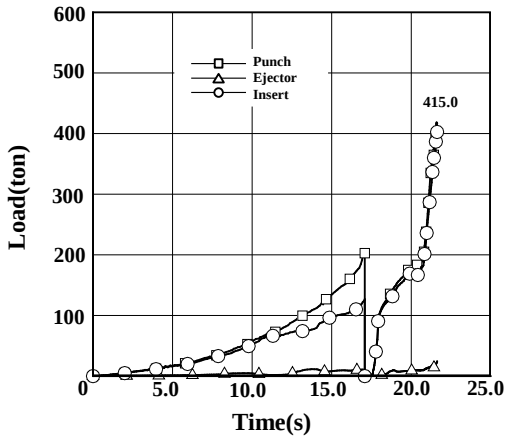
Fig. 2 Comparison of metal flow lines



(a) Rigid-plastic material – elastic die (Case 1)

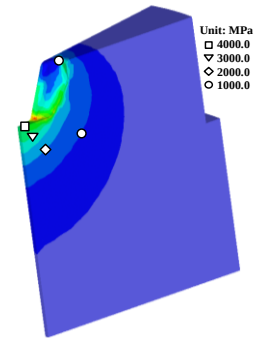


(b) Elastoplastic material– rigid die (Case 2)

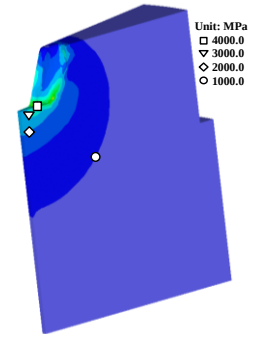


(c) Elastoplastic material – elastic die (Case 3)

Fig. 3 Comparison of forming load

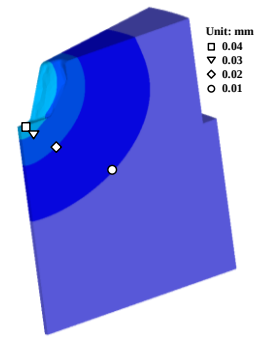


(a) Rigid-plastic material – elastic die (Case 1)

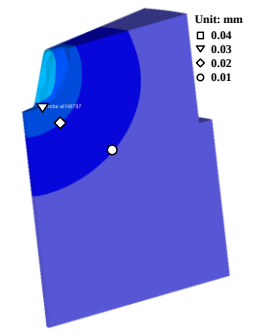


(b) Elastoplastic material – elastic die (Case 3)

Fig. 4 Comparison of die stresses

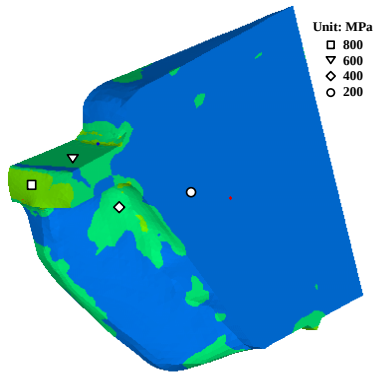


(a) Rigid-plastic material – elastic die (Case 1)

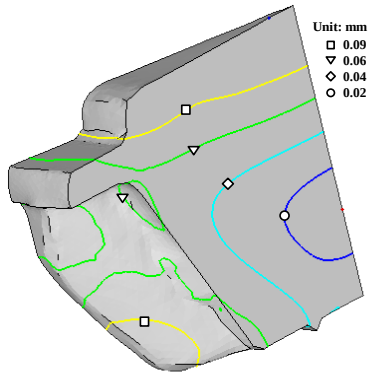


(b) Elastoplastic material– elastic die (Case 3)

Fig. 5 Comparison of die displacements



(a) Residual stress



(b) Displacement

Fig. 6 Residual stress and displacement(Case 3) due to springback

Fig. 3은 성형하중을 비교하고 있다. 각 경우별로 해석의 종료 시간은 조금씩 다르다. 최종 스트로크를 형상의 비교 목적으로 금형의 탄성변형을 고려하여 결정하였기 때문이다. 강소성 해석결과가 탄소성 해석결과에 비하여 하중이 약 20% 정도 나타났으며, 탄소성의 경우 금형의 탄성변형 고려 여부에 따라 조금의 차이는 나타났지만 무시 가능한 수준이다. 이 결과는 2차원에서와 유사한 현상이다[4].

Fig. 4와 Fig. 5는 금형을 탄성체로 가정한 두 경우에 대한 유효응력과 최종단계에서 금형의 변위를 나타내고 있다. 두 해석 결과가 크게 다르지 않다. 이것은 마찰이 비교적 작은 덩어리 소재의 냉간단조에서 소재에 대한 근사화, 즉 탄성변형의 무시가 하중이나 변형의 관점에서 큰 영향을 미치지 못함을 암시한다.

Fig. 6은 case 3에 대한 잔류응력과 하중제거로 인한 탄성회복 변위를 나타내었다.

3. 결 론

이 논문에서는 금형의 탄성변형을 고려한 탄소성 유한요소법을 이용하여 베벨기어 냉간단조 공정 해석을 실시하였다.

이 해석결과를 강소성 소재에 대한 해석 결과 및 강체 금형의 조건하에서 획득한 해석 결과와 비교되었다.

아직까지 실용적인 단조 시뮬레이션은 강체 금형의 가정하에서 강소성 유한요소법을 주로 사용하고 있다. 소재 및 금형의 탄성변형의 영향을 고려한 정교한 해석 기술은 베벨기어와 같이 정형단조 공정의 개발에 필수적인 기술로 자리잡게 될 것으로 예상된다. 이 연구 결과는 이러한 기술 발전 추세를 가속화하는데 기여할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2014년도 중소기업청의 혁신기업기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음. (S2227173)

참 고 문 헌

- [1] D. Y. Yang, 2015, Flexible manufacturing innovation in net shape manufacturing, ASPF, p. 16.
- [2] Isogawa, 2015, Trends of precision forging in Japan, ASPF, p. 10.
- [3] M. C. Lee, R. H. Park, B. Y. Jun, M. S. Joun, 2006, Adaptive finite element analysis of an enclosed die forging process of a bevel gear and its experimental verification, Spring meeting of KSPE, Vol. 23, No. 4, pp. 37~43.
- [4] J. G. Eom, S. H. Chung, W. J. Chung, M. S. Joun, 2016, Elastoplastic finite element analysis of axis-symmetric cold forging process considering elastic deformation of dies, Spring Meeting of KSTP.

금형 탄성변형을 고려한 크랭크샤프트 열간단조 공정의 강소성 유한요소해석

김민철¹ · 정승원¹ · 전만수^{1,#}

Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Hot Forging Process of a Crankshaft Considering Elastic Deformation of Dies

M. C. Kim, S. W. Jeong, M. S. Joun

Abstract

In this paper, rigid-viscoplastic finite element analysis is conducted for a hot forging process of automobile crankshaft considering elastic deformation of dies. The predictions obtained with die elastic deformation considered are compared with those obtained using the conventional forging simulation technology in which the dies are assumed rigid, revealing that the deformed shapes are almost the same, but that the local deformation of dies is not negligible and that forming load is affected very sensitively by elastic deformation dies, which emphasizes the importance of die elastic deformation considered simulation of precision hot forging process for die structural engineering.

Key Words : Forging Simulation (단조 시뮬레이션), Crankshaft(크랭크샤프트), Die Elastic Deformation(금형 탄성 변형), Isothermal Analysis (등온해석)

1. 서 론

전통적인 열간단조품의 예로 크랭크샤프트와 크넥팅로드를 들 수 있다. 크랭크샤프트는 형상의 복잡함으로 인하여 개발 실패에 노출되어 있고, 결속 결함 및 겹칩 결함에 노출되어 있다. 큰 성형하중으로 인하여 금형의 탄성변형이 크며, 그로 인하여 돌출부의 소성유동이 크게 영향을 받을 수 있다.

일반적으로 금형의 구조해석은 강체 금형의 가정하에 획득된 성형하중 정보를 이용하여 후처리의 일환으로 이루어지고 있다[1]. 이러한 접근 방법은 공학적인 의미를 갖는다. 그러나 단조 마지막 단계에 이르러 자유표면이 크게 줄어드는 열간단조의 경우, 강체 금형은 급격한 성

형하중의 증가와 함께 과도한 성형하중을 예측하게 된다. 열간단조 해석결과의 일반적인 특성으로 선행연구[2]에서 성형하중이 실제의 하중에 비하여 크게 예측되는 문제가 지적된 바가 있다. 물론 이것은 과도한 금형 응력으로 연결된다.

진술한 이유로 금형의 구조해석 결과, 즉 응력과 변형은 일반적으로 그 상대적 크기가 의미를 갖는다. 즉, 설계의 개선 여부에 초점을 두고 활용하는 것이 대부분이다. 최근들어 단조 시뮬레이션 기술도 발전하였고, 사용자의 경험도 축적되어 점점 단조 시뮬레이션 결과의 절대치를 활용하고자 하는 시도가 이루어지고 있고, 관련된 연구개발의 요구가 점증하고 있다.

특히 성형하중의 크기는 투자해야 할 장비의 용량을 결정하는데 매우 중요하기 때문에 그 절대치에 대한 높은 정확도가 요구된다. 그렇지만 강체 금형으로는 이러한 요구에 대응할 수 없다.

1. ㈜엠에프알씨 기술연구소

교신저자: 경상대학교 기계공학부,

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

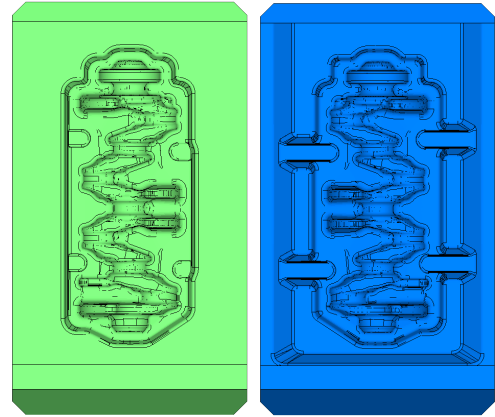
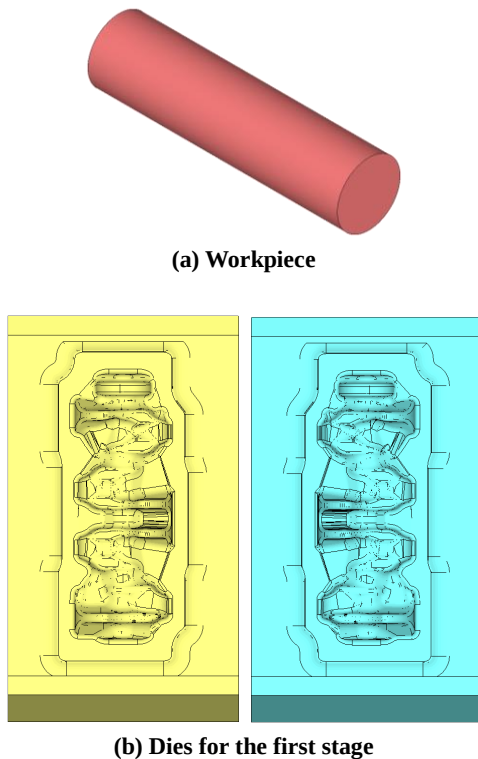
이 연구에서는 선행연구[2]에서 사용된 크랭크샤프트 열간단조 공정에 대해서 금형 탄성변형 고려 해석 기법을 적용하여 분석함으로써 그 적용 가능성 및 필요성을 확인하고자 한다.

2. 공정의 정의와 해석

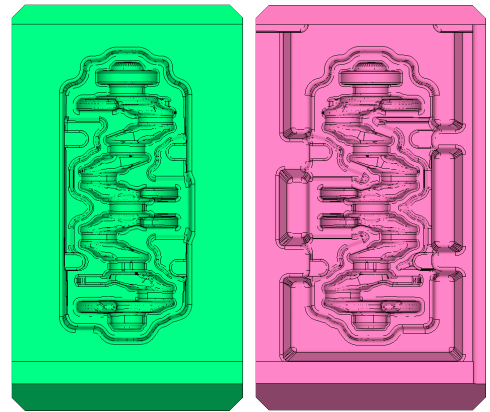
Fig. 1은 자동차용 크랭크샤프트 기초소재의 열간단조를 위한 3단의 단조공정을 나타내고 있다. 시험공정은 총 3단으로 구성되어 있으며, 일반 기계식 단조프레스를 사용하여 단조할 목적으로 개발이 시도되었다.

Fig. 1의 공정에 대한 두 가지 해석, 즉, 금형을 강체로 가정한 해석과 탄성체로 가정한 해석을 실시하여 그 결과를 비교함으로써 금형 탄성변형의 영향을 논하고자 한다. 소재는 강점소성의 변형 거동 특성을 갖는 것으로 가정하였다.

해석에 사용된 조건은 선행연구[2]에서 사용한 것과 동일하다. 금형의 탄성계수와 포아송비는 각각 210 GPa과 0.3이다. 금형의 구조해석 시에 금형의 뒷면, 즉 다이세트 또는 프레스에 장착되는 부분의 모든 자유도를 구속하였다.



(c) Dies for the second stage



(d) Dies for the third stage

Fig. 1 Definition of test process

Fig. 2는 두 경우에 대한 최종 스트로크에서 단류선을 비교하고 있다. 두 해석결과는 거시적으로는 동일하다. 육안으로 그 차이를 구별할 수 없을 정도로 차이는 미세하다. 물론 탄성 금형의 경우, 성형 중 금형의 변형이 Fig. 3에서 보는 바와 같이 0.13mm 발생했기 때문에 국부적인 차이는 불가피하다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 최종 스트로크에서 금형의 변위를 비교한 결과, 강체금형의 가정에 획득된 표면력을 사용하여 예측된 금형의 변위의 크기가 0.26 mm인 반면, 금형의 탄성변형을 고려한 단조 시뮬레이션 기술로 예측된 금형의 변위 크기는 약 0.13 mm로 나타났다. 물론 두 경우의 금형 변형 형태는 유사하다.

두 방식의 차이는 Fig. 4에서 보는 바와 같이

최종 스트로크에서의 성형하중의 차이에 기인하는 것이다. 성형하중을 살펴보면, 최대의 성형하중의 크기가 30-50% 정도의 차이를 보이고 있다. 이것은 매우 큰 차이이다. 특히 성형하중이 단의 종료 이전에 최대치를 나타내다가 급격하게 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 이것은 금형의 탄성변형과 속도 저하에 따른 유동응력의 감소에 기인한다.

각 해석 스텝에서 속도는 일정하다고 보기 때문에 실제 입력 데이터 상에서는 연속된 속도 함수가 입력되었다고 하더라도 총 해석스텝의 수, 해의 수렴 특성, 금형-소재의 접촉 알고리즘 등에 따라 최종의 속도는 다소 영향을 받는다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 속도가 일정값 이하로 떨어지면, 최종 스트로크에 도달할 때까지 그 값으로 간주할 수 밖에 없으므로 Fig. 4에서 최종 스트로크에 접근하면서 발생한 급격한 성형하중의 감소는 다소 수치적 영향이 내재된 결과로 보는 것이 타당하다.

Fig. 5는 3 단계에서의 하형의 응력을 나타내고 있으며, 전반적으로 성형하중 및 금형의 변위의 크기와 유사한 차이를 반영하고 있다.

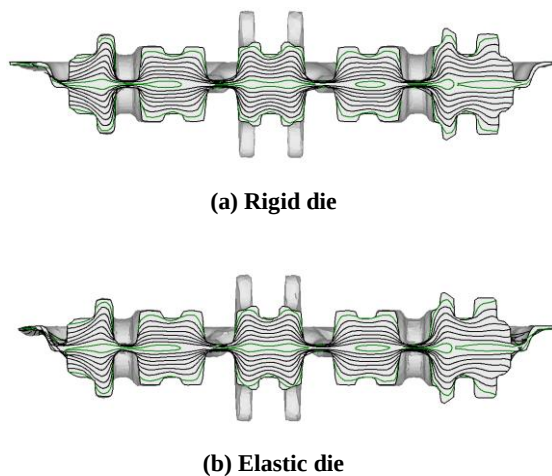
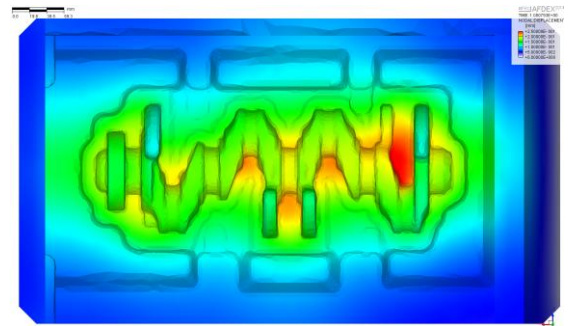
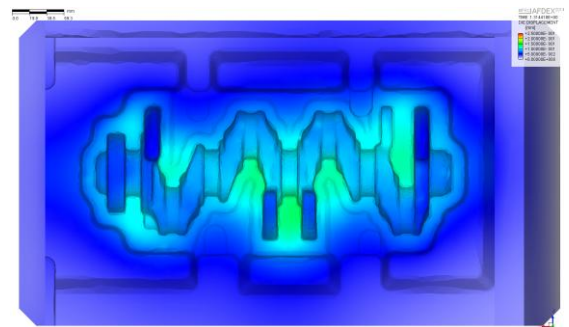


Fig. 2 Comparison of metal flow lines

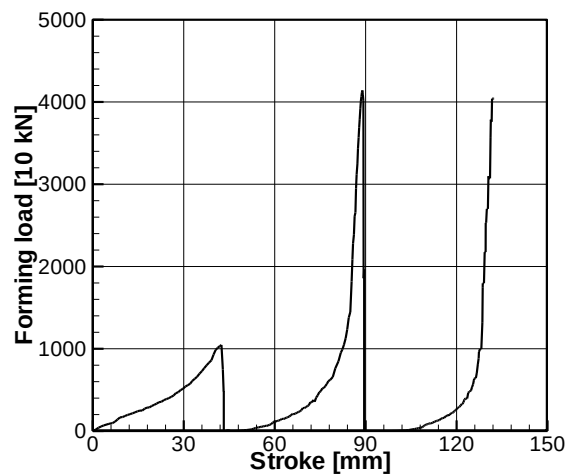


(a) Rigid die (max: 0.26 mm)

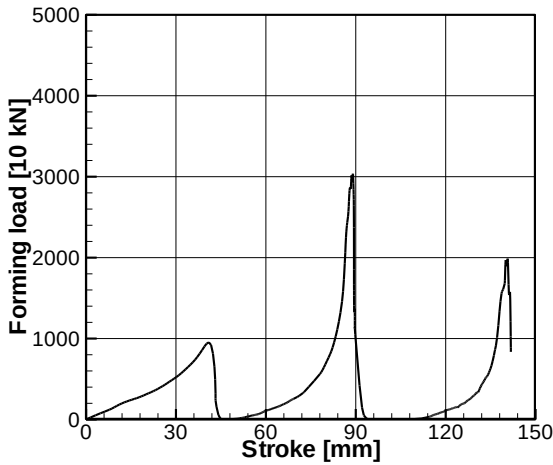


(b) Elastic die (max: 0.13 mm)

Fig. 3 Comparison of die displacement

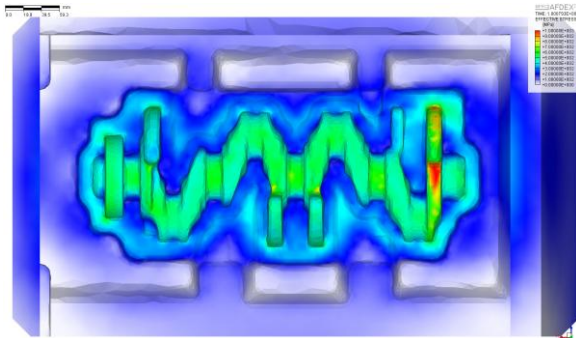


(a) Rigid die

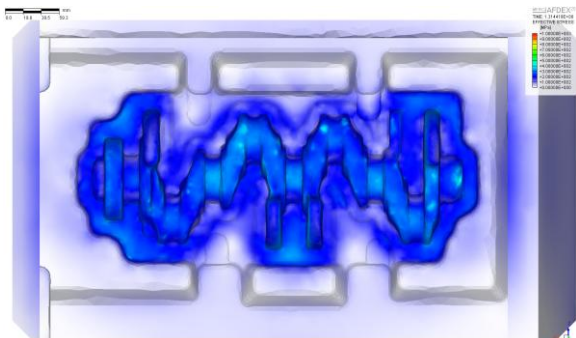


(b) Elastic die

Fig. 4 Comparison of forming load



(a) Rigid die (max: 1150 MPa)



(b) Elastic die (max: 340 MPa)

Fig.5 Comparison of effective stresses of lower die in stage 3

3. 결론

이 연구에서는 크랭크샤프트 열간단조 공정에 대해서 금형 탄성변형 고려 해석 기법을 적용하여 그 결과를 분석하였다. 금형 탄성변형 고려 해석 결과는 강체금형 사용 해석 결과와 비교되었다.

이 두 해석결과는 금형의 탄성 변위량 측면에서 비교적 큰 차이를 보였다. 특히 성형하중의 크기에서 약 30 - 50%의 차이를 보였다. 두 해석 결과 모두 금형의 탄성변형량이 금형설계 시에 무시될 수 없을 만큼 크게 나타났다.

현재까지 주로 단조 시뮬레이션 시에 금형의 변형을 고려하지 않았다. 그 결과, 성형 마지막 단계에서 급격한 하중의 증가가 발생하였고 이에 근거한 금형의 구조해석 결과, 과도한 응력이 작용하는 사례가 많았다.

이 연구의 결과로 제시된 예제에 보는 바와 같이, 금형의 수명 예측 목적이나 장비의 결정을 위하여 절대적인 의미를 가진 성형하중을 얻고자 할 경우, 금형의 탄성변형 고려 단조공정 해석이 불가피하다.

후 기

본 연구는 2014년도 중소기업청의 혁신기업기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음 (S2227173).

참 고 문 헌

- [1] M. S. Joun, M. C. Lee and J. M. Park, 2002, "Finite element analysis of prestresses die set in cold forging", Int. J. Mach. Tools Manu., pp.1213-1222.
- [2] 엄제근, 이민철, 이장호, 최영길, 김동환, 전만수, 2015, 크랭크샤프트 단조 공정 중 금형 마모의 유한요소해석, 한국소성가공학회 2015년도 춘계학술대회 논문집, pp. 258~262.

타원형 다단 딥드로잉 제품의 성형성 향상을 위한 초기 블랭크 형상 연구

이사람¹ · 박상민¹ · 김호진² · 전만수³ · 홍석무[#]

Optimization of Initial Blank Shape of Multi-stage Deep Drawing for Improvement of Formability

S. Lee, S. Park, H. Kim, M. S. Joun and S. Hong

Abstract

Multi-stage deep drawing is one of wide used process in industry field and applications are gradually being expanded to small products as well as large products. The USB C-type socket used for smart phone has very small, precise and large slenderness for example and it is manufactured from an oval multi-stage deep drawing. The thickness distribution of the final product in multi-stage deep drawing is guaranteed only if the thickness distribution of the product in the overall process must be uniform. Therefore, the minimization of the height difference of long and short side walls after first operation is a significant process design factor ensuring a uniform thickness of the final product. Finite element simulations were performed in order to determine the initial blank geometry ensuring a uniform height after the first draw operation. The initial blank shape of sheet metal was optimized and the results showed that it is satisfied both minimal thickness reduction and even thickness distribution. Finally, the geometry determined from optimized simulation was compared with experiments.

Key Words : Optimization, Stamping, Multi-stage stamping

1. 서 론

최근 산업 현장에서 소형화 제품이 활발히 생산되고 있다. 또한 이에 대한 산업계의 수요도 계속 증가될 것으로 예상된다[1]. 이에 따라 용접을 하던 소형화 제품들은 다단 딥 드로잉 기술을 도입하고 있다. 드로잉(drawing) 기술은 강판을 주름이나 파단 등이 발생하지 않고 제품 형상으로 성형하는 방법이다.

다단 딥 드로잉의 경우 형상의 높이 차이와 두께 분포가 균일하지 않은 문제점이 많이 발생하고 있다. 특히 타원 형상의 드로잉은 원형 드로잉의 경우보다 높이 차이가 불규칙하게 나타

난다.

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 타원 형상인 스마트폰 C-type USB 소켓 부품의 다단 딥 드로잉 제품의 성형성에 영향을 미치는 초기 블랭크 형상에 대한 연구를 수행하였다. 최초 1공정 드로잉 후 균일한 높이를 얻기 위해서 초기 블랭크 최적 설계를 수행하였다. 초기 블랭크 형상을 타원의 장변과 단변의 길이 변화를 각각 고려한 총 9개로 분류하여 유한요소 해석을 수행하고 각 case별 성형 후 높이 차이를 분석하고 최적의 초기 블랭크 형상을 제안하였다.

1. Department of Metalmold Design Engineering, Kongju National University. 2. MS Tech, 3. School of Mechanical Engineering/Engineering Research Institute, Gyeongsang Nat. University

Corresponding Author : Department of Metalmold Design Engineering, Kongju University, Smhong@kongju.ac.kr

2. 본 론

스마트 폰 C-type USB 소켓 제품의 목표 치수에 따라 초기 블랭크 형상을 결정하였으며 총 7 공정으로 정하였다.

1공정 이후 타원형 제품의 장변부, 단변부의 최대, 최소 높이 차이 즉, Δh 값이 가장 최소가 되는 것을 목적 함수(object function)을 삼고, 관련된 설계 변수는 블랭크의 물성, 마찰계수 등을 변화시켜 높이 차이에 대한 영향도(sensitivity)를 살펴보고 분석하여 가장 큰 영향을 미치는 변수를 case별로 나누었다. Fig. 1과 같이 총 9개의 case로 분류하여 성형 해석을 수행하였다. 성형 해석 후 높이 차이에 따라 블랭크 최적 형상을 판단하였다.

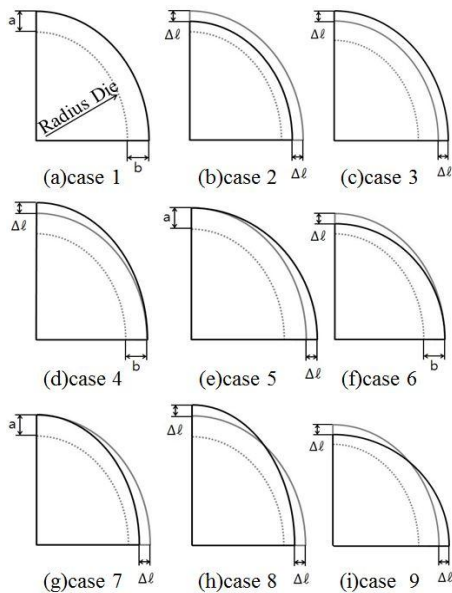


Fig. 1 Shapes of initial blank according to design variables

재료는 SUS304 를 사용하였으며 1 공정의 1/4 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석은 유한 요소 해석 프로그램 AFDEX[2]를 사용하였다. Case 별 유한 요소 해석 결과 최대, 최소 높이 차이 Δh 는 case 6의 경우 가장 낮은 높이 차이를 보였다. Δh 가 최소일 때, 제품 상부 두께 분포도 균일한 것으로 나타났다.

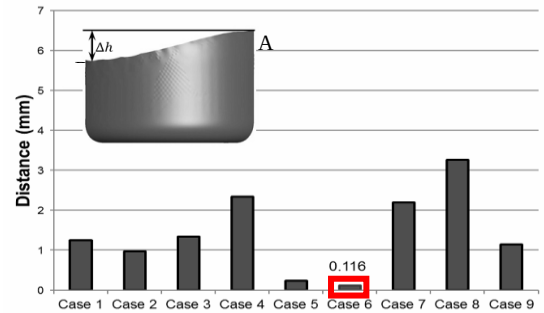


Fig. 2 Distance between Comparison of thickness between original blank and optimal designed blank

타원형 다단 딥 드로잉 제품은 1 공정의 실제 공정을 거친 제품의 3 차원 측정 결과와 유한 요소 해석을 통한 데이터를 높이 분포를 비교 분석하였다. 3 차원 광학 측정 장비인 GOM ATOS[3]를 활용하여 3 차원 측정을 수행하였다. 3 차원 측정 결과와 유한 요소 해석 결과는 5% 정도의 오차 수준으로 유한 요소 해석이 충분히 신뢰할 만한 수준으로 보여진다.

3. 결 론

본 연구에서는 두께 0.15mm 인 Al 3005 블랭크를 사용하여 타원 형상을 다단 드로잉 할 때 최종 제품에서 균일한 제품의 두께 분포를 갖을 수 있는 설계 변수가 초기 드로잉 공정 이후 제품의 단변부, 장변부의 높이 차이임을 파라미터 스터디를 통해 확인하였다. 1 공정 드로잉 이후 최소의 높이 차이를 갖도록 초기 블랭크 최적 설계를 수행하였으며, 실제 공정에 적용하였다. 제안된 초기 소재를 실제 드로잉 제품으로 만들어 3 차원 측정 장치를 이용하여 비교 검증한 결과, 최소의 Δh 를 통해 제품 상부 두께 분포를 감소시킬 수 있고 두께 편차도 최소화를 가능함을 측정을 통해 검증되었다.

REFERENCE

- [1] K. S. Lee, J. B. Kim, W. J. Jung, J. H. Kim, 2014, Influence of Blank holding Force and Blank Diameter on the Drawability and Quality of Very Small Cylindrical Cups, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 8, pp. 489~494.
- [2] AFDEX, www.afdex.com
- [3] GOM ATOS 2015, ATOS Professional user's manual, GOM mbH.

Ni 분말 초내열합금 고온변형특성과 항온단조 공정기술 연구

전 찬^{1#} · 배병범¹ · 윤은유¹ · 이영선¹ · 김동훈² · 홍성석² · 김흥규² · 윤준도³

Abstract

니켈기 초내열합금은 크롬, 티타늄, 텅스텐, 몰리브덴, 코발트 등 10가지 이상의 원소를 첨가하여 기지상인 Ni에서 첨가원소의 고용 및 석출강화로 인해 우수한 고온강도 및 내부식성을 나타내어 항공용 터빈디스크의 고온/고압 부품에 적용된다. 이러한 니켈기 초내열합금은 주조방식을 통하여 제작하기 때문에 주조시 온도차이에 의해 주조시편 위치에 따른 응력이 달라지게 되어 단조공정시 성형성에 문제를 가지고 있다. 반면에 분말야금법을 이용하여 만든 부품은 설계의 선택사항을 통해 상(phase)을 선택적으로 조절하여 제품을 응용 용도에 맞게 재단할수 있으며, 시편내의 잔류응력이 낮다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 분말야금법을 활용한 니켈기 초내열합금 부품성형기술개발을 위해 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Ni기 초내열합금 분말을 열간등압성형(HIP) 공정을 통하여 치말화 한 후 시편을 고온압축시험(Gleeble test)하여 공정변형지도(Processing map)를 통해 소성불안전영역과 소성안전영역을 분석하였고 OM, SEM-EBSD를 통해 미세조직을 분석하여 압축실험과 유한요소방법(FEM)을 통한 압축시험해석을 비교분석하여 변형량과 미세조직과의 상관관계를 분석하였다. 또한 Ni기 분말 초내열합금을 터빈디스크 성형 단조공정 최적화를 위해 재료의 변형량 최소화 및 균일하게 분포시키기 위한 연구를 수행하였다. 소재의 변형 방향을 다르게 설계하여 항온단조 공정을 유한요소방법으로 해석하였으며, 두가지의 변형 방향은 단순 단조 방식(Normal Forging)과 양단 압출 방식(Bilateral Extrusion)으로 해석하여 변형량 분포를 분석하였다.

Key Words : Ni superalloy, Isothermal Forging, Powder metallurgy, Processing map

1. 재료연구소 실용화연구단 소재성형연구실

2. 국방과학연구소 제4기술연구본부

3. 경남대학교

교신저자 : 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구실, E-mail : cksday@kims.re.kr

서보 모션에 따른 U-Cup 마찰 특성에 관한 연구

박세제¹ · 전만수² · 김병민³ · 김동환[#]

A Study of Friction Characteristics of U-cup Extrusion on a Servo Motion

S. J. Park, M. S. Joun, B. M. Kim, D. H. Kim

Abstract

본 연구에서는 서보 프레스 사용하여 펀치의 모션에 따른 마찰 특성을 연구하였다. 서보프레스의 자유로운 움직임을 이용하여 펀치의 속도 변화 및 맥동 모션은 알루미늄 6061 소재를 사용하여 후방압출 실험을 수행하였다. Al6061은 자동차, 선박, 항공기 등 널리 사용되고 있다. 본 실험에 앞서 SS400 소재를 사용하여 더블컵 전후방압출 공정을 서보 모션을 이용하여 실험하였다. 그 결과 맥동과 단계 모션이 일반 프레스 모션에 비해 약 20% 이상의 성형하중이 감소하였다. Al6061 소재를 이용한 후방압출 공정에서 성형 시 마찰 특성 및 소재 변형에 서보 모션이 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다. 실험 방법으로는 유한 요소해석을 통하여 성형하중을 네 구간으로 구분하고, 각 구간별 맥동 모션을 적용하여 그 결과를 관찰하였다.

Key Words : Extrusion, Friction, Servo Press, Formability, FE-simulation

1. 부산대학교 정밀가공시스템

2. 경상대학교 기계항공정보융합공학부

3. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 한국국제대학교 항공부품공학과, E-mail: dhkim.iuk.ac.kr

AFDEX 스프링백 해석 검증

정완진^{1#}, 정석환², 전만수²

Verification of Springback Analysis of AFDEX

W. J. Chung^{1#}, S. H. Chung², M. S. Joun²

Abstract

In this study, forming and springback analyses were carried out to verify the accurateness of elasto-plastic module of AFDEX. Springback analysis procedure considering unloading process was presented. For upsetting process, and indentation process, AFDEX results were compared with the results by commercial general finite element program. In upsetting process, AFDEX springback result is equal to theoretical one in terms of deformation and stress status. In indentation process, AFDEX shows close correspondences to other commercial program. Small discrepancies may come from different contact treatment.

Key Words : Elasto-plastic FEM(탄소성유한요소법), Spring Back, AFDEX, Upsetting, Indentation, L-bending

1. 서 론

본 논문에서는 현재 국내에서 개발되고 있는 탄소성 모듈을 가진 AFDEX 와 이미 상용화되어 있는 프로그램들을 이용해 스프링백 회복량을 비교하여 AFDEX 를 검증하였다. 해석예제로는 업세팅, 압인공정을 사용하였다. 해석결과를 상용해석 프로그램과 비교하여 검토하였다.

2. 스프링백 해석 방법

성형해석이 종료된 후 스프링백 해석을 수행하기 위해서 2 가지 방법을 주로 사용한다. 첫 번째 방법에서는 금형을 제거하고 금형과 소재 사이의 반력을 남겨 힘 평형을 만족하는 상태에서 시작하여 반력을 점차 소거하여 영으로 만들어 가며 스프링백 해석을 수행한다. 두 번째 방법에서는 실제와 같이 금형의 성형 후 동작을 동일하게 구현하면서 스프링백 해석을 수행하게 된다. 후자의 방법에서는 금형과 소재의 접촉이 분리되는 과정에서 해의 수렴성이 저하되는 경우가 많으므로 전자의 경우보다 해석의 난이도가 높다. 본 연구에서는 후자의 방법을 채택하

여 보다 실제와 같은 결과를 도출하도록 하였다.

3. 스프링백 해석 및 결과분석

본 연구에서 사용한 재료는 AISI1010이며 재료물성치는 Table 1과 같다.

$$\bar{\sigma} = Y_0 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{b}\right)^a \quad (1)$$

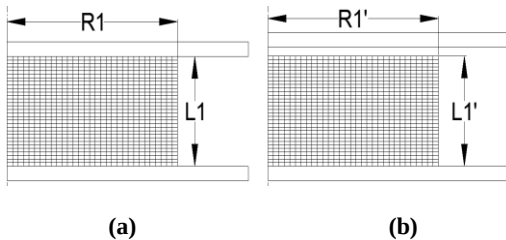
Table 1 Mechanical properties of material

	AISI1010
Young's modulus(MPa)	199950
Poisson's ratio	0.29
Yield stress (MPa)	260
a	0.22676
b	0.01138

Fig. 1 은 원통 형상 소재의 업세팅의 스프링백 전,후 그림이며 높이 15mm 의 소재를 높이 7.5mm 가 될 때까지 성형한 후 회복된 길이와 높이를 비교하였다. 모든 경우 소재와 금형 사이의 마찰계수는 0 이다. AFDEX 의 경우 L1 은 7.5mm, L1'은 7.5249mm 이다. R1 은 14.1323mm,

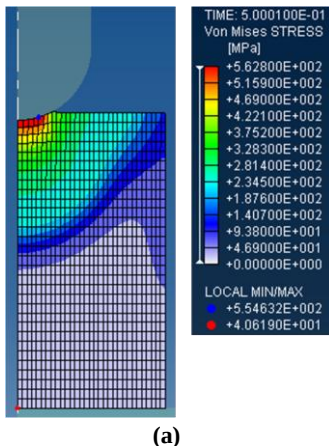
1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
2. MFRC (Metal Forming Research Corporation)
E-mail: wjchung@seoultech.ac.kr

R1'은 14.1188mm 가 나왔다. ANSYS 의 경우 L1 은 7.5mm, L1'은 7.5249mm 이다. R1 은 14.1324mm, R1'은 14.1188mm 가 나왔다. 따라서, 변형결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 Von Mises 응력의 경우 AFDEX 에서 스프링백 전 응력이 661.93MPa 이며, 스프링백 후 응력은 0.31MPa 이 나왔다. ANSYS 의 경우 스프링백 전 응력이 661.95MPa 이며, 스프링백 후 응력은 0.99MPa 이 나왔다. 최종 응력은 0 이 정확하므로 해의 수렴이 다소 부족함을 알 수 있다. 최종 부피 오차는 이론적으로 0 이 정확하나 AFDEX 의 경우 0.00116%가 나왔으며 매우 정확한 수준임을 알 수 있다.

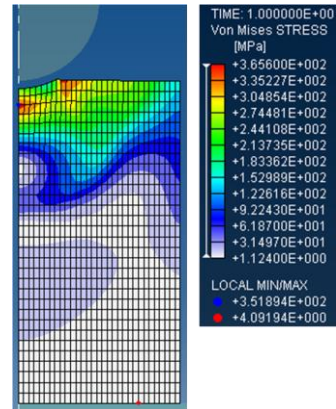


(a) Before springback (b) After springback
Fig. 1 Springback of the upsetting

축대칭 형상의 압인공정 후 스프링백을 3 차원으로 해석하였다. 소재는 반지름 5m, 높이 10 mm 이다. 반구형 펀치를 0.5 mm 내린 후 상승시키며 스프링백을 해석하였으며 Coulomb 마찰계수는 0.05 를 사용하였다. AFDEX 와 ABAQUS 는 스프링백 후 형상에서 0.1 % 내의 오차를 보였다.



(a)



(b)

(a) Before springback (b) After springback
Fig.2 Springback of 3-point bending

Fig. 2 에서 스프링백 전후의 Von Mises 응력을 비교하여 보았다. 스프링백 전에는 AFDEX 의 경우 최대 554 MPa 가 ABAQUS 의 경우 최대 563 MPa 가 계산되었다. 스프링백 후에는 AFDEX 의 경우 최대 352 MPa 가 ABAQUS 의 경우 최대 366 MPa 가 계산되었다. 응력의 차이는 접촉 알고리즘의 차이가 주 원인인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 탄소성 모듈을 가진 AFDEX 2D/EP와 ANSYS 13.0을 이용하여 스프링백 해석을 수행하였다. 이미 상용화되어 있는 다른 프로그램과의 수치비교를 통해 AFDEX 3D/EP의 신뢰성과 정확성을 검증할 수 있었다. 적용 예제 별 스프링백 회복량은 두 프로그램에서 비슷한 경향과 수치를 보였다.

후 기

이 논문은 2016 년도 중소기업청의 혁신기업 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (S227173)

참 고 문 헌

- [1] W. J. Chung, M. S. Joun, "Elastoplastic module of AFDEX 3D", Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, 2014, pp.57-60

3. 특 별 세 셴

초고강도 판재 변형제어 냉간 성형 기술 개발
(제 2 발표회장)

1.5GPa급 초고강도 강판의 스프링백 예측을 통한 금형 최적화

김종상¹ · 김현영^{1#} · 김응주² · 송정한² · 오강세³

Optimization of Mold Considering Prediction of Springback for 1.5GPa Ultra-high-strength-steel

J. S. Kim, H. Y. Kim, E. Z. Kim, J. H. Song, K. S. Oh

Abstract

전세계적으로 자동차의 온실가스 및 배기가스 배출과 관련하여 CO2 배출 관련 환경규제와 충돌안전 규제에 효과적으로 대응하고, 자동차의 중량을 감소시키기 위하여 경량소재에 대한 적용 비율을 지속적으로 증가시키고 있는 추세이다. 일반적으로 차체 중량을 10% 경량화하면 5~7%의 연비향상 효과를 가져온다. 연비 향상, 배기가스 감소 및 충돌안전성 강화 등의 요구사항을 동시에 만족시키기 위해서 국내외 자동차 업체에서는 고강도강판의 적용비율을 증가시키고 있다. 그러나 소재가 고강도강 일수록 항복응력이 높고, 연신율이 적으며, 비등방 경화거동, 비선형 탄성거동 등의 재료의 기계적 성질에 기인하는 다양한 문제점이 발생한다. 또한 고강도강의 비등방 경화거동, 비선형 경화거동을 예측하기 위해서는 재료의 응력-변형률 거동을 정확하게 표현할 수 있는 재료모델이 필요하다. 따라서, 초고강도강의 탄/소성의 거동과 성형성 및 과도한 스프링백을 해결하기 위해서는 정확한 재료모델과 소재의 특성을 평가할 수 있는 실험법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 1.5GPa급 초고강도강판의 기계적 특성을 평가하고 유한요소 해석을 이용한 성형성 평가와 스프링백 예측의 정확도를 높이기 위한 연구를 통해 최적화 금형 설계를 진행하였다. 초고강도강판의 기계적 특성을 평가하기 위하여 방향 별 인장 시험 및 인장-압축-인장의 반복하중에 따는 기계적 거동을 평가하였다. 또한 유한요소해석의 신뢰성을 높이고 정확한 스프링백 예측을 위하여 고강도강에 특화된 재료모델인 Yoshida model을 사용하였다. 재료의 기계적 거동과 스프링백 예측의 정확성을 위한 Yoshida parameter를 구하기 위해 재료시험과 U-bending 시험에 대한 방법을 정립하고 이를 이용하여 실부품 해석에 적용해 스프링백을 예측하고 최적화 금형 설계를 진행하였다.

Key Words : Mold(금형), Optimization(최적화), Springback analysis(스프링백 해석), Ultra-high-strength-steel(초고강도강), Yoshida model(요시다모델), PAM-STAMP(팜시스템프), Finite Element Method(유한요소법)

후 기

본 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.
(과제명 : 1.5GPa급 초고강도 차체부품 변형제어 냉간 정밀 프레스 성형 기술 개발)

1. 강원대학교 기계의용공학과

2. 한국생산기술연구원

3. ㈜ 세원물산

교신저자: 강원대학교, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

냉간 판재 프레스성형용 금형의 기초 마모예측모델 구성

이정흠¹ · 배상범¹ · 윤국태² · 허재영² · 김세호[#] · 박춘달²

Construction of a Basic Wear Prediction Model for the Press Die of the Cold Sheet Metal Forming Process

J. H. Lee, S. B. Bae, , K. T. Youn, J. Y. Heo S. H. Kim, C. D. Park

Abstract

최근 온실가스과 유해물질 배출규제가 강화됨에 따라 자동차 업계에서는 판재 부품에 초고강도강을 적용하는 방법으로 차체를 경량화하여 규제를 만족시키고 있다. 초고강도강으로 제품 성형 시 금형과 블랭크 간의 접촉 하중이 크게 증가하게 되며, 이로 인해 금형수명 감소, 형합 불량, 스프링백 과다 등의 문제가 발생하고 있다. 이중 큰 접촉 하중과 반복적인 마모에 의한 성형금형의 표면처리층 마모에 의한 금형수명 저하가 생긴다. 금형 수명의 이 감소에 의하여 잦은 유지보수가 필요하며 양산중 생산중단 등의 문제가 발생되기 때문에 사전에 금형수명을 예측하고 적절한 시기에 금형보수 및 생산일정 변경 등 효과적인 대응이 요구된다.

본 논문에서는 인장강도 1.5GPa 급 초고강도강판을 소재로 성형되는 차체부품용 냉간 프레스금형의 금형수명을 시험적으로 예측하기 위한 기초모델을 구성한 연구과정을 설명하였다. 대상은 폼타입 냉간 프레스 성형공정용 금형으로 열처리-이온질화처리-CrN 표면처리가 된 금형시험편을 제작하였다. 성형공정의 유한요소해석을 실시하여 성형공정 중 발생하는 접촉압력, 금형과 소재간의 상대속도, 소재 미끄럼거리의 범위를 도출하였으며, 마모시험기에서 적용 가능한 가압력, 속도, 마모거리 등의 시험조건을 추출하였다. 시험은 Pin-on-disc 방식을 사용하였으며, 공구현미경을 이용하여 마모량을 정밀측정하였다. 실험계획법을 활용하여 각 마모변수의 직교배열표를 작성하였으며, 마모 시험을 수행하고 마모량을 압력, 속도, 거리의 함수로 구성된 반응 표면을 구성하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업핵심기술개발사업 수행의 결과입니다.

Key Words : UHSS(Ultra High Strength Steel), Cold Forming, Wear Test, Prediction Model

1. 대구대학교 대학원 기계공학과

2. 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부

교신저자: 대구대학교 기계공학부, E-mail : mvksh@daegu.ac.kr

금형구조해석을 이용한 초고강도 차량부품 프레스금형의 기초 설계

곽정환¹ · 강경훈¹ · 김세호[#] · 조준행² · 최원호² · 오강세²

Design of the Press Tool Structure for an Auto-part with UHSS using the Finite Element Structural Analysis

J. H. Kwak, K. H. Kang, S. H. Kim, J. H. Cho, W. H. Choi, G. S. Oh

Abstract

최근 자동차 업계에서 경량화 요구와 안전성 및 강화된 법규에 대응하기 위해 초고강도강 사용이 증대되고 있다. 차체부품에 초고강도강의 적용이 증가함에 따라 소재의 인장강도 증가에 의한 성형 하중이 크게 증가하여 금형변형 등의 문제가 발생하게 된다. 이에 따라 금형의 내구수명 문제와 금형의 탄성변형에 의한 형합불량과 제품의 치수 정밀도 저하 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서, 시험성형 시 시행착오법을 통해 추가적으로 금형을 보정해야 하며 이는 제작과정에서의 금형 가공비 증가 및 금형 납품가의 상승 원인이 되고 있다. 특히 인장강도 1.5GPa 급 초고강도강판의 냉간성형 시 금형변형 등의 현상이 일반강에 비해 매우 클 것으로 예측되어 이에 대한 사전 대응이 요구된다.

본 논문에서는 인장강도 1.5GPa 급 초고강도강판을 소재로 적용하여 냉간 프레스 성형되는 멤버류 부품인 센터 플로어 사이드 어퍼(center floor side upper) 제작용 금형구조의 기초설계를 수행하기 위한 연구결과를 기술하였다. 금형의 강도를 예측하기 위해 성형공정해석 및 금형구조해석을 연계하였다. 금형구조해석에서 얻은 결과 중 변형량 및 응력을 정량화하였으며, 높이방향 최대 변형량이 0.42mm 로 제품의 형상정밀도에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 금형 구조부 중 가장 취약한 부위는 하형 주물부의 리브 부분이었으며, 영향도 분석 결과 주물부의 구조를 변경하는 것이 가장 효과적으로 금형 취약부를 보강할 수 있는 것으로 판단되었다. 금형 구조설계의 기본안을 도출하기 위하여 위상최적설계에서 얻은 설계안 및 기존 리브 재구성안 등 4 개안을 기준으로 금형구조해석을 실시하였으며, 위상최적설계안이 가장 효과적인 설계안으로 검증되었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

Key Words : Tool Design, UHSS, Tool Deformation, Structural Analysis

1. 대구대학교 대학원 기계공학과

2. ㈜세원물산

교신저자: 대구대학교 기계공학부, E-mail : mvksh@daegu.ac.kr

서보프레스 모션제어에 따른 1.5GPa급 초고강도강의 스프링백 특성평가

박정수¹ · 김용배¹ · 김응주¹ · 송정환^{1#} · 김세호² · 오강세³

Springback Characteristics of Ultra-High Strength Steel with 1.5GPa Grades with Various Motion Controls with Servo Press

J. S. Park, Y. B. Kim, E. Z. Kim, J. H. Song, S. H. Kim, G. S. Oh

Abstract

Although the ultra-high strength steel sheets are attractive in reducing weight of cars, the amount of springback of ultra-high strength steel sheets after forming is very large due to high strength. In the past few years, the use of mechanical servo press has increased. This technology combines the main feature of servo-motor and mechanical press to produce various slide motions and velocities, which enables the forming of geometrically complex parts. It has been mentioned in the literature that this technology can be applied to control springback. In this paper, the springback behavior of martensitic steel sheets with the tensile strength of 1470 MPa was investigated under 2-D draw bending conditions. Experiments were performed using a direct-drive digital servo-press in three different slide motions (conventional crank motion, relation motion and attach-detach motion). The effect of slide motion, forming speeds and blank holding forces on the amount of springback were examined. The results indicates that forming speeds and blank holding forces are greatly influence on the amount of springback. On the other hands, the slide motions such as detaching the tools were little influence on the springback.

Key Words : Springback, Slide motion control, Servo-press, U-draw bending, Ultra-high strength steel

후 기

본 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 산업소재핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소

2. 대구대학교 기계·자동차공학부

3. ㈜세원

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail:jhsong@kitech.re.kr

초고강도강판 냉간성형용 금형의 PVD 코팅층 종류에 따른 계면 밀착력 및 마모·마찰 특성

허재영[#] · 윤국태¹ · 임형철¹ · 송재선¹ · 윤일채¹ · 박춘달¹

Characterization of Interface Adhesion and Friction/Wear in PVD coated on Cold Work Tool Steel for UHSS Forming Die

J. Y. Heo, K. T. Youn, H. C. Lim, J. S. Song, I. C. Yoon, C. D. Park

Abstract

최근 자동차 경량화 및 탑승자 안전성 확보를 위해 초고강도강판 적용이 크게 증가하고 있으며, 이로 인한 금형 수명 문제로 다양한 표면처리를 검토, 적용하고 있다.

본 연구에서는 초고강도강판 냉간 성형용 금형강 표면에 이온질화 및 PVD 코팅을 적용하여 각 표면처리의 계면 밀착력과 마찰·마모 특성 등을 분석하고 금형 수명에 미치는 효용성을 고찰하였다.

STD11 냉간 금형강을 모재로 하여 1030°C Austenitizing 하고 500°C 고온 Tempering 후, 이온질화 및 이온질화+PVD 코팅을 실시하였다. PVD 코팅 종류는 CrN, CrAlN, TiAlN, TiAlSiN 으로 각 코팅 층 두께 및 상태를 광학현미경 및 주사전자현미경을 통하여 관찰하였다. 또한 코팅층과 모재와의 계면 밀착력을 평가하기 위해 Scratch Tester 를 활용하여 각 코팅층의 피막 파괴 임계하중값 및 파괴모드를 고찰하였다. 인가하중 및 인출속도에 따른 각 코팅층의 마찰계수를 평가하기 위하여 평면(편면)마찰시험을 수행하였다. 그리고, 코팅층의 수명비교 평가를 위해 Al_2O_3 Ball 상대재를 활용하여 Ball-on-Disc 마모시험을 진행하였으며, 별도 제작된 전단 시험금형을 활용하여 전단 수명평가를 실시하였다.

각 코팅층의 경도 측정에서 TiAlSiN 코팅층의 경도가 가장 높았고, 피막 파괴 임계하중값은 TiAlN 이 가장 크게 나타났으며, 이온질화 전처리를 미실시한 TiAlSiN 층의 밀착력이 가장 낮았다. 열·표면처리된 각 시험편의 마찰시험에서 인가하중 및 인출속도가 증가함에 따라 마찰계수는 전체적으로 낮아지는 경향을 보였다. 마모시험 후 마모흔의 폭을 측정한 결과 다른 코팅에 비하여 코팅층 밀착력이 낮은 이온질화를 미실시한 TiAlSiN 코팅 및 열처리 시험편의 마모폭이 비교적 크게 나타났다. 표면처리 적용 금형의 수명을 확인하기 위한 전단시험 결과 CrAlN 코팅 금형이 10,000 타 이상으로 가장 우수하였고, 이온질화 전처리를 미실시한 TiAlSiN 코팅 금형의 경우 6,500 타 수명으로 밀착력이 금형 수명에 주요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Key Words : UHSS(Ultra high Strength Steel), PVD Coatings, Scratch Test, Adhesion, Friction Coefficient

Acknowledgment : 본 연구는 산업기술혁신사업(과제명 : 1.5GPa급 초고강도 차체부품 변형제어 냉간 정밀 프레스 성형 기술 개발, 과제번호 : 10053026) 및 지역연고산업육성사업(과제명 : 대구금형산업 글로벌 역량 강화 사업, 과제번호 : NP2013-0006)의 일환으로 수행되었습니다.

1. 대구기계부품연구원
DMI, E-mail: jyheo@dmire.kr

4. 특 별 세 셴

미래형 자동차용 고효율 Air-Conditioning
System 융합설계 및 제조기술 개발
(제 2 발표회장)

Mg합금의 기계적물성 획득을 위한 평면변형을 압입시험 제안

임규범¹ · 정기호¹ · 곽호빈¹ · 권인우¹ · 고은실¹ · 전찬후¹ · 이근안¹ #

A Suggestion of plane-strain indentation method to obtain mechanical properties of magnesium alloy

G. B. Lim, K. H. Jung, H. B. Kwak, I.W. Kwon, E.S. Go, C.H. Jeon, G.A. Lee

Abstract

With the development of transportation industry, light metal alloys have been developed such as automobiles and aircraft. Among the light metal alloys, magnesium is the lightest structural material with superior specific strength and many attractive physical and mechanical properties. However, magnesium alloys were difficult to obtain the mechanical properties at warm temperature. The aims of present work were to establish an analytical relation between mechanical properties and plastic flow induced by plane-strain indentation. An experimental investigation of the local strain distribution was carried out using a specially designed plane-strain indentation equipment in conjunction with ARAMIS based on digital image correlation method.

Key Words : light metal alloy, magnesium alloy, plane-strain indentation, ARAMIS

1. 한국생산기술연구원

교신저자: 이근안, E-mail:galee@kitech.re.kr

박판주조법과 압연접합법에 의한 자동차 열교환기용 알루미늄 클래드 개발

김형욱¹ · 어광준^{1#}

Development of Aluminum Clad Sheets for Automotive Heat Exchangers Using Strip Casting and Roll Bonding

H. W. Kim, K. Euh

Abstract

Aluminum clad sheets for automotive heat exchangers are required to exhibit both high strength and excellent brazing properties. Conventionally, aluminum clad sheets for brazing materials are produced using ingot-cast core and filler alloys. The core alloys have a relatively high Mn concentration, which can be readily produced by the strip casting and the strip-cast core alloy shows an enhanced tensile strength with comparable sag and erosion resistance. In this study, aluminum clad sheets are fabricated by the roll bonding process with strip-cast aluminum alloys. The clad sheets for heater tube are manufactured using twin-roll-cast (TRC) modified A3527 core alloys with an A4343 filler and an A7072 sacrificial alloys. The clad sheets are further cold-rolled down to the thickness of 0.20 or 0.22 mm with different final annealing temperatures. Condenser fins are produced using TRC modified A3003 core alloys and an A4343 filler alloy and intermediate annealing at the different temperatures is conducted during cold rolling down to 0.07 or 0.08mm in thickness. The effect of annealing temperature on the tensile, erosion, sag properties of aluminum clad sheets is investigated by means of microstructural analysis.

Key Words : Aluminum Clad, Strip Casting, Roll Bonding, Automotive Heat Exchanger, Heater Tube, Condenser Fin

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소, E-mail: keuh@kims.re.kr

실린더 압축실험에서의 고주파 진동의 영향

김상우^{1#} · 이영선¹

Effect of High Frequency Oscillation on Compression Tests of Cylindrical Specimens

S. W. Kim, Y. S. Lee

Abstract

Recent researches have reported that the superposition of ultrasonic vibrations in metal forming provides beneficial effects such as the reduction of forming load, flow stress and interfacial friction which improve the surface quality of end products. This paper presents experimental investigations on the effects of ultrasonic vibrations in upsetting tests of aluminum. The ultrasonic exciting system consists of piezoelectric transducer and resonator was designed and constructed to superimpose ultrasonic vibration on the forming tools. Ultrasonic vibration-assisted upsetting tests were performed for various vibration modes and the results were compared with that of conventional upsetting tests. The results showed that the superimposition of ultrasonic vibration reduces the upsetting load. And the mechanism of load reduction was investigated in various aspects such as acoustic softening, interfacial friction and stress superposition.

Key Words : Ultrasonic Vibration, Aluminum, Upsetting, Resonance, PZT, Transducer

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자: 재료연구소, E-mail:kimsw@kims.re.kr

5. 특 별 세 셴

가변 단면 튜브 적용 경량화율 30%이상의
770mm 급 일체형 장구동축 복합성형기술 개발
(제 3 발표회장)

롤 포밍에 의한 변형 잔류응력이 레이저 하이브리드 용접 잔류응력에 미치는 영향 분석

이영호¹ · 최명우² · 이영석[#]

A Study on how residual stress caused by roll forming process affects Laser arc hybrid welding condition

Youngho Lee, Myoungwoo Choi, Youngseog Lee

Abstract

This study examined the influences of residual stress in the material produced by roll forming that makes a pipe on setting up the laser hybrid welding condition. The conditions for laser hybrid welding are the welding order and welding speed. Finite element analysis was carried out to calculate the residual stress distribution and establish welding condition. The material used in this study is ST35MnB and X-ray diffraction and instrumented indentation was used to measure the residual stress. The influences of the residual stress on the welding conditions were investigated by comparing the residual stresses computed from finite element analysis with the one measured. This study found out that a condition for laser hybrid welding that residual stress distribution is minimized.

본 연구에서는 파이프 제조용 롤 포밍 공정에서 소재에 발생하는 변형 잔류응력이 레이저 하이브리드 용접조건설정에 어떠한 영향을 미치는 정도를 분석하였다. 레이저 하이브리드 용접조건은 용접순서와 용접속도이다. 잔류응력을 계산하고 용접조건을 설정하기 위해 유한요소법이 사용되었다. 사용된 소재는 ST35MnB 이고 잔류응력 측정에 사용된 방법은 X-선 회절법과 계장화압입법이다. 계산된 잔류응력과 측정된 잔류응력을 비교하여 용접 FE모델의 유효성을 검증하였다. 롤 포밍에 의한 잔류응력의 유무에 따라 용접 잔류응력이 어떻게 변하는지 비교 후 용접조건설정에 미치는 영향을 분석하였다. 용접 잔류응력 분포가 최소화 되기 위한 레이저 하이브리드 용접조건을 찾았다.

Key Words : Laser welding, Gas metal arc welding(GMAW), Hybrid laser-GMA welding, Finite elements method(FEM), Residual stress, Heat affected zone(HAZ), Roll forming, X-ray diffraction, instrumented indentation

본 연구에서 잔류응력이 2가지 입니다.
롤 포밍 잔류응력, 용접잔류응력
이 두 가지를 반드시 구분해야 합니다.

1. 중앙대학교 기계공학과

2. 중앙대학교 기계공학과

교신저자: 중앙대학교 기계공학과, E-mail: ysl@cau.ac.kr

밀스프링과 길이 신장율을 고려한 가변단면 판재 열간 압연 공정 연구

이호원¹ · 오영석¹ · 강성훈[#]

Manufacturing of Tailored Rolled Plate using Hot Rolling Process by Considering Mill Spring and

H. W. Lee, D. K. Lee, Y. S. Oh, S. H. Kang

Abstract

In this paper, the hot rolling process of tailored rolled plate, used as a raw material for half-shaft of SUV vehicle, was investigated numerically and experimentally. The tailored rolled plate was manufactured by the hot rolling using upper roll with tooth profile and lower cylindrical roll. The finite element analyses of hot rolling process were conducted for acquiring suitable roll tooth profile which can ensure desired plate specifications. The major specifications of tailored rolled plate were the thicknesses of thin and thick area and the length of thin area. Therefore, the experimentally acquired mill spring constants was used in simulation for compensate elastic deformation of rolling mill. The arc length of roll was designed by considering contact length and longitudinal strain from above numerical results. Finally, the hot rolling process of TRP with designed upper roll was conducted and the optimal conditions for manufacturing TRP was discussed based on above experimental findings.

Key Words: Tailored Rolled Plate, Hot Rolling, Finite Element Analysis, Mill Spring

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구실

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구실,
E-mail:kangsh@kims.re.kr

소재 물성 및 공정변수에 따른 스웨이징 후육화율 연구

이종섭¹ · 김용배¹ · 정선희¹ · 임성주¹ · 강성훈² · 이상목[#]

Study on the thickness variation after the swaging process with various process parameters

J. Lee, Y. B. Kim, S. H. Jeong, S. J. Lim, S. H. Kang, S. Lee

Abstract

Recently, monobloc hollow drive shaft is required for the weight reduction of the auto-body parts. New manufacturing process for the drive shaft using variable cross-section tube has been proposed. At the final stage of this process, the variable cross-section tube is swaged in order to form the stub part of the drive shaft. Thickness variation during the swaging is required for the process design of the variable cross-section.

In this study, the tube thickness variation after the swaging process has been studied. Tubes for swaging were made using S45C and S20C. The thickness increases with respect to various materials and process parameters was investigated.

Key Words : tube thickness variation, swaging, material, process parameter

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소

2. 재료연구소

교신저자: 한국생산기술원 뿌리기술연구소,

E-mail:sanmokl@kitech.re.kr

가변단면판재의 미세조직 및 용접부 분석

손승우¹ · 이종훈[#]

Analysis on Microstructure of Variable Cross Section Plate and Weld Joint of Tube Material

S. Son, Z. Lee

Abstract

To weight reduction of car, our research group have been trying to compose a shaft as variable cross section. We analyzed each part of the variable cross section plate made by KIMS. With those analysis, effects of laser-arc hybrid welding variables were also studied. Among the welding processes, an arc welding and a laser welding are common in the field. The arc welding process is easy and convenient when an object is thick, but it has demerits when an object is thin because of its large fusion area. On the other hand, the laser welding process has merits of deep fusion depth and fast welding speed. Because of these merits and demerits of welding processes, industrial field tried to combine the arc and the laser welding processes as hybrid welding. Laser-arc hybrid welding has both advantages in welding speed and penetration depth. The variable conditions such as laser power, arc current and welding speed will be used for manufacturing variable thickness hollow drive shaft for automobile. This study investigates the microstructure of weld joints by laser-arc hybrid welding. Additionally, transmission electron microscopy was performed to characterize the microstructure of joints. Finally, the effects of hybrid welding parameters were investigated to find suitable conditions for stable welding process.

Key Words: Laser-Arc Hybrid Welding, Microstructure Analysis, Transmission Electron Microscopy

1. 울산과학기술원 신소재공학부
교신저자: 울산과학기술원 신소재공학부,
E-mail: zhlee@unist.ac.kr

6. 특 별 세 셴

설계기반 미래성형기술
(제 1 발표회장)

냉간 단조 공정에서 성형모드에 따른 마찰특성 평가 및 적용

김정훈¹ · 고병호² · 이태규² · 김병민[#]

Evaluation and Application of Friction Characteristics in Deformation type

J. H. Kim, B. H. Ko, T. K. Lee, B. M. Kim

Abstract

Zinc phosphate coating is required in nearly all steel cold forging operations. In the formation process of the phosphate coating layer, the sludge is created and the degradation is generated by deposited sludge. Therefore, the water-soluble lubricants are primarily used for the positive environmental impacts. However, for the design of the cold forging process applied water-soluble lubricant, the evaluation of the friction characteristics is necessary.

In this study, the friction characteristics of lubricants were evaluated using the double cup test and spike forging test. The double cup test is a combination of single forward and single backward extrusion processes. The spike forging test is a combination of upsetting and backward extrusion processes. With the use of FE simulation, friction calibration curves, i.e. cup height ratio vs. punch stroke and spike height vs. punch stroke, were established from different friction factor values. By matching the cup height ratio and the punch stroke and spike height vs. punch stroke from experiment to that obtained from FE simulations, the friction factor of the lubricants was determined. The friction factor determined was applied in the cold forging process.

Key Words : Cold Forging(냉간단조), Friction factor,(마찰상수) Water-Soluble lubricant(수용성윤활제), Double Cup Test(더블컵 시험), Spike Forging Test(스파이크 단조 시험)

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (no.2012R1A5A1048294).

1. 부산대 대학원 정밀가공시스템 전공

2. 발레오전장시스템스코리아주

교신저자: 부산대학교 기계공학부, E-mail:bmkim@pusan.ac.kr

초고강도강 점용접 접합부의 파괴 거동평가

노우람¹ · 정관수² · Xin Yang³ · 이명규^{1#}

Failure Analysis of AHSS Resistance Spot Welded Joints under Dynamic Loading

W. Noh, K.Chung, X. Yang, M.G. Lee

Abstract

Failure of resistance spot welded joints for advanced high strength steel sheets was investigated with finite element method. A coupled numerical-experimental technique was applied to the tension test results for quantitative characterization of mechanical properties, especially for ductile fracture criteria and plastic hardening of welded joints. The load-displacement curves of the base materials were measured using a standard tension test, while a miniature type of specimen was applied to the simple tension to obtain the load-displacement curves of the spot welded joints. The geometric feature of spot weld nugget was identified by hardness distribution and metallography. Tension tests of the single welded coupons were conducted under dynamic loading conditions and their failure behavior of welded joints at dynamic loading was analyzed by the finite element analysis.

Key Words : Advanced High Strength Steel Sheet, Resistance Spot Welding, Failure behavior, Dynamic Loading, Coupled numerical-experimental technique

1. 고려대학교 신소재공학부

2. 서울대학교 재료공학부

3. General Motors China Science Lab, China

교신저자: 고려대학교 신소재공학부, E-mail: myounglee@korea.ac.kr

전자기 성형의 바운싱을 줄이기 위한 액중 방전 성형의 해석적 연구

우민아¹ · 노학곤¹ · 박형규¹ · 김홍교¹ · 김 정[#]

Numerical research of electrohydraulic forming to reduce the bouncing of electromagnetic forming

M. A. Woo, H. G. Noh, H. K. Park, H. G. Kim, J. Kim

Abstract

Electromagnetic forming (EMF) is one of the high-speed forming process that uses Lorentz force to form a blank. Because of the high speed impact, high strain rate can improve the formability of the blank. However, when the blank is formed into a complex shape, bouncing phenomenon occurs and it gives the blank negative influences such as cracks and wrinkles. Therefore, in this paper, electrohydraulic forming (EHF) was proposed to overcome the bouncing problem of EMF. EHF is another high-speed forming that uses electric discharge in water. Shock waves generated from the electric discharge are propagated through water and it forms the blank that is situated below water. Using LS-DYNA program, a numerical study of EHF was performed to confirm the forming procedure in detail. In this simulation, an Arbitrary Lagrange-Eulerian method was used to create the element of fluid parts and a middle block die was used to form the blank into the complex shape. The results of EHF simulation were compared with EMF and it showed that bouncing effect didn't occur in EHF process and EHF can form the blank into the complex shape without any cracks and wrinkles.

Key Words : Electromagnetic forming, Bouncing, Electrohydraulic forming, Middle block die, Arbitrary Lagrange-Eulerian method

Acknowledgement

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No.2012 R1A5A1048294)과 중견연구자지원사업(No.2014R1A2 A1A11054473)의 지원을 받아 수행되었습니다.

1. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : Pusan National University, E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

섬유금속적층판의 모드 I, II 층간분리에 대한 실험 및 수치적 연구

박으뜸¹ · 김 정¹ · 강범수¹ · 송우진[#]

Experimental and Numerical Studies of Delamination in Mode I, II of Fiber Metal Laminates

E. T. Park, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song

Abstract

Fiber metal laminates, based on aluminum alloy and self-reinforced polypropylene sheets, have shown outstanding specific impact absorbed energy and remarkable recyclability. For these advantages, the laminates have been notable from aerospace and automotive industries. However, the laminates have a critical problems on the delamination phenomenon by the normal- or transverse-direction force. For these reason, the interlaminar fracture behavior of the laminates should be identified by the experimental procedure. The objective of this study is the assessment of mode I and II energy released rates. First, the double cantilever beam and end-notched flexure tests were carried out to obtain the experimental data such as load, displacement, and delamination length. Next, the experimental data were used to calculate the mode I and II energy released rates. Finally, the finite element simulation was done to evaluate the obtained energy released rates by comparing the experimental and numerical results. As a result, the mode I and II energy released rates obtained by the experiments could explain the interlaminar fracture behavior of the laminates.

Key Words : Delamination (층간분리), Double Cantilever Beam Test, End-Notched Flexure Test, Energy Released Rate (에너지 해방률), Fiber Metal Laminates (섬유금속적층판)

Acknowledgement

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294). 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

1. 부산대학교 항공우주공학과
교신저자: 부산대학교 융합학부,
E-mail: woodysong@pusan.ac.kr

Al 6061-O과 CFRP 홀 클린칭의 접합강도 관한 연구

신 국¹ · 이찬주² · 김병민³ · 고대철[#]

A Study on Joint Strength in Hole-clinching with Al6061-O and CFRP

G. Shen, C. J. Lee, B. M. Jim, D.C. Ko

Abstract

The hole-clinching process is a mechanical joining method using a set of tools (punch and die). In the hole clinching process, the punch side sheet is plastically deformed and geometrical interlock is formed by inserted into the hole of the die side sheet. The process can be employed to join dissimilar materials such as the metal and the composite. It is very important for a successful design of the hole clinching to analysis the failure mode, such as neck fracture as well as button separation. In this study, the joint strength of the hole clinched joints with Al6061 and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) was investigated through normal tension test. In order to save time and cost, the hole clinching parameters could be optimized by the use of finite element simulation. Pull-out tests of the hole clinching joints fabricated by different punch sizes were carried out to compare with the analysis of the joint strength. The results showed joints strength are highly depended on die depth.

Key Words : Hole-clinching, Button separation, Aluminum alloy, CFRP, Joint strength

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 연비향상을 위해 기존 철강 재료로 제작되어 있는 부품을 알루미늄, 마그네슘 또는 복합재료 등 경량화 소재로 대체하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 서로 다른 용융점을 가진 이종소재는 기존 저항 점 용접(Resistance spot welding)으로 접합이 불가능하다. 이로 인해 다양한 소재로 제작된 부품에서 이종소재 간 접합기술이 요구된다. 최근에 추가적인 접합요소가 필요 없는 기계적 클린칭을 통한 접합공정이 경제적, 친환경성, 생산성 등의 장점으로 인해 다양한 분야에 적용되고 있다. 클린칭

공정은 두 판재를 펀치로 가압 하여 하부 다이 형상 따라 소재의 국부적인 소성변형에 의해 접합되는 방법이다. 하지만 복합체(Composite)와 같은 탄성체는 금속과 같은 소성 변형이 불가능하기 때문에, 기계적 클린칭 접합을 적용하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 홀 클린칭 접합공정이 개발 되었다.

홀 클린칭 공정은 펀치 가압을 통해 소성변형이 발생한 상부 소재가 하부 소재의 홀을 통과하여 다이 내부로 삽입되고, 최종적으로 언더컷(Undercut)을 형성시키는 기계적 접합(Mechanical joining) 방법이다.

본 연구에서는 홀 클린칭시 Al6061-O와 CFRP 간의 접합강도 예측 방법을 제시하였으며, 풀아웃 시험(Pull-out test)을 통해 접합강도 예측방법의 유효성을 평가하였다. 또한, 제시한 접합강

1. 부산대학교 융합학부

2. 한국생산기술연구원

3. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 부산대학교 ERC/ITAF

E-mail:dcoko@pusan.ac.kr

도 예측수식을 통해 파괴 모드를 예측하고 요구 강도를 만족시키는 홀 클린칭 접합 공정을 설계 하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2012R1A5A10 48294)으로 수행된 연구결과입니다.

가변성형공정에서의 국소굽힘효과를 활용한 펀치배열방법

박지우¹ · 윤준석¹ · 김정¹ · 강범수[#]

Punch Array Method using Local Bending Effect in Flexible Forming Process

J. W. Park, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang

Abstract

A lot of punches are used to implement mold shape for various objective surfaces in flexible forming process. Generally, the number of upper and lower punches is the same and each upper punch and its corresponding lower punch are located in the same horizontal position. Punch force could be increased by those punch arrangements that could lead to forming failure. In the present study, a new punch array method which is different with conventional one-to-one arrangement is suggested. In this improved method, the punch force decreases by local bending effect which is appeared through modified arrangement. In addition, it is predicted that forming failures such as dimpling and wrinkling are diminished by the suggested method. From the results of this study, advantages and potential of the new punch array are confirmed and it could be used for various forming experiments.

Key Words : Flexible Forming Process, Punch Array, Numerical Simulation

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. NRF-2012R1A5A1048294)과 중견연구자지원사업(No. NRF-2014R1A2A1A11054473)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

1. 부산대학교, 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과, E-mail: bskang@pusan.ac.kr

국부가열을 이용한 Tailor rolled blank의 핫스탬핑 공정에서 스프링백 예측

심규호¹ · 김재홍² · 김병민[#]

Springback prediction in hot stamping process of tailor rolled blank using partial heating

G. H. Sim, B. M. Kim

Abstract

Springback is one of the most important defect in tailored blank of sheet metal forming process. Multi-strength hot stamping by using partial heating disagree springback in high strength part and low strength part separately. In addition, springback affect dimension accuracy on in low strength part. In this study, springback prediction was performed in hot stamping process of Tailor Rolled Blank(TRB) using partial heating. The thicker and thinner part of TRB were heated up to 900°C and below A_{c3} transformation temperature to manufacture multi-strength part. The springback was predicted by FE-simulation considering kinetics of phase transformation in hot stamping process. FE-simulation was performed LS-Dyna(R7.1.2) software with MAT_106 for low strength part and MAT_248 for high strength part. MAT_106 and MAT_248 were used to describe behavior of elastic viscoplastic material with thermal effects and dilatation of phase transformation according to heating temperature respectively. In order to evaluate effectiveness of springback prediction, experiment was conducted and its result was compared with FE-simulation prediction.

Key Words : Hot stamping (핫스탬핑), Tailor rolled blank (가변 압연 소재), Partial heating(국부가열),
Phase transformation (상변태), Springback (스프링백)

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294).

1. 부산대학교 정밀가공시스템 전공

2. 부산대학교 정밀가공시스템 전공

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

AA6061 판재의 열간성형 및 온간성형 공정에서 스프링백 특성에 관한 연구

심인보¹ · 김재홍² · 이찬주³ · 김병민[#]

Study on Springback Characteristics of Aluminum Alloy 6061 Sheet in Hot Forming Quenching and Warm Forming

I. B. Shim, J. H. Kim, C. J. Lee B. M. Kim

Abstract

Recently, aluminum alloy is extensively used as a structural material in the automotive industry for reducing body weight. However, conventional sheet forming of aluminum alloy leads low formability and excessive springback. To overcome these problems, hot forming quenching(HFQ) or warm forming were applied to manufacture automotive part with aluminum alloy sheets. In this study, springback characteristics of aluminum alloy 6061(AA6061) sheets were investigated in HFQ and warm forming process. Hat shape forming is performed to evaluate the dimensional accuracy of deformed part. To identify relationship between forming temperature and dimensional accuracy, experiment was carried out with various forming temperature. In case of HFQ, dimensional change was also investigated in artificial aging process by thermal deformation. As a result, springback of AA6061 was increased with decline of forming temperature and HFQed part represented superb springback characteristics in comparison with warm formed part.

Key Words : AA6061 sheet(알루미늄 6061 판재), Hot forming quenching(핫 포밍 퀴칭), Warm forming(온간 성형), Springback characteristics(스프링백 특성), Forming temperature(성형 온도)

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294).

1. 부산대학교 정밀가공시스템 전공
3. 한국생산기술연구원 동남지역본부
교신저자: 부산대학교 기계공학부,
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

고진원도 배터리 케이스 제조를 위한 다단 딥 드로잉 및 아이어닝 공정에 관한 연구

강길석¹ · 신현집² · 김병민³ · 고대철[#]

A Study on Multistage Deep Drawing and Ironing for Manufacturing Battery Case of High Roundness

G. S. Kang, H. J. Shin, B. M. Kim, D. C. Ko

Abstract

In many industrial fields, a multistage deep drawing process within one progressive press is important for a continuous production. The drawing process requires the suitable design and manufacture of the necessary tools in order to achieve successful production. This study focuses on the roundness of a battery case using cold-rolled SUS304L sheet. The product with the final wall thickness of 0.65 mm is produced by multistage deep drawing process using a blank with the initial thickness of 0.65 mm. However, the roundness of general drawing product is reduced because the fracture and wrinkling occur in the wall portion. The roundness of the product can be improved by the application of the ironing process with the initial thickness of 0.8 mm in multistage deep drawing process. The effect of the ironing process in multistage deep drawing was investigated by 3-dimensional finite element analysis. FE-simulation results for different conditions indicated that the application of ironing process has the high roundness and the lowest wrinkling. Experiments under the same conditions as FE-simulation for the application of ironing process were performed by progressive die. As a result, the multistage deep drawing process by using application of ironing process was effective for high roundness without fracture in wall portion.

Key Words : Deep drawing(딥 드로잉), Ironing(아이어닝), Roundness(진원도), Battery case(배터리 케이스)

1. 부산대학교 융합학부

2. (주) 상아피에스

3. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 부산대학교 융합학부, E-mail:dcko@pusan.ac.kr

중공분리형 터빈 정익의 후판 성형공정에 관한 해석적 · 실험적 연구

강병권¹ · 박기범¹ · 윤만중² · 전재영² · 강범수³ · 구태원[#]

Numerical and Experimental Study on Thick Plate Forming of Hollow Partitioned Turbine

B. K. Kang, G. B. Park, , M. J. Yoon, J. Y. Jeon, B. S. Kang, T. W. Ku

Abstract

A steam turbine blade plays an important role in nuclear and thermal power plants. The flow of wet steam caused steam erosion on the surface of blades. On the blades of low-pressure turbine, this problem is more prominent. For this reason, hollow-partitioned stationary blade is lately introduced. This study deals with tool design and modification for thick plate forming process to manufacture a hollow-partitioned turbine blade(stator). This hollow partitioned stationary blade consist of upper and lower plates, and the upper plate is considered in this study. With the consideration of the anisotropic behavior and the blank direction of SUS409L thick plate with thickness of 5.00mm, the forming surfaces of the forming punch and the lower die are designed according to the target configuration. Numerical simulations using ABAQUS Explicit/Implicit are carried out with various forming conditions and forming processes. After considering elastic recovery of the deformed plate, forming surface modifications of the forming punch and the lower die are performed to reduce the shape error between the target and the deformed geometries, and repetitively to meet the admissible dimensional error of $\pm 1.50\text{mm}$. After fabricating tool, a series of the thick plate forming experiments are also performed to validate the feasibility of thick plate forming process.

Key Words : Turbine Diaphragm, Hollow-Partitioned Turbine Stator, Thick Plate Forming, Finite Element Analysis

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 투자자연계형 소재부품기술개발사업(No. 10052835)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294).

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 파워엔씨(주)

3. 부산대학교 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 설계기반미래성형기술센터,

E-mail: longtw@pusan.ac.kr

7. 일반 논문 발표

(제 2 발표회장)

혈관계 스텐트용 NiTi합금 미세튜브의 소프트맨드렐 인발공정 설계

신기승^{1,2} · 최지환¹ · 최성우¹ · 이상원¹ · 박찬희¹ · 홍재근¹ · 박용호² · 염종택^{1#}

Soft-Mandrel Drawing Design of NiTi Alloy Fine Tubes for Vascular Stent

G. S. Shin, J. H. Choi, S.W. Choi, S. W. Lee, C. H. Park, J. K. Hong, Y. H. Hong, J. T. Yeom

Abstract

최근, NiTi합금은 우수한 형상기억 및 초탄성 특성으로 인해 센서 및 생체의료용 소재로 광범위하게 활용되고 있으며, 특히 혈관계 스텐트, 카테터 등의 의료기기 분야에서 그 수요가 점차 증가하고 있다. 일반적으로 혈관계 스텐트는 외경 2mm 이내 미세튜브로부터 레이저 가공, 표면처리, 후열처리 등을 거쳐 최종 제조하게 되며, 이러한 일련의 제조공정 중 직진도 및 진원도가 우수한 미세튜브를 제조하기 위한 정밀 인발공정은 혈관계 스텐트의 품질을 좌우하는 가장 핵심적인 공정이다. 본 연구에서는 혈관계 스텐트용으로 활용하기 위한 우수한 품질의 NiTi합금 미세튜브를 제조하기 위하여 소프트 맨드렐 인발공정을 활용하였다. 최적의 미세튜브 인발공정 조건을 설계하기 위해서 유한요소해석을 활용하였고, 초기 인발 하중 및 다이스 설계는 Geleji식에 의해 도출하였다. 또한, 초기 소프트 맨드렐 인발공정 해석결과는 인발시험을 통해 측정한 각 패스별 인발직경, 두께, 하중변화 결과와 비교분석 함으로써 해석의 신뢰성을 높이고자 하였다. 최종적으로 소프트 맨드렐 인발공정 해석을 통해 최적의 공정조건을 도출하였고, 실제 소프트 맨드렐 인발공정으로 NiTi합금 미세튜브를 제조한 후 치수정밀도 측정 및 레이저 가공을 통해 제조된 NiTi합금 미세튜브의 혈관계 스텐트로의 적용가능성을 입증하였다.

Key Words : NiTi alloy tube, Geleji equation, Soft mandrel, Tube drawing, Stent

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 타이타늄연구실
2. 부산대학교 재료공학과 첨단기능재료연구실
교신저자:한국기계연구원 부설 재료연구소, E-mail:yjt96@kims.re.kr

적층가공 보수방법을 적용한 포트홀 압출 금형 소재의 마모특성 평가

이성윤¹ · 이상곤^{1, #} · 이인규¹ · 정명식¹ · 성지현¹ · 이재욱¹ · 김다혜¹ · 조용재¹ · 고대철²

Evaluation of Wear Characteristics of Porthole Extrusion Die Material Repaired by Metal Additive Manufacturing Process

S. Y. Lee, S. K. Lee, I. K. Lee, M. S. Jeong, J. H. Sung, J. W. Lee, D. H. Kim, Y. J. Cho, D. C. Ko

Abstract

포트홀 압출은 길이방향으로 긴 중공단면의 프로파일을 갖는 제품을 제조하는데 적합한 성형공정이다. 포트홀 압출 금형은 포트홀, 웰딩챔버, 맨드릴 등으로 구성되어 있으며 구조뿐만 아니라 금형 내의 소재 유동이 매우 복잡하다. 특히, 맨드릴은 압출품의 최종 형상을 성형하는 부분으로 높은 면압에 의한 마모결함이 지배적으로 발생된다. 마모결함이 발생된 맨드릴은 제품 정밀도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 일반적으로 용접육성을 통한 보수 또는 금형 교체가 수행된다. 하지만 용접육성은 작업자의 경험에 의존하여 실질적인 금형 보수에 어려움을 겪고 있는 실정이며, 금형 교체는 경제적으로 비효율적인 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하는 방안으로 최근 3D 프린터를 이용한 보수방법이 대두되고 있다. 3D 프린터의 적층가공을 이용한 보수는 마모된 금형을 정밀하게 보수하는 이점이 있으나 마모특성에 관한 연구가 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 금속 3D 프린터의 적층가공을 이용한 금형 보수 기초 연구의 일환으로 보수방법에 따른 마모특성을 평가하였다. 마모특성을 평가하기 위해 포트홀 압출 금형에 적용되는 열간 금형강 STD61을 기준으로 일반 STD61, 용접육성 및 적층가공을 적용한 STD61 시험편을 제작하여 열적 기계적 물성을 고려한 고온 마모시험(Pin on disk)을 수행하였다. 최종적으로 보수방법에 따른 마모특성을 비교하여 적층가공 보수방법의 유효성을 평가하였다.

Key Words : Porthole extrusion die, 3D Printer, Metal additive manufacturing, High Temperature wear test, Die repair

1. 한국생산기술연구원 극한제조기술그룹

2. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 한국생산기술연구원 극한제조기술그룹, E-mail: sklee@kitech.re.kr

혈관계 스텐트용 나노결정립 NiTi합금 튜브 제조기술

염종택^{1#} · 신기승¹ · 최지환¹ · 박찬희¹ · 이상원¹ · 김성웅¹ · 홍재근¹

Manufacturing Technology of Nano Grain Sized NiTi Tube for Vascular Stent

J. T. Yeom, G. S. Shin, J. H. Choe, C. H. Park, S. W. Lee, S. W. Kim, J. K. Hong

Abstract

Fine tubes of NiTi alloy have been attracted to bio-medical applications such as catheters, special injection needle and stent because of its superior superelastic property. However, high manufacturing cost and relatively low fatigue strength of NiTi fine tubes were brought on a more limited application. In this study, the soft mandrel drawing process for making nano grain sized NiTi fine tubes was introduced. Especially, the soft mandrel drawing process is a continuous process to reduce manufacturing cost. In order to improve the fatigue property, the thermo-mechanical process considering phase transformation behavior of NiTi alloy was applied during the drawing process and post heat treatment. In that case, the sub-equipment for achieving nanostructured grain of NiTi fine tubes was designed. Finally, the validation of the nano grain sized NiTi fine tube was made by the tensile and fatigue tests and microstructure analysis.

Key Words : Fine Tube, NiTi Alloy, Soft Mandrel Drawing, Nano Structured Grain, Fatigue Strength

1. 타이타늄연구실, 재료연구소

교신저자: 재료연구소, E-mail:yjt96@kims.re.kr

용융층 두께 해석 기반 이종 플라스틱 소재 열융착 공정에 관한 연구

명호¹, 정명기¹, Mohd Zairulnizam Mohd Zawawi¹, 한재호¹, 강신일^{1#}

A study on thermal bonding process for the dissimilar plastic materials based on the analysis of the melting layer thickness

H. Myung, M. Jung, M. Z. Zawawi, J. Han, S. Kang

Abstract

Reducing the mass of vehicles is a critical technology objective for automobile manufactures. Among the candidate technologies, hot plate welding process is the bonding process which creating a molecular bond between two plastics which can achieve higher bonding strength and shorter cycle times. In this paper, we analyzed the melting layer thickness during hot plate welding process of similar/dissimilar plastic materials and determined process parameters. Subsequently, we constructed a hot plate welding testing system and performed welding test using ABS/PMMA specimen under specified conditions of ASTM D3163. Lap shear strength results of welded specimens were measured with universal testing machine and the correlation between the melting layer thickness and weld strength was investigated.

Key words : Melting layer thickness, Thermal bonding process, Dissimilar plastic materials, Weld strength

1. 서론

자동차 제작 기업들은 최근 법률 요건에 따라 배출가스를 절감하고 연료 소비량을 감소시키기 위해 자동차 경량화를 목표로 다양한 연구를 진행하고 있다. 차체의 경량화를 위한 개발된 신소재들 대부분이 높은 기계적 성질을 갖는 플라스틱 신소재이나 이러한 소재는 안정성 및 신뢰성 등의 문제로 기존 소재로 된 부품을 완전히 대체하지 못하고 있는 상황이다. 따라서 경량화를 위해 개발된 신소재를 이용하여 제작된 파트와 기존 소재로 된 파트의 안정적인 접합 기술이 요구되는 상황이다. 그러나 기존의 물리적 방식 또는 접착제를 이용한 접합 방식은 접합력이 부족하고 cycle time이 길기 때문에 이를 대체할 기술이 요구된다.[1] 이러한 기술 개발의 일환으로 모재 자체를 가열하거나 레이저 조사, 초음파 진동 등을 가함으로써 용융시켜 접합하는 방식에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 이종 플라스틱 소재를 이용한 열융착 공

정에 있어 중요한 요소 중 하나인, 가열에 의해 발생하는 용융층 두께를 해석하고 인장시험을 수행함으로써 본 연구에서 설정한 공정조건을 기반으로 한 열융착 조건이 보다 우수한 접합력을 보일 수 있음을 검증하였다.[2]

2. 이종 플라스틱 소재 용융층 두께 분석을 위한 열전달 시뮬레이션

용융층 두께는 본 연구에서 열융착 공정 시, 열원의 온도에 의해 플라스틱 시편에 형성되는 용융층의 두께를 분석하기 위하여 열전달 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 이종 플라스틱은 자동차의 rear combination lamp에 사용되는 ABS, PMMA로 선정하였으며, ASTM D3163 규격 시편 형상과 LG화학社の ABS와 PMMA의 물성을 기준으로 하여 모델링을 수행하였다.

우선 ABS시편과 PMMA시편끼리 열융착하는 조건을 모델링 하였으며, 각각 열원을 위치시키고 열원의 온도를 각각 260, 280, 300, 320℃로 설정하여 10초 동안 가열 후 10초 동안 자연대류로 인하여 냉각되는 열전달 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 필요로 하는 용융층 두께를 형

1. 연세대학교 기계공학부

교신저자: 연세대학교 기계공학부,

E-mail: snlkang@yonsei.ac.kr

성하는데 필요한 열원별 가열시간 및 냉각에 소요되는 시간을 확인하였다. 또한 이를 바탕으로 ABS-PMMA 이중 플라스틱 시편의 용착력을 비교하기 위해 시뮬레이션을 통해 500 μ m의 동일한 용융층 두께를 가지는 가열시간 4, 5.5, 7초의 열융착 공정 조건과, 300, 500 μ m의 용융층 두께를 가지는 공정 조건을 선정하였다.

3. 동종, 이중 플라스틱 소재간 열융착 공정수행 및 용착 강도 분석

열융착 공정에 사용할 ASTM D3163 표준시편 제작을 위하여 사출성형용 금형을 제작하였으며, 이를 이용하여, ABS 및 PMMA 시편을 사출 성형 공정을 통해 제작하였다. 또한 열융착 실험 test-bed를 구축하여 온도조건 및 가열시간을 제외한 조건을 균일하게 유지한 상태에서 제작된 표준 시편에 대해 용착 실험을 진행하였다.

시뮬레이션에서 획득한 공정 조건을 이용하여 ABS 및 PMMA 시편 각각에 대하여 온도조건 300 $^{\circ}$ C에서 용융층 두께 300, 500 μ m의 열융착 시편을 제작하여 인장 시험을 수행하고 Lap shear strength를 획득하였다. 그 결과 Table 1 과 같이 용융층 두께가 증가함에 따라 Lap shear strength 또한 증가함을 확인하였다.

Table 1. 가열온도 300 $^{\circ}$ C조건, ABS-PMMA 열융착 시편의 Lap shear strength 측정 결과

용융층 두께 (μ m)	Lap shear strength(MPa)	
	ABS	PMMA
300	14.3	15.1
500	14.8	22.6

또한 시뮬레이션을 통해 선정된 공정조건에 대해 ABS-PMMA 간 이중 플라스틱 시편의 열융착 실험을 진행하고 인장시험을 수행하였다. 그 결과 Table 1 와 같이 동일한 용융층 두께를 가질 것으로 예상된 공정조건에서 제작된 ABS-PMMA 용착시편의 Lap shear strength는 유사함을 확인하였으며, Table 2 와 같이 다른 용융층 두께를 가질 것으로 예상된 공정조건에서 제작된 ABS-PMMA 용착시편은 용융층 두께가 증가함에 따라 보다 강한 Lap shear strength를 가짐을 확인하였다.

Table 2. ABS-PMMA 시편의 동일 용융층 두께에 대한 열융착 공정 조건 및 인장실험 결과

용융층 두께 (μ m)	가열 시간 (sec)	ABS시편 가열온도 ($^{\circ}$ C)	PMMA시편 가열온도 ($^{\circ}$ C)	Lap shear strength (MPa)
500	4	312	293	16.24
	5.5	281	274	16.05
	7	264	262	16.24

Table 3. ABS-PMMA 시편의 다른 용융층 두께에 대한 열융착 공정 조건 및 인장실험 결과

용융층 두께 (μ m)	가열 시간 (sec)	ABS시편 가열온도 ($^{\circ}$ C)	PMMA시편 가열온도 ($^{\circ}$ C)	Lap shear strength (MPa)
300	2	284	274	12.77
500	5.5	281	274	16.05

4. 결 론

본 연구에서는 열전달 해석을 통해 플라스틱 소재의 용융층 두께 해석 연구를 수행하였으며 이를 기반으로 제작된 이중소재 열융착 시편의 접합력 특성을 검증하였다. ABS 및 PMMA 소재에서 열원의 온도 및 가열시간의 변화에 따른 용융층 두께 변화를 시뮬레이션 하였으며, 이를 기반으로 용착 시편을 제작하고 Lap shear strength를 비교 분석하여 용융층 두께의 증가에 따라 접합력이 증가함을 확인하고 보다 우수한 접합력을 가진 조건을 예측할 수 있음을 보였다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2015R1A5A1037668)

참 고 문 헌

- [1] M.K. Besharati Givi, P. Asadi, Advances in Friction-Stir Welding and Processing, 2014, Woodhead Publishing
- [2] Michael Gehde, Michael Giese and Gottfried W. Ehrenstein, 1997, Welding of thermoplastics reinforced with random glass mat, Polymer Engineering & Science, Vol. 37, pp702-714

보론강 판재 시편의 가열-급냉 공정에서 금형접촉 조건에 따른 열변형 해석

권태하¹ · 서창희[#] · 전효원¹ · 오상균¹ · 박춘달¹ · 이재진²

Thermal Distortion Simulation of Boron Steel Sheet during Heating and Rapid Cooling according to Die Contact Condition

T. H. Kwon, C. H. Suh, H. W. Jeon, S. K. Oh, C. D. Park, J. J. Lee

Abstract

Hot stamping process is classified as direct and indirect methods. In direct method, a blank is formed and cooled with dies. In indirect method, the formed parts at room temperature are heated and then cooled in a liquid bath to produce high strength. In both methods, thermal distortion is occurred. In order to predict the thermal distortion during hot stamping, a coupled thermo-mechanical simulation is needed. In this study, the simulation of heating and cooling of boron steel sheet was performed to predict thermal distortion during direct and indirect methods. The material properties for the simulation were calculated from JMatPro, and the convective heat transfer coefficient was obtained from experimental tests. The results show that the thermal distortion and the residual stresses are well predicted by the coupled simulation.

Key Words : Boron steel sheet(보론강 판재), Heating(가열), Rapid cooling(급냉), Die contact(금형 접촉), Thermal distortion(열변형)

1. 대구기계부품연구원

2. ㈜신화에스티

교신저자: 대구기계부품연구원, E-mail:suhch@dmi.re.kr

스프링백을 고려한 Sill Side Rail의 롤 포밍 공정 설계

차태원¹ · 김재홍¹ · 김근호² · 김병민[#]

Roll Forming Process Design of Sill Side Rail Considering Springback

T. W. Cha, J. H. Kim, G. H. Kim, B. M. Kim

Abstract

The roll forming process is widely used in automotive industry to manufacture structural components using High Strength Steel(HSS) sheet. This process can effectively form sheet metal along the longitudinal way without thickness changing by successive pairs of rolls. However, a large amount of springback occurs after roll forming of HSS sheet because of the high tensile and yield strength. The purpose of this study is to design roll forming process for sill side rail with DP980 sheet considering springback. Amount of springback was predicted by FE-simulation of roll forming with conventional flower pattern. To compensate springback, over-bending method applied to modify flower pattern. To verify effectiveness of developed process, experiment of roll forming was conducted and its results represented high dimensional accuracy compared with target shape of sill side rail.

Key Words : Roll Forming Process(롤 포밍 공정), Flower Pattern (플라워 패턴), Springback(스프링백), High Strength Steel Sheet(고강도강판)

후 기

이 논문은 산업기술산업의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.10052779).

1. 부산대학교 정밀가공시스템 전공

2. ㈜아산 중앙기술연구소

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

컨투어 가열-냉각시 변속기용 평기어의 열변형 해석

서창희[#] · 권태하¹ · 정윤철¹ · 김용달² · 김수경² · 성환진³

Thermal Distortion Simulation of Transmission Spur Gear during Contour Heating-Cooling

C. H. Suh, T. H. Kwon, Y. C. Jung, Y. D. Kim, S. K. Kim, H. J. Sung

Abstract

Carburizing is normally used for transmission gears. However, carburizing has disadvantage like thermal distortion. To overcome this disadvantage, contour hardening using dual frequency induction heating is developed. In this study, thermo-mechanical simulation is carried out to predict thermal distortion of spur gear during contour hardening. The material properties for the simulation were calculated from JMatPro, and the convective heat transfer coefficient was obtained from experimental tests. The results show that the thermal distortion is well predicted by the coupled simulation.

Key Words : Spur gear(평기어), Contour heating(윤곽 가열), Dual frequency induction heating(이중주파수 유도가열), Cooling(냉각), Thermal distortion(열변형)

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업(1MW 급 이중주파시스템 및 컨투어 표면경화 적용 고내구성 동력전달부품 제조기술 개발)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

1. 대구기계부품연구원

2. ㈜영풍열처리

3. ㈜피에스텍

교신저자: 대구기계부품연구원, E-mail:suhch@dmi.re.kr

Direct Laser Melting 공정시 분말 형태가 적층 품질에 미치는 영향

이성훈¹ · 길태동¹ · 박준영¹ · 한상욱¹ · 문영훈[#]

Effect of powder morphology on the deposition quality in direct laser melting process

S. H. Lee, T. D. Kil, J. Y. Park, S. W. Han, Y. H. Moon

Abstract

Direct laser melting(DLM) process is an additive manufacturing process that can produce parts by solidification of molten metallic powder layer by layer. The properties of fabricated parts strongly depend on characteristics of metallic powder. Atomized powders having spherical morphology have commonly been used for DLM process. Mechanical ball-milling is a powder processing technique involving repeated cold welding, and re-welding of powder particles in a high-energy ball mill. Mechanical ball-milling can provide non-spherical powders in solid state without melting. The aim of this study is to investigate the performance of powder morphologies on the deposition quality in DLM process. To characterize the morphological effect, the performances of respective powders, both mechanical ball-milled and atomized powders have been compared through single- and multi-track DLM experiments. Single-track melting tests were performed at various laser process parameters such as laser power and scan rate, and the deposition quality were compared. For the multi-track melting tests, quadrangle structures were fabricated by DLM using metallic powders made by both mechanical ball-milling and atomizing. The surface roughness, cross-section bead shape and process defects such as balling or non-filled area were compared and discussed in this study.

Key Words : Direct laser melting, Mechanical ball milling, Atomizing, Powder Morphology, Fiber laser

1. 서 론

분말을 이용한 DLM(Direct Laser Melting) 공정은 3차원 CAD 모델을 이용하여 분말을 층별로(layer-by-layer) 용융 적층시켜 부품을 생산하는 방법[1,2]으로서 복잡한 형상을 갖는 부품의 시작품 제작에 주로 이용되었다. 근래에는 적용의 폭이 넓어지면서 자동차와 항공산업, 주형, 의학용품, 기계부품 등의 분야에도 널리 적용되

고 있으며, DLM 공정에 대한 관련 연구도 여러 재료에 대해 지속되어 왔다.[3] 일반적으로 DLM용 분말은 아토마이징(atomizing)된 구형 분말을 이용하게 되는데 기계적 볼 밀링(mechanical ball milling)된 비구형 분말을 DLM공정에 사용할 수 있다면 분말에 대한 제한이 크게 완화되어 다양한 분말의 적용이 가능하게 된다.

이에 본 연구에서는 형태학적 효과를 분석하기 위해 채 진동기로 제작한 비-구형 분말과

1. 부산대학교, 기계공학부 정밀가공시스템/정밀정형 및 금형가공 연구센터

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과 / 정밀정형 및 금형가공 연구소, E-mail: yhmaon@pusan.ac.kr

아토파이징 된 분말, 기계적 불 밀링 된 분말을 사용하였다. 분말의 입자 크기는 20 μm , 40 μm , 60 μm 이며, 기계적 불 밀링을 통해 혼합하였다. DLM공정을 통해 선 용융시험 및 사각형상 용융 시험을 비교 분석 하였다. 선 용융시험은 레이저 파워와 주사속도 등의 각종 레이저 변수에서 수행하였고, 사각형상 용융시험은 각 분말 별로 적층하여 표면 조도를 측정하였고, 적층 단면의 비드 형상과 볼링, 비 충전영역을 비교 분석하였다.

2. 연구 내용

2.1 실험 장치 및 재료

그림 1은 레이저 용융 시스템 장치의 모식도이다. 레이저 장치의 최대출력은 200W, 빔직경 0.08mm, 파장 1.07 μm 인 IPG사의 fiber 레이저 YLR-200을 사용하였으며, 파우더 레이어링 두께를 10 μm 로 정밀하게 제어할 수 있는 빌드 실린더를 사용하였다. 스캐너(SCANLAB hurrySCAN 20)는 레이저 발광을 제어하는데 사용하였다. 또한 분말 용융 시 시험편의 산화 방지를 위해 Ar 가스 분위기에서 수행하였다.

본 연구에서 순수 철 분말의 입자크기는 20 μm , 40 μm , 60 μm 로 각각 구형과 비-구형으로 준비하였으며, 일정 비율로 혼합된 분말은 표1에 나타내었다. 균일한 혼합분말을 얻기 위해 KMD-1B 볼 밀링기를 사용하였고, 600rpm으로 20분간 시행하였다.

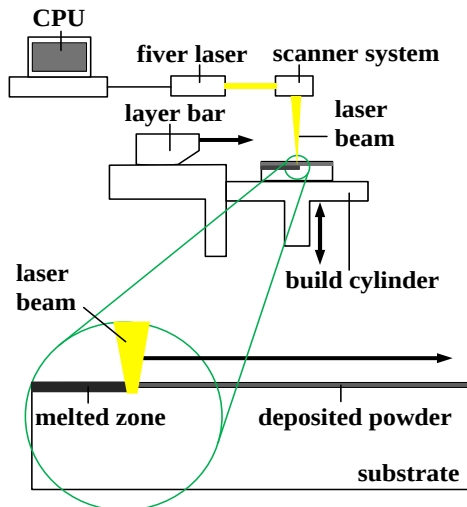


Fig. 1 Schematic of direct laser melting system

Table 1 Mixing ratio of spherical and non-spherical powders

	spherical powder	non-spherical pow.
	size (mixing%)	size (mixing%)
P1	20 μm (50%)	20 μm (50%)
P2	40 μm (50%)	40 μm (50%)
P3	60 μm (50%)	60 μm (50%)
P4	20 μm (60%)	60 μm (40%)
P5	60 μm (40%)	20 μm (60%)

2.2 분말 모양에 따른 건전성

DLM공정을 위해 분말을 평탄하게 만들어 주기 위한 레이어링시 분말의 모양에 따라 레이어링 정도에 큰 차이를 보였다. 그림 2에 나타낸 것과 같이 비구형의 분말인 경우, 형상이 상대적으로 불규칙하므로 레이어링 바가 통과할 때 국부적으로 분말의 이동이 연속적이지 못해 레이어링 불량이 발생하는 빈도가 높았다. 구형 분말의 경우에는 균일한 레이어링 형태를 보였다. 하지만 구형 분말의 경우에도 크기가 40 μm 이상에서는 레이어링 불량이 발생하는 빈도가 상대적으로 증가하였다.

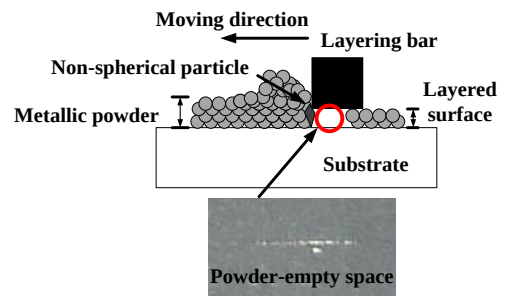


Fig. 2 Creation of powder-empty space due to non-spherical particle

2.3 단일 트랙 용융 실험

DLM 공정으로 제조된 부품의 건전성은 금속 분말의 응고 특성에 의존하므로, 단일 트랙 용융시험을 실시하였다. 시험을 위해 150W와 200W의 레이저 출력, 0.06mm의 빔 직경, 주사속

도는 36.6mm/s부터 220mm/s 범위를 설정하였다. 분말의 도포 두께는 분말크기의 1.5배로 도포하였다. 다양한 레이저 공정변수에 의해 형성된 비드의 폭과 두께는 이미지 이미지 분석 프로그램(TDI plus 5.0)을 이용하여 측정 하였다. 형성된 비드의 형상 비(비드 높이/ 비드 폭)는 약 0.5를 최적 형상으로 간주하였다.[4]

단일 트랙 용융 시험을 수행 결과, 구형 및 비구형 분말 모두 DLM공정을 통해 안정적인 비드를 형성할 수 있었다. 그림 3은 구형과 비구형 분말의 레이저 주사 속도 별 형상 비를 나타내었으며 최적 조건은 구형 분말의 경우 주사속도가 110mm/s일 때 약 0.5의 형상 비를 가지며, 비구형 분말의 경우 주사속도가 73mm/s 일때 최적 조건을 가진다. 따라서 최적 비드 형상 비 0.5를 나타내기 위한 레이저 입열 조건 측면에서 비교하면 구형과 비구형 분말간의 차이를 보임을 알 수 있다.

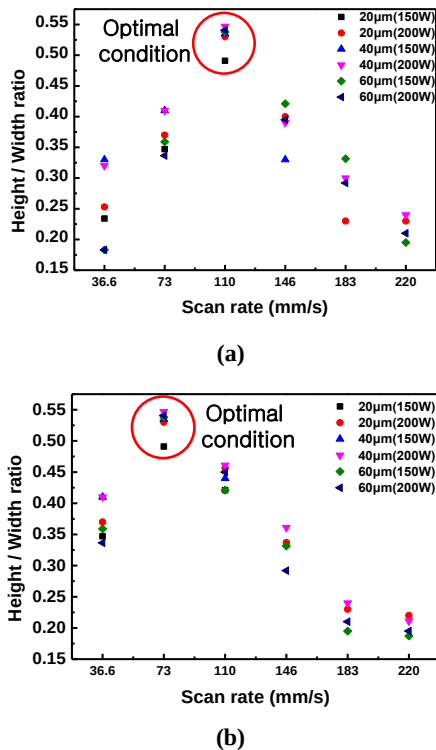


Fig. 3 H/W ratio by laser process parameters; (a)spherical powder, (b)non-spherical powder.

2.4 멀티 트랙 용융 실험

멀티트랙(multi-track) 용융 특성을 관찰하기 위해 사각형태의 DLM공정을 수행하였다. 수행 결과, 구형 및 비구형 모두 단일 트랙 용융시험에 비해 DLM공정 안정성이 낮게 나타났다. 특히 구형 분말의 경우에 비해 비구형 분말은 건전한 비드를 형성하는데 한계를 보였다.

그림 4(a)에 실험을 통해 얻어진 볼링(balling) 형상을 나타내었다. 멀티트랙시험의 경우, 입자 모양과 크기에 따라 특정 층 이상에서 볼링이 발생 되므로, 후속 고정을 위한 분말의 레이어링이 불가능해져 더 이상의 적층이 불가능 하였다. 그림 4(b)에 볼링이 없는 건전한 면을 나타내었는데 레이어링을 방해할 만한 결함이 없으므로 높은 적층 형상을 얻을 수 있다.

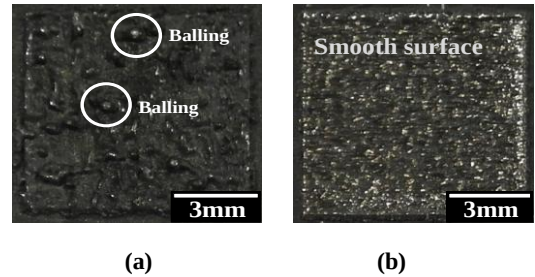


Fig. 4 Deposited surface obtained from DLM process; (a) surface showing balling, (b) smooth surface.

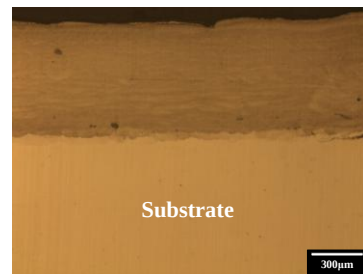


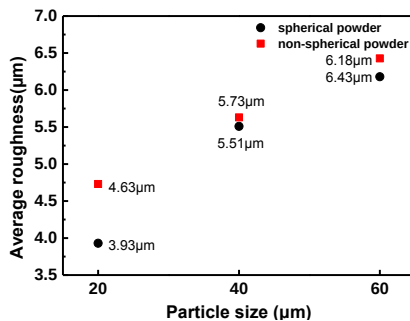
Fig. 5 Cross-section of quadrangle structure made by atomized powder

그림 5 는 다른 분말에 비해 비교적 적층이 잘 된 시편의 단면을 분석한 사진이다. 20 μm의 구형 분말을 사용하여 레이저 출력 200W, 주사속도 110mm/s의 조건에서 결함 없이 30층 적층한 사진이다. 비구형에 비해 구형 분말이 상대

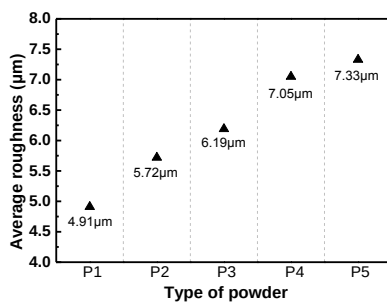
적 적층 가능 횟수가 많았고, 구형과 비구형 분말을 혼합하여 적층 후 단면을 분석한 결과 기공률이 구형 분말을 사용하여 적층 하였을 때 보다 높았다.

2.5 적층 후 표면 조도 측정

구형과 비구형 분말, 기계적 불 밀링으로 혼합한 분말을 적층 후 표면 조도를 측정하였다. 그림 6(a)에 구형과 비구형 분말의 평균 조도를 나타내었고, 6(b)에 혼합한 분말의 평균 조도를 나타내었다. 구형, 비구형 모두 분말의 입자크기가 작을수록 매끄러운 표면을 보였다. 분말의 크기가 작을수록, 모양이 구형일수록 레이저링 시 빈 공간 없이 레이저링이 되기 때문에 불링 현상이 감소하며 상대적으로 치밀한 표면을 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 6 Variation of the average surface roughness; (a) spherical- and non-spherical powders, (b) mixed powders.

3. 결론

단일 트랙 DLM 공정의 경우, 구형과 비구형 분말 모두 안정적인 비드를 형성하였으며 최적 비드 형상 비 0.5를 나타내는 레이저 입열 조건은 구형 및 비구형 분말간의 차이를 보였다.

적층시 DLM공정 안정도는 분말 형태가 구형일수록, 입도가 작을수록, 레이저 출력이 높을수록 우수하였다. 구형 분말의 적층 안정도가 비구형에 비해 우수하며, 입자크기가 20μm 이하인 경우에 입자 형상과 무관하게 안정적인 적층이 이루어 졌다. 또한 비구형 분말을 전적 또는 부분적으로 혼합하여 사용하기 위해서는 가능한 작은 입자크기의 분말을 사용하여야 한다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부의 (미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 2012R1A5A1048294).

참 고 문 헌

- [1] J. Y. Jeng, M. C. Lin, 2001, Mold Fabrication and Modification using Hybrid Processes of Selective Laser Cladding and Milling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 110, No. 1, pp. 98~103
- [2] B. D. Joo, J. H. Jang, H. S. Yim, Y. H. Moon, 2009, Effect of Process Parameters on Forming Characteristics of Selective laser Sintered Fe-Ni-Cr Powder, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 3, pp. 262~267.
- [3] F. Abe, K. Osakada, m. Shiomi, K. Uematsu, M. Matsumo, 2001, The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting, J. Mater. Process. Technol., Vol. 111, No. 1, pp.210~213.
- [4] S. W. Han, W. J. Ji, Y. H. Moon, 2014, Fabrication of Gear Having Functionally Graded Properties by Direct Laser Melting Process, Adv. Mech. Eng., Vol. 2014, pp. 1-6.

8. 일반 논문 발표

(제 3 발표회장)

다중 응답 최적화를 이용한 Al5052-O 판재 점진성형 연구

도반크웅¹ · 샤오샤오^{2*} · 김영석[#]

Multi Response Optimization to Study Single Point Incremental Forming of Al5052-O Sheet

V. C. Do, X. Xiao, Y. S. Kim

Abstract

Single point incremental forming (SPIF) is a sheet forming technique which a die-less sheet metal manufacturing process for rapid prototyping and small batch production. In the forming process, critical parameters are tool diameter, step depth, feed rate, spindle speed, etc. In this research work these parameters and the die shape using the Varying Wall Angle Conical Frustum(VWACF) model were used for Al-5052 sheet with 0.8mm in thickness.. The Taguchi method of Experiments of Design (DOE) with Grey relational optimization were used to determine the optimum parameters in SPIF. The response study was performed on formability, thickness reduction and spring back. The research shows that the best combination of these parameters to give best performance of SPIF as follows; tool diameter is 6mm; spin speed is 60rpm; step depth is 0.3mm; feed rate is 500mm/min.

Key Words : Al5052-O sheet, multi response optimization, single point incremental forming, Taguchi orthogonal array

1. 서 론

1.1 점진성형기술 개요

점진성형이란 간단한 공구를 사용하여 판재에 국부적 소성변형을 연속적으로 가하여 성형하는 기술이다. (Fig. 1) 점진성형에서 일반적으로 CNC머신에 구형의 공구편을 장착하고 판재의 외각 가장자리에서 클램프로 고정시킨 후 프로그램에 입력된 공구 경로에 따라 공구가 이동하면서 원하는 형상의 제품을 만든다. Leszak[1]가 처음으로 다이 없이 성형하는 공정을 제시했지만 당시에는 기술이 발달하지 않아 직접적으로 구현하지 못했다. 그러나 기술이 점점 더 발전하면서 점진성형에 대해 연구를 시작하였고. Jeswiet 등[2]이 점진성형 기술에 대해 소개를 하였다.

최근 점진성형에 관한 연구가 이슈가 되는 가운데 Minutolo 등[3]이 점진성형 최대 성형각도에 대해서, Ambrogio 등[4]이 공정변수가 실험결

과와 정밀도에 영향을 많이 미친다는 것을 밝혔다. 또한 Leon 등[5]과 Kim 등[6]이 공정변수가 점진성형의 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하였고 공구직경, 이송속도, 회전속도, Z방향 피치 등이 점진성형 공정에서 아주 중요한 변수라고 강조하였다. 그리고 알루미늄 같은 가벼운 판재가 대량생산이 되면서 Jeswiet 등[7], Shim 등[8]이 알루미늄 판재 점진성형에 대해 연구하였다. Park 등[9]이 점진성형에서 공구회전에 의한 공구와 판재의 마찰열을 이용하여 성형이 어려운 마그네슘 판재를 상온에서 성공적으로 성형하였다. 최근에 Do 등[10]이 점진성형에서 엠보싱(Embossing)이 된 알루미늄 판재를 사용하여 평평한 판재보다 성형성이 향상됨을 보여주었다. Ganesh 등[11]은 다구찌 방법(Taguchi method)을 바탕으로 그레이 관계형 최적화 (Grey relational optimization)를 이용하여 각 변수에 대해서 평가하고 최적 변수 조합을 찾아내었다.

1.2 연구목표

1.경북대학교 대학원 기계공학과
2.경북대학교 대학원 기계공학과
#.경북대학교 기계공학부, E-mail:caekim@knu.ac.kr

다구찌 방법은 단일 변수를 최적화 할 수 있는 실용적인 방법이지만 점진성형에서 원하는 결과를 얻기 위해 공구 직경, 이송 속도, 회전 속도, Z방향피치 등 많은 변수를 고려해야 한다. 그레이 관계형 최적화 기술은 다중 응답들에 대한 변수들의 상호 작용(Interrelationships among multiple responses)을 평가하여 변수들을 최적화할 수 있기 때문에 본 연구에서 이용하였다.

본 연구에서는 성형성, 스프링백 양과 두께 감소량을 목적함수로 하여

- (1) 각 변수들이 실험결과에 대해 어떤 영향을 미치는지 알아보고
- (2) 실험 결과를 통해서 최적 변수조합을 찾는 것을 목적으로 한다.

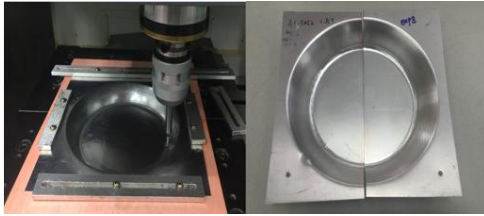


Fig. 1 Overview of the SPIF process with CNC machine and formed specimen

2. 본 문

2.1 점진성형 성형성 평가

본 연구에서는 최대 성형각도로 성형성을 평가 한다. Fig. 2와 같이 Jeswiet 등[12]이 제시한 Varying Wall Angle Conical Frustum(VWACF) 모델을 이용하였다. 이 모델에서 성형각도는 40도부터 90까지 점점 증가하기 때문에 파단할 때까지 식 (1)과 식 (2)를 통해 최대 성형각도 Φ 를 한번에 도출할 수 있다는 장점이 있다. (Fig. 3)

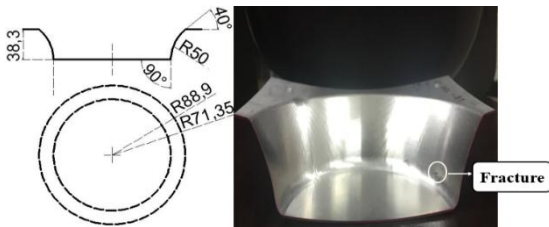


Fig. 2 Drawings of VWACF test shape and section view of formed part

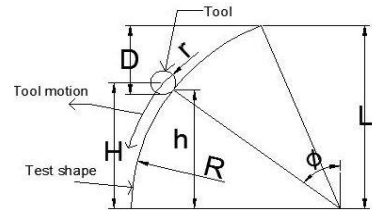


Fig. 3 Geometry used to determine the wall angle Φ for a given tool position

$$H = L - D + r \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{H}{r+R}\right) \quad (2)$$

여기서 D 는 최종 성형 깊이이고 R 는 50mm 이다. L 는 38.3mm 이며 r 는 공구직경이다.

Table 1 Properties of Al5052-O material

	Al5052-O
Density (g/cm ³)	2.7
Young's modulus (GPa)	70
Yield strength (MPa)	183
Tensile strength (MPa)	230
Elongation (%)	11
Strain hardening exponent, n	0.1

Table 2 Level of selected paramaters

	Level 1	Level 2	Level 3
a : Tool diameter (mm)	6	10	14
b: Spindle speed (rpm)	60	120	180
c: Step depth (mm)	0.3	0.5	0.7
d: Feed rate (mm/min)	500	1000	1500

2.2 재료의 선정

본 연구에서 두께가 0.8mm인 Al5052-O 판재를 사용하여 실험하였다. Al5052-O 기본물성과 성형 변수조건을 Table 1과 Table 2에서 나타내었다.

2.3 다구찌 방법

다구찌 방법으로 Table 3과 같이 제어 및 변수를 따라서 L9 직교표를 사용하였다.

VWACF 모델을 사용해서 점진성형을 수행하

여 Fig. 3과 같이 각 실험 중에 VWACF의 밑면에서 시편에 파단이 발생하였을 때 최종 성형깊이 D를 이용하여 식 (1)을 통해 H 값을 구하고 식 (2)를 통해 성형성(최대 성형각도)을 평가하였다.

스프링백 양은 Fig. 4와 같이 15mm 깊이에서 측정된 판재형상과 목표형상의 차이를 양쪽에서 측정하여 평균값으로 취하였다. 또한 같은 위치에서 Fig. 5와 같이 두께 감소량을 마이크로미터로 측정하여 평균값으로 취하였다. 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

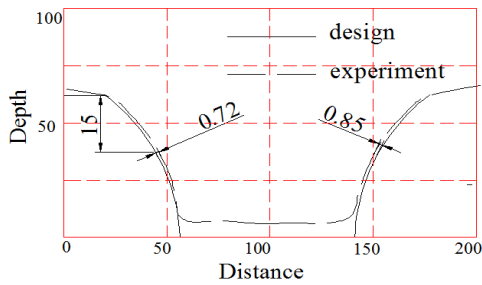


Fig. 4 Spring back measurement for experiment No. 1

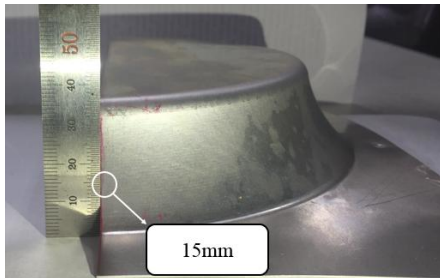


Fig. 5 Thickness measurement for experiment

Table 3 ANOM table

Exp no.	a	b	c	d	D (mm)	Max angle Φ (°)	Δ Spring back (mm)	Δ Thickness (mm)
1	1	1	1	1	30.15	77.856	0.785	0.390
2	1	2	2	2	29.45	77.080	0.760	0.410
3	1	3	3	3	29.05	76.636	0.770	0.406
4	2	1	2	3	28.45	74.336	0.885	0.402
5	2	2	3	1	30.45	76.489	1.250	0.406
6	2	3	1	2	31.65	77.771	0.910	0.401
7	3	1	3	2	29.70	74.116	1.125	0.390
8	3	2	1	3	27.50	71.803	0.940	0.399
9	3	3	2	1	30.45	74.899	0.990	0.390

2.4 그레이 관계형 최적화

Ganesh 등[9]이 제시했던 그레이 관계형 최적화 기술을 이용하여 다음의 식 (3), (4), (5), (6)를 통해서 복수 응답간의 상호 관계(G_n)를 구하였다.

여기서 변수 n_j 는 각 수준의 실험 j 의 n 번의 실험 횟수의 결과이다. Y 는 실험결과와 S/N 비이고 Z 는 정상화 한 S/N 비이다. GC 는 그레이 관계형 계수이며 δ 는 0.5로 취하였다.

이번 연구에서 성형성(성형각도)는 클수록 좋기 때문에(망대특성) 식 (3)을 이용하였고 반면에 스프링백 양과 두께 감소량이 작을수록 좋기 때문에(망소특성) 식 (4)를 이용하였다.

$$Z_{nj} = \frac{Y_{nj} - \min Y_{nj}}{\max Y_{nj} - \min Y_{nj}} \quad (3)$$

$$Z_{nj} = \frac{\max Y_{nj} - Y_{nj}}{\max Y_{nj} - \min Y_{nj}} \quad (4)$$

$$GC_{nj} = \frac{Z_{\min} + \delta Z_{\max}}{Z_{nj} + \delta Z_{\max}} \quad (5)$$

$$G_n = (1/Q) \sum GC_{nj} \quad (6)$$

3. 결과와 토론

3.1 S/N 비와 그레이 관련 계수의 계산

그레이 관계형 최적화 기법을 이용하여 그레이 관련 등급을 Table 4에 나타내었다. 그레이 관련 계수가 클수록 실험결과가 더 좋으므로 성형성, 스프링백 양, 두께 감소량을 목적함수로 하여 최적화 하는 변수 조합은 실험 1의 경우이다.

또한 성형성만으로 평가할 때 실험 1이 가장 좋고 스프링백 양만으로 평가할 때 실험 2가 가장 좋으며 두께 감소량만으로 평가할 때 실험 1이 가장 좋다는 것도 알 수 있었다.

3.2 각 변수들이 실험결과에 미치는 영향

Table 5에 그레이 관련 계수 평균값을 취해서 각 변수의 영향을 정략적으로 평가하였다. 최대값과 최소값(Max - Min)의 차이가 클수록 영향을 더 많이 주기 때문에 본 연구에서는 공구직경이 최종 실험결과에 영향을 가장 많이 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

또한 성형성과 스프링백 양에는 공구직경이 영향을 가장 많이 미치고 두께 감소량에는 이송

속도가 영향을 가장 많이 미친다는 것도 확인할 수 있었다.

Table 4 Grey relational coefficient

Exp No.	S/N(*) form-ability	S/N(**) Δ thick-ness	S/N(**) spring back	Z-S/N form-ability	Z-S/N Δ thick-ness	Z-S/N spring back	GC-form-ability	GC- Δ thick-ness	GC-spring back	Grey relational	Rank
1	37.826	8.190	2.103	1	0	0.065	0.333	1	0.885	0.739	1
2	37.739	7.744	2.384	0.876	1	0	0.363	0.333	1	0.566	6
3	37.689	7.840	2.270	0.805	0.785	0.026	0.383	0.389	0.950	0.574	5
4	37.424	7.926	1.061	0.428	0.592	0.306	0.539	0.458	0.620	0.539	7
5	37.672	7.829	-1.938	0.781	0.809	1	0.390	0.382	0.333	0.369	9
6	37.816	7.937	0.819	0.987	0.567	0.362	0.336	0.468	0.580	0.462	8
7	37.398	8.179	-1.023	0.392	0.025	0.788	0.561	0.952	0.388	0.634	4
8	37.123	7.981	0.537	0	0.470	0.427	1	0.516	0.539	0.685	2
9	37.489	8.179	0.087	0.522	0.025	0.531	0.489	0.952	0.485	0.642	3

* : S/N ratio(dB) = $(-10) * \log \sum 1/(Y_{n,j})^2$ (larger-the-better)

** : S/N ratio(dB) = $(-10) * \log \sum (Y_{n,j})^2$ (smaller-the-better)

Table 5 Average grey relational grade for each input parameter

	Level 1	Level 2	Level 3	Max-Min
Tool diameter	0.626	0.456	0.654	0.197
Spin speed	0.637	0.540	0.559	0.098
Step depth	0.629	0.582	0.525	0.103
Feed rate	0.583	0.465	0.599	0.134

3. 결 론

본 연구에서는 두께가 0.8mm인 Al5052-O 판재를 이용하여 VWACF 모델을 점진성형하는 경우에 성형성, 스프링백 양과 두께 감소량을 목적함수로 하여 최적 변수조합에 대한 연구하였다.

- (1) 성형성, 스프링백 양, 두께 감소량을 종합적으로 평가할 때 공구직경은 6mm, 회전속도는 60rpm, Z방향피치는 0.3mm, 이송속도는 500mm/min일 때 성형품질이 제일 좋다는 것을 알 수 있었다.
- (2) Al5052-O 판재를 이용하여 VWACF 모델을 점진성형하는 경우에 공구직경이 성형성, 스프링백 양, 두께 감소량에 미치는 영향이 가장 크다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호: 2014R1A2A2A01005903)

참 고 문 헌

- [1] E. Leszak, Patent US3342051A1, 1967, Apparatus and process for incremental die less forming.
- [2] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, J. Allwood, 2005, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, Journal of Manufacturing Technology, Volume 54, pp 88-114.
- [3] F. CapeceMinutolo, M. Durante, A. Formisano, A. Langella, 2007, Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process, Journal of Materials Processing Technology, Volume 194, pp 145-150.
- [4] G. Ambrogio, I. Costantino, L. D. Napoli, L. Filice, L. Fratini, M. Muzzupappa, Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation, 2004, Journal of Materials Processing Technology, Volume 153-154, pp 501-507.
- [5] J. Leon, D. Salcedo, C. Ciauriz, C. J. Luis, J. P. Fuertes, I. Puertas, R. Luri, 2013, Analysis of the influence of geometrical parameters on the mechanical properties of incremental sheet forming parts, Procedia Engineering, Volume 63, pp 445-453.
- [6] Y. H. Kim, J. J. Park, 2002, Effect of process parameters on formability in incremental forming

- of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 130–131, pp 42–46.
- [7] M. Ham, J. Jeswiet, 2006, Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003, *Annals of the CIRP-Mechanical and Materials Engineering*, Volume 55, pp 1-5.
 - [8] M. S. Shim, J. J. Park, 2001, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 113, pp 654-658.
 - [9] J. Park, J. H. Kim, N. K. Park, Y. H. Kim, 2010, Study of forming limit for rotational incremental sheet forming of magnesium alloy sheet, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 42, pp 97-105.
 - [10] V. C. Do, D. T. Nguyen, J. H. Cho, Y. S. Kim, 2016, Incremental forming of 3D structured aluminum sheet, *Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Volume 17, pp 217-223.
 - [11] A. Sundarasrinivasan, P. Ganesh, 2015, Experimental study of incremental forming in stainless steel(AISI 316) for a truncated pyramid shape, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Science*.
 - [12] J. Jeswiet, D. Adams, M. Doolan, T. McAnulty, P. Gupta, 2015, Single point and asymmetric incremental forming, *Advanced Manufacturing Technology*. Volume 3, pp 253–262.

1.2GPa 강판의 판재성형에서 주름 및 성형성 향상을 위한 다중 목적함수 최적 설계

이영섭¹ · 권순호¹ · 김홍래² · 김승완³ · 정철영³ · 홍석무[#]

Multi-objective Optimization to Reduce Wrinkle & Thinning of Sheet Metal Forming of Ultra High Strength Steel (1.2GPa)

Y. S. Lee, S. H. Kwon, H. R. Kim, S. W. Kim, C. Y. Jung, S. Hong

Abstract

Recently, Ultra high strength steel (UHSS) sheet metal has been widely used to improve lightweight structures in the automobile industry. Because UHSS sheets have high strength but low elongation, it is difficult to control both of wrinkle and thinning for complex shaped products. The draw beads on die surface were introduced to reduce wrinkle and thinning in this study. The positions and strength values of draw beads were selected as design variables and it was optimized using finite element analysis. The beads positions and strengths of a mold for a B-pillar part were determined with the proposed optimization design method. As the result, the accuracy of die design from optimization was verified by comparing with the results from 3-D scanned geometry.

Key Words : Optimization, Bead, UHSS(Ultra High Strength Steel), Thinning, Wrinkle

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 경량화 이슈로 인해 고강도 등이 요구되고 있고, 이러한 기능적 목적을 만족시키기 위해 고강도 소재 사용이 급증하고 있다. 초고강도 강철(UHSS, Ultra High Strength Steel, 1.2GPa)은 높은 항복강도와 낮은 연신율로 자동차 산업 현장에 바로 적용하기는 어렵다[1].

본 연구에서는 자동차 부품의 B-pillar의 경량화 및 고강도화를 위해 초고장력 강판을 도입했고, CAE 해석 기법을 활용했다. 최적 비드의 위치 결정을 위해 실험계획법 (DOE, Design of Experiment)으로 변수 연구를 수행했으며, DOE 결과를 활용한 최적 설계기법으로 주름 및 두께 변형률을 최소화 하는 최적 비드 설계 방법을 제안했다[2, 3].

2. 유한요소 해석

강판의 물성 및 유동응력은 Table. 1에 나타내었다. 초기 블랭크의 두께는 1.4mm이다.

Table.1 Mechanical properties of UHSS

Parameters	UHSS
K (MPa)	1704
ϵ_0	0.016
n	0.108
Young's Modulus E (GPa)	210
Poisson's ratio (ν)	0.3

해석에 사용된 재료의 hardening curve는 deep drawing quality 강판에 주로 사용되는 식 (1)의 Swift model을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

1. Department of MetalMold Design Engineering, Kongju National University
2. Kostech, TEL : 82-31-903-2061, www.kostech.co.kr
3. Daewoo industry, TEL : 82-31-463-0871, www.daewooindustry.com
교신저자: Department of MetalMold Design Engineering, Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유동응력, K 는 강도계수, $\bar{\varepsilon}$ 는 유효 변형률, n 은 가공경화지수, ε_0 는 초기 변형률이다.

3. 두께 변형률 감소를 위한 최적설계

실험 계획법 (DOE, Design of Experiment)을 진행하려면 설계 변수 (Design variables), 목적 함수 (Objective functions), 구속 조건 (Constraints)이 필요하다. 다중 목적 함수는 하고자 하는 목표 즉, Thinning, Wrinkle의 최소화이다. Design variables는 각 설계 변수의 구속 조건의 비드력 계산은 비드의 각 위치 (A, B, C, D and E)에서 Restraining force를 1000N을 설정하고 그 힘에 대한 Percent(%)로 설정했다. 바인더 홀딩력은 60kN에서 600kN 사이로 설정했다(Fig. 1).

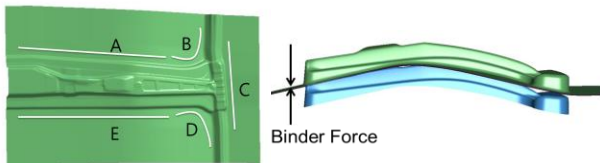


Fig. 1 Design variables : bead force, bead position and binder force

LS-OPT 5.2로 Optimization을 진행한 History를 Fig. 2에 나타냈다[4]. (a)는 Thinning부의 optimization 값이 20에 수렴하는 것을 볼 수 있다. (b)는 Wrinkle 값이 0에 가까운 값에 수렴하는 것으로 보아 Thinning 값은 대략 40% 줄었음을 확인하였다(Fig. 2)

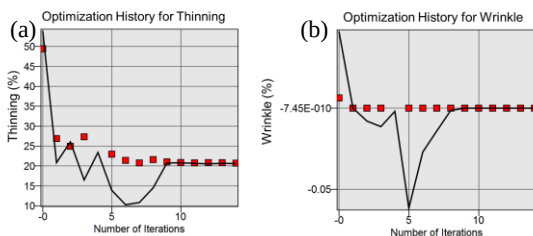


Fig. 7 Optimization history of (a) Thinning and (b) Wrinkle

성형 해석 정확도 검증을 위해서 실제 양산품에는 비드 E지점에서 비드를 삽입 후 생산하고 있다. 실제 양산되는 제품의 두께 변형률을 3차원

측정장비 (GOM-ARGUS)로 측정했다[5]. Fig. 3에 나타난 것처럼 (a)는 측정값이고 최대 11.97% Thinning이 발생한다. (b)는 해석 결과를 나타내며 최대 12.33%로 측정과 매우 유사한 결과가 나타났다.

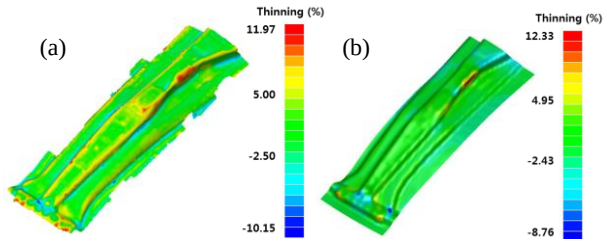


Fig. 3 Comparison of the measurement thinning from 3D scanning and simulation

4. 결 론

UHSS 판재 성형에서 두께 변형률 최소화를 위한 비드 최적 설계에 대한 연구를 수행했다. 두께 변형률을 감소시키기 위해 드로우 비드를 적용했고, 민감도 분석을 통해 드로우 비드의 위치를 먼저 결정했다. 결정된 A, C, E의 위치에서 Optimization을 통해 비드의 위치 최적화를 수행했다(Fig. 1). 최적 설계를 수행한 결과 A : 82.02N, C : 15.42N, E : 82.02N로 나타났다.

REFERENCE

- [1] Han. S., Kim. S., Seo. Y., Yu. E., Kim. J., 2011, Trans. of the Kor. Soc. Automotive Eng., Kor. Soc. Automot. Eng, Seoul, Korea, pp. 1873~1879.
- [2] DYNAFORM-PC User's Manual, Version 1.0, 2011, Engineering Technology Associates Inc.
- [3] S. Hong, J. Hwang, 2014, Bead Optimization to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using High Strength Steel, J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng., Vol. 23, No. 4, pp. 350~354.
- [4] LS-OPT® User's Manual, 2012, Engineering Technology Associates Inc.
- [5] GOM "ARGUS Training guide", 2008, pp. 1~10.

1.2GPa급 강판 판재 성형에서 스프링백 감소를 위한 금형 보상 설계

권순호¹ · 이호성¹ · 이영섭¹ · 김승완² · 정철영² · 홍석무[#]

Design Compensation to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using 1.2GPa Ultra High Strength Steel

S. H. Kwon, H. S. Lee, Y. S. Lee, S. W. Kim, C. Y. Jung and S. Hong

Abstract

The manual modification of stamping die has widely been used in order to reduce springback after sheet metal forming. When UHSS (Ultra High Strength Steel) is used in sheet metal forming, the die design considering springback compensation is more difficult because higher strength sheet has more springback. In this study, the optimization strategy was used in order to design die geometry considering springback compensation after forming of 1.2GPa UHSS. Die geometries were defined as design variables and the springback distance from the die surface was conducted as object function in optimization process. The optimized die geometry considering springback compensation was performed using finite element and optimization analysis. The simulation results such as thickness distribution and springback amount were compared with test results using 3D optical measurement system (GOM ARGUS, ATOS). And the prediction of springback amount showed a good agreement within test results.

Key Words: Springback Compensation, UHSS (Ultra High Strength Steel), 3D Optical measurement

1. 서 론

최근 자동차 업계에서는 배기가스 등 환경문제와 연비 개선 문제로 차체 부품의 초고강도 강판의 적용이 증대되고 있다. 높은 항복 강도를 가지며 얇은 두께로 충돌 안전 강도를 낼 수 있지만, 스프링백 양의 발생이 증가하여 부품 조립 시 불량률이 발생하고 있다. 따라서 스프링백을 제어하기 위한 금형 설계의 필요성이 대두되고 있다[1].

본 연구에서는 1.2GPa급 초고강도 강판을 적용한 제품 성형에서 발생하는 스프링백을 예측하기 위해 유한 요소 해석 프로그램인 DYNAFORM 5.9.2을 사용하였다[2]. 이를 바탕으

로 보상 해석을 통해 금형을 구조적으로 수정하였다. 최종적으로 3차원 측정을 통해 해석에 대한 타당성을 검증했다.

2. 스프링백 보상 설계 프로세스

스프링백 보상 해석을 적용하기 위해 B-pillar의 드로잉 공정(drawing), 트림 공정(trimming), 리스트라이킹 공정(re-striking) 및 피어싱(piercing) 중 스프링백이 가장 많이 발생하는 드로잉(drawing) 공정의 금형에 대하여 프로세스를 적용하였다. 드로잉 공정의 금형을 수정하기 위해 보상 값을 구하는 과정은 Table 1의 최적설계 기법(optimization design)을 사용한다. 스프링백의 양($\Delta\theta$)이 최소가 되도록 목적함수(object function)를 정하고 금형 형상(die geometry)을 그에 대한 설계 변수(design variables)로 정한다. 마지막으로 보상 값을 구하는 구간을 제대로 찾지

1 : Department of Metalmold Design Engineering, Kongju National University

2 : Daewoo industry, TEL: 82-31-463-0871, www.daewooindustry.com

교신저자: Department of Metalmold Design Engineering, Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

위해 구속조건(constraint condition)을 설정하였다. 구속 조건은 성형성에 문제가 되지 않도록 금형 형상에 역구배(undercut)가 5° 이내가 되도록 설정하였다. Fig. 1의 과정의 결과로 나온 금형이 원하는 조건(tolerance)에 만족하지 않으면 조건을 만족할 때까지 해석을 반복하여 실시하였다.

Table 1 Optimal design for springback minimization

Design variables	Die geometry
Objective functions	Minimize $F(x) = \Delta \theta$
Constraint condition	Undercut $< 5^\circ$

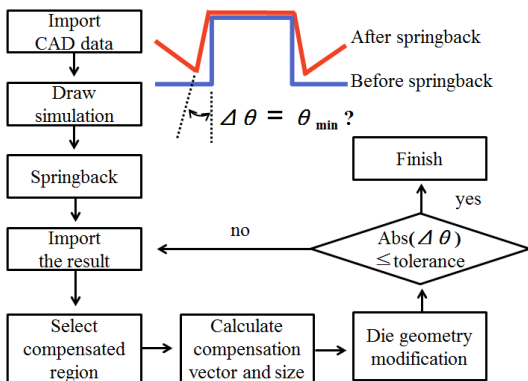


Fig. 1 Optimal design for springback compensation process

3. 스프링백 보상 해석 결과 및 검증

스프링백을 예측하여 금형 보상 해석을 수행함에 있어 CAE 해석 정확도가 검증되지 않는다면, 금형 제작 시 기존과 동일하게 시행 착오(try-out)를 반복하게 된다. 따라서 보상 해석 후의 스프링백 양의 측정값이 실제 보상 금형의 스프링백 측정값과 정량적으로 근접해야 해석의 타당성을 검증 할 수 있다. 실제 제품의 형상 데이터를 얻기 위해 3D 광학 측정 장비(GOM ATOS)를 사용하였다[3]. 스프링백을 3차원으로 가시화 할 수 있으며 해석 결과와 실제 측정 결과의 비교 분석 할 수 있다. 제품의 CAD 도면의 법선 방향을 기준으로 해석 결과가 앞 쪽에 위치하면 (+) 붉은색으로 구성되고 뒤 쪽에 위치하면 (-) 파란색으로 나타낸다. 만약 제품의 CAD 도면과 동일한 위치에 있다면 (0)으로 측

정되어 녹색으로 보여진다. Fig. 2를 보면 CAD 도면과 거리의 차이가 조립 허용 치수 공차인 $\pm 5\text{mm}$ 를 만족하는 것을 확인 할 수 있다.

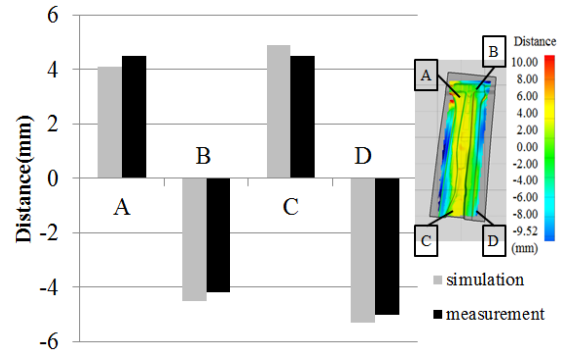


Fig. 2 The difference of distance at 4 measuring points between 3D measuring and simulation

4. 결론

초고강도 강판의 스프링백 양을 예측하고, 이 결과를 바탕으로 최적설계기법을 적용하였다. 스프링백을 고려한 보상 해석을 통해 금형을 설계하였고, CAE 예측 정확도 검증을 위해 3차원 측정 결과와 해석 결과를 비교하여 타당성을 입증하였다. 보상 전 금형에 비해 제품에 발생하는 스프링백의 양이 치수 허용공차($\pm 5\text{mm}$)를 만족 시키는 보상 금형을 설계하였다.

REFERENCE

- [1] S.A. Asgari, M. Pereire, B. F. Rolfe, M. Dingle, P. D. Hodson, 2008, Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 203, pp. 129~136.
- [2] DYNAFORM-PC User's Manual, Version1.0, 2015, Engineering Technology Associates Inc.
- [3] ATOS, GOM mbH, <http://www.gom.com>.

Ti-6Al-4V 합금의 유동응력 예측을 위한 구성방정식 개발

명동준¹ · 곽호빈^{1,2} · 정기호² · 임성식² · 이명규[#]

Prediction of Flow Stress of Ti-6Al-4V at Various Temperatures and Strain Rates

D.J. Myung, H.B. Kwak, K.H. Jung, S.S. Lim, M.G. Lee

Abstract

Titanium alloys have been processed at high temperature regime owing to their good formability with moderate dimensional accuracy after forming at elevated temperature. Therefore, for the accurate simulation of the forming process for Titanium alloys it is necessary to attain precise constitutive model which reproduces the flow behavior under various temperature and strain rate conditions. In this study, a flow stress model for Ti-6Al-4V alloy was proposed to analytically predict the flow stress response, which will be applied to the finite element simulation in the future. The constitutive model is based on typical Arrhenius type phenomenological model and described as a function of temperature, strain and strain rate. For characterizing the model parameters, hot compression tests were performed by the Gleeble simulator. A preliminary result is presented by comparing the calculated flow curves by current and existing models with those from experiment.

Key Words : Ti-6Al-4V (타이타늄합금), phenomenological(현상학적), Arrhenius type equation, isothermal hot compression(등온열간압축)

1. 고려대학교 신소재공학부

2. 한국생산기술연구원

이명규: 고려대학교 신소재공학부, E-mail:myounglee@korea.ac.kr

고압비틀림 공정을 이용한 구리-다이아몬드 초미세립 복합 재료의 제조

윤은유¹ · 김형섭^{2#}

Production of ultrafine grained Cu-diamond composites using high-pressure torsion

E. Y. Yoon, H. S. Kim

Abstract

Powder metallurgy and severe plastic deformation by high-pressure torsion (HPT) approaches were combined to achieve both full density and grain refinement at the same time. Pure Cu powders were mixed with 5 and 10 vol% diamonds and consolidated to disc-shaped samples at room temperature by HPT of 6 GPa and 1 turn, resulting in ultrafine grained metallic matrices embedded with diamonds. Neither heating nor additional sintering was required with the HPT process so that an in situ consolidation was successfully achieved at ambient temperature. Significantly refined grain structures of Cu metallic matrix by increasing diamond volume fractions were observed by electron backscatter diffraction (EBSD), which enhanced the microhardness of the Cu-diamond composites.

Keywords : high pressure torsion, copper, diamond, ultrafine grain, nanocomposite

1. 서 론

기계적 특성 및 변형저항성이 우수한 나노 결정립의 금속을 다이아몬드 복합체의 기지 재료로서 적용하게 될 경우 다이아몬드 공구의 특성 향상에 큰 영향을 미칠 것이라 판단되며 이를 위해서 복합분말로부터 낮은 온도에서 벌크 재료를 형성하는 즉 냉간 소결법에 대한 연구가 진행되고 있다.

그 중 최근에 연구되고 있는 새로운 저온소결 기술로서, 극심한 소성변형을 부과하여 초미세립 / 나노결정립 상태의 미세조직을 가지는 벌크 금속 소재를 만드는 강소성 (Severe Plastic Deformation, SPD) 공정이 있다. 강소성 공정을 통한 재료는 결정립도 1 μm 이하로 정의되는 초미세립 (ultrafine grained) 또는 결정립도 100 nm 이하의 나노결정립 (nanocrystalline) 상태의 미세조직을 바탕으로 초고강도화를 이룰 뿐 아니라, 균일한 초미립조직에 의한 우수한 내식성과 내마모성을 보인다. 강소성 공정중의 하나인 고압비틀림 (High Pressure Torsion, HPT) 성형 공정은 다른 강소성 공정보다 높은 변형량을 지속적으로 부과할 수 있어 더욱 미세한 조직을 형성시키는데 효과적이다. 이에 고압비틀림 공정을 이용한 성형은 벌크 소재의 초미세립화를 목표로 하는 초기의 연구뿐만 아니라, 비교적 낮은 온도에서의 공정을 통하여 분말의 미세조직의 결정립 성장을 억제하는 동시에 높은 치밀화를 얻을 수 있는 공정이다.

본 연구에서는 구리-다이아몬드 복합분말의 상온 고압비틀림 공정을 통해, 구리기지 다이아몬드 복합분말의 치밀화를 이루면서, 구리기지의 미세결정립 및 초미세조직의 벌크 재료를 제조하고, 제조된 초미세 복합재료의 기계적 성질을 고찰하고자 한다.

1. 재료연구소(KIMS)

2.# 교신저자: 포항공과대학교

2. 실험 방법

본 연구에서는 사용된 순 구리 분말의 입도는 4~6 μm 이며 결정립 크기 공업용 합성 다이아몬드 분말의 입도는 15-25 μm 이다. 볼 밀링을 이용하여 각각 5 vol%, 10 vol%의 다른 다이아몬드의 부피 비를 갖는 복합 분말을 불균일 응집이 없도록 혼합하였다 (그림 1 a, b, c). 혼합한 구리-다이아몬드 복합분말은 보다 균일한 시편 제조를 위해 직경 20 mm의 디스크 형태로 선다짐 (pre-compaction)을 하였다. 이렇게 선다짐한 시편을 그림 2의 개략적인 모식도와 같이 고압비틀림 공정을 실시하였다. 먼저, 선다짐 시편을 하부 금형의 0.25 mm 깊이의 원형 홈에 위치시키고, 하부 금형을 상승시켜 시편에 2.5 GPa의 정수압을 가하였다 (그림 1 b: stage I). 시편에 2.5 GPa의 압력을 가한 상태로, 1 rpm의 속도로 하부 금형을 회전시켜 상온에서 시편에 1 회전을 부과하였다 (그림 2).

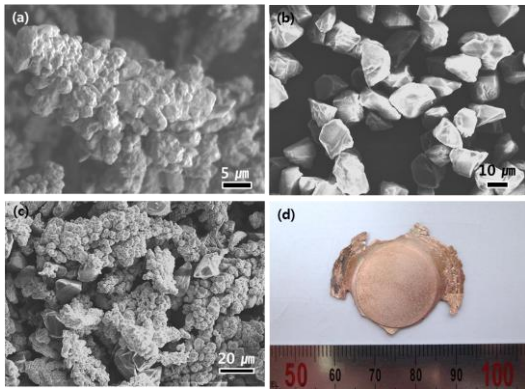


Figure 1 (a) Cu powders, (b) diamond particles, (c) initial blended Cu-Diamond powder, and (b) HPT (1.25 GPa, 1 turns) processed Cu-diamond composite disk.

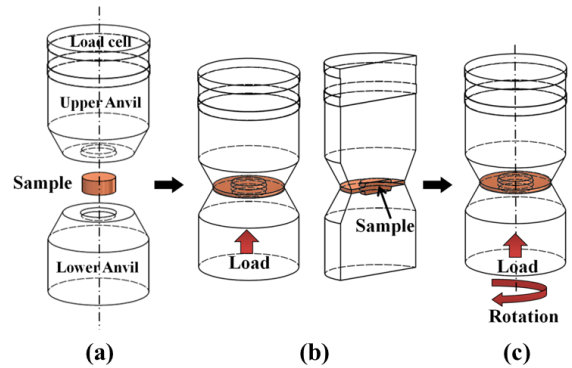


Figure 2. HPT process

3. 결 론

구리-다이아몬드 복합분말의 상온 고압비틀림 공정을 이용한 치밀화 과정을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 고압비틀림 공정은 상온 공정임에도 고압을 통하여 구리-다이아몬드 복합재로 벌크화 성형할 수 있었다. 뿐만 아니라 초기 낮은 변형량에서 높은 변형량까지의 변화에 의한 분말의 변형거동을 관찰할 수 있었으며, 다이아몬드의 영향으로 구리 분말이 다이아몬드 주변 부위에서 미세화가 보다 효과적으로 이루어 졌음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] S. C. Yoon, S. J. Hong, M. H. Seo, Y. G. Jeong and H. S. Kim: J. Kor. Powd. Met. Inst., 11 (2004) 233.
- [2] H. S. Kim and D. N. Lee: Mater. Trans., 45 (2004) 1829.

압출된 AZ91 마그네슘 합금에서 $Mg_{17}Al_{12}$ 상의 용체화에 미치는 전류의 효과에 대한 연구

정혜진¹·김문조¹·박주원¹·임창동²·한홍남^{1#}

Effect of electric current on dissolution of $Mg_{17}Al_{12}$ phase in as-extruded AZ91 magnesium alloy

H.-J. Jeong¹, M.-J. Kim¹, J.-W. Park¹, C.D. Yim², H.N. Han^{1#}

Abstract

The application of magnesium alloy as competitive materials to aluminum alloy is being widespread to automotive industry due to increasing demand of lightweight materials. AZ91 (Mg-9Al-1Zn) is one of the most popular magnesium alloys because it has excellent properties, such as low density, high specific strength, and high corrosion resistance, etc. However, there are a lot of $Mg_{17}Al_{12}$ phases which adversely affects the mechanical property by cracking of $Mg_{17}Al_{12}$ phase during forming in this alloy. Therefore, the additional dissolution heat treatment should be needed to eliminate the brittle $Mg_{17}Al_{12}$ phase. However, this process could bring about low production efficiency and high process cost.

In this study, using Electrically-Assisted Manufacturing (EAM) technique, effect of electric current on dissolution of $Mg_{17}Al_{12}$ phase in as-extruded AZ91 magnesium alloy was investigated based on microstructural analysis using scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS), and electron backscatter diffraction (EBSD). In comparison with conventional dissolution heat treatment, it was observed that dissolution kinetic of $Mg_{17}Al_{12}$ phase is accelerated by EAM. Additionally, the effect of electric current on $Mg_{17}Al_{12}$ phase during plastic deformation was evaluated based on a comparative analysis of microstructure between non-pulsed tension and pulsed tension. To distinguish joule heating effect, tensile test at high temperature was also carried out. Finally, the effect of electric current on dissolution kinetic of $Mg_{17}Al_{12}$ phase in as-extruded AZ91 magnesium alloy was discussed with a distinct effect of joule heating.

Key Words : AZ91 magnesium alloy; $Mg_{17}Al_{12}$; Dissolution; Electrically-assisted treatment; Electroplasticity

1. 서울대학교

2. 재료연구소(KIMS)

1.# 교신저자: 서울대학교, E-mail:hnhan@snu.ac.kr

압축방향에 따른 마그네슘 합금 판재 특성

배병범¹ · 이영선[#] · 김세종¹

The properties of the magnesium alloy sheet according to the compressive direction

Abstract

Mg alloy has been focused for high specific strength, strong electromagnetic shielding, high recyclability, heat conduction quality and developed to increase the fuel efficiency and reducing the carbon emissions. Although there are already several usages of Mg alloy in the automotive and aerial industry, it is not easy to replace for the conventional transportation parts of Al alloy and steel due to its low elongation at room temperature by the limited slip system of the Hexagonal closed-packed structure. According to the previous studies, Mg alloy sheet having more disorderly crystal texture shows the higher formability at low temperature. In this study, in order to observe the formability on the deformation texture of Mg alloy sheet with compressive directions, the limit dome height tests and the tensile tests along the rolling direction(RD) were conducted. Also, microstructures were observed. As a result, it was investigated that the mechanical property improvement on the deformation texture of Mg alloy in comparison with the commercial As-received sheet by the limit dome height tests. This result can expect to present a direction of Mg alloy development.

Key Words : sheet metal forming, texture, formability, compressive direction

1. Process Commercialization Center, Korea Institute of Materials Science

교신저자: Process Commercialization Center, Korea Institute of Materials Science, E-mail: lys1668@kims.re.kr

초음파표면압연공정의 평면변형 탄소성 유한요소모델링

이라니 미쌤¹ · 전만수[#]

Elastoplastic Finite Element Modeling of an Ultrasonic Surface Rolling Process under Plane Strain Assumption

M. Irani, M. S. Joun

Abstract

In this study, plane-strain elastoplastic finite element model is developed to predict the residual stress in the surface layer of ultrasonic surface rolled material. During ultrasonic surface rolling process elastoplastic loading by a mass of high energy successive impacts is exerted in a small zone of the surface. A two dimensional elastoplastic finite element model is employed to simulate the process. Results of parametric study showed that the magnitude and depth of maximum residual stress are increased by applying higher static forces. Moreover, the variation of residual stress along the surface of material revealed that the distribution of residual stress is not homogeneous on the surface of ultrasonic surface rolled material.

Key Words : Ultrasonic Surface Rolling Process(초음파표면압연공정), Residual stress(잔류응력), Plane Strain(평면변형), Finite element model(유한요소법)

1. Introduction

Ultrasonic surface rolling process (USRP), which utilizes the combination of static extrusion and dynamic impact is a novel surface nanocrystallization technology based on severe plastic deformation. In USRP, an ultra-hard processing tip is employed to roll the material surface under a static force [1]. Meanwhile, dynamic impacts applied to the surface through the tip by ultrasonic apparatus creates a severe plastic deformation on the surface of the material and gives a grain refined surface layer with compressive residual stresses [2]. The schematic diagram of USRP is shown in Fig.1. Since the set-up of this process is time consuming and requires costly experimental procedures; development of numerical methods can be useful to assess the effect of process parameters and optimize the process with less experimental expenses. Liu et. al [3] presented a finite element model for USRP and determined the geometry, constitutive relation and mesh parameters. They also studied the effects of process parameters on the residual stresses and surface roughness [2]. In their studies, a 3D model has been developed to simulate the process. They investigated a very small zone of target material due to the limitation on the number of elements in modeling. However, they assumed that the treating features of USRP are theoretically uniform along the surface. In this study, in order to investigate a larger zone in the surface layer of USRPed material, a 2D elastoplastic model is built under plane-strain assumption and the distribution of residual stress is studied.

1. Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

교신저자: School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

E-mail: msjoun.gnu.ac.kr

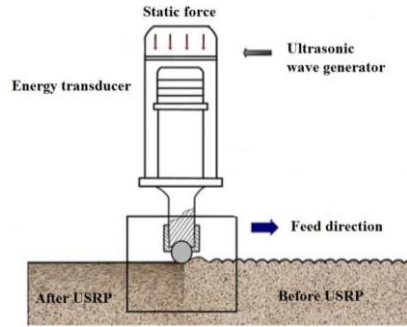


Fig. 1 Schematic illustration of Ultrasonic Surface Rolling Process

2. Finite element modeling

A two dimensional elastoplastic base model is employed under plane strain assumption to simulate the process using AFDEX forging simulator. The target material is modeled as a rectangular body (25*50 mm), sufficiently large to avoid the effects of boundary conditions on the residual stress state in the process area (1.5*20 mm) which is located in the center of the target material. As the deformation in USRP is concentrated at a thin surface layer of the material, size of the smallest element has a key effect on prediction results. On the other hand, the simulation softwares usually have limitations on the number of elements utilized in modeling. Thus, using appropriate mesh size plays an important role in the modeling of such process like USRP. Fig. 2 shows the 2D simulating model set up used in this work. According to the results of former researches [4, 5] mesh height (h) and width (w) of 20 and 80 μm are used respectively. For the tool tip which endured much less deformation than the specimen, a rigid sphere with a diameter of 10 mm is modeled. The strain rate dependency of target material is not included in the model, thus, it is applicable for the low strain rate sensitive metals such as aluminum.

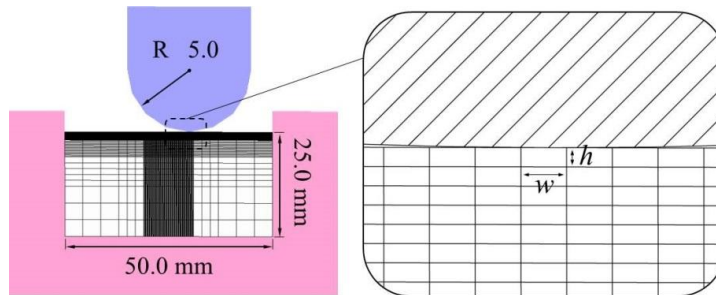


Fig. 2 Two dimensional finite element mode

3. Results and discussion

The workpiece surface suffers severe elastic-plastic loading by a mass of high energy successive impacts during USRP, therefore, an elastoplastic base model is required to detect the static and dynamic forces on the surface of material. The predicted static and dynamic forces in steady-state stage of an ultrasonic surface rolling process is depicted in Fig.3.

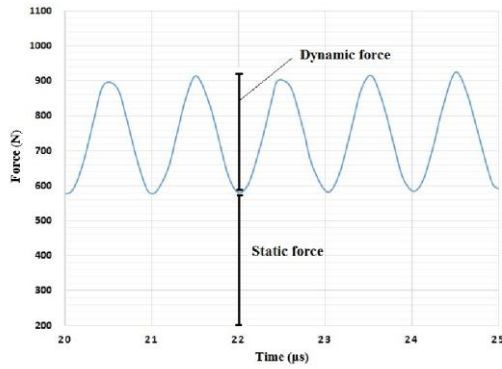


Fig. 3 Static and dynamic forces in simulation of ultrasonic surface rolling process.

Compressive residual stresses that can improve fatigue life by preventing the propagation of fatigue cracks are generated in the surface layer of material subjected to USRP. It is therefore very useful to be able to predict the magnitude, distribution and depth of these compressive residual stresses near material surface. The variation of predicted residual stress in the surface layer of target material is shown in Fig.4. In order to simulate a real process, the main parameters i.e. feeding rate, ultrasonic vibration amplitude and frequency are assumed as 25 mm/s, 10 μm and 20 kHz respectively. The simulation was carried out with 3 different static forces of 70, 270 and 570 N. As it is seen in all curves, the subsurface residual stress reaches maximum at a specified depth and then gradually decreases as the location deepens. The overall trend of predicted residual stress is in agreement with results of previous studies [3]. However, the amount of compressive residual stress is underpredicted due to the plane strain assumption in the modeling.

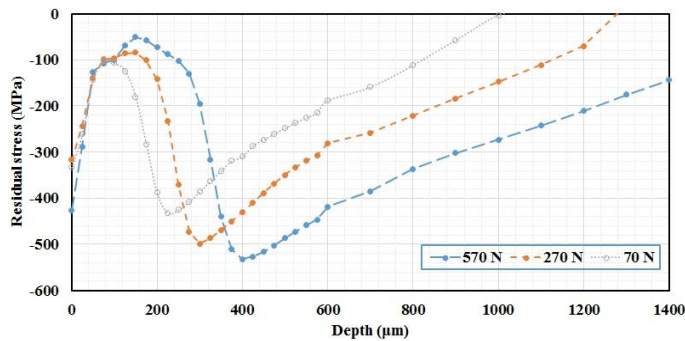


Fig.4. Predicted residual stress profile along the depth of material with static force of 70, 270 and 570 N.

As shown in Fig. 4, static force plays an important role in USRP through influencing on the magnitude and depth of maximum residual stress. The magnitude and depth of maximum residual stress increase with static force ascending and improve the material properties. Particularly the depth of compressive stress that enhances the fatigue properties of material is very sensitive to static force. It is noted that the variation of maximum compressive residual stress is more obvious than that of surface residual stress.

Fig.5 shows the variation of residual stress along the surface of the USRPed material with static force of 570 N. As can be seen, the variation at surface is significant compared to the depth of 400 μm in which the maximum residual stress is located. In other words, unlike the former researches assumption, the distribution of residual stress along the surface of USRPed material, especially close to the surface, is not homogenous and can be affected by the process parameters.

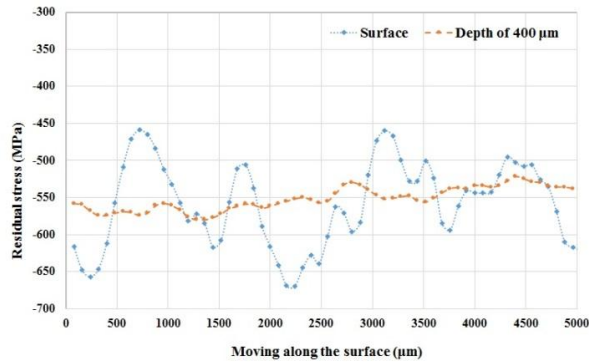


Fig. 5 Predicted residual stress along the surface of the USRPed material with static force of 570 N.

4. Conclusion

In present work, the ultrasonic surface rolling process as a novel surface modification technique has been introduced and a two dimensional finite element model for simulation of USRP was developed under plane strain assumption. The predicted variation of residual stress in the surface layer shows that the overall trend of residual stress profile is in agreement with the results of other researches but the magnitude of that is underpredicted due to the plane strain assumption in the modeling. Therefore, simulating the USRP process under plane strain assumption cannot predict the exact residual stress magnitude. The parametric study of USRP reveals that the depth and magnitude of maximum residual stress is strongly affected by static force while the amount of compressive residual stress on the surface of material does not vary significantly. Furthermore, the predicted distribution of residual stress along the surface of USRPed material, especially close to the surface, is not homogenous.

Acknowledgments

This work is supported by BK 21 plus project and the project for industry-university cooperative research of Korean Small and Medium Business Administration.

References

- [1] Haibo Wang, Guolin Song, Guoyi Tang, 2015, Enhanced surface properties of austenitic stainless steel by electro pulsing-assisted ultrasonic surface rolling process, *Surf. Coat. Tech.*, Vol. 282, pp. 149 ~ 154.
- [2] Y. Liu, X. Zhao, D. Wang, 2014, Effective FE model to predict surface layer characteristics of ultrasonic surface rolling with experimental validation, *Mat. Sci. and Tech.*, Vol.30, pp. 627 ~ 636.
- [3] Yu Liu, Lijun Wang, Dongpo Wang, 2011, Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.211, 2106 ~ 2113.
- [4] M. Irani, S.H. Joe, H. T. Jin, M. S. Joun, 2015, Investigation into effect of meshing size on prediction of residual stress in ultrasonic surface rolling process, *Proceeding of KSMPE Spring Conference*, p. 34.
- [5] S. Bagherifard, R. Ghelichi, M. Guaglino, 2014, Mesh sensitivity assessment of shot peening finite element simulation aimed at surface grain refinement, *Surf. Coat. Tech.*, Vol. 243, pp. 58 ~ 64.

DED 기술을 적용한 고속도 공구강 M4 분말 적층에 관한 연구

이은미¹ · 신광용² · 이기용² · 심도식^{2#}

Study on the deposition of high speed steel AISI M4 powder on 1045 substrate using direct energy deposition (DED) process

E. M. Lee, G. Y. Shin, K. Y. Lee, D. S. Shim

Abstract

Direct Energy Deposition (DED)은 고출력 레이저 에너지 빔을 이용하여 금속분말을 용융시켜 원하는 형상으로 적층하는 기술로 현재 금형 강화 및 금형 재생에 많이 적용되고 있다. 높은 내마모성과 고경도를 요구하는 금형강화에 있어서 높은 탄소함유량과 크롬 함유량을 가진 고속도 공구강 (AISI M4)의 DED 기술 적용은 금형 수명의 향상을 기대할 수 있다. 그러나 DED 공정 중 금속 분말은 완전 용융 후 급속 응고 과정을 거치게 되는데 이로 인해 발생하는 열응력에 의해 계면에서의 delamination이 심각히 발생된다. 이때, DED 공정에서 모재에 예열을 하게 될 경우 열응력을 감소시켜 계면뿐만 아니라 적층영역에서의 균열 감소 효과를 얻을 수 있다. 그러나 과도한 예열은 모재 및 적층부의 기계적 특성을 변화시키기 때문에 적당한 예열 온도 선정이 매우 중요하다. 본 논문에서는 DED 공정을 이용하여 상온에서부터 500 °C까지 예열 온도를 달리하여 SAE-AISI 1045 기판 상에 AISI M4 분말을 10 mm X 20 mm X 1.5 mm 로 면적층 하였으며, 예열 온도에 따른 적층 영역과 계면 사이의 균열 및 delamination 발생 저감효과를 관찰하고 예열 온도별 적층부의 경도 관찰을 통해 예열 온도에 따른 기계적 물성 변화를 관찰하였다.

Key Words : direct energy deposition, high speed steel, delamination, preheating, microhardness, microstructure

1. 전남대학교 기계공학과

2. 한국생산기술연구원

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail: imagineer@kitech.re.kr

DED 기술 적용 피어싱 금형 강화에 대한 연구

백경윤¹ · 심도식^{2, #} · 서진선¹ · 김명호²

Hardfacing of Piercing mold using DED technique

G. Y. Baek, D. S. Shim, J. S. Seo, M. H. Kim

Abstract

본 연구에서는 프레스 가공에서 마모와 파손이 빈번하게 발생하는 피어싱 펀치 금형을 강화하기 위하여 DED (direct energy deposition) 금속 적층 기술을 이용하였다. 피어싱 금형은 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 SKD11 소재를 이용하였으며, 표면 강화를 위하여 내마모성이 우수한 AISI H13 금속분말과 고경도 재료인 AISI M2 금속분말을 고출력 레이저로 용융시켜 파손이 가장 많이 발생하는 금형의 상면에 1 mm 높이로 적층하였다. 적층된 펀치금형은 경도 시험과 마모시험, 충격시험을 통하여 기계적 물성 분석을 수행하였다. 분석 결과, 적층부의 기계적 성질은 열처리된 SKD11 와 유사하거나 높게 나타났으며, 이는 각각의 금속분말과 모재를 용융시켜 합금 처리함으로 금속분말에 함유되어 있는 성분에 의해 기계적 성질이 개선된 것으로 판단된다. 동일한 조건의 피어싱 가공 후에, 열처리된 SKD11 금형은 약 10,000 타 공정 후 금형에 chipping이 발생하였으며, 성형 제품에도 bur가 발생하였다. 반면에, M2 금속분말로 강화된 금형은 파손된 부분이 없었으며, 표면의 마모 상태도 열처리 D2금속보다 상대적으로 우수하게 나타났다. 이로써, DED 금속 적층 기술을 이용하여 금속 표면의 기계적 특성을 개선할 수 있었으며, 금형강화로 인해 내구성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : 레이저용융 금속적층 기술(DED), 피어싱 펀치금형, 표면강화, 내구성

1. 전남대학교 기계공학과

2. 한국생산기술연구원 그린가공공정그룹

한국생산기술연구원 그린가공공정그룹, E-mail: imngineer@kitech.re.kr

Size Effect가 보스-리브 테스트에서의 마찰 거동에 미치는 영향 연구

문인용¹ · 김보현² · 이호원¹ · 오영석¹ · 강성훈[#]

A Study of Size Effect on Boss and Rib Test for Friction Condition

I. Y. Moon, B. H. Kim, H. W. Lee, Y. S. Oh S. H. Kang

Abstract

Friction behavior in metal forming plays an important role because it related to metal flow, forming load, die wear, etc. Furthermore, micro size workpiece has bigger ratio of surface/volume than macro size workpiece. So, friction condition is crucial factor in micro forming. In this study, die and punch for boss and rib test were manufactured to investigate friction behavior in micro forming. For making small size of tube-shaped punch, micro size hole with high aspect ratio should be drilled. In the field of μ EDM, under $\varnothing 100 \mu\text{m}$ holes with aspect ratio 10 can be drilled without additional apparatus. For this reason, μ EDM technique was used to make tube-shaped punch. Half cylinder shaped tool was applied to reach high level of aspect ratio. Consequently, $\varnothing 320 \mu\text{m}$ hole with aspect ratio 7.18 could be drilled. To analyze size effect on stress-strain curve, compression test were performed using workpiece size $\varnothing 0.7 \text{ mm}$, $\varnothing 1.0 \text{ mm}$, $\varnothing 2.0 \text{ mm}$, $\varnothing 10 \text{ mm}$. The results show the flow stress decreases with decreasing specimen diameter. Correlation between flow stress and the number of grain in a workpiece was investigated

Key Words: Size Effect, Micro Scale, Boss and Rib test, Friction Condition, μ EDM, Tube-Shaped Punch

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 숭실대학교 기계공학과

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소, E-mail: kangsh@kims.re.kr

광학식 자동 표면변형률 측정 시스템 개발

오테환¹ · 김성곤² · 김형종[#]

Development of an automated optical surface-strain measurement system

T. H. Oh, S. G. Kim, H. J. Kim

Abstract

표면변형률 측정을 위하여 대상물의 표면에 인쇄하는 격자 패턴은 대상물의 재료, 형상, 크기, 표면 상태 및 측정 목적에 따라 다양하다. 본 연구에서는 구조적인 연결성을 가진, 균일 또는 불균일 격자 패턴을 선택적으로 사용할 수 있는 영상 처리 및 인식 기술을 기반으로 광학식 자동 표면변형률 측정 시스템을 개발하였다. 영상의 크기와 회전에 불변하는 특징점을 추출하여 그 화소값을 분석한 필터링을 적용하는 SIFT 알고리즘을 사용함으로써 효과적이고 정확하게 격자 패턴을 검출하였다. 또한, 범용 디지털 카메라를 사용함으로써 카메라 호환성을 개선하였으며, 카메라 보정을 통해 카메라의 내부 파라미터, 왜곡 계수 및 기하학적 관계를 계산하고, 인식된 격자 패턴에 스테레오 정합 알고리즘을 적용하여 측정 패턴의 3차원 좌표를 계산하였다. 요소 구성은 Delaunay 삼각분할(triangulation) 방식을 적용하였다. 고가의 하드웨어를 요구하는 상용 장비와 동일 대상물의 변형률 측정값을 비교 평가한 결과, 본 시스템으로 정확한 표면 변형률 측정이 가능함을 확인하였다.

Key Words Surface Strain, Optical Measurement, Stereo Vision, Homography, SIFT

1. 강원대학교 대학원 기계융합공학과
2. 강원대학교 대학원 기계융합공학과
교신저자: 강원대학교 기계의용공학과,
E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

9. 일반 논문 발표

(제 4 발표회장)

파단예측 신뢰성 향상을 위한 재료시험 및 파단해석 모델링

김현승¹ · 이충안¹ · 김대영² · 김현영[#]

Material Test and Failure Modeling for Improved Reliability Fracture Prediction

H. S. Kim¹, C. A. Lee¹, D.Y. Kim², H. Y. Kim[#]

Abstract

차량 주행 시 승객에게 외부로의 충격과 진동을 흡수하며 승차감이나 안전에 직접적으로 관련된 부분은 시트이다. 더불어 차량의 급격한 움직임이나 정면, 후면에서의 충돌에 대해 승객을 안전하게 보호해주는 역할을 하기 때문에 그에 따른 강도, 강성과 내구성을 지녀야 하는 중요한 구조물이다. 최근 다양한 파단모델을 사용하여 구조물에 대한 파단부위, 파단양상 등의 예측을 위한 유한요소해석 연구가 진행되고 있으며 시트 프레임의 파단문제가 야기됨에 따라 승객의 안전을 위해 시트 구조물의 강도예측을 위한 파단모델 정립이 필요하다.

본 연구에서는 시트 프레임 레일 판재에 대한 기계적특성 및 파단특성을 확보하고 유한요소해석을 진행했다. 파단모델은 LS-dyna의 GISSMO 모델을 사용하였으며 GISSMO 파단모델은 네킹 이후 재료의 연화현상 및 파단시점이 정확하게 모사가 가능하고 삼축응력(Triaxiaity)과 파단 변형률로 파단을 정의하는 모델이다.

GISSMO 파단모델의 파라미터 및 파단특성을 평가하기 위해서는 재료시험 및 해석기술이 필요하다. 따라서 시트 프레임에 적용되고 있는 각 소재에 대해 다양한 응력모드에서 파단 변형률을 평가하기 위해 단축인장, 순수전단, 노치, 이축인장시험 등을 실시하였고, 동시에 DIC 장비(ARAMIS)를 이용한 파단변형률을 측정하여 파단특성 분석에 활용하였다. 재료시험은 INSTRON 5882 UTM(Universal Test Machine)장비 및 상/하 복동식 유압프레스(Formability tester)를 사용하였다. 시트 프레임은 주로 얇은 박판 소재로 구성되어 있어 shell 요소를 이용하여 모델을 구성하지만, 시트 레일과 같이 접촉이 많은 부품의 경우 Tshell을 사용하기 때문에 시편모델에 대한 해석은 Tshell로 하였다. 재료시험을 통해 소재의 기계적특성 및 파단특성으로 GISSMO 파라미터를 도출하였고 그 파라미터를 도출하기 위한 방법을 제안하였다. 도출된 GISSMO 파라미터를 이용하여 시편모델해석을 진행하였고 시험과의 비교로 신뢰성을 검증하였다. 또한 시트 레일에 적용하기 위해 레일 lock 강도해석 및 시트벨트 앵커리지 해석을 실시한 후 시험과 비교하였다.

Key Words : Seat(시트), Rail(레일), Fracture(파단), GISSMO, Triaxiality(삼축응력), UTM(만능재료시험기)

후 기

본 논문은 (주)DAS에 의해 지원된 연구임을 밝힘.

1. 강원대학교 기계의용공학과

2. (주) DAS 선행해석팀

Corresponding Author: Mechanical & Biomedical Engineering in Kangwon national university, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

자동차 휠 베어링 설계 시 3축성형한계를 고려한 크랙 예측

이인하¹ · 안정호¹ · 송민우¹ · 송가형² · 곽호택^{2#}

Prediction of Crack Considered Triaxial Forming Limit in Design for Automotive Wheel Bearing

I. H. Lee, J. H. An, M. W. Song, G. H. Song, H. T. Kwak

Abstract

In this study, orbital forming process, assembly method of automotive wheel bearing hub and inner ring, was analytically implemented using the STAMPACKTM that is based on explicit finite element method. CPU time significantly reduced beside implicit finite element method and STAMPACKTM analysis showed similar results with the test data. Additionally, It predicted crack and found solution plan using TFD(triaxiality fracture diagram).

Key Words: STAMPACK, Triaxiality failure diagram(3축성형한계, TFD), Orbital forming(오비탈 포밍), Explicit finite element method(외연적 유한요소법), Wheel bearing(휠 베어링), Forming limit diagram(성형한계도)

1. 서 론

성형한계도(Forming Limit Diagram, FLD)는 판재 성형에서 가장 널리 쓰이는 성형성 평가 방법이다. 성형한계도는 두께방향 변형률을 고려하지 않고 주변형률과 부변형률의 선도(Forming Limit Curve, FLC)로 표현되어 오직 평면응력 상태에서만 유효하다. 보다 정확한 성형성 평가를 위해선 3축응력상태를 고려한 성형성 평가방법이 필요하다. 일반적으로 판재성형의 유한요소해석의 경우 실제 두께가 아닌 두께를 가정하여 계산하는 Shell 요소가 쓰이고 있다. Shell 요소는 두께 방향의 변형의 영향을 무시해도 되는 박판에 대해서 유효하며, Solid 요소에 비해 절점의 수가 매우 적기 때문에 해석시간을 단축 시킬 수 있다. 그러나 오늘날에는 컴퓨터와 소프트웨어의

발전으로 보다 실제와 유사한 Solid 요소를 사용하여 실제 산업현장에서 적용 가능할 정도의 해석시간이 소요된다. 따라서 최근에는 두께가 있는 판재인 후판(Thick sheet)을 포함하여 두께가 3mm 이하인 박판에 대해서도 Solid 요소를 사용하여 해석하는 것이 추세이며 3축 응력상태를 고려한 성형성 평가와 파단 예측이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 판재가 아닌 부피가 있는 Bulk에 대해서도 3축 응력상태를 고려한 성형성 평가 방법에 대한 유효성을 확인하고자 한다. 이를 위해 두께방향의 변형률을 고려한 3축 파단이론(Modified Mohr-Coulomb fracture criterion, MMC)을 기반으로 하는 TFD를 사용하는 상용소프트웨어 STAMPACKTM를 이용하여 자동차 휠 베어링 허브에 대한 유한요소해석을 진행하였다. TFD는 Triaxiality와 Equivalent strain to fracture의 선도이며, Triaxiality는 식 (1)로 Equivalent strain to fracture는 식 (4)로 정의된다. σ 는 유효응력, σ_m 은 평균응력, θ 는 Load angle, r 는 third invariant of the deviatoric stress tensor로 정의된다[1].

1. (주)일진글로벌

2. (주)씨에이이테크놀로지

교신저자: (주)씨에이이테크놀로지,

E-mail: htkwak@caetech.co.kr

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{3} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_f = f(\eta, \bar{\theta}) \quad (4)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos\left(\left(\frac{r}{\sigma}\right)^3\right) \quad (5)$$

$$r = \left[\frac{27}{2}(\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m)\right]^{1/3} \quad (6)$$

2. 오비탈 포밍

오비탈 포밍은 자동차용 휠 베어링의 생산과정에서 허브(hub)와 내륜(inner ring)을 조립하는 공법으로 성형 핀(peen)이 회전과 하강을 동시에 하면서 반복적으로 허브를 성형하는 방법이다. 이 공법의 해석은 보다 정확한 해석, 실제 실험과 유사한 결과를 얻기 위해서 내연적 유한요소법을 사용하는 것이 효과적[2]이나 산업현장의 실무에 적용하기에는 너무 긴 해석시간이 소요되는 단점이 있다. 시간을 단축시키기 위해 축대칭 모델을 이용한 해석 방법[3]이 시도되고 있으나, 이는 시간을 단축시킬 수 있지만 실제 실험과 큰 오차가 발생하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 외연적 유한요소법을 기반으로 하는 STAMPACK™[4]을 사용하여 내륜 압입 및 오비탈 포밍 공정을 해석적으로 구현하고 3축 응력을 고려한 성형성 평가 방법인 TFD의 기법으로 성형성 평가 및 판단 가능성을 예측하였다.

3. 유한요소해석

3.1 경계조건

해석은 압입, 성형(오비탈 포밍)을 통해 실제 공정과 동일하게 진행하였다. 해석시간 단축을

위해 핀의 이동 및 회전속도를 실제 실험 속도보다 1000배 빠르게 하였다(time scale 1/1000 적용). 성형속도 증가에 따른 동적 효과(dynamic effect)의 과대한 발생이 성형하중을 증가시킬 수 있다. 이에 대한 해결방법으로 핀의 질량과 물성의 변형률 속도에 대한 민감도를 제거하여 성형하중에 미치는 영향을 최소화하였다.

3.2 유한요소모델

현재 모델(current)에 대한 해석결과 TFD와 Triaxiality를 통해 허브 끝단부에 크랙이 예측되어, 허브 형상을 수정한 개선 모델(improve)을 추가로 해석적으로 구현하였다. 두 모델은 Fig. 1과 같이 허브 가장자리 형상에만 차이가 있고, 그 외 조건은 모두 같다. 유한요소모델은 베어링 구성요소 중 내륜, 허브, 핀만 모델링 하였다. 내륜과 허브는 Solid 요소인 Hexahedron 요소, 핀은 Shell 요소인 Triangle 요소를 사용하여 구성하였고, 핀은 강체인 Rigid 요소로 가정하여 구성하였다.

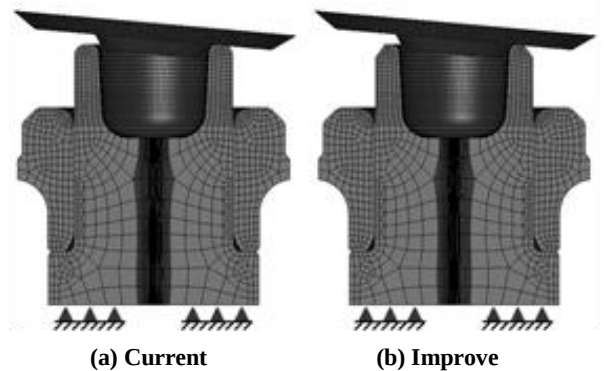


Fig. 1 Finite element model of current and improve

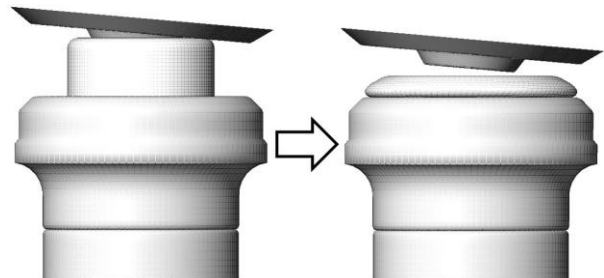


Fig. 2 Hub shape after analysis

4. 결과 및 비교

Fig. 2는 해석 후의 허브 형상이다. 해석결과 검증에 위해 Table 1에 성형 후 허브 상단부의 두께, 내륜의 대외경 변화량, 핀과 허브 사이에 발생하는 하중의 최대값을 실제 실험 결과와 비교하였다. Table 1은 T/O 대비 오차 값을 표기 하였다. Fig. 3은 핀과 허브 사이에 발생하는 접촉력의 선도이다. 현재 모델의 해석 결과에서 Triaxiality 선도를 통해 크랙을 예측할 수 있었다. Fig. 4는 크랙 예측에 사용된 허브 가장자리 특정 요소의 Triaxiality 선도이다. Triaxiality 값이 + 값이면 인장력을 -값이면 압축력을 받고 있는 상태를 의미한다. 최종 성형상태에서의 Triaxiality 값은 현재 모델이 개선 모델보다 약 1.6배 크게 나타났고, 현재 모델의 전체 Triaxiality 분포에서도 허브 가장자리에서 부분적으로 높은 값이 발생되었다. 이는 인장에 의한 크랙 또는 파단이 될 가능성이 높음을 의미한다.

Table 1 Comparison between analysis result and test data

형 상	STAMPACK	
	Current	Improve
두께 (mm)	+ 0.00 mm	+ 0.03 mm
대외경 변화량 (mm)	-0.02 mm	-0.02 mm
핀 하중 (Ton)	+ 1.20 Ton	+ 0.50 Ton

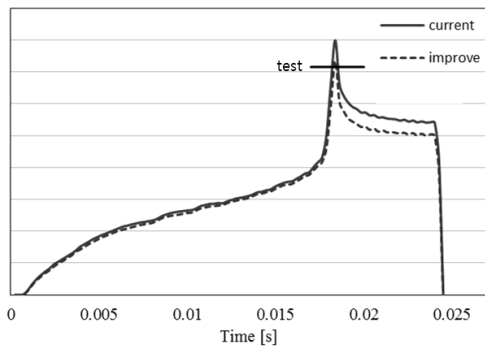


Fig. 3 Contact force – time diagram between peen and hub

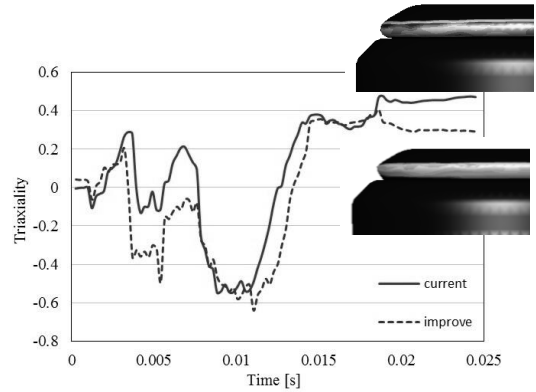
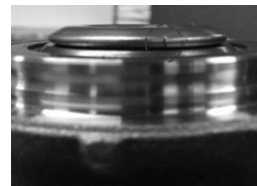


Fig. 4 Triaxiality – time curves

5. 결 론

변형률과 응력분포는 현재 모델과 개선 모델이 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나, 파단 가능성을 예측할 수 있는 두께방향 변형률까지 고려한 Triaxiality 분포는 현재 모델에서 허브 가장자리에 부분적으로 높은 값을 나타냈는데 이는 파단이 될 가능성이 높음을 의미한다. 이를 보완하여 설계한 개선모델에서는 Triaxiality 분포가 균일하게 나타났고, Fig. 4의 그래프와 같이 Triaxiality의 값이 현재 모델보다 낮게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 개선 모델이 현재 모델에서 발생하는 파단의 가능성을 보완한 설계임을 검증한 결과라고 할 수 있다. 실제 실험에서도 현재 모델의 Triaxiality가 부분적으로 높은 값을 나타내는 영역에 파단이 발생하였고, 개선 모델은 파단이 발생하지 않는 것을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 이는 TFD를 이용한 파단예측 기법이 자동차 휠 베어링 설계 시 적용 가능할 것으로 판단된다.



(a) Current



(b) Improve

Fig. 5 Crack location in actual test

참 고 문 헌

- [1] Yaning Li, Meng Luo, Jorg Gerlach, Tomasz Wierzbicki, 2010, "Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming", Journal of Materials Processing Technology, 210(2010), pp. 1858~1869.
- [2] An, H. G., Lee W. Y. and Lee S. P., 2014, "3 Dimensional Orbital Forming Analysis of Automotive Wheel Bearing", KSME 2014 Fall Annual Meeting, 214.11, pp. 786~788.
- [3] Jung Y. J., Lee C. A., Lee W. Y., An H. G., Lee S.P. and Kim H. Y., 2015, "A study on the axisymmetric analysis of Orbital forming process", KSME 2015 Spring Annual Meeting, KSME2015R8002, pp. 125~126.
- [4] STAMPACK™ V7.1 User's manual, Quantech ATZ, www.stampack.com.

멀티 스케일 기법을 이용한 결함의 거동 변화 예측

김용관¹ · 윤용석¹ · 이경훈[#]

Prediction of defect evolution using multi-scale method

Y. G. Kim, Y. S. Yoon, K. H. Lee

Abstract

Internal void are usually present in ingot, bloom, slab produced by casting. These voids must be closed in the subsequent process such as forging(upsetting, cogging) or rolling to ensure high quality of the product. In this work, Multi-scale method has been applied to predict the defect behavior in metal forming process. Void Model which constructed for a ingot containing a void and RVE Model which is representative volume element of a void are simulated by finite element analysis. Deformation behavior of void in two models was compared.

Key Words : Multi-Scale, RVE(Represent volume element), Void, Finite Element Method

1. 서 론

대표적인 소성가공중 하나인 단조와 압연 공정은 잉곳(Ingot), 블룸(Bloom), 슬라브(Slab) 등을 가공하여 선박, 플랜트, 발전소 등의 주요 부품을 생산한다[1]. 이러한 부품의 제조 과정에서 원소재의 내외부 결함의 정도는 품질을 좌우하는 주요 요소로 알려져 있다. 특히 주조를 통한 원소재의 생산에서 불가피하게 잔존하는 내부 기공은 후속된 압연 공정 또는 업세팅(Upssetting) 및 코깅(Cogging) 공정에서 압착되는 것으로 알려져 있으며, 완전한 기공 폐쇄를 위해 금형 폭비, 압하율 등과 같은 공정 변수가 기공의 변형 거동에 미치는 영향에 대해 이해하는 것은 중요하다.

기공 압착 거동에 대한 연구는 실험적으로 소재 내부에 원하는 크기의 기공을 인위적으로 생성하는 데 어려움이 있고 이론 해석의 한계성으로 인해 유한요소해석을 통한 연구가 주를 이루고 있다[2,3]. 그러나 대부분의 유한요소해석에서는 소재와 임의 결함 형상을 함께 모델링하거나

기공의 크기를 수 배 내지 수십 배로 모델링하여 요소수 증가에 따른 계산시간 증가와 현실적인 기공의 변형 현상을 가시화하는 데 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 방법으로서는 멀티 스케일 기법이 활용될 수 있다.

Lee[5,6]등은 기공의 거동 분석을 위해 거시(Macro) 모델의 속도장을 사용하여 미세(Micro) 모델의 표면을 평면으로 구속하는 방법을 사용하는 한편, 거시 모델에서 보다 많은 절점의 이력을 추출하고 고차 형상 함수(high order shape function)를 사용하여 모든 표면의 절점에 속도장을 직접 부여하는 방식으로 멀티 스케일 기법을 적용하였다.

본 연구에서는 기존 방법의 단점을 보완하고 간결한 계산 방식의 멀티스케일 기법을 개발하였다. 이 기법을 이용하여 성형 공정에서 기공의 형상 변화 거동을 예측하였고 계산 결과의 검증에 위해 소재에 기공을 직접 모델링한 경우와 멀티 스케일 기법을 이용한 경우를 비교하여 체적 감소량 등을 분석하였다.

1. ㈜ 솔루션랩

교신저자: ㈜ 솔루션랩, E-mail : klee@solution-lab.co.kr

2. 멀티스케일 해석

2.1 멀티 스케일 해석 개요

멀티 스케일 해석은 분석하고자 하는 문제가 해당 크기 스케일에서의 해석 기법만으로 거동을 파악하기 어려워 다른 크기 스케일의 기법과 연결함으로써 보다 정확하게 문제를 분석할 수 있는 접근 방법이다. 일반적인 성형 공정에서 사용하는 거시(Macro) 모델과 상대적으로 매우 작은 결함 등을 고려하는 미세(Micro) 모델로 나누고 두 모델간에 적절한 연결을 통하여 미세 모델에서의 변화를 효과적으로 분석할 수 있게 된다. Fig. 1은 업셋팅 공정의 거시 모델과 내부 기공을 고려한 미세 모델을 나타낸다. 기공의 크기가 거시 모델의 크기에 비해 매우 작을 경우 거시 모델에 기공을 표현하는 것이 현실적으로 불가능하게 된다. 이럴 경우 거시 모델과 미세 모델을 별도로 해석하는 멀티 스케일 기법이 효과적일 수 있다.

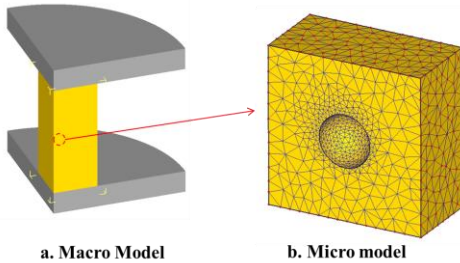


Fig. 1 Schematics of macro model and micro model

이전에 개발한 멀티 스케일 기법은 미세 모델의 체적 변화나 활용성 등에서 단점이 있었으며 이를 개선한 새로운 멀티 스케일 기법이 개발되어 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 최신 버전에 추가되었다. 멀티 스케일 해석 절차는 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 소재의 성형 공정 해석을 거시 모델로 수행하고 결함이 존재하는 지점에서의 변형 이력(변형 구배, 응력, 온도)을 추출한다. 그리고 기공을 포함한 미세 모델에 추출한 변형 이력을 경계 조건으로 부여함으로써 미세 모델의 변형을 예측할 수 있게 된다. 이때 미세 모델의 해석은 거시 모델에서의 시간 증분과 동일하게 입력하여 수행한다.

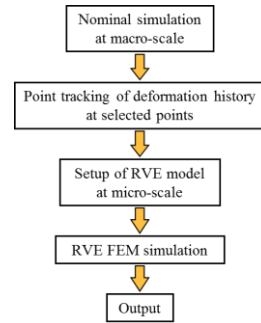


Fig. 2 Diagram of multi-scale method for the prediction of defect evolution

2.2 해석 결과

본 연구에서는 개발된 멀티 스케일 기법의 검증을 위해 소재의 중심에 원형 기공이 있고 균일한 압축을 받는 공정에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 해석 모델(Fig. 3)은 평면 변형률로 가정하여 2차원으로 수행하였으며, 소재의 중심 내부에 기공을 직접 모델링한 모델(Void Model)과 RVE(Representative Volume Element) 모델을 각각 해석하여 기공의 거동과 체적 변화량을 비교하였다.

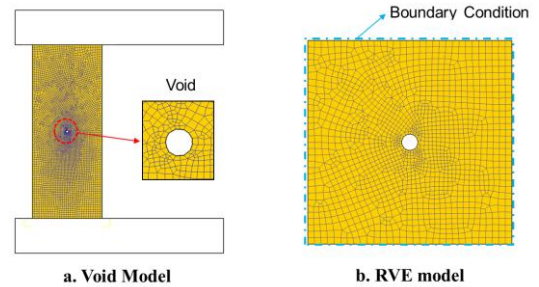


Fig. 3 Configuration of void model and RVE model

두 모델의 시간에 따른 체적 변화량을 Fig. 4에 나타내었다. Void Model은 균일한 압축이 가해짐에 따라 기공 체적이 선형으로 일정하게 감소하였고, RVE Model 역시 일정하게 감소하는 경향을 보이며 약 5 % 이내의 편차를 나타내었다. 기공 주위에 분포된 요소수를 비교했을 때, 상대적으로 RVE Model이 기공 변형 형상을 묘사하는 데 유리한 것을 알 수 있다. 더구나 형상이 복잡해지고 공정이 많아질수록 Void Model은 기공의 거동 분석이 어렵게 된다.

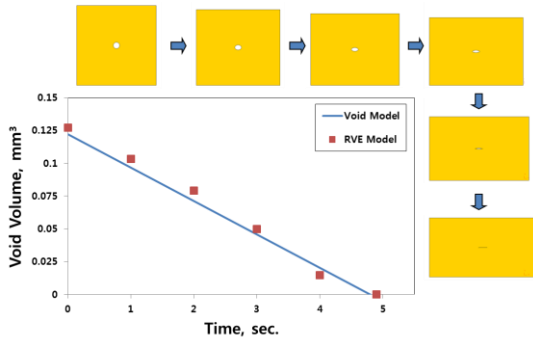


Fig. 4 Comparison of void volume between void model and RVE model

내부의 기공 뿐만 아니라 표면에서의 결함을 추적, 분석하기 위해 소재 표면에 반원 형태의 기공을 모델링하고 두가지 해석 기법에 대한 비교를 하였다(Fig. 5). 역시 평면 변형을 가정의 2차원 해석으로서 금형으로 소재를 압축하면서 표면의 기공은 금형에 의해 눌리게 된다. 표면의 기공은 점차 평평한 형태로 변하게 되어 결국은 사라지게 된다. 또한 두 모델에서의 기공 체적은 매우 유사하게 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 6).

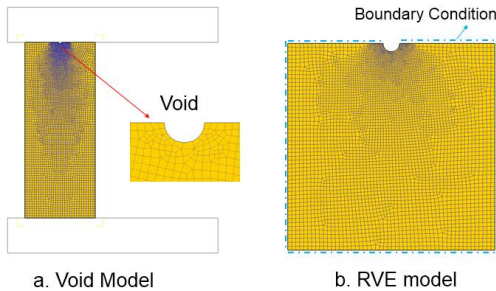


Fig. 5 Configuration of surface void model and RVE model

2차원 해석의 경우 실제 크기의 성형 모델 직접 기공을 모델링하는 것이 어느 수준의 크기까지는 가능하겠지만, 3차원 해석의 경우는 엄청난 계산 시간으로 인해 현실적이지 않다. 앞에서와 같은 방법으로 3차원의 업셋팅 해석에 멀티 스케일 기법을 적용하였다(Fig. 7).

1/4 대칭 모델로서 거시 모델로 해석을 수행하고 거시 모델의 중심과 표면으로부터 변형 이력을 추출하였다.

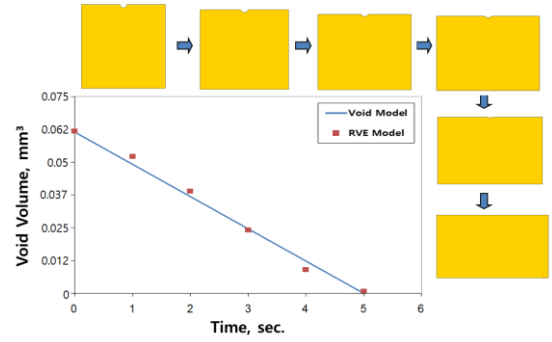


Fig. 6 Comparison of surface void volume between void model and RVE model

거시 모델의 변형 이력을 미세 모델에 경계 조건으로 부여하여 기공 결함의 거동을 분석하였다. 2차원에서의 결과와 유사하게 표면 기공은 평평해지면서 사라지게 되고 내부 기공은 압착되어 닫히게 된다(Fig. 8).

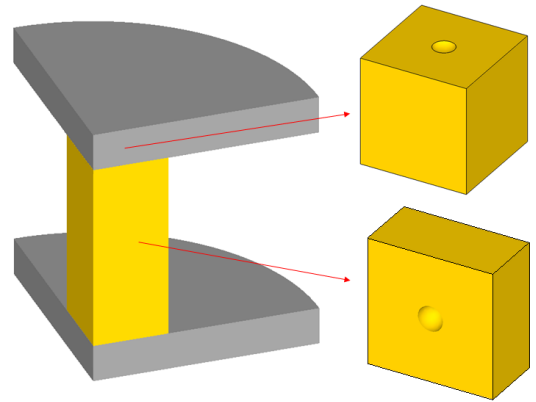


Fig. 7 Configuration of 3D model and RVE model

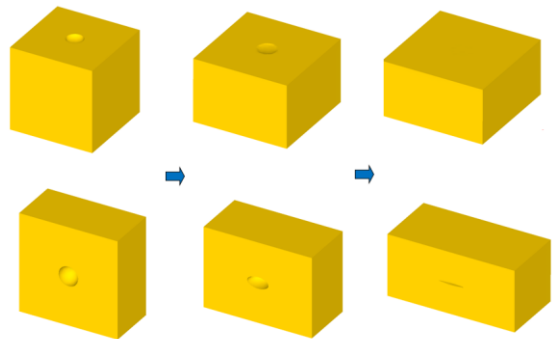


Fig. 8 Deformation behavior of RVE model

3. 결 론

본 연구에서는 멀티 스케일 유한 요소 해석을 이용하여 성형 공정에서 기공 결함의 형상 변화를 예측하였다. 검증을 위해 실제 모델에 기공을 직접 모델링한 결과와 비교하여 새로운 멀티 스케일 기법이 기공의 거동 분석에 효과적임을 확인하였다.

추후 연구에서는 실제의 압연 공정에 멀티 스케일 기법을 적용하여 압연중 소재 결함의 거동을 예측하고 또한 거시 모델의 상태 변수 등을 이용한 수식 모델의 적용 가능성을 파악하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, S. W. Lee, N. S. Kim, 2008, FE-Analysis on void closure behavior during hot open die forging process, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 57~60.
- [2] J. J. Park, 2013, Prediction of void closure in steel slabs by finite element analysis, Met. Mater. Int., Vol. 19, No. 2, pp. 259~265.
- [3] H. Yu, A. K. Tieu, C. Lu, A. R. Godbole, 2014, Investigation of closure of internal cracks during rolling by FE model considering crack surface roughness, Int. J. of Advanced Manufacturing Tech., Vol. 75, pp. 1633~1640.
- [4] K. H. Lee, S. Moorthy, S. Ghosh, 1999, Multiple Scale Computational Modeling for Damage in Composite Materials, Comput. Methods appl. Mech. Engrg. Vol. 172, No.1-4, pp. 175~201.
- [5] E. J. Kwak, G. P. Kang, K. H. Lee, I. H. Son, 2009, Prediction of defect shape change using multiple scale modeling during wire rod rolling process, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 169~172.
- [6] E. J. Kwak, G. P. Kang, K. H. Lee, 2012, A study of multiple scale FEM Modeling for prediction of inner void closing behavior in open die forging process, Trans. Mater. Process, Vol. 21, No. 5, pp. 319~323.

변형공정지도를 이용해 Gd가 듀플렉스 스테인리스 강에 미치는 영향

박성환¹·길태동¹·오일영¹·우영윤¹·문영훈[#]

The effect of gadolinium on duplex stainless steel by using deformation processing map

S. H. Park, T. D. Kil, I. Y. Oh, Y. Y. Woo, Y. H. Moon

Abstract

In this study, cracking susceptibility of PREN 50 grade duplex stainless steel is predicted by using deformation processing map. To develop deformation processing map, dynamic materials model has been used on the basis of Gleeble compression test. Deformation processing map indicating η (the efficiency of power dissipation) which means how efficiently applied power dissipated through microstructural evolution. During compression test, unit deformation volumes in specimen have different microstructure ratio because they are deformed at different working conditions. To predict cracking susceptibility, quantitative index has been suggested. As a quantitative index, summation of η multiplied by unit deformation volume fraction has been produced. For the validation of quantitative index, the predicted condition has been experimentally compared.

Key Words : deformation processing map, duplex stainless steel, compression test, cracking susceptibility

1. 서 론

듀플렉스 스테인리스 강은 페라이트 기지 위에 오스테나이트 조직이 공존하는 2 상(dual phase) 조직으로 우수한 가공성을 제공하는 오스테나이트 상과 우수한 내식성을 제공하는 페라이트 상이 결합되어 있다. 입계부식 및 응력부식균열에 민감한 오스테나이트 스테인리스 강의 단점을 보완하고 우수한 기계적 특성 및 부식 특성을 가진다[1]. 크롬, 몰리브덴, 니켈과 결합되면 국부 공식(pitting)과 틈새 부식(crevice)에 대해 더욱 우수한 저항성을 가진다. 따라서 고강도와 우수한 내식성이 동시에 요구되는 석유화학산업, 담수설비, 해양플랜트 등과 같은 산업현장에서 구조재료 이용되고 있다.

듀플렉스 스테인리스 강의 문제점은 성형 시에도 페라이트 상과 오스테나이트 상이 여전히

공존하게 되어 두 상의 열변형 민감성 차이로 인하여 가공성이 좋지 않다는 점과 변형과정에서 σ , χ 와 같은 유해한 상들이 생성되어 취성으로 인한 기계적 성질 및 내식성이 저하된다는 점이 있다. σ 상은 800~1000 °C 에서 생성되는 취약한 금속간 화합물로 충격 인성과 내식성을 급격히 떨어뜨리고, χ 상은 Fe-Cr-Mo계나 Fe-Cr-Ni-Mo계에서 생성되는 화합물로 크립 연성을 떨어뜨린다. 이를 보완하기 위해 스테인리스 강에 희토류 금속을 첨가하여 고용체 강화나 시그마상과 같은 유해한 상의 석출을 줄이는 연구가 진행중이다. 이 중 가돌리늄(Gd)을 스테인리스 강에 첨가할 경우 열간 가공성을 향상시키고 더 높은 내식성과 기계적 특성을 가지는 것으로 보고되어 앞으로의 활용가능성이 높을 것으로 기대된다[2]. 그래서 고온변형특성을 분석할 수 있는 변형공정지도는 중요한 역할을 할 것이다.

본 연구는 변형공정지도를 이용해 가돌리늄이 첨가된 듀플렉스 스테인리스 강의 고온변형특성을 분석하였다. 파워분산효율인자(η) 값을 구하

1. 부산대학교 정밀기계공학과

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과,

E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

고 이를 통해 구한 성형성 정량지수 (Formability Index)와 크랙발생조건을 비교해보았다.

2. 연구 내용

2.1 실험방법

실험 소재는 PREN 50급 듀플렉스 스테인리스 강으로 가돌리늄을 첨가하지 않은 MAT-1과 가돌리늄을 첨가한 MAT-2를 사용하였다. 소재의 물성은 Table 1과 같다. 응력-변형률 곡선을 얻기 위해 높이 15mm, 지름 10mm의 원통형 시편을 Gleeble 3500의 고온 압축모드에서 0.01, 0.1, 1, 20s⁻¹의 변형률 속도와 700에서 1200℃의 가공 온도 조건에서 50%까지 압축하였다. 금형과 시편 사이에 윤모판을 넣어 마찰을 최소화 하였다.

유한요소해석은 FORGE™을 이용하여 강의 고온 변형 특성을 분석하였다. 변형률 속도 0.01, 0.1, 1, 20s⁻¹ 와 온도 900, 1000, 1100, 1200℃의 조건하에서 진행하였다. 형상은 원통형 시편의 직경과 높이를 Φ1000/h1500으로 모델링 하였다.

Table 1 Composition of duplex stainless steel MAT-1 and MAT-2 (wt%)

Fe+Minor Element	MAT-1 Bal.	MAT-2 Bal.
Cr	27	27
Ni	7	7
Mo	4	4
Gd	-	0.001

2.2 고온 특성 평가

Prasad[3] 등이 제안한 동적재료 변형모델 (dynamic materials model)에 기초하여 고온압축실험 결과를 분석하였다. 동적재료 변형모델은 시편을 외부에서 가해진 힘을 분산시키는 힘의 분산자로 생각하여 이것의 효율성을 판단할 수 있는 파워분산효율인자(η)를 제시한다. 가장 이상적으로 힘이 분산되었을 때는 변형률 속도 민감도(m)가 1 이 되고 분산된 에너지(J)는 최대한 공급된 파워의 절반이 된다. 그러므로 η 는

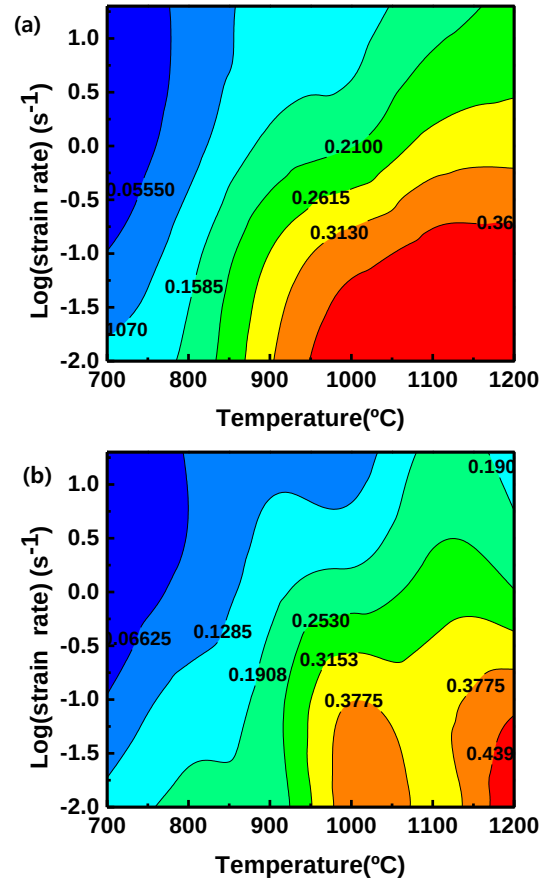


Fig.1 Deformation processing map. Each contour number represents efficiency of power dissipation (η) (a) MAT-1 (b) MAT-2

아래의 식과 같이 정의되고, 이것은 미세조직학적으로 분산된 에너지 효율을 나타낸다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (1)$$

Ziegler[4]는 고온 변형 중 재료의 안정성에 대한 연구를 하였고, 고온 변형 중 재료가 안정한 구간을 나타내는 소성 불안정 인자 $\xi(\dot{\epsilon})$ 을 식 (2)와 같이 제안하였다. 여기서 $\xi(\dot{\epsilon})$ 이 음의 값을 가질 때 소성불안정 구간으로 정의된다.

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln \frac{m}{(m+1)}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m > 0 \quad (2)$$

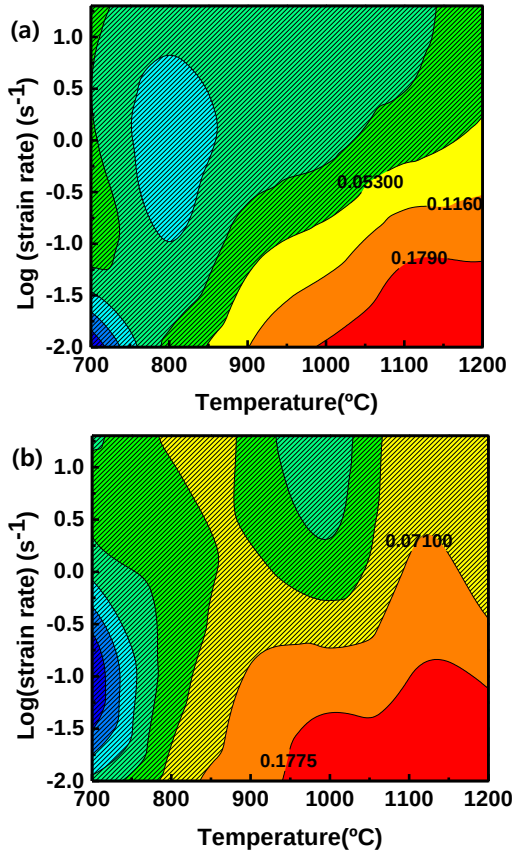


Fig. 2. Deformation processing map. Each contour number represents Ziegler parameter (ξ) (a) MAT-1 (b) MAT-2

그림 1과 2는 에너지 분산효율을 활용한 변형공정지도와 Ziegler의 소성불안정 인자를 활용한 변형공정지도를 나타낸 것이다.

3.3 성형성 정량 지수(Formability Index)를 통한 크랙 발생 조건 분석

고온 변형 특성을 분석하는데 중요한 역할을 하는 변형공정지도는 파워분산효율인자를 제시함으로써 변형 과정 중에 시편에 가해진 힘이 얼마나 효율적으로 분산되었는지를 판단할 수 있게 한다. 그러나 실제 단조품의 성형 시 단조품 내의 미소한 부분은 각기 다른 온도 및 변형률 속도를 갖는다. 이러한 미소한 부분들은 주

어진 성형조건에서 성형이 일어나는 것으로 볼 수 없고, 각기 다른 온도 및 변형률 속도에서 성형이 되고 있는 것으로 봐야 한다.

변형공정지도를 중첩시켜, 각각의 온도에서 성형된 단조품에 성형성 정량지수를 부여하기 위해 y축 Log(변형률 속도)를 단위 그룹으로 분류한 후 단위 면에 해당되는 소성안정화 구간을 나타내는 Ziegler 계수를 곱하여 성형성 정량지수를 구했다. 따라서, 제시하려는 성형성 정량지수는 아래의 (3)식으로 나타내어진다.

$$\text{Formability Index (FI)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \eta_{ij} A_{ij} \quad (3)$$

η_{ij} = j 단위 면의 i 단위 변형영역의 파워 분산 인자

A_{ij} = j 단위 면의 i 단위 변형 영역

i = 주어진 ξ , T에서의 단일 변형그룹으로 분류된 i 단위 그룹

n = 주어진 ξ , T에서의 단일 변형그룹으로 분류된 전체 단위 그룹의 수

j = 주어진 ξ , T에서의 단일 변형그룹으로 분류된 j 단위 면

m = 주어진 ξ , T에서의 단일 변형그룹으로 분류된 총 단위 면의 수

성형성 정량 지수를 통해서 두 소재에서의 크랙 발생 조건을 정량적으로 분석하였다. 그림 1과 2의 변형공정지도를 보면 온도가 높을 수록, 변형률 속도가 낮을수록 성형성 정량 지수는 높은 값을 가졌다. 그 이유는 변형공정지도 상에서 온도가 높고, 변형률 속도가 낮게 되면, η 값과 Ziegler 계수가 더 높아지게 되기 때문이다.

크랙 발생조건을 분석해 보면 낮은 온도에서 발생했고, 높은 온도에서도 변형률 속도가 빠를 때 발생하였다. 이 발생 조건은 소성안정구간을 나타내는 Ziegler 계수를 이용한 변형공정지도 경계부 조건과 흡사하였다.

그림 3은 두 수치를 이용해 나타난 성형성 정량 지수와 크랙발생조건을 비교한 그림이다.

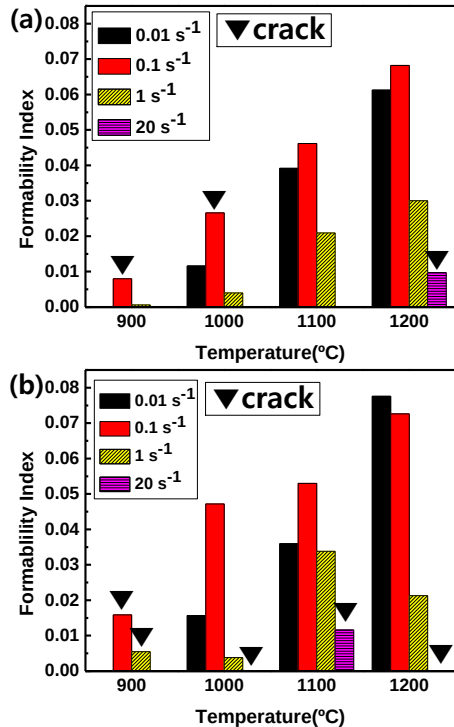


Fig. 3 Formability Index (a) MAT-1 (b) MAT-2

크랙이 발생한 조건의 성형성 정량 지수가 0.03 이상의 값을 가지지 않음을 보였다. 또한, 0.03 이하의 값은 대부분 소성 불안정 영역에 해당하는 조건 이므로 크랙이 발생한 가능성이 크다. 그러므로 성형성 정량 지수를 통해서 크랙을 일부 예측할 수 있다고 사료된다.

가돌리늄을 첨가한 소재와 첨가하지 않은 소재의 성형성 정량 지수가 조금 상승함을 확인하였다. 이는 최근 연구 결과와 같이 가돌리늄의 첨가가 고온 가공성을 향상시켜 준다고 생각된다. 하지만 1200°C의 1s⁻¹변형률 속도 조건에서 성형성 정량지수의 감소를 확인할 수 있었다. 이는 가돌리늄의 높은 산소 반응성으로 인해 복합산화물이 생성되었고, 이 산화물이 결함으로 작용한 것으로 생각된다.

4. 결론

변형공정지도를 이용해 가돌리늄이 첨가된 듀플렉스 스테인리스 강의 고온변형특성을 분석한 결과 다음의 결론은 얻었다.

1. 파워분산효율인자(n) 값을 구하고 이를 통해 구한 성형성 정량지수(Formability Index)와 크랙발생조건을 비교해 본 결과, 크랙 발생 조건이 소성 불안정 구간의 경계 조건과 흡사함을 보였고, 이 조건에서 일정 성형성 정량 지수 값 이하를 가졌다.
2. 가돌리늄을 첨가한 소재의 성형성 정량 지수는 첨가하지 않은 소재에 비해서 대부분의 조건에서 향상됨을 확인하였다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부 산업융합원천기술 개발사업 해수계통 PREN50급 초내식 주단강 소재 및 공정 기술개발 (과제번호 : 10042657)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Charles, 1991, Super duplex stainless steels: structure and properties, Duplex stainless steels'91, Vol.1, pp.151~168
- [2] Z. Khan, 2012, Influence of gadolinium on the microstructure and mechanical properties of steel and stainless steel, J. South Afr. Inst. Min. Metall., Vol. 112, pp. 309~321
- [3] Y. V. R. K. Prasad, S. Sasidhara, 1991, Hot working guide: a compendium of processing maps, ASM, America, pp.5~8
- [4] H. Ziegler, 1963, Progress in solid mechanics, John Wiley and sons, New York, pp.93

열간 사상압연에서 공정 변수에 따른 슬래브의 폭 퍼짐 예측에 관한 연구

전준배¹ · 이경훈² · 김병민[#]

Study on the prediction of slab width spread with process variables in hot finish rolling

J. B. Jeon, K. H. Lee, B. M. Kim

Abstract

The purpose of this study is to develop the advanced prediction model for width spread in hot finish rolling for controlling width precisely. To predict the amount of spread is difficult because it depends on many factors, such as the draught, temperature, rolling speed, initial shape of metal, type of steel, roll diameter, condition of roll and metal surface, etc. FE-simulations were performed to investigate the effect of process variables on width spread such as reduction ratio, forward and backward tension and initial width at each stand. From the statistical analysis of simulated data, advanced model was developed based on the existing prediction models. The experimental trials show that newly developed model provide more accurate predictions.

Key Words : Hot Rolling(열간 압연), Width Spread(폭 퍼짐), Tension(장력), Finish Rolling(사상압연), Prediction Model(예측 모델), FE-simulation(유한요소해석)

후 기

본 연구는 현대제철 산학연구과제 및 PNU-IFAM 국제 공동 연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

1. 부산대학교 기계공학부

2. 한국해양대학교 기관학부

교신저자: 부산대학교 기계공학부,

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

선재압연공정에서 롤 마모 보상 값 설정방법 연구

강한샘¹ · 이영석[#]

A Study on the setting compensation values for roll wear in continuous rod rolling

Han-Saem Kang, Youngseog Lee

Abstract

A semi-analytical model which predicts the wear contour of roll groove in rod rolling process was proposed. The wear contour was assumed to be of a second order polynomial function and computed by using the linear interpolation of the radius of curvature of an incoming material's cross section, that of roll groove and a weighting function which takes into account roll force, contact length between roll groove and material, property of roll and roll tonnage. The semi-analytical model was applied to the roughing mill of an actual rod mill and the wear contour of roll groove at each stand (pass) was predicted. Roll wear has been found to be linearly dependent on the contact length, roll tonnage, but non-linearly on the roll force and inverse proportional to hardness of work roll. Based on these wear contour, worn area were computed and then compensation values for roll wear were predicted using by reconciling the worn area and decrement of the roll gap at each stand.

선재압연에서 롤 마모형상을 예측하는 준-해석모델을 제안한다. 마모형상은 2차 다항식으로 표현된다고 가정하였고 다항식은 압연되는 소재단면의 곡률반경, 공형의 곡률반경, 압하력, -해석식은 실제 선재압연의 조압연에 적용되었고 각 스탠드(패스)에서 롤 마모형상은 계산되었다. 계산된 롤 마모형상을 기초로 해서 롤 마모면적이 계산되었다. 최종적으로 각 패스에서 롤 마모량을 보상하는 값을 롤 갭 감소와 마모면적을 같다고 하여 구할 수 있었다.

Key Words : Roll wear, compensation values for roll wear, Roll groove, Semi-analytical model, Rod rolling

1. 중앙대학교 기계공학과

교신저자: 중앙대학교 기계공학과, E-mail: ysl@cau.ac.kr

선재(봉강) 압연 공정에서 압연기 외륜 링에서 파손 원인 분석

조동혁¹ · 김태용² · 강한샘³ 변상민⁴ 이영석[#]

Cause Analysis of Fracture in Outer Ring in Mill Stand in Hot Rod (or Bar) Rolling Process

D.H Cho, T.Y Kim, H.S Kang, S.M. Byon Y Lee

Abstract

This study examined the probable causes of failure of the outer ring in the choke in the mill stand for rod (or bar) rolling by employing a sequential load transfer approach, which is applicable to the stress analysis of a large-scale structure. It calculates sequentially the stress distribution in the inner and outer roll bearing in the choke using the roll forces computed at the previous step. We made three-dimensional finite element (FE) model for the structures that includes work rolls, chock, and roll housing. Thermo-elastic FE simulations on the work rolls were conducted to predict stress state in the outer ring, inner ring, and roller dependent on material properties and location of caliber in the roll barrel. Number that a maximum contact stress occurs at the outer ring was estimated based on the number of revolution of the work roll. Cyclic stress range was then computed on the basis of the analysis results of contact stress. Finally, number of cycle to failure of the outer ring was evaluated by applying these calculation results to the high cycle fatigue model.

본 연구에서는 대형 구조물에 적용 가능한 순차적인 하중 전달 방법을 도입하여 선재(봉강) 압연기의 쇼크에 있는 외륜 링(outer ring)의 파손 원인을 조사하였다. 순차적인 하중전달 접근법은 이전 단계에서 계산된 워크롤 하중을 이용하여 순차적으로 쇼크의 외륜 및 내륜 링의 응력분포를 계산하는 방법이다. 워크롤, 쇼크, 하우징을 포함하는 구조물을 3차원 유한요소모델을 만들었다. 워크롤에 대한 열-탄성 유한요소 해석을 먼저 수행하여, 강종 변화 및 공형 위치에 따른 외륜 링, 내륜 링, 롤러의 응력상태를 계산 하였다. 워크롤의 회전 수를 바탕으로 외륜 링에 최대 접촉 응력 이 발생하는 횟수를 계산하였다. 접촉 응력 해석결과를 바탕으로 베어링 외륜 링에 발생하는 주기적인 응력 범위(cyclic stress range)를 예측하였다. 이런 계산결과를 고 피로 모델에 적용하여 외륜 링의 피로 수명을 평가 하였다.

Key Words : Rod Rolling Mill, Bearing, Roll Bearing, Chock, Fatigue, Fracture, FE simulation

1. 중앙대학교 기계공학부

2. 중앙대학교 기계공학부

3. 중앙대학교 기계공학부

4. 동아대학교 기계공학부

교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail: ysl@cau.ac.kr

종횡비를 고려한 I형 선재의 다단 형상압연 공정 설계

김남진¹ · 이경훈² · 임상혁³ · 이제문³ · 김병민[#]

Process Design of Multi-Pass Shape Rolling for I-shaped Wire Considering Aspect Ratio

N. J. Kim, K. H. Lee, S. H. Lim, J. M. Lee, B. M. Kim

Abstract

I-shaped wire is produced by multi-pass shape rolling which is type of caliber rolling and universal rolling. It is important to design the roll caliber for increase of the productivity. Roll caliber has been generally designed by major shape dimensions of final product inversely. In case that the flange width is wide and web thickness is narrow, the initial wire is apt to have high aspect ratio using above caliber design method. On the entry condition of initial wire with the high aspect ratio, it is easy to occur the deflection of wire of the horizontal asymmetry. Therefore, it is vital to divide cross-section of initial wire uniformly for dimensional accuracy.

In this study, the process of multi-pass shape rolling for I-shaped wire was designed considering aspect ratio. Deflection of initial wire at the first pass was calculated by analytical method. After that, in order to improve the horizontal asymmetry, the aspect ratio of initial wire was changed from 1.58 to 1.04. FE-simulation and experiment were conducted to verify effectiveness of the suggested aspect ratio.

Key Words : Shape rolling(형상 압연), Aspect ratio(종횡비), Caliber design(공형 설계), FE-simulation(유한요소해석), I-shaped wire(I-형상 와이어)

후 기

이 논문은 고려특수선재 사외위탁연구과제 및 PNU-IFAM 국제공동연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.

1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템전공

2. 한국해양대학교 기관공학부

3. 고려특수선재 이형선 부서

교신저자: 부산대학교 기계공학부,

E-mail:bmkim@pusan.ac.kr

Deep Drawability vs. Crystallographic Texture of Sheet metals

Dong Nyung Lee (dnlee@snu.ac.kr)

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University

The dependence of the limiting drawing ratio (LDR) on the plastic strain ratio (R) is expressed as [1,2].

$$\ln(\text{LDR}) = \eta(2+2^a R)^{1/a} / \{2[1+(R^{a/(a-1)} + R)/(1+R^{1/(a-1)})^a]^{1/a}\} \quad (1)$$

where η is a deformation efficiency to account for frictional and bending work and a is given in the following yield criteria for anisotropic materials proposed by Hosford [3].

$$F|\sigma_2 - \sigma_3|^a + G|\sigma_3 - \sigma_1|^a + H|\sigma_1 - \sigma_2|^a = 1 \quad (2)$$

where $a = 6$ for bcc metals and $a = 8$ to 10 for fcc metals. The constants F , G , and H characterizing the anisotropy may be evaluated from simple tension tests [4].

As can be seen in Eq. (1), the deep drawability is closely related to R . For planar isotropic sheets a higher R value implies higher resistance to thinning in the thickness direction, resulting in a higher LDR. For planar anisotropic sheets, the R value varies with the tensile direction. The variation of R value with tensile direction is associated with earing behavior in deep drawing. Earing occurs along the directions of higher R values.

The sheet anisotropy is closely related to the sheet texture. Methods for the prediction of R and yield stress as a function of sheet texture were proposed by many authors [5-10]. Lee [10] advanced a modified form of the V-W-F equation on the assumption that all the slip systems contribute to the deformation in proportion to their Schmid factors. The method gave satisfactory results for sheets whose texture might be approximated by one orientation. However, This gave rise to an R value of infinity instead of unity for a specimen with random orientation, because one texture component giving rise to infinite R value dominates R value of a randomly oriented specimen. Lee and Oh [11] modified the Lee equation [10] so that the R value can be unity for random orientation. The modified equation can be expressed as.

$$R = \frac{(d\varepsilon_w)_{av}}{(d\varepsilon_t)_{av}} = \frac{\sum (d\varepsilon_w)_j V_j}{\sum (d\varepsilon_t)_j V_j} = \frac{\int_v d\varepsilon_w(g) f(g) dg}{\int_v d\varepsilon_t(g) f(g) dg} \quad (3)$$

Where the subscript av indicates the average value, and expressions for $d\varepsilon_w$ and $d\varepsilon_t$ are given in Ref. [11] or p. 545 in Ref. [11]. V_j are volume fractions of texture components j .

References

- [1] D.N. Lee, *J. Mater. Sci. Letters* **3**, 677 (1984).
- [2] D.N. Lee, *Strength of Metals and Alloys* (Proc. ICSMA 7) pp. 971-976 (1985).
- [3] W.F. Hosford, R.M. Caddell, *Metal Forming – Mechanics and Metallurgy*, Prentice Hall International Editions, pp.269-272 (1983).
- [4] D.N. Lee, *Texture and Related Phenomena*, The Korean Institute of Metals and Materials, Second Edition, Chapter 7 (2014).

- [5] W.F. Hosford, W.A. Backofen, *Fundamentals of Deformation Processing*, Syracuse Univ. Press, New York, p. 259 (1964).
- [6] H.J. Bunge, *Texture Analysis in Materials Science*, Butterworths, London, p.330 (1982).
- [7] R.W.Vieth, R.L.Whiteley, *IDDRG Colloquium*, Inst.of Sheet Metal Eng. London(1964).
- [8] M. Fukuda, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 8, 68 (1964).
- [9] B. Perovic, Z. Karastojkovic, *Metals Technol.* 7, 79 (Feb. 1980).
- [10] D.N. Lee, *J. Korean Inst. Metals* **20**, 586 (1982).
- [11] D.N.Lee, Oh K.H., *J. Mater. Sci.* 20, 3111 (1985).

상대재에 따른 순철의 미끄럼 마멸속도 차이 분석

구본우¹ · 권혁우² · 김용석[#]

The influence of the counterpart on the sliding-wear rate variation in a pure iron

B. W. Gu, H. W. Kwon, Y.-S. Kim

Abstract

During the sliding wear of a ferrous metal, a subsurface layer is formed of which the microstructure, constituting phases and the mechanical property are different from those of the original wearing metal. Since the wear occurs at the layer, it is important to understand how the wear rate varies with different layers. The layers are composed of oxide layers, MMLs and deformation layers. Their formation mechanisms are known to vary depending on sliding-wear test conditions such as counterpart material and environmental conditions. In this research, two different counterparts, AISI 52100 steel and Al_2O_3 were utilized to see the effect of counterpart on the formation of the layers and subsequent wear behavior. Sliding wear tests of the pure iron were carried out to exclude other effects from the carbide and cementite phases in the air and in an Ar atmosphere. After the sliding wear test, worn surfaces, debris and cross sections were analyzed by SEM, TEM and EDS. Wear rates were analyzed by comparing constituting phases, mechanical properties and thickness of the layer, which changed with the two different counterparts and test environments.

Key Words: Sliding wear, Pure iron. Counterpart, Subsurface layer, Environment, Deformation layer.

1. 서 론

철강 재료의 미세조직, 결정구조, 상, 집합조직 등은 강의 조성, 가공법, 열처리에 따라 다양한 구성요소와 형상을 보이고, 이들 성질은 철강의 미끄럼 마멸 특성에 많은 영향을 미친다. 철강재료의 미끄럼 마멸 특성에 미치는 미세조직의 영향은 일반적으로 그 기계적 특성 차이를 통해 나타난다[1-4]. 예를 들어, 경도가 낮은 ferrite 상은 미끄럼 마멸 저항성이 낮고 경도가 높은 martensite 상 또는 pearlite 조직의 마멸 저항성은 높게 나타난다. 그러나 미끄럼 마멸 시험 중에 형성되는 표면 변형층은 초기조직과 구성 상과 미세조직이 크게 달라, 미끄럼 마멸속도의 변화를 단순한 기계적 특성으로 설명하기

어렵게 한다.

마멸 시험 중 발생하는 마찰열은 마멸면에 금속 산화물의 형성을 촉진한다[5-7]. 이러한 금속 산화물은 시험 조건과 환경에 따라 미끄럼 마멸면 직하에 수 nm 에서 수 μm 두께의 oxide film 또는 oxide layer로 존재한다. 또한, 마찰열에 의해 결정립 성장 또는 상변태 등 원자 확산과 관련된 미세조직 변화도 발생할 수 있다. 마멸면과 그 직하에는 높은 변형률의 소성 변형이 인가되므로 미끄럼 방향으로 연신된 결정립, 높은 전위밀도, 그리고 미세한 결정립 등이 관찰 된다. 또한 표면에서 떨어져 나온 마멸 입자와 금속 산화물이 서로 기계적으로 혼합되어 형성되는 기계적 혼합층(MML, Mechanically Mixed Layer)은 잘 알려진 마멸면 표층(subsurface layer)이다[8,9]. 이 같은 표면층의 기계적, 화학적 상태는 초기 소재와 매우 다르므로, 철강재료의 미끄럼 마멸

1. 국민대학교

Corresponding Author : Kookmin university, E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

특성 연구 시 이들 표면층의 형성 기구와 이들이 마멸 속도에 미치는 영향을 이해하는 것은 매우 중요하다. 표면층의 형성 기구에는 마찰 상대 재질, 시험 하중 그리고 미끄럼 속도 등의 미끄럼 마멸 시험 조건과 습도, 온도, 그리고 gas 분위기 등의 시험 환경이 영향을 미친다.

본 연구는 철강재료의 미끄럼 마멸 중 형성되는 표면층의 종류, 형상과 그 형성기구에 미치는 마찰 상대재의 영향을 규명하기 위해 수행되었고, 마찰 상대재에 따라 변화하는 표면층과 미끄럼 마멸 속도 간의 관계를 설명하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구의 소재로는 cementite 또는 여러 합금 탄화물들의 영향을 배제하기 위해 ferrite 단상 조직을 갖는 순철을 사용하였고, 시험 소재의 조성을 표 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the tested steel (wt.%)

Designation	Mn	C	Si	P	S
Pure iron	0.14	0.005	0.06	0.004	0.008

구입된 순철 시편은 가로 28 mm, 세로 28 mm, 그리고 두께 8 mm의 각재로 가공되었다. 가공된 순철 시편의 표면을 SiC 연마지(grit number 100, 400, 1000, 2000)로 연마 후, 입도 3 μm 다이아몬드 suspension으로 polishing 하고, 마멸 시험을 행하였다. 순철 시편의 미끄럼 마멸실험은 ball-on-disk 마멸시험기를 사용하여 상온 대기 중 (습도 $36 \pm 3\%$)과 Ar 분위기에서 건식으로 수행되었다. 시험 하중은 100 N, 미끄럼 속도는 0.1 m/s, 미끄럼 거리는 300 m로 하였다. 순철 디스크의 마멸 상대재 볼(ball)로 AISI 52100 베어링강과 세라믹 소재 alumina (Al_2O_3)를 사용하였다. 미끄럼 마멸 시험 전 후 순철 시편의 무게변화를 전자저울을 이용하여 측정하고, 이 값을 시편의 밀도와 미끄럼 거리로 나누어 마멸속도를 산출하였다. 순철 시편의 미끄럼 마멸 시험 후 마멸단면을 SEM과 EDS로 분석하고 마멸면 직하 micro-Vickers 경도를 10 g 하중으로 깊이 방향으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1에 상대재와 분위기를 달리하여 시험된 순철 시편의 미끄럼 마멸 속도를 비교하여 나타내었다.

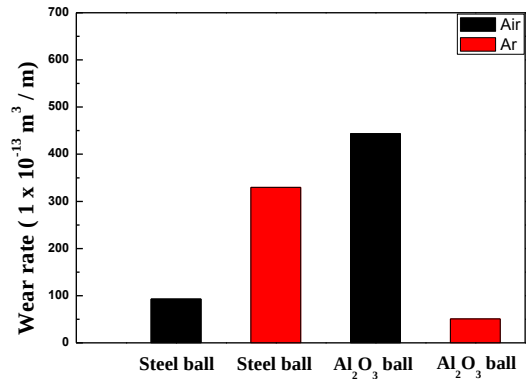


Fig. 1 Comparison of wear rates of the pure iron tested against different counterparts under different environments.

Steel ball을 상대로 한 순철의 미끄럼 마멸속도는 대기 중에서 $93 \text{ m}^3/\text{m}$, Ar 분위기에서는 그보다 매우 높은 $329.8 \text{ m}^3/\text{m}$ 로 나타났다. Ar 분위기에서는 특히 미끄럼 마멸 시험 중 약 52 m의 미끄럼 거리에서 상대재인 steel ball이 ball holder에서 이탈되는 현상이 발생되었다. Al_2O_3 ball을 상대로 한 순철의 마멸속도는 대기 중에서 $443.4 \text{ m}^3/\text{m}$ 로 steel ball을 상대로 한 경우보다 매우 높았던 반면, Ar 분위기에서는 $50.64 \text{ m}^3/\text{m}$ 로 가장 낮게 나타났다. 즉, 순철의 미끄럼 마멸 속도에 미치는 상대재의 영향은 시험 환경에 따라 상반되었다.

각기 다른 시험 환경과 상대재로 미끄럼 마멸 시험된 순철의 마멸 단면의 micro Vickers 경도를 마멸면 직하 깊이 방향에 따라 측정하여 그림 2에 나타내었다. 마멸면 직하 10 μm 깊이에서는 Ar 분위기에서 Al_2O_3 ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편의 마멸단면이 평균 848 HV로 가장 높은 경도를 보였고, 대기 중에서 steel ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편의 마멸단면이 두번째로 높은 590 HV의 경도를 나타내었다. 이는 순철 시편의 낮은 미끄럼 마멸속도와 관련된 것으로 보인다. 반면에 미끄럼 마멸속도가 높았던 대기 중에서 Al_2O_3 ball을 상대

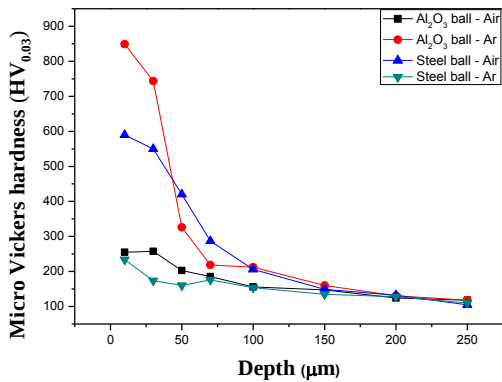


Fig. 2 Micro Vickers hardness variation as a function of depth from the worn surface

로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편과 Ar 분위기에서 steel ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편의 단면 경도는 마멸면 직하 10 μm에서 각각 255 HV, 234 HV로 낮은 값을 보였다. 또한 각각 다른 네 가지 조건의 시험 모두 마멸 단면의 깊이가 깊어질수록 기지의 경도값을 나타냈고, 100 μm 정도 깊이에서 비슷한 경도를 보였다. 이것은 마멸시험 중 마멸면에 형성되는 표면층(subsurface layer)의 두께가 100 μm 이하임을 나타낸다. 다만 특이한 것은 Ar 분위기에서 Al₂O₃ ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편에서 깊이가 30 μm에서 50 μm로 더욱 깊어질 때 경도의 급격한 하락을 보인 점이다. 이 같은 경도의 차이는 30 μm와 50 μm 깊이에서의 미세조직이 서로 다른 때문으로 해석된다. 시험 분위기와 상대재에 따라 경도 분포가 달라지는 것은 시험 조건에 따라 마멸면 직하에 각기 다른 미세조직이 형성되는 것을 나타낸다.

그림 3은 서로 다른 시험 조건에서 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편의 마멸면을 SEM으로 관찰한 결과이다.

대기 중에서 steel ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험되어 낮은 마멸속도를 보였던 순철 시편(그림 3(a))의 마멸면 직하층을 EDS 분석한 결과 Fe, O, 그리고 상대재인 AISI52100 steel ball의 성분 중 하나인 Cr이 확인되었다. 이러한 결과는 순철 시편의 마멸입자들과 steel ball의 마멸입자들이 반복적으로 천이(순철 시편 표면에서 steel ball 표면으로 또는 steel ball 표면에서 순철 시편 표면으로)되면서 서로 혼합되어 MML이 형성되었

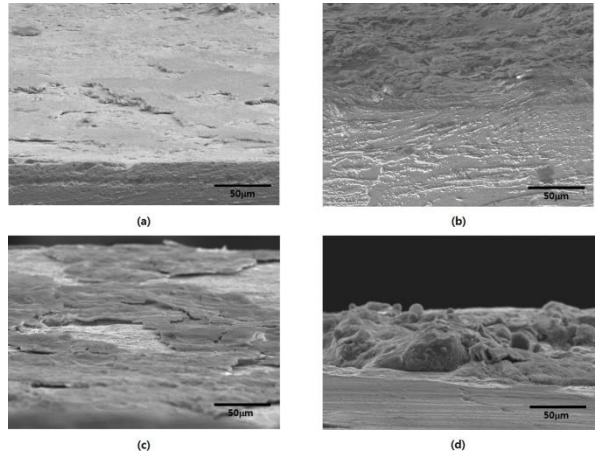


Fig.3 Worn surfaces of the pure iron tested against (a) bearing steel in the air, (b) bearing steel in Ar, (c) Al₂O₃ in the air (d) Al₂O₃ in Ar.

음을 보여준다. Ar 분위기에서 steel ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편은 대기 중에서 steel ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편에 비해 매우 거친 마멸면을 나타내었다(그림 3(b)). 이러한 결과는 Ar 분위기에서 산화막의 형성이 억제되어 순철 시편과 steel ball이 서로 강하게 응착되었음을 시사한다. 따라서 상대재인 steel ball이 미끄럼 거리 52 mm에서 holder로부터 이탈 된 것은 두 시편이 강하게 응착된 때문으로 설명될 수 있다. 대기 중에서 Al₂O₃ ball을 상대로 시험된 순철 시편의 마멸면(그림 3(c))은 나무껍질 형상의 층이 형성되어 있는 것이 관찰되었는데, EDS 분석에서 Fe와 O로 이루어져 있고 Cr 등의 상대재인 steel ball의 성분은 검출되지 않았다. MML의 형성보다는 산화물층이 마멸면에 형성되어 산화마멸이 주로 일어난 것으로 해석되었다. 그림 3(d)는 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편들 중 가장 높은 경도를 보였던 Ar 분위기에서 Al₂O₃ ball을 상대로 미끄럼 마멸 시험된 순철 시편의 마멸면이다. 다른 미끄럼 마멸 시험 조건에서 형성되는 변형층과는 다른 50 μm ~ 70 μm 두께의 특이한 층 형성된 것을 확인하였다. 이 마멸면 직하의 층을 EDS로 분석한 결과 Fe로만 이루어진 것을 확인하였고, 마멸 파편들이 떨어져 나가지 못하고 지속적인 변형을 받아 형성된 층으로 분석되었다. 높은 변형으로 인하여 매우 심화된 결정립미세화와 높은 전위밀도가 확인되었고, 이에 따라 높은 경

도와 낮은 마멸속도가 나타난 것으로 설명되었다.

4. 결 론

순철의 미끄럼 마멸속도가 상대재의 종류에 따라 다르게 나타나는 원인을 알아보기 위해 AISI 52100 steel ball과 Al_2O_3 ball을 상대로 상온 대기 중과 Ar 분위기에서 미끄럼 마멸시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 대기 중에서 steel ball을 상대로 시험한 순철의 경우 transfer와 back transfer의 반복으로 산화물과 기지, 상대재의 입자가 뒤섞여 형성된 MML이 마멸면과 상대재의 마찰표면에 형성되었고, 이 MML 층 간의 마멸로 낮은 마멸속도가 측정되었다.

(2) 대기 중에서 Al_2O_3 ball을 상대로 시험한 순철의 경우 비금속인 Al_2O_3 에 의해 back transfer가 이루어지지 않아 산화물과 기지 금속으로만 이루어진 산화물 층이 형성되었다. 이로 인해 높은 하중 하에서도 산화마멸이 발생하였고, 마멸속도 또한 높았다.

(3) Ar 분위기에서 steel ball을 상대로 시험한 순철의 경우 산화막 형성이 억제되었고, 금속간 접촉은 강한 응착을 일으켜 시험 중 상대재의 이탈이 발생하였다.

(4) Ar 분위기에서 Al_2O_3 ball을 상대로 시험한 순철의 경우 산화물 층이 형성되지 않았고, 응착 또한 발생하지 않았다. 이로 인해 순철에는 매우 심한 변형으로 SPD와 유사한 기구로 매우 작은 크기의 결정립이 형성되고 전위밀도가 매우 높아져 높은 경도와 낮은 마멸속도가 나타났다.

이들 결과는 순철의 마멸속도가 상대재의 종류에 따라 다르게 나타나는 원인이 마멸시험 중 형성되는 마멸면 표면층 때문임을 보인다.

참 고 문 헌

- [1] N. Jin, 1997, Effect of microstructure on rolling, sliding wear of low carbon bainitic steels, *Wear* 202, pp. 202~207
- [2] C.C. Viàfara, 2005, Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels, *Wear* 259, pp. 405~411
- [3] P. Clayton, 1996 Unlubricated sliding and rolling sliding wear behavior of continuously cooled, low/medium carbon bainitic steels, *Wear* 200, pp. 74~82
- [4] V. Abouei, 2008, An investigation of the wear behaviour of 0.2% C dual phase steels, *J. Mater. Process. Technol.*, 203, pp. 107~112
- [5] I. M. Hutchings, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Anold London (1992), p.88-105
- [6] I. Haq, T.I. Khan, 2011, Tribological behavior of electrodeposited Ni-SnO₂ nano-composite coatings on steel, *Surface and Coatings Technology*, 205, pp.2871~2875
- [7] N.F. Garza-Montes-de-Oca, W.M. Rainforth, 2009, Wear mechanism experienced by a work roll grade high speed steel under different environmental condition, *Wear*, 267, pp.441~448
- [8] .M. J. Ghazali, W. M. Rainforth, M. Z. Omar, 2007, A comparative study of mechanically mixed layers (MMLs) characteristics of commercial aluminium alloys sliding against alumina and steel sliders, , *J. Mater. Process. Technol.*, 201, pp.662~668
- [9] John L. Young Jr., Doris Kuhlmann-Wilsdorf, R. Hull, 2000, The generation of mechanically mixed layers (MMLs) during sliding contact and the effects of lubricant thereon, *Wear*, 256, pp.74~90

텐션레벨러에서의 판재 변형해석 기술 개발 및 형상 교정 조건 설정 적용

박기철^{1#} · 오경석¹

Deformation Analysis Technique of Tension Leveling and Its Application for Optimizing Leveling Conditions

K.C. Park, K.S. Oh

Abstract

In order to investigate deformation characteristics of tension leveling and optimizing process conditions for improving sheet flatness, deformation analysis technique is developed. Sheet is divided in several elements along width direction and applied tension is distributed at each element by adapting tension distribution factor and sheet initial steepness. Deformation of each element at each work roll is computed by bending-unbending under tension and the continuity conditions along width are assessed and flatness levels after final work roll are estimated. The computed results show same tendency with experiment and the developed technique is applicable for optimizing tension leveling conditions.

Key Words: Tension Leveling, Wave, Steepness, Sheet Steel Flatness, Bending-Unbending under Tension

1. 서 론

텐션레벨러 (tension leveler) 는 극속박판의 평탄도에 대한 요구가 엄격해짐에 따라서 발전된 판재의 형상 교정 장치이다. 롤러레벨러 (roller leveler) 가 반복적인 굽힘 변형에 의하여 주로 판재의 만곡을 교정하는 것에 비하여 텐션레벨러는 가공롤 (work roll) 에 판재가 굽힘변형을 받으면서 연신이 발생하도록 충분한 길이 방향 인장력을 적용하여 판재에 발생된 이파(edge wave) 나 중파 (center buckle) 등 부분적인 길이 차이에 따른 형상 불량을 교정하게 된다[1]. 압연 후의 강판 평탄도는 급준도로 0.2%~2.0% 의 범위로 편차가 크게 발생한다. 최신 압연기에서는 우수한 형상 교정 능력을 갖추고 있으나 형상 검출기 능력한계로 형상 편차가 존재한다. 현재 요구되는 평탄도는 급준도로 0.4% 이하이나 0.2% 이하도 일반화 되고 있다[2]. 적절한 설비로 구성되어 최적 조건으로 작업되는 텐션레벨러에서는 형상 검출과 제어 과정 없이 이러한 평탄도 수준을 만족시킬 수 있다[3].

텐션레벨러는 레벨링 부분 (leveling unit) 앞과 뒤에 인장력을 가하기 위한 브라이들 롤 (bridle roll) 을 이용해서 항복응력의 1/5~1/2 정도의 인장력을 판재에 가한다[1]. 작은 직경 롤들을 배열하고 이들이 판재에 대하여 상부와 하부로 교차로 돌출하게 하여 반복적인 굽힘 변형 중에 신장 변형이 발생하는데, 레벨러 전단부의 신장부분에 의하여 가해지는 연신율은 통상 0.1-2.0% (형상 교정용은 1% 이하가 대부분) 정도이다. 후단부에서는 연신부에서의 굽힘 변형에 의하여 발생하는 폭 방향 만곡 (C 만곡, Gutter) 및 길이방향 만곡 (L 만곡, Curl)을 교정한다. 교정 후 판재의 급준도 (steepness) 가 0.1% 에 달하는 경우 거의 평탄한 형상을 얻은 것으로 볼 수 있다[1].

1. POSCO Steel Solution Marketing Dept.

교신저자: 포스코 철강솔루션판매실, E-mail: parkkc@posco.com

많이 사용되는 텐션레벨러의 구조를 Fig.1 에 나타내었다. 이들 구조 중에서 Type A 는 일반탄소강 및 스텐레스의 소둔재 용으로 자주 사용되는데, 교정 장력이 비교적 작아 신장 부분에서 C 만곡이 발생하지 않아 L만곡 교정 장치만 설치한 것이다. Type B 는 일반 탄소강 및 스텐레스의 고강도재 (항복강도 800MPa까지) 를 대상으로 한다. 신장 부분에서 C만곡이 발생하므로 C만곡과 L만곡 교정부를 갖추고 있다. Type C 는 L 만곡을 더욱 안정화 시킬 필요가 있을 때 적용한다. 항복강도가 800MPa 를 초과하는 재료, 속도가 800m/min 을 초과하는 설비, 블랭크 만곡 (blank bow) 이 문제되는 재료에 사용한다 [3].

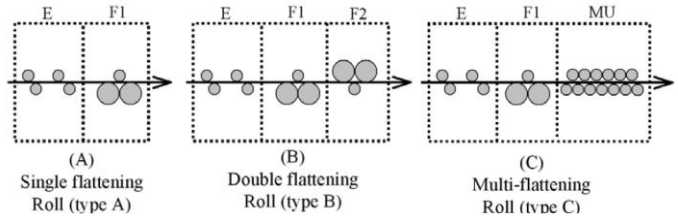


Fig.1 Leveling roll arrangement of typical tension levelers [3].

본 연구에서는 이러한 텐션레벨러의 교정과정에서의 소재 변형 해석 기술을 개발하고, 이를 이용한 교정 조건 설정에 적용한 사례 및 이를 통한 활용 방안을 소개한다.

2. 텐션레벨러 변형 해석 기술

2.1 텐션레벨러에서의 인장 변형 해석

텐션레벨러는 인장에 굽힘 변형이 같이 작용하는 (bending-unbending under tension) 경우는 단순 인장에 비하여 작은 인장력에서 재료가 인장변형을 한다는 Swift 가 밝혀낸 성질을 이용하고 있다[1]. 이러한 인장력 작용 조건에서의 굽힘변형을 텐션레벨링 공정에 작용하여 해석하는 기술은 Misaka 등[4]이 개발하였으며, 본 연구에서는 수치 알고리즘과 재료특성 반응을 개선한 박기철등[5]의 방법으로 텐션레벨러에서의 인장력 조건 굽힘변형을 계산하였다.

2.2 텐션레벨러에서의 형상 (wave) 교정 과정 해석

2.2.1 길이 차이를 반영한 변형 과정 해석

길이방향 요소의 선길이가 폭위치별로 다르기 때문에 긴 요소는 압축력을 받게 되어 좌굴이 발생하여 파형 (wave) 이 나타나게 된다. 파형은 일반적으로 파고(h)와 파장(L)의 비인 급준도 (steepness) 로 나타내는데, 파형을 sine curve 로 가정하면 급준도로부터 파형 부분의 연신을 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta L/L = 2.47(h/L)^2 \quad (1)$$

위의 식(1)에서 L 은 길이 방향의 파형이 없는 부분 길이 이며 ΔL 은 파형 부분의 길이 증가 이다.

텐션레벨링 하기 전의 소재를 판폭 방향으로 분할 ($j=1\sim m$)하고 초기 급준도 λ_0 에 대응하는 각 요소의 초기 길이 ($L_{01}, \dots, L_{0m}$) 를 설정한다. 그리고 판재 전체에는 평균 인장응력 σ_T 를 가한다. 각 요소에 작용하는 σ_{Tj} 는 Hira 등[6]과 같이 인장력배분인자 (tension distribution factor) 를 도입한 식(2)와 같이 해서, 인장력 배분인자 ϕ 를 도입하여, 폭 위치별 요소의 선 길이에 대응하여 각 요소에 배분하였다.

$$\sigma_{Tj} = \sigma_T + \left(1 - mL_j / \sum_{k=1}^m L_k\right) \phi \quad (2)$$

L_j 는 요소 j 의 i 번째 롤 입측에서 길이이며, $i=1$ 에서는 초기 길이이다. 임의 시점에서 ϕ 를 크게하면 짧은 선길이이 대한 σ_{Tj} 는 커져서 교정은 급격하게 진행되나 롤통과 후에는 반대로 계산상으로 길이가 길어지는 역전 현상이 발생할 수 있다. 실제로는 I 롤의 입측에서 길이가 긴 요소는 파형으로 나타나며, 짧은 길이의 요소가 긴 요소와 동일한 길이로 늘어나면서 장력의 일부가 긴 요소에도 배분되어 같은 길이로 (계산상에서는 급준도 0.05% 이하로) 변형된다고 볼 수 있으므로 길이의 역전은 발생하지 않는다. 한편

ϕ 가 작은 경우는 급준도 개선이 더디게 된다. 또한 길이 역전이 발생하는 ϕ 의 크기보다는 작은 범위에서 긴 요소에 압축응력이 작용하게 되는 경우가 있다. 이런 경우 실재는 과형이 되며 이때 짧은 요소에서 압축응력에 상당하는 인장응력 증가는 나타나지 않는다. 따라서 각 요소는 다음 식을 만족할 필요가 있다.

$$\sigma_{Tj} \geq 0 \quad (3)$$

계산상에서는 각 롤에서 위의 식을 만족하고, 길이의 역전이 발생하지 않는 한계내에서 가능하면 큰 ϕ 를 적용하는 것이 타당하다고 가정하고 계산하였다. 폭 각 부분 요소의 인장력 분포가 결정되면 2.1절의 방법으로 각 요소의 변형을 계산한다. 선길이 역전을 허용하지 않고 식(3)을 만족하기 위해서는 반복계산을 수행하게 된다.

2.2.2 레벨링 후 탄성 회복 과정 계산

변형 과정에서 같은 길이로 (또는 길이 차이가 작게) 늘어난 폭 방향 각 요소에 작용하는 응력은 크기가 서로 다르다. 따라서 인장력을 제거하는 경우 각 부분의 탄성회복량이 달라지는데 이에 의하여 교정 후의 형상이 결정된다. 전체적인 인장력이 영으로 되는 제하과정은 각 요소에 작용하는 인장응력에 평균 인장응력을 빼서 구하였다. 따라서 초기에 길이가 긴 요소에서는 압축응력이 작용하며, 압축응력이 Euler's Column Formula[6]의 좌굴발생응력보다 크게 작용하는 경우 좌굴이 발생하여 이 부분 응력은 거의 영이되고 따라서 모든 인장응력 작용부는 응력이 영인 상태로 탄성회복 한다.

그러나 인장력을 제하한 상태에서 판폭의 일부에 작용하는 압축응력이 좌굴하중보다 작은 경우는 이 부분에서 약간의 압축응력이 잔존하기 때문에 인장력이 작용하는 부분에서는 인장응력이 계속 작용하여 추가적인 탄성회복은 나타나지 않는다. 본 연구에서는 각 요소에 평균인장력을 제하한 후에 압축 응력과 좌굴발생조건식을 비교하여 압축응력이 좌굴하중보다 큰 경우는 이 부분 인장응력이 영이 되는 조건으로 응력 분포를 수정하여 탄성회복 시켰으며, 이에 따른 잔류 급준도를 구하였다.

2.3 텐션레벨러에서의 교정 실험과 해석 결과 비교

교정 전에 인위적인 과형을 Fig.2 와 같은 롤 1개를 통과하고 이어서 20mm 간격 (pitch) 으로 배치된 30mm 직경의 3개 롤에서 교정을 하는 방법으로 시험하였다. 소재는 폭이 45mm 여서 양쪽 가장자리의 7.5mm씩이 롤의 경사부에 접촉하고 4% 연신이 가장 끝부분의 소재가 받도록 하였다. 실험에서 D=100mm, D'=100.65mm 이다. 시험에 사용한 소재는 0.24mm 두께의 T1 (항복강도 222MPa) 급 소재와 0.20mm 두께의 T4 (항복강도 296MPa) 이다. 시험 결과는 Table 1 에 정리하였다. 실험과 본 연구에 따른 해석 결과가 대체로 일치하는 경향을 보임을 알 수 있다.

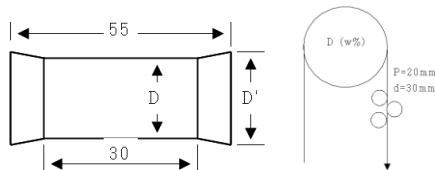


Fig.2 Wave making roll (80 and 100mm diameter) and leveling roll (30mm diameter, 3roll).

Table 1 Leveling experimental and computed result.

Material	Tension (kgf)	Intermesh (mm)	Initial Steepness (%)	Leveled Steepness (%)	
				Experimental	Computed*
T4, 0.20t	100	1.0	1.73	1.62	1.21
		2.0	1.42	1.19	0.75
		5.0	1.57	0.00	0.06
		0.5	1.10	1.10	0.77
T1, 0.24t	60	1.0	1.05	0.43	0.63
		2.0	1.03	0.08	0.08
		0.5	1.45	1.17	0.90
	100	1.0	1.80	0.43	0.77
		2.0	1.63	0.04	0.04
		0.5	1.63	0.04	0.04

*) L (wave length) = 55mm for T4 0.20t and 62mm for T1 0.24t from experiment

3. 형상 교정 조건 설정 활용

3.1 평탄한 형상을 얻기 위한 필요 연신율

텐션레벨러 (Fig.3) 에서 0.6t (두께 영향은 0.4t, 0.8t 포함) 에 항복강도 260MPa (항복강도 영향은 240MPa

및 280MPa 포함) 소재의 교정 조건 변경에 따른 연신율과 급준도의 변화를 Fig.3 에 정리하였다. 두께가 달라도, 일정 연신 조건에서 교정이 되며, 초기 파형과 소재 강도가 증가하는 경우는 필요 연신이 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 실용적으로 많이 사용되고 있는 “평탄한 형상을 얻기 위한 필요 연신율 = $2.47 \times (\text{급준도})^2 + \text{항복강도/탄성계수}$ ” 을 실용적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

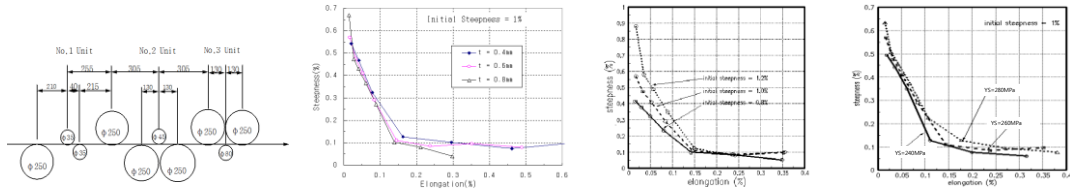


Fig.3 Analyzed tension leveler and steepness change due to leveling elongations.

3.2 텐션레벨러에서의 만곡 교정 조건

항복강도가 480MPa 인 강판에 있는 1% 급준도 교정을 위한 연신율 0.26% 를 가하면서 만곡이 없는 교정 조건을 본 연구의 해석 기술로 검토한 결과가 Table 2 이다. 소재 연신을 위해서는 No.1 Unit 의 인터메시(intermesh)인 IM1 이 중요하며, C만곡(Gutter)은 IM2 를 조정하는 경우에 그리고 L 만곡은 IM2 와 IM3 에 모두 영향을 받고 있다. 따라서, 인장력 및 IM1, IM2, IM3 를 적절한 순서로 조정하면서 해석함에 의해서 교정 조건 설정이 가능함을 알 수 있다.

Table 2 Manual computing procedure for finding tension leveler conditions and their results.

Mat.	Thick.	Width	IM1	IM2	IM3	Unit Ten.		Ten	Elong. (%)		Curl	Gutter
	mm	mm	mm	mm	mm	kgf/mm ²	kgf/mm	tonf	Loading	Unloading	m ⁻¹	m ⁻¹
YS=480M Pa, 1.21t	1.21	1382	7.0	1.0	1.0	6.00	7.26	10.03	0.097	0.070	2.2100	0.2964
	1.21	1382	8.0	1.0	1.0	6.00	7.26	10.03	0.116	0.089	2.3950	0.5017
	1.21	1382	8.0	1.0	1.0	8.00	9.68	13.38	0.184	0.149	2.4750	0.6278
	1.21	1382	9.0	1.0	1.0	8.00	9.68	13.38	0.230	0.195	2.6750	0.8539
	1.21	1382	9.0	1.0	1.0	8.40	10.16	14.05	0.255	0.219	2.6950	0.8832
	1.21	1382	9.0	4.0	1.0	8.40	10.16	14.05	0.256	0.220	1.7530	0.9428
	1.21	1382	9.0	10.0	1.0	8.40	10.16	14.05	0.268	0.231	-0.8459	0.7399
	1.21	1382	9.0	12.0	1.0	8.30	10.04	13.88	0.269	0.233	-1.0480	0.4091
	1.21	1382	9.0	14.0	1.0	8.20	9.92	13.71	0.274	0.238	-1.0840	0.0575
	1.21	1382	9.0	14.0	5.0	8.00	9.68	13.38	0.254	0.220	-1.0710	0.0627
	1.21	1382	9.0	14.0	8.0	8.10	9.80	13.54	0.264	0.229	0.0595	-0.1615
	1.21	1382	9.0	13.0	8.0	8.15	9.86	13.63	0.262	0.226	0.1779	-0.0381
	1.21	1382	9.0	13.0	7.5	8.15	9.86	13.63	0.261	0.226	-0.0424	0.0064

4. 결 론

텐션레벨링에서의 판재 변형해석 기술을 개발하고 이를 형상 교정 최적화에 적용하여, 이 기술이 텐션레벨링에서의 소재 변형과 최적 공정 설정을 위한 시험의 초기 조건 설정에 활용 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 日本塑性加工学会, 1991, 橋正加工, 塑性加工技術シリーズ 15, pp.90-129.
- [2] K. Kaneshige, 1993, Flatness Requirement for Metal Strip and Tension Leveller Specification, 15th Symp. of the JSTP, pp.53-65.
- [3] 阿部 敬三, 2013, 板形状矯正設備の最前線, 日本塑性加工学会 第129 回塑性加工講座, pp.1-19.
- [4] Y.Misaka and T.Masui, 1976, Shape Correction of Steel Strip by Tension Leveller, JSTP, Vol.17, No.191, pp.988-994.
- [5] 박기철, 전영우, 정기조, 1997, 박강판 제조 공정에서의 소재 굽힘 변형과 잔류 만곡 발생 해석, 한국소성가공학회지, 제6권2호, pp.118-135.
- [6] T.Hira, H.Abe and S.Azuma, 1988, Analysis of Sheet Metal Deformation under repeated bending in Process Lines and Its Application, Technical Report of Kawasaki Steel, Vol20, No.1, pp.7-13.
- [7] S.P.Timoshenko and J.M.Gere, 1961, Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book Company.

알루미늄 합금에서의 통전 소성 거동에 대한 연구

김문조¹ · 정혜진¹ · 박주원¹ · 홍성태² · 이명규³ · 한홍남^{1#}

Electroplasticity in aluminum alloys

M.-J. Kim¹, H.-J. Jeong¹, J.-W. Park¹, S.-T. Hong², M.-G. Lee³, H.N. Han¹

Abstract

Electrically-assisted forming is an emerging technique, in which the mechanical property of a metal can be enhanced by simply applying electricity to the metal during deformation. General observations of electrically assisted deformation include reduced plastic flow stress and increased ductility. However, the governing mechanism of electrically assisted deformation is still controversial. In this research, effect of electric current on aluminum alloy under uniaxial tension was investigated based on microstructural analysis. The tensile test was carried out under periodically pulsed electric current. The thermal effect due to the joule heating was measured the temperature profile by an infra-red thermal camera. Microstructure was observed by electron backscatter diffraction (EBSD), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM). The effect of electroplasticity on the deformation behavior was then discussed based on the microstructural changes of the specimen.

Key Words : English Key Word: Electroplasticity; Aluminum alloy; Annealing; Aging; Fracture.

1. 서울대학교

2. 울산대학교

3. 고려대학교

1.# 교신저자: 서울대학교, E-mail:hnhan@snu.ac.kr

스탬핑용 고강도강 TRB 판재의 성형 특성

박시준¹ · 이현철¹ · 정우영¹ · 박현경² · 박진우² · 송종호[#]

The formability of high strength steel plate applied TRB for stamping

S. J. Park, J. H. Song, H. C. Lee, W. Y. Chung, H. K. Park, J. W. Park

Abstract

Recently, research for lightweight of automobile is continuously increasing to response high safety standard and environmental regulation. Application of high strength steel is one of effective methods for developing lightweight car body. A TWB(Tailor Welded Blank) is major method that allows partial high strength with light weighting by using multi-thickness and multi-material welded blank. However, additional welding process is required for preparing blank and quality control for welding process also required. In order to secure this point, TRB(Tailor Rolled Blank) method was suggested. In TRB, Thickness of sheet controlled by rolling presses and production efficiency is much higher than welding in TWB methods. In the study, the formability of high strength TRB steel plate was analyzed for investigating rolling effect of blank. The formability of specimen was tested by thickness of 0.8 and 1 mm of steel sheets of TRB plate. The strain was analyzed by digital image sensing of grid markings on the specimen and forming limit diagram was calculated. And cup drawing test for thickness of 0.8 ~ 1.2 mm TRB specimen was carried out and formability was investigated by comparing with FE analysis.

Key Words : TRB(Tailor Rolled Blank), FLD(Forming limit Diagrams) Test, formability, Forming, high strength steel

1. 자동차부품연구원 전남본부 소재융합연구센터

2. ㈜동해금속

교신저자: 자동차부품연구원 전남본부 소재융합연구센터,
E-mail: jhsong@katech.re.kr

단조 성형해석을 통한 비대칭 Weld Nut 개발

이종범¹ · 김동수¹ · 설주연¹ · 서재윤¹ · 박종혁¹ · 이광희[#]

Development of a Weld Nut with Elliptic-shape Optimized by Forging Analysis Tool

J.B.Lee, D.S.Kim, J.Y.Seol, J.Y.Seo, J.H.Park, K.H.Lee

Abstract

본 연구에서는 냉간 단조 공법을 적용하여, 비대칭 날개면의 최적 설계 방안을 연구하였다. 본 연구에서 개발 하고자 하는 비대칭 날개 형상을 가진 웰드 너트는 포머 공정에서 비대칭 날개 부위를 burr 발생 없이 성형을 하고, 또한 양산성을 확보하는 것이 주요 목표이다. 본 연구를 위해 단조 공정도를 설계 하였고, burr 발생 공정을 최소화하기 위한 성형 해석을 진행하여 최적의 공정을 확보하였다. 최적공정을 확보한 후 금형 제작 및 시제품 제작을 하였고, 이에 대한 검증을 하는 방식으로 진행하였다..

Key Words : Cold Forging Process, Forging Analysis Tool(AFDEX), Weld Nut with elliptic-shape

1. ㈜ 풍강

교신저자: ㈜풍강 기술연구소, E-mail: kwangheeleee@pungkang.co.kr

냉간포머용 항복비제어강을 이용한 8T급 볼트 특성

이영선^{1#} · 이창길¹ · 최정목²

Characteristics of 8T-bolt using the Yield-Ratio-Control-Steel for Cold Former

Y. S. Lee^{1#}, C.G. Lee¹, J.M. Choi²

초 록

항복비제어강은 항복강도를 조절함으로써 항복비를 제어하는 철강소재로서 동일한 인장강도라도 항복강도를 감소시켜 단조하중을 감소시킴으로써 금형수명을 향상시킬 수 있는 장점을 냉간단조 공정에 이용할 수 있다. 또한, 냉간단조 후에는 가공경화 효과에 의해 요구 강도를 얻을 수 있음으로써 단조 후 열처리(Quenching/Tempering) 공정을 생략할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 냉간포머용 항복비제어강을 이용하여 인장강도 80kgf/mm²급 자동차용 볼트를 제조하고 그 특성을 분석함으로써 고장력 볼트 류에 적용 가능성을 확인하였다. 사용된 소재는 항복비가 0.5로서 40kgf/mm²에서 항복(소성변형)이 시작되는 만큼 구상화 소둔된 기존 소재(1045K)의 항복강도(50kgf/mm²)보다도 20%이상 낮은 항복강도를 갖는 만큼 단조하중 또한 20% 이상 감소하였다. 제조된 볼트는 부위별 요구경도(HRC 25~30)를 만족하였으며 볼트 피로시험 결과 기존 볼트 보다 우수한 피로한도를 나타내고 있어 자동차용 부품 제조에 활발히 이용될 것으로 기대된다.

Key Words: 8T-Bolt, Cold Former, Yield-Ratio-Control-Steel, Non-heat-treated Steel

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. ㈜진합

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,

E-mail: lys1668@kims.re.kr

금형 탄성변형을 고려한 고정스크롤 단조공정의 해석

김영신¹·임재곤²·전만수[#]

Analysis of the fixed scroll die forging process considering the elastic deformation of dies

Y. S. Kim, J. G. Lim, M. S. Joun

Abstract

In this study, die elastic deformation considered simulation of an aluminum fixed scroll forging process, a kind of forward extrusion process, is conducted, which is very special because of complexity in die geometries. The material is assumed rigid-viscoplastic and the dies are elastically behaved. The predictions are compared in terms of dimensions and forming load with the other predictions obtained without consideration of die elastic deformation during forging. The reasons of die fracture occurring in hot aluminum forging of a fixed scroll are revealed using finite element predictions.

Key Words : Die Elastic Deformation (금형 탄성변형), Forging Simulation (단조 시뮬레이션), Fixed Scroll (고정 스크롤)

1. 서 론

최근 단조 시뮬레이션 기술의 발전과 사용자의 활용 기술 향상으로 고정도 시뮬레이션의 중요성이 점점증하고 있다. 실제 단조 시뮬레이션 기술은 선도 단조회사에서 혁신의 구심점 역할을 담당해 왔다.

거시적 관점에서 열간단조공정의 특성에 비교적 큰 영향을 미치는 요소는 금형의 탄성변형이다. 기존의 방식에 의한 단조 시뮬레이션은 대체적으로 실제보다 큰 성형하중을 예측하는 경향이 있었다. 이러한 문제는 관련 연구에서 금형을 강체로 가정하는 것에 크게 연유하는 것으로 나타났다.

금형의 탄성변형 연계 해석 기술은 이미 오래 전부터 이론 및 응용 연구가 이루어졌다. 그러나 수치적 불안정성과 프로그래밍상의 어려운 문제로 인하여 사용자의 요구에

부응하지 못하여 왔다.

최근 들어 정형단조 및 경제적 생산의 요구가 커짐에 따라 단조 시뮬레이션 기술의 정교화가 요구되어 왔다. 금형의 탄성변형 고려 해석을 위해서는 수치적으로 해석이 안정되어야 한다. 성형하중의 수치적 진동은 금형 탄성변형 고려 시 증폭될 가능성이 매우 크기 때문이다.

이 논문에서는 선행연구[1]에서 실시한 동일한 단조공정에 대해서 금형 탄성 고려 및 미고려의 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하고, 그 결과의 비교 검토를 통하여 탄성변형의 영향에 대해서 고찰한다. 적용 대상 예제는 알루미늄 고정스크롤의 열간단조 공정으로 선행연구에서 금형의 파손 원인 분석에 활용된 것이다.

2. 해석의 비교

Fig. 1(a)는 금형의 형상과 제품의 형상을 나타내었다. 이 금형은 Fig. 1(b)에서 보는 바와

1. 경상대학교 기계공학과 일반대학원

2. ㈜ 세방금속기술

교신저자: MFRC, 경상대학교 기계공학과

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

같이 금형의 파괴로 인하여 적절한 설계가 아님이 밝혀져 있다[1]. 한편, 이 금형은 비교적 복잡하여 소재의 소성유동이 자연스럽지 못하다. 물론 대칭면이 존재하지 않는다.

따라서 이 공정은 단조 시뮬레이터의 안정성 시험 목적에 적합하다. 이 연구에서는 다음의 시뮬레이션 조건 하에서 금형의 탄성변형을 감안한 경우와 감안하지 않은 두 경우에 대하여 해석을 실시한다.

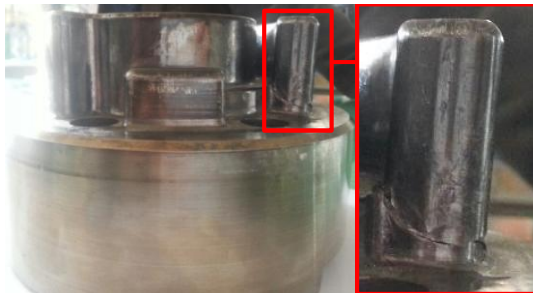
-유동응력: Fig. 2 참조

-초기소재온도: 400 °C

-마찰조건: 쿨롱마찰법칙, 마찰계수 $\mu=0.2$



(a) Fixed scroll and die



(b) Die fractured

Fig. 1 Die and its fracture occurring in aluminum hot forging of a fixed scroll

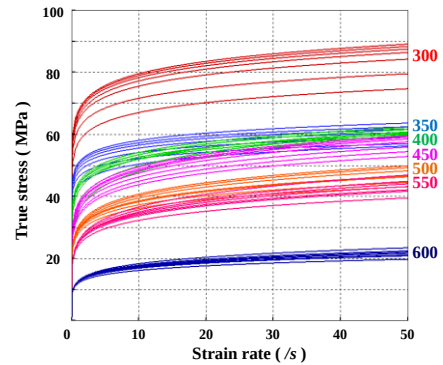
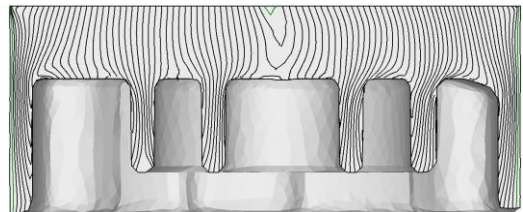
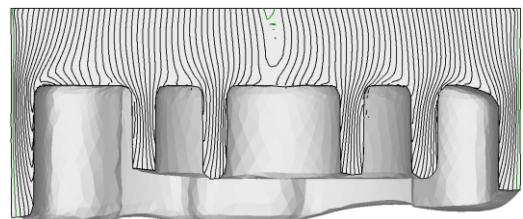
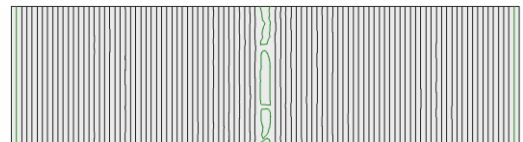


Fig. 2 Flow stress information

Fig. 3은 두 경우에 대해서 예측된 최종 단류선을 비교하고 있으며, Fig. 4는 성형하중을 비교하고 있다.

이미 선행연구에서 밝힌 바와 같이 금형의 조기파손의 원인은 성형 종료 시점에 이르러 국부 미충진에 의해 발생하는 급격한 하중의 증가에 있다. 이 때, 소성유동은 측방향으로 작용하는 힘을 발생시키며, 이로 인하여 랩(wrap)의 하단이 인장응력에 의하여 파단된다[1].



(a) Elastic die

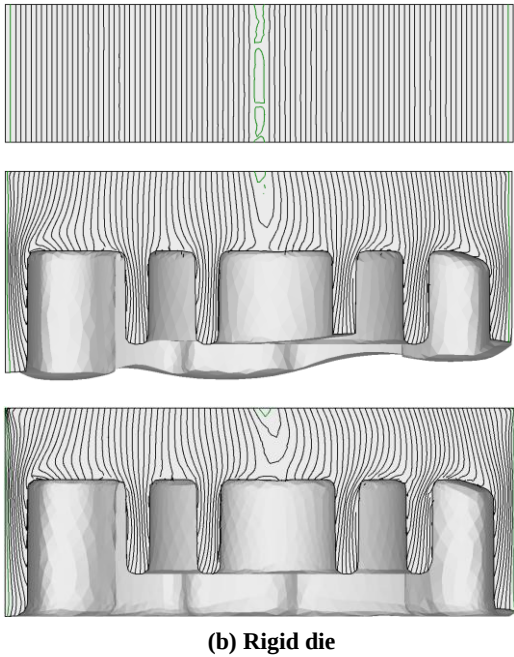


Fig. 3 Comparison of metal flow lines

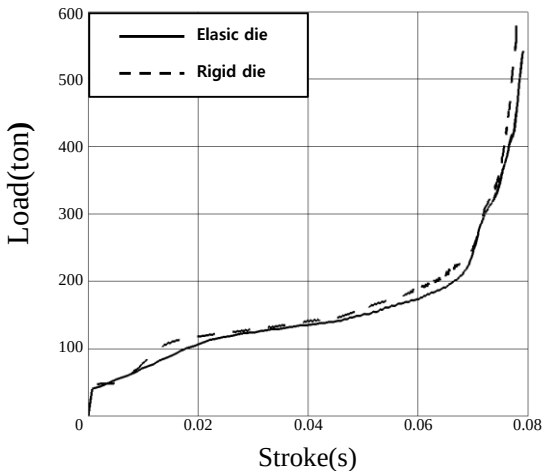


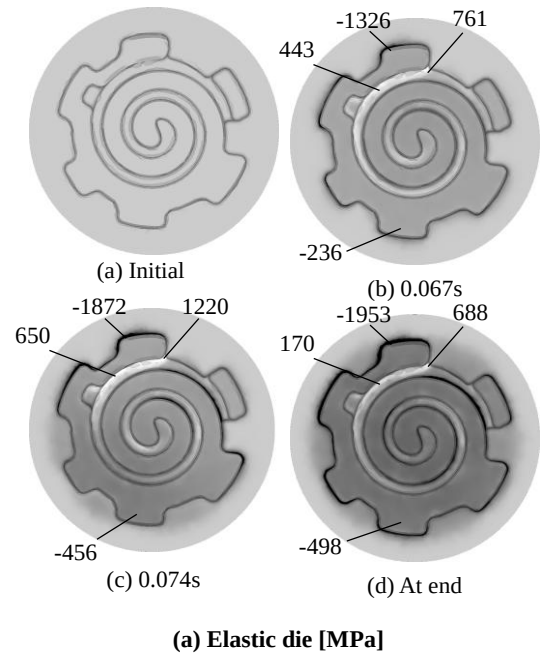
Fig. 4 Comparison of forming load

Fig. 4를 보면 금형의 탄성변형을 고려하였을 경우보다 고려하지 않았을 때의 성형하중이 약 42ton 높게 나타난다. 이 수치는 금형 탄성변형 미고려 시의 최대 성형하중의 약 7.2%이다.

Fig. 5(a)는 금형의 탄성변형을 고려한 경우이고, Fig. 5(b)는 금형의 탄성변형을 고려하지 않은 경우의 금형에 작용하는 응력을

나타내고 있다. Fig. 5(b)는 금형이 강체라는 가정하에서 얻는 금형에 작용하는 응력벡터를 입력하여 얻은 해석결과이다. 이 두 결과 모두, 비슷한 시점과 지점에서 금형이 파손되는 것을 예측하였다. Fig. 6은 파손부위의 시간에 따른 응력값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 금형의 탄성변형을 고려했을 시의 응력 성분 σ_{yy} 의 최대치는 약 1220MPa이고, 금형의 탄성변형 미고려 시의 이 값은 약 1240MPa로 나타난다. 금형의 탄성변형 미고려 시를 기준으로 했을 때, 약 20MPa의 차이이다. 물론 최소치는 이보다 훨씬 큰 차이를 보이고 있다. 이것으로부터 금형의 탄성변형의 고려가 관점에 따라서 큰 의미가 없을 수도 있고, 때에 따라서는 매우 큰 차이를 발생시킴을 알 수 있다.

Fig. 6은 파단이 발생한 최대 인장응력이 작용하는 지점에서의 단조방향의 응력성분의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 이 그림으로부터 금형의 탄성변형의 영향이 최종 스트로크에 접근하면서 급격하게 커지고 있다. 이것은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 하중의 급격한 증가 및 상대적 차이와 직결되어 있다.



(a) Elastic die [MPa]

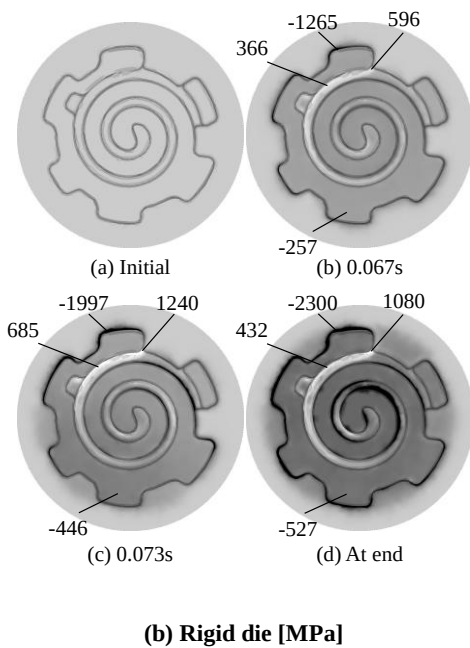


Fig. 5 Comparison of die stress components σ_{yy}

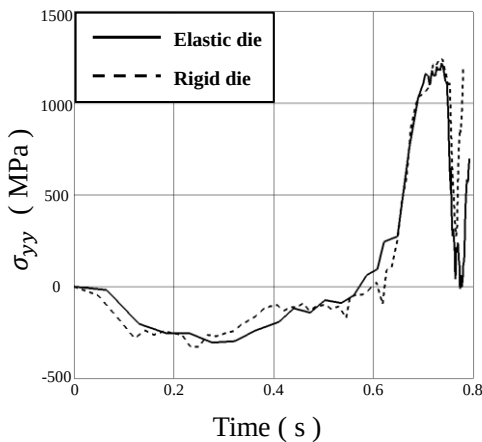


Fig. 6 : Variation of σ_{yy} with time

4. 결 론

이 논문에서는 기하학적 및 역학적으로 매우 복잡한 형상을 지닌 승용차용 스크롤의 알루미늄 열간 단조 공정에 대하여 금형의

탄성변형 고려 단조 시뮬레이션을 실시하여, 그 결과를 금형의 탄성변형을 고려하지 않고 해석한 결과와 비교하였다.

해석결과를 검토한 결과, 해석 종료 시점에 이르러 잦은 요소망재구성 전후에서 발생하는 성형하중의 수치적 변화가 성형하중의 수치적 진동을 증폭시키는 문제가 발생하였다. 이러한 문제의 해소를 위하여 요소망재구성 전후에서 성형하중의 변화를 최소화하기 위하여 경계조건의 변화, 즉 접촉영역의 변화를 최소화시켰다.

이 연구를 통하여 금형을 강체로 고려하고 해석하였을 시 나타나는 성형하중의 과대측정을 탄성변형을 고려한 해석과 비교하여 확인할 수 있었으며, 단조공정 시뮬레이션 시의 금형의 탄성변형의 반영의 중요성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 BK plus 21 사업과 2015년도 산업통상자원부의 ‘엔지니어링 산업진흥 강화’의 지원을 받아 연구되었음.(과제번호 N0000819)

참 고 문 헌

- [1] Y. S. Kim, S. W. Jeong, J. G. Lim, M. S. Joun, 2015, Die fracture in hot forging of a fixed scroll, ASPF 2015, 85-87
- [2] H. Yoshimura, K. Tanaka, 2000, Precision forging of aluminum and steel, Journal of Material , 98(2), 196-204
- [3] K. H. Lee, Scroll compressors for air conditioning, 1998, Journal of Fluid Machinery, 1(1), 121-128.
- [4] Y. S. Lee, J.H. Lee, 2001, The forging die design of scroll rotor by using the 3-D FEM analysis, Spring conference of KSME 2001, 111-115.
- [5] Y. B. Kim, K. H. Jung, S. Lee, E. Kim, J. Lee, D. S. Choi, G. A. Lee, 2013, Development of a closed-die Design with Backpressure to Forge Rotating Scrolls, Transactions of Materials Processing, vol. 22, No. 4, 183-188

알루미늄 LNG 구형 탱크의 열간 성형 공정 설계에 관한 연구

최지원^{1#} · 이동기¹ · 김하근¹

A Study on Hot Forming Process Design for Aluminum LNG Spherical Tank

J. W. Choi, D. G. Lee, H. K. Kim

Abstract

The purpose of this study is to establish the hot forming process of the aluminum plates for the spherical LNG tank used in a MOSS type LNG carrier. The comprehensive FE analyses were first performed to get the uniform curvature of formed plates in consideration of spring-back. From the FE analysis results, the gap between upper and lower die and the upper die opening time after the hot forming were identified as the principal factors controlling the accuracy of hot forming process. To get uniform curvature of formed plates, the gap and the die opening time need to be increased with the increase of thickness. The proper conditions corresponding to the gap and die opening time were established with the dimensional variables including size and thickness and verified by comparing the formed curvatures obtained by both FEA and experiments.

Key Words : Hot forming, Spherical aluminum tank, Finite element analysis

1. 현대중공업 중앙기술원

교신저자: 현대중공업 중앙기술원, jwchoi77@hhi.co.kr

10. 일반 논문 발표

(제 5 발표회장)

TWB(CR420)와 HSS(CR420)/CFRP 하이브리드 복합소재로 이루어진 센터필라 보강재의 이론과 해석을 통한 충돌실험 비교

이민식¹ · 김대원² · 강충길[#]

Comparison of the Collision test in Center-pillar Reinforcement with TWB and CR420 /CFRP Hybrid composite Materials by Using Experimental and Theoretical Methods

M. S. Lee, D. W. Kim, C. G. Kang

(Received Month Day, Year / Revised Month Day, Year / Accepted Month Day, Year)

Abstract

In this study, center-pillar reinforcement was formed with TWB(Tailor Welded Steel) and CR420/CFRP hybrid composite materials. After forming, collision test was conducted to evaluate fracture toughness with center-pillar reinforcement of TWB and CR420/CFRP hybrid composite materials. Center-pillar reinforcement with CR420/CFRP hybrid composite materials was lighter than TWB and fracture toughness was also improved. Experiment collision result was compared with CAE to verify again. Detailed result was analyzed with ABAQUS/explicit. Because elastic modulus of TWB was higher than CR420/CFRP hybrid composite materials, impact time of CR420/CFRP hybrid composite materials is longer than TWB. Accordingly, when conducting collision test with CR420/CFRP hybrid composite materials, impulse that impactor receive was increased. When TWB was replaced with next generation material CR420/CFRP composite, body weight of the car became lighter by around 44%, while impulse was improved by around 11%. In this simulation, impact time, fracture toughness and velocity change of impactor was evaluate and have a good agreement with experiment results.

Key Words : Collision test, hybrid materials, TWB, simulation, CFRP

후 기

본 연구는 지식경제부의 우수제조기술연구센터사업(ATC)의 재원으로 한국산업기술평가관리원(No. 10039031)과 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2011-0030013).

1. 부산대학교 기계공학부(바탕, 8pt.)

2. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail:cgkang@pusan.ac.kr

Mg 합금 판재의 스프링백 정밀 예측을 위한 재료시험 및 재료 모델링 방법 연구

조병찬¹ · 이충안¹ · 서민홍² · 안강환² · 김현영[#]

Material test and study of material modeling method for precision prediction of springback of Mg alloy sheet

B. C. Jo¹, C. A. Lee¹, M.H. Seo², K.H. Ahn², H. Y. Kim[#]

Abstract

마그네슘 합금은 큰 이방성과 낮은 탄성계수로 인해 성형 후 형상의 변화가 심하기 때문에 스프링백을 정확하게 예측하는 해석 기술이 필요하다. 또한 소재의 탄성계수는 Pre-strain에 따라 변화하는 특징이 기존 많은 논문에서 의해서 밝혀진 바 있으며, 이러한 현상은 성형해석에서 반드시 고려되어야 한다. 이를 위해서는 정밀한 물성 측정 및 탄성계수를 고려한 재료 모델링 기법이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 만능재료시험기 Instron 5882 UTM 장비를 이용하여 온도 및 Pre-strain에 따른 탄성계수 변화를 측정하였고, 상온 및 온간에서 U-draw bending 시험의 스프링백 결과와 PAM-STAMP의 해석 결과를 비교 분석 하였다.

Mg 합금 판재의 Pre-strain에 따른 탄성계수 변화를 측정하기 위해 Loading-unloading 반복 시험을 실시하였으며, Unloading시 발생하는 기울기를 탄성계수로 측정하였다. 탄성계수 측정 방식은 Yoshida 논문에서 수행한 측정 방식을 사용했으며, 각 온도별로 탄성계수 변화를 측정하였다. 또한 Mg 합금의 특이 거동 및 탄성계수 변화를 고려해 주기 위해 PAM-STAMP User-subroutine을 사용하여 성형 및 스프링백 해석을 진행하였고, 해석 결과를 U-draw bending 시험 결과와 비교 분석하여 스프링백 정밀 예측을 위한 프로세스를 정립하였다.

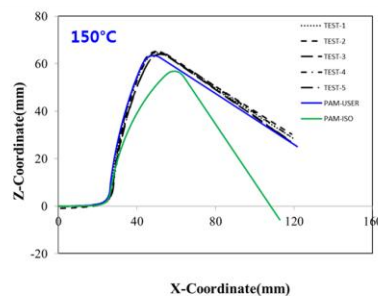
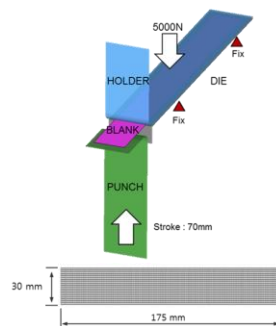


Fig. 1 U-draw bending model Fig. 2 Springback result at 150°C

Key Words : Elastic modulus(탄성계수), Mg alloy sheet(마그네슘 합금 판재), Pre-strain(선 변형)

후 기

본 논문은 (주)포스코에 의해 지원된 연구임을 밝힘.

1. 강원대학교 기계의용공학과
2. 포스코 철강솔루션마케팅실 PAC

Corresponding Author: Mechanical & Biomedical Engineering in Kangwon national university, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

경량 센터플로어 모듈용 CFRP 물성 평가 및 동적 강성 해석

이동훈^{1#} · 하유정¹ · 이만옥² · 최강훈² · 고광운³ · 김준기³

A Study on mechanical properties of CFRP for light weight center floor module and analysis of the dynamic characteristics

D. H. Lee^{1#}, Y. J. Ha¹, M. O. Lee², K. H. Choi², K. U. Ko³, J. K. Kim³

Abstract

Recently, methods for improvement of fuel efficiency are developing due to enhanced environmental regulations and the advent of the era of high oil prices. Various studies to lightweight automobile are underway for this purpose. For developing lightweight automobile, many methods for replacing conventional steels with lightweight materials and the manufacturing process for lightweight materials are suggested and developed. Carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) are commonly used wherever high strength-to-weight ratio and rigidity are required, such as aerospace, automobile and civil engineering, sports goods and an increasing number of other consumer and technical applications. In this study, we measured the mechanical properties of the CFRP for lightweight center floor module and analyzed the dynamic characteristics of conventional center floor module and CFRP module by FEM analysis.

Key Words : Lightweight, Center floor, CFRP, FEM analysis, dynamic characteristic

1. 자동차부품연구원

2. ㈜호원

3. 한국물드검제

교신저자: 자동차부품연구원, E-mail: dhlee1@katech.re.kr

FEM 해석을 통한 이속압연 변형거동 해석

고영건^{1#}

Deformation Behavior of Differential Speed Rolling via FEM Analysis

Y. G. Ko

Abstract

This paper reported the deformation characteristics of Al-2.2 wt.%Mg alloy processed by differential speed rolling (DSR) based on microstructure evolution and finite element (FE) analysis. The FE analysis was carried out to examine the distribution of the effective strain during DSR deformation with respect to the roll speed ratio. As the roll speed ratio increased from 1:1 to 1:4 for the lower and upper rolls, the amount of the effective strain imparted to the sample during DSR deformation increased, which was also accompanied with reasonably homogeneous distributions of microstructure and microhardness over the entire samples. At the roll speed ratio of 1:4, the effective strain of 1.5 was calculated in the top part of the DSR-deformed sample. In addition, the rolling load was observed to decrease with the roll speed ratio increased, which was attributed mainly to the influence of friction between the rolls and sample.

Key Words : Differential Speed Rolling, Finite Element Method, Microstructure, Rolling Load

1. Introduction

In recent years, the development of nanostructured materials via severe plastic deformation (SPD) techniques has attracted attention in the scientific community owing to their excellent mechanical properties compared to conventional coarse-grained counterparts [1]. A differential speed rolling (DSR) technique, one of the SPD methods, was a process in which the different rotational speeds of the upper and lower rolls were applied, so that intense shear strain could be imposed throughout the samples due to asymmetry on the characteristic of the deformation zone. DSR has successfully obtained promising results of the microstructural evolution and mechanical properties in various ranges of metals such as Fe, Al, Mg, and Ti due to its capability of imposing intense

shear strain uniformly throughout the workpiece. Hence, it is important to know the deformation behavior in the deformation zone of metallic materials during DSR with an aid of FE analysis. At present, a systematic study combining simulation and experimental results of metals to shed a light on the effect of DSR processing variables coming from either simulation or actual experimental endeavors on the microstructure and mechanical properties has not been documented yet.

Therefore, the influence of various DSR parameters on deformation characteristics of Al-2.2 wt.%Mg alloy was investigated per FE perspective. The microstructures and mechanical properties of the deformed samples were studied, and these were compared to that obtained by ESR. In addition, the relationship between the roll speed ratio and the rolling load was discovered based on friction effect between the rolls and sample.

1. 영남대학교 신소재공학부

교신저자: 영남대학교 신소재공학부,

E-mail: younggun@ynu.ac.kr

2. Experimental procedures

The material used in this study was a Al-2.2 wt.%Mg alloy sheet with a chemical composition of 2.2 Mg, 0.2 Cr, 0.4 Fe, 0.25 Si, 0.028 Ti, and balance Al (in wt.%). To understand the role of intense shear strain during DSR, two-dimensional plane strain FE analysis was simulated using a finite element (FE) code, DEFORM 2D. The working rolls of 220 mm in diameter were considered rigid body, whereas the samples were treated as an elasto-plastic continuum body. The ND-RD plane of the samples was divided into the nine parts of square mesh elements. The first, fifth, and ninth parts were referred to as the top, middle, and bottom parts which would be corresponded to the top, middle, and bottom parts in microstructure. The first and ninth parts were in contact with the upper and lower rolls, respectively. The shear friction factor (m) between the rolls and sample was ~ 0.7 [2].

3. Experimental results

Neutral points were determined using the distributions of frictional stress in rolling process. For ESR, the stress started to increase from the entrance of the roll gap and reached the peak at the neutral points for the upper and lower surfaces. For DSR, however, the distribution of the stress showed that the neutral point of the upper roll moved to the exit while that of the lower roll moved toward the entrance. The deformation behavior of the sample processed by individual ESR and DSR operations is analyzed based on FE calculation. In ESR deformation, compressive deformation of the sample where a number of mesh elements were flattened was detected markedly at the middle part. Unlike deformation at the middle part, shear deformation took place at the top and bottom parts. However, the neutral points determined by friction stress were observed to be same after deformation, giving rise to the good symmetry of the mesh structure. In contrast to ESR, it is noted that the elements of the sample deformed by DSR experienced compression and shear strain throughout the thickness. Moreover, it can be seen that the intense shear strain was concentrated significantly at the top part due to the

asymmetry of the upper and lower rolls which was led to the different location of neutral points after DSR deformation. FE calculation showed that the amount of effective strain imposed by both ESR and DSR tended to increase significantly. In ESR, the maximum effective strain of ~ 0.93 was observed at the top and bottom parts which were much higher than that at the middle part. The calculated effective strain at the middle part appeared to be reasonably identical to the theoretical compression strain since shear deformation generated by interface friction between the rolls and the sample was relatively weak during ESR. On the other hand, the distributions of effective strain at the top, middle, and bottom parts were found to vary during DSR deformation. The maximum values of calculated effective strain which were measured to be ~ 1.50 , 1.39 , and 1.37 at the top, middle, and bottom parts, respectively were found in the sample deformed at the roll speed ratio of 1:4.

4. Conclusion

The effect of the roll speed ratio on the deformation characteristics was explored based on FE analysis. The uniform shear deformation throughout the ND-RD plane was achieved when the roll speed ratio increased. A strain of ~ 1.5 was detected on the top part of the sample deformed at the roll speed ratio of 1:4.

Acknowledgment

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, South Korea (NRF-2014R1A1A2059004).

Reference

- [1] R. Z. Valiev et al., 2000, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 45, pp. 103~189.
- [2] Y.H. Ji and J.J. Park, 2009, Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 499, pp. 14~17.

FEM을 활용한 대형 일체형 크랭크샤프트 예비성형체 성형공정 해석

전효원¹ · 정상인² · 전용배² · 오상균[#]

Analysis on the pre-forging process of heavy solid crank shaft using finite element method

H. W. Jeon, S. I. Jeong, W. B. Jeon, S. G. Oh

Abstract

Before, pre-form is manufactured machining for solid crank shaft of ship or generator engine. In this study, we performed by hot forging simulation for manufacturing pre-form of solid crank shaft. For hot forging simulation of solid crank shaft pre-form, we are using finite element analysis program(DEFORM-3D). We performed gleeble test for hot forging simulation by 50Cr-Mo alloy steel of solid crank shaft material. The gleeble test is performed at 800~1200 °C and 0.1~10/sec. We performed hot forging analysis at 900, 1000, 1100 °C of surface temperature. And we analyzed material flow according to surface temperature at pre-form forging.

Key Words : Solid crank shaft, Hot forging, Pre-form, Gleeble test, 50Cr-Mo steel

* 이 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 경제협력권산업 육성사업(Groove 단조 공법을 이용한 12,000kW급 대형 일체형 크랭크샤프트 제조 기술 개발)으로 수행된 연구결과입니다.

1. 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부 금형기술연구팀

2. 현진소재

Corresponding Author : Daegu Mechatronics & Materials Institute,

E-mail: rglee@dmi.re.kr

자동차용 자동변속장치의 피니셔형 구조 부품의 생산효율 개선을 위한 열간 단조 최적 성형 공정기술 연구

김화정¹ · 김용조²

A study on optimum hot forging process technology for improving the production efficiency of the finisher-type structural part of the automatic transmission device for automobiles

H. J. kim , Y. J. Kim

Abstract

Abstract : This study is the tension of the hot forging products in research related to improving productivity of hot forging process for the production of the inner race with a finisher-type gear structure of the automatic transmission is applied to a car which may occur in the shape of hot rolling of the inner race interpret and analyze the forging process using a finite element method in order to minimize forging defects in stress cracking by producing a prototype based on the result thereof, and Adjust the hot forging process through re-interpretation and analysis based on the results of the production of prototypes for some parameters such as flow pattern of metal optimally to secure and build inner race productivity-based hot forging process of automatic transmissions and also off.

1. 서 론

자동차용 변속장치의 기술적 구조는 너무 복잡하고 제어도 어렵기 때문에 높은 기술력을 필요로 한다. 최근 자동변속장치 기술은 기계적 메커니즘과 제어장치가 지능화 추세에 따라 현저히 발전하고는 있으나 이를 제조하기 위한 원천 뿌리기술은 보다 난해함에도 그 기술의 진보가 매우 느린 형상의 산업적 기술 구조를 가지고 있다. 특히 자동변속기의 이너레이스 부품의 경우 소재 특성에 의한 열간 단조 공정을 시행함에 있어 그 구조적 특성(Finisher-type gear) 때문에 제조 과정에서 다양한 결함 형태가 나타나며 이의 결함은 자동차의 성능과 안전에 관련됨으로 이에 관련된 제조 결함 분석 및 예측 과정이 반드시 필요한 기술이다. 따라서 본 연구는 승용차의 주행 시 동력을 끊지 않고도 기어비를 기계적 메커니즘으로 변화시킬 수 있도록 하는 핵심 부품인 유성캐리어 내의 유성기어와 단방향 클러치가 조합되어 있는 피니셔형 구조의 이너레이스의 열간 단조 제조 공정을 보다 다양한 결함 예측 방법을 통하여 검증하고, 또한 유한요소 해석 및 분석을 통해 금형 설계 내역을 보완하여 열간 단조 공정에 대한 공정지도를 최적 상태로 구성하여, 기존 제조 방식에서 발생하는 가공 부품의 열간 단조 중 파단, 단조 금형 파손 등의 공정 부적합 요소를 해소하여 제품의 품질향상을 얻고자 하였다.

1. 한국폴리텍대학

2. 경남대학교

교신저자: 김화정, E-mail: topeyenet@naver.com

2. 자동변속기 이너레이스 열간 단조 공정 분석

2.1 공정분석 목적

여기에 열간 단조 공정기술은 자동차의 자동변속기 이너레이스를 단조함에 있어 발생하는 공정 결함 변수를 유한요소 해석을 기반으로 최적 제조 공정을 확보하고자 함이며, 이는 열간 단조 시 발생할 수 있는 단조 결함을 최소화하기 위함이다. 이는 핵심 내역인 금형설계 내용을 분석하여 금형에 요구되는 조건을 1차로 검토 하여 금형의 크기, 소 내의 조성 및 성질, 성상의 복잡성, 단조 온도, 단조 작업의 유형, 등을 확보하고 이는 열간 단조 금형 요구 조건으로(a) 고온에서의 강도와 인성 변화가 없을 것, (b) 균일하게 경화할 수 있는 능력을 보유할 것, (c) 기계적 및 열 충격에 대한 저항력이 강할 것, (d) 마모 저항, 특히 열간 단조에서 소재에 생기는 스케일에 대한 마모 저항력이 있을 것을 기준으로 하며, 또한 고온의 소재로부터 금형으로 열이 전달되고 이에 따라 금형이 변형되는 것도 중요한 사항이며 금형 변형은 곧 금형의 파손으로 이어지므로 적용 금형의 부적절한 열처리, 부적절한 설계, 과열 및 열 하중으로 인한 고온 균열, 과도한 마모, 과부하 등에 부적합 적용요소를 본 연구로 최대한 억제하고자 한다.

2.2 소재 물성 도출을 위한 유동응력분석 [SCR420H]

이너레이스 단조 해석을 위한 SCR420HB 소재의 유동응력선도 시험 응력선도를 도출하였다.

분석 방법은 약 1,150 °C의 단조온도 및 금형으로의 열전달을 고려하여 고온압축시험을 수행 조건하에서 변형률 속도 0.01/s, 0.1/s, 1.0/s, 10.0/s를 적용하였다.

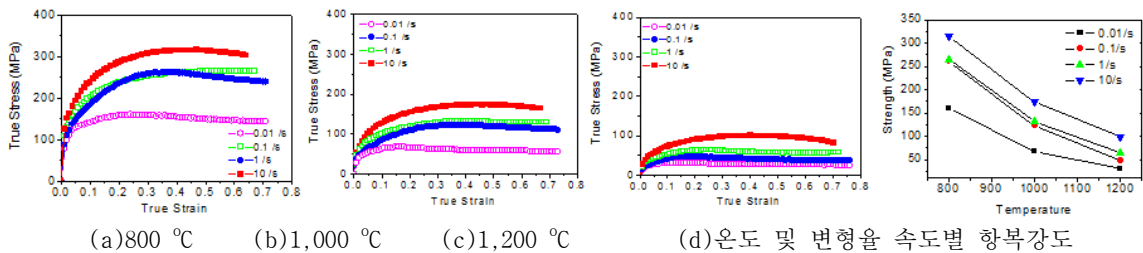
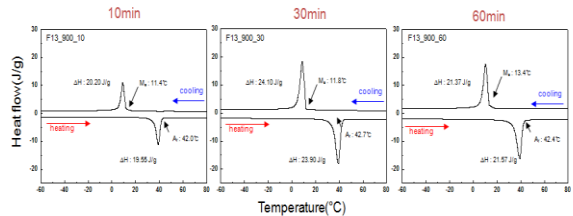


Fig. 1 Stress-strain curves of SCR420

2.3 열간 단조에 따른 소재 성형특성 변화

이너레이스 열간 단조 해석을 위한 SCR420HB 소재의 DSC 곡선 변화와 열간 단조 변형율을 12% 내외로 하였을 때 소재 변화량을 분석하였다.



2.4 열간 단조 공정운영에 따른 성형 결함 예측 및 평가

열간 단조 성형공정에서 형성될 수 있는 성형결함으로는 전단밴드, 공공(void)생성 및 V자형 크랙과 같은 내부균열과 표면균열 등이며 이러한 결함의 발생 원인으로는 금형과 소재사이의 마찰과 Die Chilling 효과에 의한 소재 표면과 중심의 온도 불균일 등의 요인으로 결함이 발생하며 이의 결함을 해소하기 위하여 성형평가를 수행하고 유동응력을 보정하여 최적 열간 단조 공정 확보 성형 예측은 다음의 수식으로 유동응력을 보정하였다.

$$P_a = \sigma_f + m \cdot \frac{\sigma_f}{\sqrt[3]{3}} \cdot \frac{d}{h} = \sigma_f \left(1 + \frac{m}{\sqrt[3]{3}} \cdot \frac{d}{h} \right)$$

여기서 P_a : 측정응력, σ_f : 유동응력, m : 마찰계수, d : 시편직경, h : 시편높이

2.5 고온 열간 성형성 결함 예측 방법

동적재료 모델에 의한 결함 예측 방법은 금속 및 합금의 연구에서 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료내의 에너지 분산특성은 고온에서 재료를 변형시킬 때 재료의 소성변형에 의해서 소모되는 에너지와 미세 구조적 변화를 유발하는데 소모되는 에너지에 기인하며 이러한 변화는 온도와 변형속도의 함수로 얻어지는 변형속도민감도를 통해서 예측함이 가능하였다.

연성파괴 개념을 기초로 한 접근 방법은 소성가공 시 발생하는 금속재료의 파괴는 대개 연성파괴로 분류될 수 있으나 연성 파괴기구는 온도, 변형속도에 의존하면서 변화하며 이는 3단계로 구분하여 진행됨을 알 수 있다. 첫 번째 단계는 응력제어 과정인 공공(void)의 생성으로, 주로 제2상 및 Inclusion에서 공공이 생성되기 시작한다. 두 번째 단계는 변형률제어 과정인 공공(void)의 성장을 의미한다. 마지막 단계는 공공(void)의 성장이 한층 진행되어 공공(void)들 간의 Linking이 이루어져 결국, 연성파괴가 일어나는 과정을 나타낸다. 이의 연성 파괴는 다음의 식으로 정의할 수 있다.

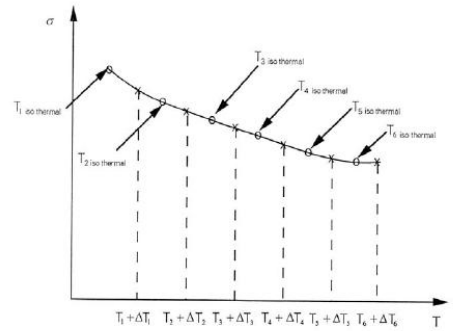


Fig. 3 온도와 변형속도조건 에서 변형

K : 전단밴드에서의 변형률 집중계수 , η : $\sigma = K\epsilon^\eta$ 에서의 변형경화 지수

l_0 : 공공(void)의 초기길이 , a_0 : 공공의 초기반경 , $\bar{\sigma}$: 유효유동응력

σ_a : 장축방향의 주응력성분 , σ_b : 단축방향의 주응력성분

$$\int_0^{\epsilon_f} \left[\frac{2}{\sqrt{3}(1-\eta)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-\eta)}{2} \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\bar{\sigma}} \right\} + \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\bar{\sigma}} \right] d\epsilon = \left(K = \frac{3}{4} k \cdot \ln \left(\frac{l_0}{2a_0} \right) \right)$$

또한 유동 불안정 및 인장 불안정(네킹) 인자를 기초로 한 방법이 있으며 이의 예측 방법으로 고온에서의 높은 유동응력과 함께 극히 제한된 공정구간(process window) 등으로 인하여 일반 열간 단조로 복잡한 형상의 부품을 성형할 경우 형상 및 조직제어에 어려움이 많고, 금형과 소재사이의 마찰과 Die Chilling효과에 의한 소재표면과 중심의 온도 불균일에 기인하여 전단밴드, 내부 및 표면균열 등의 성형결함을 일으키는 것으로 예측하였다.

2-6 열간 단조 공정 분석에 의한 단조 및 응력 해석

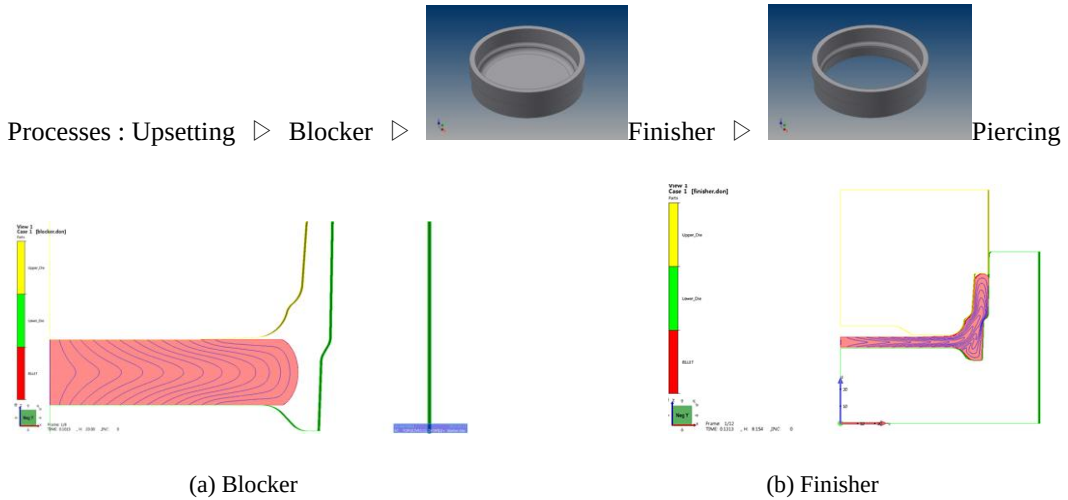


Fig 4 단조 및 응력 해석

2-7 Piercing 공정에 임계 손상 계수의 효과

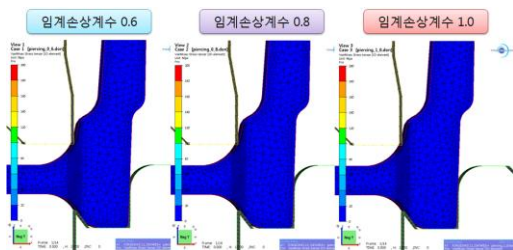


Fig5 유효응력 비교

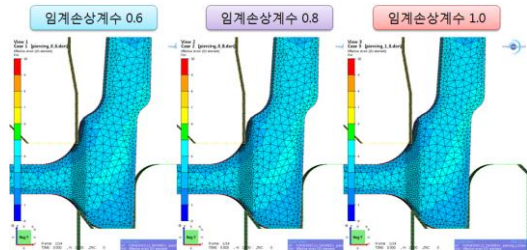


Fig6 변형률 비교

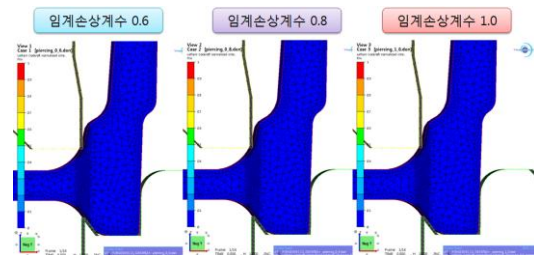


Fig7 Damage 분포 비교

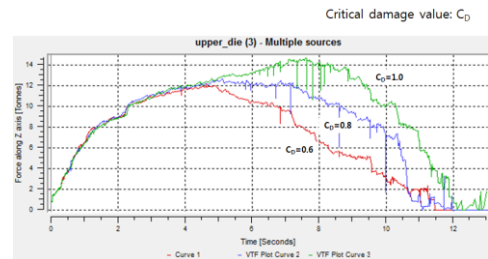


Fig8 금형 하중비교

Critical damage value의 값의 변화에 따라 변형률, 응력, Damage값의 분포는 각각 다르고, 응력과 변형률, Damage는 임계손상계수가 높아짐에 따라 함께 증가하고, 임계손상계수의 값이 증가함에 따라 금형의 하중도 높아졌고 임계손상계수의 값이 증가함에 따라 전단 표면에 Sheared surface의 길이가 같이 증가하는 경향이 있고 최종 치수에 크게 관련되는 요소로는 열수축량, 단조 시의 변형량, 내부의 잔류응력, 탄성회복량 등으로 나누어 이번 공정에서 지배적인 요소를 정하고 그에 따른 해석을 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단되었다.

4. 결 론

정밀 열간 단조 소재(SCR420HB)의 성형 및 성형결함과 제조 결함 분석 및 제조기술을 위한 연구를 하였다.

- (1) 응력과 변형률 및 Damage는 임계손상계수가 높아짐에 따라 함께 증가하고 임계손상계수의 값이 증가함에 따라 금형의 하중도 높아짐이 관찰되었다.
- (2) 임계손상계수의 값이 증가함에 따라 전단 표면에 Sheared surface의 길이가 같이 증가하는 경향이 관찰되었다.

본 연구는 이너레이스(중공 부품) 소재에 대한 열간 단조 성형평가 방법을 적용하여 CAD/CAM기술과 FEM해석을 도입하여 체계적이고, 과학적인 접근방법으로 수율향상, 결함억제, 공정최적화를 얻고자 하였다. 따라서 열간 단조의 안정성을 표시하는 다양한 요소(변형속도, 민감도계수, 에너지 분산효율, 소성안정 및 불안정인자 등)들에 대한 정밀 분석을 통하여 변이를 기반으로 안정된 변형을 기대할 수 있는 영역을 구축하여 최적 공정 요건을 확립하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] F. Bakkali El Hassania, A. Chenaouia, R. Dkiouaka, L. Elbakkalib, A. Al Omari, Characterization of deformation stability of medium carbon microalloyed steel during hot forging using phenomenological and continuum criteria, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 199, pp. 140~149, 2008.
- [2] B. A. Behrens, Finite element analysis of die wear in hot forging processes, CIRP annals ... manufacturing technology, Vol. 57, No. 1, pp. 305~308, 2008.
- [3] X. W. Chen, D. W. Jung, A. X. Sun, Hot Forging Process Design Optimization Based on Approximate Model and FEM Simulation, Materials science forum, Vol. 575/578, pp. 334~339, 2008.
- [4] 김낙수, 형단조 예비성형체 설계의 CAE, 대한기계학회지, Vol. 32, pp. 524~535, 1992.
- [5] 염성호, 이병섭, 노병래, 디젤 엔진용 분절 피스톤의 예비성형체 단조 공정 연구, 한국소성가공학회 논문집, Vol. 13, pp. 635~641, 2004.
- [6] 염성호, 이종호, 우호길, 열간단조에서 유한요소법과 유전 알고리즘을 이용한 예비성형체의 최적형상 설계 연구, 한국공작기계학회 논문집, Vol. 16, pp. 29~35, 2007.
- [7] K. Lange, "Handbook of Metal Forming," Mcgraw Hill, Inc. USA, 1995.
- [8] 이정환, 이영선, "신소성 가공 기술," 한국기계연구원 무절삭 정밀단조 연구실, 2002. 등

JMAK 결정립 모델의 몬테카를로 시뮬레이션

곽은정¹ · 강경필¹ · 이경훈^{1#} · Wei-Tsu Wu²

Monte Carlo Simulation of JMAK Grain Model

Eunjeong Kwak, Geongpil Kang, K.Lee, Wei-Tsu Wu

Abstract

The Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK) model describes the recrystallization kinetics of metals during thermal-mechanical processing with average grain size. The normal variation and uncertainties in the material and the processing conditions during forming will result in distribution of grain size. This paper aims at to predict the distribution of grain size, especially ALA grain size which can be used as an indicator for fatigue life, rather than average value via Monte Carlo simulation.

Key Words : JMAK Model, Monte Carlo Simulation, Recrystallization, Grain Growth

1. 서 론

결정립의 크기는 물성과 관련하여 항복강도, 피로강도, 크립/파단수명에 직접적으로 연관되므로 공정 중 그 변화를 추적하는 일은 매우 중요하다. 실제 미시조직은 초기 결정립의 크기가 동일하지 않고, 분포를 이루게 되며, 공정의 결과로 나타나는 결정립의 크기도 다양하게 되나 기존의 JMAK 모델은 평균적인 값만을 예측하는 한계가 있다. 본 연구에서는 공정상 불확실성을 반영한 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 통하여 피로 특성 등의 지표[1]로 사용되는 ALA(as large as) 결정립 분율을 예측해보고자 한다.

2. JMAK 모델

2.1 동적 재결정(DRX)

JMAK 결정립 모델은 열-기계적 공정에서 소재 내부의 동적 재결정, 준동적 재결정, 정적 재결정, 결정립 성장의 4가지의 현상을 모사하

는데 사용된다.

동적 재결정에서는 Fig.1(a)에 나타낸 것과 같이 예를 들어, 초기 평균 결정립 크기가 50 μ m, 초기 재결정 분율이 0인 원통형 소재를 압축시, Fig.1(b)와 같이 평균 크기 10 μ m, 동적 결정립 분율 30%로 변하게 된다.

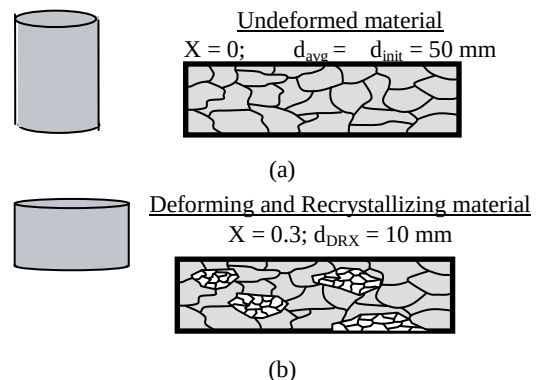


Fig. 1 Schematic representation of dynamic recrystallization

1. ㈜솔루션랩

2. Scientific Forming Technologies Corporation

교신저자: ㈜솔루션랩, E-mail:klee@solution-lab.co.kr

재결정을 시작하려면 변형되는 동안 임계변형률(ϵ_c)에 도달하여야 하는데, 임계변형률과 소재 유동 응력선도의 최대변형률(ϵ_p)과의 관계는 Fig. 2 에 나타내었다. 식(1)의 최대 변형률(ϵ_p)은 변형률-응력 선도의 최대 유동응력값(peak flow stress)에 대응하는 값이다. 임계 변형률은 결정립 크기, 변형률 속도, 온도의 함수로 식(2)과 같이 정의되며, 동적 재결정 분율 축적이 시작되는 시점에 상응하는 변형율이다. d_0 는 초기결정립 크기, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도, Q_1 는 활성화 에너지, T 는 절대온도, R 은 기체상수이다. a_1 , n_1 , m_1 , c_1 는 모두 재료상수이다. 이 모든 상수들은 유동응력 데이터로부터 구하게 된다. 동적 재결정 분율은 식 (3)에 의해 구하게 된다.

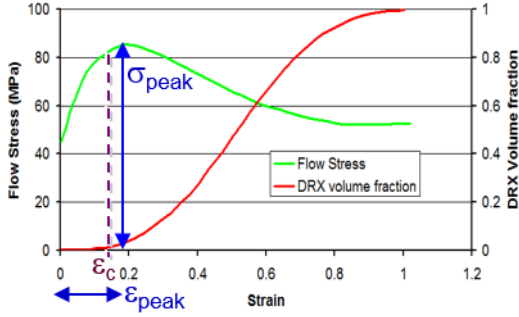


Fig. 2 Relations of peak stress, peak strain and critical strain.

$\epsilon_{0.5}$ 는 동적 재결정 분율이 50%에 도달했을 때의 변형률이다. 재결정된 결정립의 크기는 식 (5)에 나타내었다. β_D 와 k_d 는 상수이고, 식 (2)의 a_2 는 0과 1사이의 값을 가진다.

$$\epsilon_p = a_1 d_0^{n_1} \dot{\epsilon}^{m_1} \exp\left(\frac{Q_1}{RT}\right) + c_1 \quad (1)$$

$$\epsilon_c = a_2 \epsilon_p \quad (2)$$

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left[-\beta_D \left(\frac{\epsilon - a_3 \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^{k_d}\right] \quad (3)$$

$$\epsilon_{0.5} = a_4 d_0^{h_4} \dot{\epsilon}^{m_4} \exp\left(\frac{Q_4}{RT}\right) + c_4 \quad (4)$$

$$D_{DRX} = a_5 d_0^{h_5} \dot{\epsilon}^{n_5} \exp\left(\frac{Q_5}{RT}\right) + c_5 \quad (5)$$

2.2 결정립 성장

본 연구에서 사용한 결정립 성장에 따른 결정립 크기를 예측하는 모델은 아래와 같다.

$$d_g = [d_0^m + a_6 t \exp(-Q_6 / RT)]^{1/m} \quad (6)$$

3. JMAK 모델 변수 선정 방법 및 결과

재결정 체적 분율과 결정립 크기등과 관련한 계수들은 유동응력 데이터를 상용 소프트웨어인 DEFORM 에서의 변수 선정 툴(Parameter Fitting Utility)에 입력하여 구할 수 있다.

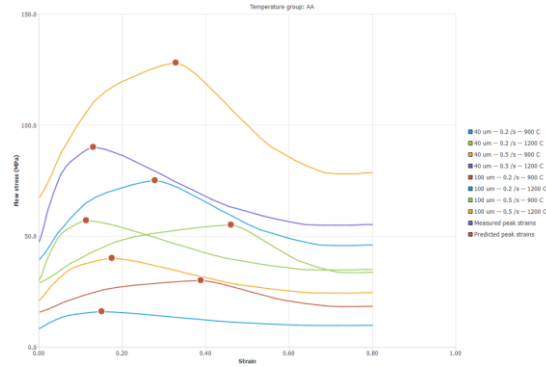


Fig. 3 Comparison of experimental data and predicted curve from fitted coefficients.

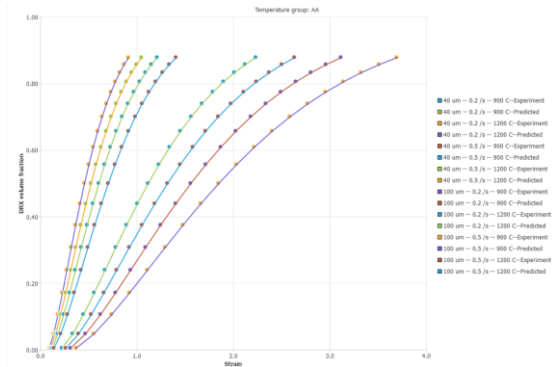


Fig. 4 The fitted constants for DRX volume fraction data under different initial grain size, temperature and strain rates.

결정립 크기, 온도, 변형률 속도에 따른 유동 응력 선도를 입력하면, 자동으로 a_1 , n_1 , m_1 , c_1 , Q 계수들을 포함하는 최대 변형률을 찾아주고, 선정된 상수들은 실험 데이터와 비교하여 Fig 3과 같이 나타난다. 초기 결정립 크기, 온도, 변형률 속도에 따른 동적재결정 분율 데이터를 입력하면 Fig. 4와 같이 동적 재결정 분율 식의 계수들을 자동으로 선정한다. 마찬가지로, 동적 재결정 결정립 크기도 초기 결정립 크기, 온도, 변형률 속도에 따라 함수형태로 입력하여 구할 수 있다.

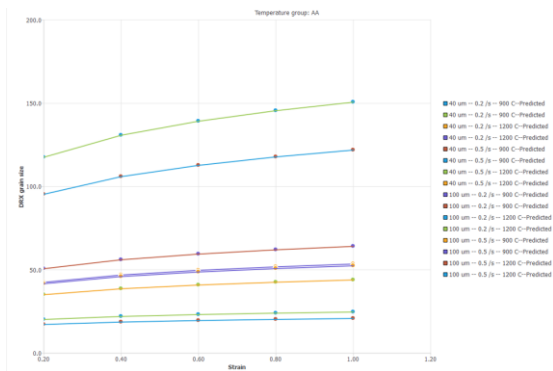


Fig. 5 The fitted constants for DRX grain size data under different initial grain size, temperature and strain rates

선정된 JMAK 모델상수 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material parameters of JMAK grain model

a_1	0.004659	a_2	0.83	a_5	4.85E10
n_1	0	a_3	0.8	n_5	-0.41
m_1	0.1238	a_4	5.043E-9	m_5	-0.028
Q_1	49520	n_4	-1.42	Q_5	-240000
C_1	0	m_4	-0.408	c_5	0
h_4	0	Q_4	196000	h_5	0
βd	0.693	c_4	0		
kd	1				
T	1000				

4. Monte Carlo JMAK 모델을 이용한 ALA결정립 예측

가열로에서 꺼낸 소재를 성형한 후 상온까지 냉각시키는 경우 공정이 진행됨에 따라 동적 재결정, 정적재결정, 준동적재결정, 결정립 성장 등이 일어날 수 있다. 이번 연구에서는 확보한 JMAK 모델 계수 값을 적용하여 업셋팅 공정에서 성형에 따른 최종 변형률 등의 상태 변수뿐만 아니라 ALA(As Large As)결정립 체적 분율을 예측 하고자 한다.

4.1 해석 모델

IN718소재를 가열로에서 균일하게 가열한 뒤 540도의 금형에서 25.4mm/s의 속도로 성형하여, 초기 결정립 크기 30 μ m가 최종 공정 후에 위치별로 어떻게 달라지는지 예측하였다. 공정 모식도 및 관심부위의 위치 3곳(P1, P2, P3)는 Fig. 6에 나타내었다.

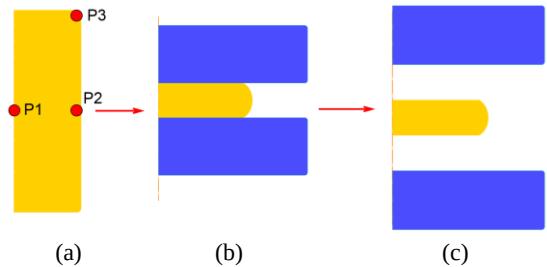


Fig. 6 The process of cylindrical compression test (a) resting 15sec, (b) forging, (c) cooling

4.2 해석 방법

Monte Carlo(MC) JMAK 모델은 관심있는 부위에 초기 결정립 크기, 온도, 분포를 평균과 표준편차의 확률 값으로 입력하여 변형에 따른 재결정 및 결정립 성장을 예측하는 모델이다. 초기 결정립 크기(30 μ m), 결정립의 개수(1000), 결정립 크기의 표준 편차(5 μ m), 초기 온도(소재 980도, 금형 540도), 초기온도의 표준편차(25도), 변형률 표준 편차(0.125), 변형률 속도 표준편차(0.0025 1/s), 한계 변형률 속도(0.001 1/s)를 입력하였다. 소재의 물성은 상용소프트웨어 DEFORM에 물성 라이브러리에 있는 IN718 소재를 적용하고, Table 1의 JMAK모델의 상수값을 입

력하여 해석을 진행하면 초기 결정립 크기분포가 공정이 진행됨에 따라 어떻게 달라지는지 예측할 수 있다.

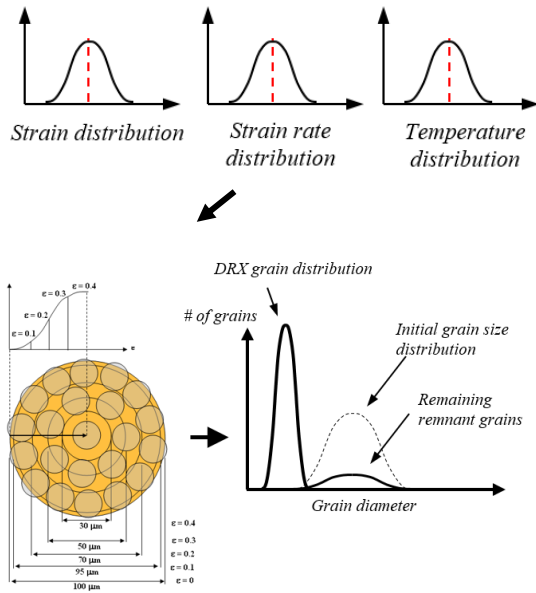


Fig. 7 Schematic methodology to compute evolution of grain size distribution function as a function of distributions of state variables.

4.3 해석 결과

관심부위 3곳(P1, P2, P3)의 초기 결정립 크기 분포가 최종 공정 후에 어떻게 달라지는지 Fig. 8에 나타내었다. P1위치에서는 대부분 재결정 일어나 미세화 되었고, P2와 P3의 위치에서는 초기 결정립 크기가 남아 있는 것을 확인 할 수 있다.

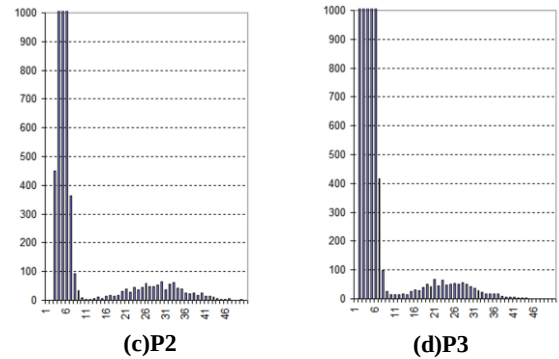
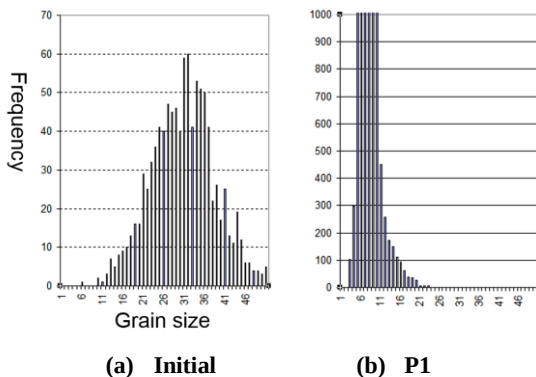


Fig. 8 comparison of grain size distribution of initial and point1, 2 and 3

4. 결 론

기존의 JMAK 모델식과 몬테카를로(MC) 방법을 결합하여, 재결정 거동과 함께 결정립 크기를 분포로 예측하였다. 니켈 합금의 성형과정에서, 전체적으로 평균 결정립 크기는 많이 감소하였으나, 지점에 따라 초기 결정립이 일부 재결정 되지 않고, ALA결정립으로 존재하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. P. Gabb, P. T. Kantzos, J. Telesman, J. Gayda, C. K. Sudbrack, B. Palsa, 2011, , Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy disk, Int. J. Fatigue Vol. 33, pp.414-426
- [2] Yanagida, A., Yanagimoto, J. "A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization using the flow curve:. Journal of Materials Processing Technology, v151(2004), pp.33-38
- [3] Thomas, J.P., Semiatin, S.L. "Mesoscale Modeling of the recrystallization of waspaloy and application to the simulation of the ingot-cogging process:. Materials Science and Technology Conference, 2007, Cincinnati, Ohio, USA.
- [4] DEFORM v11.1 system documentation, Scientific Forming Technologies Corp. Ohio, USA

그립의 기능을 강조한 롤단조 공정의 유한요소모델링 및 적용

진호태¹ · 남태현² · 강석순² 전만수[#]

Finite Element Modeling of a Hot Roll Forging Process with Emphasis on Role of Grip and its Application

H. T. Jin, T. H. Nam, S. S. Kang, M. S. Joun

Abstract

In this paper, a finite element model of grip in roll forging is presented, which is believed to have a deep influence on both finite element predictions and real process. A fraction of roll separating force is exerted on the front end of the material to be pulled. The pulling force during forming is considered as surface traction at the end. Effect of the pulling force is examined, revealing that the predictions of final length and major deformed region have a distinct function of the fraction of the pulling force with respect to the roll separating force, which can be a characteristic property of the process. The approach is applied to aluminum roll forging of manufacturing an optimized perform for a stepped bar.

Key Words : Roll Forging (롤단조), Grip Pulling Force (그립 인장하중), Finite Element Method (유한요소법)

1. 서 론

롤단조(Roll forging)[1]는 일종의 압연에 속하는 것으로 길이방향으로 형상이 균일하지 않는 봉재 형상의 제품 또는 예비성형체를 제조하는 목적으로 사용되고 있다. 롤단조 공정은 원주방향으로 단면이 일정하지 않는 역방향으로 회전하는 두 개의 롤 사이로 봉재 형상의 소재를 통과시킴으로써 행해진다. 롤단조는 완성품 제작에도 사용되고 있으나, 주로 건전한 금속유동선도와 소재의 실수율 향상을 목적으로 하는 예비성형체의 생산에 사용되고 있다[2, 3].

롤단조 제품에서 소성유동선도의 건전성 등으로 롤단조 제품은 형단조 제품에 비하여 우수한 기계적 성질을 가지는 것으로 알려져 있다. 롤단조는 성형하중이 작게 소요되고 크기가 작기 때문에 대형 단조품의 경제적 생산에 유리한 면

이 있다.

롤단조에 관한 학술적 연구는 산업적 중요성에 비하여 많지 않다. 일반 형상압연에 비하여 기하학적으로 복잡한 것이 한 원인으로 사료된다. Cai [3]는 회전롤의 표면과 소재의 표면 사이의 접합해석을 바탕으로 하는 롤 설계 기법을 제안하였다. Liu 등[4]은 타원형-원형 형상의 비교적 단순한 형상의 제품의 생산을 위한 롤단조 공정을 상용 소프트웨어를 이용하여 등온 시뮬레이션을 실시하였다. 엄재근 등[5]은 강열점소성 유한요소법을 이용하여 알루미늄 봉재의 롤단조 공정의 비등온해석을 실시하고 그 결과를 실험 결과와 비교함으로써 결과의 타당성 검토하였다. 두 결과는 대체적으로 유사한 점을 보였지만, 성형 중간에 소재가 금형으로 분리되는 구간에서의 소재의 강체운동을 반영하는 점과 그립의 운동에 따른 소재와 그립의 미끄러짐 등에 있어서 불확실성을 피할 수가 없었다. 그 결과, Fig. 1 에서 보는 바와 같이 끝 부분의 길이 차이가 약간 발생하였다.

따라서 이 연구에서는 그립에 대한 합리적인

1. 경상대학교 일반대학원 기계항공공학부

2. ㈜한국샤프트

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,

E-mail: msjoun.gnu.ac.kr

처리 기법을 확립하고 적용을 통하여 그 가능성을 검증하고자 한다.

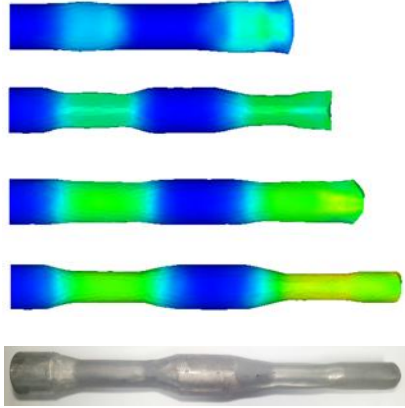


Fig. 1 Comparison between predictions and experiments of an aluminum roll forged product [5]

2. 그림의 모델링

롤단조에서 그림은 소재와 접촉할 경우도 있고, 분리될 수도 있다. 대개의 경우에는 일단 접촉이 발생한 이후에는 분리되지 않지만, Fig. 1의 제품과 같이 길이 방향으로 제품의 단면적의 변화가 클 경우, 성형 중에 소재가 롤로부터 분리될 수 있다. 이 때, 그림은 반동과 관성에 의해서 매우 복잡한 운동을 하게 될 것으로 짐작이 된다. 그러나 공학적으로 분리되어 있을 때는 그림에 부과된 일정한 속도로 움직인다고 간주할 수가 있다.

금형이 소재에 접촉하는 순간과 금형과 소재가 분리되는 순간에도 그림의 영향이 클 수가 있다. 그림에는 순간적으로 힘의 변화가 크게 발생할 것이고, 이것은 소재와 금형의 순간적 미끄러짐을 발생시킬 것이다.

전술한 그림이 소재의 운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 압하력 F_{RS} 에 비례하는 추정된 하중을 그림에 부과하는 방법을 이 논문에서 제안한다. 즉, 그림에 의해서 소재에 부과된 하중 즉 그림 인장하중 F_G 은 다음 식에 의해서 정의되며, 실제의 해석에서는 이 힘에 상응하는 균일한 응력을 소재의 선단면에 부과하였다.

$$F_G = f \times F_{RS} \quad (1)$$

여기서 상수 f 는 비례상수이며, 이 값은 실험과 해석의 비교를 통하여 공정에 특징에 따라 결정되는 일종의 공정변수를 정량화한 것이다.

만약 소재가 금형으로부터 분리되면, 입력된 그림의 이동속도로 소재가 강제운동하도록 하였다.

Fig. 2는 적용 대상의 공정을 나타내고 있다. 이 공정은 계단 봉재를 생산하는 공정으로 비교적 형상 측면에서 단순하지만, 그림 모델의 정량화 목적으로는 유리한 측면이 있다.

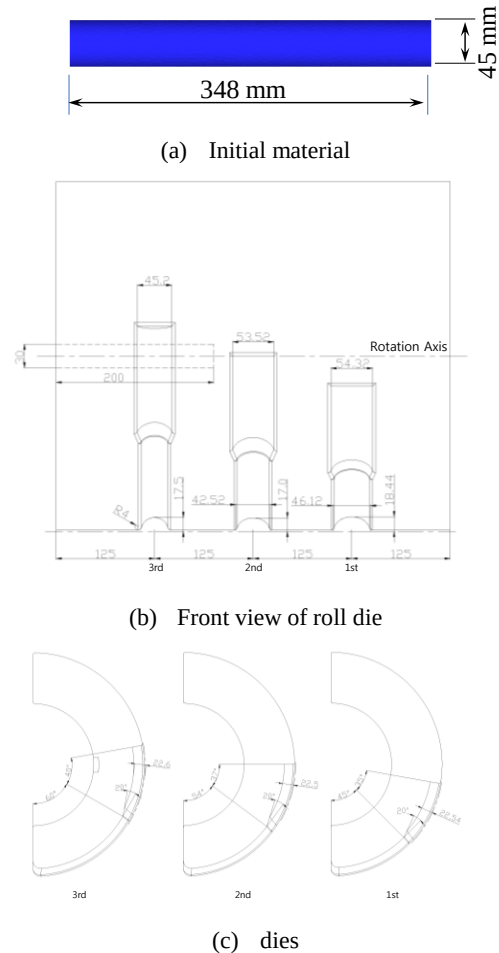


Fig. 2 Finite element model

Fig. 3 에 유동응력 정보를 나타내었다. 물과 소재 사이의 마찰조건으로 쿨롱마찰법칙을 사용하였고, 마찰계수로 0.25 를 사용하였다. 물의 회전속도는 50 rpm 으로 하였다.

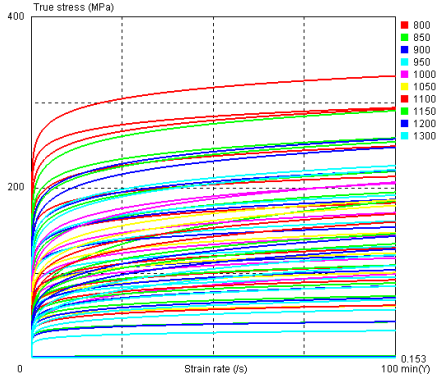
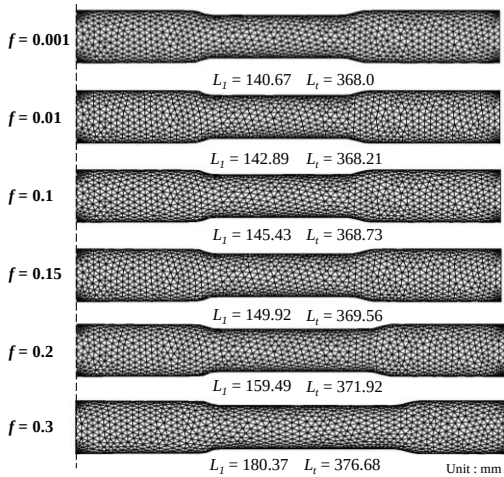
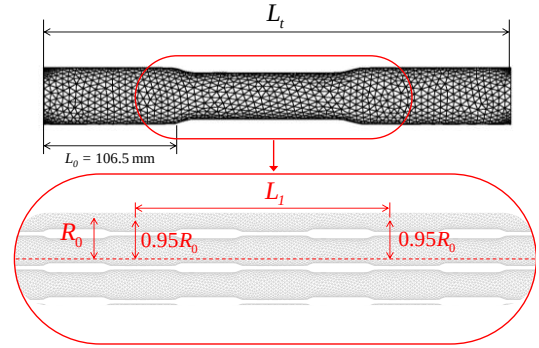


Fig. 3 Flow stress

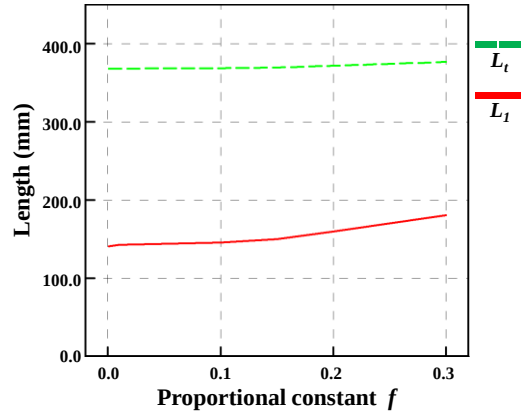
먼저 제 1 단을 이용하여 상수 f 의 영향을 분석하였다. f 에 따른 변형 형상을 정리한 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이, 상수 f 에 따라서 좌측, 즉 입구에서의 변형은 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 주변형 구간에서 길의 변화가 비교적 크게 발생하며, 전체적으로는 길이 변화가 발생하지만 주변형 구간에 비하면, 크지 않다.



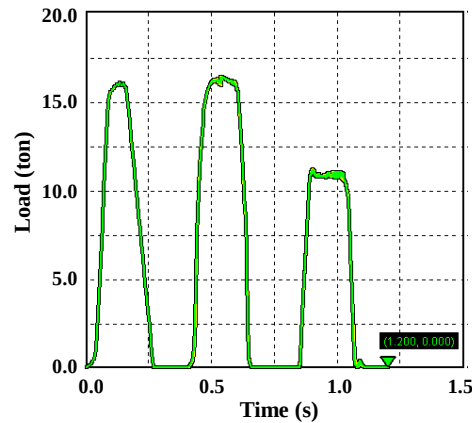
(a) Deformed shapes at the end of 1st stage



(b) Definition of measures L_1 and L_t



(c) $f - L_1$ curve



(d) Roll separating force when $f = 0.2$

Fig. 4 Effect of pulling force on the roll forged bar

따라서 Fig. 4(b)에서 정의된 주변형 구간의 길이 L_1 로 상수 f 의 영향을 정량화하는 것이 바람직하다. 주변형 구간은 직경이 초기치 대비 95% 이하로 줄어든 영역으로 정의하였다. Fig. 4(c)에 전체 길이 L_t 및 주변형 구간의 길이 L_1 와 f 의 관계를 나타내었다. Fig. 4(d)는 시간경과에 따른 공정 중 물의 압하력의 변화를 나타내었다.

Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이, 그립 인장하중의 증가에 따른 L_1 의 증가가 $f = 0.15$ 이후에 급격히 늘어난다. 따라서 수치적 안정성 측면에서 0.1 내외의 값은 이 공정에서 형상 예측에는 큰 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.

반면, 경험적으로 볼 때, 대부분의 경우에 대해서 0.1 내외의 인장하중을 가하는 것은 형상 변화에는 큰 영향을 미치지 않지만, 특히 초반의 접촉처리의 취급에 있어 수치적 안정성에 도움을 준다.

물론 상수 f 는 상황에 따라 다르며, 실험적으로 결정되어야 할 공정 상수이며, 유사한 공정에 적용이 가능하다.

Fig. 5는 $f = 0.1$ 일 때의 변형이력을 나타내었다. 롤단조를 통하여 건전한 단류선을 얻을 수 있는 것은 당연하다.

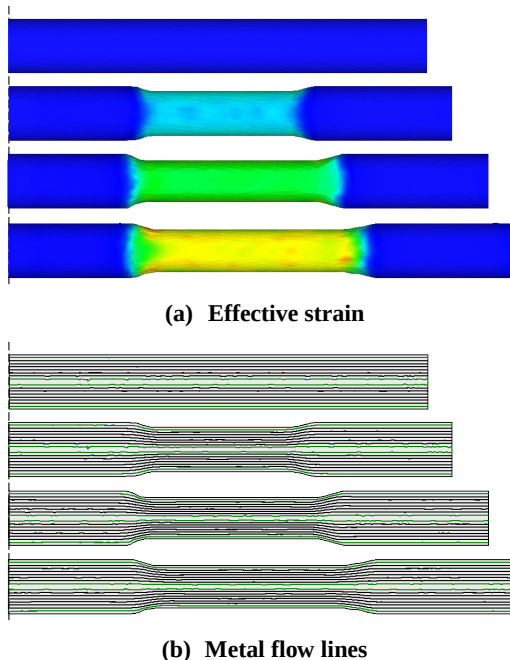


Fig. 5 History of deformation when $f = 0.1$

3. 결론

이 논문에서는 롤단조 공정의 해석에서 난제 중의 하나인 그립의 모델링을 제시하였다. 이 그립의 모델은 소재와 물이 접촉하지 않을 때에는 입력된 일정한 속도로 운동하며, 물과 소재가 접촉할 때에는 압하력의 일정 비율로 그립이 소재를 앞으로 당기도록 하였다. 이것은 물과 소재의 수치적 미끄러짐을 방지하는 역할을 하며, 그 크기에 따라서 롤단조 된 제품의 길이에 영향을 미친다. 따라서 해석과 실험 결과의 비교를 통하여 축적된 경험 수치를 이용함으로써 롤단조 공정 해석의 신뢰성을 제고시킬 수가 있다.

후 기

이 연구는 중소기업청 산학연협력기술개발사업과 BK plus 21사업의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] K. Lange, 1985, Handbook of metal forming, Society of manufacturing engineers.
- [2] S. Z. Hong and R. G. Hu, 1989, A Study of the roll forging technology for turbine blades of a supercharger, Rotary Forming in Proc. Int. Conf., Int. Academic Publishers, Beijing, pp. 230-233.
- [3] Z. Y. Cai, 2005, Precision design of roll-forging die and its application in the forming of automobile front axles, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 168, pp. 95-101.
- [4] G. H. Liu, G. S. Ren and C. G. Xu, 2007, Simulation of 3-D deformation and material flow during roll forging process using system of oval-round groove, Acta Metall. Sinica, Vol. 20, No. 5, pp. 380-384.
- [5] 엄재근, 강신길, 김진우, 김민철, 박건형, 정순종, 이민철, 전만수, 2010, 알루미늄 로우암의 고수율 복합성형 공정의 유한요소해석, 한국소성가공학회 추계학술대회, pp. 242~245

11. 포스터 발표

(제 5 발표회장)

이속압연 가공된 극저탄소강의 미세조직 및 우선방위 거동

양해웅¹ · 권정현¹ · 고영건[#]

Microstructure and Texture Development of Interstitial Free Steel Deformed by Differential Speed Rolling

H. W. Yang, J. H. Kwon, Y. G. Ko

Abstract

The work studied the role of the deformation route on the microstructure, mechanical properties, and texture of interstitial free (IF) steel via differential speed rolling method. For the deformation experiment, total height reduction of 75% was imparted by differential speed rolling operations using three kinds of route at a fixed roll speed ratio of 1:4 for the upper and lower rolls, respectively. Microstructural analyses using electron backscattered diffraction measurements showed that the samples rolled at deformation level of 50% resulted in the finest mean grain size of $\sim 0.5 \mu\text{m}$ with a relatively uniform microstructure. Texture interpretation revealed that the fraction of alpha fiber and gamma fiber in the deformed samples increased as the deformation level per pass increased.

Key Words : Interstitial Free Steel, Differential Speed Rolling, Deformation, Microstructure, Texture

1. Introduction

Ultrafine grained (UFG) metals and alloys with mean grain size less than $1 \mu\text{m}$ were found to show superior mechanical properties to their coarse-grained counterparts, such as excellent strength and high superplasticity at low temperatures and/or high strain rates. UFG materials in bulk dimensions are produced effectively using severe plastic deformation (SPD) methods, where the processed material is subjected to large plastic deformation [1,2]. A range of SPD techniques have been developed to fabricate bulk ultrafine grained materials, including equal-channel angular pressing (ECAP), high-pressure torsion (HPT), accumulative roll-bonding (ARB), and differential speed rolling (DSR) [3-7]. DSR is a promising method with the potential for the continuous production of large bulk materials in the form of sheets for industrial

applications. In this process intense plastic deformation can be introduced uniformly throughout the sheet thickness by two identical working rolls with different rotation speeds.

Processing by DSR is currently one of the most promising methods for achieving UFG structures in a wide range of metals. When processing using DSR, several factors influence the workability and the microstructural characteristics of an as-rolled sheet, such as the total height reduction, height reduction per pass, roll speed ratio, rolling route, and rolling temperature. The total height reduction is the most significant experimental factor because it dictates the total amount of deformation imposed by DSR. Different studies have reported the effect of the total height reduction and showed that the height reduction has a significant influence on the development of the ultrafine microstructure formed by DSR. In addition, the effects of various height reductions per pass, ranging from 10 to 63%, were investigated on magnesium alloy sheets processed by DSR using the

1. 영남대학교 신소재공학부

교신저자: 영남대학교 신소재공학부,

E-mail: younggun@ynu.ac.kr

same total height reduction of 63%. It was found that the microstructure and texture evolutions of the DSR-processed sheet were strongly affected by the height reduction per pass, where the increasing of the height reduction imposed on the processed sample per pass resulted in a finer and more homogenous microstructure and the height reduction per pass should be higher than a critical value of 20% to produce uniform fine grains. To obtain the same total height reduction, a different number of operations when processing by DSR should be applied regarding to the height reduction per pass leading to different deformation paths.

Accordingly, the present investigation was motivated by two different considerations. First, the limited number of works reporting texture evolutions achieved after deformation by DSR of bcc materials. Second, the effects of the deformation path during DSR processing on the microstructural and textural developments as well as the mechanical properties have not been given sufficient attention. Therefore, the aim of the study reported here was to investigate the effects of the deformation path during the DSR process on microstructure, microhardness and texture evolution of interstitial free (IF) steel.

2. Experimental procedures

Interstitial free (IF) steel samples (Fe - 0.009C - 0.5Mn - 0.041Al - 0.024 Ti - 0.012 Si (wt. %)), which had a fully recrystallized single-phase ferrite structure with mean grain size of $\sim 35 \mu\text{m}$ (Fig. 1a), were used in the form of sheets with a thickness of 4.8 mm, width of 30 mm, and length of 95 mm machined from the starting material. The DSR process was carried out on the samples at room temperature using two identical rolls with a diameter of 220 mm at a roll speed ratio of 1:4 for the lower and upper roll, respectively, under lubricated conditions using graphite as a lubricant. To examine the effects of the deformation path on the microstructure, microhardness and texture evolution of the samples fabricated by DSR, the rolling process was carried out in two steps using three different height reductions per pass (10%, 30%, and 50%), which are indicated herein as the deformation levels. The first

step involved rolling down by a total height reduction of 50%, and the second rolling step was performed with a further reduction by a 75% total height reduction. The rolling steps were conducted at the different deformation levels leading to three deformation paths. The electron backscatter diffraction measurements were carried on the deformed samples at different thickness locations: top, middle, and bottom. These polished samples were also used for the optical microscopy (OM) observations. To measure the Vickers microhardness, the as-received and DSR-processed IF steel samples with mirror-like polished surfaces were examined using a Vickers microhardness tester equipped with a Vickers indenter using a load of 200 gram and a dwell time of 10 second. The microhardness values were recorded in a rectilinear grid pattern across the thickness direction of the fabricated samples.

3. Experimental results

3.1 Microstructure evolution

With increasing the deformation level imposed on the IF steel samples during DSR process, the deformation bands became thinner and the boundaries between the bands were very blurry and difficult to resolve by the optical microscope (Fig. 1), indicating that large plastic deformation occurred homogeneously during DSR processing.

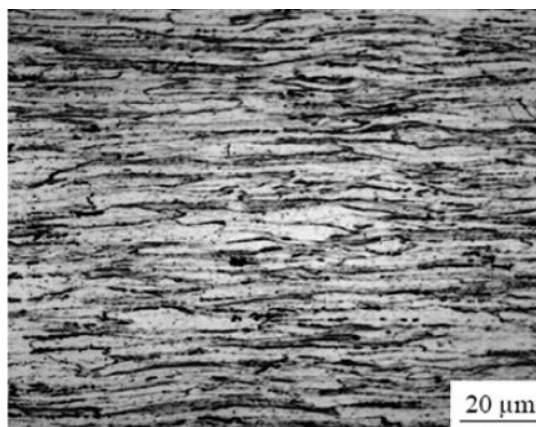


Fig. 1 OM image showing the microstructure of the

DSR-deformed IF steel sample

3.2 Mechanical properties

The average microhardness values of the IF steel samples after processing by DSR method at the various deformation levels. The results showed that the average value of the microhardness increased significantly after DSR deformation compared to the initial sample with a microhardness value of ~ 94 Hv due to the grain refinement after DSR deformation and it increased with increasing the deformation level. After a 75% total height reduction of DSR, the sample achieved reasonable level of homogeneity over the thickness direction. Finally there was additional homogeneity and hardening with a microhardness of ~ 260 Hv after DSR processing for a deformation level of 50%.

3.3 Texture evolution

Evolution of the experimental texture as a deformation level of DSR showed that the rolling texture components become more pronounced with increasing deformation level, which are consistent with other reports of IF steel after processing by a lubricated-ARB process and conventional rolling.

4. Conclusions

Samples of interstitial free (IF) steel were processed using a differential speed rolling (DSR) method for 50% and 75% total height reductions at room temperature and a speed ratio of 1:4. The deformation-induced grain refinement mechanism, microhardness homogeneity, and texture developed with the respect to the imposed DSR-deformation level were reported. The results obtained in the present study can be summarized as follows.

(1) DSR-deformation level has a significant effect on the grain refinement evolution of IF steel. After a total height reduction and deformation level of 75% and 50%, respectively an ultrafine grained microstructure

with a grain size of $0.5\ \mu\text{m}$ possessing misorientations with high angles was obtained.

(2) Measurements of the Vickers microhardness recorded throughout the thickness direction show that the microhardness increases significantly after DSR deformation due the grain refinement, and the microhardness distributions throughout the thickness direction of the IF steel samples depended on the amount of deformation imposed on the sample per pass.

Acknowledgment

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, South Korea (NRF-2014R1A1A2059004).

References

- [1] R. Z. Valiev, 2000, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 45, pp. 103 ~ 189.
- [2] Y. G. Ko, 2006, An analysis of the strain hardening behavior of ultra-fine grain pure titanium, *Scripta. Mater.*, Vol. 54, pp. 1785~1789.
- [3] R. Z. Valiev, 2006, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Prog. Mater. Sci.* Vol. 51, pp. 881~981.
- [4] Y. G. Ko, 2006, Low-temperature superplasticity of ultra-fine grained Ti-6Al-4V processed by equal-channel angular pressing, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 37, pp. 381~391.
- [5] C. Xu, 2010, Principles of ECAP-Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy, *Acta. Mater.*, Vol. 58, pp. 1379~1386.
- [6] A. P. Zhilyaev, 2008, Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 53, pp. 893~979.
- [7] E. Y. Yoon, 2013, Grain refinement and tensile strength of carbon nanotube-reinforced Cu matrix nanocomposites processed by high-pressure torsion, *Met. Mater. Int.*, Vol. 19, pp.927~932.

초고강도강판 성형용 금형의 수명 향상을 위한 PVD 코팅의 특성 분석 I : 스크래치 시험을 통한 코팅층의 밀착력 및 파괴모드 분석

임형철[#] · 윤국태¹ · 허재영¹ · 송재선¹ · 윤일채¹ · 박춘달¹

Analysis of Surface Properties of PVD Coatings to Improve the Service Life of Die for UHSS I : Adhesion and Failure Mode of the Coating Layer by Scratch Test

H. C. Lim, K. T. Youn, J. Y. Heo, J. S. Song, I. C. Yoon, C. D. Park

Abstract

Experimental works were carried out to investigate the properties about surface treatments to improve the service life of the dies for formation of UHSS(Ultra High Strength Steel) sheet. It was applied on the SKD11 that surface treatments are the ion nitriding and PVD coating such as CrN, CrAlN, TiAlN and TiAlSiN. The thickness of ion nitriding and coating layer are about 50 μm and 3~5 μm respectively. The results of hardness tests showed that the PVD coating layer was higher than the SKD11 applied heat treatment and ion nitriding. The adhesion between the coating layer and substrate is an important factor in deciding whether or not to apply coating on the dies. It is defined in this study that the adhesion is the critical load delaminated the coating layer for the first time. The critical load was assessed by the scratch test. And also the critical load was analyzed according to whether or not the ion nitriding is applied on the substrate because the critical load depends on the hardness of the substrate. In the results of scratch tests, in the case of TiAlSiN coating without ion nitriding, the critical load was lower than with ion nitriding. Thus, the ion nitriding should be applied to improve the adhesion. Also, the failure mode was analyzed through the scratch track in order to investigate the adhesion relation between coating layer and substrate.

Key Words : PVD coating, Adhesion, Failure Mode, Service Life, UHSS(Ultra high Strength Steel)

Acknowledgment : 본 연구는 산업기술혁신사업(과제명 : 1.5GPa급 초고강도 차체부품 변형제어 냉간 정밀 프레스 성형 기술 개발, 과제번호 : 10053026) 및 지역연고산업육성사업(과제명 : 대구금형산업 글로벌 역량 강화 사업, 과제번호 : NP2013-0006)의 일환으로 수행되었습니다.

1. 대구기계부품연구원
DMI, E-mail: lhc@dmire.kr

초고강도강판 성형용 금형의 수명 향상을 위한 PVD 코팅의 특성 분석 II : 마찰, 마모 및 전단시험 평가

임형철[#] · 윤국태¹ · 허재영¹ · 송재선¹ · 윤일채¹ · 박춘달¹

Analysis of Surface Properties of PVD Coatings to Improve the Service Life of Die for UHSS II : Evaluation of Friction, Wear and Shear test

H. C. Lim, K. T. Youn, J. Y. Heo, J. S. Song, I. C. Yoon, C. D. Park

Abstract

Previous works was carried out to analysis properties such as adhesion and scratch test failure modes of the PVD coatings for UHSS forming dies. In the results of previous works, it was suggested that the ion nitriding should be applied to improve the adhesion between coating layer and substrate by the scratch test. In this study, plane friction test and ball-on-disc wear test were conducted according to conditions of the surface treatment such as the ion nitriding and PVD coating. The results of plane friction test confirmed that friction coefficient is lower when the normal force and feed speed of the tool increases. Also, in the results of the ball-on-disc wear test, the wear volume of specimens applied PVD coatings is smaller than that without PVD coating. In addition, it was revealed that delamination of the coating layer without ion nitriding occurred in the initial stage of the test because of low adhesion. In order to investigate the service life of dies according to the surface treatment, the shear test was performed using dies applied ion nitriding and PVD coating. Also, the optimum condition of surface treatment was suggested based on mechanical properties obtained by various tests.

Key Words : PVD coating, Friction Coefficient, Wear, Service Life, UHSS(Ultra high Strength Steel)

Acknowledgment : 본 연구는 산업기술혁신사업(과제명 : 1.5GPa급 초고강도 차체부품 변형제어 냉간 정밀 프레스 성형 기술 개발, 과제번호 : 10053026) 및 지역연고산업육성사업(과제명 : 대구금형산업 글로벌 역량 강화 사업, 과제번호 : NP2013-0006)의 일환으로 수행되었습니다.

1. 대구기계부품연구원
DMI, E-mail: lhc@dmire.kr

열가소성 엔지니어링 플라스틱의 경도와 강도관계

박규남¹ · 민동균[#]

The relationship between strength and hardness For engineering thermoplastics

K. N. Park, D. K. Min

Abstract

Both strength and hardness have an effect on forming and machining. Also plastics has a part to give an influence to a property of matter. The hardness tester are a various types. One of thing is Hv(Hardness Vickers). It's commonly used to every materials. But it is difficulty to use in case of plastics cause of ductility. So it have to use HRR(Hardness Rockwell scale R) to measure on hardness of plastics. In the strength, there is tension and compression. It's not same values on plastics case alternatively the metallic material. So it have to separate tension case and compression case. In this study, the experiment was performed with commonly thermoplastics except fiber reinforced plastics. The study will be presented the relationship between the strength and hardness.

Key Words : Hardness, Strength, Rockwell R, Thermoplastics, Engineering plastics.

1. 서 론

재료를 성형하거나 가공하는데 있어서 기계적 물성이 영향을 주는 것은 흔히 알고 있는 내용이다. 그 영향을 주는 다양한 요소 중에서 특히 강도와 경도는 주요 영향으로 작용한다고 볼 수 있다. 이 부분에 대해서는 특히 금속 재료에 대해서는 많은 연구결과[1]를 찾아 볼 수 있다. 마찬가지로 플라스틱 소재에서도 영향을 고려해 볼 필요가 있었다. 최근 다양한 엔지니어링 플라스틱이 금속 소재처럼 성형뿐만 아니라 가공품으로써도 사용 되고 있기 때문이다. 금속의 경우 경도와 강도에 대한 연구는 많은 성과가 이뤄져 있었다. 특히 경도 계는 넓은 측정값을 가지는 Hv(비커스 경도)를 이용하여 측정하고 일정부분 수렴하는 강도와와의 특정 비를 결정하였다.

일찍이 1945년, 비숍[2]은 원뿔형 압입자를 이

용하여 구 또는 실린더 구멍의 근사 하는 힘의 분배를 제안하였는데, 입장의 작용하는 힘의 평균과 young's modulus 와 전단응력 그리고 가공 경화에 대한 관계에 대해서 아래 식(1)과 같이 정리하였다.

$$\frac{P}{\sigma} = \frac{2}{3} \left(1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)\sigma} \right) \quad (1)$$

이 식은 이후에 많은 연구에 의해서 강도와 경도의 관계를 나타내는 역할을 하였고 아래 식(2)는 일반적인 금속재료에서 강도와 경도의 관계를 나타낸다.

$$Hv \cong 3 \cdot \sigma \quad (2)$$

플라스틱 소재의 경우 Hv를 통해 측정이 어렵기 때문에 가능한 측정범위를 가진 HRR(로크웰 R) 또는 HRM(로크웰 M)을 이용하여야 한다. 본 연구에서는 측정범위가 넓은 HRR을 이용하여 경도 값 측정을 진행하였다. 강도 값의 경우 인장강도와 압축강도로 나누어서 볼 수 있는데,

1. 한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학
민동균: 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부,
E-mail:dkmin@koreatech.ac.kr

플라스틱 소재는 인장과 압축의 관계가 일정한 금속과는 다르므로 각각 분리하여 분석을 진행하였다. 본 연구에서는 시중에서 다방면으로 이용되고 있는 열가소성 플라스틱을 기준으로 하여 강화섬유 플라스틱이 아닌 일반 엔지니어링 플라스틱에 한정하여 수행하였다.

2. 실험

실험을 진행하기 위해서 열가소성 엔지니어링 플라스틱 소재를 선정하였다. 선정된 소재는 Polyester S1000, PPS, Melidin70001, PVC, POM, MC, ABS, PE, PP, PC, 6N 이다. 더 많은 데이터를 누적하는 것이 중요하지만, 정도 및 강도 실험을 진행해야 하는 한계성 때문에 경향을 보기 위한 연구로 한정하였다.

2.1 경도실험

시편 제작 및 시험방법은 ASTM E18-03 그리고 ASTM D785-05의 관련 규격을 적용하였다. 장비는 아래 Fig.1의 경도계를 이용하였다.



Fig.1 Rockwell hardness tester

2.2 강도실험

인장/압축 실험은 Fig.2의 시마즈 사의 AG-X 모델을 이용하였으며, 시험조건 및 시편의 규격은 ASTM D638의 코드기준을 적용하였다.



Fig.2 AG-X Tester

3. 실험 결과

3.1 결과 데이터

측정된 결과 값을 바탕으로 하여 아래 Table.1과 Table.2를 작성하였다. 작성된 내용은 다음과 같다.

Table.1 Result of test

	Tensile (MPa)	Compressive (MPa)	Hardness (Rockwell)
S1000	62.1	127.1	R122
PPS	97.6	96.5	R119
Meldin	95.5	125.8	R124
PVC	52.1	53.7	R118
POM	61.1	105.0	R117
MC	77.2	93.1	R110
ABS	41.7	47.2	R105
PE	34.1	19.5	R34
PP	42.3	48.8	R99
PC	61.1	66.7	R114
6N	80.6	90.4	R111

Table.2 Ratio of result

	H/Tensile	H/Compressive
S1000	1.96	0.96
PPS	1.22	1.23
Meldin	1.30	0.99
PVC	2.36	2.36
POM	1.95	1.95
MC	1.38	1.38
ABS	1.16	2.44
PE	0.57	0.97
PP	2.34	2.03
PC	1.87	1.71
6N	1.38	1.23

Table.2 에서 H/Tensile 값은 경도 값을 인장 응력 값으로 나눈 결과이다. H/Compressive 값은 경도 값을 압축 응력 값으로 나눈 값이다. 이 값은 경도와 강도의 관계를 의미한다. 전체적인 경향을 보기 위해서 그래프를 만들어 데이터를 분석해 보았다.

3.2 데이터 분석

결과 데이터를 통해서 아래 Fig.3, Fig.4 에 그래프를 통해서 분석 결과를 얻을 수 있었다. 결과 비율은 인장강도와 경도에 경우 1.5745이며, 압축강도와 경도에 경우 1.2217 이다. 표본 데이터와 연구 자료의 양이 충분하지 않기 때문에 본 결과 값을 절대적으로 해석하기에는 부족하지만, 어느 정도 수렴하는 것을 알 수 있었다. 물론 플라스틱의 경우는 금속 재질과 다르게 앞서 설명하였듯이 인장강도와 압축강도의 차이가 있고 압축강도가 대체적으로 인장강도보다 더 크기 때문에 본 결과처럼 압축 값의 비가 작은 것은 내용과 일치한다고 보여 진다.

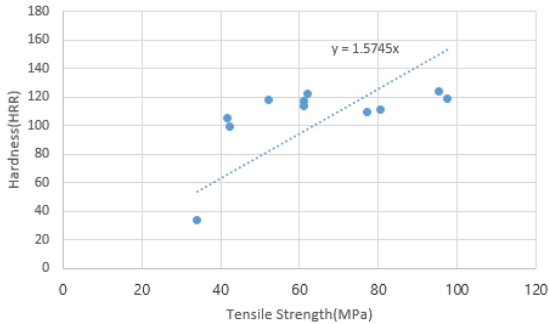


Fig.3 Ratio of Tensile-Hardness

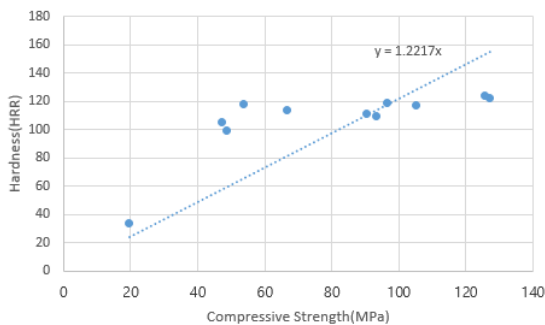


Fig.4 Ratio of Compressive-Hardness

4. 결 론

본 연구에서 얻은 데이터 결과에 대한 분석은 다음과 같다.

(1) 경도에 따른 인장응력과 압축응력에 대한 경향 값으로 각각 1.5745와 1.2217을 얻을 수 있었다.

(2) 얻은 결과값은 경향으로 정확한 값으로 추정되기는 어렵지만, 플라스틱 소재에서도 강도와 경도의 비례 관계가 있음을 확인 할 수 있었다.

(3) 열가소성 플라스틱 소재에서도 경도와 강도는 관계는 유의성이 있음을 증명하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Zhang, General relationship between strength and hardness. J. Material. Sci. Eng. A529(2011) pp. 62 ~ 73.
- [2] R.F. Bishop, R. Hill, N.F. Mott, Proc. Phys. Soc. 57(1945) pp. 147 ~ 159.
- [3] K. Park, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. (Spring 2015) pp. 226 ~ 229.

공석강 펄라이트 강선의 연성에 영향을 미치는 미세조직 인자

안강석¹ · 박정훈¹ · 정신웅¹ · 배형준² · 남원종[#]

Effects of Microstructural Factors on the Ductility of Fully Pearlitic Eutectoid Steel Wires

K. S. An, J. H. Park, S. W. Jeong, H. J. Bae, W. J. Nam

Abstract

The effect of microstructural features, such as interlamellar spacing, prior austenite grain size (AGS) and cementite thickness, on ductility (Reduction of Area) of fully pearlitic eutectoid steel wires was investigated, correlating with the variations of and isothermal transformation temperatures. The samples were austenitized at 900 °C for 3min, followed by isothermal transformation in the temperature range of 560 °C ~ 650 °C. Unlike the existing literature, RA seems to be an optimum reaction temperature for best ductility in the 620 °C. The crack initiation and surface fracture, which is closely related to the microstructural factors such as upper bainite, thickness of lamellar cementite and cementite particles, can be classified into three types.

Key Words: Pearlitic steel wires, Ductility, Reduction of Area, Crack initiation, Surface fracture, Upper bainite

1. 국민대학교 신소재공학부

2. 고려제강 기술개발연구원

교신저자: 국민대학교 신소재공학부

E-mail: wjnam@kookmin.ac.kr

Twin roll strip casting 공정으로 제조된 Al 3003 합금의 저주기 피로 변형 거동에 미치는 열처리의 영향

백민석¹ · 함기수¹ · 어광준² · 정창열³ · 이기안^{1#}

Effect of Heat treatment on Low-cycle Fatigue Deformation Behavior of Al 3003 Alloy Manufactured by Twin Roll Strip Casting Process

M. S. Baek, G. S. Ham, K. J. Euh, C. Y. Jung, K. A. Lee

Abstract

본 연구는 Strip casting 공정으로 제조된 Al 3003 합금의 저주기 피로 특성에 미치는 후 열처리 영향에 대하여 조사하였다. 쌍롤 박판 주조(twin roll strip casting) 공정을 이용하여 두께 8mm, 폭 400mm 의 Al 3003 합금 스트립을 제조, 사용하였다. Strip casting 공정으로 제조된 Al 합금에서는 일반적인 Al 합금의 미세 조직과 다르게 급냉 응고 조직인 globular type 의 dendrite 가 관찰되었다. 이러한 급냉 응고 조직은 열처리(450℃/6h, 공냉) 이후 다소 치밀화되고 조대해지는 것을 확인할 수 있었다. 열처리 전 Al 3003 F 소재와 열처리 후 Al 3003 O 소재 의 XRD 및 EPMA 분석 결과 Al 기지에 $Al_6(Mn,Fe)$ 및 $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ 상들이 관찰되었다. 상기 상들은 열처리 이후 미세하고 고르게 분포되는 것을 FE-SEM 및 TEM 결과를 통하여 확인할 수 있었다. 기본적인 기계적 특성 평가를 위하여 F 소재와 O 소재의 상온 인장 시험을 수행하였다. F 소재의 항복 강도는 120.78MPa, 최대 인장 강도는 166.18MPa 그리고 연신율은 19.86% 로 얻어졌다. 열처리 후 O 소재의 항복 강도는 F 소재보다 10 MPa 낮아졌고 최대 인장 강도는 유사한 값을 나타냈으며 연신율은 약 4.5% 증가하는 결과를 나타내었다. 저주기 피로 시험은 stress ratio(R) = -1, strain rate = $1 \times 10^{-3}/s$, low cycle fatigue limit = 10^4 으로 상온에서 수행하였다. 저주기 피로 시험 결과 열처리 후 O 소재가 열처리 전 F 소재보다 저주기 피로 특성이 우수하게 나타났다. 저주기 피로 파단면과 파단면의 단면을 분석/관찰하였으며, 열처리 후 피로 특성(수명)이 우수한 것은 강화상들의 미세하고 고른 분포와 급냉 응고 조직의 치밀화에 기인하는 것을 알 수 있었다.

Keyword: Twin roll casting, AA 3003, Low cycle fatigue, Heat treatment, Al-Mn alloy

1. 국립 안동대학교 신소재공학부
2. 한국 기계연구원 부설 재료연구소
3. 동국대학교 신소재공학부

Corresponding Author : Kee-Ahn Lee, Andong Natl. Univ., E-mail: keeahn@andong.ac.kr

1. 서 론

Al 3xxx 합금은 Mn 을 첨가한 합금으로써 고용강화 및 미세 석출물 분산 효과로 인해 강도를 높이며, 경량소재로써 충분한 강도, 우수한 비강도, 내식성, 열전도도 그리고 성형성 등의 장점을 가진다. 이에 사용되는 분야로는 열 교환기, 저장탱크 그리고 자동차 부품 등에 사용되고 있다. 이러한 합금은 주로 DC(direct chill casting) 공정으로 제조되고있다. 하지만 최근 Al 합금을 판재로 제조 할 때 생산속도 향상을 줄이고자 하는 연구가 활발히 일어나고 있는 추세이다[1]. 따라서, twin roll casting 공정으로 제조된 Al 3xxx 판재 소재의 기계적 특성 평가는 twin roll casting 공정 소재의 기초 데이터로써 매우 중요한 의미를 가지며 본 연구진에서 연구한 바 있다. 다음과 같은 연구를 진행함에 따라 Al 3xxx 판재 소재가 사용되는 분야에서 저주기 피로 특성이 중요하다고 판단되었으며, 이에 따른 연구 또한 부족한 실정이다. 따라서 Al 3003 합금 소재의 저주기 피로 특성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구진은 twin roll casting 공정으로 제조된 Al 3003 합금 소재의 저주기 피로 특성을 미세조직과 연계하여 분석/규명 하였다.

2. 실험방법

Twin roll casting 공정의 경우 상기 조성의 합금을 720℃로 용해하고 twin 롤 표면 온도를 상하 모두 100℃로 유지한 후 폭 400mm 두께 8mm의 strip 으로 연속적으로 제조하였다.

Table 1 Chemical composition of Al 3003 alloy

Wt.%	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Al
3003	0.001	0.136	1.14	0.53	0.16	Bal.

소재의 성분 분석을 위해 ICP 분석을 수행하였으며 그 결과를 Table 1 에 나타내었다. 열처리의 영향을 알아보기 위해서 twin roll cast Al 3003 소재를 450℃ 에서 6hr. 동안 유지 후 air cooling 하였다. 상기 논문에서는 열처리 전 소재를 F, 열처리 후 소재를 O 소재로 명명하기로 했다. 열처리 전 과 후의 상을 분석하기 위해 XRD Ultima IV 장비를 사용하여 두

소재의 상을 비교/분석 하였다. XRD 분석을 위해 시편을 제조 후 polisher 로 #400~#4000까지 연마를 한 후 1μm diamond paste 를 이용하여 경면 연마를 하였다. 또한 기계적 특성을 알아보하고자 Al 3003 F 소재와 O 소재의 경도 및 인장시험을 수행하였다. 정확한 data 를 확보하기 위해 각 시편당 경도시험은 12번씩, 인장시험은 3번씩 수행하였으며 인장시험 시 정확한 변형량을 측정하기 위해 extensometer 를 장착한 후 시험을 진행하였다. 저주기 피로 시험을 상온에서 응력 비($R = -1$), strain rate = $10^{-3}/s$, fatigue limit = 10^4 조건으로 수행하였다. 이에 인장 및 저주기 피로 파단면을 통하여 변형기구를 규명하기 위해 SEM(TESCAN; VEGA II LMU)장비를 사용하여 파단면 관찰을 수행하였다. 파단면을 관찰 하기 위해 저주기 피로 시험이 끝난 시편을 Instron 8501 장비를 이용하여 시편을 파단 후에 저주기 피로 파면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Twin roll cast Al 3003 합금의 미세조직

Twin roll casting 공정을 이용하여 제조된 Al 3003 F 와 O 합금의 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 1 에 나타내었다.

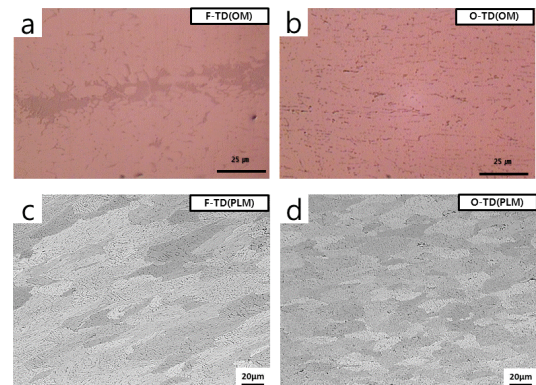


Fig. 1 Microstructure of twin roll cast Al 3003 alloy with; optical microscope (a) F, (b) O alloy and polarization microscope (a)F, (b) O alloy.

OM 결과에서 F 합금은 strip 중앙 부위에 석출물들이 띠 형태로 존재하고 있으며, 열처리 후 띠 형태들은 사라졌다. Twin roll casting 특징인 급냉응고 조직을 관찰하기 위해 편광현미경을 이용하였다. 그 결과 열처리 전 불 균일한 급냉응고 조직들이 열처리 후 치밀해 되며 균일해진 것을 확인하였다.

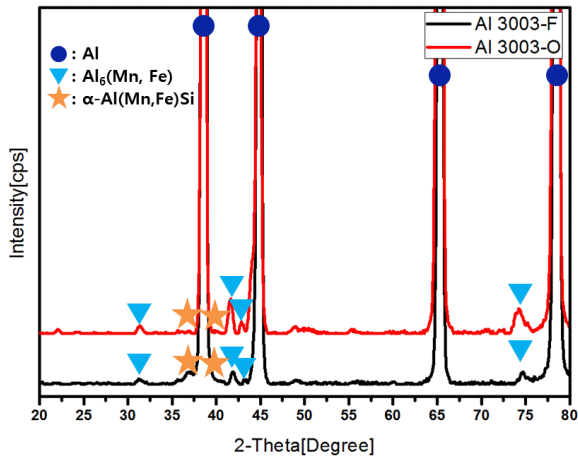


Fig. 2 XRD results of twin roll cast Al 3003 alloy

Twin roll casting 공정으로 제조된 Al 3003 합금의 XRD 분석을 Fig. 2 에 나타내었다. 기본적으로 두 합금은 Al 기지에 $Al_6(Mn, Fe)$ 그리고 $\alpha-Al(Mn, Fe)Si$ 상으로 구성되어 있는 것으로 확인되었다.

3.2 TRC Al 3003 합금의 저주기 피로 거동

Table. 2 에 twin roll cast Al 3003 합금들의 인장특성 결과를 나타내었다.

Table 2 Tensile properties of TRC Al 3003 alloys

	Y.S.[MPa]	U.T.S.[MPa]	El.[%]
F alloy	124.8	166.4	19.6
O alloy	112.2	167.2	23.0

열처리 후 항복강도는 줄어들었지만 인장강도는 유사하게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 석출물들이 미세하고 고르게 분산되어 가공경화가 많이 나타났기 때문으로 사료된다. 또한 연신율은 열처리 후 증가하였다. Twin roll casting 공정으로 제조된 소재의 소성변형을 진폭과 피로 수명의 관계를 알아보기 위해 Coffin-Manson 식을 이용하여 Fig. 3 에 도식화 하여 나타냈다.

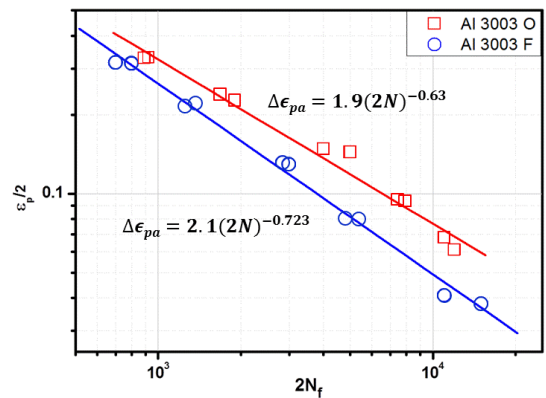


Fig. 3 Results of low-cycle fatigue test

그 결과, 열처리 후 O 소재가 F 소재에 비해 높은 저주기 피로 특성이 나타났다. 일반적으로 연신율이 높게 나타나면 저주기 피로 특성이 높다고 알려져 있다. 앞서 Table. 2 에 언급한 결과와 일치하는 결과를 나타내고 있다

이를 명확히 규명하기 위해 저주기 피로 파단면을 관찰했다(Fig. 4).

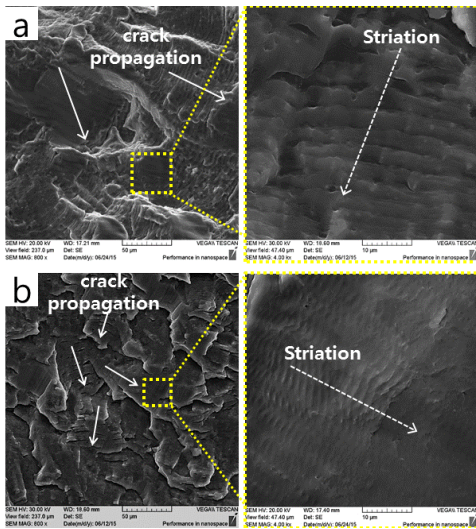


Fig. 4 Fracture surfaces after low-cycle fatigue test

($\Delta\epsilon_f/2=0.3\%$); (a) F, (b) O alloy.

그림에서 나타난 바와 같이 열처리 전 F 소재의 저주기 피로 파면에서는 불규칙한 피로 파면이 관찰되고 있다. 반대로 열처리 후 O 소재의 저주기 피로 파면에서는 F 소재에 비해 상대적으로 규칙적인 피로 파면이 관찰되고 있다. 이러한 이유는 앞서 언급한 바와 같이 주강화 상들의 미세화 및 고른 분포로 기인한 것으로 사료된다. 여기서 주목할 점은 striation들의 형태이다. 저주기 피로는 고주기 피로와 달리 피로 균열 시작점(fatigue crack initiation)이 아닌 피로 균열 전파(fatigue crack propagation)가 매우 중요하게 작용된다. 저주기 피로 특성이 우수한 소재일수록 O 소재와 같이 striation 폭이 좁게 나타난다. 이는 피로 균열 전파가 느리게 나타난다는 의미와 같다. 따라서 열처리 후 O 소재가 피로 특성이 우수해지는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Twin roll casting 공정으로 제조된 Al 3003 합금의 저주기 피로 변형 거동에 미치는 열처리 영향에 대해 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 열처리 전 F, 열처리 후 O 합금 모두 Al

기지에 $Al_6(Mn, Fe)$ 그리고 $\alpha-Al(Mn, Fe)Si$ 상으로 구성되어 있었다. F 합금은 twin roll casting 직 후 strip 중앙 부위에 석출물들이 뭉쳐있는 것이 관찰되었고, 불 균일한 급냉응고 조직이 관찰되었다. 반대로 열처리 후 O 소재의 경우 뭉쳐져 있는 석출물들이 미세화 되고 분산된 것으로 관찰되었으며, 열처리로 인해 급냉응고 조직들이 치밀화 되어 균일하게 분포된 것으로 관찰되었다.

(2) 저주기 피로 특성 결과, 열처리를 수행함에 따라 O 소재가 저주기 피로 특성이 우수하게 나타났다. 일반적으로 연신율이 높을수록 저주기 피로 특성이 우수하다고 보고되고 있다. 이처럼 본 연구에서 인장시험 결과에서 열처리 및 가공경화로 인한 연신율의 증가와 일치한 결과가 나타났다.

(3) 저주기 피로 파면 관찰결과, F 소재의 경우 불 균일한 피로 파면이 관찰되는 반면, 열처리 후 O 소재의 경우 균일한 피로 파면이 관찰되었다. 뿐만 아니라 저주기 피로 균열 전파를 알아보기 위해 고 배율로 striation 을 관찰하였다. 그 결과, 열처리 후 O 소재의 경우 striation 폭이 F 소재에 비해 매우 좁게 나타났으며 피로 전파가 느리게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, 열처리 후 O 소재의 경우 저주기 피로 수명이 우수한 것을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 금속소재융합솔루션센터 구축사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] Y. S. Park, S. B. Lee and N. J. Kim: Mater. Trans., Vol. 44, No. 12, (2003) pp. 2617-2624

레이저 클래딩 공정으로 제조된 Ni-Cr-B-Si 소재의 예열처리에 따른 미세조직 및 물성 변화

강병훈¹ · 김철오¹ · 박순홍² · 이기안^{1#}

Effect of Pre-Heating on the Microstructure and Macroscopic Properties of Ni-Cr-B-Si Material Manufactured by Laser Cladding Process

B. H. Kang, C. O. Kim, S. H. Park, K. A. Lee

본 연구에서는 laser cladding(L.C) 공정을 이용하여 Ni-Cr-B-Si 코팅층을 제조하고 미세조직 및 물성을 조사하였다. 먼저 Cu substrate(20mm)위에 Ni 도금(0.6mm)을 먼저 실시한 후 L.C를 실시하여 Ni-Cr-B-Si의 코팅층을(A소재) 제조 하였다. L.C공정 중 예열처리에 의한 영향을 알아보기 위하여 L.C전 Ni 도금이 실시된 상태에서 300℃까지 예열한 후 L.C를 실시한(B소재) 소재를 제조하였다. 또한 Ni 도금층만의 영향을 확인하고자 Cu substrate(20mm)위에 Ni-도금을 실시한(C소재) 소재, 도금층을 Ni이 아닌 NiB으로 도금하여 NiB(0.7mm)을 도금한(D소재) 소재를 제작하여 연구 하였다. L.C 공정에 사용된 분말의 조성은 Ni-7.5Cr-3.5Si-2.5Fe-1.7B-0.25C이었으며, 구형의 분말을 사용하였다. 초기 분말과 L.C소재의 상분석 결과 공정에 의한 상들의 변화는 없는 것을 확인하였다. 코팅층의 두께는 B소재가 1.67mm로, 예열처리를 하지 않은 A소재(1.17mm)에 비해 높게 생성되었다. 각 코팅층의 물성을 알아보고자 상온경도, 고온경도, 마모시험, 열충격시험을 실시하였다. 상온 경도의 경우 A, B, C, D 각각 440Hv, 391.2Hv, 227Hv, 521Hv로 D소재가 가장 높았으나, 고온의 조건인 300℃이상에서는 D소재가 A, B 소재보다 더 낮게 나타났다. 마모시험 결과 $C < A \approx B < D$ 의 순서로 마모량이 나타났으며, 마모량과 유사하게 마모 파단면이 확인되었다. 열충격시험에서 A소재가 1cycle의 시험만에 L.C층에서 crack이 발생하여 가장 안좋게 나타났다. D소재 또한 4cycle 만에 도금층에서 crack이 발생하였다. 그러나 B, C소재는 최종 10cycle까지 crack 및 코팅층의 박리가 나타나지 않았다. 본 연구를 통해 L.C공정 중 예열처리가 미치는 코팅층의 영향에 대해 확인하고자 하였다. [본 연구는 POSCO의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.]

Key Words : Laser cladding, Ni-Cr-B-Si, Heat-treatment, High temperature hardness, Wear, Thermal shock test

1. 국립안동대학교 금속신소재공학과
2. 포항산업과학연구원 연료전지연구단
keeahn@andong.ac.kr

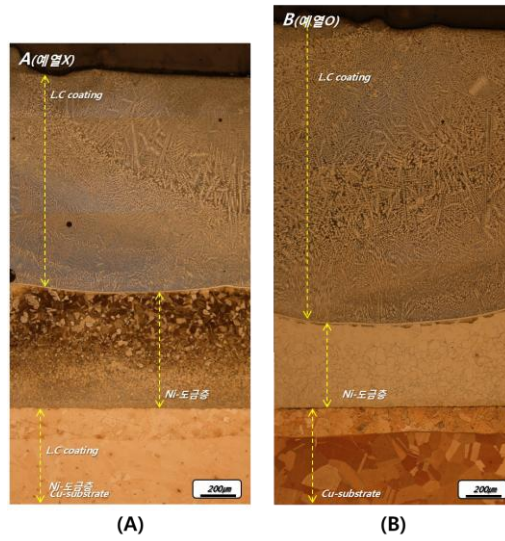


Fig1. Macro images of Laser cladding Ni-Cr-B-Si (a) heat (b) unheat

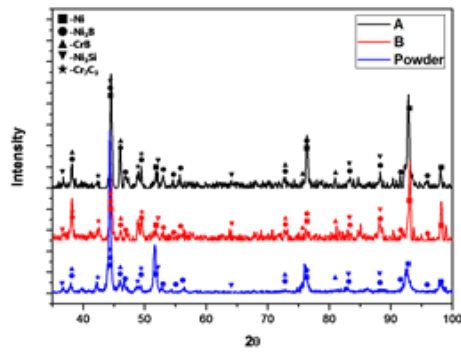


Fig. 2. Result of the XRD analysis of coating layers

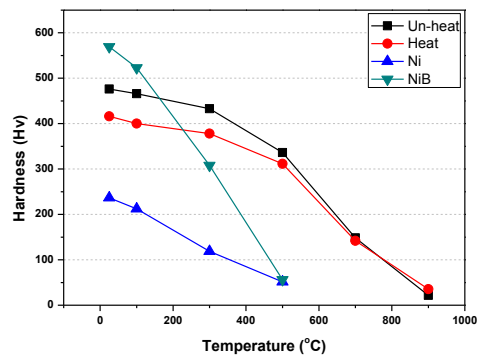


Fig. 3. Result of the high temperature micro hardness test

Ti-3Al-2.5V 튜브의 초소성성형/확산접합에서 접합계면 특성

유원규 · 이상용[#]

Characteristics of Bonding Interfaces of Ti-3Al-2.5V Tube Structure manufactured by the Superplastic Forming/Diffusion Bonding Process

W. G. You, S. Y. Lee

Abstract

A T-shape structure was manufactured by the superplastic forming and diffusion bonding process using two Ti-3Al-2.5V alloy tubes. A Ti-3Al-2.5V tube was prepared for the hydroforming in the superplastic condition until it reaches a surface area such as a roof welded in the hole of another Ti-3Al-2.5V tube. Afterward, the superplastic forming process and the diffusion bonding process were carried out simultaneously until the appropriate bonding along the interface area of two Ti-3Al-2.5V tubes was obtained. The bonding qualities would be different at each location of the entire interface according to the applied process conditions such as strain, pressure, temperature, holding time, geometries, etc. The microstructures of bonding interface have been observed to understand the characteristics of the applied processes in this study.

Key Words : Ti-3Al-2.5V, Superplastic Forming, Diffusion Bonding, Bonding Interface, Microstructure

1. 서 론

최근 타이타늄 소재는 우주항공산업과 방위산업뿐만 아니라 스포츠 및 의료산업 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 경량화와 정밀한 부품 제조를 위한 기술 개발의 중요성이 증대되고 있다. 타이타늄 합금 가운데 가장 많은 응용과 개발이 된 Ti-6Al-4V 합금보다 비교적 저렴하고 고온 특성이 불필요한 Ti-3Al-2.5V 합금을 사용하여 경제성을 높이하고자 하는 기술 개발이 요구되고 있다[1]. 성형 공정 중 하나인 초소성 성형은 이미 우주항공분야에 보편적인 성형 공정으로 사용되고 있다. 또한 확산 접합 공정은 초소성 성형과 요구되는 온도 및 분위기 등이 유사하므로 쉽게 결합이 되는 특징을 가지고 있다. 초소성성형/확산접합을 동시 또는 연속적으로 적용

시킬 경우[2] 기존의 부품보다 더욱 복잡하게 제조가 가능하며, 공정 과정도 단순화하여 비용을 절감시킬 수 있다.

본 연구에서는 두 개의 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브로 초소성성형/확산접합 기술을 이용하여 T 형 구조물을 제조하는 기술 개발의 예를 보여주고자 한다. 기존의 성형 공정과 달리 본 성형 공정에서는 초소성성형/확산접합이 고온에서 연속적으로 수행되는 것이 특징이다. 초소성성형/확산접합의 공정으로 제조된 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브에서 접합부의 미세조직을 관찰하여 본 기술의 특성을 이해하고, 접합 상태의 제어 가능 여부를 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브의 성형 조건은 다음과 같다. 외경 지름 39.2mm, 두께 2.1mm인 튜브의 양쪽 면을 동일한 소재의

안동대학교 신소재공학부

[#] 교신저자: 안동대학교 신소재공학부 sylee@andong.ac.kr

판재로 용접한 후에 초소성 성형에 적합한 형태로 제조하였다. 제조된 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브를 T 형태의 금형에 넣고 870℃에서 N₂ gas를 2~3MPa 압력으로 주입하여 약 25min 초소성 성형을 실시하였다. 이후 같은 공정 조건에서 다른 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브를 이용하여 약 3h 동안 초소성 및 확산 접합을 연속으로 수행하였다.

본 공정으로 제조된 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브 T형 구조물의 단면을 절단하여 초소성성형/확산 접합이 연속적으로 수행된 부분의 미세조직을 관찰 하였다.

3. 결 과 및 고 찰

그림 1은 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브로 제조된 T형 구조물의 단면을 절단한 사진이다. 초소성 성형과 확산 접합이 연속적으로 수행되는 부분은 표시된 곳이며, 미세조직 관찰을 실시한 부분이다.

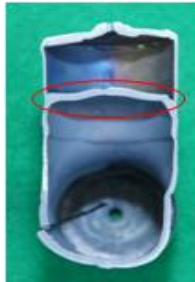


Fig.1 Cross section showing the bonding interface of two Ti-3Al-2.5V tubes.

그림 2는 초소성 성형과 확산 접합이 연속적으로 수행된 접합 부분에서 확산 접합의 단계별 특징을 보여주기 위해 특정 부위를 선정하여 미세조직을 관찰 하였다.

a)에서 아래는 초소성 된 부분이며 위는 확산 접합을 위해 다른 튜브를 이용하여 접합을 수행한 부분이다. 이는 확산 접합의 초기단계에 해당된다. b)는 확산 접합 1단계로 확산에 의한 소성변형이 되어 void가 축소되는 것을 확인할 수 있다. c)는 계면이동을 통한 void의 소멸과정과 계면을 통한 결정립의 성장을 보여주는 2 단계에 해당된다. d)는 마지막 단계인 3 단계로 확산에 의해 계면이 이동하며, 결정립의 성장과 재결정 현상으로 void가 완전하게 소멸되는 것을

확인할 수 있다.

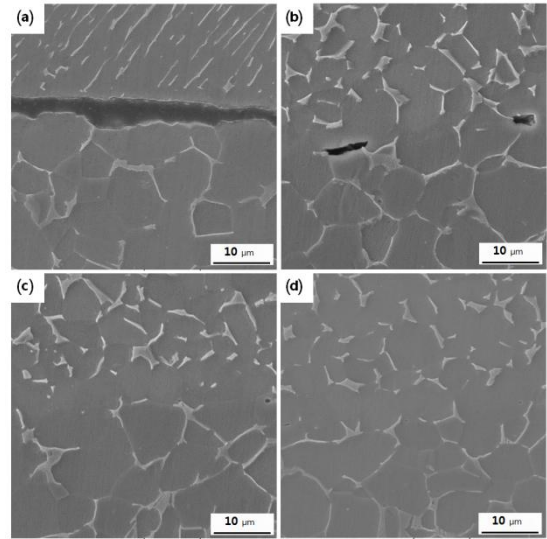


Fig.2 SEM micrographs of diffusion bonded interfaces at different locations.

4. 결 론

본 연구에서는 Ti-3Al-2.5V 합금 튜브의 초소성 성형/확산접합이 연속적으로 수행된 T형 구조물에서 접합부분의 미세조직을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단면의 중심부에서는 부위에 따른 미세조직 변화 즉, 확산접합의 초기 모습부터 void가 소멸되는 모습 및 void가 소멸 후 결정립이 성장하는 것이 관찰 되었다.

(2) 초소성성형/확산접합의 공정 조건에 따라 접합상태의 제어가 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] R.R Boyer, O.N. Senkov and F.H. Froes, 1999, Recent Titanium Developments, The Minerals Metals & Materials Society, pp, 21-33.
- [2] S.S.Hong, Y.H.Kim, 1996, Finite Element Analysis of Superplastic Forming/Diffusion Bonding Processes, Trans. Mater. Process, Vol. 5, No. 1, pp. 37~39.

Twin roll strip casting 공정으로 제조된 Al 3527K 합금의 인장 및 피로 변형 거동

함기수¹ · 백민석¹ · 어광준² · 임영목² · 이기안^{1#}

Tensile and Fatigue Deformation Behavior of Al 3527K Alloy Manufactured by Twin Roll Strip Casting Process

G. S. Ham, M. S. Baek, K. J. Euh, Y. M. Rhyim, K. A. Lee

Abstract

This study investigated tensile and fatigue properties of Al 3527K alloy manufactured by strip casting process. Al 3527K alloy (as strip casted (F material)) produced by twin roll strip casting and H heat treated (480 °C, 6hr, AC) alloy were examined and compared. Microstructure observation results revealed that both alloys (F and H) featured rapid solidification microstructures. In addition, both alloys were identified to be composed of Al, Al₆(Mn, Fe) and AlFeMnSi phases. As H heat treatment was applied, Al 3527K-H alloy formed a more even phase distribution than Al 3527K-F alloy. The tensile properties showed that H heat treatment resulted in increase of strength and decrease of elongation. In tensile fracture surface observation, both alloys showed typical ductile fracture modes. The F alloy was measured to have a dimple size of 6.8 μm on average, and the H alloy measured 4.2 μm on average in fracture surfaces. High-cycle fatigue tests were performed using ISTRON 8501, and the test conditions were stress ratio R=0.1, 10 Hz at room temperature. The fatigue limit showed that H heat treatment resulted in increase of fatigue properties at all stress condition. Furthermore, F alloy featured a larger deviation in fatigue life in all identical stress conditions compared to the O alloy. This study also discussed the fatigue deformation behavior of Al 3527K alloy manufactured by strip casting through the abovementioned mechanical properties as well as the tensile and fatigue fractographies.

Key Words : Twin roll strip casting, Al 3527K alloy, Tensile, Fatigue, Deformation

1. 서 론

알루미늄 합금은 대표적인 경량 소재로서 자동차, 항공기, 건설, 주방용품에 이르기까지 다양한 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 알루미늄 합금은 일반적으로 주조, 압출, 압연 등의 공정을 이용하여 제조되고 있다. 일반적으로 알루미늄 합금을 주조 공정으로 제조할 경우 casting defect가 쉽게 생길 수 있고 이러한 결함들이 파괴 및 피로 균열 생성 원인이 되어 기계적 특성을 저하시킨다[1]. 반면 알루미늄 합금을 압연 및 압출 등의 공정으로

제조할 경우에는 상대적으로 균일하고 제어될 수 있는 미세조직과 우수한 기계적 특성을 나타내지만 추가적인 공정으로 인하여 비용과 시간 등이 상승하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 알루미늄 합금 판재 생산에 용탕에서 직접 판재를 제조할 수 있는 strip casting 공정이 적용, 시도되고 있다. Strip casting 공정의 경우 제조 중에 상대적으로 빠른 냉각 속도를 부여하게 되어 일반 주조 공정과는 다른 미세한 조직을 나타낸다고 알려져 있다[2].

현재까지 Al 3527 합금에 대해서 그 미세조직과 기계적 특성에 대한 연구는 거의 알려진 바 없다. 특히 strip casting 공정으로 제조된 Al 3527 합금에

1. 국립 안동대학교 신소재공학부

2. 한국 기계연구원 부설 재료연구소

Corresponding Author : Kee-Ahn Lee, Andong Natl. Univ., E-mail: keeahn@andong.ac.kr

대한 인장 및 피로 등에 대한 연구는 전혀 보고된 바 없다.

본 연구에서는 strip casting 공정으로 제조된 Al 3527K 알루미늄 합금의 미세조직, 인장, 피로 특성에 미치는 열처리의 영향을 조사하였다. 또한 strip casted 알루미늄 합금의 변형 거동을 미세조직과 연계하여 토의해 보았다.

2. 실험방법

Strip casting 공정의 경우 상기 조성의 합금을 730℃로 용해하고 롤 표면 온도를 상하 모두 100℃로 유지한 후 폭 470mm 두께 8mm의 strip으로 연속적으로 제조하였다.

Table 1 Chemical composition of Al 3527K alloy

Wt.%	Si	Fe	Mn	Cu	Zr	Al
3527K	0.51	0.56	1.58	1.04	0.3	Bal.

소재의 성분 분석을 위해 ICP 분석을 수행하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 열처리의 영향을 알아보기 위해서 strip cast Al 3527K 소재를 480℃에서 6hr. 동안 유지 후 air cooling 하였다. 이 논문에서는 strip cast 소재를 F 합금으로 열처리를 수행한 소재를 H 합금으로 명명하기로 한다. 미세 조직을 관찰하기 위해 표면을 #2000번까지 SiC paper를 이용하여 연마하였으며 그 후 1μm 수준으로 다시 미세 연마를 하였다. 이후 1% HF + 99% 증류수를 이용하여 수 초간 에칭하였다. 상 분석을 위해 XRD, SEM/EDS 등을 수행하였다.

기계적 특성을 평가하기 위해 인장 및 고주기 피로 시험을 수행하였다. 인장 및 피로 실험의 경우 ASTM E8와 E466 규격을 따른 시편을 가공하여 실험을 진행하였다. 상온 인장 실험 및 피로 실험을 위해 INSTRON 8501을 사용하였다. 인장 실험의 경우 1×10^{-3} /s의 초기 변형률 속도로 총 3번 실험하여 평균값을 사용하였다. 고주기 피로 실험 조건은 $R=0.1$, 주파수 10Hz로 설정하였으며, 피로한은 10^7 cycle에서 파괴가 일어나지 않는 최대 응력 조건으로 설정하였다. 인장 및 고주기 피로

실험 후 미세 조직이 피로 변형 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 SEM을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TRSC Al 3527K alloy의 미세 조직

Strip casting 공정을 이용하여 제조된 Al 3527K-F 합금과 H 합금의 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

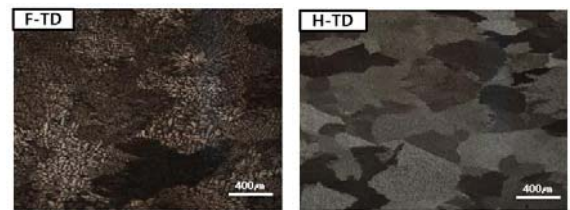


Fig. 1 Microstructure of TRSC Al 3527K alloys

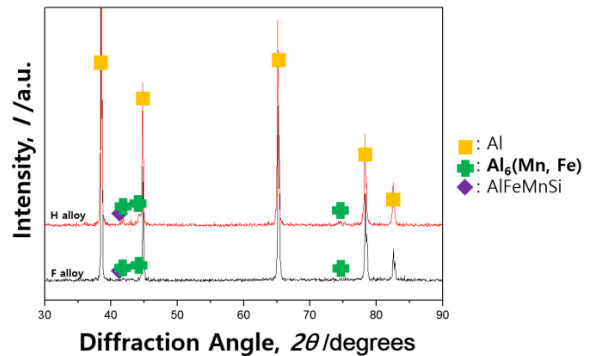


Fig. 2 XRD results of TRSC Al 3527K alloys

F 합금은 상당히 불균일한 미세조직을 가지고 있었으며 전체적으로 globular type의 미세한 dendrite가 나타내었다. 한편 열처리를 수행한 H 합금 역시 F 합금과 유사한 globular dendrite로 구성되어 있지만 상대적으로 더 고른 미세조직을 나타내었다. Strip casting Al 3527K 합금의 XRD분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 기본적으로 두 합금은 Al, $Al_6(Mn, Fe)$, AlFeMnSi 상으로 구성되어 있는 것으로 확인되었다.

조금 더 명확한 상 분석을 위해 수행한 EDS 분석

결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 두 소재 모두 $Al_6(Mn, Fe)$, $AlFeMnSi$ 상이 관찰되었으며 F 소재에서 두 상들이 넓게 뭉쳐서 함께 나타남을 확인할 수 있었다. 열처리를 수행한 H 소재는 F 소재보다 $Al_6(Mn, Fe)$, $AlFeMnSi$ 상이 더 미세하고 고르게 분포되어 있었다.

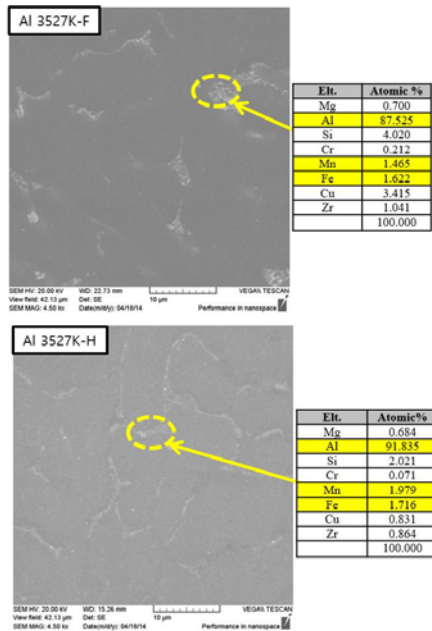


Fig. 3 SEM/EDS results of TRSC Al 3527K alloys

3.2 TRSC Al 3527K alloy의 인장 특성

Table. 2에 strip cast Al 3527 합금들의 인장특성 결과를 나타내었다. 열처리를 수행함에 따라 항복 강도, 인장 강도는 증가하였고 연신율은 감소하였다. 인장 실험 후 관찰한 SEM fractography 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 두 합금 모두에서 dimple 로 대표되는 연성 파괴 mode를 보였다. F 합금의 경우 dimple 크기가 평균 약 $6.8\mu m$ 로 관찰되었으며 dimple의 내부와 주위에 $Al_6(Mn, Fe)$, $AlFeMnSi$ 상이 뭉쳐 있는 것을 확인할 수 있었다. 열처리를 수행한 H 합금 파단면의 dimple 크기는 약 $4.2\mu m$ 로 나타났으며 주로 dimple안에 미세한 $Al_6(Mn, Fe)$, $AlFeMnSi$ 상이 존재하는 것을 알 수 있었다. 즉, F와 H 합금들 모두에서 $Al_6(Mn, Fe)$, $AlFeMnSi$ 상들이

효과적인 강화상임을 알 수 있었다. H 합금의 미세조직 결과에서 관찰되었던 미세하고 고른 석출상들의 분포로 인하여 파단면(Fig. 4)에서도 상대적으로 작고 고른 dimple 들이 형성되었음을 쉽게 이해할 수 있다. 열처리를 수행한 H 합금에서 미세한 석출상들의 효율적인 강화가 응력 집중을 분산시켜 상대적으로 높은 강도를 유발하는 것으로 판단된다.

Table 2 Tensile properties of TRSC Al 3527K alloys

	Y.S.[MPa]	U.T.S.[MPa]	EL.[%]
F alloy	135	194.7	14.3
H alloy	149.9	235.2	10.9

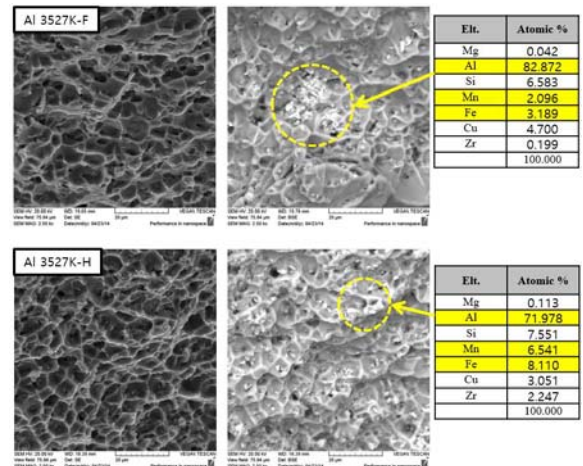


Fig. 4 Tensile fractographies of TRSC Al 3527K alloys

3.2 TRSC Al 3527K alloy의 피로특성

Strip casting 공정으로 제조된 Al 3527K 합금 및 그 열처리 합금의 고주기 피로 특성 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 모든 응력 조건에서 H 합금이 F 합금의 피로 수명보다 긴 것을 알 수 있다. F 합금의 피로한은 120MPa로, H 합금의 피로한은 145MPa로 나타났다. H 합금의 경우 동일 응력 조건에서 피로 수명 deviation이 작은 반면에, F 합금의 경우는 그 deviation이 매우 크게 나타났다.

고주기 피로 시험 후 SEM을 이용하여 피로 파단면을 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. F

합금의 경우 상당히 불균일한 미세조직으로 인해 피로 파단면이 상당히 rough하고 불균일 한 특징을 나타내었다. EDS 분석 결과 micro crack 내부나 주위에 조대한 $Al_6(Mn, Fe)$ cluster가 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 반면 H 합금은 F 합금에 비하여 상대적으로 균일한 파단면을 보였다.. 또한 micro crack은 관찰되지 않았으나, 일부 $Al_6(Mn, Fe)$ 상에서 균열 진전 방향을 바꾸는 경향은 동일하게 나타났다. 열처리를 수행한 H 합금의 우수한 피로 특성은 F 합금에 비해 균일한 미세조직과 미세하고 고른 상화상들의 분포에 기인한 것으로 판단된다.

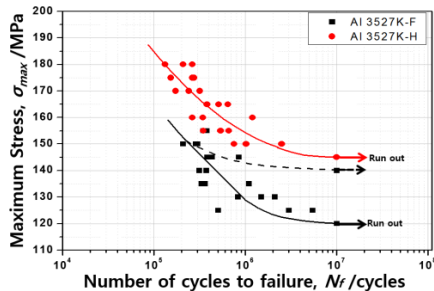


Fig. 5 S-N curve of TRSC Al 3527K alloys

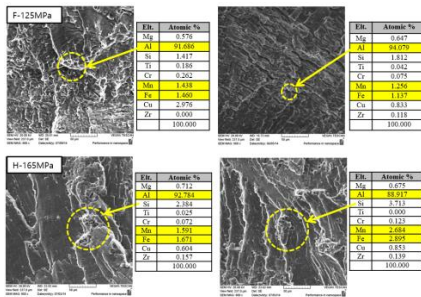


Fig. 6 fatigue fractographies of TRSC Al 3527K alloys

4. 결 론

본 연구에서는 Twin roll strip casting 공정으로 제조된 Al 3527K 합금의 인장 및 피로 변형 거동에 대해 조사하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) F, H 합금 모두 Al, $Al_6(Mn, Fe)$, AlFeMnSi 상으로 구성되어 있었다. F 합금은 급냉 응고에 의한 불균일한 조직을 가지고 있었지만 열처리를 수행한 경우 상대적으로 균일한 미세조직을 가지고 있었다.

또한 열처리를 수행함에 따라 $Al_6(Mn, Fe)$, AlFeMnSi상이 보다 균일하고 미세하게 분포하였다.

(2) 인장시험 결과 열처리를 수행함에 따라 항복, 인장강도는 증가하고 연신율은 감소하는 경향을 보였다. 인장 파단면 관찰결과, 두 합금은 전형적인 연성 파괴 mode를 보였으며 열처리를 수행함에 따라 dimple 크기가 감소하였으며 $Al_6(Mn, Fe)$, AlFeMnSi상들이 효과적인 강화상으로 작용함을 확인 할 수 있었다.

(3) 피로 시험 결과 열처리를 수행하매 따라 모든 응력 조건에서 피로 수명이 높게 나타났다. F 합금은 피로수명 deviation이 상대적으로 크게 나타났다. F 합금의 경우 불균일한 피로 파단면과 조대한 석출상에 의해 유발된 secondary micro crack들을 쉽게 관찰 할 수 있었으나, O 합금은 상대적으로 균일한 전형적인 피로 파단면을 나타내었다. H 합금의 우수한 피로특성은 $Al_6(Mn, Fe)$, AlFeMnSi상의 미세하고 고른 분포에 의해 균열의 생성과 불균일한 균열 전파가 억제되었기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 금속소재종합솔루션 센터 구축사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] H. Mayer, M. Papakyriacou, B. Zetti, S. E. Stanzl-Tschegg, 2003, Influence of Proximity on the Fatigue Limit of Die Cast Magnesium and Aluminum Alloys, Int. J. Fatigue, 25, 245-256
- [2] H. W. Kim, J. H. Cho, C. Y. Lim, S. B. Kang, 2010, Melt Direct Rolling Technology for Low-cost and High-strength Aluminum Alloys, 23, 16-22

박판 미세성형 공정에서 소재의 조성이 성형성에 미치는 영향

지양룡루이¹ · 강충길[#]

Effect of the material composition for formability by sheet metal forming processes

L. R. Jiang, C. G. Kang

Abstract

Sheet metal stamping has been applied in industrial field widely. Stamping forming method not only can get light weight, thin thickness, good rigidity products, productive, low cost, and is suitable for mass production. By contrast, sheet metal stamping has high hardness, high yield point, easy to cause crack, and cause the spring-back, such as the inevitable defects. In this study, through the quantitative analysis on the material, compared the content of the element difference, using the same stamping speed, within a certain range of load, the three different kinds of sheet metal for molding by stamping method. The forming depth and spring-back angle of these three materials after stamping were compared. The results by comparing, which analyzed the influence of material composition for sheet metal forming processes.

Key Words : Stamping , Formability , Forming Depth , Spring Back Angle , Material Composition

1. 서론

박판금속재료에 대한 가공방법인 스탬핑 방식은 공업생산에 널리 쓰이고 있다. 예를 들어 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 분리판, 열교환기의 개스킷(gasket) 등은 주로 스탬핑 공법으로 만들어 진다. 스탬핑 방식을 이용하면 경량화가 되고 또한, 두께가 얇고 강성이 좋은 제품을 가공할 수 있다. 그래서 생산성이 우수하고 원가도 저렴하기 때문에 대량 생산의 이점을 가지게 된다. 반면에 스탬핑 방식으로 박판 재료에 가공을 하면 경도가 높아지고 균열이 쉽게 일어나며 스프링 백 현상 등이 단점으로 나타난다. 원소재의 성분, 금형의 구조 및 재질, 스탬핑의 하중과 속도 등 스탬핑 공법의 성형 효과

에 대해 영향을 미친다. 현재는 국내외 전문가들이 스탬핑 성형성의 개선에 대해 많은 연구를 진행 중이며, 스탬핑 방식으로 성형된 품질의 제어에 대해 많은 성과를 얻었다.

본 연구 내용은 박판 금속 소재 안에 들어있는 조성함량 차이에 따른 성형성에 미치는 영향을 보여주는 것이 목적이다. 본 연구에서 일정한 스탬핑 속도를 지정하고, 지정된 범위 내의 하중을 조절하여 세 가지 박판 금속 재료를 순서대로 정적 하중 스탬핑 공법으로 성형한다. 성형된 소재에 대해 성형 깊이와 스프링 백 각도를 측정한다. 최종적으로 재료의 성형 결과를 비교하여 분석해서 결과의 차이를 통해 소재의 조성이 성형성에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

교신저자: 부산대학교 기계공학부, E-mail:

cgkang@pusan.ac.kr

2. 실험



Fig. 1 MTS material testing machine

본 연구에서 사용된 Fig. 1에서 보듯이 프레스 장비는 정격 하중 25톤 동적 재료시험기(MTS)이다. MTS장비는 미세속도 및 하중제어가 가능하여 정밀 하중실험이 요구되는 스탬핑 실험에 적합하다. 또한 스탬핑 성형 시 프레스 장치에 부착된 로드 셀을 통해 성형 하중을 측정하였으며, 동적 스트레인 미터를 이용하여 수치화 하였다.

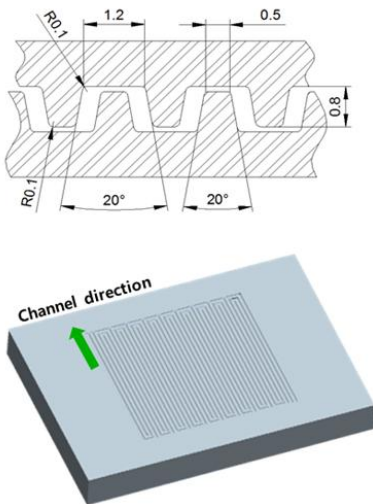


Fig. 2 Schematic diagram of stamping die

본 실험에서 사용된 다른 장비는 펀치, 상부 다이, 하부 다이로 구성되어 있다. 상부 다이와 하부 다이의 소재는 내마모성이 우수한

AISI H13(STD61)을 사용하였다. 상부와 하부 금형에는 미세 채널 성형을 위한 코어 다이(core die)가 설계되었다. Fig. 2에서는 코어 다이를 나타낸다. 치수는 높이 0.8mm, 채널(channel) 간격 1.7mm, 채널 폭은 0.9mm, 리브(rib) 폭은 0.5mm, 채널과 리브 사이의 곡률은 0.1mm, 구배 각은 20°의 크기로 설계하였다. 또한, 금형의 상,하 움직임 중에 금형 뒤틀림 방지를 위해 가이드 라인을 설치하였다.

Table 1 Relative abundance(Wt. %)

	C	Ni	Cr	Fe	Mo
①	0.054	8.130	18.103	73.603	0.110
②	0.065	8.148	18.244	73.411	0.132
③	0.048	10.364	16.608	70.808	2.172

두께 0.1mm의 세가지 금속 판재를 사용하였으며, 가로 100mm x 100mm의 크기로 가공한다. 3가지 판재의 합금 성분을 정량분석을 통해 Table. 1에 나타내었다. 본 실험조건은 스탬핑 공정을 정격 하중 180kN부터 190kN, 200kN, 210kN, 220kN, 230kN, 240kN까지 10kN씩 증가로 하며 일정한 속도 15kN/sec로 실험하였다. 속도가 빠르면 분리판의 변형이 빠르게 증가한다. 이로 인해 소성변형을 일으키는 유동응력이 높아지는 경향이 있다. 연신율이 감소하여 정하중 스탬핑으로 성형 시 크랙이 더 발생하며, 시편과 하중을 가하는 펀치에 마찰이 증가해서 크랙이 쉽게 발생하게 된다. 실험조건에 대해 스탬핑 속도가 15kN/sec로 설정하는 이유는 실험을 통해 15kN/sec일 때, 성형성이 제일 우수하다고 알 수 있었다. 하중을 180kN ~ 240kN 범위 안에서 설정하는 이유는 압력이 증가함에 따라 소재를 금형의 캐비티로 충전 시켜서 압력 증가에 따라 미세채널의 성형 깊이 증가의 많은 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 그리고 이 실험에서 사용된 프레스 장비는 최대 하중이 250kN 밖에 가할 수가 없기 때문에 장비의 안정성을 고려해서 240kN까지 지정하였다. 그래서 최대 하중은 10kN씩 감소하게 설정하였다.

스탬핑 하중이 180kN보다 작아지면 펀치가 소재에 충분한 가압을 주지 못하여, 소재를 금형의 캐비티 내로 충진 시키지 못해서 성형이 잘 이루어지지 않는다. 여러 가지 공정 변수를 고려하여 앞에서 언급한 실험조건대로 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

미세채널을 갖는 세 가지 판재를 제작하였다. 제작된 판재를 1번, 2번, 3번 순서대로 나누고 미세채널의 수직방향에 대하여 각각 와이어커팅(wire cutting)을 실시하여 디지털 현미경으로 채널의 단면모양을 관찰하고, 성형 깊이와 스프링 백 각도를 측정하여 평가하였다.

Table 2 Forming depth of simple by stamping

	①	②	③
180kN	128	113	304
190kN	130	124	326
200kN	133	130	335
210kN	141	133	341
220kN	146	X	354
230kN	X	X	363
240kN	X	X	398

Table. 2는 정적 하중으로 성형된 판재 채널의 깊이를 나타낸다. Fig. 3은 정적 하중으로 성형된 1번 소재와 2번 소재 파단을 일어나는 실제 사진이다.



Fig. 3 Fracture specimen of the relief image photo

Fig. 4는 정적 하중으로 성형된 세 가지 판재의 채널 깊이 결과 값을 비교하는 그래프이며 Fig. 5는 스프링 백 각도 결과 값을 비교하는 그래프이다.

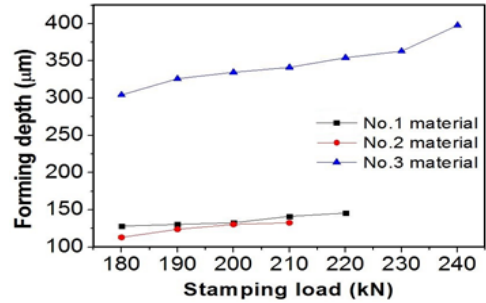


Fig. 4 Three kinds of the materials according to the stamping load for compared forming depth

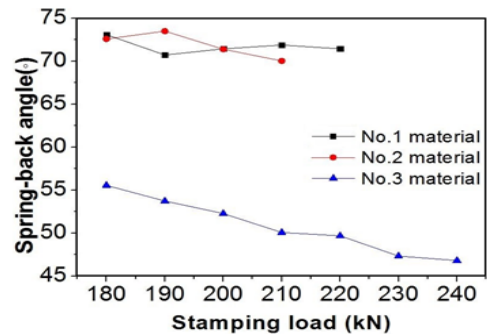


Fig. 5 Three kinds of the materials according to the stamping load for compared spring-back angle

Table 3 Spring-back angle by stamping

	①	②	③
180kN	73.1	72.6	55.5
190kN	70.7	73.5	53.7
200kN	71.4	71.4	52.3
210kN	71.9	70.0	50.1
220kN	71.4	X	49.7
230kN	X	X	47.3
240kN	X	X	46.8

Table. 3은 정적 하중으로 성형된 판재의 스프링 백 각도 값이다.

위의 표와 그림을 보면 같은 실험 조건(하중, 속도)에서는 세 가지의 서로 다른 소재는 성형성 차이를 가진다. 정적 스탬핑 공법으로 성형시 소재의 탄성 회복에 의한 스프링 백 현상과 편치 하중에 따른 성형 깊이 차이를 나타낸 것이다. 하중 시점으로 살펴보면 180kN부터 210kN까지 구간에서 세 개 소재를 모두 성형이 가능하다. 220kN 하중을 주면 2번 소재가 크랙이 발생하여, 성형이 이루어지지 못 한다. 230kN 하중을 주면 1번과 2번 소재 모두 크랙이 발생하여 파단을 일으키게 된다. 단지 3번 소재가 240kN 하중을 가해도 크랙이 발생하지 않고, 성형을 잘 이루게 된다. 성형 깊이 시점으로 살펴보면 1번 소재는 180kN ~ 220kN에서 파단을 일어나기 전까지 128.260 μ m ~ 145.668 μ m로 성형된다. 2번 소재는 180kN ~ 210kN에서 파단을 일어나기 전까지 113.043 μ m ~ 132.626 μ m로 성형된다. 3번 소재는 180kN ~ 240kN에서 304.355 μ m 부터 397.832 μ m까지 성형된다. 성형 깊이가 거의 400 μ m를 된다고 볼 수 있다. 스프링 백 각도 시점으로 살펴보면 1번 소재와 2번 소재가 스프링 백 각도가 모두 70° 이상 넘어서 성형성이 그다지 좋지 않다. 반면, 3번 소재는 스프링 백 각도가 1번과 2번에 비해 상대적으로 15° ~ 25° 만큼 줄어서 성형성이 더욱 우수하다고 볼 수 있다.

본 실험에서 이용한 세 가지 소재 중에서 성형성이 제일 우수한 소재는 3 번 소재이다. 같은 실험조건(속도, 하중)에서도 3 번 소재가 성형 깊이가 더욱 깊고 스프링 백 각도도 나머지 두 가지 소재보다 줄어드는 것을 알 수 있다. 세 가지 소재의 조성을 서로 대비하다 보니 비금속 원소 C 와 금속 원소 Ni, Mo, Fe 의 성분함량 차이가 많이 크다고 볼 수 있다.

C 는 철강 중의 기본적인 비금속 원소이고 항복강도에 대해 큰 영향을 준다. 탄소 함유량을 높아질수록 철강 안의 Fe₃C 의 량을 증가해서 인장강도와 항복강도를 높아지는 반면에 소성이 떨어져서 스탬핑에 대해 악영향을 준다. 특히 Fe₃C 결정립 계에서 나타나면 스탬핑 성능에 부정적인 영향을 준다.

Ni의 역할은 오스테나이트 상(phase) 구역을 안정화 시키고 확대하며 강이 완전히 오스테나이트 조직을 얻도록 해 준다. Ni의 함량이 증가할수록 경도와 인장강도가 떨어지고, 인성(toughness)이 높아지며 내부식성도 높아진다. 1%

Ni함량을 증가하면 소재 강도는 약 29.4Pa를 높아진다. Ni함량이 낮아지면 오스테나이트 스테인리스 강이 안정하지 않아서 냉간 가공을 하고 나서 오스테나이트 경화를 확실히 나타내며, 인성이 떨어진다.

Mo은 스테인리스안에 들어있는 역할은 주로 부식방지를 담당한다. Mo의 함량을 증가할수록 강의 내부식성이 더욱 우수해지고 공식에 대한 저항성이 크다. 가공 경화성은 대단히 크며, 자성은 없다. 기본적으로 오스테나이트계 스테인레스 강재로 내부식성, 가공성, 용접성이 우수하고 용접후의 내입계부식이 양호하며, 응력제거 열처리 후의 입계 부식도 우수하다.

4. 결 론

본 연구에서는 소재 조성 함량 차이에 따라 세 가지 소재를 스탬핑 공법으로 성형한 다음에 성형성에 대해 분석하였다.

(1) 철, 크롬, 몰리브덴 등의 원소와 화합하여 소재의 강도와 경도를 향상시킨다는 것을 확인할 수 있다.

(2) 니켈 성분 함량이 높아질 수록 소재가 성형 깊이가 대략 180 μ m 이상 더 깊이 성형될 수 있고 스프링 백 각도도 기본적으로 15°이상 줄어서 성형성이 더욱 우수하다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Ja-Yoon Koo, Yong-phil Jeon, Chung-Gil Kang, "Effect of stamping load variation on deformation behavior of stainless steel thin plate with microchannel", Institution of Mechanical Engineers., Vol. 10, pp. 1~8, 2013.
- [2] Min-June Kim, Chul-kyu Jin, Chung-Gil Kang, "Comparison of formabilities of stainless steel 316L bipolar plates using static and dynamic load stamping", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 75,pp.651~657,2014.
- [3] Hae-June Kwon, Yong-Pil Jeon, Chung-Gil Kang, "Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminium bipolar plate with microchannel", Int J adv Manuf Technol Vol 64,pp.681~694,2013.

Laser Metal Deposition 공정으로 제조된 Ni-1.6%Si 금속의 미세조직 및 고온 인장 변형 거동

김영균¹, 김철오¹, 박순홍², 유지훈³, 이기안^{1*}

Microstructure and High Temperature Tensile Deformation Behavior of Ni-1.6%Si Metal Manufactured by Laser Metal Deposition Process

Y. K. Kim¹, C. O. Kim¹, S. H. Park², J. H. Yu³, K. A. Lee^{1*}

Abstract

본 연구에서는 최근 금속 3D printing 공정 중 하나로 제시되고 있는 Laser Metal Deposition(LMD) 공정을 이용하여 Ni계 금속을 제조하고 이에 대한 미세조직과 상-고온 인장 변형 거동에 대해 조사하였다. 제조된 소재의 크기는 54x27x28(mm)였으며 초기 미세조직은 기공이 거의 없는 주조 조직으로 나타났다. 상 분석 결과 γ 상이 수지상의 형태로 존재하였으며 carbide인 M_6C 가 inter-dendrite에 존재하였다. 기계적 특성을 조사하고자 서로 다른 온도 조건에 대해 상온 및 고온 인장 시험을 수행하였다. 상온 인장 시험의 경우 항복 강도와 연신율이 각각 156.63MPa, 10.45%로 유사 조성의 상용 합금과 비교해 볼 때 항복 강도는 우수한 반면 연신율은 다소 낮은 것을 알 수 있었다. 고온 인장 시험은 300°C, 450°C, 600°C의 온도조건에서 수행하였으며 300°C의 경우 항복 강도 및 연신율이 상온과 유사하였고 인장곡선 또한 유사하게 나타났다. 그 이상의 온도 조건에서는 항복 강도가 감소하고 연신율이 점차 증가하는 일반적인 경향을 보였으며, 600°C에서 항복 강도와 연신율은 116.40MPa, 25.54%로, 그 값은 크게 변하였다. 파단면 관찰 결과 상온에서 수지상 사이의 M_6C 가 파괴되고, 파괴된 영역을 따라 균열이 진전되어 파단이 일어남을 알 수 있었다. 고온의 경우 M_6C 의 파괴 뿐만 아니라 수지상 내의 변형도 함께 나타났다. 이상의 결과와 함께 미세조직, 기계적 특성, 파단면 분석을 통해 LMD 공정으로 제조된 소재의 변형/파괴 거동에 대해서도 토의해보았다.

[본 연구는 “KIMS 금속3D 프린팅용 분말소재 기반기술 개발”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.]

Key words : Laser metal deposition, Ni, Microstructure, Tensile deformation behavior, High temperature

Table 1. Chemical composition of laser metal deposited Ni material.

Composition	Sample	Ni	Si	Co	Cr	Fe	Others
Alloy Element [wt.%]	Bulk	97.7	1.6	0.3	0.15	0.1	0.15

1.국립 안동대학교 신소재공학부

2.포항산업과학연구원

3.한국기계연구원 부설 재료연구소

* Corresponding Author : Kee-Ahn Lee, Andong Natl. Univ., E-mail: keeahn@andong.ac.kr



Fig. 1 Initial microstructure of laser metal deposited Ni-1.6%Si.

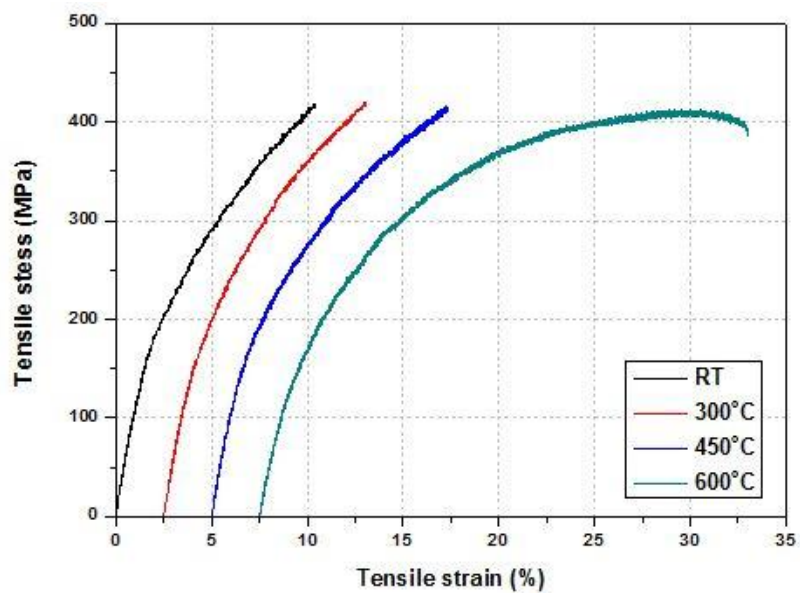


Fig. 2 Stress-strain curves for laser metal deposited Ni-1.6%Si metal with different temperature.

고주파 국소강화 열처리에 관한 공정 및 기계적 특성 평가

심우정^{1#} · 최영립¹ · 전형준² · 양우호³

Evaluation of Mechanical Characteristic for Local Hardening using High Frequency Induction Heat Treatment Process

W. J. Sim, Y. L. Choi, H. J. Jeon, W. H. Yang

Abstract

최근 자동차 산업에서 환경규제 및 안전규제의 강화로 인해 초고강도 강의 적용이 급증하고 있다. 이에 따라 고온에서 가공하여 성형성 및 강도를 확보하고 경량화를 동시에 만족 할 수 있는 장점을 가진 핫스탬핑 강판의 사용이 증가되고 있는 추세이다. 하지만 핫스탬핑 강판은 소재의 가열과 고온소재 성형하는 설비 등의 교체 주기 등과 같은 문제로 원가상승 및 고온 가공에 따른 생산성 저하가 발생하게 된다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 핫스탬핑 공정에 사용되는 보론강 소재를 사용하여 제품 형상으로 성형 후 고주파 유도가열을 통해 국소적 열처리하는 공정으로 개선하여 진행하였다. 고주파 유도가열 열처리 공정 시 효율을 향상시키기 위해 코일에 코어(core)를 장착하여 사용하였으며, 열처리 공정 시 발생하는 온도 및 기계적 특성을 파악하였다.

Key Words: Boron Steel (보론강), Induction-Heating (고주파 열처리), Local Hardening(국소강화),

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 연비 및 환경 규제 강화로 차량의 중량을 줄이는 동시에 충돌 시 승객의 안전성 확보라는 두 가지 목적을 달성하기 위해 1GPa급 이상의 초고강도 소재를 이용한 자동차 차체 부품 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 하지만 소재의 강도가 증가할수록 탄성 회복(Spring back)현상으로 인한 치수 정밀도의 확보가 어렵고 낮은 연신율로 성형성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 고온에서 성형하는 핫스탬핑(Hot-Stamping) 기술을 적용한 방법이 사용되고 있다. 핫스탬핑 기술이란 고온으로 가열된 소재를 금형을 이용하여 성형함과 동시에 냉각 함으로써 제품의 강도를 향상시키는 기술이다.

하지만 핫스탬핑 기술은 소재를 고온으로 가열하기 위한 승온공정과 가열된 소재를 성형하기 위한 금형 및 고온가열에 사용되는 설비의 교체 주기 증가 등의 이유로 원가 상승과 고온 가공에 따른 생산성 저하를 문제점으로 가지고 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 보론강을 금형으로 성형 진행 후 고주파 유도가열을 통해 국소적으로 열처리하는 공정으로 개선하여 진행하였다. [1, 2]

고주파 유도가열은 고주파 전류가 흐르는 코일 속에 위치하는 도전체에 자기장에 의한 와전류 손실(Eddy Current Loss)과 히스테리시스 손실(Hysteresis Loss)의 저항에 의해서 급속히 열이 발생하는 원리로 인가 주파수, 고주파 전력, 코일과 도전체와의 거리로 인해 가열 정도 및 표피효과 두께 정도가 변화하는 특성을 가지고 있다. 또한 급속가열, 단기가열 그리고 급속냉각을 실시할 수 있는 것이 장점이다. [1~3]

1. (주)새한산업

2. (주)명진테크

3. 현대자동차(주)

교신저자: (주)새한산업, E-mail: swj1207@sae-hani.com

발전기로부터 인가된 전력으로 인해 코일에서 발생하는 자기장은 모든 방향으로 동일하게 형성된다. 하지만 코어(core)를 사용하게 되면 자기장 확산영역을 특정부위로 한정시킬 수 있는 기능 부여할 수 있다. 일반적으로 코어는 페라이트계 소재를 사용한다. 연자성 특성을 가진 페라이트계 코어는 고주파영역에서 투자율이 크기 때문에 고주파에서 발생한 자기장을 특정영역으로 집중시키는 효과를 보인다. [4]

따라서 본 연구에서는 소재의 고온 가열과 성형에 따른 원가 상승 및 생산성 저하를 향상시키기 위해 보론강 성형 후 고주파 유도가열을 이용한 급속가열 및 급속냉각하여 국소적으로 강화하는 열처리 시험을 적용하였다. 이때 고주파 유도가열 공정 조건과 열처리 후의 강화 정도를 파악하기 위해 기계적 특성을 시험 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재 특성 및 형상

본 연구에서는 Table. 1 와 같은 기계적 특성을 가진 Al-Si 도금된 두께 1.2t 보론강을 사용하였다.

Table. 1 Mechanical Characteristic of Boron Steel

Tensile Strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
609	499	21.6

Fig. 1 과 같이 모자 형상을 가진 시험편으로 실험을 진행하였으며 R부위 치수가 5mm인 모서리와 모서리부 중심에서 6mm 연장하여 강화 열처리하는 것을 목표로 실험을 진행하였다.

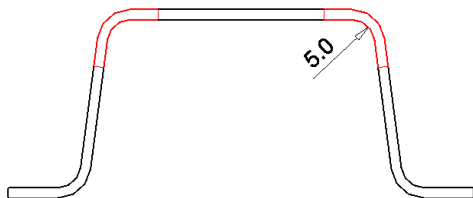


Fig. 1 Part Geometry

2.2 해석

보론강을 모자 형상으로 성형 후 국소적 열처리를 진행하였을 때 강성 증가 효과를 확인하기 위하여 해석 Tool인 PAM-STAMP를 사용하여 검증 실시하였다. 해석은 Fig. 1과 같은 형상으로 길이가 1200mm인 시험편에 R구간 4면에 국소강화 열처리된 시험편을 비교하였다. 실시 방법은 Fig. 2와 같은 3점 굽힘 시험으로 Impactor의 하강속도는 15mm/msec로 하였고 이때 발생하는 하중-변위 변화와 에너지-변위 변화를 결과값으로 확인하였다.

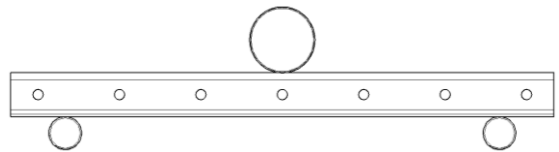


Fig. 2 Part Geometry

2.2 고주파 유도가열 열처리 공정

Fig. 3과 같은 열처리 시험방법은 고주파 유도가열 공정에 많이 사용되는 공법으로, 일정 속도 및 다양한 변수 등을 적용하기 위해 로봇(Robot)에 고주파 코일을 장착하여 스캔방식을 적용하여 실험하였다.

또한 고주파 유도가열의 효율을 향상시키기 위하여 Fig. 4와 같이 고주파 코일에 Core를 설치하였고 로봇에 WQ (Water Quenching) 장치를 함께 설치하여 고주파 고온 가열과 동시에 급속으로 냉각시켜 강도를 증가 시킬 수 있도록 설비를 구성하였다.

스캔방식의 고주파 유도가열 열처리 시험으로 열처리 온도가 900℃ 이상으로 발생하는 고주파 출력, 로봇의 이동속도 및 고주파 코일과 보론강 판넬의 간격을 확인하였다.

2.3 온도 측정 및 경도 측정

온도측정은 고주파 코일의 이동 경로를 따라 적외선 온도계로 측정하였다. 또한 경도 측정은 고주파 열처리 시험 후 비커스 경도기를 이용하여 측정하였다. 측정 위치는 모서리 중심부 기준으로 양쪽 8mm를 2mm 간격으로 측정하여 강화된 구간을 확인하였다.

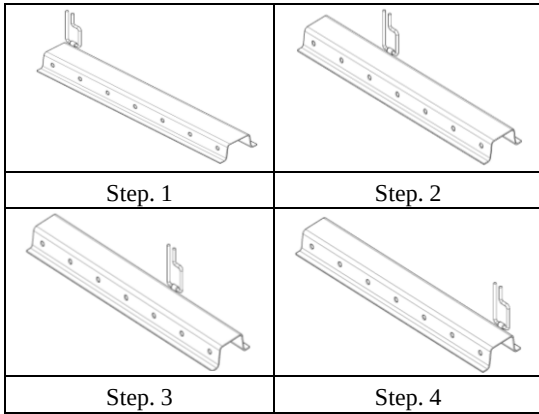


Fig. 3 Induction-Heating Process

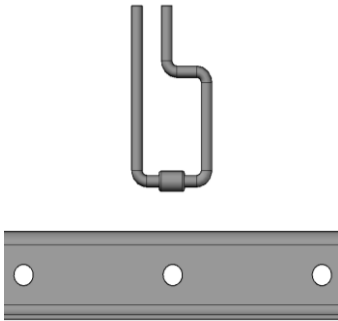


Fig. 4 Work Coil and Core

3. 실험 결과

3.1 강성증가 검증 해석 결과

해석 결과 Fig. 5, 6 에서 볼 수 있듯이 보론강 성형 시험편의 최대 하중은 18.00 kN으로 확인되었으며 국소강화 열처리가 적용된 보론강 성형 시험편은 22.42 kN으로 확인되었다. 이는 19.7% 강성이 향상된 값이다. 또한 에너지-변위 커브로 에너지흡수율을 확인한 결과 보론강 성형 시험편은 912.64J, 국소강화 열처리가 된 보론강 성형 시험편은 1063.57J로 확인되며 이는 14.2% 향상된 값이다. 따라서 국소강화를 통해 강성증가효과가 나타나는 것으로 판단된다.

3.2 고주파 유도가열 열처리 공정 조건

고주파 특정 출력으로 열처리 공정을 진행하면 가열 소재와의 저항 변화, 가열 소재와 코일의 미세한 간격변화, 냉각수의 영향으로 인해

출력이 변동하는 것을 확인 할 수 있었다.

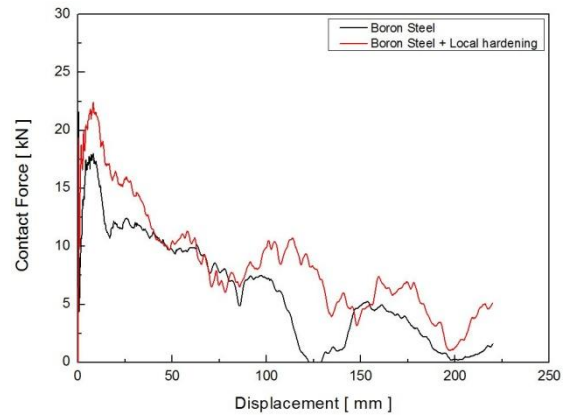


Fig. 5 Force - Displacement curve

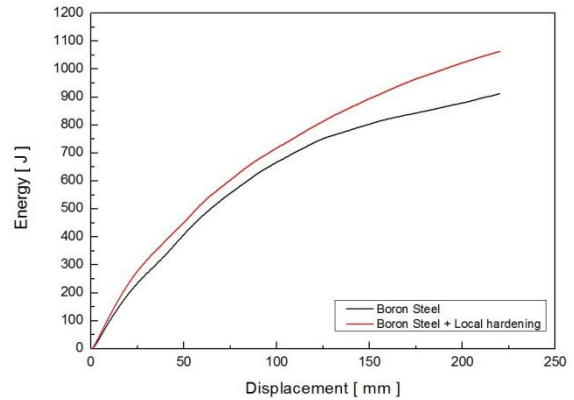


Fig. 6 Energy - Displacement curve

또한 초기 출력이 열처리 시험 출력의 정도를 좌우하였다. 고주파의 초기 출력이 낮은 경우 목표 온도에 도달하지 않는 것을 확인 할 수 있었으며 초기 출력이 높은 경우 열처리 공정 시 가열 소재의 Melting 현상을 보였다. [2]

따라서 초기 출력 4.5kW에서 적외선 온도계를 이용하여 열처리 온도 935℃까지 가열되는 조건으로 확인되었다. 초기 출력을 4.5kW로 열처리 공정을 진행하면 고주파 출력은 평균 7.0 kW를 나타났으며 최대 6.7 kW, 최소 7.6 kW로 확인 되었다. Fig. 7는 열처리 공정 중 변화하는 출력을 그래프로 나타낸 것이다.

열처리 속도는 로봇의 이동속도에 의해 좌우되며 로봇의 이동속도는 평균 9.1 m/s로 시험을 진행하였다. 코일의 이동에 따른 열영향부 누적 및 미세한 코일의 위치, 간격 등으로 이동 속도의 변화가 있어 평균 값으로 표현 하였으며 열

처리 시작 및 종료 지점에 대기시간을 주어 동일한 온도가 측정되도록 하였다.

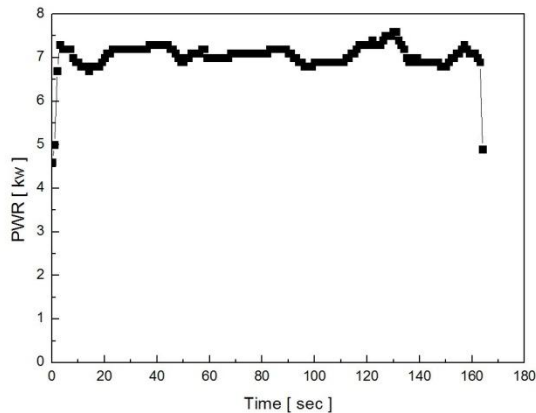


Fig. 7 Induction Heat Treatment Process due to Induction Power (Starting Power: 4.5kW)

또한 고주파 유도가열의 이송 특성 변수인 코일과 소재와의 간격은 로봇 구간 별로 변동이 있는 것을 확인하였으며, 본 연구에서 진행한 열처리 시험의 코일과 소재와의 간격을 측정해 본 결과 평균 4.0mm로 확인 되었다. 뿐만 아니라 강도 증가 향상을 위한 WQ시 사용되는 물의 유입으로 고주파 유도가열 영향의 변동이 발생하는 현상을 확인 할 수 있었다. 이는 물도 자성을 띄는 물체이기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

3.3 경도측정결과

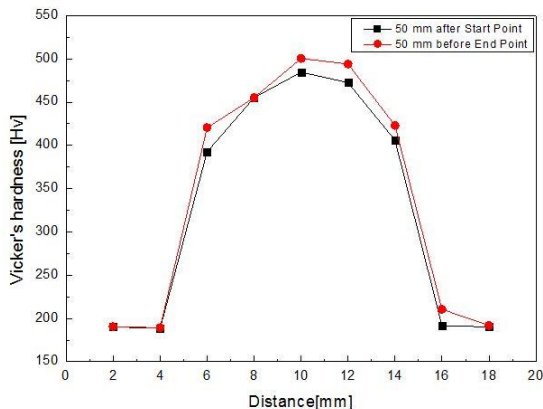


Fig. 8 Vicker's Hardnesses of Local Hardening part

Fig. 8 에서 거리 10mm 구간은 모서리의 중심이며 모서리 중심 좌우로 2mm까지는 450 Hv 이상의 경도 값을 보이며 4mm 구간까지는 열처리의 영향을 받은 것을 확인하였으며 가열 후 냉각 효과에 대한 검증하였다.

4. 결론

고주파 국소강화 열처리에 관한 시점 및 기계적 특성 평가를 진행해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3점 굽힘 해석을 통한 국소가열 열처리 후 강성증가 비교는 최대하중 19.7%, 에너지흡수율 14.2% 증가되는 것을 보였다.

(2) 고주파 유도가열 국소강화 열처리 시험은 초기 출력 4.5kW, 열처리 평균 속도를 9.1mm/sec, 코일과 소재와의 평균 간격 4.0mm로 하였을 때 최적의 조건으로 확인되었다.

(3) 경도측정 결과 400 Hv 이상의 경도 값이 모서리 중심에서 4mm까지 얻어지는 것을 확인하였고 400 Hv이상의 경도가 확인되는 것으로 보아 냉각 효과를 확인 할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2015년 현대자동차 지원으로 생기개발센터와 공동 연구를 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] J.H.Lee, A Study on microstructure and Mechanical Properties of Automotive Center Pillar Hardend By Local Induction Heating, Mater Dissertation, Catholic Univ. of Daegu
- [2] W.J.Sim, H.J.Jeon, K.B.Kim, 2015 Evaluation of Mechanical Characteristic for Softening Heat Treatment of 1500MPa hot stamping Steel, Trans. Mater. Process, PP.252~255.
- [3] W.H.Kim, Basic Research of High Frequency Induction Heating for Development of High Strength Auto-body Part, Mater Dissertation, Univ. of Ulsan
- [4] O.H.Kwon, A study on the magnetic properties of Mn-Zn Ferrite depending on the Mn oxide mantissa, Mater Dissertation, Univ. of Kwandong

비대칭 압연한 알루미늄 합금의 열처리 조건과 집합조직

남수권¹, 이철우¹, 김민지¹, 이동녕², 김인수^{1*};

알루미늄 합금 판재의 성형성을 올리기 위하여 다양한 연구가 진행되어 오고 있다.

그 이유는 알루미늄 합금이 경량이라는 장점이 있으나 성형성이 낮다는 단점이 있기 때문이다. 그 동안 알루미늄 합금의 성형성 향상을 위한 연구는 1차 심한 비대칭 압연과 열처리 후에 2차 가벼운 압연 후 열처리에 의하여 좋은 결과를 얻었다.

이 때 열처리 조건의 변화에 의한 집합조직의 변화에 대하여 연구가 미약한 상태이다.

본 연구에서는 알루미늄 합금 판재를 1차 심한 비대칭압연하고, 열처리 온도 조건을 바꾸고 열처리한 후에 2차 비대칭압연을 5~30% 각각 실시하여 열처리 온도 조건을 바꾸어 열처리하였다. 이 시편을 XRD를 이용하여 극점도를 측정하고 집합조직의 변화를 관찰하고 소성변형비 값을 계산하여 성형성의 변화를 관찰하였다.

Keywords: 알루미늄; 비대칭압연; 열처리; 집합조직; 성형성

1. 금오공과대학교 신소재공학부

2. 서울대학교 재료공학부,

* 교신저자

NaNO₃ Nitriding한 2상 스테인리스강의 집합조직과 기계적 특성

Jamshid¹, 이철우¹, 박지환¹, 김인수*

최근에 질산나트륨(NaNO₃)염욕에 의하여 질소원자가 철 또는 철 합금에 침입형으로 확산시키는 질화하는 방법이 알려 졌다.

2 상스테인리스 강은 철 합금이나 내부식 특성이 높은 재료이다. 이러한 2 상스테인리스 강을 질화 할 수 있는지 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 2 상스테인리스 강(두께 = 1.0 mm)을 질산나트륨(NaNO₃) 염욕으로 질화하여 경도, 인장강도 증가, 연신율 감소의 변화를 알아보았다.

또한 nano SIMS 를 이용하여 두께 층 깊이에 따른 질소 농도의 변화를 측정하였고 파단면 조직의 변화를 SEM 을 이용하여 분석하였다.

Keywords: Salt bath; NaNO₃ Nitriding; Dual phase stainless steel; Mechanical property

1. 금오공과대학교 신소재공학부

* 교신저자

알루미늄 잉곳·재처리재 복합빌렛을 이용한 압출

박찬곤¹ · 최영^{#1} · 김대업¹ · 원태연²

Extrusion for the composite billet with ingot and recycled aluminum

C. G. Park¹, Y. Choi^{#1}, D. U. Kim¹, T. Y. Won²

Abstract

The composite billet with dissimilar materials was casted. A measurement method to evaluate the tensile strength of the welding line between ingot and recycled material of extrusion was investigated. The inside material of the billet is recycled-Al and outside is ingot-Al6063. The die was designed to extrude the ingot-recycle Al bar with the welding line at the center position for evaluating the tensile strength of the welding line. The measured tensile strength of welding line was compared and discussed.

Key Words : Recycle aluminum, Composite billet, Extrusion, Tensile strength, Welding line

1. 서 론

최근 재처리 알루미늄을 사용한 친환경적인 압출기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 재처리 알루미늄을 사용한 압출 시 알루미늄의 물성저하로 인하여 압출속도의 고속화에는 한계가 있다. 또한 압출 후, 아노다이징 표면처리에 보다 높은 비용이 소요된다.

내·외부의 재료가 다른 복합빌렛(Composite billet)은 내부-외부 또는 외부-내부 순서로 주조되기 때문에 경계면에서 산화층이 발생하며, 이는 기계적 물성저하와 제품 불량률의 원인이 된다.

본 연구에서는 주조된 내·외부 재료가 알루미늄 합금간의 이중 재질인 복합빌렛의 압출 시 압출된 제품의 경계면에서 인장강도를 측정하는 방법에 대하여 연구하였다. 인장강도를 측정하기 위하여 인장시험이 용이하도록 경계면이 중앙에 위치하는 바(bar)를 압출하기 위한 금형을 설계하였다. 압출된 바(bar)의 접합면에 수직인 방향, 즉 압출방향에 수직으로 인장시험편을 가공하여 인장시험을 통한 인장강도를 측정하였다.

2. 복합빌렛

Fig. 1 과 같이 잉곳재와 재처리-Al의 단면적 비율이 동일 하도록 빌렛을 설계하였다. 복합빌렛을 제작하기 위하여 Fig. 2와 같이 주조 금형을 제작하였다. 그라파이트 튜브 내부에 재처리-Al 코어를 주조 한 후 코어 외부에 잉곳재 Al-6063 을 주조하여 복합빌렛을 제작하였다.

3. 접합강도 평가

3.1 접합강도 평가 금형 설계

알루미늄 합금간의 이중 재질 압출제품의 접합강도를 측정하기 위한 평금형을 설계하였다. 압출된 바(bar)의 중앙에 접합면이 위치하도록 반경방향을 장축으로 하는 직사각형 형태로, 단면감소율을 80%로 압출되도록 다수의 홀을 설계하였다.

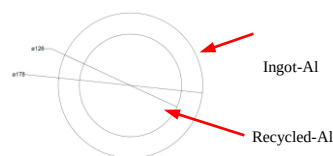


Fig. 1 Cross-sectional design of the billet

1. 한국생산기술연구원 전북지역본부 탄소경량소재응용그룹
2. (유)원진알루미늄
교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail:ychoi@kitech.re.kr



Fig. 2 Billet mold and composite billet

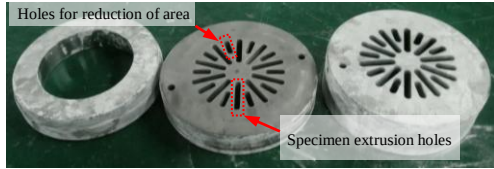
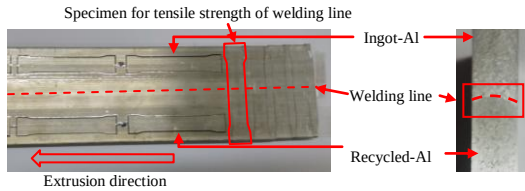


Fig. 3 Extrusion dies



(a) Specimen (b) Welding line

Fig. 4 Specimens of extruded composite billet



(a) Welding line fracture (b) Ingot-Al fracture

Fig. 5 Fracture of Specimens

Table 2 Tensile test results

Specimen	#1	#2	#3	#4
U.T.S.(MPa)	112.67	120.44	122.16	123.52
Fracture	Welding line	Ingot-Al	Ingot-Al	Ingot-Al

Specimen	Recycled -Al-#1	Recycled -Al-#2	Ingot- Al-#1	Ingot- Al-#2
U.T.S.(MPa)	112.67	120.44	122.16	123.52
Avg.(MPa)	132.36		120.17	

3.2 접합강도 평가 시편 인장시험

주조한 복합빌렛을 바(bar)형태로 압출성형 하였다. 압출된 바(bar)를 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 접합면에 수직하도록 압출방향에 수직하게 인장

시험편을 제작하였다. 시험편은 KS B 0801의 특별시험편 7호로 제작하였다[1]. 또한 모재의 인장강도 측정을 위하여 잉곳재 Al-6063과 재처리-Al의 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편에서 접합면을 확인하기 위하여 폴리싱과 부식을 실시하였으며 Fig. 4(b)와 같이 접합면을 확인하였다.

인장시험 결과를 Table 2에 나타낸다. 잉곳재 Al-6063의 인장강도가 재처리-Al의 인장강도보다 낮았기 때문에 모재의 인장강도는 잉곳재 Al-6063의 인장강도로 하였다. 잉곳재 Al-6063과 재처리 Al 접합면에서의 인장강도는 인장시험에서 접합면이 파단된 시험으로부터 결정된다.

접합면에서의 인장강도는 112.67MPa로 잉곳재 Al-6063의 인장강도인 120.17MPa의 93.7%이다. 일반적으로 압출 제품의 경우 압출방향의 인장강도가 수직방향의 인장강도보다 높다[2]. 접합면에서 인장강도의 저하는 6.3%이다.

3. 결론

본 연구에서는 내·외부 재료가 다른 복합빌렛을 주조하였다. 또한 접합면의 인장강도를 평가할 수 있는 바(bar)를 압출하기 위하여 압출금형을 설계하였다. 바(bar)로부터 인장강도를 측정한 결과는 아래와 같다.

(1) 접합강도는 모재대비 93.7% 이상이다.

(2) 코어 주로 후 외부를 주조하는 방법으로 접합면에서 물성저하가 낮은 빌렛을 제작할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 산업계연계형 세부사업 플랫폼형 R&D(JA150016)로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 2007, 금속 재료 인장 시험편(KS B 0801)
- [2] L. Aydi, M. Khlif, C. Bradai, S. Spigarelli, M. Cabibbo, M. El Mehtedi, 2015, Mechanical Properties and Microstructure of Primary and Secondary AA6063 Aluminum Alloy after Extrusion and T5 Heat Treatment, ICEB 2015, Volume 2, Issue 10, Part A, 2015, pp 4890~4897.

제진강판의 인장특성 및 접합특성평가

하유정^{1#} · 이현철¹ · 고건영¹ · 임완섭² · 최승조²

Investigation of tensile and adhesive characteristics of the vibration proof steel

Y. J. Ha, H. C. Lee, G. Y. Go, W. S. Lim, S. J. Choi

Abstract

In recent year, there is strong demand for the light weight automobiles in order to meet environmental regulation and safety standard. on the other hand, customer requirement for emotional quality is continuously increasing. Thus, light weighting with high NVH quality is essential in modern automobile industry. Vibration proof steel sheet is consist of visco-elastic layer between two steel sheets and it can reduce vibration by visco-elastic behavior of the layer which transfer vibration into thermal energy. And it can reduce weight of automobile parts by eliminating additional use of damping pad and LASD(Liquid Applied Sound Damping). However, mechanical characteristics of vibration proof steel was not fully investigate because of its sandwich structure. In this study, mechanical properties of the vibration proof steel was investigated by tensile test and it is compared with conventional steel sheet. adhesion strength of the vibration proof steel was evaluated by T-peel test. Finally, mechanical and adhesive characteristics were investigated for forming of vibration proofing steel.

Keywords: Vibration proof steel, Tensile Properties, Adhesion Properties, T-Peel Test

1. 자동차부품연구원

2. ㈜현대하이텍

교신저자: 자동차부품연구원, E-mail: hyjeong@katech.re.kr

장소재 인발공정 중 금형의 온도변화 예측

이광휘¹·김동환¹·정승원²·이장호²·전만수[#]

Finite Element Prediction of Temperature Prediction of Dies in Long Material Drawing

K. H. Lee, D. H. Kim, S. W. Jeong, J. H. Lee, M. S. Joun

Abstract

An approach to non-steady-state prediction of temperature in drawing of a long tube/pipe with high accuracy is presented in this paper. A fine mesh system near the contacting area is employed to keep appropriate contact between material and dies, which is of great importance because contact region is inherently quite small in tube/pipe drawing. Once the end of refined mesh region passes a certain point located at before the deformation effective region, a new refined mesh system is generated by a special remeshing scheme. During remeshing, the entry region is rebuilt with initial material while the material at the exit side which is far away from the deformation effective region. An application example is given, which shows the characteristics of the presented scheme.

Key Words : Tube/Pipe Drawing(튜브/파이프 인발), Temperature(온도), Accuracy(정확도), Special Remeshing Scheme (특별 요소망 자동생성 기법)

1. 서 론

인발, 압연, 개방압출과 같이 길이가 긴 소재의 소성가공에서 금형의 수명은 최대 관심사 중의 하나이다. 이러한 공정에서 금형의 수명은 마모가 좌우하며, 마모수명의 예측에는 금형 온도 예측이 필수적이다. 박판압연과 같이 소재가 매우 길어 정상상태의 가정이 타당할 경우에는 정상상태의 유동해석 기법[1]을 이용하여 고신뢰성을 가진 온도분포를 예측할 수 있다. 그러나 일반적으로 직선의 파이프나 봉재의 인발 및 개방압출은 정상상태에 이르지 못한다고 봐야 하며, 지속적으로 금형의 온도가 변한다. 이러한 경우, 소재가 비교적 길기 때문에 일반적인 체적소성가공 공정의 해석기법으로는 고신뢰성을 가진 해를 얻기에는 무리가 따른다. 특히 접촉영역이 크지 않은 튜브/파이프 인발 공정의 경

우, 전체의 해석 영역을 대상으로 공학적 의미를 가진 해를 얻는 것은 불가능하다.

따라서 전술한 인발 및 개방압출 공정의 특징을 고려한 해석 기법의 개발이 필요하다. 이 논문에서는 인발 및 개방압출과 같이 비교적 긴 소재를 대상으로 하는 비정상상태의 소성가공 공정의 공학적 해석 기법을 제안하며, 적용 예제로 튜브/파이프 인발 공정의 적용 사례를 소개한다.

2. 해석 모델

Fig. 1은 장소재의 소성가공 중 금형의 온도해석을 강조한 해석모델을 의미한다. 일반적으로 인발공정은 상대적으로 낮은 금형-소재 간 압력하에서 이루어지며, 후방인장력이 가해지면 금형-소재 간 접촉압력은 더 낮아진다[2]. 물론 낮은 금형압력은 금형 수명에 유리하다. 공정해석적 관점에서 볼 때, 낮은 접촉응력은 접촉영역을 작게 만들며, 이로 인하여 일반적인 해석

1. 한국국제대학교 항공부품공학과

2. ㈜엠에프알씨

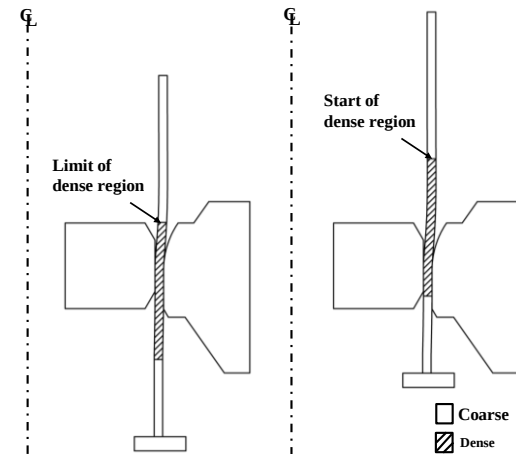
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부/㈜엠에프알씨

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

모델을 이용하여 금형 관련 해석, 즉, 금형의 구조해석 및 온도해석의 관점에서 좋은 답을 얻을 수가 없다. 따라서 접촉영역 주위에서 매우 조밀한 해석모델의 사용이 필수적이다.

이 연구에서는 전술한 문제의 해결을 위하여 전용 해석모델을 제안한다. 요소망 재구성을 주기적으로 실시하며, 이 때, 출구 쪽의 소재 길이와 입구쪽의 소재길이를 사용자가 지정한 일정한 크기로 인위적으로 조절한다. 대신 금형-소재 접촉면 주위를 비롯한 적절한 길이에 대하여 조밀한 요소망을 사용하며, 이를 통하여 소재 길이에 비하여 매우 짧은 금형-소재 접촉영역에서 일정 수 이상의 절점의 접촉을 유지시킨다.

입력데이터는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 요소망 재구성 직후의 소재의 입출구 길이, 요소망 재구성 시점에서 출구에서의 소재의 길이, 입구에서의 소재의 내외경 등이다. 요소망의 밀도제어는 사용자가 입력한 고정된 박스에 속하는 영역에서의 요소의 밀도를 높임으로써 이루어진다. 요소의 고밀도 영역은 입구 쪽의 적절한 영역을 포함함으로써 빈번한 요소망 재구성을 피하는 것이 바람직하다. 요소망 재구성은 해석결과에 매우 좋지 않은 영향을 미친다.



(a) Just before remeshing (b) Just after remeshing
Fig. 1 Analysis model

3. 적용 사례

Fig. 2는 적용 공정 설계를 나타내고 있다. 소재의 길이는 6000 mm이며, 금형의 온도가 정상 상태에 이른다고 가정하기에는 다소 짧다. 공정 해석 정보는 Table 1에 나타내었다.

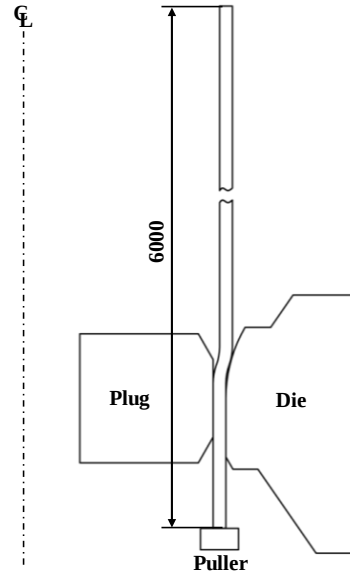


Fig. 2 Definition of test example

Table 1 Analysis information

유동응력	$\bar{\sigma} = Y_0 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{b} \right)^a$ Minimum yield strength: 116 Strain hardening exponent(a): 0.11531 Strain reduction ratio(b): 0.00711
마찰계수	Law of Coulomb friction $\mu = 0.03$
인발금형의 속도	200.0 mm/s
인발금형의 열적 특성	열전도계수: 0.03 W/mm² · °C 열용량: 0.005 J/mm³ · °C
금형의 초기온도	25 °C
소재의 초기온도	20 °C

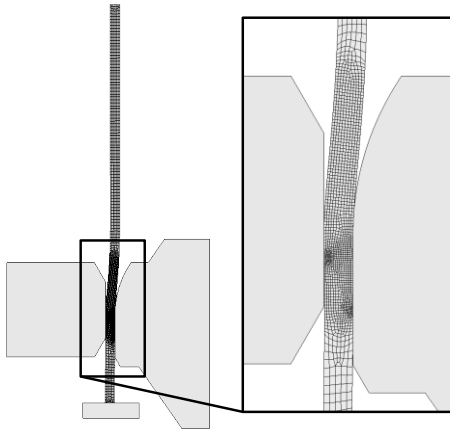
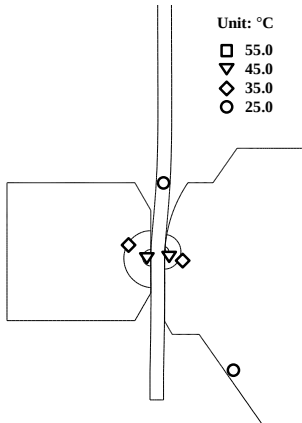
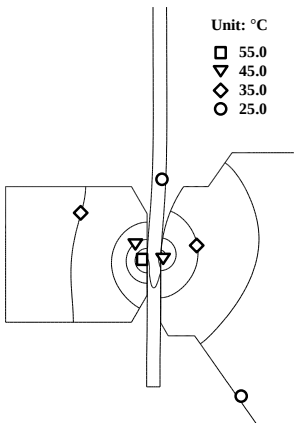


Fig. 3 Finite element mesh system just after remeshing



(a) Just before remeshing



(b) Just before remeshing

Fig. 4 Temperature just before the end of pipe drawing

Fig. 3은 요소망 재구성 직후의 요소망을 나타내고 있다. 요소망의 고밀도 영역이 금형-소재 접촉부에서 입구쪽으로 치중되어 있으며, 이 조밀요소 영역이 출구에 가까워지면, 요소망 재구성이 이루어지도록 입력변수를 정하였다.

Fig. 4(a)는 500 mm 시점에서의 온도분포를 나타내고 있고, Fig. 4(b)는 종료 시점에서의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 5는 전체 소재의 출구 측 길이의 변화에 따른 출구에서의 소재 온도변화를 나타내고 있고 Fig. 6은 인발금형과 플러그의 온도 변화를 나타내고 있다. 출구에서의 소재의 온도 변화는 일찍 정상상태에 도달하였다. 플러그의 온도 상승이 인발금형에 비하여 크게 나타났으며, 공정 후미에 이르러 온도의 변화가 크지 않은 정상상태에 도달하였다. 플러그의 온도는 약 54도까지 상승하였다.

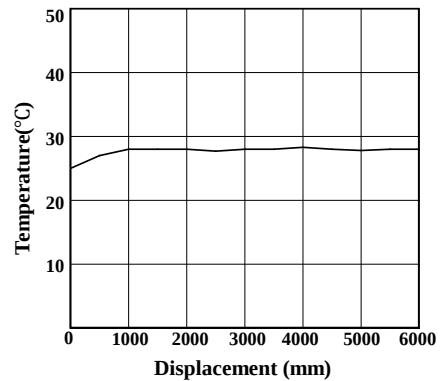


Fig. 5 Variation of temperature of material with the length of drawn material

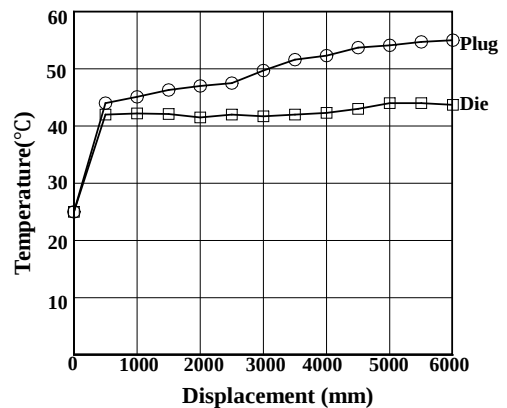


Fig. 6 Variation of temperature of plug and drawing die with the length of drawn material

4. 결 론

이 논문에서는 특수 요소망 재구성 기법을 적용하여 인발공정 중에 발생하는 소재와 금형의 온도 분포를 예측하였다. 전용 요소망 재구성 기법에서는 소성변형 영역에서 양호한 접촉조건 지속적으로 유지하기 위하여 극 조밀요소망을 사용하는 대신, 해석에 불필요한 전후 소재를 짜르거나 점진적으로 붙여주는 방식을 사용하였다.

이 방식은 해의 정확성과 경제적 해의 획득 양면을 고려한 것으로 인발공정 또는 개방압출 중 발생하는 금형의 온도변화 및 마모수명 예측 등에 활용되기에 적합하다.

후 기

이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 ‘엔지니어링 산업진흥 강화’의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 N0000819).

참 고 문 헌

- [1] S. M. Hwang, M. S. Joun, Y. H. Kang, 1992, Finite element analysis of temperatures, metal flow and roll pressure in hot strip roiling, Trnas. ASME J. Eng. ForInd., pp. 207~214.
- [2] M. C. Kim, J. G. Eom, S. T. Ahm, M. S. Joun, 2011, Finite element analysis of multi-pass drawing under back tension using a virtyal state-variable body-force scheme, KSTP, pp. 73~75.

초고장력 강판의 가공 경화를 고려한 전단 금형의 마모 영향도 분석

이호성¹ · 진흥교² · 엄재근³ · 홍석무[#]

A Study on the Wear of Shear Die Considering Work Hardening of Ultra High Strength Steel

H. S. Lee, H. K. Jin, J. G. Eom and S. Hong

Abstract

The use of ultra-high strength steel (UHSS) is increasing in recent automotive industry by requirement of light-weight. However, UHSS accelerates die-wear or fracture more rapidly than mild-steel. In addition, the abnormal die-wear or fracture has been occasionally reported though same shearing punches are used to pierce on different positions which have different deformation histories. Therefore, the influence of work hardening on die-wear in shearing of UHSS was researched in this paper. Finite element simulations of shearing process were performed with different work hardened sheet materials. The influences of work hardening on die wear were analyzed numerically as well as die stress considering elastic deformation of punch. As the result of simulations, it could be possible to explain that the reason of abnormal wear and fracture occurs occasionally even though same shear die is used.

Key Words : Tool Wear, UHSS(Ultra High Strength Steel), Work hardening

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 차체 경량화와 안전성을 동시에 추구하기 위해 초고장력 강판을 적용한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 초고장력 강판의 높은 강도로 인하여 성형성이 낮아지고 성형하중이 증가하게 된다[1]. 성형 하중의 증가는 공구 마멸 및 파손의 직접적 원인이 되며, 이론적으로 마멸은 금형 펀치 하중에 비례하게 된다. 일반적으로 펀치의 단면적이 작을수록 마멸은 크게 발생하지만, 산업현장에서는 오히려 직경이 큰 펀치가 먼저 마모되고 파손되는 경우가 종종 보고되고 있다. 이러한 이상적인 금형 마모와 파손의 경우 금형 열처리의 문제가 주로 발생하지만, 금형 열처리가 정상적인

로 수행되고, 잔류 응력의 문제가 없는 경우에는 다른 원인을 연구해 볼 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 금형 열처리 등이 정상적으로 수행되었다는 가정하에, 프레스 가공으로 인한 소재의 가공 경화가 펀치에 마모에 주는 영향을 연구하였다. 가공 경화가 큰 강판의 경우 드로잉 또는 벤딩 등으로 국부적으로 소성 변형을 받고 가공 경화에 의해 재 가공 시 항복 응력도 크게 상승하게 된다. 이후 서로 다른 변형 이력을 가진 부위에 피어싱, 트리밍 등 후공정이 진행되기 때문에 가공 경화를 더 받은 영역에서 전단 시 높은 전단 응력이 발생하게 된다. 이로 인해 펀치가 받는 인장 응력이 커져서 금형 마모가 더 빨리 발생할 것으로 본 연구에서는 가정하였다. Fig. 1에 가공 경화에 의한 다이 마모 현상을 설명하였다.

1. Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University, 2. ㈜엠에스 오토텍,

3. ㈜MFRC 기술 연구소

교신저자: Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

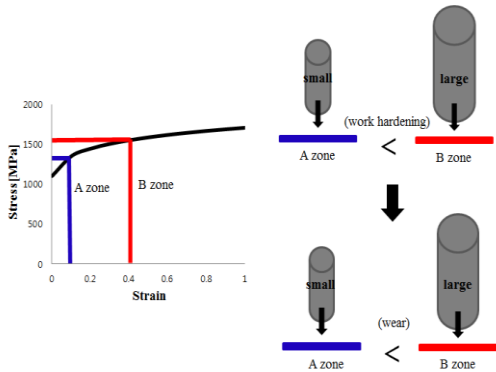


Fig. 1 Die wear according to work hardening

2. 금형의 마모 및 응력 해석

유한 요소 해석프로그램 AFDEX를 사용하였으며 펀치 단면적에 따른 마멸 발생량을 확인하기 위해 10mm, 20mm, 30mm로 하여 1.2GPa급 초고강력 강판의 물성을 동일하게 적용 해석을 수행하였다[2]. 가공 경화에 따른 마멸 발생량의 차이를 확인하는데 변형률 4%, 40%일 때 1.2GPa 물성을 적용하여 Fig. 1과 같은 형상이 발생하는지 확인하였다. 펀치 단면적이 크기와 관련 없이 가공 경화만을 고려하여 마멸 발생이 이루어지는 보기 위하여 펀치 10mm에서 4%, 20% 그리고 40%의 물성을 각각 적용하여 수행하였다. Fig. 2에서는 전체 해석 순서도를 나타내었다. 파손 형상 또한 가공 경화에 영향을 살펴보기 위하여 각 해석 결과에서 금형이 받은 유효 응력을 상대적으로 비교하였다.

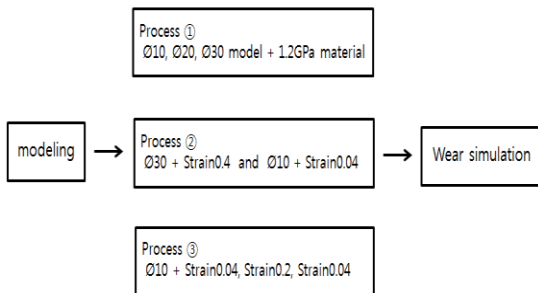


Fig. 2 Process of wear simulation

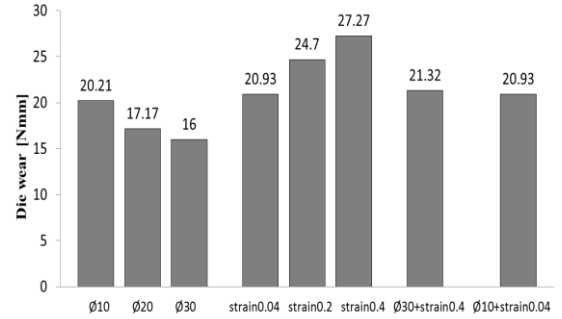


Fig. 3 Influence of work hardening on die wear

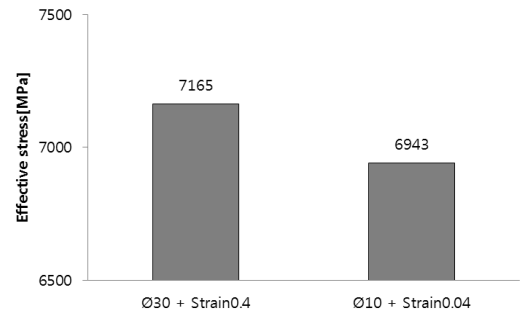


Fig. 4 Comparison between effective strain 0.4 and 0.04 of punches

3. 결 론

본 연구에서는 전단 가공 시 전단 소재의 가공 경화에 따른 금형 마멸 발생의 차이가 발생하는지 유한 요소 해석을 통해 파악하였다. 가공 경화에 의한 항복 강도 차이가 마멸 발생의 차이를 발생하는 것을 수치적으로 나타냈으며, 금형 파손 형상 도 가공 경화에 따른 영향을 보기 위해 금형에 대한 인장 응력 확인한 결과 차이가 있음을 확인하였다. 결과적으로 금형 마멸 현상에 미치는 요인으로 가공 경화를 고려해 볼 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of high strength steel body by hot stamping, Trans. Mater. Process, Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.
- [2] AFDEX, www.afdex.com

Al-Si(12%wt.)합금의 스크래치 마모특성 연구

강연지¹ · 백민석² · 함기수³ · 김종호⁴ · 이시우⁵ · 이기안^{1#}

Wear property of Al-Si(12%wt.) with Scratch tester

Y. J. Kang, M. S. Baek, G. S. Ham, J. H. Kim, S. W. Lee, K. A. Lee

Abstract

본 연구에서는 압출공정으로 제조된 Al-12%Si 합금의 T6 열처리에 따른 내마모 특성을 Scratch tester를 이용해 평가하였다. 그에 따라 모든 시험은 열처리 전 소재(F 합금)와 열처리 후 소재(T6 합금)에 대하여 동일 조건에서 각각 시행되었다. 상기 소재의 공정Si상의 크기는 F 합금에서 약 2.3 μ m, T6 합금에서는 약 2.5 μ m로 측정되었다. XRD를 이용한 상분석 결과, Al기지에 Si상과 Al₂Cu, Al₃Ni, Mg₂Si의 미세상이 존재하며 열처리 전·후 합금 내 존재하는 상의 종류에는 변화가 없었다. 그러나 FESEM-EDS과 EPMA를 통한 미세조직 관찰결과 Al 기지내 존재하는 Al₂Cu상이 T6 열처리 후 크기와 분포가 더욱 고르고 미세해진 것을 관찰할 수 있었다. T6열처리 전후 기계적 특성을 비커스 경도시험과 스크래치 테스트의 결과로써 나타내었다. 비커스 경도는 열처리 전 F 합금에서 52HV, 열처리 후 T6 합금에서는 125HV로 향상되었다. 스크래치 테스트는 CLST(constant load scratch test)와 MPST(multipass scratch test) 조건에서 각각 시행되었으며, 각각의 조건에서 residual depth를 측정하여 열처리 전후의 마모특성을 평가하였다. Scratch tester로 얻은 scratch coefficient는 마모저항성을 나타내는데 순수한 마모저항성을 도출하기 위해 본 연구에서는 접촉면적 A로 나누어줌으로써 열처리 전 후 합금의 내마모 특성을 비교하였다. 추가적으로 FESEM를 사용하여 MPST 마모 시험과정에서 발생하는 미세조직 변형 매커니즘을 분석하였다.

Key Words : Al-Si(12wt.%) alloy, Scratch test, Wear-resistance, T6 Heat-treatment

1. 국립 안동대학교

2. 국립 안동대학교

3. 국립 안동대학교

4. RIST

5. 보원경금속

교신저자: 국립안동대학교, E-mail: keeahn@anu.ac.kr

1. 서 론

최근 자동차나 항공기 등 운송수단의 연비 절감, 환경보호의 차원에서 경량화가 요구되고 있으며 그에 따라 경량화 소재에 대한 관심도 증가하는 추세이다[1]. 본 연구에서 사용된 Al-12%Si 합금은 높은 성형성과 낮은 열팽창성, 높은 부식저항성을 비롯하여 Al기지에 공정 Si상이 균일하게 분포함으로써 뛰어난 경도와 내마모 특성을 가지고 있는 합금이다. 그러므로 자동차나 항공기 엔진부의 실린더 라이너, 엔진블락 등의 재료의 내마모성이 요구되는 application에 효과적인 응용이 가능하다. 본 연구에서는 Al-12%Si 합금의 마모특성을 스크래치 테스트를 이용해 평가하였다. 최근 재료의 마모 특성을 스크래치 테스트를 이용하여 분석하려는 시도가 이어져 왔다. 스크래치 테스트는 시험법이 간편할 뿐만 아니라 마모시험 종료 후 재료의 손상이 적어 미세조직 변화와 연계하여 재료의 마모 초기 변형 거동을 분석할 수 있다.

2. 실험방법

Table 1 Chemical composition of Al-12%Si alloy

Wt. %	Mg	Si	Fe	Ni	Cu	Al
Al-Si	0.938	12.08	0.137	0.785	1.07	Bal.

소재의 성분 분석을 위해 ICP 분석을 수행하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 열처리의 영향을 알아보기 위해서 Al-12%Si 소재를 850℃에서 10hr. 용체화 처리 후 급냉하고 510℃에서 인공시효하였다. 상기 논문에서는 열처리 전 소재를 F 합금, 열처리 후 소재를 T6 합금으로 명명하기로 했다. 열처리 전과 후의 상을 분석하기 위해 XRD Ultima IV 장비를 사용하여 두 소재의 상을 비교/분석하였으며 그림 2에 도시하였다. 분석 후 열처리 전 후의 상

변화 및 결정립 등의 미세조직 변화를 관찰하기 위해 FE-SEM(TESCAN; LYRA 3XMH) 장비를 이용하여 관찰/분석해보았다. 또한 Al-12%Si 경도를 알아보고자 F 합금과 T6 합금에 대해 vicker's hardness tester로 각 시편당 12번씩 경도 시험을 시행하였다. Scratch test는 F 합금과 T6 합금에서 각각 CLST(Constant Load Scratch Test)조건과 MPST(Multi-Pass Scratch Test)조건으로 시험하였다. CLST 조건은 각 하중 별로 0.5kgf-4kgf 범위에서 0.5kgf간격으로 시험하였으며, MPST 조건은 각각 합금에서 1회부터 15회까지 반복 시험하였다. Data는 수직하중/수평하중 값인 Scratch coefficient와 residual depth를 이용하여 각 합금을 비교하였으며, scratch 저항성을 나타내기 위해 Scratch coefficient를 접촉면적 A로 나누어 그림 3(c)에 도시하였다. 이에 마모흔 관찰을 통하여 변형기구를 규명하기 위해 SEM(TESCAN; VEGA II LMU)장비를 사용하여 마모흔 내 변형거동 관찰을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Al-12%Si 합금의 미세조직

압출 공정으로 제조된 Al-12%Si F와 T6 합금의 미세조직 관찰 결과를 그림 1에 나타내었다.

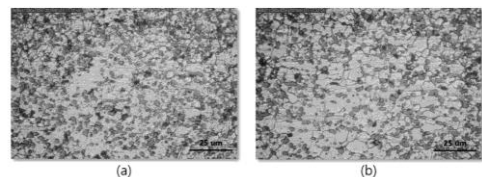


Fig. 1 Microstructure of extruded Al-12%Si

OM(Optical Microscope)

(a) F : as-extruded, (b) after being T6 treated

미세조직 관찰은 OM을 사용하여 T6 열처리 후 변화하는 기지와 Si 상의 전반적인 상의 형상 및 크기를 관찰하였다. 그 결과로써 Al 기지 grain size는 $8.7\mu\text{m}$ 에서 T6 열처리 후 $13.6\mu\text{m}$ 로 대폭 증가하였다. 또한 Al 기지 내 분포하고 있는 Si상의 모양은 압출공정에 따라 구형을 띠었고, 공정 Si size는 F 합금에서 $2.3\mu\text{m}$, T6 합금에서는 $2.49\mu\text{m}$ 로 그 모양과 크기가 유사하게 관찰되었다.

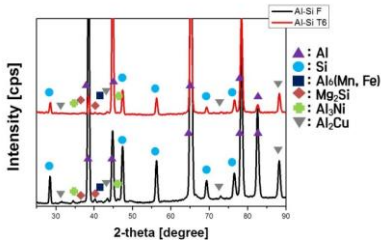


Fig. 2 XRD results of extruded Al-12%Si alloy

압출공정으로 제조된 Al-12%Si 합금의 XRD 분석을 그림 2에 나타내었다. 기본적으로 미세상들은 두 합금에서 동일하게 나타났으며, 두 합금은 Al 기지에 공정 Si 상을 비롯해 Al₆(Mn, Fe), MgSi, Al₃Ni, Al₂Cu의 상들로 구성되어 있는 것으로 확인되었다.

조금 더 명확한 상 분석을 위해 FE-SEM/EDS 분석 결과를 그림 3에 나타냈다. 그 결과 두 소재 모두 Al₂Cu상이 관찰되었으며 F 합금에서는 비교적 크고 산발적인 분포를 보인 반면에 열처리 후 T6 합금에서 상들이 미세하고 고르게 분포된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 Al₂Cu상의 열처리 후 변화된 양상은 합금의 경도와 마

모특성에 영향을 준 주된 요인이라고 사료된다.

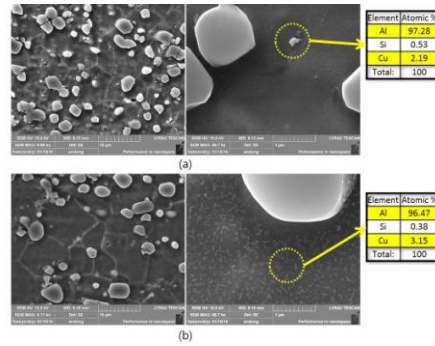


Fig. 3 Results of FE-SEM with;
(a)F, (b)T6 alloy as to Al₂Cu phases

3.2 Al-12%Si 합금의 경도 및 Scratch 마모 거동

Al-12%Si 합금의 T6 열처리에 따른 경도의 변화를 그림 4에 나타내었다. T6 열처리 후 경도는 55HV에서 123.4HV로 대폭 향상되었으며 이는 열처리 후 미세화 된 Al₂Cu 상의 영향인 것으로 사료된다.

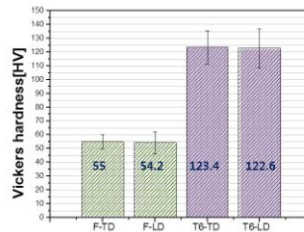


Fig. 4 Quantitative value of Vicker' s hardness.

Al-12%Si 합금의 하중에 따른 Scratch test결과를 F 합금(검정색) T6 합금(빨간색)에 대하여 그림 5에 나타내었다. 접촉면적의 차이가 scratch coefficient에 기여하

는 바가 크기 때문에 본 연구진은 접촉면적 A로 나눈 scratch coefficient를 각각 F 합금과 T6 합금에 관하여 비교하였다. 그 결과 하중 별 스크래치 마모저항성은 T6 합금에서 더 높은 양상을 나타내었다.

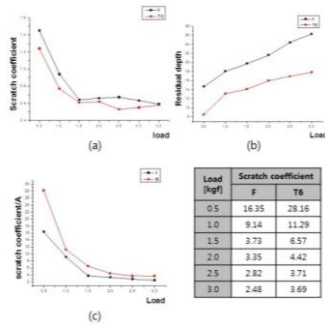


Fig. 5 CLST tested results; (a)scratch coefficient

(b)Residual depth (c)Scratch coefficient/A

F 합금과 T6 합금에 대한 MPST 조건의 시험결과를 그림 6에 도시하였다. CLST 조건과 마찬가지로 정확한 스크래치 마모저항성을 나타내기 위하여 각각 시험 값을 접촉면적으로 나누어 비교하였다. 두 합금 모두 횡수가 증가할수록 scratch coefficient의 감소가 나타났으며, T6 합금이 모든 횡수에서 높은 수치를 띠었다.

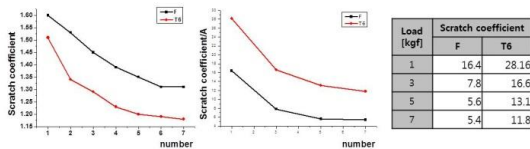


Fig. 6 MPST tested results; (a)scratch coefficient

(b)scratch coefficient/A.

4. 결 론

열처리 전 F, 열처리 후 T6 합금 모두 Al 기지에 공정 Si 합금이 다량 분포하고 있는 양상을 띠었으며 Si 상의 형상과 크기에는 차이가 나타나지 않았다. 또한 Al_2Cu 상의 T6 열처리 후 변화된 양상은 Al-12%Si합금의 경도와 스크래치 마모특성 향상의 주된 요인으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 민군기술협력사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] K. H. Lee, Y. S Yun, S. J. LEE:Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 12, No.6 June, (1995)20-26

열간 압출공정을 이용한 ECAP된 마그네슘 합금의 조직제어

윤덕재^{1#} · 배성환¹ · 임성주¹ · 김응주¹

A Structural Control of ECAPed Magnesium Alloy Processed by Hot Extrusion

D. J. Yoon, S. -H. Bae, S. J. Lim, E. Z. Kim

Abstract

In this paper, a structural control of AZ31 Mg alloy produced by equal-channel angular pressing (ECAP) process was investigated through tensile test and microstructure observation. The effects of extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties of the Mg alloy are evaluated after conventional direct extrusion test, which are carried out at three different elevated temperatures. As a result of the tensile test in three directions (0°, 45°, and 90° to the extrusion direction of the sheet) at room temperature, elongation of as-extruded AZ31 alloy showed an unusual anisotropic behavior depending on the extrusion direction although the yield strength and tensile strength are similar to the ECAPed AZ31 alloy. After extrusion process at 473K, microstructural observations of ECAPed magnesium alloy showed a significant grain refinement, which is leading to an equiaxed grain structure with average size of 2.5 μm . The microstructures of the extruded billet are observed by the use of an Electron Back-Scattering Diffraction (EBSD) technique to evaluate the influence of extrusion process on the grain refinement and recrystallization mechanism of AZ31 Mg alloy.

Key Words : Extrusion temperature, AZ31 Mg alloy, anisotropy, equal-channel angular pressing, sheet extrusion

1. 서론

마그네슘합금은 조밀육방(HCP)를 갖는 구조로 부족한 슬립계로 인해 상온에서 성형성이 취약하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 마그네슘 합금의 산업적 적용 분야를 확대하기 위하여 이를 개선하고자 합금 개발 및 미세조직 제어를 통해 강도 및 성형성 향상을 위한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 그 중 미세조직 제어연구는 강소성가공법 (Severe plastic deformation, SPD) 중의 하나인 등통로각압축 공정 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP)을 적용하여 극심한 전단변형을

부과하여 초미세 결정립을 갖는 소재를 제조함으로써 기계적 특성과 성형 특성 향상시키는 연구 사례가 발표되었다[3]. 그러나 ECAP 공정 특성상 최종 제품의 크기에 제한을 갖는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 ECAP 공정을 통해 조직 제어된 시편을 장선화가 가능한 직접 압출공정에 적용하였다. 여기서 압출 공정온도를 변수로 하여 마그네슘 합금 압출판재의 기초 물성과 미세조직 변화 및 이방성에 미치는 영향에 대하여 조사 분석하였다. 또한 조직 제어하지 않은 압출판재와 물성을 비교 평가에 하여 ECAP 공정의 영향도 고찰하였다.

1. 한국생산기술연구원 성형기술그룹
E-mail:ydj@kitech.re.kr

2. 연구결과

ECAP 공정 이후 압출판재에 대한 기계적 물성의 변화를 분석하기 위해 3가지 방향으로 일축 인장시험을 수행하여 압출온도에 따라 응력-변형률 선도를 Fig. 1에 도시하였다.

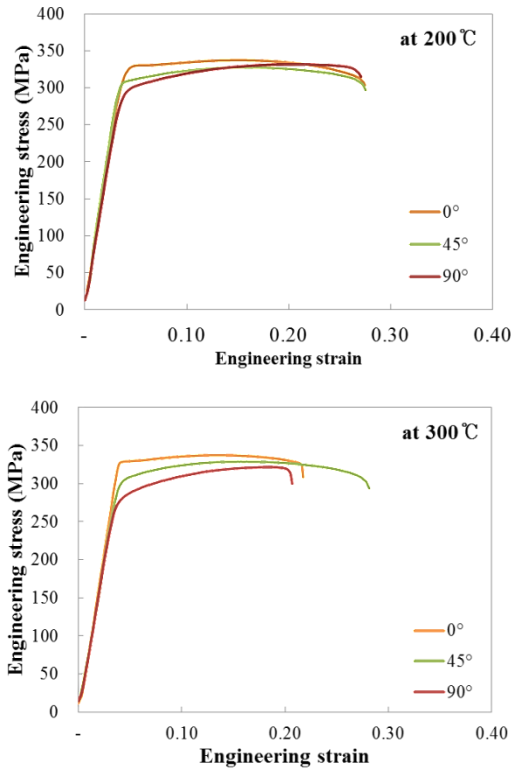


Fig. 1 Engineering strain-stress curve of sheet extrusion at 200 °C and at 300 °C.

먼저 인장강도의 변화를 살펴보면, 압출판재의 항복강도는 각각 방향에서 비슷한 수준을 유지하였으나 연신율에서는 공정온도 200 °C에서 압출한 판재가 각도별 최대 0.5% 차이를 보이는 것에 비해 공정온도가 상승할수록 0~90° 방향에서 3.11%, 6.46%의 차이를 나타내었다.

이는 ECAP 반복공정에 의해 마그네슘 합금의 미세조직 극미세화로부터 줄어든 미세조직이 공정온도에 따라 결정립 성장한 것으로 판단된다.

ECAP 공정에 따라 소재의 연신율과 소성변형률비의 변화 양상이 다르게 나타나는 원인을 분석하기 위해 광학현미경을 이용하여 미세조직을

관찰하여 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2는 ECAP 공정 후 공정 온도별 압출한 판재의 수직 단면을 관찰한 미세조직 사진이다.

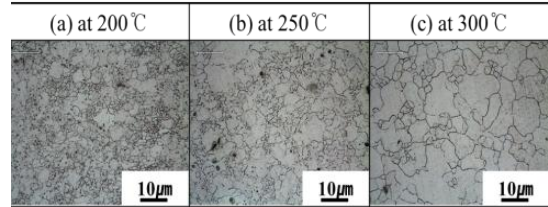


Fig. 2 Microstructures of AZ31 in sheet extrusion (a) at 200 °C, (b) at 250 °C, (c) at 300 °C.

먼저 압출 온도별 미세조직을 비교해보면 평균 결정립 크기는 200 °C에서 0.92 μm, 250 °C에서 3.49 μm, 300 °C에서 5.172 μm로, 이전 연구에서 ECAP 공정 후 평균 결정립 크기가 2.5 μm인걸 감안하면 온도가 상승할수록 결정립이 성장이 일어난 것으로 판단되며, 결과적으로 연신율 거동에 영향을 주는 것으로 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 AZ31 마그네슘합금을 ECAP공정과 직접 압출공정에 적용하여 압출온도를 변수로 판재 제조하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) ECAP 공정 4회된 시편으로부터 직접 압출공정에 적용하여 평균 결정립의 크기가 1 μm이하인 압출판재를 제조할 수 있었다.

(2) 압출온도 200 °C에서 판재의 압출 방향별, 연신율의 값이 일정한 압출판재를 제조할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B.L. Mordike, T. Ebert, 2001, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 302, pp. 37~45.
- [2] J. Bohlen, S.B. Yi, J. Swiostek, D. Letzig, H.G. Brokmeier and K.U. Kainer, 2005, Scr. Mater. Vol. 53, pp. 259~264.
- [3] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon, 1996, Scripta Mater. Vol. 35, pp. 143~146.

E-form Mg 합금 판재의 소성변형비 이방성에 관한 연구

김민성, 황지현, Kale amol B., 최시훈

Abstract

본 연구에서는 일축인장 시 E-form Mg 합금 판재에 발생하는 소성변형비(Plastic Strain Ratio, R-value)의 이방성(Anisotropy)에 관한 연구를 수행하였다. E-form Mg 합금의 거시집합조직(Macrotexture)을 측정하기 위해 X-선 회절(X-ray Diffraction, XRD)법을 이용하였다. 고온만능시험기(Instron Coporation-5585H) 및 DIC(Digital Image Correlation)기술을 이용하여 일축인장 시 E-form Mg 합금 판재의 표면에 발생하는 변형분포 및 변형률에 따른 소성변형비 변화를 분석하였다. 초기 거시집합조직으로부터 얻어진 다결정 방위를 고려한 VPSC(Visco-Plastic Self-Consistent) 다결정소성모델을 이용하여 일축인장 시 집합조직 및 소성변형비의 변화를 이론적으로 예측하였다. 한편, FE-SEM 에 부착된 EBSD(Electron Backscattered Diffraction)을 이용하여 각 합금의 일축인장 변형에 의한 미시집합조직의 변화를 실험적으로 분석하였다. 본 연구 결과로부터 얻어진 일축인장 시 E-form Mg 합금 판재에 발생하는 집합조직 및 소성변형비의 변화에 대한 결과는, 향후 성형성이 우수한 Mg 합금 판재 개발 연구에 활용이 기대된다.

Keywords : Mg alloy, R-value, DIC, Anisotropy, Macrotexture

Lightweight Duplex Steel의 각 구성상에 대한 Microscopic Hardening Parameter 예측

김은영, 우완측*, 김동규*, 박재현**, 최시훈

Eun-Young Kim, WanChuck Woo*, DongKyu Kim*, JaeHyun Kwak** and Shi-Hoon Choi

Abstract

자동차 강판에 Al 첨가는 고온에서 ferrite 와 austenite 를 형성하는데 도움을 주며, 4~6 wt%의 Al 을 첨가하면 기존의 자동차 강판 대비 6~9%를 경량화 할 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 Mn 및 Al 이 각각 3.5 wt%, 6.0 wt%이 함유된 lightweight duplex steel(LW-DS)의 일축인장 시 각 구성상(α (ferrite), γ (austenite), α' (martensite))의 microscopic hardening parameter 를 이론적으로 예측하였다. 파쇄 중성자원(spallation neutron source)으로 VOLCAN 을 이용하여 in-situ 일축 인장시험을 수행하였으며, 각 구성상의 결정면에서의 회절 피크(diffraction peak)를 측정하였다. 실험적으로 측정된 결과와 결정소성 유한요소법(crystal plasticity finite element method, CPFEM)을 결합하여 각 구성상에 대한 microscopic hardening parameter 를 결정하였다. LW-DS 의 일축인장 시 γ 상에 α' 상으로의 변태를 고려하기 위하여 CPFEM 에 상변태 모델을 적용하였다. LW-DS 의 각 구성상에 해당하는 microscopic hardening parameter 를 예측함으로써, 구성상에 해당하는 기계적 물성을 성공적으로 얻을 수 있었다. 이론적으로 예측된 LW-DS 의 각 구성상에 대한 microscopic hardening parameter 를 적용하여 실제 미세조직을 기초로 하여 소성변형 시 LW-DS 에 발생하는 미소역학적 변형 및 파괴거동을 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Lightweight Duplex Steel, In-situ, Neutron Diffraction, CPFEM, Phase Transformation

순천대학교 대학원 인쇄전자공학과

* 한국원자력연구원, 중성자과학연구부

** POSCO 기술연구소 박판연구그룹

굽힘 피로 시험 시 연성 동박 적층판의 전기적 저항에 미치는 미세조직 변화의 영향

박기성, 황지현, 신지환, 김민성, Atanu Bag, 최시훈

Ki-Seong Park , Ji-Hyun Hwang, Ji-Hwan Shin, Min-Seong Kim, Atanu Bag and Shi-Hoon Choi

Abstract

굽힘 피로 시험 시 8 μ m 두께의 동박(Copper film)층과 100 μ m 두께의 Kapton PI(Polyimide)층으로 구성되어 있는 연성 동박 적층판(Flexible Copper Clad Laminate, FCCL)의 전기적 저항에 미치는 미세조직 변화의 영향을 이해하기 위하여 자체적으로 제작한 굽힘 피로 시험기(Bending Fatigue Tester)를 이용하여 굽힘 횟수(Bending Cycle)에 따른 전기적 저항을 실험적으로 측정하였다. 굽힘 피로 시험 시 굽힘 횟수에 따라 동박층의 두께방향으로 발생하는 미세조직의 변화를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 및 EBSD를 이용하여 관찰하였다. 굽힘 피로 시험 시 발생하는 연성 동박 적층판의 국부적인 변형 집중(Strain Concentration)과 변형 분포(Strain Distribution)를 예측하기 위하여 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 수행하였다. 유한요소해석에 필요한 연성 동박 적층판에 대한 각 구성층의 응력-변형률 곡선은 DIC(Digital Image Correlation)기술을 이용하여 일축인장 실험으로부터 결정하였다. 굽힘 피로 시험 시 인장 및 압축 변형을 겪는 부분에서의 변형을 모사하기 위하여 유한요소해석에 손상(Damage) 모델을 적용하여 실험 결과와 비교함으로써, 굽힘 피로 시험 시 연성 동박 적층판의 전기적 저항에 미치는 미세조직의 영향을 이해하고자 하였다.

Keywords : Lightweight Duplex Steel, In-situ, Neutron Diffraction, CPFEM, Phase Transformation

태핏하우징의 냉간단조 공정개발

곽은조¹ · 주원홍¹ · 신경식² · 고상배² · 박성영[#]

Development of Cold Forging Process for Tappet Housing

E. J. Gwak, W. H. Ju, K. S. Sin, S. B. Ko, S. Y. Park

Abstract

In this study, roller type tappet housing for engine valve train is applied by FEM analysis. Based on the analysis results, we designed a cold forging process. Cold forging process was performed two steps, and improved the formability through annealing and coating before each forging process. When producing a product in a process developed in this study, it is possible to reduce the input material and improving the dimensional precision than conventional processing process. 본 연구에서는 엔진 밸브트레인에 적용되는 Roller type 태핏하우징을 FEM을 통하여 성형 해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 냉간단조 공법을 설계하였다. 냉간 단조공정은 2차로 나누어 수행하고, 단조 전 어닐링과 피막작업을 통해 가공성을 향상시킨다. 본 연구를 통해 개발된 공정으로 제품을 생산할 경우, 기존의 가공방식에 비해 소재투입량 및 치수정밀도가 향상될 것으로 사료된다.

Key Words : FEM(유한요소법), Tappet housing(태핏 하우스), Cold forging(냉간단조)

1. 서 론

현재 강화되는 환경규제에 대응하기 위하여 완성차 업체를 비롯한 자동차 업계에서는 엔진의 효율개선 및 차량 경량화 등 연비 저감기술에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이에 따른 연구의 일환으로 엔진계통의 마찰저감 기술연구 또한 활발히 이뤄지고 있다.[1]

엔진의 출력에 영향을 주는 부품 중에 밸브트레인 부품들이 엔진의 성능과 출력에 직접적인 영향을 미친다. 특히 밸브트레인계의 마찰은 저속영역에서의 점유율이 엔진마찰의 15% 이상으로 연료소모 측면에서 그 비중이 매우 크다. 밸브트레인의 형태와 구조는 엔진의 연소실에 공기와 연료를 공급하는 중요한 역할을 수행하기 때문에 엔진의 초기 설계에서부터 개발이 진행되는 엔진의 핵심부품군 중의 하나이다. 밸브트레인은 엔진의 종류와 규격에 따라 다양하게 분류될 수 있지만, 일반적으로 직동식(Direct

Acting Type), 핑거팔로우어(Finger Follower Type), 그리고 Center Pivot OHV의 Roller Follower Type으로 나눌 수 있다. 기존 문헌에 따르면 동일한 밸브트레인 시스템에서 각 접촉부에 롤러 태핏을 적용할 경우 마찰을 50% 정도 감소시킬 수 있다[2].

기존의 Roller Follower Type 태핏하우징은 CNC와 MCT가공 공법으로 제작하여 가공시간이 오래 걸리고 생산성이 떨어지며, 소재투입량이 큰 단점이 있다. 반면, 단조가공법은 가장 오래된 소성가공법의 하나이며, 냉간단조는 재료를 가열하지 않고 상온 또는 상온에 가까운 온도에서 실시하는 단조 방법으로 제품의 치수정밀도가 높다. 정밀도가 높기 때문에 후 공정의 기계가공이 불필요하거나 가공공정수가 대폭으로 저감된다. 단조가공법은 대량생산이 가능하기 때문에 자동차산업과 더불어 비약적으로 발전해왔다.[3].

본 연구에서는 태핏 하우스를 정밀 냉간단조 공법을 통하여 제작하기 위한 최적의 공정을 개발하였다.

1. 공주대학교 일반대학원 기계공학과

2. (주)세립티앤디

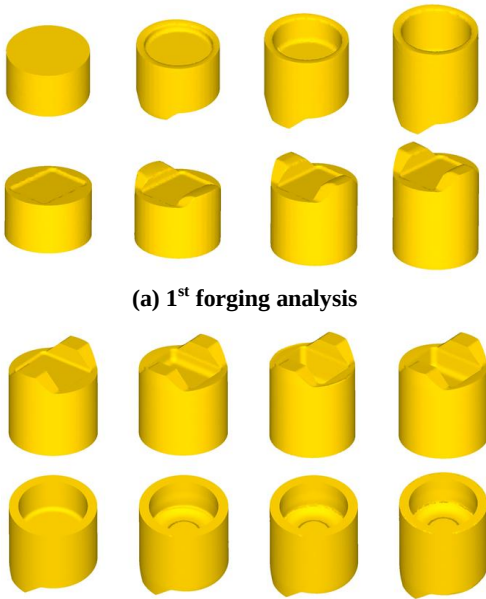
공주대학교 기계자동차 공학부,

E-mail:sungyoung@kongju.ac.kr

2. 본 론

2.1 성형해석

공정설계를 위하여 FEM Code인 Deform-3D를 사용하여 태핏 하우징의 단조공정 성형해석을 진행하였다. 소재는 16MnCr5 크롬 합금으로, 태핏의 구조 특성상 공정을 1차와 2차로 나누어 진행하였다.



(a) 1st forging analysis

(b) 2nd forging analysis

Fig. 1 Roller tappet housing forming analysis

2.1.1 해석 결과

해석 결과 소재에 작용하는 최대 변형응력은 1차 단조공정에서 약 820 MPa, 2차 단조공정에서 약 850 MPa 이었으며, 편치에 작용하는 최대 하중은 1차 단조공정에서 약 150 ton, 2차 단조공정에서 165 ton 으로 계산되었다. 해석결과 1차, 2차 단조공정 중 파손부위 없이 진행되었으며, 실제 생산을 위하여 250톤급 이상의 프레스가 사용되어야 할 것으로 판단된다.

2.2 제품생산을 위한 단조공정 설계

해석결과를 바탕으로 태핏하우징 생산을 위한 공정을 설계하였다. 제품 도면은 Fig. 2와 같다. 냉간단조 공정은 2차로 나누어 진행하며, 단조

전에 가공성 향상을 위하여 어닐링 및 피막작업을 수행하였다. 어닐링 후 경도는 HRB75로 결정하였다. 2차 단조 후 가공 및 열처리와 연마를 통하여 제품을 생산한다.

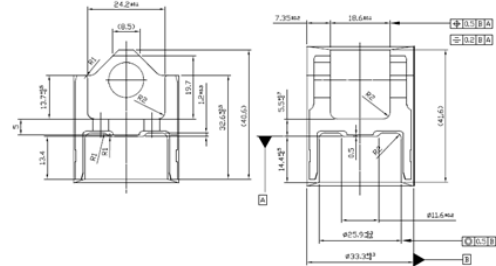


Fig. 2 Drawings of roller tappet housing

4. 결 론

자동차 엔진의 밸브트레인에 적용되는 태핏하우징의 성형해석을 진행하고 제품 제작을 위한 공정설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 태핏하우징 단조공정 해석결과 균열 및 파손 등 문제점이 보이지 않아 실제 냉간단조 공법을 통한 제품 제작이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 해석데이터를 바탕으로 정밀 냉간단조공정 설계를 수행하였으며, 해당 공정을 통하여 제품을 생산할 경우 생산성 증대와 원소재 절감 및 높은 치수정밀도를 갖는 제품생산이 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] S. S. Moon, 2014, Engine Research Trend in Japan : Tribology Technology. Journal of the Korean Society of Automotive Engineers 36(11), 22-25
- [2] 최재권, 1997, 저연비엔진 윤활시스템 설계기술 The Korean Society Of Automotive Engineers Workshop , 107-129
- [3] W. S. Lim, Y. I. Park, S. B. Chung, J. M. Lee, 1994, Experimental Study for the Performance Analysis of Automatic Transmissions, J. Kor. Soc. Auto. Eng., pp. 365~371.

자동차 조향축의 텔레스코픽 기능을 위한 튜브 슬라이드 하우징 성형공정 연구

임성식¹ · 윤덕재¹ · 최호준¹ · 신영철¹ · 김연구² · 신익철² · 임성주^{1#}

Cold Forming Process Study for Tubular Slide Housing with Telescopic Function in Vehicle Steering System

S. S. Lim¹, · D. J. Yoon¹, · H. J. Choi¹, · Y. C. Shin¹, · Y. K. Kim¹, I. C. Shin², · S. J. Lim^{1#}

Abstract

A tubular slide housing is one of the telescopic functional components assembled in steering column shaft of a vehicle. The tubular slide housing which is considered for steering performance and stability characteristics in the automotive steering system has a lubrication surface for smooth longitudinal movement after assembly.

In particular, the tubular slide housing having thin thickness involves stringent forming requirements and it is very difficult to form a high dimension precision and geometrical accuracy under a cold extrusion process due to folding and buckling. The present study has been carried out to optimize parameters influencing on cold extrusion process such as reduction ratio of area, number of process, material dimension, friction factor, length of die land and die entrance angle to form a tubular slide housing. Experimental and FE analyzing simulation results shows that optimized forming conditions to get a final product with good dimensional accuracy and smooth surface are friction factor 0.1, length of die land 5mm, reduction ratio of area about 10%, die entrance angle 40°.

Key Words : Tubular shaft, precision forming, slide housing, cold forming, FEA

1. 한국생산기술연구원 성형기술그룹

2. ㈜대림엔티아이 소성가공연구실

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail: lim@kitech.re.kr

냉간다단단조 공법을 적용한 최적의 축비대칭샤프트 설계방안 연구

민두식 · 김광민 · 김구락 · 박상균 · 황태민[#]

Drawing Analysis of Optimal Eccentricity Shaft For Cold-Forging Process

D. S. Min, K. M. Kim, K. R. Kim, S. K. Park, T. M. Hwang[#]

SUNGJIN FO-MA INC.

Abstract

본 연구에서는 냉간다단단조공법을 적용하여 축비대칭샤프트의 상측부위가 한쪽으로 치우친 축비대칭샤프트의 최적의 설계방안을 연구하였다. 본 연구에서 개발하고자하는 축비대칭샤프트는 다단단조 공정에서 축의 이동을 단조공법으로만 구현해야 하기 때문에 높은 성형기술을 필요로 하며 국내최초의 연구시도이다. 축비대칭샤프트의 연구를 위해 첫번째로 Free 단조공정도를 설계하였고, 이 단조공정도에서 가장 중요한 공정의 형상을 조건별로 설계하여 Metal Flow(단류선)와 응력분포해석을 통한 성형해석을 진행하여 최적의 공정설계를 하고자 한다. 최적의 공정설계완료 후 검증을 위해 금형제작 및 시제품 제작을 하여 해석결과와 시제품을 비교 분석하므로 설계연구의 결과를 리뷰하고자 한다.

Key Words : 축비대칭, 냉간다단단조, 포머단조, 소성가공, AFDEX

상용 자동차용 부품 냉간 판재성형 공정설계에 관한 연구

최동환¹ · 이상익¹ · 이정환[#]

Study on cold Sheet Metal Forming Process Design for Commercial Automotive components

D. H. Choi, S. I. Lee, J.H. Lee

Abstract

Head for sealing inside of the brake chamber typically fabricated by 4-stage cold-pressing processes to obtain uniform thickness without any local thinning of wall. Because of high manufacturing cost and low productivity of head, reduction of manufacturing processes was a major concern. In this study, forming processes of head were numerically investigated by finite element method to reduce manufacturing processes. In the simulation, two dimensional axisymmetric model was used to reduce the computation time in the commercial finite element analysis software DEFORM-2D. In order to confirm analysis results, simulation results were compared with final product of head. From above study, 3-Stage forming processes were drawn from the numerical simulations without any local thinning of wall. In the simulation results, minimum thickness of head are larger than design criterion and entire part of head satisfied margin of error of 10%.

Key Words : Brake Chamber, Cold Forming , TD(Toyota Diffusion), FEA(Finite Element Analysis), Commercial car, Process design

1. KIMS

교신저자: KIMS, E-Mail : ljh1239@kims.re.kr

고정단(fixture) 이 평평함을 유지 하지 않을 때 수평형 라디언트 튜브의 크립수명 평가

이수호¹ · 강한샘² · 이영석[#]

Evaluation of creep life of a vertical type radiant tube When flatness of fixture is not maintained

SooHo Lee, Kang Han Saem, Youngseog Lee

Abstract

Vertical type radiant tube is being used in Continuous Annealing Line (CAL) to heat up the strip. High temperature combustion gas flows through the inside of the radiant tube and released continuously. Since the structure of radiant tube is generally exposed to high temperature (600~900°C) for long time (3~4 years), it is subjected to creep deformation. This study evaluates the creep life of the radiant tube by performing finite element analysis when flatness of the fixture varies from 0 to 7 degree. Larson-Miller parameter was used to predict the creep life. Results show that creep life at each region in the radiant tube is sensitive when flatness of the fixture changes. In overall, the creep life is not proportional to flatness of the fixture.

수직형 라디언트 튜브는 Continuous Annealing Line (CAL)에서 스트립(strip) 을 가열하기 위해 사용되고 있다. 높은 온도의 연소가스가 라디언트 튜브를 지속적으로 통과하여 흘러 나간다. 라디언트 튜브는 일반적으로 오랜 시간(3~4년) 동안 그리고 고온(600~900°C)에 노출되기 때문에 크리프 변형이 수반된다. 이 연구는 라디언트 튜브의 고정단과 지지대 접촉 각도가 0~7°로 변화할 때, 라디언트 튜브의 크리프 수명을 유한요소모사를 바탕으로 평가하였다. 크립 수명 예측에는 Larson-miller Parameter가 사용되었다. 결과적으로 라디언트 튜브의 크리프 수명이 고정단의 평평함의 변화에 민감하다는 것을 알 수 있었다. 전체적으로 고정단과 지지대의 접촉각도 변화에 따라 크리프 수명이 비선형적으로 변화하였다.

Key Words: Radiant tube, Larson-Miller parameter, Finite Element Analysis, Creep Strain Analysis

1. 중앙대학교 기계공학과

2. 중앙대학교 기계공학과

교신저자: 중앙대학교 기계공학과, E-mail: ysl@cau.ac.kr

마그네슘 합금재질의 마찰교반용접 공정 전산모사 연구

이승열^{1#} · 강경필¹ · 이경훈¹ · 김정석² · 이우근² · 선승주² · 임재용³

A Study on the Finite Element Analysis in Friction Stir Welding Process of Magnesium Alloy

S. Y. Lee, K.P. Kang, K. Lee, J. S. Kim, W. G. Lee, S. J. Sun, J. Y. Lim

Abstract

Friction stir welding(FSW) process of magnesium alloy was simulated using the finite element method. Fully coupled thermo-mechanical model was adopted in this simulation. Comparison of the flow pattern and temperature distribution for the various rotational and translation speed is presented in this work.

Key Words : Friction Stir Welding(마찰교반용접), Magnesium Alloy(마그네슘 합금), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서 론

마찰교반용접(FSW)은 고속으로 회전하는 비소모성툴(Tool)을 피접합체에 삽입하여 툴과 피접합체와의 마찰에 의해 발생한 열에 의해 연화된 피접합체의 소성유동을 이용하는 용접 공정이다[1,2]. 마찰교반용접의 장점은 높은 에너지 효율을 가지며 용접변수의 제어가 용이하고 이종재료의 용접이 가능하다는 점을 들 수 있다. 또한 용접공정 중에 용융 및 응고 과정을 수반하지 않는 고상(Solid state) 용접공정이어서 용접부의 기계적 특성이 우수할 뿐만 아니라 기존의 용융용접 방법으로는 건전한 용접부를 얻기 어려웠던 난용접성 금속소재에 대한 용접성능을 인정받아 알루미늄합금, 마그네슘합금과 같은 경량금속의 용접공정으로 각광을 받고 있다[3]. 일본과 미국, 유럽에서는 마찰교반용접 기술의 전반에 대해 수치해석을 통해 마찰용접 메커니즘에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에 비해 국내의 연구개발 활동은 소수의 연구기관에서만

수행되고 있으며 기초적인 연구개발에 한정되어 있어 매우 미약한 수준이다[4]. 본 논문에서는 체계적인 마찰교반용접 공정개발을 위해 마찰교반용접 공정에 대한 전산모사가 가능한 수치해석 프로세스를 구축하고, 공정 변수에 따른 마찰교반용접 접합부의 열 분포 및 역학적 특성을 분석 하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델

본 연구의 유한요소해석은 상용 소프트웨어 DEFORM-3D를 사용하였으며, 효율적인 계산 시간을 고려하기 위하여 Fig. 1과 같이 용접 모재의 일부분만 모델링 하였다. 용접 모재는 사면체요소를 사용하였으며, 용접 공구는 강체로 가정하여 해석모델을 구성하였다. Fig. 2는 용접 공구 형상을 보여주고 있으며 Table 1에 마찰용접 공정조건을 정리하였다. 용접 공구 형상은 Taper pin 형태로 숄더(Shoulder)부분과 프로브(Probe)부분으로 구분할 수 있다. 숄더부 직경은 18mm이고, 프로브 직경은 3.4mm, 6mm의 치수로 잘린 원뿔 형상이며,

1. (주)솔루션랩
2. 한국철도기술연구원
3. 대구대학교

교신저자: (주)솔루션랩, E-mail:sylee@solution-lab.co.kr

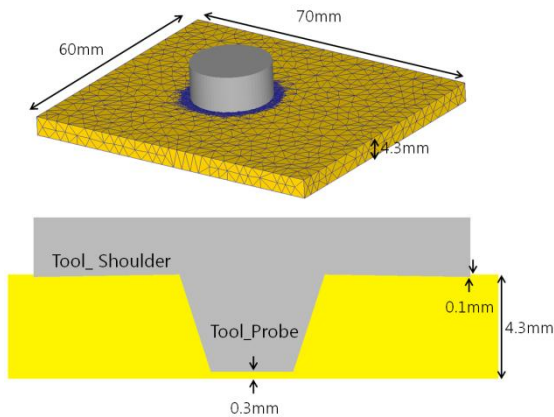


Fig. 1 FE model of FSW process

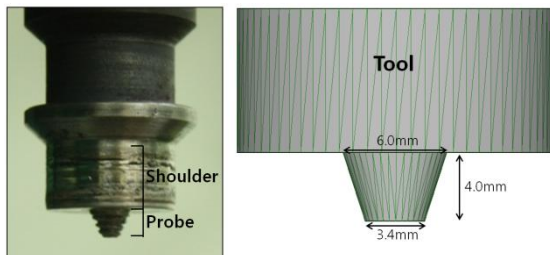


Fig. 2 Geometry of the tool

Table 1 Process Conditions

Welding Variable	Value
Travels speed(mm/sec)	1.6, 5
Rotation speed(rpm)	400, 800

높이는 4mm이다. 프로브에 나사산 가공이 되어 있지만 본 연구에서는 나사산 효과를 고려하지 않은 해석모델을 구성하였다.

2.2 재료의 물성치

용접 모재는 마그네슘 합금 AZ31B종을 사용하였다. 용접 모재로 선택된 AZ31B는 온도의 영향에 의해 그 재료 물성치가 달라진다. 사용된 AZ31B의 온도별/ 변형률 속도별 유동응력은 Fig. 3과 같다. 온도는 100~500(°C) 영역의 데이터를 사용하였고, 변형률 속도는 0.1~100(1/s)에서의 데이터를 사용하였다. 열전도도와 열용량은 각각 96[W/m²/C], 1.77[J/°C]으로 상숫값을 사용하였다.

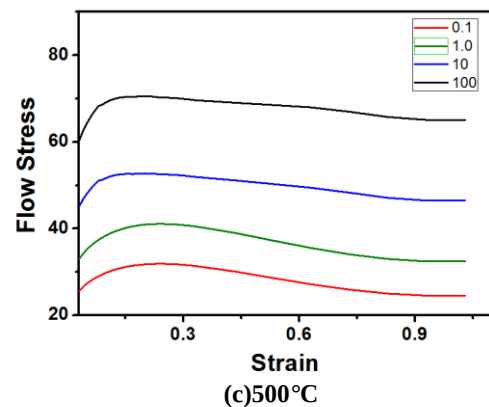
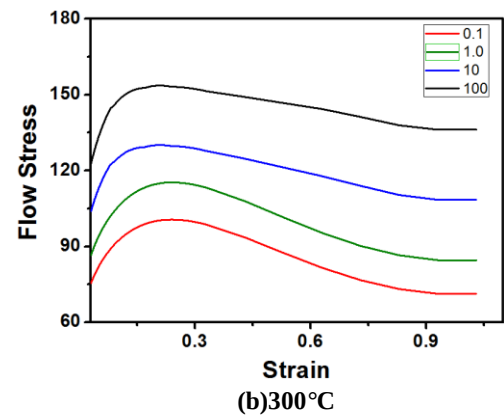
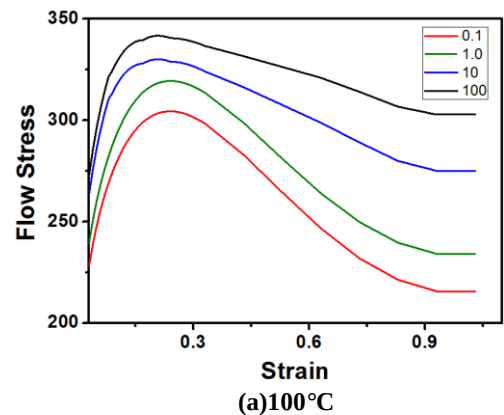


Fig. 3 Stress-strain curves of magnesium alloy AZ31B

2.3 수치해석 결과

해석 결과 용접 공구의 회전 속도에 따른 용접모재의 속도장을 Fig. 5에 나타내었다. 용접공구와 접촉하고 있는 영역에서 속도장이 나

타나며, 솔더 가장자리와 접촉하고 있는 부분에서 속도장이 가장 크게 나타나고 있다. 용접 공구의 회전 속도가 증가함에 따라 용접 모재의 속도장도 비례하여 증가하고 있으며 용접 공구의 병진 속도에 따른 속도장의 변화는 미미한 것으로 확인되었다. Fig. 4는 용접 모재 단면의 속도장 분포를 비교 하였으며 용접 공구의 병진 속도 및 회전 속도에 따른 속도장 분포 패턴 차이는 미미한 것으로 확인되었다. 용접 공구와 접촉하고 있는 영역에서 약 450~550°C의 온도 분포로 나타났으며, 각각의 공정조건 별로 최대 온도 값은 차이를 보였다. 용접 공구의 회전속도가 빠를수록 최대 온도 값이 증가하는 경향을 확인하였고, 용접 공구의 병진 속도에 따른 온도 편차는 미미한 것을 확인하였다. 마찰교반용접 공정에는 AS(Advancing Side of the weld) 영역과, RS(Retreating Side of the weld) 영역이 존재한다. AS 영역의 경우 용접 톨의 회전 속도와 병진 속도가 중첩되어 RS영역보다 용접공정에서 발열이 더 많은 것으로 문헌에 보고되어 있다 [5]. 본 연구에서도 AS, RS 영역의 온도 분포

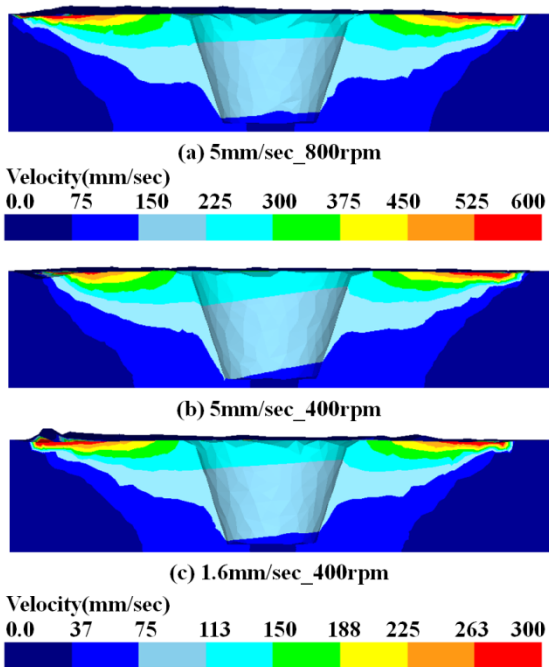


Fig. 4 Velocity distribution at the material cross section

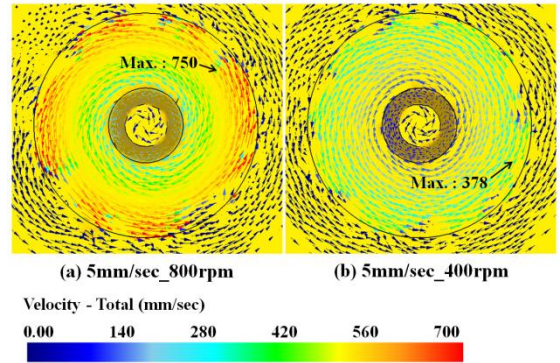


Fig. 5 FE analysis result : Velocity field around the FSW tool

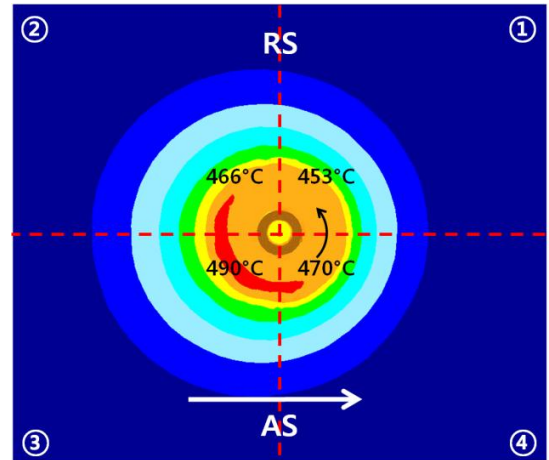


Fig. 6 Temperature distribution around the FSW tool

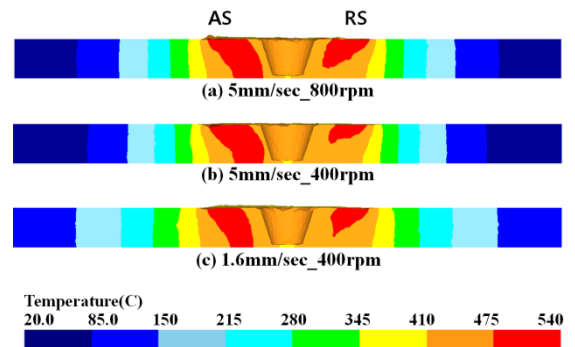


Fig. 7 Cross sectional temperature distribution

를 분석하기 위하여 Fig. 6과 같이 영역별 온도 분포를 나타내었다. 대체로 AS 영역이 RS 영역보다 대략 20℃ 정도 높게 평가되고 있음을 확인하였으며, 특히 Fig. 6과 같이 3 사분면에서 온도가 가장 높게 분포하고 있다. 이는 AS 영역 중에서도 용접 공구의 전진 방향의 영역(4 사분면)은 계속하여 상온의 소재가 인접되는 영역이고 3 사분면의 영역은 가열된 소재 뒤를 따라가며 가열이 중첩되는 영역이기 때문에 3 사분면의 온도가 가장 높게 분포하고 있다. Fig. 7은 각 공정 조건별로 용접 모재의 단면에 나타나는 온도분포를 관찰한 결과이다. 모든 조건에서 AS 영역이 온도가 높게 분포하는 것을 확인 할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 마찰교반용접 접합부에 나타나는 역학적 특성들을 전산 수치적 시뮬레이션을 이용하여 분석하기 위한 프로세스를 구축하였으며, 마찰교반용접 과정에서 주요 공정변수인 용접 공구의 회전 속도 변화와 병진 속도 변화에 따른 용접 모재의 열 분포 특성을 분석하였다.

(1) 마찰교반용접 과정 중에 용접 모재에 발생하는 온도 분포는 용접 공구와 용접 모재 사이 접촉이 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

(2) 용접 공구의 회전 속도가 증가함에 따라 용접부 최대 온도가 증가한다.

(3) 용접부에 나타나는 온도분포는 AS 영역이 RS 영역보다 대략 20℃ 정도 높게 평가되고 있음을 확인하였다. 이는 AS 영역의 경우 용접 공구의 회전 속도와 병진 속도가 중첩되어 RS 영역보다 용접공정에서 발열이 더 많은 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 첨단 철도신소재 기술 개발과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Rajiv S., Murrar W., 2007, Friction Stir Welding & Processing. Materials Park, OH. ASM International.
- [2] Zhang Z., Chen J., 2008, The simulation of material behaviors in friction stir welding process by using rate-dependent constitutive model, J. Mater., Vol. 43, pp.222~232.
- [3] Zhang H., Zhang Z., 2005, The finite element simulation of the friction stir welding process, Mater. Eng A, Vol. 403, pp.340~348.
- [4] Li T., Shi QY., 2007, Residual stress simulation for friction stir welding joint, Technol. Weld Join, Vol. 12, pp.634~640.
- [5] Schmidt H., Hattel J., 2005, A local model for the thermo-mechanical conditions in friction stir welding, Mater. Eng., Vol. 13, pp.77~93.

제진강판의 성형성 특성에 관한 연구

이현철^{1#} · 하유정¹ · 고건영¹ · 임완섭² · 최승조²

A Study on Formability characteristics of the vibration proof steel

H. C. Lee, Y. J. Ha, G. Y. Go, W. S. Lim, S. J. Choi

Abstract

In recent year, there is strong demand for the light weight automobiles in order to meet environmental regulation and safety standard. on the other hand, customer requirement for emotional quality is continuously increasing. Thus, light weighting with high NVH quality is essential in modern automobile industry. Vibration proof steel sheet is consist of visco-elastic layer between two steel sheets and it can reduce vibration by visco-elastic behavior of the layer which transfer vibration into thermal energy. And it can reduce weight of automobile parts by eliminating additional use of damping pad and LASD(Liquid Applied Sound Damping). However, formability of the sandwiched panel different with conventional steel sheet. Thus, formability of the vibration proof steel sheet should be verified with proper quantitative methods. In this study, the formability of vibration damping steel sheets was evaluated by cup drawing test. For the cup drawing test, the formability evaluation equipment SMF-500 was used. By investigating strain distribution with digital imaging method, formability limit curve(FLC) of the vibration proof steel was examined.

Key Words : Formability, Vibration proof steel, FLC(forming limit curve)

1. 자동차부품연구원

2. (주)현대하이텍

교신저자: 자동차부품연구원, E-mail: hclee@katech.re.kr

샌드위치 판재의 접합 형식에 따른 성형 특성 분석

이경민¹ · 박시준¹ · 전재민² · 안승현² · 송종호[#]

Formability of the Joining Method on the Sandwich Plate

G. M. Lee¹, S. J. Park¹, J. M. Jeon², S. H. Ahn², J. H. Song[#]

Abstract

Recently, research for development of light weight vehicle body is continuously increasing to response fuel economy regulation. For light weighting of vehicle body, conventional steel plate has been substituted by light weight material with high specific strength and jointing of multi-material is generally applied. However, customer's demand for safety and emotional quality in NVH (Noise, Vibration and Harshness) becomes more important, light weight should be done with proper strength and NVH quality. In the view of light weighting and NVH quality, application of vibration proof steel plate can be an effective solution. The vibration proof steel plate is sandwiched panel of two steel plates with visco-elastic polymer inside. By visco-elastic behavior of polymers, vibration energy is transferred to thermal energy and it is dissipated. However, formability of sandwich panel is different with conventional steel sheet. Thus, careful analysis of formability should be required. This study aims to characterize formability of sandwich high-strength steel plate. The high-strength steel plates of different thicknesses with resistance spot welding and sealer bonding were analyzed by lab shear test and forming limits diagram was investigated by cup drawing test. Finally, proper jointing method for sandwiched panel was suggested for vibration reduction with proper joint strength.

Key Words : Sandwiched panel, Forming limits diagram, spot welding, sealer bonding, patchwork, NVH

1. 자동차부품연구원

2. ㈜현대하이텍

교신저자: 자동차부품연구원, E-mail: jhsong@katech.re.kr

박판 성형에서 Bottoming을 이용한 스프링백 최소화

윤형우¹ · 김원섭¹ · 홍석무[#]

Springback Prediction of Sheet Metal Forming using Curved TV Bottom Chassis

H. Yoon, W. Kim and S. Hong

Abstract

Curved TV in the display industry has become the latest design trends. Bottom chassis is one of curved TV components such as main-board, LED and front cover. Because bottom chassis maintains the curvature of curved TV as well as assembly another parts, the dimensional accuracy of bottom chassis is very important. Therefore, a new die design method considering the springback of the curved bottom chassis is requested in the industry. The springback prediction after forming and the improvement of die design considering springback compensation were carried out in this study. Finite element analysis was performed to predict occurring springback after stamping of bottom chassis. And, the accuracy of finite element analysis was verified by utilizing the three-dimensional measurement system to measure the amount of deformation after stamping. Finally, the die curvature satisfying the specifications required by the product is determined through finite element analysis and optimal design technique.

Key Words : Curved TV, Springback Prediction, 3D Optical Measurement

1. 서 론

최근 개발되는 TV의 디자인은 대형화, 박형화이다. 그 중 Curved TV는 곡률을 통해 화면에 대한 몰입감을 주기 때문에 앞으로 더욱 확대 적용될 것으로 기대된다. Curved TV는 메인 보드(main board), 백라이트(Back-light), 액정(LED) 그리고 Bottom Chassis 등의 부품으로 구성되며, 그 중 Bottom Chassis는 화면의 뒷면에서 부품들을 지지하면서 결정된 곡률을 유지하는 역할을 한다. 기존 평판 Bottom Chassis 제조 공법에서는 단순 평면 박판 금속의 벤딩(bending), 피어싱(piecing), 트리밍(trimming) 등으로 공정이 구성되었고, 평면도를 유지하기 위해 재가공(restriking) 공정을 추가하여 평면도

를 조정하여 제품을 완성하였다. 하지만 곡률을 가진 Curved TV의 경우, 곡률에 의한 스프링백이 추가되어 요구되는 제품 사양을 만족시키기에 더욱 어려움을 겪게 된다. 따라서, 제품 개발 일정 지연 및 스프링백을 교정하기 위한 후가공 공정의 추가로 제조 비용 상승이 문제가 되고 있는 것이 현실이다. 산업 현장에서는 Curved TV Bottom Chassis 설계 시 스프링백을 미리 예측하여 이를 설계에 반영함으로써 제품 개발 기간의 단축과 후가공 비용을 감소시키기 위해 연구가 절실하다.

따라서, 본 연구에서는 Curved TV의 Bottom Chassis성형 후 스프링백을 예측하고, 예측된 스프링백량과 원하는 곡률이 최소가 될 때까지 금형의 곡률을 수정하여 제조 후 실제 곡률이 설계 곡률이 될 수 있도록 금형 곡률 최적 설계 기법을 적용하였다[1].

1. Graduate school of techno convergence, Kongju National University
2. GOM OMA

Corresponding Author: Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University, E-mail:smhong@kongju.ac.kr

2. 유한 요소 해석 신뢰성 검증

유한요소 해석에 사용된 소재의 재질은 SPCC 이고, 소재의 두께는 0.6mm이다. 소재의 물성치는 인장시험을 통해 결정하였다. 금형은 전체 3 공정으로 이루어진다. 1공정은 형상 포밍 (Forming), 2공정은 트리밍(Triming), 3공정은 벤딩 (Bending)이다. 1공정은 소재 유입 시 Gravity Loading해석을 적용하였다. 얇은 소재가 초기 금형에 투입 될 때는 중력의 영향을 받아 처짐 현상이 발생하는데 이 부분이 최종 형상과 변형률에 영향을 미치기 때문에 gravity loading의 적용 여부는 해석의 정확도를 향상시키는 방법으로 사용 되었다.

해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해서 3D 측정 장비로 측정한 값과 비교하였다. 본 연구에 사용한 3D측정 장비로는 비 접촉식 측정 장비인 GOM사의 ATOS를 활용 하였다. ATOS에서 얻어진 3D 스캔 데이터는 제품 도면과 비교가 가능하여 정량적인 스프링백 량의 확인이 가능하다. Fig. 1(a)는 제품 설계 도면의 3차원 CAD 데이터와 유한요소 해석 후 스프링백 결과를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 1(b)에서는 3차원 CAD 데이터와 실제 성형 후 스프링백이 발생한 제품의3D 스캔 결과를 비교하여 보여주고 있다. 두 결과를 비교 해보면 제품의 중앙 부분의 처짐이 동일하게 발생하였고, 가장 자리가 들림 현상이 발생한 것을 알 수 있다. 즉, 가장 자리에 스프링백이 발생하여 해석에서는 3.5mm의 오차가 발생하였고, 실제 제품에서는 2.9mm가 발생하여 전체적으로 비슷한 경향으로 발생 한다는 것을 알 수 있다. 다만 실제 제품에는 스프링백 외에도 뒤틀림 현상이 발생하였지만 해석에서는 뒤틀림 현상을 제외 하고 해석을 진행 하였다.

3. 스프링백을 고려한 곡률 결정

금형의 곡률 값을 변경하였을 경우 제품의 스프링백이 얼마나 발생하는지를 유한 요소 해석으로 분석을 하였다. 실제 제품이 가진 곡률 값이 1630R 이였고 제품과 동일한 곡률 값으로 금형을 제작하였을 경우 스프링백으로 인해서 제품보다 큰 곡률 값이 발생하는 것을 확인 하였다.

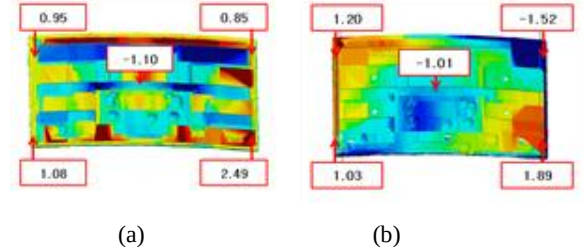


Fig.1 (a) CAD & Analysis Result Comparison
(b) CAD & 3D Scan Comparison

따라서 본 연구에서는 스프링백을 고려해서 원하는 제품의 최종 곡률보다 작은 값을 적용하여 최종 제품을 곡률을 결정하는 over bending 법을 적용하였다. 이를 위해서 유한 요소해석 결과와 최종 제품의 스프링백 량을 비교하고, 이를 반영하여 유한 요소 해석 금형 모델의 곡률을 감소시켰다. 이와 같은 절차를 반복하여 최종 원하는 공차 이내에 도달하였을 경우 해석을 종료하였다. 곡률 값을 순차적으로 1629R, 1579R, 1529R로 50R씩 줄여서 해석을 진행한 결과, 금형의 곡률 값이 1529~1629R로 제작 하였을 경우 허용 공차 범위에 들어 오는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

1630R 의 곡률 값을 가진 Curved TV Bottom Chassis 의 성형 시 발생 되는 스프링백을 유한 요소 해석을 통해 예측하였고, 이를 3D 측정으로 금형 설계단계에서 예측 가능 여부를 실험 하였다. 다양한 곡률의 스프링백 해석 결과, 금형의 곡률 값이 1500~1650R 일 경우 스프링백 량이 허용 공차 내에서 있음을 확인 할 수 있었다. 본 연구를 통한 스프링백 예측으로 Curved TV 개발 시 금형 제작 기간 단축과 제작비 절감 효과가 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] DYNAFORM-PC User's Manual, Version1.0, 2015, Engineering Technology Associates Inc.
- [2] GOM ATOS 2015, ATOS Professional user's manual, GOM mbH.

알루미늄 캔 제조공정에서 Bottoming을 이용한 스프링백 최소화

박상민¹ · 이사람¹ · 김동규² · 정훈² · 홍석무[#]

Springback Minimization using Bottoming in Al Can Deep Drawing

S. Park, S. Lee, D. Kim, H. Jung and S. Hong

Abstract

The technology of multistage deep drawing has been widely applied in metal forming industry because of advantages such as reducing cost and cycle time. Multistage shape of the product being stamped by deep drawing is complicated slenderness large product for example a battery can which is one of cellular phone components. It is very important to reduce springback after drawing for improvement of assembly quality. Some practical methods have been used in industry to reduce springback after drawing such as over bending, corner setting and ironing and so on. A bottoming is proposed as an improvement method in this study. In order to apply at the time of bottoming springback to determine the generation change was carried out to classify the case. Were compared analyzed quantitatively measuring the change in springback amount. As a result, the simulation result was compared with experiment and showed a good agreement. In conclusion, the proposed bottoming-method is expected as an practical method to reduce springback in the industry.

Key Words : Springback, Bottoming, Multi-stage Deep Drawing

1. 서 론

스마트폰 내부의 부품 중 하나인 배터리 케이스는 사각 컵 모양이 주로 사용되고 있다. 사각 컵 형상을 성형하기 위해서는 초기 평판 소재를 여러 단계의 디프드로잉 공정을 거쳐 원하는 형상으로의 판재 성형을 수행한다. 다만 디프드로잉 공정을 거치면서 판재의 탄성 복원에 의한 스프링백 현상을 겪게 되면 성형된 제품 형상이 금형의 형상을 벗어나게 된다[1]. 이러한 스프링백을 감소하기 위한 방법으로는 오버 벤딩, 코너 세트, 아이어닝 공법이 실용적으로 사용되고 있다[2]. 위 방법들을 각각 문제점들을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 스마트폰 배터리 케이스의 사각 컵 형상 다단 디프드로잉 시 나타나는 스프링백 문제를 해결하기 위해 기존에

사용하던 방법의 문제점을 개선한 방안으로 Bottoming에 대해 연구하였고, Bottoming을 적용하였을 때 영향을 분석하기 위하여 Case를 분류하여 해석을 수행했다. Case 별 모델링은 동적 유한 요소 해석 프로그램인 DYNAFORM 5.9.2.1이 사용되었다[5].

2. 본 론

Bottoming을 적용하였을 시 발생하는 변화를 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 Case를 분류하였다. Case 1의 경우 단순한 제품 생산 방식과 같은 스탬핑 공정만을 진행했고, Case 2는 스탬핑 공정을 진행하면서 정교한 모서리 가공을 하기 위해 패드를 받치고 진행한다. Case 3과 Case 4는 스탬핑 공정 후 스프링백 현상을 감소 시키기 위해 블

1. Department of Metalmold Design Engineering, Kongju National University

2. SANGSIN EDP Research Laboratory

Corresponding Author : Department of Metalmold Design Engineering, Kongju National University, E-mail:smhong@kongju.ac.kr

랭크에 추가적으로 압축응력을 가하는 Bottoming 공정을 적용했다. 이후 스프링백 감소량을 비교하여 Bottoming 공정이 스프링백에 미치는 영향을 분석했다.

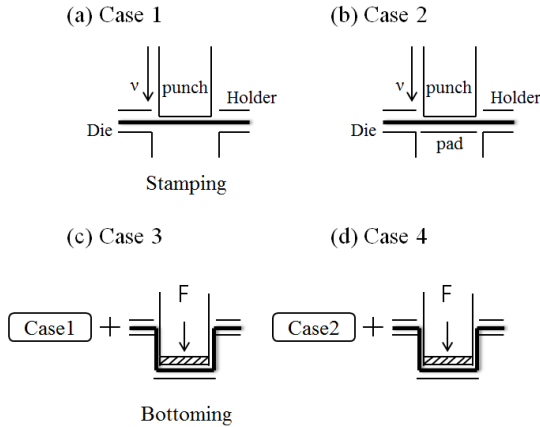


Fig. 1 Case study of stamping analysis

Case 별 성형 해석을 진행 후 스프링백 해석을 진행하여, 나타나는 스프링백 현상을 분석했다. 스프링백 현상을 정량적으로 측정하기 위해 Numisheet' 93 Benchmark에서 제안된 방법으로 다이 하단 굽힘 각을 측정해 비교 분석했다[3]. Fig. 2는 다이 하단 굽힘 각을 Case 별로 측정해 그 그래프로 나타냈다. 그래프에 나타난 바와 같이 패드를 받치고 스탬핑을 진행한 뒤 Bottoming을 적용한 Case 4의 다이 하단 굽힘 각인 스프링백량이 최소로 나타난다.

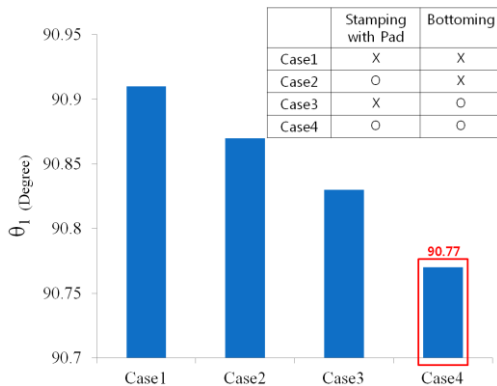


Fig. 2 Comparison of springback according to different analysis conditions

3. 결론

다단 디프드로잉에서 기존의 스프링백 감소 방법이 아닌 새로운 방법 Bottoming을 적용하여 스프링백 결과에 대한 연구를 진행했다. Bottoming 적용 시 스프링백량의 변화를 정량적으로 측정하기 위해 Numisheet' 93 Benchmark에서 제안된 방법으로 다이 하단 굽힘 각을 측정해 비교 분석하였다. 그 결과 기존의 스프링백 제어 문제점을 개선한 실용적인 방법인 Bottoming을 제시할 수 있게 되었고, Bottoming 적용 시 스프링백량이 감소하는 사실을 알 수 있었다. 향후 Bottoming 적용으로 스프링백 제어가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] T. W. Ku, J. W. Park, S. C. Heo, B. S. Kang, 2010, Experimental Study on Non-Axisymmetric Rectangular Cup using Multi-Stage Deep Drawing Process, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 4, pp. 253~262.
- [2] Joon-Ki Chung, Woong-Shick Cho, Taek-Sung Lee, 2004, Combined Process of Ironing and Redrawing in Progressive Drawing, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., Vol.28, No. 5, pp. 654~661.
- [3] C. Gomes, O. Onipede, M. lovell, 2005, Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 159, No. 1, pp. 91~98.
- [4] Se-Ho Kim, Seung-Ho Kim, Hoon Huh, 2002, Optimum Tool Design in a Multi-stage Rectangular Cup Drawing and Ironing Process with the Large Aspect Ratio by the Finite Element Analysis, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., Vol. 26, No. 6, pp. 1077~1084.
- [5] DYNAFORM-PC User's Manual, Version1.0, 2001, Engineering Technology Associates Inc.

카운터 펀치 포스 변화에 따른 440MPa급 강판 성형공정의 스프링백 특성 연구

박승연¹ · 이현철^{1#} · 이만옥² · 최현범² · 박관수³ · 송종호¹

A study on property of spring back of 440MPa grade steel sheet stamping by using various counter punch force

S. Y. Park¹, H. C. Lee^{1#}, M. O. Lee², H. B. Choi², K. S. Park³, J. H. Song¹

Abstract

Recently, light weight vehicle body applied high strength steel is being developed to improve the fuel efficiency and to response the environmental regulation and more complexity and preciseness for vehicle components has been required. The progress of research to improve forming accuracy have been made, the spring-back effect can not be ignored in order to improve the accuracy of forming. In this study, the counter punch force was selected for the factors affecting the spring-back in forming. During the spring back analysis, counter punch force is applied as hydraulic or spring force. The forming process was simulated through the finite element analysis base on FLD(Forming Limit Diagram) data and effects of a forming process and spring-back were analyzed by various counter punch force. Angle of product with respect to target value was analyzed to determine spring-back effect. Through this study, optimal counter-punching force could be selected for reducing spring back for processing of the vehicle body part.

Key Words : Spring Back, Counter Punch Force, Forming, FLD(Forming Limit Diagram)

1. 자동차부품연구원 소재융합연구센터

2. ㈜호원

3. 세화정공㈜

교신저자: 자동차부품연구원, E-mail: hclee@katech.re.kr

마찰교반 홀 클린칭 공법을 이용한 Al6061과 CFRP 접합에 관한 연구

고룡해1 · 이정민2 · 김병민3 · 고대철#

A Study on Friction Stir Hole-Clinching for Joining of Al6061 and CFRP

L. H. Gao, J. M. Lee, B. M. Jim, D.C. Ko

Abstract

With the successful application of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) in aircraft, the CFRP is gradually applied in automotive industry. However, CFRP could not be weld by current resistance sport welding with metal alloy because of different melting points. The friction stir hole-clinching (FSHC) is suggested as a new joining method for CFRP and metal alloy. The main process is stir-heating top material and forming it into a prefabricated hole of the bottom material. This study applies for a FSHC process for joining aluminum alloy 6061 with CFRP. A couple thermo-mechanical model was developed to observe the temperature and joining shape of aluminum alloy 6061 under different rotating speeds and different tool shape, during the FSHC process of the plunge stage. A three-dimensional FE-model was constructed in ABAQUS/Explicit using the arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation. Numerical results indicated that temperature in the FSHC process was increased with the rotational speed was increased, which could be used to reduce plunge force. To ensure reliability, the numerical results were compared with the experiment results. It was shown in this study that FSHC process is available for joining of aluminum alloy 6061 with CFRP.

Key Words: Friction stir hole-clinching(마찰교반 홀 클린칭), Dissimilar materials(이종소재), Numerical simulation(수치 시뮬레이션), Mechanical joining(기계적 접합)

1. 서 론

최근 금속재료의 대체 가능성이 큰 신소재의 개발과 더불어 응용기술이 요구되어 짐에 따라 두 가지 이상의 화학적 성분이 다른 구성 요소가 조합되어 기계적 특성을 충족시키는 복합재료에 관한 관심이 높아지고 있다. 그중 CFRP(Carbon fiber reinforced plastic)는 기존 금속에 비해 가벼우며, 비강성과 비강도가 높으므로 비행기, 자동차 산업 등에 다양하게 적용되고 있다. 차체 구조물의 경량화를 위한 이종소재(Dissimilar-material)의

사용이 증가하고 있기 때문에 CFRP 와 금속합금 접합기술이 요구된다. 두 소재의 용융점 차이가 크기 때문에 저항 점 용접의 사용이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 마찰교반 홀 클린칭(Friction Stir Hole-clinching) 공정이 제시된다. 마찰교반 홀 클린칭 공정은 상부 소재와 마찰교반용접 툴 사이에 강한 회전으로 마찰열을 발생시킨다. 열에 의하여 소재의 소성 유동을 추진하여 하부 소재의 홀을 통과하여 다 이 내부로 삽입되고, 최종적으로 다이 바닥부에 접촉됨으로써 언더컷(Undercut)이 생성된다.

1. 부산대학교 대학원 융합학부
2. 부산대학교 대학원 기계공학부
3. 부산대학교 기계공학부
교신저자: 부산대학교 ERC/ITAF,
E-mail:dcko@pusan.ac.kr

본 연구의 목적은 마찰교반 홀 클린칭 공법을 사용하여 CFRP 소재와 Al6061 합금을 접합하는 것이다. 마찰교반 용접 톨의 회전속도를 다르게 설정하고 형상이 서로 다른 마찰교반용접 톨을 설계하여 ABAQUS해석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과의 유효성을 판단하기 위하여 실험을 수행하고 해석결과와 비교하였다. 이를 통해 마찰교반 홀 클린칭 공법은 CFRP 소재와 Al6061 합금을 접합하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

후기

본 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2012R1A5A1048294)으로 수행된 연구결과입니다.

자동차용 강판의 변형 모드에 따라 변형률속도가 성형성에 미치는 영향

김효동¹ · 장은혁² · 정완진[#]

A Study on the Influence of the Strain-rate on the Formability in Automobile Steel Sheet Forming according to Deformation modes

H. D. Kim¹, E. H. Jang², W. J. Chung[#]

Abstract

In this paper, the influence of strain rate in sheet metal formability is studied experimentally and numerically. A biaxial stretch test, a plane strain stretch test and a circular cup drawing test are carried out at different forming speed. In order to consider the effect of strain rate, the high speed stretching material properties are used and the appropriate material model is utilized. The change of strain rate influences the formability. In case of biaxial stretch mode, the formability is improved at high strain rate and there is no significant effect in case of plane strain mode. In case of circular cup drawing, the formability is improved as the strain rate increases.

Key Words : Strain rate, Formability, Deformation modes, Sheet metal forming

1. 서 론

판재성형에서 변형률속도는 성형성에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다. 따라서 변형률속도가 성형성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. Kim[1] 등은 CQ강과 DP590강의 고속 인장재료시험 및 성형한계시험을 통해 성형한계도의 변화에 대한 연구를 하였다. 그 결과 인장시험만으로는 성형성을 판단할 수 없고 변형률속도가 성형한계도에도 영향을 주는 것을 보였다.

본 연구에서는 판재성형공정에서 발생하는 대표적인 변형모드인 드로잉변형 모드, 평면변형모드, 2축 인장변형모드의 3가지 변형모드에 대하여 변형률속도가 성형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 성형실험 및 해석을 진행하였다.

2. 실험적 연구

1. 대학원 제품설계금형공학과

2. 아바코 R&D본부 장비개발그룹

[#] Corresponding Author : Seoul National University of Science and Technology E-mail: wjchung@seoultech.ac.kr

2.1 연구 방법

SGACUD 0.7t 소재를 사용하여 3가지 변형모드에 대한 성형실험을 수행하였다. 실험에 사용된 금형은 Fig. 1에 나타내었다. 실험은 200톤급 서보프레스를 사용하였다. 평면변형을 시험에서 펀치는 원통 형상의 펀치를 사용하였다. 성형속도는 성형구간에서 평균적으로 24mm/s과 240mm/s로 실험하였다.

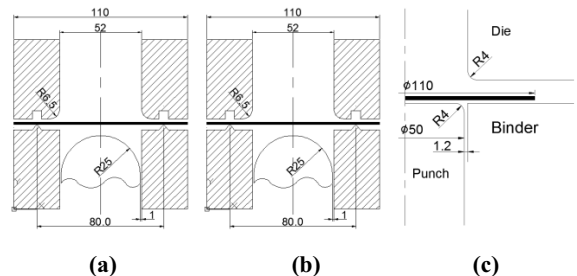


Fig. 1 Die and Punch for the formability test (a) Biaxial stretch test (b) Plane strain stretch test (c) Drawing test

2.2 연구 결과

2축변형실험의 경우 240mm/s에서 파단이 더 빨리 발생한 것을 확인할 수 있다. 평면변형실험의 경우 두 속도에서 모두 비슷한 경향을 보이고 있으며, 드로잉실험의 경우 24mm/s에서 파단이 더 빨리 발생한 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Comparison of biaxial stretching data

		Results (S: Success, F: Failure, N: Necking)									
Speed(mm/s)		24					240				
Stroke (mm)	21.5	S	S	S	S	S	N	F	F	N	N
	22.0	N	N	S	S	S	F	F	F	F	F
	22.5	F	F	N	N	F	F	F	F	F	F

Table 2 Comparison of plane strain stretching data

		Results (S: Success, F: Failure, N: Necking)									
Speed(mm/s)		24					240				
Stroke (mm)	22.0	S	S	N	N	N	N	S	N	N	N
	22.5	F	F	N	F	F	N	F	F	F	F
	23.0	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Table 3 Comparison of circular cup drawing data

		Results (S: Success, F: Failure, N: Necking)									
Speed(mm/s)		24					240				
Limit Drawing Ratio	2.26	F	F	N	N	S	S	S	S	S	S
	2.28	F	F	N	N	F	S	S	S	S	S
	2.3	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

3. 수치적 연구

3.1 연구 방법

동적외연적유한요소법을 사용하는 LSDYNA 3D를 사용하였으며 재료의 동적 특성을 고려하기 위해 재료의 응력-변형률 관계를 고속인장시험 데이터센터[2]의 자료를 활용하였으며 변형률속도에 따라 테이블로 입력하였다. (Fig. 2)

3.2 연구 결과

2축인장변형 해석의 경우 240mm/s에서 파단이 빨리 발생하였으며, 평면변형의 경우 두 속도에서 비슷하여 두 변형모드 모두 실험과 동일한 경향을 보

인다. 드로잉 해석의 경우 240mm/s에서 파단이 빨리 발생하여 실험과는 다른 결과를 보인다. 이는 고정된 마찰계수를 사용하여 성형속도가 증가할 시 마찰계수가 감소하는 효과를 고려하지 않은 것이 주요인으로 추정된다.

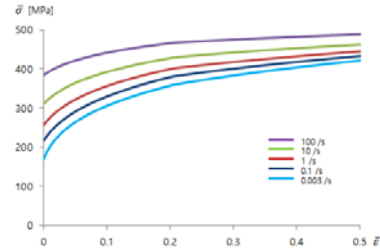


Fig. 2 Strain-stress relations of SGACUD with different strain rates

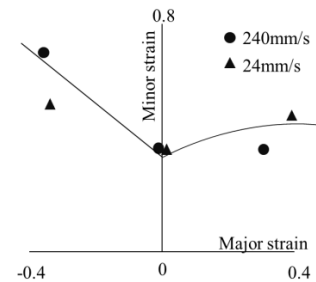


Fig. 3 Forming limit diagram of SGACUD with simulation results

4. 결론

변형모드에 따라 변형률속도의 변화에 따른 성형성의 변화를 연구하였다. 실험에서는 2축인장모드의 경우 변형률속도가 느릴수록 성형성이 향상되었으며 평면변형모드의 경우 속도에 따른 차이가 크지 않았다. 드로잉모드의 경우 변형률속도가 빠를수록 성형성이 향상되었다. 해석은 2축인장모드와 평면변형모드의 경우 실험과 동일한 경향을 보였으나 드로잉 모드의 경우 반대 경향을 나타내었다.

REFERENCES

- [1] S. B. Kim, H. Huh, H. H. Bok, M. B. Moon, 2011, Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming, J. Mater. Process. Technol., pp. 851-862.
- [2] Standard Reference Data (Property of High Speed) KSRD.01.2011.004.036: 국가참조표준센터

1pass 프로파일 링 롤링기술을 이용한 두께 30mm 부품 제조기술 개발

박민철¹ · 이정민¹ · 김형익¹ · 성낙문² · 이찬주[#]

Development of Manufacturing Technology of Part for Thickness of 30mm using 1Pass Profile Ring Rolling

M. C. Park, J. M. Lee, H. I. Kim, N. M. Sung, C. J. Lee

Abstract

Recently, the interest of the profile ring rolling technique for forming a complex cross-section shape without seams is increased. The advantage of the profile ring rolling technique may reduce the production time and the high material recovery rate of machining. In this study, the profile ring rolling technique developed a thin part of the thickness 30mm level. Forming defect prediction was performed using the finite element analysis. And forming experiments were carried out on the basis of the finite element analysis. Finally, experimental results are in good agreement with finite element analysis.

Key Words : 1pass Profile Ring Rolling(1패스 프로파일 링 롤링), FEA(유한요소해석), Mold Shape(금형 형상)

1. 한국생산기술연구원

2. ㈜갈텍

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail: cjlee80@kitech.re.kr

트림리스 블랭크를 이용한 핫스탬핑-피어싱 동시성형공정 개발

이인규^{1,2} · 이상곤^{1,#} · 이성윤¹ · 정명식¹ · 김다혜¹ · 이재욱¹ · 황선희¹ · 안민수² · 김병민³

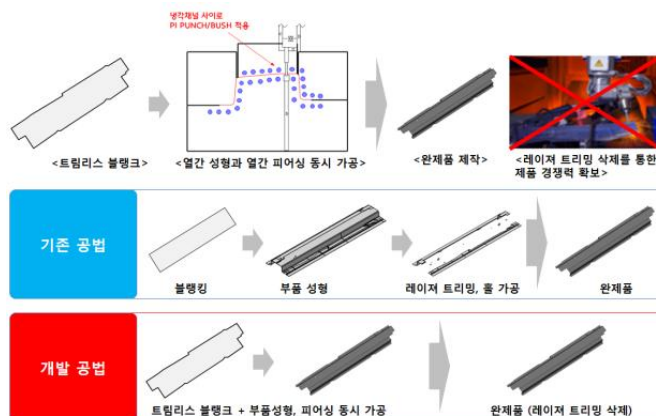
Development of Hot Stamping-piercing Concurrent Forming Process using Trimless Blank

I. K. Lee, S. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Jeong, D. H. Kim, J. W. Lee, S. K. Hwang, M. S. Ahn, B. M. Kim

Abstract

최근 자동차의 경량화 및 안전성을 확보하기 위해 핫스탬핑 공정을 통해 제조되는 고강도부품 적용이 급증하고 있다. 일반적으로 핫스탬핑 공정이 적용되는 고강도부품들은 추가적으로 적용되는 피어싱 및 레이저 트리밍 공정을 거쳐 최종 제조된다. 하지만 레이저 트리밍 공정은 고가의 장비 도입과 유지 보수가 요구되며, 공정 시간이 길어 생산성이 감소되는 문제점을 가지고 있다. 또한, 피어싱 공정은 핫스탬핑 공정을 통해 제조된 고강도부품의 높은 강도로 인해 금형 파손이 잦아 생산성 및 품질 유지에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 레이저 트리밍 공정을 삭제하기 위한 트림리스 블랭크 설계 및 금형 수명 확보를 위한 핫스탬핑-피어싱 동시성형공정을 개발하였다. 핫스탬핑-피어싱 동시성형공정을 위해 피어싱 금형을 스탬핑 금형 내부에 설치하였으며, 냉각 성능 확보를 위한 최적 금형 냉각 채널을 설계하였다. 또한, 요소제거법을 고려한 DEFORM-2D를 이용하여 버 감소를 위한 최적 공정조건을 설계하였다. 트림리스 블랭크 형상은 3차원 레이저 스캐너와 PAM-STAMP 2G를 활용하여 역설계하였다. 최종적으로 트림리스 블랭크 및 핫스탬핑-피어싱 동시성형공정을 적용한 실험을 수행하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

Key Words : Concurrent forming process, Trimless blank, Reverse engineering, Piercing, Hot-stamping



1. 한국생산기술연구원 극한제조기술그룹

2. ㈜신영 기술연구소

3. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 한국생산기술연구원 극한제조기술그룹, E-mail: sklee@kitech.re.kr

롤포밍 공정해석을 위한 DP980 소재 스프링백 예측

임재혁¹·김근호²·이종섭^{1,#}

The Springback Prediction of DP980 material for Roll Forming Process analysis

J. H. Lim¹, K. H. Kim, J. Lee^{1,#}

Abstract

최근, 차량 연비 상승을 위한 경량화를 실현시키기 위하여, 두께가 얇고 강도가 높은 고장력 강판을 많이 사용하고 있다. 차량 시트레일 또한 경량화 추세를 따라 고장력 강판으로 대체되고 있는 부품 중 하나이다. 고장력 강판은 높은 탄성 회복으로 인하여 스프링 고(spring-go) 또는 스프링 백(spring-back) 현상이 크게 발생하기 때문에 일반적인 프레스 가공이 어렵다. 시트레일은 주로 다단 롤 포밍 공정에 의해 점진적으로 성형되기 때문에 프레스 가공에 비하여 높은 치수 정밀도를 갖지만, 롤의 단면 형상에 따른 굽힘 변형량을 제대로 예측하기 위해선, 굽힘부의 R값에 따른 스프링 고 또는 스프링 백 현상을 확인할 필요가 있다. 이를 확인하기 위하여, 본 연구에서는 V-bending 실험을 수행하여 펀치 R값에 따른 굽힘 각도를 해석과 비교하였다.

Key Words : Roll forming, Spring back, DP980

1. 서 론

최근, 환경 규제 강화로 인하여 차량 연비를 증가시키기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중, 기존 차량 부품의 두께를 줄이는 동시에 고장력 강판으로 대체하는 방안은 연비 상승에 큰 역할을 한다.

차량 부품 중 자동차 시트의 위치를 결정하기 위한 시트레일(Seat-rail)은 길이 방향을 따라 슬라이딩 운동을 하는 부품으로써, 하부레일과 상부레일의 조립으로 구성되었으며, 각각의 레일은 Notch, Emboss, Hole 등 체결을 위한 기능성 요소가 적용되어 있다. 시트레일 또한 경량화가 가능한 부품으로써, 최근 고장력강을 사용하여 성형하기 위한 시도가 증가하고 있다.

고장력 강판을 성형하는 공법 중 기존 프레스 성형 공정은 고장력 강판의 높은 탄성회복량에

의해 발생하는 스프링고(spring-go) 또는 스프링 백(spring-back)을 일정하게 제어하기 어렵기 때문에 형상동결성과 우수한 치수정밀도를 만족시키기 어렵다. 반면, 다단 롤 포밍(Multi-stage Roll forming) 공정은 상·하부 롤이 회전하면서 소재를 성형하는 공정으로써, 점진적인 소성변형에 의해 제품의 높은 정밀도를 만족시킬 수 있다. 또한, 시트레일과 같이 압연방향으로 긴 판재 형상을 가공하는데 유리하다. 하지만, 고장력 강판의 높은 탄성회복량과, 굽힘부의 R값에 따른 탄성변형량에 의해 스프링고 또는 스프링고 현상이 발생[1-2]할 수 있기 때문에 시트의 단면 형상에 대한 탄성변형량을 보정하기 위하여 R값에 따른 굽힘량을 확인하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 점진성형 공법의 일환인 롤포밍 공정 시 DP980 소재의 탄성에 의한 탄성회복량을 확인하기 위하여, 상용 유한요소

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소

2. ㈜ 아산

교신저자: 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소

E-mail: Jongsup@kitech.re.kr

해석 프로그램인 DYNAFORM을 사용하였으며, 요소모델과 펀치 R값을 변경하여 V-Bending 해석을 수행하였고, 실험 통해 굽힘각도를 비교하였다.

2. 해석 및 실험 조건

2.1 실험 조건

V-bending 시험은 Fig. 1에 나타난 만능재료시험기 (MTS, Material testing machine)를 이용하였으며, 소재와 금형 치수는 Fig. 2와 같이 길이 200mm, 폭 30mm, 두께 1.6mm인 DP980 소재를 사용하였다. Seat-rail은 길이방향에 수직방향을 따라 굽힘이 발생하기 때문에 폭방향이 압연방향과 평행하게 시편을 가공하였다. 실험 절차는 Fig. 3과 같이 펀치는 25mm/min 속도로 하강하여 소재를 90° 굽힌 후 30초 유지한 후 하중을 제거하였다. 이때, 실험에 사용된 펀치 R값은 3, 5, 7, 10, 20mm로 다양하게 변경하였으며, 각각의 펀치에 대하여 5회 실험 후 최대·최소를 제외한 스프링백의 평균을 산출하였다.

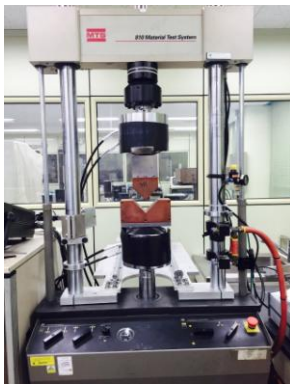


Fig. 1 Setup for V-bending experiments

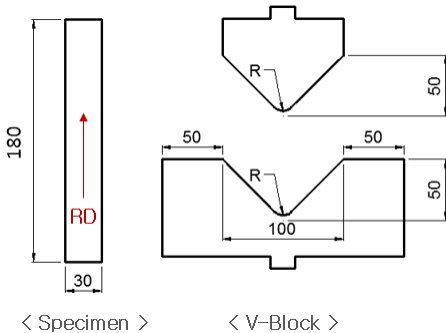


Fig. 2 Modeling of specimen and V-block

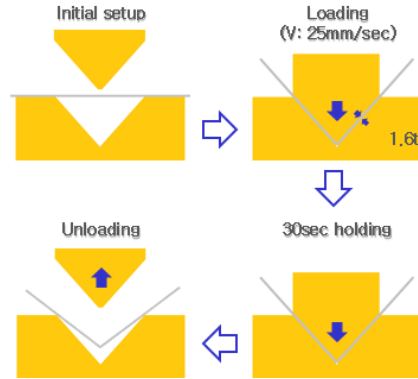


Fig. 3 Schematic of V-bending procedure

2.2 해석 조건

해석에 사용된 금형은 강체로 모델링 하였으며, 소재는 탄소성으로 모델링 하였다. 이 때, 소재 물성은 Hill 3R 모델을 사용하였으며, 굽힘 금형과 소재는 모두 사각형 셀 요소를 사용하였다. 소재를 정의하는 요소 모델은 BELYTCHKO-TSAY 와 FULLY INTEGRATED 를 사용하였으며, 해석의 정확도를 위해 두께 방향 적분점은 9개를 사용하였다. 이 외의 해석 조건은 실험과 동일하게 세팅하였다.

3. 해석 및 실험 결과

Fig. 4에 R값에 따른 실험에 의한 변형 결과를 나타내었으며, Fig. 5 (a), (b) 에 셀 모델과 R 값에 따른 해석에 의한 변형 결과를 나타내었다. 굽힘 각도(α)를 정량적으로 평가하기 위하여 Table. 1에 해석과 실험값을 나타내었다. 실험 결과, R값이 작을 때 스프링고 현상이 발생하였으며, R값이 7 이상일 때 스프링백 현상이 발생하였다. 이러한 결과는 코너부 R값이 작을 때 펀치 접촉면에서 발생한 압축응력이 다이 접촉면에서 발생한 인장응력보다 크지만, R값이 증가할수록 다이 접촉면에서 인장응력이 더 크게 발생하기 때문이다. 해석 결과를 살펴보면, 펀치 R값이 3인 경우, 두 가지 요소 모델 모두 실험보다 큰 굽힘각도를 나타내었다. R값이 5, 7 인 경우는 반대로 작은 굽힘각도를 나타내었다. 하지만, R값이 증가할수록 FULLY INTEGRATED 요소 모델은 실험값과 유사한 경향을 보이지만, BELYTCHKO-TSAY 요소 모델은 더 낮은 굽힘각도를 나타내었다.

해석과 실험값이 차이를 보이는 이유는 굽힘을 받는 부위를 표현하기 위한 사각형 요소가 충분하지 않은 것으로 예상된다. 편치 R값이 작을수록 굽힘응력을 받는 영역이 좁아지기 때문에 요소 수를 충분히 증가시킬 필요가 있다. 한편, R값이 증가함에도 불구하고 요소 모델에 따라 굽힘 각도에 차이가 발생하는 이유는 요소면 내의 적분점 수가 다르기 때문이다. BELYTSCHKO-TSAY 모델은 면내에서 1개의 적분점을 사용하는 반면, FULLY INTEGRATED 모델은 면 내에서 4개의 적분점을 사용한다. 따라서 편치 R값이 증가함에도 불구하고 FULLY INTEGRATED 모델이 굽힘을 더 정확하게 모사하는 것으로 보여진다.

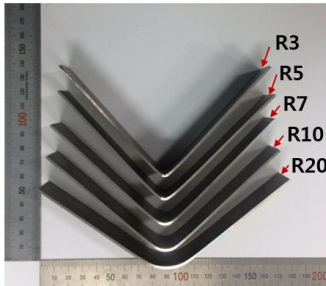
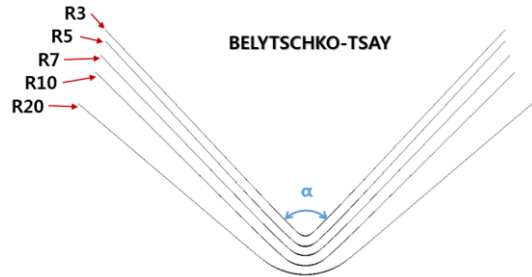
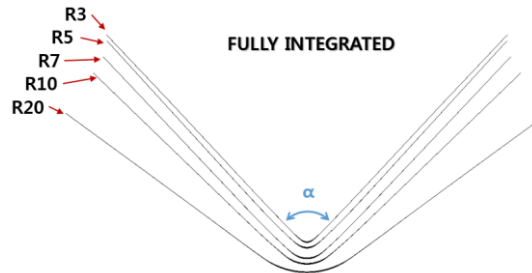


Fig. 4 Experimental results for V-bending



(a) BELYTSCHKO-TSAY shell model



(b) FULLY INTEGRATED shell model

Fig. 5 FE analysis results for V-bending with respect to shell model

Table 1 Comparison of bending angle

	Experiments	FE Analysis	
		BELYTSCHKO-TSAY	FULLY INTEGRATED
R3	84.1	87.7	87.2
R5	87.7	86.8	85.9
R7	91.8	89.1	87.9
R10	95.5	91.5	93.1
R20	107.2	100.3	108.4

4. 결론

본 연구에서는 DP980 강판의 롤 포밍 시 발생할 수 있는 스프링백을 확인하기 위하여, 편치 R값에 따른 V-bending 실험과 해석을 수행하였다. 실험 결과, R값이 작을수록 편치 접촉면에서 압축응력이 크게 발생하여 스프링고 현상이 발생하였으며, R값이 증가할수록 다이 접촉면에서 인장응력이 크게 발생하여 스프링백 현상이 발생한 것으로 판단된다. 성형해석을 통해 요소 모델에 따른 굽힘 각도를 비교한 결과, 편치 R값이 작은 경우 두 가지 요소 모델이 굽힘을 제대로 표현하지 못하였고, 그 이유는 굽힘부를 표현하기 위한 요소 수가 충분하지 않은 것으로 판단된다. 반면, 편치 R값이 증가할수록 FULLY INTEGRATED 요소 모델이 굽힘을 더 정확하게 표현하는 이유는 면 내의 요소수가 더 많기 때문으로 보여진다.

참 고 문 헌

- [1] P. Chen, M. KOC, 2007, Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels, Int. J. Mater. Proc. Tech, Vol. 190, Issue 1-3, pp. 189-198
- [2] J. Lee, K. Lee, D. Kim, H. Choi, B. Kim, Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature, Comput. Mater. Sci, Vol 100, Part A Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651 ~ 156.

금형의 탄성변형을 고려한 포트홀 압출공정의 유한요소해석

정석환¹ · 이장호¹ · 이민철¹ · 전만수^{1, #}

Finite Element Analysis of a Porthole Extrusion Process Considering Die Elastic Deformation

S. H. Chug, J. H. Lee, M. C. Lee, M. S. Joun

Abstract

In this paper, non-steady state finite element simulation of a porthole extrusion process for manufacturing a radiation pipe under isothermal assumption is conducted with emphasis on effect of elastic deformation of dies. Effect of die elastic deformation on forming load and deformed shape of material is investigated, revealing that consideration of die elastic deformation is inevitable for precision or optimized die orifice design in extrusion of aluminum bars with complicated cross-sections. It is shown that extrusion simulation considering die elastic deformation is numerically stable, compared with forging simulation. It is, of course, due to steady-state behavior of forming load in extrusion.

Key Words : Porthole Extrusion (포트홀 압출), Die Elastic Deformation (금형 탄성변형), Finite Element Analysis (유한요소해석)

1. 서 론

알루미늄과 같이 성형성과 용접성이 뛰어난 재료의 중공축 제조 공법으로 포트홀 압출이 광범위하게 이루어지고 있다. 이 공법은 컨테이너 속의 소재가 평면금형(flat-faced die)에 나 있는 포트홀(porthole)를 지나면서 찢어졌다가 챔버(chamber)내에서 용접되어 금형의 출구와 평면금형에 붙어 있는 맨드릴 사이를 통과함으로써 중공축을 대량 생산한다.

이러한 중공축은 기계 및 자동차부품은 물론이고, 건설 구조용 봉재, 방열파이프, 조선 기구재 등의 다용도로 사용되고 있다. 그리고 원자재 가격의 지속적 상승과 에너지 효율 제고 및 환경 보존의 세계적 흐름 속에서 차량의 중량 감소가 시대적 정신이므로 그 응용이 점증하는 추세이다.

중공축 압출 제품은 일반적으로 용접부에 결함이 내포되어 있을 가능성이 많다. 이러한 용접부의 결함을 줄이기 위해서는 챔버 내에서 일정 이상의 압력 유지가 중시되고 있다. 문제는 실험적 방법으로 챔버 내의 상황을 파악하는 것이 불가능하다. 이러한 이유로 다수의 연구자들이 유한요소법을 이용한 중공축 압출 공정의 해석을 시도하였다. Kim 등[1]은 강소성 유한요소법을 2 차원 및 3 차원 정상상태의 가정하에 포트홀 금형을 가진 중공축 압출공정의 해석에 적용하였다 [2, 3, 4].

대부분의 기존의 연구에서는 금형을 강체로 가정하였다. 실제, 압출중 금형의 탄성변형은 무시할 수 없다. 금형의 탄성변형은 제품의 치수에 직접적인 영향을 미치므로 구조재로 사용되는 복잡한 단면 형상의 알루미늄 압출품의 공정 설계에서 가장 어려운 과제로 남아 있다.

1. (주) 엠에프알씨

교신저자: 경상대학교 기계공학부

E-mail:msjoun@gnu.ac.kr

구조용 압출품의 경우, 주요 부위의 두께가 엄격하게 규제되어 있다. 생산자 입장에서는 소재를 줄이는 것이 경제적 생산의 지름길이기 때문에 금형의 탄성 변형으로 불량품이 발생할 가능성이 상존한다. 불량 압출재는 건축물이나 차량 등에서 대형 사건으로 발전할 수가 있다.

이 연구에서는 선행연구[4]에서 연구된 방열 파이프의 포트홀 압출공정을 금형 탄성변형을 고려하여 해석하였다. 이 공정은 실공정이 아니며, 접근 방법의 타당성과 금형의 탄성변형 고려 해석의 중요성을 강조하기 위한 가상의 공정이다.

2. 문제의 정의와 유한요소해석

이 연구에서 해석한 공정의 개념도는 Fig. 1에서 보는 바와 같다[4]. 총 4개의 금형 구성품으로 이루어져 있다. 램, 컨테이너, 챔버, 포트홀 부와 맨드렐이 그것이다. 컨테이너 내의 재료는 램으로부터 가해지는 압력을 받아, 포트홀을 지나면서 찢어졌다가 챔버에서 용접되어, 금형 출구로 빠져 나가면서 금형과 맨드렐 사이의 빈 공간의 형상을 가진 중공 파이프 압출제가 만들어진다. 포트홀의 입구는 반경 13.0 mm로 라운드 처리되어 있다.

이 연구에서 해석한 공정은 4개의 포트홀이 대칭적으로 배열되어 있기 때문에 1/8 즉, 45°에 대해서 해석을 수행하였다. 그리고 압출과정에서 소재의 온도변화는 크지 않다는 가정 하에 등온해석을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 소재의 유동응력, 마찰조건, 램의 속도 등은 다음과 같다[1].

- 유동응력: $\bar{\sigma} = 39.89\dot{\epsilon}^{0.1131}$ MPa
- 하이브리드 마찰법칙: 마찰계수 0.3 및 마찰상수 0.6
- 램의 속도: -100.0 mm/s

Fig. 1의 그림은 실제 해석에 사용된 형상 정보를 나타내고 있으며, 금형설계는 실 공정 적용 목적으로 이루어진 것이 아니다. 따라서 포트홀이 나 있는 평판 금형의 두께가 다소 작다. 따라서 해석 중 과도한 변형을 막기 위하여 이것을 초경합금으로 가정하였다. 다시 한번 이것은 실 공정이 아니라는 점을 강조한다.

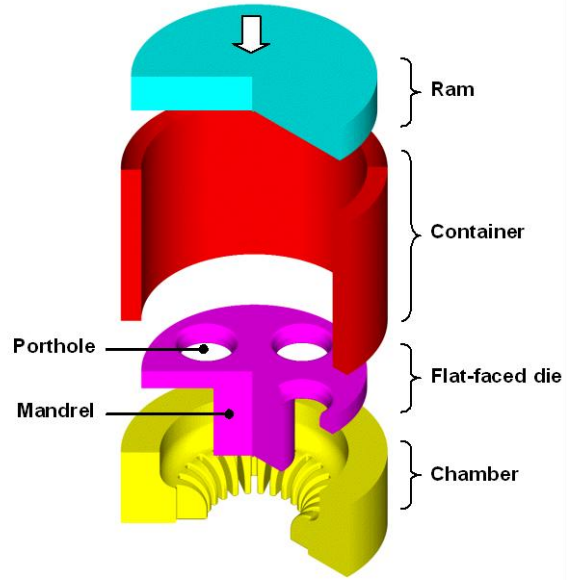
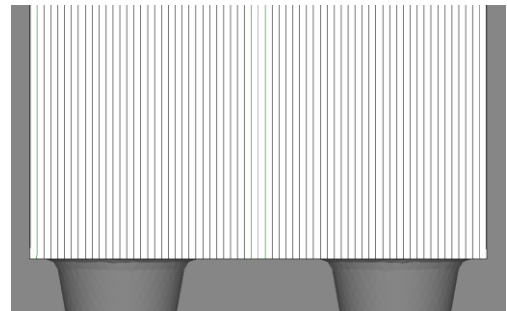


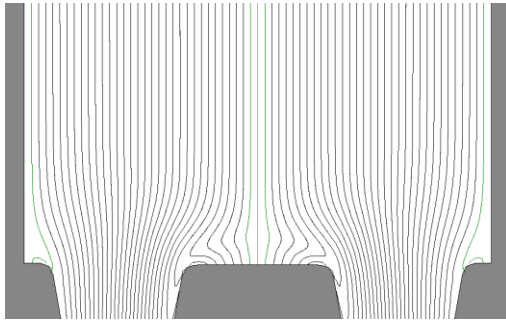
Fig. 1 Tool assembly of the test porthole die extrusion

해석은 AFDEX 3D의 압출모듈을 사용하여 실시되었다. 총 사면체요소의 수는 약 60,000 개가 되도록 하였고, 요소밀도 분포를 위하여 AFDEX 3D의 기본 기능[5]을 사용하였다. 챔버의 하단에서 압출품이 닿지 않는 영역에 위치한 절점의 자유도를 구속시켰다(Fig. 4 참조).

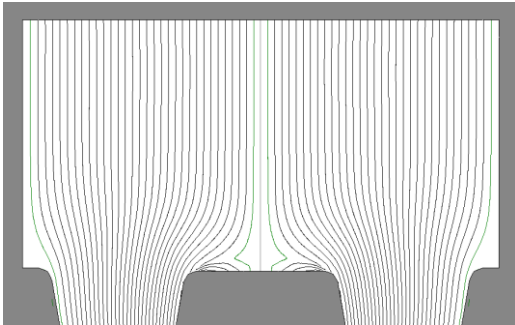
Fig. 2에 시간 경과에 따른 단류선의 변화를 나타내었다. Fig. 2(c)의 단류선에서 볼 수 있는 바와 같이, 중심부와 외곽 모서리 부에서 데드 메탈 영역이 존재한다.



(a) 0.0 s



(b) 0.215 s



(c) 0.43 s

Fig. 2 Variation of metal flow lines with stroke

Fig. 3 은 스트로크에 따른 성형하중의 변화와 평판금형 중심부의 변위를 나타내고 있으며, Fig. 4 는 금형의 변형량을 나타내고 있다. 금형의 구조해석 시에 Fig. 4 의 Region A 에서 표시된 영역의 수직방향 자유도를 구속시켰다.

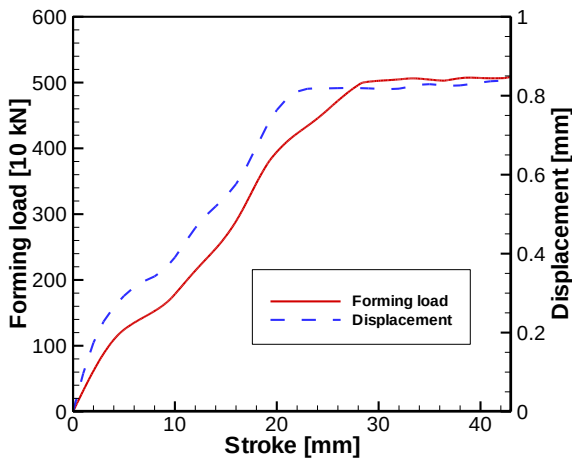


Fig. 3 Variation of forming load and maximum displacement of flat-faced die with stroke

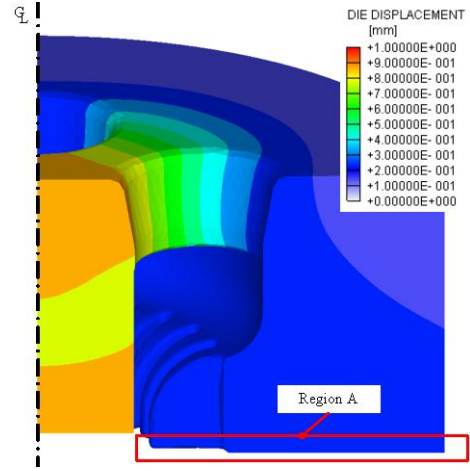


Fig. 4 Displacement of die when steady-state condition is reached

출구가 정상적인 모양을 갖추었을 때, 하중은 최대치에 도달하였고, 그 이후로는 전형적인 정상상태에 도달한 모습을 보이고 있다. 정상상태에 도달할 때까지 포트홀이 뚫려 있는 평판금형의 중심부의 변위는 약 0.85 mm 에 이르렀다. 스트로크에 따른 변위의 변화는 성형하중의 변화와 유사한 패턴을 보이고 있다. 물론 초기에 변형이 상대적으로 큰 이유는 후반부로 갈수록 챔버 압력이 커지면서 소재가 평판금형을 떠받치는 역할을 하기 때문이다.

Fig. 3 은 비교적 복잡한 형상의 공정임에도 불구하고 매우 안정적인 해를 보여주고 있다. 단조와 같이 비정상상태의 변형이 지속되고, 갈수록 성형하중이 급격하게 상승하는 문제에 비하여 수치적 문제의 발생 가능성이 작을 수밖에 없다. 따라서 정상상태 영역이 있는 압출 공정에서 금형의 탄성변형을 고려한 정밀 해석은 매우 활용성이 높다고 사료된다.

한편, 금형을 탄성체로 간주한 경우와 강체로 가정한 경우에 대하여 동일한 조건하에서 해석을 수행하여, 그 결과를 비교하였다. Fig. 5에서는 성형하중을 비교하고 있다. 두 결과는 매우 유사하다. 단조의 경우, 금형의 탄성변형 고려 시에 성형하중의 뚜렷한 감소가 목격되었지만, 정상상태가 존재하는 압출의 경우, 그 양상이 다를 수 있다. 실제 포트홀 압출의 경우 출구에서의 압력이 상대적으로 크지 않으며, 금형

의 탄성변형이 압출비의 유의미한 변화를 야기시키지 못한다. Fig. 5는 이러한 현상이 반영된 결과이다.

Fig. 6은 금형의 변형형상을 비교하고 있다. 강제 금형을 사용하여 획득한 표면력 정보를 이용하여 금형구조해석을 실시한 결과와 금형을 탄성체로 간주하여 시뮬레이션 한 결과에서 금형의 중심부에서 변위는 각각 0.95 mm, 0.85 mm로 나타났다. 강제로 가정한 경우가 약간 크게 나타났으나, 기본적으로 큰 차이를 보이지는 않고 있다.

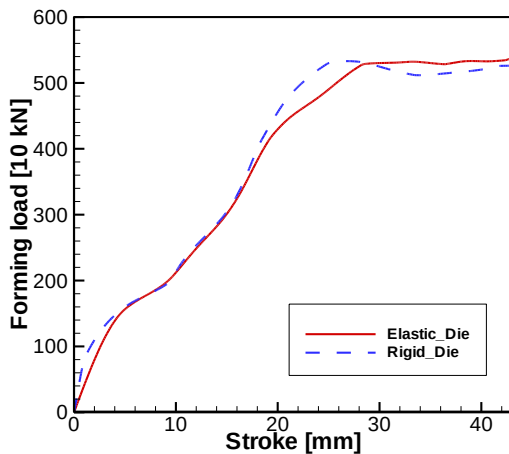
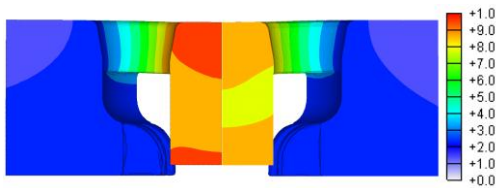


Fig. 5 Comparison of forming loads between elastic die and rigid die



(a) Rigid die (b) Elastic die
Fig. 6 Comparison of deformed shapes between elastic die and rigid die

3. 결 론

이 논문에서는 AFDEX의 압출 모듈의 적용성을 검증하기 위하여, 금형의 탄성변형을 고려하여 알루미늄 중공 봉재의 포트홀 압출공정에 관한 유한요소해석을 실시하였다. 선택된 공정

은 실제의 공정은 아니지만, 비교적 복잡한 단면 형상과 실제의 공정과 유사한 점을 특징으로 한다.

알루미늄 압출공정은 단면감소율이 매우 크다. 따라서 컨테이너 내부의 압력이 높기 때문에 금형 출구의 탄성변형이 설계자의 주 관심사 중의 하나이다. 적용 예제를 통하여 금형의 탄성변형의 영향을 가시화하였다. 단조에 비하여 정상상태가 존재하는 압출 공정의 금형 탄성변형 고려 해석이 수치적으로 안정되어 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 ‘엔지니어링 산업진흥 강화’의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 N0000819).

참 고 문 헌

- [1] K. J. Kim, C. H. Lee and D. Y. Yang, 2002, Investigation into the improvement of welding strength in three-dimensional extrusion of tubes using porthole dies, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 130-131, pp. 426-431.
- [2] H. H. Jo, C. S. Jeong, S. K. Lee and B. M. Kim, 2003, Determination of welding pressure in the non-steady state porthole die extrusion of improved Al7003 hollow section tubes, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 139, pp. 428-433.
- [3] G. Liu, J. Zhou, and J. Duszczuk, 2008, FE analysis of metal flow and weld seam formation in a porthole die during the extrusion of a magnesium alloy into a square tube and the effect of ram speed on weld strength, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 200, pp. 185-198.
- [4] 이민철, 조주현, 박정휘, 전만수, 2008, 알루미늄 방열 파이프의 생산 목적의 포트홀 금형 압출공정의 유한요소해석, 한국소성가공학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, pp. 458~461.
- [5] M. C. Lee, J. K. Lee, M. S. Joun, 2007, “Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation”, Finite Elem. Anal. Des., 788-802.

FDM방식 삼차원프린터의 기초성형 특성파악

장종명¹ · 정민음² · 홍주표[#]

Basic forming characteristics of FDM type 3D printing

Z. M. Zhang, M. E. Jung, J. P. Hong

Abstract

Fused deposition modeling (FDM) is an easy and conventional three-dimensional printing method, and widely used for lower-priced printer. Laminating thickness is sometimes considered as a performance indicator of the 3D printer for accuracy or precision. To explore possibly formable minimum thickness with FDM type 3D printer, we set process parameters such as feeding speed and nozzle head temperature along with the gap between the nozzle and the test bed. We introduced the concept of the build rate as the deposited area over the unit area, and analyzed the performance results.

Key Words : 3D printing, fused deposition modeling (FDM), laminating thickness, forming characteristic, build rate

1. 서 론

본 연구에서는 FDM방식 3D 프린터의 기초 성형 특성을 파악하고자 형상 및 적층 높이 등을 측정하고 분석하였다.

2. 본 문

3차원 프린터를 이용한 가공에서 레이어 높이, 출력속도, 출력온도 등 시작품의 정밀도에 영향을 주는 요소들이 있다. 모델을 이용한 기초 성형 특성 파악을 위해 프린팅 순서상 기초평면 생성 후 첫 번째 작업 층을 1st layer로 정의하였다(Fig. 1).

3DISON+ 프린터를 사용하여 Table 1과 같은 공정조건에 따른 1st layer 까지의 시편을 만들고, Adobe Acrobat Pro를 사용하여 단위 영역의 빈 공간 면적을 계산하여 Fig. 2와 식 (1) 과 같이 형성율(build rate)의 개념을 도입하였다.

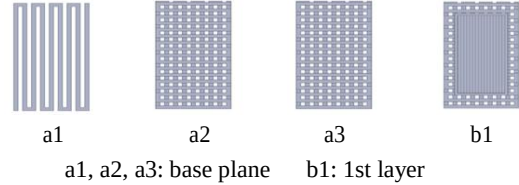


Fig. 1 Printing sequence

Table 1 Process conditions

Layer height	0.05mm, 0.1mm, 0.2mm
Output speed	20mm/s, 40mm/s, 60mm/s
Output temperature	195℃, 205℃, 215℃, 225℃
Size	20mm x 30mm, 30mm x 50mm
Material	PLA

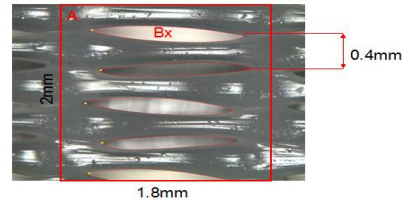


Fig. 2 The shape of the 1st layer

1. 한국기술교육대학교 창의융합협동과정
2. 한국기술교육대학교 기계공학부
#. 한국기술교육대학교 디자인공학과

$$b_r = \frac{A - B_x}{A} \quad (1)$$

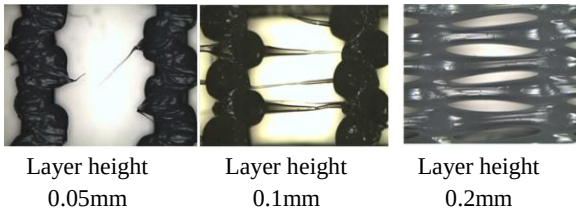


Fig.3 1st layer shape in accordance with the process environment

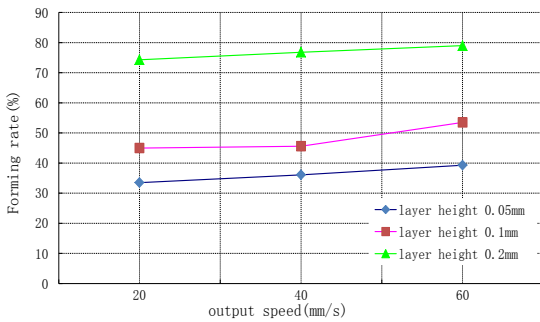


Fig. 4 Build rate vs. feeding speed at nozzle temperature of 215 °C with respect to the gap

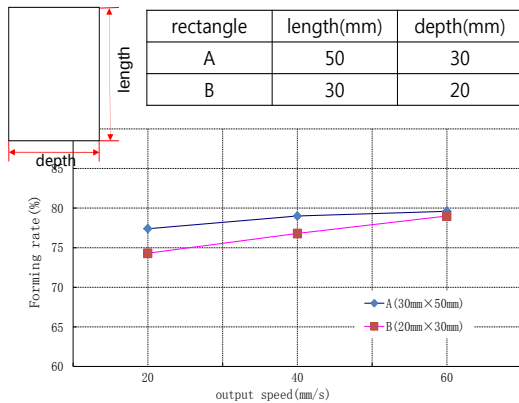


Fig. 5 Build rate with respect to the deposited area

노즐과 테스트베드 사이의 간격에 따른 기초 평면 위 1st layer의 형상을 Fig. 3에 나타냈으며, 면적을 측정하여 형성율을 출력속도에 따라 Fig. 4에 도시하였다. 적층 높이가 0.2mm보다 작은 경우에는 형성율이 50% 이하로 형상이 제대로 구현되지 않았다. 적층 높이와 출력속도가 커질수록 형성율이 높아지는 것을 알 수 있지만 출력속도는 적층 높이에 비해 적은 영향을 보였다.

적층 면적에 따른 형성율의 차이를 Fig. 5에 도시하였다. 크기에 따라 형성율이 차이를 보이지만, 출력속도가 빠를수록 비슷해지는 경향을 나타냈다.

3. 결 론

FDM 방식 3차원 프린터를 대상으로 현미경을 활용하여 FDM방식 3D프린터의 형상, 적층 높이 등을 측정하고 분석하였다. 형상적인 측면에서 두 부품 사이 간격이 0.3mm보다 작거나 3mm 이하 크기의 부품 성형은 어려운 것으로 보이며, 레이어 높이가 작업의 첫 층 형성율에 많은 영향을 주는 것으로 확인 됐다. 적층 두께는 0.2mm 가 적절하며 그 이하에서는 성형이 제대로 되지 않았다. 노즐 이송속도가 빠를수록 형성율이 높아졌으며, 60mm/sec 일 때 면적에 따른 편차도 적어 가장 적절한 속도로 판정하였다.

후 기

이 연구는 중소기업청 기술혁신개발사업의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. C. Yoon, H. M. Shin, H. W. Choi, 2015, Optimum Design and Characterization of F-theta lens by a 3D Printer (II), J. Kor. Soc. Manuf. Proc. Eng., Vol.14, No.4, pp.49~54
- [2] S. O. Choi, S. S. Hwang, 2014, 3D Printing Design for Minimizing Flextion Phenomenon, J. Kor. Ins. of Elec. Comm. Sci., Vol.9, No.12, pp. 1415~ 1420
- [3] H. S. Lee, K. C. Wi, 2015, Restoration of Earthenware & Porcelain Cultural Assets using 3D Printing, J. of Conservation Sci., Vol.31, No.2, pp131~145
- [4] X. Y. Wang, 2012, China High Tech Enterprises, 3D printing tech and the development of industry and prospect analysis
- [5] Niuzhenhua, Fuyaqi, Dongqianqian, 2014, Jiangsu Sci. & Tech. Inf., Research of 3d printing speed

마그네슘 합금을 적용한 컨트롤암의 성형성 및 내구성 평가에 관한 연구

이상익¹ · 임성곤² · 이정환^{#1}

Evaluation of the formability and durability of magnesium alloy for the control arm in an automobile

Lee S. I. Lee, S. G. Lim, J. H. Lee

Abstract

Magnesium (Mg) alloys have been researched to replace steel or aluminum parts in automobile industry because of the fuel economy through a weight reduction. The application of Mg alloys has been limited by its insufficient formability at room temperature, which results from a shortage of active slip systems. In this paper, An extruded TAZ711(Mg-7Sn-1Al-1Zn) alloy was warm forging into control arm in an automobiles to evaluate the formability of the material. Warm forging was carried out at temperatures of 200, 250, 350 and 450°C. Durability evaluation was carried out in the specimen as-forged at 250°C. The results showed good durability

Key Words : TAZ711 as-extruded, Warm forging, Control arm, Formability evaluation, Durability evaluation.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 센트랄 중앙연구소

Corresponding Author : Korea Institute of Materials Science, E-mail:
ljh1239@kims.re.kr

열간 공구강과 Al6061의 고온 미끄럼마모 특성 연구

마태동¹ · 김병민¹ · 고대철[#]

Wear Behavior of Hot Work Tool Steels Sliding against Al6061 at Elevated Temperatures

T. D. Ma, B. M. Kim, D. C. Ko

Abstract

Aluminum alloy sheets are well applied for the lightweight automotive panels with its high strength-weight ratio and corrosion resistance. When stamping these sheets, elevated temperature of sheets provide serious problems due to its strong tendency to transfer to the tool steel surfaces. In this study, wear behavior of various hot work tool steels sliding against Al6061 was investigated by using Hot Flat Surface Drawing Test (HFSDT) at elevated temperatures. In order to evaluate wear behavior of tool steel, variation of friction coefficient was measured as a function of sliding distance at each temperature condition to identify the critical sliding distance, where the transition to more unstable friction coefficient was observed. Contact was also investigated by using optical microscopy and SEM/EDS analysis regarding the mass and volume of transferred aluminum.

Key Words : Aluminum alloy (알루미늄 합금), Stamping(스탬핑), Hot work tool steel(열간 금형강), Galling(소착)

1. 서 론

최근 자동차 연비 및 온실가스 배출기준 강화에 대응하기 위하여 차체 경량화에 대한 요구가 증가되고 있다. 경량화에 대한 연구는 자동차 차체용 소재를 중심으로 이루어지고 있으며, 이러한 소재 중 알루미늄 합금은 기존 연강과 고장력 강판보다 높은 비강도와 내부식성을 가지기 때문에 일본, 유럽 등의 선진국에서는 차체 내 그 적용 비율이 점점 늘어 나고 있는 추세이다.

그러나 알루미늄 합금의 알루미늄 성분은 스탬핑 금형의 철 성분과의 높은 화학적 친화성으로 인하여 성형 공정중에 금형 표면으로의 강판 응착 및 알루미늄 천이(transfer)가 발생한다[1~3]. 금형재에 천이된 알루미늄 입자는 산화 및 가공경화에 의해 경화되며, 일부는 탈락되어 세물체

연삭마멸(three-body abrasive wear)에 의한 금형 및 제품의 표면 손상을 일으키는 원인이 된다[1].

열간 단조(Hot forging), 어닐링(annealing), 퀴칭 및 템퍼링(Quenching and Tempering)과 같은 일련의 열처리 과정을 거쳐 제조된 STD61 금형재는 템퍼드 마르텐사이트(Tempered martensite) 기지와 함께 첨가된 합금 원소에 따른 다양한 형태의 탄화물이 존재한다. 이러한 탄화물들은 금형재의 미세경도 및 내응착성을 증가시킨다고 알려져 있다[4~5].

한편, 고온 상태의 알루미늄 응착 및 천이는 소재의 온도, 금형재의 고온 경도, 토포그래피에 많은 영향을 받는다고 알려져 있다[3]. 그러나, 금형재 미세조직과 형성된 탄화물의 영향에 관한 연구는 수행되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 열간 금형재와 Al6061의 고온 미끄럼 마모 특성을 평가하였다.

1. 부산대학교 설계기반미래성형기술센터(ERC/ITAF)
교신저자: 부산대학교 부품소재산업협력연구소,
dcko@pusan.ac.kr

후 기

이 논문은 산업원천기술개발사업(10040054) 및 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A4A01012787).

참 고 문 헌

- [1] M. Pellizzari, High temperature wear and friction behaviour of nitrided, PVD-duplex and CVD coated tool steel against 6082 Al alloy, *Wear*, Vol. 271, pp. 2089-2099, 2011
- [2] J. Jerina et al, Initiation and evolution of the aluminium-alloy transfer on hot-work tool steel at temperatures from 20°C to 500°C, *Wear*, Vol. 319, pp. 234-244, 2014
- [3] J. Pujante et al, Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures, *Wear*, Vol. 308, pp. 193-198, 2013
- [4] Yogesh Kumar Singla et al, On the modeling of dry sliding adhesive wear parameters of vanadium additive iron-based alloys at elevated temperatures, *Surface & coating Technology*, Vol. 283, pp. 223-233, 2015
- [5] J.C Shin et al, Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys, *Surface & Coating Technology*, Vol. 166, pp. 117-126, 2003

집합조직 변화와 양극산화 Nano pore 특성

박병현, 김인수* ;

OCI, 금오공과대학교 신소재공학부. * 교신저자

Abstract

알루미늄 합금의 집합조직은 여러 가지 특성에 영향을 미친다.

특히 알루미늄 합금의 집합조직 변화가 AAO-Template 에서 나노 pore의 변화에 미치는 영향을 알아보았다.

알루미늄의 집합조직은 단결정을 이용하였으며 이에 따른 AAO-Nano Template를 제조하여 Nano pore의 변화를 비교하였다.

알루미늄의 극점도를 XRD로 측정하여 확인 하였다.

또 양극 산화하기 전 다이아몬드분말로 미세연마 하였다.

알루미늄의 양극산화는 2단계공정까지 진행하여 반복 실험 하였다.

양극산화 결과는 FE-SEM으로 표면의 Nano pore의 형태를 관찰하여 실험 조건에 따른 Nano pore의 변화를 비교하였다.

Key Words : AAO, Anodic Aluminum Oxide, Texture, Nano pore, Template

초고강도 부품 제작을 위한 22MnB5 스틸의 Joule Heating 특성에 관한 연구

정경근¹ · 명재곤¹ · 채관석² · 홍민선² · 정재형² · 김동욱[#]

The Study of Joule Heating of 22MnB5 Steel for Hot Press Forming Process

K. G. Jung, J. G. Myung, K. S. Chae, M. S. Hong, J. H. Jung, D. O. Kim

Abstract

In recent, there are many active researches and manufacturing activities for automotive companies to apply ultra-high strength steel on automotive body structure due to its light-weight characteristic and improvement of passenger's safety. Although the advantages of the ultra-high strength steel component are apparent, the size and investment of heating system for steel sheet has not been affordable to many automotive companies. In addition, conventional gas fueled heating system is not efficient in terms of energy use. Thus, in this research, joule heating system has been used to heat 22MnB5 steel sheet to study the feasibility for hot press forming process. The joule heating simulation and experiment have been carried out to study the heat generation on the steel sheet, and the mechanical properties after quenching have been tested. It has found that the joule heating is feasible process to attain ultra-high strength steel component by appropriate quenching. The temperature of 950℃ has been reached within 5sec, and the tensile strength of 1.5GPa has been attained with martensitic structure.

Key Words : Joule Heating (전기저항열), Ultra High Strength (초고강도), Steel Sheet(스틸판재), Finite element Analysis (유한요소해석)

1. 자동차부품연구원 금속성형시스템연구팀

2. 경기산업㈜ 기술연구소

교신저자 : 자동차부품연구원, E-mail : dokim@katech.re.kr

전자기 접합용 평판 일회전 코일의 형상이 충격 속도에 미치는 영향

박헌일¹ · 김대용^{1#} · 이광석¹ · 이진우¹ · 이영선¹.

Effect of the configuration of a flat one-turn coil on the impact velocity in electromagnetic welding

Hyeonil Park, Daeyong Kim, Kwang Seok Lee, Jinwoo Lee, Youngseon Lee

Abstract

Electromagnetic welding (EMW) is a type of high velocity welding by the Lorentz force generated by interaction between the magnetic field of the coil and the induced current in the workpiece. Although many experimental studies have been investigated about the expansion and compression joint of tube using the EMW process, it is unusual studies on the EMW process of butt joint and lap joint between flat sheets. Since it is easy to control the magnetic field enveloped inside the tube, the electromagnetic technique has been widely used for tube welding. On the other hand, it is difficult to control the magnetic field in the flat sheet welding so that it is not easy to obtain the required welding velocity. The present work analyzed the effect of coil configuration on the welding velocity to make proper flat one-turn coil for the EMW of the flat sheets. The finite element (FE) multi physics simulation involving magnetic and structure field of EMW were conducted with the commercial software LS-DYNA to analyze the influence of various thicknesses, standoff distances of the flat one-turn coil on the welding velocity. The specific configuration of the flat one-turn coil was designed from the FE simulation results to obtain maximum welding velocity. The experiments were performed with the aluminum alloy 1050 sheets of 1.0mm thickness using the proposed flat one-turn coil. It was observed for the welded samples that the bonding strength of the joint was quite high and it failed at the parent sheet under shear deformation. Therefore, the proposed flat one-turn coil produced the better joint bonding strength for aluminum alloy 1050 sheets.

Key Words : Electromagnetic welding (전자기 접합), Flat one-turn coil (평판 일회전 코일), Aluminum alloy sheets (알루미늄 합금 판재), Multi physics simulation (다물리 해석)

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소, E-mail: daeyong@kims.re.kr

스트레스 적분법이 Yoshida-Uemori 모델의 해석결과에 미치는 영향에 대한 분석

이은호¹ · 윤정환^{1, 2#}

Study on the effect of stress integration methods with Yoshida-Uemori model

E. H. Lee, J. W. Yoon

Abstract

In simulation of sheet metal forming process, material modeling which can describe material behavior under cycling load has been important issue in order to predict springback. Since the isotropic hardening model cannot predict the asymmetric behavior of material (Bauschinger effect, work-hardening stagnation, and permanent softening), it overestimates flow stress under cycling loading. As a result, it usually provides an upper bound solution for springback. Yoshida-Uemori model has been widely used in predicting the cyclic response of materials, since the model is able to describe an asymmetric behavior. In addition to material model, stress integration scheme is another important factor which affects predicting its material behavior in computational mechanics. Euler -backward method imposes the normality of plastic flow at the end of each time increment, but Euler-forward dose it at the beginning of each time increment. In this work, Yoshida-Uemori model has been implemented into Abaqus UAMT with both Euler-backward and forward methods to study the effect of the stress integration scheme on Yoshida-Uemori model. The study shows that the stagnation response of cyclic loading curve differs from the values of parameters in Yoshida-Uemori model according to the selected stress integration scheme.

Key Words : Yoshida-Uemori model, Euler-forward method, Euler-backward method

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. Deakin University 기계공학과

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail:j.yoon@kaist.ac

한국소성가공학회
2016 년도 춘계학술대회

◎ 조 직 위 원 장 : 남 원 중 부회장 (국민대학교)