

Al6082의 가공한계를 고려한 냉간단조 공정설계

안규희*, 강종훈**, 허수진***, 신태수****, 조해용*****,#

*충북대학교 대학원 기계공학과 **중원대학교 항공기계공학과 *** (주)태정기공 기술연구소
****(주)태정기공 *****충북대학교 기계공학부

Multistage Cold Forging Process Design of Al6082 Considering Forming Limit

Ku-Hee Ann*, Jong-Hun Kang**, Su-Jin Heo***, Tae-soo Shin****, Hae-Yong Cho*****,#

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungbuk University.

**Department of Aeromechanical Engineering, Jungwon university.

***Taejung Technical MFG CO.,LTD., Institute of Technology.

****Taejung Technical MFG CO.,LTD.

*****Department of Mechanical Engineering, Chungbuk University.

(Received 22 July 2020; received in revised form 21 August 2020; accepted 22 August 2020)

ABSTRACT

Recently, as the weight reduction of vehicles has been actively progressed, parts developed using aluminum 60XX series from existing steel materials are increasing. In this paper, the bushing used for the front frame rail, which is one of the parts for fixing engines and other parts in automobiles, was changed to an aluminum material of the Al60XX series, and it was intended to be produced by applying of cold forging method. The bushing is a part that secures the engine frame, and in order to produce it by cold forging, the molding limit is predicted through process design, and a multi-stage process is designed through finite element analysis. In addition, in order to verify the feasibility of the designed forging process, the limits of the multi-step process were verified based on the Cockcroft Latham theory, and the crack and overlap of the actual forging work were predicted and improved.

Key Words : Cold Forging(냉간단조), Die Design(금형설계), Non-Axisymmetric(비축대칭), Finite Element Analysis(유한요소해석), Shrinkage Ring(보강링)

1. 서 론

자동차에서 경량화의 추세에 따라 차체와 하체

부품에서의 알루미늄합금 사용범위가 확대되고 있다. 특히 차체의 핵심구조인 프론트 프레임 레일(Front Frame Rail)은 엔진 및 기타 부품을 자동차 차체에 고정하고 차체의 강성을 증가시키는 부품이다. 프론트 프레임레일에 사용되는 부싱(Bushing)은 엔진을 프레임에 고정하기 위하여 브

Corresponding Author : hycho@cbnu.ac.kr

Tel: +82-43-261-2464, Fax: +82-43-263-2441

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

랜드 및 차중에 따라 다양한 형상을 가진다. 그 중에서도 기능과 성능요구에 따라 특수한 형상을 가진 부품들도 있다. 그 중에서도 본 연구에서 개발한 프론트 프레임 레일용 부싱은 중심축을 기준으로 원통형의 구조를 가지고 있으며 체결을 위한 나사가 중심부에 가공이 되어 있다. 프론트 프레임 레일용 부싱의 소재는 주로 AISI1010 연강이 사용되며 프론트 프레임 레일에 용접되어 부품을 고정하는 역할을 한다. 배기가스 규제 및 연비규제로 인해 차량 경량화가 활발히 진행되고 있다. 프론트 프레임 레일을 기존의 철강소재에서 Al 60XX 계열로 개발하여 차량 경량화 및 전기차, 하이브리드 자동차와의 플랫폼을 공유하는 경향이 있다. 프론트 프레임 레일이 알루미늄 소재로 변경됨에 따라 철강 소재로 제작되던 부싱도 알루미늄으로의 개발이 불가피하게 되었다.

알루미늄 합금은 혼합되는 합금성분에 따라 10XX에서 70XX까지 다양한 성질과 기계적 성질을 나타낸다. 다양한 합금 중 60xx의 알루미늄이 단조용 소재로 널리 사용되고 있는데 이는 60XX 계열 소재 중에서 높은 강도를 가지고 있으며 석출경화를 통해 강도를 향상 시킬 수 있다. 또한 응력부식에 강하고 압출성이 우수하며 성형성, 가공성이 검증된 소재로 자동차 부품에 널리 사용되고 있다.^[1]

알루미늄 소재를 냉간단조 공법에 적용할 경우는 철강 소재에서 단조성을 증대시키기 위한 구상화 열처리(spheroidizing annealing)나 인산염피막(phosphating treatment) 처리를 할 수 없어 성형도가 클 경우 연성파괴에 의한 단조 크랙의 위험성과 금형과 접하는 구간에서 높은 마찰상수로 인한 표면결함이 발생될 가능성이 매우 크다.^[2-4] 또한 알루미늄 합금은 철강소재에 비해 성형성이 떨어지기 때문에 알루미늄 냉간단조품을 다단 공정으로 설계하고 유한요소법으로 설계된 공정의 타당성을 검증하기 위해서는 정밀한 유동응력과 연성파괴에 의한 가공한계에 대한 연구가 선행되어야 한다. 소재의 유동응력을 구하기 위해서는 인장시험과 압축시험이 주로 이용되지만 단순 압축시험에서 얻어지는 유동응력은 유효변형률을 평균화하여 예측하중이 실제 값보다 낮게 나타날 가능성이

많다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 역문제법으로 유동응력을 계산하는 연구가 진행되었다.^[5-7]

본 연구에서는 일반화된 Cockcroft Latham 이론에 근거한 Model을 이용하여 다단 공정의 한계를 검증하였다. 금형과 소재간의 마찰은 성형공정에 많은 영향을 미치는데 알루미늄 소재는 화학적 피막 처리를 할 수 없기 때문에 액상윤활제의 링압축시험을 통해 가장 낮은 마찰저항을 나타낸 윤활제를 선택하였다. Deform 2D를 이용한 다단공정설계 및 해석을 진행하였으며 해석결과 단조 작업 중 겹침 현상이 일어남을 알 수 있었다. 이를 보다 자세하게 확인하고자 단조작업을 진행하였다. 실제 단조품에서 미세크랙과 겹침이 발생되었으며, 이는 유한요소해석에서 예측된 바와 같았다. Al 6082 알루미늄 인장시험을 통한 유동응력과 연성파괴식에 의한 가공한계 이론이 실제 단조공정에 잘 적용될 수 있음을 검증하고자 하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 인장시험

Al6082 소재를 이용한 냉간단조 공정의 성형해석을 위해서는 정확한 유동응력이 요구된다. 인장시험편은 Al6082 인발소재에서 채취하였으며 ASTM E8 규격에 따라 제작하여 표점거리 25mm, 직경 $\phi 6\text{mm}$ 와 체결부는 M12로 가공되었다. 인장시험은 10mm/mm/sec의 변형율속도로 시험을 진행하였으며 측정된 시험결과를 도시하면 Fig. 1과 같다.

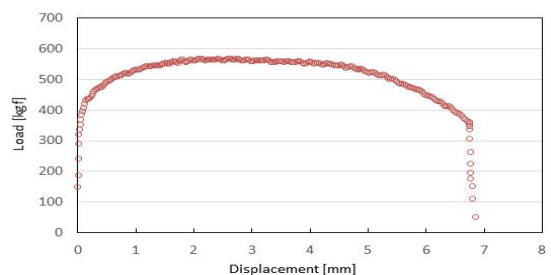


Fig. 1 Force and displacement by tensile test

2.2 유동응력의 계산

인장시험의 변위와 하중을 이용하여 표점거리 이내의 재료가 균일하게 변형된다는 가정하에 진 변형율과 진응력을 계산할 수 있다.^[8-10] 하지만 Necking으로 인해 균일한 변형이 발생되지 않음으로 진응력-진변형율의 계산은 JOUN 등이 제안한 Necking 점을 기준으로 강도계수(Strength coefficient), 가공경화지수 (Strain hardening coefficient) 를 계산하는 수식을 적용하여 계산할 Necking은 최대 하중이 발생하는 지점에서 발생하며, 인장시험 결과로부터 표점의 변위가 1.845 mm, 571.4 kgf임을 알 수 있다. Necking 시점의 공칭변형율과 공칭응력을 구하여 강도계수와 가공경화지수를 계산하면 인장시험에 의한 진응력-진 변형율 관계식을 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = 253.74\bar{\epsilon}^{-0.071} \quad (1)$$

인장시험으로 구한 유동응력인 식(1)을 이용하여 인장시험의 성형해석을 진행하였다. 대변형이 발생함으로 강소성 유한요소해석을 실시하였으며 Deform 2D를 이용하였다.

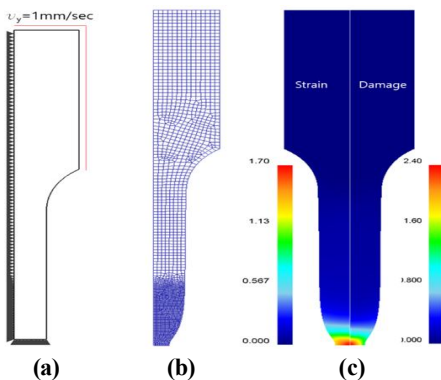


Fig. 2 Finite element analysis result of tensile test (a) Mesh and boundary conditions (b) Deformed shape (c) Effective strain and damage distribution of tensile test flow stress at 7mm displacement

인장시험은 통상 시험의 중심부에서 Necking이 발생함으로 유한요소 해석모델은 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 인장시험의 표점거리 영역을 1/4 model로 모델링하고 축대칭 경계조건을 부과하여 해석을 수행하였다. 인장시험해석을 위한 Mesh system은 Necking이 발생하는 중심위치를 조밀한 격자로 나눴다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 축대칭 문제임으로 중심 위치는 x 방향의 속도를 구속하였으며, Necking이 발생하는 위치는 y 방향으로 대칭조건임으로 y 방향의 속도를 구속하였다. 인장시험을 위측 Node에 1 mm/sec의 속도로 총 7 mm의 변위를 부여하였다. 인장시험에서 구한 유동응력(인장유동응력)을 입력한 경우 인장시험 해석결과를 Fig. 2에 도시하였으며, Necking 현상이 뚜렷하게 나타났으며 최대 변형율은 1.88에 도달하였다.

유동응력은 성형하중을 정확하게 예측해야 함으로 인장해석결과와 시험하중을 비교하면 Fig. 3와 같다. Fig. 3에서 실험하중보다 인장하중이 낮은 것을 알 수 있고 이는 인장 유동응력 계산이 Necking 이전의 짧은 영역에서 계산된 것임으로 선행연구와 같이 보정하여 반복 해석을 통해 계산한 결과를 Fig. 3에 동시에 나타내었다. 보정된 유동응력을 Holloman 수식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 275.2\bar{\epsilon}^{0.099} [\text{MPa}] \quad (2)$$

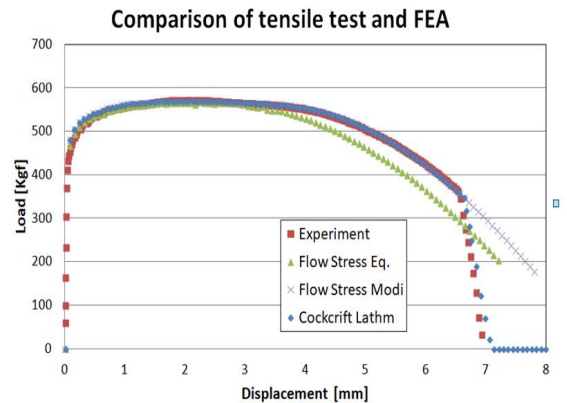


Fig. 3 Comparison of load and displacement

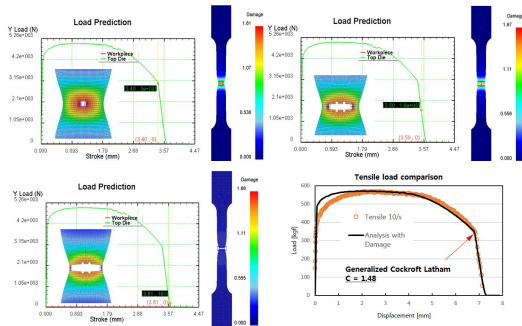


Fig. 4 Calculation of fracture damage value

2.3 Cockcroft Latham 모델의 성형한계

냉간단조 공정에 적합한 연성과괴 이론인 Generalized Cockcroft Latham 이론을 이용한 손상값을 이용할 경우 Fig.3 와 같이 6.7 mm 지점에서 Necking 부에 크랙이 진전되어 하중이 급격이 저하되는 현상을 정확하게 예측할 수 있다. Generalized Cockcroft Latham 이론의 손상값 계산은 식(3)에 따르며, Fig. 3 와 같이 하중그래프를 일치시키기 위한 Damage 값은 Fig. 4 와 같은 1.48 이다.

$$\frac{1}{\sigma_y} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

3. 다단 단조공정 설계

3.1 마찰상수 시험

알루미늄 6082 소재의 냉간 단조공정에서의 마찰상수를 확인하기 위하여 링압축시험을 실시하였다. 링압축 시험편은 외경:내경:높이(6:3:2) 비율로 시험편을 가공하였으며, 시험편은 외경 18 mm, 내경 9 mm, 높이 6 mm 로 제작하였다. 압축시험은 윤활유 4종류에 대하여 10%, 20%, 30%, 50%의 압하율을 시험 속도 1 mm/min로 진행하였다.

압축 시험 후 치수를 측정하여 Fig. 5의 마찰상수 차트에 도시하여 시험조건별 마찰계수를 비교하였다. 윤활유를 사용하지 않은 경우(None)의 마찰계수는 0.6 정도로 나타났다. 윤활유 4 종류의

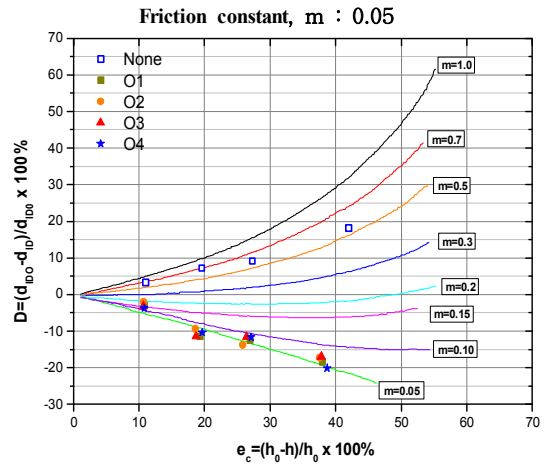


Fig. 5 Friction constant test result

마찰계수는 0.05 정도로 4 조건 모두 비슷한 마찰상수를 나타내었다.

3.2 다단 단조공정 설계와 성형해석

본 연구의 대상이 되는 단조품의 냉간 다단공정을 Fig. 6 과 같이 설계하였다. 원소재는 내경과 플랜지 부위의 성형량을 분산하기 위하여 직경 32.7 mm 로 선정하였고 내경부와 외경부는 6 개의 공정의 분산하여 점진적으로 성형되도록 설계하였다.

초기 설계된 공정의 성형 안전성을 평가하기 위하여 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 2D 를 이용하여 해석을 수행하였다. 유동응력은 2 절에서 계산한 유동응력을 이용하였으며, 성형속도는 냉간 성형시 변형을 속도의 영향이

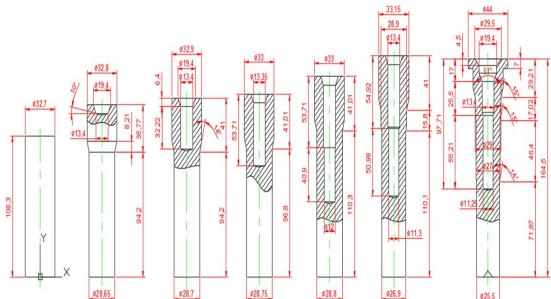


Fig. 6 Cold forging multi-step process design

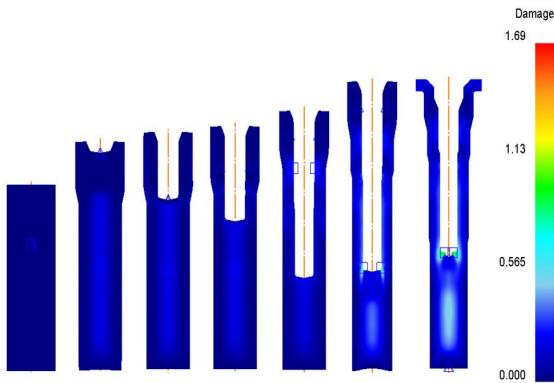


Fig. 7 analysis results of cold forging process

적다는 가정 하에 1 mm/sec로 입력하였다. 마찰상수는 윤활에 대하여 마찰실험에서 구한 일정전단 마찰상수 0.05를 입력하였다.

DEFORM을 이용한 해석결과 중 유효변형률과 손상 값을 Fig. 7에 나타내었다. 다단성형공정의 전체하중은 334.5 kN이며 이중 최종 공정인 6단계에서 262 kN이 나타났다. 변형률은 플랜지의 내경에서 5.53으로 가장 높게 나타났으며 손상값은 5차 공정의 후방압출 부위에서 1.25 그리고 6차 공정에서 1.69가 예측되었다.

3.3 다단 단조공정 설계와 성형해석

설계된 다단공정으로 크랙 발생 유무를 확인하기 위하여 초기 설계된 공정으로 성형성 평가를 진행하였다.

연성과괴에 의한 손상값(Damage)는 Fig. 7과 같이 최대 1.69로 인장시험에서구한 1.48보다 높은 결과를 보이고 있다. 이는 크랙의 위험성이 존재하는 의미이며 세부적인 분석을 진행하였다. 5차 공정에서 나타난 최대 손상값이 1.25로 소재의 임계값인 1.48보다 낮은 값을 나타내고 있으나 실제 단조공정에서는 크랙이 관찰되었다. 이는 소재의 불균일성의 기인한 차이로 판단되며 크랙 위치는 동일하였다. 또한 6차 제품의 하단에서 Fig. 8과 같은 겹침 현상이 관찰되었으나 해석에서는 실제 형상보다 적은 겹침이 예상되었다. 이는 DEFORM S/W가 Air Trap의 공기의 체적을 계산할 수 없기 때문에 나타난 차이로 판단된다.

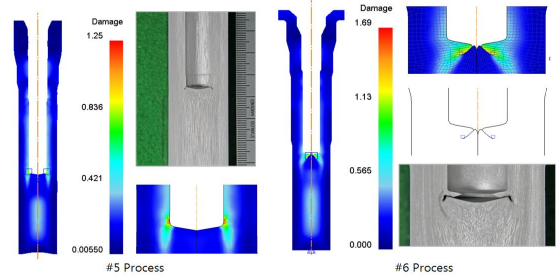


Fig. 8 Damage analysis of #5, 6th process

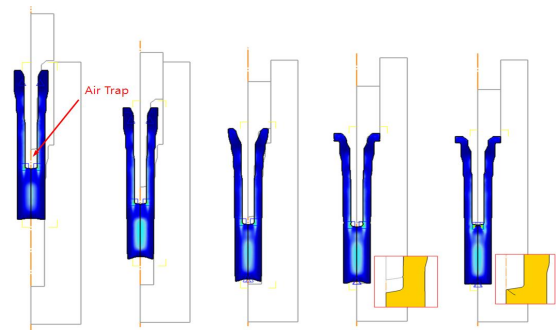


Fig. 9 Analysis of causes of overlap due to dimensional differences between #5 shape and #6 mold

1차 설계 다단공정에서 겹침이 발생된 원인을 분석하면 Fig. 9과 같이 5차 공정에서 내경의 깊이 성형을 완성한 후 6차에서는 제품 하단부 외경을 전방압출로 완성하고 마지막 단계에서 플랜지를 성형하도록 설계되었다. 따라서 5차 공정의 내경과 6차 공정의 펀치와 금형 사이에 길이 차이로 인해 소재가 없는 공간이 만들어지고 성형이 진행됨에 따라 소재안에 갇힌 공기가 빠져나가지 못하는 Air Trap 현상으로 인해 겹침이 발생된 것으로 판단된다.

3.4 단조공정 개선

기존의 단조공정은 전방압출된 소재를 2,3중으로 다시 압출하는 공법으로 표면부에 변형률이 높아져 결함발생 가능성이 높다고 판단되어 외경부 형상을 초기에 성형한후 내경과 플랜지를 성형하는 공정을 설계 하였다. 개선 단조공정을 Fig. 10에 나타내었다.

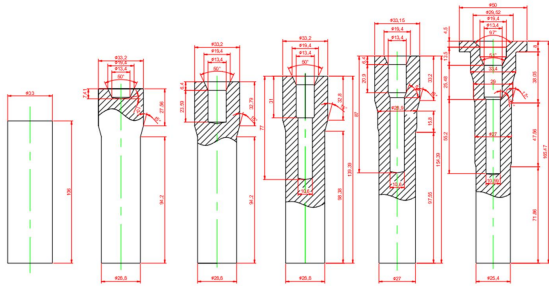


Fig. 10 Improving forging process

개선공정은 초기 설계에서 발생한 크랙과 Air Trap의 문제점을 개선하기 위해서 후방압출 깊이를 줄이고 플랜지 성형공정에서 금형과 소재 사이에 공간을 삭제하였다. 초기공정과 개선공정간의 후방압출 깊이는 4차 공정기준 88.2 mm에서 77 mm 감소시켰으며, 6차공정에서 금형과 소재간의 공간을 제어하기 위해 5차공정에서 후방압출 깊이를 95.6 mm에서 87 mm로 변경하였다. 단조공정 또한 하중분산에 영향이 없어 6단에서 5단으로 단순화하였다. 개선된 단조공정을 Fig. 10에 나타냈다.

개선 단조공정의 성형성 및 결함 발생유무를 확인하기 위하여 성형해석을 수행하였으며, 성형하중은 334.5 ton에서 272.1 ton으로 개선되고 변형을 및 손상값이 모두 저감되는 것을 볼수 있으며 Air trap으로 인한 결함도 개선된 것이 확인되었다. 개선된 공정의 유효변형율과 손상값 분포를 Fig. 11에 나타냈다.

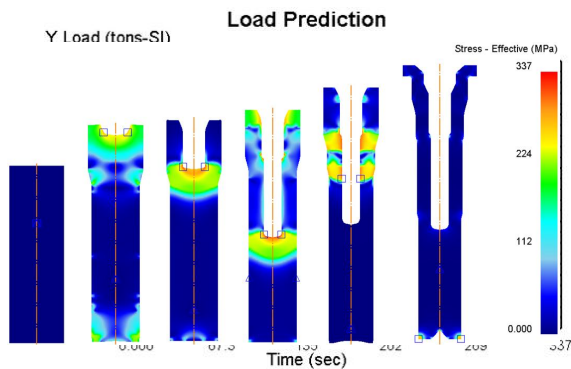


Fig. 11 Effective strain and damage value distribution of improvement process

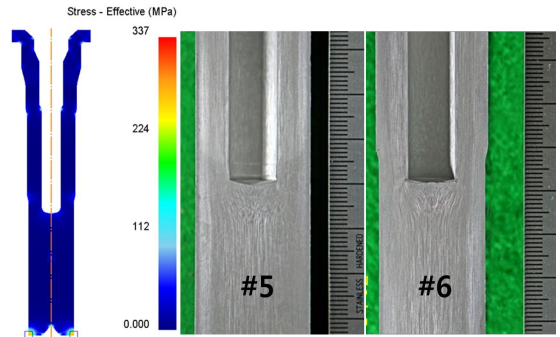


Fig. 12 #5, 6 Forging process crack improvement confirmation

개선공정에서 내부 크랙과 겹침이 개선되는지를 확인하기 위하여 단조 시험을 진행하였으며 Fig. 12과 같이 크랙 및 결함이 개선된 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 프론트 프레임레일에 사용되는 부싱(Bushing)을 알루미늄 6082 소재를 이용하여 다단 냉간단조 공법으로 성형하기 위하여 다단 공정 설계에 대한 해석을 진행하였으며, 발견된 문제공정에 대하여 damage 값을 구하고 개선설계 공정과 금형 제작 및 시작업을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄 소재는 냉간 단조시 연성과파괴에 의한 단조 크랙의 위험성이 매우 크므로 유한요소해석으로 공정설계의 타당성을 검증 해야 한다. 이를 위해 역문제법을 사용하여 보다 정확한 유동응력을 계산하여 유한요소해석에 적용하였다.
2. Al6082 소재의 인장시험에서 파단 한계를 계산하고자 유한요소해석을 진행하였으며 해석 결과 최대 변형율은 1.88에 도달하고 Necking 현상이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.
3. 다단공정설계 후 유한요소해석을 통하여 단조품의 성형성을 평가한 결과 #6공정의 성형한계가 임계선상에 있는 공정으로 평가 되었으며 단조 작업에서 크랙과 겹침 현상이 발생함을 확인하였다.

4. 6 공정 성형 시 변형률이 높아 결함발생 가능성이 높아지므로 외경부 형상을 초기에 성형후 내경과 플랜지를 성형하였으며, Air Trap의 문제점을 개선하기 위해서는 후방압출 깊이를 줄이고 플랜지 성형공정에서 금형과 소재 간 공간을 삭제하는 것이 좋다.
5. 개선공정을 제안하고 유한요소해석을 진행한 결과 크랙과 겹침현상이 사라졌음을 확인하였다. 실제 단조품의 결함을 확인하기 위하여 단조 작업을 진행한 결과 결함이 없는 제품을 생산되었으며, AL6082 소재에 대하여 정밀 유동응력과 성형한계 해석의 타당성을 확인하였다.

후 기

“본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업집적지경쟁력강화사업 프로젝트R&D의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.” (No. PCC19001R1)

REFERENCES

1. “Toishi.info”, Japan Aluminium Association
2. Murty, S. N., Rao, B. N., & Kashyap, B. P., “Improved ductile fracture criterion for cold forming of spheroidised steel”, Journal of materials Processing Technology, Vol. 147, No. 1, pp. 94-101, 2004.
3. Rao, A. V., & Ramakrishnan, N., “A comparative evaluation of the theoretical failure criteria for workability in cold forging”, Journal of materials Processing Technology, Vol. 142, No. 1, pp. 29-42, 2003.
4. Jeysingh, J. J. V., Rao, B. N., & Reddy, A. C., “Development of a ductile fracture criterion in cold forming”, Material Scienced Research Journal, Vol. 2, pp. 191-206, 2008.
5. Joun, M. S., Choi, I. S., Eom, J. G, Lee, M. C., “Finite element analysis of tensile testing with emphasis on necking”, Computational Materials Science, Vol. 41, pp. 63-69, 2007.
6. Joun, M. S., Eom, J. G, Lee, M. C., “A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method”, Mechanics of Materials Vol. 40, pp. 586-593, 2008.
7. Chio, I. S., Eom, J. G., Lee, M. C., Joun, M. S., “Analysis of the Tensile Test by the Rigid-Plastic Finite Element Method”, Transactions of Materials processing, pp. 371-377, 2006.
8. Wyatt, J. E., Berry, J. T., “A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, pp. 132-140, 2006.
9. Kim, H. S., Kim, S. H., Ryu, W. S., “Finite element analysis of the onset of necking and the post-necking behaviour during uniaxial tensile testing”, Materials Transactions, Vol. 46, pp. 2159-2163, 2005.
10. Chu, S. J., “True stress-true strain curves obtained by tensile tests using finite element program”, Transactions of the KSME.A, pp. 25-31, 2011.