

알루미늄 합금 볼트의 제조 공정 설계

Manufacturing Process Design of Aluminum Alloy Bolt

김지환¹, 채수원^{2,✉}, 한승상³, 손요현³
Jihwan Kim¹, Soo-Won Chae^{2,✉}, Seung Sang Han³ and Yohun Son³

1 고려대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

2 고려대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

3 영신금속공업 주식회사 (Youngsin Metal Industrial Co., Ltd)

✉ Corresponding author: swchae@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3367

Manuscript received: 2009.9.17 / Revised: 2010.2.17 / Accepted: 2010.3.18

The use of aluminum alloy parts in the automotive industry has been increasing recently due to its low weight compared with steel to improve fuel efficiency. Companies in the auto parts manufacturing sector are expected to meet the government's strict environmental regulations. In this study, manufacturing process of aluminum alloy bolt has been designed from forming to heat treatment. Bolt forming process is composed of cold forging for body and rolling for thread. In this study only cold forging process is considered by employing the finite element method. In the cold forging process, preform shape was designed and damage value was considered for die design. Two steps of forging process has been developed by the simulation and a prototype was manufactured accordingly. As a final process, solution heat treatment and aging process was employed. A final prototype was found to meet the required specifications of tensile strength and dimension.

Key Words: Al Alloy Bolt (알루미늄 합금 볼트), Cold Forging (냉간 단조), Finite Element Method (유한요소법), Damage Value (데미지 지수), Heat Treatment (열처리)

기호설명

- σ^* = max. principal stress
- σ = effective stress
- ϵ = effective strain
- ϵ^f = effective fracture strain
- C = critical value

1. 서론

최근 에너지 절감에 대한 사회적 요구에 따라 자동차 산업은 높은 에너지 효율을 추구하는 방향

으로 발전하고 있다. 이에 대한 가장 기본적인 요소로 부품의 경량화를 꼽을 수 있다.¹ 따라서 기존의 강철 재료를 대신하여 이와 동등한 강도를 갖는 AI 합금 등의 재료를 사용한 부품이 점차 상용화 되고 있다. 기존에는 주로 수입에 의존하였지만 국내에서도 체결용 부품인 AI 합금 볼트의 수요가 점차 커지면서, 최근 이에 대한 연구와 생산이 증가하는 추세이다. 그 중 우수한 강도를 갖는 AI 7000 계열 합금은 기계적 특성은 좋지만 냉간 단조 시 성형성이 좋지 않아 경험적인 설계와 시행 착오를 통한 단조 성형으로는 개발에 한계가 있었다. 이에 비해 유한요소법을 이용한 시뮬레이션

선의 활용은 금속 제품의 생산 전 설계 단계에서 시행착오를 줄여주어 개발 시간과 비용을 절약하는 이점을 갖고 있다.² 다른 재료의 단조와는 달리 알루미늄 단조에서 특히 고려해야 할 사항으로는 응력 집중부위 완화 또는 적절한 열처리를 통해 잔류응력에 의한 뒤틀림 현상 방지하고, 내부 결정립 성장 등 내부 결함을 억제 해야 한다는 점을 들 수 있다.

본 연구는 Al 7075 소재 볼트의 냉간 단조 성형에 있어 유한요소법을 이용하여 적절한 예비 성형체의 형상을 찾는 단계와, 연성 파괴 이론을 적용하여 최종 단조 성형 제품의 내부 결함을 예측하는 단계, 끝으로 열처리를 통해 내부 결정립 성장 억제를 유도하는 단계로 진행되었다. 먼저 사용된 연성 파괴 이론에 대해 간략히 소개하고, 단조 성형공정 설계와 내부 결함 분석을 위한 유한요소 해석을 진행한다. 마지막으로 열처리를 통해 금속 내부 결정의 변화를 분석한다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 냉간 단조 시뮬레이션을 통한 소성가공 공정설계를 위해 상용 유한요소 코드인 DEFORM-3D 를 사용하였다. 내부 결함의 분석을 위해서는 DEFORM-3D 에 내장된 Normalized Cockcroft&Latham 의 연성 파괴 기준을 이용하였다.^{3,4} 이는 다음의 식(1)로 표현되며 변형의 해석과 동시에 압출, 엷셋팅 등의 다양한 하중 조건을 적용할 수 있다.⁵

$$\int \frac{\sigma^*}{\sigma} d\epsilon = C \tag{1}$$

DEFORM-3D 의 경우 내부 결함 분석을 위해 식(1)을 각 성형 단계별로 축적시킨 값을 데미지 지수(damage value)라 표현한다. 식(1)의 값은 소재의 전 영역에서 각 성형 단계가 진행됨에 따라 누적되는 에너지이며, 이 때 데미지 지수가 높을수록 연성 파괴가 발생할 가능성이 높아진다. 유효 변형률(effective strain), 유효응력(effective stress), 최대 주응력(maximum principal stress)에 의해 데미지 지수가 각 소재마다 고유한 임계값 C 에 도달했을 때 재료가 연성 파괴된다고 가정한다. 본 연구에서는 Al 7075-O 의 물성을 Kang⁶ 등이 제시한 응력-

변형률 관계(2)로 설정하였고 임계값의 적용은 생략하였다.

$$\bar{\sigma} = 309.10\bar{\epsilon}^{-0.140} \text{ (MPa)} \tag{2}$$

3. 제조 공정 설계

3.1 단조 공정 기본 설계

ø10mm 육각 플랜지 볼트의 단조 공정 설계를 위한 기본적인 볼트 성형 과정을 살펴보면 Fig. 1 과 같이 전방압출, 예비성형, 육각머리 엷셋팅, 플랜지 트리밍 등의 4 단계의 과정으로 이루어지는 것이 보통이다. 본 연구에서는 기존의 성형 단계를 4 단계에서 2 단계로 줄이는 설계를 시도하였다. 이를 위해 전방압출과 예비성형 단계를 통합하며, 육각머리 엷셋팅과 플랜지 트리밍의 단계를 통합하여 진행되도록 하였다.

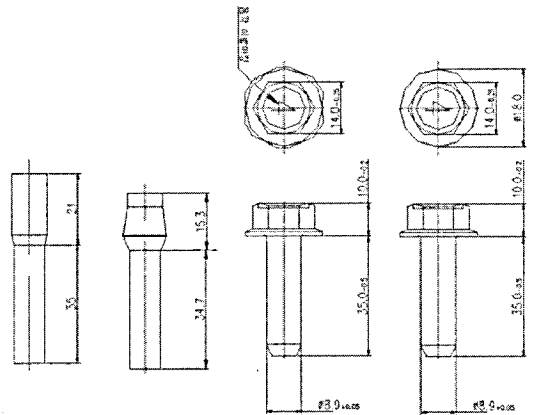


Fig. 1 Established forming process of bolt

3.2 CAE 를 이용한 단조 성형 공정 설계

단조공정을 설계한 후 CAE 시뮬레이션을 통해 설계검토하는 방법을 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 성형 조건으로 재료는 강소성(rigid plastic)으로, 금형을 강체(rigid)로 설정하였다. 강소성 해석은 탄소성 해석에 비해 해석 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으며 변형량이 큰 경우에 적합하다.^{3,7} 재료의 요소로는 4 절점으로 이루어진 4 면체 요소를 사용하였으며 소재 기준 약 53,000 개로 구성되어 있다. 금형과 재료 간의 마찰계수는 0.05 로 설정하였다.

알루미늄 합금 볼트의 냉간 단조 가공에 있어

중요한 설계 인자로 예비성형체의 형상을 들 수 있다. 이는 예비 성형체의 형상에 따라 최종 성형 제품의 형상 결함을 조절할 수 있기 때문이다.⁸ 본 연구에서 단조 성형 공정은 적절한 예비성형체의 형상을 찾는 것에 중점을 두고 설계하였다. 이에 따라 총 3 가지 경우의 설계를 고려하였다. 설계 1 과 설계 2 의 경우는 코일 형태로 가공된 원소재를 최종제품의 중량만큼 절단하여 볼트의 나사부 위까지만 압출하면서 동시에 볼트 머리부위를 단 조 가공한 것으로 전방압출과 예비성형을 하나의 단계로 통합한 설계이다. 설계 3 은 코일 형태 원 소재를 전체적으로 압출 한 후 절단하여 전방압출 없이 예비성형체로 단조 가공한 경우이다. 3 가지 설계 모두 소재 → 예비성형체 → 최종 단조품의 과정으로 총 2 단계의 성형 과정을 실시하였으며, 육각머리 업셋팅과 플랜지 성형은 하나의 단계로 동시에 진행되었다.

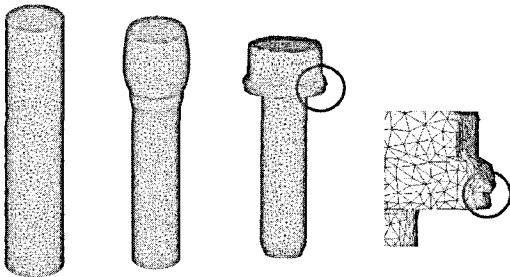


Fig. 2 Preform shape fault of design 1

최초 설계인 설계 1 의 경우 총 2 단계의 단조 과정 중, 예비 성형체에서 최종 단조품으로 진행되는 2 번째 과정에서 플랜지 부위의 접힘 현상이 발생하였다. Fig. 2 는 다이 하중이 가장 큰 최종 단 조 단계에서, 설계 1 의 이러한 형상 결함이 발생 함을 보여준다. 예비성형체의 볼트 머리부분의 형 상이 플랜지 부위의 성형을 위해 아래로 볼록한 형상이어야 이러한 결함이 발생하지 않을 것으로 예상되어 설계 2, 설계 3 으로 설계가 대체 되었다.

Fig. 3 는 최초 설계와 동시에 임시로 진행한 실 제 단조 실험의 결과를 보여주며, 시뮬레이션 결 과와 동일하지 않고 볼트 머리부위가 터지는 결함 이 발생하였다. CAE 시뮬레이션 에서는 볼트에 가해지는 모든 힘이 볼트의 중심을 기준으로 대칭되 지만 실제 볼트의 제조공정상에서는 볼트에 가해 지는 힘이 대칭되지 않고 약간의 오차를 포함하고

있기 때문에 볼트 머리 부위와 나사 부위의 동심 도가 맞지 않는 결과가 발생한다. 따라서 2 단계 제조공정인 육각머리 업셋팅과 플랜지 성형 시 불 안정한 형상으로 인해 큰 하중을 견디지 못하고 볼트 머리부위가 터지는 결함이 발생한 것으로 예 상된다.

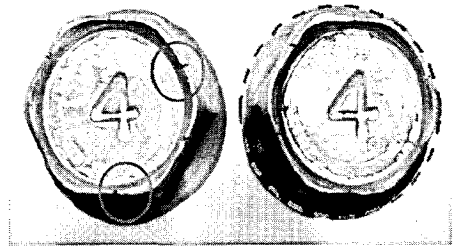
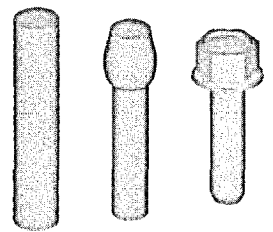
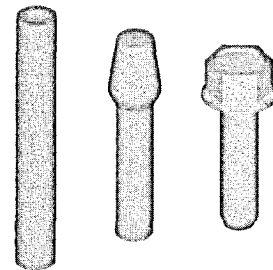


Fig. 3 Faults of prototype by design 1



(a) Design 2



(b) Design 3

Fig. 4 Forming simulations of design 2 and design 3

Fig. 4 는 설계 2 와 설계 3 의 각 단계 별 성형 과정의 시뮬레이션 형상을 보여준다. 설계 1 에서 형상 결함을 발생시킨 원인이 되었던 예비 성형체 의 형상과 다르게 볼트의 플랜지 부위가 퍼져 나 가기 용이하도록 설계하였다. 변경된 설계를 통해 해석한 결과 두 가지 설계 모두 성형 과정 중 형 상 결함이 발생하지 않음을 확인하였고 두 가지 설계 중 실제 시험 생산에 적합한 대상을 찾는 작 업을 실시하였다.

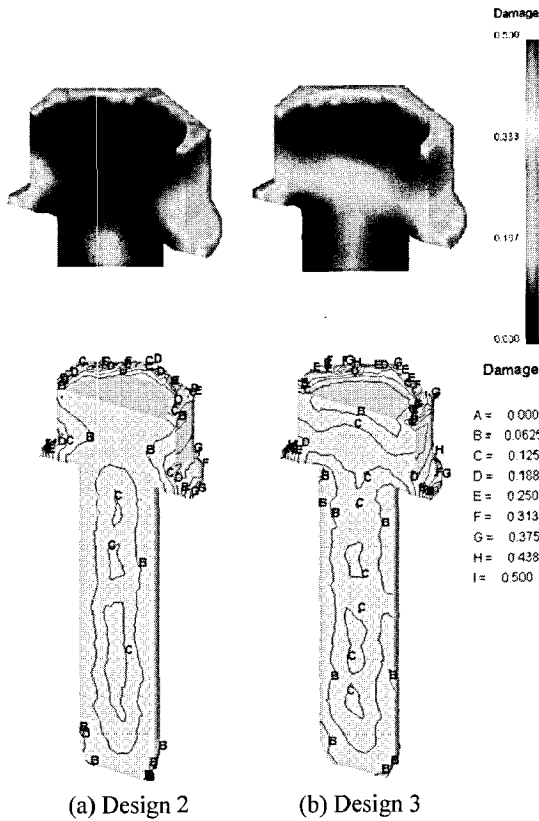


Fig. 5 Damage values between design 2 and design 3

시험 생산을 위한 설계의 선택을 위해 단면 데미지 지수의 비교를 통한 내부결함을 분석하였다. Fig. 5 는 최종 성형 제품의 데미지 지수를 비교하는 그림으로, 설계 2 의 경우 볼트 머리 내부에 데미지 지수가 낮게 분포하지만 나사부위의 중심에 상대적으로 높은 데미지 지수 분포를 보인다. 볼트의 경우 머리 부위와 나사 부위가 만나는 지점이 인장 강도에서 중요한 부위이므로, 데미지 지수 비교를 통해 볼트의 인장강도에 대하여 설계 2 가 설계 3 에 비하여 다소 유리할 것으로 예측된다. 설계 3 의 경우 볼트 머리 중심부가 높고 나사 부위에는 상대적으로 낮은 분포를 보인다. 따라서 단조 후 나사산을 만드는 전조 가공 이후의 치수 정밀도는 설계 3 이 유리할 것으로 예측된다. 데미지 지수 분포의 양상으로는 두 가지 설계의 장단점이 존재하므로 최종 설계 결정을 위해 치수 정밀도 확보의 용이성을 고려하였다. 이 때 설계 2 는 예비 성형체를 만드는 첫 번째 단조 과정에서 나사부위의 압출과 머리부위의 단조가 동시에 이루어지므로, 머리 부위의 단조만 이루어 지는 설

계 3 에 비해 치수 정밀도 확보 측면에서 불리할 것으로 예측된다.

3.3 시제품 제작

시뮬레이션 결과를 바탕으로 설계 3 을 이용해 Fig. 6 와 같이 시제품 제작을 위한 최종 설계 사양을 결정하였다. 시제품의 사양을 결정 한 후 Fig. 7 의 금형을 설계, 제작하여 자동 포머(SAKAMULA HBF-430SSL)⁹ 에 장착하였다. 자동 포머의 윤활 조건은 1 단계와 2 단계의 단조 단계에 따라 다르게 설정하였다. 냉간 단조의 경우 압축률이 높아질수록 좌굴의 위험이 커지므로 2 단계에서 1 단계에 비해 윤활재의 양을 줄였다.

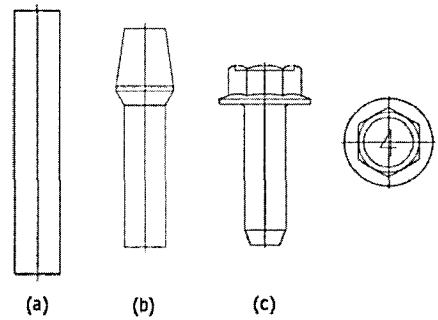


Fig. 6 Prototype forging process of design 3

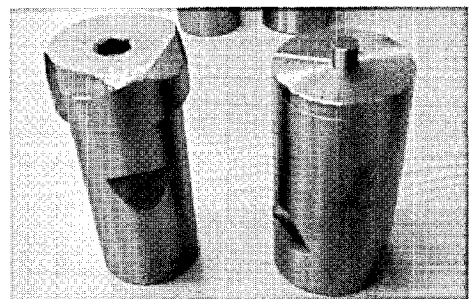


Fig. 7 Dies for prototype forging of design 3

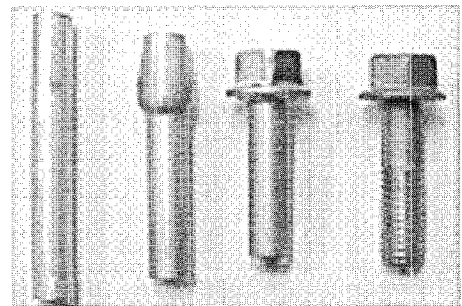
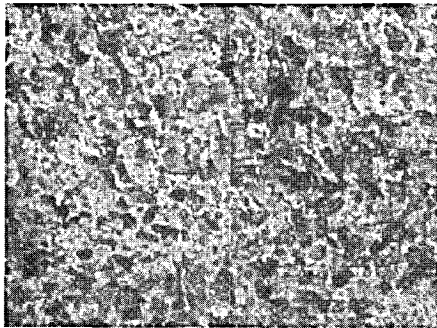


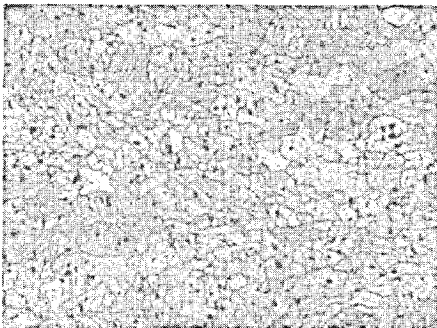
Fig. 8 Forging steps and final rolled prototype

이를 통해 마찰 계수를 크게 하여 좌굴의 위험성이 줄어들도록 조절하였다.¹⁰ Fig. 8 은 시험 생산한 Al 합금 볼트의 단조 과정 및 최종 나사산 가공까지의 각 단계별 시편을 보여주고 있다. 시험 생산한 볼트는 오차 범위 내에서 목표한 치수를 확보하였다.

Al 합금 냉간 단조의 경우 소성변형으로 인한 결정립의 변형이 제품의 강도를 저하시키는 주요한 원인이므로 제품화를 위해서 적절한 열처리를 통한 금속 내부 성질 개선이 필수적이다. 일반적으로 시효 경화 형 7000 계 합금은 강도향상을 목적으로 시효 전 용체화 열처리를 통하여 과포화 고용체를 형성시킴으로써 중간상(phase)을 석출시키기 위한 시효처리를 하게 된다. 용체화 열처리(solid solution heat treatment)는 과포화 고용체(supersaturated solid solution)를 형성시키며, 동시에 시효 처리 후 재료에 연성을 부여하는 역할을 한다.¹¹



(a) Before heat treatments



(b) After heat treatments

Fig. 9 Sectional pictures of Al alloy bolt before and after heat treatments by 200X magnification

용체화 처리 초기 단계에서는 재료내부에 재료의 변형 시 유동응력(flow stress)의 방해물로 작용

하는 집적된 합금원소 및 석출물이 존재하게 된다. 그러나 시간이 경과함에 따라 합금원소나 석출물이 재료내부로 확산되어 고용됨에 따라 재료변형 시 유동응력을 감소시키며 2 차상(second phase) 주변에 공극의 형성을 억제해 줌에 따라 연성을 향상시켜주는 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 470°C±10°C 부근에서 2 시간 유지 후, 급냉하는 용체화 처리를 실시하였고, 120°C 부근에서 20 시간 전후 공냉하는 시효처리를 실시하였다.

Fig. 9 는 최종 단조품의 열처리 전·후에 대한 단면의 광학 현미경 사진이다. 이를 통해 단조 과정에서 늘어난 공극이 열처리를 통해 감소되었음을 알 수 있다. 열처리한 시편을 인장 시험한 결과 강도 요구치인 450Mpa 이상을 만족하였다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 부품의 경량화를 위한 Al 합금 볼트의 제조 공정을 단조부터 열처리까지의 과정에 대해 설계하였다. 유한요소 해석을 이용하여 실제 제작 전 성형성 평가를 통해 시행 착오를 줄일 수 있었다. 이를 통해 기존 국내 제품의 경우 통상 3~4 단계의 단조 과정으로 생산되던 것에 비해 2 단계의 단조 과정만으로 성형을 완료하는 기술적 성과를 이루었다. 이러한 공정의 단순화를 통해 제작 비용을 절감하는 효과가 있을 것으로 예상된다. 또한 열처리에 대한 노하우를 확보하여 향후 소형 Al 합금 단조 제품의 설계와 생산에 응용할 수 있을 것으로 예상된다. 끝으로 본 연구를 통해 수입의 비율이 높은 부품의 국산화로 국내 산업 경쟁력 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2008 년도 산학연 공동기술개발지원 사업과 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(No. 2009-0063176).

참고문헌

1. Cole, G. S. and Sherman, A. M., "Light weight materials for automotive applications," Material Characterization, Vol. 35, No. 1, pp. 3-9, 1995.

2. Kubota, S., Yamamoto, T. and Yamanaka, M., "Forging Process Design by the Computer Simulation," Trans. of Material Processing, Vol. 16, No. 2, pp. 95-100, 2007.
3. Scientific Forming Technologies Corporation, "DEFORM-3D Version 6.1 User's Manual," 2008.
4. Kim, H., Yamanaka, M. and Altan, T., "Prediction and Elimination of Ductile Fracture in Cold Forging Using FEM Simulations," Proc. NAMRC, pp. 63-69, 1995.
5. Cockcroft, M. G. and Latham, D. J., "Ductility and Workability of Metals," J. Institute of Metals, Vol. 96, No. 2, pp. 33-39, 1968.
6. Kang, S., Lee, J., Cheon, J. and Im, Y., "The Effect of Strain-Hardening on Frictional Behavior in Tip Test," Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 46, No. 6, pp. 855-869, 2004.
7. Mori, K. and Yoshimura, H., "Three-dimensional rigid-plastic finite element method using diagonal matrix for large-scale simulation of metal-forming process," Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 42, No. 9, pp. 1821-1834, 2000.
8. Kim, D. J., Ko, D. C., Kim, B. M. and Choi, J. C., "The Prediction of Geometric Configuration and Ductile Fracture Using the Artificial Neural Network for a Cold Forged Product," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 105-111, 1996.
9. Sakamula Machine Co. Ltd., www.sakamula.org
10. Kim, W. S., Lee, B. S., Hwang, D. S. and Hong, S. I., "A Study on the Buckling and Plastic Instable Flow in Upset Forging," Trans. of Materials Processing, Vol. 8, No. 4, pp. 393-398, 1999.
11. Smith, W. F. and Hashemi, J., "Foundations of Materials Science and Engineering(4th Ed.)," McGraw-Hill, pp. 249-252, 2005.