

Al-Zn-Mg-Sc 알루미늄 합금 볼트 성형에 관한 연구

윤덕재¹ · 함승연² · 이용신[#]

A Study on Forming of Al-Zn-Mg-Sc Aluminum Alloy Bolts

D. J. Yoon, S. Y. Hahm, Y. S. Lee

(Received August 27, 2012 / Revised October 15, 2012 / Accepted October 17, 2012)

Abstract

This paper is concerned with forming of Al-Zn-Mg-Sc aluminum alloy bolts, focusing on the effects of heat treatment and age-hardening on the formability and ductile damage evolution. Both experimental and finite element studies were performed. From the experiments, it is observed that the heat treatment or the normalization of Al-Zn-Mg-Sc aluminum alloy increases its formability dramatically resulting in successful bolt forming, while the effects of age-hardening at room temperature on the stress-strain relationship and formability are not very critical. Deformation characteristics such as distribution of effective stress and strain, material flow, and ductile damage evolution during bolt forming are examined using a commercial finite element package, Deform-2D. It should be noted that the extrusion load predicted by the finite element method matches well the experiment results. The finite element predictions on the deformation characteristics support the experimental observations such as fracture of bolt head flange, material flow, and distribution of hardness.

Key Words : Al-Zn-Mg Aluminum Alloy, Bolt Forming, Finite Element Method

1. 서론

차세대 자동차 연구에서 핵심 개발 기술의 하나인 차체의 경량화는 연비향상을 효과적으로 달성할 수 있게 한다. 이를 위하여는 자동차부품을 경량 소재로 대체하기 위하여 신경량 소재의 개발과 신소재의 성형기술 발전이 뒷받침되어야 한다. 최근 Al 및 Mg 합금은 여러 금속재료 중에서도 경량이며 기계적 성질이 우수하여 경제적 효율성이 높아 전 세계적으로 생산량과 사용량 꾸준히 늘어왔으며 앞으로 증가할 것으로 예측되고 있다. 한편, 경량재료 부품을 강재볼트로 체결시에는 이종부품간의 접촉부에서 여러 가지 문제점이 발생한다. 일례로, 강재볼트는 내식성이 우수한 알루미늄 합금과 접촉하는 경우에 갈바닉 부

식(galvanic corrosion)에 의해 내식성을 현저히 저하시켜 Al 합금볼트의 필요성이 요구된다[1~3].

근래의 연구에서 A7003 계열을 바탕으로 극소량의 Sc을 첨가하여 새롭게 개발된 Al-Zn-Mg-Sc 합금은 중강도급의 합금으로 인장강도 320MPa, 연신율 10%이상의 기계적 성질을 보여주며, 상용의 Al-Zn-Mg 합금에 비해 압출성형성 및 충격치가 떨어지는 단점이 보완되었다[4, 5]. 그러나 새로운 Al 합금이 체결용 부품으로도 적합하게 사용되기 위하여는 합금 소재의 균질화 열처리 및 시효경화 특성과 성형 중에 유발되는 가공경화가 볼트성형 미치는 영향에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 균질화 열처리(풀림)를 한 Al-Zn-Mg-Sc 합금 소재와 상온 시효경화에 의하여 강도가 증가된 합금 소재의 볼트성형 특성을 실험과

1. 한국생산기술연구원

2. 한국교육과정평가원

교신저자: 국민대학교, E-mail:yslee@kookmin.ac.kr

유한요소해석을 수행하여 비교한다. 더불어 실험에서는 관찰하기 어려운 소재 내부의 결함과 변형특성은 유한요소해석을 이용하여 조사한다.

2. 실험

2.1 물성 실험

본 연구의 소재는 A7003 계열의 알루미늄을 바탕으로 한 Al-Zn-Mg 합금에 소량의 Sc을 추가하여 충격 특성과 단조성을 향상시키도록 개발된 소재로 Table 1에 성분조성이 주어진다.

알루미늄 합금은 주조 시 발생하는 조대한 금속간 화합물을 고용시키는 목적으로 균질화 열처리 즉 풀림처리(annealing)를 수행한다. 알루미늄 합금의 열처리는 고강도 합금일수록 온도가 낮고, 유지 시간이 긴 것이 일반적이다. 본 연구의 Al 합금의 열처리는 430℃에서 2시간 유지 후 노냉하였다.

압축 시험의 시편은 직경 12mm, 높이 18mm로 직경대비 높이 1:1.5 비율로 선정하였고, 압축 시험은 상온에서 수행하였으며 압축속도 2mm/s 로 수행하였다.

균질화 열처리 전의 Al-Zn-Mg-Sc 합금의 압축 시험은 35% 정도의 압축률에서 배불림의 2차 인장에 의한 크랙이 발견되었으며 원소재와 함께 Fig. 1에 보여진다. 균질화 처리된 Al-Zn-Mg-Sc 합금의 압축시험은 압축률 65%까지는 크랙의 발생 없이 진행되었고, 70% 정도에서 크랙이 시작되었으며 원소재와 압축률이 50%, 60%, 65%, 70% 때의 시편의 사진이 Fig. 2에 주어진다.

균질화 열처리 전의 소재와 균질화 열처리 후의 자연 시효경화에 따른 소재의 물성 변화를 조사하였다. 균질화 열처리 후에는 4주간 1주 간격으로 압축 시험을 하여 응력과 변형률 곡선을 얻었으며 Fig. 3에 주어진다. 열처리 후에 1주까지는 시효경화의 영향이 미미하나, 2주 후부터는 영향이 나타나고 있으며 그 후에는 시간이 지나도 더 이상의 큰 경화는 무시할 만한 것으로 나타난다. 균질화 열처리는 400MPa 정도인 초기 항복강도를 150MPa까지 떨어 뜨렸으나, 연성은 3배 정도가 되는 것을 보여주고 있다.

자연 시효경화는 변형경화에 영향을 주어 유효 변형률이 0.2인 경우에 시효경화의 기간이 길어짐에 따라 항복응력이 커지고, 최대 25%까지 항복응력이 증가하는 것을 보여준다. 그러나 변형율이

Table 1 Chemical composition of Al-Zn-Mg-Sc

CHEMICAL COMPOSITION(%)				
Al	Zn	Mg	Cu	Sc
Bal.	8.06	2.01	1.83	0.159
Si	Fe			
0.092	0.134			



Fig. 1 Compression test of Al-Zn-Mg-Sc Alloy before heat treatment

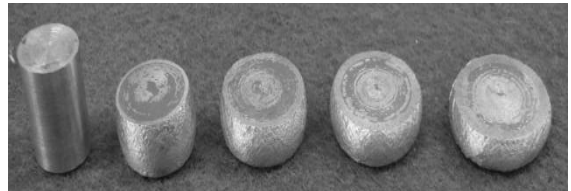


Fig. 2 Compression test of Al-Zn-Mg-Sc Alloy after heat treatment

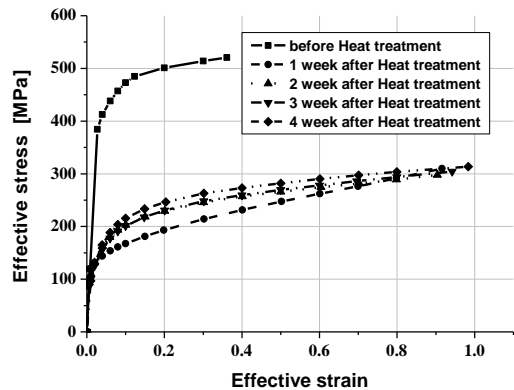


Fig. 3 Effective stress-strain curves for aged Al-Zn-Mg-Sc Alloy after heat treatments

더욱 커지면 시효경화의 영향에 따른 항복응력의 차이가 줄어들어 유효변형률이 0.8 정도에 이르면 시효경화 기간에 따른 유효응력의 차이가 미미한 것을 보여주고 있다.



Fig. 4 Photo of forming press

Table 2 Specification of forming press

Max. capacity	40Ton
Frame size	600mm×540mm×2000mm
Open height	400mm
Bolster area	280mm×340mm
Electric motor	10kW×4P×220V
Max. working pressure	210kg/cm ²

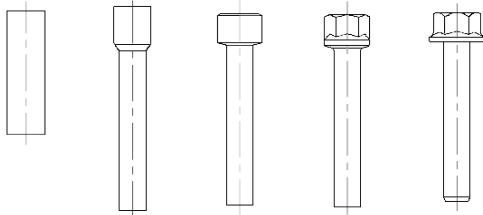


Fig. 5 Schematic of bolt forming schedule

2.2 볼트 성형

본 연구의 볼트성형 실험은 균질화 열처리 전과 후의 소재를 갖고 상온에서 수행되었으며, 금형과 소재 사이에는 몰리브덴 건조 윤활제를 사용하였다. 실험에 사용된 성형기의 모습과 재원이 각각, Fig. 4와 Table 2에 주어진다. Fig. 5에 주어지는 바와 같이, 볼트 성형공정은 볼트몸통 전방압출, 머리부 단조, 예비성형, 그리고 육각볼트 머리 단조의 4단계로 구성된다. 예비성형과 육각볼트 머리를 성형하는 단계에서는 볼트 머리의 압축보다는 플랜지부에 걸리는 원주 방향의 과다한 인

장에 의하여 크랙이 자주 발생하게 된다. 이와 같은 현상을 피하기 위하여 볼트 머리를 성형하는 마지막 단계에서는 오목한 펀치로 펀치의 중앙부와 소재 윗면 사이에 공간이 있는 공정도 시도하였다[1].

볼트 머리 플랜지부의 복잡한 변형특성을 이해하기 위하여 성형이 완료된 시편의 단면을 잘라 유선의 형태를 조사하고, 4 단계의 변형을 거치는 동안 경화 정도를 살펴보기 위하여 비커스 경도를 단면의 여러 곳에서 측정하였다.

3. 유한요소 해석

볼트성형 공정 중의 성형특성을 조사하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 실험에서는 측정하기 어려운 결함의 성장이나 볼트 내부의 응력 및 변형률 분포 등의 변형특성을 유한요소 해석으로 조사한다. 볼트 머리의 형상을 고려하면 3차원 해석을 수행하여야 하나, 공정 설계 초기 단계의 효율성을 고려하여 축 대칭 해석을 수행하였다.

본 연구의 유한요소해석은 상용 소프트웨어 Deform 2D를 이용하였으며, 성형공정 중의 결함을 예측하기 위하여 Cockcroft & Latham 손상모델을 사용하였으며, 그들의 손상모델은 다음과 같다.

$$D_f = \int \left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

크랙 발생을 예측하는 임계 손상값(Critical damage parameter)을 얻기 위하여 앞 절에서 소개한 일축 압축실험에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석에서는 실험에서 크랙이 발생하는 압축률까지 해석을 진행하고, 크랙이 발생하는 부분의 결함 값을 계산하여 Cockcroft & Latham 모델의 임계 결함 값을 얻었다. 균질화 풀림처리를 하기 전과 후에 4주간의 시효경화를 겪은 시편의 경우에 임계 결함 값이 각각 0.098과 0.298을 갖는 것으로 나타났다.

4. 결과 및 분석

4.1 전방압출

전방압출은 매우 흔한 성형공정으로 다단의 볼트성형에서 필수적으로 사용되는 공정이다. 알루미늄 합금소재의 전방압출 실험과 유한요소 해석을 수행하여 자연시효에 의한 소재의 변형경화가

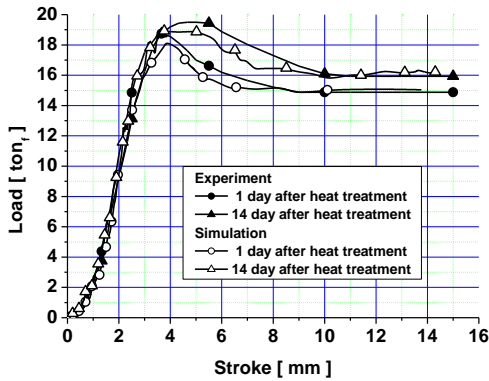


Fig. 6 Load comparison between experiment and simulation

압출하중에 미치는 영향을 조사하였다. 균질화 열처리를 수행하기 전에는 강도가 비교적 높고 연성이 낮아 볼트성형에는 미흡하지만, 전방압출은 성공적으로 수행된다. 본 연구에서는 직경 15.5mm인 Al-Zn-Mg-Sc 알루미늄 합금소재를 압출비 2.96, 압출 다이 반각 45°의 조건으로 상온에서 전방압출 실험을 수행하였다. Fig. 6에는 실험에서 구한 압출하중과 유한요소해석에 의한 압출하중을 비교하여 보여준다. 실험에서 측정한 압출하중과 유한요소법으로 예측한 압출하중은 모두 성형 초기에 급격히 증가한 후에 서서히 감소하여 정상상태에 이르는 것을 보여주고 있다. 2주의 시효경화를 겪은 소재의 압출하중은 최대치 이후에서 정상상태에 이르기 전에는 시효경화가 없는 소재의 압출하중보다 최대로 약 17% 정도 높으나 정상상태에 이를수록 차이가 줄어드는 것을 보여준다. 이와 같은 현상은 Fig. 3에 주어지는 알루미늄 합금의 물성으로부터 예측이 가능하며, 유한요소해석에 의해 예측된 압출하중과 실험으로 측정한 압출하중이 펀치 스트로크에 따른 변화의 비교에서 유사함을 보여주어 본 연구의 유한요소해석이 타당함을 확인할 수 있었다.

4.2 볼트성형

균질화 풀림처리를 받기 전의 알루미늄 합금소재는 비교적 강도는 높으나 연성이 낮아 성공적인 볼트성형이 확신되지 않는 상태이다. 균질화 풀림처리 전의 소재에 대한 볼트성형 실험과 유한요소해석을 수행하였고, 실험결과와 유한요소해석에 의한 결함 분포가 Fig. 7에 보여진다. 실험에서는 볼트머리를 성형하는 4번째 단계에서 플

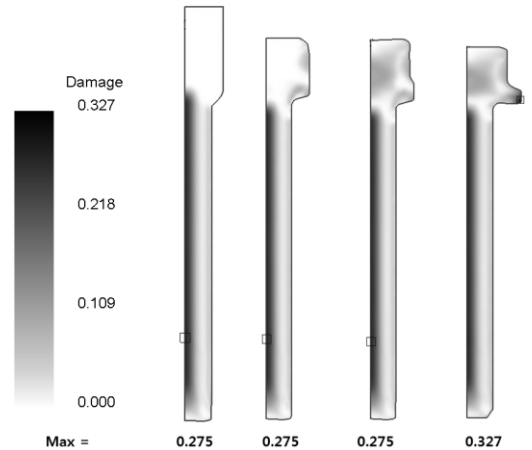


Fig. 7 Specimens at each stages during bolt forming with Al-Zn-Mg-Sc alloys before annealing

랜지부에서 파손이 일어나는 것을 보여주고 있다. 유한요소해석으로 예측한 최대 결함값 0.327이고, 4번째 단계에서 플랜지부에 발생되며 임계 결함값인 0.098보다 커서 크랙 발생을 예측하고 있다. 이와 같이 실험과 유한요소해석에 의한 예측이 일치하여 본 연구의 결함해석과 볼트성형 실험이 유효함을 입증한다.

첫 번째 단계의 전방압출 후에는 최대결함이 볼트몸통의 중심부에서 발생하는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 전방압출에 의한 단면 감소가 축방향 인장을 일으키고 이에 따른 인장력이 몸통중심부에서 커져 평균응력을 크게하여 결함을 성장시키는 것으로 분석된다. 그러나 그 후의 세 단계에서는 볼트 머리성형을 위한 단조특성에 의해 몸통 중심부의 결함성장은 없고, 볼트 머리부 특히 플랜지 부위에서 결함이 성장하는 것을 예측하고 있다. 첫 단계의 전방압출에서 발생하는 몸통중심부의 결함성장을 줄이기 위하여 전방압출용 펀치의 밀면을 약간 오목하게 하여

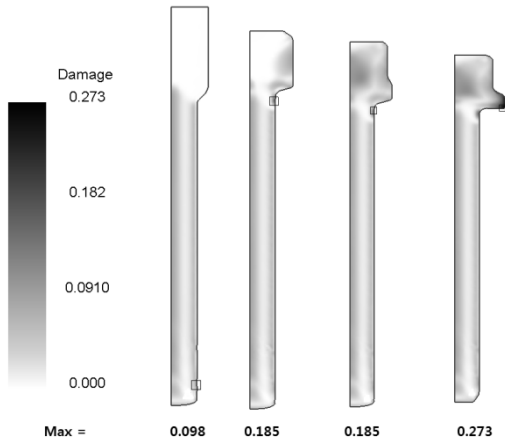


Fig. 8 Specimens at each stages during bolt forming with Al-Zn-Mg-Sc alloys after annealing

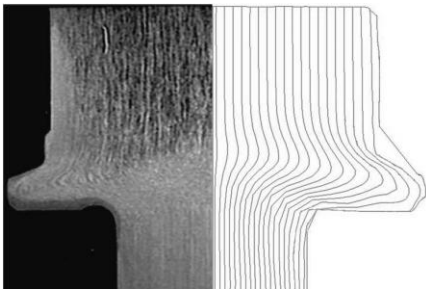


Fig. 9 Metal flow in the head of formed bolt

볼트머리의 윗면이 될 부분을 약간 볼록하도록 설계하는 방법도 제안되고 있다[3].

다음에는 균질화 열처리를 수행한 직후 소재에 대하여 볼트성형 실험과 유한요소해석을 수행하였으며, 실험결과와 유한요소해석에 의한 결함 분포가 Fig. 8에 보여진다. 균질화 처리 후에는 물성 실험에서 보여준 바와 같이 연성이 커져 파손이 없이 성공적인 볼트성형이 수행되었음을 볼 수

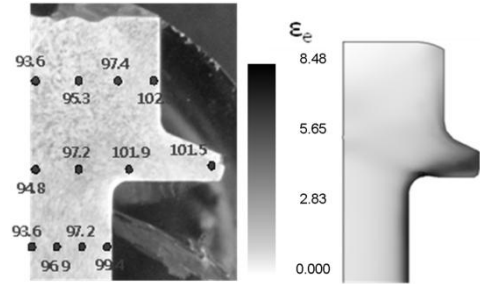


Fig.10 Distribution of Vickers Hardness by experiment and effective strain by FEM

있다. 균질화 열처리를 겪은 소재는 4 단계의 볼트 성형 실험을 거치는 동안에 결함값의 최대치가 0.273으로 임계결함 값보다 작아 파손이 없이 성공적인 성형이 수행될 수 있음이 예측되었다. 결함 값의 최대치가 볼트몸통 플랜지부에서 발생하는 것도 실험에서의 관찰로 예측될 수 있는 결과이다. 또한, 균질화 열처리 후에 4주의 상온시효 경화를 겪은 알루미늄 합금소재도 성공적인 볼트성형이 수행되었다.

실험에서는 시효경화의 영향이 거의 없는 것으로 나타나고 있어, 다음의 결과들은 균질화 열처리를 수행하고 하루가 지난 Al 합금소재를 갖고 볼트성형을 수행한 실험에서 관찰한 것을 유한요소 해석과 비교하여 보여준다. Fig. 9에서는 볼트머리와 몸통을 연결하는 부분을 포함하는 곳에서의 단류선(Flow line)을 실험에서 관찰한 사진과 유한요소해석의 예측을 비교하여 보여준다. 실험에서의 관찰과 유한요소 예측은 전반적으로 비슷하나, 볼트 플랜지 밀면에서 유선 간의 밀착된 정도가 약간의 차이가 있다. 이는 유한요소해석에서 사용한 마찰계수 0.05 가 실제와는 차이가 있음에 의한 것으로 생각된다. 볼트머리와 몸통을 연결하는 플랜지의 내부에서 유선의 완곡점이나 꺾임이 형성되지 않음을 실험과 유한요소 예측이 일치하여 보여주고 있다. 따라서 볼트성형 과정 중에 내부에서도 크랙이 없이 기계적 성질이 우수한 제품을 성형할 수 있었음을 뒷받침하고 있음을 검증하였다.

Fig. 10에서는 볼트성형 실험이 성공적으로 수행된 경우에 볼트머리 단면에서의 경도를 측정하고, 유한요소 해석에 의한 유효변형을 분포를 비교하여 보여준다. 실험으로 측정된 비커스 경도분포는 볼트 중심부에서는 낮으며 바깥 표면에서는

크게 나타나고 있고, 최대치는 플랜지에서 나타나고 있다. 이는 볼트 중심부 보다는 바깥 표면에서 전단변형이 큰 것에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 10의 오른쪽에 주어지는 유효 변형률 분포는 실험에서 측정된 경도분포와 유사한 것을 보여주며 실험결과와 본 연구의 분석을 뒷받침하고 있다.

5. 결 론

비철금속 부품의 체결용으로 개발된 알루미늄 합금소재의 볼트성형에서 균질화 열처리 및 시효경화의 영향을 조사하기 위하여 실험과 유한요소 해석을 병행하였다.

균질화 처리 전의 알루미늄 합금소재 볼트성형은 볼트머리와 몸통을 연결하는 플랜지부에서 파손이 발생되었으나, 균질화 처리된 소재와 균질화 처리 후에 상온 시효경화를 겪은 알루미늄 합금의 볼트 성형은 모두 성공적이었다.

균질화 처리 후에 2주 이상의 자연 시효경화를 겪은 소재는 유효응력이 커지는 것을 보여주었으나, 소재의 유효변형률이 60% 이상이 되는 경우에는 시효경화에 의한 영향이 매우 작아 알루미늄 합금볼트 성형에는 큰 영향이 없는 것으로 조사 되었다.

결합성장을 포함하는 유한요소 해석은 플랜지 부위에서 원주방향의 인장에 의하여 결합성장이 큰 것을 보여주며 볼트 성형 실험에서 관찰한 플랜지 끝 부분의 크랙 발생을 예측할 수 있었다.

균질화 열처리를 수행한 Al-Zn-Mg-Sc 합금소재의 볼트성형을 수행하여, 볼트 머리와 플랜지 그

리고 볼트 몸통에서 측정된 유선과 경도를 유한요소 해석에 의한 예측과 비교하였다. 실험에서의 측정결과와 유한요소 예측이 유사함은 본 연구의 타당성을 뒷받침한다.

후 기

본 연구는 국민대학교의 교내 연구비 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Sakurai, 2008, Recent Tendency of Al Forging in Japan, Trans. of Mater. Process., Vol. 17, No 8, pp 550~557.
- [2] R. Narayanasamy, K. Baskaran, D. Muralikrishna, 2008, Some Studies on Stresses and Strains of Al Alloy during Extrusion-forging at Room Temperature, Mater. Des., Vol. 29, No. 8, pp. 1623~1632.
- [3] N. Y. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, J. T. Yeom, D. G. Lee, S. G. Lim, N. K. Park, 2006, Effect of Processing Condition on the Hot Extrusion of Al-Zn-Mg-Sc Alloy, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 2, pp. 143~147.
- [4] D. J. Yoon, E. Z. Kim, S. Lee, Y. S. Lee, S. H. Yoon, 2008, KSPE Spring Meeting, Kor. Soc. Precis. Eng., Seoul, Korea, pp. 903~904.
- [5] D. J. Yoon, E. Z. Kim, S. Lee, S. H. Yoon, Y. S. Lee, 2009, KSPE Spring Meeting, Kor. Soc. Precis. Eng., Seoul, Korea, pp. 649~650.