

# 알루미늄 합금 볼트성형에서 결함성장과 변형특성 Damage Evolution and Deformation Characteristic in Forming of Al Alloy Bolts

윤덕재<sup>1</sup>, 김응주<sup>1</sup>, 이승현<sup>2,\*</sup>, 이용신<sup>3</sup>, 윤상현<sup>4</sup>

Duk-Jae Yoon<sup>1</sup>, Eung-Zoo Kim<sup>1</sup>, Seunghun Lee<sup>2,\*</sup>, Yong-Shin Lee(yslee@kookmin.ac.kr)<sup>3</sup>, Sang-Hun Yoon<sup>4</sup>  
<sup>1</sup> 한국생산기술연구원, <sup>2</sup> 부산일다이하스, <sup>3</sup> 교신저자, 국민대 기계자동차공학부, <sup>4</sup> 국민대 신소재 성형기술연구소

Key words : Damage, Al Alloy Bolt, Extrusion, Finite Element Method

## 1. 서론

최근의 자동차 산업에서 차체 경량화는 체결부품용 비철재료의 개발과 상용화를 이끌고 있다. 일례로 알루미늄은 체결용 부품으로 고강도 및 경량의 조건을 만족시킬 수 있어 많은 연구자들이 알루미늄 합금 설계 및 합금의 성형성 연구를 시도하였다 [1-4]. 본 연구에서는 실용화를 최우선의 목적으로 새로운 조성을 갖는 알루미늄 합금의 개발보다는 현재 사용되고 있는 알루미늄 합금의 성능을 개선한 소재의 압출 성형성을 조사하는 방향에 초점을 둔다.

기존의 Al-Zn-Mg 합금인 A7003 합금의 경우에 320 MPa의 인장강도, 10% 이상의 연신률 등 기계적 특성은 체결용 볼트로서 적절하나 성형성이 좋지 못하고 충격치가 떨어져 충돌에너지를 흡수하여야 하는 자동차용 체결 부품으로는 적합치 못하다. 따라서 충격특성을 향상시키는 합금조성과 단조성을 높이도록 조직 미세화를 일으키는 기술의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 먼저 A7003 계열을 바탕으로 새로운 합금을 설계 제조한 선행연구를 간략히 소개하고, 개발된 소재의 볼트 성형공정 설계를 위한 볼트성형 실험과 유한요소 해석을 수행한다.

## 2. 알루미늄 합금 볼트소재 개발

합금의 설계는 7000계열의 알루미늄 합금 중에서 압출형상 및 성형의 자유도를 갖는 7003 합금을 기준으로 하였다. 반사료를 이용하여 용해 후에 70 mm/s의 속도로 주조하였으며 가스제거는 30분, 냉각수 온도는 20℃로 하였으며 주조 마크로 조직에서는 편석이나 결함이 없었다. 균질화 처리는 480℃에서 20시간 유지후에 공냉하였다. 균질화 후 조직관찰에서는 용질입자들이 입내에 고루 확산되었음을 확인하였다.

460℃에서 540℃까지의 온도범위에서 압출 실험을 수행하여 특성을 평가하여 최적의 온도조건은 500℃임을 확인하였다. 압출된 후의 열처리는 475℃에서 1.5시간 가열후에 급냉하고 124℃에서 30시간 에이징을 하였다. 이와같은 열처리를 겪은 소재의 강도가 약간 저하되었으나 연신률 및 충격에너지를 현저히 향상되었으며, 본 연구의 볼트 성형공정에 사용하였다.

## 3. 볼트 성형 공정

실험을 위한 공정성형 설계를 하기 전에 유한요소해석을 수행하여 성형성을 검토하였다. 실제의 볼트 성형은 볼트 헤드의 형상으로 3차원 해석을 수행해야 하지만, 효율성을 고려하여 시작 단계로 축대칭 해석을 수행하였다. 본 연구의 유한요소해석은 상용의 유한요소 패키지인 Deform 2D를 이용하였고, 결함해석은 Deform 2D 패키지에 내장되어 있는 Cockcroft 모델을 이용하였다 [5]. 앞 절에서 소개된 소재의 압출 실험으로 소성변형 해석에 필요한 물성 데이터를 얻고, 파단시까지의 업셋팅을 수치해석으로 모델링하여 파단시의 결함 값을 얻었다.

세 경우의 볼트 성형공정을 시뮬레이션하였다. 육각형

볼트머리의 외접하는 원과 내접하는 원의 크기에 맞추어 중간 형상을 설계하였다. Case 1은 볼트성형공정에서 중간 형상이 육각볼트머리 외접원의 크기(Fig 1(c)참조)로 축대칭 해석을 하는 경우이고, Case 2는 내접원을 기준으로 한 경우이다. Fig. 1은 Case 1의 압출 및 헤드 단조의 단계별 유한요소격자를 보여주고 있다. 첫 단계인 전방 압출 후의 형상 (Fig. 1(b))은 두 번째 단계의 폐쇄단조로 머리부가 볼트 헤드의 최대 직경까지 확대(Fig.1 (c))가 되기까지는 축대칭 변형을 만족시킨다. 육각형 볼트 머리 부를 만드는 Fig. 1 (d), (e)에서는 축대칭으로 단순화한 것을 보여준다. Fig. 1(c)에서 (d)로 변하는 볼트 머리 성형의 첫 단계 성형에서는 소재의 윗면과 펀치 사이에 공간이 있어 머리부의 형상을 만들기 위한 성형에 대한 보상으로 머리부의 중앙에 인장이 발생한다. 그러한 인장은 평균응력을 크게 하여 Fig. 2(a)에 보여지는 바와 같이 그 곳에서 결함이 크게 성장하는 것을 예측하게 된다. Case 2의 경우에도 Case 1과 비슷한 변형특성을 보여 본 논문에서는 생략한다.

Case 1이나 Case 2의 경우에 볼트 머리 내부의 최대 결함은 파괴에 이르게 하지는 않지만 제품의 기계적 성질을 열악하게 한다. 따라서 내부의 결함 성장을 줄이는 공정설계가 필요하며 이를 위하여는 볼트 머리 중앙부에 인장이 발생치 않도록 하여야 한다. 이에 Fig. 1(b)에서 (c)로 되는 두 번째 단계의 폐쇄단조에서 Case 2와 같이 볼트 머리 직경을 최종의 볼트머리 직경과 같도록 줄이고, Fig. 1(c)에서 (d)로 만드는 세 번째 단계에서는 소재의 머리와 펀치 사이의 공간을 없애 볼트 머리 중앙에도 압축이 발생토록 Case 3의 공정을 고안하였다.

Case 3를 시뮬레이션하여 축적된 결함의 분포를 Fig. 2(b)에 보여주고 있다. 의도하였던 바와 같이 Case 1이나 Case 2와는 달리 볼트 머리부의 중앙에는 결함성장이 현저하게 줄어들어 있음을 알 수 있었다. 그러나 볼트 머리부에는 압축만 작용한 것이 플랜지부에는 보다 큰 인장을 발생시켜 플랜지 끝 부위의 접합이 커짐을 보여주고 있다.

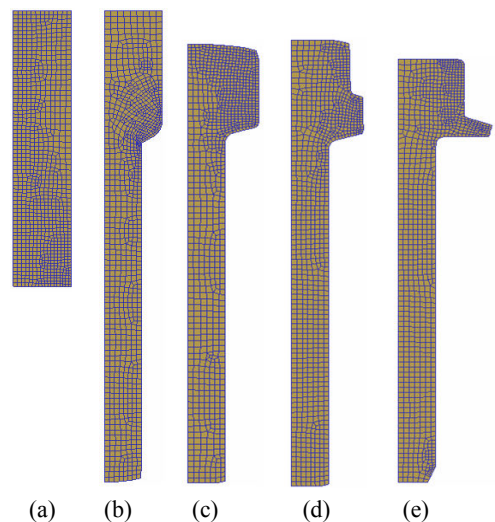


Fig. 1 Finite element meshes showing bolt forming procedure (Case 1)

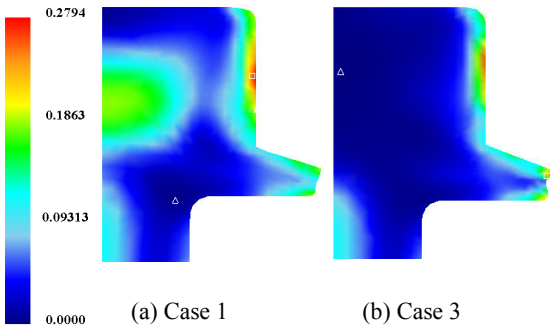


Fig. 2 Distribution of accumulated damage

라 금속유동을 보여주고 있다. 볼트 머리 중앙부에는 금속 유동이 양의 평균응력 값을 유발하고 이것이 결함 성장을 일으키는 원인이 된다. 이러한 현상은 Case 1 이나 Case 2 의 시뮬레이션 결과와도 일치하고 있다.

Fig. 5 에서는 최종의 전조성형을 거친 볼트의 단면에서 경도를 측정된 것을 보여주고 있다. 5 번 지점에서 최대의 경도 값이 측정되었고, 8 번 지점에서의 경도 값이 최소치로 측정되었다. 플랜지 끝에서 약간 안쪽에 위치한 5 번 지점은 유한요소 해석에서도 변형률과 유효응력이 큰 것으로 예측되고 있었으며 이러한 변형이력이 경도를 크게 한 것으로 사료된다. 반면에 8 번 지점은 축적된 결함이 가장 큰 것으로 예측되었으며(Fig. 2 (a)), 결함 성장에 의한 재료의 열화가 원인이 되어 경도가 작아진 것으로 사료된다. 이러한 단점은 본 연구에서 제시하는 Case 3 와 같은 공정으로 해결될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

비철재료 부품 체결용 고강도 경량의 알루미늄 합금볼트 성형기술 개발을 목표로 새로운 조사의 알루미늄 합금 개발과 볼트 성형공정 개발연구를 수행하였다.

볼트성형공정 개발 연구는 유한요소해석과 실험을 통하여 성형특성, 결함성장 및 기계적 성질의 변화를 조사하였다. 실험으로 조사한 형상변화, 금속 유동 및 경도는 유한요소해석 결과의 유효함을 입증하였다. 유한요소 해석 결과에 근거하여 볼트의 기계적 성질을 개선하기 위하여는 Case3 와 같은 공정을 제시한다.

3 차원 볼트 형상을 2 차원 축대칭 해석으로 변형특성과 결함 성장을 조사한 시도는 공정 설계의 첫 단계로서는 유효한 것으로 사료된다. 그러나 볼트머리 육각형부위의 변형은 3 차원 해석이 요구되며, 축대칭 해석결과를 이용하는 3 차원 유한요소해석기법의 개발이 진행 중이다.

#### 후기

본 연구의 일부는 2008년도 국민대 교내연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. H. Yi, D. Suh, S. Lee, K. Lee, 2003, Microstructural changes of Al-Zn-Mg-Cu alloys containing Sc during hot extrusion and post heat treatments, KSTP Fall Meeting, pp. 281~284.
2. J-H Park, Y Kwon, Y-S Lee, S Kang, B Lee, J-H Lee, 2004, Effect of Alloying Elements on the Tensile Property of Al-Mg-Si Alloy, KSTP Fall Meeting, pp. 234~237.
3. N-Y Kim, J. Kim, Yeom, D. Lee, S. Lim, N-K Park, 2006, Effect of Processing Condition on the Hot Extrusion of Al-Zn-Mg-Sc Alloy, Trans. of Materials Processing, Vol. 15, No. 2, pp. 143~147.
4. D-J Yoon, K-H Na, C. Cho, The Microstructure of AZ31 Mg Alloy by Forward Extrusion with Various Extrusion Parameters, Materials Science Forum, Vol. 539-543, pp. 1818~1823.
5. Deform 2D, Scientific Forming Technology Corporation.
6. D-J Yoon, E-Z Kim, Y-S Lee, 2007, Finite Element Study on Deformation Characteristics and Damage Evolution in Warm Backward Extrusion of AZ31 Alloys, Trans. of Materials Processing, Vol. 16, No. 8, pp. 614~620.

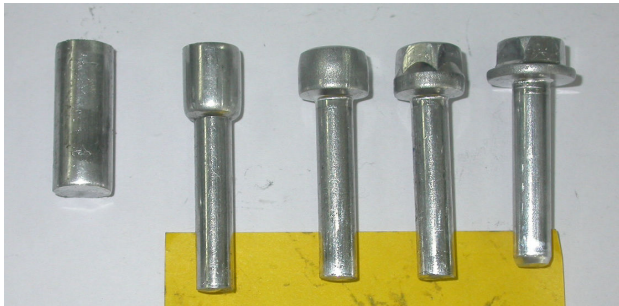
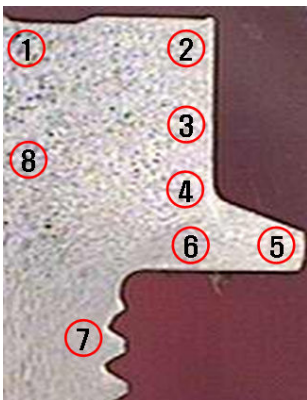


Fig. 3 Specimens at each forming stages



Fig. 4 Metal flow



Location	Hardness
1	113.1
2	115.3
3	118.9
4	127.8
5	135.5
6	121.9
7	113.6
8	95.8

Fig. 5 Hardness

Fig. 3 에서는 Case 1 이나 Case 2 에서와 같이 육각볼트머리 성형단계에서 소재의 윗 부분과 펀치 바닥면 사이에 공간이 있는 공정으로 볼트 성형을 수행한 단계별 시편을 보여주고 있다. 볼트 머리 플랜지부는 시뮬레이션한 경우보다 두께가 얇아 겹침 같은 현상은 나타나지 않았다.

Fig. 4 에서는 육각 볼트 머리를 성형한 후의 단면을 잘