

변형량 및 변형속도 변화에 따른 Al 6061합금의 특성 변화

권용남·권진욱·이영선·이정환*

Mechanical Characteristics of Al 6061 Alloy with the Variation of Strain and Forming Speed

Y.-N. Kwon, J. W. Kwon, Y. S. Lee and J. H. Lee

Abstract

The forging of Al 6061 has been studied by using finite element analysis and real forging experiment to find out the effect of strain rate and strain on the final forged product. It seems to be well known that the mechanical properties depend on the microstructures of forged products. The hot deformation of Al alloys including Al 6061 has been researched quite a long period on the various aspects. However, the forging of Al alloys seem to have few information, especially the recrystallization, recovery and grain growth. To elucidate the process variables to control those microstructural aspects the specially designed model was used for finite element simulation and forging experiments, in which the variation of strain and strain rate could be obtained. The effect of strain and strain rate has been related with the microstructures of forging stocks.

Key Words : Al 6061, Hot Forging, Finite Element Analysis of Forging

1. 서론

1990년대 이후 자동차 경량화에 대한 요구가 급격히 높아짐에 따라 알루미늄 합금의 사용량이 크게 증가하는 추세이다. 그 대표적인 예로 최근 Ford사가 발표한 리무진급 "Prodigy"라는 컨셉트 모델의 경우 차체가 1,085kg으로 알루미늄 부품이 폭넓게 채택되고 있다[1]. 알루미늄 부품의 사용량의 증가에 따른 경량화는 연비, 환경 문제의 해결뿐만 아니라 자동차 성능에 운전자들의 만족도도 동시에 높이고 있어 향후 알루미늄 부품 채용 범위는 더욱 더 높아질 것으로 예상된다. 기존에 4~5개 이상의

steel 부품을 접합하여 제조하던 컨트롤 암 등 조향장치의 알루미늄화가 현재 진행중이며 열간 단조공정이 가장 대표적인 제조 공정으로 판단되어 현재 개발중에 있다.

Al-Mg-Si계 합금은 주조 및 가공재의 형태로 제조되어 중급 정도의 강도를 가지며 우수한 용접성과 내부식성을 가지고 있는 합금이다[2]. Al-Mg-Si계 합금이 처음 개발된 1930년대 이래 합금의 고온 소성가공에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔으나 연구의 대상이 주로 압출 공정에 국한되어 있었다[3]. 또한, 압출 가공시 변화하는 미세조직보다는 거시적인 변형저항 및 소성가공후 기계적 물성값에 연구의 초점이 국한되어 왔다.

* 한국기계연구원 공정연구부 소성용융그룹

단조 공정은 부품의 형상이 결정됨에 따라 부품의 위치에 따른 변형을 및 변형을 속도를 압출공정과 같이 일정하게 제어할 수 없다. 이러한 공정의 특징은 Al 6061합금과 같은 열처리형 알루미늄 합금의 단조시 최종 제품의 강도를 결정하는 용질원소, 석출 및 분산 입자들의 분포에 영향을 주어 최종 부품의 기계적 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 알루미늄 조항부품의 제조시 예상되는 변형을 고려한 모델 부품을 제안한 후 이 모델품의 단조공정 해석 및 실험을 통하여 단조품의 형상에 따른 변형을 및 변형속도가 최종 물성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법

그림 1은 본 연구에 사용한 모델 부품의 형상으로 알루미늄 컨트롤 암을 고려하여 설계하였으며 단조품은 공정 연구 및 신뢰성 평가에 사용하였다.

본 연구는 알루미늄 조항장치 제조시 가장 많이 사용되는 상용 Al 6061합금이 사용하여 실시하였으며 소재의 제조법에 따른 영향을 평가하기 위하여 압출재, 연주재 및 본 모델품의 외관에 상응하는 크기를 가지는 압출형재가 사용되었다. 본 연구에 사용된 단조소재의 크기 및 단조방향을 표 1에 정리하였다.

그림 1에 제안된 모델 단조품의 단조공정을 해석하기 위하여 상용 유한요소프로그램인 DEFORM-3D™을 사용하였다. 유한요소해석결과를 바탕으로 단조에 사용된 소재의 크기를 결정하였으며 이에 따른 단조하중을 예측하였다. 또한, 실제 사용한 Hammer프레스의 단조속도를 해석에 부여하여 단조시 발생하는 metal flow, 단조가열 등이 작업조건을 예측하여 단조 실험시 가이드라인으로 활용하였다.

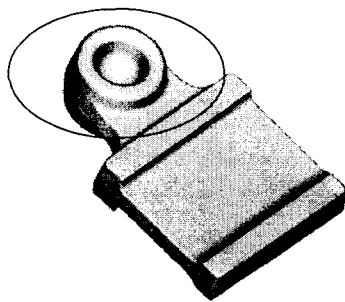


Fig. 1 The proposed configuration of forged model.

Table 1 The geometry of forging stocks and forging direction used in this study

	외관크기	단조방향
압출봉재	Φ 60×140	압출 수직방향
압출형재	102×164×30	압출 방향

3. 실험결과 및 고찰

그림 1에 타원으로 표시한 상단의 원형부위는 모델 시편에서 가장 변형율의 변화가 큰 부분임을 유한요소해석을 통해 확인하였으며 이 부위내의 변형을 및 변형속도를 측정하였다. 평균 변형속도가 30/s정도인 Hammer 프레스를 이용하여 압출봉재를 단조한 후 그림 1의 타원으로 표시한 부분의 macro조직을 관찰하였다. (그림 2(a)) 또한, 단조품을 530℃에서 3시간 용체화처리 후 177℃에서 8시간에 걸쳐 인공시효를 한 결과(T6처리)를 그림 2(b)에 나타내었다. 단조 직후 시편(그림 2(a))에서는 절단면의 중심, 즉 단조시 분할선을 따라서 길게 늘어진 조대한 결정립들이 관찰되나 표면을 제외한 나머지 구역에서는 결정립들이 관찰되지 않고 있다. 이에 반해 T6 열처리를 실시한 후 시편의 전면에 걸쳐 길게 늘어진 결정립들을 관찰할 수 있다. 그림 2에 나타난 시편의 경우 초기 원소재가 8:1의 압출비로 제조된 압출봉재로써 사진의 수평방향이 원소재의 압출방향과 동일하다.

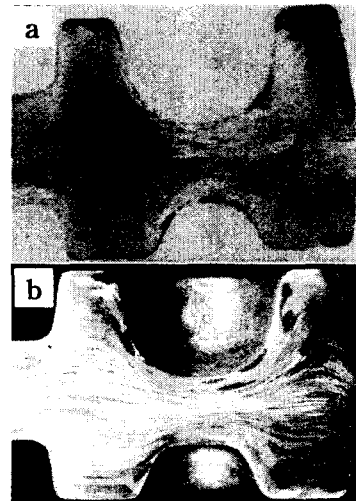


Fig. 2 The Macrostructure of forged model using an extruded Al 6061.

(a) As-forged and (b) T6 treated conditions

그림 3은 그림 2에서 나타낸 부위의 유한요소해석으로 결정한 각 부위별 변형을 및 변형속도를 나타낸 결과이다. 해당 부위 변형율은 0.65~1.45에 이르는 범위를 가지며 변형속도는 약 30/s 정도로 부위별로 차이를 나타내지 않고 있다. 하지만 모서리에 위치한 7~10번들은 시간에 따라 변형속도의 요동이 관찰되었다. 변형량이 가장 큰 부위는 1번이며 압출방향을 따라 위치한 2~6번의 경우 변형속도는 전체 변형동안 일정하였으며 변형량도 1.0~1.4으로 모서리부의 0.8이하에 비해 높은 값을 가지고 있다.

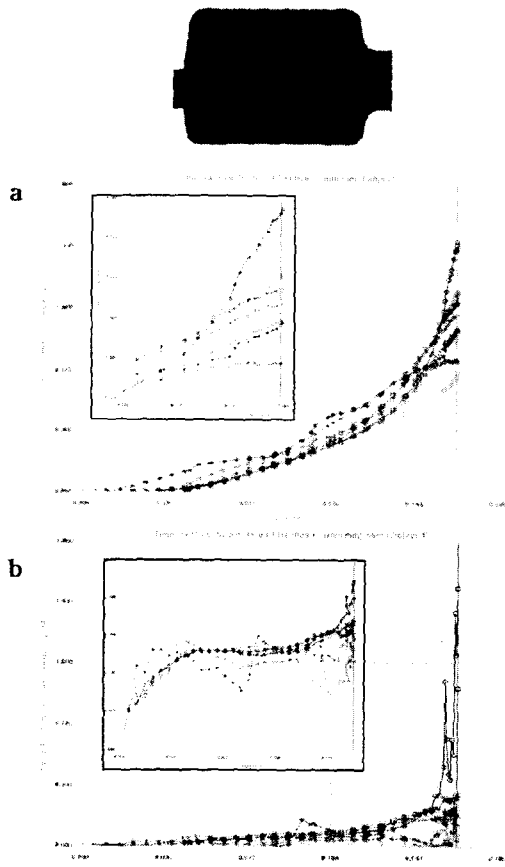


Fig.3 FE analysis results for forged model showing (a) Strain distribution and (b) Strain rate distribution.

유한요소해석 및 실제 단조품 조직을 비교한 결과 압출 Al 6061합금의 Hammer단조시 변형속도가 30/s 이상에서 변형율일 1.0 이상으로 높을 경우 재결정이 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 알루미늄 적층결합에너지가

166mJ/m²으로 다른 금속에 비해 높기 때문에 고온변형시 재결정보다는 회복이 우선적으로 발생하는 것으로 알려져 있다[4]. 일부 조성을 제외한 대부분의 알루미늄 합금도 알루미늄과 동일한 고온변형거동을 나타낸다. 하지만 변형속도가 높을 경우 일정 변형량에 도달하면 climb을 통한 전위의 이동 속도보다 전위밀도 변화속도가 재결정 핵이 발생할 수 있는 수준 이상으로 더 빨리 높아질 수 있다. 단조품의 경우 형상이 결정되면 부위별로 변형량이 일정할 수 없기 때문에 한개 부품내에서 재결정이 발생한 부분과 회복이 발생한 부분에서 기계적 물성의 차이를 예상할 수 있다. 하지만, 단조시편에서 관찰된 높은 변형을 구역에서 조대 결정립들이 형성되는 과정은 명확하게 판정할 수 없었다. 이를 확인하기 위하여 단조조건과 유사한 조건에서 단순 압축시험을 실시하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 금형과 마찰로 인한 변형구속이 발생하는 부위에서는 압출재 조직이 그대로 보존되는 반면 변형이 집중되는 구역에서는 결정립들이 비교적 등방성을 가지며 100~150 μ m 정도의 크기를 가지는 것을 확인하였다. 실제 단조 및 압축시험에서 측정된 변형속도를 고려할 때 등축정의 결정립의 형성은 재결정에 의해 진행된 것으로 판단된다. 각 부위별 물성의 분포를 조사하기 위하여 T6 열처리 후 Rockwell경도 측정을 실시하여 그림 5에 나타내었다. 변형량이 상대적으로 높은 구역에서 경도가 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나 전체 영역에 걸쳐 비슷한 수준의 경도를 보이고 있었다. Al 6061의 주 강화 인자는 미세한 석출물들로서 고온소성변형시 발생한 미세조직이 최종 물성에 미치는 영향은 상대적으로 낮은 수준으로 파악된다. 하지만 그림 4에서 알 수 있듯이 높은 수준의 단조변형량을 얻은 구역에서는 각종 입자들이 입계에 쌓이는 경향을 나타내며 이는 정적인 강도 뿐만 아니라 피로와 같은 동적환경에서 신뢰성을 낮출 수 있는 가능성이 존재한다.

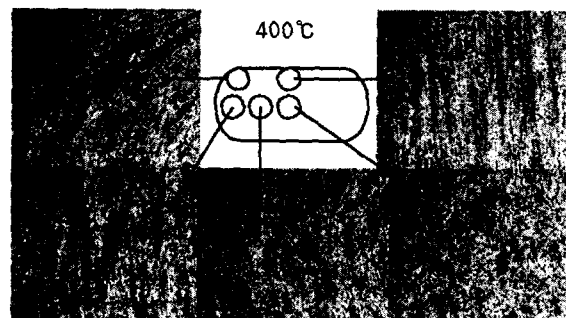


Fig. 4 The microstructural variation of Al 6061 with the compressive stress of 50% at 400°C.

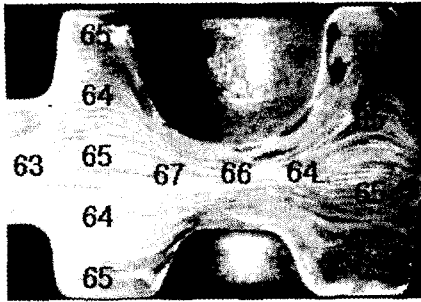


Fig. 5 Hardness Variation across the forged model specimen of the extruded Al 6061.

압출봉재의 경우 압출시 소재에 형성된 변형조직이 단조품에 어떻게 영향을 미치는지를 고찰하기 위하여 압출방향과 동일한 방향으로 단조를 실시하였다. 이를 위하여 본 연구에 사용한 모델품의 크기를 고려하여 특정한 형상을 가진 압출형재를 제조하였다. 단조는 압출봉재와 동일한 조건을 사용하여 모델 단조품을 제조하였다. 그림 6은 압출형재를 이용하여 단조한 시편의 macro조직을 보여주는 결과이다. 오른쪽 상단부에 약간의 미성형이 발생한 것을 관찰할 수 있었는데 이는 실제 단조작업시 금형상에 소재의 위치선정에 문제로 인해 발생한 것으로 판단된다. 유한요소해석을 이용하여 각 부위별 변형을 및 변형률속도를 계산한 결과 위치별 변형률은 압출봉재에 비해 낮은 0.8-1.0수준이며 변형률속도는 압출봉재 단조와 동일한 수준인 30/s임을 확인하였다. 변형률이 높은 구역에서는 상대적으로 미세한 결정립들이 관찰되고 있으며 이 결정립들은 재결정에 의해 생성된 것으로 판단된다. 또한, 변형률이 낮은 구역에서는 초기 압출형재의 압출조직이 고온분위기에 노출됨에 따라 조대하게 성장하는 것을 관찰할 수 있었다. 한편 금형과 접촉하는 표면쪽에서는 상대적으로 미세한 결정립이 형성되고 있다.

이상의 결과에서 Al 6061의 단조시 형상에 따라 부위별 변형을 및 변형률속도의 변화가 발생할 수 있으며 이는 최종 단조품이 물성에 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있었다. 신뢰성이 높은 최종 단조품을 제조하기 위해서는 거시적인 소재의 열간가공성 뿐만 아니라 단조공정시 형상에 따른 변형을 및 변형률속도의 분포를 고려한 공정 설계가 필요하다. 이와 함께 압출재를 단조소재로 사용할 경우 재질의 이방성을 최소화하기 위해서는 최종 단조품의 형상 및 요구 물성을 고려하여 단조 방향의 설정이 필요할 것으로 판단된다. 단조소재로 연주재를 사용할 경우 이방성의 발생은 압출재에 비해 줄어들 것으로 판단된다.



Fig. 6 The Macrostructure of the forged model samples of a shape extruded Al 6061-T6.

4. 결론

본 연구에서는 일정한 형상을 가지는 열간단조시 발생하는 미세조직 형상을 이해하기 위하여 단조모델을 제안하여 유한요소해석과 실제 단조실험을 실시하였다. 복잡한 형상을 가지는 단조품일수록 변형을 및 변형률속도의 분포는 변화하며 이에 따라 결정립크기 및 입자들의 분포가 영향을 받고 있음을 하였다. 또한, Al 6061합금의 Hammer단조시 일정한 변형률을 받은 구역에서는 재결정이 발생할 수 있으며 회복조직만을 얻고자 할 경우 적절한 부품의 형상설계가 요구된다.

후기

본 연구는 과학기술부 차세대 소재성형기술 개발사업단 "3차원 형상 Seamless플랜지류 복합접진 일체화 성형기술"의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) New Vehicle models with Plenty of Aluminum Aluminum, 76, 852 (2000)
- (2) L.F. Mondolfo, Aluminum alloys, Butterworths (1976).
- (3) R. D. Doherty, etc, Mater. Sci. & Eng., A238, 219 (1997)
- (4) John P. Hirth and Jens. Lothe, Theory of Dislocation 2nd Ed., John Wiley & Sons (1982)