

## 압출 및 연주 Al 6061 합금의 열간단조 특성 연구

권용남\*·박정호\*·이영선\*·배명환\*\*·이정환

### The Study on the Hot Forging of a Extruded and Continuously Cast Al 6061

Y.-N. Kwon, J. H. Park, Y. S. Lee, M. H. Bae and J. H. Lee

#### Abstract

Generally, forging process has been known to enhance most of the mechanical properties by developing the continuous metal flow across the forged stocks. However, we have found out that forging of Al 6061 did not always give the enhancement of the mechanical properties but the degradation of the original characteristics, especially for a extruded Al 6061. There are several candidates for the culprit of this unfavorable phenomenon. We have been trying to clear out the cause of the mechanical degradation of the forged a extruded Al 6061. One of the most plausible causes seems to be that the particles containing Mn and/or Cr is coarsened and redistributed preferentially onto grain boundaries due to a repetitive exposure in an elevated temperature condition. On the other hand, a continuously cast Al 6061 did not show any strength degradation after a hot forging under the same process condition with the extruded Al 6061.

**Key Words** : Al 6061, Forging, Tensile Strength

#### 1. 서 론

Al 6061 합금은 다른 합금에 비해 상대적으로 넓은 조성 범위를 가지고 있기 때문에 중강도에서 고강도에 이르기까지 사용 목적에 따라 강도의 맞춤이 가능할 뿐만 아니라 압출성, 냉각민감성(quench sensitivity), 내부식성 등의 물성의 맞춤도 용이한 대표적인 Al-Mg-Si계 합금이다. 현재 알루미늄 합금중 수송, 건축 및 각종 산업에 걸쳐 가장 많이 사용되고 있으며 압출, 압연 및 단조 등의 소성가공을 통해 다양한 형태로 제조되고 있다[1].

최근 북미 완성차 업계들의 통계에 따르면 자동차 한대에 사용되는 평균 알루미늄 합금의 양이 1976년에 40kg에서 1999년 113kg까지 증가하였다[2]. 이러한 경량화에 추세속에서 기존 steel로 제조되던 조향장치는 알루미늄으로 재설계된 모듈이 제안되어 북미, 일본 업계에서는 실제 장착을 하고 있다. 새로운 알루미늄 조향장치의 제조시 가장 유력한 알루미늄 합금은 Al 6061으로 알려져 있다. 하지만 일반적으로 단조공정은 기계적물성의 향상을 가져온다고 알려진 바와 달리 압출 Al 6061 합금의 단조시 원소재에 비해 강도가 낮아지는 현상을 본 연구팀이 확인하였다.

\* 한국기계연구원 공정연구부 소성용융그룹

\*\* (주) CTR 기술연구소 G7팀

이상의 문제를 해결하기 위해서는 Al-Mg-Si계 합금의 강화기구, 고온 소성변형 기구 및 열처리 공정에 대한 이해가 필수적이다. 하지만, Al-Mg-Si계 합금은 최초 개발후 사용된 역사가 70년이 넘었음에도 불구하고 아직까지도 합금원소의 영향까지도 명확하게 규명되어 있지는 않은 실정이다[3]. 특히 Si의 함량에 따른 Mg<sub>2</sub>Si 상의 형성과정 및 분포가 많이 달라지고 있으며 이에 따른 고온변형도 영향을 받을 수 있음을 예상할 수 있다 [4]. 특히, 최적 단조온도로 알려진 400~450℃에서의 단조소재의 미세조직에 관한 연구는 거의 이루어져 있지 않은 상태이다. 본 연구에서는 단조품의 물성 저하 원인의 체계적인 규명을 시도함으로써 보다 높은 기계적 물성을 가지는 단조품을 제조할 수 있는 단조 및 후속 열처리 공정의 최적화를 이루고자 하였다.

## 2. 실험 방법

Al 6061 단조품의 원소재의 차이에 따른 최종 단조품의 물성비교를 위하여 압출비 8:1의 압출봉재와 연주봉재를 본 연구에서 사용하였다. 사용된 합금들은 두레어 메탈(Alcoa Korea로 회사명 변경)에서 제조되었으며 원소재의 지름은 60 mm를 사용하였다.

그림 1은 본 연구에 사용한 Al 6061 압출재 및 연주재의 대표적인 미세조직을 보여주고 있다. 그림 1(a)는 압출봉의 압출 방향을 따라 관찰한 결과로 각종 입자들이 길게 늘어서 있다. 압출방향을 따라서는 결정립들이 명확하게 관찰되지 않았으나 압출방향의 수직면에서 결정립은 약 60 $\mu$ m 정도의 크기를 가지고 있었다. 연주재는 입자들이 특정한 방향성을 가지지 않는 등방성의 조직을 나타내고 있다. 하지만, 수직상정과 같은 주조조직이 관찰되고 있으며 특히, 입계를 따라서 다량의 용결원소들이 분포하고 있음을 알 수 있다.

Al 6061 단조는 알루미늄 조향장치 실제 부품을 고려하여 제안된 모델 금형을 이용하여 실시하였다. 모델 시편의 설계 개념은 부위에 따라 실부품의 제조시 가장 많이 사용되는 단조변형량의 범위내로 두께를 분배하여 변형량에 따른 단조 특성을 정량적인 파악하고자 하였다.

단조 실험을 위하여 표 1에 나타난 바와 같이 문헌상에 보고된 Al 6061합금의 최적 단조온도를 참고로 단조시 소재온도를 400~450℃로 변화시켰으며 금형온도는 160~240℃ 범위에서 실험을 실시하였다. Hammer 단조기를 사용하여 열간단조를 실시하였으며 단조시 평균 변형 속도는 40/s였다. 단조 시편의 특성을 평가하기 위하여 일반적인 광학현미경 관찰을 실시하였으며 인장시

험, 경도측정 및 파면 관찰을 실시하였다.

본 연구에서 사용한 모델품의 단조시험 결과와 비교 목적으로 열간가공모사시험기 ThermoMaster-Z를 사용하여 변형율속도  $\dot{\epsilon} = 8.3 \times 10^{-1}$ , 8.3 및 83.3/s 조건에서 압축시험을 실시한 후 변형후 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다. 이상에서 설정한 변형율속도는 Al 합금의 단조에 사용될 수 있는 유압프레스, 기계식 프레스 및 hammer의 변형율속도 범위를 모두 포함할 수 있는 것으로 향후 실제 알루미늄 단조시 기초적인 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

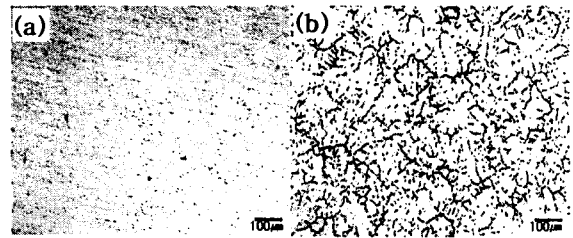


Fig. 1 Optical Micrography of Al 6061 Alloy. (a) Extruded Al 6061 and (b) Cast Al 6061

Table 1 The optimum forging conditions for commercial Al 6061.

	단조온도
Metal Handbook	430~480℃
Handbook of Metal Forging	460~520℃

## 3. 실험결과 및 고찰

압출봉재와 연주봉재를 이용하여 소재온도 400 및 450℃, 금형온도 200℃ 조건에서 Hammer를 사용하여 단조한 후 530℃에서 3시간 용체화처리 및 177℃에서 8시간 시효처리 후 인장시험 결과를 표 2에 나타내었다. 압출재의 경우 단조후 원소재에 비해 항복강도는 72% 이하, 인장강도는 80% 가량 물성의 저하가 발생함을 확인할 수 있었다. 이에 반해 연주재의 경우 단조온도에 관계없이 전반적인 강도 향상을 얻어짐이 확인되었다.

그림 2는 각 단조조건에서 시험한 후 미세조직을 관찰한 결과로 압출재의 경우 100 $\mu$ m 이상의 조대한 결정립이 형성되었음을 관찰할 수 있었다. 연주재의 경우에도 결정립의 크기는 100 $\mu$ m 이상으로 비교적 조대하게 형성됨을 알 수 있었다.

압출재 및 연주재의 단조후 결정립크기가 동일한 수준에 있음에도 불구하고 압출재는 단조후 강도가 저하하

는 반면 연주재는 증가하는 경향으로부터 Al 6061 단조품의 강도에 영향을 미치는 미세조직 인자는 결정립 크기 보다는 다른 지배적인 인자가 존재함을 예상할 수 있다. Al 6061합금은 시효처리시 석출하는 기지와 정합관계를 가지는  $\beta''$  상이나 semi-coherent 관계를 가지는  $\beta'$  상에 의한 강화효과를 얻을 수 있다. 현재 대부분의 연구자들이 동의하고 있는 Al-Mg-Si계 합금의 석출거동은 Si atoms cluster  $\rightarrow$  GP zone  $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 의 순서로 진행되나 각 상의 석출거동에 대한 kinetics 및 상의 구조에 대해서는 현재까지도 많은 논란이 있는 상태이다. 이상의 결과를 종합하면 원소재의 변화에 따라 단조품의 열처리시 석출거동에 차이가 발생할 수가 있음이 예상된다.

Table 2 Tensile Properties of forged Al 6061

(a) 압출봉재

단조온도	YS(MPa)	TS(MPa)	elong.(%)
원소재	362	400	15.6
400°C	263	313	17.3
450°C	222	279	18.2

(b) 연주봉재

단조온도	YS(MPa)	TS(MPa)	elong.(%)
원소재	227	293	11.8
400°C	255	304	17.8
450°C	251	307	17.9

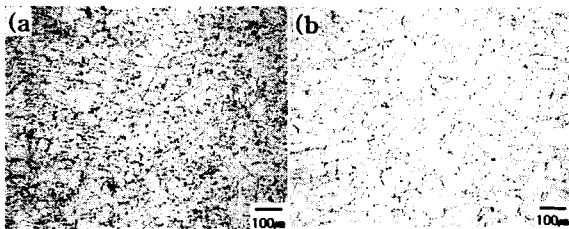


Fig. 2 Optical Micrography of forged Al 6061 Alloy. (a) Extruded and forged at 400°C and (b) Cast and forged at 400°C

그림 3은 인장시험후 파면을 관찰한 결과이다. 압출봉 원소재의 경우 파면 전체에 걸쳐 dimple들이 비교적 균일한 크기를 가지고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 압출재 단조품의 경우 dimple의 크기가 위치에 따른 차이가 관찰되었으며 조대한 dimple들을 연결할 경우 결정립 크기와 유사한 크기를 가지고 있음을 알 수 있다. 즉, 압출을 통해 제조된 Al 6061합금의 단조품을 T6 열처리할

경우 입계를 따라서 조대한 석출물들이 발생하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 연주재의 파면의 경우 단조방향에 수직 방향으로 결정립들이 늘어나는 경향은 관찰되나 dimple의 크기는 크게 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 이상의 결과를 정리하면 압출 Al 6061의 경우 원소재는 dimple들의 크기 및 분포가 단조품에 비해 상대적으로 균일하며 이는 단조시 소성가공의 영향으로 석출거동이 영향을 받고 있다고 판단할 수 있다.

Al 6061 합금의 경우 177°C 부근에서 실시하는 인공 시효시 기지와 semi-coherent한 관계를 가지고 생성되는  $\beta'$  상이 주 강화상으로 알려져 있다. 시효시 최대의 강도를 얻기 위해서는 석출물을 구성하는 Mg 및 Si 원소들이 기지내에 완전히 용해되어 있어야 한다. 하지만, 용체화처리 후 급냉시 Mn이나 Cr를 포함한 분산입자들의 표면은 Mg 및 Si 원자들의 석출에 유리한 낮은 계면 에너지를 제공하기 때문에 Mn 및 Cr를 함유한 분산입자 표면에 부정합 석출물들이 석출하여 기지내 용질원소의 농도를 낮추며 결과적으로 시효처리시 강도 향상에 한계를 가져오게 된다. 기타 알루미늄 합금에 비해서 Al 6061합금은 비교적 높은 수준의 냉각감수성(quench sensitivity)을 가지며 Mn 및 Cr의 함유량이 증가할수록 더욱더 시효강화효과를 얻기 어려워진다. Mn 및 Cr 함유 입자들은 주로 주조시 생성되어 용체화처리시에도 재용해되지 않으며 고온 분위기에서는 원자들의 확산속도가 증가하기 때문에 입자성장이 발생한다. 본 연구에서 관찰한 압출재 단조품의 강도 저하는 압출, 단조 공정을 통과함으로써 Al 6061합금내에 분산입자들의 크기 및 분포의 변화에 따라 기지내 고용된 용질원소의 농도가 낮아짐에 따라 시효처리시 Al 6061합금이 가지는 최대강도를 얻을 수 있는 석출반응이 불가능해져 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 단조시 결정립계를 따라 분포하는 Mn 및 Cr 입자들 표면에 Mg 및 Si등이 조대하게 석출함으로써 시효시 기지에 균일하게 분포하여야 할  $\beta'$  상의 형성에 한계가 발생하며 또한, 결정립계에 조대한 입자들은 변형시 응력집중처로 작용하여 조기 파단을 유도하게 된다. Mn 및 Cr입자들이 고온소성가공을 받지 않은 연주재의 경우 압출재의 경우와 같은 강도 저하가 발생하지 않은 것은 분산입자들이 압출재에 비해 상대적으로 열적분위기에 노출되는 시간이 짧아 초기 주조시 크기를 유지할 뿐만 아니라 압출에 의해 특정한 방향으로 배치가 발생하지 않기 때문으로 판단된다.

그림 4는 압출재 Al 6061을 변형율속도를 변화시키면서 압축시험을 실시한 후 변형 시편의 각 부위의 미세조직을 관찰한 결과이다. 변형율속도가 증가함에 따라 변형

중 재결정의 양상을 확인할 수 있다. 또한, 변형량이 낮은 외곽 부분의 경우 원소재에서 관찰되는 것과 동일하게 압출방향으로 늘어선 입자들을 관찰할 수 있으나 변형량이 큰 중심부에서는 입자들이 분포가 뭉쳐지고 있음을 관찰할 수 있다. 이상의 압축시험 결과 압출 Al 6061 이 동적 혹은 정적인 재결정 및 결정립 성장이 시편내 부위에 따른 변형을 및 변형율속도에 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었으며 실제 단조시에도 유사한 미세조직 형성과정을 확인할 수 있었다.

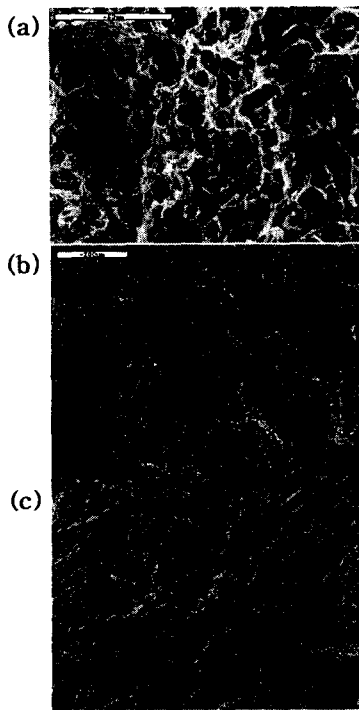


Fig. 3 The fractography of Al 6061.  
(a) Extruded stock, (b) Extruded and Forged at 400°C and (c) Cast and Forged at 400°C

#### 4. 결론

본 연구에서는 Al 6061의 단조시 압출재의 경우 강도의 저하가 발생하는 반면 연주재의 경우 강도가 향상되는 결과를 금속학적 측면에서 고찰하였다. 압출재 Al 6061의 단조시 분산입자들의 분포 및 크기에 변화가 발생하며 이에 따라 T6 처리시 시효능에 변화가 발생하여 강도가 현저히 감소하는 것으로 판단된다. 이에 따라 열간단조 직전 상태의 미세조직 형성 및 이의 제어가 단조

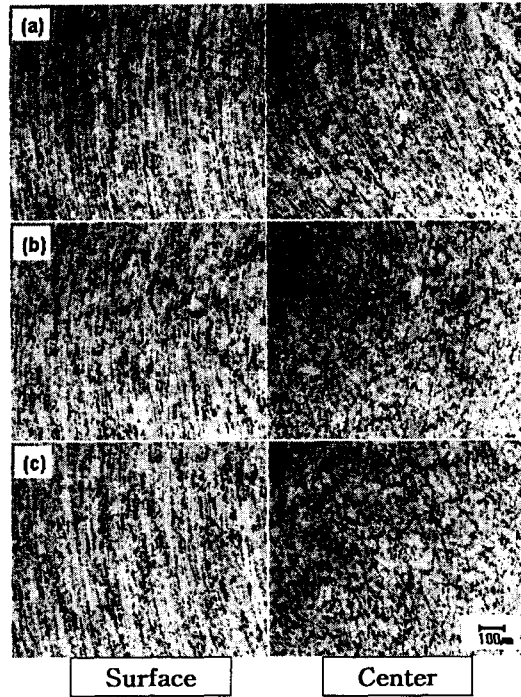


Fig. 4 The microstructures of compressed specimen with the strain rate of (a)  $8.3 \times 10^{-1}/s$ , (b)  $8.3/s$  and (c)  $83.3/s$ .

공정 제어에 필수적인 공정변수임을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 경상남도 지역특화 MK 21 사업, "경량소재 Fusion 성형기술개발"의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) L.F. Mondolfo, Aluminum alloys, Butterworths (1976)
- (2) Aluminum, The Corrosion Resistant Automotive Material, The Aluminum Association Inc. (2001)
- (3) R. D. Doherty, etc, Mater. Sci. & Eng., A238, 219 (1997)
- (4) N. Murayama, etc., Scripta. Mater., 36, 89 (1997)