

## 연속주조 Al6061 합금의 열처리에 따른 소성변형거동

박정호\* · 권용남\* · 이영선\* · 이정환\*

### Plastic Deformation Behavior of Al6061 depending on Heat Treatment Condition

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

#### Abstract

In the recent years, lightweight components fabricated with aluminum alloys have been applied into building the automobiles. Among the several competing fabrication methods, hot forging is taken as the most reliable technique to produce suspension parts such as control arms. Generally, Al forging products have been used widely for the aircraft building with the extruded stock as a starting material. For the economical base, however, the cast stocks turn to be as the forging stocks recently after a continuously casting technique was developed to produce quite a uniform microstructure enough to use for the forging process. Even more, there is a tendency to omit the homogenization step before forging, which is considered to be an indispensable process for all kinds of Al alloy. In the present study, a series of compression test was carried out to find out how the cast structure and the following heat treatments influence the deformation behavior, that is, forging characteristic.

**Key Words** : Al6061, Heat Treatment, Homogenization, Annealing, Plastic Deformation, Forging

#### 1. 서론

자동차 경량화의 요구가 높아짐에 따라 알루미늄 합금의 적용은 크게 증가하는 추세이다. 일본, 유럽, 미국 자동차사들의 경우 조향 부품인 컨트롤 암을 비롯하여 차체 프레임에 이르기까지 다수의 알루미늄 부품을 상용차에 이미 적용한 상태이다. 이에 반해 국내 자동차사의 경우 아직까지 본격적으로 알루미늄 조향 부품을 적용하고 있지 않지만 외국 자동차사들과의 경쟁을 위해 현재 광범위한 연구가 진행되고 있는 것으로 알려져 있다.

대표적인 조향 부품중 하나인 컨트롤 암의 제조에는 현재 주조, 단조법이 사용되고 있다. 특히, 단조법의 경우 주조법에 비해 높은 부품 신뢰도를 얻을 수 있기 때문에 점점 더 많은 자동차 모델이 알루미늄 단조 컨트롤 암을 채택하고 있는 추세이다. 이러한 알루미늄 부품을 자동차에 적용할 때 기존 철강소재를 대체하여 얻어지는 경량화 효과 뿐만 아니라 부품의 기능 및 제조가격에 대해서도 많은 고려가 있어야 한다. 자동차 부품 제조 산업은 전통적으로 가격 경쟁이 품질에 못지 않게 중요한 기술적인 목표로 설정되는 기술 분야라는 특징을 가진다.

\* 한국기계연구원 공정연구부

전통적으로 알루미늄 열간단조품은 항공기 부품의 제조에 많이 적용되어 왔다. 단조용 원소재로는 열간압출재나 부품의 형상에 따라 압연 후판을 이용하였다. 자동차용 알루미늄 단조품의 경우에도 개발 초기에는 단조용 원소재로 열간 압출재를 사용하는 경우가 대부분이었다. 하지만, DC(Direct Chill) 주조법을 대신하여 Air slip 방식의 연속주조기술이 개발된 이후 기존 압출재나 압연재를 대신하여 연속주조재를 단조용 소재로 사용하는 기술이 개발되고 있다. Air slip 방식의 연속주조기술로는 직경이 100mm 이하의 봉재의 경우 표면에서 수 mm 정도의 표피부를 제외하고는 전체적으로 매우 균일한 미세조직을 얻을 수 있어 단조용 소재로 적합하다고 판단된다. 최근에 일부 알루미늄 합금 제조사는 주조 후 실시하는 균질화처리(homogenization treatment)까지도 생략하고 530°C 이상의 고온에서 열간단조를 실시하여 생산비를 줄일 수 있는 새로운 공법을 제안하고 있다.

본 연구에서는 자동차 조향부품 소재로 적용되고 있는 연속주조 Al6061 합금의 미세조직 상태에 따른 고온소성변형거동을 고찰함으로써 연속주조 합금을 이용한 단조공정제어의 기초데이터를 확보하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용한 합금은 Air-Slip 방식의 연속주조법을 이용하여 제조하였으며 화학조성은 표 1에 나타내었다. 미세조직상태에 따른 소성변형거동을 비교하기 위하여 표 2에 나타낸 조건으로 열처리를 실시하여 연속주조, 균질화처리 및 소둔상태의 시편을 준비하였다. 일반적으로 균질화처리후 냉각 조건에 따라  $Mg_2Si$  석출물의 크기가 변화하며 이에 따라 기계적 물성의 차이가 발생한다. 본 연구에서는 공냉을 실시하여  $Mg_2Si$  상 석출물 크기를 상대적으로 미세하게 제어하였다. 일반적으로 Al 합금의 냉간 소성가공시 변형력을 최소화하기 위하여 용질원소를 조대한 입자로 기지내에 석출시키는 소둔처리를 실시한다. Al6061 합금의 경우 CCT(continuous cooling transformation) 곡선상의  $Mg_2Si$  상의 nose에 해당하는 415°C에서 3시간 열처리를 실시한 후 노냉을 실시하였다. 그림 1에 주조, 균질화처리 및 소둔 상태의 조직상태 및 경도를 나타내었다. Fig. 1(a)의 경우 결정

립계를 따라 용질원소들이 편석되어 있는 전형적인 주조조직을 나타내고 있다. 이에 반해 균질화처리 및 소둔조직의 경우 주조조직에서 결정립계에 쌓여 있던 Mg, Si 등의 용질원소들이 석출상태로 존재함을 알 수 있다. 주조조직의 경우 균질화처리 혹은 소둔조건에 비해 용질원소들이 기지내에 고용되어 상대적으로 높은 경도를 나타내고 있음을 알 수 있으며 415°C에서 소둔을 실시한 경우 가장 낮은 경도를 나타냄을 확인하였다.

Table 1. Chemical compositions of Al 6061 used in the present study(wt.%).

Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Cr	Al
1.06	0.73	0.27	0.38	0.14	0.15	Bal.

Table 2. Homogenization and annealing conditions used in this study.

Homogenization	10hrs at 570°C → Air Cooling
Annealing	10hrs at 570°C → Air Cooling → 3hrs at 415°C → Furnace Cooling

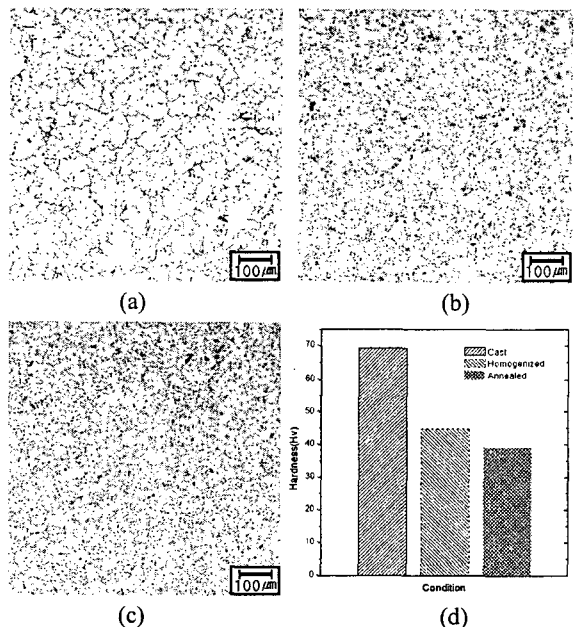


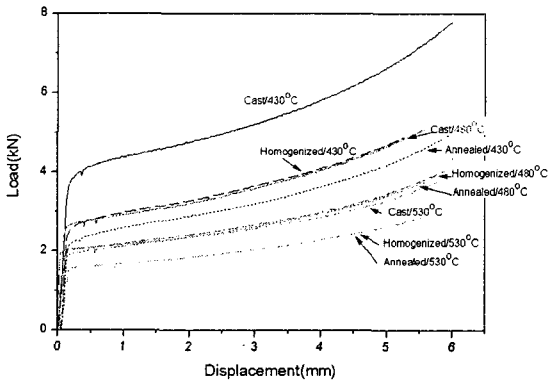
Fig. 1 Microstructure of (a) as-cast, (b) homogenized, (c) annealed Al 6061 and (d) Vickers hardness.

압축시험에 사용한 시편은 직경 10mm, 높이 12mm의 크기를 가지며 윤활제로 흑연분말을 사용하였다. 압축시험은 430 ~ 530°C 온도범위에서 초

기 변형율속도,  $\dot{\epsilon} = 0.05/s$  의 조건으로 평균 50% 압하율까지 시험을 실시하였다. 시편의 가열시간은 목표 온도 도달 후 10 분으로 고정하였다. 열간단조시 가열시간의 변화에 따른 변형거동의 영향을 평가하기 위하여 500°C 에서 각각 30 분 및 90 분 소둔한 후 압축시험을 실시하였다. 압축시험후 시편은 530°C 에서 1 시간 용체화처리 후 170°C 에서 8 시간 동안 시효처리를 하여 미세조직 및 경도를 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 2 는 주조, 균질화 및 소둔상태의 시편을 430~530°C 의 온도범위에서 50°C 간격으로 압축시험한 결과를 나타내고 있다. 전 온도조건에서 주조재가 균질화처리 및 소둔시편에 비해 높은 하중값을 나타내고 있음을 확인하였다. 주조조직은 균질화처리나 소둔시편에 비해 용질원소들이 결정립계에 편석되는 등 상대적으로 불균일한 미세조직을 가지고 있어서 결정립계 강화효과등이 나타나는 것으로 판단된다.

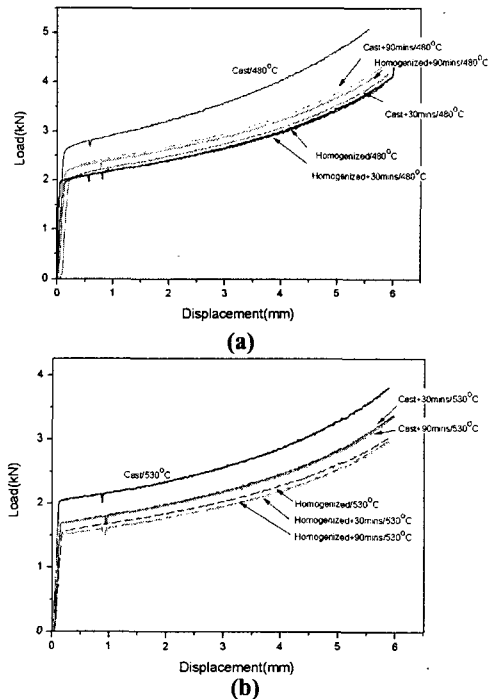


**Fig. 2 Load-Displacement curves of as-cast, homogenized and annealed Al 6061 in the temperature range of 430~530°C.**

430°C 에서는 균질화처리 조건과 소둔처리 시편의 변형하중이 차이를 보이는데 반해 온도가 높아짐에 따라 균질화처리 및 소둔처리 시편사이의 변형하중 차는 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 변형온도가 Al6061 의 용체화처리 온도에 근접함에 따라 용질원소들이 석출상태에서 고용상태에 존재하기 때문에 서로 유사한 미

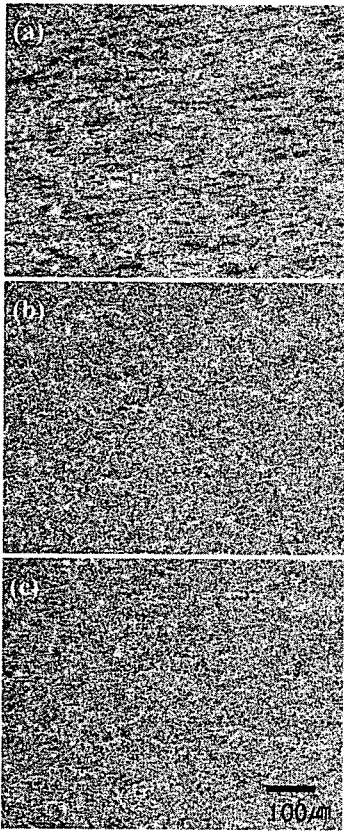
세조직을 가지기 때문이다. 이에 반해 주조상태의 경우 용질원소들의 편석 정도가 심해 균질화처리나 소둔상태에 유사한 조직을 형성하기에 필요한 확산시간이 짧아 상이한 거동을 나타낸다.

열간단조시 가열시간의 영향을 평가하기 위하여 500°C 에서 30 분 및 90 분 열처리한 후 480°C 및 530°C 에서 주조 및 균질화처리 시편의 압축시험 결과를 그림 3 에 나타내었다. 480°C 조건인 경우 소둔시간이 30 분인 열처리한 경우에 비해 90 분 열처리를 실시한 경우 변형하중이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이에 반해 그림 3(b)에 나타난 530°C 조건의 경우 열처리 시간에 따른 변형하중의 차이가 나타나지 않음을 관찰할 수 있었다. 용체화처리 온도에서 용질원소의 고용량이 증가할수록 변형하중의 증가가 발생하는 것으로 해석된다. 즉, 알루미늄합금의 열간단조온도가 용체화처리 온도에 가까울수록 재료는 고용상태에서 변형이 이루어져 석출이 활발한 400°C 전후에서 단조를 실시한 경우와 상이한 단조조직을 형성할 것으로 판단된다.



**Fig. 3 Load-Displacement curves of as-cast and homogenized Al 6061 at (a) 480°C and (b) 530°C after annealing for 30 and 90 mins at 500°C.**

그림 4는 압축 시편을 T6(530°C, 1시간→170°C, 8시간) 처리한 후 미세조직을 관찰한 결과를 나타내고 있다. 주조재의 경우 결정립계를 따라서 석출상들이 관찰되는 반면 균질화처리나 소둔조건의 경우 결정립계가 밝게 부식된 것을 관찰할 수 있는데 이는 용체화처리지 결정립계에 존재하던 용질원소들이 조대한 입자로 석출하여 결정립계에 용질원소 농도가 낮아져 발생한 것으로 판단된다. T6 처리후 경도값은 압축시험조건의 변화에 관계없이 66HRB 정도의 값을 가지는 것으로 측정되었다.



**Fig. 4** Microstructure after T6 treatment of Al 6061 compressed to 50% at 530°C with (a) cast, (b) homogenized and (c) annealed conditions.

#### 4. 결론

Al6061 합금의 열간단조에 미치는 열처리의 영향을 고찰하기 위하여 430~530°C의 온도범위에서 압축시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 주조상태의 합금은 Al6061의 단조온도로 알려진 430~530°C의 온도범위에서 균질화처리나 소둔 상태 합금에 비해 높은 변형하중을 가짐을 알 수 있었다. 이는 결정립계등에 편석된 용질원소에 기인하는 것으로 판단된다.

(2) Al6061 합금의 용체화처리 온도인 500°C 이상의 온도에서 변형은 고용상태에서 이루어지며 이 때 변형하중은 고용정도가 높아질수록 증가하다가 완전고용이 이루어지면 일정한 값을 가지는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 부품소재기술개발사업 “6000계 알루미늄 제어단조소재 개발”의 연구비 지원으로 수행된 결과로써 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) R. C. Dorward and C. Bouvier, 1998, “A rationalization of factors affecting strength, ductility and toughness of AA6061-type Al-Mg-Si-(Cu) alloys”, Mater. Sci. & Eng. A254, p.33.
- (2) F. J. Humphreys and M. Matherly, 1995, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Pergamon.
- (3) 김재성, 1999, “고강도 알루미늄 단조기술 개발”, 한국소성가공학회 단조심포지엄, p.99.
- (4) 김성일, 1998, “Al 6061 합금의 고온 소성변형 조건에 관한 연구”, 98춘계학술대회논문집, p.76-79
- (5) S. Esmaili, etc., 2001, “The deformation behaviour of AA6111 as a function of temperature and precipitation state”, Mater. Sci. & Eng. A319, p. 461.
- (6) H. J. McQueen, etc., 2001, “Solution and precipitation effects on hot workability of 6201 alloy”, Mater. Sci. & Eng. A319, p. 420.