

Al 6061-T6 단조 성형품의 기계적 특성

박철 · 김상식[†] · 권용남* · 이영선* · 이정환*

경상대학교 재료공학부, 공학연구원 진주
*한국기계연구원 재료기술부 창원

Mechanical Properties of Hot-forged Al 6061-T6

C. Park, S. S. Kim[†], Y. N. Kwon*, Y. S. Lee* and J. H. Lee*

Division of Materials Science and Engineering, Engineering Research Institute,
Gyeongsang National University, Chinju, Korea

*Materials Engineering Department, Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon, Korea

(2003년 5월 26일 받음, 2003년 6월 13일 최종수정본 받음)

Abstract The effect of forging parameters, including different forging stock, strain rate and strain, on the mechanical properties of hot-forged Al 6061-T6 was investigated. The forging was conducted using either hydraulic press, crank press or hammer press, respectively, at a forging temperature of 400°C. When using an extruded bar as a forging stock, the tensile strength was lower for the specimens prepared by hammer forging than those by crank press forging. It was found that the coarsening of recrystallized grain was responsible for the decrease in tensile strength with hammer forging. Systematic studies on the effects of strain and strain rate on the tensile properties of hot-forged Al 6061-T6 products using extruded bar as a forging stock further suggested that the coarsening of recrystallized grains and Mg₂Si precipitates complexed the observed trends in the tensile behavior. In case of hot forging with continuous cast bar as a forging stock, on the other hand, the mechanical properties of the specimen were largely improved with hammer press compared to those with crank press, which appeared to be due to the homogenization of microstructure.

Key words Hot-forging, Al 6061-T6, strain rate, strain, recrystallization

1. 서론

최근 지구 환경문제에 의한 에너지 절감이 관심을 끌면서 자동차 부품의 경량화 문제가 크게 대두되고 있다. 자동차 경량화를 위하여 현재 널리 사용되고 있는 철계 소재를 대체할 만한 재료로서 알루미늄계 합금의 자동차 부품에의 적용이 큰 관심을 모으고 있다.¹⁻³⁾ 알루미늄 합금은 기계적 성질, 성형성, 내구한도 및 재활용성 등에서 다른 경량 재료와 비교하여 그 우수성을 인정받고 있어 자동차 산업에의 적용이 큰 폭으로 증가하고 있다. 실제로 1990년대 이후부터 차체부품과 조향 및 현가장치와 같은 구동제어 및 새시부품에 알루미늄 합금을 이용한 주물이나 단조품이 빠르게 적용되고 있다. 특히 알루미늄 단조용 소재로서 강도, 인성 및 피로강도 등의 기계적 특성과 내식성 등이 우수한 Al-Mg-Si계 6061 합금 압출재가 현재 널리 사용되고 있다. 그러나 알루미늄 합금을 이용한 열간 단조 시에 온도(T), 변형률(ϵ), 변형률 속도($\dot{\epsilon}$), 응력(σ) 등의 공정변수가 적절히 조합되지 않으면 기계적 특성이 급격히 저하될 수 있다.^{4,7)} 즉 고온 변형 시 공정변수에 따라 재결정 및 결정립 성장 등에

의한 미세조직, 석출상의 크기 및 분포가 결정되고, 이는 다시 단조 성형품의 최종 물성에 큰 영향을 미치게 된다.⁸⁻¹²⁾ 지금까지 Al 6061 합금 단조품이 산업 전반에 널리 사용되고는 있음에도 불구하고 변형률이나 변형률 속도 등이 열간 단조품의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향에 관한 체계적 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 변형률의 차이와 가공속도가 다른 프레스(예: 유압 프레스, 크랭크 프레스 및 해머 프레스)를 사용할 때 발생하는 변형률 속도의 차이가 Al 6061 합금 압출봉재를 이용하여 열간 단조한 시편의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 관찰하고자 한다. 한편 원소재에 따른 공정변수의 효과를 알아보기 위하여 Al 6061 합금 연주봉재를 사용하여 열간 단조한 성형품의 미세조직 및 기계적 특성을 비교하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 8:1의 압출비로 성형된 60 mm 직경의 Al 6061 합금 압출봉재를 사용하여 해머와 기계식 크랭크 프레스를 이용하여 Fig. 1에서 보는 바와 같은 형상의 성형품을 열간 단조하였다. 열간 단조는 각각 소재온도를 400°C, 금형온도를 300°C로 예열하여 실시하였다.

[†]E-Mail: Sang@nongae.gsnu.ac.kr

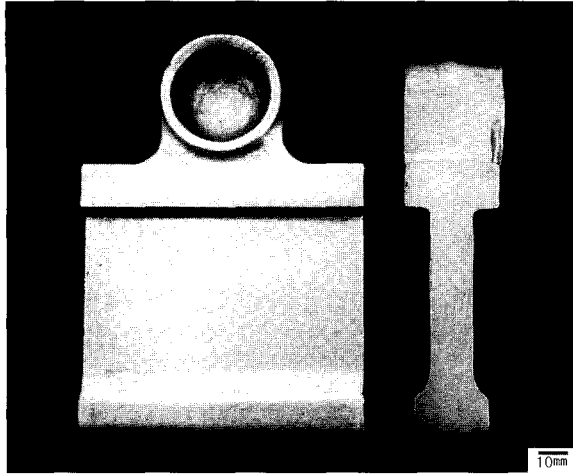


Fig. 1. Photograph of hot-forged Al 6061-T6 product in the present study.

한편 변형률과 변형률 속도가 인장특성에 미치는 영향을 체계적으로 연구하기 위하여 변형률을 각각 0.5와 0.8로 제어하면서, 각각 해머, 크랭크 프레스 그리고 유압 프레스로 변형률 속도를 체계적으로 변화시켜 열간 단조를 실시하였다. Table 1은 각 프레스의 가공 속도를 나타내고 있다. 이 때 단조 형상은 Fig. 1과 달리 정확한 변형률 제어를 위해 단순히 봉재를 판상 형태로 옆세팅 성형하였다. 열간 단조 온도는 해머와 크랭크 프레스의 경우는 전술한 조건과 동일하게 제어하였으며, 유압 프레스의 경우는 작업속도를 감안하여 소재와 금형을 동일하게 400°C로 예열하여 성형하였다. 열간 단조 후 시편은 동일하게 530°C에서 2시간 용체화처리한 후 176°C에서 8시간 시효처리한 T6 열처리를 행하였다. 한편 원소재에 따른 공정 변수의 영향을 알아보기 위해 127 mm 직경의 6061 합금 연주봉재를 이용하여 Fig. 1의 형상으로 각각 크랭크와 해머를 이용하여 열간 단조하였다. 이 때 단조 조건과 열처리 조건은 압출봉재와 동일하게 유지하였다. 본 연구에서 사용한 여러 가지 단조 공정 변수를

Table 1. Forging rates for the presses used in the present study.

Type of press	Hydraulic	Crank	Hammer
Forging rate (mm/sec)	0.025~2.5	300	600~1,000

Table 2. Summary of forging parameters used in the present study.

Forging stock	Diameter(mm)	Forging shape	Strain	Strain rate (/sec)	Type of press used
Extruded bar	60	Fig. 1	1.1~2.2	50~2646	Hammer, Crank
		Upsetting	0.5	0.002, 0.15, 7, 18	Hammer, Crank, Hydraulic
		Upsetting	0.8	0.0045, 0.4, 17, 45	Hammer, Crank, Hydraulic
Continuous cast bar	127	Fig. 1	0.6~1.3	6~170	Hammer, Crank

Table 3. Chemical composition of Al 6061 alloy in weight percent.

Cu	Cr	Mg	Fe	Si	Mn	Al
0.15~0.40	0.04~0.35	0.8~1.2	≤0.7	0.40~0.8	≤0.15	Bal.

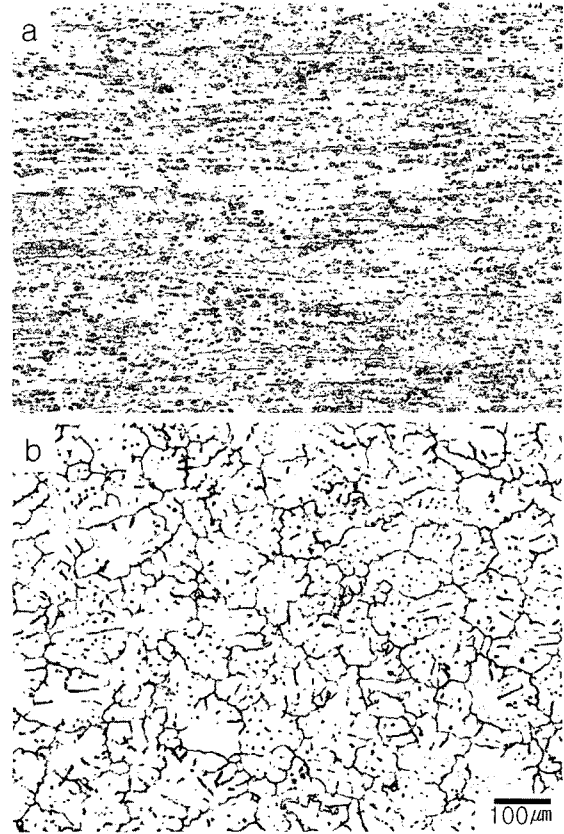


Fig. 2. Optical micrographs of Al 6061 in the form of (a) extruded bar and (b) continuous cast bar, respectively.

Table 2에 정리하였다.

Table 3과 Fig. 2는 각각 Al 6061 합금의 조성과 본 연구에서 사용한 (a) 압출봉재와 (b) 연주봉재 원소재의 광학현미경 미세조직 사진을 보여주고 있다. 압출봉재의 경우, 수지상 조직은 압출 과정에서 파괴되고 압출방향으로 미세한 Mg₂Si상들만이 관찰되고 있다. 연주봉재의 경우 주조조직에서 볼 수 있는 80 µm 크기의 전형적인 수지상 조직을 관찰할 수 있다. 미세조직은 1%의 불산 용액을 사용하여 시편을 부식시킨 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 인장특성 측정을 위하여 표점거리 20 mm, 직경 4 mm의 봉상 인장시편을 채취하여 제작한 후 INSTRON 재료시험기 모델 8872를 이용하여 1×10⁻³/sec의 변형률 속도로 인장시험을 행하였다. 인장시험 후

파단면과 석출상을 주사현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 충격 시험은 하중 6 kg의 충격시험기를 이용하여 행하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 4는 Al 6061 압출봉재를 Fig. 1의 형상으로 열간 단조한 시험편의 인장 및 충격 특성을 보여주고 있다. 비교를 위해 열처리한 원소재의 기계적 특성도 함께 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 열간 단조된 시험편의 인장 특성이 단순히 T6 열처리된 시험편의 인장 특성에 비해 월등히 감소되어 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 단조에 의해 기계적 특성이 증가한다는 일반적인 믿음과는 매우 상반된 현상임을 알 수 있다. 또한 변형률 속도가 높은 해머 단조품이 크랭크 단조품에 비해 강도는 감소하고 연성과 충격흡수에너지는 다소 증가하였음을 알 수 있다.

이러한 기계적 특성의 변화 원인을 살펴보고자, 각 단조품의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였다. Fig. 3은 Al 6061 압출봉재를 각각 (a) 크랭크와 (b) 해머 프레스로 단조한 후 T6 열처리한 시험편의 광학현미경 미세조직 사진을 보여주고 있다. Al 6061 압출 봉재를 열간 단조하였을 경우, 재결정에 의한 결정립이 관찰되었다. 한편 크랭크 프레스로 단조하였을 경우에는 크기가 약 90 μm 내외의 결정립 들이 관찰되는 데 반해, 해머 단조품에서는 결정립의 크기가 120에서 160 μm 내외로 조대화되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 재결정과 결정립 조대화는 강도의 감소 등을 포함한 기계적 특성에 큰 영향을 끼칠 것으로 판단된다.

지금까지 Table 4와 Fig. 3을 통해 Al 6061 합금 압출봉재의 경우, 열간 단조시 변형률 속도의 차이가 재결정과 결정립 조대화 현상에 영향을 미쳐 이로 인해 기계적 특성이 변화할 수 있음을 관찰할 수 있었다. 실제로 재결정을 일으키는데 필요한 에너지는 결정립 성장에 필요한 에너지보다 높으므로,¹³⁾ 재결정이 일어나는 공정 조건에서는 재결정 이후 급속한 결정립 조대화가 일어나 기계적 특성을 감소시킬 수 있는 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 압출봉재의 열간 단조시 공정변수와 미세조직의 변화 그리고 이에 따른 인장 특성의 변화를 좀더 체계적으로 관찰하고자, 각각 변형률 0.5와 0.8에서 변형률 속도를 유압식 프레스, 크랭크 프레스 및 해머를 이용하여 0.002/sec에서 45/sec까지 변화시켜 이에 따른 재결정 및 결정립 성장과 인장특성간의 관계를 관찰하였다. Fig. 4와 Table 5는 Al 6061 압출봉재를 이용하여 열간

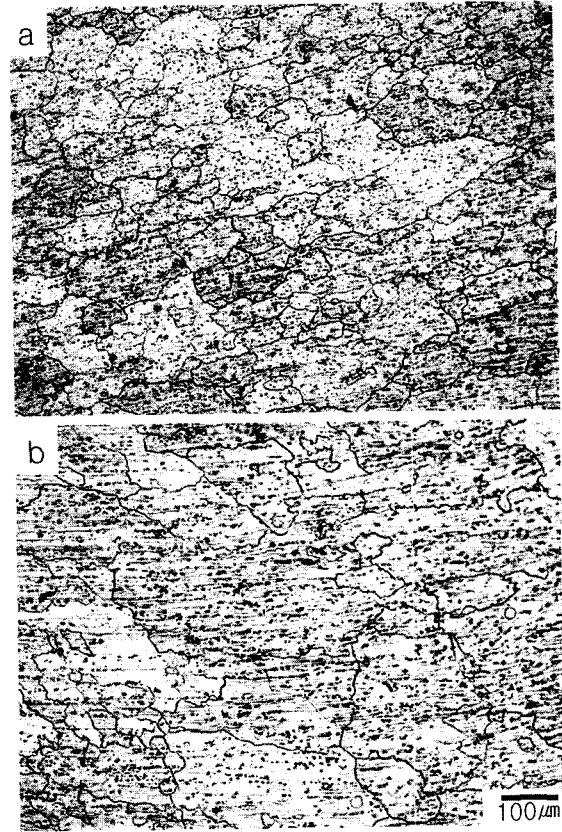


Fig. 3. Optical micrographs of as-forged Al 6061-T6 extruded bar forged with (a) crank press or (b) hammer press, respectively.

단조한 성형품의 변형률 및 변형률 속도에 따른 미세조직과 인장 특성 및 평균 결정립 크기를 나타내고 있다. 이 때 변형률 속도는 전산모사해석을 이용하여 계산하였다. 본 그림과 표를 통해 변형률 속도와 변형률이 변함에 따라 Al 6061 압출봉재 열간 단조품의 미세조직과 인장 특성이 매우 큰 폭으로 변화될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 압출봉재를 원소재로 사용하여 옆세팅 단조할 경우 변형률 속도가 증가할수록 강도 및 연신률이 동시에 감소할 수 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 상대적으로 형상이 복잡한 단조품의 인장 특성을 나타낸 Table 4의 경향과 유사하였다. 결정립의 크기 또한 변형률 속도가 증가하면서 크게 증가된 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 변형률 속도에 따른 결정립의 크기 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 본 그림을 통해 유사한 변형률 속도에서는 낮은 변형률에서 더욱 결정립이 조대화되는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 재결정은 변형률이 높을수록 저장 에너지가 크므로 인해 더욱 조장될 수 있

Table 4. Tensile and impact properties of hot-forged Al 6061-T6 product using an extruded bar as a forging stock.

Type of press	YS (MPa)	UTS (MPa)	Tensile elongation (%)	Impact energy (J/cm ²)
As-received + T6	363	400	16.0	-
Crank	232	263	18.9	30.0
Hammer	205	255	22.1	32.7

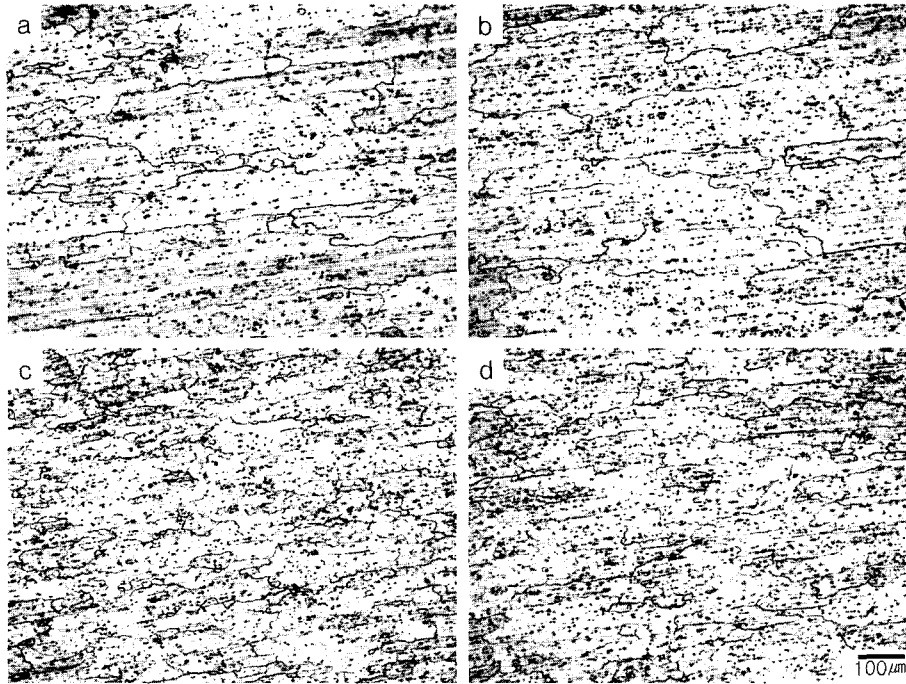


Fig. 4. Representative optical micrographs of as-forged Al 6061-T6 extruded bar with different strain and strain rates: (a) $\epsilon = 0.5$, $\dot{\epsilon} = 0.002/\text{sec}$, (b) $\epsilon = 0.5$, $\dot{\epsilon} = 0.15/\text{sec}$, (c) $\epsilon = 0.8$, $\dot{\epsilon} = 0.0045/\text{sec}$ and (d) $\epsilon = 0.8$, $\dot{\epsilon} = 0.4/\text{sec}$.

Table 5. Tensile properties and average grain sizes of hot-forged Al 6061-T6 with different strain and strain rates.

Strain rate (/sec)	Strain	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Average grain size (μm)
0.002	0.5	274	339	14.1	400
0.0045	0.8	273	337	16.5	40
0.15	0.5	243	301	12.2	450
0.4	0.8	281	331	17.1	100
7	0.5	222	274	13.0	500
17	0.8	234	267	12.7	200
18	0.5	234	266	11.1	900
45	0.8	218	270	13.4	400

으나, 재결정 이후 결정립 성장은 오히려 높은 변형률에서 억제된다는 Mehl의 보고와 잘 일치하고 있다.¹⁴⁾

한편 공정변수에 따른 결정립 크기의 변화와 인장강도간의 상관관계를 알아보하고자 Table 5의 결과를 $1/\sqrt{\text{결정립 크기}}$ 의 함수로 나타내었다. Fig. 6은 이러한 Al 6061 열간 단조품의 항복강도와 결정립 크기간의 Hall-Petch 관계를 보여주고 있다. 흥미로운 것은 각 변형률에서는 Hall-Petch 관계가 성립하고 있으나, 두 변형률이 결정립 크기에 따라 하나의 직선을 나타내지 않고 있다. 즉 결정립 크기만으로는 Al 6061 열간 단조품의 변형률에 따른 인장 특성이 설명될 수 없음을 알 수 있다. 결정립 크기 이외의 원인을 알아보하고자 인장 특성에 영향을 미칠 수 있는 Mg_2Si 상의 크기와 분포를 관찰하였다. Fig. 7은 유사한 변형률 속도에서 변형률이 각각 (a) 0.5($\dot{\epsilon} = 0.15/\text{sec}$), (b) 0.8($\dot{\epsilon} = 0.4/\text{sec}$), (c) 0.5($\dot{\epsilon} = 0.002/\text{sec}$) 및 (d) 0.8($\dot{\epsilon} = 0.0045/\text{sec}$)일 때 Al 6061 열간 단조품의 고배율 미세조직을 보여주고 있다. 본 그림

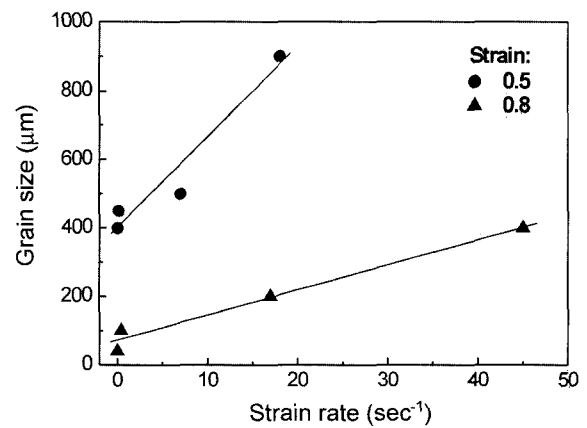


Fig. 5. The change in the grain size of as-forged Al 6061-T6 extruded bar as a function of strain rate for each strain value.

에서 보는 바와 같이 변형률이 증가함에 따라 Mg_2Si 상들이 전반적으로 조대화되는 것을 알 수 있다. 이러한 조

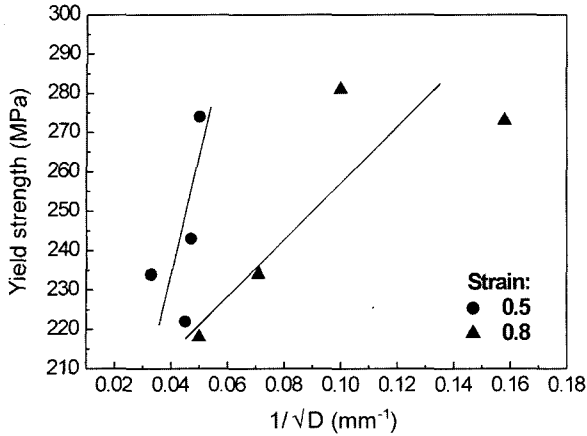


Fig. 6. Hall-Petch relationships for as-forged Al 6061-T6 extruded bar at two different strain values of 0.5 and 0.8, respectively.

대한 Mg₂Si상들은 단조품의 강도와 연신률을 동시에 감소시킬 것으로 판단된다. 즉 높은 변형률에서 단조된 시편에서 낮은 변형률에 비해 상대적으로 미세한 결정립 크기에도 불구하고 인장 특성이 우수하지 않은 것은 Mg₂Si 상의 조대화에 의한 것으로 판단된다.

지금까지 Al 6061 합금 압출봉재를 이용한 단조 성형

결과, 변형률속도가 증가함에 따라 재결정과 결정립 성장이 일어남으로 인해 기계적 특성이 현저히 저하되는 것을 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 압출봉재에 비해 상대적인 저장 에너지가 낮은 연주 봉재를 이용하여 압출봉재와 동일한 조건으로 열간 단조하여 그 기계적 특성을 비교하였다. Table 6은 Al 6061 연주봉재를 Fig. 1의 형상으로 열간 단조한 후 T6 열처리한 시편의 인장과 충격 시험한 결과를 보여주고 있다. 연주봉재의 경우 열간단조품의 인장 특성이 원소재에 비해 향상되었으며, Table 4의 결과와 비교하면 강도면에서 압출봉재보다 우수할 수도 있음을 보여주고 있다. 또한 압출봉재에서는 변형 속도가 증가할수록 인장특성이 저하되었으나, 연주봉재에서는 강도, 연신율 및 충격흡수에너지가 모두 향상되었음을 알 수 있다.

이러한 기계적 특성의 변화 원인을 살펴보기 위해 연주봉재를 사용한 열간단조품의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 8은 Al 6061 연주봉재를 각각 (a) 크랭크 프레스와 (b) 해머를 이용하여 열간단조한 시편의 광학현미경 미세조직 사진을 나타내고 있다. 두 시편 모두 수지상 조직이 상당 부분 남아있기는 하였으며, 변형 속도가 상대적으로 높고 충격량이 큰 해머 단조의 경우 수지상 조직이 크랭크 프레스 단조에 비해 미세화되어 있음을 알

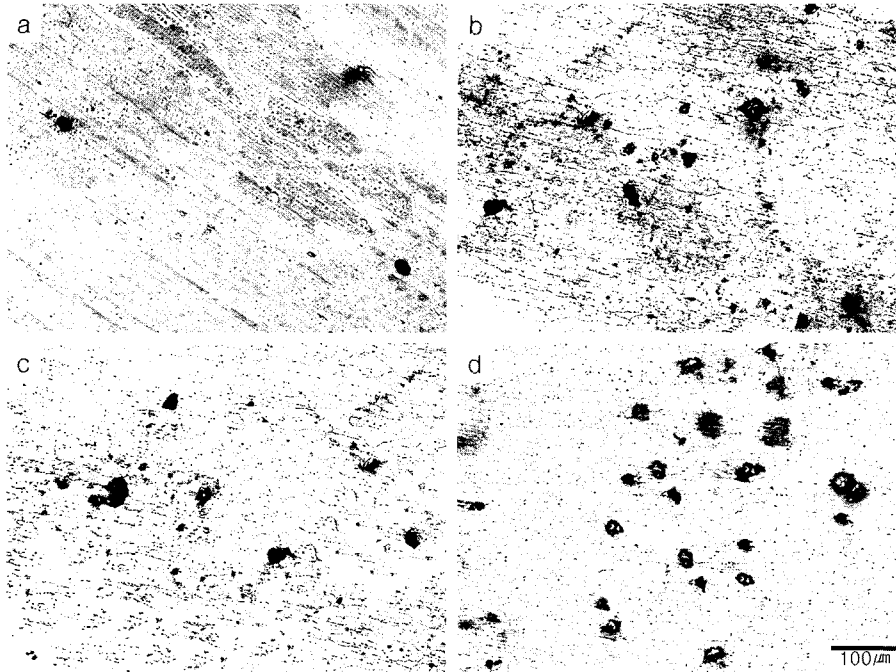


Fig. 7. SEM micrographs showing Mg₂Si precipitates in the as-forged Al 6061-T6 extruded bar at similar strain rates and with different strain values of (a) $\epsilon = 0.5$, $\dot{\epsilon} = 0.15/\text{sec}$, (b) $\epsilon = 0.8$, $\dot{\epsilon} = 0.4/\text{sec}$, (c) $\epsilon = 0.5$, $\dot{\epsilon} = 0.002/\text{sec}$ and (d) $\epsilon = 0.8$, $\dot{\epsilon} = 0.0045/\text{sec}$, respectively.

Table 6. Tensile and impact properties of hot-forged Al 6061-T6 product using a continuous cast bar as a forging stock.

Type of press	YS (MPa)	UTS (MPa)	Tensile elongation (%)	Impact energy (J/cm ²)
As-received + T6	219	282	8.7	-
Crank	246	287	14.7	14.5
Hammer	261	311	18.0	17.8



Fig. 8. Optical micrographs of as-forged Al 6061-T6 continuous cast bar forged with either (a) crank press or (b) hammer press, respectively.

수 있다. 이러한 수지상 조직의 미세화가 Table 6에서 관찰된 바와 같이, 해머 단조품의 인장 및 충격 특성을 향상시킨 것으로 사료된다. Fig. 9는 각각 (a) 크랭크 프레스와 (b) 해머로 단조된 연주봉재 시제품의 인장 후 파단면을 보여주고 있다. 크랭크 프레스 단조품의 경우, 수지상 조직의 전단 파단에 의한 약 $10\ \mu\text{m}$ 내외의 평평한 facet들이 다수 관찰되고 있다. 이에 반해 해머 단조품에서는 전형적인 공공연합(microvoid coalescence)에 의한 연성파단 양상을 보여주고 있다. 이처럼 Al 6061 연주봉재를 원소재로 사용하여 열간 단조할 경우, 압출봉재와는 달리 변형률 속도가 높은 성형 공정을 이용함으로써 수지상 조직을 미세화시켜 조직의 균질화를 얻음으로서 건전한 단조 성형품을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al 6061 압출봉재와 연주봉재를 이용하여 열간 단조된 시제품의 공정변수의 변화에 따른 미세조직과 기계적 특성을 비교하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al 6061 압출봉재를 이용하여 열간 단조할 경우 크랭크 프레스로 성형된 단조품에 비해 해머 단조품의 강도는 전반적으로 감소하는 반면 연신률은 다소 증가하는

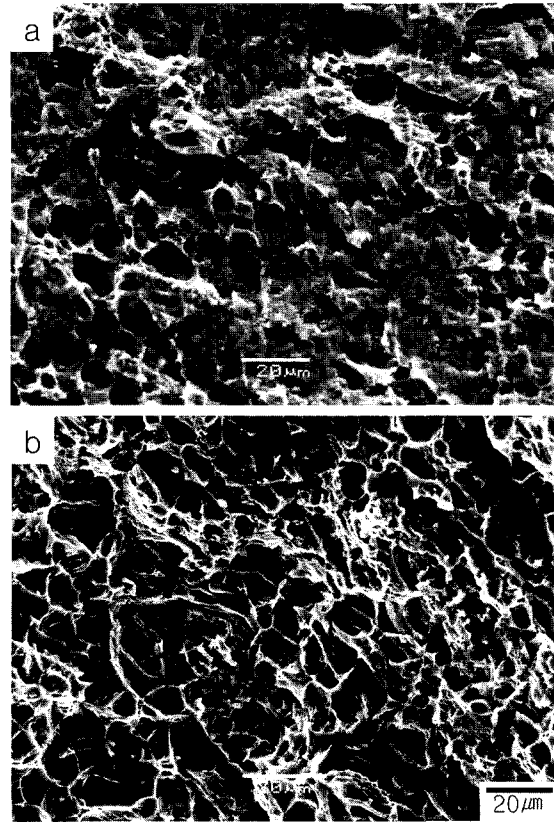


Fig. 9. SEM fractographs of as-forged Al 6061-T6 continuous cast bar forged with (a) crank press or (b) hammer press, respectively.

경향을 나타내었다. 미세조직 관찰 결과 빠른 변형 속도로 열간 단조하는 과정에서 조장된 재결정 및 결정립 조대화 현상이 원인인 것으로 사료된다.

2. Al 6061 압출봉재를 이용한 열간 단조품의 체계적인 변형률 및 변형률 속도에 따른 인장 특성 비교를 통하여, 변형률 속도가 증가할수록 강도 및 연신률이 동시에 감소할 수 있음을 관찰하였다. 그 원인은 재결정과 급격한 결정립 조대화에 의한 것으로 판단되어진다. 한편 높은 변형률에서 결정립 성장 억제에 의한 상대적으로 미세한 결정립 크기에도 불구하고 강도 증가가 크지 않은 원인은 Mg_2Si 상의 조대화에 의한 것으로 판단된다.

3. 압출봉재에 비해 저장 에너지가 낮은 Al 6061 연주봉재를 원소재로 사용하여 열간 단조할 경우 크랭크 프레스로 성형된 단조품에 비해 해머 단조품의 강도, 연성 및 충격흡수에너지가 모두 높은 경향을 나타내었다. 이는 해머 단조시 크랭크 프레스에 비해 상대적으로 높은 변형률 속도와 충격량으로 인한 수지상 조직의 미세화와 균질화 때문인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. J. S. Lee, S. W. Kim and K. D. Woo, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **36**, 1355 (1998).
2. K. D. Woo, I. O. Hwang and J. S. Lee, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **37**, 1468 (1999).

3. G. S. Cole, A. M. Sherman, *Mater. Characterization*, **35**, 3 (1995).
4. Y. C. Yoo, J. S. Jeon and B. C. Ko, *Mater. Sci. Forum.*, **217**, 1157 (1996).
5. Y. C. Yoo, J. S. Jeon and J. H. Lee, *Comp. Sci. Technol.*, **57**, 351 (1997).
6. L. N. Pussegoda, S. Yue, and J. J. Jonas, *Mater. Sci. Tech.*, **7**, 129 (1991).
7. C. M. Sellars, *Mater. Sci. Tech.*, **6**, 1072 (1990).
8. N. Raghathan, M. A. Zaide and T. Sheppard, *Mater. Sci. Tech.*, **2**, 938 (1986).
9. T. Sheppard, N. C. Parson, *Mater. Sci. Tech.*, **17**, 481 (1993).
10. X. Duan and T. Sheppard, *J. Mater. Proc. Tech.* **130**, 245 (2002).
11. F. J. Humphreys, *Acta Mater.*, **25**, 1323 (1997).
12. W. Weronki, A. Gontarz and Zb. Peter, *J. Mater. Proc. Tech.*, **92**, 50 (1999).
13. I. Baker, *Intermetallics*, **8**, 1195 (2000).
14. R. F. Mehl, *Metals Handbook*, 259-268 (1948).