

알루미늄 6061 합금의 열간단조시 변형율속도 및 변형율에 따른 기계적 성질에 관한 연구

김정식* · 이영선** · 김용조* · 이정환**

A Study on the Mechanical Properties with the Strain rate and Strain for Aluminum 6061 Alloy in Hot Forging

J.S. Kim, Y.S. Lee, Y.J. Kim and J.H. Lee

Abstract

The mechanical properties of Al 6061 extruded bar were deformed in high temperature with the variable deformation conditions and characterized by the tensile test. Three types of different strain rate were experimentally performed by using hydraulic press, crank press and hammer and two types of the nominal strain 0.5 and 0.8 were achieved. To decide optimum forging process, the relationship among the strain rate, strain and mechanical properties was explained by analyzing the microstructures of the forged and heat treated parts. The strength was deeply related with the strain rate due to the dynamic recrystallization (DRX) in hot forging, and the best forging condition was presented in Al 6061 alloy.

Key Words : Tensile Test, Strain Rate, Microstructures, Dynamic Recrystallization (DRX), Hot Forging

1. 서 론

금속의 변형은 상온에 비해 고온에서 재료의 항복강도는 낮고 가공경화 현상이 없으므로 소성변형에 요구되는 유동응력은 감소한다. 유동응력의 감소에 따라 소모되는 성형에너지가 낮으므로 열간 단조는 장비의 능력이 제한적이고 대변형이 요구되거나 복잡한 형상의 부품을 제조할 때 유리한 공정이며 이러한 장점들로 인해 항공기나

자동차 부품의 생산에 널리 이용되고 있다. Al 합금의 열간단조는 비교적 빠른 변형속도로 이루어지기 때문에 냉간가공을 할 때와는 달리 재료의 조직변화가 크고 불균일할 수 있으므로 열간변형의 열적-기계적 가공변수인 변형율속도, 온도, 응력 등이 적절하게 선정되어야 향상된 상온 기계적 특성과 신뢰도를 기대할 수 있다.^(1~3) 즉 열간 단조공정에서는 동적 회복(dynamic recovery, DRV) 및 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)

* 경남대학교 기계자동차공학부

** 한국기계연구원

에 의한 동적 연화(dynamic softening)에 의해서 미세조직, 석출물 크기 및 분포 뿐 아니라 변형저항까지도 조절할 수 있으므로 재료의 특성은 열간 단조공정중에 대부분 결정된다. 또한 단조변형율에 따라서 각 부위의 변형이 균일하지 못하는데, 이것은 조직의 불균일로 이어지고, 결국은 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 이러한 이유는 동적재결정 및 준동적 재결정등의 고온연화정도가 외부응력을 받는 부위에 따라서 달라지기 때문이다.⁽⁴⁾ 그러나 단조공정시 적절치 못한 공정조건하에서는 국부적으로 불균일한 변형과 조대결정립들이 생성되고 또한 단류선(Metal flow)도 불균일하게 된다.⁽²⁾ 이처럼 단조품의 기계적 성질과 밀접한 관련이 있는 기계적 변수들에 관한 기존의 연구결과는 변형조건에 따라서 최대응력을 결정하거나, 변형량에 따른 유동응력을 예측하는 것에 국한되어 있다. 본 연구에서는 Al 6061 합금의 실제 열간 단조공정과 연계하여 해머, 기계식 프레스, 유압식 프레스의 3가지 성형장비의 변형율속도 차이에 의한 재료의 특성을 비교하는것에 중점을 두어 최적의 기계가공 변수를 선정하고자 하였다.

2. 실험방법

원소재는 Al 합금중 대표적인 Al 6061(Al-Mg-Si 계 합금, Table 1) 압출봉재를 사용하였다. 압출봉재는 연속주조, 균질화 열처리 후 8:1의 압출비로 압출후 내부조직 균일화를 위해 소둔처리를 하였으며 열간단조 후 T6 열처리를 수행하였다. 525~535℃에서 용체화처리를 한 후 170~180℃에서 시효처리⁽⁶⁾를 하는 T6 열처리는 시효경화특성을 이용하여 용체화 처리와 시효경화 처리에 의한 준안정 석출상의 형성으로 인하여 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 압출봉재의 T6 열처리후 미세조직은 Fig. 1에 나타나 있다. 원소재는 압출방향에 따른 방향성이 남아 있고 미세한 결정립구조를 가지고 있다. 본 연구에서 변형율은 실제 공정에서 활용도가 높은 공정변형율 0.5와 0.8의 두가지로 설정하였고, 변형율속도는 실제 생산 조건에서 가장 빠른 변형율속도를 가지는 해머와 크랭크 프레스, 유압 프레스로 변형율속도에 변화를 주어 실험하였다. 해머는 가장 빠른 램 속도를 낼 수 있고, 크랭크 프레스는 해머 보다는 램 속도가 상대적으로 느린 반면 유압 프레스에 비해서는 빠르다. 이러한 변형율속도 차이가 최대한 반영된 결과를 도출하기 위해 해머는 45/s와 85/s의 변형율속도를, 크랭크 프레스는 8/s와 14/s, 유압 프레스는 2.0×10^{-3} /s와 3.5×10^{-3} /s로 각각의 변형율속도를 설정하였고 Al 6061 압출봉재를 횡방향

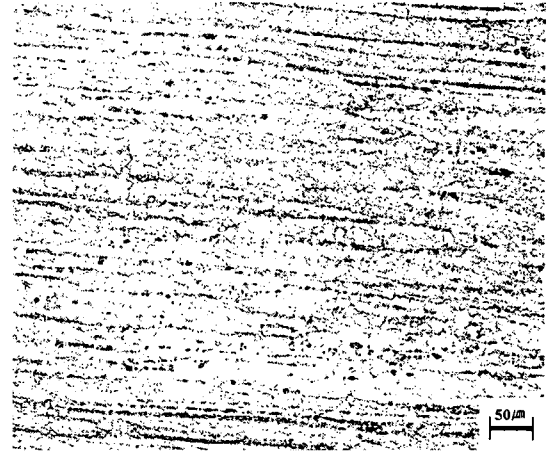


Fig. 1 Optical microstructure of Al 6061 as extruded and heat treated

Table 1 Chemical composition of Al 6061

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.

(Transverse direction)으로 성형하였다. 단조온도는 해머 단조와 크랭크 프레스 단조에서는 소재온도 400℃ 금형온도 300℃로 예열하여 단조하였고, 유압 프레스에서는 소재와 금형 모두 400℃로 예열하여 단조하였다. 각각의 변형율속도 차이에 의한 상대적인 단조작업중의 단조열 발생, 금형과 소재의 마찰에 의한 유동의 불균일성, 금형과 소재의 온도차에 의한 소재냉각효과 등 여러 가지 최종 단조품의 결과에 영향을 미치는 인자들이 있지만, 이러한 인자들의 영향이 최종적으로는 단조품의 연신율과 강도에 영향을 미칠것으로 판단하여 각각의 조건에 따른 단조품을 인장시험을 통하여 강도값을 비교하고 내부 미세조직과 변형율속도에 따른 기계적 성질의 변화를 정량화 하였다. 인장시험은 성형된 단조품의 횡방향으로 시편을 채취하여 행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

일반적으로 변형율속도가 증가하면 재결정 임계 변형량도 증가하는 것으로 보고되고 있다.⁽⁶⁾ 각각의 변형율과 변형율속도에 따른 인장시험결과를 원소재의 인장특성과 같이 Fig. 2~4에 나타내었다. 일반적으로 단조후 소재의 내부 조직이 치밀해져 기계적 특성이 향상되는 것으로

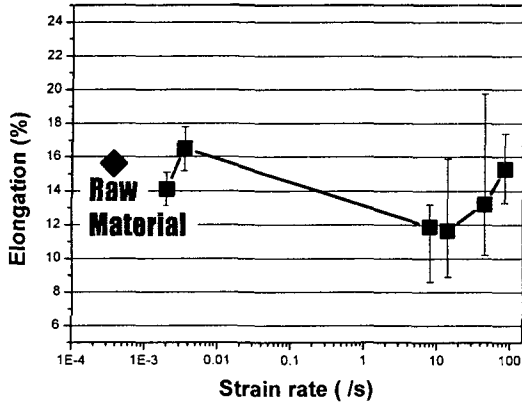


Fig. 2 The representative elongation of Al 6061 as forged and heat treated

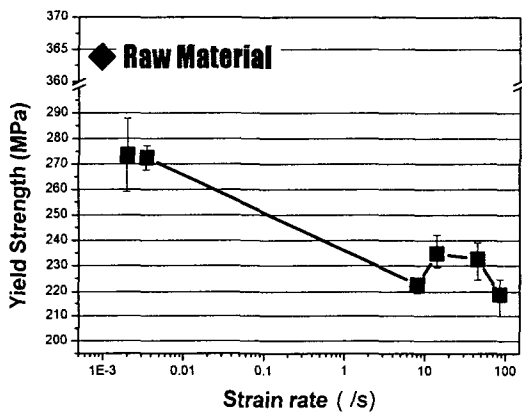


Fig. 3 The representative yield strength of Al 6061 as forged and heat treated

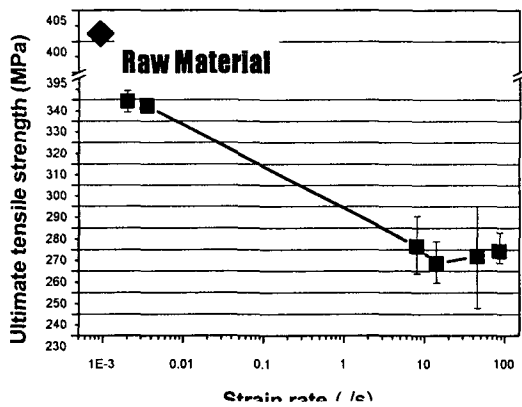


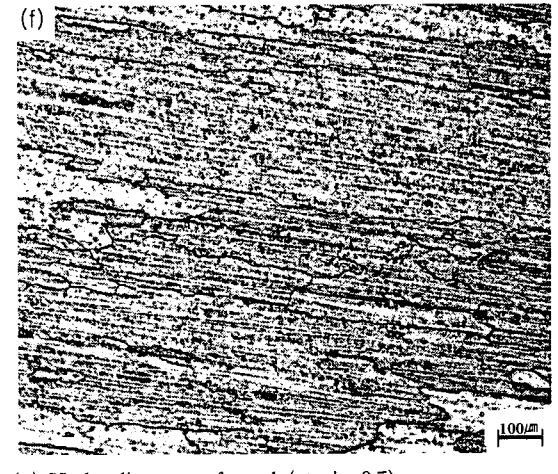
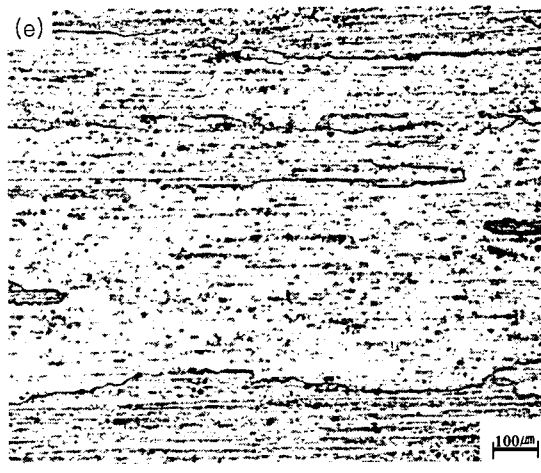
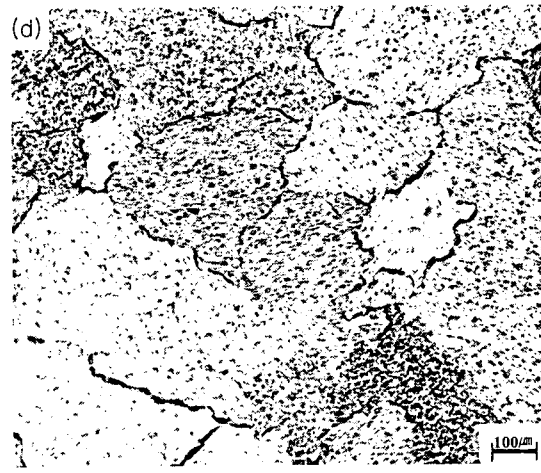
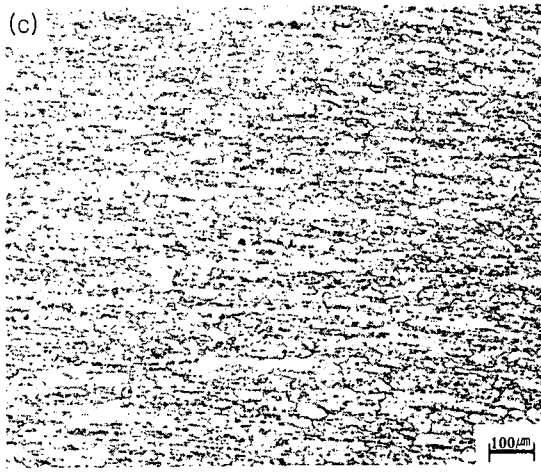
Fig. 4 The representative ultimate tensile strength of Al 6061 as forged and heat treated

알려져 있으나 본 연구결과 기계적 특성이 저하되는 현상을 발견할 수 있었고, 이는 단조전 원소재의 상태에 좌우된다고 판단할 수 있다. Fig. 2에 가공변수에 따른 연신율의 차이를 나타냈으나 연관성을 규명하기가 힘들다. Fig. 3~4에는 각각 항복강도와 인장강도를 나타내었는데, 변형율에 따른 강도의 차이는 근소함을 알 수 있다. 특히 Fig. 4는 변형율에 따른 인장강도의 영향이 적음을 나타내고 있다. 그러나 변형율속도 8/s이하에서는 변형율속도와 항복강도와 인장강도가 반비례하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 특정한 변형율속도 범위에서는 변형율속도와 강도가 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다.

3.2 미세 조직 관찰

인장 특성을 분석하기 위해 각 인장시편의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 5에 각각 공정 조건별 미세 조직을 나타내었다. 단조후 결정립들의 크기가 단조전 원소재의





- (a) Hydraulic-press forged (strain 0.5)
- (b) Hydraulic-press forged (strain 0.5)
- (c) Hydraulic-press forged (strain 0.8)
- (d) Crank-press forged (strain 0.5)
- (e) Crank-press forged (strain 0.8)
- (f) Hammer forged (strain 0.8)

Fig. 5 Optical microstructures of Al 6061 as forged and heat treated

결정립에 비해 조대화 되어 있음을 알 수 있고 이는 단조와 열처리 후의 기계적 특성이 원소재의 열처리 후 기계적 특성보다 저하되는 현상을 설명하여 준다. 그림 (a),(c)에서 나타난 바와같이 변형률속도가 느린 유압 프레스를 이용한 단조품에는 동적 재결정에 의해 미세화된 결정립을 얻을수 있었고 이에 따라 기계적 특성의 향상을 관찰할수 있다. (a)와 (b)는 동일한 소재의 미세 조직 사진으로 변형률이 상대적으로 작은 경우에도 부분적으로 재결정이 발생한 것을 (b)에서 확인할 수 있다. (c)는 변형률속도가 느리고 변형률이 많은 만큼 결정립의 방향성 상실과 그 크기의 미세화로 미루어 동적 재결정과 준 동적 재결정이 발생하였을 것으로 볼 수 있으나 이 경우에도 원소재의 조직보다는 조대화 되어져 있다. (d)와 (e)에서는 변형률 차이를 가지는 크랭크 프레스 단조후의 미세조직을 나타낸 것으로 변형률 차이에 따른 재결정 조직은 발견할 수 없었으나 변형률의 증가에 따른 결정립의 방향성을 관찰할 수 있었다. (f)역시 공칭변형률 0.8까지 해머 단조후의 미세조직으로 (e)와 비슷한 양상을 나타낸다. 이러한 미세 조직의 분석을 통해 재결정 발생여부를 판독하므로써 변형률과 변형률속도에 따른 기계적 차이를 이해할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 Al 6061 합금의 실제 열간 단조공정과 물리적으로 상사된 조건하에서 실시하였으며, 단조시 변형율과 변형율속도에 따른 기계적 성질의 변화를 분석하기 위해 해머, 기계식 프레스, 유압식 프레스의 3가지 장비를 사용하여 재료의 특성을 분석하였다. 연구결과 공칭 변형율 0.5와 0.8사이에서 Al 6061 합금의 변형율에 따른 기계적 성질의 변화는 근소하였으나 변형율속도 8/s이하에서는 변형율속도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었고, 이로 인하여 단조품의 기계적 특성은 특정한 변형율속도의 범위에서는 변형율속도가 증가하면 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이러한 변형율속도에 따른 강도값의 변화 경향은 단조 공정중 발생한 동적 재결정 및 준동적 재결정에 의한 결정립의 크기변화에 의한 것으로 판단된다. 단조품의 기계적 성질은 결정립의 크기뿐 아니라 석출물의 크기와 모양 그리고 분포정도에 의해서도 좌우될 것으로 예상되어 이에 대한 연구를 향후 계속적으로 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) C. M. Sellars, 1990, Mater. Sci. Tech., Vol. 6, p. 1072.
- (2) W. Weronki, A. Gontarz, Zb. Pater, 1999, "The reasons for structure defects arising in forging of aluminium alloys analysed using the finite element method" J. Mats. Proc. Technol. 92-93. pp. 50~53.
- (3) Y. C. Yoo, J. S. Jeon and B. C. Ko, 1996, "Hot Deformation and Dynamic Recrystallization of SiCw/AA2124 Composites" , Material Science Forum, Vol. 57, pp. 1157~1162.
- (4) F. J. Humphreys (1977) : Acta. Metall. 25 1323.
- (5) "Heat Treatment Aluminum Alloys" , MIL-H-6088G.
- (6) 김성일, 정태성, 유연철, 오수익, 1999, "Al 6061 합금의 고온 소성변형 조건의 예측" , 한국소성가공학 회지, 제8권, 제6호, pp. 576~582.