

Al 6061 합금의 고온 소성변형 조건에 관한 연구

김성일 정태성 유연철 *오수익
인하대학교 금속공학과 *서울대학교 기계설계학과

High Temperature Plastic Deformation Condition of Al 6061 Alloy

Sung Il Kim, Tae Sung Jung, Yeon Chul Yoo, *Soo Ik Oh
Department of Metallurgical Engineering, Inha University, Incheon 402-751
*Department of Mech. Design and Product Engineering, Seoul national University

ABSTRACT

High temperature plastic deformation behavior of Al 6061 alloy was characterized by hot torsion test. The Al 6061 alloy deformed continuously in the temperature range of 400 ~ 550°C, and strain rate range of 0.05 ~ 5/sec. The softening mechanism of Al 6061 alloy was dynamic recrystallization and identified by hyperbolic sine law and zener-Hollomon parameter. The evolution of grain size and deformation resistance were calculated by the relationships of deformation variables.

1. 서론

구조용 재료로 폭넓게 이용되는 Al 6061합금은 고온 소성변형 중에 동적인 연화(dynamic softening)과정을 거치게되며 그 결과 미세한 동적 재결정립(dynamic recrystallized grain)을 얻을 수 있는데 이 때의 결정립의 크기와 재료의 변형저항(deformation resistance)은 가공 변수들인 온도(T), 변형속도($\dot{\epsilon}$), 변형량(ϵ)에 의해 변화되며 이는 최종 기계적 성질에 영향을 미치게 된다¹⁾. 따라서 Al 6061합금의 고온에서의 변형 특성을 파악하고 적합한 가공조건을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Al 6061합금의 연속변형(continuous deformation)으로부터 구한 응력-변형률 곡선의 분석과 미세 조직 관찰을 통하여 고온 연화 기구의 정량화와 변형저항 및 결정립 크기의 예측을 연구하고자 하였다.

2. 실험방법

표1의 조성을 갖는 Al 6061합금의 봉재를 10mm ϕ x20mm l의 고체형 비틀림 시편으로 제작하여 고온 비틀림 시험을 실시하였다. 연속 변형은 400 - 550°C, 0.05 - 5/sec의 변형조건에서 실시하였으며 각각의 공정변수에 따른 응력-변형률 곡선의 변화를 분석하였다. 미세 조직의 관찰은 3%HF로 에칭하여 광학 현미경과 Image analyzer을 이용하였다.

3. 실험 결과

고온 연화 기구

연속 변형 후 얻은 응력-변형률 곡선을 미세 조직의 변화와 함께 Fig. 1에 나타내었다. 변형 초기 단계에서 가공 경화에 의해 유동 응력은 급격히 증가하다가 임계 변형량(critical strain, ϵ_c) 이후에 동적 재결정의 핵 생성으로 빠르게 진행되는 동적인 연화 과정으로 인해 응력은 최대 값(peak stress, σ_p)에 도달하였다가 점차 감소하게 되며 변형이 계속 진행되면 가공 경화의 정도와 동적인 연화 정도가 평형을 이루어 정상 상태 응력(steady state stress, σ_{ss})을 유지하게 된다. 이 때의 동적 재결정립의 크기는 일정한 수준을 유지하는데 초기 결정립에 비해 미세하고 동축정의 안정된 결정립을 갖게 된다^{1,2)}. Al 6061합금의 경우 동적 재결정의 핵 생성에 필요한 임계 변형량은 모든 변형 조건에 대해 최대 변형량(peak strain, ϵ_p)의 60- 65% 정도로 나타났다.

구성 방정식과 Zener-Hollomon parameter

Al 6061합금의 유동 응력곡선에서의 응력 수준은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 변형 속도가 증가할수록 증가하였으며 변형온도가 증가할수록 감소하였다. 이때 최대 응력(σ_p)과 가공 변수들과의 정량적인 관계식은 멱수 법칙(power law), 지수 법칙(exponential law), 하이퍼볼릭 사인 법칙(hyperbolic sine law)으로 구할 수 있었는데 이 들 중 Fig. 3에 나타낸 hyperbolic sine law를 적용하는 것이 모든 변형 조건에 있어서 잘 일치하였으며 이를 바탕으로 응력과 변형속도와의 구성 방정식으로 정량화하였다. 또한 Fig. 4에 보인 유동 응력의 변형속도에 대한 의존성과 변형온도에 대한 의존성을 함께 고려한 Zener-Hollomon parameter^{3, 4)}를 hyperbolic sine law에 적용하므로써 가공 변수들인 온도(T), 변형속도($\dot{\epsilon}$), 응력(σ)을 모두 고려한 다음의 정량식으로 나타낼 수 있었다.

$$\dot{\epsilon} = 2.9 \times 10^{13} [\sinh(0.0256 \sigma_p)]^{7.296} \exp[(-216k/mol)/RT]$$

동적 재결정립의 크기는 Z-parameter가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있는데 정확한 동적 재결정립의 크기 변화를 조사한 결과 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$d_{DRX} = 156.52 - 3.98 \ln Z$$

정량식의 응용

Fig. 5에 보인바와 같이 Al 6061합금의 최대 응력을 재료의 변형에 대한 저항으로 고려할 때 임의의 변형 조건에 대한 변형 저항을 쉽게 예측할 수 있었으며 이로부터 제조 공정에서의 압하력이나 제조 방법 등을 선택할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6에 나타낸 동적 재결정립의 크기의 예측으로 재료의 사용 조건을 고려한 적합한 변형 조건의 선택이 가능하다고 사료된다. 이처럼 재료의 고온에서의 동적인 거동에 대한 정량식들은 공정 변수의 제어뿐만 아니라 컴퓨터를 이용한 공정 시뮬레이션에 있어서 기본식으로 이용될 수 있으므로 매우 유용하다 하겠다.

4. 결론

1. Al 6061합금의 고온 연화 기구는 고온 유동 곡선의 형태와 미세 조직의 관찰 결과 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)이었으며 동적 재결정에 필요한 임계 변형량은 전 변형 조건에서 최대 변형량의 약 60 - 65% 정도로 나타났다.

2. Hyperbolic sine law와 Zener-Hollomon parameter를 이용한 가공 변수들 간의 정량식은 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\dot{\epsilon} = 2.9 \times 10^{13} [\sinh(0.0256 \sigma_p)]^{7.296} \exp[(-216 \text{ kJ/mol})/RT]$$

3. 가공 변수의 변화에 대한 동적재결정립의 크기 변화는 다음과 같은 Z-parameter와의 관계식으로 나타낼 수 있었다.

$$d_{\text{DRX}} = 156.52 - 3.98 \ln Z$$

4. 위의 정량식들을 이용하여 임의의 변형 조건에 대한 변형저항과 동적 재결정립의 크기를 예측할 수 있었으며 450℃, 0.5/sec의 변형조건에서 변형저항은 약 370MPa이었으며 이때의 동적 재결정립의 크기는 약 16 μm 이었다.

후기

본 연구는 1997년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. C.M. Sellars : Mater. Sci. Tech., 6 (1990) 1072
2. Y.C. Yoo, J.S. Jeon and B.C. Ko : Material Science Forum Vol. 217-222 (1996) 1157
3. S.H. Cho, S.I. Kim, Y.C. Yoo, K.S. Rho, K.J. Lee, and O.J. Kwon : J. of Korean Inst. of Met. & Mater., 35(6) (1997) pp. 681.
4. L.N. Pussegoda, S. Yue, and J.J. Jonas : Mater. Sci. Tech., 7 (1991) 129.

Table 1. Chemical composition(wt%) of Al 6061 alloy

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Al
0.8-1.2	0.4-0.8	0.15-0.4	0.7	0.15	bal.

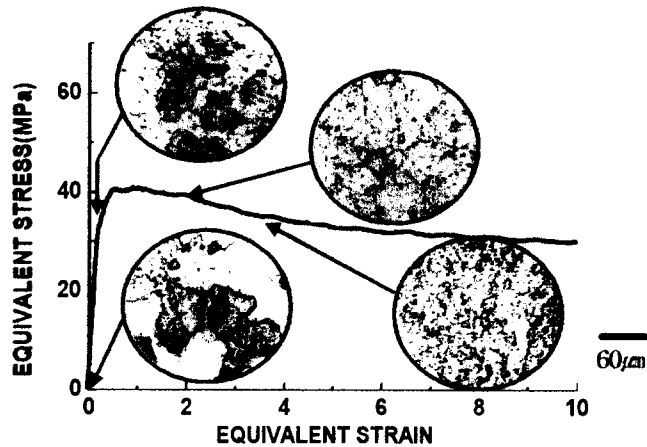


Fig. 1. Stress-strain curve and microstructure of Al 6061 alloy at the condition of 450℃, 0.5/sec.

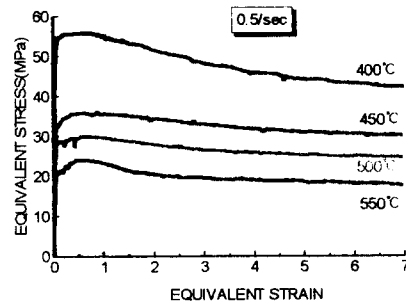
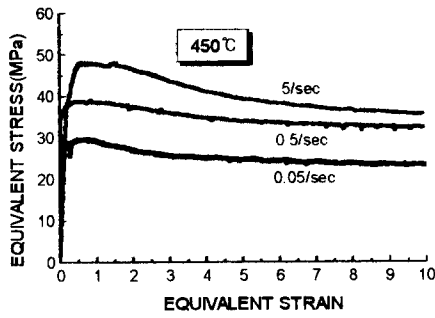


Fig. 2. Stress-strain curves of Al 6061 alloy deformed at the various conditions.

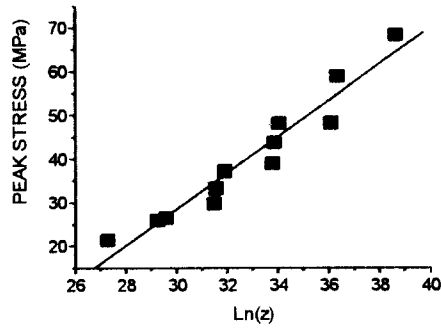
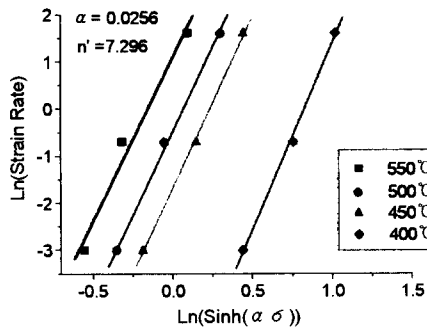


Fig. 3. hyperbolic sine law analysis of flow stress on strain rate at various temperature.

Fig. 4. Relationship between Zener-Holomon parameter and flow stress.

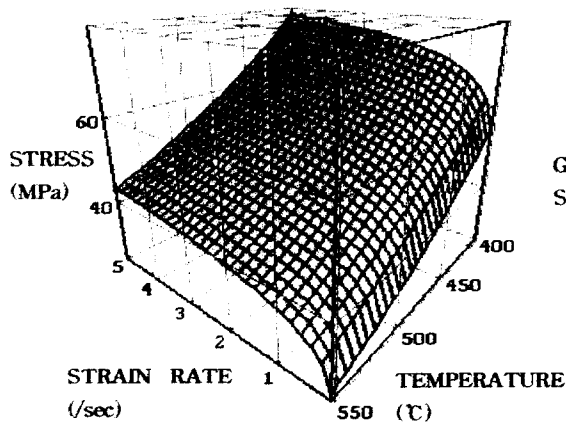


Fig. 5. The relationship between strain rate, temperature, and peak stress.

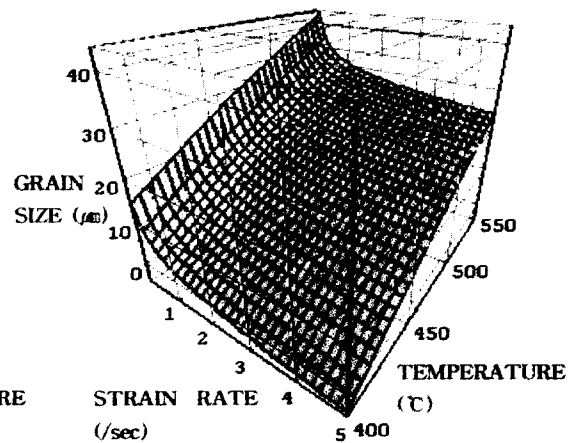


Fig. 6. The relationship between strain rate, temperature, and grain size.