

급냉응고된 과공정 Al-Si 합금의 고온변형 특성에 관한 연구

한창훈* · 김성일* · 유연철* · 이재철** · 이호인**

High Temperature Deformation Behavior of Rapid-Solidification Processed Al-18Si Alloy

C.H. Han, S.I. Kim, Y.C. Yoo, J.C. Lee, and H.I. Lee

Abstract

The high temperature deformation behavior of spray-formed Al-18wt.%Si-1.87wt.%Mg-0.085wt.%Fe alloy was studied by torsion testing in the strain rate range of $0.001-1 \text{ sec}^{-1}$, and in the temperature range of $300-500 \text{ }^\circ\text{C}$. The relationship between stress, temperature, and strain rate is expressed using the Power law. The behavior of dynamic recrystallization is showed in $300-350 \text{ }^\circ\text{C}$, $1-0.1\text{sec}^{-1}$ and the behavior of dynamic recovery is showed in $450-500^\circ\text{C}$, $0.01-0.001\text{sec}^{-1}$. The size of Si particles is small when the temperature is low and the strain rate is high. The strain rate sensitivity(m) and the apparent activation energy(Q) indicate the dependence on strain rate and temperature for flow stress respectively. The hot ductility is high when m is high and Q is low. The maps of strain rate sensitivity and apparent activation energy suggest the optimum processing conditions.

Key Words : Hypereutectic Al-Si Alloy, Spray-Forming, Deformation Map, Strain Rate Sensitivity, Apparent Activation Energy

1. 서론

과공정 Al-Si합금은 열팽창계수가 작고 내마모성이 우수하여 경량 구조용 재료로의 응용이 확대되고 있다. 그러나, 일반 주조법으로 과공정 Al-Si 합금을 제조하면 초정 Si 입자가 조대하게 정출하여 기계적 성질과 가공성을 저

해하므로 급속 응고법의 일종인 분무성형법을 이용하여 미세하고 균일하게 Si 입자를 분산시킴으로써 주조재에 비해 우수한 기계적 특성과 내마모성을 가진 합금을 얻을 수 있다⁽¹⁾. 그러나, 이들 재료의 고온 가공성 평가에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 분무성형한 과공정 Al-Si합금을 고온 비틀림 시험하여 구한 유동

* 인하대학교 재료공학부

** 한국과학기술연구원 재료연구부

응력 곡선을 분석하여 온도(T), 변형속도($\dot{\epsilon}$), 변형량(ϵ), 유동응력(σ)의 공정변수들의 관계를 정량적으로 표현하였다. 또한 공정변수에 따른 변형속도 민감도(strain rate sensitivity, m)와 활성화 에너지(apparent activation energy, Q)의 변화로부터 최적의 공정조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 과공정 Al-Si 합금의 조성은 Al-17.9wt.%Si-1.87wt.%Mg-0.085wt.%Fe-0.004wt.%Ni-0.0039wt.%Cu 이었으며 한국과학기술연구원(KIST)에서 분무성형법과 열간압출법으로 제조되었다. 이 압출봉을 표점 거리 10mm, 직경 7mm의 고체형 비틀림 시편으로 제작하여 495°C에서 2시간 용체화 처리한 후 고온 변형시험은 시험온도 300-500°C, 시험변형속도 1.0×10^{-3} - 1.0×10^0 의 범위에서 하였다. 변형은 목표온도에서 10 min동안 유지한 후에 파괴 변형량까지 변형을 하였다. 미세조직의 관찰은 미세연마 후 HF(0.05%) 수용액으로 에칭하여 광학현미경으로 하였고 투과전자현미경의 관찰은 3mm 디스크를 20 μ m까지 그라인딩한 후 20 μ A로 이온 밀링하였다.

3. 실험 결과

3.1 유동응력 곡선과 미세조직

Fig. 1에 분무성형법으로 제조된 Al-18Si합금을 고온 변형시험하여 얻은 유동응력 곡선과 이에 따른 미세조직의 변화를 나타내었다. 유동응력 곡선은 낮은 온도, 높은 변형 속도 영역에서 동적 재결정(Dynamic Recrystallization, DRX)의 거동을 나타내었고 높은 온도, 낮은 변형 속도 영역에서는 동적 회복(Dynamic Recovery, DRV)의 거동을 나타내었다. 이와 같은 유동 응력곡선의 특징은 미세조직의 관찰결과로도 확인할 수 있었는데 유동응력 곡선 상에서 동적 회복의 특징을 보이는 500°C, 0.001/s와 동적 재결정의 특징을 나타내는 300°C, 1/s 경우의 미세조직의 차이를 투과전자현미경 사진으로 나타내었다. Fig. 1(b)는 유동응력 곡선이 동적회복의 거동을 보이는 것과 같이 미세조직도 결정립의 크기가 변형 전과 거의 같은 크기의 결정립을 보였지만 Fig. 1(c)에서는 동적 재결정이 발생하여 새로운 결정립이 Si입자와 Al기지 경계에 생성되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 고온 연성은 Fig. 1(a)에서 나타난 것처럼 동적 재결정이 발생하는 비교적 낮은 온도 영역에서 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 Fig. 2

에 나타난 것처럼 300°C에서는 Si입자가 미세하고 균일하게 분포되어 있는 반면, 점점 온도가 높아질수록 Si입자가 조대해지고 500°C에서는 매우 조대해진 Si입자가 불균일하게 분포하였기 때문임을 알 수 있었다. 즉, Al-18Si 합금의 고온 가공성은 기지조직의 동적 재결정 발생 유무와 상관없이 Si입자의 크기와 분포에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 공정변수에 따른 유동응력의 변화는 Power law를 이용하여 다음과 같이 구성방정식으로 정량화 할 수 있었다

$$\dot{\epsilon} = 7.863 \times 10^{-10} \sigma^{6.407} \exp(-244900/RT)$$

윗 식에서 σ 는 최대 응력값이다.

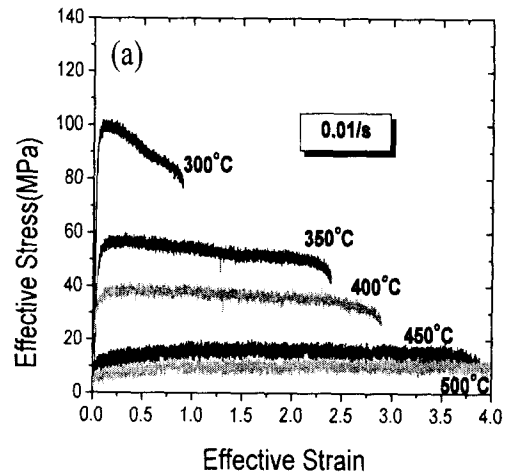


Fig. 1 Flow curves and microstructural changes obtained from torsion test (a) flow stress curves at 300-500°C, 0.01/s (b) TEM micrograph in 500°C, 0.001/s (c) TEM micrograph in 300°C, 1/s

3.2 변형속도 민감도와 활성화 에너지

Fig. 3에는 0.01/s의 변형속도에 대하여 각 온도에 따른 변형속도 민감도(m)와 활성화 에너지(Q)의 변화를 나타내었다. 변형속도민감도(m)는 350°C와 450°C에서는 낮은 값을 보였으며 300°C와 400°C에서 변형하였을 때에는 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 기지금속인 Al은 온도가 증가할수록 전위 상승(dislocation climb)과 입계 미끄럼 (grain boundary sliding) 같은 열적 활성화 (thermal activation)과정이 활발하게 이루어져 변형속도 민감도가 증가하지만 강한 Si입자가 미세하고 균일하게 분포되어 있는 Al-18Si합금은 Al 기지금속과 Si 입자와의 계면반응이 전위의 열적 활성화과정에 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되었다⁽²⁻⁴⁾. 또한 m 값은 전체적으로 변형량이 작을수록 큰 값을 나타내었는데 이는 변형량이 증가할수록 기지조직인 Al과 강화상인 Si입자의 변형특성 차이가 커지기 때문인 것으로 사료되었다. Fig. 3(b)에 나타난 활성화 에너지는 450°C이상의 고온영역에서는 변형량에 대해 거의 무관하였으나 350°C이하의 저온영역에서는 변형량에 대해 크게 변화하였다.

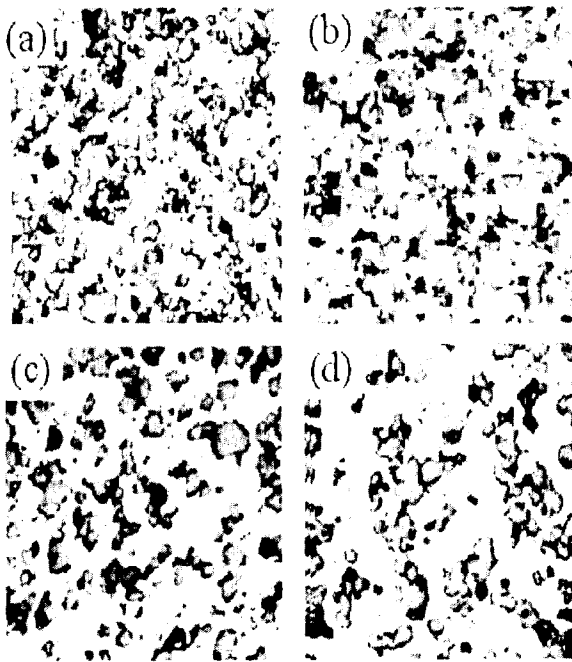


Fig. 2 Microstructural changes obtained from torsion test (a) as-received (b) 300°C, 0.01/s (c) 400°C, 0.01/s (d) 500°C, 0.01/s

활성화 에너지는 유동응력의 온도에 대한 의존성을 나타내므로 활성화 에너지가 변형량에 대해 민감하게 변화하는 저온영역에서는 기지와 강화상 사이의 변형거동 차이가 더욱 커지게 되므로 고온 변형시 피해야 할 변형조건이라고 할 수 있다.

변형속도 민감도와 활성화 에너지는 공정변수인 변형온도와 변형속도에 의존하므로 Fig. 4에 보인 변형지도로 나타낼 수 있었다. Fig. 4(a)와 (b)는 모두 유효 변형량 60%에 대한 것으로 변형속도 민감도는 400°C, 0.001/s와 500°C, 0.1/s에서 최대값을 나타내었고 300°C, 1/s와 350°C, 0.1/s, 0.01/s에서 최소값을 보였다. 변형속도민감도에 대한 변형지도와 활성화 에너지에 대한 변형지도를 동시에 고려하여 최적의 고온 변형조건을 선택할 수 있었다. m 값이 큰 영역에서는 낮은 Q 값을 나타내었고 m 값이 작은 영역에서는 Q 값이 높게 나타났다. 이들 지도로부터 m 값이 높고 Q 값이 낮은 영역을 이상적인 가공조건으로 제시할 수 있다. 또한 Q 값의 변화가 급하지 않은 영역이 열간 가공시 안전성이 높은 영역임을 알 수 있다.

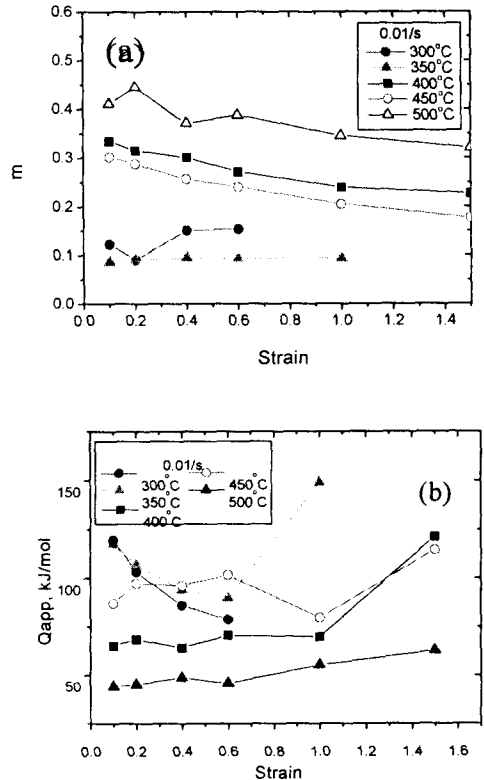


Fig. 3 (a) strain rate sensitivity and (b) apparent activation energy for strain in the range of 300°C-500°C, 0.01/s

4. 결론

분무성형법으로 제조된 과공정 Al-18Si 합금을 고온 변형하여 가공변수에 대한 변형속도 민감도와 활성화 에너지의 변화를 분석하여 Al-18Si합금의 고온 변형시 재료의 결함발생을 최소화할 수 있는 변형조건을 구체적으로 제시할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) H.I. Lee, K.H. Oh, D.H. Yeo et al., 1993, "Development of Light Materials for Automotive Engine", Korea Inst. of Sci. and Technol., Research Report.
- (2) F. Montheillet, J.J. Jonas, 1996, "Temperature dependence of the rate sensitivity and its effect on the activation energy for high-temperature flow", Metallurgical and materials transaction A, Vol. 27A, p. 3346.
- (3) H.P. STÜWE, P. LES, 1998, "Strain rate sensitivity of flow stress at large strains", Acta mater., Vol.46, No. 18, p. 6375.
- (4) Y.V.R.K. Prasad, T. Seshacharyulu, 1998, "Modelling of hot deformation for microstructural control", Int. Materials reviews, Vol. 43, No. 6, p. 243.

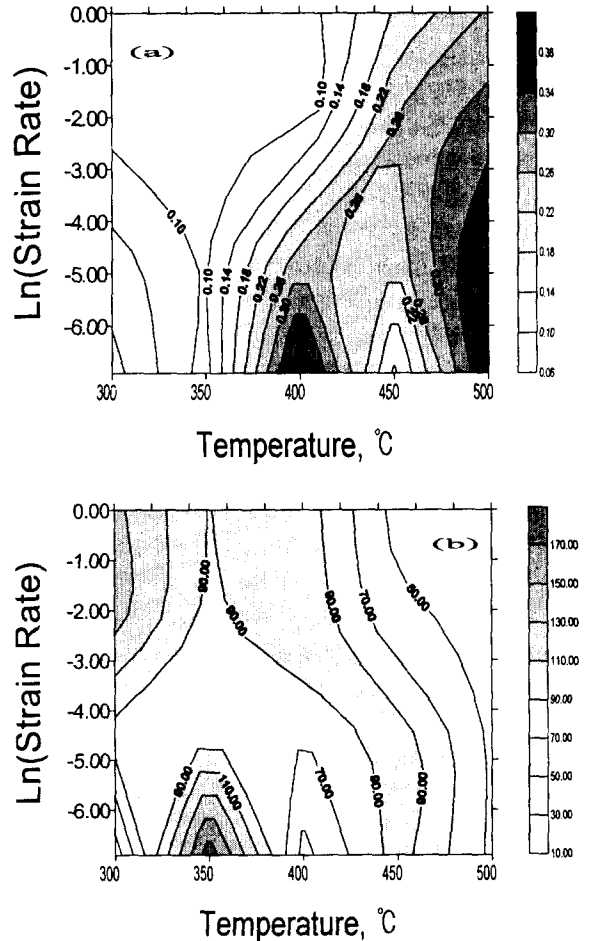


Fig. 4 Map of (a) strain rate sensitivity and (b) apparent activation energy at $\epsilon=0.6$