

초소성 7075 알루미늄 합금의 변형특성 평가

권용남, 장영원

포항공과대학교 항공재료연구센터

Characterization of Superplastic Deformation Behaviors of 7075 Al Alloy

Yong Nam Kwon, Young Won Chang

Center for Advanced Aerospace Materials, POSTECH

Abstract

The superplastic deformation behaviors of 7075Al alloy have been characterized experimentally and analyzed by the internal variable theory of inelastic deformation. A simple rheological model including the grain boundary sliding has been used to interpret the superplastic deformation behaviors. A series of load relaxation and tensile tests have been carried out for 7075Al alloy at the various temperatures. The superplastic deformation of 7075Al alloy is confirmed to consist of the grain boundary sliding and accommodating grain matrix deformation.

1. 서론

초소성이란 결정재료가 특정 범위의 온도와 변형률 속도에서 수백 %이상의 균일한 연신율을 나타내는 현상이다. 이를 이용한 초소성 성형공정은 기존의 판재 성형공정으로 제작이 부적합하였던 복잡한 모양의 부품 생산에 효과적으로 적용할 수 있다. 초소성 성형공정은 공정의 단순화와 이에 따른 생산비 절감 및 부품 유지 및 보수비등이 낮은 장점을 가지고 있으며 최근에 이르러 항공산업뿐만 아니라 자동차산업, 정밀부품산업 등으로 적용 범위가 넓어

지고 있다.[1]

초소성 재료의 성형은 일반적인 탄소성 재료의 판재 성형시와는 달리 초소성이 낮은 변형률 속도 및 유동 응력하에서 나타나므로 매우 느린 공정 속도를 나타낸다. 따라서 성형품에 국부적인 두께감소나 파괴를 일으키지 않는 범위에서 최대한 빠른 속도로 공정을 제어할 필요가 있다.[2] 성형공정의 제어를 위해 다양한 공정해석이 제시되고 있으며 유한요소법을 이용한 수치해석이 크게 증가하고 있다. 이러한 수치해석을 통해 정확한 공정변수의 예측을 얻기 위해서는 재료의 물성을 적합하게 표현

해 줄 수 있는 구성방정식이 무엇보다 필수적이다. 초소성 변형은 결정립계 미끄러짐이 주 변형기구로 작용하며 재료의 연속성을 유지해 주기 위한 도움기구로 전위운동이나 확산 등의 기구가 제시되고 있다. 대부분의 초소성 연구에서 결정립계 미끄러짐을 매우 빠른 속도로 진행되는 변형기구로 보고 전체적인 변형속도 및 유동응력은 결정립계 미끄러짐의 도움기구에 의해 결정된다고 보고 있으며 이에 따라 초소성 변형의 구성방정식은 도움기구의 구성방정식과 같은 형태로 표현되고 있다. 또한 대부분의 초소성 구성방정식은 점성유동식의 형태를 가지고 있으나 실제 초소성 변형시 발생하는 결정립 성장에 따른 가공경화현상을 적절히 표현해 주지 못해 초소성 공정설계에 적용하였을 경우 해석의 오차를 발생시키는 원인이 된다.

본 연구에서는 내부변형변수이론에 바탕을 둔 초소성 변형이론을 이용하여 초소성 7075 알루미늄 합금의 변형거동을 해석하였다. 다른 초소성 변형모델들은 앞서 언급한 바와 같이 주 변형 기구인 결정립계 미끄러짐의 변형거동을 독립적으로 기술하지 못하는 등의 문제점을 가지고 있다. 이와 달리 본 이론에서는 실제 초소성의 주 변형기구인 결정립계 미끄러짐의 구성방정식을 사용하여 미세 변형기구에 바탕을 둔 근본적인 변형특성의 기술이 가능하게 되었다.[3,4,5] 또한 변형량의 증가에 따라 발생하는 결정립 성장 등의 미세조직변화

와 이에 따른 변형특성의 변화 및 이를 정확하게 기술할 수 있는 방법에 대해서도 고찰하였다.

2. 내부변형변수이론을 이용한 초소성 변형이론

그림 1에서와 같이 초소성 변형은 결정립계 미끄러짐과 도움기구로 작용하는 전위거동에 의한 결정립내 변형으로 구성되며 아래와 같은 기구학적 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma = \sigma^I + \sigma^F \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = \dot{a} + \dot{\alpha} + \dot{g} \quad (2)$$

초소성이 나타나는 온도범위는 $0.5T_m$ 이상으로 결정격자마찰에 의한 응력 σ^F 는 무시할 수 있어서 전위의 상호 작용에 기인한 응력 σ^I 만으로 응력상태를 기술할 수 있으며 내부변형속도 \dot{a} 도 변형이 정상상태에 도달하면 무시할 수 있다. 따라서 초소성 변형거동은 결정립내 변형율 $\dot{\alpha}$ 과 결정립계 미끄러짐을 나타내는 \dot{g} 의 합으로 이루어져 있다. 재료의 결정립내 변형을 기술해 주는 구성방정식은 (3)과 (4)로 표현되며 결정립계 미끄러짐의 구성방정식은 (5)과 (6)이다.

$$(\sigma^* / \sigma^I) = \exp(\dot{\alpha}^* / \dot{\alpha})^p \quad (3)$$

$$\dot{\alpha}^* = f^I (\sigma^* / \mu)^{n^I} \exp(-Q^I / RT) \quad (4)$$

$$(\dot{g} / \dot{g}_0) = (\sigma / \Sigma_g - 1)^{1/M} \quad (5)$$

$$\dot{g}_0 = f_g (\Sigma_g / \mu_g)^{n^*} \exp(-Q^g / RT) \quad (6)$$

그림 2는 495°C에서 결정립 크기를 달리한 재료를 이용하여 응력이완시험을 실시한 후 얻은 유동 곡선들이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 결정립 크기가 감소함에 따라 변형이 빠른 변형율 속도와 낮은 응력 구역쪽에서 진행됨을 알 수 있다. 그림 3은 응력이완시험에서 얻은 유동곡선을 앞에서 설명한 초소성 모델에 따라 해석한 결과이다. 초소성 변형은 결정립내 변형율 $\dot{\alpha}$ 과 결정립계 미끄러짐을 나타내는 \dot{g} 의 합으로 표현되어지며 변형율 속도의 변화에 따라 두 변형기구의 기여도가 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 2에서 실선으로 표시한 것과 같이 결정립 크기에 관계없이 초소성 변형은 내부변형변수이론에 의한 초소성 모델로 정확하게 표현될 수 있음을 알 수 있다. 기존 초소성 모델들에서 초소성 변형의 미시적인 변형과정을 무시하고 도움기구의 구성방정식으로 초소성을 표현한 것과 달리 초소성의 주 변형 기구인 결정립계 미끄러짐에 대한 구성방정식을 사용함으로써 보다 물리적으로 의미가 있는 초소성 물성평가가 가능하게 되었다. 그림 4는 7075Al 합금의 초소성 변형에 미치는 온도의 영향을 평가하기 위하여 응력이완 시험을 실시한 결과이다. 온도가 낮아짐에

따라 유동곡선은 전체적으로 낮은 변형율 속도와 높은 응력영역으로 이동하고 있다. 본 합금의 최적 초소성 온도는 500°C 이상으로 알려져 있으나 410°C의 비교적 낮은 온도에서도 활발한 결정립계 미끄러짐을 관찰할 수 있었다. 결정립계 미끄러짐이 활발한 변형율 속도 구역에서 실시한 인장 시험 결과 500%이상의 높은 연신율을 확인할 수 있었다. 일반적으로 초소성 변형시 결정립계 미끄러짐의 기여도는 50%~100%로 보고되고 있다.[6] 본 이론을 통해 변형율 속도에 따른 결정립계 미끄러짐의 기여도의 정량적 평가가 가능하며 성형 공정설계시 적절하게 사용될 수 있다. 결정립내 변형의 활성화 에너지는 164 kJ/mol·K로 Al의 자기확산계수의 활성화 에너지와 비슷한 값을 나타냈으며 결정립계 미끄러짐의 경우 88 kJ/mol·K으로 결정립계 확산시와 비슷한 값을 나타내었다.

3. 변형량 증가에 따른 초소성 변형특성의 변화

미세한 결정립을 가진 초소성 알루미늄 합금들은 결정립 성장을 억제하기 위한 미세한 석출물을 포함하고 있어 초소성 변형 온도에 노출시 결정립 성장속도는 크지 않다. 하지만 변형을 진행되면 결정립계 미끄러짐이 활발해짐에 따라 결정립계 부근은 공공등의 결함 농도가 매우 높아지며 변형에 의한 결정립 성장이 발생하며 이에 따

라 유동응력이 증가한다. 변형을 받지 않은 재료의 결정립계는 입계의 이동을 억제하는 입자들이 전체 결정립내에 균일하게 분포하고 있으나 일정값 이상의 초소성 변형을 받은 경우 결정립계 주위에 석출물 및 분산입자들이 존재하지 않는 구역이 관찰된다. 이러한 미세조직 변화는 결정립계 미끄러짐뿐만 아니라 도움기구로 작용하는 전위운동에도 영향을 줄 것으로 생각된다.

변형율의 증가에 따른 변형특성을 평가하기 위하여 변형량을 증가시키면서 응력이완시험을 실시하였으며 결과를 그림 5에 나타내었다. 변형량 증가에 따라 유동곡선의 위치는 낮은 변형율 속도와 높은 응력 방향으로 이동하고 있는데 이는 변형에 따른 결정립성장이 주요한 원인으로 생각되며 앞서 설명한 결정립 크기의 증가 효과와 같은 결과이다. 이와 더불어 변형곡선의 모양도 낮은 변형율 속도 구역에서 변형율 속도 민감계수(m)가 낮아져 임계응력(threshold stress)현상을 관찰할 수 있다. 변형량이 낮은 상태에서 얻은 유동곡선의 경우 결정립계 미끄러짐이 활발한 변형율 속도의 범위가 일정 구역으로 제한되었던 것에 반해 일정 변형량 이상에서 얻은 유동곡선의 경우 낮은 변형율 속도 영역에서 결정립내 변형이 더 이상 관찰되지 않고 결정립계 미끄러짐에 의해서만 변형이 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 결정립 크기가 큰 경우 변형량 증가에 관계없이 결정립내 변형이 전체 변형율 속도구역에서 변형을

주도함을 관찰하였다. 결정립계 미끄러짐의 구성방정식에 정의된 상수값 M_g 는 변형량 증가에 따라 변형초기 1.0에서 0.5의 값으로 감소하였다. 변형 초기 뉴토니안 점성유동을 보이던 결정립계 미끄러짐은 변형이 진행됨에 따라 재료내부에 공공과 같은 결함이 증가하고 결정립계의 특성, 분산입자 분포 등의 미세조직이 변화함에 따라 초기와는 다른 변형거동을 보이는 것으로 생각된다. Bicrystal을 이용한 결정립계 미끄러짐 연구에 따르면 변형의 초기단계에서는 결정립계가 쉽게 미끄러져 이상적인 뉴토니안 점성거동을 보이거나 이후 일정 변형량에 이를 때까지 경화현상을 나타낸다.[7]

응력이완시험을 정확한 결과를 얻기 위해서는 시편에 아주 작은 정도의 내킹도 허용되지 않기 때문에 변형량을 증가시키며 실시하는 응력이완시험은 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 다양한 변형율 속도로 인장시험을 실시하여 시편의 파단에 이르기까지 초소성 변형특성을 평가하였다. 그림 6은 변형율 속도에 따른 인장곡선으로 변형에 따른 가공경화의 정도가 초소성 재료에서도 무시할 수 없음을 알 수 있다. Hart는 재료가 내킹을 발생시키지 않고 안정한 변형을 유지하기 위한 조건으로 $m+\gamma \geq 1$ 을 제시하였다. 여기서 m 은 γ 는 각각 $m = (\dot{\epsilon}/\sigma)(\partial\sigma/\partial\dot{\epsilon})$ 과 $\gamma = (1/\sigma)(\partial\sigma/\partial\epsilon)$ 을 의미한다. 그림 6의 변형율속도에 따른 인장곡선들은 파괴시까지 Hart에 의한 안정도 계수의 조건을 만족하고 있으며 파괴시까

지 균일한 연신을 보여준다. 그림 5의 인장곡선으로부터 변형량에 재료의 유동곡선을 얻을 수 있다. 응력이완시험을 통해 얻은 유동곡선은 미세조직의 변화가 거의 없는 일정한 미세조직 상태에서의 변형특성인데 반해 인장시험을 통해 얻은 유동곡선은 변형을 속도에 따라 다른 변형경로로 인해 결정립 크기의 차이를 포함하고 있다. 따라서 응력이완시험으로 구한 유동곡선에 비해 재료의 변형 특성을 정확하게 표현하지 못하는 면이 있다. 하지만 초소성 변형시 가장 중요한 미세조직인자는 결정립 크기이며 변형에 의한 결정립 성장속도는 $\dot{d} \propto \dot{\epsilon}$ 과 같이 변형을 속도에 비례하는 경향을 나타낸다.[8] 따라서 같은 변형량에서는 비슷한 정도의 결정립 크기를 가진다고 가정할 수 있다. 인장 곡선에서 얻은 유동곡선을 응력이완시험으로 얻은 유동 곡선에 연결하여 재료의 물성을 평가할 수 있다.

4. 결론

초소성 재료의 특성은 초소성 현상의 근본 기구인 결정립계 미끄러짐의 구성방정식과 이를 보완하기 위한 전위 운동에 의한 결정립내 변형으로 잘 표현할 수 있다. 변형량이 증가함에 따라 결정립 크기의 증가에 따른 유동응력의 증가뿐만 아니라 결정립계 특성 및 결정립내의 석출물 분포등의 미세조직 변화가 변형 특성에 영향을

를 확인할 수 있었다. 초소성 성형공정시 재료는 상당한 정도의 변형량을 가지게 되며 가공 경화를 고려하지 않은 점성유동식에 의한 성형공정설계는 오차를 가져오게 된다. 따라서 변형의 축적에 따른 변형거동의 정확한 평가는 우수한 공정해석의 필수 조건이다.

참고문헌

1. O. D. Sherby and J. Wadsworth, *Prog. Mater. Sci.*, 33(1990), 169
2. N.Chandra and S.C.Rama, *Trans.ASME*, 114(1992) 452
3. Y. W. Chang and E. C. Aifantis, *Constitutive Laws for Engineering Materials; Theory and Application* (ed. C. S. Desai et al, Tuscon, 1987), 293
4. T. K. Ha and Y. W. Chang, *Scripta Metall.*, 35(1996), 635
5. T. K. Ha and Y. W. Chang, *Scripta Metall.*, 35(1996), 1317
6. R. Z. Valiev and M. G. Zelin, *Superplasticity in Advanced Materials* (ed. S. Hori, M. Tokizane and N. Furushiro, JSRS, 1991), 95
7. R.L.Bell and T.G.Langdon, *Interface Conference*(ed. R.C.Gifkins, 1969), 115
8. D.S.Wilkinson and C.H.Caceres, *Acta. Metall.* 32(1984), 1335

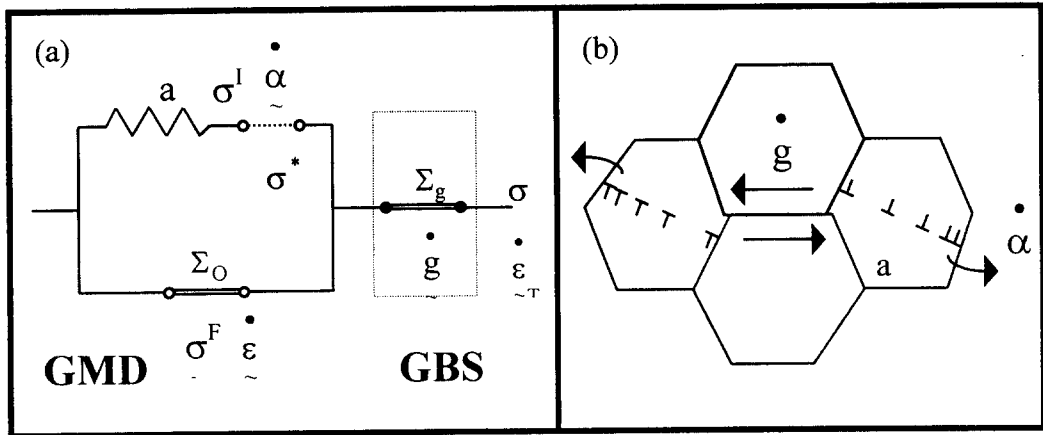


Fig. 1. An internal variable model for superplasticity

(a) Rheological model (b) Physical model

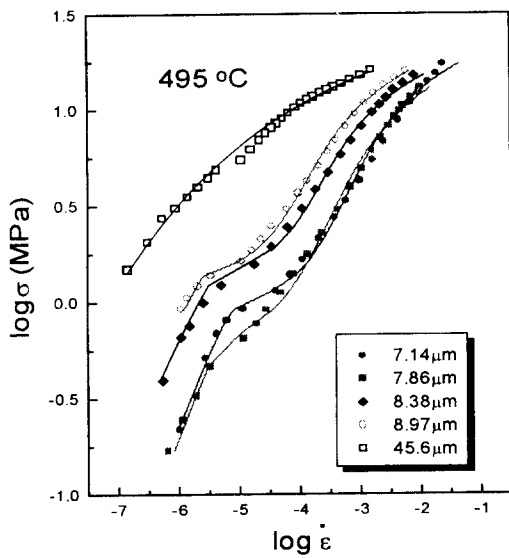


Fig. 2. The flow curves of 7075Al alloy with the grain size

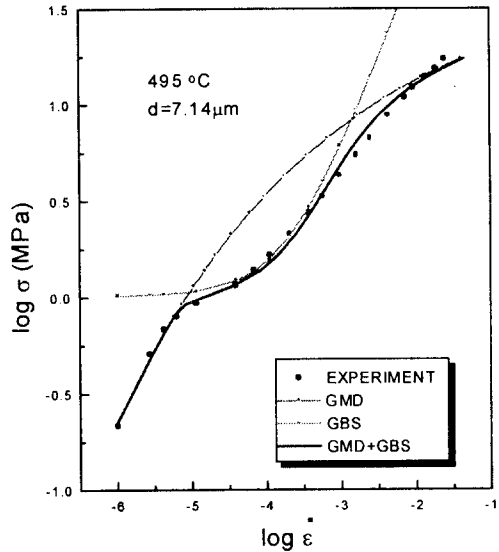


Fig. 3. The analysis shows that the flow curve consists of GBS and GMD

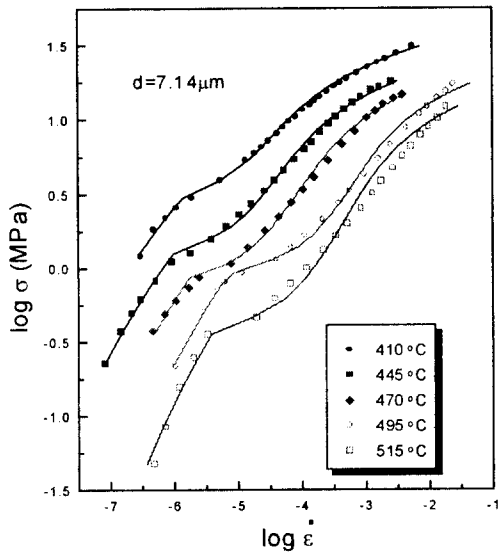


Fig. 4. The effect of temperature flow behavior of 7075 Al alloy

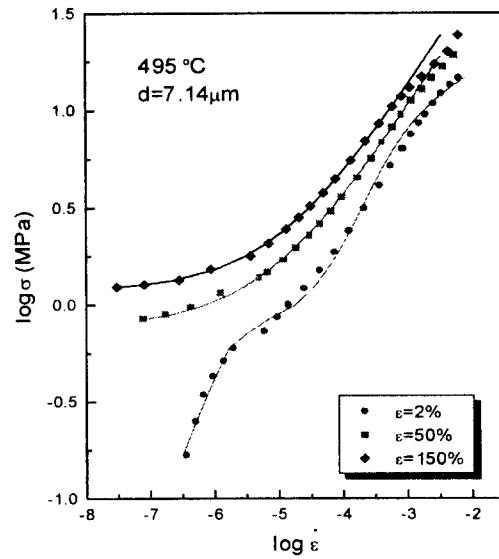


Fig. 5. The effect of strain accumulations on the flow behavior

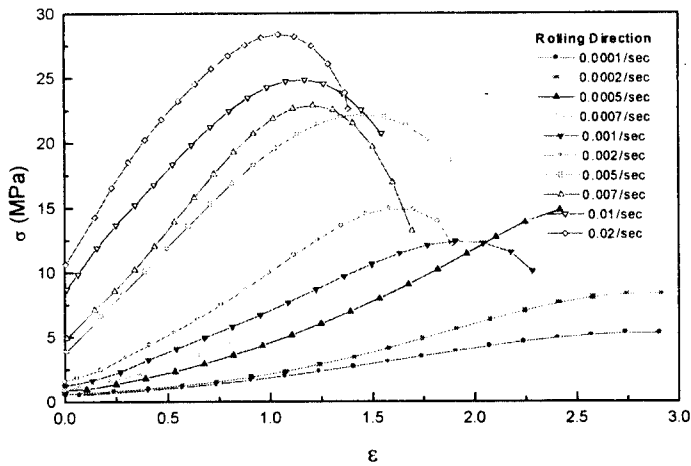


Fig. 6. The true stress-strain curves of 7075Al alloy