

초소성변형거동의 온도의존성에 대한 이론 및 실험적 고찰

방원규, 장영원

포항공과대학교 항공재료연구센터 (CAAM)

포항시 남구 효자동 산31번지, 790-784

Theoretical and Microstructural Study on the Temperature Dependence of Superplastic Deformation Behavior

Abstract: A series of load relaxation tests was performed to determine stress-strain rate curves at high temperatures. Constitutive parameters of GBS and GMD were evaluated from the curves using the recently proposed inelastic deformation theory. Tensile tests and Microstructure investigations showed deformation behavior as the relaxation test results predicted.

Key Words: superplastic deformation, grain boundary sliding, precipitate free zone

1. 서론

초소성형성은 낮은 응력에서 높은 연신율을 이용하여 한번에 이음매 없는 형상을 만들 수 있다는 잇점을 가지고 있다. 이러한 초소성공정을 최적화하기 위해서는 고온영역에서의 계반조건 변화에 따른 변형거동을 정확히 기술할 수 있는 구성방정식과 식이 포함하는 물성값의 결정이 필수적이다. 지금까지의 연구에서는 주로 응력-변형율의 외부변수를 포함하는 power law로 표시한 경험식이 사용되어[2,4] 온도 등의 가공변수에 따른 변형거동의 변화를 재료 내부의 물성변화와 연관지어 고찰하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 초소성변형을 주도하는 결정립계미끄러짐과 입내변형에 의한 도출기구를 정량적으로 해석하기 위하여 본 연구에서는 일련의 응력이완시험 결과에 최근 제안된 고온변형이론을 적용하여 각 변형기구의 재료상수들을 구하였다. 이론적인 해석결과로 예측되는 변형거동을 검증하기 위하여 온도에 따른 인장시험 및 변형미세조직의 직접관찰을 행하였다. 연신율의 측정과 응력이완시험 결과에서 나타나는 초소성구간을 중심으로 관찰된 변형조직을 통해 기구학적 해석의 타당성을 검증할 수 있다.

2. 실험방법

본 연구에서는 가공열처리를 거치 미세한 결정립 ($\sim 13\mu\text{m}$)이 얻어진 7475 Al 합

금을 사용하였다. 결정립계미끄러짐이 거의 나타나지 않는 영역부터 최적 초소성이 나타난다고 알려진 500℃ 이상의 구간에서 온도별로 응력이완실험을 행하였다. 같은 온도범위에서 인장시험을 행하여 거시적인 연신율의 변화를 관찰하였다. 변형기구의 직접적인 확인을 위한 미세조직 관찰을 위해서는 역시 같은 크기로 결정립이 조절된 관상시편을 주어진 온도구간에서 일정한 변형량까지 인장한 즉시 급냉하여 절단, 투과전자현미경 시편을 제작하였다. TEM 을 통해 결정립계 주변을 중심으로 제반조건에 따른 변형전후의 전위운동 및 변형조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

응력이완실험에서 나타나는 Load-Time 곡선의 Numerical Differential 을 구하면 아래의 fig.1 과 같은 응력-변형율간의 유동곡선을 구할 수 있다.

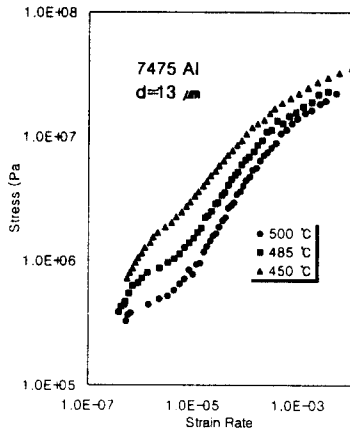


Fig.1 7475Al-The Temperature Dependence of flow behavior

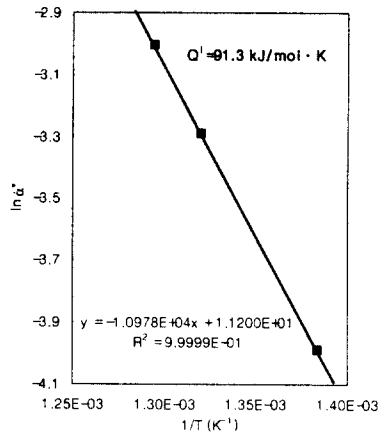


Fig.2 The $\ln \dot{\alpha}^*$ plot for activation E. determination

온도의 상승에 따라 낮은 응력 및 높은 변형율속도 쪽으로 전체 유동곡선이 이동하며, 결정립계미끄러짐이 나타나는 구간도 확대됨을 알 수 있다. 전술한 비탄성변형이론을 적용하여 유동곡선을 분석해 보면 전체변형량($\dot{\epsilon}$)이 아래와 같이 결정립계미끄러짐과(\dot{g}) 이를 보완하는 결정립내변형($\dot{\alpha}$)으로 나누어지게 된다.[1]

$$\dot{\epsilon} = \dot{\alpha} + \dot{g} \quad [1]$$

$$\left(\frac{\dot{g}}{\dot{g}_0}\right) = \left(\frac{\sigma}{\Sigma_x} - 1\right)^{1/M_x} \quad [2]$$

$$\left(\frac{\sigma^*}{\sigma'}\right) = \exp(\dot{\alpha}^*/\dot{\alpha})^n \quad [3]$$

이러한 구성방정식에 나타난 재료상수를 각 온도에 대하여 수치해석적으로 결정할

수 있다. (Table.1)

Temp (°C)	GMD (p=0.15)		GBS ($M_r=1.0$)	
	log σ^* (MPa)	log $\dot{\alpha}^*$	log Σ_r (MPa)	log \dot{g}_n
450	2.03	-1.73	0.185	-5.32
485	1.96	-1.43	-0.145	-5.21
500	1.94	-1.30	-0.397	-5.13

Table.1. The constitutive parameters determined from load relaxation

위의 결과에서 알 수 있듯이 결정립계미끄러짐은 $M_r=1.0$ 인 뉴턴점성유동을 보이며, 온도의 상승에 따라서 낮은 임계응력(Σ_r)과 높은 임계속도(\dot{g}_n)를 가지게 됨을 알 수 있다. 도움기구인 입내변형은 주어진 온도구간에서 내부강도(σ^*)가 비교적 일정한 값을 나타냈고 이는 미세조직이나 입내변형기구가 실험구간 내에서 일정하게 유지된다는 것을 가리킨다. 일정한 내부강도가 가정될 수 있을 때, 소성변형의 온도의존성을 나타내는 $\dot{\alpha}^*$ 를 온도에 따라 plot 하면 (fig.2) 선단전위가 결정립계의 장애물을 통과하는 데 필요한 활성화에너지 Q'를 구할 수 있는데, 이 값은 91.3 kJ/mol·K 로 Al의 결정립계에서의 자체확산 (grain boundary self diffusion)의 활성화에너지 (~84 kJ/mol·K)보다 약간 높은 값을 나타냈다.[1.2]

이러한 행해진 인장시험에서는 결정립계미끄러짐이 뚜렷이 나타나기 시작하는 485°C 를 전후로 연신율의 증가폭이 커짐을 알 수 있었다. 변형미세조직의 관찰에서는 응력이완실험의 해석에서 결정립계 미끄러짐이 나타나지 않는 구간에서는 입내에서의 전위활동을 관찰할 수 있었고, 초소성이 예측되는 구간에서 변형된 조직은 결정립계에서 도움기구의 작용으로 인한 PFZ (precipitate free zone)등이 형성되어 있음을 볼 수 있었다[2,3]. 이러한 결정립계의 변화가 비탄성변형이론에 의한 해석에서 예측되는 최적초소성조건에 가까울수록 활발히 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

초소성변형을 구성하는 결정립계미끄러짐과 입내변형에 의한 보완을 응력이완실험결과에 대한 비탄성변형이론의 적용으로 정량적으로 해석할 수 있었다. 고온영역에서 소성변형에 대한 온도의존성을 제시된 내부변수의 변화로 파악하였으며, 이렇게 예측된 초소성변형조건이 실제 인장시험 및 미세조직변화와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Y.W.Chang & E.C. Eifanis, "Constitutive Laws for Engineering Materials"

- ed. C.S.Desai, 1987, 293
2. D.H.Shin, K.S. Kim, D.W.Kum, & S.W.Nam, 1990, Metall. Trans. Vol.21A, 2979
 3. U.Koch, W.Bunk, P.J. Winkler, 1991, Superplasticity in Advanced Materials, ed. S.Hori, M.Tokizane & N. Furushiro, 57
 4. M.K.Rao, A.K.Mukherjee, 1987, JOMS, Vol.22, 459