

Al 6061 합금의 고온 소성변형 조건의 예측

김성일* · 정태성* · 유연철* · 오수익**

(1999년 6월 30일 접수)

Prediction of High Temperature Plastic Deformation Variables on Al 6061 Alloy

Sung-Il Kim, Tae-Sung Jung, Yeon-Chul Yoo and Soo-Ik Oh

Abstract

The high temperature behavior of Al 6061 alloy was characterized by the hot torsion test in the temperature ranges of 400~550°C and the strain rate ranges of 0.05~5/sec. To decide optimum deformation condition, three types of deformation maps were individually made from the critical strain (ϵ_c), deformation resistance (σ_p) and deformation efficiency (η). The critical strain (ϵ_c) for dynamic recrystallization (DRX) which was decided from the inflection point of strain hardening rate (θ) - effective stress (σ) curve was about 0.65 times of peak strain(ϵ_p). The relationship among deformation resistance (peak stress, σ_p), strain rate ($\dot{\epsilon}$), and temperature (T) could be expressed by $\dot{\epsilon} = 2.9 \times 10^{13} [\sinh(0.0256\sigma_p)]^{7.3} \exp(-216,000/RT)$. The deformation efficiency (η) which was calculated on the basis of the dynamic materials model (DMM) showed high values at the condition of 500~550°C, 5/sec for 100% strain. The results from three deformation maps were compared with microstructures. The best condition of plastic deformation could be determined as 500°C and 5/sec.

Key Words : High Temperature Deformation, Dynamic Recrystallization (DRX), Deformation Resistance, Deformation Efficiency (η), Deformation Map

1. 서 론

알루미늄 구조용 재료로 폭넓게 이용되는 Al 6061 합금은 열간 압연 또는 단조공정으로 고온 소성 변형되며 변형 중에 가공 경화 (strain hardening)와 동적인 연화 (dynamic softening)가 동시에 발생하므로 이들의 상호작용으로 최종 기계적 성질이 결정된다.^(1, 3-9) 특히, Al 6061 합금은 열처리형 합금으로 고온 변형 후 석출 경화

(precipitation hardening)를 위한 열처리를 하는데 이때 석출물은 주로 결정립계 (grain boundary)와 아결정립계 (subgrain boundary), 및 전위 주위에서 석출된다.⁽²⁾ 석출 경화에 의한 강화효과를 효과적으로 얻기 위해서는 열처리 공정 전 미세 조직이 동적 재결정 (dynamic recrystallization, DRX)에 의해 전위 밀도와 결정립계의 밀도가 높은 상태이어야 한다. 따라서, 열처리 전 고온 소성변형 조건은 동적 재결정의 발생에 적합한 조건으로

* 인하대학교 재료공학부
** 서울대학교 기계항공공학부

되어야 하는데 이는 고온 변형 중에 발생하는 동적 회복 (dynamic recovery, DRV)이나 동적 재결정의 동적인 연화과정은 변형 조건에 따라 달라지므로 적절한 가공 조건의 선택은 재료의 최종 기계적 성질의 향상에 있어서 매우 중요하다고 하겠다. 또한, 가공 변수들인 온도 (T), 변형속도 ($\dot{\epsilon}$), 변형량 (ϵ)에 따라 동적인 연화의 정도와 변형저항 (deformation resistance)이 결정되므로 제품의 형상이 복잡하거나 큰 변형량이 가해질 경우에는 국부적인 소성유동에 의한 응력 집중 (stress concentration)이나 미세 균열 (micro crack)이 발생하기도 한다. 따라서, 가공변수에 따라 변화하는 재료의 동적인 거동과 변형저항을 정확히 예측하여 변형결함을 최소화하고 동적 재결정에 의한 결정립 미세화 (grain refinement)까지 얻을 수 있는 최적의 변형조건을 파악하는 것이 열간 변형에는 필수적이라고 하겠다.

본 연구에서는 고온 유동곡선을 분석하여 가공 변수에 따라 변화하는 변형저항 및 임계 변형량 (critical strain)을 정량적으로 나타내 이 정량식들을 이용하여 동적 재결정의 발생에 초점을 맞춘 변형 지도 (deformation map)와 연속변형에서의 최대 응력값을 표시한 변형 지도를 작성하고자 하였다. 이와 함께 변형효율 (deformation efficiency, η)을 이용한 변형 지도를 작성하여 주어진 변형량에 대해 동적인 연화과정이 가장 쉽게 발생할 수 있는 영역을 판단하고자 하였다. 세 가지 형태의 변형 지도로부터 Al 6061 합금의 고온에서의 변형 특성을 파악하고 이를 미세 조직과 비교하여 적합한 가공조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

표 1의 조성을 갖는 Al 6061 합금의 봉재를 10 mm ϕ x 20 mm l 의 고체형 비틀림 시편으로 제작하여 고온 비틀림 시험을 실시하였다. 초기 결정립의 크기는 변형 전 550°C에서의 열처리를 통해 110 μ m로 일정하게 하였다. 연속 변형은 400~550°C, 0.05~5/sec의 실제 생산공정과 비슷한 변형조건에서 실시하였으며 각각의 공정변수에 따른 응력-변형률 곡선의 변화를 분석하였다. 이 때 변형 온도까지의 승온 속도는 1°C/sec로 하였고 변형 온도에서 10분간 유지한 후 변형하였다. 실험에서 얻은 토오크-전단변형률은 유효응력-유효변형률로 전환하여 유동곡선을 구하였다. 가공 변수에 따른 유동 응력곡선의 변화를 이용하여 미세 조직의 변화와 공정변수와의 관계를 정량화 하였고 변형효율을 계산하였다. 고온비틀림시험을 통해서

Table 1 The 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.

얻은 비틀림모우멘트와 비틀림각은 Fields와 Backofen이 제시한 식과 von Mises 항복조건을 이용하여 다음과 같이 일축압축인장 상태인 유효응력(σ)과 유효변형률(ϵ)로 변환하였다.^(1,3)

$$\tau = M(3 + p + q) / 2\pi r^3 \quad (1)$$

$$\gamma = 2\pi r N / L \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{3}\tau \quad \epsilon = \gamma / \sqrt{3} \quad (3)$$

비틀림응력 τ 는 비틀림모멘트값으로부터 (1)식과 같이 계산할 수 있으며 이때, τ 는 전단응력, γ 는 전단 변형률, M는 비틀림 모멘트, p는 가공경화율(strain hardening rate), q는 변형속도 민감도(strain rate sensitivity)이고 r, L은 시편의 측정부 반경 및 길이, N은 회전수이다. 시편은 미세 조직의 관찰을 위해 변형 후 급냉하고 단면을 미세 연마 후 3%HF - 5% H_2SO_4 수용액으로 에칭하였다. 미세 조직의 관찰은 광학 현미경을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고온 연화 기구와 임계 변형량

Fig. 1은 일정한 변형온도, 450°C에서 변형속도를 달리 하여 변형한 후 얻은 유동 응력곡선과 일정한 변형속도, 0.5/sec에서 변형온도를 달리하여 연속 변형한 후 얻은 곡선을 함께 나타낸 것이다. 유동 응력은 변형 초기 단계에 가공 경화에 의해 급격히 증가하다가 임계 변형량 (critical strain, ϵ_c) 이후에 발생하는 동적 재결정(DRX)의 진행으로 인해 최대 값(peak stress, σ_p)에 도달한 후 점차 감소하게 된다. 이때 변형 전의 조대한 결정립은 변형 중 동적 재결정의 발생으로 점차 미세해지고 변형이 계속 진행되면 가공 경화의 정도와 동적인 연화 정도가 평형을 이루어 유동 응력은 정상 상태 응력(steady state stress, σ_{ss})을 유지하게 된다. 정상 상태에서의 동적 재결정립의 크기는 일정한 수준을 유지하는데 초기 결정립에 비해 매우 미세한 등축정의 결정립을 갖게 된다. 이는 동적 재결정립의 핵이 변형 중에 결정입계, 슬립밴드, 석출

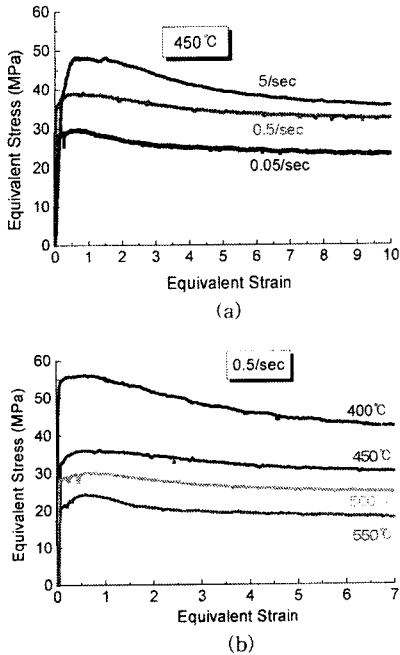


Fig. 1 The representative flow stress curves of Al 6061 alloy from hot torsion tests
 (a) showing the effects of strain rates under the constant temperature of 450 °C
 (b) showing the effects of temperature under the constant strain rate of 0.5/sec

Table 2 Critical strain, deformation resistance, and deformation efficiency at the various deformation conditions

Temperature (°C)	Strain Rate (s ⁻¹)	Critical Strain	Deformation Resistance (MPa)	Deformation Efficiency		
				Strain 0.4	1	2
400	0.05	0.38	48.11	0.161	0.196	0.227
400	0.5	0.39	58.85	0.133	0.164	0.189
400	5	0.40	68.40	0.104	0.130	0.150
450	0.05	0.36	29.72	0.215	0.219	0.252
450	0.5	0.37	38.91	0.170	0.196	0.213
450	5	0.37	48.23	0.123	0.171	0.172
500	0.05	0.35	25.86	0.200	0.206	0.253
500	0.5	0.35	33.23	0.194	0.213	0.243
500	5	0.36	43.71	0.187	0.221	0.233
550	0.05	0.33	21.39	-0.040	0.187	0.239
550	0.85	0.34	26.50	0.211	0.234	0.274
550	5	0.35	37.18	0.407	0.278	0.307

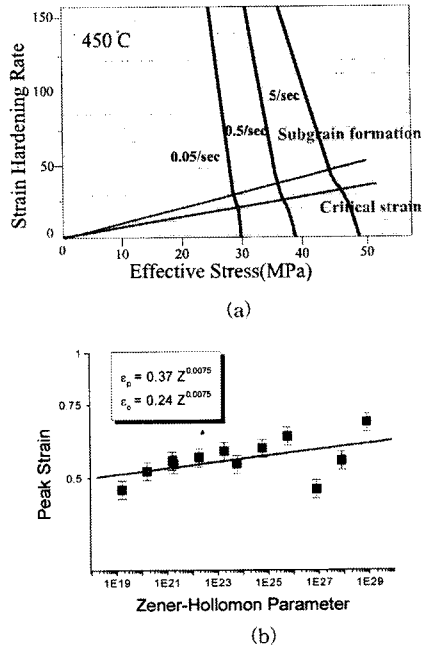


Fig. 2 The plots of (a) strain hardening rate - effective stress curve and (b) the relationship between critical strain and Z-parameter

물 등에서 빠르게 발생한 후 성장하기 때문이다.^(1, 3-9) Al 6061 합금의 경우, 동적 재결정립의 평균 크기는 초기 결정립의 크기의 약 1/4 정도로 미세해졌다. 특히, 변형 후 고온에서 유지할 때 발생하는 정적 재결정 (static recrystallization)에 의해 형성된 결정립이 매우 낮은 전위밀도를 나타내는 반면에 동적 재결정립은 고온에서의 연속 변형 중에 발생하기 때문에 결정립 내부에 전위 셀 조직 (cell structure)이나 아결정립(subgrain)이 형성되며 결정립의 크기도 훨씬 미세해서 기계적 특성이 향상된다.^(1, 3-9) 따라서 동적 재결정의 발생 유무는 재료의 기계적 특성 향상에 있어 매우 중요하다고 하겠다. 금속 재료에 있어서 동적 재결정의 발생은 임계 변형량을 초과했을 때 나타나는데 일반적으로 임계 변형량은 대략 최대 변형량 (peak strain, ϵ_p)의 60~80%의 값을 갖는 것으로 보고되고 있다.⁽³⁻¹²⁾ 동적 재결정의 발생에 필요한 임계 변형량은 Fig. 2(a)에 보인 가공경화 속도(strain hardening rate, θ)-유효 응력(effective stress)의 관계로부터 구할 수 있다. 이 곡선의 기울기는 변형이 진행되면서 변화하는데 가공경화에 의해 생성된 전위가 아결정립(subgrain)을 형성할 때와 아결정립의 밀도가 임계 수준에 도달해서

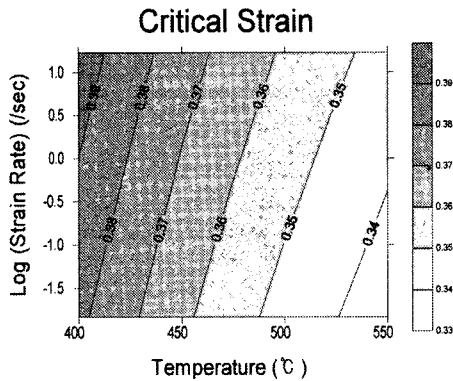


Fig. 3 The deformation map of critical strain at the various deformation conditions

동적 재결정립의 핵생성이 발생하는 때에 변화한다.⁽¹²⁾ 따라서 이 곡선의 변곡점으로부터 임계 변형량을 결정할 수 있다. Al 6061합금의 경우 임계 변형량은 모든 변형 조건에 대해 최대 변형량(ϵ_p)의 65% 정도의 값을 나타내었다. 임계 변형량은 변형속도와 변형온도에 의존하므로 변형속도를 변형온도로 보정한 Zener-Hollomon parameter⁽⁶⁻¹²⁾를 이용하여 정량식으로 나타낼 수 있었으며 이를 Fig. 2(b)와 표 2에 나타내었다. 그림 3에 변형 조건에 대한 임계 변형량의 변화를 등고선도를 이용하여 나타내었다. 임계 변형량은 변형속도의 변화보다는 온도의 변화에 대해 민감하게 변화하므로 변형온도를 이용하여 쉽게 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 임계 변형량 값이 작은 변형조건에서의 변형은 임계 변형량이 큰 변형조건에서의 변형에 비해 작은 변형량으로도 쉽게 동적 재결정을 발생시킬 수 있다는 점에서 재료의 동적인 거동이 유리한 조건이라고 할 수 있다. 따라서 임계 변형량 값이 비교적 작은 고온 저변형속도의 조건을 선택하는 것이 변형에 유리할 것으로 판단된다.

3.2 변형저항의 예측

유동 응력곡선에서 응력 수준은 변형온도와 변형속도에 의존하였는데 Fig. 1에 나타낸 것처럼 변형 속도가 증가할수록 증가하였으며 변형온도가 증가할수록 감소하였다. 이때 최대 응력(σ_p)과 변형 속도의 관계식은 멱수 법칙(power law, $\dot{\epsilon} = 2.17 \times 10^{-16} \sigma_p^{9.87}$), 지수 법칙(exponential law, $\dot{\epsilon} = 0.7 \times 10^{-4} \exp[0.253 \sigma_p]$) 및 hyperbolic sine law($\dot{\epsilon} = 0.3 \sinh[0.0256 \sigma_p]^{7.296}$)로 표현할 수 있다. Al 6061합금은 이 중 hyperbolic sine law에 적용하는 것이

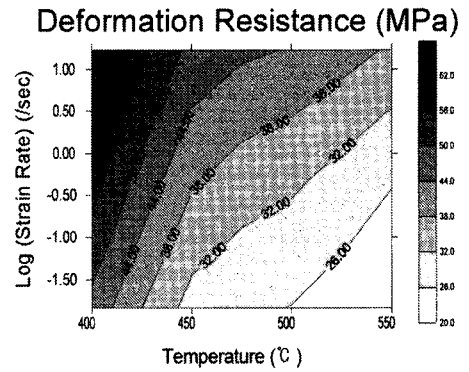


Fig. 4 The deformation map of deformation resistance at the various deformation conditions

가장 적합하였다.^(11,13) 따라서 가공 변수들과의 정량적인 관계식은 Zener-Hollomon parameter와 hyperbolic sine law를 이용하여 온도 (T), 변형속도 ($\dot{\epsilon}$), 응력 (σ)을 모두 고려한 다음의 정량식으로 나타낼 수 있었다.

$$\dot{\epsilon} = 2.9 \times 10^{13} [\sinh(0.0256 \sigma_p)]^{7.296} \exp[-(216 \text{ kJ/mol}) / RT] \quad (4)$$

Fig. 4는 최대 응력 값(σ_p)을 변형에 대한 저항으로 고려하여 변형조건에 대해 나타낸 등고선도이다. 임의의 변형 조건에 대한 변형저항은 위의 식으로부터 쉽게 예측할 수 있었으며 그 결과를 표 2에 보였다. 변형저항은 온도가 감소할수록, 변형속도가 증가할수록 증가하였다. 고온 변형 시 저온, 고변형속도에서 높은 변형저항을 보이므로 이 조건을 피하여 변형할 때 변형결함이나 국부적인 소성유동을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 변형저항이 낮은 변형조건은 임계 변형량이 작은 값을 나타내는 변형조건과도 일치하므로 동적 재결정의 발생이 유리한 변형조건에서 변형은 동적 재결정에 의해 가공 경화된 재료의 변형저항을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이처럼 변형 저항을 이용한 변형지도는 그림 3에 보인 임계 변형량을 이용한 변형지도와 함께 사용하면 제조 공정에서 임의의 변형 조건에 대한 필요 압하력과 동적 재결정을 발생시키는 데 필요한 최소 압하량을 미리 예측할 수 있다. 즉, 450°C, 5/sec의 변형조건이 주어진다면 연속변형 시 동적 재결정의 발생을 위해 35% 이상의 변형량을 가해야 하며 32 MPa 이상의 응력을 극복할 수 있는 압하력을 가해야 한다. 임계 변형량을 최소 압하량으로 선택하는 이유는 다만 변형공정으로 이루어지는 실제 변형공정에 있어서

변형과 변형사이의 유지시간 중에 발생하는 정적인 연화 과정에 있어서 정적 재결정보다는 준동적 재결정 (meta-dynamic recrystallization, MDRX)을 발생시키는 것이 미세한 결정립을 얻는데 유리하기 때문이다.^(14~15) 이처럼 임계 변형량과 변형저항을 이용한 변형지도는 적절한 공정 조건의 선택에 있어서 기준이 되며 다단변형 (multi-pass deformation) 공정으로 이루어져 있는 실제의 고온 소성변형에 있어서 변형횟수 (pass)와 패스 변형량 등을 결정하는데 있어서도 중요한 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 변형 효율(deformation efficiency)

변형 효율은 변형되는 재료를 에너지의 분산자 (energy dissipator)로 고려한 동적 재료 모델 (dynamic materials model, DMM)이론^(16~22)에 근거하여 계산할 수 있다. 재료를 변형시키기 위해 가해진 에너지는 Fig. 5에 보인 것처럼 두 가지 형태의 에너지로 분산되는데 순수하게 재료의 동적인 변형을 통해 분산되는 파워 분산자 (power dissipator)인 J co-content와 소성 불안정성이 주원인이 되어 열 발생으로 분산되는 G content이다. 변형 효율 (deformation efficiency)은 동적 회복이나 동적 재결정 처럼 재료의 동적인 거동으로 분산되는 에너지의 효율을 의미하는 것으로서 재료의 변형속도 민감도 (strain rate sensitivity, m)가 1일 때 갖는 최대 값 (Jmax)에 대한 J co-content의 비율이다. 즉, 변형효율이 높다는 것은 주어진 변형 에너지가 재료의 동적인 변형 거동으로 소모 되는 정도가 커서 동적 회복이나 동적 재결정이 쉽게 발생 한다는 것을 의미한다. 따라서 변형효율이 높은 변형조건에서 재료를 변형하면 가공경화에 의해 전위의 밀도가 높아진 미세 조직이 동적인 연화과정을 통해 전위가 소멸되거나 재배열하고 새로운 결정립이 형성되어 심한 국부적인 변형에 의해 발생할 수 있는 결함이 거의 없는 미세 조직을 유지한다고 할 수 있다. 또한 동적인 재료 거동이 유리하므로 변형저항이 비교적 낮은 값을 보이게 된다. 재료의 응력과 변형속도의 관계는 변형속도 민감도를 이용하여 표현되므로 변형효율은 다음의 식(2), (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$dJ/dG = d \log \bar{\sigma} / d \log \dot{\epsilon} = m \tag{5}$$

$$\eta = J / J_{max} = 2m / (m + 1) \tag{6}$$

변형속도 민감도 (strain rate sensitivity, m)는 변형조

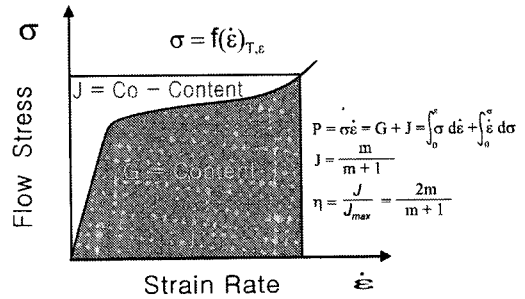


Fig. 5 The schematic diagram of flow stress-strain rate showing the region of G content and of J co-content^(18~20)

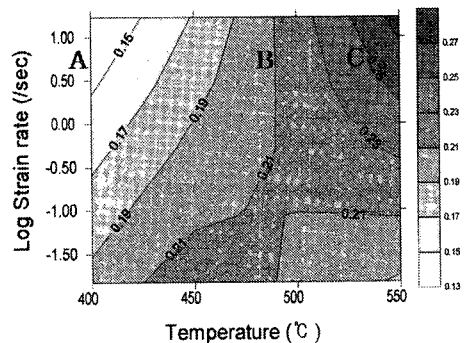


Fig. 6 The deformation map of Al 6061 alloy showing contours of constant efficiency at the constant strain of 1.0

건에 따라 변하므로 변형 효율은 변형 조건인 변형속도와 변형온도에 의존한다. 따라서 변형조건에 대한 변형효율 값을 변형지도(deformation map)로 나타낼 수 있었다. 표 2에 여러 가지 변형조건에 대한 변형효율을 변형량 0.4, 1, 2에 대해 각각 나타내었다. 변형량이 증가할수록 전체적인 효율값은 증가하였는데 이는 변형량이 증가함에 따라 동적 재결정 분율(fraction of DRX)이 증가하기 때문으로 판단된다. Fig. 6에 변형량이 1.0인 경우에 대한 변형효율을 등고선도로 나타내었다. 변형효율은 변형 조건이 550℃, 5/sec일 때 최대값을 보였으며 400℃, 5/sec에서 최소 값을 나타내었다. 전체적으로는 고온과 높은 변형속도의 변형 조건에서 높은 변형효율을 나타내었고 저온과 높은 변형속도의 변형 조건에서 낮은 변형효율을 나타내었다. 이 결과로부터 고온일수록 낮은 변형저항과 작은 임계 변형량을 보이는 앞의 결과와 비교해볼 때 변형효율이 높은 변형조건에서 재료의 동적인 거동, 즉 동적 재결정이 잘 발생할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

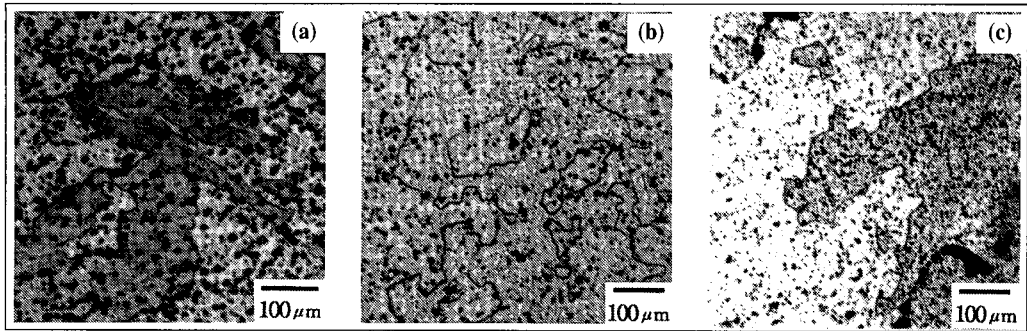


Fig. 7 The optical microstructure of Al 6061 alloy 100% hot deformed at the conditions, A, B, C of Fig. 6 (a) A (400 °C, 5/sec), (b) B (500 °C, 5/sec) and (c) C (550 °C, 5/sec)

또한 변형효율이 변형속도 보다는 변형온도의 영향에 민감한 경향을 보이는 것도 입계 변형량과 변형저항이 보이는 결과와 대체로 일치하였다. 따라서 Al 6061 합금을 고온 변형할 때 변형온도를 이용하여 미세 조직을 쉽게 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 미세 조직의 관찰

미세 조직의 관찰은 서로 다른 변형조건에서 100% 변형된 시편에 대해 실시하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 3, 4, 6에 각각 나타낸 입계 변형량과 변형 저항 그리고 변형 효율은 변형속도 보다는 변형온도의 변화에 따라 크게 변화하므로 실제 가공공정에 가까운 5/sec의 일정한 변형속도에서 400°C, 500°C, 550°C에 대한 미세 조직을 관찰하였다. Fig. 7(a)의 400°C, 5/sec의 변형조건은 입계 변형량이 높고, 변형저항이 매우 큰 값을 나타내며 변형 효율은 최소 값을 보인 영역으로 국부적인 변형이 발생하거나 동적 재결정이 거의 발생하지 않을 것으로 예측할 수 있다. 그 미세 조직도 예측한 결과와 마찬가지로 특별한 결함은 발견되지 않았지만 동적 재결정립이 거의 관찰되지 않은 변형된 조직을 보였다. 따라서 100%이상의 변형을 받거나 복잡한 형상으로 변형할 경우에 결함이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 입계 변형량과 변형저항이 비교적 작고 변형 효율이 최대 값을 보인 550°C, 5/sec에서 변형한 시편의 미세 조직(c)은 0.85T_m에 해당하는 550°C의 높은 온도에서의 변형으로 입계에서 균열이 발생하였다. 이는 입계에 존재하는 제 2상 입자 (α AlFeSi, AlFeSiMg)가 상대적으로 연성이 높아진 기지조직의 변형에 대해 균열의 원인으로 작용한 것으로 판단되며 이 변형 조건에서 변형 효율이 큰 값을 나타낸 것은 균열 발생으로 새로운 계면이 생성되어 변

형 에너지가 분산되었기 때문이다.⁽²²⁻²³⁾ 500°C, 5/sec의 경우에는 부분적으로 동적 재결정이 발생하여 (a), (c)에 비해 작아진 결정립을 관찰할 수 있었으며 결함도 발견되지 않았다. 이는 고온에서 입계의 확산계수와 이동도가 증가하므로 (a)의 경우보다 아결정립의 성장이 빨라져 동적 재결정의 발생 및 진행이 촉진된 것으로 판단된다.^(1,3-9, 24) 따라서 Al 6061합금의 최적의 변형조건은 동적 재결정이 쉽게 발생할 수 있을 만큼의 고온이며 변형 중 입계 균열이 발생하지 않는 500°C, 5/sec로 결정할 수 있었다.

4. 결론

(1) Al 6061합금의 동적 재결정 발생에 필요한 입계 변형량(ϵ_c)은 최대 변형량(ϵ_p)의 약 0.65배 정도이었으며 정량화 하여 변형지도로 작성할 수 있었다.

(2) 변형저항은 온도 (T) · 변형속도 ($\dot{\epsilon}$) · 응력 (σ)을 모두 고려한 다음의 정량식으로 나타낼 수 있었으며 입계 변형량과 변형저항을 이용한 변형지도로부터 적절한 압하량과 압하력을 예측할 수 있었다.

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

(3) 변형효율을 계산하여 작성한 변형지도를 통해 변형량 (ϵ) · 온도 (T) · 변형속도 ($\dot{\epsilon}$)에 따른 Al 6061 합금의 동적인 거동이 유리한 변형조건을 예측할 수 있었으며 100%의 변형량에 대해 550°C, 5/sec의 조건에서 최대 효율을 보였다.

(4) 100%의 변형량에 대해 입계 변형량 · 변형 저항 · 변형효율 · 미세 조직의 관찰 결과를 종합해 볼 때 Al

6061 합금을 큰 변형량으로 변형시킬 때 변형결함을 최소화할 수 있는 변형조건 영역은 500℃, 5/sec이었다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) C. M. Sellars, 1990, Mater. Sci. Tech., Vol. 6, p. 1072.
- (2) A. J. Ardell, 1985, Metall. Trans., 16A, p. 2131.
- (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. 217, pp. 1157~1162.
- (4) Y. C. Yoo, J. S. Jeon and H.I.Lee, 1997, "The Effect of SiCw on The Hot Deformation Behavior of SiCw/AA2124 Composites", Comp. Sci. Technol., Vol. 57, pp. 651~654.
- (5) 조상현, 김성일, 유연철, 노광섭, 이경중, 권오준, 1997, "304 오스테나이트계 스테인리스강의 고온 연화", 대한금속학회지, 35(6), pp. 681~688.
- (6) B. C. KO, K. S. PARK and Y. C. YOO, 1998, "Hot Deformation Behavior of SiCp/Al2024 Composites Reinforced with Various Sizes of SiCp", Mater. Sci. Tech., 14, 8, pp. 265~269.
- (7) S. H. CHO, S. I. KIM and Y. C. YOO, 1997, "Determination of No-Recrystallization Temperature of Invar Alloy by Fractional Softening Measurement during the Multistage Deformation", J. of Mater. Sci. Lett., 16, pp. 1836~1837.
- (8) S. H. CHO, S. I. KIM and Y. C. YOO, 1998, "The Effects of Determination Variables on Hot Workability of Austenitic Stainless Steel", Metals and Materials, 4, 4, pp. 732~736.
- (9) L. N. Pussegoda, S. Yue, and J. J. Jonas : Mater. Sci. Tech., 7 (1991) 129.
- (10) C. C. Anya and T. N. Baker : Mater. Sci. Technol., 6, (1990), 554.
- (11) 조상현, 김유승, 유연철, 임성한, 오수익, 1998, "Al6061 합금의 고온변형시 변형저항 예측", 대한금속학회지, 36, 4, pp. 502~508.
- (12) E. I. Poliak and J. J. Jonas, 1996, "A One-Parameter Approach to Determining the Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization", Acta Mater., 44, 1, pp. 127~136.
- (13) H. J. McQueen, E. Evangelista, N. Jin and M. E. Kassner (1995) : Metall. Trans., 26A. 1757.
- (14) C. Roucoules, P. D. Hodgson, S. Yue, and J. J. Jonas, 1994, "Softening and Microstructural Change Following the Dynamic Recrystallization of Austenite", Metall. Trans., 25A., pp. 389~400.
- (15) C. Roucoules, S. Yue, and J. J. Jonas, 1995, Metall. Trans., 26A., p. 181.
- (16) F. Montheillet, J. J. Jonas, and K. W. Neale, 1996, "Modelling of Dynamic Material Behavior: A Critical Evaluation of the Dissipator Power Co-content Approach", Metall. Trans. A 27A, pp. 232~235.
- (17) Y. V. R. K. Prasad, 1996, "Author's Reply : Dynamic Materials Model : Basis and Principles", Metall. Trans. 27A, pp. 235~236.
- (18) J. Sarkar, Y. V. R. K. Prasad, and M. K. Surappa, 1995, "Optimization of Hot Workability of An Al-Mg-Si alloy Using Processing Maps", J. Mater. Sci., 30, pp. 2843~2848.
- (19) S. Venugopal, S. L. Mannan, and Y. V. R. K. Prasad (1992) : Metall. Trans. 23A, 3093.
- (20) N. Srinivasan and Y. V. R. K. Prasad (1992) : Mater. Sci. Tech., 8, 206.
- (21) A. K. S. Kalyan Kumar. MS Thesis. Indian Institute of Science, Bangalore, India (1987).
- (22) B. V. Radhakrishna Bhat, Y. R. Mahajan, H. Md. Roshan and Y. V. R. K. Prasad (1995) : Mater. Sci. Tech., 11, 167.
- (23) F. J. Humphreys (1977) : Acta. Metall. 25 1323.
- (24) W. P. Sun and E. B. Hawbolt (1995) : ISIJ International 35, 7, 908.