

변형가공도를 이용한 Al 5083 합금의 고온변형거동

고병철* · 김종현* · 유연철*

(1998년 6월 9일 접수)

High Temperature Deformation Behavior of Al 5083 Alloy Using Deformation Processing Maps

Byung-Chul Ko, Jong-Hyun Kim and Yeon-Chul Yoo

Abstract

The high temperature deformation behavior of Al 5083 alloy has been studied in the temperature range of 350 to 520 °C and strain rate range of 0.2 to 3.0/sec by torsion test. The strain rate sensitivity (m) of the material was evaluated and used for establishing power dissipation maps following the dynamic material model. These maps show the variation of efficiency of power dissipation ($\eta = 2m/(2m+1)$) with temperature and strain rate. Hot restoration of dynamic recrystallization(DRX) was analyzed from the flow curve, deformed microstructure, and processing maps during hot deformation. Also, the effect of deformation strain on the efficiency of power dissipation of the alloy was analysed using the processing maps. Moreover, relationship between the hot-ductility and efficiency of power dissipation of the alloy depending on temperature and strain rate was studied using the Zener-Hollomon parameter ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$). It is found that the maximum efficiency of power dissipation for DRX in Al 5083 alloy is about 74.6 pct at the strain of 0.2. The strain rate and temperature at which the efficiency peak occurred in the DRX domain is found to be $\sim 0.1/\text{sec}$ and ~ 450 °C, respectively.

Key Words : High Temperature Deformation Behavior, Power Dissipation, Processing Map, Dynamic Recrystallization, Zener-Hollomon Parameter, Hot Ductility

1. 서 론

최근 금속재료의 고온소성변형에 있어서 어떤 외력하에서 변형이 일어났을 때 변형온도(T) · 변형속도($\dot{\epsilon}$) · 변형률(ϵ) 등의 변형조건을 이로부터 변형조직을 예측함은 물론 조직의 균일성을 얻기 위하여 유한요소 해석⁽¹⁾이나 모델링⁽²⁾ 등을 사용하여 최적의 열간가공조건을 예측하려

는 시도들이 진행되고 있다.

Gegel과 Alexander 등은 고온변형시의 온도와 변형속도를 달리하여 얻은 고온 유동응력곡선을 이용하여 재료의 동적거동을 예측할 수 있는 가공도(processing map)를 이용하여 최적의 고온가공조건을 결정할 수 있는 방법을 얻었다.^(3, 4) 이 가공도는 고온소성가공시 동적인 재료 거동을 정량적으로 기술할 수 있는 모델로써 Prasad⁽⁵⁾에

* 인하대학교 금속공학과

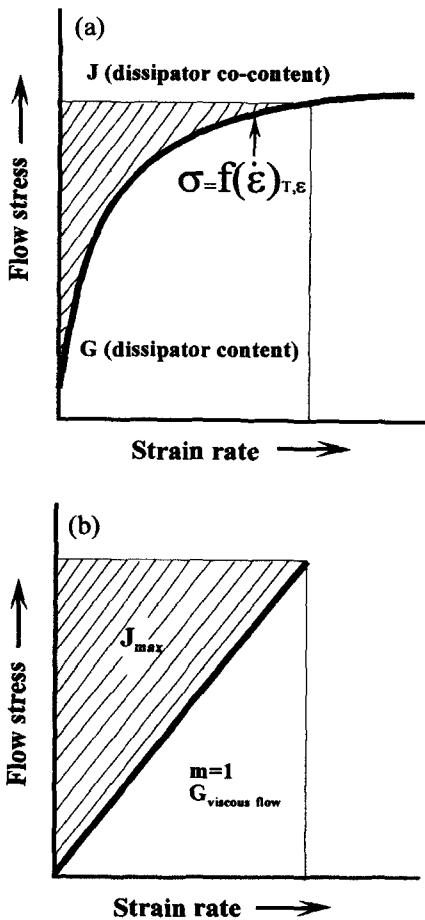


Fig. 1 (a) Schematic representation of G content and J content, representing the power dissipation through metallurgical processes such as dynamic recrystallization (DRX) and dynamic recovery (DRV). (b) Schematic representation showing J_{max} which occurs when strain rate sensitivity (m) of materials equals 1.⁽⁵⁾

의해 기초하며, 고온변형을 받는 재료가 파워(power) 분산자(dissipator)로 작용하는 시스템을 고려한 것이다. 즉, 고온소성가공시 외부로부터 가해진 파워는 열적 혹은 미세조직적으로 분산되며 G항과 J항으로 나눌수 있다(Fig. 1). 이때 G항은 소성불안정성에 관계되는 것으로써 주로 열발생과 관련된 파워분산을 나타내는 항(온도증가를 나타냄)이며, J항은 재료의 동적거동에 따른 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX)과 동적회복(dynamic recovery, DRV)과 같은 미세조직 변화에 의한 분산을 나타내는 항이다. 그리고, J항과 G항은 변형속도 민감도(strain rate sensitivity, m)에 의해 구분되며

일정온도, 일정변형량에서 J는 다음과 같은 식에 의해 m 의 함수가 된다.⁽⁵⁾

$$J = \int \dot{\epsilon} \cdot d\sigma = \frac{\sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot m}{m+1}$$

이상적인 파워분산자의 경우 G항이 최소가 되고 동적 미세조직 변화에 의한 J항이 최대가 되며 이때 $m=1$ 이고 $J=J_{max}=\sigma\dot{\epsilon}/2$ 로 표현할 수 있으며, 고온소성가공시 동적변형을 받는 재료의 파워 분산효율(efficiency of power dissipation)은 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁵⁾

$$\eta = \frac{J}{J_{max}} = \frac{2m}{m+1}$$

금속재료의 고온변형중 동적인 미세조직 변화는 DRX와 DRV로 대별되며, 파워분산효율 η 의 차이에 따라서 재료 전체가 갖는 변형효율이 달라지게 되므로 DRX나 DRV의 미세조직 차이도 나타나게 된다. 따라서, 최적의 고온소성가공 조건을 얻기 위해서는 η 이 최대가 되는 변형온도(T)와 변형속도($\dot{\epsilon}$) 조건을 동적재결정 영역(domain)에서 찾는 것이 필요하며 변형온도와 변형속도 따른 η 의 변화를 쉽게 알 수 있는 변형가공도를 얻는 것이 중요하다고 할 수 있다. 즉, 주어진 온도와 변형속도 구간에서 금속재료의 열간변형시 DRV와 DRX의 고온연화가 발생하는 안정 변형조건과 균열발생·공동형성·국부적 소성유동 등이 나타나는 불안정 변형조건의 영역을 쉽게 알 수 있으므로 동적변형을 받는 재료의 거동을 설명하는데 있어 대단히 편리하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 고강도 및 용접성이 우수하나 고온가공 조건에 따라 열간취성이 나타나는 Al 5083을 이용하여 Gegel과 Alexander 등의 모델^(3,4)을 적용하여 변형 가공도를 얻음으로써 최적의 열간가공조건을 제시하고자 하였으며 이때 파워분산효율에 따라 DRX와 DRV의 동적연화 특성이 어떻게 나타나는지를 미세조직 변화와 관련하여 구명하고자 하였다.

2. 실험방법

Al 5083 합금의 고온변형시 최적의 열간가공조건을 얻기 위하여 (주)롯데 알루미늄에서 구입한 Al 5083 압연 판재 Table 1을 사용하여 고온비틀림 시험하였다. Al 5083 합금의 고온변형 특성 평가를 위해 우선 압연 판재

를 500℃에서 1 시간 동안 용체화 처리한 후 표점거리 10 mm, 직경 7 mm의 고체형 비틀림 시편으로 제작하여 350, 370, 400, 430, 450, 480, 500, 520 ℃의 변형온도와 0.2, 0.5, 1.0, 3.0/sec의 변형속도에서 비틀림 시험하였다. 변형후 얻은 비틀림 모멘트(M)와 비틀림 각(θ)은 Fields 와 Backofen 이 제시한 식⁽⁶⁾과 Von Mises 항복조건⁽⁷⁾을 이용하여 유효응력(σ)과 유효변형률(ϵ)로 변환하였다.

$$\sigma = \sqrt{3} M(p+q+3)/2\pi r^3 \quad (1)$$

$$\epsilon = \gamma\theta/\sqrt{3} / L \quad (2)$$

여기서 p는 변형속도 민감도(strain rate sensitivity), r은 시편반경(specimen radius), q는 가공경화지수(strain hardening exponent), L은 표점거리(gauge length), θ 는 회전각(twist angle)이다.

Table 1 Chemical composition of Al 5083 alloy (wt.%)

wt. %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Al
Al 5083	~0.40	~0.35	~0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	~0.15	~0.25	bal.
this work	0.28	0.30	0.025	0.48	2.20	0.07	0.015	0.003	bal.

Table 2 Torque moment values (Nm) of Al 5083 alloy at different strain rates and temperatures for various strains

Strain	Strain rate (/sec)	Torque moment for temperature (°C) of							
		350	370	400	430	450	480	500	520
0.1	0.1	5.35	5.08	4.05	3.26	2.21	1.79	1.43	1.26
	0.2	5.94	5.15	4.30	3.40	3.37	2.41	2.16	1.83
	0.5	6.05	5.90	5.14	4.06	3.53	2.66	2.51	1.92
	1.0	6.16	5.91	5.02	4.24	3.83	3.13	2.55	2.37
	3.0	6.46	6.22	4.48	4.09	4.05	2.30	3.10	2.49
0.5	0.1	5.74	5.23	4.16	3.31	2.26	1.92	1.59	1.42
	0.2	6.54	5.42	4.48	3.49	3.47	2.55	2.26	2.02
	0.5	6.70	6.42	5.37	4.13	3.63	2.71	2.60	2.08
	1.0	7.02	6.47	5.46	4.48	3.98	3.25	2.62	2.50
	3.0	7.49	6.80	6.02	4.98	4.67	3.99	3.43	3.23
1.0	0.1	5.47	4.92	3.97	3.21	2.20	1.92	1.62	1.43
	0.2	6.20	5.08	4.23	3.31	3.32	2.49	2.23	2.02
	0.5	6.23	6.02	4.98	3.91	3.36	2.54	2.53	2.02
	1.0	6.54	5.97	5.03	4.13	3.67	3.03	2.54	2.37
	3.0	6.92	6.18	5.49	4.56	4.34	3.66	3.21	3.0
1.5	0.1	5.25	4.74	3.83	3.11	2.12	1.88	1.59	1.40
	0.2	5.90	4.82	4.04	3.20	3.21	2.40	2.16	1.96
	0.5	5.95	5.74	4.78	3.72	3.25	2.48	2.43	1.98
	1.0	6.22	5.72	4.82	3.95	3.52	2.91	2.42	2.29
	3.0	6.52	5.84	5.20	4.29	4.06	3.50	3.02	2.87
2.0	0.1	5.09	4.52	3.66	2.98	2.04	1.80	1.54	1.35
	0.2	5.71	4.64	3.90	3.09	3.08	2.35	2.11	1.93
	0.5	5.73	5.49	4.49	3.58	3.13	2.37	2.38	1.92
	1.0	5.93	5.54	4.61	3.80	3.39	2.80	2.36	2.23
	3.0	6.19	5.54	4.88	4.06	3.89	3.31	2.88	2.74

동적재결정에 필요한 임계변형률(critical strain, ϵ_c) 값은 유동응력곡선을 이용하여 일정 변형률($\epsilon=0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$)에서 가공경화율($\theta = (d\sigma/d\epsilon)$)과 유효변형률(ϵ)과의 관계로부터 구하였다.⁽⁷⁾ 고온연화 및 미세조직 변화와 관련된 파워 분산자의 효율($\eta = 2m/(m+1)$)은 비틀림 모멘트(Table 2)와 변형속도의 관계를 이용하여 변형속도 민감도(m) 값을 구하고 난 후 이를 이용하여 계산하였으며, 얻어진 파워분산자의 효율을 변형속도와 온도를 이용하여 3 차원 그래프로 나타내었으며 이를 온도와 변형속도의 2 차원 평면에 투영하여 등효율(iso-efficiency)의 등고선도(contour map)를 얻었다.

고온변형 후의 미세조직은 투과전자현미경으로 관찰하였으며, 투과전자현미경 관찰을 위한 시편은 $\sim 60 \mu\text{m}$ 까지 기계적 연마 후에 $\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ 를 1:3으로 하는 부식액에서 40 mA, -40°C 조건하에서 전해연마(jet thinning)하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 동적재결정 및 임계변형률

Fig. 2(a)와 (b)는 각각 Al 5083 합금을 370°C 및 430°C 에서 변형속도를 달리하여 고온비틀림시험한 후의 유동응력곡선이다. 유동곡선의 형태로 보아 가공경화 후 최대응력(peak stress)의 단일 피크(single peak)를 나타내었으며, 변형량이 증가함에 따라 유동응력이 일정하게 나타나는 정상상태를 갖는 전형적인 동적재결정 형태의 고온 유동응력 곡선을 얻을 수 있다. 그림에서와 같이, 변형온도가 $370 \rightarrow 430^\circ\text{C}$ 로 높아짐에 따라 유동응력은 감소하였으며, 변형속도가 $0.1 \rightarrow 3.0/\text{sec}$ 로 빨라짐에 따라서 유동응력은 증가하였으며, 피크변형률 이전에서의 가공경화율 역시 유동응력과 마찬가지로 변형온도 증가 및 변형속도 감소에 따라 감소함을 알 수 있었다. 이와같이 변형온도 증가 및 변형속도 감소에 따른 가공경화율의 감소는 고온변형시 동적재결정 시작에 필요한 임계변형률의 감소를 가져오게 된다. 즉, 동적재결정 시작에 필요한 ϵ_c 값은 Fig. 2의 유동응력곡선을 이용하여 가공경화율과 유동응력과의 관계로부터 구할 수 있는데⁽⁸⁾, $370, 430, 480^\circ\text{C}$ 에서 $0.5/\text{sec}$ 로 변형한 경우 동적재결정 시작에 필요한 임계변형률 값은 각각 $\sim 0.12, \sim 0.09, \sim 0.06$ 로 얻어졌다. 그리고, $370, 430, 480^\circ\text{C}$ 에서 피크변형률(peak strain, ϵ_p)은 각각 $\sim 0.19, \sim 0.14, \sim 0.09$ 로

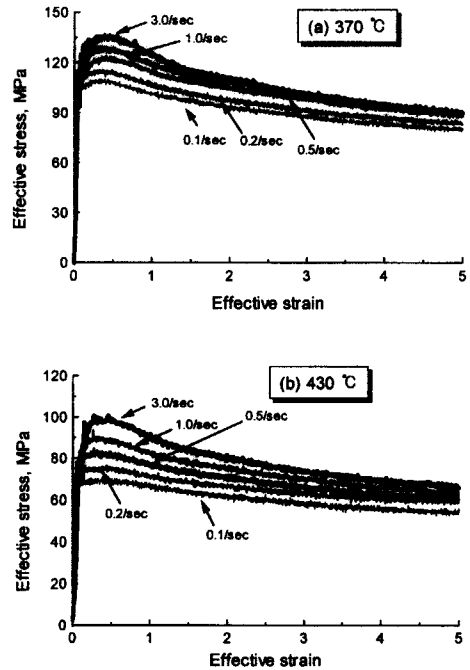


Fig. 2 Flow curves of Al 5083 alloy deformed at (a) 370°C and (b) 430°C under different strain rates



Fig. 3 TEM microstructure of the Al 5083 alloy deformed at 450°C under a strain rate of $1.0/\text{sec}$

나타나는 것으로 보아 고온일수록 동적재결정을 일으키기 위한 초기 변형량이 작음을 알 수 있다. 그리고, 동적재결정 시작에 필요한 임계변형률 ϵ_c 와 피크변형률 ϵ_p 와의 관계 (ϵ_p/ϵ_c)는 370, 430, 480 °C에서 각각 ~0.63, ~0.64, ~0.66 ϵ_p 인 관계가 있었으며 변형온도가 증가함에 따라 ϵ_c 와 ϵ_p 의 간격이 줄어들음을 알 수 있었다.

동적재결정에 필요한 ϵ_c 와 ϵ_p 는 변형조건에 따라 달라질 뿐만 아니라 서로 상관관계를 가지고 있는데 지금까지 연구결과에 의하면 $\epsilon_p/\epsilon_c \sim 0.6-0.8$ 의 범위에 있게 된다. 게다가, 온도와 변형속도 뿐만 아니라 변형전 초기 결정립 크기(D_0)도 ϵ_c 와 ϵ_p 값에 영향을 미치게 되는데 ϵ_p 의 경우 D_0 가 클수록 ϵ_p 도 증가한다는 연구결과도 있다.⁽⁹⁾ 이와같이 결정립 크기·결정구조·합금조성 등의 재료의 내부적인 성질과 온도·변형속도·변형량 등의 외부변형조건에 따라 ϵ_c 와 ϵ_p 가 어떻게 달라지는지 그리고 어떤 상관관계가 있는지를 정량적으로 밝히는 것은 압연·단조·인발 등의 고온소성변형동안에 동적재결정을 일으키기 위해서 초기변형률을 얼마로 해야하는지를 결정할 수 있으므로 대단히 중요한 문제라 할 수 있다.

금속재료의 고온변형시 동적재결정의 확인은 유도곡선의 형태와 함께 변형조직으로부터 구명되어야 한다. 즉 동적재결정이 발생한 변형조직은 아결정립, 결정립내 전위 등을 특징으로 하며 같은 크기의 정적재결정(static recrystallization, SRX)된 결정립의 경우보다 전위밀도가 높게 되므로 더욱 우수한 강도특성을 얻게 된다.^(9, 10) Al 5083 합금에서 동적재결정의 변형조직을 확인하기 위하여 450°C에서 1.0/sec로 고온변형하고 난 후의 조직을 TEM으로 관찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이, 고온변형동안 동적재결정 발생으로 인하여 결정립내에 아결정립이 발달하였음을 알 수 있고 결정립내에는 전위도 관찰되는 것으로 보아 Al 5083 합금의 고온연화기구는 동적재결정임을 알 수 있다. 일반적으로, 고온변형시 동적재결정 발생 후 결정립 크기는 온도와 변형속도 조건에 따라서 달라지게 된다. 즉 변형속도가 빠르고 변형온도가 낮을수록 결정립 및 아결정립 크기는 작아지게 된다. 이와같은 사실은 이미 지난 연구결과⁽¹¹⁾에서 TEM 조직으로 확인한 바 있는데, 350°C에서 변형한 경우에 등축정의 결정립과 연신된 결정립이 함께 관찰되었으며, 변형후 결정립 크기는 ~4 μm 으로 변형전의 결정립 크기보다 미세해짐을 알 수 있었고, 결정립내에는 ~0.4 μm 의 아결정립이 관찰되었다. 그리고 변형온도가 ~450°C로 높아짐에 따라 결정립은 ~7 μm 로 커졌으며 아결정립도 ~0.7 μm 로

써 ~350°C에서 변형한 경우보다는 커짐을 알 수 있었다. 이상으로부터, 유도응력곡선과 변형후 미세조직으로부터 Al 5083 합금의 고온연화기구는 동적재결정임을 알 수 있고, 공정변수인 변형속도와 온도를 제어함으로써 미세조직 제어가 가능함은 물론 동적재결정을 일으키기 위해 초기변형률을 얼마로 해야 하는지를 결정할 수 있었다.

3.2 파워분산효율

Fig. 4(a)는 변형률이 0.1일때 변형속도와 온도변화에 따른 파워분산효율의 효율 η 를 3차원으로 나타낸 것으로써, 고온·저변형 속도에서의 파워분산효율은 저온·고변형 속도에서의 효율값보다 큼을 알 수 있으며, ~450°C, 0.1/sec에서 효율값이 최대가 됨을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 분산효율을 온도와 변형속도의 2 차원 평

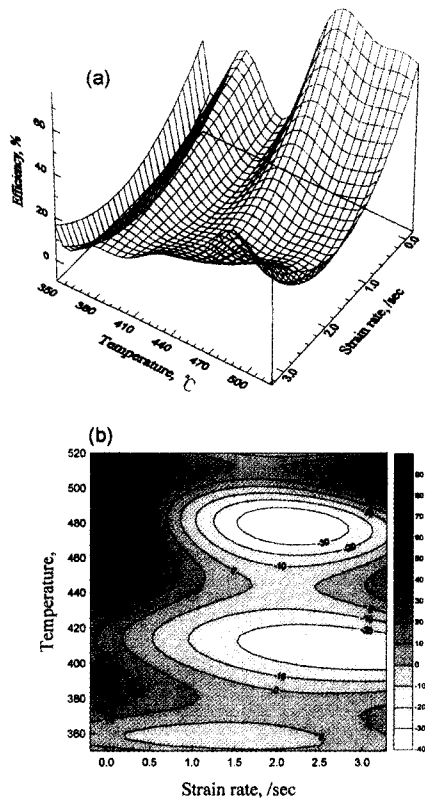


Fig. 4 (a) 3-D view of the variation of power dissipation efficiency with temperature and strain rate for Al 5083 alloy at strain of 0.1. (b) Contour map with iso-efficiency contour of the efficiency of power dissipation for Al 5083 alloy corresponding to 3-D map

면에 투영하여 나타낸 것이다. 변형량 $\epsilon = 0.1$ 에서 얻은 파워분산 효율을 DRX 발생에 필요한 ϵ_c 와 관련하여 해석해 보면, 370℃, 0.5/sec ($\epsilon_c \sim 0.12$)에서와 같이 변형량이 ϵ_c 보다 작은 경우에는 파워분산효율이 ~20%로 작게 나타나는 반면, 430℃, 0.5/sec ($\epsilon_c \sim 0.09$)에서와 같이 변형량이 ϵ_c 보다 큰 경우에는 파워분산효율이

~30~60 %로써 ϵ_c 이전의 변형량보다 ϵ_c 이후의 변형량에서 보다 높은 효율값을 나타내었다. 그리고, 변형온도가 증가함에 따라 효율값이 증가함을 알 수 있었는데, 이는 동적재결정 발생시 미세조직 변화로 인해 분산효율이 증가함을 나타내며 고온에서 더욱 동적재결정 발생이 용이해지는 것을 의미한다. 즉, $\epsilon = 0.1$ 일 때 370℃에서 얻은 분산효율은 동적재결정이 발생하기 전인 가공경화 단계에서 얻은 효율값이고, 430℃에서 얻은 분산효율은 동적재결정 발생에 필요한 ϵ_c 이후의 변형량에서 얻은 것으로써 가공경화 단계를 지나 동적재결정이 발생하고 있는 변형률이라 할 수 있다. 따라서 동적재결정이 발생하는 재료의 경우 ϵ_c 이전의 변형량보다 ϵ_c 이후의 변형량에서 변형효율이 큼을 알 수 있는데, 이는 고온변형 중 동적재결정 발생시에는 가공경화단계 동안에 증가된 전위밀도가 ϵ_c 를 지남으로 인해 동적재결정 발생을 위해 새로운 핵생성을 시작하게 하므로 전위소멸이 발생했기 때문이라고 판단된다.

이와같이, 파워분산효율은 온도와 변형속도 조건에 따라 그 효율값이 다르게 되고 아울러 변형기구가 달라지게 되는데 크게 동적재결정이나 동적회복이 발생하는 안전영역과 입계파괴나 불안정 소성유동 등이 나타나는 손상영역으로 나눌 수 있게 된다.^(12, 13) 예를들어, 손상영역에서 단단한 입자를 함유하는 금속재료를 저온·고변형속도하에서 소성변형하는 경우에 변형기구는 이 입자주위에서 공동(void)을 형성하여 파괴가 나타날 것이며, 반대의 경우 즉 고온·저변형속도하에서는 결정립계나 3중점 등에서 쉼균열 등이 발생하여 파괴가 나타날 수 있을 것이다. 특히, 변형속도가 10¹/sec 이상으로 아주 빠르게 되면 단열 전단밴드(adiabatic shear band)를 형성하거나 국부적 응력 집중으로 인해 소성유동이 불안정한 소성제품을 얻게 된다. 이와같이, 공동형성이나 결정립계 균열 등에 의한 파괴발생은 변형중 새로운 계면을 형성하여 파워를 분산시키는 과정이므로 전위증식 및 소멸에 의해 나타나는 동적재결정이나 동적회복 등의 고온연화로 인해 나타나는 효율값보다 높다고 할 수 있다. 그러나 $\epsilon = 0.1$ 인 경우에는 변형량이 작아서 이러한 손상과정은 나타나지 않을 것이며 동적재결정 또는 동적회복의 안정한 변형기구으로써 분산효율을 설명할 수 있을 것이다.

앞서 언급한 바와같이, ϵ_c 이후의 변형조건에서는 ϵ_c 와 이전의 변형조건보다 파워분산효율이 더 큼을 알 수 있었다. 즉, ϵ_c 이하의 변형률에서 얻은 파워분산자의 효율 즉 370℃에서는 파워분산자의 효율이 ~20%로 나타났으

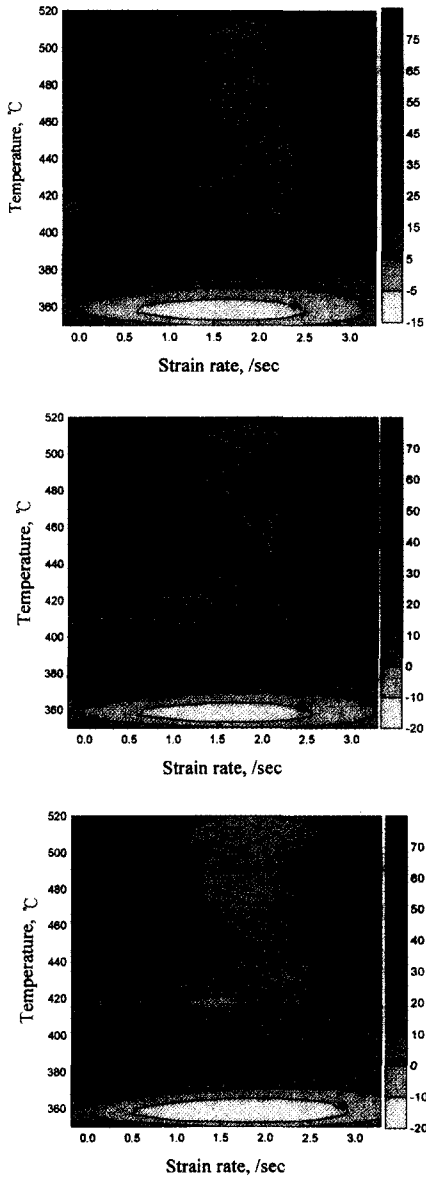


Fig. 5 Contour maps with iso-efficiency contours of the efficiency of power dissipation for Al 5083 alloy at strains of (a) 0.5, (b) 1.0, and (c) 2.0

며, 임계변형률 이상의 변형률에서 얻은 파워분산자의 효율 즉 430℃ 이상에서는 ~30 - 60%의 높은 효율값을 나타내었다. 또한, Fig. 4(b)에서와 같이, 430℃와 480℃ 온도에서는 비교적 고변형속도 구간에서 효율값이 아주 낮은 독립된 영역이 존재함을 알 수 있었다. 즉, 변형온도가 일정하더라도 변형속도 차이에 따라서 효율값이 차이 나는 영역을 관찰할 수 있었는데 특히, 430℃와 480℃의 변형온도에서 파워분산자의 효율에 미치는 변형속도의 영향을 보면 430℃의 경우에는 변형속도가 0.5/sec 이상에서, 480℃에서는 1.0/sec 이상에서 파워분산자의 효율이 작은 값으로 나타나는 것으로 보아 변형온도가 높을수록 파워분산자의 효율이 고변형속도하에서 높게 나타남을 알 수 있는데, 이는 고온에서 동적재결정 핵생성을 위해서는 더욱 빠른 변형속도가 필요하기 때문이라고 판단된다. 또한 430℃와 480℃의 변형온도에서는 변형속도 2.0/sec 이상의 빠른 변형속도에서의 변형효율은 음의 값으로 나타나는 것으로 보아 빠른 변형속도하에서는 이 재료의 소성유동이 상당히 불균일하게 나타남을 예측할 수 있다. 따라서 분산효율 η 이 커질수록 열간가공시 동적재료가동에 대한 파워분산이 커지게 되어 변형효율이 증가하게 되므로 최적의 고온가공 조건이 갖추어야 할 조건 중의 하나는 재료의 유동을 최대화하는 변형조건 즉 η 이 최대가 되는 온도 · 변형속도 · 변형률 조건이라 할 수 있다.

Fig. 5에 나타낸 바와같이, 변형률이 동적 재결정 발생에 필요한 임계변형률 이후의 변형량인 0.5 이상에서도 변형률이 0.1인 경우와 마찬가지로 변형온도 증가에 따라 파워분산 효율이 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 효율값은 변형률이 0.1인 경우보다 큼을 알 수 있다. 그리고, 변형률이 1.5 이상에서는 변형량 증가에 따라 파워분산 효율의 변화가 그리 크지 않음을 알 수 있는데, 이는 유동응력값이 동적재결정 이후에 정상상태에 도달했기 때문이라 판단된다. 즉 변형량 증가에 따라서 유동응력이 일정한 정상상태에 도달하게 되면 변형률이 증가하더라도 변형속도 민감도값이 변형률에 관계없이 일정한 값을 갖게 되기 때문이라 판단된다. 그리고, $\epsilon = 0.1$ 인 경우와 마찬가지로 최대효율은 ~450℃, ~0.1/sec인 변형조건에서 나타나고 있으며, $\epsilon = 2.0$ 일때 최대효율은 ~74.6%로써 동적재결정이 나타나는 변형조건에 해당한다.

3.3 파괴변형률과 파워분산효율

Fig. 6(a)는 Al 5083 합금의 파괴변형률을 Zener-Hollomon 파라메타 ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$)에 의해 나타낸

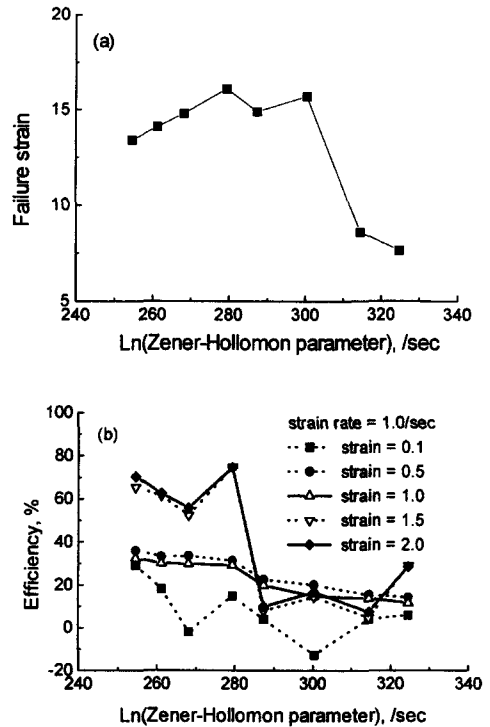


Fig. 6 Variations of the (a) failure strain and (b) efficiency of power dissipation with Zener-Hollomon parameter

것으로써 위로 볼록한 형태의 그래프를 얻을 수 있었다. 이때, Z 값을 얻기 위한 이 재료의 활성화에너지 값은 지난 연구결과⁽¹¹⁾에서 구한 값(~203.7 kJ/mol)을 사용하였으며, $\dot{\epsilon} = 1.0/\text{sec}$ 로 하고 변형온도만을 달리하여 구한 Z값을 사용하였다. 그림에서와 같이 이 재료의 파괴변형률값은 Z 값이 작거나 큰 범위에서는 연신율이 감소하는 경향을 나타냈으며 중간 범위에서 Z 값에서는 가장 높은 연신율 특성을 나타내었고 이에 해당하는 변형조건은 ~450℃, 1.0/sec 조건이었다.

Fig. 6(b)는 Z값에 따른 효율의 변화를 나타낸 것으로써 Fig. 6(a)의 Z값에 따른 이 재료의 파괴변형률값 변화와 변형효율과의 상관관계를 알아보기 위해 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Z 값이 증가함에 따라 전체적으로 효율값은 감소하는 경향을 나타내었으며 변형량 증가에 따라서 즉 $\epsilon = 0.1 \rightarrow 1.5$ 까지는 효율이 증가하다가 $\epsilon = 1.5$ 이상에는 거의 비슷한 효율값을 나타내었다. 최대효율을 나타내는 변형조건은 최대 파괴변형률을 나타내는 변형조건과 일치하는 것으로 보아 정상상태 이후의 변형률에서

구한 변형효율값으로부터 파괴변형률이 가장 높게 나타나는 변형조건을 예측할 수 있으리라 판단된다. 그리고, $\ln(Z) < 268.2/\text{sec}$ 조건(480°C , $1.0/\text{sec}$)에서는 Z 값이 감소함에 따라 즉 변형온도가 증가함에 따라 이 재료의 파괴변형률은 감소함에도 불구하고 변형효율은 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이와같은 것은 변형온도가 높을수록 결정립계나 3 중점에 위치하는 제 2 분산상(Mg_2Si , $(\text{FeMn})\text{Al}_2$)들에 의해 입계파괴 경향이 나타나므로 이들의 영향때문에 동적재결정 발생에 의한 분산효율보다 더 높게 나타난 것으로 판단된다. 변형온도 증가에 따라 파괴변형률 값이 감소함에도 불구하고 변형효율이 다시 증가하는 현상은 순 Al(5N)의 실험결과⁽¹⁴⁾에서도 나타났는데, $10^{-3}/\text{sec}$ 의 느린 변형속도와 450°C 이상의 온도에서 변형할 경우에는 결정립계나 결정립 3 중점 등에서 미끄러짐 변형이 우선적으로 나타나 변형효율값이 다시 증가한다고 하였다.

4. 결론

파워분산도를 이용하여 Al 5083 합금을 $350\sim 520^\circ\text{C}$ 의 온도와 $0.1\sim 3.0/\text{sec}$ 의 변형속도에서 고온변형한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유동곡선 및 변형후 미세조직으로부터 Al 5083합금의 고온연화기구는 동적재결정이었다. 동적재결정 시작에 필요한 입계변형률 ϵ_c 와 피크변형률 ϵ_p 와의 관계 (ϵ_p / ϵ_c)는 370 , 430 , 480°C 에서 각각 ~ 0.63 , ~ 0.64 , ~ 0.66 ϵ_p 인 관계가 있었으며 변형온도가 증가함에 따라 ϵ_c 와 ϵ_p 의 간격이 줄어들었다.

(2) 고온·저변형속도에서의 파워분산효율은 저온·고변형속도에서의 효율값보다 큼을 알 수 있으며, $\sim 450^\circ\text{C}$, $0.1/\text{sec}$ 에서 분산효율이 최대가 됨을 알 수 있다. 그리고, ϵ_c 이전의 변형량보다 ϵ_c 이후의 변형량에서 변형효율이 큼을 알 수 있었는데, 이는 고온변형 중 동적재결정 발생시에 가공경화단계 동안에 증가된 전위밀도가 ϵ_c 를 지남으로 인해 동적재결정 발생을 위해 새로운 핵생성을 시작하여 전위소멸이 발생했기 때문이라고 판단된다.

(3) 430°C 의 경우에는 변형속도가 $0.5/\text{sec}$ 이상에서, 480°C 에서는 $1.0/\text{sec}$ 이상에서 파워분산자의 효율이 작은 값으로 나타나는 것으로 보아 변형온도가 높을수록 파워분산자의 효율이 고변형속도하에서 높게 나타났는데, 이는 고온에서 동적재결정 핵생성을 위해서는 더욱 빠른 변형속도가 필요하기 때문이라고 생각된다.

(4) 최대효율을 나타내는 변형조건($\sim 450^\circ\text{C}$, $0.1/\text{sec}$)은 최대 파괴변형률을 나타내는 변형조건과 일치하였으며, 정상상태 이후의 변형률에서 구한 변형효율값으로부터 파괴변형률이 가장 높게 나타나는 변형조건을 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1996년 인하대학교 RRC(황해권수송 시스템 연구센터)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이정서, 박종진, 1998, "열간압연 중 발생하는 강판재 내의 재결정 거동 예측", 한국소성가공학회지, 7, (2), pp. 150~157.
- (2) N. Srinivasan and Y. V. R. K. Prasad, 1992, "Characterization of Dynamic Recrystallization in Nickel Using Processing Map for Hot Deformation", Mater. Sci. and Technol., 8, pp. 206~212.
- (3) H. L. Gegel, J. C. Malas, S. M. Doraivelu, and V. A. Shende, 1987, 'Metals Handbook', 9 edn., Materials Park, OH, ASM, 14, pp. 417~418.
- (4) J. M. Alexendar, 1984, 'Modeling of Hot Deformation of Steels', (ed. J. G. Lenard), Berlin, Springer-Verlag, pp. 101~114.
- (5) Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraivelu, J. C. Malas, J. T. Morgan, K. A. Lark, and D. R. Barker, 1984, "Modeling of Dynamic Material Behavior in Hot Deformation: Forging of Ti-6242", Metall. Trans., 15A, pp. 1883~1892.
- (6) D. S. Fields and W. A. Backofen, 1959, "Strain Hardening in Aluminum Alloy", TRANS. ASM, 51, p. 946.
- (7) K. Mills, J. R. Davis, J. D. Destefani, D. A. Dieterich, G. M. Crankovic, H. J. Frissel, D. M. Jenkins, W. H. Cubberly, and R. L. Stedffld, 1985, Metals Handbook: Mechanical Testing, 8, ASM, Metals Park, OH, pp. 154~184.
- (8) N. D. Ryan and H. J. McQueen, 1990, "Work

- Hardening, Strength and Ductility in the Hot Working of 304 Stainless Steel”, High. Temp. Technol., 8, (1), pp. 27~44.
- (9) 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.
- (10) X. Xia, P. Sakaris and H. J. McQueen, 1994, “Hot Deformation, Dynamic Recovery, and Recrystallization Behavior of Aluminum 6061-SiCp Composites”, Mater. Sci. and Technol., 10, pp. 487~496.
- (11) 고병철, 김종현, 유연철, 1998, “AA5083 합금의 고온변형시 유동응력 및 연신율에 미치는 온도와 변형속도의 영향”, 한국소성가공학회지, 2, (2), pp. 168~176.
- (12) R. Raj, 1981, “Development of a Processing Map for Use in Warm-Forming and Hot Forming Processes”, Metall. Trans., 12A, pp. 1089~1097.
- (13) S. V. Radhakrishna, Y. R. Mahajan, H. Md. Roshan, and Y. R. K. Prasad, 1995, “Processing Map for Hot Working of 6061 Al-10 vol. % Al₂O₃ Metal Matrix Composites”, Mater. Sci. and Technol., 11, pp. 167~173.
- (14) N. Ravichandran and Y. V. R. K. Prasad, 1991, “Dynamic Recrystallization during Hot Deformation of Aluminum”: A Study Using Processing Maps, 22A, pp. 2339~2348.
- (15) S. L. Semiatin, J. R. Davis, J. D. Destefani, T. B. Zorc, G. M. Crankovic, H. J. Frissel, A. W. Ronke, D. M. Jenkins, K. L. O’Keefe, 1988, ‘Metals Handbook: Forming and Forging’, 14, ASM, Metals Park, OH, pp. 372~422.