

304 스테인레스강의 준동적재결정에 관한 연구

한형기* · 조상현* · 유연철*

(2000년 9월 7일 접수)

A Study on Meta-Dynamic Recrystallization of 304 Stainless Steels

H. K. Han, S. H. Cho and Y. C. Yoo

Abstract

The static softening mechanisms of 304 stainless steel were studied by hot torsion test. The interrupted deformation tests were performed in the range of 900 ~ 1100°C and 5.0×10^{-2} ~ 5.0×10^0 /sec. The metadynamic recrystallization (MDRX) could be distinguished from the static recrystallization (SRX). Comparison of the softening kinetics between MDRX and SRX showed that the rate of MDRX was more rapid than that of SRX for the same deformation variables. To the exact prediction of MDRX, the MDRX parameter, which could be simultaneously estimated by the interpass time and Zener-Hollomon parameter, was developed. The time for 50% MDRX, $t_{0.5}$ was modeled using the deformation parameters : $t_{0.5} = 1.33 \times 10^{-11} \dot{\epsilon}^{-0.41} D \exp(230.3 \text{kJ/mol} / RT)$ and the predicted value was very correspondent with the measurement. It was found that the static parameters such as interpass time can control the dynamic states in the several successive deformation process.

Key Words : Hot Deformation, Dynamic Recrystallization, Meta-Dynamic Recrystallization, Fractional Softening, Static Recrystallization.

1. 서 론

동적재결정(dynamic recrystallization, DRX)^(1~3)에 의한 결정립 미세화는 실제 열간압연공정에서 매우 중요하다. 그러나 이와 같은 동적재결정은 변형량이 많고 온도가 높은 처음 몇 단계에서나 발생이 용이하며 최종 단계로 갈수록 그 가능성은 희박해진다. 그러므로 최근 들어 준동적재결정(meta-dynamic recrystallization, MDRX)에

대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 아직까지 이에 대한 연구는 미흡한 영역이어서 정량적인 해석에 많은 이견을 보이고 있다.^(4,5)

고온 소성재의 기계적 특성은 동적인 상태(dynamic state)의 변형 뿐만 아니라 정적인 상태(static state)에서의 유지시간 및 유지온도에도 많은 영향을 받는다는 것은 기존의 연구^(6,7)등으로 이미 알려져 있다. 그러나 동적인 상태에서 동적재결정을 위한 임계변형량 이상의 변형

* 인하대학교 재료공학부

으로 인해서 재결정 핵이 생성된 후에 단속이 발생하게 되면 기존의 정적 재결정으로 알려진 정적연화현상과는 달리 준동적재결정에 의해 연화과정이 지배된다. 준동적재결정은 변형량이 동적재결정 핵생성에 필요한 임계변형량(critical strain, ϵ_c)을 초과한 후 다음 단계까지 단속하면 이미 발생된 동적재결정핵 때문에 잠복기(incubation time)가 없이 정적재결정이 일어나는데 이러한 재결정형태를 준동적재결정이라고 부른다. 준동적재결정은 대단히 짧은 단속시간(interpass time) 동안 미세구조의 개선에 중요한 역할을 하게 되고 이때 미세조직은 짧은 단속시간에도 준동적재결정에 의해 상당히 미세해진다.^(4,8)

이와 같은 빠른 연화는 일단 변형이 일어나면 패스사이의 재결정을 촉진시키므로써 패스 변형량(ϵ_i) 및 단속시간(t_i) 또한 줄일 수 있게 된다. 특히, 304 스테인레스강과 같이 고온변형저항이 큰 재료에서는 동적재결정이 발생하기 위한 변형량이 크기 때문에 제어압연을 시도하기가 매우 어렵고, 그러므로 이와같은 연구가 반드시 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 304 오스테나이트계 스테인레스강을 이용하여 준동적재결정이 변형을 받은 후와 피크변형량

을 지난 후에 연화에 미치는 영향에 대해 분석하였고 변형속도 변형량 온도의 영향을 고찰하였고 또한 동적 및 정적인 상태의 연화와 비교함으로써 준동적재결정에 관하여 종합적으로 연구하고자 하였다.

2. 실험 방법

시료는 오스테나이트계 스테인레스강 (STS304)이었으며 그 화학조성은 Table 1과 같았고 실험은 $\Phi 10\text{mm} \times \ell 20\text{mm}$ 인 고체형 비틀림시험편을 사용하였다.

동적재결정을 위한 임계변형량값을 구하기 위하여 0.05~5/sec, 900~1100°C 조건에서 연속변형 한 후 여기서 구한 임계값을 이용하여 단속변형시 패스변형량을 결정하였다. 단속변형은 변형온도 900~1100°C, 변형속도 0.05~5/sec, 단속시간 0.5~100초하에서 행하였고 이때 패스변형량은 임계변형량을 초과하는 최대변형량으로 고정하였다. 단속변형조건을 Table 2 에 정리하였다.

조직변화는 일정시간 유지 후 급냉하고 연마지로 #1500 까지 연마하여 3 μm , 1 μm 다이아몬드 페이스트로 미세연마하였다, 미세 조직은 10ml HNO₃, 15ml HCl, 10ml Acetic Acid로 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였다.

Table 1 The chemical composition of STS304 stainless steel used, wt%

C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Cu
0.045	0.45	1.03	0.25	18.21	8.16	0.16

Table 2 Summary of multistage deformation process where ϵ_p is the strain corresponding peak stress

Continuous Deformation	Temperature (°C)	900, 1000, 1100
	Strain Rate, $\dot{\epsilon}$ (/sec)	0.05 0.5 5
Interrupted Deformation	Temperature (°C)	900, 1000, 1100
	Strain Rate, $\dot{\epsilon}$ (/sec)	0.05 0.5 5
	Interpass Time, t_i (sec)	0.5, 1, 3, 10, 50, 100
	Pass Strain, ϵ_i	$\epsilon_i = 0.5 \epsilon_p$ $\epsilon_i = \epsilon_p$ $\epsilon_i = 3 \epsilon_p$

3. 실험 결과

3.1 고온유동곡선

Fig. 1은 연속변형곡선으로써 1000°C 변형온도에서 변형속도의 영향(0.05 ~ 5/sec)을 나타낸 것이다.⁽⁹⁾ 유동응력은 같은 변형온도에서 변형속도가 빨라질수록 높은 값을 나타내는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 유동응력이 공정변수 즉, 변형속도와 온도에 의존한다는 것을 나타낸다 하겠다.

Fig. 1의 유동곡선형태는 초기변형에서 가공경화 효과에 의해 급격하게 응력이 증가하며 최대응력에 도달한 후에는 동적재결정으로 인하여 응력이 점차 감소하고 가공경화와 동적연화가 평형을 이루어 정상상태응력을 나타내었다. 또한 최대응력에 이르는 변형률은 온도가 낮아지고 변형속도가 빨라짐에 따라 커졌는데, 이는 고온변형시 연화가 변형으로 인한 축적에너지와 열적활성화에 의해 조절되기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 즉, 같은 온도에서 변형속도가 빠르면 축적변형에너지는 증가하나 계속되는 변형으로 연화가 억제되어 높은 유동응력을 나타내게 되는 것이다. 이러한 유동곡선 관찰을 통해 304 스테인레스강의 고온연화기구가 동적재결정임을 확인할 수 있었다.

3.2 준동적재결정 발생을 위한 패스변형량 결정

동적재결정을 위한 임계변형량(critical strain, ϵ_c)을 결정하기 위하여 Fig. 2에 변형속도 0.5/sec, 변형온도 900~1100°C 조건에서 가공경화속도($\theta = d\sigma/d\epsilon$)와 유동응력(σ)과의 관계를 나타내었다.⁽⁹⁾ 그림에서 알 수 있듯이 각 곡선은 크게 3 단계로 나뉘어진다. 첫째는 유동

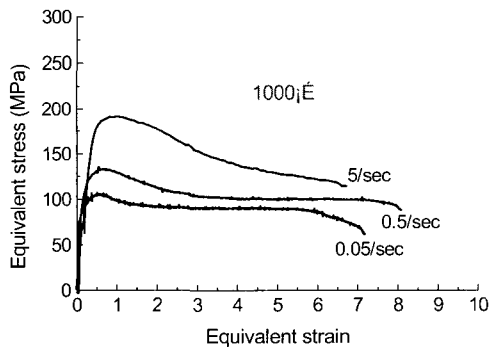


Fig. 1 Representative flow curves of 304 stainless steel from hot torsion tests showing the effects of change in strain rate with 1000°C temperature

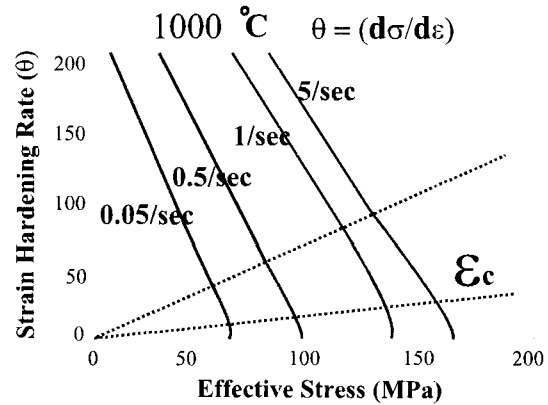


Fig. 2 $\theta - \sigma$ curves to determine the critical strain(ϵ_c) for 304 stainless steel

응력이 "0"($\sigma=0$)이 되는 θ_0 에서 아결정립(subgrain)이 생성되는 단계로 가공경화속도가 직선적으로 감소하는 구간이고 둘째는 아결정립이 발달하는 단계로 이 구간 또한 가공경화속도가 거의 선형적으로 감소한다. 마지막으로 동적재결정핵이 생성되는 구간으로 최대응력(σ_p)에서 가공경화속도는 "0"이 얻어지는데 σ_p 이전에 기울기 변화가 불연속적으로 변화하는 점이 존재하게 되고 이 변곡점을 임계변형량(ϵ_c)으로 결정할 수 있었다.⁽¹¹⁾ Fig. 2에서 구한 임계변형량은 최대변형량(ϵ_p)의 약 80%로 나타났고 그 값은 온도가 낮고 변형속도가 빠르면 크게 나타났는데 이는 고온변형특성이 열적활성화 과정임을 다시한번 나타내는 것이라 하겠다. 즉 동일온도에서 변형속도가 빠르면 가공경화속도가 고온연화속도보다 우세하여 동적연화가 상대적으로 지연되어 큰 값을 나타내게 된다. 그리고 동일변형속도하에서는 온도가 낮을 경우 변형속도에 따른 가공경화가 빨라서 낮은 온도에서의 이러한 가공경화를 부합할 만한 변형량이 필요하여 ϵ_c 및 ϵ_p 의 값은 높게 나타나게 된다.⁽⁹⁻¹¹⁾

본 연구에서는 패스사이에서 동적인 효과를 충분히 얻기 위해서 패스변형량을 임계변형량보다 큰 최대변형량으로 설정하였고 패스변형량과 공정변수와의 관계를 다음과 같이 Zener-Hollomon 값(Z)과 초기 결정립 크기(D_0)에 대해 정량화 하였다.

$$\epsilon_p = 3.02 \times 10^{-3} D_0^{1/2} Z^{0.089} \quad (1)$$

이를 Fig. 3에 나타내었고 이 관계로부터 결정된 패스변형량은 실제 연속유동곡선상에서 측정된 값과 큰 차이가 없었으며 따라서 패스변형량은 Z 값이 가장 작은 조

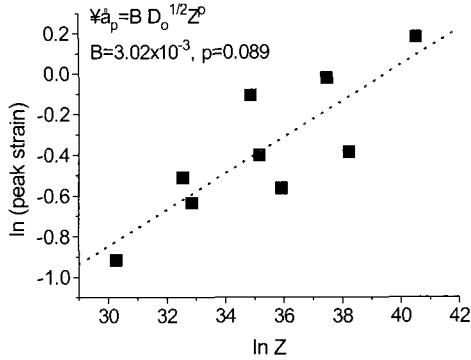


Fig. 3 Dependence of Zener-Hollomon parameter on the peak strain

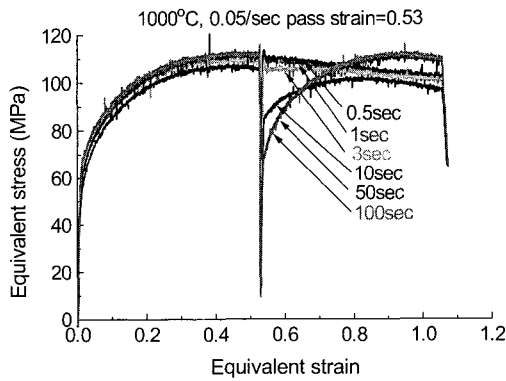


Fig. 4 Double-twist flow curves obtained from interrupted torsion tests

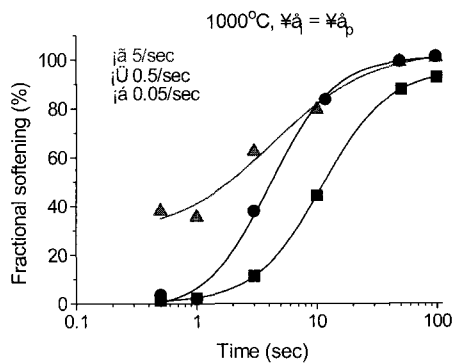


Fig. 5 Effect of strain rate on the rate of softening

건인 1100°C, 0.05/sec에서 0.34, 가장 큰 조건인 900°C, 5/sec에서 1.04로 결정할 수 있었다.

3. 3 연화비율(fractional softening, FS)

Fig. 4에는 위에서 언급한 바와 같이 단속변형량을 결정 한 후에 단속시간을 변화시키면서 단속변형한 결과를 나타내었다. 1000°C, 0.05/sec 변형조건에서 초기변형량을 최대변형량으로 변형한 결과를 나타낸 것이다. 단속 시간이 10초 이상으로 길어지면서 두 번째 패스의 유동 곡선이 초기 유동곡선과 유사한 형태를 보이고 있었다. 이는 일단 초기변형을 임계변형량 이상으로 함으로써 동적재결정이 어느 정도 발생하여 연화가 이루어졌기 때문에 전위밀도를 낮추므로 따라서 유동곡선 수준이 낮아졌다고 판단된다.

Fig. 5 에 준동적 연화에 미치는 변형속도의 영향을 나타내었다. 변형 중에 동적재결정을 발생시키기 위하여 패스변형량을 최대변형량으로 정하였고 변형온도 1000°C에서 변형속도를 0.05 - 5/sec로 변화시키면서 하였다. 전체적으로 연화곡선은 전형적인 S 자 형태를 나타내면서 단속시간이 길어질수록 연화는 급속하게 진행됨을 알 수 있었다. 단속시간이 10초 이내로 작은 경우는 변형속도가 5/sec 일 때 변형속도가 낮은 경우에 비해서 빠르게 연화가 진행되었으나 단속시간이 50초 이상으로 길어지게 되면 그 차이가 점점 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 변형속도 0.5/sec, 패스변형량을 최대변형량으로 고정하고 변형온도를 900~1100°C로 변화시키면서 단속한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 5와 마찬가지로 연화곡선은 S 자 형태를 나타내고 있었으며 변형온도가 900°C에서 1100°C로 높아짐에 따라서 연화정도는 대단히 커졌는데 연화가 50%정도 진행되는데 요구되는 시간이 900°C에서 40초 정도였는데 반해 1100°C인 경우는 약 1초로 대단히 빨라짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 7 은 변형온도 1000°C, 변형속도 0.5/sec 조건에서 패스변형량의 영향을 나타낸 것이다. 이때 다른 공정 변수들은 일정하게 하고 패스변형량을 최대변형량의 0.5, 1, 3배로 변화시켰다. 일반적으로 준동적재결정에 미치는 변형량의 영향은 무시할만하다고 보고^(4,17)되었는데, 본 연구에서도 기존의 결과와 일치하였다. 단속변형량이 최대변형량을 넘지 못할 경우와 넘는 경우를 비교하여 보면, 이 두 조건의 연화속도는 큰 차이가 있었다. 그러나 패스변형량이 최대변형량을 초과하는 경우, 변형량이 증가함에 따라서 연화속도는 약간씩 증가하였는데 이는 변형량이 커짐에 따라서 동적으로 재결정되는 분율이 증가하는 것에 기인한다고 판단되나 전위밀도나 동적으로 재

결정된 부분이 변하는 것이 아니기 때문에 이러한 분율이 준동적재결정에 미치는 영향은 무시할 만 하다고 판단된다.

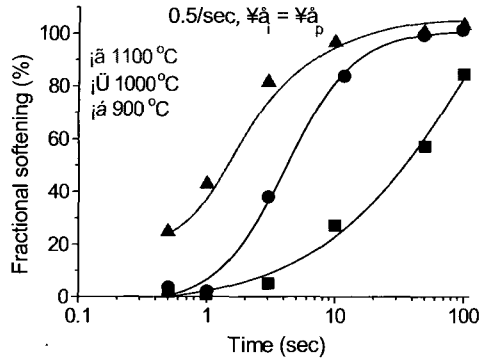


Fig. 6 Effect of temperature on the rate of softening

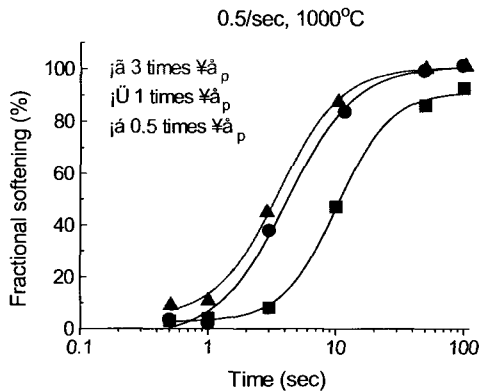


Fig. 7 Effect of pass strain on the rate of softening

3.4 준동적 재결정 속도론

준동적 재결정 역시 정적연화의 한 종류이고 다음과 같은 Avrami식에⁽¹²⁾ 의해 설명될 수 있다.

$$X = 1 - \exp[-0.693 (t/t_{0.5})^n] \quad (2)$$

$$X : \text{재결정 분율}, t_{0.5} = A \dot{\epsilon}^p D \exp(Q/RT)$$

n은 상수 값이고 t_{0.5}는 50% 재결정에 걸리는데 필요한 시간이다. Avrami 상수, n을 구하기 위하여 ln(ln(1/(1-X))) vs. ln(time) 곡선을 Fig. 8에 나타내었고

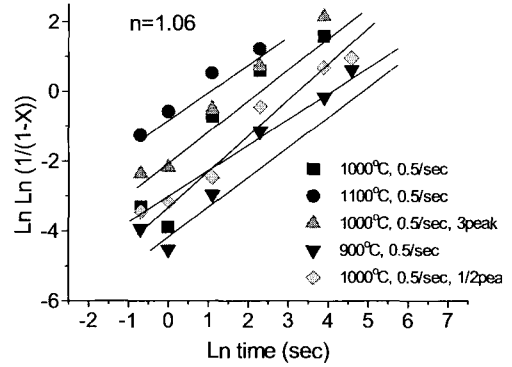


Fig. 8 Dependence of $\ln \ln [1/(1-X)]$ on $\ln t$ under different conditions of pass strain, temperature and strain rate

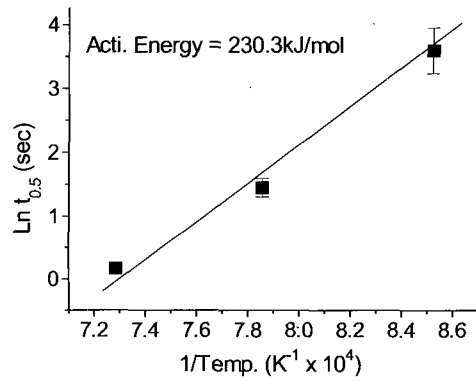


Fig. 9 Plot of $t_{0.5}$ against the reciprocal of the temperature

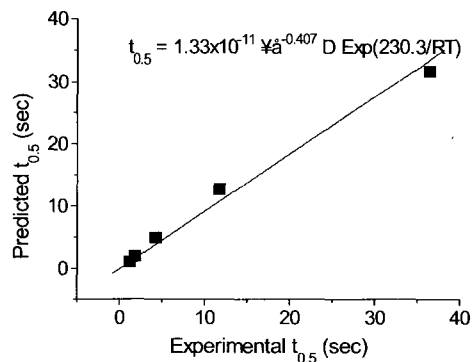


Fig. 10 Comparison of experimental and calculated $t_{0.5}$

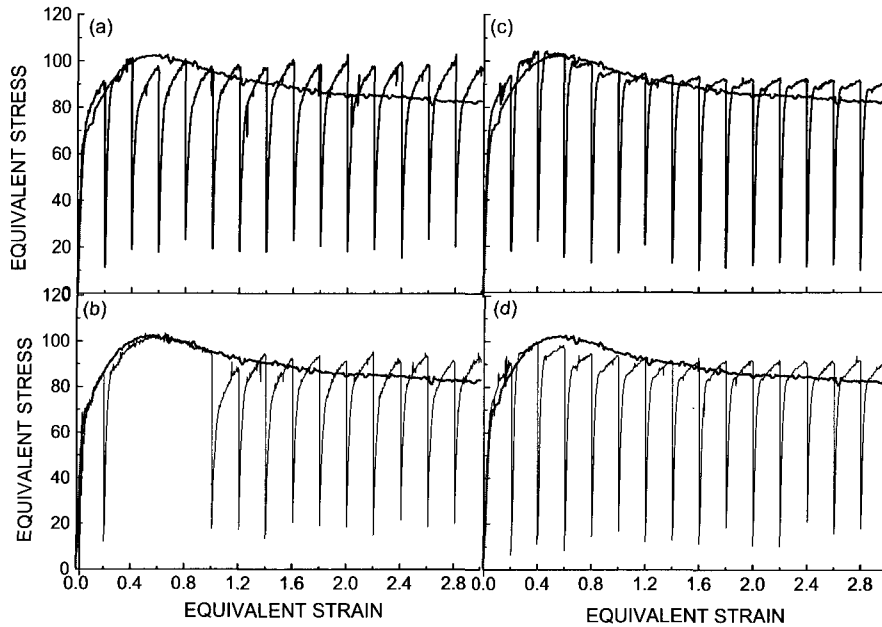


Fig. 11 Multistage torsional stress-strain curves with continuous flow curve at 1100°C, 0.5/sec strain rate
 (a) $\epsilon_i = 0.2, t_i = 5\text{sec}$ (b) $\epsilon_i = 0.2, 0.8, t_i = 5\text{sec}$ (c) $\epsilon_i = 0.2, t_i = 0.5\text{sec}$ (d) $\epsilon_i = 0.2, t_i = 2\text{sec}$

여기서 구한 상수값은 1.06이었다. 일반적으로 n 값은 정적재결정이 발생하는 조건에서 1~2 사이 이고 준동적재결정에서는 0.5~1.8 사이로 준동적연화가 발생하는 조건이 약간 낮은 것으로 보고되고 있다.^(8,14,15)

Fig. 8에서 구한 상수값은 1.06으로써 304 스테인레스강의 정적재결정에서의 상수값 1.018과 유사하였다.

Fig. 9 에는 준동적재결정시 활성화에너지를 구하기 위하여 $t_{0.5}$ 과 변형온도의 관계를 나타내었다. 직선의 기울기로부터 활성화에너지를 구할 수 있었고 이때 활성화에너지는 230.3kJ/mol로서 동적재결정의 379.6kJ/mol⁽⁹⁾보다는 작았고 정적재결정의 196.7kJ/mol보다는 큰 값이었는데 이는 준동적재결정의 변형온도에 대한 의존성이 정적 및 동적재결정 사이에 있다는 것을 의미한다고 하겠다.

50% 연화가 발생하는데 걸리는 시간은 일반적으로 변형온도, 패스변형량 및 변형속도등과의 함수($t_{0.5} \propto f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$)로 나타낸다. 그러나 준동적 재결정에서는 변형량의 영향이 없으므로 본 연구에서도 이 항목을 무시하고 나머지 공정변수들과의 관계로부터 이 값을 정량화할 수 있었고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그럼에서 확인할 수 있듯이 정량화된 결과가 실제값과 잘 일치하고 있었으며 정량식은 다음과 같았다.

$$t_{0.5} = 1.33 \times 10^{-11} \dot{\epsilon}^{-0.41} D \exp(230300\text{J/mol} / RT) \quad (3)$$

3.5 준동적재결정을 이용한 제어압연 공정

Fig. 11 에 동적인 상태를 제어한 공정과 정적인 상태를 제어한 공정을 비교하기 위하여 다단변형의 유동응력곡선과 연속변형의 유동응력곡선을 함께 나타내었다. 이때 변형온도는 1100°C, 변형속도는 0.5/sec 이었고 Fig. 11 (a)는 모든 패스변형량이 0.2로 동일한 일반공정이고, (b)는 두 번째 패스에서 패스변형량을 0.8로 조절하여 동적재결정을 발생시킨 경우이며, (c)는 단속시간을 0.5초로 짧게 설정하여 3~4패스부터 동적재결정을 유발시킨 경우이다. 마지막으로 역시 단속시간을 조절하여 변형말기에 준동적재결정 효과를 얻은 공정을 Fig. (d)에 나타내었다.

(a)와 같은 경우는 현재 대부분의 열연에서 행하여지고 있는 공정으로서 패스변형량이 동적재결정을 발생시키기에는 못 미치고 단속시간도 일정시간 이상 됨으로 재결정에 의한 연화는 정적인 효과 이외에는 얻지 못하는, 단순한 형상제어만이 가능한 공정이다. 이에 반해서 (b)는 초기 패스에서 임계변형량 이상의 큰 변형을 가함으로써 동적재결정에 의해서 조직을 미세하게 만들고

유동응력까지 낮출 수 있는 공정으로 동적인 효과를 최대한으로 얻을 수 있었다. 그러나 일반적으로 동적재결정은 일반적인 압연 스케줄에서 중요한 역할을 못한다. 왜냐하면 동적재결정을 발생시키기 위해서 패스변형량을 늘리면 그만큼 변형저항이 커지고 패스변형량을 줄이면 한 패스에서 축적되는 변형량이 동적재결정을 일으키기 위한 임계변형량에 못 미치기 때문이다. 그렇지만 패스 변형량을 늘리지 않고도 동적인 효과를 얻을 수 있는데, 이러한 효과를 이용한 것이 동적재결정 제어압연(dynamic recrystallization controlled rolling, DRCR)이다.⁽¹⁵⁾ 결정립은 반복되는 정적재결정을 거치면서 상당히 미세해질 수 있고 연속되는 변형에 의해서 가공경화 효과가 누적되면서 압연의 최종 패스에 즈음하여 동적재결정이 발생하여 결정립이 미세하게 된다. Fig. 11 (c)를 살펴보면 단속유동곡선이 연속유동곡선과 같은 형태를 나타내고 있었고 이는 정적인 공정변수를 제어해서도 동적인 효과를 얻을 수 있다는 것으로 중요한 의미가 있다. (d)에서는 준동적재결정을 이용할 수 있는 공정을 나타내었다. 재결정 기구가 앞서 언급한 바와 같이 공정변수가 바뀔 때 따라 변화하게 되지만 준동적연화는 일단 어느 정도의 동적효과를 얻기만 하면 단속중에 대단히 빠른 시간내에 발생하기 때문에 열간압연 모델링시 준동적연화를 이용하는 것이 대단히 중요하다.

4. 고 찰

준동적재결정 현상을 연구하기 위해서는 ϵ_c 또는 ϵ_p 값을 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 임계변형량은 가공경화단계에서 동적연화가 발생하는 현상을 의미하는 것이고 본 실험에서도 확인할 수 있었던 변형속도와 변형온도 등 열간가공 공정변수들과 밀접한 관계를 갖게 된다. 다단계변형에서 전(前) 단계의 단속변형량이 임계 변형량을 초과한 경우 다음단계의 유동곡선의 형태, 연화비율등에 많은 영향을 미치게 되는데^(7,8,17) 이는 단속 시간이 작더라도 단속변형량이 크게 되면 정적연화를 일으키는 구동력이 작은 것을 보상할 수 있기 때문이라고 판단된다. 변형량이 매우 작은 경우에는 단지 회복만이 발생하고 어떤 임계변형량이상에서 연화는 얼마만큼의 변형에너지를 축적했느냐에 따라서 달라지지만 어느 정도의 잠복기 후에 정적재결정에 의해 발생한다. 그러나 변형이 동적재결정을 위한 임계변형량을 초과했을 경우에는 준동적재결정에 의해서 잠복기 없이 또는 대단히 빠른 속도로 연화가 일어난다. 이때 유동곡선상의 변화를 살펴보면, 동적재결정은 최대응력에 도달하기 전, 즉 임

계변형량에서 어떤 임계 전위밀도의 하부조직을 갖게 되고 이 변형량 부근에서 새로운 동적재결정립이 형성된다. 따라서 동적재결정 유동곡선은 응력이 점차로 증가하다가 최대응력을 보인 후 동적재결정에 의한 연화가 가공경화정도와 연화정도가 균형을 이루는 정상상태응력을 보이게 된다. 여기서 동적재결정 분율과 연관지어 보면 임계변형량에서는 동적재결정이 일반적으로 5%내외, 최대변형량 부근에서 20~50%, 정상상태변형량에서 98% 정도라고 알려져 있다.^(10,16,17)

변형속도가 빨라지면 또한 결정립 내부에 포함된 전위 밀도가 증가하게 되고 이는 유동응력 및 최대응력에 도달하는 변형량을 증가시킨다. 궁극적으로 변형속도가 빨라짐에 따라서 준동적재결정 속도를 향상시키고 이러한 효과는 특히 잠복기 없이 단속이 시작되는 시점에서 바로 연화가 발생하는 준동적재결정의 특성상, 단속시간이 짧은 경우에 보다 뚜렷하기 때문에 Fig. 5와 같은 연화 곡선 형태가 얻어진 것으로 판단된다.

준동적 재결정은 정적인 상태에서 발생하는 연화의 종류라고는 하나 동적인 변형조건에 영향을 많이 받는 것이기 때문에 준동적재결정 정도를 동적연화를 가장 효과적으로 설명할 수 있는 Zener-Hollomon 인자(Z)와 연관시켜 이를 Fig. 12 에 나타내었다.

$$Z = A(\sinh \alpha \sigma)^n = \exp(Q/RT) \quad (4)$$

$$\sigma = f(\dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = f(Z)) \quad (5)$$

여기에서 Q는 고온연속변형에 대한 활성화 에너지이며 A, α 및 n은 각각 실험상수이다. Z값은 고온변형저항(σ)과 변형온도(T) 및 변형속도($\dot{\epsilon}$) 등의 변형조건과의 관계 뿐만 아니라 조직과의 연관성까지 정량적으로 설명할 수 있는 값이다.^(9,10,16,17) 변형속도에 온도항을 첨가함으로써 유동곡선 해석 및 미세조직 변화를 설명하는데 유용하므로 정적인 상태에서도 그 적용도가 높을 것으로 판단하였다. 그러나 기대와는 달리 이 값을 이용하여 준동적연화를 정량적으로 설명하는 것은 타당하지 못하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 Z값이 10^{14} 정도로 일정한 공정변수 조합(1100°C-0.5/sec, 1000°C-0.05/sec)이라 하더라도 준동적재결정에 의한 연화는 많은 차이가 있었다. 단속직전에 유동응력 수준이 비슷하다는 것은 동적인 상태에서 얻은 구동에너지가 유사하다는 것을 의미한다. 그러나 정적인 상태에서의 연화는 변형속도보다는 변형온도의 영향을 훨씬 크게 받는 것으로 나타났고 이는 고온변형시의 정적연화 역시 열적활성화과정임을 나

타낸다 하겠다. 즉, 동적연화의 경우에는 온도나 변형속도가 달라져도 동일한 Z값을 갖는다면 결정립도와 유동 응력이 비슷한 값을 유지하기 때문에 Z값만으로 표현이 가능하지만 동적연화와 정적연화가 동시에 발생하는 다단압연과 같은 소성변형공정은 Z값만으로 표현될 수 없다. 이는 변형 후 유지시간 중에 발생하는 정적연화가 유지온도와 시간에 대한 의존성이 크기 때문이다.

동적인 상태에서 이미 재결정이 발생한 금속조직의 정적인 상태에서의 변화는 전위밀도분포로 설명되어지며 초기 열처리 조직의 전위밀도가 가공경화에 의해서 동적 재결정 조직은 다음과 같은 3가지로 구분된다. 첫째, 매우 낮은 전위밀도를 갖는 동적재결정 핵 둘째, 결정립계 주위의 전위밀도가 낮고 내부에 셀(cell) 하부구조가 잘

발달한 성장하기 시작한 동적재결정립, 마지막은 다음주기 재결정을 위한 핵이 생성될 수 있을 정도로 전위밀도가 증가한 가공경화된 재결정립이다.^(2,3) 따라서 임계변형량 이상의 변형을 받은 후 응력을 제거하면, 즉 패스와 패스의 단속 중에 연화는 준동적재결정에 의해 우선적으로 동적재결정 핵이 성장하게 된다. 이는 성장하는 동적 재결정립들은 결정립계 주위의 전위밀도가 낮기 때문에 정적재결정이 발생하기 어렵기 때문이다. 따라서 Fig. 7과 같이 패스변형량이 임계변형량을 초과하게 되면 연화 속도가 더 이상 변형량의 영향을 받지 않게 된다.^{16,17)}

Fig. 13은 Fig. 7의 연화비율과 패스변형량과의 관계를 각각의 연화도에 걸리는 시간과의 관계로 다시 나타낸 것이다. 이때 패스변형량은 최대변형량의 0.25, 0.5, 1, 3배로 설정하였는데, 이 그림으로부터 준동적재결정이 패스변형량에 민감하지 않다는 것을 밝힐 수 있었다. 준동적재결정은 일반적인 정적재결정과는 달리 패스변형량이 동적재결정을 위한 임계변형량을 초과하여야만 발생이 가능하다. 그림에서 패스변형량($\epsilon_i = 0.67$)이 최대변형량에 도달하기 전에는 일정 재결정 분율에 걸리는 시간이 패스변형량에 의존하면서 변화하였다. 즉, 패스변형량이 증가함에 따라서 재결정속도는 지수적으로 증가하였다. 그러나 패스변형량이 최대변형량을 지난 후에는 변형량의 변화에 무관하게 재결정 분율은 일정하였고 이를 통해서 준동적재결정은 일단 최대변형량을 초과하는 변형을 받게되면 발생하게 되고 이때 변형량이 증가함에 따라서 큰 차이가 없다는 것을 확인할 수 있었다.

이를 미세조직적으로 고찰해 보아도 쉽게 알 수 있다. 일반적으로 재결정은 핵생성과 성장단계를 가진다. 그러나 준동적재결정은 핵생성 단계를 거치지 않기 때문에 잠복기 없이 바로 성장단계로 넘어가게 된다. 동적으로 핵이 생성된 후에 성장하는 결정립에서는 정적재결정이 발생하기 용이하지 못하다. 왜냐하면 결정립계 주위의 전위들이 이미 감소하였기 때문이고, 따라서 이러한 연화를 준동적 재결정이라고 하여 전형적인 정적재결정과 구분한다. 그러므로 정적재결정과 준동적재결정의 주된 차이점은 그들의 기구에 영향을 미치는 공정변수에서 찾을 수 있다고 하겠다. 준동적재결정은 변형속도 및 변형 온도에 민감하고 변형량에는 영향을 받지 않는다. 반면에 정적재결정은 변형량 및 변형온도에는 민감하지만 변형속도에는 상대적으로 덜 민감하다. 따라서 Fig. 10과 같이 준동적연화에 있어 $t_{0.5}$ 를 정량화할 때 변형량의 영향을 배제할 수 있다.

이와 같은 결과를 바탕으로 Fig. 14와 같이 정적연화 및 준동적연화를 모든 공정변수와 연관시켜 나타낼 수

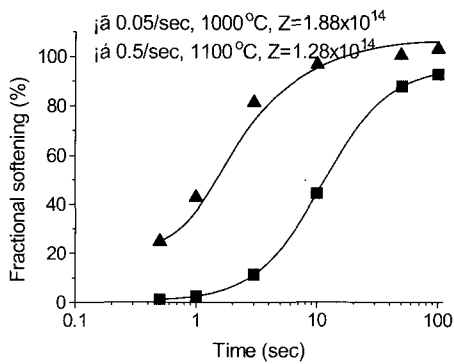


Fig. 12 Comparison of softening behaviors observed after deforming to the peak strain at similar values of Zener-Hollomon parameter

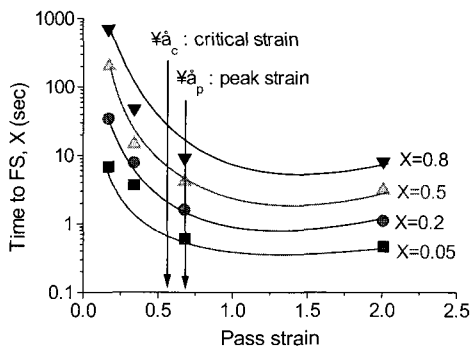


Fig. 13 Pass strain dependence of the time for 5~80% softening

있었다. 정적 및 준동적재결정 기구의 차이점은 50% 재결정에 요하는 시간과 변형량과의 관계에서 찾을 수 있다. Fig. 14 는 정적에서 준동적으로 변하는 전이점을 나타내준다. 또한 이 그림은 $t_{0.5}$ 의 변형속도에 대한 의존성도 나타낸다.

최대변형량에 도달하지 전에는 연화가 주로 정적재결정에 의해 일어나고, 따라서 $t_{0.5}$ 는 단속변형량에 민감하고 상대적으로 변형속도에 덜 민감하게 된다. 그러나 변형이 최대점에 도달한 후의 단속은 준동적재결정이 발생하게 되므로 변형속도나 변형온도가 주된 공정변수가 되고 더 이상 변형량에 의존하게 되지 않는다. 이와 같은 사실은 실제 고온압연과 같은 변형과 단속이 반복되고 정적연화가 동적인 상태 직후에 발생하는 연화(postdynamic softening)는 통상적인 정적재결정과 같은 행동을 보이지는 않지만 대신 준동적재결정과 같은 행동을 한다는 것을 의미한다.

준동적연화가 발생할 때의 미세조직 변화를 Fig. 15 에 도식적으로 나타내었는데, 이는 Sakai 모델⁽⁵⁾과 Roucoules⁽⁶⁾ 모델을 종합하여 변형한 것이다. 변형이 진행됨에 따라서 전위밀도가 점점 증가하고 어떤 임계점에 도달하면 동적재결정이 발생한다. 이때 미세조직은 동적재결정핵, 성장하는 동적재결정립 및 임계수준의 전위를 내포하고 아직 핵생성이 일어나지 않은 가공경화된 결정립으로 구분된다. 이 상태에서 변형이 중단되면, 즉 단속이 발생하면 Fig. 15에서와 같이 3 단계로 구분되어 최종 조직을 형성하게 된다. I 단계는 이미 만들어진 핵은 준동적으로 성장하고(metadynamic recrystallization) 이미 성장하는 동적재결정립이 전위를 소모하였기 때문에 고전적인 정적재결정 발생이 어렵고 정적회복이 발생하는 단계이고, II 단계는 준동적재결정립들이 계속 성장하고 가공경화된 결정립들에서 정적회복을 거쳐 정적재결정핵이 생성되고 성장하는 정적재결정이 일어나는 단계이며 마지막으로 III 단계는 이러한 결정립들이 성장하는 단계이다. Roucoules등⁽⁴⁸⁾의 이론에 의하면 준동적재결정이 발생하면 정적재결정이 발생하기 불가능한 것으로 알려졌지만 이것은 동적재결정핵이 만들어지고 성장하는 하나의 결정립에 국한한 것으로 판단된다. 즉, 결정립계의 가공경화를 이미 동적재결정이라는 동적연화를 통해서 소멸시켰기 때문에 그 결정립내의 전위들이 감소하고 축적에너지를 방출하였으므로 정적재결정에 필요한 임계에너지를 갖지 못하게 됨으로써 변형후 단속중이더라도 정적연화가 발생하기 어렵다. 그러나 단속변형량이 동적재결정을 위한 임계변형량을 초과하더라도 재료내에서 균일하게 100% 동적재결정핵이 분포하는 것이 아니

기 때문에 Fig. 15와 같이 II 단계에서 핵이 발생한 부분에서는 준동적재결정이 발생하지만 나머지 가공경화된 부분에서는 임계수준의 에너지를 바탕으로 고전적인 정적재결정이 발생할 것으로 판단된다.

Fig. 11 (d)를 살펴보면 (a)와 (c)의 중간적인 형태를 보이고 있다. (a)는 정적연화가 충분히 발생하였기 때문에 단속곡선의 기울기가 모두 비슷하며 연속곡선의 최대

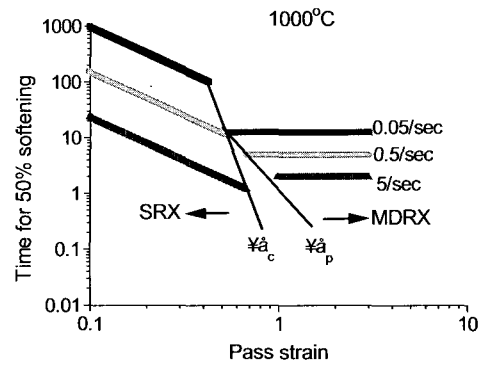


Fig. 14 $t_{0.5}$ as a function of the strain for strain rate of 0.05, 0.5, 5/sec. When $\dot{\epsilon}_i < \dot{\epsilon}_c$, SRX takes place and $\dot{\epsilon}_i > \dot{\epsilon}_p$, MDRX occurs

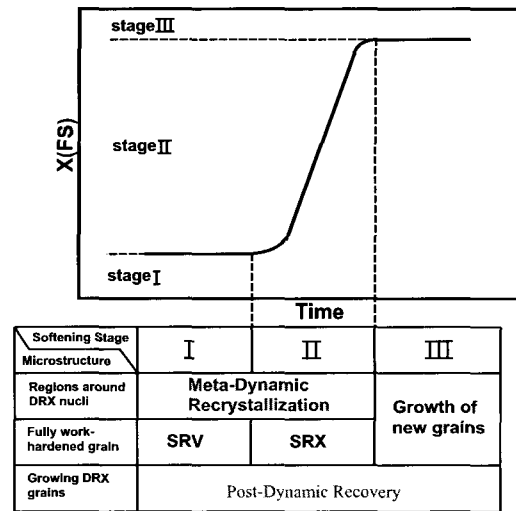


Fig. 15 Schematic illustration showing the relationship between each of the softening stages and the main restoration processes operating after DRX

응력에 일치하였고 (c)는 단속중에 정적연화가 발생하지 못하였기 때문에 첫 번째 곡선의 기울기에 비해서 후속되는 곡선의 기울기가 상당히 급격한 것을 알 수 있다. 이에 비해서 (d)의 경우는 단속곡선의 기울기나 유동응력 수준이 정적연화(a)와 동적연화(c)를 혼합한 정도이고 변형후반에 어느 정도의 동적효과를 얻었다면 단속시간 2초 이내에 충분한 준동적연화를 얻을 수 있었다고 판단된다. 또한 본 연구에서의 변형속도는 0.5/sec 였지만 실제 열연공정은 20~200/sec 정도의 매우 빠른 변형속도 하에서 일어나기 때문에 준동적재결정도 보다 빠른 시간 안에 일어날 것으로 예상된다.

5. 결론

고온연속 및 단속변형 실험을 통해 304 스테인레스강의 준동적연화 현상에 관해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 패스사이에서 준동적연화 효과를 충분히 얻기 위해서 패스변형량을 최대변형량으로 결정하였고 최대변형량과 공정변수와의 관계를 다음과 같이 Zener-Hollomon 값을 이용하여 정량화 하였다.

$$\epsilon_p = 3.02 \times 10^{-3} D_0^{1/2} Z^{0.089} \quad (6)$$

(2) 동일한 Z 값에서는 변형온도나 변형속도가 다르더라도 결정립도 및 유동응력 수준이 유사함에도 불구하고 단속중에 발생하는 준동적연화는 그 속도나 분율이 달라지므로 준동적연화를 Z 인자로 설명하기는 불가능하였으며 Zener-Hollomon parameter에 대한 상관관계가 적다는 면에서 동적재결정과는 다른 연화기구라는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 준동적재결정 현상은 변형속도 및 변형온도에 대해서는 동적재결정의 경우에 비하여 상대적으로 그 영향이 적으며 변형량에는 거의 무관하였고, 따라서 패스변형량의 영향이 적다는 면에서는 정적인 재결정과는 상이한 면을 확인할 수 있었다.

(4) 50% 연화가 발생하는데 걸리는 시간을 변형온도 및 변형속도와 함수로 다음과 같이 정량화 하였고 정량식에 의해 예측된 결과는 실제값과 잘 일치하고 있었다.

$$t_{0.5} = 1.33 \times 10^{-11} \dot{\epsilon}^{-0.41} D \exp(230300 \text{ J/mol} / RT) \quad (7)$$

(5) 준동적재결정을 이용한 압연공정에서 동적 공정변수를 바꿈으로서 정적현상을 제어할 수 있고 반대로 정

적상태를 바꿈으로써 동적인 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었으며 궁극적으로 이 두 상태가 서로 밀접한 관계를 유지한다는 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) C. Roucoules, P. D. Hodgson, S. Yue and J. J. Jonas, 1994, "Softening and Microstructural Change Following the Dynamic Recrystallization of Austenite", Metall. and Mater. Trans. A, Vol. 25, pp. 389~400.
- (2) C. M. Sellars, 1990, "Modelling Microstructural Development during Hot Rolling", Mater. Sci. Technol., Vol. 6, pp. 1072~1081.
- (3) S. H. Cho, Y. S. Kim and Y. C. Yoo, 1998, "Metadynamic Recrystallization of AISI 304 Stainless Steel", The 3rd Pacific Rim Int. Conf. on Advanced Materials and Processing(PRICM-3), Vol. 1, pp. 49~57.
- (4) C. Roucoules, S. Yue and J. J. Jonas, 1995, "Effect of Alloying Elements on Metadynamic Recrystallization in HSLA Steels", Metall. Trans. A 26A, pp. 181~190.
- (5) T. Sakai and M. Ohashi, 1990, "Dislocation Substructures Developed during Dynamic Recrystallization in Polycrystalline Nickel", Mater. Sci. and Technol., Vol. 6, pp. 1251~1257.
- (6) E. I. Poliak, J. J. Jonas, 1996, "A One-Parameter Approach to Determining the Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization", Acta mater. Vol. 44, pp. 127~136.
- (7) N. D. Ryan, H. J. McQueen and E. Evangelista, 1986, "Dynamic Recrystallization in Austenitic Stainless Steel", Proc. of the 7th Risø Inter. Sympo. on Metall. and Mater. Sci., pp. 527~534.
- (8) C. Roucoules and P. D. Hodgson, 1979, "Post-dynamic Recrystallization after Multiple Peak Dynamic Recrystallization in C-Mn Steels", Mater. Sci. and Tech., Vol. 11, pp. 548~556.
- (9) 조상현, 김성일, 유연철, 노광섭, 이경중, 권오준, 1997, "304 오스테나이트계 스테인리스강의 고온 연화", 대한금속학회지, 35(6), pp. 681~688.
- (10) 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*, Vol 4, No. 4 , pp. 732~736.
- (11) 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.
- (12) M. Avrami, *J. Chem. Phys.*, 1939, Vol. 7, p. 1103.
- (13) J. H. Beynon and C. M. Sellars, 1992, "Modeling Microstructure and Its Effects during Multipass Hot Rolling", *ISIJ Inter.* Vol. 32, No. 3, pp. 359~367.
- (14) M. J. Luton, R. A. Petkovic and J. J. Jonas, 1979, "Kinetics of Recovery and Recrystallization in Polycrystalline Copper", *Acta Metall.*, Vol. 28, pp.729~743.
- (15) J. M. Cabrera, A. A. Omar, J. J. Jonas and J. M. Prado, 1997, "Modeling the Flow Behavior of a Medium Carbon Microalloyed Steel Under Hot Working Conditions", *Metal. and Mater. Trans.A.* Vol. 28, pp. 2233~2244.
- (16) H. J. Mcqueen, E. Evangelista, N. Jin and M. E. Kassner, 1995, "Energy Dissipation Efficiency in Aluminum Dependent on Monotonic Flow Curves and Dynamic Recovery", *Metall and Mater. Trans. A*, Vol. 26, pp. 1757~1766.
- (17) S. I. Kim, S. H. Cho and Y. C. Yoo, 1999, "Metadynamic and Static Recrystallization of 304 Stainless Steel", *AIM, Chia Laguna Sardinia Italy*, Vol. 2, pp. 423~428.