

## SCM 440 강재의 정적 및 준동적 연화에 미치는 공정변수의 영향

한형기\* · 김성일\* · 정태성\* · 유연철\*

(1999년 10월 22일 접수)

### Effects of Process Variables on Static and Metadynamic Softening of SCM 440

H.K. Han, S.I. Kim, T.S. Jung and Y.C. Yoo

#### Abstract

The static softening behavior of SCM 440 could be characterized by the hot torsion test in the temperature ranges of 900°C~1100°C and strain rate ranges of 0.05/sec~5/sec. Interrupted deformation was performed with 2 pass deformation in the pass strain ranges of  $0.25\epsilon_p \sim 3\epsilon_p$  and interrupted time ranges of 0.5~100sec. The dependences of process variables, pass strain ( $\epsilon_i$ ), strain rate ( $\dot{\epsilon}$ ), temperature (T) and interpass time ( $t_i$ ), on static recrystallization (SRX) and metadynamic recrystallization (MDRX) were individually predicted from the modified Avrami's equations. The dependence of pass strain on MDRX was neglectable. 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. Controlled multipass deformations were performed using static and metadynamic recrystallization of SCM 440.

**Key Words** : Static Softening, Static Recrystallization, Metadynamic Recrystallization, Deformation Efficiency, Controlled Deformation.

#### 1. 서론

일반적으로 금속 재료의 고온 연화현상은 변형 중에 발생하는 동적 회복 (dynamic recovery, DRV)과 동적 재결정 (dynamic recrystallization, DRX)의 동적인 연화 (dynamic softening)와 정적 회복 (static recovery,

SRV)과 정적 재결정 (static recrystallization, SRX)의 정적인 연화 (static softening) 그리고 이 두 가지 현상을 모두 포함하는 준동적 연화 (metadynamic softening) 기구로 구분되며 열간 가공 변수인 온도(T), 패스 변형량( $\epsilon_i$ ), 변형속도( $\dot{\epsilon}$ ), 유지시간( $t_i$ )에 의해 제어된다.<sup>(1-2)</sup>

\* 인하대학교 재료공학부

<sup>16)</sup> 특히, 열간 압연, 열간 단조 등의 고온 소성가공은 연속 변형의 반복과정으로 구성되므로 이들 현상이 모두 발생할 수 있다. 또한 각각의 연화기구상 상호 영향을 미치므로 공정 변수의 제어에 따라 재료의 변형 저항 (deformation resistance)과 결정립 크기가 달라지게 되며 최종제품의 기계적 특성과 급형 및 기계의 수명이 크게 달라지게 된다.<sup>(3~9)</sup> 더욱이, 고온 다단 변형(multipass deformation)은 대체로 빠른 변형속도로 이루어지므로 심각한 국부 변형으로 미세 조직의 불균일성을 초래할 수 있기 때문에 응력 집중 (stress concentration), 미세 균열(micro crack) 등이 발생하기 쉽다. 따라서 변형 중에 발생하는 동적 재결정과 변형과 변형 사이에 발생하는 정적 재결정 및 준동적 재결정 현상을 정확하게 이해하여 다음 단계의 변형에 대한 적절한 공정변수를 선택함으로써 변형저항을 감소시키는 동시에 결정립 미세화를 얻을 수 있는 공정이 필요하다. 특히, 준동적 재결정은 정적인 연화기구이지만 핵생성을 위한 잠복기가 없어서 정적 재결정에 비해 매우 빠르게 진행하므로 짧은 유지시간에 더 높은 재결정 분율을 얻을 수 있다는 장점이 있어서 실제 생산 공정의 개선에도 큰 도움이 될 수 있다고 하겠다. 대표적인 구조용 강재인 SCM 440 강재는 변형저항이 높고 고온 변형 후 급냉되므로 균열의 발생이 쉬우며 불균일 변형된 미세 조직이 잔존하게 된다. 따라서 본 연구에서는 주로 열간 단조 및 압연공정으로 제조되는 SCM 440 구조용 강재를 고온 비틀림 시험기를 이용하여 2단 변형시험을 하였으며 이를 통하여 얻은 유동 응력곡선을 분석하여 다단 변형시 주요 공정변수가 되는 변형온도 (T) 변형속도 ( $\dot{\epsilon}$ ) 패스 변형량 ( $\epsilon_i$ ) 및 유지시간 ( $t_i$ )과의 관계를 가장 일반적으로 사용되고 있는 Avrami식<sup>(10)</sup>으로 정량화 함으로써 변형과 변형사이에 발생하는 미세 조직의 변화를 응력의 변화를 이용하여 예측함으로써 공정 변수의 정확한 제어가 가능하도록 하였다. 또한 정적 연화기구인 정적 재결정과 준동적 재결정을 체계적으로 정량화 하여 제어변형 공정이 가능하도록 하였다. 이 같은 과정으로 구조용 강재의 열간 변형기술 확립을 위한 열간 가공데이터를 구축하고 더 나아가 미세 조직을 균일하게 하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 기초 기술자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험방법

실험에 사용한 시료는 상용 SCM 440 봉재료써 그 화학조성은 Table 1과 같았으며, 이때 초기 결정립 크기는 약 150 $\mu$ m이었고 시험편은 직경 10mm×표점거리20mm로 절

Table 1 The chemical composition of SCM 440

Elements	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	Fe
wt %	0.39	0.18	0.21	0.67	0.07	0.15	bal.

삭가공한 고체형 비틀림 시험편을 사용하였다. 단속변형 시험은 변형속도 5.0x10<sup>-2</sup>/sec ~ 5.0x10<sup>0</sup>/sec 로 저변형 속도에서 실제 가공속도에 가까운 속도의 넓은 범위를 선택하였고 이를 변형온도와 함께 Table 2에 나타내었다. 변형온도는 1000℃ ~ 1200℃를 선택하였는데 이는 실제 열간 압연공정의 온도와 유사한 것이다. 변형 전에 1200℃에서 30분 유지하여 안정화시킨 후 변형온도에서 10분간 유지하였으며 변형 중 유지시간은 0.5sec에서 100sec까지의 범위로 선택하였다. 다단변형 공정의 모의 실험은 300%의 총변형량을 1100℃에서 1000℃로 감온하는 동시에 0.05/sec에서 5/sec로 가속되는 10패스의 다단 변형으로 하였다. 열간 변형에 의한 조직변화를 관찰하기 위해 미세 연마하여 picral 에칭액으로 부식하였으며 광학현미경을 이용하였다.

Table 2 The summary of interrupted deformation process

Interrupted deformation	Temperature(℃)	1000, 1100, 1200
	Strain rate(/sec)	0.05, 0.5, 5
	Interrupted time(sec)	0.5, 1, 3, 10, 50, 100
	Pass strain	$\epsilon_i = 0.25 \epsilon_p$ $\epsilon_i = 0.5 \epsilon_p$ $\epsilon_i = \epsilon_p$ $\epsilon_i = 3 \epsilon_p$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 단속 변형곡선과 패스 변형량의 영향

Fig. 1은 SCM 440 강재에 대하여 온도를 1200℃로 승온시킨 후 변형온도인 1100℃에서 패스 변형량 (pass strain,  $\epsilon_i$ )을 임계 변형량 (critical strain,  $\epsilon_c$ )보다 작은 최대 변형량 (peak strain,  $\epsilon_p$ )의 0.5배로 하여 변형한 경우와 최대 변형량과 같게 하여 변형한 단속 변형곡선이다. 두 경우 모두 유지시간이 0.5sec에서 100sec로 증가함에 따라 두 번째 변형에서의 응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 유지시간이 증가함에 따라 충분한 정적인 연화가 발생하여 두 번째 단계에서 첫 번째의 변

형에 의한 가공경화의 영향이 점차 감소했기 때문이다. 특히, 유지시간이 10초 이상으로 길어지는 경우에는 응력의 감소가 더 크게 나타났는데 유지시간 중에 발생하는 정적 재결정은 잠복기를 거친 후에 발생하므로 단속 초기보다는 약 10초 이후부터 더 큰 재결정 속도를 가지고 연화가 진행되기 때문이다 (Fig. 1 a). 그러나 변형량이 임계 변형량 보다 큰 경우 (Fig. 1 b)에는 10초 이전에 응력의 감소정도가 a의 경우보다 더 크게 나타나는데 이는 임계 변형량 이후에 발생한 동적 재결정의 핵이 유지시간 중에 빠르게 성장하여 잠복기가 없는 정적인 연화가 진행된 결과로 준동적 연화 (metadynamic softening) 기구가 작용했음을 알 수 있었다. 유지 시간 중의 정적인 연화의 정도는 유동 응력곡선에서 응력의 변화를 McQueen 등<sup>(23)</sup>이 제시한 다음의 관계식에 의해 연화 비율 (fractional softening, F.S)로 계산함으로써 알 수 있었다

$$FS = \frac{\sigma_{un} - \sigma_{y2}}{\sigma_{un} - \sigma_{y1}} \quad (1)$$

이 식에서  $\sigma_{un}$ 은 첫 번째 패스 변형 직후의 응력값이고  $\sigma_{y1}$ 과  $\sigma_{y2}$ 는 각각 첫 번째 변형에서의 항복응력과 두 번째 변형에서의 항복응력값이다.

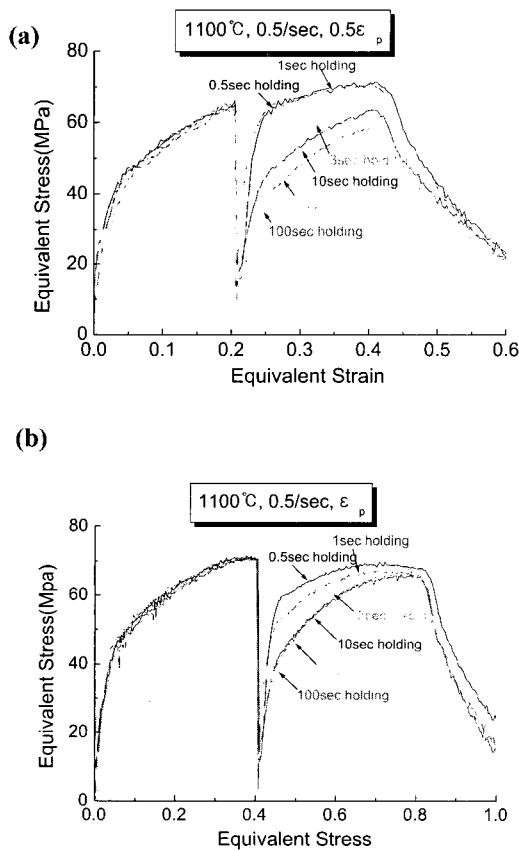


Fig. 1 Flow curves obtained from interrupted torsion test (a) 1100°C, 0.5/sec, 0.5 ε<sub>p</sub>, (b) 1100°C, 0.5/sec, ε<sub>p</sub>

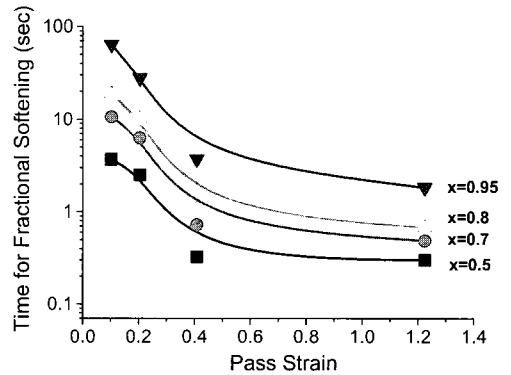


Fig. 2 Effect of strain on the rate of softening (1100, 0.5/sec)

Fig. 2에 변형온도 1100°C, 변형속도 0.5/sec 조건에서 정적 및 준동적 연화에 대한 패스 변형량의 영향을 나타내었다. 연화곡선은 패스 변형량이 임계 변형량 보다 작은 경우 연화 비율은 유지시간에 대해 전형적인 S자 형태 (sigmoidal shape)를 나타내었는데, 유지시간이 경과함에 따라 연화가 급속하게 진행됨을 알 수 있다. 이와 같은 연화 곡선은 기울기에 따라 크게 세 부분으로 구분할 수 있는데 첫 번째 부분은 잠복기 (incubation time) 이후에 정적 재결정이 발생하기 시작하는 상태로 비교적 재결정 속도가 작으며 두 번째 부분은 재결정 속도가 최대인 영역으로 수초 내에 재결정이 거의 완료되기도 한다. 마지막으로 세 번째 영역은 재결정이 거의 완료되거나 이미 정적 재결정의 구동력인 변형 에너지 (strain energy)가 소모되어 재결정이 완료되지 못하고 결정립 성장 (grain growth)이 발생하는 영역이다.<sup>(11, 12)</sup> 그러나 패스 변형량이 임계 변형량보다 큰 경우에는 연화곡선이 첫 번째 영역이 없는 형태로 나타나며 두 번째 영역의 기울기도 증가함을 알 수 있었다. Fig. 2의 결과는 패스 변형량을 최대 변형량의 0.25, 0.5, 1, 3배로 변화시킨 것으로 일반적으로 임계 변형량 또는 최대 변형량 이후의 주된 연화기구인 준동적 재결정에 미치는 변형량의 영향

은 무시할만하다고 보고<sup>(11~13)</sup>되어 있는데, 본 연구에서도 기존의 결과와 일치함을 알 수 있었다. 패스 변형량이 최대 변형량을 넘지 않는 경우와 넘는 경우를 비교하여 보면, 이 두 조건의 연화속도는 큰 차이가 있었다. 패

하여 전형적인 정적 재결정과 구분하는 것이다. 그러므로 정적 재결정과 준동적 재결정의 가장 주된 차이점은 그들의 기구에 대한 영향인자의 차이에서 비롯됨을 알 수 있다.

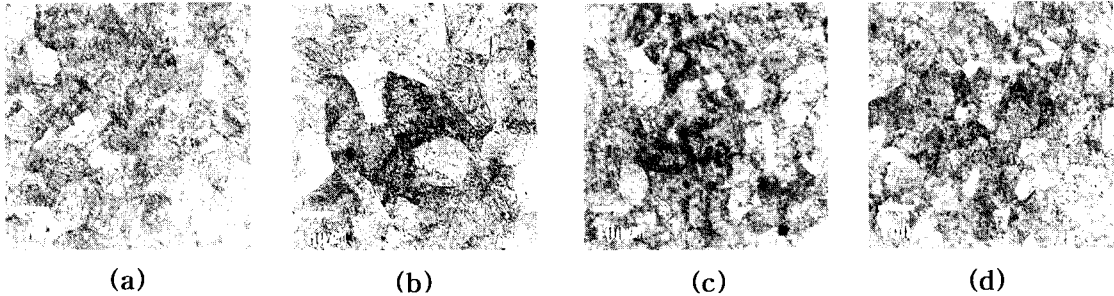


Fig. 3 Optical microstructures show strain effect at 10sec holding after deformation at 1100°C, 0.5/sec (a)0.25 ε<sub>p</sub>, (b)0.5 ε<sub>p</sub>, (c) ε<sub>p</sub>, and (d)3 ε<sub>p</sub>

스 변형량이 최대 변형량을 초과하는 경우, 변형량이 증가함에 따라서 연화양상은 거의 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 변형량이 커짐에 따라서 동적으로 재결정되는 분율이 증가함에도 불구하고 전위밀도나 동적 재결정핵의 밀도가 변하는 것이 아니기 때문에 패스 변형량이 증가해도 준동적 재결정에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 광학 현미경으로 관찰한 미세 조직에서도 나타났는데 변형량이 증가함에 따라 재결정의 구동력인 변형 에너지가 증가해서 정적 재결정이 빨리 진행함으로 최대 변형량을 넘지 않을 때에는 Fig. 3에 보인 것처럼 결정립의 크기가 변형량이 증가함에 따라 감소하였으나 최대 변형량을 초과하여 변형한 경우에는 준동적 재결정의 발생으로 결정립의 크기 변화는 거의 나타나지 않았다. Fig. 4에 연화비율과 패스 변형량과의 관계를 각각의 연화 비율을 얻는데 필요한 시간과의 관계로 다시 나타내었다. 이 결과로부터 순수한 정적 재결정은 패스 변형량에 의존성을보인 반면에 준동적 재결정이 패스 변형량에 민감하지 않다는 것을 밝힐 수 있었다. 이와 같은 사실은 미세 조직적인 고찰을 통해서도 확인해 볼 수 있는 것이다. 일반적으로 재결정은 핵 생성과 성장단계를 가진다. 그러나 준동적 재결정은 핵생성 단계를 거치지 않기 때문에 잠복기 없이 바로 재결정립 형성단계로 넘어가게 되며, 동적인 상태에서 핵이 형성된 후에 성장하는 결정립에서는 정적재결정의 발생이 용이하지 못하게 된다. 이것은 결정립계 주위의 전위들이 이미 소멸하여 구동력의 감소를 초래하기 때문이며, 따라서 이러한 연화를 준동적 재결정이라고

### 3. 2 정적 재결정 분율과 준동적 재결정 분율

연화 곡선은 변형량 뿐만 아니라 변형온도와 변형속도의 변화에 따라 변화하였는데 이와 같은 가공 변수들이 정적 재결정에 미치는 영향을 정량적으로 나타내기 위해서 각각의 가공 변수가 미치는 영향을 파악하여 다음의 Avrami 식으로 정량화 하였다.

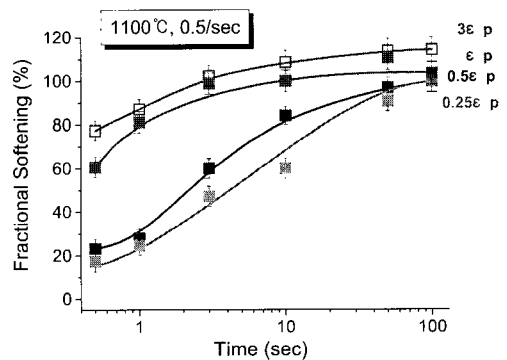


Fig. 4 Strain effect on static softening after interrupted deformation at 1100°C, 0.5/sec

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

X : 재결정 분율

t : 유지 시간

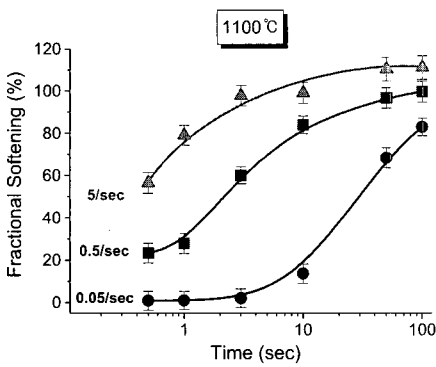
$n$  : Avrami 상수

$t_{0.5}$  : 재결정이 50% 발생하는데 걸리는 시간

정적 재결정이 50% 발생하는데 소요되는 시간인  $t_{0.5}$  다음과 같이 변형량, 변형속도, 온도, 그리고 초기 결정립도의 함수인데 본 연구에서는 변형 전에 열처리를 실시하여 초기 결정립도를  $150\mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다.

$$t_{0.5} = A \cdot \epsilon^p \cdot \dot{\epsilon}^q \cdot D_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

(a)



(b)

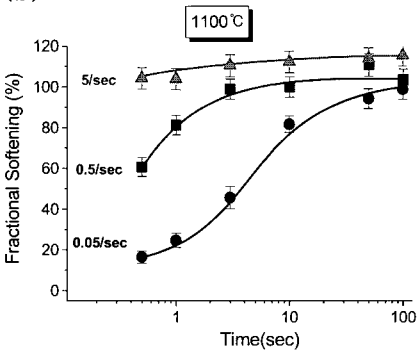


Fig. 5 Effect of strain rate on the rate of softening. (a) 1100°C,  $0.5 \epsilon_p$ , (b) 1100°C,  $\epsilon_p$

Fig. 5에 1100°C에서 각각 0.05, 0.5, 5/sec의 변형속도에서 단속변형 (interrupted deformation)하여 얻은 연화곡선을 나타내었다. Fig. 5 a는 첫 번째 단계에서 최대

변형량의 0.5배까지 변형한 후 단속 중에 발생하는 연화 과정을 보인 것으로 변형 속도가 0.05/sec에서 5/sec로 증가함에 따라 연화 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 5 b에 보인 것처럼 패스 변형량을 임계 변형량 보다 크게 하면 변형속도에 대한 의존성이 더욱 증가하여 더욱 빠르게 연화가 진행됨을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 변형 속도의 증가로 인해 결정립 내부의 전위밀도가 증가하게 되고 축적되는 변형 에너지량의 증가를 가져와 정적 재결정 속도를 증가시키며 전위, 슬립밴드 등의 정적 재결정핵이 발생하는 장소가 많아지기 때문으로 판단된다. 또한 패스 변형량이 임계 변형량 이상이 되면 변형 중에 이미 동적으로핵생성이 된 상태에서 정적 연화가 이루어지므로 연화 속도가 변형속도에 대해 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 변형온도가 연화곡선에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 변형속도가 일정할 때 1000~1200°C까지의 온도변화에 따른 연화 곡선의 변화를 나타내었는데, 온도가 1000°C에서 1200°C로 증가함에 따라서 일정 유지시간에 대한 연화비율이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이처럼 정적 연화에 미치는 온도의 영향은 열적 활성화 에너지인  $Q$ 로 표시되는데 식(3)의 양변에 대수를 취해 얻을 수 있었으며 패스 변형량이 임계 변형량 보다 큰 경우, 즉 정적 재결정을 위한 활성화 에너지 ( $Q_{SRX}$ )는 약 70265 J/mol 이었고 패스 변형량이 임계 변형량보다 커서 준동적 재결정이 발생한 경우에는 준동적 재결정을 위한 활성화 에너지 ( $Q_{MDRX}$ )값이 22020 J/mol이었다. 이상의 가공 변수들의 영향을 종합하여 정적 재결정과 준동적 재결정이 각각 50% 발생하는데 걸리는 시간인  $t_{0.5}^{SRX}$ 와  $t_{0.5}^{MDRX}$ 를 다음의 식(4)와 (5)로 완성할 수 있었다. Avrami의 식을 완성하기 위해서 Avrami's constant 또는 Avrami's exponent로 불리우는  $n$ 을 구해야 하는데 식(3)로 부터 구한  $t_{0.5}$ 를 Avrami의 식에 대입하여 여러 가지 변형 조건에 대한  $n$ 값을 구하였으며 이 값들을 평균하여 구한  $n$ 값은 정적 재결정과 준동적 재결정에 대해 각각 0.564와 0.602 이었다. 일반적으로 탄소강에 대한  $n$ 값은 1 - 2의 값을 나타내며 304 스테인레스강의 경우에는 1정도의 값을 나타내는 것으로 보고되고 있다<sup>(14~16)</sup>. 이상의 결과로 얻은 SCM 440의 Avrami 식을 이용하여 계산한 연화 비율은 실험 값에 잘 일치하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다. SCM 440의 단속변형에서 얻은 결과, 식

$$t_{0.5}^{SRX} = 2.02 \times 10^{-4} \cdot \epsilon^{-1.61} \cdot \dot{\epsilon}^{-1.05} \cdot D_0 \cdot \exp(70265/RT) \quad (4)$$

$$t_{0.5}^{MDRX} = 0.69 \times 10^{-2} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.693} \cdot D_0 \cdot \exp(22020/RT) \quad (5)$$

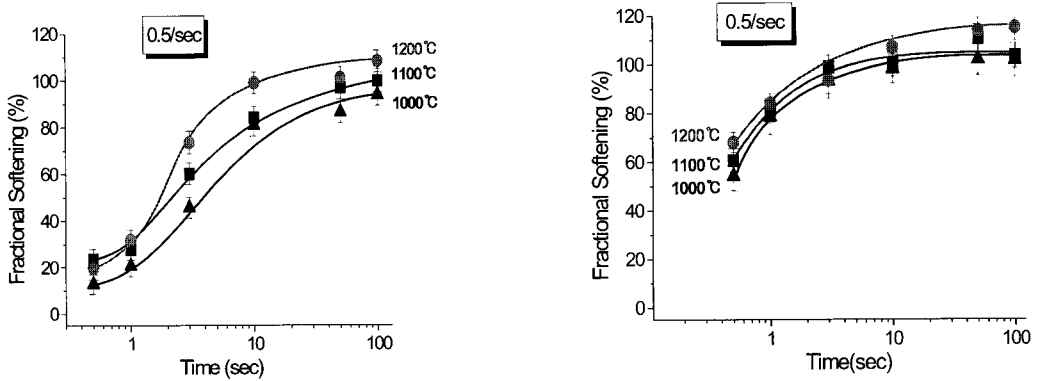


Fig. 6 Effect of temperature on the rate of softening. (a) 0.5/sec,  $0.5 \epsilon_p$  and (b) 0.5/sec,  $\epsilon_p$

Table 3 Deformation schedules for SRX controlled and MDRX controlled deformation

pass	deformation condition			schedule 1			schedule 2		
	$\dot{\epsilon}$ ( $s^{-1}$ )	T ( $^{\circ}C$ )	$\epsilon_i$	$\epsilon_r^{SRX}$	$t_i^{SRX}$ (sec)	$X_{SRX}$ (%)	$\epsilon_r^{MDRX}$	$t_i^{MDRX}$ (sec)	$X_{MDRX}$ (%)
1	0.05	1100	0.10		38.6	35		6.87	15
2	0.2	1057	0.17	0.065	23.1	66	0.085	4.68	35
3	0.4	1049	0.21	0.058	13.8	75	0.111	2.26	40
4	0.7	1035	0.25	0.053	10.8	85	0.126	1.02	40
5	1	1027	0.29	0.038	6.1	85	0.150	0.57	40
6	1.4	1020	0.33	0.044	5.1	90	0.174	0.34	40
7	1.8	1012	0.35	0.033	3.7	90	0.198	0.25	40
8	2.3	1007	0.40	0.035	2.3	90	0.210	0.16	40
9	3	1001	0.45	0.040	1.7	92	0.240	0.10	40
10	5	1000	0.49	0.036			0.270		

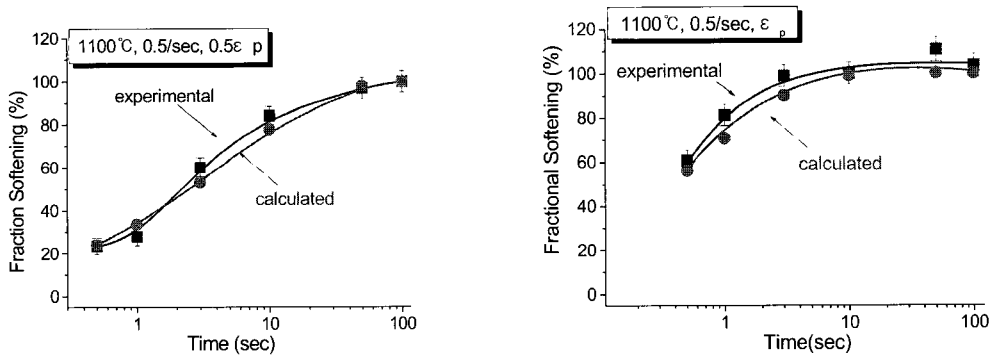


Fig. 7 Comparison of experimental and calculated results

(4)와 (5)를 바탕으로 실제공정과 유사한 감온가속 다단 변형 공정을 설정하여 그 결과를 비교하였다. 다단변형 모의실험은 정적 재결정을 이용한 공정과 준동적 재결정을 이용한 공정으로 각각 실시하였으며 그 공정표를 표 3에 나타내었다

Table 3의 첫 번째 공정은 정적 재결정의 효과만을 고려한 공정으로 각 패스의 변형량은 동적 재결정이 발생하지 않도록 임계 변형량 보다 작은 값을 설정하였으며 평균 재결정 분율( $X_{SRX}$ )이 78% 이상이 되도록 충분한 단속시간을 설정하였다. Table 3의 두 번째 공정은 패스 변형량은 첫 번째의 공정과 동일하지만 유지 시간( $t_i^{MDRX}$ )을 제어하여 패스후반에 잔류 변형량 (retained strain)에 의한 준동적 재결정 현상을 발생시키기 위한 공정이다. 즉 유지 시간을 줄임으로써 재결정 분율을 40%이하로 낮추었으며, 이때 생긴 잔류 변형량은 Kwon<sup>(17)</sup>등이 제안한 식 (6)을 이용해 바로 전 패스의 영향만을 고려하였다.

$$\Delta \epsilon_{i+1} = (1-X) \epsilon_i \quad (6)$$

$\epsilon_i$  : i번째 패스의 변형량, X : 재결정분율.

Fig. 8에 첫 번째 공정과 두 번째 공정후의 유동응력 곡선을 나타내었다. 두 유동응력 곡선을 살펴보면 두 번째 공정의 응력값이 패스가 진행됨에 따라 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 재결정 분율을 40%이하로 낮춤으로써 변형 시에 받은 가공이력을 완전히 연화시키지 못한 상태에서 가해진 다음 패스의 변형으로 가공경화현상이 발생하기 때문이며, 이로 인해 응력값이 약 20MPa 정도 증가하는 현상을 보였다.

변형후의 미세 조직을 살펴보면 Fig. 9에 보인 것과 같이 정적 재결정의 효과만을이용한 공정보다는 잔류 변형량을 이용하여 준동적 재결정을 발생시킨 두 번째 공정의 미세 조직이 훨씬 미세한 것을 알 수 있었다. 이처럼 패스 변형량, 변형온도, 변형속도가 모두 동일한 공정이라도 식(4)와 (5)를 바탕으로 유지 시간을 제어함으로써 서로 다른 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었으며 위의 두 공정을 종합적으로비교해 볼 때 두 번째 공정의 변형저항이 약 20MPa 정도 큰 값을 보였지만 변형조직이 더 미세하고 공정시간도 120초에서 20초로 단축되어 훨씬 효율적인 공정임을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

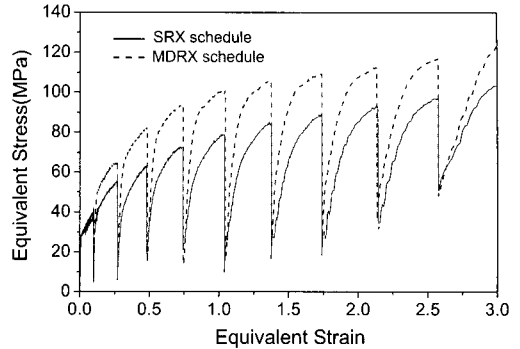


Fig. 8 Flow curves after multi-pass deformation a) schedule 1 and b) schedule 2

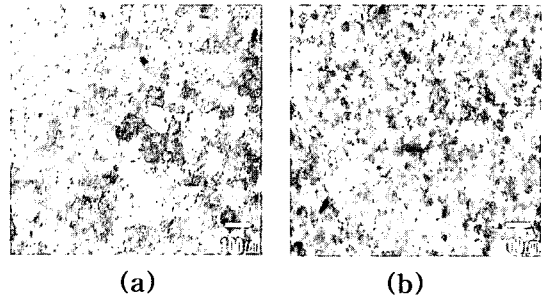


Fig. 9 Microstructures after multi-pass deformation (a) schedule 1 and (b) schedule 2

SCM 440 강재의 정적 및 준동적 연화기구를 구명하기 위해 1000~1200℃의 변형온도(T)와 0.05~5/sec의 변형속도( $\dot{\epsilon}$ ) 조건에서 고온 비틀림 열간변형시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다

(1) 변형 사이의 유지시간은 다단변형의 중요한 변수로서 다음 단계의 변형에서 항복응력의 변화를 초래하였는데 유지시간이 길어질수록 항복응력이 감소하였으며 준동적 연화기구의 진행속도가 정적 연화기구 보다 컸음을 알 수 있었다.

(2) 패스 변형량의 변화에 따른 연화곡선으로부터 정적 재결정이 패스 변형량에 큰 영향을 받는데 비해 준동적 재결정은 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

(3) 재결정 분율이 50%에 도달하는데 필요한 시간  $t_{0.5}$ 는 정적 재결정과 준동적 재결정에 대해 식 (4)와 (5)로 정량적으로 표현할 수 있었다.

(4) Avrami 상수는 가공변수에 따라 변화하였으며 정적 재결정과 준동적 재결정에 대해 각각 0.565, 0.602로

결정할 수 있었고 다음의 Avrami 식으로 완성할 수 있었다.

$$X_{SRX} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5}^{SRX})^{0.565}]$$

$$X_{MDRX} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5}^{MDRX})^{0.602}]$$

(5) 정적 재결정 및 준동적 재결정의 정량식을 기초로 하여 제어변형공정을 설정할 수 있었으며 준동적 재결정 제어압연의 경우 평균 결정립 크기를 약 20 $\mu$ m 정도로 줄일 수 있었으며 공정시간도 정적 재결정 제어압연에 비해 약 1/6수준으로 단축할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) J. H. Beynon and C. M. Sellars, 1992, "Modeling Microstructure and Its Effects during Multipass Hot Rolling", ISIJ, Vol. 32, No. 3, pp. 359~367.
- (3) C. M. Sellars, 1990, "Modelling Microstructural Development During Hot Rolling", Mater. Sci. Technol., Vol. 6, pp. 1072~1081.
- (4) K. N. Ramakrishnam, H. B. McShane, T. Sheppard and E. K. Loannidis, 1992, "Characterisation of Two Al-Fe based High Temperature Alloy Powders", Mater. Sci. Technol., Vol. 8, pp. 709~715.
- (5) 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. Technol., Vol. 14, No. 8, pp. 265~269.
- (6) 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., Vol. 16, pp. 1836~1837.
- (7) B. C. Ko and Y. C. Yoo, 1998, "Hot Deformation Behavior of AA2124 Composites Reinforced with Both Particles and Whiskers of SiC", Comp. Sci. and Technol., Vol. 58, pp. 479~485.
- (8) S. H. Cho, S. I. Kim and Y. C. Yoo, 1998, "The Effect of Deformation Variables on Hot Workability of Austenite Stainless Steel", Metals and Materials, Vol. 4, No. 4, pp. 732~736.
- (9) 조상현, 김성일, 유연철, 노광섭, 이경중, 권오준, 1997, "304 오스테나이트계 스테인리스강의 고온연화", 대한금속학회지, Vol. 35, No. 6, pp. 681~688.
- (10) M. Avrami, 1939, J. Chem. Phys., 7, p. 1103.
- (11) 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.
- (12) Zhou Xu, Guo-Rong Zhang and Taku Sakai : ISIJ, 35 (1995) p.210.
- (13) 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.
- (14) A. Laasraoui and J. J. Jonas, 1991, "Recrystallization of Austenite After Deformation at high Temperature and Strain Rates-Analysis and Modeling", Metall. Trans., 22A, pp. 151~160.
- (15) 조상현, 김유승, 유연철, 1997, "304 스테인리스강의 고온다단변형에 의한 정적 연화", 제 11회 재료강도심포지움, 대한금속학회, 22, pp. 15~22.
- (16) 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.
- (17) 권오준, 김교성, 1990, "스테인리스강의 최적열연조건 설정연구", 결과보고서, 산업과학기술연구소, 11.