

## AISI 4140 강재의 재결정 제어변형

\*김성일 조범호 한형기 유연철

# Recrystallization Controlled Deformation of AISI 4140

Sung-Il Kim\*, Beum-Ho Joe, Hyoung-Ki Han and Yeon-Chul Yoo

### ABSTRACT

The static softening behavior of AISI 4140 could be characterized by the hot torsion test in the temperature ranges of 1000°C~1200°C and strain rate ranges of 0.05/sec~5/sec. Deformation efficiency which was based on dynamic materials model was calculated from flow stress curves obtained continuous deformation. 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) could be individually predicted from the modified Avrami's equations. 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 deformation efficiency, static and metadynamic recrystallization of AISI 4140.

### 1. 서론

최근 열간 변형기술은 결정립 미세화를 통한 재료의 기계적 특성향상을 목적으로 연구 개발되고 있다<sup>1-5)</sup>. 특히, 열간 압연, 열간 단조 등의 실제 고온 소성가공은 연속 변형의 반복과정으로 구성되므로 동적(dynamic) 및 정적 연화(static softening)기구와 준동적 연화(metadynamic softening)기구가 복합적으로 발생하므로 이들 연화기구를 모두 제어하기 위해서는 공정 변수인 패스 변형량( $\epsilon_i$ ), 변형속도( $\dot{\epsilon}$ ), 변형온도(T), 유지시간( $t_i$ )에 따른 각각의 연화기구의 변화를 정확히 예측할 수 있어야 한다<sup>2-11)</sup>. 따라서 본 연구에서는 주로 열간 단조 및 압연공정으로 제조되는 AISI 4140 구조용 강재를 고온 비틀림

시험기를 이용하여 연속 및 단속 변형시험을 하였으며 이를 통하여 얻은 유동 응력곡선을 분석하여 다단 변형시 공정변수가 정적·준동적 연화기구에 미치는 영향을 가장 일반적으로 사용되고 있는 Avrami식<sup>12)</sup>으로 정량화 함으로써 다단 변형시 미세 조직변화를 공정 변수를 이용하여 제어할 수 있도록 하였다. 또한, 동적 재료 모델(dynamic materials model, DMM)을 이용하여 동적인 연화기구를 평가하고 낮은 변형 저항과 결정립 미세화를 동시에 얻을 수 있는 제어변형(controlled deformation)공정을 설정하고자 하였다.

인하대학교 재료공학부

School of Materials Science & Engineering, Inha University

## 2. 실험 방법

실험에 사용한 시료는 상용 AISI 4140 봉재로 Fe-0.4C-0.18Cr-0.21Si-0.67Mn-0.07Ni-0.15Mo-0.18Cu의 화학조성을 갖고 있으며 초기 결정립 크기는 약  $150\mu\text{m}$ 이었다. 시험편은 직경  $10\text{mm} \times$  표점 거리  $20\text{mm}$ 로 절삭가공한 고체형 비틀림 시험편을 사용하였다. 연속 및 단속 변형시험은 변형속도  $5.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^0/\text{sec}$ , 변형온도  $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ 의 범위에서 하였는데 승온속도를  $1^\circ\text{C}/\text{sec}$ 로 하여  $1200^\circ\text{C}$ 에서 30분 유지한 후 각각의 변형온도에서 10분간 유지, 변형 사이의 유지시간은 0.5sec에서 100sec까지의 범위로 선택하였다. 다만 변형 공정의 모의실험은 300%의 총변형량을  $1100^\circ\text{C}$ 에서  $1000^\circ\text{C}$ 로 감온하는 동시에  $0.05/\text{sec}$ 에서  $5/\text{sec}$ 로 가속되는 감온가속변형으로 하였다. 열간 변형에 의한 조직변화를 관찰하기 위해 미세 연마하여 picral 에칭액으로 부식하였으며 광학현미경을 이용하였다.

### 동적 재료모델 (Dynamic Materials Model)

고온 변형 시 AISI 4140 강재의 유동 응력은 Fig. 1에 나타난 것처럼 변형량, 변형속도 그리고 변형온도에 따라 크게 달라졌는데 이 같은 변화는 유동 응력이 연속변형 중 발생하는 가공경화와 동적 회복 그리고 동적 재결정의 상호작용에 의존하기 때문이다. 이 같은 고온 변형시 발생하는 여러 가지 현상을 변형되는 재료를 에너지의 분산자 (energy dissipator)로 고려한 동적 재료 모델 (dynamic materials model, DMM)이론에 근거하여 표현할 수 있다<sup>6,7)</sup>. 변형 효율 (deformation efficiency)은 동적 회복이나 동적 재결정처럼 재료의 동적인 거동으로 분산되는 에너지의 효율을 의미하는 것으로서 변형속도 민감도 (strain rate sensitivity,  $m$ )를 이용하여 다음과 같이 표현되어 진다.

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

변형속도 민감도는 변형조건에 따라 달라지므로 변형효율이 최대가 되는 변형조건을 선택할 수가 있었다. Fig. 2에 보인 것처럼 변형효율은 변형량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였는데 이는 변형량이 증가함에 따라 동적 재결정 분율 (volume fraction of DRX)이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 주어진 변형조건에 대해 변형 효

율이 최대가 되는 변형량이 존재하였으며 전체적으로는 고온과 낮은 변형속도의 변형 조건에서 높은 변형효율을 나타내었고 저온과 높은 변형속도의 변형 조건에서 낮은 변형효율을 나타내었다. 따라서 변형효율이 최대가 되는 변형조건을 결정할 수 있었다.

### 정적 재결정과 준동적 재결정

Fig. 3은 AISI 4140 강재에 대하여 온도를  $1200^\circ\text{C}$ 로 승온시킨 후 변형온도인  $1100^\circ\text{C}$ 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<sup>12-14)</sup>. 두 경우 모두 유지시간이 증가함에 따라 두 번째 변형에서의 응력이 감소하였는데 패스 변형량이 임계 변형량 보다 큰 경우가 작은 경우보다 두 번째 변형의 응력값이 더 빠르게 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 준동적 연화 (metadynamic softening)기<sup>13,14)</sup>가 발생했기 때문인데 이와 같은 유지 시간 중의 정적인 연화의 정도는 유동 응력곡선에서 응력의 변화를 McQueen<sup>11)</sup>이 제시한 다음의 관계식에 의해 연화 비율 (fractional softening, F.S)로 계산함으로써 알 수 있었다.

$$FS = \frac{\sigma_{\text{un}} - \sigma_{\text{y2}}}{\sigma_{\text{un}} - \sigma_{\text{y1}}} \quad (2)$$

이 식에서  $\sigma_{\text{un}}$ 은 첫 번째 패스변형 직후의 응력값이고  $\sigma_{\text{y1}}$ 과  $\sigma_{\text{y2}}$ 는 각각 첫 번째 변형에서의 항복응력과 두 번째 변형에서의 항복응력 값이다. Fig. 4에 연화비율을 유지시간에 대해 나타난 연화곡선을 보였으며 변형온도, 변형속도, 패스 변형량 등의 가공변수들이 정적 및 준동적 연화에 미치는 영향을 나타내었다. 연화비율은 패스 변형량이 증가함에 따라 증가하였지만 임계 변형량 또는 최대 변형량을 초과하게 되면 연화양상은 변형량이 증가해도 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 연화 곡선은 변형온도와 변형속도의 변화에 따라 변화하였는데 이와 같은 가공변수들이 정적 연화에 미치는 영향을 정량적으로 나타내기 위해서 각각의 가공 변수가 미치는 영향을 파악하여 다음의 Avrami 식으로 정량화 하였다.

Pass Process	Conditions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		SRCD	$\epsilon_i$	0.2	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
	$\dot{\epsilon}_i$ ( $/s^{-1}$ )	0.05	0.1	0.2	0.6	1	1.5	2	2.5	3	5
	$t_i$ (sec)	29.4	23.3	16.3	6.7	4.3	2.3	2.2	1.5	1.0	
MDRCD I	$\epsilon_i$	0.2	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
	$\dot{\epsilon}_i$ ( $/s^{-1}$ )	0.05	0.1	0.2	0.6	1	1.5	2	2.5	3	5
	$t_i$ (sec)	2.26	5.74	2.63	0.62	0.3	0.16	0.06	0.05		
MDRCD II	$\epsilon_i$	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65		
	$\dot{\epsilon}_i$ ( $/s^{-1}$ )	0.05	0.1	0.4	0.7	1	2	3	5		
	$t_i$ (sec)	8.8	5.44	2.08	1.41	1.1	0.68	0.52			

Table. 1. schedules for controlled deformation.

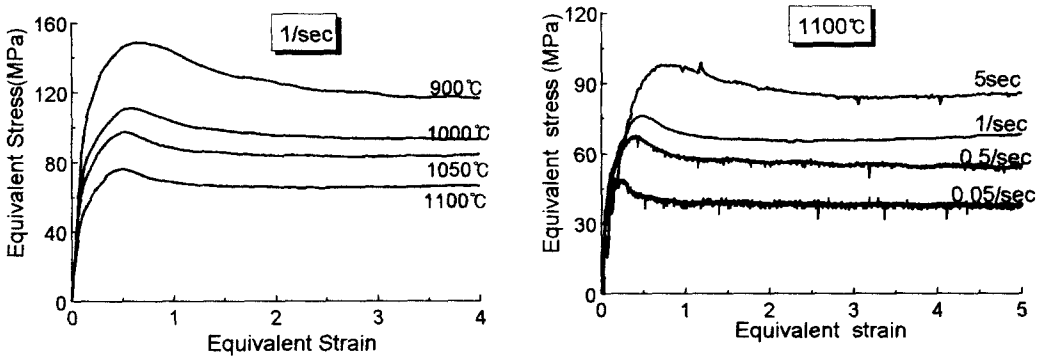


Fig. 1. Representative flow stress curves at the various deformation conditions.

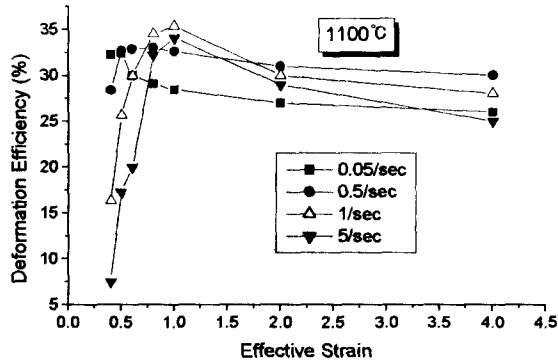


Fig. 2. Variation of deformation efficiency with strain at the various deformation conditions.

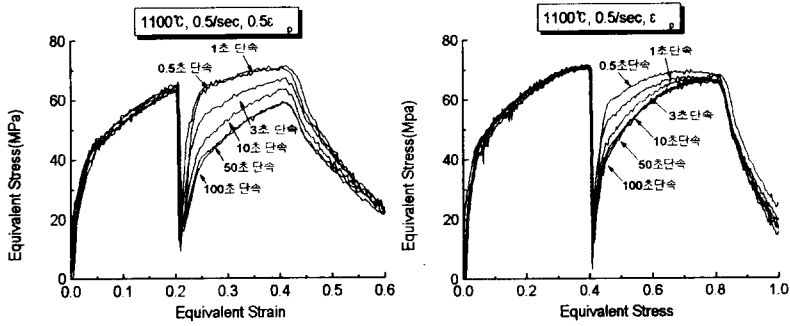


Fig. 3. Flow stress curves obtained from interrupted torsion tests.

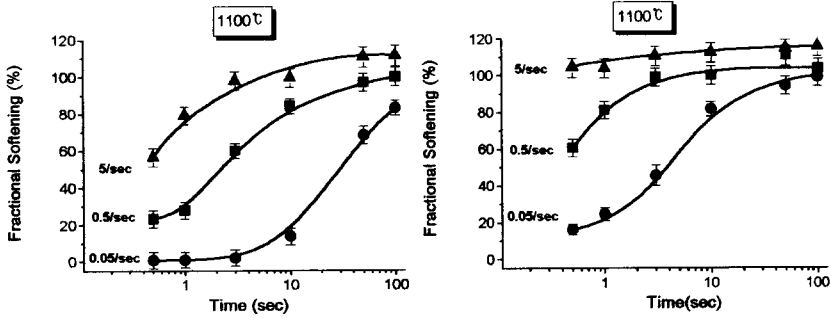


Fig. 4. Fractional softening curves at the various deformation conditions.

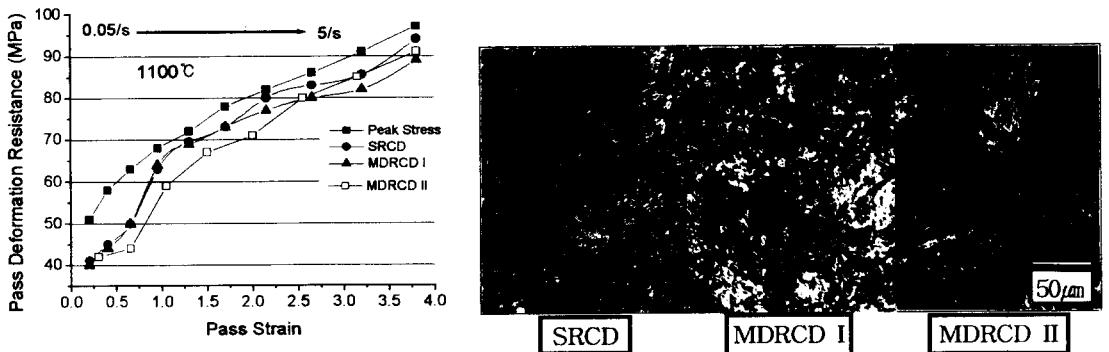


Fig. 5. Deformation resistance and microstructures obtained from several controlled deformations.

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

$$X_{SRX} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5}^{SRX})^{0.565}] \quad (3)$$

$$t_{0.5}^{MDRX} = 0.7 \times 10^{-2} \epsilon^{-0.69} D_0 \text{Exp}(22020/RT)$$

$$X_{MDRX} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5}^{MDRX})^{0.602}] \quad (4)$$

Fig. 5에 단속변형에서 얻은 정량식들과 변형 효율을 바탕으로 실제공정과 유사하게 등온가속 다단변형하여 그 결과를 비교하였다. 다단변형 모의실험의 공정은 표 1에 나타내었다. 표 1의 첫 번째와 두 번째 공정은 각각 정적 재결정 제어변형 (static recrystallization controlled deformation, SRCD)과 준동적 재결정 제어변형 (metadynamic recrystallization controlled deformation, MDRCD)으로 유지시간의 제어로 잔류 변형량을 다르게 하였는데 다음 식을 이용하였다.

$$\Delta \epsilon_{i+1} = (1-X) \epsilon_i \quad (5)$$

첫 번째 SRCD 공정은 재결정 분율이 평균 90%인 경우이며 두 번째 MDRCD I 공정은 패스 간 유지시간을 짧게 설정하여 평균 40%의 재결정 분율이 이루어지도록 설정하였다. 그 결과 두 유동응력 곡선의 변형저항값이 거의 동일하게 나타났다. 후반부에서는 오히려 MDRCD I 공정의 변형저항이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 재결정 분율을 40%이하로 낮춤으로서 변형시에 받은 가공이력을 완전히 연화시키지 못한 상태에서 가해진 다음 패스의 변형으로 발생한 잔류 변형량 때문이다. 이 잔류 변형량은 주어진 패스 변형량과 더해져서 임계 변형량을 초과하게 되므로 준동적 재결정이 발생하게 된다. 세 번째 공정은 이 같은 준동적 재결정을 효율값이 최대일 때의 변형량을 패스 변형량으로 설정하여 제어한 경우이다. 전체적인 변형저항이 앞의 두 공정에 비해 낮게 나타났다. 세 공정의 변형 후 미세 조직은 모두 비슷한 크기의 결정립을 보였지만 정적 재결정의 효과만을 이용한 공정보다는 준동적 재결정의 발생을 유도한 두 번째와 세 번째 공정을 이용한 경우가 전위 밀도가 높은 미세 조직을 갖게되므로 더 우수한 기계적 특성을 보일 것으로 판단되었다. 이처럼 공정 변수들을 제어하여 각각의 패스에서의 미세 조직과 변형저항을 예측할 수 있었으며 특히, 준동적 재결정 현상과 변형효율을 이용한 제어변형으로 낮은 변형

저항과 미세한 결정립을 얻을 수 있었고 공정시간도 단축할 수 있었다.

#### 4. 결론

가공 변수인 온도 (T), 변형속도( $\dot{\epsilon}$ ), 유지시간( $t_i$ ) 및 패스 변형량( $\epsilon$ )에 따라 변화하는 AISI 4140 강재의 고온 연화기구인 정적 재결정과 준동적 재결정을 정량화 할 수 있었으며 공정 변수에 따라 변화하는 변형 효율을 파악하여 효과적으로 준동적 및 정적 연화를 제어할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. C. ROUCOULES, S. YUE and J. J. JONAS, Metall. Trans., 26A (1995), 181.1.
2. B. C. KO, K. S. PARK and Y. C. YOO, Mat. Sci. Technol., Vol. 14, No. 8, (1998), 765.
3. S. H. CHO, S. I. KIM and Y. C. YOO, J. of Mater. Sci. Lett., 16 (1997), 1836.
4. B. C. KO and Y. C. YOO, Comp. Sci. and Technol., 58 (1998), 479.
5. S. H. CHO and Y. C. YOO, J. of Mater. Sci. Lett., 18, (1999), 987-989.
6. N. RAVICHANDRAN and Y. V. R. K. PRASAD, Metall. Trans., 22A (1991) 2339.
7. S. VENOGOPAL, S. L. MANNAN, and Y. V. R. K. PRASAD, Metall. Trans., 23A (1992) 3095.
8. R. A. PETKOVIC, M. J. LUTON and J. J. JONAS, Acta Metall., 27, (1979), 1633.
9. T. SAKAI and M. OHASHI, Mater. Sci. and Technol., 6 (1990), 1251.
10. C. M. SELLARS, Mater. Sci. and Technol., 6 (1990), 1072.
11. N. D. RYAN and H. J. McQUEEN, Can. Metall. Q., 30, (1991), 113.
12. S. H. CHO, S. I. KIM and Y. C. YOO, Metals and Materials, Vol. 4 No. 4 (1998), 732.
13. C. ROUCOULES, P. D. HODGSON, S. YUE and J. J. JONAS, Metall. Trans., 25A (1994), 389.
14. P. D. HODGSON, Mater. Sci. and Technol., 12 (1996), 788.