

## 비조질 중탄소강의 정적 및 준동적 재결정에 관한 연구

한창훈\* · 김성일\* · 유연철\* · 이덕락\*\* · 주용용\*\*

### Static and Metadynamic Recrystallization of Non-Heat Treated Medium Carbon Steels

C. H. Han, S. I. Kim, Y. C. Yoo, D. L. Lee and W. Y. Choo

#### Abstract

The static and metadynamic recrystallization of non-heat treated medium carbon steel(Fe - 0.45wt.%C - 0.6wt.%Si - 1.2wt.%Mn - 0.12wt.%Cr - 0.1wt.%V - 0.017wt%.Ti) were studied by the torsion test in the strain rate range of  $0.05 - 5 \text{ sec}^{-1}$ , and in the temperature range of  $900 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Interrupted deformation was performed with 2 pass deformation in the pass strain range of  $0.25 \epsilon_p$ (peak strain) and  $2 \epsilon_p$ , and in the interpass time range of  $0.5 - 100 \text{ sec}$ . The dependence of pass strain( $\epsilon_i$ ), strain rate( $\dot{\epsilon}$ ), temperature(T), and interpass time( $t_i$ ) on static recrystallization (SRX) and metadynamic recrystallization (MDRX) were predicted from the modified Avrami's equations respectively. Comparison of the softening kinetics between SRX and MDRX was indicated that the rate of MDRX was more rapid than that of SRX under the same deformation variables.

**Key Words** : Non-Heat Treated Medium Carbon Steel, Static Recrystallization, Metadynamic Recrystallization, Avrami Equation

#### 1. 서론

비조질 중탄소강(non-heat treated medium carbon steel)은 열간 가공시 높은 변형 저항을 보이며 후속 열처리 공정이 없으므로 인성 및 기계적 성질을 제어하기가 매우 어렵다. 따라서 최근 고온 변형시 발생하는 동적 재결정,

정적 재결정 및 준동적 재결정을 이용한 응력 및 미세조직 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 비조질 중탄소강의 고온 소성변형 공정은 반복적인 연속 변형으로 구성된 다단 압연으로 제조되며 압연 중에는 동적 재결정이 발생하고 압연과 압연 사이의 유지 시간 동안에는 정적 및 준동적 재결정이 발생하게 된다. 특히,

\* 인하대학교 재료공학부

\*\* 한국과학기술연구원 재료연구부

정적 및 준동적 재결정은 가공변수인 온도(T), 패스 변형량( $\epsilon_i$ ), 변형속도( $\dot{\epsilon}$ ), 유지 시간( $t_i$ ) 등의 공정 변수에 크게 영향을 받아 변화하므로 최종 제품의 기계적 성질이 크게 변화하게 된다.<sup>(1-3)</sup> 따라서 본 연구에서는 비조질 중 탄소강을 연속 변형 및 단속 변형하여 변형과 변형 사이의 유지 시간 동안에 발생하는 정적 및 준동적 재결정을 각각 정량적으로 표현하고자 하였다. 또한 이들 정량식을 이용하여 실제 압연 공정에 적용할 수 있는 기초 데이터를 확립하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 비조질 중탄소강은 (주)POSCO에서 생산되고 있는 강종으로 Fe - 0.45wt.%C - 0.6wt.%Si - 1.2wt.%Mn - 0.12wt.%Cr - 0.1wt.%V - 0.017wt.%Ti 이었다. 고온 변형 시험은 표점 거리 20mm, 직경 10mm의 고체형 비틀림 시편으로 하였으며 변형온도 900 - 1100°C, 변형속도  $5.0 \times 10^{-2} - 5.0 \times 10^0$ 의 범위에서 하였다. 2단 변형시험은 최대 변형량( $\epsilon_p$ )을 기준으로 동적 재결정이 발생하기 전인  $0.25\epsilon_p$ 와  $0.5\epsilon_p$ , 동적 재결정이 발생한 후인  $\epsilon_p$ 와  $2\epsilon_p$ 로 설정하여 정적 재결정과 준동적 재결정의 영향을 구분하여 평가하였다.

## 3. 실험 결과

### 정적 연화기구와 임계 변형량

Fig. 1에 중탄소강을 고온 변형 시험하여 얻은 연속변형 곡선의 기울기인 가공경화속도(work hardening rate,  $\theta$ )와 유효 응력(effective stress)과의 관계를 나타내었다. 변형초기에는 가공경화로 인해서 높은  $\theta$  값을 나타내지만 변형이 계속 진행됨에 따라 동적 회복에 의한 아결정립(subgrain)이 생기므로  $\theta$  값은 점차 감소하게 된다. 동적 재결정은 아결정립의 밀도가 임계 수준에 도달하였을 때 핵 생성되며 이때 Fig. 1의 가공 경화속도에 큰 변화가 나타나게 된다. 따라서 이와 같은 가공 경화속도의 변화로부터 임계 변형량을 결정할 수 있었다. 변형과 변형 사이에 발생하는 정적 연화기구는 이 임계 변형량을 기준으로 크게 달라지게 된다. Fig. 2에 정적 재결정과 준동적 재결정에 의해 연화된 2단 변형곡선을 도시하였다. Fig. 2(a)는 패스 변형량을 임계 변형량(critical strain,  $\epsilon_c$ )보다 작은 최대 변형량(peak strain,  $\epsilon_p$ )의 0.5배로 하여 변형한 경우이다. 두 번째 변형에 의한 유효응력의 감소가 유지시간이 증가함에 따라 증가하였다. 특히, 유효응력의 감소는 유지

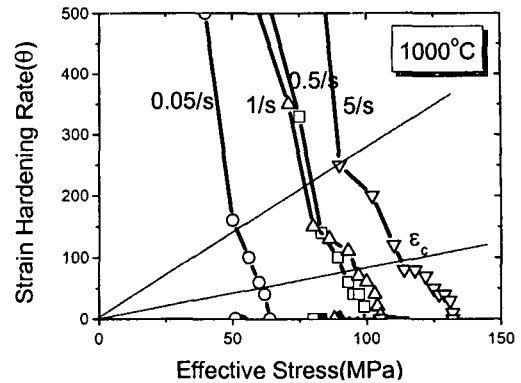


Fig. 1 Work hardening rate( $\theta$ ) -  $\sigma$  curves to determine the critical strain( $\epsilon_c$ )

시간이 10초 이상이었을 때 두드러지게 나타났다. 하지만 Fig. 2(b)에 도시한 것처럼 패스 변형량을 임계 변형량 보다 크게 하여 변형하였을 때에는 유효응력의 감소는 유지 시간이 짧을 때 급격하게 발생하였다.

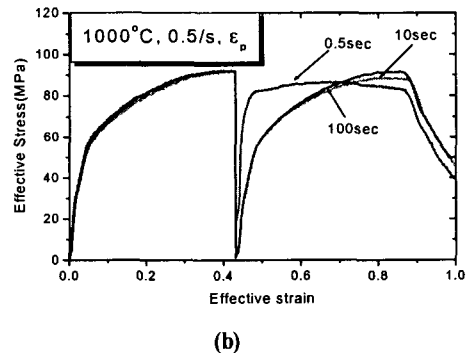
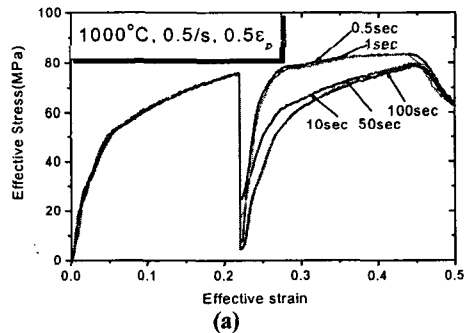


Fig. 2 Flow curves obtained from interrupted torsion test (a) 1000°C, 0.5/sec,  $0.5\epsilon_p$ , (b) 1000°C, 0.5/sec,  $\epsilon_p$

이와 같은 응력 감소의 차이는 Fig. 3에 나타낸 것처럼 임계 변형량 이후에 발생한 동적 재결정에 의해 정적 연화기구가 다르게 나타났기 때문이다. Fig. 2(b)에서 발생한

정적 연화 기구를 준동적 재결정이라 하며 정적 재결정의 핵생성을 위한 잠복기 없이 빠르게 진행되는 것으로 알려져 있다.

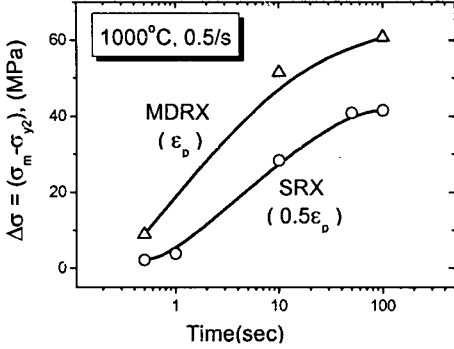


Fig. 3 Comparison of the softening kinetics between SRX and MDRX

#### 정적 재결정과 준동적 재결정

유지 시간에 따른 응력의 감소는 연화 비율(fractional softening, FS)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있었다.

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

여기서  $\sigma_m$ 은 첫 번째 패스변형 직후의 응력값이고  $\sigma_{y1}$ 과  $\sigma_{y2}$ 는 각각 첫 번째 변형에서의 항복응력과 두 번째 변형에서의 항복응력값이다.

연화 비율은 변형온도, 변형속도, 변형량 및 유지 시간에 따라 변화하였으며 다음의 Avrami 식으로 정량적으로 표현할 수 있었다.<sup>(4)</sup>

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

여기에서 X는 연화 비율로 재결정 분율을 의미한다. t와 n은 각각 유지 시간과 Avrami 상수이며  $t_{0.5}$ 는 재결정이 50%발생하는데 필요한 시간으로 다음과 같이 표현되며

$$t_{0.5}^{SRX} = 8.98 \times 10^{-7} \epsilon^{-0.65} \dot{\epsilon}^{-1.24} D_0 \exp(92100/RT) \quad (4)$$

$$X_{SRX} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5}^{SRX})^{0.587}] \quad (5)$$

$$t_{0.5}^{MDRX} = 4.46 \times 10^{-7} \epsilon^{-0.78} D_0 \exp(105100/RT) \quad (6)$$

$$X_{MDRX} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5}^{MDRX})^{0.657}] \quad (7)$$

변형량, 변형속도, 온도, 그리고 초기 결정립도의 함수로 본 연구에서는 변형전 열처리를 통해 초기 결정립도를  $120 \mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다.

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

Fig. 4에 정적 재결정에 의한 연화곡선과 준동적 재결정에 의한 연화곡선을 나타내었다. Fig. 4(a)는 정적 재결정의 변형속도에 대한 영향으로 Fig.4(b)에 나타난 준동적 재결정의 경우에 비해 변형 속도에 대한 의존성이 약간 작은 값을 나타내었다. 식(3)을 이용하여 이와 같은 변형 속도에 대한 의존성은 각각  $t_{0.5}^{SRX}$ 와  $t_{0.5}^{MDRX}$ 으로 표현할 수 있었다. 또한 정적 및 준동적 재결정의 변형 온도에 대한 의존성은 식(3)에 나타난 것처럼 활성화 에너지(activation energy)로 표현할 수 있었으며 그 결과 정적 재결정과 준동적 재결정의 활성화 에너지는 각각 92.1 kJ/mol과 105.1 kJ/mol이었다.  $\epsilon_p$ 에 대하여 온도에 따른 연화곡선을 나타내었다. 온도가 증가할수록 연화속도도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 가공 변수들간의 영향을 분석하여 정적 재결정과 준동적 재결정이 각각 50% 발생하는데 걸리는 시간인  $t_{0.5}^{SRX}$ 와  $t_{0.5}^{MDRX}$ 를 다음의 식(4)와 (6)으로 완성할 수 있었다.

또한  $t_{0.5}$ 를 Avrami식에 대입하여 Avrami's constant인 n값을 구하고 정적 재결정과 준동적 재결정에 대하여 각각 Avrami 식을 식(5), (7)으로 완성하였다. 정적 연화기구의 패스 변형량에 대한 의존성을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 일정한 변형온도와 변형속도에서 패스 변형량을 다르게 하였을 때의 연화 곡선이다. 패스 변형량이 0.5  $\epsilon_p$ 에서 2  $\epsilon_p$ 로 증가함에 따라 연화비율은 점차 증가하였지만  $\epsilon_p$ 에서 2  $\epsilon_p$ 로 증가할 때에는 큰 변화를 보이지 않았다. Fig. 5(b)에 이와 같은 패스 변형량의 영향을 여러 변형 온도에 대해 나타내었다. 모든 변형 조건에 대해 임계 변형량 보다 큰 패스 변형량으로 변형하였을 때에는 연화비율의 패스 변형량에 대한 의존성이 매우 낮아서 무시할 만 하였다.<sup>(5-6)</sup> 이는 준동적 재결정이 패스 변형량에 무관하다는 의미로 기존의 연구 결과와도 일치하는 것이었다.

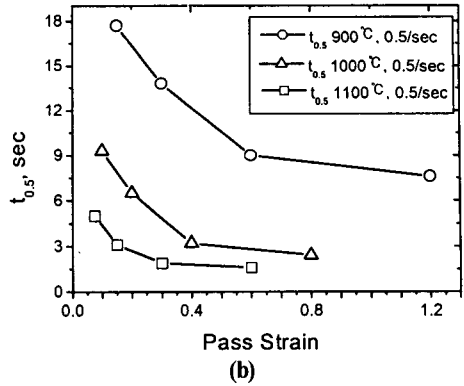
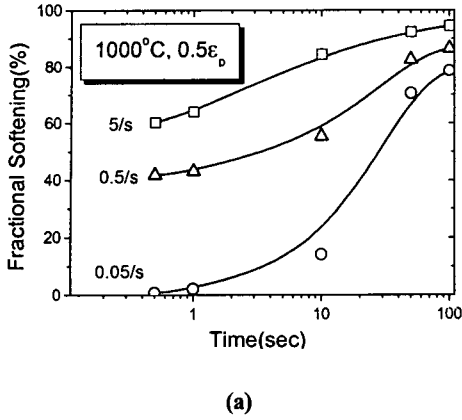
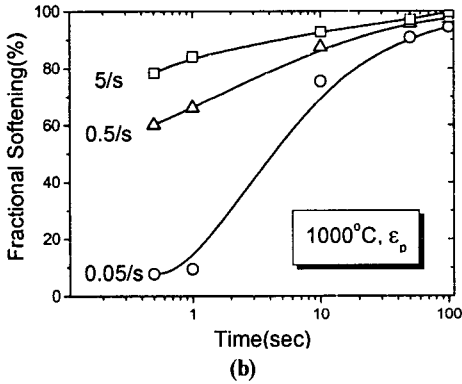


Fig. 5 (a) Strain effect on static softening after interrupted deformation at 1000°C, 0.5/sec, (b) Relationship between  $t_{0.5}$  and pass strain



#### 4. 결론

중탄소강의 2단 변형시의 온도( $T$ ), 변형속도( $\dot{\epsilon}$ ), 유지시간( $t_i$ ), 패스 변형량( $\epsilon_i$ ) 등의 제어에 의하여 2번째 변형에서의 항복 응력의 변화가 발생하였는데 이로부터 정적 및 준동적 재결정 기구를 알 수 있었다. 또한  $t_{0.5}^{SRX}$ 와  $t_{0.5}^{MDRX}$ 를 정량화하고 정적 및 준동적 재결정에 대하여 각 Avrami식을 완성할 수 있었다.

#### 참고 문헌

- (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, "Modelling Microstructure and Its Effects during Multipass Hot Rolling", ISIJ, Vol. 32, No. 3, pp. 359~367.
- (3) C. M. Sellars, 1990. "Modeling Microstructural Development During Hot Rolling", Mater. Sci. Technol., Vol. 6, pp. 1072~1081.
- (4) M. Avrami, 1939, J. Chem. Phys., 7, p. 1103.
- (5) 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
- (6) C. Roucoules, P. D. Hodgson, S. Yue, and J. J. Jonas, 1994, "Softening and Microstructural Changes Following the Dynamic Recrystallization of Austenite", Metall. Trans., 25A, pp. 389~400

Fig. 4 Strain rate effect on the rate of softening (a) 1000°C, 0.5  $\epsilon_p$ , (b) 1000°C,  $\epsilon_p$

