

중탄소강의 동적 재결정에 관한 연구

김성일* · 한창훈* · 유연철* · 이덕락** · 주용용**

Dynamic Recrystallization of Medium Carbon Steels

S. I. Kim, C. H. Han and Y. C. Yoo

Abstract

The dynamic recrystallization (DRX) of medium carbon steels (SCM 440 and POSMA45) was studied with torsion test in the temperature range of 900 - 1100°C and the strain rate range of 5.0×10^{-2} - 5.0×10^0 /sec. To establish the quantitative equations for DRX, the evolution of flow stress curve with strain was analyzed. The critical strain (ϵ_c) and strain for maximum softening rate (ϵ^*) could be confirmed by the analysis of work hardening rate ($d\sigma/d\epsilon = \theta$). The volume fraction of dynamic recrystallization (X_{DRX}) as a function of processing variables, such as strain rate ($\dot{\epsilon}$), temperature (T), and strain (ϵ) were established using the ϵ_c and ϵ^* . For the exact prediction, the ϵ_c , ϵ^* and Avrami' exponent (m') were quantitatively expressed by dimensionless parameter, Z/A, respectively. The transformation-effective strain-temperature curve for DRX could be composed. It was found that the calculated results were agreed with the experimental data for the steels at any deformation conditions.

Key Words : Dynamic Softening, Medium Carbon Steel, Critical Strain, Strain for Maximum Softening Rate, Transformation-Effective Strain-Temperature Curve

1. 서 론

동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)을 이용한 제어변형은 고품질의 철강 재료를 생산하기 위해 필수적인 공정으로 많은 연구가 이루어지고 있으며 선진국에서는 실제 공정에도 일부 적용되고 있다¹⁾. 최근 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있지만 동적 재결정의

미세 조직제어에 대한 심도있는 연구는 미흡한 실정이다. 동적 재결정은 금속재료의 열간 변형 중에 나타나며 가공변수인 변형온도(T), 변형속도($\dot{\epsilon}$) 및 변형량(ϵ)에 따라 변화하는 연화기구로서 실제의 소성 변형공정에서 쉽게 관찰되어진다. 하지만 실제의 압연공정은 연속 변형이 아닌 다단변형(multipass deformation)으로 이루어져 있으며 고온에서 매우 빠른 변형속도로 변형되므

* 인하대학교 재료공학부

** POSCO 기술연구소

로 불균일 변형이 심하며 미세 조직을 제어하기 어렵다. 따라서 압연공정에서의 미세 조직제어를 위해서는 동적 재결정 현상을 정확하게 이해해야 한다. 동적 재결정은 임계 변형량 이후에 핵생성하여 성장하기 시작하며 유동 응력이 정상상태를 나타낼 때 완료되어 결정립의 크기변화가 없게 되는데 이때의 결정립은 변형전에 비해 매우 작아지게 된다. 이와 같은 동적 재결정 분율의 변화는 일정한 변형온도와 변형속도의 조건에 대해 변형량에 따라 변화하는데 이 때 주어진 변형량에 대해 발생한 동적 재결정 분율은 다음과 같은 Avrami' equation을 기본으로 한 식으로 예측할 수 있다.

$$X = 1 - \exp(-\beta t^{m'}) \quad (1)$$

여기에서 X는 동적 재결정 분율이며 β 와 m' 은 실험적으로 결정되는 상수값으로 m' 은 Avrami's exponent라고 한다. 식 (1)에서 t는 시간으로 일정한 변형속도의 변형조건에 대해서 변형량으로 표현될 수 있다^{1,2)}. 하지만 식(1)의 형태만으로는 동적 재결정 분율을 정확히 예측하기 어려우며 이를 이용한 유동 응력 예측도 심한 오차를 나타내게 되는데 이는 실험 상수인 β 와 m' 의 모호성 때문이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 중탄소강인 SCM 440강재와 POSCO (주)에서 생산하고 있는 POSMA45 강재에 대해 동적 재결정 분율 예측식을 완성하여 재결정 제어변형을 위한 기초 데이터로 활용하고자 하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 시료는 상용 SCM 440 봉재와 POSMA45 (POSCO(주))로 화학조성은 표 1에 나타난 것처럼 탄소의 함량이 각각 0.4wt%C 와 0.45wt%C의 중탄소강이었다. 시험편은 직경 10mm×표점거리 20mm로 절삭가공한 고체형 비틀림 시험편을 사용하였다. 연속 변형시험은 변형속도 $5.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^0$ /sec, 변형온도 900 ~ 1100°C의 범위에서 하였으며 승온속도를 1°C/sec로 하여 1100°C에서 5분 유지한 후 각각의 변형온도에서 5분간 유지한 후 변형하였다. 변형 전 초기 결정립 크기는 두 강종 모두 약 120 μ m 이었다. 변형 후 비틀림 모멘트와 비틀림각은 Fields와 Backofen이 제시한 식과 Von Mises 항복조건을 이용하여 유효응력(σ)과 유효변형량(ϵ)으로 변환하였다. 미세 조직은 시편을 미세 연마하여 에칭한 후 광학현미경을 이용하였다.

Table 1 The chemical composition of SCM440 and POSMA45

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti
SCM 440	0.4	0.67	0.21	0.18	0.5	·	·
POSMA45	0.45	1.2	0.6	0.12	·	0.1	0.017

3. 실험 결과

동적 재결정의 핵생성과 성장

동적 재결정이 주된 연화기구인 금속재료의 고온 유동 응력곡선은 Fig. 1에 나타난 것처럼 유동 응력이 변형량이 증가함에 따라 급격히 증가하여 최대 응력(peak stress, σ_p)에 도달한 후 정상 상태(steady state)를 보일 때까지 서서히 감소하는 형태를 나타낸다.

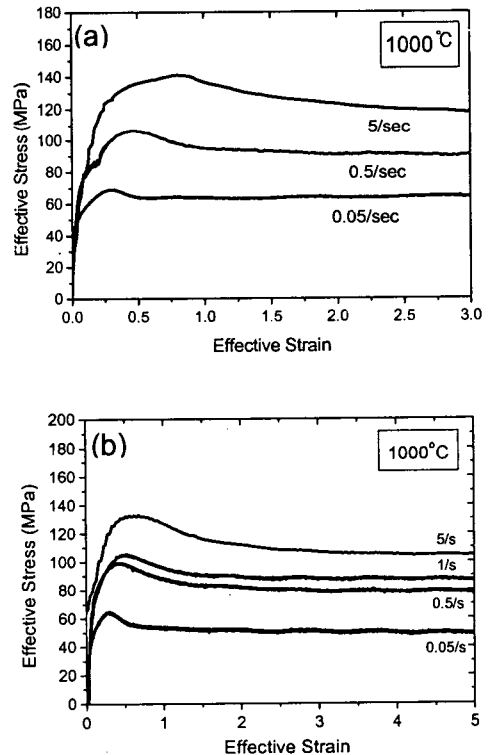


Fig. 1 Representative flow curves of (a) SCM440 and (b) POSMA45 obtained under various strain rates at 1000°C

Fig. 1(a)와 (b)에 중탄소강인 SCM440과 POSMA45의 유동 응력곡선을 각각 나타내었다. 이 같은 변형량에 따른 유동 응력의 심한 변화는 변형 중에 발생하는 동적 재결정에 의해 미세 조직이 심하게 변화하기 때문이다. 특히, 미세 조직은 변형 초기에는 심한 가공 경화에 의해 결정립이 연신되고 결정립 내의 전위밀도가 증가하는 변화가 발생하며 동적 재결정이 성장해 나가는 최대 응력 이후의 변형 중반에는 새로운 결정립의 발생과 성장으로 결정립의 크기 변화가 심해진다. 따라서 미세 조직의 변화는 그대로 유동 응력곡선의 변화로 나타나게 된다.

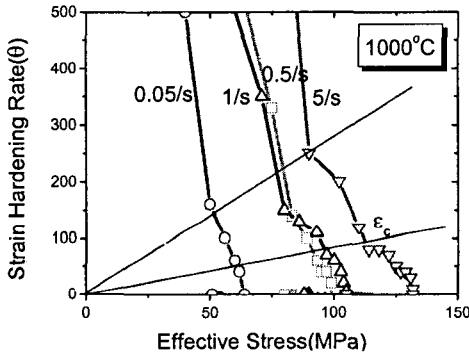


Fig. 2 Work hardening rate - effective stress curves of POSMA45 obtained under various strain rates at 1000°C

동적 재결정이 발생하기 시작하는 임계 변형량(critical strain, ϵ_c)은 Fig. 2에 보인 것처럼 유동 응력곡선의 기울기인 가공경화 속도(work hardening rate, θ)의 변화로부터 결정할 수 있었다. 변형 초기의 가공경화 속도는 동적 회복의 발생에 의해 점차 감소하게 되며 새로운 결정립의 발생과 대경각입계의 증가로 전위밀도가 갑자기 감소하기 시작하는 임계 변형량에서 더 큰 변화를 나타내게 된다. 따라서 임계 변형량은 유동 응력이 최대 응력에 도달하기 직전에 가장 큰 기울기 감소를 보이는 응력값에 상응하는 변형량으로 결정할 수 있었다. SCM440의 경우 임계 변형량은 탄소함량이 많은 POSMA45에 비해 약간 큰 값을 보였는데 이는 POSMA45에 미량 첨가되어 있는 Ti 및 V과 탄소의 화합물이 석출하여 동적 재결정의 핵생성 자리가 좀 더 증가하였기 때문으로 판단되었다. 이와 같은 방법으로 동적 연화속도가 최대가

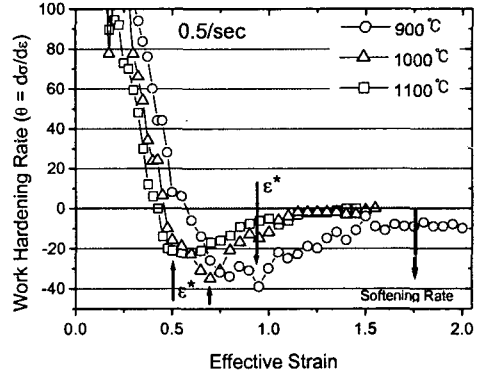


Fig. 3 Work hardening rate - effective strain curves of SCM 440 obtained under various temperature at 0.5/sec

되는 변형량을 결정할 수 있었는데 이를 Fig. 3에 나타내었다. 가공 경화속도는 최대 응력 이후에 음의 값을 갖는데 이는 동적 재결정의 발생 및 성장에 의한 응력의 연화현상으로 가공 경화속도가 아닌 동적 연화속도로 표현될 수 있다²⁾. 동적 연화속도는 최대 응력 이후에 계속 감소해서 최대값을 보인 후에 다시 정상상태에 도달하게 된다. Fig. 3에 보인 것처럼 이 최대값에 해당하는 변형량은 변형온도가 감소할수록 변형속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 임계변형량, 최대응력에 상응하는 최대 변형량 및 정상상태 변형량도 같은 경향을 나타내었다. 이와 같은 변형온도와 변형속도에 대한 의존성은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있었다.

$$\epsilon_c = 0.25 (Z/A)^{0.158} = 0.73 \epsilon_p \quad \text{for SCM 440} \quad (2)$$

$$\epsilon_c = 0.25 (Z/A)^{0.158} = 0.62 \epsilon_p \quad \text{for POSMA45} \quad (3)$$

$$\epsilon^* = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad \text{for SCM 440} \quad (4 a)$$

$$\epsilon^* = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad \text{for POSMA 45} \quad (4 b)$$

$$\epsilon_{ss} = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad \text{for SCM 440} \quad (5 a)$$

$$\epsilon_{ss} = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad \text{for POSMA 45} \quad (5 b)$$

여기에서 Z는 변형온도로 보정한 변형속도인 Zener-Hollomon parameter이고 A는 hyperbolic sine law로 최대 응력과 변형속도 및 변형온도의 상관관계를 정량화한 구성방정식의 계수로서 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(318\text{kJ/mol}/RT) = A[\sinh(0.0109 \sigma_p)]^{4.86} \quad (6)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(295\text{kJ/mol}/RT) = A[\sinh(0.0107 \sigma_p)]^{4.73} \quad (7)$$

동적 재결정 분율 예측식

일정한 변형온도와 변형속도 하에서 동적 재결정 분율의 변화는 변형량에 의존하였다. 동적 재결정은 임계 변형량에서 핵생성되어 점차 성장하다가 정상상태에서 성장을 멈추게 되며 더 이상 결정립의 크기 변화는 없게 된다. 따라서 동적 재결정 분율은 임계 변형량에서 0%이며 정상상태에서 100%에 도달한다. 이와 같은 경계조건을 다음과 같은 식에 대입하여 동적 재결정 분율 예측식을 완성할 수 있었다.

$$X_{DRX} = 1 - \exp[-((\epsilon - \epsilon_c) / \epsilon^*)^m] \quad (8)$$

식 (8)은 식(1)에서 시간의 항이 일정한 변형속도에서의 변형이므로 변형량의 항으로 대체하였고 임계 변형량에서 동적 재결정 분율, X_{DRX} 는 0 이므로 $(\epsilon - \epsilon_c)$ 로 표현하였다. 또한 계수 β 는 상수값이 아닌 변형조건에 따라 변화하는 값으로 표현하기 위해 동적 연화속도가 최대일 때의 변형량인 ϵ^* 를 적용하였다. 이는 이미 언급한 것처럼 ϵ^* 는 변형조건에 따른 동적 재결정에 의한 연화정도를 파악할 수 있는 기준이 될 수 있으므로 동적 재결정 분율을 예측하는 식에 적용함이 타당하다고 하겠다. Avrami 상수인 m' 은 경계조건을 식에 대입하여 구할 수 있었으며 다음과 같이 무차원 상수인 Z/A 로 정량화할 수 있었다.

$$m' = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad \text{for SCM 440} \quad (9 a)$$

$$m' = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad \text{for POSMA 45} \quad (9 b)$$

Fig. 4에 완성된 동적 재결정 분율 예측식을 이용하여 구한 동적 재결정의 변태 - 변형량 - 온도 곡선 (transformation-effective strain-temperature curve for DRX)을 도시하였다. 동적 재결정 분율이 각각 0%, 50%, 100%일 때의 변형량을 변형온도에 대해 도시한 것으로 전체적으로는 'C' 형태의 곡선으로 나타났다. 동적 재결정 분율이 100%에 도달하는데 필요한 변형량은 변형온도가 감소할수록 점점 증가하였다. 동적 재결정이 완료되는 필요한 변형량은 변형속도가 증가할수록 증가하였으며 이는 Fig. 5에 나타낸 SCM 440의 변태 - 변형량 - 온도 곡선으로부터 확인할 수 있었다.

4. 결 론

대표적인 중탄소강인 SCM 440과 POSMA 45의 고온 유동 응력곡선의 변화로부터 가공변수인 온도 (T), 변형

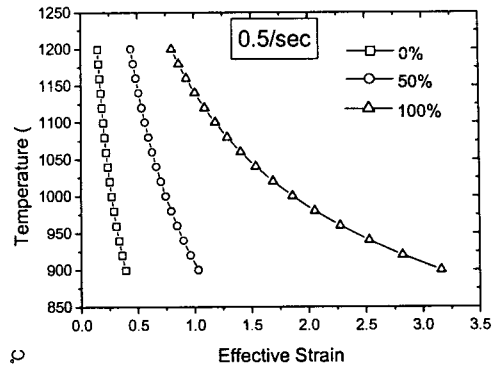


Fig. 4 Transformation - effective strain - temperature curves of POSMA 45 obtained under 0.5/sec

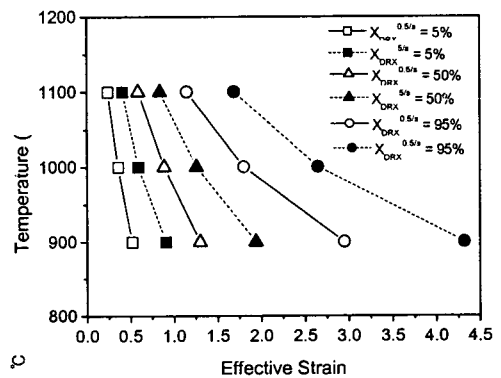


Fig. 5. Transformation - effective strain - temperature curves of SCM 440 obtained under various strain rate

속도($\dot{\epsilon}$), 및 변형량(ϵ)에 따른 동적 재결정 분율의 변화를 정확하게 예측할 수 있는 정량식을 구할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "Modelling of the Dynamic Recrystallization of Austenite in Low Alloy and Microalloyed Steels", *Acta Mater.*, Vol. 44, No. 1, pp. 165~171.
- (2) 한형기, 김성일, 유연철, 2000 "304스테인리스강의 고온유동응력곡선과 미세조직의 예측", *한국소성가공학회지*, Vol. 9, No. 1, pp. 72~79.