

## SCM 440 강재의 동적 재결정 조직 변화에 관한 연구

한형기\* · 유연철\*

(2000년 9월 7일 접수)

### The Evolution of Dynamically Recrystallized Microstructure for SCM 440

H. K. Han and Y. C. Yoo

#### Abstract

The high temperature deformation behavior of SCM 440 can 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. The aim of this paper is to establish the quantitative equation of the volume fraction of dynamic recrystallization (DRX) as a function of processing variables, such as strain rate ( $\dot{\epsilon}$ ), temperature (T), and strain ( $\epsilon$ ). During hot deformation, the evolution of microstructure could be analyzed from work hardening rate ( $\theta$ ). For the exact prediction of dynamic softening mechanism, the critical strain ( $\epsilon_c$ ), the strain for maximum softening rate ( $\epsilon^*$ ) 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 steel at any deformation conditions.

**Key Words** : Hot Deformation, Dynamic Recrystallization, Critical Strain, Strain for Maximum Softening Rate, Transformation-Effective Strain-Temperature Curve.

#### 1. 서론

구조용 재료로 이용되고 있는 SCM 440 강재는 Cr과 Mo이 첨가된 중탄소강으로서 열간 압연이나 열간 단조 등의 소성 가공공정으로 최종제품이 제조된다. 고온에서도 높은 변형저항을 보이는 SCM 440 강재는 열간 변형 중 발생하는 불균일 변형에 의해 고온변형 직후에 냉각

중에 균열이 발생하기도 한다. 특히, 제품의 형상이 복잡한 경우에는 심한 국부 변형에 의해 쉽게 미세 균열 (micro crack)이 발생할 수 있으며 금형과 기계의 수명이 단축되기도 한다. 따라서 결함이 없는 제품을 제조하기 위해서는 공정변수인 온도(T), 변형량( $\epsilon$ ), 그리고 변형속도( $\dot{\epsilon}$ )에 따라 변화하는 재료의 고온 변형특성을 이해하고 적절한 공정변수의 조합에 의한 제어변형(con-

\* 인하대학교 재료공학부

trolled deformation)이 필요하다. 특히, 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)을 이용한 제어변형은 큰 변형량을 가하거나 복잡한 형상의 제품을 제조하고자 할 때 결함이나 불량을 최소화하고 결정립 미세화의 효과를 얻을 수 있는 방법으로 알려져 있다<sup>(1~5)</sup>. 따라서 동적 재결정의 발생과 미세 조직의 변화를 정확하게 파악하고 이를 정량적으로 표현하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 고온 비틀림 시험으로 얻은 유동 응력 곡선 및 미세 조직을 분석하여 동적 재결정의 발생에 필요한 임계 변형량(critical strain for DRX,  $\epsilon_c$ ), 동적 재결정 진행속도가 최대가 되는 변형량 (strain for maximum softening rate,  $\epsilon^*$ ), 동적 재결정 분율 (volume fraction of DRX), 및 동적 재결정립 크기 ( $D_{DRX}$ )를 정량적으로 표현하고자 하였다. 또한 정량화된 동적 재결정 분율을 이용하여 변태 - 변형량 - 온도 곡선(transformation - effective strain - temperature curve)를 작성하였으며 이를 이용하여 SCM 440 강재의 동적 연화 현상을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

Table 1의 조성을 갖는 SCM 440 강재를 10mm $\phi$  x20mm l의 고체형 비틀림 시편으로 제작하여 고온 비틀림 시험을 실시하였다.

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.

변형 전 결정립 크기는 약 140 $\mu$ m로 일정하였다. 연속 변형시험은 고온 비틀림 시험기를 이용하였으며 변형온도까지 1 $^{\circ}$ Cs<sup>-1</sup>의 승온 속도로 1100 $^{\circ}$ C까지 가열하여 10분간 유지한 후 변형온도 범위 900~1100 $^{\circ}$ C 그리고 0.05~5s<sup>-1</sup>의 변형속도 범위에서 하였다. 유동 응력곡선은 비틀림 시험으로 얻은 비틀림 모멘트 (M)와 비틀림 각을 다음에 나타낸 Fields-Backofen식과 Von Mises 항복조건을 이용하여 진응력 ( $\sigma$ )과 진변형률 ( $\epsilon$ )로 변환하여 구하였다<sup>(6~9)</sup>.

$$\tau = M(3+p+q)/2\pi r^3 \quad (1)$$

$$\gamma = 2\pi rN/L \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{3}\tau, \quad \epsilon = \gamma/\sqrt{3} \quad (3)$$

여기에서  $\tau$ 와  $\gamma$ 는 각각 전단응력과 전단변형률이며 M은 토오크(torque), p는 가공경화율(work hardening rate), q는 변형속도민감도 (strain rate sensitivity)이고 r과 L은 각각 시편의 반경과 길이, N은 회전수이다. 최대 응력 ( $\sigma_p$ )과 정상상태 응력 ( $\sigma_{ss}$ ), 최대 변형률 ( $\epsilon_p$ ) 및 정상상태 변형률 ( $\epsilon_{ss}$ )은 유동 응력곡선 상에 나타난 값을 이용하였다. 미세 조직의 관찰은 미세 연마 후 50 mlH<sub>2</sub>O-2gFeCl<sub>3</sub> 혼합액으로 부식하여 광학 현미경과 영상 분석기를 이용하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 동적 재결정의 발생

고온 유동응력은 가공변수인 변형온도· 변형속도· 변형량에 따라 변화하는데 SCM 440강재의 유동 응력은 Fig. 1에 보인 것처럼 1000 $^{\circ}$ C, 0.5/sec의 변형조건에서 최대응력이 약 108 MPa를 나타내었으며 이는 대표적인 오스테나이트 스테인리스강인 STS 304에 비해 약 20 MPa 정도 작은 값이었다<sup>(6,7)</sup>. 유동 응력은 변형온도가 감소할수록, 변형속도가 증가할수록 변형 중에 전위밀도가 증가하여 가공 경화량이 증가함으로 커졌는데 이처럼 유동 응력은 가공 경화량에 의존함으로 변형량에 따라 크게 달라지는 경향을 보였다. Fig. 1에 보인 유동응력 곡선에서 변형 초기단계에 가공경화(strain hardening)에 의해 증가한 유동응력은 최대 응력(peak stress,  $\sigma_p$ )값을 나타낸 후 감소하여 정상 상태 응력(steady state stress,  $\sigma_{ss}$ )에 도달하게 된다. 이와 같은 응력의 변화와 Fig. 2에 보인 미세 조직의 변화로부터 동적 재결정의 발생 및 성장을 확인할 수 있었다. 변형량이 증가할수록 변형전의 140 $\mu$ m의 조대한 결정립은 약 50 $\mu$ m의 등축정의

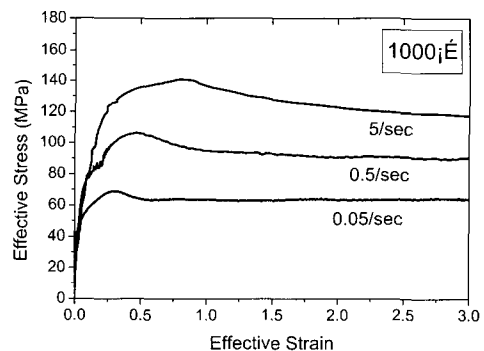


Fig. 1 Representative flow stress curves of SCM 440 obtained under various strain rate at 1000 $^{\circ}$ C

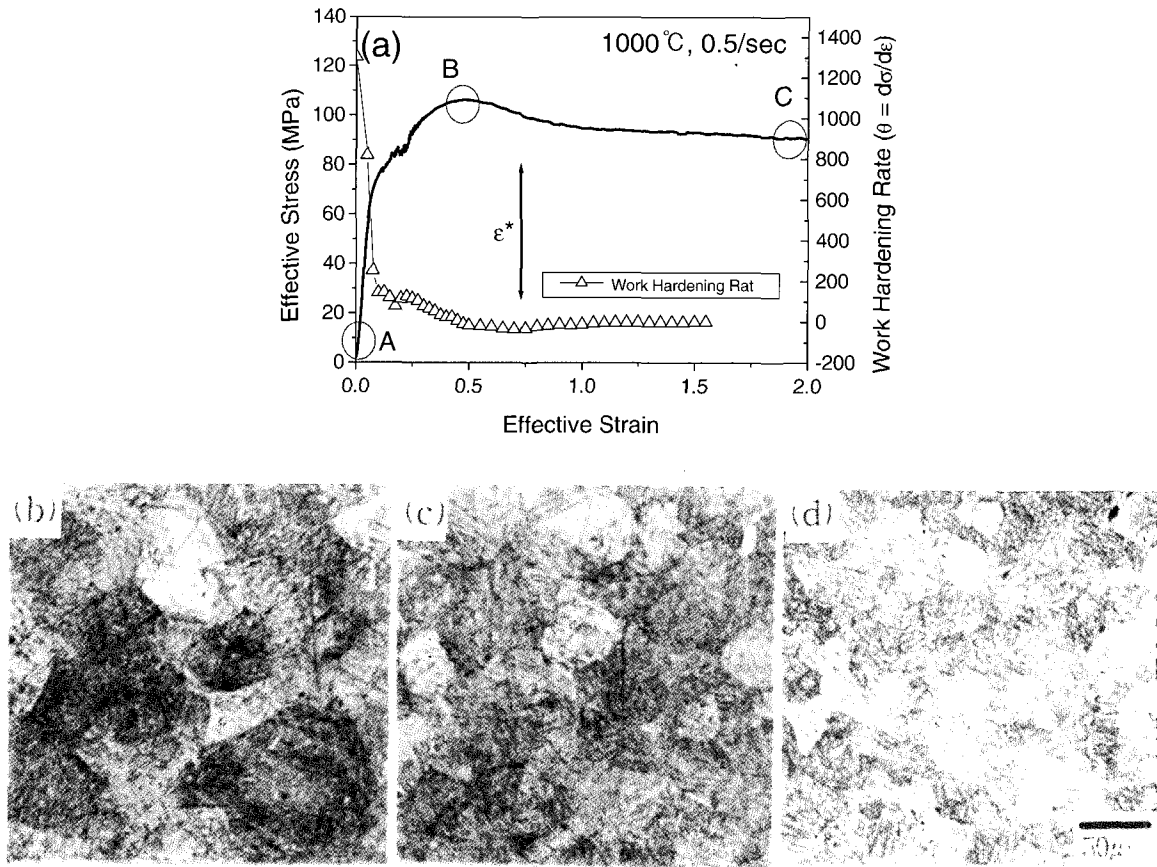


Fig. 2 (a) Flow stress curve and work hardening rate - effective strain curve and (b) - (d) microstructures obtained under 1000 °C and 0.5/sec. The microstructures indicated by (b), (c), and (d) were obtained from A, B, and C positions in (a), respectively

결정립으로 미세화 되었으며 유동응력은 최대응력에 도달한 후 정상상태로 다시 감소하는 형태를 나타내었다. 이는 임계 변형량 이후에 결정립계에서 주로 핵생성되어 성장하는 동적 재결정립에 의해 결정립이 미세화 되었기 때문이며 결정립의 발생에 의해 전위밀도가 급격하게 감소하였기 때문이다<sup>(6-12)</sup>. 이처럼 SCM440 강재는 고온 변형 중 가공경화, 동적 회복 및 동적 재결정에 의존하여 변화하며 고온 변형 중 유동 응력곡선의 변화와 미세 조직의 변화는 상호 의존한다고 하겠다.

동적 재결정의 발생에 필요한 변형량은 Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 가공 경화속도(strain hardening rate,  $\theta$ ) - 유동 응력(effective stress) 곡선으로부터 쉽게 결정할 수 있었다. 임계 변형량은 고온 변형으로 형성된 이결정립(subgrain)들간의 전위밀도 차이가 임계 수준에 도달해서 동적 재결정립의 핵생성이 발생할 때 생기는 변곡

점으로부터 결정할 수 있다<sup>(6,11)</sup>.

SCM 440의 임계 변형량은 최대 변형량(peak strain,  $\epsilon_p$ )의 약 75%정도로 나타났다. 최대 변형량과 임계 변형량은 변형속도와 변형온도에 의존하므로 변형속도를 변형온도로 보정한 Zener-Hollomon parameter를 이용하여 정량식으로 나타낼 수 있었다<sup>(12-14)</sup>.

$$\epsilon_c = 0.25 (Z/A)^{0.158} \quad (4)$$

여기에서 Z는 Zener-Hollomon parameter로  $Z = \dot{\epsilon} \exp(318\text{kJ/mol}/RT)$ 로 표현된다. A는 공정변수들간의 구성방정식인 hyperbolic sine law ( $\dot{\epsilon} = A[\sinh(0.0109 \sigma_p)]^{4.86}$ )에서의 실험값으로 Z/A는 무차원 상수이다. 임계 변형량은 동적 재결정을 발생시키는데 필요한 최소 변형

량이므로 임의의 변형 조건에서의 고온 변형시 동적 재결정의 발생유무를 판단할 수 있으며 동적 재결정을 이용한 제어변형공정 설정에 있어서 기준이 될 수 있다. 임계 변형량 이외에 유동 응력곡선의 기울기는 최대 변형량과 정상상태 변형량의 중간 정도의 지점에서 다시 크게 변화하는데 이 때의 변형량 역시 가공경화속도의 변화를 이용하여 결정할 수 있었다. 가공경화속도는 음의 값을 갖게 되면 가공경화의 의미보다는 가공경화에 대해 상대적으로 발생한 연화의 정도를 나타내게 되므로 Fig. 3(b)에 보인 가공경화속도-변형량 곡선에서 최소값을 나타낸 변형량값은 연화속도가 최대일 때의 변형량을 의미한다고 하겠다. 연화속도가 최대일 때의 변형량은 Fig. 3(b)에 나타낸 것처럼 변형온도가 감소할수록 증가하였으며 또한 변형속도에 따라서도 변화하였다. 따라서 무차원 상수인 Z/A로 다음과 같이 표현할 수 있었다<sup>13,14)</sup>.

$$\epsilon^* = 0.528 (Z/A)^{0.168} \quad (5)$$

이처럼 임계 변형량과 연화속도가 최대일 때의 변형량은 주어진 변형조건에 대한 상대적인 동적 연화과정의 난이도와 속도를 파악할 수 있는 유용한 자료라 할 수 있다. 예를 들어, 동적 재결정이 1100°C, 0.05s<sup>-1</sup>의 고온과 저변형속도의 조건에서 0.35 정도의 작은 변형량으로도 쉽게 발생할 수 있으며 0.6의 변형량에서 최대 연화속도를 보이지만 900°C, 5s<sup>-1</sup>의 저온 고변형속도의 조건에서는 동적 재결정을 발생시키기 위해서는 0.8 이상의 변형량이

필요하며 최대 연화속도를 위한 변형량도 1.2로 동적 재결정이 매우 느리게 진행된다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 동적 재결정 분율

고온연화기구가 동적 재결정인 SCM 440 강재에서 변형속도 및 변형온도에 따라서도 연화가 시작되는 시간(임계 변형량)이나 완료되는 시간(정상 상태 변형량)이 달라지게 된다. 이때 X % 만큼의 동적 재결정이 발생하는데 요하는 시간은 일정 변형속도에서 변형량을 의미하며 다음과 같은 Avrami 식으로 표현될 수 있다<sup>15,16)</sup>.

$$X = 1 - \exp(-\beta t^k) \quad (6)$$

식 (6)에서  $\beta$ 와  $k$ 는 재료의 연화특성에 의해 결정되는 상수이고  $t$ 는 시간으로 일정한 변형속도 조건에서 동적으로 변형이 이루어질 때 변형량을 의미한다. 일반적으로 동적 재결정의 시작은  $X=0.01$ 일 때이고 이때의 변형량은 Fig. 2와 3에 보인 것처럼 임계 변형량에 해당하며 유동 응력이 최대값에 도달하기 전 변곡점을 나타낼 때의 응력값이다. 또한 동적 재결정이 완료되는 시점은  $X=0.99$ 에 해당하며 유동 응력이 정상 상태에 도달했을 때이다. 이처럼 동적 재결정의 형성 및 발달은 유동 응력의 변화와 연관이 있는데 유동 응력곡선에서 응력의 감소가 최대로 이루어지는 지점에서 동적 재결정의 진행속도가 최대가 되며 정상 상태에 도달하는 지점에서 동적 재결정 분율은 90%이상의 값으로 100%에 도달할 때까지 매우 완만하게 증가한다. 따라서 동적 재결정에 의

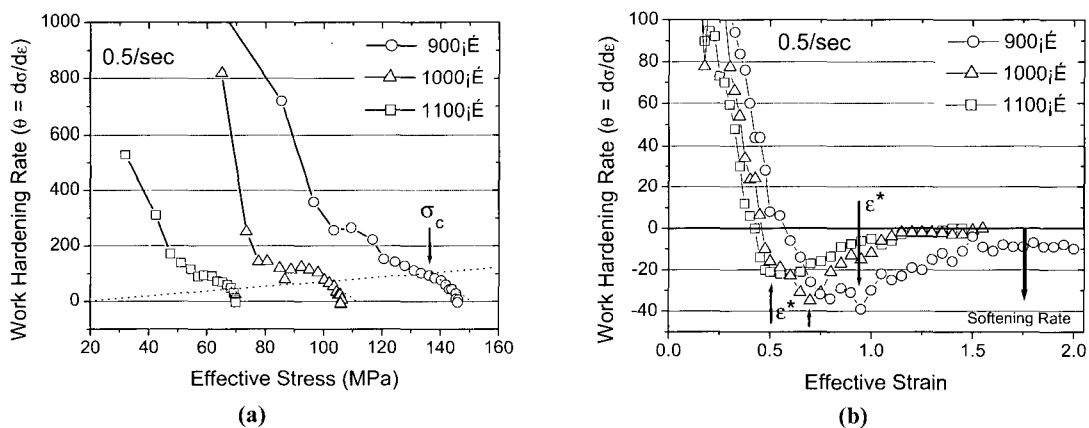


Fig. 3 (a) Work hardening rate - effective stress curves to determine the critical strain and (b) work hardening rate - effective strain curves to determine the strain for maximum softening rate

한 미세 조직의 변화, 동적 재결정 분율 ( $X_{DRX}$ )은 유동 응력의 변화 과정과 식 (6)에 의해 다음의 Avrami's equation<sup>15,16)</sup>의 형태로 예측할 수 있었다.

$$X_{DRX} = 1 - \exp[ - \{ (\epsilon - \epsilon_c) / \epsilon^* \}^{m'} ] \quad (7)$$

이 식에서  $\epsilon_c$ 와  $\epsilon^*$ 는 각각 임계 변형량 (critical strain)과 연화속도가 최대일 때의 변형량이다. 연화속도가 최대일 때의 변형량,  $\epsilon^*$ 을 도입한 것은 주어진 변형 조건에 대해 동적 재결정 진행과정에 대한 기준이 될 수 있으며  $\epsilon^*$ 만으로도 변형조건에 따른 연화 정도를 쉽게 파악할 수 있기 때문이었다. 식 (7)에는 식 (6)의  $\beta$ 에 해당하는 상수값을 고려하지 않았는데 이는 불필요한 상수값의 도입보다는  $\epsilon^*$ 와 같은 의미 있는 값으로 연화 속도를 나타내는 기능을 충분히 대신할 수 있었기 때문이었다. Avrami 지수인  $m'$ 은 Zener-Hollomon parameter를 이용하여 다음과 같은 무차원 상수,  $Z/A$ 의 함수로 표현할 수 있었다<sup>(12~16)</sup>.

$$m' = 1.578 (Z/A)^{-0.02} \quad (8)$$

Avrami 지수,  $m'$ 은 일반적으로 각각의 변형조건에 대해 구한 값들에 대한 평균값을 사용하고 있지만 본 연구에서는 예측의 정확도를 향상시키기 위해 변형속도와 변형온도의 함수로 고려하였으며 온도가 증가할수록 변형속도가 감소할수록 감소하였다. 이는 일정한 변형량에

대해 온도가 증가할수록 변형속도가 감소할수록 동적 재결정 분율이 증가함을 의미한다. 그러나 결정립의 크기는 변형 중에 발생하는 전위밀도와 연관이 있으므로 일정한 변형량에 대해 주어진 변형조건에서 동적 재결정 분율의 증가가 동적 재결정립의 감소를 의미하는 것은 아니다. 임계 변형량, 연화속도가 최대일 때의 변형량, Avrami 지수는 Fig. 4에 보인 것처럼 실험값에 대한 선형 fitting으로 결정할 수 있었으며 이 때 R값 (correlation coefficient)은 각각 -0.99858, 0.91997, 0.8577이었다.

식 (7)을 이용하여 계산한 변형량에 따른 동적 재결정 분율의 변화를 Fig. 5에 여러 가지 변형조건에 대해 나타내었다. 동적 재결정 분율은 최대 변형량 이후에 급격하게 증가하였으며 약 80% 이후에는 매우 완만하게 증가하다가 정상 상태 변형량에서 거의 일정한 값을 보였다. 동적 재결정이 완료되는 정상 상태 변형량 이후의 결정립 크기 ( $D_{DRX}$ )는 변형량이 증가해도 더 이상 변화하지 않았으며 변형 조건인 변형온도와 변형속도에 따라 달라졌는데 이를 다음 식으로 나타낼 수 있었다.

$$D_{DRX} = 67.8 (Z/A)^{-0.017} \quad (9)$$

이처럼 동적 재결정립의 크기를 변형조건에 대해 단순히 표현하는 것은 기존의 많은 연구자들도 제시한 방법으로 열간 압연과 단조 등의 실제 가공 공정에서의 미세 조직변화를 변형조건만으로도 평가할 수 있어서 매우

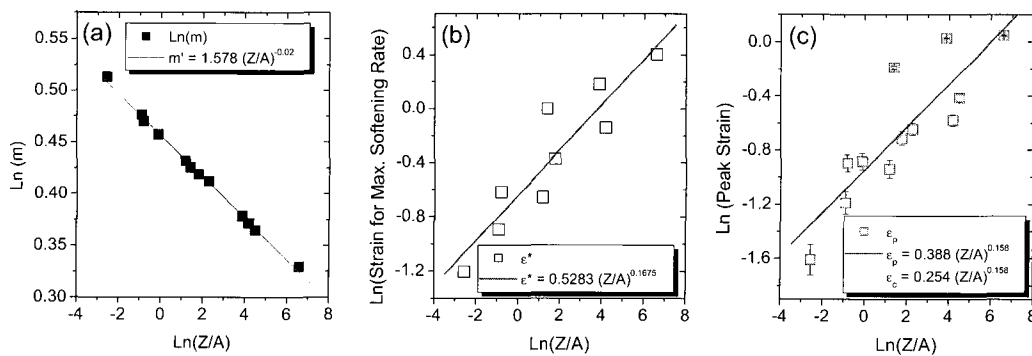


Fig. 4 Relationships between the dimensionless parameter,  $Z/A$ , and (a)  $\epsilon_p$ , (b)  $\epsilon^*$  and (c)  $m$ . These parameters are linearly fitted by the method of least squares and their correlation parameters ( $R$ ) are -0.99858, 0.91997 and 0.8577, respectively

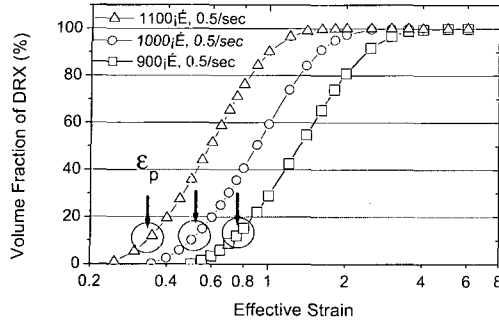


Fig. 5 Calculated volume fractions of DRX obtained at various deformation conditions<sup>1</sup>

유용하다고 하겠다<sup>6,7,16</sup>. 동적 재결정립의 크기는 Zener-Hollomon parameter가 증가할수록 감소하였는데 이는 주어진 변형조건이 높은 가공 경화량 즉, 높은 전위밀도가 얻어질 수 있는 조건일수록 동적 재결정립의 크기가 감소하는 것으로 전위밀도가 높을수록 동적 재결정의 핵 생성 자리가 증가하며 변형 중에 형성된 아결정립의 밀도도 증가하기 때문으로 판단된다. 그러나 상대적으로 동적 재결정이 완료되는데 필요한 변형량도 증가하였는데 이는 동적 재결정 변태곡선으로부터 쉽게 알 수 있었다. Fig. 6에 900 - 1100°C의 변형조건에서 0.5 s<sup>-1</sup>와 5 s<sup>-1</sup>에 대해 계산한 변태 - 온도 - 변형량 곡선 (transformation-temperature-effective strain curve)을 도시하였다. 곡선은 동적 재결정 분율이 각각 5%, 50%, 95%일 때에 대한 것으로 식 (7)로부터 계산하여 작성한 것이다. 따라서 다른 변형온도 및 변형속도 조건에서의 값도 계산이 가능하였다. 변태곡선은 전체적으로 'C' 형태의 곡선을 나타내었으며 변형온도가 감소할수록 동적 재결정이 완료되는데 필요한 변형량이 증가하였다. 또한 변형속도가 증가할수록 동적 재결정의 발생에 필요한 변형량과 완료에 필요한 변형량 모두 증가하였다.

#### 4. 결론

SCM 440 강재를 연속 변형시험을 하여 고온 변형거동을 동적 재결정 중심으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SCM 440의 고온 연화 기구는 고온 유동 곡선의 형태와 미세 조직의 관찰 결과 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)이었으며 동적 재결정에 필요한 임계 변형량은  $\epsilon_c = 0.25 (Z/A)^{0.153}$ 로 정량화 할 수 있

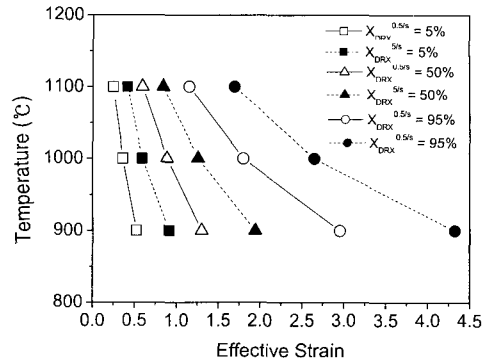


Fig. 6 Calculated transformation - temperature - effective strain curves at the condition of 1000°C and 0.5/sec

었다.

(2) 동적 재결정 진행속도가 최대가 되는 변형량을 가공경화속도-유효변형량(work hardening rate - effective strain) 곡선으로부터 구할 수 있었으며 다음과 같이 정량적으로 표현할 수 있었다.

$$\epsilon^* = 0.528 (Z/A)^{0.168} \quad (10)$$

(3) 동적 재결정 분율을 Avrami 식에 기초하여 정량적으로 표현할 수 있었으며 Avrami 지수, m'도 Z/A의 함수로 나타낼 수 있었다. 또한 계산된 동적 재결정 분율로 변태 - 온도 - 변형량 곡선(transformation - temperature - effective strain curve)을 작성하였다.

$$X_{DRX} = 1 - \exp[-\{(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon^*\}^{m'}] \quad (11)$$

$$m' = 1.578 (Z/A)^{-0.02}$$

#### 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) 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.
- (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) 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.
- (5) C. M. Sellars, 1990, "Modelling Microstructural Development during Hot Rolling", Mater. Sci. Technol., Vol. 6, pp. 1072~1081.
- (6) 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.
- (7) S. I. Kim, S. H. Cho, Y. C. Yoo, In: Proc. Int. Conf. The 3rd European Congress of Stainless Steel 99 Science and Market, Chia Laguna Sardinia, Italy, 1999, p. 423.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) T. Sakai and M. Ohashi, 1990, "Dislocation Substructures Developed during Dynamic Recrystallization in Polycrystalline Nickel", Mater. Sci. and Technol., Vol. 6, pp. 1251~1257.
- (11) 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.
- (12) 조상현, 김유승, 유연철, 임성환, 오수익, 1998, "Al6061 합금의 고온변형시 변형저항 예측", 대한 금속학회지, Vol. 36, No. 4, pp. 502~508.
- (13) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "General Expression of the Zener-Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels", Acta Mater., Vol. 44, No. 1, pp. 137~148.
- (14) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "The Influence of Chemical Composition on the Peak Strain of Deformed Austenite in Low Alloy and Microalloyed Steels", Acta Mater., Vol. 44, No. 1, pp. 149~154.
- (15) M. Avrami, J. Chem. Phys., 1939, Vol. 7, p. 1103.
- (16) 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.