

# AISI 316 스테인리스강의 고온 변형특성에 관한 연구

김성일\* · 유연철\*

## Hot Deformation Behavior of AISI 316 Stainless Steel

S. I. Kim and Y. C. Yoo

### Abstract

The dynamic softening mechanisms of AISI 316, AISI 304 and AISI 430 stainless steels were studied with torsion test in the temperature range of 900 - 1200°C and the strain rate range of  $5.0 \times 10^{-2}$  -  $5.0 \times 10^0$ /sec. The austenitic stainless steels, such as AISI 316 and AISI 304 were softened by dynamic recrystallization (DRX) during hot deformation. Also, the evolutions of flow stress and microstructure of AISI 430 ferritic stainless steel show the characteristics of continuous dynamic recrystallization (CDRX).

To establish the quantitative equations for DRX of AISI 316 stainless steel, the evolution of flow stress curve with strain was analyzed. The critical strain ( $\epsilon_c$ ) and strain for maximum softening rate ( $\epsilon^*$ ) 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 ( $\epsilon$ ) were established using the  $\epsilon_c$  and  $\epsilon^*$ . For the exact prediction, the  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon^*$  and Avrami' exponent ( $m'$ ) were quantitatively expressed by dimensionless parameter,  $Z/A$ , respectively. It was found that the calculated results were agreed with the experimental data for the steels at any deformation conditions. Also, we can reasonably conclude that the DRX, CDRX and grain refinement of stainless steels can be achieved by large strain deformation at high Z parameter condition.

**Key Words** : Austenitic Stainless Steel, Ferritic Stainless Steel, Dynamic Recrystallization (DRX), Continuous Dynamic Recrystallization (CDRX), Grain Refinement

### 1. 서론

최근 스테인리스강은 그 제조 기술 및 합금 원소에 대한 체계적인 연구가 많이 진행되어 기계적 성질의 향상 및 제조 공정의 단축으로 수요가 더욱 증대되고 있는 추세이다<sup>1,2)</sup>. 하지만 결정립 미세화를 목적으로 한 고온 가공기술의 향상은 부족한 실정인바 내부식성과 고인성

을 동시에 필요로 하는 구조용 재료에 대한 응용이 적다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 스테인리스강의 고온 소성가공 공정에서 발생하는 동적 연화기구를 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강인 AISI 316강에 대해 규명하였으며 이를 AISI 304 스테인리스강 및 페라이트계 스테인리스강인 AISI 430 강과 비교하여 고온 소성가공성의 차이를 체계적으로 설명하고자 하였다.

\* 인하대학교 재료공학부

## 2. 실험 방법

표 1에 나타낸 화학조성을 갖는 AISI 316 압연 판재를 비틀림 시험편으로 제작하여 고온 변형시험하였다. 시험편은 직경 10mm×표점거리 20mm로 절삭가공한 고체형 비틀림 시험편을 사용하였으며 연속 변형시험은 변형 속도  $5.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^0/\text{sec}$ , 변형온도 1000~1200°C의 범위에서 하였다. 변형 전 초기 결정립 크기는 약 80 $\mu\text{m}$  이었다. 변형 후 비틀림 모멘트와 비틀림각은 Fields와 Backofen이 제시한 식과 Von Mises 항복조건을 이용하여 유효응력( $\sigma$ )과 유효변형량( $\epsilon$ )으로 변환하였다. 미세 조직은 시험편을 미세 연마하여 에칭한 후 광학현미경을 이용하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 고온 연화기구

AISI 316 스테인리스강의 주된 고온 동적 연화기구는 잘 알려진 것처럼 동적 재결정이었으며 이는 Fig. 1에 나타낸 고온 유동응력 곡선으로 알 수 있었다. Fig. 1에 함께 도시한 AISI 304 오스테나이트계 스테인리스강과 AISI 430 페라이트계 스테인리스강의 유동 응력곡선들을 비교해 볼 때 AISI 316 스테인리스강의 유동 응력이 가장 높게 나타났는데 이는 합금 원소의 영향 때문인 것으로 판단되었다. 표 1에 나타낸 것처럼 AISI 316강에는 Mo이 약 2.0wt.% 정도 함유되어 있으며 이 때문에 고온강도 및 부식 저항성이 증가되는 것으로 알려져 있다. AISI 316과 AISI 304강은 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강으로 상온에서 적층결합에너지가 약 20mJ/m<sup>2</sup> 정도를 나타내며 AISI 430강은 페라이트계 스테인리스강으로 적층결합에너지가 약 100mJ/m<sup>2</sup> 이상으로 오스테나이트계 스테인리스강의 약 5배 정도 큰 값을 나타낸다. 이 값들은 고온에서도 비슷한 정도의 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 고온 소성변형 중에 오스테나이트계 스테인리스강은 높은 변형저항을 나타내었으며 페라이트계 스테인리스강은 변형저항이 낮지만 높은 연성을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions and contents for applied stainless steels

Material	C	Cr	Ni	P	Mn	S	Si	Mo
AISI 316	0.08	16.0	12.0	0.045	2.0	0.03	1.0	2.0
AISI 304	0.08	18.0	8.0	0.045	2.0	0.03	1.0	
AISI 430	0.01	16.0		0.04	1.0	0.03	1.0	

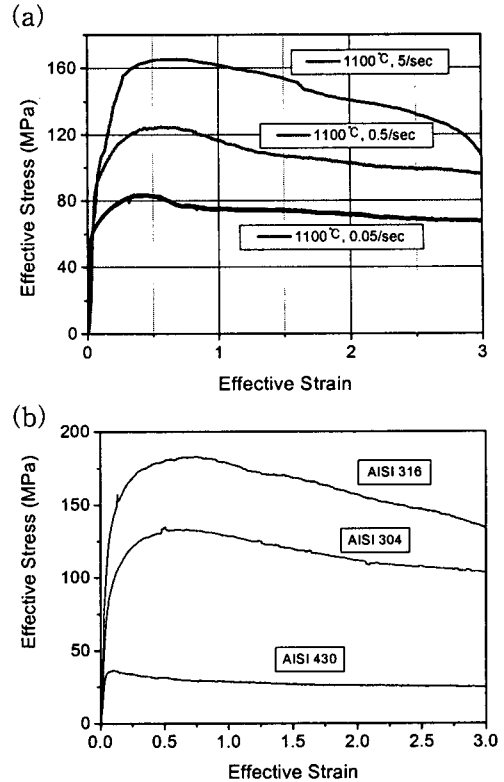


Fig. 1 Effective stress - effective strain curves of stainless steels obtained from hot deformation tests

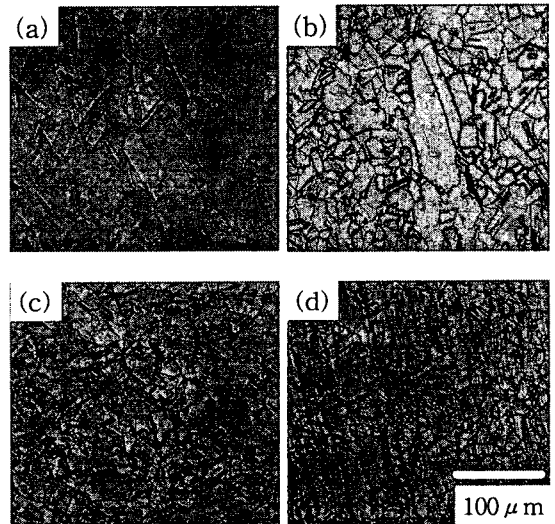


Fig. 2 Microstructures of AISI 316 stainless steel obtained under 1000°C and 0.5/sec. The microstructures indicated by (a), (b), (c), and (d) were 30% strain, 60% strain 90% strain and 120% strain deformed microstructure, respectively

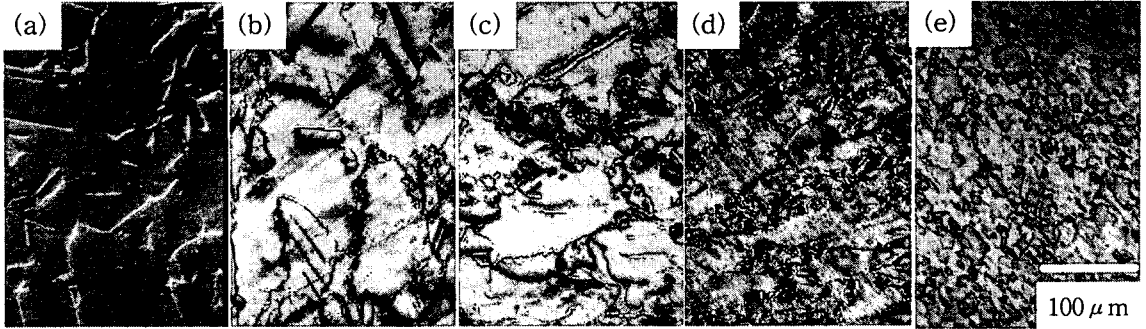


Fig. 3 Microstructures of AISI 304 stainless steel obtained under 1000 °C and 0.5/sec. The microstructures indicated by (a), (b), (c), (d), and (e) were before deformed, 50% strain, 70% strain 100% strain and 300% strain deformed microstructure, respectively

이와 같은 변형특성의 차이는 Fig. 2 - Fig. 4에 나타난 변형량에 따른 미세조직의 변화에서 알 수 있듯이 고온 연화기구의 차이에 기인하는 것임을 확인할 수 있었다. Fig. 2에 AISI 316의 변형량 증가에 따른 미세조직의 변화를 나타내었다. 변형량이 증가함에 따라 동적 재결정이 발생하여 재결정 분율이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 이와 같은 동적 재결정의 발달은 Fig. 3에 나타난 AISI 304의 미세조직 변화에서도 관찰할 수 있었다. 이와 같은 동적 재결정 분율의 발달과정은 다음과 같은 식으로 정량적으로 표현할 수 있었다<sup>1)</sup>.

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

$$\epsilon_c = 0.24(Z/A)^{0.057}$$

$$\epsilon^* = 0.73(Z/A)^{0.124}$$

$$m' = 1.44(Z/A)^{-0.049}$$

$$\sigma_{(WH+DRV)} = \sigma_p [1 - \exp(-C\epsilon)]^m \quad (2)$$

$$\sigma_{(DRX)} = (\sigma_p - \sigma_{ss})[(X_{DRX} - X_{ep})/(1 - X_{ep})], \quad \epsilon > \epsilon_p \quad (3)$$

$$\sigma_{(DRX)} = 0, \quad \epsilon < \epsilon_p \quad (4)$$

$$\sigma_{(Total)} = \sigma_{(WH+DRV)} - \sigma_{(DRX)} \quad (5)$$

식(1)에서  $X_{DRX}$ 는 동적 재결정 분율이며  $\epsilon_c$ 와  $\epsilon^*$ 는 각각 임계 변형량과 최대 연화변형량이다.  $m'$ 은 Avrami's exponent이다. 또한 식(2)-(4)에서  $\sigma_p$ 와  $\sigma_{ss}$ 는 각각 최대 응력과 정상 상태 응력이며  $\epsilon_p$ 는 최대 변형량,  $C$ 와  $m$ 은 변형조건에 따라 변화하는 상수로서  $m$ 은 가공경화지수이다. 변형조건에 따라 변화하는 최대 응력, 정상 상태 응력, 최대 변형량 및  $C$ 와  $m$ 을 Zener-Hollomon parameter ( $\dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A \sinh(\alpha \sigma_p)^n$ )<sup>1)</sup>를 이용하여 무차원 상수,  $(Z/A)$ 로 표현할 수 있

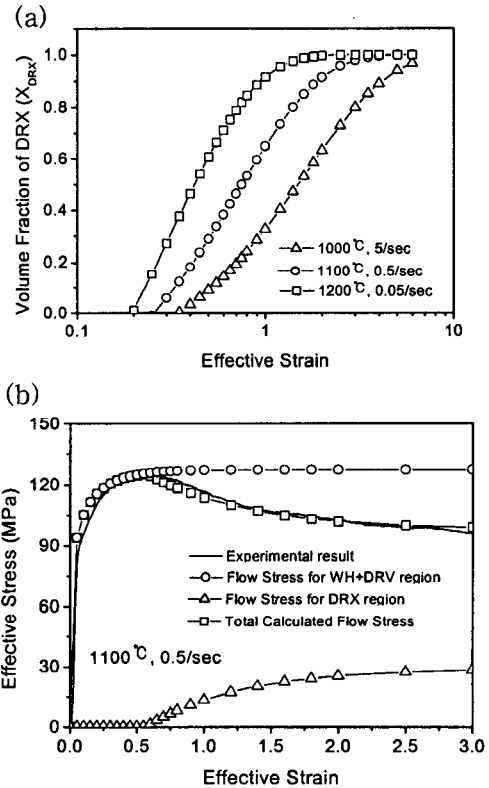


Fig. 4 Calculated DRX volume fractions and predicted flow stress curve of AISI 316 stainless steel

었다<sup>1)</sup>. 고온 변형 중 오스테나이트계 스테인리스강의 동적 재결정 분율 및 유동응력의 변화를 공정 변수의 변화에 대해 매우 정확한 예측이 가능할 수 있었다. 이용하여 비교적 정확하게 표현할 수 있었으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이와 같은 변형 중 유동응력의 예측은 실제 압연공정에서의 압하력과 변형저항을 제어하는데 필수적이라고 하겠다.

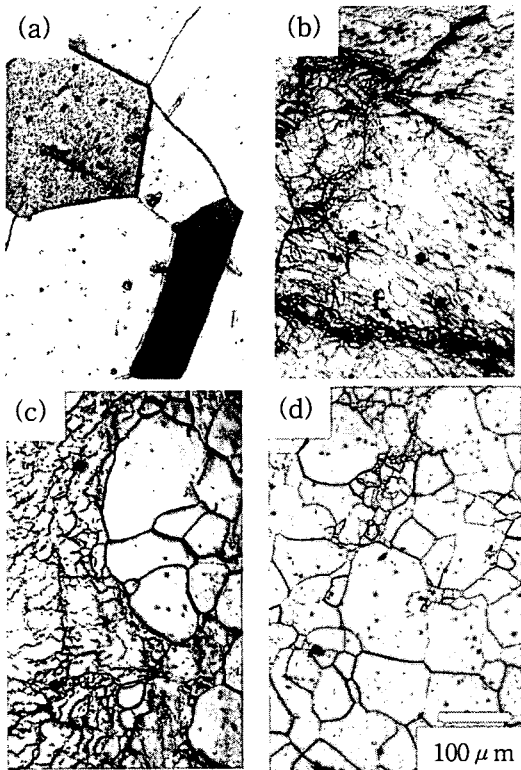


Fig. 5 Microstructures of AISI 430 stainless steel obtained under 1000 °C and 0.5/sec. The microstructures indicated by (a), (b), (c), and (d) were before deformed, 10% strain 50% strain and 300% strain deformed microstructure, respectively

AISI 430의 유동 응력곡선은 Fig. 1에서 오스테나이트계 스테인리스강인 AISI 304와 AISI 316과는 그 형태가 다르게 나타났는데 변형량 증가에 따른 미세조직의 변화 역시 Fig. 5에 나타낸 것처럼 다른 특징을 나타내었다. 동적 재결정에서와 같이 임계 변형량 이후에 새로운 결정립의 출현이 없었으며 변형량이 증가함에 따라 기존의 결정립 내부에 수많은 아결정립들이 발달하여 최종적으로는 이들 아결정립들이 대경각입계를 갖는 결정립으로 발달하게 됨을 알 수 있었다. 이와 같은 미세조직의 발달로부터 AISI 430 스테인리스강이 연속 동적 재결정에 의해 동적 연화가 진행되었다는 것을 알 수 있었다<sup>2)</sup>. Fig. 6에 연속 동적재결정에 의해 미세조직이 발달해나가는 과정을 EBSD로 분석하여 나타내었다. 변형량이 증가함에 따라 기존의 결정립계를 중심으로 전위밀도가 증가하고 전위구조와 아결정립이 발달하는 과정에서 아결정립계가 대경각입계로 변화하는 것을 알 수 있었다<sup>2)</sup>.

#### 4. 결론

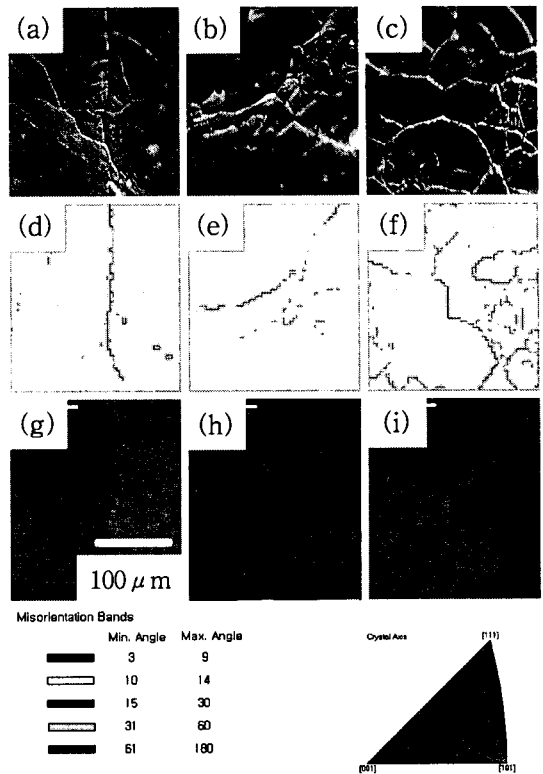


Fig. 6. Images of electron back scattered diffraction (EBSD) at 1000 °C and 0.5/sec under various strains ; (a) 10%, (b) 50% and (c) 500%. Grain boundary misorientation maps of electron back scattered diffraction (EBSD) at 1000 °C and 0.5/sec under various strains ; (d) 10%, (e) 50% and (f) 500%. Crystal orientation maps of electron back scattered diffraction (EBSD) at 1000 °C and 0.5/sec under various strains ; (g) 10%, (h) 50% and (i) 500%.

오스테나이트계 스테인리스강과 페라이트계 스테인리스강을 고온 연속 변형시험하여 각각의 고온 변형특성이 동적 재결정과 연속 동적 재결정에 의존하여 변화한다는 것을 규명할 수 있었다.

#### 참고 문헌

- (1) S. I. Kim and Y. C. Yoo, 2001, "Dynamic recrystallization behavior of AISI 304 stainless steel", Mater. Sci. & Eng. A, Vol. 311/1-2, pp. 108~113.
- (2) S. I. Kim, C. H. Jin, S. H. Chun and Y. C. Yoo, 2001, "Continuous dynamic recrystallization and grain refinement of AISI 430 ferritic stainless steel" Pro. of Rex-GG Inter. Conf., Vol. 2, pp. 917~922.