한국소성가공학회 '99춘계학술대회 논문집 pp.171~175

304 스테인레스강의 고온 유동응력곡선과 미세 조직의 예측

*김성일 조범호 유연철
인하대학교 재료공학부

Prediction on Flow Stress Curves and Microstructures of 304 Stainless Steel

Sung-Il Kim*, Beum-Ho Joe and Yeon-Chul Yoo
School of Materials Science and Engineering, Inha University, Inchon 402-751

ABSTRACT

The high temperature deformation behavior of 304 stainless steel was characterized by the hot torsion test. Continuous deformation was carried out at the temperature ranges 900~1100℃ and the strain rate ranges $5x10^{-2}$~5/sec. The formulation of the flow stress curves was developed as subtraction form which was based on dynamic softening mechanisms. The volume fraction of dynamic recrystallization and the mean grain size could be expressed as a function of deformation variables, temperature (T), strain (ε), strain rate ($\dot{\varepsilon}$). The calculated values of flow stress and mean grain size could be well matched with experimental values.

1. 서론

최근 강재의 열간 압연이나 열간 단조 등의 고온 소성변형공정에 관한 연구는 우수한 기계적 특성을 갖는 제품을 제조할 수 있는 제어변형 (controlled deformation) 공정개발에 대해 집중적으로 이루어지고 있다[1-3]. 특히, 오스테나이트계 스테인레스 강의 고온 소성변형 시 변형저항 (deformation resistance)은 일반 탄소강에 비해 약 2배정도로 매우 높은 값을 보이므로 공정 제어가 필수적으로 요구되고 있다. 더욱이, 열간 변형의 공정 제어는 유동 응력 (flow stress)과 미세 조직의 제어가 목표이므로 공정변수인 온도 (T), 변형속도 ($\dot{\varepsilon}$), 변형량 (ε)에 대한 정확한 유동 응력과 미세 조직의 상태를 예측하는 연구[4-10]가 우선적으로 이루어져야 한다. 유동 응력과 미세 조직의 정확한 예측은 변형 중에 발생하는 동적 재결정 (dynamic recrystallization)에 의한 연화과정을 정확하게 이해하고 이를 유동 응력과 결정립 크기의 변화 예측에 적용해야 정확한 예측이 가능하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 오스테나이트계 스테인레스 강인 304 스테인레스 강의 동적 연화기구를 바탕으로 유동 응력과 미세 조직의 변화를 정확하게 예측할 수 있도록 고온 변형 중에 발생하는 동적인 연화기구를 정량화 하였으며 제어변형 (controlled deformation) 기술을 확립하는데 기여하고자 하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 시료는 상용되고 있는 304 스테인레스강 (Fe-8.16Ni-18.21Cr-0.045C)으로 100

0℃, 30min의 열처리 과정으로 초기 결정립 크기를 약 100㎛로 일정하게 하였다. 시험편은 직경 10㎜×표점거리 20㎜로 절삭 가공한 고체형 비틀림시험편을 사용하였다. 연속변형시험은 고온 비틀림 시험기를 이용하였으며 변형은 900~1100℃ 그리고 0.05~5/sec의 범위에 대해 실시하였다. 미세 조직의 관찰은 미세 연마 후 15㎖ HCl-10㎖HNO_3-10㎖아세트산 혼합액으로 부식하여 광학 현미경을 이용하였다.

3. 실험 결과

유동 응력 예측

고온 변형 시 유동 응력은 가공경화에 의해 크게 증가하다가 동적 재결정의 발생으로 최대 응력에 도달한 후 정상상태 응력으로 감소하는 형태를 보인다. 따라서 유동 응력의 변형량에 따른 변화는 식(1)~(4)에 보인 것처럼 가공경화(work hardening, WH)와 동적 회복 (dynamic recovery, DRV)의 영역 그리고 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)의 영역으로 구분하여 예측하였다. 특히, 동적 재결정의 영역에서의 유동 응력의 변화는 동적 재결정 분율(X_{DRX})을 이용하여 미세 조직의 변화에 따른 응력의 변화를 표현하였다.

$$\sigma_{(WH+DRV)} = \sigma_p[1-\mathrm{Exp}(-C\varepsilon)]^m \quad (1)$$

$$\sigma_{(DRX)} = (\sigma_p-\sigma_{ss})\left[\frac{(X_{DRX}-X_{\varepsilon_p})}{(1-X_{\varepsilon_p})}\right], \quad \varepsilon>\varepsilon_p \quad (2)$$

$$\sigma_{(DRX)} = 0, \quad \varepsilon<\varepsilon_p \quad (3)$$

$$\sigma_{(Total)} = \sigma_{(WH+DRV)} - \sigma_{(DRX)} \quad (4)$$

여기에서 σ_p와 σ_{ss}는 각각 최대 응력과 정상상태 응력이며 ε_p는 최대 변형량, C와 m은 변형조건에 따라 변화하는 상수로서 m은 가공경화지수이다. 표 1에 여러 가지 변형조건에 대해 실험으로 얻은 σ_p, σ_{ss}, ε_p, C와 m을 나타내었다. 변형조건에 따라 변화하는 최대 응력, 정상 상태 응력, 최대 변형량 및 C와 m을 Zener-Hollomon parameter ($\dot{\varepsilon}\exp(Q/RT) = A\sinh(\alpha\sigma_p)^n$)[7,11,12]를 이용하여 무차원 상수, (Z/A)로 표현할 수 있었으며 이를 그림 1과 2에 나타내었다. 그림 3에 연속 변형실험으로 구한 유효 응력-유효 변형률 곡선과 식 (1)~(4)로부터 계산한 결과를 함께 도시하였다. 304 스테인레스 강의 고온 유동응력을 임의의 변형조건에 대해 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

동적 재결정 분율과 평균 결정립 크기 예측

고온에서의 소성 변형 중 발생하는 연화기구인 동적 재결정의 분율 (X_{DRX})은 다음의 Avrami's equation[13]의 형태로 예측할 수 있었다.

$$X_{DRX} = 1-\exp[-((\varepsilon-\varepsilon_c)/\varepsilon^*)^{m'}] \quad (5)$$

이 식에서 ε_c와 ε^*는 각각 임계 변형량(critical strain)과 연화속도가 최대일 때의 변형량이며 m'은 Avrami 지수로 변형조건에 따라 변화하였으며 이를 표 1에 나타내었다. 따라서 모두 무차원 상수인 Z/A의 함수로 표현할 수 있었으며 그림 4(a), (b), (c)에 나타내었다.

동적 재결정을 위한 임계 변형량은 최대 응력(peak stress)에 상응하는 변형량인 최대 변형량(peak strain)의 평균 0.73배에 해당하였으며[12] 연화속도가 최대일 때의 변형량 (ε^*)은 그림 5에 보인 것처럼 최대 변형량 이후에 음의 값을 갖는 가공경화율 (work hardening rate, $d\sigma/d\varepsilon$)이 최소값을 나타낼 때의 변형량으로 변형속도가 증가할수록, 변형온도가 감소할수록 증가하였다. 따라서 연화속도가 최대일 때의 변형량만으로도 주어진 변형조건에 대해 상대적인 재결정 속도를 파악할 수 있는 유용한 자료로 판단되었다. 동적 재결정 중의 미세 조직의 변화는 image analyzer를 이용하여 측정된 초기 결정립 크기와 ε^*, ε_{ss}에서의 결정립 크기 그리고 식(5)를 이용하여 예측할 수 있었다. 초기 결정립 크기 100㎛에 대해 동적 재결정이 완료되었을 때(ε_{ss})의 결정립 크기는 변형 조건에 따라 달라지는데 이를 식(6)으로 나타낼 수 있었다.

$$D_{DRX} = 67.8\ (Z/A)^{-0.017} \quad (6)$$

그림 6에 1000℃, $0.5s^{-1}$의 변형조건에 대해 계산한 동적 재결정 분율과 평균 결정립 크기의 변형량에 따른 변화를 실험 값과 함께 나타내었다. 평균 결정립 크기는 그림 7에 보인 미세 조직의 관찰로 구한 값과 거의 같은 결과를 보였다.

4. 결론

1. 가공 변수인 온도 (T), 변형속도($\dot{\varepsilon}$) 및 변형량(ε)에 따라 변화하는 고온 유동응력은 가공경화와 동적 회복이 발생하는 영역 그리고 동적 재결정이 발생하는 영역으로 구분하여 정량화 함으로써 예측할 수 있었으며 임의의 조건에 대해 유동 응력곡선을 매우 정확하게 재현할 수 있었다.

2. 변형온도와 변형속도에 따라 변화하는 σ_p, σ_{ss}, ε_p, ε_c, ε^*, C, m 그리고 m'은 모두 무차원 상수인 (Z/A)로 표현할 수 있었다.

3. 304 스테인레스 강의 고온 변형조건에 따른 동적인 연화 정도는 연화 속도가 최대일 때의 변형량 (ε^*)만을 이용하여 상대적으로 평가할 수 있었다.

4. 고온 변형 중 동적 재결정에 의한 미세 조직의 변화는 임계 변형량(ε_c)과 연화속도가 최대일 때의 변형량(ε^*)을 이용하여 표현하였으며 실험적으로 측정한 평균 결정립 크기와 잘 일치하였다.

참고문헌

1. B. C. KO, K. S. PARK and Y. C. YOO : Mater. Sci. Technol., Vol. 14, No. 8, (1998), 765.
2. S. H. CHO, S. I. KIM and Y. C. YOO : J. of Mater. Sci. Lett., 16, (1997), 1836.
3. C. M. Sellars : Mater. Sci. Technol., 6, (1990), 1072.
4. D. R. Barraclough and C. M. Sellars : Mater. Sci. Technol., 13, (1979), 257.
5. M. J. Luton, R. A. Petkovic and J. J. Jonas : Acta Metall., 28 (1979) 729.
6. R. A. Petkovic and J. J. Jonas : ISIJ, 210, (1972) 256.
7. S. F. Medina and C. A. Hernandez : Acta mater. Vol. 44, No. 1, (1996), 137.
8. S. F. Medina and C. A. Hernandez : Acta mater. Vol. 44, No. 1, (1996), 149.
9. S. F. Medina and C. A. Hernandez : Acta mater. Vol. 44, No. 1, pp. (1996), 165.
10. C. A. Hernandez, S. F. Medina and J. Ruiz : Acta mater. Vol. 44, No. 1, (1996), 155.
11. H. J. McQueen and J. J. Jonas : Can. J. Phys. 45, 1225, (1976).
12. S. H. CHO, S. I. KIM and Y. C. YOO : Metals and Materials, Vol. 4, No. 4, (1998), 732.
13. M. Avrami : J. Chem. Phys., 7 (1939), 1103.

Table. 1. Experimental values acquired from flow curves analysis of 304 stainless steel.

$\dot{\varepsilon}$ (/sec)	T(℃)	σ_p(MPa)	σ_{ss}(MPa)	ε_p	C	m	ε^*	m'
0.05	1100	66.5	59	0.42	10.12	0.52	0.58	1.951
0.5	1100	99	80	0.6	8.6	0.57	0.9	1.288
5	1100	145	114	0.89	5.68	0.7	1.07	1.001
0.05	1000	105	91.5	0.54	9.54	0.61	0.81	1.239
0.5	1000	133	100	0.63	8.18	0.69	0.94	0.931
5	1000	192	130	0.92	6.38	0.71	1.15	0.796
0.05	900	170	145	0.67	9.82	0.69	0.86	0.918
0.5	900	215	156	0.69	11.86	0.79	1.02	0.765
5	900	262	180	0.96	6.44	0.8	1.2	0.661

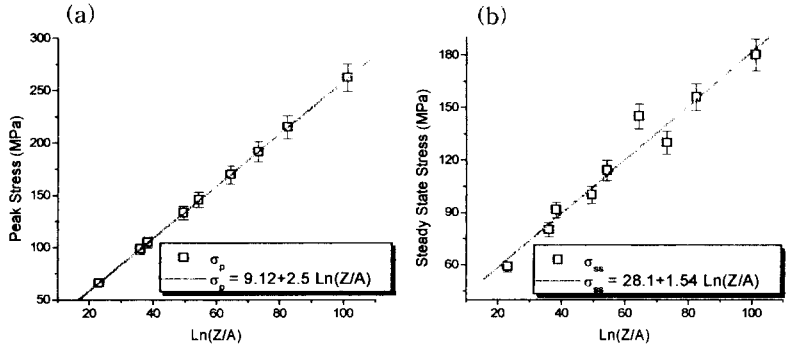

Fig. 1. Relationships with dimensionless parameter, Z/A and (a) peak stress (σ_p), (b) steady state stress (σ_{ss})

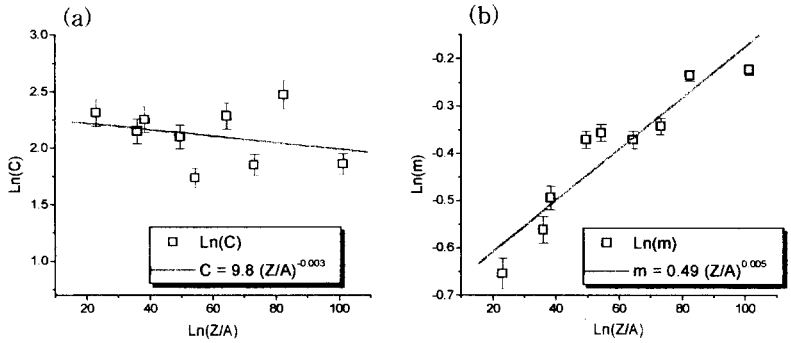

Fig. 2. Relationships with dimensionless parameter, Z/A and (a) C, (b) work hardening rate (m)

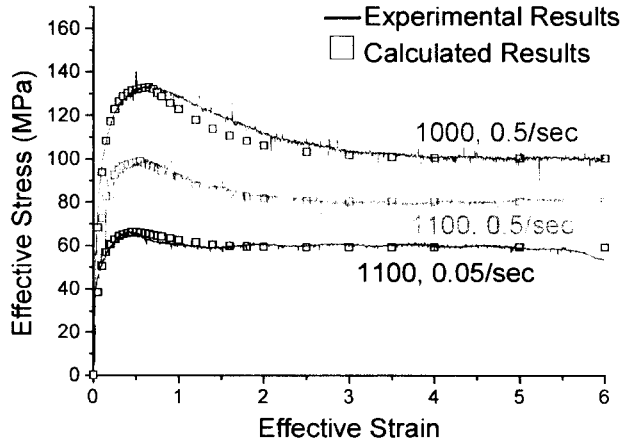

Fig. 3. Comparison of calculated and experimental flow stress at the various deformation conditions.

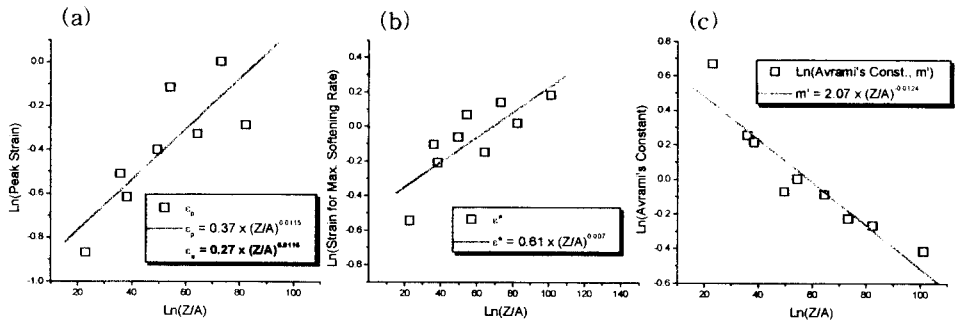

Fig. 4. Relationships with dimensionless parameter, Z/A and (a) critical strain (ε_c), (b) strain for maximum softening rate (ε^*), and (c) Avrami's constant (m').

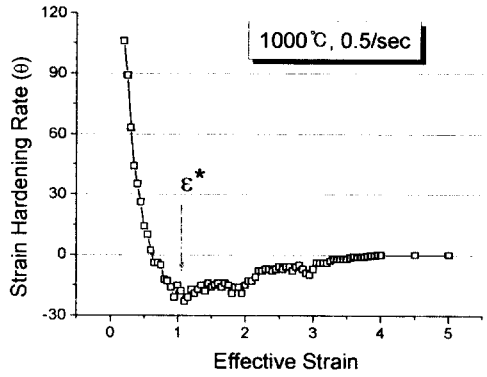

Fig. 5. Plot of work hardening rate - effective strain for determining strain for maximum softening rate (ε^*).

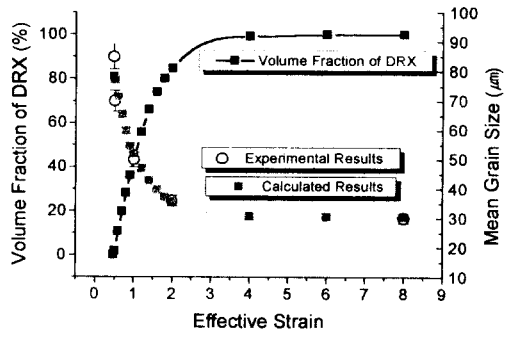

Fig. 6. Fractional softening curve of DRX and mean grain size at the condition of 1000℃, 0.5/sec.

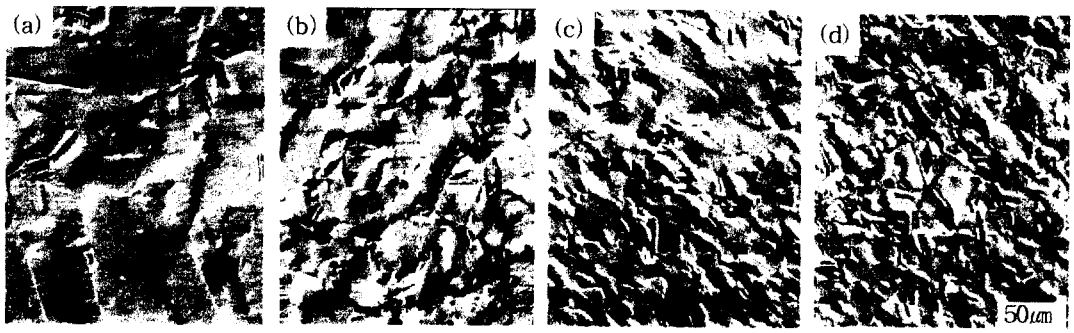

Fig. 7. The evolution of microstructure at the deformation condition of 1000℃, 0.5/sec. (a) as received (b) ε = 0.5 (c) ε = 1 (d) ε = 2.