

304 스테인레스강의 고온소성변형특성에 미치는 정적연화 효과

조상현 김유승 유연철

인하대학교 금속공학과

Effect of Static Softening on Hot Plastic Deformation Behaviour for 304 Stainless Steel

Sang Hyun Cho, Yu Seung Kim and Yeon Chul Yoo

Department of Metallurgical Engineering, Inha University, Incheon 402-751

Abstract

Static restoration during hot interrupted deformation of 304 stainless steel was studied in the temperature range from 900 to 1100°C under various strain rate of 0.05 ~ 5/sec and pass strain of 1/4~3 times peak strain. The static restoration was dependent on the pass strain, deformation temperature and strain rate. Fractional softening(FS) values increased with increasing strain rate, deformation temperature and pass strain. Recrystallization kinetics was well explained by the Avrami equation and the time for 50% recrystallization was evaluated using equation of $t_{0.5} = 2.01 \times 10^{-10} \epsilon^{-1.56} \dot{\epsilon}^{-0.81} D \exp(196.66/RT)$.

1. 서 론

변형을 받은 재료는 변형이후 정적복구(static restoration)과정을 거치게 되고 이때 정적복구는 주어진 온도·변형속도 및 변형량에 의존하며 회복(recovery)·재결정(recrystallization) 및 준동적복구(metadynamic restoration)등 여러가지 기구에 의해 진행된다.⁽¹⁾ 정적복구는 고온다단압연과 같이 동적 및 정적인 상태가 반복되는 변형공정에서 중요한 연화기구인데, 이때 정적연화가 발생하는 일어난는 시점 및 속도에 따라서 그 재료의 최종 기계적특성이 달라지게 된다. 특히 304 스테인레스강은 일반강재에 비해서 변형저항이 크고 동적재결정을 일으키는 임계변형량 역시 크기 때문에 열간변형시에 동적연화를 발생시키기 어렵다. 그러나 정적연화는 이에 비해서 발생이 용이하고 결정립미세화 효과도 우수하므로 이 재료에서는 정적연화를 적극적으로 활용하는 것이 고온소성변형을 용이하게 하는데 효과적이다.

재결정 속도는 주어진 변형량·변형속도·변형온도 및 초기 결정립도등에 영향을 받

으며 시간의 변화에 따른 재결정분율은 S 자 형태를 나타내고 이는 Avrami식 형태로 표현된다.⁽²⁾ 이와같은 정적연화에 관한 연구는 일반 강재에 대해서는 정적재결정에 미치는 열역학적·조직학적 요인⁽³⁾, 재결정속도에 미치는 공정변수들의 영향, 50% 연화에 걸리는 시간($t_{0.5}$)등⁽⁴⁾ 비교적 많은 연구가 이루어졌으나 스테인레스강의 경우는 고유한 기술로 인식되어 발표된 것이 드물다.

따라서 본 연구에서는 304 스테인레스강의 고온변형 공정변수 즉 변형온도 변형속도 및 패스변형량이 정적연화에 미치는 영향을 분석하고 일정 재결정 분율에 도달하는 시간(t_{SRX})을 정량화 하고자 하였다.

2. 실험방법

시료는 오스테나이트계(304) 스테인레스강이었으며 그 화학조성은 표 1에 나타내었다. 고온변형시험은 비틀림 시험기에서 하였으며 시험편은 10mm ϕ x 20mm/인 고체형이었다.

연화비율을 구하기 위해서 등온등속 변형실험을 하였으며 이때 가열속도를 1 $^{\circ}$ C/sec로 하여 목적온도에 도달한 후 열적안정화 및 결정립도 균일화를 위해 10분간 유지한 후 변형하였다. 변형은 변형속도 및 변형온도를 각각 0.05~5/sec, 900~1100 $^{\circ}$ C 범위에서 하였으며 이때 단속변형량은 최대변형량(peak strain, ϵ_p) 전후로 설정하였다.

3. 실험 결과

고온단속유동곡선

그림 1은 변형후 순수하게 단속중에 발생하는 정적연화만을 평가하기 위해서 패스변형량을 동적재결정을 위한 임계변형량(critical strain, ϵ_c)을 넘지 않도록 최대변형량의 절반수준으로 하고 1000 $^{\circ}$ C, 0.5/sec 변형조건에서 구한 유동곡선이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 첫 번째 곡선에서는 변화가 없었지만 단속시간이 길어짐에 따라서 두 번째 유동곡선의 형태가 변하였다. 단속시간이 10초일 때 두 번째 단속곡선은 0.5~3초의 곡선과는 달리 첫째 곡선과 유사한 가공경화 기울기를 가지고 증가하는 것으로부터 알 수 있었다. 이는 일단 초기 변형후에 어느정도의 시간이 지난 후에는 정적재결정의 발생으로 결정립도가 작아지고 전위가 상당량 소멸됨으로써 처음 패스와 유사한 곡선형태를 나타낸다고 할 수 있다. 이와같은 현상은 다른 공정변수, 즉 변형온도나 변형속도가 변하여도 마찬가지인데, 두 번째 단속곡선은 변형온도가 높아지거나 변형속도가 빨라지게 되면 단속시간이 짧더라도 첫 번째 곡선과 유사해졌다. 이처럼 처음과 두 번째 유동곡선이 유사해 진다는 것은 단속중에 그만큼 연화가 많이 발생하였다는 것을 의미한다.

연화비율 (fractional softening, FS)

각각의 공정변수에서 연화비율(fractional softening, FS)을 (1) 식에 의해서 구하였다. 그 중에서 변형온도의 영향을 그림 2에 나타내었다. 모든 연화곡선은 S 자 형태를 보이고 있었는데, 이는 정적연화가 시간에 의존한다는 것을 의미한다고 하겠다.

그림 2에서 변형온도가 900 $^{\circ}$ C에서 1100 $^{\circ}$ C로 증가함에 따라서 연화는 빠르게 이루어지는 것을 알 수 있었고 이는 온도가 높아짐에 따라서 결정립계의 이동도(mobility)가 증가하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 변형속도가 0.05에서 5/sec로 빨라짐에 따라서, 패스변형량이 최대변형량의 1/4에서 3배까지 증가함으로써 역시 연화속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있었다.

재결정 속도

그림 2와 같이 연화곡선은 전형적인 S 자 곡선을 나타내었는데 이때 재결정 과정은 다음과 같은 Avrami식에 의해 설명될 수 있다.

$$X = 1 - \exp[-0.693 (t/t_{0.5})^n], t_{0.5} = A \epsilon^p \dot{\epsilon}^q D \exp(Q/RT)$$

일반적으로 n 값은 정적재결정이 발생하는 재료에서 1 ~ 2 사이로 보고되었고⁽⁵⁾ 본 연구에서도 n 값은 1.02이었다.(그림 3) $t_{0.5}$ 를 정량화하기 위해서 $t_{0.5} \propto \epsilon^p, \dot{\epsilon}^q$ 의 관계를 구했고, 본 연구에서 구한 p, q값은 각각 -1.56, -0.81 이었다.

연화의 시작과 끝은 연화곡선상에서 직선부분이 벗어나는 것으로부터 구할 수 있거나, 5, 50, 95%연화가 되는 연화비율을 구함으로써 알 수 있다. 연화정도에 따른 시간의 변화를 예측하여 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 정량화된 식에 의해 계산된 결과와 실험에서 얻은 결과와 잘 일치하였다. 또한 온도변화에 따른 $t_{0.5}$ 를 계산하여 그림 5에 나타내었다. 연화가 50% 발생하는데 걸리는 시간은 변형온도가 높아질수록 급격하게 빨라져서 1100℃ 이상이 되면 거의 1초 이하인 것을 알 수 있었다. 또한 일정 재결정분율에 요구되는 시간을 모델링하여 그림 6에 나타내었다. 변형온도 1000℃, 변형속도 0.5/sec 조건에서 재결정 시작(5%), 50% 그리고 끝나는 시점(95%)에 걸리는 시간은 모두 패스변형량이 증가함에 따라서 지수적으로 감소함을 알 수 있었다.

4. 결 론

고온단속변형 실험을 통해 304 스테인레스강 고온변형후 정적연화에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 정적연화는 패스변형량, 변형온도 및 변형속도에 의존하였는데, 이때 패스변형량이 커지고 변형온도가 높아지며 변형속도가 빨라질수록 재결정이 발생하는데 걸리는 시간(t_{SRX})은 빨라졌다.
2. 일정 재결정 분율에 도달하는 시간, t_{SRX} 은 패스변형량(ϵ), 변형속도($\dot{\epsilon}$) 및 변형온도(T)등에 다음과 같은 멱수함수의 관계로 나타낼 수 있었고 이 식에 의해 정량화된 값은 실측값과 잘 일치하였다.

$$t_{0.5} = 2.01 \times 10^{-10} \epsilon^{-1.56} \dot{\epsilon}^{-0.81} D \exp(196.7/RT)$$

3. 재결정 시작(5%), 50% 그리고 끝나는 시점(95%)에 걸리는 시간은 패스변형량이 증가하고 변형속도가 빨라지면 지수적으로 감소하였다. 또한 변형온도가 높아짐에 따라서 각 분율에 요구되는 시간이 감소하였고 특히, 변형량이 동적재결정을 위한 임계변형량 이상으로 커지면 이들 시간의 차이가 없어짐을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 조상현,오명석,소찬영,유연철 : 한국소성가공학회지, 3, 4 (1994) 415
2. C. M.Sellars : Mater. Sci. Technol., 6 (1990) 1072
3. D. R. Barraclough and C. M. Sellars : Mater. Sci. Technol., 13, (1979) 257,
4. M. J. Luton, R.A. Petkovich and J. J. Jonas : Acta Metall., 28, 1979, 729
5. C. Roucoules, P. D. Hodgson, S. Yue and J. J. Jonas : Metall. Trans. A 25A, (1994), 389

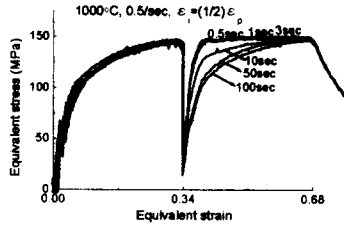


Fig. 1. Double-twist flow curves obtained from interrupted torsion tests.

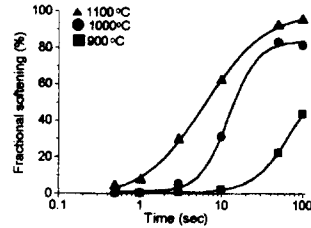


Fig. 2. Effect of temperature on the rate of softening.

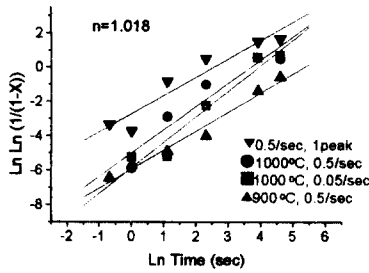


Fig. 3. Dependence of $\ln \ln [1/(1-X)]$ on $\ln t$ under different conditions of pass strain, temperature and strain rate.

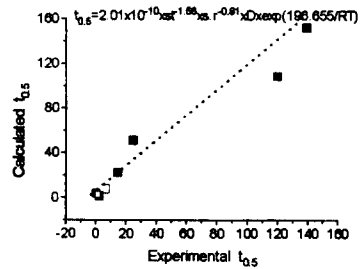


Fig. 4. Comparison of experimental and calculated $t_{0.5}$.

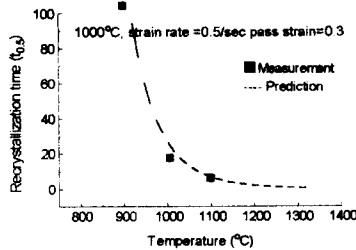


Fig. 5. Comparison between the measured and predicted recrystallization values for softening with varying deformation temperature.

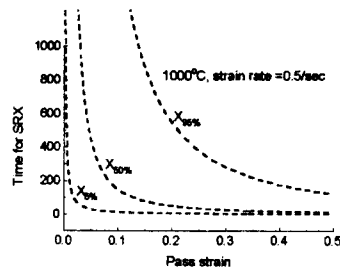


Fig. 6. Prediction of time for 5, 50, 95% and predicted recrystallization values for softening with varying pass strain.