

## 304 스테인레스강의 고온다단변형시 재결정 거동

조상현 김성일 유연철 노광섭\*  
인하대학교 금속공학과 \*포항제철 기술연구소

### Recrystallization Behavior of 304 Stainless Steel during Hot Multistage Deformation

Sang Hyun Cho, Sung Il Kim, Yeon Chul Yoo and Kwang Seob Noh\*

*Department of Metallurgical Engineering, Inha University, Incheon 402-751*  
*\* Technical Research Lab., Pohang Iron & Steel Co., Ltd., Pohang, 790-785*

#### Abstract

The torsion tests in the range of 900~1100°C,  $5.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^0$ /sec were performed to study the recrystallization behavior of 304 stainless steel in the high temperature multistage deformation. The no-recrystallization temperature( $T_{nr}$ ) and fractional softening(FS) were determined by the change of flow curves. The inflection points of stress slope were moved to lower temperature area as the strain rate and the interrupt time were increased. From the multipass flow curve, the intersection between pass stress and FS curve was corresponding to the pass which the FS dropped abruptly and it was shown that the recrystallization area could be determined by the FS measurement in multipass deformation.

Key word : multipass flow curve, no-recrystallization temperature( $T_{nr}$ ), fractional softening(FS)

#### 1. 서 론

304 스테인레스강의 고온 다단변형공정에서는 재료의 동적회복(dynamic recovery) 및 동적재결정(dynamic recrystallization)에 의한 동적연화(dynamic softening)와 패스간의 짧은 유지시간에 발생하는 정적회복(static recovery) 및 정적재결정(static recrystallization)을 포함하는 정적연화(static softening)가 발생하게 된다.<sup>(1,2)</sup> 특히 열간압연과 같은 변형공정은 한 번의 패스로 끝나는 것이 아니라 5~20 패스에 걸쳐 재료의 크기나 형상을 제어하므로 이러한 다단변형에서는 필연적으로 동적 및 정적 연화가 동시에 발생하게 되고 이들 연화는 상호간 밀접하게 영향을 미치게 된다<sup>(3,4)</sup>. 따라서 고온소성변형시 재결정거동의 제어는 재료의 기계적 특성을 결정하는 가장 중요한 요소이다.

본 연구에서는 비재결정온도 및 연화비율(FS)을 분석하여 304스테인레스강의 재결정은

도 영역을 제시함으로써 다단변형시 발생하는 동적·정적연화를 종합적으로 연구하고자 하였다.

## 2. 실험방법

시료는 오스테나이트계(304) 스테인레스강(18.2%Cr - 8.2%Ni)을 진공유동용해하여 제조하였고 실험은 10mm $\Phi$  x 20mm인 고체형 비틀림시험편을 사용하였다.

감온단속변형은 변형온도를 1100 $^{\circ}$ C에서 900 $^{\circ}$ C로 낮추면서 패스변형량, 단속시간, 변형속도를 각각 10~30%, 5~20초, 0.05~5/sec로 조절하면서 이러한 공정변수의 변화로 인한 유동응력, 비재결정 온도( $T_{nr}$ , no-recrystallization temperature) 및 연화비율(FS) 등의 변화를 조사하였다.

## 3. 실험 결과

### 비재결정 온도( $T_{nr}$ )에 미치는 공정변수의 영향

그림 1 은 패스변형량 및 단속시간을 각각 30%와 10초로 고정한 후 변형온도를 1100에서 900 $^{\circ}$ C로 내릴 때 얻은 응력-변형률 곡선이다. 여기서 유동응력은 변형온도가 감소함에 따라서 점점 증가하였는데 980 $^{\circ}$ C 부근에서 일종의 변곡점이 나타나게 된다. 이러한 변곡점이 나타나는 이유는 감온다단변형시 변형기구가 달라지는데 기인한다. 즉 변곡점을 기준으로 고온인 영역에서는 재결정에 의한 연화가 가공경화보다 우선하여 발생하게 되고, 저온인 오른쪽 영역에서는 온도도 감소하게 되고 앞 단계로부터 반복되는 변형이 연속적으로 축적됨으로써 연화보다는 가공경화가 우선하여 발생하기 때문이다<sup>(5)</sup>. 이와 같은 변곡점을 비재결정 온도(no recrystallization temperature,  $T_{nr}$ )라 하며 이 온도보다 높은 영역이 다단변형시 재결정이 용이하게 발생하는 구간이다.

비재결정 온도에 미치는 변형속도의 영향을 그림 2 에 나타내었다. 변형속도를 각각 0.05, 0.5, 5/sec로 변화시키면서 재결정 영역을 평가한 것으로 변형속도가 10<sup>2</sup>/sec로 빨라짐에 따라서 비재결정 온도는 70 $^{\circ}$ C 정도 낮아지고 있었다. 변형속도가 빨라지면 일반적으로 동적연화(dynamic softening)뿐만아니라 정적연화(static softening)도 증가하는 것으로 알려져 있는데<sup>(4)</sup> 다단변형시 발생하는 재결정은 동적인 상태와 정적인 상태로 정확하게 구분되는 것이 아니라 이 두 상태에서 발생하는 연화가 복합적으로 나타난 것이다. 따라서 변형속도가 증가하면 변형을 받는 동적인 상태에서는 동적재결정을 촉진하고 패스와 패스사이의 정적인 상태에서 정적연화를 유발하여 결과적으로 다단변형시에 비재결정 온도를 낮추는 것이다. 이와 마찬가지로 패스변형량이 증가함에 따라서 비재결정 온도는 낮아졌고 단속시간이 5초에서 20초로 증가함에 따라서 역시 비재결정 온도는 낮아졌다. 이를 종합해보면 다단변형시 연화와 가공경화가 동시에 발생하지만 변형온도·변형량 및 단속시간 등에 따라서 두 기구중에서 어느 하나가 우선하는 구간이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

### 감온다단변형시의 연화비율(FS)

그림 3 은 단속시간을 각각 10, 20초로 하면서 변형온도를 1100에서 900 $^{\circ}$ C로 낮추고 변형속도를 0.05에서 5/sec로 빠르게 하면서 20 패스의 변형을 한 후 각 패스의 정적연화정

도를 정량적으로 나타내기 위해서 연화비율(fractional softening)을 구한 것이다. 이때 연화비율은 Ryan등이 제시한 식<sup>(6)</sup>을 이용하여 구하였고 연화비율은 거의 모든 패스에서 온도가 떨어짐에 따라 감소하였다. 고온변형후 단속중 정적복구기구는 정적재결정(static recrystallization) 정적회복(static recovery) 준동적재결정(metadynamic recrystallization) 과 같은 복구기구에 의존하고 이러한 세가지의 복구기구는 연화비율과 상관관계를 갖게 된다. 그림 3 에서 나타나듯이 304 스테인레스강은 감온단속변형중에서 연화비율이 40 ~ 110% 정도로 모든 패스에서 정적재결정이 발생하는 것을 알 수 있었다.

#### 비재결정 온도( $T_n$ )와 연화비율(FS)의 비교

그림 4 는 위에서 구한 비재결정온도와 연화비율을 단속시간 10초의 경우에 함께 도시한 것이다. 패스가 진행됨에 따라서 변형온도가 낮아지고 변형속도가 빨라지게 됨으로써 연화비율은 점차적으로 감소하였다. 이때 감소하는 정도를 매 단계마다 계산하여 보면 감소폭이 가장 큰 패스에서 비재결정 온도와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이와같은 결과로부터 재결정 영역을 확인할 수 있고 또한 감온가속변형공정에서도 비교적 간단하게 재결정 영역을 결정할 수 있다. 이러한 경향은 단속시간이 20초일때도 마찬가지로 나타났는데 이는 실제 압연공정과 같은 감온가속변형에서 연화비율을 통해서도 재결정 영역을 확인할 수 있는 중요한 결과라 할 수 있다.

### 4. 결 론

1. 다단변형시에 재결정온도 영역을 정량화하였는데 변형속도가 빨라지고 패스변형량 및 단속시간이 증가함에 따라서 비재결정온도는 낮아졌다. 이때 패스변형량이 10%에서 30%로 증가함에 따라서 비재결정 온도는 1037℃에서 985℃로 낮아졌음을 확인할 수 있었다.
2. 감온가속변형에서 연화비율을 구한 결과 연화비율은 패스가 진행될수록 감소하였고 단속시간이 긴 경우가 짧은 경우에 비하여 10% 정도 컸다.
3. 연화비율과 단속변형의 최대응력을 동시에 비교해 보면 연화비율의 감소폭이 큰 패스와 비재결정온도가 일치함을 확인하였는데 이것은 비재결정 온도를 감온다단변형시의 연화비율을 통해서도 구할 수 있음을 증명하는 것이다.

#### 참고문헌

1. Y. C. Yoo, J. S. Jeon and J. H. Lee : Proc. ICSMA10, H.Oikawa and K.Maruyama (Eds.), Sendai, Japan, (1994) 831
2. L. N. Pussegoda, S. Yue, and J. J. Jonas : Mat. Sci. Tech., 7 (1991) 129-938-945
3. K. S. Forcey, I. Iordanova and D. K. Ross : Mat. Sci. Tech., 6 (1990) 357
4. Y. C. Yoo, J. S. Jeon and B. C. Ko : Materials Science Forum Vol. 217-222 (1996) 1157
5. D. Q. Bai, S. Yue, W. P. Sun and J. J. Jonas : Metal. Trans. A, 24, 10,

(1993), 2151

6. N. D. Ryan and H. J. McQueen : Mat. Forum, 14, (1990) 283

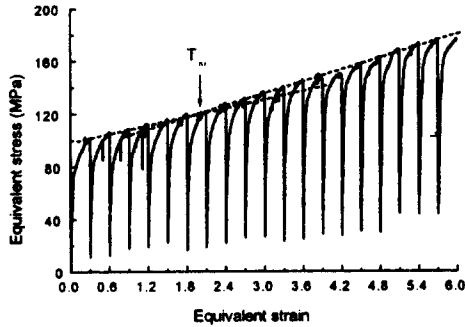


Fig. 1. Multistage torsional stress-strain curves for 304 stainless steel with pass strain of 0.2, strain rate of 0.5/sec and decreasing temperature from 1100°C to 900°C.

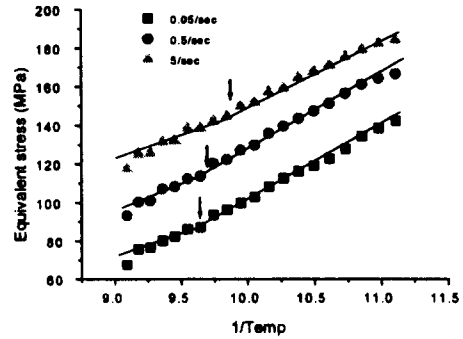


Fig. 2. The strain rate dependency of  $T_{nr}$ .

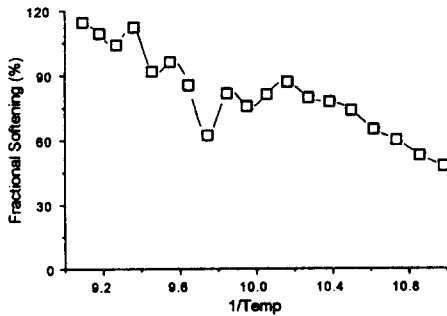


Fig. 6. Fractional Softening for 304 stainless steel in multistage tests with declining temperature from 1100 to 900°C at rising  $\dot{\epsilon}$  from 0.05 to 5/sec.

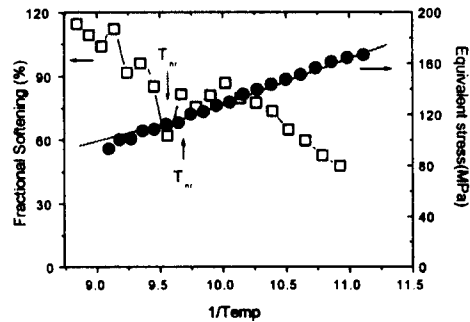


Fig. 7. Comparison between the pass stress and fractional softening on the declining temperature during the multistage deformation with 10 sec intervals.