

2003 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## Type 316 스테인리스 강의 피로특성에 미치는 냉간가공의 영향

### Effect of Cold Work on Fatigue Properties of Type 316 Stainless Steel

김대환, 한창희, 조해동, 류우석

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

316 스테인리스 강에 미치는 냉간가공의 영향을 평가하기 위하여 14%로 냉간가공하여 상온~600℃의 온도범위에서 인장과 피로시험을 수행하였다. 냉간가공은 인장강도를 증가시켰지만 연신율은 감소시켰다. 가공경화지수는 냉간가공에 의해서 감소하였다. 응력완화는 냉간가공에 의해서 증가하는 경향을 나타내었다. 저주기 피로수명은 상온에서는 냉간가공에 의해서 증가하지만 300℃와 600℃에서는 피로수명이 냉간가공에 의해서 감소하는 경향을 나타내었다. 피로시험에서 포화응력은 냉간가공에 의해서 증가하였다. 피로시험후 소성유기마르텐사이트 함량은 냉간가공에 의해서 감소하였다.

#### Abstract

Tensile and LCF (Low Cycle Fatigue) tests was conducted at RT~600℃ for type 316 stainless steel cold worked to 14%. Cold work increases tensile strength but decreases elongation. Cold work decreases strain hardening exponent but increases stress relaxation. Cold work increases LCF life at RT but decreases at high temperature. Saturation stress increases with cold work in LCF test. Strain induced martensite decreases with cold work.

## 1. 서론

오스테나이트 스테인리스강은 고온강도, 연성, 인성, 내식성 등이 우수해서 경수로 및 액체금속로의 일차계 구조재료로서 국제적으로 사용되고 있다. 316형태의 스테인리스강은 제조된 경험도 많고 특성도 우수할 뿐만 아니라 사용환경과 중성자조사 등에 대한 내구성도 양호하고 설계에 필요한 데이터 베이스도 구축되어 있어서 차세대원자로 및 고속로의 구조재료로서 유망한 재료이다[1].

원자력 발전소의 노내구조물 및 볼트 등에 사용되어지고 있는 316계 스테인리스 강은 강도를 고려하여 냉간가공된 상태로 사용되어지고 있다. 가동과 정지에 의한 응력변화, 사용중 구조물의 하중에 의한 응력의 변화 등에 의해서 발생하는 저주기 피로가 노내구조물의 수명을 제한하는 주요 인자로 알려져 있으므로 냉간가공된 316 스테인리스 강의 고온 저주기 피로특성이 반드시 평가되어야 한다. 그러나 냉간가공에 의해서 강화된 316계 스테인리스 강의 고온 기계적 특성에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 냉간가공된 316 스테인리스 강으로 고온 인장 및 저주기 피로 특성을 평가하고 수명에 영향을 미치는 인자들을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 화학조성

실험에 사용된 스테인리스 강의 화학조성을 표 1에 나타내었다. 냉간가공이 되지않은 시편은 판재를 사용하였고 냉간가공은 봉상시편을 14% 냉간가공하여 사용하였다. 압연방향이 시편의 길이방향이 되도록 시편을 채취하였다. 결정입의 크기는 냉간가공을 하지 않은 경우는  $65\mu\text{m}$ , 냉간가공을 한 경우는  $48\mu\text{m}$  이었다.

### 2.2. 시험방법

인장시험은 상온 $\sim 700^{\circ}\text{C}$  범위에서 수행하였고 시편은 직경이 6 mm이고 평행부 길이가 25인 봉상이었다. 제어는 변위제어, 변형속도는  $2\times 10^{-3}/\text{s}$ 이었다.

저주기 피로시험은 상온 $\sim 600^{\circ}\text{C}$ 에서 시험하였고 시험기간중 온도편차를  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  이내로 제어하였다. 온도의 균일함을 얻기 위하여 시험온도에서 1시간 유지후 시험을 수행하였다. 저주기 피로시편의 형상은 평행부 길이가 8 mm이고 직경이 7 mm인 봉상시편이었고, 변형범위 0.8~1.5%, 변형속도  $2\times 10^{-3}/\text{s}$ , 삼각파를 사용하여 strain 제어로 Instron 8502를 사용하여 ASTM E606에 정하는 바에 따라서 수행하였다. Strain 게이지는 시편

의 어깨부분에 부착하여 사용하였다. 이와같이 변형게이지를 시편의 어깨부분에 부착한 것은 게이지를 부착시에 약간의 흠을 만들어 석영 rod를 부착하게 되는데 이때 평행부에 흠을 만들면 이 흠 부분에서 응력의 집중이 발생하는 것을 방지하기 위해서이다. 피로수명은 포화응력의 75%되는 사이클로 정의하였다.

피로시험이 끝난 시편의 파면으로부터 1mm 떨어진 곳에서 하중축과 수직되는 방향으로 시편을 절단하여 투과전자현미경 시편을 제작하였다. 투과전자현미경 시편은 95% acetic 산과 5% perchloric 산에서 70V, 10°C에서 전해부식시켜 JEOL 200FX를 사용하여 전위구조를 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1. 인장시험

##### 3.1.1. 강도 및 연신율의 변화

냉간가공이 인장특성에 미치는 영향을 그림 1에 나타내었다. 항복강도는 냉간가공에 의해서 2배 이상 증가하였지만 최대인장강도는 약 10% 증가하였다. 연신율은 40~50% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 인장강도의 증가에는 전위밀도, 소성유기마르텐사이트, 결정립의 크기, 동적변형시효 등이 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

온도가 증가하면 동적변형시효가 발생하여 응력-변형곡선에서 serration 현상이 발생하는데 냉간가공은 이 serration을 감소시키고 serration이 발생하는 온도도 고온쪽으로 이동시키는 것으로 나타났다. 이러한 것으로부터 냉간가공은 동적변형시효를 억제하는 효과가 있는 것으로 판단된다. 이러한 원인은 동적변형시효를 발생시키기 위해서는 전위의 움직임이 활발하여야 하는데 냉간가공에 의해서 발생한 전위들이 서로 엉켜있어 움직일 수 있는 전위들이 감소하였기 때문으로 판단된다.

##### 3.1.2. 가공경화지수의 변화

전위의 움직임에 의해서 가공경화가 발생하기 때문에 가공경화지수를 측정한 결과를 그림 2에 나타내었다. 가공경화지수는 냉간가공에 의해서 약 1/2 정도 감소하였다. 이와 같은 결과는 냉간가공에 의해서 전위의 움직임이 감소하였다는 것을 간접적으로 나타내고 있다.

##### 3.1.3. 응력완화의 변화

300°C와 600°C에서 응력완화시험을 한 결과를 그림 3에 나타내었다. 응력완화시험을 3단계로 수행하였는데 우선 항복응력 근방에서와 항복응력과 최대응력 중간부분에서 10분간 멈추어서 그때의 응력의 변화를 관찰한 것이다. 응력완화가 300°C에서는 냉간가공에

의해서 크게 증가하지는 않지만 600°C에서는 약 3배 정도 증가하는 경향을 나타내었다. 300°C와 600°C 모두 변형이 증가할수록 응력완화는 증가하는 경향을 나타내었다. 이와같은 원인은 냉간가공에 의해서 증가된 전위밀도가 감소하기 때문으로 판단된다.

## 3.2. 피로시험

### 3.2.1. 저주기 피로수명의 변화

냉간가공이 저주기 피로수명에 미치는 영향을 그림 4에 나타내었다. 상온에서는 냉간가공에 의해서 피로수명이 약간 증가하지만 300°C와 600°C에서는 오히려 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

### 3.2.2. 포화응력의 변화

모든 온도에서 냉간가공에 의해서 포화응력이 증가하는 것을 그림 5에 나타내었다. 냉간가공을 하지 않은 경우 초기에 경화가 발생한 후 포화되었다가 파단이 발생하는 반면 냉간가공을 하면 초기에 약간의 경화가 발생한 후 계속 연화되다가 파단이 발생하였다.

냉간가공을 하지 않은 경우 초기에 발생한 경화는 온도가 증가하면 증가하는 경향을 나타내었는데 이러한 경화는 동적변형시효에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다[2]. 냉간가공을 한 경우 초기에 경화가 크게 발생하지 않는데 이러한 현상은 인장시험에서 serration의 발생이 억제된다는 결과와 일치한다.

### 3.2.3. 피로시험후 소성유기마르텐사이트의 변화

인장시험 후와 변형범위 1%에서 저주기 피로시험을 수행한 후 소성유기마르텐사이트 함량을 측정된 결과를 표 2에 나타내었다. 인장시험의 경우 소성유기마르텐사이트가 냉간가공의 의해서 감소하는 경향을 나타내었고 온도가 증가하면 급격히 감소하였다. 저주기 피로시험의 경우는 인장시험의 경우보다 소성유기마르텐사이트 량이 감소하였고, 냉간가공에 의해서 역시 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 인장시험과 저주기 피로시험에서 강도가 증가하는 것이 소성유기 마르텐사이트 보다는 전위밀도의 증가때문으로 판단된다.

### 3.2.4. 전위구조의 변화

변형범위 1%에서 시험후 전위구조를 관찰한 것을 그림 6에 나타내었다. 전위구조상으로 냉간가공과 관계없이 planar한 구조가 관찰되었고 냉간가공을 하지 않은 경우는 cell 형태에 가까운 형태를 나타내기도 하였지만 특별한 전위구조의 변화는 관찰되지 않았다.

### 3.2.5. 잔류응력의 영향

피로시험의 경우 표면에 압축잔류응력이 존재하면 피로수명이 증가하는 것으로 알려져 있다. 냉간가공은 표면에 압축잔류응력을 발생시키기 때문에 피로수명 증가에 기여 할 수 있다. 그러나 이러한 잔류응력은 온도가 증가하면 감소하기 때문에 고온에서 그 영향은 감소할 것으로 판단된다. 따라서 상온에서 냉간가공에 의해서 피로수명의 증가에 잔류응력이 일정한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.2.6. 냉간가공에 의한 저주기 피로수명의 변화 원인 분석

저주기 피로수명에 영향을 미치는 것은 전위구조, 소성유기마르텐사이트, 결정립 크기, 동적변형시효, 잔류응력 등이 있다. 냉간가공된 시편은 결정립의 크기가 감소하였으므로 피로수명 증가에 영향을 미치는데 결정립 크기 감소에 의한 피로수명의 증가는 10% 미만인 것으로 알려져 있다[3]. 동적변형시효는 고온 저주기 피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있는데[4] 냉간가공에 의해서 감소하였다. 소성유기마르텐사이트는 저주기 피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있는데[5] 냉간가공에 의해서 소성유기마르텐사이트함량이 감소하였지만 고온에서는 소성유기마르텐사이트 함량이 급격히 감소하므로 소성유기마르텐사이트가 고온 피로수명에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 냉간가공에 의해서 표면에 압축잔류응력이 발생 할 수 있는데 압축잔류응력은 피로수명을 증가시키는 경향이 있으므로[6] 상온에서 냉간가공에 의한 피로수명 증가에 기여 하지만 고온에서는 잔류응력이 감소되므로 고온 피로수명에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 전위구조는 냉간가공에 의해서 크게 변화되지 않는 것으로 관찰되었기 때문에 전위구조에 의한 피로수명 변화는 적을 것으로 판단되지만 냉간가공에 의해서 계속 연화가 발생하는 것으로부터 냉간가공에 의해 발생한 높은 전위밀도가 피로수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

따라서 냉간가공에 의한 상온에서의 피로수명의 증가는 결정립 크기의 감소, 소성유기마르텐사이트 함량의 감소, 전위의 재배열에 의한 연화, 잔류응력 등의 상호작용에 의해서 발생한 것으로 판단된다. 고온에서는 냉간가공을 하지 않은 경우 동적변형시효가 발생하고 결정립이 증가하는데도 불구하고 피로수명이 증가하는 원인은 냉간가공에 의해서 발생된 높은 전위밀도가 온도의 증가로 인해서 재배열되어 추가적인 피로시험에 의해서 전위의 재배열이 어려워져서 높은 강도를 발생시키기 때문으로 판단된다.

## 4. 결론

냉간가공한 316 스테인리스 강으로 고온 인장시험과 저주기 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉간가공은 강도는 증가시키지만 연신율은 감소시켰다. 냉간가공에 의해서 가공경화 지수는 감소하였고 응력완화는 증가하였다.
2. 저주기 피로수명은 상온에서는 냉간가공에 의해서 증가하였지만 300°C 이상의 고온에서는 약간 감소하였다. 피로강도는 냉간가공에 의해서 증가하였다.
3. 소성유기 마르텐사이트 함량은 냉간가공한 경우가 감소하였다.

## 후 기

연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기사업중 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 과제에서 수행한 결과의 일부분입니다.

## 참 고 문 헌

1. W.S. Ryu : KAERI/AR-487/98
2. D.W. Kim, W.S. Ryu, J.H. Hong, I.H. Kuk, and S.K. Choi : Journal of Nuclear Materials, vol. 254, 2-3 (1998) 226.
3. D.W. Kim, W.G. Kim, J.H. Hong, and W.S. Ryu : Proc. 14th Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Seoul, D.I. Kwon, editors, 2000, p355.
4. V.S. Srinivasan, R. Sandhya, K.B.S. Rao, S.I. Mannan, and K.S. Raghavan : Int. J. Fatigue 13(6), (1991) 471.
5. G. Baudry and A. Pineau : Mat. Sci. and Eng., 28 (1977) 229.
6. G.E. Dieter : Mechanical Metallurgy, p409, McGraw-Hill, New York, 1986

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	GS( $\mu$ m)
AS	0.05	0.58	1.26	0.032	0.001	16.77	10.75	2.06	65
CW	0.06	0.41	1.51	0.030	0.001	17.03	10.83	2.20	48

Table 2. Strain induced martensite

	After tensile test		After LCF test at $\Delta \epsilon_t=1.0\%$	
	As-receive	Cold work	As-receive	Cold work
RT	13.5	6.72	2.7	1.58
300°C	1.01	0.51	0.7	0.25
600°C	0.49	0.32	–	–

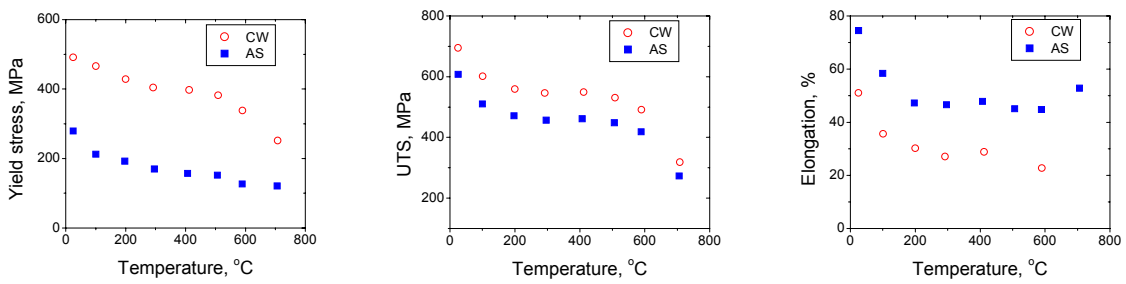


Fig. 1. Tensile properties of as-receive and cold worked type 316 stainless steel.

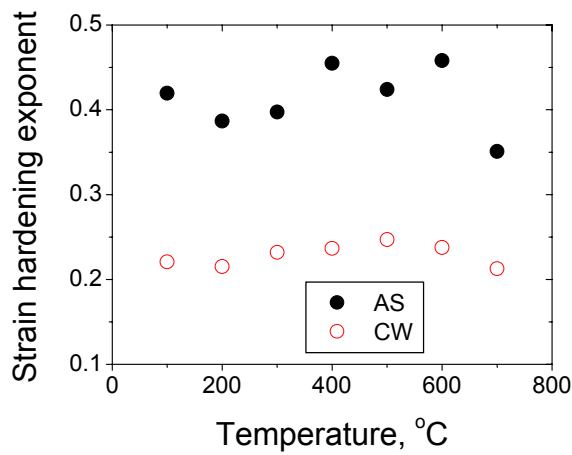


Fig. 2. Strain hardening exponent with cold work for type 316 stainless steel.

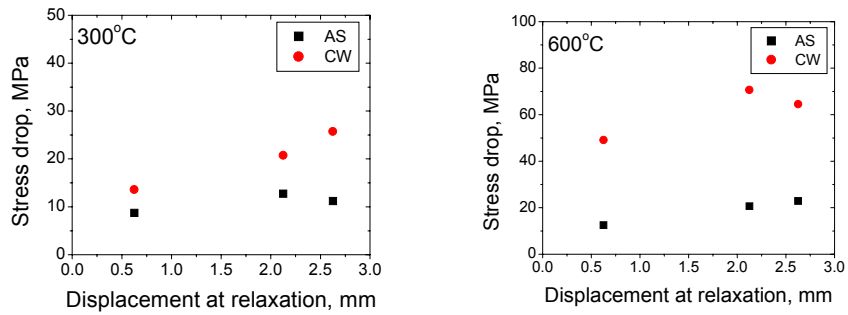


Fig. 3. Stress relaxation with cold work for type 316 stainless steel.

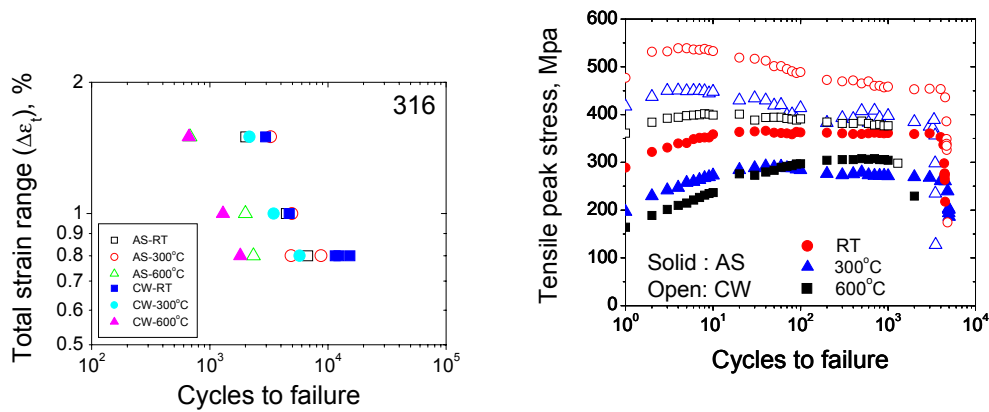


Fig. 4. LCF life with cold work for type 316 stainless steel.

Fig. 5. Saturation stress at  $\Delta \epsilon_t=1.0\%$  with temperature and cold work for 316 stainless steel.

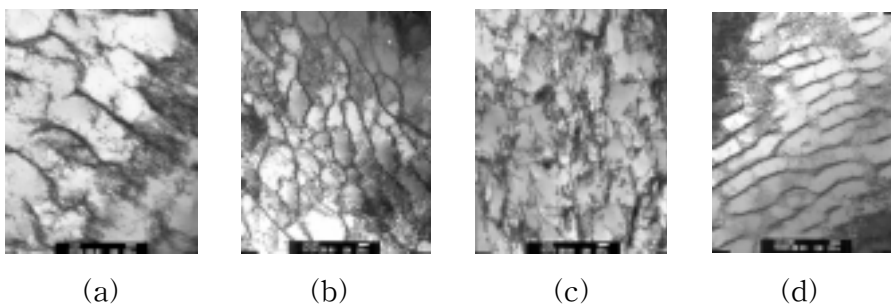


Fig. 6. Dislocation structures after LCF test at  $\Delta \epsilon_t=1.0\%$  for 316 stainless steels : (a) As-receive at RT (b) Cold worked at RT (c) As-receive at 300°C (d) Cold worked at 300°C.