

## 질소첨가 316L 스테인레스 강에서 고온 저주기피로시 발생하는 경화거동

김대환, 류우석, 김영철, 홍준화  
한국원자력연구소

최시경  
한국과학기술원

### 요 약

질소의 함량을 0.04%~0.15% 까지 변화시킨 316L 스테인레스 강으로 공기 중에서 저주기 피로시험을 수행하였다. 전체변형범위 1%, 변형속도  $2 \times 10^{-3}$ /sec, 삼각파로 상온 ~ 600°C 온도범위에서 시험을 수행하였다. 상온에서는 사이클이 진행됨에 따라서 연화가 계속해서 발생하지만 온도가 증가하면 초기에 경화가 발생한다. 피로시험 초기에 경화되는 정도와 saturation 응력은 온도가 증가하면 증가한다. 이러한 경화현상은 동적변형시효에 의해서 발생하는 것으로 판명되었다. 질소를 첨가하면 강도는 증가하지만 경화는 감소되었다. 질소에 의한 경화의 감소는 질소가 동적변형시효를 억제하기 때문이다.

### 1. 서론

고속로의 일차냉각경계의 구조재료는 600°C에 이르는 고온 운전 중에 발생하는 가열과 냉각에 의한 온도구배에 의해 열응력이 반복해서 발생되어 저주기 피로손상을 일으키게 된다. 반복 열응력에 의한 저주기 피로는 고온 구조재료의 주요 파손원인 중의 하나이므로 고온구조재료 설계시에는 반드시 고려되어야 한다. 저주기 피로수명에 영향을 미치는 인자로서는 온도, 변형범위, 변형속도, 환경, wave shape 등이 있다. 이러한 인자들 중에서 온도가 증가하면 상온에서는 발생되지 않는 산화, 크리프, 회복 및 동적변형시효 등과 같은 여러 현상들이 나타나 매우 복잡한 양상을 띄게 되므로 저주기 피로손상에는 온도와 환경의 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있다.

고온 강도를 향상시키기 위하여 질소를 첨가한 316L 스테인레스 강은 온도가 증가하면 피로수명이 감소하는 것으로 알려져 있다[1]. 이러한 현상은 피로시에 발생하는 경화현상과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 질소가 피로시의 경화거동에 미치는 영향을 평가하여야 함에도 불구하고 여기에 대한 자료가 아직 보고되고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 질소를 첨가한 316L 스테인레스 강으로 피로시험을 수행하여 고온 피로시에 나타나는 경화거동을 고찰하고 질소가 경화거동에 미치는 영향을 살펴보자 한다.

## 2. 실험방법

실험에 사용된 스테인레스 강은 0.04 ~ 0.15% 범위의 질소를 첨가한 316L 강으로 그 화학조성은 표1과 같다.

표 1. 피로시험에 사용된 시편의 화학조성 (wt%)

시편번호	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Fe
N04	0.018	0.67	0.95	12.21	17.78	2.36	0.042	Bal.
N10	0.019	0.70	0.97	12.46	17.23	2.38	0.103	Bal.
N15	0.020	0.67	0.96	12.19	17.88	2.41	0.151	Bal.

시험편은 진공유도 용해하여 15mm 까지 열간압연 한 후 압연방향이 길이 방향이 되도록 채취되었고 gage length가 8 mm 이고 직경이 7 mm인 봉상시편으로 가공되었다. 열처리는 1100 °C, Ar 분위기에서 1시간 유지하여 수냉한 용체화 상태이다. 시험온도 범위를 상온에서 600°C까지 변화시켰고 시편의 gage length에서 온도편차를 ±2 °C 이내로 제어하였으며 온도의 균일함을 얻기 위하여 시험온도에서 1시간 유지후 공기중에서 시험을 수행하였다. Instron 8562를 사용하여 완전 대칭인 삼각파로서 변형범위 ±0.5%와  $2 \times 10^{-3}$ /sec의 변형속도로 strain 제어로서 시험하였다. 피로수명은 saturation 응력의 75% 되는 사이클로 정의하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

그림 1에는 각 질소량과 온도에서 사이클이 진행됨에 따라 응력이 변화하는 것을 나타내었다. 각 온도에서 질소 첨가에 의해서 응력은 증가하였으나 전체적인 곡선의 모양은 비슷하였다. 상온에서는 사이클이 진행됨에 따라서 연화가 계속해서 발생하지만 고온에서는 초기에 경화가 발생한 후 연화가 발생되거나 saturation이 발생한다. 경화가 발생하는 정도를 최대응력과 초기응력의 차이로써 판단할 때 경화되는 양은 그림 2에서 보듯이 온도가 증가하면 증가하는 경향을 나타낸다. Saturation 응력은 온도가 증가하면 그림 3에서와 같이 증가하는 경향을 나타내었다.

재료의 강도증가는 결정립 미세화, 변형시효발생, 고용강화, 미세 석출물의 석출, 점결합 생성, martensite 존재, 가공경화 등에 의해서 발생된다. 응력과 사이클의 곡선에서 초기의 경화는 상온에서는 발생되지 않고 온도가 증가하면 발생하는 것으로 보아 온도와 어떤 관계가 있는 기구이다. 그러나 적층결합에너지는 온도가 증가하면 증가하여 교차슬립이 조장되어 경화가 감소하는 경향을 나타내게 되므로 응력변화 곡선상의 초기의 경화 거동에는 전위의 상호작용에 의한 가공경화가 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 고용강화효과는 온도에 따라 급격히 감소한 후 약 300°C 이상의 온도에서는 거의 일정한 값을 갖는 것으로 알려져 있다[2]. 또한 결정립 강화는 온도에 따라서 거의 영향이 없는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 위에서 언급한 기구들 중에서 온도와 밀접한 관계가 있는 것은 석출물의 석출과 변형시효이다.

용체화 처리한 시편은 600 °C에서 석출물이 석출할 수 있으며, 피로시험시의 응력곡

선에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 탄화물이 석출하는 시간은 316L 스테인레스 강의 경우 600 °C 에서 시효시킨 경우 대략 50시간이다. 하중이 가해지면 탄화물이 석출하는 시간이 감소하는데 20%의 냉간가공을 하였을 경우 탄화물이 석출하는 시간은 약 3시간 정도로 감소하게 된다. 본 연구의 경우 600 °C에서 시험시간이 약 3시간이고 변형률이 1% 이므로 석출물의 석출조건을 만족시키지 않을 것으로 판단되지만 석출물의 유무를 위하여 TEM의 관찰을 수행하였다. 그 결과 탄화물의 석출은 관찰할 수 없었으며 응력 변화 곡선에 탄화물은 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

동적변형시효가 저주기 피로에 미치는 영향을 평가하기 위하여 인장시험을 수행하여 동적변형시효가 발생하는 온도구간을 그림 4에 나타내었다. 동적변형시효는 변형속도가  $2 \times 10^3 / \text{sec}$  일때 약 350~650 °C의 범위에서 발생되고 질소는 동적변형시효가 발생하는 온도구간을 고온 쪽으로 이동시키는 것으로 나타났다. 피로시험에서의 동적변형시효가 발생하는 온도는 인장시험의 온도보다 낮은 온도에서 발생한다고 Tzuzaki[5]가 보고한바를 고려하면 경화가 발생하는 온도는 동적변형시효가 발생하는 온도구간과 일치한다.

본 피로실험에서는 hysteresis loop 상에는 strain aging의 특성인 serration이 발생되지 않았지만 동적변형시효의 발생을 확인하기 위하여 변형속도를 변화시키면서 피로시험을 수행한 결과 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 변형속도를  $1 \times 10^2 / \text{sec}$ ,  $2 \times 10^3 / \text{sec}$ ,  $2 \times 10^4 / \text{sec}$ 의 속도로 감소하면 그때의 인장응력 폭은 증가하고 피로수명은 감소하는 것으로 나타났다. 즉 strain rate sensitivity가 부(negative)의 값을 가진다. 이것은, Beukel[4]의 정의에 의하면, 동적변형시효가 발생하는 것으로 생각할 수 있으므로 비록 hysteresis loop 상에서는 serration이 발생되지 않더라도 전위와 solute atom사이에는 어떠한 상호작용이 있음을 즉 동적변형시효가 발생하는 것을 의미한다.

400 °C이하의 온도에서는 경화되는 정도가 적은 반면 온도가 증가하면 경화가 많이 되는 것은 저온에서는 Cr이 전위주위로 확산하기가 어렵지만 온도가 증가하면 확산이 용이하기 때문에 동적변형시효의 영향에 의해서 온도가 증가할수록 경화가 많이 된다고 생각된다. 따라서 피로시험초기에 경화가 발생하는 것은 동적변형시효의 영향으로 결론되어진다.

질소를 첨가하면 경화가 되는 정도가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 원인으로서는 그림 4에서 처럼 질소는 동적변형시효가 발생하는 온도구간을 고온 쪽으로 이동시키며 질소가 동적변형시효를 지연시키기 때문에[6] 경화가 억제되는 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

질소를 첨가한 316L 스테인레스 강으로 고온 저주기 피로시험을 수행한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 응력-사이클 곡선으로 부터 상온에서는 사이클이 진행되면 경화현상 없이 연화현상이 나타나지만 온도가 증가하면 초기에 경화되는 현상이 나타난다.
2. Hysteresis loop 상에서는 serration이 발생되지는 않았지만 경화가 나타나는 온도 범위와 동적변형시효가 발생하는 온도범위가 일치하고, 피로시험에서 strain rate sensitivity가 부의 값을 가지며 피로시험시 초기의 경화와 saturation 응력이 온도

에 따라 증가하는 것 등으로부터 피로시험 초기의 경화는 동적변형시효에 의해서 발생하는 것으로 판명되었다.

3. 질소를 첨가하면 응력-사이클 관계곡선의 형태는 변화되지 않지만 질소가 동적변형시효를 억제하기 때문에 작용되는 응력은 증가하고 초기의 경화는 감소하였다.

## 참고문헌

1. V. S. Srinivasan, R. Sandhya, K. Bhanu, Sankara Rao, S. L. Mannan, and K. S. Raghavan, *Int. J. Fatigue*, 13, No. 6 (1991) 471.
2. M.L.G. Byrnes, M. Grujicic, and W. S. Owen, *Acta Metall.* vol. 35, No.7 (1987) 1853.
3. L. A. Norstrom, *Metal Science*, June (1977) 208.
4. Van den Beukel, *Acta Metall.*, 28 (1980) 965.
5. Kaneaki Tsuzaki, Takashi Hori, Tadashi Maki, and Imao Tamura, *Mat. Sci. Eng.*, 6 (1983) 247.
6. 김대환, 류우석, 김영철, 홍준화, 최시경, 한국원자력학회, '96춘계 학술발표대회,(1996) 59.

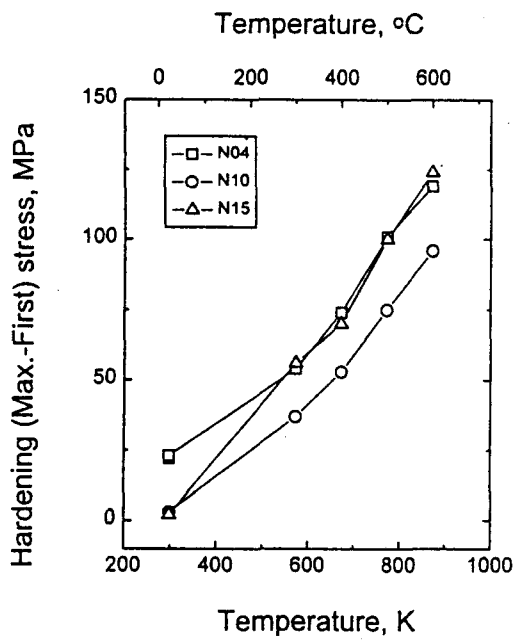


Fig. 2. The stress change from first to maximum cyclic stress with temperature.

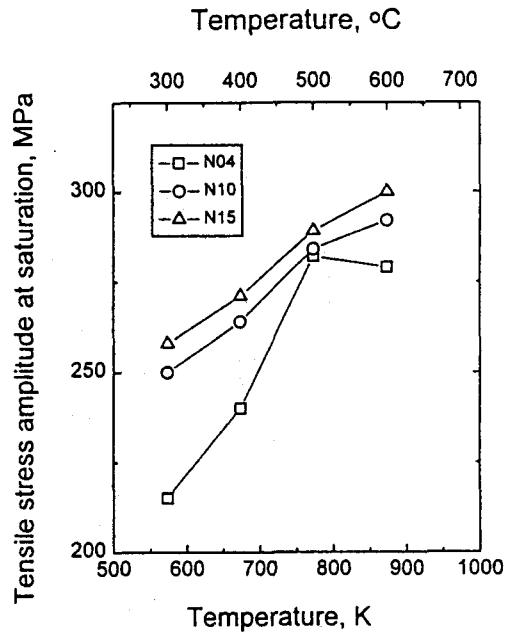


Fig. 3. Variation of cyclic saturation stress with temperature.

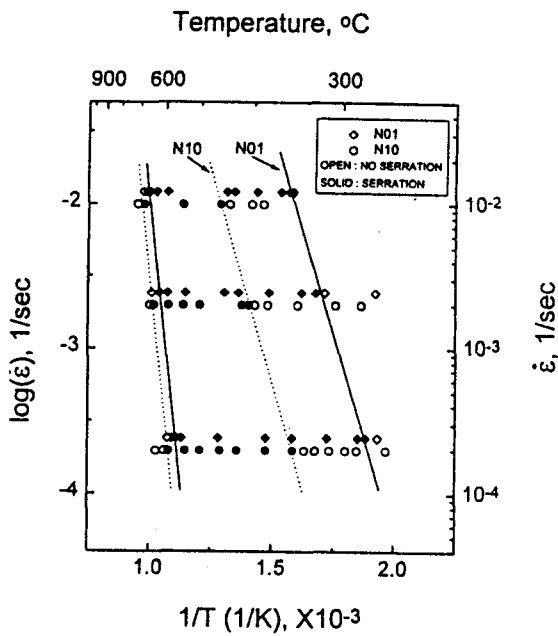


Fig. 4. Test conditions where serrations occurred during tensile tests of N01 and N10.

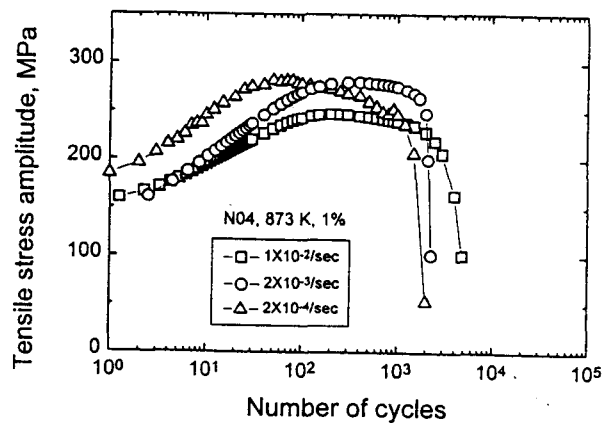
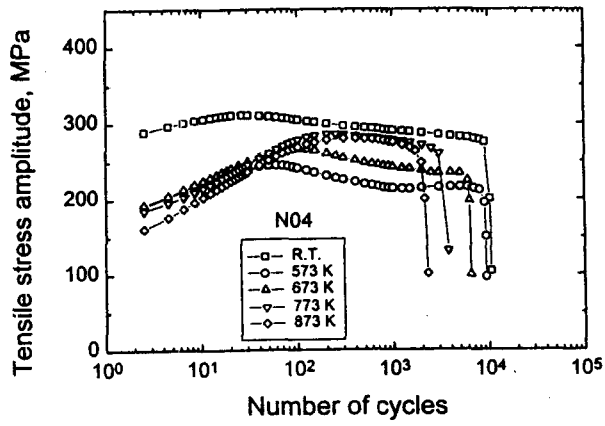
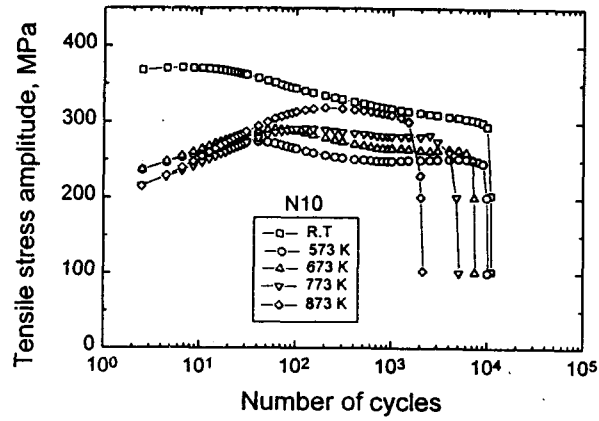


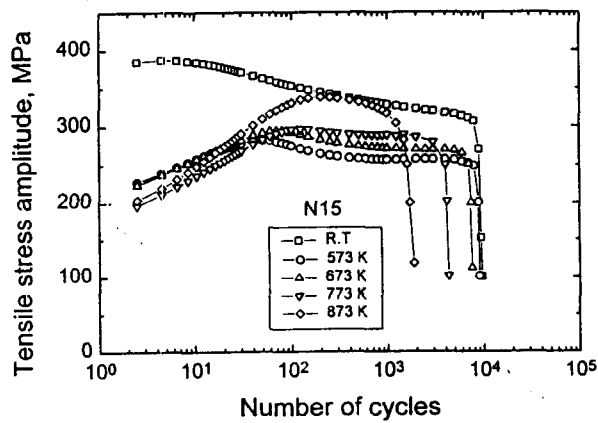
Fig. 5. Strain rate dependence of low cycle fatigue test at 873 K for N04.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Temperature dependence of the cyclic tensile stress amplitude of (a) N04, (b) N10, (c) N15.