

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Type 316L 스테인리스 강의 고온 피로특성에 미치는 탄소와 질소의 영향

Effect of Carbon and Nitrogen on High Temperature Fatigue Properties of Type 316L Stainless Steel

김대환, 한창희, 조해동, 류우석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

Type 316L 스테인리스 강을 기준으로 탄소와 질소를 첨가한 316, 316LN 스테인리스 강으로 상온과 600°C에서 저주기 피로시험을 수행하였다. 저주기 피로시험 결과 상온에서는 탄소와 질소를 첨가하면 피로수명이 약간 증가하는 경향을 보였다. 600°C에서는 316은 316L과 비슷한 피로수명을 나타내었지만 316LN은 이들보다 증가하였다. 피로강도는 상온에서 316은 316L과 비슷하고 316LN 보다는 감소하였고, 600°C에서는 316과 316LN은 316L 보다 증가하였다. 피로시험후 소성유기 마르텐사이트 함량은 탄소와 질소를 첨가하면 감소하였지만 탄소를 첨가한 경우가 질소를 첨가한 경우보다 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 전위구조는 탄소와 질소를 첨가하지 않으면 cell 형태를 나타내었지만 탄소와 질소를 첨가하면 planar한 형태를 나타내었다. 또한 탄소의 함량이 낮은 경우는 결정입계에 탄화물이 관찰되지 않았지만 탄소의 함량이 높은 경우는 결정입계에 탄화물이 관찰되었다.

Abstract

LCF was conducted at RT and 600°C for type 316L (low carbon and low nitrogen content), 316 (high carbon and low nitrogen content), 316LN (low carbon and high

nitrogen content) stainless steel. LCF life increased with the addition of carbon and nitrogen at RT but was greater in 316LN than 316 and 316L at 600°C. LCF strength increased with the addition of nitrogen but did not with the addition of carbon at RT. LCF strength increased with the addition of carbon and nitrogen at 600°C. Strain induced martensite was decreased with the addition of carbon and nitrogen. Dislocation structures were cell for 316L and planar for 316 and 316LN. Carbides were precipitated at grain boundary in 316 but not for 316L and 316LN.

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].

종래의 316 스테인리스강은 강도를 확보한다는 관점에서 탄소량을 0.04% 이상 함유하도록 되어 있었으나 온도가 올라가면 탄화물을 석출시켜서 고온 기계적 특성을 현저히 저하시키므로 최근에는 탄소의 함량을 낮추는 경향이다. 그러나 저탄소 스테인리스 강은 강도저하를 유발하므로 강도를 확보하기 위해서 고용강화효과가 탄소보다 크고 탄화물의 석출을 지연시키는 것으로 알려진 질소를 첨가한 새로운 316LN 스테인리스 강이 개발되고 있다[2-10].

탄소와 질소가 고온 피로특성에 어떠한 영향을 미치는 지를 명확히 규명하기 위하여 탄소와 질소의 함량을 낮춘 316L 스테인리스 강을 기준으로 탄소의 함량을 높이고 질소의 함량을 낮춘 316 강, 탄소의 함량을 줄이고 질소의 함량을 높인 316LN 스테인리스 강으로 피로수명을 측정하여 탄소와 질소가 고온 저주기 피로특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 화학조성과 열처리

실험에 사용된 스테인리스 강의 화학조성을 표 1에 나타내었다. 탄소와 질소의 함량이 낮은 시편 316L을 기준으로 질소의 함량을 일정하게 하고 탄소의 함량을 높인 316, 탄소

의 함량을 일정하게 하고 질소의 함량을 높인 316LN 시편을 진공유도 용해방법으로 제작하였다. 탄소와 질소의 영향을 명확히 관찰하기 위하여 316과 316LN간의 경우 탄소와 질소함량의 합은 일정하게 하였다. 시편은 1100℃에서 1시간 용체화처리하여 수냉하였고, 압연방향이 시편의 길이방향이 되도록 시편을 채취하였다. 이때 결정입의 크기는 316L과 316의 경우가 316LN 보다는 약 2배의 값을 나타내었다.

2.2. 시험방법

저주기 피로시험은 상온과 600℃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 시편의 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℃에서 전해부식시켜 JEOL 200FX를 사용하여 전위구조와 탄화물의 존재를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1. 온도에 따른 피로수명의 변화

상온에서는 316L보다는 316과 316LN의 저주기 피로수명이 약간 증가하는 경향을 나타내었고 600℃에서는 316L과 316이 비슷한 결과를 나타내었지만 316LN은 이들보다 피로수명이 증가하는 결과를 나타내었다.

질소첨가에 의한 피로수명의 증가는 전위구조의 변화, 결정입 크기의 감소, 동적변형 시효의 감소 등에 의한 것으로 알려져 있다[2,3]. 탄소를 첨가한 316의 경우 316L과 결정입 크기는 비슷하고, 전위구조는 316LN과 같고, 동적변형시효는 316L의 경우보다 낮은 온도에서 시작하여 높은 온도까지 발생한다. 따라서 316은 상온에서 전위구조 변화에 의해서 316L보다 피로수명이 증가하여 316LN과 비슷한 결과를 나타내지만 고온에서는 이들 외에 동적변형시효와 탄화물의 석출이 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

3.2. 응력-사이클 곡선

상온에서 316L과 316의 피로강도는 거의 비슷하지만 316LN의 피로강도는 이들보다 증가하였다. 600°C에서는 316L보다 316과 316LN이 피로강도가 증가하였다.

탄소와 질소는 고용강화를 일으키기 때문에 316과 316LN의 피로강도가 316L보다는 증가될 것으로 예측하였으나 상온에서 탄소를 첨가한 316이 316L과 거의 같은 피로강도를 나타내고 질소를 첨가한 316LN은 이들보다 피로강도가 증가하였다. 이와같이 상온에서 질소를 첨가한 316LN의 피로강도가 316L보다 높은 것은 질소에 의한 고용강화, 단범위규칙, 결정입의 미세화에 의한 것으로 보고되고 있다[2-8]. 그러나 상온에서 고용강화를 일으키는 탄소를 첨가한 316의 피로강도가 질소를 첨가한 316LN의 경우보다 감소하고 316L과 거의 비슷한 경향을 나타내는 원인은 피로시험후 316L이 316과 316LN보다 소성유기 마르텐사이트 함량이 많으므로 이것이 피로강도에 영향을 미쳐 316L의 피로강도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 600°C에서는 316L보다 316 및 316LN의 피로강도가 증가하는 원인은 질소에 의한 강도의 증가는 단범위규칙과 결정입 미세화가 고온에서도 유효한 것으로 알려져 있고, 탄소에 의한 강도의 증가는 고온에서는 고용강화와 소성유기 마르텐사이트의 영향을 기대하기 어렵기 때문에 탄소함량의 증가로 인하여 316이 316L보다 동적변형시효가 활발히 발생하기 때문으로 판단된다.

3.3. 소성유기 마르텐사이트의 변화

상온에서 변형범위 1%에서 피로시험후 소성유기 마르텐사이트를 측정된 결과 316L이 316과 316LN의 경우보다 크게 높았고 316과 316LN은 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 600°C에서는 316L, 316, 316LN 모두 소성유기 마르텐사이트가 검출되지 않았다.

소성유기 마르텐사이트도 피로강도의 증가에 기여할 수 있는데 316L에서 소성유기 마르텐사이트가 가장 높았기 때문에 316L과 316의 피로강도가 비슷하게 나오는데에 기여할 수 있다고 판단된다. 또한 소성유기 마르텐사이트가 피로균열의 생성장소로 작용하여 피로수명을 감소시킬 수 있는데 상온에서는 소성유기 마르텐사이트가 증가하면 피로수명이 감소하지만 고온에서는 소성유기 마르텐사이트가 검출되지 않았음에도 불구하고 316L의 피로수명이 가장 낮은 것으로부터 상온에서는 전위구조의 변화외에 소성유기 마르텐사이트가 영향을 미치지 않지만 고온에서는 소성유기 마르텐사이트보다는 동적변형시효가 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.4. 전위구조의 변화

316L은 cell 형태의 전위구조를 나타내었지만 316과 316LN은 planar 형태가 나타나고 있고 이러한 구조는 상온과 600°C에서 모두 나타났다.

일반적으로 전위구조가 cell보다는 planar일때가 더 피로수명이 증가하는 것으로 알려져 있다. 탄소와 질소를 첨가하면 전위구조가 planar 형태로 변화되므로 상온의 피로수명 결과와는 부합된다. 그러나 600℃에서는 316은 전위구조가 planar한 형태를 나타냄에도 불구하고 316L과 비슷한 피로수명을 나타내었는데 이러한 원인은 피로수명이 고온에서는 전위구조외에 동적변형시효에도 영향을 받기 때문으로 판단된다.

3.5. 결정입계 탄화물의 관찰

600℃에서 316L과 316LN의 경우는 결정입계에 탄화물이 관찰되지 않았지만 316의 경우는 결정입계에서 탄화물이 관찰되었다.

316이 316L과 비교해서 상온에서는 피로수명이 증가하지만 600℃에서는 비슷한 결과를 나타내는 것이 316에서 동적변형시효가 활발히 발생하기도 하지만 결정입계에 석출한 탄화물이 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

Type 316L 스테인리스 강을 기준으로 탄소와 질소를 첨가한 316, 316LN 스테인리스 강으로 상온과 600℃에서 저주기 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로수명은 상온에서는 316L 보다 316과 316LN이 증가하였지만 316과 316LN은 거의 같은 값을 나타내었고 600℃에서는 316L과 316이 비슷하지만 316LN은 이들보다 증가하였다.
2. 전위구조는 316L은 cell, 316과 316LN은 planar 형태를 나타내었고, 600℃에서 결정입계 탄화물이 316L과 316LN에서는 관찰되지 않았지만 316에서는 관찰되었다.
3. 소성유기 마르텐사이트는 상온에서는 316L이 316과 316LN보다 크게 높았지만 600℃에서는 소성유기 마르텐사이트가 검출되지 않았다.

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. J.W. Simmons : Mater. Sci. Eng., A207 (1996) 159.
3. M. L. G. Byrnes, M. Grujicic and W. S. Owen : Acta Metall., 7 (1987) 1853.
4. L. A. Norstrom : Metal Science, June (1977) 208.
5. E. Werner : Mater. Sci. Eng., A101 (1988) 93.
6. J. O. Nilsson : Fatigue Eng. Mater. Struct., vol. 7, No.1 (1984) 55.
7. R. Taillard and J. Foct : Proc. High Nitrogen Steels Conf., J. Foct and A Hendry (eds.), Lille France, May 18-20, 1988, The Institute of Metals, London (1989) p387.
8. J. B. Vogt, J. Foct, C. Regnard, G. Robert and J. Dhers : Met. Trans., vol. 22A, (1991) 2385.
9. T. Takemoto, K. Mukai and K. Hoshino : Trans. ISIJ, vol. 26 (1986) 337.
10. S. Degallaix, G. Degallaix and J. Foct : ASTM STP 942 (1988) 798.

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	C+N	GS(μm)
316L	0.018	0.67	0.95	0.007	0.002	17.78	12.21	2.36	0.042	0.060	100
316	0.058	0.47	1.05	0.024	0.002	17.78	12.15	2.35	0.043	0.101	98
316LN	0.019	0.70	0.97	0.007	0.002	17.23	12.46	2.38	0.103	0.122	47

Table 3. Strain induced martensite after fatigue test at 1.0%

	316L	316	316LN
RT	1.47	0.33	0.27
600°C	-	-	-

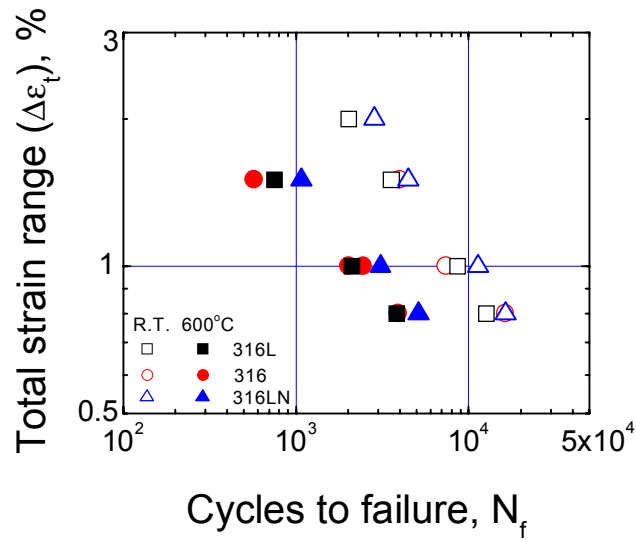


Fig. 1. Low cycle fatigue life with temperature for 316L, 316 and 316LN stainless steel

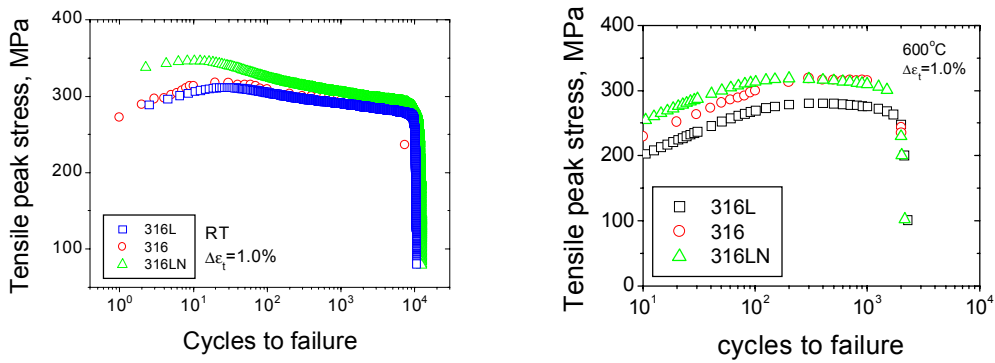


Fig. 2. Fatigue strength with temperature at 1.0% total strain for type 316L, 316 and 316LN stainless steel

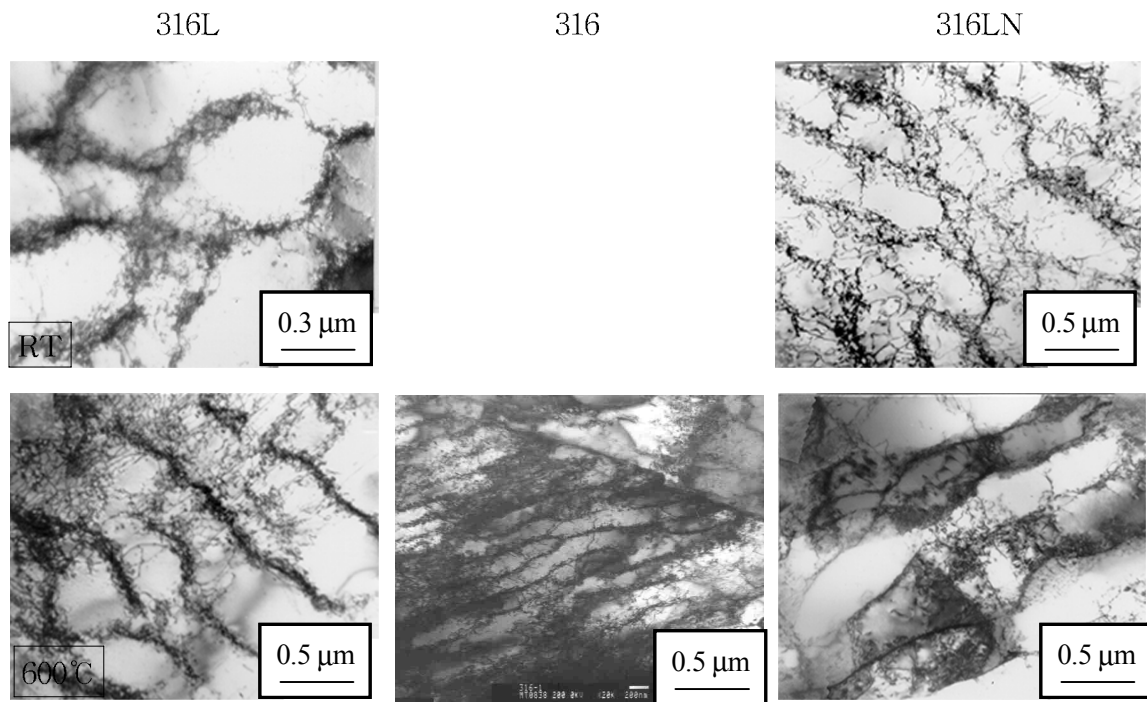


Fig. 3. Dislocation structures after LCF test at $\Delta\varepsilon_t=1.0\%$ for 316L, 316, 316LN stainless steels.