

오스테나이트 스테인리스 강의 고온 저주기 피로특성

Properties of High Temperature Low Cycle Fatigue in Austenitic Stainless Steel

김대환, 한창희, 류우석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

오스테나이트 스테인리스 강인 304와 316으로 상온과 300°C에서 인장 및 피로시험을 수행하였다. 인장강도와 연신율은 온도가 증가하면 감소하는 경향을 나타내었고 피로수명은 온도가 증가하면 증가하는 경향을 나타내었다. 304보다는 316의 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었다. 304와 316 모두 전위구조는 온도에 따라서 큰 변화없이 cell과 planar가 섞여 있는 형태를 나타내었다. 소성유기 마르텐사이트는 온도가 증가하면 감소하는 경향을 나타내었고 304보다는 316이 소성유기 마르텐사이트가 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 300°C에서 피로수명이 증가에는 소성유기 마르텐사이트의 함량이 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

Abstract

Tensile and fatigue tests were conducted at R.T. and 300°C for type 304 and 316 stainless steel. Tensile strength and elongation decreased and fatigue life increased with temperature for both type 304 and 316 stainless steel. Fatigue life of type 316 stainless steel was longer than fatigue life of type 304 stainless steel. Dislocation structures were mixed with cell and planar at R.T. and 300°C for both type 304 and 316 stainless steel. Strain induced martensite of type 316 stainless steel was less than that of type 304 stainless steel and decreased with temperature. It is considered that strain induced martensite is an important factor to increase fatigue life at 300°C.

1. 서론

경수로의 노내구조물은 부식을 고려하여 오스테나이트 스테인리스 강이 사용되어지고 있다. 경수로의 가동온도는 약 300℃의 온도에서 약 150기압의 압력으로 가동되어지고 있다. 이와 같은 조건에서 노내구조물은 냉각수의 흐름에 의해서 발생하는 고주기피로 및 온도와 기계적 하중의 변화에 의한 저주기 피로 등이 발생하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 온도가 증가하면 피로수명이 감소하는 것으로 알려져 있는데 노내구조물에 사용되어지고 있는 오스테나이트 스테인리스 강이 경수로 가동온도에서는 피로수명이 감소하지 않거나 오히려 증가한다는 보고가 있다[1-3]. 따라서 본 연구에서는 경수로 가동온도 범위에서 오스테나이트 스테인리스 강의 피로수명을 측정하고 수명변화의 원인이 무엇인지에 대해서 고찰해 보고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용된 오스테나이트 스테인리스 강은 304와 316 스테인리스 상용강으로 그 화학조성을 표 1에 나타내었다. 시편은 1100℃에서 1시간 용체화처리하여 수냉하였고, 압연방향이 시편의 길이방향이 되도록 채취하였다. 시험온도는 상온 및 300℃로 변화시켰고 시험기간중 온도편차를 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이내로 제어하였다. 온도의 균일함을 얻기 위하여 시험온도에서 1시간 유지후 시험을 수행하였다. 인장시험은 평행부가 25 mm, 직경이 6 mm인 봉상시편으로 Instron 4505로 변위제어로서 $2 \times 10^{-3}/\text{s}$ 의 변형속도로 시험하였다. 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.

3. 실험결과 및 토의

3.1. 인장특성

인장강도와 연신율은 온도가 증가하면 감소하는 경향을 그림 1에 나타내었다. 304와 316은 인장강도와 연신율은 거의 같은 값을 나타내었다. 페라이트를 안정화시키는 원소인 Mo를 첨가하면 항복강도는 약간 증가하는 것으로 알려져 있으나[4] 본 실험에서는 Mo를 2% 정도 첨가해도 항복강도에는 거의 영향이 없었다. 316의 경우 300℃에서 최대 인장강도 부근에서 serration 현상이 나타났으나 304의 경우는 serration이 나타나지 않았다. 이 serration은 동적변형시효가 발생하였다는 증거이고 동적변형시효가 발생하면 인장강도는 증가하고 연신율은 감소하는 것으로 알려져 있는데[5] 300℃에서 304와 316의 인장강도와 연신율은 큰 차이가 나지 않았기 때문에 동적변형시효의 영향이 300℃에서는 크지 않음을 알 수 있었다. 동적변형시효가 발생하는 것은 저온에서는 침입형원소가 전위 주위로 이동하여 전위의 움직임을 방해하기 때문으로 알려져 있으므로[5-7] 316의 경우

가 304보다는 탄소의 함량이 약간 많기 때문에 동적변형시효가 발생하는 것으로 판단된다.

3.2. 저주기피로수명의 변화

304 스테인리스 강보다는 316 스테인리스 강의 피로수명이 증가하는 경향을 그림 2에 나타내었다. 상온보다는 300°C에서 피로수명이 증가하였다. 300°C에서의 피로수명 증가는 304가 316보다 컸다. 고온 저주기 피로수명에 영향을 미치는 인자로서는 전위구조, 소성유기 마르텐사이트, 결정입 크기, 동적변형시효, 소성변형 등이 있다.

본 실험에서는 결정입의 크기가 상온과 300°C에서 차이가 나지 않음에도 불구하고 피로수명은 증가하였기 때문에 300°C에서의 피로수명의 증가는 결정입의 크기의 영향은 없는 것으로 판단된다. 또한 316의 경우는 300°C에서 동적변형시효가 발생하였음에도 불구하고 피로수명이 약간 증가하고 304의 경우보다 피로수명의 증가가 작은 것은 300°C에서 피로수명 증가에 동적변형시효가 영향을 미치지 않으므로 판단된다. Alain[2]는 316L 스테인리스 강의 경우 300°C에서 피로수명이 증가하는 원인을 소성변형이 작게 발생하기 때문으로 보고하였는데 본 연구에서는 상온과 300°C에서 소성변형의 변화가 거의 없었기 때문에 소성변형에 의해서 피로수명이 증가하였다는 것으로 보기 어렵다.

변형유기 마르텐사이트 강의 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서는 준안정 오스테나이트계 스테인리스 강과 Fe-C-Mn-Si계 변태유기소성 강을 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 마르텐사이트는 인접한 모상의 가공경화를 촉진하며, 변형후기에는 먼저 변태된 마르텐사이트의 주위에 전위증식이 발생하여 가공경화율을 높여서 궁극적으로 네킹 발생을 높은 변형량 영역으로 이동시키므로 강도와 연성이 동시에 향상된다. 또한 피로균열전파에 미치는 영향은 균열선단에 형성된 변형유기 마르텐사이트가 균열전파 에너지를 흡수하여 동일한 조건에서 변형유기 마르텐사이트 함량이 증가 될 수록 균열전파속도가 감소되는 것으로 보고되고 있다[8-10]. 그러나 변형유기 마르텐사이트의 존재가 피로특성에 미치는 영향에 대해서는 강의 화학조성이나 소성변형량에 따라 서로 상이한 점이 많다. Baudry와 Pineau[11]는 피로시험 중 소성변형에 의해 형성된 변형유기 마르텐사이트는 강의 응력진폭을 증가시키며 증기된 응력진폭에 의해 균열의 생성과 전파속도를 증가시킨다고 하였다. 또한 Chanani와 Antolovich[12]는 균열생성이전에 형성된 마르텐사이트는 균열성장의 우선적 위치로 작용하여 피로특성을 저하시킨다고 보고하였다. Hennessy[13] 등은 균열전파속도는 균열선단에서 마르텐사이트 변태가 발생하면 감소한다고 하였고 이는 균열생성후 형성된 변형유기 마르텐사이트가 균열선단에서 균열전파 에너지를 흡수하여 잔류압축응력을 발생시켜 균열전파속도를 감소시킨다고 하였다. 따라서 소성유기 마르텐사이트 함량의 변화가 피로수명의 변화에 영향을 미치게 될 것이다.

3.3. 포화응력의 변화

상온과 300°C에서 사이클이 진행됨에 따른 응력의 변화를 살펴보면 그림 3과 같다. 인장시험에서와 같이 상온보다는 300°C에서의 응력이 감소하는 경향을 나타내었다. 온도의

증가에 따라서 포화응력이 감소하는 원인은 온도가 증가하면 인장강도가 감소함과 동시에 소성유기 마르텐사이트가 감소하기 때문으로 판단된다.

3.4. 전위구조

적층결합에너지가 높고 낮은 변형범위에서는 교차슬립이 어려우므로 primary 슬립면을 벗어나지 못하여 band나 wall을 형성하지 못하고 planar한 구조를 나타내고 적층결합에너지와 변형범위가 높을 때는 cell 구조를 나타내는 것으로 알려져 있으므로[14-17] 상온과 300°C에서 변형범위가 1%에서 피로시험한 후 전위구조를 관찰한 결과를 그림 4에 나타내었다. 304와 316의 경우 적층결합에너지가 약 30 mJ/m²로 높은 값을 가지고 변형범위가 1%는 높은 변형범위 임에도 불구하고 전위구조는 cell과 planar가 섞여 있는 전위구조를 나타내었고 온도의 증가에 따라서 전위구조의 변화는 없었다.

3.5. 소성유기 마르텐사이트

소성변형이 진행됨에 따라서 소성유기 마르텐사이트가 발생하므로 상온, 1.0%에서 피로시험이 끝난 시편의 표면에서의 소성유기 마르텐사이트를 XRD로서 측정된 결과를 그림 5에 나타내었다. 상온에서는 소성유기 마르텐사이트가 발생하였지만 300°C에서는 소성유기 마르텐사이트를 관찰할 수 없었다. 소성유기 마르텐사이트의 정량적인 평가를 위해 Ferritescope를 사용하여 표면에서의 소성유기 마르텐사이트를 측정된 결과를 표 2에 나타내었다. 온도가 증가하면 급격히 소성유기 마르텐사이트가 감소함을 알 수 있고 304보다는 316의 경우가 소성유기 마르텐사이트가 작다. 이와 같은 결과는 300°C에서 피로수명이 증가하는 경향과 일치하는 것이고, 마르텐사이트에 의해서 피로수명이 감소한다는 보고와도 일치하는 결과를 나타내었다[11,12]. 따라서 300°C에서 저주기 피로수명이 상온보다 증가하는 것은 피로시험중에 발생한 소성유기 마르텐사이트가 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

4. 결론

상용강인 304 및 316 스테인리스 강으로 상온 및 300°C에서 인장시험 및 저주기 피로시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도가 증가하면 인장강도와 연신율은 감소하지만 재질에 따라서는 변화가 없었다.
2. 온도가 상온에서 300°C로 증가하면 피로강도는 감소하고 피로수명은 증가하였다.
3. 전위구조는 온도에 따라서 크게 변화하지 않았고 cell과 planar가 섞여 있었다.
4. 온도가 증가하면 소성유기 마르텐사이트의 함량이 감소하였다.
5. 304보다는 316의 피로수명이 우수하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. V.S. Sieinivasan, R. Sandhya, K. Bhanu Sanakara Rao, S.L. Mannan and K.S. Raghavan, *Int. J. Fatigue*, 13 (1991) 471.
2. R. Alain, P. Violan, and J. Mendez, *Mat. Sci. Eng.*, A229 (1997) 87.
3. M. Gerland, R. Alain, B. Ait Saaף, and J. Mendez, *Mat. Sci. Eng.*, A229 (1997) 68.
4. J.W. Simmons, *Mat. Sci. Eng.*, A207 (1996) 159.
5. S.L. Mannan, K.G. Samuel, and P. Rodriguez, *Trans. Ind. Inst. Metals*, 36 (1983) 313.
6. L.H. de Almeida and P.R.O. Emygdio, *Scripta Metall.*, 31 (1994) 505.
7. S. Venkadesan, C. Phaniraj, P.V. Sicaprasad, and P. Rodriguez, *Acta Metall.*, 40 (1992) 569.
8. S.D. Antolovich and B. Singh, *Metall. Trans.*, 2A (1971) 2135.
9. C. Bathias and R.M. Pelloux, *Metall. Trans.*, 4A (1973) 1265.
10. A.G. Pineau and R.M. Pelloux, *Metall. Trans.*, 5A (1974) 1103.
11. G. Baudry and A. Pineau, *Mater. Sci. Eng.*, A28 (1977) 229.
12. G.R. Chanani and S.D. Antolovich, *Metall. Trans.*, 5A (1974) 217.
13. D. Hennesy, G. Steckel and C. Altstetter, *Metall. Trans.*, 7A (1976) 415.
14. C. Laird, Philip Charsley and Hael Mughrabi, *Mater. Sci. Eng.*, 81 (1986) 433.
15. Karel Obrtlik, Tomas Kruml and Jaroslav Polak, *Mater. Sci. Eng.*, A187 (1994) 1.
16. A. W. Thompson, *Met. Trans.*, 8A (1977) 833.
17. B. Bay, N. Hansen, D. A. Hughes and D. Kuhlmann-Wilsdorf, *Acta Metall. Mater.*, 40 (1992) 205.

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

Spec. ID	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Grain size (μm)
304	0.045	0.04	1.68	0.030	0.001	18.23	8.15	–	61
316	0.050	0.58	1.26	0.032	0.001	16.77	10.75	2.06	65

Table 2. Contents of strain induced martensite measured by Ferritescope (%).

	304	316
R.T.	15.9	5.7
300°C	1.5	0.4

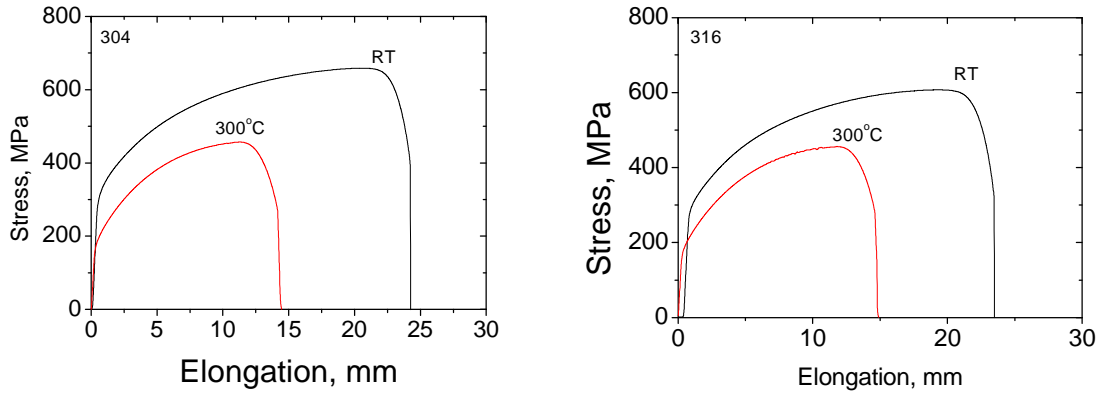


Fig. 1. Tensile curve with temperature for type 304 and 316 stainless steel.

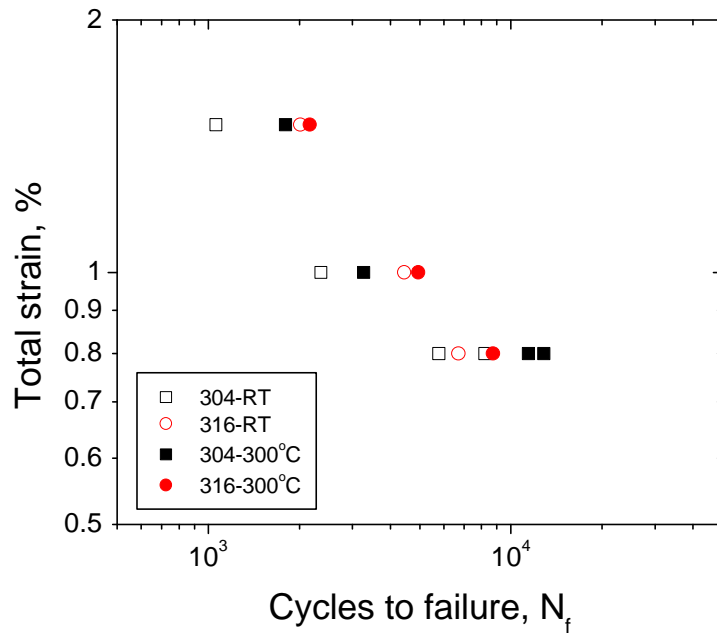


Fig. 2. Low cycle fatigue life with temperature for type 304 and 316 stainless steel.

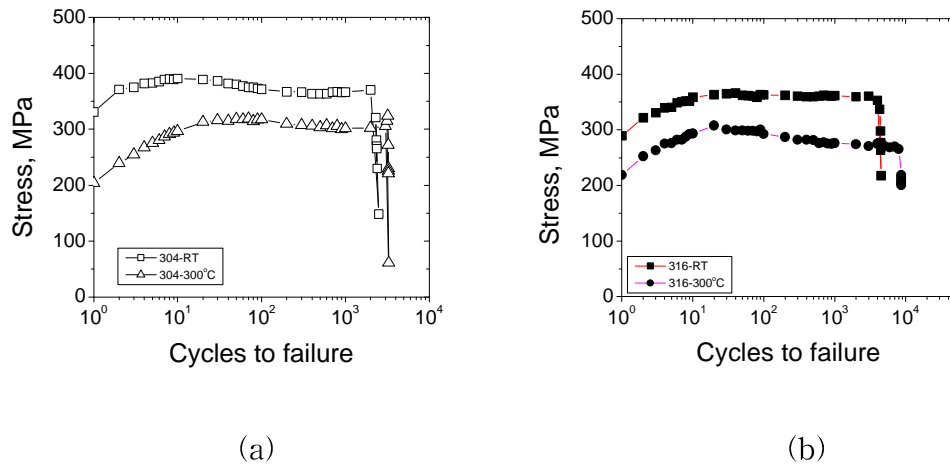


Fig. 3. Cyclic tensile peak stress with temperature for (a) type 304 and (b) 316 stainless steel.

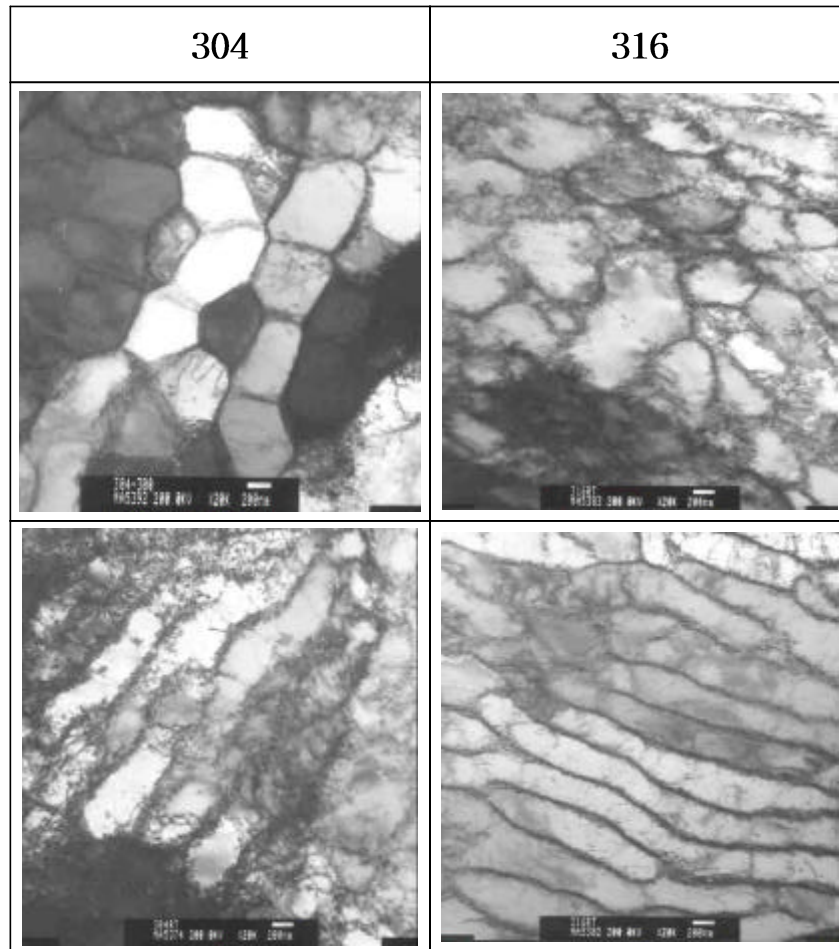


Fig. 4. Dislocation structures tested at $\Delta\varepsilon_t=1.0\%$ and R.T. for type 304 and 316 stainless steel

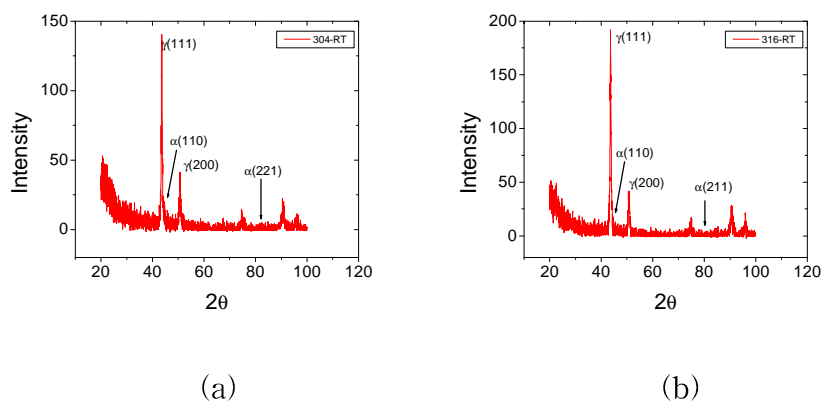


Fig. 5. Strain induced martensite after LCF test at $\Delta\varepsilon_t=1.0\%$ and R.T. for (a) type 304 and (b) 316 stainless steel.