

316LN 스테인레스 강의 피로균열전파 특성에 미치는 질소함량과 온도의 영향

Effect of Nitrogen Content and Temperature on Fatigue Crack Growth Rate of Type 316LN Stainless Steel

김대환, 김우곤, 한창희, 류우석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

상온~600℃의 온도범위에서 질소의 함량을 0.04~0.15%까지 변화시킨 316L(N) 스테인레스 강으로 공기중에서 저주기피로 수명과 피로균열전파속도를 측정하였다. 온도가 증가함에 따라서 저주기피로수명은 감소하였고 피로균열전파속도는 증가하였다. 질소를 첨가하면 저주기피로수명은 증가하였고 피로균열전파속도는 감소하였지만 질소함량이 0.10%에서 가장 우수한 특성을 나타내었다. 피로균열전파속도를 나타내는 Paris 식에서의 지수값은 온도가 증가하면 감소하지만 질소함량을 증가하면 큰 변화가 없는 값을 나타내었다.

Abstract

Low cycle fatigue and fatigue crack growth rate was tested at room temperature~600℃ in the air environment for type 316L(N) stainless steel containing different nitrogen content from 0.04% to 0.15%. Low cycle fatigue life decreased but fatigue crack growth rate increased with increasing temperature. Low cycle fatigue life increased but fatigue crack growth rate decreased with the addition of nitrogen. The 0.10% nitrogen content was the most resistant to low cycle fatigue and fatigue crack growth rate. The n value of Paris's law decreased with increasing temperature and did not greatly change with the addition of nitrogen.

1. 서론

액체금속로의 일차경계 재료는 고온 특성을 고려하여 316LN 스테인레스 강이 사용되고 있는데 첨가된 질소는 인장강도 및 크리프 파단시간을 증가시킬 뿐만 아니라 고온 저주기 피로수명도 증가시키는 것으로 보고되고 있다[1-9]. 고온에서 주요 파괴기구 중의 하나인 피로파괴 현상은 피로균열이 생성되어서 전파되는 과정을 통하여 일어나는데 피로균열전파에 소요되는 사이클이 피로수명의 많은 부분을 차지하기 때문에 질소가 피로수명을 증가시키는 원인을 파악하기 위해서는 316LN 스테인레스 강에 첨가한 질소가 피로균열전파속도에 미치는 영향을 평가하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 질소량을 변화시킨 316LN 스테인레스 강으로 각 온도에서 저주기 피로수명 및 피로균열전파속도를 측정하여 피로균열전파가 피로수명에 미치는 영향 및 적절한 질소함량을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용된 스테인레스 강은 0.04~0.15%범위의 질소를 첨가한 316L(N) 스테인레스 강으로 그 화학조성을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

Spec. ID	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	P(max.)	S(max.)
N04	0.018	0.67	0.95	12.21	17.78	2.36	0.042	0.007	0.002
N10	0.019	0.70	0.97	12.46	17.23	2.38	0.103	0.007	0.002
N15	0.020	0.67	0.96	12.19	17.88	2.41	0.151	0.007	0.002

시편의 제작은 실험실적으로 진공용해하여 15mm까지 열간압연 후 저주기피로시험편은 압연방향이 시편의 길이방향, 피로균열시편은 압연방향이 균열의 길이방향이 되도록 시편을 채취하여 1100℃에서 1시간 아르곤 분위기에서 용체화처리하여 수냉하였다. 시험온도는 상온~600℃로 변화시켰고 시험기간중 온도편차를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내로 제어하였다. 온도의 균일함을 얻기 위하여 시험온도에서 1시간 유지후 Instron 8516으로서 ASTM E606 및 E647에 정하는 바에 따라서 수행하였다. 시편의 형상은 저주기 피로시험의 경우는 평행부 길이가 8 mm이고 직경이 7 mm인 봉상시편이었고 피로균열전파시험의 경우는 그림 1에서와 같이 두께 6 mm, 폭 25 mm, 예비균열길이 1 mm의 C-T 시편을 사용하였다. 저주기 피로시험은 변형범위 1.0%, 변형속도가 $2 \times 10^{-3}/\text{s}$, 삼각파를 사용하여 strain 제어로서 시험을 수행하였고 피로균열전파 시험은 sine파, 10 Hz, R=0.1, $\Delta P=297 \text{ kg}_f$, 하중제어를 사용하여 공기중에서 수행하였다. 피로균열전파속도시험에서 균열의 측정은

DCPD (Direct Current Potential Drop) 방법을 사용하였고 사용된 전류는 5A의 일정전류방법을 사용하였다. 입력 및 출력단자의 위치는 ASTM E647에서 제시된 위치를 사용하였다. 이러한 시편을 전압과 균열의 길이에 대하여 보정한 결과와 ASTM E647에서 제시된 Hick's and Pickard의 관계식과 비교하여 일치함을 확인한 후 Hick's and Pickard의 관계식을 사용하여 균열의 길이를 계산하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1. 저주기피로수명의 변화

316LN 스테인레스 강에서 각 온도에 따라서 저주기 피로수명의 변화를 그림 2에 나타내었다. 300℃ 이상에서 피로수명이 급격히 감소하게 되는데 이러한 원인은 350~700℃의 온도범위에서 동적변형시효가 발생하기 때문으로 보고되고 있다[9]. 동적변형시효는 변형을 위한 응력을 증가시켜 균열선단에 응력을 집중시키기 때문에 저주기피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 고온에서는 동적변형시효 외에 산화도 피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있는데[10] 피로수명에 영향을 주는 산화효과는 크게 세 가지로 나눌 수가 있다. 첫째, 시편표면에 형성된 산화막에 미세균열이 형성되면 국부적인 응력과 변형의 집중장소로 작용하여 피로균열의 조기 생성을 도와준다. 둘째, 성장하는 균열선단에서 산화막의 형성으로 인해 기지의 조성이 바뀌므로 해서 균열성장속도를 증가시킨다. 셋째, 산소의 존재로 인해 입계가 취화된다. 온도의존 손상인 산화효과가 도입되면 표면입계의 산화에 의해 입내 균열생성에서 입계균열 생성으로 균열생성위치가 바뀌어 조기 균열생성으로 균열생성 사이클수가 감소하여 피로수명을 감소시킨다. 따라서 고온에서 피로수명의 감소는 동적변형시효와 산화에 의한 영향으로 판단된다.

질소의 첨가에 의해서 고온 저주기 피로수명이 증가하게 되는데 이와같은 원인은 질소가 전위구조를 planar하게 변화시키고 동적변형시효를 억제하기 때문으로 보고되고 있다[11].

3.2. 피로균열의 길이보정

균열의 성장은 최근까지 많은 연구가 진행되었지만 아직도 이것에 대한 명확히 설명되어지고 있지 못한데 그 이유는 균열이 재료내부에서 성장하기 때문에 관찰이 어렵고 또한 균열선단에서 탄성과 소성변형이 발생하는 구역내에 적용할 응력-변형에 관한 수학적식이 정의되지 못하고 있기 때문이다. 그래서 균열성장은 탄성응력하에서 피로변형되고 시편내에 존재하는 충분히 긴 균열의 성장에 관하여 탄성변형량과 응력의 관계식을 이용하여 균열성장을 설명하려는 것이 일반적인 방법이다. 따라서 피로변형에서의 응력이 특정의 범위내에서 변화하는 특성을 감안하여 정적인 하중에서의 재료의 파괴난이도를 결정지어주는 물성치인 응력확대계수범위 ΔK 를 정의하여 이 값에 따른 균열의 성장속도를 표시하게 된다. 응력확대계수범위는 C-T 시편의 경우 다음과 같이 정의된다[12].

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} (0.886 + 4.64a - 13.32 a^2 + 14.72 a^3 - 5.6 a^4) \quad (1)$$

여기서 $\alpha = a/W$ for $a/W \geq 0.2$

$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$, for $R > 0$

B : 시편의 두께

W : 시편의 폭

Paris는 응력확대계수와 균열성장속도와의 관계식을 다음과 같이 제안하였다[13].

$$da/dN = C (\Delta K)^n \quad (2)$$

여기서 C, n : 재료, 응력비, 환경 등에 따라서 다른 값을 갖는 상수

1식에서 시편의 두께와 폭은 시편의 형상에 의해서 결정되고 하중의 변화를 결정하고 균열의 길이를 알면 응력확대계수를 알 수 있다. 2식에서는 응력확대계수를 알면 균열전파속도를 알 수 있기 때문에 균열의 길이를 정확히 측정하는 것이 중요하게 된다. 균열의 길이를 정확하게 측정하기 위하여 우선 상온에서 균열의 길이를 잴 후 이것을 DCPD 방법으로 측정한 전압과의 관계를 구하였다. 그리고 이것을 Hicks와 Pickard[14]에 의해서 제시된 다음과 같은 관계식과 비교하였다.

$$a/W = B_0 + B_1 (V/V_r) + B_2 (V/V_r)^2 + B_3 (V/V_r)^3 \quad (3)$$

for $0.24 \leq a/W \leq 0.7$

$$B_0 = -0.5051$$

$$B_1 = 0.8857$$

$$B_2 = -0.1398$$

$$B_3 = 0.0002398$$

실험결과와 수식으로 구한 값의 비교를 그림 3에 나타내었다. 균열길이와 전압과의 관계가 직선적으로 잘 일치하고 있음을 나타내었고 기울기는 약 1을 나타내었다. 따라서 고온에서의 균열크기는 Hicks와 Pickard을 사용하여 계산하였다.

3.3. 균열전파속도에 미치는 온도의 영향

각 질소함량에서 온도에 따른 균열의 전파속도를 그림 4에 나타내었다. 각 질소함량에서 온도가 증가함에 따라서 피로균열전파속도가 증가함을 알 수 있다. 저주기 피로수명은

300℃까지는 거의 변화가 없고 그 이상의 온도에서 급격히 감소하였는데 피로균열전파속도는 300℃부터 증가하는 경향을 나타내었다. 동적변형시효의 발생이 없는 300℃에서도 피로균열전파속도가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보아 본 실험조건에서의 피로균열전파에는 동적변형시효의 영향이 아니라 산화의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3.4. 균열전파속도에 미치는 질소함량의 영향

각 온도에서 질소함량에 따른 피로균열전파속도를 그림 5에 나타내었다. 질소함량이 증가하면 피로균열전파속도는 감소하는 경향을 나타내었지만 질소함량이 0.15% 일때 보다는 0.10% 일때가 피로균열전파속도에 더 저항적이었다. 이와같은 현상은 그림 2에서의 피로수명 결과와도 일치하는 경향을 나타내었다. 따라서 저주기 피로수명이 0.10%에서 가장 우수한 것은 피로균열전파속도가 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다.

질소의 첨가에 따라서 피로균열전파속도가 감소하는 것은 질소를 첨가하면 그림 6에서 보는 바와 같이 전위구조가 cell 구조에서 planar구조로 변화되어서 slip reversibility가 증가하기 때문으로 판단된다. 질소의 첨가에 의한 planar한 전위구조는 600℃에서도 유지되지만 질소첨가에 의해서 Cr과의 상호작용에 의해서 형성된 단범위규칙에 의해 강도가 증가하기 때문에 균열선단에서의 응력집중이 증가하게되어 고온에서의 피로균열전파속도는 전위구조가 planar함에도 불구하고 질소함량이 0.10%에서 가장 우수한 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

3.5. Paris 식의 상수 결정

각 온도와 질소함량에 따른 Paris 식에서의 지수 n값을 구해보면 표 2와 같다. 온도가 증가하면 지수가 감소하는 경향을 나타내었지만 질소함량에 따라서 큰 변화가 없었다. 2식의 양변에 log를 취해서 상수값 C를 구해보면 표 3과 같다. 상수값 C도 온도가 증가하면 감소하는 경향을 나타내고 질소함량에 따라서는 큰 차이가 나지 않았다.

Table 2. N values of Paris's law

	N04	N10	N15
R.T.	5.9	6.3	5.5
300℃	3.9	4.4	3.9
600℃	2.9	3.5	3.7

Table 3. C values of Paris's law

	N04	N10	N15
R.T.	-12.0	-13.0	-11.8
300℃	-8.9	-9.9	-9.1
600℃	-7.4	-8.2	-8.3

4. 결론

질소함량을 변화시킨 316LN 스테인레스 강으로 상온~600℃ 온도범위에서 피로균열전파속도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고온저주기 피로수명은 질소를 첨가하면 증가하였지만 질소함량이 0.10%에서 가장 우수한 피로수명을 나타내었다.
2. 온도가 증가하면 피로수명은 300℃까지 거의 변화가 없다가 그 이상의 온도에서는 급격히 감소하였지만 피로균열전파속도는 온도증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다.
3. 각 온도에서 질소를 첨가하면 피로균열전파속도는 감소하였지만 질소함량이 0.10%에서 가장 우수한 피로균열전파 특성을 나타내었다. 이것은 고온 저주기피로수명의 결과와 일치하는 경향을 나타내었다.

후 기

연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기사업중 노심재료 및 종합데이터베이스구축과제에서 수행한 결과의 일부분입니다.

참 고 문 헌

1. J.O. Nilsson, Scripta Metallurgica, vol. 17, 1983, p593.
2. R.P. Reed, J. Metals, March, 1989, p16.
3. V. Gerold and H.P. Karnthaler, Acta metall., vol. 37, No. 8, 1989, p2177.
4. D.L. Douglass, G. Thomas, and W.R. Roser, Corrosion NACE, January, vol. 20, 1964, p15t.
5. P.R. Swann, Corrosion, vol. 19, 1963, p1021.
6. V.S. Sirinivasan, R. Sandhay, Bhanu Sankara Rao, S.L. Mannan, and K.S. Raghavan, Int. J. Fatigue, 13, NO. 6, 1991, p471.
7. J.T. Barnby, Journal of the Iron and Steel Institute, April, 1965, p392.
8. S.L. Mannan, K.G. Samuel, and P. Rodriquez, Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 4&5, August-October, 1983, p313.
9. D.W. Kim, W.S. Ryu, J.H. Hong, and S.K. Choi, Proc. of the tenth conference on mechanical behaviors of materials, Ansan, Korea, October 11-12, 1996, p305.
10. L. F. Coffin, Jr., Met. Trans., 3, 1972, p1777.
11. D.W. Kim, W.S. Ryu, W.G. Kim, I.H. Kuk, J. Kor. Inst. Met & Mater., Vol. 37, No. 5, 1999, p539.
12. ASTM E647.
13. P.C. Paris and F. Erdogan, Trans. ASME, vol. D85, 1963, p528.
14. M.A. Hicks and A.C. Pickard, Int. J. Fracture, No. 20, 1982, p91.

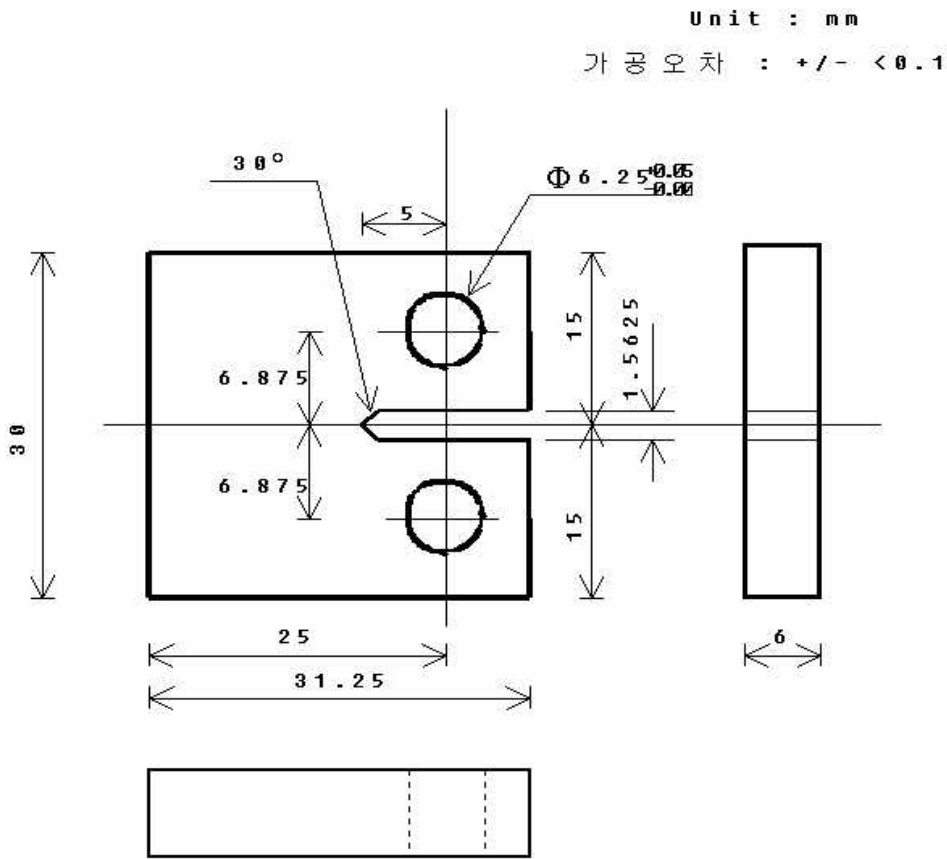


Fig. 1. Geometry of specimen for fatigue crack growth rate test.

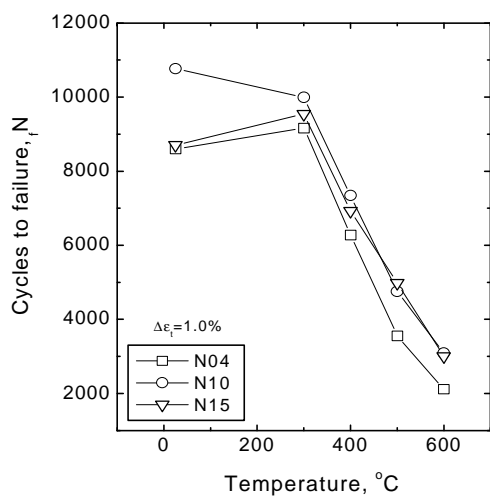


Fig. 2. Low cycle fatigue life with temperature at each nitrogen content.

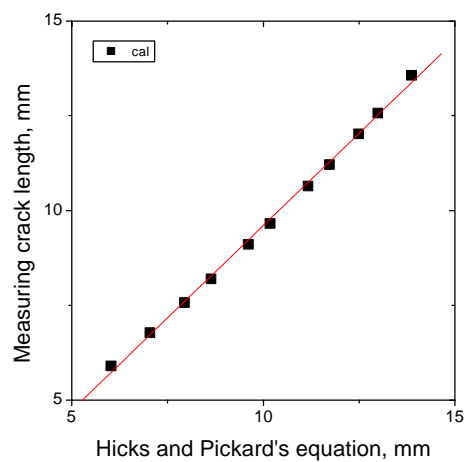


Fig. 3. Crack length calibration curve.

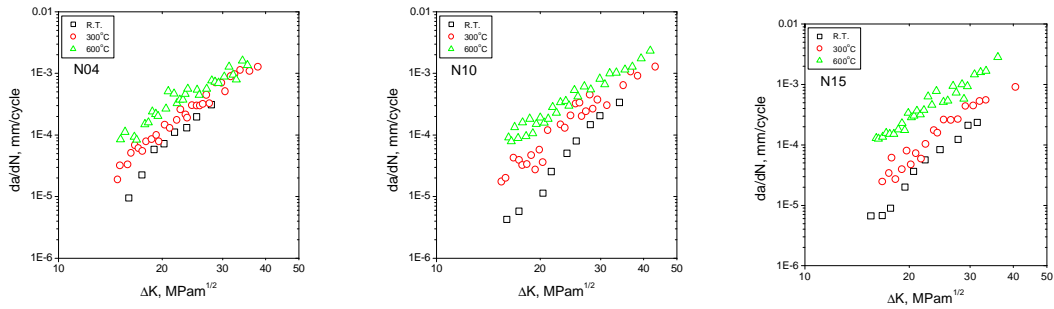


Fig. 4. Fatigue crack growth rate with temperature at each nitrogen content.

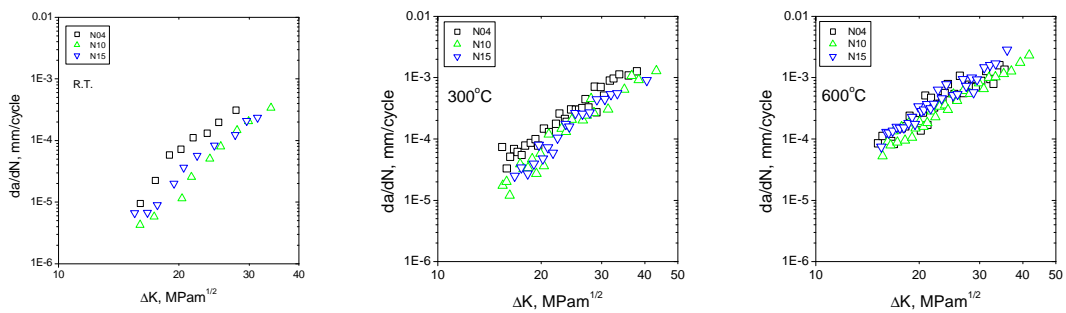


Fig. 5. Fatigue crack growth rate with nitrogen content at each temperature.

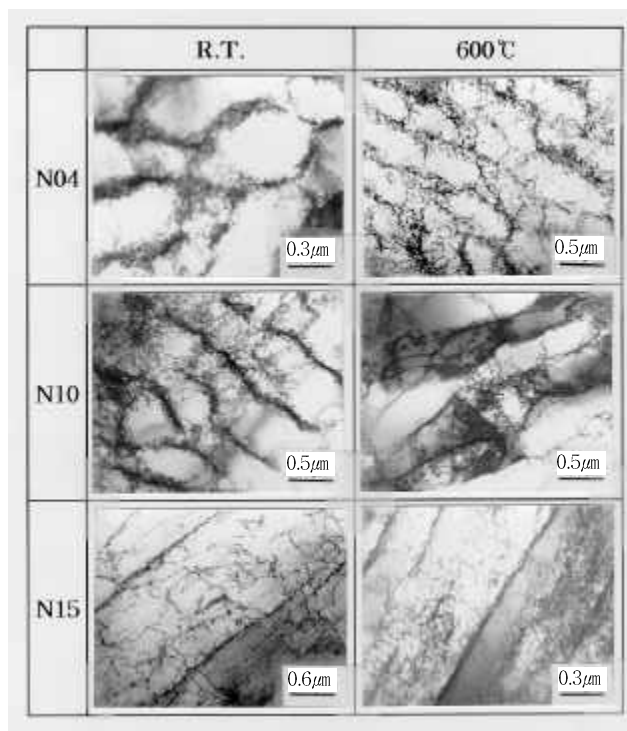


Fig. 6. Dislocation structures tested at $\Delta \epsilon_t = 1\%$ and R.T. and 600°C for N04, N10 and N15.