한국소성가공학회 2007년도 추계학술대회 논문집 pp. 334~337

터빈 디스크용 스테인리스강의 고온 인장 및 저주기 피로 물성 측정

임형대[1] · 박철규[1] · 이광주[2] · 임성한[2#] · 김춘택[3]

Evaluation of high temperature tensile behavior and LCF properties of stainless steel for turbine disks

H. D. Im, C. K. Park, K. Lee, S. H. Rhim, C. T. Kim

Abstract

Austenitic stainless steel is used as high temperature components such as gas turbine blade and disk because of its good thermal resistance. In the present investigation, tensile and low cycle fatigue(LCF) behavior of stainless steel for turbine disks was studied at wide temperature range 20℃ ~ 750℃. In the tensile tests, it was shown that elastic modulus, yield strength, ultimate tensile strength decreased when temperature increased. The effect on fatigue failure of the parameters such as plastic strain amplitude, stress amplitude and plastic strain energy density was also investigated. Coffin-Manson and Morrow models were used to adjust experimental data and predict the fatigue life behavior at different mean strain values during cyclic loading of high temperature components.

Key Words : Austenitic Stainless Steel(오스테나이트 스테인리스강), High Temperature Behavior(고온거동), Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Life Prediction(수명 예측)

1. 서 론

본 연구에서는 우수한 고온강도 및 연성으로 인해 터빈용 부품으로 많이 사용되는 오스테나이트계 316 스테인리스강의 고온 인장 물성과 저주기 피로 특성을 얻기 위해 실험과 분석을 수행하였다. 또한 결과로 얻어진 저주기 피로 물성으로부터 수명예측모델(Coffin-Manson법[1], Morrow법[2])의 파라미터들을 결정하고, 이 식을 이용하여 터빈 디스크의 피로수명 예측이 가능하도록 하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 변형률-수명곡선(Strain-Life Curve)

1910 년, Basquin 은 S-N 관계를 대수좌표 위에 직선으로 나타낼 수 있음을 보여주었고, 그것에 의하여 다음과 같 은피로 지수 법칙을 설정하였다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f'(2N_f)^b \qquad (1)$$

$\Delta\sigma/2$는 진 응력진폭, $2N_f$는 파괴까지의 반복수 σ_f'는 피로강도계수 b 는 피로강도지수이다. 1955 년, Coffin 과 Manson 은 각각 열적피로문제에 대하여 소성변형률-수명데이터를 로그-로그 좌표 상에 직선으로 표현하였다.

$$\frac{\Delta\varepsilon_P}{2} = \varepsilon_f'(2N_f)^C \qquad (2)$$

여기서, $\Delta\varepsilon_P/2$는 소성 변형률진폭, ε_f'는 피로연성계수, c는 피로연성지수이다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \qquad (3)$$

1. 한국기술교육대학교 대학원
2. 한국기술교육대학교 기계정보공학부
3. 한국항공우주연구원
교신저자: shrhim@kut.ac.kr

식 (2)에 식 (3)과 다음 식 (4)를 대입하면 식(5)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2}=\frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b \tag{4}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2}=\frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b+\varepsilon_f'(2N_f)^c \tag{5}$$

2.2 고온 저주기 피로 수명 예측

여러 피로 수명식 중 가장 일반적으로 사용되는 재료의 피로수명식이 소성변형률 진폭과 관계가 있다고 가정한 Coffin-Manson 수명식(6)이다.

$$N_f^m\Delta\varepsilon_p=C \tag{6}$$

재료의 피로손상은 각 사이클 당 누적되는 소성변형률에너지밀도[6] ΔW_p 와 관련이 있다고 가정한 Morrow 에 의한 피로수명예측식은 식 (7)과 같으며, ΔW_p 를 이용해 예측할 수 있다. 여기서 m 과 C 는 실험으로부터 구해지는 재료 상수이며, ΔW_p 는 반 수명(half life)에서 응력-변형률 이력곡선의 안쪽 면적으로 식 (8)을 이용해서 구할 수 있다.

$$N_f^m\Delta W_p=C \tag{7}$$

$$\Delta W_p=4K'^{-1/n'}\sigma_a^{\frac{1+n'}{n'}}\frac{1-n'}{1+n'} \tag{8}$$

3. 물성 시험

3.1 시험장비

시험에 사용된 터빈디스크용 스테인리스강은 화학조성은 아래의 표 1 과 같다.

가공에 의해 발생응력을 제거하기 위하여 Cr 탄화물의 입계석출 온도보다 높은 880℃에서 3 시간 동안 안정화 열처리를 한 후 공랭하였다.

Table 1 Chemical compositions of 316 stainless steel (in wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.061	0.403	1.522	0.0326	0.0026	17	2.088	10.125	0.404

3.2 시험장비

인장 및 저주기 피로 시험을 수행하기 위해서 MTS사에서 제작된 10 Ton 용량의 만능시험기가 사용되었으며, 고온 인장 및 저주기 피로시험의 수행을 위해서 최대가열온도 1400℃, 오차 범위는 ± 1℃인 가열로를 사용하였다. 상온에서 정확한 측정값을 위해 상온용 단축신장계(gage length = 25 mm, strain range : +50% ~ -10%)와 고온에서 정확한 결과값을 측정하고 변형률 제어를 이용하여 시험을 수행하기 위해서 고온용 단축신장계(gage length = 25 mm, strain range : +10% ~ -5%)를 사용하였다.

3.2 시험 방법

상온 및 고온에서 재료의 기본적인 기계적 물성치를 측정하기 위해서 상온, 300℃, 600℃, 750℃의 온도에서 2mm/min의 변위제어를 통해 상온 및 고온 인장 시험을 수행하였다. 변위제어를 이용할 경우 시편의 표점거리에 발생하는 변형률에 대해 오차가 발생하게 되므로, 정확한 변형률을 측정하기 위하여 상온시험 시에는 상온용 단축 신장계를, 고온시험 시에는 고온용 단축 신장계를 사용하여 오차 값을 보정하였다. 또한 상온 및 고온에서 재료의 변형률 속도에 대한 의존성을 연구하기 위하여 상온, 300℃, 600℃, 750℃에서 $1\times10^{-2}/s$, $1\times10^{-3}/s$, $1\times10^{-4}/s$ 의 변형률 속도 제어를 통해 +9% strain 범위까지만 수행하였다. 피로수명에 대한 온도 및 진폭의 영향을 알아보기 위해 상온, 600℃에서 $1\times10^{-3}/s$ 의 변형률 제어를 통해 상온에서는 1.5%, 1.8%, 2%의 총변형률진폭으로, 600℃에서는 1.4%, 1.6%, 1.8%, 2%의 총변형률진폭으로 저주기 피로시험을 수행하였고, 고온시험 시 재료의 열적 안정화를 위해 인장시험과 같은 방법을 이용하였다.

4. 결 과

4.1 인장시험

상온, 300℃, 600℃, 750℃에서 2mm/min 의 변위제어를 이용한 인장시험을 수행하여 응력-변형률 선도(Fig.1)를 얻었다. 재료의 기본적 물성치는 Table2에 표시하였다.

유동응력의 변형률 속도 의존성을 알아보기 위해 상온(20℃), 300℃, 600℃, 750℃에서 각각 $1\times10^{-2}/s$, $1\times10^{-3}/s$, $1\times10^{-4}/s$ 의 변형률 속도로 인장 시험을 수행한 결과를(Fig.2)에 나타내었다.

Table 2 Mechanical Properties

	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)	Ultimate strength (MPa)
상온	467	703	197	51	979
300℃	369	571	180	33	757
600℃	315	519	149	30	676
750℃	284	401	139	29	451

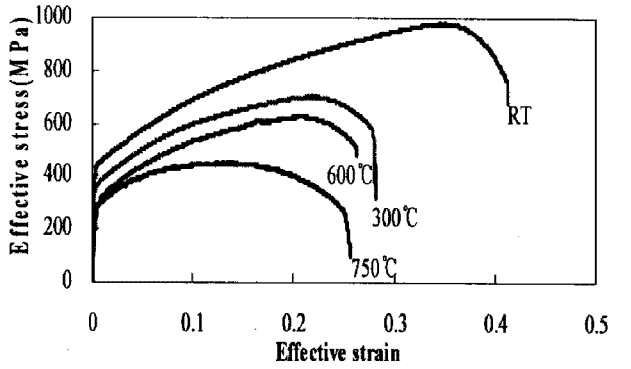

Fig. 1 Flow stress-strain curve

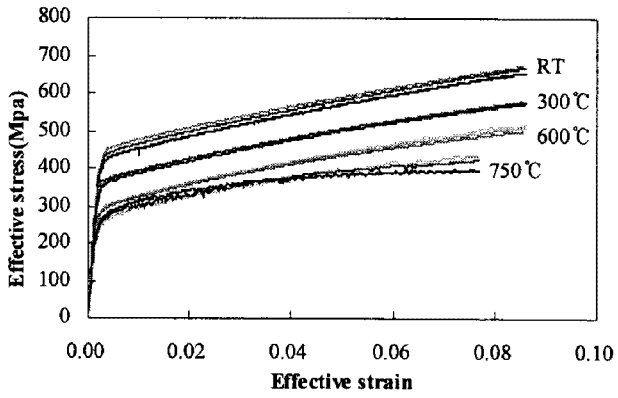

Fig. 2 Flow Stress-Strain Curve for Strain rate control

모든 온도에서 변형률 속도가 증가할수록 변형률 경화가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 유동응력의 변화가 변형률 속도에 의존하지만, 그 영향이 온도의 영향보다는 크게 미치지 않음을 알 수 있었다.

4.2 저주기 피로 시험

Coffin 과 Manson 의 수명예측 모델을 이용하여 상온 및 600℃에서 본 연구재료의 저주기 피로수명을 예측하였다. 수명예측 모델에 사용되는 피로 물성치들은 안정화된 히스테리시스 루($N_f/2$)에서 $\Delta\sigma$ 와 $\Delta\varepsilon_p$ 를 구한 후, Basquin 모델을 나타낸 식 (1)을 이용해서 기울기 b , 절편 σ_f' 를 결정하고, Coffin 모델을 나타낸 식 (2)를 이용하여 기울기 c , 절편 ε_f' 는 최소자승법을 사용하여 결정할 수 있었다. 최소자승법으로 구한 상온 및 600℃의 피로 물성치는 각 각 Table 3 에 나타내었다.

식 (5)를 이용하여 구해서 전체변형률-수명과 탄성변형률-수명, 소성변형률-수명의 데이터를 Fig.3 Fig.4 에 나타내었다.

4.3 Coffin-Manson 방법을 이용한 수명예측

가장 일반적으로 사용되는 Coffin-Manson 수명식 (6)을 이용해서 상온과 600℃를 모두 고려한 재료의 피로수명 예측치를 구하였다 (Fig. 5). 이때 수명식의 재료상수 m과 C는 회귀분석법을 이용하여 각각 0.3348, 0.048의로 정하였다.

4.4 Morrow method를 이용한 수명예측

안정화된 사이클($N_f/2$)에서의 히스테리시스루프

Table 3 Fatigue properties of 316 stainless steel at RT

Determined from strain-life curve	상온	600℃
피로 강도 계수(MPa), σ_f'	849	580
피로 강도 지수, b	-0.075	-0.047
피로 연성 계수, ε_f'	0.185	0.056
피로 연성 지수, c	-0.476	-0.331
Curve fit		
반복적 강도 계수, K'	1056	835
반복적 변형률 경화지수, n'	0.149	0.133

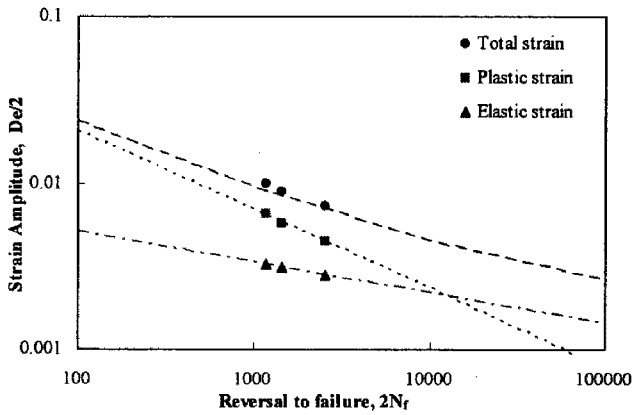

Fig. 3 Strain-life curve of 316 stainless steel at RT

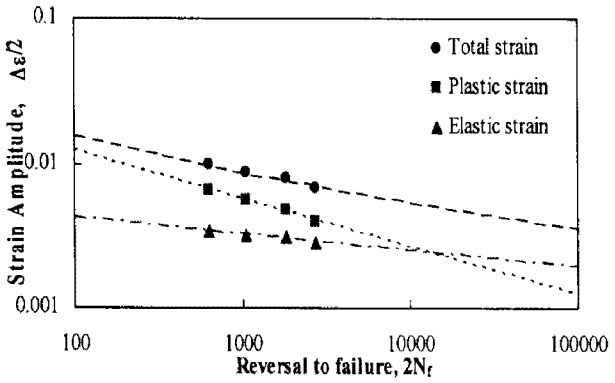

Fig. 4 Strain-life curve of 316 stainless steel at 600℃

에서의 데이터와 소성변형률에너지에 대한 식(8)을 사용하여 Morrow식 (7)을 적용하였다 (Fig. 6). 이 때 재료 상수 m과 C는 회귀분석법에 의해서 각각 3.1313과 28.84로 정하였다.

5. 결 론

상온 및 300℃, 600℃, 750℃에서 인장 시험을 통해 고온 물성데이터를 얻을 수 있었고, 이러한 물성데

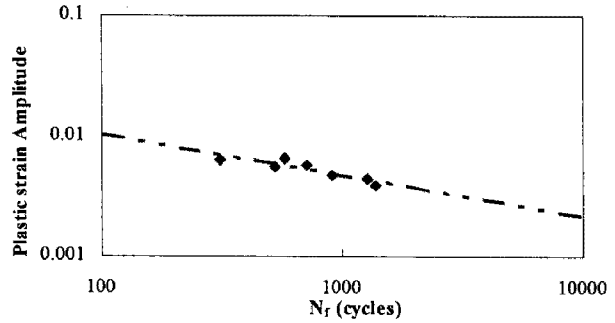

Fig. 5 Fatigue life prediction used to Coffin-Manson method

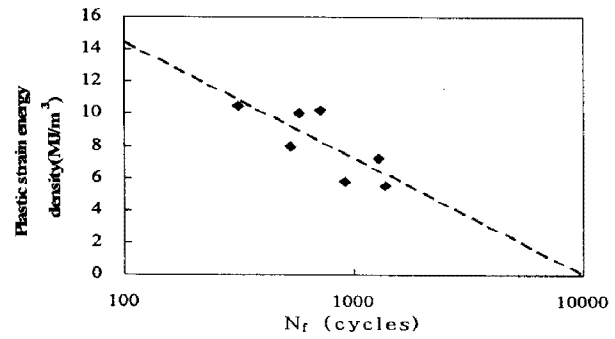

Fig. 6 Fatigue life prediction used to Morrow method

이터를 해서 온도가 상승함에 따라 터빈디시크용 스테인리스강의 기계적 물성치(탄성계수, 항복강도, 인장강도, 연신율 등)들이 감소함을 관찰 할 수 있었다. 또한 재료의 변형률 속도에 대한 영향을 알아보기 위해 변형률 속도 제어를 통해 인장시험을 수행하여 이 재료가 변형률속도의 영향을 받지만 온도의 영향에 비해서는 크지 않음을 알 수 있었다.

상온 및 600℃에서 변형률 제어를 통한 저주기 피로 시험을 수행하여, 각 온도별로 재료의 주기적 거동 및 피로 물성치를 구하였다. 상온 및 600℃에서 터빈디스용 스테인리스강의 저주기피로수명을 예측하기 위하여 소성 변형률 진폭-수명을 이용한 Coffin-Manson 수명예측식(6)과 소성 변형률 에너지-수명을 이용한 Morrow 수명예측식(7)을 적용하여 다음과 같이 저주기피로수명 예측식을 얻을 수 있었다.

$$N_f^{-0.3348}\Delta\varepsilon_p = 0.048 \tag{9}$$

$$N_f^{3.1313}\Delta\varepsilon_p = 28.84 \tag{10}$$

후기

동 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI주관) 연구결과 중 일부임.

참 고 문 헌

[1] L. F. Coffin, Jr., "ASME Trans. 76,"1954.

[2] J. D. Morrow, "ASTM STP 376," ASTM, 1964, pp.45

[3] H. J. Gough, Crystalline Structure in Relation to Failure of Metals-Especially by Fatigue, Edgar Marburg Lecture, Am. Soc. Test. Proc., Vol.33, Part 2, 1933, pp.3-114

[4] W. N. Findley, " ATheory for the Effect of Mean Stress on Fatigue of Metals under Combined Torsion and Axial Load or Bending," Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. B81, 1959, pp.301-306.

[5] M. W .Brown, K. J .Miller, "A Theory for Fatigue Failure under Mutiaxial Stress-Strain Conditions," Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.187, No.65, 1973, pp.745-755.