

316 스테인리스강의 고온 물성 연구 및 구조 평가

임성한* · 이광주** · 김진배** · 양인영***

Mechanical Behavior Evaluation and Structural Analysis of 316 Stainless Steel at High Temperature

SungHan Rhim* · Kwangju Lee** · JinBae Kim** · InYoung Yang***

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 behavior of 316 stainless steel was studied at wide temperature range 20°C~750°C. In the tensile tests, it was shown that elastic modulus, yield strength, ultimate tensile strength decreases when temperature increased. The effect on fatigue failure of the parameters such as plastic strain amplitude and plastic strain energy density was also investigated. With the experimental results, a structural analysis of turbine blades of 316 stainless steel were carried out.

초 록

오스테나이트 계열 스테인리스강의 경우 뛰어난 내열성으로 인해 가스 터빈 블레이드나 디스크 등으로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 터빈 블레이드로 사용되는 316 스테인리스강의 고온 인장 및 저주기 피로 물성을 실험적으로 구하였다. 실험 결과 탄성계수와 항복강도, 최대인장강도 모두 온도 증가에 따라 감소하는 것으로 확인되었다. 소성변형률 진폭, 소성변형률 에너지 등의 인자들이 피로파괴에 미치는 영향도 조사하였다. 실험을 통해 얻어진 고온 인장 물성을 이용하여 316 스테인리스강으로 제작된 가스터빈 블레이드의 구조해석을 수행하였다.

Key Words: High Temperature Behavior(고온거동), Low Cycle Fatigue(저주기피로), Structural Analysis(구조평가)

1. 서 론

고온·고압 상태에서 작동되는 가스터빈 분야의 경우 부품의 내구성 및 수명 증대 등과 관련된 연구가 절실히 요구되고 있다. 특히, 많은 수의 부품으로 구성된 터빈 시스템의 구조 신뢰성을 검증할 수 있는 최적 설계 방법을 도출하기 위해서는 가스터빈 부품에 사용되는 재료에 대

* 한국기술교육대학교 기계정보공학부
연락처, E-mail: shrhim@kut.ac.kr

** 한국기술교육대학교 기계정보공학부

*** 항공우주연구원 KHP 엔진팀

한 구조적 평가가 가능하여야 한다.

이에 본 연구에서는 구조용 강으로서 우수한 고온강도 및 연성으로 인해 가스터빈용 부품의 재료로 사용될 수 있는 오스테나이트계 316 스테인리스강을 대상으로 상온 및 고온에서 얻은 물성 결과를 정리하고자 한다. 또한 상온 및 고온에서 저주기 피로시험을 수행하였다.

2. 시 험

2.1 시험 시편

시험 시편은 인발 공정을 통해 직경 14mm, 공차 $\pm 2/100$ 로 가공된 후 잔류 응력 등을 제거하기 위해 Cr탄화물의 입계석출 온도보다 높은 880°C에서 3시간 정도 안정화 처리 후 공랭시켰다. 재료의 화학적 조성은 표1과 같다. 표면 거칠기가 시험 결과에 영향을 주는 것을 방지하기 위해 #2000(13 μ m)까지 표면 처리하였다. 인장시험의 경우 ASTM E8규격을, 피로시험의 경우 ASTM E606-92규격을 따랐다.

2.2 시험 장비

인장시험 및 저주기피로 시험에 사용된 장비는 MTS社에서 제작된 서보 유압 장치(servohydraulic testing systems)이며 10톤급 하중 센서를 장착하였다. 시편은 유압 형식의 그립(grip)에 의해 고정되며, 그립이 견딜 수 있는 최대 압력은 21MPa이다.

또한 최대가열온도가 1400°C이고 오차범위는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 인 가열로(furnace)가 사용되었다. 상온 및 고온에서 정확한 결과값을 측정하고 변형률 제어를 이용하여 엄밀한 시험을 수행하기 위해서 상온용 단축신장계(extensometer, gage length = 25 mm, strain range : +50% ~ -10%)와 고온용 단축신장계(gage length = 25 mm, strain range : +10% ~ -5%)를 온도대역별로 사용하였다. 단축신장계의 검증을 위해 시험 전 상온에서 각각 스트레인 게이지와 단축신장계를 사용한 저주기 피로 시험을 수행하여 획득된 두 변형률 값을 비교하였다. 두 변형률 값의 차이가 최대

0.01%이고 실제 저주기 피로 시험의 총변형률이 1.4~2%이므로 단축신장계의 성능은 타당한 것으로 판단된다.

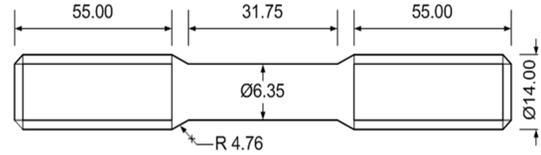


Fig. 1 Specimen

Table 1. SUS 316

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

2.3 시험 방법

상온 및 고온에서 재료의 기본적인 기계적 물성치를 측정하기 위해서 상온(20°C), 300°C, 600°C, 750°C의 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°C, 600°C, 750°C에서 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도 제어를 통해 +9% 변형률 범위까지만 수행하였다. 피로수명에 대한 온도 및 진폭의 영향을 알아보기 위해 상온, 600°C에서 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 제어를 통해 상온에서는 1.5%, 1.8%, 2%의 총변형률진폭으로, 600°C에서는 1.4%, 1.6%, 1.8%, 2%의 총변형률 진폭으로 저주기 피로시험을 수행하였고, 고온시험 시 재료의 열적 안정화를 위해 인장시험과 같은 방법을 이용하였다. 시험시 시편의 피로 수명은 실제 파괴가 발생한 후 최대 응력 진폭의 90% 수준에서 결정하였다.

3. 시험 결과

3.1 인장시험

상온, 300°C, 600°C, 750°C에서 2mm/min의 변위제어를 이용한 인장시험을 수행하여 응력-변형률 선도(Fig. 2)를 구했다. 탄성계수는 응력-변형률 선도의 기울기를 사용하여 구하였고 항복강도는 0.2% 오프셋으로 정의하였다. 재료의 기본적 물성치는 Table 2에 표시하였다.

유동응력의 변형률 속도 의존성을 알아보기 위해 상온(20°C), 300°C, 600°C, 750°C에서 각각 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도로 인장 시험을 수행한 결과를 그림 3에 나타내었다. 모든 온도에서 변형률 속도가 증가할수록 변형률 경화가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

3.2 저주기 피로 시험

Coffin과 Manson의 수명예측 모델을 이용하여 상온 및 600°C에서 본 연구재료의 저주기 피로 수명을 예측하였다. 수명예측 모델에 사용되는

Table 2. Mechanical Properties of SUS316

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

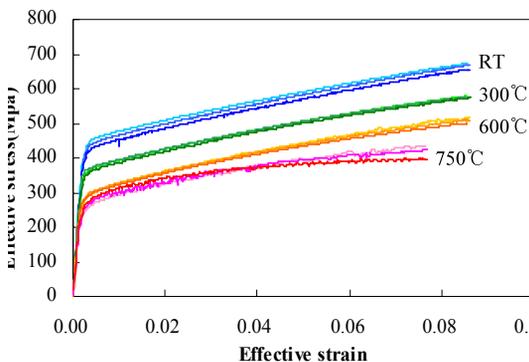


Fig. 2 Stress-Strain Curve (750°C)

피로 물성치들은 안정화된 히스테리시스 루프 ($N_f/2$)에서 $\Delta\sigma$ 와 $\Delta\epsilon_p$ 를 구한 후, 기울기 b , 절편 σ_f' 를 결정하고, Coffin모델을 나타낸 식 (2)를 이용하여 기울기 c , 절편 ϵ_f' 는 최소자승법을 사용하여 결정할 수 있었다. 최소자승법으로 구한 상온 및 600°C의 피로 물성치는 Table 3에 나타내었다[1-2].

Table 3. Fatigue Properties of SUS316

Determined from strain-life curve		상온	600°C
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(MPa)	K'	1056	835
반복적 변형률 경화지수	n'	0.149	0.133

4. 구조해석

4.1 모델링

본 연구에서는 산업용 터보 엔진의 제 1단 터빈 블레이드를 Fig. 3과 같이 사용하였다. 구조 해석을 통하여 우수한 고온강도 및 연성을 가진 SUS316이 본 가스터빈용 블레이드의 재료로 사용 가능성을 알아보려고 한다. SUS316의 물성치를 Table 4에 정리하였다.

4.2 응력 해석

본 논문에서는 응력 해석을 위하여 상용 구조 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

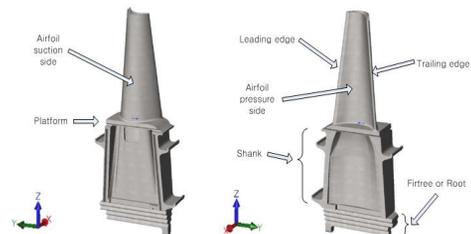


Fig. 3 Gas Turbine Blade of GE MS7001EA Engine

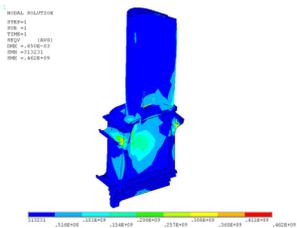
Table 4. Material Properties of SUS316

Young's Modulus	193.0 (GPa)	
Poisson's Ratio	0.3	
Thermal Expansion Coef.	17.5×10 ⁻⁶ (1/°C)	
Density	8,000 (kg/m ³)	
Yield Strength (0.2%)	Temperature (°C)	Yield Strength (MPa)
	20	467
	300	369
	600	315
	750	284

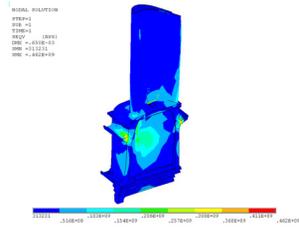
해석에 사용한 요소는 Solid98이며, 총 노드는 36,360개이고 총 Element 수는 19,519개이다. 본 논문에서는 블레이드 주변 기체의 높은 온도 (약 600°C, 750°C, 900°C)와 터빈의 회전 (약 3,600rpm)에 의하여 발생하는 응력을 고려하였다. 블레이드 주변의 고온 기체에 의하여 발생하는 응력을 구하기 위해서는 블레이드의 온도 분포를 계산하였으며, 동일한 블레이드를 사용한 타 논문의 해석 결과와 거의 동일함을 확인하였다[3]. 기체온도와 터빈의 회전을 고려한 구조 해석 결과 최대 응력 값이 600°C에서 462MPa, 750°C에서 550MPa, 900°C에서 632MPa임을 확인하였다. 응력 해석 이전에 수행한 온도 분포 해석에서 각각의 위치의 온도는 600°C에서 약 380°C, 750°C에서 약480°C, 900°C에서 약540°C이었다. 각각의 해석결과를 Fig.4에 도시하였다.

5. 결 론

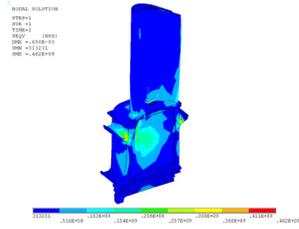
본 연구에서는 터빈 블레이드로 사용되는 316 스테인리스강의 고온 인장 및 저주기 피로 물성



(a) 600°C



(b) 750°C



(c) 900°C

Fig. 4 Thermal-structural stress distribution of gas turbine blade

을 실험적으로 구하였다.

또한 실험을 통해 얻어진 고온 인장 물성을 이용하여 316 스테인리스강으로 제작된 가스터빈 블레이드의 구조해석을 수행하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI주관) 위탁연구결과 중 일부임.

참 고 문 헌

1. L. F. Coffin, Jr., "ASME Trans. 76,"1954.
2. J. D. Morrow, "ASTM STP 378," ASTM, 1964, pp.45.
3. 현중섭, 김범신, 강명수, 하정수, 이영신, "가스터빈 블레이드의 열응력해석 및 열피로 수명예측," 기계관련 산학연 연합 심포지엄, 대한기계학회편, 2002, pp. 137-142