

316L 스테인리스 강의 고온 저주기 피로 수명식 개발

홍성구[†], 이순복^{*}

(2001년 8월 16일 접수, 2001년 12월 18일 심사완료)

Development of a New LCF Life Prediction Model of 316L Stainless Steel at Elevated Temperature

Seong-Gu Hong and Soon-Bok Lee

Key Words : Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Life Prediction(수명 예측), Elevated Temperature(고온), 316L Stainless Steel(316L 스테인리스 강)

Abstract

In this paper, tensile behavior and low cycle fatigue behavior of 316L stainless steel which is currently favored structural material for several high temperature components such as the liquid metal cooled fast breeder reactor (LMFBR) were investigated. Research was performed at 550°C, 600°C and 650°C since working temperature of 316L stainless steel in a real field is from 400°C to 650°C. From tensile tests performed by strain controls with 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s and 1×10^{-5} /s strain rates at each temperature, negative strain rate response (that is, strain hardening decreases as strain rate increases) and negative temperature response were observed. Strain rate effect was relatively small compared with temperature effect. LCF tests with a constant total strain amplitude were performed by strain control with a high temperature extensometer at R.T, 550°C, 600°C, 650°C and total strain amplitudes of 0.3%~0.8% were used and test strain rates were 1×10^{-2} /s, 1×10^{-3} /s and 1×10^{-4} /s. A new energy based LCF life prediction model which can explain the effects of temperature, strain amplitude and strain rate on fatigue life was proposed and its excellency was verified by comparing with currently used models

기호설명

- LCF : 저주기 피로
- RT : 상온
- N_f : 피로수명
- $\Delta \epsilon_p$: 소성 변형률 진폭
- W_p : 소성 변형률 에너지 밀도
- σ_{ultme} : 진 인장 응력

1. 서론

고온 구조물에 사용되는 재료들은 시스템의 운

행 및 정지에 의해 유발되는 온도 구배(thermal gradient)에 의한 열변형을 겪게 된다. 또한 시스템의 냉각 장치에 사용되는 재료들도 사용되는 냉각제의 온도 변화에 의해 열변형을 겪게 된다. 이러한 열변형은 시스템이 구속되어 있으므로 그대로 기계적인 변형이 되고, 실제로 주기적인 기계적 변형이 가해지는 상황에 놓이게 된다. 재료의 이러한 거동을 실제 상황과 유사하게 모사하는 방법으로는 변형률 제어를 통한 저주기 피로 시험법이 널리 이용되고 있다. 따라서, 변형률 제어 저주기 피로 시험을 통해 재료의 피로 수명을 예측하는 것은 고온 구조물의 설계에 매우 중요한 부분이 되고 있다.

지금까지 많은 연구자들에 의해 다양한 재료들의 저주기 피로 수명식이 연구되어왔다. 가장 널리 사용되고 있는 모델로는 재료의 피로수명이 소성 변형률 진폭과 관계가 있다고 가정한 Coffin-

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : hsg@cais.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3069 FAX :

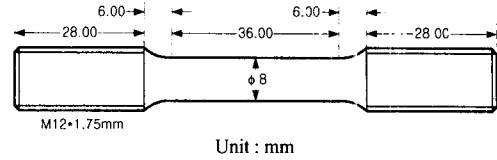
^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

Table 1 The chemical composition of 316L stainless steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.025	0.41	1.41	0.025	0.025	10.22	16.16	2.09	-	0.043

Manson model,⁽¹⁾ Morrow 에 의해 제안된 피로수명과 plastic strain energy density 의 관계를 나타낸 energy based model,^(2,3) Coffin-Manson 모델에서 변형률 속도의 영향을 고려한 frequency modified Coffin-Manson model⁽⁴⁾ 그리고 frequency modified Coffin-Manson model 에 에너지 개념을 도입한 frequency modified energy model^(5,6) 등이 있다. Coffin-Manson model 및 energy based model 은 등은 상황에서 재료의 피로수명을 잘 예측할 수 있지만, 피로수명에 대한 변형률 속도 의존성을 고려하지 못 한다. 변형률 속도 의존성을 고려하기 위해서는 frequency modified Coffin-Manson model 이나 frequency modified energy model 을 사용해야 한다. 비록 이 두 모델이 등은 상황에서 피로수명에 대한 변형률 진폭 및 변형률 속도의 의존성을 고려할 수 있지만, 온도가 바뀌게 되면 역시 수명예측에 어려움이 따르게 된다. 고온에서 재료의 피로수명에 영향을 미치는 변형률 속도, 온도 및 변형률 진폭의 영향을 모두 고려하기 위해서는 기존에 개발된 수명식에 온도와 관계된 항을 추가할 필요가 있다.

본 연구에서는 최근 LMFBR(liquid metal cooled fast breeder reactor)과 같은 고온 구조물에서 선호되고 있는 316L 스테인리스 강⁽⁷⁻¹⁰⁾을 대상으로 저주기 피로 수명식을 개발하였다. 재료의 실제 사용 온도가 400°C~650°C 임을 감안하여 550°C, 600°C, 650°C 세 온도에 대해 연구를 수행하였으며, 상온에서도 연구를 수행하여 결과를 비교 및 분석하였다. 우선 재료 거동의 변형률 속도 및 온도의 의존성과 기계적 물성치를 알아보기 위해 각각의 온도에서 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s, 1×10^{-5} /s 의 변형률 속도로 인장 시험을 수행하였다. 저주기 피로 수명식을 개발하기 위해 등은 일정 변형률 진폭하에서 단축 신장계(extensometer)를 이용한 변형률 제어 저주기 피로시험이 수행되었다. 실험은 상온, 550°C, 600°C 및 650°C 에서 수행되었으며, 1×10^{-2} /s, 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s 의 변형률 속도 및 0.3%~0.8%의 총 변형률 진폭이 실험 변수로서 사용되었다. 에너지 개념을 도입한 새로운 저주기 피로 수명식이 제안되었으며, 기존 모델들과의 비교를 통해 제안된 모델의 우수성을 검증하였다. 제안된 수명예측 모델에서는 피로 수명에 대한 온도 의존성을 고려하기 위해 인장 시험 결과에서 구한 true ultimate

**Fig. 1** Specimen for tensile and LCF tests

tensile stress 을 이용하였다.

2. 시험

2.1 시험 시편

가공전의 재료는 지름이 16mm 로 인발(extrusion)에 의해 가공되었고, 1100°C 에서 40 분간 고용화 처리(solution treatment)한 후 수냉시켰다. 재료의 화학적 조성은 Table 1 과 같으며, Linear intercept method 를 이용해 재료의 평균 입도(grain size)를 측정된 결과 53 μ m 였다. 시편은 원재료로부터 선반 가공하였으며 표면 거칠기가 시험 결과에 미치는 영향을 배제하기 위해 에머리 페이퍼를 사용하여 #2000(13 μ m)까지 경면가공 하였다. 미세한 긁힘에 의해 표면에 발생할 수 있는 하중이 작용하는 방향으로의 응력 집중을 방지하기 위하여 시편의 축방향을 따라 표면 처리를 하였다. 시험에 사용될 시험 시편의 모양 및 치수는 ASTM code E606-92 에 의거하여 결정하였다(Fig. 1).

2.2 시험 장비

인장 시험 및 저주기 피로 시험을 수행하기 위해 MTS 사에서 제작된 5 톤 용량의 closed-loop servo-hydraulic test system 이 사용되었으며, 온도제어를 위해 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도제어가 가능한 resistance type furnace 가 사용되었다. 시편은 유압 그립에 의해 시험기에 고정되며, 시편이 시험기에 체결된 모습이 Fig. 2 에 제시되어 있다. 변형률 제어를 위해 MTS 사에서 제작된 고온용 단축 신장계(model no. : 632-13F-20, gage length : 25mm)를 사용하였고, 실험을 수행하면서 변위, 하중 및 변형률 신호를 측정하였다.

2.3 단축 신장계의 검증

변형률 제어를 위해 MTS 사에서 제작된 고온용 단축 신장계(model no. : 632-13F-20, gage length : 25mm)를 사용하였다. 실험에 앞서 단축 신장계의 유효성을 검증하였다. 시편의 gage length 부위에 상온용 변형률 게이지(Kyowa : KFG-1-120-C1-23) 및

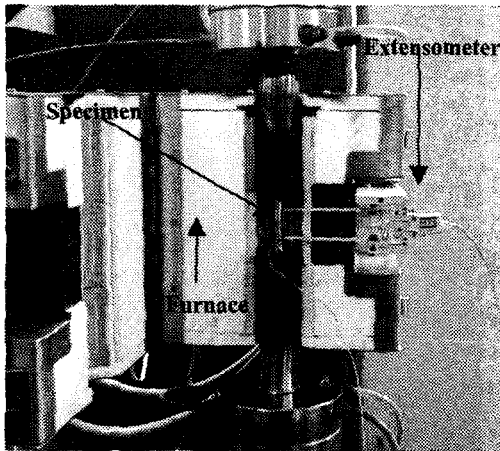


Fig. 2 High temperature grip assembly

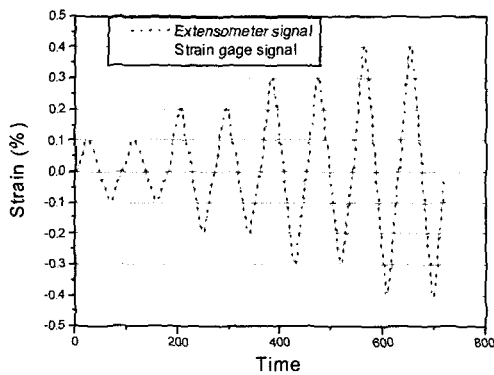


Fig. 3 The verification of an extensometer at RT

단축 신장계를 부착하여 상온에서 저주기 피로 시험을 수행하였고, 획득된 두 변형률 신호를 비교함으로써 단축 신장계의 유효성을 검증하였다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 두 신호의 최대 차이는 0.005% 였으며, 이러한 차이는 실제 저주기 피로 시험이 0.3% 이상의 총 변형률 범위에서 이루어진다는 점을 감안할 때 타당한 값이었다.

2.4 시험 방법

2.4.1 인장 시험

재료의 기본적 기계적 물성치(E , σ_y , σ_u , ϵ_f , toughness 등)를 측정하기 위해 2mm/min. 의 변위 제어를 통해 상온(20°C), 550°C, 600°C 및 650°C 에서 인장 시험을 수행하였다. 또한, 재료 거동의 변형률 속도 및 온도 의존성을 연구하기 위해 550°C, 600°C, 650°C 에서 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s, 1×10^{-5} /s 의 변형률 제어를 통해 인장 시험을 수행하였다. 실험

에 사용된 단축 신장계의 사용범위가 -5% ~ +10% 이므로 변형률 제어를 이용해 실험할 경우, +5%까지 인장을 한 후 변형률을 고정시켜 응력이완 시험을 병행하였다. 고온 시험시 재료의 안정화를 위해, 하중제어를 이용해 시편에 부가되는 하중이 '0' 이 되도록 제어하면서 온도를 실험 온도까지 올리고, 1 시간동안 유지시켜 재료가 열적으로 안정화된 후에 시험을 수행하였다.

2.4.2 저주기 피로 시험

피로수명에 대한 온도 및 변형률 진폭의 영향을 알아보기 위해 상온, 550°C, 600°C 및 650°C 의 온도에서 1×10^{-3} /s 의 변형률 제어를 통해 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%의 총 변형률 진폭 저주기 피로시험을 수행하였고, 피로수명에 대한 변형률 속도의 의존성을 알아보기 위해 550°C, 600°C, 650°C 세 온도에서 1×10^{-2} /s, 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s 변형률 속도로 0.5% 총 변형률 진폭 저주기 피로 시험을 수행하였다. 고온 시험시 재료의 안정화를 위해, 하중제어를 이용해 시편에 부가되는 하중이 '0' 이 되도록 제어하면서 온도를 실험 온도까지 올리고, 1 시간동안 유지시켜 재료가 열적으로 안정화된 후에 저주기 피로 시험을 수행하였다.

시험시 시편의 피로 수명은 응력 진폭의 load drop 을 측정해 안정화된 cycle(=N_f/2)에서의 응력 진폭의 70%가 되는 시점으로 정의하였다. 70%의 load drop 이 발생한 후 시편이 완전 파손될 때까지는 불과 수 cycles 이 소모되므로, 피로수명에 대한 이러한 정의는 타당하였다.

저주기 피로 시험에서 얻어진 응력-변형률 이력 곡선(stress-strain hysteresis loop)으로부터 소성 변형률 진폭 $\Delta\epsilon_p$ 를 계산하는 방법으로는 여러 방법이 사용되고 있다. 이중 널리 사용되고 있는 방법에는 BS 7270(1990), ASTM E606-92, ISO/DIS 12106 및 AECMA prEN 3988 등이 있다. F. A. Kandil⁽¹¹⁾에 의하면 $\Delta\epsilon_p$ 를 계산하는데 있어 서로 다른 방법을 사용할 경우 최대 30%정도의 차이가 발생하므로, $\Delta\epsilon_p$ 를 수명예측 모델 및 설계 코드에 사용할 경우 $\Delta\epsilon_p$ 구하는 방법에 있어 일관성을 두어야 함을 보여주었다. BS 7270 : 1990 (=ISO/DIS 12106) 코드가 가장 일반적으로 사용되고 있으므로, 본 연구에서는 $\Delta\epsilon_p$ 를 계산하기 위해 이 방법을 채택하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 인장 시험

3.1.1 변위 제어 시험

상온, 550°C, 600°C, 650°C에서 2 mm/min.의 변위 제어를 이용한 인장 시험을 수행함으로써 재료의 기본적 물성치(E, σ_y , σ_u , ϵ_f , toughness 등)를 구하였다. 탄성계수 E를 구하는 방법으로는 인장시 탄성 영역에서의 응력-변형률 곡선의 기울기를 사용하지 않고, 탄성 영역에서 일정량을 인장한 후 하중을 제거할 때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 구하여 측정하였다. 항복응력 σ_y 를 구하는 방법으로는 0.2% offset strain을 이용하였다. 인장 시험을 통해 얻어진 재료의 기본적 물성치가 Table 2에 나타나 있다.

변형률이 커지게 되면 시편의 단면적이 작아지므로 실제 시편에 추가되는 응력은 공칭 응력보다 커지게 된다. 인장 시험의 경우 파손이 발생하기까지 30% 이상의 변형률이 발생하므로 ultimate tensile stress의 경우 공칭 응력을 사용한다면 실제 값과 많은 차이가 발생한다. 따라서 진 응력-변형률 관계식(true stress-strain relation)이 요구된다. 인장 시험시 전체 변형률에 비해 탄성 변형률은 무시할 수 있으므로 전체 변형률을 소성 변형률로 본다면, 소성 변형률에서는 부피 변화가 '0'으로 간주되므로 진 응력-변형률 관계식이 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$A_0 l_0 = A l = \text{const.} \Rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0} \quad \&$$

$$\epsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1+e) = \ln \frac{A_0}{A}$$

$$\therefore \sigma = \frac{P}{A} = S \frac{A_0}{A} = S(1+e) \quad (1)$$

위 식에서 e, ϵ , S, σ 는 각각 공칭 변형률, 진 변형률, 공칭 응력 및 진 응력을 나타낸다. 식 (1)에 의해 계산된 true ultimate tensile stress 값이 Table 2에 제시되어 있다.

3.1.2 변형률 제어 시험

Fig. 4는 550°C에서 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s, 1×10^{-5} /s의 변형률 속도로 인장 시험을 수행한 결과를 보여준다. 변형률 속도가 증가할수록 hardening이 감소하는 negative strain rate response를 관찰할 수 있었다. 또한 1×10^{-4} /s, 1×10^{-5} /s의 느린 변형률 속도에서 serration 현상이 관찰되었다.

Fig. 4에서 보면 재료의 거동이 변형률 속도에 의존하지만, 그 영향이 그리 크지 않음을 관찰할 수 있다. 그러나 온도의 경우 재료 거동에 매우

Table 2 The mechanical properties of 316L stainless steel

Temp.	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ϵ_f (%)	σ_{ultrue} (MPa)	Toughness (MJ/m ³)
20°C	9.3×10^{-4}	187	684	50.1	552	326.1
550°C	9.4×10^{-4}	151	487	24.0	554	107.0
600°C	9.1×10^{-4}	149	457	25.3	528	106.7
650°C	9.7×10^{-4}	144	403	33.7	472	124.6

σ_{ultrue} : true ultimate tensile stress

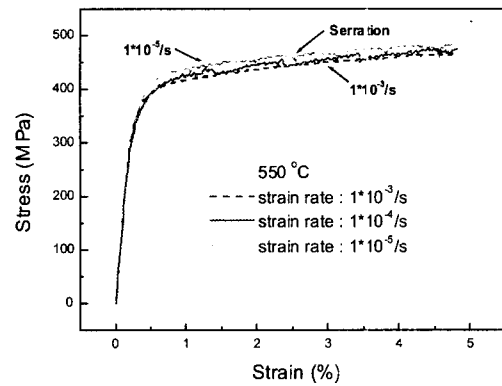


Fig. 4 Strain rate dependency at 550°C

중요한 영향을 미침을 알 수 있다.(Table 2).

3.2 저주기 피로 시험

3.2.1 저주기 피로 수명에 대한 온도의 영향

상온, 550°C, 600°C, 650°C에서 1×10^{-3} /s의 변형률 속도로 0.3% ~ 0.8%의 총 변형률 진폭 저주기 피로시험을 수행하였다. 우선, 가장 보편적으로 사용되는 Coffin-Manson 수명식을 시험 결과에 적용해 보았다.

$$N_f^m \Delta \epsilon_p = C \quad (2)$$

Fig. 5에서 보면 각 온도에 대한 소성 변형률 진폭과 피로수명이 log-log scale 상에서 선형적인 관계를 만족하지만 550°C, 600°C 및 650°C의 경우는 마치 하나의 온도에서 얻어진 시험 결과처럼 보여진다. 이는 같은 총 변형률 진폭에 대한 소성 변형률 진폭이 온도에 따라 변하기 때문이다. 각각의 총 변형률 진폭에 대한 소성 변형률 진폭의 온도 의존성이 Fig. 6에 제시되어 있다. 온도가 증가할수록 각각의 총 변형률 진폭에서 소성 변형률

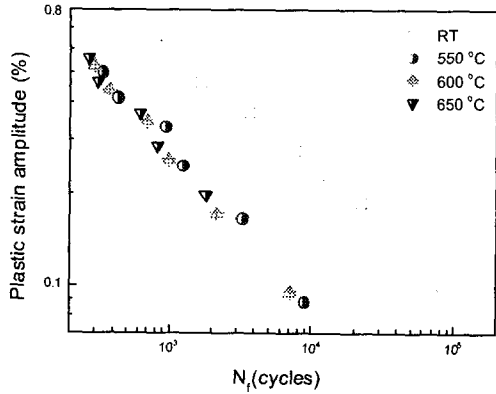


Fig. 5 Life prediction by Coffin-Manson model at $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$

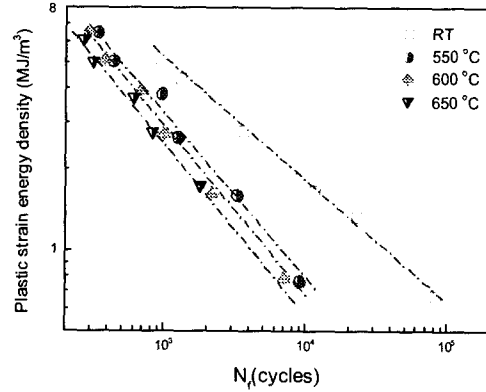


Fig. 7 Life prediction by Morrow model at $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$ (I)

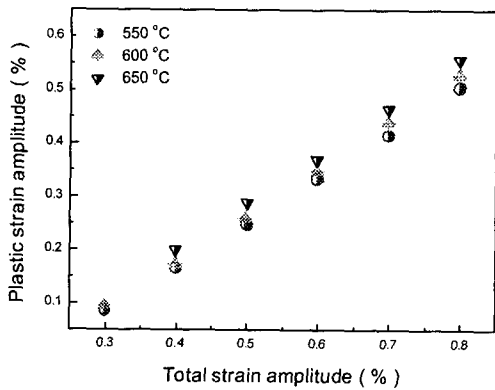


Fig. 6 Temperature dependency of $\Delta\epsilon_p$ at $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$

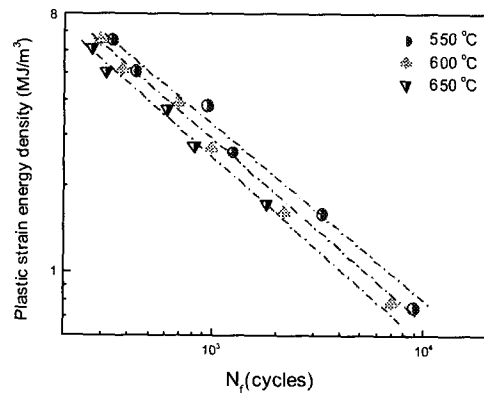


Fig. 8 Life prediction by Morrow model at $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$ (II)

진폭이 차지하는 부분이 증가하였으며, 이는 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 같은 총 변형률 진폭에 대한 피로수명의 온도 의존성을 감소시키는 역할을 한다. 따라서, 수명예측을 위해 소성 변형률 진폭을 사용할 경우 상온과 고온 영역(550°C, 600°C 및 650°C) 각각에 대해서는 좋은 결과를 얻을 수 있으나, 상온과 고온 영역 모두를 하나의 수명식으로 표현하기에는 다소 어려움이 있다.

Morrow 에 의해 제안된 수명식을 적용해 보기 위해 각 수명에 대한 plastic strain energy density 를 안정화된 cycles(=N_f/2)에서 구하였다. Morrow 에 의해 제안된 수명식은 식 (3)과 같이 피로수명이 plastic strain energy density 에 의해 표현될 수 있다.

$$N_f^m W_p = C \quad (3)$$

Fig. 7, 8 에서 보면 각 온도에서 plastic strain energy density 와 피로수명은 log-log scale 상에서 선형적인 관계에 있음을 알 수 있다. 즉, 각각의 온도에 대해 식 (3)을 이용해 재료의 피로수명을 잘 예측할 수 있다. 하지만 식 (3)의 경우 피로수명에 대한 온도의 영향을 고려할 수 없기 때문에, 상수 C 가 온도에 따라 다른 값을 갖게 된다. 따라서 온도의 영향을 고려하기 위해서는 수명식의 변형이 요구되며, 다음과 같은 온도 보상 함수 $f(T)$ 를 이용한 수명식을 생각할 수 있다.

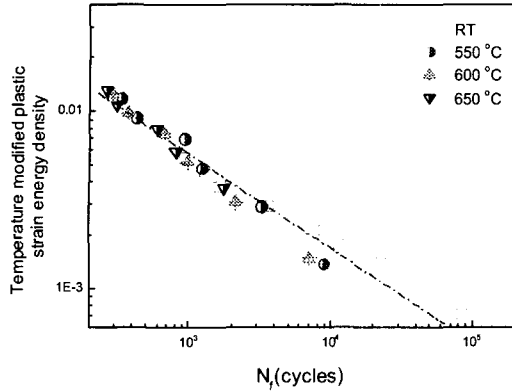


Fig. 9 The verification of a new LCF life prediction model (I)

$$N_f^m \frac{W_p}{f(T)} = C \quad (4)$$

여기서 온도 보상 함수 $f(T)$ 는 피로수명에 대한 온도의 영향을 보상하기 위해 사용된 재료 상수이며, 재료상수 C 가 온도에 관계없이 일정한 값을 갖게 한다. 온도가 증가함에 따라 피로수명은 감소하게 되고, 이로 인해 재료상수 C 는 작아지게 되므로 이를 보상하기 위해서는 $f(T)$ 가 온도에 반비례해야 한다. 온도 보상 함수 $f(T)$ 로 사용될 수 있는 많은 재료 상수들이 존재하지만, 본 연구에서는 인장 시험을 통해 구한 true ultimate tensile stress가 최적임을 알 수 있었다. 따라서, 수명식 (4)는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$N_f^m \frac{W_p}{\sigma_u |_{true}} = C \quad (5)$$

여기서 $\sigma_u |_{true}$ 는 인장 시험으로부터 구한 true ultimate tensile stress 이며, $\frac{W_p}{\sigma_u |_{true}}$ 는 temperature modified plastic strain energy density 를 의미하는 항으로서 재료가 정의되었다. 수명식 (5)를 이용해 재료의 피로수명을 예측한 결과가 Fig. 9 에 제시되어있다. 결과에서 볼 수 있듯이 상온에서 650°C 까지의 넓은 범위의 데이터가 제안된 수명식에 의해 하나의 직선상에 놓여진다. 이는 수명식 (5)에서 재료상수 C 가 온도에 관계없이 일정한 값을 가짐을 의미하며, 따라서 제안된 수명식의 유효성

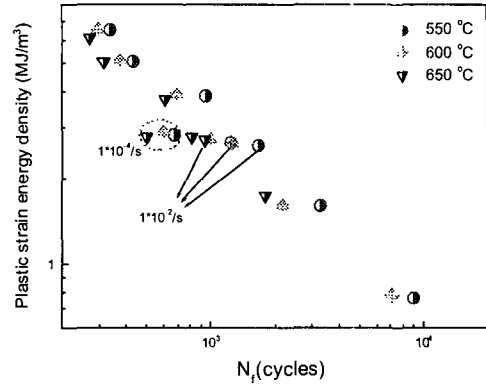


Fig. 10 The strain rate and temperature dependency of fatigue life

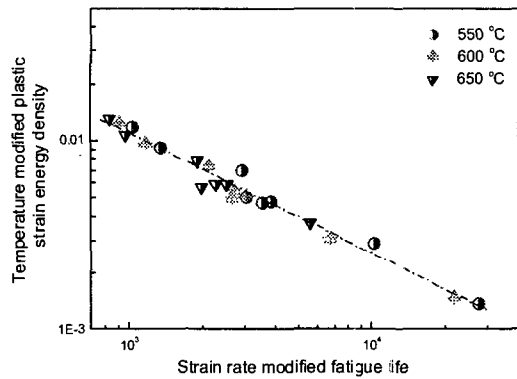


Fig. 11 The verification of a new LCF life prediction model (II)

을 검증할 수 있었다. 식 (5)에 사용되는 재료 상수 m 과 C 는 회귀법에 의해 구해지며 그 값은 각각 0.522, 0.210 이다.

3.2.2 저주기 피로 수명에 대한 변형률 속도의 영향

상온의 경우 변형률 속도가 재료의 변형 거동 및 피로수명에 미치는 영향을 무시할 수 있었으나, 고온이 되면서 변형률 속도 의존성이 중요하게 되었다. 본 연구에서는 550°C, 600°C, 650°C의 온도에서 0.5%의 총 변형률 진폭에 대해 1×10^{-2} /s, 1×10^{-3} /s, 1×10^{-4} /s의 변형률 속도로 실험을 수행하여 재료의 피로수명에 대한 변형률 속도 의존성을 연구하였다. Fig. 10에서 보면 변형률 속도가 빨라지면 재료의 피로수명이 길어지고, 변형률 속도가 느려지면 재료의 피로수명이 줄어드는 현상을 관찰할

수 있다. 재료의 피로수명에 이러한 변형률 속도 의존성이 발생하는 이유는 변형률 속도가 느려지게 되면 한 cycle 동안의 tension loading 부분의 시간이 길어져 기공 및 기타 재료에 손상을 주는 요인들이 발생, 진전하는 것이 용이해지므로 피로수명이 짧아지게 된다. 또한 변형률 속도가 빨라지게 되면 한 cycle 당 tension loading 부분의 시간이 짧아지므로 기공 및 기타 재료에 손상을 주는 요인들이 충분히 발생, 진전하기도 전에 압축력을 받기 때문에 재료의 피로수명이 길어지게 된다.

본 연구에서는 재료의 피로수명에 대한 변형률 속도 의존성을 고려하기 위해, 수명식 (5)에 변형률 속도와 피로수명을 이용한 strain rate modified fatigue life 개념을 도입하였으며, 이를 이용해 제안된 수명식은 식 (6)과 같다. Fig. 11 은 수명식 (6)을 이용해 재료의 피로수명을 예측한 결과이며, 결과에서 볼 수 있듯이 넓은 범위의 온도(550°C~650°C) 및 변형률 속도(1×10^{-4} /s ~ 1×10^{-2} /s)에 대해 실험된 데이터가 하나의 직선상에 놓여진다. 즉, 제안된 수명식 (6)을 이용하여 재료의 피로수명을 예측할 경우, 변형률 속도 및 온도 의존성이 잘 설명될 수 있다. 식 (6)에 사용되는 재료상수 m, k, C 는 회귀법에 의해 구해지며 그 값은 각각 0.635, 0.836, 0.877 이다.

$$\left[N_f \dot{\epsilon}^{k-1} \right]^m \frac{W_p}{\sigma_u |_{true}} = C \quad (6)$$

여기서 $N_f \dot{\epsilon}^{k-1}$ 와 $\frac{W_p}{\sigma_u |_{true}}$ 는 각각 strain rate modified fatigue life 와 temperature modified plastic strain energy density 를 나타내며, 재료 상수 k 는 H.D.Solomon⁽⁵⁾에 의해 제안된 방법을 이용해 구하였다.

4. 결론

316L 스테인리스 강의 저주기 피로 시험이 넓은 범위의 온도(상온~650°C) 및 변형률 속도(1×10^{-4} /s ~ 1×10^{-2} /s)에 대해 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 316L 스테인리스 강의 피로수명은 온도 및 총 변형률 진폭에 반비례하였고, 변형률 속도에는 비례하였다.
- (2) 온도가 증가할수록 각각의 총 변형률 진폭에서 소성 변형률 진폭이 차지하는 부분이 증가하였으며, 피로수명예측을 위해 소성 변형률 진폭을 사용할 경우 넓은 범위의 온도를 고려하는 수명식을 제안하기에 적합하지 않았다.
- (3) 피로수명에 대한 온도 및 변형률 속도의 영향을 고려하기 위해 temperature modified plastic strain energy density 및 strain rate modified fatigue life 개념을 도입한 새로운 저주기 피로수명 예측식이 제안되었으며 실험 결과를 이용하여 제안된 모델을 검증하였다.

후 기

본 연구는 KISTEP 에서 주관하는 원자력기초연구사업의 지원에 의해 한국과학기술원 CARE Lab. 에서 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) L.F.Coffin, Jr., ASME Trans. 76, 931, 1954.
- (2) J.D.Morrow, ASTM STP 378, pp.45, ASTM, Philadelphia, 1964.
- (3) 현중섭, 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 12 호, pp. 2093~2099, 1998.
- (4) L.F.Coffin, Jr., ASME STP 520, pp.5, ASTM, Philadelphia, 1973.
- (5) Solomon, H.D. and Tolksdorf, E.D., ASME J. Electron, Packaging, 117, 130, 1995.
- (6) X.Q.Shi and H.L.J.Pang, Scripta Materialia, Vol. 41, No. 3, pp. 289~296, 1999.
- (7) Sandhya, R., Scripta Materialia, Vol.41, No.9, pp. 921~927, 1999.
- (8) Sergio Simón, Carl Hanser Verlag, München, Z. Metallkd, 84, 1993, 10, pp. 708~715.
- (9) Tarun Goswami, Int. J. Fat., 21, 1999, pp. 55~76.
- (10) V.S.Srinivasan, Int. J. Fat., 21, 1999, pp. 11~21.
- (11) F. A. Kandil, Int. J. Fat., 21, 1999, pp. 1013~1018.