

냉간 가공된 316L 스테인리스 강의 저주기 피로 거동에 미치는 온도의 영향 (II) - 수명 예측 및 파손 기구 -

홍성구* · 윤삼손* · 이순복†

(2002 년 12 월 2 일 접수, 2003 년 4 월 15 일 심사완료)

The Influence of Temperature on Low Cycle Fatigue Behavior of Prior Cold Worked 316L Stainless Steel (II) - Life Prediction and Failure Mechanism -

Seong-Gu Hong, Samson Yoon and Soon-Bok Lee

Key Words : Low Cycle Fatigue (저주기 피로), Life Prediction (수명 예측), Cold Work (냉간 가공), 316L Stainless Steel (316L 스테인리스 강)

Abstract

Tensile and low cycle fatigue tests on prior cold worked 316L stainless steel were carried out at various temperatures from room temperature to 650°C. Fatigue resistance was decreased with increasing temperature and decreasing strain rate. Cyclic plastic deformation, creep, oxidation and interactions with each other are thought to be responsible for the reduction in fatigue resistance. Currently favored life prediction models were examined and it was found that it is important to select a proper life prediction parameter since stress-strain relation strongly depends on temperature. A phenomenological life prediction model was proposed to account for the influence of temperature on fatigue life and assessed by comparing with experimental result. LCF failure mechanism was investigated by observing fracture surfaces of LCF failed specimens with SEM.

기호설명

- LCF : 저주기 피로
- RT : 상온
- N_f : 피로수명
- $\Delta\epsilon_t$: 총 변형률 범위
- $\Delta\epsilon_e$: 탄성 변형률 범위
- $\Delta\epsilon_p$: 소성 변형률 범위
- ΔW_p : 소성 변형률 에너지 밀도

1. 서론

오스테나이트계 스테인리스 강은 고온 강도, 연성, 인성, 내식성 등이 우수하여 경수로 및 액체금속로와 같은 원자력발전소의 일차계 구조 재료로

서 널리 사용되고 있다. 특히 316L 스테인리스 강은 제조된 경험도 많고 특성도 우수할 뿐만 아니라 사용 환경과 중성자 조사 등에 대한 내구성도 양호하고 설계에 필요한 데이터 베이스도 구축되어 있어서 경수로의 노내구조물, 액체금속로 및 핵융합로의 구조 재료로서 유망한 재료이다.⁽¹⁾

고온 구조물에 사용되는 재료는 운전 중에 발생하는 가열과 냉각에 의한 온도 구배에 의해 열변형이 반복해서 발생하게 되어 피로손상을 일으키게 된다. 이러한 열변형에 의한 피로손상은 등은 저주기 피로상황에 의해 모사될 수 있으며, 따라서 저주기 피로시험 결과는 고온 구조물의 설계 및 안정성 평가에 있어 유용한 자료로 이용되고 있다.

오스테나이트계 스테인리스 강의 경우 사용 온도가 높아짐에 따라 피로저항(fatigue resistance)의 감소가 발생한다는 사실이 알려져 있으며, 이러한 피로저항의 변화는 저주기 피로시 발생하는 소성 변형 메커니즘, 크리프 및 산화 효과 등을 이용하여 설명되어질 수 있다.⁽²⁻⁷⁾ 참고 문헌 [2-6]에 의

† 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : sblee@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3029 FAX : (042)869-3210
* 한국과학기술원 기계공학과

하면 저주기 피로시 소성 변형을 일으키는 메커니즘은 온도에 따라 다르다는 것이 보고되었다. 상온부터 300°C의 온도 영역에서는 cell 형태의 전위 구조가 형성되며, 300°C~600°C의 온도 영역에서는 planar 한 전위 구조가 형성된다. 600°C 이상에서는 다시 cell 또는 아결정(subgrain) 형태의 전위 구조가 형성된다. 이러한 소성 변형 메커니즘의 온도 의존성은 재료의 응력-변형을 관계에 영향을 주게 되며 또한 재료의 강도 및 연성에도 영향을 주게 된다. Landgraf, R. W⁽⁸⁾에 의하면 재료의 피로수명은 강도 및 연성의 관점에서 설명되어질 수 있다. 총 변형을 진폭이 작을 경우(고주기 피로) 재료의 강도에 의해 피로수명이 지배되며, 총 변형을 진폭이 큰 경우(저주기 피로)는 재료의 연성에 의해 피로수명이 지배된다. 이러한 관점에서 본다면 온도에 따른 강도 및 연성의 변화는 재료의 피로저항에 영향을 주게 될 것이다. 또한 피로수명 예측을 위해 사용되는 수명인자의 선택도 중요하게 된다. Part I에서 설명되었듯이 재료의 응력-변형을 관계가 온도에 따라 크게 변하게 되므로, 수명 예측시 어떤 수명인자를 선택했느냐에 따라 피로수명에 대한 온도의 영향이 다르게 나타나게 되기 때문이다.

Part I에서는 재료의 인장 및 반복 거동에 미치는 온도의 영향에 대해 분석하였다. Part II에서는 재료의 피로수명 예측 및 피로파손 메커니즘에 대해 분석하고자 하며, 온도가 증가함에 따라 발생하는 피로저항의 감소 원인 및 적합한 수명예측 모델의 검증과 제안에 초점이 맞추어진다. 탄성 변형을 진폭, 소성 변형을 진폭, 응력 진폭 및 소성 변형을 에너지 밀도를 수명인자로 하여 재료의 피로수명에 미치는 온도의 영향을 분석하였으며, SEM(주사전자현미경)을 이용한 파단면 분석을 통해 저주기 피로의 파손 메커니즘에 대한 분석을 수행하였다.

2. 저주기 피로수명 예측

총 변형을 진폭 제어 시험을 통해 얻어진 저주기 피로 수명 데이터가 Fig. 1에 제시되어 있다. 시험시 피로수명에 대한 변형률 속도의 영향을 제거하기 위해 변형률 속도를 1×10⁻³/s로 일정하게 유지하였다. 피로수명은 온도 및 총 변형을 진폭이 증가함에 따라 급격히 감소하였으며, 피로수명에 대한 온도 및 총 변형을 진폭의 영향을 알아보기 위해 탄성 변형을 진폭, 소성 변형을 진폭, 응력 진폭 및 소성 변형을 에너지 밀도를 수명인자로 사용하여 시험 결과를 분석하였다.

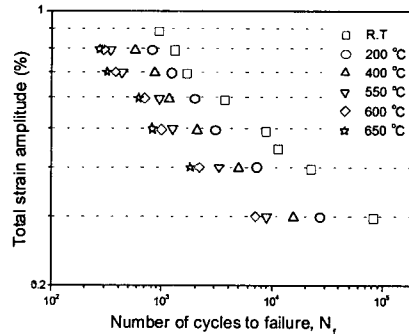


Fig. 1 Total strain amplitude-fatigue life ($\Delta\epsilon_f/2-N_f$) curves

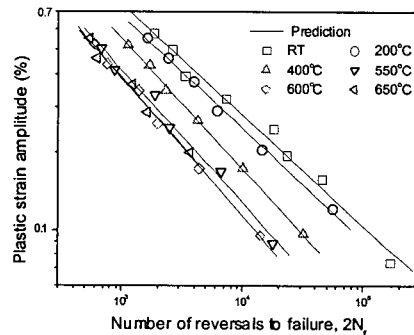


Fig. 2 Plastic strain amplitude-fatigue life ($\Delta\epsilon_p/2-N_f$) curves

우선 각 실험 온도에서 Coffin-Manson⁽⁹⁾ 모델을 적용하였다. Coffin-Manson 모델은 저주기 피로영역에서 소성 변형을 진폭과 피로수명과의 관계를 나타내는 수명식으로서 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서 $\Delta\epsilon_p/2$ 와 N_f 는 소성 변형을 진폭과 피로수명을 의미하며, ϵ'_f 와 c 는 피로 연성 계수와 피로 연성 지수를 의미한다.

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f \cdot (2N_f)^{-c} \quad (1)$$

또한 고주기 피로영역에서는 Basquin⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 식 (2)를 이용해 탄성 변형을 진폭과 피로수명과의 관계를 구할 수 있다. 여기서 $\Delta\epsilon_e/2$ 와 E 는 탄성 변형을 진폭 및 탄성 계수를 의미하며, σ'_f 와 b 는 피로 강도 계수와 피로 강도 지수를 의미한다.

$$\frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^{-b} \quad (2)$$

탄성 및 소성 변형을 진폭을 독립적으로 사용할 경우 수명인자로서 유용하게 사용될 수 있지만, 실제 사용함에 있어 탄성 및 소성 변형을 값을 직

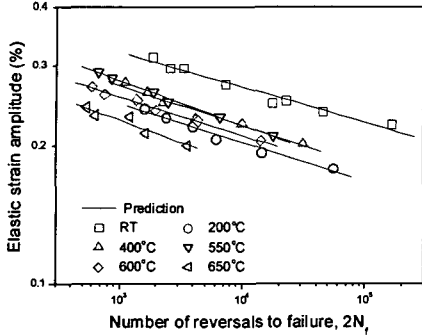


Fig. 3 Elastic strain amplitude-fatigue life($\Delta\epsilon_p/2-N_f$) curves

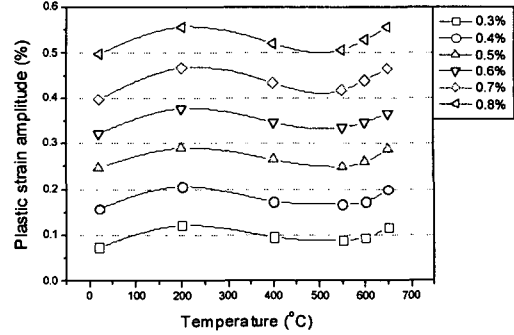


Fig. 4 Temperature dependency of plastic strain amplitude at each total strain amplitude (at $N_f/2$ cycles)

Table 1 LCF parameters of 17% CW 316L stainless steel at various temperatures

Temp. (°C)	σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f (%)	c	K' (MPa)	n'	N_f (cycles)
RT	1015	0.077	14.6	0.430	1078	0.148	5503
200	774	0.086	13.6	0.435	883	0.166	8795
400	808	0.089	18.1	0.506	777	0.132	2731
550	820	0.098	14.5	0.515	829	0.141	1319
600	690	0.085	16.0	0.538	727	0.131	1266
650	640	0.096	14.2	0.522	714	0.149	1743

집 알아야 하는 어려움이 발생함으로, 일반적으로 식 (1)과 (2)를 더하여 구한 총 변형률 진폭과 피로수명과 관계의 관계를 나타내는 식 (3)을 이용하고 있다. 여기서 $\Delta\epsilon_p/2$ 는 총 변형률 진폭을 의미한다.

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^{-b} + \epsilon'_f \cdot (2N_f)^{-c} \quad (3)$$

각 실험 온도에서 소성 변형률 진폭과 탄성 변형률 진폭을 이용하여 피로수명을 예측한 결과가 Fig. 2 와 3 에 제시되어 있으며, 결과에서 알 수 있듯이 각 온도에 대해 실험 결과와 좋은 일치 보여주었다. 각 온도에서의 재료 상수 값들이 Table 1 에 제시되어 있다.

Fig. 2 는 소성 변형률 진폭과 피로수명과 관계의 관계를 보여주며, 온도에 따라 두 관계가 어떻게 변하는 지를 알 수 있다. 총 변형률 진폭을 수명인자로 사용한 결과(Fig. 1)와 비교해 볼 때 상온과 200°C 그리고 고온영역(550°C~650°C)에서 피로수명에 대한 온도 의존성이 크게 감소함을 관찰할 수 있으며, 특히 600°C 와 650°C 의 경우 온도 의존성이 거의 관찰되지 않는다. 이는 총 변형률 진폭에서 해당 소성 변형률 진폭이 차지하는 비율이 온도에 따라 크게 변화하기 때문인 것으로 사료된

다. Fig. 4 는 총 변형률 진폭에 대해 해당 소성 변형률 진폭이 차지하는 비율이 온도에 따라 어떻게 변화하는지 보여준다. 소성 변형률 진폭이 차지하는 비율은 200°C 까지 온도와 함께 증가하지만 그 이후의 온도에서는 감소하는 경향을 보여주며 550°C 이상의 온도에서는 다시 증가하는 경향을 보여준다. 피로 손상의 누적이 소성 변형의 반복에 의해 발생된다는 점을 고려할 때, 같은 총 변형률 진폭에 대해 소성 변형률 진폭의 비율이 높아지게 되면 그 만큼 재료에 많은 손상이 가해질 것이고 따라서 피로수명은 감소하게 된다.

식 (1)에 사용되는 재료상수 ϵ'_f 와 c 는 온도의 함수로 표현되며(Table 1), 온도 의존성은 크게 두 영역으로(RT~200°C 와 400°C~650°C) 나누어진다. 각각의 온도영역에서 온도가 증가함에 따라 c 는 증가하고 ϵ'_f 는 감소하였으며, 이는 온도가 높아짐에 따라 피로수명의 감소가 발생함을 의미한다. 재료 상수의 온도 의존성은 온도가 증가함에 따라 산화, 크리프 및 소성 변형 메커니즘의 변화(또는 상호 작용)가 피로수명에 중요한 인자로 작용하기 때문인 것으로 생각된다. 200°C 에서 400°C 로 온도가 증가할 경우에 발생하는 재료상수의 갑작스런

변화는 316L 스테인리스 강의 녹는점이 1600°C 정도 임을 고려할 때, 200°C \approx 0.25 T_m , 400°C \approx 0.36 T_m 이므로 크리프 현상이 400°C 이상의 온도에서 중요하게 되기 때문이다. 또한, 소성 변형 메커니즘의 변화도 주요 원인으로 생각된다. 참고 문헌 [2]에 의하면 AISI 310 강의 경우 200°C 이하의 온도에서는 cell 모양의 전위구조가, 200°C~550°C 에서는 동적변형시효에 의해 planar 구조가, 550°C 이상에서는 다시 cell 또는 아결정 구조가 생성된다는 것이 보고되었다. Bressers J⁽³⁾ 는 오스테나이트 스테인리스 강에서 동적 변형 시효가 일어나는 온도는 300°C~600°C 이며, 이 온도 영역에서는 동적 변형시효에 의해 planar 한 전위 구조가 생성된다고 보고하였다. 또한 316L(N) 스테인리스 강에 대해서도 유사한 결과가 보고되었다.⁽⁶⁾ 이러한 온도에 따른 소성 변형 메커니즘의 변화는 본 연구에 사용된 316L 스테인리스 강에도 적용될 것이며, 200°C 에서 400°C 로 온도가 증가할 경우 소성 변형 메커니즘은 cell 구조에서 planar 구조로 바뀌게 된다. 전위 구조가 planar 하게 되면 전위의 교차슬립을 방해하게 되어 소성 변형을 위한 응력이 증가하게 되고, 이로 인해 균열 선단에서는 더 큰 응력집중이 발생하게 되어 피로균열의 성장을 가속화 시킨다. 따라서 피로수명의 감소가 발생한다.

Fig. 3 은 탄성 변형을 진폭과 피로수명과의 관계를 보여준다. 각 온도에서 선형적인 관계를 만족하지만, 온도의 영향은 일관성이 없는 것처럼 보인다. 식 (2)에서 재료상수 σ'_f 와 b 는 온도의 함수(Table 1)이며, σ'_f 의 경우 400°C~550°C 영역에서 오히려 증가하였는데 이는 동적변형시효에 의해 재료의 강도가 증가했기 때문에 나타나는 결과이다(Part I 의 Fig. 2). 탄성 변형을 진폭을 이용하여 피로수명을 예측하게 되면, Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 동적변형시효에 의해 재료의 취성화가 발생하는 400°C~550°C 온도 영역에서 오히려 피로수명이 향상되는 결과를 얻을 수 있다. 하지만 소성 변형을 진폭을 이용할 경우 이와는 다르게 온도가 증가함에 따라 피로수명이 감소하는 결과를 보여준다. 따라서 식 (3)에 의해, 총 변형을 진폭을 이용하여 피로수명을 예측할 경우 위의 두 영향이 합쳐져서 나타나게 되며, 온도가 증가함에 따라 피로수명이 감소하는 결과를 보여주게 된다(Fig. 1). 각 온도에서 식 (3)에 의한 예측 결과가 Fig. 5 에 제시되어 있다.

천이 피로수명 N_t (transition fatigue life : 탄성 변형을 진폭과 소성 변형을 진폭이 같게 되는 총 변형을 진폭에서의 피로수명을 의미하며, 일반적으

로 강도가 증가할수록 또 연성이 감소할수록 작아지는 경향을 보여준다.)는 Fig. 5 에서 직접 구할 수 있으며, 각 온도에서의 값들이 Table 1 에 제시되어 있다. 비교적 높은 값의 N_t 가 관찰되었으며, 이는 316L 스테인리스 강이 연성이 매우 큰 재료이기 때문이다. 천이 피로 수명의 온도 의존성은 온도에 따른 강성 및 연성의 변화에 의해 설명될 수 있다(Part I 의 Fig. 2 와 3). 상온에서 200°C 로 온도가 증가할 경우 N_t 는 오히려 증가하였는데 이는 강도에 있어서 급격한 감소가 발생하였기 때문이며, 200°C 에서 400°C 로 온도가 증가할 경우 동적변형시효에 의해 강도의 증가 및 연성의 감소가 발생하므로 천이 피로수명은 급격히 감소하게 된다. 550°C~600°C 에서는 강도 및 연성의 변화가 거의 없기 때문에 N_t 의 값에 큰 변화가 없게 된다. 650°C 에서는 연성의 증가로 인해 N_t 값이 다시 증가하게 된다. 또한 총 변형을 진폭에 대한 해당 소성 변형을 진폭의 비율이 온도에 따라 변하는 것도 중요한 이유이다. Fig. 4 에서 보면 200°C 와 650°C 에서 소성 변형을 진폭의 비율이 최대가 되었으며, 이로 인해 이 두 온도에서는 천이 피로수명에 해당하는 총 변형을 진폭이 다른 온도에 비해 작아지게 되므로, 결국 천이 피로수명이 증가하게 된다.

Morrow⁽¹¹⁾에 의하면 재료의 피로손상은 각 사이클당 누적되는 소성 변형을 에너지 밀도 ΔW_p 와 관련이 있으며, 피로수명은 식 (4)와 같이 ΔW_p 를 이용해 예측할 수 있다. 여기서 m 과 C 는 실험으로부터 구해지는 재료 상수이며, ΔW_p 는 반수명(half life)에서 응력-변형을 이력 곡선의 안쪽 면적을 나타낸다.

$$N_f^m \cdot \Delta W_p = C \quad (4)$$

각 실험 온도에서 소성 변형을 에너지 밀도와 피로수명과의 관계가 Fig. 6 에 제시되어 있다. 결과에서 알 수 있듯이 모든 온도에서 재료의 피로수명은 Morrow 모델에 의해 잘 예측되었으며, 각 온도에서 계산된 재료상수 m 과 C 의 값이 Table 2 에 제시되어 있다. ΔW_p 를 수명인자로 사용할 경우 피로수명에 대한 온도의 영향이 잘 나타남을 볼 수 있는데, 이는 ΔW_p 에는 이미 소성 변형을 및 응력의 온도 의존성이 내포되어 있기 때문이다 Figs. 4 와 7 에서 보는 바와 같이 소성 변형을 진폭의 비율이 증가하는 200°C 와 550°C~650°C 의 온도에서 피크응력(peak stress)은 감소하게 되므로 결국 ΔW_p 에 대한 온도 의존성은 Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 작아지게 된다. 따라서 피로수명에 대한 온도 의존성은 $\Delta \epsilon_f/2 \cdot N_t$ 곡선의 결과(Fig. 1)와

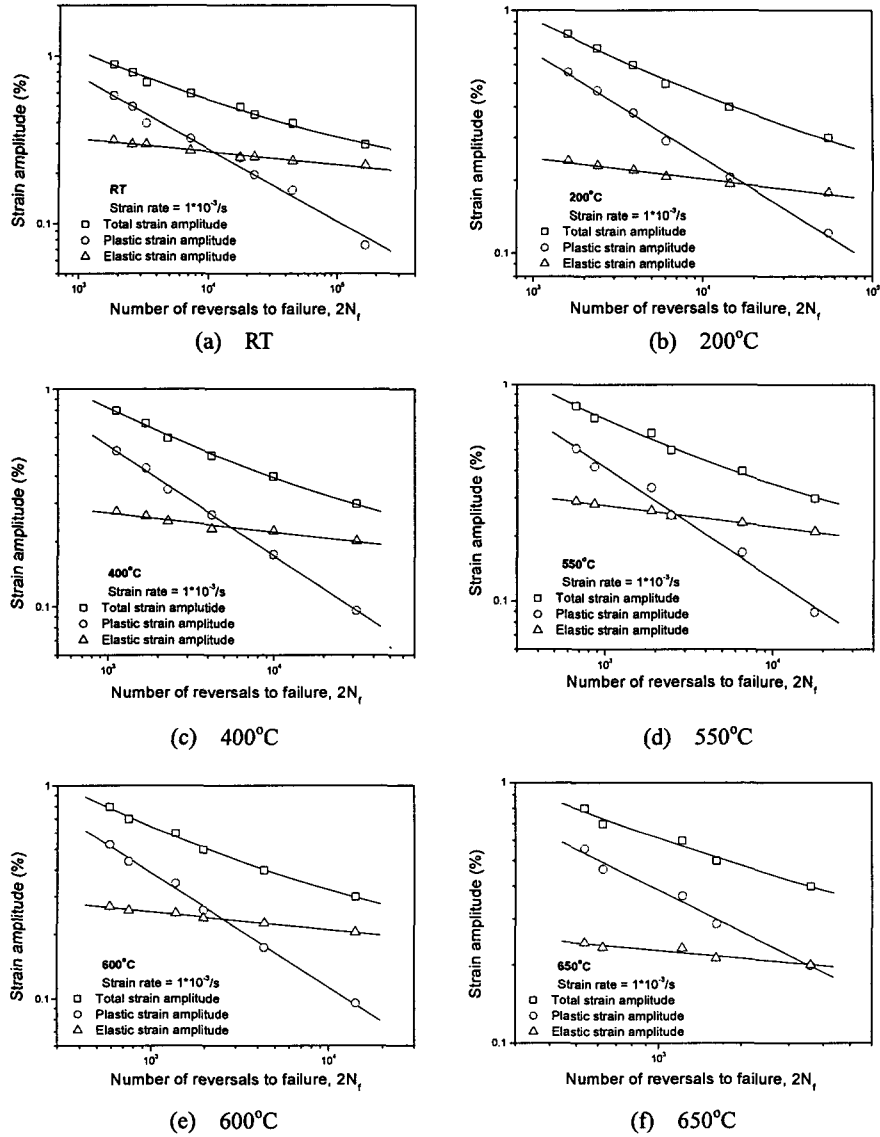


Fig. 5 A comparison of the plastic and elastic fatigue resistances for material subjected to six different levels of temperature

Table 2 Material constants in Morrow model

Temp.	RT	200°C	400°C	550°C	600°C	650°C
m	0.531	0.558	0.622	0.639	0.666	0.645
C	346	278	333	268	281	218

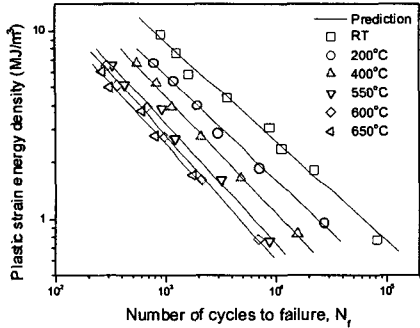


Fig. 6 Plastic strain energy density-fatigue life (ΔW_p-N_f) curves

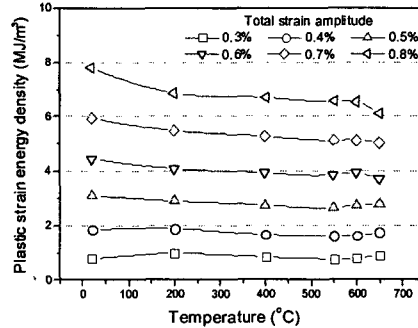


Fig. 8 Temperature dependency of ΔW_p at each total strain amplitude (at $N_f/2$ cycles)

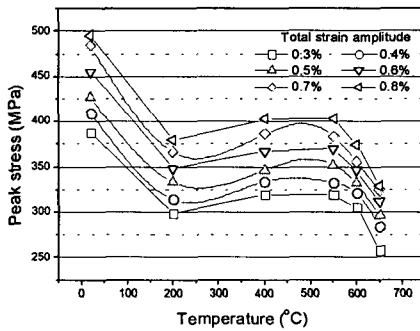


Fig. 7 Temperature dependency of peak stresses at each total strain amplitude (at $N_f/2$ cycles)

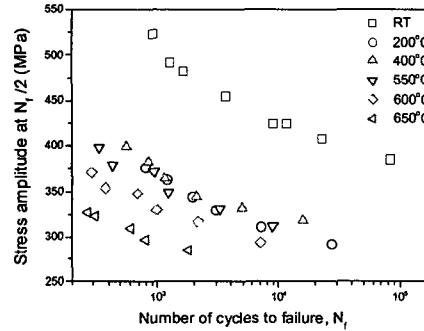


Fig. 9 Stress amplitude-fatigue life(S-N) curves

유사하게 된다.

Table 2 에서 볼 수 있듯이 재료상수 m 과 C 는 온도의 함수이며, 온도의 영향은 Coffin-Manson 모델에서와 유사하게 크게 두 영역으로(RT~200°C 와 400°C~650°C) 구분되었다. 각각의 온도 영역에서 온도가 증가함에 따라 m 은 증가하고 C 는 감소하였으며, 이는 온도가 올라감에 따라 피로수명의 감소가 발생함을 의미한다. 또한 200°C 에서 400°C 로 온도가 증가하는 경우 재료 상수들의 급격한 변화가 관찰되었다. 이러한 재료 상수들의 온도 의존성은 Coffin-Manson 모델에서와 같은 이유에 의해 설명되어 진다. 즉, 온도가 올라감에 따라 산화, 크리프 및 소성 변형 메커니즘의 변화(또는 상호 작용)가 피로수명에 중요한 인자로 작용하기 때문이다.

반수명에서의 응력진폭을 이용해 재료의 S-N 관계를 구해 보았으며, 그 결과가 Fig. 9 에 제시되어 있다. 각 온도에서 응력진폭과 $\log N_f$ 의 관계는 선형적이지 않았으며, 온도가 증가함에 따라 피로수명의 감소를 보여주지만 앞서 예측된 결과와 비교해볼 때 상이한 양상을 보여준다. 상온에서 200

°C 로 온도가 증가할 경우 수명의 급격한 감소가 관찰되며, 200°C~550°C 의 온도영역에서는 온도의 영향이 거의 없는 결과를 보여준다. 550°C 이후에는 다시 수명의 감소가 관찰된다. 이러한 피로수명의 온도 의존성은 실험이 총 변형률 진폭 제어 하에 수행되었으며, 이때 반수명에서 유발되는 피크응력이 Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 온도에 따라 크게 변화하기 때문이다. 400°C~550°C 에서 관찰되는 피크응력의 증가는 동적변형시효에 의해 재료가 취성화 되었기 때문이다.

지금까지의 분석결과에서 알 수 있듯이 응력과 변형률의 관계는 온도에 크게 의존하였으며, 따라서 적절한 수명인자의 선택이 피로수명 예측에 매우 중요하였다. 이러한 사실은 고온 구조물의 설계 및 안정성 평가시 온도의 영향을 고려하는 것이 피할 수 없는 중요한 문제임을 고려할 때 매우 유용한 정보가 될 것이다. 수명인자로서 소성 변형률 에너지 밀도를 사용할 경우 응력과 변형률 모두를 포함하고 있으므로 피로수명에 대한 온도 의존성이 가장 명확하게 관찰되었다.

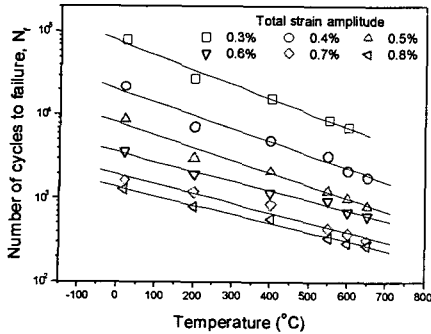


Fig. 10 Temperature dependency of fatigue life at each total strain amplitude

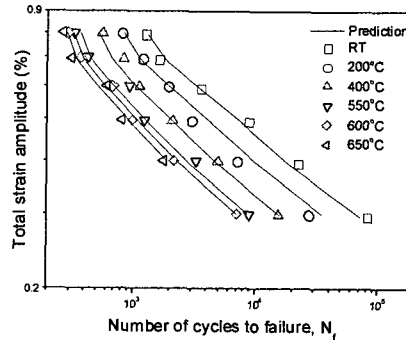


Fig. 11 Experimental data vs predicted fatigue life

Table 3 Material constant, C in Eq. (5)

$\Delta\epsilon_f / 2$ (%)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
C	0.00174	0.00158	0.00152	0.00117	0.00116	0.00109

3. 현상학적 수명예측 모델 제안

기존에 제시된 수명예측 모델들을 이용할 경우, 등은 상황에 대해서는 좋은 예측 결과를 보여주지만 피로수명에 대한 온도 변화의 영향을 하나의 수식을 이용해 설명하는 것은 사실상 불가능하였다. 하지만, 각각의 총 변형률 진폭에 대해 온도와 피로수명과의 관계를 살펴보면 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 선형-대수눈금 상에서 선형적인 관계가 있음을 알 수 있으며, 이러한 관계를 이용한다면 온도 영향이 고려된 현상학적 수명예측 모델의 제안이 가능하게 된다. 일정 총 변형률 진폭에 대해 피로수명과 온도는 식 (5)의 관계를 갖는다. 여기서 N_f 와 T 는 피로수명 및 온도를 의미하며, 재료상수 C 는 총 변형률 진폭의 함수이다.

$$\frac{d \log N_f(T)}{dT} = -C \quad (5)$$

식 (5)를 상온에서 관심이 되는 온도까지 정적분하면, 상온에서는 $T=T_R$ 일때 $N_f=N_{fR}$ 이므로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (6)을 정적분한 값은 식 (7)과 같이 표현된다. 여기서 T_R 와 N_{fR} 은 각각 상온과 상온에서의 피로수명을 나타낸다.

$$\int_{N_{fR}}^{N_f(T)} d \log N_f(T) = \int_{T_R}^T -C \cdot dT \quad (6)$$

$$N_f(T) = N_{fR} \cdot 10^{-C(T-T_R)} \quad (7)$$

각각의 총 변형률 진폭에 대해 재료상수 C 를 계산해 보면 Table 3에 제시된 바와 같이 총 변형률 진폭에 대해 선형적으로 감소하는 값을 갖는다 즉 재료상수 C 는 총 변형률 진폭의 일차함수로 표현되며, 최소자승법을 이용해 재료상수 C 와 총 변형률 진폭과의 관계를 구하면 식 (8)의 관계가 구해진다.

$$C = -0.00139 \cdot (\Delta\epsilon_f/2) + 0.00214 \quad (8)$$

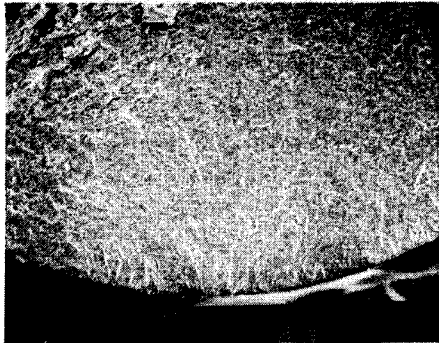
따라서 식 (7)과 (8)을 이용하여 수명 예측식 (9)를 얻을 수 있다.

$$N_f(T) = N_{fR} \cdot 10^{[-0.00139 \cdot (\Delta\epsilon_f/2) + 0.00214] \cdot (T-T_R)} \quad (9)$$

제안된 수명식 (9)를 이용하여 재료의 피로수명을 예측한 결과가 Fig. 11에 제시되어 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 넓은 범위의 온도영역 (RT~650°C) 및 총 변형률 진폭(0.3%~0.8%)에 대해 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 즉, 수명식 (9)를 이용한다면 상온에서의 저주기 피로 시험 데이터를 가지고, 관심이 되고 있는 온도 및 총 변형률 진폭에 대한 피로수명을 예측하는 것이 가능하게 된다.

4. 피로파손 메커니즘

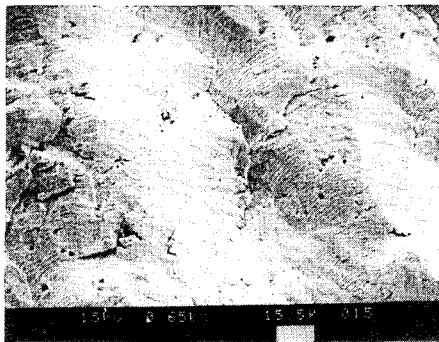
LCF 변형시 발생되는 피로파손 메커니즘을 관찰하기 위해, 저주기 피로시험이 끝난 시편을 대



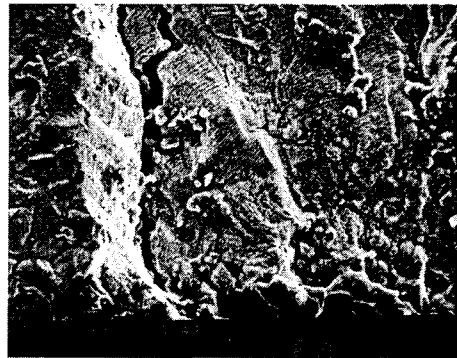
(a) Crack initiation on the fracture surface border ($\Delta\varepsilon_f = \pm 0.6\%$, $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$, 400°C)



(b) Fracture surface near the crack initiation site showing transgranular crack propagation with fatigue striations ; the same specimen as in (a)



(c) Fracture surface near the crack initiation site showing similar figure as (b) ($\Delta\varepsilon_f = \pm 0.6\%$, $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$, 200°C)



(d) Fracture surface near the crack initiation site ($\Delta\varepsilon_f = \pm 0.6\%$, $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$, 650°C)



(e) Fracture surface near the final fracture showing increased striation spacing and secondary cracks ; the same specimen as in (d)

Fig. 12 Fracture surfaces of the fatigue tested specimens

상으로 SEM(주사전자현미경)을 이용하여 파단면을 관찰하였다(Fig. 12). $1 \times 10^{-3}/s$ 의 변형률 속도로 제어된 경우 파단 양상은 모든 실험온도(RT~650°C)에서 유사하였으며, 시편의 표면에서부터 균열이 발생하여 striation 을 갖는 입내(transgranular)진

전 모드로 시편 내부로 전파해가는 양상을 보여주었다. J. Wareing⁽¹²⁾에 의하면, 저주기 영역에서 고온 피로시험이 수행될 경우 산화나 부식에 의해 시편의 표면에서 균열이 발생하며, 균열의 진전은 입내 진전 양상을 갖는다. 이때, 재료의 특성(연성

또는 취성)에 따라 striation 이 존재할 수도 없을 수도 있다. 균열이 진전함에 따라 striation 간격이 커짐을 관찰할 수 있었으며(Fig. 12-(e)는 최종 파단이 일어난 부분의 사진이다. 같은 배율의 사진(d)와 비교해 볼 때 striation 가격이 크게 증가하였음을 관찰할 수 있다), striation 사이에 많은 딴플(dimple)들이 관찰되었다. 또한, 2차 균열(secondary crack)의 발생을 관찰할 수 있으며, 판단면에서 의해 없어진 것이다.

striation 이 없어진 부분은 피로 시험 중 마찰에 V. S. Srinivasan⁽⁶⁾에 의하면 316L(N) 스테인리스 강 의 경우, 500°C~600°C 온도영역에서 비교적 빠른 변형률 속도($> 3 \times 10^{-3}/s$)로 LCF 변형이 일어나게 되면 균열의 발생 및 진전은 입내 발생 및 진전 양상을 보이지만, $3 \times 10^{-4}/s$ 이하의 느린 변형률 속도에서는 균열이 입계(intergranular) 진전 양상을 보여준다. 산화의 영향은 $3 \times 10^{-5}/s$ 의 느린 변형률 속도에 대해 600°C 에서 관찰되었으며, 이 경우 입계 진전이 산화에 의해 촉진 되었다.

5. 피로수명에 대한 변형률 속도 의존성

상온의 경우 변형률 속도가 재료의 변형 거동 및 피로수명에 미치는 영향을 무시할 수 있었으나 고온이 되면서 변형률 속도 의존성이 중요하게 되었다. 특히 피로수명에 대한 영향이 크게 관찰되었다. 550°C, 600°C, 650°C 의 온도에서 0.5%의 총 변형률 진폭에 대해 $1 \times 10^{-2}/s$, $1 \times 10^{-3}/s$, $1 \times 10^{-4}/s$ 의 변형률 속도로 저주기 피로 시험을 수행한 결과가 Fig. 13 과 14 에 제시되어있다. 모든 온도에서 재료의 피로수명은 변형률 속도가 느려짐에 따라 급격히 감소하였다. 재료의 피로수명에 이러한 변형률 속도 의존성이 발생하는 이유는 다음과 같이 설명되어질 수 있다. 인장과 압축이 동시에 작용하는 피로상황에 놓여있는 재료의 경우, 각 사이클에서 재료에 손상을 주는 부분은 인장하중(tension-going)부분이라는 것이 많은 연구자들에 의해 보고되었다.⁽¹³⁾ 따라서 변형률 속도가 느려지게 되면 각 사이클에서 인장하중부분이 차지하는 시간이 길어지게 되므로 재료에 손상을 주는 요인들이 발생, 진전하는 것이 용이해져 각 사이클에서 누적되는 손상이 커지게 되므로, 결국 피로수명은 감소하게 된다. 이와는 반대로 변형률 속도가

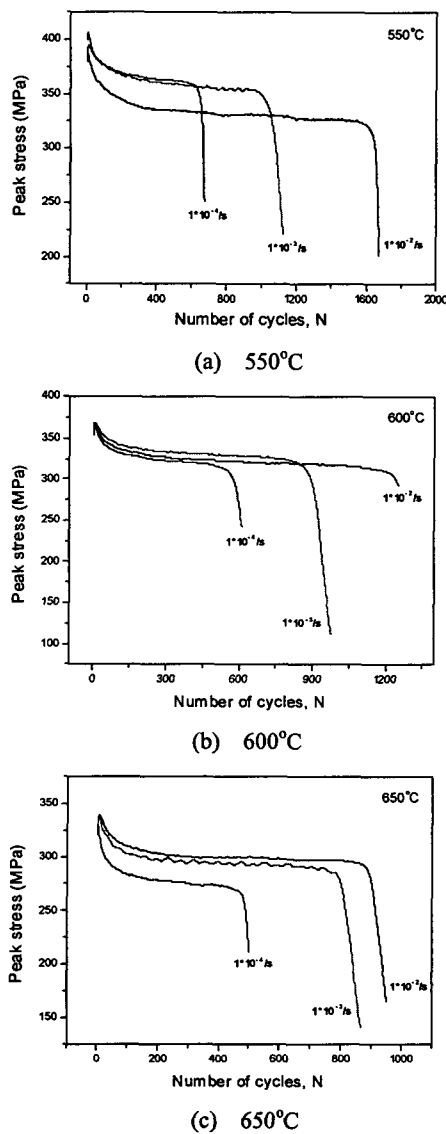


Fig. 13 Cyclic stress response as a function of strain rate at each temperature

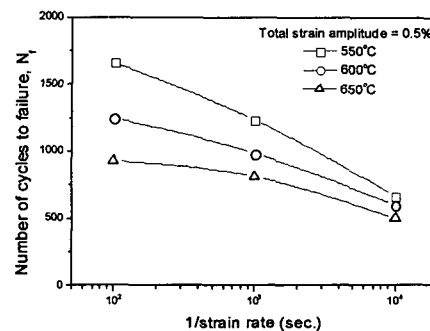


Fig. 14 Variation of fatigue life with strain rate at each temperature

빨라지게 되면 각 사이클에서 인장하중부분의 시간이 짧아지므로 재료에 손상을 주는 요인들이 충분히 발생, 진전하기도 전에 압축력을 받기 때문에 각 사이클에서 누적되는 손상은 상대적으로 줄어들게 되며, 따라서 재료의 피로수명이 증가하게 된다.

참고문헌 [4-5]에 의하면 입내(transgranular) 균열 진전이 지배적인 경우 동적변형시효에 의한 피로수명에 있어서의 급격한 감소가 보고되었다. 변형을 속도에 의한 피로수명의 감소는 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 550°C에서 가장 현저하게 나타나는데, 이는 550°C에서 negative strain rate stress response 거동이 일어나기 때문이다. Fig. 13의 (a)에서 관찰되듯이, 변형을 속도가 느려지게 되면 이때 유발되는 응력이 증가하게 되므로 균열 선단에 큰 응력집중이 발생하게 되고, 이로 인해 균열의 진전이 가속화되어 재료의 피로수명은 감소하게 된다.

온도가 높아짐에 따라 산화의 영향이 중요해지며, 특히 변형을 속도가 느려지면 중요하게 된다.⁽¹⁴⁾ 또한 크리프의 영향도 온도가 높아짐에 따라 중요하게 되며, 변형을 속도가 느려지게 되면 한 사이클당 누적되는 크리프 손상이 증가하게 되므로 결국 재료의 수명은 감소하게 된다. 위에서 언급된 손상 메커니즘들은 각각 작용하기도 하지만 서로 상호 작용에 의해 더욱 재료의 손상을 가속화 시키며, 이로 인해 온도의 증가 및 변형을 속도의 지연이 발생할 경우 피로수명에 있어서의 급격한 감소가 발생하게 된다.

피로수명에 대한 온도의 영향은 변형을 속도에서 비례하였으며 $1 \times 10^{-2}/s$ 의 변형을 속도에서 최대가 되었다(Fig. 14). 이러한 결과는 V. S. Srinivasan⁽⁶⁾에 의해 발표된 316L(N) 스테인리스 강의 경우와 유사하였다.

6. 결론

316L 스테인리스 강의 인장 시험 및 저주기 피로 시험이 넓은 범위의 온도(상온~650°C) 및 총 변형을 진폭(0.3% ~ 0.8%)에 대해 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 온도의 증가 및 변형을 속도의 지연에 의해 재료의 피로저항(fatigue resistance)에 급격한 감소가 발생하였으며, 이는 소성 변형 메커니즘의 변화, 크리프 및 산화 효과(또는 상호작용)에 의해 설명되어 질 수 있다.

(2) 응력과 변형률의 관계가 온도에 크게 의존하므로 피로수명 예측시 수명인자의 선택이 매우

중요하였다. 소성 변형률 에너지 밀도를 수명인자로 사용할 경우 응력과 변형률 모두가 고려되므로 피로수명에 대한 온도의 영향이 가장 명확하게 관찰되었다.

(3) 피로수명에 대한 온도의 영향을 고려한 현상학적 모델이 제안되었으며, 실험 결과와의 비교를 통해 제안된 수명식의 유효성을 검증하였다.

(4) 저주기 피로의 파손 메커니즘은 모든 온도(RT~650°C, $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} / s$)에서 유사하였다. 시편의 표면에서부터 균열이 발생하여 striation을 갖는 입내(transgranular)진전 모드로 시편의 내부로 전파해가는 양상을 보여주었다.

후 기

본 연구는 국가지정 연구실 CARE Lab.의 지원 하에 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, D. W., Ryu, U. S. and Hong, J. H., 2000, The Korean Institute of Metals and Materials Trans., 13(8), pp. 36-42.
- (2) Kanazawa K, Yamaguchi K, Nishijima S., 1988, ASTM STP 942, pp. 519-530.
- (3) Bressers J., 1987, In High Temperature Alloys, Their Exploitable Potential, ed. J. B. Marriott, M. Merz, J. Nihoul and J. Ward. Elsevier Applied Science, Amsterdam, pp. 385-410.
- (4) Valsan M, Sastry DH, Bhanu Sankara Rao K, Mannan SL, 1995, Metall. Trans., 25A, pp. 159.
- (5) Srinivasan VS, Sandhya R, Bhanu Sankara Rao K, Mannan SL, Raghavan KS, 1991, Int. J. Fat., 13(6), pp. 471.
- (6) Srinivasan, V. S., Valsan, M., Sandhya, R., K. Bhanu Sankara Rao, Mannan, S. L., Sastry, D. H., 1999, Int. J. Fat., 21, pp. 11-21.
- (7) Hong, S. G., Lee, S. B., 2002, KSME Trans. A, 26(3), pp. 521-527.
- (8) Landgraf, R. W., 1970, in "Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys", ASTM STP 467, pp. 3-36.
- (9) Coffin, L.F., Jr., 1954, ASME Trans., 76, p. 931.
- (10) O. H. Basquin, 1910, "The Exponential Law of Endurance Tests," Am. Soc. Test. Mater. Proc., 10, pp. 625-630.
- (11) Morrow, J.D., 1964, ASTM STP 378, p. 45.
- (12) Wareing, J., 1983, Fatigue at High Temperature, ed. R.P.Skelton, Applied Science Publishers, Barking, p. 142.
- (13) Ostergren. W. J., 1976, ASME-MPC symposium on creep/fatigue interaction, MPC-3, New York.
- (14) Driver JH, Gorier C, Belrami C, Vidan P, Amzallag C, 1988, ASTM STP 942, p. 438.