

고온저사이클 피로시험에서 변형률파형이
피로수명에 미치는 영향에 대한 연구

A Study of Strain Waveform Effect on Fatigue Life
in High Temperature Low Cycle Fatigue Test

유 재 환*

Jae-Hwan Yoo

(1999년 1월 13일 접수, 1999년 2월 25일 채택)

ABSTRACT

The fatigue life tests were performed in strain control with triangular and hold-time waveforms at 650°C. The fatigue lives were investigated according to waveform examining damage mechanisms, which could be used to predict the fatigue life and estimate the remaining life. The results obtained are as follows:

The fatigue lives were in order of the fast-fast>the fast-slow>the slow-fast in the triangular waveforms, and the fatigue lives in slow-fast waveforms got shorter in the hold-time waveforms.

The damage mechanisms of the fracture surfaces were transgranular fracture in the fast-fast, the fast-slow waveforms and intergranular fracture in the slow-fast waveform.

1. 서 론

산업의 발달과 첨단 과학기술의 개발과 더불어 가혹한 분위기 하에서 사용되는 기계 구조물들이 증가하고 있다. 특히, 고온 또는 고온·고압 상태에서 사용되는 기계는 계속 증가하고 있으며, 이러한 분위기에서 사용되는 기계는 그 안

정성이 대단히 중요하다. 따라서 여기에 사용되는 재료는 내식성과 내열성이 양호해야 하며 사용 목적에 해당하는 분위기 및 역학적 조건에서 고온강도에 대한 충분한 연구가 요청된다^{1,2)}.

고온에서 구조물의 위험한 파괴를 방지하고, 사용 중에 안전성을 확보하기 위해서는 재료 수명이 정확히 예측되어야 한다. 정확한 수명 예측

* 세명대학교 산업안전공학과

은 다양한 조건 하에서 각각의 조건이 피로수명에 미치는 특징적인 효과와 손상기구를 구명하는 작업을 요구한다. 특히, 이들 조건이 피로수명에 미치는 지배적인 손상기구는 크리프와 피로의 단순 또는 복합적인 손상기구이므로, 크리프와 피로의 거동과 손상기구를 명확히 구명하는 연구가 필요하다.

크리프 손상은 온도분위기에 기인한 입계변형이 원인이 되어 입계에서 썩기형 또는 원형보이드(void)의 발생·성장 그리고 합체에 의하여 시간의존형으로 진행하며³⁾, 피로손상은 슬립밴드(slip band)에 집적된 반복 소성변형이 원인이 되어 사이클의존형으로 진행한다⁴⁾고 알려져 있다. 또한, 크리프와 피로의 전혀 다른 손상기구가 공존하면서 동시에 진행할 경우에 두 손상기구가 단순히 독립적으로 작용하기도 하지만 복합적인 상호작용을 일으켜 손상이 가속화됨으로써 수명이 감소하는 현상이 일어난다고 보고되고 있다⁵⁾.

크리프·피로의 상호작용 시험은 주로 환봉형 시험편을 사용하여, 유지시간을 부가한 파형에서 저사이클 피로수명 시험을 실시하는 것이 일반적이다. 실험의 결과로 얻은 응력-변형률 히스테리시스루프 및 소성스트레인과 파괴시간에 대한 자료를 이용하여 크리프-피로 상호작용을 조사하게 된다. 그러나 최근에 유지시간을 부가하는 파형 이외에 삼각파형 특히, 비대칭 삼각파형에 대한 관심이 증대하고 있다^{6,7)}. Conway⁸⁾ 등은 1 사이클의 반복시간이 동일한 경우에 피로수명을 비교하면, 변형률 속도에 의한 피로수명의 저하와 유지시간 증가에 의한 피로수명 저하의 정도가 동일한 것에 기초하여, 변형률 속도의 영향과 유지시간의 영향이 동일하다고 하였으나, 그후의 연구⁹⁾에서는 변형률 속도를 느리게 한 경우와 유지시간을 길게 한 경우는 상이한 손상이 재료에 축적된다고 보고하고 있다. 이와 같이 유지시간이나 변형률 속도의 인자로 정리하는 파형효과에 대한 문제는 명확하지 않다. 따라서 유지시간이나 변형률 속도를 달리한 파형에서 피로수명에 대한 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고온용 구조물 재료로 널리

사용되고 있는 STS 304강을 650℃ 고온에서, 대칭 삼각파형, 비대칭 삼각파형 및 유지시간파형 등을 이용하여 변형률 제어 방식으로 고온 저사이클 피로수명 시험을 실시하고, 전체 변형률파형의 피로수명 결과를 비교·고찰하였다.

2. 시험방법

2.1 재료

시험에 사용한 재료는 원자로 압력용기, 고온 고압 압력용기, 가스터어빈 등 고온 구조물 재료로 많이 사용하는 STS 304 오스테나이트 스테인레스 강이며, Table 1은 이 재료의 화학적 성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition for STS 304 stainless steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.072	0.50	0.68	0.026	0.013	18.0	8.36

소재는 지름이 $\phi 22\text{mm}$ 인 STS 304강 환봉을 이용하였으며, 1,100℃에서 1시간 유지한 뒤 수냉하여 소재를 용체화 처리하였다.

용체화 처리한 재료는 20℃ 및 고온 피로시험 온도인 650℃에서 기계적 성질을 측정하였다. Table 2는 실험 재료의 20℃ 및 650℃에서 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 2 Mechanical properties of STS 304 stainless at 20℃ and 650℃

Tem Temp.	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elonga- tion (%)	Reduc- tion of area(%)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
20℃	252.06	732.48	59.04	72.20	199.7	0.275
650℃	112.03	361.38	46.07	62.19	135.97	-

2.2 시험편

Fig. 1은 고온 저사이클 피로수명 시험에 이용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸다. 그림에서 2점 썩선으로 표시된 부분은 실험 중에 시험편 스트레인을 측정하기 위한 고온변위계(high

temp. extensometer)에 부착된 석영유리봉(quartz rod)이다. 시험편의 표면은 표면거칠기의 효과를 최소화하기 위하여, 사포 #100~#1200을 이용하여 연마하고, 알루미늄 파우더(입경 0.3 μm)를 이용하여 경면으로 폴리싱(polishing)하였다. 표면 폴리싱을 완료한 시험편은 밀링을 이용하여 고온변위계 석영유리봉의 팁 부분을 접촉시킬 홈(divot)을 만들었으며, 게이지길이(gage length)가 되는 두 홈의 간격은 12.5mm이었다.

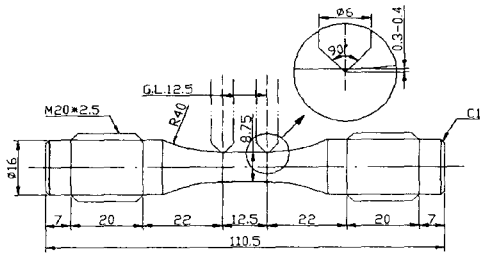


Fig. 1 Geometry and configuration of STS 304 stainless steel specimen for fatigue life test at 650°C in air

2.3 장치 및 실험방법

고온 저사이클 피로수명 실험에 사용한 시험기는 용량 10 tonf의 전기유압 서보식 피로시험기(instron model 1331)이다. 전체 고온 실험은 STS 304강의 예민화 온도 범위(450~850°C)에 포함되는 650°C(분위기 온도)에서 실시하였다. 시험편은 분할형 전기로를 이용하여 가열하였다. 전체 실험은 실험을 시작하기 전에 전기로 안의 분위기 온도를 안정시키기 위하여 시험편을 시험기에 장착하고, 실험 온도 650°C에서 soaking time을 1시간 이상 유지하였으며, 실험 중에 온도는 자동 온도 조절장치를 이용하여 650°C 실험 온도를 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 유지하였다.

고온 저사이클 피로수명 실험은 변형률 제어 방식(strain control mode)으로 실시하였으며, ASTM E606⁽¹⁰⁾에서 추천하는 규정에 맞추어 실험하였다. 게이지길이(gage length)는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 12.5mm이고, 게이지길이를 기준하여 전변형률범위 $\Delta\epsilon_1$ 는 1.0%, 1.5% 및

2.0% 3종류로 선택하였으며, 석영유리봉이 부착된 고온변위계를 이용하여 축방향 변형률 제어(axial strain control)로 실험하였다.

피로수명에 미치는 변형률파형의 반복속도, 속도 비대칭성 및 유지시간의 효과를 조사하기 위하여 부가한 변형률파형은 삼각파형 및 유지시간파형이다. 삼각파형은 대칭 삼각파형 fast-fast, 비대칭 삼각파형인 fast-slow 및 slow-fast(fast: $4 \times 10^{-3}/\text{sec}$, slow: $4 \times 10^{-5}/\text{sec}$)이며, 유지시간파형은 fast-fast 파형에서 최대 인장변형률에 도달했을 때 유지시간을 부가하였고, 유지시간은 1min 및 10min이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 변형률 사이클에 따른 최대응력 거동

Fig. 2는 전변형률범위 $\Delta\epsilon_1=1.0\%$ 에서, 대칭 삼각파형, 비대칭 삼각파형 및 유지시간파형의 피로시험 과정 중에 반복수(N)에 따른 최대인장응력(σ_{max})과 최소압축응력(σ_{min})의 변화를 나타낸 것이다. 전체 변형률 파형에서 수명 초기에 응력이 증가하는 반복 변형률 경화 거동을 보이다가, 경화가 종료하고 응력 안정 상태가 일정한 사이클 동안 유지되며, 피로수명 가까이에서 응력이 급격히 감소하는 거동을 나타내고 있다.

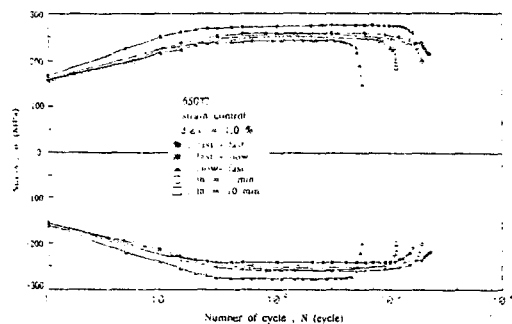


Fig. 2 Behavior of stress in strain cycling under strain control($\Delta\epsilon_1=1.0\%$) at 650°C in air

최대 응력 크기의 파형에 대한 거동을 보면, 대칭 삼각파형의 경우는 최대 인장응력과 최소 압축응력의 크기가 동일한 대칭형이다. 비대칭

삼각파형의 경우에, 압축쪽 크리프가 부하되는 fast-slow 파형은 전체 응력범위가 인장쪽으로 이동하여 인장 평균응력 현상이 발생한다. 인장쪽 크리프가 부하되는 slow-fast 파형과 인장쪽 변형률이 유지되는 유지시간 파형은 응력범위 전체가 압축쪽으로 이동하여 압축 평균응력 현상이 발생한다.

고온 저사이클 피로수명 시험에서 변형률 속도가 저속으로 될 경우에 최대응력 크기가 감소한다는 보고¹¹⁾와 증가한다는 보고¹²⁾가 있으며, 본 시험에서는 변형률 속도가 느려져 최대응력 크기가 감소하였다. 또한, 대칭 삼각파형에 유지시간을 부가하면, 유지시간쪽의 최대응력 크기가 감소한다¹¹⁾는 시험 결과와 증가한다¹²⁾는 시험 결과가 보고되고 있으며, 본 실험에서는 유지시간을 부가한 경우에 최대응력이 감소하였다.

2.2 파형 및 유지시간 효과

Table 3은 대칭 삼각, 비대칭 삼각 및 유지시간 파형 등 전체 변형률파형의 실험에서 얻어진 피로수명의 실험 결과를 종합적으로 수록한 것이다. 각각의 전변형률범위($\Delta \epsilon_t$)에 대한 소성변형률범위($\Delta \epsilon_p$) 및 탄성변형률범위($\Delta \epsilon_e$)의 구분은 응력의 안정 상태에서 ASTM 1150¹³⁾에 추천된 도식적인 방법을 이용하여 구분하였다. 피로수명으로 표시한 $N_f(3/4)$ 는 Fig.2 형태의 그래프 또는 히스테리시스루프(hysteresis loop)에서 인장응력이 안정 상태 크기에서 25% 감소했을 때에 해당하는 사이클수로 정의하였다¹⁰⁾.

Fig.2는 fast-fast, fast-slow, slow-fast 변형률 제어 삼각파형과 유지시간 1min, 10min인 변형률 제어 유지시간파형에서 실험한 결과를 전변형률범위 $\Delta \epsilon_t$ 와 피로수명 $N_f(3/4)$ 의 관계로 나타낸 그림이다. 실험 결과의 전체 경향을 살펴보면, 모든 변형률파형에서 전변형률범위가 증가하면 피로수명은 감소하며, 대칭 삼각파형, 비대칭 삼각파형 및 유지시간파형 등 변형률파형 종류에 따라 피로수명의 차이가 확실히 나타남으로써, 변형률 반복속도, 파형 및 유지시간의 효과가 피로수명에 뚜렷이 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

Table 3 Fatigue test data of STS304 stainless steel in different waveforms and hold time periods at 650°C

item \ waveform	$\Delta \epsilon_t$	$\Delta \epsilon_p$	$N_f(3/4)$
fast-fast	1.0	0.63	2297
	1.5	1.02	1168
	2.0	1.50	636
fast-slow	1.0	0.70	1686
	1.5	1.14	740
	2.0	1.62	420
slow-fast	1.0	0.67	517
	1.5	1.09	280
	2.0	1.58	146
hold time (1.0 min)	1.0	0.65	1900
	1.5	1.10	961
	2.0	1.56	496
hold time (10.0 min)	1.0	0.66	1141
	2.0	1.57	450

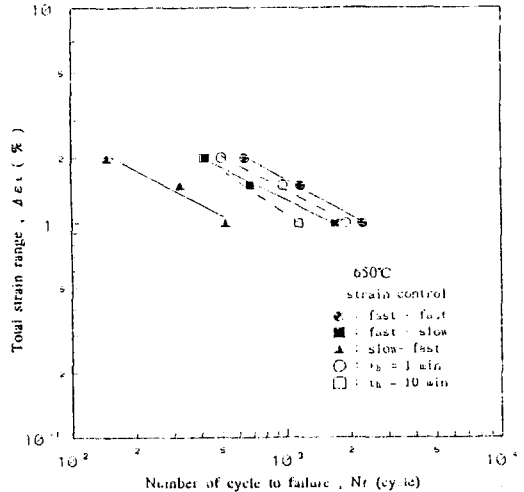
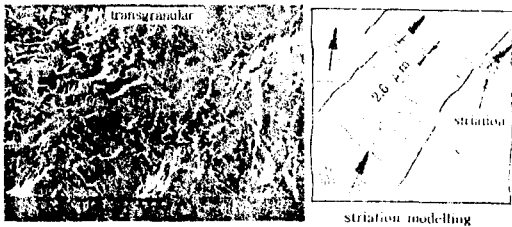


Fig.3 Total strain range vs. numbers of cycle to failure ($N_f(3/4)$) under strain control at 650°C in air

피로수명에 미치는 유지시간의 효과를 살펴보면, 유지시간 파형은 연속 삼각파형에 비해서 피로수명이 감소하며, 유지시간이 길어질수록 감소 정도는 커지고, 이 감소 정도는 전변형률범위가 작을수록 크게 나타나고 있다.

그리고 3종류 삼각파형에서 반복속도와 파형 효과를 살펴보면, 동일한 변형률범위에서 반복속도가 빠른 fat-fast 파형에 대해서 반복속도가 느린 fast-slow 및 slow-fast 파형의 피로수명이 크게 감소하였다. 또한, 비대칭 삼각파형에서 slow-fast 파형 경우가 fast-slow 파형보다 피로수명이 현저히 짧게 나타나서 비대칭성의 영향이 인장과 압축에서 다르게 나타나는 파형 효과가 발생하였다. Fast-fast 파형을 기준으로 비교하여 fast-slow 파형의 경우에는 63~73% 수준으로 감소하였고, slow-fast 파형의 경우에는 더욱 감소하여 23~24%에 해당하는 피로수명을 나타내고 있다.

실험의 결과에서 나타난 각 파형에서 현저한 피로수명의 차이를 조사하기 위하여 시험편의 파단면과 종단면을 상호 관련시켜 각각의 실험 결과를 비교 검토하였다.



(a) fast-fast, $\Delta\epsilon_f=1.0\%$



(b) fast-slow, $\Delta\epsilon_f=1.0\%$

Fig. 4 SEM photograph for fractured surfaces at 0.5mm depth from circumference under $\Delta\epsilon_f=1.0\%$ at 650°C in air

먼저, fast-fast 파형과 fast-slow 파형의 손상 거동을 조사하기 위하여 Fig. 4에서 전변형률 범위를 기준으로 (a) fast-fast 파형과 (b) fast-slow 파형을 비교하였다. Fast-fast 파형의 경우

는 스트라이에이션이 예리한 톱니형인 것에 비해서 fast-slow 파형의 경우는 스트라이에이션이 둥근형임을 알 수 있다. 이는 스트라이에이션의 발생기구인 인장-압축에 의한 둔화-재예화 과정에서 재예화의 정도 차이에 기인한 것으로 생각된다^{14,15)}. 즉, 압축과정의 재예화가 완전한 경우는 Fig. 4(b)와 같은 둥근형 스트라이에이션이 형성되고, 불완전한 경우는 Fig. 4(a)와 같은 톱니형 스트라이에이션이 형성되는 것이다.

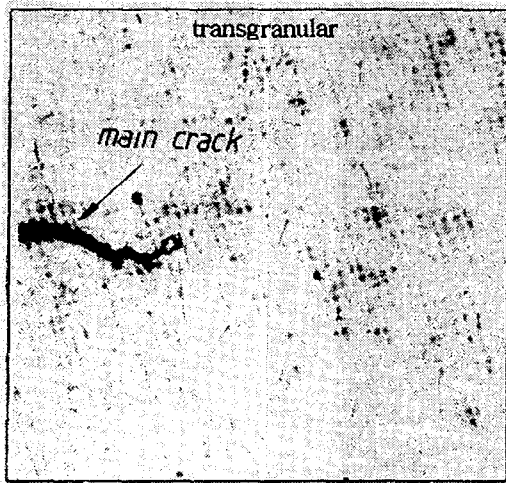
따라서 fast-fast 파형과 fast-slow 파형을 비교하여, fast-slow 파형의 경우가 피로수명이 짧은 이유는 피로균열 전파 과정 중의 압축 시에 균열선단이 fast-fast 파형의 경우보다 예화 정도가 상대적으로 크서 인장 시에 균열 진전이 보다 용이해지기 때문이라 생각된다. 이는 파단면 사진에서 스트라이에이션의 형태와 간격을 조사하여 얻은 결과이다. 두 파형에서 파단면 형태는 크리프의 영향이 전혀 없는 스트라이에이션만 존재하는 순수한 입내파괴를 보이지만 스트라이에이션 형태는 fast-fast 파형에 비해서 fast-slow 파형의 경우가 훨씬 명확하고, 간격은 fast-fast 파형은 2.6 μm 이고 fast-slow 파형은 3.2 μm 이어서 fast-slow 파형이 fast-fast 파형에 비해서 크게 관찰된다.

Fig. 5는 반복속도와 파형 효과에 따른 손상 기구를 해석하기 위하여, 전변형률범위 $\Delta\epsilon_f=2.0\%$ 인 경우에 fast-fast 및 fast-slow 파형과 slow-fast 파형의 대표전면 균열전파 과정을 비교한 시험편 종단면을 보여주고 있다.

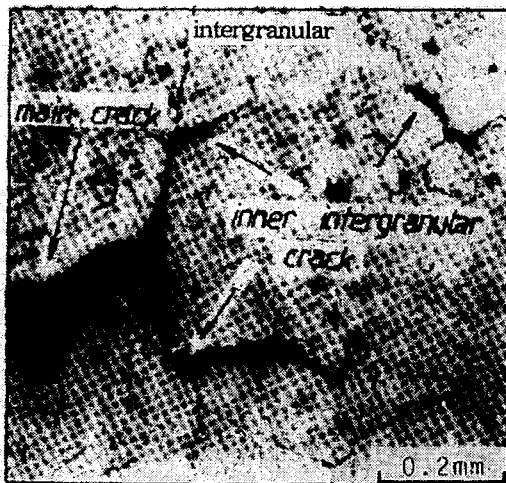
Slow-fast 파형의 경우는 주균열이 입계를 따라 전파함과 동시에 크리프의 영향에 의하여 내부에 입계 삼중점에서 입계균열 w형 캐비티가 생성하고 성장하면서 주균열과 합체하는 거동을 보여준다. 이러한 거동과는 다르게 fast-fast 및 fast-slow 파형의 경우는 크리프에 의한 입계균열은 전혀 관찰할 수 없으며, 주균열만이 단순하게 피로에 의해서 전파하고 있어 slow-fast 파형의 거동과 확연히 구분된다.

즉, fast-fast 및 fast-slow 파형의 경우는 단순히 피로에 의한 입내파괴의 형태를 보이며, slow-fast 파형의 경우는 크리프와 피로의 영향을 동시에 받아 입내파괴와 입계파괴가 중첩되

는 것으로 생각되며, 주파피구는 입계파피로 생각된다. 그러므로 파피거동에 미치는 변형률 속도의 영향이 인장쪽과 압축쪽에서 상이한 파형 효과가 보이며, 크리프 효과는 압축쪽 변형률 속도에는 관계없이 인장쪽 변형률 속도에 의해서만 발생하는 것으로 생각된다.



(a) fast-fast, fast-slow waveform



(b) slow-fast waveform

Fig. 5 Photograph showing crack growth behavior in longitudinal cross-section view under $\epsilon_1=2.0\%$ at 650°C in air

Fig. 3에서 slow-fast 파형과 유지시간 10.0 min인 파형의 피로수명을 비교하면, slow-fast 파형의 피로수명이 유지시간 10.0min인 파형보다 현저히 짧게 나타나고 있다. 피로수명에 큰 영향을 미치는 반복시간^{16,17)}은 slow-fast 파형의 경우가 252.5sec이고, 유지시간 10.0min인 파형의 경우는 605sec로 유지시간 10.0min인 파형이 반복속도가 느리다. 반복속도가 느릴수록 피로수명이 짧다는 보고¹⁷⁾가 일반적이지만, 본 실험에서는 반대로 반복속도가 빠른 slow-fast 파형의 경우가 훨씬 짧게 나타나고 있다.

변형률 속도의 영향과 유지시간의 영향은 다르게 나타나며, slow-fast 파형이 동일 주기의 유지시간 파형보다 수명이 단축됨을 의미한다. 이러한 피로수명의 차이를 나타내는 원인은 2가지로 생각된다. 첫째는 하중의 작용 형태의 차이에 의한 균열전파 거동의 차이이다. 두 경우가 피로에 의한 손상과 크리프에 의한 손상이 상호 작용하는 거동은 동일하지만 유지시간 파형의 경우는 인장 기간 동안에 재료가 정적하중을 받아 주로 확산지배기구에 의하여 r형 캐비티로 전파하고¹⁸⁾, slow-fast 파형의 경우는 동적하중을 받게됨으로써 주로 결정입계의 미끄럼에 의해서 w형 캐비티로 전파하여¹⁹⁾, slow-fast 파형의 경우가 피로수명이 짧게 된다고 생각된다²⁰⁾. 둘째는 부식기구의 차이에 의한 균열전파 거동의 차이이다. 유지시간 파형의 경우는 유지시간 중에 일단 시험편 균열 선단에서 산화가 발생하여도 정적 부하이기 때문에 피막이 산화 방지제로써 역할을 하지만, slow-fast 파형의 경우는 동적 부하이기 때문에 산화 피막이 형성되었다 하더라도 변형이 계속 진행되어 산화피막이 파괴되기 때문에 산화 분위기에 계속 노출됨으로써 균열전파가 용이해져 피로수명이 짧아지는 것이다²¹⁾.

Fig. 6은 fast-fast, fast-slow, slow-fast 변형을 제어 삼각파형과 유지시간 1min, 10min인 변형을 제어 유지시간파형에서 실험한 결과를 소성변형률범위 $\Delta\epsilon_p$ 와 피로수명 $N_f(3/4)$ 의 관계를 나타낸 그림이다. $\Delta\epsilon_1-N_f(3/4)$ 의 관계를 나타낸 Fig. 3과 비슷한 경향을 보이고 있어서 소성변형률범위 $\Delta\epsilon_1$ 가 고온저사이클 피로에서 피

로수명을 결정하는 파라미터(parameter)임이 확인된다.

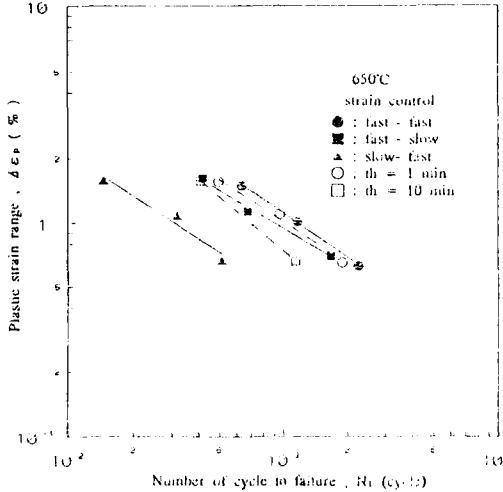


Fig. 6 Plastic strain range vs. numbers of cycle to failure(N_f (3/4)) under strain control at 650°C in air

4. 결 론

본 연구는 STS 304강을 사용하여 650°C 고온에서 삼각파형 및 유지시간 파형으로 변형률 제어 피로수명 시험을 실시하고, 변형률파형에 따른 피로수명과 과단면의 해석을 통하여 피로수명에 영향을 미치는 변형률파형 효과를 조사하여 피로수명을 예측할 수 있는 기초 자료를 얻었다.

피로수명은 삼각파형의 경우 fast-fast > fast-slow > slow-fast 순서로 나타났고, slow-fast 파형의 피로수명이 유지시간 10min 파형에 비해서 현저히 짧았다. Fast-fast 파형을 기준으로 fast-slow 파형은 63~73% 수준으로 감소하였고, slow-fast 파형은 더욱 감소하여 23~24% 피로수명을 나타내었다.

과단면 형상은 fast-fast, fast-slow 파형에서는 전형적인 입내파괴, slow-fast 파형에서는 입계파괴를 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Case Interpretation, p. 1592, 1974.
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, C.CN-47-27, p. 1592, 1988.
- 3) 平 修二, 大谷隆一, “材料の高温強度論”, 日本, オーム社, pp. 129~185, 1980.
- 4) 平 修二, 大谷隆一, “材料の高温強度論”, 日本, オーム社, pp. 189~236, 1980.
- 5) 八木晃一, 久保 清, 田中千秋, “SUS316鋼のクリープ・疲労相互作用に及ぼすクリープ應力の影響”, 材料, 第28巻, 第308號, pp. 400~406, 1979.
- 6) 竹内悦男, 松岡三郎, 西島 敏, “高温疲労き裂伝ば特性に及ぼす荷重波形の影響”, 日本機械學會論文集, 第56巻, 第530號, pp. 2078~2084, 1990.
- 7) 松田憲昭, 梅澤貞夫, “高耐力耐熱合金の疲労・クリープ相互作用下におけるき裂進展測に基づく壽命評價法の検討”, 材料, 第39巻, 第439號, pp. 414~419, 1990.
- 8) J.B. Conway and J.T. Berling, Met. Trans., Vol. 11, p. 324, 1970.
- 9) J.B. Conway, J.T. Berling, and R.H. Stentz, ASTM STP520, p. 637, 1973.
- 10) ASTM E606, “Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing”.
- 11) 남수우, “Creep·피로 그리고 분위기의 상호작용(IV)”, 대한금속학회지, 제21권, 제9호, pp. 808~818, 1983.
- 12) 平川賢爾, 時政勝行, 外山 和男, “オーステナイト系ステンレス鋼SUS321の低サイクル疲労挙動に及ぼす温度ひずみ速度の影響”, 材料, 第27巻, 第301號, pp. 945~956, 1978.
- 13) ASTM E1150, “Standard Definition of Terms Relating to Constant-Amplitude, Low-Cycle Fatigue Testing”.
- 14) 오세욱, 이규용, 김중완, 문무경, “STS 316강의 고온저사이클 피로강도와 파괴거동에 미치는 크리프-피로 상호작용의 영향”, 대한기계학회논문집, 제9권, 제2호, pp. 140~149, 1985.
- 15) 北川英夫, 小寺澤良一, “フラクトグラフィ”,

- 培風館, 日本, pp. 80~120, 1978.
- 16) 오세욱, 이규용, 서한수, "STS 316강의 저 사이클 고온피로 강도와 파괴거동", 대한기계학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 305~312, 1984.
- 17) J.T. Berling and t. slot, ASTM STP 459, p. 3, 1969.
- 18) 小寺澤良一, "フラクトグラフィとその應用", 日本工業新聞社, 日本, p. 226, 1983.
- 19) Baik and R. Raj, "Wedge Type Creep Damage in Low Cycle Fatigue", Metall. Trans., Vol. 13A, pp. 1207~1214, 1982.
- 20) 北川英夫, 小寺澤良一, "フラクトグラフィ", 培風館, 日本, pp. 141~144, 1978.
- 21) 中村俊哉, 屋口正次, 新田康雄, 朝田泰英, "高温真空中ワリーク*疲労相互作用における破面形態と寿命評價に関する研究", 日本機械學會論文集, 第59巻, 第557號, pp. 100~104, 1993.
-