

변형률제어 비대칭파형 하의 고온피로수명 및 파면

허정원[†] · 박원조* · 유재환**

안산공과대학 컴퓨터응용기계설계과

*경상대학교 기계항공공학부 · **세명대학교 안전공학과

(2002. 12. 2. 접수 / 2003. 2. 10. 채택)

High Temperature Fatigue Life and Fractography under Asymmetric Waveform in Strain Control

Chung-Weon Hur[†] · Won-Jo Park* · Jae-Hwan Yoo**

Department of Computer Applied Mechanical Design, Ansan College of Technology

^{*}School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang University,

^{**}Department of Safety Engineering, Semyung University

(Received December 2, 2002 / Accepted February 10, 2003)

Abstract : In this paper, the low cycle fatigue(LCF) life tests were carried out under waveforms of asymmetric triangle(4×10^{-3} and 4×10^{-5} strain rate) and hold-time(1min and 10min) in strain control.

In triangular waveform, the fatigue lives of fast-slow waveforms were decreased to about 63~73% and them of slow-fast waveforms were down to about 23~24% compared to them of fast-fast waveforms. The shapes of fracture surfaces were transgranular in fast-fast and fast-slow waveforms and intergranular in slow-fast ones.

The fatigue lives of slow-fast waveforms were remarkably shorter than them of hold-time waveforms even though cycle times of hold time waveforms were longer than them of slow-fast ones. The damage mechanisms of fracture surfaces were mixed fracture with both transgranular and intergranular, but intergranular fractures were r-type cavity in hold-time waveforms and w-type cavity in slow-fast ones.

Key Words : low cycle fatigue(LCF), waveform, fracture surface

1. 서 론

고온기기 및 구조물들은 가열과 냉각이 반복되면서 발생하는 온도구배에 의해서 부분적으로 또는 전체적으로 열변형을 받는다.

열변형은 변형부위가 구속되어 있어서 기계적 응력으로 작용되고 실제로 주기적인 기계적 응력이 발생하는 상태가 된다.

이러한 재료의 거동을 실제 상황과 유사하게 모사하는 방법으로 변형률제어 방법을 통한 저주기피로 시험법이 널리 이용되면서 변형률제어 저주기피로 시험을 이용한 고온용 재료의 피로수명에 대한

연구는 다양하게 수행되고 있다^{1,2)}.

고온에서 구조물의 위험한 파괴를 방지하고 안전성을 확보하기 위해서는 재료 수명에 대한 정확히 예측이 필요하다. 이는 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·피로의 상호작용 시험은 주로 환봉형 시험편을 사용하여, 유지시간을 부가한 파형에서 저사이클 피로수명 시험을 실시하는 것이 일반적이다. 최근에는 유지시간을 부가하는 파형 이외에 삼각파형 특

[†]To whom correspondence should be addressed.
benhur@ansanc.ac.kr

히, 비대칭 삼각파형에 대한 관심이 증대하고 있다^{3,4)}.

Conway⁵⁾ 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, 그 후의 연구⁶⁾에서는 변형률 속도를 느리게 한 경우와 유지시간을 길게 한 경우는 상이한 손상이 재료에 축적된다고 보고하고 있다. 유지시간이나 변형률 속도의 피로수명의 의존성에 대한 문제는 명확하지 않다. 따라서 유지시간이나 변형률 속도가 다른 변형률 파형 하에서의 피로수명에 대한 다양한 연구가 필요하다.

본 연구는 STS304강을 650℃ 고온에서 변형률제어 로 삼각파형과 유지시간파형으로 저사이클 피로수명 시험을 실시하여, 변형률파형의 피로수명을 조사하고 결과를 파면을 이용하여 비교·고찰하였다.

2. 시험방법

2.1. 재료

시험에 사용한 재료는 원자로 압력용기, 고온고압 압력용기, 가스터어빈 등 고온 구조물 재료로 많이 사용하는 STS304 오스테나이트스테인레스 강이며, Table 1은 이 재료의 화학적 성분을 나타내었다.

소재는 지름이 $\varnothing 22\text{mm}$ 인 STS304강 환봉을 이용하였으며, 1100℃에서 1시간 유지한 뒤 수냉하여 소재를 용체화처리하였다.

용체화처리한 재료는 20℃ 및 고온피로시험 온도인 650℃에서 기계적 성질을 측정하였다. Table 2는 시험 재료의 20℃ 및 650℃에서 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 1. Chemical composition for STS304 stainless steel (wt.%)

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

Table 2. Mechanical properties of STS304 stainless at 20℃ and 650℃

Item Temp.	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Red. 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	-

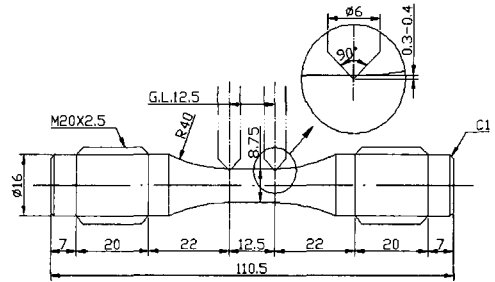


Fig. 1. Geometry and configuration of STS304 stainless steel specimen for fatigue life test at 650℃ in air.

2.2. 시험편

Fig.1은 고온 저사이클 피로수명 시험에 이용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

그림에서 2점 쇄선으로 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.

2.3. 장치 및 실험방법

고온저사이클 피로수명 실험에 사용한 시험기는 용량 10tonf의 전기유압 서보식 피로시험기(INSTRON Model 1331)이다. 전체 고온 실험은 STS304강의 예민화온도 범위(450~850℃)에 포함되는 650℃(분위기 온도)에서 실시하였다. 시험편은 분할형 전기로를 이용하여 가열하였다. 전체 실험은 실험을 시작하기 전에 전기로 안의 분위기 온도를 안정시키기 위하여 시험편을 시험기에 장착하고, 실험온도 650℃에서 침투시간을 1시간 이상 유지하였으며, 실험 중에 온도는 자동온도 조절장치를 이용하여 650℃ 실험온도를 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 유지하였다.

고온 저사이클 피로수명 실험은 ASTM E606⁷⁾에서 추천하는 규정에 맞추어 실험하였다. 게이지길이(gage length)는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 12.5mm이고, 게이지길이를 기준하여 전변형률범위 $\Delta\epsilon_t$ 는 1.0%, 1.5% 및 2.0% 세 종류로 선택하여 축방향 변형률제어(axial strain control)로 실험하였다.

피로수명에 미치는 변형률파형의 반복속도, 속도 비대칭성 및 유지시간의 효과를 조사하기 위하여 부가한 변형률파형은 삼각파형 및 유지시간파형이다. 삼각파형은 대칭삼각파형 fast-fast, 비대칭삼각파형인 fast-slow 및 slow-fast(fast: 4×10^3 /sec, slow: 4×10^5 /sec)이며, 유지시간파형은 fast-fast 파형에서 최대 인장변형률에 도달했을 때 유지시간을 부가하였고, 유지시간은 1분 및 10분이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 피로수명

Fig. 2는 fast-fast, fast-slow, slow-fast 삼각파형과 유지시간 1분, 10분인 유지시간파형에서 실험한 결과를 전변형률범위 $\Delta\epsilon_t$ 와 피로수명 $N_f(3/4)$ 의 관계로 나타낸 그림이다.

각각의 전변형률범위($\Delta\epsilon_t$)에 대한 소성변형률범위($\Delta\epsilon_p$) 및 탄성변형률범위($\Delta\epsilon_e$)의 구분은 응력의 안정 상태에서 ASTM 1150⁸⁾에 추천된 도식적인 방법을 이용하여 구분하였다. 피로수명으로 표시한 $N_f(3/4)$ 는 히스테리시스루프(hysteresis loop)에서 인장응력이 안정 상태 크기에서 25% 감소했을 때에 해당하는 사이클수로 정의하였다⁷⁾.

Fig. 2에서 전체 실험결과를 모든 변형률파형에서 변형률범위가 증가하면 피로수명은 감소하며, 대칭삼각파형, 비대칭삼각파형 및 유지시간파형 등 변형률파형의 종류에 따라 피로수명의 차이가 분명하게

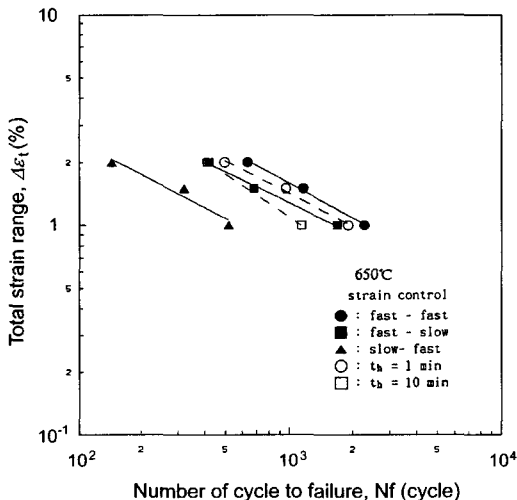


Fig. 2. Total strain range-numbers of cycle to failure($N_f(3/4)$) under strain control at 650°C in air.

나타나고 있다. 이는 변형률 반복속도, 파형 및 유지시간의 효과가 피로수명에 영향을 미쳤음을 의미한다.

먼저, 유지시간이 피로수명에 미치는 영향을 살펴보면, 유지시간파형은 대칭삼각파형에 비해서 피로수명이 감소한다. 파형의 유지시간이 길어질수록 피로수명의 감소 정도는 커지고, 이 감소 정도는 전변형률범위가 작을수록 크게 나타나고 있다.

삼각파형에서 반복속도가 피로수명에 미치는 영향을 살펴보면, 동일한 변형률범위에서 반복속도가 빠른 fast-fast 파형에 대해서 반복속도가 느린 fast-slow 및 slow-fast 파형의 피로수명이 감소하였다.

또한, 반복속도가 동일한 비대칭삼각파형에서 slow-fast 파형 경우가 fast-slow 파형보다 피로수명이 현저히 짧게 나타나서 비대칭성의 영향이 인장과 압축에서 다르게 나타나는 파형 효과가 나타났다. fast-fast 파형을 기준으로 비교하여, fast-slow 파형의 경우에는 63-73% 수준으로 감소하였고, slow-fast 파형의 경우에는 23-24%에 해당하는 피로수명을 나타내고 있다. 즉, 인장 쪽 반복속도가 압축 쪽 반복속도에 비해서 피로수명을 감소시키는 영향이 현저하게 증대됨을 알 수 있다.

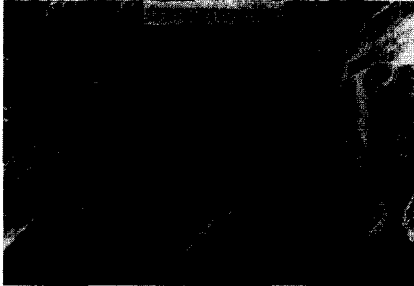
3.2. 파면 고찰

실험의 결과에서 나타난 전체 파형에 대한 피로수명의 차이를 파면의 측면에서 조사하기 위하여 각 파형의 시험편 파단면과 종단면을 비교 검토하였다. 전체 파면 사진은 시험편의 표면에서 0.5mm 내부의 위치에서 촬영한 사진이다.

Fig. 3은 fast-fast 파형의 파면이다. 모든 전변형률범위에서 공통적으로 스트라이에이션을 동반한 전형적인 입내파괴를 보이고 있으며, 전변형률범위가 증가하면서 스트라이에이션의 간격이 커지고 전체적으로 평탄하게 되는 경향이 관찰된다.

Fig. 4는 전변형률범위 1.0%인 fast-slow 파형의 파면 사진이다. fast-fast 파형의 전변형률범위 1.0% 경우와 비교하여 전체적으로 평탄하고 스트라이에이션 형상이 뚜렷하다. fast-fast 파형에서는 균열전파의 둔화-재예화 과정에서 균열선단의 둔화부가 툽니형으로 형성되고 스트라이에이션 방향이 patch에 따라 다르게 나타나서 결정방위의 영향을 받으며, fast-slow 파형은 둔화부가 구형으로 형성되고 스트라이에이션 방향이 거시 균열 방향과 동일하여 결정방위의 영향을 받지않음이 확인된다.

따라서 Fig. 2에서 나타나는 두 파형의 피로수명의 차이는 균열전파의 둔화-재예화 과정에서 재예화 정도의 차이에 의한 결과임을 알 수 있다.



(a) fast-fast $\Delta\epsilon_t=1.0\%$

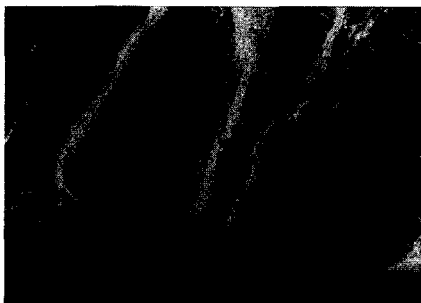


(b) fast-fast $\Delta\epsilon_t=1.5\%$



(c) fast-fast $\Delta\epsilon_t=2.0\%$

Fig. 3. Fractured surface at 0.5mm depth from circumference under fast-fast waveform at 650°C in air



fast-slow $\Delta\epsilon_t=1.0\%$

Fig. 4. Fractured surface at 0.5mm depth from circumference under fast-slow waveform at 650°C in air

Fig. 5는 slow-fast 파형의 파면사진이다. 전변형률 범위가 증가할수록 크리프 영향이 증대되어 입계파괴가 점차 많아지고 있다.

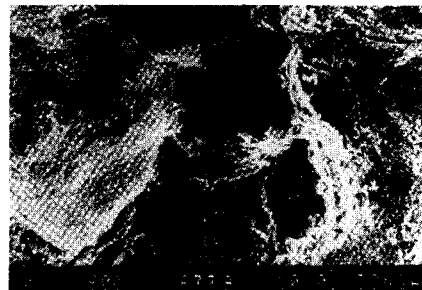
Fig. 3~5 파면사진을 비교하면, fast-fast와 fast-slow 파형의 경우는 입내파괴로 균열이 전파하고, slow-fast 파형의 경우는 입계파괴로 균열이 전파함을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 파형에 따른 손상기구를 고찰하기 위하여, 전변형률범위 2.0%인 경우에 fast-fast 및 fast-slow 파형과 slow-fast 파형의 균열전파 과정을 비교한 시험편 중단면을 보여준다.

slow-fast 파형의 경우는 주균열이 입계를 따라 전파함과 동시에 크리프의 영향에 의하여 내부의 입계 삼중점에서 입계균열 w형 캐비티가 생성하고 성



(a) slow-fast $\Delta\epsilon_t=1.0\%$



(b) slow-fast $\Delta\epsilon_t=1.5\%$



(c) slow-fast $\Delta\epsilon_t=2.0\%$

Fig. 5. Fractured surface at 0.5mm depth from circumference under slow-fast waveform at 650°C in air

장하면서 주균열과 합체하는 거동을 보여준다. fast-fast 및 fast-slow 파형의 경우는 주균열만이 입내로 피로에 의해서 전파하고 있어 slow-fast 파형의 거동과 확연히 구분된다.

fast-fast 및 fast-slow 파형의 경우는 피로에 의한 입내파괴의 형태를 보이며, slow-fast 파형의 경우는 크리프와 피로의 영향을 동시에 받아 입내파괴와 입계파괴가 중첩되지만 주파괴 기구는 입계파괴로 생각된다.

이 결과는 파괴거동에 미치는 변형률속도의 영향이 인장 쪽과 압축 쪽에서 상이한 효과를 나타냄을 의미한다. 크리프 효과는 인장 쪽 변형률속도가 느려지면 발생하지만 압축 쪽 변형률속도가 느린 경우에는 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 유지시간 파형의 파면 사진이다. 전변형률범위 1.0%에서 유지시간 1분인 경우는 입내파괴를 보인다. 유지시간 10분인 경우는 크리프 영향으

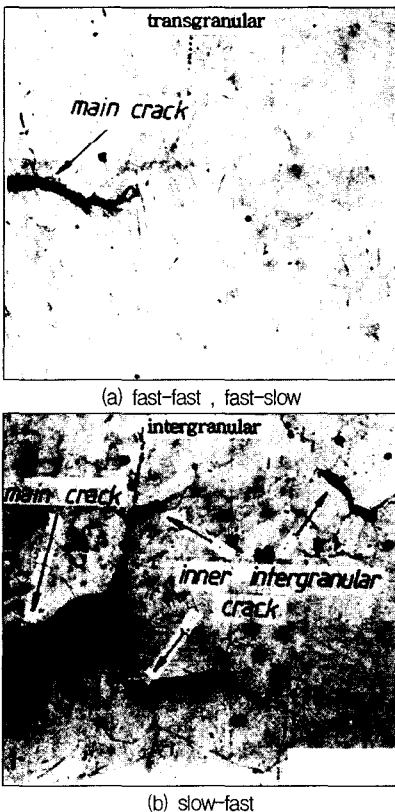


Fig. 6. Photograph showing crack growth behavior in longitudinal cross-section view under $\Delta\epsilon_t=2.0\%$ at 650°C in air.

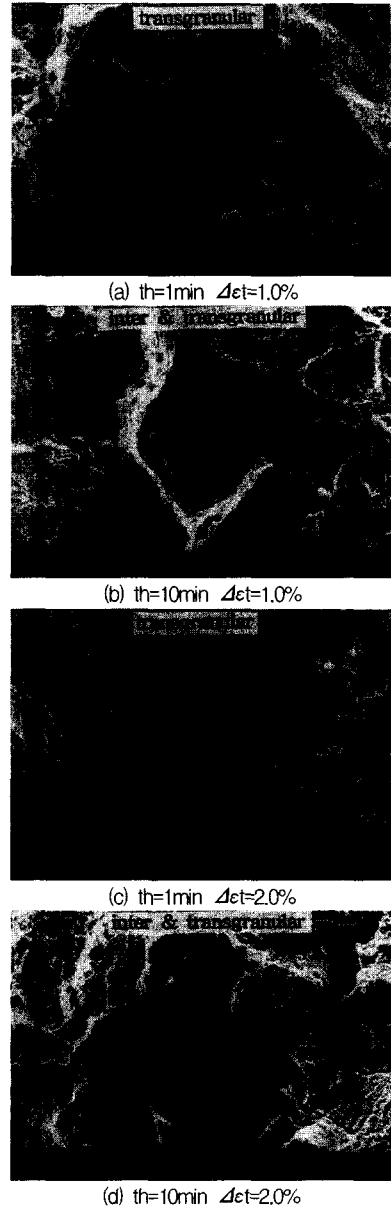


Fig. 7. Fractured surface at 0.5mm depth from circumference under hold time waveform at 650°C in air

로 내부 입계의 여러 위치에서 동시에 균열이 생성하고 성장하여 피로의 영향으로 전파한 균열과 합체하여 형성된 파단면 형상이 관찰된다.

유지시간 파형의 전체적인 파면은 유지시간 1분인 경우는 대체로 입내파괴를 보이며, 유지시간 10분인 경우는 입내파괴와 입계파괴가 혼재되어 나타나며 캐비티의 형태는 r형으로 생각된다.

Fig. 2에서 slow-fast 파형의 피로수명이 유지시간 파형의 피로수명에 비해서 현저하게 짧게 나타나고 있다. 전변형률범위 2.0%를 기준으로 slow-fast 파형과 유지시간 10분인 파형의 피로수명을 비교하면, 피로수명에 큰 영향을 미치는 반복시간^{9,10}은 slow-fast 파형의 경우가 502.5sec이고, 유지시간 10분인 파형의 경우는 605sec로 유지시간 10분인 파형이 길다. 반복속도가 길수록 피로수명이 짧다는 보고¹⁰가 일반적이지만 본 실험에서는 반복속도가 빠른 slow-fast 파형의 경우가 피로수명이 현저하게 짧게 나타난다.

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 전파하고¹¹, slow-fast 파형의 경우는 동적하중을 받게됨으로써 주로 결정입계의 미끄럼에 의해서 w형 캐비티로 전파하여¹², 피로수명이 slow-fast 파형의 경우가 유지시간 파형에 비하여 짧게 된다고 생각된다¹³.

4. 결 론

STS304강을 650℃ 고온에서 변형률제어로 삼각 파형 및 유지시간 파형으로 피로수명 시험을 실시하고, 피로수명과 파단면의 해석을 통하여 피로수명에 영향을 미치는 변형률파형 효과를 조사하였다.

1) 삼각파형의 경우 피로수명은 fast-fast 파형을 기준으로 fast-slow 파형의 경우는 63~73%로 감소하였고, slow-fast 파형의 경우는 23~24%로 나타났다. 파단면 형상은 fast-fast, fast-slow 파형에서는 전형적인 입내파괴, slow-fast 파형에서는 입계파괴를 나타내었다.

2) slow-fast 파형의 피로수명이 반복시간이 긴 유지시간 파형에 비해서 현저히 짧았다. 파단면 형상은 두 경우에서 피로와 크리프 영향이 혼재하여 나타났다. slow-fast 파형에서는 w형 캐비티가 유지시간 파형에서는 r형 캐비티가 나타났다.

감사의 글 : 이 논문은 2001학년도 안산공과대학 학술연구비에 의하여 연구된 것임

참고문헌

- 1) 하정수, 옹장우, 고승기, "변형률분할법에 의한 12Cr 단조강의 열피로 수명해석," 대한기계학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1192~1202, 1994.
- 2) 홍성구, 이순복, "316L 스테인레스 강의 고온 저주기 피로 수명식 개발," 대한기계학회논문집, 제26권, 제3호, pp. 521~527, 2002.
- 3) 竹内悦男, 松岡三郎, 西島 敏, "高温疲労き裂 傳播特性に及ぼす荷重波形の影響," 日本機械 學會論文集, 第56卷, 第530號, pp. 2078~2084, 1990.
- 4) 松田憲昭, 梅澤貞夫, "高耐力耐熱合金の疲 勞・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卷, 第 439號, pp. 414~419, 1990.
- 5) J. B. Conway and J. T. Berling, Met. Trans., Vol. 11, p. 324, 1970.
- 6) J. B. Conway, J. T. Berling, and R. H. Stentz, ASTM STP520, p. 637, 1973.
- 7) ASTM E606, "Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing."
- 8) ASTM E1150, "Standard Definition of Terms Relating to Constant-Amplitude, Low-Cycle Fatigue Testing."
- 9) 오세욱, 이규용, 서한수, "STS316강의 저사이클 고온피로 강도와 파괴거동," 대한기계학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 305~312, 1984.
- 10) J.T. Berling and t. slot, ASTM STP459, p.3, 1969.
- 11) 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.
- 12) Baik and R. Raj, "Wedge Type Creep Damage in Low Cycle Fatigue," Metall. Trans., Vol. 13A, pp. 1207~1214, 1982.
- 13) 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.