

## 소성변형에너지법을 이용한 1Cr0.5Mo강의 저주기피로 특성에 관한 연구

백수곤 · 현중섭 · 송기욱 · 홍성인\*

전력연구원 수화력발전연구소

\*충남대학교 기계공학과

### Low Cycle Fatigue Characteristics of 1Cr0.5Mo Pipe Steel Using the Plastic Strain Energy Method

Soo-Gon Baek, Jung-Seob Hyun, Gee-Wook Song and Sung-In Hong\*

Korea Electric Power Research Institute, PGRL

\*Chungnam National University, Mechanical Engineering Dept.

(1997년 8월 22일 받음, 1997년 9월 30일 최종수정본 받음)

**초 록** 영월화력발전소 보일러헤드 재질인 1Cr0.5Mo강의 파형에 따른 저주기 피로특성을 규명하고자 상온(298K) 및 고온(788K)의 삼각파와 사인파형 저주기 피로시험을 수행하였고 소성에너지법을 이용하여 파형에 따른 소성변형에너지와 피로수명과의 +관계를 분석하였다. 저주기 피로시 재료내부의 소성변형에너지를 히스테리시스루프의 면적으로 계산하여 구하였으며 이를 통해 저주기 피로수명을 예측하였고 Coffin-Manson법 및 변형률분할법을 이용한 저주기 피로수명 결과와 서로 잘 일치하였다. 또한 상온 및 고온에서 피로반복수의 증가와 함께 재료가 반복연화됨을 알 수 있었다.

**Abstract** Low-cycle fatigue tests with triangular and sinusoidal strain wave were performed on 1Cr0.5Mo steel at 298K and 788K. Specimens were machined from a boiler header of the Youngweol power plant which was serviced 185,000 hours. The relationship between plastic strain energy and number of cycle to failure was examined in order to predict the low-cycle fatigue life of 1Cr0.5Mo steel using the plastic strain energy method. The life was predicted by the plastic strain energy method and found to agree with experiment data and results obtained from models such as Coffin-Manson method and the strain range partitioning method. Also, the cyclic behavior of 1Cr0.5Mo steel was characterized by cyclic softening with increasing number of cycle at 298K and 788K.

### 1. 서 론

최근 발전설비 및 대형 중화력 설비들이 크게 발달함에 따라 고온 고압하에서 운전되는 대형 설비들이 증가하고 있으며, 이러한 설비들이 받게되는 반복하중은 국부적으로 탄성한도를 넘는 높은 변형률을 발생시켜 구조물을 파손에 이르게 하고 있다. 특히, 빈번한 기동·정지 및 부하변동에 따른 과도상태하에서 열응력 및 피로 현상은 심각한 문제로 대두되고 있는 현실이다. 이러한 피로손상은 일반적으로 소성반복 변형률(Plastic cycle strain)에 의하여 야기되며 회복되지 않은 소성변형률은 변형에너지를 소비하므로 소성변형에너지는 손상과정에서 중요한 역할을 하게 된다. Morrow<sup>2)</sup>는 소성변형에너지를 이용하여 피로수명을 구하는 방법을 제시하였으며, Eyrin<sup>2~4)</sup>은 소성변형에너지 손상법칙을 기초로 피로파손 기준을 제안하였고 Giglio와 Vergani<sup>5)</sup> 등은 이 에너지 기준을 노치를 가진 시험편의 피로수명예측에 적용하여 피로수명을 예측할 수 있음을 보였다. 이러한 피로수명 예측법들은 실가동 설비에 적용되어야 함에도 불구하고 시험편채취의 어려움으로 인하여 가동중 열화된 재료에 대해 피로실험을 수행하고 수명예측법을 적용하여 타당성을 입증한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라

서, 본 연구에서는 185,000시간을 운전하고 폐기되어 439회의 기동·정지 이력을 갖고 있는 영월화력 2호기의 3차 과열기 재질인 1Cr0.5Mo강을 피로시험편으로 채취하여 상온(298K) 및 고온(788K)에서 사인파형과 삼각파형의 저주기 피로시험을 수행하였고 피로손상시 소비되는 히스테리시스루프의 소성변형에너지를 계산하여 피로수명을 예측하였으며, 다른 피로수명예측 방법인 Coffin-Manson법, 변형률 분할법과 비교하여 피로수명이 일치함을 확인하여 소성변형에너지법을 이용한 수명예측법이 실 가동중 열화된 재료에도 적용 가능함을 입증하였다.

### 2. 실험 방법

#### 시험 및 실험장치

본 연구에 사용된 1Cr0.5Mo강의 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 표점거리가 40mm이고 외경이 13mm, 내경이 10mm인 중공봉상(Hollow cylindrical) 시험편이다. 내·외면은 표면의 거칠기를 줄이기 위하여 가공후 연마되었으며, 특히 외면은 변형률제어(strain control)를 위해 #1,500연마지로 연마한 후 6 $\mu$ 다이아몬드 페이스트를 이용, 마무리 연마를 함으로써 표면의 거칠기를 줄였다. 저주기 피로시험에 사용

Table 1. Chemical composition of 1Cr0.5Mo pipe steel (wt%)

Comp.	C	S	Si	P	Mn	Cr	Mo
wt(%)	0.178	0.017	0.334	-	0.586	0.735	0.699

Table 2. Mechanical property of 1Cr0.5Mo steel

Temp. (K)	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	0.2% Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
298	205.1	484.1	280.7	33.8
788	190.2	315.9	198.6	35.1

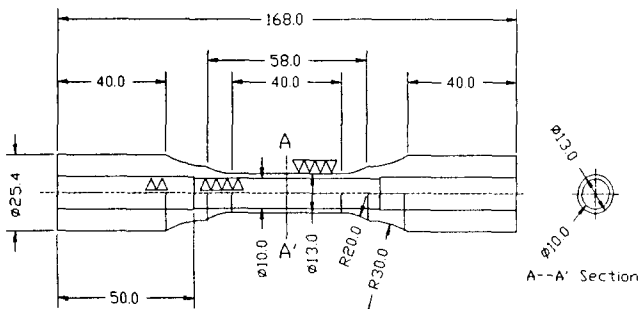


Fig. 1. The specimen of low-cycle fatigue test

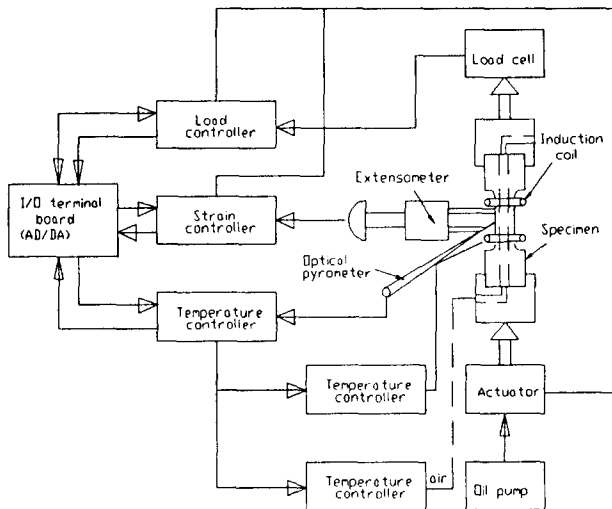


Fig. 2. Block diagram of low-cycle fatigue test

된 실험장치는 유압식 피로시험기(INSTRON 8521)로서 시편의 유도가열을 위한 고주파 발생장치, 시편 냉각용 모타펌프, 그림장치 및 광학 고온도계(Optical pyrometer)를 사용하는 고온측정제어시스템을 장착하고 있으며 모든 장치구동을 제어할 수 있는 컴퓨터로 구성된다. 변형률 측정 은 시편 평행부의 중심에서 축방향으로 놓여있는 40mm의 표점거리내 12.5mm의 고온용 신장계(extensometer)를 사용하여 측정하였다. Fig. 2는 실험장치의 블록 다이어그램을 나타낸다.

**실험조건**

저주기 피로시험은 공기 분위기에서 상온(298K) 및 고온의 저주기 피로시험으로 행해졌으며 고온실험은 실제 보일

러헤더의 운전온도인 788K에서 수행되었다. 본 연구의 주요 관점인 사이클의 파형은 사인파형(Sine waveform)과 삼각파형(Triangular waveform)이며 각 주기는 동일 주기로 사인파형은 0.1Hz, 삼각파형은 0.004'의 일정한 변형률을 유지하도록 하였다. 또한 총 변형률 진폭(Amplitude)은 0.2~0.6%로 수행되었으며, 피로수명은 시편이 파단될 때까지의 사이클 수 대신에 임의의 주기에서의 최대 인장응력이 피로시험초기 최대인장응력값의 3/4을 나타낼 때 이를 피로수명( $N_f$ )으로 정의하였다<sup>1)</sup>(Fig. 4). 또한, 파단된 시편의 파단면을 관찰하기 위하여 시험후 파단면을 SEM(Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰하였다.

**소성변형에너지법**

저주기 피로동안 발생하는 소성변형에너지는 대부분 열로 소비되며 일부는 재료에 흡수된다<sup>2)</sup>. 사이클당 소비되는 소성변형에너지는 히스테리시스 루프(hysteresis loop)의 면적이며 소비되는 총에너지는 이들 루프의 합으로 각 재료는 에너지를 흡수할 수 있는 일정용량을 가지고 있어 이 한계치에 도달할 때 재료는 파손된다. Fig. 3에서 보듯이 재료가 피로를 받게되어 한사이클당 소비되는 소성변형에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta W_p = \int \sigma_{ii} d\epsilon_{ii}^p \tag{1}$$

$$\sigma = 2\sigma_a, \quad \epsilon = 2\epsilon_p \tag{2}$$

$$\Delta W_p = 4\sigma_a \epsilon_a^p - 2 \int_0^{2\sigma_a} \epsilon^p d\sigma \tag{3}$$

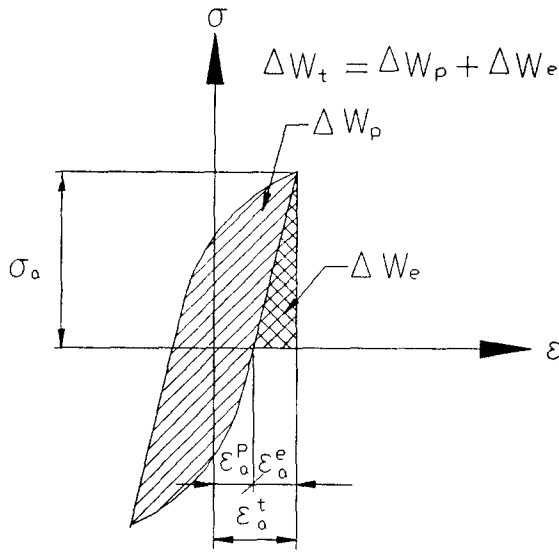
Morrow<sup>1)</sup>의 응력-변형률 관계에 따르면  $\sigma = K'(\epsilon_p)^{n'}$  이므로

$$\sigma = \frac{2\sigma_a}{(2\epsilon_p)^{n'}} (\epsilon_p)^{n'} \tag{4}$$

식(4)를 (3)에 대입하면

$$\Delta W_p = 4\sigma_a \epsilon_a^p \frac{1-n''}{1+n''} \tag{5}$$

여기서  $n''$ 을 응력-변형률 관계의 경화지수  $n'$ 과 같다고 가정하고  $\epsilon_a^p = (\frac{\sigma_a}{K'})^{1/n'}$  이므로 다음과 같은 소성변형에너지식을 나타낼 수 있다.



$W_t$  = Total strain energy  
 $W_p$  = Plastic strain energy  
 $W_e$  = Elastic strain energy

$\epsilon_a'$  = Total strain  
 $\epsilon_a''$  = Plastic strain  
 $\epsilon_a'$  = Elastic strain

Fig. 3. Plastic and elastic strain density definition

$$\Delta W_p = 4K^{-1/n'} \sigma_a \frac{1+n'}{n'} \frac{1-n'}{1+n'} \quad (6)$$

#### 4. 실험 결과

##### 응력과 변형률 거동고찰

298K와 788K에서 저주기 피로실험의 변형률과 응력범위  $\Delta\sigma$ 의 변화는 Fig. 4와 같다. 삼각파형과 사인파형의 저주기피로시 응력범위의 변화는 반복수( $N_f$ )가 점차 증가함에 따라 응력진폭이 감소하는 반복연화(Cyclic softening) 경향을 보이고 있다. 이처럼 응력진폭이 감소하는 현상은 대체로 전체 피로수명의 20% 이내에서 급격히 일어나다가 포화되는 경향을 가지며 재질에 따라 반복경화(Cyclic hardening)나 피로연화가 발생할 수 있으며, 반복경화는 인장실험시 경화되는 현상처럼 전위의 이동이 장애물에 의해 방해되는 반면, 연화현상은 이런 장애물이 점차 제거되어 전위의 이동이 쉬워지는 방향으로 재료의 성질이 변화게 된다. Fig. 4는 삼각파형 저주기피로시 총변형률 0.3, 0.6%에 대해 피로수명 감소와 피로반복수에 따라 반복연화현상이 발생함을 알 수 있다.

##### 변형률과 저주기 피로수명( $N_f$ ) 사이의 관계

Fig. 5와 6은 상온 및 고온에서 수행한 사인파형 및 삼각파형의 저주기 피로시험에서 얻어진 총변형률과 반복수의 관계를 Coffin-Manson식에 의해  $\epsilon$ -N곡선으로 나타내었다. 일반적으로 한 파형내에서 상온과 고온을 비교할 때 온

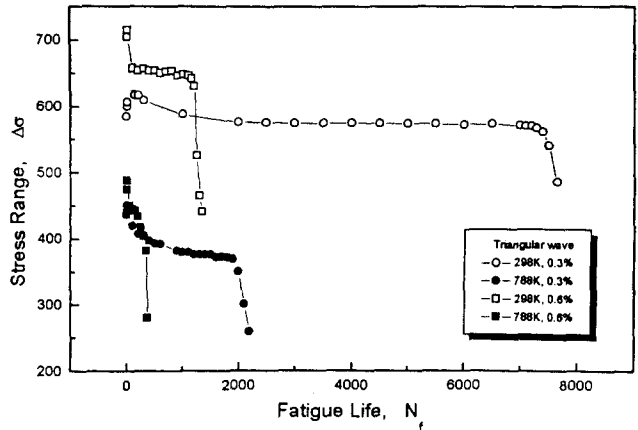


Fig. 4. Stress range vs. applied cycles

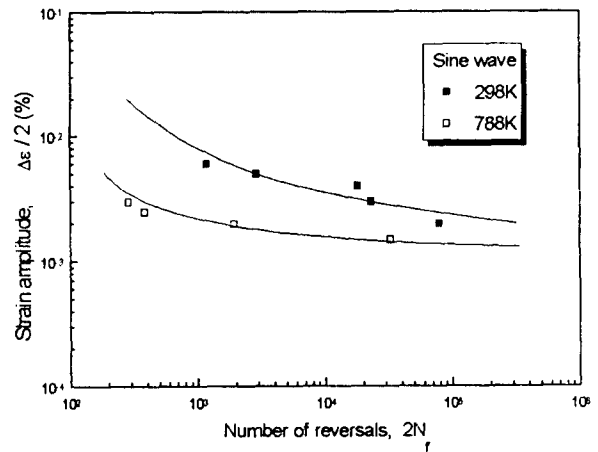


Fig. 5. S-N curve of sine wave low-cycle fatigue test

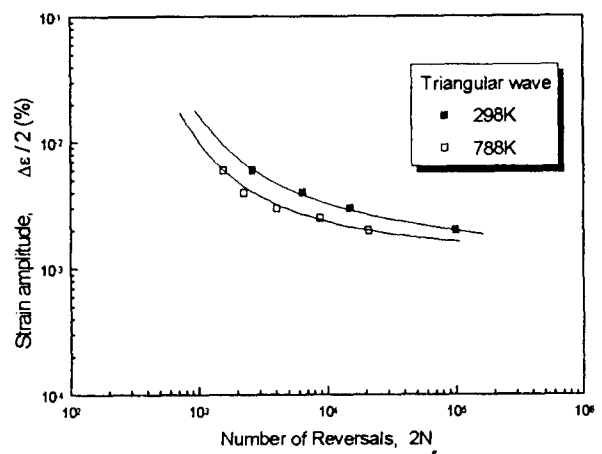


Fig. 6 S-N curve of triangular wave low-cycle fatigue test

도효과로 인하여 상온보다 고온에서 피로수명이 크게 저하된다. Fig. 5와 6으로부터 사인파형보다 삼각파형 피로수명은 상온에서 고온으로의 피로수명 감소폭이 작고, 사인파형에 비해 일정변형률에서 상온과 고온의 피로수명 차이가 적음을 알 수 있다. 또한, 피로한도의 경우에는 파형에 관계없이 상온과 고온에서 삼각파형과 사인파형이 거의 일치함을 알 수 있었다.

Table 4. The result of plastic strain energy with 298K and 788K

$\Delta W$		Temp.	298K	788K
$\Delta W$	Triangular Wave		$850.7 \times (N_f)^{-0.735}$	$237.54 \times (N_f)^{-0.692}$
	Sine Wave		$121.83 \times (N_f)^{-0.51}$	$2.98 \times (N_f)^{-0.28}$

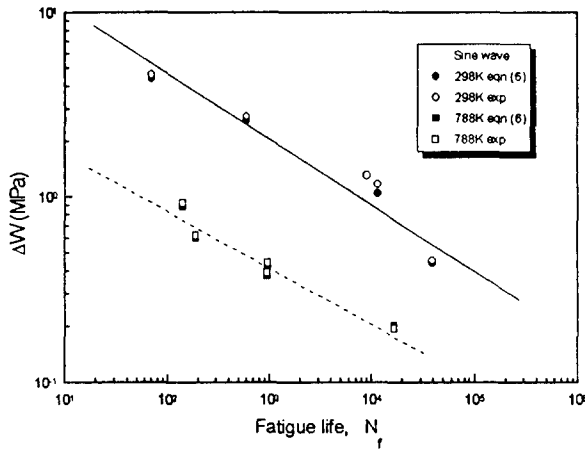


Fig. 7. The relation between  $\Delta W$  and  $N_f$  of sine wave

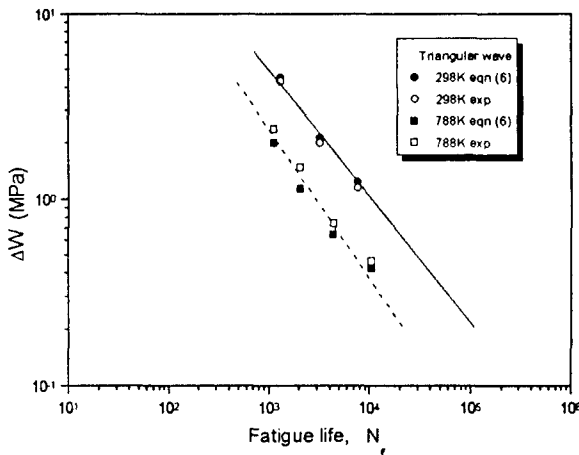


Fig. 8. The relation between  $\Delta W$  and  $N_f$  of triangular wave

5. 소성변형에너지법의 수명예측에의 적용

소성변형에너지와 피로수명과의 관계

소성변형에너지는 파단반복수의 1/2 cycle에서 히스테리시스루프의 면적을 측정하여 구할 수 있다. Table 4는 식(6)을 계산하여 소성변형에너지  $\Delta W$ 를 구하고 파단반복수와와의 관계를 통해 찾아낸 식이다. Fig. 7, 8은 사이클당 소성변형에너지와 파단반복수 사이의 관계를 도식화 한 것으로 히스테리시스루프의 면적으로부터 구한  $\Delta W$  측정값과 식(6)으로부터 구한 계산값을 비교한 결과 매우 근사함을 알 수 있다. Fig. 7, 8로부터 삼각파형의 사이클당 소성변형에너지량이 사인파형에 비해 더 크며, 고온에 비해 상온에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 삼각파형 저주기피로시는 재료내부에 발생하는 소성변형에너지량이 사

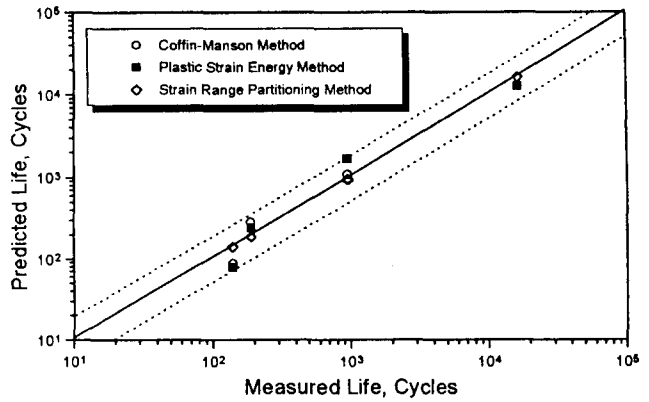


Fig. 9. Measured life vs. predicted life of 1Cr0.5Mo steel

인파형보다 크게 증가하여 재료에 크게 피로손상이 누적됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 Table 4의 소성변형에너지법으로 계산한 피로수명을 Coffin-Manson법, 변형률분할법에 의한 수명예측 방법과 비교하였으며, 각 결과가 매우 일치함을 알 수 있다. 따라서 저주기 피로수명은 식(6)에서 구한 소성에너지량과 Table 4의 식을 이용하여 1Cr0.5Mo강의 파단수명을 정확히 예측할 수 있다.

6. 파단면의 미시적특성

일반적으로 고온피로 영역에서는 온도에 의한 크리프 영향으로 인하여 파단면에서 입계균열(intergranular crack)이 관찰되며, 상온피로에서는 파단면에서 입내균열(transgranular crack)이 관찰된다. Fig. 10은 788K, 0.2% strain 조건에서 사인파형과 삼각파형 저주기 피로시험시 파단면을 SEM 관찰한 것이다( $\times 500$ ). 삼각파형 및 사인파형 모두 연성파괴의 양상을 띄고 스트라이에이션(striation)이 발견되었으며, 사인파형은 일부 입계파괴의 형태를 보이고 있다. 삼각파형의 스트라이에이션 간격이 사인파형보다 넓으며 이것은 사이클당 균열진전율이 삼각파형이 더욱 큼을 알 수 있다. 따라서 삼각파형의 사이클당 피로손상이 사인파형보다 크고 소성변형에너지가 많이 소비됨을 알 수 있으며 이것은 실험결과와 일치한다.

7. 결 론

1) 사인파형과 삼각파형의 고온 저주기피로시험을 통해 나타난 피로수명은 상온(298K)에 비해 고온(788K)에서 온도 효과에 의해 피로수명이 현저하게 감소하였으며, 삼각파형의 피로수명이 사인파형에 비해 소성에너지량의 증가

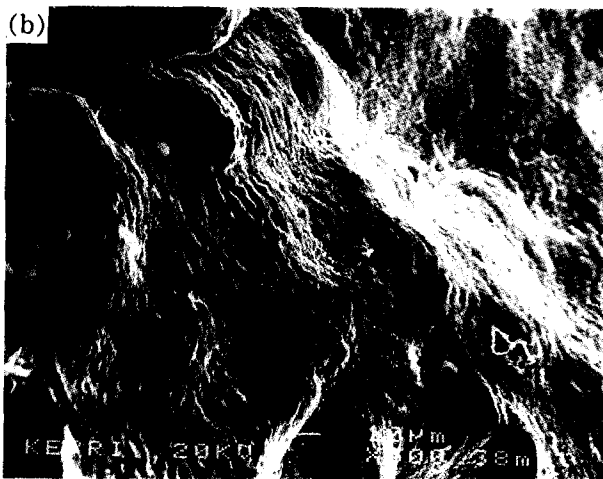
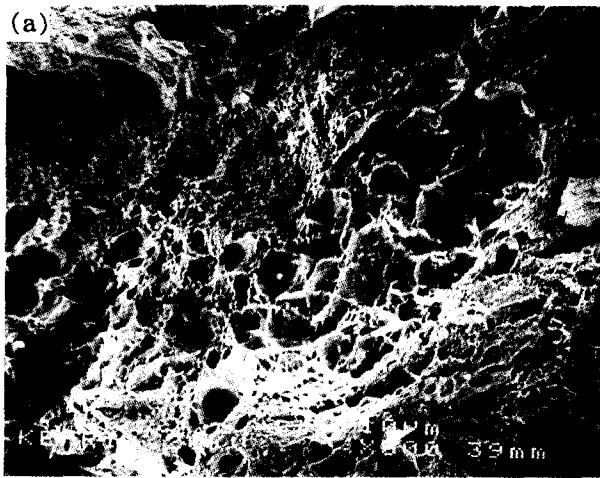


Fig. 10. SEM image showing typical fracture surface in isothermal fatigue tests(0.2%strain, 788K, ×500) (a) Sine wave (b) Triangular wave

로 피로수명이 더 감소하였다.

2) 1Cr0.5Mo강의 소성변형에너지는 상온 및 고온에서 각각 다음의 관계를 가진다.

삼각파형의 경우,

$$\Delta W = 850.7 \times (N_f) - 0.735 \quad (298K)$$

$$\Delta W = 237.54 \times (N_f) - 0.692 \quad (788K)$$

사인파형의 경우,

$$\Delta W = 121.83 \times (N_f) - 0.51 \quad (298K)$$

$$\Delta W = 2.98 \times (N_f) - 0.28 \quad (788K)$$

3) 수명예측결과, 소성변형에너지법은 Coffin-Manson 식, 변형률분할법에 의한 각 수명예측 결과들과 서로 잘 일치하였으며, 파형에 따른 파단수명의 차이를 정확하게 예측할 수 있다.

### 참고 문헌

1. C.E. Feltner, J.D. Morrow, "Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture", *Journal of Basic Engineering*, **1(1)**, pp.15-22 (1961)
2. F. Ellyin, D. Kujawski, "Plastic Strain Energy in Fatigue Failure", *Journal of Pressure Vessel Technology*, **106(4)**, pp.342-347 (1984)
3. D. Lefebvre, F. Ellyin, "Cyclic response and inelastic strain energy in low cycle fatigue", *Int. Journal of Fatigue*, **6(1)**, pp.9-115 (1984)
4. F. Ellyin, "Effect of Tensile-Mean-Strain on Plastic Strain Energy and Cyclic Response", *Journal of Engineering Materials and Technology*, **107**, pp.119-125 (1985)
5. M. Giglio, L. Vergani, "Life Prediction of Notched Components", *Journal of Engineering Materials and Technology*, **117**, pp.50-55 (1955)
6. 熱疲勞共通試驗小委員會, "熱疲勞共通試驗結果報告", *材料*, 第24卷, 第58號, pp.254-268 (1975)
7. G.R. Halford, "The Energy Required for Fatigue", *Journal of materials*, **1(1)**, pp.3-15 (1966)