

〈논 문〉 SAE NO. 953700

유지시간 효과를 고려한 12Cr 내열강의 열피로 및
저주기 피로 특성
Thermal-Mechanical and Low Cycle Fatigue Characteristics of 12Cr
Heat Resisting Steel with Hold Time Effects

하 정 수,* 고 승 기,** 옹 장 우***
J. S. Ha, S. K. Koh, J. W. Ong

ABSTRACT

Isothermal and thermal-mechanical fatigue characteristics of 12Cr heat resisting steel used for high temperature applications were investigated including hold time effects. Isothermal low cycle fatigue test at 600°C and in-phase, out-of-phase thermal-mechanical fatigue test at 350 to 600°C were conducted using smooth cylindrical hollow specimen under strain-control with total strain ranges from 0.006 to 0.015. Regardless of thermal-mechanical and isothermal fatigue tests, cyclic softening behavior was observed and much more pronounced in the thermal-mechanical fatigue tests with hold times due to the stress relaxation during the hold time. The phase difference between temperature and strain in thermal-mechanical fatigue tests resulted in significantly shorter fatigue life for out-of-phase compared to in-phase. The differences in fatigue lives were dependent upon the magnitudes of plastic strain ranges and mean stresses. During the hold time in the strain-controlled fatigue tests, the increase in the plastic strain range and the stress relaxation were observed. It appeared that the increase in plastic strain range per cycle and the introduction of creep damage made important contributions to the reduction of thermal-mechanical fatigue life with hold time, and the life reduction tendency was more remarkable in the in-phase than in the out-of-phase thermal-mechanical fatigue. Isothermal fatigue tests performed under the combination of fast and slow strain rates at 600°C showed that the fatigue life decreased as the strain rate and frequency decreased, especially for the low strain ranges.

주요기술용어 : Thermal-Mechanical Fatigue(열피로), Isothermal Fatigue(등온 피로), Hold Time(유지 시간), Cyclic Softening(피로 연화), Creep-Fatigue(크리프-피로), Stress Relaxation(응력 이완), Mean Stress(평균 응력)

* 한국전력공사 기술연구원
** 정희원, 군산대학교 생산기계공학과
*** 충남대학교 기계설계학과

1. 서 론

열피로는 반복적인 열팽창 및 수축의 구속에 의하여 재질의 열화 및 균열에 이르는 파손현상으로서 항공기 및 자동차 엔진과 같은 운동기기에서부터 터빈등의 발전설비에 이르는 고온기기 및 부품에서의 주요 손상 원인이 되고 있다. 이러한 고온기기의 운전 및 정지 그리고 부하변동은 열적 과도 상태를 필연적으로 유발하게 되며 온도구배에 의한 열응력이 발생하게 된다. 특히 불연속점에서의 열응력에 의한 반복적인 소성변형은 예측할 수 없는 조기 균열 및 파괴현상을 나타내게 됨에 따라 고온기기의 설계 및 안전성 해석을 위하여 고온기기의 운전환경 조건 하에서의 재료의 변형, 파괴 거동 및 수명예측에 관한 연구가 진행되어 오고 있다.^{1,2)}

고온에서 사용되는 설비의 재질들은 대부분 열응력은 물론 기계적 응력을 받게 되고 특히 온도의 변화와 함께 응력 및 변형률의 변동도 함께 수반되므로 등은 저주기 피로거동(isothermal low cycle fatigue behavior)과는 다른 열피로 거동(thermal-mechanical fatigue behavior)을 보인다. 일정한 고온 상태에서의 저주기 피로 파괴 특성을 바탕으로한 기계 및 구조물에 대한 기존의 열피로 수명 예측³⁾은 많은 오차를 보이게 됨에 따라 온도와 변형률이 동시에 변할 때 재질의 열피로 특성을 파악하고자 하는 실험방법의 개발⁴⁻⁶⁾과 함께 열피로 수명예측 방법⁷⁻¹⁰⁾에 제안되어 오고 있으며 자동차 엔진의 새로운 소재 개발에 대한 적용 연구도 진행되고 있다.¹¹⁾ 하지만 열피로

실험은 최대 및 최소 온도, 온도범위, 주파수, 온도와 기계적 변형률과 위상, 파형, 유지시간 등의 많은 현상학적 변수를 포함하고 있으므로 등은 피로실험에 비하여 많은 비용과 시간이 소요되며 그 해석에도 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 고온기기 및 부품으로 쓰이고 있는 12Cr 내열강을 사용하여 변형률 속도와 변형률 주파수를 달리하는 600°C 고온 저주기 피로실험, 온도와 변형률의 위상을 변화시킨 열피로 실험, 그리고 최대온도에서 일정 유지시간을 부과하였을 때의 열피로 실험을 수행하여 열피로 특성을 통한 저주기 피로 특성과 비교, 규명하였으며 변형률과 피로수명 사이의 관계를 제시하였다.

2. 실험편 및 실험방법

본 연구에서 사용된 12Cr 내열강은 고온기기에 쓰여지고 있는 고온강도가 우수한 재질로서 그 화학적 조성 및 기계적 성질은 각각 Table 1과

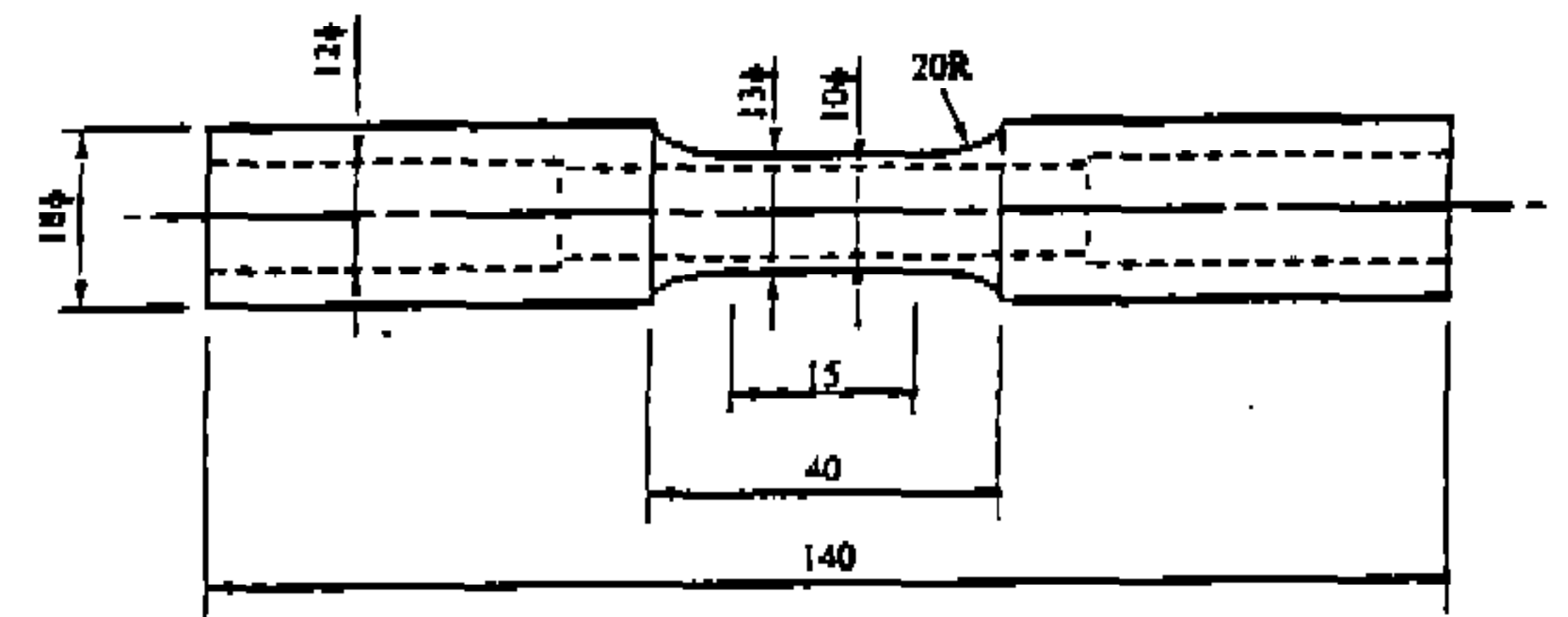


Fig.1 Isothermal and thermal-mechanical fatigue test specimen(Dimensions in mm)

Table 1 Chemical composition of 12Cr steel(%weight)

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
| C | si | Mn | S | P | Ni | Cr | Mo | V | Nb |
| 0.16 | 0.24 | 0.67 | 0.003 | 0.005 | 0.58 | 11.01 | 0.92 | 0.23 | 0.05 |

Table 2 Mechanical properties of 12Cr steel

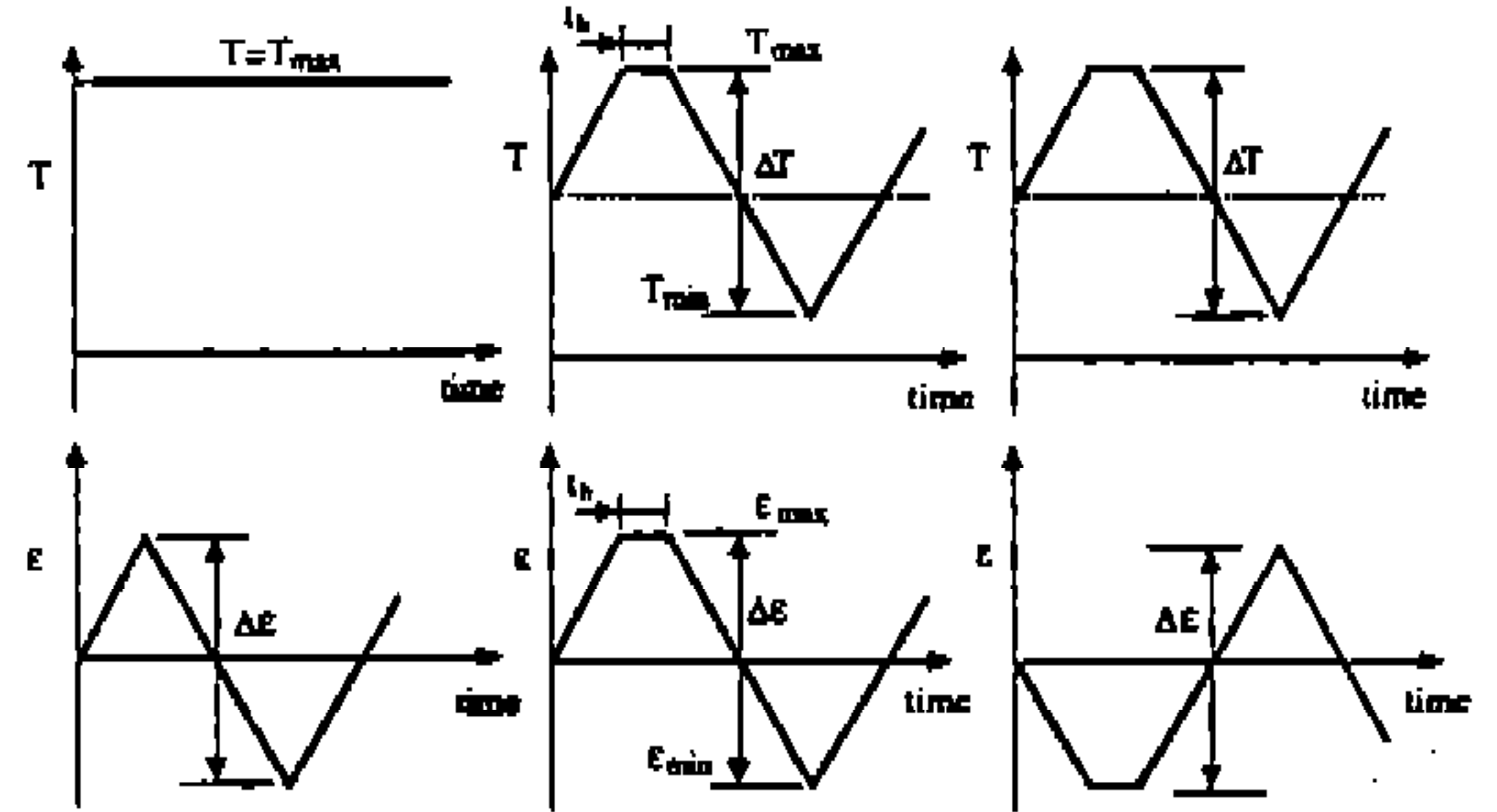
| | | | |
|---|--------|-------|-------|
| Mechanical property | 250°C | 350°C | 600°C |
| Elastic modulus, E(GPa) | 226.1 | 198.9 | 126.6 |
| 0.2% offset yield strength, σ_{ys} (MPa) | 777.6 | 660.1 | 370.7 |
| Strain hardening exponent, n | 0.045 | 0.062 | 0.032 |
| Strength coefficient, K(MPa) | 1022.7 | 969.7 | 448.6 |

2에 나타내어 있다. 시편의 형상은 Fig.1과 같이 표점거리가 15mm이고 외경이 13mm, 내경이 10mm인 속이 빈 실린더형 시편이다. 시편의 내표면 및 외표면은 1200번의 연마지로 연마한 후 6 μ m 입자의 다이아몬드 연마제를 사용하여 마무리 연마를 함으로서 시편 표면 기질기에 의한 영향을 줄이고자 한다.

열피로 실험에 사용된 실험장치는 10톤 용량의 Instron사의 전기기계식 피로 실험기(Instron model 1362)로서 시편을 가열하기 위한 고주파 발생장치, 시편에 냉각용 공기를 공급하기 위한 공기압축기등이 포함되어 있으며, 시편을 하중 방향에 정렬하여 편심이 되지 않도록 우즈 메탈 그립(Wood's metal grip)을 사용하였다. 변형률은 시편의 축방향으로 설치된 10mm 표점거리의 신장계(extensometer)를 사용하여 측정하였으며, 시편의 온도는 표점거리의 중앙 부위에 점용접(spot weld)된 열전대에 의하여 측정되었다.

온도와 변형률이 동시에 변할 때의 손상 역할을 연구하기 위한 열피로 실험은 온도와 변형률의 위상차에 따라 기본적으로 두가지 형태, 즉 동상(in-phase)과 역상(out-phase) 열피로 실험으로 구분되어 진다. 동상 열피로 실험은 최대 온도에서 최대 변형률이 발생하도록 하며 역상 열피로 실험에서는 최대 온도에서 최소 변형률이 발생하도록 하여 수행된다. 이러한 동상 및 역상 열피로 실험에서의 시간에 따른 온도와 변형률의 변화는 등온(isothermal) 피로실험과 비교하여 Fig.2와 같다. 동상 열피로 실험에서는 온도가 상승하면서 기계적 인장 변형률이 작용하므로 같은 방향의 기계적 변형률과 열적 변형률이 더하여진 총변형률로 반복 제어되며, 역상 열피로 실험에서는 온도가 강하하면서 기계적 인장 변형률이 작용되므로 변형률의 방향이 서로 상이한 기계적 변형률과 열적 변형률의 합인 총변형률이 제어되는 특징을 지니고 있다. 본 연구에서의 열피로 실험 온도 범위는 350 $^{\circ}$ C와 600 $^{\circ}$ C 사이의 영역이었으며, ASTM Standard Practice E606에 의거하여 변형률 제어 상태로 수행되었다.¹²⁾ 변형률 사이클의 파형은 삼각파이었으며 주파수는 0.5cycle/min, 온도변화율은 4.167 $^{\circ}$ C/sec이었고, 총변형률

범위, $\Delta\epsilon=0.015, 0.012, 0.010, 0.008, 0.006$ 에서 실험이 수행되었다. 또한 열피로에서의 피로-크리프 상호작용을 파악하기 위하여 Fig.2와 같이 최고 온도에서 일정 유지시간(hold time, t_h)을 갖는 사다리꼴 형태의 파형으로 열피로 실험을



1) Isothermal 2) In-phase 3) Out-of-phase

Fig.2 Temperature and strain waveforms in isothermal and thermal-mechanical fatigue tests

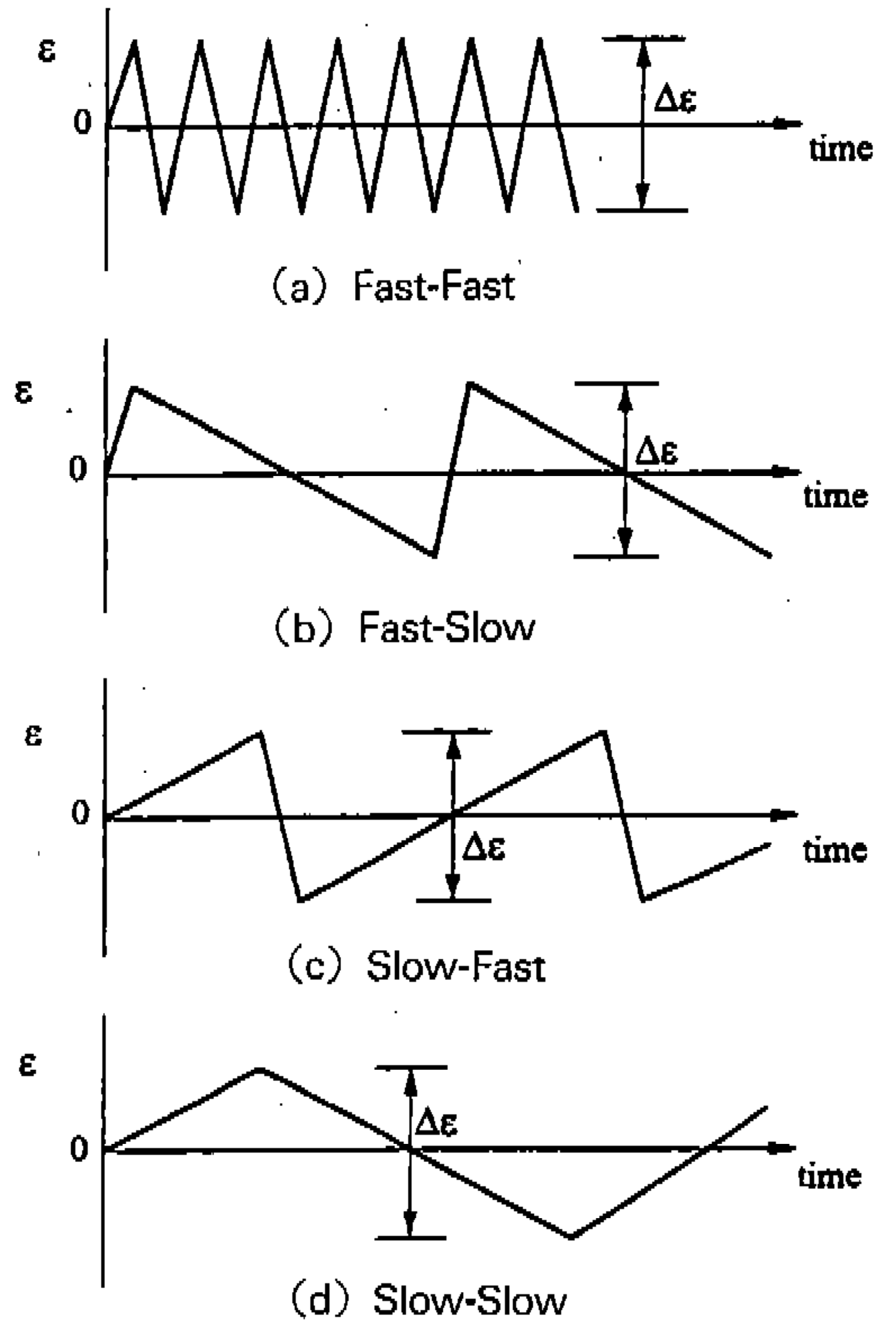


Fig.3 - Strain waveforms with different strain rates in isothermal fatigue tests

수행하였다.

열피로 파괴 거동과 등은 저주기 피로 파괴 거동을 비교하기 위하여 등은 저주기 피로실험을 열피로 실험의 최고 온도인 600°C 에서 열피로 실험에서와 같은 주파수인 $0.5\text{cycle}/\text{min}$ 로 수행되었다. 또한 크리프 변형률을 발생시키는 $\dot{\epsilon}=4\times 10^{-5}\text{sec}^{-1}$ 의 느린 변형률 속도와 소성 변형률만을 발생시키는 $\dot{\epsilon}=4\times 10^{-3}\text{sec}^{-1}$ 의 빠른 변형률 속도를 조합하여 Fig.3과 같이 Fast-Fast, Fast-Slow, Slow-Fast, Slow-Slow의 변형률 파형을 지니는 등은 저주기 피로실험을 수행하여 변형률 속도와 파형이 피로수명에 미치는 영향을 관찰하였다. 피로실험 과정에서 최대 인장응력이 연속적으로 강하하는 현상이 발생하여 피로수명을 정의하는데 어려움이 있었으므로 히스테리시스 루프에서의 최대 인장응력이 피로실험의 준안정 상태에서의 최대 인장응력의 75퍼센트를 나타낼 때까지의 반복수를 피로수명으로 정의하였다.

3. 주기 응력과 변형률의 거동

변형률 제어상태에서 재료의 응답특성은 각 주기에서의 히스테리시스로부터 파악될 수 있다. $350\sim 600^{\circ}\text{C}$ 범위의 동상 및 역상의 열피로 실험과 600°C , 0.5cpm 의 등은 저주기 피로실험에서 온도와 변형률의 주기적 반복에 따른 히스테리시스에서의 응력범위 변화는 Fig.4와 같으며 Fig.4에서 총 변형률 범위는 동상 열피로에서는 0.012, 그리고 역상 열피로 및 등은 피로에서는 0.010이었다. Fig.4에서 알 수 있듯이 모든 경우의 실험에서 반복수가 증가함에 따라 점증적으로 응력범위가 감소하는 피로연화(cyclic softening) 경향을 보이고 있으나, 일반적으로 상온 저주기 피로에서 보이는 응력범위는 안정상태(stabilized or saturated state)는 관찰되지 않았다.¹³⁾

Fig.4에서 600°C 등은 저주기 피로 실험에서의 응력범위는 열피로 실험의 응력범위의 약 60퍼센트를 나타내고 있지만 응력 감소곡선의 기울기는 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 동상 열피로 실험에서는 다른 경우에서 보다 상대적으로 완만한 기울기로 응력의 감소가 이루어지고

있음을 알 수 있다. 이는 등은 피로하중 또는 역상 열피로 하중에서의 열피로 손상이 동상 하중에서의 열피로 손상이 보다 크음을 의미하며, 따라서 동상 열피로 실험은 다른 두 경우보다 긴 열피로 수명을 나타내었다. 특히 10분의 유지시간을 갖는 경우에는 유지시간을 갖지 않는 경우에 비하여 빠른 속도로 응력범위가 감소하고 있음을 알 수 있으며, 이는 유지시간 동안의 응력이완 현상에 기인하고 이 동안의 크리프 손상에 의하여 유지시간이 없는 경우에 비해 상당히 짧은 수명이 얻어졌다. 실험이 끝난 후 등은 및 역상 열피로 시편 표면에서는 심한 산화막(oxide scale)과 많은 수의 미세한 표면균열이 관찰되었으나, 동상 열

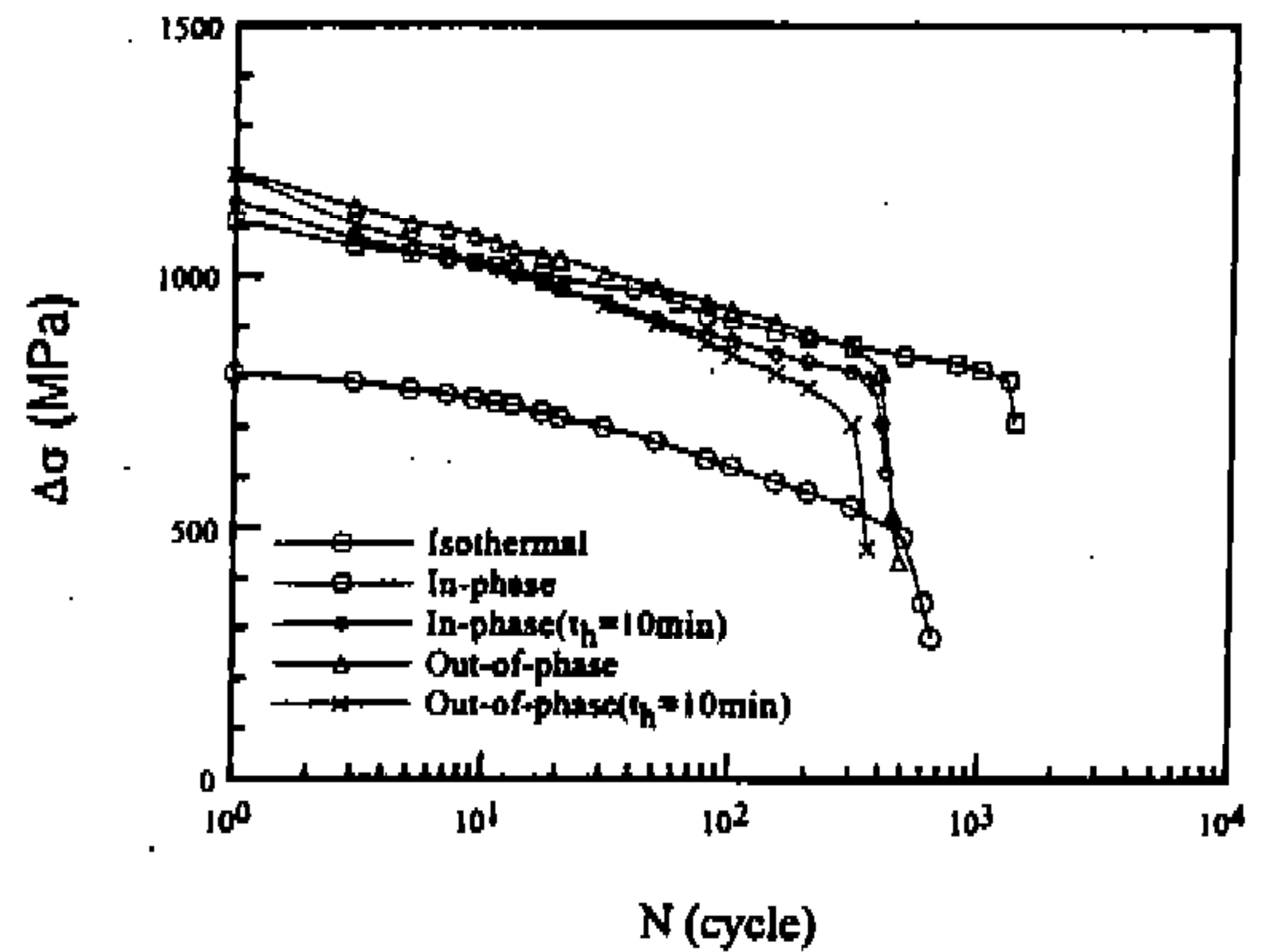


Fig.4 Variation of stress ranges during cycling (Isothermal : 600°C , In-phase : $350\sim 600^{\circ}\text{C}$, Out-of-phase : $350\sim 600^{\circ}\text{C}$)

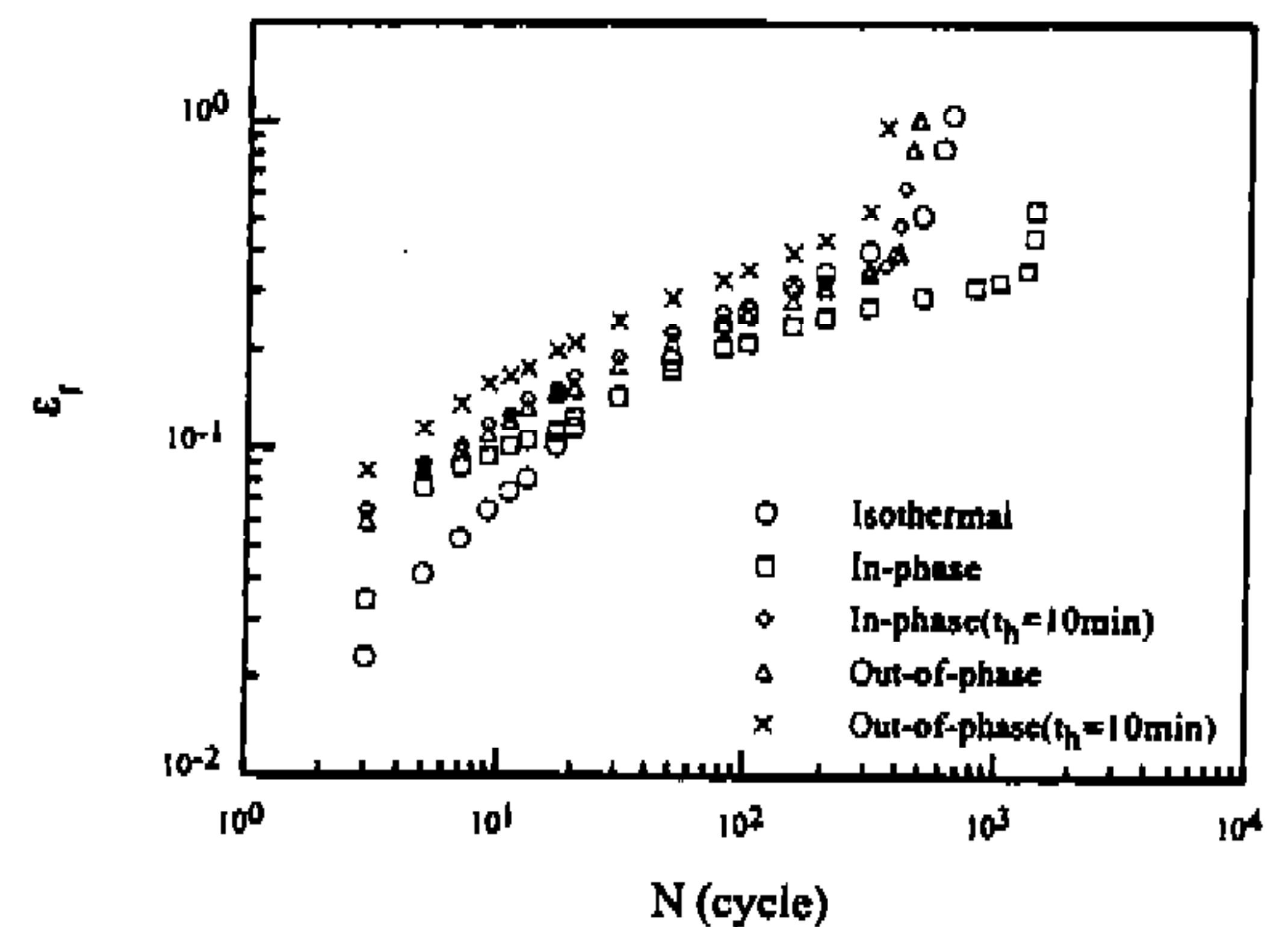


Fig.5 Softening value versus applied cycles (Isothermal : 600°C , In-phase : $350\sim 600^{\circ}\text{C}$, Out-of-phase : $350\sim 600^{\circ}\text{C}$)

피로 시험에서는 표면 균열을 거의 발견되지 않았다.

피로연화 현상 보다 정량적으로 표현하기 위하여 피로연화치, ϵ_r 을 정의하면 다음과 같다.¹⁴⁾

$$\epsilon_r = \ln(\Delta\sigma_0/\Delta\sigma_i) \quad (1)$$

위에서 $\Delta\sigma_0$ 는 최초 주기에서의 응력범위, $\Delta\sigma_i$ 는 i번째 주기에서의 응력범위를 의미한다. 식 (1)을 이용한 등온($\Delta\epsilon=0.010$) 및 동상($\Delta\epsilon=0.012$), 역상($\Delta\epsilon=0.010$) 열피로 실험에서의 피로연화치와 피로수명과의 관계는 Fig.5와 같다. 실험의 초기단계에서는 피로연화치가 급격히 증가하지만 반복수가 증가함에 따라 중간단계에서는 기울기가 일정한 안정상태를 유지하며 마지막 단계에서 다시 급격히 증가하여 파손하는 경향의 크리프 곡선과 유사한 형상을 보여 주고 있다. 안정상태에서 동상 및 역상 열피로 연화치의 기울기는 유사한 경향을 보이고 있으나 동상의 경우에는 다른 경우에 비하여 큰 기울기를 나타내고 있으며, 유지시간을 갖는 열피로 실험에서의 피로연화치 곡선은 유지시간이 없는 경우의 피로연화치 곡선과 거의 비슷한 형상을 지니지만 유지시간 중의 응력이완에 의하여 더 큰 피로연화치를 보이고 있다.

주기적 하중에서의 재료의 응답은 응력과 변형률과의 관계로서 나타낼 수 있으며, 각 피로 실험의 중간수명(half-life)에서 히스테리시스의 응력 진폭과 변형률 진폭을 최소자승법에 의한 커브 피팅으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{k'}\right)^{1/n'} \quad (2)$$

Table 3 Cyclic stress-strain properties of 12Cr steel

| Type | n' | K' (MPa) |
|--------------|-------|------------|
| Isothermal | 0.140 | 603.7 |
| In-phase | 0.180 | 1164.8 |
| Out-of-phase | 0.196 | 1365.7 |

위에서 n' 은 주기 변형률 경화지수(cyclic strain hardening exponent), K' 은 주기 강도계수(cyclic strength coefficient)이며, 각 등온 피로 및 열피로 하중에 대한 n' , K' 값은 Table 3과 같다. 주기적 변형률을 받을 때 강도 계수는 등온 피로에서 보다 열피로에서 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 Fig.4에서 등온 저주기 피로의 응력범위가 상당히 낮은 현상에 기인하고 있다.

4. 변형률과 피로수명의 관계

열피로 온도 범위인 350~600°C의 동상 및 역상 열피로 실험과 주파수 0.5cycle/min, 600°C 등온

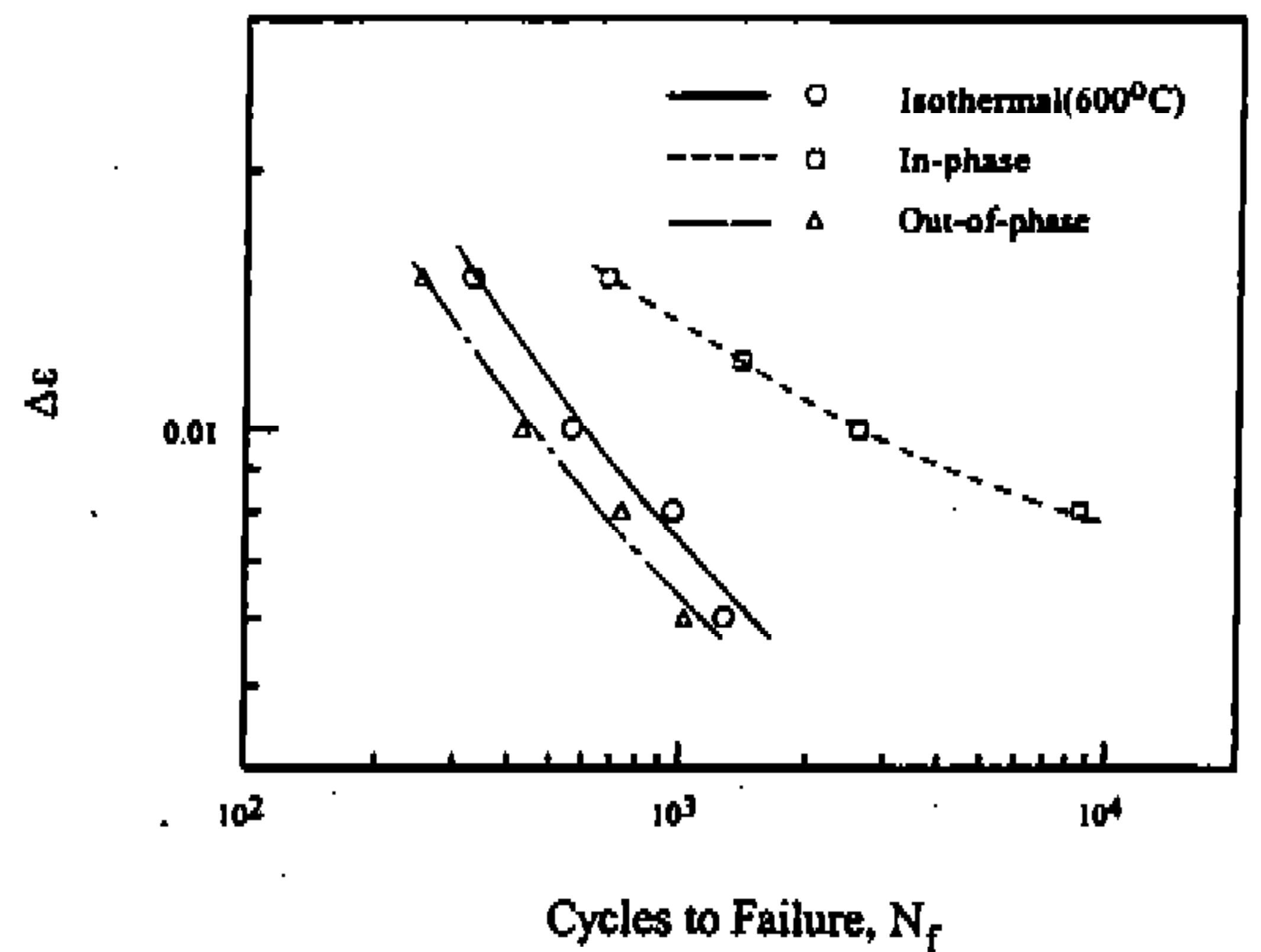


Fig.6 Total strain range versus cycles to failure

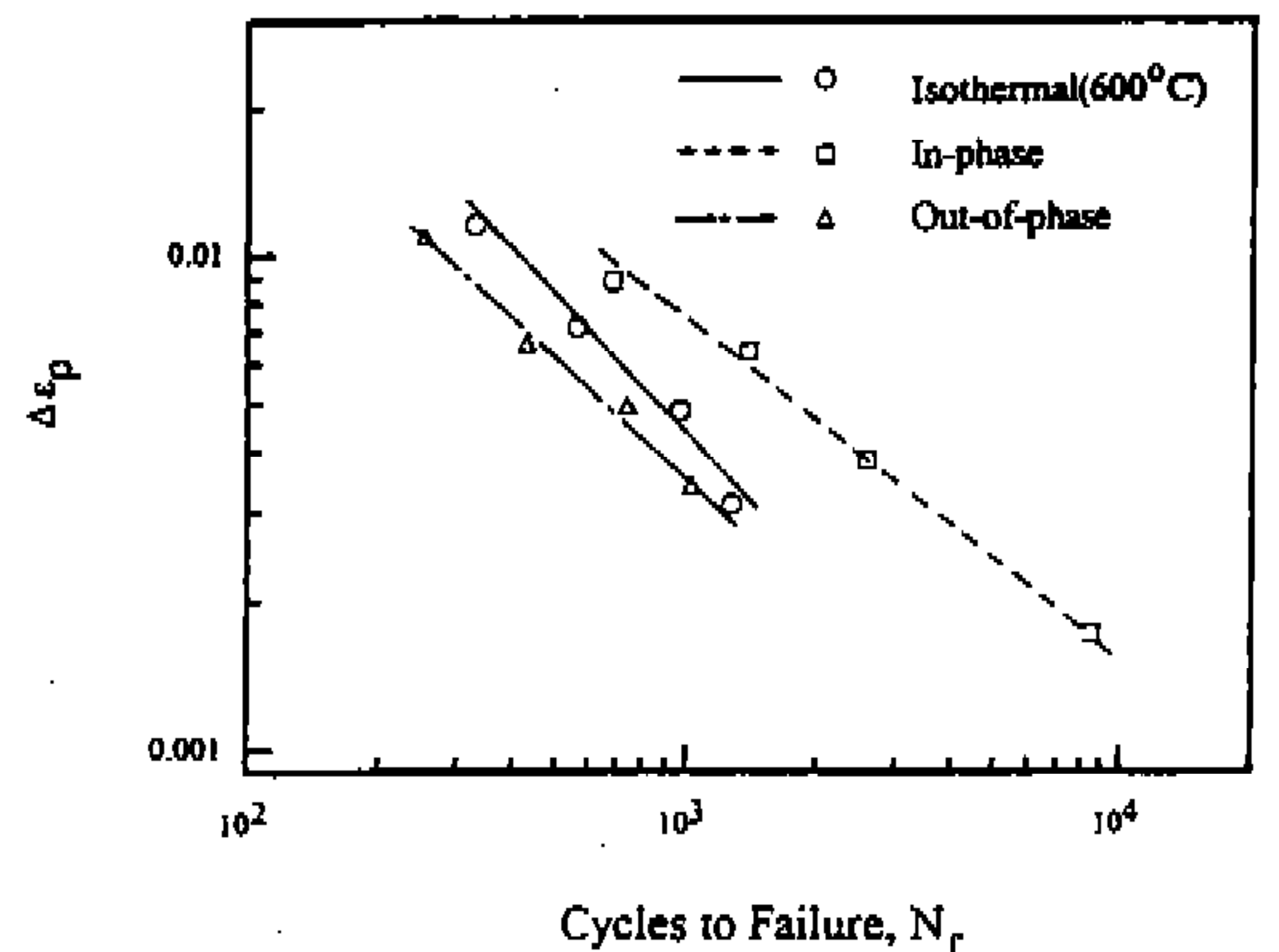


Fig.7 Plastic strain range versus cycles to failure

Table 4 Isothermal and thermal-mechanical fatigue test results

| Type | | t_h (min) | N_f (Cycle) | $\Delta\epsilon$ | $\Delta\epsilon_e$ | $\Delta\epsilon_p$ | σ_{max} (MPa) | σ_{min} (MPa) | $\Delta\sigma/2$ (MPa) |
|------------------------|--------------|----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Isothermal (0.5cpm) | | 0 | 328 | 0.015 | 0.0035 | 0.0115 | 297.4 | 293.7 | 295.5 |
| | | 0 | 560 | 0.012 | 0.0029 | 0.0071 | 270.3 | 279.5 | 274.9 |
| | | 0 | 965 | 0.010 | 0.0032 | 0.0048 | 255.2 | 253.4 | 254.3 |
| | | 0 | 1271 | 0.008 | 0.0029 | 0.0031 | 245.6 | 251.1 | 248.7 |
| Thermal- Mechanical | In-phase | 0 | 680 | 0.015 | 0.0062 | 0.0088 | 312.0 | 565.3 | 436.7 |
| | | 0 | 1382 | 0.012 | 0.0057 | 0.0063 | 291.0 | 540.8 | 415.9 |
| | | 0 | 2586 | 0.010 | 0.0062 | 0.0038 | 254.8 | 500.5 | 377.6 |
| | | 0 | 8566 | 0.008 | 0.0063 | 0.0017 | 206.0 | 452.1 | 329.0 |
| | | 3 | 731 | 0.012 | 0.0052 | 0.0068 | 253.1 | 524.3 | 388.7 |
| | | 10 | 400 | 0.012 | 0.0043 | 0.0077 | 271.2 | 524.3 | 397.8 |
| | | 30 | 396 | 0.012 | 0.0043 | 0.0077 | 253.2 | 506.2 | 379.8 |
| | Out-of-phase | 0 | 252 | 0.015 | 0.0041 | 0.0109 | 592.9 | 400.1 | 496.5 |
| | | 0 | 428 | 0.010 | 0.0034 | 0.0066 | 547.9 | 334.2 | 441.1 |
| | | 0 | 738 | 0.008 | 0.0031 | 0.0049 | 525.0 | 309.0 | 413.0 |
| | | 0 | 1026 | 0.006 | 0.0026 | 0.0034 | 509.4 | 292.9 | 401.1 |
| | | 3 | 349 | 0.010 | 0.0023 | 0.0077 | 511.4 | 293.2 | 204.6 |
| | | 10 | 318 | 0.010 | 0.0025 | 0.0075 | 509.6 | 293.2 | 401.4 |

저주기 피로실험의 결과가 Table 4에 나타나 있다. Table 4에서 $\Delta\epsilon_e$, $\Delta\epsilon_p$, σ_{max} , σ_{min} , $\Delta\sigma/2$ 는 중간수명의 히스테리시스 루프에서 얻은 탄성 변형률 범위, 소성 변형률 범위, 최대응력, 최소응력, 그리고 응력진폭을 의미하며, 총변형률 범위와 피로수명(N_f)의 관계, 그리고 소성 변형률 범위와 피로수명과의 관계가 각각 Fig.6와 Fig.7에 나타내어 있다. Fig.6로부터 역상 열피로 수명이 가장 짧으며, 동상 열피로 수명이 가장 길게 됨을 알 수 있다. 매우 큰 소성 변형을 나타내는 변형률 범위인 $\Delta\epsilon=0.015$ 에서의 동상 열피로 수명은 역상 열피로 수명의 약 3배의 긴 수명을 나타내고 있지만 상대적으로 적은 소성 변형을 나타내는 낮은 변형률 범위에서는 큰 수명의 차이를 보이고 있어서 $\Delta\epsilon=0.008$ 에서는 약 12배의 차이를 나타내고 있으며, 등은 저주기 피로수명은 동상 열피로 수명보다는 짧고 역상 열피로 수명보다는 긴 경향을 보이고 있다.

Fig.7의 소성 변형률 범위와 수명과의 관계는 다음과 같이 Coffin-Manson식으로 표현될 수 있다.¹⁵⁾

$$\Delta\epsilon_p = CN_f^m \quad (3)$$

위 식에서의 계수와 지수를 로그-로그 선형 회귀법(log-log linear regression analysis)을 이용하여 구한 결과는 Table 5와 같으며, 등은 피로에서의 소성 변형률-수명 곡선은 동상 및 역상 열피로에 비하여 큰 기울기를 지니고 있다.

열피로 손상은 피로 손상과 크리프 손상의 합으로 알려져 있으므로¹⁶⁾ Fig.7에서 같은 변형률 주파수를 가지는 피로실험에서의 수명의 차이는 서로 다른 열피로 하중에 의한 피로 손상량의 차이에 기인함이라고 생각되며, 이는 Fig.8의 같은 변형률 범위의 히스테리시스 루프에서 동상 열

Table 5 Coefficients and exponents of plastic strain-life equations

| Type | C | m |
|--------------|-------|--------|
| Isothermal | 2.729 | -0.939 |
| In-phase | 0.727 | -0.668 |
| Out-of-phase | 0.914 | -0.803 |

피로가 상대적으로 작은 소성 변형률을 나타내고 있으므로 다른 경우보다 적은 피로 손상을 받게 되어 긴 수명을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 또한 Fig.8(d)의 역상 열피로 히스테리시스루프에서는 인장 평균응력(tensile mean stress), $\sigma_m = 107\text{MPa}$ 이 존재하고 있으며 Fig.8(b)의 동상 열피로 히스테리시스 루프에서는 압축 평균응력(compressive mean stress), $\sigma_m = -123\text{MPa}$ 의 상당히 큰 평균응력이 존재하고 있어 인장 평균응력이 피로수명을 단축시키는 반면에 압축 평균응력은 피로수명을 연장시키는 영향을 미치고 있다.¹³⁾ 따라서 역상 열피로 수명이 동상 열피로에 비하여 짧은 이유는 실험 중 관찰되는 표면 산화막 균열과 히스테리시스 루프에서의 상대적으로 큰 소성변형률, 그리고 인장 평균응력 등으로 설명될 수 있다.

5. 유지시간이 피로수명에 미치는 영향

고온기기 및 구조물이 기동이나 운전변동에 의하여 부분적으로 재질의 탄성한도를 초과하는 크기의 열응력을 받을 수 있게 되며 그 후 계속적인 운전기간동안 이미 소성변형률을 받은 장소에서 응력이완 또는 크리프가 발생하게 된다. 따라서 실제 운전조건과 유사하게 시뮬레이션하기 위하여서 유지시간을 고려한 피로실험을 통하여 설계에 적합한 재료특성치를 얻을 수 있다. 이처럼 유지시간이 열피로 수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 최고온도에서 일정한 변형률 상태로 3분, 10분, 30분의 유지시간을 지나는 Fig.2와 같은 변형률 및 온도파형을 지나는 열피로 실험을 수행하였으며 그 결과는 Table 4에 나타내어 있다.

총변형률 범위가 0.012인 동상 열피로 수명은 유지시간이 각각 3분, 10분, 30분으로 증가함에 따라 유지시간이 없는 열피로 수명의 0.53, 0.29, 0.29배로 감소하였으며, 총변형률 범위가 0.010인 역상 열피로 수명은 유지시간이 각각 3분, 10분으로 증가함에 따라 유지시간이 없는 열피로 수명의 0.82, 0.74배로 감소하여 Fig.9와 같은 결과가 얻어졌다. 이러한 열피로 수명의 감소는 Fig.8(c),

(d)의 히스테리시스 루프로 부터 알 수 있듯이 일정 유지시간 동안의 최고온도에서 응력이완에 의하여 발생하는 소성변형률의 증가로 인한 피로 손상과 유지시간 동안의 크리프 손상의 중첩에 기인한다.¹⁷⁾

비록 서로 다른 총변형률 범위에서 동상 및 역상 열피로 실험이 수행되어 직접 비교하기는 어렵지만 유지시간에 따른 열피로 수명의 감소 경향은 역상에 비하여 동상 열피로에서 두드러지게 나타나고 있는데 이는 인장 변형률 상태에서의 유지시간이 압축 변형률 상태에서 보다 열피로 수명에 더 큰 영향을 미치고 있음을 의미

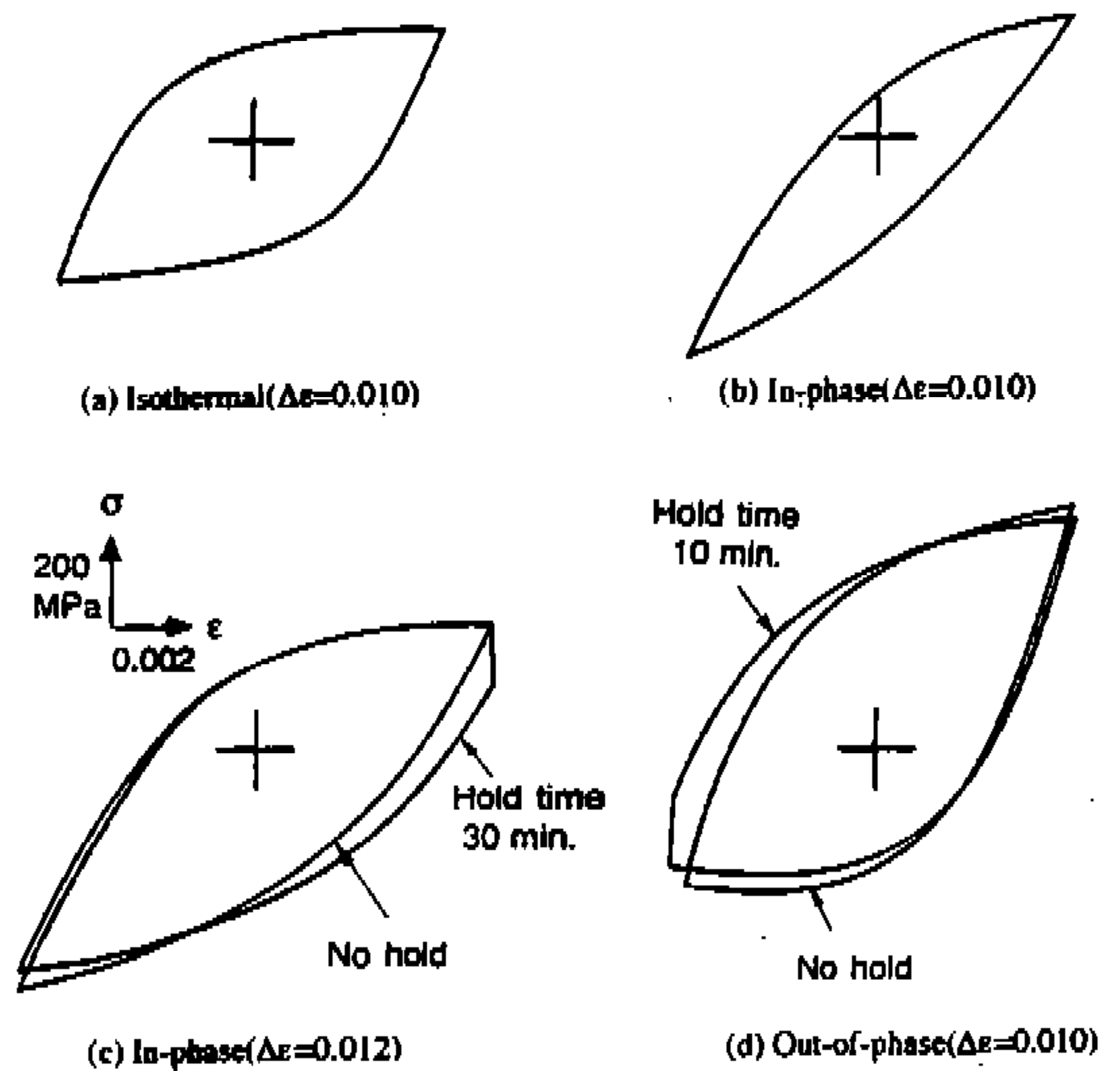


Fig.8 Typical hysteresis loops at approximate half live

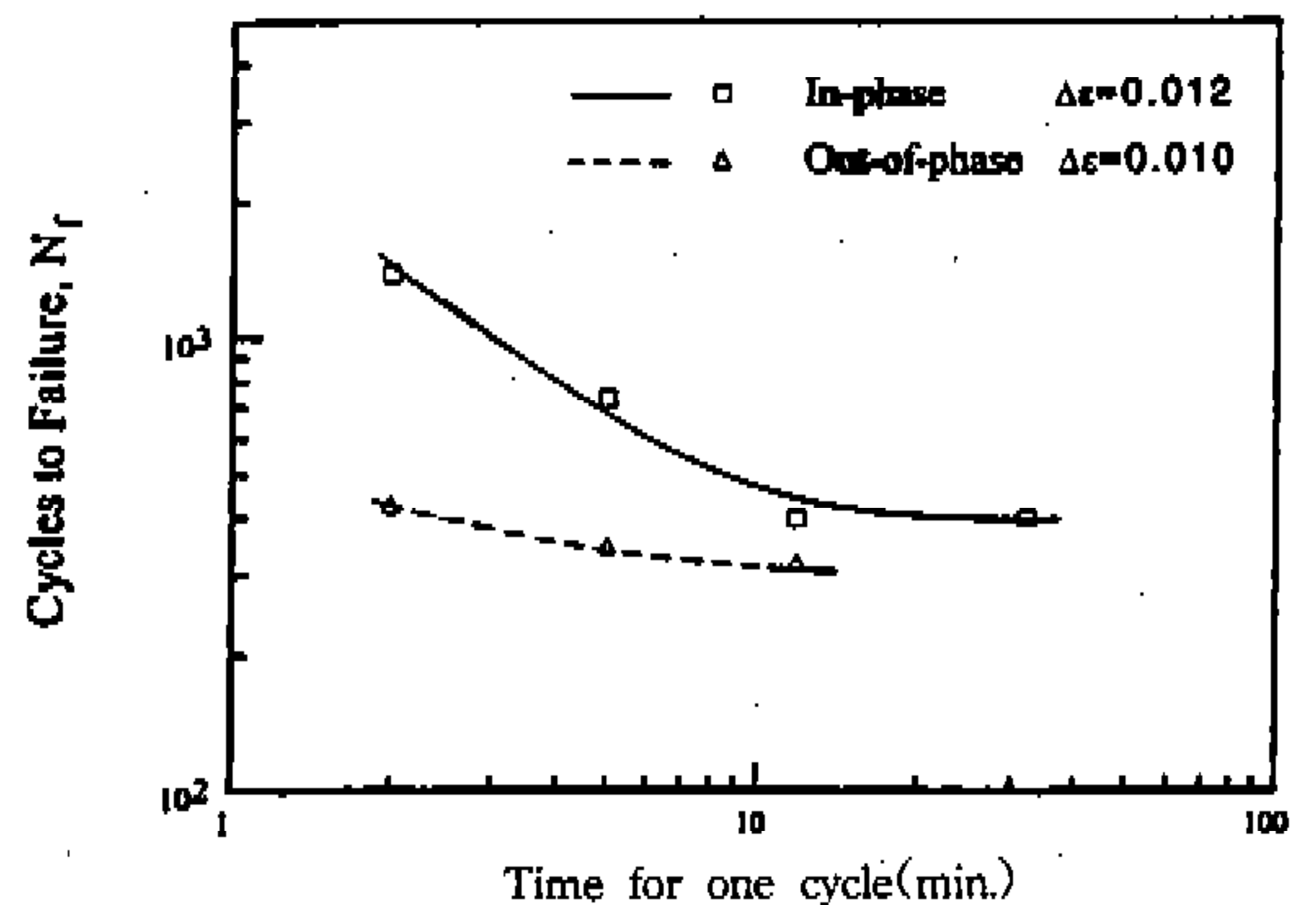


Fig.9 Cycles to failure versus time for one cycle

한다. Fig.9에서 동상 열피로 수명은 유지시간 10분까지 크게 감소하지만 그 이상에서는 유지시간의 영향이 점차 줄고 있으며, 이처럼 동상 열피로에서 두드러진 피로수명 감소현상으로 부터 유지시간이 존재하는 경우의 동상 및 역상 열피로 수명의 경향은 유지시간이 없는 경우와 상이함을 알 수 있다.¹⁸⁾ 유지시간에 이완되는 응력, σ_r 은 Fig.10과 같이 동상에서 보다 역상 열피로에서 크게 나타나고 있으며, 유지시간이 증가함에 따라 이완응력의 크기는 일정하게 수렴하는 경향을 보이고 있다. Fig.10에서 σ_M 은 유지시간 직전의 최대 인장응력 또는 최대 압축응력의 크기이다.

등온 저주기 피로 및 역상 열피로 실험 후의 시편 표면은 Fig.11과 같이 동상 열피로 시편 표면과 뚜렷히 구별되는 입계파단 양상을 보여

주고 있다. 같은 총변형률 범위 $\Delta\epsilon=0.010$ 에서의 동상 열피로 시편에서는 표면 균열이 거의 없었으나, 역상 열피로 및 등온 피로 시험편에서는 많은 표면균열이 존재하였다. 특히 역상 열피로 시편에서는 파단면에서 멀리 떨어진 표면에서도 무수한 미세 균열이 관찰되어 많은 손상을 받았음을 보여 주었다.

6. 변형률 파형이 등온 저주기 피로수명에 미치는 영향

일반적으로 실온에서는 변형률 속도(strain rate, $\dot{\epsilon}$)가 12Cr강의 저주기 피로수명에 미치는 영향이 적은 것으로 알려져 있으나 고온에서는 크리프에 의한 영향으로 변형률 속도가 느릴수록 판단될 때까지의 반복수가 짧아지게 된다. 따라서 저주기 피로실험이 600°C의 일정한 온도에서 빠른 변형률 속도인 $4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 와 느린 변형률 속도 $4 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 의 조합인 Fig.3과 같은 Fast-Fast, Fast-Slow, Slow-Fast, Slow-Slow 형태의 변형률 파형을 갖도록 수행하여 변형률 파형을 달리 하는 저주기 파기 피로특성을 파악하였다.

Fig.12는 각 변형률 파형에서의 총변형률 범위와 수명과의 관계를 보여 주고 있다. Fast-Fast 파형의 수명은 다른 파형의 수명에 비하여 변형률 범위에 따라 약 1.3에서 2.3배까지의 긴 수명을 나타내고, 변형률 범위가 작을수록 큰 수명의 차이를 보이고 있으며, Slow-Fast 파형의 수명이

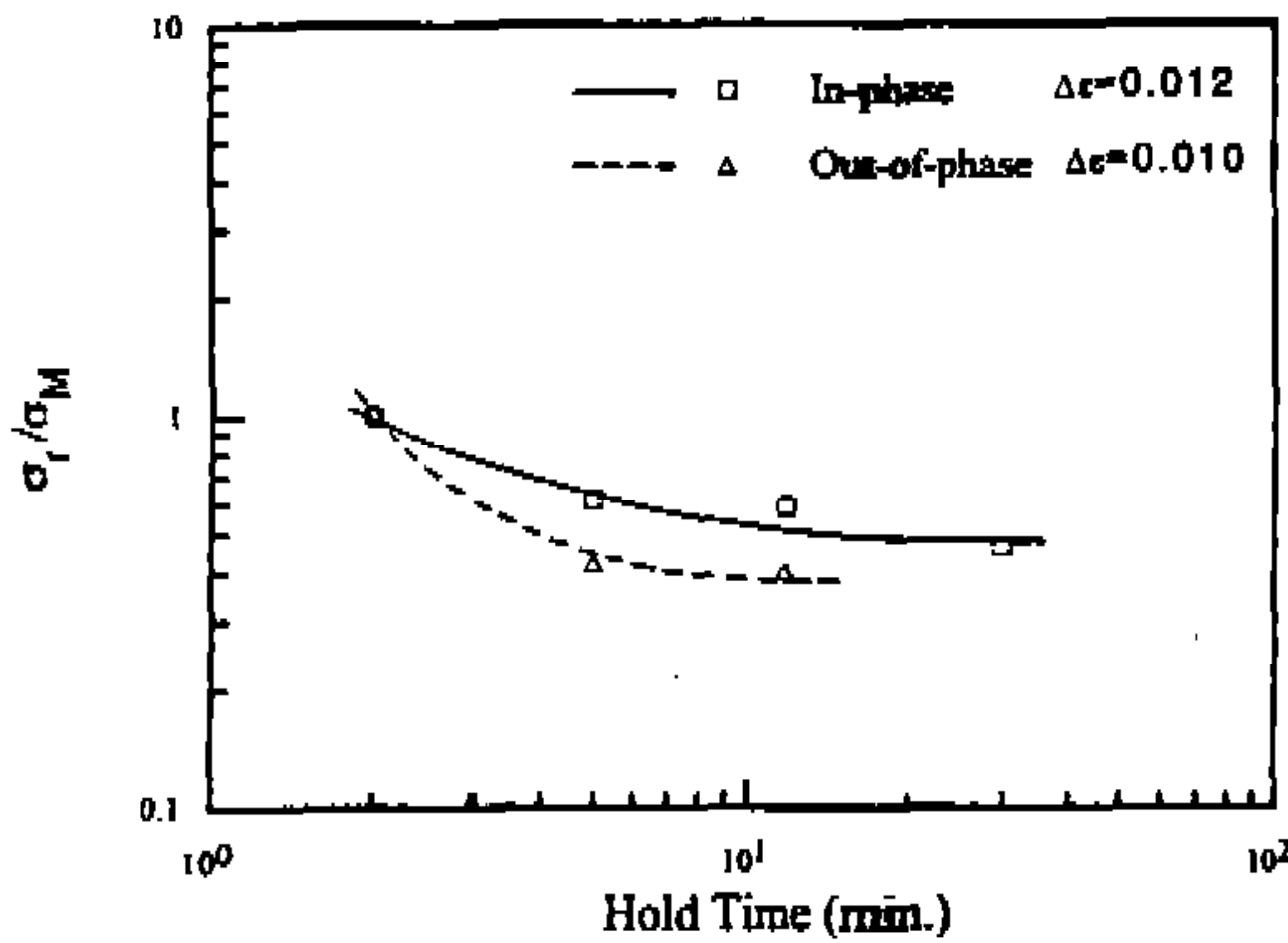


Fig.10 Stress relaxation versus time for one cycle

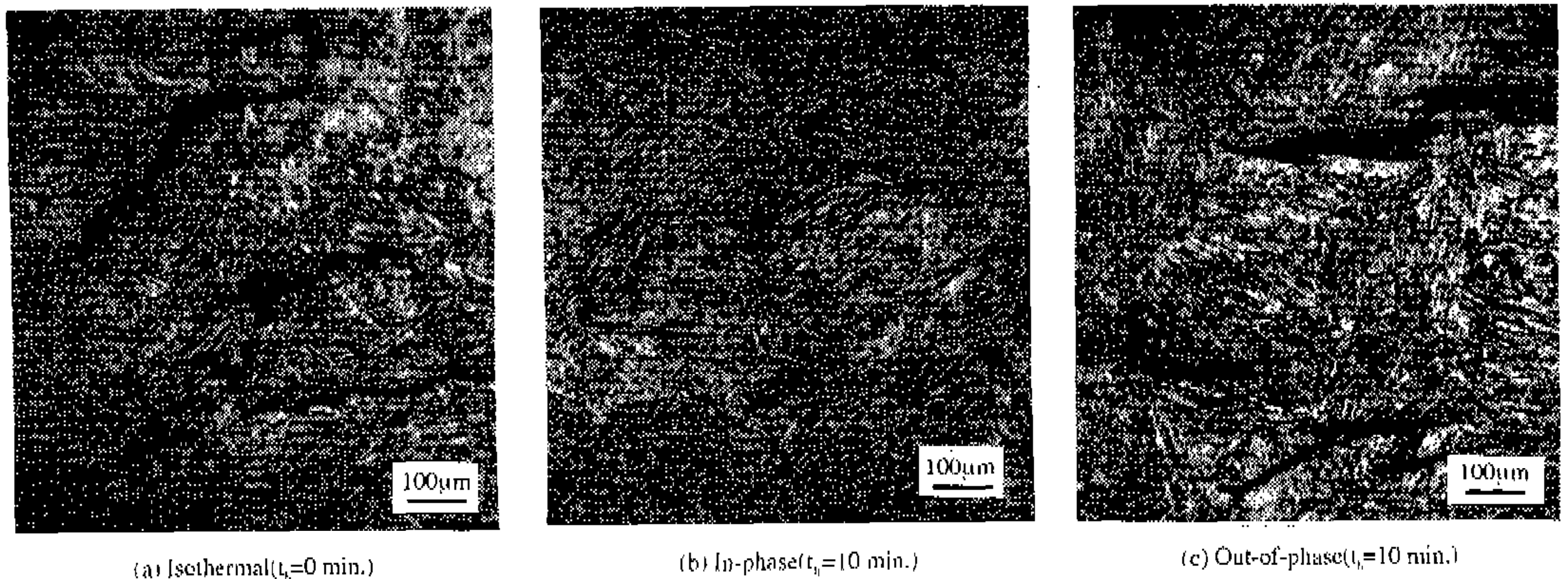


Fig.11 Specimen surfaces after fracture for $\Delta\epsilon=0.010$

Fast-Slow과형보다 약간 짧은 경향을 나타내고 있다. 각 변형을 파형을 지나는 등은 저주기 피로수명은 비탄성 변형을 범위 (inelastic strain range)와 수명과의 관계는 Fig.13과 같으며, 이 관계는 Coffin-Manson식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.528} = 0.269 (\text{Fast-Fast}) \quad (4)$$

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.648} = 0.352 (\text{Fast-Sast}) \quad (5)$$

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.661} = 0.418 (\text{Slow-Fast}) \quad (6)$$

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.846} = 1.395 (\text{Slow-Slow}) \quad (7)$$

위 식에서의 지수와 계수는 최소 오차법을 이용한 로그-로그 선형 회귀법으로 구하여졌다.

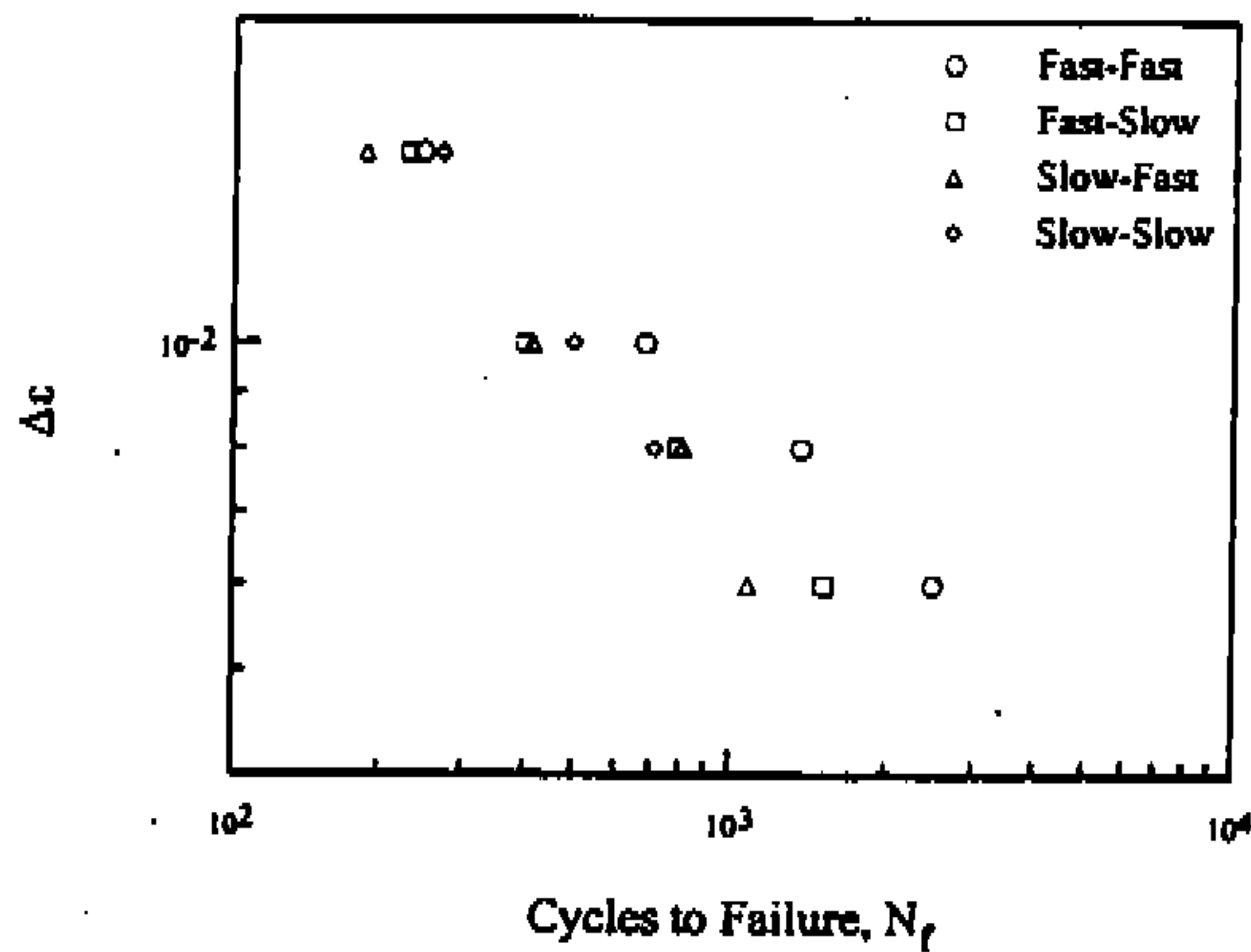


Fig.12 Total strain range versus cycles to failure in isothermal fatigue tests with different strain waveforms

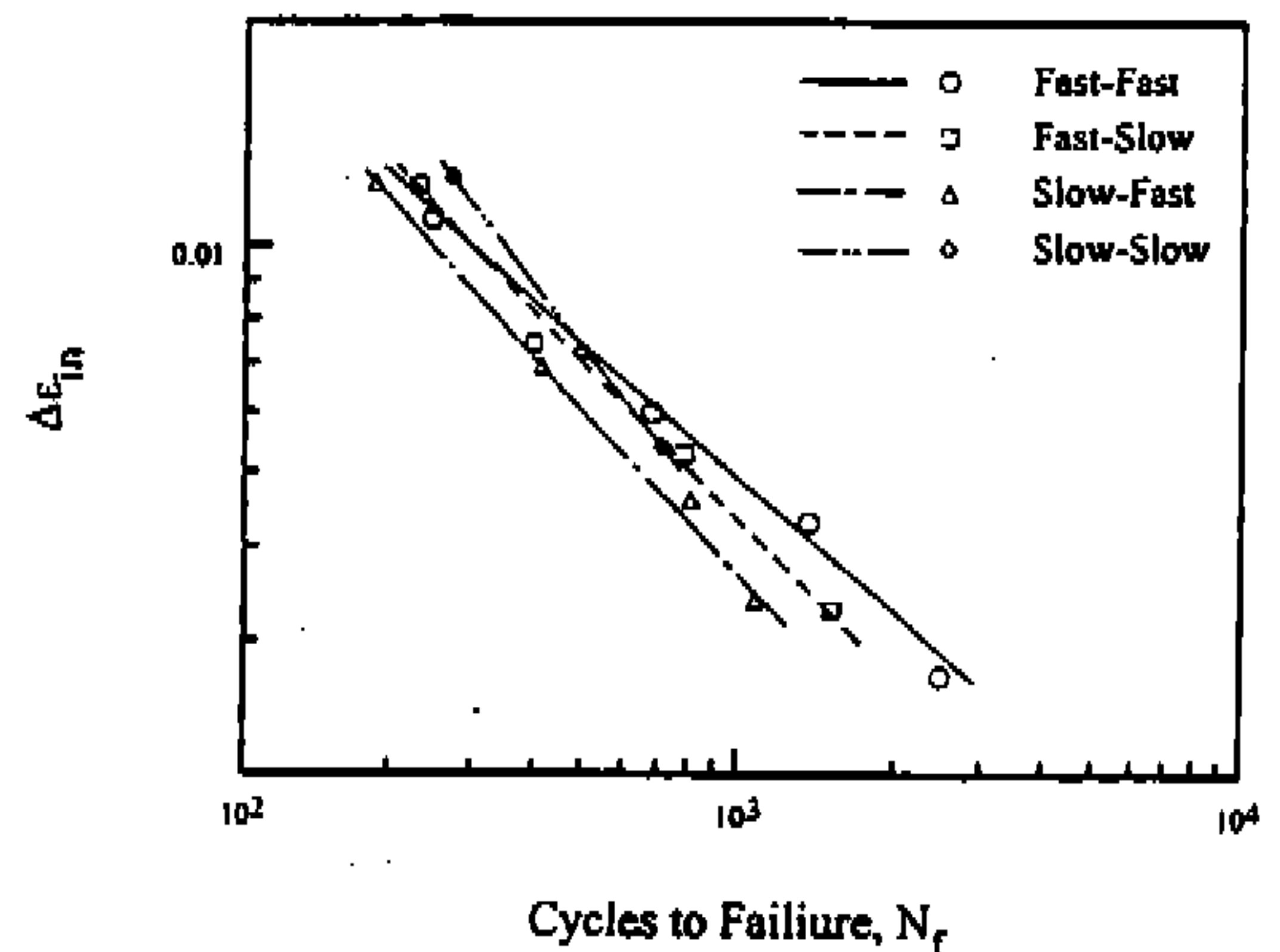


Fig.13 Inelastic strain range versus cycles to failure in isothermal fatigue tests with different strain waveforms

Table 6 Isothermal fatigue test results with different types of strain waveforms

| Type | N _f (Cycle) | Δε | Δε _e | Δε _{in} | σ _{max} (MPa) | σ _{min} (MPa) | Δσ/2 (MPa) |
|-----------|---------------------------|-------|-----------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| Fast-Fast | 246 | 0.015 | 0.0042 | 0.0108 | 380.0 | 385.5 | 382.8 |
| | 680 | 0.010 | 0.0040 | 0.0060 | 352.5 | 356.2 | 354.4 |
| | 1370 | 0.008 | 0.0037 | 0.0043 | 338.1 | 346.3 | 342.2 |
| | 2492 | 0.006 | 0.0033 | 0.0027 | 316.5 | 314.7 | 315.6 |
| Fast-Slow | 230 | 0.015 | 0.0030 | 0.0120 | 324.9 | 257.0 | 290.9 |
| | 396 | 0.010 | 0.0026 | 0.0074 | 312.3 | 246.6 | 279.4 |
| | 784 | 0.008 | 0.0027 | 0.0053 | 278.9 | 233.3 | 256.1 |
| | 1512 | 0.006 | 0.0027 | 0.0033 | 260.2 | 225.6 | 242.9 |
| Slow-Fast | 186 | 0.015 | 0.0029 | 0.0121 | 280.8 | 351.5 | 316.2 |
| | 412 | 0.010 | 0.0031 | 0.0069 | 264.8 | 325.1 | 295.0 |
| | 806 | 0.008 | 0.0034 | 0.0046 | 286.2 | 317.2 | 301.7 |
| | 1082 | 0.006 | 0.0026 | 0.0034 | 246.5 | 289.3 | 267.9 |
| Slow-Slow | 270 | 0.015 | 0.0027 | 0.0123 | 233.1 | 229.4 | 231.3 |
| | 496 | 0.010 | 0.0028 | 0.0072 | 246.6 | 246.6 | 246.6 |
| | 710 | 0.008 | 0.0026 | 0.0054 | 224.2 | 233.3 | 228.8 |

식 (4)~(7) 및 Fig.13로부터 Slow-Slow파형에서의 비탄성 변형률-수명식 기울기는 Fast-Fast, Fast-Slow, Slow-Fast파형의 기울기 값에 비하여 상당히 큰 경향을 나타내고 있다. 이는 큰 변형률 범위에서는 변형률 속도가 피로수명에 비교적 적게 영향을 미치고 있어서 같은 변형률 범위에서 서로 다른 변형률 파형에 따른 피로수명에 미치는 영향이 상당히 커져서 매우 작은 변형률 속도를 지니는 Slow-Slow파형의 피로수명이 상대적으로 빠른 변형률 속도를 지니는 Fast-Fast파형의 피로수명에 비하여 상당히 감소하는 현상에 기인한다.

변형률 속도의 피로수명에 대한 영향은 서로

다른 세가지의 변형률속도를 이용하여 얻어진 등온 저주기 피로수명 결과를 비교하면 Fig.14으로부터 확인된다. 변형률의 속도가 감소함에 따라 크리프 손상이 커져 피로수명이 짧아지게 되는데 이러한 경향은 변형률 범위가 낮을 수록 심하게 나타나고 있다. 이는 Fig.15에 나타나 있는 것처럼 같은 변형률 범위에서 변형률 주파수가 작을수록 등온 저주기 피로수명이 짧아지는 현상과 같다. 피로수명은 작은 변형률 범위에서는 변형률 주파수에 의한 영향이 심하게 나타나고 있으나 큰 변형률 범위에서는 변형률 주파수에 많은 영향을 받지 않고 있으며 이는 큰 변형률 범위에서 크리프 손상에 비하여 상대적으로 큰 기계적 피로 손상에 기인한다.

7. 결 론

본 연구에서는 600°C의 등온 저주기 피로하중 및 유지시간을 포함하는 온도 범위 350°C~600°C의 열피로 하중을 받는 12Cr 내열강의 피로실험이 수행되었다. 열피로 특성은 온도와 변형률의 위상차이에 따라 동상 및 역상의 열피로 실험으로부터 얻어졌으며 주기 응력과 반형률의 거동, 변형률과 피로수명과의 관계 등을 등온 저주기 피로 특성과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 등온 저주기 피로, 동상 및 역상 열피로 등 모든 경우의 피로실험에서 반복수가 증가함에 따라 점증적으로 응력범위가 감소하는 피로연화 현상을 보였으며 지속적인 응력이완으로 인하여 응력범위의 안정상태는 관찰되지 않았다. 유지시간을 갖는 경우에는 유지시간을 갖지 않는 경우에 비하여 상대적으로 빠른 속도로 응력범위가 감소하였으며, 이는 유지시간 동안의 응력이완 현상에 기인하고 이 동안의 크리프 손상에 의하여 유지시간이 없는 경우에 비해 상당히 짧은 수명이 얻어졌다.
- 2) 피로수명은 역상 열피로, 등온피로, 동상 열피로의 순서로 긴 수명을 보였으며, 변형률 범위에 따라 동상 열피로 수명은 역상

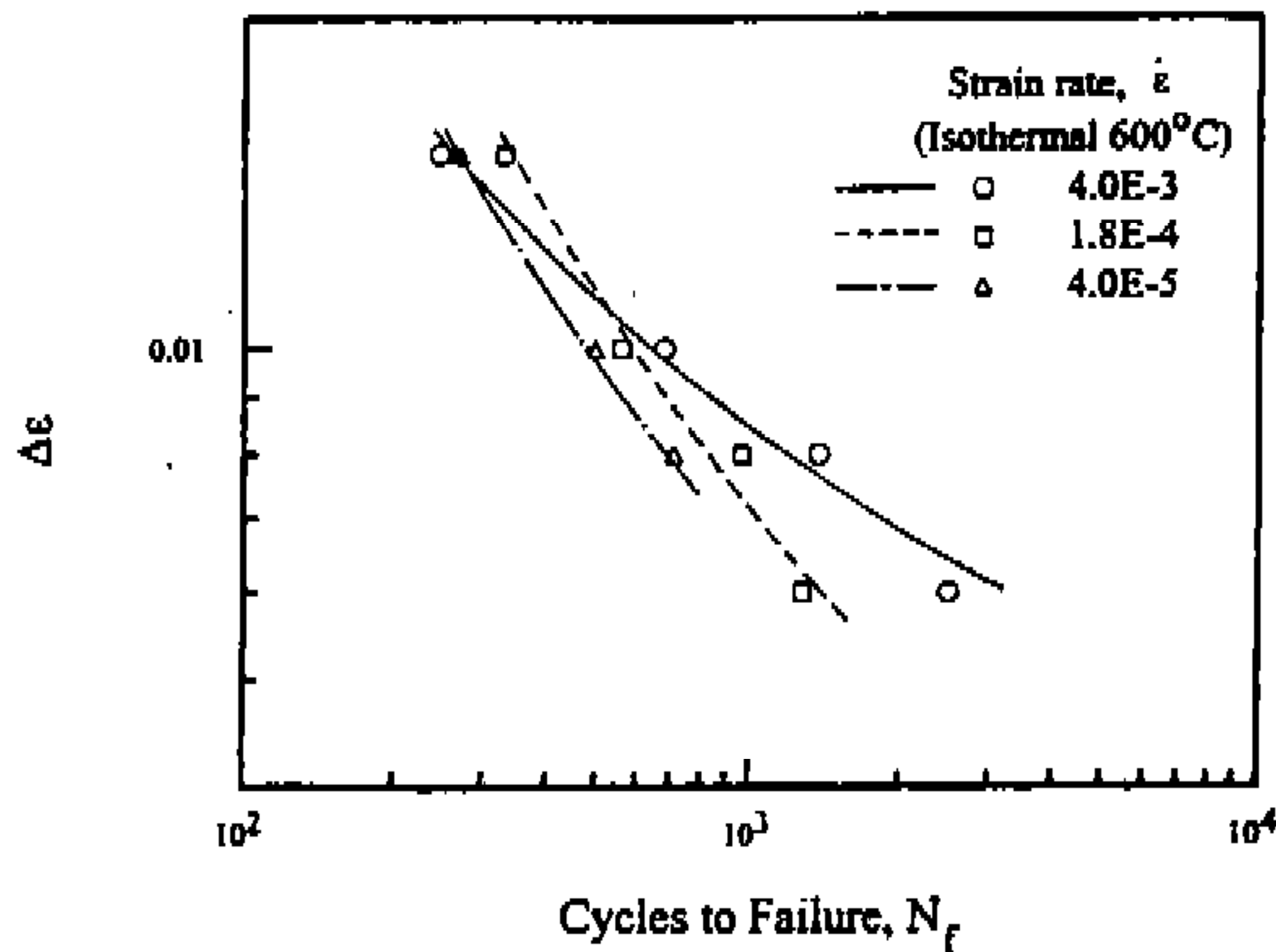


Fig.14 Total strain range versus cycles to failure in isothermal fatigue tests with different strain rates

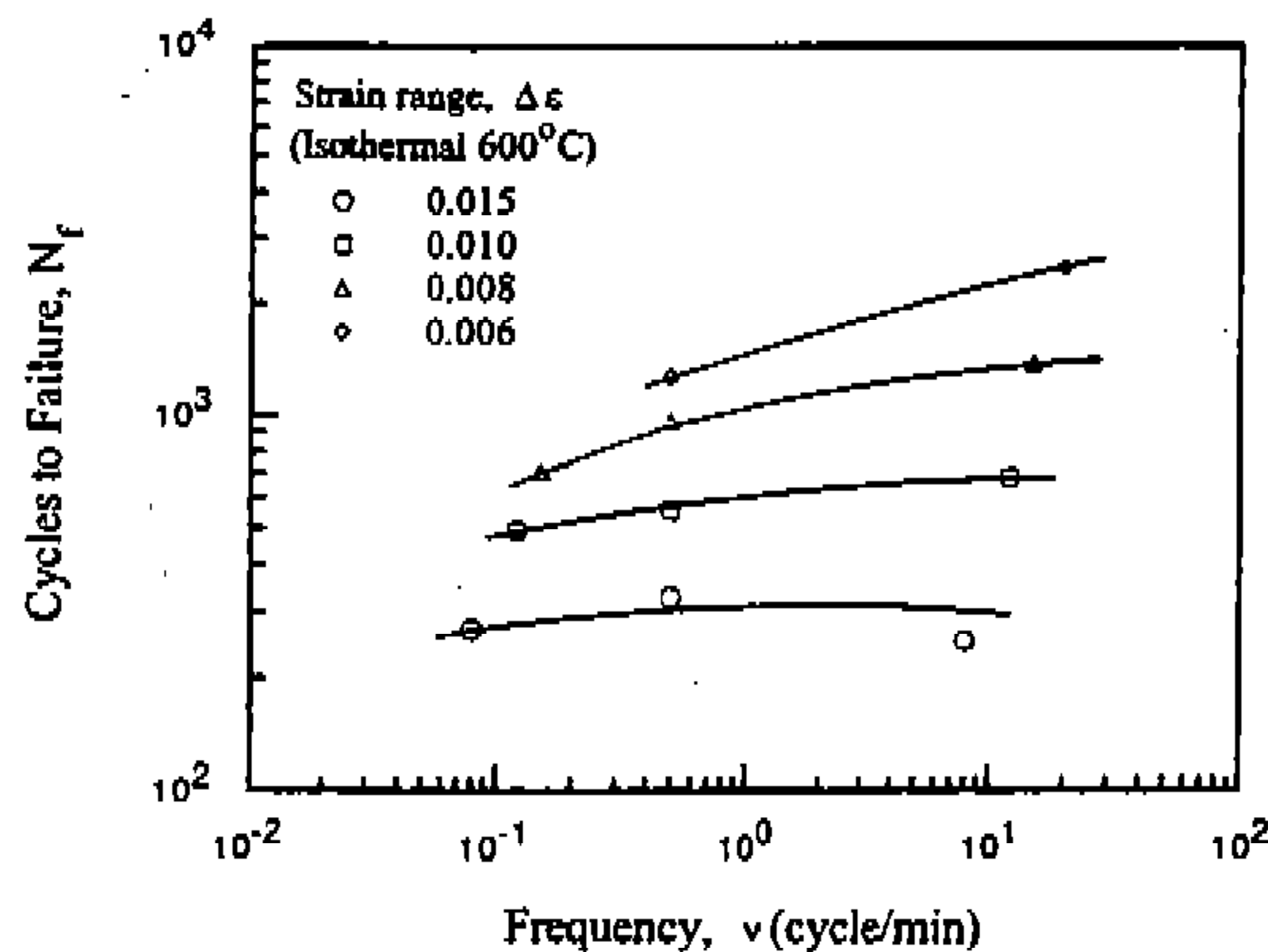


Fig.15 Cycles to failure versus frequency in isothermal fatigue tests

열피로 수명의 약 3배에서 12배의 긴 수명을 나타냈다. 이는 역상 열피로가 상대적으로 심한 표면 산화막 균열의 발생과 큰 소성 변형률에 의한 큰 피로 손상과 인장 평균 응력의 영향에 기인하였다.

- 3) 일정 유지시간 동안의 최고온도에서 응력이완에 의하여 발생하는 소성변형률의 증가로 인한 피로 손상과 유지시간 동안의 크리프 손상의 증첩에 의하여 유지시간이 3분에서 30분으로 증가함에 따라 유지시간이 없는 열피로 수명의 0.8에서 0.3배로 감소하였다. 인장 변형률 상태에서의 유지시간이 압축 변형률 상태에서 보다 열피로 수명에 더 큰 영향을 미치어 유지시간에 따른 열피로 수명의 감소경향은 역상에 비하여 동상 열피로에서 현저히 나타났다.
- 4) 서로 다른 변형률 과형중 큰 변형률 속도의 Fast-Fast과형을 지닌 피로수명은 다른 과형의 수명에 비하여 변형률 범위에 따라 약 1.3에서 2.3배까지의 긴 수명을 보였다. 변형률 속도 및 변형률 주파수가 작을수록 크리프에 의한 손상이 증가하여 피로수명은 짧아졌으며 이러한 경향은 변형률 범위가 작을수록 심하게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원(과제번호 : 94-027)에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. J.L. Malpertu and L.Remy, "Thermomechanical Fatigue Behavior of a Superalloy", Low Cycle Fatigue, ASTM STP 942, pp.657-671, 1988.
2. G.R. Halford, M.J., Verrilli, S.Kalluri, F.J. Ritzert, R.E. Duckert, and F.A. Holland, "Thermomechanical and Bithermal Fatigue Behavior of Cast B19001Hf and Wrought Haynes 188", Advances in Fatigue Life Prediction Techniques, ASTM STP 1122, M.M. Mitchell and R.W. Lan-

- dgaf, Eds., pp.120-142, 1992.
3. S.S. Manson "Fatigue : A Complex Subject- Some Simple Approximations", Experimental Mechanics, Vol.5, No.7 pp.193-226, 1965.
4. J.R. Coffin, Jr. and R.P. Wesley, "An Apparatus for the Study of Effects of Cyclic Thermal Stresses on Ductile Metals", Trans. ASME, Vol.76, pp.923-930, 1954.
5. A.E. Carden, "Thermal Fatigue Evaluation", Manual on Low Cycle Fatigue Testing, ASTM STP 465, pp.163-188, 1970.
6. S.W. Hopkins, "Low-Cycle Thermal Mechanical Fatigue Testing", Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612, D.A. Spera and D.F. Mowbray Eds., pp.157-169, 1976.
7. S. Taira, "Relationship Between Thermal Fatigue and Low-Cycle Fatigue at Elevated Temperature", Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520, pp.80-101, 1973.
8. Manson, S.S., "The Challenge to Unify Treatment of High Temperature Fatigue-A Partisan Proposal Based on Strainrange Partitioning", Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520, pp.744-782, 1973.
9. W.J. Ostergren, "A Damage Function and Associated Failure Equations for Predicting Hold Time and Frequency Effects in Elevated Temperature Low Cycle Fatigue", Journal of Testing and Evaluation, Vol.4, No.5, pp.327-339, 1976.
10. H. Sehitoglu, "Thermo-Mechanical Fatigue Life Prediction Methods", Advances in Fatigue Life Prediction Techniques, ASTM STP 1122, M.M. Mitchell and R.W. Landgraf, Eds., pp.47-76, 1992.
11. W.A. Ardell, H. Sehitoglu, M. Mushiakke, "The Effect of Particle Size on the Thermomechanical Fatigue Behavior of Metal Matrix Composites", Fatigue '93, Montreal, Canada, pp.939-944, 1993.
12. Standard E606, "Strain-Controlled Fatigue Te-

- sting", ASTM Standards, Vol.03.01, pp.632-646, 1993.
13. S.K. Koh and R.I. Stephens, "Mean Stress Effects on Low Cycle Fatigue for High Strength Steels", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol.12, No.4, pp.413-428, 1991.
 14. T. Ishiguro and J. Watanabe, "Creep-fatigue Damage on Cr-Mo-V Low-alloy Steel", 14th Symp. on High Temperature Strength of Materials, JSMS, pp.41-44, 1976.
 15. L.F. Coffin, Jr., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal", *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol.76, pp.931-950, 1954.
 16. R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", American Society for Metals, Metals Park, pp.132-152, 1989.
 17. E.Krempl and B.M. Wundt, "Hold-time Effects in High-Temperature Low-Cycle Fatigue", ASTM STP 489, pp.1-29, 1971.
 18. A. Nitta and K. Kuwabara, "Thermal-Mechanical Fatigue Failure and Life Prediction", *High Temperature Creep-Fatigue*, R. Ohtani, M. Ohnami and T. Inoue, Eds., Elsevier Applied Science, 1988, pp.203-222.