

# 크리이프-피로 상호작용하의 균열성장속도 예측에 관한 연구

주 원 식\* · 조 석 수\*\*

(95년 7월 31일 접수)

A Study on Prediction of Crack Growth Rate Under Creep-Fatigue Interaction

Won-Sik Joo\* · Seok-Swoo Cho\*\*

**Key Words :** High temperature low cycle fatigue(고온저사이클피로), Transitional parameter (천이파라미터), Cycle-dependent crack growth(사이클의존형균열성장), Time-dependent crack growth(시간의존형균열성장), Modified J integral (수정 J적분), Fatigue J integral range(피로 J적분범위)

## Abstract

High temperature low cycle fatigue shows that cycle-dependent crack growth owing to cyclic plastic deformation occurred simultaneously with time-dependent crack growth owing to intergranular deformation. Consequently, to estimate crack growth rate uniquely, many investigators have proposed various kinds of parameters and theories but these could not produce satisfactory results. Therefore the goal of this study is focused on prediction of crack growth rate using predominant damage rule, linear cumulative damage rule and transitional parameter  $\Delta J_c/\Delta J_f$ . On the basis of these background, high temperature fatigue crack growth tests were carried out under sinusoidal loading waveform at 600°C and 700°C.

## I. 서 론

물리적 실체가 명확하고 정량화가 용이한 균열 성장거동을 기초로 고온에서 사용되는 부재의 신뢰성을 확보하고 그들의 적절한 보수 기간을 결정하는 것은 대형 구조물의 파손 및 파괴를 방지하는 관점에서 대단히 유용할 것으로 기대된다. 그러나 고온피로균열성장실험은 균열 길이, 균열개구

변위 또는 실험 재료의 경시적 변화등을 실험을 중단하지 않고 측정해야 하기 때문에 정확한 실험 결과를 얻는 것은 쉬운 작업이 아니다. 따라서 실온하의 재료 강도 데이터에 비하여 고온하의 실험 결과는 매우 부족한 실정이며 이에 관한 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있는 실정이다.<sup>1)</sup>

종래의 고온저사이클피로균열성장거동에 관한 연구에 의하면, 반복소성변형이 원인이 되는 사이클

\* 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 동아대학교 대학원

의존형균열성장과 입계변형이 원인이 되는 시간의존형균열성장거동이 동시에 나타났었다. 전자는 Dowling<sup>2)</sup>에 의한 피로 J적분범위  $\Delta J_I$ 와 Paris<sup>3)</sup>등에 의한 응력확대계수범위  $\Delta K$ 등이, 후자는 Ohji<sup>4)</sup>등에 의한 수정 J적분  $J'$  또는 Landes<sup>5)</sup>등에 의한  $C'$ 에 의하여 균열성장속도를 정리할 수 있었다. 그러나 고온저사이클피로균열성장거동에서 나타나는 사이클의존형에서 시간의존형균열성장으로의 천이 현상때문에 전체의 균열성장속도를 일관성 있게 평가할 수 있는 파괴역학적 손상법칙 및 파라미터의 제안이 요구되어졌다. 따라서 Okazaki<sup>6)</sup>등은 각종 변형을 파형하의 균열성장속도를 J적분비를 이용한 상호누적손상법칙으로 정리하였으며, Yokobori<sup>7)</sup>등은 열적활성화 과정에 기초한 균열성장구성방정식을 만들어 단위시간당균열성장속도를 일의적으로 평가할 수 있는 Q파라미터를 제안하였다. 그러나 이러한 방법은 구성방정식에 포함되는 정수를 결정하기 위해서 많은 실험 데이터를 필요로 하는 결점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 실험온도 및 하중반복속도에 따른 균열성장속도를 예측하는 데 있어 독립손상법칙과 선형누적손상법칙 및 천이 파라미터  $\Delta J_I/\Delta J_I$ 로 평가하여 이 중에서 상술의 방법을 극복할 수 있는 파라미터가 무엇인가를 검토하고자 한다.

## II. 실험 방법

### 1. 재료 및 시험편

시험편의 재료는 고온기기의 구조용 부재로써 널리 사용되는 SUS 304 스테인레스 강이며 이의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.049	0.4	1.49	0.021	0.03	8.76	18.5	Bal.

이 시험편의 소재는 직경 20mm인 환봉이며 1050℃에서 1시간 유지한 후 수냉함으로써 용체화 처리를 하였다. 용체화 처리된 재료에 대한 상온 및 각 실험온도에서의 기계적 성질을 Table 2에

나타내었다.

Table 2 Mechanical properties

Temp. (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)	Young's modulus (GPa)
at room	723.3	59.6	72.2	222.9	196.3
600	382.2	49.4	66.4	-	153.2
700	269.8	43.2	42.6	-	141.6

고온저사이클피로균열성장실험에 사용한 시험편은 중앙에 균열이 있는 중앙균열평판시험편이며 형상과 치수는 Fig. 1에 표시하였다. 직경 0.2mm의 와이어 컷 방전 가공기(wire cut electric spark machine)를 이용하여 시험편 평행부에 슬릿을 6mm로 가공한 뒤 예균열을 응력비 R=0.1, 정현하중파형하에서 슬릿 선단으로부터 각각 좌우로 2mm씩 도입하여 초기균열길이가 약 10mm되게 하였다.

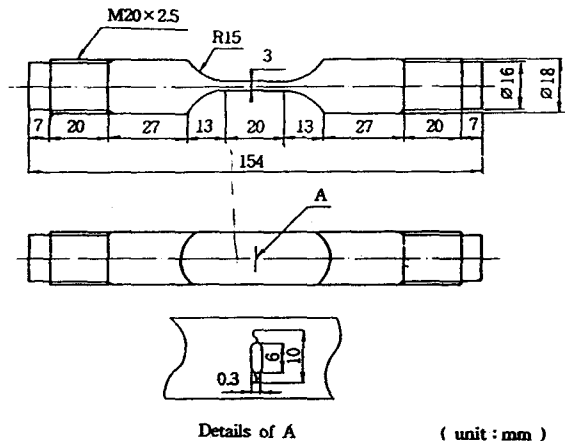


Fig. 1 Geometry of center cracked specimen

### 2. 실험 방법

본 실험에 사용한 시험기는 980kN인 전기유압 서보식피로시험기(INSTRON model 1331)이며 시험편에 발생하는 하중점변위는 표점 거리가 16mm이고 게이지 범위가 ±1.5mm인 클립 게이지(clip gage)를 이용하여 측정하였다. 고온저사이클피로 균열성장실험은 정현하중파형을 기초로 초기 최대 응력을 모든 조건에서 170MPa이 되도록 하고 응력

비를 0.5로 고정시키는 일정하중진폭방식이며 Table 3에 하중반복속도 및 실험 온도에 대한 조건을 각각 나타내었다.

Table 3 Test condition

Temp. (°C)	R	$\nu$ (Hz)	Symbol
600	0.5	6	●
		1.6	⊙
0.08		○	
0.008		⊕	
700			

### III. 파괴역학량을 구하는 방법

#### 1. 응력확대계수 K

중양 균열 평판 시험편의 K는 Tada<sup>8)</sup> 등의 응력 해석결과를 이용하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F(2a/W) \quad (1)$$

$2a/W = \xi$  라 두면 수정 계수 F는 다음과 같이 표현된다.

$$F(\xi) = (1 - 0.025 \xi^2 + 0.06 \xi^4) \sqrt{\sec(\pi \xi / 2)}$$

( $0 < \xi < 1$ 에서 0.1%의 오차 범위)

#### 2. 피로 J적분 범위 $\Delta J_f$

Dowling<sup>2)</sup>이 제안한 다음 식을 이용하여 피로 J적분 범위  $\Delta J_f$ 를 구하였다.

$$\Delta J_f = \frac{\Delta K^2}{E} + \frac{S_p}{Bb} \quad (2)$$

여기서 B는 시험편의 두께, b는 리가멘트 길이,  $S_p$ 는 하중P가 최소치에서 최대치까지 부하되었을 때 P- $\delta$ 곡선과 그 양단을 연결한 직선에 둘러싸인 부분의 면적이며 E는 SUS 304강의 각각의 실험온도에서 구한 종탄성계수이다.

#### 3. 수정 J적분의 실험치 $J'_{ex}$

본 실험에 사용되는 시험편이 깊은 균열의 범위 ( $a/w > 0.5$ )에 들어가고 크리이프 지수 n가 크기 때

문에 수정 J적분의 실험치  $J'_{ex}$ 는 Ohji<sup>9)</sup> 등의 차원 해석에 기초를 둔 간편식을 이용하여 구하였다.

$$J'_{ex} = \sigma_{net} \delta \quad (3)$$

$J'_{ex}$ 의 계산에 사용되는  $\sigma_{net}$ 는 같은 시간에 동 크리이프와 같은 변형률을 생기게 하는 정 크리이프의 응력인 동가정응력(equivalent static stress)  $\sigma_e$ 이다.

$$\sigma_e = \sigma_m \left[ (1/2\pi) \int_0^{2\pi} [1 + A \sin(\omega t)]^n d(\omega t) \right]^{1/n} \quad (4)$$

단,  $\sigma_m$  : 평균응력

A : 응력비 ( $\sigma_a / \sigma_m$ )

$\omega$  : 반복 응력 각속도

여기서 n은 Norton의 법칙  $\dot{\epsilon} = B \sigma^n$  관계식의 크리이프 지수로써, 600°C에서 n=13.9이며 700°C에서 n=8.0이다.<sup>10)</sup> 또한  $\delta$ 는 표점거리 16mm에서 발생하는 하중점변위속도를 나타낸다.

#### 4. 크리이프 J적분 범위 $\Delta J_c$

크리이프 J적분 범위는 반복 하중이 작용할 때 단위 인장 사이클 동안의 변형이 일 방향 크리이프 변형과 동일하다는 가정을 기초로 수정 J적분 실험치의 단위 인장 사이클 동안의 누적치로서 평가된다.

$$\Delta J_c = \int_0^{1/\nu} J' dt = J'_{ex} / \nu \quad (5)$$

#### 5. 전 J적분범위 $\Delta J_t$

고온 피로 균열성장 구동력으로 사용되는 전 J적분범위  $\Delta J_t$ 은 피로 균열성장구동력인  $\Delta J_f$ 와 크리이프 균열성장구동력인  $\Delta J_c$ 의 선형적 합으로 주어진다고 생각하여 다음과 같이 구한다.

$$\Delta J_t = \Delta J_f + \Delta J_c \quad (6)$$

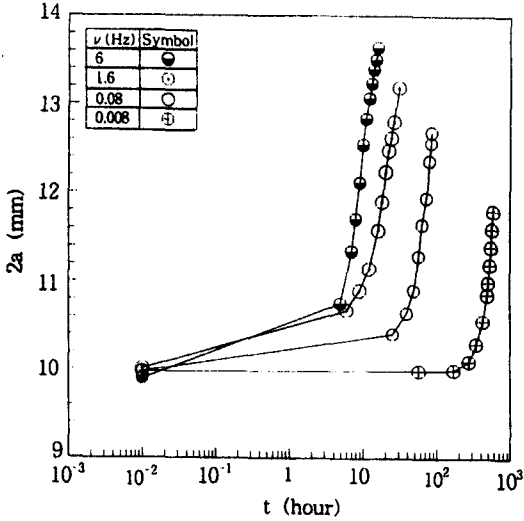
### IV. 실험결과 및 고찰

#### 1. 균열 성장과 하중점 변위 선도의 특성

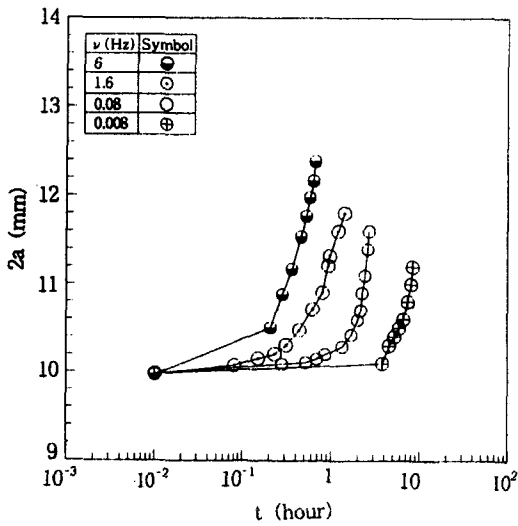
고온피로균열성장거동에 미치는 하중반복속도와

온도의 영향을 관찰하기 위하여 균열성장곡선  $2a-t$  선도와 하중점변위곡선  $\delta-t$  선도를 Fig. 2, 3에 각각 나타내었다. 그림에서  $f=6\text{Hz}$ 와 같이 하중

는 것을 알 수 있다.



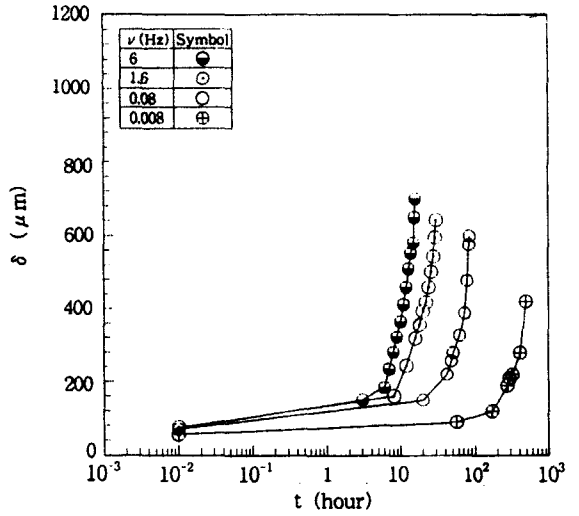
(a) 600°C



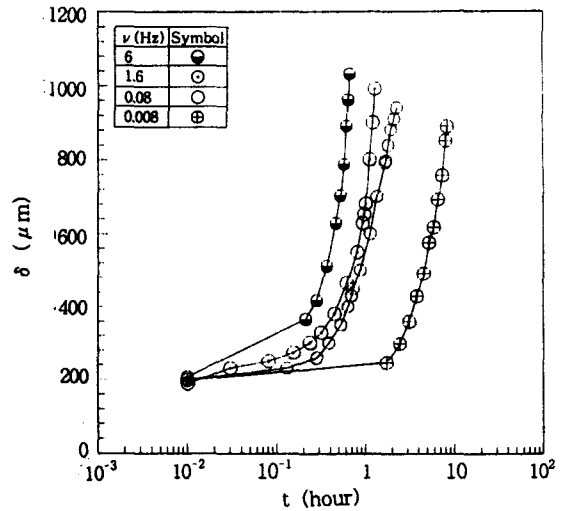
(b) 700°C

Fig. 2 Relation of crack length  $2a$  with time  $t$

반복속도가 빠르거나,  $T=700^\circ\text{C}$ 와 같이 실험온도가 상승할 수록 고온피로균열성장수명  $t_f$ 가 짧아진다



(a) 600°C



(b) 700°C

Fig. 3 Relation of load line displacement  $\delta$  with time  $t$

Fig. 4는 Yokobori<sup>11)</sup>등이 수행한  $T=700^\circ\text{C}$ 의 사다리꼴 하중 파형의 고온피로수명비와 하중반복속도와의 관계를 나타낸 것으로  $t/t_{0.0016}$ 은 0.0016Hz의

수명을 기준으로 한 다른 하중반복속도의 피로수명비를 표시하고 있다. 그림에서 유지시간이 길어져 하중반복속도가 저하함에 따라 본 실험의 정현하중파형과는 반대로 사다리꼴 하중 파형하의 고온피로균열성장수명  $t_c$ 은 감소된다.

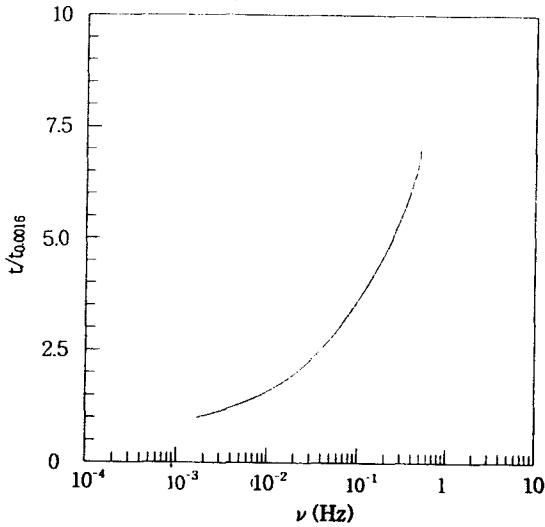
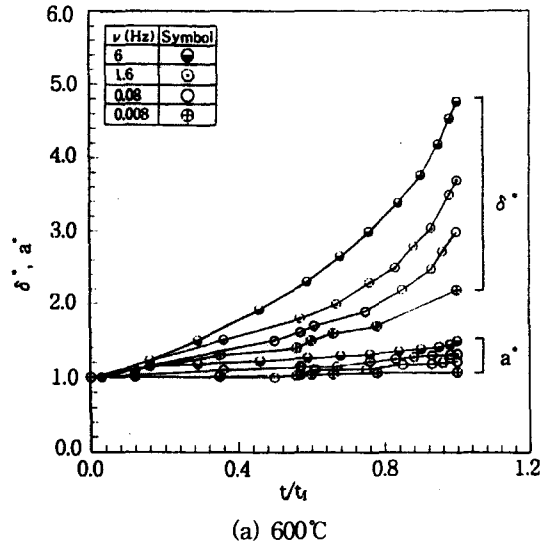


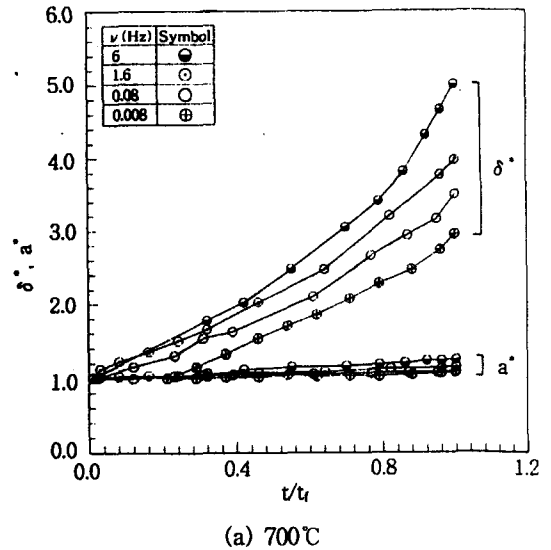
Fig. 4 Relation of crack growth life with frequency under trapezoidal waveform

이렇게 하중파형에 따라 고온피로균열성장수명에 차이가 나는 것은 균열 선단 근방에 누적되는 크리이프 변형률의 크기가 다르기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 사다리꼴하중파형은 최대인장유지응력에 의하여, 정현하중파형은 같은 시간에 동 크리이프 (dynamic creep)와 똑 같은 변형률을 발생시키는 등가 정응력(equivalent static stress)에 의하여 각각 크리이프 변형률이 균열 선단 근방에 누적된다. 그런데 Ohji<sup>(12),(13)</sup> 등의 실험 결과에 의하면 하중반복속도가 저하함에 따라, 사다리꼴하중파형의 경우 유지시간의 증가로 인하여 탄성 변형률 속도에 비하여 크리이프 변형률 속도가 매우 증가하게 되고, 정현하중파형의 경우 등가정응력  $\sigma_e$ 에 의하여 크리이프 변형률 속도가 거의 일정한 값이 되며 탄성 변형률 속도는 오히려 더 감소하게 된다. 따라서 하중반복속도의 저하에 따라 균열 선단 근방에 누적되는 전변형률 속도의 크기는 정현하중파형의

경우, 사다리꼴하중파형의 경우와 반대로 감소하게 되며 전변형률 속도를 간접적으로 나타내는 하중점 변위선도 Fig. 3에서도 이러한 경향을 보이고 있다. 또한 그림에서 하중점변위속도가 증가하면 균열성장속도도 증가하게 되므로, 하중반복속도가 저하함에 따라 사다리꼴하중파형의 경우 고온저사이클피로균열성장수명이 감소되고 정현하중파형의 경우 전자와 반대의 거동을 나타낸다는 것을 알 수 있다.



(a) 600°C



(a) 700°C

Fig. 5 Relation of normalized displacement  $\delta^*$  and normalized crack length  $a^*$  with normalized time  $t/t_c$

또한,  $T=600^{\circ}\text{C}$ 의 경우 하중반복속도의 영향을 받아 고하중반복속도의 경우 실험 초기부터 하중점변위가 증가하나 저하중반복속도의 경우 실험초기에 완만히 증가하다가 후반부터 급격히 증가하고 있다. 그러나  $T=700^{\circ}\text{C}$ 의 실험에서는 하중반복속도에 관계없이 하중점변위가 실험초기부터 급격히 증가하고 있으므로 실험온도 상승에 따른 열적 활성화가 균열 선단 근방의 변형률 속도장을 지배한다고 생각된다. 따라서 상술의 결과에서 실험온도가 증가하게 되면  $\delta$ - $t$ 곡선의 기울기가 현저히 증가됨과 동시에 고온저사이클피로균열성장수명이 급격히 감소됨을 알 수 있다. 이상의 실험 결과는 Kikuchi<sup>14)</sup>등이 Hastelloy XR을 이용하여 초고온하에서 행한 실험결과와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 5은 하중반복속도  $\nu$ 를 6Hz에서 0.008Hz까지 다양하게 변화시켰을 때 균열선단에서 발생하는 표준화 균열길이  $a^*$ 와 균열 중앙부에서 발생하는 표준화 하중점 변위  $\delta^*$ 를 파단수명으로 무차원화한 실험 시간  $t/t_r$ 에 대하여 비교할 수 있는 형태로 표시한 것이다. 여기서  $a^*$ 와  $\delta^*$ 는 균열선단이 둔화된 뒤 임의 반복수가 지나게 되면 균열이 예화됨과 동시에 균열이 성장하게 되는 데 이때의 전체 균열길이나 하중점변위를 실험하중 첫 부하시의 균열길이나 하중점변위로서 나누어 표준화시킨 값이다. 그림에서 하중반복속도의 증가에 따라 하중점변위가 급격히 증가함에도 불구하고 균열성장이 급격히 이루어지지 않음을 알 수 있다. 또한 사이클의존형균열성장거동이 나타나리라 생각되는  $\nu=6\text{Hz}$ 의 경우 실험 초기부터  $\delta^*$ 가  $a^*$ 보다 크게 되어 균열이 시험편의 대규모 변형상태하에서 성장하고 있으나 시간의존형균열성장거동이 나타나리라 생각되는  $\nu=0.008\text{Hz}$ 의 경우 실험초기에는  $\delta^*$ 가  $a^*$ 에 근접하게 되는 소규모 변형상태하에서 균열이 성장하고 있으나, 실험중기부터는  $\delta^*$ 가  $a^*$ 보다 커지는 대규모 변형상태하에서 성장하게 된다. 그러나 실험온도가 상승하는 경우 하중반복속도에 관계없이  $\delta^*$ 가  $a^*$ 보다 크게 되어지는 대규모 변형상태하에서 균열이 성장하고 있다. 이와 같이 하중반복속도 및 실험온도의 증가에 따라 표준화 하중점변위  $\delta^*$ 가 표준화 균열길이  $a^*$ 에 비하여 현저히 증가하는 것은 균열성장거동의 상이에 기

인하는 것으로 생각된다.

2. J적분을 이용한 균열성장속도의 평가

Fig. 6은 단위사이클당 균열성장속도  $da/dN$ 을 파로 J분범위  $\Delta J_r$ 로 정리한 것이다.

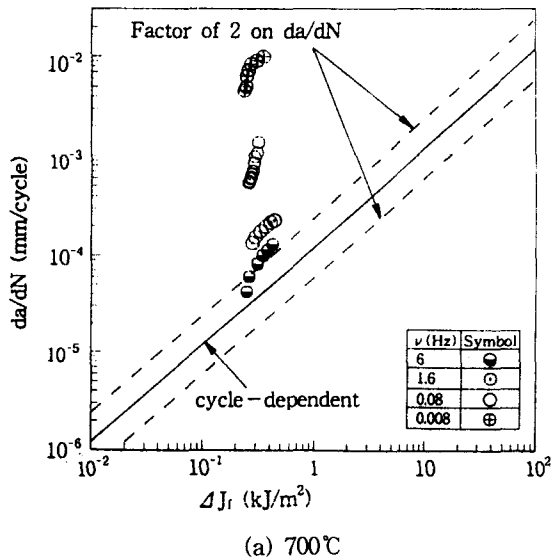
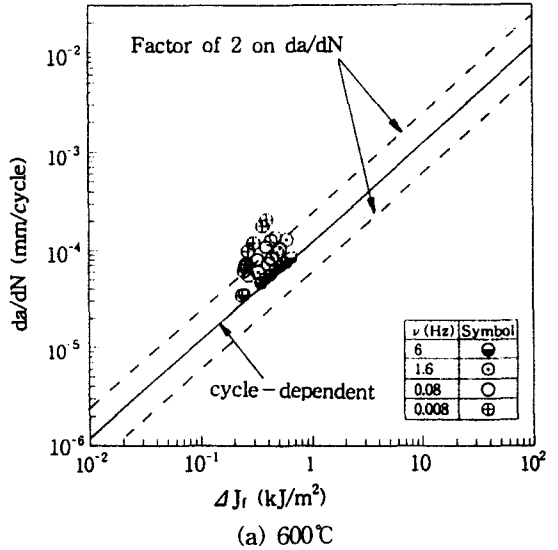


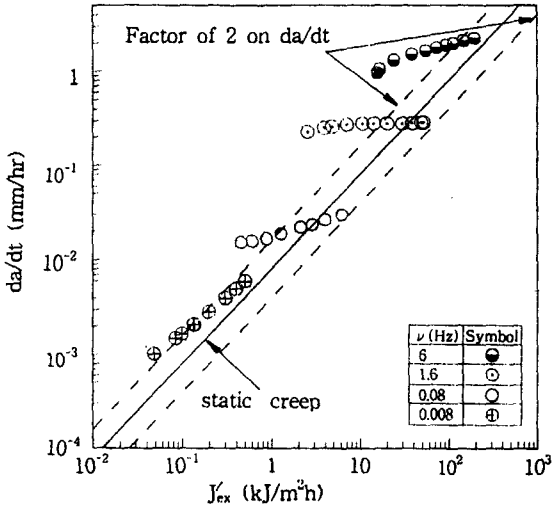
Fig. 6 Relation of crack growth rate  $da/dN$  with fatigue J-intergral range  $\Delta J_r$

그림 중의 실선은 Ohji<sup>15)</sup>등의 연구 결과에서 사

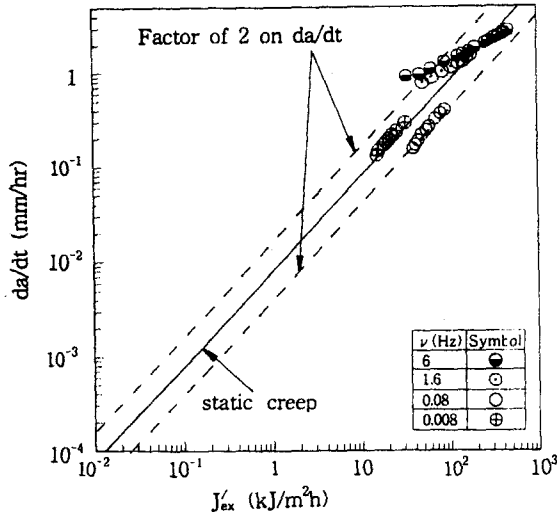
이클의존형균열성장거동을 보이는 실험점들의 중심선이며 이 직선의  $da/dN$ 과  $\Delta J_r$ 의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$da/dN = 1.2 \times 10^{-4} \cdot \Delta J_r \quad (7)$$

또한 파선은 중심선에 대한 계수 2의 밴드 폭을 표시하고 있으며 이 데이터 밴드 (data band)내에



(a) 600°C



(a) 700°C

Fig. 7 Relation of crack growth rate  $da/dt$  with modified  $J$ -integral  $J'_{ex}$

들어가는 실험점은 사이클의존형균열성장거동을 나타낸다고 생각된다.  $T=700^\circ\text{C}$ 의 실험점은  $T=600^\circ\text{C}$ 의 실험점에 비하여 단위사이클당균열성장속도가 가속되어져 초기 균열성장부터 사이클의존형균열성장의 데이터 밴드(data band)를 벗어나고 있다. 또한 하중반복속도가 빠를수록 사이클의존형균열성장의 데이터 밴드내에 위치하고 있으나 반복속도가 느린 경우 실험 초기부터 사이클 의존형 균열성장 데이터 밴드를 벗어나고 있다.

Fig. 7은 단위 시간당 균열성장속도  $da/dt$ 와 수정  $J$ 적분의 실험치  $J'_{ex}$ 의 관계를 나타낸 것이다. 그림중의 실선은 Ohji<sup>15)</sup>와 Koterazawa<sup>16)</sup>등의 연구 결과를 토대로 한 정 크리이프 실험결과의 중심선이며 이것의  $da/dt$ 와  $J'_{ex}$ 의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$da/dt = 8.0 \times 10^{-3} \cdot J'_{ex} \quad (8)$$

또한 파선은 중심선에 대한 계수 2의 밴드 폭을 나타내고 있으며 이 데이터 밴드내에 들어간 실험점은 시간의존형균열성장거동을 보인다고 생각된다.  $T=600^\circ\text{C}$ 의 실험점은 데이터 밴드의 좌측 하방에서 우측 상방으로 증가하면서 정 크리이프 데이터 밴드 내에 접근하게 되나  $T=700^\circ\text{C}$ 의 경우  $\nu=6\text{Hz}$ 를 제외하고는 대부분의 실험점이 초기 균열 성장부터 정 크리이프 데이터 밴드내에 위치하면서 기울기 1의 실선 주위를 따라 균열이 급속하게 성장하고 있다.

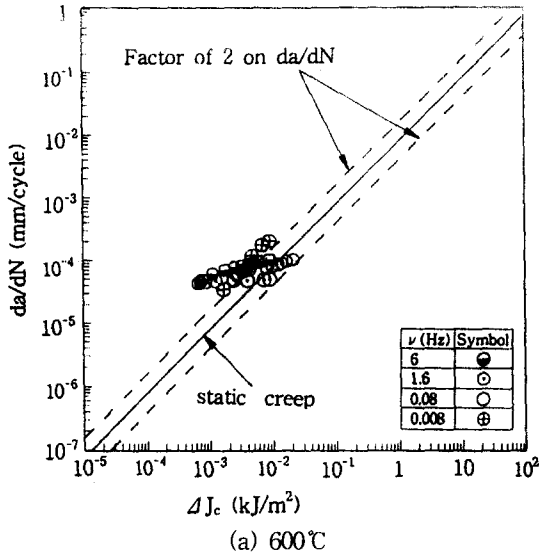
Fig. 8는  $da/dt$ - $J'_{ex}$ 선도를 단위사이클당균열성장속도  $da/dN$ 과  $\Delta J_c$ 로 다시 정리한 것이다.  $da/dN$ - $\Delta J_c$ 의 관계식은 식(8)로 부터 유도되어지며 다음과 같이 표현된다.

$$da/dN = 8.0 \times 10^{-3} \cdot \Delta J_c \quad (9)$$

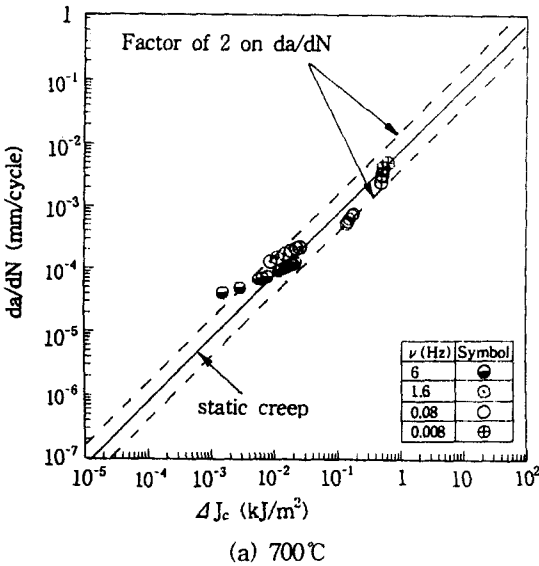
파선은 실선의 계수 2의 밴드 폭을 표시하고 있다.  $T=600^\circ\text{C}$ 의 경우  $da/dt$ - $J'_{ex}$ 선도에서 보였던 하중반복속도 의존성이  $\Delta J_c$ 의 도입에 의해 사라지나  $T=700^\circ\text{C}$ 의 실험은 이러한 의존성을 그대로 유지하고 있다. 이러한 결과는  $T=700^\circ\text{C}$ 의 경우 대부분의 실험점이 시간의존형균열성장거동을 보여서 수정  $J$ 적분 실험치  $J'_{ex}$ 가 하중반복속도에 둔감해 졌기 때문이라 생각된다.

단위사이클당균열성장속도  $da/dN$ 를 전  $J$ 적분범위

$\Delta J_i$ 로 정리하여 나타낸 것이 Fig. 9 이다.



(a) 600°C

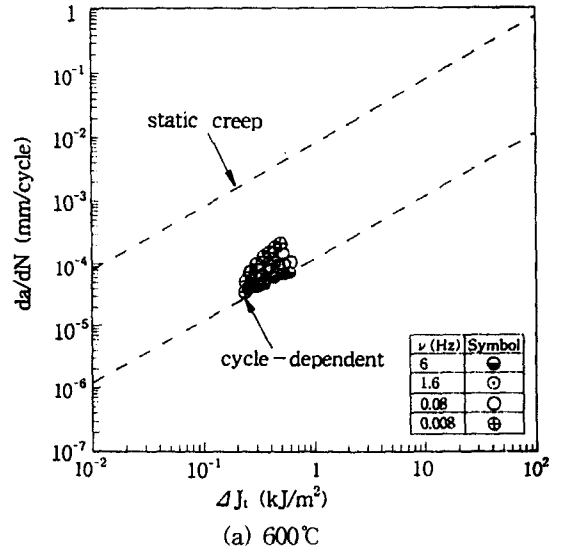


(a) 700°C

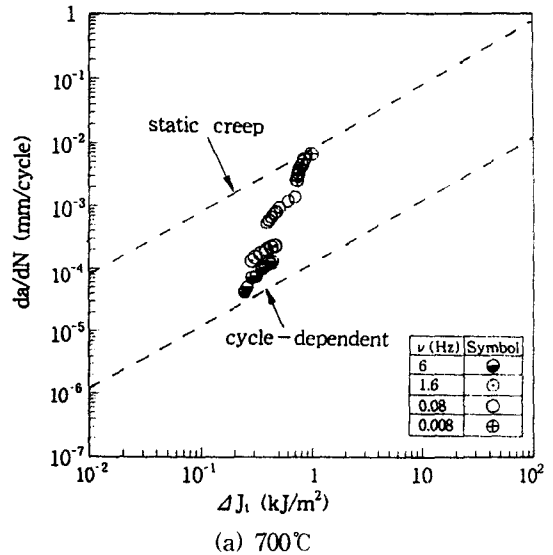
Fig. 8 Relation of crack growth rate  $da/dN$  with creep J-integral range  $\Delta J_c$

그림 중의 실선은 Ohji<sup>15)</sup>등이 제안하고 있는 사이클의존형 또는 시간의존형균열성장 실험점의 중심선에 관한 관계식 (7)과 (9)를 각각 나타내었다. 모든 실험점들이 두 중심선 내에 포함되고 있으며, 실험온도가 증가함에 따라 실험점들이  $da/dN-\Delta J_i$ 에서  $da/dN-\Delta J_c$  데이터 밴드의 중심선으로 접근

하고 있다. 이러한 결과는 실험온도가 600°C에서 700°C로 증가함에 따라 사이클의존형에서 시간의존형균열성장으로 균열성장거동이 달라졌기 때문인 것으로 생각된다.



(a) 600°C



(a) 700°C

Fig. 9 Relation of crack growth rate  $da/dN$  with total J-integral range  $\Delta J_i$

이상의 실험 결과에서 단일 J적분값을 이용하여 고온저사이클피로균열성장속도를 평가하면 사이클의존형과 시간의존형균열성장거동이 동시에 나타나는



실험조건이 존재하기 때문에 균열성장속도를 일관성 있게 평가하기 어렵다. 따라서 다음 절에서는 적어도 두가지 이상의 파괴역학 파라미터를 이용하여 재료 손상을 평가하는 독립손상법칙과 선형누적손상법칙으로 균열성장속도를 예측하여 보고자 한다.

3. 손상법칙에 의한 균열성장속도의 평가

SUS 304 스테인레스 강의 고온저사이클피로균열

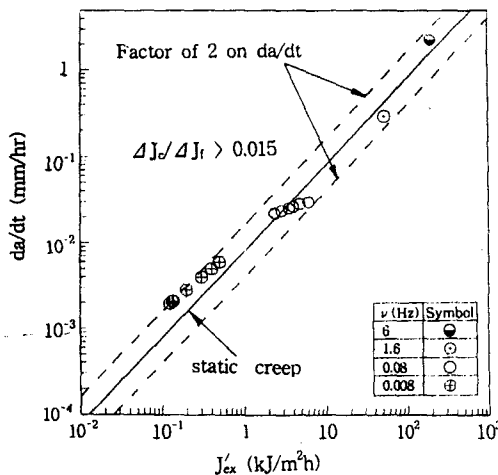
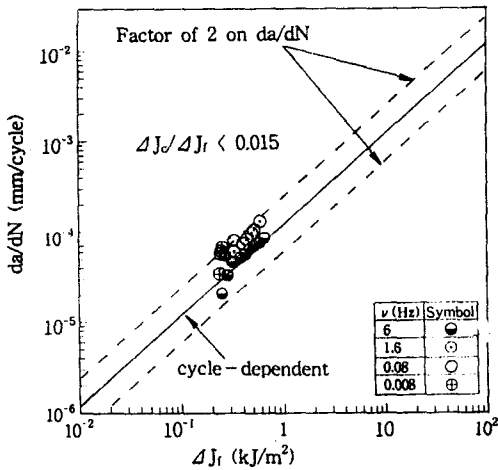


Fig. 10 (a) Prediction of fatigue crack growth rates on the basis of predominant damage rule (600°C)

성장속도를 일관성 있게 예측하기 위하여 독립손상법칙을 이용하면, Joo<sup>17)</sup> 등이 제안한 천이 조건을 기초로 천이 파라미터  $\Delta J_c/\Delta J_r$ 가 0.015보다 작을 때 사이클의존형균열성장이, 0.015보다 클 때 시간의존형균열성장이 전체 균열성장거동을 지배한다고 생각할 수 있다. Fig. 10 (a), (b)에 상술의 조건을 이용하여  $da/dN-\Delta J_r$ 와  $da/dt-J'_{ex}$  선도에 나타내면 각각의 실험점들은 분리되어 분포하고 있다. 600°C의 조건은  $\nu=0.008\text{Hz}$ 와 같은 저하중반복속도가  $da/dt-J'_{ex}$  데이터 밴드에 들어가는 것을 제외하고는 실험 초기에  $da/dN-\Delta J_r$ 에, 실험 후기에  $da/dt-J'_{ex}$  데이터 밴드에 분포되어 있다. 그러나 700°C의 실험점은 고하중반복속도  $\nu=6\text{Hz}$ 가 실험 초기에  $da/dN-\Delta J_r$ 에, 실험 후기에  $da/dt-J'_{ex}$  데이터 밴드에 분포하는 것을 제외하고는 대부분의 실험점들이  $da/dt-J'_{ex}$  데이터 밴드에 들어가 있다.

그리고 또 하나의 균열성장속도 평가법으로 선형누적손상법이 있으며 이것은 사이클의존형 균열성장속도식(7)과 시간의존형 균열성장속도식(9)를 선형화함으로써 주어진다고 생각하여 아래와 같이 나타낸다.

$$da/dN = (da/dN)_f + (da/dN)_c \tag{10}$$

윗 식의  $(da/dN)_f$ 와  $(da/dN)_c$ 는 사이클의존형과 시간의존형균열성장 실험식인 식 (7)과 (9)을 각각 나타내고 있다.

$$da/dN = (1.2 \times 10^{-4} \Delta J_r) + (8.0 \times 10^{-3} \Delta J_c) = 8.0 \times 10^{-3} (\Delta J_c + 0.015 \Delta J_r) \tag{11}$$

Fig. 11은  $da/dN$ 를 윗 식의  $(\Delta J_c+0.015\Delta J_r)$ 에 대하여 정리한 것이며 실선은 식(11)를 표시한 것이고 파선은 실선의 계수2의 밴드 폭을 나타낸 것이다. 600°C의 대부분의 실험점들이 선형 누적 손상법칙을 기초로 한 데이터 밴드의 좌측 하방에 위치하고 있는 것에 비해 700°C의 실험점들은 우측 상방에 들어가 있다. 이러한 결과는 동일균열길이와 응력비에서 실험 온도가 증가함에 따라  $\Delta J_r$ 는 동일한 데 비하여  $\Delta J_c$ 의 증가에 따른 시간의존형균열성장이 상대적으로 증대하여 단위사이클당균열성장속도  $da/dN$ 을 가속시키는 것에 기인하고 있다. 따라서 실험 온도와 하중반복속도에 관계없이

SUS 304 스테인레스 강의 고온저사이클피로균열 성장속도 예측에 독립손상법칙과 선형누적손상법칙이 유효함을 알 수 있다.

JEOL사의 JSM-35CF형)을 이용하여 시험편의 파면을 촬영하였다.

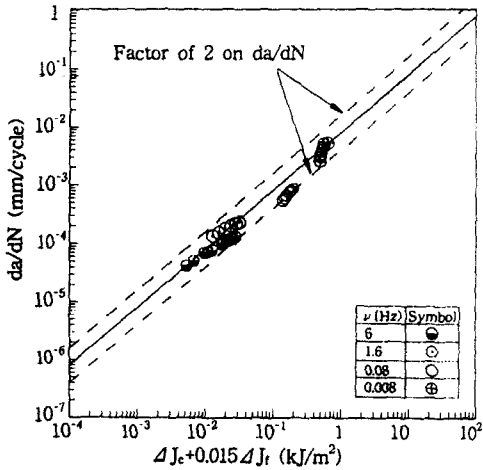
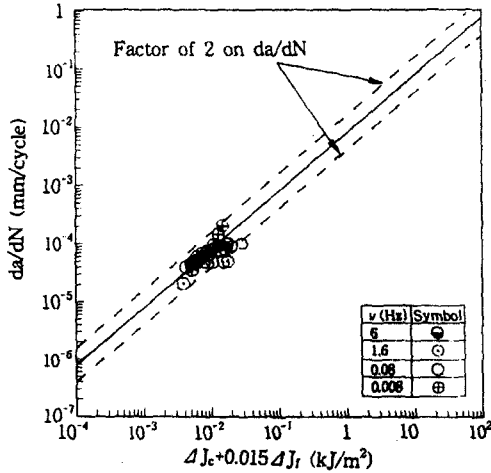
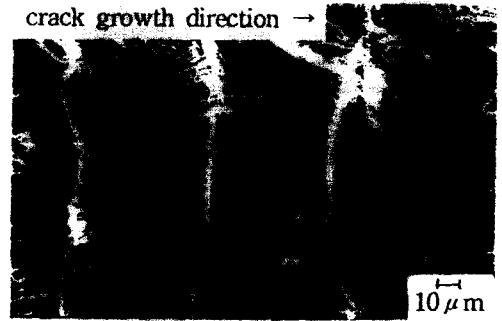


Fig. 11 Prediction of fatigue crack growth rates on the basis of linear cumulative damage rule.

4. 주사형 전자 현미경에 의한 파면 관찰

사이클의존형과 시간의존형균열성장거동에 관한 해석을 시험편의 파면과 관련시켜 보기 위하여 주사형 전자 현미경(Scanning Electron Microscope :



(a) 600°C, R=0.5



(b) 700°C, R=0.5

Fig. 12 Fractography on the ruptured surface at 600°C and 700°C ( $\nu=1.6\text{Hz}$ ,  $\Delta J_f=0.35\text{kJ/m}^2$ )

파면에 미치는 온도의 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 12에  $\nu=1.6\text{Hz}$ 의  $T=600^\circ\text{C}$ 와  $700^\circ\text{C}$ 의 파면단을 각각 나타내었다. 전자는 시험편 전역에 반복소성변형에 기인하는 입내파면을, 후자는 크라이프 변형에 기인하는 입계파면을 각각 나타내고 있다. 즉, 실험온도가 증가할수록 시험편의 파면 중 입계 파면이 차지하는 비율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 하중반복속도의 영향을 알아 보기 위하여  $T=600^\circ\text{C}$ 의 각 하중반복속도에 대한 파면을 Fig. 13에 나타내었다. 하중반복속도가 느려질수록 파면상에 형성되는 스트라이프 간격이 급격히 늘어나면서 스트라이프 사이에서 형성되는 입계 파면의

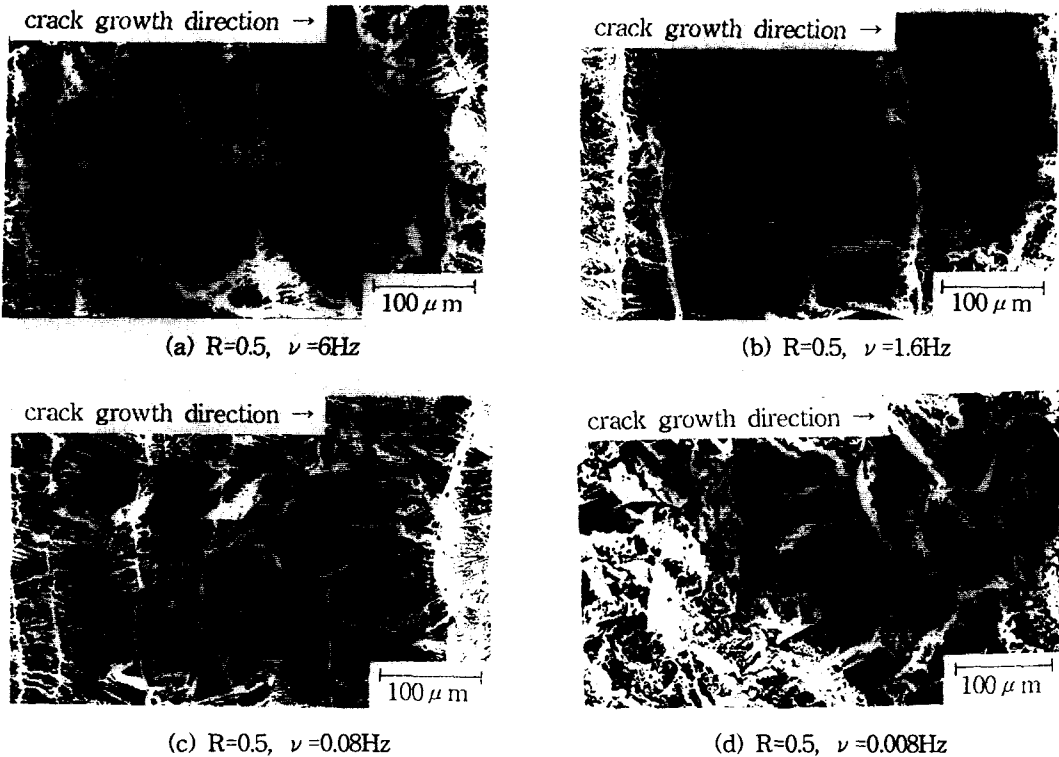


Fig. 13 Fractography on the ruptured surface at various frequencies ( $T=600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta J_f = 0.35\text{kJ/m}^2$ )

비율이 증가하고 있다. 따라서 2절과 본 절의 결과를 비교하면, 실험온도의 증가와 하중반복속도의 감소에 따른 사이클의존형에서 시간의존형균열성장으로의 전이는 입내에서 입계 표면으로의 전이를 발생시킨다고 생각할 수 있다. 이러한 결과는 Inoue<sup>18)</sup> 등의 고온저사이클피로 실험결과와도 잘 일치하고 있다

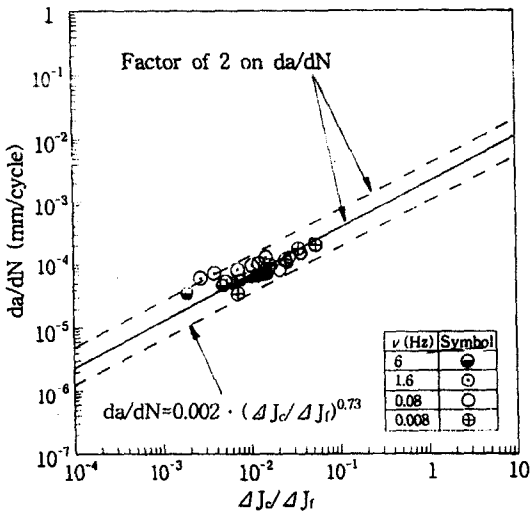
5.  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 에 의한 균열성장속도의 평가

Table 4는 각 실험조건에 대한 천이 파라미터  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 의 값을 나타낸 것이다. 여기서  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 의 값은 균열이 성장함에 따라 서서히 증가하므로 실험 초기값과 최종값을 동시에 표시하였다. Fig. 12, 13에서 나타난 파면과  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 의 변화 거동을 관찰하여 보면, 입계파면의 비율이 증대함에 따라  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 의 값이 크게 증대함을 알 수 있으며 이것은 전보<sup>17)</sup>에서 밝힌 바와 같이 전균열성장영역중 시간의존형균열성장거동의 비율이 증가하기 때문인

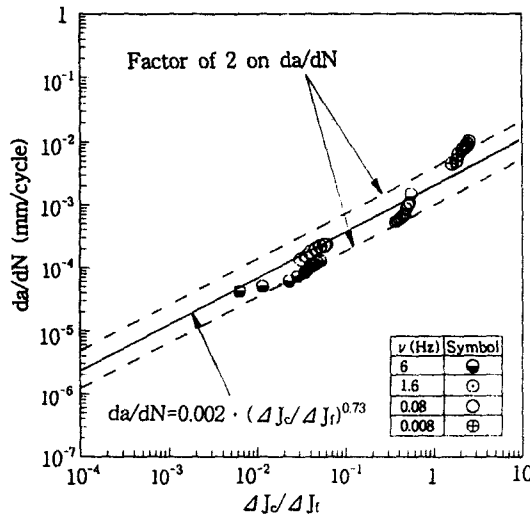
것으로 생각된다. 또한 Fig. 6, 7에서 보는 바와 같이 시간의존형균열성장거동의 비율이 증가하게 됨에 따라 단위사이클당균열성장속도  $da/dN$ 가 현저하게 증가되므로  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 가 증가함과 동시에  $da/dN$ 도 증가된다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실에 기초하여 Fig. 14에  $\Delta J_c/\Delta J_f$ 와  $da/dN$ 의 관계를 나타내었다.

Table 4 Change of  $\Delta J_c/\Delta J_f$  in test condition

Temp.( $^{\circ}\text{C}$ )	$\nu$ (Hz)	$\Delta J_c/\Delta J_f$
600	0.008	0.008~0.0055
	0.08	0.005~0.038
	1.6	0.003~0.015
	6	0.002~0.015
700	0.008	1.600~2.500
	0.08	0.360~0.540
	1.6	0.030~0.059
	6	0.006~0.015



(a) 600°C



(b) 700°C

Fig. 14 Relation of crack growth rate  $da/dN$  with  $\Delta J_c/\Delta J_f$

모든 실험점을 이용하여 최소자승법으로 커브 피팅(curve fitting)한 관계식은 다음과 같다

$$da/dN = 0.002 \cdot (\Delta J_c/\Delta J_f)^{0.73} \quad (12)$$

그림 중의 실선은 식 (12)를, 파선은 이 식을 이용한 실선의 계수 2의 밴드 폭을 나타내고 있다. 실

험온도나 하중반복속도에 관계없이 식(12)를 기초로 하는 데이터 밴드내에 모든 실험점들이 들어가고 있으며  $T=600^\circ\text{C}$ 의 경우 좌측 하방에,  $T=700^\circ\text{C}$ 의 경우는 우측 상방에 위치하고 있다.

한편, 본 장의 3절에서 보는 바와 같이 기존의 독립손상법칙이나 선형누적손상법칙을 이용하면 피로균열성장속도를 예측할 수는 있으나 이러한 데이터 밴드를 만들기 위해서는 많은 실험 데이터를 필요로 하므로 균열성장속도평가에 상당한 시간 및 경제적 손실을 요구하게 된다. 그러나 본 절에서 제안하고 있는 식(12)와 같은 실험식을 이용하게 되면 실험온도나 하중반복속도에 관계없이 균열성장속도를 일관성있게 예측할 수 있어 상술의 평가법이 가진 결점을 극복할 수 있으리라 생각된다.

## V. 결 론

본 연구는 일반 기계 설비에서 가장 일반적으로 나타날 수 있는 정현하중파형을 기초로 SUS 304 스테인레스 강의 예민화 온도에 해당하는  $600^\circ\text{C}$ 와  $700^\circ\text{C}$ 에서 하중반복속도를 다양하게 변화시켜 고온저사이클피로균열성장속도를 간편하게 예측하기 위한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고온저사이클피로균열성장수명은 실험온도와 하중반복속도가 저하함에 따라 정현하중파형이 사다리꼴하중파형에 비하여 현저히 증가되며, 균열은 정현하중파형이 사다리꼴하중파형에 비하여 소규모 변형상태하에서 성장하게 된다.

2. 실험온도가 상승하거나 하중반복속도가 감소하게 되면 고온저사이클피로균열성장속도는  $\Delta J_f$ 만으로 평가하기 어렵고  $J'_{ex}$ 나  $\Delta J_c$ 를 같이 이용해 야만 한다.

3. 실험온도를 달리하더라도 사이클의존형이나 시간의존형 균열성장 데이터 밴드를 기초로 하는 기존의 독립손상과 선형누적손상법칙을 이용하면 균열성장속도를 일관성 있게 평가할 수 있었다.

4. 하중조건이 동일한 경우 실험온도의 증가와 하중반복속도의 감소에 따라 파단면의 스트라이프 간격이 늘어나면서 그 사이에 형성되는 입계파면의 비율이 증가함과 동시에 사이클의존형에서 시

간의존형 균열성장으로의 천이를 발생시킨다.

5. 고온저사이클피로균열이 성장함에 따라  $\Delta J_c / \Delta J_f$ 의 값이 현저하게 증가함을 기초로  $da/dN$ 을  $\Delta J_c / \Delta J_f$ 으로 평가한 결과, 실험온도나 하중반복속도에 관계없이 모든 실험점들이 하나의 데이터 밴드내에 모이고 있으므로 많은 실험 데이터를 기초로 하는 결론 3의 평가법보다 훨씬 더 간편하게 균열성장속도를 평가할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1995년도 동아대학교 학술연구조성비(일반과제)에 의하여 연구되었으며 관계자에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 大谷, "크리프-疲労龜裂傳ばから見た高温強度の特徴", 日本機械學會論文集, 第52卷, 第478號, pp. 1461-1468, 1986.
- (2) Dowling, N.E., "Geometry Effects and the J-Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth", ASTM, STP 601, pp. 19-32, 1976.
- (3) P.C.Paris and F.Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME J. Basic Eng., Vol.85, p. 528, 1963.
- (4) 大路, 小倉, 久保, "全断面塑性におけるJ積分の簡便式とそれのクリーブき裂問題への應用に関する検討", 日本機械學會論文集, 第44卷, 第382號, pp. 1831-1838, 1978.
- (5) J.D.Landes and J.A.Begley, "A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth", ASTM STP 590, pp. 128-148, 1976.
- (6) M.Okazaki, F.Shiraiwa, I.Hattori, T.Koizumi, "Effect of Strain Wave Shape on Low Cycle Fatigue Crack Propagation of Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature, JSME, Vol.32, No.357, pp.645-650, 1983.
- (7) A.Toshimitsu Yokobori, Jr. Takeo Yokobori, Hideo Tomizawa, Hiroshi Sakata, "Parametric Representation of Crack Growth Rate Under Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction at High Temperature", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.105, pp. 13-15, 1983.
- (8) H. Tada, P. Paris and G. Irwin, "The Stress Analysis of Cracks Hand Book", Del Research Co., pp. 88, 1973.
- (9) 大路, 小倉, 久保, "J積分および修正J積分の簡便式に関する検討", 日本機械學會論文集, 第47卷, 第416號, pp. 400-405, 1981.
- (10) 平 修二, "金屬材料高温強度データ集 第2編 ステンレス鋼編", 養賢堂, pp. 116-117, 1968.
- (11) 横堀, 横堀, 栗山, 卓, "高温クリーブ-疲労, クリーブ-疲労重疊条件下でのき裂發生, 傳ば破壊, 各壽命特徴" 日本機械學會論文集, 第52卷, 第477號, pp.1215-1220, 1986.
- (12) 大路, 久保, 周, 久利, "SUS304鋼のクリーブ温度領域における正弦波部分片振應力下の時間依存形および繰返し數依存形き裂傳ば", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第467號, pp. 2137-2145, 1986.
- (13) 大路, 小倉, 久保 外 2人, "SUS304鋼を用いたクリーブ-疲労相互作用下のき裂傳ば實驗", 材料, 第33卷, 第36號, pp. 145-151, 1984.
- (14) 菊地, 加治, 武, 北出, "超高温領域のクリーブ-疲労壽命評價", 日本機械學會論文集, 第59卷, 第557號, pp. 94-99, 1983.
- (15) 大路, 久保, 山河, "SUS304鋼の高温低サイクル疲労き裂傳ばにおける繰返し依存形・時間依存形き裂傳ばの分離とその遷移條件", 日本機械學會論文集, 第50卷, 第454號, pp. 1218-1227, 1984.
- (16) 小寺澤, 森, "クリーブき裂傳ばを支配する破壊力學的因子", 材料, 第26卷, 第289號, pp. 948-954, 1977.
- (17) 주원식, 조석수, 손승우, "SUS 304강의 고온저사이클 피로균열성장 거동에 미치는 온도의 영향", 대한기계학회 '94년도 추계학술대회 논문집, pp. 109-195, 1994.

- (18) R.Ohtani, M.Ohnami, T.Inoue, "Current Japanese Materials Research Vol.3". Elsevier applied science, pp. 91-113, 1990.