

**研究論文**

# SUS304강의 사이클의존형에서 시간의존형균열성장으로의 천이에 관한 연구

주 원 식\* · 조 석 수\*\*

## A Study on Transition from Cycle-dependent to Time-dependent Crack Growth in SUS 304 Stainless Steel

W. S. Joo\* and S. S. Cho\*\*

**Keywords** : Transitional parameter (천이 파라미터), Fatigue J integral (피로 J 적분), Modified J integral (수정 J 적분), Cycle-dependent crack growth (사이클의존형 균열성장), Time-dependent crack growth (시간의존형 균열성장), High temperature low cycle fatigue (고온 저사이클 피로)

### Abstract

High temperature low cycle fatigue crack growth behavior is investigated over a range of two temperatures and various frequencies in SUS 304 stainless steel. It is found that low frequency and high temperature can enhance time-dependent crack growth. With high temperature, low frequency and long crack length,  $\Delta J_c / \Delta J_f$ , the ratio of creep J integral range to fatigue J integral range is increased and time-dependent crack growth is accelerated. Interaction between  $\Delta J_f$  and  $\Delta J_c$  is occurred at high frequency and low temperature and  $\Delta J_c$ , creep J integral range is fracture mechanical parameter on transition from cycle-dependent to time-dependent crack growth in creep temperature region.

### 1. 서 론

고온분위기하에서 사용되는 부재와 설비는 크리이프 변형에 의한 손상이 현저하기 때문에 이러한

설비와 부재들의 신뢰성을 확보하고 그들의 적절한 보수 기간을 결정하기 위하여 크리이프-피로 조건하의 피로균열성장거동에 관한 정량적 평가가 필요하다.<sup>1,2)</sup> 또한 크리이프 온도역에서 피로균열 성장거동은 반복소성변형이 원인이 되는 사이클의 존형과 입계변형에 기인된 시간의존형 균열성장이

\* 비회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 동아대학교 대학원

복합적으로 나타나기 때문에 사이클의존형에서 시간의존형 균열성장으로의 천이를 지배하는 역학 인자의 구명이 요구된다.

최근까지의 연구에 의하면 Riedel<sup>3)</sup> 등은 단일 인장 하중을 받는 크리이프 조건하에서 균열성장에 관한 응력해석을 수행한 결과, 소규모 크리이프상대에서는 균열선단 근방의 응력과 변형률 속도장이 응력확대계수 K에 의하여 지배되나 대규모 크리이프상대에서는 C\*에 의하여 지배되며, 균열성장에 수반되는 이러한 역학적 환경의 변화는 특성 시간 (characteristic time)  $t_i$ 으로 결정할 수 있다고 주장하였다. 또한 Ohji<sup>4)</sup> 등은 이러한 정적인 응력 해석에 사용된 응력확대계수 K나 수정 J적분  $J$  대신에 반복하중을 고려한 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 나 크리이프 J적분 범위  $\Delta J_i$ 를 이용하여 만든  $\beta$ 가설을 기초로 고온 저사이클 피로균열성장거동에서 나타나는 사이클의존형 균열성장에서 시간의존형 균열성장으로의 천이영역을 해석적으로 추정하여 보았다. 그러나 특성시간  $t_i$ 을 기초로 하는  $\beta$ 가설은 탄성 변형률과 크리이프 변형률의 상호작용에 의하여 수정 J적분의 해석치  $J_m$ 가 수정 J적분의 실험치  $J_m$ 에 비하여 과소 평가되기 때문에 데이터 밴드를 이용한 균열성장거동의 천이점과 일치하지 않는 경향이 있다. 이러한  $\beta$ 가설을 기초로 균열성장속도를 예측하게 되면 균열성장속도 da/dN가 과소평가될 수 있으므로 사용 재료의 안전성을 확보할 수 없을 것이다. 따라서 Ohji<sup>4)</sup> 등이 제안한 해석적 수법의  $\beta$ 가설이 아닌 실험 데이터를 기초로 하는 천이 파라미터로써 이러한 천이와 균열성장거동과의 관계를 정확히 밝혀내어 이에 미치는 역학 인자를 검토한다면 균열성장속도를 정량적으로 평가하는데 대단히 유용할 것이라 생각된다.

본 논문에서는 SUS 304 스테인레스 강의 예민화 온도에 해당하는 600℃와 700℃에서 정현하중파형에 의한 피로균열성장실험을 수행하여 사이클의존형에서 시간의존형으로의 천이를 비선형 파괴역학 파라미터인 J적분을 토대로 구명하였으며 이에 따른 온도 및 하중반복속도의 영향을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 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 각각의 실험 온도에서의 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

고온 저사이클 피로균열성장 실험에 사용한 시험편은 중앙에 노치가 있는 중앙균열평판시험편이며 형상과 치수는 Fig.1에 표시하였다. 시험편의 예균열은 응력비 R=0.1, 정현하중파형하에서 기계 노치 선단으로부터 각각 좌우로 2mm씩 도입하여 초기균열길이가 약 10mm되게 하였다.

### 2.2 실험 방법

실험에 사용한 시험기는 98kN인 전기유압서보식피로시험기 (INSTRON model 1331)이다. 본 실험은 균열길이 2a가 10mm되는 지점에서 최대하중과 최소하중을 각각 4080N과 2040N으로 일정하게 고정시키는 일정진폭하중제어방식 (constant amplitude loading control)으로 실시하였으며 온도와 하중반복속도에 관한 실험조건은 Table 3에 각각 나타내었다. 시험편이 600℃와 700℃에 각각 도

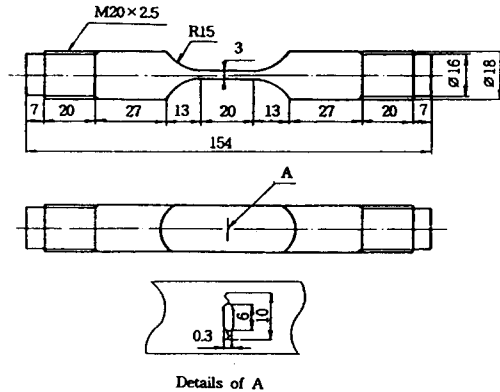


Fig. 1 Geometry of center-cracked specimen

달한 후 노 내의 온도를 안정화시키기 위하여 몰입시간(soaking time)을 1시간 준 뒤 자동온도조절장치를 이용하여 실험온도의 편차를 ±5이내로 유지시켰다.

또한, 피로균열길이는 전기로 앞면에 관찰용 창을 설치하고 이 창을 통해서 측정 밀도가 0.01mm인 이동식 망원현미경(배율 20배)을 이용하여 측정하였으며 수정 J적분의 실험치를 구하기 위한 하중점변위속도δ는 X축을 실험 시간으로, Y축을 고온신장계에서 나오는 하중점 변위로 설정하여 이 곡선의 기울기로서 구하였다.

### 3. 파괴역학량을 구하는 방법

#### 3.1 응력확대계수 K

중앙 균열 평판 시험편의 K는 Tada<sup>5)</sup> 등의 응력해석결과를 이용하였다.

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

2a/W= ξ라 두면 수정 계수 F는 다음과 같이 표현된다.

Table 3. Test condition

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

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

(0 < ξ < 1에서 0.1%의 정밀도)

#### 3.2 피로 J적분 범위 ΔJ<sub>f</sub>

Dowling<sup>6)</sup>이 제안한 다음 식을 이용하여 피로 J적분 범위 ΔJ<sub>f</sub>를 구하였다.

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

여기서 B는 시험편의 두께, b는 제하 리가멘트 길이, S<sub>p</sub>는 하중P가 최소치에서 최대치까지 부하되었을 때 P-δ곡선과 그 양단을 연결한 직선에 둘러싸인 부분의 면적이며 E는 SUS 304강의 종탄성계수이다.

#### 3.3 수정 J적분의 실험치 J'<sub>ex</sub>

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

J'<sub>ex</sub>의 계산에 사용되는 σ<sub>net</sub>는 같은 시간에 동크리이프와 같은 변형률을 생기게 하는 정 크리이프의 응력인 등가정응력(equivalent static stress)σ<sub>e</sub><sup>7)</sup>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, σ<sub>a</sub> : 응력진폭

σ<sub>m</sub> : 평균응력

Λ : 응력비 (σ<sub>a</sub>/σ<sub>m</sub>)

ω : 반복 응력 각속도

여기서 n은 Norton의 법칙 ε=Bσ<sub>n</sub> 관계식의 크리이프 지수로써 600℃에서 n=13.9이며 700℃에서 n=8.0이다.<sup>8)</sup>

#### 3.4 크리이프 J적분 범위 ΔJ<sub>c</sub>

크리이프 J적분 범위는 반복 하중이 작용할 때 인장 한 사이클 동안의 변형이 일 방향 크리이프 변형과 동일하다고 가정하여 수정 J적분 실험치의 한 사이클 동안의 누적치로서 다음과 같은 식으로

평가할 수 있다.

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

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 J적분을 이용한 균열성장속도의 평가

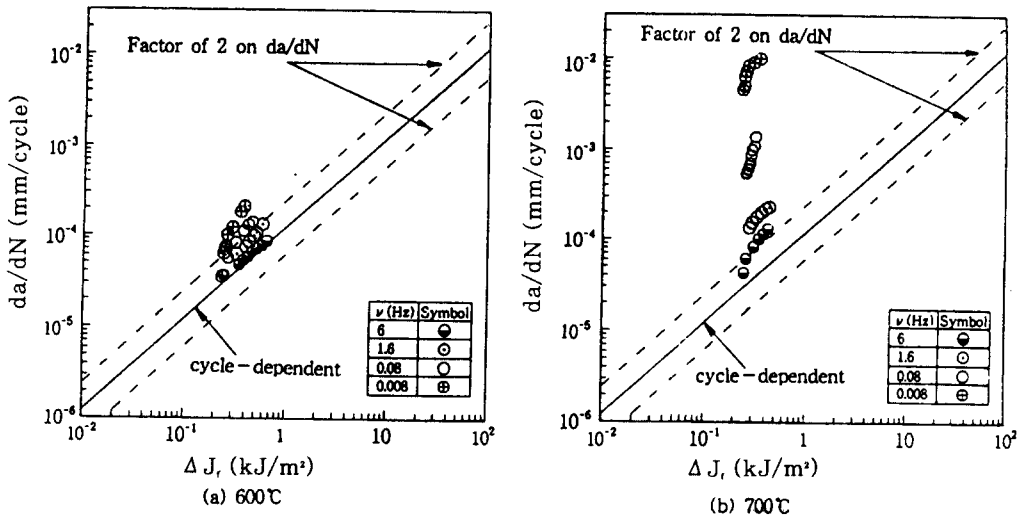


Fig. 2 Relation of crack growth rate da/dN with fatigue J-integral range  $\Delta J_i$

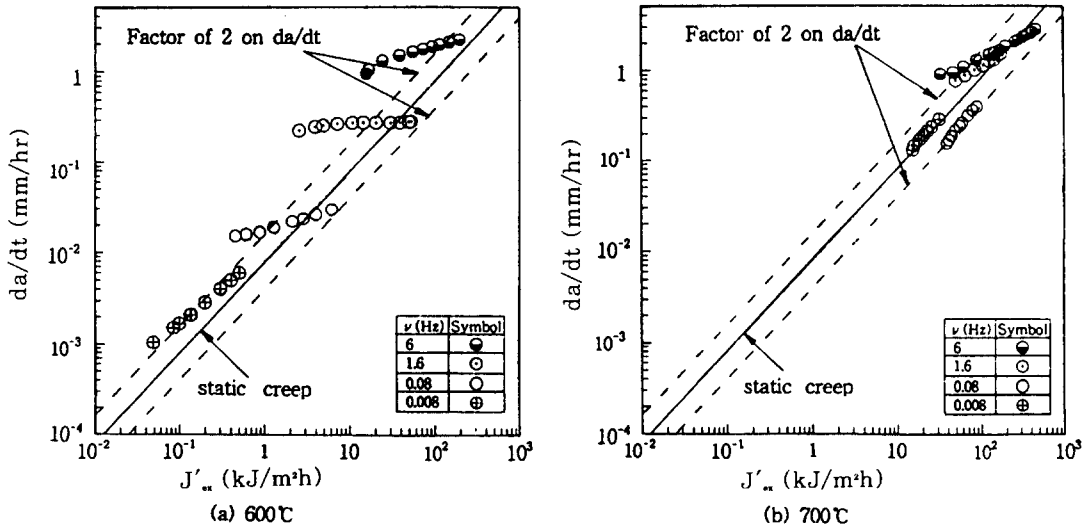


Fig. 3 Relation of crack growth rate da/dt with modified J-integral  $J'_{..}$

Fig. 2, 3은 균열성장속도를 피로 J적분범위  $\Delta J_i$ 와 수정 J적분  $J'_{..}$ 으로 각각 정리한 것이다. 그림 중의 실선은 Ohji<sup>9)</sup>와 Koterazawa<sup>10)</sup> 등의 연구결과에서 피로실험에 기초한 사이클의존형 균열성장거동을 보이는 실험점들의 중심점과 정크리프 실험에 기초한 시간의존형 균열성장거동을 보이는 실험점들의 중심선을 각각 나타낸 것으로 이들의 관계는 다음과 같이 표현되며 파선은 이러한 중심선

에 대한 계수 2의 밴드 폭을 나타내고 있다.

$$da/dN = 1.2 \times 10^{-4} \cdot \Delta J_c \quad (6)$$

$$da/dt = 8.0 \times 10^{-3} \cdot J'_{\alpha} \quad (7)$$

사이클의존형 균열성장 데이터 밴드내에 들어가는 실험 조건은 실험 온도가 낮거나 하중반복속도가 빨라지는 경우이며, 이러한 경우 시간의존형 균열성장 데이터 밴드에서는 실험점들이 벗어나게 된다. 그러나 실험 온도가 높거나 하중반복속도가 느려지면, 실험점은 사이클의존형과 시간의존형 균열성장 데이터 밴드상에서 위와 반대의 거동을 나타내게 된다.

Fig. 3의  $da/dt \cdot J'_{\alpha}$  선도를 단위 사이클당 균열성장속도  $da/dN$ 와  $\Delta J_c$ 로 정리한 것이 Fig. 4이다.  $T=600^{\circ}\text{C}$ 의 경우  $da/dt \cdot J'_{\alpha}$  선도에서 보였던 하중반복속도 의존성이  $\Delta J_c$ 의 도입에 의하여 사라지나  $T=700^{\circ}\text{C}$ 의 실험은 이러한 의존성을 그대로 유지하고 있다. 이러한 결과는  $T=700^{\circ}\text{C}$ 의 경우 대부분의 실험점이 시간의존형 균열성장거동을 보여서 수정 J적분 실험치  $J'_{\alpha}$ 가 하중반복속도에 둔감해 졌기 때문이다.

이상의 실험 결과에서 고온저사이클피로균열성장실험의 경우 사이클의존형과 시간의존형 균열성

장거동이 동시에 나타나는 실험조건이 존재하기 때문에 균열성장속도를 일관성 있게 평가하기 위해서는 균열성장거동의 천이를 규정짓는 파라미터 및 이에 미치는 역학적 인자에 관한 검토가 절대적으로 필요할 것으로 생각된다.

#### 4.2 하중 변동과 실험 온도 상승에 기인된 수정 J적분의 증대 현상

실험 온도나 하중반복속도가 증가함에 따라 수정 J적분이 증가하는 것은 탄성 변형률과 크리이프 변형률의 상호작용을 고려한 다음의 해석해<sup>11)</sup>에 기초하여 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$J' = \frac{(\Delta K)^2/E}{(n+1)t} \quad (8)$$

실험 온도의 증가에 따른  $J'$ 의 증대는 탄성계수 E와 크리이프 지수 n의 감소에 기인하고 있다. 주기 t가 일정할 경우 식 (8)을 기초로  $T=600^{\circ}\text{C}$ 와  $T=700^{\circ}\text{C}$ 의  $J'$ 를 비교하면 약 1.8배 정도  $700^{\circ}\text{C}$ 의  $J'$  값이  $600^{\circ}\text{C}$ 의  $J'$  값보다 증가하게 된다. 또한 주기 t를 인장 부하시간으로 하여 하중반복속도에 따른  $J'$ 의 증대 정도를 알아보기 위하여 6Hz와 0.008Hz의 실험을 상호 비교하면 6Hz의 실험이 0.

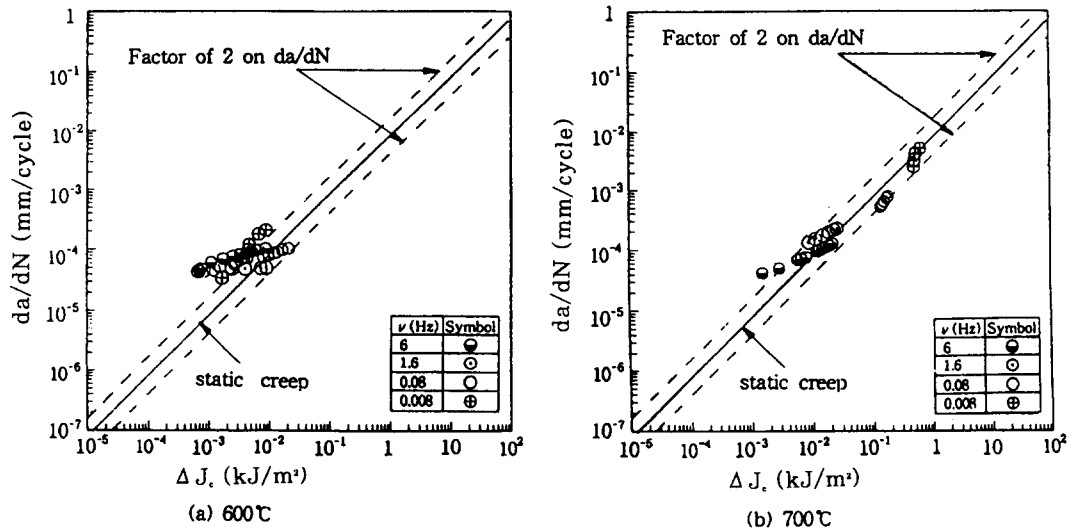


Fig. 4 Relation of crack growth rate  $da/dN$  with creep J-integral range  $\Delta J_c$ .

008Hz의 실험에 비하여 750배 정도 증가하게 된다.

따라서 실험 온도가 높거나 하중반복속도가 빠를수록  $J_c$ 의 증대는 현저하며 본 실험에서 사용한 수정 J적분 실험치  $J_{max}$ 에서도 이러한 경향을 인지할 수 있어,  $J_{max}$ 의 증대가 상술의  $J$  해석에서 사용된 탄성계수와 크리프지수 및 인장부하시간에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 한편 균열성장속도는 수정 J적분의 실험치인  $J_{max}$ 의 증대 비율 만큼 가속되지 않고 있으나 이렇게 증가된  $J_{max}$  값을 해석적 천이파라미터  $\beta_{max}^{(1)}$ 의  $J_{max}$  대신 사용하면, 사이클의존형에서 시간의존형 균열성장영역으로의 천이가 실제보다 빨리 일어나 부재의 잔존 수명을 과대 평가하여 사용 재료의 안전성을 확보할 수 없으므로 실험자료를 기초로 하는 천이 파라미터의 검토가 절실하다.

### 4.3 사이클의존형에서 시간의존형 균열 성장으로의 천이 조건

Taira<sup>12)</sup> 등은 S15C와 SUS 316강을 이용하여 고온 저사이클피로균열성장거동의 천이가 일정한  $\Delta J_c / \Delta J_r$  값에서 발생하며 이 지점을 전후로 사이클이나 시간의존형 균열성장이 지배적이라고 주장했다. 따라서 본 절에서는 상술의 개념을 기초로 SUS

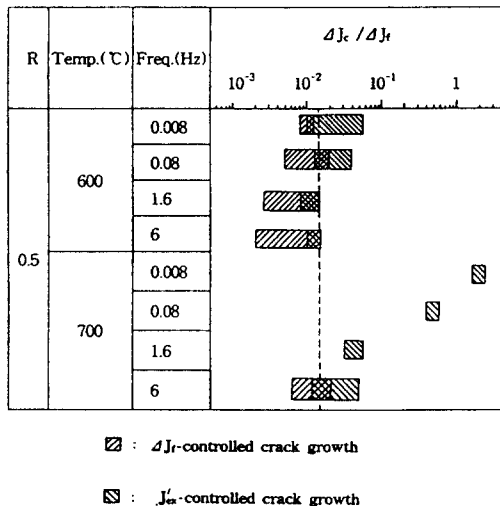


Fig. 5 Relation of transitional parameter  $\Delta J_c / \Delta J_r$  with crack growth behavior

304강의 사이클의존형과 시간의존형균열성장 데이터 밴드를 이용하여 Fig. 2,4에서 표시된 균열성장속도식이 동일하게 되는 지점을 사이클의존형에서 시간의존형 균열성장으로의 천이가 발생한다고 생각하였다. 따라서 다음 식이 얻어진다.

$$\Delta J_c / \Delta J_r = 0.015 \quad (9)$$

실험 온도 레벨과 하중반복속도에 따른  $\Delta J_c / \Delta J_r$  값의 변화를 보기 위하여 Fig.5에 전균열성장기간에 대한  $\Delta J_c / \Delta J_r$  값을 모든 실험 조건에 대하여 나타내었다. 그림 중의 파선은 식(7)에 표시한 사이클의존형에서 시간의존형으로의 천이조건이다. 4.1절의 균열성장거동과  $\Delta J_c / \Delta J_r$ 를 관련시켜 보면, 균열성장속도가 파선의 좌측 영역은  $\Delta J_c$ 에 의하여, 우측 영역은  $J_{max}$ 에 의하여 지배되며 파선 부근의 실험점은  $\Delta J_r$ 나  $J_{max}$  어느쪽 파라미터로도 정리 가능하였다. 또한, 그림에서 실험 온도 레벨이 높거나 하중반복속도가 느릴수록  $\Delta J_c / \Delta J_r$  값이 현저하게 증가하게 되므로, 사이클의존형보다 시간의존형 균열성장거동이 가속화 되어 균열성장거동의 천이가 발생하게 된다. Okazaki<sup>13)</sup> 등에 의하면 이러한 천이는 전 J적분범위  $\Delta J_c$ 에 대한 크리프 J적분범위  $\Delta J_r$ 의 증대에 의존하고,  $\Delta J_c / \Delta J_r$ 의 증가는 역학량의 견지에서  $\Delta J_c / \Delta J_r$ 의 증가와 동일하므로 본 실험결과와 잘 일치하고 있다.

### 4.4 천이에 미치는 각종 인자의 검토

고온 환경하에서 크리프와 피로가 중첩되는

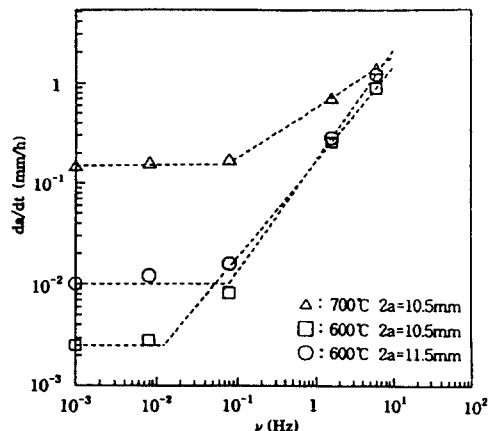


Fig. 6 Relation of crack growth rate  $da/dt$  with stress cycle  $\nu$

경우, 하중반복속도가 느려지면 크리이프와 피로의 상호 작용이 일어날 수 있는 사이클의존형에서 시간의존형균열성장으로의 천이 영역이 존재하게 된다. Fig. 6은 사이클의존형에서 시간의존형으로의 천이 영역에 미치는 각종 인자의 영향에 대하여 검토하기 위하여 T=600℃와 700℃의 조건하에서 초기균열길이 2a<sub>0</sub>를 일정하게 고정시켜 하중반복속도ν를 단위시간당균열성장속도 da/dt와의 관계로써 나타내었다. da/dt-ν선도의 기울기가 1에 접근하면 사이클의존형 균열성장인, 기울기가 0에 접근하면 시간의존형 균열성장이 지배적이기 때문에 두 기울기의 교점을 중심으로 사이클의존형과 시간의존형균열성장을 분리할 수 있으며 ΔJ<sub>r</sub>/ΔJ<sub>c</sub>을 기초로 천이에 미치는 하중반복속도ν, 균열길이 2a, 온도 레벨의 영향에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 균열길이가 어느 일정치 (2a=10.5, 11.5)에 도달했을 때의 하중반복속도를 비교하면 일반적으로 고하중반복속도영역에서 사이클의존형이, 저하중반복속도영역에서 시간의존형 균열성장거동이 나타나므로 중간하중반복속도영역에서 천이가 발생하게 된다. 즉, ΔJ<sub>r</sub>의 값은 하중조건에 의하여 일정하기 때문에 T=600℃에서 하중반복속도가 6Hz에서 0.008Hz로 감속하는 경우 ΔJ<sub>c</sub>의 값이 2.4배 증가하게 된다. 따라서 ΔJ<sub>c</sub>/ΔJ<sub>r</sub>의 값은 저하중반복속도영역으로 진행될 수록 증가되어 시간의존형 균열성장거동을 가속시키기 때문에 저하중반복속도와 고하중반복속도사이의 중간하중반복속도에서 천이가 일어나게 된다.

둘째, 일정진폭하중방식에서 균열길이 2a가 증가하게 되면 고하중반복속도영역에서 천이가 발생하게 된다. 이 경우 ΔJ<sub>r</sub>/ΔJ<sub>c</sub>에 미치는 인자로서 피로 J적분 ΔJ<sub>r</sub>와 크리이프 J적분범위 ΔJ<sub>c</sub>를 들 수 있다. T=600℃에서 균열길이 2a가 10.5mm에서 11.5mm로 증가함에 따라 전하중반복속도영역에서 ΔJ<sub>r</sub>/ΔJ<sub>c</sub>의 값이 1.25~1.59배 정도 증가하게 된다. 그런데 사이클의존형에서 시간의존형으로의 천이는 일정한 ΔJ<sub>r</sub>/ΔJ<sub>c</sub>값에서 일어나기 때문에 균열길이가 길어지는 경우 고하중반복속도에서 천이가 발생하게 된다.

셋째, 균열길이 2a가 10.5mm에 도달했을 때 실험온도가 높게 되면 사이클의존형에서 시간의존형

균열성장으로의 천이가 고하중반복속도에서 일어나게 된다. ν=0.08Hz의 경우 ΔJ<sub>r</sub>/ΔJ<sub>c</sub>의 값이 전하중반복속도영역에서 T=600℃의 실험점보다 T=700℃의 실험점이 114배 정도 더 증가하게 된다. 따라서 ΔJ<sub>c</sub>/ΔJ<sub>r</sub>의 천이조건을 이용하면 실험온도의 상승에 따라 고하중반복속도에서 천이가 발생하게 된다.

### 4.5 균열성장구동력에 의한 천이현상의 검토

Fig. 7은 천이 영역에서 균열성장의 구동력인 피로 J적분범위 ΔJ<sub>r</sub>와 크리이프 J적분범위 ΔJ<sub>c</sub>사이의 상호 작용과 천이에 미치는 파괴 역학적 인자

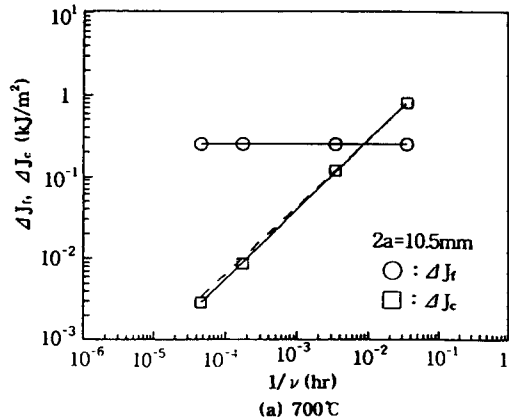
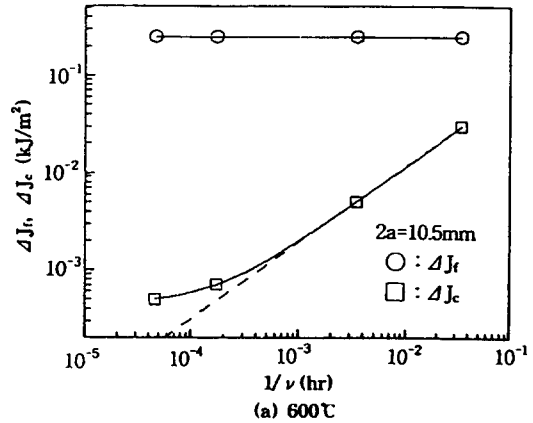


Fig. 7 Dependence of the J-integral ranges on the period of stress cycle

를 구명하기 위하여 주기  $1/\nu$ 와 J적분범위를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 모든 실험점을 기초로 하여 커브 피팅(curve fitting)한 결과를, 파선은 고하중반복속도영역에 해당하는  $\nu=6, 1.6\text{Hz}$ 의 실험점을 기초로 하여 커브 피팅한 결과를 각각 나타낸 것이다.  $T=700^\circ\text{C}$ 의 경우  $\Delta J_c$ 는  $J_{c\infty}$ 가 정상 크리이프 상태에서 항상 일정하기 때문에 주기  $1/\nu$ 에 비례하고  $\Delta J_c$ 는  $1/\nu$ 에 독립적이다. 따라서  $\Delta J_c$ 와  $\Delta J_c$  사이에 현저한 상호작용을 관찰할 수 없다. 그러나  $T=600^\circ\text{C}$ 와 같이 주기  $1/\nu$ 가 짧아질수록 그림 중의 파선을 벗어나  $\Delta J_c$ 와  $\Delta J_c$ 사이의 관계를 선형적인 1차함수의 관계로 표현할 수 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 저하중반복속도에 비하여 고하중반복속도에서 제하 과정중의 동적 회복과 탄성 변형률과 크리이프 변형률사이의 상호작용에 의하여  $J_{c\infty}$ 이 증대함에 기인하고 있다. 따라서 균열성장구동력의 상호작용에 의한 균열성장속도가 가속되는가 또는 감속되는가를 알아 보기 위해서 일정  $\Delta J_c (=0.25\text{kJ/m}^2)$  하에서  $\Delta J_c$ 의 증가에 따른  $da/dN$ 의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

그림에서 (a)의 경우 실험 결과에 변곡점이 예상되므로 고하중반복속도영역에 속하는  $1.6\text{Hz}$ 이상의 영역과 저하중반복속도영역에 속하는  $0.08\text{Hz}$ 이하의 영역으로 나누어 실험점들을 커브 피팅하였으며 (b)의 경우 변곡점이 생기지 않으므로 모든 실험점들을 기초로 커브 피팅하였다.  $T=700^\circ\text{C}$ 의 경우 균열성장구동력사이의 현저한 상호작용이 없기 때문에 균열성장속도가 주기  $1/\nu$ 에 선형적인 관계를 가지고 있어 가속 또는 감속현상을 발견할 수 없다.  $T=600^\circ\text{C}$ 의 경우  $\Delta J_c$ 가  $1/\nu$ 에 상관관계를 가지지 못하는 기울기 0인 사이클의존형과 선형적 함수관계를 가지는 기울기 1인 시간의존형균열성장거동을 나타내고 있으며  $da/dN$ 가 균열성장 구동력사이의 상호작용이 일어남에도 불구하고 가속되지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Cr-Mo-V 주강을 이용해서 행한 Ohtani<sup>14)</sup> 등의 실험결과와 동일하다. 또한 천이가 일정한  $\Delta J_c/\Delta J_c$ 의 값에서 일어난다는 것을 고려하면, 천이는 주로  $\Delta J_c$ 의 증대 여하에 달려 있으며  $\Delta J_c$ 는 그다지 천이에 영향을 주지 못하고 있다. 따라서 하중반복속도나 온도의 영향을 직접적으로 받아

균열성장거동의 천이에 미치는 파괴역학 파라미터는 크리이프 J적분범위  $\Delta J_c$ 라는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 일반기계설비에서 가장 일반적으로 나타날 수 있는 정현하중파형을 기초로 실험온도와 하중반복속도를 다양하게 변화시키는 고온저사이클피로균열성장실험을 실시하여 사이클의존형에서 시간의존형 균열성장으로의 천이에 대하여 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험 온도와 하중반복속도의 증가에 따라 수정 J적분이 증가하는 것은 탄성계수, 크리이프 지수와 인장부하시간의 감소에 각각 기인하고 있다.

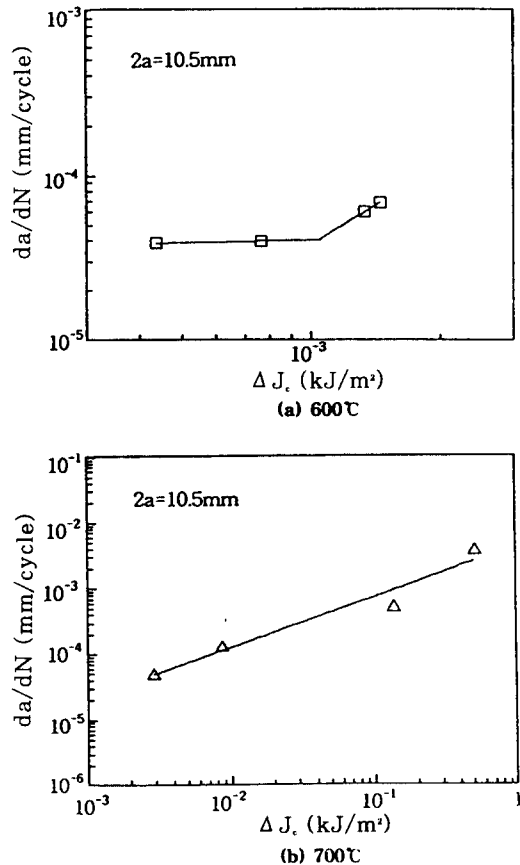


Fig. 8 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta J_c$  under  $\Delta J_c = 0.25\text{kJ/m}^2$



2.  $\Delta J_c/\Delta J_i$ 의 값은 하중반복속도의 감소와 균열 길이와 실험 온도 레벨의 증가에 따라 그 값이 현저하게 증가되고 이에 따라 사이클의존형에서 시간의존형균열성장거동으로의 전이를 촉진시킨다.

3.  $\Delta J_i$ 와  $\Delta J_c$ 사이의 상호작용에 의하여 균열성장거동의 전이가 일어나며 전이에 미치는 파괴역학 파라미터는 크라이프 J적분 범위  $\Delta J_c$ 이다.

## 후 기

본 논문은 1995년도 동아대학교 학술 연구비에 의하여 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- G. R. Halford, M. H. Hirschberg and S. S. Manson : "Temperature Effect on the Strain Range Partitioning Approach for Fatigue Creep Analysis ", ASTM STP 520, pp. 658-669, 1973
- N. E. Dowling : " Crack Growth during Low-Cycle Fatigue of Smooth Axial specimens", ASTM STP 637, pp. 97-121, 1977
- H. Ridell, J. R. Rice : "Tensile Cracks in Creeping Solids", ASTM STP 700, pp. 112~130, 1980
- 大路, 久保, 山河 : "SUS304鋼의 고온저사이클疲労龜裂傳ばにおける繰返し數依存形·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
- H. Tada, P. Paris and G. Irwin : "The Stress Analysis of Cracks Hand Book", Del Research Co. , pp. 88, 1973
- N. E. Dowling : "Geometry Effects and the J-integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth", ASTM, STP 601, pp. 19-32, 1976
- 小寺澤 : "材料の動クリ-ブおよび動クリ-ブ破斷強度", 日本材料試驗 第8卷 第166號, pp. 219-229, 1959
- 平 : "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
- 大路, 久保, 周, 久利 : " SUS304鋼のクリ-ブ溫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
- 小寺澤, 森 : "クリ-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
- 大路, 小倉, 久保 : " J積分および修正J積分の簡便式に關する檢討", 日本機械學會論文集, 第47卷, 第416號, pp. 400-405, 1981
- 平, 大谷, 北村, 山田 : "クリ-ブ疲労重疊下のき裂傳ばに關するJ積分による檢討", 材料, 第28卷, 第208號, pp. 414-420, 1977
- 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
- R. Ohtani, T. Kitakawa : "Crack Propagation Behavior and Fatigue Life under Creep-Fatigue Interaction Condition", Role of Fracture Mechanics in Modern Technology, pp. 353-367, 1987