

<論 文>

## SUS 304 鋼의 크리이프 溫度領域에 관한 時間依存型 및 사이클依存型 疲勞크랙傳播의 遷移<sup>†</sup>

劉 憲 --\* · 周 原 植\*\*

(1985年 4月 1日 接受)

### Transition from Cycle-Dependent to Time-Dependent Fatigue Crack Propagation at Creep Temperature of SUS 304 Steel

Heon Il Yoo and Won Sik Joo

**Key Words:** Fracture Mechanics(파괴역학), Creep-Fatigue Interaction(크리이프·피로상호작용), Crack Propagation(크랙전파), Modified  $J$  Integral(수정  $J$  적분), Cycle-Dependent(사이클의존형), Time-Dependent(시간의존형)

#### Abstract

The low-cycle fatigue crack growth behavior of SUS 304 Stainless steel was investigated at 650°C by the nonlinear fracture mechanics.

Crack Propagation can be separated into cycle-dependent and time-dependent, the former is correlated with  $\Delta J$ ,  $J$ -integral range and the latter is correlated with  $J$ , modified  $J$  integral.

Transition from cycle-dependent to time-dependent crack growth was successfully predicted using the  $\beta$  hypothesis, which was proposed by the authors on the basis of an analysis on the interaction of elastic and creep strain.

To investigate the reliability of  $\beta$ -hypothesis, experimenting by the change of stress-level, stress rate and frequency, following conclusions were obtained.

(1) High temperature fatigue crack propagation was separated into cycle-dependent and time-dependent.

(2) Transition of crack propagation was predicted by  $\Delta J_c/\Delta J_f$  or  $\beta$ .

(3) Lower limit in cycle-dependent crack propagation was obtained.

#### 1. 序 論

크리이프가 무시되지 않는 高溫域에서는 疲勞損傷만이

<sup>†</sup>大韓機械學會 '84年度 秋季學術大會(11.10)에서 發表

\* 正會員, 國民大學校 工科學 機械工學科

\*\* 正會員, 東亞大學校 工科學 機械工學科

아니고 크리이프 損傷도 存在하게 된다.

疲勞損傷은 슬립밴드(slip band)에 集中되는 反復塑性變形이 原因이 되어 사이클依存型으로 進行되고, 크리이프損傷은 溫度上昇에 기인된 粒界變形이 原因이 되어 粒界에 쉐기형 또는 원형보이드(void)의 發生, 成長 合體에 의하여 時間依存型으로 進行한다고 생각된다.

이와같이 전혀 다른 損傷이 共存하면서 同時에 進行

할 때 이들 두 損傷을 간단히 分離할 수 있을 것인가, 할 수 있다면 양자사이의 相互作用은 없을까, 損傷의 蓄積은 어떻게 되며, 破損은 어떤 過程으로 決定될까 등 많은 問題가 남는다.

다행스럽게도 最近高溫強度의 分野에서 크랙材의 強度가 주목을 모으고 있고, 그 중에서도 크랙材의 高溫低사이클 疲勞크랙傳播에 관한 問題는 工業적으로도 重要하며 研究報告도 增加하고 있다.

이 研究報告들에 의하면 平滑材에 있어서 스트레인 範圍分割法과 같이 每回反復된 破壞力學 變數를 사이클依存型의 成分과 時間依存型의 成分으로 分離한뒤, 彈塑性破壞力學을 適用하여 크랙傳播學動을 사이클依存型과 時間依存型으로 分離하였으며, 또 사이클依存型 크랙傳播速度는 常溫의 低사이클疲勞의 경우와 같이  $J$ 積分範圍  $\Delta J_f$  로, 그리고 時間依存型 크랙傳播速度는 修正  $J$ 積分  $J'$ 에 의해 一價函數의 形式으로 表示되었다<sup>(1,2)</sup>.

사인應力波에서도 應力比  $R \geq 0$ 인 범위에서 平滑材에 대한 크리이프變形과 破壞의 問題를 動크리이프문제라 하고, 靜크리이프 試驗結果에서 動크리이프變形 및 破斷수명을 推定하는 方法이 1960년대에 처음으로 確立되었다<sup>(3)</sup>.

大谷등<sup>(4)</sup>은  $R \geq 0$ 인 영역에서 사인應力波의 크랙傳播를 動크리이프法을 이용하여 高應力下에서 얻은 결과에서는 時間依存型이 된다고 報告하고 있다.

그러나 大路<sup>(5)</sup>등은 사다리꼴應力波이긴 하지만 高溫低사이클 疲勞實驗에서  $R \geq 0$ 인 영역에서도 實驗條件에 따라 사이클依存型 크랙傳播와 時間依存型 크랙傳播가 共存하고 있음을 보고하였다.

그렇다면 사이클依存型 크랙傳播가 나타날 가능성이 있고, 負荷條件이 다르긴 하나 大谷등과 大路등의 實驗結果는 명백한 모순을 가진다.

또 이들은 反復應力에 의한 크랙先端近傍의 小規模 크리이프現象의 理論的인 解析結果<sup>(6)</sup>를 기초로 하여, 크랙전파거동이 사이클依存型에서 時間依存型으로의 遷移條件으로 다음식을 提案했다.

$$\beta = (n+1) \cdot J'_a \cdot t_2 / (\Delta K^2 / E) \quad (1)$$

여기서  $n$ : 크리이프 指數

$J'_a$ : 定常크리이프下의  $J'$ 의 解析值

$\Delta K$ : 應力擴大係數範圍

$E$ : 세로彈性係數

이  $\beta$  값은 遷移를 豫測하는 有用한 값으로 實證되었다<sup>(5)</sup>.

또 이들은 사이클依存型과 時間依存型이 共存할 때,

이 두 종류의 크랙傳播거동을 분리하기 위해  $\beta$  값으로 實驗點들을 추적하여 각 거동의 대체적인 범위 즉 밴드를 찾아내었다.

따라서 以上과 같은 研究現狀을 背景으로 應력비  $R \geq 0$ 인 사인應力波에서도 사이클依存型 크랙傳播가 共存하는가, 共存한다면 그 遷移를 결정짓는 條件을 구하기 위해, 代表的인 高溫用 材料인 SUS 304 鋼을 이용하여 온도  $650^\circ\text{C}$ , 大氣中에서 反復速度  $\nu$ , 應力比  $R$ , 應력레벨  $\sigma_{\max 0}$  등의 實驗조건을 바꾸어 高溫低사이클 疲勞實驗을 하였다.

또 이 현상의 기초과정을 이해하는데 도움을 주기 위하여 破面觀察을 행하였다.

## 2. 實驗方法

本 實驗에 使用된 材料는 市販의 SUS 304 鋼이며, 素材는  $1050^\circ\text{C}$ 에서 溶體化 處理한 직경 20mm의 圓봉이며, 그 化學成分을 Table 1에, 상온의 機械的 性質은 Table 2에 표시하였다.

이용된 試驗片은 Fig. 1과 같은 중앙크랙 平板試驗片이며 初期크랙은 放電加工한 슬릿끝에 疲勞豫備크랙을 넣었다.

Table 1 Chemical compositions

Chemical compositions (wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.06	0.51	1.76	0.028	0.022	9.25	18.55	Bal

Solution treated at  $1080^\circ\text{C}$

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (H <sub>B</sub> )
559	70.2	76.8	128

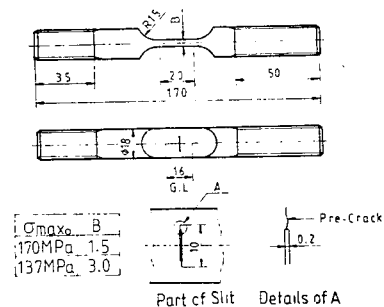


Fig. 1 Specimen geometry

Table 3 Experimental terms

R	$\sigma_{max0}$ MPa	$\sigma_{a0}$ MPa	$\nu$ Hz	Symbol	
0.0	137	68.5	1.1	○	
			0.30	⊙	
			0.008	⊛	
0.3	137	48.0	1.1	◇	
0.5		34.3		□	
0.7		20.6		▽	
0.0	170	85.0	0.080	◇	
0.3		59.5		◊	
0.5		42.5	6.0	0.080	△
			1.6		▲
			0.0080		▲

試驗片의 加熱에는 니크롬線爐를 이용했고 標點間(16mm)變位  $\delta$ 는 石英유리봉으로 自作한 크릴게이지로 測定하였다.

實驗은 荷重制御下에서 行하여졌고, 荷重의 負荷에는 電氣油壓서어보 모우터試驗機(MTS 810, 부하용량  $\pm 98.1\text{KN}$ )을 이용했다.

試驗片에는 直接 사인波의 反復인장형 荷重을 負荷했다.

本 研究에서 行했던 全實驗의 條件은 Table 3과 같으며 여기서 R은 應力比(=  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ),  $\sigma_{max0}$ 와  $\sigma_{a0}$ 는 각각 1 사이클중의 正味應力의 最大值  $\sigma_{max}$ 과 振幅  $\sigma_a$ 의 初期值이며  $\nu$ 는 反復速度이다.

크랙傳播擧動에 대한 시험편 板두께 B의 영향은 적었기 때문에 편의상  $\sigma_{max0}$ 가 137MPa의 경우는 B=3mm로,  $\sigma_{max0}$ 가 170MPa의 경우는 B=1.5mm로 했다.

### 3. 各種 力學量을 구하는법

本 實驗 範圍內的 P- $\delta$ (荷重-荷重點變位)曲線은 直線으로 표시되었기 때문에 J積分範圍<sup>(7)</sup>  $\Delta J_f$ 에 미치는 塑性成分은 무시하여 식 (2)와 같이 彈性成分만 으로 구하였다.

$$\Delta J_f = \Delta K^2 / E \quad (2)$$

그리고 修正 J積分의 實驗值  $J'_{ex}$ 는 깊은 크랙에 대

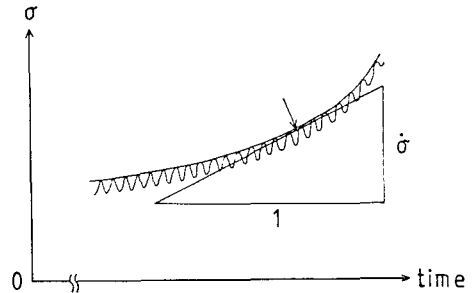


Fig. 2 Method of  $\dot{\delta}$  calculation

한 大路<sup>(8)</sup>등의 簡便式을 이용했다.

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

윗식의 正味斷面應力  $\sigma_{net}$ 는 動크리이프에 대한 等價靜應力  $\sigma_e$ 를 이용했다<sup>(9)</sup>.

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

식 (4)의  $\sigma_n$ 은 正味斷面應力의 平均值,  $\sigma_a$ 는 正味斷面應力의 振幅이며 또 n은 定常크리이프에 대한 Norton의 법칙 次,

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \quad (5)$$

에서 크리이프指數이고,  $\omega$ 는 應力反復의 角速度이다.

식 (3)의 變位速度  $\dot{\delta}$ 는 Fig. 2와 같이 1 사이클의 最大變位值의 接線 기울기로서 구하였다.

또 定常크리이프 條件下에서 修正 J積分의 解析值  $J'_a$ 는 大路등이 提案한 다음식으로 구했다<sup>(10)</sup>.

$$1/J'_a = 1/J'_s + 1/J'_d \quad (6)$$

단,  $J'_s = \pi(n\pi/2)^{(n-1)(2n-2)} \cdot a \cdot \sigma_{net} \cdot \dot{\epsilon}_{net}$ .

$$J'_d = [4\pi / \{(\pi^2 - 4) \sqrt{n}\}] \cdot b \cdot \sigma_{net} \cdot \dot{\epsilon}_{net}$$

여기서 a는 크랙길이의 1/2, b는 ligament 길이며  $\dot{\epsilon}_{net}$ 는  $\sigma_{net}$ 가 작용할 때 定常크리이프 스트레인속도이다.

그리고  $\sigma_{net}$ 는 식 (4)중의 n 대신 (n+1)로 치환한 等價靜應力을 이용하여  $\dot{\epsilon}_{net}$ 의 계산에 이용했다.

### 4. 實驗結果 및 考察

4.1.  $\Delta J_f$  및  $J'_{ex}$ 에 의한 크랙傳播速度의 整理  
크랙傳播速度  $da/dN$ 을 J積分範圍  $\Delta J_f$ 로 정리한 것을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 점선은 사다리꼴 荷重波形에서 사이클依存型 크랙傳播를 보였던 밴드이며, 실선은 이 밴드의 中心線이다<sup>(6)</sup>.

$\sigma_{max0} = 137\text{MPa}$ 의 경우, 應力振幅이 크고 反復速度가 빠른 ○표(R=0,  $\nu = 1.1\text{Hz}$ )는 밴드속에 들어가며

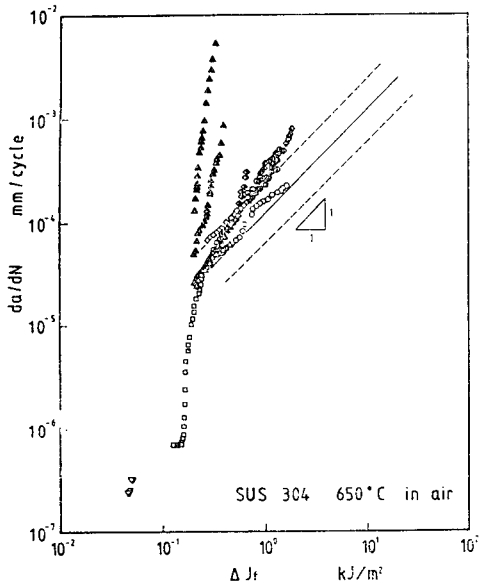


Fig. 3 Crack propagation rate plotted against experimental value of  $J$  integral range,  $\Delta J_r$

경사도가 거의 1에 일치하나, 反復速度를 다소 낮추거나 (○, ●표), 應力振幅이 적어지면 (◇표) 크랙길이 길어질때의 實驗點들은 밴드를 벗어난다. 그러나 짧은 때는 밴드 속에 들어있다. 따라서 크랙길이 짧을 때의 크랙傳播速度  $da/dN$ 은 대개  $\Delta J_r$ 로 整理될 수 있다고 생각된다.

그러나 이 3가지의 경우에는 破斷直前に 리거먼트 (ligament) 길이가 적어져  $\sigma_{net}$ 가 크게 되고 이 때문에 應力依存性이 강한 時間依存型 크랙傳播를 보이게 되어서 實驗點은 사이클依存型 크랙傳播特性을 보이는 밴드를 벗어날려는 傾向을 보이고 있다. 이 경향은 反復速度가 낮을수록 현저하게 되고, 實驗點은 실험개시 直前부터 밴드를 벗어날려는 傾向이 많다.

응력레벨  $\sigma_{max0}$ 가 170MPa로 높아지면 반복속도  $\nu = 0.08\text{Hz}$ 의 경우,  $R=0$ (◇표),  $R=0.3$ (◆표)의 實驗點은 크랙길이 비교적 짧은때에 밴드를 벗어난다.

특히  $\sigma_{max0}=170\text{MPa}$ ,  $R=0.5$ ,  $\nu=0.08\text{Hz}$ (▲표) 및  $\nu=0.008\text{Hz}$ (▲표)의 경우에는 실험초기부터 대부분 급격히  $da/dt$ 가 상승하는 경향을 보이나 反復速度에 대한 依存性은 위의 두 경우와 같다.

反復速度가 빠른 1.6Hz,  $R=0.5$ (△표)의 경우에는 쏘크랙길이에 대해 實驗點은 거의 밴드내에 들어가고,  $\nu$ 가 더욱 빠른 6.0Hz,  $R=0.5$ (△표)로 될 경우에는 거의 사다리꼴의 사이클依存型 크랙傳播速度 特性線의 주위에 集中하고 있다.

以上の 경향은 大谷<sup>(5)</sup> 등의 사다리꼴波形에서의 結果와 일치한다.

따라서 사다리꼴 荷重波形下的 사이클依存型 크랙전파의  $da/dN-\Delta J_r$  관계 즉 점선중에 대개 들어간 實驗點은 사이클依存型 크랙전파를 보이고 있다고 推定된다

大谷<sup>(4)</sup> 등은 平均應力을 重疊한 사인荷重波形을 이용한 低사이클 疲勞試驗을 행하여, 實驗結果는 거의 時間依存型 크랙전파를 보인다고 보고하고 있다. 그렇다면 본 實驗의 結果는 反復荷重 條件에 의해서는 명백히 사이클依存型 크랙전파가 되는 領域이 存在한다는 것을 보이고 있어 大谷 등의 結果와는 一致하지 않는다.

Fig. 3에서  $R=0.5$ ,  $\sigma_{max0}=137\text{MPa}$ ,  $\nu=1.1\text{Hz}$ (□표)의 경우는 初期의 크랙전파速度가  $10^{-6}\text{mm/cycle}$  이하의 극히 적은값을 가진다. 또 初期에는  $\Delta J_r$ 에 대해 크랙전파속도는 一定値를 보인후, 크랙전파속도는 急激히 증가하고 그 뒤 크랙길이가 어느 一定値로 뒀을 때의 實驗點은 사다리꼴波의 사이클依存型 크랙전파 特性밴드內에 들어간다. 그러나 應力比  $R$ 을 다시 올린  $R=0.7$ ,  $\sigma_{max0}=137\text{MPa}$ ,  $\nu=1.1\text{Hz}$ (▽표)의 경우에는 크랙전파속도가  $3 \times 10^{-7}\text{mm/cycle}$  정도로 더욱 적다.

이 現象은 常溫에서 疲勞크랙전파의 下限界現象과 類似한 것으로 생각되어져 이 領域에서는  $\Delta J_r$ (혹은  $\Delta K$ )가 본 시험편의 사이클依存型 크랙전파 下限界値를 밑돌고 있거나 接近하여 이런 現象이 일어났다고 생각되어진다.

다음에는 修正  $J$ 積分의 實驗値  $J'_{ex}$ 를 橫軸에, 단위

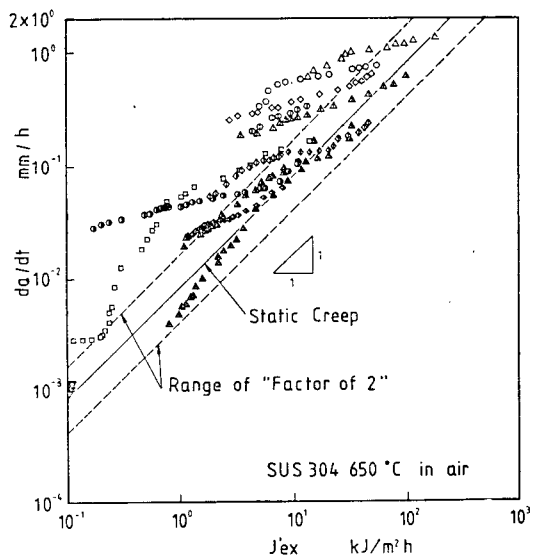


Fig. 4 Crack propagation rate plotted against experimental value modified  $J$  integral  $J'_{ex}$

시간당의 크랙전파속도  $da/dt$  를 縱軸에 잡고 實驗值를 정리한 것이 Fig. 4 이다.

그림 중의 점선은 시간依存型 크랙傳播를 보였던 靜크라이프 實驗結果<sup>(11)</sup>의 特性밴드이며 실선은 이 밴드의 中心線이다.

그림에서 實驗點은 左측에서 점점 右上으로 밴드幅內로 진입한후 대개 경사 1의 實線, 즉 時間依存型 크랙傳播特性線을 따라 變化하고 있다.

이 傾向은 反復速度가 낮은  $\nu=0.08\text{Hz}$ ,  $\sigma_{\max}=170\text{MPa}$ ,  $R=0.5$ (△표)와  $\nu=0.08\text{Hz}$ ,  $\sigma_{\max}=170\text{MPa}$ ,  $R=0.3$ (◇표),  $\nu=0.008\text{Hz}$ ,  $\sigma_{\max}=170\text{MPa}$ ,  $R=0.5$ (▲표),  $\nu=0.08\text{Hz}$ ,  $\sigma_{\max}=137\text{MPa}$ ,  $R=0$ (⊙표),  $\nu=0.08\text{Hz}$ ,  $\sigma_{\max}=170\text{MPa}$ ,  $R=0$ (◇표)의 5 가지중 3 번째가 특히 명백하다. 다른 條件이 같다면, 反復速度  $\nu$  가 낮을수록, 應力比  $R$  이 클수록, 應力레벨  $\sigma_{\max}$  가 크게 될수록 빠르게 靜크라이프 特性에 접근하는 傾向을 보인다.

그리고 Fig. 3 에서 사이클依存型 크랙傳播特性의 밴드에서 윗쪽으로 벗어난 實驗點은 Fig. 4 의 時間依存型 크랙傳播特性의 밴드幅內에서 變化하고 있다.

사다리꼴 荷重波形的 경우에서 시간의존형 크랙傳播速度를  $J_{ex}$  로 정리한 결과는 靜크라이프下의 크랙傳播特性과 일치하였기 때문에<sup>(5)</sup> Fig. 4 에서 靜크라이프 크랙傳播特性의 밴드內에서 실선을 따라 變化하고 있는 實驗點은 時間依存型 크랙傳播를 보인다고 推定할 수 있다.

또  $R=0.5$ ,  $\sigma_{\max}=137\text{MPa}$ ,  $\nu=1.1\text{Hz}$ (□표)의 경우에서는 다른 경우와 동일하게 수평으로 밴드에 접근하여 밴드內에 들어가나, 곧 크랙전파가 급격히 增加하다가 크랙길이가 어느정도 길어지면 크랙전파 속도는 靜크라이프의 밴드 윗쪽에 위치하고 實驗點은 1 보다도 적은 경사로 또다시 밴드에 접근하고 그리고 밴드內에 들어오는 複雜한 變動을 보이고 있다. 이와같은 특이한 거동의 原因은 不明이지만 水平에 가까운 적은 기울기로 밴드에 접근하는 狀態는 사다리꼴波에서 사이클依存型 크랙전파를 보인 典型的인 特徵과 일치한다.

따라서 □표 및 ▽표( $\sigma_{\max}=137\text{MPa}$ ,  $R=0.7$ ,  $\nu=1.1\text{Hz}$ )의 實驗點만을 제외한다면 Fig. 3 에서 밴드外의 點은 Fig. 4 의 밴드內에 들어가며, Fig. 4 에서 밴드外의 點은 대개 Fig. 3 의 밴드內에 들어가고 있어 大略<sup>(5)</sup>의 結果와 잘 一致하고 있다.

따라서 Fig. 3 을 참조로 할 때 밴드內의 과정을 사이클依存型 크랙전파과정이라고 解釋해도 큰 無理는

없다고 생각되어진다.

그러면  $\sigma_{\max}=137\text{MPa}$ ,  $\nu=1.1\text{Hz}$ ,  $R=0.5$ (□표) 및  $R=0.7$ (▽표)의 경우를 檢討한다.

□표에서 크랙길이는 짧은 초기 크랙전파의 경우는 前述한것 같이  $\Delta J_I$  가 사이클依存型 크랙전파의 下限界以下의 領域에 들어갔다고 한다면 사이클依存型 크랙전파는 생기지 않을 것이다.

따라서 값은 적으나 시간의존형 크랙전파가 나타난다  $R=0.7$ (▽표)의 경우는 實驗初期의 實驗點은 Fig. 3 에서 사이클依存型 크랙전파의 매우 아래쪽에 있으나, Fig. 4 에서는 靜크라이프 크랙전파特性을 보이는 實線을 中心으로 밴드幅內에 모이는 것은 위의 이론을 支持한다고 생각할 수 있다.

다시 □표의 實驗點에 대해서는 시간依存型 크랙전파에서 크랙길이가 길어지면  $\Delta J_I$  는 그 限界值를 넘어서 사이클依存型 크랙전파가 시작된다고 생각되고 그것도 Fig. 3 에 있어서, 實驗點의 급격한 상승뒤 곧 사이클依存型 크랙전파特性이 出現한다.

또 Fig. 4 에서는 일시 時間依存型 크랙전파特性의 밴드幅에 들어간 實驗點은 上方으로 올라가 사이클依存型 크랙전파의 特性이 된다.

그러다가 또 다시 時間依存型 크랙전파의 特性밴드內에 접근하는 傾向을 보이고 있다고 解釋된다.

#### 4.2. 사이클依存型 및 時間依存型 크랙 傳播의 分離와 遷移條件

前節에서 얻었던 사이클依存型 및 時間依存型 크랙傳播의 尙방이 존재한다는 것을 立證시키기 위해  $\sigma_{\max}=137\text{MPa}$ ,  $R=0$ , 및  $\sigma_{\max}=170\text{MPa}$ ,  $R=0.5$  두 경우에 대한  $da/dt-\nu$  를 整理한 것이 Fig. 5 의 (a)와 (b)이며 ⊕, ⊙, ○표는 리저먼트길이  $2b$  가 5, 7, 8mm 일 때의 實驗值이다.

Fig. 5 의 (a)에서 反復速度  $\nu$  가 큰 範圍에서는  $da/dt$  는  $\nu$  에 거의 비례하여 사이클依存型 크랙전파를 보이고 있다. 또 Fig. 5 의 (b)에서는  $\nu$  가 적으면  $\nu$  에 무관하게  $da/dt$  는 一定한 값이 되며 時間依存型 크랙傳播를 보인다.

또 Fig. 5 에서 사이클依存型 크랙傳播라고 判定한 實驗點은 Fig. 3 의 점선內에, 그리고 時間依存型 크랙전파라고 判定한 實驗點은 Fig. 4 의 점선內에 들어있어 前節의 考察과 一致하고 있다.

이상의 結果를 給合하면 時間依存型만 나타났다면  $R \geq 0$  의 사인荷重波形에 대해서도 實驗條件인 反復速度  $\nu$ , 應力比  $R$ , 應力레벨  $\sigma_{\max}$  를 잘 選擇하면 사이

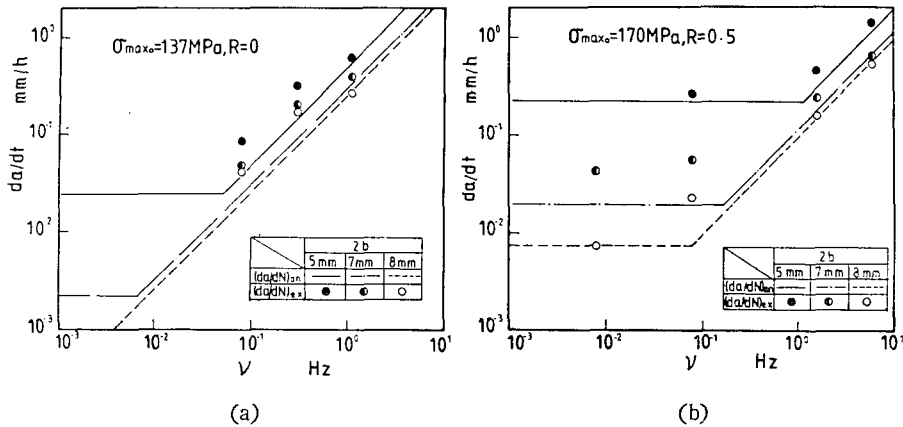


Fig. 5 Frequency dependence of the crack propagation

클 의존형 및 시간 의존형의 양쪽이 나타난다는 것을 알 수 있다.

다음에는 사이클 의존형 크랙전파와 시간 의존형 크랙전파의 遷移條件에 대하여 考察을 하여 본다.

前節의 結果에서 사인應力波에 있어서 사이클 의존형 크랙전파속도는 사다리꼴 應力波<sup>(5)</sup>에서 사이클 의존형 크랙전파속도와  $\Delta J_I$ 의 관계, 즉

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

으로 표시할 수 있다.

그리고 식 (7)에 식 (2)의  $\Delta J_I$ 를 대입하여 얻어진 값을  $(da/dN)_s$ 로 표시한다. 또  $(da/dN)$ 을  $(da/dt)$ 로 換算은  $\nu \cdot (da/dN) = (da/dt)$ 로 주어지므로 식 (7)은 시간基準의 사이클 의존형 크랙傳播速度로 표시된다. 즉,

$$(da/dt)_s = 1.2 \times 10^{-4} \Delta K^2 \cdot \nu / E \quad (8)$$

한편 靜크리이프<sup>(11)</sup>의 크랙傳播速度  $da/dt = J'_{ex}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$(da/dt)_c = 8.0 \times 10^{-3} J'_{ex} \quad (9)$$

또  $J'_{ex}$ 와  $J'_a$ 가 근사한 값을 보인다면 식 (9)는 아래와 같다.

$$(da/dt)_c = 8.0 \times 10^{-3} J'_a \quad (10)$$

前節에서 사이클 의존형 크랙전파속도는 식 (8)로 시간 의존형 크랙전파속도는 식 (10)으로 표시된다.

Fig. 5의 직선들은 식 (8)과 식 (10)에서 사이클 의존형 크랙傳播速度  $(da/dt)_s$ 와 시간 의존형 크랙傳播速度  $(da/dt)_c$ 를 평가하여 이들 중 큰쪽이 크랙전파속도로써 나타난다고 생각했을 때의 結果를 참고로 한 것이다.

Fig. 5의 實驗點은 대개 직선상에 있고,  $(da/dt)_s$ 와  $(da/dt)_c$ 의 양쪽이 동일할 때 遷移가 생긴다는 것

이 된다.

식 (8)과 식 (10)을 동일하다고 놓으면 遷移條件으로서 다음식이 얻어진다.

$$\Delta J_c / \Delta J_I = 0.015 \quad (11)$$

여기서

$$\Delta J_c = \Delta J'_a / \nu = J'_a \cdot t_c \quad (12)$$

이며,  $t_c$ 는 應力反復 1사이클의 時間이고,  $\Delta J_c$ 는 1사이클당의  $J'_a$ 의 累積值이다.

사다리꼴 荷重波形에서 遷移는 식 (1)로 定義되었으며  $\beta$ 가 약 0.08로 됐다고 大路등은 報告하고 있다<sup>(5)</sup>.

本 實驗에서  $n=7.19$ 이므로 식 (1)을  $\Delta K^2/E = \Delta J_I \cdot J'_a \cdot t_c = \Delta J_c$ 로 바꾸어 식 (11)에 대입하면  $\beta=0.12$ 가 유도된다.

따라서 本 實驗의 範圍內에서는  $\Delta J_c / \Delta J_I$ 의 基準條件은 大路등이 提議한  $\beta$ 值을 基準으로 하는 것과 等價라고 해도 좋으므로 어느 쪽을 이용해도 一致한다는 것을 알 수 있다.

또 이들 식 (11)과 식 (1)은 遷移를 記述하는가에 대한 檢證을 하기 위해 먼저  $\Delta J_c / \Delta J_I > 0.015$ 를 만족하는 實驗點을 찾아내어 Fig. 6의 (a)에, 또  $\Delta J_c / \Delta J_I < 0.015$ 를 만족하는 實驗點은 Fig. 6의 (b)에 기호로 표시했다.

참고로 사다리꼴波形에 대하여 얻었던 遷移條件  $\beta=0.08$ 에 대해서도 檢討하였다. Fig. 6의 (a)에서는 기호속에 점이 없는 實驗點까지  $\beta > 0.08$ 을 滿足한다. 또 Fig. 6의 (b)에 나타난 全實驗點은  $\beta < 0.08$ 을 滿足한다.

그리고 크랙傳播의 下限界가 問題로 된 경우에는 어느 쪽을 이용해도 遷移는 推定할 수 없었다.

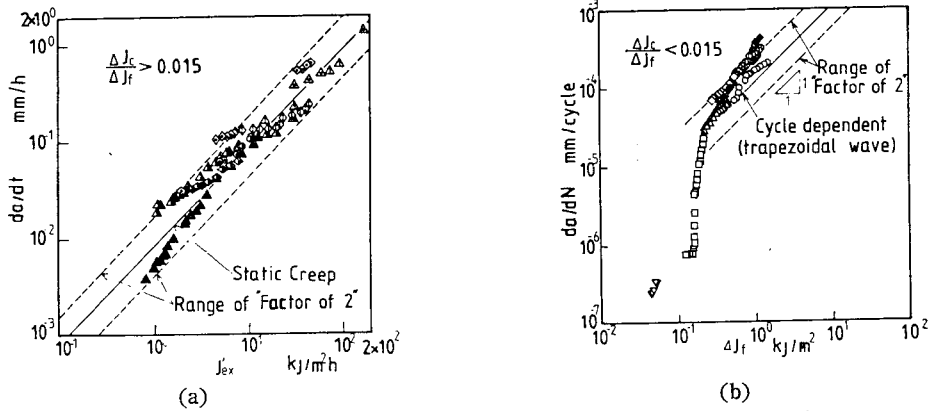


Fig. 6 Transition from cycle-dependent to time-dependent crack growth

4.3.  $J'_{ex}$ 의 增大現象

大路<sup>(6)</sup> 등은 사다리꼴의 高應力維持中에는  $J'_{ex}$ 가 荷重變動의 影響을 받아 同應力레벨의 靜크리프의  $J'_{ex}$  値보다 현저히 增加하는 것을 實驗的으로 증명했다.

Fig. 7은 縱軸에  $J'$ 의 實驗值  $J'_{ex}$ 를 잡고 橫軸에 定常크리프下의  $J'$ 의 解析值  $J'_a$ 를 잡아 서로를 비교한 것이다.  $J'_{ex}$ 는 反復速度가 높을수록 顯著한 增加를 보이거나 應力比의 影響은 적다.

$\sigma_{max0}=137\text{MPa}$ 의 경우에 비해  $\sigma_{max0}=170\text{MPa}$  쪽이 實線에 接近하였다. 그러나 破斷直前이 되면 全體的으로  $J'_{ex}$ 의 增加가 점점 크게되는 傾向을 보인다. 이것은 板두께 方向의 네킹(necking)이 생긴 때문으로 추

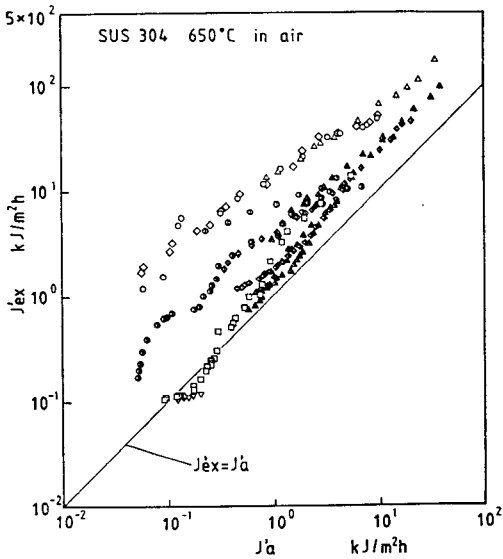


Fig. 7 Increase of modified  $J$  integral  $J'_{ex}$

정된다.

사이클依存型 크랙傳播의 下限界以下の 領域에 들어간 것으로 推定된 ( $\square$ 표 前半部,  $\nabla$ 표)의 경우에는  $J'_{ex}$ 와  $J'_a$ 는 잘 一致했다.

4.4. 破面觀察

本節에서는 走査型 電子顯微鏡을 이용하여 破面觀察을 하여 사이클依存型 크랙傳播 및 時間依存型 크랙傳播의 對應관계를 조사했다.

크랙傳播가 사이클依存型으로 되는 경우, 時間依存型으로 되는 경우, 및 中間的內지는 사이클依存型에서 時間依存型으로 遷移舉動을 보이는 경우, 한편 사이클依存型 크랙傳播의 下限界以下の 特性에서 順次的으로 依存性을 바꾸었다고 생각되는 경우, 총 4가지로 나누어 檢討를 하였다.

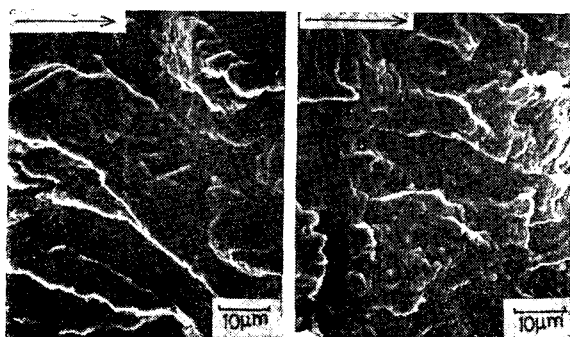
前節에서 크랙길이에 관계없이 사이클依存性을 보였던  $R=0, \nu=1.1\text{Hz}, \sigma_{max0}=137\text{MPa}$ ( $\circ$ 표) 및  $R=0.5, \nu=1.6\text{Hz}, \sigma_{max0}=170\text{MPa}$ ( $\triangle$ 표)의 觀察例를 각각 Fig. 8의 (a)와 (b)에 나타냈다.

그림중의 회살표는 크랙傳播方向을 보이고 그림밑은 각 實驗條件을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 全域에 걸쳐서 粒內破壞이고 特히 (a)의 경우에는 部分的인 스트라이에이션(striation)도 나타났다. (b)의 경우에는 비교적 平面的인 粒內破面이 관찰되어진다.

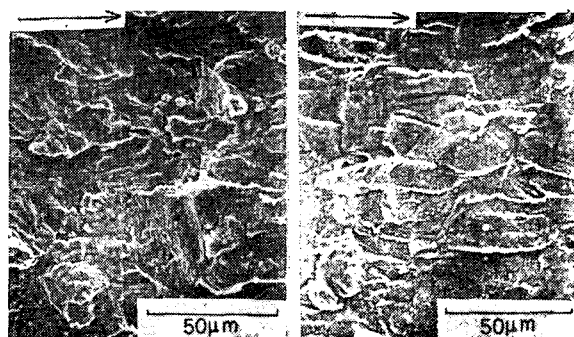
Fig. 9는 時間依存型 크랙전파를 보였던  $R=0.5, \nu=0.08\text{Hz}, \sigma_{max}=170\text{MPa}$ ( $\triangle$ 표)의 파면사진으로 全域에 걸쳐서 粒界破面이 지배적이다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 사이클依存型 크랙전파와 時間依存型 크랙전파의 中間的인 舉動을 보이는 경우이다

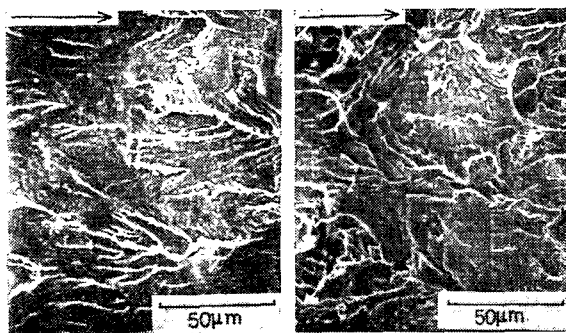
그림에서 대체적으로 粒內와 粒界의 混合破面을 보인다고 할 수 있다.



2a=9.30mm      2a=12.44mm  
 $da/dt=2.55 \times 10^{-1} \text{mm/h}$     $da/dt=6.53 \times 10^{-1} \text{mm/h}$   
 (a)  $R=0$ ,  $\sigma_{\max 0}=137 \text{MPa}$ ,  $\nu=1.1 \text{Hz}$ (C)

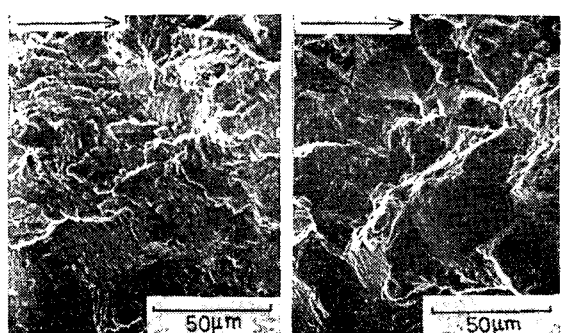


2a=9.99mm      2a=10.74mm  
 $da/dt=2.80 \times 10^{-1} \text{mm/h}$     $da/dt=3.14 \times 10^{-1} \text{mm/h}$   
 (a)  $R=0.3$ ,  $\sigma_{\max 0}=137 \text{MPa}$ ,  $\nu=1.1 \text{Hz}$ (◇)



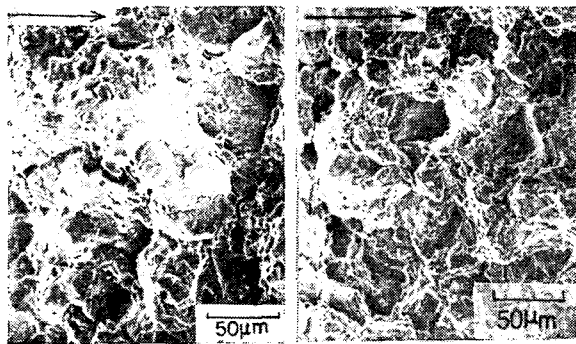
2a=10.59mm      2a=12.86mm  
 $da/dt=2.10 \times 10^{-1} \text{mm/h}$     $da/dt=6.14 \times 10^{-1} \text{mm/h}$   
 (b)  $R=0.5$ ,  $\sigma_{\max 0}=170 \text{MPa}$ ,  $\nu=1.6 \text{Hz}$ (△)

Fig. 8 SEM fractographs of fracture surface to cycle-dependent crack propagation



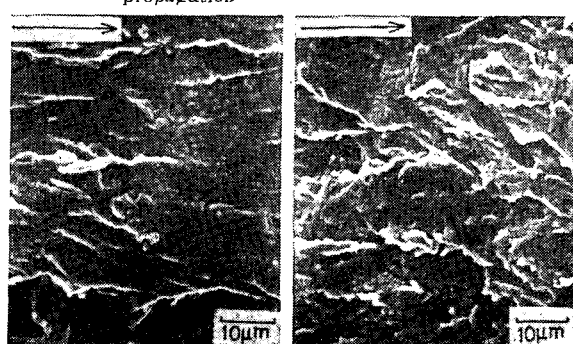
2a=9.57mm      2a=11.08mm  
 $da/dt=7.06 \times 10^{-2} \text{mm/h}$     $da/dt=1.20 \times 10^{-1} \text{mm/h}$   
 (b)  $R=0$ ,  $\sigma_{\max 0}=170 \text{MPa}$ ,  $\nu=0.08 \text{Hz}$ (◇)

Fig. 10 SEM fractographs of fracture surface to time-dependent and cycle-dependent crack propagation



2a=9.98mm      2a=10.53mm  
 $da/dt=2.45 \times 10^{-2} \text{mm/h}$     $da/dt=5.47 \times 10^{-2} \text{mm/h}$   
 $R=0.5$ ,  $\sigma_{\max 0}=170 \text{MPa}$ ,  $\nu=0.08 \text{Hz}$ (C)

Fig. 9 SEM fractographs of fracture surface to time-dependent crack propagation



2a=10.26mm      2a=11.76mm  
 $da/dt=2.83 \times 10^{-3} \text{mm/h}$     $da/dt=8.77 \times 10^{-2} \text{mm/h}$   
 $R=0.5$ ,  $\sigma_{\max 0}=137 \text{MPa}$ ,  $\nu=1.1 \text{Hz}$ (□)

Fig. 11 SEM fractographs of fracture surface to low-limited crack propagation



(a)의 경우에서는 그림에 나타난 관찰조건의 범위에서 크랙길이 커지면 粒內破面이 증가하고 있다.

그러나 (b)의 경우에는 크랙길이 커지면 粒界破面이 증가하여 混合破面이 나타난다.

이상에서 사이클依存型을 보였던 범위에서는 粒內破面이, 時間依存型을 보였던 범위에서는 粒界破面の 비율이 높다.

實驗開始후 初期에 사이클依存型 크랙傳播의 下限界領域에 들어갔다고 생각했던  $R=0.5, \nu=1.1\text{Hz}, \sigma_{\max}=137\text{MPa}$ ( $\square$ 표)의 경우에는 Fig. 11에 보이는 것 같이 크랙전파의 初期部에서는 粒內破面이 되지만 破斷直前에는 混合破面도 나타나고 있다.

### 5. 結 論

SUS 304 鋼의 中央크랙 平板試驗片을 이용하여, 片振 및 部分片振의 사인應力波下에서 溫度  $650^{\circ}\text{C}$ , 大氣中, 疲勞크랙傳播의 實驗을 통하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

(1)  $R \geq 0$ 의 사인應力波의 경우에도 크랙傳播學動은 사이클依存型과 時間依存型으로 分離되었다.

(2)  $J$ 積分範圍  $\Delta J_I$  支配의 사이클依存型의 크랙전파속도가 修正  $J$ 積分  $J'$  支配의 時間依存型 크랙전파속도보다 큰 경우에는 粒內破壞를 보이는 사이클依存型 크랙傳播가 나타났다. 또 이들 大小관계가 逆일때는 粒界破壞를 보이는 時間依存型 크랙傳播가 나타났다.

(3) 사이클依存型 크랙傳播와 時間依存型 相互間の 遷移條件은 양 의존형크랙 전파속도를 等置한 것으로 얻은  $\Delta J_c / \Delta J_I$ 의 比, 혹은  $\beta$ 에 의하여 表現될 수 있었다.

(4)  $\Delta J_I$ 가 적은 領域,  $R=0.5, \sigma_{\max}=137\text{MPa}, \nu=1.1\text{Hz}$ 에서 사이클依存型 크랙傳播의 下限界가 나타났다.

(5) 사인應力波의 反復荷重에 있어서도 修正  $J$ 積分의 實驗值  $J'_{ex}$ 가 解析值  $J'_a$ 보다 增大하였는데, 그 現象은 應力比의 영향이 적었고  $\sigma_{\max}$ 가 큰  $170\text{MPa}$  쪽이 實線에 접근하였다.

### 參 考 文 獻

- (1) 平, 大谷, 北村, 山田, “クリープ・疲勞重疊下のき裂傳ばに關する  $J$ 積分による檢討”, 日本材料學會論文 文集, 第 28 卷 第 308 號, pp. 414~420, 1979
- (2) 小寺澤, “線形破壞力學のクリープ條件下におけるき裂傳ばへの適用”, 日本材料學會論文 文集, 第 24 卷 第 267 號, pp. 1121~1126, 1975
- (3) Koterazawa, R., and Mori, T., “Fracture Mechanics and Fractography of Creep and Fatigue Crack Propagation at Elevated Temperatures” Int. Conf. Engineering Aspects of Creep, Sheffield, IME 1, pp. 219~224, 1980
- (4) 大谷, 山田, 柏木, 松原, “304ステンレス鋼の高溫低サイクル疲勞き裂傳ば”, 日本機械學會論文 文集, 第 48 卷 第 435 號, pp. 1378~1390, 1982
- (5) 大路, 久保, 山河, 久利, “SUS304 鋼の高溫低サイ クル疲勞き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
- (6) 大路, 小倉, 久保, “クリープ變形初期のき裂先端 近傍の應力・ひずみ場と修正  $J$ 積分”, 日本材料學會 論文 文集, 第 29 卷 第 320 號, pp. 465~472, 1980
- (7) Dowling, N.E., “Geometry Effects and the  $J$ -Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth”, ASTM STP 601, pp. 19~32, 1976
- (8) 大路, 小倉, 久保, “全斷面塑性における  $J$ 積分の 簡便式とそれのクリープき裂問題への應用”, 日本機械 學會論文 文集, 第 44 卷 第 382 號, pp. 1831~1837, 1978
- (9) 小寺澤, “材料の動クリープおよび動クリープ破斷強 度”, 日本材料試驗, 第 8 卷 第 66 號, pp. 219~229, 1959
- (10) 大路, 小倉, 久保, “ $J$ 積分および修正  $J$ 積分の簡 便計算式に關する檢討”, 日本機械學會論文 文集, 第 47 卷 第 416 號, pp. 400~405, 1981