

〈論 文〉

第 3. 14

SUS 304 강의 크리프 온도역에 있어서 피로균열성장거동에 관한 연구

주원식* · 오세욱* · 허정원** · 조석수***

(1993년 4월 19일 접수)

A Study on Fatigue Crack Growth Behavior at a Creep Temperature Region in SUS 304 Stainless Steel

Won-Sik Joo, Sae-Wook Oh, Chung-Weon Hue and Seok-Swoo Cho

Key Words : High Temperature Fatigue Crack Growth(고온 피로균열성장), Cycle-Dependent Crack Growth(사이클의존형 균열성장), Time-Dependent Crack Growth(시간의존형 균열성장), J-Integral Range(J적분 범위), Modified J-Integral(수정 J적분), Creep Temperature Region(크리프 온도역)

Abstract

The high temperature fatigue crack growth behavior of SUS 304 stainless steel at 550°C and 650°C was investigated under various kinds of stress ratio and frequency in sinusoidal waveform on the basis of the non-linear fracture mechanics. The result arranging crack growth rate by modified J-integral J' showed influence of stress ratio and frequency. All the data obtained under the test at 550°C were plotted within data band of $da/dN-\Delta J_r$ relationship for cycle-dependent crack growth. On the basis of static creep and cycle-dependent data band; both time- and cycle-dependent crack growth behavior was observed under loading conditions at 650°C, but cycle-dependent crack growth behavior predominantly appeared and time-dependent crack growth behavior was little observed under loading conditions at 550°C. Fractographic examinations for fracture surface indicated that the fracture mode was generally transgranular. The stripes were found on fracture surface and each stripe was accompanied by a crack tip blunting and an abrupt increase in the load-point displacement. The J'_{an} had a validity in case of 650°C, but scarcely had it in case of 550°C.

1. 서 론

재료가 고온 하에서 반복하중을 받는 경우, 재료는 크리프손상과 피로손상을 동시에 받게 되어 크리

프-피로 상호작용에 의한 파괴를 일으킨다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 이러한 손상들은 미끄럼선에 집중되는 반복소성변형이 원인이 되어 사이클의존형으로 진행되는 피로손상과 입계변형이 원인이 되어 입계에 췌기형 또는 원형 보이드의 발생, 성장 및 합체에 의하여 시간의존형으로 진행되는 크리프손상으로 나눌 수 있다.⁽²⁾ 이러한 복합적인 손상에 의한 파괴는 환경적 조건의 실험온도 및 분위기 등과 역학

*정회원, 동아대학교 기계공학과

**정회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

***동아대학교 기계공학과 대학원

적 조건의 하중파형, 응력비 및 주파수 등에 의존한다고 알려져 있다.⁽³⁾ 따라서 정확한 수명예측을 하기 위해서는 이들의 상호작용에 의한 손상특성에 관한 연구가 필요하다.

전보⁽⁴⁾에서 온도 $T=650^{\circ}\text{C}$ 에서 여러 종류의 응력비와 반복속도에 대한 고온 저사이클 피로균열성장실험을 실시하여, 이들 역학적 조건에 따라 균열성장률이 사이클의존형을 나타내는 J 적분범위 ΔJ_f 의 지배영역과 시간의존형을 나타내는 수정 J 적분 J' 의 지배영역으로 정리됨을 보고하였으며, J_{ex} 와 J'_{an} 의 결과를 비교하고 J'_{an} 의 유용성을 기술하였다.

또한, Koterazawa 등⁽⁵⁾은 온도 $T=250, 500, 550, 650^{\circ}\text{C}$ 에서 응력비 $R=0.05$ 의 사다리꼴 파형을 이용한 고온 저사이클 피로균열성장실험을 실시하여 크리이프 영향이 적은 250, 500°C 에서 응력확대계수범위 ΔK 가 균열성장을 지배하는 역학량이고, 크리이프 영향이 많은 550, 650°C 에서는 저성장속도 영역에서 ΔK 가, 고성장속도 영역에서 최대정미단면응력 $\sigma_{net,max}$ 과 수정 J 적분 J' 이 균열성장을 지배하는 역학량임을 보고하였다.

본 실험재료인 SUS 304강은 열교환기나 과열기의 튜브, 증기라인 및 왕복운동기관의 배기 시스템 등과 같은 고온용 부재로써, 사용온도 범위는 $425\sim 870^{\circ}\text{C}$ 이다.⁽⁶⁾ 그런데 동종재료의 650°C 에 대한 피로균열전파거동에 관한 연구결과는 많지만 550°C 나 그 이하 온도에 대한 연구결과는 미비한 실정이며 특히 작동중인 기계구조물에서 나타날 수 있는 가장 일반적인 하중파형인 정현파에 대한 실험은 거의 없는 실정이다.

따라서 550°C , 정현파에서 응력비와 주파수를 변화시켜 고온 저사이클 피로균열성장실험을 실시하여 다음과 같은 사항을 검토하였다.

- ① 650°C 와 550°C 의 온도조건에서 각각의 응력비 조건 및 주파수조건에서 역학량의 비교
- ② 수정 J 적분의 실험치 J_{ex} 와 해석치 J'_{an} 을 비교
- ③ 각각의 실험조건에 대한 Fractography

2. 실험장치 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 고온 기기의 구조용 부재로써 널리 사용되고 있는 18Cr~8Ni의 오스테나이트계 스테인레스강이며, 이의 화학적 성분은

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.049	0.4	1.49	0.021	0.030	8.76	18.5	Bal.

Table 2 Mechanical properties

Temp. (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)	Young's modulus (GPa)
at room	732.59	59.6	72.2	222.9	196.3
550	391.2	48.7	65.3	—	148

Table 1에 나타내었다.

이 시험편 소재는 지름 20 mm인 둥근 봉이며 1050°C 에서 1시간 유지한 후 수냉함으로써 용체화 처리를 하였다. 용체화 처리한 재료에 대한 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

고온 저사이클 피로균열성장실험에 사용한 시험편은 중앙에 노치가 있는 CCT(center cracked tension)형 시험편이며, 형상과 치수는 Fig. 1에 표시하였다.

시험편 중앙의 슬릿은 와이어 커터(wire cutter)를 사용하여 폭 0.3 mm, 길이 6 mm로 가공하였다. 시험편의 평행부는 표면 조건의 영향을 없애고 균열의 관찰을 쉽게 하기 위하여, 샌드 페이프 #100~#1200을 이용하여 폴리싱을 하고 알루미늄 파우더를 사용하여 거울 다듬질면상태로 버핑하였다. 시험편의 예균열은 응력비 $R=0.1$, 정현하중파형

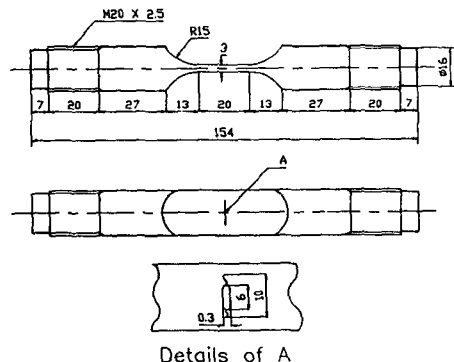


Fig. 1 Specimen configuration and dimensions (unit ; mm)

으로 슬릿 양쪽 선단에서 각각 2 mm를 도입하여 최종 예균열 길이가 약 $2a=10\text{ mm}$ 되게 하였으며, 균열의 발생까지는 최대 정미단면응력이 $\sigma=130\text{ MPa}$ 로 하였고, 하중을 단계적으로 감소시켜서 마지막으로 $\sigma=123\text{ MPa}$ 로 조절하여 본 실험 응력 레벨보다 낮은 값으로 처리하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용한 시험기는 용량이 10 tonf인 전기 유압 서보식 피로시험기 (INSTRON model 1331)이다. 고온 저사이클 피로균열성장실험은 SUS 304 강의 예민화 온도범위인 550°C (분위기 온도)에서 실시하였다. 시험편의 가열은 분할형 전기로를 사용하였고, 본 실험 전에 노 내의 분위기 온도를 안정시키기 위하여 실험온도에서 1시간 이상 유지시켰으며, 실험과정 중에 자동온도 조절장치를 이용하여 실험온도를 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 조절하였다. 실험은 하중제어방식으로 실시하였으며, 하중은 모든 시험편의 초기 최대 정미단면응력이 $\sigma=170\text{ MPa}$ 되도록 일정하게 조정하였다. 그리고 응력비 및 주파수의 영향을 조사하기 위하여 응력비와 주파수의 조건을 선택하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다.

피로균열길이는 전기로의 앞면에 관찰용 창을 설치하고, 이창을 통해서 측정정밀도가 0.01 mm인 이동식 망원현미경 (배율 20배)을 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 J' 을 산출하는데 필요한 시험편의 하중점 변위속도 δ 를 측정하기 위한 고온신장계 (high temperature extensometer system)를 나타내

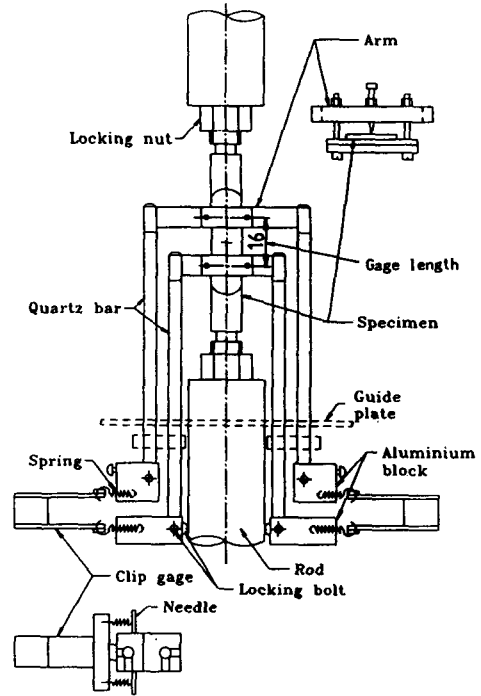


Fig. 2 Extensometer system at high temperature

는 모식도이다.

하중점 변위를 측정하는 클립 게이지 (clip gauge)는 표점거리 (gauge length)가 10 mm이고, 측정범위 (gauge range)가 $\pm 1.5\text{ mm}$ 되도록 자작하여 사용하였으며, 이것은 0.00025 mm의 측정 정밀도가 있는 캘리브레이터 (calibrator)를 이용하여 정밀도를 검사한 결과, 최대 편차가 0.0021 mm이었다.

Table 3 Test conditions

σ_{\max} (MPa)	T ($^\circ\text{C}$)	R	ν (Hz)	sym.
170	550	0.0	0.08	○
		0.3	0.08	□
		0.5	0.008	●
			0.08	■
			1.6	◇
			6.0	△
		0.57	5.0	☆
		0.7	6.0	◆

●, ■, ◆ : non-propagated specimens

3. 파괴역학량을 구하는 방법

실험결과인 균열성장속도는 최대 정미단면응력 $\sigma_{\text{net,max}}$, 응력확대계수폭 ΔK , J 적분범위 ΔJ_I 및 수정 J 적분 J' 을 이용하여 정리하였다. K 의 계산은 Tada⁽⁷⁾가 제안한 식을 이용하였다.

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

$$\text{단, } F'(2a/W) = \{1 - 0.025(2a/W)^2 + 0.06(2a/W)^4\} \sqrt{\sec(\pi a/W)}$$

ΔJ_I 는 Dowling이 제안한 식⁽⁸⁾을 이용하였으며, 본 실험범위 안에서 P - δ 곡선이 선형적이기 때문에 ΔJ_I 에 포함되는 소성성분을 무시할 수 있고, 이 경우

ΔJ_r 는 다음 식으로 계산된다.

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

수정 J 적분 실험값 J_{ex} 는 Ohji 등⁽⁹⁾이 제안한 깊은 균열에 대한 간편식으로 구했다.

$$J_{ex} = \sigma_{net} \cdot \delta \quad (3)$$

여기서, σ_{net} 는 정미단면응력이고, 본 연구에서 σ_{net} 는 동 크리프에 대한 동가정응력(equivalent static stress)이며 다음과 같다.

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

여기서, σ_a : 응력진폭

σ_m : 평균응력,

n : 크리프 지수

ω : 반복응력각속도

을 이용하였다. 하중점 변위속도 δ 는 시간 t 에 대하여 도표화한 곡선($\delta \cdot t$)의 경사로써 구하였다. 정상 크리프 조건하의 수정 J 적분의 해석치 J_{an} 은 Ohji 등⁽¹⁰⁾이 제안한 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$1/J_{an} = 1/J_s + 1/J_d \quad (5)$$

$$J_s = \pi (n\pi/2)^{(n-1)/(2n-1)} \cdot a \cdot \sigma_{net} \cdot \dot{\epsilon}_{net} \quad (6)$$

$$J_d = [4\pi / \{(\pi^2 - 4)\sqrt{n}\}] \cdot b \cdot \sigma_{net} \cdot \dot{\epsilon}_{net} \quad (7)$$

여기서, a 는 균열길이의 1/2, b 는 리가멘트 길이이다. σ_{net} 는 σ_a 를 구하는 식(3)에서 n 을 $(n+1)$ 로 치환한 아래 식으로 산출한다.

$$\sigma_{net} = \sigma_m \left[(1/2\pi) \int_0^{2\pi} \{1 + (\sigma_a/\sigma_m) \sin(\omega t)\}^{n+1} d(\omega t) \right]^{1/(n+1)}$$

$\dot{\epsilon}_{net}$ 는 $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ 에서 σ_{net} 의 응력이 작용하는 경우 정상 크리프 변형률 속도이다. 여기서, $A = 4.623 \times 10^{-27}$, $n = 10.176$ 을 이용하였다.⁽¹¹⁾

4. 실험결과 및 고찰

2.1 ΔJ_r 및 J_{ex} 에 의한 균열성장속도 정리

Fig. 3(a)는 550°C에서 단위부하 사이클당 균열 성장속도 da/dN 을 J 적분범위 ΔJ_r 를 이용하여 정리한 것이다.

그림 중에서 실선은 순수한 피로균열성장을 보이는 사이클의존형 균열성장의 실험점을 기초로 한 것이며, 파선은 이 실선을 기준으로 작도한 계수 2

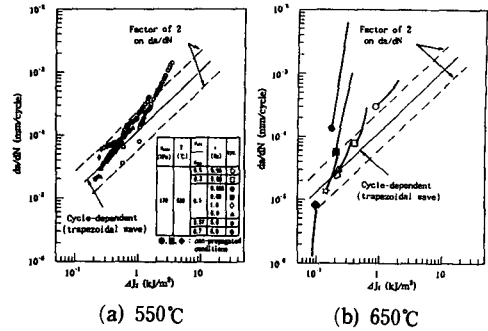


Fig. 3 Relation of crack growth rate da/dN with fatigue J -integral range ΔJ_r .

의 밴드폭을 표시한다. 실선의 $da/dN \cdot \Delta J_r$ 관계식은 다음과 같다.

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

Fig. 3(b)는 온도조건 650°C에서의 결과인 전보⁽⁴⁾의 연구결과이며 550°C의 경우와 비교하기 위하여 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)에서 사이클의존형 균열성장을 나타내기 쉬운 경우의 실험점들은 경사 약 1의 실선 주위에 집중하고 있으며, 하중조건에서 반복속도가 빠르고 응력비가 대체로 높은 실험점(◇, △, ☆)들은 전체 실험점들이 밴드폭 안에 모이고 있다. Fig. 3(b)에서도 이들 실험점들은 모두 밴드폭 안에 위치하고 있다. 따라서 위의 하중조건은 550°C와 650°C의 온도조건에서 모두 사이클의존형 균열성장으로 생각된다.

Fig. 3(a)에서 반복속도가 느리고 응력비가 낮은 실험점(○, □)들은 균열길이가 짧은 시기는 밴드폭 안에 위치하지만 균열길이가 길어짐에 따라 윗 방향으로 향하면서 밴드폭을 벗어나고 있다. Fig. 3(b)에서 이들 실험점들은 균열길이가 짧은 경우에도 거의 모든 실험점들이 밴드폭을 벗어나서 위치하고 있다. Fig. 3(b)에서 하중조건이 ●, ■, ◆인 경우는 밴드를 벗어나 있고 경사가 급격한 거동을 보이는데, 550°C에서는 이들 하중조건에서 균열이 성장하지 않았다.

Fig. 4(a)는 단위 부하시간당 균열성장속도 da/dt 와 수정 J 적분 실험치 J_{ex} 와의 관계를 나타낸 것이며 그림 중의 실선에 관한 식은 다음과 같다.

$$da/dt = 8.0 \times 10^{-3} \cdot J_{ex}$$

그림 중의 밴드는 시간의존형 균열성장의 정 크리

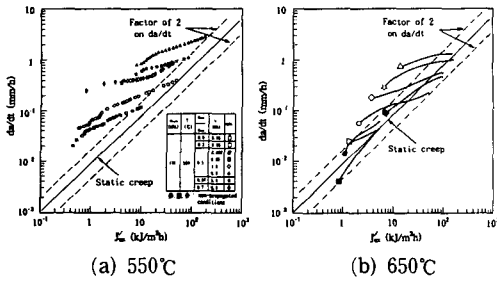


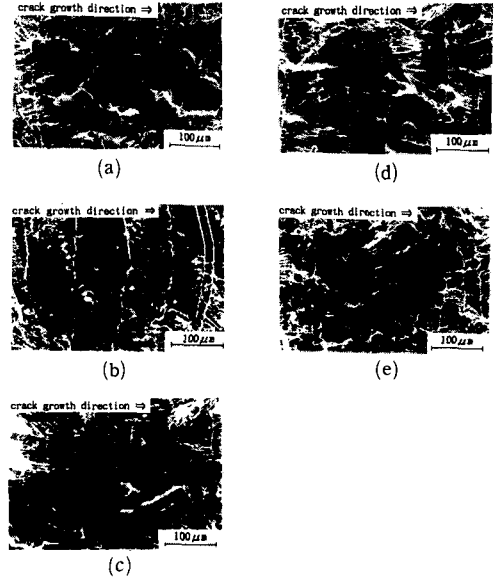
Fig. 4 Relation of crack growth rate da/dt with modified J-integral J_{ex}

프 실험결과이며, 실선은 밴드의 중심선이다. 전체적으로 실험점들은 균열성장에 따라 정 크리프 밴드의 왼쪽에서 오른쪽으로 완만하게 증가하면서 정 크리프 밴드에 접근하는 거동을 보인다. 특히, Fig. 3(a)에서 사이클의존형 균열성장의 밴드폭에서 왼쪽으로 벗어났던 실험점들을 보였던 하중조건에서 후반부의 일부 실험점들이 최종적으로 정 크리프 밴드 안에 들어가 있음을 알 수 있다. 650°C의 온도조건에서 정현파나 사다리꼴파를 기초로 한 실험(4,12)에서와 마찬가지로 밴드 안으로 들어간 실험점은 시간의존형 균열성장일 것으로 추정된다. 또한, 650°C에서 실험한 전보(4)의 연구결과인 Fig. 4(b)에 대하여, 온도조건 550°C에서 균열이 개시되지 않았던 하중조건에 해당하는 실험점들을 조사하면 실험점 모두가 균열성장개시부터 밴드폭 안에 위치하고 있고 전체 균열성장기간 동안에 정 크리프 특성과 일치하며 시간의존형 균열성장 특성을 보이고 있다. 따라서 이들 하중조건들은 550°C에서는 하한계영역이지만 650°C에서 열적활성화가 증대되었기 때문에 동일한 하중조건에서도 균열이 성장됨을 알 수 있다.

4.2 파면관찰

Fig. 5는 SEM을 이용하여 시험편의 파면을 촬영한 대표적인 사진이다.

모든 사진에서 균열성장방향에 수직하게 형성된 줄무늬(stripe)가 관찰되었는데 이는 Koterazawa(13)의 연구결과에서 보고된 바와 동일하였다. 시험편 표면에서는 이러한 줄무늬가 형성되는 위치에서 균열성장 방향에 대하여 약 45° 각도로 소성역이 형성됨을 관찰하였다. 파면상에 관찰되는 줄무늬는 하중점 변위(δ)의 급격한 증가와 균열의 둔화에 동반되는 스트레치 존(stretch zone)인 것으로 고



- (a) R=0.0, ν=0.08 Hz
da/dN=3.24 × 10⁻⁴ mm/cycle
- (b) R=0.3, ν=0.08 Hz
da/dN=2.22 × 10⁻⁴ mm/cycle
- (c) R=0.5, ν=1.6 Hz
da/dN=7.91 × 10⁻⁴ mm/cycle
- (d) R=0.5, ν=6.0 Hz
da/dN=8.0 × 10⁻⁵ mm/cycle
- (e) R=0.57, ν=5.0 Hz
da/dN=3.85 × 10⁻⁵ mm/cycle

Fig. 5 Typical fractographs for all condition at 550°C

려된다. 균열이 성장하는 형태는 균열의 둔화가 진행되면서 열적 활성화분위기에서 피로에 의하여 균열선단이 일정한 손상을 받았을 때 균열이 갑자기 성장하고 다시 성장할 시기까지 균열선단이 둔화되면서 정체되는 과정을 반복함을 알 수 있다.

파면의 형태는 전체적으로 연성 입내파괴이며, 전절까지의 논의에서 균열이 긴 경우에 시간의존형 균열성장을 나타내어 입계파괴가 관찰될 것으로 판단한 하중조건(R=0.0 ν=0.08 후반부)에서도 입내파괴 형태가 관찰되었다. 이것은 J' 지배하에서도 입내파괴가 관찰된다고 하는 Koterazawa(13)나 Ohji(14)의 보고와 일치한다.

4.3 J_{ex}와 J_{an}의 비교

Fig. 6(a)는 수정 J적분의 실험치 J_{ex}을 정상 크라이프의 가정에 기초한 수정 J적분의 해석치 J_{an}과 비교한 것이다.

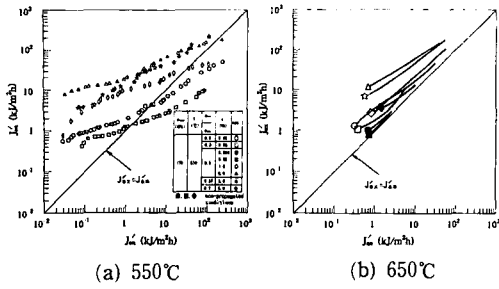


Fig. 6 Comparison of the experimental J -values with the analytical J -values

하중조건에 대한 J_{ex} 의 크기를 보면, 응력비가 동일할 경우에는 주파수가 빠를수록 J_{ex} 가 크고, 주파수가 동일한 경우에는 응력비가 낮을수록 J_{ex} 가 크게 나타난다. 일반적으로 변동 하중이 있는 경우는 J_{ex} 이 J_{an} 보다 과도적으로 크게 증대하는 현상이 지적되고 있다. 650°C에서 전보(4)의 연구결과인 Fig. 6(b)에서는 전체적으로 이러한 거동이 나타나고 있으며, 일부 하중조건에서 J_{an} 의 유용성이 나타나지만, Fig. 6(a)에서는 J_{ex}/J_{an} 의 기울기가 현저히 작아졌으며 초기에는 $J_{ex} > J_{an}$ 이지만 후반에 반대의 거동을 보이기도 한다. 이와 같이 $J_{ex} < J_{an}$ 의 현상이 나타나는 것은 초기에는 탄성 변형률이 정상상태의 크리프 변형률보다 크지만 후반에는 정상상태의 크리프 변형률이 탄성 변형률보다 커지기 때문이다.

4.4 검토

지금까지 앞절에서 기술한 결과는 온도조건 550°C의 경우는 반복속도가 느린 두 경우(○, □)의 극히 적은 부분을 제외하면, 본 실험의 모든 조건에서 사이클의존형 균열성장의 특성을 보였다. 또한, 시간의존형 균열성장으로 추정되는 부분도 파면형태는 입체파괴가 아닌 입내파괴의 형태를 보이고 있어 이 부분은 순수한 시간의존형 균열성장이라고 판단하기 어렵고, 사이클의존형에서 시간의존형으로 천이되는 초기 영역이라 생각된다.

균열성장속도를 ΔJ_I 로 정리한 경우와 J 으로 정리한 경우를 비교하면 J 은 응력비와 반복속도의 영향이 현저하게 나타나고 있지만 ΔJ_I 는 응력비나 반복속도에 관계없이 거의 일직선상에 집중하는 경향을 보인다. 즉, 본 실험조건에서 균열성장속도를 지배하는 역학인자는 ΔJ_I 임을 알 수 있다. 위의

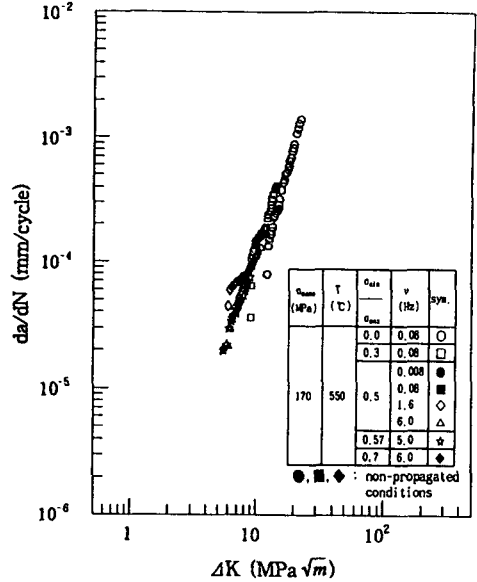


Fig. 7 Relation of crack growth rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

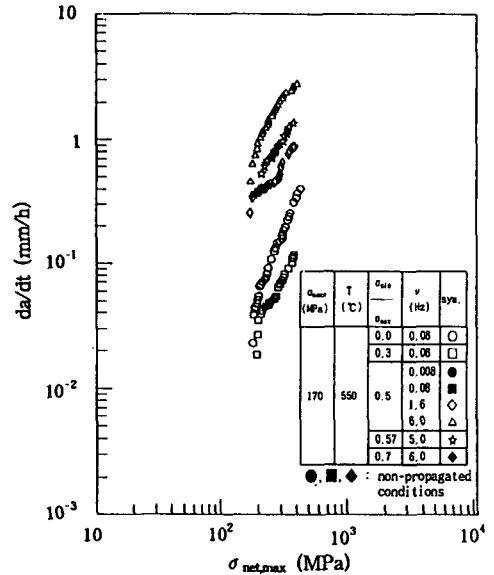


Fig. 8 Relation of crack growth rate da/dt with maximum net section stress $\sigma_{net,max}$

실험결과를 ΔK 로 정리를 할 수 있으면 ΔJ_I 에 비해서 훨씬 간편하게 균열성장속도를 정리할 수 있을 것이다. Fig. 7은 균열성장속도를 ΔK 를 이용하여 정리한 도표이다.

모든 실험점들이 일직선상에 집중하는 거동이 명

확히 나타냈다. 또한, 최대 정미단면응력 $\sigma_{net,max}$ 로 균열성장속도를 정리한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

그러나 J' 과 마찬가지로 응력비와 반복속도의 영향이 현저하게 나타나고 있다.

따라서 이들 결과를 종합하면, 본 실험조건에서 J 적분범위 ΔJ_r 와 응력확대계수 폭 ΔK 가 균열성장속도를 지배하는 역학인자임을 알 수 있다.

5. 결 론

SUS 304 강을 이용하여 550°C, 대기중, 정현하 중과형을 기초로 응력비와 주파수를 변화시켜 고온 저사이클 피로균열성장실험을 실시하여 650°C와 550°C의 온도조건에서 수정 J 적분의 실험치 J'_{ex} 와 J 적분범위 ΔJ_r 를 이용한 균열성장거동과 수정 J 적분 실험치 J'_{ex} 와 해석치 J'_{an} 의 비교 및 각각의 실험 조건에 대한 파면해석을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 균열성장속도를 수정 J 적분을 이용하여 정리한 결과 응력비와 주파수의 영향이 나타났지만, J 적분범위 ΔJ_r 로 정리한 결과 전체 데이터가 좁은 밴드 내에 모여서 550°C 본 실험 범위에서 지배역학량으로 적합하였다.

(2) 650°C에서 본 실험의 하중조건은 사이클의존형과 시간의존형 균열성장이 혼합된 결과를 보이지만, 550°C에서는 극히 일부분을 제외한 모든 실험 점들이 사이클의존형 균열성장을 나타내었다.

(3) 모든 실험조건에 대한 파면의 파면을 조사한 결과, 파면이 모두 입내파괴만을 나타내었다.

(4) J'_{ex} 와 J'_{an} 을 비교 검토한 결과, 650°C에서는 J'_{an} 의 유용성이 일부 나타났으나 550°C에서는 J'_{an} 의 유용성을 발견할 수 없었다.

후 기

본 연구는 1992년도 동아대학교 학술 연구비에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분에게 감사 를 드립니다.

참고문헌

(1) R. P. Skelton, 1983, *Fatigue at high temperature*, Applied Science Publishers, London and New York, pp. 135~185.

- (2) 劉憲一, 周原植, 1985, SUS 304鋼의 크리이프 온도領域에 關한 時間依存型 및 사이클依存型 疲勞 크랙傳播의 遷移, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第5號, pp. 539~547.
- (3) 大谷, 北村, 大南, 1986, 크리이프키裂傳ばにもとづく高温構造材料の壽命余壽命推定の基本的概念, 鐵と鋼, 第72年, 第7號, pp. 711~719.
- (4) 大路, 久保, 周, 久利, 1985, SUS 304鋼의 크리이프 온도領域における正弦波部分片振り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469號, pp. 2137~2145.
- (5) 小寺澤, 森, 1980, 疲勞・크리이프條件下의 키裂傳ばとフラクトグラフィ, 材料, 第29卷, 第321號, pp. 592~598.
- (6) ASM Committee, 1986, *Properties and Selection: Stainless steels, Tool Materials and Special Purpose Metals*, Metals Handbook, 9th ed, Vol. 3, pp. 204~206.
- (7) Tada, T., 1973, *The Stress Analysis of Crack Hand Book*, p. 88.
- (8) Dowling, N. E., 1976, "Geometry Effects and the J-Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth," *ASTM, STP 601*, pp. 19~32.
- (9) 小寺澤, 森, 1976, 크리이프키裂傳ば를 支配する 破壞力學的因子, 材料, 第26卷, 第289號, pp. 948~954.
- (10) 大路, 小倉, 久保, 1981, J 積分および修正 J 積分의 簡便式에 關する 檢討, 日本機械學會論文集, 第47卷, 第416號, pp. 400~405.
- (11) 小川, 石川, 吉澤, 木手, 和田, 1986, SUS 304鋼의 高温材料特性における豫ひずみ效果, 材料, 第35卷, 第399號, pp. 1186~1187.
- (12) 大路, 久保, 山河, 久利, 1984, SUS 304 鋼의 高温低사이클疲勞龜裂傳ばにおける繰返し數依存形 時間依存形龜裂傳ば의 分籠とその遷移條件, 日本機械學會論文集, 第50卷, 第454號, pp. 1218~1227.
- (13) 小寺澤, 西川, 森, 1978, 크리이프條件下의 키裂傳ば를 支配する 破壞力學的因子とフラクトグラフィ, 材料, 第27卷, 第292號, pp. 92~98.
- (14) 大路, 小倉, 久保 外 2名, 1984, SUS 304鋼을 이용한 크리이프 疲勞相互作用下의 키裂傳ば實驗, 材料, 第33卷, 第365號, pp. 145~151.