

◎ 論 文

SUS 304강의 하중파형에 따른 고온피로균열전파속도 및 전체하중파형의 평가방법의 연구

이 상 록* · 이 학 주* · 오 세 육** · 허 정 원*** · 임 만 배***
(1992년 1월 28일 접수)

A Study on Fatigue Crack Growth with Loading Waveform and Analysis
Method for All Loading Waveform at Elevated Temperature
in SUS 304 Stainless Steel

Sang-Rok Lee, Hak-Joo Lee, Sae-Wook Oh, Chung-Weon Hue, Man-Bea Lim

Key Words : Loading Waveform(하중파형), Elevated Temperature Low Cycle Fatigue(고온 저사이클피로), Asymmetrical Waveform(비대칭파형), Trapezoidal Waveform(사다리꼴파형), Crack Growth Rate(크랙성장속도), Modified J-integral(수정 J적분)

Abstract

The effect of loading waveform on elevated temperature low-cycle fatigue crack growth behavior in a SUS 304 stainless steel have been investigated under symmetrical triangular (fast-fast), trapezoidal and asymmetrical(fast-slow, slow-fast) waveforms at 650°C.

It was found that the crack growth rate in fast-slow loading waveform appeared to be higher a little and the crack growth rate in slow-fast loading waveform much higer than that in fast-fast loading waveform, and difference in crack growth rate between fast-slow and slow-fast waveforms nearly didn't appear in the region of $da/dN > 10^{-2}$.

The crack growth rate in the trapezoidal loading waveform with $t_h = 500\text{sec}$ appeared to be faster than that in slow(500sec)-fast(1sec).

In addition, parameter modified J-integral could be considered as useful parameter for fatigue crack growth rate in all waveforms.

The result obtained are as follow.

$$da/dN = 4.91 \times 10^{-3} (\Delta J_c)^{0.565}$$

* 정희원, 한국기계연구소 재료강도실

** 정희원, 동아대 공과대 기계공학과

*** 정희원, 동아대 대학원 기계공학과

1. 서 론

고온 구조물재료 혹은 원자력 발전소와 같은 고온 고압용 재료의 파손 및 파괴의 원인 규명은 새로운 재료개발의 기술적 자료 제공 뿐만 아니라, 인류의 생명과 재산의 보호관점에서 연구되고 있다. 고온재료는 운전의 상태에 따라서 여러가지 형태의 환경적 조건과 역학적 조건을 받게 된다.

고온재료의 피로수명은 환경적 조건의 시험 온도 및 분위기 뿐만 아니고 역학적 조건의 하중레벨과 하중파형에도 의존한다고 알려져 있다. 하중파형의 효과에 있어서 유지시간의 효과에 대한 연구는 많이 보고되고 있으나,^{1,2)} 비대칭 하중파형에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 사다리꼴 하중파형과 비대칭 하중파형의 관계에 대한 보고는 거의 찾아 볼 수 없다.

본 연구의 목적은 고온용 구조물 재료로 널리 사용되고 있는 SUS 304 스테인레스강을 이용하여, 사다리꼴 하중파형 및 비대칭 하중파형 등 여러가지 하중파형에서 고온피로균열전파 시험을 하여 사다리꼴 하중파형에서 유지시간의 효과, 비대칭 하중파형에서 하중속도의 효과 및 사다리꼴 하중파형과 비대칭하중파형의 관계에 대한 피로균열전파거동을 조사하고, 전체 하중파형의 균열전파 속도를 수정J-적분범위 ΔJ_c 로 통일적으로 정리하여 그 결과의 타당성을 검토하였다.

2. 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 시험편 재료는 직경이 22mm인 환봉으로 국내산 SUS 304 오스테나이트계 스테인레스강(austenite stainless)이며, 이의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 이 시험편 재료를 1100°C에서 1시간 유지한 후 수냉함으로써, 용체화처리를 하였다. 위의 용체화 처리한 재료의 기계적 성질을

Table 1. Chemical composition for SUS 304 stainless steel(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.072	0.50	0.68	0.026	0.013	18.0	8.36

Table 2. Mechanical properties of SUS 304 stainless steel at room temperature and 650 °C

Item Temp.	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	elong- ation (%)	Reduction in area (%)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
room	252.06	732.48	59.04	72.20	194.7	0.2751
650°C	112.03	361.38	46.07	62.19	145.97	—

Table 2에 나타내었다. 조직의 결정입경은 Hyen³⁾의 선분석법에 의하여 측정하였으며 결정입경은 87μm이다. 고온피로균열전파 시험에 사용된 시험편은 중앙에 균열이 있는 CCT형 시험편이며, 형상과 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 시험편의 중앙에

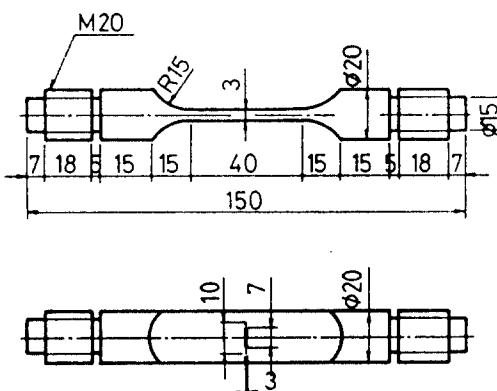


Fig. 1 Geometry and dimensions of fatigue specimen.

폭 0.3m 길이 7mm의 노치를 방전 가공한 후 wire cutting machine을 이용하여 노치 양끝에서 최소폭 0.1mm 길이 약 0.7mm의 노치를 가공하였다. 시험편의 표면은 사포 #100 - #1200을 이용하여 연마한 후 알루미늄 파우더(0.3μm)를 이용하여 경면 polishing 하였다. 표면 polishing작업 후 상온 대기 중에서 응력비 0.1인 sinusoidal파형으로 노치 양끝에서 약 0.8mm의 예비균열을 만들었다. 균열이 발생될 때까지는 최대응력확대계수를 $K_{max} = 11 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 로 하였고 균열발생 후 ASTM E647-88에 따라 하중을 단계적으로 감소시켰으며, 최종 최대응력확대계수를 $K_{max} = 7.3 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 으로 유지

하여, 본 실험 시 최초의 최대응력확대계수보다 낮은 값으로 처리하였다. 기계가공에 의한 노치 길이에 예비균열의 길이를 더한 시험초기의 균열 길이는 약 10mm였다.

3. 실험장치 및 실험조건

실험에 사용된 시험기는 용량 10tonf의 전기유압 서어보식 피로시험기(INSTRON Model 1331)이다. 고온피로전파 시험은 오스테나이트계 스테인레스강의 예민화온도 범위인 650°C (분위기 온도)의 온도로 대기중에서 실시하였다. 시험편의 가열은 분할형 전기로를 이용하였으며, 고온피로전파 실험 전에 로내의 분위기 온도를 안정시키기 위하여 650°C에서 1시간 이상 유지(soaking time)시켰으며 실험과정 중에 자동온도조절장치를 이용하여 650°C의 실험온도를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내로 유지시켰다. 하중재어 방식으로 실험을 실시하였고, 최대공칭응력 $\sigma_n = 78.4 \text{ MPa}$ ($\sigma_n = P/B \cdot W$; P =하중, B =시험편두께, W =시험편의 폭)이 되게 부하하였으며, 응력비는 $R=0.1$ 이었다. 하중파형은 사다리꼴, fast-fast, fast-slow, slow-fast 등이며, 그 구체적인 형은 Fig. 2과 같다. 크랙길이의 측정은 로의 앞면에 관찰용 창을 설치하고, 이 창을 통해서 측정정도가 0.01mm인 이동식 망원현미경(배율 20

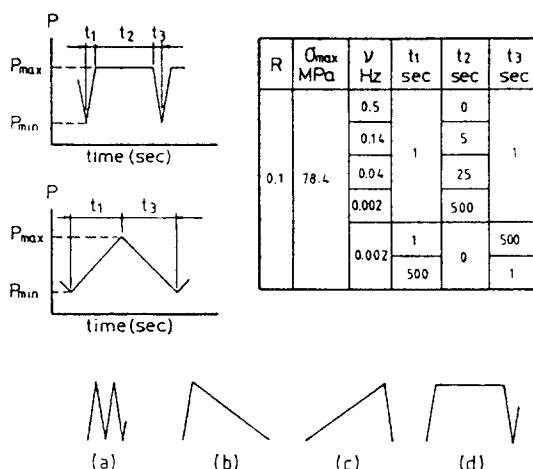


Fig. 2 Schematic illustration of loading waveforms.

배)을 이용하여 약 0.3~0.5mm 간격으로 측정하였다. 균열성장속도(da/dN)는 측정한 사이클수에 대한 균열길이의 증분에 의한 곡선의 경사로부터 결정된다. 이 데이터를 응력확대계수폭 ΔK 와 수 정J적분범위 ΔJ_c 에 대하여 정리하였다. K 의 값은 Tada's hand book⁴⁾의 식으로 평가하였으며, K 의 레벨이 소규모항복조건을 만족하는 $(4/\pi)(K_{max}/\sigma_y)^2 \leq W-a$ 의 영역안에서 실험응력을 결정하였다. ΔJ_c 의 결정은 Ohji⁵⁾ 등이 제안한 간편식을 이용하였다. [$\Delta J_c = J/v, J = \sigma_{net} \cdot \delta$ (J : modified J-integral, δ : crack center opening displacement rate, v : frequency, σ_{net} : net stress)]) 균열중앙열림변위 속도를 평가하기 위해서 측정길이(gage length)가 10mm이고 측정범위(gage range)가 $\pm 1.5\text{mm}$ 인 클립게이지(clip gage)를 자작하여 사용하였으며, 사용된 클립게이지는 0.00050mm의 정확도가 있는 캘리버레이트(calibrator)를 이용하여 정확도를 검사한 결과 표준편차가 0.0021mm이었으며, 이는 ASTM E813에서 규정하는 정확도를 만족하였다.

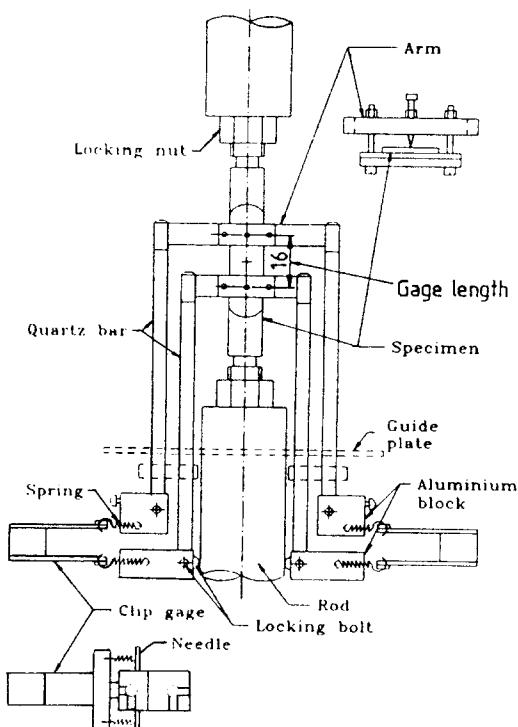


Fig. 3 High temperature extensometer system.

Fig. 3 은 고온신장계(hight temperature extensometer system)가 장착된 상태를 나타내는 모식도이다.

4. 실험결과

4. 1 사다리꼴 하중파형(trapezoidal loading waveform)의 피로균열전파거동

Fig. 4는 사다리꼴 하중파형에서 각 유지시간에 따른 피로균열전파속도(da/dN)를 응력확대계수폭(ΔK)에 대하여 정리한 것이다. 유지시간이 증가할수록 균열진전율이 증가함을 알 수 있으며, 또한 그 속도의 정도는 ΔK 가 높아지면서 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 여기서 유지시간이 길어질수록 피로균열전파속도가 빨라지는 이유는 피로의 영향과 동시에 크리아이프의 영향이 작용하기 때문이다. 즉 유지시간 중에 크리아이프의 영향이 피로균열전

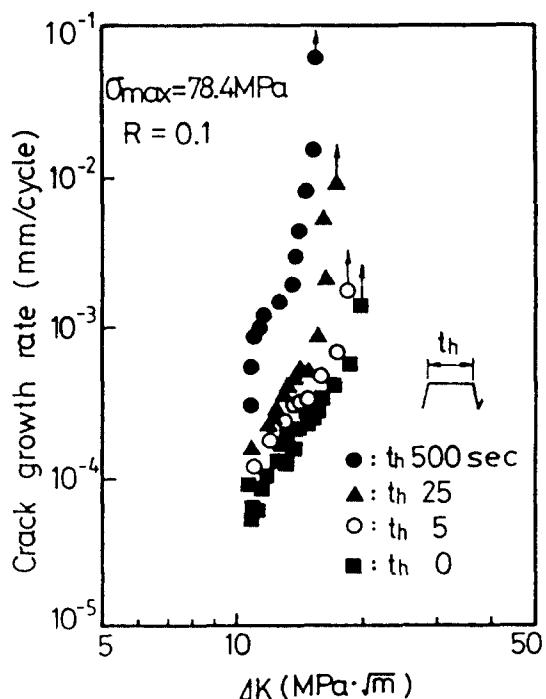


Fig. 4 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range in trapezoidal waveforms.

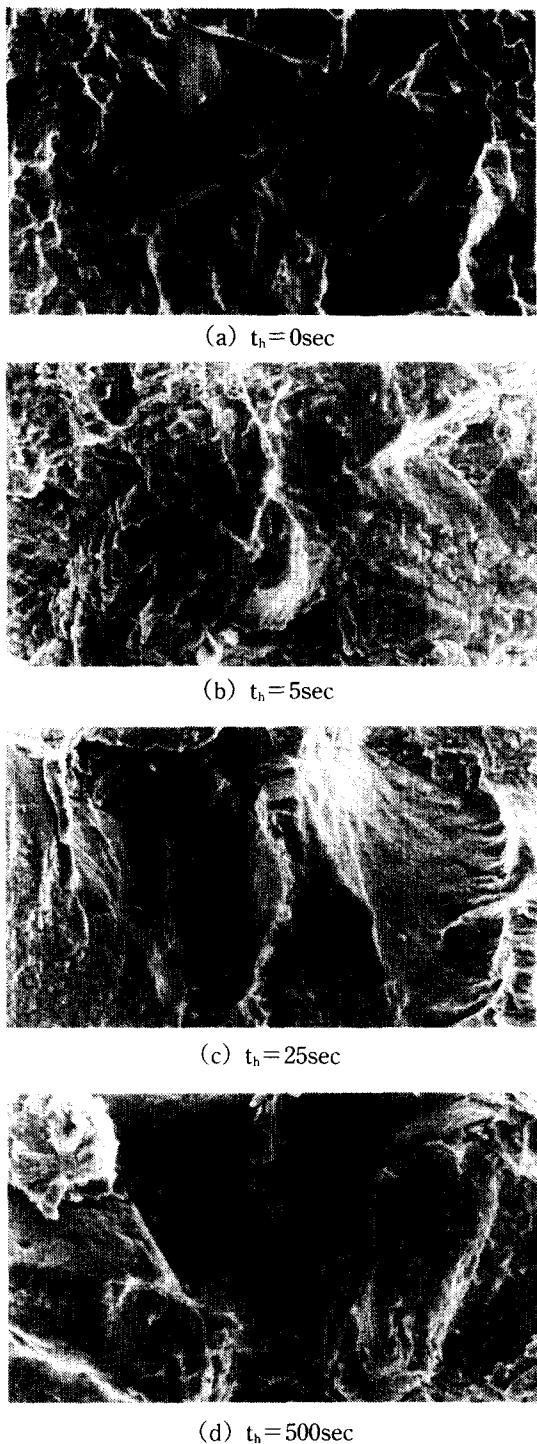


Photo. 1 The photographs for fracture surface in trapezoidal waveform.

파속도를 가속시키는 것으로 생각되며, 유지시간이 길어질수록 가속의 효과는 더욱 증대하는 것이다. Photo. 1은 사다리꼴하중파형의 각 유지시간에 대한 파면이다. (a)는 $t_h=0\text{sec}$ 인 경우이며 스트라이에이션(striation)이 보이는 전형적인 입내연성파괴의 형태를 보이고 있고, (b)는 $t_h=5\text{sec}$ 이며 (a)의 경우와 거의 비슷하지만 약간의 입계파괴형태가 나타나기 시작하면서 파면의 요철이 보이고 있다. (c)는 $t_h=25\text{sec}$ 의 경우이며 입계파괴가 뚜렷이 나타나고 입내파괴와 입계파괴가 혼재하고 있으며, (d)는 $t_h=500\text{sec}$ 의 경우이며 파면이 고온분위기에 장시간 노출되어서 산화파막이 덮여 있긴 하지만 파면이 전체적으로 입계파괴의 형태를 나타내면서 표면의 요철도 심하게 되고 있다.

4. 2 비대칭하중파형(unbalanced loading waveform)의 피로균열전파거동

Fig. 5는 fast-fast, fast-slow 및 slow-fast 하

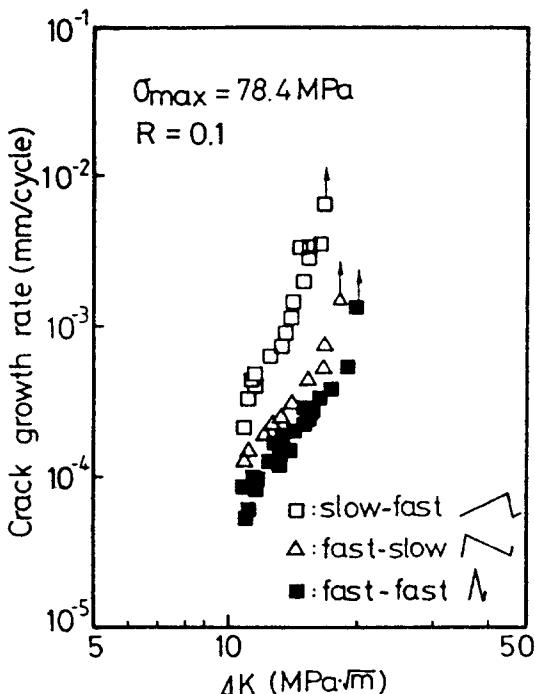
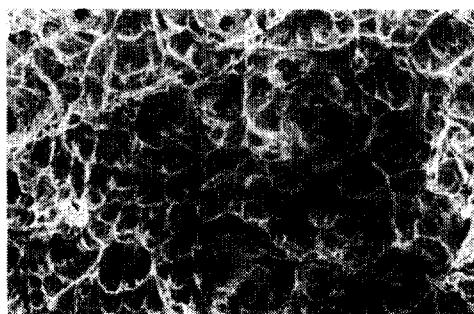


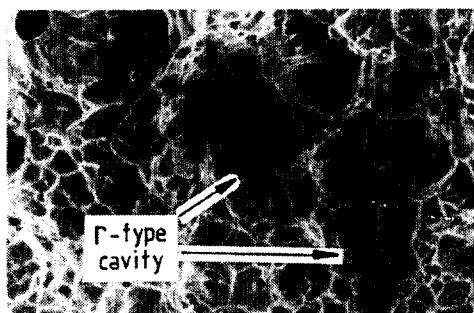
Fig. 5 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range in asymmetrical waveforms.

중파형의 피로균열전파속도(da/dN)을 응력확대계수폭(ΔK)으로 정리한 것이다. 피로균열전파속도는 slow-fast>fast-slow>fast-fast 순으로 나타나고 있으며, fast-slow 하중파형의 전파속도는 fast-fast 하중파형의 경우보다 조금 증가하였으며, slow-fast 하중파형의 경우는 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 이 전파속도의 차이는 응력확대계수폭이 증가함에 따라 증가하며, 데이타의 산포는 있지만 시험편이 파괴될 때까지 전파한 최종균열길이는 fast-fast>fast-slow>slow-fast 순서로 되었다. 이 결과는 시험편에 누적된 크리이프의 영향때문이라고 생각된다. 이것을 확인하기 위해서 파괴된 시험편의 급속 파단부를 SEM을 이용하여 관찰하였다. Photo 2는 3종류의 파형에 대한 급속파단면의 파면사진이다. 사진에서 보듯이 크리이프 손상을 관찰할 수 있으며, cavity의 형태도 r-type에서 w-type으로 전이하는 것을 알 수 있다. (a)는 단지 딥풀(dimple)파괴만 나타났으며, (b)는 딥풀 이외도 r형 캐비티(r-type cavity)가 부분적으로 나타났으며, (c)의 경우는 w형 캐비티(w-type cavity)가 아주 뚜렷이 나타났다. 피로균열전파 과정중에 피로균열의 전방에 있는 시험편의 리가멘트부(uncracked ligament region)는 크리이프 손상을 받고, 이것은 시간에 따라 누적되며, 리가멘트부의 파괴저항은 감소할 것이다. 결과적으로 최종파단부의 길이는 누적된 크리이프 손상에 의존한다. 또한, fast-slow파형의 파면은 fast-fast와 같이 스트라이에이션을 동반하는 전형적인 입내파괴를 보이는 경우와 스트라이에이션에 크리이프에 의한 r형 캐비티가 보이는 경우가 있으며, slow-fast 파형은 w형 캐비티가 지배적인 입계파괴를 보인다는 보고가 있다.⁶⁾ 각파형의 파면이 산화파막에 덮혀있기 때문에 파면을 직접적으로 관찰할 수 없었으나, Photo 2의 사진을 이용하여 이것을 간접적으로 확인하였다.

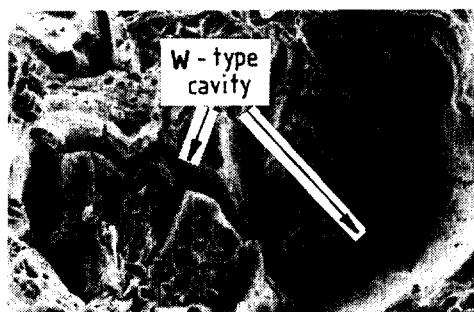
지금까지의 결과로부터 균열전파속도는 하중속도와 하중파형에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 부하쪽이든 제하쪽이든 상대적으로 저 하중속도를 갖는 fast-slow와 slow-fast파형의 균열전파속도는 fast-fast파형의 경우에 비해서 가속되었다. 또한 fast-slow의 경우는 fast-fast에 비해서 조금



(a) fast-fast



(b) fast-slow



(c) slow-fast

Photo. 2 The photographs for rapid rupture surface in fast-fast, fast-slow and slow-fast waveforms.

가속되며, slow-fast의 경우는 현저하게 가속된다. 따라서 피로균열전파속도는 제하측의 하중속도에 약간의 영향을 받으며, 부하측 하중속도에 큰 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. Fig. 6은 fast-slow와 slow-fast의 고응력화대계수폭에서 피로균열전파속도와 응력화대계수폭의 관계를 보여주

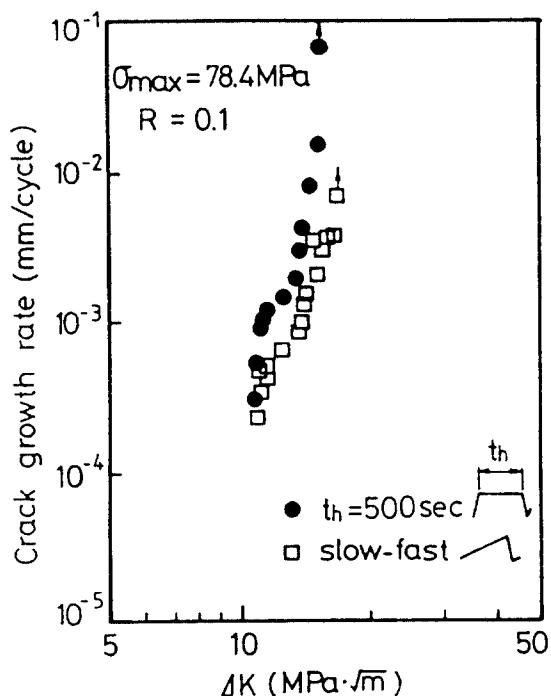


Fig. 6 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range at high stress intensity factor range in asymmetrical waveforms.

고 있다. 고응력화대계수폭에서 두 파형의 속도는 거의 동일하며, 특히 $da/dN > 10^{-2}$ 영역에서는 속도 차이가 나타나지 않는다.

4. 3. 사다리꼴 하중파형과 비대칭 하중파형의 피로균열전파속도

Fig. 7은 유지시간 $t_h = 500 \text{ sec}$ 하중파형과 slow-fast 하중파형의 피로균열전파속도를 비교한 것이다. 동일한 하중시간(period)의 조건에서 피로균열전파속도를 조사하기 위하여 두 하중파형의 주파수를 동일하게 하였다. 유지시간 하중파형이 slow-fast 하중파형에 비해서 피로균열전파속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 원통형 봉재시험편을 이용하여, slow-fast와 유지시간 파형의 균열전파특성 및 피로수명을 연구한 논문들의 결과에서 slow-fast 파형의 균열전파속도가 유지시간

파형의 경우에 비해서 조금 빠르거나 또는 동일하다는 보고⁶⁻⁹⁾가 많이 있다. 즉, 본 논문의 결과와 반대이다. 이와같이 반대의 거동은 본 연구에서는 평판시험편을 이용하여 균열전파시험의 경우이고, 다른 연구에서는 원통형 봉재 시험편을 이용한 피로수명시험의 경우이기 때문에 시험의 성격상 차이에서 발생한다고 생각된다. 그러나, 본 논문의 결과와 일치하는 보고도 있다.^{10,11)} 예를들면, Morishita 등의 보고에 의하면, 고 변형율 범위에서는 slow-fast 파형의 경우가 피로수명이 짧고, 저변형율 범위에서는 유지시간 파형의 경우가 피로수명이 짧다고 보고하고 있다.¹⁰⁾ 본 연구는 소규모항복의 조건에서 실험을 실시하였으므로, Morishita 등의 보고와 일치하고 있다. 그러나 변형율 범위에 따라 어떻게 거동이 변하는지 명확히 규명되지 않았기 때문에 이 문제는 앞으로 연구할 과제이다.

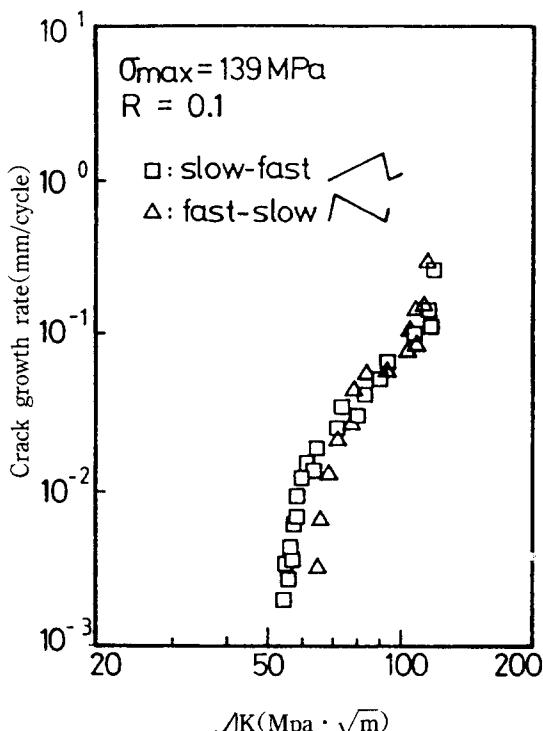


Fig. 7 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range in trapezoidal ($t_h=500sec$) and slow(500sec)-fast(1sec) waveforms.

4.4 수정J-적분 범위와 피로균열전파속도

Fig. 8은 모든 파형에 대하여 피로균열전파속도를 통일적으로 정리하기 위한 시도로써 수정J-적분범위(ΔJ_c)로 정리한 것이다. 파형에 관계없이 모든 데이터가 좁은 벤드(factors of 2 on da/dN) 안에 위치하고 있다. 따라서, 수정J-적분 범위는 파형에 관계없이 피로균열전파속도를 정리할 수 있는 파라미터임을 확인하였다. 여기서, 수정J-적분범위(ΔJ_c)와 피로균열전파속도(da/dN)의 log-log 좌표상에서의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$da/dN = 4.91 \times 10^{-3} (\Delta J_c)^{0.565}$$

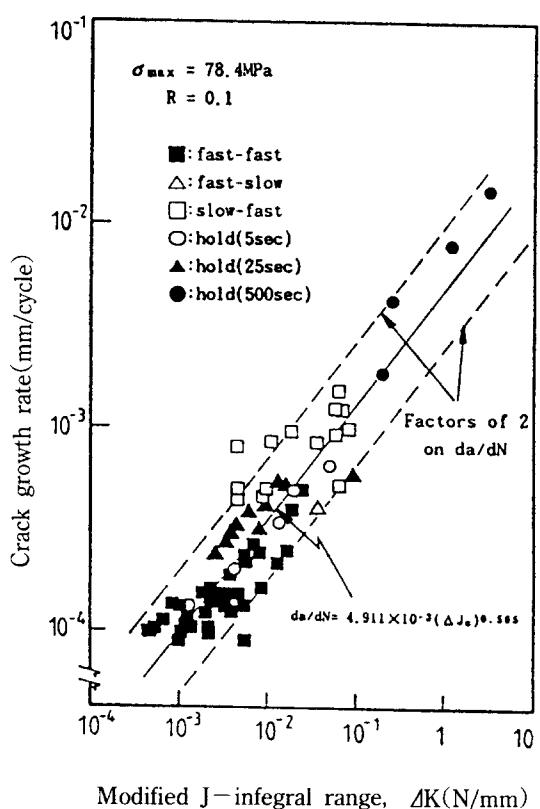


Fig. 8 Relation between crack growth rate and modified J-integral range for waveforms of all kinds.

5. 결 론

본 연구는 피로균열전파속도에 미치는 하중파형의 효과를 조사하기 위해서 SUS 304 스테인레스 강을 이용하여, 고온(650°C)의 대기중에서 하중제어 방법으로 고온피로균열전파시험을 실시하였으며, 시험의 결과는 다음과 같다.

1. 사다리꼴하중파형(trapezoidal loading waveform)에서 유지시간이 길수록 피로균열전파속도(da/dN)는 빨라지며, 또한 응력확대계수폭(ΔK)가 높아지면서 그 차이는 증가하였다.

2. 비대칭하중파형(unbalanced loading waveform)에서 피로균열전파속도는 fast-fast 파형을 기준으로 fast-slow 파형의 경우는 조금 증가하지만, slow-fast 하중파형의 경우는 현저한 증가를 보였다. 따라서 피로균열전파속도는 부하측 시간에 크게 의존하며, 제하측 시간에는 영향이 적음을 알 수 있었다.

3. fast-slow와 slow-fast 하중파형간의 피로균열전파속도의 차이는 $da/dN > 10^{-2}$ 의 영역에서는 거의 나타나지 않았다.

4. 본 실험의 범위($\sigma_{nominal} = 78.4 \text{ MPa}$)에서, 하중시간이 동일한 사다리꼴하중파형($t_h = 500 \text{ sec}$)과 비대칭 하중파형 slow(500sec)-fast(1sec)의 피로균열전파속도는 사다리꼴하중파형의 경우가 빠르게 나타났다.

5. 수정J-적분범위(ΔJ_c)는 파형에 관계없이 피로균열전파속도(da/dN)를 정리할 수 있는 유용한 피라미터임을 확인하였다. 이를 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$da/dN = 4.91 \times 10^{-3} (\Delta J_c)^{0.565}$$

후기 : 이 연구는 과학기술처 특정연구 개발사업의 일환으로 연구 되었음.

참 고 문 헌

- Takeuchi, E., Matsuoka, S. and Nishijima, S., Effect of loading Waveform on Fatigue Crack Growth Properties at Elevated Temperature, Tran. Japan Soc. Mech. Eng., Vo. 56, No. 530, pp. 278, 1990.
- Okazaki, M., Hattori, I., Ikeda, T. and Kozumi, T., Low Cycle Fatigue Crack Growth Behavior at Elevated Temperature Under The Combined Strain-Wave-Shape Cycling in Type 304 Stainless Steel, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp. 346, 1985.
- ASME E112, Standard Methods for Determining Average Grain SIZE
- Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., The Stress Analysis of Cracks Hand Book, Del Research Corporation, 1973.
- Ohji, K., Ogura, K., and Kubo, S., Estimates of J-integral in the General Yielding Range and its Application to Creep Crack Problems, Trans. JSME, Vol. 44, No. 382, pp. 1831-1838, 1978.
- Sang-Rok Lee, Hak-Joo Lee, Jin-Oh Chung, Sae-Wook Oh, Chung-Weon Hue and Doo-Peow Yoon, Waveform Effect on The Low-Cycle Fatigue Behavior of AISI 304 Stainless Steel at High Temperature Proceedings of the KSME/JSME Joint Conference Fracture and Strength '90, pp. 1, 1990.
- Matsuda, N., Umezawa, S. and Miyata, H., A New Prediction Method of Fatigue Creep Interaction Behavior Based on Total Strain Energy for High Strength Super Alloy, Trans. Japan Soc. of Mat. Sci., Vol. 38, No. 430, pp. 809, 1989.
- Takeuchi, E., Matsuoka, S. and Nishijima, S., Effect of Loading Waveform on Fatigue Crack Growth Properties at Elevated Temperature, Tran. Japan Soc. Mech. Eng., Vol. 56, No. 530, pp. 2078, 1990.
- Yamaguchi, K and Kamazawa, K., Application of Strain Range Partitioning Method to Fatigue Creep Interaction in SUS 316 and 1 1/4 Cr-1/2Mo Steels, Tran. of Iron and Steel,

- Vol. 66, pp. 1160, 1980.
10. Morishita, M., Asada, Y. and Mitsuhashi, S., Creep Fatigue Interaction of SUS 304 Stainless Steel in Super-High Vacuum, Tran. Japan Soc. Mech. Eng., Vol. 51, No. 462, pp. 307, 1985.
11. Taira, S., Fujno, M. and Takahashi, T., Fatigue Damage in Low Cycle Fatigue et Elevated Temperatures under Saw-Tooth Wave Strain Cycling, Tran. Japan Soc. of Mat. Sci., Vol. 27, No. 296, pp. 434, 1978.