

## 高溫下 304 스테인리스鋼의 크리프-疲勞相互作用下的 미소표면균열에 관한 파괴거동<sup>+</sup>

서창민\* · 이상돈\*\* · 조일현\*\*\*

(1988년 10월 15일 접수)

### Micro-Surface-Cracks Behavior of 304 Stainless Steel under Creep-Fatigue Interaction at Elevated Temperature

Chang-Min Suh, Sang-Don Lee and Il-Hyun Cho

**Key Words :** Creep(크리프), Micro-Surface-Crack(미소표면균열), High Temperature Fatigue(고온피로), Fracture Mechanics(파괴역학), Smooth Specimen(평활재), Weibull Distribution of Cumulative Probability(와이블 누적 확률)

#### Abstract

This paper deals with the micro-surface-cracks behavior on the unnotched smooth specimens of Type 304 stainless steel at 593°C in air under creep and creep-fatigue conditions that have 10 min and 1 min load holding times respectively. The behaviors of the micro-surface-cracks have been visualized by means of surface replica method and optical micro-photography. The quantitative characteristics of initiation, growth and coalescence of micro-surface-cracks have been investigated by observing and measuring the crack growth behaviors.

Some of the important results are as follows :

Main crack initiates at grain boundary in the early stage(10 to 20%) of its life time and grows through coalescence and finally leads to fracture. The distribution of micro-surface-crack length,  $2a$ , can be plotted against the composite Weibull distribution. The growth rate of the main crack can be plotted against the stress intensity factor, crack tip opening displacement and  $J$  integral.

+ 1988년도 한국해양공학회 춘계 학술대회 발표(1988년 6월)

\* 정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 쌍용중공업(주)

\*\*\* 포항종합제철소

1. 서 론

고온기기의 사용증가와 더불어 高温機器 및 構造物의 검사, 보수, 안전성평가 및 잔존수명에측 등을 위한 각종 재료의 고온하의 크리프-피로 상호작용에 관한 연구는 工學的 및 工業的으로 그 중요성이 절실히 요구되고 있으며, 이 분야에 파괴역학이 광범위하게 확장, 적용되고 있다.<sup>1-18)</sup>

고온하의 균열성장은 환경, 크리프현상 및 금속학적 영향 등 많은 요인에 기인하여 상온과는 다른 현상을 나타낸다. 고온하의 관통균열재에 관한 자료는 최근 많이 연구되어 보고되고 있지만, 결합이 없는 平滑材상의 작은 표면균열의 발생 및 성장거동에 관한 연구는 실험적, 해석상의 어려움 때문에 의외로 적다. 특히 고온기기 및 구조물상의 작은 표면균열의 발생, 성장, 합체에 의한 재료의 파괴거동을 퍼스널 컴퓨터로 시뮬레이션하기 위해서는 이상과 같은 자료의 축적이 절실히 요구되고 있으며, 평활재의 수명추정은 실구조물의 고온강도 설계상 가장 중요한 문제의 하나이다.<sup>1-19)</sup>

본 연구에서는 고속증식형 원자로(F.B.R) 및 고온기기의 구조용 부재로 널리 사용되고 있는 304 스테인리스강을 사용하여 593°C (1100°F)의 고온 대기중에서 크리프-피로시험을 행하여 평활재 표면상에서 발생, 성장하는 미소표면균열에 관한 파괴거동을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 용체화처리된 304 스테인리스강으로서 기계적성질을 Table 1에 나타내었다. 시험편형상은 직경 19mm의 열간압연관봉을 Fig. 1과 같은 평활재 시험편으로 가공하였다.

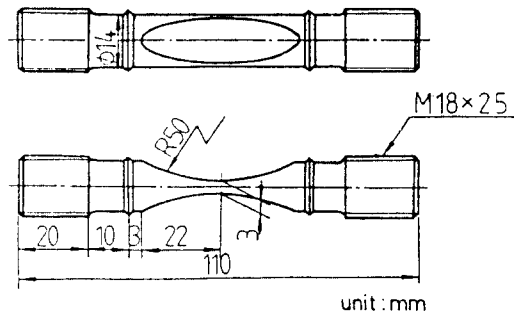


Fig. 1 Configuration of creep-fatigue specimen

그리고 중앙평활부는 연마지 1200번까지 연마하여 산화크롬분말로 버핑을 한 후 입계, 슬립선 및 미소균열의 관찰을 쉽게 하기 위하여 왕수로 가볍게 부식시켰다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 크리프-피로시험기는 하중비 1:10, 용량 1톤의 레버식 크리프시험기를 개조한 것이다. 전원의 入力상태에 따라 모터의 회전방향이 바뀌고, 이에따라 스크루 잭(screw jack)에 연결된 크로스 헤드가 상하운동을 하게 되어 하중을 부하, 유지 및 제거할 수 있게한 것이다.

본 실험에서 실시한 실험조건은 Fig. 2(a), (c)와 같은 응력파형으로 부하응력 30kgf/mm<sup>2</sup>, 온도 593°C의 고온대기하에서 크리프, 유지시간 10분 및 유지시간 1분인 크리프-피로시험을 행하였다. 또한 결과의 정리는 Fig. 2(b)와 같은 응력파형으로 바꾸어 계산하였다. 시험편의 가열은 전기저항식 전기로를 사용하였으며, 자동온도조절장치에 의해 593°C로 일정하게 유지시켰다. 하중부하는 전기로내의 온도가 593°C에 도달한 후 약 3시간의 물입시간을 준 후에 실시하였다.

미소표면균열의 발생, 성장 및 합체거동을 관찰하기 위하여 파단수명비(t/t<sub>0</sub>)의 약 0.2, 0.4,

Table 1 Mechanical properties

	Temperature	Yield point 0.2% offset kgf/mm <sup>2</sup>	Tensile strength kgf/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Reduction in area %	Hardness Hv
Standard	R. T.	min 21	min 53	min 40	min 60	max 197
Material	R. T.	32	65	67	79	194
Material	593°C	17.9	43	40	67.7	-

KS No.14 A tensile specimen

Loading speed : 3mm/min (R.T.: room temperature)

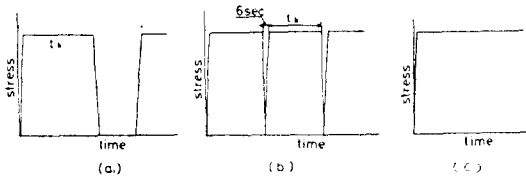


Fig. 2 Stress wave type of the creep-fatigue test( $t_h$ =hold time)

0.5, 0.7 및 0.9부근에서 시험기를 일시 정지시켜 상온까지 서냉시킨 후 각 경우에 따라 시험편 중앙부 표면에 발생, 성장하는 미소표면균열을 표면 레프리카(surface replica)로 채취하고 이것으로부터 시험편을 파단에 이르게 한 주균열(main crack)을 선정하여 수명의 후기에서 초기의 逆順으로 추적하여 균열의 거동을 광학현미경으로 측정하였다.

또한 주균열을 포함하는 일정영역을 관찰영역(6 mm×3mm)으로 선택하여 각 파단수명마다 광학현미경을 사용해서 한장의 레프리카에서 약 100장 정도의 사진으로 확대, 촬영하였다. 이 사진들을 서로 인접한 사진들과 조합시켜 트레이싱하고 이를 다시 축소시켜 미소표면균열의 발생, 성장 및 합체거동을 圖視化하였다.

이와 더불어 시험편 표면에 분포된 미소표면균열의 길이를 정밀하게 측정하여, 각 수명단계에서의 미소표면균열의 밀도변화와 평균균열길이를 조사하였으며, 시험편의 수명을 좌우하는 主균열의 발생, 성장거동을 파괴역학적으로 분석, 고찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미소표면균열의 발생 및 성장특성

Fig. 3은 부하응력  $30\text{kgf}/\text{mm}^2$ 에서 유지시간 10분의 크리프-피로시험중 평활표면에서 발생, 성장한 미소표면균열의 발생과 성장, 합체거동을 육안으로 볼 수 있도록 도시화한 그림이다. 여기서 미소균열의 판정은 파단수명의 초기에 발생하는 슬립선이나 보이드(void) 등의 존재로 인하여 도시화된 자료의 관찰만으로는 그 판별이 곤란하므로 광학현미경으로 그 상태를 점검하여 결정입

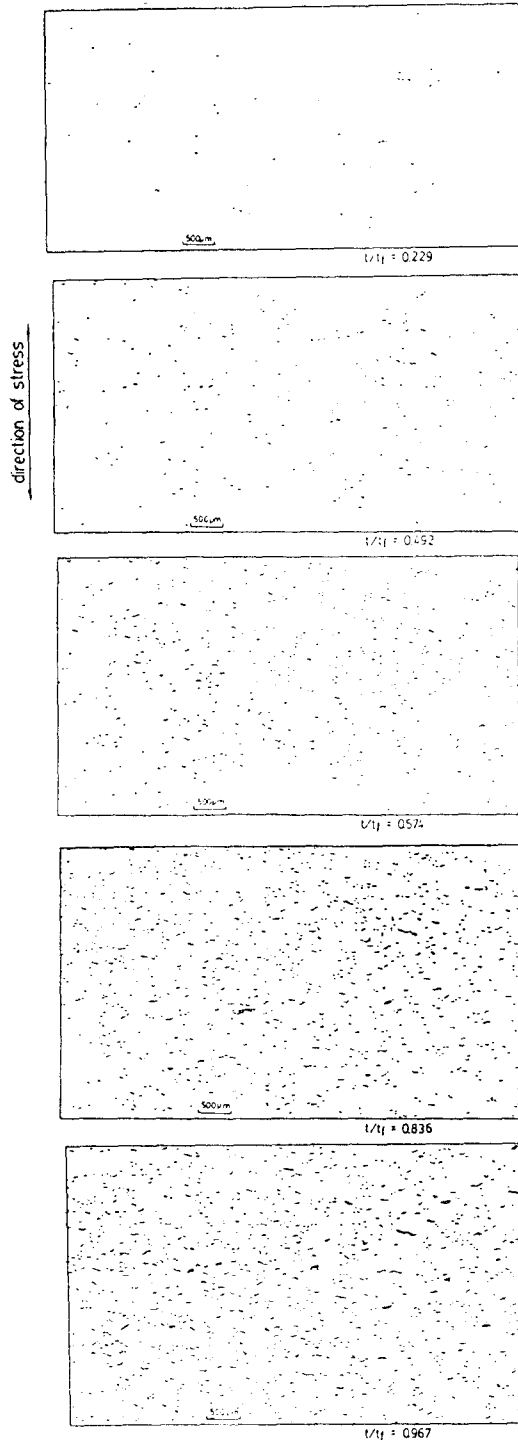


Fig. 3 Initiation, propagation and coalescence of microcracks on the surface of smooth specimen (SUS 304,  $\sigma = 30\text{kgf}/\text{mm}^2$ ,  $593^\circ\text{C}$ , Hold time 10min)

계가 완전히 분리되었거나 인접한 결정입계를 통과해서 성장한 균열들을 미소균열로 정의하였다. Fig. 3과 사진의 관찰로부터 얻어지는 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1) 미소균열들은 파단수명의 극히 초기(10~20%)에 주로 결정입계에서 지그재그(zigzag)형태로 불규칙하게 발생, 성장하였고, 수명의 대부분이 이러한 균열의 발생과 성장과정에 소비됨을 알았다.

2) 파단수명비가 증가함에 따라 계속해서 미소표면균열들이 발생, 성장 및 합체를 일으키면서 최종파단에 이르는 것을 관찰하였다.

3) 발생된 균열들은 표면상의 관찰로는 잠시 정체하는 경우도 있고 다른 균열과 합체하면서 점차적으로 성장이 가속화되어 파단수명의 말기에는 급속히 성장하여 파단에 이르렀다. 이는 Wagner 등<sup>17)</sup>의 Ti-8.6Al합금에 있어서 미소균열의 성장 모델과 동일한 경향이였다.

4) 대부분의 미소균열들은 主應力軸에 약 45° 혹은 수직한 방향으로 발생함을 알 수 있었다. 이 결과는 작은 人工缺陷이 있는 고온의 실험결과<sup>4),5)</sup>와 결함이 없는 평활재의 실험결과<sup>1),2)</sup>와도 일치하였다.

5) 파단수명비가 증가함에 따라 축방향의 신장과 함께 횡방향의 수축이 현저함을 알 수 있다.

본 실험의 대부분의 미소균열은 결정입계에서 발생해서 결정입계를 따라 성장하여 파괴가 진행되는 고온하에 있어서의 전형적인 파괴양상인 입계파괴(intergranular fracture)를 나타내었다. 또한 고온하의 크리프-피로상호작용하의 파괴의 척도는 크리프 손상( $\phi_c$ )과 피로손상( $\phi_f$ )의 합이 1이 될때 파괴된다. 따라서 크리프-피로상호작용하의 파괴는 파괴가 일어나는 선형수명비 누적손상법칙에 의해 평가될 수도 있다.<sup>18)</sup>

### 3.2 미소표면균열의 통계적 고찰

#### 3.2.1 균열길이에 대한 와이불 누적확률

Fig. 4는 미소표면균열길이  $2a$ 의 계급치와 균열 개수와의 관계를 와이불(Weibull) 누적확률로 나타낸 것이다. 표면균열길이  $2a$ 는 結晶粒界를 따라서 지그재그로 성장한 균열을 주응력축에 수직한 방향으로 投影시켜 그 투영된 길이를 균열길이

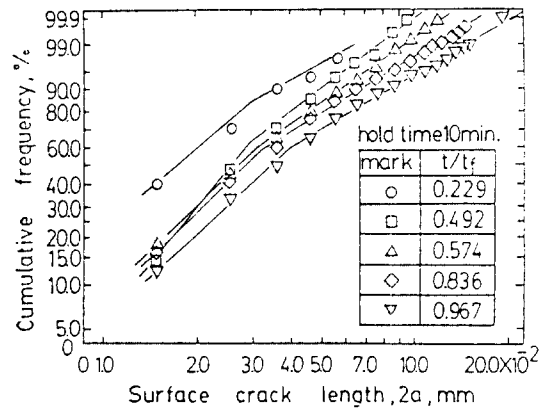
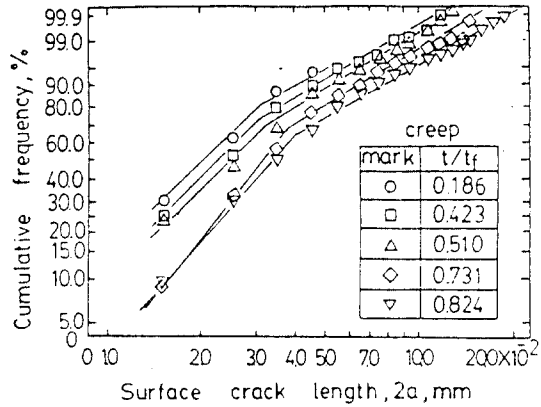


Fig. 4 Weibull distribution of the cumulative probability of failure versus the surface microcrack length(SUS 304,  $\sigma = 30\text{kgf}/\text{mm}^2$ , 593°C smooth specimens)

2a로 정의하였다.

또 균열길이 및 개수의 결정에 있어서 두개 혹은 그 이상의 인접한 균열들이 疊體되면 이를 하나의 균열로 취급하였다. 파단수명비의 증가와 더불어 미소균열이 계속해서 발생, 성장하고 합체 연결되어 그 길이가 길어짐에 따라 각각의 곡선은 경사가 적어지고 미소균열의 길이가 약 0.025~0.04mm에서 切點이 생기는 것을 알 수 있다. 이 절점은 파단수명의 초기에 발생한 미소균열들이 성장, 합체에 의하여 균열길이가 길어지면서 동시에 균열의 길이방향으로도 성장한 제1단계 전단형 균열에서 제2단계 인장형균열로 이동하는 천이점으로 생각된다.<sup>21,7)</sup>

또한 파단수명비의 0.7 혹은 0.9부근에서도 대부분의 미소균열길이가 0.02~0.05mm 정도로 대

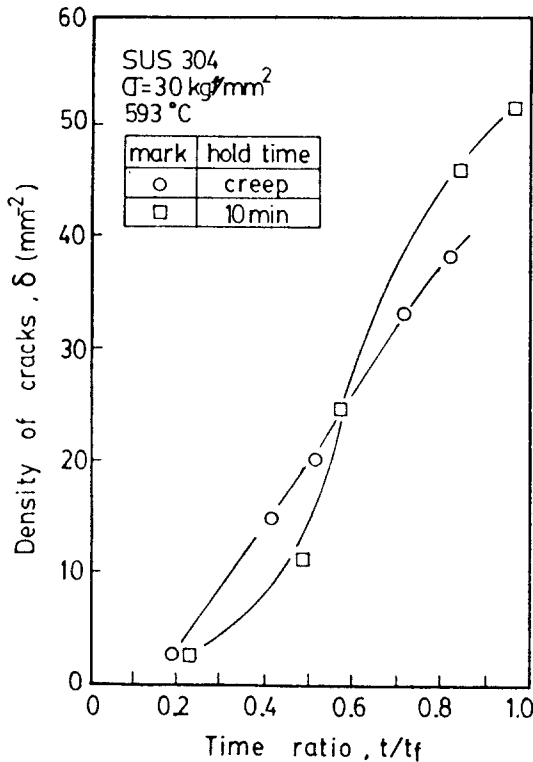


Fig. 5 Relation between the surface microcrack density,  $\delta$ , and the time ratio,  $t/t_f$

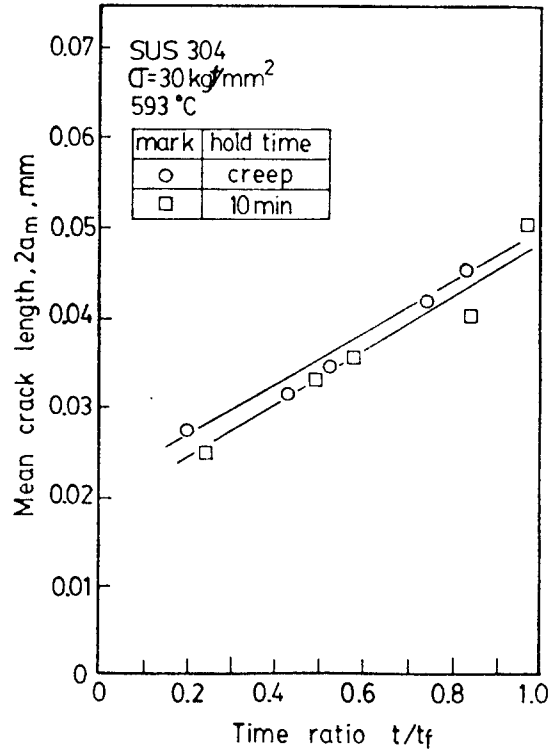


Fig. 6 Relation between the mean surface microcrack length,  $2a_m$ , and the time ratio,  $t/t_f$

단히 짧다. 또 파단수명의 말기에서도 새로운 미소균열이 끊임없이 발생, 성장함을 알 수 있다.

### 3.2.2 균열밀도와 평균균열길이의 변화

Fig. 5와 Fig. 6은 Fig. 3 및 Fig. 4의 자료를 이용하여 미소표면균열의 밀도  $\delta$  와 평균균열길이  $2a_m$ 을 구하여 파단수명비  $t/t_f$ 에 대한 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 균열밀도는 Fig. 3에서 나타낸 주균열을 포함한 일정영역당의 균열갯수를 나타낸 것으로 파단수명비와 더불어 증가하며, 파단수명의 후기에서는 다소 증가율이 초기보다 떨어지는 경향이 나타나고 있다.

이것은 파단직전의 미소표면균열들의 합체물이 균열의 발생률보다 크기 때문이라고 생각된다. 이와같은 경향은 상온의 연강평활재<sup>2)</sup>와 고온의 304 스테인리스강 평활재의 경우<sup>6,7)</sup>와도 비슷하였다.

또한 Fig. 5에서와 같이 파단 직전에는  $1\text{cm}^2$ 당 균열의 갯수는 수천개에 달할 것으로 추측할 수 있고, 극히 高密度의 미소균열이 평활재 표면에서 발생, 성장, 합체하여 파단을 일으킴을 알 수 있

다.

Fig. 6은 Fig. 3의 관찰 영역상의 균열길이를 광학현미경으로 측정하여 이를 균열갯수로 산술평균한 균열길이  $2a_m$ 을 파단수명비에 따라 그 변화를 나타낸 것이다. 그림에서  $2a_m$ 은  $t/t_f$ 가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있고, 이것은 파단수명의 후기에도 미소한 균열들이 계속해서 발생, 성장하기 때문이라고 생각된다.

### 3.2.3 축신장과 횡단면 수축의 변화

Fig. 7은 주균열을 포함한 일정영역을 나타낸 Fig. 3에 대하여 실험이전의 일정영역의 크기와 고온하의 각 파단수명비에 대한 일정영역의 크기를 비교하여 축방향의 신장도  $\epsilon$  과 횡방향의 수축도  $\epsilon'$ 를 계산하여 그 변화를 나타낸 것이다.

이 그림에서  $\epsilon$  과  $t/t_f$ 사이에는 통상의 크리프 시험에서 나타나는 전형적인 크리프곡선을 나타내고 있다.

즉 실험의 초기단계인  $t/t_f$ 가 0.2이전에는 축방향 신장도  $\epsilon$  이 급격히 증가하는 제1기 크리프,

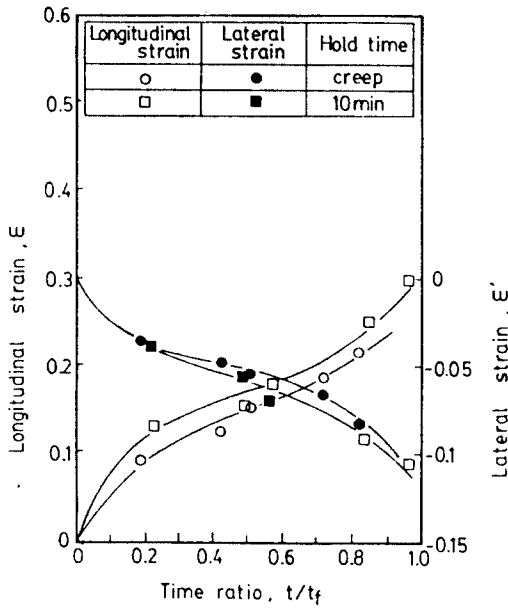


Fig. 7 Increase of longitudinal strain,  $\epsilon$  and decrease of lateral strain,  $\epsilon'$  against the time ratio,  $t/t_f$  (SUS 304, 593°C,  $\sigma = 30\text{kgf/mm}^2$ )

그 후부터는 완만하게 증가하는 정상상태 크리프인 제2기 크리프와 파단수명의 말기인  $t/t_f$ 가 0.8에서  $\epsilon$ 이 다시 급격히 증가하는 가속크리프인 제3기 크리프로 구분할 수 있다.

또 횡단면 수축도  $\epsilon'$ 는 초기에 급속히 감소하다가 그 후부터는 완만하게 감소하며 축방향의 신장도  $\epsilon$ 과 상반된 현상을 나타내고 있다.

### 3.3 주균열의 성장특성에 관한 파괴역학적 고찰

#### 1) $\Delta K_I$ 에 의한 정리( $\Delta K_I - d(2a)/dt$ 특성)

시험편의 수명을 좌우하는 주균열의 성장속도를 구하기 위하여 불규칙적으로 성장, 합체하는 미소표면균열의 성장거동을 다소의 굴곡이 생기지만 원활한 곡선으로 나타낼 수 있었다. 이와같은 방법으로 구한 본 실험의 세가지 조건에 대한 균열 성장곡선에서 미소표면균열의 성장속도  $d(2a)/dt$ 를 구하고 응력확대계수범위  $\Delta K_I$ 를 계산하여 Fig. 8에 나타내었다.

그림과 같이 본 실험의 세가지 조건에 대한 균열성장속도는 미소균열에 있어서의 전형적인 성장거동을 나타내고 있다. 즉  $\Delta K_I$ 가  $10\text{kgf/mm}^{3/2}$

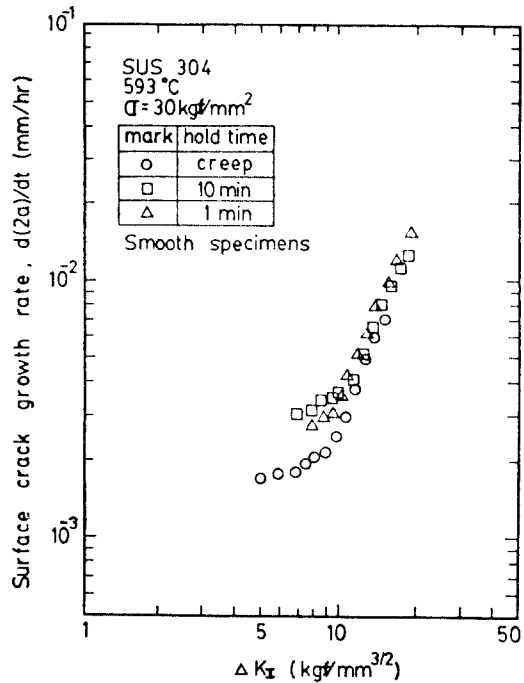


Fig. 8 Dependence of the main surface crack growth rate upon the stress intensity factor range

이하에서는 세가지 조건에 따라 성장속도가 다소 차이가 나지만 각각 하나의 곡선으로 표시되고  $\Delta K_I$ 가  $10\text{kgf/mm}^{3/2}$  이상에서는 유지시간의 차이에도 불구하고 거의 하나의 직선상에 모이는 특성을 나타내었다.

#### 2) J적분에 의한 정리(특성)

여기에 사용한 J적분값 Dugdale-Barenblatt 모델로서 J적분값과 균열선단개구변위(CTOD) 값  $\delta_c$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>19)</sup>

$$J_{Ia} = \sigma_y \cdot \delta_c \dots \dots \dots (1)$$

즉 적분값과 균열선단개구변위값  $\delta_c$ 은 1대1로 대응하므로 식(1)을 사용하여 J적분치를 계산한 후 균열성장속도와와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 균열선단개구변위와 같이 J값으로 나타내어 본 결과 유지시간의 차이에도 불구하고 비교적 좁은 영역내에 자료들이 모이고 있음을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구는 593°C의 고온대기중에서 304스테인리

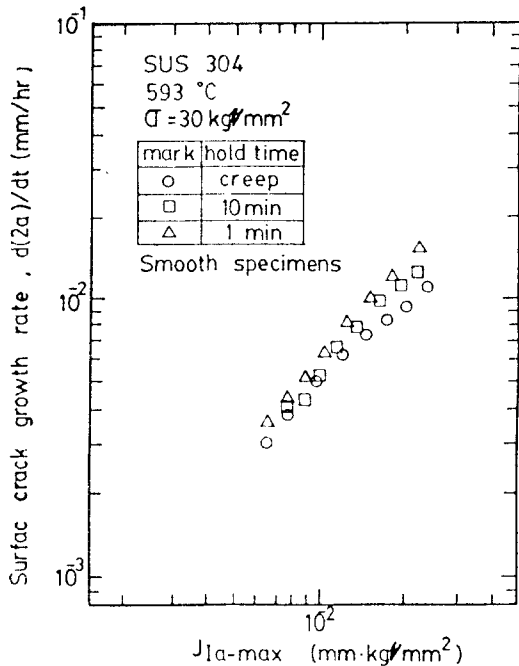


Fig. 9 Dependence of the main surface crack growth rate upon  $J_{Ia-max}$

스강 平滑材를 사용하여 크리프 및 크리프-피로 시험을 행하여 시험편 중앙평활부에서 발생, 成長, 合體하는 微小表面균열을 관찰하고, 그 정량적 특성을 조사하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 대부분의 미소균열은 파단수명의 10~20%의 初期에 주로 결정입계에서 발생하고, 수명의 대부분은 이 미소균열들의 성장과정에 소비됨을 알았다. 또한 파단수명비가 증가함에 따라 성장하며 그 중 극히 일부의 균열들이 주균열과 합체되어 파단에 이르게 됨을 알 수 있다.

2) 미소분포균열의 표면길이는 복합형 와이불분포로 표시할 수 있고, 제1단계의 전단형균열과 제2단계 인장형균열의 천이점으로 생각되는 절점이 생기는 직선으로 표시할 수 있었다.

3) 미소표면균열의 성장속도를 응력확대계수로 표시한 결과 유지시간의 차이에도 불구하고 한 직선상에 모이는 특성을 나타내었고,  $J$ 적분으로 표시한 결과 좁은 영역내의 밴드에 데이터가 모이는 것을 알았다.

## 후 기

본 연구는 1986년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 재단관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

## 參 考 文 獻

- 1) 徐昌敏, "引張 軸荷重疲勞에 의한 微小表面균열의 發生·成長舉動", 大韓機械學會論文集, 9(1), pp. 1-9, 1985
- 2) 徐昌敏, 北川英夫, 結城良治, "平滑材表面의 微小疲勞균열에 관한 基礎的 特性", 大韓機械學會論文集, 7(1), pp. 28-35, 1983
- 3) 徐昌敏, 申亨燮, 權寧泰, "304 스테인리스鋼의 高溫에서의 表面균열 成長特性에 관한 연구", 大韓機械學會論文集, 11(3), pp. 355-361, 1987
- 4) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, "高溫における ステンレス 鋼의 表面き裂의 疲勞き裂成長特性", 日本材料學會, 材料, 31(344), pp. 500-504, 1982
- 5) 徐昌敏, 趙一顯, "304 스테인리스鋼의 高溫 表面微小균열의 거동에 관한 基礎的 研究", 大韓機械學會, 秋季學術大會 抄錄集, pp. 69-72, 1986
- 6) Suh, C.M., H. Kitagawa, G. N. Kim and R. Yuuki, "Quantitative Analysis of Surface Microcracks in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", ASME, PVP, 98(1), pp. 137-142, 1985
- 7) Suh, C. M., D. Y. Suh and B. W. Hwang, "Surface Microcracks in a Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Proceedings of 2nd A.P.C.S. Seoul, Korea, pp. 221-226, 1986
- 8) 北川英夫, 結城良治, 高橋進, 徐昌敏, "平滑 表面に發生·成長する微小き裂の破壊力學的 研究," 日本機械學會 講演論文集(第16回疲勞シンポジウム), 790(9) pp. 25-30, 1979
- 9) 大谷隆一, 北村隆行, "き裂傳ばの破壊力學則より導かれた平滑材の 高溫疲勞壽命則について," 日本材料學會, 材料, 34(382), pp. 843-849, 1985

- 10) Shahinian, P. and K. Sadananaa, "Effects of Stress Ratio and Hold-time on Fatigue Crack Growth in Alloy 718", ASME J. of Material and Tech., 101, pp. 224-230, 1979
- 11) Shahinian, P., "Creep-fatigue crack Propagation in Austenitic Stainless Steel," ASME J. of Pressure Vessel Tech., 75, pp. 166-172, 1976
- 12) James, L. A., "Hold-time Effects on the Elevated Temperature Fatigue-crack Propagation of Type 304 Stainless Steel", Nuclear Tech., 16, pp. 521-530, 1972
- 13) James, L. A., "The Effect of Frequency upon the Fatigue-crack Growth of Type 304 Stainless Steel at 1000°F", ASTM STP 513, pp. 218-229, 1972
- 14) 田中啓介, "微小疲勞き裂の傳ば", 日本材料學會, 材料, 33(371), pp. 961-972, 1984
- 15) 堀口正一, 川崎正, "オーステナイト系ステンレス鋼の650℃における疲勞クリープ相互作用下の破壊舉動に関する研究", 日本材料學會, 材料, 31(342), pp. 277-282, 1982
- 16) 徐昌敏, 金植圭, 破面解析과 그 應用(IV)", 大韓機械學會誌, 24(4), pp. 262-274, 1984
- 17) Wagner, L., J.K. Gregory, et al., "Propagation Behavior of Short Cracks in a Ti-8.6 Al alloy", Small Fatigue Cracks, Proceedings of 2nd Eng. Foundation Int. Conference, pp. 117-128, 1986
- 18) 大谷隆一, "總合材料強度學講座 第7卷 環境・高溫強度學," オーム社, 日本, pp. 181-212, 241, 1984
- 19) 金澤武, 町田進, 金田重裕, 小野塚正, "J-績分における破壊基準について", 日本造船學會 論文集, 138, pp. 480-489, 1985



△ 身上變動 申告案内 △

1. 住宅移轉時는 새 住所 및 電話番號
2. 職場變動時는 職場名, 所在地, 電話番號
3. 其他 學位를 받거나 海外旅行의 경우 또는 慶吊관계 등 학회 사무국으로 알려 주십시오.  
<전화 (051) 205-2325>