

<論 文>

304 스테인리스鋼의 高温에서의 表面균열 成長特性에 관한 研究

徐昌敏* · 申亨燮** · 權寧泰***

(1986年 8月 25日 接受)

Surface Crack Growth Behaviors of 304 Stainless Steel at Elevated Temperatures

Chang-Min Suh, Hyung-Seop Shin and Young-Tae Kwon

Key Words: Creep(크리이프), Maximum Stress Intensity Factor(최대응력확대계수), Crack Growth Rate(균열성장속도), Hold Time(유지시간), Creep-Fatigue Interaction(크리이프-피로상호작용), Surface Crack(표면균열)

Abstract

Creep and fatigue tests were carried out on crack growth properties of small surface cracks in 304 stainless steel at 538°C, 593°C and 650°C in air, by using small plate specimens with a small artificial pit. All the data of the crack growth rate per hour obtained in the present tests were correlated with the maximum stress intensity factor, so that the applicability of linear fracture mechanics to the crack growth of surface cracks at elevated temperature was investigated.

In the creep test, relation of $\sigma^n \cdot t_f = C$ is obtained between failure time and nominal stress at each temperature level, where n has the value of 11~14 depending on the temperature level. In the creep and fatigue crack growth properties of surface cracks at the elevated temperatures, the maximum stress intensity factor, $K_{I\max}$, is some extent applicable parameter to describe the surface crack growth rate under the present experimental conditions. The crack growth rate per hour increases when the holding time decreases, and creep crack growth rate per hour becomes the lowest limit of crack growth rate per hour in this tests.

1. 序 論

最近 高温機器의 개발과 用途의 多樣化에 따라 高温機器의 設計, 保守, 殘存壽命豫測 및 安全性評價등에

必要한 高温下에서의 材料特性과 균열의 成長舉動에 관한 基礎的인 데이터가 絶실히 要求되고 있다. 따라서 종래에는 高温하의 設計資料를 얻기 위하여 平滑材의 파단수명만을 고려한 크리이프시험이 行하여져 왔다. 그러나 이러한 종래의 크리이프試驗으로는 構造物의 部材內에 實存 가능한 表面缺陷에서 成長하게 될 작은 表面균열에 關한 定量的인 資料를 얻을 수 없다⁽¹⁻³⁾.

最近 破壞力學의 擴張⁽⁴⁾과 더불어 高温下의 균열成

* 正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

** 正會員, 金星精密株式會社

*** 正會員, 慶北大學校 大學院

長舉動에 관한 報告가⁽¹⁻⁵⁾ 많아졌지만 大部分의 자료는 大形貫通균열의 成長舉動에 국한된 것이다^(1,5,7,8).

그러나 工學的 및 工業的으로 그 重要性이 인정되는 작은 表面균열의 高溫下의 成長舉動에 관한 자료는 거의 찾아 볼 수 없으나 실용상 이 분야에 관한 기초적인 자료가 절실히 要求되고 있다.

따라서 本 研究에서는 高溫機器의 部材로 널리 사용되는 304 스테인리스鋼을 使用하여 機器의 使用條件을 고려한 538°C(1000°F), 593°C(1100°F) 및 650°C(1200°F)의 세가지 온도레벨하의 대기중에서 크리프-피로 시험을 실시하여 작은 人工表面缺陷으로부터 發生·成長하는 表面균열의 成長舉動을 調査 研究하였다. 또한 주파수의 영향을 조사하기 위하여 538°C에서 고온피로 시험을 실시하여 이 결과를 크리프 및 크리프-피로 시험의 결과와 비교·검토하였다.

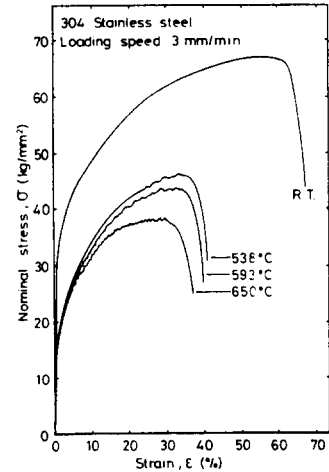


Fig. 1 Relation between the nominal stress and the engineering strain at room temperature, 538°C, 593°C and 650°C

2. 實驗方法

2.1 試驗片 및 實驗裝置

本 實驗에 使用된 材料는 溶體化處理된 304 스테인리스鋼이며 그 化學的 成分을 Table 1에 나타내었다. 또한 常溫, 538°C, 593°C 및 650°C 하의 引張試驗(인장속도 : 3mm/min)의 結果를 Table 2와 Fig. 1에 나타내었고, 고온이 될수록 여러가지 기계적 성질이 저하됨을 알 수 있다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 시험

편의 형상과 시험편의 중앙에 가공된 작은 人工缺陷의 형상을 나타낸 것이다. 시험편상의 작은 缺陷은 정밀 드릴링머신으로 加工하여 그 精密度를 이동현미경으로 확인하여 +4%以內의 것만 실험에 利用하였다.

크리프-피로 시험은 레버식 크리프 시험기에 모우터의 정·역회전 및 정지상태를 이용한 維持時間調

Table 1 Chemical compositions(weight percent)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Standard	max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.04	max 0.03	—	8.0~10.5	18.0~20.0
Material	0.07	0.52	1.32	0.02	0.017	—	8.6	18.0

Table 2 Mechanical properties

	Temperature	Yield point 0.2% offset kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Reduction of area %	Hardness H _B
Standard	R.T.	min 21	min 53	min 40	min 60	max 187
Material	R.T.	32	65	67	79	184
Material	538°C	19	46	41	68	—
Material	593°C	17.9	43	40	67.7	—
Material	650°C	17.8	37.7	37	66.8	—

KS No 14A type tensile specimen
Loading speed : 3mm/min (R.T. : room temperature)

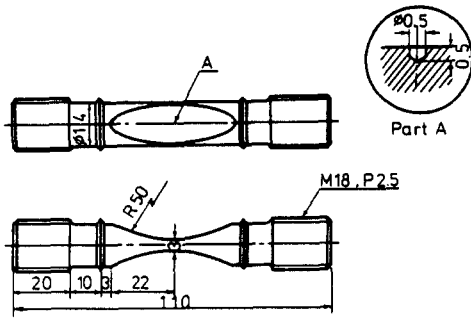


Fig. 2 Configurations of creep test, creep-fatigue test specimen(unit : mm)

節裝置를 부착시켜 所期의 時間을 조절 可能하게한 크리이프 시험기를 사용하였다.

시험편의 加熱方式은 저항식 전기로를 使用하였고 各 온도는 自動溫度조정장치를 使用해서 一定 溫度를 維持시켰다. 試驗片內의 溫度편차는 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以內로 제한하였고 시험편의 中央部에 열전대를 설치해서 소기의 온도를 확인하였다. 고온피로시험은 전기유압식 피로 시험기(MTS 10 톤)에 의하여 大氣中에 應力比 $R=0.1$ 의 하중제어 피로시험을 실시하였다.

2.2 實驗方法

Fig. 3에는 本 實驗에 行해진 크리이프시험과 유지시간의 영향을 고려한 크리이프-피로시험 그리고 피로 시험의 응력파형을 각각 (a), (b) 및 (c)에 나타낸다.

여기서 크리이프 및 크리이프-피로시험은 538°C , 593°C 및 650°C 의 고온에서 荷重제어방식에 의하여 행하였다, 이때 爐內의 霧圍氣溫度가 設定溫度에 도달한 후 3時間의 물입시기(soaking period)를 지낸 다음 충격荷重이 더해지지 않도록 Fig. 3(a)(b)과 같은 파형으로 荷重시켰다.

한편 작은 表面缺陷으로부터 發生成長하는 表面균열

의 길이와 균열中央開口變位는 전기로의 벽면에 설치된 창을 통하여 바깥에서 초점거리를 길게한 移動式顯微鏡을 사용하여 一定時間(t , 의 5~7%)마다 測定하였다. 여기서 측정된 破斷時間에 對한 表面균열길이 $2a$ 를 基礎로하여 단위 時間當 表面균열成長速度, $d(2a)/dt$, 길이방향의 성장속도 db/dt 와 最大應力擴大係數 $K_{I\max}$ 을 計算하여 各 온도와 시험조건에 따라 各자 비교·검토했다. 표면결합의 길이 b 는 동일재료의 상온에서 비치마크법과 템퍼컬러법을 사용하여 얻은 균열면형상관계에서 표면길이 $2a$ 를 개입시켜 결정하는 방법을 이용하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 負荷應力和 破斷時間과의 관계

Fig. 4는 크리이프시험을 行하여 各 溫度레벨하의 公稱應力 σ 와 破斷時間 t_r 의 關係를 兩對數방안지에 나타낸 것이다. 이 그림에서 시험온도의 증가에 따라 시험편의 破斷시간은 상당히 감소되었으며 또한 공칭 응력도 감소함을 알 수 있다.

세가지 온도 레벨에서 얻은 각각의 데이터는 거의 一直線上에 위치하고 식(1)과 같은 관계로 표현되었다. 이때 n 의 값은 온도에 따라 다소 차이가 있고, 538°C 는 $n=11$, 593°C 는 $n=12$, 650°C 는 $n=14$ 의 값을 얻었다.

$$\sigma^n t_r = C \tag{1}$$

3.2 작은 表面欠陷에서 發生 成長하는 균열의 成長特性

Fig. 5(a)는 538°C 하의 네가지 응력레벨하에 실시된 크리이프시험에서 얻은 表面균열의 成長舉動을 일 예로 나타낸 것이다.

Fig. 5(b)는 538°C , $\sigma=36\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 응력레벨하에서 크리이프 시험과 維持時間 1分, 維持時間 10分인

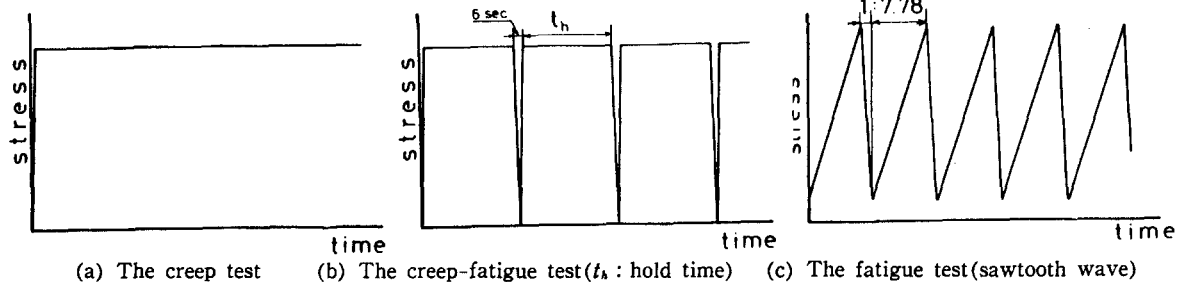


Fig. 3 Stress wave type of each test

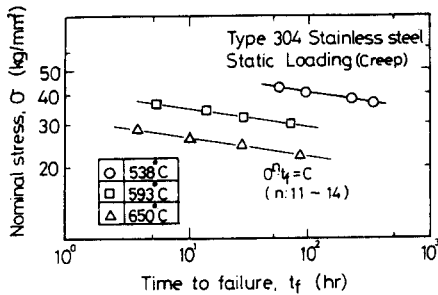


Fig. 4 Relation between the nominal stress and the time to failure

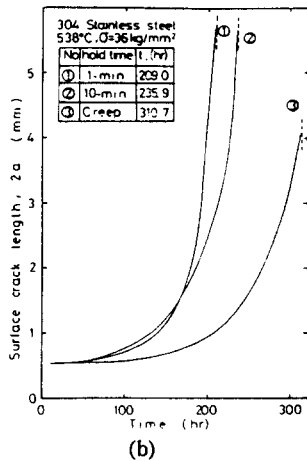
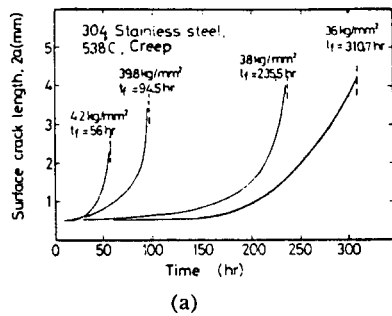


Fig. 5 Initiation and propagation behaviors of creep cracks initiated from a pit of 304 stainless steel at 538°C

크리이프-피로試驗에 의한 균열의 성장거동을 나타낸다.

이 그림에서 보면, 同一 온도하에서 응력이 감소함에 따라 균열의 성장곡선의 기울기가 완만해짐을 알 수 있고, 維持時間이 증가함에 따라 曲線의 기울기가 완만해지고 크리이프 균열성장에 근접될 것을 예상할 수 있다.

3.3 時間比(t/t_f)에 따른 균열성장거동

Fig. 6(a), (b), (c)는 538°C, 593°C 및 650°C 하의 크리이프시험에서 얻은 표면균열길이와 시간비의 특성을 각각 나타낸 것이다. Fig.6(a)는 Fig. 5(a)의 자료를 t/t_f로 나타낸 것으로 큰차로 벌어진 2a-t 곡선의 응력의 의존성인 특성은 Fig. 6에서는 거의 없어지고 각각의 온도레벨하에서 비교적 좁은 분산대내에 여러 응력레벨의 데이터가 모이는 특성을 나타내고 있다.

크리이프하의 표면균열의 發生은 總破斷時間의 10~20%에 相當하는 잠복기(incubation period)를 지난후 人工缺陷에서 균열이 發生해서 成長을 개시하였다. 이때 發生한 균열은 처음에는 느린 속도로 成長하다가 점차 加速되어 破斷時間의 90%以上에서는 급속히 破斷하였다. 이러한 특성은 高溫피로균열⁽³⁾ 및 크리이프-피로 상호작용의^(2,5) 경우와 유사한 成長特性을 나타낼 수 있었다.

Fig. 7은 538°C, 36kg/mm²의 應力下에서 얻은 크리이프 파단면을 SEM에 의해서 관찰한 一例를 나타낸 것이다. Fig. 7(b)는 균열이 작은 人工缺陷에서부터 發生하여 서서히 成長하는 粒界破壞⁽²⁾(intergranular fracture)部分을 나타내며, Fig. 7(c)는 剪斷에 의해 급속한 破斷을 일으키는 部分이 半타원 形狀의 경계를 이루면서 나타나고 있다. 또한 Fig. 7(a)는 人工缺陷의 양상을 Fig. 7(d)는 급속한 파단을 일으키는 方面으로서 引張破壞에서 나타나는 덩플등이 많이 존재함을 알 수 있다.

3.4 表面균열 成長速度的 破壞力學的 考察

Fig. 8은 304 스테인리스鋼의 常溫의 작은 표면缺陷에서 發生·成長하는 疲勞균열의 형상관계를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 상온에서 얻은 균열형상비의 관계로부터 다음과 같은 방법으로 파괴역학적 평가를 실시하여 그 결과를 나타낸다.

이때 응력확대계수는 Shah-Kobayashi의 반타원형 균열의 K_{1max} 식을 이용하였고 自由表面의 영향을 나타내는 ϕ치는 완전타원적분으로 아래와 같은 식을 이용하였다.

$$K_{1max} = \frac{\sigma_{max} \sqrt{\pi b}}{\phi} \left\{ \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \right\}^{1/4} \quad (2)$$

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \left(1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2} \sin^2 \psi \right)^{1/2} d\psi \quad (3)$$

표면방향의 피로균열의 K_{1max}a는 ψ=0일때의 K_{1max}

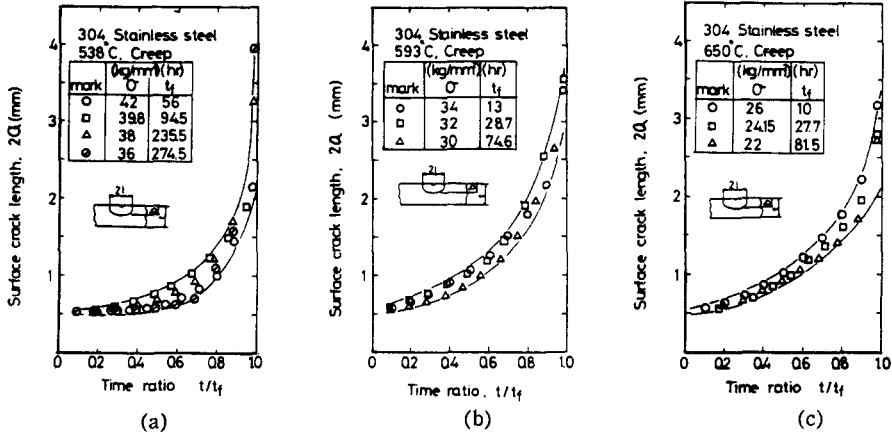


Fig. 6 Relation between the surface crack length and the time ratio at 538°C, 593°C and 650°C

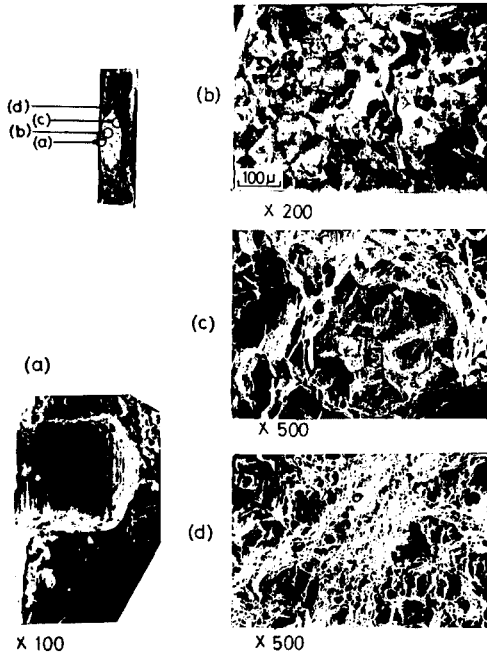


Fig. 7 SEM fractographs showing creep fracture surface micromorphology at various points. (for 304 stainless steel, 538°C, $\sigma = 36 \text{ kg/mm}^2$, creep)

의 값이며, 깊이방향의 피로균열(최심점)에서의 $K_{I \max}$ 는 $\psi = \frac{\pi}{2}$ 일 때의 $K_{I \max}$ 의 값으로 하였다.

Fig. 9(a), Fig. 9(b)에 각각 Fig. 5(a)에 나타난 균열성장곡선을 사용해서 538°C의 크리프 균열의 표면상 및 깊이방향의 성장속도를 最大應力擴大係數로 각각 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서는 네가지 응력레벨

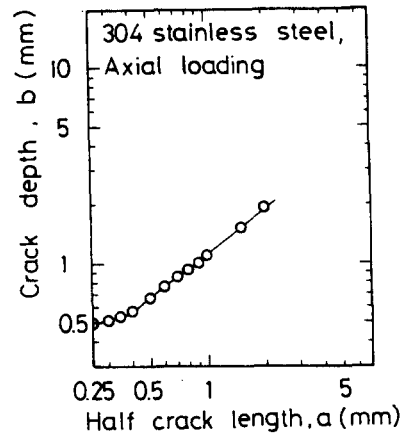


Fig. 8 Relationship of half crack length, a , and crack depth, b , at room temperature in 304 stainless steel

에 따라 破斷時間上으로는 큰 差가 있지만, 이를 균열 성장속도 $d(2a)/dt$ 및 db/dt 와 $K_{I \max}$ 로 나타내면 4가지 응력레벨의 자료가 응력에 무관하게 비교적 좁은 分散帶內에 모여짐을 알 수 있다.

여기서 데이터상에 折點이 나타나는 것은 고온疲勞⁽³⁾의 경우와 같고 이 折點이 생기는 現象은 J.A. Feeny⁽⁶⁾, L.A. James⁽⁷⁾들이 發表한 結果에 의하면, 材料의 固有한 特性, 즉 소성영역크기, 粒子間 間격 및 材料의 연성 등에 기인한 것으로 설명하고 있다. 또한 593°C, 650°C의 온도하에서도 Fig. 9와 같은 特性을 나타내었다.

Fig. 10(a)는 538°C, 593°C 및 650°C의 세가지 온도하의 크리프의 實驗結果를 동시에 나타낸 것이다.

이때 Fig. 9와 같은 538°C의 데이터는 온도만의 비교를 위하여 벤드로 나타나는 자료의 중간부분을 하나의 직선으로 표시한 것이다.

이 그림상의 크리이프 균열의 성장속도는 온도의 상승과 더불어 증가하고 있다. 이와 같은 특성은 James^(7,8)들이 SEN 시험편으로 본 연구와 유사한 온도범위에서 행한 관통균열의 실험결과와 같은 경향을 나타내고 있다.

이와 같이 크리이프 균열 및 크리이프-피로 균열의 성장속도도破壊力學의 파라미터를 사용하여擴張適用可能함을 알 수가 있다. 그러나 세가지 온도 레벨하의 균열의 성장속도를 온도에 無關하게 統一的으로 整理할 수는 없었다.

Fig. 10(b)는 538°C, $\sigma=36\text{kg/mm}^2$ 하의 크리이프, 유지시간 1분과 10분하의 균열의 깊이방향성장속도 db/dt 와 $K_{I\text{-max}}$ 의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 유지시간 1분의 경우가 크리이프보다 절점이하에서는 비슷하여도 절점이상에서 빠름을 알 수 있다. 이와 같은 성장의 특성을 온도별로 비교하여 Fig. 10(a)에 나타낸다.

각 온도레벨하에서 유지시간에 따라서 균열의 성장속도가 약간 다르고 유지시간이 짧을수록 성장속도가 빨라지고, 유지시간이 길수록 크리이프에 가까운 균열 성장속도를 나타내고 있다.

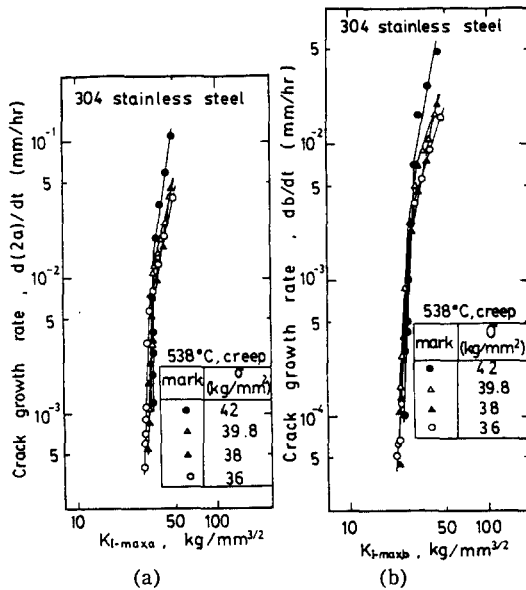


Fig. 9(a) Dependence of the growth rate of creep surface cracks upon $K_{I\text{-max}}$ at 538°C
 (b) Dependence of the growth rate of creep cracks upon $K_{I\text{-max}}$ at 538°C

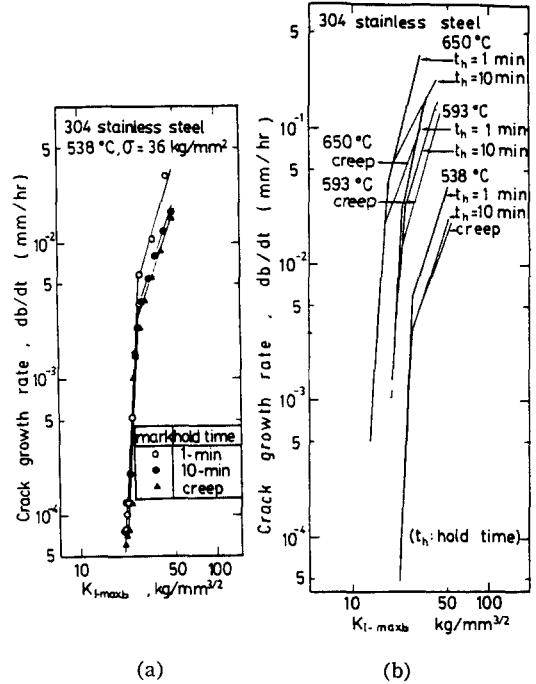


Fig. 10(a) Dependence of the time basis crack growth rate, db/dt , upon the maximum stress intensity factor, $K_{I\text{-max}}$ at various temperature levels.
 (b) Dependence of the growth rate upon the maximum stress intensity factor at 538°C $\sigma=36\text{kg/mm}^2$.

즉 維持時間이 증가함에 따라 時間當 均열成長速度가 減少함을 알 수 있다. 이것은 維持時間이 增加함에 따라 主 均열(main crack)선단에 밀집된 微小分布均열의 수가 증가하므로 이에 의한 응력집중도가 감소하므로 성장속도가 늦어지는 것으로 생각된다. 이것에 대한 연구는 다른 보고서⁽¹¹⁾로 발표되었다.

Fig. 11는 538°C하의 크리이프시험 결과와 4cpm, 40cpm, 400cpm 하의 고온피로시험($R=0.1$)을 행한 결과를 서로 비교한 것이다. 이 그림에서 고온피로시험에서 주파수가 증가함에 따라 같은 최대응력확대계수 값에서 표면상의 균열성장속도 $d(2a)/dt$ 가 점차 증가함을 알 수 있다. 또한 400cpm에서 4cpm으로 주파수가 늦어질수록 균열 성장에 크리이프의 영향과 산화작용(즉 oxide attack)이 크므로 크리이프 균열의 경우가 가까워짐을 알 수 있다. 따라서 크리이프에 의한 균열의 성장은 고온피로시험의 하한계를 형성함을 알 수 있다.

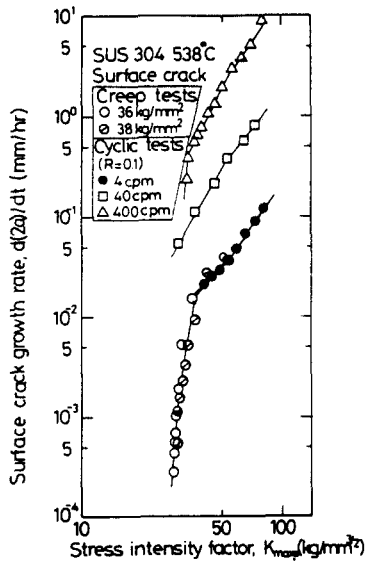


Fig. 11 Crack propagation behaviors of type 304 stainless steel at 538°C under cyclic and static loadings.

4. 結 論

작은 人工表面缺陷이 있는 304 스테인리스鋼의 시험편을 사용하여 538°C, 593°C 및 650°C에서 크리프 및 크리프-피로시험을 실시하여 表面균열의 成長擧動에 미치는 유지시간의 영향을 調査한 즉, 다음과 같은 結果를 얻었다.

(1) 크리프시험에서 各 溫度레벨에서는 破斷時間數 t_f 와 公稱應力 σ 사이에서 $\sigma^n \cdot t_f = c$ 의 關係式을 얻었다. 이때 n 는 11~14로 變하였다.

(2) 表面균열의 成長速度는 最大應力擴大係數로 정리 가능하였고 또한 크리프-피로시험에서 유지시간이 증가할수록 시간당의 成長速度는 감소되며, 크리프에 의한 均열성장은 最大應力擴大係數로 나타냈을때 고온균열성장의 下限界를 형성함을 알았다.

參 考 文 獻

(1) Kenyon, J.L., Webster, G.A., Radon, J.C. and Turner, C.E., 1973, "An Investigation of the App-

lication of Fracture Mechanics to Creep Cracking", IME, Int. Conference on Creep and Fatigue in Elevated Temperature Applications, Vol. 13, pp.156.1 ~156.7.

(2) Koterazawa, R. and Iwata, Y., 1976, "Fracture Mechanics and Fractography of Creep and Fatigue Crack Propagation at Elevated Temperature," Trans. ASME J. of Materials Eng. and Tech, Vol. 98, pp.296~304.

(3) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, 1982, "高温におけるステンレス鋼の表面き裂の疲労き裂成長特性", 日本材料學會, Vol. 31, No. 344, pp.500~504.

(4) Paris, P.C. and Erdogan F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", ASME J. of Basic Eng., Vol. 85, pp.528~534.

(5) Atanmo, P.N. and A.J. McEvily, Jr., 1973, "Creep-Fatigue Interaction During Crack Growth", Fatigue at Elevated Temperature, ASTM STP Vol. 520, pp.157~165.

(6) Feeney, J.A., McMillian, J.C. and Wei, R.P., 1970, "Enviromental Fatigue Crack Propagation of Aluminum Alloys at Low Stress Intensity Levels", Material Transactions, Vol. 1, pp.1741~1757.

(7) James, L.A. and Schwenk, E.B., 1972, "Fatigue-Crack Propagation Behavior of Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Metallurgical Transactions, Vol. 2, pp.491~496.

(8) James, L.A., 1972, "Some Preliminary Observations On the Extension of Cracks under Static Loading at Elevated Temperature", Int. J. of Fracture Mechanics, Vol. 8, pp.347~349.

(9) Dieter, G.E., 1978, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Book Company, New York, pp.451~489.

(10) David Broek, 1978, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Sijhoff & Noordhoff, London, pp.215~235.

(11) 서창민, 조일현, 1986, "304 스테인리스강의 고온 표면 미소균열의 거동에 관한 기초적 연구", 대한기계학회추계학술대회초록집, pp.69~72.