

<論 文>

微小格子를 利用한 304 스테인레스鋼의 疲勞 크랙 進展學動에 관한 研究

邕 章 祐*, 林 隴 鎬**

(1982年 1月 4日 接受)

Fatigue-Crack Propagation Behavior of 304 Stainless Steel by Moire Grating

Jang Woo Ong and Young Ho Lim

Abstract

The fatigue crack propagation behavior of non-heat-treatment and thermally aged type 304 stainless steel was investigated on the basis of linear elastic fracture mechanics. This Study was concentrated on the relations between the crack propagation rate and the stress intensity factor range.

The following results are obtained:

The precision measurement and observation of fatigue crack propagation behavior is studied with moire grating.

The effect of thermally aged type 304 stainless steel is investigated under small load.

In the equation $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$, factor m of thermally aged steel is a little higher than non-heat-treated steel and its limit is $m=1.35\sim 4.2$.

The relations between the fatigue crack propagation rate, $\frac{da}{dN}$ and the stress intensity factor range, ΔK , are as follows:

$$\frac{da}{dN} = 3.59 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.44} \quad \text{for non-heat.}$$

$$\frac{da}{dN} = 1.02 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.17} \quad \text{for 6hr-aged.}$$

$$\frac{da}{dN} = 5.90 \times 10^{-13} (\Delta K)^{3.32} \quad \text{for 24hr-aged.}$$

1. 序 論

機械構造物 部材인 金屬材料의 疲勞 크랙 傳播를 보 다 一般的인 크랙 傳播速度式으로 誘導하는 것은 이들

機械構造物의 設計와 安全保守라 하는 機械工學의 面뿐 만 아니라 크랙 傳播抵抗이 큰 새로운 材料의 開發이 라고 하는 材料工學의 面에서도 極히 重要한 問題이다. 그러므로 疲勞크랙 傳播에 관한 研究는 近年에 새로운 破壞力學의 因자에 依한 傳播表示式이 많이 提案되어 왔다.

그 代表的인 例로서는 小規模降伏條件下에서는 應力 擴大係數幅 ΔK 에 依한 整理가 定着되어가고 있으며

* 正會員, 忠南大學校 工敎大 機械設計科

** 正會員, 忠南大學校 大學院 機械工學科

大規模 全面降伏條件下에서는 最近 ΔJ 積分이 제창되고²⁾ 또 이들 巨視의 力學量 外에 局部的 力學量으로 크랙開口變位(crack opening displacement)가 提唱되어지고²⁾ 있다.

그러나 지금까지의 各種 疲勞크랙傳播速度式의 檢討는 限定된 實驗條件과 方法에서 이루어져 有效範圍에 制約이 많으므로 아직 廣範圍하게 適用되고 있지 않으며, 모든 材料와 實驗條件에 普遍的으로 適用되고 傳播速度를 整理할 수 있는 有效한 力學的 인자는 確立되어 있지 않은 것이 現在의 狀態이다. 또한 現在까지의 實驗結果는 實際의 크랙傳播舉動을 단순한 力學的 인자 만으로 解析할 수 없는 특이한 現狀이 많이 存在하고 있는 것도 事實이다. 이와같이 複雜한 樣相을 갖는 疲勞 크랙傳播問題의 解明을 위하여 破壞現象의 原點的 再檢討의 立場에서 이 分野에 대해서 現在까지도 많은 研究가 活潑히 이루어지고 있다.

本 實驗은 耐蝕性이 높고 成形性(Formability)이 優秀하며 特히 高溫및 低溫에서의 機械的 性質이 優秀한 高強度 材料인 오오스테나이트제 304 스테인레스鋼이 耐蝕性 분위기가 아닌 使用條件下³⁾에서는 時効處理에 依하여 炭火物을 析出し키므로서 引張強度를 增加시키고 크랙傳播速度를 줄여 疲勞強度를 增加시킬 수 있기 때문에 304 스테인레스鋼의 常溫疲勞現象에 미치는 熱處理의 影響은 重要하다고 생각되어 時効處理에 따른 疲勞크랙傳播速度($\frac{da}{dN}$)와 應力擴大係數幅 ΔK 의 關係等을 直接 微小格子를 利用하여 精密測定 함으로서 比較檢討 하였다.

2. 實驗方法

2.1. 材料 및 試驗片

本 實驗에 使用한 材料는 市販用의 두께 15 mm의 AISI 304 스테인레스鋼으로 Table 1의 化學成分을 갖는 오오스테나이트系이다.

또한 使用材料의 機械的 性質은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of the material (wt %).

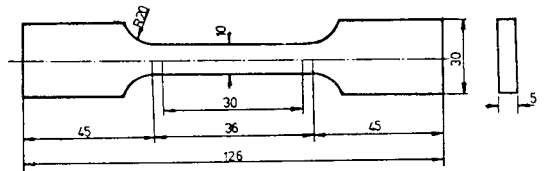
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.031	0.569	0.7	0.025	0.01	8.24	19.12
Mo	Cu	V	Al	Ti	Co	Pb
0.08	0.082	0.101	0.01	0.001	0.146	0.01

Table 2 Mechanical properties of the materials.

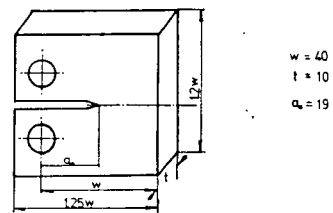
	Non heat	6hr aged	24hr aged
0.2% Proof strength (kg/mm ²)	50	46	47
Tensile strength (kg/mm ²)	70	71.9	71.6
Elongation (%)	65.3	66.4	66.8
Reduction of area (%)	61.8	68	70.9
Micro vickers Hardness (Hv)	234	198	192

試驗材料는 無時効材와 時効材의 2種類이며 時効材는 머플로에서 1080°C로 1時間 加熱한 후 물속에 急冷하여 溶體化處理를 하였다. 時効處理는 18-8 스테인레스鋼의 一般의인 最高 使用溫度이며 炭火物의 析出이 가장 顯著하다고 알려진 650°C의 溫度에서 6時間, 24時間의 2種類의 時効材를 準備하였다.

이들 無時効材와 2種의 時効材들은 Fig.1 (a)(b)의 形狀과 치수로 各各 加工하였다⁴⁾. 크랙發生을 容易하게 하기 위한 노치는 製作의 容易性등을 고려하여 放電加工機를 使用하여 Stright thru 로 加工하였다. 微小格子인 모아레격자의 제작은 表面을 버뜨연마한 후 피치 25.4 μm의 微小格子板을 사용 製作하여 完成하였다.



(a) Geometry of tensile specimen (mm)



(b) Geometry of Fatigue specimen (mm)

Fig. 1 Specimen configuration.

2.2. 實驗方法

引張實驗은 SCR式 速度制御方式을 採用한 10 ton UTM을 使用하여 5톤의 Load cell에서 引張速度 2 mm/min로 一定하게 行하였다.

時効에 따른 組織檢査는 75% HCl+25% HNO₃의 腐蝕液을 使用하여 120~150초 동안 腐蝕한 후 金屬顯微鏡으로 觀察한 후 寫眞 촬영하였다.

Fig.2는 無時効材와 2種類의 時効材의 金屬顯微鏡 組織을 表示한 것이다.

無時効材에서는 쌍정이 散在함이 觀察되었는데 이는 304 스테인레스鋼에서 나타나는 어니얼링雙晶이다. 時効材는 時間에 따라 결정립의 크기가 약간 커짐을 觀察할 수 있었다.

疲勞實驗은 SIMAZU 20 ton Electro Hydraulic Servo

Pulser의 引張 壓縮 疲勞試驗機를 使用하였으며 試驗 條件은 平均應力=0의 定應力의 引張·壓縮으로 應力比 $\downarrow R(P_{min}/P_{max})=-1$, 波形은 사인波, 사이클링速度는 1 Hz로 室溫 大氣中에서 一定하게 취하여 試驗하였다. 實驗中 크랙 進展은 traveling microscope로 관찰 검사하면서 크랙이 適當한 約 1個格子길이(25.4 μ m) 進展되었을때 試驗機에서 分離하여 金屬顯微鏡을 使用하

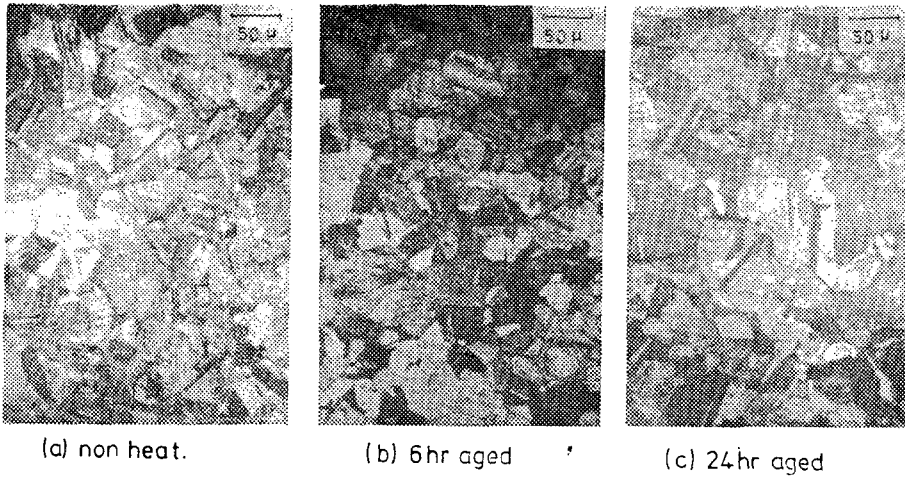


Fig. 2 Microstructural features.

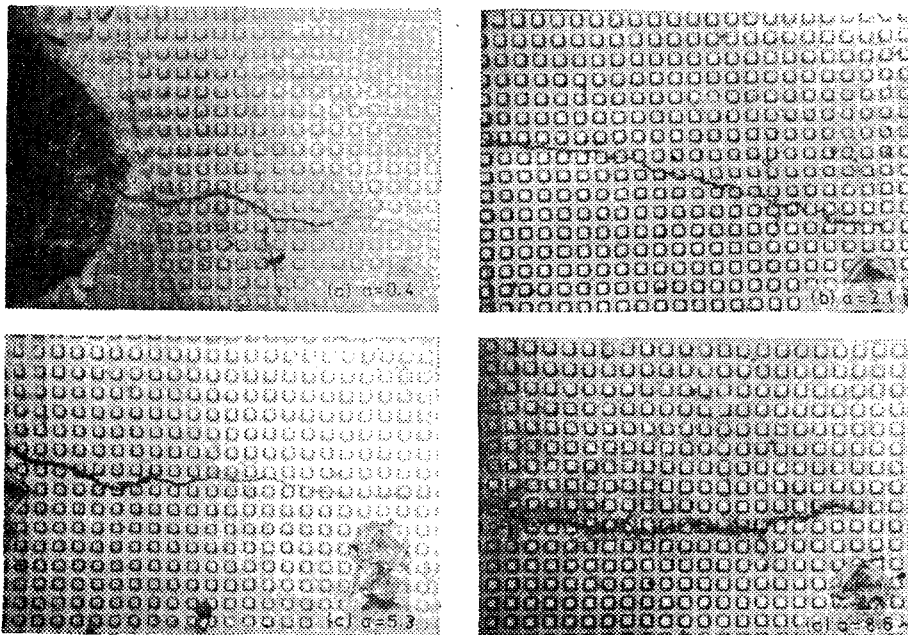


Fig. 3 Crack propagation behavior.

여 크랙進展 先端部를 擴大하여 사진 촬영하였다. 크랙길이의 測定은 촬영된 negative film을 투영검사기를 使用하여 1個格子間隔을 25.4 μm 로 보고 測定하였다. 試驗片을 試驗機에 다시 附着할 때는 Oscilloscope와 X-Y리코오더로 狀態를 記錄點檢하면서 試驗을 行하였다.

3. 結果 및 考察

3.1. 時効에 따른 機械的 性質

Table 2는 2種類의 時効材와 無時効材와의 機械的 性質을 나타낸다. 時効材는 機械的 性質에 있어서 Table 2에서 보는 바와같이 延伸率은 變化가 보이지 않으나 斷面收縮率에 있어서는 時効材와 無時効材에서 61%→71%정도의 差異가 보였다. 硬度는 時効材가 無時効材보다 낮고 24時間 時効材가 6時間 時効材보다 약간 떨어지고 있었다. 時効材에는 Cr-炭化物의 粒界析出로 因하여 粒內的 固溶體強化效果는 감소되어 硬度가 감소한 것으로 생각된다.

時効材는 粒界에 Cr 炭化物이 析出되어 破斷壽命이 增加한다는 報告가 있다⁵⁾⁶⁾.

即 800°C~450°C範圍는 Cr 炭火物이 生成되는 溫度區間으로서 時効時間이 짧으면 不連續炭化物이 粒界에 析出하고 時効時間이 길면 粒界에 連續約으로 炭化物이 析出한다. 本顯微鏡組織에서는 倍率이 낮아 炭化物 析出의 連續 및 不連續을 區別 觀察할 수 없었다.

3.2. 疲勞 크랙 傳播曲線

Fig. 3은 24時間 時効 試驗片의 크랙進展舉動($P = \pm 400 \text{ kg}$)을 보여주는 사진이다.

Fig. 3에서 크랙이 進展될수록 先端의 塑性變形量이 增加함을 알 수 있다.

疲勞크랙길이가 a 를 縱軸, 반복횟수 N 을 橫軸으로한 $a-N$ 曲線을 各 熱處理 및 荷重條件에 따라 行한 實驗의 結果는 Fig. 4와 같다.

여기에서 a 는 試驗片에 따라 荷重에 垂直인 方向으로 測定하였다. Fig. 4에서 반복횟수의 增加에 따라 疲勞크랙의 길이는 낮은 荷重으로 부터 높은 荷重으로 移動됨에 따라 曲線의 傾斜가 더욱 增加하는 傾向을 나타내고 있다. 또한 크랙 發生時期는 使用된 荷重이 높을수록 빠르고 또한 破斷까지의 反復回數가 적어짐을 볼 수 있다.

Fig. 5는 實驗結果에서 얻은 同一한 荷重條件($P = \pm 480 \text{ kg}$, $P = \pm 400 \text{ kg}$)에서 無時効材와 時効材의 $a-N$

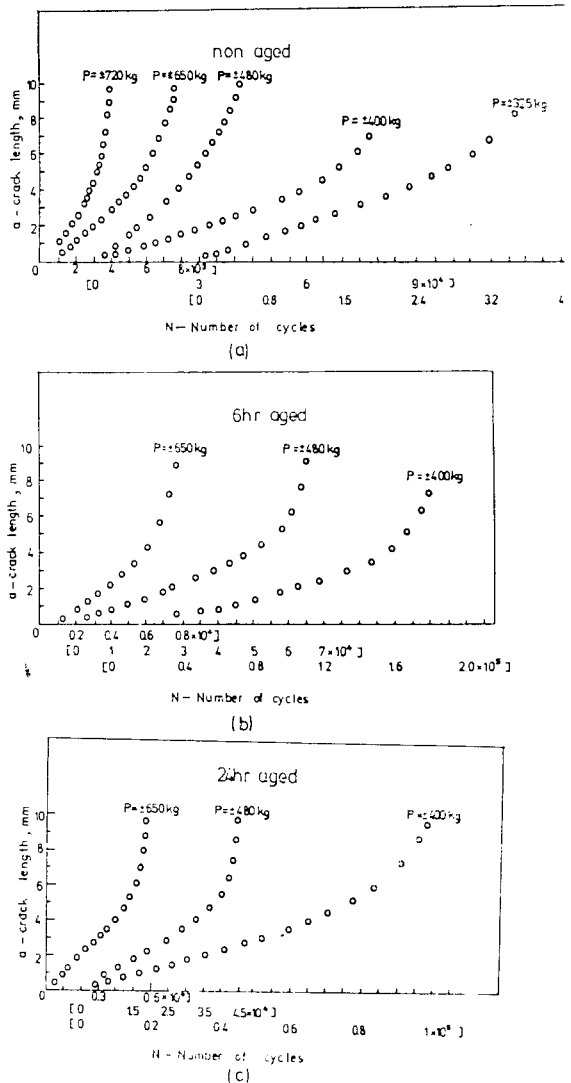


Fig. 4 Fatigue crack propagation behaviors.

曲線이다.

여기에서 反復荷重에 따라 無時効材가 時効材보다 빠르게 크랙進展을 일으키며 6時間 時効材가 24時間 時効材보다 늦은 크랙進展을 보여주고 있음을 알 수 있다. 6時間 時効시키면 粒界에 不連續인 炭化物이 析出하여 強度 및 延性を 增加시키고 있음을 알 수 있다. 一般적으로 疲勞強度는 引張強度에 比例해서 增加하므로 6時間 時効材는 크랙進展이 不連續炭化物²⁾에 依해서 저지되기 때문에 크랙傳播速度가 감소되는 것으로 생각된다.

24時間 長時間 時効시키면 粒界에 連續인 炭化物

析出이 發生하여 크랙이 粒界를 通하여 傳播되도록 Intergranular fracture path²⁾를 만들어 주기 때문에 크랙 傳播速度가 커지는 것으로 생각된다.

3.3. 疲勞 크랙 傳播速度

크랙이 成長함에 따른 크랙 傳播速度를 比較하기 위해 Fig. 4의 $a-N$ 曲線에서 各 點의 接線句配로 부터 크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$ 를 구하여 對數座標로 縱軸에, 크랙 길이 a 를 橫軸에 直角座標로 잡아 荷重에 따른 $\frac{da}{dN}-a$ 의 變化를 表示하면 Fig. 6과 같다.

여기에서 $\frac{da}{dN}$ 는 어떠한 반복회수동안 成長한 크랙의 사이클당의 平均길이로서 表示하면 다음식과 같다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{a_2 - a_1}{N_2 - N_1} \text{ (mm/cycle)} \quad (1)$$

(단 a_1, a_2 는 반복회수 N_1, N_2 에 對한 各各의 크랙길이이다)

Fig. 6의 曲線으로부터 크랙 傳播速度는 가해진 荷重이 낮아질수록 저하하며, 또한(낮은 傳播速度를 보여 주며)가해진 荷重이 높을때에는 時効에 依한 傳播速度에 큰 차이가 없으나 낮은 荷重에서는 傳播速度에 차이가 있음을 보여준다. 無時効材는 크랙의 初期에 時

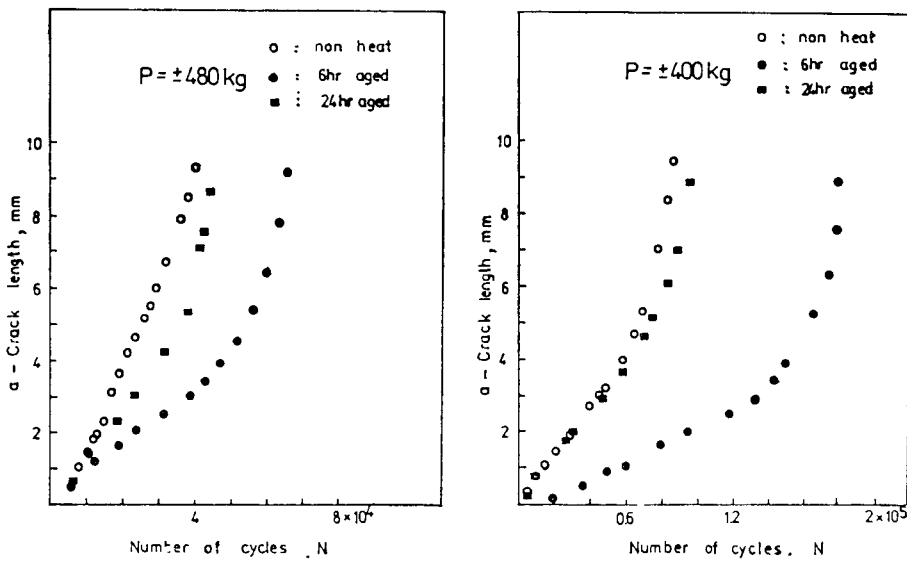


Fig. 5 Fatigue crack propagation behavior.

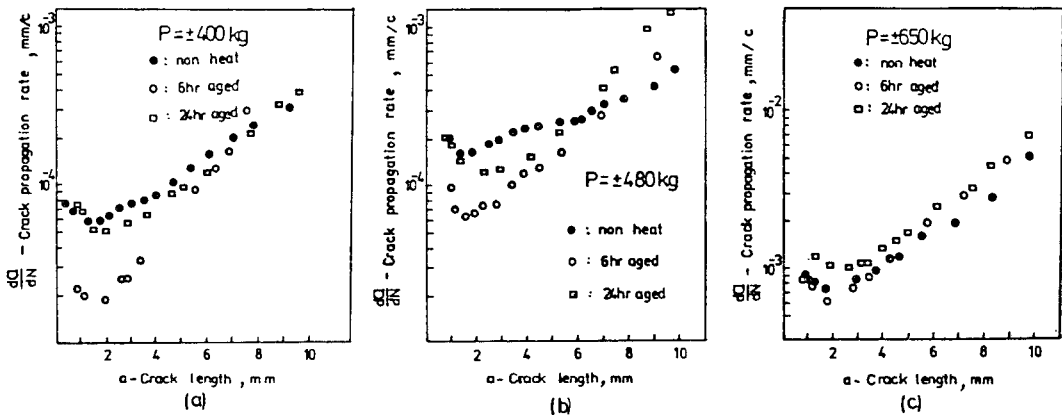


Fig. 6 Crack propagation rate vs. crack length.

効材보다 傳播速度가 빠르나 점차 크랙이 進展함에 따라 時効材보다 늦은 傳播速度를 보여주고 있다.

또한 6時間 時効材는 크랙進展 初期에 無時効材와 24時間 時効材에 비해 가장 늦은 傳播速度를 보이나 크랙의 進展에 따라 점차 빠른 傳播速度를 보이고 있으며 이 現象은 가해진 荷重이 낮을수록 더욱 크게 나타나 $P = \pm 400$ kg의 경우에 가장 빠른 速度를 나타내고 있다.

3.4. 疲勞 크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$ 와 應力擴大係數幅 ΔK 와의 관계

應力擴大係數幅 ΔK 값은 CT 試驗片에서 일반적으로 다음式으로 부터 구해진다.⁷⁾⁸⁾⁹⁾

$$\Delta K = \frac{P}{t\sqrt{w}} (29.6\alpha^{0.5} - 185.5\alpha^{1.5} + 655.7\alpha^{2.5} - 1017\alpha^{3.5} + 638.9\alpha^{4.5}) \left(\alpha = \frac{a}{w}\right) \quad (2)$$

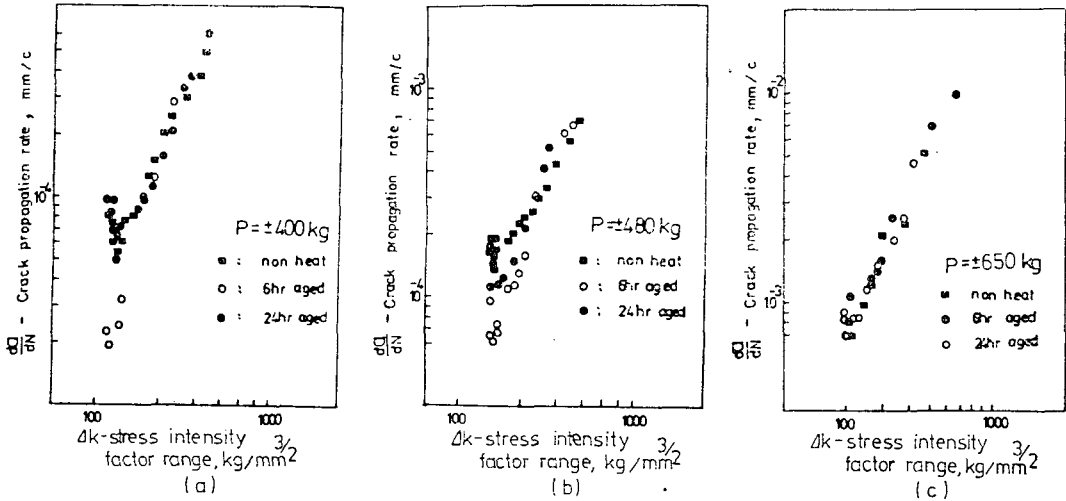


Fig. 7 The crack propagation rate vs. the stress intensity factor range.

(2)式에서 計算한 ΔK 값을 橫軸에, 크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$ 를 縱軸에 兩對數函數로 表示하면 Fig. 7과 같다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 共通으로 보여주는 크랙 傳播의 初期段階에서의 傳播速度의 屈曲은 銳利한 노치低部에 있어서의 應力分布때문에 크랙 傳播速度는 일단 減少한 후에 增加하게 되기 때문이다.¹⁰⁾

屈曲을 지난 크랙 傳播는 거의 直線關係로 나타나는 安定成長 範圍라 할 수 있어 Paris 등이 提唱한¹¹⁾ (3) 式의 形態로 表現이 可能하다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (3)$$

Fig. 7(a)(b)(c)에서 時効에 따른 c 와 m 값을 구하면 다음과 같다.

無時効材

$$\left[\begin{array}{l} -P = \pm 480\text{kg}; \frac{da}{dN} = 1.73 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.354} - \\ P = \pm 400\text{kg}; \frac{da}{dN} = 5.00 \times 10^{-9} (\Delta K)^{1.155} \\ -P = \pm 325\text{kg}; \frac{da}{dN} = 3.47 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.006} \end{array} \right.$$

6時間時効材

$$\left[\begin{array}{l} -P = \pm 650\text{kg}; \frac{da}{dN} = 1.565 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.45} \\ P = \pm 480\text{kg}; \frac{da}{dN} = 2.707 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.43} \\ -P = \pm 400\text{kg}; \frac{da}{dN} = 3.616 \times 10^{-14} (\Delta K)^{4.20} \end{array} \right. \quad (4)$$

24時間時効材

$$\left[\begin{array}{l} -P = \pm 650\text{kg}; \frac{da}{dN} = 4.021 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.28} \\ P = \pm 480\text{kg}; \frac{da}{dN} = 1.179 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.74} \\ -P = \pm 400\text{kg}; \frac{da}{dN} = 1.904 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.99} \end{array} \right.$$

여기에서 應力擴大係數幅 ΔK 의 指數인 m 값은 荷重에 反比例하여 나타남을 보인다. 또한 無時効材보다 時効材에서 좀더 크게 나타나며 安定成長 영역에서 時効材의 疲勞크랙 傳播傾向은 비슷함을 나타낸다. Fig. 7에서 各 作用荷重의 綜合的인 c 와 m 의 값은 다음과 같다.

$$\left[\begin{array}{l} \text{無時効材}; \frac{da}{dN} = 3.59 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.44} \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} 6 \text{時間時効材}; \frac{da}{dN} = 1.02 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.17} \\ 24 \text{時間時効材}; \frac{da}{dN} = 5.90 \times 10^{-13} (\Delta K)^{3.32} \end{array} \right] \quad (5)$$

Paris 등은 4 乘則을 提唱하여 材料에 관계없이 $m=4$ 에서 實驗結果가 가장 廣範圍하게 整理된다 하였으나 많은 實驗結果에 依하여 m 값은 4 에 限定되지 않으며 鋼材의 경우 0.5~8 의 範圍에 있다고 報告하고¹²⁾ 있다 本 實驗에서 얻은 m 값은 1.354~4.2 로서 Paris 의 $m=4$ 와는 약간의 차이가 있으나 0.5~8 의 範圍內에 包含되고 있음을 보여준다.

4. 結 論

常溫에서 304 스테인레스鋼의 650°C 에서 6 時間, 24 時間 時効材와 無時効材의 疲勞 크랙 傳播學動을 微小格子를 利用하여 測定 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 크랙 進展測定에 微小格子를 利用한 結果 크랙 進展을 직접적으로 精確히 測定할 수 있었다.

(2) 크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$ 는 荷重이 낮을수록 느린 傳播速度를 보이며 時効에 依한 傳播速度의 影響은 높은 荷重에서는 적고 낮은 荷重에서 크게 나타났다.

(3) 無時効材는 時効材보다 初期의 크랙 傳播速度가 빠르나 크랙이 進展함에 따라 반대로 늦은 傳播速度를 보이고 있었다.

(4) 時効材의 應力擴大係數幅 ΔK 의 指數 m 값은 無時効材보다 다소 크나 時効時間의 差에 依한 變化는 거의 없으며 $m=1.354 \sim 4.2$ 의 範圍에 있었다.

(5) 時効에 따른 크랙 傳播速度와 應力擴大係數幅의 關係식은 다음식으로 表示된다.

$$\text{無時効材} \quad ; \quad \frac{da}{dN} = 3.59 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.44}$$

$$6 \text{時間時効材}; \frac{da}{dN} = 1.02 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.17}$$

$$24 \text{時間時効材}; \frac{da}{dN} = 5.90 \times 10^{-13} (\Delta K)^{3.33}$$

Reference

- 1) N.E. Dowling & J.A. Begley, ASTM STP 590 (1976) 80.
- 2) W.F. Smith; Structure and Properties of Engineering Alloys (1981) p.296~299, p.477.
- 3) A.S. Tetelman & A.J. McEvily, Fracture of Structural Materials, John Wiley & Sons. Inc 1967.
- 4) ANNUAL Book of ASTM STANDARDS, America Society for Testing and Materials E399, 1973.
- 5) P. SOO & J.G.Y. Choo, High Cycle Fatigue Behavior of Solution-Annealed and Thermally-Aged Type 304 Stainless Steel. Journal of Engineering Materials and Technology Vol.102, pp.141~146, Jan. 1980.
- 6) 吳世旭의 4 명, SUS 316 鋼의 高溫低 Cycle 疲勞學動에 미치는 粒界析出物의 影響, 대한기계학회 논문집, 제 4 권 제 4 호. pp.152~159, 1980.
- 7) S.T. Rolfe & J.M. Barson, Fracture and Fatigue control in structures Chap.3. Prentice-Hall, New Jersey. 1977.
- 8) J.F. Knott 의 2 명 Fundamentals of Fracture Mechanics. Chap 5, John Wiley & Sons. New York. 1973.
- 9) Lee. A. James & EARL. B. Schwenk, Fatigue-Crack Propagation Behavior of Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperatures, Metallurgical transactions. Vol.2, pp.491~496, Feb.1971.
- 10) Tatsuo Sakai et al, Effect of Aging Treatment on Fatigue Crack Propagation of 18% Ni Maraging Steel Bulletin of the JSME. Vol.22. No.165, pp. 289~294, March 1979.
- 11) P. Paris & F. ERDOGAN, A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Transactions of the ASME, pp.528~534 Dec.1963.
- 12) Hideo kidagawa, 疲勞 Crack 에 破壞力學適用 日本機械學會誌 Vol. 75, pp.1068~1080, 1972.