

<論 文>

SUS 304 鋼의 常溫下 表面疲勞균열의 發生 · 成長舉動에 관한 研究

徐 昌 敏* · 金 奎 南**

(1984年 2 月 29日 接受)

A Study on the Initiation and Growth Behaviors of Surface Crack in a Type 304 Stainless Steel at Room Temperature

Chang Min Suh and Gju Nam Kim

Abstract

In-plane tension fatigue tests ($R=0.1$) were carried out to investigate the initiation and growth behaviors of very small surface fatigue cracks on smooth unnotched surfaces of type 304 stainless steel at room temperature. The present paper deals with the unification of two approaches to the analysis of fatigue; the one approach is based on fracture mechanics concept and the other on low-cycle fatigue concept.

The results are; (1) Maximum crack length, $2a_{max}$, initiated at a very small surface scratch not exceeding $20 \mu m$ which can exist on the surface after buffing. And the density of small surface crack is remarkably low compared to that of mild steel.

(2) The growth rate, $d(2a)/dN$, of very small fatigue cracks can be represented by one straight line as a function of either stress intensity factor range, ΔK_I , or cyclic total strain intensity factor range, ΔK_{ϵ} , for various values of the nominal stress range.

1. 緒 論

疲勞現象을 巨視的 및 力學的으로 취급한 研究에 대해서도, 大別하면 平滑材의 疲勞強度에 着眼한 소위 低사이클 疲勞概念과 균열계의 疲勞균열 成長舉動에 착안한 破壞力學的 概念으로 分類된다. 특히 後者の 研究는 最近 급속하게 진보되어, 各種 材料의 貫通大 균열의 成長舉動에 관해서는 多數의 데이터가 報告되어, 材料選擇뿐만 아니라, 構造物中에 檢出된 缺陷의 評價 및 殘存壽命의 豫測 등에 적용되어 成果를 올리

고 있다⁽¹⁾.

그러나, 構造物中에 檢出되어 問題가 되는 것은 微小表面疲勞균열의 경우가 많다. 특히 평활재의 경우에는 疲勞壽命의 대부분은 微小表面균열의 發生 · 成長過程에 소요되기 때문에 最近 平滑材 表面의 微小表面균열의 成長⁽²⁾ 및 疲勞균열의 初期成長에 관한 研究⁽³⁾의 重要性이 認識되어 있지만, 이러한 研究는 實驗技術上 및 解析上의 困難때문에 研究例가 적고, 破壞力學的 觀點과 手法으로 定量的으로 조사된 研究는 극히 적다^(2,4).

本 研究는 平滑材 表面에 發生 · 成長하는 微小疲勞 균열에 着眼해서, 그 定量的 解析을 目的으로 한다. 本報는 그 方向의 研究努力의 一環으로서 앞서 연구된

*正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

**正會員, 釜山大學校 工科大學 機械工學科

軟鋼 平滑材 表面에 發生·成長하는 微小表面 균열의 舉動^(4,5,6,8)을 근거로 해서, 高溫機器에 使用頻도가 높은 스테인레스 304 鋼 平滑材의 常溫의 片振引張軸荷重 疲勞試驗을 실시하여, 試驗片 表面에 發生·成長하는 微小表面균열을 레프리카法을 使用하여 詳細하게 觀察하고, 試驗片을 破斷시킨 最大균열의 成長特性을 定量的으로 評價한 것이다.

따라서 本報는 SUS 304 鋼의 常溫하의 平滑材 表面에 發生·成長하는 微小表面 疲勞균열의 舉動을 破壞力學的 觀點과 手法으로 定量的으로 조사하려는 研究의 一環이다.

2. 實驗方法

試驗片은 機器部材에 使用頻도가 높은 SUS 304 스테인레스鋼 溶體化 處理材이며, 直徑 25mm 인 壓延丸棒이다. 이의 化學成分과 機械的 性質을 Table 1에 나타낸다. 本 實驗에 使用된 引張軸荷重疲勞試驗用은 이 丸棒에서 Fig. 1과 같이 機械加工으로 成形한 후, 中央平滑部를 연마지 2,000 번까지 研磨하였다.

本 研究에는 試驗片 中央表面에 缺陷이 없는 平滑材 試驗片을 使用하며, 表面균열이 成長하는 方向은 壓延 方向과 直角으로 되도록 하였다. 또 시험편은 微小균

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

Chemical composition, Wt, %							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.07	0.35	1.89	0.032	0.014	—	8.5	18.0
Mechanical properties							
Yield point (0.2% offset)	Tensile strength	Elongation	Reduction of area	Hardness Brinell No.			
kg/mm ²	kg/mm ²	%	%	H _B			
32.0	66.0	57.0	72.0	179			

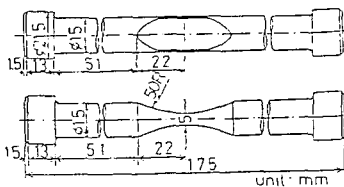


Fig. 1 Configuration of the specimen for in-plane tension fatigue test (R=0.1)

열의 觀察을 容易하게 하기 위하여 王水로 가볍게 에칭시켰다. 또 시험편의 平均結晶粒徑은 약 10 μ m 이었다.

疲勞試驗은 電氣油壓式疲勞試驗機를 使用하였고, 大氣中에서 應力比 R=0.1의 荷重制御疲勞試驗을 실시하였다. 荷重波形은, 周波數 600cpm의 正弦波와 400cpm의 正의 鋸齒狀波(上昇時間/下降時間=7.78)를 使用하였다.

平滑材上的 微小균열의 측정은, 疲勞壽命의 5%마다 試驗機를 일시 停止시키고, 平滑平行部에 레프리카를 채취, 보관하고, 시험편 파단후, 시험편을 最終破斷시킨 最大균열의 發生·成長舉動을 光學顯微鏡을 사용하여, 反復數의 後期에서 初期로 향하여 逆으로 微小균열을 精密하게 追跡·測定하였다. 또 균열의 깊이 방향의 깊이 b 및 균열면 형상의 測定은 膜퍼컬러법을 使用하여, 表面균열 깊이 2a를 개입시켜 깊이 b를 決定하는 方法을 취하였다. 또한 SEM에 의한 破斷面 觀察도 실시하여, 微小表面 균열의 發生에 대하여 조사하였다.

3. 實驗結果와 考察

3.1. 應力-荷重反復數 特性

Fig. 2에 本 實驗에서 얻은 平滑材의 片振引張軸荷重疲勞試驗(R=0.1)에 의한 常溫의 S-N_f 곡선(○ ⊗로 表示)을 公稱應力의 全振幅 $\Delta\sigma$ 와 破斷反復數 N_f로 나타낸다. 이 S-N_f 線圖에서 平滑材의 常溫의 疲勞限度는 10⁷回 基準強度로 $\sigma_{max}=45.5\text{kg/mm}^2$ 이며, 降伏點 32kg/mm²을 넘고 있다. 또한 平滑材 高溫에

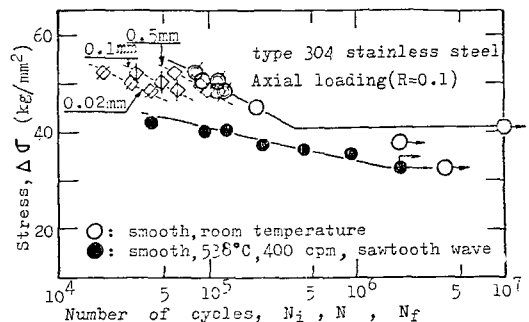


Fig. 2 The number of load cycles for initiation of cracks and the crack length at a later stage of the fatigue life. The numbers indicate the crack length

서의 疲勞強度는 $\sigma_{max}=36\text{kg/mm}^2$ 이며, 溫度에 의한 疲勞限度의 低下를 나타낸다. 이 高溫 538°C 의 데이터는 400cpm 一定인 正의 鋸齒狀波로 얻어진 結果이다(●으로 표시함).

微小表面균열의 發生時期와 成長舉動을 조사하기 위하여 Fig. 2에는 $S-N_f$ 곡선에 ⊙으로 나타낸 셋 應力레벨 즉 $\sigma_{max}=54, 56, 58\text{kg/mm}^2$ 에서의 表面균열길이 $2a$ 가 어떤 一定值로 되는 反復數를 연결한 等균열길이 곡선을 병기하였다. 균열발생반복수 N_i ($2a=0.02\text{mm}$ 로 되는 反復數를 N_i 로 定義하고⁽⁴⁾, ⊙으로 표시한다)와 균열길이 a 가 어떤 一定值로 되는 反復數 N (즉 $2a=0.1\text{mm}$ (◇으로 표시)과 0.5mm (◇으로 표시)을 연결한 等균열길이곡선과 破斷反復數 N_f 를 표시한다. 破線에 화살로 표시한 數字는 미소표면 균열의 측정시의 表面길이 $2a$ (이 경우 最大균열^(4,5)의 표면 길이임)이다.

이 等균열길이 곡선은 $S-N_f$ 곡선과 거의 平行하고, $N_i, N_{2a}=\text{const.}$, N_f 간의 比는 應力레벨에 관계없이, 거의 一定하며, 이 傾向은 軟鋼의 結果^(4,5)와도 잘 一致한다. 이상의 結果는 破壞力學的인 疲勞壽命의 豫測과 檢査에도 有用하다.

3.2. 平滑材 表面에서의 微小균열의 發生과 成長舉動

Photo 1(a)는 平滑材 常溫의 疲勞試驗에 破斷된 破斷面의 사진을 나타낸다. Photo 1(b)는 Photo 1(a) 상의 同一面上의 近接한 두 F 균열의 擴大 寫眞을 나타낸다. Photo 1(c)는 Photo 1(b)의 表面레프리카 사진을 4회의 反復數에 대하여 나타낸다.

Photo 1(b)에서 着色된 균열면이 左右對稱形에서 약간 逸脫해서 近接하는 균열단이 다른 단에 比해서 약간 成長이 빠름을 알 수 있다. 그後 F_1 균열과 F_2 균열은 合體해서 Photo 1(c)의 (d)와 같이 한개의 連結된 균열면을 形成하게 된다. 이와같이 인접된 두 균열의 合體는 균열의 相對의 位置에 따라 균열성장속의 加速 혹은 減速의 傾向을 취한다. 이러한 傾向은 HT80, SM 50材의 平滑材에도 관찰되었다⁽²⁾.

本 研究의 SUS 304 鋼의 常溫 疲勞試驗에서는, 軟鋼⁽²⁾, SM 50材⁽²⁾의 平滑材 結果에 比較해서, 平滑材 表面에 發生하는 微小疲勞균열의 密度가 적고, 균열의 干涉·合體는 드물었다. 軟鋼 平滑材⁽⁶⁾에서는 微小균열이 結晶粒界와 結晶粒內의 슬립밴드에서 多數 發生함에 대해서, SUS 304 鋼의 常溫 平滑材에서는 試驗片 表面의 研磨 흄등의 작은 表面缺陷등에서 發生하는

것이 觀察되었다.

Photo 2에는 Photo 1(a)와 동일 試驗片상의 表面에 관찰된 F_2 균열과 S 균열에 대하여 미소균열이 發生한 곳의 SEM 寫眞을 나타낸다. 이 SEM 사진에서 보면 약 $20\mu\text{m}$ 의 表面缺陷에서 微小表面疲勞 균열이 發生한 것을 알 수 있다.

本 試驗片의 常溫에서는 이와같은 작은 表面缺陷에서 疲勞균열이 小數個 發生하였고, Photo 1과 같이

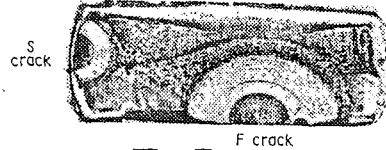


Photo 1(a) Fracture surface showing multiple crack origins and temper colored crack configurations ($\sigma=56\sim 5.6\text{kg/mm}^2$)

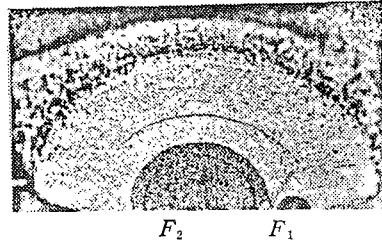


Photo 1(b) Magnification of F crack

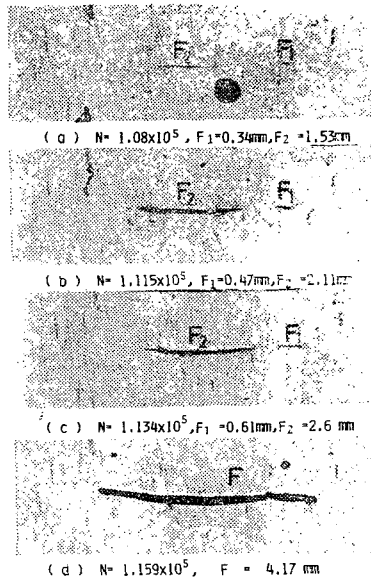


Photo 1(c) Propagation and coalescence of two fatigue cracks (F_1, F_2) on the smooth surface. Photo 1(b) showing the fracture surface of these fatigue cracks

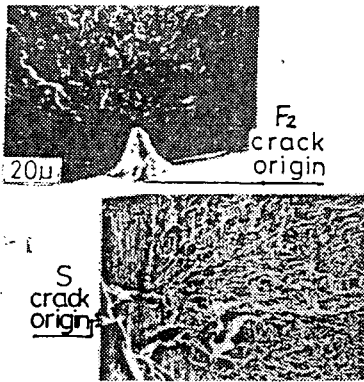


Photo 2 SEM fractographs showing fatigue fracture surface micromorphology and crack origin

거의 單獨으로 成長하는 경향이 관찰되었다. 이것은, SUS 304 鋼의 常溫에서는 작은 表面缺陷에 대한 切缺感受性이 높기 때문이다. 이 材料는 高溫이 되면 表面의 작은 人工피트(0.5mmφ)에서 균열이 發生하기 어려운 狀態로 되고 常溫보다 高溫의 疲勞限度가 增加하고 있는 것이 著者에 의하여 報告되어 있다⁽⁷⁾.

Fig. 3(a)는 Fig. 2 상에서 설명한 세 응력레벨에서의 最大균열 $2a_{max}$ 의 成長에 착안하고, 그 平滑材의 試驗片 表面에의 균열成長特性을 나타낸다. 측정된 피로 균열의 표면길이는 약 0.02mm에서 10mm 정도까지 3차(order) 이상으로 되어 있기 때문에, 一連의 成長特性을 같은 精密度로 記載하기 어렵기 때문에, 縱軸의 균열길이의 스케일을 2種類로 併記하고, 각각의 스케일에 따라 2개의 곡선을 나누어서 나타내었다. 이때 이 곡선에는 對應하는 스케일의 番號를 ①②(①은 0~2.5mm, ②는 0~10mm)로 나타내었다. 그림 중에 화살표(→)는 작은 표면피로 균열의 合體를 나타낸다.

常溫 平滑材의 작은 표면균열의 길이 $2a$ 와 反復數比 N/N_f 와의 관계를 정리하여, Fig. 3(b)에 나타낸다. 이 SUS 304 鋼의 균열 발생은 疲勞壽命의 10~20%에 달하고, 이러한 傾向은 軟鋼^(4,8)과도 一致한다. 이와같은 整理를 실시하면 $2a-N/N_f$ 곡선은 應力레벨에 거의 依存하지 않고, 比較的 좁은 分散帶內에 모이는 特性을 나타내고, 軟鋼의 結果와도 一致하는 경향을 나타내고 있다.

이 그림에서 疲勞壽命의 約 80%以上이 균열성장 과정에 소비되고, $2a-N/N_f$ 特性에서 應力依存성이 적은 것은, 앞서 설명한 등균열길이 곡선이 각각 $S-N_f$

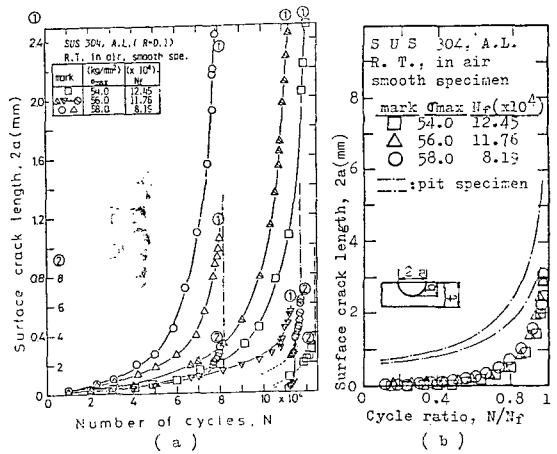


Fig. 3 (a) Propagation behaviors of fatigue cracks initiated on smooth specimen of type 304 stainless steel(axial loading, $R=0.1$, room temperature)
(b) Relation between surface crack length and the cycle ratio

곡선에 거의 平行한 平行直線群이 되는 것과 對應하고 있다.

3.3. 균열면 형상의 변화

本 研究에 의하면, 平滑材에서 發生·成長하는 작은 表面균열은 全壽命을 통해서 시험편 표면 및 荷重軸에 거의 直交한 平坦한 면을 形成하고, 이 2차원 형상은

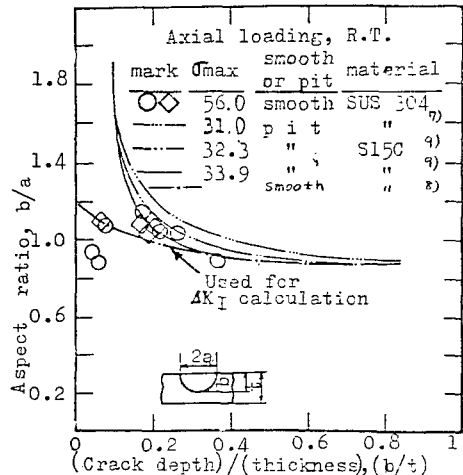


Fig. 4 Relation of aspect ratio(b/a) with the ratio of crack depth versus the thickness of specimen for axial loading ($R=0.1$, R.T)

시험편 표면과 균열前緣이 直角하는 半圓에 가까운 形狀에 있음이 명백하다. 이와같은 데이터를 使用해서 균열표면 길이와 깊이의 형상비(aspect ratio) b/a 즉 균열면형상의 균열성장과의 變化를 Fig. 4에 나타낸다.

Fig. 4에는 이를 서로 比較하기 위하여 SUS 304의 피트재⁽⁷⁾와 軟鋼 G材의 平滑材⁽⁸⁾와 피트재⁽⁹⁾의 데이터를 同時에 나타낸다. 이 데이터에서 첫째, 균열성장과 더불어 b/t 이 0.4 이상에서 b/a 가 約 0.9의 거의 半圓에 가깝게 된다. 이 경향은 ---로 나타낸 軟鋼 G材⁽⁸⁾와 비슷하다. 둘째, 平滑材의 데이터는 피트材보다 호트러짐이 크다. 셋째, 균열의 成長과 더불어 b/a 가 서서히 低下하고, b/t 가 0.6 以下에서는 피트材와 平滑材의 데이터가 一致하는 傾向을 나타낸다.

3.4. 疲勞균열 成長速度의 破壞力學的 整理

上記의 모든 結果를 기초로하여 平滑材에 發生·成長하는 微小表面균열의 發生 直後에서 破斷에 달하는 最大균열의 成長特性의 破壞力學的 評價를 시도하였다. 이때 單獨균열로 해서 成長하는 領域만의 成長速度에 대해서 以下の 두가지 方法으로 整理를 실시하여 그 結果를 Figs. 5, 7에 나타낸다.

(1) $\Delta K_I - d(2b)/dN$ 特性

Fig. 3상의 表面길이의 成長特性은 Fig. 4상에 ---로 표시된 관계에서 表面길이는 疲勞균열의 最深點의 길이로 換算하였다. 이 微小表面疲勞 균열의 最深點의 疲勞균열 成長速度 $d(2b)/dN$ 를 Kobayashi 式⁽¹⁰⁾을 사용하여 구한 最深點의 ΔK_I 로 整理한 結果를 Fig. 5에 나타낸다. HT 80材, SM 50材에서도 이와같은 整理方法으로 平滑材 表面上的 微小균열의 破壞力學的 整理가 可能하다고 報告되어 있다⁽²⁾. 本 研究에서도 이와같은 整理方法에 의하여 $R=-1$ 의 軟鋼에서 存在한 應力依存性⁽⁶⁾과 $R=0.05$ 의 應力依存性이 나타나지 않고, 세 應력레벨의 데이터가 統一적으로 整理되었다.

(2) 反復스트레인擴大 係數에 의한 整理

다음에 本 研究에서는 低사이클 疲勞概念과 破壞力學的 概念을 統一적으로 運用하기 위하여 著者 중에 일인이 發表한 ΔK_c (cyclic strain intensity factor range)^(6,8,9)에 의한 方法으로 整理하여 본다. 이것은 線形破壞力學에서 사용하고 있는 스트레인 擴大係數範圍, 즉 $\Delta K/E$ 와 區別해서, 非線形인 應力·스트레인의 최스테리시스에서 얻어지는 $\Delta \epsilon$ 을 사용하는 反復스트레인 擴大係數 範圍이다.

이 스트레인 範圍 $\Delta \epsilon$ 은 試驗片 平滑平行部 中央에

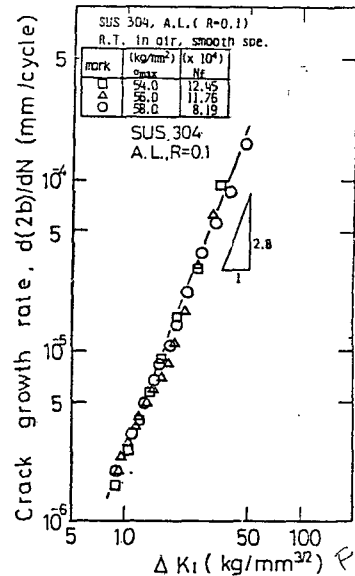


Fig. 5 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks initiated at smooth unnotched specimen upon the stress intensity factor range ΔK_I

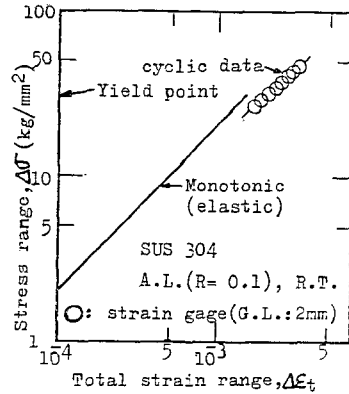


Fig. 6 Relation between cyclic total strain range, $\Delta \epsilon_t$, versus stress range $\Delta \sigma$

균열測定面과 反對側에 抵抗式 스트레인 게이지(게이지 길이 2mm)를 부치고 X-Y 레코더를 사용하여 動的으로 얻은 應力-스트레인의 安定된 최스테리시스에서 測定한다. Fig. 6에는 multiple stage(多段)法⁽¹¹⁾에 의한 各 應력레벨에서의 安定된 최스테리시스 곡선에서 測定한 $\Delta \epsilon_t$ 과 應力值의 關係를 ○으로 表示한다.

이 Fig. 6에서 應력레벨과 스트레인과의 關係는 兩對數紙上에서 直線으로 되고, 應력과 스트레인 관계가 指數關係로 되는 軟鋼의 結果^(8,9)와도 一致한다. 이 데이터에 나타낸 安定된 全스트레인 範圍 $\Delta \epsilon_t$ 를 使用한

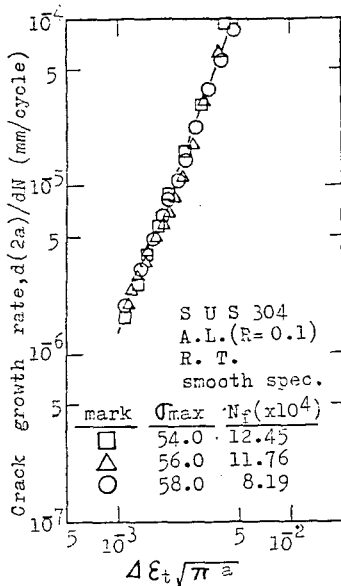


Fig. 7 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the cyclic strain intensity factor range

$\Delta K\epsilon_t$ 와 $d(2a)/dN$ 곡선을 상온의 평활材 데이터에 대해서 Fig. 7에 나타낸다.

이와같이 $\Delta\epsilon_t$ 를 사용한 $\Delta K\epsilon_t$ 는 세 응력레벨의 데이터가 한개의 직선에 모이고 응력依存性은 消滅하였다. 따라서 反復스트레인 擴大係數는 SUS 304의 상온 평활材上的 微小表面疲勞라도 統一的인 整理가 可能함을 나타낸다. 또한 $\Delta K\epsilon_t$ 에 의한 $R=0.05$ 및 $R=-1$ 의 軟鋼 G材 평활材上的 微小表面疲勞 균열에도 統一的인 整理가 可能함이 報告되어 있다⁽⁸⁾.

4. 結 論

低사이클 疲勞概念과 破壞力學概念과의 統一的運用을 目的으로 해서, 片振引張軸荷重疲勞試驗을 실시하여 SUS 304 강의 상온 평활材 表面에 發生·成長하는 微小表面피로 균열의 舉動을 측정하여 破壞力學的 觀點과 手法으로 조사한 즉

(1) 평활材表面에 發生하는 균열의 密度는 적고, 상온에는 切缺感受性이 크기 때문에, 평활材 表面에 남은 20 μ m 정도의 작은 表面缺陷에서 微小균열이 發生·成長해서 試驗片을 最終적으로 破斷시켰다.

(2) 평활材 試驗片을 破斷에 달한 最大균열의 成長特性을 ΔK_I 과 $d(2b)/dN$ 로 정리하여, ΔK_I 依存性을 명백히 하였다. 또 反復 스트레인 擴大係數 範圍 $\Delta K\epsilon_t$ 와 $d(2a)/dN$ 로 整理해도 한 개의 직선상에 統一的인 정리가 可能함을 알았다.

후 기

본 研究는 1983년도 산학협동재단의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 謝意를 표한다.

參 考 文 獻

- (1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Appendix A, 1977
- (2) 北川英夫, 結城良治, 高橋進, 徐昌敏; “平滑表面에 發生成長する 微小疲勞き裂의 破壞力學的 研究”, 日本機械學會講論, No. 790-9, pp. 25~30, 1979
- (3) Forsyth, P.J.E; “Fatigue Damage and Crack Growth in Aluminium Alloys”, ACTA Metallurgica, Vol.11, pp.703~715, 1963
- (4) 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 第7卷 第1號, pp.28~35, 1983
- (5) Suh, C.M., R. Yuuki and H. Kitagawa; “Basic Study for the Detection and Evaluation of Micro-Surface-Fatigue-Cracks”, Treaties of the Pan Pacific Symposium on NDT, Seoul, pp.233~247, 1978
- (6) Kitagawa, H., S. Takahashi, C.M. Suh and S. Miyashita, “Quantitative Analysis of Fatigue Process-Micro-Cracks and Slip Lines under Cyclic Strains”, ASTM STP 675, pp.420~449, 1979
- (7) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, “高温における 스텐레스鋼의 表面き裂의 疲勞き裂成長特性”, 材料, 第31卷 第344號 pp.500~504, 1982
- (8) 北川英夫, 徐昌敏, “軟鋼平滑材의 回轉曲げ及び 片振り引張리疲勞における 微小表面き裂의 成長舉動 (平滑材疲勞의 破壞力學解析)”, 日本材料學會의 第13回疲勞 Symposium, pp.10~14, 1979
- (9) 北川英夫, 結城良治, 徐昌敏, “小さな人工缺陷からの 疲勞き裂成長舉動”, 日本材料學會의 第14回疲勞 Symposium, pp.26~30, 1980
- (10) Kobayashi, A.S.; “Crack Opening Displacement in a Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending”, Proc. Second Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, ASM, ICM-II, pp.1073~1077, 1976
- (11) Landgraf, R.W., Morrow, Jo Dean and Endo, T., “Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve”, Journal of Materials, Vol. 4 No. 1, pp. 176~188, 1969