

<論 文>

平滑材表面의 微小疲勞균열에 관한 基礎的 特性

徐 昌 敏* · 北川英夫** · 結城良治**

(1982年 9月 22日 接受)

Basic Characteristics of Micro-Fatigue-Cracks on the Unnotched Smooth Specimens

Chang Min Suh, Hideo Kitagawa and Ryoji Yuuki

Abstract

Quantitative analysis have been carried out on the micro-cracks on the surface and into the depth of unnotched smooth mild steel specimen under cyclic strains by rotating bending fatigue tests.

Some of the results are;

- (1) Cracks initiate at the early stage of fatigue life, $N_i/N_f=10$ to 20%, and propagate during the rest of fatigue life.
- (2) Coalescence of highly crowded small fatigue cracks of random distribution seems to induce the final fracture at higher stress level.
- (3) The curves of crack initiation and the equal crack length on the graph of stress versus number of cycles are parallel to the S-N curve.
- (4) The distributions of micro-surface crack length and depth show the composite Weibull distributions which are approximated to two straight lines separated by the value of transient region between stage I and stage II crack.

1. 緒 論

各種의 機器·構造物의 疲勞破壞防止를 目的으로 現在까지 여러가지 觀點에서의 金屬材料의 疲勞現象에 關한 많은 研究가 축적되어 왔다. 疲勞現象을 巨視的 및 力學的으로 취급한 研究에 對하여 大別하면, 平滑材의 疲勞強度에 着眼한 소위 低 사이클 疲勞의인 어프로치(approach)와 균열材의 疲勞균열 成長舉動에 착안한 破壞力學的인 어프로치로 分類된다. 특히 後者の 큰 貫通 균열의 成長舉動에 關한 研究는 最近, 急速히 進歩되어, 各種材料의 데이터가 報告되어, 材料選擇 뿐

만 아니라, 構造物中에 檢出된 欠陷의 評價 및 殘存壽命의 豫測等에 적용되어, 成果를 올리고 있다.¹⁾ 그러나 構造物中에서 問題가 되는 것은 微小表面균열이고, 더우기 高密度로 分布하는 경우가 많다. 疲勞壽命의 大部分은 이와같은 微小表面균열의 發生·成長過程에 소 比되고 있기 때문에 最近 平滑材表面의 微小균열의 成長²⁾ 및 疲勞균열의 初期成長에 關한 研究의 重要性이 認識되고 있지만, 이와같은 研究는, 實際技術上 및 解析上의 困難으로 研究例가 적고, 定量的 評價法도 確 立되어 있지 않다.

本 研究는 平滑材表面에 多數 發生·成長하는 微小 疲勞균열 舉動, 즉 1) 微小分布균열의 發生·成長합체 舉動, 2) 表面균열의 形狀變化 및 깊이방향의 成長舉 動, 3) 最大균열의 成長特性 等에 着眼하여 이의 定量

* 正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

** 東京大學 生産技術研究所 第一部

的 解析에 目標를 두어 反復應力을 받는 疲勞현상의 諸問題의 규명에 필요한 기초적 자료를 얻기 위함이다.

2. 試料 및 實驗方法

試料는 壓延鋼板 SB-22(A材라 함)이고, 930°C에서 한 時間 加熱한 後, 冷却한다. 試驗片은 試驗片의 軸이 試料의 壓延方向과 一致하도록 採取했다. 그 化學成分과 앞서의 熱處理 後의 機械的 性質을 table 1에 나타낸다. 熱處理를 실시한 試料의 平均結晶粒徑은 23 μ 程度(ASTM 粒度番號 8)이다. 試驗片은 上記 熱處理後, 機械加工하고, 中央의 平滑部(직경 10mm, 길이

Table 1 Chemical composition and mechanical properties.

Chemical composition, wt, %				
C	Mn	Si	P	S
0.20	0.65	0.373	0.021	0.026
Mechanical properties*				
yield point kg/mm ²	tensile strength kg/mm ²	elongation %	hardness Hv	
28.5	44.9	35.3	127	

* KS 14-A type tensile specimen.

15mm)는 機械加工後 연마지 2000番까지 研磨하고, 酸化크롬粉末로써 버핑한 後, 粒界, 슬립밴드 및 微小分布균열의 觀察이 容易하도록 5% 질산용액(nital)에 가볍게 에칭하였다. 단, 이 에칭(etching)은 疲勞壽命에 影響을 미치지 않음이 確認되고 있다. 疲勞試驗은 小野式 回轉굽힘疲勞試驗機를 使用하여, 荷重制御疲勞試驗을 實施한다. 本 實驗에 있어, 應力振幅-破斷反復數特性($S-N_f$ 曲線)을 얻음과 同時에 各 應力레벨마다 試驗片表面의 微小分布균열의 觀察을 다음과 같이 實施했다. 試驗片 表面의 微小疲勞균열의 觀察은 豫想되는 破斷疲勞壽命 N_f 의 2~5%마다 試驗機를 一時 停止시켜, 試驗機에 설치된 光學顯微鏡에 依한 寫眞攝影法과 表面 레플리카(replica)法을 併用해서 試驗片 表面의 現象을 採取記錄했다. 이것을 整理·保存하고, 試驗片 破斷後, 注目되는 균열 혹은 극부적인 表面에 對하여 疲勞壽命의 後期에서 初期로 逆으로 追跡한다. 또한, 光學顯微鏡을 利用하여 試驗片 表面에 發生·成長하는 많은 微小疲勞균열을 精密度높게 測定하여 균열의 分布密度, 疲勞균열의 分布, 合體成長舉動 等의

基本特性에 對하여 定量的으로 조사했다. 또 템퍼컬러(temper color)法과 비치마크(beach mark)法을 併用하여, 表面균열의 最深點의 깊이와 그 分布도 조사했다. 특히 破斷後의 한계의 試驗片을 軸方向으로 二等分되게 加工하여 切斷面上에 觀察되는 微小균열의 個數와 깊이를 顯微鏡寫眞과 光學顯微鏡을 併用해서 精密度높게 測定했다.

3. 實驗結果와 考察

3.1. 應力-荷重反復數($S-N$)特性

本 疲勞實驗에서 얻은 $S-N$ 特性은 Fig. 1과 같다. 이는 各 應力레벨에 對한 破斷反復數 N_f , 균열發生時의 反復數 N_i , 最大균열의 표면길이 $2a_{max}$ 가 어떤 일정 길이에 도달할 때의 反復數 $N(a=const)$ 의 變化를 同時에 나타낸 것이다. 그림中的 () 內의 數字는 測定時의 最大균열의 表面균열길이(단위 mm)이며, 시험편의 疲勞限度는 10^7 回基準疲勞強度로 $\sigma_w = 23 \text{ kg/mm}^2$ 이다.

疲勞壽命의 初期에 發生하는 슬립밴드 혹은 微小균열은 表面觀察만으로는 그 判別이 곤란하므로 本 研究에서는 많은 實驗經驗을 근거로 균열 혹은 슬립밴드 같은 균열이 結晶粒界를 通過하여 隣接結晶粒內까지 成長할 때, 균열이라고 定義하고, 平均 結晶粒徑보다 작고, 結晶粒界를 通過하지 않은 것은 슬립밴드라고 취급한다. 이 定義는, 균열은 疲勞壽命의 後期에 發生한다는 종래의 思考方式과 다른 새로운 方式이다. 그림 1에서 平滑材表面에 多數 發生·成長하는 微小分布균열

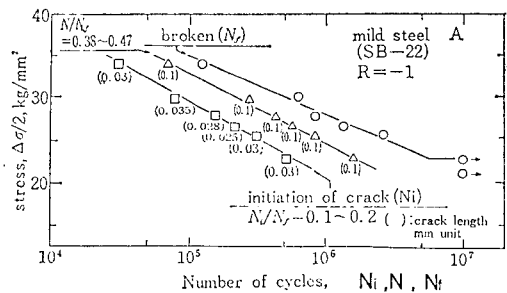


Fig. 1 The number of load cycles for initiation of cracks and the crack length at a later stage of the fatigue life. The numbers in parentheses indicate the crack length for N_i/N_f or N/N_f . N_i is the number of cycles for the initiation of the crack, N_f is the number of cycles to fracture and N is another specified number of cycles.

에 最大균열은 疲勞壽命의 早期(口표시), 즉, $N_i/N_f \approx 0.1 \sim 0.2$ 경에 發生하고, 疲勞壽命의 대부분은 이 最大균열의 成長過程에 소요된다. 또 3개의 直線이 서로 平行함으로써, 非破壞檢査(NDI)에 의하여 檢出된 微小균열의 疲勞壽命을 豫測할 수 있다. 또, Δ 표시는 균열길이 0.1mm 일 때를 나타낸다.

3. 2. 微小疲勞균열發生·成長의 特徵과 統計的 諸元

Fig. 2는 應力레벨 34, 30kg/mm²에서의 平滑表面에 發生·成長한 微小分布균열의 舉動을 나타낸다. 이것은 記錄·保存한 表面에 플리카를 光學顯微鏡으로 擴

大撮影하여, 그 寫眞을 連續적으로 연결하여 투사, 縮小시킨 그림이다. 그림에서 表面에 發生하는 微小균열은 不規則하게 分布하고, N 의 增加와 더불어 새로운 微小균열이 發生·成長하며, 그 分布密度가 增加한다. 그림中, 화살표로 나타낸 균열은 試驗片의 最終破斷을 일으킨 최대균열(2a_{max}라 함)이다. Photo 1은 疲勞균열發生·成長 및 슬립밴드 發達의 例를 나타내며, Fig. 2중의 작은 하나의 線은 Photo 1과 같은 微小균열을 나타내는 一例에 지나지 않지만, 다른 觀測點과 다른 應力레벨의 實驗과도 類似點이 많다. 이들의 觀測에서 얻어지는 定性的 諸情報중, 本 研究와 關係가 많다고 생각되는 點들을 보면,

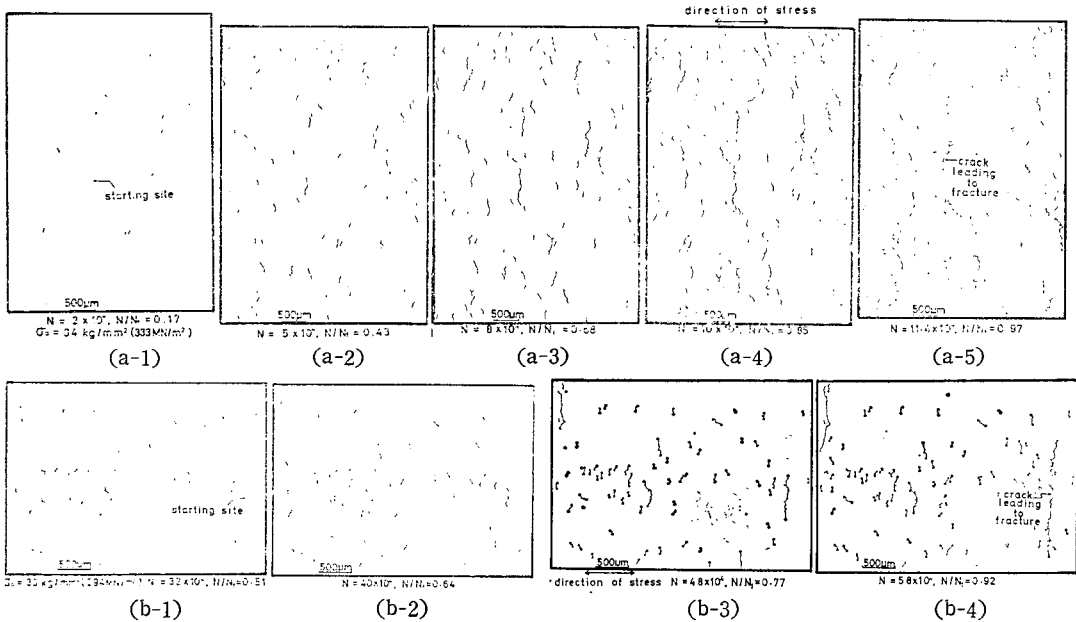


Fig. 2 Initiation, propagation, interaction and coalescence of many micro fatigue cracks distributed on the smooth surface of specimen. Stress range (a-1) to (a-5); $\sigma_a=34\text{kg/mm}^2$ (333MN/m²), and (b-1) to (b-4); $\sigma_a=30\text{kg/mm}^2$ (294MN/m²). These figures show that the cracks propagate and coalesce with one other at high stress $\sigma_a=34\text{kg/mm}^2$, while the cracks seems to grow independently at $\sigma_a=30\text{kg/mm}^2$.

- 1) 平滑材의 균열發生은 疲勞壽命中 극히 初期에 生 킨다.
- 2) 結晶粒徑과 같은 크기의 微小균열의 發生過程에 는 슬립밴드의 發達程度가 다른 結晶粒界에서 많이 생 킨다. Photo 1의 CI가 이것을 나타내며, 이 경우의 結晶粒界는 主應力軸과 約 45° 혹은 그 以上의 경사를 가지는 것이 많다.
- 3) 上記 2)에 對應해서, 試驗片表面에 나타나는 균 열成長徑路는 曲折·分岐를 수반하는 지그자그(zigzag) 로 成長하지만, 여러 結晶粒을 通過한 균열徑路는, 主

應力에 垂直하게 成長하므로, 이것을 投影해서 表面길 이 2a라고 定義한다.

Fig. 2에서, 微小分布疲勞균열의 個數 및 그 길이分 布를 조사하여, Fig. 3에 N/N_f 에 대한 균열길이의 階級値의 와이불(Weibull) 累積確率을 나타낸다. 균열 길이의 分布는 N/N_f 의 增加와 더불어 균열길이가 큰 쪽으로 移動하지만, 破斷直前에도 대부분의 균열길이 는 0.5mm 以下이다. Fig. 3의 直線群은 複合型와이 불 累積確率로서, N/N_f 의 增加와 더불어 傾斜가 적 어지고, 균열의 길이가 큰 쪽으로 移動하며, 2a가 약

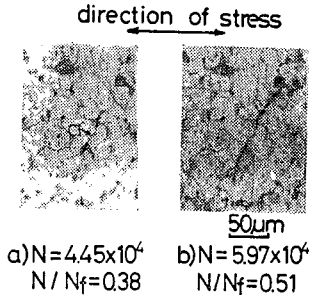


Photo 1 Growth of a micro surface crack through the field enriched with slipped grains on material A, mild steel; stress range σ_a ($=\Delta\sigma/2$) = 34 kg/mm², $R = -1$.

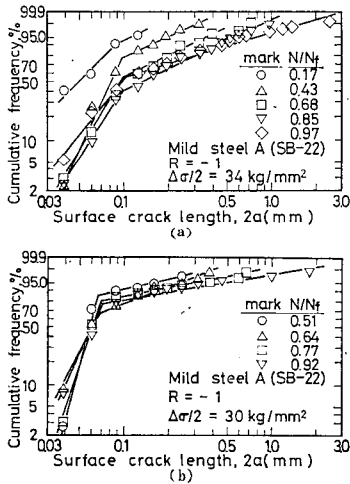


Fig. 3 Weibull distribution of the cumulative probability of failure against the surface crack length.

0.06~0.1mm 에 각 應力레벨의 折點이 있다. (와이블 分布의 상세한 사항은 3.6. 부록을 참조할 것)

上記 데이터를 使用하여, 平均疲勞균열 길이 $2a_m$ 과 균열密度 δ 를 구하여, N/N_f 에 대한 變化를 Fig. 4 에 나타낸다. 應力 34 kg/mm² 에서는, 連結·合體가 현저하므로, 數個의 균열이 合體된 균열을 하나로 畵한 密度를 □로 나타내고, 合體한 균열을 하나하나 畵도로 畵한 密度를 ■로 나타낸다. δ 는 N/N_f 와 함께 增加하고, 疲勞壽命後期에는, 應力레벨에 의하여 N_f , $2a_m$ 이 현저하게 다른에도 불구하고, 兩應力레벨에서 비슷한 傾向을 갖고, 특히 合體한 균열을 개개로 畵한 ■데이터들은 合體가 비교적 적은 30 kg/mm² 의 데이터와 $N/N_f=0.7$ 以後에는 잘 一致하는 傾向을 나타낸다.

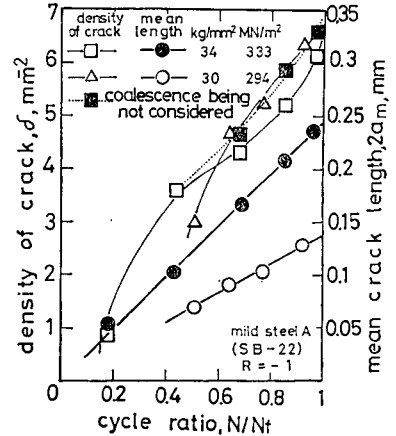


Fig. 4 Increase of mean crack length, $2a_m$, and crack density, δ , against the cycle ratio (N/N_f).

다. 一般的으로 應力레벨이 높을수록 微小균열의 밀도가 높은 것으로 알려져 있지만, 本實驗의 데이터와 같이 最大균열의 近傍에서는 새로운 微小균열의 發生때문에, 疲勞壽命의 약 70%頃에는 兩應力레벨에서 균열密度가 一致하는 傾向을 나타낸다. Fig. 4 와 같이 破斷直前에는 1cm² 당 균열의 個數는 數百個에서 數千個에 달하고, 이 데이터에는 前述의 微小피로균열의 定義와 같이, 平均結晶粒徑 23µ 以下の 微小균열 혹은 슬립밴드(slip band)는 포함되지 않은 것을 감안하면, 극히 高密度의 균열이 平滑材 表面에 發生된다.

Fig. 4 의 $2a_m-N/N_f$ 線圖에서, $2a_m$ 은 N/N_f 의 增加와 함께 直線의으로 增加하고, 應力이 높을수록 $2a_m$ 이 크다. 또 破斷時期($N=N_f$)에도, $2a_m$ 는 34 kg/mm² 應力레벨에서 0.25mm 以下이고, 30 kg/mm² 에서 0.15 mm 以下인 點이 注目된다. 이는 Fig. 2 와 3 에서도 알 수 있듯이 疲勞壽命의 後期에도 微小한 分布균열이 過半數를 占하며, 극히 소수의 균열만이 加速的으로 成長·破斷에 달하는 것에 대하여, 全體균열個數로 균열 길이를 平均하였기 때문이라고 解釋된다.

3.3. 疲勞균열의 表面길이와 깊이의 關係

微小表面균열의 最深點의 깊이 및 균열形狀은 試驗片을 길이方向으로 절반切斷해서서 一般的으로 精密度 좋은 측정은 불가능하므로, 템퍼컬러법 및 비치마크法을 併用해서 測定했다. Photo 2 에 템퍼컬러한 破斷面의 例를 나타낸다. N_f 는 템퍼컬러한 때의 反復數이며, 화살표는 疲勞균열의 發生點을 나타낸다. Photo 中

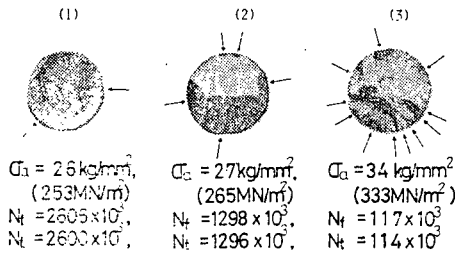


Photo 2 Photos. of fatigue fractures of smooth specimens of mild steel A. N_f is the number of cycles to fracture, and N_c is the number of cycles for temper colouring 1hr. at 300°C. Arrows show origins of fatigue cracks.

2 (3)의 高應力の 破面에는 작고 얇은 균열이 多數分布하고, 그중 數個의 균열이 合體하고 있다. 한편, photo 2 (1) (2)의 低應力에서는 크고 깊은 小數의 균열이 성장함으로써 最終破斷에 달한다. Fig. 5에 이와 같은 방법으로 測定한 균열面形狀比(b/a)와 表面길이 $2a$ 와의 關係를 나타낸다. 이 그림에 의하면, 應力레벨에는 관계없이 균열發生直後는 b/a 가 0.95의 半圓에 가까운 形狀이며, 균열成長과 함께 b/a 가 徐徐히 低下(扁平化)하고, 表面길이 9mm 이상에서는 거의 一定한 0.6의 얇은 橢圓形狀으로 됨을 알 수 있다. 이 傾向은 平板의 引張軸荷重疲勞의 경우와는 달리, 丸棒의 회전굽힘피로에 한정된 特有한 現象인 것 같다.⁴⁾

表面균열 最深點의 깊이分布를 알기 위하여 Fig. 2와 같은 데이터를 Fig. 5에 實線으로 나타낸 曲線을 使用하여, 表面길이를 깊이로 換算하고, N/N_f 에 대한 깊이 b 의 階級値의 와이불累積確率을 Fig. 6에 나타낸다. Fig. 6으로 부터 表面균열의 最深點의 깊이分布는 균열이 작은 경우($b=0.03\sim 0.05\text{mm}$)를 제외하고

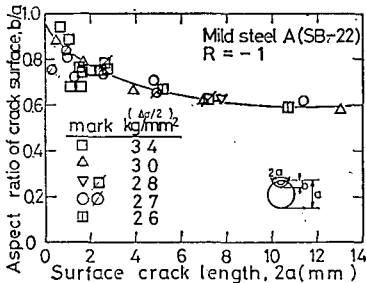


Fig. 5 Relation of aspect ratio (b/a) with the surface fatigue crack length ($2a$).

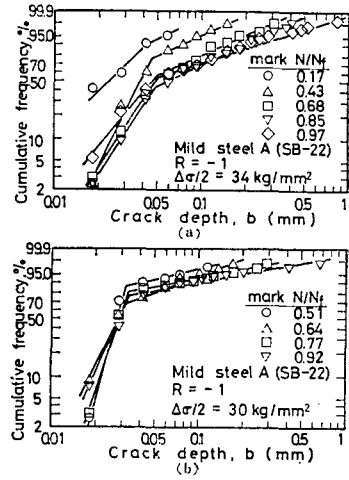


Fig. 6 Weibull distribution of the cumulative probability of failure against the crack depth.

는, 와이불確率紙에서 直線으로 되고, 이 直線群은 N/N_f 의 增加와 함께, 傾斜가 적어지고, 균열깊이가 깊은 쪽으로 移動한다. 이 傾向은 Fig. 3의 表面길이 데이터와 거의 같다.

3.4. 試驗片의 軸方向의 切斷에 의한 疲勞균열의 깊이

3.3.의 方法과는 달리 試驗片을 軸方向으로 二等分으로 切斷하고, 切斷面에서의 균열깊이와 그 分布를 測定했다. 이 경우 切斷面이 表面균열의 最深點을 通過한다고 볼 수 없으며, 一般적으로 最深點의 깊이보다 얇아질 것이다. 應力레벨 34kg/mm²에 대하여 두개로 疲勞破斷된 ($N/N_f=1$) 試驗片을 밀링머신으로 軸方向이 二等分되도록 切削하고, 연마지로 2000번까지 研磨한 후, 버핑한다. 그후 5%질산용액으로 가볍게 부식시켜, 顯微鏡으로 切斷面上的 試驗片表面近傍을 50배의 倍率로 撮影했다. Photo 3은 切斷面上的 疲勞균열의 例를 나타내지만, (a)는 Forsyth가 分類한 第一段階균열이고, (b)는 剪斷形에서 引張形으로 成長한 第二段階 균열이다.

비교적 길이 큰 대부분의 균열은 試驗片表面에 대하여 垂直方向으로 진행하고, 應力軸에 垂直한 平面上에 있다. 試驗片表面에서 균열先端쪽의 垂直거리를 400배의 倍率로 測定하고, 試驗片 軸方向의 測定位置에 대하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 試驗片의 切斷面에서 photo 3과 같은 疲勞균열이라고 認定된 균열은 118個이었고, 平滑部 15mm의 軸方向을 따라서 거의 均一하게 發生하였다. 이것의 平均길이(b_{ms})는 0.096mm.

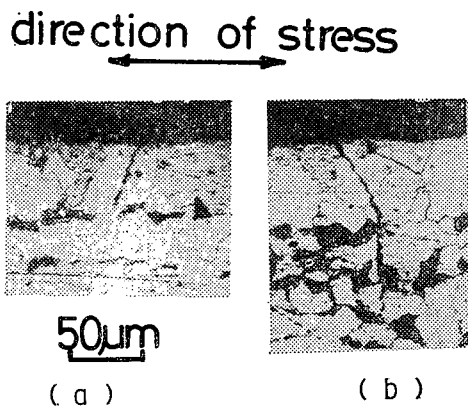


Photo 3 Illustrations of the modes of fatigue fracture observed in mild steel A, stress range $\sigma_a = 34 \text{ kg/mm}^2$, $R = -1$, $N/N_f = 1$ (a) stage I; slip plane crack, (b) stage II crack.

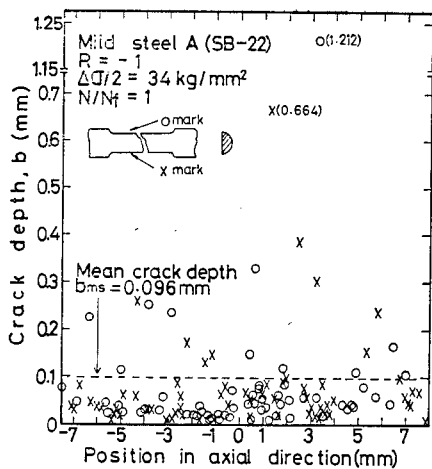


Fig. 7 Relation of crack depth (b) to the position of many micro-surface-cracks in axial direction.

이고, Fig. 7 중에 點線으로 나타낸다. 118 個중에서, 平均깊이보다 깊은 균열은 22 個 뿐이고, 대부분의 疲勞균열은 b_m 보다 작으며 제일 깊은 균열은 1.212mm 였다.

Fig. 8 에 이 데이터의 깊이 階級値를 와이블累積確率로 나타내며 절점을 가진 直線으로 된다. Fig. 8 과 Fig. 6 의 $N/N_f = 0.97$ 의 데이터를 比較하여 보면, 兩者의 傾向은 거의 一致하며, 이 切斷面上에서 觀察한 Fig. 8 쪽이 약간 累積確率이 크다. 이것은 破斷直前에는 微小균열이 계속 發生·成長하며, 合體連結의 傾

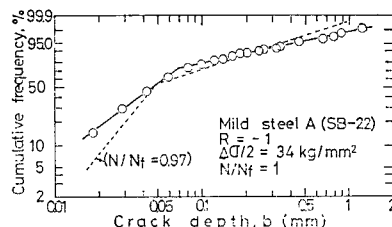


Fig. 8 Weibull plot of the cumulative probability of failure against the crack depth in axial direction.

向이 현저하고, 數個의 큰 균열이 작은 균열을 連結·合體해서 最終破斷에 達하기 때문이다. 또한 切斷面上의 平均깊이 ($b_m = 0.096 \text{ mm}$)와 破斷直前의 表面깊이에서 換算한 最深點의 平均깊이 ($N/N_f = 0.97$, $b_m = 0.095 \text{ mm}$)가 거의 一致하는 것이 注目된다. 切斷面上에서 觀察된 118 個의 疲勞균열중, 剪斷型³⁾⁵⁾은 約 40%이고, 剪斷型에서 引張型으로 成長한 균열은 約 60%이다. 이중 第一段階균열에서 第二段階로 成長한 균열깊이는 結晶粒徑의 크기에 따라서 多少 差는 있지만, 平均結晶粒 2 個程度에 달하는 약 0.05mm이다. 이것은 Fig. 8 의 折點에 해당하고, 조금 差가 있지만, Fig. 6 과는 잘 一致한다.

Fig. 3, 6, 8 과 같이 2개의 直線으로 近似되는 複合型와이블分布에서의 折點은 균열길이와 깊이에 대하여 N/N_f 로 정리하면 Fig. 9 와 같다. 그림 9 에서 各應力別 折點은 표면길이 $2a_p$ 및 깊이 b_p 에 대하여 直線으로 되고, 應力레벨에 따라서 差가 있다. 즉, $2a_p$ 는 3~5 結晶粒以內에서, b_p 는 1~3 結晶粒以內에 折點이 있고, 이것은 剪斷型에서 引張型으로의 遷移點으로서 解析할 수 있다. 이것에 關한 研究은 적지만 佐々木들의 깊이 데이터⁶⁾와 本 研究의 깊이 結果와는 비슷한 傾向을 나타낸다.

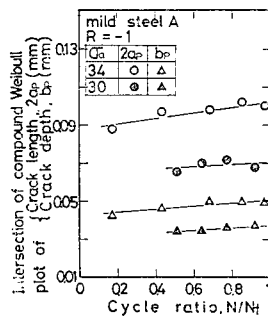


Fig. 9 Relation between the intersection of compound Weibull distribution and the load cycle ratio.

3.5. 最大균열을 포함한 微小分布균열의 成長 特性

應力 $\sigma_a=34\text{kg/mm}^2$ 의 平滑表面上에 多數 發生 · 成長하는 分布균열의 成長過程을 調査하여, 反復數 N 에 대하여 추적한 結果 Fig. 10과 같다. 最大균열은 이 多數의 分布균열중 특히 成長速度가 빠르고, 1.0mm 以上の 깊이까지 成長하며, 試驗片의 最終破斷에 기여한 것으로 이 데이터중에 $- \times -$, $- \nabla -$, $\dots \square \dots$ 로 表示된 3개의 데이터만을 선택하여 使用하였다. 이와 같은 方法으로 선택한 $2a_{\max}$ 의 N/N_f 에 대한 變化를 3가지의 應力레벨에 대하여 調査하여 Fig. 11에 나타낸다. 이 그림으로부터, 最大균열은 疲勞壽命의 10~20%에서 發生해서, 加速的으로 連續 成長하지만, 疲勞壽命의 80~90%에 있어서도 2mm 程度에 달한다.

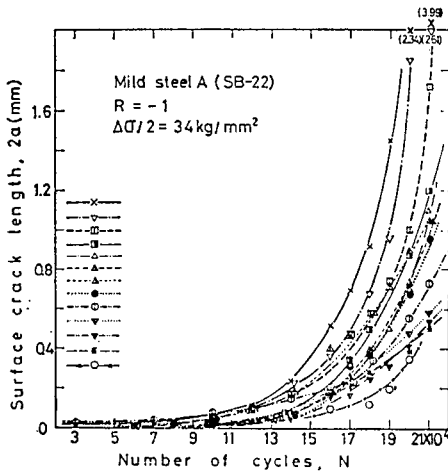


Fig. 10 The growth behavior of micro-surface-cracks at a constant stress level.

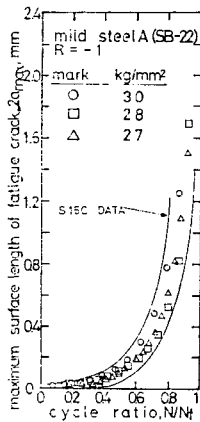


Fig. 11 Increase of maximum surface micro-crack length, $2a_{\max}$, against the cycle ratio.

Fig. 11은 약간 應力레벨이 높은 쪽이 加速하는 傾向을 나타내지만, 應力레벨이 서로 다른 데이터가 比較的 좁은 分散帶內에 모여 있다. 더우기 Fig. 11중 實線과 같은 軟鋼材(S15C)⁷⁾의 最大균열의 成長特性과도 一致하는 傾向을 나타낸다. $2a_{\max}-N/N_f$ 特性이 應力레벨에 거의 依存하지 않는 것과 Fig. 1에 나타낸 最大균열의 等길이 曲線이 $S-N_f$ 曲線에 거의 平行으로 되는 것은 서로 잘 대응하는 것이다. 또한, 이 結果는 平滑材上的 最大균열成長特性의 破壞力學 評價可能性을 示唆하는 것으로 이에 따른 報告書는 이미 發表되었다.⁸⁾

3.6. 부 록

Fig. 2와 같은 平滑材表面上에 發生成長하는 微小表面疲勞균열의 길이에 따른 막대그림표(histogram)는 指數分布에 가깝기 때문에, 그 分布狀態를 調査하기 위하여, 와이볼 確率紙에 나타낸 例가 Fig. 3이다. 이 그림은 表面길이 $2a=60\mu\sim 100\mu$ 을 境界로 折點 δ 가 있는 2개의 複合型 와이볼 分布로 表示된다. 즉, 確率密度函數 $f(x)$ 는 다음 式으로 주어진다. (단 $x=2a$ 이며, 微小疲勞균열의 表面길이이다)(Fig. 12 참조)

$$f(x) = p_1 f_1(x) + p_2 f_2(x) \tag{1}$$

$$\text{여기서 } p_1 + p_2 = 1$$

$$f_1(x) = \frac{m_1}{\alpha_1} (x-r_1)m_1^{-1} \cdot e^{-\frac{(x-r_1)^{m_1}}{\alpha_1}} \tag{2}$$

$$r_1 \leq x < \delta$$

$$f_2(x) = \frac{m_2}{\alpha_2} (x-r_2)m_2^{-1} \cdot e^{-\frac{(x-r_2)^{m_2}}{\alpha_2}} \tag{3}$$

$$\delta \leq (2a=x)$$

여기서 m_1, m_2 는 形狀(shape) 패러미터(parameter) α_1, α_2 는 尺度(scale) 패러미터 r_1, r_2 는 位置(position) 패러미터이다. 또 δ 는

$$F_1(\delta) = \int_{r_1}^{\delta} f_1(x) dx = F_2(\delta) = \int_{r_2}^{\delta} f_2(x) dx \tag{4}$$

를 만족하는 패러미터이다. r_1, r_2 는 그림 3과 같이 2개의 直線으로 나타나므로 $r_1=r_2=0$ 로 된다. Fig. 3

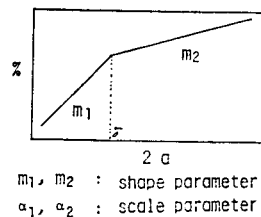


Fig. 12 Schematic Weibull plot against crack length.

에서 얻어진 패러미터 m 과 α 를 Table 2 에 나타낸다. 이 데이터에서 $m_1=2\sim6$ 정도로 變化가 크지만, m_2 는 점차 감소하는 傾向을 나타내며, 表面疲勞균열이 成長하여, 큰 균열의 數가 增加함을 알 수 있다.

點은 第一段階균열에서 第二段階균열 쪽으로의 遷移點과 對應하는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1981 년도 문교부 학술연구조성비의 도움을 받았으며, 문교부 당국과 관계자에게 謝意를 표하는 바이다.

Table 2 Data obtained from Weibull distribution of the cumulative probability.

$\Delta\sigma/2$	N/N_f	m_1	m_2	α_1	α_2	
kg/mm ²	0.17	2.1	1.09	0.301	0.383	
	0.43	5.77	1.2	0.223	0.844	
	34	0.68	3.5	1.08	1.25	1.57
	0.85	3.6	0.983	1.45	1.82	
	0.97	2.82	0.625	1.05	1.2	
30	0.51	7.06	0.53	0.019	0.411	
	0.64	3.3	0.75	0.44	0.625	
	0.77	6.5	0.3	0.026	0.512	
	0.92	4.5	0.2	0.183	0.512	

參 考 文 獻

- (1) 예를 들면 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, 日本機械學會講演論文集(第16回疲勞強度 symposium) No. 790~9, pp. 25~30, 1979.
- (3) P.J.E. Forsyth, Fatigue Damage and Crack Growth in Aluminium Alloys, ACTA Metallurgica, Vol. 11, pp. 703~715, 1963.
- (4) 北川英夫, 結城良治, 徐昌敏, 小さな人工欠陥からの 疲勞き裂成長學動, 日本材料學會의 第14回疲勞 symposium, pp. 26~30, 1980.
- (5) 小林英男, 中沢一, 第一段階의 疲れき裂進展過程, 機械의 研究, 連載講座 第 24-11~第 26-1, 1972~1974.
- (6) 越智保雄, 佐々木茂美, 平沢泰治, 低炭素鋼의 疲勞 微視き裂의 觀察 (發生と初期成長의 分布特性について), 材料, 第31卷 第345號, pp. 559~565, 1982.
- (7) 北川英夫, 徐昌敏, 軟鋼平滑材의 回轉曲げ及び片振り引張り疲勞における 微小表面き裂의 成長學動(平滑材疲勞의 破壞力學的 解析), 日本材料學會의 第13回疲勞 symposium, pp. 10~14, 1979.
- (8) H. Kitagawa, S. Takahashi, C.M. Suh, and S. Miyashita, Quantitative Analysis of Fatigue Process—Microcracks and Slip Line Under Cyclic Strains, ASTM STP 675, American Society for Testing and Materials, pp. 420~449, 1979.

4. 結 論

軟鋼平滑材의 回轉굽힘疲勞試驗을 實施하여, 試驗片에 發生·成長하는 微小分布균열을 表面, 破斷面 및 깊이方向에서 觀察·測定하고, 그 定量的 特性을 調査했다. 그 結果 微小疲勞균열의 最大균열은 壽命의 10~20%의 극히 早期에 發生하고, 疲勞壽命의 대부분은 이 균열의 成長過程에 소요됨이 明백해졌다. 또, 平滑材 表面에는 微小균열이 高密度로 發生·성장하고, 그중 極히 少数의 균열이 다른 균열과의 干涉·合體를 반복하여 加速적으로 成長하는 過程이 明백해졌고, 이 最大균열의 成長特性은 應力레벨이 다른 데이터와 比較的 좁은 分布帶內에 모이고 있다.

이것은 等最大균열길이曲線이 $S-N_f$ 曲線과 거의 平行하게 되는 것과 잘 對應하는 것이다. 微小균열의 表面길이, 깊이 및 切斷面上의 깊이分布는 2개의 直線으로 近似되는 複合型와이블分布로 표시된다. 또 이 折