

<論 文>

引張 軸荷重 疲勞에 의한 微小表面 균열의 發生 · 成長舉動

徐 昌 敏*

(1983年 12月 13日 接受)

Initiation and Propagation Behaviors of Micro-Surface-Fatigue Cracks under In-Plane Tension Fatigue Tests

Chang Min Suh

Abstract

In-plane tension fatigue tests ($R=0.05$) were carried out to investigate the initiation and propagation behaviors of micro-surface-fatigue cracks on smooth surfaces of a mild steel. Also, the investigations of saturated cyclic strain which can be obtained by the fatigue tests have been made via the cyclic strain intensity factor, $\Delta K\epsilon$, for the purpose of unifying two approaches of the study of fatigue; the one approach is based on fracture mechanics concept and the other on lowcycle fatigue concept.

Some of the results are as follows;

The growth rate, $d(2a)/dN$, of small cracks cannot be represented by one straight line as a function of ΔK for various values of the nominal stress range, $\Delta\sigma$, and is higher than that of a large through crack.

The rearrangement of the $d(2a)/dN$ by $\Delta\epsilon\sqrt{\pi a}$ ($=\Delta K\epsilon$) with the stress range $\Delta\sigma$ in ΔK replaced by $\Delta\epsilon$, strain range, gives one straight line of the $\Delta K\epsilon-d(2a)/dN$ relation for various values of stress range $\Delta\sigma$.

1. 緒 論

疲勞破壞된 實際 구조물 및 기기의 파단표면을 면밀하게 觀察하여 보면, 疲勞破壞의 大部分은 破壞力學 (Fracture Mechanics)의 發達과 더불어 過去의 研究對象이 되어 왔던 대형관통균열보다는 크기는 비교적 작지만 數의으로 대단히 많은 表面균열(surface crack)에 의한 破壞임이 확인되었다^(1,2). 그러므로 이로 인한

구조물 및 기기의 破壞를 방지하기 위해서는 現在 解析的인 배경이 체계화된 파괴역학적인 측면에서 연구하여 정량적인 評價法을 확립할 필요성이 절실히 요구되고 있다^(3,4,5). 따라서 이러한 미소표면균열의 成長 問題를 파괴역학적인 견지에서 취급하려는 연구가 最近 선진국에서도 정력적으로 수행되려는 부문으로 매 두되고 있다^(4,5).

그러나 표면에서 형성되는 초기 피로균열은 어떠한 형태를 취하고 있을가? 이것은 초기 피로균열의 발생 성장거동이 나타내는 하나의 결과이기 때문에 미소표 면균열의 발생 거동에 있어서 대단히 중요한 것이지만

* 正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

이것에 대하여 상세히 조사된 보고는 찾아 볼 수가 없다. 본 연구에서는 이러한 점에도 역점을 두어서 초기 피로균열의 발생·거동을 관찰하기 쉬운 軟鋼을 선택하여 片振引張反復荷重을 작용시켜, 軟鋼 平滑材의 表面上에 發生·成長하는 미소표면균열의 거동을 전자현미경과 광학현미경을 병용하여 표면과 파단면을 입체적으로 조사하여, 피로균열의 초기발생상태를 조사하고, 그 성장율을 조사하여 파괴역학적으로 해석하여 그 특성을 조사한다.

2. 實驗方法

試料는 直徑 16mm의 熱間 壓延丸棒인 軟鋼(mild steel G)으로 化學成分과 應力제거 언니링후의 기계적 특성을 Table 1에 나타낸다. 引張軸하중 피로 시험편의

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of specimens

Chemical composition, wt, %							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.15	0.26	0.55	0.022	0.021	0.02	0.015	0.011
Mechanical properties*							
Upper yield point	Lower yield point	Tensile strength	Elongation	Reduction of area	Vickers hardness		
kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²	%	%	Hv		
28.0	24.5	40.1	40.3	68.3	114		

* KS 14-A type tensile specimen

형상은 Fig. 1에 나타낸다. 試料는 930°C에서 60분간 加熱爐冷한 후 燐鎔에서 기계가공하여 平滑 형태로 제작하였다. 疲勞試驗片 中央의 平滑 平行部는 上기 機械加工後 연마지로 1500번까지 연마하여 진공중 600°C에서 두시간의 應力제거 소둔후 2000번까지 연마해서 산화크로울 분말로 버핑하였다. 그 후, 粒界, 슬립밴드 및 미소균열의 관찰을 용이하게 하기 위하여 5% 나이탈로 가볍게 에칭하였다.

軸荷重 疲勞試驗은 전기유압식 피로시험기에 의하며, 주파수 20Hz, 應力比 $R=0.05$ 의 正弦波 荷重으로 행하였다. 疲勞過程의 극히 初期에는 슬립밴드와 미소균열의 區別이 명확하지 않기 때문에 균열 혹은 균열 같은 선이 結晶粒界를 通過해서 인접 粒內까지

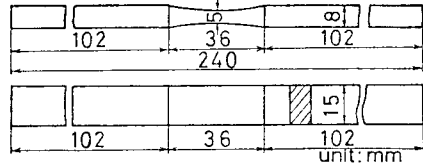


Fig. 1 Configuration of the specimen for in-plane tension fatigue tests

成長을 시작했을 때 균열이라고 判別하는 방법을 採用하였다⁽⁹⁾. 材料의 平均結晶粒徑은 約 20 μ m이었다. 따라서 미소균열의 초기길이를 平均해서 約 20 μ m로 하였다.

試驗片 表面에는 많은 微小表面균열이 發生하고 成長·連結을 반복하기 때문에 破斷壽命의 2~5%마다 시험기를 일시 정지시켜 金屬顯微鏡에 의한 寫眞撮影法과 表面 레프리카법을 併用해서, 試驗片 表面의 現象·記錄을 실시하였다. 이것을 整理·保存하고, 試驗片 破斷後, 注目할 균열 혹은 最大균열 $2a_{max}$ (시험편이 最終破斷에 달한 균열)을 피로수명의 後期에서 初期로 逆으로 追跡하고, 光學顯微鏡을 使用해서 시험편 表面에 發生·成長하는 많은 미소균열을 詳細히 관찰하고, 미소표면균열의 成長舉動의 破壞力學的 解析을 시도하였다.

反復荷重에 따른 應력과 전스트레인(σ - ϵ_r)의 히스테리시스곡선은 시험편 평활평행부의 중앙에 균열 측정면과 반대쪽에 스트레인 게이지(게이지 길이 2mm)를 접착시켜 測定하였다. 반복수비 N/N_r 가 0.2以前에는 전스트레인 범위 $\Delta\epsilon_r$ 의 變化가 크므로 자주 측정했으며, X-Y 레코더로 히스테리시스곡선을 그릴때는 시험기의 주파수를 0.2Hz로 낮추어서 사용하였다. 이때 얻어지는 안정된 스트레인 값은 反復스트레인擴大係數範圍(cyclic strain intensity factor range) $\Delta K\epsilon^{(1,5)}$ 에 의한 미소피로균열성장속도 da/dN 로 정리하여 파괴역학적으로 해석한다.

3. 實驗結果

3.1. S-N 特性

Fig. 2에 應力-파단반복수($S-N_r$)특성을 표시한다. 이때 最大應力 σ_{max} 를 종축에 잡고 있으며, 실선만을 표시한 데이터는 同一 材料의 回轉굽힘 疲勞試驗($R=-1$)의 結果이다. 이와같은 軸荷重 疲勞試驗은 回轉굽힘 피로시험보다 높은 應力레벨하에서 피로됨을 알 수 있다. 軸荷重 疲勞試驗중 引張強度보다 높은 應力에서

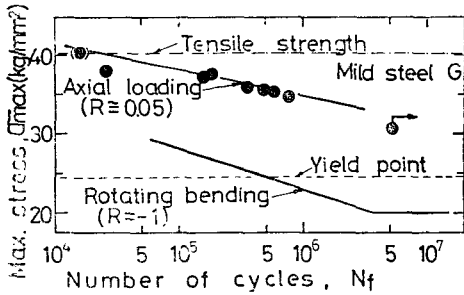


Fig. 2 Relation between maximum stress, σ_{max} , and the number of cycles to fracture N_f .

는 低사이클疲勞의 特徴의인 티어링(tearing)破斷이 나타나므로 Fig. 2 중에 ●표로 나타낸다.

Fig. 3은 Fig. 2의 데이터에다 겹쳐 칠한 원형의 데이터에 대하여 실험방법에서 설명한 最大균열의 균열 발생 반복수 N_i ($2a=0.02\text{mm}$ 以上の 결정입을 통과한 반복수), N ($2a=0.06\text{mm}$, 0.1mm)의 等균열길이 곡선과 N_f 를 나타낸다. Fig. 3 중의 () 내의 數字는 測定時의 $2a_{max}$ 의 表面길이 $2a$ (單位: mm)이다.

균열의 發生時期는 $N_i/N_f=0.07\sim 0.2$ 이고 約 0.022mm 까지 發生하였다. 그러나 $N/N_f=0.26\sim 0.45$ 에서 等균열곡선은 約 0.06mm 으로 성장되고, $N/N_f=0.49$

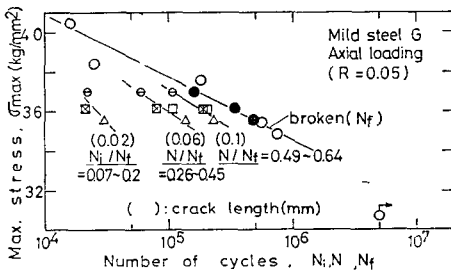


Fig. 3 The number of load cycles for initiation of cracks and the crack length at a later stage of the fatigue life. The numbers in parentheses indicate the crack length for N_i/N_f or N/N_f . N_i is the number of cycles for the initiation of the crack, N_f is the number of cycles to fracture and N is another specified number of cycles

~ 0.64 에서 0.1mm 밖에 成長하지 않았다. 각 直線은 서로 平行하며 應力레벨에 關係없이 N_i , $N2a=const.$, N_f 間의 比는 일정하다. 이러한 성질은 연강 G제의 回轉굽힘피로시험의 結果^(1,6)와도 동일한 결과이다. 이러한 結果는 破壞力學的인 疲勞壽命의 豫測과 檢査에도 극히 有用하며 3.5.절에서 알 수 있지만 微小균열의 成長速度式的 決定에도 重要한 指針이 된다.

3.2. 微小疲勞균열의 發生·成長舉動

(1) 平滑表面上의 微小균열의 發生과 成長特性

引張軸 荷重 疲勞試驗에서 조사한 최대균열의 發生·成長舉動을 예로서 2개의 應力레벨에 대해서 Photo 1~3에 나타낸다. Photo 1은 $\sigma_{max}=37.0\text{ kg/mm}^2$ 應力하의 균열이며, 結晶粒界에서 微小균열이 發生·成長하

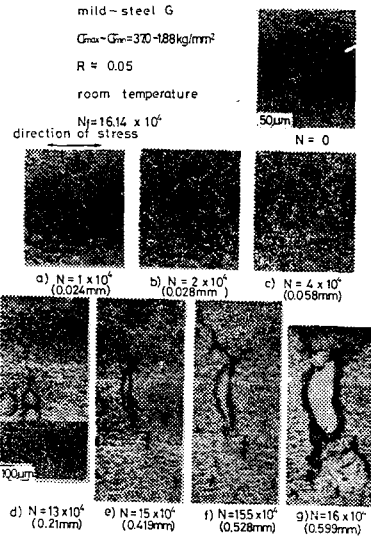


Photo 1 Microphotographs showing the initiation and propagation behavior of a microcrack initiated at a grain boundary on the smooth surface of mild steel. (Note: The $2a-N$ diagram of this crack is plotted in Fig. 4, and it's marked by (), at various stages of the fatigue life)

는 過程을 관찰한 사진이다. Photo 2,3은 주로 微小疲勞균열의 發生의 初期成長만을 注目한 것이며, 각각 A 균열, C 균열이라 칭한다. A, C 균열은 $\sigma_{max}=36.1\text{ kg/mm}^2$ 應力레벨의 시험편상에 관찰된 것이다. A 균열 (Photo 2)은 平滑表面上의 퍼얼라이트에서 미소균열이 發生하였고, C 균열(Photo 3)은 結晶粒內의 슬립벤드에서 發生·成長하였다(또한 B 균열은 C 균열과 같은 시험편상의 미소균열이며 結晶粒界에서 發生하였다).

이상 세가지의 寫眞 및 표면관찰에서, 미소균열은 主應力軸에 約 45° 의 경사진 結晶粒界에서 發生하는 일이 많이 관찰 되었지만 슬립벤드에 의한 결정입내의 발생과 介在物에 의한 퍼얼라이트에서의 미소균열발생도 이따금 생기는 것이 관찰 되었다.

이와같은 第1段階에서의 미소균열 發生의 관찰 結果는 다음節에서 SEM에 의하여 상세히 검토하였다.

軸荷重 疲勞試驗에서 平滑表面에 發生·成長한 $2a_{max}$

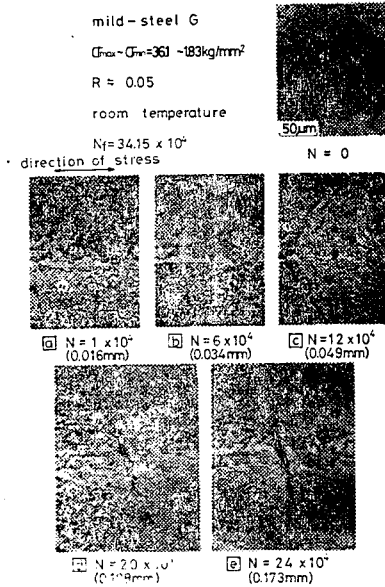


Photo 2 Microphotographs showing the initiation and propagation behavior of a micro crack initiated at a pearlite on the smooth surface of mild steel (Note: The $2a-N$ diagram of this crack is plotted in Fig. 5 and it's marked by \square , at various stages of the fatigue life)

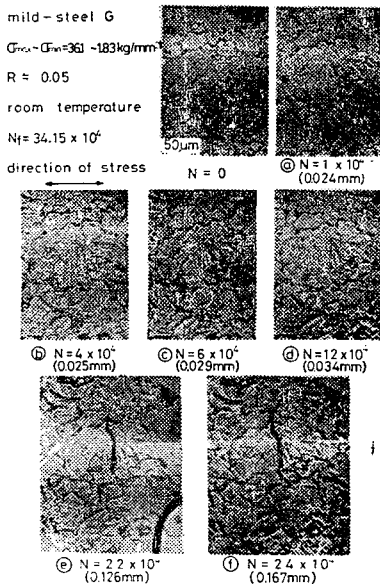


Photo 3 Microphotographs showing the initiation and propagation behavior of a micro crack initiated inside of a grain on the smooth surface (Note: The $2a-N$ diagram of this crack is plotted in Fig.5 and it's marked by \circ , at various stages of the fatigue life)

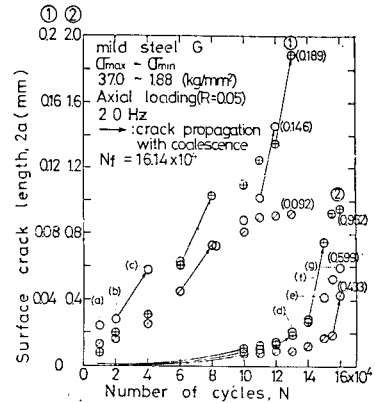


Fig. 4 The $2a-N$ diagram showing the propagation behavior of micro cracks on smooth surface of mild steel (axial loading)

의 $2a-N$ 곡선을 2개의 응력레벨에 대하여 각각 Fig. 4, 5에 나타낸다. 이 최대균열 $2a_{max}$ 의 표면길이 $2a$ 는 2절에서 정의한 미소균열이고, 詳細히 보면 지그재그로 성장하기 때문에 主應力軸과 直角되는 축의 投影길이를 表面길이 $2a$ 로 하였다. 이 표면길이는 約 0.02mm에서 10mm以下程度까지의 3次(order)以上에 걸쳐 있다. 그 때문에 일련의 성장특성을 같은 精密度로 기재하는 것이 어렵기 때문에 종축의 스케일을 3종류로 並記해서, 成長變動은 동일 그림상에 각 종류의 스케일에 의한 곡선으로 나누어 표시하고 있다.

이때 각 곡선에 대응하는 순환의 번호를 부쳤다. 그림중의 화살표(\rightarrow)는 미소균열의 合體·成長變動을 나타낸다. 또 그림상의 \square , \circ , (\quad) 기호내의 英字는 각각 Photo 1~3의 것에 對應하는 균열을 나타내며, (\quad) 속의 숫자는 미소균열의 표면길이를 각각 나타낸다. 이 그림에서 平滑表面에서 發生한 微小균열은, 다른 미소

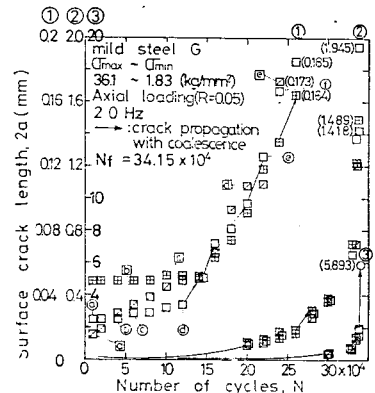


Fig. 5 The $2a-N$ diagram showing the propagation behavior of micro cracks on the smooth surface of mild steel (axial loading)

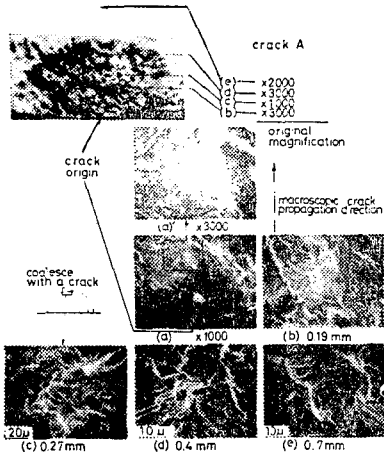


Photo 4 SEM fractographs showing fatigue fracture surface micro morphology at various points ($\sigma_{max}=36.1\text{kg/mm}^2$)

분포균열과의 합체領域을 제외한 영역, 즉 單一균열로서 成長하고 있는 範圍에서는 슬립으로서의 成長을 포함해서 균열성장곡선의 경사는 어느 段階라도, 그림상의 화살표와 같이 급격한 變化 및 變曲點이 나타나는 일은 없고 連續的으로 圓滑하게 成長하기 때문에 슬립의 成長 혹은 작은 균열에서 그 후의 큰 균열로 될 때까지의 成長特性에는 급격한 變化가 없는 것으로 생각된다. 이것은 本 研究에서 使用한 平滑表面에 發生하는 微小표면균열의 경우, 將來 균열로 될 結晶粒界 및 슬립面에 생긴 미소 균열에 대해서도 그 균열길이의 증가가 확실하다. 이 表面 관찰에서 보면, 高應力레벨일수록 複數의 微小分布균열이 많이 발생하고 合體는 빈번히 일어나며, $2a_{max}$ 의 單獨成長에 대해서 合體에 의한 成長이 破壞를 접하는 율이 대단히 크며 또한 支配的임을 알 수 있었다. 이러한 結果는 回轉굽힘 疲勞試驗에서도 軟鋼에 대하여 同一한 結果를 얻었다⁽⁹⁾.

(2) SEM에 의한 破斷面上的의 微小疲勞균열의 發生·成長舉動

슬립밴드 혹은 結晶粒界에 따라 시험편 내부로 성장

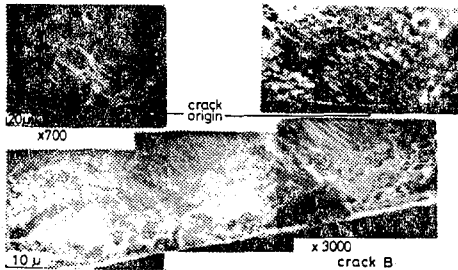


Photo 5 SEM fractographs ($\sigma_{max}=36.1\text{kg/mm}^2$)

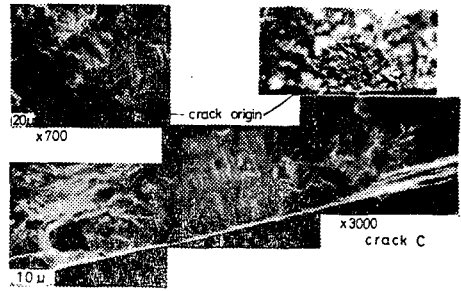


Photo 6 SEM fractographs ($\sigma_{max}=36.1\text{kg/mm}^2$).

한 初期疲勞균열이 어떠한 형태를 하고 있는가는 初期疲勞균열의 發生·成長舉動이 나타내는 하나의 結果라고 생각되기 때문에 중요한 일이지만 이것에 대하여 상세히 조사한 報告는 극히 적은 것 같다⁽⁸⁾. Photo 4에는 A균열의 發生·成長舉動을 나타내고 Photo 5와 6에는 각각 B균열과 C균열의 균열 發生源만을 SEM寫眞으로 나타낸다. Photo 4의 상단의 사진은 텀퍼컬러시킨 파단면 사진이다, A균열은 (a)와 같이 퍼얼라이트에 存在가능한 魚眼(fish eye)같은 介在物(Photo 2 참조)에서 發生하고 (a)'는 미소균열이 內部方向으로 進展한 곳으로 平坦한 無特徵인 破面이다. (b)(d)는 疲勞破斷面에 널리 관찰되는 延性縞樣樣(ductile striation)와 劈開(cleavage)가 共存한 破面이다. (e)는 表面에서 약 0.7mm 떨어진 곳의 사진으로 작은 덩플도 섞어 있다.

시험편의 表面觀察로는 약 $49\mu\text{m}$ (Fig. 5의 田 표시 참조)의 初期균열이 發生 하였지만 Photo 5의 SEM 확대 사진 중앙에는 깊이가 넓고(약 $10\mu\text{m}$ 정도) 비교적 凸凹이 큰 균열발생원이 관찰 되었다. 이 發生源을 제외하면 Photo 5와 같이 破面은 平坦한 무특징의 第1段階 피로균열 파면이다(B균열은 결정입계에서 형성된 균열이다). Photo 6에는 시험편 表面의 슬립밴드에 의하여 結晶粒內가 균열發生源이 된 C균열의 파단면 사진을 나타내며, 擴大사진의 中央에는 슬립밴드에 의한 균열이 발생한 제 1 단계의 무특징한 破面을 나타낸다.

3.3. 微小疲勞균열의 成長特性($2a-N/N_f$ 特性)

平滑材 表面의 最大균열 $2a_{max}$ 을 反復數比 N/N_f 에 대해서 표시하면 Fig. 6과 같이 應力레벨이 달라도 試驗片의 最終破斷을 일으킨 最大균열에 대해서는 比較的 좁은 分散帶內에 데이터가 모인다. 또한 Fig. 6 중의 점선은 회전굽힘 피로시험(동일한 재료)의 分散帶를 比較한 것이다. 이 $2a-N/N_f$ 特性에서 다음의 共通點이 指摘될 수 있다.

(가) $N/N_f=0.85\sim 0.9$ 라도 $2a$ 는 $1\sim 2\text{mm}$ 정도이므로, 피로수명의 大部分이 미소균열의 成長에 接하고

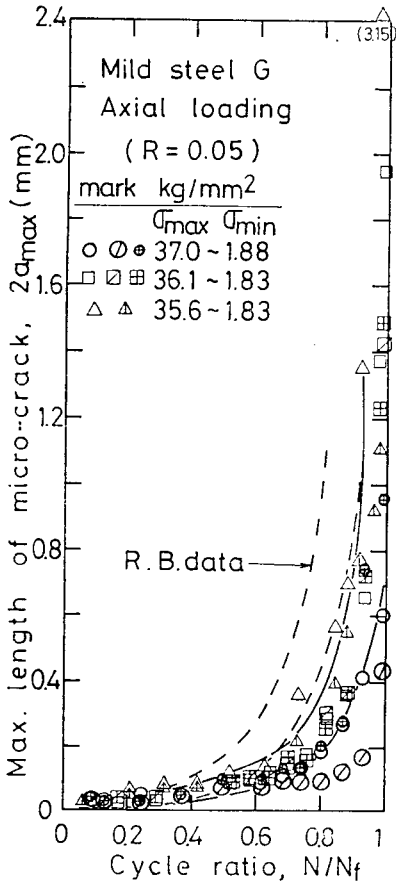


Fig. 6 Increase of maximum surface micro crack length, $2a_{max}$, against the cycle ratio

때때로 승리가 생기지만 1개의 원활한 성장곡선으로表現될 수 있다. 축하중 피로시험의 데이터는 $N/N_f \leq 0.4$ 까지는 점선의 회전굽힘 피로시험과 같은 곡선상에 있지만 그 이후에는 늦게 성장하여 破斷에 따른다.

(나) 應力레벨에 의하여 피로수명이 $S-N$ 곡선상에서는 수십배이상 다르지만 N/N_f 에 대한 $2a$ 를 정리하면 균열성장기 거의 동일한 곡선으로 된다.

(다) 응력레벨에 관계없이 $2a_{max} - N/N_f$ 곡선이 거의 동일한 것은 Fig. 3에 있어 등균열길이곡선, 균열발생곡선, 파단곡선등의 $\sigma - N$ 곡선상의 平行성과 對應한다.

3.4. 균열면 형상의 변화와 K의 수정계수

템퍼칠리법과 비치마크법에 의하여 정한 균열면 형상은 全壽命을 통해서 시험편 표면과 荷重軸方向에 거의 直交한 平坦한 面을 形成하고, 成長의 初期는 시험편 표면과 균열前線 兩端이 直交하는 半圓形을 가지지만, 그후 어느 정도 成長하면 점차로 $2a$ 를 長軸으로

하는 半橢圓形($a > b$)에 가까운 形狀으로 移動한다. 즉 균열면 형상의 형상비(aspect ratio) b/a 의 變化는 균열이 작을 때는 1.3~1.1에 가깝고 균열成長과 더불어 低下하므로, 미소균열의 範圍를 問題로 하는 경우는 형상비의 比가 큰 變化가 없다. 이렇게 하면 시험편의 두께에 비해서 균열이 충분히 작으면 應력확대계수범위 ΔK 의 式의 수정계수 $f(a)$ 는 거의 일정 하던지, 적은 變動만을 고려하면 좋을 것이다(實際 균열면 形狀을 測定하여 보면 Fig. 7과 같이 균열이 작을수록 精密度가 좋은 데이터를 얻기 어렵다).

미소표면균열의 ΔK 의 修正係數 $f(a)$ 의 變化를 검토하기 위하여 미소표면균열의 성장속도 $d(2a)/dN$ 를 $\Delta\sigma \sqrt{\pi a}$ 에 대하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 이 그림에서 다음과 같은 것을 알 수 있다.

(가) 兩對數上에서 應력레벨마다 각 1개의 직선으로 近似할 수 있다. 만일 균열이 $d(2a)/dN = C(\Delta K)^m = C[\Delta\sigma \sqrt{\pi a}, f(a)]^m$ 에 따라 $\Delta\sigma \sqrt{\pi a} - d(2a)/dN$ 가 거의 直線에 있으면 $f(a) \cong$ 일정으로 된다. (c, m는 재료의 정수) 그러나 각 직선마다 $\Delta\sigma = \text{const.}$ 이므로 $\Delta\sigma$ 의 대신에 $(\Delta\sigma)^m$ 로 취해도 혹은 C를 $\Delta\sigma$ 의 함수로 생각해도 이 $f(a)$ 에 관한 결론은 같다⁽¹⁾.

(나) 應力레벨에서 $\Delta\sigma \sqrt{\pi a} - d(2a)/dN$ 가 다르고, 거의 차가 없이 平行하게 이동하고, 다소의 應力依存性에 의한 非線形 關係를 나타내고 있다(단 ΔK_{th} 근처의 미소균열만은 예외로 한다).

3.5. 微小疲勞균열성장속도의 파괴역학적정리

(1) ΔK 에 의한 정리($\Delta K_I - d(2b)/dN$)

ΔK_I 와 $d(2b)/dN$ 의 관계를 Fig. 9에 나타낸다. 이는 Fig. 7상의 點線으로 표시한 형상비를 使用해서 표

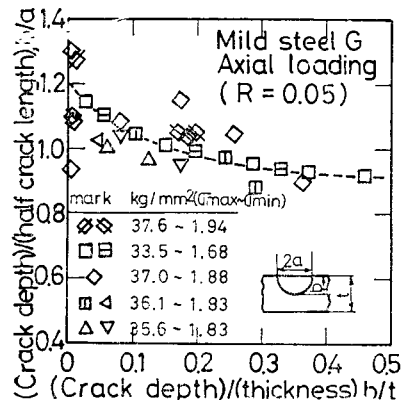


Fig. 7 Relation of aspect ratio (b/a) with the ratio of crack depth versus the thickness of specimen for A.L. ($R=0.05$)

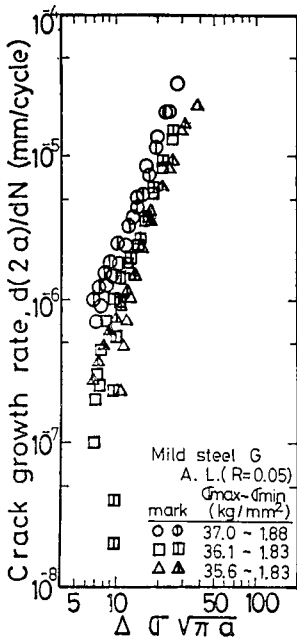


Fig. 8 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon $\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$, which varies with stress range for axial loading testing method

면균열의 最深點 ($\theta = \frac{\pi}{2}$)의 ΔK_I 를 Kobayashi 解⁽¹⁰⁾에 의하여 구한 것이다. Fig. 9에서 다음 사항을 알 수 있다.

(가) 미소피로균열의 데이터는 동일재료의 $R \approx 0.05$ 의 貫通균열의 $\Delta K_I - d(2a)/dN$ 관계에서 떨어져 있다.

(나) 이 재료의 貫通균열의 $R \approx 0.05$ 에 걸친 ΔK_{th} 보다 낮은 ΔK 레벨이라도 ΔK_{th} 의 存在가 明確하지 않다. 이것은 이 微小한 피로균열은 ΔK_{th} 이하의 극히 낮은 영역에서도 成長할 수 있는 것을 의미한다.

(다) 應力레벨의 차에 의하여 $\Delta K_I - d(2b)/dN$ 이 다소 다른 경향을 취하고 있다. 이것은 미소표면균열의 成長速度에는 線形破壞力學의 ΔK 에 의한 整理가 그대로 사용할 수 없는 것을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 低사이클피로와 破壞力學을 統一的으로 運하기 위하여 前 報告⁽¹⁾와 같이 본 연구에서도 $\Delta\epsilon$ 을 스트레인 變動範圍로 취하여 $d(2a)/dN$ 를 $\Delta K\epsilon$ 으로 整理하기로 한다. $\Delta\epsilon$ 은 히스테리시스곡선에서 直接 구하는 측정치이다.

(2) 應력-스트레인 히스테리시스의 하중조건의 영향 荷重制御疲勞試驗에 걸친 N/N_f 의 증가에 따른 全

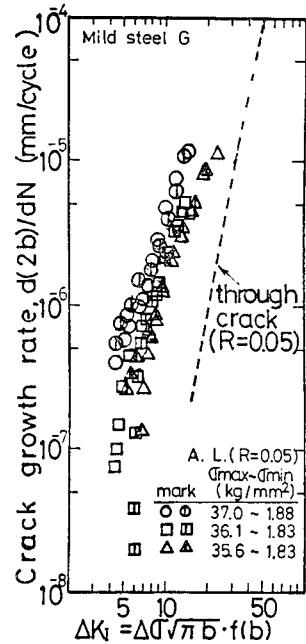


Fig. 9 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the stress intensity factor range $\Delta\sigma\sqrt{\pi b} f(b)$, which varies with stress range for A.L. testing method

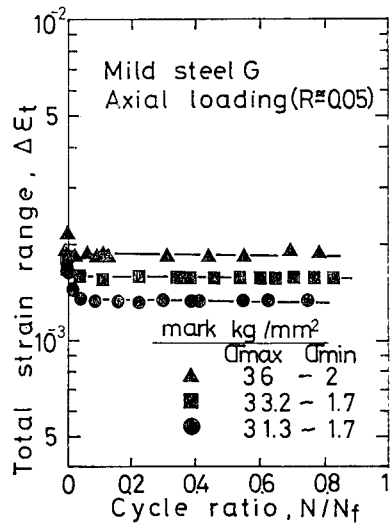


Fig. 10 Stabilization of cyclic total strain range, $\Delta\epsilon_t$, in the early stage of fatigue life, N_f (Note: Earlier than 20% of N_f)

스트레인 범위 $\Delta\epsilon_t$ 의 變化를 Fig. 10에 나타낸다. 이것으로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

(가) 이 재료에서는 피로수명의 약 10% 以前에 $\Delta\epsilon_t$ 가 포화해서 一定하게 되며 微小 疲勞 균열의 成長開始

期($N=N_i$)는 이 포화완료가의 直後에 해당하는 것 같다.

(나) 그림상의 安全時期前의 스트레인變化, 즉 최초의 $\Delta\epsilon_i$ 는 單調增加 荷重을 가한 경우의 σ - ϵ 關係에서 정하는 스트레인值를 가지고 그 후 反復作用에 의하여 減少해서 安定值에 달하고 있다.

(다) $\Delta\epsilon_p$ (塑性스트레인範圍)는 본 연구와 같은 高사이클 피로에 있어서는 $\Delta\epsilon_i$ (全스트레인範圍)에 비하여 상당히 적은 값이기 때문에 安定한 值을 스트레인 게이지로부터 얻기 어렵고 또한 그 값의 변화폭이 크므로 $\Delta\epsilon_p$ 의 값은 $\Delta\epsilon_i$ 의 값에서 $\Delta\epsilon_e$ (彈性스트레인範圍)를 제한 값으로 계산하였다.

(3) 反復스트레인擴大係數에 의한 정리

線形破壞力學(LEFM)에서 사용하고 있는 탄성스트레인 擴大係數範圍⁽¹⁾ 즉 $\Delta K/E$ 와 구별하여 非線形적인 應力·스트레인의 히스테리시스 관계에서 구한 $\Delta\epsilon$ 에 對應하는 $\Delta\epsilon \sqrt{\pi a f(a)}$ 의 반복스트레인 擴大係數範圍⁽¹⁾ $\Delta K\epsilon$ 을 이용하여 정리하여 본다.

Fig. 11(a)에 全스트레인범위($\Delta\epsilon_i$)를 採用한 $\Delta K\epsilon_i - d(2a)/dN$ 곡선을, Fig. 11(b)에 塑性스트레인범위($\Delta\epsilon_p$)를 採用한 $\Delta K\epsilon_p - d(2a)/dN$ 곡선을 나타낸다. 이때 사용한 $\Delta\epsilon_i$ 는 多段法(multiple step method)⁽¹⁰⁾에 의하여 구한 安定한 값이다. Fig. 11의 양 그림에서와 같이 각각의 데이터가 각각 한개의 선상에 보이며 Fig. 8, Fig. 9에서 나타난 應力依存性은 消滅되어서 통일적인

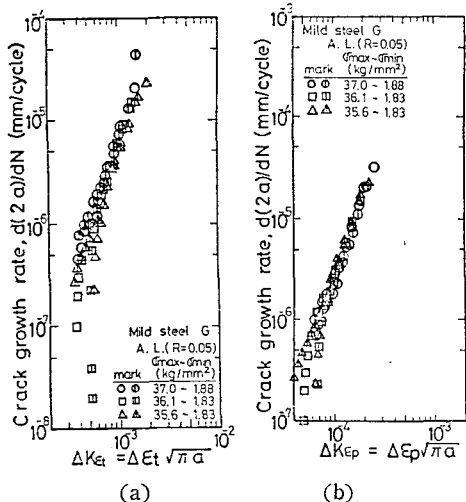


Fig. 11 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon (a) cyclic total strain intensity factor range and (b) cyclic plastic strain intensity factor range for A.L. testing method

정리가 되었다. 이렇게 미소표면균열의 성장거동을 ΔK 대신에 $\Delta K\epsilon$ 을 使用하면 從來와 같이 破壞力學의 表現이 가능함을 알 수 있다. 이 정리가 가능한 것은 平滑材 疲勞過程에 크랙의 발생·성장과정을 도입함에 의하여 破壞力學의 側面에서도 接近한 것으로 된다.

4. 結 論

平滑材의 疲勞破壞에 破壞力學의 擴張適用의 可能性을 檢討하기 위하여 軟鋼平滑材의 片振引張軸荷重 疲勞試驗($R \leq 0.05$)을 실시해서 미소표면 피로균열이 발생하는 초기단계에서 파단에 이르는 全 舉動을 詳細히 조사하였다. 동시에 應력-스트레인의 히스테리시스 곡선을 조사해서 安定된 스트레인 범위를 사용한 반복 스트레인 擴大係數($\Delta K\epsilon$)를 매개체로서 平滑材의 疲勞破壞를 破壞力學에 의한 統一의 理解를 확장, 시도한 즉 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 安定된 스트레인 범위를 使用하는 반복 스트레인 擴大계수범위 $\Delta K\epsilon$ 은 ΔK 의 정리에서 생긴 應力依存性이 없어지고 1개의 직선으로 통일적인 정리가 가능하였다.

(2) 微小한 平滑材 表面상의 피로균열은 동일 재료의 貫通균열의 ΔK_{th} 보다 낮은 應력레벨에서도 成長 可能함을 알 수 있었다.

(3) 미소균열은 主應力軸에 약 45° 의 경사진 結晶粒界에서 발생하는 일이 많이 관찰되었지만, 슬립밴드에 의한 結晶粒內에서의 發生과 介在物에 의한 퍼올라이트에서도 미소균열이 발생·성장하였다.

후 기

본 연구는 1982년도 한국과학재단의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 謝意를 표한다.

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) Usami, S., Y. Fukuda and S. Shida, Initiation and Growth of Small Cracks on the Smooth Specimen in High-Temperature Plastic Fatigue, Proc. Japan Soc. Mechanical Engineers, No. 810~7,

- pp. 219~224, 1981
- (3) Kitagawa, H., T. Fujita and K. Miyazawa, Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue, ASTM STP 642, pp. 98~114, 1978
- (4) EL HADDAD, M.H., K.N. Smith and T.H. Topper, Fatigue Crack Propagation of Short Cracks, Trans. of ASME, J. of Engr. Materials and Technology, Vol. 101, pp. 42~47, 1979
- (5) Kitagawa, H., S. Takahashi, C.M. Suh, Y. Nakasone and S. Miyashita, Propagation of Small Cracks, Engineering Foundation Conference on Fatigue Crack Initiation and Early Growth in Asilomar Conf. Grounds Pacific Grove, California, U.S.A, 1980
- (6) Suh, C.M., R. Yuuki and H. Kitagawa, Basic Study for the Detection and Evaluation of Micro-Surface-Fatigue Cracks, Treatise of the Pan Pacific Symposium on NDT, Seoul, pp. 233~247, 1978
- (7) 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
- (8) 小林英男, 中澤一, 第一段階の疲れき裂進展過程, 機械の研究, 連載講座 第24-11~第26-1, 1972~1974
- (9) 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
- (10) Landgraf, R.W., J. Morrow, and T. Endo, Determination of the Cyclic Stress Strain Curve, J. of Materials, 4-1, pp. 176~188, 1969