

<論 文> 2

過大, 過小應力下에서의 疲勞크랙 發生 傳播舉動(Ⅱ)

—炭素鋼材의 내부크랙을 中心으로—

宋 森 弘* · 元 時 太**

(1985年 9月 18日 接受)

Behavior of Initiation and Propagation of Fatigue Crack under Periodic Overstressing(Ⅱ)

—About the Inside Crack of the Carbon Steel—

Sam Hong Song and Si Tae Won

Key Words: Overstress(과대응력), Understress(과소응력), Slip Band Occurrence Stage(슬립밴드 발생단계), Crack Propagation Stage(크랙전파단계), Crack Closure(크랙닫힘), Crack Opening(크랙열림)

Abstract

With respect to structural carbon steel(SM 22C), it was studied how the overstress or the understress has effects on fatigue inside crack propagation curve of a two level stress. Obtained results are summarized as follows.

- (1) The overstress or the understress, at a slip band occurrence stage, does not change the inside crack propagation curve because the crack closure and opening phenomena do not happen.
- (2) The overstress, at a crack propagation stage, does not change the inside crack propagation curve because the crack closure of overstress in compressive state is nearly same that of base stress in compressive state.
- (3) The understress, at a crack propagation stage, give rise to an acceleration of crack growth because the crack closure of understress in compressive state is more open than that of base stress in compressive state and the phenomenon is the essential increase of the actual applied stress of the specimen.

1. 序 論

機械 및 構造物 등은 사용환경과 운전조건에 따라 하

重이 變動하는 경우가 大部分이고 이와같은 상황에서 疲勞크랙傳播 및 疲勞壽命의 精確한 豫則은 매우 重要하다.

이와같은 不規則한 應力狀態에 대한 疲勞破斷壽命을 檢討하는데 가장 간단하고 보편적으로 사용되고 있는 被害理論은 Miner⁽¹⁾가 精確한 線形被害法則이고 이것은 被害程度를 단순히 사이클비 n/N 으로 가정하여 m

* 正會員, 高麗大學校 工科大學 機械工學科

** 正會員, 高麗大學校 大學院, 現 京畿工業開放大學

段 應力이 作用하는 경우 다음과 같다.

$$D_r = \sum_{i=1}^n n_i / N_i$$

여기서 D_r 는 총피해율, N_i 는 應力 σ_i 에서 破斷까지의 壽命, n_i 는 σ_i 가 作用한 反復數이다.

그러나 Manson⁽²⁾ 등은 2段應力에서 線形被害法則 ($\sum \frac{n}{N}$)이 荷重의 順序가 다른 경우, 즉 高荷重에서 低荷重 負荷時에는 $\sum \frac{n}{N} < 1$ 이고 低荷重에서 高荷重 負荷時에는 $\sum \frac{n}{N} > 1$ 이 되는 現象이 나타나고 특히 이와같은 現象은 같은 크랙길이라 하더라도 應力에 의한 조건이 다르고 또한 材料에 따라 硬化 및 軟化가 되는 性質에 기인한다고 豫測하였다. 한편 Elber⁽³⁾ 등은 중앙에 구멍을 갖는 2024-T3 알루미늄 合金板材의 反復引張實驗에서 疲勞크랙 닫힘現象을 제안하고 특히 크랙 닫힘現象이 變動荷重에서 크랙傳播의 加速 및 遲延效果를 갖는다고 하였다. 이밖에 青木⁽⁴⁾ 및 中村⁽⁵⁾ 등은 V형 환상노치를 갖는 S40C, S15C, 및 S35C 材의 回轉굽힘 疲勞試驗에서 荷重을 變化시킨 경우 크랙傳播曲線의 樣相에 따라 重合則과 平行則의 모델을 제시하고 過大應力을 加한 경우에는 重合則이 成立하고 過小應力을 加한 경우에는 加速現象에 의한 平行則이 成立한다고 하였다.

以上的 몇 가지 結果를 檢討하면 크랙傳播의 遲延 및 加速現象에 대한 主要因자는 크랙선단부의 微視的 變化에 의한 被害要因과 크랙의 形狀的인 要因으로 생각되어진다.

이와같은 觀點에서 不規則荷重을 받는 部材에 대한 研究의 기초로서 前報⁽⁶⁾에서는 2段應力모델을 설정하고 應力이 變動하는 時期는 不規則하게 나타나므로 基準應力에 의해 슬립밴드가 發生한 初期段階과 表面크랙이 傳播한 段階($l=0.5\text{mm}$)로 區分하여, 過大 및 過小應力을 가하고 表面크랙 傳播曲線을 중심으로 크랙 선단부에서 發生하는 被害程度를 硬度值로 환산하여 檢討하였다. 이 結果 크랙선단부의 被害條件에 따라 피해상황이 현저히 차이가 나는 크랙傳播段階에서 變動應力이 作用하면 크랙傳播曲線에 큰 영향이 나타나고 있다. 그러나 비슷한 硬度值의 차이에도 불구하고 過小應力에 의한 크랙傳播의 加速現象이 過大應力에 의한 遲延現象보다 현저히 크게 나타나는 등 불명확한 점이 있다. 또한, 크랙선단부의 피해상황 이외에도 크랙의 傳播가 應力段階에 따라 內部로 傳播하는 모양이 상이하게 나타날 것이 豫測되며 이에 대한 檢討도 명확히 할 필요가 있다고 생각된다.

따라서 本 研究에서는 應力이 變動되는 경우 內部크랙 傳播特性을 중심으로 內部크랙 傳播舉動을 表面크랙 傳播舉動과 비교 검토하였다.

2. 實驗方法

本 實驗에 使用한 試驗片은 國產構造用 炭素鋼材이고 化學成分과 機械的 性質은 Table 1 및 Table 2 와 같다.

Table 1 Chemical composition(W, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SM 22 C	0.23	0.15	0.50	0.003	0.022	0.01	0.01	0.01	0.03

Table 2 Mechanical properties

Material	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)
SM 22 C	68	14	46	200

疲勞試驗片은 Fig. 1 과 같이 슬립밴드 및 크랙의 길이를 측정하는데 용이함을 위해 이들이 試驗片의 한 부분에서 發生하도록 圓孔의 지름 $d_1=1\text{mm}$, 길이 $h_1=5d_1$ 로 비관통시켰다. 한편 表面크랙은 圓孔의 선단에서 發生, 傳播하므로 이것의 관찰을 용이하게 하기 위해 연마지 #1200 까지 연마한 후 電解研磨하였다.

本 實驗에 使用된 疲勞試驗機는 小野(Ono)型 回轉굽힘 疲勞試驗機이고 試驗機의 能力은 最大굽힘모멘트 10kgf-m, 每分 回轉數는 300rpm 이다.

應力의 계산은 공칭응력으로 하였고 또한 각각의 應力段階에 따른 크랙傳播舉動을 파악하기 위하여 前報⁽⁶⁾와 같이 Fig. 2 와 같은 2段應力 모델을 선정하였다. 여기서 먼저 가하는 應力은 1次應力(σ_1 : 편의상 基準應力으로 한다)으로 하고 基準應力보다 후에 가하는

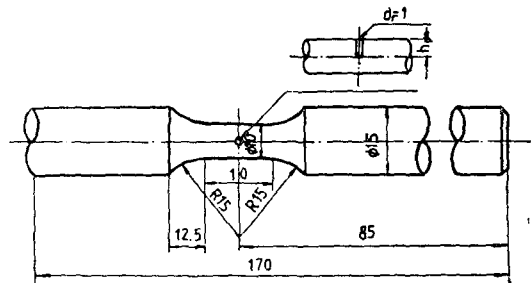


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen(mm)

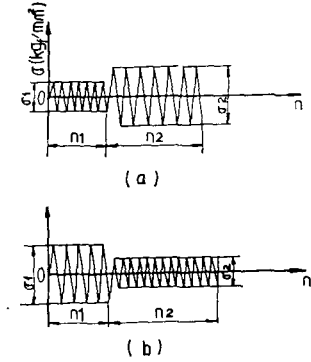


Fig. 2 The model of the two level stressing

應力을 2次應力(σ_2)이라 한다. 이것을 基準應力에 대하여 2次應力이 큰것을 過大應力(모델 a), 작은 것을 過小應力(모델 b)이라 한다. 그리고 이들 過大 및 過小應力이 가해지는 時期를 前報⁽⁶⁾의 表面크랙傳播擧動과의 관계를 고려하여 基準應力에 의해 表面에서 슬립 밴드가 發生한 段階과 크랙이 傳播한 段階($l=0.5\text{mm}$)로 同一하게 하였다.

한편 傳播하는 크랙길이는 Fig. 3과 같이 圓孔의 양단에서 發生한 表面크랙($l=l_1+l_2$)에 대하여 內部크랙(h)은 內部로 傳播한 最大길이로 하였다. 여기서 內部크랙은 가열착색법을 이용하여 전기로에서 가열 착색 후 疲勞試驗機에서 破斷시켜 관찰하였다.

한편, 각각의 應力狀態에 따른 內部크랙의 열립 및 닫힘現象을 檢討하기 위하여 試驗片 表面에서의 引張 및 壓縮狀態에 대한 크랙모양을 레프리카를 이용하여 관찰하였다.

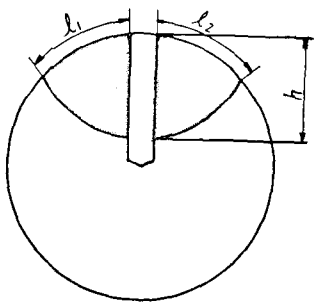


Fig. 3 Crack length(mm)
Surface crack ($l=l_1+l_2$)
Inside crack (h)

3. 實驗結果 및 考察

3.1 一定 應力下에서의 크랙 傳播擧動

試驗片은 反復應力을 받으면 疲勞크랙의 初期狀態는

表面에 슬립이 發生하고 이 슬립이 누적되어 슬립 밴드에 의한 軟化現象이 생긴후 初期크랙을 發生시킨다⁽⁷⁾. 이후 發生된 크랙이 傳播하여 最終破斷에 이른다.

Fig. 4는 각각의 應力段階에서 슬립밴드가 發生하는 壽命 및 表面크랙이 0.5mm 傳播하는 壽命, 그리고 破斷壽命을 나타내며 이때, 疲勞限度는 $\sigma_w=16.5\text{kgf/mm}^2$ 이다. 應力段階의 선정은 疲勞限度 以上の 값에서 破斷壽命을 중심으로 低사이클壽命, 中間사이클壽命, 및 高사이클壽命을 갖는 應力을 선택하였다. 이때 低사이클壽命 범위 ($N_f \approx 1.3 \times 10^4$)인 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$ 을 高應力段階, 中間사이클壽命 범위 ($N_f \approx 9 \times 10^4$)인 $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$ 을 中間應力段階, 高사이클壽命, 범위 ($N_f \approx 1 \times 10^6$)인 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 을 低應力段階로 하였다.

Table 3은 각 應力段階에서 破斷壽命에 대한 (1) 슬립밴드 發生時期(n_1) (2) 圓孔에서 微視表面크랙의 發生時期(n_2) [本 實驗에서는 $100\mu\text{m}$ 程度의 크기를 의미한다⁽⁷⁾], (3) 表面크랙(l)이 0.5mm까지 傳播한 時期(n_3)를 구한 것이다. 이상의 結果에서 表面크랙의 發生 및 傳播過程은 應力에 따라서 n_i/N_f 의 比가 다

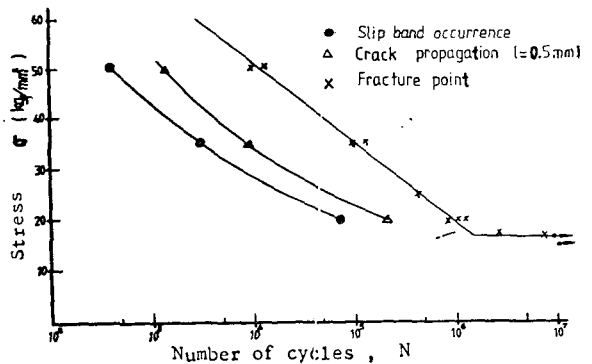


Fig. 4 S-N curve diagram

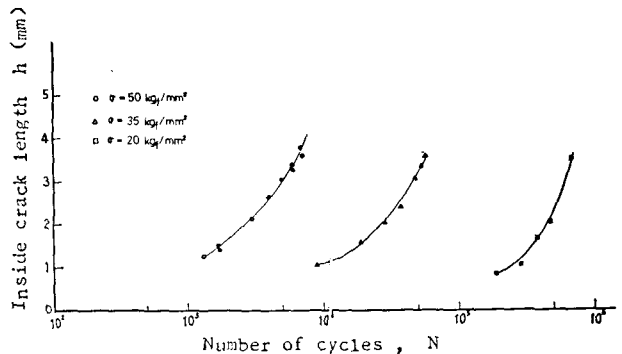


Fig. 5 $h-N$ curve in case of constant stress amplitude

Table 3 The ratio of n_i/n_f

Stress level	$\sigma=50\text{kgf/mm}^2$	$\sigma=35\text{kgf/mm}^2$	$\sigma=20\text{kgf/mm}^2$
Cycle to fracture	$N_f \doteq 1.3 \times 10^4$	$N_f \doteq 9 \times 10^4$	$N_f \doteq 1 \times 10^6$
(1) Slip band occurrence stage	$n_1 \doteq 4 \times 10^2$ $\frac{n_1}{N_f} = 3\%$	$n_1 \doteq 3 \times 10^3$ $\frac{n_1}{N_f} = 3.33\%$	$n_1 \doteq 7.5 \times 10^4$ $\frac{n_1}{N_f} = 7.5\%$
(2) Crack initiation stage (100 μm)	$n_2 \doteq 7 \times 10^2$ $\frac{n_2}{N_f} = 5.3\%$	$n_2 \doteq 5.2 \times 10^3$ $\frac{n_2}{N_f} = 5.5\%$	$n_2 \doteq 1 \times 10^5$ $\frac{n_2}{N_f} = 10\%$
(3) Crack propagation stage ($l=0.5\text{mm}$)	$n_3 \doteq 1.3 \times 10^3$ $\frac{n_3}{N_f} = 10\%$	$n_3 \doteq 9 \times 10^3$ $\frac{n_3}{N_f} = 10\%$	$n_3 \doteq 2 \times 10^5$ $\frac{n_3}{N_f} = 20\%$

르고 高應力段階가 빨리 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 表面크랙의 結果에 대하여 Fig. 5는 各應力段階에서 回轉數의 증가에 따른 內部크랙傳播曲線이다. Fig. 6은 各應力에 대하여 傳播하는 內部크랙 길이와 破斷壽命에 대한 回轉數의 比를 나타낸다.

Fig. 7은 各各의 應力에서 反復數의 증가에 따라 傳播한 內部크랙길이 (h)와 前報⁽⁶⁾에서 發表한 表面크랙길이 (l)를 비교한 것으로 크랙傳播의 初期段階에서 表面크랙길이보다 內部크랙길이 크고 內部크랙길이 가 表面크랙길이와 같아지는 시점을 應力에 따라 各各다름을 알 수 있다. 그리고 이 시점을 지나면 表面크랙길이 가 內部크랙길이보다 큰것을 나타낸다.

Fig. 8은 反復數의 증가에 따른 內部크랙 傳播速度 ($\frac{dh}{dN}$)를 表面크랙 傳播速度($\frac{dl}{dN}$)와 함께 나타낸 것이다. 여기서 크랙傳播速度($\frac{dh}{dN}$, $\frac{dl}{dN}$)는 應力이 클수록 높은 상태를 나타내고 또한 크랙傳播의 初期段階

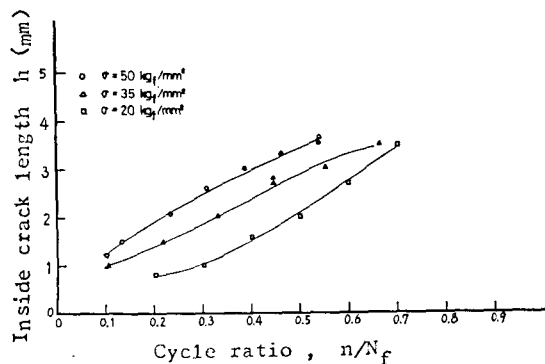


Fig. 6 $h-n/N_f$ curve

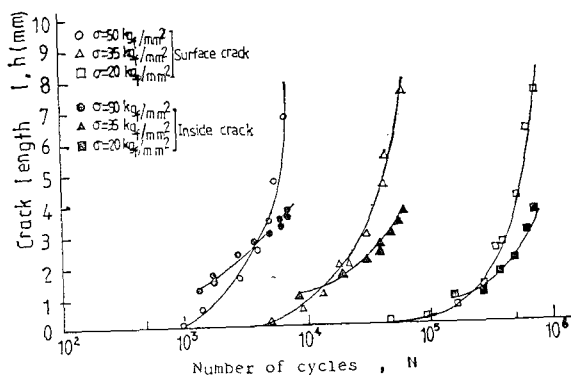


Fig. 7 The relation between surface crack length (l) and inside crack length (h)

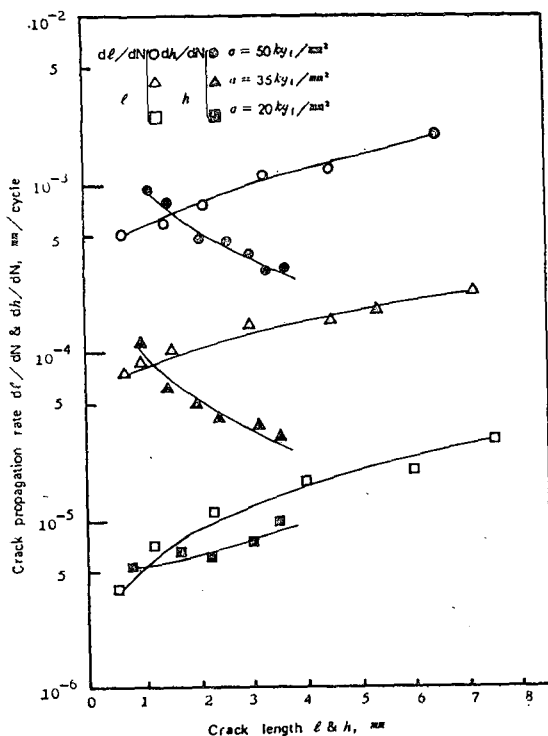


Fig. 8 Relation between crack propagation rate and crack length

에서 $\frac{dh}{dN}$ 가 $\frac{dl}{dN}$ 보다 큰 상태를 볼 수 있다. 그러나 應力의 크기가 낮은 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 의 경우에는 $\frac{dl}{dN}$ 및 $\frac{dh}{dN}$ 가 크랙길이 (l , h)에 대하여 거의 같은 樣相을 볼 수 있지만 應力이 큰 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$, $\sigma=35\text{kgf/}$

mm² 인 경우에는 $\frac{dl}{dN}$ 은 상승하는 반면 $\frac{dh}{dN}$ 는 점차 적인 감소경향을 나타낸다. 以上の結果로부터 反復數에 따른 表面크랙 및 内部 크랙길이의 變化는 應力크기에 따라 各 方向의 크랙傳播速度에 차이가 있기 때문이라 생각된다.

한편 Fig. 9는 各各의 應力段階에서 内部로 傳播하는 크랙의 모양을 나타낸다. 이들의 그림으로부터 크랙면의 形狀은 應力の 크기 및 反復數의 증가에 따라 變化하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 宋⁽⁸⁾, 西谷⁽⁹⁾ 등은 微小圓孔 노치가 존재하는 경우에 크랙면의 形狀은

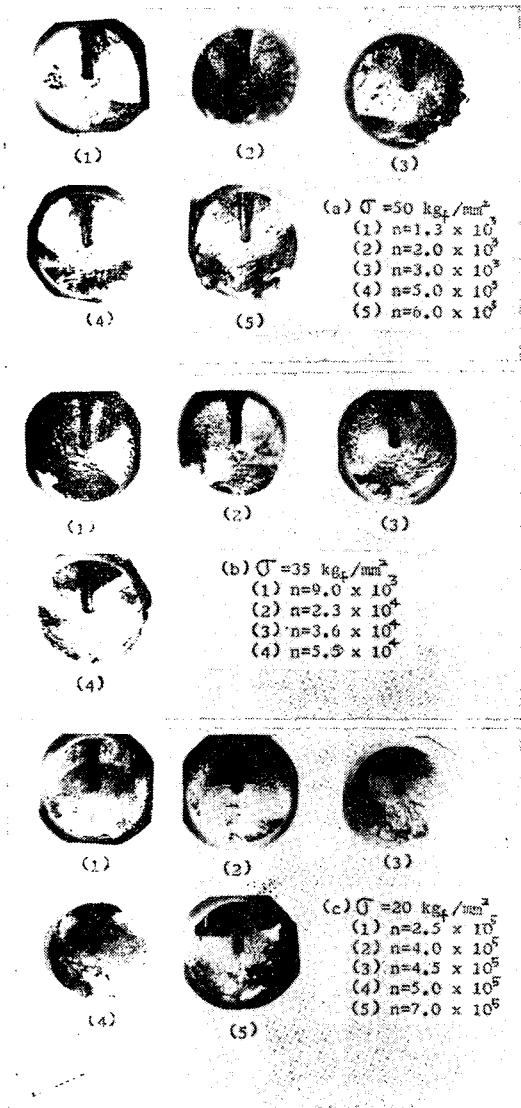


Fig. 9 The characteristic of inside crack propagation

應力の 크기에 관계없이 半橢圓 또는 半圓形임을 보고하고 있다. 이와같은 관점에서 살펴볼 때 本 實驗에서 나타나는 크랙면 形狀의 차이는 圓孔의 크기 (d_1)와 깊이 (h_1)에 의한 영향으로 생각이 되어 圓孔에서의 應力集中에 대하여 檢討하였다!

즉 Chijiwa⁽¹⁰⁾ 등은 回轉굽힘을 받는 疲勞試驗片의 경우 圓孔의 깊이 (h_1)가 圓孔의 지름 (d_1)과 비교하여 $h_1 \geq 1.5d_1$ 인 경우에는 貫통한 試驗片의 疲勞強度와 같다고 보고하고 있다. 따라서 本 實驗에 사용한 試驗片은 $h_1 = 5d_1$ 이므로 貫통재의 경우와 같이 생각할 수 있다. 또한 試驗片 지름 (D)과 圓孔의 지름 (d_1)의 관계에 의한 應力集中을 고려하면 Okubo⁽¹¹⁾ 西谷⁽⁹⁾ 등은 굽힘모우멘트를 받는 圓筒재의 경우 試驗片 지름 (D)과 圓孔의 지름 (d_1)의 비 즉 $\frac{d_1}{D}$ 값이 증가할 수록 應力集中係數 (α)는 증가경향을 보이고 또한 $\frac{d_1}{D}$ 이

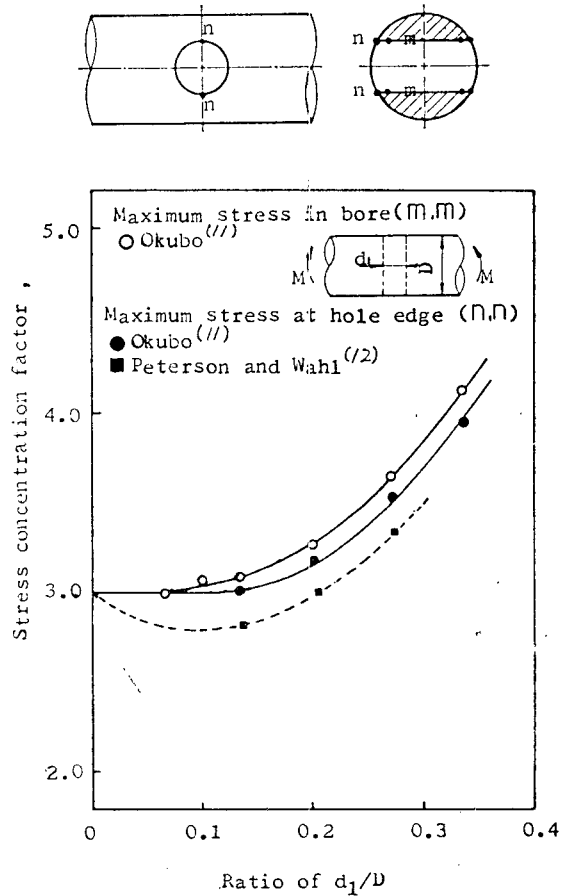


Fig. 10 Stress concentration factors for shafts with transverse holes, subject to bending

약 0.06 이상이 되면 圓孔선단의 應力集中係數보다 試驗片的 중심방향으로 약간 內則으로 들어간 圓孔모서리 部分의 應力集中係數가 크다고 하였다. Fig. 10은 Okubo⁽¹¹⁾, Peterson⁽¹²⁾ 등이 구한 應力集中係數 (α)와 $\frac{d_1}{D}$ 과의 관계를 나타낸 것이다. 이상과 같은 검토에서 微小圓孔을 갖는 경우에는 微小圓孔의 선단에서 最大應力이 나타나고 있는 상태와 관련지을 수 있고 $h_1 \geq 1.5d_1$ 및 $\frac{d_1}{D} \geq 0.06$ 의 범위를 갖는 試驗片의 경우에는 應力集中位置가 圓孔內則의 모서리 部分에서 가장 크므로 이것에 의한 영향이 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 크랙傳播의 初期過程에서 內部크랙길이 및 內部크랙傳播速度가 表面크랙길이 및 表面크랙傳播速度보다 크게 나타나는 것으로 생각된다.

3.2 內部크랙 傳播曲線에 미치는 過大應力の 영향

Fig. 11은 基準應力에서 表面에 슬립밴드가 發生한後 [이때의 內部크랙은 各 應力段階에서 $h=0$ mm 이다] 過大應力($\sigma_1=35\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=50\text{kgf/mm}^2, \sigma_1=20\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=35\text{kgf/mm}^2$)을 가한 結果를 나타내며 이때의 크랙傳播曲線은 過大應力에 해당하는 一定應力($\sigma=50\text{kgf/mm}^2, \sigma=35\text{kgf/mm}^2$)의 크랙傳播曲線과 일치한다.

Fig. 12는 基準應力에서 表面크랙 (l)이 0.5mm 傳播한 段階[이때 各 應力段階의 內部크랙 (h)은 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$ 에서 $h=1.25\text{mm}$, $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$ 에서 $h=1\text{mm}$, $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 에서 $h=0.8\text{mm}$ 이다]에서 過大應力($\sigma_1=35\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=50\text{kgf/mm}^2, \sigma_1=20\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=35\text{kgf/mm}^2$)을 가한 結果이며 이때의 크랙傳播曲線은 過大應力에 해당하는 一定應力($\sigma=50\text{kgf/}$

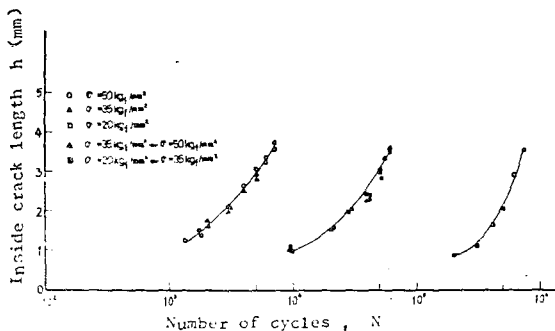


Fig. 11 h - N curve in case of overstressing at the slip band occurring stage

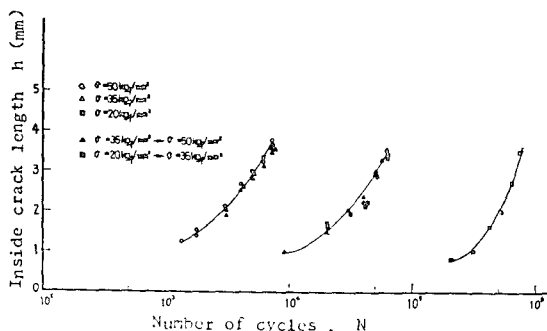


Fig. 12 h - N curve in case of overstressing in the crack propagation stage

$\text{mm}^2, \sigma=35\text{kgf/mm}^2$)의 크랙傳播曲線에 거의 일치하며 傳播하고 있다.

以上的 內部 크랙傳播曲線에 대한 實驗結果에 대하여 슬립밴드 發生段階에서는 內部크랙이 존재하지 않은 상태이므로 內部크랙傳播에는 變化가 없는 것으로 생각된다. 한편 크랙傳播段階에서는 過大應力을 받기 이전 同一한 表面크랙길이 ($l=0.5\text{mm}$)에 대하여 이미

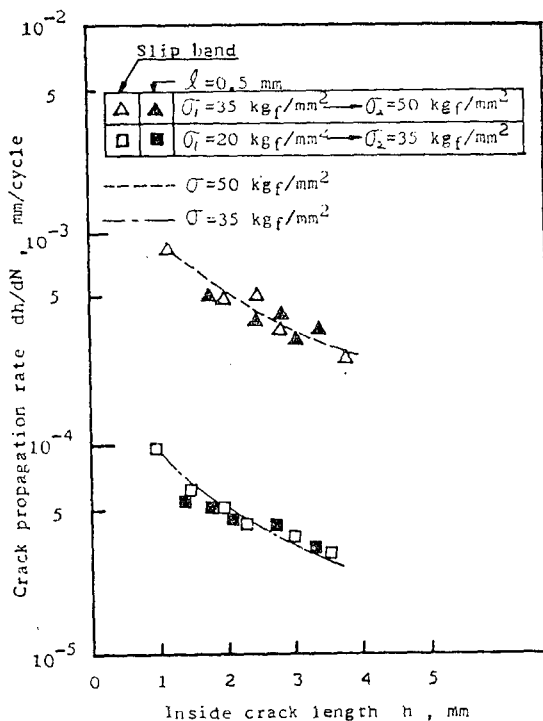


Fig. 13 Crack propagation rates of single level stressing and overstressing

内部크랙은 약 0.2~0.25mm 만큼 적게 들어가 있기 때문에 크랙傳播는 늦어질 것으로 예상되지만 큰變化가 없음을 알 수 있었다.

따라서 Fig. 13은 内部크랙 傳播速度($\frac{dh}{dN}$)를 過大應力의 크기에 해당하는 一定應力만을 받는 경우 얻어진 $\frac{dh}{dN}$ 와 비교한 것이다. 즉 슬립밴드 發生段階인 경우에는 $\frac{dh}{dN}$ 의 變化가 없음을 알 수 있고 한편 크랙傳播段階인 경우에도 應力變動 初期過程에서 약간 늦어지는 현상이 나타나고 있지만 큰變化가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 크랙傳播에 미치는 因子는 内部크랙 길이 차이에 의한 영향이외에 크랙달집 및 열림現象을 함께 고려하여야 할 것으로 생각되고 이것에 대하여는 3.4節에서 檢討하고자 한다.

3.3 内部크랙 傳播曲線에 미치는 過小應力의 영향

Fig. 14는 基準應力에서 表面에 슬립밴드가 發生한後[이때의 内部크랙(h)은 各應力段階에서 $h=0$ mm 이다] 過小應力($\sigma_1=50\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=35\text{kgf/mm}^2$, $\sigma_1=35\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=20\text{kgf/mm}^2$)을 가한 結果이다. 이때 内部크랙은 過小應力에 해당하는 一定應力($\sigma=35\text{kgf/mm}^2$, $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$)의 크랙傳播曲線과 일치한다.

Fig. 15는 基準應力에서 表面크랙(l)이 0.5mm 傳播한 段階[이때 各應力段階의 内部크랙(h)은 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$ 에서 $h=1.25\text{mm}$, $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$ 에서 $h=1\text{mm}$, $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 에서 $h=0.8\text{mm}$ 이다]에서 過小應力($\sigma_1=50\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=35\text{kgf/mm}^2$, $\sigma_1=35\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=20\text{kgf/mm}^2$)을 가한 結果이다. 이때 크랙傳播曲線은 過小應力에 해당하는 一定應力($\sigma=50\text{kgf/mm}^2$, $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$)에서의 크랙傳播曲線보다 빨리傳播하는 現象을 나타내고 있다. 즉 크랙傳播段階에서

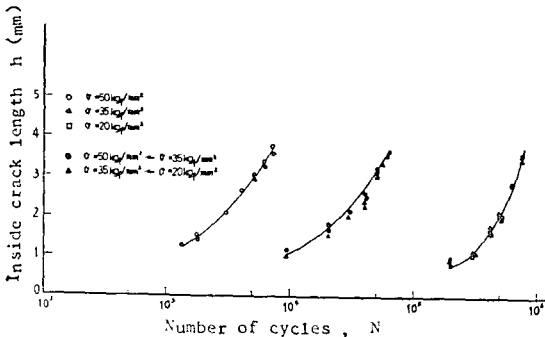


Fig. 14 $h-N$ curve in case of understressing at the slip band occurring stage

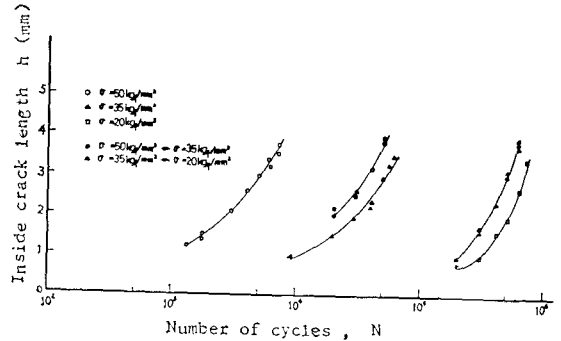


Fig. 15 $h-N$ curve in case of understressing in the crack propagation stage

過小應力의 영향은 매우 크다고 할 수 있다.

以上の 結果를 종합하면 内部크랙傳播曲線의 경우에도 前報(6)에서 발표한 表面 크랙 傳播曲線의 경우와 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 16은 過小應力을 받는 경우 内部크랙傳播速度($\frac{dh}{dN}$)와 처음부터 過小應力의 크기에 해당하는

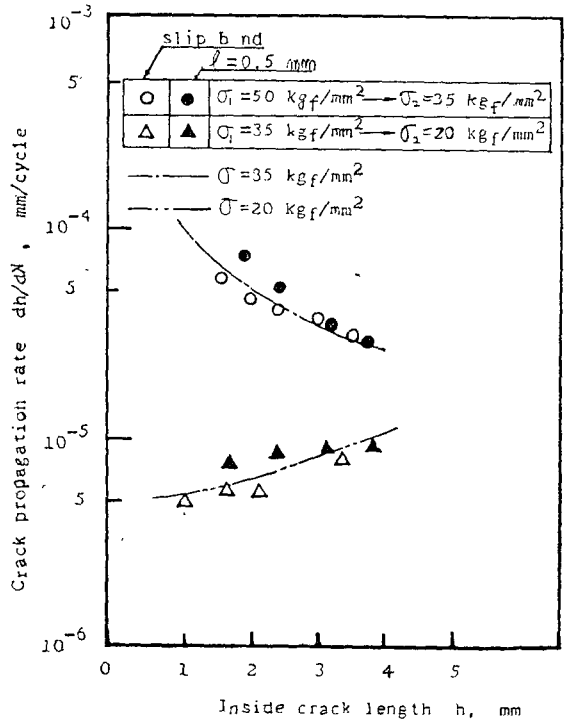


Fig. 16 Crack propagation rates of single level stressing and understressing

一定應力만을 받는 경우의 $\frac{dh}{dN}$ 와 비교한 것이다. 이때 슬립밴드 發生段階의 경우에는 $\frac{dh}{dN}$ 의 變化가 없고 過大應力을 받는 경우와 같이 생각할 수 있다. 그러나 크랙傳播段階인 경우에는 過大應力을 받는 경우와는 달리 $\frac{dh}{dN}$ 는 應力이 變動된 初期過程에서 一定應力의 $\frac{dh}{dN}$ 보다 큰 상태를 볼 수 있고 점차적으로 一定應力의 $\frac{dh}{dN}$ 와 비슷한 경향을 나타낸다. 이와같은 結果는 過小應力을 받기 以前에 이미 内部크랙이 약 0.2~0.25mm 만큼 内部로 더 들어가 있기 때문이라 생각된다. 그러나 같은 크랙길이의 차이에도 불구하고 3·2節의 過大應力을 받는 경우에는 크랙傳播曲線과 $\frac{dh}{dN}$ 에 큰 變化가 나타나지 않는 것을 생각하면 過小應力을 받는 경우에도 크랙열림과 닫힘現象을 함께 檢討하여야 할 것으로 생각된다.

3.4 크랙열림 및 닫힘現象과 크랙傳播 特性的 檢討

本 實驗과 같이 回轉굽힘疲勞에서는 引張 및 壓縮狀態가 反復되고 이들 應力狀態에 따라 引張의 경우에는 크랙의 열림現象이, 壓縮의 경우는 크랙닫힘現象이 나타나게 된다. 이와같은 表面에서의 크랙열림과 닫힘現象이 内部크랙의 경우에도 비슷한 結果로 나타날 것이 豫測이 되어 다음과 같이 檢討하였다.

(1) 슬립밴드 發生段階인 경우

Fig. 17 와 Fig. 18은 基準應力에서 슬립밴드가 發

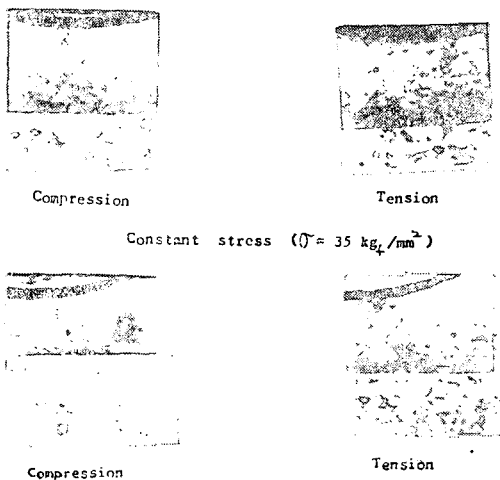


Fig. 17 In case of overstressing at the slip band occurring stage ($\sigma_1=35\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=50\text{kgf/mm}^2$)

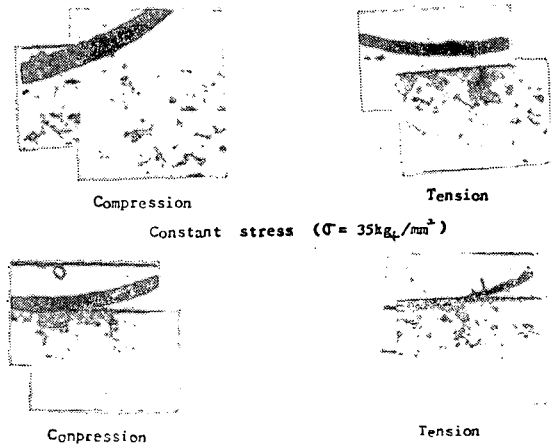


Fig. 18 In case of understressing at the slip band occurring stage ($\sigma_1=35\text{kgf/mm}^2 \rightarrow \sigma_2=20\text{kgf/mm}^2$)

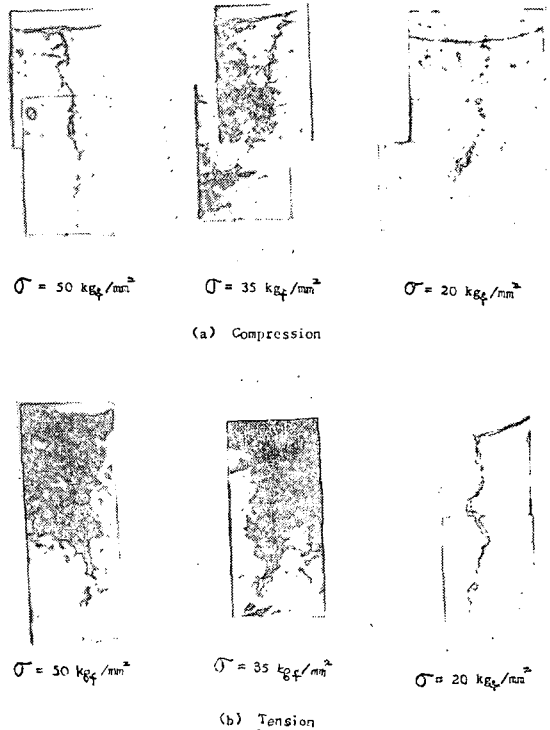


Fig. 19 The characteristic of crack closure and opening with respect to constant stress

生한 후 過大 및 過小應力을 가한 예로서 슬립밴드가 發生한 段階에서는 表面 및 内部크랙이 존재하지 않으므로 引張 및 壓縮狀態에서도 크랙열림 및 닫힘現象을 볼 수 없고 이때 過大 및 過小應力을 가하면 크랙은 過大 및 過小應力에 해당되는 一定應力의 크랙傳播曲

線과 일치하며 傳播하는 것으로 생각된다.

(2) 크랙 傳播 段階인 경우

Fig. 19는 各各의 一定應力에서 表面크랙이 0.5mm 傳播한 후 壓縮 및 引張狀態를 나타낸다. Fig. 19(a)는 크랙이 壓縮狀態에 놓인 경우로서 크랙의 닫힘現象이 Fig. 19(b)는 크랙이 引張狀態에 놓인 경우로서 크랙의 열림現象이 나타나고 있다.

한편 Fig. 20은 基準應力에서 크랙이 0.5mm 傳播한 후 過大應力을 가한 경우이고 Fig. 20(a)는 壓縮狀態로 크랙닫힘現象이 Fig. 20(b)는 引張狀態로 크랙열림現象이 나타난다. 이것을 過大應力에 해당하는 一定應力의 壓縮狀態[Fig. 19(a)] 및 引張狀態[Fig. 19(b)]의 경우와 비교하면 거의 비슷한 크랙닫힘 및 열림現象을 볼 수 있다. 따라서 內部크랙 傳播曲線에는 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 생각된다.

그러나 Fig. 21은 基準應力에서 크랙이 0.5mm 傳播한 후 過小應力을 가한 경우이다. 여기서 Fig. 21(a)는 크랙이 壓縮狀態에 놓인 경우이고 過小應力에 해당하는 一定應力의 壓縮狀態[Fig. 19(a)]와 비교할때 크랙닫힘 現象이 좋지 못하고 基準應力에 의해 이미 벌어진 크랙이 壓縮狀態에서도 완전히 닫히지 못하고 어

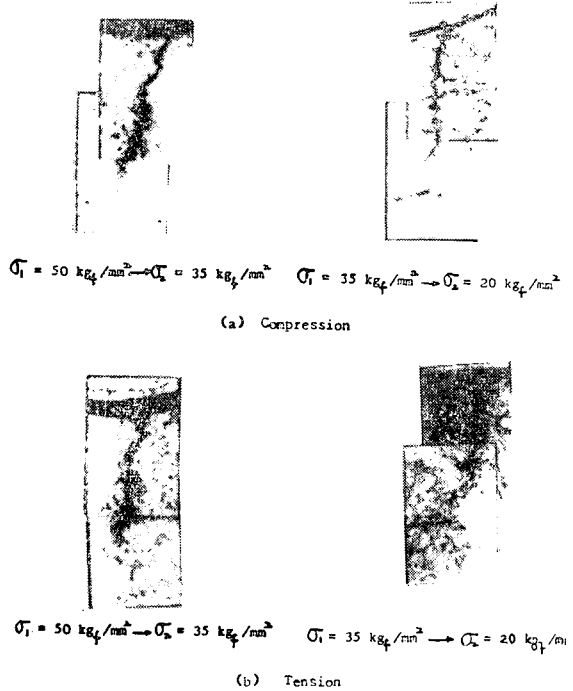


Fig. 21 The characteristic of crack closure and opening with respect to understressing in the crack propagation stage

느 정도 열린 상태로 존재한다. 한편 Fig. 21(b)는 크랙이 引張狀態에 놓인 경우로서 크랙열림 現象을 볼 수 있다.

이상의 結果에서 크랙 傳播曲線에 큰 영향을 미치는 크랙 傳播段階에서 過小應力을 받는 경우에는 壓縮狀態에서도 크랙닫힘이 좋지 못하기 때문에 이것에 의한 실제 하중부담의 증가와 함께 3·1 節에서 고려된 크랙 傳播特性에 의한 內部크랙의 깊이차이에 의한 영향이 크랙을 빨리 傳播시키는 것으로 생각된다.

4. 結 論

國產 構造用 炭素鋼材(SM 22C)를 使用하여 2段應力모형을 設定하고 基準應力에 의해 表面에 슬립밴드가 發生한 段階와 크랙이 內部로 傳播한 段階로 區分하여 過大 및 過小應力을 가한 結果 內部크랙 傳播曲線의 특징을 크랙닫힘과 열림現象에 의해 檢討하였다.

이때 얻어진 結果를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 基準應力에서 슬립밴드가 發生한 다음 過大 및 過小應力을 가한 경우에는 基準應力 狀態에서 크랙이

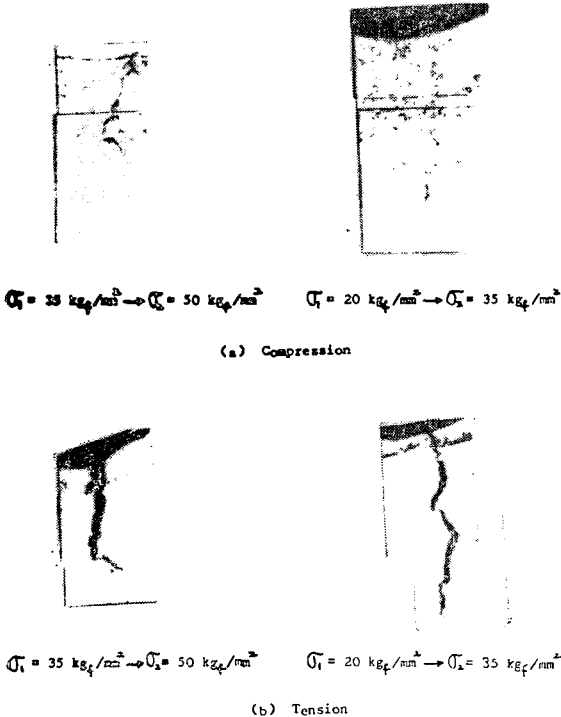


Fig. 20 The characteristic of crack closure and opening with respect to overstressing in the crack propagation stage

존재하지 않으므로 크랙닫힘과 열림現象이 없으며 內部크랙 傳播曲線에 變化가 없다.

- (2) 基準應力에 의해 크랙이 傳播한 段階에서 過大應力을 가한 경우에는 壓縮狀態에서의 크랙닫힘이 過大應力에 해당하는 一定應力의 그것과 거의 비슷하며 內部크랙 傳播曲線에 거의 變化가 없다.
- (3) 基準應力에 의해 크랙이 傳播한 段階에서 過小應力을 가한 경우에는 壓縮狀態에서의 크랙닫힘이 過小應力에 해당하는 一定應力의 그것보다 닫힘現象이 좋지 못하기 때문에 이것에 의한 실제 作用應力의 증가와 함께 크랙 傳播特性에 의한 內部크랙의 깊이차이에 의한 영향이 크랙을 빨리 傳播시키는 것으로 생각된다.

後 記

本 研究는 韓國科學財團의 1983年度 후반기 研究費 支援에 의하여 이루어졌으며, 同 財團의 관계 諸位께 感謝드립니다.

參 考 文 獻

- (1) M.A. Miner, Cumulative Damage in Fatigue, Trans. ASME J. Applied Mechanics, Vol. 12 A159, 1945
- (2) S.S. Manson et al., Application of a Double Linear Damage Rule to Cumulative Fatigue, ASTM STP 415, pp.384~411, 1967
- (3) Wolf Elber, The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486, pp.230~242, 1971
- (4) 青木逸郎外 5人, 實働應力と疲れ強さ, 日本機械學會論文集, 第34卷, 第267號, pp.1854~1861, 1968
- (5) 中村宏外 1人, 最小의 $\Sigma(n_i/N_i)$ 의 値을 與える應力 패턴にする實驗, 日本機械學會論文集, 第36卷, 第287號, pp.1059~1066, 1970
- (6) 宋森弘外 1人, 過大, 過小應力下에서의 疲勞크랙 發生, 傳播舉動(I) —炭素鋼材의 크랙선단부 被害를 中心으로—, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第3號 pp.301~308, 1985
- (7) 村上裕則外, 破壞力學入門, p.127, 오름社, 1979
- (8) 宋森弘外 1人, 表面缺陷에서 發生하는 疲勞크랙 舉動, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第2號, pp.150~157, 1985
- (9) 西谷弘信, 小穴付き試驗片의 回轉曲げ試驗片による 裂傳ば特性의 評價, 日本機械學會論文集, 第42卷, 第354號, pp.325~335, 1976
- (10) K. Chijiwa, H. Ouchida, J. Hoshino, K. Nishioka, Journal of JSME, Vol. 69, 572, p.1134, 1966
- (11) H. Okubo, Stress Concentration Factors in shafts Containing Transverse Holes and Subjected to Bending, Journal of Applied Mechanics, Vol. 18, p.478, 1956
- (12) R.E. Peterson, Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, pp.146, 235, 1974