

## 壓延鋼板의 疲勞龜裂 傳播舉動에 對한 研究

姜 昌 蒼\*

### A Study on the Propagation Behaviour of the Fatigue Cracks in Rolled Steel Plates

by

C. S. Kang\*

#### Abstract

There are many reports on fatigue crack of metallic materials but most of them relate crack propagation rate to stress intensity factor. The problem of crack propagation is not yet clarified, especially the bridge between micro and macro phenomena.

In this experiment rotating bending fatigue tests have been carried out with smoothed specimen of rolled steel plates including 0.2% carbon under application of three stress conditions to investigate the slip band and the crack propagation behaviour.

The results obtained are as follows;

1) The length of cracks which have grown at initial crack tips can be expressed as follows;

$$l = Ae^{BNr} \quad (A, B: \text{constant}, N_r: \text{cycle ratio})$$

$$\frac{dl}{dN} = \frac{AB}{N_f} \cdot e^{BNr} \quad (N_f: \text{fatigue life})$$

2) The ratio of slipped grain number to total grain number is

$$S_f = 7\sigma - 5.6\sigma_c \quad (\sigma: \text{stress amplitude})$$

(σc: fatigue limit)

3) When the fatigue process transfers from Stage I to Stage II, the crack which propagates into specimen changes its direction from that of the maximum shear stress to the direction of perpendicular to principal stress and this is same in the circumferential direction of specimen.

The crack propagation behaviours of both sides of a crack are different each other when they approach to the grain boundary.

#### 1. 緒論

疲勞破壞에 대한 研究는 鐵道車軸의 破壞事故가 原因이 되어 始作되었다. 船舶이나 航空機를 위시하여 各種機械의 構造要素에 發生하는 破壞事故의 相當數가 疲勞破壞이다. 그原因是 荷重을 받고 있는 部材에 存在할 수 있는 어떤 應力集中源으로부터 龜裂이 發生하여, 以致이 使用中에 서서히 傳播하여 드디어 最終破斷에 이르게 되는 일이 많다. 이로 因하여 材料의 疲勞에 對

한 研究가 많은 사람들에 의하여 行하여졌다. 즉 疲勞破壞의 機構, 疲勞損傷과 回復問題, 疲勞에 對한 热處理의 影響, 疲勞強度에 對한 研究, 疲勞에 對한 表面處理의 영향, 龜裂傳播過程과 傳播速度 등에 對한 研究들이다.

이들 研究中에는 巨視的 혹은 微視的인 龜裂傳播速度가 應力擴大係數와 관계되어진 結果가 많다[1], 그러나 이들의 관계식으로 균연의 傳播挙動의 物理的인 性質을 充分히 表現할 수 있으리라고 생각하기에는 곤

만한 問題가 많다. 그 理由로서는

(1) 疲勞龜裂傳播理論과 機構에 對해서 Head[2]의 連續體力學을 使用한 에너지 model 을 위치하여 Weertman[3]이나 Lardner[4]의 微小轉位論에 의한 轉位 model, 核生成 model 그리고 Wood 등[5]의 관찰에 立脚한 微小空洞 model 등 多數의 理論과 model 이 提案되어 왔다. 그런데 이들 理論의 大部分이 直接的으로 龜裂先端 근처의 微視組織等의 관찰을 通해서 그 正當性이 實證된 것인 아니고, 直觀的인 傳播速度式 혹은 fractography 와의 對應으로부터 그妥當性을 檢討하고 있는데, 電子顯微鏡을 使用하여 疲勞破面을 관찰하고 微視的 疲勞龜裂의 動動이 推定되고 있지만, 이것과 直觀的인 動動을 完全히 結付시키는데까지는 이르지 못하고 있는 것 같다.

(2) 龜裂傳播速度  $dC/dN$  ( $C$ : 疲勞龜裂의 半의 길이,  $N$ : 反覆數)를 豫示하는 方法으로서의 傳播法則의 研究가 活發하게 되었지만, 이제까지의 多數의 法則을 綜合하면  $dC/dN$  는  $c^{\alpha} \sigma^{\beta}$  ( $\sigma$ : 應力振幅 또는 最大應力)의 函數로 表示된다. 그리고 Head[2]는  $n=3/2$ ,  $l=0$ , Frost[6]는  $n=1$ ,  $l=3$ , Paris[1]나 Weertman[7]은  $n=2$ ,  $l=4$ , Liu[8]나 Lardner[4]는  $n=1$ ,  $l=2$ , 와 같다고 했다. 이들의 提案은 모두가 金屬에 對한 것이고 上記와 같은  $n$  와  $l$  은 材料의 種類나 組織에 따라서 變한다고 報告되어 있다[9].

(3) Griffith[10]가 1920年에 提案한 脆性破壞의 理論을 Irwin[11]이 發展시켜 應力擴大係數  $K$  를 써서 龜裂問題를 解決하려는 소위 破壞力學理論을 發表하였다. 以後 近年에 와서 應力集中係數와 함께 널리 實際에 利用되고 있다. 이들 理論에 의할 것 같으면 龜裂形缺陷이 先在해야 하고, 이 理論은 直觀破壞力學이라고 하는 分野의 基礎가 되었다. 또 1957年에 Irwin[11]는 材料中の 龜裂先端의 應力解析을 하면서 龜裂先端應力擴大係數(crack-tip stress intensity factor)라는 概念을 發表하여 이를  $K$ 로 表示해서 線型彈性破壞力學의 研究分野를 개척하였고, 그 뒤 이리 研究者들에 依해서 여러 가지 形態의 應力과 龜裂의 組合(crack combination)에 對해서 急進的으로 研究, 應用되어 왔다. 그러나 아직도 實際問題에의 適用의 길이 트여지지 않는 경우가 許多하고, 本研究에서와 같은 回轉屈撓試驗에 對해서는 이 理論의 適用方法이 전히 發見되지 못하고 있다.

(4) 龜裂傳播法則에 對해서는 Paris 등[1]이 行한 方法에 따라 傳播速度를 應力擴大係數의 函數로서 表示하면  $dC/dN=BK^m$  와 같이 되고  $m$  的 值은 2-7의 值을 取한다고 하고, Weertman이나 Lardner는 指數가 4 혹은 2의 경우에는 이 理論을 뒷바침하고 있다. 또 橫掘등에 의해 龜裂先端附近領域에서의 核生成論을 基

礎로 한 傳播理論이 提案되고, 理論中에 材料定數의導入에 의해 上記의 指數變化를 說明하고자 하는 試圖가 있다[12]. 이런 뜻에서 脆性破壞에 使用되고 있는 連續體力學으로서의 破壞力學을 그대로 모든 疲勞破壞에 適用해서 좋을지에는 문제가 있는 것 같고, 더욱기 本研究와 같이  $K$ 의 式이 誘導되지 않는 경우에는 全然적용할 方法이 없다.

以上과 같은 理由와 또한 notch 係數와 應力集中係數에는 對應關係가 없는 것 같고[13]-[16], 至人工 notch 가 없는 平滑材 回轉屈撓試驗片에 對한 疲勞龜裂의 形成과 傳播舉動研究는 充分하지 未하므로[17], 本研究에서는 平滑材의 回轉屈撓 疲勞試驗片을 使用하여 初生龜裂의 發生位置 및 이 初生龜裂의 兩先端에서 圓周方向의 傳播過程을 Forsyth의 傳播機構[18]와 比較 檢討하고, 또 第二段階의 龜裂傳播 모양을 分類하여 Laird의 傳播模型[19]과 比較檢討해 보았다. 그리고 龜裂傳播速度를 應力擴大係數가 아닌 다른 因子로 表示하고자 試圖하였다. 또한 slip band 가 發生한 結晶粒數와 應力과의 關係, 그리고 slip 이 發生한 結晶粒內의 slip band의 角度와 應力과의 關係를 조사하여 壓延鋼板의 疲勞龜裂의 傳播舉動을 究明하였다.

## 2. 材料, 試驗片과 實驗方法

### 2-1. 材料와 試驗片

本 實驗에 使用한 材料는 SB22인 두께 16mm의 壓延鋼板材(浦鐵製)이고 그의 化學成分은 Table 1과 같다

Table 1. Chemical Composition

Nominal Composition	C	Mn	Si	P	S
WT. (%)	0.21	0.91	0.086	0.013	0.011

試驗片은 鋼板材로부터 壓延方向의 試驗片의 軸과 一致되도록 採取하였다. 各材料를 Fig. 1 및 Fig. 2 와 같은 치수로 平滑疲勞試驗片과 引張試驗片으로 製作하여 最高溫度 930°C에서 60分間 加熱하여 空冷하였다.

金屬組織은 热處理를 하기 전(Photo. 1.B)에는 壓延面에 따라 ferrite 와 pearlite 가 順次의으로 層狀은 이른 典型적인 壓延組織를 나타내고 있었지만, 热處理後(Photo. I.A.)에는 壓延效果가 완화하였고, 結晶粒子의 크기는 ASTM grain size 8에 해당하였다.

試驗材料의 機械的 性質은 Table 2와 같다.

Table 2. Mechanical Properties of Specimens

Yield Point (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Area Reduction (%)	Fatigue Limit (kg/mm <sup>2</sup> )
23.2	43.3	33.5	67.9	17.0

疲勞試驗片은 平行部(15.4mm)의 表面을 emery 紙 1000番까지로써 研磨한 後, 酸化크롬 가루로 buffering하였다. 本試驗材料의 回轉疲勞試驗으로 求한  $S-N$ 曲線은 Fig. 3과 같으며 疲勞限度  $\sigma_c=17\text{kg/mm}^2$ 이다.

本實驗에 사용한 試驗機는 小野(Ono)式 高溫回轉疲勞試驗機(H-5)이고, 能力은 最大 爪荷도우멘트 10kg-m, 每分回轉數는 3400이며, 本實驗은 室內溫度에서 進行되었다.

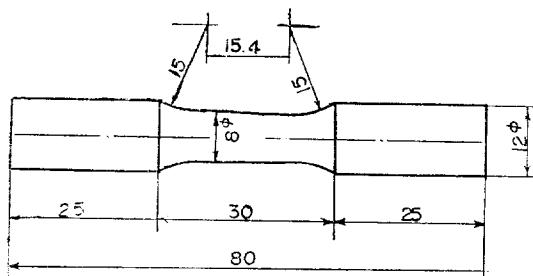


Fig. 1. Dimension of smooth specimen

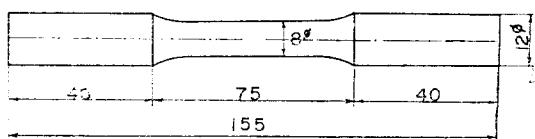


Fig. 2. Dimension of tensile test specimen

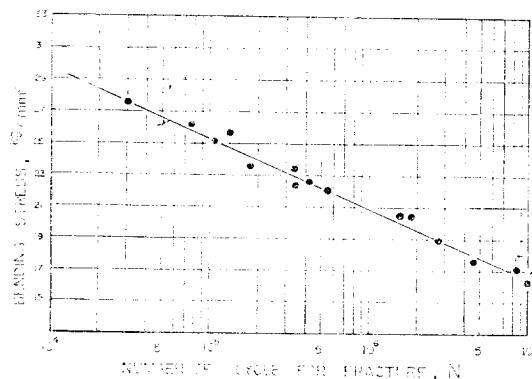


Fig. 3.  $S-N$  Diagram for smooth specimen

## 2-2. 實驗方法

上記와 같은 條件으로 製作된 平滑試驗片에

- 1) 疲勞限度 以上的 一定應力を 加하였을 때,
- 2) 疲勞限度 以下の 一定應力を 加하였을 때,
- 3) 疲勞限度 以下の 一定應力を 加하여  $N=1\times 10^7$  까지 疲勞시킨 後, 疲勞限度 以上的 二次應力を 加하는 二段二重 重複應力を 加하였을 때.

의 疲勞反覆數  $N$ 에 따른 試驗片 表面上에 發生하는 疲勞現象을 一定한 疲勞反覆數마다 觀察하고, 龜裂의 成

長過程을 調査하였다. 또한 slip band 와 龜裂의 傳播過程도 觀察하였다.

金屬顯微鏡을 사용하여 疲勞現象을 연속적으로 觀察하기 위하여 예정된 回數마다 試驗機를 停止시켜 試驗片 表面上의 疲勞龜裂運動과 圓周方向으로 傳播해 가는 龜裂의 運動을 觀察하였다. 이와 同時に slip 이 發生한 結晶粒子數를 조사하여 疲勞反復應力別로 疲勞損傷率을 計算하였다. 그리고 再作動에는 初期의 回轉方向과 一致되도록 하였다.

## 3. 實驗結果 및 考察

### 3-1. 疲勞龜裂의 發生位置와 傳播運動

#### 3-1-1. 疲勞限度 以上的 一定應力下에서

疲勞限度( $\sigma_c=17\text{kg/mm}^2$ ) 以上的 一定應力은 a).  $\sigma_1=23.7\text{kg/mm}^2$ , b).  $\sigma_2=22.3\text{kg/mm}^2$ , c).  $\sigma_3=19.9\text{kg/mm}^2$ , d).  $\sigma_4=17.8\text{kg/mm}^2$ 의 4段階로 하였다. 觀察時期는 各段階의 疲勞壽命의 2%~5%마다 하였다. 이와 同時に 試驗片의 圓周에 따라 疲勞運動을 观察하였다.

#### A) 疲勞龜裂의 發生位置

Slip band는 結晶粒內에서 發生하여 試驗片의 軸方向과 平行되지 않는 結晶粒界에 의해 阻止되고, 반복수  $N$ 의 증가와 銀분이 密度가 증가한다. 上述을 [過程 I]라 하기로 한다. 이 密集된 slip band를 가로타고 있는 試驗片의 軸方向과 45° 以上 되는 結晶粒界(Photo. (2-1)A, Photo. (2-2)A, Photo. (2-3)A, Photo. (2-4)A)에서 微小龜裂 す初生龜裂이 生成하였다. 上述을 [過程 II]라 하기로 한다.

[過程 I]. 이것은 notch 와 같은 應力集中源이 없는 平滑材이므로 slip 面을 따라 轉位의 反복운동의 결과로 slip line 또는 slip band가 發生하고, 이 slip band가 銳利한 表面 notch가 되어 slip band先端附近에 應力이 集中하고,  $N$ 가 증가함에 따라 slip band가 密集하면서 傳播하여 結晶粒界에 阻止된다.

[過程 II]. 密集된 slip band內에서 微小龜裂이 形成되면서 印記粒內로 傳播하기 前에 密集된 slip band를 阻止하고 있던 結晶粒界가 集中되는 應力에 依하여 粒界를 따라 長차 巨視龜裂의 根源이 될 初生龜裂이 生成되었다.

Forsyth[18]에 의해 分類된 第一段階 및 第二段階의 龜裂傳播機構(Fig. 4) 즉 龜裂傳播의 第一段階는 結晶學的 特徵을 나타내는 段階이고, 第二段階는 結晶學的 特定面에 의하지 않고 垂直應力에 直角으로 龜裂이 傳播하는 段階라고 한 것과 比較 檢討해 보면, 本實驗의 [過程 I] [過程 II](Fig. 5)는 過程 I이 먼저 觀察이 되고, 過程 II가 뒤에 觀察이 되기는 했어도 大體의 으로

Forsyth의 第一段階傳播機構와 一致한다고 보여진다. 다만 本 實驗에서는 過程Ⅱ에서 나타나듯이 初期龜裂傳播가 粒界를 따라서 最大剪斷應力面方向으로 成長함이 관찰되었다. 이러한 過程Ⅱ의 같은 관찰은 다른 報告들[17][20][23]에 의해서도 뒷받침되고 있다.

Forsyth의 分類는 수직應力を 받아 試驗片의 表面에서 발생한 微視的 疲勞龜裂이 반복되는 應力에 따라 内部로 傳播擴大되는 形態를 分類한 것이므로 各種 形狀의 試驗片이 垂直應力を 받을 때는 符合할 것이다. 回轉咀形 試驗片이면 notch[17][24], 橫孔[25]등 應力集中源이 있어야 할 것이고, 실제 그結果를 是認한 報告도 있다[21][25]. 應力集中源이 있어야 하는 理由는 第一段階의 微視的 龜裂은 疲勞壽命의 極히 初期에 發生하고 크기는 結晶粒의 1~2個分에 지나지 않으며[24] notch가 微小하다해도 結晶粒의 크기와는 그 單位에 있어서 원통히 크므로 應力集中源에서 發生한 第一段階龜裂先端에 계속集中된 應力이 作用하여 擴大傳播하고 notch效果를 無視할 수 있을 때에는 이미 第二段階의 傳播가 進行되고 있는 後라고 할 수 있고, 龜裂傳播方向의 選擇自由度가 없다고 할 수 있다.

平滑材에서는 한 結晶粒內에서 第一段階龜裂이 發생했다면 깊이는 그 粒徑의 1/4~1/2程度된다 하더라도, 結晶粒底部에 作用하는 應力보다는 表面 notch를 形成하는 slip band의 兩先端에 作用하는 應力이 크므로 깊이 方向보다는 表面을 따라 傳播하기 쉽다. 또한 이 slip band가 第二段階의 龜裂傳播로서 인접粒內로 傳播못하는 理由는 인접粒 사이의 結晶粒界와 이 粒界下層의 結晶粒에 優先 傳播해야 하고, 또 관련된 3個의 結晶粒은 結晶方位가 서로 다를 것이므로 結晶粒내로 傳播하자면 큰 energy가 所要될 것이다. 주어지는 energy는 疲勞損傷을 입은 結晶粒에 축적되고 따라서 이 結晶粒의 底部를 包含한 結晶粒周圍의 粒界에 주어진 energy가 축적되는 결과로 表面에서 最大剪斷應力이 作用하는 粒界인 同時に 깊이 方向으로 最大剪斷應力이 作用하는 粒界[3-3節에서 뒷받침됨]에서 初生龜裂이 優先形成되리라는 理論이 成立되리라고 본다.

Peterson[26]과 大久保等[27]은 slip line의 發生은 主로 材料에 加へ지는 반복 最大剪斷應力에 支配되어 發生한다고 하였고, 宋等[23]은 S15C材料를 使用한 研究에서 試驗片軸에 對해서  $55^\circ \sim 60^\circ$ 傾斜한 初生龜裂을 剪斷形龜裂이라는 證明을 하였고, 清家等[28]은 純鐵材를 사용한 回轉咀形과 비틀임 試驗結果에서 試驗片軸과 수직方向으로 發生한 初生龜裂도 剪斷形龜裂이 라하였다.

微視的 疲勞龜裂의 發生位置에 對해서 橫掘等[20]은 低炭素鋼은 結晶粒界 및 slip band 내로부터 發生할 빈

도가 크고, 西谷等[17]은 S10C을 使用한 實驗에서 結晶粒界로부터 發生하였고, 高炭素鋼에서는 非金屬介在物[1][22]에서 發生하고, 中硬度鋼[21][23]과 低炭素鋼이라도 ferrite가 消失되도록 完全 quenching한 狀態의 高強度鋼[23]에서는 舊 austenite粒界等이라 指摘하고 있다.

이들의 事實은 本 實驗에 使用된 材料( $mHv=130$ )에서의 結果와 理論은 正當하다는 것을 뒷받침하고 있으며 微視的 疲勞龜裂의 發生位置는 結晶粒界라 할 수 있다.

### B) 疲勞龜裂의 傳播舉動

初生龜裂의 兩先端인 先導先端(L.回轉方向으로 앞서 가는 先端)과 從屬先端(F.回轉方向으로 뒤따르는 先端)으로부터 試驗片의 表面을 따라 圓周方向으로 인접粒內로 傳播하는 舉動에는 差異가 있음이 관찰되었다. 前者를 [傳播舉動Ⅰ], 後者를 [傳播舉動Ⅱ]라 부르기로 한다.

[傳播舉動Ⅰ]. L에서 龜裂은 試驗片 軸方向에 對하여 수직(또는 거의 수직)方向으로 인접粒內로 傳播擴大하고 (形態Ⅰ), 再次分岐되는 粒界에 到達하면 兩粒界를 따라 傳播하다가 이를 停止하고 兩粒界龜裂에서 거의 平行하게 2個의 粒內龜裂이 發生하여 한 龜裂은 傳播를 계속하는데 對해 다른 한 龜裂은 傳播를停止한다(形態Ⅱ). [Photo. (2-1)], [Photo. (2-4)] 또는 L에서 곧(形態Ⅲ)로 傳播擴大한다[Photo. (2-3)].

[傳播舉動Ⅱ]. F에서 分岐되는 兩粒界를 따라 傳播하다가 兩粒界는 傳播를停止하고, 試驗片 軸方向에 對해서 기의 수직되는 方向으로 한 粒界龜裂에서 인접粒內로 傳播한다(形態Ⅳ) [Photo. (2-1)], [Photo. (2-3)], 또는 F에서 分岐되는 兩粒界中, 한 粒界를 따라 傳播하고 分岐되는 結晶粒界的頂點에서 試驗片의 軸方向에 對해서 수직방향으로 인접粒내로 傳播한다(形態Ⅳ) [Photo. (2-4)].

[傳播舉動Ⅰ]과 [傳播舉動Ⅱ]를 比較하면 (形態Ⅰ)과 (形態Ⅳ)와 對應하고 (形態Ⅱ)와 (形態Ⅲ)이 對應한다고 할 수 있다. [傳播舉動Ⅰ]은 分岐되는 結晶粒界的頂點에서 2個의 粒內龜裂로 傳播하다가, 그中 한 龜裂은 成長을 中止하고 粒內龜裂이 發生하기 전에 分岐된 兩粒界에서 發生하였던 粒界龜裂은 比較的 짧다. 이에 對해서 [傳播舉動Ⅱ]는 分岐된 兩粒界龜裂의 깊이는 比較的 깊고, 分岐된 兩粒界의 頂點에서 1個의 粒內龜裂이 成長하여 傳播하여 간다.

以上的 結果를 Laird의 第二段階龜裂傳播形態(Fig. 6)와 比較하기 為하여 圖示한 것이 Fig. 7이다.

初生龜裂의 兩先端으로부터의 傳播길이 傳播速度를 比較한 것이 Fig. 8~11이다. Fig. 8~9는 각각  $\sigma_0=$

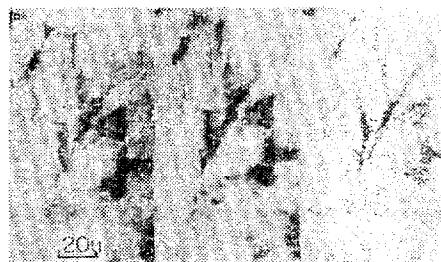
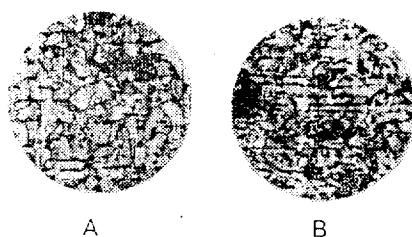


Photo. 1. Representative microstructures in a specimen

a)  $N=0.5 \times 10^4$    b)  $N=1 \times 10^4$    c)  $N=2 \times 10^4$

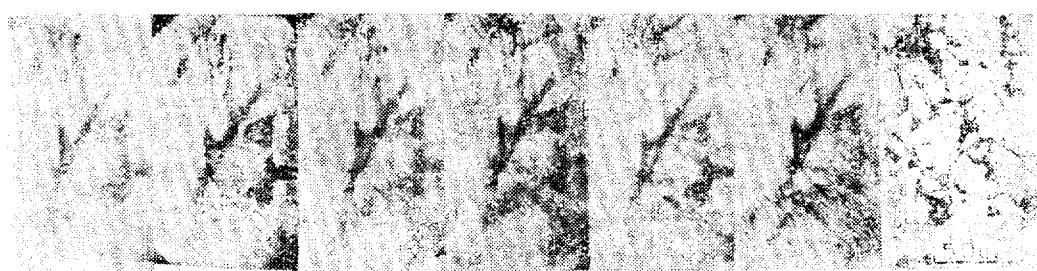
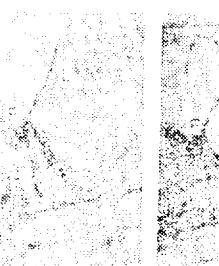


Photo. (2-1)  $\sigma=23.7 \text{ kg/mm}^2$



a)  $t=6 \text{ sec}$



b)  $t=8 \times 10^3$



c)



d)



e)



f)



g)  $N=1 \times 10^5$



h)  $N=1.5 \times 10^5$

$t=16 \text{ sec}$



i)  $N=1.5 \times 10^5$



j)  $N=1.5 \times 10^5$

Photo. (2-2)  $\sigma=22.3 \text{ kg/mm}^2$

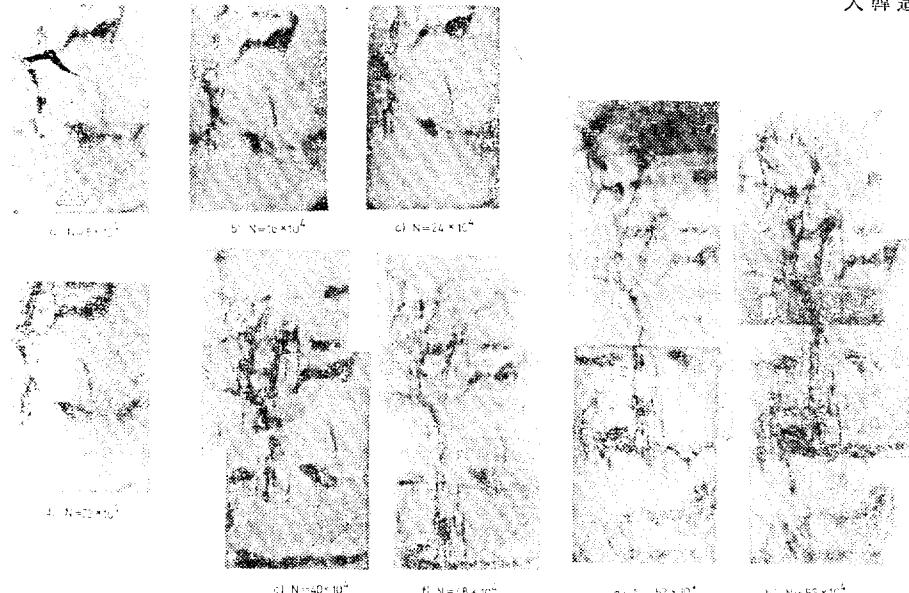


Photo. (2-3)  $\sigma=19.9 \text{ kg/mm}^2$

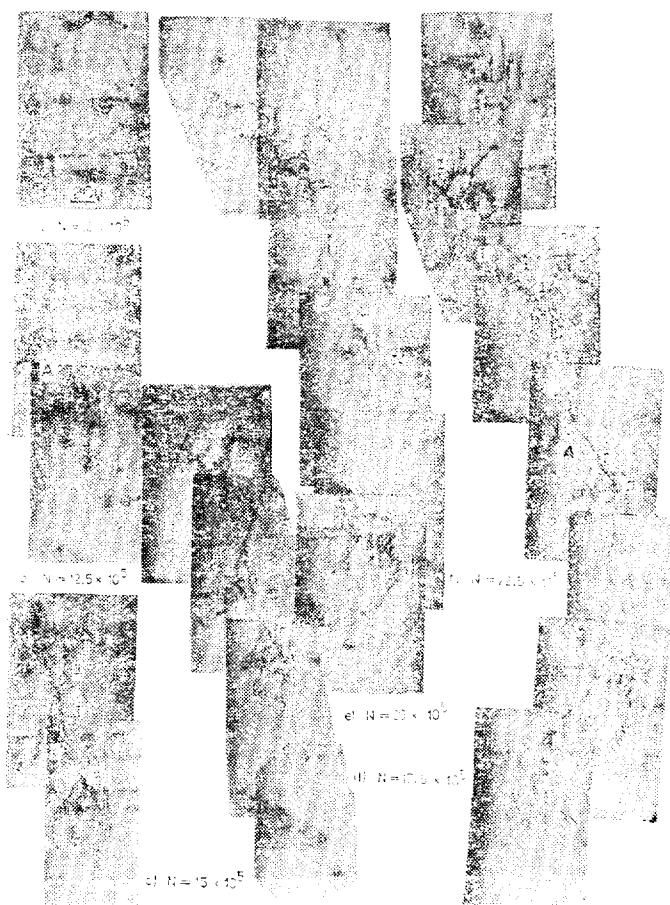


Photo. (2-4)  $\sigma=17.8 \text{ kg/mm}^2$

Photo. 2. An illustration of a relation between slip bands and grain boundary micro-cracks and that of crack propagating behaviour from leading and following crack tips

$22.3 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_i = 17.8 \text{ kg/mm}^2$  인 경우의 결과들이고,  $l_f$ ,  $l_t$ 은 각각 終屬先端과 先導先端으로부터의 傳播길이, 그리고  $N_f$ 은 疲勞壽命  $N_f$ 에 對한 疲勞反覆數  $N$ 의 比이다. 또한 Fig. 8-1, 8-2를 Fig. 9-1, 9-2로, 다시 이들을 Fig. 8, Fig. 9와 같이 整理해 보았더니, 이들로부터 다음과 같은 近似的인 關係式을 얻을 수 있었다.

$$l_f = A_1 e^{B_1 N}, \quad (1)$$

$$l_t = A_2 e^{B_2 N_f} \quad (2)$$

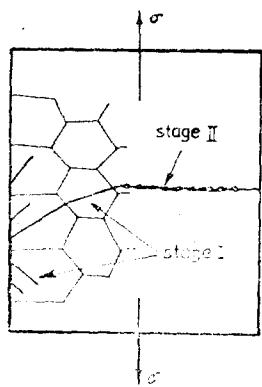


Fig. 4. Forsyth's mechanics of the two stages of crack propagation

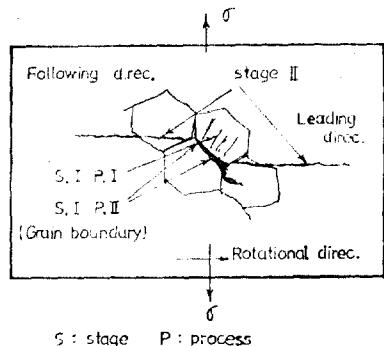


Fig. 5. Schematic representation of crack propagation along on the surface of rotational smooth specimen

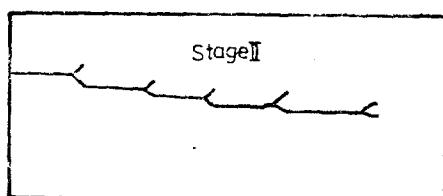


Fig. 6. Laird's stage II propagation mode of fatigue cracks

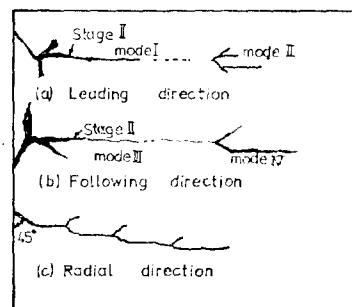


Fig. 7. The propagation mode of fatigue cracks stage II

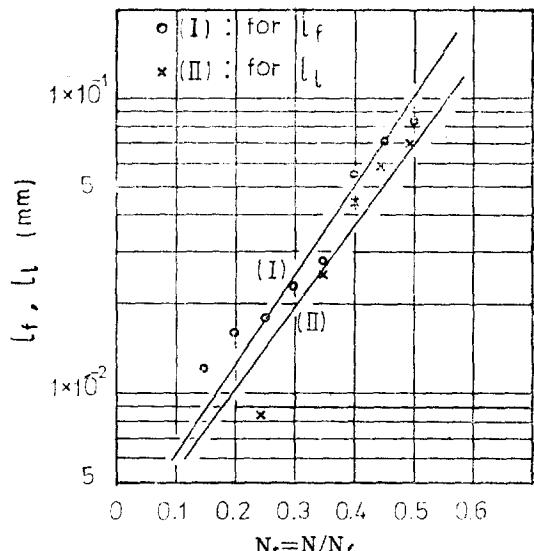


Fig. 8. Crack length  $l_t$ ,  $l_f$  plotted as a function of number of cycles  $N$  ( $\sigma = 22.3 \text{ kg/mm}^2$ )

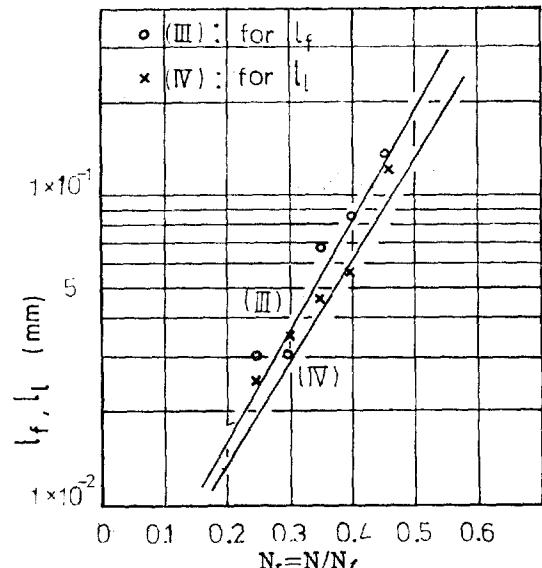
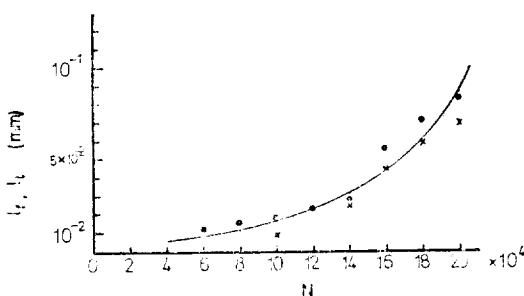
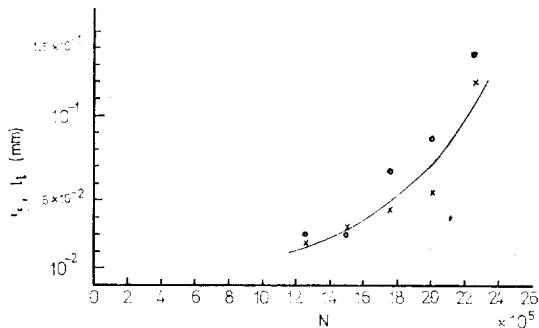
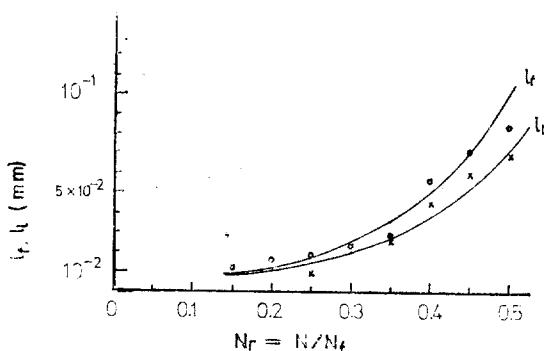
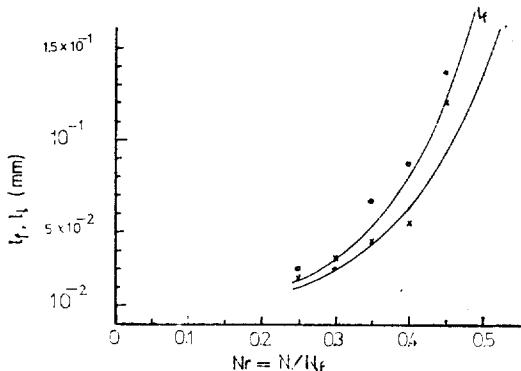


Fig. 9. Crack length  $l_t$ ,  $l_f$  plotted as a function of number of cycles  $N$  ( $\sigma = 17.8 \text{ kg/mm}^2$ )

Fig. 8-1.  $l_f, l_t$ - $N$  curve for  $\sigma_2$ Fig. 8-2.  $l_f, l_t$ - $N$  curve for  $\sigma_4$ Fig. 9-1.  $l_f, l_t$ - $N_r$  curve for  $\sigma_2$ Fig. 9-2.  $l_f, l_t$ - $N_r$  curve for  $\sigma_4$ 

이들 式으로부터  $N_r$ 에 對한  $l_r = l_t/l_f$ 를 求하면 다음 式(3)과 같이 되고, 이 式(3)을 圖示한 것이 Fig. 10이다.

$$l_r = A_3 e^{B_3 N_r} \quad (3)$$

여기에서  $A_i$ 와  $B_i$ 의 值들은 다음 表와 같다.

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
$\sigma_2$	0.003	0.003	1.00	7.02	6.32	0.70
$\sigma_4$	0.003	0.003	1.00	8.25	7.62	0.63

式(1), (2)로부터 龜裂傳播速度는 각각 다음과 같이 된다.

$$\frac{dl_f}{dN} = \frac{1}{N_f} \quad \frac{dl_f}{dN_r} = \frac{A_1 B_1}{N_f} e^{B_1 N_r} \quad (4)$$

$$\frac{dl_t}{dN} = \frac{1}{N_f} \quad \frac{dl_t}{dN_r} = \frac{A_2 B_2}{N_f} e^{B_2 N_r}, \quad (5)$$

이들 式으로부터 다음 (6)式이 얻어지고,

$$\frac{dl_f}{dN} / \frac{dl_t}{dN} = A_3 \frac{B_1}{B_2} e^{B_3 N_r} > 0 \quad (6)$$

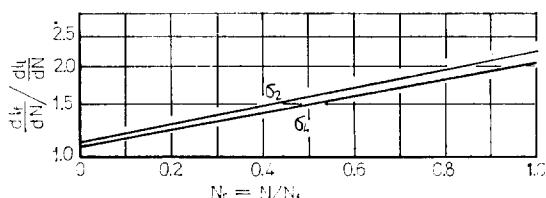
式(6)을 圖示한 것이 Fig. 11이다.

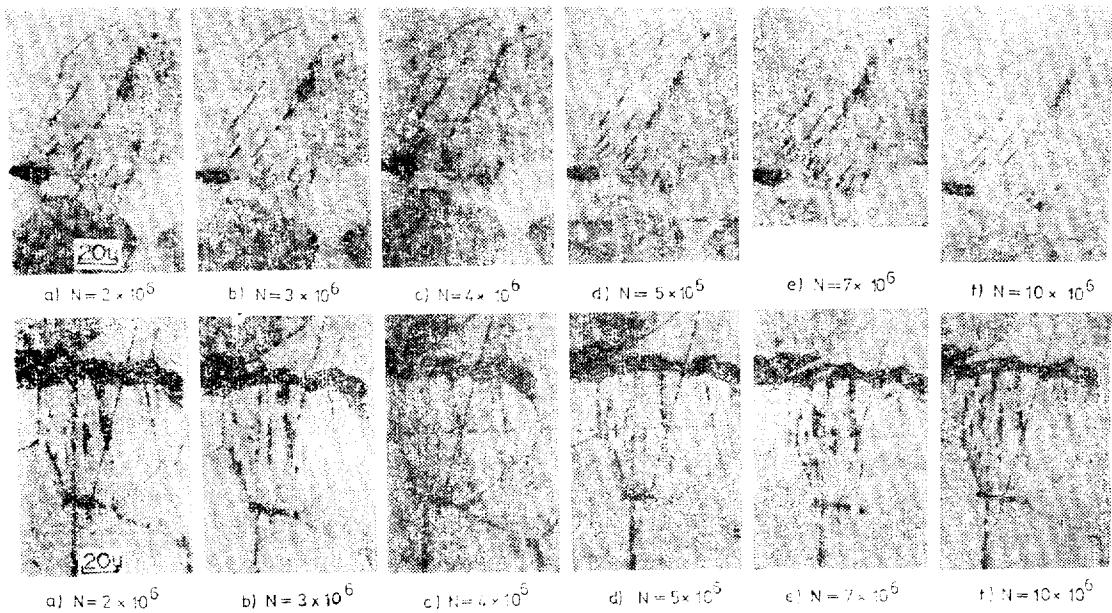
本 實驗에서 從屬先端의 龜裂傳播速度는 先導先端의 龜裂傳播速度보다 빠르다. 그리고 破斷時의 兩龜裂傳播길이의 比는 高應力時나 低應力時나 約2이다. 試驗片 全周에 對한 兩龜裂合의 比率은 高應力時는 20% 임에 比해 低應力時는 70%에 達한다.

Forsyth의 傳播機構[18]와 比較하면 初生龜裂發生位置[過程Ⅱ]의 兩先端으로부터 龜裂이 試驗片 軸方向에 對하여 垂直方向으로 變向하여 傳播하는 傾向은 Forsyth의 第二段階 龜裂傳播와 一致한다. 龜裂이 第二段階의 傳播로서 成長할 때는 部分的으로 粒界를 通過하고 있다[29].

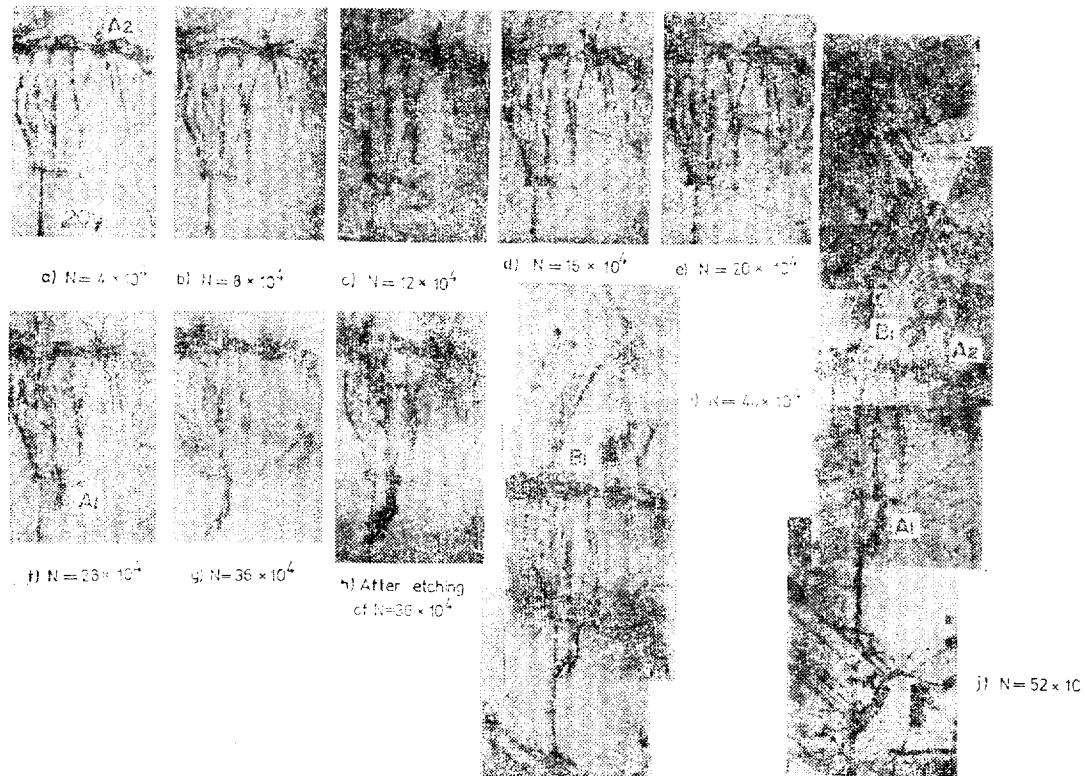
龜裂이 分岐되는 粒界의 頂點에서 粒界에 따르는 分岐되는 작은 龜裂을 남기는 모양은 Laird의 龜裂成長模型[19]과 [傳播舉動Ⅱ]는 잘 一致한다고 할 수 있으나, [傳播舉動Ⅰ]은 약간 差異가 있는 것 같다. 龜裂生成理論은 Laird의 理論이 合當하다고 볼 수 있다.

그리나 Forsyth나 Laird의 實驗은 高應力下에서 低

Fig. 10. Ratio  $l_r, l_f$  to  $l_t$ , plotted as a function of number of cycles  $N$



**Photo. 3.** Active slip bands, developed at the surface of a rolled directional specimen that was fatigued at fatigue stress  $\sigma=15.7 \text{ kg/mm}^2$ , until fatigue number became  $N=1\times 10^7$ . Showing nonpropagating fatigue slip bands. Upper: Surface along fibrous layers. Lower: Surface perpendicular to fibrous layers



**Photo. (4-1)** Surface perpendicular to fibrous layers

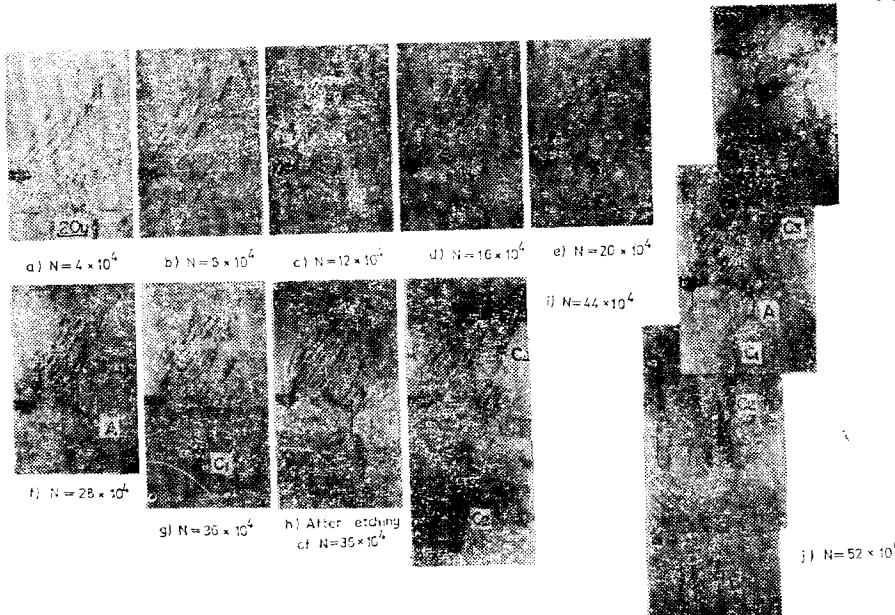
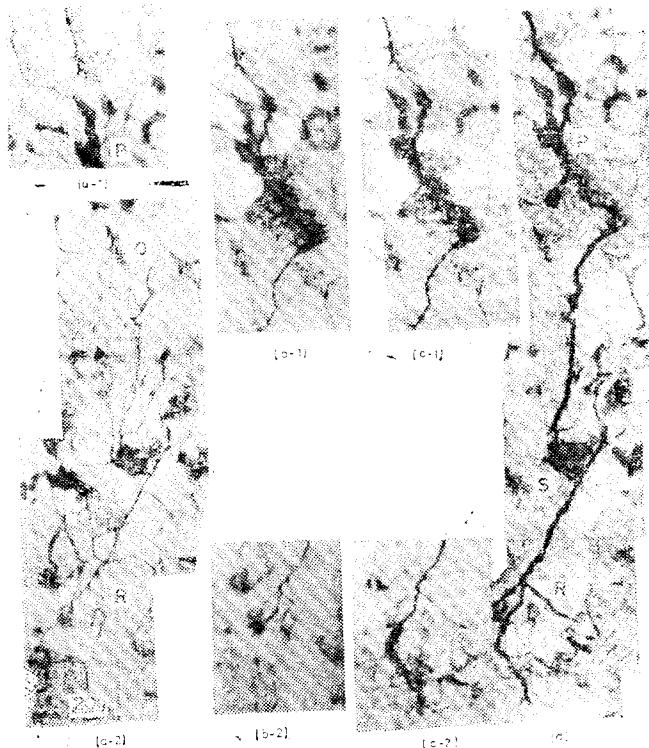


Photo. (4-2) Surface along fibrous laeryls

**Photo. 4.** Active fatigue slip band with propagating fatigue cracks, developed in active slip bands at the surface of a rolled directional specimen that was fatigued at bending stress  $\sigma=19.9 \text{ kg/mm}^2$  after fatigued until fatigue number became  $N=1\times 10^7$  (stress under fatigue limit  $\sigma=15.7 \text{ kg/mm}^2$ )



**Photo. 5.** (a) Non propagated fatigue cracks, developed at the surface of a smoothed specimen, then polished, etched and

(b) fatigued at bending stress  $=22 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=1\times 10^4$  more

(c) fatigued again at same stress  $N=1.3\times 10^4$  more,

(d) propagating fatigue cracks after electric polishing, showing short non-propagating fatigue cracks

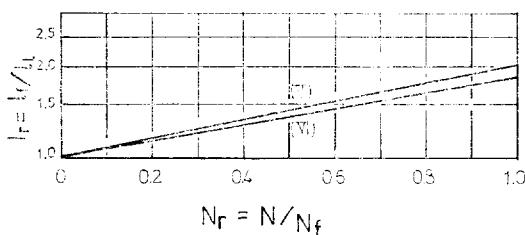


Fig. 11. Ratio,  $dl_f/dN_f, dl_i/dN$  of propagation rate of  $l_f$  and  $l_i$  as a function of  $N_r = N/N_f$

반복으로 垂直應力を 加하여 時効硬化한 Al 合金으로 實驗한 結果이므로 應力의 한 反覆마다 分岐된 龜裂이 난기는데 對하여 本實驗에서는 結晶粒單位로 分岐된 龜裂이 形成되었다. 이 것은 實驗方法과 材質의 差異때문인 것 같고, 分岐된 結晶粒界의 結晶粒에 高反覆에 따르는 energy 가 축적되었다가 一時에 結晶粒單位로 龜裂이 傳播하는 것으로 생각된다.

### 3-1-2. 疲勞限度以下의 一定應力 下에서

試驗片에 疲勞限度보다 7.7% 낮은 一定應力  $\sigma = 15.7 \text{ kg/mm}^2$ 을 加하여  $N=1 \times 10^7$ 까지 皮로시켰을 때에 試驗片의 U 와 V 面上(ferrite 와 Pearlite 가 順次의으로 層狀을 이룬 方向을 V 方向, V 方向에 直角인 方向을 U 方向)에서 成長한 微視的疲劳龜裂을 관찰한 결과는 다음과 같다.

Photo. (3-1)은 U 面上의 結晶粒內에서 發生한 slip band이고 試驗片軸과 約 45°를 이루고 있다. Photo. (3-2)는 V 面上의 結晶粒內에서 軸와 수직 방향으로 發생한 slip band이다. 이를 slip band는  $N=2 \times 10^6$ 일 때나  $N=10 \times 10^6$ 일 때나 別差異가 없고, 第二段階의 疲勞龜裂로 傳播하지 못하고 結晶粒內에서 停留된 微視的疲劳龜裂로 머물고 있다. 이러한 slip에 起因하는 微視的停留龜裂에 對한 報告는 이미 있었고 [30]~[33], 疲勞限度以下의 反覆應力에서도 發生 [28]한다.

그리고 이러한 微視的疲劳龜裂이 發生하지 않는 疲勞限度는 純鐵 [28]인 경우(結晶粒徑  $D=40\mu$ )는 疲勞限度의 76%, 低炭素鋼 [33]( $C=0.15\%$ )인 경우( $D=25\mu \sim 96\mu$ )는 76~79%로 되어 있어, 炭素量의 증가와 粒徑의 감소에 따라 增加하는 傾向이 있다.

本 實驗材( $C=0.20\%$ ,  $D=21.6\mu$ )는 約 80%로 推定된다. 따라서 疲勞限度는 靜的機械性質에 各方性이 험지하 認知되는 壓延鋼板에서도, 龜裂이 發生하지 않는 限界應力이 아니고, 이를 微視的停留龜裂이 傳播하지 않는 限界應力이다.

一般的으로 炭素鋼의 微視的疲劳龜裂이 發生하지 않는 疲勞限度는 疲勞限度의 約 75~80%이다,

### 3-1-3. 二段二重 重複應力下에서

앞節의 疲勞限度보다 7.7% 낮은 一定應力  $\sigma = 15.7 \text{ kg/mm}^2$ 으로  $N=1 \times 10^7$ 까지 疲勞시킨 同一試驗片에 二次應力으로서 疲勞限度보다 17.1% 낮은 一定應力  $\sigma = 19.9 \text{ kg/mm}^2$ 을 加하여, 一次應力으로 試驗片表面에서 發生하였던 微視的疲劳龜裂이 二次應力에 의한 動動을  $N=4 \times 10^4$ 마다 관찰하였다.

Photo. (4-1)은 Photo. (3-2)에서 使用하였던 同一試驗片의 同一結晶粒內의 slip band의 動動이다. 結晶粒內에서 發生하였던 active slip band는  $A_1$ 과  $A_2$  점에서 第二段階로 變化하여 傳播하고, 인접 結晶粒에서  $B_1$ 과 같은 밀접된 slip band와 서로 연결되어 巨視的疲劳龜裂로 成長하고 있다.

Photo. (4-2)는 Photo. (3-1)에서 使用한 同一試驗片面上의 同一 slip band를 연속 관찰한 것이다. 試驗片의 軸과 57°傾斜진 active slip band를 阻止하고 있던 結晶粒界에서 龜裂이 發生하여 第二段階로 A 인 粒界로 播傳한 후,  $C_1$ 과  $C_2$ 로 擴大되어가는 播傳擴動은 Photo. (2-1)등에서 관찰한 것과 同一型이다. 또한  $C_3$ 의 發生位置는 Photo. (2-1)의 E.F. Photo. (2-3)의 C 등의 成長과 類似하다고 할 수 있다.

一次應力에 의해 微視的疲劳龜裂(停留龜裂)이 成長한 結晶粒에서보다 인접된 結晶粒에서 더욱 密集된 微視的疲劳龜裂이 慢速度로 成長하는 傾向이 있다. 이것은 coaxing 効果로 인한 것이고, 疲勞限度보다 약간 낮은 應力を 10<sup>7</sup>回 反覆하면 疲勞限度가 上昇하고 [30], 이것은 龜裂先端部의 加工硬化와 이와 同時に 變形時效가 關係한다 [17] [31] [32]고 할 수 있다.

以上的事實로서 平滑材에서는 大體로 보아 一次應力에 의해 成長한 微視的停留龜裂은 疲勞限度 以上的 二次應力에 의해 그 密度를 더해가는 傾向은 있으나, 그 自體가 第二段階의 龜裂로 播傳하지 않고, 微視的疲劳龜裂을 阻止하고 있는 結晶粒界에서 먼저 初期龜裂이 發生하여 第二段階로 移行하는 것은 앞서의 疲勞限度 以上的 一定應力下(3-1-1節)에서의 疲勞龜裂成長의 動動과 一致하고, 以後의 巨視的疲劳龜裂 播傳擴大動도 一致한다고 하겠다.

### 3-2. 平滑材圓周面上의 部分龜裂들의 傳播動

平滑材에 疲勞限度 以上的 一定應力を 加하여 回轉 굽힘 疲勞試驗을 하면 平滑部 全面에서 調測할 수 없는 چك수의 疲勞龜裂이 生成된다(3-4節參照). 이를 龜裂이 試驗片의 表面上에서 圓周方向으로 어떠한 形態로 서로連結하여 最終破斷에 이르게 되는가를 관찰하였다.

Photo. 5는 그 連結狀態를 나타내고 있다. 疲勞限度 보다 約 30% 낮은  $\sigma = 22 \text{ kg/mm}^2$ 의 一定應力を 加하여  $N=2.1 \times 10^5$ 까지 皮로시킨 후, minute slip을 滅去하기

위하여 表面을 微小量 增加한 후 부식시킨 것이 (a-1), (a-2)이다.

龜裂 P.Q 와 R 은 아직連結이 完成되지 못한 第二段階의 龜裂들이다. 各龜裂들의 生成은 앞서(3-1-1)節에서 說明한 [過程 I]에서 [過程 II]로 移行한 機構를 實實하게 뒷받침 해 주고 있는 것을 관찰할 수 있다. 龜裂 P 와 Q 는 約  $65\mu$  정도 떨어져서 發生해 있다. 이것을 다시  $N=1\times 10^4$ 만큼 더 反覆시킨 것이 (b-1), (b-2)이다.

(b-1)에서 보는 바와 같이 P 와 Q 의 龜裂先端에 應力이 集中하여 兩龜裂 사이에 密集된 active slip band 가 발생하고 龜裂 Q 的 先端에서 第 I 形態의 傳播機構를 이루고 兩龜裂이 完全連結되었다. 한편 (b-2)의 R 에서는 第 II 形態의 傳播機構를 볼 수 있다.

(c-1)과 (c-2)는 (b-1), (b-2)를 同一應力下에서  $N=1.3\times 10^4$ 만큼 더 반복시킨 것이다. 龜裂의 幅이 커지는 한편 R에서 보는 바와 같이 세로운 龜裂이 形成傳播되어가고 있다. 이렇게 (c-1), (c-2)처럼 成長된 龜裂을 잘 관찰하기 위하여 電解研磨하였더니 鏡面의 形狀이 (d)와 같이 나타났다.

Q 와 R 은 介在物 S 를 通過하여 連結되어 있다. P 와 R에서 第 I 또는 第 II 形態의 傳播擊動을 이루고 있다.

最終破斷面이 되는 龜裂徑路上에 사의 微小龜裂의 發生數는 低炭素鋼에서는 高炭素鋼보다 많다는 報告도 있다[37].

以上에서 說明한 바와 같이 各龜裂 P, Q 와 R 는 (3-3-1)節에서 말한바와 같은 傳播擊動으로 相互連結하여 結果의 으로는 最終破斷面을 이루게 된다.

### 3-3. 試驗片의 軸心方向으로의 疲勞龜裂

平滑試驗片의 表面에서 成長한 龜裂이 試驗片의 軸心方向으로 傳播하는 擬動을 調査하기 위하여 試驗片의 軸을 包含하는 길이 方向으로 切斷하였다.

Photo. 8(a)는 한 예이고 ( $\sigma=22 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=25\times 10^4$ ) 切斷面上에 나타난 15개의 龜裂中 가장 긴 것이다. 表面에서 軸心方向으로 約 0.6mm 까지 龜裂이 傳播하고 있다.

Photo. 8(b)는 同一斷面을 電解研磨한 후의 사진이다. 表面으로부터 K까지는 試驗片軸에 對하여 거의 수직方向으로 變向하여 傳播하고 있다.

(3-1-1)節 (A)의 [發生位置]에서 說明한 바와 같이 表面에서 K까지의 龜裂은 [過程 II]에 該當하고, 剪斷形應力에 의한 龜裂이다. 表面에서 K까지의 下部가 겹게 나타나 있는 것은 初生龜裂이 成長하는 인접粒內에 發生한 [過程 I]에 의한 slip band로서 結晶粒이 그 底部까지 損傷을 입고 있는 것을 나타내고 있다. 따라서

發生位置에 對한 (3-1-1)節 (A)에서의 考察(45p.p.)을 充分히 뒷받침 하고 있다.

K에서 龜裂이 變向한 것은 K以後의 龜裂傳播는 作用하는 힘에 支配되어 龜裂은 主應力面에 따라서 傳播하는 것으로 引張形應力에 의한 龜裂로 보여진다.

龜裂傳播擊動은 (3-1-1)節 (B)에서 說明한 [傳播擊動 II]와 거의 一致하고 있다. Forsyth[18]의 龜裂傳播機構외도 一致하고 있다. 다만 表面의 初生龜裂이 結晶粒內가 아니고, 結晶粒界에서 始作되었다는 點에 差異가 있다.

第二段階에서 分岐된 小龜裂을 난기는 舉動(Photo, 8, N, L<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, L, M<sub>1</sub>, N<sub>3</sub>)는 Laird[19]가 時効硬化한 Al合金의 實驗[18]에서 發見하여 分類한 形態와 대단히 잘 一致하고 있다. 그러나 (3-1-1)節에서 관찰한 바와 같이 그 길이에 있어서는 얼마간의 差異가 있다. (Fig. 6과 Fig. 7(c) 참조)

### 3-4. Slip Band 와 疲勞損傷

#### 3-4-1 slip band 發生率과 疲勞損傷

反覆應力과 slip band 發生率과의 關係를 究明하기 위하여 5段階( $\sigma_1=23.7 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_2=22.3 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_3=19.9 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_4=17.8 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_5=15.7 \text{ kg/mm}^2$ )의 應力別로 試驗片 平滑部(길이 15.4mm)의 中央과 中央에서 左右 2.5mm 되는 3곳에서 試驗片의 圓周에 따라 등간적으로 각각 20個所를 選定하여 이곳을 観察하였다. Photo. 7은 이들의 한 例이다.

이들 사진으로 結晶粒內에 slip band의 密度에는 관계없이 slip band가 發生한 結晶粒數  $M_f$ 를 調査하여, 全體의 結晶粒數  $M$ 에 對한 比率  $S_f$ 를 計算하였다. 이  $S_f$ 가 slip band 發生率이다.

$S_f$ 와  $\sigma_i$ 와의 關係를 圖示한 것이 Fig. 12이다.

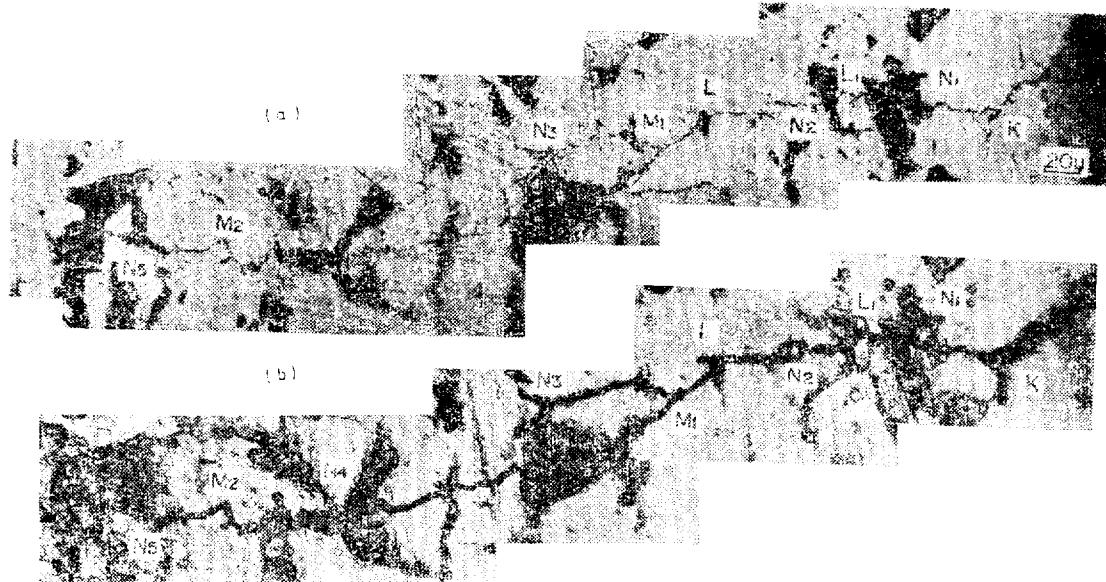
高應力下( $\sigma_1$ )에서는 全結晶粒의 80% 以上的 結晶粒에서 slip band가 發生하고, 低應力下( $\sigma_5$ )에서는  $S_f=8\%$ 정도밖에 되지 못하였다.

應力  $\sigma$ 가 증가함에 따라  $S_f$ 는 거의 直線的으로 比例하고 있고, 3-1-2節의 結果인 微觀的 疲勞龜裂이 成長되지 않는 疲勞限度는 疲勞限度  $\sigma_c$ 의 約 80%라는 것을 감안하여 式으로 表示하면 다음과 같다.

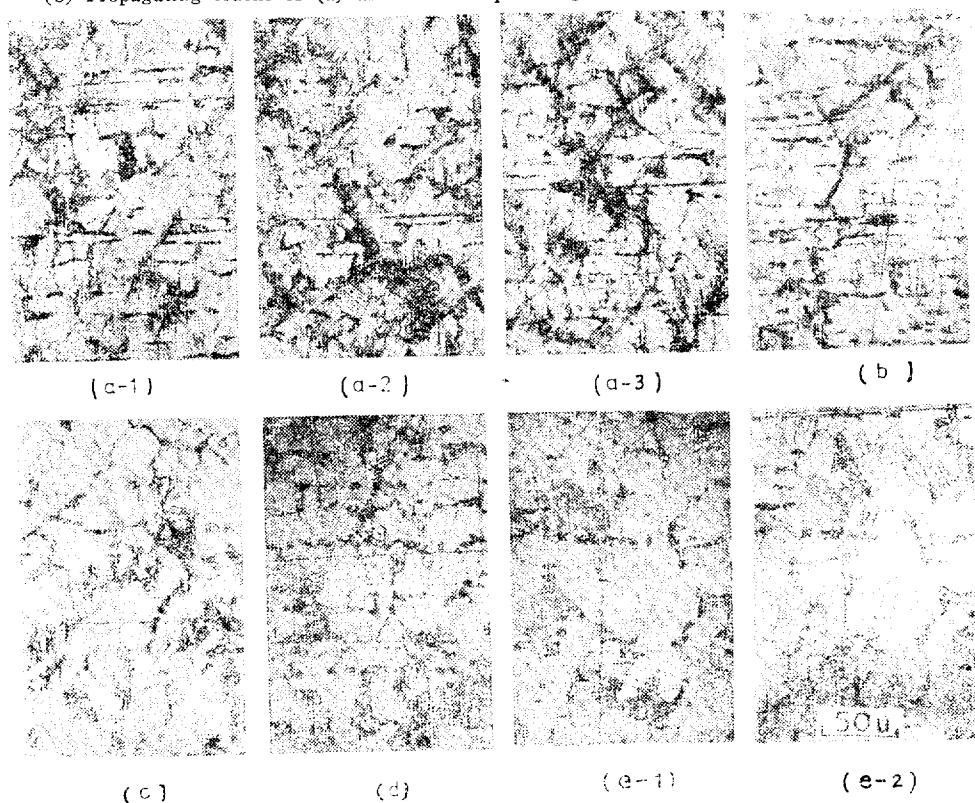
$$S_f = 7\sigma - 95.2 \quad \sigma_i \geq 0.8\sigma_c \quad (7)$$

低應力  $\sigma_5$ 下에서  $N=1\times 10^7$ 까지 반복한 것 [Photo. 7(e-1)]을 再次 高應力  $\sigma_3$ 下에서 疲勞시켰더니  $S_f$ 가 8%로부터 40%以上까지 증가하였다 [Photo. 7(e-2)]

slip band는 結晶粒內에서 發生하고,  $M_f$ 는 應力의 증가에 따라 應力에 거의 直線的으로 比例하고, 反覆數  $N$ 와는 別로 관계가 없으나,  $N$ 의 증가에 따라 slip band가 發生한 粒內에서 그 길이와 個數가 증가하였다 [31]. 그러나 疲勞限度以下의 應力  $\sigma_5$ 下에서는 別로



**Photo. 6.** Propagating cracks seen in etched sections, perpendicular to the surface and parallel to the stress axis, in rolled directional specimen fatigued at bending stress  $\sigma=22 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=25\times 10^4$ .  
 (b) Propagating cracks of (a) after electric polishing



**Photo. 7.** Fatigue damage on the surface of the smoothed specimen fatigued at (a-1, a-2, a-3): bending stress  $\sigma=23.7 \text{ kg/mm}^2$ , fatigue number  $N=5\times 10^4$ , (b):  $\sigma=22.3 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=20\times 10^4$ , (c):  $\sigma=19.9 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=56\times 10^4$ , (d):  $\sigma=17.8 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=70\times 10^4$ , (e-1):  $\sigma=15.7 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=1\times 10^7$  (bending stress under fatigue limit), (e-2):  $\sigma=19.9 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N=1\times 10^7+52\times 10^4$

차이가 없었다. 이 결과는 (3-1-2)節의 결과를 뒷받침하고 있다.

大體로 高應力下에서 발생한 slip band는 거칠고, 텔집하게 發生하고, 低應力下에서는 簡單하고 個數도 적다. 따라서 高應力下에서 破斷된 破斷面의 가장자리는 低應力下에서의 그것보다 굽곡이 대단히 甚하다는 것이 이해된다.

### 3-4-2 slip band의 角度

앞 (3-4-1)節에서 使用한 同一사진을 使用하여 結晶粒內에 發生한 slip band의 角度  $\theta$ 를 測定하였다.  $\theta$ 는 한 結晶粒에서 發生한 slip band角度의 平均值이고, slip band의 法線이 應力軸과 이루는 angle를 나타낸다. 또한  $\theta$ 를 整理하는데 있어서 편의상  $10^\circ$ 段階로 区分하여 表示했다. 그結果를 整理하여 表示한 것이 Fig. 13이다.

各段階의 應力에 관계없이  $0^\circ \sim 10^\circ$ 의 것이 40%~70%로 가장 많고 [34][35], 應力의 증가에 따라 減少하였다. 다음으로  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 것이 많고, 應力의 증가에 따라 증加하였다.  $60^\circ$ 以上의 것은 極히 小數이고 [34][35],

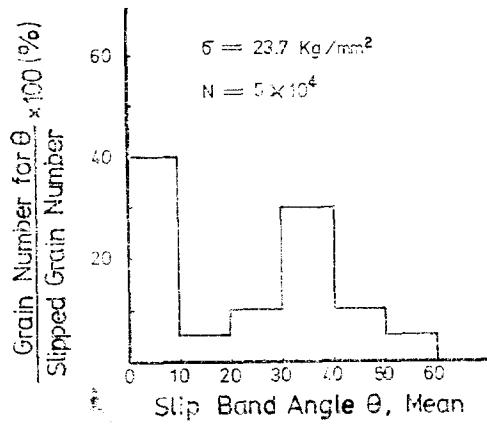


Fig. 13. Slipped grain number pct. versus slip band angle

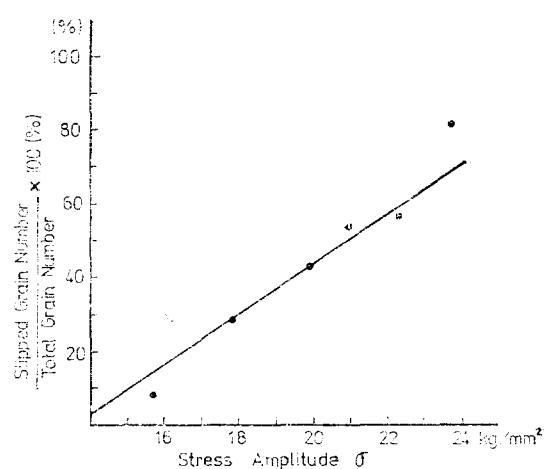
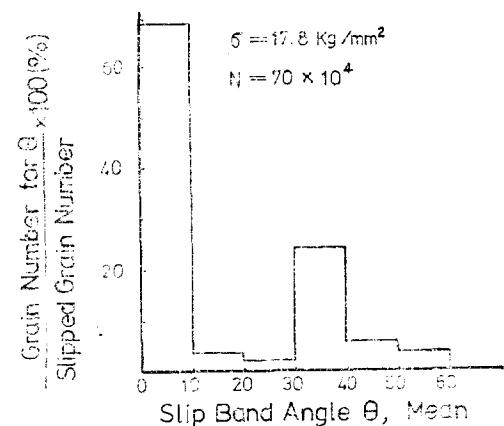
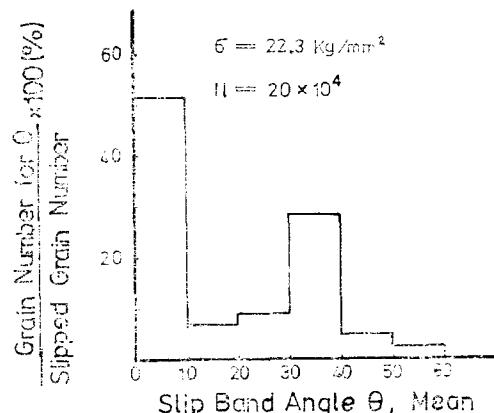


Fig. 12. Slipped grain number pct. versus stress amplitude

其他角度의 것은 應力의 증가에 따라 증가하는 傾向은 있으나, 不過 數% 내지 10數%에 지나지 않았다.

由[35]은 0.20% 炭素鋼인 圧延丸棒에서  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,



$20^\circ \sim 30^\circ$ ,  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 각段階의 것들이 거의 같은率로 發生하나,  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 것이  $0^\circ \sim 10^\circ$ 의 것의約 1/3 인데 비해, 佐佐木[34]는 0.07% 炭素鋼을 使用한 實驗結果  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,  $20^\circ \sim 30^\circ$ ,  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 것들이 同率로 發生하고,  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 것이  $0^\circ \sim 10^\circ$ 의 것의 2/3以上으로 된다고 하고 있다.

$0^\circ \sim 10^\circ$ 의 것이 가장 많은 것은 cross slip 을 일으키기 쉽기 때문이고[34][35],  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 것이 다음으로 많은 것은 (3-1)章에서 설명한 바와 같이 slip band 나 初生龜裂의 生成은剪斷型應力에 의한다라는 것을 생각하면 설명이 된다. slip band의 角度에 관계없이 slip band 내의 2次 slip band의 角度는 모두  $45^\circ$ 라는 報告가 있다[34].

以上으로서 slip band의 發生率은 反覆應力에 比例하고 反覆數에는 別影響을 받지 않고, 高應力下에서는 低應力下에서보다 slip band가 거친고 密集하여 發生한다. 따라서 表面의 疲勞損傷程度는 疲勞反覆數와 反覆應力의 증가에 따라 甚해지고, slip band 發生率에 數倍 품한 값에 比例하여 나타난다.

그리고 slip band가 發生한 結晶粒數의 40%以上은 slip band의 角度가  $0^\circ \sim 10^\circ$ 의 것이고, 應力의 감소함에 따라 증가하고, slip band의 角度가  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의는 結晶粒數는 應力의 高低에 관계없이 거의 30%이다.

#### 4. 結 論

以上의 實驗과 觀察과 考察들을 整理하면 다음과 같이 結論을 달할 수 있겠다.

(1) 初生龜裂의 發生位置는 應力의 高低에 關係없이 結晶粒界이고, 이 結晶粒界는 試驗片의 表面에서 應力軸에 對하여  $50^\circ \sim 60^\circ$ 이며, 內部方向으로는  $45^\circ$ 를 이루고 있다.

(2) 初生龜裂의 兩先端으로부터 試驗片의 表面을 따라 傳播하는 龜裂의 길이( $l$ )와 傳播速度는 從屬, 先導에 관계없이

$$l = Ae^{BNr} \quad (A, B \text{는 定數})$$

$$\frac{dl}{dN} = \frac{AB}{N_f} e^{BNr} \quad (N_f \text{는 疲勞壽命})$$

의 形式으로 각각 表示되고, 兩龜裂길이의 比  $l_r$ 은

$$l_r = l_f/l_i = e^{CNr}$$

로 表示된다. 여기서  $C$ 는 應力의 高低에 관계없이 約 0.7이다. 즉 破斷時( $N_f=1$ )의 從屬先端으로부터의 龜裂길이  $l_f$ 는 先導先端으로부터의 龜裂길이의 約 2배이다.

(3) 疲勞龜裂의 第一段階로부터 第二段階로 移行하는 過程은 試驗片길이 方向이나 兩先端으로부터 表面

을 따른 圓周方向이나 모두 같다. 즉 龜裂은 最大剪斷應力方向으로부터 主應力에 直角되는 方向으로 變向하여 傳播한다.

(4) 第二段階의 龜裂이 兩先端에서 分岐되는 粒界의 頂點에 到達하면 分岐된 兩粒界로 傳播하다가 停止하는 傾向은 같으나, 先導先端方向에서는 分岐된 兩粒界에서 各各 1個의 粒內龜裂이 成長하여 그中 한個가 快速傳播擴大하는데 對하여, 從屬先端方向에서는 分岐된 兩粒界中 한 個의 粒界에서만 粒內龜裂이 成長하여 傳播하는 傾向이 있다. 이 形態는 Laird의 龜裂傳播模型과 若干 差異이 있다.

(5) 平滑材의 全表面에서, slip이 發生한 結晶粒의 全結晶粒에 對한 比率( $S_f$ )은 下式과 같다.

$$S_f = 7\sigma - 5.6\sigma_c \quad (\%)$$

(6) Slip이 發生한 結晶粒中에서 40%以上을 占有하고 있는 slip band角度  $0^\circ \sim 10^\circ$ 인 結晶粒들은 應力의 減少에 따라 增加하는데 對하여, 角度  $30^\circ \sim 40^\circ$ 를 갖는 結晶粒들은 應力에 關係없이 거의 一定하다.

#### 參 考 文 獻

- [1] P.C. Paris, and F. Erdogan, *Trans. ASME. Ser. D.* 85-4 (1963-12), 528.
- [2] A.K. Head, *Phil. Mag.*, 44-356 (1953-9), 925.
- [3] J. Weertman, *Int. J. Frac. Mech.*, 2-2(1966-6), 460.
- [4] R.W. Lardner, *Phil. Mag.*, 17-145 (1968-1), 71.
- [5] W.A. Wood, et al., *Acta Metallurg.*, 11-7(1963-7), 643.
- [6] N.E. Frost, and D.S. Dugdale, *J. Mech. Phys. Solids*, 6 (1958), 92.
- [7] J. Weertman, *Proc. 1st Int. Conf. on Fracture*, Sendai, 1 (1965), 153.
- [8] H.W. Liu, *Trans. ASME. Ser. D.* 85-1 (1963-3), 116.
- [9] T. Yokobori, et al., *Rep. Res. Inst. Str. Frac. Mat.*, Tohoku Univ. 3-2 (1967), 39.
- [10] A.A. Griffith, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* 221 (1920), 163.
- [11] G.R. Irwin, *J. Applied Mechanics*, 24-3 (1957-9), 361.
- [12] T. Yokobori, *Rep. Res. Inst. Str. and Fract. of Mat.*, Tohoku Univ. 3-1 (1968)
- [13] 何本, 西岡, 材料試験 2-5 (1953-5), 147.
- [14] P. Kuhn and I.E. Figge, NASA, *Technical Note D-1259*, (1962-5).

- [15] C.V. Byre Gowda, and J.H. Topper, *Trans. ASME*, Ser. E, 37-1 (1970-3), 77.
- [16] J.H. Topper, et al., *Materials* (a), 4-1 (1969), 200.
- [17] 西谷, 高尾, *Trans. JSME*, 40-340 (1974-12), 3254.
- [18] P.J.E. Forsyth, *Acta Metallurg.*, 11-7 (1963-7), 703.
- [19] C. Laird, *ASTM STP* No. 415 (1963), 131.
- [20] 横堀, 外3名, 日本金屬學會誌, 35-1 (1971), 70.
- [21] B.Z. Weiss, et al, *J. Iron & Steel Inst.*, 12 (1967-9), 1246.
- [22] R.F. Thomson, *Trans. Amer. Soc. Metals*, 56 (1963), 803.
- [23] 宋 外 3名 *Trans. JSME*, 39-324 (1973-8), 2291.
- [24] 中澤, 小林, *Jour. JSME*. Vol. 75-642 (1972-7), 120.
- [25] 吳世延, 廉永夏, *Jour. of KSME*, 14-3 (1974), 240.
- [26] R.E. Peterson, *Colloquium on Fatigue*, (1955), 186.
- Springer-Verlag.
- [27] 大久保 外2名, *Trans. JSME*, 34-264 (1968-8), 1349.
- [28] 清家, 外2名, *Trans. JSME*, 40-335 (1974-7), 1819.
- [29] 大路清嗣, *Jour. JSME*, Vol. 76-658 (1973-9), 1087.
- [30] 大久保, 酒中, *Trans. JSME*, 33-248 (1967-4), 495.
- [31] 西谷, 西田, 日本機械講演論文集, No. 198 (1968-9), 83.
- [32] 西谷, 千代, *Trans. JSME*, 40-329(1974-1), 41.
- [33] 中澤 外5名, *Trans.JSME*. 40-329 (1974-1), 9.
- [34] 佐佐木, 日本材料強度學會誌, Vol. 2-2 (1967), 3.
- [35] 白南桂, 釜山工大生産技術研究報告, Vol. 11 (1971), 59.
- [36] 三澤, 川田, *Trans. JSME*, 40-335 (1974-7), 1803.
- [37] T. Yokobori, et al., *Rep. Res. Inst. Str. and Fract. of Mat.*, Tohoku Univ. 5-1 (1969), 1.