

<論 文>

## 表面欠陷에서 發生하는 疲勞크랙 舉動

—低炭素鋼材를 中心으로—

宋 森 弘\* · 吳 煥 燮\*\*

(1984年 11月 2日 接受)

### Behavior of Fatigue Crack Propagation from Surface Flaw

—for Low Carbon Steel—

Sam Hong Song and Hwan Sub Oh

**Key Words:** Fatigue limit, Initiation of slips and micro-cracks, Size effect of micro-holes, Relation of stress concentration and micro-cracks

#### Abstract

In terms of behavior of fatigue cracks propagated after build-up around the artificial drilled micro-hole, this study has been made of the build-up process of slips and micro cracks, behavior of micro-crack propagation and the definition of fatigue limit under the rotating bending stress with low carbon steel.

The results of this study are as follows:

- (1) The fatigue limit is the repropagating critical stress for the nonpropagating cracks which have grown to some limit around the micro-hole in regard of the magnitude of micro-hole.
- (2) Behavior of the slips and micro-cracks initiation are occurring simultaneously in front and in rear of micro-hole tips in the view of the rotational direction, regardless of the magnitude of micro-hole.
- (3) Behavior of fatigue crack propagation is different from magnitude of micro-hole, its behavior is propagation of single crack about respectively large hole, but about respectively small hole, fatigue crack propagated joining phenomena of micro-cracks.
- (4) The behavior of fatigue fracture is affected by the factor of its defects in the view of magnitude of micro-hole when the diameter of the micro-holes are smaller than  $50 \mu\text{m}$ , and this is also affected with the size effect of micro-hole diameter.

\*正會員, 高麗大學校 工科學 機械工學科

\*\*正會員, 慶熙大學校 工科學 機械工學科

### 1. 序 論

材料가 갖는 欠陥이나 非金屬介在物이 疲勞舉動에 미치는 영향은 多様하고, 특히 그것들의 모양, 치수, 놓여지는 方向, 位置등에 따라서 疲勞強度, 疲勞크랙 發生 및 傳播 등의 舉動에 미치는 영향은 매우 複雜하다<sup>(1-5)</sup>. 특히, 炭素鋼材料가 갖는 基地의 硬度가 높을수록( $H_v \geq 500$ ) 欠陥이나 非金屬介在物은 疲勞크랙發生起點이 되고<sup>(6)</sup> 이것을 起點으로 하는 疲勞크랙은 傳播하여 그 材料의 最終破斷을 일으키고 따라서 疲勞強度는 그만큼 낮아진다. 또는 疲勞크랙發生源은 欠陥이나 非金屬介在物 그 自體가 되기도 하고<sup>(7)</sup>, 또한 이것을 포함한 그 局部領域이 應力集中源이 되어, 疲勞크랙은 이 應力集中을 일으키는 微小圓孔의 선택된 테두리에서 發生傳播한다<sup>(8,9)</sup>. 그러나 결함이나 非金屬介在物은 疲勞크랙發生과는 거의 관계가 없다<sup>(10,11)</sup>는 등의 研究報告도 있다. 이와는 반대로 材料가 갖는 基地의 硬度가 낮을수록( $H_v \leq 400$ ), 欠陥이나 非金屬介在物은 疲勞크랙發生源이 되기도 하나<sup>(12)</sup>, 그것은 疲勞크랙發生과 거의 관계가 없고 그대신 基地의 軟한 組織自體가 疲勞크랙發生源이 된다<sup>(13,14)</sup>. 특히 基地의 硬度가 더욱 낮아지면( $H_v \leq 200$ ) 이러한 欠陥이나 非金屬介在物은 疲勞크랙發生과는 관계가 없고 대부분 基地의 軟한 組織內에서 疲勞크랙은 發生傳播한다<sup>(15)</sup>. 이상과 같이 欠陥이나 非金屬介在物이 疲勞크랙舉動에 미치는 영향은 일정하지 않으나 그것이 疲勞크랙發生源이 되는 경우는 硬度의 大小에 관계없이 그것들을 포함한 局部場所가 應力集中源이 된다는 見解를 얻을 수 있다.

한편, 이상과 같이 應力集中源이 될 수 있는 自然欠陥 대신에 人工구멍을 갖는 材料에 대한 疲勞舉動을 조사한 연구도 다소 찾아볼 수 있다. 즉, 人工欠陥의 大小가 疲勞強度에 미치는 영향을 조사한 것<sup>(16-18)</sup>, 人工欠陥材의 停留크랙과 破壞를 논한 것<sup>(19)</sup>, 그리고 圓孔주위에 發生하는 應力集中舉動에 관한 理論的인 解析등<sup>(20,21)</sup>을 열거할 수 있으나 이들을 대략 종합하여 보면 (1) 人工微小欠陥의 존재로 인하여 應力集中이 發生하기 때문에 그곳에서 疲勞크랙은 發生傳播한다. (2) 人工微小欠陥의 大小는 疲勞舉動에 영향을 줄 것이다. 등으로 집약된다.

그런데 人工微小欠陥의 크기가, 材料가 원래 가지고 있는 自然欠陥의 크기에 가까워지면 그 주위에 發生하는 疲勞크랙은 어떠한 舉動을 나타내는가, 특히, 人工

微小구멍의 大小에 따른 疲勞限度의 舉動, 人工微小구멍주위에 관찰될 것이 예상되는 슬립 및 미시크랙은 시험편의 回轉方向을 中心으로 微小구멍의 前方에서 먼저 發生하는지, 혹은 後方에서 먼저 發生하는지, 또한 그것들은 어떠한 形態의 特性을 가지고 發生하는지 또는 人工微小구멍의 大小에 따라서 疲勞크랙傳播特性은 어떤 것인지 등 疑問點이 많이 남아있다.

本 研究에서는 自然的인 微小欠陥주위에 發生, 傳播하는 疲勞크랙의 舉動을 檢討하기 위하여, 既存材料가 갖고 있는 欠陥이나 非金屬介在物을 代身할 수 있다고 생각되는 크기가 다른 非貫通 人工微小구멍을 갖는 여러 종류의 試驗片을 준비하고, 이 試驗片들이 갖는 人工微小구멍주위에 發生傳播하는 疲勞크랙의 舉動을, 金屬顯微鏡觀察를 토대로 詳細히 考察하였다. 그리고 이러한 觀察를 기초로 하여 非貫通人工微小구멍의 大小에 따른 疲勞限界度舉動에 대해서도 考察하였다.

### 2. 試驗片 및 實驗方法

#### 2.1. 試驗片

實驗을 위한 試驗片素材는 低炭素鋼壓延丸棒材이며 化學成分은 Table 1 과 같고 그 材料의 機械的인 性質은 Table 2 와 같다. 試驗片은 平滑試驗片과 人工微小圓孔試驗片을 준비했다. 시험편의 모양과 치수는 Fig. 1 과 같으며 非貫通微小圓孔은 材料에 포함되는 欠陥이나 非金屬介在物을 고려하고 人爲的으로 加工可能한  $d=50 \mu\text{m}$ ,  $60 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  및  $300 \mu\text{m}$  의 것으로 選定 加工하였다(Fig. 2). 이러한 微小圓孔을 加工할 경우, 加工할 位置決定은 현미경 관찰하에서 실시하였다. 그리고 圓孔加工時에는 냉각액으로서 충분히 냉각을 시켰고, 또 加工完了된 微小圓孔의 깊이는 微小圓孔을 2 등분 절단하여 측정함으로써 圓孔의 지름과 거의 일치

Table 1 Chemical composition of specimen

Material	Composition(%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Mild steel	0.17	0.12	0.53	0.01	0.01	0.18	0.23	0.13	0.14

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Mild steel	69	12	46

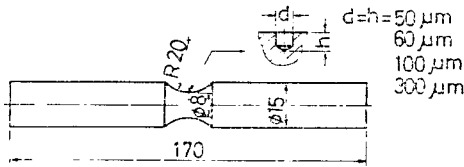


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen(unit: mm)

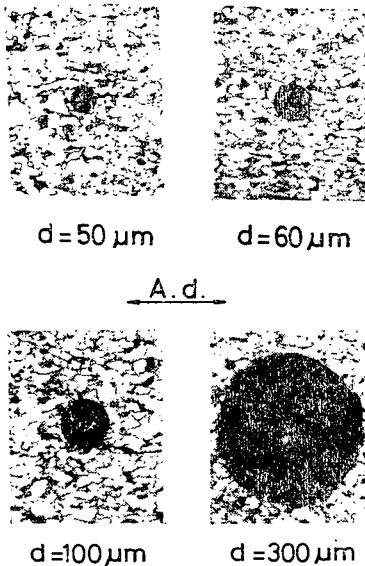


Fig. 2 Illustration of micro hole. A.d.: Axial direction

하고 있음을 알았다. 微小圓孔의 加工이 끝난 시험편을 실험에 사용할 때에는 電解研磨에 의하여 그 表面을 1 μm 이하로 가볍게 연마한후 사용하였다.

2.2. 實驗方法

실험의 精度를 높이기 위하여 上記와 같이하여 얻어진 人工微小圓孔의 크기 및 眞圓度を 확인하였다. 즉 人工微小圓孔의 크기 및 眞圓도가 확실한가를 확대경(×100)에서 조사하고 眞圓도가 타당하다고 認定되는 것만을 試驗片으로 선정 사용하였다. 또한 微小圓孔의 大小에 의한 단면계수의 변화는 d=300 μm인 경우가 0.8% 정도이므로 무시하였다. 疲勞舉動은 人工微小圓孔을 갖는 試驗片의 疲勞限度曲線을 토대로 應力레벨 및 應力反復數에 따라서 슬립의 發生, 微視크랙의 發生, 傳播 등을 조사하였다. 이때 表面크랙舉動은 金屬顯微鏡觀察을 통하여 연속적으로 사진촬영한 후 그 사진들을 확대분석하였다. 本實驗에 사용한 實驗機는 오노(小野)型 回轉굽힘 疲勞試驗機(Ono's type rotary ben-

ding fatigue testing machine; 10 kg-m, 3000 rpm)이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 微小圓孔의 大小에 따른 疲勞限界舉動

本實驗에 사용한 각 시험편의 疲勞限度曲線을 Fig. 3에 제시한다. 平滑材(HS 00)의 疲勞限度는  $\sigma_w = 31 \text{ kgf/mm}^2$ 을 얻었고 人工微小圓孔을 갖는 各試驗片의 疲勞限度는 微小圓孔지름이 d=50 μm(HS 50), 60 μm(HS 60), 100 μm(HS 100), 300 μm(HS 300)의 順序로  $\sigma_{w50} = 30 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w60} = 30 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w100} = 22 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w300} = 18 \text{ kgf/mm}^2$ 를 얻었다. 따라서 疲勞限度는 微小圓孔이 적어질수록 平滑材의 疲勞限度에 接近하고 있음을 관찰할 수 있다. 그리고 이러한 S-N<sub>f</sub>曲線上에서 관찰되는 疲勞限度의 幅은 넓어지는 反面에 疲勞限度以上の 有限壽命下에서는 高應力레벨일수록 그 曲線들 사이의 幅은 좁아지고 있는 傾向을 나타낸다.

한편 Fig. 4은 微小圓孔의 大小에 따른 疲勞限度의 舉動을 考察해 본 결과인데 微小圓孔의 크기가 작아질수록 疲勞限度는 平滑材의 疲勞限度에 接近하고 있다.

이 結果는 平滑材가 원래 가지고 있는 既存 欠陷의 크기 대신에 人工微小圓孔으로 대체하여 疲勞限度舉動을 檢討하여도 무방하다는 것을 시사하는 것이라고 생각된다. 따라서 노치재료로서의 圓孔의 치수效果를 考慮한 限界구멍은 약 50 μm 前後가 될 것으로 생각된다.

일반적으로, 노치의 應力集中係數는 圓孔이 작은 경우는 크고, 圓孔이 큰 경우는 작다. 圓孔이 작은 경우는 圓孔이 큰 경우보다 높은 應力集中 때문에 크랙發生이 빠르고 따라서 疲勞限度도 낮아질 것이 豫想된다.

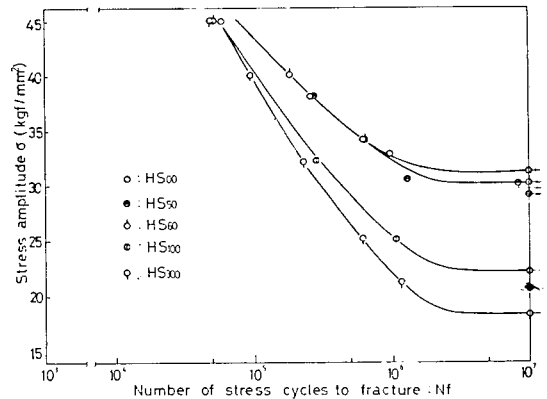


Fig. 3 S-N<sub>f</sub> Curve(rotary bending fatigue test)

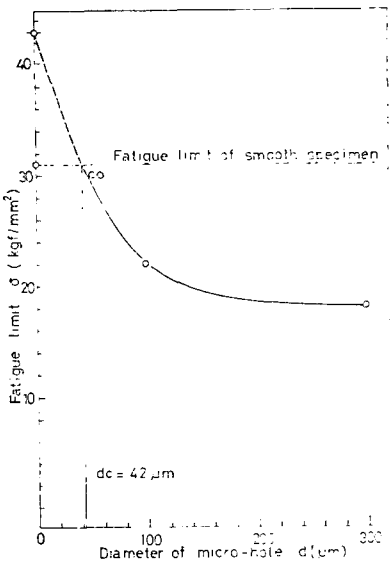


Fig. 4 Relation of fatigue limit and diameter of microhole

그러나 本 實驗의 範圍에서의 결과는 그렇지 않다. 즉, 圓孔이 작은 경우는 圓孔이 큰 경우보다 크랙發生은 빠르지 않고 疲勞限度도 圓孔이 큰 경우보다 작은 경우가 오히려 높다. 이러한 결과에 대한 理由로서는 치수効果의 영향이 豫測되나 이 점에 대하여는 보다 詳細한 檢討가 要望된다.

한편, 疲勞限度의 舉動을 詳細히 檢討하기 위하여 各 試驗片의 疲勞限度近傍에서 관찰된 停留크랙의 一例을 Fig. 5에 제시한다. 停留크랙은 微小圓孔의 大小에 관계없이 試驗片 表面의 微小圓孔주위에서 관찰되는데 그것은 軸方向을 기준으로 主應力이 最大인 點을 포함하는 어떤 角度범위내에서 微小圓孔先端 근방에 存在함을 관찰할 수 있다. 또한 停留크랙의 크기는 微小圓

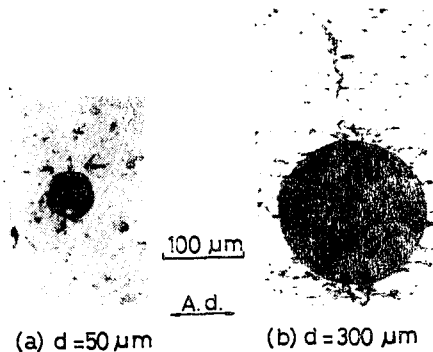


Fig. 5 Illustration of nonpropagation crack under fatigue limit( $N=10^7$ ). A.d.: Axial direction

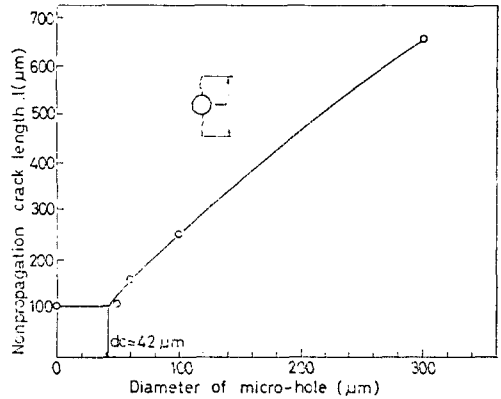


Fig. 6 Relation of nonpropagation crack length and diameter of micro-hole

孔의 大小에 比例하여 各 微小圓孔 크기 程度의 것이 最大이고 그것을 기준으로 그 以下の 크기를 갖는 停留크랙도 관찰되었는데 그것들을 Fig. 6에 정리하였다. 그리고 그것들의 數는 1個에서 2~3個까지 任意의 個數가 散在하고 있음을 觀察할 수 있다.

한편, 停留크랙의 傳播舉動을 觀察하기 위하여, 各 試驗片의 疲勞限度에서 관찰되는 停留크랙을 갖는 試驗片을 再次, 各 疲勞限度以上の 應力레벨에서 疲勞試驗을 實施한 결과, 微小圓孔주위에 이미 存在하고 있는 停留크랙은 應力 反復數의 增加와 더불어 傳播하고 結局은 이 停留크랙의 傳播가 계속됨에 따라서 試驗片은 最終破斷에 도달하는 것이 觀察되었다.

따라서 本 實驗에서 疲勞限度라고 하는 것은 微小圓孔의 大小에 관계없이 微小圓孔 주위에 발생되어 傳播되지 않는 停留크랙이 傳播하는 限界應力으로서 定義할 수 있다고 생각된다. 다만 微小圓孔의 크기에 比例하여 停留크랙이 存在하는 理由에 대해서는 계속 檢討中이다.

### 3.2. 微小圓孔의 大小에 따른 슬립 및 微視크랙의 發生舉動

Fig. 7은 微小圓孔의 크기가  $d=50 \mu\text{m}$ ,  $60 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $300 \mu\text{m}$ 의 順序로  $\frac{N}{N_f}=0$ 에서 부터  $\frac{N}{N_f}=5\%$ 까지의 구간에서, 슬립 및 微視크랙의 發生過程에 대한 形態를 詳細히 觀察한 結果의 一例이다.  $N_f$ 는 破斷壽命이고  $N$ 는 破斷壽命을 기준으로 한 任意의 應力 反復數이다. 또 이때 加해진 負荷應力の 크기는 各 試驗片이 갖는  $S-N$ 曲線의 疲勞限度를 基準으로 疲勞限度의 120%에 해당하는 應力이다.

슬립 및 微視크랙은, 반드시 微小圓孔 주위에 應力

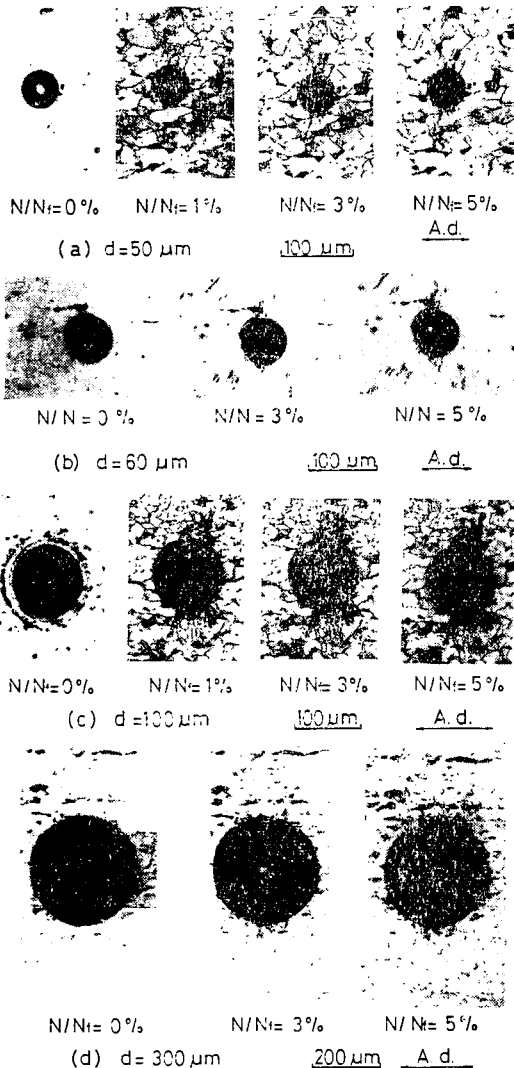


Fig. 7 Behavior of slip and micro crack around micro-holes:

- (a)  $\sigma = 34.2 \text{ kgf/mm}^2$   $N_f = 6 \times 10^5$
- (b)  $\sigma = 34.2 \text{ kgf/mm}^2$   $N_f = 6 \times 10^5$
- (c)  $\sigma = 34.2 \text{ kgf/mm}^2$   $N_f = 2.3 \times 10^5$
- (d)  $\sigma = 33.6 \text{ kgf/mm}^2$   $N_f = 2 \times 10^5$   
(A.d.: Axial direction)

集中이 最大로 되는 局部場所에서만 發生하지 않고 그것은 그 微小圓孔 주위의 選擇된 場所에서 發生하여 그 形態는 多樣하다. 特히 微小圓孔 주위의 슬립 및 微視 크랙의 發生形態는 平滑材에서의 그것들의 發生形態와 거의 同一하고, 또 그것들의 成長은 應力이 反復됨에 따라 進行된다. 以上과 같이 反復應力의 初期에 發生

하는 슬립은 그후의 應力反復數의 增加에 따라서 점차적으로 슬립밴드 혹은 微視크랙이 發生한다. 이와같이 하여 發生한 슬립 및 微視크랙은 그것들의 先端方向에 이미 發生되어 있는 다른 그것들 중 선택된 것과 合體하면서 傳播한다. Fig. 7의 (a), (c)는 슬립 및 微視 크랙의 發生過程을 結晶粒의 크기의 次元에서 考察한 一例인데,  $\frac{N}{N_f}$ 의 比率이 0%~5%까지의 区間에서 觀察된 슬립 및 微視크랙은 應力反復數가 增加함에 따라서 그 數를 增加시키고, 길이도 增加하여, 結局 그 中에서 選擇된 것에서 微視크랙은 發生된다. 이 경우 이들의 發生은 대체적으로  $\frac{N}{N_f}$ 의 比率이 5%이내에서 끝나고, 그 比率이  $\frac{N}{N_f} = 5\%$ 를 넘어서면서부터 微視 크랙의 傳播는 활발해지는 것을 관찰할 수 있었다.

이러한 슬립 및 微視크랙은 試驗片의 回轉方向을 中心으로 (1) 微小圓孔의 前方先端에서 우선 發生하고, 그後에 後方先端에서 發生하는 경우, (2) 微小圓孔의 後方先端에서 우선 發生하여 그 後에 前方先端에서 發生하는 경우, (3) 微小圓孔의 前後方先端에서 同時に 發生하는 경우, 등으로 생각할 수 있으나 本實驗의 경우는 (3)의 경우가 大部分이었다. 따라서 슬립 및 微視 크랙의 發生時期는 微小圓孔의 大小에 關係없이 破斷壽命을 基準으로 破斷壽命의 약 5%이내이다.

또, 이들의 發生범위는, 試驗片軸과 直角方向軸, 即, 微小圓孔주위에 應力集中이 發生한다고 豫想되는 局部點을 잇는 軸을 中心으로 對稱的으로 약  $30^\circ$  범위이내에 있음을 觀察할 수 있었다. 또, 슬립 및 微視크랙은 上述한 角度범위에서 微小圓孔의 大小에 關係없이 最大主應力軸線上的 方向에서는 1個 또는 2個 程度의 結晶粒 크기의 범위에서 發生한다(Fig. 7 (a), (c) 참조). 또한 本 실험材料의 表面 마이크로빅커스 硬度의 平均은  $H_v \approx 248$  정도(Fig. 8)로 낮고, 따라서 슬립 및 微視크랙은 반드시 微視圓孔 때문에 發生하는 應力集

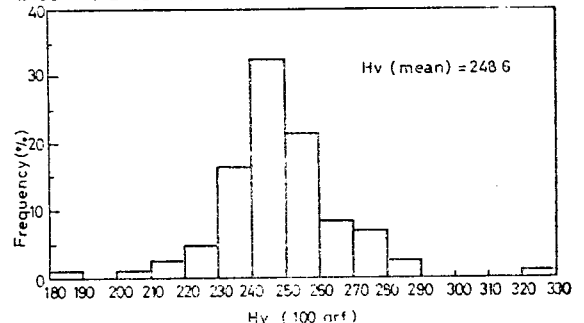


Fig. 8 Distribution of micro-Vickers hardness (100 points)

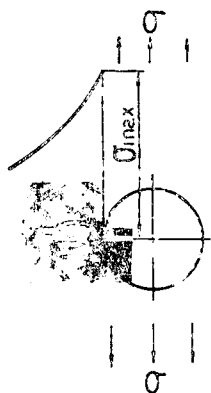


Fig. 9 Relation of stress concentration and initiation of micro cracks

중이 最大로 되는 Fig. 9의 P 點을 포함하는 局部領域에서 發生한다고 생각된다.

이상과 같은 觀察結果로부터, 微小圓孔의 存在로 인한 應力集中이 곧 슬립이나 微視크랙의 發生을 意味하는 것이 아니고, 應力集中은 限定된 場所에서 그것들의 發生을 促進시키는 役割을 하고, 微小圓孔 주위에 觀察되는 슬립 및 微視크랙의 發生에는 剪斷應力이 支配的으로 關여하고 있음을 알았다.

3.3. 微小圓孔의 大小와 疲勞크랙傳播形態

Fig. 10 은 지름이  $d=300 \mu\text{m}$  인 微小圓孔 주위에서

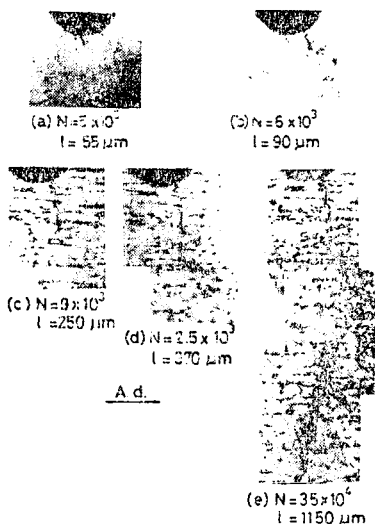


Fig. 10 Behavior of fatigue crack propagation at same area:  $\sigma=45 \text{ kgf/mm}^2$ (A.d.: Axial direction)

發生하는 疲勞크랙의 一例로서, 微小圓孔 한쪽 方向의 크랙길이가 약  $1,150 \mu\text{m}$  정도의 것이다. 이 경우 疲勞크랙의 傳播初期(例로서 Fig. 10 (a) 참조)에서 부터 크랙傳播가 進行된 後의 過程까지(例로서 Fig. 10 (e) 참조), 疲勞크랙은 크랙先端附近에 슬립 및 微視크랙을 同伴하고 있으며 이들 중에 選擇된 것이 크랙傳播 經路에 吸收된다. 또한 이러한 크랙은 巨視的으로는 지그재그의 形態로 傳播한다.

以上과 같이 일단 크랙의 傳播가 시작되던 微小圓孔 때문에 發生하는 應力集中의 影響은 점차 적어지고 크랙自身에 의해 크랙先端에 發生하는 應力集中이 크랙傳播에 影響을 미친다고 생각된다.

또한 Fig. 11 에는 微小圓孔의 大小에 따른 疲勞크랙傳播舉動을 比較調査한 一例를 제시한다. 微小圓孔지름이  $d=60 \mu\text{m}$  인 경우의 크랙傳播는 슬립 및 微視크랙들 중에 選擇된 것들의 合體 또는 吸收됨에 따라서 일어나는 反面, 微小圓孔지름이  $d=300 \mu\text{m}$  인 경우의 크랙傳播는 單一크랙의 成長에 의하여 일어나고 있음을 관찰할 수 있다. 즉, 微小圓孔지름이 커질수록 단일크랙의 전파가 일어나고 微小圓孔지름이 작아질수록 슬립 및 微視크랙을 同伴한 合體크랙의 傳播가 일어난다는 事實은, 微小圓孔이 작을수록 疲勞限度는 平滑材의 疲勞限度에 接近한다는 前節의 結果와 密接한 關係를 갖고 있음을 예시하는 結果라고 생각된다.

따라서 微小圓孔의 크기가  $d=50 \mu\text{m}$  보다 작은 경우

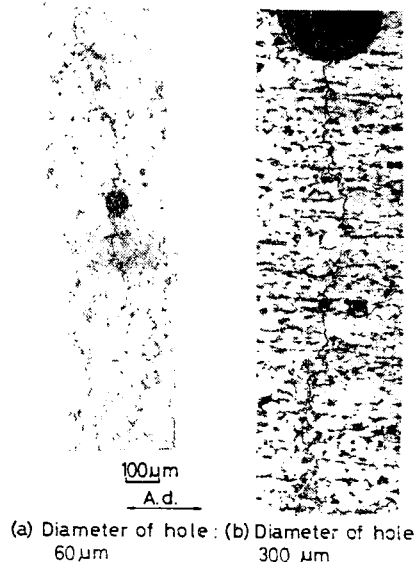


Fig. 11 Illustration of fatigue crack propagation (A.d.: Axial direction)

의 微小圓孔은 치수효과를 갖는 圓孔으로서의 意味가 없고, 欠陷으로서의 意味를 갖는다고 豫測이 되고, 反面, 微小圓孔의 크기가  $d=300\ \mu\text{m}$  인 경우의 微小圓孔은 치수효과를 갖는 圓孔으로서 意味를 갖는다고 豫測되는데 어느쪽이나 모두 疲勞舉動에는 支配的인 影響을 준다. 금후 이점에 대해서는 系統的인 檢討가 요망된다.

#### 4. 結 論

본 연구에서는 自然的인 微小欠陷 주위에 發生傳播하는 疲勞크랙의 舉動을 檢討하기 위하여, 回轉굽힘 應力下에서 低炭素鋼 壓延丸棒材에 크기가 다른 非貫通 人工微小구멍을 갖는 여러 종류의 시험편을 준비하고 人工微小圓孔 주위에 發生하는 슬립 및 微視크랙의 舉動과 傳播舉動 그리고 疲勞限度의 意味를 考察하였다. 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 疲勞限度는 微小圓孔의 大小에 따라서 微小圓孔 주위에 發生停留된 各 크랙이 傳播하는 限界應力으로 定義할 수 있다.

(2) 平滑材 및 微小圓孔지름이  $d=50\ \mu\text{m}$ ,  $60\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ ,  $300\ \mu\text{m}$  順으로 疲勞限度는  $\sigma_w=31\ \text{kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w50}=30\ \text{kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w60}=30\ \text{kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w100}=22\ \text{kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{w300}=18\ \text{kgf/mm}^2$  를 얻었다. 그 결과 微小圓孔이 작을수록 疲勞限度는 平滑材의 疲勞限度에 接近하는데, 微小圓孔은  $d=50\ \mu\text{m}$  보다 작으면 치수효과를 갖는 圓孔으로서의 意味가 없고 欠陷으로서 意味를 갖는다.

(3) 微小圓孔은 지름이  $d=50\ \mu\text{m}$  보다 작으면 欠陷으로서 疲勞舉動에 기여하고, 그것보다 커지면 치수효과를 갖는 圓孔으로서 疲勞舉動에 기여한다.

(4) 微小圓孔 주위에 發生하는 슬립 및 微視크랙은 微小圓孔의 大小에 관계없이 破斷壽命의 5% 以內에서 發生한다.

(5) 슬립과 微視크랙은 微小圓孔의 大小에 관계없이 試驗片의 回轉方向을 中心으로 微小圓孔의 前, 後方先端에서 同時에 發生한다.

(6) 微小圓孔 주위에 發生하는 應力集中은 슬립 및 微視크랙의 發生을 促進시키는 役割을 하고 그것들의 發生에는 剪斷應力이 支配的인 役割을 한다.

(7) 微小圓孔이 작을수록, 疲勞크랙傳播는 슬립 및 微視크랙의 合體에 의하여 일어나고, 微小圓孔이 커질수록 그것은 單一크랙의 成長에 의하여 일어난다.

#### 後 記

本論文은 韓國學術振興財團의 1983年度 研究費支 援에 의하여 研究되었으며 關係諸位께 感謝드립니다.

#### 參 考 文 獻

- (1) 川田, 中澤, 軸受鋼의 回轉굽힘 疲勞強度에 およぼす 介在物의 形狀, 分布의 影響, 日本機械學會論文集, 第 29 卷, 第 206 號, pp.1674~1681, 1963
- (2) 荒木透, 繰返し應力下의 焼もどしマルテンサイト組織의 破壞舉動と非金屬介在物의 役割, 日本鐵と鋼 第 56 卷 第 13 號, pp.1737~1746, 1970
- (3) 宋森弘, 國尾武, 高硬度鋼의 疲れ破壞における 介在物의 役割, 日本材料科學會誌, 第 8 卷 第 3 號, pp.152~162, 1970
- (4) 宋森弘, 熱處理鋼材의 疲勞舉動에 관한 研究, 大韓機械學會誌, 第 15 卷 第 3 號, pp.275~283, 1975
- (5) D. Brook shank, K.W. Andrews, Stress Fields Around Inclusions and Their Relation to Mechanical Properties, Journal Iron & Steel Inst., 210-4 Series, pp.246~254, 1972
- (6) 宋森弘, 國尾武, 高硬度鋼의 마이크로領域における 疲れき裂生成過程, 日本機械學會論文集, 第 40 卷 第 334 號, pp.1503~1510, 1974
- (7) 横堀武夫外 3 人, 低炭素マルテンサイト高張力鋼의 疲れき裂の發生と傳播, 日本金屬學會誌, 第 35 卷 第 1 號, pp.70~82, 1970
- (8) 宋森弘, 高強度鋼의 疲勞舉動과 機構, 大韓機械學會論文集, 第 3 卷 第 3 號, pp.116~123, 1979, 第 4 卷 第 1 號, pp.10~15, 1980
- (9) 高尾, 西谷, 疲勞き裂發生機構의 表面連續觀察による 檢討, 日本機械學會論文集, 第 46 卷 第 402 號, pp.123~131, 1980
- (10) 清水眞佐男外 4 人, 高硬度鋼의 疲れ過程に現わる 組織變化について, 日本機械學會論文集, 第 36 卷 第 281 號, pp.17~20, 1970
- (11) 今井, 中炭素マルテンサイト鋼における 低サイクル 疲勞クラック의 發生と傳播, 日本材料, 第 20 卷 pp.1114~1120, 1971
- (12) S.H. Song, T. Kunio et al, Fatigue Crack Formation at High-Hardened Steels, Proc. 1st. Int. Conf. Mech. Behavior of Materials, Kyoto, II,

- pp.143~152, 1972.
- (13) 宋森弘外 3人, 低炭素マルテンサイト組織の疲れ舉動におよぼす舊オステナイト結晶粒度の影響, 日本機械學會論文集, 第39巻 第324號, pp.2291~2298, 1973
- (14) J.J. Bush, Microstructural and Residual Stress Changes in Hardened Steel due to Rolling Contact, Trans. ASM., Vol. 54, pp.390~398, 1961
- (15) 平修二外 2人, 焼入焼もどし炭素鋼の疲れ破壊に関する研究, 日本機械學會論文集, 第38巻, pp.3059~3066, 1972
- (16) 村上, 遠藤, 疲勞強度におよぼす微小欠陥の影響評價法, 日本機械學會論文集, 第49巻 第438號, pp.127~136, 1983
- (17) 村上, 遠藤, S45C焼なまし材のねじり疲勞におよぼす人工微小欠陥の影響, 日本機械學會論文集, 第47巻 第415號, pp.249~256, 1981
- (18) 村上外 3人, アルミ合金と7:3黄銅の疲勞強度におよぼす直径40~200 $\mu$ 人工微小孔の影響とコーキング効果, 日本機械學會論文集, 第47巻 第424號, pp.1293~1301, 1981
- (19) 村上外 2人, 疲勞強度におよぼす疲勞欠陥の影響 日本機械學會論文集, 第44巻 第388號, pp.4003~4013, 1978
- (20) 齊藤, 中原, 半球ピットを有する半無限板の一軸引張り, 日本機械學會論文集, 第33巻 第247號, pp.343~350, 1967
- (21) 村上外 3人, 軸對稱表面ピットを有する半無限體の2軸引張りにおける應力集中, 日本機械學會論文集, 第48巻 第426號, pp.150~159, 1982