

<論 文>

深孔 非貫通노치材의 疲勞크랙 傳播舉動에 관한 研究

宋 森 弘* · 元 時 太**

(1988年 6月 14日 接受)

Behavior of Fatigue Crack Propagation for the Deep Non-Through Radial Holed Notch Specimens

Sam Hong Song and Si Tae Won

Key Words : Deep Non-through Radial Hole(深孔 非貫通), Surface Crack Propagation Rate (表面 크랙 傳播速度), Interior Crack Propagation Rate(內部 크랙 傳播速度), Shape of Cracked Surface(크랙面形態), Semi-ellipse(半橢圓),

Abstract

In this study rotating bending fatigue tests have been carried out with the deep non-through radial holed notch specimens of low carbon steels(SM 22C). It is investigated that the behaviors of surface and interior fatigue crack propagation and the variations of the shape of the cracked surface on the magnitude of bending stresses. The Obtained results are summarized as follows.

(1) The relations between [Crack length] and [Cycle ratio] are expressed by following eq. in the 0.1~0.6 range of N/N_f . $\log[\text{crack length}] = A + B[N/N_f]$

In case of surface crack length, values of A and B are uniformed independent upon the magnitude of bending stress, but those are variable according to the magnitude of bending stress for interior crack length.

(2) The following eq. is derived on the surface crack propagation rate, bending stress and surface crack length. $(d\ell/dN) = (3.94 \times 10^{-12}) \sigma^{4.54} \ell$

(3) Under small stress, interior crack propagation rate increase with the interior crack growth but it decrease for large stress.

(4) The shape of cracked surface depends upon the magnitude of bending stress. Under small stress fatigue crack propagates as an semi-ellipse with semi-major axis of surface crack length with semi-major axis of interior crack length for large stress.

1. 序 論

機械 또는 構造物을 構成하는 部材는 部材에 內

存되어있는 微小缺陷과 함께 키이홈, 핀홀등과 같이 機械加工에 의한 인위적인 노치形狀을 갖게된다. 한편 이들 部材가 反復應力을 받으면 缺陷 또는 노치先端이 最大應力集中源이 되어 이곳에서 크랙이 發生 및 傳播하여 最終破斷의 3段階 疲勞過程으로 구성되는 것으로 알려져 있다^(1,2).

* 正會員, 高麗大學校 工科學 機械工學科

** 正會員, 서울産業大學 金型設計學科

이때 크랙傳播過程의 관점에서 살펴보면 疲勞크랙은 表面方向의 크랙과 함께 內部方向의 크랙이 동시에 傳播하고 있고 이들 各 方向의 크랙傳播舉動의 검토는 매우 중요하다. 한편 內部에서의 疲勞크랙 傳播特性은 疲勞破面解析^(3,4)에 의한 방법이 있지만 疲勞크랙舉動은 크랙 관찰의 용이함때문에 大部分 表面크랙을 中心으로한 研究가 많다. 따라서 表面 및 內部로 傳播한 크랙을 크랙 面形狀比 (表面크랙길이/內部크랙길이)로 表示하면 表面크랙의 測定에 의해서도 內部크랙傳播樣相 및 크랙面變化過程을 알수있고 最終破斷에 이르기까지의 疲勞過程을 어느정도 예측할수 있을것으로 생각된다.

한편 微小缺陷 및 貫通노치를 갖는 板材의 크랙面變化와 크랙성장특성에 대한 研究동향을 살펴보면 Burck⁽⁵⁾등은 微小缺陷 板材가 平面굽힘 疲勞應力을 받으면 크랙傳播初期段階에서는 缺陷의 形狀에 의해 이후 크랙이 成長하면 굽힘 應力分布의 영향에 의해 크랙面形狀이 약간의 차이가 나타나지만 宋⁽⁶⁾등은 板材의 內部에서 나타나는 크랙面形狀은 거의 半橢圓形을 갖는다고 하였고 이때 나타나는 半橢圓形 크랙面先端에서의 應力狀態를 應力強度係數의 개념을 도입하여 많은 검토가 행해지고 있다.

한편 回轉굽힘應力을 받는 丸棒材의 크랙面形狀에 대한 研究結果를 살펴보면 다음과 같다. 萩原⁽⁷⁾등은 V노치재의 경우 同一 表面크랙길이에 대하여 內部크랙길이는 둔한노치재가 예리한 노치재보다 크다고 하였고 缺陷의 의미를 갖는 微小圓孔材의 경우에서 吳⁽⁸⁾등은 缺陷의 分布가 다양하면 크랙 상호간의 간섭현상에 의해 크랙面은 복잡한 樣相을 갖지만 吳⁽⁸⁾, 西谷⁽⁹⁾등은 微小圓孔이 1개인 경우에서 生成된 크랙面形狀은 缺陷의 크기 應力의 大小 및 材質에 무관하게 거의 半圓形을 갖는다고 보고하고 있다. 그러나 실제 部材에서 볼수있는 나사구멍, 기름구멍등과 같이 微小缺陷의 의미를 벗어난

특히 깊은 노치를 갖는 경우의 크랙面形狀을 검토한 研究結果는 많지않고 따라서 이들 노치재에 대해서는 노치형상을 고려하여 表面 및 內部에서 傳播하는 疲勞크랙舉動과 그크랙面形狀을 검토하는 것이 바람직하다고 생각된다.

本 研究에서는 回轉굽힘應力下에서 非貫通노치를 갖는 材料의 疲勞舉動을 分析하기 위하여 우선 試驗片의 반지름에 해당한 深孔노치를 갖는 試驗片을 준비하고 이 試驗片이 高, 中間, 低應力을 받는 경우 作用應力의 大小에 의한 表面 및 內部크랙傳播特性和 함께 크랙面形狀變化 關係를 검토하였다.

2. 實驗方法

本 實驗에 使用한 試驗材料는 國產機械構造用 低炭素鋼材이고 化學成分과 機械的性質은 Table 1 및 Table 2와 같다.

疲勞試驗片은 Fig. 1과 같이 試片의 平行部分에 圓孔의 지름 $d_1=1mm$, 길이 $h_1=5mm$ 로 非貫通시켰다.

한편 圓孔先端 表面에서 發生 傳播하는 表面크랙은 1段階레프리카를 만들어 金屬顯微鏡에서 200배의 배율로 測定하였고 內部크랙은 表面크랙이 傳播한 段階에서 試片을 電氣爐에서 가열 淬火후 다시 疲勞破斷시켜 金屬顯微鏡에서 200배로 관찰하였다. 이때 表面크랙길이(l)는 Fig. 2와 같이 圓孔과 圓孔의 양단에서 傳播한 크랙길이의 반 [$l=(l_1+l_2$

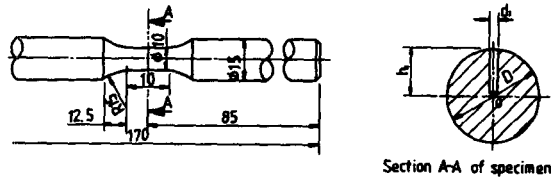


Fig. 1 Fatigue test specimen (unit : mm)

Table 1 Chemical composition of the specimen material (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SM22C	0.23	0.15	0.50	0.003	0.022	0.01	0.01	0.01	0.03

Table 2 Mechanical properties of the test specimen

Material	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Mean hardness (Hvm)
SM 22C	58.2	53.9	15.9	54.8	200

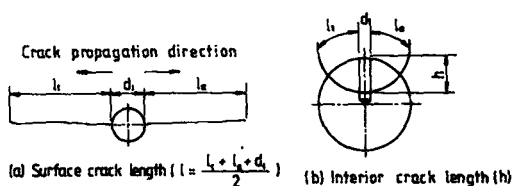


Fig. 2 Crack length(unit : mm)

+d₁]/2]으로 하였고 内部크랙 길이(h)는 内部로 傳播한 最大길이로 하였다.

本 實驗에 使用한 疲勞試驗機는 小野型 回轉굽힘 疲勞試驗機이고 容量은 最大굽힘모우멘트 10kgf-m, 每分回轉數는 3000rpm 이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 作用應力의 大小와 表面크랙傳播舉動

本 節에서는 作用應力의 大小에 의한 表面크랙傳播特性을 조사하기 위하여 먼저 Fig. 3과 같은 S-N 曲線을 구하고 이때 얻어진 疲勞限度는 $\sigma_w = 16.5 \text{ kgf/mm}^2$ 이다.

한편 本 實驗에서 作用할 應力의 크기는 S-N 曲線上의 有限壽命域에서 破斷壽命을 基準으로 高應力($\sigma = 50 \text{ kgf/mm}^2$), 中間應力($\sigma = 35 \text{ kgf/mm}^2$), 低應力($\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$)을 선정하였다. 이때 이들 應力下에서 슬립밴드 및 微視크랙의 發生時期는 平滑材 및 微小缺陷材의 경우와 같이 破斷壽命을 基準으로 5~10%의 범위에서 發生한다는 結果^(10,11)와 일치한다. 이후 發生한 微視크랙은 反復數의 증가와 더불어 점차 成長하여 巨視의인 크랙으로 傳播함을 알 수 있고 微視크랙이 發生하여 破斷되기까지의 壽命은 全疲勞壽命의 약90%를 차지하고 있으므로 크랙의 傳播過程에서 크랙舉動의 파악은 매우 重要하다.

Fig. 4는 各應力에서 反復數의 증가에 따른 表面크랙길이와의 關係를 도시한 것으로서 이들 크랙은 初期傳播過程에서 一定時間 잠복후 크랙이 傳播하기 시작하고 이후 크랙傳播는 反復數의 증가와 더불어 급속히 증가함을 알 수 있다.

이것을 검토하기 위해 Fig. 5는 表面크랙길이와 破斷壽命에 대한 反復數의 比(壽命比)와의 關係를 나타낸 것이다. 이때 應力의 大小에 무관하게 同一壽命比에 대하여 $(\log \ell)$ 과 (N/N_f) 은 하나의 비례關係를 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 西谷⁽⁶⁾ 등은 이들 關係를 다음과 같이 表示하였다.

$$(\log \ell) = A + B(N/N_f) \quad (1)$$

여기서 A는 圓孔의 크기에 따라 주어지는 常數이고 B는 比例常數이다.

本 實驗結果 이들의 關係는 다음 式으로 정리된다.

$$(\log \ell) = -0.327 + 1.56(N/N_f) \quad (2)$$

이때 本 實驗에서 얻어진 比例常數 B의 값은 1.56인 반면 西谷⁽⁶⁾등이 微小圓孔($d_1 = 0.3 \text{ mm}$, $h_1 = 0.3 \text{ mm}$)을 갖는 網 및 黃銅材에서는 1.0~1.3

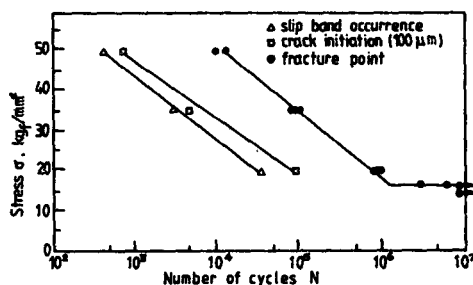


Fig. 3 S-N Curve

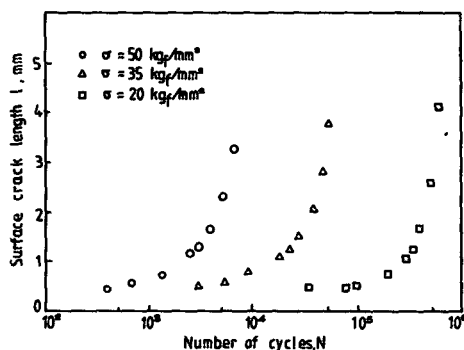


Fig. 4 L-N Curve

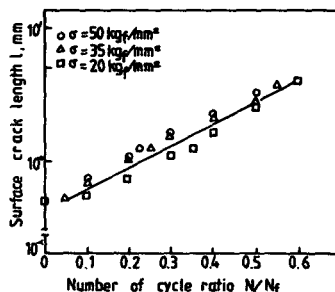


Fig. 5 Relation between surface crack length and number of cycle ratio

의 범위를 갖는경우와 비교하면 다소 큰값을 나타내고 있다.

Fig. 6은 應力의 大小에 따른 表面크랙 傳播速度 ($d\ell/dN$) 및 表面크랙길이(ℓ)와의 관계를 도시한 것으로 作用應力이 클수록 또한 表面크랙길이가 증

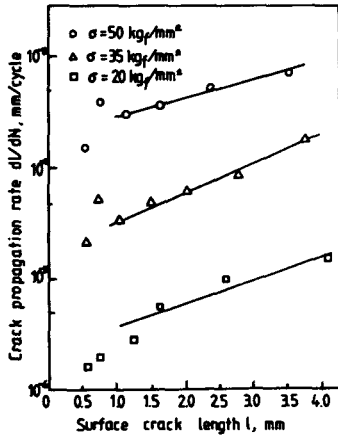


Fig. 6 Relation between crack propagation rate and surface crack length

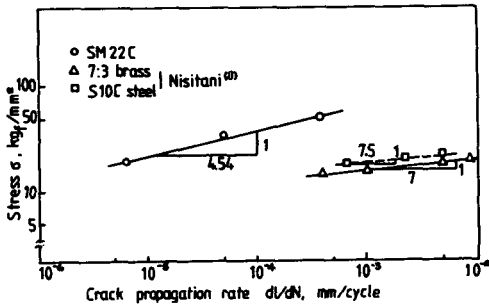


Fig. 7 Relation between stress and crack propagation rate

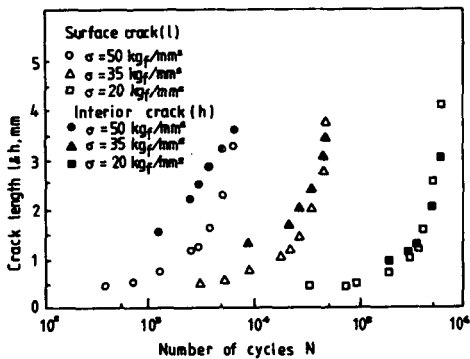


Fig. 8 Relation between surface crack length and interior crack length

가할수록 表面크랙 傳播速度는 상승함을 알 수 있다.

따라서 이들관계를 다음과 같이 表示하여 보았다. 식(1)의 양변을 미분하고 정리하면 다음식이 얻어진다.

$$(d\ell/dN) = (B/N^r) \cdot \ell \quad (3)$$

식 (3)은 ($d\ell/dN$)과 (ℓ)이 比例關係임을 나타내고있고 本 實驗結果에서도 表面크랙길이 [$1.0\text{mm} < \ell < 3.5\text{mm}$]의 구간에서 表面크랙傳播速度는 비례關係임을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6에서 나타난바와 같이 表面크랙傳播速度는 作用應力의 大小에 따라 다르므로 Christensen⁽¹²⁾ 등이 表面크랙傳播速度에 대하여 應力 및 表面크랙길이와의 관계를 다음과 같이 제안한 일반식을 적용하여 보았다.

$$(d\ell/dN) = C\sigma^n \ell^m \quad (4)$$

여기서 $c, n,$ 및 m 은 材料常數이다.

먼저 表面크랙傳播速度와 表面크랙길이의 관계를 살펴보면 ($d\ell/dN$)과 (ℓ)이 比例關係이므로 식(4)의 指數 $m=1$ 이다. 다음에 表面크랙傳播速度와 應力과의 관계를 살펴보면 식(2)에서 나타난바와같이 表面크랙길이와 壽命比의 관계는 應力의 大小에 무관하므로 ($d\ell/dN$)과 (ℓ)이 比例關係로 나타나는 구간중에서 表面크랙길이가 임의의 크기에 도달했을때 表面크랙傳播速度에 미치는 應力依存性を 검토하였다.

Fig. 7은 表面크랙길이가 약 1.6mm 傳播한 경우에서 應力과 表面크랙傳播速度와의 관계를 나타낸 것이고 이것을 微小圓孔을 갖는 鋼 및 黃銅材와 비교⁽⁸⁾하여 도시한 것이다.

本 實驗結果 Fig. 7에서 나타난 應力과 表面크랙傳播速度에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\log(\sigma) = 2.465 + 0.22\log(d\ell/dN) \quad (5)$$

한편 식(5)에서 表面크랙 傳播速度에 대한 應力の 指數(n)을 구하고 또한 表面크랙길이에 대한 指數(m)는 1이므로 이들관계를 모두 고려하여 식(4)의 형태로 정리하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$(d\ell/dN) = (3.94 \times 10^{-12}) \sigma^{4.54} \ell \quad (6)$$

本 實驗結果 應力에 관한 指數(n)는 4.54를 나타내고 있다. 한편 n 값은 板材의 경우에서 Frost⁽¹³⁾ 등은 3으로 Christensen⁽¹²⁾ 등은 $2 \leq n \leq 4$ 의 범위에서 나타난다고 하였고 西谷⁽⁸⁾ 등은 同一한 微小圓孔 노치 丸棒材에서도 담금질한 鋼材는 3인 반면 풀림 처리한 鋼材 및 黃銅材는 7~8의 범위를 갖는다고

한 結果를 살펴보면 n 값은 응력방식, 시험편노치 모양 및 材質등과 관계가 있고 $2 \leq n \leq 8$ 의 범위에서 매우 다양하게 나타나고 있으며 本 實驗과 같이 深孔노치를 갖는 경우의 n 값도 이들 범위에 있음을 알 수 있다.

3.2 作用應力の 大小와 內部크랙傳播舉動

本 節에서는 作用應力の 大小에 의한 內部크랙傳播舉動을 조사하였다.

Fig. 8은 各 作用應力에서 反復數의 증가에 대한 內部크랙 길이를 Fig. 4의 表面크랙길이의 結果와 함께 도시한 것이다. 이때 應力の 작은 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 의 경우 크랙傳播初期段階에서는 同一反復數에 대하여 表面크랙길이가 內部크랙길이가 큰 차이가 없는 반면 應力이 큰 $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$ 및 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$ 에서는 內部크랙길이가 表面크랙길이에 비하여 많이 傳播된 것을 알수있다. 그러나 反復數의 증가와 더불어 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 인 경우 表面크랙이 內部크랙에 비하여 큰 상태로 증가하는 반면 $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$ 와 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$ 에서는 表面크랙길이가 內部크랙길이의 차이는 점차적으론 감소하는 樣相을 보이고 있다.

한편 이들관계를 檢討하기 위하여 內部 크랙길이의 壽命比와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 이때 Fig. 5에서 검토한 表面크랙의 경우와는 달리 內部크랙의 경우는 內部크랙길이의 壽命比와의 관계가 應力の 大小에 따라 各 各 기울기가 다른 比例關係式을 나타낸다. 따라서 이들의 관계를 식(1)의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma=50\text{kgf/mm}^2\text{에서} \\ \log(h) &= 0.16 + 0.86(N/N_f) \\ \sigma=35\text{kgf/mm}^2\text{에서} \\ \log(h) &= 0.02 + 0.93(N/N_f) \\ \sigma=20\text{kgf/mm}^2\text{에서} \\ \log(h) &= -0.29 + 1.24(N/N_f) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

한편 Fig. 10은 作用應力の 大小와 內部크랙길이 및 內部크랙 傳播速度의 관계를 Fig. 6의 表面크랙 傳播速度의 結果와 함께 도시한 것이다. 이때 應力이 작은 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 에서는 表面 및 內部크랙 傳播速度가 크랙길이(l, h)의 증가와 더불어 점차 상승하는 樣相을 나타내고 있으나 應力이 큰 $\sigma=35\text{kgf/mm}^2$ 및 $\sigma=50\text{kgf/mm}^2$ 의 경우 表面크랙 傳播速度는 表面크랙길이의 증가와 더불어 상승하는 반면 內部크랙 傳播速度는 內部크랙길이의 증가와

함께 점차적으론 감소하는 상반된 경향을 보이고 있다. 以上の 結果에서 深孔노치를 갖는 試驗片의 경우 作用應力の 大小에 따라 同一反復數에서 傳播한 表面 및 內部크랙길이의 상이함과 함께 同一壽命化에 대한 表面 및 內部크랙길이의 관계식이 서로 달리 나타나는 원인은 作用應力の 大小에 따라 表面과 內部로 향하는 크랙傳播速度의 차이와 밀접한 관계가 있다고 생각된다. 그러나 크랙의 成長과 함께 크랙傳播速度는 증가하는 대부분의 연구결과에 대하여 作用應力이 크면 內部크랙傳播速度가 감소하는 경향이 나타나는 점에 대해서는 계속적인 검토가 요망된다.

3.3 作用應力の 大小와 크랙面特性

本 節에서는 作用應力の 大小에 의한 크랙面の 變化特性을 조사하였다.

Fig. 11은 應力の 大小에 따라 傳播한 表面 및 內部크랙길이의 관계를 나타낸 것이다. 이때 이들 크랙의 관계는 $h = A_1 l^{B_1}$ 의 식의 형태로 나타낼 수

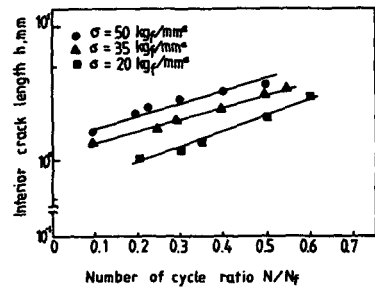


Fig. 9 Relation between interior crack length and number of cycle ratio

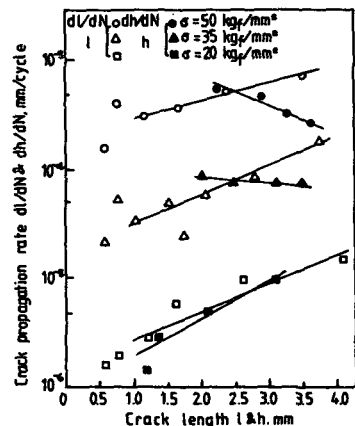


Fig. 10 Relation between crack propagation rate and crack length

있으며 여기서 A_1 및 B_1 의 應力의 大小에 따라 주어지는 材料常數이다.

本 實驗結果 얻어진 이들의 關係식을 정리하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma = 50 \text{ kgf/mm}^2 \text{에서 } h &= 2.044 \ell^{0.538} \\ \sigma = 35 \text{ kgf/mm}^2 \text{에서 } h &= 1.577 \ell^{0.611} \\ \sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2 \text{에서 } h &= 1.149 \ell^{0.658} \end{aligned} \right\} (8)$$

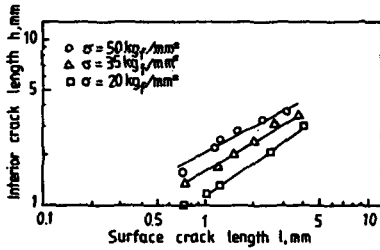


Fig. 11 Relation between interior crack length and surface crack length

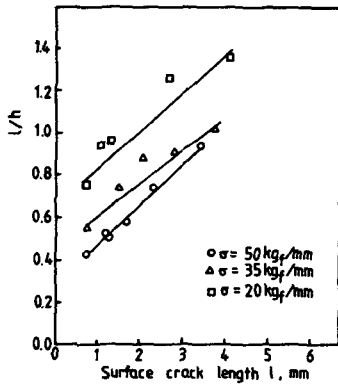


Fig. 12 Ratio of surface & interior crack length (l/h) VS. surface crack length

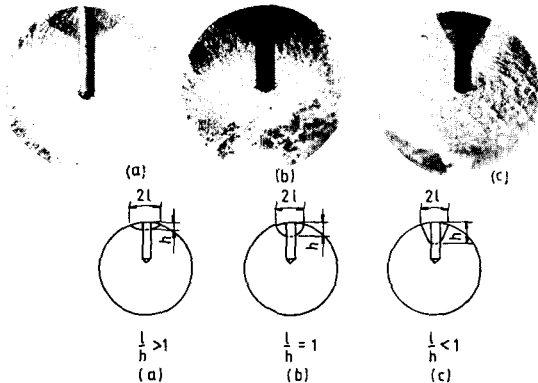


Fig. 13 Photographics and schematic shapes of cracked surface

한편, 이들 表面 및 内部크랙을 크랙面形狀의 관점에서 검토하기 위하여 크랙面形狀比(l/h)와 表面크랙길이(l)와의 關係를 나타낸 것이 Fig. 12이다. 여기서 $l/h=1$ 인 半圓形크랙面을 基準으로 하면 應力이 큰 $\sigma=35 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma=50 \text{ kgf/mm}^2$ 의 경우 크랙傳播初期段階에서 나타난 크랙面은 内部크랙길이를 長半徑으로 하는 半橢圓形($l/h < 1$)이고 점차 크랙이 成長하면서 破斷點에 이르러서야 半圓形 크랙面에 가까워지는 樣相을 갖는다. 그러나 應力이 낮은 $\sigma=20 \text{ kgf/mm}^2$ 경우 初期段階에서의 크랙面은 ($l/h < 1$)이지만 크랙이 成長하여 表面크랙길이가 거의 1mm 정도 傳播하면 ($l/h=1$)이 되고 그 이후에는 表面크랙길이를 長半徑으로 하는 半橢圓形 크랙面 ($l/h > 1$)形狀을 갖는다.

한편 Fig. 13은 應力의 大小에 따라 나타난 크랙面 사진의 일예와 함께 本 試驗片과 같이 深孔노치를 갖는 경우 나타날 수 있는 크랙面을 크랙面形狀比(l/h)의 因子로서 표시한 3가지 형태의 모식도이다.

以上の 結果에서 나타난 作用應力의 大小에 의한 3형태의 크랙面變化는 試驗片의 形狀條件에서 주어진 圓孔의 크기(d) 및 깊이(h)에 의한 영향과는 어떠한 關係가 있는가에 대하여 우선 圓孔에서의 應力集中問題를 검토하였다.

千々岩健兒⁽¹⁴⁾ 및 廉⁽¹⁵⁾ 등은 回轉굽힘應力下에서 圓孔의 깊이(h)가 圓孔의 지름(d)과 비교하여 $h_1 \geq 1.5d_1$ 인 경우에는 貫通材의 疲勞強度와 같다고 하였다. 따라서 本 試驗片은 貫通材의 경우와 같이 고려할 수 있다. 한편 Fig. 14는 試驗片 지름

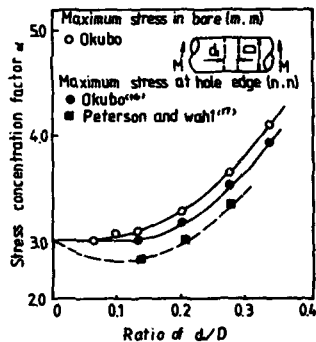
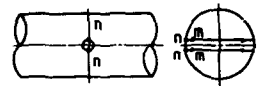


Fig. 14 Stress concentration factors for shafts with transverse holes, subject to bending

(D)과 圓孔의 지름(d_1)의 관계에 의한 應力集中을 고려하기 위하여 Okubo⁽¹⁶⁾ Peterson⁽¹⁷⁾ 등이 제시한 것을 도식한 것이다. 이 때 Okubo⁽¹⁶⁾, 西谷⁽¹⁸⁾ 등은 굽힘모멘트를 받는 丸棒材의 경우(d_1/D)값이 증가할수록 應力集中係數(α)는 증가경향을 보이거나(d_1/D)값이 약 0.06이상 이 되면 圓孔表面先端(n, n)에서의 (α)보다 試驗片의 中心方向으로 약간 內則으로 들어간 圓孔모서리부분(m, m)에서 (α)가 最大가 된다고 하였다.

이상과같은 관점에서 西谷⁽⁸⁾, 吳⁽⁹⁾, 및 徐⁽¹⁰⁾ 등의 (d_1/D) < 0.06인 조건을 갖는 微小圓孔缺陷材의 경우에는 應力의 大小에 무관하게 微小圓孔의 表面先端(n, n)에서 最大應力이 작용하기 때문에 이곳에서 表面 및 內部方向의 크랙이 同時에 發生, 傳播하여 크랙面은 거의 半圓形으로 나타나는 것으로 생각된다.

한편 本 試驗片과 같이 深孔노치($h_1 \geq 1.5d_1$, (d_1/D) ≥ 0.06 의 범위)를 갖는 경우에는 最大應力集中位置가 圓孔內則모서리부분(m, m)에서 나타나기 때문에 表面에서 보다 먼저(m, m)위치에서 內部크랙이 發生하여 傳播하므로서 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 크랙傳播初期過程에서 內部크랙길이가 表面크랙길이보다 크게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 8 및 Fig. 10에서 보는바와 같이 크랙傳播 初期過程에서도 高應力이 作用하면 低應力이 作用한 경우에 비하여 內部크랙길이가 表面크랙길이에 비해 더욱 크게 나타나는 점과 함께 점차 크랙이 成長하면서 表面크랙傳播速度는 증가하는 반면 內部크랙傳播速度는 점차적으로 감소하는 양상에 의해 이들 크랙간격이 줄어드는 것은 深孔노치材의 기하학적 모양과 관련된 應力集中位置(m, m)에 의한 최초의 크랙發生位置가 高應力이 작용하면 低應力이 作用하는 경우보다 內部 깊숙히 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 이들 크랙發生位置에 대한 정확한 값은 전자 현미경에 의한 破面 관찰을 통해 보다 정량적인 검토가 요망된다.

以上과 같이 本 實驗結果 나타난 크랙面形狀變化와 크랙傳播舉動은 深孔노치 모양에 따른 最大應力集中位置의 관점에서 고려하였지만 이밖의 검토 因子로서 다음을 생각할 수 있다. 즉 本 實驗의 경우처럼 回轉굽힘應力을 받는 경우 중립면에서의 應力은 0이 되고 表面에서 最大引張 및 最大壓縮應力이 作用하는 응력구배현상이 나타나고 이때 作用應力이 큰 35kgf/mm²와 50kgf/mm²인 경우는 應力이

작은 20kgf/mm²에 비해 圓孔에서 應力集中에 의해 圓孔內測面의 상단부분이 塑性變形이 될 가능성에 의해 크랙面의 形狀變化가 예상되고 또한 크랙傳播速度와 밀접한 관계를 갖는 應力強度係數幅은 크랙面形狀變化에 따라 表面과 內部에서 달라 나타나기 때문에 表面과 內部에서의 크랙傳播速度의 상이함이 나타날 수 있을것으로도 예측이 되며 앞으로 이들 因子에 대해서도 좀더 자세한 검토가 요망된다.

4. 結 論

本 研究는 深孔 非貫通노치를 갖는 低炭素鋼材(SM22C)에 대하여 回轉굽힘應力下에서 作用應力의 大小에 의한 表面 및 內部크랙傳播舉動을 조사하고 이들 크랙이 傳播할때 나타나는 크랙面形狀變化를 검토하였다. 얻어진 結果를 요약하면 다음과 같다.

(1) 크랙길이의와 壽命比의 관계는 $(N/N_i) = 0.1 \sim 0.6$ 구간에서 다음식으로 정리된다.

$$\log[\text{크랙길이}] = A + B[\text{壽命比}]$$

材料常數 A, B 의 값은 表面크랙길이의 경우에는 應力의 大小에 무관하게 일정하나 內部크랙길이의 경우에는 應力의 크기에 따라 변화한다.

(2) 表面크랙傳播速度는 作用應力의 크기와 表面크랙길이에 依存하고 이들의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$(dl/dN) = (3.94 \times 10^{-12}) \sigma^{4.54} l$$

(3) 內部크랙傳播速度는 應力이 작은경우 內部크랙의 成長과 함께 상승하는 경향을 보이거나 應力이 클수록 점차 감소하는 경향을 갖는다.

(4) 크랙面形狀은 應力의 크기에 依存하고 應力이 클수록 內部크랙길이를 長半徑으로 하는 半橢圓形으로 應力이 작을수록 表面크랙길이를 長半徑으로 하는 半橢圓形으로 나타난다.

參 考 文 獻

- (1) 宋森弘外, 1970, “高強度鋼의 シクロ領域における 疲勞き製發生成長過程”, 日本機械學會論文集, 第40卷, 第34號, pp. 1503~1510.
- (2) K. Nakasa, 1977, “The Effect of Repeating Load on the Crack Growth Initiation and Crack Propagation in Delayed Failure”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, pp. 867~877.

- (3) R. Koterazawa, 1973, "Fractographic Study of Fatigue Crack Propagation", Transaction of the ASTM, pp. 202~211.
- (4) 北川英夫外, 1979, "フラクトグラフィ", 培風館, 東京, pp. 79~123.
- (5) L. H. Burck, 1977, "Fatigue Growth of Surface Cracks in Bending", Eng. Fracture Mech., Vol. 9, pp. 389~395.
- (6) 宋智浩 外, 1978, "Notch材 疲労와 Kikukawa-Compliance 法", 大韓機械學會論文集, 第2卷, 第1號, pp. 10~28.
- (7) 萩原芳彦外, 1974, "疲れき裂進展に及ぼす切欠き形状の影響に關する研究", 日本機械學會論文集, 第40卷, 第338號, pp. 2701~2711.
- (8) 西谷弘信, 1976, "小穴付き試験片の回轉曲げ試験によるき裂傳ば特性の評價", 日本機械學會論文集, 第42卷, 第354號, pp. 325~335.
- (9) 吳煥燮, 1985, "表面微小缺陷을 갖는 低炭素鋼材의 疲労크랙 舉動에 關한 研究", 慶熙大學校 大學院, 博士學位論文.
- (10) 서창민, 1984, "炭素鋼材의 작은 表面缺陷에서 成長하는 表面疲労龜裂의 成長特性에 關한 研究", 대한 조선학회지, 제21권, 제1호, pp. 35~42.
- (11) 宋森弘外, 1985, "表面缺陷에서 發生하는 疲労크랙 舉動", 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第2號, pp. 150~157.
- (12) R. H. Christensen et al, 1967, "Limitations of Fatigue-Crack Research in the Design of Flight Vehicle Structures", ASTM. STP. 415, pp. 5~23.
- (13) N. E. Frost et al, 1958, "The Propagation of Fatigue Cracks in Sheet Specimens", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 6, pp. 92~110.
- (14) 千々岩健兒 外, 1966, "普通鑄鋼品の疲れ強さ", 日本機械學會誌, 第69卷, 第572號, pp. 1134~1145.
- (15) 廉永夏 外, 1974, "回轉굽힘을 받는 스프링鋼의 疲労強度와 크랙傳播에 關한 研究(1)", 大韓機械學會誌, 第14卷, 第2號, pp. 149~161.
- (16) H. Okubo, 1956, "Stress Concentration Factors in shafts Containing Transverse Holes and Subjected to Bending", J. Applied Mech., Transactions ASME, Vol. 18, p. 478.
- (17) R.E. Peterson, 1974, "Stress Concentration Factors", John Wiley & Sons, pp. 146, 235.
- (18) 西谷弘信, 1973, "電解研磨した横穴材の回轉曲げ疲れ", 日本機械學會論文集, 第38卷, 第323號, pp. 2005~2011.