

## 2個의 對稱表面龜裂의 龜裂形狀變化 豫測

Prediction of the Crack Aspect Change in Twin Surface Cracks

崔 鎔 湜,\* 金 在 元\*\*

Y. S. Choy, J. W. Kim

Key Words : 表面龜裂 (surface crack), 疲勞 (fatigue), 應力擴大係數 (stress intensity factor), 相互作用係數 (interaction factor), 龜裂形狀變化 (crack aspect change)

### ABSTRACT

An analytical scheme for predicting the crack aspect pattern of materials which contain twin surface cracks was developed. Fatigue tests were performed on twin surface cracked PMMA plate specimens to obtain the interaction factor accounting for the interference effect of adjacent cracks. Here, the interaction factor is defined as the ratio of the stress intensity factor for twin surface cracks to that for a single surface crack. From the analysis of the fatigue test results, the interaction factor was presented as the ninth-order polynomial expression having a function of dimensionless crack spacing ratio. Then the polynomial expression was incorporated into the prediction program of the crack aspect pattern for twin surface cracked materials. And, the interaction effect and the coalescence condition of adjacent cracks were simplified in the newly developed prediction scheme of the crack aspect pattern. The predicted crack growth pattern using the prediction scheme was compared with test data from PMMA specimen. The predicted pattern agreed well with the test data.

### 1. 序 論

單獨表面龜裂에 대한 應力擴大係數는 지금 까지 많은 研究者들에 의하여 體系的으로 研究되어 信憑性이 있는 近似解가 數式化되어 있다.<sup>1)</sup>

그러나, 複數表面龜裂에 대한 應力擴大係數는, Murakami 와 Nisitani<sup>2)</sup>가 體積力法으로 半無限體의 경우에 대하여 解析한 것과 Mi-yoshi, Shiratori, Yoshida 와 Tanabe 등<sup>3)</sup>이 두꺼운 Shell을 利用한 Line Spring 法으로 有限板材의 경우에 대하여 解析한 것 등, 몇

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* 수원전문대 금형설계과

몇 研究者들에 의하여 研究되어 왔으나, 이것들은 圖表形態로만 表示되고 있어서, 實際問題에 適用하기에는 不便하다. 따라서, 複數表面龜裂材의 龜裂形狀變化 및 疲勞壽命을 豫測하기 위하여는, 複數表面龜裂에 대한 應力擴大係數의 數式化된 形態가 必要하다.

Yoshida 와 Yuuki<sup>4)</sup>는 複數表面龜裂材의 龜裂形狀變化를 豫測하는데 있어서, 複數表面龜裂에 대한 應力擴大係數로서는, 2次元貫通龜裂에 대한 隣接한 龜裂의 相互干涉效果가 이미 數式化되어 있기 때문에<sup>5)</sup>, 이 2次元貫通龜裂에 대한 干涉效果를 3次元效果로 補正하여 使用하였다. 그러나, 2次元貫通龜裂의 干涉效果는 3次元表面龜裂의 干涉效果에 비하여 크기 때문에, 相互干涉影響이 過大評價될 수 있다. 따라서, 表面龜裂에 대하여 Yoshida 와 Yuuki 가 使用한 相互作用係數는 그 妥當성에 問題가 된다고 하였다.

本 研究에서는, 먼저 2個의 對稱表面龜裂을 갖는 PMMA 板材를 試驗片材料로 選擇하여 一定振幅 引張-引張形 疲勞試驗을 遂行한後, 表面龜裂이 成長함에 따라 隣接한 兩龜裂의 間隔變化에 의한 干涉舉動을 解析한다. 이 實驗解析에서는, Murakami 와 Nisitani<sup>2)</sup>에 의한 2個의 對稱表面龜裂의 相互干涉影響의 研究結果에 立脚하여, 疲勞龜裂成長舉動을 單純化하여 實驗結果를 解析한後, 表面龜裂의 間隔變化에 따른 龜裂相互間의 干涉效果를 나타내는 相互作用係數를 實際로 利用에 便利하도록 數式化한다.

本 研究者들의 앞서의 研究<sup>6)</sup>인 單獨表面龜裂材에 대한 龜裂形狀變化 豫測 모델에 이 相互作用係數를 適用하여, 2個의 對稱表面龜裂을 갖는 材料의 龜裂形狀變化를 豫測하는 節次를 設定한다. 이 節次에 따라 2個의 對稱表面龜裂을 갖는 PMMA 板材試驗片에 대하여 龜裂形狀變化를 豫測하고, 實驗結果와 比較하여, 그 妥當성을 確認하고자 한다.

## 2. 實 驗

### 2.1 試驗片

試驗片材料로는, 表面龜裂의 깊이方向 龜裂 길이의 직접 測定이 可能한, 透明度가 좋은 PMMA 板材를 使用하였으며, 이 材料의 機械的 性質은 Table 1과 같다.

試驗片의 形狀은, Fig.1에서와 같이 SCT (surface crack tension)形이며, 試驗片의 앞면에는 Fig.2와 같이 自體 製作한 Fly Cutter 를 使用하여 2個의 圓弧形 表面 Notch 를 對稱으로 加工하였다.

試驗片의 릿수는 Table 2의 試驗片 TW 1 과 같이, 2個의 表面龜裂間에 相互干涉舉動을 評價하기 위하여, 兩表面龜裂의 最近點 사이의 初期間隔  $e_0$ 를 初期表面龜裂의 길이  $2a_0$ 의 2倍로 하여 충분히 거리를 두었다.

Table 1 Mechanical properties of PMMA plate.

Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Specific gravity
3.1	290	2-7	1.2

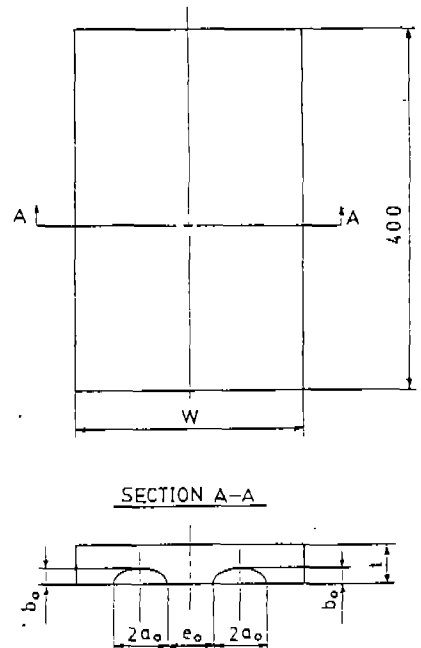


Fig.1 Configuration of specimen.

Table 2 Dimensions of specimen.

Specimen No.	$a_0$ (mm)	$b_0$ (mm)	$W$ (mm)	$t$ (mm)	$e_0$ (mm)	$\frac{b_0}{a_0}$	$\frac{2a_0}{e_0}$	$\frac{b_0}{t}$
TW 1	7.50	2.00	125.00	19.10	30.00	0.267	0.500	0.105
TW 2	8.00	2.42	100.00	15.00	8.00	0.302	2.000	0.161

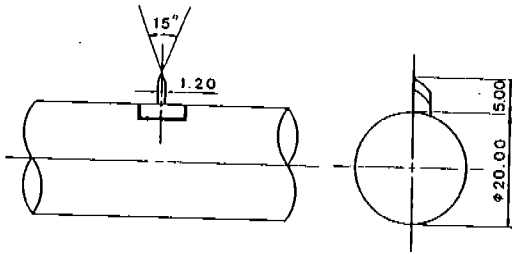


Fig. 2 Detail drawing of a self-made fly cutter.

### 2.2 實驗裝置 및 實驗條件

疲勞試驗用 試驗機로는 25 ton 容량의 Instron Dynamic Test System, Model 1332 를 使用하였다.

試驗片의 裝着에는, 平板用 Grip 을 使用하였고, 荷重條件이 對稱이 되도록 細心한 注意를 하였으며, 室溫(24℃)에서 一定振幅 引張-引張形의 荷重制御方式의 疲勞試驗을 遂行하였다.

荷重의 크기는  $\sigma_{max} < 0.2 \sigma_{YS}$ 의 範圍에서 設定하였으며, 荷重比는  $R = 0.3$ 으로 하였다. 한편, 試驗機는 20 Hz의 正弦波로 作用시켰다.

龜裂길이의 測定은, 綜合倍率 25 倍인 移動式顯微鏡 3대를 利用하여 하였고, 각각 試驗片의 앞면과 양쪽 측면에 設置하여, 2 個의 表面龜裂 각각에 대하여 龜裂 最近點의 成長量, 最近點 反對面 表面點의 成長量과 龜裂 最深點의 成長量을 따로 測定하였다. 이때, 移動式顯微鏡의 移動方向과 測定面과의 平行에 留意하였으며, 測定은 1/100mm의 精密度로 하였다.

### 2.3 豫備實驗

疲勞龜裂은 2 個의 圓弧形인 表面 Notch의

最深點에서 각각 거의 동시에 發生하여 Notch의 先端을 따라 점차 擴散되어 갔고, 이것이 試驗片의 表面點에 到達하기까지에는 상당한 荷重反復數가 所要되었으며, 이동안에 깊이 方向으로의 疲勞龜裂成長이 크게 이루어졌다.

2 個의 疲勞龜裂이 Notch 先端의 全面으로 퍼져서 表面點에 到達하였을 때까지를 Prec-rack 으로 看做하였다. 2 個의 疲勞龜裂이 非對稱成長을 한 試驗片은 試驗片 裝着時 荷重條件의 對稱이 잘못된 것이므로 本實驗用으로 는 除外하였다.

2 個의 疲勞龜裂이 각각 앞면의 自由表面까지 進展된 以後에는 龜裂의 形態를 半橢圓으로 보아도 無妨할 정도로 觀察되었으며, 따라서 이 以後의 解析은 半橢圓表面龜裂에 대한 應力擴大係數의 適用이 可能하다고 하겠다.

本實驗에서도 2 個의 疲勞龜裂이 서로 非對稱成長을 한 試驗片의 Data는 解析 對象에서 除外하였다.

### 3. 實驗結果 解析

2 個의 對稱表面龜裂의 相互干涉舉動을 評價하기 위하여, Murakami와 Nisitani<sup>2)</sup>의 研究結果에 立脚하여 Fig. 3과 같이 表面龜裂의 疲勞成長舉動에 대한 圖式的인 모델을 設定하여 試驗片 TW 1에 대한 疲勞試驗結果 Data를 解析하였다.

2 個의 對稱表面龜裂이 서로 干涉을 하지 않을 정도로 間隔  $e$ 가 충분히 떨어져 있다면, 각각의 表面龜裂은 單獨表面龜裂과 類似하게 成長할 것이다.

Murakami와 Nisitani<sup>2)</sup>의 研究結果에 의하면, 2 個의 對稱表面龜裂이 서로 干涉을 할 정도로 間隔  $e$ 가 가까워지면, 龜裂形狀比  $b/$

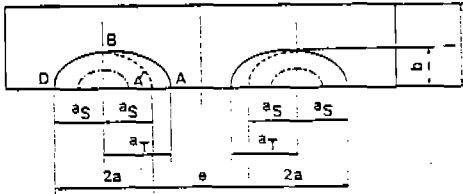


Fig.3 Schematic model for crack growth assumed to obtain interaction factor of twin surface cracks by experiment.

$a$ 가 1.0 보다 작을 때, 2개의 表面龜裂의 最近點  $A'$ 에서의 相互干涉效果는 커지지만, 反對面 表面點  $D$ 와 最深點  $B$ 에서의 相互干涉效果는 無視할 수 있을 정도로 작다. 따라서, 2개의 對稱表面龜裂이 충분히 가까와서 相互干涉을 하며 成長하여도, 表面點  $D$ 와 最深點  $B$ 에서의 相互干涉舉動을 無視하면 이 點들에서의 疲勞龜裂成長舉動은 單獨表面龜裂의 경우에서와 같다고 볼 수 있다. 다만, 最近點  $A'$ 에서만은 相互干涉效果에 의하여 疲勞龜裂成長舉動이 달라질 것이다. 결국, 임의의 疲勞龜裂成長 過程에서, 一點鎖線과 같은 半橢圓表面龜裂이 成長하여, 單獨表面龜裂이 龜裂길이  $2a_s$ , 龜裂깊이  $b$ 를 갖는 半橢圓形  $A'BD$ 와 같은 表面龜裂이 될 때, 2개의 對稱表面龜裂의 경우는 相互干涉影響에 의하여 龜裂길이  $(a_T + a_s)$ , 龜裂깊이  $b$ 를 갖는 半橢圓形  $ABD$ 와 같은 表面龜裂이 될 것이다. 즉, 最近點  $A$ 에서는 相互干涉影響에 의하여 單獨表面龜裂의 경우에서보다  $(a_T - a_s)$  만큼 疲勞龜裂成長이 더 커지게 될 것이다. 相互干涉의 影響을 받는 表面龜裂의 先端部分에서, 單獨表面龜裂에 대한 應力擴大係數와 2개의 對稱表面龜裂에 대한 應力擴大係數의 差異가 疲勞龜裂成長速度의 差異로 나타난다고 假定하면, 最近點에서 이와 같은 龜裂成長의 差異가 發生한다고 볼 수 있다.

2개의 對稱表面龜裂의 最近點에서의 相互干涉效果를 나타내는 相互作用係數(Interaction factor)  $r$ 을 單獨表面龜裂의 應力擴大係數에 대한 2개의 對稱表面龜裂의 應力擴大係數의 比로 定義한다. 그러면 여기에서, 單

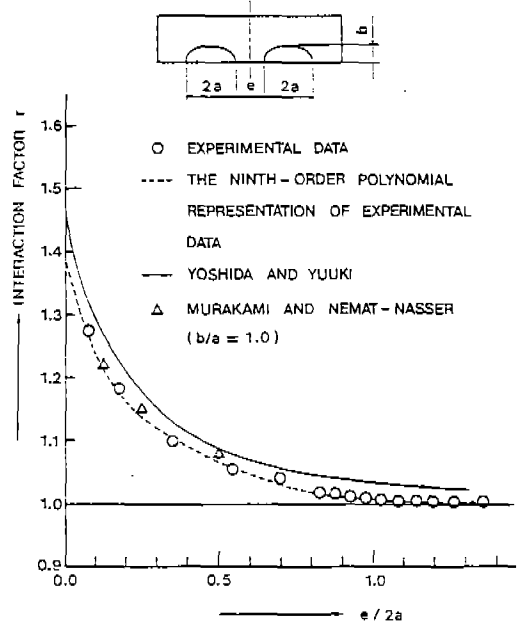


Fig.4 Interaction factor for twin surface cracks.

獨表面龜裂의 應力擴大係數는 龜裂半길이  $a_s$ , 龜裂깊이  $b$ 인 半橢圓形  $A'BD$ 에 대한 點  $A'$ 에서의 應力擴大係數와 같고, 이에 對應하는 疲勞龜裂成長段階에서, 2개의 對稱表面龜裂의 應力擴大係數는 龜裂半길이  $a_T$ , 龜裂깊이  $b$ 인 半橢圓形에 대한 點  $A$ 에서의 應力擴大係數와 같다.

應力擴大係數의 計算式으로서는 Newman-Raju의 式<sup>1)</sup>을 使用하여, 試驗片 TW 1의 實驗結果 Data 들로부터 각각의 疲勞龜裂成長段階에서 相互作用係數  $r$ 을 구하고, 이것을 間隔比  $e/2a$ 와 關係시킨 것이 Fig.4와 같다.

Fig.4에서, 本研究의 實驗解析에 의한 結果는 두 表面龜裂의 間隔比  $e/2a$ 가 1.0인 近方에서부터 相互干涉效果가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 結果는 Murakami와 Nisitani<sup>2)</sup>의 研究結果와 一致하는 傾向을 보여 주고 있다. 즉, 2개의 對稱表面龜裂 사이에, 같은 크기의 龜裂이 들어갈 수 있는 餘裕가 있으면, 龜裂間의 相互干涉影響을 無視하여도 좋다.

한편, Yoshida와 Yuuki<sup>4)</sup>가 2次元 貫通龜裂에 대한 相互干涉效果를 表面龜裂의 3次元 相互干涉效果로 補正하여 使用한 相互作用係數는 實線으로 表示되었다. 여기에서, Yoshida와 Yuuki가 使用한 相互作用係數는 두 表面龜裂의 間隔比  $e/2a$ 가 1.0 보다 큰 경우에서도 相互干涉效果가 過大評價되고 있다.

Murakami와 Nemat-Nasser<sup>7)</sup>는 體積力法으로 龜裂形狀比  $b/a$ 가 1.0인 半圓形의 2개의 對稱表面龜裂이  $e/2a = 0.125, 0.25, 0.5$ 인 경우에 대하여 相互作用係數를 구하였는데, 이 結果도 Fig. 4에 表示하였다.

Murakami와 Nemat-Nasser의 解析結果는 비록 龜裂形狀比  $b/a$ 가 1.0인 半圓形의 表面龜裂에 대한 것일지라도, 本研究의 實驗解析結果와 잘 一致하였다.

Murakami와 Nisitani<sup>2)</sup>의 研究結果에 의하면, 龜裂形狀比  $b/a$ 가 1.0 보다 작은 경우에는 1.0 보다 큰 경우에서보다 두 表面龜裂의 最近點에서의 相互干涉效果가 더 작게 나타나고 있다. 本研究의 實驗結果에서, 圓弧形의 表面 Notch로부터 疲勞龜裂이 成長하여 破斷될 때까지의 龜裂形狀比  $b/a$ 는 1.0 보다 작은 形狀에서 變化하였다. 따라서, 本研究의 實驗解析結果로부터 얻은 2개의 對稱表面龜裂의 最近點에서의 相互干涉效果는 Fig. 4에서 Murakami와 Nemat-Nasser가 얻은 解析結果 보다는 최대한 같거나 작게 나타나야 한다.

이러한 解析結果의 考察로부터, 本研究의 實驗解析結果로부터 얻은 相互作用係數는 Yoshida와 Yuuki<sup>4)</sup>가 使用한 相互作用係數보다 더 精密度가 좋다고 볼 수 있겠다.

本研究의 實驗解析結果로부터 얻은 相互作用係數의 Data를 實際問題에 適用 可能하도록, 最小自乘法를 利用하여 9次 多項式의 形態로 數式化하면 다음과 같다.

$$r = \sum_{i=0}^9 A_i (e/2a)^i \quad (1)$$

여기에서, 각각의 係數들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_0 &= 1.3832, & A_1 &= -1.8446 \\ A_2 &= 5.5479, & A_3 &= -10.1857 \\ A_4 &= 13.5098, & A_5 &= -19.8473 \\ A_6 &= 27.7988, & A_7 &= -24.5945 \\ A_8 &= 11.3212, & A_9 &= -2.0818 \end{aligned}$$

이 9次 多項式에 따른 相互作用係數의 傾向은 Fig. 4에서 點線으로 表示되었다.

한편, 相互作用係數는 龜裂形狀比  $b/a$ 에 依存하지만, 實際問題에서 表面龜裂의 形狀比  $b/a$ 는 1.0 보다 작은 경우가 大部分이고, 式(1)은 이 範圍에서 얻어졌으므로, 式(1)의 適用限界를  $b/a \leq 1$ 인 範圍로 局限하되,  $b/a \leq 1$ 인 範圍內에서의 相互作用係數의 變化는 無視하기로 한다.

#### 4. 龜裂形狀變化 豫測에 대한 解析의 모델

##### 4.1 單獨表面龜裂材의 龜裂形狀變化 豫測 모델

單獨表面龜裂材의 龜裂形狀變化 豫測에 대한 本研究者들의 앞서의 研究結果<sup>6)</sup>로부터 豫測 모델을 參考로 要約하면 다음과 같다.

1) 一般的인 豫測 모델

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{U_a}{U_b} \Delta K_a \right)^m = C (0.91 \Delta K_a)^m \quad (2)$$

$$\frac{db}{dN} = C (\Delta K_b)^m \quad (3)$$

2) 本研究者들이 提議한 豫測 모델

$$\frac{da}{dN} = C (0.91 \Delta K_a)^m \quad (4)$$

$$\frac{db}{dN} = C (\Delta K_b)^m / F_s \quad (5)$$

여기에서, 補正係數  $F_s$ 는

$$F_s = [\pi \sec \{ (\pi a/W) \sqrt{b/t} \}]^{1/2} \quad (6)$$

이다.

#### 4.2 2개의 對稱表面龜裂材의 龜裂形狀變化 豫測 모델

2개의 對稱表面龜裂을 갖는 材料에서, 두 表面龜裂의 最近點에서의 相互作用係數는 單獨表面龜裂의 應力擴大係數에 대한 2개의 對稱表面龜裂의 應力擴大係數의 比로 定義되었다. 그리고, 이 相互作用係數는 本 研究에서 實驗的인 解析方法에 의하여 9次 多項式의 形態로 數式化되었다. 따라서, 2개의 對稱表面龜裂의 最近點에서의 應力擴大係數는 單獨表面龜裂의 應力擴大係數와 相互作用係數의 乘으로 얻어질 수 있다.

이와 같은 關係를 4.1節의 單獨表面龜裂材의 龜裂形狀變化 豫測에 대한 解析的 모델에 適用하면, 相互干涉의 影響下에 있는 2개의 對稱表面龜裂을 갖는 材料에 대한 龜裂形狀變化의 豫測을 할 수 있다.

먼저, 式(2)와 (3)에 相互作用係數를 適用하면 다음과 같다. 여기에서부터 添字 A는 두 表面龜裂의 最近點을 意味하고, 添字 B는 最深點, 添字 D는 最近點 反對便의 表面點을 意味한다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dN}\right)_A &= C \{0.91(\Delta K_a)_A\}^m \\ &= C(0.91 r \Delta K_a)^m \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dN}\right)_D &= C \{0.91(\Delta K_a)_D\}^m \\ &= C(0.91 \Delta K_a)^m \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{db}{dN} &= C \{(\Delta K_b)_B\}^m \\ &= C(\Delta K_b)^m \end{aligned} \quad (9)$$

다음, 本 研究者들이 修正, 提案한 式(4)와 (5)에 相互作用係數를 適用하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dN}\right)_A &= C \{0.91(\Delta K_a)_A\}^m \\ &= C(0.91 r \Delta K_a)^m \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dN}\right)_D &= C \{0.91(\Delta K_a)_D\}^m \\ &= C(0.91 \Delta K_a)^m \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{db}{dN} &= C \{(\Delta K_b)_B\}^m / F_s \\ &= C(\Delta K_b)^m / F_s \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서,  $(\Delta K_a)_A$ ,  $(\Delta K_a)_D$ ,  $(\Delta K_b)_B$ 는 2개의 對稱表面龜裂에 대한 點A, 點D, 點B에서의 각각의 應力擴大係數 變動幅이다. 그리고,  $\Delta K_a$ 와  $\Delta K_b$ 는 單獨表面龜裂의 表面點과 最深點에서의 應力擴大係數 變動幅이다. 相互作用係數  $r$ 은 式(1)을 使用하며, 補正係數  $F_s$ 는 式(6)을 使用한다.

#### 5. 龜裂形狀變化 豫測節次

2개의 對稱表面龜裂을 갖는 材料에 대한 龜裂形狀變化의 豫測은 다음과 같은 節次에 의하여 遂行되었다.

(1) 龜裂의 크기(龜裂길이  $2a$ , 龜裂깊이  $b$ )와 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 를 測定한다.

(2) 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 와 龜裂길이  $2a$ 를 比較한다.

##### 5.1 龜裂相互干涉影響이 없을 때의 疲勞 龜裂成長舉動 豫測

(3) 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 가 龜裂길이  $2a$ 보다 클 때, 龜裂間의 干涉效果는 無視할 수 있을 정도로 작다. 따라서, 이때는 單獨表面龜裂에 대한 豫測節次<sup>6)</sup>에 따라 遂行한다. 그리고, 새로운 形狀의 表面龜裂이 얻어질 때마다, 龜裂 最近點 사이의 間隔은 減少되고, 그 減少길이는  $2\Delta a$ 만큼이므로 前段階의 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 에서  $2\Delta a$ 를 빼면, 現段階에서의 龜裂 最近點 사이의 間隔을 얻을 수 있다. 그리고, 다시 現段階의 龜裂 最近點 사이의 間隔과 새로운 形狀의 表面龜裂의 길이를 比較하면서 위의 節次를 反復 遂行한다.

## 5.2 龜裂相互干涉影響에 의한 疲勞龜裂成長 豫測

(4) 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 가 龜裂길이  $2a$ 보다 작거나 같을 때, 龜裂間의 相互干涉效果는 龜裂의 最近點에서 나타나기 시작하므로 다음 節次에 따라 遂行한다.

(5) 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 가 0보다 큰 陽(+)<sup>1)</sup>의 값인지를 判別한다. 만일 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 가 0보다 큰 陽(+)<sup>1)</sup>의 값이면, 두 表面龜裂의 最近點끼리는 아직 接觸하지 않은 狀態이기 때문에 相互干涉을 하면서 成長하게 되므로, 다음 節次에 따라 遂行한다.

① 表面龜裂의 寸수  $a, b$ , 材料의 形狀寸수인 幅  $W$ , 두께  $t$ , 材料가 받는 最大應力  $\sigma_{max}$  등의 情報와 應力擴大係數의 式<sup>1)</sup>, 相互作用係數의 式(1)을 利用하여, 龜裂先端에서의 應力擴大係數의 最大值  $K_{max}$ 을 決定한다. 이때, 表面龜裂의 最近點에서의 應力擴大係數는, 單獨表面龜裂의 表面點에서의 應力擴大係數를 구한 後, 이 結果值에 相互作用係數를 곱하면 얻어진다. 따라서, 여기에서 얻은 表面龜裂의 最近點에서의 應力擴大係數와 最深點에서의 應力擴大係數를 比較하여, 큰 쪽의 값을 最大值  $K_{max}$ 으로 決定한다.

② 決定된 應力擴大係數의 最大值  $K_{max}$ 을 材料의 破壞靱性值  $K_{IC}$ 와 比較한다.  $K_{max}$ 이  $K_{IC}$ 보다 클 경우에는, 不安定 破壞가 일어날 것이므로, 이때 豫測節次는 完了된다.  $K_{max}$ 이  $K_{IC}$ 보다 작을 경우에는, 龜裂이 安定한 成長을 할 것이므로, 豫測節次를 계속 遂行한다.

③ 龜裂깊이比  $b/t$ 를 1.0과 比較한다. 龜裂깊이比  $b/t$ 가 1.0에 到達하게 되면, 表面龜裂은 材料의 두께를 貫通하여, 2次元 貫通龜裂로의 遷移成長을 일으키게 되므로, 더 이상 表面龜裂에 대한 解析節次를 適用할 수 없으며, 本 研究 對象밖의 問題이므로 豫測節次를 完了시킨다. 龜裂깊이比  $b/t$ 가 1.0보다 작을 경우에는 表面龜裂은 아직 材料의 두께를 貫通하지 않은 때이므로, 豫測節次를 繼

續 遂行한다.

④ 表面龜裂의 寸수  $a, b$ , 材料의 形狀寸수  $W, t$ , 材料가 받는 最大應力  $\sigma_{max}$  과 最小應力  $\sigma_{min}$  등의 情報와 應力擴大係數의 式<sup>1)</sup>, 相互作用係數의 式(1)을 利用하여, 表面龜裂의 最近點에서와 그 反對便의 表面點, 그리고 最深點에서의 應力擴大係數 變動幅  $(\Delta K_a)_A, (\Delta K_a)_D, (\Delta K_b)_B$ 를 計算한다. 여기에서, 두 表面龜裂의 最近點 反對便의 表面點과 最深點에서의 相互干涉效果를 無視하면,  $(\Delta K_a)_D$ 는 單獨表面龜裂의 表面點에서의 應力擴大係數 變動幅  $\Delta K_a$ 와 같고,  $(\Delta K_b)_B$ 는 單獨表面龜裂의 最深點에서의 應力擴大係數 變動幅  $\Delta K_b$ 와 같다. 한편, 두 表面龜裂의 最近點에서의 應力擴大係數 變動幅  $(\Delta K_a)_A$ 는 單獨表面龜裂의 表面點에서의 應力擴大係數 變動幅  $\Delta K_a$ 에 相互作用係數  $r$ 을 곱한 結果와 같다.

⑤ 龜裂 最深點에서의 微小成長  $\Delta b$ 를 決定한다. 本 研究에서는  $\Delta b$ 를  $t/500$ 으로 決定하였다.<sup>9)</sup>

⑥ 앞에서 計算된  $(\Delta K_b)_B$ 와 決定된  $\Delta b$ 를 利用하여 式(9)나 式(12)로부터 龜裂 最深點에서의 微小成長  $\Delta b$ 에 對應하는 荷重反復數  $\Delta N$ 을 計算한다.

⑦ 앞에서 計算된  $(\Delta K_a)_A, (\Delta K_a)_D$ 와  $\Delta N$ 을 利用하여 式(7)과 (8)이나 式(10)과 (11)로부터 龜裂 最近點과 反對便 表面點에서의 微小成長  $(\Delta a)_A, (\Delta a)_D$ 를 計算한다.

⑧ 計算된  $(\Delta a)_A, (\Delta a)_D$ 로부터,  $[(\Delta a)_A + (\Delta a)_D]/2$ 를 計算하여 前段階의 龜裂크기  $a$ 에 더하고, 決定된  $\Delta b$ 를 前段階의 龜裂크기  $b$ 에 더하면 새로운 表面龜裂의 形狀을 얻을 수 있다. 새로운 形狀의 表面龜裂이 얻어 짐으로써, 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 는 減少되고, 그 減少길이는  $2(\Delta a)_A$ 만큼이므로, 前段階의 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 에서  $2(\Delta a)_A$ 를 빼면, 現段階에서의 龜裂 最近點 사이의 間隔을 얻을 수 있다. 그리고, 다시 現段階의 龜裂 最近點 사이의 間隔을 0과 比較하면서, 위의 節次를 反復 遂行한다.

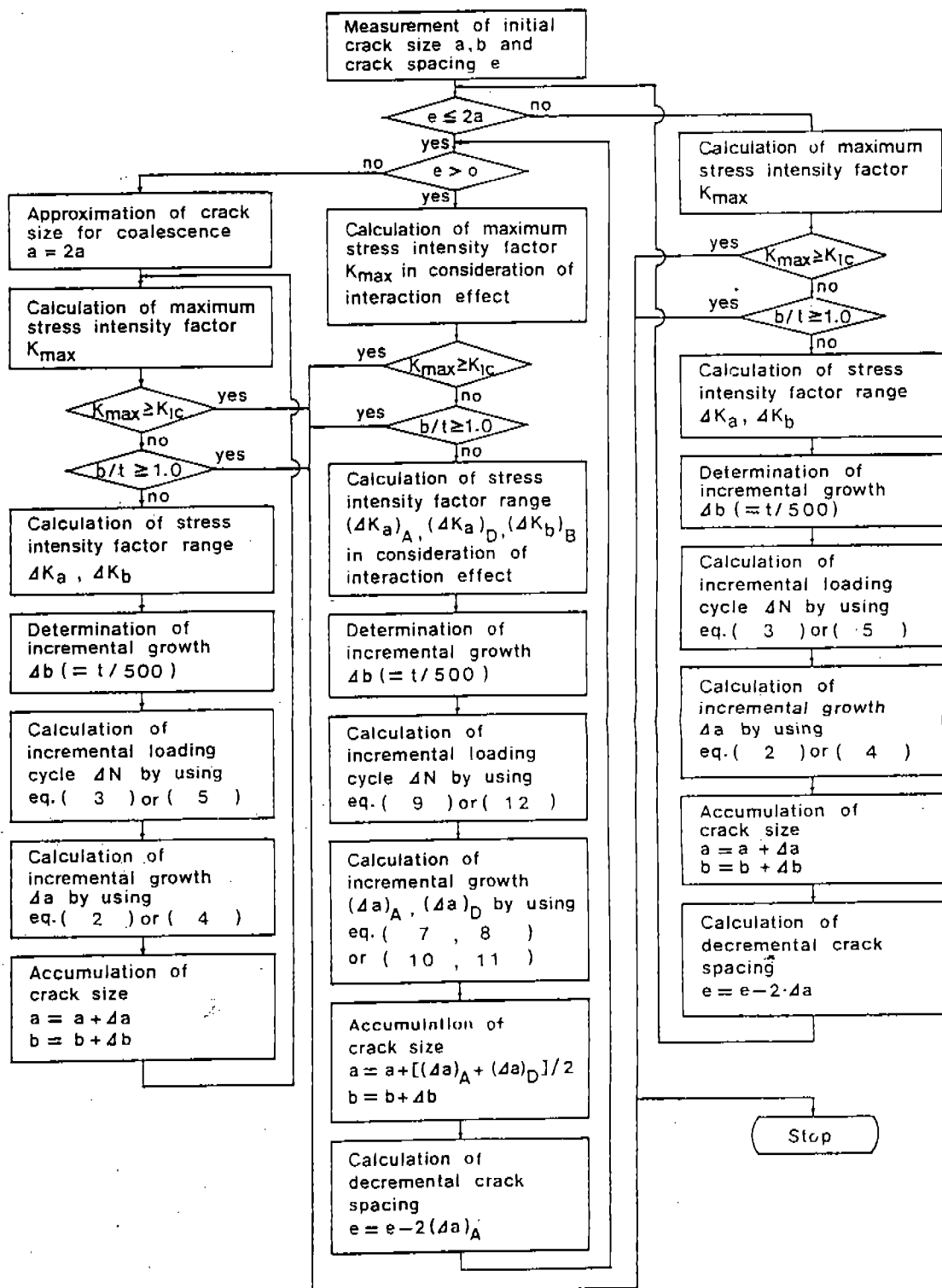


Fig.5 Flow chart of prediction procedure for crack aspect change (Twin surface cracked specimen).



5.3 龜裂 合體 後의 疲勞龜裂成長舉動 豫測

(6) 龜裂 最近點 사이의 間隔  $e$ 가 같거나 陰 (-)의 값이면, 두 表面龜裂의 最近點은 서로 接觸한 狀態가 된다. 이때부터 두 表面龜裂은 合體가 되어, 하나의 近似 半橢圓表面龜裂이 될 때까지 遷移成長舉動을 일으키게 된다. 그런데, 이 遷移成長舉動은 瞬息間에 일어나기 때문에, 遷移成長壽命은 表面龜裂材의 全體의 疲勞壽命과 比較하면, 無視할 수 있을 정도로 작다.<sup>9)</sup> 따라서, 두 表面龜裂의 最近點이 서로 接觸한 瞬間부터는 하나의 半橢圓表面龜裂로 近似하여 생각하여도 無妨하다.

두 表面龜裂의 最近點이 서로 接觸한 瞬間부터, 龜裂깊이는 接觸한 瞬間의 龜裂깊이와 같고, 龜裂길이는 두 表面龜裂의 長이를 더한 것과 같은 하나의 近似 半橢圓表面龜裂로 考慮하면, 이 以後의 豫測節次는 單獨表面龜裂의 豫測節次<sup>6)</sup>와 같은 方法으로 遂行된다.

이상과 같은 2개의 對稱表面龜裂에 대한 龜裂形狀變化의 豫測節次를 要約하면 Fig. 5의 흐름圖와 같다.

6. 解析結果 및 考察

Table 1의 TW2 試驗片으로 疲勞試驗을 遂行하여, 2개의 對稱表面龜裂의 形狀變化 豫測에 대한 解析的 모델의 有効性を 調査하였다.

試驗片 TW2의 疲勞試驗에서, 實驗條件은 試驗片 TW1의 경우와 같게 하였다.

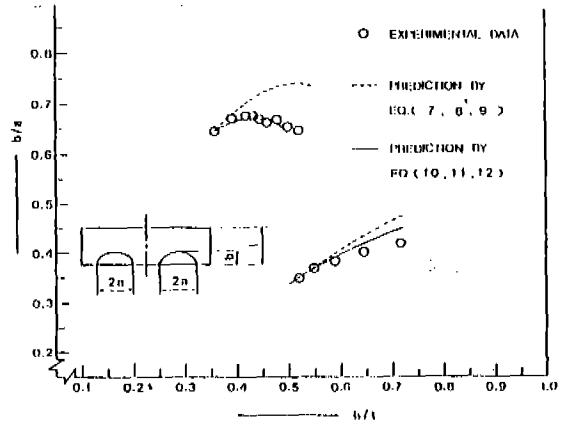


Fig. 6  $b/a - b/t$  relations for twin surface cracks (Specimen No. TW 2).

Table 3 A summary of the comparison between the experimental data and the predicted data for aspect change of twin surface cracks (Specimen No. TW 2).

$(b/a)_p$  : Predicted data

$(b/a)_E$  : Experimental data

$n$  : Number of data points

$s$  : Standard deviation

$$s = \left\{ \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \{ (b/a)_{p,i} - (b/a)_{E,i} \}^2 \right\}^{1/2}$$

s			
Before coalescence		After coalescence	
Prediction by eq. (7, 8, 9)	Prediction by eq. (10, 11, 12)	Prediction by eq. (7, 8, 9)	Prediction by eq. (10, 11, 12)
0.054	0.008	0.036	0.021

앞節에서 記述한 龜裂形狀變化 豫測節次에 따라서, 試驗片 TW2의 表面龜裂形狀變化를 豫測하였으며, 그 豫測結果는 Fig. 6에서 實驗結果와 比較된다. Fig. 6에서 龜裂形狀比  $b/a$ 가 0.6~0.8의 範圍에 있는 Data들은 두 表面龜裂이 合體하기 直前까지의 相互干涉影響에 의한 龜裂形狀變化舉動을 나타내며,  $b/a$ 가 0.3~0.5의 範圍에 있는 Data들은 두 表面龜裂이 合體한 直後부터 單獨表面龜裂로 成長하여 가는 龜裂形狀變化의 舉動을 나타낸다. 여기에서, 式(7)~(9)에 따라 豫測된 龜裂形狀變化는 實驗結果보다 過大評價되고 있다. 그러나, 本 研究者들이 提案한 補正係數  $F_s$ 를 適用한 式(10)~(12)에 따라 豫測된 龜裂形狀變化는 實驗結果와 잘 一致하고 있다. 또한 Fig. 6에서, 式(7)~(9)에 의하여 豫測된 結果는 實驗結果보다  $b/t$ 가 조금 작은 數値에서 合體가 發生하였다.

한편, 式(7)~(9)와 式(10)~(12)에 의한 龜裂形狀變化의 豫測値와 實驗値와의 定量的인 比較를 위하여, 龜裂이 成長하여 合體되기 直前까지, 그리고 合體된 直後부터 破壞될 때까지를 區分하여 龜裂形狀比  $b/a$ 에 대한 豫測値와 實驗値의 差異를 考慮하여 標準偏差를 구하였으며, Table 3에 이것을 나타냈다. 單獨表面龜裂의 경우<sup>6)</sup>와 比較하여 보면, 모든 경우에 매우 精密度가 좋은 것으로 나타났으며, 특히 式(10)~(12)에 의한 豫測結果는 合體되기 直前까지에서 극히 優秀한 것으로 나타났다.

## 7. 結 論

以上과 같이, 2개의 對稱表面龜裂을 갖는 材料에 대한 疲勞試驗 解析結果와 龜裂形狀變化 豫測結果의 考察을 통하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 2개의 對稱表面龜裂을 갖는 材料에 대하여, 表面龜裂의 疲勞龜裂 成長舉動을 適切하게 單純化시켜서, 두 表面龜裂間에 相互干涉效果가 있는 最近點에서의 相互作用係數를 實驗的인 解析方法에 의하여 구하였으며, 이

相互作用係數의 妥當性이 立證되었다.

(2) 2개의 對稱表面龜裂의 形狀變化 豫測節次過程에서, 두 表面의 相互干涉效果和 合體條件 등이 單純化되어 適用되었으며, 이러한 單純한 假定에 의하여도 비교적 精密度 좋게 龜裂의 形狀變化가 豫測되었다.

(3) 單獨表面龜裂의 形狀變化 豫測에서, 낮은 應力水準, 즉  $\sigma_{max} < 0.2 \sigma_{YS}$ 의 範圍에서 龜裂形狀變化를 精密度 좋게 豫測하기 위하여 導入된 補正係數  $F_s$ 의 有効性이, 2개의 對稱表面龜裂의 形狀變化 豫測에서도 立證되었다.

## 參 考 文 獻

1. J.C. Newman, Jr. and I.S. Raju, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engng. Frac. Mech.; Vol. 15, No. 1-2, pp. 185-192, 1981.
2. Y. Murakami and H. Nisitani, "Stress Intensity Factors for Interacting Two Equal Semi-Elliptical Surface Cracks in Tension", JSME, Ser. A, Vol. 47, No. 415, pp. 295-303, 1981.
3. T. Miyoshi, M. Shiratori, Y. Yoshida and O. Tanabe, "Study on Stress Intensity Factors of Closely Located or Partly Overlapped Twin Surface Cracks", JSME, Ser. A, Vol. 50, No. 451, pp. 477-482, 1984.
4. R. Yuuki and T. Yoshida, "Fatigue Life Prediction System for Structures", JHPI, Vol. 24, No. 3, 1986.
5. M. Isida, "Elastic Analysis of Cracks and Stress Intensity Factors", Fracture Mechanics and Strength of Materials 2, Baifukan, pp. 181-184, 1976.
6. 崔鎔混, 梁源鎬, 金永鎮, 金在元, "表面龜裂의 疲勞成長舉動研究—引張反復荷重下에서의 龜裂形狀比 豫測—", 韓國自動車工學會誌, 第12卷, 第2號, pp. 43~50, 1990.

7. Y. Murakami and S. Nemat-Nasser, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws Under Tension and Bending", Engng. Frac. Mech., Vol. 16, No. 3, pp. 373-386, 1982.
8. M.A. Mahmoud, "Quantitative Prediction of Growth Patterns of Surface Fatigue Cracks in Tension Plates", Engng. Frac. Mech., Vol. 30, No. 6, pp. 735-746, 1988.
9. 崔鎔湜, 金在元, "對稱二重表面缺陷의 疲勞龜裂成長舉動에 對한 研究", 成均館大學校 論文集, 科學技術編, 第39輯, No. 1, pp. 85~91, 1988.