

〈論 文〉

## 疲勞크랙 進展過程에서의 크랙열림점 評價에 관한 研究(Ⅱ)

—數值計算에 의한 크랙열림비의 影響度 評價—

崔乘起\* · 尹漢鏞\*\* · 朴昌彥\*\* · 丁太權\*\*\*

(1990年 12月 8日 接受)

### A Study on Evaluation of Crack Opening Point in Fatigue Crack Propagation Course(Ⅱ)

—Parameter Sensitivity Study of Crack Opening Ratio by Using Numerical Calculation—

Byung-Ky Choi, Han-Yong Yoon, Chang-Eun Park and Tae-Gweon Jeong

**Key Words :** Parameter Sensitivity Study(파라미터 영향도 평가), Crack Opening Ratio(크랙 열림비), Fatigue Crack Propagation life(피로크랙진전수명), Effect of Parameter(파라미터의 영향)

#### Abstract

The fatigue crack propagation rate has so far been measured by the effective stress intensity factor range  $\Delta K_{eff}$ . But no research has been done to study how much the crack opening ratio influences the expectation of the fatigue crack propagation. Therefore, this paper evaluates the influence of the crack opening ratio on the fatigue crack propagation life by using the method of parameter sensitivity study. Summarizing the result ; (1) When the crack opening ratio  $U'$  is high, the effect of  $U'$  gets larger than any other except for the material factor  $m$ . But when  $U'$  is low, the effect is also diminished. Therefore, the selection of the lowest value possible is desirable in the evaluation of life. (2) When the value of the material factor  $m$  is high, the effect of crack opening ratio  $U'$  is increased ; at the same time the effect of the other parameters also increased wholly. The effect of material factor  $m$  itself on life is high, but in case the material factor  $m$  is high, that the effect of each parameter on life get higher is unique. In designing, better attention to the material selection should be drawn. (3) In case the stress ratio  $R$  gets smaller, the effect of crack opening ratio  $U'$  is unchangeable. But the effect of  $R$  itself remarkably decreases, and the effect of material factor  $m$  somewhat decreases.

#### 1. 序 論

\* 正會員, 朝鮮大學校 工科大學 機械工學科  
\*\* 正會員, 木浦大學校 工科大學 機械工學科  
\*\*\* 正會員, 朝鮮大學校 工科大學 機械設計工學科

信賴性 解析手段中 파라미터의 影響度 評價 (parameter sensitivity study)라고 하는 方法이 있어서 各 파라미터가 破壞確率 혹은 壽命 等に 미치

는 影響의 정도를 評價하는데에 이용되고 있다. Shinozuka<sup>(1,2)</sup>는 航空機를 대상으로 해서 파라미터의 影響度를 評價했으며 北川, 久島<sup>(3)</sup>는 壓力容器를 대상으로 해서 影響度를 評價했고 板恒<sup>(4)</sup> 등은 銲接部 缺陷을 대상으로 해서 信賴性 解析의 일환으로 影響度 評價를 했다.

本 論文은 有效應力擴大係數로서 疲勞크랙 進展 壽命을 評價할 時 이용되는 크랙열림比(本 論文에서는 後述하는 最大應力에 對한 크랙 열림應力の 比를 크랙 열림比로 한다)가 進展壽命에 미치는 影響을 評價하기 위한것으로서, 第1報<sup>(5)</sup>에서는 實驗에 依하여 크랙 열림點을 實測한 結果 測定位置에 따라 다른 값을 나타내며 壽命評價時 크랙 先端으로부터 떨어진 곳(크립게이지를 이용한 크랙마우스 등)에서 測定한 크랙 열림點 값을 이용함이 보다 正確함을 밝혔다. 本 第2報에서는 크랙열림比가 壽命評價에 미치는 影響을 上記의 파라미터 影響度 評價手法를 이용하여 評價하고자 한다.

## 2. 解析方法

### 2.1 影響度 指標

破壞確率 혹은 壽命의 分布  $P$ 는 重要한 獨立된 파라미터  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 의 函數로서

$$P = P(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며 1次近似 2次모멘트法을 適用하면,

$$\bar{P} = P(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \quad (2)$$

$$V_p^2 = \sum \alpha_i^2 V_{x_i}^2 \quad (3)$$

처럼  $P$ 의 平均  $\bar{P}$ 와 變動係數(coefficient of variation)  $V_p$ 를 求할 수 있다. 여기서,  $V_{x_i}$ 는 파라미터  $X_i$ 의 變動係數이다. 또,  $\alpha_i$ 는

$$\alpha_i = \left( \frac{\partial P}{\partial X_i} \right) \left( \frac{\bar{X}_i}{\bar{P}} \right) \quad (4)$$

로서, 影響度 指數(sensitivity index)라고 불리워진다.

$P$ 의 變動係數  $V_p$ 가  $P$ 의 不確實性의 크기를 나타내므로  $V_p$ 에의 寄與 그 자체는 式 (3)에 나타내는 것처럼  $\alpha_i V_{x_i}$ 이지만  $\alpha_i$ 는  $X_i$ 의 不確實性이  $P$ 의 不確實性에 어느정도 寄與하는가를 나타내는 하나의 指標이며  $V_{x_i}$ 를 몰라도 求할 수 있는 量이기 때문에 많이 이용되고 있다. 단,  $\alpha_i$ 가 크다고 해서 꼭 影響이 크다고 確實하게 말할 수 없는 點은 있다. 本 연구의 目的은 데이터 자체의 不確實性을

論하기 위한 것이 아니라 設計 등의 時點에서 파라미터의 값을 약간 바꾼다던가, 혹은, 解析上 값을 약간 잘못 評價할 경우 그러한 것이 壽命에 미치는 影響이 어느 정도인가를 밝히기 위한 것이기 때문에 각 파라미터를 確率變數가 아닌 確定值로서 取扱할 수 있으며 따라서  $X_i$ 의 變動係數  $V_{x_i} = \text{一定}$ 이기 때문에  $\alpha_i$  자체로서 影響의 크기를 確實하게 論할 수 있다.

### 2.2 疲勞크랙 進展過程上的 파라미터의 影響度 指標

疲勞크랙 進展速度는 線形破壞力學을 이용하여 一般的으로 다음 式

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (5)$$

이 使用되나 크랙 先端의 塑性域의 크기가 무시할 程度이거나 應力比의 影響을 排除하기 위해서는 有效應力擴大係數  $\Delta K_{eff}$ 를 이용한 다음 式

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \quad (6)$$

이 使用된다. 위 두 式에서  $a$ 는 크랙길이,  $N$ 은 사이클 數,  $\Delta K$ 는 應力擴大係數,  $\Delta K_{eff}$ 는 有效應力擴大係數,  $C, m$ 은 材料常數이다. 初期크랙길이  $a_1$ 으로부터 限界크랙길이  $a_2$ 까지의 壽命  $N$ 은 式 (6)을 積分함으로 해서

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C \Delta K_{eff}^m} \quad (7)$$

처럼 求할 수 있다. 應力擴大係數  $K$ 의 一般式은, 試驗片의 有限幅, 有限길이 등에 대한 補正係數  $f(a/W)$ 를 計算의 간단성을 避하기 위하여 1로 놓으므로 해서

$$K = S \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

가 되며 이를 式 (7)에 適用해서

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C (\Delta S_{eff} \sqrt{\pi a})^m} \quad (9)$$

이 된다. 여기서,  $\Delta S_{eff}$ 는 有效應力幅이다. 最大應力을  $S_{max}$ , 最小應力을  $S_{min}$ , 크랙열림應力을  $S_{op}$ 라 하면 應력폭  $\Delta S$ 와 有效應력폭  $\Delta S_{eff}$ 는

$$\Delta S = S_{max} - S_{min} \quad (10)$$

$$\Delta S_{eff} = S_{max} - S_{op} \quad (11)$$

과 같이되고 上記 式 (11)에 크랙열림比  $U'(S_{op}/S_{max})$ 와 應力比  $R(S_{min}/S_{max})$ 을 適用하여 다시 整理하면

$$\Delta S_{eff} = (1 - U') \frac{\Delta S}{(1 - R)} \quad (12)$$

처럼 되며, 이를 다시 式 (9)에 適用하면

$$N = \frac{2(1-R)^m}{C(1-U')^m \Delta S^m \pi^{m/2} (2-m)} (a_2^{(1-m/2)} - a_1^{(1-m/2)}) \quad (13)$$

이 얻어진다. 各 파라미터의 影響度指標  $\alpha_i$ 는 式 (4)를 바로 이 式 (13)에 適用하므로써 얻어지며 다음에 適用結果를 나타낸다.

$$\alpha_{a_1} = \frac{\bar{a}_1}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial a_1} \right) = \left( \frac{a_1^{(1-m/2)}}{a_2^{(1-m/2)} - a_1^{(1-m/2)}} \right) \left( \frac{2-m}{2} \right) \quad (14)$$

$$\alpha_{a_2} = \frac{\bar{a}_2}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial a_2} \right) = \left( \frac{a_1^{(1-m/2)}}{a_2^{(1-m/2)} - a_1^{(1-m/2)}} \right) \left( \frac{2-m}{2} \right) \quad (15)$$

$$\alpha_{U'} = \frac{\bar{U}'}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial U'} \right) = m \frac{U'}{1-U'} \quad (16)$$

$$\alpha_R = \frac{\bar{R}}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial R} \right) = -m \frac{R}{1-R} \quad (17)$$

$$\alpha_{\Delta S} = \frac{\bar{\Delta S}}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial \Delta S} \right) = -m \quad (18)$$

$$\alpha_C = \frac{\bar{C}}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial C} \right) = -1 \quad (19)$$

$$\alpha_m = \frac{\bar{m}}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial m} \right) = \left( \frac{-a_2^{(2-m)} \ln(a_2) + a_1^{(2-m)} \ln(a_1)}{a_2^{(2-m)} - a_1^{(2-m)}} \right) m + m \ln \left( \frac{1-R}{((1-U') \Delta S \pi^{1/2})} \right) + \left( \frac{m}{2-m} \right) \quad (20)$$

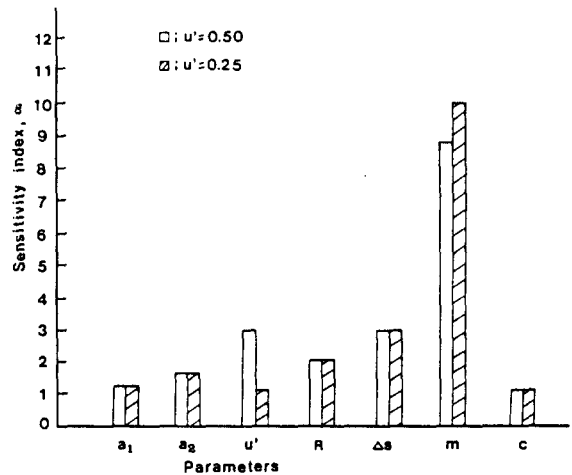
### 3. 計算結果 및 考察

파라미터의 影響度指標는 上記式들에 實際의 값을 代入하므로 해서 간단히 求해진다. 여기서는 第 1報의 實驗條件과 同等한 값을 適用하기로 한다.

(1) Table 1에서 Value는 計算에 適用된 데이터 값이며 오른쪽의  $\alpha_i$ 가 計算結果 얻어진 影響度의 값으로서 값이 클수록 壽命에 미치는 影響이 크다는 것을 意味한다. Case 1과 Case 2의 差異는 크랙열림比  $U'$ 를 0.5와 0.25를 適用한 것이다. Fig. 1은 Table 1의 結果를 알기쉽게 그래프로 表示한 것으로 影響의 크기가 한눈에 把握된다. 표와 그림으로부터 알 수 있듯이  $U'$ 의 값이 0.5일 경우  $U'$ 의 影響度는  $m$ 다음으로 2번째인 데 비해  $U'$ 의 값이 0.25의 경우는 가장 작은 값을 나타낸다. 다시 말해서  $U'$ 의 값이 작을수록 그 影響은 작아지므로

**Table 1** Parameter sensitivities(difference by crack opening ratio,  $U'$ )

Parameter	Case 1		Case 2	
	Value	$\alpha_i$	Value	$\alpha_i$
$a_1$	16.0	1.15	16.0	1.15
$a_2$	33.0	1.65	33.0	1.65
$R$	0.4	2.0	0.4	2.0
$U'$	0.5	3.0	0.25	1.0
$\Delta S$	0.57	3.0	0.57	3.0
$m$	3.0	8.76	3.0	9.98
$C$		1.0		1.0



**Fig. 1** Changes of parameter sensitivity by crack opening ratio,  $U'$

**Table 2** Parameter sensitivities(difference by material factor,  $m$ )

Parameter	Case 1		Case 2	
	Value	$\alpha_i$	Value	$\alpha_i$
$a_1$	16.0	1.15	16.0	0.87
$a_2$	33.0	1.65	33.0	2.06
$R$	0.4	2.0	0.4	2.92
$U'$	0.5	3.0	0.5	4.38
$\Delta S$	0.57	3.0	0.57	4.38
$m$	3.0	8.76	4.38	12.55
$C$		1.0		1.0

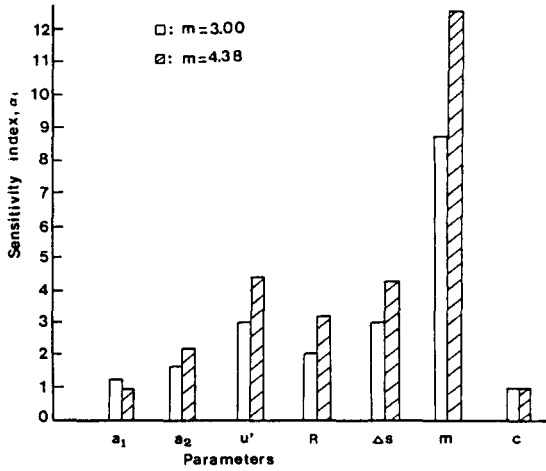


Fig. 2 Changes of parameter sensitivity by material factor,  $m$

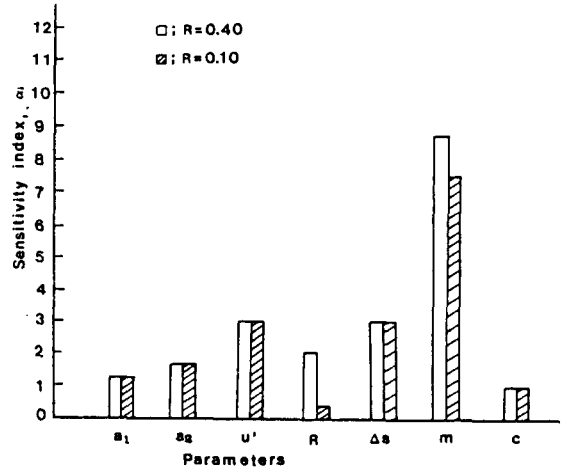


Fig. 3 Changes of parameter sensitivity by stress ratio,  $R$

Table 3 Parameter sensitivities(difference by stress ratio,  $R$ )

Parameter	Case 1		Case 2	
	Value	$\alpha_i$	Value	$\alpha_i$
$a_1$	16.0	1.15	16.0	1.15
$a_2$	33.0	1.65	33.0	1.65
$R$	0.4	2.0	0.1	0.33
$U'$	0.5	3.0	0.5	3.0
$\Delta S$	0.57	3.0	0.57	3.0
$m$	3.0	8.76	3.0	7.55
$C$		1.0		1.0

壽命評價에 있어서 가능한 한 작은 값을 택하는 것이 바람직 하다고 하겠다.

第1報에서 크랙 열림點의 값 測定時 測定位置에 따라 그 값이 다르고, 크랙 마우스나 試驗片의 背面에서 測定한 값이 크랙先端에서 보다 작으며 바로 이 작은 값을 擇하는 것이 보다 正確한 評價가 可能하다는 것을 밝혔다. 本報에서의 計算結果는 이를 더욱 立證해 준다고 생각된다.

(2) Table 2와 Fig. 2는 材料가 다른 경우를 考慮한 것으로서 材料常數  $m$ 의 값을 바꾸어 보았다. 4.38이라고 하는 값은 SS41材의 값으로서 別度の

데이터<sup>(6)</sup>를 引用했다. 그림으로부터 알 수 있듯이  $m$ 의 값이 클 境遇  $U'$ 의 影響이 커짐과 同時に 全般的으로 다른 파라미터의 影響도 커진다.

(3) Table 3과 Fig. 3은 다른 應力比  $R$ 의 경우를 考慮한 것으로  $R$ 이 작아질 경우  $U'$ 의 影響度에는 變化가 없으나  $R$ 자체의 影響은 현저하게 작아지고  $m$ 의 影響도 약간 작아지는 현상이 나타났다.

#### 4. 結 論

本報에서는 간단한 數值計算에 依하여 크랙 열림比를 包含한 여러 파라미터의 疲勞크랙 進展壽命에 미치는 影響의 크기를 評價했다. 그 結果는 다음과 같다.

(1) 크랙열림比  $U'$ 의 값이 클 경우 影響의 크기는 材料常數  $m$  다음으로 크지만  $U'$ 의 값이 작아지면 그 影響도 함께 작아지므로 壽命評價에 있어서는 가능한 한 작은 값을 擇하는 것이 바람직 하다고 생각된다.

(2) 材料常數  $m$  값이 클 경우 크랙 열림比  $U'$ 의 影響이 커짐과 同時に 全般的으로 다른 파라미터의 影響도 커진다. 材料常數  $m$  자체가 壽命에 미치는 影響도 크지만  $m$ 이 큰 材料의 경우는 각 파라미터가 壽命에 미치는 影響도 커지는 것은 특이한 점이라 할 수 있으며, 設計時 材料選定에 注意를 要해야 함을 알 수 있었다.

(3) 應力比  $R$ 이 작아질 경우 크랙 열림비  $U'$ 의 影響度에는 變化가 없으나  $R$ 자체의 影響은 현저하게 작아지고 材料常數  $m$ 의 影響도 다소 작아지는 현상이 나타났다.

### 참 고 문 헌

- (1) Shinozuka, M. 1976, "Development of Reliability-Based Aircraft Safety Criteria", AFFDL-TR-76-31
- (2) 岡村弘之, 板恒浩, 1979 "強度の統計的取扱い", 培風館, pp. 234~241.
- (3) 北川英夫, 久田俊明, 1979, "表面龜裂の成長と非破壊検査を考慮した信頼性解析", pp. 526~1042.
- (4) 板恒浩, 豊田政男, 深川容三, 朝田洋雄, 1981, "缺陷を有する溶接部の信頼性解析", pp.526~531.
- (5) 최병기, 윤한용, 박창언, 정태권, 1990, "피로크랙 진전과정에 있어서의 크랙열림점 평가에 관한 연구", 대한기계학회 호남지부 학술강연회 초록집.
- (6) 전경옥, 박상국, 권재도, 진영준, 장재영, 1989, "疲勞크랙進展壽命의 統計學的 分布特性에 관한 研究", 大韓機械學會 秋季學術大會 抄錄集, pp. 63~66.