

〈論 文〉

## 동일평면상에 존재하는 복수표면균열의 피로성장수명예측

이진호\* · 최용식\*\* · 김영진\*\*\*

(1992년 10월 20일 접수)

### Fatigue Growth Life Prediction for Collinear Multiple Surface Cracks

J.H. Lee, Y.S. Choy and Y.J. Kim

**Key Words :** Surface Crack (표면균열), Life Prediction (수명예측), Interaction Effect (간섭효과), Crack Closure (균열닫힘), Fatigue (피로)

#### Abstract

The objective of this paper is to develop a computational model for predicting the fatigue propagation of collinear multiple surface cracks under constant amplitude and variable amplitude loadings. After examining fatigue crack growth behavior for CT specimens and single surface crack specimens, empirical equations of (11) and (12) are proposed for the prediction of fatigue life in a multiple surface crack geometry. The accuracy of the proposed model is verified using a life prediction computer program. Several case studies were performed to check the accuracy of the proposed model and to verify the usefulness of the developed program. Good agreement is observed between the numerical results based on the proposed model and the published experimental data.

기 호 설 명			
$a$	: 표면균열의 깊이 또는 관통균열의 길이	$K_{min}$	: 최소 응력확대계수
$c$	: 표면균열 표면길이의 1/2	$K_{open}$	: 균열열림 응력확대계수
$C$	: Paris식의 계수	$K_{Ic}$	: 파괴인성
$C_{eff}$	: 관통균열에 대한 Elber 균열닫힘 모델의 계수	$\Delta K_{th}$	: 응력확대계수폭 하한계
$C_{ctr}$	: 표면균열에 대한 Elber 균열닫힘 모델의 계수	$\Delta K$	: 응력확대계수폭
$da/dN$	: 균열길이방향의 피로균열성장률	$\Delta K_{eff}$	: 유효응력확대계수폭
$dc/dN$	: 균열길이방향의 피로균열성장률	$m$	: Paris식의 지수
$K$	: 응력확대계수	MFACTOR	: $C_{ctr}/C_{eff}$ 로 정의되는 실험상수
$K_{max}$	: 최대 응력확대계수	$N$	: 사이클수
		$R$	: 응력비 ( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )
		$t$	: 시편두께
		$U$	: 관통균열에 대한 균열열림비
		$U_A$	: 균열길이방향에 대한 균열열림비
		$U_B$	: 균열길이방향에 대한 균열열림비
		$W$	: 시편폭의 1/2
		$\gamma$	: $U_A/U_B$ 로 정의되는 균열열림비

\*정회원, 육군사관학교 기계공학과

\*\*정회원,성균관대학교 기계공학과

\*\*\*정회원,성균관대학교 기계설계학과

### 1. 서 론

급격한 온도구배가 나타나는 구조물(예: 터보기계류)에서는 미소표면균열들이 다수 생성되어 인접 표면균열과 서로 합체되면서 주균열로 성장한다. 따라서, 피로하중하의 표면균열의 정확한 성장수명 예측은 구조물의 건전성 및 안전성 확보 측면에서 매우 중요한 과제이다. 복수표면균열의 수명예측은 피로균열성장률, 균열형상비의 변화 및 복수균열의 간섭효과 등의 문제로 인하여 매우 어렵다. 동일평면상에 존재하는 복수표면균열의 간섭 및 합체를 해석하기 위하여 체적력법,<sup>(1,2)</sup> 유한요소법<sup>(3-7)</sup>을 이용한 수치연구 및 실험적인 연구<sup>(5-10)</sup>가 수행되었다. 또한 Soboyejo와 Knott<sup>(11)</sup>는 다른 평면상에 존재하는 복수표면균열의 피로성장을 실험적으로 규명한 바 있다. 그러나, 이러한 연구들은 계산 및 실험상의 어려움으로 인하여 이상화된 모델에 국한되어 있다.

한편, 균열성장거동을 보다 편리하게 예측하기 위하여 다양한 컴퓨터 프로그램들이 개발되었다. Peterson과 Vroman<sup>(12)</sup>은 일정진폭하중하의 단일표면균열에 대한 피로수명예측 프로그램을 개발하였고, Forman 등<sup>(13)</sup>은 단일 표면균열을 포함한 다목적 피로수명예측 프로그램을 개발하였으나 복수표면균열에 대한 성장예측은 다루지 못했다. 또한, Chang<sup>(14)</sup>은 변동하중하의 CCT시편에 대한 ASTM round-robin 수명예측 결과를 보고한 바 있으나 변동하중하의 표면균열에 대한 성장예측은 다루지 못했다. 한편, Yuuki와 Yoshida<sup>(15)</sup>는 일정진폭하중하의 복수표면균열의 피로성장거동을 예측하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 개발한 바 있으나 한정된 응력비 범위 내에서만 사용할 수 있다.

본 연구의 목적은 응력비 범위의 제한없이 일정진폭하중과 변동하중을 받는 복수표면균열의 피로성장거동 예측에 사용할 수 있는 모델을 제시하는 것이다. 이어서 제시된 모델을 바탕으로 복수표면균열의 수명예측 프로그램을 개발하고, 사례연구를 통하여 제시한 수명예측법의 타당성을 검토하고자 한다.

### 2. 수명예측법

표면균열의 피로성장거동은 관통균열에 대한 El-

ber의 균열닫힘모델(crack closure model)<sup>(16)</sup>을 표면균열 최심점과 표면점에 각각 독립적으로 적용하여 예측할 수 있다. 표면균열의 성장거동을 예측하려면 응력확대계수, 균열열림비 및 표면균열에 대한 재료상수값을 결정하여야 한다.

#### 2.1 응력확대계수

막응력  $\sigma_m$  및 굽힘응력  $\sigma_b$ 가 작용하는 평판(Fig. 1)에 존재하는 길이  $a$ , 길이  $2c$ 인 반타원 표면균열에 대한 응력확대계수는 다음 식으로 표시된다.

$$K_I = (M_m \cdot \sigma_m + M_b \cdot \sigma_b) \sqrt{\pi a / Q} \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 형상계수이며,  $M_m$ 과  $M_b$ 는 응력확대계수의 수정계수로 본 연구에서는 Newman-Raju의 식<sup>(17)</sup>을 수정한 Fett의 식<sup>(18)</sup>을 사용하여 계산한다.

한편, Fig. 2와 같은 복수표면균열에 대한 응력확대계수는 단일표면균열에 대한 응력확대계수에 인접표면균열간의 상호간섭계수를 곱하여 얻어진다.<sup>(15)</sup> 본 연구에서는 복수표면균열이 존재할 때 식(1)의  $M_m$  및  $M_b$  값으로 다음의 Yuuki-Yoshida의 수정식<sup>(15)</sup>을 사용한다.

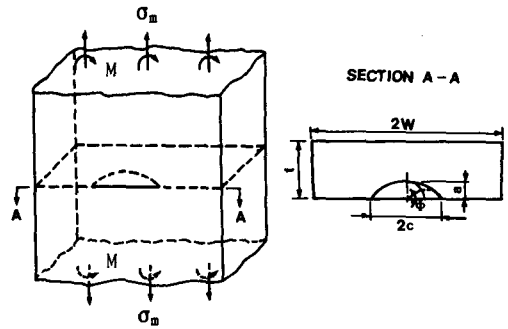


Fig. 1 Surface crack in a finite plate subject to uniform stress

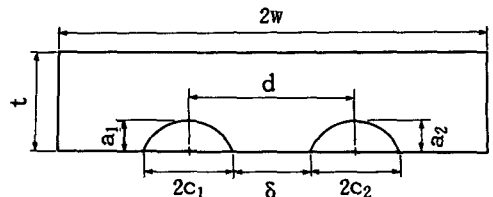


Fig. 2 Two surface cracks in a finite plate subject to uniform stress

$$M_m = \{1 + r_m(F-1)\} \cdot (M_m)_{n-r} \quad (2a)$$

$$M_b = \{1 + r_b(F-1)\} \cdot (M_b)_{n-r} \quad (2b)$$

여기서  $(M_m)_{n-r}$  과  $(M_b)_{n-r}$  은 단일표면균열에 대한 Fett의 식<sup>(18)</sup>의 수정계수이고,  $F$ 는 2차원 관통균열에 대한 간섭계수이다. 또한,  $r_m$ 과  $r_b$ 는 3차원 효과에 대한 보정계수로서 각각 0.8과 0.4이다.

2.2 균열열림비

균열이 진전하면 균열선단에는 압축잔류응력이 발생하며, 하중이 0이 되기전에 인장하중하에서도 균열이 닫히며 이를 균열닫힘거동이라 한다. 이 거동은 균열열림비를 사용하여 설명되며, 균열열림비는 다음과 같이 정의된다.<sup>(16)</sup>

$$U = \frac{K_{max} - K_{open}}{K_{max} - K_{min}} \quad (3)$$

여기서,  $K_{max}$ 와  $K_{min}$ 은 각각 최대 응력확대계수와 최소 응력확대계수이고,  $K_{open}$ 은 균열열림 응력확대계수이다.

표면균열의 선단을 따라 다르게 나타나는 균열닫힘현상은 표면균열 최심점과 표면점에서의 균열열림비의 차이로 설명될 수 있으며, 표면균열성장시의 형상변화에 큰 영향을 미친다. 지금까지 발표된 여러 연구자들<sup>(9,10,19,20)</sup>의 연구결과를 검토해 보면, 표면균열 최심점에서의 균열열림비  $U_A$ 와 표면점에서의 균열열림비  $U_B$  사이에는 대체로 다음과 같은 관계가 성립한다.

· 알루미늄 합금

$$U_A = \begin{cases} 1.1 U_B & \text{for } R \leq 0.5 \\ U_B & \text{for } R > 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

· 스텐레스 강

$$U_A = \begin{cases} 1.21 U_B & \text{for } R \leq 0.5 \\ U_B & \text{for } R > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

한편, 시편으로부터 얻는 관통균열에 대한 균열열림비  $U$ 는 대략 평면응력상태인 시편표면에서 측정되는 값이므로, 역시 평면응력상태인 표면균열 표면점에서의 균열열림비  $U_B$ 와 같다고 볼 수 있다.

$$U \approx U_B \quad (6)$$

2.3 재료상수의 결정

시편의 균열성장거동은 균열닫힘을 고려한  $\Delta K_{eff}$ 를 사용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$da/dN = C_{eff} \cdot (\Delta K_{eff})^m \quad (7)$$

여기서  $C_{eff}$ 는 재료상수이다. 또한, 표면균열의 최심점과 표면점의 균열성장식은 각각 식(8a), 식(8b)와 같다.

$$da/dN = C_{effr} \cdot (\Delta K_{eff})_A^m \quad (8a)$$

$$dc/dN = C_{effr} \cdot (\Delta K_{eff})_B^m \quad (8b)$$

여기서  $C_{effr}$ 는 표면균열에 대한 피로시험 데이터를  $\Delta K_{eff}$ 로 정리했을 때 얻어지는 재료상수이다. 식(7)과 식(8)에서 직선의 기울기  $m$ 은 동일한 재료에 대해서 큰 차이를 보이지 않기 때문에 일정한 것으로 가정하였다.

Fig. 3은 식(7)과 식(8)로부터 얻어지는 두 직선을 같은 그래프상에 표시한 것이다. 이때 나타나는 두 직선의 차이는 관통균열과 표면균열의 응력확대계수 차이때문에 발생하는 값이라 생각된다.  $C_{effr}$ ,  $C_{eff}$  및  $m$ 값은 응력비  $R$ 의 영향을 받지않는 재료고유의 값이므로,  $C_{effr}$ 와  $C_{eff}$  사이의 관계도 재료상수로 볼 수 있다. 본 연구에서는  $C_{effr}$ 와  $C_{eff}$  사이의 일정한 관계를 재료상수 보정계수 MFAC-TOR를 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$MFAC-TOR = C_{effr}/C_{eff} \quad (9)$$

한편, 시편으로부터 얻는 관통균열에 대한 a-N 피로시험 데이터를  $\Delta K$ 로 처리하여 얻어지는 재료

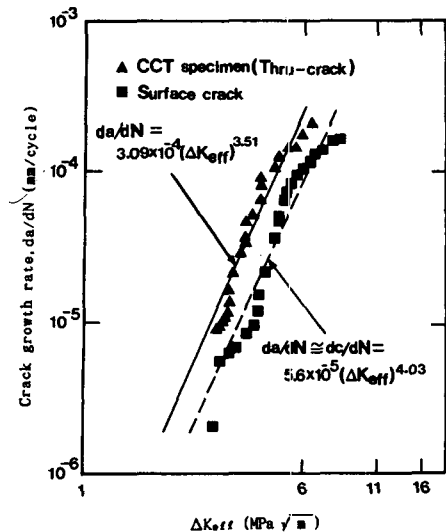


Fig. 3 Relationship between crack growth rate and range of effective stress intensity factor for through thickness crack and surface crack<sup>(20)</sup>

상수를  $C$ 라 놓으면,

$$C_{eff} = C/U^m \tag{10}$$

의 관계가 성립한다.

2.4 수명예측모델

이상의 결과로부터 균열단합현상을 고려한 균열 성장모델을 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C_{eff} \cdot (\Delta K_{eff})_A^m \\ &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot (U_A \cdot \Delta K_A)^m \\ &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot (\gamma \cdot U_B \cdot \Delta K_A)^m \\ &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot (\gamma \cdot U \cdot \Delta K_A)^m \\ &= MFACTOR \cdot C \cdot (\gamma \cdot \Delta K_A)^m \end{aligned} \tag{11a}$$

$$\begin{aligned} dc/dN &= C_{eff} \cdot (\Delta K_{eff})_B^m \\ &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot (U_B \cdot \Delta K_B)^m \\ &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot (U \cdot \Delta K_B)^m \\ &= MFACTOR \cdot C \cdot (\Delta K_B)^m \end{aligned} \tag{11b}$$

여기에서  $\gamma$ 는 열림비(opening ratio)이며  $U_A/U_B$ 로 정의되는 값이다.

일정진폭하중하의 표면균열에 대한 식(11)의 수명예측모델과 변동하중하의 관통균열에 대한 Socie의 모델<sup>(21)</sup>을 결합하여 변동하중하의 표면균열의 수명예측모델을 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta a}{\Delta B} &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot \sum_1^N (\gamma \cdot U \cdot \Delta K_A)^m \\ &= MFACTOR \cdot C \cdot \sum_1^N (\gamma \cdot \Delta K_A)^m \end{aligned} \tag{12a}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta c}{\Delta B} &= MFACTOR \cdot C_{eff} \cdot \sum_1^N (U \cdot \Delta K_B)^m \\ &= MFACTOR \cdot C \cdot \sum_1^N (\Delta K_B)^m \end{aligned} \tag{12b}$$

여기서 단위하중블럭은 Fig. 4와 같이 일정한 간격을 두고 하중특성이 반복적으로 나타나는 하중이력의 주기로 정의되며,  $\Delta B$ 는 하중블럭의 증분,  $N$ 은

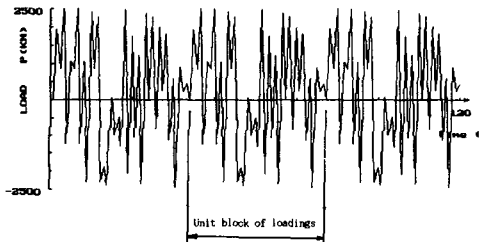


Fig. 4 Load history of random loadings

단위하중블럭내에서 작용하는 변동하중의 총 사이클수이다.

2.5 재료상수 MFACTOR의 결정

식(10)의 관계로부터

$$MFACTOR = \left(\frac{C_A}{C}\right) \left(\frac{U}{U_A}\right)^m \tag{13}$$

이고, 식(6)의 관계로부터

$$MFACTOR = \left(\frac{C_A}{C}\right) \left(\frac{U_B}{U_A}\right)^m = \left(\frac{C_A}{C}\right) \left(\frac{1}{\gamma}\right)^m \tag{14}$$

이다. 식(14)에서  $U_A$ 와  $U_B$ 사이에는 식(4) 또는 식(5)와 같은 대략적인 관계가 성립한다. 따라서, MFACTOR를 사용하여 표면균열의 피로수명을 예측하기 위해서는  $C_A$ 와  $C$ 사이의 관계를 결정하여야 한다. 몇몇 연구자들<sup>(9,17)</sup>은  $C_A = C$ 로 가정하고 표면균열의 수명을 예측하였다. Fig. 5은 이러한 경향을 나타내고 있다. 그러나, Fig. 3과 같이 균열단합이 없는 응력비의 범위( $R > 0.5$ )에서는  $C_A$ 와  $C$ 는 명백히 다르므로  $C_A = C$ 라는 가정은  $R <$

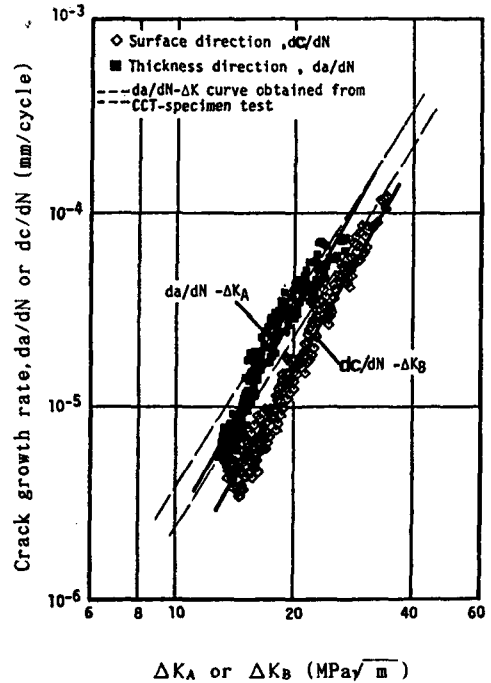


Fig. 5 Relationship between crack growth rate and range of stress intensity factor in thickness and surface direction<sup>(9)</sup>

0.5인 경우에만 적용할 수 있다.

본 연구에서 새롭게 제안한 재료상수 MFACTOR는  $C_A \approx C$ 인 응력비 ( $R < 0.5$ )에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$MFACTOR = \left(\frac{U_B}{U_A}\right)^m = \left(\frac{1}{\gamma}\right)^m \quad (15)$$

재료상수 MFACTOR는 응력비  $R$ 에 영향을 받지 않는 재료고유의 값이므로  $C_A$ 가  $C$ 와 같지 않는 응력비의 범위 ( $R > 0.5$ )에도 적용할 수 있다.  $R > 0.5$ 일때  $\gamma = 1$ 이므로 식(11a)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} da/dN &= MFACTOR \cdot C \cdot (\gamma \cdot \Delta K_A)^m \\ &= MFACTOR \cdot C \cdot (\Delta K_A)^m \end{aligned} \quad (16)$$

### 3. 프로그램의 개발

복수표면균열의 피로성장수명예측을 좀 더 효율적으로 수행하기 위하여 본 연구에서 제안한 수명 예측모델을 기본으로 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. Fig. 6은 본 연구에서 개발한 복수표면균열의

피로성장수명예측을 위한 컴퓨터 프로그램의 흐름도로서, 입력부, 해석부 및 출력부의 3부분으로 구성되어 있다. 프로그램은 도형처리에 편리한 C-언어를 사용하여 작성하였다.

#### 3.1 입력부

입력부는 해석에 필요한 값들을 입력하는 부분과, a-N 피로시험 데이터를 도형처리하는 부분으로 구성되어 있다. 자료입력 부분에서는 해석모델의 폭과 두께, 균열의 형상, 균열의 위치, 하중조건(일정하중 및 변동하중, 막하중 및 굽힘하중) 및 재료상수( $\Delta K_{th}$ ,  $K_{Ic}$ ,  $C$  및  $m$ ) 등이 입력된다. 도형처리부분은 재료상수가 주어지지 않은 경우 a-N 피로시험 데이터를 도형처리하여  $C$ (또는  $C_{eff}$ )와  $m$ 값을 구하는 부분으로 구성되어 있다. a-N 데이터 처리부에서는 7점증분다항식법(seven point incremental polynomial method)을 사용하여  $da/dN - \Delta K$ (또는  $\Delta K_{eff}$ )의 관계를 도형출력한 후, 원하는 데이터만을 사용하여 최소자승법으로 재료상수를 결정한다.

#### 3.2 해석부

해석부에서는 먼저 복수표면균열의 합체를 판정하는 데 다음의 3가지 합체기준식을 사용하였다. 합체조건 2는 가동중검사결과 검출된 결함의 파괴역학 평가법으로 미국기계학회에서 제정한 것이며, 합체조건 3은 영국표준국에서 제정한 것이다.

- 합체조건 1 : 표면점의 연결

$$\delta_0 = 0 \quad (17)$$

- 합체조건 2 : ASME Sec. XI<sup>(22)</sup>

$$\delta_0 = \min(a_1, a_2) \times 2 \quad (18)$$

- 합체조건 3 : BSI PD 6493<sup>(23)</sup>

$$\delta_0 = c_1 + c_2 \quad (19)$$

여기서  $\delta_0$ 는 합체시 인접한 균열 최근점간의 거리이며,  $a_1$ 과  $a_2$ 는 표면균열의 깊이,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 표면균열 표면길이의 반이다.

임의의 순간에 인접한 2개의 균열 최근점간거리를  $\delta$ 라 할때 합체는  $\delta$ 가  $\delta_0$  이하가 되었을 때 발생하며, 합체후 균열형상은 다음과 같다.

$$a = \max(a_1, a_2) \quad (20)$$

$$2c = 2(c_1 + c_2 + \delta/2)$$

합체가 발생한 경우는 식(20)에 의해 균열의 길이와 깊이가 다시 계산된다. 계산된 균열의 깊이가

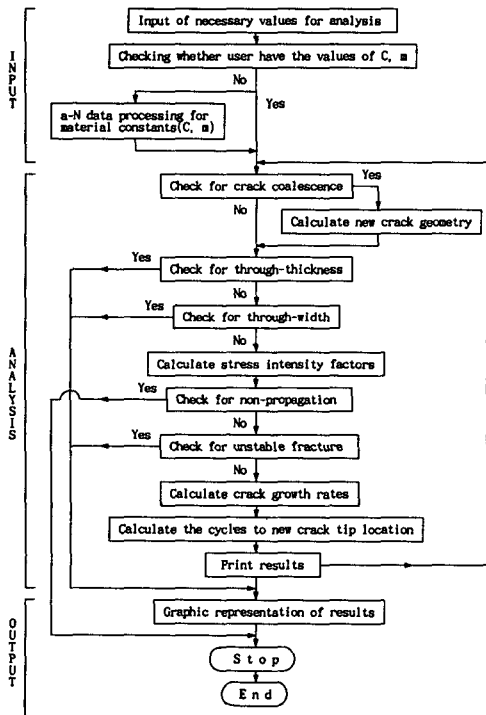


Fig. 6 Flow chart of life prediction program for multiple surface cracks

판두께보다 크면 판두께 관통판정을 내리고 프로그램 수행을 중단한다. 또한 계산된 균열의 길이가 판폭보다 크면 판폭관통 판정을 내리고 프로그램 수행을 중단한다. 해석의 다음 단계에서는 복수표면균열에 대한  $K$ 값을 식 (1)을 이용하여 계산한다. 만일  $\Delta K_{max}$ 이  $\Delta K_{th}$ 보다 크면 균열성장 시뮬레이션을 계속하여,  $K_{max}$ 과 파괴인성치  $K_{Ic}$ 를 비교하여 불안정 파괴의 판정을 내리도록 한다.

3.3 출력부

출력부에서는 해석부의 해석결과를 화일로 읽어 들인 후 스크린, 프린터 및 플롯터를 사용하여 사용자가 균열의 성장거동을 쉽게 관찰할 수 있도록 하였다. 현재 본 프로그램의 출력내용은 다음과 같다.

- 균열형상변화
- $a/c - a/t$  선도
- $a - N$  및  $c - N$  선도
- $K_{max} - N$  선도

4. 사례연구

본 연구에서 제시한 수명예측모델 및 프로그램의 정확도를 검증하기 위해 사례연구를 통하여 본 프

로그래의 수명예측결과를 복수표면균열에 대한 Shibata 등<sup>(9,10)</sup>의 실험결과(평균 및 원통)와 비교 검토하였다. Table 1은 사례연구에 사용된 4가지 Case에 대한 실험조건을 정리한 것으로서, Case I, II 및 III은 인장력을 받는 평판에 존재하는 표면균열의 경우이며, Case IV는 내압을 받는 원통의 경우이다.

4.1 일정진폭하중의 경우

(1) Case I

Case I은 평판에 존재하는 단일표면균열의 경우이다. 이제  $\gamma=1.21$ ,  $m=3.26$ (CCT 시편에서 측정된 값)을 식 (15)에 대입하면, 스텐레스 강에 대한 재료상수 MFACTOR는 0.537로 계산된다. Fig. 7은 해석결과를 도시한 것으로 실험결과와 잘 일치하고 있다.

(2) Case II, III

Case II ( $d=42$  mm)와 Case III ( $d=60$  mm)에서는 평판에 존재하는 복수표면균열중심간 거리  $d$ 를 변수로 하여 해석을 반복하였으며, Case I에서 구한 MFACTOR=0.537을 사용하였다.

Fig. 8은 3가지 합체조건식을 이용하여 Case II에 대한 해석결과를 도식적으로 나타낸 것으로서, 표면점의 연결을 합체조건으로 사용한 경우가 실험

Table 1 Test conditions of SUS 304L stainless steel plates and cylinder

Items \ Case No.	Case I	Case II	Case III	Case IV
Number of cracks	1	2	2	3
Crack spacing	—	42 mm	60 mm	57.3 mm
Membrane stress range	$\Delta\sigma_m = 137$ MPa			$\Delta\sigma_m = 115.6$ MPa
Bending stress range	$\Delta\sigma_b = 0$ MPa			$\Delta\sigma_b = 13.7$ MPa
Stress ratio	$R = 0.05$			$R = 0.1$
Geometry of test section	$t = 24$ mm $2w = 200$ mm			$t = 35$ mm $2w = 400$ mm
Geometry of crack	$a = 5$ mm $2c = 12$ mm			$a = 8$ mm $2c = 24$ mm
Material constants (for m/cycle-MPa $\sqrt{m}$ )	$C = 1.73 \times 10^{-12}$ * $m = 3.26$			$C = 4.63 \times 10^{-12}$ ** $m = 2.98$

\*Material constants obtained from CCT specimen

\*\*Material constants obtained from CC(Center Cracked) cylinder specimen

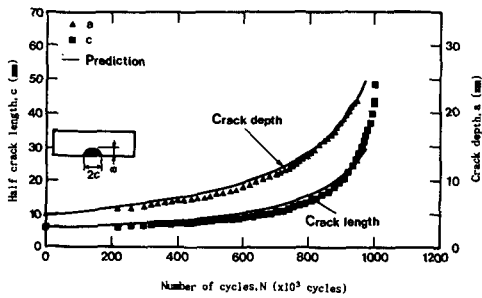
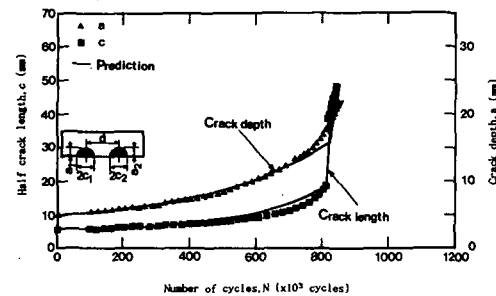
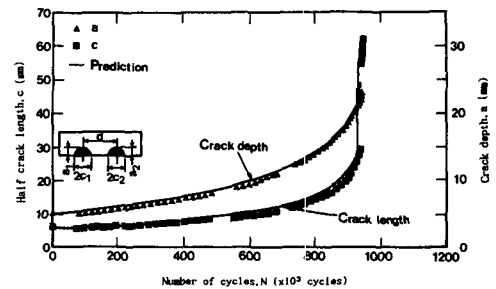


Fig. 7 Comparison of crack growth curves between predicted results and experimental ones(Case I)

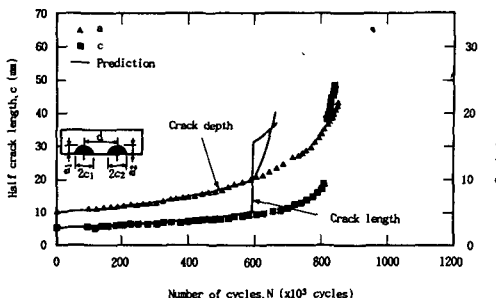
결과와 가장 잘 일치하고 있다. ASME Sec. XI와 BSI PD 6493을 합체조건으로 사용하면 합체이전의 균열성장과정은 잘 예측하였으나, 최종수명은 각각 약 29%, 34%씩 적었다. Fig. 9는 Case III에 대한 해석결과를 도식적으로 나타낸 것으로서, Case II의 경우와 마찬가지로 표면점의 연결을 합체조건으로 사용한 경우는 실험결과와 잘 일치하였으나, ASME Sec. XI와 BSI PD 6493을 이용한 최종수명 예측은 각각 16%, 20%씩 적게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 복수표면균열의 수명예측모델은 인접표면균열간 간섭현상을 잘 설명하고 있음을



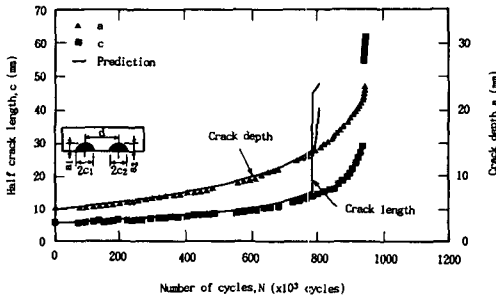
(a)  $\sigma_0 = 0$



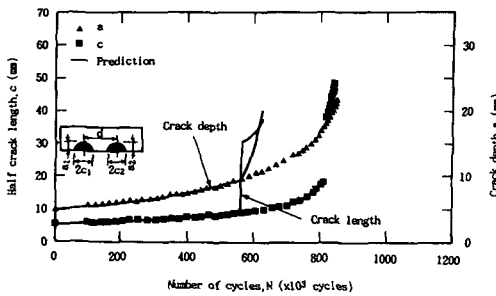
(a)  $\sigma_0 = 0$



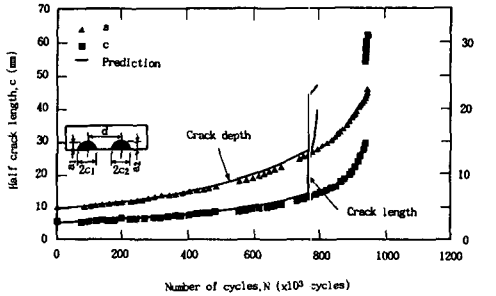
(b) ASME section XI



(b) ASME section XI



(c) BSI PD6493



(c) BSI PD6493

Fig. 8 Comparison of crack growth curves between predicted results and experimental ones(Case II)

Fig. 9 Comparison of crack growth curves between predicted results and experimental ones(Case III)

알 수 있다.

(3) Case IV

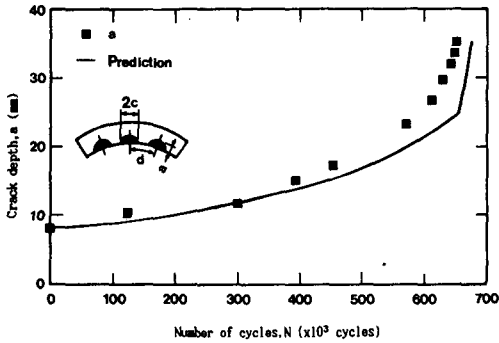
Case IV는 원통구조물에 3개의 동일한 표면균열이 존재하는 경우이다. 이제  $\gamma=1.21$ ,  $m=2.98$  (중앙균열 원통시편에서 측정된 값)을 식(15)에 대입하면, 재료상수 MFACTOR는 0.566으로 계산된다.

Fig. 10은 3가지 합체조건식을 이용하여 Case IV에 대한 해석결과를 도식적으로 나타낸 것으로서, 표면점의 연결을 합체조건으로 사용한 경우는 실험결과와 2% 이내에서 잘 일치하였다. ASME Sec. XI와 BSI PD 6493을 이용한 해석결과는 합체이전의 성장과정은 잘 예측하였으나, 최종수명은 각각 약 35%, 45%씩 적게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 수명예측모델은 원통구조물에도 잘 적용됨을 알 수 있다.

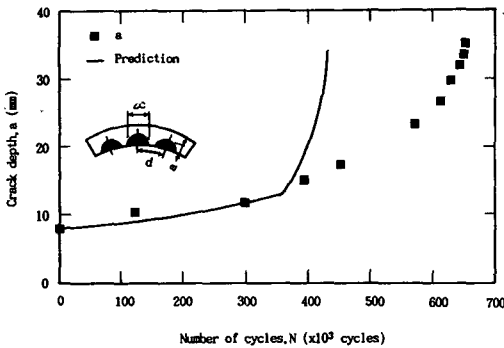
Fig. 11은 사이클수의 증가에 따른 균열형상의 변화를 도식적으로 나타낸 것으로서,  $6.68 \times 10^5$  사이클과  $6.74 \times 10^5$  사이클 사이에서 합체가 발생함을 보여주고 있다.

4.2 변동하중의 경우

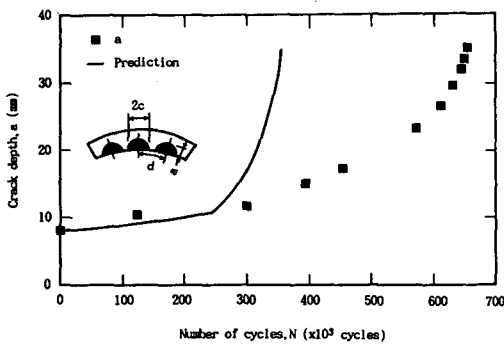
본 사례연구의 해석조건은 Case II와 같고, 작용하중이력은 ASTM round robin 연구<sup>(14)</sup>에서 사용한 "Instrumentation and Navigation Mission" 과정중에 발생하는 변동하중이다.



(a)  $\sigma_o=0$



(b) ASME section XI



(c) BSI PD6493

Fig. 10 Comparison of crack growth curves between predicted results and experimental ones(Case IV)

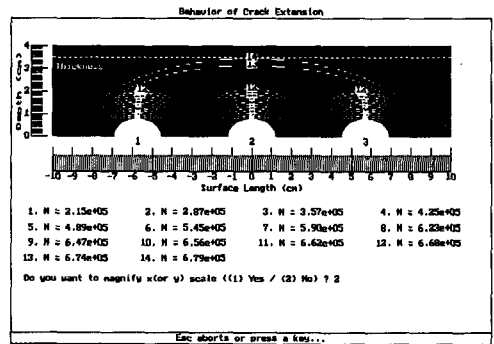


Fig. 11 Prediction of crack shape change(Case IV)

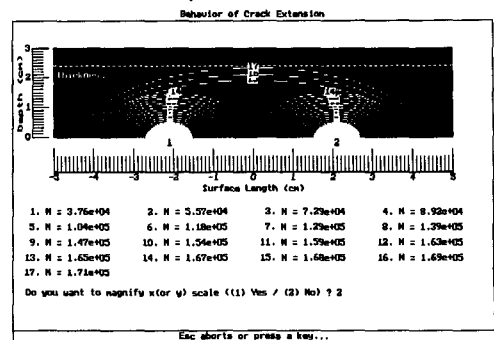


Fig. 12 Prediction of crack shape change under random loading



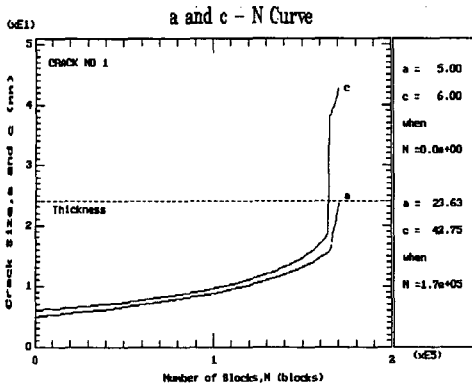


Fig. 13 Predicted crack growth curves under random loading

변동하중이력을 받는 표면균열의 균열성장 데이터를 획득하는 것은 매우 어려우므로, 본 연구에서는 수명예측 결과만을 나타내었다. Fig. 12는 균열의 형상변화를 보여주고 있다. Fig. 13은 사이클수에 대한 균열길이의 변화를 나타낸 것으로  $1.63 \times 10^5$  사이클 부근에서 합체가 발생하며 합체후에 균열의 크기가 급격하게 변화됨을 알 수 있다. 단위하중블럭이 500 사이클 정도이고 하중변동이 완만한 경우에는 균열열림비의 변화가 별로 크지 않다. 따라서 본 연구에서 제시한 수명예측모델은 근사적으로 변동하중하의 수명예측에 사용할 수 있다.

## 5. 결 론

복수표면균열의 피로수명예측에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열단합모델에 기초하여 새롭게 제안한 수명예측모델은 인접균열간 상호간섭이 존재하는 복수표면균열의 피로성장거동을 잘 설명해 주고 있다.

(2) 개발된 컴퓨터 프로그램을 사용하여 표면균열이 존재하는 구조물의 피로수명평가를 효율적으로 수행할 수 있다.

(3) 합체시기가 구조물의 수명에 큰 영향을 미치며, 표면점의 연결을 판정기준으로 사용한 모델이 실제와 가장 잘 일치하였다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단의 터보동력기계연구센터

의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분에게 깊은 감사의 뜻을 포함합니다.

## 참고문헌

- (1) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., 1983, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws Under Tension and Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.16, No.3, pp. 373~386.
- (2) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., 1983, "Growth and Stability of Interacting Surface Flaws of Arbitrary Shape," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 17, No.3, pp. 193~210.
- (3) O'Donoghue, P. E., Nishioka, T. and Atluri, S. N., 1984, "Multiple Surface Cracks in Pressure Vessels," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 20, No.3, pp. 545~560.
- (4) Heath, B. J. and Grandt, A. F. Jr., 1984, "Stress Intensity Factors for Coalescing and Single Corner Flaws Along a Hole Bore in a Plate," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No.4, pp. 665~673.
- (5) Grandt, A. F. Jr., 1986, "An Experimental and Numerical Investigation of the Growth and Coalescence of Multiple Fatigue Cracks at Notches," *Fracture Mechanics: Seventeenth Conference, ASTM STP 905, American Society for Testing and Materials*, pp. 239~252.
- (6) Soboyejo, W. O., Kishimoto, K., Smith, R. A. and Knott, J. F., 1989, "A Study of the Interaction and Coalescence of Two Coplaner Fatigue Cracks in Bending," *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 12, No.3, pp. 167~174.
- (7) Soboyejo, W. O., Knott, J. F., Walsh, M. J. and Cropper, K. R., 1990, "Fatigue Crack Propagation of Coplanar Semi-Elliptical Cracks in Pure Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp. 323~340.
- (8) McComb, T. H., Pope, J. E. and Grandt, A. F. Jr., 1986, "Growth and Coalescence of Multiple Fatigue Cracks in Polycarbonate Test Specimens," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, pp. 601~608.

- (9) Shibata, K., Yokoyama, N., Ohba, T., Kawamura, T. and Miyazono, S., 1985, "Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws ( I )," *Journal of Japanese Nuclear Society*, Vol. 28, No. 3, pp. 250~262.
- (10) Shibata, K., Yokoyama, N., Ohba, T., Kawamura, T. and Miyazono, S., 1986, "Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws ( II )," *Journal of Japanese Nuclear Society*, Vol. 28, No. 3, pp. 258~265.
- (11) Soboyejo, W. O., Knott, J. F., 1991, "The Propagation of Non-Coplanar Semi-Elliptical Fatigue Cracks," *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 14, No. 1, pp. 37~49.
- (12) Peterson, D. E. and Vroman, G. A., 1979, "Computer-Aided Fracture Mechanics Life Prediction Analysis," *Part-Through Crack Fatigue Life Prediction*, ASTM STP 687, American Society for Testing and Materials, pp. 129~142.
- (13) Forman, R. G., Shivakumar, V., Newman, J. C., Jr., Piotrowski, S. M. and Williams, L. C., 1988, "Development of the NASA/FLAGO Computer Program," *Fracture Mechanics: Eighteenth symposium*, ASTM STP 945, American Society for Testing and Materials, pp. 781~803.
- (14) Chang, J. B., 1981, "Round-Robin Crack Growth Predictions on Center-Cracked Tension Specimens under Random Spectrum Loading," *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, ASTM STP 748, American Society for Testing and Materials, pp. 3~40.
- (15) Yuuki, R. and Yoshida, T., 1986, "Fatigue Life Prediction System for Structures," *Journal of High Pressure Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 115~123.
- (16) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials, pp. 230~242.
- (17) Newman, J. C. and Raju, I. S., 1981, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, No. 1~2, pp. 185~192.
- (18) Fett, T., 1987, "An Extension of the Newman-Raju Formula," *International Journal of Fracture*, Vol. 33, R47-R50.
- (19) Jolles, M. and Tortoriello, V., 1983, "Geometry Variations During Fatigue Growth of Surface Flaws," *ASTM STP 791*, pp. 297~307.
- (20) 장우진, 1989, "7075-T6 알루미늄 합금의 표면피로균열 진전거동에 관한 연구," *한국과학기술원 석사학위 논문*.
- (21) Socie, D. F., 1977, "Prediction of Fatigue Crack in Notched Members under Variable Amplitude Loading Histories," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp. 849~865.
- (22) ASME, 1989, "Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI: Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components."
- (23) British Standard Institute, 1980, "Guidance on Some Methods for the Deviation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints" PD 6493.