

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 33 卷 第 4 號 1996 年 11 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architecture of Korea  
 Vol. 33, No. 4, November 1996

## 복수표면균열을 갖는 구조요소의 피로수명 예측

김재동\*, 이종원\*, 홍창호\*\*

### Fatigue Life Prediction for Multiple Surface Cracks in Finite Plates

by

J.D. Kim\*, J.W. Lee\* and C.H. Hong\*\*

#### 요 약

최근, 선박, 해양구조물, 항공기 및 원자력 플랜트 등 대형구조물의 사용조건이 극도로 가혹해짐에 따라 이들에 대한 신뢰성 및 안전성 보장이 심각한 문제로 대두되고 있다. 이들 대형구조물에 있어, 파손사례의 대부분은 어떤 형태로든 피로현상과 관련된 것으로서 수명 및 잔여수명의 예측과 함께 안전성 평가기술의 확립이 절실히 요구되고 있다. 그러나, 실제 대다수의 결합은 복수표면균열 상태로 존재하며, 이들은 단일균열의 경우와는 달리 급속히 합체, 성장할 가능성이 높고 따라서, 관통수명 또한 짧아지며, 관통시 표면균열의 길이가 상대적으로 커져 불안정 파괴의 위험성도 그만큼 높아지게 된다.

본 연구에서는, 평판 및 필릿 용접부에 존재하는 복수의 직렬표면균열을 대상으로 인접균열간 간섭효과, 합체현상을 고찰하여 피로균열 진전거동 및 피로수명 예측프로그램을 개발하고, 이를 기존의 실험결과와 비교, 평가하여 그 정도 및 실용성을 확인하였다.

#### Abstract

A fatigue life prediction program for multiple planar surface cracks in finite plates and T-fillet joints, based on linear elastic fracture mechanics was developed. This prediction technique include the crack coalescence, mutual interaction and the stress intensity concentration effect in welded joints. Total of 44 cases were compared with Iida's and Vosikovskiy's experimental results and it was found that the present method was a reasonable tool for the prediction of fatigue life.

---

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9.)

접수일자 : 1996년 2월 3일, 재접수일자 : 1996년 9월 19일

\* 한국기계연구원 구조시스템연구부

\*\* 충남대학교 항공우주공학과

### 1. 서 언

최근, 대형기기 및 구조물의 사용조건이 극도로 가혹해짐에 따라 이에 대한 신뢰성 및 안전성 보장이 심각한 문제로 대두되고 있다. 이들 파손사례의 대부분은 어떤 형태로든 피로현상과 관련된 것이며 따라서, 수명 및 잔여수명의 예측과 함께 안전성 평가기술의 확립이 절실히 요구되고 있다.

현재, 선박, 항공기 및 원자력 Plant 등 대형구조물의 경우에는 고도정밀의 안전성평가를 목표로 한 '파괴관리제어 설계'가 수행되고 있다. 또한, 중대한 재해가 발생하기 전에 피로균열을 검출, 대처하거나 미처 결함을 발견하지 못한 경우일지라도 다음 정기검사시까지 그 안전성을 확인 보증한다는 이른바 'Leak Before Failure(LBF)' 설계개념도 도입, 활용하고 있다. 이를 위하여는 설계 및 검사단계에서 파괴역학적 기법에 근거한 엄밀한 구조안전성 평가과정이 필수적으로 요구되는데 즉, 설계수명중 피로균열의 발생, 진전 및 불안정파괴등 일련의 파괴과정을 명확히 파악하여 그 안전성을 보증해야만 한다.

그런데, 실제 대다수의 결함들은 복수표면 균열 상태로 존재하며, 이들은 단일균열의 경우와는 달리 급속히 합체, 성장할 가능성이 높기 때문에 관통계 관통수명 또한 짧아지며, 관통시 표면균열의 길이가 상대적으로 커져 불안정파괴의 위험성도 그 만큼 높아지게 된다.

따라서, 복수표면 균열의 간섭 및 합체현상을 포함하는 보다 합리적이고 정도높은 균열전파 및 피로수명 평가기법이 요구된다. 본 논문에서는, 평판 및 필릿용접부에 존재하는 직렬표면균열을 대상으로 피로균열 진전거동 및 인접균열간의 간섭, 합체현상을 고찰하여, 피로균열 진전거동 및 피로수명예측 기법을 개발하고 이를 기존의 실험결과와 비교, 평가하여 그 실용성을 검증하였다.

피로수명예측 프로그램의 개략적인 흐름을 Fig. 1에 보였으며, 그 주요과정에 대하여 다음 순서로 기술하기로 한다.

- 기준 응력확대계수의 산정
- 용접부 응력확대집중계수

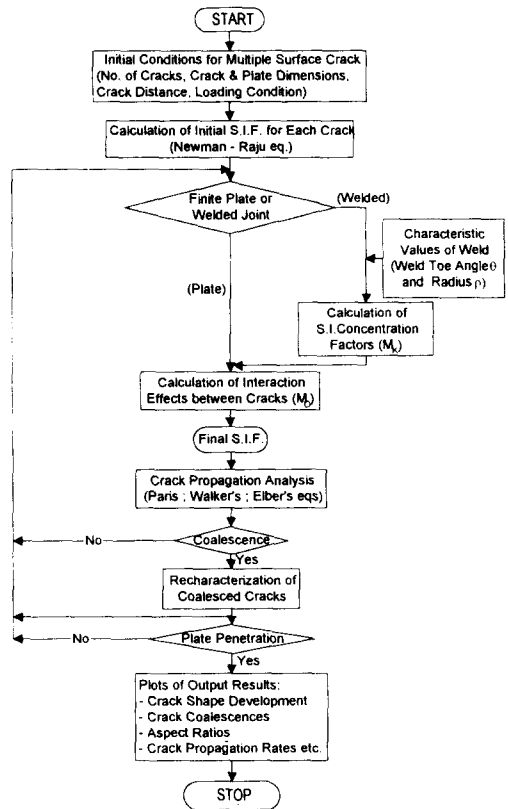


Fig. 1 Fatigue life prediction procedure for multiple surface cracks

- 인접균열간 간섭효과
- 균열의 합체 및 합체균열의 재정의
- 균열진전해석

### 2. 기준 응력확대계수의 산정

유한평판 및 용접부재에 존재하는 복수표면균열의 균열전파해석 과정은 이들 복수균열을 Fig. 2에 보인 바와 같은 평판에 존재하는 단일 표면균열의 집합으로 보아 먼저, 각각의 균열에 대한 응력확대계수를 산정하는 것으로부터 시작하게 되는데, 이를 기준 응력확대계수라 한다.

본 논문에서는 응력확대계수 산정식으로 가장 일반적으로 사용되고 있는 Newman-Raju의 식[1]

을 이용하였다.

Fig. 2에 보인 바와 같이, 막응력 및 굽힘응력을 받는 유한평판에 존재하는 깊이  $a$ , 길이  $2c$ 인 반타원 표면균열의 응력확대계수는 다음과 같다.

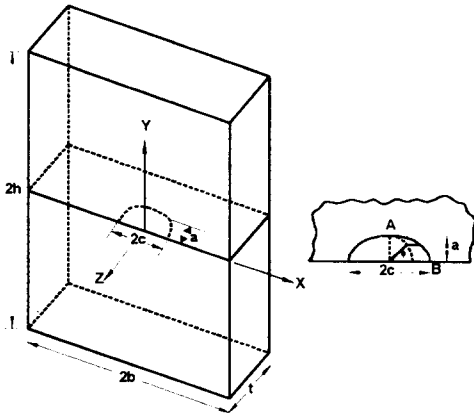


Fig. 2 Surface crack in a finite plate

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

여기서,  $Q$ 는 형상보정계수로 약산식은  $1+1.464(a/c)^{1.66}$ 이고, 막응력과 굽힘응력에 대한 계수  $M_m$  및  $M_b$ 는 Newman-Raju의 식으로부터 구할 수 있으며, 본 논문에서는 균열의 최심점과 표면점을 계산점으로 하였다.

계수  $M_m$  및  $M_b$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_m &= F_s(a/c, a/t, a/b, \phi) \\ M_b &= H_s F_s(a/c, a/t, a/b, \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $0 \leq a/c \leq 2$  이고  $c/b < 0.5$ 이고,  $0 \leq \phi \leq \pi$ ,  $a/t < 1$ 이다.

또한,

$$F_s = [M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4] g f_\phi f_u \quad (3)$$

이고,

(i)  $a/c \leq 1$ 일 때,

$$\begin{aligned} M_1 &= 1.13 - 0.09 a/c \\ M_2 &= -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_3 &= 0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14(1 - a/c)^{24} \\ g &= 1 + [0.1 + 0.35(a/t)^2](1 - \sin \phi)^2 \\ f_\phi &= [(a/c)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi]^{1/4} \\ f_u &= [\sec(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}})]^{1/2} \end{aligned}$$

한편, 굽힘응력에 대한 보정계수는  $H_s$ 는 다음과 같다.

$$H_s = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi \quad (4)$$

여기서,  $H_1$ ,  $H_2$  및  $p$ 는 각 균열의 형상에 따라 정의되며, 표면균열의 경우

$$\begin{aligned} p &= 0.2 + a/c + 0.6 a/t \\ H_1 &= 1 - 0.34 a/t - 0.11(a/c)(a/t) \\ H_2 &= 1 + G_{21}(a/t) + G_{22}(a/t)^2 \end{aligned}$$

이고,  $H_2$ 에서

$$\begin{aligned} G_{21} &= -1.22 - 0.12 a/c \\ G_{22} &= 0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5} \end{aligned}$$

이다.

(ii)  $a/c > 1$ 일때

$$\begin{aligned} M_1 &= (c/a)^{1/2} (1 + 0.04 c/a) \\ M_2 &= 0.2(c/a)^4 \\ M_3 &= -0.11(c/a)^4 \\ g &= 1 + [0.1 + 0.35(c/a)(a/t)^2](1 - \sin \phi)^2 \\ f_\phi &= [(c/a)^2 \sin^2 \phi + \cos^2 \phi]^{1/4} \end{aligned}$$

이때, 굽힘응력에 대한 계수는 식(4)와 동일하며,

$$\begin{aligned} p &= 0.2 + c/a + 0.6 a/t \\ H_1 &= 1 + G_{11} a/t + G_{12}(a/t)^2 \\ H_2 &= 1 + G_{21} a/t + G_{22}(a/t)^2 \\ G_{11} &= -0.44 - 0.41 c/a \\ G_{12} &= 0.55 - 1.93(c/a)^{0.75} + 1.38(c/a)^{1.5} \\ G_{21} &= -2.11 + 0.77 c/a \\ G_{22} &= 0.55 - 0.72(c/a)^{0.75} + 0.14(c/a)^{1.5} \end{aligned}$$

이다.

### 3. 용접부 응력확대집중계수

Fig. 3과 같은 필릿 용접부의 경우, 평판에서와는 달리 용접부 존재의 기하학적 불연속으로 인하여 용접토우부에 응력집중현상이 필연적으로 발생하게 되며, 이는 응력확대계수에 상당한 영향을 미치게 된다. 이러한 현상은 용접형태, 용접부의 상대적 치수 특히, 응력확대계수와 관련하여 균열형상 및 치수에 따라 크게 변한다.

O.D.Dijkstra등은 용접토우부에 존재하는 반타원형 균열에 대하여 다음과 같은 응력확대계수 산정식을 제시한 바 있다.

$$K_a = (M_{k,m,a} M_{m,a} \sigma_m + M_{k,b,a} M_{b,a} \sigma_b) \sqrt{\pi a/Q} \quad (5)$$

$$K_c = (M_{k,m,c} M_{m,c} \sigma_m + M_{k,b,c} M_{b,c} \sigma_b) \sqrt{\pi a/Q}$$

여기서  $a, c$ 는 각각 균열길이 및 길이방향을 나타내며, 평판에 대한 수정계수  $M_{m,a}, M_{b,a}$  및  $M_{m,c}, M_{b,c}$ 는 앞절 2.에서 Newman-Raju의 식으로부터 즉, 최심점 및 표면점에 대하여 각각  $\phi = 90^\circ$  및  $0^\circ$ 값을 식(2)에 대입하여 계산함으로써 구할 수 있다.

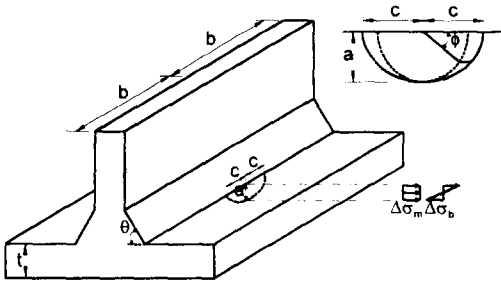


Fig. 3 Semi-elliptical crack at the weld toe

식(5)에서 응력확대집중계수(stress intensity concentration factor)  $M_{k,m,a}, M_{k,b,a}$  및  $M_{k,m,c}, M_{k,b,c}$ 는 다음의 식(6),(7),(8) 및 Table 1,2의 보정계수를 이용하여 구할 수 있다[2].

$$M_k = [A + \frac{B}{(a/t - C)}] [\frac{f_{\theta,\theta}}{f_{\theta,70}}] f_\rho \quad (6)$$

첫 식은 용접토우각  $\theta = 70^\circ$ , 용접토우반경  $\rho = 0 \text{ mm}$ 일때의 응력확대집중계수 값으로서, 이때 계수  $A, B$  및  $C$ 의 값은 Table 1과 같다.

Table 1 Curve fitting coefficients for  $M_k$  at weld toes in T-joints with  $\theta = 70^\circ$  and  $\rho = 0$ .

Region	Load Case	A	B	C
$0 \leq a/t < 0.025$	Bending	1.1362	0.015011	-0.0034398
	Membrane	1.0291	0.012040	-0.0034689
$0.025 \leq a/t < 0.1$	Bending	0.88539	0.031426	-0.015361
	Membrane	0.93832	0.016203	-0.006543
$0.1 \leq a/t < 0.4$	Bending	0.95471	0.019388	0.0047441
	Membrane	0.96858	0.011363	0.0044927

둘째 식은 실제 용접토우각  $\theta$ 에 대한 보정계수로서

$$f_\theta = \begin{cases} (10 \frac{a}{t})^{-\frac{1}{2} \log A_\theta}; & 0.001 \leq \frac{a}{t} \leq 0.1 \\ \text{where, } A_\theta = 13.096 \times 10^{-3} + 28.119 \times 10^{-3} \theta - 139.45 \times 10^{-6} \theta^2 & \\ 1.0 & ; \frac{a}{t} \geq 0.1 \end{cases} \quad (7)$$

이고, 식(6)에서

$f_{\theta,\theta}$  : 실제 용접토우각  $\theta$ 에 대한 식(7)의 값,

$f_{\theta,70}$  : 용접토우각  $70^\circ$  일때의 식(7)의 값

이며,  $25^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ 이다.

셋째 식은 용접토우반경  $\rho$ 의 영향에 대한 보정계수로서, 다음과 같다.

$$f_\rho = \begin{cases} 1.0 - A_\rho e^{-B_\rho(\rho/t)} & ; a/t \leq 0.1 \\ 1.0 & ; a/t > 0.1 \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $A_\rho = A_{\rho 1} + A_{\rho 2}(\rho/t - A_{\rho 3})$

$$B_\rho = B_{\rho 1} + B_{\rho 2}(\rho/t)^2$$

이고, 계수  $A_{\rho 1}, A_{\rho 2}, A_{\rho 3}$  및  $B_{\rho 1}, B_{\rho 2}$ 는 Table 2와 같다.

Table 2 Curve fitting coefficients for  $f_p$ .

Loading	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$A_{p3}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
Bending	0.70754	-0.020160	-0.024502	75.323	-1541.7
Membrane	0.71032	-0.024015	-0.028061	105.29	-1993.8

4. 인접균열간 간섭효과

동일 평면상에 존재하는 복수표면균열은 합체(colalcescence)시까지 서로 간섭하며 성장한다. 이때 표면점에서는 간섭효과가 있으나, 최심점에서 무시할 수 있다[3]. 2차원 관통균열의 경우, 인접균열의 간섭효과에 관한 연구가 다수 수행된 바 있으나[4,5], 3차원 표면균열에 대하여는 유한요소법 및 체적력법등 해석적 방법에 의한 시도가 이루어지고 있지만 아직 체계화되지 못한 상태이다.

본 논문에서는 간섭계수를 산정하기 위하여  $i$  田등[6]이 제안한 방법을 이용하였는데, 그 개요는 다음과 같다. Fig. 4에 보인바와 같이 복수표면균열의 판 표면에서의 응력확대계수는 표면점에서의 간섭계수를 도입하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

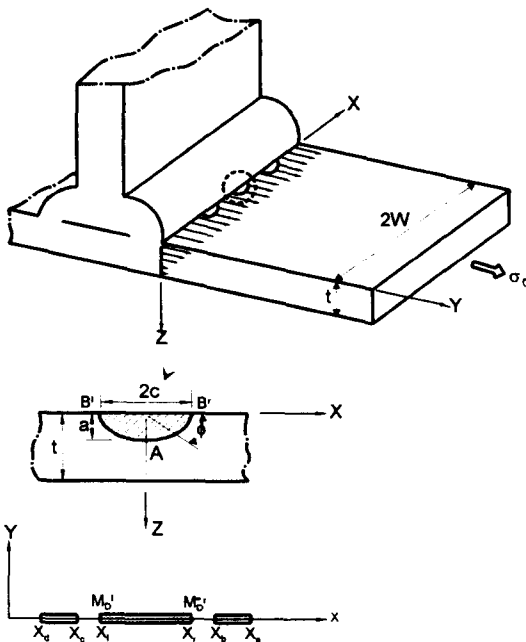


Fig. 4 Interaction effect of multiple surface cracks in welded joint

$$K_B = M_t M_s M_D \sigma \sqrt{\pi a/Q} \tag{9}$$

여기서,  $M_t$  는 평판중 단일표면균열에 대한 수정계수로서 Newman-Raju 식으로부터 구할 수 있다. 단, 복수표면균열의 경우에는 인접균열간의 간섭효과가 지배적이기 때문에 판폭방향 유한폭의 영향은 고려하지 않았다[7].  $M_s$ 는 판표면에서의 응력분포에 대한 수정계수로, 균열부위 판표면에서 폭방향으로의 응력분포가 일정하다고 가정하면  $M_s = 1.0$  이 된다.

끝으로, 간섭계수  $M_D$ 는 균열의 좌단과 우단에서 각각 다음과 같다.

$$M_b = \sqrt{\frac{x_i - x_d}{(x_r - x_i)^2 (x_i - x_r)}} [(x_r - x_i) - (x_r - x_i) \left\{ 1 - \frac{E(k_i)}{K(k_i)} \right\}]$$

$$M_b' = \sqrt{\frac{x_a - x_r}{(x_b - x_r)(x_r - x_i)^2}} [(x_r - x_i) - (x_b - x_i) \left\{ 1 - \frac{E(k_r)}{K(k_r)} \right\}] \tag{10}$$

여기서,  $x$ 는 Fig. 4에서 보인 각 균열단부의 좌표값이고,  $K(k)$  및  $E(k)$ 는 각각 제1종 및 제2종의 완전타원적분이며,

$$k_l = \sqrt{\frac{(x_r - x_i)(x_c - x_d)}{(x_r - x_c)(x_i - x_d)}} \tag{11}$$

$$k_r = \sqrt{\frac{(x_a - x_b)(x_r - x_i)}{(x_a - x_r)(x_b - x_i)}}$$

이다.

5. 균열의 합체 및 합체균열의 재정의

복수균열에 대한 대표적인 규정이라 할 수 있는 ASME Code : Section XI에서는, 검출된 결함을 이들을 포함하는 4각형으로 간주하여 이에 내접하는 타원균열 또는, 반타원 표면균열로 정의한다. 즉, 균열의 근접도에 따라 처음부터 합체균열 또는, 독립균열로 취급하고 있고 더우기, 균열의 합체판정은 검출시에 한하며, 피로균열 진전중에 대하여는 전혀 언급되어 있지 않다.

복수균열이 간섭, 합체과정을 거쳐 성장할 때, Fig. 5에서와 같이 인접균열간 간격  $\delta$ 가 어느 일정한 기준치 이하에 도달하면 합체된 것으로 보는

것이 일반적이다. 합체 기준치의 산정에는 여러 가지 방법이 있으나, 그중 대표적인 예는 다음과 같다.

(i) ASME Boiler and Pressure Vessel Code ; Sec.XI [8] : 인접 두 균열간 거리가 두 균열의 깊이 중 큰 것의 2배 이내일 때를 합체로 간주한다.

$$\delta_o = 2 \text{Max}(a_1, a_2)$$

(ii) BSI PD6493 [9] :

인접 두 균열간 거리가 두 균열의 길이의 합보다 같거나 작을 경우 합체로 본다.

$$\delta_o = c_1 + c_2$$

(iii) 표면점의 연결 [10] :

균열 간격이 0이 될 때를 합체로 정의한다.

$$\delta_o = 0$$

본 논문에서는 균열합체 기준으로서 (iii)을 택하였으며, 합체가 순간적으로 이루어지는 것으로 보아 합체 이후의 균열치수를 다음과 같이 재정의 하였다.

$$\text{합체균열의길이} : a' = \text{Max}(a_1, a_2) \quad (12)$$

$$\text{합체균열의 } \frac{1}{2} \text{ 의 길이} : c' = c_1 + c_2 + \frac{\delta}{2}$$

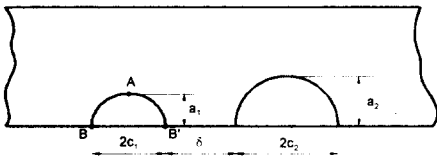


Fig. 5 Coalescence of adjacent surface cracks

### 6. 균열진전해석

일반적으로, 균열진전속도는 다음과 같이 응력 확대계수 범위와 응력비의 함수로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (13)$$

대표적인 피로균열 진전식으로는 다음과 같은 식들이 있으나, 본 논문에서는 가장 광범위하게 사용되고 있는 (i)의 Paris식을 택하기로 한다.

(i) Paris식[11]:  $da/dN = C(\Delta K)^m$

(ii) Walker식[12]:  $da/dN = C[K_{max}(1-R)^n]^m \quad (14)$

(iii) Elber식[13]:  $da/dN = C[(0.5 + 0.4R)\Delta K]^m$

여기서, c, m 및 n은 각각 재료특성치로서 실험적으로 구해지는 값들이다.

이하에서는 균열진전해석과정에 관하여 기술하기로 한다. 먼저 식(13)의 좌변에서 미소차분을 고려하고, 각 차분구간에서  $\Delta K$ 는 일정한 것으로 간주하여 그 진전량을 계산하였다.

복수균열에서, 균열 i의 깊이 및 길이방향 진전량의 증분을 각각  $\Delta a_i$  및  $\Delta c_i$ 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta a_i &= \alpha \Delta a_i \\ \Delta c_i &= \alpha \Delta c_i \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $\alpha$ 는 균열진전률로서 0.01로 정하였는데, 이는 실용적으로 충분한 정도이다[14].

다음, 균열의 최심점(Fig. 5의 A점) 및 표면점(Fig. 5의 B점 및 B'점)에서의 반복수의 증분을 아래와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \Delta N_i^A &= \alpha a_i / f(\Delta K^A, R) \\ \Delta N_i^B &= \alpha c_i^B / f(\Delta K^B, R) \\ \Delta N_i^{B'} &= \alpha c_i^{B'} / f(\Delta K^{B'}, R) \end{aligned} \quad (16)$$

즉, 균열이 미소량만큼 진전하는데에 소요되는 반복수의 증분을 얻게 된다.

이들  $\Delta N_i$  중 최소치를  $\Delta N_{min}$ 이라하면, 균열의 깊이 및 길이방향 진전량의 증분은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta a_i &= f(\Delta K^A, R) \Delta N_{min} \\ \Delta c_i^B &= f(\Delta K^B, R) \Delta N_{min} \\ \Delta c_i^{B'} &= f(\Delta K^{B'}, R) \Delta N_{min} \end{aligned} \quad (17)$$

이후 식(15)의 우변은 다음과 같이 되고,

$$\begin{aligned} a'_i &= a_i + \Delta a_i \\ c'_i &= c_i + \Delta c_i \end{aligned} \quad (18)$$

판두께 관통조건까지 반복계산과정을 거치게 된다.

### 7. 피로수명 추정결과 및 고찰

이상의 과정을 통하여 개발된 "구조요소의 피로수명예측 기법"의 정도 및 실용성을 확인하기 위하여, 평판 및 필릿용접부에 존재하는 단일 및 복수의 직렬표면균열에 대한 해석을 수행하고 이를 기존의 실험결과와 비교,평가하였다.

Table 3 Crack coalescence and penetration life (Tension load)

No. of Cracks	Specimen Code	Dimension of Specimen & Initial Crack Size(mm)						s**	λ***	W	t	Stress Range (kg m <sup>-2</sup> )	Initiation Life: No. (×10 <sup>5</sup> ) cycles	Coalescence Life : N <sub>c</sub> (×10 <sup>5</sup> )			Penetration Life : N <sub>p</sub> (×10 <sup>5</sup> )		
		a <sub>1</sub> *	c <sub>1</sub> *	a <sub>1</sub> /c <sub>1</sub>	a <sub>2</sub> *	c <sub>2</sub> *	a <sub>2</sub> /c <sub>2</sub>							Predicted (N <sub>CP</sub> )	Exp. (N <sub>CE</sub> )	$\frac{N_{CP}}{N_{CE}}$	Predicted (N <sub>PP</sub> )	Exp. (N <sub>PE</sub> )	$\frac{N_{PP}}{N_{PE}}$
1	6A1P	2.86	3.17	0.90	-	-	-	-	179.5	20.4	20.0	1.18	-	-	-	3.65	4.35	0.89	
	6A1Q	5.35	4.82	1.11	-	-	-	-	179.8	21.4	25.5	3.12	-	-	-	3.89	4.05	0.96	
	6A1R	2.56	3.32	0.77	-	-	-	-	178.9	21.3	22.5	1.02	-	-	-	2.99	3.05	0.93	
	6A2	12.64	13.17	0.96	-	-	-	-	180.9	21.7	25.4	1.35	-	-	-	1.50	1.72	0.87	
	7A1	5.30	5.20	1.02	-	-	-	-	180.2	21.2	22.5	6.12	-	-	-	7.53	8.00	0.94	
	7A2	5.64	4.21	1.34	-	-	-	-	179.7	20.9	22.5	1.68	-	-	-	3.22	3.95	0.82	
	8A2	11.69	7.59	1.54	-	-	-	-	161.2	40.3	20.0	0.64	-	-	-	2.08	2.15	0.97	
2	6A3	3.18	3.66	0.87	3.39	4.78	0.71	9.54	0.88	180.2	21.2	21.3	4.11	4.17	4.79	0.87	5.25	5.33	0.99
	6A6	6.32	10.72	0.59	6.76	10.73	0.63	38.80	0.55	185.3	21.8	25.4	0.45	0.69	0.71	0.97	0.73	0.76	0.96
	7A4	5.20	3.47	1.50	5.82	3.22	1.81	9.98	0.66	181.0	20.8	22.5	0.72	0.96	1.30	0.74	1.77	2.10	0.84
	7A5	3.17	3.30	0.96	2.74	3.23	0.85	14.98	0.44	179.4	21.1	22.5	1.54	2.76	3.85	0.72	3.39	4.18	0.81
	7A6	3.20	3.59	0.89	4.14	6.27	0.66	17.48	0.56	180.5	18.8	15.9	2.00	4.06	4.40	0.92	5.08	6.20	0.82
	8A4	5.07	5.17	0.98	10.33	6.02	1.75	30.03	0.37	179.4	39.0	20.0	0.50	1.57	1.90	0.83	1.91	2.18	0.88
	8A5	10.14	7.92	1.28	6.63	10.87	0.61	35.10	0.34	179.4	39.0	20.0	0.45	1.10	1.16	0.95	1.43	1.53	0.93
	8A6	6.72	6.05	1.11	10.92	6.96	1.57	20.16	0.65	180.6	42.0	20.0	0.50	0.83	1.00	0.83	1.38	1.73	0.91
8A7	5.68	5.36	1.06	10.56	6.36	1.66	40.19	0.29	178.6	40.6	20.0	0.20	1.53	1.40	1.09	1.70	1.84	0.92	

Table 4 Crack coalescence and penetration life(Bending load)

No. of Cracks	Specimen Code	Dimension of Specimen & Initial Crack Size(mm)						s**	λ***	W	t	Stress Range (kg m <sup>-2</sup> )	Initiation Life: No. (×10 <sup>5</sup> ) cycles	Coalescence Life : N <sub>c</sub> (×10 <sup>5</sup> )			Penetration Life : N <sub>p</sub> (×10 <sup>5</sup> )		
		a <sub>1</sub> *	c <sub>1</sub> *	a <sub>1</sub> /c <sub>1</sub>	a <sub>2</sub> *	c <sub>2</sub> *	a <sub>2</sub> /c <sub>2</sub>							Predicted (N <sub>CP</sub> )	Exp. (N <sub>CE</sub> )	$\frac{N_{CP}}{N_{CE}}$	Predicted (N <sub>PP</sub> )	Exp. (N <sub>PE</sub> )	$\frac{N_{PP}}{N_{PE}}$
1	6B2	3.08	10.99	0.28	-	-	-	-	249.6	18.1	26.6	0.32	-	-	-	3.51	3.35	1.05	
	7B1P	6.25	7.53	0.83	-	-	-	-	250.1	16.9	28.4	12.00	-	-	-	15.40	14.80	1.04	
	7B1Q	2.90	2.71	1.07	-	-	-	-	249.9	18.1	29.7	2.92	-	-	-	7.26	8.00	0.91	
	8B2	11.26	9.87	1.14	-	-	-	-	249.2	40.2	25.0	1.02	-	-	-	3.76	4.80	0.78	
	8B14	10.06	7.18	1.4	-	-	-	-	987.2	41.9	23.7	0.41	-	-	-	5.60	8.00	0.70	
2	6B4Q	4.86	6.75	0.72	1.98	2.64	0.75	14.94	0.63	248.4	18.0	26.7	2.75	3.15	3.65	0.86	5.69	4.65	1.22
	6B3Q	3.08	3.46	0.89	2.90	2.90	1.00	15.02	0.42	249.8	18.1	25.1	7.40	8.34	11.10	0.75	11.60	13.15	0.88
	7B5	1.27	1.33	0.96	2.37	2.21	1.07	14.20	0.25	249.3	18.2	26.1	3.07	5.59	9.85	0.57	9.41	12.00	0.78
	8B3	5.99	7.13	0.84	5.99	7.13	0.84	29.93	0.48	251.4	39.9	25.2	0.68	1.42	2.05	0.69	3.39	4.15	0.82
	8B4	5.96	6.54	0.91	10.32	7.70	1.34	30.17	0.47	250.1	39.7	25.4	0.57	1.15	1.51	0.76	2.86	3.10	0.92
	8B5	10.35	8.41	1.23	7.16	11.94	0.60	35.02	0.58	250.7	39.8	25.2	0.54	0.96	1.08	0.89	2.59	2.98	0.78
	8B7Q	6.23	7.41	0.84	7.89	12.72	0.62	40.26	0.50	240.7	41.5	21.7	1.00	2.13	2.31	0.92	4.33	4.23	1.02
	8B7R	10.35	8.09	1.28	7.04	12.55	0.57	40.16	0.51	240.1	41.4	23.9	0.72	1.41	2.08	0.68	3.04	3.58	0.85

\* a : crack depth, c : half crack length

\*\* crack center-to-center distance

\*\*\* intimacy btm two cracks :  $\lambda = (c_1 + c_2)/s$

7.1 유한평판

본 피로수명 예측기법의 정도를 검증하기 위하여 29개 평판시편에 대한 飯田의 실험결과[15]와 비교하였다. 이들 시편의 재질은 A533B강이고, 재질은 시편 6□의 경우는  $C=1.65 \times 10^{-11}$ ,  $m=2.97$ 이며, 시편 7□ 및 8□에서는  $C=5.06 \times 10^{-11}$ ,  $m=3.17$ 이며, 응력비  $R \approx 0$ 이고, 최종수명인 판관통수명은  $a/t=0.85$ 일 때이다.

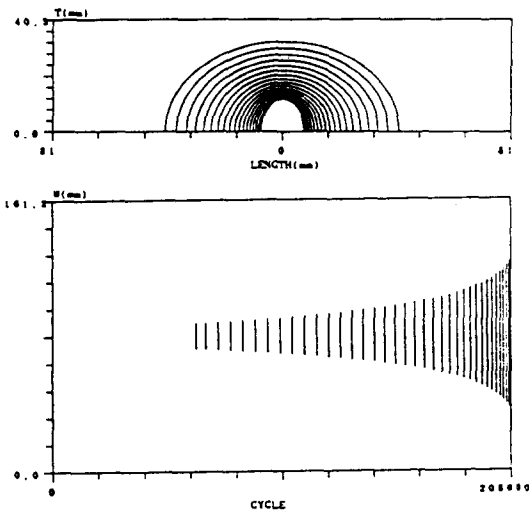


Fig. 6 Predicted crack growth(8A2)

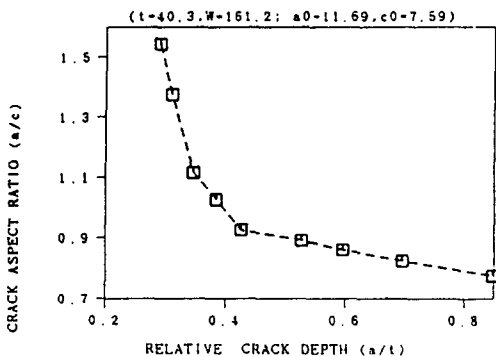


Fig. 7 Change of crack aspect ratio(8A2)

추정 및 실험치와 함께 비교결과를 인장 및 굽힘하중으로 나누어 Table 3 및 4에 각각 나타냈으며, 인장 및 굽힘하중 작용시 균열의 성장, 합체 및 파단과정의 대표적인 예를, 단일 및 복수균열의 경우로 나누어 Fig. 6 - Fig. 9 및 Fig. 10 - Fig. 13까지에 보였다.

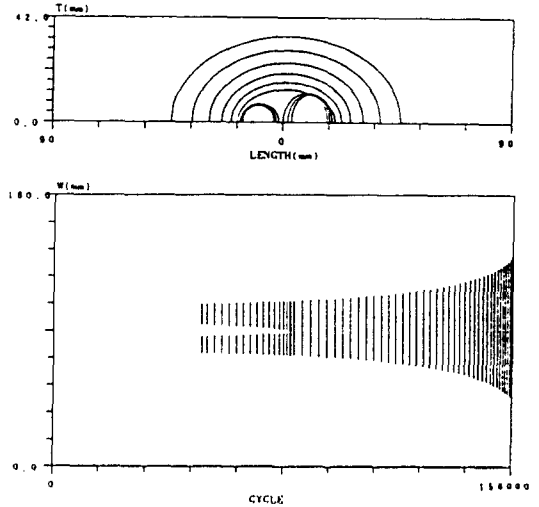


Fig. 8 Predicted crack growth(8A6)

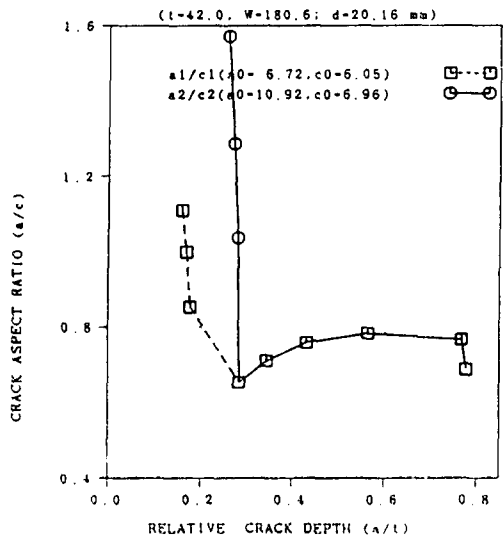


Fig. 9 Change of crack aspect ratio(8A6)



2개 직렬 복수표면균열 시편에 대한 합체수명의 비 즉, 추정치/실험치를 살펴보면 인장하중 및 굽힘하중에서 그 평균치는 각각 0.88과 0.77이고, 표준편차는 두 경우 모두 0.12이다. 평균치의 오차는 각각 -12%와 -23%로써 양자 모두 안전측의 값을 보이며, 인장하중의 정도가 2배가량 좋다. 합체수명 전체로 보면, 평균치는 0.83, 표준편차는 0.13으로 하한치가 다소 낮은 경향이 있으나 공학적으로 안전측의 값이다.

관관통수명을 고찰해보면, 인장하중의 경우 평균치는 단일균열이 0.92, 복수균열이 0.90으로 단일균열쪽이 다소 크고, 표준편차는 양자가 0.06으로 매우 작다. 굽힘하중의 경우, 평균치는 단일 및 복수균열에서 각각 0.90 및 0.92로서 인장하중의 경우와 반대양상을 보이며, 표준편차는 각각 0.16과 0.14로서 복수균열쪽의 정도가 다소 좋다.

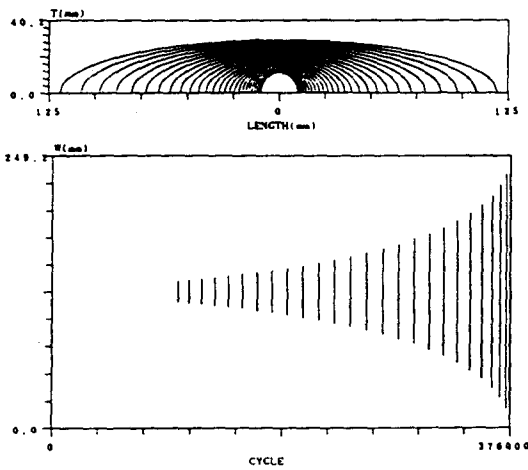


Fig. 10 Predicted crack growth(8B2)

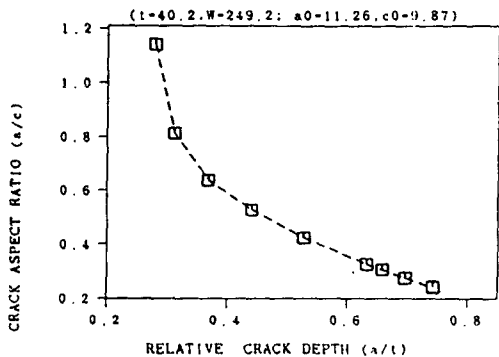


Fig. 11 Change of crack aspect ratio(8B2)

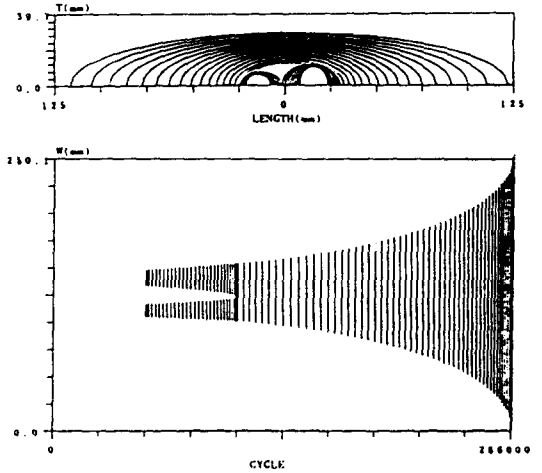


Fig. 12 Predicted crack growth(8B4)

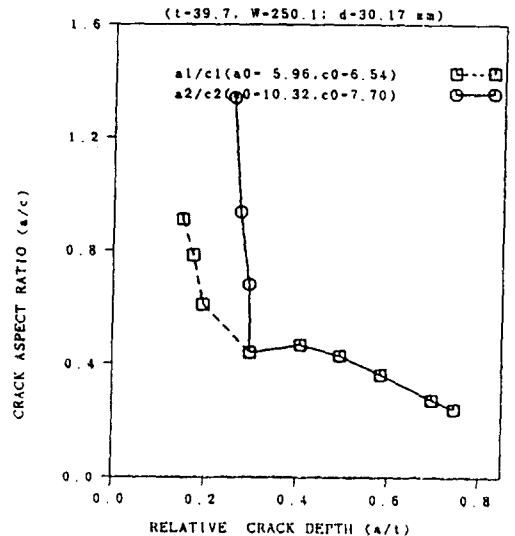


Fig. 13 Change of crack aspect ratio(8B4)

그러나, 굽힘하중에 대한 추정정도는 인장의 경우에 비해 2.5배쯤 좋지 못함을 알 수 있다.

결국, 인장 및 굽힘에 대해 평균치는 0.91로 양자가 같고, 표준편차는 각각 0.06 및 0.14로서 굽힘하중쪽이 2배이상의 편차가 있으나, 전체적으로 평균치가 0.91, 표준편차 0.10으로 만족할 만한 범위의 값을 주고 있다.

이상의 고찰로부터 본 피로수명 추정기법은 충분한 정도 및 실용성이 있음을 확인할 수 있다.

**7.2 T-필릿 용접부재**

T-필릿 용접부재에 대하여는 O. Vosikovsky 등의 실험결과[16]와 비교, 고찰하였다. 하중조건은 일정진폭 3점굽힘이고, 응력비  $R=0.05$ , 주파수는  $4\sim 20\text{Hz}$ 이다. 한편, 파단수명은 최대균열깊이가 0.5t에 도달한 시점이며, 재료상수  $m = 3.0$ ,  $C = 10 \times 10^{-11} (m, \text{MPa})$ 이다.

실제, 용접부 피로현상에 있어서는 균열전전의 초기단계 즉, 미소균열의 발생 및 합체과정이 중요한 문제이나, 본 해석에서는 균열발생이후의 균열전파수명을 고찰대상으로 하여 균열발생수명은 실험결과를 그대로 이용하였다.

시편 및 용접부 상세와 함께, 추정 피로수명을 실험결과와 비교하여 Table 5에 보였다. Fig.14에 추정 S-N곡선을 실험치와 함께 나타내었으며, Fig. 15에는 용접부 피로수명에 대한 판두께의 영향을 보였다.

Table 5 및 Fig. 14에 보인 바와 같이, 추정치는 실험치에 비해 평균 10%정도 높은 값을 주고 있다. 이것은 비교대상 실험모형의 경우 다수의 초기 미소균열을 포함한 반면, 본 추정기법은 최초 발견된 가장 깊은 균열만을 단일균열로 모형화한 것에 기인하는 것으로, 참고문헌[16]도 이와 유사한 결과를 보이고 있다. 따라서, 용접부에 대한 보다 합리적인 피로수명 추정을 위하여는 복수 균열 모델링기법이 도입되어야 할 것이다. 더우기, 상당한 편차가 존재할 수 있는 피로시험에서 두께별로 각 한개씩만의 실험결과와 비교한 점을 감안할 때, 본 추정치는 충분히 만족할 만한 정도라 할 수 있다. 이때, 동일 두께에서의 오차는 하중크기가 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내고 있으며, Fig. 14 및 Fig. 15로부터 하중증가 및 두께증가에 따른 피로수명의 감소현상을 각각 재확인 할 수 있다.

Table 5 Total fatigue life for T-fillet joints

Plate Thickness (mm)	Weld Details		Initial Crack Size $a_0$ (mm)	Stress Range (MPa)	Crack Initiation Life: $N_i$ ( $\times 10^5$ cycles)	Total Fatigue Life ( $\times 10^5$ cycles)		$\frac{N_{TP}}{N_{TE}}$
	Toe Angle $\theta$ (°)	Toe Radius $\rho$ (mm)				Predicted $N_{TP}$	Experimental $N_{TE}$	
16	39	1.3	0.5	-	-	-	-	-
				150	3.20	12.30	12.70	0.97
				200	1.47	5.31	4.60	1.15
				100	11.30	34.80	39.10	0.89
26	39	1.4	0.5	150	3.90	10.90	11.30	0.97
				200	0.88	3.82	3.36	1.14
				100	5.00	15.70	12.10	1.30
				150	1.05	4.21	3.70	1.14
52	40	1.2	1.0	200	0.47	1.80	1.37	1.31
				100	3.30	10.60	12.60	0.84
78	46	1.5	1.0	150	0.95	3.10	2.82	1.10
				200	0.31	1.22	0.97	1.26
103	43	1.6	1.5	100	2.30	7.91	6.60	1.20
				150	0.75	2.41	1.67	1.44
				-	-	-	-	-

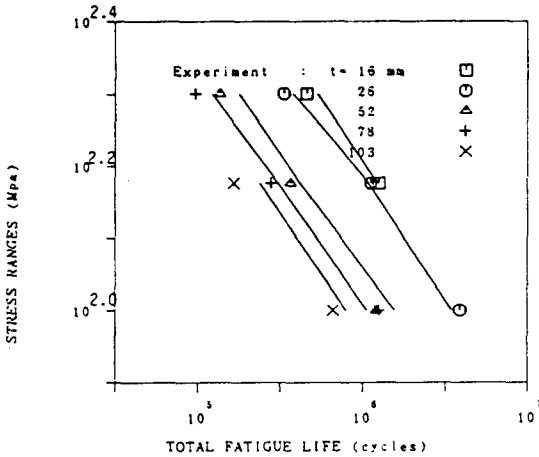


Fig. 14 Predicted S-N curves

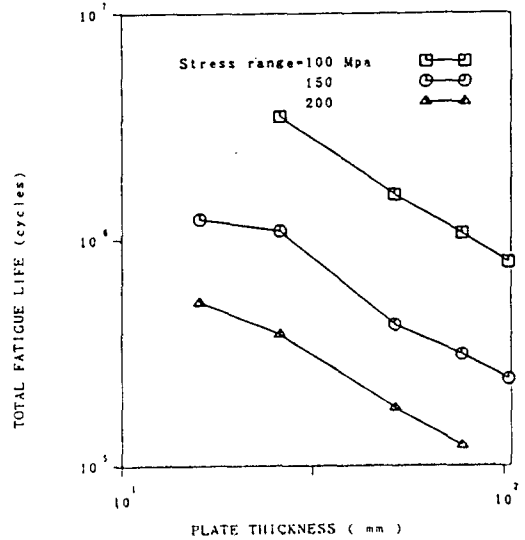


Fig. 15 Thickness effect on fatigue life

### 8. 결 언

유한평판에 존재하는 직렬 복수표면균열 및 T-필릿 용접부에서의 피로균열 성장거동 및 전파수명 추정법을 개발하였으며, 그 실용성을 확인하였다. 이상으로부터 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 유한평판에 대하여 인장 16개, 굽힘 13개 등 총 29개 시편에 대한 비교평가결과, 추정합체수명은 실험치의 70%-96%, 관통수명은 81%-101% 범위의 값으로, 그 정도 및 실용성이 검증되었다.

(2) T-필릿 용접부의 경우에는, 두께 6종의 총 13개 시편에 대하여 고찰한 결과, 추정피로수명은 실험치에 비해 평균 10% 정도 높은 값을 제시하고 있으나, 실용적으로 만족할 만한 정도이다.

(3) 본 추정기법에서는 직렬복수표면균열의 피로균열 전파과정을 합체 전·후로 구분하여 다루었으며, 균열전파과정중의 균열형상 변화를 고려하였

다. 또한, 복수균열 상호간의 간섭효과와 용접부에서의 응력확대집중계수를 도입한 점이 특징이라 할 수 있다.

추후, 응력비 효과 및 3개이상의 균열에 대한 검증과 인장, 굽힘 복합하중의 경우 또한, 균열성장과정중의 형상변화 및 용접부에서의 균열발생과정등에 대한 엄밀한 고찰이 이루어져야 할 것으로 본다.

### 참 고 문 헌

- [1] Newman, J.C. and Raju, I.S., *Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads*, NASA, T.P. 1578, 1979
- [2] Dijkstra, O.D., et al., "Fatigue crack growth calculations using stress intensity factors for weld toe geometries", *Proc. of the 8th OMAE*, Mar.19-23, 1989
- [3] 村上敬宜 外, "二つの等大半た"形き裂の干渉おける 應力擴大係數", *日本機械學會論文集(A編)*, 47卷, 415号, 1981

- [4] 石田 誠, “任意の直線き裂群を持つ板における  
應力擴大係數の解析”, 日本機械學會論文集(第1  
部), 35卷, 277号, 1969
- [5] 山本善之 外, “切欠き底から發生したクラックの  
應力擴大係數” 日本造船學會論文集, 第137号,  
1975
- [6] 石田 誠, 破壊力學と材料強度講座 : き裂の彈性  
解と 應力擴大係數, 培風館, 1971
- [7] 後川理, “溶接継手部の疲勞き裂伝播シミュレー  
ション解析”, 西部造船會會報, 第70号, 1985
- [8] ASME, *Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI : Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Append. A*, 1980
- [9] British Standard Institute, *PD 6493 Guidance on Some Methods for the Deviation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints*, 1980
- [10] 高温構造安全技術研究組合, *ISES 8218 BWR 1 次冷却系配管の健全性 評價に關する 研究*, 1982
- [11] Paris, P.C. and Erdogan, F., “A critical analysis of crack propagation laws”, *Trans. ASME Ser. D85/3*, 1963
- [12] Walker, K., *The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum*, ASTM STP 462, 1970
- [13] Elber, W., *The significance of fatigue crack closure*, ASTM STP 486, 1971
- [14] 吉田敏雄, 結成良治, “鋼構造物の疲勞き裂進展壽命評價システム”, 壓力技術, 第24卷, 3号, 1986
- [15] 飯田國廣 外, “複數表面缺陷からの疲勞龜裂伝播壽命評價(第1報), 直列配置複數龜裂問題”, 日本造船學會論文集, 第148号, 1980
- [16] Vosikovskiy, O., et al., “Fracture mechanics assessment of fatigue life of welded plate T-joints, including thickness effect”, *Pro. of the BOSS '85, Delft, the Netherland*, Jul. 1-5, 1985