

〈論 文〉

상하좌우 대칭으로 분포된 작은 크랙근방에서의 중앙크랙의 역학적 거동

趙在雄* · 李億燮** · 金相哲**

(1990년 3월 6일 접수)

The Mechanical Behavior of the Center Crack Having Symmetrically Distributed Small Cracks

J. U. Cho, O. S. Lee and S. C. Kim

Key Words : Contour Lines(등고선), Normalized Stress Intensity Factor(등응력 확대계수), Superposition Method(중첩법), Plastic Zone(소성영역), Interaction(상호간섭), Least Square Method(최소자승법), Total Energy Method(전에너지법)

Abstract

In this study, the mechanical behaviors of center crack having symmetrically distributed small cracks are investigated. For the case that a center crack is surrounded by four small cracks which are symmetrically distributed for the center crack, the contour lines of normalized stress intensity factor (K_I/K_0) of the center crack corresponding to the position of the small crack tip are established. It is found that the stress intensity factor of the center crack with small cracks can be estimated by these contour lines. It is also shown that in case of multiple distributed small cracks, the stress intensity factor for the center crack may be efficiently determined by superposition method. The behavior and shape of plastic zone due to the interaction between the center crack and small cracks are analyzed by the finite element method.

1. 서 론

기계구조물 내부에 존재하는 크랙들은 밀집하여 존재하는 경우가 많기 때문에, 단일 피로크랙의 성장특성과 함께 근접분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장도 고려해야 할 경우가 많다. 또한 크랙상호간의 간섭현상은 아직 많은 연구가 되어져야 할 분야이며, 이 경우에는 크랙진전의 양상도 단일크랙 때와는 다르므로 이 현상에 대해서도 많은 연구가 필요하다. 결국, 재료의 파괴는 재료내부에 존재하고

있는 근접된 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장으로 일어나는 것이 대부분이므로 이러한 현상들을 상세하게 고려하여 소재의 강도를 정확히 평가하여 구조물의 정밀안전 설계에 필요한 기초자료를 제공해야 할 것이다. 분포크랙의 발생은 Corrosion Fatigue^(1,2) 조건하에서 잘 나타나는데 이들에 대하여는 통계적인 방법^(3,4)과 유한요소법^(5~8)등으로 해석한 연구가 발표된 바 있다.

종래의 유사한 연구결과에서는 무한판에서 두 개의 평형크랙들 사이에 크랙선단의 상호 간섭도를 수학적 해⁽⁹⁾로써 계산하여 응력확대계수를 결정하였다⁽²⁾.

그러나 본 연구에서는 작은 크랙이 중앙 크랙선

* 정회원, 천안공업전문대학 기계과

** 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

단 주위에 대칭으로 배치 분포되어 있는 유한 평판의 경우에 대한 것으로, 우선 균일분포하중을 받는 정방형판에 분포크랙이 있는 경우 분포크랙의 위치에 따른 중앙 크랙 선단에서의 응력확대계수의 변화를 유한요소법으로 해석하여 등응력확대계수 곡선들로 나타냈다. 그리고 크랙들 사이의 상호 간섭에 의해 일어나는 소성영역도 고려하여 그 안정성을 검토하여 보았는데, 특히 크랙들이 서로 가까와지면 그 크랙들 간에 상호간섭이 커져 소성영역이 크랙선단 주위에 크게 발생되므로써 크랙들은 쉽게 연결되고 합체로 인한 크랙성장이 되어 파괴됨을 예측할 수 있고 중앙 크랙선단 주위의 분포크랙의 위치에 따른 소성영역 변화도 유한요소법으로 해석하여 도식적으로 나타냈다.

본 논문의 연구결과를 종합하여 놓으면 구조물내에 분포되어 있는 크랙 또는 결함들의 위치와 갭수에 대응하여 그 안정성을 검토할 수 있는 설계기준을 정할 수 있다. 따라서 이러한 사항들을 체계적으로 연구하여 종합하면, 재료의 재질의 향상(재강입 등), 안전 설계 또는 안전수명의 평가(간접입 또는 원자력발전소등)에 필요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 예상이 된다.

2. 2차원 모델

본 연구에서는 관통 크랙이 같은 방향으로 분포되어 있는 경우로써, 2차원 모델을 택하였으며 중앙에 크랙을 갖는 정방형판을 선택하였다. Fig. 1은 중앙 크랙 주변에 이 크랙보다 크기가 작거나 같은 크랙들이 대칭으로 분포되어 있는 경우들 중 대표적인 것들을 나타낸 것이다. 이 모델은 구속조건이 상하, 좌우 모두 대칭이므로 해석은 판의 1/4 사선된 부분에 대해서만 유한요소해석을 하였으며

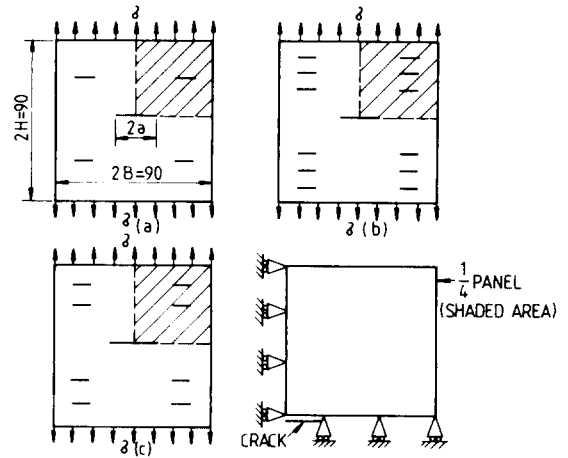


Fig. 1 Center cracked models with symmetrical small cracks and boundary condition

경계 조건은 Fig. 1과 같다.

3. 전에너지법과 중첩법의 적용

선형탄성체의 역학적거동을 해석하기 위하여 유한요소법을 이용하였다. 중앙 크랙선단에서의 응력확대계수의 결정에는 여러가지 방법이 있으나 비교적 오차가 작은 전에너지법을 이용하였다.

Fig. 2에서 중앙에 있는 주크랙 주위에 6개의 작은 크랙이 대칭으로 존재하고 있을 경우, Fig. 2의 (b)와 (c)로 분리시켜서 무차원화 응력확대계수(normalized stress intensity factor; K_i/K_0)로 표시할 수 있다. Fig. 2에서 (a)의 경우의 K_a/K_0 의 값을 중첩법으로 구하면

$$K_a/K_0 = K_b/K_0 + K_c/K_0 - K_0/K_0 = K_b/K_0 + K_c/K_0 - 1$$

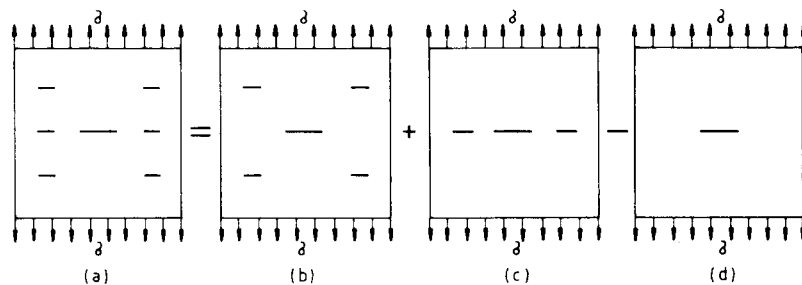


Fig. 2 Superposition concept applied to compound stress intensity factors

이 된다.

여기서 K_0 는 중앙크랙만 있는 경우의 응력확대 계수이다.

일반적으로 크랙이 여러개(N 개) 있을 때에는

$$K_{IN} = 1 + \sum_{n=1}^N (K_n - 1) + K_{N1}^{(10)}$$

이 성립한다.

여기서 K_{IN} , K_n : 무차원화 응력확대계수

K_{N1} : N 개 경계조건들의 상호간섭에 대한 보정항

크랙간의 거리가 떨어져 있을 때에는 크랙들의 상호간섭의 영향에 대한 보정항 K_{N1} 는 무시할 수 있다.

4. 해석결과 및 고찰

본 해석에서의 중앙 크랙의 길이는 $2a=20, 30, 40, 50\text{mm}$ 로 하였으며, 중앙 크랙주위에 대칭으로 분포되어 있는 작은 크랙의 길이는 10mm 로 하였다. 작은 크랙들이 존재할 경우 중앙크랙 선단에서의 응력확대계수(K_I)를 구하고 이를 중앙 크랙만 있는 경우의 응력확대계수(K_0)로 나누어 무차

원화 시킨 응력확대계수(K_I/K_0)를 결정하였다.

Figs. 3~6은 중앙 크랙의 길이 $2a=20, 30, 40, 50\text{mm}$ 일 때 작은 크랙 좌측 선단의 각 위치에서 중앙 크랙 선단의 무차원화 응력확대계수의 값이 같은 점들을 원할한 곡선으로 연결한 등고선들이다.

예를 들어 Fig. 7은 중앙크랙의 길이가 $2a=20\text{mm}$ 때에 작은 크랙이 수직방향으로 이동할 때의 중앙크랙선단의 무차원화 응력확대계수를 원할한 곡선으로 표시하여 놓은 것이다. 같은 방향으로 작은 크랙이 수평방향으로 이동할 때에 중앙크랙선단의 무차원화 응력확대계수를 Fig. 8에 보였다.

이 그림들에서 각 곡선에 표기한 기호 $a, b, c, d, e, f, g, A, B, C, D, E, F, G$, 및 H 는 다음과 같다. 즉 b 곡선은 Fig. 9에서 보인 바와 같이 작은 크랙의 좌측선단이 $b-b$ 직선을 따라 중심으로부터 상방으로 이동할 때의 K_I/K_0 의 변화를 나타낸 것이고, B 곡선은 작은 크랙의 좌측선단이 $B-B$ 직선을 따라 우측으로 이동하였을 때의 K_I/K_0 의 변화를 나타낸 것이다. $a, b, c, d, e, f, g, A, B, C, D, E, F, G, H$ 등의 곡선도 같은 결과를 갖는다.

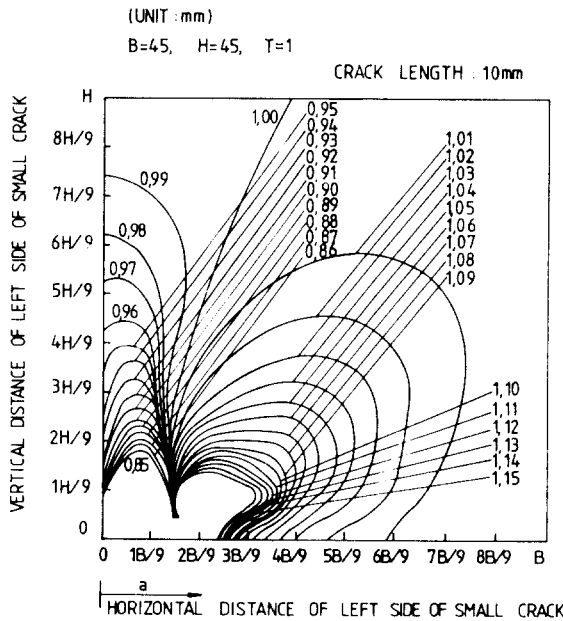


Fig. 3 Contour lines of normalized stress intensity factor, K_I/K_0 ($2a=20\text{mm}$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

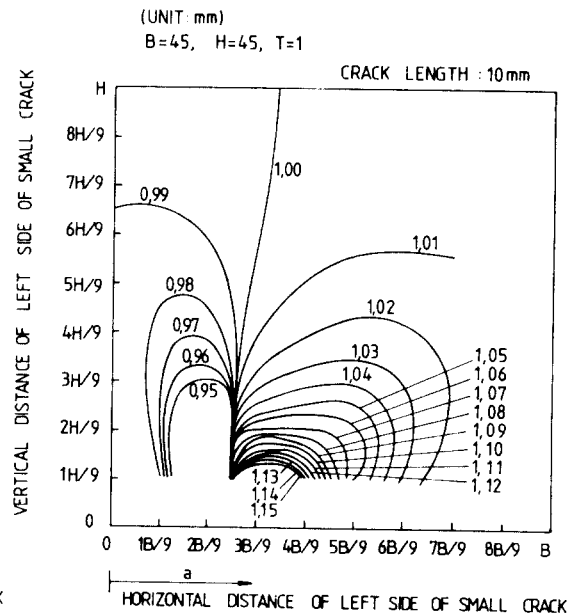


Fig. 4 Contour lines of normalized stress intensity factor, K_I/K_0 ($2a=30\text{mm}$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

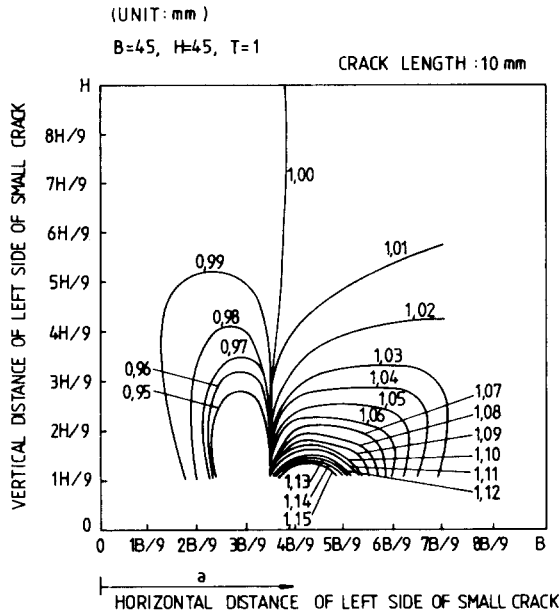


Fig. 5 Contour lines of normalized stress intensity factor, K_1/K_0 ($2a=40\text{mm}$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

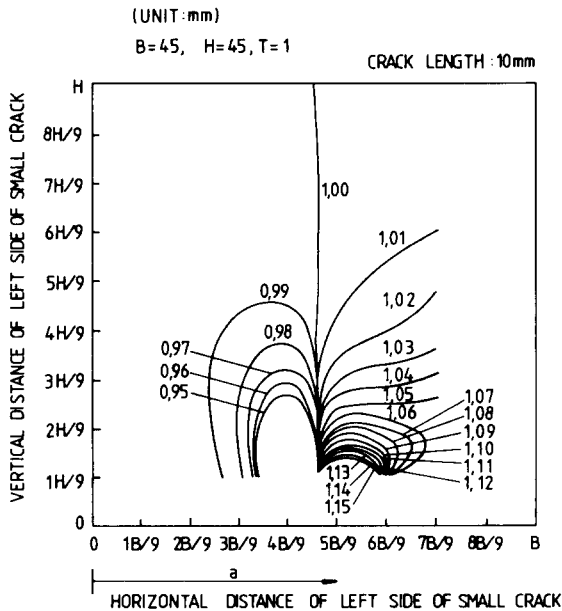


Fig. 6 Contour lines of normalized stress intensity factor, K_1/K_0 ($2a=50\text{mm}$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

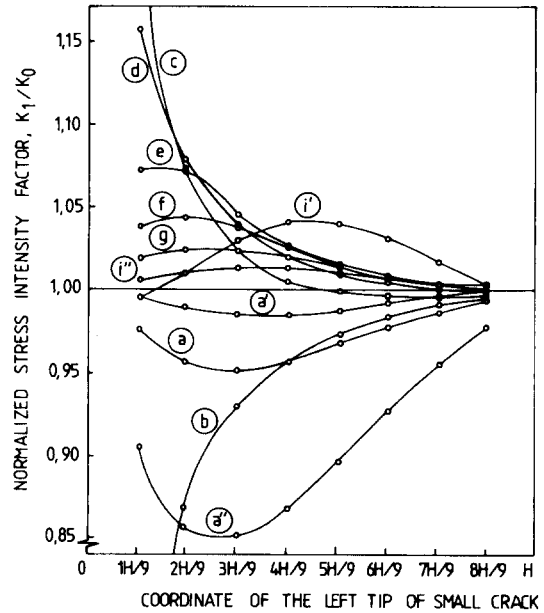


Fig. 7 K_1/K_0 vs. relative position of small crack in the vertical direction ($2a=20\text{mm}$)

Fig. 7에 있어서의 a' , a'' 및 i' , i'' 곡선은 Fig. 10에서 보인바와 같이 a' 및 a'' 는 길이 10mm 및 20mm의 작은 크랙의 중앙점이 a-a'직선을 따라 상방으로 이동할 때에 대한 곡선이고, i' 및 i'' 는 길이 10mm인 작은 크랙의 좌측선단이 i-i'직선을 따라 상방으로 이동할 때에 대한 곡선이다.

Fig. 7 및 Fig. 8을 이용하여 작은 크랙의 좌측선단의 위치에 따르는 중앙크랙 선단의 무차원화 시킨 등응력확대계수 곡선들을 작성할 수 있다.

Figs. 3~6의 결과를 관찰해 보면 작은 크랙의 위치에 따라 중앙 크랙 선단에서의 응력확대계수 크기가 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

또한 작은 크랙의 좌측선단이 중앙 크랙 우측선단보다 좌측에 있을 때에는 포물선의 형태가 되고, 작은 크랙의 좌측선단이 중앙 크랙 우측선단보다 우측에 있는 경우에는 변형된 원의 모양을 이루고 있음을 알 수 있다. 이것을 다음의 두가지 경우로 나누어 이에 대한 곡선의 식을 최소자승법 (least square method)으로써 작은 크랙의 좌측선단의 위치 즉, 직각 좌표계 (x, y) 와 극 좌표계 (r, θ) 로 표시하여 보았다^(11,12).

즉, 무차원화 응력확대계수가 포물선을 이루는 곡선에 대하여는 직각좌표계로 해석하였고 변형된

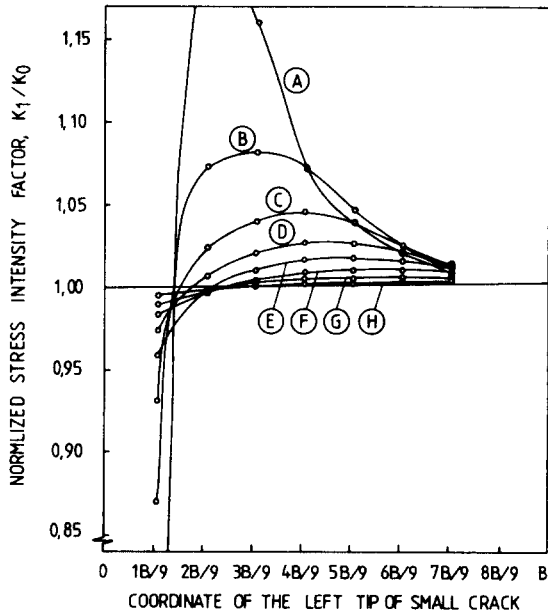


Fig. 8 K_1/K_0 vs. relative position of small crack in the horizontal direction ($2a=20\text{mm}$)

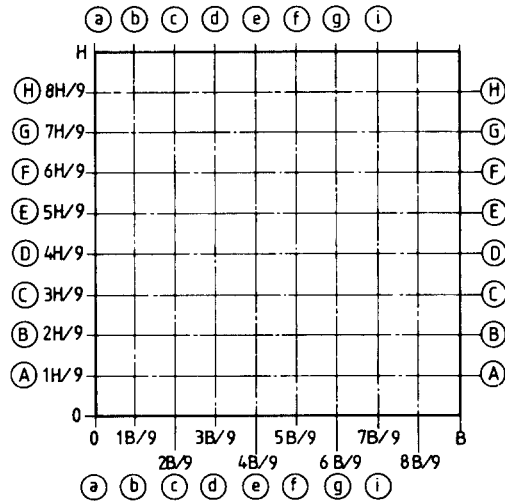


Fig. 9 Schematic illustration for the position of the left tip of small crack

원의 형상을 이루는 것에 대하여는 극좌표계로 해석하였다. 원점은 중앙 크랙 우측선단보다 좌측으로 2.5mm인 점을 기준으로 취하였으며 미지의 계수들은 f 및 a/B 의 함수이다. a/B 는 시험편 폭에 대한 중앙크랙 길이의 비이며 본 연구에서의 범위는 $1/9 \leq a/B \leq 5/9$ 이다. F 는 무차원화 응력확대

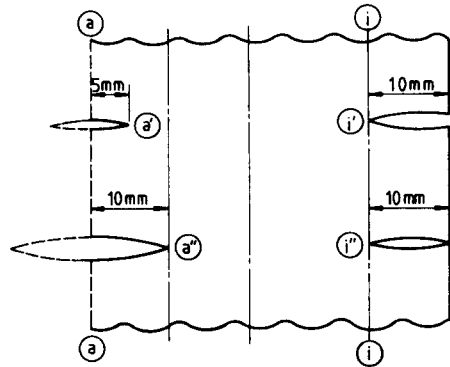


Fig. 10 The illustration of a', a'', i', i'' curve in Fig. 7

계수 (K_1/K_0)이다.

포물선을 이루고 있는 곡선에 대한 해석으로는 다음과 같은 직각 좌표계를 사용하여 그 곡선의 식을 구하였다.

$$y = B_1x + B_2x^2$$

여기서 x : 원점 O 로부터 작은 크랙 좌측 선단까지의 수평거리

y : 원점 O 로부터 작은 크랙 좌측 선단까지의 수직거리

B_1 과 B_2 는 미지의 계수로서 최소 자승법을 사용하여 다음과 같이 결정되었다.

$$B_1 = (-1.6130644 \times 10^3 + 5.3087137 \times 10^3 F - 5.7969978 \times 10^3 F^2 + 2.0910055 \times 10^3 F^3) \times (1/11.8786986) \times [94.1780786(a/B)^3 - 120.324934(a/B)^2 + 34.9323556(a/B) + 9.02441964]$$

$$B_2 = (-4.047405 \times 10^2 + 1.3658546 \times 10^3 F - 1.5341704 \times 10^3 F^2 + 5.7253856 \times 10^2 F^3) \times (1/1.11789871) \times [36.1562431(a/B)^3 - 48.5575623(a/B)^2 + 19.6993294(a/B) - 1.25860129]$$

변형된 원의 형상을 이루는 곡선에 대한 해석으로는 다음과 같이 극좌표계를 사용하여 그 곡선의 식을 구하였다.

$$\text{즉, } r^2 = Q^2 \sin^2 \theta$$

여기서 r : 원점 O 로부터 작은 크랙 좌측선단까지의 거리

θ : 선분 r 이 x 축과 이루는 각도

Q^2 는 미지의 계수로서 다음과 같이 최소자승법을 이용하여 결정하였으며 F 및 a/B 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ln Q^2 = & [-21844, 6595(a/B)^3 + 23656, 7239(a/B)^2 \\ & - 6924, 28033(a/B) + 1129, 55268] \\ & + [18071, 6907(a/B)^4 \\ & + 2282, 03133(a/B) - 640, 65995] F \\ & + [77826, 0851(a/B)^3 - 94288, 9568(a/B)^2 \\ & + 35408, 671(a/B) - 4529, 42663] F^2 \\ & + [-120732, 687(a/B)^3 + 140261, 522(a/B)^2 \\ & - 49265, 8441(a/B) + 6458, 96327] F^3 \\ & + [46732, 2797(a/B)^3 - 53613, 2013(a/B)^2 \\ & + 18516, 6387(a/B) - 2412, 57581] F^4 \end{aligned}$$

F가 1이며 $1/9 \leq a/B \leq 3/9$ 일 때에는

$$r^2 = Q^2 \sin 2\theta$$

단, $\ln Q^2 = 6, 19550014(a/B) + 6, 71933579$

$3/9 < a/B \leq 5/9$ 일 때에는

$$y = x / [-0, 275452288(a/B) + 0, 153028895]$$

여기서, 응력확대계수 K_I/K_0 값의 범위는 0, 85 ~ 1, 5이며, $K_I/K_0 > 1$ 일 때에는 중앙 크랙만이 있을 때 보다 불안정하며, $K_I/K_0 < 1$ 인 경우는 중앙 크랙만이 있는 경우보다 더 안정함을 알 수 있다. $K_I/K_0 = 1$ 인 경우는 중앙크랙만이 있는 경우와 같다.

Figs. 11~14는 위에서 결정할 실험식들을 이용

(UNIT: mm)

B=45, H=45, T=1

CRACK LENGTH: 10 mm

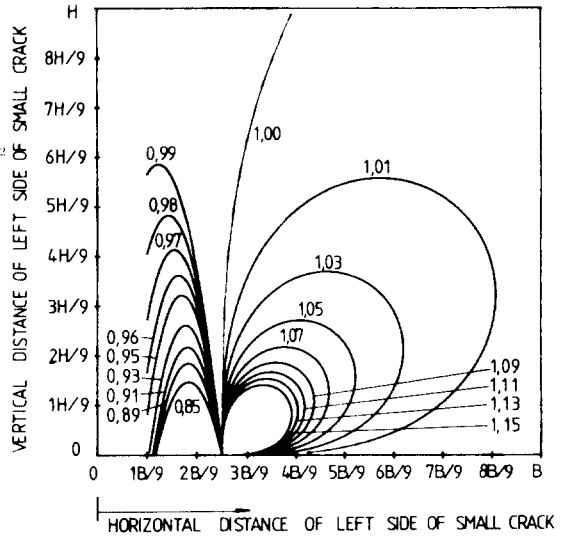


Fig. 12 Contour lines of normalized stress intensity factor drawn by calculated equations, K_I/K_0 ($2a = 30$ mm) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

(UNIT: mm)

B=45, H=45, T=1

CRACK LENGTH: 10 mm

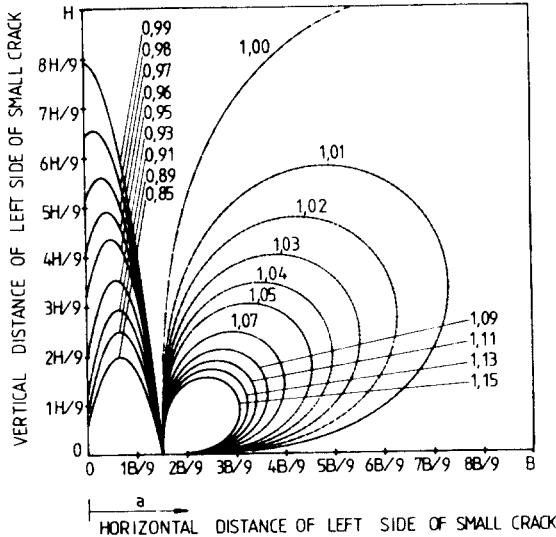


Fig. 11 Contour lines of normalized stress intensity factor drawn by calculated equations, K_I/K_0 ($2a = 20$ mm) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

(UNIT: mm)

B=45, H=45, T=1

CRACK LENGTH: 10 mm

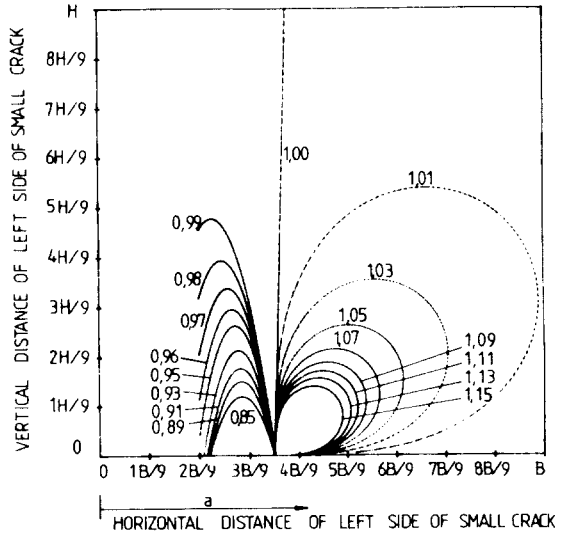


Fig. 13 Contour lines of normalized stress intensity factor drawn by calculated equations, K_I/K_0 ($2a = 40$ mm) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

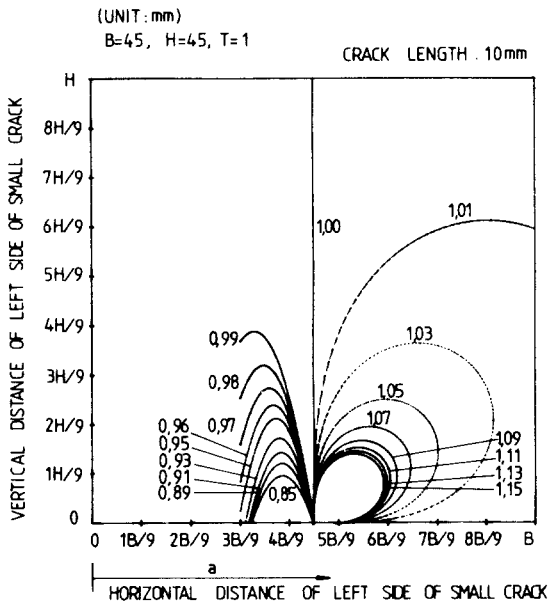


Fig. 14 Contour lines of normalized stress intensity factor drawn by calculated equations, K_1/K_0 ($2a=50\text{mm}$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

하여 Figs. 3~6에 대응하는 결과들을 나타낸 것이다. Figs. 11~14에서, 중앙 크랙 우측선단 전방부 근이나 무차원화 응력확대계수가 0.99인 곡선 부근을 제외하고는 위에서 구한 실험식을 응용하여 계산한 결과와 유한요소법으로 결정하여 K_1/K_0 의 등고선을 연결한 곡선이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

종래에는 유한요소법을 사용하여 작은 크랙의 위치에 따라 각각의 경우에 대한 응력확대계수를 해석하거나 무한판에서 크랙들 사이에 크랙선단의 상호 간섭도를 수학적으로 계산하여 응력확대계수를 결정하여야 했지만 본 연구의 결과를 이용하면 작은 크랙이 패널내에 임의의 장소에 위치해 있을 때, K_1/K_0 값을 쉽게 결정할 수 있다.

이 등고선의 모양은 광탄성의 등색선과 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 2와 같이 중앙 크랙주위에 작은 크랙들이 존재하고 있을 때의 응력확대계수를 중첩법으로 결정할 경우, 이의 정밀도를 검토하여 보았다. 즉, 여기서는 Figs. 1(a), (b), (c)들의 3가지 형에 대하여만 작은 크랙들의 위치를 각각 변화시키고 이 때의 중앙크랙의 길이는 $2a=20, 30, 40, 50\text{mm}$ 로 하였다. 총 800

Table 1 Values of K_1/K_0

Position $2a$	A	B	C	RATT	RAT	Error (%)
20mm	0.70814	0.95825	1.00085	0.66724	0.69662	-4.217
30mm	0.98055	0.97807	0.99956	0.95818	0.96215	-0.413
40mm	0.99775	0.99095	0.99702	0.98572	0.98646	-0.075
50mm	0.99963	0.99642	0.99715	0.99320	0.99332	-0.012

(RATT : Superposition method)

(RAT : Total energy method)

여회 해석을 하였는데 그 중 Fig. 1(b)에 대한 결과를 Table 1에 나타냈다. Table 1에서 A, B, C의 경우는 Fig. 1(a)의 경우와 같은 작은 크랙만이 있을 때의 중앙크랙선단에서의 K_1/K_0 의 값을 나타낸 것이고, RATT는 중첩법에 의한 K_1/K_0 의 값, RAT는 전에너지법(total energy method)에 의하여 구한 값을 나타낸다.

해석결과, 작은 크랙으로 인하여 중앙크랙선단에서 응력확대계수의 값이 현저하게 떨어지는 경우 등을 포함해서 그 오차가 약 4%정도이었다. 따라

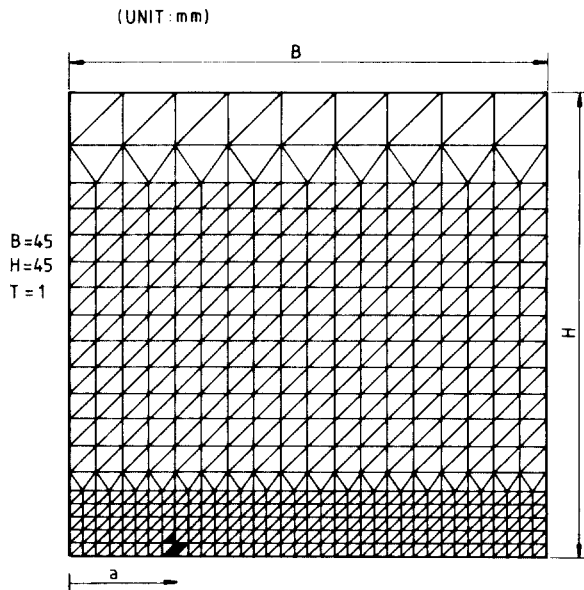


Fig. 15 Comparison of plastic zone shape near the crack tip ($a/B=2/9$, $B=45$, $H/B=1.0$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

서 전에너지법으로 직접 구한 해와 중첩법에 의하여 구한 해와는 잘 일치하여 대체적으로 중첩법의 효용성이 증명된다고 사료된다.

다음으로 작은 크랙이 중앙크랙에 근접해 있을 때 크랙들 사이의 상호간섭에 의해 일어나는 소성영역 변화를 고려하여 그 안정성을 검토하였다.

이 경우에서도 판의 1/4의 사선친 부분에 대한 해석을 행하였고, 이 경우의 시편의 크기 및 구속 조건은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 중앙크랙의 길이는 일정하게 $2a=20\text{mm}$ 로 취하였으며 중앙크랙 주위에 대칭으로 분포되어 있는 4개의 작은 크랙의 길이는 10mm 로 하였다. 하중조건으로서는 크랙선단에 소성영역이 발생하도록 공칭응력 $\sigma_n=200.31\text{MPa}$ 을 가하였으며, 탄성계수(E)는 205.8GPa , 프와송비(ν)는 0.3 으로 하였다. 소성상태에서의 응력과 변형률은 다음 관계식으로 표시하였다.

$$\bar{\epsilon}_p = C(\bar{\sigma}/\bar{\sigma}_{ys})^n$$

단, $\bar{\epsilon}_p$: 상대소성변형률

C, n : 재료물성치

$\bar{\sigma}$: 상대응력

σ_{ys} : 항복응력

사용재료의 $\sigma_{ys}=480.2\text{MPa}$ 이며 완전탄소성 경화재로 가정하였고, 따라서 $n=1$ 로 하였다. 그리고 C 값은 2333.3333 으로 하였다⁽⁸⁾.

Fig. 15는 중앙크랙만이 있는 경우에 대한 소성영역을 표시한 것이고 Figs. 16~18은 중앙크랙 우측선단을 기준으로 했을 때 작은 크랙의 좌측선단의 위치에 따라서의 소성영역을 표시한 것이다. 여기서 Fig. 16은 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙 우측선단으로부터 연직 상방으로 2.5mm 에 위치하고 있는 경우이며, Fig. 17은 크랙 좌측선단이 중앙크랙 우측선단으로부터 상방으로 2.5mm , 좌측으로 5mm 에 위치하고 있는 경우이다. Fig. 18은 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙에 더욱 근접하여 중앙크랙 우측 선단으로부터 상방으로 1.25mm , 좌측으로 5mm 에 위치하고 있는 경우이다.

중앙크랙만이 있는 경우 즉, Fig. 15의 소성영역을 보면 중앙크랙 우측선단에 흑색으로 표시한 바와 같이 3개 요소가 소성상태이었으며, Fig. 16과 같이 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙의 우측선단 연직선상에 있는 경우는 작은 크랙 좌우에 14개 요소가 소성상태로 되어 불안정하게 됨을 보이고 있다. 그러나 Fig. 17과 같이 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙 우측선단보다 좌측에 있는 경우에는 소성

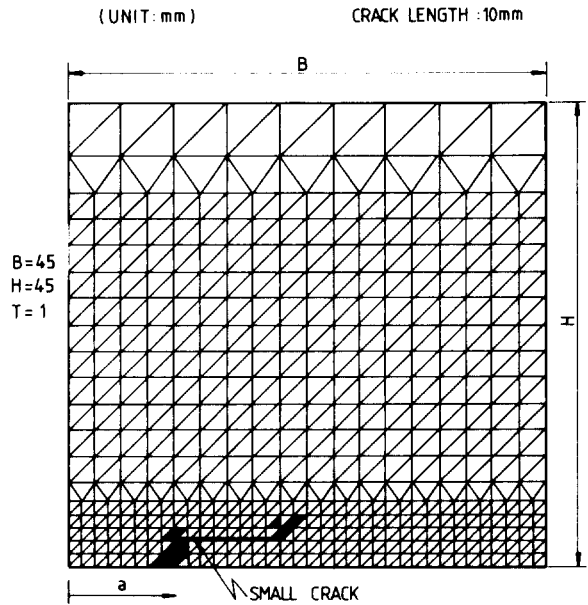


Fig. 16 Comparison of plastic zone shape near the crack tip ($a/B=2/9, B=45, HB=1.0$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

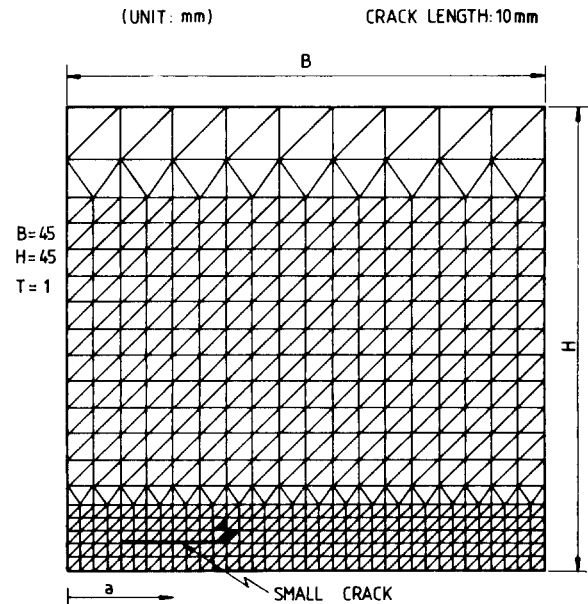


Fig. 17 Comparison of plastic zone shape near the crack tip ($a/B=2/9, B=45, H/B=1.0$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

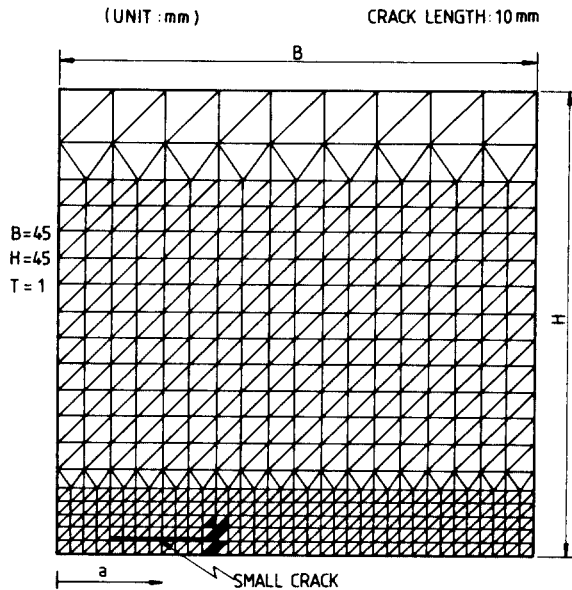


Fig. 18 Comparison of plastic zone shape near the crack tip ($a/B=2/9$, $B=45$, $H/B=1.0$) (B : half panel width, H : half panel length, T : panel thickness)

영역이 작은 크랙 좌측선단에 생기지 않고 우측선단에만 발생하여 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙 우측선단 상방에 있는 경우보다는 안정함을 보이고 있다.

Fig. 18에서 볼 수 있는 바와 같이 작은 크랙의 좌측선단이 중앙크랙 우측선단보다 좌측에 위치하여 작은 크랙이 중앙크랙 선단 상방으로 1.25mm에 가까이 존재하는 경우는 중앙크랙 선단의 무차원화 응력확대계수가 0.5이하까지 상당히 낮아져 중앙 크랙선단에는 소성영역이 발생하지 않으며 작은 크랙의 우측선단에만 6개의 소성영역이 발생되고 있음을 보여 준다. 특히 크랙들이 서로 가까워지면 그 크랙들 간에 상호간섭이 커져 소성영역이 크랙선단 주위에 크게 발생되므로써 크랙들은 쉽게 연결되고 합체로 인한 크랙성장이 되어 파괴됨을 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 중앙크랙선단 주위에 대칭으로 작은 크랙이 존재하는 정방형판에서, 작은 크랙의 위치에 따르는 등응력확대계수곡선의 경험식을 최소

자승법으로 결정하여 이 식의 타당성을 증명하였다. 또한 이러한 경계조건하에서 발생하는 소성영역에 대한 고찰을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 종래에는 작은 크랙의 위치에 따라 일일이 중앙크랙 선단의 응력확대계수를 유한요소법으로 해석하거나 무한판에서 크랙들사이에 크랙선단의 상호간섭도를 수학적으로 계산하여 응력확대계수를 결정하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 등응력확대계수 곡선을 이용하면 작은 크랙이 어떤 임의의 위치에 있더라도 정확하고 쉽게 이에 대응하는 응력확대계수를 결정할 수 있다.

(2) 작은 크랙이 산재하고 있을 때에도 중앙 크랙 선단에서의 응력확대계수를 중첩법에 의하여 용이하게 구할 수 있는 방안을 제시하였다.

(3) 중앙크랙에 근접된 작은 크랙의 위치에 따라서 중앙 크랙과 작은 크랙의 상호간섭에 의한 소성영역을 유한요소법에 의하여 해석하여 작은 크랙의 위치에 따르는 소성영역의 발생양상을 검토하여 중앙크랙 또는 작은 크랙의 안정성을 검토하였다.

참 고 문 헌

- (1) Kitagawa, H., 1977, "Passive Analysis of Various Given Cracks and Cracking Processes", Proc. Int. Conf. Frac. Mech. & Tech., Vol. 2, pp. 995~1009.
- (2) Kitagawa, H., Fujita, T. and Miyazawa, K., 1978, "Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue", 生研 Seminar-Text, pp. 382~398.
- (3) Bogdanoff, J. L. and Kozin, F., 1984, "Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth-II", Eng. Frac. Mech., Vol. 20, pp. 255~270.
- (4) Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., 1984, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio", Eng. Frac. Mech., Vol. 20, pp. 501~513.
- (5) Hilton, P.D. and Mayville, R. A., 1984, "Finite Element Modelling in Fracture Mechanics", Machine Design, pp. 89~91.
- (6) Pratap, C. R., Pandey, R. K., Natarajan, R. and Gupta, K. N., 1984, "Numerical Evaluation of Stress Intensity Factor and J Integral in Three-Point Bend Specimen", Int. J. for Numerical Methods in Eng., Vol. 20, pp. 15~24.
- (7) Kühne, K., Redmer, J. and Dahl, W., 1982, "Elastic-plastic FEM Calculations of the Stress Dis-

- tribution of Notches with Different Geometry", Eng. Frac. Mech., Vol. 16, pp. 845~855.
- (8) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄, 1980, "數值破壊力学", 實教出版株式會社.
- (9) Isida, M., 1973, "Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems", Noordhoff, p. 56.
- (10) Aamodt, B. and Bergan, P.G., 1976, "On the Principle of Superposition for Stress Intensity Factors", Eng. Frac. Mech., Vol. 8, pp. 437~440.
- (11) Rooke, D.P. and Cartwright, D.J., 1976, "Compendium of Stress Intensity Factors", London Her Majesty's Stationery Office.
- (12) Beyer, W.H., 1978, "Standard Mathematical Tables", CRC Press Inc.