

〈論 文〉

다점선정법에 의한 편심 및 굴절균열의 응력확대계수의 결정

金鍾周\* · 徐仁輔\* · 崔善浩\*\*

(1990년 5월 30일 접수)

Determination of Stress Intensity Factors of Bent and Eccentric Cracks  
by Multi-Point Selection Method

Joung-Joo Kim, In-Bo Suh and Sun-Ho Choi

**Key Words:** Slab Analogy(슬랩상사), Multi-Point Selection Method(다점선정법), Moire Tilted Master Grating Method(모아레 경사격자법), Stress Intensity Factor(응력 확대계수)

Abstract

Recently, demand for the experimental analysis of crack, such as arbitrary or distributed ones which has been considered quite difficult to investigate by the theoretical and numerical method, is increasing. Among existent experimental methods applied to the analysis of stress intensity factors, the slab analogy method have the following merits ; cracks can be replaced by similarly-shaped rigid body, and the distribution of stress is represented by slab curvature of duly bent specimen. For the accuracy improvement of this method, multi-point selection method was introduced and its accuracy proved by applying this method to the analysis of centrally linear and inclined cracks in a finite plate which are theoretically known. In this paper, moreover, the stress intensity factors of eccentric and skew-symmetric bent cracks were determined by multi-point selection method and newly developed moire tilted master grating method. The results obtained by this method showed good agreement with the reliably theoretical solutions.

기 호 설 명

$2a$  : 균열의 길이

$2A$  : 시험편의 폭

$b$  : 굴절균열의 굴절길이

$2c$  : 굴절균열의 투영길이

$e$  : 균열의 편심량

$\ell, m$  : 방향여현 (direction cosine)

$P, P'$  : 매스타 그레이팅의 피치

$q$  : 슬랩에 작용하는 등분포하중

$R_x$  : 슬랩변위곡선의  $x$ 방향 곡률반경

$r, \theta$  : 균열첨단의 극좌표

$S$  : 슬랩 변위곡선의 현의 길이

$s, \nu$  : 슬랩경계의 점선 및 법선방향

$U$  : Airy 응력함수

$V$  : 체적력 (body force)

$W$  : 슬랩의 매스타 그레이팅에 대한 수직변위

$\bar{X}, \bar{Y}$  : 슬랩경계에 작용하는 외력

$x, y$  : 직각좌표

$\alpha$  : 평행 입사광과 카메라 광축사이의 각

$\beta$  : 균열의 경사각

$\delta$  : 매스타 그레이팅의 경사각

$\nabla^2$  : Laplacian

\* 정희원, 영남공업전문대학 기계과

\*\* 정희원, 영남대학교 공과대학 기계설계학과

- $\mu$  : 프와송 비
- $\gamma$  : 슬랩상수
- $\lambda$  : 기하학적 상사비
- $K_0, K_I, K_{II}$  : 응력 확대계수
- $k_x, k_y, k_{xy}$  : 슬랩의 곡률성분
- $\alpha'_i, \beta'_i, \gamma'_i$  : 슬랩의 경계상수
- $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  : 응력성분

데 목적이 있다.

## 2. 기초이론

### 2.1 슬랩상사이론

슬랩상사이론<sup>(6,11)</sup>에 의하면 Airy 응력함수  $U$ 로 표시되는 응력성분과 두변이 단순지지된 얇은 슬랩이 등분포하중  $q$ 를 받을 경우의 곡률성분 사이의 관계는

$$\begin{aligned} \sigma_x - V &= \gamma k_y \\ \sigma_y - V &= \gamma k_x \\ \tau_{xy} &= \gamma k_{xy} \\ U &= \gamma \lambda^2 W \\ \frac{1-2\mu}{1-\mu} \nabla^2 V &= -\frac{\gamma q}{\lambda^2 D} \end{aligned} \tag{1}$$

이고, 이때의 슬랩 경계상의 각점에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma W_{c_i} &= \int_0^s (B'_i \ell - A'_i m) ds + \alpha'_i x \\ &\quad + \beta'_i y + \gamma_i \dots \dots \dots (i=1, 2, 3, \dots, n) \tag{2} \\ \gamma \frac{\partial W}{\partial \nu} \Big|_{c_i} &= A'_i \ell + B'_i m + \alpha'_i \ell + \beta'_i m \\ &\quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \tag{3} \end{aligned}$$

여기서  $k_x = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$ ,  $k_y = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}$ ,  $k_{xy} = -\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}$  이고

$A'_i = -\int_0^s (\bar{Y}_i - Vm) ds$ ,  $B'_i = \int_0^s (\bar{X}_i - Vl) ds$  이다.

이때 경계상수  $\alpha'_i, \beta'_i, \gamma'_i$ 는 슬랩 전체의 강체적 병진운동(rigid body translation)과 회전(rotation)에만 관계하고, 곡률에는 영향을 미치지 않으며<sup>(12)</sup>, 또 체적력  $V$ 가 조화함수 이므로 식 (1)에서 압력  $q=0$ 이다. 그러므로, 슬랩을 상사비  $\lambda$ 로 평판의 외형과 동일하게 만들고, 슬랩의 내외의 경계를 강체로 변환시켜서 식 (2)와 (3)의 경계조건을 만족하는 변형 즉, 슬랩에 순수굽힘 모멘트를 가하여 미소하게 변형시키면 된다<sup>(6,11)</sup>.

### 2.2 다점선방법 (Multi-Point Selection Method)

경사균열을 가진 유한판이 균일 인장응력  $\sigma_0$ 를 받을 경우 균열 첨단부근의 특이 응력장에서의 응력성분  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 는 다음과 같다<sup>(13)</sup>.

## 1. 서 론

1950년대 후반 Irwin<sup>(1)</sup>이 Griffith의 에너지 해방률의 개념을 도입하여 균열주변의 특히 응력장에서의 응력분포는 응력확대계수  $K$ 에 의하여 지배된다는 것이 제안된 이후, 이론 및 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 경우 경계조건이 복잡하여 탄소성적 이론해석이 거의 불가능하므로 수치적 또는 실험적 해석법에 많이 의존하고 있다.

실험적 해석법으로는 광탄성 실험법<sup>(2)</sup>, Compliance법<sup>(3)</sup>, 공간섭법<sup>(4)</sup>, Caustic법<sup>(5)</sup>등을 들 수 있으며 이 실험적 해석법들은 실제에 가까운 예리한 균열의 제작이 어렵고, 실험과정이 복잡하고 어려우며, 고가의 실험장비가 필요한 것이 단점으로 지적되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 해석법으로 "슬랩상사에 의한 응력확대계수의 실험적 해석법"<sup>(6,7)</sup>이 개발되어 그 유용성이 확인되었고, 또 실험정밀도를 개선하기 위하여 다점선정법(multi-point selection method)<sup>(8,9)</sup>을 개발하여 유한판 중앙직선 균열의 응력확대계수의 해석에 적용하여 좋은 결과를 얻은 바 있다. 이 해석법은 타 실험법과는 달리 균열을 강체로 대체할 수 있기 때문에 굴절, 분기, 분포 및 임의형 균열의 제작이 용이하고, 실제에 가까운 예리한 첨단 균열을 얻을 수 있는 것이 타 실험법에 비하여 가장 큰 장점이다. 그러나 편심, 분포 및 임의형 균열의 경우 내부경계의 경사로 인해서 변위동결법<sup>(9,10)</sup>이 아니고는 슬랩상사의 경계조건을 만족하는 수치변위  $W$ 의 측정은 거의 불가능하다.

본 연구는 모아레 경사격자법(moire tilted master grating method)을 개발하여 그 유용성을 확인하고 이를 굴절 및 편심균열의 응력확대계수의 해석에 확대 적용하여 다점선정법의 적용범위를 넓히고, 또 분포균열 및 임의형균열의 해석 가능성을 타진하여 완성된 실험법으로서의 위치를 구축하는

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ &\quad - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} (2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) + \sigma_o \cos 2\beta \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 균열첨단의 극좌표를 직각좌표로 변환시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{3}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r+x}}{r} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{y^2\sqrt{r+x}}{r^3} \right] \\ &\quad - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{5}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r-x}}{r} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r^2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{y^2\sqrt{r-x}}{r^3} \right] \\ &\quad + \sigma_o \cos 2\beta \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{3}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r+x}}{r} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r+x}}{r^3} \right] \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r-x}}{r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r^2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r-x}}{r^3} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r-x}}{r} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r-x}}{r^3} \right] \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r+x}}{r} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r+x}}{r^3} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이다. 식 (5)의 제2식에 슬랩상 사이론을 적용시키면

$$\begin{aligned} r \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{3}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r+x}}{r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r^2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r+x}}{r^3} \right] \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r-x}}{r} \right. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\left. + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r^2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r-x}}{r^3} \right]$$

이다. 식 (6)을  $x$ 에 대하여 2회 적분하면 식 (7) 및 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} r \frac{\partial W}{\partial x} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{r+x} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r} \right] \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{r-x} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r} \right] + C_1(y) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} rW &= (r+x)^{3/2} \left[ \frac{K_I}{3\sqrt{\pi}} - \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{r-x}}{\sqrt{r+x}} \right] \\ &\quad + C_1(y)x + C_2(y) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 적분상수  $C_1(y)$  및  $C_2(y)$ 는  $y$ 의 함수이다. 식 (7)을  $y$ 에 대해서 편미분하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r-x}}{r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r^2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r-x}}{r^3} \right] \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r+x}}{r} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{x^2\sqrt{r+x}}{r^3} \right] + \frac{d}{dy} [C_1(y)] \end{aligned} \quad (9)$$

식 (5)의 제 3식과 식 (9)에서  $\frac{d}{dy} [C_1(y)] = 0$ 이므로 적분상수  $C_1(y)$ 는 상수이다.  $C_1(y) = C_1$ 으로 하면 식 (8)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} rW &= (r+x)^{3/2} \left[ \frac{K_I}{3\sqrt{\pi}} - \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{r-x}}{\sqrt{r+x}} \right] \\ &\quad + C_1x + C_2(y) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을  $y$ 에 대해서 2회 편미분하여 정리하면

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{3}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r+x}}{r} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r+x}}{r^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{y^2\sqrt{r+x}}{r^3} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{5}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{r-x}}{r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{x\sqrt{r-x}}{r^2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{y^2\sqrt{r-x}}{r^3} \right] \\ &\quad + \frac{d^2}{dy^2} [C_2(y)] \end{aligned} \quad (11)$$

이다. 식 (5)의 제 1식과 식 (11)에서  $\frac{d^2}{dy^2} [C_2(y)] = \sigma_o \cos 2\beta$ 이므로  $C_2(y)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$C_2(y) = \frac{y^2}{2} \sigma_o \cos 2\beta + C_3 y + C_4 \quad (12)$$

식 (12)를 식 (8)에 대입하면

$$rW = (r+x)^{3/2} \left[ \frac{K_I}{3\sqrt{\pi}} - \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{r-x}}{\sqrt{r+x}} \right] + \frac{y^2}{2} \sigma_o \cos 2\beta + C_1 x + C_3 y + C_4 \quad (13)$$

이다. 여기서 적분상수  $C_1$ ,  $C_2$ , 및  $C_4$ 는 슬랩상사 이론의 경계조건에서 변위  $W$ 의 원점을 균열첨단으로 하면

$$\begin{aligned} W|_{(0,0)} &= 0 \text{ 이므로 } C_4 = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial y}|_{(0,0)} &= 0 \text{ 이므로 } C_3 = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial x}|_{(0,0)} &= 0 \text{ 이므로 } C_1 = 0 \text{이다.} \end{aligned}$$

적분상수  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ 를 식 (13)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$rW = \frac{K_I}{3\sqrt{\pi}} (r+x)^{3/2} - \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi}} (r+x) \sqrt{r-x} + \frac{y^2}{2} \sigma_o \cos 2\beta \quad (14)$$

여기서  $r$ 는 응력과 곡률사이의 스케일 팩타로서  $r = \sigma_o R_x$ 이므로 식 (14)을 정리한 후 다시 극좌표로 변환시키면 다음과 같다.

$$W = \frac{2\sqrt{2a}}{R_x} r^{3/2} \cos^3 \frac{\theta}{2} \left[ \frac{1}{3} \frac{K_I}{K_o} - \frac{K_{II}}{K_o} \tan \frac{\theta}{2} \right] + \frac{r^2 \sin^2 \theta}{2R_x} \cos 2\beta \quad (15)$$

여기서  $K_o = \sigma_o \sqrt{\pi a}$ 이다. 실험을 통해서 곡률반경  $R_x$ 와 균열첨단에서 임의의 각  $\theta$ 방향으로  $r$ 만큼 떨어진 점들의 매스타 그레이팅에 대한 수직변위  $W$ 를 측정하여 식 (15)에 Newton Raphson의 반복법에 의한 최소자승법<sup>(8,14)</sup>을 적용하면 무차원 응력확대계수  $K_I/K_o$  및  $K_{II}/K_o$ 을 구할 수 있다.

### 2.3 곡률반경 $R_x$ 의 결정

곡률반경  $R_x$ 는 곡률과 응력 사이의 크기관계를 나타내는 슬랩상수  $\Upsilon (= \sigma_o R_x)$ 에서 나온 값이므로 Saint Venant의 원리에 의하면 균열에서 충분히 떨어진 원방에서의  $x$ 방향의 곡률반경에 해당한다. 균열에서 충분히 떨어진 원방에서  $x$ 방향의 슬랩의 변위곡선은 진원이 되므로 Fig. 1에서 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>.

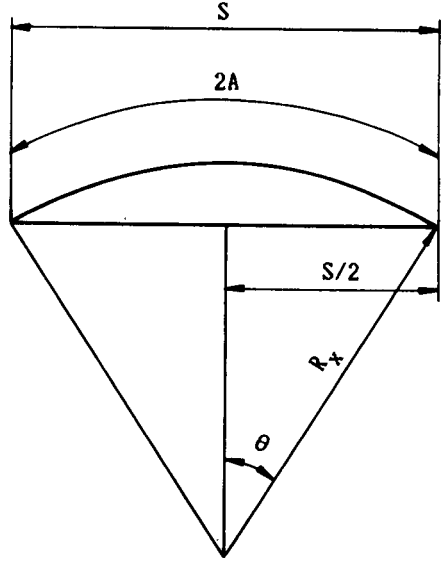


Fig. 1 Graphical representation of radius of curvature  $R_x$

$$\frac{S}{2R_x} - \sin\left(\frac{A}{R_x}\right) = 0 \quad (16)$$

### 2.4 모아레 경사격자법 (Moire Tilted Master Grating Method)에 의한 수직변위 $W$ 의 측정법

Fig. 2(a)와 같이 새도우 모아레 (shadow moire) 광학계에서 매스타 그레이팅 (master grating)의 피치를  $P$ , 매스타 그레이팅이 수평방향에 대하여  $\delta$ 만큼 경사졌을때 경사효과에 의한 피치를  $P'$ , 평행 입사광과 카메라 광축 사이의 각을  $\alpha$ , 등고선의 무늬수를  $F_n$ 라 하면 변위  $W_1$ 은 다음과 같다.<sup>(15)</sup>

$$W_1 = \frac{P'F_n}{\tan \alpha} \quad (17)$$

여기서 매스타 그레이팅의 경사효과에 의한 피치  $P'$ 는 Fig. 2(b)에서 매스타 그레이팅이 수평방향에 대하여  $\delta$ 만큼 경사졌으므로 피치  $P$ 사이에서 입사할 수 있는 평행광의 폭이  $\overline{AB}$ 에서  $\overline{CD}$ 로 증가함으로 경사효과에 의한 매스타 그레이팅의 피치  $P'$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P' &= P \cos \delta + b \\ &= P(\cos \delta + \sin \delta \tan \alpha) \end{aligned} \quad (18)$$

그러므로 원점 (균열첨단)  $O$ 으로 부터  $X$ 만큼 떨어진

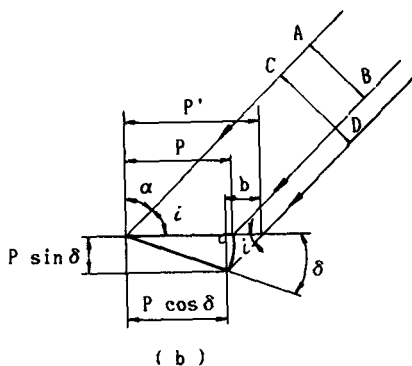
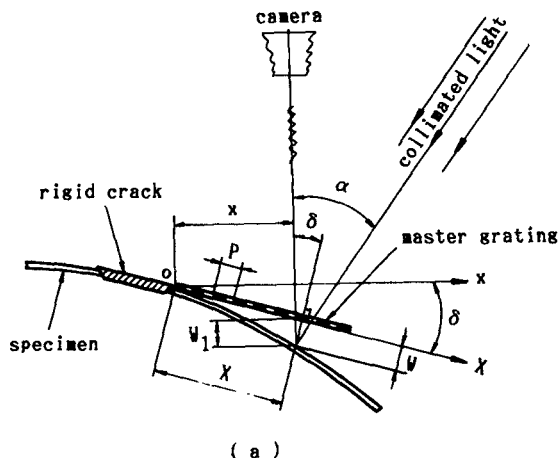


Fig. 2 Schematic diagram of shadow moiré's optical system

진 임의의 점에서 매스타 그레이팅에 수직한 변위  $W$ 는 다음과 같다.

$$W = \frac{P(\cos\delta + \sin\delta \tan\alpha) F_n \cos\delta}{\tan\alpha} \quad (19)$$

단, 여기서  $X$ 는 다음과 같다.

$$X = \frac{x}{\cos\delta} + W \tan\delta \quad (20)$$

식 (19)을 이용하면 모아레 무늬사진에서 균열 첨단으로부터  $X$ 만큼 떨어진 임의의 점에서의 매스타 그레이팅에 수직한 슬랩의 변위  $W$ 를 측정할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 시험편의 제작 및 실험방법

시험편의 재료는 탄성이 큰 경질 염화비닐

(polyvinyl chloride) 판으로 그 재질 및 두께(0.5 mm)가 균일한 것을 선택하여 사용하였다. 시험편의 표면에는 새도우 모아레법에 의해서 변위를 측정하기 위하여 백색 수성페인트를 균일하게 도포하였다. 강제균열은 얇은 강판을 해석대상과 동일한 모양을 만들고 이를 가열하여 비닐판의 소정의 위치에 압입하여 슬릿(slit)을 만든 후 이를 강력 접착제로 부착하여 시험편을 제작하였으며 제작된 시험편에 슬랩상사의 경계조건을 만족하는 순수 굽힘모멘트를 가하여 미소변형을 주어서 실험을 하였다<sup>(6,8)</sup>. 변위  $W$ 를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 새도우 모아레 광학계를 제작하여 사용하였으며 이때 사용한 매스타 그레이팅의 피치  $P$ 는 0.152mm이다.

#### 3.2 실험결과 및 고찰

모아레 경사격자법에 의한 수직변위  $W$  측정법의 정당성을 증명하기 위하여 매스타 그레이팅의 경사각  $\delta$ 를  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 로 변화시키면서 실험을 행하여 실제 변위와 비교하여 보았다. 이때  $\delta$ 는 사인바와 블록게이지를 이용하여 정밀하게 조정하였다. Fig. 3은  $\delta$ 의 변화에 따른 모아레무늬 사진이

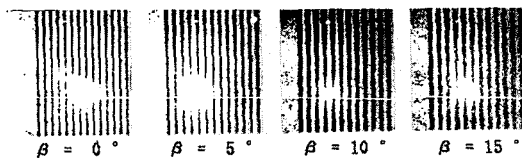


Fig. 3 Moiré fringe patterns

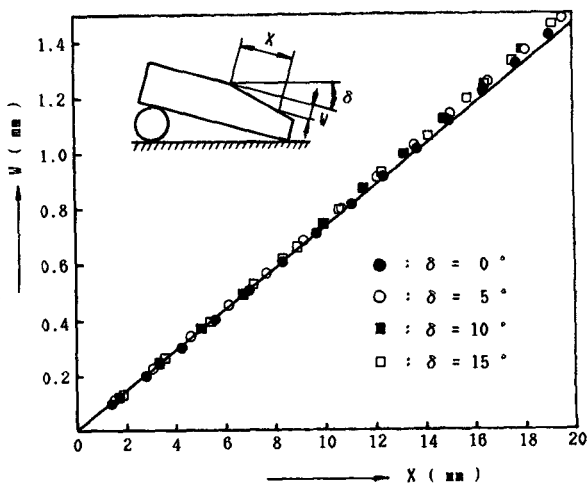


Fig. 4 Vertical displacement  $W$  for distance  $X$

다. 각 무늬까지의거리  $x$ 는 촬영한 모아레 무늬사진에서 디지털 마이크로미터가 부착된 optical comparater를 이용하여 측정하였다. Fig. 4은 거리  $X$ 의 변화에 따른 변위  $W$ 를 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 고찰해보면 최대오차가 3%이하로 충분한 정밀도로 실제 변위와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 내부경계가 경사진 편심균열의 해석에 본 수직변위 측정법의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

Fig. 5은 각종 균열의 모아레 무늬(moire fringe)를 촬영한 사진을 예시한 것이다. 이 사진에서 균열의 침단에서 임의의 각  $\theta$ 방향으로 각 무늬까지의 거리  $r$ 는 옵티칼 optical comparater를 이용하

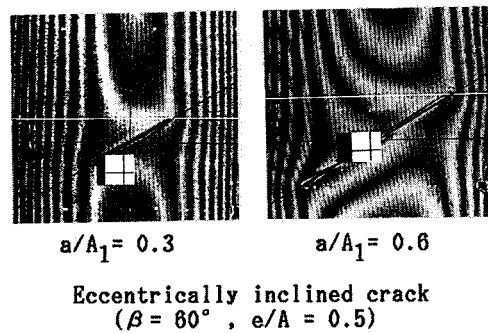
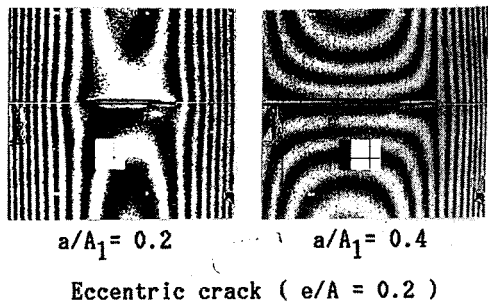
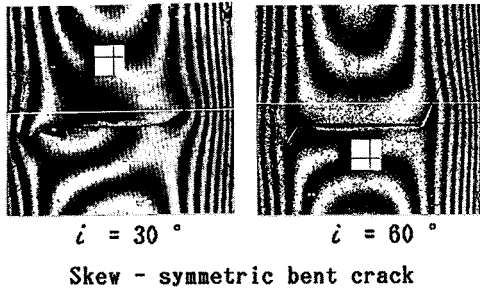


Fig. 5 Moire fringe patterns of skew-symmetric bent and eccentric cracks

여 측정하였으며 그 점에서의 변위  $W$ 는 식 (19)를 이용하여 계산하였다. 사진 중의 + 표시는 매스타 그레이팅의 경사각  $\delta$ 와 사진의 배율을 계산하기 위한 것이다.

Fig. 6는 균열의 평행부의 길이  $2a$ 와 시험편의 폭  $2A$ 의 비  $a/A=0.2$ , 균열의 굴절부 길이  $b$ 와  $a$ 의 비  $b/a=0.4$ 인 양측 굴절균열(skew-symmetric bent crack)을 가진 유한판이 인장응력  $\sigma_0$ 를 받을 경우 무차원 응력확대계수  $K_I/K_0$  및  $K_{II}/K_0$ 를 Katagawa의 무한판의 결과<sup>(16)</sup>와 비교한 것으로서 시험편의 유한폭을 감안하면 정성적으로 같은 경향의 값들을 얻을 수 있음이 증명되었다.

Fig. 7은 편심량  $e$ 와  $A$ 의 비  $e/A=0.2$ 인 편심 균열을 가진 유한판에서  $c$ 점 및  $d$ 점의 무차원 응력확대계수  $(K_I/K_0)_c$  및  $(K_I/K_0)_d$ 를 Isida의 결과<sup>(17)</sup>와 비교한 것이고, Fig. 8은  $\beta=60^\circ$ ,  $e/A=0.5$ 인 편심 경사균열을 가진 유한판의 무차원 응력확대계수  $K_I/K_0$ 를 Tamate의 결과<sup>(18)</sup>와 비교한 것이다. Fig. 8중의 점선은 편심량이 0인 경우( $e/A=0$ ) Kitagawa의 결과<sup>(19)</sup>를 참고로 표시한 것이다. 이 두 결과는 최대오차가 8%이하로 충분한 정밀도를 가지고 있는 것으로 생각된다.

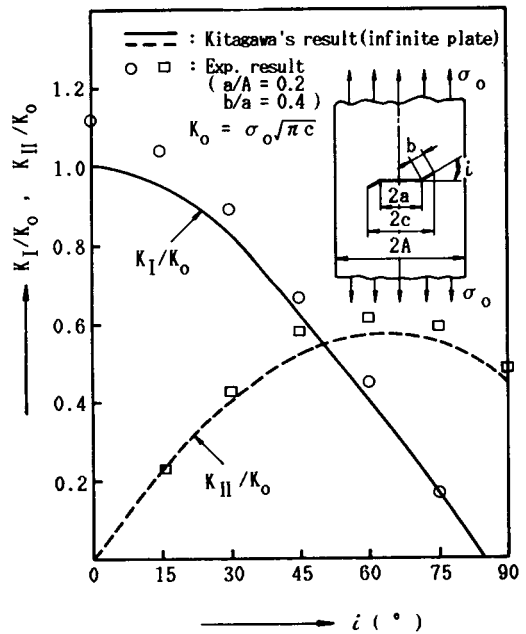


Fig. 6 Normalized stress intensity factors  $K_I/K_0$  and  $K_{II}/K_0$  of skew-symmetric bent crack as function of bent angle  $i$

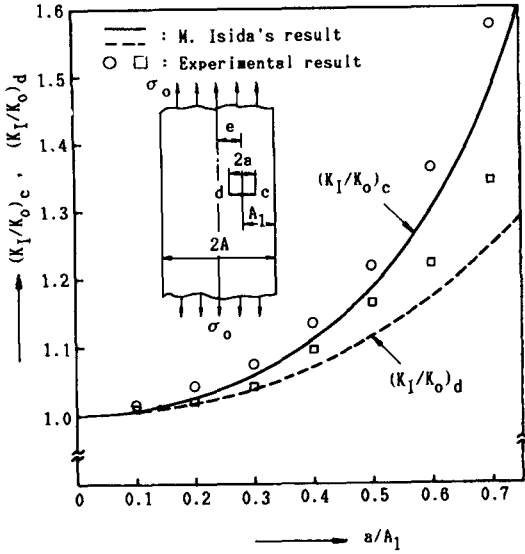


Fig. 7 Normalized stress intensity factor  $(K_I/K_0)_c$  and  $(K_I/K_0)_d$  of eccentric crack as function of  $a/A_1$  ( $e/A=0.2$ )

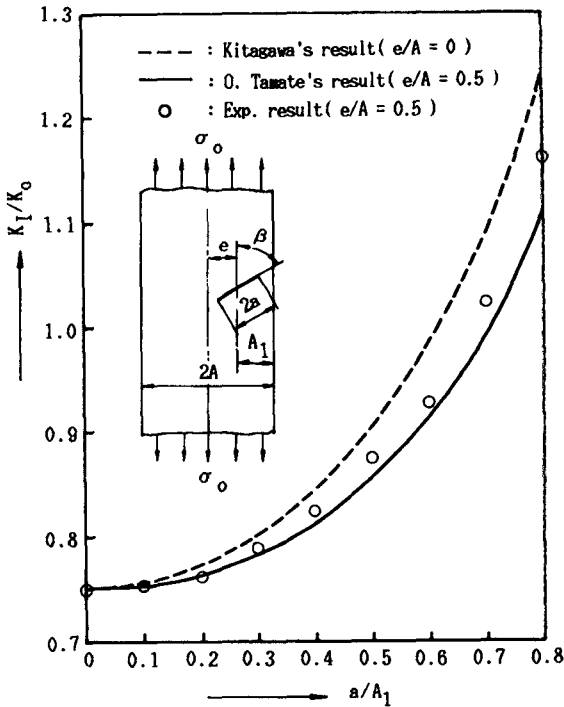


Fig. 8 Normalized stress intensity factor  $K_I/K_0$ , eccentrically inclined crack as function of  $a/A_1$  ( $\beta=60^\circ$ ,  $e/A=0.5$ )

이상의 결과로 미루어 볼때 본 연구에서 개발된 Moire경사격자법에 의한 수직변위  $W$ 의 측정법과 다점선정법을 이용하면 굴절균열 및 편심균열의 해석은 물론이고 데이터 측정부가 한정되어 있고 또 내부경계(강체균열)의 경사때문에 변위동결법이 아니고는 거의 해석이 불가능하였던 분포균열 및 임의형 균열의 해석에도 적용이 가능할 것으로 생각 된다.

#### 4. 결 론

이상의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 개발된 모아레 경사격자법에 의한 수직변위 측정법은 최대 오차가 3%이하로서 충분한 정밀도를 가지고 있다.
- (2) 다점선정법을 양측 굴절균열의 응력확대계수의 해석에 적용하여 본 결과 충분한 정밀도를 가지고 있다.
- (3) 모아레 경사격자법에 의한 수직변위의 측정법을 이용하여 다점선정법을 편심균열의 해석에 적용하여 기존의 이론해와 비교한 결과 최대오차가 8%이하로서 충분한 정밀도를 가지고 있다.
- (4) 본 해석법을 이용하면 내부경계의 경사 때문에 변위동결법이 아니고는 거의 해석이 불가능하였던 편심균열의 해석은 물론이고 분포 및 임의형 균열의 해석에도 유효할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 1989년 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 관계자 제위께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Irwin, G.R., 1960 "Structural Mechanics", Pergamon Press, London, p. 560.
- (2) 崔善浩, 黃在錫 외1인, 1983, "테프론 모듈딩법에 의한 S.I.F.의 광탄성 실험해석", 대학기계학회논문집, 제7권, 제1호, pp.1~10.
- (3) Bubsey, R.T., et al, 1973, "Experimental Techniques in Fracture Mechanics I", Edited by A.S. Kobayashi, Soc. Exp. Stress Analysis, pp. 76~95.
- (4) Sommer, E., 1981, "Experimental Determination of Stress Intensity Factor by COD Measurement",

- Mechanics of Fracture VII, Edited by G.C. Sih, Norrdhoff Int. Pub., pp. 331~347.
- (5) Theocaris, P.S., 1981, "Elastic Stress Intensity Factors Evaluated by Caustics", Mechanics of Fracture VII, edited by G.C. Sih, Noordhoff Int. Pub., pp. 189~252.
- (6) 崔善浩, 金鍾周, 權在度, 徐仁輔, 蔡泳哲, 1982, "모아레법과 슬랩상사의 복합에 의한 응력확대계수의 실험적 해석법", 대한기계학회논문집, 제6권, 제4호, pp. 315~322.
- (7) 崔善浩, 金鍾周, 徐仁輔, 權在度, 黃在錫, 北川英夫, 1990, "스랩·아나로즈-와 모아레의組合せによる  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  混合モード의 應力擴大係數의 實驗的解析法", 日本機械學會論文集(A編), 第52卷, 第521號, pp. 63~71.
- (8) 金鍾周, 崔善浩, 1988, "다점선정법에 의한 슬랩상사 응력확대계수 해석법의 정도향상에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제12권, 제6호, pp. 1248~1251.
- (9) 金鍾周, 1989, "슬랩相似와 變位凍結法에 의한 應力擴大係數의 實驗的 解析法", 博士學位論文, 영남대학교 대학원, pp. 1~82.
- (10) 崔善浩, 金鍾周, 1983, "변위동결법에 의한 응력확대계수의 실험적 해석법", 대한기계학회논문집, 제7권, 제4호, pp. 434~440.
- (11) Hetenyi, M., 1957, "Handbook of Experimental Stress Analysis", John Willey and Sons, pp. 702~789.
- (12) 栖原二郎, 1974, "平版の曲げ理論", 培風館, 日本, pp. 1~34.
- (13) Gdoutos, E.E. and Theocaris, P.S., 1978, "A Photoelastic Determination of Mixed Mode Stress Intensity Factors", Experimental Mechanics, SESA, pp. 87~96.
- (14) Sanford, R.J. and Dally, J.W., 1978, "Stress Intensity Factors in the Third Stage Fan Disk of the TF-30 Turbine Engine", NRL Report 8202, pp. 1~21.
- (15) Durelli, A.J. and Parks, V. J., 1970, "Moire Analysis of Strain", Prentice Hall Inc. London, pp. 251~256.
- (16) Kitagawa, H. and Yuuki, R., 1978, "Analysis of Stress Intensity Factors for Doubly Symmetric Bent Crack and Forked Cracks", JSME, Vol. 44, No. 386, pp. 3346~3353.
- (17) Isida, M., 1966, "Stress Intensity Factors for the Tension of an Eccentrically Cracked Strip", Trans. ASME, Sreies E, J. of Appl. Mech., Vol. 33, No. 3, pp. 674~675.
- (18) Tamate, O. and Iwasaka, N., 1976, "An Arbitrarily Oriented Crack in a Long Strip under Tension", JSME, Vol. 42, No. 356, pp. 1054~1060.
- (19) Kitagawa, H. and Yuuki, R., 1977, "Analysis of Arbitrarily Shaped Crack in a Finite Plate Using Conformal Mapping", 1st Report, Construction of Analysis Procedure and it Application, JASE, Vol. 43, No. 376, pp. 4354~4362.