

<論 文>

레이저 干涉法에 의한 應力擴大係數 測定에 관한 研究

최 상 인* · 최 선 호** · 황 재 석*** · 권 재 도**

(1988년 4월 27일 접수)

A Study on the Measurement of Stress Intensity Factor by Laser Interference

Sang-In Choi, Sun-Ho Choi, Jai-Sug Hawong and Jae-Do Kwon

Key Words : Teflon Crack Molding Method(테프론 균열 주형법), Microhardness Tester(현미경도계), Indentation(압인), Laser Interference Method(레이저 간섭법), Extrapolation Method(외삽법), S.I.F.(응력확대계수)

Abstract

When laser interference method is used to measure stress intensity factor with experiment, crack molded from teflon crack molding method is better than the crack manufactured through fatigue test. It is known that center distance between two indentations which is best for detecting the laser interference fringe order is about $80\mu\text{m}$ with photodetector used in this research. Errors with measurement of stress intensity factor through laser interference are between 2% and 11%, therefore, experimental process and method developed in this research can be used with obtaining the more precision experimental data for stress intensity factors.

(IN KOREAN)

기 호 설 명

a : 균열의 길이
 b : 시편의 폭
 D : 슬릿 간격
 G : 전단 탄성계수
 h : 시편의 길이
 K_I : 응력 확대 계수

$\frac{K_I}{K_0}$: 응력 확대계수 의 무차원 값

r, θ : 균일 선단에서 반사면까지의 극좌표

r_1, r_2 : 광로의 길이

u_y : 하중방향의 변위

a_0 : 입사광과 반사광이 이루는 각

Δd : 외력에 의한 미소변위

Δm : 간섭무늬 차수

λ : 레이저 광의 파장

ν : 프와송 비

σ : 기초응력

1. 序 論

應力擴大係數는 材料의 龜裂先端 近方의 應力分布 및 材料의 舉動을 支配하고 龜裂特性을 나타내는 線形破壞力學의 媒介變數이다.

이 應力擴大係數를 求하기 위한 여러가지 方法들이 提案되고 있으나 實驗的인 方法으로는 光彈性法⁽¹⁾, 슬라브 아나로지(slab analogy)法⁽²⁾, 薄膜相似理論에 依한 法⁽³⁾, J積分法⁽⁴⁾, 컴플라이언스

* 정회원, 상주농업전문대학 농업기계과

** 정회원, 영남대학교 공과대학 기계설계학과

*** 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

(compliance)法⁽⁵⁾, 光干涉法⁽⁶⁾ 등이 있다.

이들 實驗方法中에서 光干涉에 依한 應用例로서는

- (1) P. B. Crosley 등이⁽⁷⁾ 유리로된 이중 외팔보 (D.C.B)에서 微小變位를 測定한 例와
- (2) W. T. Evans 등이⁽⁸⁾ 直線龜裂에 레이저 스펙클 (laser speckle) 法으로 應力擴大係數를 求한 例와
- (3) W. N. Sharpe 등이⁽⁹⁾ 알루미늄판의 疲勞균열 兩便에 反射面을 形成하고 레이저 干涉으로 微小變位를 測定한 例가 있다.

이와 같은 光干涉에 依한 應力擴大係數의 測定方法은 超低溫 또는 超高溫에 使用되는 材料나 세라믹 (ceramic)과 같은 脆性材料의 應力擴大係數 測定에도 利用될 수 있을 것으로 思慮된다.

本 論文에서는 上述한 바와 같이 光干涉에 依한 脆性材料 및 超低溫, 超高溫에 使用되는 材料의 應力擴大係數 測定法에 對한 應用의 한 方法으로서 테프론 균열 주형법에⁽¹⁰⁾ 依한 人工龜裂을 에폭시 (epoxy) 판으로 주형하고 레이저 干涉法에 依한 應力擴大係數의 測定을 시도하여 光子 (phototransistor)로 추적하기에 適當하고 鮮명한 간섭무늬를 얻을 수 있는 反射面 中心間의 距離를 實驗적으로 決定하고 光彈性法에 依한 實驗結果와 比較하여 레이저 干涉法의 實用性을 確認하려고 한다.

2. 基礎理論

균열선단 부근의 변형양식중에서 開口形 變形 (Mode I)인 경우에 平面應力 狀態의 變位는 式 (1)과⁽¹¹⁾ 같다.

$$U_x = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$U_y = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left[\frac{2}{1+\nu} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (1)$$

여기서 U_x , U_y 는 균열선단에서 變位の x , y 成分이고 G 는 剪斷彈性係數이며 ν 는 프와송 비, r 와 θ 는 균열先端에서 任意의 點까지의 極座標이다.

應力擴大係數는 作用하는 外力의 條件, 균열의 길이와 位置 및 幾何學의 形像의 函數로서 式 (2)와 같이 表示된다.

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F(a/b) \quad (2)$$

여기서 σ 는 기초 應力, a 는 균열의 길이, 그리

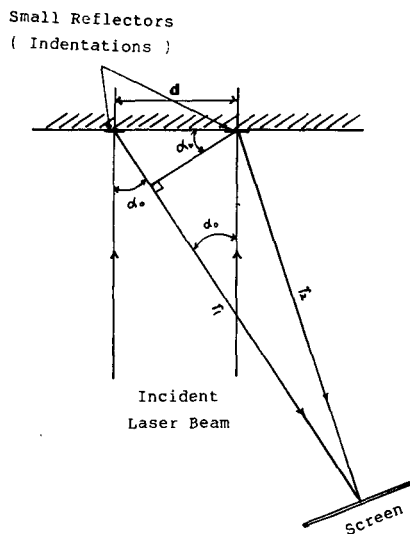


Fig. 1 Two-slit interferometer

고 b 는 시편의 폭이다.

에지이고 하중방향에 수직균열을 갖는 경우에 $F(a/b)$ 에 對한 修正係數는 여러 學者들이 研究한 例들 中에서 比較的 正確하다고 알려진 Brown과 Srawley가⁽¹²⁾ 提案한 式 (3)과 比較하였고 중앙관통이고 하중방향에 수직균열일 때는 Tada가⁽¹³⁾ 提案한 式 (4)와 比較하였다.

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = 1.12 - 0.23\left(\frac{a}{b}\right) + 10.6\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 21.7\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 30.4\left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (3)$$

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = \left\{ 1 - 0.5\left(\frac{a}{b}\right) + 0.370\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0.044\left(\frac{a}{b}\right)^3 \right\} / \left(1 - \frac{a}{b}\right)^{1/2} \quad (4)$$

레이저 干涉을 얻기 위한 方法으로 Fig. 1과 같은 二重슬릿 (double slit)을 利用하였다.

또한 슬릿을 통한 光路差는 式 (5)와 같이 表示된다.

$$r_1 - r_2 = d \sin \alpha_0 \quad (5)$$

여기서 r_1 , r_2 는 슬릿에서 進行한 光路이고 d 는 슬릿간격, α_0 는 入射光과 反射光 (간섭무늬)이 만드는 角이다.

따라서 간섭무늬의 밝기가 極大가 되기 위한 條件은 式 (6)과 같이 表示된다⁽¹⁴⁾.

$$d \sin \alpha_0 = m \cdot \lambda$$

$$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (6)$$

여기서 m 는 간섭무늬차수, λ 는 사용한 레이저의 파장이다.

外力에 의한 反射面의 微小變位를 干涉무늬의 移動으로 表示하면 式 (7)과 같다.

$$\Delta d = \frac{\Delta m \cdot \lambda}{\sin \alpha_0} \quad (7)$$

실제의 變位는 龜裂의 兩便에서 일어나므로 應力擴大係數는 式 (8)과 같이 表示된다.

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{\lambda}{\sin \alpha_0} \cdot \Delta m \cdot G}{\sqrt{\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left[\frac{2}{1+\nu} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]}} \quad (8)$$

여기서 G 및 ν 는 材料의 定數이고 λ 는 사용한 레이저의 파장, r 와 θ 는 균열선단에서 임의의 점까지의 位置를 나타내므로 干涉에 依한 무늬차수 Δm 과 입사광과 반사광이 이루는 角 α_0 를 測定하여 應力擴大係數 K_1 을 求할 수 있다.

3. 實驗方法

(1) 試片의 製作

實物에 가까운 예리한 테프론 균열을 에폭시판에 埋立하기 위하여 著者들이 考案한 테프론 균열 주형법을 使用하였다.

이 方法으로 제작한 테프론 균열을 가진 에폭시판을 切斷形像에 따라 外部 및 内部 균열을 갖는 試片을 制作할 수 있다.

이 때 試片은 폭이 40mm, 길이가 240mm, 길이와 폭의 비 $\frac{h}{b}=3$ 으로 一定하게 하여 에지이고 하

중방향에 수직균열은 $\frac{a}{b}=0.21, 0.26, 0.31, 0.36, 0.44, 0.49$ 인 6개를 制作하였고 중앙관통이고 하중방향에 수직균열은 $\frac{a}{b}=0.25, 0.29, 0.36, 0.37, 0.44, 0.50$ 인 6개를 制作하여 使用하였다.

(2) 光彈性에 依한 應力擴大係數의 決定法

제작한 試片을 透過用 光彈性 實驗裝置에서 適當한 荷重으로 等色線 무늬사진을 촬영하였다.

이 사진을 $\frac{1}{1000}$ mm까지 測定할 수 있는 디지털 마이크로미터(digital micrometer)가 부착된 만능투영기(comparator)로서 光彈性 實驗의 最小自乘法에⁽¹⁵⁾ 必要한 r_m, θ_m 卽 x_m, y_m 값을 무늬사진에서 10개 이상 測定하여 應力擴大係數 K_1 값을 求하였다.

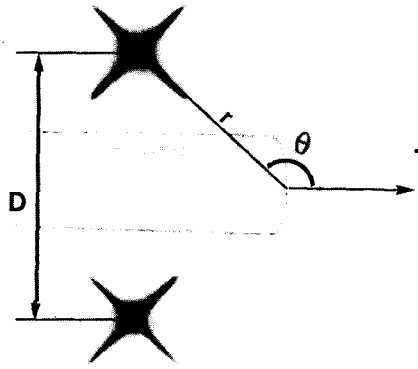


Fig. 2 Photomicrograph of a set of indentation with $\theta=141$ deg, $r=64\mu\text{m}$, $D=80\mu\text{m}$

(3) 眞空蒸着法

光彈性 實驗法에서 使用한 同一한 試片을 레이저 干涉法으로 微小變位를 測定하기 위하여 均열先端 近方을 거울면과 같이 연마하였다.

그후에 현미경도계(microhardness tester)로서 Fig. 2와 같이 均열선단 좌표계로 에지이고 하중방향에 수직균열은 x 方向에서 $-50\mu\text{m}$, y 方向에서는 $\pm 40\mu\text{m}$ 떨어진 곳에 그리고 내부 수직균열일 경우에는 x 方向에서 $-500\mu\text{m}$, y 方向에서 $\pm 40\mu\text{m}$ 되는 곳에 피라밋형(pyramidal type)의 다이아몬드(diamond) 끝으로 壓印(indentation)하였다.

그 후에 액체질소로서 오물을 完全히 除去하고 眞空蒸着機에서 10^{-6} Torr 狀態로 알루미늄 皮膜을

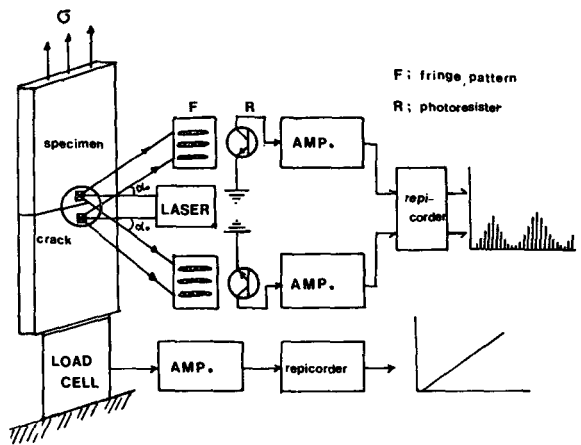


Fig. 3 Schematic diagram of patterns generation and recording system

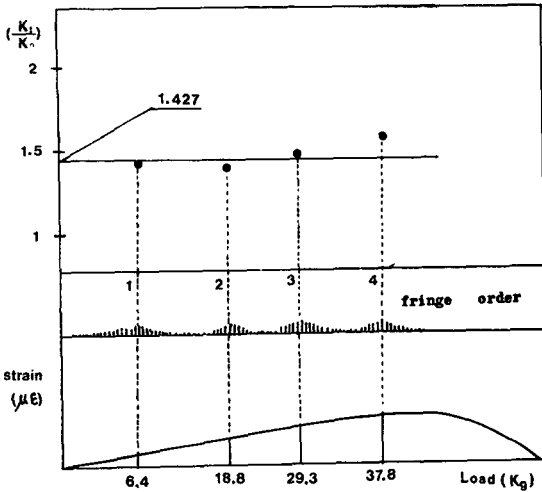


Fig. 4 Determination of K_I by extrapolation method for interferometric fringe patterns

約 2000 Å 程度 蒸着시켜서 反射面을 完成하였다.

(4) 微小變位 測定法

龜裂先端의 反射面에 레이저光(出力 15mW, He-He gas laser)을 投射시킬때 同一한 方向으로 反射된 빛이 서로 겹쳐서 간섭무늬를 이루었다.

이 때 作用한 荷重値는 로오드 셀(load cell)을 利用하여 記錄하고 光素子로서 이동하는 간섭무늬를 추적 기록하기 위하여 Fig. 3과 같은 裝置를 使用하였다.

引張荷重과 간섭무늬차수와의 關係로 부터 應力擴大係數를 式 (8)에서 求하고 精密度를 높이기 위하여 Fig. 4와 같이 直線外插法을 適用하였다.

4. 實驗結果 및 考察

(1) 간섭무늬

레이저를 균열선단의 反射面에 投射시킬때 光素子로 추적 기록하기에 適當하고 鮮명한 간섭무늬를 實驗的으로 決定하기 위하여 反射面 中心間의 距離를 여러가지로 變化시키면서 얻은 간섭무늬 사진은 Fig. 5와 같다.

本 實驗에서 使用한 光素子로서는 이웃한 反射面 中心間의 距離가 100μm 以上이면 간섭무늬가 너무 調密하여 區分이 어렵고 60μm 以下에서는 너무 疎어서 光電流로 變換할 때 많은 노이즈(noise)를 받게 되었다.

따라서 80μm 程度가 가장 適當함을 찾았다.

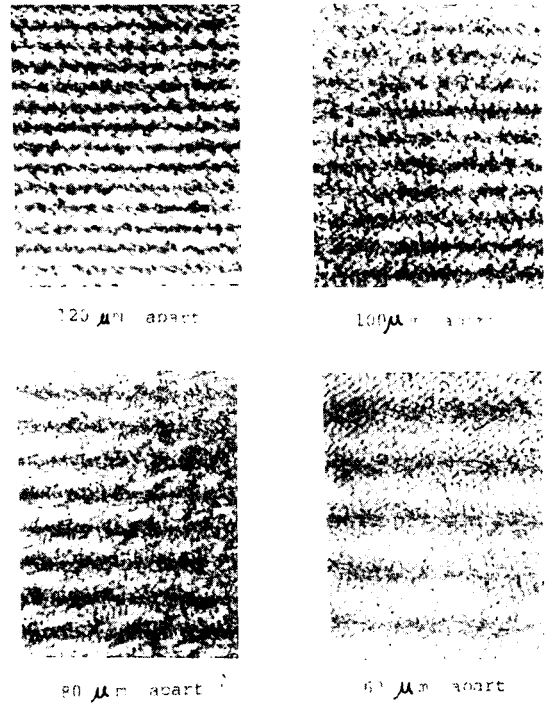


Fig. 5 Laser interferometric fringe patterns for various indentations

從來의 機械加工에 의한 균열의 幅을 勘案할 때 두께가 30μm 미만인 테프론 균열이 本 實驗에서 使用하기에 適當하고 鮮명한 간섭무늬 사진을 얻을 수 있었다.

(2) 微小變位 測定

Fig. 3의 장치로서 引張荷重에 對한 移動하는 간섭무늬를 기록하고 또 간섭무늬에 相當한 微小變位 U_y 를 求하였다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 에지이고 하중방향에 중앙관통이고 하중방향에 수직균열과 내부 수직균열을 로오드 셀을 利用하여 測定한 荷重과 微小變位사이의 關係를 表示했다.

그림에서 알 수 있듯이 간섭무늬차수가 2차 이상에서는 荷重과 變位가 서로 正比例하므로 本 實驗에서 使用한 裝置가 信賴性이 있음을 나타내고 1차에서 약간 벗어나는 것은 初期荷重狀態가 不安하다고 生覺된다.

(3) 應力擴大係數의 解析

本 實驗에서 使用한 試片의 剪斷彈性係數 $G = 142.5 \text{ kg/mm}^2$ 세로탄성계수 $E = 315 \text{ kg/mm}^2$, 프와송의 비 $\nu = 0.4$, 그리고 레이저의 波長 $\lambda = 6328 \text{ Å}$

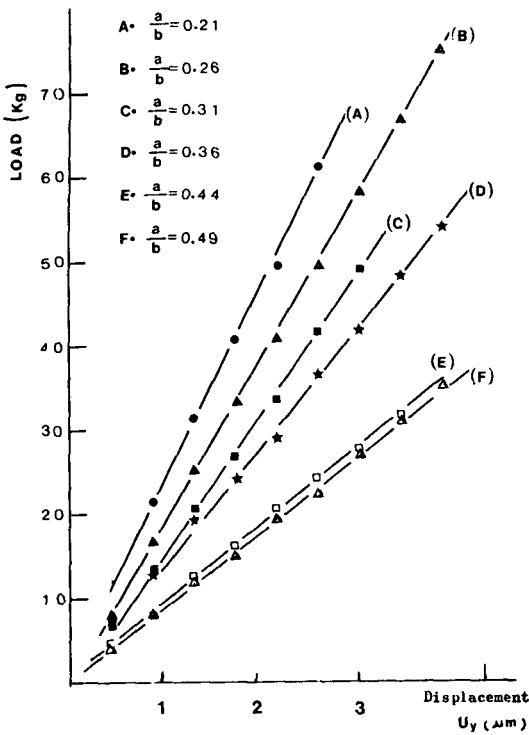


Fig. 6 Edge crack displacement for various loads

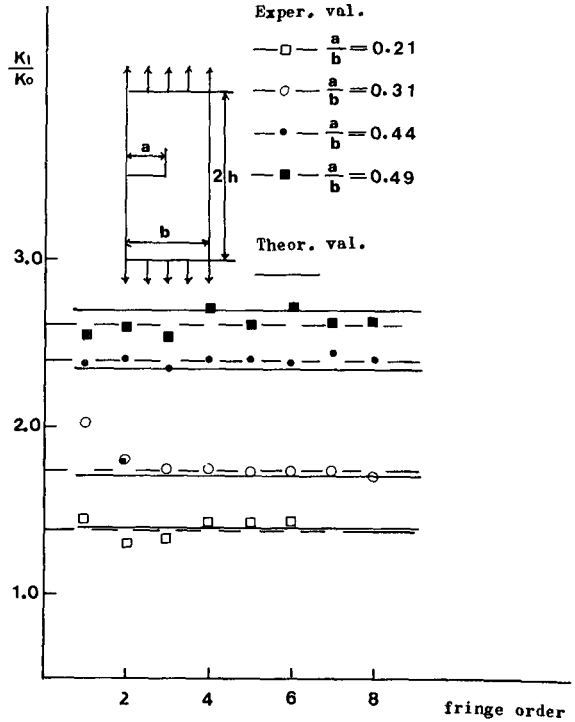


Fig. 8 Comparison between numerical and experimental value for edge horizontal crack

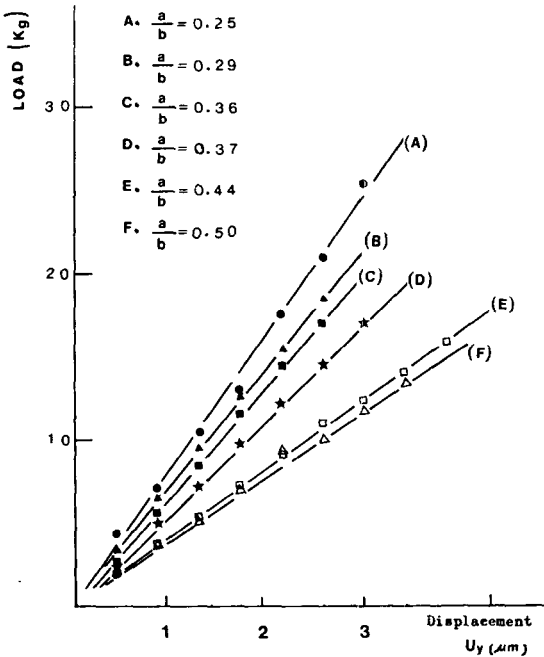


Fig. 7 Through thickness crack displacement for various loads

이다.

또 實驗結果로 부터 測定한 r, θ, α_0 및 上記한 常數들을 式 (8)에 代入하여 各 간섭 무늬차수에 對한 應力擴大係數를 求한 結果는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다.

그림에서 알 수 있듯이 에지이고 하중방향에 수직균열의 각 간섭무늬차수에 對한 應力擴大係數의 無次元值 $\frac{K_I}{K_0}$ 를 直線外挿法으로 求하였다.

實驗結果와 Brown과 Sawley의 수치해석값을 比較하면 $\frac{a}{b}=0.21$ 일 때 差가 約 7%, $\frac{a}{b}=0.26$ 일 때는 約 10%, $\frac{a}{b}=0.31$ 일 때는 約 2%, $\frac{a}{b}=0.36$ 일 때는 約 3%, $\frac{a}{b}=0.44$ 일 때는 約 2%, $\frac{a}{b}=0.49$ 일 때는 約 2%의 差를 나타 내었다.

그리고 중앙관통이고 하중방향에 수직균열에서는 實驗결과와 Tada의 수치해석값을 比較하니 $\frac{a}{b}=0.25$ 일 때 差가 約 8%, $\frac{a}{b}=0.29$ 일 때는 約 7%, $\frac{a}{b}=0.36$ 일 때 約 11%, $\frac{a}{b}=0.37$ 일 때는 約 7%, $\frac{a}{b}=0.44$ 일 때 約 10%, $\frac{a}{b}=0.50$ 일 때는 約 4%의 差를 나타냈다.

以上의 結果로 부터 本 試驗方法이 脆性材料의

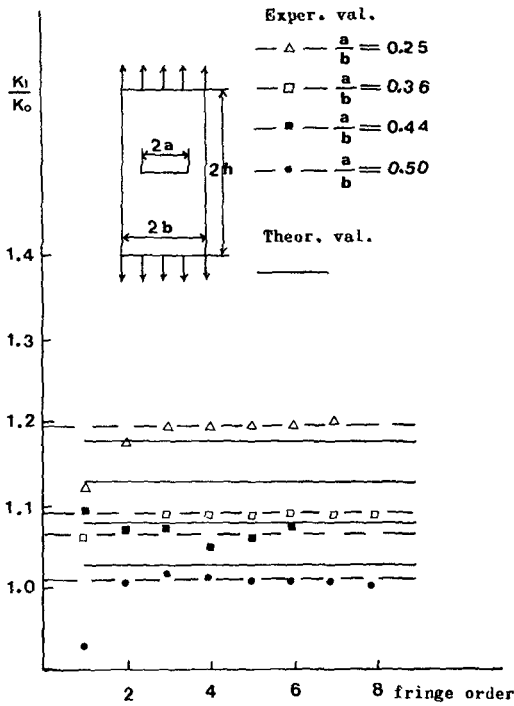


Fig. 9 Comparison between numerical and experimental value for internal horizontal crack

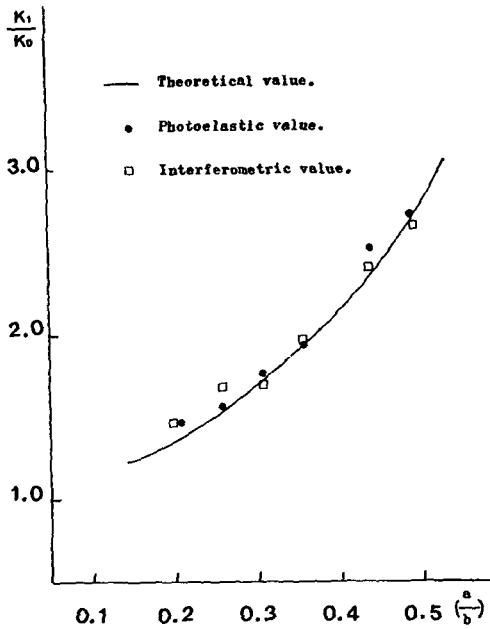


Fig. 10 Comparison of numerical, photoelastic, interferometric, value for edge horizontal crack

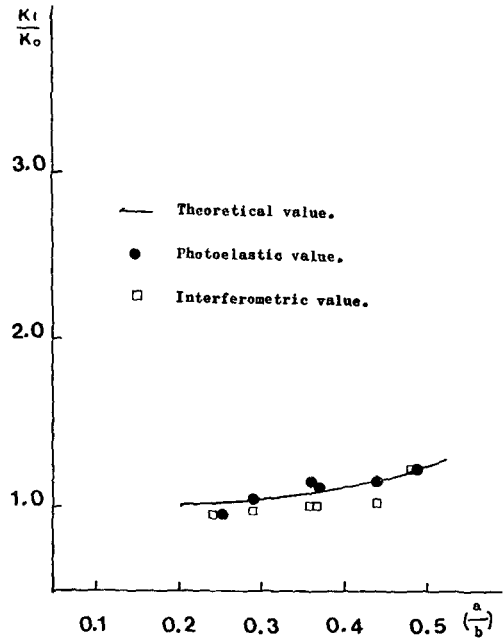


Fig. 11 Comparison of numerical, photoelastic, interferometric value for internal horizontal crack

레이저 干涉法에 의한 應力擴大係數 解析에 매우 實用性이 있음이 確認되었다.

以上에서와 같이 레이저 干涉法을 에폭시판에 適用시킨 結果 實用性이 있는 것으로 봐서 超低溫, 및 超高溫에서 使用되는 材料의 應力擴大係數 解析에도 適用할 수 있는 方法이라 思慮된다.

그리고 同一한 試片으로 $\frac{K_I}{K_0}$ 의 값을 光彈性 實驗法으로 求한 實驗값과 수치해석값을 比較하여 에지이고 하중방향에 수직균열은 Fig. 10 그리고 중앙관통이고 하중 방향에 수직균열은 Fig. 11에 表示하였다.

그림에서 알 수 있듯이 에지이고 하중방향에 수직균열에서는 本 實驗에서 求한 實驗값과 Brown과 Srawley의 수치해석값이 매우 近接하였으며 光彈性 實驗값과도 同等한 精밀도 範圍內에 屬하였다.

그러나 중앙관통이고 하중방향에 수직인 균열에서는 레이저 干涉에 의한 實驗값을 Tada의 수치해석값과 比較해 보니 光彈性 實驗值 보다 精밀도가 약간 떨어지는 傾向이 있었다.

이것은 同一한 試片을 同一한 實驗條件에서도 중

양관통이고 하중방향에 수직균열의 변위가 예지이고 하중방향에 수직균열의 변위보다 적으므로 차이가 발생하기 쉽고 또한 중앙관통이고 하중방향에 수직균열인 경우에 荷重에 對한 간섭무늬의 移動方法이 一定하지 못하기 때문이라고 思慮된다.

5. 結 果

레이저 干涉法에 依한 應力擴大係數의 解析에 關한 實驗結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 테프론 균열 주형법으로 제작한 테프론 균열의 폭이 $30\mu\text{m}$ 미만이므로 鮮명한 간섭무늬를 얻을 수 있었다.

(2) 균열 兩便에 壓印한 反射面 中心間의 距離가 $80\mu\text{m}$ 일 때 光素子로 간섭무늬를 추적 기록하기에 適當하였다.

(3) 레이저 干涉法으로 求한 $\frac{K_I}{K_0}$ 의 값이 수치해석값에 比하여 예지이고 하중방향에 수직균열에서 2~10%의 차이가 발생하였고 중앙관통이고 하중방향에 수직균열에서는 4~11%가 발생 하였으나 應力擴大係數의 解析에 實用性이 있는 實驗方法이라 生覺되었다.

참 고 문 헌

- (1) G. R. Irwin, 1957, Analysis of Stress and Strains Near the End of a crack Traversing a plate, J. Appl. Mech., 24.
- (2) 崔善浩, 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎, 1980, 11., "モアレ法とスラブアナロジーの組合せによる應力擴大係數의 實驗的解釋法", 日本機械學會 關西支部 Proceedings, pp. 159~161.
- (3) J. Willey, 1950, "Handbook of Experimental Stress

- Analysis", p. 700, Heteny.
- (4) J. R. Rice, 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks", J. Appl. Mech., pp. 379~386.
- (5) Lubehn. J. D., 1959, "Experimental Determination of Energy Release Rate for Notch Bending and Notch Torsion", Proc., ASTM, 59, pp. 885~913.
- (6) Sharpe, W. N., Jr., 1968, "The Interferometric Strain Gage", Exp. Mech., pp. 164~170.
- (7) P. B. Crosley, S. Mostovoy and E. J. Rippling, 1971, "An Optical-Interference Method for Experimental Stress Analysis of Cracked Structures", Eng. Fracture Mech., Vol. 3., pp. 421~433.
- (8) W. T. Evans., A Luxmoor., 1974, "Measurement of Inplane Displacements Around Crack Tips by A LASER Speckle Method", Vol. 6., pp. 735~743.
- (9) W. N. Sharpe, Jr., and A. F. Grandt, Jr., 1976, "A Preliminary Study of Fatigue Crack Retardation Using LASER Interferometry to Measure Crack Surface Displacement", ASTM, pp. 302~320.
- (10) 崔相寅, 崔善浩, 黃在錫, 1987, "테프론 균열 주형법 개발에 관한 연구", 大韓機械學會論文集, 제11권, 제6호, pp. 945~952.
- (11) 岡村弘之, 1976, "線形破壞力學入門", 培風館, pp. 103~104.
- (12) W. F. Brown, J. E. Strawley., 1966, STP. 410., ASTM.
- (13) H. Tada., P. G. Paris and G. R. Irwin., 1973, "The Stress Analysis of Crack Handbook", Del. Research Corp, Hellertown, pp. 2~46.
- (14) Jenkins, F. A. and White, H. E., 1957, "Fundamental of Optics", McGraw-Hill, Newyork.
- (15) R. J. Sanford., 1979, "A General Method for Deteming Mixed Mode Stress Intensity Factor from Isochromatic Fringe Patterns", Eng. Fract. Mech., Vol 11, pp. 621~633.