

직교이방성체 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법 개발에 관한 연구

신동철[†] · 황재석* · 남정환* · 이준현**

A Study on the Development of Reflection Type Photoelastic Experimental Hybrid Method for Orthotropic Materials

Dong-Chul Shin, Jai-Sug Hawong, Jeong-Hwan Nam and Joon-Hyun Lee

Key Words: Reflection type Photoelasticity(반사형 광탄성실험), Orthotropic Material (직교이방성체), Stress Optic Law (광응력 법칙), Stress Intensity Factor (응력확대계수)

Abstract

The reflection type photoelastic experiment can be used more effectively than the transparent type photoelastic experiment in industrial fields. However, the reflection type photoelastic experiment for orthotropic material has not been studied. Therefore, the reflection type photoelastic experimental hybrid method for the fracture mechanics of orthotropic material was developed in this research. Comparing the results obtained from this method with those from the hybrid method for isotropic material about the same isotropic specimen, the validity of this method was verified. And then, the reflection type photoelastic experiment for orthotropic material was applied to the orthotropic plates with a central crack of the various inclined angle. Using this hybrid method for the orthotropic material, it is able to obtain stress intensity factors and separate stress components at the vicinity of the crack-tip in orthotropic plates from only the isochromatic fringe patterns of isotropic coating material.

1. 서 론

투과형 광탄성 실험이 모델실험에 국한되어 사용되어지고 있는 반면, 반사형 광탄성 실험은 산업구조물 등 실제 구조물에 직접 적용할 수 있다는 이점이 있으며, 실험 장비가 간단하고 이동성(portable)이 좋기 때문에 산업현장의 구조물의 응력이나 변형율을 해석하는 문제에 매우 효과적으로 이용될 수 있다. 해석의 정확성은 투과형에 비해 다소 떨어지고 코팅재료 선정 및 코팅 두께 측정에 어려움이 있으나, 실물 실험이 더욱 요구되고 있는 현시점에서 실제 구조물에 적용 가능한 반사형 광탄성 실험에 대한 연구의 필요성은

더욱 더 증가되고 있다.

광탄성 분야에서는 등색선 무늬를 이용하여 등방성체 평면의 원공 주위의 응력성분들을 등각사상을 통하여 분리하는 방법이 1991년에 Huang⁽¹⁾ 등에 의해서 개발되었다. 1995년에는 Hawong과 Rowlands⁽²⁾ 등이 직교 이방성체 평면 원공에 대해 등각사상을 이용한 투과형 광탄성 실험용 하이브리드 법을 개발하고 1998년에는 신동철, 황재석^(3,4) 등에 의해 등방성체 및 직교이방성체 균열 문제에 투과형 광탄성 실험용 하이브리드 법을 적용하여 그 유효성을 증명하였다. 또한 2001년에 Hawong과 Shin⁽⁵⁾ 등이 이를 더욱 체계화 시켜 이방성재료의 파괴역학 문제에 투과형 광탄성 실험 하이브리드 법을 제시하였다.

그러나 지금까지는 등방성체용 반사형 광응력 법칙만이 제시되어 등방성 재료에 대한 반사형 광탄성 실험만이 이루어져 왔다. 그러므로 본 연구에서는 정적 평면문제의 직교이방성 재료에 사

† 부산대학교 기계공학부

E-mail : dcshin12@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2822 FAX : (051)518-2430

* 영남대학교 기계공학부

** 부산대학교 기계공학부

용될 수 있는 반사형 광탄성 하이브리드 법을 개발하고 그 유효성을 확인하고자 한다.

2. 기초 이론

2.1 등방성체내 균열 선단 응력장

등방성체 평면문제에 대한 응력성분의 멱급수 형태의 표현에 관한 선 연구를 통하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있음을 밝혔다^(3,5).

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Re}\{C_n[2f(n,z) - g(n,z)] + (-1)^n \overline{C_n} f(n,z)\} \quad (1) \\ \sigma_y &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Re}\{C_n[2f(n,z) + g(n,z)] - (-1)^n \overline{C_n} f(n,z)\} \\ \tau_{xy} &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Im}\{C_n g(n,z) - (-1)^n \overline{C_n} f(n,z)\}\end{aligned}$$

where

$$f(n,z) \equiv \frac{n}{2} z^{\frac{n}{2}-1}, \quad g(n,z) \equiv \frac{n}{2} \left\{ z \left(\frac{n}{2} - 1 \right) - \frac{n}{2} z \right\} z^{\frac{n}{2}-2}$$

여기서 $z = x + iy$ 는 균열선단을 원점으로 하는 파괴 역학적 좌표상의 위치이며, C_n 은 각 멱급수에서의 복소계수이다.

2.2 등방성체용 반사형 광응력 법칙과 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법

Fig. 1에서 보듯이 시편과 코팅재료가 완전히 접촉된 경우 계면에서의 응력 성분은 다르나 변형률은 동일하게 된다. 그러므로 변형률이 같다는 조건으로서 시편의 응력 성분을 코팅재료의 변형률과 후크의 법칙(Hook's law)을 사용하여 구할 수 있다. 따라서 이 관계를 주변형률과 주응력에 적용하여, 이를 코팅재료의 광응력 법칙인 식(2.a)에 대입하면 식 (2.b)를 얻을 수 있다.

$$\sigma_1^c - \sigma_2^c = \frac{Nf_\sigma}{2h_c} \quad (2.a)$$

$$\begin{aligned}\frac{Nf_\sigma}{2h_c} &= \frac{E_c}{1+\nu_c} (\epsilon_1^c - \epsilon_2^c) = \frac{E_c}{1+\nu_c} (\epsilon_1^s - \epsilon_2^s) \quad (2.b) \\ &= \frac{E_c}{1+\nu_c} \left[\frac{1+\nu_s}{E_s} (\sigma_1^s - \sigma_2^s) \right]\end{aligned}$$

여기서 N 은 등색선 무늬차수이며 f_σ 와 h_c 는 각각 코팅재료의 응력 프린치치와 코팅두께이다. 첨자 s와 c는 각각 시편(specimen)과 코팅재료

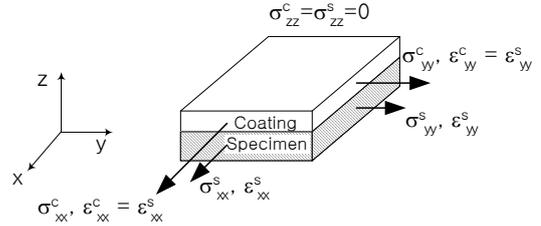


Fig. 1 Elementary section of coating and specimen

(coating material)을 의미한다.

그러므로 식 (2)로부터 시편과 반사형 등색선무늬와의 광응력 법칙은 식 (3)과 같다.

$$\sigma_1^s - \sigma_2^s = \left(\frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{1+\nu_c}{1+\nu_s} \right) \cdot \frac{Nf_\sigma}{2h_c} \quad (3)$$

식 (3)에 Newton-Raphson법에 의한 비선형 최소자승법을 사용하기 위해 양변을 제곱하고 식 (1)을 적용하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\left[\left(\frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{1+\nu_c}{1+\nu_s} \right) \cdot \frac{Nf_\sigma}{2h_c} \right]^2 &= (\sigma_{xx}^s - \sigma_{yy}^s)^2 + (2\tau_{xy}^s)^2 = D_s \\ &= \left\{ 2 \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{Re}[f_s(n,z) - g_s(n,z)] + 2 \sum_{n=1}^N b_n \operatorname{Im}[f_s(n,z) + g_s(n,z)] \right\}^2 \\ &+ \left\{ 2 \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{Im}[g_s(n,z) - f_s(n,z)] + 2 \sum_{n=1}^N b_n \operatorname{Re}[f_s(n,z) + g_s(n,z)] \right\}^2\end{aligned} \quad (4)$$

where, $f_s(n,z) = (-1)^n f(n,z)$, $g_s(n,z) = g(n,z)$

식 (4)를 수렴 한계치(10^{-5})에 도달하도록 하는 복소계수 $C_n = a_n + ib_n$ 를 구하면 식 (1)로부터 균열선단 주위의 각 응력성분들을 구할 수 있고, 응력확대계수도 구할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 방법을 등방성체용 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법이라 한다.

응력확대계수의 일반적인 정의⁽⁷⁾로부터 복소계수($n=1$)와 응력확대계수와와의 관계식을 구하면 식 (5)와 같다⁽³⁾.

$$\begin{aligned}K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}^s(r,0) = \sqrt{2\pi} \cdot a_1 \quad (5) \\ K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}^s(r,0) = -\sqrt{2\pi} \cdot b_1\end{aligned}$$

2.2 직교이방성체용 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법

등방성체와 마찬가지로 변형률이 같다는 조건을 사용하여 직교이방성체의 반사형 광응력 법칙

을 유도할 수 있다 그러나 등방성체와 마찬가지로 방법으로는 시편의 주응력차와 등색선무늬와의 관계를 규정지을 수 없다.

먼저 식 (2.a)의 코팅재료(등방성체)의 광응력 법칙으로부터 식 (4)는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\left[\frac{Nf_\sigma}{2h_c} \right]^2 = (\sigma_{xx}^c - \sigma_{yy}^c)^2 + (2\tau_{xy}^c)^2 = D_c$$

$$= \left\{ 2 \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{Re}[f_c(n,z) - g_c(n,z)] + 2 \sum_{n=1}^N b_n \operatorname{Im}[f_c(n,z) + g_c(n,z)] \right\}^2$$

$$+ \left\{ 2 \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{Im}[g_c(n,z) - f_c(n,z)] + 2 \sum_{n=1}^N b_n \operatorname{Re}[f_c(n,z) + g_c(n,z)] \right\}^2 \quad (6)$$

where $f_c(n,z) = (-1)^n f(n,z)$, $g_c(n,z) = g(n,z)$

식 (4)의 f_s 와 g_s 는 시편, 식 (6)의 f_c 와 g_c 는 코팅재료에 대한 함수 값이다.

식 (6)을 비선형 최소자승법을 사용하여 복소 계수 $C_n = a_n + ib_n$ 을 구하고, 이 것을 사용하여 코팅재료에서의 응력성분 및 응력확대계수를 구할 수 있다. 이 때 코팅재료에서의 변형률과 응력성분과의 관계식은 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^c = \epsilon_{xx}^s \\ \epsilon_{yy}^c = \epsilon_{yy}^s \\ \gamma_{xy}^c = \gamma_{xy}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_c & -\nu_c/E_c & 0 \\ -\nu_c/E_c & 1/E_c & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^c \\ \sigma_{yy}^c \\ \tau_{xy}^c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fig. 2와 같은 직교이방성체에서의 응력과 변형률 관계식은 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

그런데 임의의 좌표축 (x,y)이 직교이방성체의 주축(1,2)에서 θ 만큼 회전되었다면 새로운 강성

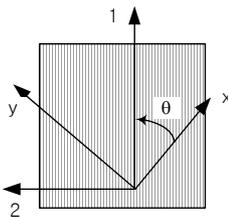


Fig. 2 Relationship between the reference axes and principal axes of material

(stiffness)을 사용하여야 한다. 따라서 시편(직교이방성체)의 응력성분은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^s \\ \sigma_{yy}^s \\ \tau_{xy}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^c = \epsilon_{xx}^s \\ \epsilon_{yy}^c = \epsilon_{yy}^s \\ \gamma_{xy}^c = \gamma_{xy}^s \end{bmatrix} \quad (9)$$

where

$$Q_{11} = C_{11}c^4 + 2(C_{12} + 2C_{66})s^2c^2 + C_{22}s^4$$

$$Q_{12} = (C_{11} + C_{22} - 4C_{66})s^2c^2 + C_{12}(s^4 + c^4)$$

$$Q_{22} = C_{11}s^4 + 2(C_{12} + 2C_{66})s^2c^2 + C_{22}c^4$$

$$Q_{16} = (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})sc^3 + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})s^3c$$

$$Q_{26} = (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})s^3c + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})s^3c$$

$$Q_{66} = (C_{11} + C_{22} - 2C_{12} - 2C_{66})s^2c^2 + C_{66}(s^4 + c^4)$$

$$c = \cos\theta, \quad s = \sin\theta$$

그러므로 직교이방성체 시편의 응력확대계수는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$K_I^s = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}^s(r,0) \quad (10.a)$$

$$= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (Q_{12}\epsilon_{xx}^c + Q_{22}\epsilon_{yy}^c + Q_{26}\gamma_{xy}^c)$$

$$= \left(\frac{Q_{22} - \nu_c Q_{12}}{E_c} \right) K_I^c + \frac{Q_{26}}{G_c} K_{II}^c$$

$$K_{II}^s = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}^s(r,0) \quad (10.b)$$

$$= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (Q_{16}\epsilon_{xx}^c + Q_{26}\epsilon_{yy}^c + Q_{66}\gamma_{xy}^c)$$

$$= \left(\frac{Q_{26} - \nu_c Q_{16}}{E_c} \right) K_I^c + \frac{Q_{66}}{G_c} K_{II}^c$$

여기서 $n=1$ 일 때 $\lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{xx}^c(r,0) = 0$ 이며, K_I^c 와 K_{II}^c 는 코팅재료의 응력함수에서 계산되어지는 응력확대계수이다.

이와 같이 코팅재료(등방성체)와 시편(직교이방성체) 사이의 변형률 동일 조건을 이용하여 코팅재료의 광탄성 하이브리드 법으로 코팅재료의 응력성분과 응력확대계수를 구하고 변형률 성분을 구한다. 그런 다음 식 (9)와 (10)를 이용하여 시편에서의 응력성분과 응력확대계수를 구하는 이러한 방법을 직교이방성체용 반사형 광탄성 하이브리드 법이라고 한다.

3. 실험 및 실험방법

3.1 시편

본 연구에서 등방성체 반사형 광탄성 실험의

시편은 1Cr-0.5Mo강으로 하고 코팅재료는 CY230 에폭시수지(Nagese CIBA Ltd.) 를 사용하였으며 저점도를 위해서 디메틸아민을 첨가하였고, 경화 시간의 단축과 선명한 광탄성 무늬를 얻기 위해서 톨루엔과 페놀을 각각 첨가하여 사용하였다. 직교이방성체 반사형 광탄성 실험의 시편은 구리강하 에폭시 복합체(copper fiber epoxy composite: C. F. E. C.)^(2,4)을 사용하고 코팅재료는 시바-가이 기(Ciba-Geigy)사의 아랄다이트(Araldite-B41)와 경화제 HT903을 중량비 10:3의 비율로 배합한 에폭시 수지를 사용하였다. 이러한 재료의 물성치는 Table 1과 같고 실험에 사용된 시편의 기하학적 형상은 Fig. 3과 같다. Table 1의 E_{11} , E_{22} , G_{12} , ν_{12} 등은 직교이방성체의 기본 물성치이다. 여기서 E , G , ν 등은 각각 세로탄성계수, 가로탄성계수 그리고 포아송 비 (Poisson's ratio)를 의미한다.

3.2 실험장치 및 실험방법

Fig. 4와 같은 반사형 광탄성 실험 장비 시스템을 이용하여 시편이 단순 인장하중을 받는 경우의 등색선 무늬를 촬영하였으며, 이것을 화상처리 프로그램을 이용하여 70~120여 개의 무늬차수 데이터를 얻었다. 이러한 데이터를 이용하여 응력함수의 복소계수($C_n = a_n + ib_n$)를 비선형 최소자승법을 이용하여 구하였다. 반사형 광탄성 하이브리드 법으로 계산된 응력함수를 이용하여 다시 광탄성 등색선 무늬로 그래픽하여 실제 등색선

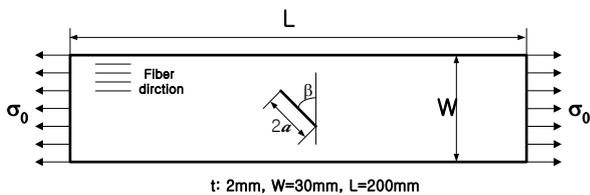


Fig. 3 Schematic of the specimen for reflection type photoelastic experiment

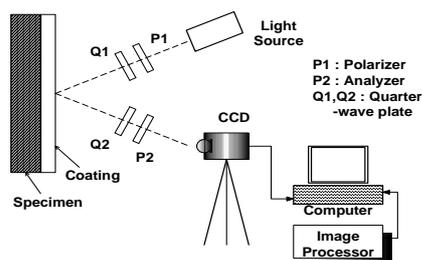


Fig. 4 Reflection type photoelasticity system

Table 1 Material properties used in this research

Properties	Material			
	CY230	1Cr-0.5Mo	Epoxy resin	C.F.E.C.
V_f (%)	·	·	·	10.9
E_{11} (GPa)	2.86	206.3	3.20	13.75
E_{22} (GPa)	2.86	206.3	3.20	4.18
G_{12} (GPa)	1.08	78.80	1.16	1.43
ν	0.33	0.31	0.38	0.376
f_σ (kN/m)	13.82	·	10.62	·

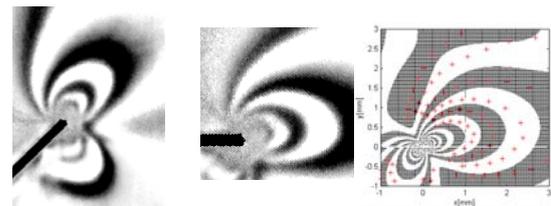
무늬와 비교 평가하였으며, 또한 계산된 응력확대계수를 이론값과 비교함으로써 광탄성 실험 하이브리드 법의 유효성을 평가하였고, 직교이방성체용 하이브리드 법의 유효성을 평가하기위해 등방성체 시편에 대해 등방성체 및 직교이방성체용 광탄성 실험 하이브리드 법으로 구한 두 결과를 비교하여 보았다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 등방성체 반사형 광탄성 실험

등방성체 반사형 광탄성 실험은 등방성체 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법의 유효성 뿐만아니라 직교이방성체용 하이브리드 법의 유효성을 평가하기 위해 시행하였다. 사용된 시편 폭(W)은 30mm 균열길이($2a$)는 12mm로 하였고, 균열 경사각(β)은 45° 경우이다.

Fig. 5는 45° 의 균열경사각을 가진 1Cr-0.5Mo강의 등방성체 시편에 CY230 에폭시수지를 코팅하여 반사형 광탄성 실험을 행하여 얻은 실제 전체 등색선 사진(왼쪽)과 하이브리드 법으로 구한 응력함수를 이용하여 x축이 수평이 되도록 하여 그래픽한 등색선 무늬(오른쪽) 그리고 실제 사진에서 그래픽 영역을 취한 사진(중앙)을 각각 나타낸 것이다. 여기서 그래픽한 등색선 무늬 내부에 "+"



$\sigma_0 = 263.69 \text{MPa}$, $\beta = 45^\circ$, $2a/w = 0.4$, $h_c = 2.18 \text{mm}$

Fig. 5 Actual isochromatic photographs and graphic isochromatic fringes

는 마크는 등색선 무늬의 데이터가 측정된 위치를 나타내고 좌표수치는 실제의 좌표 수치이다. 또한 등방성체용 및 직교이방성체용 광탄성 실험 하이브리드 법을 이용하여 구한 응력함수를 통해 재현한 등색선 무늬는 두 경우가 동일하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 각각의 경우에서 실제 등색선 무늬와 하이브리드 법으로 그래픽 된 등색선 무늬는 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 경우에 각각 등방성체 및 직교이방성체용 반사형 광탄성 하이브리드 법을 적용하여 구한 응력성분들을 균일 분포응력(σ_0)으로 무차원하여 나타낸 응력분포도이며, 두 경우 모두 균열선상에서 σ_{yy} 와 τ_{xy} 가 0으로 자유 표면력 조건을 정확히 만족하고 있으며, 두 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

반사형 광탄성 실험 하이브리드 법으로 얻어진 복소계수(a_1, b_1)를 식 (5)에 적용하여 계산한 응력확대 계수비를 Table 2에 나타내었다. 이론치에 대한 실험치의 오차는 2%내외로 매우 잘 일치하며, 등방성체 및 직교이방성체용 하이브리드법으로 구한 결과 값의 차이는 수치해석시 계수 값들의 처리에 따른 오차에 의한 것으로 생각된다.

이상의 결과로써 균열면에서 자유-표면력 조건과 응력확대계수의 정확성 등으로 미루어 개발된 등방성체 및 직교이방성체용 반사형 광탄성 실험 하이브리드법이 유효함을 알 수 있다.

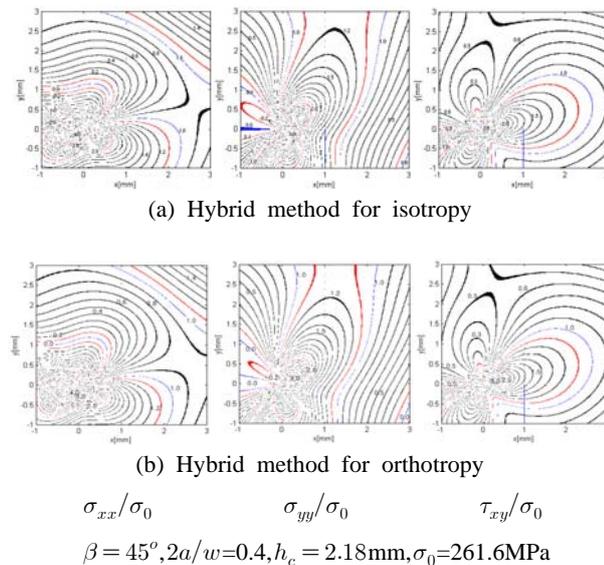


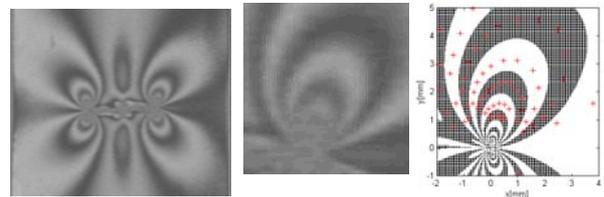
Fig. 6 Stress contours obtained from the hybrid methods for reflection type photoelasticity

Table 2 Stress intensity factors (isotropy specimen)

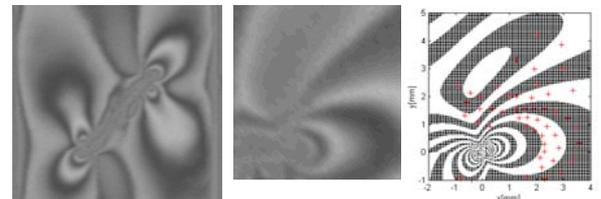
β	Method	K_I/K_0			K_{II}/K_0		
		Theo. Value ⁽¹⁰⁾	Exp. Value	Error [%]	Theo. Value ⁽¹⁰⁾	Exp. Value	Error [%]
45°	Iso. Hybrid	0.5719	0.578	1.07	0.5290	0.534	0.95
	Ortho. Hybrid		0.566	1.11		0.532	0.57

4.2 직교이방성체 반사형 광탄성 실험

Fig. 7은 시편은 C.F.E.C.이고 코팅재료로 에폭시 수지(Araldite-B41+HT903)가 사용된 시편에 대한 결과이다. Fig. 7에서 보듯이 각각의 경우에

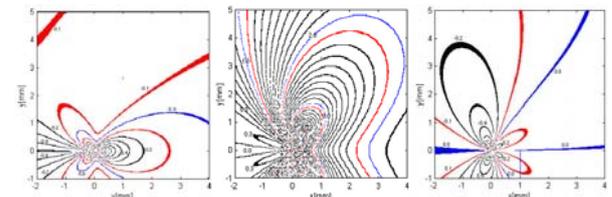


(a) $\beta = 0^\circ, 2a/w=0.4, W=31\text{mm}, \sigma_0=17.94\text{MPa}$

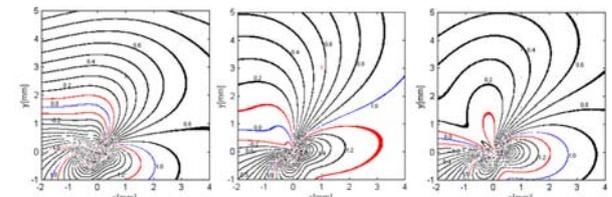


(b) $\beta = 45^\circ, 2a/w=0.417, W=30.4\text{mm}, \sigma_0=18.29\text{MPa}$

Fig. 7 Actual isochromatic photographs and graphic isochromatics



(a) $\beta = 0^\circ, 2a/w=0.4, W=31\text{mm}, \sigma_0=17.94\text{MPa}$



(b) $\beta = 45^\circ, 2a/w=0.417, W=30.4\text{mm}, \sigma_0=18.29\text{MPa}$

Fig. 8 Contours of $\sigma_{xx}/\sigma_0, \sigma_{yy}/\sigma_0$ and τ_{xy}/σ_0

Table 3 Stress intensity factors (Orthotropy)

β	$2a/W$	K_I/K_0		K_{II}/K_0	
		Theo. Value ⁽¹⁰⁾	Exp. Value	Theo. Value ⁽¹⁰⁾	Exp. Value
0°	0.400	1.109 ⁽⁹⁾	1.189	0.000	0.006
15°	0.375	1.040	0.944	0.256	0.267
30°	0.442	0.874	0.871	0.455	0.524
45°	0.417	0.573	0.533	0.531	0.585

실제 등색선 무늬와 하이브리드 법으로 그려진 등색선 무늬는 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 각 경우에 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법을 적용하여 구한 응력성분들을 가하여 준 응력(σ_0)으로 무차원하여 나타낸 응력 분포도이다. Fig. 8에서도 알 수 있듯이 균열선상에서 σ_{yy} 와 τ_{xy} 가 0으로 자유 표면력 조건을 정확히 만족하고 있다.

그리고 하이브리드 법으로 얻어진 복소계수(a_1, b_1)를 식 (10)에 적용하여 계산한 응력확대 계수비를 Table 3에 나타내었는데 직교이방성체의 경우 이론 값이 없으므로 등방성체의 균열 길이비에 대한 이론 값($L/W=2$)으로 대체하였다.

이상의 결과로써 본 연구에서 개발된 등방성체와 직교이방성체용 반사형 광탄성실험 하이브리드 법의 유효성을 확인하였으며, 이것을 사용하면 단지 코팅재료의 등색선 무늬데이터를 이용하여 시편의 응력성분과 응력확대계수 등을 구할 수 있음을 확인하였고, 또한 직교이방성체용 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법을 사용하면 시편의 재료의 종류에 관계없이 코팅재료의 광응력 법칙과 변형률 동일 조건을 사용하여 등방성체, 직교이방성체 그리고 이종재료의 정적 평면의 파괴역학 문제의 해석이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) (직교)이방성체용 반사형 광탄성 실험 하이브리드 법을 개발하였으며, 그 유효성을 확인하였으며, 등방성체 코팅재료의 응력확대계수와 (직교)이방성체 시편의 응력확대계수를 식 (10)과 같이 유도하였다.

(2) 본 연구에서 개발된 (직교)이방성체 반사형 광탄성 하이브리드 법을 사용하면 직교이방성체

의 광응력 법칙과 복잡한 응력프린지치와 이론식을 사용하지 않아도 코팅재료의 등색선 무늬 데이터로써 등방성체, 직교이방성체, 그리고 이종재료의 정적 평면문제의 응력성분과 응력확대계수를 구할 수 있다.

후기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-214-D00002)이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Huang, Y. M., Lin, C. H., Suhling, J. C. and Rowlands, R. E., 1991, "Determining the Three Individual Stress Components from Measured Isochromatic Fringes", *Exp. Mech.*, pp.310~318.
- (2) Hawong, J. S., Lin, C. H., Rhee, J. and Rowlands, R. E., 1995, "A Hybrid Method to Determine Individual Stresses in Orthotropic Composites Using Only Measured Isochromatic Data", *J. of Comp. Mat.*, Vol. **29**(18), pp. 2366~2387.
- (3) 신동철, 황재석, 이효재, 남정환, 권오성, 1998, 등방성체 파괴역학에 투과형 광탄성 실험의 하이브리드법 적용, 대한기계학회 논문집 A권, **22**(5), pp. 834~842.
- (4) 신동철, 황재석, 이효재, 남정환, 권오성, 1998, "직교 이방성체 파괴역학에 투과형 광탄성 실험의 하이브리드법 적용", 대한기계학회논문집 A권, **22**(6), pp. 1036~1044.
- (5) Hawong, J. S., Shin, D. C. and Lee, H. J., 2001, "Photoelastic Experimental Hybrid Method for Fracture Mechanics of Anisotropic Materials", *Exp. Mech.*, Vol. 41, No. 1, pp.310~318.
- (6) Muskhelishvili, N. I., 1963, Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, 4th Edition, P. Noordhoff Ltd., Groningen, Netherlands.
- (7) Sih, G. C. and H. Liebowitz, 1968, "Mathematical Theories of Brittle Fracture", *Fracture an Advanced Treatise*, Academic Press, Vol. II, pp. 67~190.
- (8) Isida, M., 1973, "Analysis of Stress Intensity Factors for the Tension of a Centrally Cracked Strip with Stiffened Edges ", *Eng. Frac. Mech.*, 5(3), pp. 647~665.
- (9) Kitagawa, H. and Yuuki, R., 1977, "Analysis of Arbitrarily Shaped Crack in a Finite Plate Using Conformal Mapping", *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, 43(376), pp. 4354~4362.