

〈論 文〉

횡등방성체용 광탄성재료 개발에 관한 연구

황재석* · 김병일** · 서재국*** · 이광호**** · 최선호*

(1995년 1월 17일 접수)

A Study on the Development of Photoelastic Experiment Model Material for Transversely Isotropic Material

Jai-Sug Hawong, Byoung-II Kim, Jae-Guk Suh, Kwang-Ho Lee and Sun-Ho Choi

Key Words : Transversely Isotropic Material(횡등방성체), Photoelastic Experimental Model Material(광탄성실험 모델재료), Stress Fringe Value(응력프린지치), Physical Property(물성치)

Abstract

In this paper, glass surface-mat reinforced epoxy(G.S.R.E.) is developed, It is assured that the material(G.S.R.E.) can be used as photoelastic model material and it satisfy with the required properties of photoelastic model material. Therefore, the material can be used as model material of transparent photoelastic experiment when we analyze the stress distributions of transversely isotropic material by photoelastic experiment. When we use G.S.R.E. as photoelastic experiment model material, we had better use the G.S.R.E. which fiber volume ratio is less than 0.7% in the high temperature(stress freezing method) and than 1.74% in the room temperature. Relationships between stress fringe value and elastic modulus in transversely isotropic material are developed in this paper, it is assured by experiment that they are established in the room temperature or in the high temperature. Therefore we can obtain stress fringe value or elastic modulus from the relationships between stress fringe value and elastic modulus.

1. 서 론

등방성재료로 구성된 구조물의 응력분포, 응력집중, 파괴역학 등을 실험적으로 해석하는 경우, 광탄성실험법이 주로 사용되어 왔다.⁽¹⁻⁴⁾ 이와 같은 경우에, 주로 사용되었던 광탄성실험의 재료는 1950년대에 소개된 에폭시수지로서, 주로 사용된 재료는 에폰 828,⁽⁵⁾ 에폭시-1(Epoxy-1), 에폭시-2,

CR-39, 호마라트-100(Homalite-100), 폴리카본네이트, 에폭시-3^(7,8) 등이 있다. 이와 같은 재료는 등방성재료의 구조물을 광탄성실험법으로 모델해석하는 경우에 사용되어지는 재료이다. 최근, 고강도 및 고경량화된 재료개발과 더불어 항공기, 선박 등의 각종 구조물 등의 분야에 복합재료의 사용이 증가함에 따라서, 복합재료 구조물의 응력분포 또는, 응력집중, 파괴역학 등에 관한 이론적인 연구가 진행되고 있다.⁽⁹⁻¹⁴⁾ 그러나 이러한 것에 대한 실험적인 연구는 아직 초보단계에 머무르고 있다. 복합체로 구성된 구조물의 응력분포, 응력집중, 응력확대계수 등을 광탄성실험을 통하여 얻을 수 있는 방법은 복굴절코팅법(birefringent coating method)과

*정회원, 영남대학교 기계공학과

**풍국건설(주) 환경사업부

***정회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

****정회원, 한국조폐공사

투과용 광탄성실험법 등이 있다. 복합체의 복굴절 코팅법은 등방성체에 사용되는 복굴절코팅법을 응력해석하고자 하는 복합체의 모델에 그대로 사용하더라도 해석하는 방법은 연구되어야 한다. 복합체인 직교이방성체로 구성된 구조물을 투과용 광탄성 실험법을 사용하여 응력을 해석하고자 할 때에는 직교이방성 성질을 갖고 투과용 광탄성실험의 모델 재료가 갖추어야 할 조건을 갖추고 있는 재료가 개발되어야 하므로, 이것에 대한 연구가 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔다.⁽¹⁵⁻³¹⁾

많은 연구자들에 의하여 연구된 광탄성실험용 복합체의 모델은 각각의 단점을 갖고 있으므로 본 연구의 저자는 이미 에폭시수지를 모재로 사용하고 구리선을 파이버로 사용하여 복합재 구조물의 응력해석에 적합한 투과용 광탄성실험의 모델재료로 사용될 복합재료를 개발하여⁽³²⁾ 그 재료가 투과용 광탄성재료로 사용될 수 있다는 것을 확인하였고, 그 재료를 사용하여 직교이방성 광탄성재료의 물성치와 응력프린지치의 관계 그리고 그들의 측정법,⁽³³⁾ 그 재료를 이용한 직교이방성체용 투과형 광탄성실험법의 파괴역학에 적용⁽³⁴⁾ 등에 대하여 연구한 적이 있다. 그러나 지금까지 연구된 복합체용 투과형 광탄성실험법의 모델재료는 직교이방성체용 투과형 광탄성실험의 모델재료이고 횡(橫)등방성체용 광탄성실험법의 모델재료는 개발된 적이 없으므로, 본 연구에서는 주로 수조, 용조 그리고 보트 등 산업현장의 구조물에 많이 사용되는 횡등방성체의 구조물의 응력상태를 투과형 광탄성실험법으로 분석하는데 반드시 필요한 횡등방성 광탄성재료를 개발하는 것과 그 재료가 투과형 광탄성 모델재료로서 유효한가를 확인하는 것 등을 이 연구의 주목적으로 한다.

2. 광탄성재료의 구비조건 및 물성치와 응력프린지치 측정법

2.1 광탄성재료의 구비조건

어떤 재료를 광탄성실험용 재료로 사용하려면 먼저 그 재료가 광탄성실험용 재료로서 아래와 같은 충분한 조건들을 만족하는지를 실험적으로 확인하여야 한다.

(1) 빛의 투과성이 좋아야 한다. 즉 빛의 투과성이 좋아야 등색선과 등경선 등의 무늬를 판독하기가 좋다.

(2) 응력프린지치 값은 $34.98 \times 10^{-3} \text{ kN/m} \leq f_{\sigma} \leq$

343.93 kN/m 내에 존재하여야 한다.

(3) 탄성한도내에서는 하중(응력)과 변형(변형률)의 관계가 선형적이어야 한다.

(4) 응력과 무늬차수와 관계도 좋은 선형성을 가져야 한다.

(5) 재료 모든 부분에 나타나는 성질이 균일하여야 한다.

(6) 시간의 경과에 따라 크리프(creep)현상이 적어야 한다.

(7) 큰 하중에서도 탄성적인 성질을 갖도록 재료의 비례한도가 높아야 한다.

(8) 광탄성실험용 모델재료로 사용되려면 재료내부에 어떠한 종류의 잔류응력도 내포하지 않는 것이 좋다.

(9) 재료를 제작하여 실험에 임하기까지 시간의 경과로 인한 재료의 성질변화나 습기에 의하여 발생하는 무늬차수 등의 현상, 즉 시간연효과(時間緣效果)가 적을수록 좋다.

(9) 좋은 재현성을 가져야 한다.

(10) 여러 가지 환경의 변화에 의한 수축성이 없어야 한다.

(11) 재료비가 비싸지 않고 쉽게 구할 수 있어야 한다.

(12) 여러 가지 형상의 시편으로 가공하기가 쉬워야 하고 기계가공성이 좋아야 한다.

2.2 횡등방성체의 물성치와 응력프린지치의 측정법

복합체의 일종인 횡등방성체는 프라이(ply)방향이 랜덤(random)한 라미네이터 혹은 섬유파이버

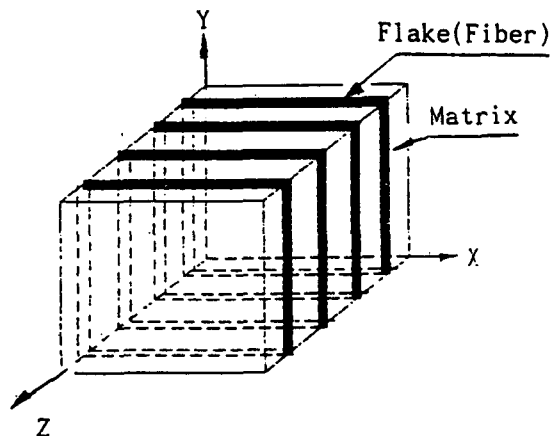


Fig. 1 Transversely isotropic material

(chopped fiber)가 랜덤하게 분산된 라미네이터를 의미한다. 이러한 복합체를 단순화하여 도형적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 보듯이 x - y 평면은 완전등방성체이고 x - z 평면 혹은 y - z 평면은 직교이방성 평면에 해당된다. 그러므로 x - y 평면을 횡등방성체의 등방성체 평면이라 하고 x - z 평면이나 y - z 평면을 횡등방성체의 직교이방성체 평면이라 한다.

2.2.1 횡등방성체의 직교이방성체의 물성치와 응력프린지치의 측정법

횡등방성체의 직교이방성체는 직교이방성체의 평면과 동일하므로 직교이방성체의 물성치와 응력프린지치의 측정법을 사용하여야 한다. 직교이방성체의 기본 응력프린지치(f_L, f_T, f_{LT})는 Fig. 2와 같은 방법과 방정식(1)과 같은 식을 각각 사용하여 구할 수 있다.⁽³³⁾

방정식(1)은 응력성분($\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$), 응력프린지치(f_L, f_T, f_{LT})와 무늬차수(n_L, n_T, n_{LT}) 그리고 시편의 두께(t) 등의 관계를 나타낸다.

$$\begin{aligned} f_L &= \frac{\sigma_L \cdot t}{n_L} \\ f_T &= \frac{\sigma_T \cdot t}{n_T} \\ f_{LT} &= \frac{2\tau_{LT} \cdot t}{n_{LT}} \\ f_a &= \frac{\sigma_a \cdot t}{n_a} \\ (f_{LT})_a &= \frac{2\tau_{xy} \cdot t}{n_{xy}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, n_L, n_T, n_a, n_{LT} 등은 Fig. 1의 (a), (b), (c), (d)와 같은 경우에 하중이 가하여졌을 때 측정되어지는 각각의 무늬차수이다. 직교이방성체의 물성치 $E_L, E_T, G_{LT}, \nu_{LT}$ 등은 Fig. 1의 각각

스트레인게이지에서 각각 측정되어지는 변형률 $\epsilon_L, \epsilon_T, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_a$ 등과 방정식(2)에서 측정될 수 있다.

$$\begin{aligned} E_L &= \frac{\sigma_L}{\epsilon_L} \\ E_T &= \frac{\sigma_T}{\epsilon_T} \\ G_{LT} &= \frac{\tau_{LT}}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \\ E_a &= \frac{\sigma_a}{\epsilon_a} \\ G_a &= \frac{\tau_{xy}}{\epsilon_{a+\frac{\pi}{4}} - \epsilon_{a+\frac{3\pi}{4}}} \\ \nu_{LT} &= -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} \\ \frac{\nu_{LT}}{E_L} &= \frac{\nu_{TL}}{E_T} \\ \nu_a &= \frac{\epsilon_{a+\frac{\pi}{2}}}{\epsilon_a} \end{aligned} \quad (2)$$

재료의 기본 물성치인 E_L, E_T 등은 등방성체의 종탄성계수인 E 를 측정할 때 사용되는 시편과 같은 형태를 사용하면 좋다. 그러나 G_{LT} 은 간접적으로 측정할 수 있으나⁽³⁵⁾ 정도면에서 문제성이 있으므로 Fig. 3의 (c)⁽³⁶⁾와 (d)⁽³⁷⁾에서 직접 측정할 수 있다. 응력프린지치로 간접적으로 f_{LT} 를 측정하는 것⁽³⁸⁾보다는 Fig. 3의 (c)와 (d)의 시편을 사용하여 직접적으로 측정하는 것이 좋다.

2.2.2 횡등방성체의 등방성체의 물성치와 응력프린지치의 측정법

횡등방성체의 등방성체 평면의 물성치와 응력프린지치는 완전히 동일한 방향성과 성질을 가지므로 일반적인 등방성체와 같은 방법으로 물성치와 응력프린지치를 측정할 수 있다. 그러나 이 재료의 물

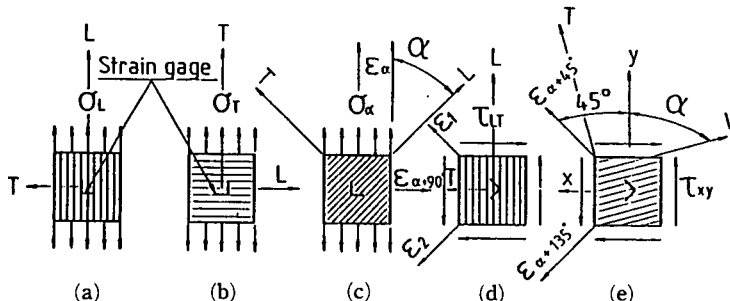


Fig. 2 Model for measurement of stress fringe value and physical properties

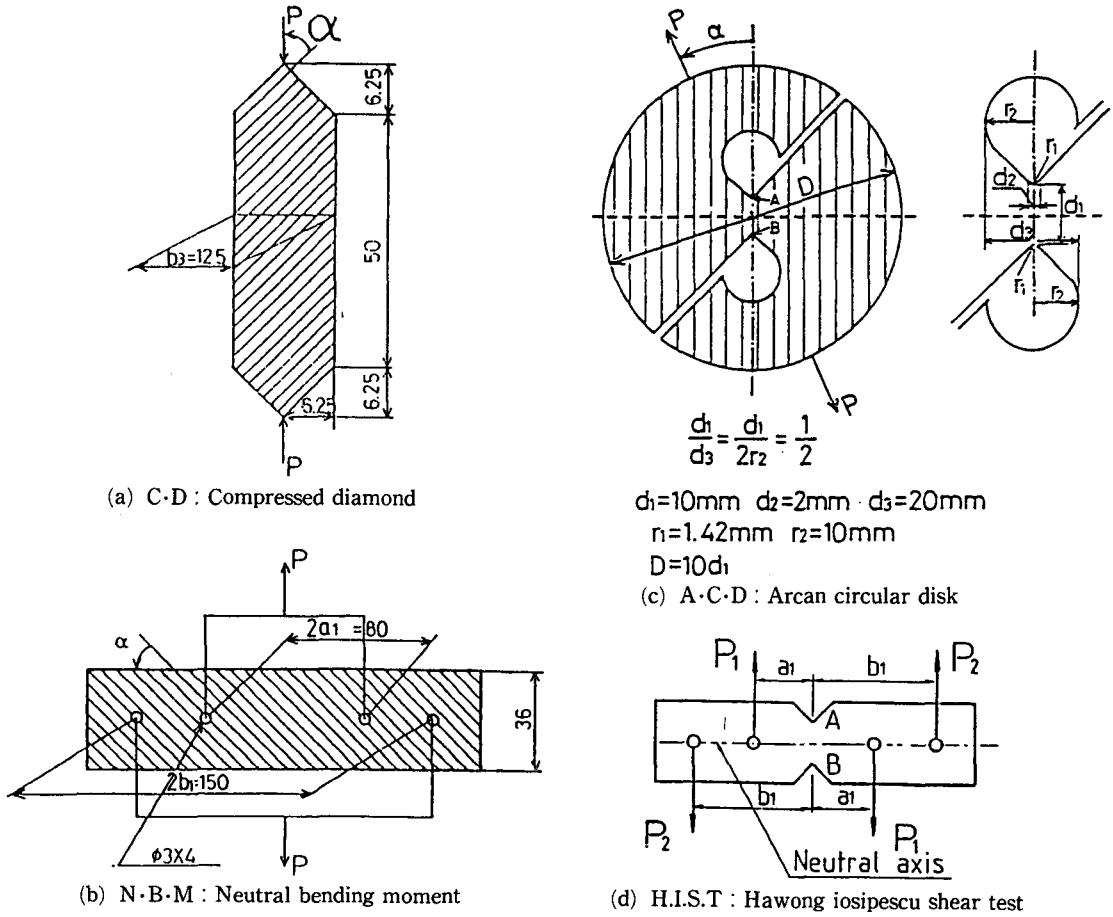


Fig. 3 Specimen for stress fringe values and material properties

성치와 응력프린지치의 관계는 일반적인 등방성체의 물성치와 응력프린지치의 관계와 틀리고 아래에 같이 설명될 수 있다. 찢드파이버(chopped fiber)가 방향에 관계없이 무질서하게 내포되어 있는 평면의 응력프린지치와 물성치는 방향에 관계없이 일정하다고 볼 수 있다. 그리고 그 평면의 무늬차수 n 은 방정식(3)처럼 파이버의 무늬차수 n_f 와 모재의 무늬차수 n_m 의 합으로 나타낼 수 있다. 첨자 f 와 m 은 각각 파이버와 모재를 의미한다.

$$n = n_f + n_m = \frac{\sigma_f}{f_f} t_f + \frac{\sigma_m}{f_m} t_m \quad (3)$$

여기서, t_f 와 t_m 은 파이버와 모재의 두께가 전체 두께에서 차지하는 두께이며, 이것을 전체의 두께 t 에 대한 체적비율로 바꾸면 각각 $\frac{t_f}{t} = v_f$ 와 $\frac{t_m}{t} = v_m$ 의 관계식이 성립하고 이 관계식을 이용하면 방정식(3)은 방정식(4)로 변경할 수 있다.

$$\frac{n}{f} = \frac{\sigma}{f} = \frac{\sigma_f}{f_f} v_f + \frac{\sigma_m}{f_m} v_m \quad (4)$$

완벽한 복합체의 동일한 판에 균일한 인장력이 작용하면 판의 변형률 ϵ , 모재의 변형률 ϵ_m 과 파이버의 변형률 ϵ_f 등은 서로 같다고 볼 수 있으므로 방정식(4)은 방정식(5)로서 나타낼 수 있다.

$$\frac{E}{f} = \frac{E_f}{f_f} v_f + \frac{E_m}{f_m} v_m \quad (5)$$

여기서, E 와 f 은 횡등방성체의 등방성체의 세로 탄성계수와 응력프린지치를 각각 나타낸다. 만약에 파이버의 응력프린지치가 무한히 큰 경우에는 방정식(5)는 방정식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{E_m}{f_m} v_m f \quad (6)$$

방정식(6)은 횡등방성체의 등방성체의(등방성체 성질을 지니는 평면) 응력프린지치와 물성치의 관

계를 나타낸 식이다. 방정식(6)을 이용하면 횡등방성체의 등방성체의 응력프린지치로서 횡등방성체의 등방성체의 물성치를 측정할 수 있다. 같은 개념으로 횡등방성체의 등방성체의 G 은 방정식(7)로서 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{G_m}{f_m} \nu_m f \quad (7)$$

Fig. 1에서 알 수 있듯이 횡등방성체의 x - z 나 y - z 평면은 직교이방성체의 성질을 가지므로 이미 저자에 의하여 유도된 직교이방성체의 응력프린지치와 물성치의 관계⁽³³⁾를 이용하여 횡등방성체의 x - z 와 y - z 평면의 기본물성치나 응력프린지치를 측정할 수 있다.

3. 광탄성실험 모델재료의 횡등방성체의 개발 및 실험방법

3.1 광탄성실험용 횡등방성체의 개발

본 연구의 저자는 이미 횡등방성체의 직교이방성체인 직교이방성체용 광탄성실험의 모델재료인 C.F.E.C.(copper fiber epoxy composite)를 개발하였다.⁽³²⁾ 그리고 횡등방성체의 등방성체용 광탄성 실험의 모델재료인 G.S.R.E.(glass surface reinforced epoxy)는 아래와 같은 과정을 통하여 주형되었다.

이때, 강화재료로 사용된 서페이스매트(surface-mat)은 미세하고 찢드된(chopped) 유리섬유를 랜덤(random)하게 분사시켜 제작한 것이다.

(1) 유리섬유 서페이스매트(glass fiber surface-mat)를 물에 완전히 적신 후에, 이것을 다시 평판 위에 평평하게 펼쳐놓고 이것을 노 내에 넣고 완전 건조시킨다. 그리고 사용하고자 하는 크기로 적당하게 제단한다.

(2) 적합한 크기의 유리판에 셀로판지를 기포가 전혀 발생하지 않도록 입히고 이 셀로판지가 터지지 않도록 밀봉하고 건조시킨다.

(3) 이렇게 만든 유리판을 밀면으로 하고 일정한 폭과 두께를 가진 유리판의 떠를 사용하여 적당한 두께의 가장자리가 형성된 주형상자를 만든다.

(4) 이렇게 만들어진 주형상자를 응력동결로 안에 넣고 수평기를 이용하여 수평을 정확하게 맞춘다.

(5) 노 속에서 완전 용해시킨 에폭시수지(epoxy resin), 즉 아를다이트(araldite : CT-200)에 경화제

(hardner : HT-903)를 중량비 10 : 3으로 배합하고 잘 섞은 다음, 기포가 발생하지 않도록 주의하면서 적당한 혼합용액을 주형상자(molding box)에 천천히 주입한다.

(6) 주입시킨 에폭시수지 용액에 미리 준비하여 두었던 유리섬유인 서페이스매트가 밀바닥까지 가라앉지 않도록 하기 위하여 적당한 시간을 두면서 원하는 파이버의 체적비율(V_f)에 맞게 서페이스매트를 적층한다.

(7) 서페이스매트가 에폭시수지 용액에 완전히 스며들면, 그 서페이스매트 위에 적당한 양의 에폭시수지 용액을 부어 두께를 조절한다.

(8) 이와 같이 에폭시수지와 서페이스매트가 적층된 것을 노내에서 Fig. 4와 같은 주형사이클(molding cycle)에 의하여 주형한다.

위와 같은 과정을 거친 후에 주형된 G.S.R.E.판을 편광기로 검사하여 잔류응력이 있는 부분을 절단하거나 Fig. 5와 같은 소둔사이클(curing cycle)을 이용하여 잔류응력을 제거한다. 이러한 잔류응력은 시편 주형시, 서페이스매트가 구부러져서 들어가거나 기타 이물질이 들어갈 경우에 발생한다.

3.2 실험방법

본 연구에서 개발되고 횡등방성체로 된 구조물의 광탄성실험용 모델재료로 사용될 G.S.R.E.의 물성

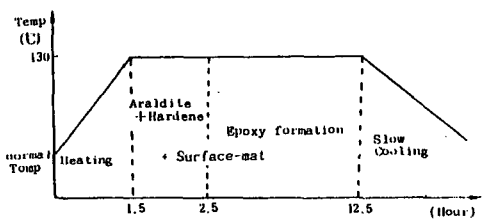


Fig. 4 Molding cycle

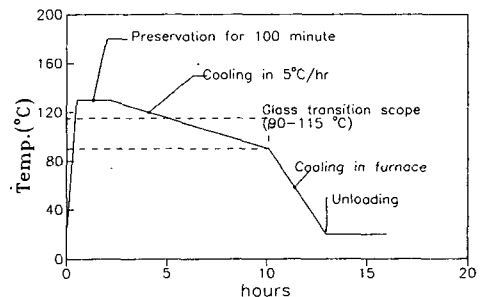


Fig. 5 Curing cycle

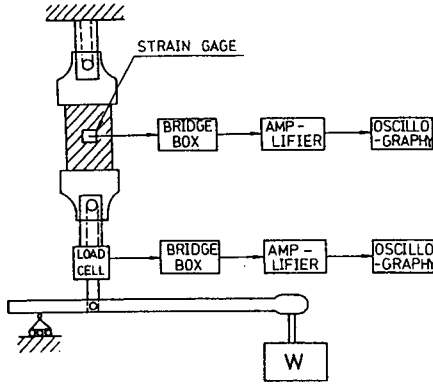


Fig. 6 Experimental device for the measurement of composite material properties

치와 응력프린지치를 측정하고 G.S.R.E.가 광탄성 재료로서 유효한가를 검토한다. 이러한 세부적인 실험방법은 다음과 같다.

(1) 실온(약 20°C)과 고온(온도가 130°C인 경우 : 이 온도는 광탄성실험에서 응력을 동결할 때 사용되는 온도이다)에서 응력프린지치를 측정한다. 고온을 유지하는데 사용되는 노는 광탄성실험의 응력동결로이다.

실온에서 응력프린지치를 측정할 때는 Fig. 3의 (a)시편과 방정식(1)를 사용하여 구하고 고온시의 응력프린지치는 Fig. 3의 (b)와 같은 시편과 방정식(1)을 이용하여 구한다.

(2) 실온과 고온시의 종탄성계수를 측정한다. 실온의 종탄성계수는 등방성체의 종탄성계수의 측정 방법과 Fig. 6과 같은 하중장치를 사용하여 측정하였고 고온시의 종탄성계수는 고온시의 종탄성계수의 측정법⁽³⁷⁾을 사용하여 측정하였다.

(3) 본 연구에서 유도된 횡등방성체의 등방성체의 물성치와 응력프린지치의 관계식인 방정식(6)의 유효성을 확인한다.

(4) G.S.R.E.가 횡등방성체의 등방성체 구조물의 해석용으로 사용될 광탄성실험의 모델재료로서 유효한가를 확인한다.

4. 실험결과 및 고찰

G.S.R.E.에서 파이버의 체적비율을 높게할수록 강화효과가 커져서 우수한 기계적 특성을 가지지만, 광탄성실험용 모델재료로 사용되려면 광탄성 실험의 모델재료의 조건을 만족하여야 한다. 따라

서 이러한 광탄성실험의 모델재료의 조건을 만족하는 체적비율을 확인하기 위해 고온과 상온 하에서 실험하였다. 그 결과 광탄성실험용 모델재료로서 유효한 서페이스매트의 체적비율(V_f)은 상온에서는 1.74% 미만이고 고온에서는 0.7% 미만이다. 이때, 파이버의 체적비율은 다음과 같이 산정되었다. 유리섬유 서페이스매트(glass-surface-mat)의 무게와 비중량(혹은 밀도, 밀도 : 2500 kg/m³)을 사용하여 유리섬유서 페이스매트의 체적을 구한다. 그리고 에폭시수지의 원료인 아라다이트(aradite)와 경화제(hardner)의 혼합액의 비중량(=1300 kgf/m³)과 무게를 사용하여 체적을 구한다. 이와 같이 구한 유리섬유서 페이스매트 체적(= v_1)과 에폭시수지의 체적(= v_2) 등을 사용하여 유리섬유 서페이스매트의 체적비율($=\frac{v_1}{v_1 + v_2} \times 100\%$)을 구하였다.

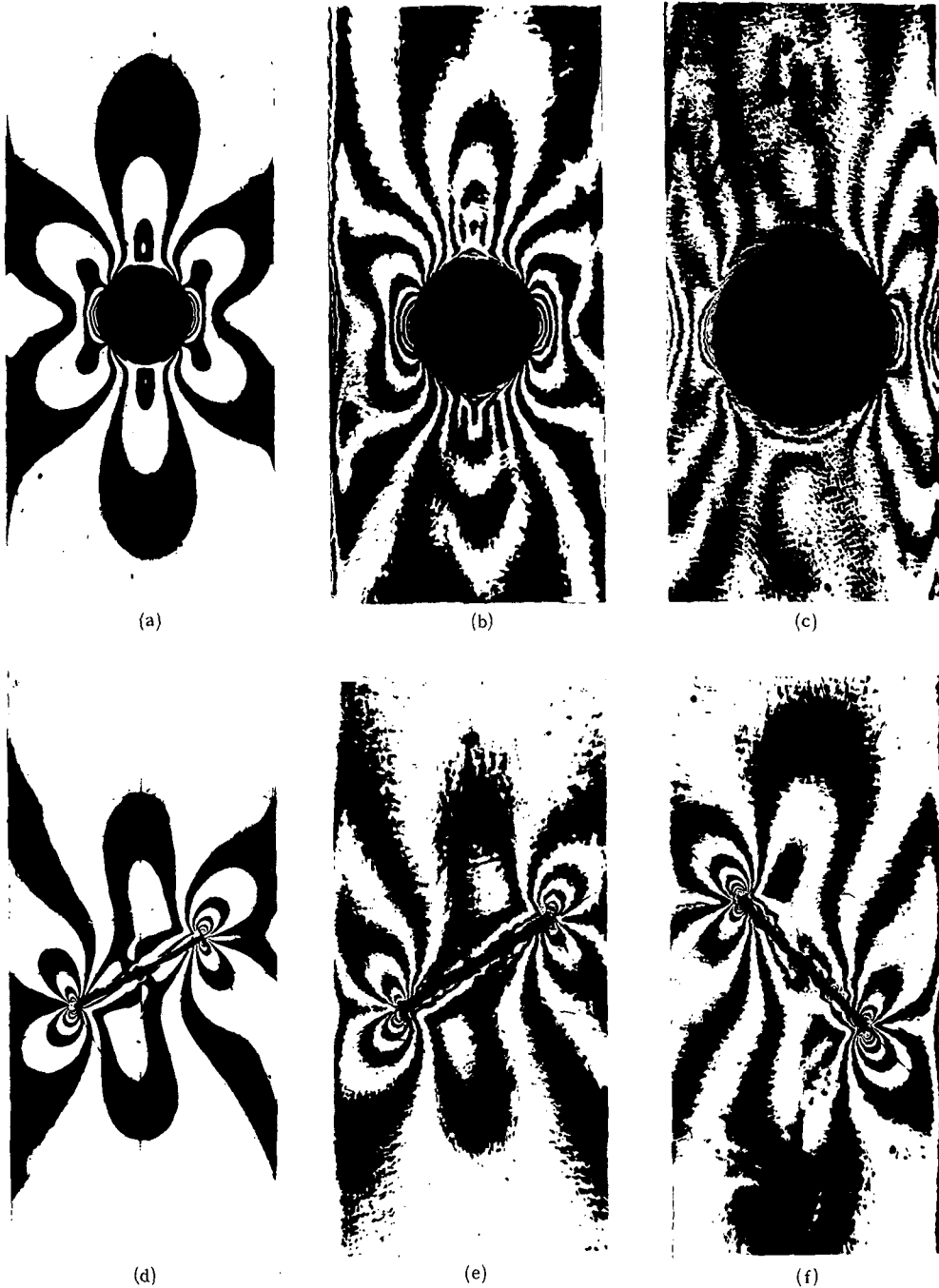
4.1 G.S.R.E.의 광탄성실험용 모델재료에 대한 유효성 검토

본 연구에서 개발하여 사용한 횡등방성체로 된 구조물의 응력해석용 광탄성실험의 모델재료인 G.S.R.E.는 다음과 같은 과정을 통하여 광탄성 모델 재료로서의 유효성을 확인하였다.

4.1.1 투과성

투과형 광탄성실험을 할 경우에 선명한 등색선 무늬를 얻기 위해서는 시편의 빛의 투과성이 좋아야 하는데 G.S.R.E.는 파이버의 체적비율이 증대됨에 따라 빛의 투과성이나 광탄성 감도가 다소 감소하나 어느 범위내에서는 Fig. 7과 같은 구형판(矩形板)의 중앙 원공상태의 응력집중 사진과 Fig. 7의 내부 크랙상태의 등색선 사진으로 알 수 있듯이 투과성은 매우 양호하다. 그리고 Table 1은 본 연구에서 실험재료로 사용한 G.S.R.E.를 각각 상온과 고온 상태에서 파이버의 체적비율과 응력프린지치의 관계를 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면,

본 실험에서 강화제로 사용한 서페이스매트의 체적비율 V_f 가 상온의 경우는 1.74%까지, 고온의 경우에는 서페이스매트의 체적비율 V_f 가 0.70%까지는 투과성이 우수하여 투과형 광탄성실험의 모델 재료로 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 상온에서의 종탄성계수 비인 E_T/E_1 는 1~1.87까지 이나 (E_T : 횡등방성체의 등방성체의 종탄성계수, E_1 : 일반적 등방성체의 종탄성계수), 고온에서의 종탄성계수의 비인 E_T/E_1 가 1~11.52까지 크게 나



- (a) $V_t=0\%$, $t=6.4$ mm, $W=40$ mm, $d=12.1$ mm, $d/w=0.3$, $P=981$ N
 (b) $V_t=0.697\%$, $t=7.3$ mm, $W=39.4$ mm, $d=16.2$ mm, $d/w=0.41$, $p=1177$ N
 (c) $V_t=1.742\%$, $t=6.5$ mm, $W=40$ mm, $2a=11.765$, $d/w=0.61$, $P=1177$ N
 (d) $V_t=0.0\%$, $t=5.1$ mm, $W=40.2$ mm, $\beta=75^\circ$, $2a/w=0.5$, $P=863$ N
 (e) $V_t=1.045\%$, $t=6.2$ mm, $W=40.2$ mm, $\beta=45^\circ$, $2a/w=0.6$, $P=981$ N
 (f) $V_t=0.0\%$, $t=6.2$ mm, $W=40.2$ mm, $\beta=60^\circ$, $2a/w=0.6$, $P=902.5$ N

Fig. 7 Fringe patterns of the specimen for stress concentration factors and stress intensity factors

Table 1 Relationships between stress fringe value with elastic modulus and volume ratio at room temperature and high temperature

E, f_σ		V_f	0.00 (I.M)	0.70 (T.I.M)	1.05 (T.I.M)	1.40 (T.I.M)	1.74 (T.I.M)
		R_T	10.43	12.06	12.99	14.30	15.57
f_σ	H_T	0.26	1.65				
	R_T	2746.8~2961.1	4139.56	4514.24	5007.79	5330.77	
E[MPa]	H_T	74.55~80.49	310.14	487.55	706.45	898.73	
	R_T	1.00	1.45	1.59	1.76	1.87	
E_T/E_I	H_T	1.00	3.98	6.52	9.06	11.52	

V_f : Fiber volume ratio(%)
 E.M. : Elastic modulus(MPa)
 R_T : Room temperature
 T.I.M. : Transversely isotropic material
 E_T : Elastic modulus of isotropic material for transversely isotropic material
 E_I : Elastic modulus of isotropic material
 f_σ : Stress fringe value(kN/m)
 I.M. : Isotropic material
 H_T : High temperature

타났다. 여기에서 알 수 있듯이 본 연구에서 광탄성실험의 모델재료를 개발한 G.S.R.E.의 종탄성계수의 비는 상온보다는 고온에서 더 큰 차이를 보이고 있다.

4.1.2 응력프린지치

투과형 광탄성실험 모델재료를 사용할 경우에는 그 재료의 응력프린지치는 $34.98 \times 10^{-3} [kN/m] \leq f_\sigma$

$\leq 343.93 [kN/m]$ 이내에 존재하여야 한다. 본 연구에서 실험재료를 사용한 G.S.R.E.의 응력프린지치는 Table 1에서 알 수 있듯이 상온과 고온에서 모두 1.0[kN/m]에서 16[kN/m]이내에 존재하므로 위의 조건을 충분히 만족함을 알 수 있으며, 상온과 고온에서 각 파이버의 체적에 따른 응력프린지치는 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있으며 파이버의 체적비 V_f 가 증가함에 따라 응력프린지치가 비례하

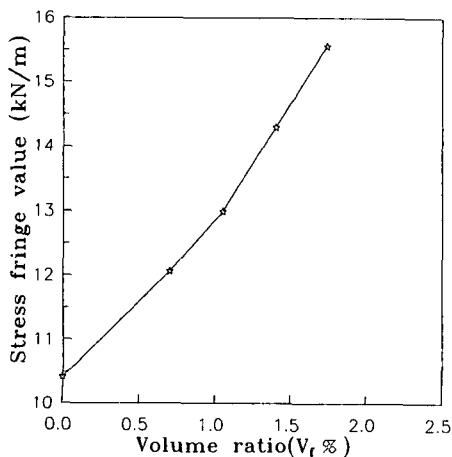


Fig. 8 Relationships between stress fringe values with volume ratios

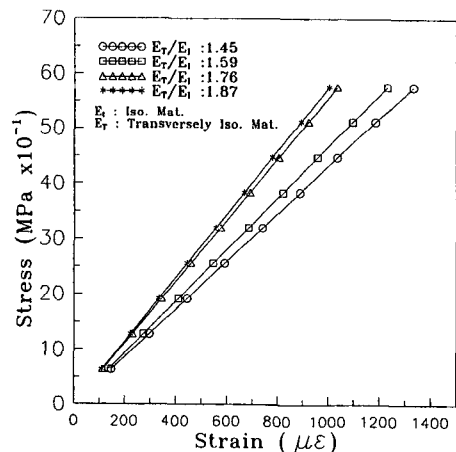


Fig. 9 Relationship between stress and strain

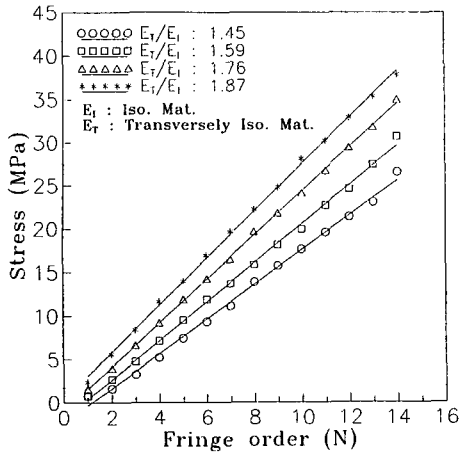


Fig. 10 Relationship between stress and fringe order

여 증대됨을 알 수 있다.

4.1.3 선형성

어떠한 구조물을 응력해석하기 위해서는 그 구조물의 하중, 경계 및 기하학적인 조건 등을 상사시켜 모델해석을 하여야하므로 광탄성재료는 탄성한도 내에서는 응력(σ)과 변형률(ϵ)과의 관계 그리고 응력과 무늬차수와의 관계가 선형적으로 변화하여야 한다. Fig. 9은 본 연구에서 개발한 G.S.R.E.의 파이버 체적비에 따른 응력과 변형률과의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 V_f 가 증가함에 따라 응력의 증가에 대하여 변형이 적은 것을 알 수 있다. Fig. 10에서도 파이버 체적비에 대한 응력과 무늬차수의 관계를 나타낸 것으로 선형적인 변화를 보이면서 또한, 파이버 체적비가 증대됨에 따라 응력의 증가에 대한 무늬차수의 변화가 적게 나타남을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 개발한 G.S.R.E.의 응력과 변형률과의 관계는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 매우 선형적인 변화를 나타내었다. 그리고 응력(σ)과 무늬차수(N)와의 관계 그래프도 Fig. 10에서 보는 바와 같이 선형적으로 변화한다. 그러므로 G.S.R.E.는 선형성이 매우 우수하다는 것을 Fig. 9와 10을 통하여 알 수 있다.

4.1.4 균질성

광탄성실험용 모델재료로 사용될 시편은 시편 전체가 균질이어야 한다. 즉, 사용하는 시편의 어느 부위에서나 동질을 가져야 한다. 본 실험에서는 응

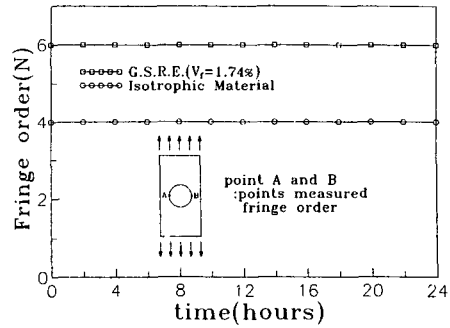


Fig. 11 Optical creep of G.S.R.E and isotropic material

력집중용 등색선 무늬와 파괴역학용 등색선 무늬로서 재료의 균질성을 확인하였다. 즉, 등색선무늬가 매끄럽게 연결되거나 연속적이면 그 재료는 균질의 성질을 가진 재료라고 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서 개발한 G.S.R.E.는 Fig. 7에서 보듯이 등색선무늬가 매끄럽고 연속적이라는 것을 알 수 있다.

4.1.5 크리프

일반적인 폴리머(polymer)계통의 재료들은 점탄성적인 성질을 지니고 있으므로 대부분이 크리프 현상을 나타낸다. 방정식(8)에서 알 수 있듯이 시간에 대한 응력의 변화인 크리프현상을 시간에 대한 무늬차수의 변화, 즉 광학의 크리프현상으로 나타낼 수 있다. 그래서 Fig. 11에서 보듯이 본 실험에서는 크리프현상을 확인하기 위하여, G.S.R.E와 등방성체의 구형판의 중앙에 원공을 가진 시편에 동일한 인장응력($\sigma=9.8$ MPa)을 가한 상태에서, 일정한 지점 즉, A지점에서의 $f\sigma(t)$ 가 관련되는 시간에 대한 광탄성 무늬차수의 변화를 관찰하였다. Fig. 11에서 보듯이 G.S.R.E와 순수 에폭시는 시간에 따라 무늬차수가 일정하므로 광학적 크리프 현상이 없다고 볼 수 있다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n}{h} f\sigma(t)$$

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{n}{h} f\epsilon(t) \tag{8}$$

4.1.6 종탄성계수 및 비례한도

광탄성재료는 어떠한 하중을 받더라도 기하학적인 형상의 변화가 없도록 좋다. 이것은 높은 종탄성계수를 가지는 것이 좋다는 의미이다. 등방성체나 횡등방성체에 있어서 푸아송의 비(ν)는 일정

하므로 $E/f_0(1+\nu)$ 은 단지 E/f_0 의 함수이다. $E/f_0=Q$ 로 놓으면, Q 가 클수록, 즉 E 가 클수록 혹은 f_0 가 작은 재료일수록 그 재료는 광탄성재료로서 유효하다. 그리고 광탄성실험 모델에서는 가능한 큰 하중에서도 파단되지 않고 견딜 수 있는 높은 비례한도(σ_{pl})를 가지는 것이 좋다. 그리고 높은 비례한도를 가질수록 더 선명한 등색선 무늬를 얻을 수 있고 응력해석이 용이하다. 광탄성 모델재료의 감도 S 는 각각 σ_{pl}/f_0 이다. 그리고 광탄성실험용 재료로서는 Q 와 S 가 클수록 좋다. 상온과 고온에서 파이버의 체적비율과 G.S.R.E.의 종탄성계수와의 관계를 Table 1과 Fig. 12의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 그리고 상온과 고온상태에서 파이버의 체적비율이 증대됨에 따라 재료의 종탄성계수 E 도 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. Fig 12에서 V_f 가 0인 것은 순수 에폭시수지를 의미하는 것이므로, 이때의 탄성계수는 순수 에폭시의 상온과 고온의 탄성계수이다. 특히 Fig 11의 (b)는 고온상태에서의 체적비율과 종탄성계수 E 와의 관계를 나타낸 것이며 여기에서도 상온처럼 파이버의 체적비율과 종탄성계수와의 관계는 선형적인 변화를 보였으며, 또한 고온의 탄성계수는 상온의 탄성계수의 약 1/10이다. 그러나 고온에서 순수 에폭시수지의 종탄성계수가 74.546~80.49 MPa이고, G.S.R.E.의

고온의 종탄성계수는 체적비율에 따라 Fig. 12과 같이 변화되고 $V_f=0.70(\%)$ 일 때 응력동결이 가능한 경우, 즉 고온의 종탄성계수는 310.14 MPa이다. 그리고 E_I (순수 에폭시의 종탄성계수)에 대한 E_T (황등방성체의 종탄성계수)의 비, 즉 E_T/E_I 는 약 4이므로 G.S.R.E.는 고온에서 황등방성체의 모델재료로서 특히 유효하게 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 실험결과에 의하면 파이버의 체적비율이 약 1% 이상이 되면 응력동결이 거의 불가능하여 고온용 광탄성모델 재료로서의 사용이 부적당하다. 그러므로 G.S.R.E.의 V_f 가 1% 이상인 경우의 G.S.R.E.의 응력해석법은 더 연구해야 한다. 그리고 파이버의 체적비인 V_f 가 1% 미만일 때는 G.S.R.E.는 황등방성체의 모델재료로서 충분하다는 것을 알 수 있다.

4.1.7

잔류응력과 시간연효과(time edge effect)는 시편의 제작방법에서 제시한 바와 같이 취급시 주의하면 극소화할 수 있다. 그러나 만약, 잔류응력이나 시간연효과가 발생되면, Fig. 5와 같은 소둔사이클(curing cycle)을 통하여 잔류응력이나 시간연효과에 의하여 발생하는 무늬차수를 제거시킬 수 있다.

4.1.8

G.S.R.E.는 재료비가 비교적 싸고 수축성이 적으며 기계 가공성도 좋은 편으로 광탄성실험용 모델 재료로서 우수한 조건을 갖추고 있는 것으로 확인되었다.

4.2 G.S.R.E.의 종탄성계수(E)와 응력프린지치(f) 등의 관계

황등방성체의 물성치인 E , G , ν 등은 Fig. 6과 같이 스트레인게이지(strain gauge)를 사용하여 상온과 고온에서 측정하였고, 상온의 물성치는 스트레인게이지(strain gauge)를 사용하여 일반적인 방법으로 측정하였고 고온의 물성치는 아래와 같은 과정을 통하여 측정하였다. 고온에서의 물성치 측정은 온도가 130°C인 노안에 시편을 장착하고, 온도를 일정하게 유지하면서 변형률의 지시값이 일정하게 유지될 때를 기다려서, 즉 하중을 가하고 2분 후에 스트레인값이 안정되었을 때의 하중과 변형률을 기록하였다. 또 상온과 고온에서 직접 측정된 황등방성체의 응력프린지치를 방정식(6)에 대입하

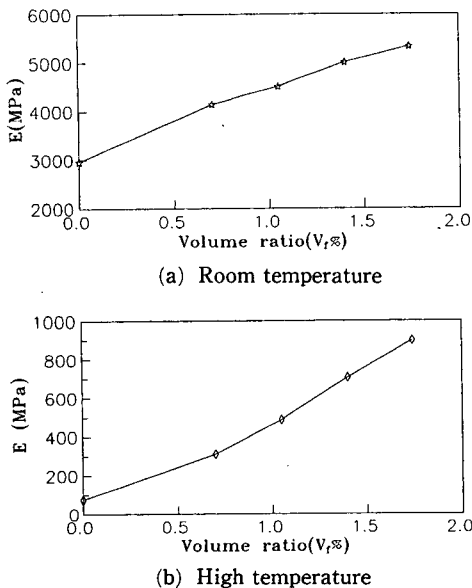


Fig. 12 Relationship between Young's modulus and volume ratio at high temperature

Table 2 Elastic moduli of transversely isotropic material obtained from strain gauge and stress fringe value

E(MPa)		V _t (%)	0.00	0.697	1.045	1.397	1.742
R _T	E _s [MPa]		2746.8~2961.1	4139.56	4514.24	5007.79	5330.77
	E _t [MPa]		2879.66	4134.09	4508.63	5010.01	5329.09
H _T	E _s [MPa]		74.5462~8049	310.143	487.547	706.448	898.733
	E _t [MPa]		77.66	313.09	488.63	710.01	889.09

E_s : Elastic modulus of transversely isotropic material obtained from strain gauge

E_t : Elastic modulus of transversely isotropic material obtained from stress fringe value

R_T : Room temperature(≈20°C)

H_T : High temperature(≈130°C)

여 얻은 종탄성계수와 스트레인게이지에 의하여 직접 측정된 횡등방성체의 등방성체의 종탄성계수 등을 Table 2에서 나타내고 있다. 그리고 Table 2에서 알 수 있듯이 스트레인게이지에서 직접 측정된 종탄성계수나 응력프린치치에 의해 계산된 종탄성계수가 고온과 상온에서 매우 유사함을 알 수 있다. 그러므로 횡등방성체의 등방성체의 경우에서도, 상온과 고온에서 방정식(6)이 유효함을 알 수 있다. 그리고 Table 1에서 알 수 있듯이 G.S.R.E.의 종탄성계수(E)는 순수 에폭시판보다 매우 크다. 그리고 G.S.R.E.의 평판은 방향에 관계없이 종탄성계수가 거의 동일하다는 것도 실험적으로 하였다. 그러므로 G.S.R.E.는 완전한 횡등방성체로 볼 수 있다.

그리고 Fig. 1과 같은 횡등방성체의 x-y평면은 횡등방성체의 등방성체 평면이고 x-z평면이나 y-z평면은 횡등방성체의 직교이방성 평면이다. 직교이방성 평면인 경우의 물성치와 응력프린치치의 관계식은 이미 본 연구자에 의하여 연구되었다.⁽³³⁾

5. 결 론

위와 같은 실험과 고찰을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 횡등방성체로 구성된 구조물의 응력분포를 광탄성실험으로 해석하고자 할 때, Fig 1의 x-y평면, 즉 횡등방성체의 등방성체의 경우는 본 연구에서 개발한 G. S. R. E를 광탄성실험 모델재료로 사용할 수 있고 Fig. 1의 x-z평면과 y-z평면, 즉 횡등방성체의 직교이방성체인 경우는 직교이방성 성

질을 가지는 광탄성재료가 광탄성실험의 모델재료로 사용될 수 있다.

(2) 횡등방성체용 광탄성 모델재료로 사용될 수 있는 G. S. R. E의 주형법이 개발되었고, G. S. R. E가 투과형 광탄성실험용 모델재료로 사용할 경우, 서페이스메트의 체적비율이 상온에서는 1.74%, 고온에서는 0.7% 미만이 좋다. 그리고 고온에서 파이버체적비율(=V_t)은 낮지만 보강효과는 매우 유효하다.

(3) 본 연구에서 유도된 횡등방성체의 등방성체의 종탄성계수와 응력프린치치와의 관계식인 방정식(6)은 고온과 상온에서도 성립하므로 횡등방성체의 등방성체의 종탄성계수만 구하면 혹은 응력프린치치만 구하면 횡등방성체의 등방성체의 응력프린치치와 물성치와의 관계식에서 고온과 상온의 응력프린치치 혹은 종탄성계수를 구할 수 있다.

후 기

본연구는 '91년도 한국과학재단 연구비지원으로 수행되었으며(연구기간: 1991.3~1993.2.28, 과제번호: 911-0910-029-2), 한국과학재단 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Müller, R. K. and Saackel, L. R., 1979, "Complete Automatic Analysis of Photoelastic Fringe," *Exp. Mech.*, pp. 245~251.
- (2) Berghaus, Donald, G., 1973, "Overdetermined

- Photoelastic Solutions Using Least Squares," *Exp. Mech.*, pp. 97~104.
- (3) Dally, J. W. and Sanford, R. J., 1979, "Classification of Stress-Intensity Factors from Isochromatic Fringe Patterns," *Exp. Mech.*, pp. 441~448.
- (4) Bradley, W. B. and Kobayashi, A. S., 1970, "An Investigation of Propagation Crack by Dynamic Photoelasticity," *Exp. Mech.*, pp. 10~17.
- (5) *Epon 828 in Casting Applications*, Shell Oil Co., Bul. Sc : 52-14.
- (6) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1975, *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill Book Comp., New York, N.Y., pp. 165~167.
- (7) Agarwal, R. B. and Teufel, L. W., 1983, "Epon 828 Epoxy: A New Photoelastic-Model Material," *Exp. Mech.*, pp. 30~35.
- (8) Lekhnitskii, S. G., 1963, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body*, Translated by D. Fern, Holden-Day, Inc.
- (9) 林毅, 1941, "直交異方性板の弾性係數と剛性に就て," 日本航空學會誌, 第8卷, 第79號, pp. 601~626.
- (10) Daniel, I. M., Rowlands, R. E. and Post, D., 1973, "Strain Analysis of Composite by Moire Methods," *Exp. Mech.*, pp. 246~252.
- (11) 林毅, 1963, "直交異方性板材料による光弾性實驗法," 應用物理, 第9卷, 第10號, pp. 808~819.
- (12) Bowie, O. L. and Freese, C. E., 1972, "Central Crack in Plane Orthotropic Rectangular Sheet," *Int. J. of Fract. Mech.*, Vol. 8, No. 1, pp. 49~58.
- (13) 中西 博, 中材 村, 赤崎智康, 鈴木惠, 1981, "異方性長方形板の應力擴大係數," 日本機械學會論文集(A編), 第47卷, 第420號, pp. 790~799.
- (14) Daniel, Issac, M., 1980, "Behavior of Graphite/Epoxy Plates with Holes Under Biaxial Loading," *Exp. Mech.*, pp. 1~8.
- (15) Daniel, Issac, M., 1982, "Biaxial Testing of $[O_2/\pm 45]_s$ Graphite/Epoxy Plates with Holes," *Exp. Mech.*, pp. 188~195.
- (16) Horridge, G. A., 1955, "A Polized Light Study of Glass Fibre Laminates," *British J. of Appl. Phys.*, 6, pp. 314.
- (17) Thomas, MacLaughlin, F., 1966, "Effect of Fiber Geometrey on Stress in Fiber-Reinforced Composite Materials," *Exp. Mech.*, pp. 481~492.
- (18) Thomas, F. MacLaughlin, 1968, "A Photoelastic Analsis of Fiber Discontinuities Materials," Vol. 2, No. 1, pp. 44~55.
- (19) Pih, H. and Knight, C. E., 1969, "Photoelastic Analsis of Anisotropic Fiber Reinforced Composite Materials," Vol. 3, pp. 94~107.
- (20) Marloff, R. H. and Daniel, I. M., 1909, "Three-Dimensional Photoelastic Analysis of a Fiber-Reinforced Composite Model," *Exp. Mech.*, pp. 156~162.
- (21) Sampson, Robert, C., 1970, "A Stress-Optic Law for Photoelastic Analysis of Orthotropic Composites," *Exp. Mech.*, pp. 210~215.
- (22) Grakh, I. I. and Mozhanskaya, A. F., 1971, "Type of Mechanically Anisotropic Optically Sensitive Material," *Makahika Polimerov*, 5, pp. 835.
- (23) Dally, J. W. and Prabhakaran, R., 1971, "Photo-Orthotropic-Elasticity," *Exp. Mech.*, pp. 346~356.
- (24) Pipes, R. B. and Rose, J. L., 1974, "Strain-Optic Law for a Certain Class of Birefringent Composite," *Exp. Mech.*, pp. 355~360.
- (25) Chandrashekhara, K., Jacob, Abraham, K. and Prabhakaran, R., 1977, "Towards Stress Freezing in Birefringent Orthotropic Composite Models," *Exp. Mech.*, pp. 317~320.
- (26) Craig, R. J., Gutzwiller, M. J., Lee, R. H. and Stitz, E. O., 1977, "A Composite Three-Dimensional Photoelastic Method," *Exp. Mech.*, pp. 433~438.
- (27) Daniel, I. M., Koller, G. H. and Niuro, T., 1984, "Development and Characterization of Orthotropic-Birefringent Materials," *Exp. Mech.*, pp. 135~143.
- (28) Agarwal, B. D. and Chaturvedi, S. K., 1978 "Improved Birefringent Composites and Assessment of Photoelastic Theories," *Fibre Sci, and Tech.*, 11(6) pp. 399~412.
- (29) Ramamurthy Prabhakaran, 1978, "Fabrication of Birefringent Anisotropic Model Mate-

- rials," *Exp. Mech.*, pp. 320~321.
- (30) Ashbee, K. H. G. and Ashbee, Elizabeth, 1988, "Photoelastic Study of Epoxy Resin/Graphite Fiber Load Transfer," *J. of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 602~615.
- (31) Freire, T. L. F., Antonell, R. A., Dror, Y. and Voloshin, A. S., 1989, "Application of Reflection Orthotropic Photoelasticity to Laminated Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 23, pp. 42~57.
- (32) 황재석, 崔善浩, 島本聰, 高橋賞, 1989, "光彈性實驗用 複合材料의 開發に 關すり研究(第一報 直交異方性 複合材料의 開發)," 日本機械學會論文集(A編), 第55券, 第509號, pp. 11~16.
- (33) 황재석, 島本聰, 高橋賞, 崔善浩, 1989, "光彈性實驗用 複合材料의 開發に 關する 研究(第二報 光彈性感度による物性値의 測定法)," 日本機械學會論文集(A編), 第55券, 第519號, pp. 2251~2258.
- (34) 황재석, 島本聰, 高橋賞, 崔善浩, 1990, "光彈性實驗用 複合材料의 開發に 關する 研究(第三報 光彈性法 直橋 二方性材料 破壞力學 適用)," 日本機械學會論文集(A編), 第56券, 第527號, pp. 1600~1680.
- (35) Arcan, M., Hashin, Z. and Voloshin, A., 1978, "A Method to Produce Uniform Plane Stress State with Applications to Fiber Reinforced Material," *Exp. Mech.*, pp. 141~146.
- (36) Jai-Sug Hawong, Kwang-Ho Lee, Akira Shimamoto, Sun-Ho Choi and Susumu Takahashi, 1990, "A Study on the Fracture Mechanics of Orthotropic Plate Under Pure Shear Force(A Study on the Development of the Pure Shear Force Device for Orthotropic Materials)," *Fracture, Strength '90*, Korea, pp. 200~205.
- (37) 황재석, 방창일, 1991, "순수비틀림모멘트를 받는 직교이방성체의 광탄성실험법 개발에 관한 연구(I)—3차원 광탄성실험법 모델의 절단법과 G_{ij} 와 f_{ij} 의 측정법—," 대한기계학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 424~435.