

<論 文>

직교 이방성의 광탄성 실험법 개발에 관한 연구(I)

최 선 호* · 황 재 석**

(1987년 6월 9일 접수)

Study on the Development of Photoelastic Experiment of Orthotropic Material(I)

Sun Ho Choi and Jai Sug Hawong

Key Words: Orthotropic Photoelastic Materials(직교 이방성 광탄성 재료), Stress fringe value(광탄성 감도), Composite(복합체), C.F.E.C.(구리섬유 에폭시 복합체), Volume Fraction of Fiber(섬유의 체적비)

Abstract

In the composite structures or the concrete structures, to analyze stress concentration factor, stress distributions and fracture mechanics of them under forces by photoelastic experiment, it is natural that to develop photoelastic model material for them is surely necessary. Thus, the orthotropic photoelastic material for the transparent type photoelastic device was developed in this paper, it is called Copper Fiber Epoxy Composite and abbreviated as C.F.E.C. It was found that C.F.E.C. developed in this paper was satisfied with the properties of photoelastic model material that the photoelastic model material should have and that C.F.E.C. had completely properties of composite material. It is thought that C.F.E.C. can be applied to both medical engineering for modeling biological tissue and to the aerospace industry as orthotropic photoelastic material.

1. 서 론

지금까지는 동방성 재료의 구조물의 응력분포, 응력 집중, 파괴역학 등을 연구하는데 광탄성 실험을 통하여 많이 연구되었다⁽¹⁻⁵⁾. 특히 이 경우에 주로 사용한

투과용 광탄성 실험의 광탄성 재료는 1950 년대에 소개된 에폭시 수지계이며 주로 사용되어 왔던 재료는 Epon 828⁽⁶⁾, Epoxy-1⁽⁷⁾, Epoxy-2⁽⁷⁾, CR-39⁽⁷⁾, Homalite-100⁽⁷⁾, Polycarbonate⁽⁷⁾ 등이 있다. 이러한 재료들은 동방성 재료의 구조물을 광탄성 실험을 통하여 모델 해석을 할 때 사용하는 재료들이다.

최근에는 높은 강도의 재료 개발과 항공기 선박 각종 구조물 등의 여러 분야에서 복합재료의 사용이 증가함에 따라 복합재료 구조물의 응력분포나 응력집중,

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계설계학과

** 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

파괴역학 등에 대한 연구가 수행되었다^(8~14). 이러한 복합체 구조물을 투과용 광탄성 실험을 통하여 해석하고자 할 때는 광탄성 모델 재료(photoelastic model material)가 절대적으로 필요하므로 본 논문에서는 이 재료를 개발하는데 목적을 둔다.

2. 광탄성 실험용 복합체 개발

2.1 투과용 광탄성 실험용 복합체 개발

본 논문에서는 투과용 광탄성 실험의 소재를 개발하기 위하여 광탄성 재료로 가장 많이 사용되고 또 테프론(teflon) 이외 어떠한 재료와도 접촉할 수 있는^(15,16) 아랄다이트(araldite)와 경화제의 혼합액을 기저재료의 원료로 사용하였다. 섬유(fiber)로서는 스테인리스선과 구리선 등이 직경이 0.1, 0.18, 0.25, 0.3, 0.45, 0.6, 0.7, 0.9 mm 등을 사용하고 섬유의 피치(pitch)를 1.41, 2.44, 4.45 mm로 변화시키면서 직교 이방성 재료를 만들었다. 이 중에서도 Fig. 1에서 보듯이 광탄성 무늬의 연속성을 기준으로 하여 판단하건대 섬유의 직경이 0.25 mm 이하인 경우가 적합하고 스테인리스보다도 열전도율이 좋은 구리가 더욱 좋다는 것이 발견되었다. 그리고 피치는 적으면 적을수록 좋지만 빛의 투과성이나 재료 제작상 난점 때문에 약 2.5 mm가 가장 적당한 것이 발견되었다. 이러한 예비 실험을 통하여 본 실험에서는 섬유로서는 동선을 사용하고 섬유의 피치는 2.44 mm로 하였다. 또 동선의 직경은 0.25 mm인 직기 리드(reed)를 안내판으로 사용하여 다음과 같은 과정에서 투과용 광탄성 실험의 복합체를 개발하였다.

(1) 셀로판지를 입힌 유리판을 사용하여 모울딩 상자(molding box)의 밑받침을 만들고 일정한 폭과 두께를 가진 유리판을 사용하여 모울딩 상자의 테두리를 만든다.

(2) 리이드를 안내판(guide)으로 사용하여 구리섬유를 필요로 하는 피치로 평행하게 (1)항에서 만든 모울딩 상자에 나열하고 그리고 각 섬유가 열을 받더라도 일정한 인장이 가해지도록 섬유의 양쪽에 추를 단다.

(3) 필요한 플라이수와 방향수 만큼 (1)과 (2)의 과정을 반복한 후에 모울딩 상자가 연어진 모울딩 장치(molding apparatus)를 응력동결노에 넣는다.

(4) 미리 노속에서 용해된 아랄다이트에 경화제를 중량비 10 : 3으로 넣고 경화제가 완전히 녹을 때까지 가열함과 동시에 짓는다.

(5) 경화제가 완전히 용해된 혼합액을 기포가 생기

지 않도록 모울딩 상자에 천천히 주입한다.

(6) 이러한 과정을 거친 후 모울딩상자를 쿠어링 사이클에 따라 열처리한다.

위의 과정을 거친 후 만들어진 판을 C.F.E.C. (copper fiber epoxy composite)로 칭한다. 이렇게 만들어진 C.F.E.C.를 판의 단면 방향으로 절단하여 이것을 편평기를 통하여 선팅창 계수의 차이 때문에 발생하는 잔류 응력이 존재하는가를 조사한다. 잔류응력이 거의 존재하지 않는 즉 잔류무늬수가 없는 것은 시편으로 사용한다. 적당한 예열과 실험을 통하여 잔류응력이 발생하지 않는 C.F.E.C.판을 만들 수 있다. 그리고 본 논문에서는 빛의 투과성을 좋게 하기 위하여 복합체 전체 체적에 대한 섬유의 체적비 V_f 를 0.34%, 0.68%, 1.0%, 1.35%로 하여 시편을 제작하였다.

2.2 C.F.E.C.의 광탄성 재료에 대한 고찰

광탄성 실험에서 가장 중요한 것 중 하나는 광탄성 모델 재료를 선정하는 것이다. 아주 완전한 광탄성 모델 재료는 이 세상에는 존재하지 않는다. 그러므로 이상적인 광탄성 재료에 나타나는 중요한 성질은 아래와 같이 들 수 있다⁽⁷⁾.

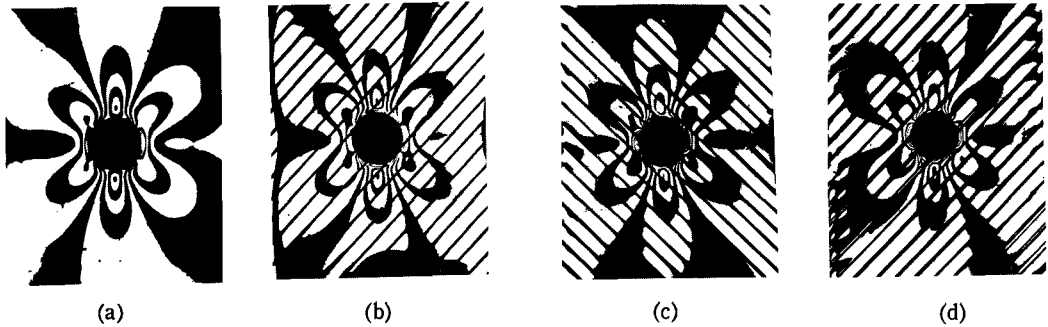
(1) 투과성(transparency), (2) 광탄성감도(sensitivity), (3) 선형성(linearity), (4) 등방성(isotropy and homogeneity), (5) 크리이프(creep), (6) 탄성계수 및 비례한도(Modulus of elasticity and proportional limit), (7) 온도감도(temperature sensitivity), (8) 시간영향(time edge effect), (9) 기계가공성(machinability), (10) 잔류응력(residual stress), (11) 재료비(cost of material)

(1) 투과성

Fig. 1의 광탄성 무늬는 본 실험에서 개발된 C.F.E.C.를 광탄성 모델 재료로 사용하여 투과용 광탄성 실험장치에서 찍은 사진이다. 이때 하중조건은 원공을 가진 유한 판이 단순 인장을 받을 경우이다. 섬유의 체적비를 V_f 에 따라 투과성은 다르지만 본 실험에서 개발된 C.F.E.C. 광탄성 무늬는 Fig. 1에서 보듯이 순수 에폭시판에서 얻은 무늬처럼 완전히 연속적이고 투과성이 좋으므로 C.F.E.C.의 투과성은 매우 좋다고 할 수 있다.

(2) 광탄성 감도

광탄성 감도($= \frac{1}{f_c}$)가 높을수록 같은 하중조건하에서는 무늬수가 많이 발생하므로 광탄성 모델재료는 광탄성 감도가 높을수록 좋다. 광탄성 모델재료로서 사용될 수 있는 재료의 광탄성 감도는 3.567 kg/mm×



	(a)	(b)	(c)	(d)
	$V_f=0.34\%$	$V_f=0.68\%$	$V_f=0.68\%$	$V_f=1\%$
Isotropic plate ($V_f=0$)	$t=6.2$ mm $W=39.5$ mm	$t=6.2$ mm $W=41.2$ mm	$t=6.2$ mm $W=41.2$ mm	$t=7$ mm $W=42.4$ mm
	$W=41$ mm $t=6$ mm	$P=152$ kg Pitch=2.44 mm	$P=176$ kg Pitch=2.44 mm	$P=168$ kg Pitch=2.44 mm
	$D=8$ mm $P=96$ kg	$\theta=45^\circ$ $D=8$ mm	$\theta=45^\circ$ $D=8$ mm	$\theta=45^\circ$ $D=8$ mm

Fig. 1 Fringe pattern

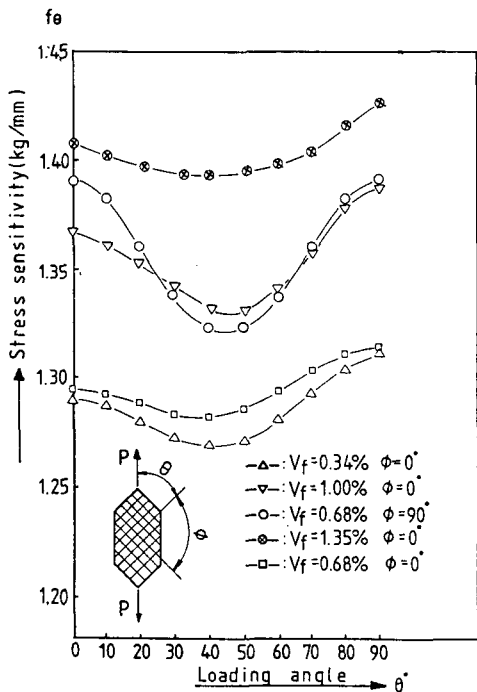


Fig. 2 Stress sensitivity of copper fiber epoxy composite with loading angle

$10^{-3} \leq f_s \leq 35.67$ kg/mm ($0.0005 \leq f_c \leq 0.50$) 내에 존재하여야 한다⁽⁷⁾. 본 논문에서 개발된 C.F.E.C.의 감도는 Fig. 2에서 보듯이 V_f 의 증가에 따라 f_s 를 증가하지만 이 조건을 충분히 만족하므로 매우 훌륭한 f_s 를 지니고 있다고 할 수 있다.

(3) 선형성

어떤 구조물을 응력해석 하기 위하여 그 구조물의 하중조건, 경계조건, 기하학적 조건 등을 상사시켜서

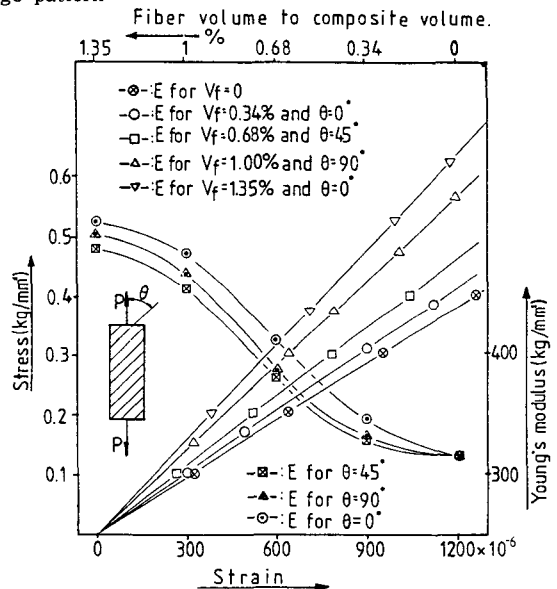


Fig. 3 Young's modulus of C.F.E.C.

모델해석을 하는 데 광탄성 실험이 주로 사용된다. 그러므로 광탄성 모델재료로 사용되는 재료는 탄성 한도 내에서 선형적인 응력과 광학적 변형을 성질을 가져야 한다. 즉 응력과 변형을 및 응력과 무늬차수 사이에서는 직선적인 관계를 가져야 한다.

본 논문에서 개발한 C.F.E.C.의 변형율과 응력 사이의 관계는 Fig. 3에서 보듯이 완전히 직선적인 관계를 가지고 있으므로 선형성 문제에서는 C.F.E.C.가 매우 우수함을 나타내고 있다. 또 체적비가 증가함에 따라 세로 탄성계수는 크게 증가함을 나타내고 있다. 이것은 구리선이 섬유로서 훌륭한 기능을 나타내고 있음을 나타낸다.

광탄성 모델재료가 가져야 할 중요한 성질 가운데

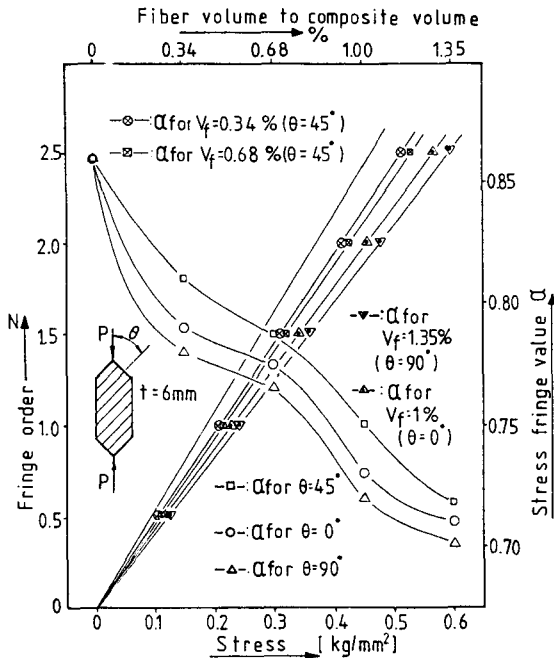


Fig. 4 Stress fringe value of C.F.E.C.

하나인 응력과 모니차수 사이의 관계도 직선적인 관계가 되어야 한다. 본 실험에서 개발된 C.F.E.C.는 Fig. 4에서 보듯이 거의 직선을 나타내며 또 V_f가 증가함에 따라 감도는 감소함을 나타낸다. 그러나 이렇게 감소하더라도 V_f가 1.35%까지는 광탄성 재료가 가져야 할 범위를 만족할 뿐만 아니라 어느 정도 증가까지도 본 실험에서 개발된 C.F.E.C.는 광탄성 모델재료로 사용될 수 있다는 것을 Fig. 3과 Fig. 4를 통하여 알 수 있다.

(4) 등방성

일반적으로 등방성재료를 모델해석하고자 할 때는 투과용 광탄성 실험장치에 등방성재료인 광탄성 재료를 사용하여야 한다. 그리고 이방성재료를 광탄성 실험으로 모델해석을 하고자 할 때는 이방성 재료의 성질을 균일하게 갖는 광탄성 모델재료를 사용하여야 한다. 그래서 본 논문에서 개발한 C.F.E.C.가 직교이방성 재료의 성질을 균일하게 가진 것인가를 확인하기 위하여 이론식이 있는 경우의 무한판의 이론값과 광탄성 모델 해석을 하여 얻은 유한판의 실험치를 Fig. 5에서 나타난 것처럼 비교하였다. 이 경우 이론값은 원공을 가진 무한판이 단순인장을 받을 경우에 원공주위의 응력 분포⁽¹⁷⁾를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보듯이 유한판의 실험치와 무한판의 이론치는 거의 일치하고 같은 경향을 나타내므로 본 실험에서 개발한 C.F.E.C.는 직교이

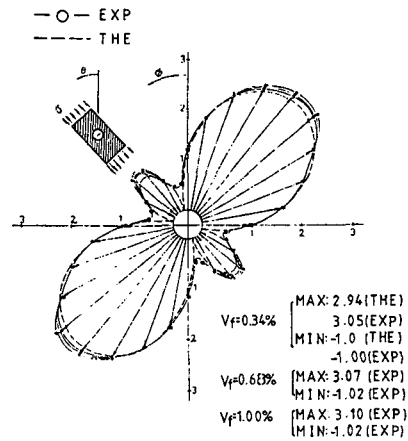


Fig. 5 Stress distributions of around a hole in orthotropic material

방성 재료로서 충분한 기능을 나타내고 또 직교 이방성재료의 성질을 균일하게 내포하고 있음을 알 수 있다.

(5) 크리이프

대부분 광탄성재료의 기저(base)는 고분자재료이기 때문에 광탄성재료는 기계적 및 광학적 성질에서 크리이프 현상을 갖고 있다. 광탄성 실험에 사용되어 온 폴리머(polymers)의 대부분은 점탄성이다. 점탄성재료에서 응력과 변형율은 방정식 (1)처럼 위치와 시간의 함수 곱으로 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$\begin{aligned} \sigma^*(x \cdot y \cdot t) &= \sigma(x \cdot y) f(t) \\ \epsilon^*(x \cdot y \cdot t) &= \epsilon(x \cdot y) g(t) \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 주응력차와 주변응력차는 방정식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{h} f_\sigma(t) \quad \epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{N}{h} f_\epsilon(t) \quad (2)$$

여기서 f_σ(t)와 f_ε(t)은 시간의 함수이고 h는 시편의 두께이다. 그러나 사진을 찍는 시간은 매우 짧으므로 f_σ(t)와 f_ε(t)은 일정하다고 간주할 수 있다. 그리고 대부분 모델재료에서 응력광탄성 감도는 하중을 가한 바로 후에 급하게 감소한다. 그리고 한시간후에는 거의 완전한 위치에 도달하게 된다. 그래서 본 논문에서는 C.F.E.C.의 크리이프 현상을 조사하기 위하여 f_σ(t)를 시간에 따라 측정하기가 매우 번거로우므로 f_σ(t)가 관계있는 시간과 무늬수 관계를 구하였다. 그래서 얻어진 결과는 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 모델의 무늬차수는 일정한 하중하에서 변화한다. 이 변화는 광학적 크리이프이다. Fig. 6에 나타난 것처럼 광학적 크리이프는 시간에 관계없이 거의 일정한 값을 나타낸다. 이것은 광탄성 모델재료로서 아주 좋은 결과를 나타내

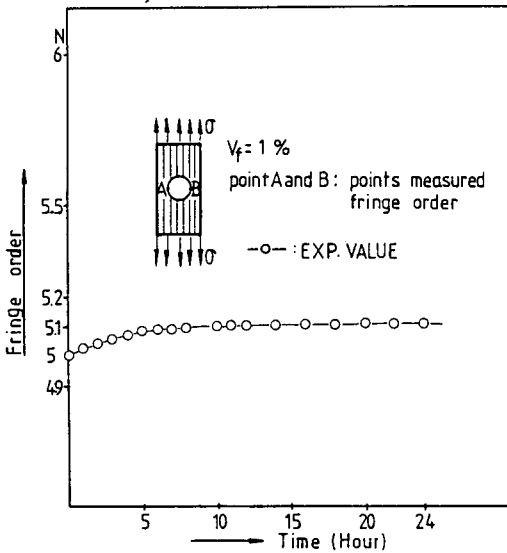


Fig. 6 The time after loading dependence of fringe order in copper fiber epoxy composite

고 있다. 그리고 이러한 데이터는 수은등(파장=5468 Å)을 사용하여 얻었다.

(6) 탄성계수와 비례한도

광탄성 실험은 모델해석이므로 광탄성재료가 하중을 받더라도 기하학적 형상이 변하지 않기 위하여는 높은 세로 탄성계수를 가져야 한다. 등방성 광탄성재료에 있어서 비틀에 견디는 저항 능력을 판단하는데 사용될 수 있는 계수는 $\frac{1}{f_e}$ 혹은 $\frac{1}{f_o(1+\nu)}$ 이다. 그리고 등방성 재료에서는 프와송의 비는 일정하기 때문에 $\frac{E}{f_o(1+\nu)}$ 은 $Q = \frac{E}{f_o}$ 로 변화된다. 그러나 복합체 평면 문제에서 단축인장을 받은 경우는 $\frac{1}{f_e} = \frac{E_{11}}{f_x(1+\nu_{12})}$ 로 표시될 수 있다. 여기서 f_x 은 이방성재료에서 Fig. 11(a)와 같은 상태에서 측정된 응력광탄성 감도이다. 이방성 재료에서도 $Q = \frac{E_{11}}{f_x}$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 모델실험을 할 때 그 모델은 높은 하중을 받더라도 파단되지 않도록 높은 비례한도 σ_{pl} 를 가져야 한다. 그러므로 높은 하중까지 힘을 가할 수 있으므로 광탄성 무늬를 많이 얻을 수 있다. 그러면 실험의 정도를 높일 수 있다. 모델재료의 감도계는 $s = \frac{\sigma_{pl}}{f_x}$ 로 정의될 수 있다. 그러므로 Q와 S가 클수록 광탄성 모델재료로서는 좋다. Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 C.F.E.C.의 세로 탄성계수가 순수 에폭시보다도 크기 때문에 S나 Q는 순수 에폭시보다 더 큰 값을 가진다. 즉 본 논문에서 개발된 C.F.E.C.는 광탄성 재료로서 기능을 잘 발휘한다는 것을 알 수 있다.

(7) 온도 감도

대부분 폴리메릭 플라스틱의 f_o 은 온도에 따라 미소하게 변화한다. 일반적으로 사용되는 에폭시의 f_o 은 0.071/in °F(0.022 KN/m°C)이다. 그러나 150°F(65°C)보다 높은 온도에서는 f_o 가 매우 예리하게 떨어지기 시작한다. 보통 실내온도(24°C, 75°F)에서는 온도에 대한 f_o 의 곡선은 수평선이다. 그러므로 상온 실험에서는 별로 문제가 되지 않는다. 그리고 온도 변화가 ±5°F(±3°C)이면 f_o 의 변환은 무시될 수 있다. 본 논문에서 개발된 C.F.E.C.의 기저는 에폭시이기 때문에 온도에 대한 f_o 은 거의 순수 에폭시와 같은 성질을 나타내고 있다.

(8) 시간영향

관찰되는 무늬는 하중에 의하여 생기는 무늬와 시간응력결과로 생기는 무늬들의 중첩이 의하여 나타나게 된다. 시간응력은 경계상에서 매우 뚜렷하게 나타나므로 태두리 응력에 의하여 발생하는 오차는 경계선상의 응력을 결정하는데 아주 중요한 영향을 미친다. 그리고 시간영향은 공기속에 있는 수증기가 플라스틱 속으로 확산 혹은 플라스틱이 공기 속으로 확산하므로 발생한다. 시간영향이 발생하는 비율은 공기속의 상대습도와 온도에 의하여 지배되고 상대습도가 80% 이상이면 광탄성 실험은 매우 어렵다. 왜냐하면 시간응력은 2~3 시간내에서 크게 발생하기 때문이다. 본 논문에서는 상대습도가 50% 미만에서 행하였고 그리고 시편을 가공하는 즉시하였으므로 시간 영향은 무시하여도 좋다고 생각한다. 그러나 특별한 경우에는 시편을 가공한 즉시 시편을 기름 속에서 보관하였으므로 시간영향은 별로 문제가 되지 않는다.

(9) 기계가공성

플라스틱을 자를 때 상당한 절단력에 의하여 플라스틱에 열이 발생한다. 따라서 기계가공할 때 발생하는 경계응력은 영원히 모델에 생기게 되고 이것은 상당히 광탄성 실험해석을 부적당하게 만든다. 그러므로 광탄성 모델을 기계가공할 때는 높은 절단힘과 열이 발생하지 않도록 주의를 하여야 한다. 그리고 본 논문에서 개발된 C.F.E.C.의 섬유로 사용된 구리선은 매우 연하므로 가공할 때 일반적인 에폭시와 같은 정도의 절단 공구힘이 필요하다. 그리고 열도 에폭시와 같은 정도로 발생한다. 그러므로 본 논문에서 개발된 C.F.E.C.은 가공면에서도 일반적인 에폭시와 같은 성질을 갖고 있음을 알 수 있다.

(10) 잔류 응력

잔류 응력이 광탄성 모델에 생기면 모델에 가해지는

하중에 의하여 생기는 응력분포의 무늬에 중첩되므로 매우 큰 오차가 발생한다. 그리고 이것을 제거시키는 것은 매우 어렵다. 이러한 것은 쿠어링 사이클(curing cycle)을 통하여 수평이 되는 평판이나 기름이 담겨진 용기에서 소문점 이상으로 조절하여 잔류응력을 감소시킬 수 있다. 그러나 광탄성 모델재료의 생산 과정에서 생긴 잔류응력을 완전히 제거하기는 거의 불가능하다. 그러므로 될 수 있는 한 생산과정에서 잔류응력이 생기지 않도록 최선을 다하여야 한다. 그리고 본 논문에서 개발된 C.F.E.C의 잔류응력은 섬유와 기저의 선팽창 계수의 차이 때문에 발생하는 수축량의 차이로 주로 발생한다. 이것을 방지하기 위하여 구리를 섬유로 사용하고 될 수 있는 한 주의하여 주조하고 그리고 등방성 광탄성 모델재료를 쿠어링할 때 사용한 쿠어링 사이클을 사용하면 제조된 C.F.E.C에는 잔류응력이 거의 발생하지 않는다. 본 논문에는 편광기를 사용하여 잔류응력이 생기지 않는 C.F.E.C만 시편으로 사용하였다.

(11) 재료비

일반적으로 광탄성 해석에서 모델재료의 가격은 전체 경비에 비하여 매우 적은 부분에 속한다. 그러므로 재료 경비는 별로 문제가 되지 않는다고 생각한다. 그리고 본 논문에서 개발된 C.F.E.C는 순수 광탄성 모델재료보다는 순수 에폭시량이 적게 소비되므로 별로 문제가 되지 않는다고 생각한다.

2.3 C.F.E.C의 물성치

이방성 재료에서는 임의의 방향에서의 물성치가 각각 틀리지만 직교 이방성 재료의 평면문제에서 임의의 방향의 물성치를 구하는데 있어서는 E_{11} , E_{22} , G_{12} , $\nu_{12}(\nu_{21})$ 등의 물성치만 필요하다. 이 중에서 E_{11} , E_{22}

와 ν_{12} 는 인장시험과 스트레인 게이지를 Fig. 7처럼 사용하여 쉽게 구할 수 있다.

여기서 E_{11} 은 하중 방향과 어떤 섬유 방향이 일치하는 경우에서 얻어진 세로 탄성계수이고 E_{22} 는 하중과 어떤 섬유 방향이 수직인 경우의 세로 탄성계수이다. ν_{12} 은 섬유의 방향 변형율에 의하여 섬유의 수직 방향으로 줄어든량을 섬유방향의 변형율로 나눈 것의 의미한다. $(-\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \nu_{12})$ 그리고 G_{12} 은 섬유 방향과 섬유의 수직 방향에 평행한 구형판의 4 변에 전단응력이 작용하는 경우의 전단탄성계수이다. 그리고 G_{12} 도 실험적으로 직접구할 수 있으나 정확한 전단하중을 주기가 어려우므로 보통 섬유의 경사각도가 45°인 시험편에 단순인장을 가하여 식(3)처럼 산술적으로 구할 수 있다⁽¹⁴⁾.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{4}{E_{45}} - \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{\nu_{12}}{E_{11}} \right) \quad (3 \cdot a)$$

$$\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}} \quad (3 \cdot b)$$

이렇게 하여 측정된 C.F.E.C의 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 직교 이방성의 물성치는 섬유에 대한 하중방향에 따라 다르다. 그러므로 물성치는 식(4)로써 계산할 수 있다^(17,14).

$$\frac{1}{E_{\theta}} = \frac{\cos^4\theta}{E_{11}} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \times \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{E_{22}} \quad (4 \cdot a)$$

$$\frac{1}{G_{\theta}} = 4 \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{2\nu_{21}}{E_{22}} \right) \times \cos^2\theta \sin^2\theta + \frac{1}{G_{12}} (\sin^2\theta - \cos^2\theta) \quad (4 \cdot b)$$

$$\nu_{\theta} = \frac{\frac{\nu_{12}}{E_{11}} (1 + \tan^4\theta) + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{1}{E_{11}} - \frac{1}{E_{22}} \right) \tan^2\theta}{\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} \tan^4\theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \tan^2\theta}$$

각 방향의 물성치 E_{θ} , G_{θ} , ν_{θ} 및 G_{12} 를 측정하는데는 E_{11} , E_{22} , E_{45} 만 필요하다. 그래서 E_{11} , E_{45} , E_{22} , ν_{12} 과 Fig. 7과 같은 하중장치에서 측정되었다. 그리고 광탄성 감도는 Fig. 11과 같은 하중상태에서 감도를 측정하였다. 이렇게 하여 본 연구에서 개발된 C.F.E.C의 물성치와 광학적 성질은 Table 1에 기록되었다.

그리고 지금까지 주로 사용되어 온 등방성 재료의 광탄성 재료와 본 실험에서 개발된 복합체 C.F.E.C의 기계적 성질 및 광학적 성질은 Table 2에 기록되었다. Table 2에서 보듯이 본 연구에서 개발된 C.F.E.C는 다른 광탄성 재료(등방성)보다도 보편적으로 광탄성 재료를 갖추어야 할 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 섬유의 플라이(ply)와 플라이가 이루는 각도를 ϕ

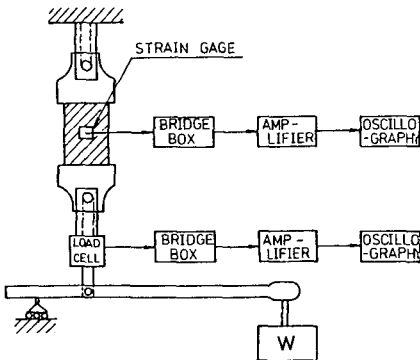


Fig. 7 Experimental device for the measurement of composite material properties

Table 1 The evaluation of optical and mechanical properties

Specimen	Pitch(mm)	Fiber ply(num.)	θ	ϕ	$E(\text{kg/mm}^2)$	ν	$G(\text{kg/mm}^2)$	$\alpha(\lambda=5468\text{\AA})\text{mm/kg}$
A	no-Fiber				315	0.396	112	0.93
B	2.44	1	0°		345	0.411	131	0.79
C	$V_f=0.34\%$		45°		324	0.427	120	0.81
D			90°		331	0.395	131	0.78
E	2.44	2	0°		413	0.418	154	0.78
F	$V_f=0.68\%$		45°		381	0.432	142	0.79
G			90°		387	0.412	154	0.77
H	2.44	2		45°	385	0.428	156	0.76
I	$V_f=0.68\%$			90°	398	0.417	140	0.72
J	2.44	3	0°		487	0.432	184	0.73
K	$V_f=1.0\%$		45°		457	0.440	169	0.75
L			90°		470	0.423	184	0.72
M	1.62	2	0°		524	0.443	176	0.71
N	$V_f=1.35\%$		45°		491	0.448	181	0.72
O			90°		502	0.429	176	0.70

Table 2 Comparison of the optical and mechanical properties of Epon 828 with severa photoelastic materials

Material	Young's Modulus (Mpa)	Stress-fringe Value (kN/m)	Figure of Merit $Q(1/\text{mm})$	Time-edge Effect	Creep	Machinability
Epon 828	4540	11.4	399	Excellent	Excellent	Excellent
Epoxy ¹⁾	3273	10.2	323	Good	Good	Poor
Epoxy ²⁾	3273	11.2	292	Good	Good	Poor
Epoxy ³⁾	3087	10.8	285	Good	Excellent	Good
CR-39 ⁴⁾	1725	15.4	112	Poor	Poor	Poor
Homalite 100 ⁴⁾	3860	23.6	163	Excellent	Excellent	Good
Polycarbonate ⁴⁾	2480	7.0	354	Excellent	Excellent	poor
Urethane rubber ⁴⁾	3	0.18	17	Excellent	Excellent	Poor
Bakelite Bt-61-893 ⁵⁾	4240	15.1	280	Poor	Excellent	Good
C.F.E.C ⁶⁾	3381	12.4	273	Good	Excellent	Good
C.F.E.C ⁷⁾	4047	12.6	321	Good	Excellent	Good
C.F.E.C ⁸⁾	4773	13.4	357	Good	Excellent	Good
C.F.E.C ⁹⁾	5135	13.8	372	Good	Excellent	Good

1) ERL-2774 with 50 parts per hundred phthalic anhydride, from ref. 7

2) ERL-2774 with 42 parts per hundred phthalic anhydride and 20 parts per hundred hexahydrophthalic anhydride

3) Epoxy manufactured in this research

4) From Ref. 7

5) From Ref. 22

6) Copper Fiber epoxy composite manufactured in this paper ($V_f=0.34\%$, $\theta=0$)

7) C.F.E.C for $V_f=0.68\%$ and $\theta=0$

8) C.F.E.C for $V_f=1.0\%$ and $\theta=0$

9) C.F.E.C. for $V_f=1.35\%$ and $\theta=0$

이라고 하면 본 실험에서는 ϕ 가 0° 와 90° 인 경우에만 한하였다. 피치가 2.44 mm, $V_f=0.34\%$ 이고 $\phi=0^\circ$ 일 때 섬유 방향에 대해 하중각도 θ 가 0° 일 때 E_{11} , ν_{12} , 또 $\theta=90^\circ$ 일 때 E_{22} , ν_{21} , $\theta=45^\circ$ 일 때 E_{45} 등을 구하여 식(3.a)에서 G_{12} 를 구하여 이러한 것들을 식(4)에 대입하여 섬유 방향에 대한 하중의 각도 변화에 따른 E_θ , ν_θ , G_θ 를 구하여 이것들을 E_{11} , ν_{12} , G_{12} 로 각각 나눈 값을 이런 부호로(—○—) 나타내었다. 같은 방법으로 피치가 2.44 mm 이고 V_f 가 0.68%일 때 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 일 때 섬유 방향에 대한 하중각도 $\theta=0^\circ$ 일 때 E_{11} , ν_{12} $\theta=90^\circ$ 일 때 E_{22} , ν_{21} , $\theta=45^\circ$ 일 때 E_{45} 등을 각각 구하여 식(3.a)에서 G_{12} 를 구한다. 이것을 식(4)에 각각 대입하여 파이퍼 방향에 대한 하중각도 변화에 따른 E_θ , ν_θ , G_θ 를 각각 구하여 이것을 E_{11} , ν_{12} , G_{12} 로 각각 나눈비를 이러한 부호로(—⊗— : $\phi=90^\circ$, —▽— : $\phi=0^\circ$)로 나타낸 것이다. 같은 방법으로 피치가 2.44 mm 이고 V_f 가 1%일 때 섬유 방향에 대해 하중 각도가 0° 일 때 E_{11} , ν_{12} 를 구하고 $\theta=90^\circ$ 일 때 E_{22} , ν_{21} 를 구하고 $\theta=45^\circ$ 일 때 E_{45} 를 구하여 이들을 식(3.a)에서 G_{12} 를 구하여 식(4)에 대입하여 섬유 방향에 대한 하중의 각도 변화에 따른 E_θ , ν_θ , G_θ 를 구하여 이것을 E_{11} , ν_{12} , G_{12} 으로 나눈비를 이러한 부호로(—△—) 나타낸 것이다.

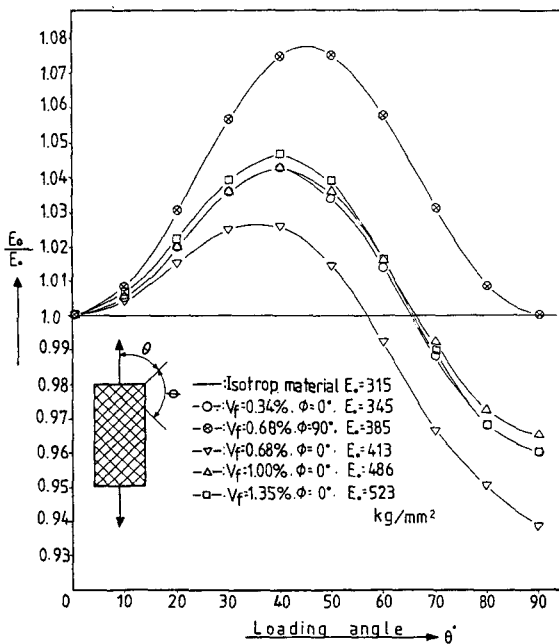


Fig. 8 Mechanical properties versus the angle between loading direction and fiber angle

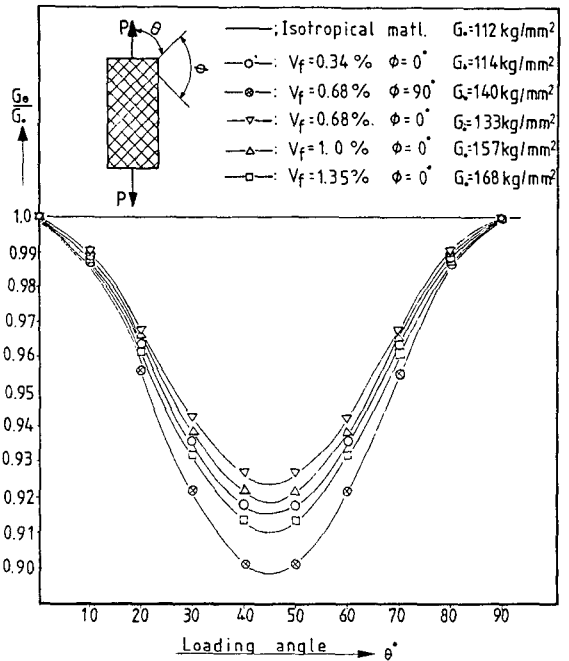


Fig. 9 Mechanical properties versus the angle between loading direction and fiber angle

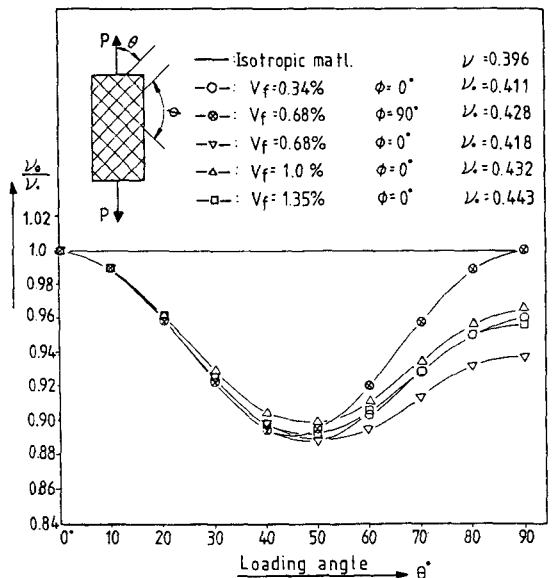


Fig. 10 Mechanical properties versus the angle between loading direction and fiber direction

같은 방법으로 피치가 1.62 mm 이고 V_f 가 1.35%일 때 섬유 방향에 대한 하중의 각도가 $\theta=0^\circ$ 일 때 E_{11} , $\theta=90^\circ$ 일 때 E_{22} , ν_{21} , $\theta=45^\circ$ 일 때 E_{45} 등을 구하여

이것들을 식(3a)에 대입하여 G_{12} 를 구하고 또 식(4)에 대입하여 섬유 방향에 대한 하중의 각도 변화에 따른 E_0 , G_0 , ν_0 를 구하여 이것을 E_{11} , ν_{12} , G_{12} 으로 나눈비를 이러한 부호로(—□—) 나타낸 것이다. 이러한 값들을 Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10에 각각 나타내었다. G_0 은 V_f 에 관계없이 45° 를 기준으로 대칭성을 나타낸다. 그러나 E_0 와 ν_0 는 대칭적인 관계는 않된다. 그러나 식(4)에서의 임의의 방향의 물성치를 구할 수 있다. 그리고 섬유의 플라이와 플라이가 90° 이루는 경우의 E_0 , ν_0 , G_0 는 그래프가 45° 를 기준으로 완전한 대칭을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10을 통하여 알 수 있듯이 본 논문에서 개발된 C.F.E.C의 E_0 , ν_0 , G_0 등의 최대값과 최소값의 차이는 별로 크지 않은 것은 섬유의 체적 비율이 적기 때문이다. 그러나 각 방향에 따라 서로 다른 값을 나타내고 있는 것은 모든 방향에서 일정한 값을 갖는 즉 각 그림에서 수평선을 나타내는 등방성 재료와 다른 점이다. 이것은 C.F.E.C가 복합체로서 충분한 역할을 한다는 것을 의미한다. E_0 , ν_0 , G_0 등의 최대값과 최소값은 90° 의 간격으로 발생하므로 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10을 통하여 임의의 방향에 대하여 E_0 , ν_0 , G_0 등을 구할 수 있고 또 식(4)에서도 구할 수 있다.

2.4 C.F.E.C.의 광탄성 감도

직교 이방성 재료의 광탄성 감도를 구하는 방법은 Sampson의 응력광학법칙⁽¹⁸⁾, 변형을 광학법칙⁽¹⁹⁾, Dally의 방법⁽²⁰⁾, Pih and Knight의 방법⁽²¹⁾ 등이 있지만 본 논문에서는 Sampson의 응력 광학법칙으로서 Fig. 11처럼 f_x , f_y 를 구하고 그리고 f_{xy} 도 Fig. 11(c)처럼 하여 구할 수 있으나 하중을 가하는 면에서 오차가 발생하고 또 순수 전단응력상태로 하중을 주기에 매우 어려우므로 하중각도가 45° 인 경우에 f_{45} 를 직접 시편에서 [Fig. 11(d)] 구하고 $\theta=45^\circ$ 와 f_{45} 를 식(5)에 대입하여 f_{xy} 도 구한다.

$$\left(\frac{1}{f_0}\right)^2 = \left(\frac{\cos^2\theta}{f_x} - \frac{\sin 2\theta}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\sin 2\theta}{f_{xy}}\right)^2 \quad (5)$$

이렇게 하여 구한 f_x , f_y 및 f_{xy} 등을 식(5)에 대입하

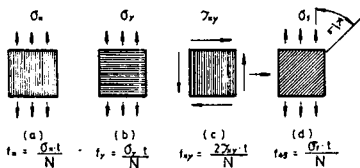


Fig. 11 Measurement of basic photoelastic constants

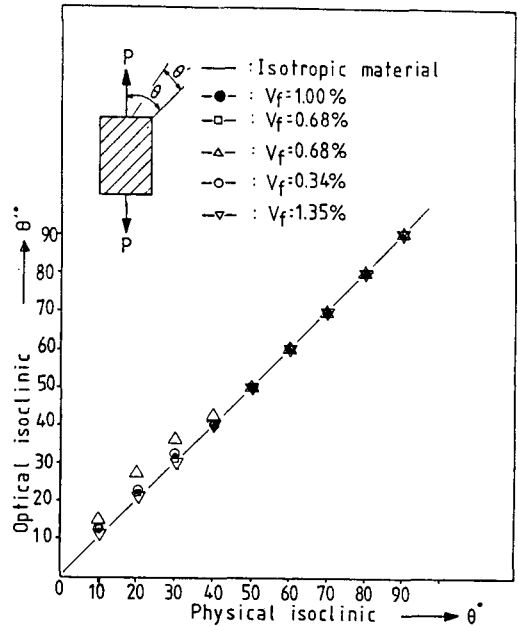


Fig. 12 The relation between physical isoclinic and optical isoclinic of C.F.E.C

여 섬유에 대한 임의의 하중 방향에 대한 f_0 를 Fig. 2처럼 구할 수 있다. Fig. 2는 본 실험에서 개발한 C.F.E.C의 f_0 를 나타낸 실험치이다. 복합체가 단순인장을 받을 경우 등경선 방향과 물리적 등경선 사이에는 식(6)처럼 주어진다.

$$\tan 2\theta' = \frac{f_x \sin 2\theta}{f_{xy} \left[\cos^2\theta - \frac{f_x}{f_y} \sin^2\theta \right]} \quad (6)$$

본 논문에서 개발된 C.F.E.C의 하와 중의 관계는 Fig. 12에 나타나 있다. 등방성 재료에서는 $f_x = f_y = f_{xy}$ 이므로 $\tan 2\theta = \tan 2\theta'$ 관계가 성립하므로 θ 와 θ' 의 관계는 $\theta = \theta'$ 인 직선관계가 된다. 그러나 등방성 재료가 아닌 경우에는 θ 와 θ' 사이의 관계는 식(6)처럼 주어지고 f_x 와 f_y 및 f_{xy} 은 서로 같지 않기 때문에 $\theta = \theta'$ 가 될 수 없다. 그러나 본 논문에서 개발된 C.F.E.C는 거의 직선적인 관계를 가지나 θ' 가 50° 미만일 때는 등방성 재료와 차이를 발생한다. 그 이외 범위에서는 등방성 재료와 같은 직선을 나타내고 있다. 이러한 것을 볼 때 V_f 가 매우 적으므로 전반적으로 모든 성질은 예측 시가 지배한다고 할 수 있다. 그러나 E_0 , G_0 , ν_0 등은 섬유에 대한 하중방향에 따라 각각 틀리므로 C.F.E.C.는 직교 이방성 재료의 역할을 충분히 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 C.F.E.C.는 광학적인 성질에서는 거의 등방성 재료처럼 기능을 발휘하고 물성적인 면에서는 완전히 이방성 재료의 기능을 발휘하므로 C.F.E.C.

는 직교 이방성 재료를 광탄성 실험으로 모델 실험을 하고자 할 때는 투과용 광탄성 실험장치의 광탄성 모델 재료로서 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 철근을 가진 어떤 콘크리트 구조물을 광탄성 실험으로 해석하고자 할 때는 본 실험실에서 개발된 C.F.E.C.의 모델링법과 적당한 섬유 선택으로 그 콘크리트 구조물의 광탄성 실험 모델재료를 개발할 수 있다. 왜냐하면 기저재료인 에폭시는 콘크리트 역할을 하고 섬유는 철근 역할을 하기 때문이다. 그리고 본 실험에서 개발된 C.F.E.C.의 섬유는 생체의 섬유질 역할을 하고 기저 재료인 에폭시는 사람의 살 역할을 하므로 C.F.E.C.는 이방성 광탄성 재료로서 의공학 및 항공 산업에도 적용될 수 있다.

3. 결 론

이상과 같은 실험과 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 본 실험에서 개발된 C.F.E.C.는 이상적인 광탄성 모델재료가 갖추어야 할 조건을 거의 완벽하게 만족하므로 이방성 재료의 광탄성 모델재료로 사용될 수 있다.

(2) 투과용 광탄성 실험장치의 복합체 모델재료를 모델링할 때는 아탈다이트와 경화제의 혼합액을 기저재료로 하고 기저재료와 섬유의 선행차를 차이 때문에 발생하는 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위해서는 열 전도율이 좋은 구리를 섬유로서 사용하는 것이 좋다.

(3) 구리 뿐만 아니라 다른 어떤 것을 투과용 광탄성 실험 모델재료의 섬유로서 사용할 때는 섬유 직경은 0.25 mm 이고 섬유의 피치는 약 2.5 mm 정도가 좋다.

(4) 어떤 복합체에 대한 일반적인 어떤응력 해석과 응력집중 및 파괴역학 등을 광탄성 실험으로 해석하고자 할 때는 본 논문에서 개발된 C.F.E.C.를 그 실험의 모델재료로 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Robert J. Sanford, 1979, "A General Method for Determining Mixed Mode Stress Intensity Factors from Isochromatic Fringe Patterns", *Engr. Fracture Mech.* pp. 621~633.
 (2) D.G. Smith and C.W. Smith, 1972, "Photoelastic Determination of Mixed Stress Intensity Factors",

Engr. Fract. Mech., Vol. 4, pp. 357~366.
 (3) D. Post, 1953, "Photoelastic Stress Analysis for an Edge Crack in a Tensile Field", *Experimental Stress Analysis*, pp. 99~116.
 (4) Robert J. Sanford, 1980, "Application of the Least Square Method to Photoelastic Analysis", *Experimental Mechanics*, pp. 192~197.
 (5) J.M. Etheridge, J.W. Dally, 1978, "A Three Parameter Method for Determining Stress Intensity Factors from Isochromatic Fringe Loops", *Journal of Strain Analysis* Vol. 13, No. 2.
 (6) "Epon 828 in Casting Application", *Shell Vil Co, Bul. So.* 52~14.
 (7) Dally, J.W. and Riley, W.F. 1978, "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill Book Co, New-York.
 (8) A.E. Green and G.I. Taylor, 1939, "Stress Systems in Aeolotropic Plates Proc", *Roy. Soc. A*, pp. 162~172.
 (9) Tsuyoshi Hayashi, 1962, "Photoelastic Method of Experimentation for Orthotropic Materials", *應用物理*, Vol. 31, No. 10, pp. 34~45.
 (10) I.M. Daniel, R.E. Rowlands and D. Post, 1973, "Strain Analysis of Composite by Moire Methods", *Experimental Mechanics*, pp. 246~252.
 (11) R.E. Rowlands, I.M. Daniel and J.B. Whiteside, 1973, "Stress and Failure Analysis of a Glass-Epoxy Composite Plate with a Circular Hole", pp. 31~37.
 (12) O.L. Bowie and C.E. Freese, 1972, "Central Crack in Plane Orthotropic Rectangular Sheet", *Int. J. of Frac. Mech.* Vol. 8.
 (13) K. Fujino, H. Sekine and H. Abe. 1984, "Analysis of an Edge Crack in a Semi-infinite Composite with a Long Reinforced Phase", *International Journal of Fracture* pp. 81~94.
 (14) 林毅, 1941, "直交異方性板の弾性係數と剛性に就て", *The Journal of the Society of Aeronautical Science of Nippon(Japan)* Vol. 8, No. 79.
 (15) Robert W. Lenz, 1967, "Organic Chemistry of Synthetic Highpolymers", Interscience Publishers, a Division of John Wiley and Sons.
 (16) Charles A. Harper, 1975, "Handbook of Plastics and Elastomers", Mac Graw-Hill Book Company, pp. 3~25.

- (17) S.G. Lekhnitskii, 1963, Theory Elasticity of an Anisotropic Elastic-Body", Holden-Day, Inc.
- (18) R.C. Sampson, 1970, A Stress-optic Law for Photoelastic Analysis of Orthotropic Composites", Experimental Mechanics, May. pp.210~215.
- (19) R.B. Pipes and J.L. Rose, 1974, "Strain Optic Law for a Certain Class of Birefringent Composites", Experimental Mechanics, pp. 355~360.
- (20) J.W. Dally and R. Prabhakaran, 1971, "Photo-Orthotropic-Elasticity", Experimental Mechanics, pp.346~356.
- (21) Pih. H. and Knight, C.E., 1969, "Photoelastic Analysis of Anisotropic Fiber Reinforced Composite", Int, Composite Materials, Vol. 3, p.94.
- (22) Frocht, M.M., 1946, "Photoelasticity", John Wiley and Sons, Incs New York, pp.323~379.