

任意形態의 纖維를 가진 複合材料 開發과 破壞力學에의 應用(I)

(시편제작을 중심으로)

박 정 도

Development and Application to Fracture Mechanics of Composites with Arbitrary Fiber Size

Jung Do Park

Abstract In order to analyze the stress distribution and stress concentration factors in composite materials, especially, in the short fiber of the reinforced composite materials by photoelastic method, it is necessary to develop the photoelastic model material having short fibers with arbitrary size and orientation.

In this paper, the orthotropic photoelastic model material having short fibers for the transparent type photoelastic device was developed by the embedded corrosion fiber method.

It was found that the model material was satisfactory to the properties of photoelastic model material, and also that the embedded corrosion fiber method can be employed for developing a model material with arbitrary size and direction to analyze the stress distribution and crack problems of composite materials.

1. 序 論

종래 複合材料에 대한 應力集中이나 破壞強度에 대한 해석에는 理論·實驗 등 많은 결과가 있으나 그 대부분이 連續纖維를 가진 複合體에 대한 것이거나 不規則的인 單纖維(short fiber)를 가진 分散形複合體에 대한 것으로^{1)~10)} 複合材料의 破壞에 큰 영

향을 미치는 纖維端에서 발생하는 龜裂發生으로 剝離現像(exfoliation) 등에 대한 미시적인 破壞現狀에 대해서는 아직 미지의 부분이 남아 있다.

지금까지 構造物材料의 應力分布나 破壞舉動 등을 실험적으로 解析하는 수단으로 光彈性實驗法이 많이 이용되어 왔으며, 이를 複合材料의 應力分布나 破壞舉動의 解析에

利用하면 좋은 결과를 얻으리라 생각된다. 그러나 지금까지 개발된 複合材料는 거의 대부분이 非透過形이기 때문에 이를 光彈性實驗에는 적용할 수가 없다. 따라서 複合材料의 應力分布나 破壞舉動의 解析에 이용될 수 있는 透過形 複合材料의 개발이 必要하다.

본 論文은 複合材料의 破壞舉動 解析에 대한 基礎研究의 하나로, 透過形 光彈性實驗에 적용할 수 있는 複合材料를 개발하기 위하여 에폭시(epoxy)를 母材로 하여 그 내부에 任意의 方向과 크기를 가진 銅纖維(copper fiber)를 매몰시킨 複合材料를 개발하고 그 材料가 透過形 光彈性實驗에 적용할 수 있는 가에 대하여 檢討를 행한 것이다.

2. 複合材料 開發

중래 透過形 光彈性實驗을 위한 모델材料用으로 사용되어 왔던 재료로는 Epon 828¹¹⁾, CR-39¹²⁾, Homalite-100¹²⁾, Epoxy-1¹²⁾, Epoxy-2¹²⁾ 등 여러재료가 있어 이들을 母材用 材料로 사용해도 좋으리라 예상되나, 본 實驗에서는 작업의 용이성과 母材의 彈性係數의 변화 등을 고려하여 Table 1에 제시한 재료(Araldite CY-230, Chiocoal LP-3, Hardner HY-951)를 母材로 사용하였다. 그리고 纖維用 原材料로는 시판의 銅薄板(copper foil)을 사용하였다.

Table 1. Materials for matrix

| | | |
|----------|--------|---------|
| Araldite | CY-230 | 100 Wt% |
| Chiocoal | LP-3 | x Wt% |
| Hardner | HY-951 | 8 Wt% |

銅板필름의 두께는 0.05, 0.07, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5mm 등을 사용하여 보았으나 두께가 0.1mm 이하의 필름은 試片의 製作過程에서 필름의 손실이 심하고 또한 母材의 強度에 비하여 強化材로서의 성능이 미약하였다. 그리고 필름의 두께가 0.1mm보다 두꺼운 필름은 Fig. 1의 過程中 銅板의 腐蝕過程에서 銅板의 腐蝕이 수직으로 되지 않는 등 難點

이 많았다. 그래서 纖維用 銅板의 두께는 0.1 mm를 선택하여 사용하였다. 그리고 纖維用 薄板재료로 스테인레스판이나 알루미늄판을 사용해도 可能하나 그 경우는 腐蝕過程에서 포토레지스트(photoresist) 感光液의 耐酸性 등의 문제로 難點이 많았으나 이는 차후 改善이 되면 이들 材料를 이용한 複合材料의 開發도 可能하리라 예상된다.

試片의 製作過程의 概略圖를 Fig. 1에 나타내었으며 그 과정은

- (1) 아크릴판을 사용하여 한쪽 면에 銅薄板을 부착시킨 鑄型을 만들어 Table 1의 材料를 적당히 重合한 에폭시레진(epoxy resin)을 주입시켜 두께 0.1 mm의 銅薄板이 한쪽 면에 접착된 에폭시 판을 만든다. 이때, 母材인 에폭시 판에 含有되는 치오콜의 含有量이 30Wt% 보다 적게 함유된 경우에는 모재의 彈性係數가 크기 때문에 纖維強化效果가 떨어지며 또한 치오콜의 함유량이 30Wt%보다 많게 되면 모재의 彈性係數가 너무 低下되므로 치오콜의 含有量은 30Wt%로 하였다.
- (2) 銅薄板 위에 IC回路 製作用 포토레지스트 감광액을 두께 10μm 정도로 塗布시켜 건조시킨다. 그리고 일정한 피

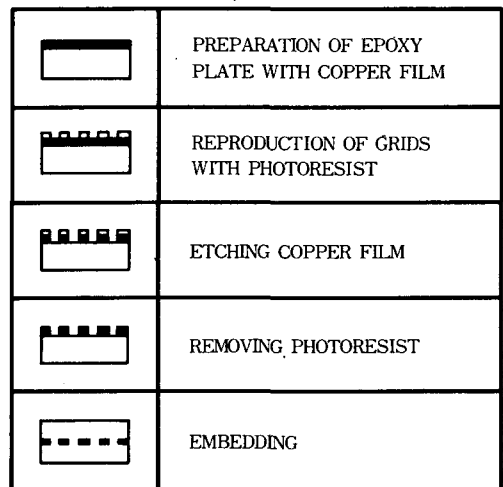


Fig. 1 Procedure for preparing the composites plates

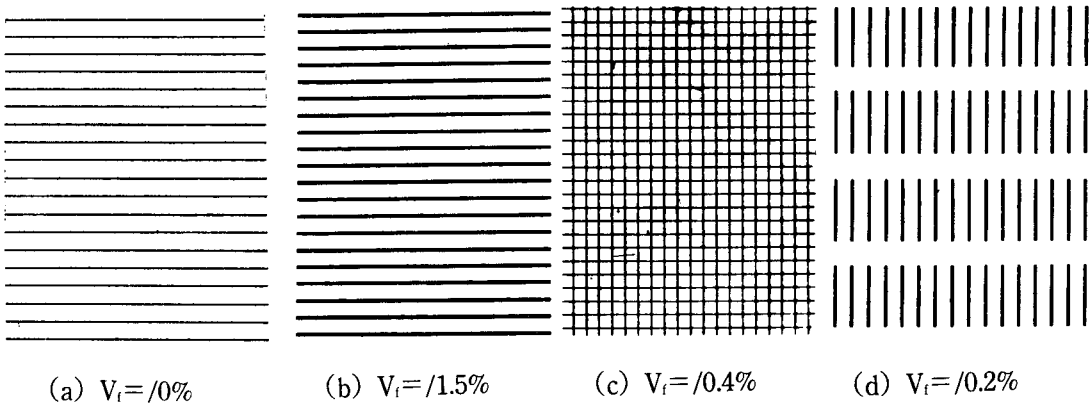


Fig. 2 Various type of the composite plate fabricated by Embedded Corrsion Fiber Method

- 치를 가진 그리드 필름(grid film)을 위에 놓고 露光시켜 현상시킨다. 그러면 纖維部分에 해당하는 감광액은 銅板 위에 남고 나머지 부분은 없어진다.
- (3) 에폭시 판을 鹽化第2鐵 溶液에 담근다. 그러면 포토레지스트가 形成된 부분은 포토레지스트 감광액의 耐蝕性 때문에 腐蝕되지 않고 나머지 부분은 腐蝕되어 에폭시판 위에는 원하는 형태의 纖維가 形成된다.
 - (4) 纖維部分의 동판 위에 남아있는 포토레지스트 感光液을 除去하면 에폭시판 위에는 원하는 크기와 方向을 가진 銅纖維(copper fiber)만 남게 되며 이 판을 진공 속에서 일정기간 유지시켜 作業過程 중에 생겨 에폭시판과 纖維에 殘留되어 있는 揮發成分을 除去한다.
 - (5) 纖維가 形成된 에폭시판 위에 母材와 같은 組成成分을 가진 에폭시 수지를 이용하여 鑄物한다. 그러면 任意方向과 크기의 纖維가 内部에 매몰된 透過形 光彈性實驗用 複合材가 완성된다.
 - (6) 위의 과정을 통하여 얻은 複合材板은 母材인 에폭시재료가 완전한 彈性係數를 가지지 못하므로 에폭시판을 爐

속에서 일정한 사이클을 통하여 熱處理시켜서 완전한 彈性係數를 가지게 한다.

만일 n층 積層板을 만들고자 할 경우에는 위의 (1)~(5)의 過程을 n번 反復하면 n層 積層板을 제작할 수 있다.

Fig. 2는 위의 과정을 통하여 製作한 各種 試片을 나타낸 것이다.

3. 應力프린지값과 物性值의 關係^{13,14)}

광탄성재료인 直交異方體에 대해서 應력프린지값(f_L, f_T, f_{LT})과 應력($\sigma_L, \sigma_T, \tau_{LT}$) 및 프린지의 무늬 차수(N_L, N_T, N_{LT}) 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$f_L = \frac{\sigma_L \cdot t}{N_L}, f_T = \frac{\sigma_T \cdot t}{N_T}, f_{LT} = \frac{2\tau_{LT} \cdot t}{N_{LT}},$$

$$f_0 = \frac{\sigma_1 \cdot t}{N_0} \dots \dots \dots (1)$$

식 (1)에서 f_L, f_T, f_{LT} 그리고 f_0 는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 스트레인 게이지(strain gage)를 複合材에 接觸시켜 하중을 가하여 光彈性實驗을 통하여 읽은 等色線무늬의 次數를 읽으면 구할 수 있다.

위 식을 일반형으로 나타내면 다음과 같다.

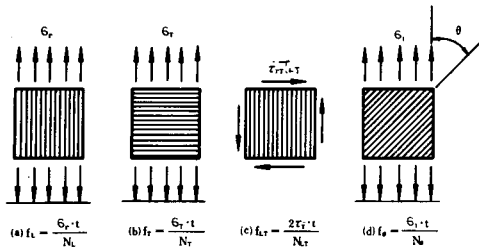


Fig. 3 Measurement of basic photoelastic constants

$$f = \frac{\sigma \cdot t}{N}, f_{LT} = \frac{2\tau_{LT} \cdot t}{N_{LT}}, \dots \dots \dots (2)$$

위 식에서 N과 N_{LT}를 섬유와 매트릭스의 무늬차수 N_f, N_m과 모재의 무늬차수 N_f, N_m의 합으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$N = N_f + N_m = \sigma_f t_f / f_f + \sigma_m t_m / f_m \dots \dots \dots (3)$$

$$N_{LT} = N_{f,LT} + N_{m,LT} = 2\tau_f t_f / f_f + 2\tau_m t_m / f_m$$

위의 (3)식을 (2)식에 대입하면 다음의 식이 성립한다.

$$f = \frac{\sigma}{(t_f/t) (1/f_f) \sigma_f + (t_m/t) (1/f_m) \sigma_m}$$

$$= \frac{E\epsilon}{(1/f_f) E_f \epsilon_f V_f + (1/f_m) E_m \epsilon_m V_m} \dots \dots \dots (4)$$

$$f_{LT} = \frac{2\tau_{LT}}{(t_f/t) (1/f_f) 2\tau_f + (t_m/t) (1/f_m) 2\tau_m}$$

$$= \frac{2G_{LT} \gamma_{LT}}{(1/f_f) 2G_f \gamma_f V_f + (1/f_m) 2G_m \gamma_m V_m} \dots \dots \dots (5)$$

위의 식에서 t_f/t = V_f, t_m/t = V_m 이다. 위의 식(4), (5)에서 본 실험에 사용되는 섬유용 재료가 구리로서 비투과성이므로 f_f = ∞이고 ε_f = ε_m, ε_f ≅ ε_m, γ_f ≅ γ_m, ε_f ≅ ε_m으로 보고 정리하면

$$f_{LT} = \frac{G_{LT} f_m}{G_m V_m}, f_\theta = \frac{E_\theta f_m}{E_m V_m} \dots \dots \dots (6)$$

그런데, f_{LT}는 純粹剪斷 상태에서의 값이나 순수전단 상태의 하중을 가하기가 어렵기 때문에 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.¹³⁾

$$f_\theta = f_{LT} [\cos^2 \theta - \frac{f_L}{f_T} \sin^2 \theta]^2 [\frac{f_L}{f_{LT}} \sin 2\theta]^{1/2} \dots \dots (7)$$

따라서 식 (6)을 이용해서 구한 f_L, f_T와 任意方向(예를 들면 θ=45°)의 f_θ를 구해서 식 (7)에 대입하면 f_{LT}를 구할 수 있다. 그러면 식 (7)은 임의방향의 프린지 값을 나타내는 식이 된다.

4. 光彈性材料로서의 適合性에 대한 考察

光彈性實驗時 중요한 사항중의 하나는 使用材料가 完전한 光彈性材料로서의 性質을 가지고 있어야 하는 것이다. 그러나 실제로 그러한 재료를 選定하기는 매우 곤란하므로 실제로는 이상적인 光彈性 材料에 가까운 性質을 가진 재료를 選擇하여 使用한다.

위의 과정을 통하여 제작된 재료가 透過形 光彈性材料로서 적합한가에 대한 妥當性 與否의 考察事項으로서는 (1)透過性(transparency), (2)光彈性感度(stress fringe value, sensitivity), (3)線型性(linearity), (4)應力弛緩(creep), (5)殘留應力(residual stress), (6)機械加工性(machinability) 등을 들 수 있다.

(1) 透過性(transparency)

Fig. 4는 본 실험에서 제작한 시편을 사용하여 内部에 圓空이 존재하는 판에 引張荷重이 가해질 때의 等色線寫眞을 나타낸 것으로, 시편의 等色線무늬는 모두 連續의이며 透過性도 좋은 것을 알 수 있다.

Fig. 4에는 제시되어 있지 않지만 纖維間 間격이 작을수록 透過性은 다소 떨어지나 피치가 P=1mm까지는 等色線이 連續의이며 透過性도 좋은 것을 알았다.

崔⁶⁾, 黃⁷⁾ 등의 연구에서는 구리섬유를 사용한 複合材의 제작시 纖維間 間격은 2.5mm가 적합한 것으로 되어 있으나 그 경우는 使用 纖維의 直徑이 0.25mm로서 본 실험에 사용

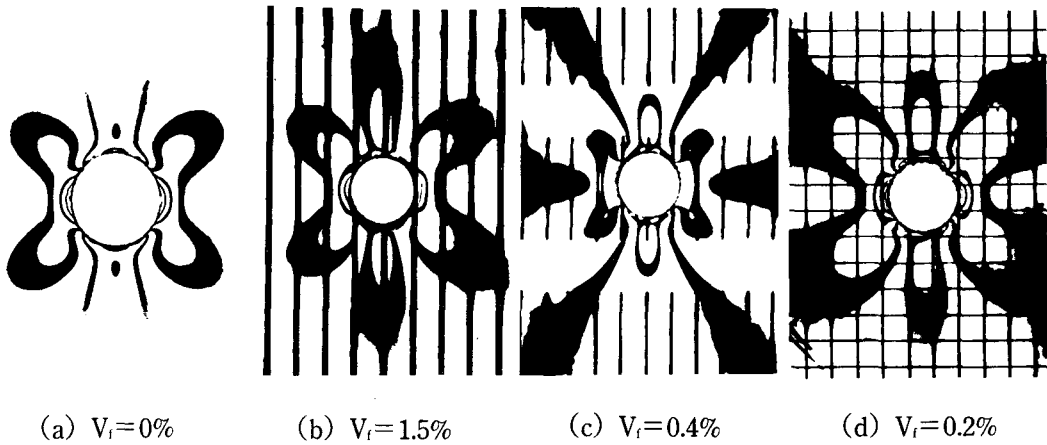


Fig. 4 Typical isochromatic fringe patterns of model composites

한 纖維인 0.1mm보다 크기 때문에 간격이 2.5mm보다 작게 하게 되면 透過性이 低下되기 때문으로 생각된다.

따라서 纖維의 直徑이 작을수록 섬유간 간격은 작아질 것으로 豫想되며 차후 에폭시판에 埋沒되는 섬유를 일반적으로 分散形 複合材의 제작에 사용되는 유리섬유(glass fiber)와 같이 20~30 μ m 정도의 직경을 가진 섬유를 埋沒시킬 수 있다면 纖維間 간격을 1mm보다 더 작게 하여도 透過性이 良好한 連續的인 等色線 무늬가 얻어지리라 예상되나 현 단계로서는 纖維間 간격은 1mm정도가 그 限界이다.

(2) 光彈性感度(stress fringe value)

透過形 光彈性實驗에 사용되는 材料는 $34.98 \times 10^{-3} \text{kN/m} < f_c < 343.93 \text{kN/m}$ ($0.0005 < f_c < 0.5$) 범위의 光彈性感度を 지녀야 한다.

Fig. 5는 식 (7)에서 구한 應力프린지값과 實地試片에서 스트레인게이지를 接觸시켜 구한 應力프린지값을 나타낸 것으로 두 값이 서로 잘 一致하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 應力프린지값은 V_f 의 증가와 함께 증가하지만 光彈性材料가 지녀야 할 範圍내에 있다는 것을 알 수 있다.

(3) 線型性(linearity)

일반적으로 光彈性材料는 彈性限度 내에서 應力-變形率($\sigma-\epsilon$) 및 應力-무늬次數

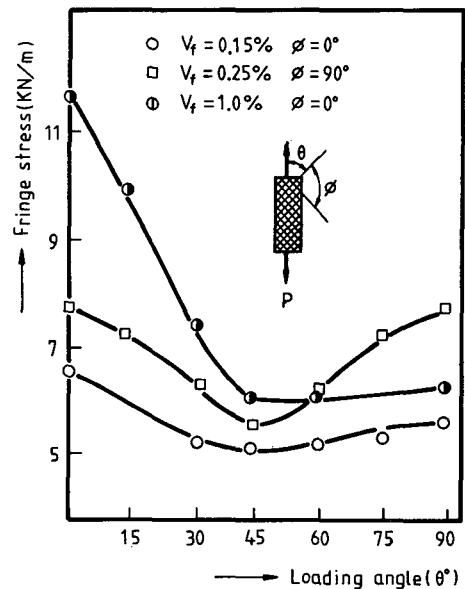


Fig. 5 Stress sensitivity of model composites with loading angle

($\sigma-N$)사이의 直線關係가 성립한다. Fig. 6은 모델재료의 應力-變形率 사이의 관계를 나타낸 것으로 應력과 변형률이 완전히 直線關係를 가지고 있어 모델재료로서의 우수한 線型性이 입증되고 있다.

그리고, 體積比率 V_f 의 증가와 함께 彈性係數도 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 銅纖維가 섬유로서의 기능을 충분히 하고 있음을 알 수 있다. 그리고 光彈性材料가 가져야 할 중요한 성질 중의 하나인 應力과 무늬次數의 關係는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서, 應力과 무늬次數는 서로 直線關係를 나타내고 있으며, 體積比率 V_f 가 增加함에 따라 感度는 減少하지만 1.0%까지는 光彈性材料가 지녀야 할 性質을 가지고 있음을 알 수 있다.

(4) 應力弛緩(creep)

대부분의 光彈性材料의 母材는 高分子材料이기 때문에 光彈性材料는 機械的 및 光學的性質에는 應力弛緩 현상을 가지고 있다. 光彈性實驗에 사용되는 高分子材料는 대부분 線型粘彈性을 지니고 있기 때문에 應力과 變形率이 時間의 함수로 나타내어진다. 그러나 본 논문에서는 應력을 時間에 따라 측정하기는 매우 번거로우므로 應력에 관계

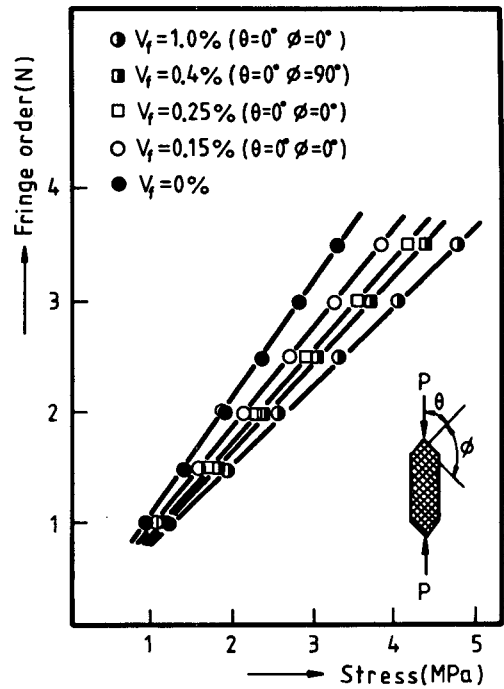


Fig. 7 Fringe order vs stress

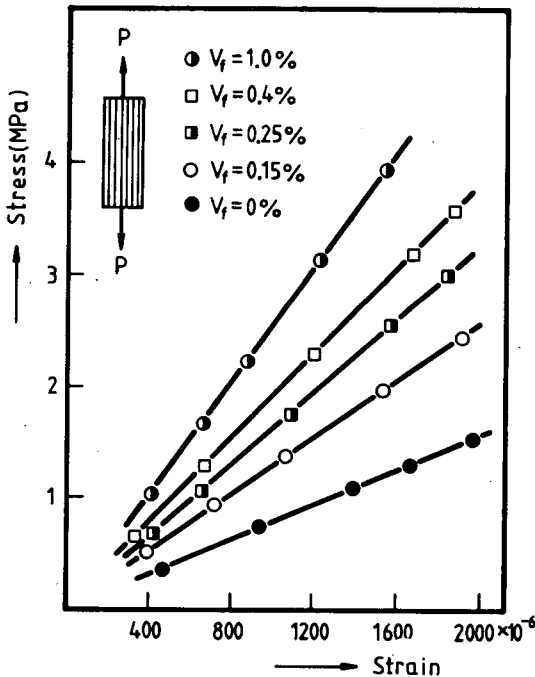


Fig. 6 Stress vs. strain for various type of composites

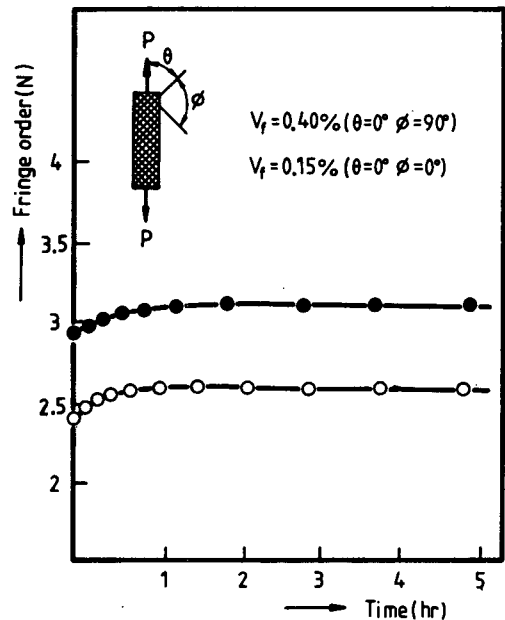


Fig. 8 Fringe order vs time

하는 무늬次數와 時間과의 關係를 조사하여 모델재료의 應力弛緩 現象을 조사하였다. Fig. 8은 그 結果를 나타낸 것으로 프린지次數는 荷重負荷 直後를 제외하고는 時間에 關係없이 거의 一定한 값을 나타내고 있어 모델재료가 光彈性實驗用 모델재료로써 적합하다는 것을 말해 주고 있다.

(5) 殘留應力(residual stress)

殘留應力이 광탄성 모델재료에 생기면 이 殘留應力이 모델에 가해지는 荷重에 의하여 생기는 應力分布의 무늬에 중첩이 되므로 매우 큰 誤差가 발생한다. 따라서 光彈性 모델재료의 生産過程에서 가능한 한 殘留應力이 적게 생기도록 주의를 해야 한다. 그러나 製作過程에서 殘留應力을 완전히 除去하기는 不可能하므로 될 수 있는 한 殘留應力이 생기지 않도록 주의를 해야 한다.

그리고 複合材料에 생기는 殘留應力은 대부분 母材와 纖維의 線膨脹係數의 차이로 인하여 발생하는 수축량의 차이로 발생한다. 본 實驗에서는 母材인 에폭시레진이 상온에서 重合되고 纖維인 銅版도 線膨脹係數가 스테인레스나 등과 같은 금속성 섬유 보다 양호하고 等方性 光彈性材料를 큐어링할 때 사용한 큐어링사이클을 사용하기 때문에 지금까지 光彈性材料로 사용되어 왔던 재료와는 달리 殘留應力이 거의 발생하지 않는다. 그리고 실험에는 片光機를 통하여 殘留應力이 생기지 않은 材料만 사용하였다. Fig. 1에서 살펴 본 바와 같이 시편에는 殘留應力이 거의 생기지 않음을 알 수 있다.

5. 破壞力學에의 應用性 檢討

본 研究를 통하여 개발된 試片製作法(이하 腐蝕埋没法이라 칭하기로 함)은 어떤 형태의 纖維를 가진 複合材料도 제작이 가능하므로 複合材料의 破壞解析에 이용되면 좋은 結果를 얻으리라 예상된다.

그 한 예로, Fig. 9에 제시한 시편을 이용할 경우 纖維端에서 생기는 龜裂의 初期發生에 대한 고찰이나, 破斷된 纖維와 纖維사이의 干涉現狀 그리고 임의 형태의 分散形

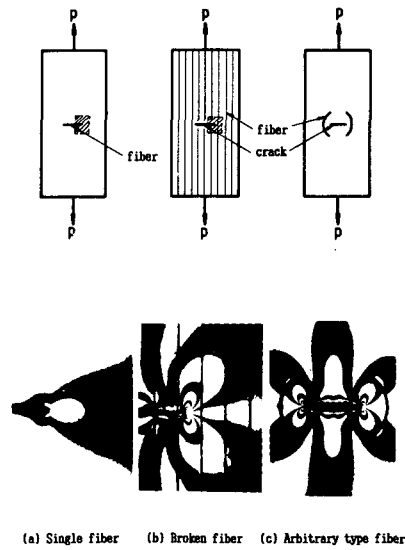


Fig. 9 Isochromatic fringe patterns applied to various type of fracture problems

纖維를 가진 複合材의 破壞現狀 등과 같은 複合材料의 破壞現狀에 대한 해석에 매우 유용한 方法이 되리라 예상한다.

6. 結 論

이상의 研究를 통하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

- (1) 複合材料에 대한 透過形 光彈性實驗에 본 腐蝕埋没法을 이용하면 殘留應力이 거의 생기지 않는 複合材料를 제작할 수 있으며, 특히 任意의 方向과 크기를 가진 分散形複合材의 제작에 본 腐蝕埋没法이 매우 有用하다.
- (2) 透過形 光彈性實驗用 複合材에서 纖維의 직경이 0.1mm 정도까지는 纖維間 間격을 1mm까지 작게 할 수 있다.
- (3) 본 研究를 통하여 제시된 腐蝕埋没法을 이용하여 複合材의 破壞舉動을 규명할 경우 纖維端에서의 初期龜裂發生이나 纖維의 薄離現象 등을 쉽게 파악할 수 있으리라 생각한다.

7. 후 기

이 논문은 1991년도 자유공모과제(지방대학육성과제) 연구비에 의하여 수행되었으며 관계자 제위에게 심심한 사의를 표한다.

References

- 1) A.E. Green, G.I. Taylor, "Stress System in Aeolotropic Plates", Proc. Roy. Soc. A, (1939) pp.162~172
- 2) I.M. Daniel, R.E. Rowlands and D. Post, "Strain Analysis of Composite by Moire Methods", Exp. Mech. (1973) pp.246~252
- 3) R.E. Rowladns, I.M. Daniel and J.B. Whiteside, "Stree and Failure Analysis of a Glass-Epoxy Composite Plate with a Circular Hole", Exp. Mech. (1973) pp. 31~37
- 4) K. Fujino, H. Sekine and H. Abe, "Analysis of an Edge Crack in a Semiinfinite Composite with a Long Reinforced Phase", Int. J. Frac. (1984) pp.81~94
- 5) 林, "直交異方性板의 彈性係數와 剛性에 就て", J. Soc. Aero-nautical Science Nippon, Vol.8, No. 79, (1941) p. 601
- 6) 崔善浩, 黃在錫, "直交異方性의 光彈性實驗法 개발에 관한 연구", 大韓機械學會論文集, Vol.8, No.79, (1988) pp.8~18
- 7) 黃在錫, 崔善浩, 島本, 高橋, "光彈性實驗用複合材料의 開發에 關する 研究", 日本機械學會論文集, Vo.59, No.509, (1989) pp.11~16
- 8) C.S. Hong, K.T. Jeong, "Strss Intensity Factors in An-isotropic Sandwich Plane with a Partthrough Crack under Mixed Mode Deformation", Eng. Frac. Mech. (1985)
- 9) Gaggar, S.K. and Broutman, L.J., ASTM Sprc. Tech. Publ., 631, (1989) pp.310
- 10) 關根, 藤田, "低溫におけるナガラス纖維強化有機複合材料의 破壞じん性에 關する 研究", 日本機械學會論文集, Vol.54, No.491, (1987) pp.1298~1306
- 11) Epon 828 in Casting Application, Shell Vil Co., Bul. No.52~14
- 12) J.W. Dally, W.F.Riley, "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill Book Co. (1978)
- 13) R.C. Sampson, "A Stress-Optic Law for Photoelastic Analysis of Orthotropic composites", Exp. Mech., May, (1970) pp: 201~215
- 14) R.B. Pipes and J.L. Rose, "Strain-Optic Law for a Certain Class of Birefringent composites", Exp. Mech. (1974) pp.335~360