

광섬유센서를 이용한 복합적층판의 변형률 해석

우성총* · 최낙삼** · 박래영*** · 권일범****

Strain Analysis of Composite Laminates Using Optical Fiber Sensor

S.C.Woo, N.S.Choi, L.Y.Park and I.B.Kwon

Abstract

Using the embedded optical fiber sensor of totally-reflected extrinsic Fabry-Perot interferometer(TR-EFPI), longitudinal strains(ϵ_x) of the core and skin layers in glass fiber reinforced plastic(GFRP) cross-ply composite laminates have been measured. Transmission optical microscopy was employed to study the damage formation around the TR-EFPI sensor. It was observed that values of ϵ_x in the interior of the skin layer and the core layer measured by embedded TR-EFPI sensor was significantly higher than that of the specimen surface measured by strain gauges. The experimental results agreed well with those from finite element analysis on the basis of uniform stress model. Large strains in the core layer led to the occurrence of transverse cracks which drastically reduced the strain at failure of optical fiber sensor embedded in the core layer.

Key Words: strain analysis, optical fiber sensor, cross-ply composite laminates, transverse crack

1. 서 론

최근에는 광섬유의 물성이 복합소재의 강화재와 물성이 비슷하여 복합재료 구조물내에 광섬유 센서를 삽입하여 구조물의 안전성과 신뢰성을 감시하기 위한 연구가 활발히 진행중이다.[1-2]

광섬유 센서는 복합재료 구조물의 파손거동을 감지할 수 있는 충분한 감도와 구조물 내에 쉽게 삽입될 수 있다는 장점이 있다. 기존의 연구 결과들은 광섬유 센서를 활용하여 복합소재의 변형률 및 온도측정과 내부 손상 시점을 찾는 연구에 주로 집중되어 있다. 하지만 복합재료 구조물의 경우, 구성섬유와 모재의 물성이 달라 다양한 종류의 손상이 과도한 정적 및 동적하중 하에 발생하고 적층 구조가 다른 경우 층별 변형률에 차이가 발생한다. 따라서, 복합소재 구조물의 내부 변형률과 표면 변형률의 차이 및 각 층별 변형률을 감시하고 규명하는 것은 건전성과 신뢰성의 정확한 평가를 위해 중요하다.

본 연구에서는, 복합적층판의 표면과 내부의

변형률, 층별 변형률의 차이를 규명할 목적으로 전반사 외부 패브리-페로 간섭(totally-reflected extrinsic Fabry-Perot interferometer, TR-EFPI) 광섬유 센서를 유리섬유강화 직교 적층판 내부에 삽입하여 제작하고 각 층별 내부 변형률을 측정하였다. 시험편 표면에서는 게이지 길이 5mm의 포일형 전기저항식 스트레인 게이지를 부착하여 표면 변형률을 측정하였다. 또한 유한요소해석을 통해 표면과 내부 변형률, 각 층별 변형률거동 그리고 성형후의 길이방향으로의 잔류 변형률을 분석하고 이들 결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 실험

2.1 TR-EFPI센서

TR-EFPI 광섬유 센서는 광섬유의 2차 단면에 금을 진공 증착하여 투과에 의해 외부로 빠져나가는 광 손실량을 줄이고 반사율을 높임으로써 반사광의 강도를 증가시키며 노이즈를 감소시키는 등 센서의 성능을 향상시킨 것이다[3]. 센서 탐촉자의 외부에서 변형이 가해져 광섬유 사이의 공기간극의 길이가 변화하면 광 검출기에서 측정되는 광 출력신호는 출력광 I_2 가 공기간극의 광로차를 겪게되어 출력광 I_1 와 합해질 때 광 간섭효과를 갖게 된다.

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계정보경영공학부

*** (주) 오토리브 만도

**** 한국표준과학연구원 스마트계측그룹

2.2 시험편 제작

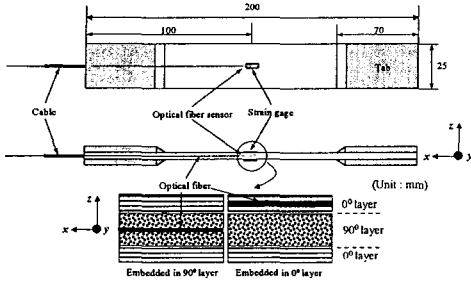


Fig. 1 Fabricated composite specimens and sensor locations.

Table 1. Locations of embedded optical fiber sensors in GFRP cross-ply laminates.

	Stacking sequence and sensor location $\{0\}$	Specimen Thickness (mm)
OFS in the skin layer	$[0^0_2/90^0_2/0^0_2/\{0\}/0^0_2]$	1.5
	$[0^0_2/90^0_2/0^0_2/\{0\}/0^0_2]$	2.0
	$[0^0_2/90^0_2/0^0_2/\{0\}/0^0_2]$	3.0
OFS in the core layer	$[0^0_2/90^0_2/\{0\}/90^0_2/0^0_2]$	1.5
	$[0^0_2/90^0_2/\{0\}/90^0_2/0^0_2]$	2.0
	$[0^0_2/90^0_2/\{0\}/90^0_2/0^0_2]$	3.0

본 연구에서 사용된 복합적층판 시험편을 SK Chemical의 두께가 0.125mm인 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(UD-GFRP, UGN-150)로 제작하였다. 모든 광섬유 센서는 시험편의 하중방향과 나란하게 삽입되었고 시험편의 형상과 광섬유 센서의 삽입위치를 Fig. 1에 나타낸다. 시험편 중류별 적층구성, 광섬유센서 삽입위치, 시험편 두께를 Table 1에 나타내었다. $\{0\}$ 표시는 광섬유 센서의 삽입위치를 나타낸다.

2.3 인장시험

만능시험기를 이용하여 1mm/min의 변위속도로 유지하면서 0.1mm씩 변위를 가한 후 광섬유 센서의 최종 파손이 발생할 때까지 변위를 증가시켰다. 광원으로는 절대변형 측정을 위해 BLS광원을 사용하였고, 광 출력 검출광의 신호는 광파형 분석기를 사용하여 취득하였으며 GPIB를 통하여 PC로 데이터를 저장하고 Labview 프로그램으로 광섬유 센서의 신호를 분석하여 변형률을 측정하였다. 한편, 광섬유센서로부터 구한 변형률 값과 비교분석하기 위해서 스트레인 게이지를 각 시험편의 중앙부 표면에 부착하였으며 인장시험에 따른 시험편 표면의 변형률 신호를 변형률 증폭기를 이용하여 측정하였다.

2.4 시험편 파손의 관찰

광섬유센서가 고장을 일으켜 시험편의 변형

률을 더 이상 측정할 수 없게 된 시험편을 저속절단기로 절취하여 광섬유센서가 삽입된 부위를 연마 및 폴리싱하였다. 200~400 μ m의 연마된 박편을 이용하여 광섬유센서 및 그 주변의 시험편 손상상태를 투과형 편광 현미경으로 관찰하였다

3. 유한요소해석

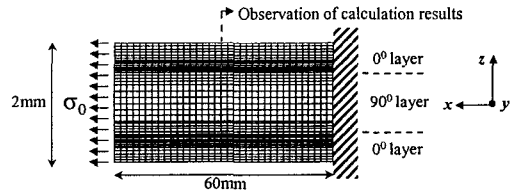


Fig. 2 Mesh configuration for finite element analysis of x-z cross-section of composite specimen model.

Table 2 The material properties used for FEA.

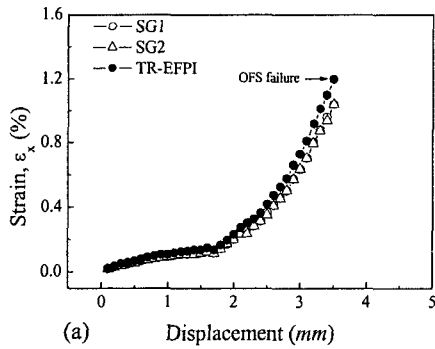
	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Shear modulus (GPa)	Coefficient of thermal expansion ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
UD-GFRP	$E_x = 38$	$\nu_{xy} = 0.25$	$G_{xy} = 4.1$	$\alpha_x = 11$
	$E_y = 10$	$\nu_{xz} = 0.25$	$G_{xz} = 4.1$	$\alpha_y = 25$
	$E_z = 10$	$\nu_{yz} = 0.5$	$G_{yz} = 3.1$	$\alpha_z = 25$

인장시험으로부터 얻은 길이방향의 변형률 값을 비교하기 위해 ANSYS를 이용하여 90°층 내부와 0°층 내부 및 표면의 변형률을 해석하였다. Fig. 2와 같이 유한요소해석에 사용된 요소는 8-node brick element를 사용하였으며 층간에서는 요소간에 완전결합을 부여하였으며 폭방향(y축 방향)으로 대칭조건을 적용하여 시험편 게이지부(W25×L60)의 1/2부분만을 모델링한 다음, 우측 단부는 완전 고정하고 좌측단부의 y-z단면에 수직 한 방향으로 일정 분포하중을 가하였다. 그리고 하중방향 변형률(ϵ_x)의 분포를 z축을 따라 구하였다. Table 2에 단일방향 복합재 $[0^0]_{16}$ 에서 구한 물성값을 나타냈으며, 각 층의 방향에 맞추어 물성값으로 이들을 종방향 및 횡방향으로 입력하였다. $[90^0]_{16}$ 의 적층구성을 갖는 시험편의 인장시험을 통하여 구한 인장강도(43MPa)값을 기준으로 해서 이 보다 작은 30MPa과 큰 60MPa의 일정한 인장형 분포하중(σ_0)을 각각 시험편의 좌측 y-z단면에 가하여 시험편의 표층과 내부의 변형률 분포를 계산하였다.

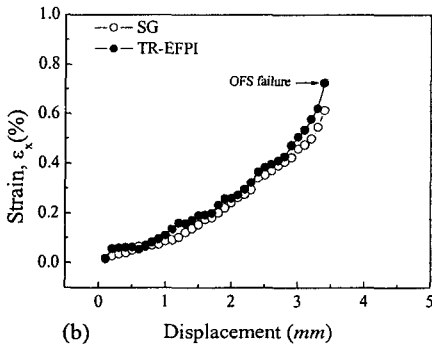
4. 결과 및 고찰

4.1 변형률 측정 및 해석

스트레인 게이지와 TR-EFPI 광섬유센서로 $[0^0_2/90^0_2/0^0_2/\{0\}/0^0_2]$, $[0^0_2/90^0_2/\{0\}/90^0_2/0^0_2]$ 의 적층구성을 갖는 시험편의 변위에 따른 길이방향 변형률 거동을 Fig. 3에 나타낸다. 이들 ϵ_x 그래프는



(a) Displacement (mm)



(b) Displacement (mm)

Fig. 3 Measurement of longitudinal strain ϵ_x versus displacement of the composite laminates : (a) $[0^\circ/90^\circ_s/0^\circ/0^\circ/0^\circ_s]$, (b) $[0^\circ/90^\circ_s/0^\circ/90^\circ_s/0^\circ_s]$.

변위(하중)의 증대에 따라, 광섬유 센서가 파손될 때까지 계측한 스트레인 게이지 출력값과 광섬유 센서 출력값을 서로 비교하여 그린 것이다. (a)의 경우, 표피층인 0° 층에 삽입된 광섬유 센서로 측정된 ϵ_x 값이 시험편 표면부의 스트레인 게이지로부터 측정된 ϵ_x 값보다 일정비율로 약간 크게 나타났다. 변위의 증가에 따른 ϵ_x 값의 증가거동은 서로 유사하였다. (b)의 경우, 시험편 표면의 스트레인 게이지로 측정된 ϵ_x 값보다 내부층인 90° 층에 삽입된 광섬유 센서로 측정된 ϵ_x 값이 더욱 크게 나타났다. 내부층(90° 층), 표피층(0° 층) 그리고 시험편 표면에서의 변형률값은 변위 1.8mm 이하의 범위에서 내부층으로 갈수록 더 커졌음을 알 수 있다. 이와 같은 거동의 타당성을 검증하기 위해 본 연구에서 수행한 3차원 유한요소해석 결과를 Fig. 4에 나타낸다. $[90^\circ]_{16}$ 의 적층구성을 갖는 단일방향 복합재 시험편의 인장강도(43MPa)를 구하고, 이 값보다 작은 30MPa과 큰 60MPa의 인장형 분포하중을 각각 Fig. 4의 모델 시험편의 좌측 y-z 단면에 일정하게 가하였다. $[0^\circ/90^\circ_s/0^\circ_s]$ 시험편을 모델링하여 시험편의 표피층과 내부층의 변형률 분포를 시험편의 두께방향을 따라 Fig. 4에 나타내었다. 시험편 표면(스트레인 게이지 부착지점, $z = -1, 1$)에서의 ϵ_x 값이 가장 낮게 나타나고 내부층으로 갈수록 높게 나타났다. 이와 같은 결

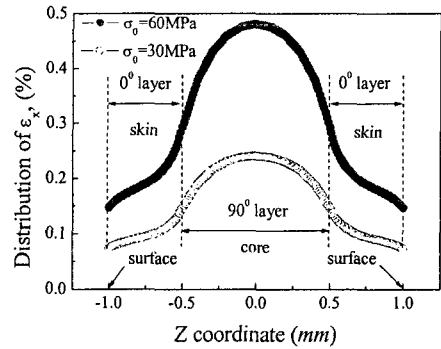


Fig. 4 ϵ_x distribution of $[0^\circ/90^\circ_s/0^\circ_s]$ specimen by finite element analysis.

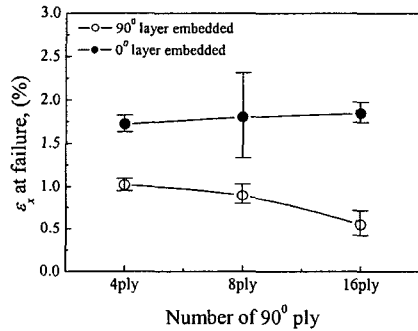


Fig. 5 ϵ_x at OFS failure along the number of core layer plies.

과는 Fig. 3의 실험결과, 즉 시험편 표면부(surface)에서 측정된 ϵ_x 값보다 표피층(skin layer)인 0° 층과 내부층(core layer)인 90° 층에서의 ϵ_x 값이 높게 나타난 것과 잘 일치하였다. 동일한 분포하중하에서 섬유 길이방향 탄성계수가 지배적인 고강성의 표피층보다는 모재의 탄성계수가 지배적인 저강성의 내부층의 ϵ_x 가 크게 나타난 것으로 해석된다.

Fig. 3의 삽입된 광섬유 센서의 고장시점의 관찰 결과에서도 90° 층에 삽입된 경우(Fig. 3(b), $\epsilon_f = 0.72\%$)가 0° 층에 삽입된 경우(Fig. 3(a), $\epsilon_f = 1.2\%$)보다 훨씬 일찍 고장이 발생하였다. Fig. 5는 90° 내부층의 두께에 따라 내부층과 표피층에 삽입된 광섬유 센서의 최종 고장시점에서의 변형률 거동을 나타낸다. 광섬유 센서가 0° 표피층에 삽입되었을 경우에는 고장시 변형률값이 90° 내부층의 두께에 관계없이 거의 일정하였지만 90° 층에 삽입된 광섬유 센서의 고장시 변형률 값은 0° 표피층에 삽입된 광섬유 센서보다 훨씬 작아졌으며, 내부층의 두께가 커질수록 작게 나타났다. 이는 내부층에서 발생하고 진전하는 횡방향 균열

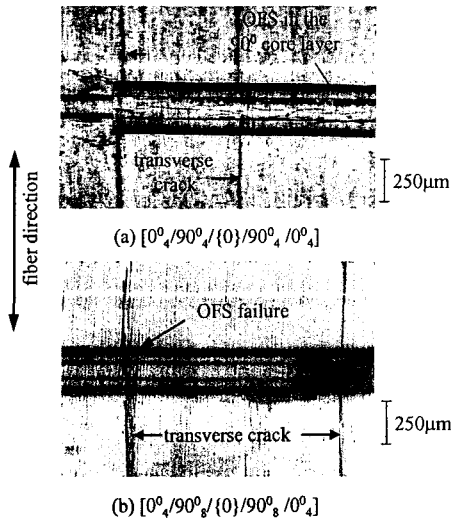


Fig. 6 Polarized optical microscopy observation of 90° layer embedded specimen in the vicinity of optical fiber sensor under transmitted light.

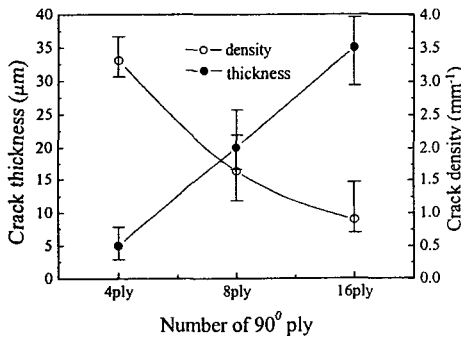


Fig. 7 Transverse crack thickness and density in the 90° core layer at the time of optical fiber sensor failure.

(transverse cracks)의 공격적인 영향을 받아 광섬유 센서가 변형중에 파손된 것으로 추정된다.

4.3 광섬유센서의 고장변형률과 시험편의 균열발생정도

Fig. 6과 같이 광섬유센서가 90°내부층에 강화섬유와 수직으로 삽입되어 있을 경우, 90°강화섬유 방향으로 진전하고 있는 다수의 횡방향균열이 광섬유센서의 주변을 수직방향으로 통과하면서 센서의 파손을 유발시켰으며, 광섬유센서가 0°표피층에 삽입되어 강화섬유와 평행하게 되어 있는 경우보다 훨씬 낮은 변형률에서 광섬유센서의 고장이 일어났다. Fig. 4가 의미하는 바와 같이, 동일분포하중에서 90°내부층의 변형률이 0°표피층보다 훨씬 크므로 균열은 내부층에서 횡방향 균열로서 발생할 것이다.

Fig. 7은 광섬유센서 고장시에 시험편 내부의 손상관찰 결과를 통해 90°내부층의 두께에 따른 횡방향 균열의 두께와 수밀도를 정량적으로 측정하여 함께 나타낸 것이다. 90°내부층의 두께가 두꺼울수록 횡방향 균열의 두께는 증가하였지만 시험편 단위길이당 횡방향 균열의 수밀도는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 횡방향 균열은 90°내부층의 두께가 얇은 경우(4ply)에는 광섬유센서 주위까지 약하게 진전하였고 90°내부층의 두께가 큰 경우(16ply)에는 광섬유센서 주위를 관통하는 것으로 관찰되었다. 따라서 90°내부층에 삽입된 광섬유센서의 고장변형률은 균열의 수밀도보다는 균열의 두께와 광섬유센서 주위에 횡방향균열의 진전 정도에 의존하여 저하되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

- 1) 90°층의 변형률, 0°층의 변형률 그리고 시험편 표면의 변형률은 내부층으로 갈수록 커졌으며, 이는 유한요소해석 결과를 통해 입증되었고 시험편 길이방향으로 높은 탄성계수를 보이는 표면층보다는 탄성계수가 낮은 내부층의 길이방향 변형률값이 크게 나타난 것으로 생각된다.
- 2) 90°내부층에 삽입된 광섬유센서의 고장변형률이 0°표피층에 삽입된 경우보다 40%이상 낮아졌으며 이는 90°내부층에서 다수의 횡방향 모재균열 진전으로 인한 광섬유센서파손 때문이었으며, 광섬유센서의 수명을 충분히 길게하기 위해서는 광섬유센서를 섬유방향과 나란하게 삽입하는 것이 좋다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 특정기초연구(과제번호:2000-1-30400-004-3) 및 한국표준과학연구원 기관고유사업(과제번호:KRISS/IR-2002-011)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) R. Hadzic, "Structural integrity analysis of embedded optical fibers in composite structures" *Composite Structures*, Volume 47, 1999, pp. 759-765.
- 2) V. Bhatia, "Wavelength-tracked White Light Interferometry for Highly Sensitive Strain and Temperature Measurements," *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 247-249.
- 3) D. A. Jackson, *Interferometers Optical Fiber Sensors*, Vol. 2, 1988.