

# 광섬유 TR-EFPI 센서를 이용한 GFRP 직교 적층판의 변형률 해석

우성충\* · 최낙삼\*\* · 권일범\*\*\*

## Strain Analysis in GFRP Cross-Ply Laminates Using TR-EFPI Optical Fiber Sensor

S.C.Woo\*, N.S.Choi\*\*, I.B.Kwon\*\*\*

**Key Words:** GFRP cross-ply composite laminates, TR-EFPI, Finite element analysis, Strain gauge

### Abstract

Longitudinal strains( $\epsilon_x$ ) of the core and skin layers in glass fiber reinforced plastic(GFRP) cross-ply composite laminates have been studied using the embedded optical fiber sensor of totally-reflected extrinsic Fabry-Perot interferometer(TR-EFPI). Foil-type strain gauges bonded on both the upper and lower surfaces were used for the measurement of the surface strains. Both TR-EFPI sensor and strain gauge bonded on the specimen surface showed excellent agreement within  $-0.0086 \sim +0.0302\%$  strain. It was shown that values of  $\epsilon_x$  in the interior of the surface 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 were ascertained with finite element analysis. Embedded TR-EFPI optical fiber sensor could measure accurately the internal strains which were different from the surface.

### 1. 서론

복합소재는 강화재인 섬유 배향을 적절히 조절함으로써 원하는 강도를 얻을 수 있고 다른 금속재료나 알루미늄 합금에 비해 우수한 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)을 가지고 있어 경량화 설계를 위한 소재로서 그 이용 가치가 증가하는 추세이다. 그리고 최근에는 광섬유의 물성이 복합소재의 강화재와 물성이 비슷하다라는 이유로 복합재료 구조물내에 광섬유 센서를 삽입하여 구조물의 안전성과 신뢰성을 확보

하기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 광섬유 센서는 복합재료 구조물의 파손거동을 감지할 수 있는 충분한 감도를 가지고 있으며[1], 한 번의 탐침으로부터 많은 정보를 얻을 수 있고 구조물내에 쉽게 삽입될 수 있다는 장점이 있다. 그리고 Culshaw 등[2]은 복합소재 속에 삽입된 광섬유 센서는 기계적 특성에 거의 영향을 미치지 않는다고 보고한 바가 있다. 하지만 복합재료 구조물의 다양한 손상은 과도한 정적 및 동적하중 하에 발생하고 적층 구조가 다른 경우 구성섬유와 모재의 물성이 틀려서 표면 변형률과 내부 변형률의 차이가 발생한다. 따라서, 구조물의 건전성을 평가하기 위해 복합소재 구조물의 내부 변형률과 표면 변형률의 차이를 규명하는 것은 건전성과 신뢰성의 정확한 평가를 위해 중요하다.

본 연구에서는 전반사 외부 페브리-페로 간섭(TR-EFPI) 광섬유 센서를 유리섬유강화 직교 적층판 내부에 삽입하여 제작해서 내부 변형률을

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 한양대학교 기계정보경영공학부

\*\*\* 한국표준과학연구원 스마트계측그룹

측정하고 시험편 표면에서는 게이지 길이 5mm의 포일형 전기저항식 스트레인 게이지를 부착하여 내부 변형률과 외부 변형률의 차이를 측정하였다. 구조물의 내부 변형률을 측정하기 위하여 광대역 광원을 이용한 TR-EFPI 광섬유 센서 시스템을 구성하였다. 또한 센서 내부의 한 쪽 반사면을 금으로 진공 증착하여 센서의 성능을 향상시켰으며 시스템의 최적 작동조건을 구현하였다. 제작된 광섬유 센서를 시험편 표면에 적용하여 변형률 측정을 위한 보정실험을 하였다. 또한 유한요소해석을 통해 표면과 내부 변형률, 각 층별 변형률거동을 분석하고 이들 결과를 위의 실험결과와 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1 TR-EFPI 광섬유 센서의 구조

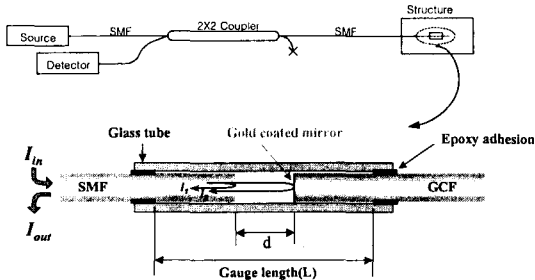


Fig. 1 Structure of TR-EFPI optical fiber sensor

광섬유의 구조는 코어(core), 클래딩(cladding), 코팅(coating)으로 구성되어 있다. 코어와 클래딩의 성분은 석영으로 코어의 굴절률이 클래딩보다 1~2%정도 커서 코어를 통과하는 빛이 코어와 클래딩의 경계에서 전 반사되어 손실이 거의 없이 전파한다. 고분자 재료로 이루어져있는 코팅은 주 구조인 코어와 클래딩을 보호하는 역할을 한다. 본 연구에서 제작한 TR-EFPI 광섬유 센서의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 센서 탐촉자의 외부에서 변형이 가해져 광섬유 사이의 공기간극  $d$ 의 길이가 변화하면 광 검출기에서 측정되는 광 출력신호는 입력광이 공기간극에서 겪게되는 광 손실 및 간섭에 따른 효과를 갖게 된다. 이러한 TR-EFPI 광섬유 센서는 광섬유의 2차 단면에 금을 진공 증착하여 외부로 빠져나가는 광 손실량을 줄임으로써 광 강도를 증가시키고 노이즈를 감소시키는 등 센서의 성능을 향상시킨 것이다 [3-4].

Table 1. Stacking sequence and thickness of GFRP cross-ply laminates

Stacking sequence	Thickness (mm)	Number of test
$[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4/0^{\circ}_2/\{0\}/0^{\circ}_2]$	1.5	2
$[0^{\circ}_4/90^{\circ}_8/0^{\circ}_2/\{0\}/0^{\circ}_2]$	2.0	2
$[0^{\circ}_4/90^{\circ}_{16}/0^{\circ}_2/\{0\}/0^{\circ}_2]$	3.0	2
$[0^{\circ}_4/90^{\circ}_2/\{0\}/90^{\circ}_2/0^{\circ}_4]$	1.5	2
$[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4/\{0\}/90^{\circ}_4/0^{\circ}_4]$	2.0	2
$[0^{\circ}_4/90^{\circ}_8/\{0\}/90^{\circ}_8/0^{\circ}_4]$	3.0	2

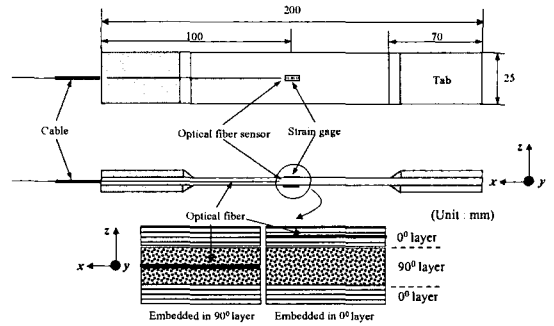


Fig. 2 Composite specimens and sensor locations

### 2.2 시험편 제작

본 연구에서 사용된 복합적층판 시험편은 SK Chemical의 두께가 0.125mm인 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(UD-GFRP, UGN-150)로 제작하였다. 적층구성, 두께 및 시편의 개수를 Table. 1에 나타내었다. {0}표시는 광섬유 센서의 삽입 위치를 나타낸다. 모든 광섬유 센서는 시험편의 중립면에 하중방향과 나란하게 삽입되었고 시험편의 형상과 광섬유센서의 삽입위치를 Fig. 2에 나타내었다. 각 시험편의 양단에는 길이 70mm의 유리섬유 에폭시 하중탭을 부착하였고 오토클레이브(autoclave)에서 적절한 경화과정을 통해 성형하였다.

### 2.3 실험방법

이상과 같이 제작된 시편을 이용하여 정적인 장시험을 수행하였다. 하중은 TSM-50 만능시험기를 이용하여 1mm/min의 속도를 유지하면서 0.1mm씩 계단식 변위를 가하여 광섬유 센서의 최종 파단이 일어날 때까지 변위를 증가시켰다. 변형률 측정실험을 위한 시스템의 전체 구성은 Fig. 3과 같다. 광대역 광원으로는 BLS광원을 사용하였고, 광 출력신호는 광 파형 분석기를 사용하여 취득하였으며 GPIB를 통하여 PC로 데이터

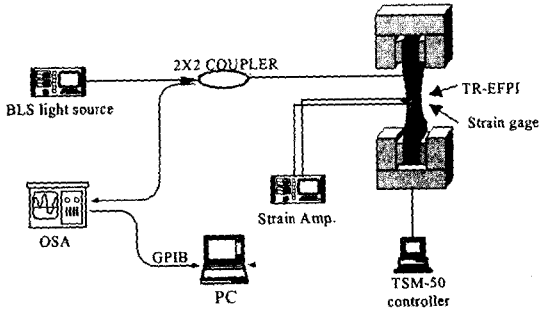


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

를 저장하고 Labview 프로그램으로 광섬유 센서의 변형률을 측정하였다. 스트레인 게이지 신호는 KYOWA EDX-1500A 증폭기를 이용하여 측정하였다.

### 3. 유한요소해석

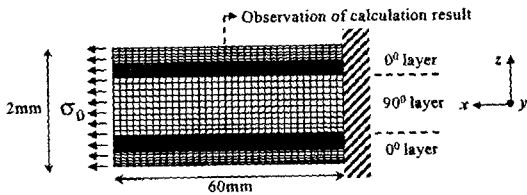


Fig. 4 Mesh configuration for finite element analysis of x-z cross section of composite specimen

인장시험으로부터 얻은 길이방향의 변형률 값을 비교하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 90°층 내부와 0°층내부 및 표면의 변형률을 해석하였다. Fig. 4와 같이 유한요소해석에 사용된 요소는 8-node brick element를 사용하였으며 총 요소 수는 100,000개였다. 폭방향(y축 방향)으로 대칭조건을 적용하여 1/2부분만을 모델링한 다음, y-z단면에 수직인 방향으로 일정 분포하중을 가하여 하중방향 면내(in-plane) 변형률의 분포를 z축(두께방향)을 따라 구하였다. 요소구성, 하중조건, 경계조건 그리고 사용된 좌표축의 방향을 Fig. 4에 나타내었고 Table. 2에

Table 2. The material properties used for FEA

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Shear modulus (GPa)
GFRP	$E_x = 38$	$\nu_{xy} = 0.26$	$G_{xy} = 4.1$
	$E_y = 10$	$\nu_{xz} = 0.26$	$G_{xz} = 4.1$
	$E_z = 10$	$\nu_{yz} = 0.52$	$G_{yz} = 3.1$

물성값을 나타내었다. 90°층만 적층된 시험편의 인장시험을 통하여 구한 인장장도(43MPa)값을 기준으로 해서 이 보다 작은 30MPa과 큰 60MPa의 일정한 인장형 분포하중( $\sigma_0$ )을 각각 시험편의 왼쪽 단부에 가하여 시험편의 표층과 내부의 변형률 분포를 계산하였다. x축을 하중방향, y축을 폭방향, z축을 두께방향으로 하였으며 모델의 크기는 60mm×12.5mm×2mm이다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 시험편 표면에서의 변형률 측정과 보정

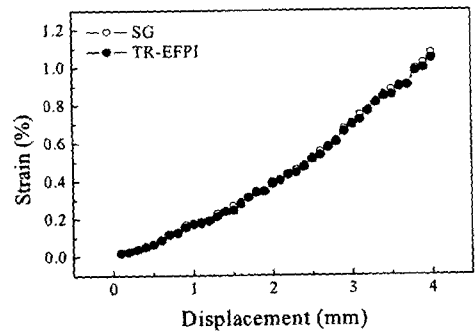


Fig. 5 Comparison between strains measured by SG and TR-EFPI on the specimen surface

우선, 시험편 표면의 중앙부에 TR-EFPI 광섬유 센서와 스트레인게이지를 부착하여 변형률 값을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었는데 -0.0086 ~ +0.0302%내에서 상호 데이터의 크기는 잘 일치함을 알 수 있다.

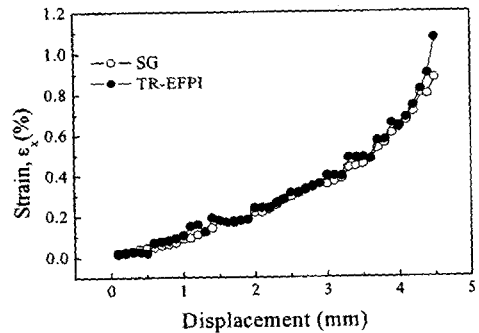


Fig. 6 Measurement of strain versus displacement of the composite laminate [0°/90°4/(0)/90°/0°] by strain gauge and TR-EFPI sensor

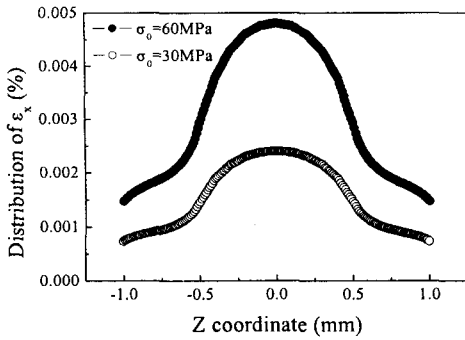


Fig. 7  $\epsilon_x$  distribution of  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$  specimen by FE analysis

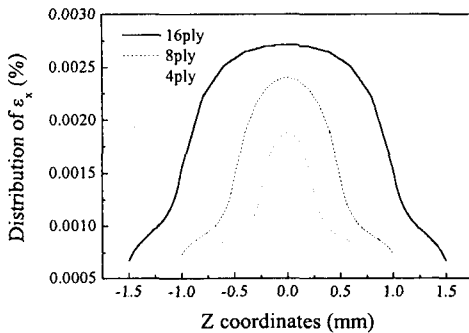


Fig. 8  $\epsilon_x$  distribution along the thicknesswise coordinate as a function of core layer plies by finite element analysis

#### 4.2 시험편 표면과 내부에서의 변형률 측정 실험

Fig. 6에 스트레인 게이지와 TR-EFPI 광섬유 센서로  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ 의 적층구성을 갖는 시험편의 변위에 따른 변형률 값을 나타내었다. 내부층에 삽입된 광섬유 센서의 변형률 값이 시험편 표면에서 측정된 스트레인 게이지의 변형률 값보다 약간 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 유한요소해석한 Fig. 7의 결과에서도 잘 나타나고 있다.  $90^\circ$ 층만을 적층하여 얻은 시험편의 인장강도(43MPa)보다 낮은 값(30MPa)과 높은 값(60MPa)으로 분포하중을 주어 유한요소해석한 결과에서도 시험편 표면( $z = -1, 1$ )에서의  $\epsilon_x$  값이 가장 낮게 나타나고 내부층으로 갈수록 높게 나타남을 알 수 있다. 그 원인은 시험편 길이방향으로 높은 탄성계수를 보이는 표면층 보다는 탄성계수가 낮은 내부층의  $\epsilon_x$ 가 크게 나타남 것으로 생각된다. Fig. 8은  $90^\circ$  내부층의 두께에 따

른  $\epsilon_x$ 분포를 나타낸 것이다.  $90^\circ$ 층(core layer)의 두께가 커질수록  $\epsilon_x$ 의 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 실험을 통해서도 나타났 다.  $90^\circ$ 층(core layer)의 두께가 커질수록 내부층에 삽입된 광섬유 센서의 파손시점이 빠르게 나타남 것과 동일한 결과라고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서 제작한 TR-EFPI 광섬유 센서와 포 일형 전기저항식 스트레인 게이지를 이용하여 GFRP 직교 적층판의 내부 변형률과 표면 변형률 을 측정하고 이 실험값을 유한요소해석 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

GFRP 직교 적층판의  $90^\circ$  내부층의 변형률과  $0^\circ$  외부층의 변형률 그리고 시험편 표면의 변형률을 측정 한 결과, 변형률 값은 내부층으로 갈수록 커 졌으며, 이는 유한요소해석 결과와 비슷한 경향 을 나타내었다. 그 원인은 시험편 길이방향으로 높은 탄성계수를 보이는 표면층 보다는 탄성계수 가 낮은 내부층의  $\epsilon_x$ 가 크게 나타남 것으로 생각 된다. 또한,  $90^\circ$ 층의 두께가 커질수록 길이방향 변형률 값이 크게 나타났는데, 이는 내부( $90^\circ$ )층 에 삽입된 광섬유 센서의 파손시점의 관찰결과와 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제 번호:2000-1-30400-004-3)의 일환으로 수행되었으 며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Sirkis, J. SPIE : Smart Sensing, *Processing and Instrumentation*, Vol. 2191, 1994, pp. 137-147.
- (2) Culshaw B, Gardiner PT. Smart structure - the relevance of optical fibers. *Fiber and Integrated Optics* 1993;2:353-73.
- (3) S. H. Kim, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 10, pp. 1869-1874, 1999.
- (4) T. A. Tran et al. *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, C. Robert Crowe, Editor, Proc. SPIE 2447, San Diego, California, 1996, pp. 312-323.