

복합재료 적층판에 삽입된 광섬유 센서의 기계적 특성에 관한 연구  
신금철\*, 이정주\*, 권일범\*\*

A study on the mechanical behavior of the optical fiber sensors  
embedded in the composite laminate.

Kum Cheol Shin\*, Jung Ju Lee\* and Il Bum Kwon\*\*

요약

지능형 복합재료 구조물(Smart Composite Structures) 사용 시 부하되는 인장하중과 복합재료의 경화 시 발생하는 열하중은 복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서의 기계적 거동에 직접적인 영향을 미친다. 게다가 복합재료의 적층 순서 및 코팅층의 유무에 따라 광섬유 센서 내의 응력 분포는 달라지게 된다. 또한, 복합재료 적층판 내에서 발생된 균열은 적층판 전체의 파괴뿐만 아니라 광섬유 센서의 파괴에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 인장하중 및 열하중이 가해지는 복합재료 적층판 내에 삽입된 광섬유 센서의 응력분포를 유한요소해석을 통해 알아보고, 복합재료 적층판의 적층 순서에 따른 영향과 광섬유 센서에 코팅을 하였을 경우 광섬유 센서 내의 응력분포에 미치는 영향을 알아보았다. 또, 인장실험을 통하여 적층판 내에서 발생한 균열이 광섬유 센서의 파괴에 미치는 영향을 알아보았다.

Abstract

Tensile stress loaded on smart composite structures and thermal stress occurred during the curing process of the smart composite materials with embedded optical fiber sensors affect directly the mechanical behavior of the embedded optical fiber sensors within the smart composite structures. Stress distribution within the optical fiber sensors varies with respect to the stacking sequence of the composite laminate and the coating conditions of the optical fibers.

The cracks occurred within the composite laminate affect not only the fracture of the composite laminate but also the fracture of the optical fiber sensors embedded within the composite laminate. In this study, firstly, stress distribution of the optical fiber sensors embedded within the composite laminate which is subjected to the tensile and thermal stresses was analyzed using Finite Element Method. And, secondly, the effect of the stacking sequence of the composite laminate and the coating conditions of the optical fiber sensors on the stress distribution of the optical fiber sensors was investigated. Finally, the effect of the crack occurred within the smart composite laminate on the fracture behavior of the optical fiber sensors was also observed through the tensile test.

1. 서론

\* 한국과학기술원 기계공학과 (Dept. of mechanical engineering, KAIST)

\*\* 한국표준과학연구원 (Korea Research Institute of Standards and Science)

<접수일자 : 1999년 9월 15일>

섬유강화 복합재료는 강철재료나 알루미늄재료에 비해서 높은 비강성( $E/\rho$ ), 비강도( $\sigma/\rho$ ) 특성과 뛰어난 감쇠효과 때문에 인공위성이나 항공기의 재료로 많이 사용되어 왔으며 복합재료를 이용한 자동차 부품 그리

고 공작기계 같은 기계 구조물에도 복합재료의 우수한 기계적 성질을 이용하기 위해서 적용되고 있다<sup>1), 2), 3)</sup>. 이와 같이 기계적 성능이 우수한 복합재료를 항공기나 인공위성, 자동차와 같은 구조물에 이용함에 따라 이러한 구조물의 기계적 거동을 모니터링하기 위하여 복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서에 관한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>4)</sup>.

Measures 등<sup>5), 6)</sup>은 최초로 광섬유 센서가 삽입된 복합재료 적층판의 인장 및 압축실험을 수행하였다. Mazur 등<sup>7)</sup>은 광섬유 센서가 삽입되는 구조물에서 복합재료의 강화섬유에 대한 광섬유의 배열방향, 광섬유 코팅층, 코팅층과 복합재료 모재 사이의 계면 강도에 관한 다양한 연구를 수행하였다. Tay 등<sup>8)</sup>은 유한요소 해석을 통하여 코팅층이 광섬유 센서에 미치는 영향과 복합재료 수지의 종류 및 강화 섬유의 적층 각도가 광섬유 센서에 미치는 영향에 관해 연구하였다. Blagojevic 등<sup>9), 10)</sup>은 케블라-에폭시(Kevlar-Epoxy) 복합재료에 삽입된 광섬유 센서가 층간 파괴 인성을 향상시킨다는 결과를 얻었다. 이것은 실리카(Silica)가 케블라 섬유에 비해 에폭시와의 접합강도가 우수하여 균열을 지연(Crack Arrestors)시키는 역할을 하는 것으로 나타났다.

Sansonetti 등<sup>11), 12)</sup>은 탄소섬유-에폭시(Graphite-Epoxy) 복합재료 내에 광섬유 센서를 삽입하여 다양한 실험을 수행하였는데 특히 코팅층을 다양하게 바꾸어서 실험을 하였다. Davidson과 Roberts<sup>13)</sup>는 유한요소 해석을 통하여 탄소섬유-에폭시 복합재료에 강화섬유에 평행하게 삽입된 광섬유 센서의 계면에서 발생하는 응력집중과 잔류 열응력에 관하여 연구하였다. Pak 등<sup>14)</sup>은 경계요소법을 사용하여 코팅층의 물성이 코팅층과 복합재료간의 변형을 전이에 미치는 영향을 계산하기 위하여 탄성해를 구하였다.

복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서는 여러 가지 하중 상태를 겪게 되는데, 특히 구조물에서 많이 발생하는 인장 하중 및 굽힘 하중을 비롯하여 복합재료의 경화 시 발생하는 열에 의한 열응력(Thermal Stress)이 중요한 부분을 차지한다. 일반적으로 복합재료와 광섬유 센서의 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion)는 차이가 커서 열응력이 구조물의 파괴 메커니즘(Failure Mechanism)의 중요한 요소로 작용할 것으로 기대된다. 복합재료의 경화 시 복합재료와 광섬유 센서의 열팽창 계수의 차이에 의해 발생하는 열응

력은 복합재료의 적층 각도(Stacking Sequence)에 따라서 차이를 보이는데 복합재료의 적층 각도가 0°에 가까울수록 적층판의 열팽창 계수와 광섬유 센서의 열팽창 계수간의 차이가 적고 적층 각도가 90°에 가까울수록 광섬유 센서와 복합재료의 열팽창 계수의 차이가 크다.

복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서에 발생하는 응력은 광섬유 센서 자체의 코팅에 의해서도 다른 양상을 보일 수 있다. 일반적으로 광섬유 센서를 사용할 경우에 광섬유 센서에 코팅된 부분을 벗겨서 사용하는데, 최근에는 광섬유 센서의 보호를 위하여 코팅된 상태 그대로 센서로 사용하는 방법에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

광섬유 센서를 복합재료 내에 삽입하여 사용할 경우 하중이 증가함에 따라 균열이 발생, 성장하여 광섬유 센서의 파괴에 영향을 미치게 된다. 또한 광섬유 센서에 코팅을 하여 사용할 경우에는 코팅층에 사용되는 재료의 탄성계수가 광섬유에 비해 훨씬 작을 뿐 아니라 유연성이 커서 복합재료 모재에서 발생한 균열의 성장을 지연하는 효과를 나타낸다.

본 논문에서는 코팅한 광섬유 센서와 코팅하지 않은 광섬유 센서를 적층 순서가 다른 복합재료 적층판에 삽입하였을 때, 인장하중 및 열하중을 가한 경우 광섬유 센서 내에서 발생하는 응력의 크기를 유한요소해석을 이용하여 계산하였다. 또, 코팅된 광섬유 센서와 코팅되지 않은 광섬유 센서를 복합재료 내에 삽입하여 사용할 경우 광섬유 센서 및 복합재료 적층판이 파괴될 때까지 광강도의 변화를 측정하여 코팅층이 광섬유 센서의 파괴에 미치는 영향을 관찰하였고 적층판의 균열발생 및 파괴모드를 관찰하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석 모델

복합재료 내에 광섬유 센서를 삽입할 경우 광섬유 센서에 접한 복합재료의 적층 방향에 따라 응력 분포가 달라진다. 특히 광섬유 센서에 접한 복합재료의 적층 방향이 광섬유 센서의 삽입 방향과 평행인 경우에는 모재 모입 영역(Resin Rich Area)이 형성되지 않는데 비해 복합재료의 적층 방향이 수직인 경우에는 모재 모입 영역이 형성되어 광섬유 센서 내의 응력 분포에 영향을 미친다. 광섬유 센서의 파손을 보호하기 위

하여 코팅층을 사용하는 경우가 많은데 일반적으로 광섬유 센서를 코팅하기 위해 사용되는 재료는 광섬유 센서에 비해 탄성계수가 훨씬 작은 반면 열팽창 계수는 훨씬 커서 광섬유 센서에 코팅을 하지 않았을 경우에 비해 광섬유 센서 내의 응력 상태가 많이 달라진다. 그러므로 복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서의 응력 특성을 비교해 보기 위하여 다음과 같은 4개의 해석 모델을 가정하였다. (Fig. 1(a)-(d))

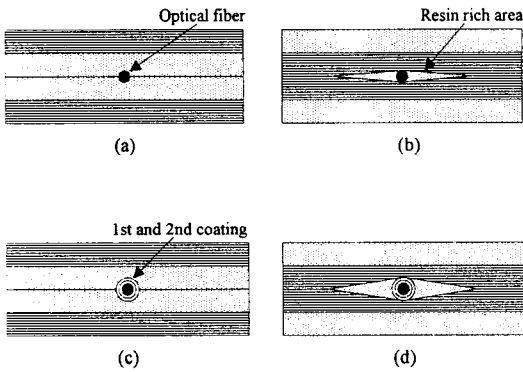


Fig. 1. Sectional shape of the four type models for the finite element analysis: (a) without resin rich area and coating layers; (b) with resin rich area and without coating layers; (c) without resin rich area and with coating layers; (d) with resin rich area and coating layers.

- (a) 코팅하지 않은 경우, 모재 모임 영역이 형성되지 않는 경우 (Type A)
- (b) 코팅하지 않은 경우, 모재 모임 영역이 형성된 경우 (Type B)
- (c) 코팅한 경우, 모재 모임 영역이 형성되지 않는 경우 (Type C)
- (d) 코팅한 경우, 모재 모임 영역이 형성된 경우 (Type D)

위의 4가지 해석 모델의 경우에 광섬유 센서에 수직인 단면을 관찰하면 중심에 대하여 대칭을 이루고 있음을 알 수 있는데 해석의 편리를 위하여 단면의 1/4만을 모델링(Modeling)하였고 대칭 경계조건을 부가하였다. 광섬유 센서에 평행한 방향에 대해서는 중앙부분에 대하여 대칭이므로 중앙부분에 대하여 변위를 구속하여

1/2만을 해석하였다. 그러므로 실제 모델에 비해 1/8만을 해석모델에 사용하였다. 하중 조건은 적층판 양방향에 대해 인장하중을 가하는 경우와 복합재료 경화 시에 발생하는 열응력을 고려하기 위하여 초기 온도 120°C에서 최종 온도 20°C로 온도가 변화하는 열하중을 고려하였다.

Table 1. Material properties of the glass/epoxy composite material.

Property	Symbol	Value
Longitudinal Tensile Modulus (GPa)	$E_1$	43.5
Transverse Tensile Modulus (GPa)	$E_2, E_3$	5
In-plane Shear Modulus (GPa)	$G_{12}, G_{13}$	5
Out-plane Shear Modulus (GPa)	$G_{23}$	2.5
In-plane Poisson's Ratio	$\nu_{12}, \nu_{13}$	0.31
Out-of-plane Poisson's Ratio	$\nu_{23}$	0.45
Longitudinal Tensile Strength (MPa)	$X^t$	1000
Transverse Tensile Strength (MPa)	$Y^t$	50
Shear Strength (MPa)	S	50
Longitudinal Coefficient of Thermal Expansion ( $10^{-6}$ strain/°C)	$\alpha_1$	6.3
Transverse Coefficient of Thermal Expansion ( $10^{-6}$ strain/°C)	$\alpha_2$	19.8

Table 2. Material properties of the optical fiber, coating materials and resin.

Property	Symbol	Value			
		Optical fiber	1st coating material	2nd coating material	Resin
Modulus (GPa)	E	71	1.68 MPa	0.613	3.44
Poisson's Ratio	$\nu$	0.14	0.49	0.33	0.34
CTE ( $10^{-6}$ strain/°C)	$\alpha$	0.5	24	14	25

\* CTE : Coefficient of Thermal Expansion

해석 모델의 크기는 2mm×0.6mm×20mm이며, 해석에 사용된 재료의 물성을 표 1, 2에 나타내었다.

- 7. 코팅하지 않은 경우, 모재 모임 영역이 형성되지 않는 경우 (Type A)

복합재료의 적층 각도는  $[90_2/0_2/OF/0_2/90_2]$ 이며 복합재료의 적층 방향과 광섬유 센서의 삽입 방향이 동일하므로 모재 모임 영역은 형성되지 않는다. 사용한 요소는 6-node wedge element와 8-node brick element의 3차원 요소를 사용하였고, 요소와 절점의 수는 각각 20800개, 23103개이다. 모델링한 단면의 모습을 Fig. 2(a)에 나타내었다.

ㄴ. 코팅하지 않은 경우, 모재 모임 영역이 형성된 경우 (Type B)

복합재료의 적층 각도는  $[0_2/90_2/OF/90_2/0_2]$ 이며 복합재료의 적층 방향과 광섬유 센서의 삽입 방향이 수직이므로 Type A와는 달리 모재 모임 영역이 형성된다. 사용한 요소는 Type A와 동일하고 요소와 절점의 수는 각각 23550개, 25551개이다. 모델링한 단면의 모습을 Fig. 2(b)에 나타내었다.

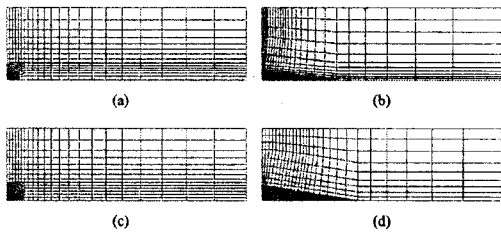


Fig. 2. Finite element meshes for the four type models: (a) without coating layers and resin rich area; (b) without coating layers and with resin rich area; (c) with coating layers and without resin rich area; (d) with coating layers and resin rich area.

ㄷ. 코팅한 경우, 모재 모임 영역이 형성되지 않는 경우 (Type C)

복합재료의 적층 각도는 Type A와 동일하며 광섬유 센서의 외부에 코팅층이 추가되었다. 코팅층은 재료의 종류에 따라 1차 코팅층과 2차 코팅층으로 분리되어 모델링되었다. 모재 모임 영역은 형성되지 않고 모델링에 사용된 요소와 절점의 수는 22600개, 25092개이다. 모델링한 단면의 모습을 Fig. 2(c)에 나타내었다.

ㄹ. 코팅한 경우, 모재 모임 영역이 형성된 경우 (Type D)

복합재료의 적층 각도는 Type B와 동일하며 광섬유 센서의 외부에 코팅층이 추가되었다. 코팅층의 모델링은 Type C의 경우와 동일하고 모재 모임 영역이 형성되었다. 사용된 요소와 절점의 수는 26850개, 28223개이다. 모델링한 단면의 모습을 Fig. 2(d)에 나타내었다.

## 2.2 해석 결과

복합재료 적층판에 하중을 가했을 때 광섬유 센서 내의 응력 분포를 살펴보기 위해 광섬유 센서의 길이 방향에 대해 응력 분포를 구하였다. 광섬유 센서의 길이 및 단면에 따른 응력 분포를 살펴본 결과, Fig. 3에 표시된 A부분이 가장 크게 나타났다. A부분은 광섬유 센서의 중앙 부분 중 윗부분으로서 Z축 방향 지지를 하고 있는 부분이다. 그러므로 이후의 응력 분포 그림은 광섬유 센서의 윗부분의 응력의 분포를 나타낸다.

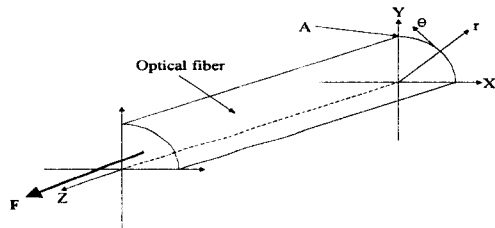


Fig. 3. Coordinates of the optical fiber sensor and point selected to measure the stress distribution of the optical fiber sensor embedded in the composite laminate.

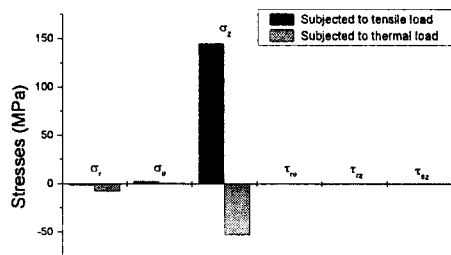


Fig. 4. Stresses in the embedded optical fiber sensor without resin rich area and coating layers.

Fig. 4에는 모재 모임 영역이 형성되지 않고 코팅층도 없는 경우에 광섬유 센서 발생하는 응력의 크기를 나타낸다. 하중 방향과 동일한 방향의 응력인  $\sigma_z$ 의 크기가 다른 응력 값에 비해 훨씬 크게 나타나고 있는데,

특히  $\tau_{rz}$ 의 경우에는 복합재료의 강성이 광섬유 센서의 강성에 비해 작아서 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나, 광섬유 센서와 접한 복합재료 부분의 전단응력은 크게 나타난다. 그러므로, 4가지 모델에 대하여 전체 응력의 크기 중 가장 크게 나타나는  $\sigma_z$ 의 크기를 서로 비교하여 보았다.

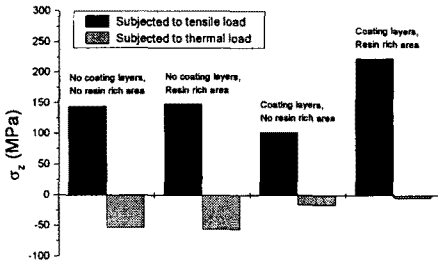


Fig. 5. Longitudinal tensile stress and residual thermal stress in the embedded optical fiber of the four type models.

Fig. 5는 인장하중을 가할 경우와 열하중을 가할 경우의 4가지 모델에 대한  $\sigma_z$ 의 크기를 비교하여 나타냈다. 인장하중을 가할 경우에는 코팅을 안한 경우에 모재 모입 영역이 있는 경우와 없는 경우에 거의 비슷하게 나타났는데 이것은 광섬유 센서와 접한 복합재료의 적층 각도와 큰 상관이 없다는 것을 의미한다. 오히려 적층판 전체의 유효 강성(Effective Stiffness)의 값에 크게 상관한다고 할 수 있는데 이것은 코팅한 광섬유 센서를 삽입한 경우에 더 분명하게 나타난다. 코팅층이 있을 때, 모재 모입 영역이 형성된 경우에는 모재 모입 영역이 차지하는 면적 때문에  $0^\circ$  층(광섬유 센서의 삽입 방향과 강화섬유가 이루는 각도)의 면적 비율이 상대적으로 낮아서 전체 적층판의 유효 강성이 낮아지는 효과가 생긴다. 그러나, 모재 모입 영역이 없는 경우에는  $0^\circ$  층의 면적 비율이 크게 줄어들지는 않기 때문에 광섬유 센서에 발생하는 응력의 크기는 증가하지 않고 오히려 코팅층의 강성이 낮아 전단변형을 통해 전달하는 하중이 줄어들어 광섬유 센서에 발생하는 응력의 크기는 줄어든다.

열하중이 가해졌을 경우에도 같은 현상이 발생하는 데, 코팅층이 없는 경우에는 열하중에 의해 잔류응력이 압축응력으로 크게 나타나지만 코팅층이 있는 경우에는 잔류 응력이 작게 나타난다. 열하중에 의한 잔류 응력은 4가지 모델에서 모두 압축응력으로 나타났는데

이로부터 인장하중을 받는 구조물에 유리하게 작용할 것을 알 수 있다. 그리고, 코팅층이 있을 때, 모재 모입 영역이 있을 경우에는 모재 모입 영역을 최소화하기 위해 복합재료 경화 시 압력을 높게 하여  $0^\circ$  층의 면적을 크게 하면 광섬유 센서 내에 발생하는 응력의 크기를 줄일 수 있다.

### 3. 인장실험

광섬유 센서는 취성이 강하여 복합재료 적층판에서 형성된 균열이 성장하여 광섬유 센서에 이르면 쉽게 파손되기 때문에 광섬유 센서를 보호할 필요가 있는 경우에는 코팅을 하여 사용하는 경우가 많다. 코팅층의 경우 강성이 낮은 대신 충격 흡수 능력이 뛰어나고 유연하기 때문에 복합재료에서 형성된 균열이 성장하여 코팅층에 도달하여도 광섬유 센서를 안전하게 보호할 수 있다. 그러나, 코팅층의 낮은 강성으로 인해 전단변형이 크게 나타나 복합재료와 광섬유 사이에 미끄러짐이 발생하게 된다. 그러므로 광섬유 센서와 1차 코팅층 사이에서 계면 분리가 발생하여 광섬유 센서에서 받은 신호에 영향을 미치게 된다.

본 실험에서는 코팅층이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 인장실험을 수행하여 광섬유 센서 내의 광이 새어 나오는 것을 포착하여 광섬유 센서의 파손을 감지하였다. 이때 복합재료 적층판이 건디는 하중과 변형량을 동시에 측정하여 코팅층이 있을 경우와 없을 경우에 따른 광섬유 센서 파손에 관하여 실험하였다.

#### 3.1 실험시편 및 실험방법

복합재료를 하중 방향과 평행하게 적층한 경우에는 인장하중을 가함에 따라 하중 방향과 수직인 방향으로 균열이 발생하지 않을 뿐만 아니라 균열이 성장하여도 균열 성장 지연 효과를 나타내기도 한다. 그러나, 복합재료를 하중 방향에 수직인 방향으로 적층할 경우에는 인장하중을 가함에 따라 균열이 쉽게 발생하게 된다. 그러므로, 광섬유 센서 주위에 적층된 복합재료의 적층 방향이 광섬유 센서의 파괴에 직접적으로 영향을 미칠 것임을 예측할 수 있다.

취성이 강한 광섬유 센서가 쉽게 부서지지 않도록 강성이 낮은 대신 충격 흡수 능력이 뛰어나고 연성이 좋은 재료를 광섬유 센서에 코팅하여 사용하기도 하는데, 이것은 복합재료 적층판에서 생성, 성장한 균열이 광섬

유 센서에까지 성장하는 것을 지연하는 효과를 나타낸다.

복합재료의 적층 순서의 영향과 코팅층의 효과를 알아보기 위하여 광섬유 센서와 접한 부분에 90°층이 삽입된 경우와 균열이 쉽게 발생하지 않는 0°층이 삽입된 두 가지 경우에 대하여 각각 시편을 제작하였고, 코팅층이 있는 경우와 없는 경우에 대해 시편을 제작하여 실험하였다. 실험시편의 적층 순서 및 실험시편의 단면의 형상은 Fig. 1(a)-(d)와 동일하다.

인장실험 장치인 10 ton MTS (Material Test System)에 시편을 장착하여 1 mm/min의 인장 속도로 인장 실험하여 복합재료 시편이 파괴될 때까지 실험하였다. 시간에 따른 변형량과 하중을 측정하였으며 동시에 광량에 따른 광강도를 측정하였다.

**3.2 실험결과**

4가지 실험시편에 대하여 실험한 결과를 Fig. 6(a)-(d)에 나타내었다. 코팅하지 않은 시편에 대해 실험한 결과를 살펴보면 Type A의 경우에 광섬유 센서에 접한 적층판의 적층 방향이 하중 방향과 동일하여 수직 방향의 적층판에서 형성된 균열의 성장을 지연하는 효과를 나타내므로 Type B에 비해서 광섬유 센서의 파단 하중이 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 그림에서 동그랗게 표시한 부분에서부터 하중에 대해 수직 방향으로 적층된 적층판에서 균열이 생성되기 시작한 부분으로 볼 수 있는데 Type A의 경우 균열이 형성된 이후에도 광섬유 센서가 파단되지 않은 것을 알 수 있다. 그러나, Type B의 경우에는 균열이 형성된 후 곧 광섬유 센서가 파단된 것을 알 수 있다. 그러므로, 적층판의 적층 각도가 균열 발생 및 성장에 영향을 미칠 뿐만 아니라 광섬유 센서의 파손에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a), (b)는 코팅하지 않은 광섬유 센서를 삽입한 적층판이 파손된 모습을 촬영한 것이다. Fig. 8(a), (b)는 복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서가 파손되어 광이 새어 나오는 것을 촬영한 것으로 90°층에서 많은 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다.

코팅한 시편에 대해 실험한 결과를 살펴보면 복합재료 적층판이 파손될 때까지 광섬유 센서의 파손이 없음을 알 수 있는데, 이것은 적층판에서 생성, 성장한 균열이 코팅층에 도달하여 균열의 성장이 지연되었기 때문으로 생각된다. 게다가 광섬유 센서에 코팅된 층에

서 미끄러짐이 발생하여 적층판에 가해진 하중과 변형량이 광섬유 센서에 전달되지 못한 것도 또 다른 하나의 원인으로 생각된다. 위와 같은 이유로 인하여 코팅을 한 광섬유 센서를 이용하여 적층판의 대변형량을 측정하는 데에는 적합하지 않음을 알 수 있는데 변형량이 작은 경우에는 미끄러짐이 발생하지 않는 정도까지 측정이 가능할 것으로 생각된다. Fig. 7(c), (d)는 코팅한 광섬유 센서를 삽입한 적층판의 파괴된 모습을 촬영한 것이다. 코팅하지 않은 광섬유 센서를 삽입한 적층판의 파괴된 모습과 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다.

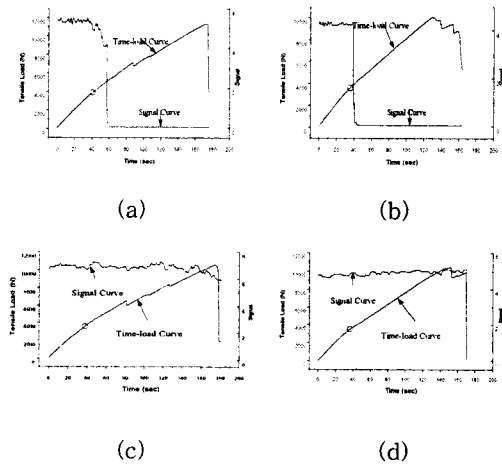
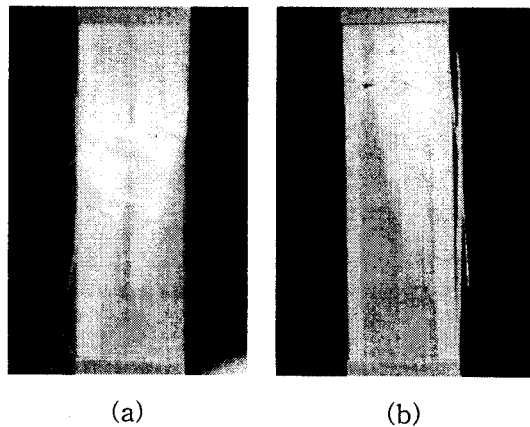


Fig. 6. Tensile load and signal results for the four type models: (a) without resin rich area and coating layers; (b) with resin rich area and without coating layers; (c) without resin rich area and with coating layers; (d) with resin rich area and coating layers.



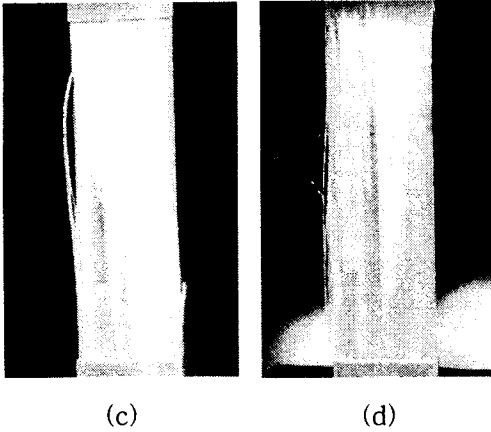


Fig. 7. Photographs of the fractured composite laminate specimens: (a) with  $[90_2/0_2/OF$  without coating layers/ $0_2/90_2]_r$  stacking sequence; (b) with  $[90_2/0_2/OF$  with coating layers/ $0_2/90_2]_r$  stacking sequence; (c) with  $[0_2/90_2/OF$  without coating layers/ $90_2/0_2]_r$  stacking sequence; (d) with  $[0_2/90_2/OF$  with coating layers/ $90_2/0_2]_r$  stacking sequence.

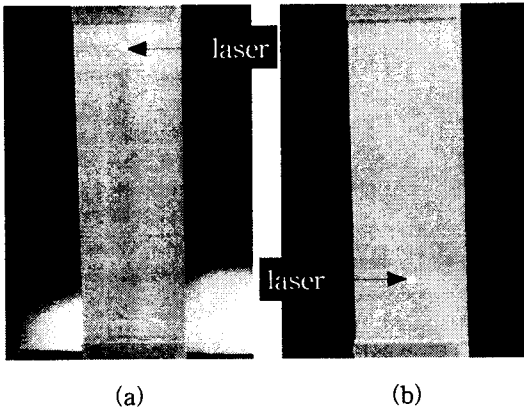


Fig. 8. Photographs of the fractured optical fiber in the composite laminate: (a) with  $[90_2/0_2/OF$  without coating layers/ $0_2/90_2]_r$  stacking sequence; (b) with  $[0_2/90_2/OF$  without coating layers/ $90_2/0_2]_r$  stacking sequence.

#### 4. 결론

복합재료 적층판에 삽입된 광섬유 센서에 관한 응력 해석을 위해 모델링된 4가지 모델에 대하여 해석한 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 광섬유 센서의 응력 분포에 가장 큰 영향을 미치는 응력은  $\sigma_z$ 로서 광섬유 센서에 접한 복합재료의 적층 각도에 영향을 받기보다는 적층판 전체의 유효 강성에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 그러므로 모재 모임 영역이 형성되는 적층 순서에서는 복합재료 경화 시 경화 압력을 크게 하여 모재 모임 영역을 최소화하면  $0^\circ$  층이 차지하는 면적을 크게 할 수 있어서 광섬유 센서가 받는 응력의 크기를 줄일 수 있다.
2. 광섬유 센서에 발생하는 열응력은 압축응력으로 작용하여 인장하중을 받는 구조물에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.
3. 광섬유 센서에 사용되는 코팅층은 강성이 낮아서 복합재료 적층판과 광섬유 센서 사이에 전단변형을 크게 유발하는 것으로 나타났다. 또한 코팅층의 열팽창 계수는 크지만 강성이 낮아 열응력 발생이 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

광섬유 센서가 삽입된 네 가지 형태의 복합재료 적층판에 인장하중을 가하여 광섬유와 적층판이 파괴될 때까지 광강도 신호 및 하중 신호를 받아 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. 복합재료 내에 삽입된 광섬유 센서의 파괴는 광섬유 센서에 접한 복합재료의 적층 방향에 의해 영향을 받는데 복합재료의 강화섬유의 방향이 광섬유 센서와 수직으로 적층된 경우에는 적층판에서 발생한 균열의 진전에 의해 발생하고 평행하게 적층된 경우에는 광섬유 센서 자체의 인장강도에 따라 파괴된다.
2. 인장하중을 받는 구조물에 광섬유 센서를 삽입할 경우에는 광섬유 센서 주위에 하중방향과 동일한 방향으로 복합재료를 적층하여 균열 진전을 지연시켜야 한다.
3. 광섬유 센서에 사용된 코팅층은 복합재료 적층판에서 발생한 균열의 진전을 지연하는 효과를 나타내지만 코팅층의 강성이 낮아 전단변형이 크게 발생할 뿐 아니라 광섬유 센서와 코팅층의 사이에서 계면분리가 발생할 수 있다.

#### 감 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(과제번호 : 96-0200-05-01-3)의 지원 하에 수행된 것입니다. 이에 대해 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1988.
- [2] M. M. Schwartz, *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [3] D. G. Lee, H. C. Sin and N. P. Suh, "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," *Annals of the CIRP*, Vol. 27, No. 1, pp. 365-369, 1985.
- [4] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [5] R. M. Measures, "Fiber Optic Smart Structures Program at UTIAS," *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 1170, pp. 92-108, 1990.
- [6] R. M. Measures, N. D. W. Glossop, J. Lymer, M. LeBlanc, J. West, S. Dubois, W. Tsaw and R. C. Tennyson, "Structurally Integrated Fiber Optic Damage Assessment System for Composite Materials," *Appl. Opt.* Vol. 28, pp. 2626-2633, 1989.
- [7] C. J. Mazur, G. P. Sendeckyj and D. M. Stevens, "Air Force Smart Structures/Skins Program Overview," *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 986, pp. 19-29, 1989.
- [8] A. Tay, D. A. Wilson and L. Wood, "Strain Analysis of Optical Fibers Embedded in Composite Materials Using Finite Element Modeling," *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 1170, pp. 521-533, 1990.
- [9] B. Blagojevic, W. Tsaw, K. McEwen and R. M. Measures, "The Influence of Embedded Optical Fibers on the Interlamina Fracture Toughness of Composite Materials," *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, Brunswick, ME, 1989.
- [10] A. B. Strong, *Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1989.
- [11] P. Sansonetti, M. Lequime, D. Engrand, P. Ferdinand, J. Plantey, D. H. Bowen, R. Davidson, S. S. J. Roberts, M. Crowders, M. Pleydell, P. Culshaw, C. Michie, M. Martinelli, P. Escobar and B. Fornari, "Intelligent Composites Containing Measuring Fiber Optic Networks for Continuous Self Diagnosis," *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 1170, pp. 211-223, 1990.
- [12] S. S. J. Roberts and R. Davidson, "Mechanical Properties of Composite Materials Containing Embedded Fiber Optic Sensors," *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* Vol. 1588, pp. 326-341, 1992.
- [13] R. Davidson and S. S. J. Roberts, *Do Embedded Sensor Systems Degrade Mechanical Performance of Host Composites?*, In *Active Materials and Adaptive Structures*(G. J. Knowles, ed.), pp. 109-114, Institute of Physics, London, 1991.
- [14] Y. E. Pak, V. DyReyes and E. S. Schmuter, *Micromechanics of Fiber Optic Sensors*, In *Active Materials and Adaptive Structures*(G. J. Knowles, ed.), pp. 121-128, Institute of Physics, London, 1991.

著 者 紹 介



**신 금 철**  
 1972년 12월 12일생. 1995년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(학사). 1997년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1997년 - 현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 주관심분야 : 복합구조물 및

접합조인트 설계

**이 정 주**

『센서학회지 제 7권 4호』 논문 98-7-4-08, p.285 참조  
 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수



**권 일 범**  
 1963년 5월 12일생. 1987년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업(학사). 1989년 한국과학기술원 기계공학과 항공전공(석사), 1997년 한국과학기술원 항공우주공학과(박사), 주관심분야 : 광섬유 센서

개발 및 응용, 스마트 구조물 설계, 해석 및 제작, 현재 한국표준과학연구원 연구원