

## 코팅된 분포형 광섬유 센서의 변형률 전달률

윤상영\* · 권일범\*\* · 유효선\* · 김은호\*†

# Strain Transmission Ratio of a Distributed Optical Fiber Sensor with a Coating Layer

S. Y. Yoon\*, I.B. Kwon\*\*, H.S. Yu\*, E. Kim\*†

**ABSTRACT:** We investigate strain transmissions of a surface bonded distributed optical fiber sensor considering strain variation according to positions. We first derive a strain transmission ratio depending on a wavelength of a strain distribution of the host structure from an analysis model. The strain transmission ratio is compared with numerical results obtained from the finite element method using ABAQUS. We find that the analytical results agree well with the numerical results. The strain transmission ratio is a function of a wavelength, i.e. the strain transmission ratio decreases (increases) as the wavelength of the host strain decreases (increases). Therefore, if an arbitrary strain distribution containing various wavelengths is given to a host structure, a distorted strain distribution will be observed in the distributed optical fiber sensor compare to that of the host structure, because each wavelength shows different strain transmission ratio. The strain transmission ratio derived in this study will be useful for accurately identifying the host strain distribution based on the signal of a distributed optical fiber sensor.

**초 록:** 본 연구에서는 구조물에 부착된 분포형 광섬유 센서의 변형률을 정밀하게 분석하기 위해 위치에 따른 변형률의 변화를 고려하여 광섬유 센서의 변형률 전달률을 분석하였다. 표면에 부착된 코팅된 광섬유 센서의 모델로부터 해석적으로 광섬유 센서의 변형률 전달률을 유도하였으며, 유도된 변형률 전달률은 유한요소해석을 통해 수치적으로 해석한 결과와 비교 검증하였다. 주 구조물의 변형률이 동일한 파장을 가지며 변하는 경우 센서의 변형률 전달률은 위치에 따라 동일한 값을 보였으며, 따라서 변형률 분포의 형상은 왜곡되지 않는다. 하지만 위치에 따라 변형률 파장이 변하면 변형률의 전달률이 위치에 따라 달라져 변형률 분포의 형상이 왜곡될 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 얻어진 파장에 따른 변형률 전달률은 분포형 광섬유 센서로부터 주 구조물의 변형률 분포를 정밀하게 추정하는데 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

**Key Words:** 광섬유 센서(Optical fiber sensor), 복합재료(Composite material), 복합재 손상(Composite damage), 변형률 전달률(Strain transmission ratio), 구조건전성 감지(Structural health monitoring)

## 1. 서 론

우주 항공 구조물이나 풍력터빈 같은 대형 구조물에는

비강도, 비강성이 높은 탄소섬유 강화 플라스틱 복합재를 많이 사용한다. 복합재 구조물은 제작, 운송, 운용 중에 층간분리, 기지파손, 섬유파손과 같은 다양하고 복잡한 내부

Received 26 July 2018, received in revised form 13 November 2018, accepted 16 November 2018

\*Department of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University

\*\*Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standard and Science

\*†Automotive Hi-Technology Research Center and LANL-CBNU Engineering Institute-Korea, Chonbuk National University & Department of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, Corresponding author (E-mail: eunhokim@jbnu.ac.kr)

손상이 발생할 수 있으며, 이러한 내부 결함은 외부에서 발견하기 어려운 경우가 많다. 최근 구조물의 안전성을 향상시키기 위해서 이러한 손상들을 감지하고 분석하기 위한 구조건전성 감지기술(structural health monitoring) 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5].

이 중에서도 특히 광섬유 센서를 이용하여 복합재 구조물에 가해지는 충격을 감지하거나 복합적층판의 과도한 변형률이나 균열을 검출하는 등의 연구가 다양하게 진행되고 있다[6-8].

광섬유 센서는 기존의 다른 센서들에 비해 대형 구조물에 적용하거나 혹독한 환경을 견디는데 있어 이상적인 센서로 소개되어 왔다. 일반적인 광섬유 센서는 탄성물질인 실리카 유리로 만들어 졌기 때문에 외부변형 및 온도에 선형으로 반응하는 성질을 가지고 있다[9,10]. 하지만 이러한 광섬유 센서는 쉽게 깨지는 취약성으로 인해 센서를 보호하기 위해 패키징(packaging)을 하거나 광섬유에 보호 코팅을 하는 방법들이 사용되고 있다[11,12]. 또한, 패키징과 코팅은 센서에 전달되는 변형률을 감소시켜 구조물의 변형률 신호를 왜곡시킬 가능성이 있어 센서의 부착 위치의 변형률을 정확하게 파악하기 위해서는 패키징과 접착제에 따른 변형률 전달률을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 패키징된 광섬유 센서에 전달되는 변형률 전달률에 대한 다양한 해석적/실험적 연구가 진행되어왔다[11-16].

최근에는 특정 위치의 변형률만 측정하는 FBG 형태의 광섬유 센서와 달리 긴 광섬유 전체를 이용하여 광범위한 영역의 변형률을 측정하는 분포형 광섬유 센서에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있다[5]. 분포형 광섬유 센서는 구조물의 넓은 부분에 부착 혹은 삽입되어 넓은 영역의 변형률 분포를 한번에 파악할 수 있는 장점이 있다. 이 경우 센서를 보호하기 위해 특정 부분을 패키징하는 방법보다는 코팅을 하는 방법이 더 용이하다. 최근 코팅된 분포형 광섬유 센서에 균일한 변형률이 주어졌을 때 변형률 전달률에 대한 연구가 진행되었다[13]. 또한 소성변형을 하는 물질로 코팅된 광섬유 센서의 변형 후 잔류 변형률을 이용하여 충격 저장 센서로의 가능성을 확인하는 실험적 연구도 보고되었다[5].

분포형 센서의 경우 구조물의 형태 및 설치 위치에 따라 국부적으로 변형률이 달라질 수 있으며, 변형률의 변화에 따라 광섬유에 전달되는 변형률의 전달률도 달라질 수 있다. 특히, 복합재료의 크랙(crack) 주변에서는 급격한 변형률의 변화가 나타나고, 충격 손상의 경우는 층간분리, 기지 파손, 섬유파손 등의 파손이 복합적으로 발생하여 변형률이 위치에 따라 급격히 변화되는 특성을 보인다. 따라서 분포형 광섬유 센서의 다양한 응용 가능성을 고려할 때, 변형률의 급격한 변화를 고려한 변형률 전달률에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서는 위치에 따른 변형률의 변화를 고려한 광

섬유 센서의 변형률 전달률을 분석하기 위해 해석적/수치적 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 구조물에 부착된 광섬유 센서 모델을 기반으로 해석적으로 파장에 따른 변형률의 전달률을 유도하였으며, 유한요소 해석을 통해 이를 검증하였다.

## 2. 해석 모델

본 연구에서 사용한 해석 모델은 구조물의 표면에 부착된 광섬유 센서를 단순화한 모델로 선행연구에서 제시한 모델을 이용하였다[9,10,16]. Fig. 1은 해석 모델을 나타내며, 광섬유 센서(OFS), 광섬유 센서(OFS)의 코팅 층, 복합재와 코팅된 광섬유 센서(OFS)를 부착시키는 접착 층, 복합재로 이루어진 주 구조물(Host)로 총 4개의 층으로 구성된다. 각 층의 주요 치수 및 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

해석 모델에서 모든 재료는 선형 탄성 거동을 하는 것으로 가정하였다. 또한 모든 층은 완전한 접합을 이루고 있으며, 축 방향(길이방향, z-축) 응력만 받는다는 가정하였다. 위의 가정들로부터 광섬유 센서의 변형률( $\epsilon_f$ )과 주 구조물의 변형률( $\epsilon_h$ ) 관계식을 다음과 같이 유도할 수 있다[13,16].

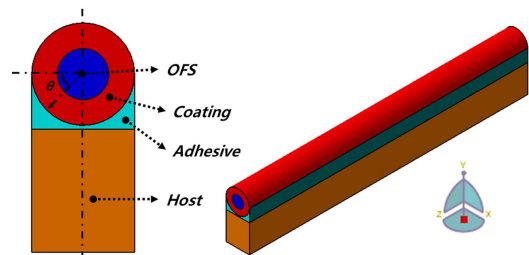


Fig. 1. Analysis model of an attached OFS on the surface of a structure

Table 1. Dimensions and mechanical properties of theoretical model [13]

Descriptions	Symbols	Values (Units)
Young's modulus of OFS	$E_f$	73 (GPa)
Poisson's ratio of OFS	$\nu_f$	0.17
Young's modulus of Coating	$E_c$	69 (GPa)
Poisson's ratio of Coating	$\nu_c$	0.33
Young's modulus of Adhesive	$E_a$	3 (GPa)
Poisson's ratio of Adhesive	$\nu_a$	0.35
Young's modulus of Host	$E_h$	168.1 (GPa)
Poisson's ratio of Host	$\nu_h$	0.26
Outer radius of OFS	$r_f$	62.5 ( $\mu\text{m}$ )
Outer radius of Coating	$r_c$	125 ( $\mu\text{m}$ )
Minimum thickness of Adhesive	$t_{\min}$	10 ( $\mu\text{m}$ )
Maximum thickness of Adhesive	$t_{\max}$	$t_{\min} + r_c$ ( $\mu\text{m}$ )
Length of model	$L_b$	(Parameter)
Height of Host	$h$	0.25 (m)

$$\varepsilon_f''(z) - \lambda^2 \varepsilon_f(z) = -\lambda^2 \varepsilon_h(z) \quad (1)$$

이때  $\lambda$ 는 재료의 기계적 물성과 형상에 의해 결정되는 상수이며, 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_c \cdot \text{const.B}(\text{const.C} \cdot E_f + E_h)}{E_h \cdot E_f}} \cdot \int_0^\pi f(\theta) d\theta \quad (2)$$

여기서,  $f(\theta)$ 는 접착층의 변형이 전단변형의 영향만 받는다는 가정하에 코팅층과 접착층의 관계로부터 식 (3)과 같이 유도된다.

$$f(\theta) = \frac{G_a G_c}{G_a \left( r_c \ln \frac{r_c}{r_f} \right) + G_c (t_{\max} - r_c \sin \theta)} \quad (3)$$

또한,  $\text{Const.B}$ 와  $\text{Const.C}$ 는 계산식을 간단히 표기하기 위한 상수이며 식 (4), (5)와 같이 계산된다.

$$\frac{1}{\text{const.B}} = \pi r_f^2 - r_c \int_0^\pi f(\theta) \frac{E_c}{2E_j G_c} \left\{ r_c^2 \ln \left( \frac{r_c}{r_f} \right) + \frac{r_f^2 - r_c^2}{2} \right\} d\theta + \frac{\pi E_c (r_c^2 - r_f^2)}{E_f} \quad (4)$$

$$\text{const.C} = \frac{\pi \left( r_f^2 + \frac{E_c (r_c^2 - r_f^2)}{E_f} \right)}{2hr_c} \quad (5)$$

각 식에 사용된 변수의 정의와 해석 모델의 물성 값은 Table 1과 같다.

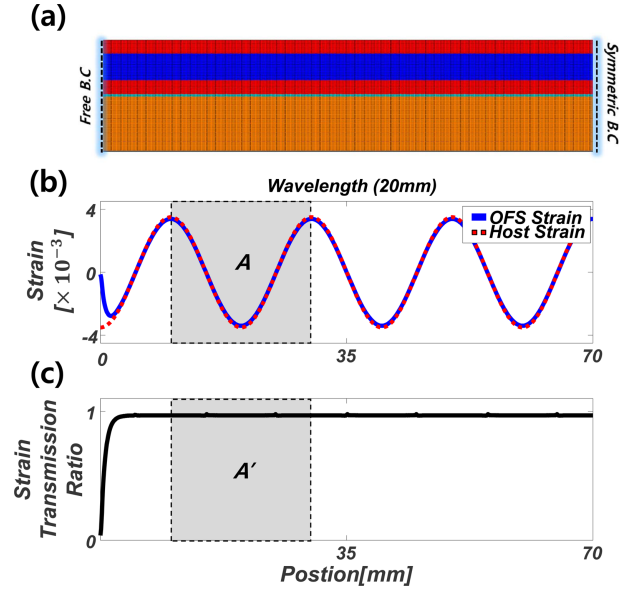
### 3. 변형률 전달률 해석 결과

본 연구에서는 먼저 주 구조물의 변형률 변화에 따른 변형률 전달률을 분석하기 위해 변형률을 특정 주기를 갖는 조화함수로  $\varepsilon_h(z) = \delta \cos az$  가정하였다. 여기서  $a$ 는 파수 (wave number)로  $2\pi/L$ 로 정의되며, 파장(L)의 역수에 비례한다. 파장이 크면( $a$ 가 작으면) 변형률의 변화가 작은 것을 의미하고, 파장이 작으면( $a$ 가 크면) 변형률의 변화가 큰 것을 의미한다. 주어진  $\varepsilon_h(z)$ 에 대한 식 (1)의 특수해  $\varepsilon_f(z)$ 는 주 구조물의 변형에 의해 광섬유 센서에 나타나는 변형률을 의미한다. 따라서 본 해석모델에서 변형률의 전달률은  $(|\varepsilon_f/\varepsilon_h|)$ 로 나타낼 수 있으며, 이는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{strain transmission ratio} = \frac{\lambda^2}{a^2 + \lambda^2} \quad (6)$$

주 구조물의 파장이 길어지면(변형률의 변화가 작으면) 전달률은 1에 가까워지며, 반대로 파장이 짧아지면(변형률의 변화가 커지면) 전달률이 작아진다.

식 (6)의 변형률 전달률을 검증하기 위해 상용프로그램



**Fig. 2.** FEA result of an attached OFS (a) Cross section of the model (b) Comparison between the host strain and the OFS strain (c) Strain transmission ratio

인 ABAQUS를 사용하여 유한요소 해석을 진행하였다. 해석 모델의 형상은 Fig. 1과 같으며 해석에 사용된 재료의 물성과 모델의 치수는 Table 1과 같다.

Fig. 2(a)는 해석 모델의 단면을 나타내며, 구조물의 오른쪽과 왼쪽 측면은 각각 길이방향으로 대칭 경계조건과 자유 경계조건을 부과하였다. 주 구조물에는 특정 파장의 변형률을 균일하게 적용하기 위해 각 단면의 노드(node) 점들에 직접적으로 길이방향 변위를 적용하였다. 따라서 주 구조물은 위치에 상관없이 길이방향으로는 동일한 변형률 분포를 가진다. Fig. 2(b)는 주 구조물에 20 mm의 파장을 가진 길이방향 변형률을 부과하였을 때, 주 구조물의 변형률(점선)과 광섬유 센서에 전달된 변형률(실선)을 나타내며, Fig. 2(c)는 위치에 따른 변형률 전달률을 나타낸다. 여기서 광섬유의 변형률은 광섬유의 중심 위치에서의 값을 이용하였다. 본 해석 모델은 변형률의 파장이 20 mm인 경우 전체적으로 광섬유의 변형률은 주 구조물의 변형률을 잘 나타내지만, 자유 경계조건이 주어진 왼쪽 측면은 경계조건의 영향으로 전달률이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

다음으로 변형률의 파장에 따른 변형률 전달률을 파악하기 위해 경계의 영향을 받지 않는 구간에서 한 파장에 해당하는 구조물(Fig. 2의 A(A'))에 주기 경계조건을 적용하여 변형률 전달률을 비교하였다. Fig. 3(a)는 각각 파장이 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm인 변형률을 갖도록 주 구조물에 적용된 응력 분포를 나타내며, 최대 응력은  $\pm 600$  MPa로 적용하였다. Fig. 3(b)는 파장에 따른 변형률 전달률을 나타내며, 변형률의 파장이 작아질수록 전달률이 급격히 감소하는 현상을 보인다. 이는 주 구조물의 변형률의 변화가 커지면 점

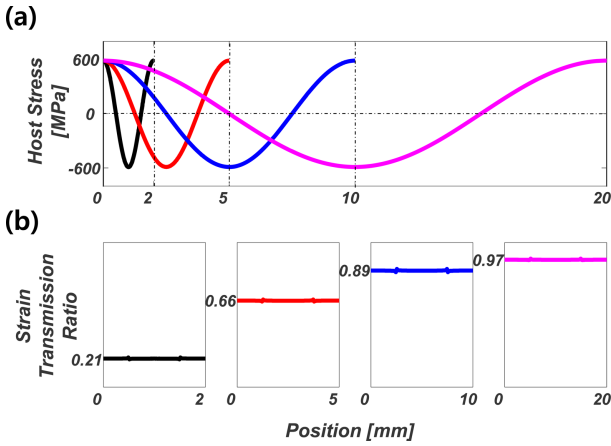


Fig. 3. Effect of wavelength on strain transmission. (a) Applied stress distribution on the host structure (b) Strain transmission ratios of the four models

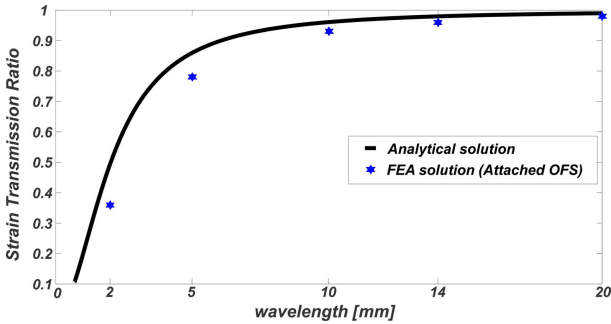


Fig. 4. Comparison of strain transmission ratios between analytical results and FEA results

착층과 코팅층에서 전단변형이 커지면서 광섬유에 전달되는 길이방향 변형율을 감소시키기 때문이다. 변형률 전달률의 정의에 의해 주 구조물의 변형률이 0이 되는 두 지점에서는 전달률이 큰 오차를 보이므로, 이 두 점을 제외하면 길이 방향으로 변형률이 변하더라도 전달률은 일정함을 알 수 있다. 이는 변형률의 파장이 일정할 경우 광섬유에 전달되는 변형률의 형태는 왜곡되지 않고, 변형률 전달률의 크기는 파장에 의해서 변함을 의미한다.

Fig. 4는 식 (6)를 통해 해석적(analytic)으로 얻어진 파장에 따른 변형률 전달률과 수치적(numerical)으로 계산한 전달률을 비교한 결과이다. 유한요소해석을 통해 수치적으로 계산된 전달률이 다소 작게 나타났으나 전체적으로 잘 일치하는 경향을 보였다.

구조물의 임의의 변형률 분포는 여러 파장(wavelength)의 조합으로 표현할 수 있으며, 이러한 파장은 변형률 분포의 Fourier 변환을 통해 분석할 수 있다. 일반적으로 변형률의 분포가 완만하면 긴 파장의 변형률 조합으로 나타나며, crack tip이나 충격 손상 주변에서처럼 변형률의 변화가 급격하게 나타나는 경우는 파장이 짧은 변형률의 조합으로 나타난다. 따라서 후자의 경우 광섬유에 전달되는 변형률의 전

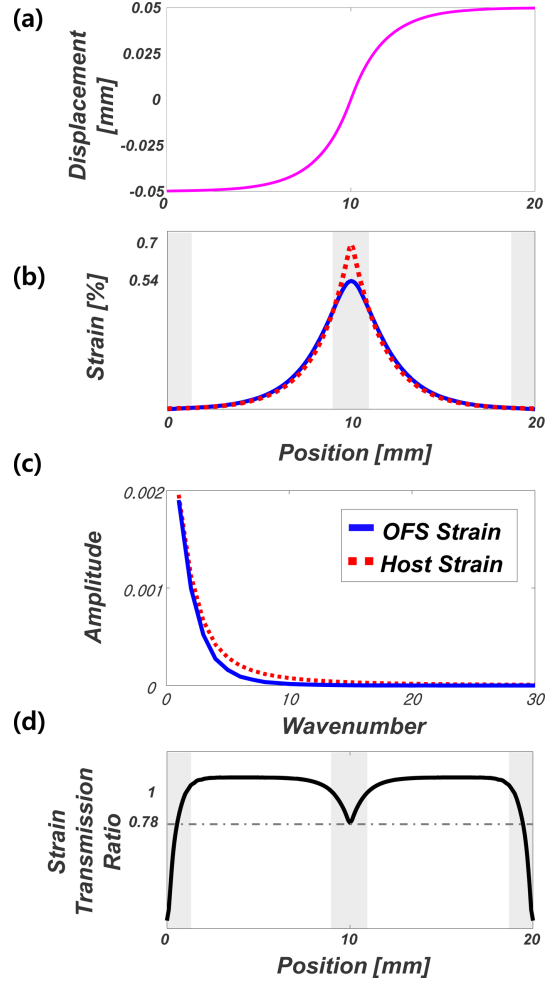


Fig. 5. Strain transmission (a) Displacement distribution of a host structure (b) Comparison of host strain and OFS strain (c) Wavenumber response of host and OFS (d) Strain transmission ratio of an attached OFS

달률이 더 작으며, 광섬유로부터 얻어지는 변형률 신호는 실제 변형률 보다 작게 나타날 뿐 아니라 위치에 따른 전달률의 변화로 인해 변형률 분포가 왜곡될 가능성이 더 크다.

Fig. 5는 주 구조물이 임의의 변형률 분포를 가질 때, 광섬유에 전달되는 변형률 분포와 위치에 따른 변형률 전달률을 보여준다. Fig. 5(a)는 구조물의 위치에 따른 변위 분포를 나타낸다. 전체적으로 인장 변형률이 나타나도록 하였으며, 구조물의 중심(10 mm)에 가까워 질수록 변형률의 변화가 더 커지는 형상을 나타낸다. Fig. 5(b)는 위치에 따른 주 구조물의 변형률(점선)과 광섬유에 전달된 변형률(실선)의 비교를 나타낸다. 변형률의 변화가 큰 10 mm 위치에 가까울수록 국부적으로 접촉층과 코팅층의 전단변형이 커지면서 광섬유로 전달되는 변형률이 감소된다. 이로 인해 광섬유 센서의 변형률 분포는 10 mm 부근에서 주 구조물의 변형률 분포를 왜곡시켜 보여지게 된다.

Fig. 5(c)는 Fig. 5(b)에 나타난 변형률 분포를 Fourier 변환

한 그래프로 변형을 분포에 포함되어 있는 파수(wavenumber) 성분을 나타낸다. 파수는 파장(wavelength)의 역수를 의미하며 파수가 작을수록 파장이 길고, 파수가 클수록 파장이 짧다. Fig. 5(c)에서 광섬유는 낮은 파수 영역에서 주 구조물보다 낮은 값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 광섬유의 변형을 분포에 짧은 파장 성분이 주 구조물보다 더 적음을 의미한다. 즉, Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 광섬유에서 변형률의 급격한 변화가 더 적게 나타남을 의미한다.

Fig. 5(d)의 위치에 따른 변형률 전달률을 보면, 구조물의 양 끝에서 자유 경계조건에 의해 전달률이 감소하는 것을 제외하면, 10 mm 위치에서 전달률이 급격히 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

광섬유의 변형률 전달률은 코팅과 접착제의 기계적 물성과 두께 등의 치수를 조절하여 다양하게 설계할 수 있다. 광섬유의 변형률 전달률이 높으면 주 구조물의 변형률 분포를 직관적으로 파악하기 쉬운 장점이 있으나, 복합재료의 크랙(crack)과 같은 급격한 변형률이 나타날 경우 쉽게 파손될 위험이 존재한다. 분포형 광섬유 센서의 경우 파손 후에 수리가 어려운 경우가 대부분이므로, 변형률 전달률을 고려하여 주 구조물의 변형률을 정밀하게 분석할 수 있다면, 코팅층 혹은 접착층을 두껍게 하여 센서의 안전성을 향상시킬 수 있다. 특히, 복합재료 구조물의 경우 파손이 대부분 변형률의 변화가 큰 크랙의 형태로 나타나기 때문에 센서의 안전성을 향상시키는 것이 중요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 구조물에 부착된 코팅된 분포형 광섬유 센서의 변형률 전달률을 분석하였다. 분포형 광섬유 센서의 신호로부터 구조물의 변형률 분포를 정밀하게 파악하기 위해서는 구조물의 위치에 따라 달라지는 변형률의 변화가 변형률의 전달률에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 변형률의 파장에 따른 변형률 전달률을 해석적/수치적 방법으로 분석 및 검증하였다. 동일한 파장을 갖는 변형률 분포의 경우 변형률 분포의 형상은 왜곡되지 않으며, 단지 파장에 따라 변형률 전달률만 달라진다. 하지만 다양한 파장을 갖는 임의의 변형률 분포는 파장에 따라 다른 변형률 전달률에 의해 광섬유에 전달되는 변형률은 형상이 왜곡될 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 분포형 광섬유 센서를 적용하는데 있어 안전성을 향상시키고, 센서의 신호를 정확하게 분석하는데 필요한 정보를 제공하므로 향후 분포형 센서를 이용한 구조건전성 감지기술 개발에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단(No. 2017R1C1B5018136)의 지원

과(주)한국화이바의 ‘수지변경에 따른 복합재 skirt의 층간 분리 결함에 대한 허용기준 정립연구’ 과제 및 표준과학연구원의 ‘주요기반 시설물 케이블 시스템 안전성 측정기술 개발(18011073)’ 과제의 일부 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. Meo, M., Polimeno, U., and Zumpano, G., “Detecting Damage in Composite Material Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy Methods,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, No. 3, 2008, pp. 115-126.
2. Ansari, F., and Yuan, L., “Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical fiber Sensors,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 4, 1998, pp. 385-394.
3. Lau, K.T., Yuan, L., Zhou, L.M., Wu, J., and Woo, C.H., “Strain Monitoring in FRP Laminates and Concrete Beams Using FBG Sensors,” *Journal of Composite Structures*, Vol. 51, No. 1, 2001, pp. 9-20.
4. Takeda, N., and Minakuchi, S., “Optical Fiber Sensor Based Life Cycling Monitoring and Quality Assessment of Carbon Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Structures,” *Journal of SPIE : Optical Fiber Sensors Conference*, Vol. 10323, 2017, pp. 1032315.1-4.
5. Choi, B.-H., and Kwon, I.-B., “Strain Pattern Detection of Composite Cylinders Using Optical Fibers after Low Velocity Impacts,” *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 154, No. 18, 2018, pp. 64-75.
6. Jang, B.-W., Park, S.-O., Lee, Y.-G., Kim, C.-G., Park, C.-Y., and Lee, B.-W., “Impact Monitoring of Composite Structures using Fiber Bragg Grating Sensors” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 24-30.
7. Ryu, C.Y., Park, J.W., Kwon, I.B., Hong, C.S., and Kim, C.G., “Detection of Matrix Cracking in Composite Laminates Using an Optical Fiber Sensor,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 9, No. 1, 1996, pp. 27-40.
8. Bang, H.-J., Kang, H.-K., Hong, C.-S., and Kim, C.-G., “Simultaneous Sensing of Failure and Strain in Composites Using Optical Fiber Sensors,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 5, 2001, pp. 12-19.
9. Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R.M., Tadros, G., Rizkalla, S.H., and Guhathakurta, A., “Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring,” *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, 1997, pp. 21-33.
10. Di Sante, R., “Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications,” *Journal of Sensors*, Vol. 15, No. 8, 2015, pp. 18666-18713.
11. Im, J., Kim, M., Choi, K.-S., Hwang, T.-K., and Kwon, I.-B., “Aluminum-thin-film Packaged Fiber Bragg Grating Proves for Monitoring the Maximum Tensile Strain of Composite Materials,” *Journal of Applied Optics*, Vol. 53, No. 17, 2014, pp. 3615-6320.
12. Kim, S.-W., Kim, E.H., Jeong, M.-S., and Lee, I., “Damage Evaluation and Strain Monitoring for Composite Cylinders Using

- Tin-coated FBG Sensors under Low-velocity Impacts,” *Composites Part B*, Vol. 74, 2015, pp. 13-22.
13. Kim, S.W., Jeong, M.S., Lee, I., Kim, E.H., Kwon, I.B., and Hwang, T.K., “Determination of the Maximum Stresses Experienced by Composite Structures Using Metal Coated Optical Fiber Sensors,” *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 78, 2013, pp. 48-55.
  14. Cho, S.-I., Yoo, S.-J., Kim, E.H., Lee, I., Kwon, I.-B., and Yoon, D.-J., “Strain Transmission Characteristics of Packaged Fiber Bragg Grating Sensors for Structural Health Monitoring,” *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 3, 2006, pp. 236-243.
  15. Cho S.-I., Yoo, S.-J., Kim, E.H., Kim, S.-W., Lee, I., Park, K.-C., and Kwon, I.-B., “Effects of Bonding Layer Characteristics on Strain Transmission and Bond Fatigue Performance,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 26, 2012, pp.1325-1339.
  16. Her, S.C., and Huang, C.Y., “Effect of Coating on the Strain Transfer of Optical Fiber Sensors,” *Journal of Sensors*, Vol. 11, No. 7, 2011, pp. 6926-6941.