

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 외팔보의 형상 모니터링

이 건 호* · 김 대 현**†

* 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Shape Monitoring of Composite Cantilever Beam by Using Fiber Bragg Grating Sensors

Kun-Ho Lee* and Dae-Hyun Kim**†

* Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received November 12, 2012 ; Revised May 2, 2013 ; Accepted May 7, 2013)

Key Words: Composite Structures(복합재 구조물), Structural Health Monitoring(구조 건전성 모니터링), Shape Monitoring(형상 모니터링), Fiber Bragg Grating Sensor(광섬유 브래그 격자 센서)

초록: 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 외팔보 형태의 복합재 구조물 2차원 형상 모니터링 연구를 수행하였다. 복합재 구조물의 형상을 모니터링하기 위해 NASA에서 개발한 처짐 방정식과 FBG 센서가 부착된 복합재 보를 이용하였으며, 처짐에 따른 복합재 보의 형상을 추정하고 동시에 실제 처짐과 측정된 처짐 크기를 비교하였다. 실험 결과 보의 형상을 성공적으로 추정할 수 있었으나 실제 처짐과 측정된 처짐이 오차가 발생하였다. 하지만 이러한 오차가 선형 관계를 갖고 있어 이를 정량화하여 보정한 후 재 실험한 결과 실제 처짐과 동일한 처짐 크기를 구할 수 있었다. 결과적으로 오차 보상을 잘 활용한다면 외팔보 구조물의 형상 모니터링을 위해 FBG 센서와 처짐 방정식이 매우 유용하다는 점을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this study, an experiment was performed to monitor the two-dimensional shape of a cantilever composite structure using fiber Bragg grating (FBG) sensors. To monitor the shape of a composite structure, a deflection equation developed by NASA was applied and a composite beam attached to three FBG sensors was used. In the experiment, the shape of the composite beam was successfully estimated and an error was evaluated by comparing a real deflection. The error increased with real deflection; therefore, it was compensated by using the linear relationship between the error and the real deflection. After compensating the error, the measured deflection shows good agreement with the real deflection. Finally, the experiment shows that the FBG sensor and the deflection equation are suitable for monitoring the deflection curve of the beam structure with compensation of the error.

- 기호설명 -

- λ_B : 브래그 파장
- Λ : 브래그 격자 주기
- n_e : 브래그 격자의 유효 굴절률
- α : 열팽창 계수
- ξ : 열광학 계수
- p_{11}, p_{12} : 변형률 광학 텐서
- n : 코어의 굴절률

- ν : 푸아송 비
- y : 수직 변위
- $M(x)$: 굽힘 모멘트
- I : 관성 모멘트
- $\epsilon(x)$: 굽힘 변형률
- c : 보 두께의 절반
- Δl : 변형률 측정 지점의 거리

1. 서론

최근 복합재료는 항공우주, 자동차, 열차와 같은 수송 분야를 비롯하여 대형건물, 교량과 같은 토목/건축분야, 풍력 발전과 같은 그린에너지 분

† Corresponding Author, dkim@seoultech.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

야 등 최근 다양한 분야에서 핵심 재료로 광범위하게 사용되고 있다.^(1,2) 이는 복합재 구조물은 금속재 구조물에 비해 비강성 및 비강도가 우수한 장점을 가지고 있어 경량화가 요구되며 장시간 운용되는 구조물에 적합하기 때문이다. 그러나 이러한 복합재 구조물도 운용 시 외부로부터 피로 하중 및 충격 하중 등 다양한 하중 유형에 의해 손상 및 파손이 발생할 수 있기 때문에 최근에는 이러한 제약점을 보완하기 위해 복합재 구조물 내에 센서를 삽입하거나 부착하여 운용 중 구조물의 손상 유무를 감시하는 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 연구가 활발히 연구되고 있다. 이때 복합재 구조물의 건전성 모니터링에 사용되는 센서는 구조물의 원래 상태에 영향을 주지 않아야 하기 때문에 크기가 작아야 하며 구조물에 부착하거나 삽입하기 적합한 구조이어야 한다. 따라서 이러한 요구사항을 만족하는 센서로서 광섬유 센서가 많은 각광을 받고 있다.⁽³⁾ 광섬유 센서에 사용되는 광섬유는 직경이 250 μm 로 크기가 매우 작기 때문에 구조물에 쉽게 삽입하거나 부착할 수 있으며, 빛을 신호로 사용하기 때문에 전자기적 간섭에 영향을 받지 않는다. 또한 센서의 길이 조절이 유연할 뿐만 아니라 높은 민감도를 가지고 있는 등 이와 같은 다양한 장점을 가지고 있어 압력 탱크나 인공위성 부품과 같은 항공우주 구조물이나 사회기반 시설과 같은 토목 구조물에서 사용이 점차 확대되고 있다. 특히, 다양한 광섬유 센서 중에서 파장 분할 다중화 기법을 기반으로 한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서가 많은 연구자들에게 관심을 받고 있다. 이는 선형 응답성, 절대 측정, 대량 생산이 가능할 뿐만 아니라 한 라인에 여러 포인트의 센서를 제작할 수 있어 대형 구조물의 건전성 모니터링에 매우 유용하다는 매력적인 장점을 가지고 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 외팔보 형태를 갖는 복합재 구조물의 구조 건전성 모니터링을 위해 복합재 보의 처짐을 측정하고 이를 이용하여 2차원 형상을 모니터링하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 형상을 모니터링 하는 이유는 일반적으로 처짐과 같이 구조물의 변위를 측정하는 방법은 구조물의 건전성 평가에 있어서 중요한 물리량이며, 구조물의 성능 저하 및 노후도를 판단하는 근거가 되기 때문이다.⁽⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 FBG 센서

로 측정된 변형률과 NASA에서 개발한 처짐 방정식을 이용하여 복합재 구조물의 형상 모니터링을 위한 기초 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 보의 세 지점을 최소 측정 지점으로 결정하고, 실제 처짐에 따른 복합재 보의 형상을 성공적으로 추정할 수 있었으며, 실제 처짐과 처짐 방정식을 통해 측정된 처짐 크기를 비교할 수 있었다. 이와 같은 실험을 통해서 구조물의 형상 모니터링에 FBG 센서와 처짐 방정식이 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었으며, 이를 이용한 복합재 구조물의 구조 건전성 모니터링의 가능성을 볼 수 있었다.

2. FBG 센서의 변형률 측정 원리

넓은 파장 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사 시킬 경우, 브래그 격자 부분에서는 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 좁은 밴드를 갖는 특별한 파장만을 반사하고 나머지 파장은 모두 통과시킨다. 이때 브래그 격자에서 반사된 파장을 브래그 파장이라 하며 이는 식 (1)을 통해 결정된다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

여기서 λ_B 는 브래그 파장, Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자 주기(grating period)이며 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이다. 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 주기의 함수이고 유효 굴절률과 격자 주기는 온도와 변형률의 함수이다. 따라서 광섬유 브래그 격자에 온도 변화나 변형이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장이 이동하게 된다. 결국 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (2)와 같이 계산해 낼 수 있으며 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_e) \epsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서 α 는 온도에 따른 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이며, ξ 는 온도에

의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. 실리카의 경우 $\alpha \sim 0.510^{-6}$, $\xi \sim 8.310^{-6}$ 정도의 값을 가지므로⁽⁶⁾ 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 그리고 식 (3)에서 p_e 는 광탄성 상수(photoelectric constant)를 의미하며 p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic constant)의 성분이고 n 은 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송의 비(Poisson's ratio)이다. 광탄성 상수 p_e 는 gemanosilicate glass의 경우 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있으나⁽⁷⁾ 광섬유에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 정확한 변형률의 측정을 위해서 이 값의 측정이 요구된다. 만약 온도 변화가 없는 상태에서 구조물의 변형률을 측정하면 식 (2)에서 $\Delta T=0$ 이 되므로 식 (4)와 같이 간단하게 변형률과 브래그 파장의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{1-p_e} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

3. 처짐 방정식 이론

본 연구에서는 외팔보 형태로 구성된 균일한 두께의 복합재 구조물의 형상을 추정하기 위해 NASA에서 개발한 처짐 방정식을 적용하였다.⁽⁸⁾ 본 처짐 방정식은 임의의 단면 형상과 균일한 두께를 갖는 외팔보의 변형률 측정 지점에서의 기울기와 처짐을 보여준다.

3.1 모멘트-변형률 관계

고전적인 보의 미분 방정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (5)$$

여기서 y 는 수직 변위, x 는 길이 방향의 좌표, $M(x)$ 는 굽힘 모멘트, E 는 탄성 계수(Young's modulus) 그리고 I 는 관성 모멘트(moment of inertia)를 의미한다. 식 (5)에서 굽힘 모멘트 $M(x)$ 는 굽힘 변형률 $\epsilon(x)$ 와 관련되어 있으며 이는 가장 바깥 표면의 굽힘 응력 방정식, $\sigma(x) = [M(x)c]/I$ 과 관계된다.

$$\epsilon(x) = \frac{\sigma(x)}{E} = \frac{M(x)c}{EI} \quad (6)$$

식 (6)에서 c 는 보 두께의 절반을 의미하며, 식 (6)을 고려했을 때 식 (5)는 $\epsilon(x)$ 의 향으로 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\epsilon(x)}{c} \quad (7)$$

굽힘 모멘트 $M(x)$ 는 x 축을 따라서 선형 함수라고 가정하면 즉, 두 개의 인접한 변형률 측정 지점이 $\{x_{i-1}, x_i\}$ 일 때, $M(x)$ 는 식 (8)과 같이 $(x-x_{i-1})$ 의 선형 함수로 간주된다.

$$M(x) = M_{i-1} - (M_{i-1} - M_i) \frac{x-x_{i-1}}{\Delta l} \quad (8)$$

여기서 $\{M_{i-1}, M_i\}$ 는 $\{x_{i-1}, x_i\}$ 에서의 굽힘 모멘트이며, $\Delta l (= x_i - x_{i-1})$ 은 변형률 측정 지점의 측 방향 거리를 의미한다. 식 (6)을 고려했을 때 식 (8)은 변형률 함수 $\epsilon(x)$ 의 향으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon(x) = \epsilon_{i-1} - (\epsilon_{i-1} - \epsilon_i) \frac{x-x_{i-1}}{\Delta l} \quad (9)$$

3.2 기울기 방정식

두 개의 변형률 측정 지점 $\{x_{i-1}, x_i\}$ 에서 균일한 보의 기울기 $\tan\theta(x)$ 는 식 (7)을 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tan\theta(x) &= \int_{x_{i-1}}^x \frac{d^2 y}{dx^2} dx + \tan\theta_{i-1} \\ &= \int_{x_{i-1}}^x \frac{\epsilon(x)}{c} dx + \tan\theta_{i-1} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\tan\theta_{i-1}$ 는 x_{i-1} 에서의 기울기를 의미한다. 식 (10)에 식 (9)를 대입하고 적분을 수행하면 다음과 같은 식 (11)을 구할 수 있다.

$$\tan\theta_i = \frac{\Delta l}{2c} (\epsilon_{i-1} + \epsilon_i) + \tan\theta_{i-1} \quad (11)$$

$i=1$ 일 때 기울기($\tan\theta_{i-1} = \tan\theta_0$)는 외팔보

의 고정지지부의 기울기이며 값은 0이 된다 ($\tan\theta_0 = 0$). 식 (11)에 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)를 대입하여 정리하면 결과는 다음과 같다.

$$\tan\theta_n = \frac{\Delta l}{2c} \left[\epsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \epsilon_j + \epsilon_n \right] \quad (12)$$

3.3 처짐 방정식

두 개의 인접한 변형률 측정 지점 $\{x_{i-1}, x_i\}$ 에서의 균일한 보의 처짐 $y(x)$ 는 식 (10)을 적분함으로써 식 (13)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} y(x) &= \int_{x_{i-1}}^x \tan\theta(x) dx + y_{i-1} \\ &= \int_{x_{i-1}}^x \int_{x_{i-1}}^x \frac{\epsilon(x)}{c} dx dx \\ &\quad + \int_{x_{i-1}}^x \tan\theta_{i-1} dx + y_{i-1} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 y_{i-1} (적분 상수)은 x_{i-1} 에서의 처짐을 의미한다. 식 (9)를 고려하여 식 (13)의 적분을 수행하면 처짐 $y_i \equiv [y(x_i)]$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y_i = \frac{(\Delta l)^2}{6c} (2\epsilon_{i-1} + \epsilon_i) + y_{i-1} + \Delta l \tan\theta_{i-1} \quad (14)$$

여기서 고정지지부를 $i = 1$, $y_0 = \tan\theta_0 = 0$ 로 가정했을 때, 식 (14)에 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 을 대입하면 다음의 식 (15)를 구할 수 있다.

$$y_n = \frac{(\Delta l)^2}{6c} \left[2\epsilon_0 + 3 \sum_{i=1}^{n-1} \epsilon_i + \epsilon_n \right] + \Delta l \sum_{i=1}^{n-1} \tan\theta_i \quad (15)$$

식 (12)를 고려했을 때 식 (15)의 마지막 항의 $\tan\theta_i$ 의 합은 다음과 같이 ϵ_i 의 항으로 쓸 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \tan\theta_i = \frac{\Delta l}{2c} \left\{ (n-1)\epsilon_0 + \sum_{i=1}^{n-1} [2(n-i) - 1]\epsilon_i \right\} \quad (16)$$

식 (16)을 고려했을 때, 식 (14)는 식 (17)과 같

이 곱힘 변형률의 항으로 표현할 수 있다.

$$y_n = \frac{(\Delta l)^2}{6c} \left[(3n-1)\epsilon_0 + 6 \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)\epsilon_i + \epsilon_n \right] \quad (17)$$

따라서 식 (17)에 의해 각각의 변형률 측정 지점에서의 처짐을 구할 수 있으며 이를 그래프로 그리면 전체적인 외팔보의 형상을 실시간으로 추정할 수 있다.

4. 검증 실험

NASA에서 개발한 처짐 방정식을 이용하여 외팔보 형태로 구성된 복합재 보($[0_3/90_4]_s$)의 형상 모니터링이 가능한지 확인하기 위해서 검증 실험을 수행하였다. 실험 구성은 Fig. 1과 같이 서론에서 언급한 것과 같이, 최소한의 측정 지점으로 3개의 지점을 결정하고, 각 지점에 FBG 센서(Bragg Wavelength: 1532 nm, 1540 nm, 1548 nm) 각각 부착하였다. 그리고 복합재 보의 한 쪽 끝을 고정지지한 후 1548 nm의 FBG 센서 위치에서 최대 25 mm까지 변위 이동이 가능한 마이크로미터를 설치하였다. FBG 센서의 브래그 파장 측정은 샘플링 주파수가 최대 1 kHz까지 가능한 Micron Optics 사의 FBG Interrogator(Model: sm130)를 사용하여 측정하였다.

실험 방법으로는 마이크로미터를 이용하여 처짐을 1 mm 간격으로 주면서 동시에 복합재 보의 형상을 실시간으로 모니터링 하였다. 또한 실제 형상이 정확하게 추정되는지 확인하기 위해서 1548 nm의 FBG 센서 위치에서 처짐 방정식을 이용해 측정된 처짐을 마이크로미터로 이동시킨 실제 처짐과 비교하였다. 여기서 1548 nm의 FBG 센서 위치에서 실제 처짐과 비교한 이유는 이 위치에서 오차가 가장 크게 발생할 것으로 예상되는 지점이기 때문이다. 전체적인 복합재 보의 형상과 처짐 크기는 처짐 방정식을 구현한 프로그램을 이용하여 추정하였으며, 이 프로그램은 National Instruments 사의 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 개발하였다. 본 프로그램의 한 가지 특이점은 처짐 방정식을 구현할 때 ϵ_0 의 값은 1532 nm의 FBG 센서로 측정된 변형률을 적용하였으며, 이 지점을 프로그램 상으로 복합재 보의 시작점(0 mm)으로 설정하였다. 이는 처짐 방정식에

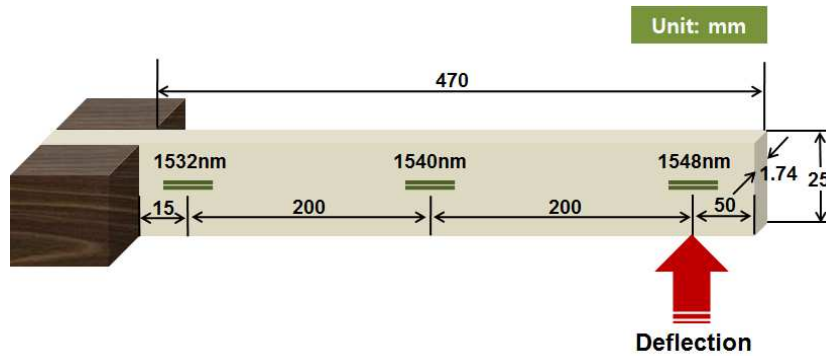


Fig. 1 The size of composite beam and location of FBG sensors

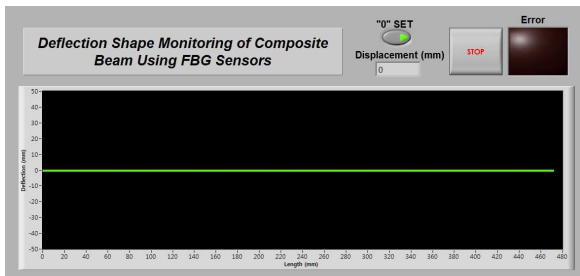


Fig. 2 The LabVIEW program for shape monitoring

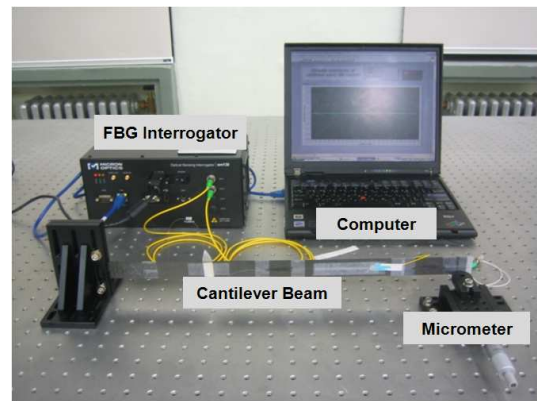


Fig. 3 Experimental set-up for shape monitoring of cantilever composite beam

서는 ϵ_0 가 0 mm 지점에 위치한 FBG 센서의 변형률을 의미하나 실제 실험 시에 0 mm 지점에 보를 위치하여 고정지지 할 경우 FBG 센서에 수직 압력이 가해져 신호 사라짐 현상이 발생하기 때문이다. 따라서 1532 nm의 FBG 센서 위치에서 15 mm 간격을 두고 보를 고정하여 실험을 수행하였다. Fig. 2는 형상 모니터링을 위한 LabVIEW 프로그램을 보여주며, Fig. 3은 전체적인 실험 구성을 보여준다.

실험 결과 Fig. 4와 같이 처짐 방정식을 통해 추정된 형상이 실제 보의 형상과 동일하게 표현됨을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 마이크로미터를 이용해 5/10/15/20/25 mm의 처짐을 가했을 때 FBG 센서가 부착된 위치에서 측정된 변형률을 이용하여 각 센서 위치에서 변위를 추정한 후 보간(interpolation)하여 보의 형상을 추정한 결과를 각 처짐에 따라 나타낸 것이다. 하지만 Fig. 5와 같이 1548 nm를 갖는 FBG 센서 위치에서 마이크로미터를 이용한 실제 처짐과 처짐 방정식을 이용하여 측정된 처짐이 다소 오차가 발생함을 알 수 있었다. 또한 그 오차가 실제 이동된 처짐의 크기가 커질수록 점점 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 현상의 원인을 알기 위해 먼저 최

종 처짐 방정식을 나타내는 식 (17)을 분석해 보았을 때, FBG 센서 간의 간격(Δl)이 좁을수록 또한 보의 많은 포인트에서 변형률을 측정할수록 더욱 정확한 처짐 크기를 측정함을 알 수 있다. 하지만 본 실험에서 정확한 처짐을 측정할 수 있을 만큼 FBG 센서 간의 거리 좁거나 변형률 측정 지점의 개수가 충분하지 못한 것으로 판단된다. 또한 고정지지점에서 측정된 변형률을 의미하는 ϵ_0 가 실험 시 실제로 고정지지점에서 측정된 것이 아닌 15 mm 떨어진 지점에서 측정된 값을 적용하여 실제 0 mm에서 측정되어야 하는 변형률 보다 더 작은 변형률이 측정된 것으로 보인다. 이는 하중 부가지점과의 거리가 더 가까워지기 때문에 모멘트 크기가 감소하여 변형률이 더 작아졌기 때문이다. 결국 이러한 두 가지 원인으로 인해 실제 처짐과 처짐 방정식을 이용하여 측정된 처짐과의 오차가 발생한 것으로 보이며 처짐 크기가 증가할수록 오차가 더 증가하는 것으로 판단된다.

하지만 처짐 이동에 따른 오차의 크기를 Fig. 6와

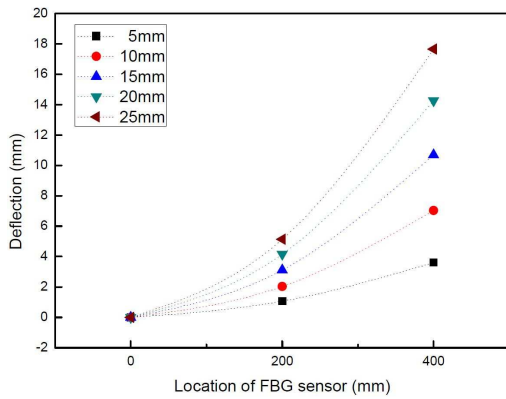


Fig. 4 The shape of composite beam according to real deflection

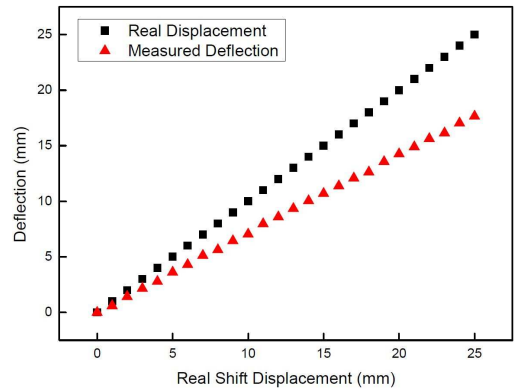


Fig. 5 The comparison between real deflection and measured deflection at 1548 nm FBG sensor

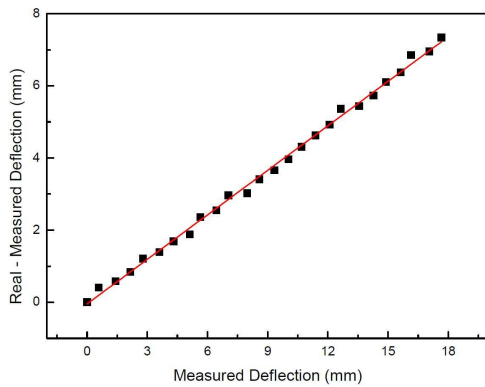


Fig. 6 The linearity of displacement errors at 1548 nm FBG sensor

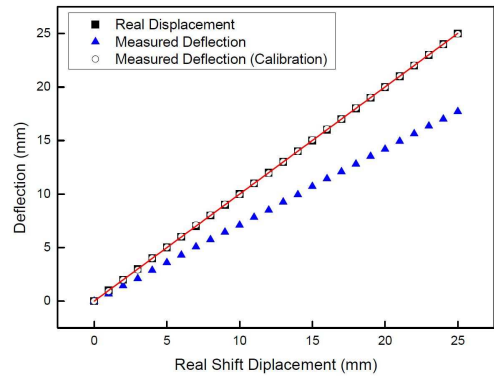


Fig. 7 The comparison between real deflection and measured deflection at 1548 nm FBG sensor

같이 나타낸 결과 오차의 증분이 선형적으로 발생함을 확인할 수 있었다($R = 0.99709$). 따라서 이러한 오차의 경향을 정량화하여 측정된 처짐을 보정(calibration)한다면 실제 처짐과 동일한 크기를 구할 수 있을 것으로 판단되어 수학적으로 보정을 취한 후 다시 실험을 수행하였다. 재 실험 결과 Fig. 7과 같이 실제 처짐($R = 1$)과 보정되어 측정된 처짐($R = 0.99996$)이 동일한 결과를 보임을 알 수 있었다. 결국 세 지점이라는 제한된 지점에서 측정된 결과값을 이용해 형상을 추정하였기 때문에 발생한 오차는 선형 보정을 통해 극복할 수 있음을 확인하였다. 추후 보다 많은 지점의 측정값을 이용한다면 보의 형상은 보다 정확하게 측정될 것이라 예상된다. 그러나 본 논문 서론에서도 언급했듯이 최소한의 센서를 사용하는 것도 본 연구의 목적이었기 때문에 허용 가능 오차 및 보정 가능 오차 범위를 충족시킬 수 있는 최대 센서 부착 간격에 관한 연구도 추후에 이뤄져야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문은 외팔보 형태를 갖는 다양한 복합재 구조물의 2차원 형상을 모니터링하기 위한 기초 연구를 보여준다. 본 연구에서는 최근 구조 건전성 모니터링 연구에서 매우 활발히 연구되고 있는 FBG 센서를 적용하였다. FBG 센서는 크기가 작고 가볍기 때문에 복합재 구조물에 부착하거나 삽입 시 구조물의 물리적 특성에 영향을 주지 않으며, 빛을 신호로 사용하기 때문에 전자기적 간섭을 받지 않는다. 또한 다점 측정이 가능하다는 매력적인 장점이 있어 현재 대형 구조물에 적용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 본 연구에서는 복합재 구조물의 형상을 추정하기 위해 NASA에서 개발한 처짐 방정식을 적용하였으며 이를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 구성은 $470 \times 25 \times 1.74$ (mm) 크기를 갖는 복합재 보에 3개의 FBG 센서를 나란히 부착하여 외팔보와 같은 형태로 한쪽 끝을 고정지지하

였으며, 3개의 센서 중 1548 nm의 FBG 센서 지점에 최대 25 mm 변위 이동이 가능한 마이크로미터를 설치하였다. 실험 방법은 마이크로미터를 이용하여 1 mm씩 처짐을 주면서 복합재 보에 부착된 FBG 센서의 변형률을 측정하였으며 이를 처짐 방정식에 적용하여 보의 전체적인 형상을 추정하였다. 실험 결과 복합재 보의 형상을 성공적으로 추정할 수 있었으나 실제 마이크로미터로 이동한 처짐과 처짐 방정식을 통해 측정된 처짐이 오차가 발생하였으며 실제 처짐이 커질수록 오차가 점점 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 FBG 센서의 측정 지점의 개수가 충분하지 못하고 센서 간의 거리가 정확한 처짐을 측정할 수 있을 만큼 가깝지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 고정지지점에 FBG 센서를 부착할 수 없기 때문에 그 지점의 변형률을 아주 정확하게 측정할 수 없어 이에 따른 오차가 발생한 것으로 보인다. 하지만 처짐 오차의 발생 경향이 선형적이기 때문에 이를 정량화 한 후 측정된 처짐을 보정하여 다시 실험을 수행하였다. 재 실험 결과 실제 처짐과 보정되어 측정된 처짐이 동일한 결과를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 FBG 센서와 처짐 방정식이 복합재 구조물의 형상 모니터링에 매우 유용할 것으로 판단되며, 차 후에는 측정 지점에서의 오차를 최소화하기 위해 복합재 보의 길이에 따라 정확한 처짐을 측정할 수 있는 FBG 센서 간의 거리와 개수 그리고 고정지지점에서의 변형률 측정을 위한 센서 부착 방법에 대해 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Koh, J.-I., Bang, H.-J., Kim, C.-G., and Hong, C.-S., 2004, "Simultaneous Measurement of Strain and Damage Signal in Composite Structures Using a Fiber Bragg Grating Sensor," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 32, No. 7, pp. 43~50.
- (2) Kim, I. K., Kim, J. S., Seo, S. I. and Lee, W. G., 2013, "Dynamic Property Evaluation of Four-Hardness Satin Woven Glass/epoxy Composites for a Composite Bogie Frame," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~6.
- (3) Kim, D.-H., 2009, "Experimental Analysis on Vibration of Composite Plate by Using FBG Sensor System," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 436~441.
- (4) Kang, D., Kim, D.-H. and Jang, S., 2012, "Design and Development of Structural Health Monitoring System for Smart Railroad-Gauge-Facility Using FBG Sensors," *Experimental Techniques*, Article first published online, 5 Jul.
- (5) Chang, S.-J. and Kim, N.-S., 2010, "Applications of Displacement Response Estimation Algorithm Using Mode Decomposition Technique to Existing Bridges," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 3, pp. 257~264.
- (6) Udd, E., 1995, "Fiber Optic Smart Structures," John Wiley and Sons, USA
- (7) Othonos, A., Alavie, A. T., Melle, S., Karr, S. E. and Measures, R. M., 1993, "Fiber Bragg Grating Laser Sensor," *Optical Engineering*, Vol. 32, pp. 2841~2845.
- (8) Ko, W. L., Richards, W. L. and Tran, V. T., 2007, "Displacement Theories for In-Flight, Deformed Shape Predictions of Aerospace Structures," NASA/TP-214612.

(1) Koh, J.-I., Bang, H.-J., Kim, C.-G., and Hong,