

풍력발전기 블레이드 처짐 측정을 위한 다중화 센서 탐촉자 설계 제작

김지대^a, 이동주^{b*}

Fabrication of a Multiplexing Sensor Probe for Measuring the Blade Deflection of a Wind Power Generator

Ji-Dea Kim^a, Dong-Ju Lee^{b*}

^a Lab. of Machining and Measurement, (305-764) Chungnam National University Gung-dong Yuseong-gu Daejeon, Republic of Korea

^b Dept. of Mechanical Engineering, (305-764) Chungnam National University Gung-dong Yuseong-gu Daejeon, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	11	February	2014
Revised	21	March	2014
Accepted	31	March	2014

Keywords:

Multiplexing sensor probe
 FBG sensor
 Wind power blade
 Measuring deflection
 Strain variation
 CFRP

ABSTRACT

This paper describes a fabrication multiplexing sensor probe that employs a fiber Bragg grating(FBG) based on multiple measurements to determine the blade deflection of a wind power generator the reliability analysis of this probe is also presented. To diminish the temperature sensitivity of the FBG sensor, we form multiple CFRPs onto the upper and lower layers of the FBG and package it with an epoxy resin. As a result, the depth of the CFRP is 1mm, and the temperature sensitivity is 2.39pm/°C. We construct a sensor network utilizing the fabricated sensor with a blade beam model. As the number of pendulums is increased on the fore-end of the beam, the strain value is measured. The strain variation is calculated from the measurement of the load on the blade beam model by monitoring the strain of the FBG sensor. When the linear equation is applied, the strain error is 0.4% and when the finite difference method is used, the tip deflection error is 3.3%. The displacement error derived from the strain value of the FBG sensor is 4.39%. The calculated result between the measured value of the dead-end of the beam and the strain is less than 2.46% tip distortion error. Therefore, our proposed multiplexing sensor probe is a low-cost and high-reliability solution for a commercial wind power generator.

1. 서론

현대 산업 및 인류는 에너지라는 매개체를 사용하지 않고서는 살아갈 수 없는 시공간에 살아가고 있다고 할 수 있다. 에너지를 만들어내는 방식에는 석탄, 석유, 천연 가스등의 광물자원을 이용하는 방법이 있다. 그러나 이러한 광물자원을 사용하여 에너지를

만들어 내는 방식은 자원의 고갈은 물론이고 환경오염 등의 심각한 사회문제를 야기하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 줄이면서 에너지를 만들어 내는 방식의 바람, 태양광, 수력 등을 이용한 에너지 생산에 여러 나라들이 기술개발에 노력을 하고 있다. 그 중에서도 풍력을 이용한 친환경 에너지 발전기 설치가 꾸준히 늘어가고 있는 추세이며 또한 대형화 되고 있다. 이에 따라 최근 풍력 발전

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5648

Fax: +82-42-822-5642

E-mail address: dongju@cnu.ac.kr (Dong-Ju Lee).

기, 인공위성, 항공기 등에 사용하는 복합재료들은 비강도 및 비강성의 우수성 있는 재료를 사용함으로써 경량화 설계에 가장 적합한 재료로 인정받고 있고 그 사용 비중이 점차 증가하고 있다. 또한, 복합재료의 가공방법 및 접합방법 등의 기술 개발로 산업 현장에서의 사용 빈도도 더욱 늘어나고 있다^[1,2]. 이러한 대형 구조물의 경량화 설계에 가장 적합한 복합재료의 이용도를 높이고 안전하고 저렴한 운영을 위해 구조건전성 모니터링(Structural Health Monitoring)에 대한 연구 및 개발 필요성은 더욱 부각되고 있다.

구조건전성 모니터링 시스템에서는 무엇보다도 성능이 우수하고 신뢰도가 높은 센서가 요구된다. 센서를 구조물에 장착 시 구조물의 성능과 기능에 영향을 주지 않아야 하므로 소형이면서 경량의 센서가 필요하고 또한 장착성이 편리하여야 한다^[3]. 또한 측정하려는 구조물이 대형화되어 측정 지점이 늘어날수록 센서수가 증가하므로 여러 장소의 물리량을 동시에 계측할 수 있는 다점 측정(Multiplexing) 기능이 우수한 센서가 필요하다^[4]. 그 중 널리 이용하는 센서로는 전기식 스트레인게이지(Electrical strain gauge), 가속도계, 압전센서(Piezoelectric sensor) 등 기존의 전기적인 센서들은 실시간 측정이 가능하며 안정적인 측정결과를 보여주고 있다. 하지만 전기신호를 이용하기 때문에 전기장이나 자기장이 강한 환경에서는 잡음이 심하여 측정 신호에 영향을 받을 수 있으며 센서 하나 당 신호케이블이 하나씩 할당되어 여러 지점을 동시에 측정할 경우 신호케이블의 부피가 늘어나 측정 장비의 규모와 비용도 매우 커지게 된다^[4]. 이런 단점을 보완해줄 수 있는 광섬유 센서는 직경이 250 μm로 작고 가벼우며 구조물의 기능에 영향을 주지 않으면서 외부에 장착 또는 내부에 삽입이 가능하다^[5]. 이러한 광섬유 센서들 중에서 광섬유 브래그 격자(Fiber bragg grating, FBG)센서는 다점 측정이 가능하여 하나의 광섬유에 브래그 격자의 중심파장을 서로 다르게 한 여러 개의 센서를 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[6]. 이러한 장점을 이용하여 해상도가 높은 단일 점 센서와 넓은 영역을 모니터링 할 수 있는 분포형 센서의 장점을 다중화 기법에 의해 결합한 준분포형 센서로의 확장이 가능하다^[4,7,8].

대형 구조물의 구조 건전성 모니터링을 위한 시스템은 다년간의 운영 기간 동안 진동, 기계적 충격, 전자기파, 그리고 외부 온도 변화 등에 영향을 받지 않아야 한다. 하지만 광섬유 나선(Bare fiber)으로 제작된 FBG 센서는 제작 및 설치 시 부주의에 의한 손상을 입기 쉽다. 따라서 이러한 손상을 막기 위해 광섬유 나선의 리코팅(Recoating)이나 보호용 패키징(Packaging)을 이용하는 것이 바람직하다^[9-13]. 그러므로 본 연구에서는 FBG 센서에 에폭시 패키징 처리를 하여 광섬유의 파손 및 온도에 대한 민감도를 개선한 센서 탐촉자를 제작하고자 한다.

2. 이론 및 센서 제작

2.1 광섬유 브래그 격자 센서(FBG Sensor) 및 측정원리

광섬유는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 코어(Core)와 클래딩을 중심으로 한 구조로 되어있다. 코어와 클래딩(Cladding)은 유리 섬유로 되어 있기 때문에 외부환경에 매우 취약하다. 때문에 코어와 클래딩을 보호하는 피복으로 폴리머(Polymer)나 아크릴레이트(Acrylate)등을 사용하여 클래딩을 보호하는 외부 자켓(Jacket)으로 이루어졌다.

브래그 격자의 생성은 광섬유 코어에 강한 자외선을 조사하면 결합구조가 변형되면서 광섬유에 브래그 격자가 생성된다. 생성된 광섬유 브래그 격자는 이러한 현상을 이용하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨다. 그리고 코어에 새겨진 격자는 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하며, 이외의 다른 파장들은 통과시키는 특성을 갖는다. 따라서 코어에 새겨진 격자에 온도 및 외력 등의 주변 환경이 변경되면 격자의 축 방향 길이 등이 변경되며, 이에 따라 광섬유의 굴절률과 공진기의 길이가 변경되어 반사되는 빛의 파장이 변화 된다. 그리하여 광섬유 브래그 격자 센서에서 반사되는 빛의 파장을 측정하면 온도, 인장, 압축, 굽힘 등을 감지할 수 있다^[12,13].

광섬유 브래그 격자 센서는 코어에 생성된 격자에 따른 굴절률의 변화를 주기적으로 변조하여 브래그 파장(Bragg wavelength)의 빛을 반사시키는 원리이다. 따라서 코어의 주기적인 굴절률 변화는 브래그 격자의 역할을 하게 된다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 브래그 격자에 광대역 광을 입사시키면 식 (1)과 같은 브래그 조건

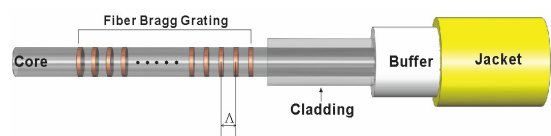


Fig. 1 Structure of fiber bragg grating sensor

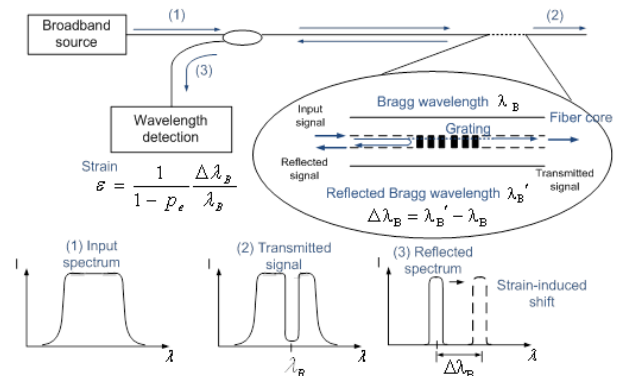


Fig. 2 Measuring principle of fiber bragg grating sensor

(Bragg condition)에 해당하는 파장의 빛은 보강 간섭을 일으켜 브래그 격자 위치에서 반사되어 되돌아오고, 나머지 파장은 통과한다^[14-16]. 되돌아온 파장은 서큘레이터를 통하여 파장 측정기로 측정하면 된다.

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

(λ_B : 브래그 파장, n_e : 광섬유 격자의 유효 굴절률로 빛이 브래그 격자의 한 주기를 진행 할 때의 평균 굴절률, Λ : 코어에 새겨진 브래그 격자의 주기)

따라서 식 (1)로부터 브래그 파장은 유효 굴절률과 브래그 격자의 함수임을 알 수 있다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 브래그 파장이 움직이게 된다^[16].

코어에 새긴 브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분을 취한 뒤 온도, 변형률과 격자 간격, 유효 굴절률의 식을 대입하면 식 (2)와 (3)를 얻을 수 있다. 이때 변형된 브래그 파장을 정밀하게 측정하면 광섬유에 가해진 온도나 외력을 계산할 수 있고, 이것이 브래그 센서 측정 원리이다.

$$\lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f) \Delta T + (1 - P_e) \epsilon] \quad (2)$$

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

(α_f : 광섬유의 열팽창 계수, ξ_f : 온도에 의한 광섬유 굴절률의 변화를 나타내는 열 광학 계수, P_e : 광탄성계수로 약 0.22, n : 코어의 굴절률, ν : 광섬유의 프와송 비, P_{11}, P_{12} : 광 변형률 상수)

이때 광섬유에 온도변화가 없다고 가정하면($\Delta T = 0$) 식 (4)와 같이 간략화 할 수 있으며, 이 식을 이용하여 FBG를 변형률 센서로 사용할 수 있으며, 변형률의 변화는 파장의 변화로 정확하게 계산됨을 알 수 있다^[17].

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

2.2 다중화 센서 탐촉자 설계 및 제작

블레이드에 적용하기 위한 FBG 센서 탐촉자를 에폭시 패키징하여 사용자의 설치가 용이하도록 설계하였다. 그런데 에폭시 패키징하는 경우 온도에 의한 열 변형 등으로 FBG 센서의 온도 민

감도가 1°C 변화에 대하여 약 40 p.m.가 변화되는 큰 변화를 보인다. 이러한 온도 민감도 저하를 줄일 수 있는 센서 탐촉자의 제작 방법으로 첫 번째로 두 개의 FBG 센서 즉 Paired FBG를 이용한 방법^[16]과 두 번째로 탐촉자의 열 변형 정도를 감소시킬 수 있는 구조의 단일 FBG 센서를 구현하여 온도 민감도를 감소시키는 방법으로 센서를 제작 하였다.

첫 번째로 제시한 Paired FBG 센서 탐촉자는 변형률 및 온도 감지도가 다른 두 개의 FBG를 한 쌍으로 만들어서 동일한 위치에 적용하게 되면, 측정하고자 하는 변형률 및 온도를 두 개의 FBG 센서의 응답으로 구할 수 있게 된다. 이러한 탐촉자의 기본 설계도는 Fig. 3과 같이 160 × 10 × 3 mm로 설계하고 제작하였다.

Paired FBG 센서 탐촉자를 이용한 측정원리는 다음과 같은 관계식으로 설명할 수 있다. 각각의 광섬유 격자가 외부 환경의 영향으로 이동된 브래그 파장의 변화를 식 (5)또는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Dl_{01} = K_{1e} De + K_{1T} DT \quad (5)$$

$$Dl_{02} = K_{2e} De + K_{2T} DT \quad (6)$$

여기서 K_{1e} , K_{1T} 는 FBG 1의 변형률 감지 계수와 열 감지계수이며, K_{2e} , K_{2T} 는 FBG 2의 변형률 감지 계수와 열 감지계수를 나타낸다. 두 식을 연립하여 파장 변화를 온도 및 변형률 변화에 대한 2 × 2행렬식으로 표현할 수 있다. 이 공식을 이용하여 역행렬을 구하면 온도 및 변형률 변화를 정확히 구분할 수 있다. 이와

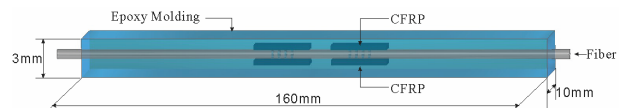


Fig. 3 Design of paired FBG sensor probe

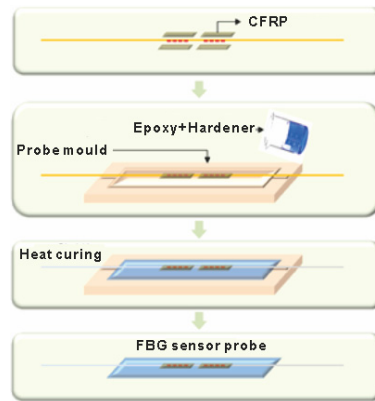


Fig. 4 FBG sensor probe with low thermal expansion material

같이 두 개의 FBG를 각각 온도와 변형률에 대한 감지도를 다르게 하기 위하여 FBG위에 탄성력 및 열팽창 계수를 위하여 열팽창 계수가 다른 물질로 FBG 센서를 제작하여 온도 감지도를 낮추어서 FBG 센서 탐촉자를 제작하고, 그 응답성을 사용하면 Paired FBG를 이용해서 온도에 의한 효과와 변형률에 의한 영향을 모두 구할 수 있게 된다.

또한 방법으로는 열 변형 감소 패키징 FBG 센서 탐촉자를 블레이드에 간편히 적용 하기위해 에폭시 수지 등을 이용하여 FBG 탐촉자를 패키징 하는 것이다^[5,16,17]. 따라서 FBG 센서 탐촉자의 온도 감지도를 감소시켜주는 것이 필요하다. 패키징된 FBG 센서 탐촉자의 FBG부분에 열팽창계수가 낮은 재료를 일체화하여 패키징 탐촉자를 제작했다. Fig. 4에서는 제작되는 패키징 FBG 센서 탐촉자의 제작 과정을 나타내었으며, 이 그림에는 FBG의 윗부분과 아랫부분에 열팽창 계수가 $-0.5 \sim +0.5 \mu\text{m}$ 정도의 값을 갖는 카본 프리프래그(CFRP)를 여러 장 성형하여 처리한 후 에폭시 수지를 성형 몰드에 부어 패키징 제작 과정을 나타낸 것이다. Fig. 5은 완성된 Paired FBG 센서를 나타내었다.

대형의 블레이드에 적용을 위하여 다중화 광섬유 FBG 센서 탐촉자는 빛의 입/출력을 고려하여 탐촉자의 긴 부분에 두 개의 광섬유 라인을 설치할 수 있도록 설계하였고, 파장 사용 범위를 최소화하기 위하여 열팽창계수가 낮은 카본 프리프래그(CFRP)를 FBG 위에 어느 정도 부착해야 하는지 알아보았다. Table 1은 패키징을 위한 CFRP의 물성치를 나타내었다. 또한 블레이드에 접착을 위한 재료도 패키징 에폭시 수지와 같은 재료를 사용하였다. 이러한 패키징 및 접착제의 경화는 확실한 성능을 확보하기 위하여 상온 경화시에는 약 3시간동안 경화시키고, 가열 경화시에는 80°C정도로 1시간 정도 챔버에서 경화 시간을 두어 제작하였다. 이때 사용 한 에

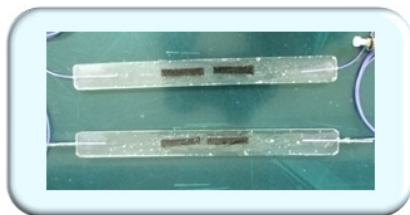


Fig. 5 Configuration of paired FBG sensor probe

Table 1 Properties of CFRP

Variable	Measurement
length	30 mm
width	20 mm
thickness	0.125 mm
Stress at Max. Load	1,878 Mpa
Strain at Max. Load	13,038 $\mu\epsilon$
Modulus of elasticity	141.8 Gpa

폭시는 국도화학 YD-128과 경화제는 IPDA (Isophorone Diamine)를 사용하였다. 혼합비율은 100:23으로 혼합하여 사용하여 제작하였다.

Paired FBG를 이용하여 최종 개발된 탐촉자의 온도에 따른 변형률 측정을 위해 온도에 대한 민감도를 측정하였다. 보다 정밀한 실험을 위해서 CFRP의 두께를 달리해 Fig. 6과 같이 여러 개의 탐촉자를 제작하였다. 이때 CFRP를 각각 2장, 4장, 8장을 부착한 FBG를 에폭시수지로 패키징한 탐촉자와 FBG만 에폭시수지로 패키징한 탐촉자를 제작하였다. 이에 따라 Fig. 7은 CFRP의 두께에 따른 온도 민감도를 나타낸 것이다. CFRP의 두께가 0.125 mm이므로 코어를 중심으로 상부에 4장 하부에 4장을 붙인 결과 즉 CFRP가 8겹(1 mm)일 때 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

또한 그이상의 경우에는 온도 민감도가 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있었으며, 구현된 탐촉자의 온도 민감도는 2.39 p.m./°C로 좋은 성능을 나타내었다.

2.3 하중 및 처짐 알고리즘 개발

블레이드의 팁 처짐을 예측하기 위해서는 블레이드를 길이 방향으로 분포된 굽힘 모멘트를 갖는 단순 빔으로 고려될 수 있다. 따라

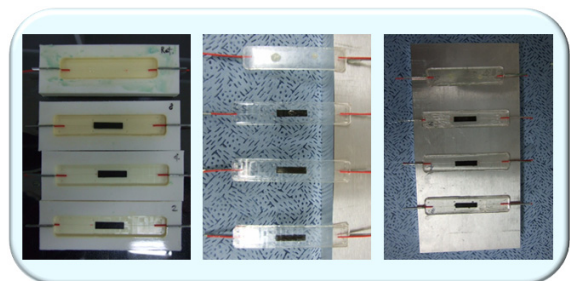


Fig. 6 Configuration of FBG sensor probe by heat curing

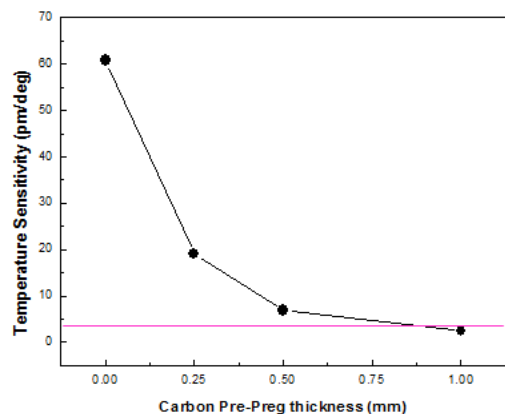


Fig. 7 Temperature sensitivity of carbon pre-preg as a function of a thickness (on paper thickness = 0.125 mm)

서 블레이드의 처짐은 변형률로부터 구해낼 수 있으며, 처짐과 변형률 사이의 관계는 빔 굽힘과 모멘트 이론으로부터 유도될 수 있다. 블레이드는 구조적으로 웹이 주요한 성분이며, 2차적으로 스킨 성분으로 가정하였다. 이러한 가정 하에 구조적 시험으로 계산된 FBG 변형률을 팁 처짐을 결정하는데 사용할 수 있다. 이 경우 블레이드의 한 지점 i 에서 처짐 y 의 2차 미분은 식 (7)의 방정식으로 유도되며 길이 방향에 따른 변형률과 특정 모멘트가 관계되어 있다.

$$\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_i = -\frac{M_i}{(EI)_i} = \frac{\varepsilon_i}{h_i} \quad (7)$$

단, M 은 모멘트, h 는 빔의 중립축으로부터의 높이, ε 은 변형률, I 는 블레이드의 한 지점을 나타낸다. 그러나 2차 미분은 단순빔을 제외하고는 해석적 방정식에 의하여 결정되지 못한다. 따라서 유한차분법이 블레이드 팁 처짐을 계산하기 위하여 적용하였다. 유한차분법은 블레이드에 위치에 따른 하중이 불규칙적이고, 블레이드 자체가 단순 빔 형태인 사각 기둥이 아니기 때문에 더욱 유용하다.

이 방법의 기본원리는 처짐 곡선의 미분 방정식을 유한 근사법으로 대체하고 블레이드 길이 방향을 따른 여러 지점에서 얻어지는 유한 차분 방정식을 수치적으로 풀어내는 방식으로 계산된다.

Fig. 8에서 함수 $y = f(x)$ 는 블레이드 처짐을 나타낸다. x 축은 dx 의 미세구간으로 나눌 수 있고, 각 지점에서 곡선의 해는 x 축을 나누는 개수만큼 나타낼 수 있다. x 축 i 지점에 대응하는 y 값 A 점에서 1차 미분 dy/dx 를 고려하면, 이 미분은 A 점에서의 접선과 동일하며, 순차적으로 B, C 점의 기울기와 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 1차 미분식을 아래의 식 (8)와 같이 근사화 할 수 있다.

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_i \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (8)$$

2차 미분 d^2y/dx^2 은 1차 미분의 변화율을 나타낸다. 그러므로

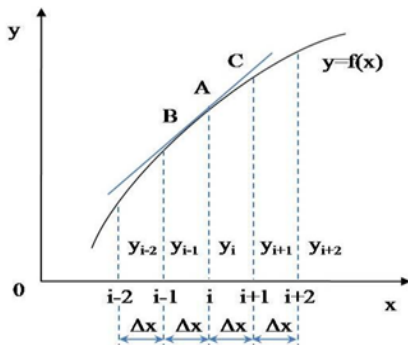


Fig. 8 Finite difference method for an evaluation of beam deflection

i 지점에서 2차 미분은 i 지점 오른쪽의 기울기와 왼쪽의 기울기 차이로 계산할 수 있으며 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_i \approx \frac{\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} - \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (9)$$

처짐 곡선의 2차 미분 방정식과 모멘트 및 변형률로 표현된 2차 미분방정식을 연립하여 블레이드의 팁 처짐을 위한 차분방정식으로 식 (10)와 같이 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_i \approx \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{\varepsilon_i}{h_i} \quad (10)$$

식 (11)에서 블레이드 루트 지점을 처짐이 0이라고 가정하면, 휘어진 팁 처짐은 블레이드 끝단에 걸쳐 처짐을 계산함으로써 얻을 수 있다. 루트에서 처짐 y_0 는 0이고, 가상의 처짐 y_{-1} 과 y_1 은 루트에서 대칭적인 기울기이므로 동일하다. i 지점에서 처짐은 인접한 지점의 처짐들과 식 (12)의 관계를 만족한다.

$$y_i = \frac{\varepsilon_{i-1}}{h_{i-1}} \Delta x^2 + 2y_{i-1} - y_{i-2} \quad (11)$$

단, $i = [1, 2, 3, \dots, N]$ 이다.

y_1 은 경계 조건에 의하여 바로 계산된다.

$$(\because y_1 = y_{-1}, y_0 = 0)$$

$$y_1 = \frac{\varepsilon_0}{2h_0} \Delta x^2 \quad (12)$$

또한 각 지점의 처짐은 식 (11)과 식 (12)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} y_2 &= \frac{\varepsilon_1}{h_1} \Delta x^2 + 2y_1, & y_3 &= \frac{\varepsilon_2}{h_2} \Delta x^2 + 2y_2 - y_1 \\ \dots, & & y_N &= \frac{\varepsilon_{N-1}}{h_{N-1}} \Delta x^2 + 2y_{N-1} - y_{N-2} \end{aligned} \quad (13)$$

y_N 은 블레이드의 굽힘으로 인한 팁 처짐을 나타낸다.

반면, 실제 블레이드의 단면은 전단웹의 중립축으로부터 비대칭이기 때문에 식 (13)의 처짐 결과는 실제 팁 처짐과 오차가 있을 수 있다. 따라서 계산된 처짐은 무계인자 α 에 의하여 보정해 주어야 한다. 블레이드 단면의 급격한 변화가 있다면 블레이드를 강체

의 회전으로 취급될 수도 있다. 그러므로 i 번째 위치에서의 처짐 v_i 는 무게 인자와 강체의 회전으로 인한 처짐을 갖는 식 (12) 및 식 (13)을 더하여 결정될 수 있다.

$$v_i = \alpha y_i + \beta l_i \quad (14)$$

단, α 는 빔 처짐의 무게인자이고, β 는 블레이드의 강체 회전각도, l_i 는 i 번째 위치에서의 길이를 나타낸다. α 와 β 는 실험을 통해 얻어진 정확한 처짐값과 변형률의 관계로부터 결정된다. 블레이드의 팁 처짐은 블레이드 길이 l_N 과 y_N 을 계산함으로써 식 (14)로부터 결정된다.

3. 실험

3.1 센서 네트워크 구성 및 성능시험

위에서 구현한 다중화 탐촉자의 성능시험을 위하여 블레이드를 모사하는 빔을 제작하고 Fig. 9와 같이 Micron Optics사의 Optical Sensing Interrogator (sm-125)를 이용하여 센서 네트워크 시스템을 구성하였다. sm-125 장비는 광대역 광원을 생성하여 FBG 센서에 입사시키고, 또한 FBG 센서에서 반사되어 되돌아오는 신호값을 측정하여 저장하는 장치이다. 센서의 설치는 두 쌍의 Paired FBG 센서를 포함하여 총 10개의 FBG 센서가 부착하였다. FBG 센서는 1,520~1,560 nm 영역으로 서로 다른 파장대를 가진 센서를 선택하였다. 각각의 센서는 인접한 파장대에 영향을 미치지 않게 하기 위해 최소 2 nm 이상의 간격을 유지하도록 FBG 센서를 제작하였다. 이때 FBG 센서의 부착 위치는 보의 중심축을 기준으로 위/아래로 한 쌍을 부착하였다. 이유는 팁 처짐으로 인해 생기는

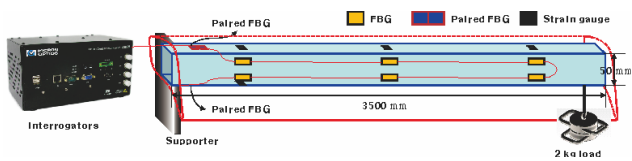


Fig. 9 Structure of a blade model attached with FBG sensor probes system

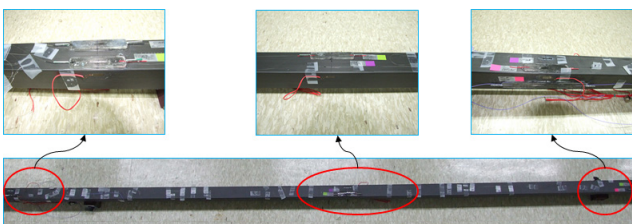


Fig. 10 Blade model picture attached with quasi-distributed FBG sensor probes

변형률이 보의 중간 윗을 기준으로 발생되기 때문에 처짐이 생길 경우 FBG의 파장 변화 방향이 서로 반대가 되어 어느 방향으로 처짐이 발생되었는지를 알 수 있다. 이 값을 통해 팁 처짐의 양 또한 측정이 가능하다. Fig. 10은 제작된 센서 네트워크이다.

구현된 센서 네트워크의 성능 시험을 위하여 선단에 2 kg의 추를 단계별로 추가하면서 변형률을 측정하였다. 그리하여 하중에 따른 변형률 변화를 선형적인 비례관계식을 이용해 FBG 센서의 변형률을 측정하여 모형의 블레이드에 가해지는 하중을 측정하였다. 또한 하중에 따른 팁 처짐 측정은 추가되는 추의 무게에 따른 변형률 변화량으로 식 (12)와 식 (13)을 이용하여 계산하였다. 따라서 Fig. 11에서 보는 것과 같이 0.4%의 오차를 가지는 것을 확인하였다.

Fig. 12는 FBG 센서와 스트레인게이지의 측정 오차를 나타낸 것으로 오차의 범위가 0.5%이내의 오차를 가지는 것으로 확인하였다.

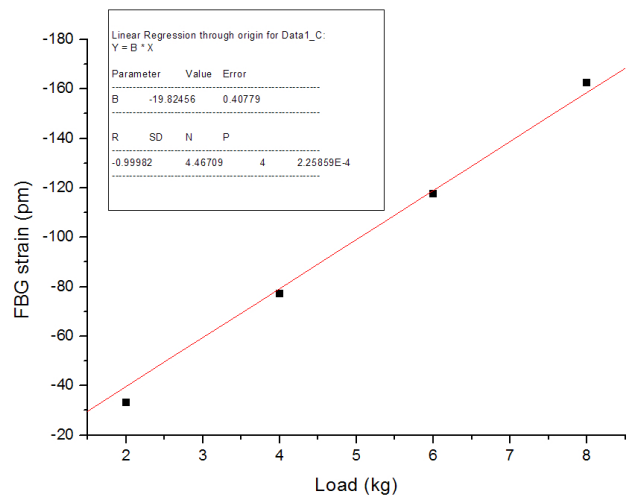


Fig. 11 Linear fit and error of FBG strain and load

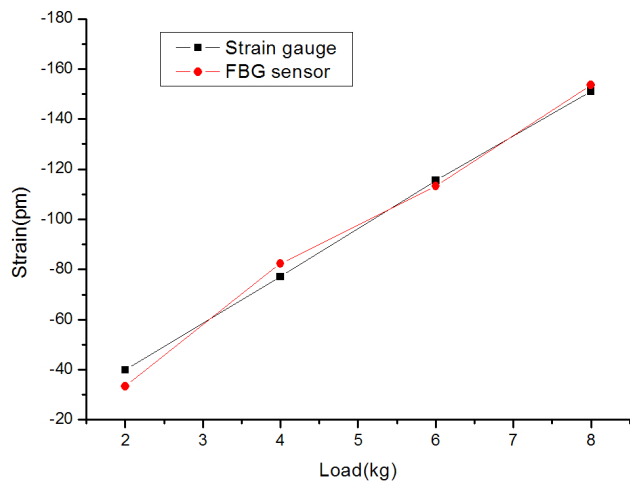


Fig. 12 Linear fit and error of strain gauge or FBG sensor

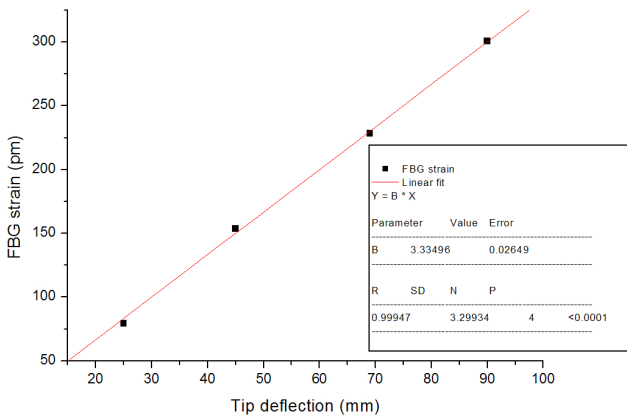


Fig. 13 Linear fit of FBG strain vs. tip deflection as a function of a load

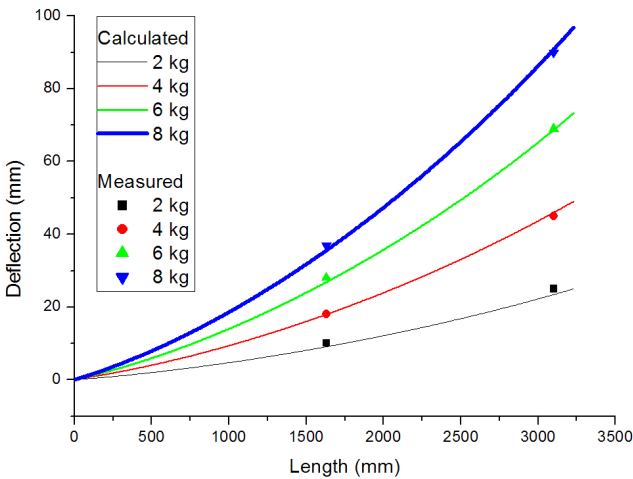


Fig. 14 Deflection calculated from FBG strains and measured from steel scale

Fig. 13는 하중에 따른 FBG 센서의 변형률과 그에 따른 팁 처짐을 나타낸 결과이다. 그림에서 보이는 것처럼 실제 측정된 팁 처짐과 약 3.3%의 오차가 있음을 알 수 있으며, 또한 위에서 언급한 오차 요인으로 생기는 부분을 보정하면 오차범위를 더 줄일 수 있으리라 판단된다. 한편, 유한 차분법에 의하여 측정된 변형률로부터 팁 처짐을 계산하는 방법을 적용하여 팁 처짐을 구하면 Fig. 14의 결과를 얻을 수 있다. 이 그림에서는 빔에 가해지는 하중을 0, 2, 4, 6, 8 kg으로 조정해가며 변위량을 측정하고 FBG 센서로부터 측정된 변형률을 보인 것이다. 이에 따라 빔의 가운데 부분에서는 측정값과 변형률로부터 측정된 변형률을 보인 것이다. 빔의 중간에서 측정된 변위와 FBG 센서의 변형률 값으로부터 계산한 변위 사이의 오차는 약 4.39%였다. 그렇지만 블레이드 팁에 해당하는 빔의 끝단에서의 측정값과 변형률로부터 계산된 결과는 약 2.46% 이하의 팁 처짐 오차가 발생하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전기 블레이드 처짐 측정을 위한 다중화 센서 탐촉자를 설계 제작하여 센서 탐촉자와 블레이드의 하중 처짐을 측정하는 알고리즘을 개발하였다.

센서 탐촉자는 FBG Sensor를 이용하여 카본 프리브래그를 1 mm 두께로 에폭시를 이용하여 센서를 제작하면 센서 자체의 온도 민감도 저하를 줄일 수 있고 동시에 다점 측정이 가능한 것을 확인하였으며, 에폭시의 성분을 블레이드에 설치가 용이한 제품으로 센서 탐촉자를 제작하였다. 시험결과에서 보는 바와 같이 스트레인게이지와의 비교를 통해 센서 동작의 안정성을 확인하였으며, 따라서 풍력 블레이드에 설치가 가능한 센서 제작 기술을 확보하였다. 또한 모사 모형 블레이드를 이용하여 시험한 결과 유한차분법을 이용하여 측정된 변형률로부터 팁 처짐을 계산할 수 있음을 확인되었다. 이에 따라 향후에는 실제 풍력발전기에 적용을 위해 수 천만원의 고가에 달하는 측정 장치인 인터로게이터를 상용할 수 있도록 저가형의 인터로 게이터로 제작하려 한다. 따라서 실제 풍력발전기 블레이드에 다중화 센서 탐촉자를 설치하고, 실증 실험을 실시하여 블레이드의 풍속에 따른 팁 처짐을 확인해 보고자 한다.

후기

이 연구는 지식경제부에서 추진하는 에너지 기술 평가원에서 추진하는 에너지 기술개발사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Paquette, J. A., Veers, P. S., 2007, Increased strength in wind turbine blades through innovative structural design, European Wind Energy Conference EWEC.
- [2] Kim, W. S., 2003, Damage Detection Techniques of Composite Laminates with Embedded FBG sensors, Master thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [3] Kwon, I. B., 2005, Structural Health Monitoring Using fiber Optic Sensors, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing 25:5 400-404.
- [4] Ciang, C. C., Lee, J. R., Bang, H. J., 2008, Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods, Meas. Sci. Technol. 19:12 122001-122021.
- [5] Herszberg, I., Li, H.C.H., Dharmawan, F., Mouritz, A. P., Nguyen,

- M., Bayandor, J., 2005, Damage assessment and monitoring of composite ship joints, *Composite Structures* 67 205-216.
- [6] Jung, D. W., Kwon, I. B., Choi, N. S., 2005, Fabrication of a Temperature-Compensating FBG Sensor for Measurement of Mechanical Strain, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing* 25:5 356-361.
- [7] Koh, J. I., 2004, Development of fiber bragg grating sensor system for the simultaneous measurement of strain and high-frequency vibration in composite structures, Doctorate Thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [8] Ryu, C. Y., 2001, Research Trend in Smart Structures Using Fiber Optic Sensors, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing* 21:3 319-329.
- [9] Lin, Y. B., Chang, K. C., Chern, J. C., Wang, L. A., 2005, Packaging Methods of Fiber-Bragg Grating Sensors in Civil Structure Applications, *IEEE sensors journal* 419-424.
- [10] Wnuk, V. P., 2005, Process for Mounting and Packaging of Fiber Bragg Grating Strain Sensors for use in Harsh Environment Applications, *Proceedings of SPIE* 46-53.
- [11] Ryu, C. Y., 2001, The Strain Monitoring of Smart Composite Structures Using Fiber Bragg Grating Sensors by Multiplexing Method, Doctorate Thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [12] Kang, L. H., 2004, Estimation of Structural Deformation Using Fiber Optic Bragg Grating Sensor Array, Doctorate Thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [13] Seo, Y. J., 2004, Characterization of Fiber Bragg Grating fabricated by the Phase Mask Method, Doctorate Thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [14] Kang, D. H., 2004, Signal and Mechanical Characteristics of FBG Sensors Embedded into Composite Structures, Doctorate Thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [15] Palaniappan, J., Ogin, S.L., Thorne, A.M., Reed, G.T., Crocombe, A. D., Capell, T.F., Tjin, S.C., Mohanty, L., 2008, Disbond growth detection in composite-composite single-lap joints using chirped FBG sensors, *Composites Science and Technology* 68 2410-2417.
- [16] Schroeder, Kerstin., Ecke, W., Apitz, J., Lembke, E., Gerhard., 2006, A fiber Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade, *Meas. Sci. Technol.* 17 1167-1172.
- [17] Henry, C., H. Li., Olivier, D., Israel, H., Paul, R. S., Claire, E. D., Adrian, P. M., 2006, Health monitoring of bonded composite repairs using fibre optic sensors, *Smart Structures and Materials: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, *Proceedings of SPIE* 6174.