

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.5.513

ISSN 1226-4881

## 광섬유 브래그격자 센서를 이용한 풍력발전기 날개의 모드 해석

김창환\* · 백인수\*\* · 유능수\* · 남윤수\*

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

### Modal Analysis of Wind Turbine Blade Using Optical-Fiber Bragg-Grating Sensors

Chang Hwan Kim\*, Insu Paek\*\*, Neung Soo Yoo\* and Yoon Su Nam\*

\* Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received July 5, 2010 ; Revised February 15, 2011 ; Accepted February 16, 2011)

**Key Words:** Wind Turbine Blade(풍력발전기날개), Modal Analysis(모드해석), Resonance(공진)

**초록:** 소형 풍력발전기 날개의 동적 거동에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 날개를 따라 배열된 광 브래그 격자 (Fiber Bragg Grating) 센서를 이용하여 날개 표면에서의 변형률(strain)을 측정하였다. 충격 햄머 실험 (Impact Hammer Test)을 통하여, 1차 및 고차 모드의 공진주파수를 측정하였다. 광섬유 센서를 이용한 실험결과를 스트레인 게이지를 이용한 실험 결과와 비교한 결과 모드 주파수는 매우 유사하였다. 하지만, 광섬유 센서의 경우 스트레인 게이지에서 감지하지 못하는 모드를 감지할 수 있었다. 또한, 실험으로부터 얻은 변형률 모드를 이용하여 근사적으로 날개의 변위 모드를 추정하였다.

**Abstract:** The dynamic behavior of a small wind-turbine blade was analyzed experimentally. Arrays of fiber Bragg-Grating (FBG) sensors attached along the blade were used to measure the strains of the blade surface. An impact test was performed to estimate the resonance frequencies of the fundamental and higher modes of the cantilever blade system developed for this study. The results were similar to the results for conventional strain gages. However, FBG sensors could sense modes that strain gauges could not sense. The strains obtained from the FBG sensor array were used to estimate displacement-mode shapes of the blade.

#### 1. 서 론

1970년대 후반 풍력발전산업의 근대화가 이루어지면서 메가와트(MW)급의 대형 풍력발전기가 본격적으로 생산되기 시작한 이후, 풍력발전 산업은 비교적 낮은 발전단가와 높은 내구성으로 인해 그 경제성을 인정받고 있다. 또한 건설비용 대비 발전수익을 높이기 위해 풍력발전기의 용량은 점점 대형화 되고 있으며 최근에는 7.5MW 풍력발전기의 개발에 이어,<sup>(1)</sup> 10MW 풍력발전기가 건설 계획 중에 있다.<sup>(2)</sup>

풍력발전기의 대형화와 함께, 풍력발전기 로터가 받게 되는 풍하중도 높아지게 되며, 이에 따

른 날개의 피로파괴에 대한 가능성도 또한 높아지고 있다.<sup>(3,4)</sup>

이에 따라 로터가 받게 되는 하중을 최소화 하기 위한 날개의 개별피치 제어기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이는 풍력발전기의 20년 수명을 보장하기 위한 필수 조건이 되고 있다.<sup>(5,6)</sup>

본 연구에서는 풍력발전기 날개의 풍하중을 줄이기 위한 개별 피치제어기술에 적용하기 위한 전 단계로 광센서를 이용한 풍력발전기 날개의 변형률을 측정하고 이를 이용하여, 날개의 모드형상을 찾아내는 연구를 수행하였다.

문헌에서는 단순보에서 광센서를 이용한 고유진동수의 측정이나,<sup>(7)</sup> 풍력발전기 날개에서의 광센서 Strain 신호의 단순 측정<sup>(8)</sup>에 관한 연구결과는 찾아볼 수 있지만, 본 연구와 같은 소형 풍력발전기 날개에서의 광센서와 전기식 스트레인 센

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 강원지회 춘계학술대회(2010. 5. 14., 강원대) 발표논문임

† Corresponding Author, paek@kangwon.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers



Fig. 1 Blade cantilever system

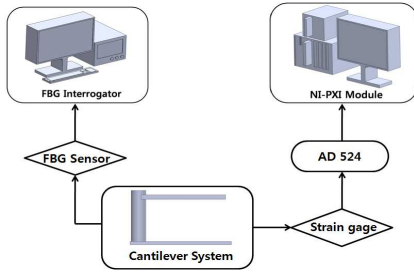


Fig. 2 Experimental setup

서를 이용한 모드 해석에 대한 비교연구는 거의 찾아볼 수 없다.

광센서는 전기식 센서인 스트레인 게이지에 비해, 전자기파의 간섭이 없고, 장시간 사용에 있어 안정적이고 센서의 보정이 필요 없으며, 하나의 광섬유에 다수의 센서를 직렬로 연결 가능하여, 풍력발전기 날개의 변형을 측정에 적합한 것으로 알려지고 있으며, 풍력발전기 날개에 장기간 설치되어 상태모니터링을 수행하기 위해 적합한 센서로 인식되어지고 있다.

## 2. 실험장치 구성

### 2.1 날개 외팔보 시스템

소형 풍력발전기 날개의 정적 또는 동적 응답에 대한 실험을 위하여, Fig. 1과 같이 외팔보 시스템을 구성하였다. 날개를 고정하는 허브 부분과 날개의 루트 부분은 그림과 같이 6개의 볼트를 이용하여 체결하였다.

Fig. 2와 같이 광 브레그격자 센서와 스트레인 게이지의 신호를 동시에 측정할 수 있는 실험 장치를 구성하였다. 광센서의 경우, 대역폭이 넓은 광 신호를 광센서에 입력시키기 위해, 40 nm의 파장범위를 갖는 FBG Interrogator를 사용하였으며,<sup>(9)</sup> 샘플링 주파수는 장비의 한계치인 500 Hz를 이용하였다. 실험결과는 FBG Interrogator에 저장되었다.

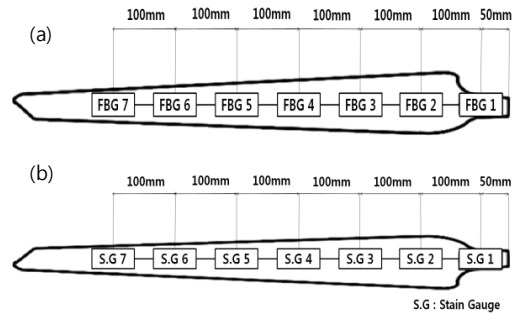


Fig. 3 Location of Sensors. (a) FBG, (b) Strain Gauge

스트레인 게이지의 경우, 신호를 증폭하기 위해 AD524를 이용한 증폭률 100배의 증폭회로를 구성하였으며, 증폭한 이후 별도의 데이터 수집장치<sup>(10)</sup>를 이용하여 광센서의 경우와 동일한 샘플링 주파수인 500 Hz로 기록하였다. 실험 결과는 매트랩 프로그램을 이용하여 분석하였다.

### 2.2 센서

Figure 1의 외팔보 시스템에 설치된 풍력발전기 날개에 Fig. 3과 같이 날개의 한쪽 표면에는 길이 방향으로 총 7개의 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 배열하고 반대쪽 면에는 동일한 루트부에서의 위치에 7개의 스트레인 게이지를 부착하였다.

본 연구에서 실험한 풍력발전기 날개의 길이는 960mm, 직경은 44.5mm이며, 재질은 FRP(Fiber Reinforced plastic)이다. 블레이드 표면에 설치한 FBG 센서간의 간격은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 100mm으로 일정한 간격으로 설치하였다.

FBG 센서의 경우 변형률은 FBG 센서로부터 반사되는 빛의 파장 변화에 비례하게 되며, 변형률이 '+' 인 경우(인장) 파장이 증가하고, '-' 인 경우(압축) 파장이 감소하게 된다. FBG 센서를 이용하여, 인장 및 압축에 대한 변형을 측정을 위해 초기 변형률을 주어 설치하였으며, 설치된 FBG 센서의 기준파장과 Pre-strain을 주어 설치한 이후의 파장은 Table 1과 같다.

## 3. 실험방법 및 결과

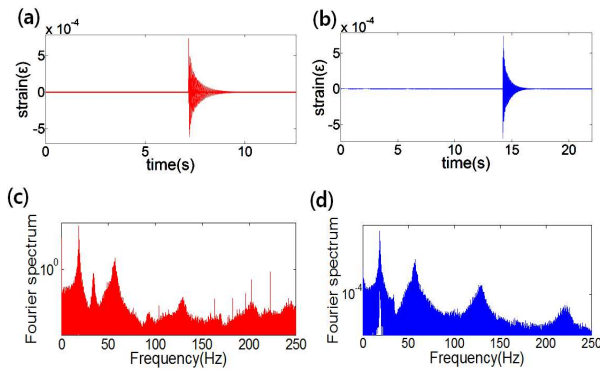
풍력발전기 날개의 공진주파수 및 모드형상을 알아보기 위해, 충격해머 실험(Impact Hammer Test)을 수행하였다. 시간 영역에서의 충격에 의한 센서의 시간영역에서의 응답과 주파수 영역에서

**Table 1** Wavelength of FBG Sensors

	기준파장	설치 후 파장
RL-1	1550.9nm	1551.9nm
RL-2	1555.9nm	1556.4nm
RL-3	1550.9nm	1551.8nm
RL-4	1561.0nm	1561.7nm
RL-5	1550.9nm	1551.8nm
RL-6	1555.9nm	1557.1nm
RL-7	1565.9nm	1567.2nm

**Table 2** Modal frequencies

	FBG Sensors	Strain gage
1 <sup>st</sup> mode	18.5Hz	18.5Hz
2 <sup>nd</sup> mode	56.8Hz	56.9Hz
3 <sup>th</sup> mode	129.8Hz	129.1Hz



**Fig. 4** Results for the impact test. (a) Time domain response, FBG, (b) Time domain response, Strain Gauge, (c) Fourier Spectrum, FBG, (d) Fourier Spectrum, Strain Gauge

의 푸리에 스펙트럼(Fourier Spectrum)의 결과가 Fig. 4에 제시되어 있다.

가속도 센서가 아닌 FBG 스트레인 센서를 이용한 날개의 동적 특성 측정은 센서가 가볍고, 폭넓은 스트레인 범위에서의 뛰어난 선형성, 그리고 하나의 광섬유에 직렬로 연결될 수 있는 이점을 포함하고 있다.<sup>(11)</sup>

두 센서를 이용한 날개의 Flapwise 방향(Fig. 3의 지면 안과 밖으로의 진동방향)의 모드 주파수는 Table 2에 제시된 바와 같이, 매우 유사한 결과를 보여주었다. 또한 FBG 센서로부터의 결과인 Fig. 4(c)의 푸리에 스펙트럼을 살펴보면 Fig. 4(d)의 스트레인 게이지로부터의 결과와 달리 Flapwise 방향의 1차 모드와 2차 모드 사이, 그리고 2차 모드와 3차 모드 사이에 작은 피크가 존재함을 알 수 있다. 이는 스트레인 게이지의 경우 스트레인 게이지가 부착되는 면의 수직 방향의 굽힘에 반응하고 측면방향의 굽힘에 반응하지 않는데 반해, FBG 센서의 경우 원형 광섬유이기

때문에 센서가 부착되는 면의 수직 방향의 굽힘뿐만 아니라, 측면방향의 굽힘이나 비틀림에도 반응하기 때문인 것으로 판단된다.

충격해머 실험에 의한 1차~3차의 변위 모드형상을 Fig. 5에 나타내었다. 변위 모드형상의 경우 근사적인 모드형상을 알아보기 위해 단순보의 미소처짐을 가정하여 계산하였다. 단순보의 미소처짐에서 곡률과 변형률, 그리고 처짐사이의 관계<sup>(12)</sup>는

$$\kappa(x) = -\frac{\epsilon(x)}{y(x)} = \frac{d^2v(x)}{dx^2} \quad (1)$$

로 쓸 수 있으며, 여기에서  $\kappa$ 는 곡률,  $\epsilon(x)$ 는 날개 길이방향의  $x$  위치에서의 변형률,  $y$ 는 단면의 중립축에서부터 표면까지의 길이, 그리고  $v$ 는 처짐을 나타낸다.

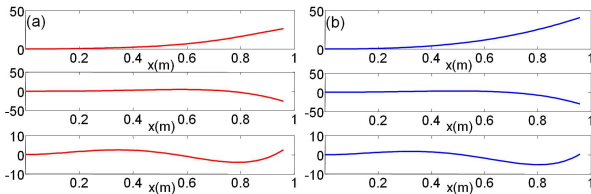
식 (1)에서 양변을 적분하고, 외팔보 고정단인  $x=0$ 인 지점에서의  $v'=v=0$ 의 경계조건을 이용하면

$$v(x) = \iint_0^x \kappa(x) dx \quad (2)$$

로 표현할 수 있다.<sup>(13)</sup>

7개의 센서로부터 각 위치에서의  $\epsilon(x)/y(x)$ 의 값을 구하고, 그 값을 만족시키는 6차 다항식의 회귀식을 이용하여  $\kappa(x)$ 를 구할 수 있으며, 식 (2)의 정적분을 수행하는 것으로  $\kappa(x)$ 로부터 처짐  $v(x)$ 를 구할 수 있다.

각 센서의 부착위치에서의  $y$  값은 단면을 일정한 재질의 단면으로 가정하고 중립축의 위치를 FBG 센서의 부착위치와 스트레인게이지 부착위치 사이의 거리의 1/2인 지점으로 가정하였다. 이런 가정을 이용하여 근사적으로 날개의 처짐  $v(x)$ 에 대한 모드를 구한 결과가 Fig. 5에 제시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 FBG와 스트레인게이지에서의 변위 모드형상은 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 두 가지 경우 모두에 대하여 효과적으로 외팔보 날개의 모드를 계산할 수 있



**Fig. 5** Results for Modal analysis (a) Mode shape obtained using FBG data. (1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> modes from top to bottom) (b) Mode shape obtained using strain gauge data. (1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> modes from top to bottom)

음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 개별 피치제어기술에 적용하기 위한 전 단계로 광 브레그격자(FBG)센서를 이용하여 소형 풍력발전기 날개의 변형률을 측정하고 날개의 모드형상을 계산하는 연구를 수행하였다. 모드형상은 각 FBG 센서로부터 측정된 변형률을 이용하여 날개의 처짐을 나타내는 변위모드를 계산하였다. FBG 센서로부터 얻은 모드형상을 스트레인 게이지를 이용하여 얻은 모드형상과 비교한 결과, 두 센서로부터의 결과는 매우 유사하였다. 하지만, 스트레인 게이지의 경우 센서가 설치된 표면의 수직방향(날개의 Flapwise 방향)으로 작용하는 굽힘에 대해서만 반응하게 되는 반면 FBG 센서의 경우 센서가 설치된 표면의 수직 과 측면 방향으로 작용하는 굽힘과 비틀림 모두에 반응하게 되므로, 푸리에 스펙트럼의 경우 스트레인 게이지신호의 경우보다 많은 모드를 감지할 수 있었다. 따라서 FBG 센서를 이용하여 모드를 추출할 경우에는 수직 및 측면방향 모두에 센서를 부착하여 각각의 경우에 해당하는 모드를 확인할 필요가 있다고 판단된다.

#### 후기

본 연구는 2011(2차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 2009T100100621)

#### 참고문헌

(1) "E-126 Turns Into 7.5 MW Wind Turbine," Article Available Online at <http://www.evwind.es/>

noticias.php?id\_not=4017, Last Seen on June 30, 2010.

(2) "World's Largest Wind Turbine," Article Available Online at <http://www.greenmuze.com/climate/energy/2287-worlds-largest-wind-turbine.html>, Last Seen on June 30, 2010.

(3) Marin, J.C., Barroso, A., Paris, F. and Canas, J., 2009, "Study of Fatigue Damage in Wind Turbine Blades," *Engineering failure analysis*, Vol. 16, pp. 656-668.

(4) Mahri, Z.L. and Rouabah, M.S., 2002, "Fatigue Estimation for a Rotating Blade of a Wind Turbine," *Rev. Energ. Ren.*, Vol. 5, pp. 39-47.

(5) Bossanyi, E.A., 2002, "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction," *Wind Energy*, Vol. 6, pp. 119-128.

(6) Bossanyi, E.A., 2005, "Further Load Reductions with Individual Pitch Control," *Wind Energy*, Vol. 8, pp. 481-485.

(7) Lee, J.W., Huh, Y.C., Nam, Y.Y., Lee, G.H., Kim, Y.S. and Lee, Y.B., 2007, "Measurement and Monitoring of Mechanical Loads of Wind Turbines Using Distributed Fiber Optic Sensor," *Trans. of the Korean Soc. for Noise and Vib. Eng.*, Vol. 17, pp. 1028-1036.

(8) Schroeder, K., Ecke, W., Apitz, J., Lembke, E. and Lenschow, G., 2006, "A Fibre Bragg Grating Sensor System Monitors Operational Load in a Wind Turbine Rotor Blade," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 1167-1172.

(9) Cytronique Co. Ltd.

(10) PXI module, National Instruments.

(11) Kang, L.H., Kim, D.K. and Han, J.H., 2007, "Estimation of Dynamic Structural Displacements Using Fiber Bragg Grating Strain Sensors," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 35, pp. 534-542.

(12) Gere, J.M. and Goodno, B.J., 2009, *Mechanics of Materials*, 7th edition, Cengage Learning, Toronto, Canada, Chapter 5.

(13) Choi, E.S., Kang, D.H., Chung W.S. and Kim, H.S., 2006, "Estimation of Dynamic Displacement and Characteristics of a Simple Beam from Fbg Sensor Signals," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 18, pp. 503-514.