

광섬유 격자센서 내장형 소형 풍력발전기 날개 제작

김창환*, 윤진용*, 김현규*, 김관수*, 백인수**, 유능수***

*강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 (honestboy@kangwon.ac.kr, yjyung@kangwon.ac.kr, khg0104@kangwon.ac.kr, kwansoo@kangwon.ac.kr)

**강원대학교 기계메카트로닉스공학과 조교수, 공학박사(paek@kangwon.ac.kr)

***강원대학교 기계메카트로닉스공학과 정교수, 공학박사(yooneso@kangwon.ac.kr)

Manufacturing of an FBG sensor imbedded small wind turbine blade

Kim, Changhwan* Yun, Jinyoung* Kim, Hyungyu* Kim, Kwansoo*
Paek, Insu** Yoo, Neungsoo***

*Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Graduate School, Kangwon National University(honestboy@kangwon.ac.kr, yjyung@kangwon.ac.kr, khg0104@kangwon.ac.kr, kwansoo@kangwon.ac.kr)

**Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Assistant professor, Ph.D(paek@kangwon.ac.kr),

***Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Professor, Ph.D(yooneso@kangwon.ac.kr),

Abstract

A Fiber Bragg Grating (FBG) sensor imbedded small wind turbine blade was manufactured to experimentally investigate the feasibility to embed FBG sensors between layers of glass fiber to monitor dynamic strains of the wind turbine blade. The blade which is similar to a commercial 300 W wind turbine blade was manufactured with glass fiber as a reinforcement and epoxy resin as base material. A total of five FBG sensors including one temperature sensor were imbedded in the blade to sense mechanical strain and temperature. While manufacturing the blade, residual strain and temperature that occurred in the small wind turbine blade were monitored using the imbedded FBG sensor array. To examine the sensor performance, an impact test was carried out. The experimental results from the FBG sensors were close to those from electrical strain gages mounted on the blade root surface. The mode shapes of the blade were analyzed also using a commercial Ansys simulation with a model obtained from a three dimensional laser scanning of the blade.

Keywords : 광섬유 격자 센서(Fiber Bragg Grating sensor), 블레이드(Blade), 잔류 응력(Residual Strain), 섬유강화 복합 재료(Fiber Reinforced Plastic)

1. 서 론

풍력 발전기의 날개는 바람과 자중으로 인한 동적 하중을 받게 되며, 불규칙적으로 불어오는 바람으로 인해 발생하는 피로 현상이 지배적으로 나타난다[1]. 따라서 운전 중인 풍력 발전기 날개의 상태를 모니터링 하는 CMS (Condition Monitoring System, 상태 모니터링 시스템) 기술에 대한 중요성이 커지고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[2].

풍력발전기 날개 상태모니터링의 경우 특히 발전기 내부에서 발생하는 고전압의 전류나 번개에 의한 EMI (Electro-Magnetic Interference, 전자과간섭)에 영향을 받지 않는 센서를 사용하는 것이 중요하다. 이러한 조건을 만족시키는 센서들 중 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating) 센서는 설치 지점에서 발생하는 기계적 변형률 및 온도, 압력을 측정하는 센서로서 구조물에 작용하는 응력이나 진동변위를 알아내는데 사용될 수 있다 [3]. 광섬유 격자 센서는 또한 센서 케이블의 길이 당 손실이 기존의 전기식 센서와 비교하여 매우 낮기 때문에 대형 구조물에 설치하여 상태 모니터링 하는데 있어 용이하며, 구조물의 분포 변형률을 측정하기 위한 광분배기를 사용할 경우 보다 많은 지점에서 발생하는 변형률을 측정할 수 있는 장점을 갖고 있다[4].

풍력발전기에 대한 광섬유 격자센서의 적용은 주로 단순화된 회전날개 또는 고정된 날개의 표면에 부착된 센서를 이용하여 날개의 동적 응답을 측정하는 연구들이 주를 이루고 있다 [5, 6]. 최근 대형 풍력발전기를 구성하고 있는 날개, 주축, 기어박스, 타워 등에서 발생하는 변형률 분포를 측정함으로써 풍력발전기의 상태 모니터링에 대한 적용 가능성을 확인하였지만 [7, 8], 이와 관련된 연구는 문헌상에서 극히 제한적이다.

또한 풍력발전기 날개의 이상 유무 감지 알고리즘 개발을 위하여, 광섬유 격자센서를 직

접 대형 풍력발전기에 적용하여 실험하는 것보다 대형 풍력발전기를 모사할 수 있는 축소형 시스템에 적용하는 것이 용이하기 때문에, 현재 세계 여러 연구팀들에서 이를 위한 축소형 모델에 대한 연구가 진행 중이다 [9-11].

따라서, 본 연구는 대형 풍력발전기 날개의 이상 유무 감지 알고리즘 개발을 위한 선행 연구로서, 대형 풍력발전기를 모사하는 축소형 시스템에 적용 가능한 소형 풍력발전기 날개에 대한 광섬유 격자센서의 적용 가능성을 확인해 보기 위해 수행되었다. 즉 소형 풍력발전기 날개 제작 시 에폭시 수지 적층 구조물 내부에 광섬유 센서를 부착하여 적층 시 발생하는 온도 및 잔류 응력을 측정하고 또한 날개 제작 이후 에폭시 적층 구조물과 함께 경화된 광섬유 격자 센서가 정상적으로 작동하게 되는지 그 적용 가능성을 알아보기 위해 수행되었다.

2. 실험장치 구성

2.1 날개

본 연구에서 사용된 풍력발전기 날개는 300W 급 상용 소형 풍력발전기 날개이다. 날개의 길이는 960 mm, 루트부 직경은 44.5mm 이다.



Fig. 1 Schematic of a 300W small wind turbine blade

고분자 복합재료로 제작된 날개는 보강재인 유리섬유와 기지재료인 에폭시 수지를 사용하였다. 에폭시 수지는 전기적 성질이 매우 우수하며, 내수성, 내마모성 성질을 갖고 있다. 또한, 상온에서 쉽게 열경화성의 물질로 만들 수 있어 날개 제작 시 용이하다. 이러한 에폭시수지를 경화시키기 위해서는 경화제와

반응시켜야 하며, 이 때 발열 현상이 동반된다. 본 연구에서는 수지 질량의 2%의 경화제를 사용하여 날개를 경화시켰다. 자세한 날개의 제작 순서는 Fig. 2에 나타나 있다.



Fig. 2 Flow chart for blade manufacturing

2.2 광섬유 격자 센서

광섬유는 코어(core), 클래딩(cladding), 외부 피복(coating)으로 구성되어 있으며, 굴절률이 높은 유리로 제작된 코어와 굴절률이 낮은 유리로 제작된 클래딩 간에 굴절률 차이로 인한 전반사로 빛 신호를 송수신 하게 된다. 본 연구에서 사용된 광섬유 타입은 SMF-28 (Single mode Fiber, 단일 섬유)로서 코어 직경은 $9\mu m$, 클래딩 직경은 $125\mu m$, 길이에 따른 빛 세기의 감쇠량은 0.22 dB/km 이다[12].

광섬유 격자 센서는 코어 내부에 브래그 격자를 생성하여 다수의 경계면에서 광신호의 일부가 반사 또는 투과하는 과정을 거치면서 다중간섭을 일으켜 위상조건을 만족시키는 파장만을 반사 또는 굴절시키는 광학 소재이다[1].

즉, 광대역의 스펙트럼(Spectrum)이 브래그 격자가 새겨진 광섬유 코어에 입사될 경

우, 식(1)을 만족시키는 파장 성분만 반사되며, 나머지 파장들은 격자 부근을 그대로 통과하여 광섬유 케이블 종단부에서 외부로 산란된다.

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

식 (1)에서 λ 는 반사되는 빛의 파장, n 은 광섬유 코어의 재질에 따라 결정되는 유효 굴절률, Λ 는 격자 간의 간격을 나타낸다[6].

광섬유 격자 센서가 설치된 구조물에서 발생된 인장 또는 압축은 광섬유 격자 센서의 간격을 변화시키며, 결과적으로 센서에서 반사되는 빛의 파장값을 변화시키게 된다. 따라서 구조물에 부착된 광섬유 격자 센서의 반사 파장값의 차이를 통해서 구조물에서 발생된 스트레인을 측정할 수 있다. 이와 같은 광섬유 격자센서의 파장변화와 스트레인의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = (10^6 \mu m/m) \frac{\Delta\lambda/\lambda_0}{F_G} - \varepsilon_{T0} \quad (2)$$

식 (2)에서 ε 은 스트레인, $\Delta\lambda$ 은 파장 변화(pm), λ_0 은 초기 기준 파장값(pm), F_G 은 게이지 상수값, ε_{T0} 는 온도변화에 의한 스트레인이다.

식 (2)에서 온도변화에 의한 스트레인값을 감해 주는 것은 광섬유 격자 센서가 구조물에서 발생하는 기계적 스트레인 뿐만 아니라 주변 온도에 의해서도 파장이 변화하게 되므로 이에 따른 온도 보상이 필요하기 때문이다. 본 연구에서는 온도보상을 위하여 광섬유 격자 온도센서를 사용하였다. 광섬유 격자 온도센서의 경우 온도와 파장과의 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = C_3(\lambda + \lambda_{OS})^3 + C_2(\lambda + \lambda_{OS})^2 + C_1(\lambda + \lambda_{OS}) + C_0 \quad (3)$$

또한 식(3)의 온도변화에 의한 스트레인 변화는 식 (4)와 같다.

$$\varepsilon_{T_0} = S_T(T - 20.0^\circ\text{C}) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 C_0, C_1, C_2, C_3 는 사용된 광섬유 격자 온도 센서의 계산 상수, λ 는 측정된 파장값(pm), λ_{OS} 는 파장 오프셋(pm), T 는 측정된 온도($^\circ\text{C}$), S_T 는 온도 센서의 민감도($\text{pm}/^\circ\text{C}$)를 나타낸다. 본 연구에서는 식 (3)과 (4)를 이용하여, 광섬유 격자 온도센서로부터 온도와, 온도변화에 의한 스트레인 값을 얻었으며, 식 (2)에 의해 광섬유 격자 센서의 스트레인 값을 온도 보정하였다.

2.3 광섬유 격자센서 설치

풍력발전기 날개에 부착되는 스트레인 센서는 크게 두 가지 목적으로 사용된다. 첫째는 풍력발전기 루트부의 스트레인값을 측정하여 굽힘 모멘트를 계산하고 이를 개별 피치제어의 입력으로 활용하게 된다 [13]. 두 번째 목적은 센서를 날개의 스펠 방향으로 설치하여 날개의 이상 유무를 모니터링 하고, 이상 발생 위치를 파악하는데 활용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 제시된 좌표 시스템과 같이 날개의 루트부에 플랫폼(flat)방향과 엣지(edge)방향의 변위와 관련되는 스트레인을 측정하기 위해 2개의 센서를 설치하였으며, 또한 날개의 스펠 방향으로 1개의 온도센서를 포함하여 5개의 센서를 설치하였다. 날개에 부착된 센서의 위치는 Fig. 4에 제시되었다.

Fig. 2의 날개 제작과정에서 4번과 5번의 중간 과정에서 유리섬유에 에폭시 수지를 바른 후 센서를 설치하였으며, 그 위에 다시 유리 섬유와 에폭시 수지를 발라 경화 시켰다.

광섬유 격자 센서를 날개의 에폭시 적층 구조물 사이에 삽입 시 외부 충격으로부터 센서를 보호하기 위해 아크릴레이트(Acrylate)로

코팅하였으며, 외부로 나와 커넥터와 연결되는 부분에는 피복 자켓을 이용하였다. 설치된 7개의 센서는 Fig. 4와 같이 직렬로 연결되었으며, 센서 설치 시 광량을 모니터링하며, 광섬유가 굽어지는 부분의 곡률 반경이 너무 작아져 광량 감소가 크게 발생하지 않도록 주의하였다. 광섬유 격자센서가 내부에 설치된 블레이드의 사진은 Fig. 5와 같다.

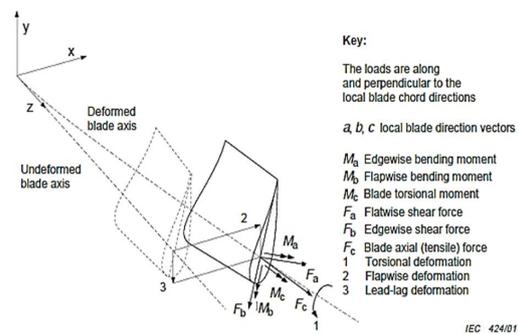


Fig. 3 Blade coordinate system.

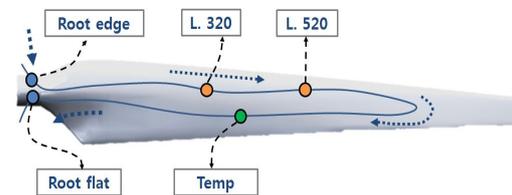


Fig. 4 Position of installed FBG sensors in blade



Fig. 5 Manufactured FBG sensor imbedded blade

2.4 광섬유 격자 센서 계측 시스템

광섬유 격자 센서를 이용한 계측시스템은 Fig. 6과 같이 인테로 게이터 (Interrogator) 와 PC를 이용하여 구성하였다. 인테로 게이 터는 광섬유 격자센서로 광대역 광신호를 내 보내고, 격자 센서에서 반사되는 광신호의 파 장을 감지함으로써, 파장 변화에 의한 스트레

인값을 계산하게 된다. 본 연구에 사용된 인테로 게이터는 5pm의 파장 안정도를 갖고 있으며, 이는 광섬유 격자 센서의 민감도를 고려하였을 때 약 $\pm 2.1\mu\text{m}$ 의 스트레인 오차에 해당한다. 또한 인테로 게이터의 샘플링 주파수는 1kHz 이며, 파장 대역은 1510nm ~ 1590nm 이다. 본 실험에서의 광섬유 격자 센서의 응답은 Ethernet 케이블을 통해 PC로 전송하여 모니터링 및 분석을 수행하였다.

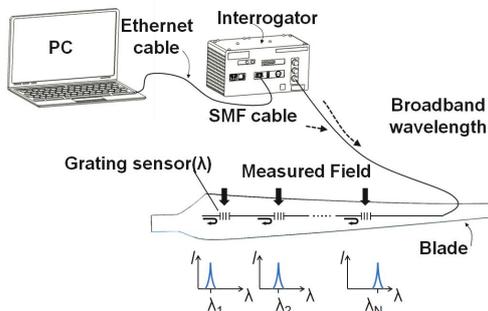


Fig. 6 Schematic of measurement system

3. 실험방법 및 결과

본 연구에서는 광섬유 격자센서를 이용하여, 날개 제작 과정 중 에폭시 수지 경화 과정에서의 온도변화 및 잔류 스트레인, 그리고 날개 제작 이후의 충격 실험을 통하여, 날개의 모드 주파수를 측정하고 센서의 응답을 확인하였다. 또한 날개의 모드 형상을 추출하기 위해 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 외부 형상을 정확히 좌표화 하고, Ansys 프로그램을 이용하여 모드해석을 수행하였다.

3.1 잔류 스트레인 및 온도 측정

Fig. 7은 에폭시 수지의 경화과정 동안의 온도변화를 나타낸 것으로, 루트부위에 설치된 광섬유 격자 온도센서를 이용하여 측정된 결과를 보여주고 있다. Fig. 7에서 측정 시작은 센서 부착이후부터 진행되었으며, 약 17분 동안 측정이 이루어졌다.

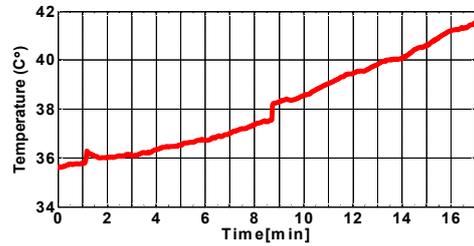


Fig. 7 Internal temperature variation of blade

Fig. 7에서 살펴보면, 예상과 같이 센서 부착이후 에폭시 수지가 경화되는 동안 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 블레이드 내부에 설치된 센서로부터 에폭시 수지가 경화되는 동안 측정된 스트레인 값의 변화를 나타낸다. 즉 Fig. 7의 온도 변화 결과를 이용하여 온도에 의한 스트레인 센서 값의 변화를 보정한 결과이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 센서가 부착된 스트레인 값(0) 으로부터 에폭시 수지가 경화됨에 따라, 스트레인 값이 작아짐을 알 수 있다. 이는 에폭시 수지가 수축하는 것을 나타낸다. 하지만, 센서가 설치된 부분에 따라 유리섬유 및 에폭시 수지의 크기 및 양이 다르기 때문에 수축하는 정도는 차이가 나는 것을 알 수 있다.

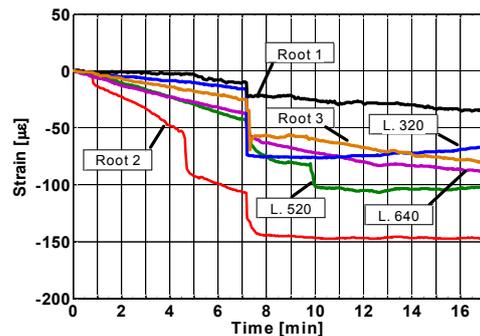


Fig. 8 Internal residual strain variation of blade

3.2 충격실험

날개 제작 시 삽입된 광섬유 격자 센서의 동적 응답 성능을 확인하기 위해, Fig. 9와 같이 외팔보 실험 장치에 날개를 설치한 후 날

개의 플랫방향에 대해 충격 실험을 진행하고, 모드 주파수를 계산하였다.

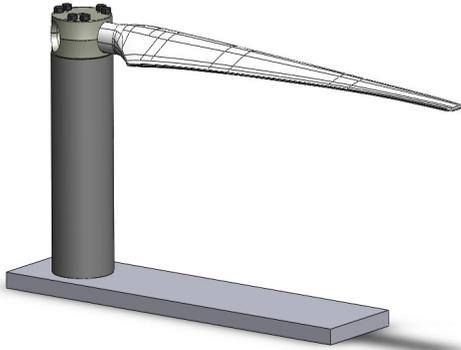


Fig. 9 Cantilever system for blade Impact test

날개에 삽입된 광센서의 응답과 비교를 위해 스트레인 게이지를 날개 표면의 루트부에 설치하고 실험을 진행하였다. 스트레인 게이지는 총 8개의 센서를 플랫(flat) 방향과 엣지(edge)방향에 대해 풀 브릿지(Full bridge)의 형태로 부착하였다. 광 센서의 응답과 스트레인 게이지의 응답에 대한 샘플링 주파수는 동일하게 1kHz를 이용하였다.

Fig. 10은 충격실험결과 측정된 모드 주파수를 나타낸다. Fig. 10에서 알 수 있듯이, 날개에 삽입된 광센서와 표면의 스트레인 게이지로부터의 모드 주파수는 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다. Fig. 10의 결과를 Table. 1에 정리하였다.

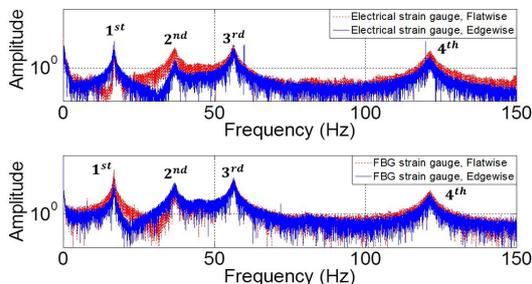


Fig. 10 Results of blade impact test

Table 1. Results of blade impact test

Mode	Strain gauge	FBG
1st Mode (Hz)	16.6	16.6
2nd Mode (Hz)	35.1	35.0
3rd Mode (Hz)	54.5	54.5
4th Mode (Hz)	116.2	116.3

3.3 모드형상 예측

각 주파수에서의 모드 형상을 알아보기 위해 본 연구에서 사용된 소형 블레이드에 대해 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 형상정보를 얻고, 날개의 두께를 약 3mm 로 가정하여 모델링을 수행하였다. 또한 구축된 FEM 모델에 대해 Ansys 프로그램을 이용하여 모드 해석을 수행하였다. 모드 해석을 위한 물성치 중 복합재의 탄성계수(Modulus of Elasticity)는 유사한 날개에 대한 문헌상의 정보를 이용하였다 [15]. 또한 복합재의 밀도는 실제 날개의 중량과 동일한 중량을 갖도록 설정하였다. Fig. 11은 Ansys에서 예측된 모드 형상을 보여준다.

Fig. 11을 살펴보면, 1차~7차 모드의 경우 모두 플랫방향의 굽힘모드 형상을 보여주고 있으며, 2차 모드와 7차모드는 플랫방향의 굽힘모드 형상에 엣지방향의 굽힘 모드가 합쳐진 형상을 보여주고 있다. 또한 5차모드와 6차모드의 경우 플랫방향의 굽힘모드와 비틀림 모드가 합쳐진 형상을 보여주고 있다.

Table. 2에는 Fig. 11의 모드 주파수가 제시되어 있다. Table. 2에서 알 수 있듯이, Ansys 프로그램의 모드해석 결과 얻어진 모드 주파수는 충격실험에서 얻어진 모드 주파수와 다소 차이를 보이고 있다. 이는 날개 자체가 수작업으로 이루어져 있어, 날개의 FEM 모델이 실제 날개를 모사하는데 오차를 갖고 있으며, 또한 복합재의 물성치를 정확히 알 수 없기 때문이다. 하지만, Ansys 프로그램을 이용한 FEM 해석을 통해, 얻어진 모드 형상은, 실제 블레이드의 기하학적 형상을 스캐닝하여 해석을 하였기 때문에, 충격실험으로 얻어

진 모드 주파수들의 1차~4차의 모드 형상은 Ansys 프로그램을 통해 예측된 1차~4차의 모드 형상과 유사할 것으로 판단된다.

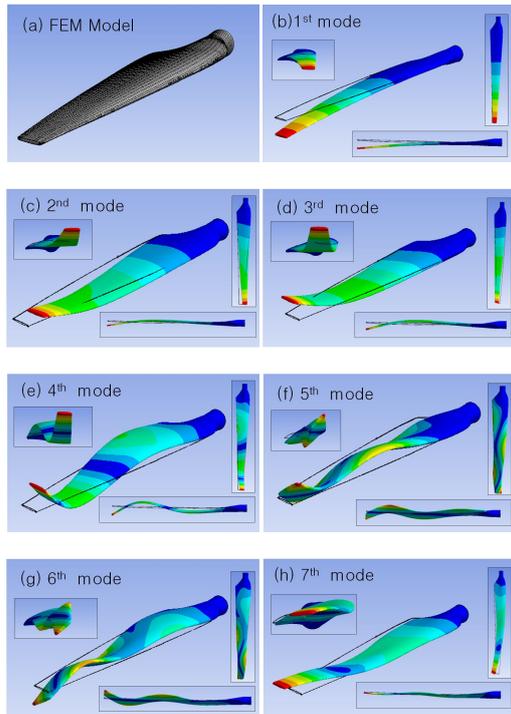


Fig. 11 Simulation results using Ansys)

Table 2. Results of modal Analysis using Ansys

Mode	Frequency (Hz)
1st	16.53
2nd	51.31
3rd	61.69
4th	119.96
5th	189.62
6th	204.54
7th	242.01

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유 격자 센서를 이용하여 소형 풍력발전기 날개 내부에서 발생하는

온도와 잔류스트레인을 측정함으로써 날개 제작 시 날개 내부에서 발생하는 수지 경화 반응 및 수축 현상을 확인하였다. 또한 풍력발전기 날개 제작 시 유리섬유와 유리섬유 사이에 광섬유 격자 센서를 삽입하여, 날개를 제작할 경우 센서가 정상적으로 작동함을 충격 실험을 통해서 확인하였다. 이 결과는 향후 대형 풍력발전기를 모사하는 축소형 풍력발전 시스템을 이용하여 날개의 이상 유무 감지 알고리즘을 개발하는데 스트레인측정을 위해 날개 내부에 광섬유 격자 센서를 적용하는 것이 가능한 것을 보여준다. 하지만, 좀 더 정확한 센서의 응답을 알아보기 위해서는 향후 개발되는 축소형 풍력발전 시스템에 센서가 내장된 날개를 적용하여 다양한 운전 상태에서의 센서의 동적 응답특성을 분석하는 것이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20093021020030)

References

1. J.C. Marin, A. Barroso, F. Paris and J. Canas, "Study of fatigue damage in wind turbine blades," Engineering failure analysis, Vol. 16, 2009, pp.656~668.
2. Hameed, Z., Hong, Y. S., Ahn, S. H., Cho, Y. M., Song, C. K., "Condition Monitoring System of Wind Turbine.", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 1, 2009, pp.1~39.
3. Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Partick, Michel LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, and E. Joseph

- Friebele, "Fiber Grating Sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, 1997, 1442-1463.
4. Gao Hongwei, Li Hongmin, Liu Bo, Zhang Hao, Luo Jianhua, Cao Ye, Yuan Shuzhong, Zhang Weigang, Kai Guiyun and Dong Xiaoyi, "A novel fiber Bragg grating sensors multiplexing technique.", Optics Communications, Vol 251, Issues 4-5, 2005, Pages 361-366.
 5. C.S. Shin, B.L. Chen, J.R. Cheng and S.K. Liaw, "Impact response of a wind turbine blade measured by distributed FBG sensors," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 25, 2010, 268-271.
 6. L.H. Kang, D.K. Kim, and J.H. Han, "Estimation of dynamic structural displacements using fiber Bragg grating strain sensors," J. of Sound and Vib., Vol. 305, 2007, 534-542.
 7. K. Schroeder, W. Ecke, J. Apitz, E. Lembke, and G. Lenschow, "A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade," Meas. Sci. Technol., Vol. 17, 2006, 1167-1172.
 8. J.W. Lee, Y.C. Huh, Y.Y. Nam, G.H. Lee, Y.S. Kim, and Y.B. Lee, "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, 2007, 1028-1036.
 9. A.W. Hulskamp, J.W. van Wingerden, T. Barlas, H. Champlaud, G.A.M. van Kuik, H.E.N. Bersee, and M. Verhaegen, "Design of a scaled wind turbine with a smart rotor for dynamic load control experiments, " Wind Energy, Published Online, 2010.
 10. C.L. Bottasso, F. Campagnolo, A. Croce, L. Maffenini, "Development of a Wind Tunnel Model for Supporting Research on Aero-servo-elasticity and Control of Wind Turbines," 13th International Conference on Wind Engineering, ICWE13, Amsterdam, The Netherlands, July 10-15, 2011.
 11. C.H. Kim, I. Paek, N.S. Yoo and Y.S. Nam, "Monitoring system of blade loads of a small wind turbine," Proceedings of the KSME 2011 Spring annual meeting, May 13-20, 2011.
 12. Corning, "SMF-28TM Optical Fiber", Issued: April 2002, Supersedes: December 2001, ISO 9001 Registered.
 13. E.A.Bossanyi, "Wind turbine control for load reduction", WIND ENERGY, Vol. 6, Issue 3, 2003, pp.229~244.
 14. IEC TS 61400-23 Wind turbine generator systems - Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades.
 15. C.h. Lee, J.M. Park, T.W. Kim, and J.S. Park, "Structural design and analysis of a composite wind turbine blade," The Korean Society of Mechanical Engineers., Vol. 2002, 2002, 558~562.