

하이브리드 광섬유 센서 시스템을 이용한 풍력발전기의 다중물리량 상태감시

(A Hybrid Fiber-Optic Sensor System for Multi-Stress Condition Monitoring
of Wind Turbines)

김대길* · 김현진 · 송민호**

(Dae-Gil Kim · Hyunjin Kim · Minho Song)

Abstract

A hybrid fiber-optic sensor system which combines fiber Bragg grating sensors and a Michelson interferometer has been constructed and evaluated for condition monitoring of large scale wind turbines. In order to measure multiple stresses applied to wind turbines such as strain, temperature and vibration, the system uses single broadband light source. It addresses both types of sensors, which simplifies the optical setup and enhances the cost-effectiveness of condition monitoring system. An athermal-packaged FBG is used to supply quasi-coherent light, of which coherence length is about 3.28mm, for the Michelson interferometer demodulation. Experimental results demonstrated that the proposed fiber-optic sensor system was capable of measuring strain and temperature with measurement accuracy of 1pm. Also 500~2000Hz vibration signals were successfully analyzed by applying FFT signal processing to interference signals.

Key Words : Fiber-optic Sensor, FBG, Michelson Interferometer, Wind Turbine, Condition Monitoring

1. 서 론

풍력발전설비가 대용량화, 해상화됨에 따라 설비의 이상 유무를 조기에 감지하여 큰 사고와 장기간의 발전중단을 예방하고자 하는 상태감시시스템(condition

monitoring system)이 큰 관심을 받고 있다[1]. 풍력 발전기에 적용하는 상태감시시스템은 블레이드(blades), 로터(rotor), 기어박스(gearbox)와 베어링(bearings) 등에서 발생하는 진동을 전기적 센서를 이용하여 측정하고 분석하는 진동분석(vibration analysis)이 주를 이룬다. 그 외에도 균열(crack)이나 결함에서 발생하는 이상마찰음을 측정하는 음향방출법(acoustic emission), 타워(tower)나 블레이드의 결함부위에서 반사되는 초음파로 균열을 검출하는 초음파검사기술(ultrasonic testing techniques), 적외선을 이용하는 열화상진단법(thermography)도 꾸준히 적

* Main author : Ph.D. student, Div. Electronics and Information Eng., Chonbuk Nat'l Univ.

** Corresponding author : Professor, Div. Electronics Eng., Chonbuk Nat'l Univ.

Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394

E-mail : msong@jbnu.ac.kr

Received : 2015. 6. 22

Accepted : 2015. 7. 7

용연구가 이루어졌다[2]. 그러나 이러한 방법은 전자 기노이즈에 취약하며, 다수 센서를 다중화할 경우 연결선이 복잡해지고 대형·중량화되며, 풍력발전기가 운전 중인 상태에서는 적용하기 어려운 단점을 가진다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 운전 중인 상태에서도 다중점 측정으로 넓은 범위에서 상태감시를 할 수 있는 광섬유 센서가 활발히 연구되고 있다[3].

광섬유 센서는 발전설비의 전자기파 간섭에 영향 받지 않으며, 다수의 센서를 쉽게 다중화할 수 있어 대규모 전력설비의 실시간 상태감시에 적합하다. 이러한 장점을 이용하여 선행연구에서 풍력발전기 블레이드의 상태감시를 위한 광섬유 격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG) 센서시스템을 개발하였다[4]. 그러나 FBG 센서는 약 150 Hz 이하의 저주파수대역에서 주로 사용되며[5], 블레이드가 아닌 풍력발전기 다른 부위에서 발생하는 진동신호를 측정하는데 취약하다. 중·고주파수대역에서 발생하는 진동신호를 측정하기 위해서는 간섭계형 광섬유 센서를 사용해야 한다[6-8]. 간섭계형 센서는 간섭계의 구조에 따라 마이켈슨(Michelson), 사냐크(Sagnac), 마하젠더(Mach-Zehnder), 패브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계 등으로 구분한다. 간섭계 센서는 광의 간섭현상을 이용하고, 간섭신호의 크기 또는 위상차의 변화를 관측함으로써 인가되는 물리량을 측정한다.

본 논문에서는 FBG와 광섬유 마이켈슨 간섭계를 사용하여 블레이드의 스트레인 및 온도 분포와 로터, 기어박스, 베어링 등에서 발생하는 진동을 동시에 측정할 수 있는 하이브리드 광섬유 센서시스템을 제안한다. FBG와 광섬유 간섭계는 사용하는 광원과 복조 방법이 서로 달라 같이 사용하기 어렵고[9-10], 각각의 센서를 위한 광원과 신호처리 과정이 필요하므로 광학 구조가 복잡해진다. 제안하는 시스템은 광학 구조를 간소화하고, 비용 효율성을 향상시키기 위하여 단일 광폭광원(broadband light source)에 비열(athermal) 포장된 FBG를 적용하여 광섬유 격자와 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서를 동시에 구동하였다. 두 가지 센서의 복조를 위해 각각 분광기(spectrometer, Bayspec Inc.)와 광검출기(photodetector, 이하 PD)를

사용하였다.

2. 하이브리드 광섬유 센서 시스템

2.1 광섬유 격자

FBG는 광섬유 코어 내부에 자외선 레이저를 이용하여 주기적인 굴절률 변화를 생성한 광학 소자이다. 격자 간 다수의 경계면에서 빛이 반사 또는 투과하는 과정에서 다중간섭을 일으켜 위상조건을 만족시키는 브래그 파장(Bragg wavelength)만을 반사시킨다. 브래그 파장은 스트레인이나 온도 등의 물리량에 선형적으로 반응하는 특성을 갖는다[11].

FBG 센서는 다수의 센서를 하나의 광섬유 라인에 직렬로 연결하여 넓은 범위의 스트레인 및 온도 분포를 실시간으로 감시할 수 있어, 대형 풍력발전기 블레이드의 상태 감시를 효과적으로 수행할 수 있다.

2.2 광섬유 마이켈슨 간섭계

간섭형 광섬유 센서는 간섭계의 감지부에 인가되는 물리량이 광섬유의 굴절률이나 길이를 변화시키는 것을 이용한다. 굴절률이나 길이의 변화가 간섭계 출력의 위상을 변화시키므로 위상변화량을 계산하여 가해진 물리량을 측정한다.

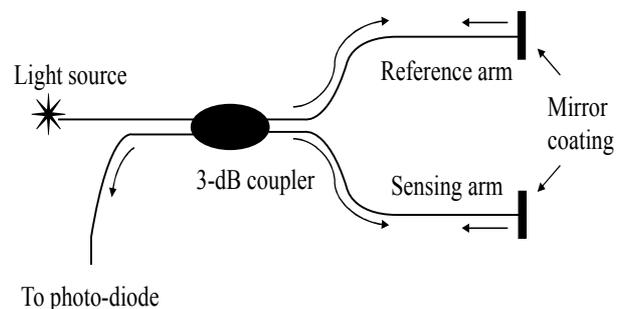


Fig. 1. Basic configuration of a fiber-optic Michelson interferometer

본 논문에서는 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서를 이용하였다. 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서는 그림 1과 같이 광섬유 결합기(optical coupler)의 끝단을 거울도

금하여 제작할 수 있다. 기준 팔(reference arm)과 감지 팔(sensing arm)에서 반사된 광신호가 결합하여 생성하는 간섭계의 출력 I 는 식 (1)과 같다.

$$I = I_0 [1 + \cos \Delta\phi] \quad (1)$$

위 식에서 I_0 는 초기 입사광의 세기이며, $\Delta\phi$ 는 간섭계의 위상차로 다음 식 (2)와 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n \Delta L}{\lambda} \quad (2)$$

위 식에서 ΔL 은 간섭계 두 팔의 길이차, λ 는 광원의 중심파장이며, n 은 광섬유 코어의 굴절률이다. 식 (2)는 광원의 간섭성(coherence)이 완전한 경우를 가정한 것으로, 실제 간섭계의 출력은 광원의 간섭성에 의해서 영향 받는다. 광원의 간섭성은 간섭성 길이(coherence length) L_c 로 표현되며, 광원의 스펙트럼 폭(spectral width)을 이용하여 식 (3)으로 표현할 수 있다[12].

$$L_c = \frac{2 \ln 2}{\pi n} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

위 식에서 λ 는 광원의 중심파장, n 은 광섬유 코어의 굴절률이며, $\Delta\lambda$ 는 광원의 스펙트럼폭이다.

광섬유 마이켈슨 간섭계의 감지 팔에 진동이 가해지면 광섬유의 굴절률과 두 팔의 길이차가 변조되어 진동신호와 동일한 주파수로 간섭신호가 변화한다. 광섬유 마이켈슨 간섭계 출력의 FFT(fast Fourier transform) 분석을 통해 간섭계에 인가되는 진동신호를 파악할 수 있다.

2.3 풍력발전기 상태감시시스템의 구성

단일 광원으로 FBG 센서와 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서를 동시에 사용하기 위하여 1550nm 중심 파장, 75nm의 스펙트럼폭을 가지는 ASE(amplitude spontaneous emission) 광폭광원을 사용하였다. 그림 2에 시스템의 개략도를 나타내었다. 제안하는 하이

브리드 광섬유 센서 시스템은 크게 FBG 센서부와 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서부로 이루어진다. FBG 센서부는 풍력발전기 블레이드의 스트레인과 온도 분포를 측정한다. 센서부는 스트레인 분포를 측정하는 6개의 일반 FBG와 일반 FBG의 온도보상 및 온도 측정을 위한 1개의 온도 FBG(Micron optics Inc., os4300)로 이루어진다. 온도 FBG는 스트레인의 영향을 받지 않도록 포장돼 있다. 센서신호간의 혼선을 피하기 위하여 각 센서의 파장간격은 2nm이상 이 되도록 설계하였다. 그림 3에 각 FBG 센서의 브래그 파장을 나타내었다.

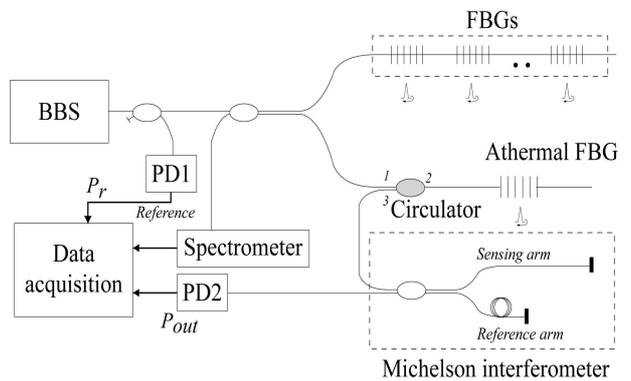
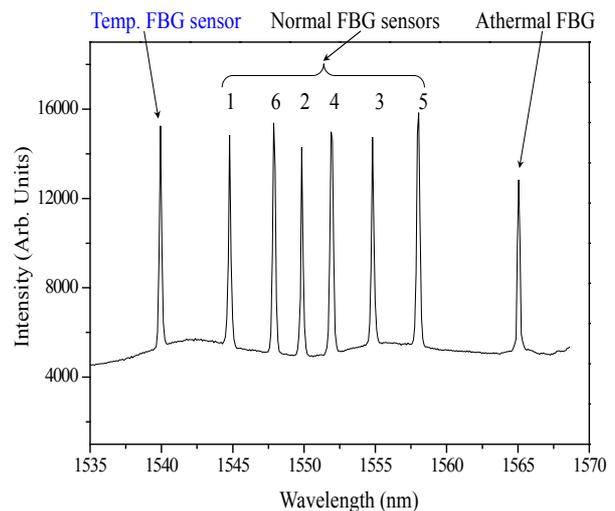


Fig. 2. Schematic diagram of proposed fiber-optic sensor system(BBS: broadband light source, FBG: fiber Bragg grating, PD: photodetector)



간접계 센서부는 블레이드 이외의 부분에서 발생하는 진동 신호를 측정한다. 실험에 사용된 광섬유 마이켈슨 간접계 센서는 서큘레이터(circulator)와 1565nm 중심파장, 0.22nm의 스펙트럼폭을 갖는 비열 포장된 FBG(JC Optronics Inc.), 2×2 3-dB 광섬유 방향성 결합기로 이루어진다. 간접계 양 광섬유의 끝단에는 97.5%이상의 반사율을 갖는 광섬유 역반사기(fiber optic retroreflector, Thorlabs Inc.)를 사용하였다. 광섬유 결합기에서 광섬유 끝단까지의 거리는 3m이다. 광섬유 마이켈슨 간접계 센서에 준간접성을 갖는 빛을 공급하기 위하여 비열 포장된 FBG를 사용하였다. 비열 FBG로부터 반사되는 빛의 간접성 길이를 식 (3)을 이용하여 계산하면 약 3.28mm이다. 비열 FBG는 온도 및 스트레인 등의 외란으로부터 영향을 최소화하여 고정된 브래그 파장을 가지므로 파장변화에 의한 간접계의 출력영향을 최소화할 수 있다. 표 1에 제원을 표시하였다.

광폭광원의 출력변동에 의한 간접계의 출력 영향을 최소화하기 위하여 PD1과 PD2에서 기준 신호 P_r , 간접계의 출력 P_{out} 을 각각 측정하여 보정하였다. 보정된 출력은 식 (4)로 표현된다.

$$P_{cal} = \frac{P_{out}}{P_r} \quad (4)$$

Table 1. Specification of the FBG sensors

	C · W nm	FWHM nm	Reflectivity %	Temp. sensitivity pm/°C
Temp. FBG	1539.94	0.25	>70	~10
FBG1	1544.8	0.22	>90	•
FBG2	1549.8	0.21	>90	•
FBG3	1554.9	0.20	>90	•
FBG4	1551.9	0.21	>90	•
FBG5	1557.9	0.20	>90	•
FBG6	1547.9	0.21	>90	•
Athermal FBG	1565.0	0.22	>80	<1.5

광폭광원의 빛은 2×2 3-dB 광섬유 방향성 결합기를 통하여 FBG 센서부와 서큘레이터에 입사한다. FBG 센서부에 입사된 빛은 FBG에 의해 반사되고, 반사된 FBG의 브래그 파장은 다시 결합기를 지나 분광기에서 파장이 복조된다. 분광기는 1525~1565nm의 파장 범위를 복조할 수 있으며, 5kHz 샘플링, 1pm의 파장 분해능을 갖는다.

서큘레이터에 입사한 빛은 비열 FBG에 의해 브래그 파장이 반사되고, 다시 서큘레이터를 지나 2×2 3-dB 광섬유 결합기에 입사된다. 광섬유 결합기에 입사된 빛은 광섬유 결합기를 통과하면서 분할되고, 각각의 빛은 광섬유 끝단의 거울에서 반사된다. 이 반사된 두 빛은 다시 광섬유 결합기를 통과하면서 재결합한다. 재결합 후에 생성된 간접신호는 PD2와 DAQ 보드(NI PXI-6284)에 의해 검출된다. 검출된 간접신호는 Labview 프로그램을 통해 FFT 신호처리 후 복원된다.

2.4 실험 및 결과

풍력발전기 블레이드의 스트레인과 온도를 측정하기 위하여 선행연구에서 제작한 모의 풍력발전기 날개의 상부와 하부에 스트레인 FBG센서를 부착하였다 [4]. 그림 4에 FBG 센서가 설치된 위치를 표시하였고, 표 1에 제원을 나타내었다.

그림 5는 그림 4의 모의 풍력발전기 블레이드 끝을 잡아당겨 임의의 자유 진동을 발생시키고, 이를 측정하는 것이다. 블레이드의 상부와 하부에 부착된 FBG 센서의 브래그 파장변화를 볼 수 있다. 브래그 파장변화는 1kHz 샘플링 속도로 분광기를 이용하여 측정하였다. 약 0.1초 동안 블레이드의 끝을 잡아당겼으며, 이때 블레이드 하부에서 받는 스트레인을 그림 5의 (b)에서 확인할 수 있다. 0.69nm의 파장변화를 FBG4에서 확인할 수 있으며, 이는 약 769με에 해당하는 변화량이다[14]. 이후 자유 진동에 의해 각 FBG 센서에 가해지는 스트레인을 충실히 복원하고 있음을 확인하였다. 온도 FBG센서의 경우 -1~0pm의 파장변화를 보이며, 이는 약 0.1°C에 해당하는 변화량이다. 이러한 실험결과는 블레이드에 충격, 파손 및 불균형 등의 이

상 발생 여부를 정상상태에서의 스트레인 패턴과 비교하여 진단하는데 활용할 수 있음을 보여준다.

비열 FBG를 이용한 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서의 진동측정 적용성 실험을 위해 다이내믹 진동기 (electro-dynamic shaker, Labworks Inc.)를 사용하였다. 다이내믹 진동기에 의해 발생하는 진동신호를 간섭계 센서의 감지 팔에 인가하였다. 간섭계의 온도변화에 의한 영향을 최소화하기 위하여 실험실의 온도를 20°C로 유지하여 실험을 진행하였다.

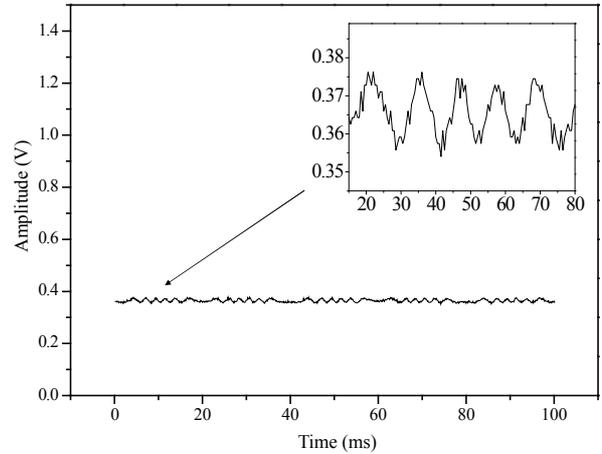
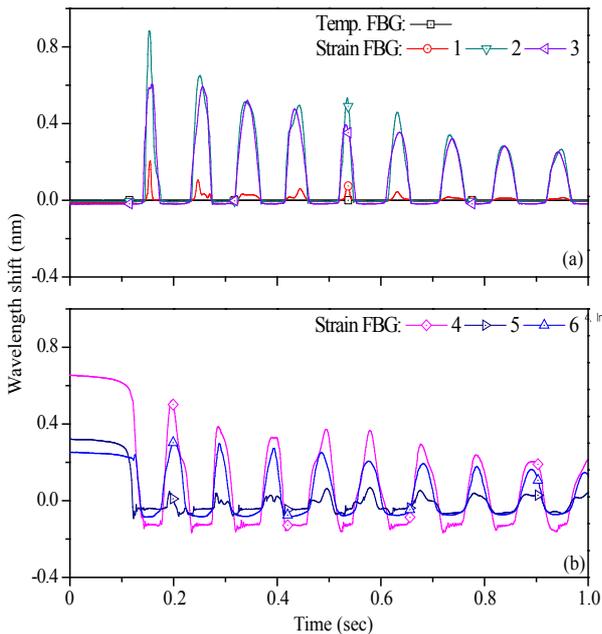
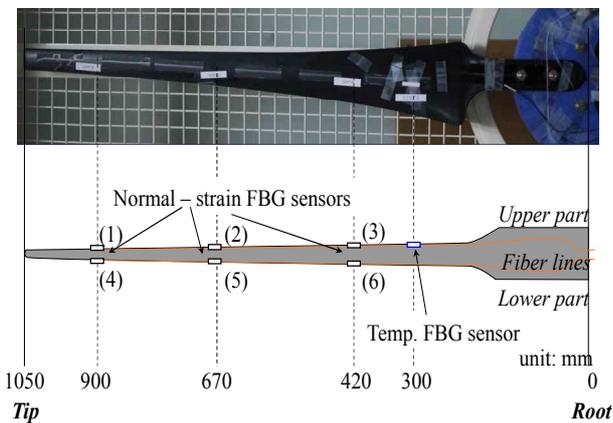


Fig. 6. Interference signal of a Michelson interferometer

그림 6은 다이내믹 진동기에 1kHz, 200mV의 사인파를 함수발생기를 통해 인가한 후 제안한 간섭계 센서를 이용하여 측정된 간섭신호이다. 약 0.4V의 DC 성분과 간섭신호를 확인할 수 있다. DC 성분은 2×2-3-dB 광섬유 결합기의 결합비 차이와 간섭계에 공급한 광원의 준간섭성에 의해 생긴 것으로 판단된다. 비열 FBG에서 반사되는 빛의 세기(intensity)가 약함에도 불구하고, 약 0.2V의 진폭을 갖는 간섭신호를 측정할 수 있었다.

그림 7은 함수발생기를 통해 다이내믹 진동기에 500, 1000, 2000Hz, 200mV의 사인파를 인가하여 측정된 간섭신호이다. 그림 7 (a)는 검출된 각각의 간섭신호를 AC커플링(coupling)한 결과이다. 진동 주파수가 증가함에 따라 간섭 신호의 진폭이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 다이내믹 진동기의 공진 특성에 의한 것으로 보인다. 그림 7 (b)는 검출된 간섭신호를 FFT 분석한 결과이다. 다이내믹 진동기를 통해 인가된 각각의 진동 주파수를 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전기의 스트레인, 온도 및 진동신호를 동시에 측정하기 위해 광섬유 마이켈슨 간섭계와 FBG 센서를 결합한 하이브리드 광섬유 센서 시스템을 제안하였다. 단일 광폭광원으로 두 광섬유

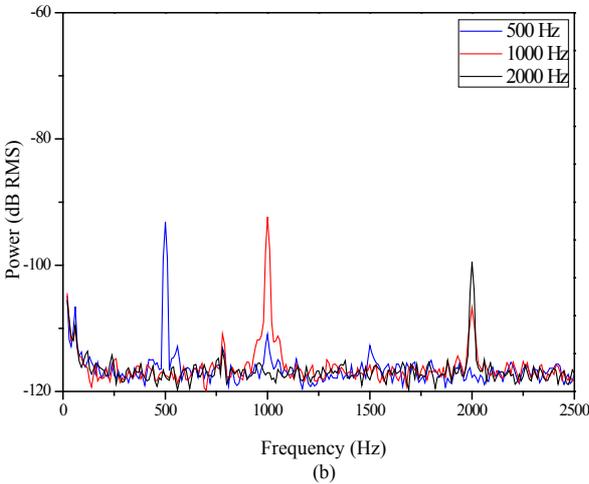
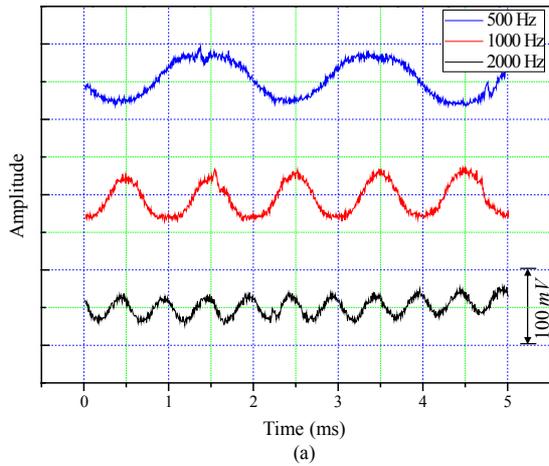


Fig. 7. Vibration measurement of a Michelson interferometer, (a) AC-coupled interference signal, (b) FFT analysis

센서를 동시에 구동하기 위하여 비열 포장된 FBG를 사용하여 간섭계에 약 3.28mm의 간섭성 길이를 갖는 준간섭성 광원을 공급하였다. 모의 풍력발전기의 블레이드에 7개의 FBG센서를 부착하여 적용성 실험을 진행하였으며, 제안한 시스템이 풍력발전기 블레이드의 다중위치에서 스트레인과 온도 분포를 1 μ m의 정밀도로 복조할 수 있음을 보였다. 또한 비열 FBG를 이용한 광섬유 마이켈슨 간섭계 센서에 진동기를 사용하여 진동신호를 인가하여 측정된 결과, 500~2000Hz의 진동신호를 FFT 분석을 통하여 복원하는 것이 가능함을 보였다.

제안한 시스템은 단일 광원으로 두 종류의 광센서를

동시에 사용하여 광학 구조를 간소화함으로써 풍력발전기의 이상 유무를 감시 및 진단하는 광섬유 상태감시시스템 구성의 비용을 줄임과 동시에 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2010-0028509)

References

- [1] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song, "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 1-39, 2009.
- [2] F. P. G. Márquez, A. M. Tobias, J. M. P. Pérez, and M. Papaelias, "Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods," *Renewable Energy*, vol. 48, pp. 169-178, 2012.
- [3] 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," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 1167, 2006.
- [4] D. Kim, H. Kim, and M. Song, "FBG sensor system for condition monitoring of wind turbine blades," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 27, no. 8, pp. 75-85, 2013.
- [5] H. Y. Au, S. K. Khijwania, and H. Y. Tam, "Fiber Bragg grating based accelerometer," *Proc. SPIE 7004*, 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, 70042S, 2008.
- [6] A. B. Tveten, A. Dandridge, C. M. Davis, and T. G. Giallorenzi, "Fibre optic accelerometer," *Electronics Letters*, vol. 16, no. 22, pp. 854-856, 1980.
- [7] H. Kim, J. Lee, and M. Song, "Demodulation of FBG and acoustic sensors embedded in a fiber-optic Sagnac loop," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 26, no. 2, pp. 44-50, 2012.
- [8] A. S. Gerges, T. P. Newson, J. D. C. Jones, and D. A. Jackson, "High-sensitivity fiber-optic accelerometer," *Optics letters*, vol. 14, no. 4, pp. 251-253, 1989.
- [9] H. Park, J. Lee and M. Song, "Distributed fiber-optic temperature sensor network for protection of electric power systems," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 20, no. 5, pp. 64-71, 2006.

[10] H. Park and M. Song, "Intrusion sensor using fiber-optic Mach-Zehnder interferometer," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 26, no. 4, pp. 255-259, 2006.

[11] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1462, 1997.

[12] F. Lexer, C. K. Hitzenberger, A. F. Fercher, and M. Kulhavy, "Wavelength-tuning interferometry of intraocular distances," Applied Optics, vol. 36, no. 25, pp. 6548-6553, 1997.

[13] R. Kashyap and B. Nayar, "An all single-mode fiber michelson interferometer sensor," Journal of Lightwave Technology, vol. 1, no. 4, pp. 619-624, 1983.

[14] D. C. Betz, G. Tursby, B. Culshaw, and W. J. Staszewski, "Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette," Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 2, pp. 1019-1026, 2006.

◇ 저자소개 ◇



김대길 (金大吉)

1986년 1월 8일생. 2011년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2013년 전북대학교 전자정보공학부 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 전자정보공학부 박사과정.
E-mail : abcd@jbnu.ac.kr



김현진 (金炫震)

1980년 11월 8일생. 2007년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2009년 전북대학교 전자정보공학부 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전자정보공학부 박사과정.
E-mail : dldpavl@jbnu.ac.kr



송민호 (宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 전북대학교 전자공학부 교수.
Tel : (063)270-4285
Fax : (063)270-2394
E-mail : msong@jbnu.ac.kr