

풍력터빈 블레이드 상태 감시용 광섬유격자 센서시스템

(FBG sensor system for condition monitoring of wind turbine blades)

김대길* · 김현진 · 송민호**

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

Abstract

We propose a fiber grating sensor system for condition monitoring of large scale wind turbine blades. For the feasibility test of the proposed sensor system, a down-scaled wind turbine has been constructed and experimented. Fiber grating sensors were attached on a blade surface for distributed strain and temperature measurements. An optical rotary joint was used to transmit optical signals between the FBG sensor array and the signal processing unit. Instead of broadband light source, we used a wavelength-swept fiber laser to obtain high output power density. A spectrometer demodulation is used to alleviate the nonlinear wavelength tuning problem of the laser source. With the proposed sensor system we could measure dynamic strain and temperature profiles at multi-positions of rotating wind turbine blades.

Key Words : Fiber Bragg Grating, Condition Monitoring System, Wind Turbine Blade,
Wavelength-Swept Fiber Laser, Spectrometer

1. 서 론

풍력발전은 기존 화석연료를 사용하는 발전기의 발전단가에 가장 근접하는 청정 재생에너지원으로서 많은 관심과 연구, 실용화 노력이 국내외적으로 집중되

어 온 분야이다. 제조 기술의 발전과 경제성의 개선 노력에 따라 풍력터빈의 크기와 설비용량이 점차 대형화되고 있는 추세이다[1]. 초기에 주로 설치되었던 육상풍력은 경제성 있는 부지의 포화, 민원 발생과 효율 저하, 대형화의 한계성 등에 따른 제약을 받으므로 최근 대용량 풍력발전기는 대부분 해상에 건설되는 추세이다.

해상풍력은 넓은 부지 확보가 가능하고 민원이 적어서 단지의 대형화가 용이하며, 육상에 비하여 바람의 품질이나 풍속이 양호하여 발전 효율이 좋다. 그러나 설치 및 운용 환경이 열악하기 때문에 고장이 발생할 가능성이 높아지고[2] 원거리 해상에 위치하므로 접근성이 떨어져 조속한 수리나 교체가 어려우므로 유지

* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 석사과정
** 교신저자 : 전북대학교 전자공학부 교수
* Main author : Graduate 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
접수일자 : 2013년 5월 21일
1차심사 : 2013년 5월 24일
심사완료 : 2013년 6월 25일

보수 비용 또한 증가한다. 풍력터빈의 기대수명은 대략 20년이며 예상되는 유지보수비용은 전체 에너지 생산비용의 25~30%, 또는 투자비용의 75~90%이다. 해상풍력의 경우에는 이 비용이 더 증가한다[3]. 따라서 유지보수비용의 감소가 풍력발전의 경제성을 개선하는데 매우 중요하다. 이를 위해서는 풍력시스템의 건전성을 상시 감시하여 가능한 사고에 대처할 수 있도록 하는 원방감시제어(Supervisory Control and Data Acquisition, 이하 SCADA) 시스템과 상태감시 시스템(Condition Monitoring System, 이하 CMS) 등이 필요하다[4-6].

SCADA 시스템은 풍력터빈의 필수 구성요소로 풍력터빈의 제어기(controller)와 연계하여 원격으로 감시 및 제어 기능을 수행한다. 풍력터빈의 운영 성능을 분석 및 보고하여 풍력단지의 전반적인 운전 상태를 감시한다. CMS는 SCADA에 비하여 진일보한 형태로 스마트 센서시스템의 적용으로 풍력터빈 구성요소의 상태를 보다 면밀히 감시, 분석, 예측하여 이상을 조기에 진단하고 조치를 취하게 함으로써 발전중지시간(downtime)을 줄여 풍력발전단지 운영의 신뢰성과 경제성을 향상시키는 기술이다. 접근성이 떨어지는 해상풍력의 경우 풍력터빈의 대형화와 신뢰성 확보 문제가 대두되면서 과거 선택적 구성요소였던 CMS가 반드시 필요한 구성요소로 인식이 바뀌어가고 있다.

풍력터빈에 사용되는 기존의 CMS 기술은 크게 진동기반 감시기술(vibration-based monitoring), 유체기반 감시기술(oil-based monitoring), 그리고 블레이드 감시기술 등으로 나뉜다[7].

진동기반 감시기술은 가속도계 센서 등을 이용하여 구성요소들의 진동을 분석하고 터빈의 현재 상태 및 성능을 추정한다. 유체기반 감시기술은 기어박스, 베어링 오일 내부 불순물의 양과 크기를 지속적으로 측정하여 부품의 마모 진행상태 등을 감시한다[5]. 블레이드 감시 기술은 블레이드의 접촉 불량, 번개에 의한 손상, 팁 처짐, 충격 등의 손실을 감시하는 기술이다. 최근 풍력터빈의 대형화로 블레이드가 풍력터빈의 안전성과 설치비용에서 차지하는 비중이 높아지면서 블레이드 감시 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.[8] 블레이드의 감시기술로는 진동해석, 초음파

진단 등 다양한 방법들이 개발되었지만[6], 최근 풍력터빈이 동작하고 있는 상태에서도 넓은 범위의 스트레인과 온도분포를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 광섬유 센서 기술이 큰 관심을 얻고 있다[4].

본 논문에서는 풍력터빈 블레이드의 상태 감시를 위하여 광섬유격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG)를 이용하는 센서 시스템을 제안하고 구성하였다. 하나의 광섬유 라인에 다수의 FBG 센서를 직렬로 연결하여 설치하면 광섬유 센서의 장점을 모두 활용하면서도 대형 블레이드의 스트레인이나 온도분포를 효과적으로 측정할 수 있기 때문이다. 제안한 센서 시스템으로 풍력터빈 블레이드의 접촉불량 및 파손 등으로 인한 뒤틀림 및 떨림, 블레이드 팁 처짐, 충격 등을 감시하여 사고를 미리 예측 가능하다. 넓은 범위의 열악한 환경에서 적용될 것을 감안하여 높은 신호 대 잡음비를 얻고자 파장가변 광섬유 레이저를 제작하여 광폭 광원을 대체하였다. 비선형적인 레이저 파장변화의 영향은 스펙트로미터(spectrometer)를 이용하는 복조 방식을 사용하여 최소화하였다. 회전하는 블레이드에 장착된 FBG 센서와 광원, 그리고 광신호처리부 사이의 신호연결은 광섬유 회전 조인트를 이용하여 이루어졌다. 구성된 센서 시스템을 실험적용하기 위하여 모의 풍력터빈을 제작하고, FBG 센서를 블레이드에 부착하였다.

2. 풍력터빈 블레이드 상태감시시스템

2.1 모의 풍력터빈

제안한 풍력터빈 블레이드 CMS를 시험적용하기 위하여 그림 1과 같이 DC 모터와 컨트롤러를 사용하여 블레이드를 회전시키는 모의 풍력터빈을 제작하였다. 그림 1의 (a)가 실험실 내부에 설치한 모의 풍력터빈으로 유리섬유 강화수지(PolyPro/Glass fiber Reinforced)로 만들어진 블레이드의 길이는 1.05m이다. (b)~(d)는 각각 모의터빈의 허브, 블레이드를 회전시키는데 사용된 DC 모터, 그리고 모터의 제어기이며, 0~2000rpm까지 회전 속도의 조절이 가능하다.

블레이드 표면의 스트레인 분포와 온도를 측정하기

위하여 각각 3개와 1개의 FBG 스트레인, 온도센서를 부착하였다.

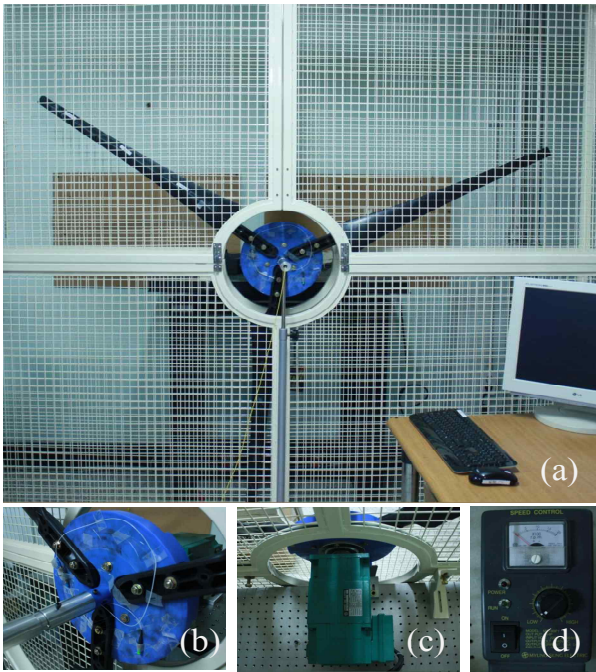


그림 1. 모의 풍력터빈
Fig. 1. Wind turbine blade simulator

2.2 광섬유 회전 조인트

회전하는 블레이드에 광섬유센서를 설치하고 그 신호를 취득하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는, 풍력터빈의 로터 내부에 신호처리부를 두어 블레이드와 같이 회전하면서 신호를 취득하는 것이다. 별도의 무선통신기술을 적용하여 센서의 출력을 전달할 수 있지만 전체 센서시스템이 같이 회전하므로 기계적 안정성이 저하되고 시스템의 복잡성이 증가한다.

두 번째 방법은 회전부와 고정부 사이에 벌크형식의 광 연결 장치를 두어 광원의 출력을 센서에 전달하고 센서의 출력을 다시 고정부에 위치한 신호처리부에 연결하는 것이다. 이 경우 광원과 신호처리부가 풍력터빈의 나셀(nacelle) 내부에 위치하므로 기계적인 움직임을 최소화하여 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다.

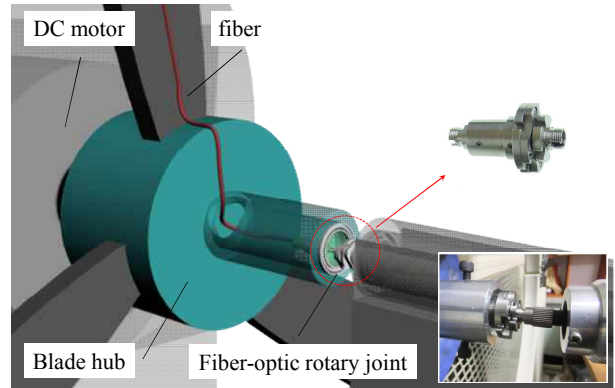


그림 2. 광섬유 회전 조인트의 구성
Fig. 2. Configuration of fiber-optic rotary joint

표 1. 광섬유 회전 조인트의 제원
Table 1. Specification of the fiber-optic rotary joint

| Parameter | Value |
|----------------------|----------------|
| Insertion loss | < 2dB |
| Wavelength range | 650~1650nm |
| Max speed | 2000rpm |
| Estimated life cycle | 200~400million |
| Working temperature | -40~85℃ |

본 논문에서는 그림 2와 같이 광섬유 회전 조인트(RFC-155-28, Princetel)를 사용하여 회전부와 고정부 사이의 광 전달을 가능하게 하였다. 사용한 광섬유 회전 조인트는 양 끝단에 광섬유 커넥터를 연결하고 베어링을 사용하여 회전하는 연결부위는 렌즈를 이용하여 벌크 광학식으로 광신호를 전달하는 방식이다. 광섬유 회전 조인트의 제원을 표 1에 나타내었다.

2.3 파장가변 레이저와 스펙트로미터

FBG 센서는 측정하는 스트레인과 온도의 정보가 센서에서 반사시키는 브래그 파장에 담겨져 있으므로 브래그 파장의 변화를 정확하게 측정하여야 하며 이를 위해서 다양한 복조방식이 개발되어 왔다[9-11]. 이 중 F-P (Fabry-Perot) 가변필터를 사용하는 방법 [12]은 센서의 공간적 배치에 영향을 받지 않으면서 다수의 센서신호를 효율적으로 분석할 수 있어서

가장 많이 사용되는 FBG 복조방식의 하나이다. 초기에는 주로 광폭광원(broadband light source)과 F-P 가변필터를 결합하여 브래그 파장을 복조하였다. FBG 센서에서 반사된 브래그 스펙트럼이 주기적으로 투과파장이 변조되는 가변필터를 거친 후 PD(photo-detector)에서 검출되면 브래그 스펙트럼과 유사한 형태의 피크신호가 시간에 따라 형성된다. 시간축의 피크위치를 추종하면 파장 축에서 FBG 센서의 피크 파장변화를 해석할 수 있다.

그림 3과 같이 F-P 파장가변필터를 광섬유 레이저의 공진기 내부에 삽입하여 파장가변 광섬유 레이저를 구성한 후 사용하면 기술한 광폭광원과 가변필터를 이용하는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 또한, 광섬유 레이저 출력의 밀도가 높아서 광폭광원에 비하여 수십~수백 배 이상 높은 출력을 얻을 수 있기 때문에 센서시스템 출력신호의 신호 대 잡음비를 대폭 향상시킬 수 있다.

그림 3은 제안한 풍력터빈 블레이드 상태 감시 시스템의 개략적인 구성도이다. 파장가변레이저의 출력은 서큘레이터와 광섬유 회전 조인트를 거쳐 블레이드에

부착한 FBG 센서 어레이에 입사한다. 센서 어레이는 1개의 온도센서와 3개의 스트레인 센서로 이루어져 있으며 온도센서의 경우 스트레인에 의한 영향을 받지 않도록 패키징되어 있다. 센서 어레이에서 반사되는 브래그 파장은 다시 광섬유 회전 조인트와 서큘레이터를 지나 스펙트로미터에서 피크파장의 변화가 검출된다.

사용된 파장가변레이저는 반도체 광증폭기(SOA, semiconductor optical amplifier), Fabry-Perot 파장가변 필터, 10:90 광섬유 결합기, 편광 조절기(polarization controller), 광차단기(optical isolator)를 사용하여 구성하였다. 파장가변레이저의 구동신호는 1kHz의 램프신호(2.7V pk-pk, +1.6V offset)로 함수발생기를 이용하여 공급하였다. 이 구동신호에 의한 파장가변레이저 출력파장의 가변범위는 1537~1553nm이다.

하지만 선행연구에서 보듯이[13] F-P 파장가변필터의 투과파장 변화는 구동전압에 대하여 비선형성을 가지고 있어 측정오차를 발생시킨다. 이러한 비선형성에 따른 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 브

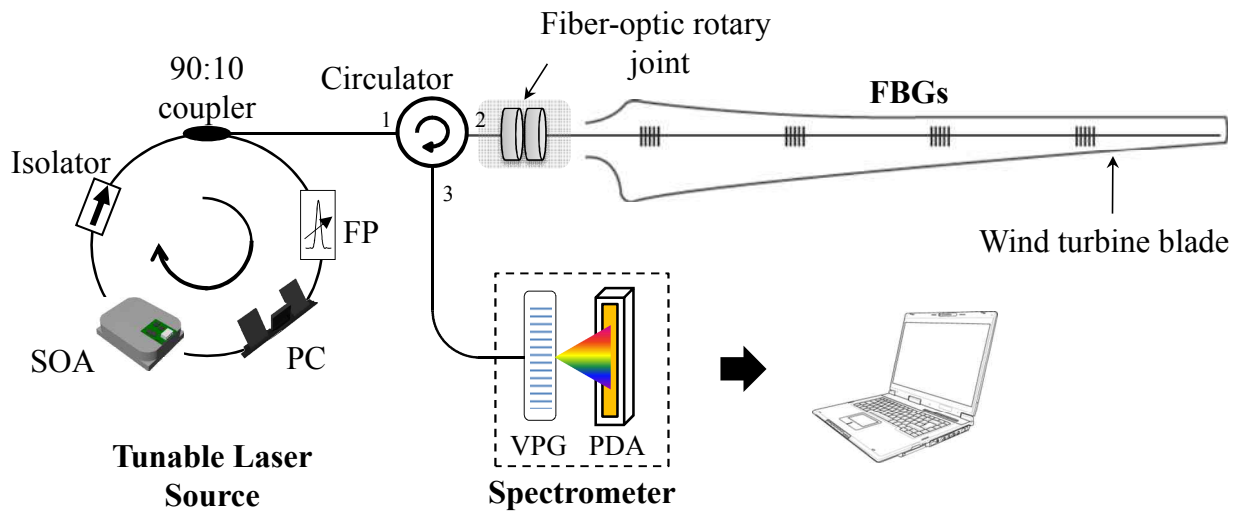


그림 3. 풍력터빈 블레이드 상태 감시 시스템 개략도

Fig. 3. Schematic diagram of the blade condition monitoring system (SOA: semiconductor optical amplifier, FP: Fabry-Perot tunable filter, PC: polarization controller, VPG: volume phase grating, PDA: photo-detector array)

래그 파장의 복조방식으로 스펙트로미터를 사용하였다[14].

스펙트로미터를 사용하여 측정된 파장 변화($\Delta\lambda_B$)와 FBG 센서의 온도변화(ΔT)를 측정하여 FBG 센서의 특성 식 (1)에 대입하면 스트레인 변화량($\Delta\varepsilon$)을 계산할 수 있다.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = [1 - P^{eff}] \varepsilon_z^{s,m} + [(1 - P^{eff})\alpha^s + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dT}] \Delta T \quad (1)$$

위 식에서 $\Delta\lambda_B$ 는 FBG 센서에서 반사되는 브래그 파장의 변화이며, λ_{B_0} 는 초기 브래그 파장이다. α^s 는 열팽창 계수, n_0 는 광섬유의 굴절률, $(1 - P^{eff})$ 는 스트레인 민감도이다. 스트레인(ε_z^s)은 열($\alpha^s \Delta T$)과 기계적 스트레인($\varepsilon_z^{s,m}$)으로 분리된다. 식 (1)에 각 계수 값을 대입하면 C-대역에서 스트레인 민감도는 대략 $1.2\text{pm}/\mu\varepsilon$ 이며, 온도 민감도는 대략 $11\text{pm}/^\circ\text{C}$ 이다[15].

파장복조를 위해 사용된 스펙트로미터(FBGA, Bayspec)는 VPG (volume phase grating)와 PDA (photo-detector array)로 이루어졌으며 표 2에 제원을 표시하였다.

표 2. 스펙트로미터의 제원
Table 2. Specification of the spectrometer

| Parameter | Value |
|-------------------------------|-------------|
| Number of pixels | 512 |
| Wavelength range | 1525~1565nm |
| Wavelength readout resolution | 1pm |
| Power resolution | 0.1dB |
| Max Sampling speed | 5kHz |

3. 실험 결과

그림 4는 제작한 모의 풍력터빈 블레이드에 FBG 센서를 부착한 사진이다. 사용한 블레이드의 길이는 1.05m이며, 사진에 FBG 센서의 부착 위치를 표시하였다. 온도 측정을 위한 1개의 온도 FBG (os4300,

Micron optics) 센서와 스트레인 측정을 위한 3개의 일반 센서 FBG를 하나의 광섬유 라인에 직렬로 연결하여 부착하였다. 센서신호간의 혼선을 피하기 위하여 각 센서의 파장간격을 5nm로 설계하였다. 실험에 사용된 FBG 센서의 중심파장과 반사율 등의 제원을 표 3에 나타내었다. 그림 5는 스펙트로미터로 측정한 각 FBG 센서의 반사파장 스펙트럼이다.

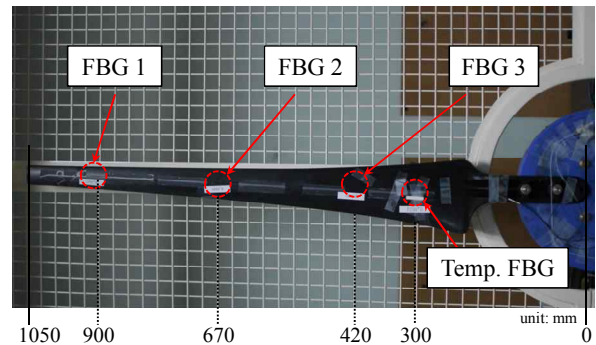


그림 4. 블레이드에 부착된 FBG 센서
Fig. 4. FBGs attached to the blade

표 3. FBG 센서의 제원
Table 3. Specification of the FBG sensors

| | Temp. FBG | FBG1 | FBG2 | FBG3 |
|-------------------------|-----------|--------|--------|--------|
| C · W nm | 1539.94 | 1544.8 | 1549.8 | 1554.9 |
| FWHM nm | 0.25 | 0.22 | 0.21 | 0.20 |
| Reflectivity % | >70 | >90 | >90 | >90 |
| Temp. sensitivity pm/°C | ~10 | • | • | • |

회전하는 센서부의 신호를 고정된 신호처리부에 연결하기 위하여 벌크 광연결 방식의 광섬유 회전 조인트를 사용하는 경우, 회전에 의한 기계적 정렬의 변화에 따라 삽입손실(insertion loss) 또한 변화한다. 삽입손실의 변화를 측정하기 위하여 블레이드를 100rpm으로 한 시간 동안 회전시키면서 3번 FBG 센서의 출력신호 변화를 측정하여 그림 6에 표시하였다. 블레이드의 회전에 따라 출력신호가 일정한 패턴으로 변화

는 것을 확인 할 수 있으며, 변동폭은 1dB 이하로 제한되었다.

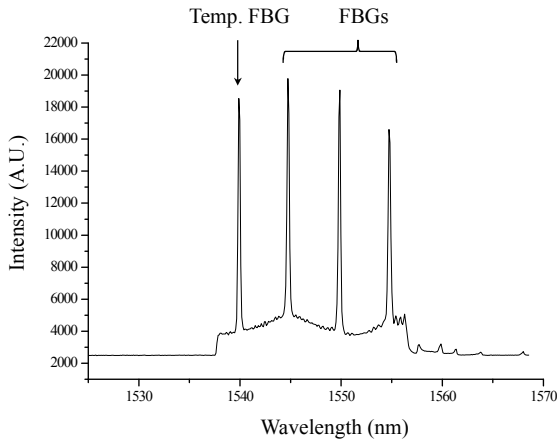


그림 5. FBG 센서 어레이의 브래그 파장
Fig. 5. Bragg wavelengths of the FBG sensor array

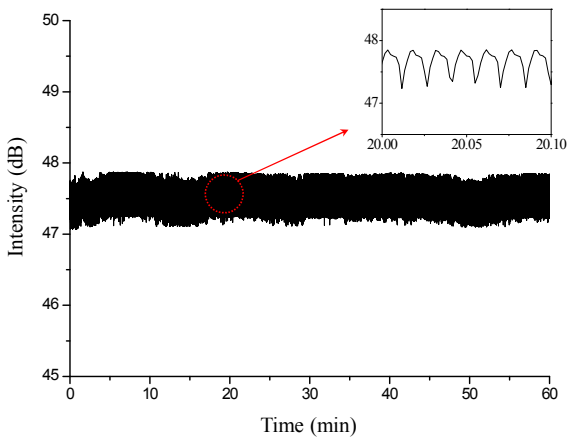


그림 6. 광섬유 회전 조인트의 출력 변동
Fig. 6. Output variation with rotation of fiber-optic rotary joint

이러한 출력신호의 변동은 FBG 반사신호의 크기를 변화시켜 최종적인 센서 시스템의 출력에 영향을 미친다. 출력 변동을 보상해주기 위해 기준 FBG 센서를 회전축에 설치하는 방법이 제안된 바 있다[16]. 본 논문에서는 스펙트로미터 복조방식의 사용으로 광섬유 회전 조인트에 의한 출력 변동의 영향을 최소화하여 회전하는 블레이드의 스트레인과 온도를 정확히 측정할 수 있었다. FBG에서 반사되는 브래그 파장은 VPG

에 의해 파장별로 PDA에 의해 복조되므로 브래그 파장을 복조하기 위한 광량이 임계값(threshold) 보다 크면 출력 변동을 무시할 수 있기 때문이다.

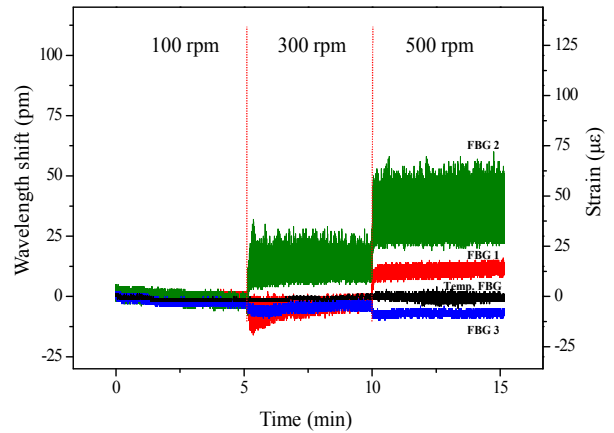


그림 7. 회전속도에 따른 스트레인 측정
Fig. 7. Strain measurement during run-up test

그림 7은 그림 4에 표시된 블레이드의 네 지점에서 스트레인과 온도를 회전속도를 증가시키면서 측정된 결과이다. 100rpm으로 회전하고 있던 블레이드를 5분 간격으로 회전속도를 100, 300, 그리고 500rpm으로 증가시킬 때 FBG 센서의 파장(스트레인) 변화를 보여준다. 스펙트로미터의 출력은 100Hz의 빠르기로 읽어 들였으며 온도센서를 제외한 나머지 센서들은 블레이드의 회전속도에 따라 서로 다른 스트레인 파형을 복원하는 것을 볼 수 있다. 블레이드가 100rpm으로 회전할 때 FBG 1, 2, 3의 출력범위는 각각 $-19 \sim 4 \mu\epsilon$, $-10 \sim 5 \mu\epsilon$, 그리고 $-10 \sim 3 \mu\epsilon$ 이며 온도센서는 $-2 \sim 1 \text{pm}$ 의 파장변화를 나타내었다. 300rpm에서는 $-18 \sim 11 \mu\epsilon$, $3 \sim 35 \mu\epsilon$, $-4 \sim -11 \mu\epsilon$, 그리고 $-2 \sim 2 \text{pm}$ 의 범위에서 변화가 있었고 500rpm에서는 $7 \sim 20 \mu\epsilon$, $23 \sim 72 \mu\epsilon$, $-5 \sim 12 \mu\epsilon$, 그리고 $-5 \sim 4 \text{pm}$ 의 범위에서 변화를 보였다. 회전속도가 증가하면서 중간위치에 부착된 FBG 2의 파장 변화가 가장 크게 나타났다. 회전속도에 따라 온도 센서의 파장 변화량도 증가하였는데 이는 블레이드 회전에 따른 냉각효과로 판단된다. 이러한 정상상태의 스트레인 패턴을 접촉불량 및 파손 등에 의한 뒤틀림 및 떨림 등이 발생한 경우의 패턴과 비교하여 이상 발생의 여부를 진단할 수 있다.

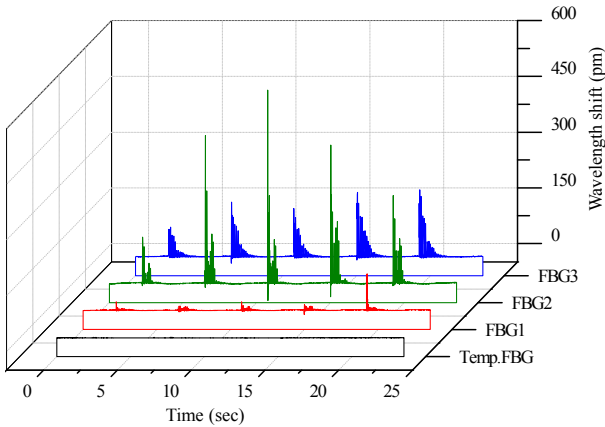


그림 8. 충격 측정
Fig. 8. Impact measurement

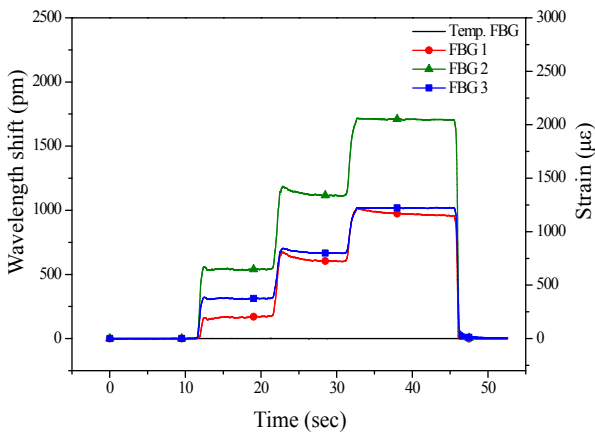


그림 9. 부하 측정
Fig. 9. Load measurement

그림 8은 블레이드가 50rpm으로 회전하고 있을 때 FBG 2가 부착된 위치에 주기적으로 임의의 충격을 가했을 때의 파장 변화를 측정된 결과이다. FBG 센서 각 지점에서의 충격으로 인한 파장 변화를 측정할 수 있었다. FBG 2의 경우 파장변화가 최대 521pm로 가장 크게 나타났으며, FBG 1, 3은 각각 최대 100pm, 180pm이다. 온도센서의 경우 2pm 이내로 제한되었다. 이와 같은 결과는 블레이드에 충격이 가해질 경우 그 위치를 파악할 수 있음을 보여준다.

그림 9는 정지 상태에서 블레이드 팁 부분에 횡력을 가하여 10초 간격으로 2cm, 5cm, 그리고 9cm 휘게 하였을 때 각 센서의 파장 변화를 측정된 것이다. 블레

이드 팁 처짐으로 인하여 각 지점 별로 파장변화를 보여주며, FBG 2의 파장변화가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 온도센서는 1분의 측정시간 동안 -1~2pm의 파장변화를 보여서 무시할 만한 온도변화를 관측할 수 있었다. 이러한 결과는 블레이드 팁 처짐 정도를 파악하여 블레이드와 타워의 충돌을 예방하는데 활용할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 FBG 센서를 이용한 풍력터빈 블레이드의 상태감시시스템을 제안하였다. 제안한 FBG 센서 시스템을 실험적용하기 위하여 모의 풍력터빈 블레이드를 구성하여 실험하였다. DC 모터를 사용하여 블레이드의 회전 속도를 조절하였으며, 블레이드가 회전하는 동안 센서와 신호처리부 사이의 광신호 전달을 위하여 광섬유 회전 조인트를 사용하였다. 높은 출력 파워를 얻기 위하여 파장가변레이저를 광원으로 사용하였으며, 파장변화의 비선형성과 광섬유 회전 조인트의 출력 변동에 의한 영향을 최소화하기 위하여 스펙트로미터 복조방식을 사용하였다. 스펙트로미터의 파장복조범위는 약 40nm로 10여 개의 FBG 센서 어레이를 복조할 수 있으며, 광스위치 등을 이용한 공간분할다중화 방식을 결합하여 사용한다면 더 많은 센서의 복조도 가능할 것이다.

제안한 FBG 센서 시스템을 이용하여 회전하는 풍력터빈 블레이드의 다중 위치에서 실시간으로 스트레인 및 온도 신호를 취득 가능성을 보였다. 이와 같은 방법은 풍력터빈 블레이드의 뒤틀림 및 떨림, 충격, 팁 처짐 등의 이상발생을 조기 진단하여 블레이드 유지 보수기술의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2010-0013118)

References

- [1] World Wind Energy Association, "World wind energy report 2009," (WWEA: Bonn, 2010), http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf.
- [2] J. Ribrant, Master Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm (2006), pp.32.
- [3] W. Vachon, "Long-term O&M costs of wind turbines based on failure rates and repair costs," in Proc. WINDPOWER, American windenergy Association Annual conference (Portland, USA, Jun. 2002), pp. 2-5.
- [4] 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* 13, 1-39(2009).
- [5] J. Y. Park, B. J. Kim, and J. K. Lee, "Development of Unmanned Remote Monitoring System for MW Class Wind Turbines," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 17, 412-418(2011).
- [6] F. P. G. Márquez, A. M. Tobias, J. M. P. Pérez, and M. Papaelias, "Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods," *Renewable Energy* 46, 169-178(2012).
- [7] R. W. Hyers, J. G. McGowan, K. L. Sullivan, J. F. Marwell, and B. C. Syrett, "Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines," *Energy Materials* 1, 187-203(2006).
- [8] P. J. Tavner, F. Spinato, G. J. W. van Bussel, and E. Koutoulakos, "Reliability of different wind turbine concepts with relevance to offshore application," in Proc. European Wind Energy Conference (Brussels, Belgium, Apr. 2008), pp. 166-170.
- [9] 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," *J. Lightwave Technol.* 15, 1442-1462(1997).
- [10] H. W. Lee, H. J. Park, J. H. Lee, and M. Song, "Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted FBG sensors by Gaussian curve-fitting," *Appl. Opt.* 48, 2205-2208(2007).
- [11] H. J. Park and M. Song, "Fiber Grating Sensor Interrogation Using a Double-Pass Mach Zehnder Interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20, 1833-1835(2008).
- [12] A.D. Kersey, T.A. Berkoff, and W.W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.* 18, 1370-1372(1993).
- [13] Z. Jin and M. Song, "Fiber grating sensor array interrogation with time-delayed sampling of a wavelength-scanned fiber laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16, 1924-1926(2004).
- [14] H. Kim and M. Song, "Linear FBG interrogation with a wavelength-swept fiber laser and a volume phase grating spectrometer," *Proc. SPIE* 7753, 77537Y (2011).
- [15] D. C. Betz, G. Tursby, B. Culshaw, and W. J. Staszewski, "Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette," *J. Lightwave Technol.* 24, 1019-1026(2006).
- [16] J. M. Lee and Y. Hwang, "Online Strain Measurement at Multiple Points on a Rotating Blade with Fiber Bragg Grating Sensors and a Rotary Optical Coupler," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 32, 77-82(2008).

◆ 저자소개 ◆



김대길 (金大吉)

1986년 1월 8일생. 2011년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전자정보공학부 석사과정.
E-mail : abcd@jbnu.ac.kr



김현진 (金炫震)

1980년 11월 8일생. 2007년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2009년 동 대학원 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 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 2000년~현재 전북대학교 전자공학부 교수.
Tel : (063)270-4285
Fax : (063)270-2394
E-mail : msong@jbnu.ac.kr