

<학술논문>

# 광섬유 격자 센서와 회전 광학 커플러를 사용한 회전하는 블레이드 여러 지점에서의 온라인 변형을 측정

이종민\* · 황요하\*

(2007년 10월 5일 접수, 2007년 12월 10일 심사완료)

## Online Strain Measurement at Multiple Points on a Rotating Blade with Fiber Bragg Grating Sensors and a Rotary Optical Coupler

Jong Min Lee and Yoha Hwang

**Key Words :** Rotary Optical Coupler(회전 광학 커플러), Fiber Bragg Grating Sensor(FBG 센서, 광섬유 격자 센서), Rotating Blade(회전하는 블레이드), Rotation Compensation(회전보상), Rotor(회전체)

### Abstract

Strain-gauges have been dominantly used to measure strain at various points on a rotor, however, either a slip ring or telemetry has to be used to send sensor signals to data acquisition instruments at stationary side. Both slip ring and telemetry have numerous inherent problems which force severe limitations in real applications. This paper introduces a new rotor condition monitoring system using FBG(Fiber Bragg Grating) sensors and a rotary optical coupler. A single optical fiber with many FBG sensors is installed on the rotor and an optical dynamic interrogator is installed at stationary side. The sensor signal connection between rotating part and stationary part is made by the rotary optical coupling method which makes use of light's unique characteristic - light travels through space. Broad band light source from the interrogator travels to the optical fiber on the rotor and reflected FBG sensor signals travel back to the optical fiber on stationary side and are connected to the interrogator. Rotary optical coupler's insertion loss change due to rotation is compensated by using a reference sensor installed at the center of the rotor. The proposed system's performance has been successfully demonstrated by accurately measuring strains at 5 points on a blade rotating at high speed.

기호설명

$L_{CST}$  : FBG 센서에서 반사된 광선의 파장에서 회전 보상된 광량 (dBm)  
 $L_R$  : 기준 FBG 센서에서 반사된 광선의 파장에서 측정된 광량 (dBm)  
 $L_{ST}$  : FBG 센서에서 반사된 광선의 파장에서 측

정된 광량 (dBm)  
 $\alpha$  : FBG 센서의 변형률 감도 ( $\mu\text{m}/\mu\epsilon$ )  
 $\beta$  : FBG 센서의 온도 감도 ( $\text{pm}/^\circ\text{C}$ )  
 $\Delta\epsilon$  : 응력에 의한 FBG 센서의 변형률 변화 ( $\mu\epsilon$ )  
 $\Delta\lambda$  : FBG 센서에서 반사되는 광선의 파장 변화 (pm)  
 $\Delta T$  : FBG 센서의 온도 변화 ( $^\circ\text{C}$ )

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원(지능시스템연구본부)  
E-mail : ljm2293@kist.re.kr  
TEL : (02)958-5669 FAX : (02)958-5659

\* 한국과학기술연구원 지능시스템연구본부

### 1. 서론

기계장치들은 일반적으로 회전 운동을 하는 부

분을 지니고 있으며, 많은 경우에 있어서 터빈의 블레이드나 헬리콥터의 날개와 같은 회전부는 기계장치에서 매우 중요한 부분이다. 최근 기계시스템의 고출력, 고효율 추세에 따라, 이러한 회전부의 성공적인 온라인 상태모니터링은 돌발적인 파손을 방지하고 보수유지 비용을 줄일 수 있기에 그 필요성이 급격히 증가하고 있다. 회전체의 상태를 모니터링하기 위해서는 회전체에 직접 센서를 설치하여 측정하는 방법이 베어링 하우징에서 가속도를 측정하는 것과 같은 간접 측정 방법에 비하여 더 유효한 방법이지만 회전체에 설치된 센서와 외부의 센서신호처리장치 사이에 신호전달을 위한 물리적 연결방법은 매우 어려운 일이다. 슬립 링(slip-ring)이나 무선송수신장치와 스트레인 게이지(strain-gauge)를 조합한 방법<sup>(1,2)</sup> 현재 회전체의 변형률(strain) 측정에 가장 많이 사용되는 방법이다. 그러나 이러한 방법들은 낮은 S/N 비나 고비용, 채널수의 제한 등 많은 문제점을 가지고 있다. 광섬유격자(Fiber Bragg Grating; FBG) 센서는 변형률과 온도를 측정할 수 있으며 스트레인 게이지보다 더 좋은 특성을 지니고 있다.<sup>(3)</sup> FBG 센서는 토목공학분야 특히 교량이나 터널과 같은 큰 구조물 모니터링에 주로 사용되어 왔으며,<sup>(4)</sup> 최근에는 기계공학분야에도 적용되기 시작하였다.

본 논문에서는 무선송수신장치나 슬립링과 같은 연결장치가 필요없는 FBG 센서를 사용한 새로운 상태모니터링 시스템에 대하여 제안하고, 이 시스템을 사용하여 회전하는 블레이드 다섯 지점에서 변형율을 측정하였다. 이 시스템은 FBG 센서의 뛰어난 특성을 충분히 활용하고, 광선이 공간을 통해 이동하는 독특한 특성을 이용한 회전 광학 커플링 방법으로 센서신호 연결문제를 해결하였다. 다수 FBG 센서가 가공된 하나의 광섬유를 회전체에 설치하고 동적 광신호 처리장치(dynamic optical interrogator)는 외부에 설치하였고, 회전 광학 커플링으로 회전부와 고정부사이의 센서신호를 연결하였다.

회전 광학 커플러는 광섬유 광 회전조인트(Fiber Optic Rotary Joint; FORJ)<sup>(5)</sup>라는 이름으로 1970년대부터 연구 개발되어 왔으며 현재 시판되고 있다. 그러나 렌즈의 정렬을 위하여 두 렌즈를 고정하는 부품을 베어링으로 구속하는 방법으로 고안되어, 현재 일반적으로 1,000 rpm 이하의 회전수에서만 사용해야 하는 제한이 있다. FBG 센서와 구속되지 않은 회전 광학 커플링을 사용한 몇몇 연구가 수행되어 왔다. Li 와 Prinz 는 블레이드의 열변형을

측정하였는데, 한 회전 당 한 번의 신호를 받을 수 있는 간단한 구조의 회전 광학 커플러를 사용하였다.<sup>(6)</sup> Krunger 등은 회전축의 토크를 측정하였는데, 회전 광학 커플러에서 발생하는 광 손실의 변화 문제를 해결하지 못하고 FBG 센서와 회전 광학 커플러로 회전축의 토크를 측정할 수 있는 가능성만을 보여주었다.<sup>(7)</sup> 회전 광학 커플러에서는 두 렌즈 사이의 공간을 광선이 통과할 때 광선의 손실(삽입손실; insertion loss)이 필연적이고, 기계적, 광학적 오차 때문에 이 삽입손실의 크기는 회전각도에 따라 변한다. 저자들은 회전 광학 커플러에서 발생하는 광 손실의 변화만을 측정할 수 있는 기준 FBG 센서(reference FBG sensor)를 회전축에 설치하여 회전 광학 커플러에서 발생하는 광 손실의 변화를 보상해 줄 수 있는 방법을 고안하였으며<sup>(8)</sup>, 실험을 통하여 회전중인 블레이드 여러 지점에서 온라인으로 변형률을 정확하게 측정하였다.

## 2. 회전체 변형률 측정장치

### 2.1 회전체 변형률 측정장치의 원리

Fig. 1 은 제안한 회전체 변형률 측정장치의 구성도이다. 여러 개의 변형률 측정용 FBG 센서들과 기준 FBG 센서가 가공된 광섬유를 회전체에 장착하며, 측정용 FBG 센서는 측정하고자 하는 지점에 완전히 밀착시켜 떨어지지 않도록 부착하고, 기준 FBG 센서는 원심력의 영향을 작게 받도록 축 중심에 위치시킨다. 회전축과 고정축을 연결하는 회전 광학 커플러의 구조는 Fig. 1 의 좌측과 같이 끊어진 양단의 광섬유에 렌즈를 연결하고, 회전축의 렌즈는 그림과 같이 회전축 중심에, 고정축 렌즈는 회전축 렌즈와 마주보도록 설치한 구조이다.

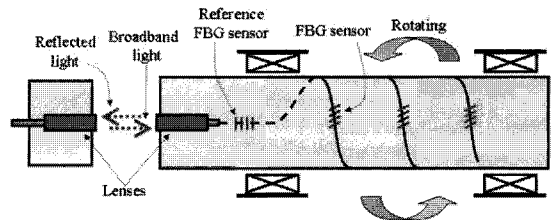


Fig. 1 Proposed rotor monitoring system with FBG sensors and a rotary optical coupler

여기서 사용된 광학 렌즈는 광섬유에서 나온 광선을 훨씬 넓은 단면으로 평행하게 하여 내보내면서 동시에 렌즈에 들어온 광선을 초점에 모아서 광섬유로 들여보내는 역할을 하여, 회전 광학 커플러에서 끊어짐 없이 광선을 주고 받을 수 있도록 해준다. 이런 용도로는 GRIN-rod 렌즈<sup>(9)</sup>와 C-렌즈가 있는데,<sup>(10)</sup> 본 논문의 실험에서는 C-렌즈를 사용하였다.

Fig. 1 에서 왼쪽 광섬유는 광대역 광원, 광신호 처리기, 컴퓨터로 이루어진 동적 광신호 처리장치와 연결되어 있어서, 광원으로부터 나온 C-대역 광선(파장: 1530nm~1565nm)<sup>(11)</sup>이 왼쪽의 렌즈에 도달한 다음, 공간을 통하여 회전하고 있는 오른쪽 렌즈로 진행한다. 오른쪽 렌즈를 통과한 광선은 회전축과 회전체에 설치된 오른쪽의 광섬유를 따라 진행하다가, 각 FBG 센서에서 해당 파장의 광선이 반사되고 남은 광선은 광섬유의 오른쪽 끝단으로 빠져 나간다. 반사된 특정 파장의 광선은 다시 오른쪽 렌즈에 도달한 다음, 공간을 통과하여 회전하지 않는 왼쪽 렌즈에 도달한다. 이렇게 FBG 센서에서 반사된 광선은 출발했던 동적 광신호 처리장치로 돌아와서 변형률을 계산하는데 사용된다.

2.2 회전 보상을 회전체 변형률

Fig. 2 는 FBG 센서와 회전 광학 커플러를 이용하여 동적으로 광신호를 처리하는 과정의 개략도이다. 광대역 광원으로부터 방사된 광선은 광 서큘레이터(optical circulator)에서 회전 광학 커플러로 전달되고, 광학 커플러를 통과한 광선 중에서 FBG 센서에서 변형률의 파장에 해당하는 광선이 반사된다. 반사된 광선은 다시 회전 광학 커플러를 거쳐 광 서큘레이터에서 튜너블 필터(tunable filter)로 전달된다. 튜너블 필터는 입력되는 광선의 파장에 비례하는 광량을 출력하는 광학 소자이다. 튜너블 필터에서 출력되는 광선의 광량은 포토 다이오드(photo-diode)에서 전기신호로 변환된다. 이때 회전 광학 커플러의 두 렌즈사이의 공간에서 필연적으로 광선의 광량 손실이 발생하며, Fig. 2 의 회전 광학 커플러 아래의 파장-광량 그래프와 같이 두 렌즈의 상대 각도의 변화에 광선의 광량 높낮이가 변화한다. 이 회전 광 커플러에서의 광량 변화는 Fig. 2 의 FBG 센서 아래의 파장-광량 그래프처럼 FBG 센서에서 발생한 광선의 파장 변화와 합쳐져 Fig. 2 의 튜너블 필터에 있는 파장-광량 그래프에 표시된 것과 같이 튜너블 필터에 입력되는 광선이 좌우로 파장만 변하는 것이 아니고

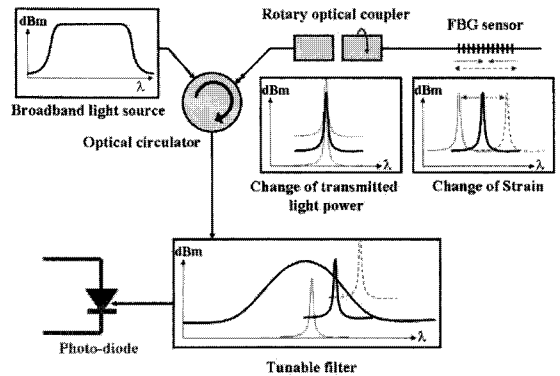


Fig. 2 Schematic diagram of a dynamic optical processing unit for a rotor monitoring system

상하로 광량도 변하게 된다. 따라서 튜너블 필터의 출력은 입력 광선의 파장뿐만 아니라 광량에 따라 변한다.

회전 광학 커플러 때문에 발생한 반사된 광선의 광량 변화를 보상하기 위하여 회전에 따른 삽입손실의 변화만을 측정하는 기준 FBG 센서를 회전축에 설치하고, FBG 센서에서 반사된 파장에 해당하는 광량( $L_{ST}$ )으로 변환한 다음 기준 FBG 센서 파장에 해당하는 광량( $L_R$ )으로 식 (1)과 같이 보상해 주면 순수하게 각 FBG 센서에 가해진 응력에 의하여 변한 파장에 해당하는 광량( $L_{CST}$ )을 얻을 수 있다.

$$L_{CST} = L_{ST} - L_R \tag{1}$$

식 (1)을 사용하기 위해서는 기준 FBG 센서에 해당하는 광량( $L_R$ )이 회전 광학 커플러에서 회전 각도에 따라 변하는 광량과 온도변화에 따른 파장 변화에 해당하는 광량만으로 이루어져 있어야 한다. 따라서 기준 FBG 센서는 변형률의 영향을 받지 않도록 가공 처리된 온도 측정용 FBG 센서를 사용하였다.

이렇게 보상된 광량( $L_{CST}$ )은 미리 측정한 튜너블 필터의 특성을 사용하여 쉽게 파장 변화( $\Delta\lambda$ )를 계산할 수 있고, 센서의 온도변화( $\Delta T$ )를 측정하여 FBG 센서의 특성 식 (2)에 대입하면 변형률 변화량( $\Delta\epsilon$ )을 계산할 수 있다.

$$\Delta\lambda = \alpha \cdot \Delta\epsilon + \beta \cdot \Delta T \tag{2}$$

여기서, FBG 센서의 변형률 감도  $\alpha$ 와 온도감도  $\beta$ 는 C-대역에서 대략  $\alpha \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 이고,  $\beta \approx 11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 이다.<sup>(12)</sup>

### 3. 회전하는 블레이드의 변형을 측정

#### 3.1 실험장치 구성

제안된 회전체 변형을 측정장치로 회전하는 블레이드의 변형을 측정하기 위하여 Fig. 3 과 같이 실험장치를 구성하였다. 테이블 위에 서보모터를 장착하고 구동축과 부하축을 분리하여 V 벨트로 증속하여 동력을 전달하도록 하였으며, 부하축의 한 끝에는 FBG 센서를 표면에 부착한 블레이드를 설치하였고 다른 한 끝은 축 중심으로 광섬유를 유도하여 기준 FBG 센서에 연결하고, 기준 FBG 센서는 회전 광학 커플러에 연결하였다.

실험에 사용된 블레이드는 Fig. 4 와 같이 무선조종 헬리콥터용 블레이드로, 여러 목재가 접합제로 접착되어 있으며 중간에 강화 플라스틱 막대가 삽입되어 있다. 블레이드의 길이는 550 mm 이고 회전평면에 4° 기울어 지도록 설치하여 회전시 블레이드에 변형이 발생하도록 하였다. Fig. 4 와 같이 왼쪽 블레이드의 표면에 1~5 번이라고 쓰여진 위치에 다섯 개의 FBG 센서를 길이방향으로 부착하였다. Fig. 5 는 회전축 중심에 설치된 기준 FBG 센서를 포함하여 여섯 개의 FBG 센서에서 반사되어 돌아온 광선의 광학 스펙트럼으로, 반사된 광선에 여섯 개 파장 성분이 있다는 것을 알 수 있다.

회전 광학 커플러는 Fig. 6 과 같이 제작했다. 오른쪽 렌즈는 회전축 중심에 설치하였고 왼쪽 렌즈는 고정부에 설치하였다. 회전축의 렌즈는 회전할 때에도 상하/좌우 변위 편차나 요-피치 각(yaw-pitch angle) 편차가 최소가 되어 렌즈의 광축이 회전축 중심과 일치하도록 조정하여 회전축 중심에 고정하였다. 고정부에 설치된 렌즈는 XYZ 작업대(stage)와 XYZ 작업대에 설치된 요-피치 각 작업대에 설치되어 렌즈의 위치와 각도를 회전축에 설치된 렌즈와 광축이 일치하도록 조절할 수 있도록 하였다.

#### 3.2 회전시 충격신호

식 (1)의 회전 보상의 효과를 알아보기 위하여 블레이드를 회전시키면서 블레이드에 충격을 가하였을 때,  $L_R$  와  $L_{ST}$  를 측정하여  $L_{CST}$  를 계산하여 보았다. 실험 조건은 샘플링 속도는 1 kHz 이고 회전 속도는 100 rpm 이었으며, 금속 막대를 블레이드 회전면에 밀어넣어 블레이드가 회전하다 금속 막대에 부딪히도록 하였다.

Fig. 7 은 실험결과로 충격 전후의 광량의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7 의 3 개의 그래프는 위에

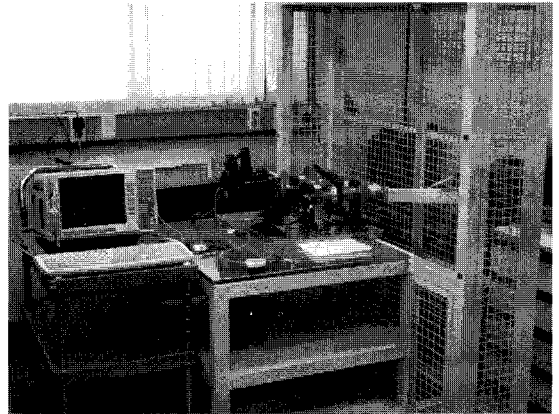


Fig. 3 Rotor blade simulator

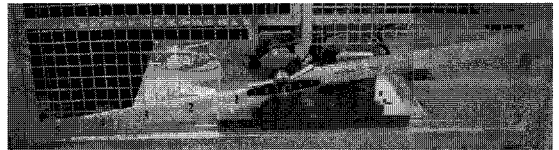


Fig. 4 Rotor blade and FBG sensor location

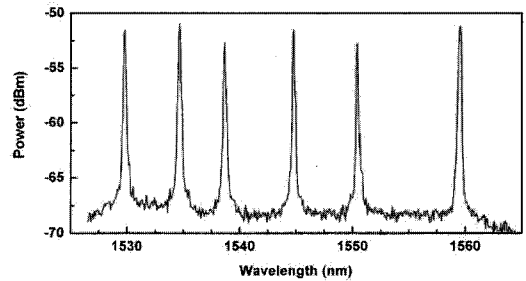


Fig. 5 Spectrum of reflected light at FBG sensors

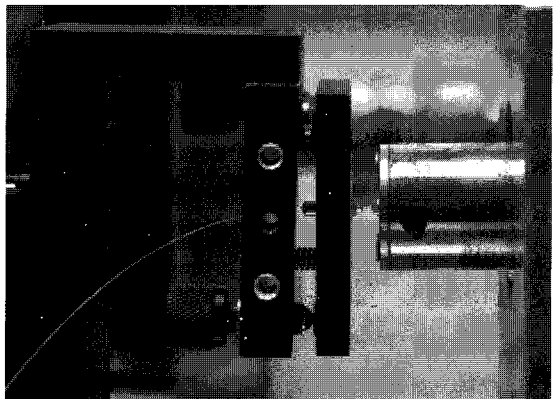


Fig. 6 Rotary optical coupler

서부터 차례로  $L_R$ ,  $L_{ST}$ ,  $L_{CST}$ 의 변화를 나타내고 있다.  $L_R$ 은 회전 광학 커플러에서 충격시 발생하는 축진동에 의한 광량변화와 회전시 발생하는 광량의 변화를 포함하고 있으나, 블레이드 진동의 영향을 보여주지는 않고 있기 때문에 기준 FBG 센서의 신호로 유효하다고 판단된다.  $L_{ST}$ 는 충격에 의한 블레이드 진동 때문에 발생한 변형률 변화와  $L_R$  변화를 포함하고 있는 변형률 측정을 위하여 블레이드 표면에 부착된 FBG 센서의 신호이다.  $L_{CST}$ 는 식 (1)에 의하여 온라인으로 계산된 값인데,  $L_{ST}$ 에서  $L_R$ 을 잘 분리하여 충격시 블레이드의 변형률 변화에 따른 광량( $L_{CST}$ )을 잘 나타내주고 있다.

실험결과는 기준 FBG 센서를 이용한 회전 광학 커플러에서 회전 때문에 발생한 광량변화를 보정하기 위한 회전 보상 방법이 유효함을 확인할 수 있다.

### 3.3 회전시 측정된 블레이드의 변형률

Fig. 8은 Fig. 4에 표시된 블레이드의 다섯 지점에서의 변형률을 회전속도를 증가시키면서 측정된 결과이다. 약 270 rpm으로 회전하고 있던 블레이드를 1초에서 2.5초 사이에 2,000 rpm까지 증가시켰으며, 샘플링 속도는 1 kHz이었다. Fig. 8에서 각 선에 표시된 1~5는 Fig. 4에 표시된 FBG 센서의 위치 1~5에 해당한다. 2,000 rpm에서 1 지점의 평균응력은 약 566  $\mu\epsilon$ , 2 지점은 약 256  $\mu\epsilon$ , 3 지점은 약 209  $\mu\epsilon$ , 4 지점은 약 86  $\mu\epsilon$  그리고 5 지점은 약 9  $\mu\epsilon$ 이다. 블레이드의 4 지점 부근에 삽입된 강화 플라스틱 막대가 3, 4, 5 지점의 정량적 결과에 왜곡현상을 발생시켰지만, 그림은 속도가 증가함에 따라 증가하는 다섯 지점에서의 블레이드의 변형률을 온라인으로 정확하게 측정하고 있음을 보여준다. 또한, 회전축에 가까운 부분에서 측정할수록 블레이드의 평균 변형률이 상대적으로 더 많이 증가하고 있다. 이는 이미 충분히 예상할 수 있었던 결과로 회전체 변형률 측정장치가 효과적으로 작동하고 있음을 입증하고 있다. 또한 회전수에 따른 변형률 변동량도 회전축에 가까운 부분일수록 더 크게 나타났다.

이와 같은 결과는 제안된 회전체 변형률 측정장치와 회전보상 방법이 잘 작동하고 있음을 보여준다. 따라서 측정된 변형률은 피측정체 물질의 재료적 특성과 기하학적 치수를 알 수 있다면, 응력이나 변위로 변환할 수 있기에, 본 논문에서 제안된 방법은 회전체 모니터링 분야에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

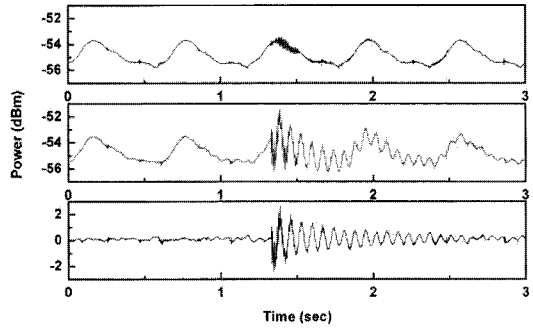


Fig. 7 Optical powers at impact test

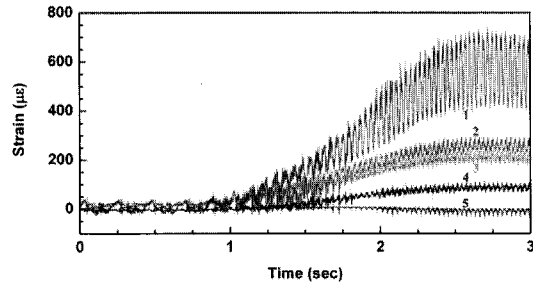


Fig. 8 On-line strains during run-up test

## 4. 결론

본 논문에서는 FBG 센서를 회전하는 블레이드에 설치하고 빛의 공간이동 특성을 이용한 회전 광학 커플러를 고안하여, 외부에서 회전하는 블레이드에 부착된 다수의 FBG 센서에 광선을 넣어주고, 센서로부터 반사된 광선을 돌려받아 블레이드에 발생한 변형률을 실시간으로 측정하였다. 회전 광학 커플러의 두 렌즈 광축 정렬 오차 때문에 발생하는 회전각도에 따라 전달되는 광선의 광량의 변화는 회전축 중심에 설치한 기준 FBG 센서에서 측정된 광량으로 보상하였다. 따라서 회전중인 회전체의 변형률을 온라인으로 정확히 측정할 수 있음을 실험으로 입증하였다.

이 방법은 그 동안 직접적인 측정이 매우 어려웠던 회전체와 회전체에 부착된 구조물의 변형률 측정에 새로운 돌파구를 열어주는 기술이 될 수 있다.

## 참고문헌

(1) Carlos E. S. Cesnik, SangJoon Shin and Matthew L.

- Wibur, 2001, "Dynamic Response of Active Twist Rotor Blades," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, pp. 62~76.
- (2) Yoonsu Nam, Mooyeol Park and Neungsoo Yoo, 2006, "A Calibration and Uncertainty Analysis on the Load Monitoring System for a Low Speed Shaft and Rotor Blade of a Wind Turbine," *Transactions of KSME, A*, Vol. 30, No. 5, pp. 560~567.
- (3) Cornelia Schmidt-Hattenberger, Marcel Naumann and Gunter Borm, 2003, "Fiber Bragg Grating Strain Measurements in Comparison With Additional Techniques for Rock Mechanical Testing," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 50~55.
- (4) Gebremichael, Y.M., Li, W., Meggitt, B.T., Boyle, W.J.O., Grattan, K.T.V., McKinley, B., Boswell, L.F., Aarnes, K.A., Aasen, S.E., Tynes, B., Fonjallaz, Y. and Triantafillou, T., 2005, "A Field Deployable, Multiplexed Bragg Grating Sensor System Used in an Extensive Highway Bridge Monitoring Evaluation Tests," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 5, No. 3, pp. 510~519.
- (5) Clenn F. Dorsey, 1982, "Fiber Optic Rotary Joints - A Review," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. CHMT-5, No. 1, pp.37~41.
- (6) Xiaochun Li and Fritz Prinz, 2004, "Analytical and Experimental Study on Noncontact Sensing with Embedded Fiber-optic Sensors in Rotating Parts," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22, No. 7, pp. 1720~1727.
- (7) Ludi Krunger, Pieter L. Swart, Anatoli A. Chtcherbakov and A. J. van Wyk, 2004, "Non-contact Torsion Sensor using Fibre Bragg Gratings," *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, pp. 1448~1452.
- (8) Injae Lee, Jong Min Lee, Sangbea Lee and Yoha Hwang, 2006, "On-line Strain Measurement of Rotating Blade Using Fiber Bragg Grating Sensors and Beam Coupler," *Transactions of KSNVE*, Vol. 16, No. 11, pp. 1172~1178.
- (9) Jose Miguel Lopez-Higuera, 1998, *OPTICAL SENSORS*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, Cantabria in Spain, pp. 97~110.
- (10) Wencai Jing, Dagong Jia, Feng Tang, Hongxia Zhang, Ge Zhou, Jinglong Yu, Fanmin Kong and Kun Liu, 2004, "Design and Implementation of a Broadband Optical Rotary Joint Using C-lenses," *Optics Express*, Vol. 12, No. 17, pp. 4088~4093.
- (11) Harun, S. W., Tamchek, N., Poopalan, P. and Ahmad, H., 2003, "Effect of Injection of C-band ASE on L-band Erbium-Doped Fiber Amplifier," *JETP Letters*, Vol. 77, No. 9, pp. 461~463.
- (12) Daniel C. Betz, Graham Tursby, Brian Culshaw and Weislaw J. Staszewski, 2006, "Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 1019~1026.