

광섬유 격자 센서와 빔 커플러를 사용한 회전중인 블레이드의 변형률 측정 방법

On-line Strain Measurement of Rotating Blade Using Fiber Bragg Grating Sensors and Beam Coupler

이 인 재* · 이 중 민** · 이 상 배*** · 황 요 하†

Injae Lee, Jong Min Lee, Sangbae Lee and Yoha Hwang

(2006년 10월 9일 접수 ; 2006년 11월 2일 심사완료)

Key Words : Fiber Bragg Grating Sensor(FBG sensor, 광섬유 격자 센서), Beam Coupler(빔 커플러), Rotating Blade(회전하는 블레이드)

ABSTRACT

Measurement of blade strain with sensors directly installed on the blade has one critical issue, how to send the sensor signal to the ground. Strain-gauges have been dominantly used to directly measure stress of a blade and either a slip ring or a telemetry system has to be used to send measured signal to the ground. However, both systems have many inherent problems and sometimes very severe limitations to be practically used. In this paper, new on-line strain monitoring method using FBG(Fiber Bragg Grating) sensors and a beam coupler is introduced. Measurement of rotor stress using FBG sensors is nothing new, but unlike other system which installs all necessary instruments on the rotor and use telemetry system to send data to the ground, this system makes use of light's unique characteristic - light travels through space. In this new approach, single optical fiber with many FBG sensors is installed on the blade and all other necessary instruments can be installed at ground thereby giving tremendous advantages over slip ring or telemetry system. A reference sensor is also introduced to compensate the beam coupler's transmission loss change due to rotation. The suggested system's good performance is demonstrated with experiments.

1. 서 론

회전 운동을 하는 블레이드(blade)는 헬리콥터를 비롯한 항공기 엔진, 터빈, 선박의 스크류 등 많은

기계장치에서 사용되는 중요한 요소이다. 회전체의 블레이드는 압력 등 변화하는 외력을 받는 환경에서 작동되므로 다른 구조물에 비하여 높은 피로하중을 받는다. 산업의 발달에 따라 큰 힘을 받거나 빠른 속도로 움직이는 환경에서의 블레이드 사용이 증가하고 있어 블레이드에 손상이 생길 경우와 같은 커다란 사고의 위험성이 커지고 있다. 따라서 블레이드의 상태를 실시간으로 모니터링하여 고장의 징후를 미리 감지하고 유지, 보수를 통해 돌발적인 파손 등의 사고를 방지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 이러한 중요성에 비하여 회전중인 블레이드의 상태

† 책임저자; 정회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지 연구센터

E-mail : yoha@kist.re.kr

TEL : (02)958-5656, Fax : (02)958-5659

* 정회원, (주)신도리코 기술연구소

** 정회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

*** 한국과학기술연구원 광기술연구센터

모니터링은 현실적으로 매우 어렵다. 블레이드의 상태를 정확하게 모니터링하기 위해서는 블레이드에 센서를 직접 설치하여 블레이드의 상태를 정확히 측정해야 하나 회전축과 같이 회전하는 센서와 회전하지 않는 센서신호 처리장치를 물리적으로 연결하는 것이 매우 어렵기 때문이다.

그러므로 블레이드를 포함한 회전체의 상태를 모니터링하여야 하는 경우 베어링하우징과 같은 부위에 센서를 설치하여 간접적으로 측정하는 방법⁽¹⁾과 회전체에 설치된 센서의 선들을 회전축 한쪽에 모아서 슬립링(slip ring)을 사용하는 방법⁽¹⁾이 가장 널리 사용되고 있으나, 간접신호를 사용한 추정, 측정 신호의 낮은 S/N비, 측정 센서의 수 제한, 회전 속도 제한 등 다양한 문제점이 있다. 무선 장치를 회전체에 설치하여 센서의 신호를 신호처리 시스템으로 전송하는 방법도 있으나 비용이 많이 들며 전원 공급, 밸런스(balance) 및 내구성 등의 문제점을 가지고 있다⁽²⁾. 최근 풍력 발전기의 경우 블레이드에 손상이 발생했을 때 생기는 음향의 차이를 이용하여 회전체 블레이드의 상태를 모니터링 하는 방법⁽³⁾이 제시되었으나 이 경우도 실시간으로 블레이드의 응력 변화를 알아낼 수 없고, 정확한 손상 부위를 알아내기 어려운 단점을 가지고 있다.

광섬유 격자(fiber bragg grating, FBG) 센서는 변형률(strain)과 온도를 측정할 수 있는 센서로서 뛰어난 성능특성과 연결의 간편함에 힘입어 최근 토목 분야에서 적용되기 시작했으며, 기계분야에서는 구조물 응력측정에 FBG센서를 사용하는 방법에 대하여 많은 연구가 수행되고 있다. 이 FBG센서는 스트레인게이지를 대체하여 회전체에서 직접 응력을 측정할 수도 있다. Li와 Prinz⁽⁴⁾는 FBG센서를 이용하여 회전운동을 하는 블레이드의 열변형을 측정하였다. 그러나 연속적인 신호를 받지 못하고 한 회전 당 한 번의 신호만을 측정할 수 있는 간단한 시스템이었다. Kruger⁽⁵⁾는 회전체에 FBG센서를 부착하고 빛의 송수신 부위인 광학렌즈(optical lens)에 베어링을 이용하여 축이 회전할 때 렌즈도 함께 회전하는 광축 정렬장치를 만들었다. 그러나 이 방법은 회전 시 광축 정렬이 어긋나게 되며 이에 따른 전달손실의 변화를 보정하지 못하여 반사되는 광신호의 파장변화를 스펙트럼 영역에서 관찰하였을 뿐 실제적인 변형률 변화는 계산하지 못하였다. 또한 황⁽⁶⁾ 등은 회전중인 회전체에서 변형률을

실시간으로 측정하기 위하여 FBG센서와 빛의 공간 이동 특성을 이용한 새로운 방법을 제안하였다.

이 논문에서는 황 등이 제안한 회전체 모니터링 방법을 사용하여 모형 헬리콥터의 블레이드에 FBG 센서를 설치하고 회전중인 블레이드에 발생하는 변형률을 측정하였다. 이 방법에서는 회전체상에 다수의 FBG센서 부위를 가진 하나의 광섬유를 설치하고, 회전체의 광섬유와 광 신호 처리부와의 연결은 공간을 통하여 이동이 가능한 광의 특성을 이용하는 빔 커플러를 사용한다. 그러나 이 빔 커플러를 회전체에 적용할 때 회전각도에 따른 빔 커플러의 전달률(transmitted rate) 변화가 발생하여 변형률 측정이 어렵다는 것을 확인하였으며 이 문제점을 해결하기 위하여 빔 커플러가 전달하는 광량만을 측정하는 기준센서를 이용한 해결방안을 제안하여 회전하는 블레이드의 변형률을 성공적으로 측정하였다.

2. 새로운 회전체 변형률 측정 장치

2.1 FBG 센서

Fig. 1은 FBG 센서의 원리를 나타낸 그림이다. 특정한 성분을 가지는 광섬유에 수직으로 빛을 주사하는 마스크 과정을 거쳐서 그림과 같이 일정 간격의 격자가 만들어진 부위를 FBG센서라고 한다. 이와 같이 FBG센서가 가공되어 있는 광섬유에 광대역 광원(broadband source)을 입력하면 FBG의 격자 간격에 해당되는 파장의 빛은 이 격자들에 의해서 반사되어 광원 쪽으로 되돌아가며, 반사된 파장의 빛을 제외한 빛은 이 격자 부위를 통과하여 진행한다. 이 FBG센서를 피측정 물체에 접촉시킨 후 접촉부에 변형이 일어나면 격자 간격이 변하게 되고 이에 따라 반사되는 빛의 파장도 변한다. 따라서 반사되는 빛의 파장변화를 측정하면 온도나 응력에 의한 접촉부의 변형률을 알 수 있다.

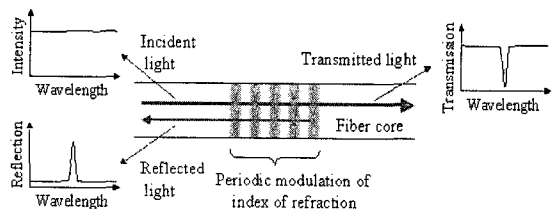


Fig. 1 Principle of FBG sensor

이와 같은 FBG센서는 각 센서에 전원선, 신호선이 따로 필요하지 않아 케이블 수와 무게를 크게 줄일 수 있으며, S/N비가 크고, 빛을 사용함으로 전자기장의 영향을 받지 않으며, 스트레인계지보다도 더 넓은 온도 범위에서 사용할 수 있다. 그러나 무엇보다도 FBG센서의 가장 큰 장점은 하나의 광섬유에 다수의 센서를 가공하여 사용할 수 있는 점이다. 이는 격자 간격이 다른 FBG센서들을 하나의 광섬유 여러 지점에 만들어 놓고, 각 센서에서 반사되어 돌아오는 빛의 파장변화를 측정하면 각 센서의 변형률을 한 번에 알 수 있다는 점이다⁽⁷⁾.

최근에는 이러한 FBG센서의 장점을 기계에 적용한 사례가 많아지고 있다. 대표적으로 기계 구조물로서 항공기 날개의 응력 측정이나⁽⁸⁾ 복합재료 만든 저장탱크의 변형을 측정⁽⁹⁾에도 적용되고 있다.

2.2 빔 커플러

Fig. 2는 FBG센서를 이용한 측정 시스템의 개략도이다. 광대역 광원으로부터 나온 빛이 광섬유를 통하여 각 FBG센서로 전해진다. FBG센서가 부착된 지점의 응력이나 온도변화에 의한 변형이 격자의 간격을 변형시켜 반사되는 빛의 파장을 변화시킬 때, 이 변화를 포토다이오드(photo-diode)를 통해 전기량으로 변환하여 FBG센서가 부착된 지점의 변형률이나 온도를 계산한다.

빛은 자유 공간을 통해 이동이 가능하다. 그러므로 회전체에 FBG센서가 있는 광섬유를 설치하고, 공간을 통해 회전체의 광섬유에 빛을 넣어주고 FBG센서에서 반사되는 빛을 받는다면 기존의 회전체 모니터링 방식이 가지고 있던 회전부의 센서와 신호처리부와의 연결 문제를 해결할 수 있다⁽⁶⁾. Fig. 3은 새롭게 제안된 회전체 모니터링 시스템 개념도이다. 그림에서 센서시스템은 FBG를 이용한 회전체 블레이드

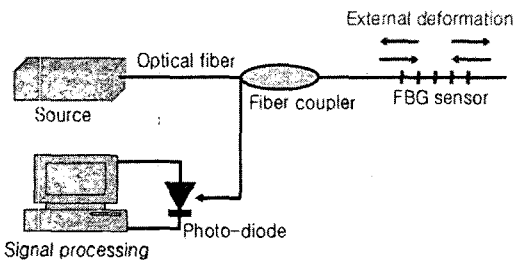


Fig. 2 FBG sensor system

이드 모니터링시스템의 개략도인 Fig. 4에서의 광대역 광원과 광 서클레이터(optical circulator), 포토다이오드, 신호처리기를 모두 포함하는 FBG 센서용 광원 및 신호처리장치이다. Fig. 3의 왼쪽은 다수의 FBG센서가 설치된 회전축이고, 오른쪽은 고정부이다. 그림에서 빔 커플러는 두 개의 광학 렌즈를 포함하는 자유공간이다. 이 빔 커플러는 고정부의 센서시스템으로부터 나온 광대역의 빛을 광학 렌즈를 통해 회전축에 부착된 광학렌즈로 전달하여 FBG센서로 보내며, 각각의 FBG센서로부터 반사된 특정 파장의 빛을 다시 광학 렌즈들을 통해 고정부의 센서시스템으로 보내어 광섬유가 없이도 자유공간을 통하여 광신호를 주고받을 수 있도록 설계되었다. 여기서 광학 렌즈의 역할은 광섬유로부터 나온 빛이 공간상에서 산란되지 않고, 마주보는 광섬유로 전달될 수 있도록 축과 평행한 방향으로 나가도록 하고, 입사광을 모아주고 또한 빛의 전달면을 확장하여 회전축의 진동 등으로 회전 중에 빛의 연결이 끊어지는 것도 방지하는 것이다.

Fig. 4는 이 실험에서 사용된 FBG를 이용한 회전체 블레이드 모니터링시스템 개략도이다. 광대역 광원에서 나온 빛을 광 서클레이터의 1번 입력단에 연결하면 광 서클레이터는 입력된 빛을 2번 입출력단

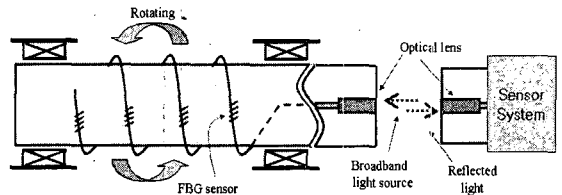


Fig. 3 New rotor strain monitoring method with FBG sensors and beam coupler

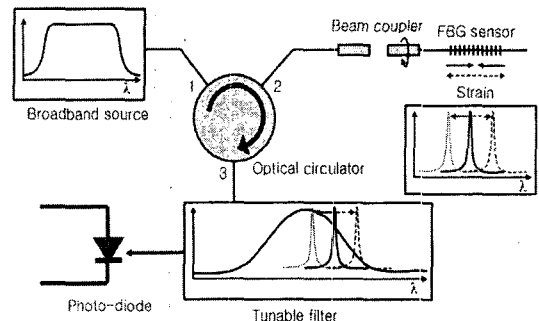


Fig. 4 FBG sensor system using beam coupler

으로 보내주며, 입출력단에서 나온 빛은 빔 커플러의 고정부쪽 렌즈로 나와 자유공간을 통과하여 회전체 쪽의 광섬유에 부착시킨 렌즈로 입력된다. 회전체쪽 렌즈에 입력된 빛은 광섬유를 따라 회전체에 부착된 광섬유 격자에 도달하고, 이때 광섬유 격자의 간격에 해당하는 파장의 빛만이 광섬유 격자에서 반사되어 되돌아가게 된다. 반사된 빛은 역순으로 빔 커플러를 통과하여 광 서클레이터의 2번 입출력단으로 입력되어 3번 출력단으로 출력된다. 회전체에 변형이 생기면 광섬유 격자의 간격이 변하며, 이에 따라 반사되는 빛의 파장이 변하게 된다. 이러한 파장변화는 튜너블 광필터(tunable optical filter)를 거치면서 파장변화에 비례하는 광량변화로 바뀌며 포토다이오드를 거쳐서 전기신호로 변환된다. 이 전기신호로부터 FBG센서가 부착된 지점의 변형률을 계산한다.

빛이 빔 커플러를 통과할 때는 필연적으로 손실이 발생하는데, 사용될 렌즈의 정렬에 따른 전달 특성을 알아보기 위하여 Fig. 5와 같이 마주보는 두 렌즈 사이를 통과한 빛이 최대가 되도록 XYZ 작업대(stage)를 조절하여 두 렌즈의 위치를 고정한 후 렌즈의 광축에 수직인 방향(Fig. 5의 X 방향)으로 한쪽 렌즈를 이동시켜가면서 광축의 오프셋(offset)에 따른 전달 특성을 측정하였다.

그 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 ‘●’ 은 측정값을 나타내고, ‘-’ 은 2차 함수로 측정값을 곡선적합(curve fitting)한 결과를 나타낸다. 빔 커플러에 사용된 광학 렌즈의 자유 공간에서의 전달된 광량은

두 렌즈가 약 $\pm 25 \mu\text{m}$ 어긋난 상태에서도 거의 일정하게 나타났으며, 어긋남이 커짐에 따라 통과하는 광량이 줄어드는 것을 확인하였다. 그러나 일반 전기 신호와는 달리 광신호에 실리는 광노이즈(noise)는 매우 적기 때문에 빔 커플러의 전달률이 작아도 전달된 신호를 크게 증폭하여 사용할 수 있다. 따라서 이 실험을 통하여 빔 커플러를 이용하여 광신호의 전달이 가능함을 확인하였다.

3. 회전하는 블레이드의 변형을 측정

3.1 실험장치 구성

제안된 회전체 변형을 측정 장치로 회전하는 블레이드의 스트레인을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 시스템을 구성하였다. 테이블 위에 서보모터를 장착하고 구동축과 부하축을 분리하여 V벨트로 동력을 전달하도록 하였으며, 부하축의 한 끝에는 FBG센서를 부착한 블레이드를 설치하였고 다른 한끝에는 축의 가운데로 광섬유 센서를 유도하여 빔 커플러에 연결하였다.

블레이드에는 10개의 FBG센서를 가진 광섬유를 각 블레이드 당 5개의 FBG센서를 표면에 길이 방향으로 Fig. 8과 같이 부착하였다. 블레이드는 무선 조종 모형 헬리콥터의 목재 블레이드로서 길이는 550 mm 이고, 바람을 받는 방향으로 4° 기울어지도록 설치하여 정상적인 대기상태에서 모형 헬리콥터가 공중에 정지하고 있는 상황을 재현하였다.

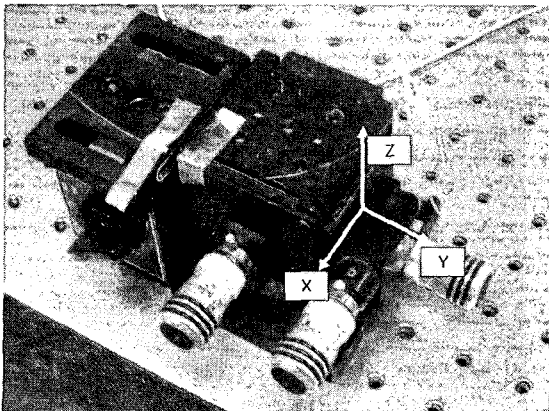


Fig. 5 Measurement of transmitted optical power by a beam coupler using XYZ stage

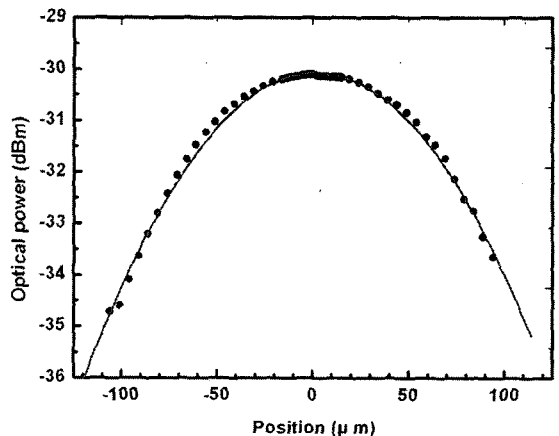


Fig. 6 Transmitted optical power through beam coupler (●: measured data, -: second order asymptotic curve)

Fig. 9는 빔 커플러와 두 렌즈의 광축 정렬을 위한 장치를 보여준다. 그림과 같이 빔 커플러의 한 렌즈는 오른쪽 고정부에 설치하였으며, 왼쪽은 회전축의 중심에 설치하였다. 고정부쪽 렌즈는 XYZ 작업대에 설치된 각도 조절 작업대에 고정하여 렌즈의 위치와 각도의 조절이 가능하도록 하였다. 회전부의 렌즈는 회전시에도 움직이지 않고 축 중심에 위치하도록 회전축 중심에 고정하여 광축의 흔들림을 방지하였다.

3.2 회전시 광신호 측정

XYZ 작업대에 설치된 각도 조절 작업대를 조절하여 빔 커플러의 두 광축이 일치하도록 정렬한 후, 블레이드를 회전시키면서 블레이드의 FBG센서로부터 되돌아오는 신호를 관찰하였다. Fig. 10은 블레이드를 100 rpm으로 회전시키면서 1 kHz의 샘플링 속도(sampling rate)로 10개의 FBG센서 신호를 측정된 결과로 시간에 따른 전압변화를 보여준다. 한 회전 당 한 번의 신호만 받을 수 있었던 이전의 연구 결과들^(4,5)과는 달리 10개 센서 신호를 각각 1 kHz의 샘플링 속도로 측정할 수 있음을 보여준다.

Fig. 10의 결과를 자세히 관찰하면 각각의 센서로부터 나온 신호들이 일정한 주기를 가지고 신호가 크게 변하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 주기적인

변화는 블레이드의 변형률과 관련된 값이 아닌 회전에 의한 빔 커플러에서 전달되는 광량의 변화로 인해 발생한 것이다. 이는 엄밀한 의미에서 렌즈 케이스의 중심축과 렌즈의 광축이 평행하지 않으며, 두 광축 사이에도 일정한 각도 공차가 존재하여 회전

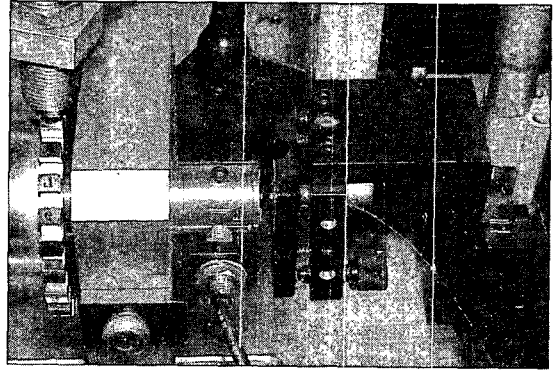


Fig. 9 Beam coupler and alignment adjusting mechanism

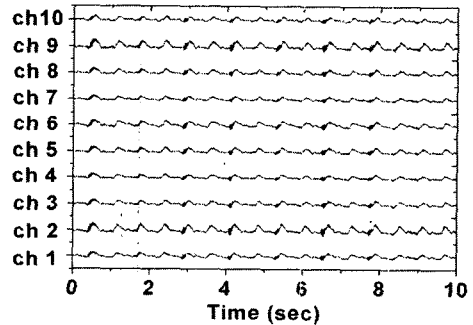


Fig. 10 The result of rotor blade measurement using FBG sensors and beam coupler

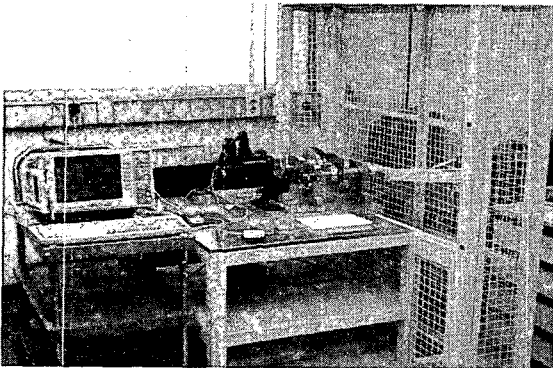


Fig. 7 Rotor blade simulator

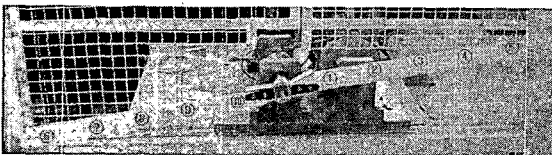


Fig. 8 Rotor blade and FBG sensor location

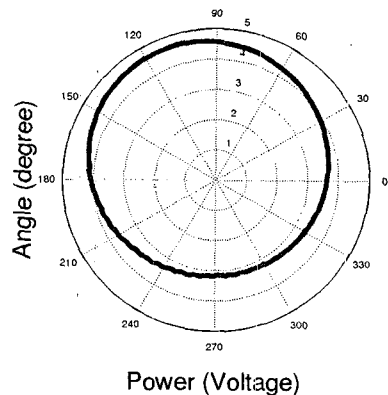


Fig. 11 Transmission loss change due to rotation

시 빔 커플러를 통과하는 광량이 회전각도에 따라 변하기 때문이다. 이로 인해 블레이드로부터 측정된 변형률 변화 신호에 회전 각도에 따른 빔 커플러에서 전달되는 광량 변화 값이 더해져서 나타나며, 회전에 따른 광량 변화의 크기가 블레이드 변형률의 변화 크기보다 훨씬 크게 나타났다. 회전에 따른 빔 커플러의 광 전달 특성을 측정하기 위하여 회전 부를 천천히 돌리며 각도에 따른 광량의 변화를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 11과 같으며 이러한 광량 변화는 회전각도에 따라 일정함으로 Fig. 10에 주기적으로 나타난 것이다.

이러한 회전 각도에 따른 빔 커플러에서 전달되는 광량의 변화 문제는 사용되는 렌즈의 특성이 완벽하지 않으며 기계적으로 정렬을 잡는 것에도 물리적인 한계가 있으므로 크기의 문제일 뿐 항상 존재하게 된다. 이에 따라 이를 보정하는 새로운 방법이 제안되었다.

3.3 회전에 따른 전달되는 광량 변화 보상

이 논문에서는 실험에서 기계적으로 광축을 조절하기 위하여 회전축에 삽입된 렌즈의 광축이 회전축과 평행하도록 하기 위하여 축에 조정나사를 두어, 렌즈의 각도를 조절하여 두 축을 최대한 평행하도록 조절하였다. 그러나 이와 같은 방법을 사용하여도 회전시 발생하는 빔 커플러에서 전달하는 광량 변화를 완전히 제거할 수는 없었다. 따라서 이 논문에서는 블레이드의 응력에 의한 변형률이 없는 부위인 회전축 중심에 빔 커플러의 광량 변화 성분만을 감

지하는 별도의 FBG센서(기준 센서)를 설치하고, 이 기준 센서에서 측정된 신호로 다른 센서 신호를 보정하여 회전 중인 블레이드의 변형률을 측정하는 방법을 사용하였다.

제안된 방식에서는 회전부 렌즈 뒤쪽 회전축 중심에 기준으로 삼을 FBG센서를 위치시켰다. 이 경우 기준 센서는 원심력의 영향을 거의 받지 않으므로 블레이드에 부착된 다른 FBG센서와는 달리 회전에 의한 광량의 변화 성분만을 출력하게 된다. 이러한 회전에 의한 광량의 변화는 모든 센서의 출력신호에 동일하게 존재하므로, 이 기준 센서로부터 측정된 값과 각 센서의 출력신호의 차를 이용하여 블레이드에 설치된 센서의 신호에서 변형률에 의한 신호를 분리해 낼 수 있다.

이를 실험적으로 증명하기 위하여 회전하는 블레이드에 충격을 가하여 진동을 발생시켜 기준 FBG센서로부터 받은 신호를 사용하여 블레이드에 부착된 FBG센서로부터 받은 신호를 보정하였다. 실험 조건은 샘플링 속도, 1 kHz, 회전속도 55 rpm이었다.

Fig. 12는 회전중인 블레이드의 옆부분에 충격을 준 전후 신호를 나타낸다. (a)는 회전체 블레이드에 부착한 FBG센서로부터 받은 변형률($\mu\epsilon$)을 나타내고 (b)는 회전축 중심에 위치시킨 기준 FBG센서 변형률($\mu\epsilon$)을 나타낸다. (a)에는 빔 커플러에서 전달되는 광량 변화성분과 충격 가진으로 인한 진동 성분이 함께 실려 있는 것을 확인할 수 있다. (b)에서는 빔 커플러에서 전달되는 광량 변화 성분만 존재하고 충격 가진으로 인한 진동 성분이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 블레이드에 걸리는 변형률의 영향을 받지 않고 오직 회전에 의한 광량 변화만을 나타낸다고 가정한 기준 센서의 기능이 잘 실현됨을 확인할 수 있다. (c)는 (a)를 (b)로 보정한 결과인데, 빔커플러에서 전달되는 광량 성분이 제외된 블레이드에 가해진 충격 신호가 잘 분리되었음을 보여준다. 그러므로 기준센서 신호 (b)를 적용하면 블레이드로부터 측정된 신호 (a)에서 광량 변화로 인한 성분을 제거하고 충격진동 성분만을 얻을 수 있음을 확인하였다.

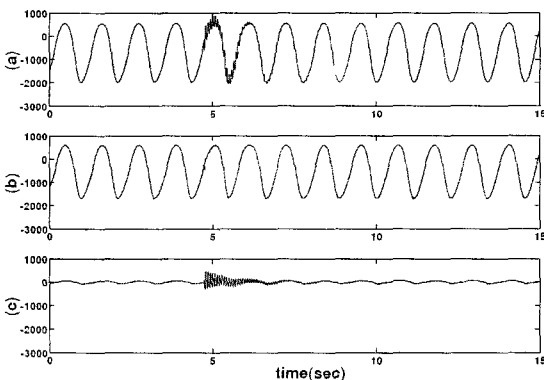


Fig. 12 Compensation example (a) FBG sensor data on a blade, (b) reference FBG sensor data, (c) impact signal after compensation

4. 결 론

이 논문에서는 FBG센서를 회전하는 블레이드에

설치하고 빛의 공간이동 특성을 이용한 빔 커플링 장치를 고안하여, 외부에서 회전하는 블레이드에 부착된 FBG센서에 빛을 넣어주고, 센서로부터 반사된 빛을 돌려받아 블레이드에 가해진 응력에 대한 변형률을 실시간으로 측정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 실제 적용 시 발생하는 광축 정렬 문제로 나타나는 회전에 의한 광량의 변화를 보상하기 위하여 회전축의 중심에 설치하는 기준 센서를 이용한 보상방안을 제시하였고 회전중인 블레이드 상의 변형률을 정확히 측정할 수 있음을 실험으로 입증하였다.

이 방법은 그 동안 직접적인 측정이 매우 어려웠던 회전체와 회전체에 부착된 구조물의 응력 변화에 따른 변형률 측정에 새로운 돌파구를 열어주는 기술이 될 수 있으며, 향후 실시간 토크 측정이나 회전 중인 팬의 실시간 작동 모드 분석 등 다양한 분야에 적용이 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Carlos E. S. Cesnik, 2001, "Dynamic Response of Active Twist Rotor Blades", SMART MATERIALS AND STRUCTURES, 10, pp. 62~76.
- (2) <http://www.riseo.dk>
- (3) Joosse, P. A., 2002, "Acoustic Emission Monitoring of Small Wind Turbine Blades", American Society of Mechanical Engineers, Vol. 124, No. 4, pp. 446~454.
- (4) Li, X. C. and Prinz, F., 2004, "Analytical and Experimental Study on Noncontact Sensing With Embedded Fiber-optic Sensors in Rotating Metal Parts", LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 22, No. 7, pp. 1720~1727.
- (5) Kruger, L., 2004, "Non-contact Torsion Sensor Using Fiber Bragg gratings", Measurement Science And Technology, 15, pp. 1448~1452.
- (6) Hwang, Y. H., Lee, S. B. and Lee, J. M., 2004, "Monitoring Device for Rotating Body", Korean Patent pending.
- (7) Andreas Othonos, 1999, Fiber Bragg Gratings, Artech House.
- (8) Lee, J.-R., 2003, "In-flight Monitoring of a Subscale Wing Using a Fiber Bragg Grating Sensor System", Smart Materials And Structures, 12, 147~155.
- (9) Kang, H.-K., 2002, "Strain Monitoring of a Filament Wound Composite Tank Using Fiber Bragg Grating Sensors", Smart Materials And Structures, 11, pp. 848~853.