

풍력발전기 복합재 블레이드의 접착 분리 모니터링을 위한 패키징 광섬유 브래그 격자 센서 탐촉자의 사용성 검토

Feasibility Study on Packaged FBG Sensors for Debonding Monitoring of Composite Wind Turbine Blade

권일범*, 최기선*, 김근진*, 김동진*, 허용학*, 윤동진*†

Il-Bum Kwon*, Ki-Sun Choi*, Geun-Jin Kim*, Dong-Jin Kim*, Yong-Hak Huh* and Dong-Jin Yoon*†

초 록 최근 대형화되는 복합재 풍력 블레이드의 운전 중 발생하는 손상을 조기에 모니터링하기 위하여 블레이드 내부에 일체형으로 설치가 가능한 스마트 센서들이 연구되고 있다. 본 연구에서는 광섬유 브래그 격자(FBG: Fiber Bragg grating) 센서를 복합재 모형 블레이드 후연부 시편에 부착하여 균열 또는 접착층 분리를 감지하는 실험을 수행하여 패키징된 광섬유 브래그 격자 센서 탐촉자의 풍력 블레이드에 적용 가능성을 검토하였다. 블레이드 시편에 인가된 인장 하중이 1100 N부터 1260 N 사이에서 노출된 광섬유 브래그 격자 센서의 파장 이동 방향이 급격히 반전되는 결과로부터 전단 웹의 균열과 접착 분리 파손을 확인할 수 있었다. 블레이드에 사용하기 위한 노출된 광섬유 브래그 격자 센서는 깨지기 쉽기 때문에 이 단점을 보완하기 위하여 에폭시로 패키징된 광섬유 브래그 격자 센서 탐촉자를 제작하였다. 블레이드 시편의 스킨 위에 제작된 탐촉자를 설치한 후 인장 시험을 수행한 결과 변형률에 대한 감지도는 약 $1.3 \mu\epsilon/\text{pm}$ 으로 노출된 광섬유 브래그 격자 센서의 감지도와 거의 동일한 것으로 확인되었다. 한편 온도 감지도는 80°C 까지의 가열 테스트를 통하여 약 $48 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 의 온도 감지도를 보였다.

주요용어: 복합재 풍력발전기 블레이드, 광섬유 브래그 격자 센서 탐촉자, 패키징, 변형률, 접착 분리

Abstract Smart sensors embedable in composite wind turbine blades have been required to be researched for monitoring the health status of large wind turbine blades during real-time operation. In this research, the feasibility of packaged FBG sensor probes was studied through the experiments of composite blade trailing edge specimens in order to detect cracking and debonding damages. The instants of cracking and debonding generated in the shear web were confirmed by rapid changes of the wavelength shifts from the bare FBG sensor probes. Packaged FBG sensor probes were proposed to remove the fragile property of bare FBG sensor probes attached on composite wind blade specimens. Strain and temperature sensitivity of fabricated probes installed on the skin of blade specimen were almost equal to those of a bare FBG sensor. Strain sensitivity was measured to be $1.3 \mu\epsilon/\text{pm}$ in a strain range from 0 to $600 \mu\epsilon$, and the calculated temperature sensitivity was to be $48 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ in the heating test up to 80 degree.

Keywords: Composite Wind Turbine Blade, Fiber Bragg Grating Sensor Probe, Packaging, Strain, Debonding

1. 서 론

풍력 발전은 화석연료에 의한 전력 생산을 보

완할 수 있을 뿐만 아니라 공해를 유발하지 않는 청정 기술로 최근에 많은 연구와 기술 개발이 진 행되고 있다. 이러한 풍력 발전은 대기의 바람이

가진 운동 에너지로 로터 블레이드를 회전시켜 기계적 에너지를 얻게 되며, 이 변환된 기계적 에너지를 이용하여 발전기를 가동시켜 전기 에너지를 얻게 되는 것이다. 풍력 발전기의 중요한 구성 요소의 하나인 로터 블레이드는 바람의 운동 에너지를 로터의 기계적 에너지로 변환시키는 요소인데, 발전 용량을 높이기 위하여 대형화하는 추세이다. 그에 따라서 가벼우면서도 강도가 큰 복합재 블레이드를 개발하고 있다. 그런데 풍력 복합재 블레이드는 외부의 돌풍, 조류의 충돌 등에 의하여 블레이드 내부에 접착부 탈락, 모재 손상, 층간 분리 등의 손상이 발생하게 된다. 이러한 손상을 그대로 방치하게 되면 블레이드, 너셀, 타워 등에 심각한 손상을 초래하는 원인이 될 수 있다. 그래서 풍력 발전기의 복합재 블레이드의 손상을 조기에 모니터링하는 것은 매우 중요하다. 한편, 광섬유 브래그 격자 센서는 광섬유를 사용하여 변형률 및 온도를 감지하는 센서로 광섬유의 직경이 작아서 복합재 내부에 매설하여 사용할 수 있고, 전자기적인 잡음이 전혀 없는 우수한 특성을 갖고 있다. 또한 광섬유는 유리로 제작되므로 내 부식성이 좋을 뿐만 아니라 다중 지점을 모니터링할 때 전기저항식 변형률 게이지는 측정 지점에 비례하여 연결선들의 개수가 증가되어 배선처리가 복잡하지만, 광섬유 격자 센서는 한 개의 광섬유라인에 수십 개를 설치할 수 있기 때문에 매우 간략한 센서시스템을 구성할 수 있다.

광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 구조물의 안전성을 모니터링하기 위한 국내의 연구로는 재료의 탄성과 검출을 위한 연구[1]와 온도 보상을 위한 두 개의 광섬유 브래그 격자를 적용한 탐측자 개발 연구[2]를 비롯하여 다양한 광섬유 센서에 의한 구조물 모니터링[3]을 소개하는 논문도 있었다. 그러나 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 복합재 풍력 발전기 블레이드의 손상을 모니터링하기 위한 연구는 최근에 활발하게 진행되고 있다. 광섬유 브래그 격자 센서를 적용하여 2 MW 풍력 발전기(U88형)의 운전 조건에 따른 차이를 실시간으로 모니터링하는 연구가 수행되었다[4]. 광섬유 브래그 격자 센서를 풍력 블레이드 내부에 매설하여 제작하고 역학적인 거동을 측정하기 위한 연구도 있었다[5,6]. 또한 블레이드의 피로 거동을 모니터링하기 위한 연구도 있

었다[7]. 그리고 충격 응답 특성을 모니터링하기 위한 연구도 있었다[8]. 한편 광섬유 브래그 격자 센서를 다중화하거나 소형화하기 위한 연구도 수행되었다[9,10]. 그러나 블레이드의 대표적인 파손인 접착 분리를 검출하기 위한 연구가 아직 많이 진행되지 않았다. 특히 스파웹과 스킨 사이의 경계면에서 발생된 접착 분리는 변형 거동에 따라 손상이 점차적으로 커지고, 블레이드 길이 방향을 따라 전체적으로 전파되기 때문에 루트부가 부러지거나 추가적으로 타워 부분에 충돌하여 손상을 줄 수 있다. 이런 경우, 블레이드 손상 지점 보수 또는 교체에 따른 유지보수 시간 증가로 이어지면서 전력 발전량이 급감하게 된다. 따라서 접착 분리 현상을 초기에 감지하여 운전을 신속하게 중단하고, 손상 부위를 보수하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 복합재 풍력 블레이드의 대표적인 파손 형태인 접착 분리 현상을 검출하기 위하여 광섬유 브래그 격자 센서를 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 접착 분리 시험을 수행하면서 광섬유 센서의 신호특성을 고찰하였다. 또한 블레이드에 사용하기에 적합하도록 탐측자를 패키징하고 변형률과 온도에 대한 감지도를 조사하였다.

2. 광섬유 브래그 격자 센서

2.1. 광섬유 격자 센서의 동작 원리

광대역의 밴드폭(bandwidth)을 갖는 광원에서 나온 빛이 광섬유에 입사되었을 때 Fig. 1과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 특정 파장 성분만이 광섬유 격자 부위에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 투과된다. 이 특정파장을 브래그 파장이라 하며, 식(1)과 같이 표현된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

식(1)에서 n_{eff} 은 광섬유 격자의 유효굴절률(effective refractive index)이고, Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 광섬유 브래그 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수임을 식(1)을 통하여 알 수 있다.

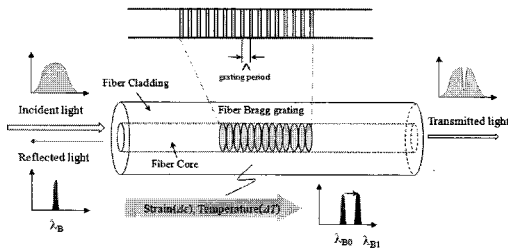


Fig. 1 A typical spectral response of a uniform-period fiber Bragg grating and operational principle of FBG sensor

외부 환경(온도, 변형률 등)이 달라지면 광섬유 격자의 유효 굴절률과 격자 간격이 일률적으로 또는 개별적으로 변화를 가져오며, 결과적으로 브래그 파장이 이동으로 나타난다. 따라서 광섬유 브래그 격자는 파장 이동 측정을 통하여 외부 물리량 변화를 정확하게 식별할 수 있는 매우 민감한 센서로 사용할 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{P_e} \Delta \epsilon + \alpha + \xi \Delta T \right) \quad (2)$$

$$\Delta \lambda_B = \frac{K_\epsilon}{\epsilon} \Delta \epsilon + \frac{K_T}{\Delta} \Delta T \quad (3)$$

즉, 광섬유 격자에 외부적 교란에 의하여 온도와 역학적 변형률이 작용하면 식(2) 또는 (3)과 같은 식에 의하여 브래그 파장의 변화가 발생된다. 식(2)에서 α 는 열팽창계수, ξ 는 열광학계수, P_e 는 광탄성계수이며, 이 식을 정리하면 식(3)에서 보이는 바와 같이 열감도계수(K_T) 및 변형률 감도 계수(K_ϵ)의 표현으로 간단하게 줄일 수 있다. 게르마늄이 첨가된 실리카 유리의 경우 1550 nm 파장에서 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 의 변형률 감지도와 13.7 pm/ $^\circ\text{C}$ 의 온도 감지도를 나타낸다.

2.2. 광섬유 격자 센서 탐촉자 설계 및 제작

온도와 변형에 민감한 광섬유 격자는 일반적인 통신용 광섬유에 코팅된 폴리머를 제거한 후 광파워가 강한 UV 레이저와 위상마스크를 사용하여 제작되는 방식이 주로 사용되고 있다. 따라서 광섬유 격자는 인장 파괴 강도(tensile braking strength)가 약 6000 Mpa인 표준광섬유에 비하여 약 700 Mpa로 0.12 배로 줄어든다. 코팅이 벗겨

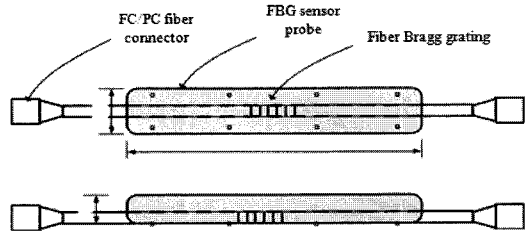


Fig. 2 Design of epoxy molded FBG strain sensor probe

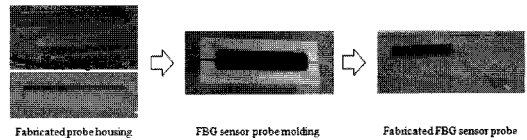


Fig. 3 Fabrication of FBG strain sensor probe

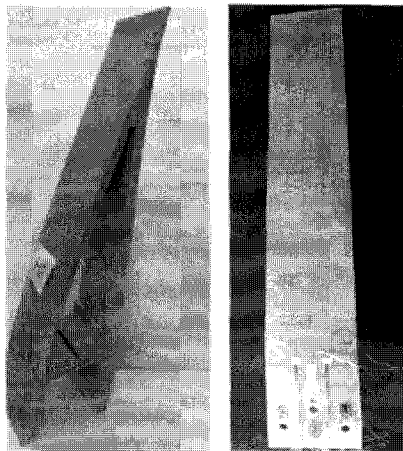
진 광섬유 격자는 충격과 장기간의 내구성에 취약하며 설치 작업이 힘들고, 부착시 원치 않는 처핑 현상으로 밴드 폭이 늘어나거나 피크 갈라짐 현상이 발생할 수 있다. 따라서 광섬유 격자를 센서로 사용하기 위해서는 설치에 간편하고 본래의 스펙트럼을 온전히 유지할 수 있는 패키징이 필수적이다.

깨지기 쉬운 광섬유 격자에 대한 에폭시 패키징 개략도와 제작 과정을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 전단 강도(shear strength)가 18 Mpa인 에폭시 물질(KFR-H 730F)로 패키징된 광섬유 격자 센서 탐촉자는 본딩면의 접착제 두께가 0.5 mm 미만으로 유지되도록 8개의 돌기가 있는 70×15(or 3)×3 크기로 Fig. 2와 같이 설계하였다. Fig. 3은 탐촉자 하우징을 KE-1300 (Shinetu. co. Ltd)로 제작하고 그 안에 광섬유 격자를 에폭시로 몰딩하여 변형률 탐촉자를 제작하는 과정이다.

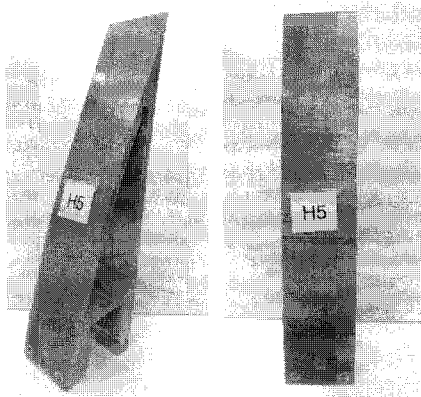
3. 복합재 블레이드 시편

3.1. 시편의 제원

본 연구에서 사용된 복합재 풍력 블레이드 모형 시편은 스파(spar)를 포함한 후연(trailing edge) 부를 제작하여 사용하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 시험에 사용된 시험편은 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side) 그리고 전단 웹(shear web)으로 구성된 후연부의 한 부분이며, 크기는



(a)



(b)

Fig. 4 Structure of the blade specimen: trailing edge - (a) #H2 used for the continuous load test and (b) #H5 used for the stepped load test

약 500 mm×102 mm×130 mm이고, 소재는 유리 섬유 강화 플라스틱(GFRP, glass-fiber-reinforced plastic)을 사용하였다. 이 복합재 풍력 블레이드 모형 시편은 이중 양방향 적층 복합재(double biaxial: 119.60 Mpa 인장강도, 14.03 Gpa 탄성계수)와 일방향 적층 복합재 (uni-directional: 703.08 Mpa 인장강도, 38.63 Gpa 탄성계수), 그리고 삼축 방향 적층 복합재(tri-axial: 651.96 Mpa 인장강도, 38.63 Gpa 탄성계수)가 적절하게 혼합 적층되어 제작되었다.

3.2. 센서의 설치 (변형률 게이지, 광섬유 브래그 격자 센서)

복합재 모형 블레이드 시편을 Fig. 5와 같이

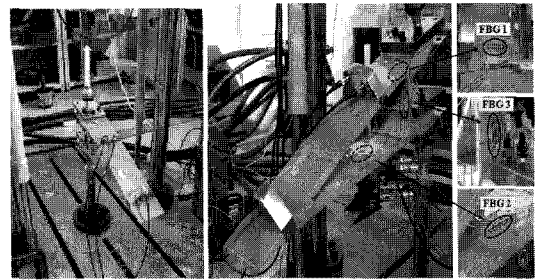


Fig. 5 FBG patched wind turbine blade specimen installed on the tensile test machine

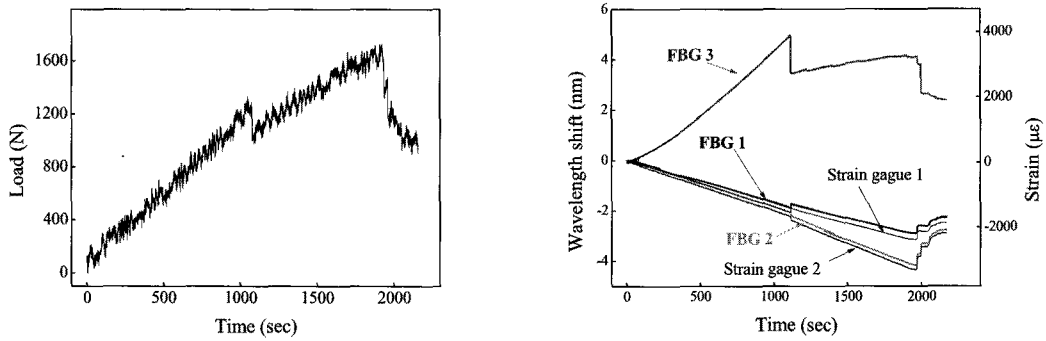
유압재료시험기(MTS 810, 최대하중 250 kN, 최대변위 200 mm)에 설치하고 하중에 따른 변형률을 시험하였다. 오른쪽 그림과 같이 모형 블레이드에 하중이 증가함에 따라 변형률 측정이 필요한 세 지점에 광섬유격자 센서를 설치하였다. 블레이드 시위 방향으로의 굽힘(chord-wise bending)에 의한 스킨 영역의 압축 또는 인장에 따른 변형률을 측정하기 위하여 첫 번째 광섬유 브래그 격자 센서(FBG1)는 압력면(pressure side) 스킨 바깥쪽에 설치하고, 두 번째 광섬유 브래그 격자 센서(FBG2)는 흡입면(suction side) 스킨 안쪽에 부착하였다. 마지막으로 주요 하중을 전달하는 스파(spar)와 전단 웹(shear web) 영역에서 길이 방향의 굽힘(flap-wise bending)에 의해 발생하는 하중의 영향을 측정하기 위하여 광섬유 브래그 격자 센서(FBG3)는 안쪽의 전단 웹에 설치하였다. 광섬유 브래그 격자 센서가 설치된 모형 블레이드를 인장 시험기에 Fig. 5의 왼쪽과 같이 장착하였다.

4. 실험 및 결과

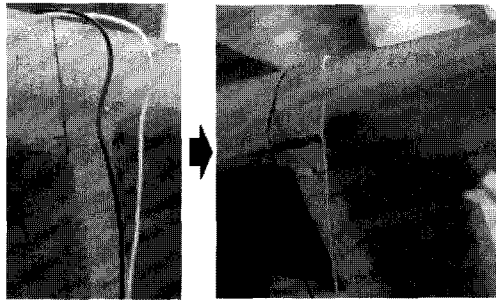
4.1. 노출된 광섬유격자 센서에 의한 변형률 측정 시험

단계적으로 또는 연속적으로 인가되는 인장력에 따른 광섬유 브래그 격자 센서의 신호를 측정하기 위하여 Fig. 5의 첫 번째 그림과 같이 복합재 모형 블레이드의 압력면을 인장 시험기의 위쪽 팔에 설치하여 바닥면에 수직 방향으로 인장 하중을 인가하였다.

첫 번째 실험으로 인장력을 연속적으로 1600 N까지 장력을 인가하면서 광섬유 브래그 격자

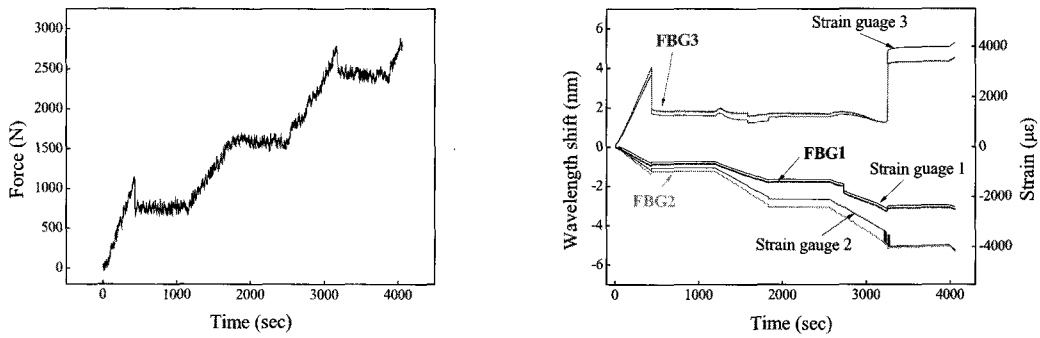


(a)

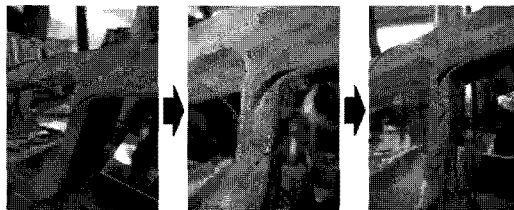


(b)

Fig. 6 Analysis of experimental results during continuous load test; (a) Induced continuous tensile force and variation of wavelength-strain, (b) Picture of shear web debonding



(a)



(b)

Fig. 7 Analysis of experimental results during stepped load test; (a) Induced stepped tensile force and variation of wavelength-strain, (b) Appearance of crack growth in the shear web under applied tensile force

센서의 출력인 브래그 파장 변화를 Fig. 6과 같이 취득할 수 있었다. Fig. 6에는 전기저항형 변형을 게이지에 의한 변형률을 실선으로 표시하여 브래그 파장 변화와 비교하였다. Fig. 6의 (a)의 왼쪽 그래프에서 약 1260 N의 인장력이 복합재 모형 블레이드에 가해졌을 때, 즉 약 1100초 근처에서 스파와 전단웹의 접착부가 분리(debonding)되면서 하중이 급격하게 감소되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6의 (a)의 오른쪽 그래프에서는 전단 웹에 설치된 FBG3의 브래그 파장이 변형을 증가에 따라서 증가하다가 약 1100초 근처에서 급격한 변형률 변화가 일어나고 있음을 볼 수 있다. 바로 이 시점에서 전단 웹 접착부의 분리가 발생한 것을 Fig. 6의 (b)의 사진으로부터 확인할 수 있다.

두 번째 실험에서는 인장 하중을 3000 N까지 증가시키는 중간에 약 3 단계 동안 하중 증가를 멈추고 다시 증가시키는 단계적인 하중 인가 시험을 수행하면서 하중 증가에 따른 광섬유 센서의 신호 변화를 살펴보았다. Fig. 7의 실험 결과에서 나타나듯이 첫 번째 스텝에서 약 1100 N의 인장력이 복합재 모형 블레이드에 가해졌을 때 전단 웹 내부에 균열이 발생하기 시작하였으며, 단계적으로 인장력이 증가할 때마다 균열이 발생된 부분을 살펴본 결과 균열의 크기가 증가되는 것을 알 수 있었다. 인장력의 증가에 따라서 전단 웹에 설치된 FBG3의 신호가 장파장으로 증가하다가 급격하게 감소되는 신호 변화로부터 접착 분리 등의 파손이 발생하였음을 Fig. 7의 (b)의 사진으로 확인할 수 있었다.

광섬유격자 센서를 사용하여 전단 웹의 내부 균열 및 전단 웹 접합부의 분리를 탐지하는 시험에서 브래그 격자의 제작 과정 중에 강도가 약해진 광섬유 브래그 격자를 실제로 블레이드 표면에 설치할 때 매우 세심한 주의가 필요하였으며, Fig. 8과 같이 인장력에 따라 원하지 않는 광섬유 브래그 격자 스펙트럼의 분리 현상이 관찰되는 결과를 초래하기도 하였다. Fig. 8에서 보인 바와 같이 코팅되지 않은 광섬유격자를 블레이드 표면에 설치하고 광섬유 브래그 격자 인터로게이터를 사용하여 스펙트럼을 측정된 결과, 초기의 단일 피크에서 인장력에 의하여 분리된 두 개의 피크를 감지하고 있음을 알 수 있다.

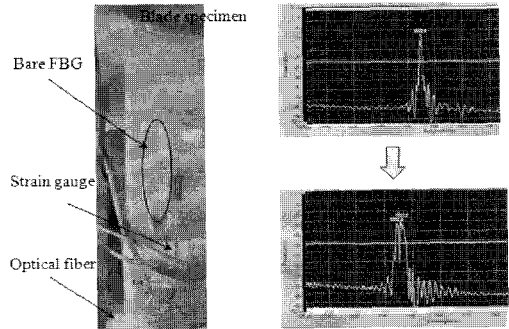


Fig. 8 Unwanted peak splitting of FBG sensor attached on blade specimen

4.2. 패키징 광섬유격자 센서 탐촉자의 풍력 블레이드 적용 시험

광섬유 브래그 격자 센서를 설치할 때 부주의로 인한 파손과 설치 후 장기간의 내구성 저하 및 Fig. 8과 같은 예상치 못한 피크 갈라짐 현상 등의 문제점을 최소화하는 것이 필요하다. 풍력 블레이드에 사용되는 에폭시를 사용하여 Fig. 2 및 Fig. 3와 같이 광섬유 브래그 격자를 패키징한 탐촉자를 제작하였다. 패키징된 광섬유격자 센서 탐촉자의 풍력 블레이드 모니터링 센서로서 적합한지를 살펴보기 위하여 전단 웹에 내부균열이 발생한 모형 블레이드 시편(Fig. 4)과 만능시험기를 Fig. 9와 같이 실험 셋업을 구성하였다.

복합재 모형 블레이드의 압력면(pressure side) 스킨에 패키징된 광섬유 브래그 격자 탐촉자 두 개와 노출된 광섬유 브래그 격자 센서 및 전기저항식 변형률 게이지를 부착하고, 날개 뒷전(trailing edge) 영역에 광섬유 브래그 격자 온도 센서를 설치하였다. 패키징된 광섬유 브래그 격자 탐촉자 두 개와 광섬유 브래그 격자 온도 탐촉자는 패키징 물질과 동일한 에폭시를 사용하여 본딩하였고, 노출된 광섬유 브래그 격자 센서는 순간접착제(Roktite 404)를 사용하여 접착하였다. 상온의 일정한 온도 하에서 만능테스터기를 사용하여 600 $\mu\epsilon$ 까지 인장력을 증가하면서 파장 변화와 변형률 변화를 모니터링하면서 여러 차례 반복하여 탐촉자들의 변형률 감지도 특성을 조사하였다.

광섬유 브래그 격자 센서 인터로게이터와 전기저항식 변형률 게이지 증폭기를 사용하여 측정된 데

이터를 분석하여 Fig. 10에 도식화하였다. Fig. 10(a)는 시간별로 측정된 본래의 데이터이며, Fig. 10(b), (c), (d)는 노출된 광섬유 브래그 격자 센서, 패키징된 광섬유 브래그 격자 센서 탐측자1, 2에 대하여 파장 변화와 측정된 변형률 값을 대응시킨 그래프로써 변형률에 대한 파장 감지도는 노출된 광섬유 브래그 격자의 경우 $1.37 \mu\epsilon/\text{pm}$ 로 나타났으며, 패키징된 광섬유 브래그 격자 센서

탐측자도 노출된 광섬유 브래그 격자와 유사하게 약 $1.3 \mu\epsilon/\text{pm}$ 의 변형률 감지도를 갖는 것으로 분석되었다.

복합재 풍력 블레이드는 역학적인 변형률 모니터링뿐만 아니라 운전 중에 발생하는 온도 변화에 따른 열변형이 미치는 영향을 감지하는 것도 매우 중요하다. 따라서 광섬유 브래그 격자 센서가 적용된 복합재 풍력 블레이드를 강제 순환 건

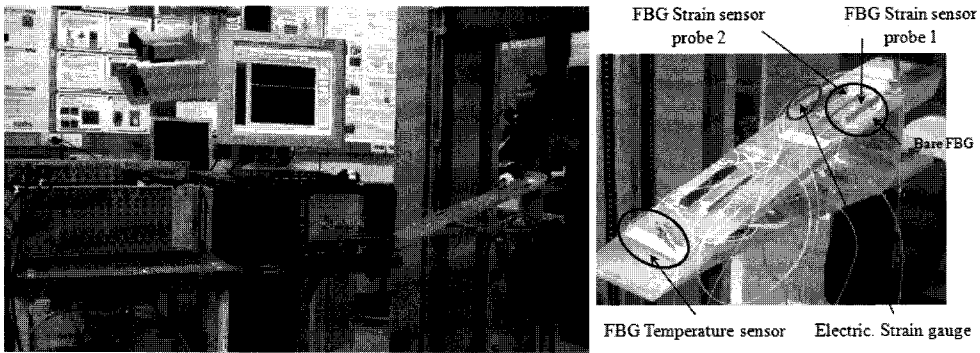


Fig. 9 Experimental set-up for evaluation of packaged FBG sensor probe

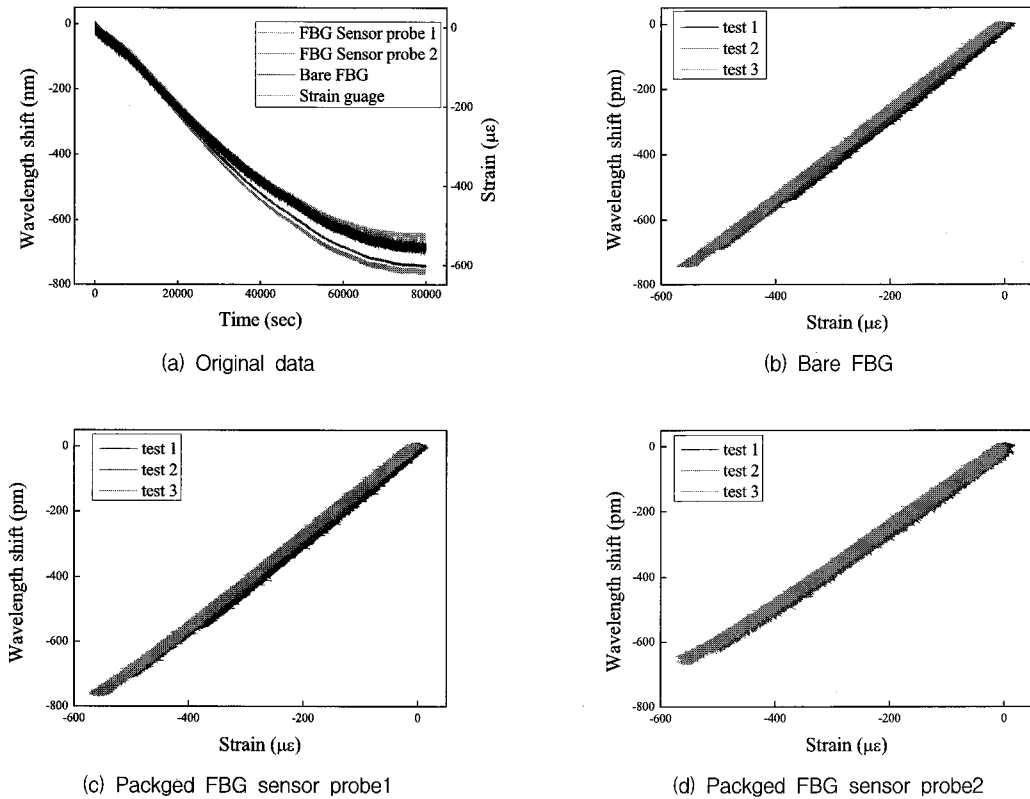


Fig. 10 Measurement data of FBG probes attached on blade specimen

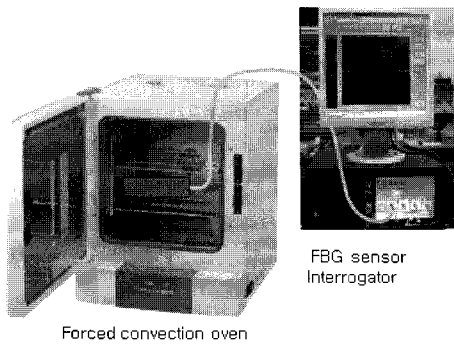


Fig. 11 Temperature chamber

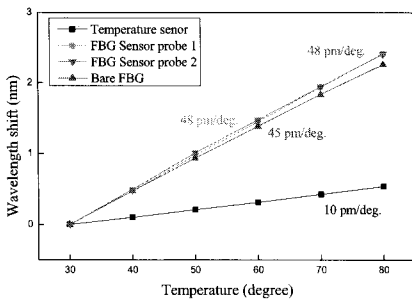


Fig. 12 Temperature sensitivity

조 온도 챔버 안에 설치하고 Fig. 11과 같이 온도 변화를 주면서 광섬유 브래그 격자 센서 탐촉자의 출력 파장 변화를 검토하였다. 본 실험 이전의 사전 실험에서 패키징 광섬유 브래그 격자 센서 탐촉자만 온도 챔버에 넣고 온도 감지도를 검토한 실험 결과로는 약 45 pm/°C의 온도 감지도를 구했었다. 따라서 이번 실험에서는 복합재 모형 블레이드에 순간접착제로 접착한 노출된 광섬유격자와 에폭시로 접착된 패키징된 광섬유격자 센서 탐촉자들을 실험한 결과 Fig. 12와 같이 45~48 pm/°C의 온도 감지도를 갖는 것으로 측정되어 탐촉자 자체만의 온도 감지도와 동일한 감지도를 가짐을 알 수 있었다. 물론 패키징하지 않은 광섬유 브래그 격자 탐촉자의 온도 감지도인 10 pm/°C보다는 약 4.5배 큰 값을 알 수 있다.

5. 결론

풍력 블레이드의 손상을 조기에 모니터링할 목적으로 후연부의 한 부분인 모형 블레이드 시편

에 부착된 노출된 광섬유격자 센서를 사용하여 인장력에 따라 발생하는 균열 및 접착층 분리 현상에 대한 실험을 수행하였다. 유압재료시험기의 인장 하중이 1100~1260 N일 때 전단 웹의 균열과 웹 접착 분리가 감지되었으며, 이에 상응하여 노출된 광섬유격자 센서의 신호가 반전되는 결과로부터 정확히 모형블레이드의 손상을 검출할 수 있었다. 또한, 깨지기 쉬운 노출된 광섬유격자의 단점을 보완하기 위하여 에폭시로 패키징된 광섬유격자 센서 탐촉자를 제작하였다. 탐촉자를 모형 블레이드에 설치한 후 변형률과 온도 민감성을 노출된 광섬유격자 센서와 비교하여 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다. 600 $\mu\epsilon$ 까지 변형률을 증가시키는 반복 실험을 통하여 약 1.3 $\mu\epsilon/\text{pm}$ 의 변형률 감지도로 측정되었으며, 80°C까지의 가열 테스트를 통하여 약 48 pm/°C의 온도 감지도를 나타내었다. 노출된 광섬유격자 센서와 동일한 감도 특성을 갖는 패키징된 광섬유격자 센서 탐촉자는 풍력블레이드 내부에 간편하게 설치하여 장시간에 걸쳐서 안정적으로 손상을 빠른 시간 내에 모니터링할 수 있는 유용한 기술이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2008-N-WD08-P-01)

참고문헌

- [1] 서대철, 권일범, 윤동진, 이승석, 이정률, "광섬유 FBG 센서를 이용한 단성과 검출", *비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-5 (2010)
- [2] 정달우, 권일범, 최낙삼, "온도보상형 Double FBG 센서의 제작과 기계적 변형률 측정 시험", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, No. 5, pp. 356-361 (2005)
- [3] 권일범, "광섬유 센서를 이용한 구조물 안전 모니터링 기술", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, No. 5, pp. 400-404 (2005)
- [4] S. Park, T. Park and K. Han, "Real-time

- monitoring of composite wind turbine blades using fiber bragg grating sensors," *Advanced Composite Materials*, Vol. 20, No. 1, pp. 39-51 (2011)
- [5] A. Turner, T. W. Graver and A. Mendez, "Structural monitoring of wind turbine blades using fiber optic bragg grating strain sensors," Society for Experimental Mechanics-SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2010, Vol. 2, pp. 1285-1290 (2010)
- [6] H-J. Bang, H-K. Shin and Y-C. Ju, "Structural health monitoring of a composite wind turbine blade using fiber Bragg grating sensors," *Proc. SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 7647, No. 76474H, (2010)
- [7] Z-S. Guo, "Fiber Bragg grating sensors for fatigue monitoring of composite wind blades," *Proc. of International SAMPE Symposium and Exhibition*, Vol. 52, pp. 12 (2007)
- [8] 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, No. 4, pp. 268-271 (2010)
- [9] S. H. Eum, K. Kageyama, H. Murayama, K. Uzawa, I. Ohsawa, M. Kanai and H. Igawa, "Process/health monitoring for wind turbine blade by using FBG sensors with multiplexing techniques," *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 7004, No. 70045B, (2008)
- [10] B. Allan, D. A. Horsley and J. R. Zayas, "Development of an embedded high performance MEMS-based fiber Bragg grating interrogation system for wind turbine applications," Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Vol. 10, pp. 7254-7264 (2006)