

論文

광강도형 광섬유센서를 이용한 피로손상 및 진동감지

양유창* · 전호찬** · 한경섭***

Fatigue Damage Detection and Vibration Sensing Using Intensity-Based Optical Fiber Sensors

Y. C. Yang*, H. C. Jeon**, and K. S. Han***

ABSTRACT

Fatigue damage detection and vibration sensing for a laminated composites and impact location detection for a steel beam have been carried out using optical fiber sensor. Intensity based optical fiber sensor is constructed by placing two cleaved fiber end in a hollow glass tube, and multiple reflection within the cavity is considered. Fatigue signals are measured by embedded optical fiber, surface mounted optical fiber sensor and strain gage simultaneously. For vibration sensing, optical fiber sensor is mounted on the carbon fiber composite beam and its response to free vibration and forced vibration is investigated. In impact location detection, two optical fiber sensors are used and the information obtained from two sensors is arrival time delay of vibration caused by impact. Impact location can be calculated from this time delay. The obtained results show that the intensity based optical fiber sensor provide reliable data during long-term fatigue loading, unlike strain gage which deteriorate during the early part of the fatigue test. Optical fiber sensor signals coincide with gap sensor in vibration sensing. The precise locations of impact can be detected within 4.1% error limit.

초 록

광섬유센서를 이용한 복합적층판의 피로손상 감지 및 진동측정, 그리고 스틸 보에 대한 충격위치 검출에 관한 연구가 수행되었다. 피로과정중의 신호는 복합재료 내에 삽입된 광섬유와 표면에 부착한 광강도형 광섬유센서, 그리고 스트레인게이지로부터 동시에 측정되었다. 진동감지 실험은 복합재료 보의 표면에 광섬유센서를 부착하여 자유진동 및 강제진동 신호를 취득하였다. 충격위치 검출에 관한 실험에서 충격위치는 충격에 의해 발생된 구조물의 진동이 두 센서에 도달하는 시간의 차를 이용하여 구할 수 있다. 광강도형 광섬유센서를 이용하여 반복 피로 신호를 잘 취득할 수 있었으며 스트레인게이지에 비하여 피로저항성이 우수함이 확인되었다. 광섬유센서는 갭센서와 동일하게 진동신호를 감지하였고 구조물에 가해진 충격위치를 비교적 정확히 검출할 수 있었다.

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

**대우중공업

***포항공과대학교 기계공학과

1. 서 론

지능형 구조물(smart structure)의 센서로서 광섬유 센서(optical fiber sensor)는 기존의 센서에 비해서 가볍고 센서의 크기를 매우 작게 구성할 수 있으며, 감도가 뛰어나고, 내장(embedding)이 용이하며, 작동 온도 범위가 높으며 전자기장의 방해받지 않고, 센서 망(sensor array)을 구성하기 적합하다는 등의 특성들로 인하여 센서의 제작 및 적용에 대한 다양한 연구가 진행중이다. 이러한 광섬유센서를 적용한 구조물의 피로손상 감시연구는 선진국의 경우에도 아직 단순한 변형 측정 등의 기본적 응용단계에 머무르고 있어 구조 해석 및 피로 파괴역학의 바탕에 광섬유 응용기술의 접목을 통한 효율적이고 정확한 구조물의 안전성 감시 연구가 필요하다.

광섬유센서의 감지원리를 크게 세 가지로 분류하면 첫째, 광강도(intensity) 해석에 의한 것으로 빛의 전달 유무를 판단하거나 마이크로벤드(microbend)에 의한 빛의 손실을 측정하는 것 등이 이에 해당하며, 둘째, 스펙트럼(spectrum) 분석에 의한 것으로 파장의 이동(wavelength shift)량을 처리하는 fiber Bragg grating (FBG) 센서가 여기에 해당된다. 셋째로는 광섬유 간섭센서(interferometric fiber optic sensor)로 ring 간섭계, Mach-Zender 간섭계, Michelson 간섭계, 그리고 Fabry-Perot 간섭계(EFPI) 등이 있으며, 빛의 파장 영역의 단위까지 감지가 가능한 매우 높은 민감도를 얻을 수 있다[1].

광섬유센서를 응용한 구조물의 감시 및 피로특성 평가에 관한 연구는 90년대에 들어서 본격적으로 시작되어, 실제 산업구조물과 그에 사용되는 재료에 대한 피로손상이나 변형측정에 관한 연구[2-5]가 수행되었다. University of Toronto, University of Vermont에서는 실제 교량에 광섬유센서를 적용하여 변형 및 교통량 등을 측정하는 연구[6]가 수행되었고, Escobar 등[7]은 콘크리트 구조물에 삽입된 광섬유센서가 5년 동안 정상적인 작동을 하고 있는 것으로 보고했으며, 영국의 City University, Brunel University 등에서는 피로손상 검출에 관한 기초적인 연구[8]가 진행 중이다. 또한 이동춘 등^[9]은 강구조물(steel structure)의 표면에 광강도형 광섬유센서(intensity-based optical fiber sensor)를 부착하여 피로균열의 진전을 검출하는 연구를 수행하였다.

1990년대 이후 광섬유센서를 진동측정에 적용하는

연구가 이루어졌는데, Murphy 등[10]은 공간적으로 조절된 광섬유센서를 이용하여 외팔보(clamp-free)와 고정-고정단(clamp-clamp) 보의 진동측정을 하였다. 또한, 광섬유 Bragg grating 센서에 대한 제작기법이 확립됨에 따라, Davis 등[11]은 파장분할(wavelength division) 다중 광섬유 Bragg grating 배열을 알루미늄 외팔보의 표면에 분산, 부착시켜서 구조물의 형상과 진동모드의 분석에 대한 연구를 수행하였다. Greene[12] 등은 EFPI를 구조물의 표면에 부착하거나 내부에 삽입하여 충격위치를 검출하는 연구를 수행하였다. 다양한 광섬유센서를 이용한 복합재료 구조물의 충격손상 감지에 관한 연구들[13-16]도 이루어 졌다.

본 연구에서는 Badcock[17] 등에 의해 제안된 광강도형 광섬유센서를 직접 제작하고, 이것을 구조물의 표면에 부착시켜 기본적인 신호특성을 파악하였다. 또한 구조물이 피로변형을 받을 때 표면에 부착한 광섬유센서의 신호와 구조물에 삽입된 광섬유로부터 나오는 신호를 비교함으로써 구조물의 피로손상을 감지하는 방법을 살펴보았으며 스트레인게이지의 측정신호와 비교하였다. 그리고, 동일한 센서를 이용하여 구조물의 자유진동 및 강제진동 신호측정과 충격 위치파악에 관한 연구를 수행하였다.

2. 광강도형 광섬유센서의 측정원리 및 제작

광섬유센서의 종류는 앞에서 서술한 것과 같이 다양한 종류가 있으며 그 중에서 광강도형 광섬유센서와 EFPI 등은 기본적으로 절단된 양쪽의 광섬유 사이에 공기층을 가진 구조이다. 광섬유와 공기의 굴절률의 차이로 광섬유에서 공기층으로 입사된 빛은 광섬유의 경계면에서 연속적으로 반사와 투과를 하게 된다. 이러한 형태의 광섬유 센서는 단면에서 반사되어서 나오는 산호들의 간섭현상을 이용하는 방법과 투과된 빛의 강도를 이용하는 방법 등의 두 가지로 구분되며 본 연구에서 사용된 광강도형 광섬유센서는 후자에 해당된다. 간섭현상을 이용하는 광섬유센서는 분해능이 사용되는 광원의 파장 단위 정도로 매우 높은 정밀도를 가지고 있으나 측정신호의 처리과정이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 그에 비하여 광강도형 광섬유센서는 민감도는 다소 떨어지지만 구조가 매우 간단하고 신호처리 방법이 간편하고 고가의 장비를 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다.

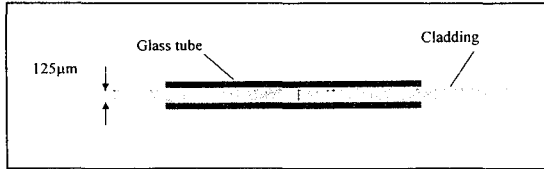


Fig. 1. Schematic illustration of intensity-based optical fiber sensor

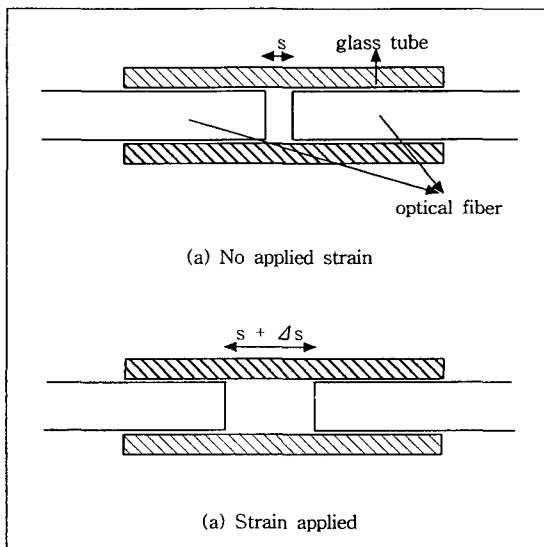


Fig. 2. Schematic illustration showing the principle of measurement of intensity-based optical fiber sensor

Fig. 1은 광강도형 광섬유센서의 형태를 나타내고 있다. 유리 모세관의 내부에 각각 수직으로 절단된 광섬유의 클래딩(cladding) 부분이 서로 마주보게 되는 비교적 간단한 구조이다. 광강도형 광섬유 센서는 Fig. 2에서와 같이 변형이 발생했을 때, 두 광섬유의 접촉부에서 발생하는 광강도의 변화로부터 간극(gap)의 변화를 측정하는 원리를 가지고 있다. 두 광섬유 사이에서 전달되는 빛의 세기의 변화량은 두 광섬유 단면의 거리에 관계가 있다. 광섬유 코어의 직경을 d , 광섬유센서의 내부간극을 s , 투과율을 T , 임계입사각을 θ_c ,라 할 때, 초기의 빛의 세기(I_0)와 입사의 순간에 측정된 빛의 세기(I_r^0)의 비 α 는 다음과 같이 구해진다[17].

$$\frac{I_r^0}{I_0} = \alpha = T \left(\frac{d}{d + 2 \cdot s \cdot \tan \theta_c} \right)^2 \quad (1)$$

광강도형 광섬유센서의 제작과정은 다음과 같다. 석

영유리 재료의 모세관을 적당한 길이로 수직으로 절단한 후 아세톤 등을 이용하여 모세관에 묻어있는 이물질을 깨끗이 제거한다. 두 광섬유를 충분한 길이로 자른 후 각각의 코팅부분을 피복제거기(jacket stripper)를 사용하여 제거하여 지름 125µm의 클래딩 부분만 남도록 하고 이물질이 남아있지 않도록 아세톤을 이용하여 깨끗이 닦아낸다. 광섬유 끝의 단면의 상태는 빛의 전송에 매우 중요하므로 광섬유절단기(cleaver)를 사용하여 절단하고 현미경을 이용하여 단면이 수직으로 절단됐는지의 여부와 이물질이 묻었는지의 여부를 확인한다. 준비된 모세관을 미세조정장치에 고정시키고 수직으로 절단된 광섬유의 단면이 동일선상에서 마주보도록 위치시키기 위해 현미경과 3축-이동기(xyz-translator)를 사용하여 광섬유를 모세관에 삽입한다. 적당한 간극을 유지하고 게이지 길이를 고려하여 시편의 표면에 3점 접촉하여 완성한다. 광섬유 단면의 간극은 사용되는 하중조건을 고려하여 신호의 선형성을 나타내는 구간에서 작동되도록 유지되었다. 마주보게 되는 두 광섬유는 코어직경이 수 µm 정도로 매우 작아 광섬유간의 광축을 일치시키기가 힘들지만 광섬유 단면사이의 간극의 변화에 따라 광강도의 변화가 크게 하기 위하여 모두 3M사에서 제작된 FS-SN-3224 단일모드(single mode) 광섬유를 사용하였다.

3. 실험 및 결과

3.1. 피로손상 감지 시험

본 시험에 앞서 광강도형 광섬유센서의 기본적인 신호특성을 파악하기 위하여 센서 내부의 두 광섬유 단면사이의 간극 변화에 따른 광강도의 변화를 측정하는 기초실험을 수행하였다. 3축-이동기 위에 광섬유를 한쪽으로 삽입한 유리모세관을 고정시키고 반대편으로 현미경으로 관찰하면서 광섬유를 삽입하며 간극변화에 따른 투과된 빛의 세기를 측정하였다. Fig. 3에 이러한 측정결과와 식 (1)의 결과를 나타내었다. 측정값과 이론값은 매우 큰 차이를 보이고 있으며 이는 이동훈 등[9]의 결과와도 비슷하다. 이러한 차이는 식 (1)이 빛의 진행방향에 수직인 입사의 단면에 대하여 빛의 강도분포가 일정한 것으로 가정한 것과 레이저에서 광섬유로 빛이 입사될 때의 오차, 그리고 광섬유의 클래딩 부분으로 전파되는 빛의 영향을 무시한 때문이라 사료된다.

본 연구에서는 광섬유 센서에 입사하는 빛으로 파장

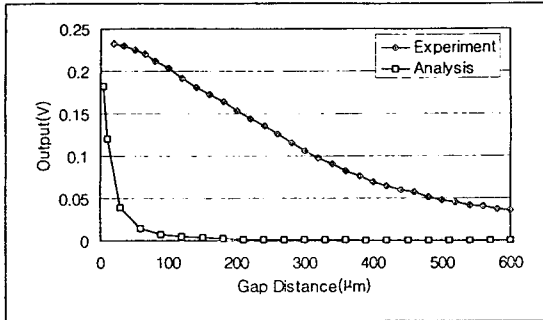


Fig. 3. Variation of light intensity versus air gap distance

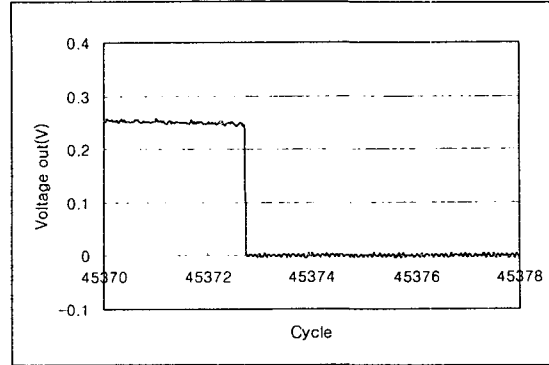


Fig. 5. Voltage output of embedded optical fiber during fatigue test

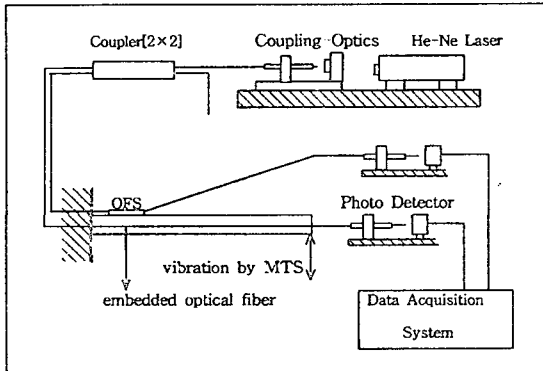


Fig. 4. Schematic diagram of experimental set-up for fatigue test

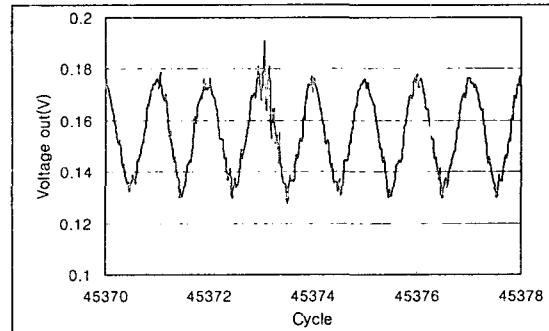


Fig. 6. Voltage output of surface mounted optical fiber sensor during fatigue test

이 632.8nm인 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser)를 사용하였으며, 레이저에서 나온 빛을 초점거리 16mm인 렌즈를 통하여 수렴시킨 후 광섬유에 입사시켰다. 입사된 빛은 다시 양방향 연계기(bidirectional coupler)를 사용하여 두 개로 분할되었다. 여기에 사용된 양방향 연계기는 Newport에서 제작된 F-SLP-S2263S를 사용하였고, 이것은 입사된 빛을 50 : 50으로 분할하며 약 3dB의 연결 손실을 갖는다. 이러한 방법으로 분할된 빛은 Newport사의 FS-SK-SA 광섬유 접속기(fiber splicer)를 사용하여 각각 시편의 광섬유센서로 연결되어 입사된다. 광섬유 센서를 통과한 빛은 센서의 감지 정도에 따라 신호의 세기가 변화하며 광검출기(photo detector)에서 전압으로 인식된다.

피로실험에 사용된 시편은 SK의 탄소섬유 prepreg (USN125A) 20층을 적층한 뒤, 열프레스(hot press)에서 제조하였다. Prepreg은 [90°/0°]_s의 적층 순서로 적층이 되었으며 가운데 있는 0°층은 시편에 강성을 주기 위해서 적층되었고, 0°층의 아래위는 균열(crack)이 가장 쉽게 발생하는 90°층으로 적층하였다. 내부에

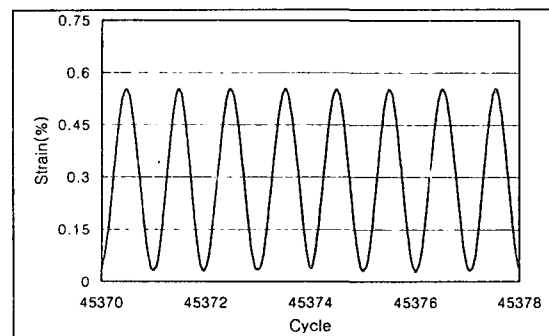


Fig. 7. Cyclic strain measured by strain gage during fatigue test

삽입된 광섬유는 18번 prepreg과 19번 prepreg 사이에 탄소섬유의 방향에 수직이 되도록 삽입하였다.

피로 실험에 대한 개략적인 시험장치 구성도는 Fig. 4와 같다. 레이저에서 나온 빛은 양방향 연계기를 사용하여 두 개로 분할된 후 광섬유 접속기를 통해 각각 시편 표면에 부착된 광섬유 센서와 시편의 내부에 삽입된 광섬유로 연결되어 입사된다. 광섬유 센서에서 받

생되는 신호의 정확성과 신호의 특성을 살펴보기 위해서 광섬유 센서와 평행한 위치에 스트레인 게이지를 부착시켰다. 따라서 내부에 삽입된 광섬유에서 유도되는 신호를 포함하여 3가지의 신호를 비교하여 실험을 수행하였다. 피로실험은 MTS를 이용하여 시편의 자유단(free end)에 0~2.5cm의 변위를 사인파(sinusoidal wave) 형태로 3Hz로 지속적으로 가하는 방법으로 하중을 주었다. 시편의 표면에 부착된 광섬유 센서와 스트레인 게이지는 고정단(fixed end)에서 5mm떨어진 곳에 위치함으로써 시편에서 가장 취약한 부분에서의 손상을 감지하였다.

피로가 진행되는 동안 시편내부에 삽입된 광섬유를 통과한 신호는 계속하여 초기값인 약 0.25V를 유지하였다. 표면에 부착된 광섬유센서는 하중이 가해짐에 따라 내부 간극이 벌어지게 되어 스트레인 게이지의 신호와 위상이 반대가 되는 형태로 취득되었다. 하지만 Fig. 5에서와 같이 피로주기가 증가하면서 시편의 내부에 피로손상이 누적되고 균열이 발생함에 따라 삽입된 광섬유는 45373사이클(cycle)이 되는 지점에서 파괴가 발생하여 광검출기로부터 나오는 전압이 약 0.25V에서 0V로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때 표면에 부착된 광섬유 센서의 신호는 Fig.6과 같이 45373사이클이 되는 지점에서 시편내부에서 발생한 손상으로 인한 외란(disturbance)으로 인하여 신호가 다른 사이클에서의 신호와 비교하여 상당히 많이 진동하고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 7의 스트레인 게이지에서의 신호를 보면 광섬유가 파괴된 지점인 45373사이클에서의 신호가 그 외의 다른 사이클에서의 신호와 비교하여 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

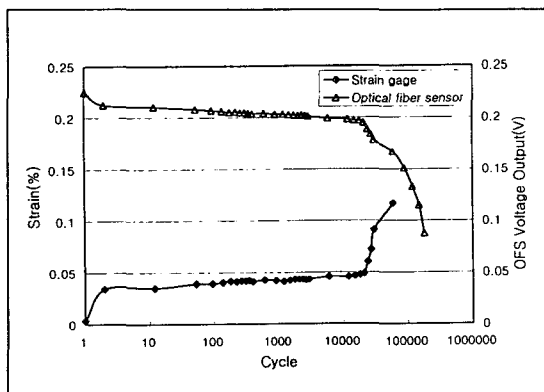


Fig. 8. Variation of fatigue signals of intensity-based optical fiber sensor and strain gage

Fig. 8은 피로실험이 진행되는 동안 하중이 가해지는 자유단이 중립면에 도달했을 때의 광섬유센서와 스트레인 게이지의 신호 변화를 나타낸 그래프이다. 시편의 표면부분이 변형이 쉽게 되는 90°층으로 이루어져 있어서 피로가 진행됨에 따라 섬유가 밀리면서 변형이 계속 누적되는 현상을 보이고 있다. 이러한 누적 피로 변형은 실험 초기에 급격한 증가를 보이다가 약 10사이클이 넘으면서 변화량이 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 약 40000사이클을 넘어서면서부터 시편의 가장 취약한 부분에서 내부손상 및 균열이 급격히 발생하여 피로변형의 변화가 심해짐을 알 수 있다. 광섬유센서의 신호는 스트레인 게이지의 신호변화와 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다. 이 그래프에서 스트레인 게이지의 경우 약 60000사이클이 지나면 스트레인 게이지 자체가 파손이 되어 더 이상의 측정이 불가능한 상태가 되지만 광섬유 센서의 경우에는 실험을 중단한 180000사이클까지도 지속적인 피로변형 신호의 측정이 가능하였다. 따라서 피로하중에 대한 광섬유 센서의 내구성도 우수함을 알 수 있다.

3.2. 충격위치 측정 시험

구조물의 표면에 충격이 가해지면 구조물에 부착된 광섬유센서는 충격으로 야기된 진동이 센서에 도착함에 따라 신호의 변화를 발생시키게 되고 진동이 전해지는 속도와 시간으로부터 충격이 가해진 위치를 구할 수 있다. 여기서는 충격이 가해졌을 때 발생하는 진동이 모든 방향에 대해서 일정한 속도를 가지게 하기 위해서 등방성 재료인 스테인레스 스틸을 재료로 범형상으로 시편을 제작하였다. 충격망치(impact hammer)를 이용하여 일곱 군데의 위치에 충격을 가하였다.

Fig. 9와 같은 시편에 미리 위치를 알고 있는 두 개의 광섬유 센서를 부착하고 역시 알려진 위치에 충격을 가하면, 이미 두 센서 사이의 거리를 알고 있으므로 센서에 전달되는 진동의 시간차를 FFT를 이용하여 측정함으로써 발생한 진동의 속도를 측정할 수 있다. 충격 위치 파악을 위하여 두 센서 사이의 임의의 위치에

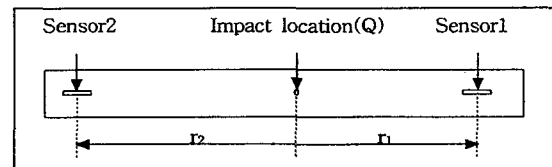


Fig. 9. Schematic diagram of specimen for impact location detection

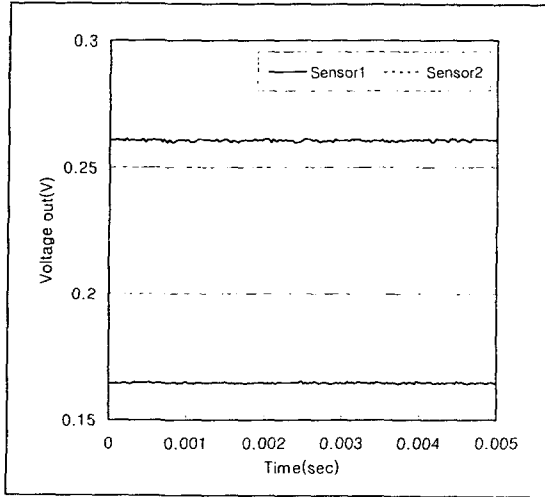


Fig. 10. Optical fiber sensor signal during non-impact

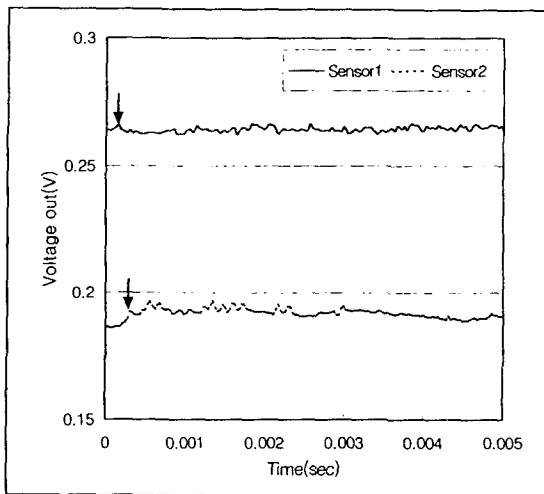


Fig. 11. Optical fiber sensor signal during impact

Table 1. Measurement of impact location

Impact location(cm) (from sensor 2)	Detected location(cm) (from sensor2)	Error(%)
2	1.4	2.7
4	4.1	0.5
7	6.9	0.5
10	9.6	1.8
14	13.8	0.9
15	15.1	0.5
20	19.2	4.1

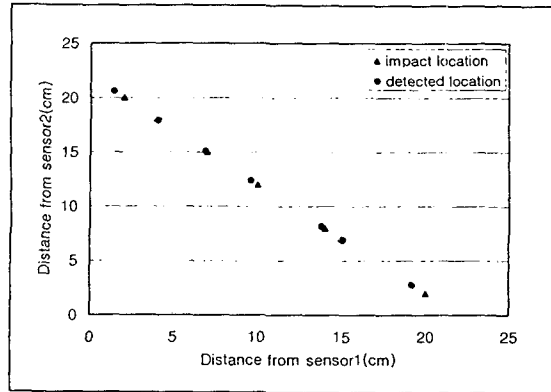


Fig. 12. Comparison of impact location and detected location

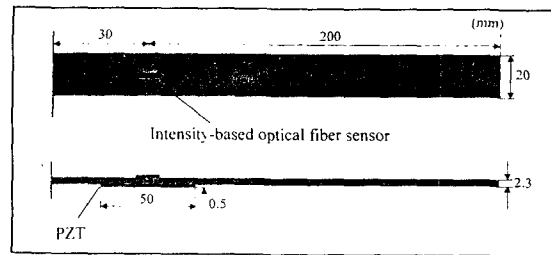


Fig. 13. Configuration of composite beam specimen for vibration test

충격을 가하고 충격이 가해진 위치에서 두 센서가 가지는 상대적인 거리의 차에 의해 발생하는 신호가 도달하는 시간차를 측정하였으며 이로부터 충격이 가해진 위치까지의 거리를 구할 수 있었다.

시편에 부착된 광섬유센서는 외부에서 충격이 가해지지 않는 경우에는 Fig. 10과 같이 일정한 신호를 나타내지만 충격이 가해지는 경우 Fig. 11에서와 같은 충격에 의한 진동이 센서에 영향을 미쳐 전압이 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 충격이 발생했을 때의 광섬유센서 신호의 한 예를 보여주고 있다. 여기서, 처음 발생하는 피크(peak) 위치를 진동이 처음으로 센서에 도달하는 순간으로 정의하였다. 이 그림에서 센서 1은 183 μ s에서 처음 피크를 나타내고 센서2는 366 μ s에서 피크를 나타내고 있으므로 이 시간차가 위치 계산에 필요한 값이 된다. 이러한 방법으로 20회를 반복하여 측정되었다. Table 1에 실제의 충격 위치에 대하여 광섬유센서로부터 구한 충격 위치와 오차를 나타내었다. 오차율은 실제로 충격이 가해진 위치와 측정된 충격의 위치의 차이를 두 센서 사이의 거리로 나눈 값으로서 0.5~4.1%의 오차범위 내에서 비교적 정확히 충격의 위치를 찾을 수 있었다. Fig. 12는 위의 결과를

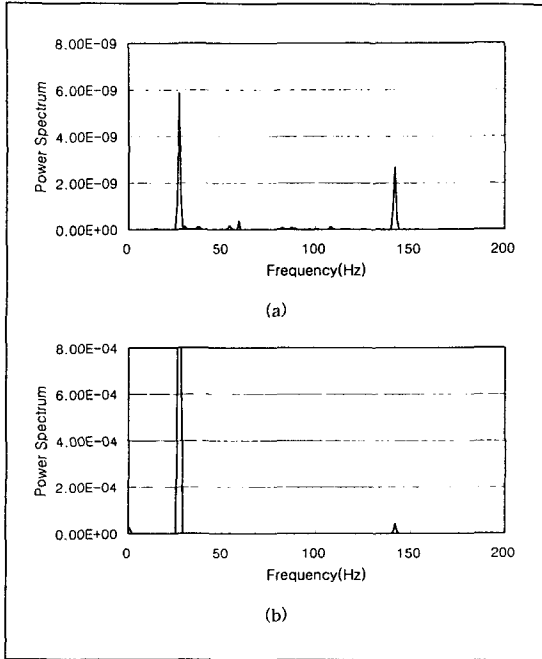


Fig. 14. Signals measured by (a) optical fiber sensor and (b) gap sensor in frequency domain

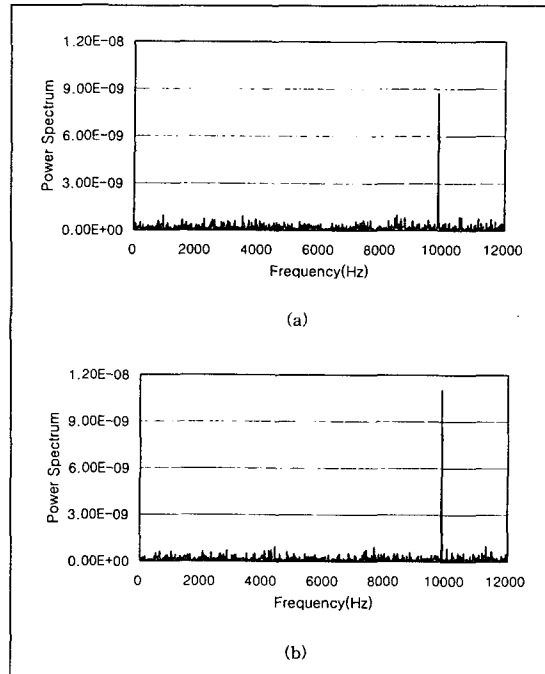


Fig. 16. Forced vibration signals measured by (a) optical fiber sensor and (b) gap sensor(10kHz)

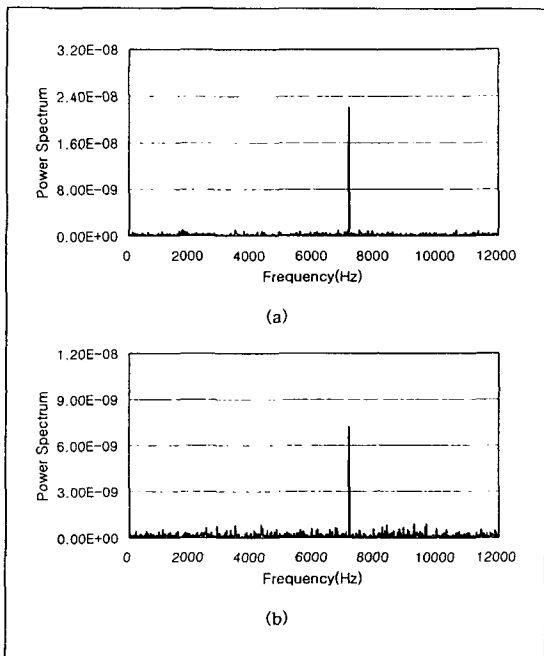


Fig. 15. Forced vibration signals measured by (a) optical fiber sensor and (b) gap sensor(7kHz)

그래프로 표현한 것이다.

3.3 진동측정 시험

구조물의 진동모드 감지 및 미약한 진동감지 시험을 위해 복합재료 보에 대한 진동 시험을 수행하였다. 시편의 형상은 Fig. 13에 나타내었으며 고정단에서 30mm 떨어진 표면위치에 광섬유센서를 부착하고 반대면의 동일한 위치에 압전세라믹(PZT)을 부착하였다. 충격망치 및 강제진동에 의한 진동신호를 광섬유센서와 갭센서(gap sensor)를 이용해 동시에 측정, 비교하였다. 레이저에서 나온 빛은 광섬유센서를 통과하여 광검출기에서 전압으로 인식된 후 갭센서의 신호와 함께 FFT로 보내어져서 해석되고, 강제 진동시험을 위해 압전세라믹은 신호발생기(function generator)와 연결되어 있다.

Fig. 14의 (a), (b)는 각각 충격망치 가력에 의한 보의 주파수 특성을 광섬유 센서와 갭센서로 측정한 것이다. 시편의 자유단 쪽에서 측정한 갭센서의 신호는 1차 진동모드가 2차 진동모드에 비하여 대단히 크게 측정되었다. 광섬유센서의 신호는 상용센서인 갭센서의 신호와 잘 일치함을 알 수 있다. 민감도가 뛰어난 EFPI 광섬유센서를 진동측정에 사용할 경우 구조물의

진동에 의한 변형이 광원 파장의 1/4 이하의 경우에만 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 단점을 가지는데 비하여 광강도형 광섬유 센서는 분해능은 다소 떨어지지만 변형의 크기에 상관없이 진동을 감지할 수 있는 장점을 가진다.

강제진동 시험은 신호발생기로 약 7kHz와 10kHz의 사인파를 발생시켜 복합재료 보에 부착된 압전세라믹을 가진시켰다. Fig. 15와 Fig. 16에서 광섬유센서는 신호발생기에서 발생시킨 두 가지 주파수 신호를 정확히 취득함을 확인할 수 있고 껌센서의 결과와도 일치하여 상대적으로 높은 진동수의 진동에 대한 감지 가능성을 확인할 수 있었다. 구조물의 손상시 나타나는 수 백 kHz 대역의 음향방출 신호감지에 대해서는 추후 연구에서 논의 될 예정이다.

4. 결 론

본 연구는 광강도형 광섬유센서를 제작하고 이를 이용한 구조물의 피로손상 감지, 충격위치 측정 및 진동 감지에 대하여 고찰해 보았다. 이로부터 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 구조물의 내부에서 손상이 발생했을 때, 이것에 의해 발생하는 외란을 표면에 부착된 광섬유 센서를 이용하여 감지함으로써 구조물의 손상을 감지할 수 있었고 피로에 대한 저항성 면에서는 광섬유센서는 스트레인 게이지에 비하여 훨씬 뛰어난 것을 알 수 있었다.
- (2) 충격에 의한 진동 전파의 속도와 진동 도달시간을 측정함으로써 광섬유센서를 이용한 구조물에서의 충격위치 검출이 가능하였다.
- (3) 구조물의 자유진동 및 고주파 진동성분을 광강도형 광섬유센서가 정확히 감지함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업설비 안전성평가 연구센터 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Udd, E., "An Overview of Fiber-Optic

Sensors", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 66, 1995, pp. 4015~4030.

2. Measures, R. M., Alavie, A. T., Maaskant, R., Ohn, M., Karr, S., and Huang, S., "A Structurally Integrated Bragg Grating Laser Sensing System for a Carbon Fiber Prestressed Concrete Highway Bridge", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, 1995, pp. 20~30.

3. Idriss, R. L., Kodindouma, M. B., Kersey, A. D., and Davis, M. A., "Multiplexed Bragg Grating Optical Fiber Sensors for Damage Evaluation in Highway Bridges", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, 1998, pp. 209~216.

4. Bronnimann, R., Nellen, P. M., and Sennhauser, U., "Application and Reliability of a Fiber Optical Surveillance System for a Stay Cable Bridge", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, 1998, pp. 229~236.

5. De Vries, M., Nasta, M., Bhatia, V., Tran, T., Greene, J., and Claus, R. O., "Performance of Embedded Short-Gage-Length Optical Fiber Sensors in a Fatigue-Loaded Reinforced Concrete Specimen", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, 1995, pp. A107~A113.

6. Measures, R. M., Le Blone, M., Liu, K., Ferguson, S., Valis, T., Hogg, D., Turner, R. and McEwen, K., "Fiber Optic Sensor for Smart Structures", *Opt. Laser Eng.*, Vol. 16, 1992, pp. 127~152.

7. Escobar, P., Gusmeroli, V., Martinelli, M., Lanciani, I., and Morabito, P., "Fiber-Optic Interferometric Sensors for Concrete Structures", *Proc. 1st Eur. Conf. on Smart Structures and Materials*, 1992, pp. 215~218.

8. Waite, S. R., "Use of Embedded Optical Fibre for Significant Fatigue Damage Detection in Composites Material", *Composites*, Vol. 21, No. 3, 1990, pp. 225~231.

9. 이동춘, 이정주, 권일범, "광강도형 광섬유센서를 이용한 강구조물의 균열진전 감시", *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 23, No. 5, 1999, pp. 743~750.

10. Murphy, K. A., Fogg B. R. and Vengsarkar, A. M., "Spatially Weighted Vibration Sensor

Using Tapered Two-Mode Optical Fibers”, *J. of Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 11, 1992, pp. 1680~1687.

11. Davis, M. A., Kersey, A. D., Sirkis, J. and Friebele, E. J., “Fiber Optic Bragg Grating Array for Shape and Vibration Mode Sensing”, *SPIE*, Vol. 2191, 1994, pp. 94~102.

12. Greene, J. A., Tran, T. A., Bhatia, V., Gunther, M. F., Wang, A., Murphy, K. A. and Claus, R. O., 1995, “Optical Fiber Sensing Technique for Impact Detection and Location in Composites and Metal Specimens”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, pp. 93~99.

13. Doyle, C. and Fernando, G., 1998, “Detecting Impact Damage in a Composite Material with an Optical Fibre Vibration Sensor System”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 543~549.

14. Doyle, C. and Fernando, G., 1996, “An Intensity-Based Fiber Optic Vibration Sensor”, *Proc. SPIE*, Vol. 2718, pp. 94~104.

15. Levin, K. and Jarlas, R., 1997, “Vulnerability of Embedded EFPI-Sensors to Low-Energy Impacts”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 6, pp. 369~382.

16. Akhavan, F., Watkins, S. E. and Chandrashekhara, K., 1998, “Measurement and Analysis of Impact-Induced Strain Using Extrinsic Fabry-Perot Fiber Optic Sensors”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 745~751.

17. Badcock, R. A. and Fernando, G. F., “An Intensity-Based Optical Fibre Sensor for Fatigue Damage Detection in Advanced Fibre-Reinforced Composites”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, 1995, pp.223~230.