

# 광강도형 광섬유센서를 이용한 진동 및 피로손상 감지

양유창\* · 전호찬 · 한경섭  
(포항공과대학교)

## 1. 서론

광섬유센서(optical fiber sensor)는 기존의 센서에 비해서 가볍고 소형이며 감도가 뛰어나고, 내장(embedding)이 용이하며, 작동온도 범위가 높으며 전자기장의 방해를 받지 않고, 센서망(sensor array)을 구성하기 적합하다는 등의 특성들로 인하여 센서의 제작 및 적용에 대한 다양한 연구가 진행중이다. 이러한 광섬유를 적용한 구조물의 피로손상 감시연구는 선진국의 경우에도 아직 단순한 변형 측정 등의 기본적인 응용단계에 머무르고 있어 구조 해석 및 피로 파괴역학의 바탕에 광섬유 응용기술의 접목을 통한 효율적이고 정확한 구조물의 안전성 감시 연구가 필요하다.

1990년대 이후 광섬유 센서를 진동측정에 적용하는 연구가 이루어졌는데, Murpy 등[1]은 공간적으로 조절된 광섬유 센서를 이용하여 외팔보(clamp-free)와 고정-고정단(clamp-clamp) 보의 진동측정을 하였다. 또한, 광섬유 Bragg grating 센서에 대한 제작방법이 확립됨에 따라, Davis 등[2]은 파장분할(wavelength division) 다중 광섬유 Bragg grating 배열을 알루미늄 외팔보의 표면에 분산, 부착시켜서 구조물의 형상과 진동모드의 분석에 대한 연구를 수행하였다.

광섬유를 응용한 산업구조물의 감시 및 피로특성 평가에 관한 연구는 90년대에 들어서 본격적으로 시작되었다. Univ. of Toronto, Univ. of Vermont에서는 실제 교량에 광섬유 센서를 적용하여 변형 및 교량 등을 측정하는 연구[3]가 수행되었다.

국내에서는 소수의 연구그룹에 의해서 광섬유센서의 제작, 인장 및 진동 등의 감지에 관한 연구와 복합재료의 피로손상 검출에 관한 연구 등이 수행되고 있다[4].

본 논문에서는 Badcock[5] 등에 의해 제안된 광강도형 광섬유센서(intensity-based optical fiber sensor)를 제작하고, 이것을 구조물의 표면에 부착시켜 기본적인 신호특성을 파악한 뒤, 이로부터 변형을 신호를 취득하였다. 또한 구조물이 피로변형을 받을 때 표면에 부착한 광섬유 센서의 신호와 구조물에 삽입된 광섬유로부터 나오는 신호를 비교함으로써 구조물의 피로손상을 감지하는 방법을 살펴보았다. 그리고, 동일한 센서를 이용하여 구조물의 진동측정과 측

격 위치파악에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 광강도형 광섬유센서의 측정원리 및 제작

광강도형 광섬유센서는 변형이 발생했을 때, 두 광섬유의 접속부에서 발생하는 광손실로부터 간극(gap)의 변화를 측정하는 센서이다. 두 광섬유 사이에서 전달되는 빛의 세기의 감소량은 두 광섬유 단면의 거리에 관계가 있다. 광섬유 코어의 직경을  $d$ , 광섬유센서의 표점거리(gage length)를  $l$ , 두과울을  $T$ , 입계입사각을  $\theta_c$ , 초기의 빛의 세기와 임의의 순간에 측정된 빛의 세기의 비를  $\alpha$ 라고 하면 변형률은 다음과 같이 구해진다.

$$\epsilon = \frac{d(\sqrt{T} - \sqrt{\alpha})}{2N \alpha \tan \theta_c} \quad (1)$$

센서의 제작과정은 우선 모세관을 적당한 길이로 자른 후, 수직으로 절단된 광섬유의 단면이 동일선상에서 마주보도록 위치시키기 위해 현미경과 3축-이동기(xyz-translator)를 사용하여 광섬유를 모세관에 삽입한다. 적당한 간극과 게이지 길이를 맞춘 후 시편에 부착하여 완성한다. 3M사의 FS-SN-3224 단일모드 광섬유와 광원으로는 파장 632.8nm의 He-Ne 레이저가 사용되었다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 인장시험 및 피로손상 감지 시험

본 실험에 사용된 시편은 SK의 탄소섬유 prepreg (USN125A) 20층을 적층한 뒤, 열프레스(hot press)에서 제조하였다. Prepreg은  $[90_7/0_3]_5$ 의 적층 순서로 적층이 되었으며 가운데 있는  $0^\circ$  층은 시편에 강성을 주기 위해서 적층되었고,  $0^\circ$  층의 아래위는 균열(crack)이 가장 쉽게 발생하는  $90^\circ$  층으로 적층하였다. 내부에 삽입된 광섬유는 18번 prepreg과 19번 prepreg 사이에 탄소섬유의 방향에 수직이 되도록 삽입하였다. 인장시험의 경우 UTM을 이용하여 1mm/min의 속도로 인장하중을 가하고 표점거리(gauge length)가 50mm인 extensometer와 광섬유 센서를 부

착하여 두 센서에서의 신호를 비교하였다. Fig. 1에서 파괴가 일찍 발생하는 90°층의 표면에 부착된 광섬유 센서는 파괴 강도의 약 50%정도에서 먼저 파괴가 발생하여 더 이상의 데이터를 구할 수 없었고 extensometer는 50mm 표점거리의 양쪽 끝단만 시편에 부착되어 있어서 시편이 파괴될 때까지 측정이 가능하였다. 두 센서의 측정값은 대략 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험결과 시편의 탄성계수는 33 GPa 이고 파괴 강도는 약 430 MPa로 나타났다.

피로 실험에 대한 개략적인 시험장치 구성도는 Fig. 2와 같다. 레이저에서 나온 빛은 양방향 연계기(bidirectional coupler)를 사용하여 두 개로 분할된 후 Newport에서 제작된 FS-SK-SA 광섬유 접속기(fiber splice)를 통해 각각 광섬유 센서와 시편의 내부에 삽입된 광섬유로 연결되어 입사된다.

광섬유 센서에서 발생하는 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 구조물의 자유단(free end)에 0~2.5cm의 변위를 sinusoidal 형태로 3Hz로 지속적으로 가하는 방법으로 하중을 주었다. 시편의 표면에 부착된 광섬유 센서와 스트레인 게이지는 고정단(fixed end)에서 5mm떨어진 곳에 위치함으로써 구조물에서 가장 취약한 부분에서의 손상을 감지하였다.

피로실험의 경우 시편내부에 삽입된 광섬유에서 나온 신호는 Fig. 3에서와 같이 45373사이클(cycle)이 되는 지점에서 광섬유의 파괴가 발생하여 포토디텍터로부터 나오는 전압이 약 0.25V에서 0V로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때 표면에 부착된 광섬유 센서의 신호는 Fig. 4와 같이 45373사이클이 되는 지점에서의 스트레인이 다른 사이클에서의 스트레인과 비교하여 상당히 많이 진동하고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 5의 스트레인 게이지에서의 신호를 보면 광섬유가 파괴된 지점인 45373사이클에서의 신호가 그 외의 다른 사이클에서의 신호와 비교하여 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 6은 피로실험이 진행되는 동안 하중이 가해지는 자유단이 중립면에 도달했을 때의 스트레인의 변화를 나타낸 그래프로 실험 초기에 많은 스트레인의 변화를 보이다가 10사이클이 넘으면서 변화량이 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 약 40000사이클을 넘어서면서부터 스트레인의 변화가 급격함을 알 수 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 계속적인 스트레인이 측정 가능함을 알 수 있

다. 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 빔형상으로 시편을 제작하였다.

충격에 의해 발생하는 진동의 속도를 측정하기 위하여 두 개의 광섬유 센서가 부착된 시편에서 두 센서의 바깥쪽에 충격을 가하면, 이미 두 센서 사이의 거리를 알고 있으므로 센서에 전달되는 진동의 시간차를 FFT를 이용하여 측정함으로써 발생한 진동의 속도를 측정할 수 있다. 충격 위치의 측정도 같은 방법으로 두 센서 사이의 임의의 위치에 충격을 가하면 충격이 가해진 위치에서 두 센서가 가지는 상대적인 거리의 차에 의해 발생하는 신호가 도달하는 시간차를 구하면 하나의 센서로부터 충격이 가해진 위치까지의 거리를 구할 수 있다.

시편에 부착된 센서는 충격이 가해지는 경우 Fig. 7에서와 같은 충격에 의한 진동이 센서에 영향을 미쳐 전압이 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 처음 발생하는 peak 위치가 진동이 처음으로 센서에 도달하는 순간을 나타내는 것이다. 이 그림에서 센서1은 183 $\mu$ s에서 처음 peak를 나타내고 센서2는 366 $\mu$ s에서 peak를 나타내고 있으므로 이 시간차가 구하고자 하는 값이 된다. 이러한 방법으로 20회를 반복하여 구한 진동의 속도는 901.12m/s로 측정되었다.

위에서 구한 진동의 속도를 이용하여 두 센서 사이에 발생한 충격의 위치 측정은 Fig. 8에 나타나 있다. 오차율은 실제로 충격이 가해진 위치와 측정된 충격의 위치의 차이를 두 센서 사이의 거리로 나눈 값으로서 0.5-4.1%의 오차범위 내에서 충격의 위치를 찾을 수 있었다.

### 3.3 진동측정 시험

구조물의 진동모드 감지 및 고주파의 미약한 진동 감지 시험을 위해 복합재료 보에 대한 진동 시험을 수행하였다. 230X20X2.3mm의 복합재료 보를 제작하고 고정단 쪽에 광섬유센서와 압전세라믹(PZT)을 부착하여 충격망치(impact hammer) 및 강제진동에 대한 진동신호를 광섬유 센서와 갭센서(gap sensor)를 이용해 측정하였다.

Fig. 9의 (a), (b)는 각각 충격망치에 의한 보의

주파수 특성을 광섬유 센서와 캡센서로 측정할 것이다. 광섬유센서의 신호는 상용센서인 캡센서의 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 광감도형 광섬유 센서는 분해능은 다소 떨어지지만 변형의 크기에 상관없이 진동을 감지할 수 있는 장점을 가진다.

강제진동 시험은 신호발생기로 약 7kHz와 10kHz의 정현파를 발생시켜 복합재료 보에 부착된 압전세라믹을 가진시켰다. Fig. 10에서 광섬유센서는 신호발생기에서 발생시킨 두 가지 주파수 신호를 정확히 취득함을 확인할 수 있고 캡센서의 결과와도 일치하였다.

#### 4. 결론

1. 광감도형 광섬유센서를 표면에 부착하여 인장 실험과 피로실험을 수행한 결과, 스트레인의 측정에 있어서 extensometer와 스트레인 게이지에서의 신호와 비교하여 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다.

2. 구조물의 내부에서 손상이 발생했을 때, 이것에 의해 발생하는 외란을 표면에 부착된 광섬유 센서를 이용하여 감지함으로써 구조물의 손상을 감지할 수 있었고 피로에 대한 저항성 면에서는 광섬유 센서는 스트레인 게이지에 비하여 훨씬 뛰어난 결과를 알 수 있었다.

3. 충격에 의한 진동 전파의 속도와 시간을 감지함으로써 광섬유센서를 이용한 충격위치 검출이 가능하다.

4. 구조물의 저주파 진동 및 고주파 진동성분을 광감도형 광섬유센서가 정확히 감지함을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 산업설비 안전성평가 연구센터 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] Measures, R.M., LeBlone, 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.

[4] 이동춘, 이정주, 권일범, "광감도형 광섬유센서를 이용한 구조물의 건전성 감시기법," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집A, 1998, pp.306~311.

[5] Badcock, R.A. and Fernando, G.F., "An Intensity - Based Optical Fibre Sensor for Fatigue Damage Detection in Advanced Fibre - Reinforced Composites," Smart Materials and Structures, Vol. 4, 1995, pp.223~230.

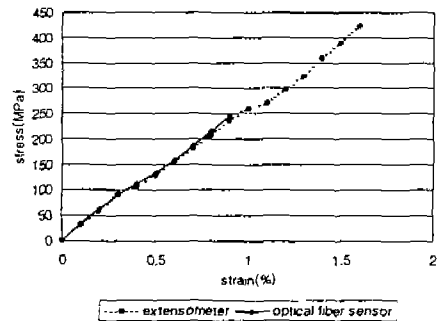


Fig. 1 Stress-strain curve of composite beam

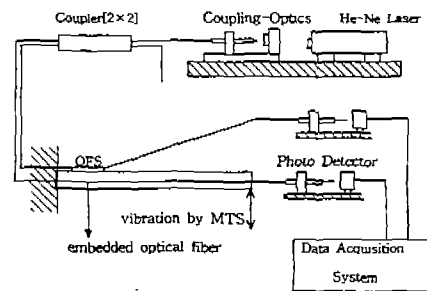


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for fatigue test

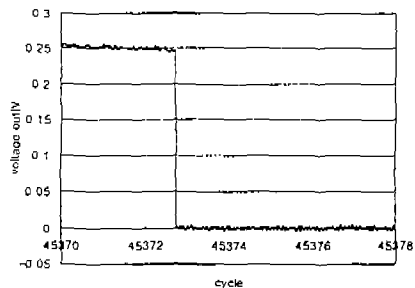


Fig. 3 Voltage output of embedded optical fiber

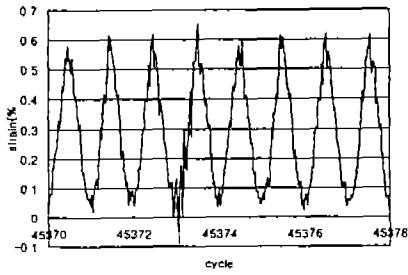


Fig. 4 Cyclic strain measured by optical fiber sensor

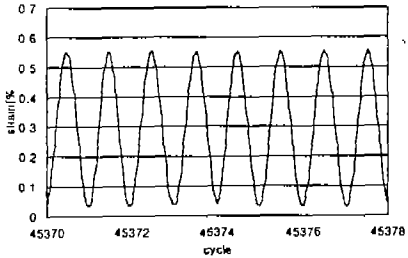


Fig. 5 Cyclic strain measured by strain gage

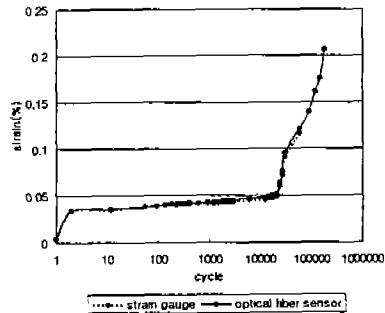


Fig. 6 Change of strain during fatigue test

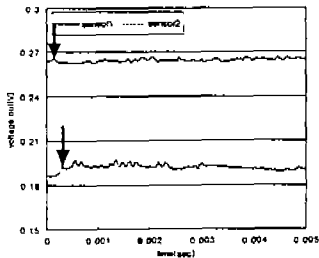


Fig. 7 Voltage output of fiber-optic sensors during impact

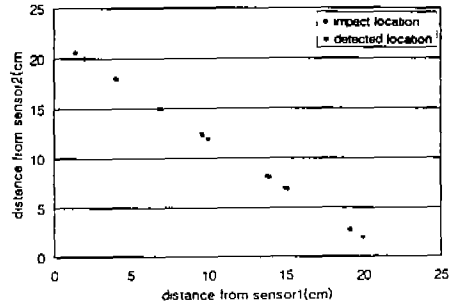
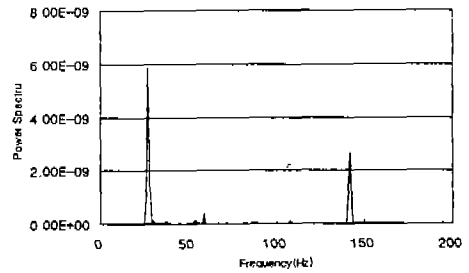


Fig. 8 Comparison between impact location and detected location



(a)

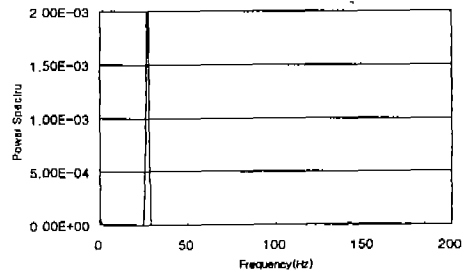
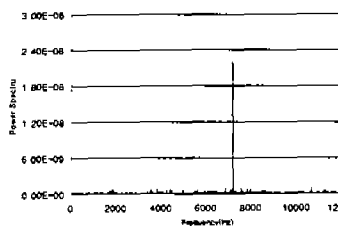
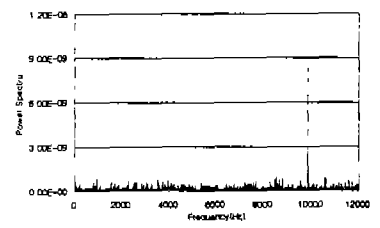


Fig. 9 Signals measured by (a) optical fiber sensor and (b) gap sensor in frequency domain



(a)



(b)

Fig. 10 Forced vibration signals measured by optical fiber sensor under (a) 7kHz and (b) 10kHz