

論文

광강도형 광섬유 진동센서를 이용한 진동감지 및 충격위치 측정

양유창* · 황운봉** · 박현철** · 한경섭**

Vibration Sensing and Impact Location Measurement Using Intensity-Based Optical Fiber Vibration Sensor

Y. C. Yang*, W. Hwang**, H. C. Park** and K. S. Han**

ABSTRACT

An intensity-based optical fiber vibration sensor is applied to monitor the structural vibration and detect impact locations on a plate. Optical fiber vibration sensor is constructed by placing two cleaved fiber end, one of which is cantilevered in a hollow glass tube. The movement of the cantilevered section lags behind the rest of the sensor in response to an applied vibration and the amount of light coupled between the two fibers is thereby modulated. For vibration sensing, optical fiber vibration sensor is mounted on the carbon fiber composite beam and its response is investigated to free and forced vibration. In impact location detection, four optical fiber vibration sensors whose location is predetermined are placed at chosen positions and the different arrival times of impact-generated vibration signal are recorded by an FFT analyzer. Impact location can be calculated from these time delays. Experimental results show that optical fiber vibration sensor signals coincide with gap sensor in vibration sensing. The precise location of impact can be detected on an acrylate plate.

초 록

광강도형 광섬유 진동센서를 이용한 구조물의 진동감지 및 판에서의 충격위치 검출에 관한 연구가 수행되었다. 광섬유 진동센서는 유리 모세관의 내부에 광섬유의 클래딩 부분이 서로 마주보게 하여 제작되며 그 중 한 쪽은 외팔보 형태이다. 진동이 센서에 가해지면 센서 내부의 외팔보가 진동하게 되고 그에 따라 맞은편 광섬유로 전해지는 빛의 강도가 변화하게 된다. 진동감지 실험을 위해 광섬유 진동센서를 복합재료 보의 표면에 부착하고 자유 진동 및 강제 진동에 대한 신호를 취득하였다. 충격 위치 검출에 관한 실험은 아크릴 판에 대하여 알려진 위치에 네 개의 센서를 표면에 부착하고 진동의 도달 시간을 FFT를 이용하여 측정하였다. 충격위치는 이러한 시간차이를 이용하여 계산되어졌다. 광섬유 진동센서는 상용센서인 갭센서와 동일하게 구조물의 진동을 감지하였으며 판에서의 충격위치를 비교적 정확히 측정하였다.

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

1. 서 론

지능형 구조물(smart structure)의 센서로서 광섬유 센서는 기존의 센서에 비하여 가볍고 센서의 크기를 매우 작게 구성할 수 있으며, 감도가 뛰어나고 내장(embedding)이 용이하며, 작동온도 범위가 넓고, 전자기장의 영향을 받지 않으며 센서망(sensor array)을 구성하기 적합하다는 등의 많은 장점과 잠재적 가능성을 가지고 있어서 센서의 제작 및 적용에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

광섬유센서의 감지원리를 크게 세 가지로 분류하면 첫째, 광강도(intensity) 해석에 의한 것으로 빛의 전달 유무를 판단하거나 마이크로벤드(microbend)에 의해 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].

위와 같은 광섬유센서의 다양한 장점을 응용한 연구는 현재까지 주로 구조물의 손상감지 및 피로특성 평가분야에 대하여 이루어졌다. 교량 및 터널 등의 산업 구조물과 그에 사용되는 재료에 대한 피로손상 및 변형 측정에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어졌다[2-7].

광섬유센서를 이용한 구조물의 진동 감지 및 측정에 관한 연구는 1990년대 이후에 본격적으로 이루어지기 시작하였다. Doyle 등[8,9]은 광강도형 광섬유 진동 센서(intensity-based optical fiber vibration sensor)를 이용하여 충격시험을 통해 복합재료의 충격손상 감지에 관한 연구를 수행하였으며 Levin 등[10]은 충격 실험에 대하여 시편에 삽입된 EFPI의 취약성에 대한 연구를 수행하였다. Akhavan 등[11]은 복합재료의 표면에 EFPI를 부착시키고 저속 충격실험을 수행하였다. EFPI 신호는 변형률 게이지(strain gage)와 PVDF film 센서와 비교하여 비슷한 경향을 보였으나 EFPI의 게이지 길이 및 방향성에 다소 영향을 받는 결과를 보였다. 또한, 광강도형 광섬유 진동센서의 원리가 기본적으로 외팔보 형태의 광섬유의 진동을 이용하는 사실로부터 저주파 가속도 센서로의 응용에 관한 연구

[12,13]도 이루어졌다. 광섬유 Bragg grating 센서의 제작기법이 확립됨에 따라, Davis 등[14]은 파장분할(wave length division) 다중 광섬유 Bragg grating 배열을 알루미늄 외팔보의 표면에 분산 부착시켜서 구조물의 형상과 진동모드의 분석에 대한 연구를 수행하였다.

평판 구조물에 가해지는 충격이나 음원의 위치를 결정하기 위해서는 3개 혹은 4개의 센서가 필요하며 센서사이의 거리와 진동이 각 센서에 도달하는 시간차로부터 그 위치를 측정할 수 있다. Tobias[15]는 세 개의 압전세라믹(PZT)을 이용한 평판에서의 음원 위치 결정방법을 제안하였으며 Asty[16]는 그 결과를 구의 표면에서의 위치측정으로 확장하였다. Greene 등[17]은 EFPI 센서를 표면에 부착하거나 내부에 삽입하여 복합재료 판과 알루미늄 패널에 대해 충격위치를 검출하는 연구를 수행하였다. 광섬유 진동 센서의 개발 및 그 응용에 대한 국내의 연구는 아직까지 미미한 실정이다.

본 연구에서는 보다 간단한 형태의 광섬유 진동 센서(optical fiber vibration sensor)의 제작기법을 확립하고 신호특성을 알아보았다. 제작된 센서를 복합재료 보의 표면에 부착하여 자유진동 및 강제진동의 모드를 감지하였다. 또한, 아크릴 판에 광섬유 진동 센서들을 부착하여 충격이 가해졌을 때의 충격위치 측정에 관한 연구를 수행하였다.

2. 광섬유 진동센서의 측정원리 및 제작

일반적으로 광섬유는 주 구조인 코어(core)와 클래딩(cladding), 그리고 코어와 클래딩을 보호하기 위한 코팅(coating)의 세 부분으로 구성되어 있다. 광섬유에 입사된 빛은 주성분이 유리인 코어와 클래딩의 경계면에서의 굴절률 차이에 의해 반사가 이루어지며 전파되고, 특히 경계면에서 전반사가 이루어질 때 빛의 손실이 가장 적어진다.

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 신

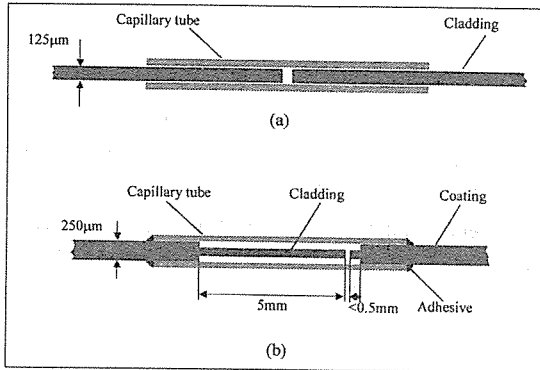


Fig. 1. Schematic illustration of (a) intensity-based optical fiber sensor and (b) optical fiber vibration sensor.

호들의 간섭현상을 이용하는 방법과 투과된 빛의 강도를 이용하는 방법 등의 두 가지로 구분된다. 간섭현상을 이용하는 광섬유 센서는 분해능이 사용되는 광원의 파장 단위 정도로 매우 높은 정밀도를 가지고 있으나 측정신호의 처리과정이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 그에 비하여 광강도형 광섬유 센서는 민감도는 다소 떨어지지만 구조가 매우 간단하고 신호처리 방법이 간편하고 고가의 장비를 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다. 광섬유 진동센서는 일반적인 광섬유 센서의 특성과 마찬가지로 빛의 투과정도나 반사정도를 이용할 수 있는데 본 연구에서는 투과광의 변화로 진동을 감지하는 광강도형 광섬유 진동센서를 사용하였다. 그리고 그 구조는 유리 모세관 내부에 수직으로 절단된 두 광섬유 단면이 동일선상에 위치시키는 면에서 일반적인 EFPI나 광강도형 광섬유 변형센서의 구조와 유사하다.

Fig. 1은 광강도형 광섬유 변형센서 및 광섬유 진동센서의 모습을 보여주고 있다. 광섬유 진동센서의 제작과정은 다음과 같다. 적당한 굵기의 모세관을 13mm-15mm 정도의 길이로 수직으로 절단한 후 아세톤 등을 이용하여 모세관에 묻어있는 이물질들을 깨끗이 제거한다. 실험에서 사용된 광섬유는 3M사에서 제작된 FS-SN-3224 단일모드 광섬유이다. 두 광섬유를 충분한 길이로 자른 후 각각의 코팅부분을 피복 제거기(jacket stripper)를 사용하여 제거하고 이물질이 남아있지 않도록 아세톤을 이용하여 깨끗이 닦아낸다. 광섬유 끝의 단면의 상태는 빛의 전송에 매우 중요하므로 광섬유 절단기(cleaver)를 사용하여 절단하고 현미경을 이용하여 단면이 수직으로 절단되었는지의 여부와 이물질이 묻었는지의 여부를 확인한다. Fig. 1(b)에서

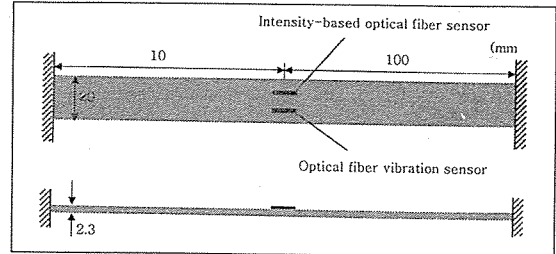


Fig. 2. Schematic of the optical fiber sensors on the composite beam.

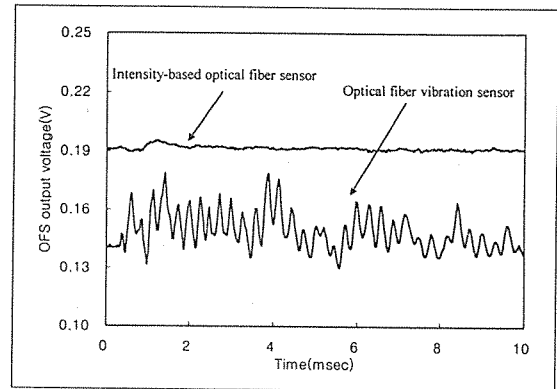


Fig. 3. Comparison of vibration signals of intensity-based optical fiber sensor and optical fiber vibration sensor for an arbitrary impact.

와 같이 남아있는 클래딩 부분이 각각 약 5mm, 0.5mm가 되도록 절단한다. 준비된 모세관을 미세조정 장치에 고정시키고 현미경과 3축-이동기(xyz-translator)를 사용하여 광섬유를 모세관에 삽입한 후 에폭시로 모세관과 광섬유를 접착 시킨다. 완전히 경화가 끝난 후 위와 같은 과정을 모세관의 반대쪽 부분에 대해서 실시한다. 오실로스코프를 통하여 센서의 신호특성을 확인하며 현미경과 미세조정장치를 이용하여 광섬유의 간극은 40-50 μm를 유지하도록 한다.

제작된 광섬유 진동센서는 진동이 발생했을 때 외팔보 형태의 광섬유 (cantilevered optical fiber)가 진동을 하게 되고, 그에 따라 맞은 편 광섬유로 전해지는 빛의 양이 변화하여 진동을 감지하게 된다. 센서의 공진 주파수는 광섬유 외팔보의 길이를 변화시킴으로써 수천 Hz정도의 범위에서 조절할 수 있다. 광섬유 외팔보의 길이가 짧아질수록 공진주파수는 높아지고 센서의 민감도는 떨어지며 길이가 길어지면 그 반대의 현상이 나타나게 된다. 타 연구들[8,9]에서는 모세관에서 광섬유 클래딩이 fiber support tube를 통하여 삽

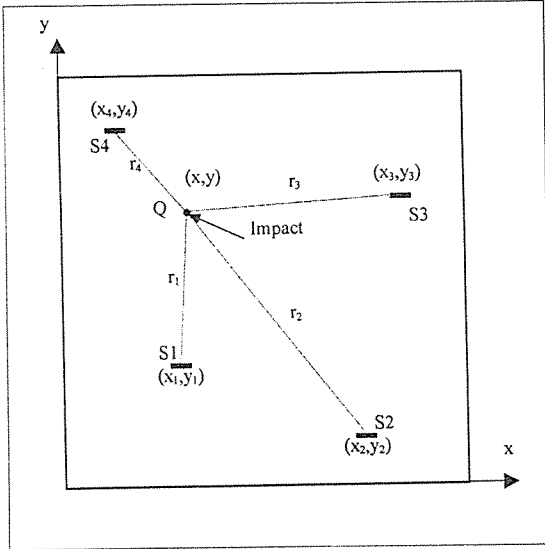


Fig. 4. Coordinate system for impact location.

입되도록 제작하였으나 본 연구에서는 코팅부분을 그대로 삽입하여 보다 간단한 형태의 광섬유 진동센서의 제작이 가능하였다.

광강도형 광섬유센서를 이용한 이전의 결과[18]와 비교하기 위해서 Fig. 2와 같이 복합재료 시편에 광강도형 광섬유센서와 새로이 제작된 광섬유 진동센서를 표면에 부착하고 충격망치(impact hammer)로 시편에 충격을 주어가며 각 센서의 출력신호를 비교하여 보았다. Fig. 3은 임의의 충격에 대한 두 센서의 출력신호를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 광섬유 진동센서는 광강도형 광섬유센서에 비하여 진동에 매우 민감함을 알 수 있다. 광섬유 진동센서의 신호는 센서가 부착된 구조물 자체의 진동특성과 광섬유 진동센서 내의 광섬유 외팔보의 진동특성이 중첩된 형태로 나타나게 된다.

3. 판에서의 충격 위치 검출

Fig. 4와 같은 평판에서 임의의 위치에서 충격이 가해졌을 때, 충격위치로부터 사방으로 진동이 전파되게 된다. 미리 위치를 알고 있는 S1 - S4의 4개의 센서는 진동이 각각의 센서로 전달되는 시간을 측정하는데 사용된다. Fig. 4와 같은 좌표계에서 일반적인 속도-거리-시간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$vt_i = r_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

여기서 v_i 는 충격위치에서 각각의 센서 방향으로 진동이 전해지는 속도, t_i 는 진동이 각각의 센서에 전해지는 시간, r_i 는 충격위치로부터 각각의 센서까지의 거리이다. 판의 재료가 등방성이라면 v_i 는 v 로 일정하다고 생각할 수 있다. 일반적으로 판에서의 충격위치를 검출하기 위해서는 4개의 센서가 필요하며, 진동의 전파속도를 아는 경우에는 3개의 센서가 필요하게 된다[17].

등방성 재료에 대하여 4개의 센서를 사용하는 경우, 식 (1)을 연립하면 다음과 같은 세 개의 연립방정식을 얻게 된다.

$$(t_2 - t_1)v = r_2 - r_1 \quad (2)$$

$$(t_3 - t_1)v = r_3 - r_1 \quad (3)$$

$$(t_4 - t_1)v = r_4 - r_1 \quad (4)$$

예를 들어, 식 (2)를 (x, y) 좌표 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$(t_2 - t_1)v = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (5)$$

또한 식 (2)-(4)에서 v 를 소거하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(1 - \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}\right)r_1 = r_2 - \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}r_3 \quad (6)$$

$$\left(1 - \frac{t_2 - t_1}{t_4 - t_1}\right)r_1 = r_2 - \frac{t_2 - t_1}{t_4 - t_1}r_4 \quad (7)$$

식 (6), (7)은 비선형식으로서 다음과 같은 형태이다.

$$u(x, y) = 0 \quad (8)$$

$$v(x, y) = 0 \quad (9)$$

충격위치 (x, y) 는 식 (6), (7)을 Newton's iteration 방법 등을 이용하여 구할 수 있게 된다.

4. 실험

본 연구에서는 광섬유 센서에 입사하는 빛으로 파장이 632.8nm인 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser)를 사용하였으며, 레이저에서 나온 빛을 초점거리 16mm인 렌즈를 통하여 수렴시킨 후 광섬유에 입사 시켰다. 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 광섬유 센서로 연결되어 입사된다. 광섬유 센서를 통과한 빛은 센서의 감지 정도에 따라 신호의 세기가 변화하며 광검출기(photo detector)에서 전압으로 인식된다.

4.1 진동감지 실험

구조물의 자유진동, 진동 모드 감지 및 고주파의 미약한 진동 감지 시험을 위해 복합재료 보에 대한 진동 시험을 수행하였다. 시편의 형상은 Fig. 5에 나타난 것과 같으며 고정단에서 50mm 표면위치에 광섬유 진동 센서를 부착하고 반대면의 동일한 위치에 압전세라믹을 부착하였다. 레이저에서 나온 빛은 광섬유 진동 센서를 통과하여 광검출기에서 전압으로 인식된 후 갭 센서(gap sensor)의 신호와 함께 FFT로 보내어져서 해석되고, 강제 진동시험을 위해 압전세라믹은 신호발생기(function generator)와 연결되어 있다. 충격망치로 시편의 표면을 가격하면서 진동신호를 취득하였고 강제 진동시험에서 압전세라믹은 신호발생기에 의해 약 10kHz로 가진되었다.

4.2 충격위치 검출

구조물의 표면에 충격이 가해지면 구조물에 부착된

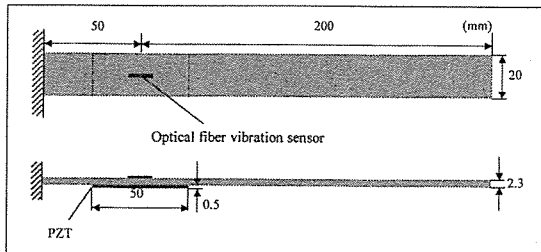


Fig. 5. Configuration of composite beam for vibration testing.

광섬유 진동센서는 충격으로 야기된 진동이 센서에 도착함에 따라 신호의 변화를 발생시키게 되고 진동이 전해지는 속도와 시간으로부터 충격이 가해진 위치를 구할 수 있다. 본 연구에서는 충격이 가해졌을 때 발생하는 진동이 모든 방향에 대해서 일정한 속도를 가지게 하기 위하여 등방성 재료인 아크릴로 판 모양의 시편을 제작하였다. 시편의 크기는 $340 \times 340 \times 1.3\text{mm}^3$ 이며 Fig. 6은 아크릴 판에서의 좌표계와 부착된 센서의 모습을 보여주고 있다.

실험장치의 구성은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 두 개의 레이저 광원, 두 개의 양방향 연계기, 네 개의 광검출기 및 FFT로 이루어져 있다. 레이저에서 나온 빛이 두 개의 양방향 연계기를 거쳐 각각 두 갈래로 갈라져 4개의 센서로 입사되고 각 센서를 통과한 빛은

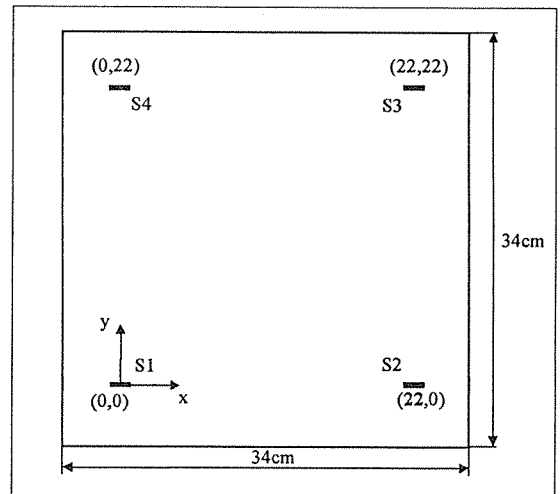


Fig. 6. Configuration of acrylate plate and predetermined optical fiber vibration sensor positions for impact location testing.

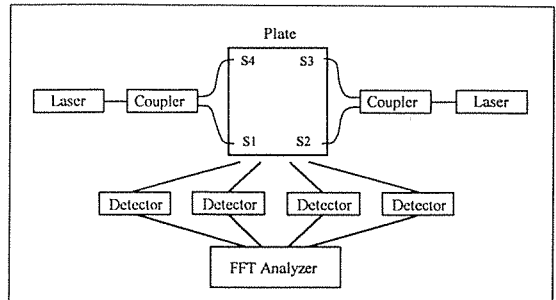


Fig. 7. Fiber optic system for measuring planar impact locations.

광검출기를 통해 전압으로 인식된 후 FFT로 보내어진 다. 충격망치를 이용하여 판의 다양한 위치에 충격을 가하고 각 센서에 도달하는 시간측정의 실험을 여러 번 반복하여 수행하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 8은 Fig. 5의 시편을 자유 진동시켰을 때의 시간에 따른 광섬유 진동센서와 갭센서의 신호를 비교한 것이다. 광섬유 진동센서는 갭센서의 신호와 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 구조물이 충격과 같은 외란에 의해 가진될 때, 결과적으로 나타나는 진동신호는 구조물 자체의 동특성뿐만 아니라 진동센서 자체의 진동특성을 반영하게 된다. 광섬유 진동 센서 신호의 첫 번째 피크 부분은 충격망치의 충격순간을 센서 내부의 광섬유 외팔보가 감지함에 따라 약간 뒤는 경향을 보인다. Fig. 9는 광섬유 진동센서와 갭센서로 측정된 복합재료 시편의 고유진동수(natural frequency)를 보여

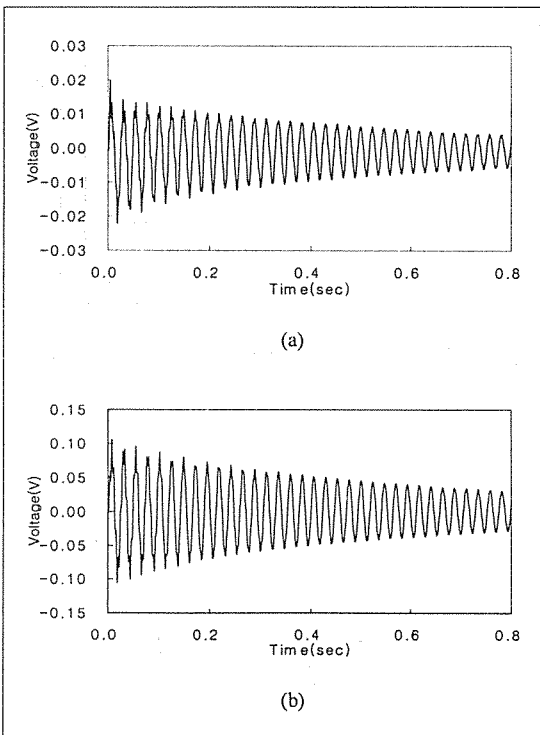


Fig. 8. Time trace curve of (a) optical fiber vibration sensor and (b) gap sensor for composite beam.

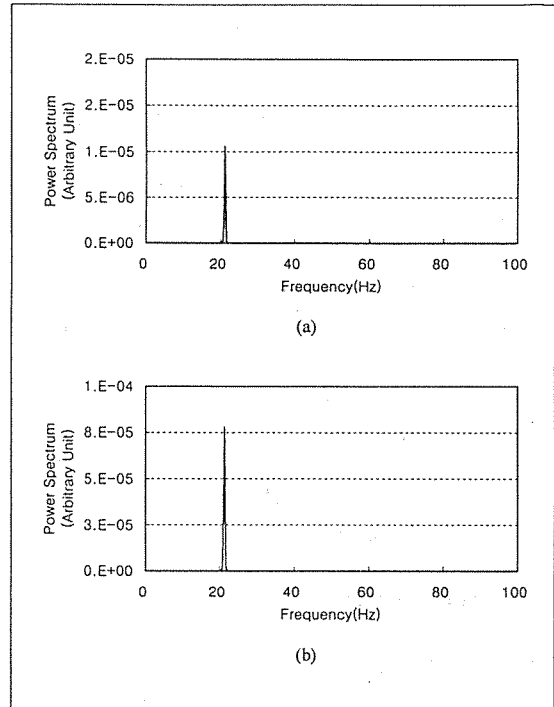


Fig. 9. Impact response measured by (a) optical fiber vibration sensor and (b) gap sensor in frequency domain.

주고 있다. 측정된 고유진동수는 약 22Hz로 두 종류의 센서에서 동일하게 측정되었다.

Fig. 10은 비교적 높은 주파수의 미세 진동에 대한 광섬유 진동센서와 갭센서의 측정 결과이다. 신호발생기로 약 10kHz의 정현파를 발생시켜 압전세라믹을 가진 시킨 결과 두 센서는 동일한 측정 결과를 보여주고 있다. 민감도가 뛰어난 EFPI 등의 간섭형 센서를 진동 측정에 사용할 경우 구조물의 진동에 의한 변형이 광원 파장의 1/4이하의 경우에만 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 단점을 가지는데 비하여 광강도형 광섬유 진동센서는 변형의 크기에 관계없이 진동을 감지할 수 있는 장점을 가진다.

Fig. 11은 충격망치로 충격을 주었을 때 아크릴 판에 부착된 광섬유 진동센서 신호의 한 예를 나타내고 있다. 전체적인 광섬유 진동센서의 신호는 약 100Hz의 아크릴 판의 진동과 광섬유 진동센서 내부 광섬유의 약 3000Hz의 진동이 중첩된 상태로 나타나고 있다. 진동 초기에 센서 내부의 광섬유 외팔보의 심한 진동에 의해 센서의 신호는 민감하게 변화하고 있으며 내부 광섬유의 진동은 25msec를 전후로 대부분 감쇠

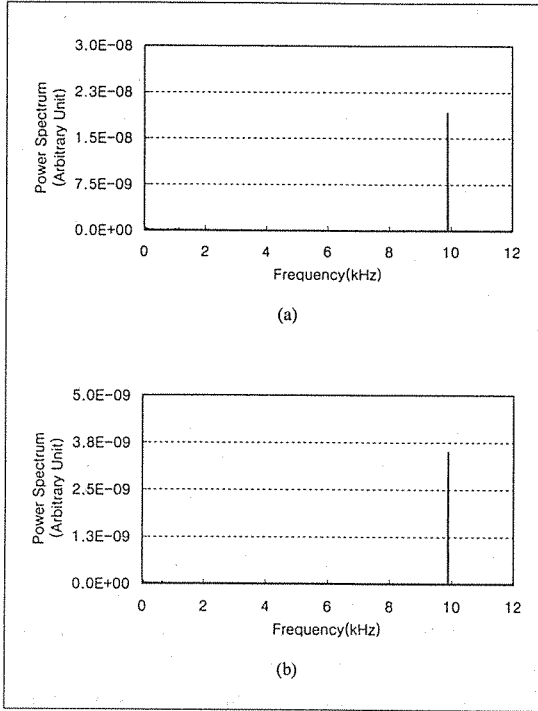


Fig. 10. Forced vibration signals measured by (a) optical fiber vibration sensor and (b) gap sensor (about 10kHz excitation).

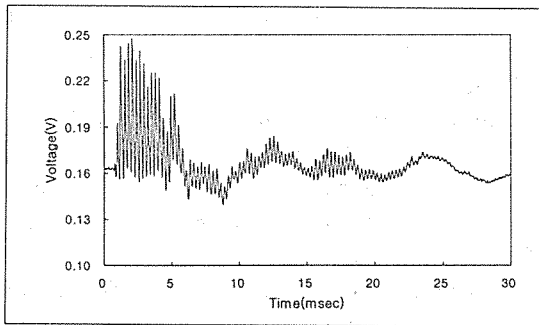


Fig. 11. Typical impact signal of the optical fiber vibration sensor attached to the acrylate plate surface.

됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 센서에 도달하는 진동의 시간을 구하는 방법을 보여주고 있다. 아무런 진동이 없을 경우, 광섬유 진동센서 자체의 노이즈의 크기는 약 1.6mV로 측정되었으며 센서의 신호가 노이즈의 크기를 벗어난 첫 번째의 시간을 진동이 센서에 도달하는 시간으로 정의하였다. Fig. 12에서는 화살표 부분이 진동이 도달한

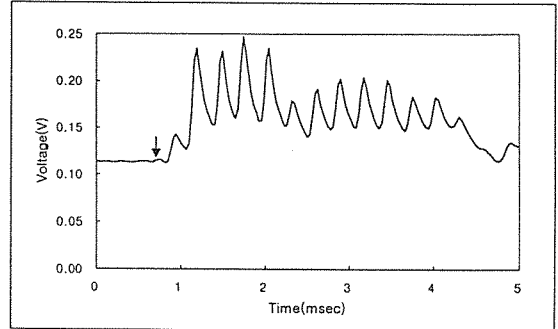


Fig. 12. Voltage output of optical fiber vibration sensor during impact on the acrylate plate(sensor 2, impact location : (2, 14)).

시간이다.

Table 1은 실제의 충격 위치에 대하여 광섬유 진동 센서로부터 구한 충격위치의 오차를 보여주고 있다. 오차는 면적 또는 길이의 관점에서 정의가 가능한데 본 연구에서는 길이에 대한 오차로 정의하였으며 식 (10) 과 같이 표현되었다. 각각의 충격위치는 식 (6), (7)을 iteration 방법을 이용하여 계산하였다.

$$Error(\%) = \frac{1}{2} \frac{x_e + y_e}{l} \times 100 \quad (10)$$

여기서, x_e , y_e 는 각각 x방향, y방향으로의 실제 충격 위치와 계산으로 얻어진 충격위치와의 오차이고 l 은 시편의 한 번의 길이(340mm)이다. 계산결과 약 3.4%의 오차의 범위 내에서 충격위치를 비교적 정확히 측정할 수 있었다. 오차는 광섬유 진동센서의 크기가 시험편에 대하여 무시할 수는 없다는 사실과 수치적인

Table 1. Actual and calculated impact locations(in cm) on an acrylate plate.

Actual Location	Calculated Location	Error(%)
11, 11	10.8, 11.6	1.2
2, 14	1.8, 14.0	0.4
18, 12	17.5, 12.1	1.0
4, 2	3.3, 1.1	2.4
14, 20	13.9, 19.5	0.9
12, 0	11.3, -0.9	2.3
24, 16	24.0, 16.3	0.5
-4, 8	-5.2, 6.9	3.4
20, 6	18.3, 5.6	3.2
8, 18	7.3, 17.8	1.3

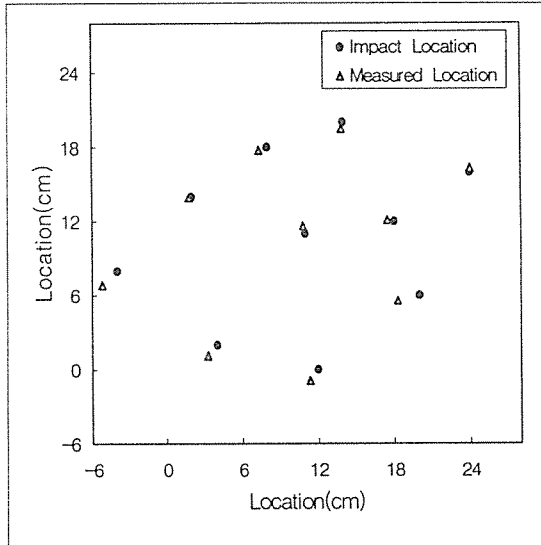


Fig. 13. Comparison of actual and measured impact locations on the acrylic plate.

방법으로 위치를 계산할 때에 주로 발생한 것으로 사료된다. Fig. 13은 실제 충격위치와 측정된 충격위치를 시편의 형상에 표시한 그래프이다.

6. 결 론

본 연구에서는 광섬유 외팔보를 이용한 보다 간단한 형태의 광강도형 광섬유 진동 센서를 제작하고 복합재료 보의 표면에 부착하여 진동시험을 수행한 결과, 자유진동 및 강제진동의 모드를 상용 센서인 겹센서와 동일하게 정확히 감지함을 확인할 수 있었다. 또한, 아크릴 판의 표면의 알려진 위치에 4개의 광섬유 진동 센서들을 부착하여 임의의 위치에 충격이 가해졌을 때의 충격위치 측정에 관한 실험을 수행하였다. 충격에 의한 진동의 각 센서에 도달한 시간을 측정함으로써 비교적 정확히 충격이 가해진 위치를 검출할 수 있었다.

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. Doyle, C. and Fernando, G., "Detecting impact damage in a composite material with an optical fibre vibration sensor system", Smart Mater. Struct., Vol. 7, 1998, pp. 543-549.

9. Doyle, C. and Fernando, G., "An intensity-based fiber optic vibration sensor", Proc. SPIE, Vol. 2718, 1996, pp. 94-104.

10. Levin, K. and Jarlas, R., "Vulnerability of embedded EFPI sensors to low-energy impacts", Smart Mater. Struct., Vol. 6, 1997, pp. 369-382.

11. Akhavan, F., Watkins, S. E. and

Chandrashekhara, K., "Measurement and analysis of impact - induced strain using extrinsic Fabry - Perot fiber optic sensors", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, 1998, pp. 745-751.

12. Lopez-Higuera, J. M., Morante, M. A. and Cobo, A., "Simple low-frequency optical fiber accelerometer with large rotating machine monitoring applications", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 7, 1997, pp. 1120-1130.

13. Morante, M., Cobo, A., Lopez-Higuera, J. M. and Lopez-Amo, M., "New approach using a bare fiber optic cantilever beam as a low-frequency acceleration measuring element", *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 6, 1996, pp. 1700-1706.

14. Davis, M. A., Kersey, A. D., Sirkis, J. and Friebele, E. J., "Shape and vibration mode sensing using fiber optic Bragg grating array", *Smart*

Mater. Struct., Vol. 5, 1996, pp. 759-765.

15. Tobias, A., "Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors", *Non-Destructive Testing*, Vol. 9, 1976, pp. 9-12.

16. Asty, M., "Acoustic emission source location on a spherical and plane surface", *Non-Destructive Testing*, Vol. 11, 1978, pp. 223-226.

17. Greene, J. A., Tran, T. A., Bhatia, V., Gunther, M. F., Wang, A., Murphy, K. A. and Claus, R. O., "Optical fiber sensing technique for impact detection and location in composites and metal specimens", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, 1995, pp. 93-99.

18. 양유창, 전호찬, 한경섭, "광강도형 광섬유센서를 이용한 피로손상 및 진동감지", *한국복합재료학회지*, 제 13권, 제1호, 2000, pp. 89-97.