

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 구조물의 모드 형상 측정

구본용* · 류치영* · 홍창선*

Mode Sensing of a Composite Beam Using Fiber Bragg Grating Sensor

Bon-Yong Koo, Chi-Young Ryu and Chang-Sun Hong

KEY WORDS : WSFL, FBG sensor system, strain measured mode shape

ABSTRACT

Fiber Bragg grating (FBG) sensor, one of the fiber optic sensor (FOS) offers lots of advantages for structural health monitoring due to its multiplexing capability. Also, it is proper to measure the structural vibration with no mass concentration effect. In this paper, we constructed two sensor arrays composed of 9 FBG sensors for the vibration and mode sensing of a composite beam. For an accurate measurement of wavelength shift, a signal processing board with an electric circuit based on time-interval counting was developed. This sensor system showed a good resolution of dynamic strain ($<10\mu\epsilon$). Using this sensor system, dynamic strains at 9 points of composite beam was measured and strain measured mode shape of the beam was calculated from the acquired strains and compared with numerical results by ABAQUS.

1. 서론

항공기 구조물은 외부로부터 극한 하중, 충격 및 피로 하중 등에 노출되어 있으며 이로 인해 외부에서는 보이지 않는 내부 손상으로 구조에 파손 및 손상이 발생할 수 있다. 이러한 손상을 항공기 운용 중 실시간으로 검사할 필요가 대두되었으며 구조의 변형 및 파손을 감지하는 스마트 센서의 후보로서 광섬유 센서에 대한 다양한 연구들이 수행되어 왔다.

광섬유 센서들 중 비교적 최근에 개발된 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)는 다른 종류의 광섬유 센서와 비교해 많은 장점을 가진다. FBG 센서는 변형률과 온도와 같은 외란에 대해 선형적인 반응을 가지며 또한 빛의 파장 영역에서 절대적인 측정이 가능하다. 또한 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기법을 사용하여 하나의 광섬유 선에 여러 점의 신호를 받아들이는 동시 다점 측정 기술을

구현하는 것이 가능하다.[1]

본 연구에서는 파장 이동 광섬유 레이저(wavelength-swept laser, WSFL)를 광원과 센서 어레이로 구성된 시스템 및 신호처리 전자 회로와 신호처리 프로그램을 제작하고 이 시스템으로서 여러 지점에서 FBG 센서를 이용하여 실시간으로 동적 변형률을 측정하고자 한다. 제작된 시스템의 변형률 해상도를 측정하여 시스템의 성능을 평가하였고, 간단한 구조물인 복합재 보에서 실시간으로 동적 변형률을 측정하고 각 지점의 변형률에서 보의 고유진동수와 모드 형상을 측정하는 실험을 수행하였다.

2. 파장이동 광섬유 레이저

광섬유 브래그 격자는 광섬유 코어에 UV 레이저의 빛을 조사 시킬 경우 코어에 굴절률이 주기적으로 변하는 층이 만들어진 것이다. 이러한 브래그 격자는 특정한 파장 대역의 빛을 반사시키는 필터로서 사용되는데 광섬유에 기계적 변형이나 온도변화가 발생할 경우 반사하는 빛의 파장에 변화가 발생하여 센서로서 사용될 수 있다.

* 한국과학기술원 항공우주공학과

파장이동 광섬유 레이저(WNFL)[2]는 패브리-페로 필터의 이동에 대응하여 시간대역에서 레이저의 파장이 반복적으로 출력되는 광섬유 레이저이다. 1525 nm 에서 1565 nm 의 레이저 출력이 시간대역에서 출력되므로 FBG 센서에 반사되어 광검출기에서 측정되는 신호 또한 시간 대역에서 파장 출력으로 나타내어 진다. Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 WNFL 의 개략도이다. 그림에서 WNFL 은 빛의 흐름이 일정한 한 방향으로만 진행하는 링 레이저이다.

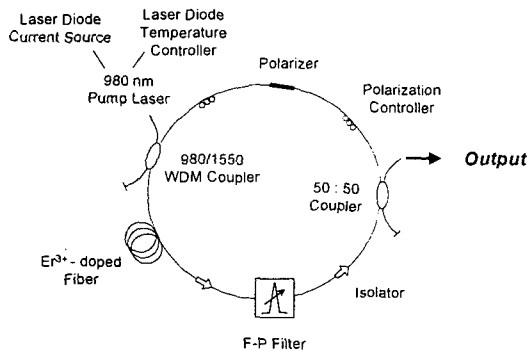


Fig. 1 Configuration of wavelength-swept fiber laser

980 nm 의 펌프 레이저로 어븀 첨가 광섬유를 펌핑하고 어븀 첨가 광섬유의 출력이 가변 패브리-페로 필터를 지나게 된다. 레이저의 출력이 한 방향으로만 흐르게 하기 위해서 아이솔레이터를 부착하였고 편광 축을 하나 제거하기 위한 편광자와 그 앞 뒤로 편광축을 조절하기 위한 편광 조절기가 레이저 내부에 들어가 있다. 패브리-페로 필터에 삼각파 형태의 가능한 주파수의 변조 전압을 가할 경우 약 40 nm 의 파장 대역에서 레이저 출력을 얻게 된다. 본 연구에서는 280 Hz 의 삼각파 형태의 변조 전압으로 패브리-페로 필터를 가진하였다.

WNFL 의 레이저 출력은 광분할기를 통해서 두 개의 센서 어레이로 입사되어 진다. FBG 센서 어레이의 개략도를 Fig. 2 에 나타내었다.

두 센서 어레이에 온도 보상을 위한 두 개의 기준 FBG 센서를 삽입하였다. 센서 어레이 1 에는 1529.44 nm 의 FBG 를 기준 센서로 한 5 개의 센서를, 어레이 2 에는 1532.47 nm 의 FBG 를 기준으로 4 개의 센서를 배치하였다. 또한 1 nm 간격을 가지는 패브리-페로 에탈론을 센서 어레이에 삽입하여 필터의 비선형성[3]을 해결하였다.

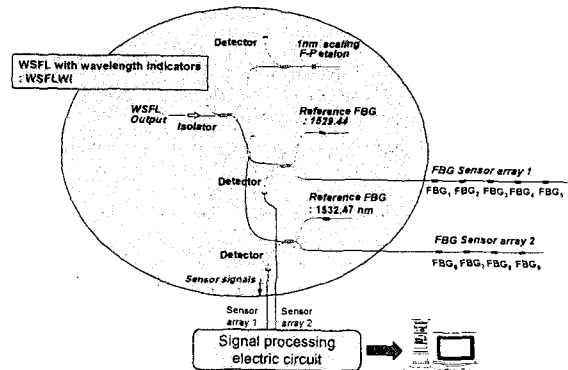


Fig. 2 Configuration of the Bragg grating sensor array

3. FBG 센서 어레이의 실시간 신호처리

실시간 신호처리를 위한 외부회로

앞에서 설명한 바와 같이 센서의 신호는 시간 축에서 빛의 파장이 연속적으로 출력된다. 두 개의 센서 어레이에서 얻어진 센서 신호를 Fig. 3 에 나타내었다.

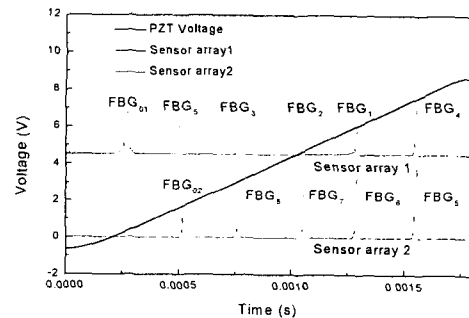


Fig. 3 Signals of two sensor arrays

그림에서 280 Hz 로 가진하고 있는 삼각파에 대응하여 센서 어레이의 신호를 나타내었다. 센서의 신호는 브래그 파장에서 피크의 형태로 나타내어 진다.

센서의 신호처리를 위해서 각 센서의 피크를 검출한 다음 피크의 위치 변화를 측정한다면 센서 신호로부터 변형률 및 온도의 변화를 측정할 수 있다. 본 연구에서 실제 사용된 방법은 OP amp 를 이용해서 신호를 미분한 다음 그 신호를 비교기를 이용하여 미분한 전압이 0 V 를 지날 때 디지털 펄스(rising edge from 0 V to 5 V)를 발생시키는 것이다. 또한 일정한 삼각파의 기울기가 양인 경우에만 센서 신호가 필요하므로 삼각파를 미분한 다음 센서 신호와 AND Gate 를 이용하여 처리하였다. 이러한 외부 회로를 이용하여 센서 어레이의 신호

를 처리하였고 회로에 의해서 처리된 센서 신호를 Fig. 4 에 나타내었다.

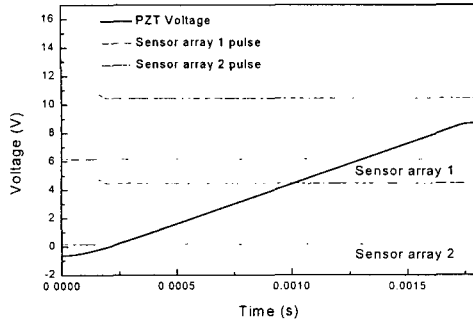


Fig. 4 Processed signals by electric circuit

그림에서 보면 센서의 피크에서 디지털 신호가 발생한 것을 알 수 있다. 이렇게 변환된 신호를 20 MHz 의 속도를 가지는 카운터를 사용하여 디지털 신호 사이의 간격을 재고 이 것을 컴퓨터로 전송한다.

실시간 신호처리 프로그램

20 MHz 카운터에 의해 측정된 숫자는 센서의 피크 사이의 간격을 의미한다. 기준 FBG 센서로부터 측정된 숫자를 더하고 그 수를 1 nm 패브리-페로 에탈론 신호에 비교할 경우 각 센서의 피크에서 파장을 알 수 있다. 모든 센서에서 온도 변화가 없다는 가정 하에 변형률과 FBG 센서의 파장 변화 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{1}{(1-p_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (1)$$

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2)$$

여기서 p_e 는 0.225 의 값을 가지는 광탄성 상수로서 실험적으로 결정된다.

카운터에 의해 측정된 수를 패브리-페로 에탈론 신호에 비교하여 파장을 계산하고 그로부터 변형률을 계산하고 그래프로 출력하여 주는 윈도우 프로그램을 Labview 소프트웨어를 이용하여 제작하였다. 제작된 프로그램은 모든 과정을 실시간으로 처리하며 10 μ s 미만의 변형률 해상도를 가졌다. 측정된 변형률 해상도는 FBG 센서마다 약간씩 다르게 측정되었는데 센서마다 피크에서 날카로운 정도가 달라서 미분하는 과정에서 에러가 발생한 것으로 생각된다. 실시간으로 다섯 지점의 변형률

을 계산하고 그 선도를 출력하는 것을 Fig. 5 에 나타내었다.

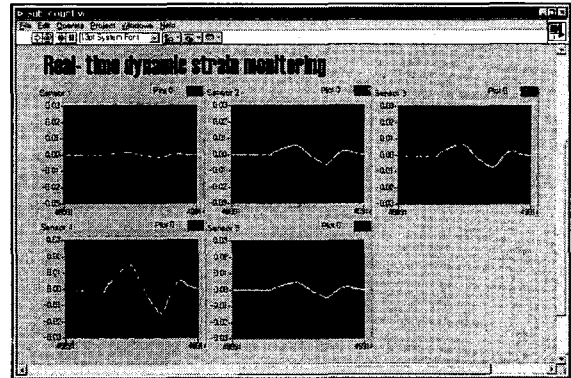


Fig. 5 Real time strain monitoring window

4. 복합재 보의 모드 형상 측정

구조물의 모드 형상을 측정하는 것은 주파수 응답함수를 사용하는 모달 테스트에 의해 측정된다. 여기서 주파수 응답함수는 구조물의 가진하는 입력과 구조물에서 얻어지는 출력 사이의 주파수 영역에서 전달 함수이다. 모드 형상을 측정하기 위해서는 측정하려는 지점에서의 주파수 응답함수가 필요한데, 입력점을 고정시키고 구조물의 출력을 측정하는 지점을 바꾸어 가며 측정하는 방법과 측정 점을 고정시키고 입력점을 바꾸어 가며 측정하는 방법이 있다. 이렇게 얻어진 각 지점에서의 주파수 응답함수를 비교하면 구조물의 모드 형상을 결정할 수 있다.

다점 측정이 가능한 FBG 센서의 장점을 이용할 경우 한 지점에서 구조물을 가진시키고 여러 지점에서 동시에 변형률을 측정하는 것이 가능하고 따라서 여러 지점의 주파수 응답함수를 동시에 구할 수 있게 된다. 이것은 기존의 센서를 여러 지점에 부착할 경우 가능한 것이나 센서와 전기적인 배선 등의 증가로 구조물의 운용 중에 사용하기에는 실용적이지 않다. 이에 반해 FBG 센서는 한 라인에 여러 개의 센서를 심는 것이 가능하므로 항공기 운용 중 실시간으로 여러 지점의 변형률을 측정하는 데 효과적이며 또한 질량 집중현상이 없으므로 정확한 측정이 가능하다.

앞에서 설명한 WSFL 을 광원으로 하고 2 개의 FBG 센서 어레이, 총 9 개의 FBG 센서를 Fig. 6 와 같이 $[0_2/90_5]_s$ 의 적층각을 가지는 복합재 보에 부착하고 충격 망치로 보를 가진한 후 실시간으로

아홉 지점의 변형률을 측정하였다.

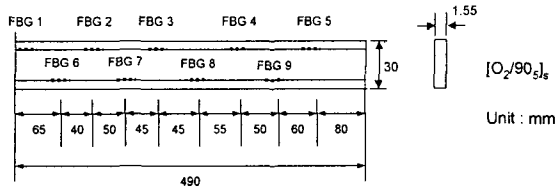


Fig. 6 Configuration of the specimen for free-vibration test

측정된 변형률을 주파수 영역으로 변환하면 복합재 보의 고유 진동수를 얻을 수 있고 각 모드마다 크기를 비교하면 복합재 보의 모드 형상을 얻을 수 있다. 패브리-페로 필터를 삼각파를 가진하는 주파수가 280 Hz 이므로 나이키스트 주파수에 의해서 140 Hz 까지 측정되게 된다.

실험에서 얻은 결과와 비교할 해석 결과를 얻기 위해서 사용 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 해석을 수행하였다. 실험과 해석에서 얻어진 고유 진동수 및 변형률 모드 형상을 다음의 Table 1 과 Fig. 7 에 나타내었다.

Mode	Experiment	Analysis
1 st	7.72 Hz	7.93 Hz
2 nd	47.85 Hz	49.68 Hz
3 rd	134.12 Hz	139.07 Hz

Table 1. Natural frequencies of a composite beam

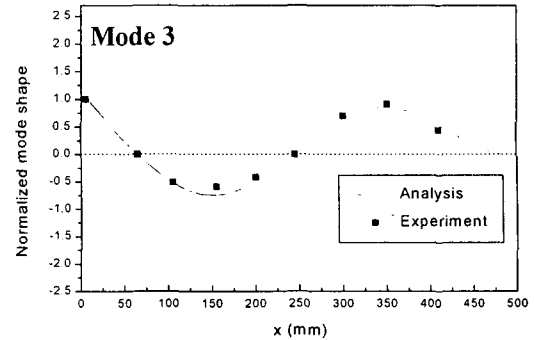
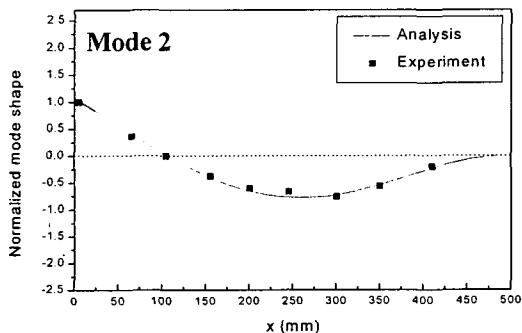
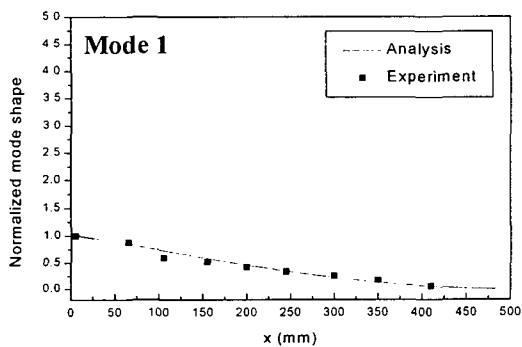


Fig. 7 Normalized strain measured mode shaped of a composite beam

실험에서 측정된 고유 진동수와 모드 형상 해석 결과와 대체로 잘 일치하며 오차의 원인은 부정확한 경계조건 및 부정확한 물성치 그리고 센서 위치의 오차에 따른 이유로 생각된다.

5. 결론

과장 이동 광섬유 레이저를 광원으로 하는 광섬유 센서 시스템에서 실시간 신호처리를 위한 외부 전기 회로와 실시간 처리 프로그램을 제작하였다. 제작된 시스템은 10 μm의 변형률 해상도를 가졌고 140 Hz 까지 동적 변형률을 측정할 수 있었다. 광섬유 센서 시스템을 이용하여 복합재 보의 고유 진동수 및 모드 형상을 측정하였고 이는 해석 결과와 잘 일치한다. 이러한 광섬유 센서 시스템을 이용해 복합재 구조물의 운용 중 실시간으로 고유 진동수 및 모드 형상의 변화를 측정할 수 있는 가능성을 확인 하였고, 이는 구조물의 파손 진단에도 적용될 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 특정연구 과제(96-0200-05-01-3)로 수행한 것이며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) G. Meltz, "Overview of Fiber Grating-Based Sensors", SPIE, Vol. 2838, 1996, pp. 2-22.
- (2) S. H. Yun, D. J. Richardson and B. Y. Kim, "Interrogation of Fiber Grating Sensor Arrays with a Wavelength-Swept Fiber Laser", Opt. Lett., Vol. 23, No. 11, 1998, pp. 843-845.
- (3) C. S. Hong, C. Y. Ryu and C. G. Kim, Proceeding. Of ICCM-12, Paris, France, 1999.