

# 광섬유 변형률 센서를 이용한 구조물의 동적 변형 추정

## Dynamic Deformation Estimation of Structures Using Fiber Optic Strain Sensors

강 래 형\* · 김 대 관\* · Stephan Rapp\*\* · Horst Baier\*\* · 한 재 흥†

Lae-Hyong Kang, Dae-Kwan Kim, Stephan Rapp, Horst Baier and Jae-Hung Han

(2006년 10월 2일 접수 ; 2006년 11월 21일 심사완료)

Key Words : Fiber Bragg Grating Sensor(광섬유 브래그 격자 센서), Displacement Estimation(변위 추정), Displacement-strain Transformation(변위-변형률 변환), Modal Approach(모드 접근법)

### ABSTRACT

In this study, structural deformation estimation using displacement-strain relationship is investigated. When displacements of a structure cannot be measured directly, estimation of displacements using strain data can be an alternative solution. Additionally, the deformation of the whole structure as well as the displacement at the point of interest can be estimated. Strain signals are obtained from Fiber Bragg Grating(FBG) sensors that have an excellent multiplexing ability. Some experiments were performed on two beams and a plate to which FBG sensors were attached in the laboratory. Strain signals from FBG sensors along a single strand of optical fiber were obtained through wavelength division multiplexing(WDM) method. The beams and the plate structures were subjected to various loading conditions, and deformed shapes were reconstructed from the displacement-strain transformation relationship. The results show good agreements with those measured directly from laser sensors. Moreover, the whole structural shapes of the beams and the plate were estimated using only some strain sensors.

### 1. 서 론

구조물의 변형 형상 측정을 위해 일반적으로 변위 센서를 사용한다. 하지만, 구조물의 운용 환경에 따라서 변위 센서를 고정하여 사용할 수 없는 경우가 존재한다. 예를 들면, 항공기가 지상에 있을 경우에는 날개 처짐을 레이저 변위 센서 등 변위계로 측정하는 일은 쉬운 일이지만, 항공기가 비행 중에는 이런 날개의 변형을 측정하는 것은 매우 어려운 일이

된다. 이 외에도 풍력발전기나 헬리콥터의 블레이드와 같이 회전하는 구조물이나 가공 중인 공작기계, 닫혀진 공간에서 구조물이 동작하는 경우와 같이 변위 센서를 장착하지 못하는 경우를 쉽게 찾을 수 있다. 이런 경우, 구조물의 변형 형상 및 진동을 추정하기 위해서 변위 센서 대신 구조물에 부착 가능한 변형률 센서를 사용하는 방법을 고려할 수 있다. 측정된 변형률 신호는 변위-변형률간의 변환 관계식을 이용하여 변위를 추정하는 데 사용할 수 있다.

이 연구에서는 구조물의 고유한 변위 모드 형상과 변형률 모드 형상을 이용하여 구조물의 변형 및 진동을 추정하였다. 이러한 변위-변형률간의 변환 관계식을 이용한 모드 접근법은 관심 주파수 영역의 저차 모드를 조합하여 전체 구조물의 거동을 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 축약 모델을 사용하기 때문에

† 책임저자 ; 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과  
E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr

Tel : (042)869-3723, Fax : (042)869-3710

\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\* Technical Univ. of Munich, Institute of Lightweight Structures

계산시간이 짧은 장점이 있다.

보와 평판의 변형을 측정을 위하여 다점 측정이 용이한 광섬유 브래그 격자<sup>(1)</sup> (fiber bragg grating, FBG) 센서를 사용하였다. FBG 센서로부터 측정되는 변형을 신호는 앞서 언급한 변위-변형을 변환 관계식을 통해 구조물의 변위 신호로 변환되며 이때 추정된 변위 값을 레이저 변위계를 이용해 측정된 변위 값과 서로 비교하였다.

## 2. 광섬유 브래그 격자 센서

광섬유 브래그 격자 센서는 코어(core)의 주기적인 굴절률 변화를 이용하며 Fig. 1과 같은 구조와 특성을 보인다.

브래그 격자에 광대역 광을 입사시키면 굴절률이 변하는 경계면에서 빛을 반사시키게 되는데 이들 중 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 해당하는 파장  $\lambda_B$ 의 빛은 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 이 외에 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. 따라서 이를 이용하면 하나의 광섬유에 반사 파장이 다른 여러 개의 센서를 동시에 제작할 수 있다.

$$\lambda_B = 2n_c \Lambda \quad (1)$$

여기서  $n_c$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률로써 빛이 광섬유 브래그 격자의 한 주기를 진행할 때의 평균 굴절률을 나타내며,  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.

식 (1)에서 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이며 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형률 등 외란이 가해지면 브래그 파장이 바뀌게 된다.

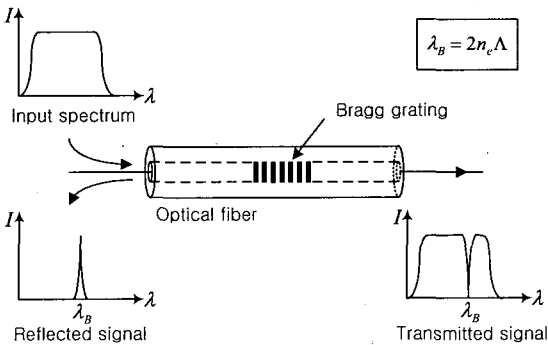


Fig. 1 FBG sensor wavelength-encoding operation

바꾸어 말하면, 변화된 브래그 파장  $\Delta\lambda_B$ 를 측정함으로써 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \quad (2)$$

여기서  $p_e$ 는 광탄성 상수이며 다음과 같이 표현된다.

$$p_e = \left( \frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

식 (2)에서  $\alpha_f$ 는 광섬유의 열팽창 계수이고  $\xi_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수이다. 또 식 (3)에서  $p_{11}$ 과  $p_{12}$ 는 스트레인 광학 텐서의 성분이며,  $\nu$ 는 광섬유의 푸아송 비(Poisson's ratio)이다. 식 (2)에서 센서에 가해지는 온도의 변화가 없다( $\Delta T = 0$ )고 가정하면 식 (2)는 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하면 FBG를 변형률 센서로 사용할 수 있으며 수식에서 알 수 있듯이 변형률은 파장의 변화량을 정확히 측정하면 구할 수 있다.

이 연구에서는 하나의 광섬유에 1536.4 nm, 1540.6 nm, 1547.1 nm, 1551.6 nm의 각기 다른 중심파장을 가지는 FBG 센서를 제작하였으며, 광대역 광을 입사시켰을 때 투과된 빛의 강도를 Fig. 2에 나타내었다.

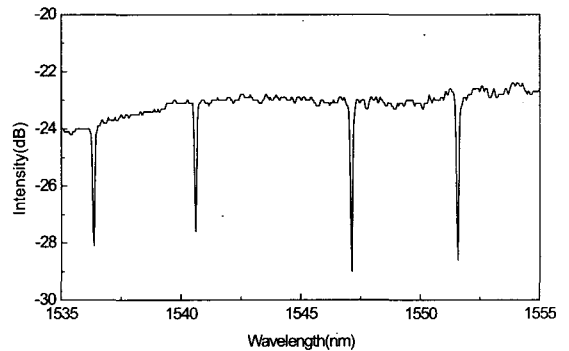


Fig. 2 Transmitted signal of the fabricated FBG sensors

### 3. 변위-변형률 변환 관계식

#### 3.1 변위-변형률 변환 관계식의 구성

구조물은 연속적 시스템이므로 무한한 자유도를 가지게 된다. 그러나 무한한 자유도를 표현하는 것은 불가능하므로 이산적인 형태의 유한한 자유도로 구조물의 거동을 모사한다. 이러한 유한한 자유도를 가진 시스템은 유한한 모드로 표현 가능하므로 행렬로 수식화가 가능하다. 만일 유한한  $N$ 개의 모드로 구조물의 형상을 모사한다면 유한한  $N$ 개의 모드 벡터를 얻게 된다. 이러한  $N$ 개의 모드 벡터를 이용하여 임의의 주파수에서의 변위 행렬  $\{d\}$ 와 변형률 행렬  $\{s\}$ 를 아래와 같이 모드 행렬과 모드 좌표의 곱으로 나타낼 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$\{d\} = [\Phi_N] \{\eta_N\} \quad (5)$$

$$\{s\} = [\Psi_N] \{\eta_N\} \quad (6)$$

여기서,  $[\Phi_N]$ 는 변위 모드 행렬,  $[\Psi_N]$ 는 변형률 모드 행렬,  $\{\eta_N\}$ 는 모드 좌표 행렬이다. 식 (6)에서 수식을 모드 좌표에 관해 정리하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\{\eta_N\} = ([\Psi_N]^T [\Psi_N])^{-1} [\Psi_N]^T \{s\} \quad (7)$$

이를 식 (5)에 다시 대입하면 최종적으로 식 (8)과 같이 변위 행렬, 변위-변형률 변환 행렬, 변형률 행렬로 구성된 식을 얻게 된다.

$$\{d\} = [\Phi_N] ([\Psi_N]^T [\Psi_N])^{-1} [\Psi_N]^T \{s\} \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 변형률을 측정하면 변위를 알아낼 수 있다. 이 연구에서는 변위 및 변형률 모드 형상을 MSC/NASTRAN을 사용하여 해석적으로 구하였으며, 이를 토대로 변위-변형률 변환 행렬을 구성하였다.

#### 3.2 변위-변형률 변환 관계식의 특성

변위-변형률 변환 관계식은 사용하는 모드 개수, 센서의 개수, 센서의 위치에 따라 다양하게 구성될 수 있다. 따라서 변위 추정을 보다 정확하게 하기 위한 변환 관계식의 조건을 알아볼 필요가 있다.

#### (1) 사용 가능한 모드 개수 선정

식 (8)에서  $([\Psi_N]^T [\Psi_N])^{-1} [\Psi_N]^T$ 의 계수(rank)는 사용한 센서 개수를 초과할 수 없다. 즉, 사용하는 FBG 센서의 개수에 따라 최대 사용 가능한 모드 수가 결정된다. 센서 개수는 센서 시스템이 측정할 수 있는 파장 범위 내에서 서로 간섭을 주지 않는 범위로 제작 가능한 FBG 센서의 수로 제한되는데 이 연구에서는 4개의 위상 마스크(phase mask)를 사용하여 센서를 제작하였다. 제작된 센서를 바탕으로 사용할 수 있는 최대의 모드 개수로 변형 형상을 추정하였다.

#### (2) 센서 위치 선정

센서의 위치는 Li 등<sup>(3)</sup>이 사용한 최소 조건 수(minimum condition number)를 기반으로 선정하였다. 최소 조건 수는 추정한 변위와 측정 변위와의 오차가 일반적으로 낮은 결과를 가져다주었다. 즉,  $[\Phi_N]([\Psi_N]^T [\Psi_N])^{-1} [\Psi_N]^T$ 으로 표현되는 변위-변형률 변환 행렬의 최소 조건 수를 구함으로써 센서 위치를 결정할 수 있다. 보다 최적화된 센서 위치에 대한 연구는 향후 수행 과제이다.

### 4. 변위 추정 실험

알루미늄 보, 아크릴 보, 아크릴 평판 구조물을 사용하여 변위 추정 실험을 수행하였다. 변형률을 측정하기 위해 사용된 FBG센서의 파장 변화는 FIBERPRO사의 IS7000<sup>(4)</sup>을 이용하여 측정하였다. 이 장비는 WSLF(wavelength swept fiber laser, 파장 이동 광섬유 레이저)을 내장하고 있어 다점측정에 용이하지만 최대 샘플링 주파수가 200 Hz로 제한되어 있다.

실험에 사용된 시편은 중력의 영향으로 인한 처짐을 피하기 위해서 지면과 수직으로 지그에 고정시켜 모드 실험을 수행하였다. 임팩트 해머와 레이저 도플러 진동계(laser doppler vibrometer)를 사용한 충격 시험을 통하여 구조물의 고유 진동수를 얻었다. 시편의 치수를 결정할 때 IS7000의 샘플링 주파수를 고려하여 2차 고유 진동수가 30 Hz 이하로 되도록 설계하였다.

#### 4.1 알루미늄 및 아크릴 보의 변위 추정

실험에 사용된 알루미늄 시편과 아크릴 시편의 물

성치를 Table 1에 나타내었다. 제작된 시편에 대해 해석적으로 구한 고유 진동수와 실험적으로 구한 고유 진동수를 Table 2에 비교하였다.

최소 조건 수로부터 센서 위치를 결정하였으며, FBG 센서는 알루미늄 보의 고정단으로부터 각각 30 mm, 37.5 mm, 114 mm, 184.5 mm 떨어진 부분에 부착되었고, 아크릴 보의 고정단으로부터 각각 80 mm, 100 mm, 304 mm, 492 mm 떨어진 지점에 부착되었다. 전체 실험 장비 구성은 Fig. 3과 같다.

Table 1 Properties of the beam structures

Cantilever beam structure		
	Aluminum beam	Acryl beam
Length( $L$ ):	0.3 (m)	0.8 (m)
Width( $b$ ):	0.025 (m)	0.04 (m)
Thickness( $h$ ):	0.00049 (m)	0.01 (m)
Young's modulus( $E$ ):	$7.1 \times 10^{10}$ (Pa)	$3.9 \times 10^{10}$ (Pa)
Density( $\rho$ ):	2710 (kg/m <sup>3</sup> )	1160 (kg/m <sup>3</sup> )

Table 2 Natural frequencies of the beam model

Mode no.	Natural frequency (Hz)			
	Aluminum beam		Acryl beam	
	Exp.	Analysis	Exp.	Analysis
1	4.50	4.47	4.43	4.63
2	28.02	28.04	29.59	29.00
3	78.71	78.51	84.24	81.21
4	154.4	153.9	168.4	159.1

보 실험의 경우는 보를 고정하고 있는 기저(base) 부분이 가진기에 연결되어 있기 때문에 보의 변위 뿐 아니라 기저의 변위도 측정하여야 한다. 이렇게 동시에 변위를 측정함으로써 기저의 변위에 대한 상대적인 보의 변위를 측정할 수 있다.

우선 알루미늄 보를 이용한 변위 추정 실험을 수행하였다. Table 1에서 나타난 바와 같이 알루미늄 보의 두께가 매우 얇게 설계되었는데, 변위 추정시 실제 측정값보다 큰 변위를 얻게 되었다. 이는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 광섬유 센서의 단면 지름이 구조물의 두께에 비교해 볼 때 무시할 수 없기 때문이라고 생각하고 보정상수  $\alpha$ 를 도입하여 이 문제를 해결하고자 하였다.

이때 보정상수는 FBG 센서에서 측정되는 변형을 알루미늄 보의 표면에서 예상되는 변형을 값으로 바꾸어주는 역할을 하며 Fig. 4를 토대로 구한 보정상수 값은 0.6622(0.245/0.37)였다. 식 (8)에서 이 보정상수를 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{d\} = [\Phi_N]([\Psi_N]^T[\Psi_N])^{-1}[\Psi_N]^T(\alpha\{s\}) \quad (9)$$

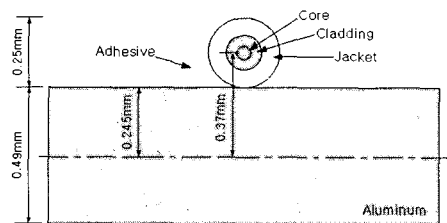


Fig. 4 Distance between the FBG sensor and neutral surface of the beam

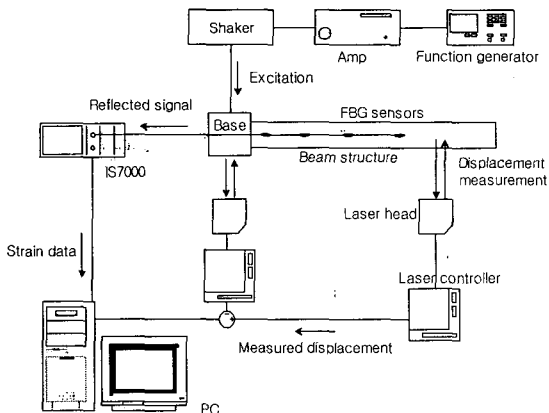


Fig. 3 Schematic of the beam test setup

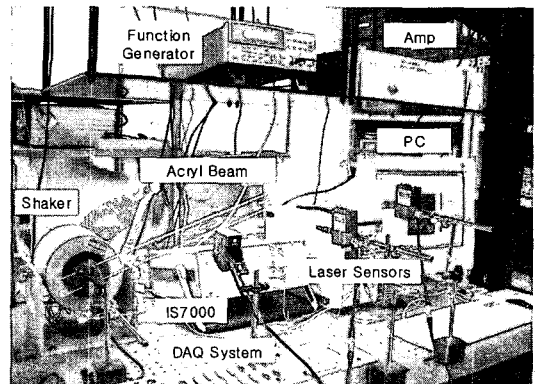


Fig. 5 Photograph of the experimental setup

광섬유 센서의 크기로 인한 영향을 없애고 보정상수를 사용하지 않기 위하여 두꺼운 아크릴 보를 제작하였다. 이 시편은 Table 1과 2에서 보듯 알루미늄 보에 비해 두꺼우면서도 고유 진동수가 낮도록 설계가 되었다. Fig. 5에 전체 실험 장비 및 시편을 나타내었다.

가진기를 통해 구조물을 가진시킨 후 변형 추정 실험을 수행하였다. 알루미늄 보와 아크릴 보에 대한 변위 측정 결과와 추정 결과를 비교하여 Fig. 6과

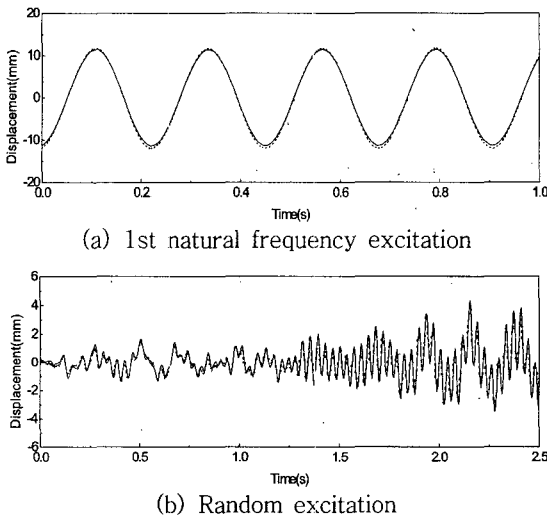


Fig. 6 Displacement measurement results at 290 mm (aluminum beam)

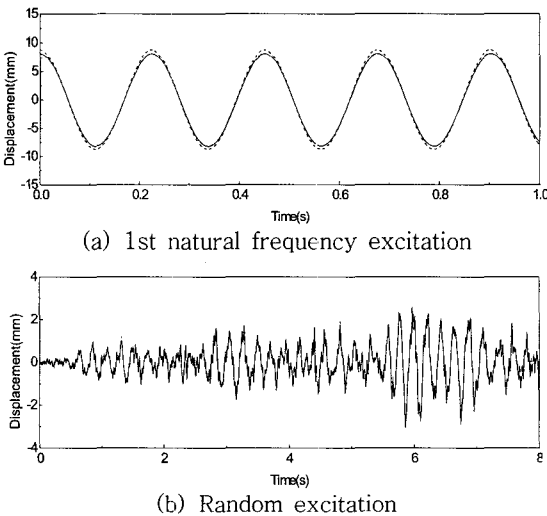


Fig. 7 Displacement measurement results at 700 mm (acryl beam)

Fig. 7에 나타내었다. 여기서 실선은 변형률로부터 변위를 추정한 값이고, 점선은 레이저 변위 센서로 측정한 값이다.

측정한 변위와 추정된 변위의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 구조물의 전체 변형 형상 또한 추정이

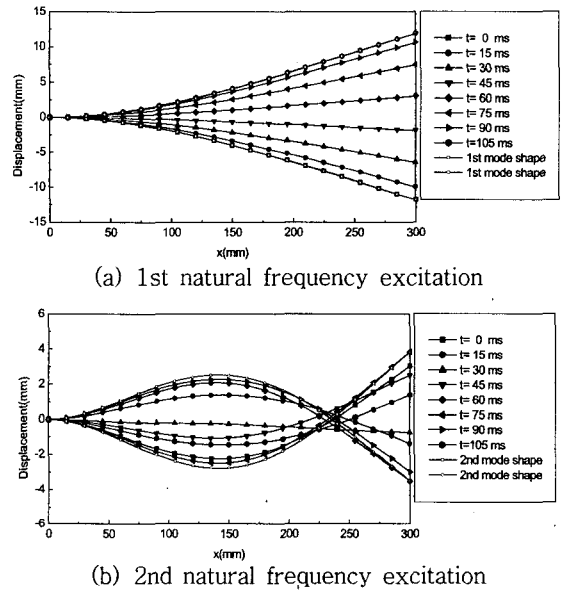


Fig. 8 The estimated deformation of the aluminum beam structure

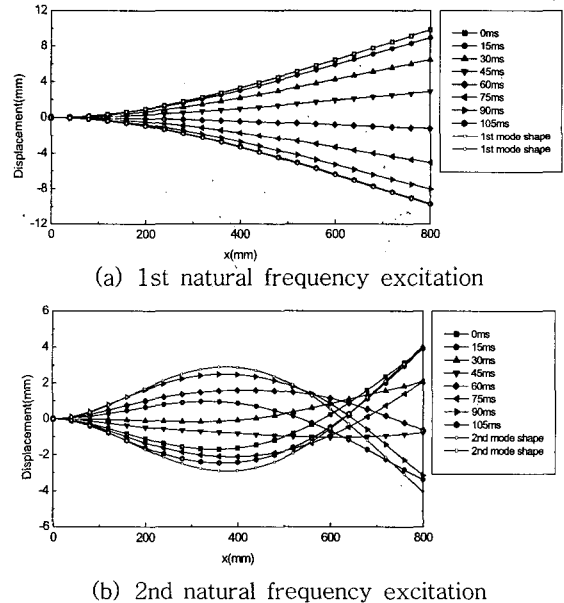


Fig. 9 The estimated deformation of the acryl beam structure

가능한데 1차와 2차 고유 진동수로 보를 가진한 경우에 대해서 시간에 대한 형상 변화를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 구조물의 형상이 각 고유 모드 형상과 유사함을 볼 수 있고 아크릴 보의 경우에는 재료 특성상 감쇠의 영향이 커서 2차 모드 가진시에 노드점이 시간에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 아크릴 평판의 변위 추정

보 구조물 외에도 아크릴 평판을 제작하여 변위추정 실험을 수행하였다. 전체 실험 구성도를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었으며 제작된 평판의 치수 및

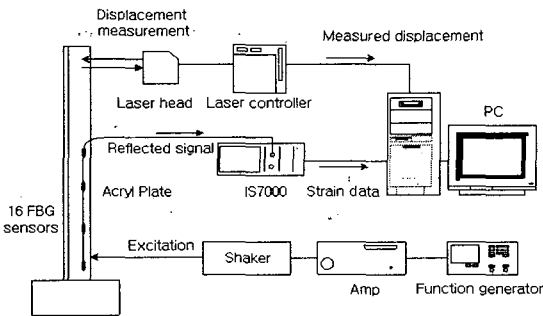


Fig. 10 Schematic of the plate test setup

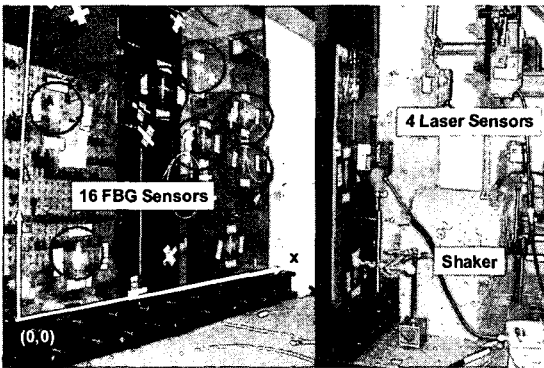


Fig. 11 Photograph of the acrylic plate with 16 FBGs

Table 3 Properties of the acrylic plate

Length ( $L$ ):	0.6 (m)
Width ( $b$ ):	0.9 (m)
Thickness ( $h$ ):	0.00835 (m)
Young's modulus ( $E$ ):	$3.9 \times 10^{10}$ (Pa)
Density ( $\rho$ ):	1160 ( $\text{kg/m}^3$ )

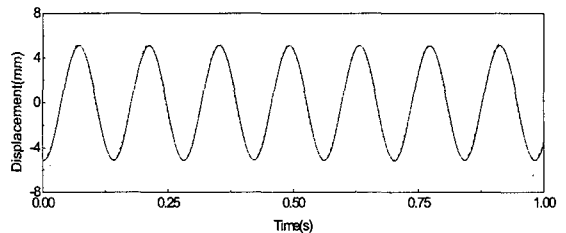
물성을 Table 3에 표시하였다.

평판의 3차 고유 진동수가 30 Hz 미만이 되게 설계를 하였으며 평판의 고유 진동수를 측정된 결과와 해석한 결과를 Table 4에 비교하였다.

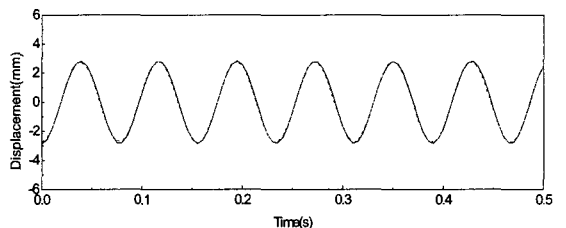
제작된 변형률 센서는 하나의 광섬유에 4개의 FBG 센서가 새겨져 있다. 이런 광섬유를 4채널로 IS7000에 연결하면 16개 지점의 변형률을 측정할 수 있다. 16개의 센서를 평판에 십자 형태로 부착하였으며 레이저 변위 센서를 사용하여 네 곳 - (30 mm, 390 mm), (30 mm, 570 mm), (330 mm, 390 mm), (330 mm, 570 mm) - 의 변위를 측정하였다. 이 중 (30 mm, 570 mm) 지점에서 측정된 변위와 추정된 변위를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 실선이 추정한 변위, 점선이 측정된 변위를 나타낸다. 평판의 전체 거동을 살펴보기 위하여 1차와 2차 고유 진동수로 구조물을 가진한 경우의 평판 전체 변형 형상을 Fig. 13에 나타내었다. \*로 표시된 곳이 실제 변위를 측정된 값을 나타낸다. 1차

Table 4 Natural frequencies of the acrylic plate

Mode no.	Natural frequency (Hz)	
	Exp.	Analysis
1	7.14	7.13
2	12.84	13.03
3	31.09	29.41

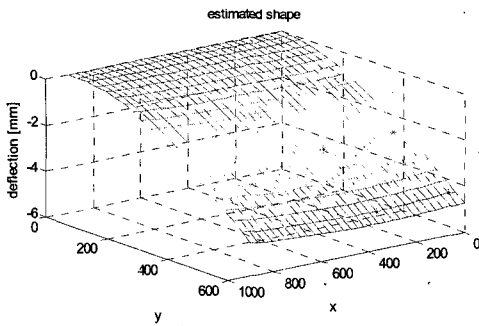


(a) 1st natural frequency excitation

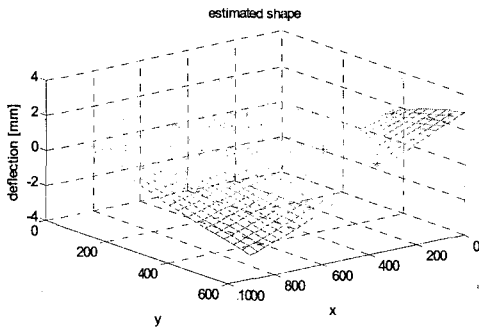


(b) 2nd natural frequency excitation

Fig. 12 Displacement measurement results



(a) 1st natural frequency excitation



(b) 2nd natural frequency excitation

Fig. 13 The estimated deformation of the acrylic plate

모드 가진시는 굽힘 모드, 2차 모드 가진시에는 비틀림 모드 형상이 나타남을 볼 수 있고 측정 변위값과 추정 변위값도 잘 일치함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 구조물의 운용 조건에 의해 직접적으로 변위를 측정하지 못하는 경우에도 변형률 센서를 사용하여 구조물의 변위를 추정하는 기법에 대해 소개하였다. 변위는 변형률과 서로 독립적인 관계가 아니므로 변위와 변형률의 관계를 알면 변형률 측정을 통하여 변위를 추정할 수 있다. 이 연구에서는 변위 모드와 변형률 모드를 사용하여 변위-변형률 변환 관계식을 얻었으며 변형률은 광섬유 센서 중 다점 측정이 가장 용이한 FBG 센서를 사용하여 측정하였다. 이렇게 측정된 변형률을 변위-변형률 변환 행렬을 사용하여 보 및 평판 구조물의 전체 변형 형상을 추정하였으며, 추정된 전체 구조물의 변형 형상의 측정 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

이 연구의 가장 큰 장점으로서는 적은 수의 변형률

센서를 사용하여 구조물의 전체 형상 변화를 감지할 수 있다는 데 있다. 이 연구는 향후 직접적으로 변위를 측정할 수 없는 여러 분야에 적용되어 구조물의 변형 형상을 알아냄으로써 구조물의 건전성 평가나 제어에도 이용 가능할 것이다.

### 후 기

이 논문은 2006년도 두뇌한국 21 사업과 ASEM-DUO 프로그램 지원에 의해 수행되었으며, 광섬유 센서 및 시스템을 지원해주신 한국과학기술원 항공우주공학과 김천교 교수님께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Kim, D.-H., Han, J.-H., Yang, S.-M., Kim, D.-H., Lee, I., Kim, C.-G. and Hong, C.-S., 2002, "Optimal Vibration Control of a Plate Using Optical Fiber Sensor and Piezoelectric Actuator", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 294~301.
- (2) Foss, G. C. and Haugse, E. D., 1995, "Using Modal Test Results to Develop Strain to Displacement Transformation", IMAC, Vol. 1, pp. 112~118.
- (3) Li, C.-J. and Ulsoy, A. G., 1999, "High-precision Measurement of Tool-tip Displacement Using Strain Gauges in Precision Flexible Line Boring", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 13, pp. 531~546.
- (4) <http://www.fiberpro.com/products/pdf/IS7000.pdf>
- (5) Pisoni, A. C. and Santolini, C., 1995, "Displacements in Vibrating Body by Strain Gauge Measurements", IMAC, Vol. 1, pp. 119~125.
- (6) Bogert, P. B., Haugse, E. and Gehrki, R. E., 2003, "Structural Shape Identification from Experimental Strains Using a Modal Transformation Technique", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 7~10.