

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.3.241>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 보 구조물의 3차원 형상 추정

이진혁* · 김현영** · 김대현****

* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원, ** 서울과학기술대학교 대학원 기계공학과,
*** 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Three-Dimensional Shape Estimation of Beam Structure Using Fiber Bragg Grating Sensors

Jin-Hyuk Lee*, Heon-Young Kim** and Dae-Hyun Kim****

* Graduate School of Energy and Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

** Dept. of Mechanical Engineering, Graduate Schools of Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

*** Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received June 10, 2014 ; Revised January 15, 2015 ; Accepted January 22, 2015)

Key Words: Fiber Bragg Grating Sensor(FBG 광섬유 브래그 격자 센서), 3-Dimensional Shape Estimation(3차원 형상 추정), Structural Health Monitoring(SHM 구조물 건전성 감시), Composite Structure (복합재료 구조물)

초록: 교량이나 배관과 같이 긴 길이의 구조물은 처짐 및 변형이 발생하기 쉽다. 이러한 구조물의 건전성 감시를 위해서는 국부적인 물리량 측정뿐만 아니라 전체의 형상 감시가 필요하다. 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG) 센서는 광섬유에 다수의 센서 적용이 가능하여 대형 구조물 감시에 효과적이다. 본 연구에서는 FBG를 이용하여 구조물의 다점에서 변형률을 측정하고, 이를 바탕으로 구조물 전체의 형상 추정을 위한 연구를 수행하였다. 구조물의 정확한 감시가 가능하도록 3차원의 형상 추정을 연구하고 실험적 검증을 수행하였다. 실험 결과 구조물의 변형에 따른 형상 변화의 추정이 가능함을 확인하였고, 추가로 특정 위치에서의 처짐량을 실제 마이크로미터로 측정한 값과 예측된 값을 비교하여 검증하였다.

Abstract: Deflection and deformation occur easily in structures with long length, such as bridges and pipelines. Shape monitoring is required for ensuring their structural health. A fiber Bragg grating (FBG) sensor can be used for monitoring a large-scale structure because of its advantage of multiplexing. In this study, FBG sensors were used for monitoring a composite beam structure, and its strains were measured at multiple points. Thereafter, a shape estimation technique based on the strains was studied. Particularly, a three-dimensional shape estimation technique was proposed for accurate structural health monitoring. A simple experiment was conducted to verify the performance of the shape estimation technique. The result revealed that the estimated shape of the composite beam structure was in agreement with the actual shape obtained after the deformation of the specimen. Additionally, the deflection at a specific point was verified by comparing the estimated and actual deformations measured using a micrometer.

- 기호설명 -

λ_B : 브래그 파장

n_e : 브래그 격자 유효 굴절률

A : 브래그 격자 간격

p_e : 광탄성 상수

α_f : 열팽창 계수

ξ_f : 열광학 계수

† Corresponding Author, dkim@seoultech.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- ϵ : 변형률
 r : 구조물 곡률 반경
 θ : 구조물 곡률 각도
 α : 구조물의 곡률 중심과 단면 축 사이 각도

1. 서론

사회 기반 시설이나 플랜트 설비에는 교량이나 철도와 같은 기반시설과 가스, 유류 수송, 해저 매설 배관 등 다양한 파이프라인과 같은 길이가 매우 긴 형태의 구조물이 다양하게 존재 하며 높은 안전성이 요구된다. 이러한 구조물은 단면적에 비해 길이가 긴 형태이고 단일 구조물을 연결하여 매우 긴 길이를 가지는 특징을 보인다. 이는 구조적으로 자중에 의한 처짐이나 외력에 의한 변형이 발생하기 쉽게 된다. 따라서 교량, 철도, 배관 등의 구조물의 안전성 감시를 위해 스트레인게이지 기반의 변형률 감시, 가속도계를 이용한 구조물의 진동 감시, GPS 변위센서를 이용한 구조물의 처짐 등 다양한 연구와 적용이 지속적으로 수행되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 기존의 감시 기법은 대부분 전자기기 기반의 센서 또는 단일 변수 측정 센서를 적용하고 있다. 대형 구조물의 감시를 위해서는 많은 지점의 물리량 측정이 필요하나 기존에 적용된 센서는 다수 지점에서 동시에 적용하기에는 한계가 있다. 특히, 전자기기 기반 센서는 물이나 습기에 약하고, 전자기노이즈 영향 등으로 외부 환경에 노출되어 있거나 전자기노이즈가 심한 대형 플랜트 구조물에 적용하는데 한계가 있다. 그리고 대형 구조물의 안전성을 확보를 위해서는 단순한 변형률, 진동 측정이 아닌 구조물 전체의 상태 감시 기법이 요구된다. 최근에는 길이가 길거나 면적이 넓은 항공기, 풍력 발전기, 자동차, 철도 등 다양한 구조물에 복합재료의 적용이 증가하고 있다. 복합재료는 금속재료에 비해 요구되는 강도 대비 매우 가벼운 구조물의 제작이 가능한 장점을 가진다. 이러한 복합재료 구조물의 감시를 위해서는 센서의 무게가 구조물에 영향을 미치는 점 등을 고려한 적용 및 감시 방법이 요구된다.^(4,5)

광섬유 기반 센서는 다양한 종류가 있으며, 기본적으로 장거리 신호 송신이 가능하고 전자기노이즈에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 이에 따라, 송전선의 감시,⁽⁶⁾ 철도레일의 감시,⁽⁷⁾ 교량의 감시⁽⁸⁾ 등 긴 길이의 구조물 감시를 위한

연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 광섬유는 단면 직경이 매우 작고 가벼운 특징으로 복합재료의 부착뿐만 아니라 구조물 내부에 삽입하여 구조물의 상태 측정이 가능하여 이를 기반으로 스마트구조물의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG) 센서는 한 라인의 광섬유에 다수의 센서를 구성하기 용이하고 다양한 물리량의 측정이 가능하여 구조물의 다 지점의 다 변수 측정에 매우 유리하기 때문에 대형 구조물에 적용 연구가 증가하고 있다.^(4,5,9)

최근에는 구조물의 단순 변형이나 진동 감시가 아닌 긴 길이의 구조물에 발생하기 쉬운 처짐 또는 변형을 감시하기 위해 변형률 측정 기반 구조물 형상 추정 연구가 교량과 복합재료의 적용이 많은 풍력발전 블레이드 등을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.^(8,9) 그러나 변형률 기반의 구조물 감시 연구는 대부분 처짐의 추정을 위해 1차원 또는 2차원에 국한되어 구조물의 한 방향 변형감시에 국한되어 있다. 또 일부 연구에서는 내시경 등의 끝 점의 위치 추정을 위하여 3차원 구조물의 형상 추정 연구⁽¹⁰⁻¹²⁾가 수행되고 있으나 아직 전체 구조물의 형상 추정 정밀도는 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 처짐, 변형 등이 발생하기 쉬운 긴 길이의 구조물의 감시를 위해 다수의 FBG를 복합재료 구조물에 적용하여 다 지점의 변형률 측정하고 이를 바탕으로 구조물의 3차원 형상 추정 연구를 수행하였다. 실험적 검증을 통해 FBG 센서를 이용한 복합재료 구조물의 형상 추정과 정밀한 변형량의 측정이 가능함을 확인하였다.

2. 광섬유 브래그 격자 센서

광섬유의 코어에 일정한 간섭무늬를 형성하면 굴절률의 변화가 발생한다. 이러한 간섭무늬는 브래그 격자의 역할을 하게 되며 이는 빛의 특정 반사 현상을 일으키게 된다. 이러한 원리는 Fig. 1에서 확인할 수 있으며, 이 격자에 광대역의 파장을 입사하면 간섭무늬의 브래그 조건에 의해 특정 파장성분이 보강 간섭을 일으키며 반사되고 나머지 파장 성분은 통과하게 된다. 브래그 조건은 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

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

여기서, n_e 는 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다.

위의 브래그 조건에서 보듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다.

브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분을 취한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식 (2)를 얻을 수 있다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 스트레인을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

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

식 (2)에서 파장의 변이는 온도의 변화에 의한 것과 변형률의 변화에 의한 것을 모두 포함하고 있다. 일반적으로 구조물에서 근접한 센서들간의 온도 차이가 없는 상태에 국한시키면 식 (2)에서 $\Delta T = 0$ 으로 둘 수 있고 다음의 식 (3)과 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다.^(4,5,13)

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

그러므로 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구할 수 있다. 또 브래그 격자는 광대역 파장의 빛을 입사하였을 때, 특정 영역의 파장을 반사시키고 나머지 파장영역의 빛은 통과시킨다. 이러한 원리로 브래그 격자의 중심

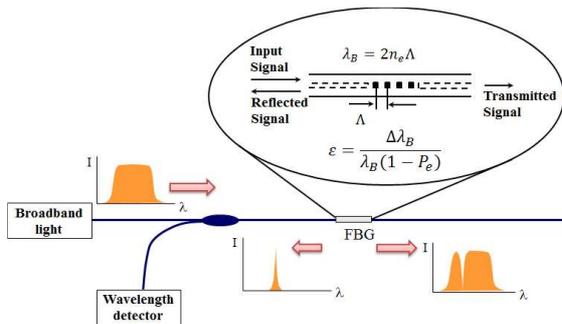


Fig. 1 Principle of FBG and characteristic of reflected signal

파장을 서로 다르게 하여 변형을 받을 때도 브래그 반사 파장이 중첩되지 않도록 구성하면 하나의 광섬유에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열하여 다점의 변형을 측정을 할 수 있게 된다.

3. 변형률 기반 구조물 형상 추정 이론

구조물의 형상은 각 지점의 곡률의 연속되는 값으로 표현할 수 있다. 구조물에 처짐이나 외력으로 인한 변형이 발생하게 되면 이는 곡률의 변화로 나타나게 된다. 즉, 구조물의 곡률을 연속적으로 도출하면 전체 형상의 추정 및 변형의 감시가 가능해진다. 제안된 FBG 센서를 이용하여 구조물의 표면의 변형률을 측정하고 이를 변형률과 곡률의 관계로 도출하면 최종적으로 구조물의 처짐 또는 형상을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 단면이 원 형태인 구조물의 형상을 추정하고자 한다. 이때, 구조물의 형상을 3차원으로 표현하기 위해서는 3축 방향으로 구조물의 변형에 대한 정보가 요구된다. 이에 따라 아래 Fig. 2와 같이 시험편에 3줄의 광섬유 센서를 적용하여 다축 방향에서 변형 정보를 수집할 수 있도록 구성한다. 구조물의 형상에 따른 곡률로 인해 3줄의 광섬유에서 발생하는 변위와 곡률의 작은 Fig. 3과 같이 표현된다. 이때, 원형구조물의 단면에서 일정한 각도를 유지하여 광섬유를 배열하면 광섬유의 위치와 x, y, z의 좌표의 관계는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

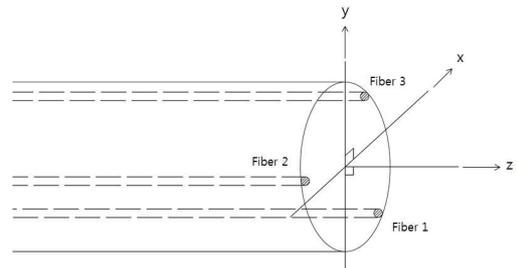


Fig. 2 Composition of optical fibers in cylindrical bar⁽¹²⁾

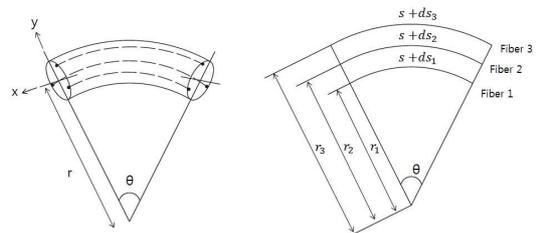


Fig. 3 Parameters of fibers on curvature⁽¹²⁾

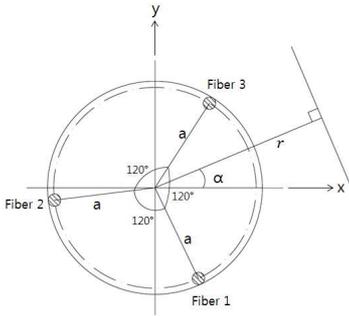


Fig. 4 Cross-section geometry of fibers in cylinder⁽¹²⁾

단면의 중심축의 곡률 반경이 r 이고, 곡률각 θ , 곡률의 중심과 x 축 사이의 각을 α 라 하면 단면의 x , y , z 좌표는 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= r(1 - \cos\theta)\cos\alpha \\ y &= r(1 - \cos\theta)\sin\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

$$z = r\sin\theta$$

곡률의 각 θ 는 Fig. 3의 기하학적 관계로부터 다음의 식 (5)와 같이 변형률의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{s + ds_1}{r_1} = s \left(\frac{1 + ds_1/s}{r_1} \right) \\ &= s \left(\frac{1 + \epsilon_1}{r_1} \right) = s \left(\frac{1 + \epsilon_2}{r_2} \right) = s \left(\frac{1 + \epsilon_3}{r_3} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 변형률 ϵ 의 값은 FBG 센서의 변형률 값으로 알 수 있다. 변형률을 측정하는 각 광섬유의 반경 r_1 , r_2 , r_3 의 값은 Fig. 4로부터 식 (6)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} r_1 &= r + a\sin\alpha \\ r_2 &= r + a\sin(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

$$r_3 = r + a\sin(\alpha - 120^\circ)$$

여기서, 120° 는 FBG 센서들이 서로 이루는 각도이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음의 식 (7)과 같이 변형률과 곡률의 반경으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} (1 + \epsilon_1)(r + a\sin(\alpha + 120^\circ)) &= (1 + \epsilon_2)(r + a\sin(\alpha)) \\ (1 + \epsilon_1)(r + a\sin(\alpha - 120^\circ)) &= (1 + \epsilon_3)(r + a\sin(\alpha)) \\ (1 + \epsilon_2)(r + a\sin(\alpha - 120^\circ)) &= (1 + \epsilon_3)(r + a\sin(\alpha + 120^\circ)) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 변형률을 상대 변형률과 응력의 관계 식으로 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{12} &= \epsilon_2 - \epsilon_1, \epsilon_{13} = \epsilon_3 - \epsilon_1, \epsilon_{23} = \epsilon_3 - \epsilon_2 \\ \sigma_1 &= 1 + \epsilon_1, \sigma_2 = 1 + \epsilon_2, \sigma_3 = 1 + \epsilon_3 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)을 대수학 식을 이용하여 정리하면, 식을 α 에 관한 식 (9)로 나타낼 수 있다. 또, 식 (8)을 식 (6)에 대입하면 곡률 반경 r 은 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tan\alpha &= \frac{\epsilon_{13}\sin 120^\circ + \epsilon_{12}\sin 120^\circ}{\epsilon_{23} - \epsilon_{13}\cos 120^\circ + \epsilon_{12}\cos 120^\circ} \\ &= \frac{\sqrt{3}\epsilon_3 + \sqrt{3}\epsilon_2 - 2\sqrt{3}\epsilon_1}{\epsilon_3 - \epsilon_2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$r = \begin{cases} \frac{a}{\epsilon_{12}} (\sigma_1 \sin(\alpha + 120^\circ) - \sigma_2 \sin(\alpha)) \\ \frac{a}{\epsilon_{13}} (\sigma_1 \sin(\alpha - 120^\circ) - \sigma_3 \sin(\alpha)) \\ \frac{a}{\epsilon_{23}} (\sigma_2 \sin(\alpha - 120^\circ) - \sigma_3 \sin(\alpha + 120^\circ)) \end{cases} \quad (10)$$

위와 같은 수식의 정리로부터, r 값, θ 값과 α 값을 구할 수 있고, 이를 식 (4)에 대입하여 최종적으로 센서가 위치한 배관 단면의 위치인 x , y , z 의 좌표값을 구할 수 있다.⁽¹²⁾

센서가 위치한 배관 단면의 위치를 구한 후 센서의 위치 정보를 이용하여 배관의 전체적인 형상을 추정할 수 있다. 이때, Polynomial Function Transform (n -1th order) 방법을 적용하면, 위치의 정보가 n 개일 때, 배관의 각 지점의 위치에 대한 함수는 다음 식 (11)과 같이 표현되며 이를 이용하여 배관 전체의 형상을 추정할 수 있다.

$$f(x, y, z) = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_2 & y_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & x_3 & y_3 & z_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x_n & y_n & z_n & 1 & \end{bmatrix} \quad (11)$$

4. 변형률 기반 구조물 형상 추정 실험

FBG 센서의 변형률을 이용하는 구조물의 형상 추정 알고리즘을 검증하고 유용성을 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

4.1 시험편 제작 및 실험 구성

구조물의 형상 추정 검증을 위한 시험편은 탄성이 높고 일정한 강도를 가져야 처짐 및 변형에 의한 파손 없이 검증 실험이 가능하다. 또 구조물에 적은 힘을 가하여 처짐 또는 변형이 발생할 수 있도록 유연성이 필요하다. 본 실험에서는 조건에 적합하도록 유리섬유강화플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastics; GFRP)을 시험편으로 사용하였다. 시험편의 외경은 4mm, 길이 1m의 중실 축 형태의 봉을 사용하여 단면에 비해 긴 길이를 갖도록 선정하였다. 시험편에 120° 간격의 일정한 각도로 미세한 홈을 가공하여 한 라인에 3개의 FBG 센서가 배열된 광섬유 3개 라인을 삽입하여 접합하였다. Fig. 5는 시험편의 단면 및 센서 부착 부를 보여준다. FBG 센서의 신호를 수집하고 변형률과 이를 기반으로 단면의 좌표를 계산하여 구조물의 형상을 도출하기 위한 신호처리 프로그램을 구현하였다. 신호처리 프로그램은 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 신호수집과 형상 및 단면의 좌표 값이 도출되도록 개발하였다. Fig. 6는 개발된 소프트웨어의 프론트패널과 알고리즘을 구현한 블록다이어그램을 보여준다.

형상 추정의 검증 실험은 다음과 같이 구성되었다. FBG 센서가 부착된 시험편은 외팔보 형태로 한쪽을 고정하였고 FBG 센서에 광대역 파장의 빛을 전송하고 반사되는 파장을 취득할 수 있는 광인터로게이터(FBG Interrogator, Micronoptics, SM-130), 센서의 값을 취득하고 신호처리를 위한 컴퓨터와 프로그램으로 구성되었다. 본 연구에서는 외부 변위에 의해 발생하는 형상의 변형량을 정확히 측정할 수 있도록 마이크로미터가 추가적으로 구성되었다. Fig. 7은 검증 실험의 구성을 보여준다.

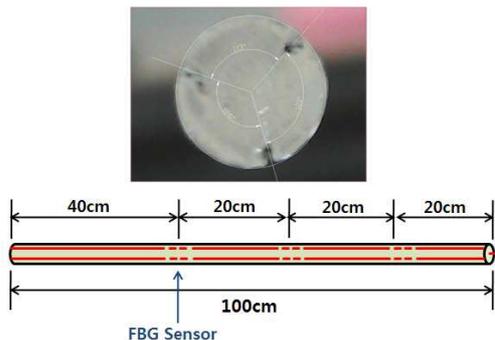
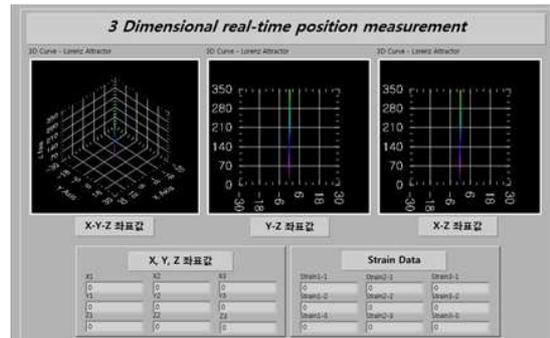


Fig. 5 Drawing and cross-section of specimen

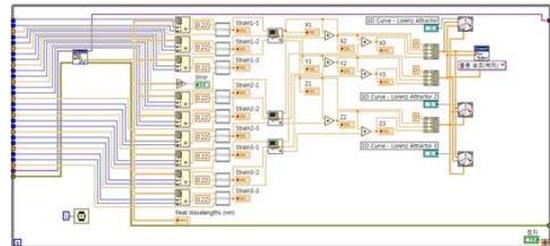
4.2 실험 결과

구조물의 형상 추정은 가해지는 외력의 방향과 크기에 따라 구조물에 발생하는 동일한 변형 방향과 크기가 추정되어야 한다. 시험편에 가해지는 외력에 따라 형상이 정확히 추정되는지 확인하기 위하여 시험편의 여러 지점에 각각 다른 방향의 힘을 가할 때 도출되는 형상을 확인하였다.

Fig. 8은 시험편의 다 지점에 외력이 가해질 때 도출된 형상을 보여준다. 실험 결과 외력에 의해 발생하는 변형이 힘의 방향과 크기에 따라 유사하게 추정됨을 확인할 수 있었다. 즉, 제안된 알고리즘을 통해 변형의 경향은 확실히 추정되는



(a) Front panel



(b) Block-diagram

Fig. 6 Signal processing soft-ware for shape estimation

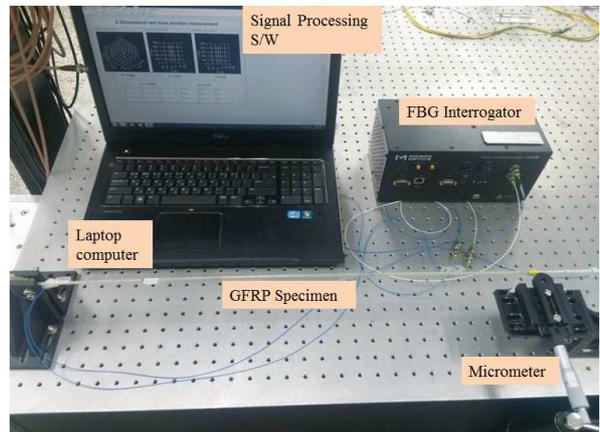


Fig. 7 Experimental set-up for verification test

것을 알 수 있다.

형상 추정의 보다 정밀한 검증을 위해 시험편에 정량적인 변위를 가하고 발생하는 처짐량을 추정하였다. 정량적인 처짐을 발생하기 위해 Fig. 7의 실험 구성에 보이는 마이크로미터를 이용하여 시험편에 정밀한 변위를 가하였다. 변형률 측정을 기반으로 추정되는 처짐량은 센서의 위치에

서 가장 정확하게 비교가 가능하다. 따라서 Fig. 9와 같이 시험편의 고정지점에서 550mm 떨어진 지점의 FBG 센서가 위치한 지점에 마이크로미터를 설치하여 시험편에 변위를 가하였다. 이때 마이크로미터는 x축 방향의 힘을 가하게 되고 이에 따라, y축과 z축의 좌표 값의 변화, 즉 변위는 발생하지 않는다.

Fig. 10은 마이크로미터를 이용하여 시험체에 1mm씩 변위를 가했을 때 측정된 처짐량을 보여 준다. 결과적으로, 형상 추정 기법을 이용하여 측정된 처짐량이 마이크로미터로 가해진 변위값과 잘 일치함을 확인하였다. 최종적으로 실험결과는 제안된 형상 추정 기법이 외력에 따라 시험편의 형상을 유사하게 추정할 수 있으며, 추정된 처짐량이 실제 가해지는 변위량과 정확히 일치함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 변형률을 이용한 구조물의 형상 추정 기법을 제안하였다. 이때 구조물의 변형률 센서로 구조물에 삽입과 다점 측정의 적용성이 높은 FBG 센서를 적용하였다. 형상 추정 구현을 위해 신호처리 프로그램을 개발하고 FBG 센서를 적용한 시험편을 이용하여 실험적 검증을 수행하였다. 실험 결과 본 연구에 적용된 형상 추정 기법이 구조물에 변형에 따른 형상을 추정하고 발생하는 처짐량을 정확히 측정할 수 있음을 확인하였다.

연구 개발된 광섬유 센서 기반 형상 추정 기법은 구조물의 매설 구조물, 내시경 등 구조물의 부피와 무게에 영향을 미치지 않고 형상 감시가 가능하여 변형률 센서 적용에 한계를 가지는 다양한 분야에 활용도가 높다. 또한 광섬유는 물과 같은 유체에 영향이 받지 않아 해저 배관이나 케이블의 변형 감시가 가능하고 수중로봇 테더(tether) 케이블의 형상 추정을 이용하여 로봇의 위치 추정 등의 다양한 수중환경 분야로 확대 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2007061).

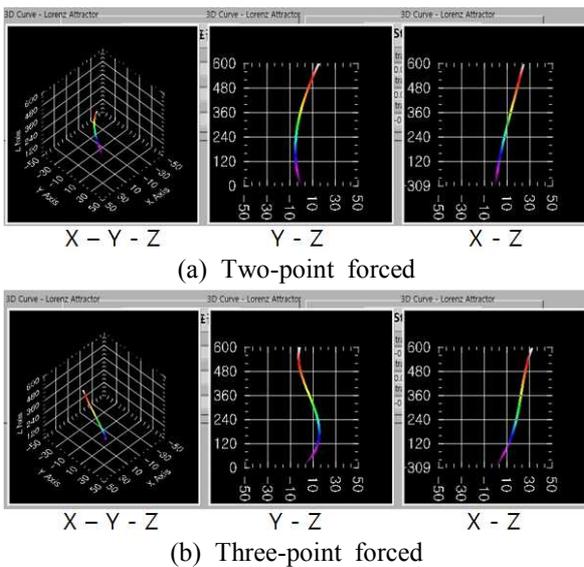


Fig. 8 Shape estimation result according to deformation of specimen

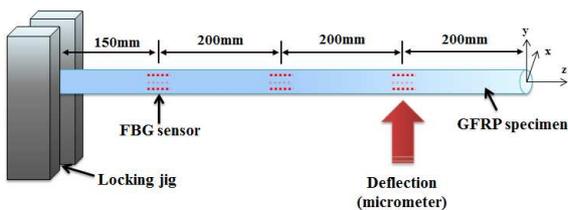


Fig. 9 Experimental set-up in detail to measure of deflections

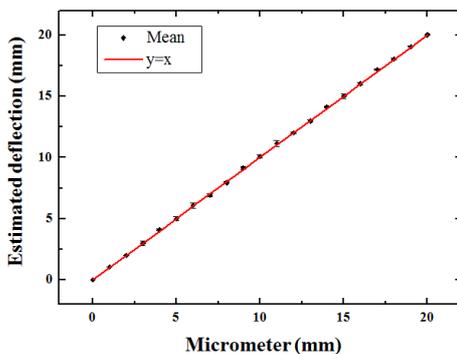


Fig. 10 Calculated displacement at contacted point with micrometer based on shape estimation technique

참고문헌
(References)

- (1) Chebrolu, K., Raman, B., Mishra, N., Valiveti, P. K. and Kumar, R., 2008, "A Sensor Network System for Railway Bridge Monitoring," *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 2~14.
- (2) Frangopol, D. M., Asce, F., Strauss, A. and Kim, S., 2008, "Bridge Reliability Assessment Based on Monitoring," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 258~270.
- (3) Moschas, F. and Stiros, S., 2011, "Measurement of the Dynamic Displacements and of the Modal Frequencies of a Short-Span Pedestrian Bridge Using GPS and an Accelerometer," *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 10~17.
- (4) Lee, K.-H. and Kim, D.-H., 2013, "Shape Monitoring of Composite Cantilever Beam by Using Fiber Bragg Grating Sensors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 7, pp. 833~839.
- (5) Kim, D.-H., 2009, "Experimental Analysis on Vibration of Composite Plate by Using FBG Sensor System," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 436~441.
- (6) Bjerkan, L., 2000, "Application of Fiber-Optic Bragg Grating Sensors in Monitoring Environmental Loads of Overhead Power Transmission Lines," *Optics*, Vol. 39, No. 4, pp. 554~560.
- (7) Tam, H. Y., Lee, T., Ho, S. L., Haber, T., Graver, T. and Méndez, A., 2007, "Utilization of Fiber Optic Bragg Grating Sensing Systems for Health Monitoring in Railway Applications," *Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1824~1831.
- (8) Casas, J. R., Cruz, P. J. S. and Asce, M., 2003, "Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 8, No. 6, pp. 362~373.
- (9) Kim, H.-I., Kang, L.-H. and Han, J.-H., 2011, "Shape Estimation with Distributed Fiber Bragg Grating Sensors for Rotating Structures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No.3, pp. 035011~035022.
- (10) Yi, X., Qian, J., Shen, L., Zhang, Y. and Zhang, Z., 2007, "An Innovative 3D Colonoscope Shape Sensing Sensor Based on FBG Sensor Array," *Proceedings of the International Conference on Information Acquisition*, pp. 227~232.
- (11) Abayazid, M., Kemp, M. and Misra, S., 2013, "3D Flexible Needle Steering in Soft-Tissue Phantoms Using Fiber Bragg Grating Sensors," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5843~5849.
- (12) Childers, B. A., Gifford, D. K., Duncan, R. G., Raum, M. T., Vercellino, M. E. and Froggatt, M. E., 2010, "Fiber Optic Position and Shape Sensing Device and Method Relating Thereto," U.S. Patent No. 7,781,724.
- (13) Kim, H.-Y., Kang, D., Lee, J.-H. and Kim, D.-H., 2013, "Characteristics of Thermal Coefficient of Fiber Bragg Grating for Temperature Measurement," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 999~1005.