

## 배관 변형 및 처짐 감시를 위한 광섬유 센서의 활용

# Application of Fiber Optic Sensors for Monitoring Deflection and Deformation of a Pipeline

이진혁\*, 김대현\*\*†

Jin-Hyuk Lee\* and Dae-Hyun Kim\*\*†

**초 록** 배관 구조물은 긴 길이를 가지며, 일정한 거리에 위치한 고정부에 설치되거나, 지중에 매설된다. 따라서 자중 또는 지반의 움직임으로 변형과 처짐이 발생하기 쉽다. 이러한 배관의 건전성 평가에는 형상 감시 기법이 매우 유용할 수 있다. 광섬유 브래그 격자 센서 (fiber Bragg grating, FBG)는 다중화의 장점이 있어 배관과 같이 긴 길이를 가지는 구조물의 여러 지점에서 변형률 측정에 매우 유용하다. 본 연구에서는 배관의 건전성 평가를 위하여 변형률 기반의 형상추정기법을 제안하였다. 제안된 기법의 유용성을 확인하기 위하여 실험을 통한 검증이 수행하였다. 실험 결과 제안된 FBG를 이용한 형상추정기법이 시험편의 변형에 따라 유사한 형상을 표현할 수 있음을 확인하였다. 또한, 형상추정기법을 통해 도출된 처짐량이 실제 배관에 가해진 처짐과 동일하게 계산됨을 확인하였다.

**주요용어:** 광섬유 브래그 격자, 형상 추정, 배관 변형 감시, 배관 처짐 감시, 구조 건전성 감시

**Abstract** Long pipe structures are usually installed in fixtures located with regular intervals or laid underground. Therefore, deflection and deformation could easily occur due to their weight or ground activity. A shape monitoring technique can be used effectively to evaluate the integrity of the pipe structures. Fiber Bragg grating (FBG) sensors, which have an advantage of multiplexing could be used to measure strains at multiple-points of a long structure. In this study, to evaluate the integrity of a pipeline, a shape estimation technique based on strain information was proposed. Furthermore, different experiments were conducted to verify the performance of the proposed technique. Thus, the proposed shape estimation technique can represent the shape according to the deformation of the specimen using the FBGs. Moreover, calculated deflection of the pipeline using the estimation technique showed a good agreement with the actual deflection of the pipeline.

**Keywords:** Fiber Bragg Grating (FBG), Shape Estimation, Deformation Monitoring of Pipe, Deflection Monitoring of Pipe, Structural Health Monitoring (SHM)

### 1. 서 론

배관은 단순한 기계부터 가정, 플랜트, 사회기반시설 등 매우 폭 넓게 사용되는 설비 구조물로 사용이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 플랜트 설비의 유류, 화학물질 등의 원료배관과 LNG 등 사회기반시설 배관의 위험도도 증가하고 있다. 이러한 배관은 파손 시 대형 사고

로 연결될 수 있고, 실제로 노후화에 따른 부식, 균열, 자체하중에 의한 처짐, 지반 및 설치 상태에 따른 변형 등 다양한 원인에 의한 파손 사례가 보고되고 있다[1-4]. 이에 따라 유도초음파를 이용한 원거리배관검사[5], 압력 측정을 통한 누설 감시[6] 등 배관 상태 감시를 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 대다수의 위험 배관은 단열 및 충격보호재가 설치되어 있거

[Received: October 12, 2016, Revised: November 15, 2016, Accepted: November 16, 2016] \*한국전력공사 전력연구원, \*\*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea (E-mail: [dkim@seoultech.ac.kr](mailto:dkim@seoultech.ac.kr))  
© 2016, Korean Society for Nondestructive Testing

나 지중에 매설되어 있어 상시감시를 위한 센서 시스템의 적용에 한계가 있다. 특히 지중 배관의 경우 지반 활동 등에 의한 영향으로 변형이 발생하기 쉽고, 이러한 변형은 배관 연결부인 플렌지, 밸브 등에서 누설을 발생시킬 수 있다 [4]. 따라서 센서의 적용이 어려운 보호재 적용 배관 및 매설배관의 효과적인 변형 감시 기술의 개발이 요구되는 실정이다.

광섬유 센서는 매우 작은 단면적으로 배관에 접합하여 보호재와 사이 층 또는 지중에도 설치가 가능하고 배관에 하중 등 영향을 주지 않아 매우 유용한 센서로 사용될 수 있다. 특히 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating, FBG) 센서는 온도, 변형률의 측정이 가능하고 하나의 광섬유 라인에 다수의 센서를 구성할 수 있어 긴 길이를 가지는 배관의 감시에 매우 적합하다 [7,8]. 최근에는 FBG 센서를 이용하여 다지점 변형률 측정을 통한 구조물 형상 추정을 위한 연구가 내시경 분야[9]와 복합재료 분야[10]에서 활발히 진행되고 있다. 선행연구에서 형상의 추정과 변형에 따른 형상 감시가 일정 부분 가능하나 정확한 처짐 등의 변형량 측정에 한계를 보인다. 또한 특정 구조물의 물성을 이용한 변형률-처짐 방정식을 기본으로 형상 감시 알고리즘을 도출하여 다양한 재료에 적용하는데 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 지반 활동 또는 설치 환경으로 변형이 발생하기 쉬운 배관의 상태 감시를 위하여 광섬유 센서를 이용한 변형 및 처짐 측정을 수행하였다. 배관의 다지점에서 변형률을 효과적으로 측정할 수 있도록 FBG 센서를 적용하였고, 기하학적 관계를 이용한 변형률 기반의 형상 감시 알고리즘을 도출하고 적용하였다. 배관 시험편의 변형 측정 실험을 통하여 배관의 형상 감시 및 처짐량 측정이 가능함을 확인하였다.

## 2. 광섬유 브래그 격자 센서의 원리

광섬유 브래그 격자 센서는 빛의 굴절률 변화를 이용한다. 광섬유의 코어에 굴절률의 변화가 발생하도록 일정한 격자를 형성시키면 빛의 특정 영역 파장이 반사하게 되어 이러한 특성을 이용하면 센서로 활용할 수 있다. 광섬유에 광대역의

파장의 빛을 입사하면 간섭무늬 영역에서 브래그 조건에 일부 파장 성분이 반사되고 나머지 성분은 통과한다. 반사 파장은 다음의 브래그 조건식(1)로 나타나게 된다.

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

여기서,  $n_e$ 는 코어 격자의 유효 굴절률이고  $\Lambda$ 는 격자의 간격(grating period)이다. 광섬유 브래그 격자에 온도 변화나 변형이 발생하는 등 격자 부분의 상태가 변화하게 되면 브래그 조건, 특히 격자의 간격이 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.

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

여기서,  $\alpha_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 열팽창계수이고,  $\xi_f$ 는 온도에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수,  $p_e$ 는 광탄성 상수이다. 식(2)에서 파장의 변이는 온도의 변화에 의한 것과 변형률의 변화에 의한 것을 모두 포함하고 있다. 정적인 온도 환경과 같이 센서에 인가되는 온도 차이가 없는 상태에 국한시키면 식(2)에서  $\Delta T = 0$ 으로 둘 수 있고 다음의 식(3)과 같이 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다.

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

하나의 브래그 격자에서는 브래그 조건에 따른 특정 파장의 빛이 반사되고, 다른 파장영역의 빛은 통과된다. 따라서 하나의 광섬유 라인에 브래그 조건이 다른 격자를 중첩되지 않도록 구성하고 광대역 파장의 빛을 입사하면 하나의 광섬유 라인의 여러 지점에서 서로 독립된 브래그 파장을 수신할 수 있다. 이러한 원리로 하나의 광섬유 라인과 다수의 브래그 격자를 이용하여 다 지점의 변형을 측정을 할 수 있게 된다[9,11].

## 3. 배관 형상 추정 알고리즘

배관의 형상은 연속적인 곡률로 표현할 수 있다. 배관의 처짐 등 형상의 변화가 발생하면 구

조물의 곡률의 변화로 나타낼 수 있다. 구조물의 곡률은 미소영역에서 기하학적 특성을 이용하면 변형률과의 관계식을 도출할 수 있다. 즉, 배관 각 지점의 변형률을 측정하고 이를 곡률로 변환하면 전체 형상과 변형 추정이 가능해진다. FBG 센서는 배관의 여러 지점에서 연속적으로 변형률 측정이 가능하고 이를 이용하여 최종적으로 배관의 형상을 추정할 수 있다.

배관의 3차원 형상을 표현하기 위해서는 구조물 변형에 대하여 최소 3축 방향 정보가 요구된다. 따라서 Fig. 1과 같이 배관에 FBG 센서가 내재된 3줄의 광섬유 라인을 적용하여 다축 방향에서 변형률을 측정하도록 구성할 수 있다. 이때 FBG 센서는 동일한 단면에서 일정한 사이 각도를 가져야 한다. 배관의 미소영역의 곡률과 변형률 관계는 Fig. 1과 Fig. 2에서와 같이 곡률 반경과 곡률각으로 표현할 수 있다. 최종적으로 광섬유 센서가 위치한 지점의  $x, y, z$ 의 좌표를 도출하고 이를 연속함수로 표현하면 배관 전체의 형상 추정이 가능해진다.

세부적인 변형률과 곡률의 관계식은 다음과 같이 도출할 수 있다. 단면의 중심축의 곡률 반경이  $r$ 이고, 곡률각  $\theta$ , 곡률의 중심과  $x$ 축 사이의 각을  $\alpha$ 라 하면 단면의  $x, y, z$  좌표는 다음의 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

곡률의 각  $\theta$ 는 Fig. 2의 기하학적 관계로부터 다음의 식(5)와 같이 변형률의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{s + ds_1}{r_1} = s \left( \frac{1 + ds_1/s}{r_1} \right) \\ &= s \left( \frac{1 + \varepsilon_1}{r_1} \right) = s \left( \frac{1 + \varepsilon_2}{r_2} \right) = s \left( \frac{1 + \varepsilon_3}{r_3} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 변형률  $\varepsilon$ 의 값은 FBG 센서의 변형률 값으로 알 수 있다. 변형률을 측정하는 각 광섬유의 반경  $r_1, r_2, r_3$ 의 값은 Fig. 2로부터 식(6)과 같이 유도된다. 이때,  $a$ 는 배관 중심으로부터 광

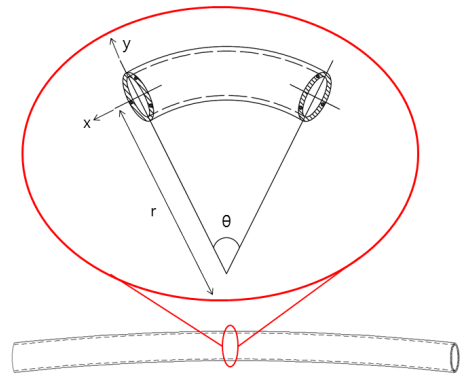


Fig. 1 Details of the geometric diagram about a curved pipe with fibers

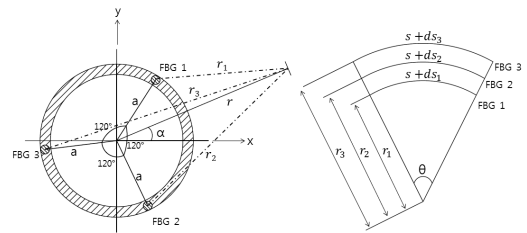


Fig. 2 Cross-section geometry and parameters of fibers on curvature

섬유 단면 중심까지 거리로 배관의 반지름과 약 125  $\mu\text{m}$  차이가 발생한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= r + a\sin\alpha \\ r_2 &= r + a\sin(\alpha + 120^\circ) \\ r_3 &= r + a\sin(\alpha - 120^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

식(5)의 변형률을 상대 변형률로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12} &= \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \\ \varepsilon_{13} &= \varepsilon_3 - \varepsilon_1 \\ \varepsilon_{23} &= \varepsilon_3 - \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)을 정리하면,  $\alpha$ 에 관한 식(8)로 나타낼 수 있다. 또, 곡률 반경  $r$ 은 식(9)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tan\alpha &= \frac{\varepsilon_{13}\sin 120^\circ + \varepsilon_{12}\sin 120^\circ}{\varepsilon_{23} - \varepsilon_{13}\cos 120^\circ + \varepsilon_{12}\cos 120^\circ} \\ &= \frac{\sqrt{3}\varepsilon_3 + \sqrt{3}\varepsilon_2 - 2\sqrt{3}\varepsilon_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$r = \begin{cases} \frac{a}{\varepsilon_{12}} (A_1 \sin(\alpha + 120^\circ) - A_2 \sin(\alpha)) \\ \frac{a}{\varepsilon_{13}} (A_1 \sin(\alpha - 120^\circ) - A_3 \sin(\alpha)) \\ \frac{a}{\varepsilon_{23}} (A_2 \sin(\alpha - 120^\circ) - A_3 \sin(\alpha + 120^\circ)) \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $A_1 = 1 + \varepsilon_1$ ,  $A_2 = 1 + \varepsilon_2$ ,  $A_3 = 1 + \varepsilon_3$  이다. 위와 같은 수식의 정리로부터,  $r$ 값,  $\theta$ 값과  $\alpha$  값을 구할 수 있고, 이를 식(4)에 대입하여 최종적으로 센서가 위치한 배관 단면의  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 의 좌표값을 구할 수 있다[12,13].

최종적으로 센서가 위치한 배관 단면의 좌표값과 각 센서의 위치 정보를 이용하여 다항식 함수 (polynomial function transform (n-1th order))를 적용하면 위치의 정보가  $n$ 개일 때, 각 지점의 위치에 대한 좌표함수를 구하여 전체적인 배관의 형상을 추정할 수 있다[13].

#### 4. 배관 형상 추정 실험

배관 형상 추정 알고리즘의 성능 검증을 위하여 기초적인 실험을 수행하였다.

##### 4.1. 형상 추정 실험 구성

형상 추정 검증을 실험실 환경에서 이를 구현하기 위해서 1 m 길이의 배관 시험편을 제작하였다. 가스배관 등 플랜트나 사회기반시설의 배관은 금속배관이 주로 적용되어 있으나 처짐 및 변형을 구현하기에 금속배관의 경우 한계가 있어 탄성이 높고 변형이 가능한 아크릴 재질의 길이 1 m, 외경 15 mm, 두께 2 mm 배관을 시험편으로 적용하였다.

배관의 3차원 형상 추정을 위한 배관의 단면을 기준으로 3개소 이상에서 변형률을 측정하여야 한다. 또한 변형률 측정 지점이 많을수록 여러 방향의 다지점 변형을 반영한 형상 추정이 가능하고 정확한 처짐량의 도출에 유리하다. 이에 따라 배관에 3줄의 광섬유 라인을 일정한 각도의 위치에 부착하기 위하여 배관에  $120^\circ$  간격으로 미세한 홈을 가공하고 각 라인별로 5개의 FBG (gage length: 5 mm)를 동일 간격(175 mm)으로

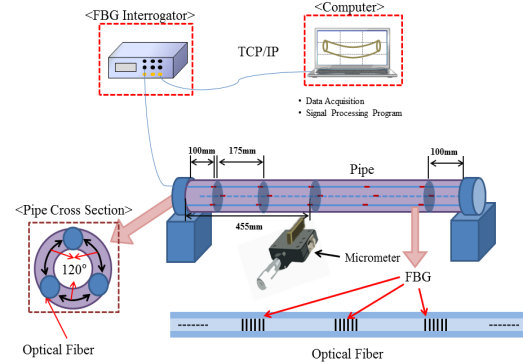


Fig. 3 Schematic diagram of the shape-estimation test

제작하여 배관에 부착하였다. 그리고 양단 고정 지그와 FBG의 간격은 140 mm 이다.

배관의 형상 추정을 위해서는 시험편과 센서의 신호를 측정하기 위한 FBG 인터로게이터 (SM-130, Micron Optics) 및 형상 추정 알고리즘을 기반으로 형상을 표현할 수 있는 프로그램으로 구성하였고, 세부적인 구성은 Fig. 3과 같다. 이때, 배관은 실제 환경에서와 같이 양단을 고정하였고, 배관의 처짐 및 변형 추정을 위해 시험편에 정밀한 외력을 가할 수 있도록 마이크로미터를 이용하여 실험을 구성하고 변형을 가하는 실험을 수행하였다.

##### 4.2. 형상 추정 실험 결과

형상 추정 알고리즘은 가해지는 외력의 방향과 크기가 일치하는 결과가 도출되어야 한다. 배관 시험편의 임의의 지점에서 다양한 방향으로 변형을 가했을 때 추정 결과를 확인하였다.

이때, 변형에 대한 알고리즘의 형상 추정 속도와 형상 모사 결과를 정성적으로 확인하기 위한 실험을 우선 수행하였다. Fig. 4는 시험편의 3번째와 4번째 센서 위치부의 중간 지점에 하중이 가해진 경우와 양단 고정부에서 약 300 mm 이격된 지점에서 다른 방향의 하중이 가해진 경우의 결과를 보여준다. 형상 추정 알고리즘이 배관의 변형을 힘의 방향에 따라 유사하게 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

형상 추정 결과의 정량적 검증을 위하여 마이크로미터를 이용한 정밀한 변형을 인가하고 추정되는 처짐량을 확인하였다. 마이크로미터는 배관의 변형 발생이 가장 용이한 중간지점의 FBG 센

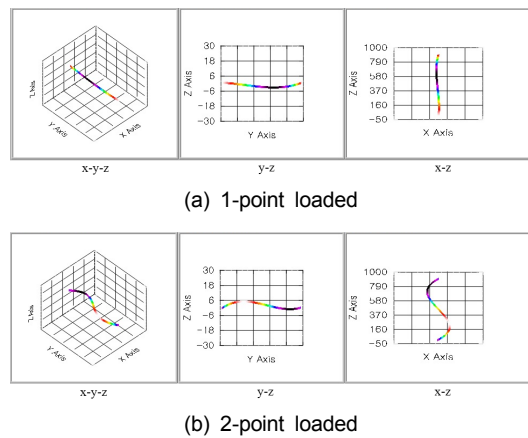


Fig. 4 Shape estimation results based on the deformation of the specimen (unit: mm)

Table 1 Result of the measured deflection (unit: mm)

Loaded Displacement	Calculated Deflection
0.50	0.50
1.00	1.02
1.50	1.53
2.00	2.04
2.50	2.55
3.00	3.06

서 부착지점(양단 고정부에서 455 mm 지점)에 위치시키고 0.5 mm씩 최대 3.0 mm까지 길이 변화를 주어 배관시험편에 일정한 처짐을 발생시켰다. 실제 인가된 변형과 측정된 처짐량은 Table 1에서 확인할 수 있다. 형상 추정 알고리즘으로 도출된 처짐량이 마이크로미터로 가해진 변형값과 오차 범위 5% 이내로 계산될 수 있음을 확인하였다.

제한된 배관 형상추정기법을 통한 배관의 변형과 처짐의 감시가 가능함을 확인할 수 있고, 정확도 있는 변형량을 계산할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구는 배관 형상 감시를 위한 광섬유 센서의 적용과 변형률 기반 형상 추정 알고리즘 적용을 제안하였다. FBG 센서를 이용한 배관 형상 감시가 가능함을 확인하였으며 세부적으로 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) FBG 센서를 이용하여 배관의 다지점 변형을 동시 측정이 가능함을 확인하였다.

- 2) 기하학적 함수를 이용하여 양단 고정 구조물의 변형률과 구조물의 형상의 관계식을 도출하였고, 이를 통해 전체적인 배관 구조물의 형상 추정이 가능함을 확인하였다.

- 3) 또한 도출된 형상 추정 알고리즘이 처짐 등의 실제 배관의 변형량을 정량적으로 계산할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 1지점의 변형에 따른 처짐량을 도출하였다. 2지점 이상의 처짐량은 변형 인가를 위한 기구부의 구성과 별도의 3차원 처짐 측정 시스템의 구축을 통해 정밀한 검증을 수행할 예정이다. 또한 실제 현장 조건을 고려하여 금속 배관의 변형 추정 연구와 긴 길이의 구조물 변형 추정 연구를 수행하여 실제 배관 구조물 감시에 활용할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] H. A. Kishawy and H. A. Gabbar, "Review of pipeline integrity management practices," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 87, No. 7 pp. 373-380 (2010)
- [2] R. Ahmad and T. Kundu, "Structural health monitoring of steel pipes under different boundary conditions and choice of signal processing techniques," *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2012, ID 813281 (2012)
- [3] Z. Liu, and Y. Kleiner, "State-of-the art review of technologies for pipe structural health monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1987-1992 (2012)
- [4] Y. W. Ma, J. Y. Kim, K. B. Yoon and Y. D. Jo, "A study on accidents of buried pipeline crossing river," *Journal of Korean Institute of GAS*, Vol. 14, No. 6, pp. 51-56 (2010)
- [5] A. K. Panda, P. K. Sharan, R. K. Roy, G. V. S. Murthy and A. Mitra, "Generation and detection of guided waves in a defective pipe

- using rapidly quenched magnetostrictive ribbons," *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, ID 045015 (2012)
- [6] S. Chen, Y. Sun, L. Wang, P. Chen, and D. Tan, "Development on dynamic pressure monitoring method and sensor for long pipeline leak detection," In 2008 7th International Pipeline Conference, pp. 457-459 (2008)
- [7] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta, and D. K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – Present status and applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147, No 1, pp. 150-164. (2008)
- [8] H. Y. Kim, D. Kang, and D. H. Kim, "Reliability evaluation of fiber optic sensors exposed to cyclic thermal load," *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 36, No. 3 pp. 225-230 (2016)
- [9] M. Abayazid, M. Kemp and S. Misra, "3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber Bragg grating sensors," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5843-5849 (2013)
- [10] H. I. Kim, L. H. Kang and J. H. Han, "Shape estimation with distributed fiber Bragg grating sensors for rotating structures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 3, pp. 035011-035022 (2011)
- [11] J. H. Lee and D. H. Kim. "Cure monitoring of epoxy resin by using fiber Bragg grating sensor," *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 3, pp. 211-216 (2016)
- [12] J. H. Lee, H. Y. Kim and D. H. Kim. "Three-dimensional shape estimation of beam structure using fiber Bragg grating sensors." *Transactions of the KSME A*, Vol. 39, No. 3, pp. 241-247 (2015)
- [13] B. A. Childers, D. K. Gifford, R. G. Duncan, M. T. Raum, M. E. Vercellino and M. E. Froggatt, "Fiber optic position and shape sensing device and method relating thereto," *U.S. Patent*, No. 7, 781,724 (2010)