

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 근육 상태 감시 시스템

Muscular Condition Monitoring System Using Fiber Bragg Grating Sensors

김현영*, 이진혁**, 김대현***†

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

초 록 광섬유센서는 전자파 무간섭, 부식 방지, 다중화 등의 장점들을 갖고 있어 다양한 상태 감시 시스템을 위한 연구에 많이 활용되고 있다. 본 논문에서는 광섬유센서 기반의 인체 근육 상태 감시 시스템을 제안한다. 상용화되어 있는 인체 상태 감시 센서는 전자기 기반의 센서가 대부분이다. 이는 전자기 간섭 및 왜곡의 우려가 있어, 이를 보완하고 장치의 간소화 및 사용자 편의성을 위해 광섬유 브래그 격자센서를 사용하였다. 근육 상태의 지표가 되는 근육 수축 및 이완을 측정하기 위해 원주방향으로의 운동 감시가 가능한 벨트 형태의 광섬유 브래그 격자센서 모듈을 제작하였다. 그리고 광섬유 브래그 격자센서 모듈의 적용성 평가를 위해 단축 인장시험을 수행하였다. 실험 결과 인장 크기에 따른 브래그 파장 변화가 상호 연관성을 보였으며, 이를 통해 브래그 격자센서 기반의 근육 상태 감시 시스템 개발의 가능성을 확인하였다.

주요용어: 상태 감시 시스템, 구조 건전성, 광섬유센서, 브래그 격자, 인체공학

Abstract Fiber optic sensors (FOS) have advantages such as electromagnetic interference (EMI) immunity, corrosion resistance and multiplexing capability. For these reasons, they are widely used in various condition monitoring systems (CMS). This study investigated a muscular condition monitoring system using fiber optic sensors (FOS). Generally, sensors for monitoring the condition of the human body are based on electro-magnetic devices. However, such an electrical system has several weaknesses, including the potential for electro-magnetic interference and distortion. Fiber Bragg grating (FBG) sensors overcome these weaknesses, along with simplifying the devices and increasing user convenience. To measure the level of muscle contraction and relaxation, which indicates the muscle condition, a belt-shaped FBG sensor module that makes it possible to monitor the movement of muscles in the radial and circumferential directions was fabricated in this study. In addition, a uniaxial tensile test was carried out in order to evaluate the applicability of this FBG sensor module. Based on the experimental results, a relationship was observed between the tensile stress and Bragg wavelength of the FBG sensors, which revealed the possibility of fabricating a muscular condition monitoring system based on FBG sensors.

Keywords: Condition Monitoring System (CMS), Structural Health Monitoring (SHM), Fiber Optic Sensor (FOS), Fiber Bragg Grating (FBG), Ergonomics

1. 서 론

상태 감시 시스템(condition monitoring system, CMS)은 우주항공, 자동차, 선박 및 철도와 같은 수송분야, 플랜트 기계설비와 같이 다양한 구조물에서의 연구가 많이 진행되어 왔다[1-3]. 특히,

운용중인 동적 구조물의 안정성 검사가 요구되어 실시간으로 변형 및 변형률과 같은 물리적 변화를 확인하는 시스템 개발이 수행되고 있다.

상태 감시를 위한 시스템 중 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 연구 분야에서는 변형 및 변형률을 측정하는 다양한 센서

[접수일: 2014. 9. 5, 수정일: 2014. 10. 17, 게재확정일: 2014. 10. 17] *서울과학기술대학교 기계공학과, **서울과학기술대학교 에너지환경대학원, ***서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea (E-mail: dskim@seoultech.ac.kr)

와 계측 시스템이 연구되고 있다. 압전소자 (piezoelectric transducer, PZT)[4,5], 스트레인 게이지(strain gauge), 가속도계(accelerometer)[6] 등 여러 지능형 센서(smart sensor)를 이용하여 구조물의 변형, 처짐, 진동 감시를 위한 연구가 수행되고 있다. 기계 구조물뿐만 아니라 바이오 분야에서 또한 지능형 센서를 이용한 연구가 진행되고 있다[7]. 하지만, 대부분의 센서는 전기적 기반의 센서로서 기존의 계측 시스템을 활용할 수 있는 이점이 있지만 외부 전자기적 간섭(electromagnetic interference, EMI)과 장시간 사용으로 인한 부식의 우려가 존재한다. 이러한 문제를 해결하고 물리적 변화를 측정하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있고, 그 중 광섬유센서(fiber optic sensors, FOS)는 원거리 신호 송수신이 가능하고, 전자기적 간섭의 영향이 없고 부식으로부터 안정하며 작은 단면적으로 구조물 삽입이 용이해 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다[8,9].

광섬유센서를 이용한 상태 감시 기법 연구를 비롯하여 생체역학(biomechanics) 및 인체공학(ergonomics)에서 또한 적용 연구가 진행되고 있다. 의료기기에 적용되는 온도센서 시스템 연구, 건강 모니터링을 위한 의료 모직 의류에 삽입된 광섬유센서 연구 등 여러 의학에서 또한 광섬유센서를 이용한 연구가 수행중이다[10,11].

특히, 광섬유센서 중 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 타 센서에 비해 다중화(multiplexing)가 용이해 여러 지점의 다양한 물리량 측정을 보다 쉽게 할 수 있다. 그 이유로, FBG 센서를 이용한 열 특성 연구, 구조물 감시 기법 연구 등 다양한 연구가 진행 중이다[12-14]. 그리고, FBG 센서를 활용한 응용연구로써 사회 기반 토목 구조물의 감시를 위한 센서 시스템 개발[15], 탄성이 우수한 구조물의 형상을 감시하기 위해 곡률 변화를 측정하기 위한 연구가 진행 중이다[16].

따라서, 본 연구에서는 이러한 여러 장점을 가진 FBG 센서를 이용하여 인체 상태 감시를 위한 센서 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 근육의 수축과 이완에 따른 동적 감시를 통해 환자의 재활 치료 및 근육 활성 정도를 파악하기 위한 기초 연구이다.

사고를 겪거나 거동이 불편한 환자와 같이 수술이나 골절 등으로 인해 장시간 활동이 부족할

경우 갑작스런 움직임으로 인해 근육의 파열 및 피사와 같은 2차 질환을 유발한다. 이를 위한 다양한 물리치료법 개발이 필요하다. 하지만, 대부분의 재활장치들은 시스템이 복잡하고 사용자의 숙련도가 요구되며, 일반적으로 보조 수행자가 필요하다. 그리고 시스템의 규모가 크기 때문에 장치가 존재하는 장소에서만 사용이 가능하다.

반면, 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고 시스템의 간소화의 위해 FBG 센서를 이용한 새로운 인체 감시 방법을 개발하였다. 구체적으로, 근육의 수축과 이완을 감지하여 인체운동 상황을 실시간으로 감시가 가능함을 실험적으로 확인하였고, 상용화 제품 개발 가능성에 대한 평가를 수행하였다.

2. 광섬유 브래그 격자센서

FBG 센서는 광섬유의 코어(core)에 주기적인 격자(grating)를 만들고, 이에 따른 빛의 굴절률 변화를 이용하며 Fig. 1과 같은 구조와 특징을 보인다. 즉, 광대역(broadband) 광을 입사시키면 굴절률이 변하는 격자 경계면에서 특정 파장 영역의 빛을 반사시키게 되는데, 식(1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 해당하는 브래그 파장(Bragg wavelength, λ_B)의 빛이 반사되며 나머지는 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. Fig. 2는 이 과정을 나타내고 있다.

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

여기서, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)로써 빛이 광섬유 브래그 격자의 한 주기를 진행할 때의 평균 굴절률을 나타내며, Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다.

식(1)에서 임의의 외란이 발생하면, 유효 굴절률과 격자의 주기가 변하게 되고, 이로 인해 브래그 파장이 바뀐다.

식(1)에서 미분을 통해 식(2)를 얻을 수 있다.

$$d\lambda_B = 2\Lambda dn_e + 2n_e d\Lambda \quad (2)$$

식(2)에 식(1)을 이용하여 정리하면 식(3)과 같이 표현된다.

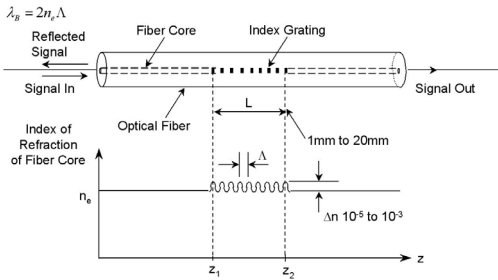


Fig. 1 Fiber Bragg grating and refractive index change in the core[17]

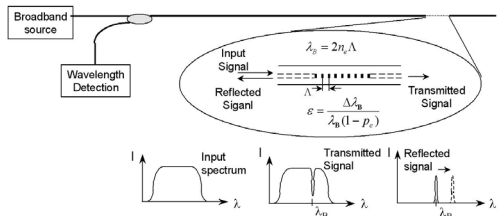


Fig. 2 Fiber Bragg grating sensor wavelength-encoding operation[3]

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{n_e} dn_e + \frac{1}{\Delta} d\Delta \quad (3)$$

$$\frac{dn_e}{n_e} = -p_e \epsilon, \quad \frac{1}{\Delta} d\Delta = \epsilon \quad (4)$$

p_e 는 광탄성 상수(photoelectric constant)로 실리카계(emanosilicate glass) 광섬유의 경우 대략 0.22의 값을 가진다. 최종적으로 식(4)를 식(3)에 대입하면 브래그 파장 변화에 따른 변형률 식(5)를 도출할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{(1-p_e)} \frac{d\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

식(5)를 바탕으로 FBG 센서를 이용한 변형률 측정이 가능하다[3,17].

3. 근육 상태 모니터링 센서 모듈

인체 근육의 상태를 감시하기 위해 착용감이 우수하고 근육의 수축과 이완 전달을 용이하게 하기 위해 Fig. 3과 같이 밴드 형식의 모듈을 제작하였다. 밴드에 FBG 센서가 부착되는 위치에는 평판을 부착하여 변형의 전달률과 센서의 안

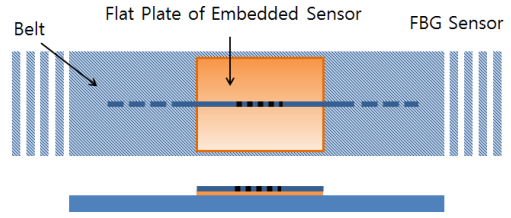


Fig. 3 Fabrication of muscular condition monitoring sensor module

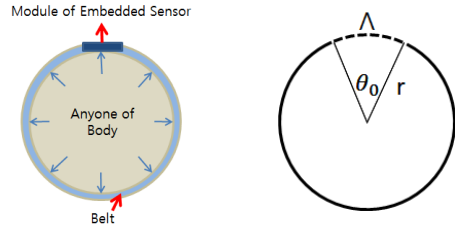


Fig. 4 Geometry of muscular condition

전성을 높였다. 특히, FBG 센서의 특성상 곡률(curvature)이 커짐에 따라 브래그 파장 측정이 불안정하게 될 수 있어 아크릴 평판을 이용하여 근육의 이완에 대해 최소의 곡률이 형성되도록 설계하였다.

센서 모듈을 이용하여 측정 대상의 근육 부위에 근접시켜 착용하게 되면 Fig. 4와 같이 되어 원주를 이루는 형태의 기하학적 형상이 된다. 따라서 FBG 센서의 측정 수식은 식(6)을 이용하게 되면 식(3)의 형태는 식(7)과 같이 된다.

$$\Delta = r\theta_0, \quad d\Delta = \theta_0 dr \quad (6)$$

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{n_e} dn_e + \frac{1}{r} dr \quad (7)$$

근육의 팽창 및 수축에 의한 원주 방향의 변수를 적용하게 되면 아래 식(8)과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{1}{r} dr = \frac{1}{(1-p_e)} \frac{d\lambda_B}{\lambda_B} \quad (8)$$

위와 같은 수식의 정리로부터 축 방향으로의 변형이 있을 경우와 원주 방향으로의 변형이 있을 경우 식(5)와 식(8)을 비교한 결과 기하학적 차이만 존재하고, 브래그 파장 변화에 따라 변형률 값이 도출된다.

이러한 원리를 이용하여 실험적 검증을 통해 센서 모듈의 적용성 평가를 수행하였다.

4. 센서 모듈의 검증 시험

FBG 센서의 이론을 이용하여 원주 방향 변형에서의 브래그 파장과 축 방향 변형에서의 파장값은 변형률에 따라 결정되므로 실험의 정확도를 위해 단축 인장시험을 통해 센서 모듈의 적용성 평가를 수행하였다. 만능 재료시험기에서 밴드에 인가되는 균일한 인장 길이에 따른 변형률과 브래그 파장 값을 비교하여 FBG 센서 신호의 신뢰성을 평가하였다. 그리고, 향후 실용화를 위한 목적으로 전용 프로그램 개발을 병행하여 진행하였다.

4.1. 시험편 제작 및 시험 구성

밴드 형식의 모듈은 Fig. 5와 같이 구성하였다. 벨트로 된 밴드는 사용자가 착용하였을 경우 불편함을 줄이고, 근육의 팽창 및 수축에 대한 전달률을 높이기 위해 폭 50 mm, 길이 300 mm, 두께 1 mm인 폴리에스터(polyester) 재료를 사용하였다. 그리고, 재현성과 안정성을 높이는 부가 효과가 있다. 센서는 Table 1와 같은 광섬유 브래그 격자센서(FBGTECH Co.)를 사용하였다. 그리고 센서의 민감도를 높이고 부착의 용이성을 위해 폭 40 mm, 길이 40 mm, 두께 1.5 mm인 아크릴(acrylic) 평판을 벨트에 적층하였다. 아크릴 평판에 센서를 부착하기 위해 에폭시(84101 PermaPoxy, Permatex Co.)를 사용하여 전달 손실을 최소화 하였다.

인장시험을 위한 장치 구성으로는 FBG 센서에 광대역 파장의 광을 전송하는 광원(83437A, Agilent Co.)과 반사되는 브래그 파장 데이터를 출력하는 광 스펙트럼 분석기(MS9710C, Anritsu Co.)로 구성하였다. Fig. 6은 검증시험을 위한 장치 구성도를 나타낸다. 만능 재료시험기(4467, Instron Co.)를 이용하여 밴드형 FBG 센서 모듈을 2 mm/min의 속도로 1 mm 스텝으로 인장시험을 수행하여 각각의 상황에서 FBG 센서 신호를 측정하였다. Fig. 7은 실제 검증시험의 구성을 보여준다.

4.2. 시험 결과

인장시험은 밴드의 양쪽을 고정하여 순차적으로 하중을 가하여 실험을 수행하였고, 밴드의 변형률과 FBG 센서의 브래그 파장은 선형적인 경향으로 증가하여야 한다.

Table 1 Specification of FBG sensor

Wavelength(nm)	1541.3
Gage Length(mm)	10
Reflectivity	70%
Recoating Material	Acrylate

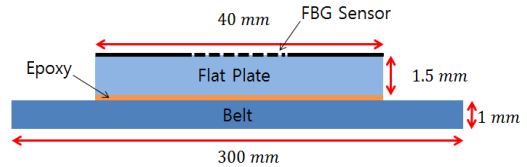


Fig. 5 Drawing of specimen

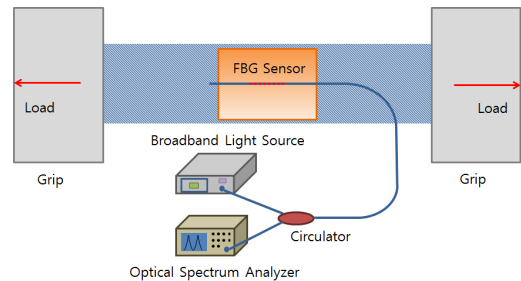


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

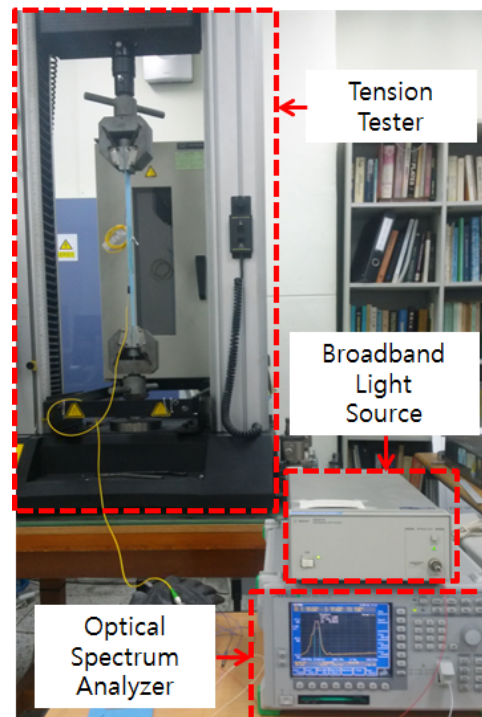


Fig. 7 Experimental setup for tension test

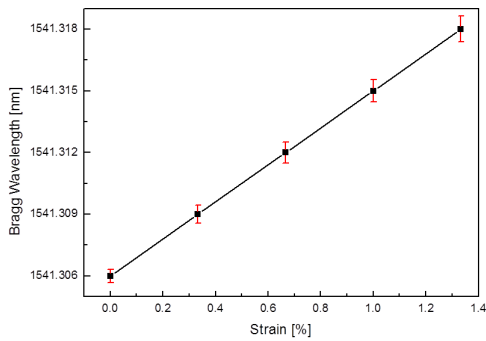


Fig. 8 A relation between Bragg wavelength of an FBG sensor and mechanical strain

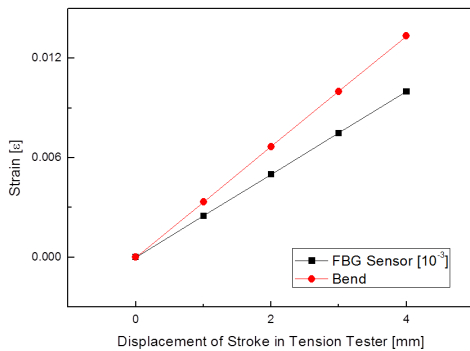


Fig. 9 A relation between strain of an FBG sensor and bend

총 3회 반복에 의해 측정된 브래그 파장과 시험편의 변형률을 비교한 결과, 밴드의 초기 길이 (300 mm) 대비 만능 재료시험기의 스트로크에 의한 연신율(elongation)이 약 0.33ε 증가함에 따라 브래그 파장은 0.003 nm 증가하여 Fig. 8과 같이 선형적으로 정비례함($R^2=1.0$)을 확인하였다. 그리고, 식(5)를 바탕으로 도출된 FBG 센서의 변형률과 밴드의 연신율을 비교한 결과 0.07%에 해당하는 작은 변형이 FBG 센서에 전달되어 절대값의 차이는 있지만, Fig. 9와 같이 선형적으로 증가함을 확인하였다.

결론적으로, 시험을 통해 밴드형 FBG 센서 모듈을 이용하여 밴드의 변형을 측정할 수 있어 근육 상태 감시 시스템의 가능성을 확인하였다.

4.3. 실험 고찰 및 시뮬레이션

FBG 센서는 다중화 중 파장분할방식 다중화 (wavelength division multiplexing, WDM)가 용이하여 단일 광섬유에 여러 브래그 격자 제작이 가능

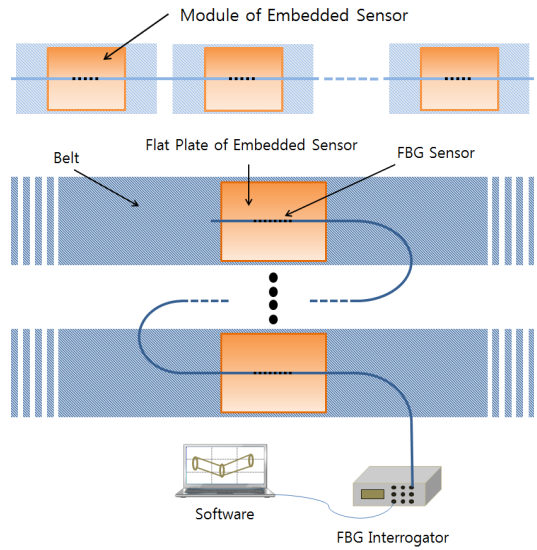


Fig. 10 A concept on muscular monitoring system based on WDM technology



Fig. 11 An entertainment software for rehabilitation using muscular condition monitoring system



Fig. 12 An application example of FBG sensor based muscular condition monitoring system

하다. WDM은 단일 광섬유에 새겨진 여러 격자에서 각 지점의 온도 혹은 변형률을 측정하는 원리이다. 따라서, 하나의 케이블로 신체의 여러 지점 근육 상태를 모니터링 할 수 있다. 그리고, Fig. 10과 같이 상용화되어 있는 FBG 광 인터로게이터(FBG interrogator)를 활용하면 단일 컴퓨터의 프로그램으로 여러 지점의 물리량을 동시에 측정이 가능하다. 이를 이용하여 실용화를 위한 전용 하드웨어 및 프로그램 개발을 수행하였다. FBG 센서 모듈을 실제 인체에 착용하여 근육 모니터링뿐만 아니라 LabVIEW를 이용하여 재활 및 물리치료에 도움이 되는 오락 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 사용자가 FBG 센서 모듈을 착용하고, 소프트웨어에서의 그림이 일정 위치에 내려오면 근육을 이완시켜 센서의 신호 변화를 통해 점수를 쌓아가는 원리이다. 그리고, 사용자의 근육 팽창이 커짐에 따라 난이도를 조절하는 부가 기능을 가지고 있다. Fig. 11은 시물레이션을 위해 개발한 소프트웨어의 프론트 패널이며, 실시간 신호 처리를 포함하고 있다. 본 프로그램과 FBG 센서 모듈을 활용하여 Fig. 12와 같이 사람이 착용하여 실제 재활 치료 시연을 보여준다. 시물레이션을 통해 실시간으로 근육 모니터링과 재활 치료까지 가능성을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 다중화가 가능한 센서를 이용하여 근육 상태 감시하는 기법에 대해 제안하였다. 특히, 변형률 측정이 용이한 FBG 센서를 적용하여 신체 여러 부위의 근육을 모니터링하는 것으로, 의료용 센서 시스템 개발의 가능성을 확인하는 연구를 수행하였다. 수행 결과, 근육의 수축과 이완에 대해 신호 민감도가 우수하였고, 신호 처리 및 오락 프로그램을 개발하여 재활 및 물리치료 시물레이션을 통해 환자들의 의료 보조장치 적용이 가능함을 확인하였다. 그리고, 간소화된 시스템 구성으로 근육의 상태를 감시할 수 있어 의료 장치 개발에 대한 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] V. Giurgiutiu, A. Zagari and J. J. Bao, "Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring," *Structural Health Monitoring*, Vol. 1, No. 1, pp. 41-61 (2002)
- [2] W. Chung and D. Kang, "Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3, pp. 643-652 (2008)
- [3] D. Kang and W. Chung, "Integrated monitoring scheme for a maglev guideway using multiplexed FBG sensor arrays," *NDT&E International*, Vol. 42, No. 4, pp. 260-266 (2009)
- [4] J. B. Ihn and F. K. Chang, "Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-19 (2008)
- [5] B. Yoo, A. S. Purekar, Y. Zhang and D. J. Pines, "Piezoelectric-paint-based two-dimensional phased sensor arrays for structural health monitoring of thin panels," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 7 (2010)
- [6] S. Kavithaa, R. J. Daniela and K. Sumangalab, "A simple analytical design approach based on computer aided analysis of bulk micro-machined piezoresistive MEMS accelerometer for concrete SHM applications," *Measurement*, Vol. 46, No. 9, pp. 3372-3388 (2013)
- [7] V. Mishra, N. Singh, U. Tiwari and P. Kapur, "Fiber grating sensors in medicine: Current and emerging applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 167, No. 2, pp. 279-290 (2011)
- [8] D. H. Kim and M. Q. Feng, "Real-time structural health monitoring using a novel fiber-optic accelerometer system," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No 4, pp. 536-543 (2007)
- [9] R. C. Tennyson, A. A. Mufti, S. Rizkalla, G. Tadros and B. Benmokrane, "Structural health monitoring of innovative bridges in Canada

- with fiber optic sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 560-573 (2001)
- [10] Y. J. Rao, D. J. Webb, D. A. Jackson, L. Zhang, and I. Bennion, "In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 779-785 (1997)
- [11] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirotte, and A. Depré, "Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 1215-1222 (2008)
- [12] T. H. T. Chan, L. Yu, H. Y. Tamb, Y. Q. Ni, S. Y. Liu, W. H. Chung and L. K. Cheng, "Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation," *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 5, pp. 648-659 (2006)
- [13] K. H. Lee and D. H. Kim. "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 (2013)
- [14] H. Y. Kim, D. Kang, J. H. Lee and D. H. Kim, "Characteristics of thermal coefficient of fiber Bragg grating for temperature measurement," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 999-1005 (2013)
- [15] P. Moyoa, J. M. W. Brownjohnb, R. Sureshc and S. C. Tjinc, "Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure," *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 12, pp. 1828-1834 (2005)
- [16] A. Fender, E. J. Rigg, R. R. J. Maier, W. N. MacPherson, J. S. Barton, A. J. Moore, J. D. C. Jones, D. Zhao, L. Zhang, I. Bennion, S. McCulloch and B. J. S. Jones, "Dynamic two-axis curvature measurement using multicore fiber Bragg gratings interrogated by arrayed waveguide gratings," *Applied Optics*, Vol. 45, No. 36, pp. 9041-9048 (2006)
- [17] E. Udd, "Fiber Optic Smart Structures," John Wiley and Sons, New York, pp. 271-285 (1995)