

주기적인 반복 열하중에 노출된 광섬유 센서의 신뢰성 평가

Reliability Evaluation of Fiber Optic Sensors Exposed to Cyclic Thermal Load

김현영*,**, 강동훈**†, 김대현***

Heon-Young Kim*,**, Donghoon Kang**† and Dae-Hyun Kim***

초 록 광섬유 브래그 격자센서(FBG)는 다중화가 용이하고 절대측정이 가능한 고유의 장점으로 다양한 구조물의 구조건전성 모니터링(SHM)에 활용도를 넓혀가고 있다. 하지만, 구조건전성 모니터링을 위해 FBG 센서를 온도 변화 환경에서 장기간 사용할 경우 FBG 센서는 계절적 요인에 의한 큰 폭의 주기적 온도 변화 환경에 노출되므로 센서의 신뢰성 확보를 위해 신호 특성에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 패키징된 FBG 센서의 제작에 많이 활용되는 각각 2가지의 모재 및 접착제를 대상으로 시편을 제작한 후 항온항습기 내에서 -20℃~60℃의 온도 조건에서 300사이클의 반복 열하중시험을 수행하였다. 시험 결과, FBG 센서에 주기적인 반복 열하중이 가해질 경우 일정량의 압축변형이 작용하며 이는 센서로 사용 시 측정 오차로 작용하므로 장기 구조건전성 모니터링을 위해 FBG 센서의 사용 전 안정화 과정을 통한 사전보정이 필요함을 확인하였다.

주요용어: 구조건전성 모니터링, 광섬유 센서, 광섬유 브래그 격자, 반복 열하중

Abstract Fiber Bragg grating (FBG) sensors are currently the most prevalent sensors because of their unique advantages such as ease of multiplexing and capability of performing absolute measurements. They are applied to various structures for structural health monitoring (SHM). The signal characteristics of FBG sensors under thermal loading should be investigated to enhance the reliability of these sensors, because they are exposed to certain cyclic thermal loads due to temperature changes resulting from change of seasons, when they are applied to structures for SHM. In this study, tests on specimens are conducted in a thermal chamber with temperature changes from -20℃ to 60℃ for 300 cycles. For the specimens, two types of base materials and adhesives that are normally used in the manufacture of packaged FBG sensors are selected. From the test results, it is confirmed that the FBG sensors undergo some degree of compressive strain under cyclic thermal load; this can lead to measurement errors. Hence, a pre-calibration is necessary before applying these sensors to structures for long-term SHM.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), Fiber Optic Sensor (FOS), Fiber Bragg Grating (FBG), Cyclic Thermal Load

1. 서 론

최근 스마트 구조물에 대한 관심이 높아짐에 따라 감지계에 이용되는 센서 및 감지 시스템에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다[1-3]. 감지계에 이용되는 센서로는 스트레인게이지,

PZT 등 전기식 센서가 주로 이용되며, 적용 분야로는 수요가 큰 항공우주 분야나 2차 사고가 발생할 경우 피해가 증폭되는 플랜트 구조물이나 대형 인프라 구조물을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다[4-6]. 특히, 최근 구조물의 장기거동 관찰에 대한 필요성이 증대됨에 따라 구조건

[Received: May 27, 2016, Revised: June 13, 2016, Accepted: June 13, 2016] *연세대학교 기계공학과, **한국철도기술연구원 첨단소재연구팀, ***서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, † Corresponding Author: Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea (E-mail: dhkang@krii.re.kr)

전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 위한 감지 계로 기존의 전기식 센서를 대체해 광학 기반의 광섬유 센서가 적용 영역을 점차 확대하고 있다 [7-10].

광섬유 센서는 전기식 센서에 비해 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI)과 같은 외란의 영향이 없고, 습기에 의한 부식으로부터 안전하며 적은 손실로 원거리 계측이 가능한 큰 장점을 가지고 있다. 여러 광섬유 센서 중, 특히 다중화(multiplexing)가 용이하여 가장 널리 활용되고 있는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 기본적으로 변형률과 온도에 반응하며 다양한 형태의 패키징을 통해 가속도, 변위 등 대부분의 물리량을 측정할 수 있는 수준으로 개발 및 상용화가 진행된 상태이다.

하지만, 구조물의 장기거동 관찰을 위한 건전성 모니터링 수행 시 광섬유 센서는 계절적 요인에 의한 큰 폭의 온도 변화($-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$) 환경에 노출되게 된다. 게다가, 온도 변화가 주기적으로 반복되기 때문에 이런 환경 하에서 광섬유 센서의 신뢰성 확보는 장기 구조건전성 모니터링에서 필수적인 요인이다. 광섬유 센서의 온도 변화에 따른 신뢰성과 관련하여 초고온(900°C) 또는 극저온(-150°C) 환경에서의 FBG 센서 자체의 피크 신호 특성 변화 및 온도에 대한 계측 민감도 변화 연구가 수행된 바 있다[11-12]. 한편, 통상적으로 광섬유 센서는 에폭시와 같은 접착제를 통해 금속재의 패키징 형태로 제작되어 이용된다. 이 경우, 센서에 가해지는 주기적인 온도 변화는 FBG 센서를 감싸고 있는 접착제에 직접 작용하여 접착력 저하로 인한 이격 유발, 접착제의 재경화 등 센서의 신뢰성과 관련된 여러 영향을 유발할 수 있어 이에 대한 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 장기 구조건전성 모니터링을 위한 광섬유 센서의 신뢰성 확인을 위해 온도 변화 환경에 노출된 FBG 센서의 신호 특성 변화를 관찰하였다. 이를 위해, 우리나라의 계절적 요인을 고려해 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건에서 300사이클의 반복환경을 설정하였고, 센서의 패키징 소재로는 현재 상용제품에서 주로 채택하고 있는 스테인리스와 티타늄을 선정하였다. 그리고 접착제로는 일반적으로 많이 활용되는 상온경화 에폭시 2종을 선정하였다.

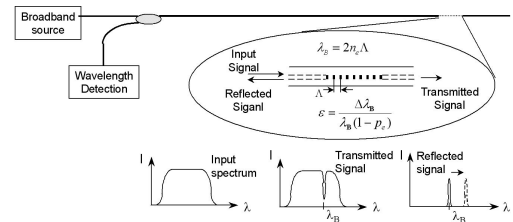


Fig. 1 FBG sensor demodulation principle



Fig. 2 Packaged FBG sensors for temperature, displacement, and acceleration [14]

2. 광섬유 브래그 격자 센서 [13]

일반적으로 FBG 센서의 신호거동은 Fig. 1과 같이, 광섬유에 광대역 파장의 빛이 입사할 경우 브래그 격자 부분에서 식 (1)과 같이 결정된 브래그 파장(λ_B)에 해당되는 좁은 밴드의 빛은 반사를 하고 나머지 파장은 모두 통과시키는 특성을 갖고 있다. 또한, 반사되는 브래그 파장은 식 (2)와 같이 온도와 변형률 변화에 대해 선형적인 관계를 가지기 때문에, 이러한 특성을 이용해 센서로 활용이 가능하게 된다.

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

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

여기서, α_f 는 광섬유의 열팽창계수이고 ξ_f 는 열광학계수이며 통상 각각 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $6 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 상수값을 갖는다.

이와 같은 기본적인 원리를 바탕으로 다양한 형태로 패키징을 통해 변형률, 온도, 가속도, 변위 등 여러 물리량의 측정이 가능하며 Fig. 2와 같이 패키징된 상용센서를 쉽게 구입할 수 있다.

3. 가속 노화시험

본 연구에서는 FBG 센서의 장기 구조건전성 모니터링에 대한 신뢰성 평가를 위해 FBG 센서에 대한 반복 열하중시험을 수행하였다. 이를 위한 실험조건 구성을 위해, 패키징된 FBG 센서의 특성을 모재(base materials) 및 접착제(adhesives)로 구분하였고 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화와 300사이클을 통해 반복 열하중을 모사하였다. 시험을 위해, 모재는 현재 패키징에 가장 많이 활용되는 2가지 소재인 스테인리스(stainless steel 316)와 티타늄(titanium grade 2)으로 선정하였다. 마찬가지로, 접착제의 경우도 일반적으로 많이 활용되고 사용이 편리한 주사기형 상온경화 에폭시 2종(araldite, permapoxy)을 선정하였다.

3.1. 시험 시편 제작

패키징된 FBG 센서의 제작 환경을 모사하기 위해 Fig. 3과 같이 FBG 센서의 브래그 격자 부분에 에폭시를 도포하여 모재에 접착하는 방법으로 시험 시편을 제작하였다. FBG 센서는 일반적으로 자외선 영역의 엑시머레이저(excimer laser)와 위상마스크(phase mask)를 통해 제작이 되며, 센서부의 보호를 위해 아크릴레이트(acrylate) 등을 이용해 재코팅(recoating) 되어 판매된다. 하지만, 패키징된 FBG 센서의 제작에는 일반적으로 변형을 전달성 등에 의한 오차 제거를 위해 코팅이 제거된 FBG 센서가 사용되므로, 본 연구에서도 마찬가지로 제공된 FBG 센서의 브래그 격자 부분의 코팅을 제거하여 사용하였다. 에폭시 도포 후 제품 사양에는 24시간 경화라 되어 있으나, 완전 경화를 위해 48시간 동안 상온에 노출하여 경화를 진행하였다. 본 연구에 사용된 FBG 센서(FBGKOREA Co.)의 사양은 Table 1과 같다. 한편, 시편의 크기는 반복 열하중시험을 위한 항온시험기 내부 크기를 고려하여 $50\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 로 제작하였다. 제작이 완료된 시편의 모습은 Fig. 4와 같다.

3.2. 시험 장치 구성

본 연구에서는 주기적인 반복 열하중시험을 위해 Fig. 5와 같은 시험 장치를 구성하였다. 실제

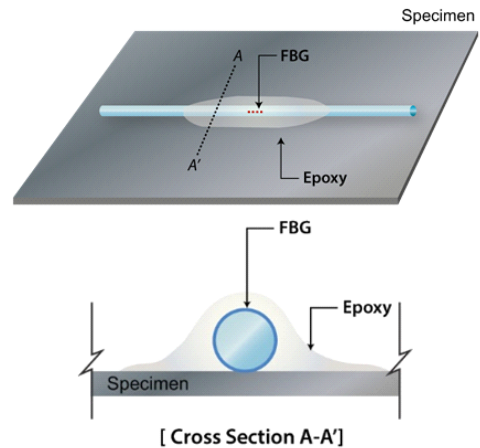
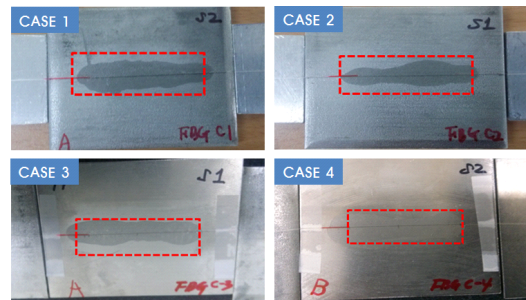


Fig. 3 Configuration of test specimens

Table 1 Specifications of an FBG sensor

Center wavelength (at RT)	1541nm
Reflectivity	70% (6 dB)
Gage length	10 mm



Case 1 : Stainless steel 316 + Araldite
Case 2 : Stainless steel 316 + Permapoxy
Case 3 : Pure titanium grade 2 + Araldite
Case 4 : Pure titanium grade 2 + Permapoxy

Fig. 4 Cases of test specimen with change of base materials and adhesives

외부 환경에서는 하절기 및 동절기에 따라 온도 대역이 구분되나, 효과적인 반복 열하중 시험을 위해 연간 온도 범위를 동시에 고려해 항온습기(TC-ME-025, JEIO-TECH Co.)의 온도 조건을 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 또한, 많은 회수의 반복시험이 필요한 시험의 특성을 고려하여, 한 사이클에 소요되는 시간이 최소화 될 수 있도록 장비의 성능($-20^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$)을 고려, 각 구간별 소요시간을 설정하였다. 구체적으로는, Fig. 6과 같

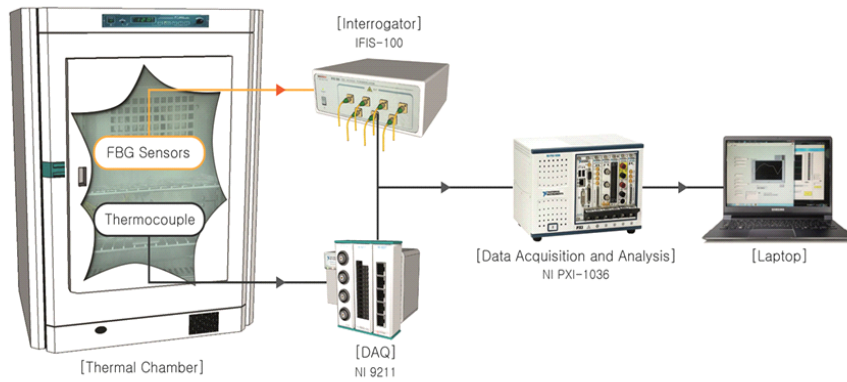


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

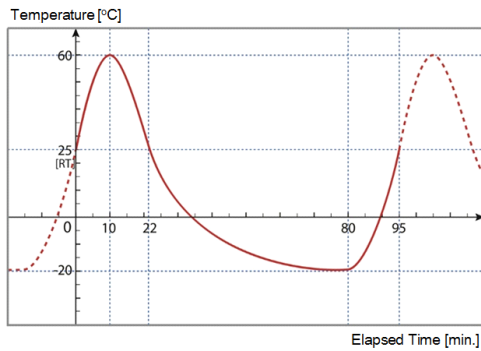


Fig. 6 Thermal cycle imposed to specimens

이 상온(25°C)에서 10분 동안 60°C까지 상승시킨 후 70분 동안 -20°C까지 냉각시키고 다시 15분 동안 상온(25°C)으로 상승시키게 되며 총 95분에 걸쳐 한 사이클이 완성된다. 이와 같은 과정을 계속 반복하며 최종 300사이클까지 가속 노화시험을 진행하였다.

시험 시편은 Fig. 7과 같이 항온항습기 내부에 위치시켰으며, 정확한 시편의 온도를 측정하기 위해 Table 2와 같은 열전대(thermocouple)를 추가로 배치하여 시험 장치를 구성하였다. 한편, FBG 센서의 신호는 FBG 인터로게이터(IFIS 100, Fiberpro Co.)를 통해 측정하였고, 열전대의 신호는 DAQ (NI-9211, National Instruments Co.)를 이용하였다. 본 연구에서 목표로 하고 있는 반복 열하중에 의한 FBG 센서의 영향만을 확인하기 위해 FBG 센서의 신호는 한 사이클 기준 25°C, 즉 같은 온도에서 브래그 파장을 측정하는 방법으로 진행하였고 데이터 측정은 총 6개 구간(0, 50, 100, 150, 200, 300사이클)에서 수행하였다.

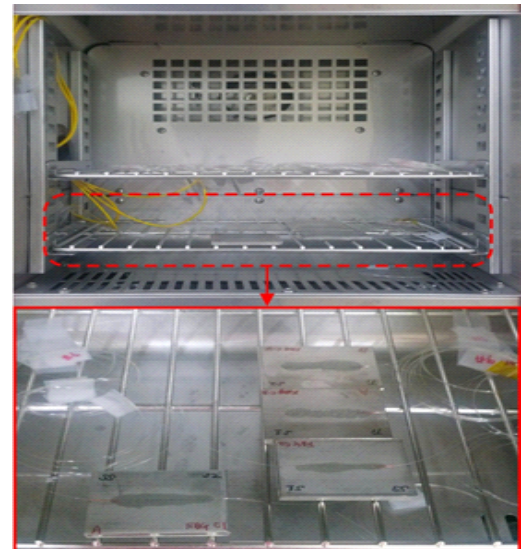


Fig. 7 Preparation of test specimens in a thermal chamber

Table 2 Specifications of a thermocouple

Type	T
Temperature range	-200°C~300°C
Resolution	0.07°C
Limits of error	±1°C

3.3. 시험 결과

총 4종류(모재 2종, 에폭시 2종)의 시험 시편에 대해 -20°C~60°C의 열하중으로 300회 반복하였을 경우 시편에 부착된 FBG 센서의 신호 특성 변화를 관찰하였다. Fig. 8은 4종류의 시험 시편 중 Case 1(stainless steel 316 + araldite)의 0사이클(초

기값) 및 300사이클에서의 시간 변화에 따른 브래그 파장 변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 300사이클 경과에 따른 파장 변화가 동일 온도인 25°C 기준으로 0.242 nm 발생하였음을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로, 총 4종류의 시편에 대해 데이터 측정 구간인 6개 구간(0, 50, 100, 150, 200, 300사이클)에 대한 브래그 파장 변화를 측정 한 결과 Fig. 9와 같이 나타났다.

Fig. 9에서와 같이 4종류 모두 값의 차이는 있으나 모두 유사한 경향을 보였다. 구체적으로, 사이클이 진행되기 전 초기 파장값에 비해 50사이클에서 일정 크기만큼의 압축변형이 발생하였으며 이후 사이클이 더 진행되더라도 일부 값의 차이는 있으나 큰 변화없이 대체로 유지되는 경향을 나타냈다. 또한, 시편에 발생하는 압축변형의 정도는 모재와 에폭시의 조합에 따라 최대 2배 이상의 차이를 보이며 각기 다르게 나타났다. 조합에 따른 차이의 원인은 약 80°C(-20°C~60°C)의 온도 변화가 반복적으로 가해질 때 센서(0.5×10^{-6} /°C, 실리카), 접착제($50 \sim 80 \times 10^{-6}$ /°C, 에폭시), 모재(스테인리스: 18×10^{-6} /°C, 티타늄: 9×10^{-6} /°C) 사이의 열팽창계수 차이와 두 가지 항목의 인터페이스라 할 수 있는 각각의 표면 상태에서 기인하는 복합적인 결과로 생각되며 만약 모재와 접착제의 종류, 표면 상태가 바뀔 경우 또 다른 값을 나타낼 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구의 시험 결과에 한정하여 판단하면 스테인리스와 araldite 조합이 반복 열하중에 대해 가장 적은 압축변형을 보여 센서 제작을 위해서 상대적으로 좋은 조합으로 판단된다. 하지만, 이 경우에도 파장 이동량 기준 약 0.237 nm, 즉 변형률로 환산 시 약 200 $\mu\epsilon$ 이상의 큰 오차로 작용하기 때문에 센서로 제작 후 사용 전 보정공정이 반드시 필요하다. 보정 방법은 Fig. 9의 결과가 말해주듯이, 온도조건 -20°C~60°C에서 약 50사이클 이상의 반복 열하중을 가하여 센서를 안정화한 후 외부 환경에서 장기 구조건전성 모니터링에 사용하는 방법으로 적용 가능하다. 한편, 본 연구에서는 최초 50사이클부터 측측을 수행한 이유로 안정화 조건을 약 50사이클을 기준으로 제안하였으나 엄밀히 말해 실제 안정화에 요구되는 최소 사이클 수는 보다 줄어들 가능성이 있다.

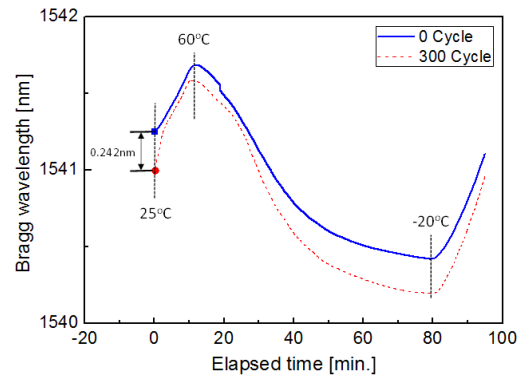


Fig. 8 Bragg wavelength changes of 0 cycle and 300 cycle (stainless steel + araldite)

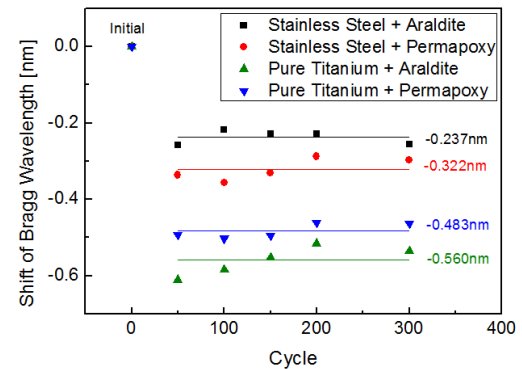


Fig. 9 Bragg wavelength shifts with cycle changes

4. 결론

본 연구에서는 장기 구조건전성 모니터링을 위한 FBG 센서의 적용성 확인을 위해 주기적인 반복 열하중하에서 FBG 센서의 신호특성을 관찰하였다. 각각 2가지 종류의 모재 및 접착제를 대상으로 시편을 제작하여 항온항습기에서 -20°C~60°C, 300회 반복시험을 통해 다음의 결론을 도출하였다.

FBG 센서에 주기적인 반복 열하중이 가해질 경우 일정량(수백 $\mu\epsilon$)의 압축변형이 발생하며 이후에는 사이클 증가와 무관하게 일정하게 유지되는 특성을 보인다. 이러한 경향은 모재 및 접착제의 종류와 무관하며 이는 센서로 사용 시 측정 오차로 작용하므로 사용 전 안정화 과정을 통한 사전보정이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원 및 한국연구재단 기초연구지원사업(NRF-2013R1A1A2007061)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 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)
- [2] J. H. Lee, D. H. Kim and I. K. Park, "Application of a fiber Fabry-Perot interferometer sensor for receiving SH-EMAT signals," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 2, pp. 165-170 (2014)
- [3] K. A. Kwon, M. Y. Choi, H. S. Park, J. H. Park, Y. H. Huh and W. J. Choi, "Quantitative defects detection in wind turbine blade using optical infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 35, No. 1, pp. 25-30 (2015)
- [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] 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)
- [6] D. Kang, D. H. Kim and S. Jang, "Design and development of structural health monitoring system for smart railroad-gauge-facility using FBG sensors," *Experimental Techniques*, Vol. 38, No. 5, pp. 39-47 (2014)
- [7] 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)
- [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] 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)
- [10] H. Y. Kim and D. H. Kim, "Sensor system for multi-point monitoring using bending loss of single mode optical fiber," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 35, No. 1, pp. 39-45 (2015)
- [11] D. Kang, H. Y. Kim and D. H. Kim, "Enhancing thermal reliability of fiber-optic sensors for bio-inspired applications at ultra-high temperatures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 7, pp. 074012 (2014)
- [12] D. Kang, H. Y. Kim, D. H. Kim and S. Park, "Thermal characteristics of FBG sensors at cryogenic temperatures for structural health monitoring," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 1, pp. 5-9 (2016)
- [13] D. Kang, S. O. Park, C. S. Hong and C. G. Kim, "The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths," *NDT & E International*, Vol. 38, No. 8, pp. 712-718 (2005)
- [14] W. Chung and D. Kang, "Application of FBG sensors for monitoring of railroad bridge," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 25-28 (2012)