

## 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 보행 진동 측정 시스템에 관한 연구

김재기<sup>1</sup> · 염상훈<sup>2</sup> · 이석순<sup>1,†</sup><sup>1</sup>경상대학교 기계공학과, ERI<sup>2</sup>FMI

## A Walking Vibration Sensing System using a Fiber Bragg Grating Sensor

Jaeki Kim<sup>1</sup>, Sanghun Yeom<sup>2</sup> and Seoksoon Lee<sup>1,†</sup><sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang University,<sup>2</sup>FMI

## Abstract

In this paper, a walking vibration sensing system (WVS system) using a Fiber Bragg Grating sensor (FBG sensor) is proposed. The seismic part of the FBG sensor was redesigned for sensitivity enhancement. The external excitation was assumed to be the walking cycle of an adult male. The FBG seismic sensor was redesigned using CATIA and ABAQUS such that the sensor's first mode natural frequency is 3.5 Hz (which is a value near the external excitation frequency). Compared with existing walking vibration sensing systems, this newly created system improves sensitivity 15 times. It is also suitable for intrusion detection applications.

## 초 록

본 연구에서 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 보행 진동 측정에 관한 연구를 수행하였다. 보행 진동 측정 시스템의 민감도를 향상시키기 위하여 FBG Seismic sensor 부를 재설계하였다. 성인남성의 평균 걷는 주기 1.5~2.5 Hz를 설계목표인 외부 가진 값으로 가정하고, FBG Seismic sensor 부의 1차 모드 고유진동수 값을 외부 가진 주파수 부근 값인 3.5 Hz를 갖도록 CATIA와 ABAQUS를 이용하여 설계하고 제작함으로써 기존의 보행 진동 측정 시스템과 대비하여 민감도를 약 15배 향상시킬 수 있었고, 침입 감지 분야 적용에 적합함을 확인하였다.

**Key Words** : Fiber Optic(광섬유), Fiber Bragg Grating(FBG), Super Luminent Diode(SLD), Walking vibration

## 1. 서 론

최근 전 세계적인 각종 테러, 국지전 등으로 인한 국가 및 산업 핵심 시설 보호의 필요성이 급증함에 따라, 무분별한 외부의 침입으로부터 해당 시설을 보호하는 시스템 설치가 확대되고 있다. 외국의 경우 현재 다양한 감지 시스템을 주요 시설물에 설치하여 침입자를 상시 감시하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.[1]

침입자 감지 시스템에 사용되고 있는 센서는 그 기능에 따라 다양하지만, 센서마다의 동작원리와 장단점이 달라 상호 보완적인 역할 분배를 통해서 신뢰성 있는 보안시스템을 구축하는 것이 바람직하다. 침입을 감지하는 기술로 대표적인 기술은 영상센서, 적외선 센서, 마이크로웨이브센서, 레이더센서 등이 있다. 이중 CCTV로 대표되는 영상센서는 침입자의 영상변화를 보고 침입여부를 판단하는 것으로 렌즈 오염이나 빛 혹은 그림자에 의한 오보가 빈번히 발생하는 단점이 있으며 특히 밤에는 조명이 있어야 한다는 큰 단점이 존재하여 전력 소모면에서 취약성을 가지고 있다. 적외선 센서는 값이 싼 수동형 소자에서부터 값비싼 능

Received: Nov. 23, 2016 Revised: Feb. 11, 2017 Accepted: Feb. 13, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-55-772-1622, E-mail: leess@ggnu.ac.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

동형 소자까지 다양하나, 열 차폐에 의한 오보의 단점이 존재한다. 다른 센서들도 어떤 특수한 경우에 매우 유리하나 고가이면서 감도가 낮고, 넓은 범위를 탐지할 수 없어 세계적으로 광섬유 기술을 이용한 침입자 탐지 시스템의 개발이 시도되었다. 개발 초기에는 특히 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) 기술을 이용하여 침입자가 광섬유를 절단했을 경우만 침입자를 감지할 수 있는 광섬유 침입자 탐지 시스템이 개발되었다. 그러나 이 시스템은 감도가 너무 낮아 실제 상황에서는 사용이 불가능하였다. 또한 간접계형 센서를 이용한 시스템이 연구되었으나 아직 실제 사용할 수 있을 정도의 신뢰성을 가진 센서 시스템은 개발되지 못하였다. [2,3,4]

따라서, 본 연구에서는 다양한 광섬유 센서의 종류 중에서도 선형 응답성과 절대 측정, 대량 생산이 가능하며 한 라인에 여러 포인트의 센서를 제작할 수 있는 파장 분할 다중화 기법의 장점을 가진 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating, FBG)를 이용하여 보행 진동 측정(Walking Vibration Sensing, WVS)에 관한 연구를 진행하였다. 본 연구는 불법침입자 감지 및 전방향용 센서 개발에 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 보행 진동 측정 장치 구성

### 2.1 광섬유 브래그 격자 센서의 측정 원리

광섬유 브래그 격자 센서는 코어의 주기적인 굴절률의 변화를 이용하며, Fig. 1과 같은 구조와 동작 특성을 보인다. 브래그 격자에 광대역 광을 입사시키면 굴절률이 변하는 경계면에서 빛을 반사시키게 되는데 이들 중 식 (2.1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 해당하는 파장의 빛은 보강간섭을 일으켜 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 이 외에 다른 파장의 빛은 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (2.1)$$

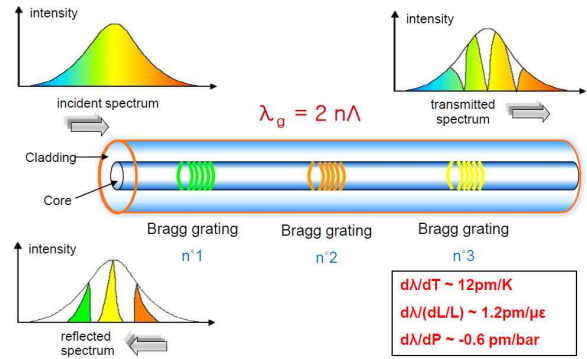


Fig. 1 Measurement principle of FBG sensor

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

식 (2.1)의 브래그 조건으로부터 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 브래그 파장이 달라지게 된다. 브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분을 취한 뒤 온도, 변형률과 격자 간격, 유효 굴절률의 식을 대입하면 식 (2.2)를 얻을 수가 있다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (2.2)를 통하여 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본원리이다.[5]

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(a_f + \zeta_f) \Delta T + (1 - P_e) \epsilon] \quad (2.2)$$

여기에서  $P_e$ 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이며 다음과 같이 표현된다.

$$P_e = \left( \frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.3)$$

식 (2.2)에서  $a_f$ 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고  $\zeta_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic constant)의 성분이며  $n_e$ 는 코어의 유효 굴절률,  $\nu$ 는 광섬

유의 프와송 비(Poisson's ratio)이다. 광탄성 상수  $P_e$ 는 gemanosilicate glass의 경우 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있다. 식 (2.2)에서 파장의 변화는 온도의 변화에 의한 정보와 변형률의 변화에 의한 정보를 모두 포함하고 있는데, 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이다. FBG를 사용하여 구조물의 변형률을 측정할 경우, 센서에 가해진 온도의 변화가 없다고 가정하면 식 (2.2)는 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \cdot \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (2.4)$$

또한 FBG가 변형률을 받지 않는 자유상태에 있고 온도 변화만을 받는다고 가정하면 식 (2.2)는 온도 변화에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha_f + \zeta_f} \cdot \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (2.5)$$

식 (2.4)에서 볼 수 있듯이 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구할 수 있다. FBG 센서는 기본적으로 단일점 센서이므로 공간 해상도가 높으며 WDM과 같은 다중화 기법을 사용하여 많은 수의 센서를 적용할 수 있으므로, 중심 파장을 서로 다르게 한 여러 개의 센서를 제작하여 준분포형 센서로의 확장이 가능하다.[6]

### 2.2 보행 진동 측정 시스템 구성 및 성능검증

본 연구에서 구성한 측정 시스템은 먼저 SLD(Super Luminescent Diodes)에서 1550 nm 부근의 평탄한 크기의 광량을 갖는 빛을 써큘레이터(Circulator)를 통하여 FBG 센서로 향하게 되는데 이때 센서의 온도 및 변형률에 따라 반사 파장은 변하게 된다. 변화된 파장은 반사되어 Ibsen에 도달하여 연결된 PC에 저장 및 나타나게 된다. 본 장치의 개념도는 Fig. 2에 나타내었고, 실제 구성된 외팔보 모니터링 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 사용한 광섬유의 스펙은 table 1에 표시한바와 같다. 외팔보는 영률 70 GPa를 가지는 Aluminium 이며 길이, 폭, 두께는 300×40×1 [mm]이다. 성능검증 시 외팔보의 중력의 영향을 최소화 하기위해 Fig. 4와 같이 외팔보를 옆으로 고정하고 외팔보의 끝단부에 27 mm 변위를 가하였다. 이 때 시스템의 66 mm, 89 mm, 213

mm 에서 변형률 값을 Strain Gauge 측정 값, 이론 값 및 FBG 센서 측정값을 비교함으로써 본 시스템을 검증하였다. 변형률 측정 결과 값은 table 2에 나타내었으며, 이론값을 기준으로 Strain Gauge와 FBG Sensor를 이용해 측정한 값이 모두 5% 이내의 오차율을 가짐을 확인 할 수 있고, 그러므로 본 FBG 측정 시스템의 성능이 검증되었다.

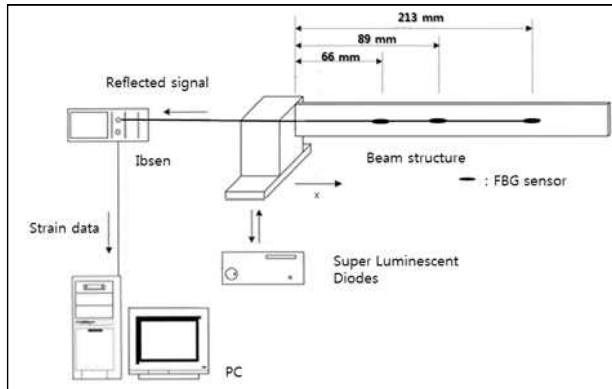


Fig. 2 Schematic diagram of WVS System



Fig. 3 Overall experimental set-up of WVS

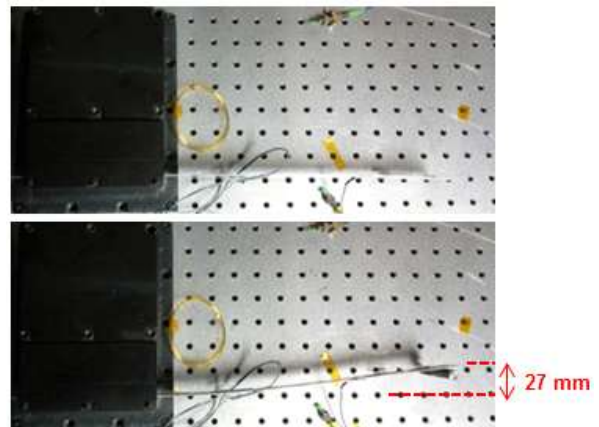


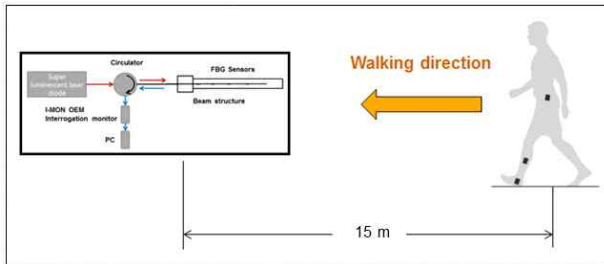
Fig. 4 Overall experimental set-up of performance verification

**Table 1** Specification of FBGs

Wavelength	1547.162 nm	1553.154 nm	1559.8522
Bandwidth	0.201 nm	0.19 nm	0.20 mm
SLSR	19.5 dB	21.5 dB	21.0 dB
Reflectivity	90 %	90.55 %	90.55 %
FBG Length	10 mm	10 mm	10 mm

**Table 2** Test Results

	66 mm	89 mm	213 mm
Theory	376 $\mu\epsilon$	339 $\mu\epsilon$	139 $\mu\epsilon$
Strain Gauge	381 $\mu\epsilon$	343 $\mu\epsilon$	135 $\mu\epsilon$
FBG Sensor	378 $\mu\epsilon$	341 $\mu\epsilon$	137 $\mu\epsilon$



**Fig. 5** Overview of Walking Vibration Sensing Experiment

**2.3 보행 진동 측정 실험**

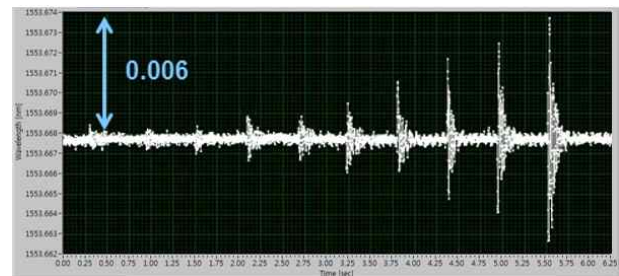
본 시스템의 성능을 검증한 후 보행에 대한 측정을 하기 위해 Fig. 5와 같이 측정 시스템으로부터 15 m 거리에서 측정 시스템 방향으로 보행한 후 결과를 확인하였다. 실험결과 Amplitude 0.006 nm를 가지는 Fig. 6과 같으며 측정 시스템으로 거리가 가까워질수록 진폭이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 노이즈 레벨은 충분히 낮으므로 본 측정 시스템으로 보행 진동 측정에 무리가 없다고 판단된다.

**2.4 FBG Seismic Sensor 부 재설계**

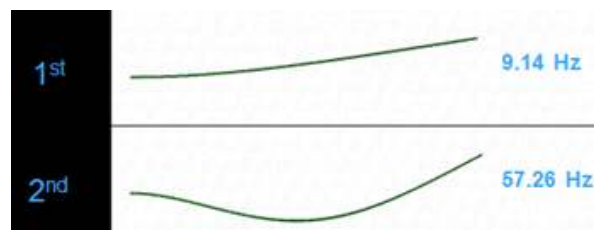
설치의 용이성과 내구성 및 민감도 향상, 소형화를 위해 FBG Seismic Sensor 부(Fig. 2의 외팔보)를 재설계하였다. 먼저, 민감도는 센서가 감지할 수 있는 가장 작은 신호의 크기를 의미하고, 입력신호인 지반운동의 속도와 출력신호

의 비인 전달함수라 할 수 있다. 그러므로 재설계에 있어서 고려하여야할 설계변수는 민감도 향상을 위한 고유진동수 조정이고, 따라서 본 연구에서 민감도 향상을 위해 FBG Seismic Sensor 부의 고유진동수를 조정하고, 센서 부착 방법을 변경하여 민감도 향상을 요하였다.

일반적인 성인남성의 평균 걷는 주기는 1.5~2.5 Hz 로 널리 알려져 있고, 본 연구에서 외부가진 값으로 가정하여 사용하였다. Fig. 7은 기존 외팔보의 고유진동수를 상용 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석한 결과이다. 1차 모드의 고유진동수 값은 9.14 Hz로 외부 가진과 주파수 비를 계산하여 주파수 응답 특성곡선에 나타내면 ( $0.167 \leq r \leq 0.273$ )으로 Fig. 8의 파란 빗금의 부분과 같다. 민감도 향상을 위해 주파수 비가 1 근처가 되기 위해 CATIA를 통해 Seismic Sensor 부를 모델링하고, ABAQUS를 통해 주파수 해석을 수행해가며 1차 모드 고유진동수 3.5 Hz 부근을 갖는 Seismic Sensor 부를 Fig, 10과 같이 설계하였다. 3D 프린터를 통해 새로운 FBG Seismic Sensor 부를 설계하였으며, 제작에 사용된 3D Printer 시료는 PLA(Poly Lactic Acid) 수지로써 밀도( $\rho$ )는  $1240 \text{ kg/m}^3$ 이고, 영률 (Young's Modulus, E)은  $3.2 \text{ GPa}$ 의 기계적 물성치를 갖는 재료를 이용하였다.



**Fig. 6** Results of Walking Vibration Measurement Experiment



**Fig. 7** Frequency analysis results of existed FBG seismic sensor parts using ABAQUS



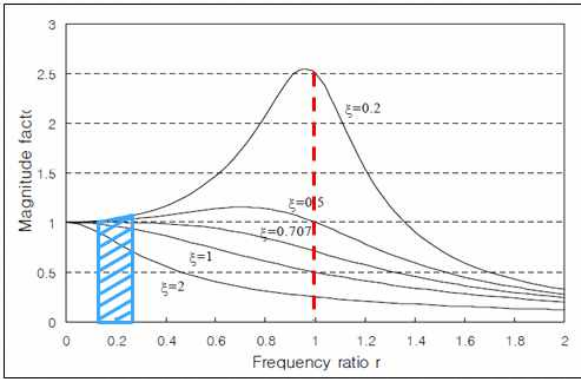


Fig. 8 Frequency-response characteristic curve of existed seismic sensor parts

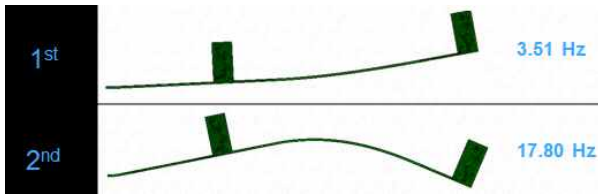


Fig. 9 Frequency analysis results of new FBG seismic sensor parts using ABAQUS

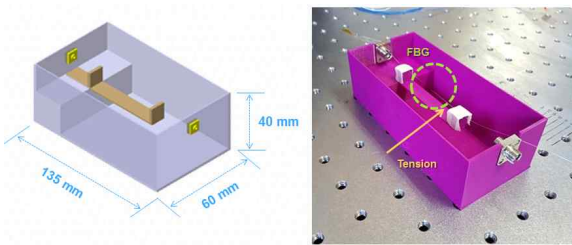


Fig. 10 Produced new FBG seismic sensor

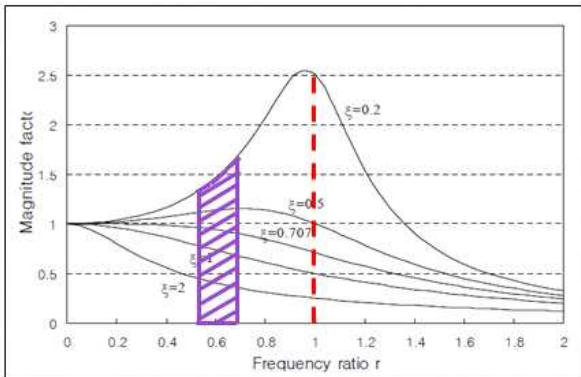


Fig. 11 Frequency-response characteristic curve of new seismic sensor parts

설계된 FBG Seismic Sensor 부의 1차 모드의 고유진동수 값은 3.51 Hz로 외부 가진과 주파수 비를 계산하여 주파수 응답 특성곡선에 나타내면 ( $0.427 \leq r \leq 0.712$ )으로 Fig. 11의 보라색 빗금의 부분과 같다.

### 2.5 보행 진동 측정 실험 2

Fig. 12와 같이 채설계된 FBG Seismic Sensors를 적용하여 동일한 실험 결과는 Fig. 13과 같으며 결과 Amplitude의 비가 약 15배 이므로, 민감도가 약 15배 향상되었음을 알 수 있다.

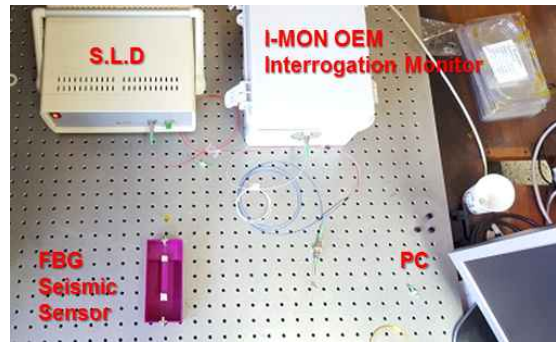
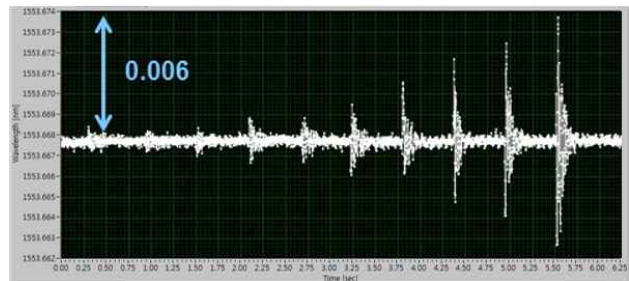
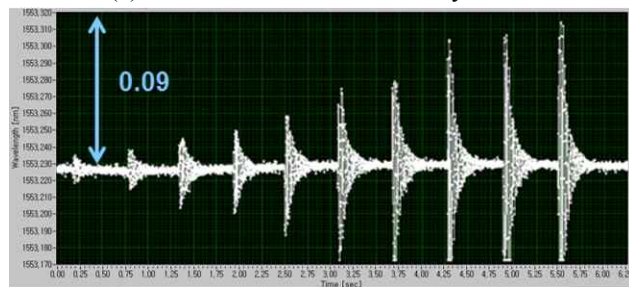


Fig. 12 Overall experimental set-up of WVS using new FBG seismic sensors



(a) Results of existed WVS system



(b) Results of new WVS system

Fig. 13 Results of Walking Vibration Measurement Experiment

### 3. 결 론

최근 전 세계적인 각종 테러, 국지전 등으로 인한 국가 및 산업 핵심 시설 보호의 필요성이 급증함에 따라, 현재 침입 감지를 위해 사용되어지고 있는 대표적인 기술 외 저가이면서 노이즈가 적어 넓은 범위를 탐지 할 수 있는 광섬유를 이용한 침입 감지 기법 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 과장 분할 다중화 기법을 이용하여 동시 다점 측정에 용이한 FBG센서를 사용하여 보행 진동 측정에 관한 연구를 진행하였다.

WVS 시스템을 구성하고 성능검증을 위해 FBG Seismic sensor 부(외팔보)의 끝단부에 27 mm 변위를 가하여 수행한 결과, 이론값과 Strain Gauge를 이용해 측정된 값과 비교하여 5 % 이내의 오차를 확인하여, 시스템의 성능을 검증하였다.

성능 검증 후 보행 진동 측정을 확인하기 위하여 측정 시스템으로부터 15 m 거리에서 측정 시스템 방향으로 보행을 수행한 결과, Amplitude 0.006 mm를 가지는 원활한 보행 진동 측정 결과를 얻을 수 있었다.

보행 진동 측정 실험 후 이동 용이성과 민감도 향상, 소형화를 위해 CATIA를 이용하여 모델링하고, ABAQUS를 통해 주파수 해석을 수행하며 3D Printer를 이용한 새로운 FBG Seismic Sensor 부를 제작하였다. 제작 후 동일한 실험결과 기존 측정 시스템과의 Amplitude 비가 약 15배 향상된 값인 0.09 mm를 얻게 되었으므로, 민감도가 약 15배 향상된 결과 값을 확인하였다.

추후 진행 방향으로는 제작된 측정 시스템을 이용하여 보행 진동 방향 측정에 대한 연구를 진행 할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 차세대 기계항공 창의인재 양성사업인 BK Plus와 교육부 지방 특성화 사업인 CK-I 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

### References

[1] I. S. Kim, J. S. Gang, K. M. Kim, "Implementation and Analysis of Digital Signal Processing System for

Intruder Detection using the Variations of the Optical Speckle Patterns," KIEES, vol. 15(4), pp. 360-367, May, 2004.

[2] S. Q. Lee, K. H. Park, W. S. Yang, "Intrusion Detection Based on the Sound Field Variation of Audible Frequency Band," KSNVE, vol. 21(3), pp. 212-219, March, 2011.

[3] J. Park, W. Lee and H. Taylor, "Fiber Optic Intrusion Sensor with Configuration and Optical Time-domain Reflectometer using Coherent Interference of Rayleigh Backscattering", Optical and Fiber Optic Sensor Systems, pp. 49-56, 1998.

[4] Shizhuo Yin, P. P. Francis and T. S. Yu, "Application of Fiber Specklegram Sensor to Fine Angular Alignment", Optics Communications, vol. 170, pp. 15-21, Oct. 1999.

[5] B. Y. Koo, C. Y. Ryu, C. G. Kim, "Dynamic Mode Sensing of a Composite Beam using Fiber Bragg Grating Sensor," SASE, vol. 29(2), pp. 27-35, March, 2001.

[6] L. H. Kang, D. K. Kim, J. H. Han, "Estimation of Structural Deformation using FBG Sensors" SASE, pp. 553-556, 2005.