

이중 FBG 광섬유센서를 이용한 구조물 가속도 및 기울기 측정 장치에 관한 연구

A Study on the Accelerometer for the Acceleration and Inclination Estimation of Structures using Double-FBG Optical Sensors

이금석* 안수홍** 손수덕*** 이승재****
Lee, Geum-Suk Ahn, Soo-Hong Shon, Su-Deok Lee, Seung-Jae

Abstract

In this study, an acceleration sensor that has optical fibers to measure the inclination and acceleration of a structure through contradictory changes in two-component FBG sensors was examined. The proposed method was to ensure precise measurement through the unification of the deformation rate sensor and the angular displacement sensor. A high sensitivity three-axis accelerometer was designed and prepared using this method. To verify the accuracy of the accelerometer, the change in wavelength according to temperature and tension was tested. Then, the change in wavelength of the prepared accelerometer according to the sensor angle, and that of the sensor according to the change in ambient temperature were measured. According to the test results on the FBG-based vibration sensor that was developed using a high-speed vibrator, the range in measurement was 0.7 g or more, wavelength sensitivity, 2150 pm/g or more, and the change in wavelength change, 9.5 pm/°C.

Keywords : Fiber Bragg Grating, Optical fiber sensor, Acceleration, Inclination of structures, Double-FBG sensors

1. 서론

건축·토목과 IT 융합은 최근 정보 표준화, 모니터링, 구조물 계측 등의 다양한 분야로 확대되고 있다. 문명의 발달과 경제성장이 커짐에 따라서 터널, 교량, 도시철도 등과 같은 사회기반시설들은 보다 정밀하고 대형화되었으며, 이들의 상시 모니터링 필요성이 높아짐에 따라 동적 특성을 측정하는 가속도 센서의 연구가 활발하게 되었다. 가속도 센서의 개발은 건축·토목분야 외에도 자동차, 기차, 로봇공학 및 공장자동화 등의 분야의 제어를 위해서 필수적

인 요소이다. 그러나 교량이나 건물과 같은 대상의 경우 매우 거친 측정환경에서 관찰이 가능하게끔 개발되어야 하며, 이러한 까닭에 전자기 센서의 사용은 노이즈로 인해서 많은 제약을 가지게 되었다. 이러한 단점을 보완하기 위한 광섬유기반의 센서가 많은 연구자들의 관심을 가지게 되었고 다양한 건축분야에 접목되고 있다.

광섬유는 일반적으로 우수한 민감도와 분해능을 지니면서도 작고 유연하게 센서를 제작할 수 있을 뿐만 아니라 필요한 곳에 쉽게 삽입할 수 있다. 또한 구조물의 표면에 부착하여 측정함으로써 실시간 모니터링에 매우 적합하고 전자기파의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 광섬유를 이용한 가속도 센서는 측정되는 방식에 따라서 크게 Light intensity-typed 센서(Lopez et al., 1997), Interferometer-typed 센서 및 Fiber Bragg Grating(FBG) 센서(Berkoff and Kersey, 1996; Mita, 2000)로 분류된다(Lee et al., 2008). 이중에서 Interferometer-typed 센서의 경우

* 정회원, (주)에프비지코리아, 대표이사
FBG Korea Inc., CEO

** 정회원, (주)아크로비전, 대표이사
Acrovision Inc., CEO

*** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 연구교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

**** 교신저자, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224
E-mail: leeseung@koreatech.ac.kr

Michelson형, Fabry-Perot형, Mach-Zender형, Moire-Fringe형 등과 같이 다양한 종류가 있으나 제작하기가 어렵고, 온도에 영향을 크게 받는다(Lee, 1992; Park et al., 2001; Wu et al., 2004). 그러나 FBG 센서의 경우 측정이 간편하고 높은 분해능과 시공성 및 멀티플렉싱 기술을 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Li et al., 2004; Baldwin et al., 2005; Majumder et al., 2008; Lee et al., 2013, Choi et al., 2013; Oh et al., 2014). 이러한 장점은 적은 수의 센서로도 부재의 최대 변형율을 계측할 수 있으며, FBG는 변형률을 계측하기 위한 포인트 센서로서 상시모니터링 분야에서 가장 널리 이용되고 있다(Chan et al., 2006; Majumder et al., 2008; Torres et al., 2011; Oh et al., 2014).

FBG 기반의 가속도 센서의 가능성은 Berkoff et al. (1996)의 문헌에서 찾아볼 수 있으며, 초기의 FBG 가속도계의 원리는 외팔보에 설치된 브래그 격자의 파장 변화를 측정하여 가속도를 추정하는 것이었다. 고감도와 크기 등의 여러 가지 장점들로 인해서 FBG 기반의 가속도계는 많은 관심을 끌게 되었고(Kang et al., 2002; Somatomo et al., 2008), 최근에도 FBG 기반의 가속도계는 이러한 초기연구의 원리를 응용하여 다양한 연구가 이루어지고 있다. 측정 원리는 기구에 연결된 하나의 FBG에서 변화가 측정되었다(Zhou et al., 2010; Song et al., 2011; Antunes et al., 2012; Khan et al., 2014; Zhang et al., 2014; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2015). 다수의 FBG에서의 상반된 변화를 측정원리로 이용한 연구의 경우 가속도뿐만 아니라 다양한 측정을 동시에 수행할 수 있었고, 여러 목적을 가진 진동계측의 FBG에 대한 연구로서 Rao et al. (1997)은 다중 in-FBG/fibre- Fabry-Perot 센서를 이용하여 변형, 온도, 가속도의 동시측정에 대해서 연구를 수행하였고, Zhang et al. (2013)은 사장교의 진동과 온도를 동시에 측정하기 위한 초극세사기반의 FBG 센서에 대해서 연구하였다. 이러한 연구를 토대로 Jiang et al. (2015)은 가속도, 온도 및 수직성을 동시에 측정하는 삼중 FBG 가속도 센서를 연구하였고, 다양한 시도가 이어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 두 개의 FBG에서 측정되는 인장과 압

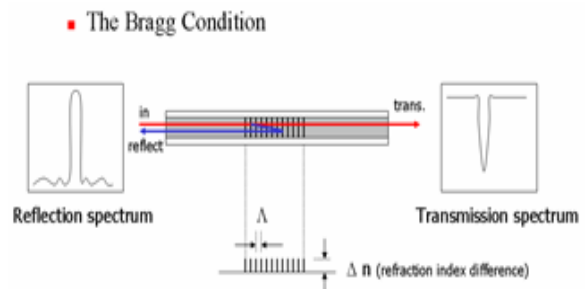
축의 상반된 변화와 각도를 이용한 가속도계에 대해서 연구하여 두 가지 구조물의 파라메타를 동시에 측정할 수 있도록 개발하였다. 제안된 원리는 정확한 계측의 목적과 더불어 변형을 센서와 각도변위 센서의 단일화를 가능하게 하는 장점이 있다. 본 논문에서는 이러한 원리를 이용하여 가속도계 프로토타입을 설계하고, 고민감도 가속도계를 제작하였다.

2. 센서인 추정원리

2.1 FBG 센서 이론

FBG 가속도 센서의 원리는 일반적으로 진동에 의해서 발생하는 FBG의 변형 량을 계측함으로써 추정할 수 있다. 가속도에 의해서 센서가 움직이게 되면 Mass는 상대적 변위가 발생하고, 변형 량에 따라 FBG 센서의 파장이 변화한다. 이를 이용하여 가속도를 예측한다. FBG 센서는 광섬유 코어(Fiber Bragg core)에 일정한 주기에 따라 굴절률(Refractive index) 변화를 유도하여 만들어지며, 브래그 조건(Bragg condition)에 의한 입사파와 반사파의 스펙트럼(Reflection and transmission spectrum)에 의해 변화량을 계측할 수 있다. 브래그 조건은 격자 주기(Grating period) (Λ)와 광섬유 코어의 유효굴절률(Effective refractive index) (n_{eff})에 의해 FBG의 반사 중심파장(Center wavelength of reflection) (λ_r)이 결정되는데, 이를 브래그 조건이라 하며, 다음 식 (1)과 같다.

$$\lambda_r = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$



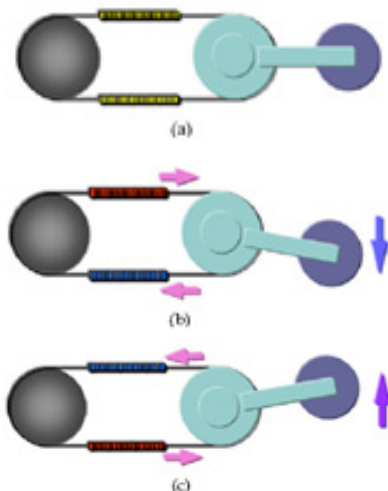
(Fig. 1) The bragg condition and the representative spectrum of the optical fiber sensor

<Fig. 1>에서와 같이 광섬유 브래그 모식도에서 처럼 진행파가 광섬유격자를 만나면 특정 파장 성분이 반사파로 진행하게 되는데 즉, 광섬유 격자에 광대역 광원을 입사시키면, 특정 파장 성분은 반사되어 입력 단으로 되돌아오고, 나머지 성분들은 광섬유 격자를 투과하게 된다. 광섬유 코어의 유효 굴절률은 격자 제작 시 UV 조사량, 주변 온도, 변형 등에 의해 변화시킬 수 있다. 광섬유 격자의 주기는 제작에 사용되는 위상 마스크의 주기에 의해 결정되고 변형을 이용하여 미세하게 조정할 수 있다.

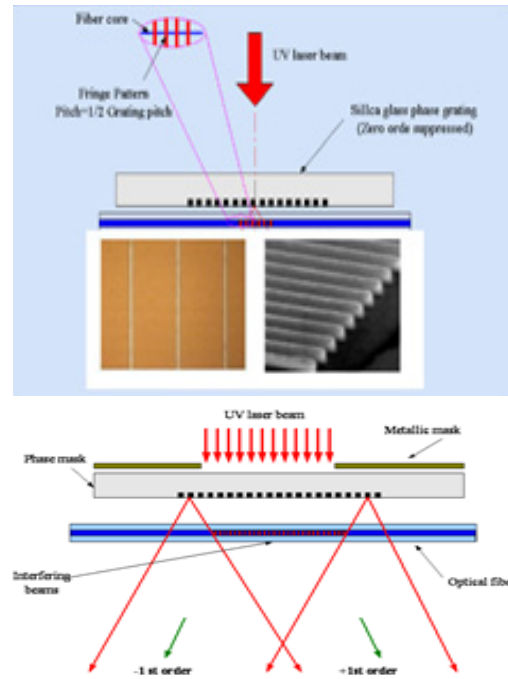
2.2 이중 FBG 기반 가속도센서

구조물 내-외부의 비정상적인 움직임이나 진동을 측정하기 위한 가속도 센서의 원리는 <Fig. 2>와 같다. FBG 기반 가속도 센서는 그림에서 보이듯이 두 개의 광섬유 격자를 사용하여 추의 움직임 방향에 따라 두 개의 광섬유 격자가 서로 반대 방향의 힘(수축력(파란색), 장력(붉은색))을 받게 된다. 즉 수축력의 광섬유 격자 중심파장은 단파장으로 변화하고, 장력은 장파장으로 변화하는 것을 이용하여 가속도를 측정하게 된다.

이러한 원리는 구조물의 기울어진 각도와 변위를 측정할 수 있는 다중 광섬유 가속도 센서로 적용 가능하며, 측정 대상물의 변동에 따른 변형량을 계산함으로써 각도와 중력가속도를 계측할 수 있다.



<Fig. 2> Wavelength changes and the acceleration sensor of the optical fiber grating



<Fig. 3> Method of optical fiber grating preparation using a phase mask

2.3 광섬유 제작과정

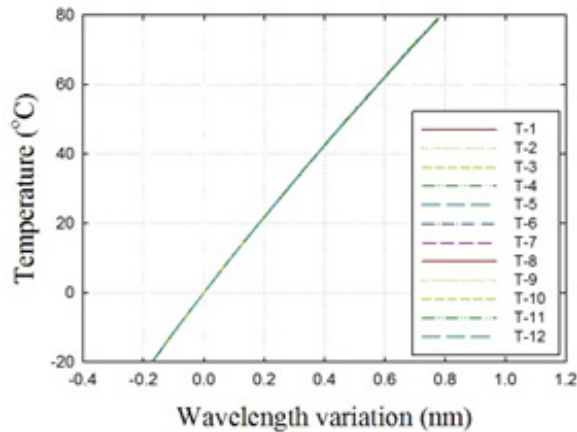
광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사하여 브래그 조건식을 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자에서 반사되는데, 이 때 광섬유 격자는 위상 마스크(Phase mask)를 사용하여 제작한다. 위상 마스크는 일종의 회절 광학소자(Diffractive Optical Element)로서 격자 형성을 UV 빛을 통과시켜 공간에 따른 위상차를 유도하는 것이다. 위상 마스크의 골의 깊이(DPM)를 조절하면 위상 마스크에 인가된 UV 빛의 0차 회절은 수 % 이내, 1차 회절은 최대로 할 수 있는데 이 1차 회절 빔들을 이용하여 광섬유 코어에 간섭무늬를 형성하게 된다<Fig. 3>. 일반적인 위상 마스크를 사용한 광섬유 격자 제조 공정은 가속도 측정용 광섬유 격자의 설계 및 제작을 위한 고려사항과 위상 마스크와 광학 시스템의 환경을 구성하여 공정을 진행한다.

3. FBG 센서의 테스트

3.1 광섬유 센서의 물리량 변화측정 실험

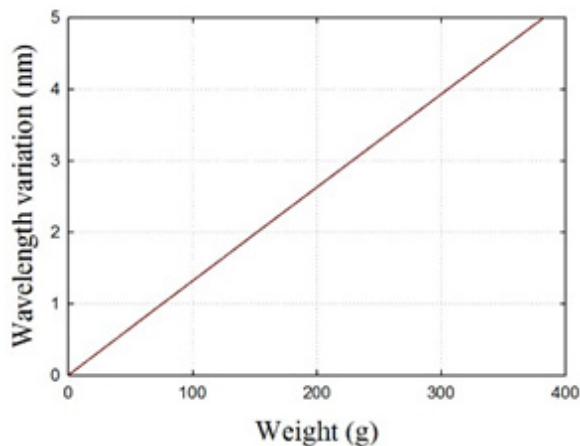
광섬유 센서의 온도에 의한 영향을 알아보기 위

해서 12개의 테스트용 FBG 센서를 제작하였다. 테스트를 위한 온도 챔버에 광섬유 센서 시편 12개를 넣어놓고 -20도에서 +80도까지의 변화를 측정하였으며, 그 결과는 <Fig. 4>와 같다. 광섬유 센서 시편 12개 모두 매우 동일한 경향을 보이며, 25 °C에서 9.5 pm/°C의 결과로 나타났다.



<Fig. 4> Wavelength results at various FBG temperatures

광섬유 센서의 장력에 의한 변화를 알아보기 위하여 센서의 한쪽 끝에 무게 추를 달아 놓고 무게를 증가시켜 측정된 변화량을 살펴보았으며, 그 결과는 <Fig. 5>와 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 광섬유 센서가 장력에 비례하여 매우 일정하게 늘어나는 것을 알 수 있었으며, 그 변화량은 100g에 1.316 nm인 것으로 나타났다.



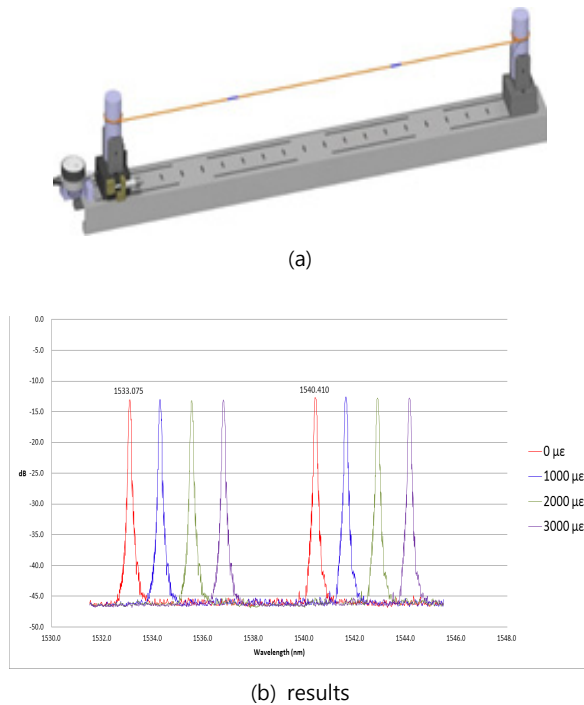
<Fig. 5> Wavelength changes according to the tension force applied to the optical fiber sensor

<Table 1> Tension test result of the sensors

Tension ($\mu\epsilon$)	Sensor 1		Sensor 2	
	Wavelength (nm)	Variation (nm)	Wavelength (nm)	Variation (nm)
0	1533.075	0.000	1540.410	0.000
100	1533.195	0.120	1540.531	0.121
200	1533.315	0.240	1540.652	0.242
300	1533.435	0.360	1540.773	0.363
400	1533.555	0.480	1540.894	0.484
500	1533.675	0.600	1541.015	0.605
600	1533.795	0.720	1541.136	0.726
700	1533.915	0.840	1541.257	0.847
800	1534.035	0.960	1541.378	0.968
900	1534.155	1.080	1541.499	1.089
1000	1534.275	1.200	1541.620	1.210
1100	1534.400	1.324	1541.745	1.334
1200	1534.524	1.449	1541.869	1.459
1300	1534.649	1.573	1541.994	1.583
1400	1534.773	1.698	1542.118	1.708
1500	1534.898	1.822	1542.243	1.832
1600	1535.022	1.947	1542.367	1.957
1700	1535.147	2.072	1542.492	2.081
1800	1535.271	2.196	1542.616	2.206
1900	1535.396	2.321	1542.741	2.330
2000	1535.520	2.445	1542.865	2.455
2100	1535.646	2.571	1542.992	2.582
2200	1535.772	2.697	1543.118	2.708
2300	1535.898	2.823	1543.245	2.834
2400	1536.024	2.949	1543.371	2.961
2500	1536.150	3.075	1543.498	3.087
2600	1536.276	3.201	1543.624	3.214
2700	1536.402	3.327	1543.751	3.341
2800	1536.528	3.453	1543.877	3.467
2900	1536.654	3.579	1544.004	3.593
3000	1536.780	3.705	1544.130	3.720

광섬유의 각 센서마다 기본적인 파장 변화량이 동일한지를 측정하기 위해 <Fig. 6 (a)>와 같은 장력 측정 시험기를 사용하여 측정 실험을 진행하였다. 테스트 결과, 파장의 변화는 <Fig. 6 (b)>와 같

은 결과를 얻을 수 있었고, 변화량은 <Table 1>과 같다. 여기서 2개 센서(1533.075 nm, 1540.410 nm)를 동시에 1,000만큼의 길이 변화를 주었으며, 3,000까지 실험한 내용을 분석한 결과, 표에서 보이는 바와 같이 2개의 광섬유 센서 모두 유사한 변화량을 보이는 것을 알 수 있다.



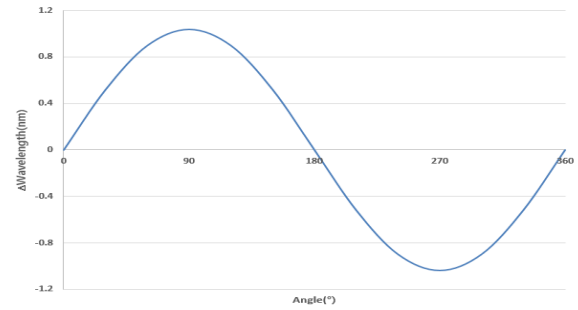
<Fig. 6> The same tension test graph in both sensors

3.2 가속도 센서 특성 실험

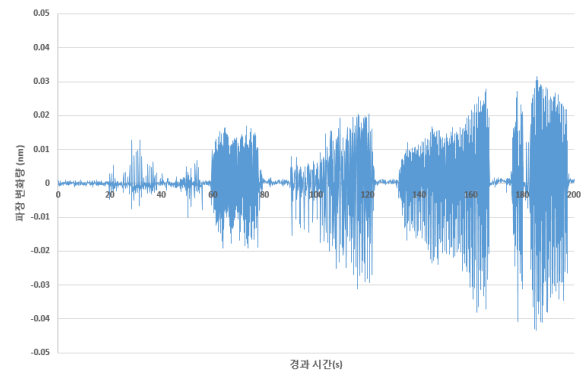
모델링한 광섬유 가속도 센서에 대해서 각도변화에 따른 중력에 의한 변화량을 측정하였으며, 이때 센서에는 50g의 추를 사용하여 측정하였다. 각도 변화를 통해 중력에 의한 파장 변화량 측정 결과, <Table 2>와 같이 90도에서 1,040 pm의 변화를 나타냈고, 파장의 변화는 중력방향에 따라 <Fig. 7>과 같이 나타났다.

<Table 2> Wavelength changes of the sensors

Angle (°)	0	90	180	270 (-90)	360 (0)
Changes (nm)	0.000	1.040	0.000	-1.040	0.000



<Fig. 7> Wavelength changes according to gravity direction



<Fig. 8> Changes in the acceleration sensor with optical fibers according to impacts

모델링한 광섬유 가속도 센서를 사용하여 충격에 따른 변화량을 측정하였고, <Fig. 8>과 같은 결과를 얻었다.

3.3 FBG 기반 가속도 센서의 프로토타입

본 연구에서 제안된 원리를 이용하여 <Fig. 9>와 같은 프로토타입의 모델을 제작하였으며, 고민감형 FBG 기반 가속도 센서이다.

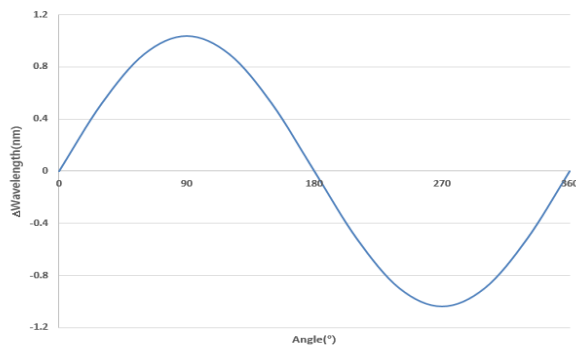


<Fig. 9> Prototypes of FBG Accelerometer

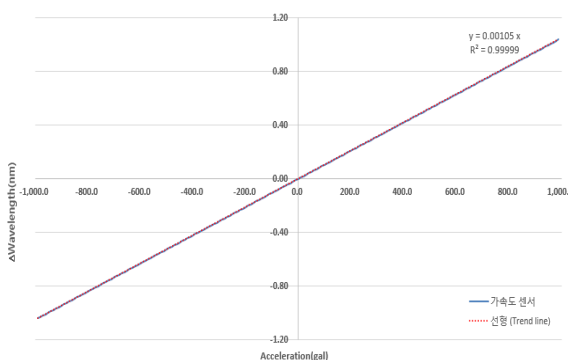
고민감형 FBG 기반 가속도 센서로서의 주요특성은 측정범위 $\pm 0.7g$, 분해능 $0.001g$, 게이지팩터 $1g/1,040pm$ 이다. 공진 파장의 변화를 측정한 결과는 <Table 3>과 같다. 또한 가속도 센서의 각도별 기울기 측정변화와 가속도 추정결과에 대해서 측정된 결과는 <Table 3> 및 <Fig. 10~11>과 같고 각도 변화에 대한 측정 결과는 만족할 만 하였다.

<Table 3> Results of measuring the wavelength change in the acceleration sensor

Angle (°)	Acceleration of Gravity (g)	Prototype	
		Wavelength (nm)	Variation (nm)
0	0	1548.160	0.000
90	1	1548.681	1.040
180	0	1548.160	0.000
270	-1	1547.640	-1.040
360	0	1548.160	0.000



<Fig. 10> Wavelength changes in Prototype C according to gravity direction



<Fig. 11> Acceleration-converted graph of Prototype C according to gravity direction

3.4 진동대 테스트

개발된 광섬유 가속도 센서의 광섬유 격자 특성을 측정하고 신뢰성을 검토하기 위하여 고속 진동 시험을 실시하였다. 사용되는 진동시험 장치의 사양은 <Table 4> 및 <Fig. 12>에 나타난 바와 같다.

<Table 4> Specifications of the vibration test equipment

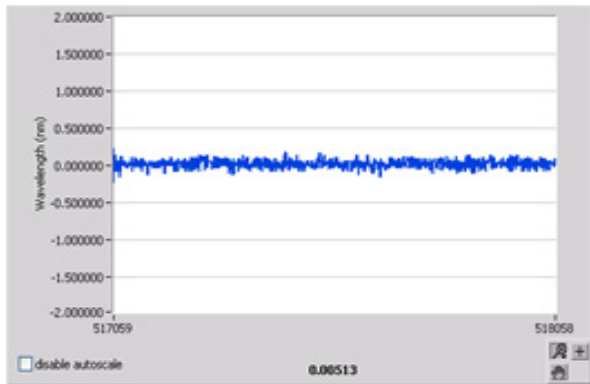
Excitation	Sine	1,000 kgf (2,205 lbf)
	Random	1,000 kgf (2,205 lbf)
Diameter	∅ 335mm	
Max. Load capacity	160 kg (353 lb)	



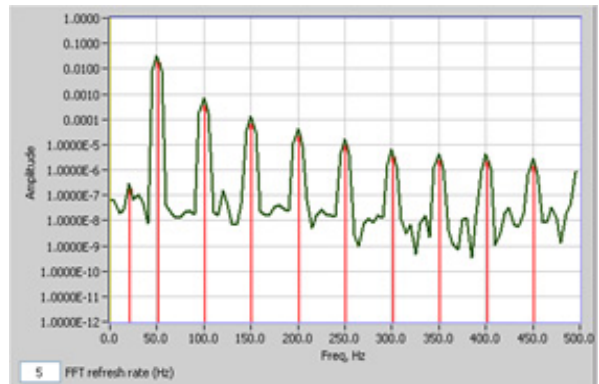
<Fig. 12> Vibration test equipment for the acceleration sensor with optical fibers

진동대의 표에서 보는 바와 같이 광섬유 가속도 센서에 대한 특성을 측정하기 위한 장치의 특성으로 비교적 높은 진동가속도 효율을 지니고 있으며, 높은 횡축강성과 직경 약 350mm로서 다양한 시험을 할 수 있다. 이러한 진동대를 이용해서 FBG 가속도 센서에 일정한 진동을 가하여서 신호를 측정하였다.

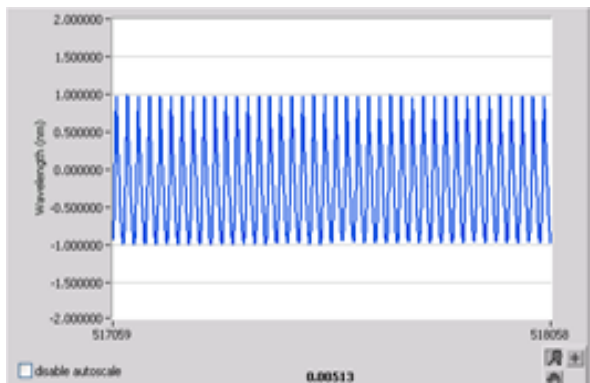
진동대를 이용해서 FBG 가속도 센서에 일정 진동(0, 50, 100 Hz)을 가했을 때의 센서가 측정하는 신호를 확인하였으며, <Fig. 13~15>에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 측정된 신호는 매우 안정적이며, 0 Hz에서의 미소한 변화에 대해서는 진동시험장비의 자체고유진동에 의해서 관측된 신호로 판단된다.



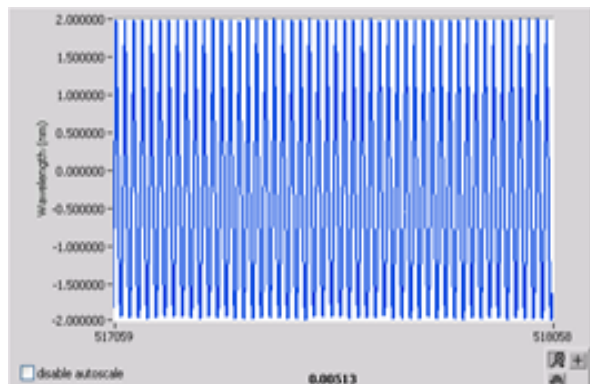
〈Fig. 13〉 Signals from the acceleration sensor with optical fibers (0 Hz)



〈Fig. 16〉 The frequency range of the Fourier-transformed signals of the acceleration sensor with optical fibers



〈Fig. 14〉 Signals from the acceleration sensor with optical fibers (50 Hz)

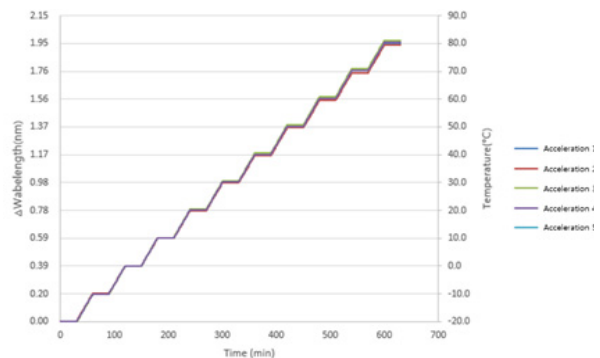


〈Fig. 15〉 Signals from the acceleration sensor with optical fibers (100 Hz)

다음으로 광섬유 가속도 센서에 진동이 가해졌을 때의 센서의 측정된 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 얻어진 주파수 대역 특성 결과는 <Fig. 16>과 같다.

3.5 주변온도에 대한 동작특성

광섬유 가속도 센서가 주변 온도 변화에 영향을 받는지를 확인하기 위하여 영하 20℃에서 영상 80℃까지 온도를 변화시키면서 서로 다른 5개의 광섬유 가속도 센서에서 발생하는 중심파장 변화를 측정하였다. 온도 변화에 따른 광섬유 가속도 센서의 중심파장 변화를 측정한 결과, <Fig. 17>과 같이 5개의 센서 모두 동일하게 온도 변화에 대해 1도에 19pm의 변화량을 보였다.



〈Fig. 17〉 Temperature test results of the five acceleration sensors using optical fibers

4. 결론

본 논문은 두 개의 FBG 센서를 이용하여 구조물의 기울기와 가속도를 동시에 계측할 수 있는 광섬유 가속도 센서에 대해서 연구하였다. 상반된 두 센

서의 장력을 이용하여 구조물의 기울기와 가속도를 측정하는 원리를 제안하였고, 고해상도의 FBG 기반 가속도 센서 프로토타입을 설계하였다. 제안된 원리는 변형을 센서와 각도변위 센서의 단일화가 가능하였고, 민감한 진동에도 측정결과는 만족할 만하였다. 또한 가속도계측 검증을 위한 진동대 테스트와 온도테스트 결과는 개발된 센서가 측정범위 0.7g, 분해능 0.0005g, gauge factor 1g/2,150pm, 파장민감도는 2,150pm/g 및 9.5pm/°C의 변화률의 결과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(15AUDP-B100343-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사합니다.

References

1. Lopez-Higuera, J.M., Morante, M.A. and Cobo, A., "Simple Low-Frequency Optical Fiber Accelerometer with Large Rotating Machine Monitoring Applications," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 7, pp. 1120-1130, 1997
2. Berkoff, T.A. and Kersey, A.D., "Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, No. 12, pp. 1677-1679, 1996
3. Mita, A., "Fiber Bragg Grating-Based Acceleration Sensors for Civil and Building Structures," *International Workshop on Present and Future in Health Monitoring; Bauhaus-Univ. Weinar, Germany*, pp. 1-7, 2000
4. Lee, Y., Jo, J., Kwan, I., Seo, D. and Lee, N., "Acceleration Sensor Using Optical Fibers and Film Gratings," *Journal of Optical Society of Korea*, Vol. 19, No. 3, pp. 175-181, 2008
5. Lee, K., "Fiber-Optic Accelerometer by Mach-Zehnder Interferometer," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 17, No. 10, pp. 1092-1099, 1992
6. Park, H., Choi, J. and Kim, Y., "Development of Fiber Optic Accelerometer for Third-Party Damage Detection," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 25, No. 10, pp.1551-1558, 2001
7. Wu, B., Chen, C., Ding, G., Zhang, D. and Cui, Y., "Hybrid-integrated Michelson fiber optic accelerometer," *Optical Engineering*, Vol. 43, No. 2, pp. 313-318, 2004
8. Li, H.N., Li, D.S. and Song, G.B., "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Engineering Structures*, Vol. 26, pp.1647-1657, 2004
9. Baldwin, C., Niemczuk, J., Kiddy, J. and Salter, T., "Review of Fiber Optic Accelerometers," *IMAC XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 2005
10. Majumder, M., Gangopadhyay, T.K. and Chakraborty, A.K., "Fiber bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, pp.150-164, 2004
11. Lee, S.J., Lee, G.S., Shon, S.D. and Moon, D.J., "FBG Strain Sensors for Creep Measurement Due to Hydration Heat in Massive Concrete," *Advanced Materials Research*, vol. 689, pp. 329-332, 2013
12. Choi, S.W., Park, K.H., Kim, Y.S. and Park, H.S., "A Numerical Study on the Strain Based Monitoring Method for Lateral Structural Response of Buildings using FBG Sensors," *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 26, No. 4, pp.263~269, 2013
13. Oh, B.K., Lee, J.H., Choi, S.W., Park, H.S.

- and Kim, Y.S., "An Estimation Method of Strain Distribution for Safety Monitoring of Multi-span Steel Beam Using FBG Sensor," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 1, pp.138-149, 2014
14. Chan, T.H.T., Yu, L., Tam, H.Y., Ni, Y.Q., Lin, S.Y., Chung, W.H. and Cheng, L.K., "Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation," *Engineering Structures*, Vol. 33, pp.648-659, 2006
 15. Torres, B., Paya-Zaforteza, I., Calderon, P.A. and Adam, J.M., "Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring," *Engineering Structures*, Vol. 33, pp.539-548, 2011
 16. Kang, H., Bang, H., Hong, C. and Kim, C., "Simultaneous measurement of strain, temperature and vibration frequency using a fibre optic sensor," *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, No. 8, pp.1191-1196, 2002
 17. Somatomo, H., Tanaka, S. and Takahashi, N., "Vibration sensing of solid using long-period fiber grating," in 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, vol. 7004 of Proceedings of SPIE, April 2008.
 18. Zhou, W., Dong, X., Ni, K., Chan, C.C. and Shum, P., "Temperature-insensitive accelerometer based on a strain-chirped FBG," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 157, No. 1, pp. 15-18, 2010
 19. Song, G.D., Wang, J.Y., Liu, T.Y., Wang, C. and Lu, L. "Optical fiber grating strain acceleration sensors ground vibration experimental research," *Procedia Engineering*, Vol. 26, pp. 784-793, 2011
 20. Antunes, P., Lima, H., Varum, H. and Andre, P., "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study," *Measurement*, Vol. 45, No. 7, pp. 1695-1705, 2012
 21. Khan, M.M., Panwar, N. and Dhawan, R., "Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 205, pp. 79-85, 2014
 22. Zhang, X., Rong, Q., Sun, H. Yang, S., Yuan L. and Hu, M, "Low-frequency fiber bragg grating accelerometer based on a double-semicircle cantilever," *Optical Fiber Technology*, Vol. 20, pp. 190-193, 2014
 23. Wang, J., Yu, Y., Chen, Y., Luo, H. and Meng, Z., "Research of a double fiber Bragg gratings vibration sensor with temperature and cross axis insensitive," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 126, No. 7, pp. 749-753, 2015
 24. Zhang, Y., Qiao, X., Liu, D., Gao, H., Shao, M. and Wang, X., "Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder," *Optical Fiber Technology*, Vol. 26, pp. 229-233, 2015
 25. Rao, Y.J., Henderson, P.J., Jackson, D.A., Zhang, L. and Bennion, I., "Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in-fibre-Bragg-grating/fibre-Fabry-Perot sensor system," *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 24, pp.2063-2064, 1997
 26. Zhang, Q., Zhu, T., Zhang, J.D. and Chiang, K.S., "Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 18, pp.1751-1753, 2013

27. Jiang, S., Wang, J., Sui, Q., Ye, Q. and Wang, L., "Study of Three-Component FBG Vibration Sensor for Simultaneous Measurement of Vibration, Temperature and Verticality," Journal of Sensors 2015, Article ID 382865, 2015

- Received : January 29, 2016
- Revised : February 29, 2016
- Accepted : February 29, 2016