Regular paper http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2014.9.8.841

구조물 변형 모니터링을 위한 FBG센서 네트워크 시스템 구현

박장식* · 박근수**

Implementation of FBG Sensor Network System for Monitoring Structure Deformation

Jang-Sik Park* · Keun-Soo Park**

요 약

FBG센서는 터널, 교량, 선박과 같은 구조물의 변형을 측정하고 활용된다. 본 논문은 구조물의 상태를 FBG 센서를 이용하여 원격모니터링 하기 위한 광전변환시스템의 개발 구현에 관한 것이다. 개발한 광전변환시스템은 원격 모니터링을 위하여 유선과 무선통신 기능으로 각각 CAN과 Zigbee를 포함한다. 광전변환시스템은 광회절격자에 의하여 분광된 FBG센서의 반사광을 선형 이미지센서로 입사하여 파장의 변이를 FPGA를 이용하여 측정한다. FBG센서신호에 대한 처리와 원격모니터링을 위한 데이터 전송을 위하여 DSC(digital signal controller)를 이용한다. 개발한 광전변환시스템이 구조물 변형 측정에 효율적임을 실험을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

FBG sensors are mainly used to measure deformation of structures such as tunnels, bridges and ships. In this paper, an interrogator of FBG sensors is developed and implemented to measure the status of structures. A developed interrogator includes CAN wired and Zigbee wireless communication for remote monitoring. Strain of structure is measured using shift of wavelength of reflected light from FBG sensor. A digital signal controller is used to process signals of a FBG sensor and transmit data for remote monitoring. As a result of experiment, developed interrogator is effective to measure deformation of structures.

키워드

Strain of Structure, FBG Sensor Interrogator
구조물 변형, FBG 센서, 광전변환시스템

Ⅰ. 서 론

최근 국토를 효율적으로 활용하고 교통체계를 편리하게 하기 위하여 터널, 교량의 건설이 활발히 진행되고 있다. 또한 터널과 교량은 거대한 구조로 건설되고 있어 구조물의 안정성을 유지하는 것이 중요한 요소가 되고 있다. 구조물의 안정성 유지는 터널, 교량 뿐만 아니라 해양플랜트에도 요구되고 있으며 ICT기술을 융합하여 구조물의 상태를 모니터링 하는 기술들이 연구 개발되고 있다. 특히 FPSO의 무어링(mo-

* 교신저자(corresponding author) : 경성대학교 전자공학과(jsipark@ks.ac.kr)
** MnSA(zeanet@naver.com)
접수일자 : 2014. 05. 30 심사(수정)일자 : 2014. 07. 21 게재확정일자 : 2014. 08. 11

oring) 케이블 또는 체인의 상태를 모니터링하기 위하여 활용되기도 한다.

일반적으로 구조물의 최대 응력 또는 부재력 수준을 결정하고 설계 기준에 의하여 부재의 허용 응력 또는 설계 강도와의 비교에 의하여 구조물의 안정성을 평가한다[1]. 구조물의 변형을 측정하기 위하여 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한 변형검출 시스템이 사용되고 있다[2]. 구조물의 상태를 모니터링하기 위하여 구조물의 균열, 기울기, 비파괴 검사 등이 있으며, 균열 또는 변형의 측정은 구조물의 안전과 직결되는 중요한 요소이다. 일반적으로 진동현방식(vibrating wire) 변형 센서가 주로 사용되고 있다[3-4]. 다른 한편으로는 광섬유를 이용하여 균열과 변형을 검출하는 방법이 있다. 광섬유 센서는 부피가 작고 가벼워서 구조물의 기능에 영향을 주지 않고 구조물의 상태를 모니터링 할 수 있다. 광섬유 센서들 중에서 광섬유 브래그 격자(FBG, Fiber Bragg Grating) 센서가 널리 활용되고 있다. FBG센서를 활용하여 구조물의 상태를 원격 모니터링 하기 위하여 WLAN 무선 센서네트워크 시스템이 개발되기도 하였으며[5], 구조물 이상과 재난 상황에 대한 신속한 대응을 위하여 재난안전 무선통신망 구축에 대한 연구가 진행되고 있다[6].

본 논문에서는 FBG센서를 이용하여 구조물의 상태를 효율적으로 모니터링 하기 위하여 유무선통신 네트워크 기능을 갖춘 광전변환시스템을 FPGA와 마이크로컨트롤러를 이용하여 개발 구현하였다. 일반적인 FBG센서 광전변환시스템은 광대역 레이저 광원을 FBG센서에 입사하여 광회절 격자로 분광된 반사광을 CCD센서로 측정한다. 본 논문에서는 CCD센서를 제어하여 반사광의 스펙트럼을 측정하는 광전변환시스템을 개발 구현하였다. 또한 개발 구현한 광전변환시스템은 구조물의 변형을 원격 모니터링할 수 있도록 유무선 통신기능을 텔레메트릭스(telemetrics) 국제표준인 IEEE 1451 표준에 부합하는 CAN과 Zigbee 통신 기능을 포함한다.

II. FBG센서 계측시스템

FBG센서는 광섬유를 따라 전송되는 가시광선을 사용하도록 광학격자(optical grating)가 제조된다[7]. FBG센서의 기본 구조는 그림 1과 같다.

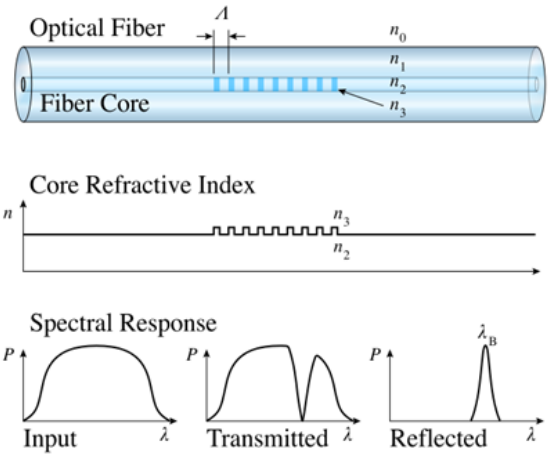

그림 1. FBG센서 구조와 스펙트럼 응답 특성
Fig. 1 A fiber bragg grating sensor structure and spectral response

그림 1과 같이 광대역 레이저 광원을 입사하면 광섬유 코어에는 일정 주기의 굴절률 변화에 의하여 식 (1)의 조건에 맞는 Bragg 파장만을 반사하고 나머지는 통과한다, 이 때, 광섬유 격자에 의하여 반사되는 파장을 Bragg 파장이라고 한다.

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

여기서, λ_B는 Bragg 파장이며, n_{eff}는 광섬유의 유효 굴절률, Λ는 제작된 격자 간격이다. 식 (1)로부터 Bragg 파장은 유효 굴절률과 Bragg 격자 주기에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 FBG 에 온도나 변형을 가하면 Bragg 파장이 달라진다. Bragg 파장의 변화량은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-P_e)\Delta\epsilon + (\alpha+\epsilon)\Delta T \tag{2}$$

P_e는 광탄성 상수이며, $\Delta\epsilon$은 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량, α는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수이며, ϵ은 온도에 의한 광섬유 굴절률 변화 계수이다. 그리고 ΔT는 광섬유 격자에 가해진 온도 변화이다. 구조물의 변형을 측정하기 위한 것이기 때문

온도 변화를 무시한다고 가정하면 변형률과 Bragg 파장의 관계를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다[8].

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{(1-P_e)}\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_B} \tag{3}$$

따라서, FBG센서 계측 시스템은 물리량의 변화에 의한 블래그 반사광 파장의 피크의 변화를 정확하게 측정하는 것이 중요한 요소이다. 정확한 계측을 위해서는 해상도가 높고 측정범위가 넓어야 한다. 일반적으로 사용되는 반사광 파장 변이 측정을 위한 광전변환시스템은 그림 2와 같이 광원(optical source), 회절격자(diffraction grating) 그리고 CCD 센서 및 제어기로 구성된다.

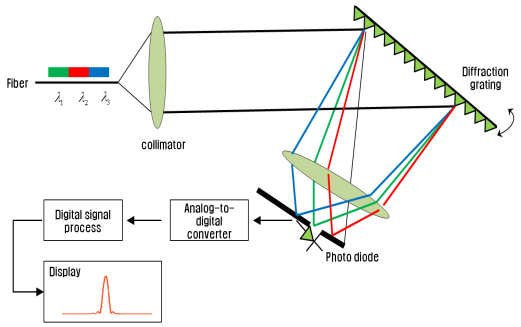

그림 2. 스펙트럼 분석기의 원리
Fig. 2 Principle of spectrum analyzer

물리적인 변형에 의한 반사광의 변형을 측정하기 위하여 회절격자(Diffraction grating) 에 의한 분광을 CCD센서에 입사하여 반사광의 파장 변화를 검출한다. 본 논문에서는 라인CCD센서 신호를 획득하기 위한 제어신호 생성을 위하여 FPGA 회로를 설계 구현하였다. 라인CCD센서의 출력신호로부터 FBG센서의 반사광 파장 변화를 측정하여 구조물의 변형을 측정하는 시스템을 구현하였다.

III. 광전변환시스템 구현

개발한 CCD방식의 광전변환시스템은 측정 파장 범위는 C 밴드로써 1,520nm에서 1,560nm까지이다. 개발 구현한 광전변환시스템의 구성도는 그림 3과 같다. 광회절격자에 의하여 분광된 반사광이 선형 이미지 센서로 입사되면 FPGA를 이용하여 선형 이미지 센서를 제어하여 파장의 변이를 측정한다. 파장의 변이를 이용하여 측정된 변이는 유선과 무선으로 각각 CAN, Zigbee 네트워크를 통하여 전송함으로써 구조물의 상태를 원격 모니터링할 수 있도록 한다.

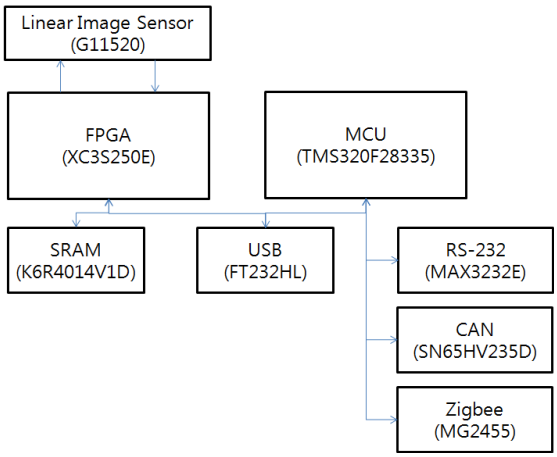

그림 3. FBG 광전변환시스템 구성도
Fig. 3 Configuration of FBG interrogator

그림 4와 5는 본 논문에서 반사광의 파장을 측정하기 위하여 활용된 이미지센서의 등가회로와 타이밍도이다. 이미지센서는 Hamamatsu 사의 G11520(InGaAs linear image sensor)를 이용하였으며, 이미지센서의 해상도는 512 화소이다. 모니터링 프로그램에서 256과 512 화소를 선택할 수 있다. 이미지센서를 제어하기 위한 기본적인 신호는 AD_sp, AD_trig 그리고 VIDEO 신호이다. AD_sp는 AD변환 시작 펄스 신호이며, AD_trig 는 CCD 이미지센서의 각 픽셀의 출력을 동기화한다. VIDEO 는 CCD 이미지센서의 출력신호이다. CCD 이미지센서에서 요구하는 클럭과 AD_sp, AD_trig 신호의 제어는 FPGA를 이용하여 제어한다. CCD의 출력신호는 AD변환하여 마이크로 컨트롤러로 전달하고, 시리얼통신, CAN 그리고 Zigbee 네트워크 중에서 선택하여 원격 모니터링 서버로 전송한다.

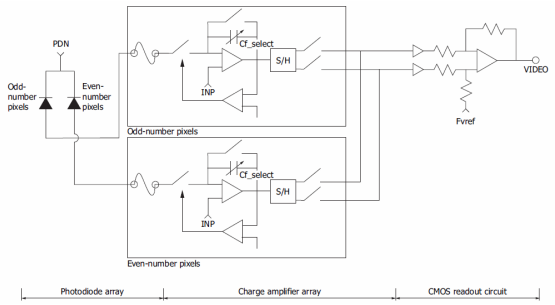

그림 4. 선형이미지센서의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of linear image sensor

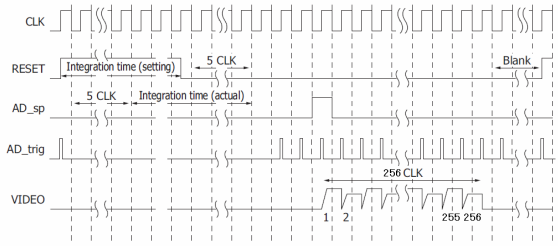

그림 5. 선형이미지센서의 타이밍도
Fig. 5 Timing chart of linear image sensor

그림 6은 선형이미지센서를 제어하기 위한 FPGA의 회로도이다. FPGA는 Xilinx사의 Spartan 3E 계열의 XC3S250E를 사용하였다. XC3S250E는 250K의 게이트를 사용할 수 있다.

그림 7과 8은 각각 CAN통신 트랜시버 회로와 Zigbee 통신 모듈의 주요 회로이다. CAN통신과 FPGA 제어를 위하여 Texas Instruments 사의 TMS320F28335 DSC (Digital signal Controller)를 사용한다. 사용한 DSC는 최대 150MHz 에서 작동하며, 512K(216K×2) 바이트 플래시 메모리가 내장되어 있다. CAN 2.0A 표준과 2.0B확장버전을 지원한다.

그림 7의 트랜시버 회로는 CAN 네트워크를 위한 전기적인 특성을 맞추기 위한 것이다. 그림 8은 Radio Pulse 사의 MG2455를 이용한 Zigbee 모듈 회로이다.

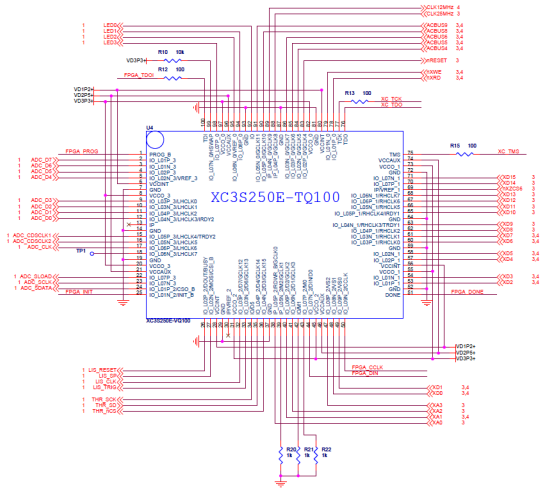

그림 6. 이미지센서 제어를 위한 FPGA 회로
Fig. 6 FPGA circuit for controlling image sensor

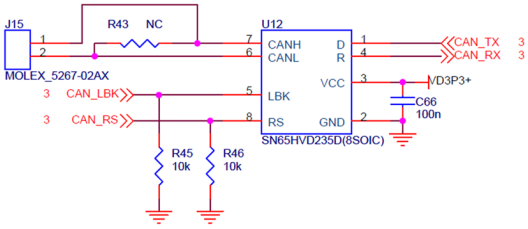

그림 7. CAN 트랜시버 회로
Fig. 7 CAN transceiver circuit

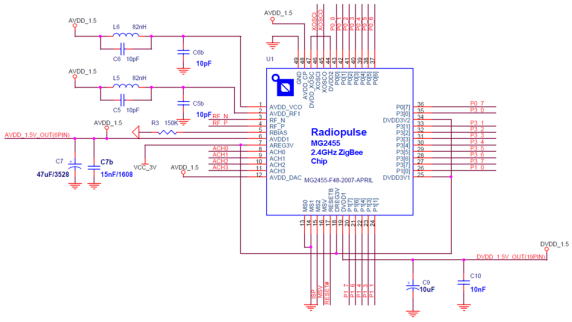

그림 8. Zigbee 통신을 위한 MG2455 주변 회로
Fig. 8 Peripheral circuit of MG2455 for Zigbee

그림 9와 10은 각각 개발 구현된 광전변환시스템 보드와 Zigbee 통신 모듈이다.

그림 9. 구현된 광전변환시스템 보드
Fig. 9 Implemented interrogator board.

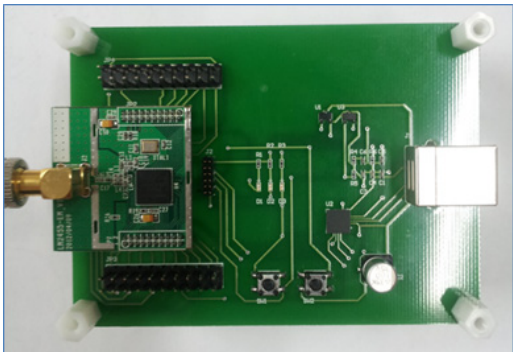

그림 10. Zigbee 통신 모듈
Fig. 10 Zigbee module

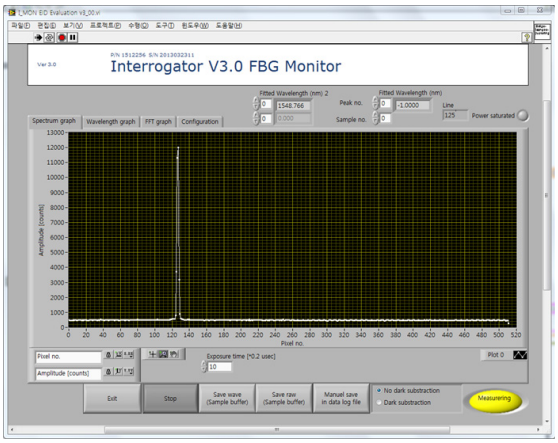

그림 11. FBG센서 파장 측정 결과
Fig. 11 Measurement results of FBG sensor

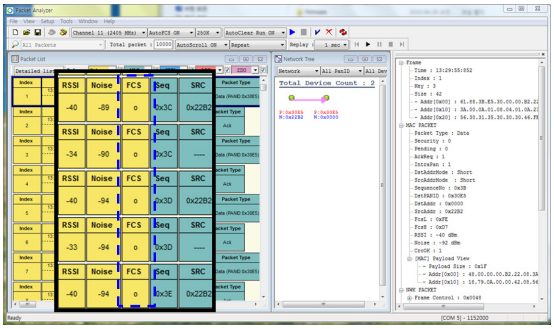

그림 12. Zigbee 통신 실험결과
Fig. 12 Experimental results of Zigbee

Ⅴ. 실험결과 및 검토

개발한 광전변환시스템을 이용하여 FBG센서의 변형에 대한 실험을 하였다. 광원으로는 1,520~1,560nm의 광대역 특성을 갖는 레이저 광원을 사용한다. 그림 11은 광전변환시스템으로부터 수집한 512 샘플 데이터이다. 구조물의 변형에 따라서 파장의 변이가 발생한다. 그림 12는 MG2455를 이용하여 구현한 Zigbee 통신 모듈에 대한 통신 실험결과이다. 코디네이트와 노드 간의 거리를 약 90m 간격으로 패킷전송 실험결과 패킷 오류가 발생하지 않음을 확인하였다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 구조물 변형을 원격 모니터링을 지원하기 위하여 유무선통신 기능을 가진 FBG센서 광전변환시스템을 개발 구현하였다. 구조물의 변형을 측정하기 위하여 이미지센서 방식의 FBG센서 반사광 측정을 FPGA를 이용하여 제어한다. FBG센서의 파장 변이를 모니터링하기 위하여 LabVIEW를 이용하여 모니터링 프로그램을 구현하고 개발한 광전변환시스템이 정상적으로 파장 변이를 측정함으로 보였다. 유무선통신 기능은 IEEE 1451 국제표준에 부합하도록 각각 CAN, Zigbee 네트워크 구성할 수 있다. Zigbee 무선통신 기능을 실험을 통하여 약 90m 거리에서 오

류없이 송수신 되는 것을 확인하였다. 향후 개발한 광전변환시스템을 FPSO의 무어링 케이블 또는 체인의 상태를 모니터링하는데 활용하기 위한 현장시험을 진행하고 기능을 보완하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2013년도 산학연공동기술사업의 연구 수행으로 인한 결과물입니다.

제5단계 BB(Brain Busan)21사업으로 "차세대 디스플레이용 고분자 소재 및 ICT융합시스템 연구개발" 과제의 결과입니다.

References

[1] H. Lee, B. Oh, and H. Park, "A Study on the Safety Evaluation of Structural Members Based on Strain Sensors," *Proc. of 2010 Annual Conf. of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Jeju, Korea, Apr. 2010, pp. 700-703.

[2] H. Kim, Y. Kim, J. Do, J. Park, and Y. Yu, "Development of FBG Sensor for Structure Deformation Measurement," *Int. J. of Security and Its Applications,* vol. 6, no. 2, Apr. 2012, pp. 251-256.

[3] K.-H. Rew, S.-J. Go, J.-S. Park, K.-H. Yu, and S.-H. Lee, "Design of Automatic Tension Control Device for a Vibrating Wire Sensor," *Proc. of 12th Int. Conf. on Control, Automation and System*, Jeju, Korea, Oct. 2012.

[4] S.-S. Kim, J.-S. Park, S.-J. Go, and H.-J. Ro, "Design and Development of Strain Measurement System Based on Zigbee Wireless Network," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 585-590.

[5] Y.-B. Kim, "A Study on the Implementation of Wireless Sensor Network for Managing Bridges," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 6, no. 5, 2011, pp. 783-788.

[6] H.-S. Shin, "A Study on South Korea's Disaster Safety of Wireless Communication," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 6, no. 1, 2011, pp. 1-6.

[7] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides : Application to Reflection Fiber Fabrication," *Applied Physics Letters,* vol. 32, issue 10. May 1978, pp. 647-649.

[8] Y.-M. Kim, N.-K. Lee, S.-H. Lee, D.-M. Bae, and Y.-S. Yu, "Study on FBG Sensors for Hull Stress Monitering," *J. of Sensor Science and Technology*, vol. 21, no. 4, 2012, pp. 276-282.

저자 소개

박장식(Jang-Sik Park)

1992년 부산대 전자공학과(학사)
1994년 부산대 전자공학과(석사)
1999년 부산대 전자공학과(박사)
1997년 3월~2011년 2월 동의과학대학 전자과 교수
2011년 3월~현재 경성대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 신호처리, 음성 및 음향신호처리, 영상처리 및 이해, 임베디드시스템

박근수(Keun-Soo Park)

2000년 부산대 전자공학과(학사)
2002년 부산대 전자공학과(석사)
2007년 부산대 전자공학과(박사)
2007년 7월~2009년 9월 엘지전자 에어컨연구소
2009년 10월~현재 ㈜MnSA 개발팀장
※ 관심분야 : 신호처리, 음성 및 음향신호처리, 전력선통신