

구조물의 정적 및 동적 거동 모니터링을 위한 광섬유 기반 하이브리드 신경망 계측 시스템

박영수¹, 송광용², 진승섭³, 박영환⁴, 김성태^{5*}

Optical Fiber-Based Hybrid Nerve Measurement System for Static and Dynamic Behavior of Structures

Young-Soo Park¹, Kwang-Yong Song², Seung-Seop Jin³, Young-Hwan Park⁴, Sung-Tae Kim^{5*}

Abstract: Various studies have been conducted on the structural health monitoring using optical fiber. Optical fibers can be used to measure multiple and distributed strain. Among the optical fiber sensors, FBG sensor has advantages of dynamic response measurement and high precision, but the number of measurement points is limited. Distributed fiber sensors, represented by distributed Brillouin sensors, usually have more than 1000 measurement points, but the low sampling rate makes dynamic measurements impossible. In this study, a hybrid nerve sensor system using only the advantages of the FBG sensor and the distributed Brillouin sensor has been proposed. Laboratory experiments were performed to verify the proposed system, and the accuracy and reproducibility were verified by comparing with commercial sensors. Applying the proposed system, dynamic response ambient measurements are used to evaluate the global state of the structure. When an abnormal condition is detected, the local condition of the structure is evaluated by static response measurement using the distributed measurement system. The proposed system can be used for efficient structural health monitoring.

Keywords: Structural Health Monitoring, Fiber Bragg Grating, Brillouin Optical Correlation Domain Analysis, Hybrid Nerve Measurement System

1. 서 론

최근 시민의 안전과 밀접하게 연관된 사회기반시설물의 노후화로 인하여 주기적인 모니터링과 유지관리 및 보수의 필요성이 증대되고 있다. 사회기반시설물의 유지관리의 시작은 시설물의 응답(가속도, 변형률, 변위 등)을 계측하는 것으로부터 시작된다. 계측된 응답의 신뢰성이 높고, 계측 정보가 다양할수록 시설물의 정확한 상태 평가를 통해 보수,보강 여부, 방법을 결정할 수 있는 지표가 된다.

기존 모니터링은 대부분 전기저항식 포인트형 센서를 이용한 응답 계측이 이루어졌다. 포인트형 센서(변위계, 변형률계, 가속도계 등)를 이용한 시설물의 응답 계측은 센서가 증가할

경우 케이블 배선, 전력 공급 등의 문제로 인하여 예상된 취약 부분, 문제가 발생된 지점 등으로 계측 위치가 제한되며, 센서의 내구성 및 전자기적 간섭으로 인한 계측 환경에 제약이 있다. 제한된 센서 설치는 부족한 정보로 인하여, 시설물의 상태를 정확히 평가하기에는 어려움이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근 광섬유를 이용한 계측 시스템의 연구가 이루어지고 있다(Amano et al. 2007; Li and Wu 2007). 광섬유를 이용한 계측은 전기저항식 변형률 게이지와 같은 기능을 가지면서 하나의 광섬유로 다중 및 분포 측정이 가능하다. 또한, 전자기파의 영향을 받지 않아 노이즈를 현저히 줄일 수 있으며, 가볍고 유연하며 부피가 작기 때문에 해저케이블에 대한 이상 감지, 파이프라인 누설 감지, 각종 건물 등의 시설물 변형 감지 등에 활용되고 있다(Sieńko et al. 2018; Zhang et al. 2019; Zhao et al. 2012).

현재까지 광섬유를 기반으로 구현된 최적의 방식으로는 다중화가 가능한 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG) 센서와 분포형 센서(Distributed Fiber Sensor; DFS)가 있다. 광섬유 브래그 격자 센서는 FBG가 새겨진 광섬유에 인장이나 압축 변형이 인가되면, FBG 중심 파장에 변화가 발생하여 변형의 크기를 정량적으로 측정할 수 있다. FBG 센서는

¹정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

²정회원, 중앙대학교 물리학과 교수

³정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 선임연구위원

⁵정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원, 교신저자

*Corresponding author: esper009@kict.re.kr

Department Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

수 KHz 이상의 샘플링 속도와 $1\mu\epsilon$ 수준의 높은 정밀도를 장점으로 갖지만, 하나의 interrogator를 통해 측정 가능한 FBG 센서의 수가 수십 개 이내로 제한적이다. FBG의 중심 파장이 중첩되지 않도록 일정한 파장 간격을 두고 사용해야 한다는 단점이 있다.

분포형 센서는 광섬유 자체를 센서로 사용하는 개념으로서 FBG와 달리 물리량의 연속적인 분포를 측정할 수 있다. 광섬유의 모든 부분이 센서로 동작해야 하므로, 빛이 광섬유의 코어 매질을 통과하면서 발생하는 자연적인 빛의 산란 현상을 기반으로 한다. 현재까지 개발된 분포형 센서 기술은 모두 이러한 선형 및 비선형 산란 현상을 이용한다(Hotate 2000). 광섬유 센서 중 브릴루앙 센서는 온도 및 변형률에 대해 모두 반응하는 센서이며, 주파수 영역에서 측정하여 정밀도가 높고,

장거리 측정이 가능한 장점을 가진 대표적인 분포형 센서이다. 광섬유를 이용한 측정 방법 중 브릴루앙 산란을 이용한 방법은 측정 가능한 유효 측정 점의 수가 통상 1000개 이상이고 임의의 지점을 선택하여 측정할 수 있는 장점이 있지만, 샘플링 속도가 상대적으로 느리고, 측정 오차가 FBG 센서에 비하여 5배 정도 크다는 단점이 있다.

본 연구에서는 하나의 광섬유를 이용하여, FBG와 브릴루앙 상관영역 측정법(Brillouin optical correlation domain analysis; BOCDA)을 선택하여 측정할 수 있는 하이브리드 신경망 센서 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템을 이용하여 실내 실험을 수행하였으며, 전기저항식 변형률 게이지와 가속도계의 측정 값과 비교를 통해 정확성과 사용성을 검증하였다.

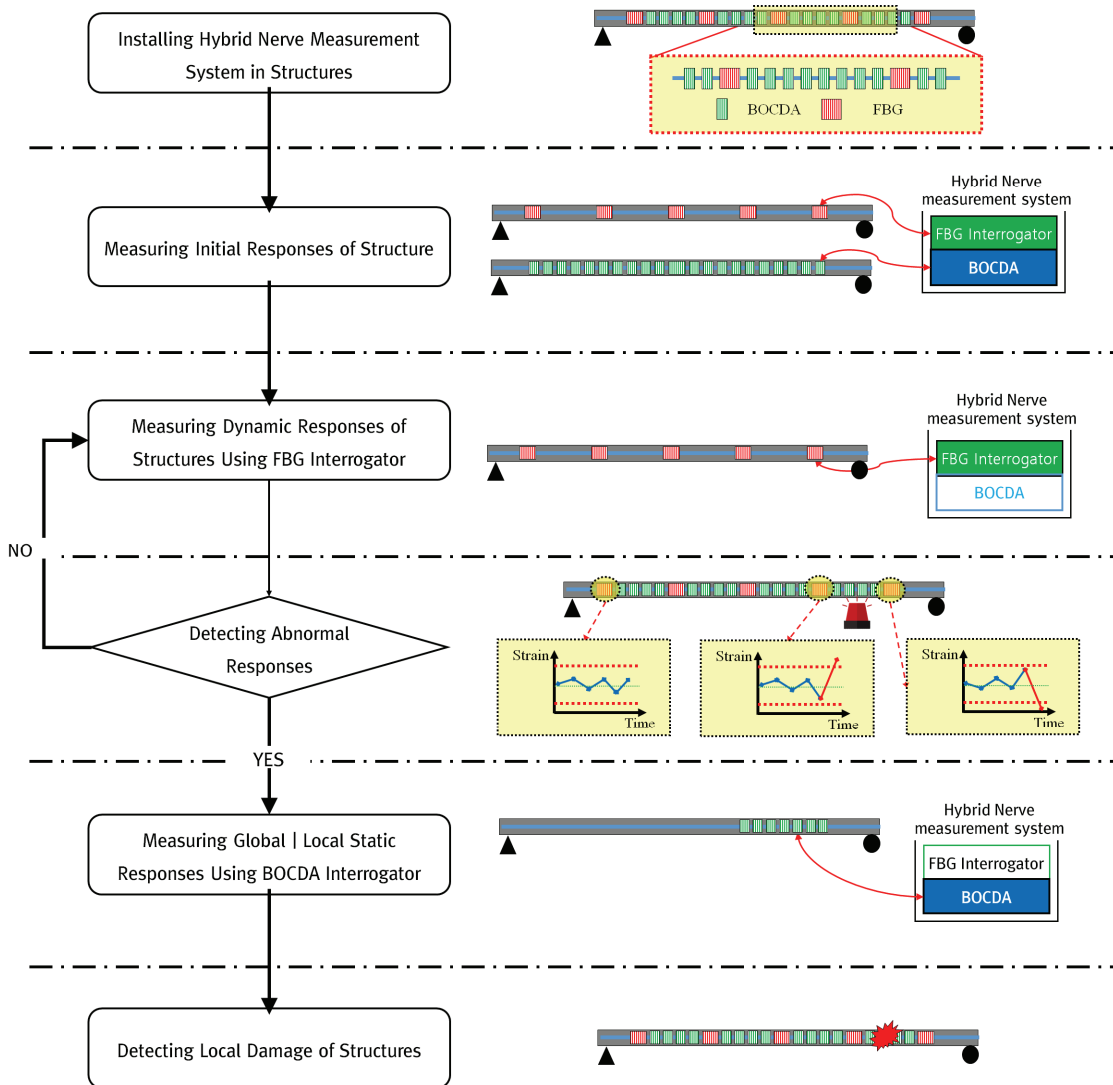


Fig.1 Flow chart for structural health monitoring using hybrid nerve measurement system

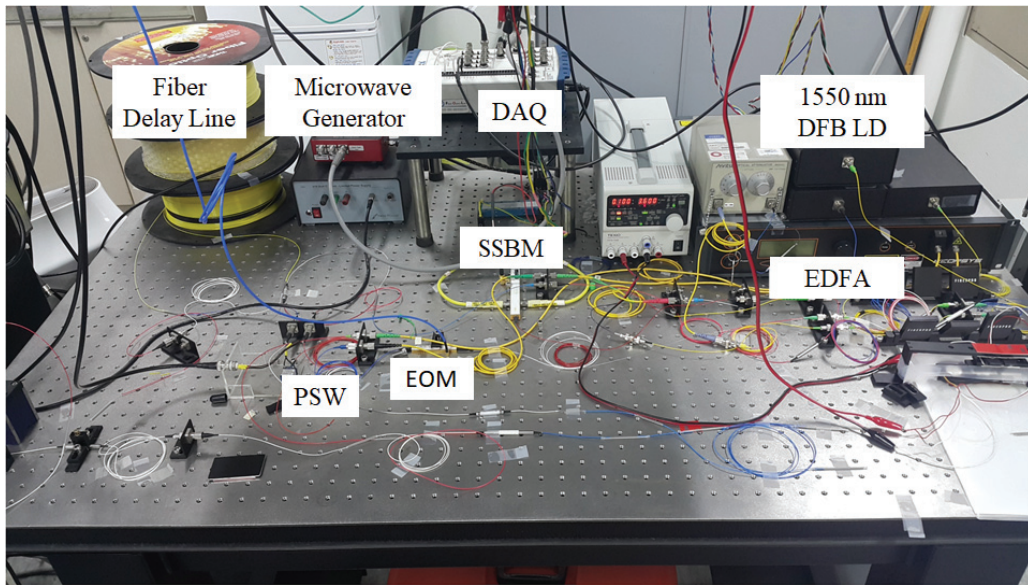
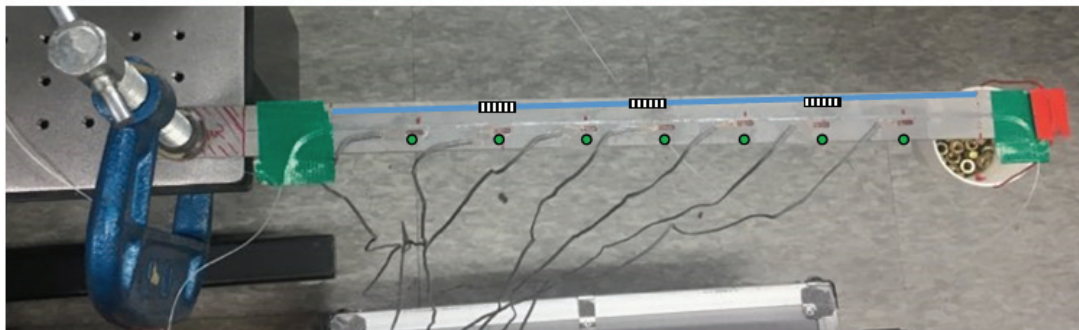
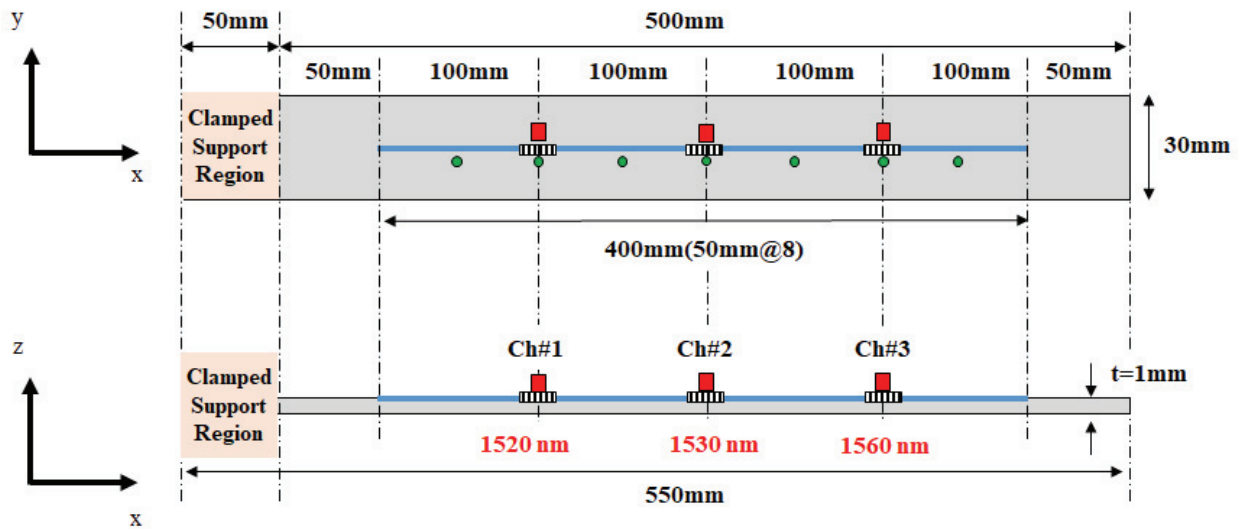


Fig. 2 Test Setup(BOCDA)



- ▤ FBG
- Strain Gauge
- Optical Fiber
- Accelerometer

Fig. 3 Test Specification

Test #01

Test #02

Test #03

163.7g

428.4g

960.0g

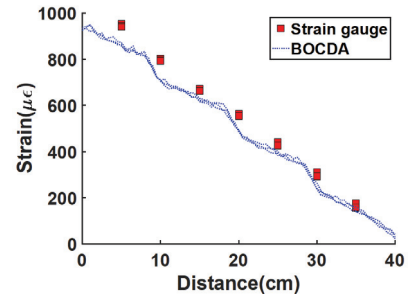
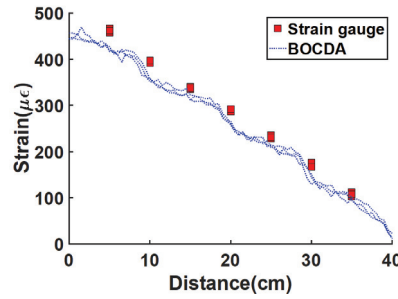
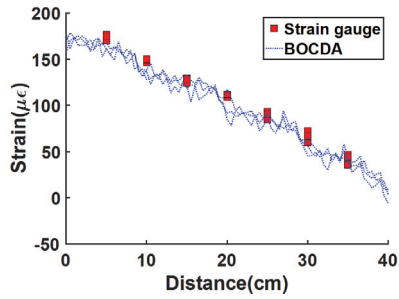






Fig. 4 Static test result

Table 1 Measuring test equipments

Accelerometer		<p>Sensitivity: ($\pm 10\%$) 10 mV/g (1.02 mV/(m/s²))</p> <p>Measurement Range: ± 500 g pk (± 4905 m/s² pk)</p> <p>Broadband Resolution: 0.005 g rms (0.05 m/s² rms)</p> <p>Frequency Range: ($\pm 5\%$) 1 to 10000 Hz</p> <p>Sensing Element: Quartz</p> <p>Weight: 0.07 oz (2.0 gm)</p>
Strain Gauge		<p>Gauge Length: 5mm</p> <p>Gauge Resistance: 120\pm0.3 Ω</p>
Strain measurement system		<p>Measuring Range : $\pm 4000 \times 10^{-6}$ strain</p> <p>Resolution : 0.1 $\times 10^{-6}$ strain</p> <p>Scanning Speed : 60Hz</p>
FBG interrogator		<p>Scan Frequency: 500Hz</p> <p>Wavelength Range : 1510~1590nm</p> <p>Dynamic Range : 25dB with user-selectable gain</p> <p>Max FBGs per channel : 80(up to 160with expanded λ range)</p>

2. 하이브리드 신경망 센서 시스템

하이브리드 신경망 시스템을 이용한 구조물의 건전도 모니터링 방법은 시설물에 FBG가 포함된 광섬유를 설치하고, 하이브리드 신경망 센서 시스템을 통하여 초기 값을 계측한다. FBG를 이용하여 동적 응답을 계측하고, 동적응답으로부터 시설물의 전역적 상태를 평가한다. 전역적 응답으로부터 이상이 감지된 FBG센서 인근 또는 주기적으로 브릴루앙 상관 영역 측정법(BOCDA)으로 정적 응답을 계측하여, 시설물의 국부적인 손상을 감지 할 수 있도록 시스템을 제안하였다.

광섬유 브래그 격자(FBG)는 일정한 주기(Λ)의 굴절률 변화가 광섬유 코어에 존재하는 구조로 되어 있다. 광섬유를 진행하는 빛이 주기의 2배에 해당하는 파장을 갖는 경우 브래그 조건에 의해 강한 반사광이 발생한다. 광섬유를 진행하는 빛이 경험하는 유효 굴절률을 n_{eff} 라고 할 때, 반사광의 파장(λ)은 FBG 주기의 함수로서 다음의 수식으로 표현된다.

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

FBG가 새겨진 광섬유에 인장이나 압축 변형이 인가되면, Λ 의 변화를 통해 λ 에 변화가 발생하여 변형의 크기를 정량

적으로 측정할 수 있다. 다만, n_{eff} 의 변화도 함께 나타나기 때문에 실제 λ 의 변화율은 Λ 의 변화율 대비 0.78배 정도로 작아진다. FBG interrogator는 파장 가변 광원을 이용하여 FBG의 값을 측정하는 시스템으로, 하나의 채널에서 최대 수십 개 정도의 FBG를 동시에 모니터링 할 수 있으나, 각 FBG의 중심 파장은 반사 스펙트럼이 중첩되지 않도록 수 nm의 간격으로 설정되어야 한다.

광섬유에 광원(빛)을 입사하면 전반사를 통해 광섬유 길이방향으로 대부분의 빛이 전송되고, 극히 일부 광은 후방 산란되는데, 이를 산란광이라고 한다(Güemes, Fernández-López, and Soller 2010). 후방 산란광은 광섬유의 위치 및 광섬유가 외부환경으로부터 받은 영향(변형 및 온도 등)의 정보를 포함하고 있으며, 이를 분석함으로써 변형을 및 온도 등 광섬유 위치 별 물리량을 계측 할 수 있다. 산란광의 종류에는 레일리 산란(Rayleigh scattering), 라만 산란(Raman Scattering) 및 브릴루앙 산란(Brillouin scattering) 등이 존재하며, 각 산란광의 진폭 및 고주파수 변화는 온도 및 변형과 밀접한 관계를 가진다. 중심 주파수가 변조된 연속파 형태의 브릴루앙 펄프광과 프로브광을 각각 측정하고자 하는 광섬유의 양 끝에서 입사하여 서로 반대 방향으로 진행시킨 후, 두 광파의 유도 브릴루앙 산란에 의해 얻는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정하고 이득이 최대가 되는 주파

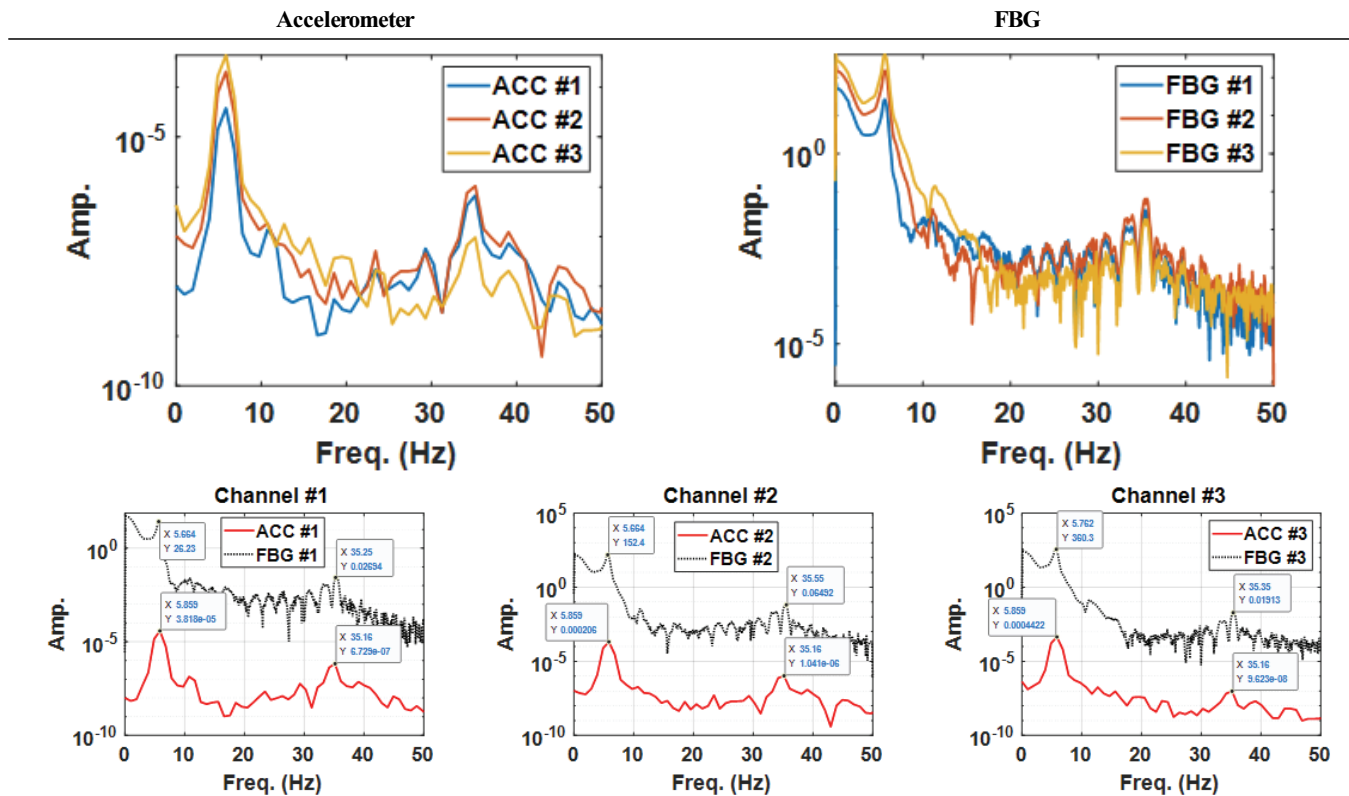


Fig. 5 Dynamic test result (Power Spectral Density by Channel)

수 차이인 브릴루앙 주파수를 측정하는 방식을 브릴루앙 광 산란영역 분석법(BOCDA)이라고 한다.

제안된 시스템에서는 광섬유의 브릴루앙 산란광을 측정하기 위한 광원으로 1550nm의 중심파장을 갖는 분포피환형 레이저 다이오드(Distributed Feed Back type - Laser Diode, DFB-LD)를 사용하였다. 광원의 광출력을 펄스광과 프로브광 방향으로 분기시켰으며, 펄스광 방향으로 진행한 광파에는 잡음 감소를 위한 락인 앰프(Lock-in Amplifier)에 전기광학변조기(Electro-Optic Modulator; EOM)를 통한 주기적인 신호를 인가하였다. 펄스광은 500m의 광 지연 선로를 지나 광섬유 증폭기(Erbium Doped Fiber Amplifier; EDFA)를 통해 증폭시킨 후, 서큘레이터(Circulator)를 이용하여 부착된 측정용 광섬유(Sensing fiber)로 진행시켰다. 프로브광 방향으로 진행한 광파는 단일 측파 변조기(Single-Sideband Modulation; SSBM)를 통해 본래 광파로부터 브릴루앙 산란 주파수만큼 낮은 주파수를 갖는 프로브광으로 변환시켰다. 프로브광은 유도 브릴루앙 산란의 편광 효과를 제거하기 위해 편광 스위치(polarization switch; PSW)를 통해 시편에 부착된 측정용 광섬유로 진행시켰다. 브릴루앙 이득 스펙트럼(Brillouin Gain Spectrum; BGS)을 측정하기 위해 마이크로파 발생기(Microwave Generator)를 이용하여 10.2 ~ 11.2GHz 영역에서 프로브광의 주파수를 스위프(Sweep)하였다. 프로브광의 세기 변화를 광 검출기로 측정하여 전기 신호로 변환한 후 락인 앰프를 이용하여 잡음을 제거하는 방식으로 원하는 측정 지점의 브릴루앙 이득 스펙트럼 데이터를 추출하였다. 각 지점의 브릴루앙 이득 스펙트럼에서 이득이 최대가 되는 주파수인 브릴루앙 주파수는 최대 값의 위치 찾기(Peak Fitting)를 통해 결정되었고, 그 변화에 $20\mu\epsilon/\text{MHz}$ 의 계수를 적용하여 변형률 변화로 환산하였다.

하이브리드 신경망 센서를 통한 계측 시 측정용 광섬유에 새길 브래그 격자의 파장 선택에 유의해야 한다. 브릴루앙 신호 측정에 사용된 파장은 1548nm이고, FBG가 3nm의 파장 간격

으로 설치되는 상황을 고려할 때, 1545-1551nm 파장 대역의 FBG가 측정용 광섬유에 존재할 경우 상황에 따라 펄스광과 프로브광이 FBG에서 후방으로 반사되는 상황이 발생할 수 있는데, 프로브광의 반사는 신호 감소를 펄스광의 반사는 광 검출기 초과 입력으로 인한 포화현상 및 잡음 증가를 일으켜 브릴루앙 이득 스펙트럼의 측정 오차가 크게 증가할 수 있다.

3. 실내실험

하이브리드 신경망 센서의 정확성과 사용성을 검증하기 위하여 실내실험을 수행하였다. 실내실험에 사용된 시편은 Fig.3과 같으며, 시편의 크기는 550 X 30 X 1(가로X세로X두께, mm)이며, 시편의 시작 지점으로부터 50mm 구간을 클램프로 고정하여 외팔보로 거동하도록 하였다. 정적 재하실험과 충격실험을 통하여 각각 정·동적 응답을 계측하였다. 측정용 광섬유는 BOCDA계측에 사용되는 주파수 대역대인 1550nm 대역을 피하여 3개의 FBG를 각각 1520nm, 1530nm, 1560nm으로 100mm 간격으로 제작되었다. 제작된 광섬유는 Fig.3과 같이 400mm 구간을 bare 광섬유를 에폭시를 이용하여 부착하였고, 나머지 광섬유는 부착하지 않고 타이트 버퍼를 이용하여 보호하였다. 정적 재하실험 검증을 위하여 전기저항식 변형률 게이지를 7개를 Fig.3과 같이 50mm간격으로 에폭시를 이용하여 부착하였다. 충격 실험을 통해 얻어지는 동적 응답을 검증하기 위하여 FBG가 새겨진 광섬유 인근에 각각 가속도계를 설치하였다.

정적 재하 실험은 외팔보 끝에 크기가 다른 하중(163.7g, 428.4g, 960.0g)을 재하하고, 하중 조건 별로 3회 실험을 수행하였다. 발생하는 변형률을 전기저항식 변형률게이지와 광섬유로부터 발생하는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정하였다. 변형률 게이지를 통한 계측은 2초 간격으로 계측하여 재하상태에서 변형률 평균을 구하였고, 광섬유를 이용한 변형률 계

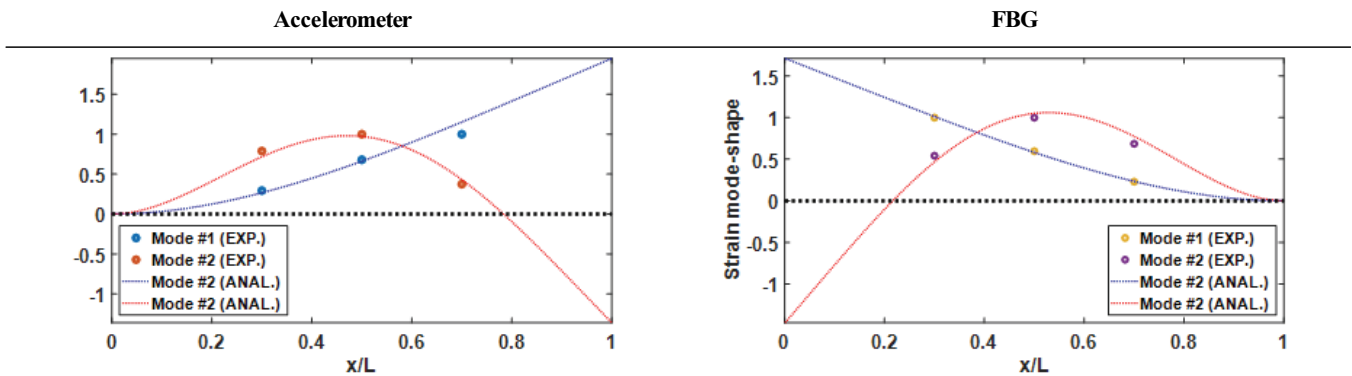


Fig. 6 Dynamic test result (Mode shape)

측은 BOCDA interrogator를 통해 5mm간격으로 101개 포인 트에서 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정하여 변형률을 계산하였다. 광섬유와 전기저항식 변형률 게이지로부터 측정된 변형률 값을 Fig.4에 비교하였으며, 정적 응답 측정 결과 전기저항식 변형률게이지와 광섬유로부터 얻어진 변형률의 상대오차는 최대 약 20%의 오차를 보였다. 현재 BOCDA계측 시스템의 측정오차로 판단되며, 계측시스템의 정확성을 높이기 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

동적 실험은 외팔보 끝에 마그네틱 베이스를 설치하여, 변형을 준 상태에서 마그네틱 베이스를 제거할 때 생긴 진동을 가속도와 변형률을 계측하였으며, 샘플링 주파수는 가속도계는 1KHz, FBG는 100Hz로 계측하였다. 측정된 동적 응답으로부터 시편의 고유진동수와 모드형상을 추정하였다. 가속도계로부터 측정된 응답으로부터 얻어진 고유진동수는 5.66Hz, 35.55Hz 이며, FBG로부터 측정된 변형률을 이용하여 추정된 고유진동수는 5.86Hz, 35.16Hz이다. 고유진동수에 해당하는 모드형상은 Fig.6에 비교하였다.

실내 실험을 통하여 정확성과 사용성을 검증하였으며, 검증 결과 정적 응답과 고유진동수의 오차는 존재하였다. 하지만, 하나의 광섬유로부터 정·동적 응답을 선택적으로 계측할 수 있는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 하나의 광섬유를 이용하여 정·동적 응답을 선택적으로 계측할 수 있는 계측 방법을 제안하고, 실내 실험을 통해 검증하였다. 제안된 방법은 FBG가 새겨진 하나의 광섬유를 브릴루앙 상관영역 측정법(BOCDA)을 이용하여 정적 응답을 계측하고, FBG를 이용하여 동적 응답을 계측한다. 실내 실험을 통해 전기저항식 변형률 게이지와 가속도계와의 비교 검증을 수행하였으며, 검증을 통하여 제안된 시스템의 정확성과 사용성을 검증하였다.

제안된 기법을 활용하여, FBG 센서로부터 동적 응답을 계측하고, 동적응답을 통해 구조물의 전역적인 이상 유무를 판별 후 구조물의 이상 발견 시, 브릴루앙 산란 상관영역 측정법(BOCDA)으로 정적응답 계측을 통해 구조물의 손상 위치와 크기를 감지할 수 있을 것으로 판단된다. 제안된 시스템을 통해 기존의 모니터링 시스템을 단점인 제한된 센서의 수와 계측기 설치의 어려움을 해결할 수 있으며, 이를 통해 구조물의 효율적인 건전도 모니터링 및 유지관리가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 “신경망 센서 개발 및 이를 활용한 콘크리트 시설물의 스마트 모니터링 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Amano, M. et al. (2007), ‘Structural health monitoring of an advanced grid structure with embedded fiber bragg grating sensors’, *Structural Health Monitoring*, 6(4), pp. 309-324..
2. Güemes, A., Fernández-López, A. and Soller, B. (2010), ‘Optical Fiber Distributed Sensing - Physical Principles and Applications’, *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 9(3), pp. 233-245..
3. Hotate, K. (2000), ‘Measurement of brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation-’, *IEICE Transactions on Electronics*, E83-C(3), pp. 405-411.
4. Li, S. and Wu, Z. (2007), ‘Development of Distributed Long-gage Fiber Optic Sensing System for Structural Health Monitoring’, *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 6(2), pp. 133-143.
5. Sierńko, R. et al. (2018), ‘Strain and crack analysis within concrete members using distributed fibre optic sensors’, *Structural Health Monitoring*, 1 November.
6. Wei, H. et al. (2019), ‘Low-coherent fiber-optic interferometry for in situ monitoring the corrosion-induced expansion of pre-stressed concrete cylinder pipes’, *Structural Health Monitoring*. SAGE Publications Ltd..
7. Zhang, Q. et al. (2019), ‘Deflection distribution estimation of the main arch of arch bridges based on long-gauge fiber optic sensing technology’, *Advances in Structural Engineering*, 22(15), pp. 3341-3351.
8. Zhao, X. et al. (2012), ‘Application of multiscale fiber optical sensing network based on brillouin and fiber bragg grating sensing techniques on concrete structures’, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012..
9. Zhou, Z. et al. (2019), ‘Structural damage detection with distributed long-gauge FBG sensors under multi-point excitations’, *Smart Materials and Structures*. IOP Publishing, 28(9), p. 095023.

Received : 01/07/2020

Revised : 02/17/2020

Accepted : 02/25/2020

요 지: 광섬유를 이용한 구조물 건전도 모니터링은 다양한 연구가 이루어졌다. 광섬유는 다중 및 분포로 변형률을 계측 할 수 있다. 광섬유 센서 중, FBG 센서는 동적 응답 계측과 정밀도가 높은 장점이 있지만, 계측 포인트의 제한이 있다. 분포형 광섬유 센서는 계측 포인트가 1000개가 넘지만, 샘플링 속도가 낮아 동적 계측이 불가능하다. 본 연구에서는 FBG와 브릴루앙 상관영역 측정법의 장점만을 이용한 하이브리드 신경망 센서 계측 시스템이 제안하였다. 광섬유 브래그 격자를 포함한 광섬유를 이용하여 정적응답과 동적 응답을 선택적으로 계측 할 수 있는 계측 시스템이다. 제안된 시스템검증을 위하여 실내 실험을 수행하였으며, 기존의 센서와의 비교를 통해 정확도와 재현성을 검증하였다. 제안된 시스템을 활용하여, 동적 응답을 상시 계측하고, 전역적인 구조물의 상태를 평가한다. 이상 상태가 감지 되면, 분포형 계측 시스템을 이용하여 정적 응답을 계측하여, 구조물의 국부적인 상태를 평가한다. 제안된 시스템을 통해 효율적인 구조물 건전도 모니터링에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 구조 건전도 모니터링, 광섬유 브래그 격자, 브릴루앙 상관영역 측정법, 하이브리드 신경망 계측 시스템
