

외부 음향 주파수 탐지를 위한 분포형 광섬유 센서망 설계

Design of Distributed Fiber Optic Sensor Net for the Detection of External Sound Frequency

이종길*

Jongkil Lee

Key Words : Distributed Fiber Optic Sensor(분포형 광섬유 센서), Frequency Spectrum(주파수 스펙트럼), Sagnac Interferometer (사낙 간섭계), External Sound(외부 음향), Sensor Net(센서망)

ABSTRACT

In this paper, to detect external sound frequency on the latticed structure, fiber optic sensor net using Sagnac interferometer was fabricated and tested. The latticed structure fabricated with dimension of 50cm in width and 50cm in height, the optical fiber, 50m in length, distributed and fixed on the latticed structure. Single mode fiber, a laser with 1,550nm in wavelength, 2x2 coupler were used. External sound signal applied to the fiber optic sensor net and the detected optical signals were compared and analyzed to the detected microphone signals against time and frequency domain. Based on the experimental results, fiber optic sensor net using Sagnac interferometer detected external sound frequency, effectively. This system can be expanded to the structural health monitoring system.

1. 서론

광섬유 센서를 이용한 음향, 진동 등의 탐지 기술은 최근 기계, 항공, 해양분야 등에서 활발히 응용되고 있다. 이러한 센서 제작 기술은 광섬유의 저손실화 및 다중화 기술의 발전과 더불어 이를 이용한 보다 효율적인 공간섭계의 개발이 이루어졌으며, 다양한 산업분야에 응용이 되고 있다.^{1, 2} 광섬유 간섭계의 형태는 주로 Mach-Zehnder, Sagnac, Speckle, Fabry-Perot 등이 있으며, 음향·진동 센서로 널리 쓰이고 있다.^{1, 2} 압전재료를 이용한 센서나 광섬유 센서 등은 지능구조물의 모니터링에 사용되며, 특히 광섬유 센서는 압전재료와 같은 전기적 방식에 비하여 전자파의 영향을 받지 않으며 저손실, 다중화 등의 장점이 있어 최근 그 연구가 활발히 진행되고 있다.^{3, 4}

지능 구조물의 모니터링(monitoring) 방법은 광섬유 센서를 이용한 진동계측이 주로 연구되고 있는데, 구조물의 결합 검사에도 이용되고 있다. Guttinger⁵ 등은 감시 시스템

(security system)에 쓰이는 광섬유 센서의 예를 특허 및 논문을 통하여 침입자 센서, 연기감지 센서, 화재감지 센서 등에 유용하게 쓰임을 조사하였다. Inaudi⁶는 토목 구조물 특히 교량에 있어서 광섬유 변위 센서를 이용한 방법이 기존의 스트레인 게이지 방법보다 안전 모니터링에 적합함을 실험으로 구현하였다. Leung⁷ 등은 침입자의 감시를 위하여 모니터링 대상물 주변에 광섬유를 매설하여 이를 실험으로 성능을 검증하였다. 이 방법은 무게가 60kg인 사람이 통과할 때의 하중을 다중모드 광섬유(multi-mode fiber)를 이용하여 감지하는 방식이다. Feng⁸ 등은 광섬유 센서 헤드(sensor head)를 길이가 한 줄인 와이어로 제작하고 프레임에 부착하여 외부 가진력을 주었을 때 이를 감지하는 시스템을 구현하였다. Feng⁸ 등의 방법은 센서부가 한 개의 와이어로 제작된 점이 기존의 연구와 차이가 있다.

Bryson⁹은 FOPIDS(Fiber Optic Intruder Detection System)라 칭하는 시스템을 구현하였는데 이는 원래 수중 청음기(hydrophone)의 개발에 사용된 것으로서 단지, 그 응용을 침입자 감시용으로 확대한 것이다. 감지 원리는 Fabry-Perot 간섭계형 센서와 유사한 것으로서 센서를 배열로 설치하고 외부신호를 다중화(multiplexing) 방식으로 감지하였다. Englund¹⁰ 등은 스펙클(speckle) 방식을 이용하여 각종 구조물의 모니터링 방법을 연구하였는데, 주로 진자형 충격 시험기의 콘크리트 지반의 진동 감지, 느슨한 형태

* 안동대학교 기계교육과
E-mail : jlee@andong.ac.kr
Tel : (054) 820-5487, Fax : (054) 823-1766

의 광섬유 네트(net)의 진동 감지, 발전기의 스테이터 코어(stator core) 진동 감지 등을 모니터링 하였다. 그 밖에 Patsias¹¹ 등은 광계측(영상) 및 웨이브렛(wavelet) 변환을 통하여 외팔보(0.6×0.025×0.001m)의 결함 감지를 시도하였으나, 광섬유를 이용한 계측방법은 아니었다.

본 연구에서는 선행연구⁶⁻¹⁰에서 보여준 광섬유를 이용한 구조물의 물리량 측정방법과는 다르게 Sagnac 간섭계를 이용하여 격자형으로 광섬유를 분포시킨 형태로서 외부 음향 주파수를 탐지하고자 하였다.

2. Sagnac 간섭계

Sagnac 간섭계의 원리는 입사광을 둘로 쪼개고, 서로 반대방향으로 광회로를 통과시킨 후, 간섭시키는 것으로서, 이의 원리를 Fig. 1에 보였다. Fig. 1과 같이 레이저에서 나온 빛은 2×2 coupler (beam splitter)를 거쳐 광섬유 루프를 서로 반대방향으로 진행하게 된다. 각 방향으로 진행되는 광은 측정하고자 하는 물리량에 의해 광섬유에 가해지는 변화에 상응하는 광경로의 변화를 겪은 후 광결합기에서 다시 합쳐져 광검출기로 검출된다. 이때 각각의 광경로 차이에 비례하는 위상차가 발생하여 검출광의 세기에 변화가 일어나고 이를 측정함으로써 광섬유 센서에 가해진 물리량의 크기를 검출하게 된다.

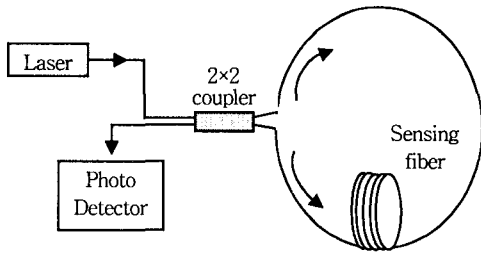


Fig. 1 Principle of the Sagnac interferometer

Fig. 1의 광섬유 루프에서 시계방향과 반시계 방향으로 진행되는 빛을 복소수로 표시할 수 있다. Fig. 1과 같이 폐회로의 반경이 R이고, 각속도가 Ω , 접선속도가 v , 파장이 λ , 광속도가 c , 면적이 A인 간섭계에 대하여, 빛이 정방향과 반대방향으로 통과하는데 소요되는 전체 시간의 차, Δt 는³

$$\Delta t = \frac{4A}{c^2(1-v/c)} \Omega \quad (1)$$

이며, $v \ll c$ 이 때에는 근사 관계식이 얻어진다. 단일 주파수인 빛의 주기가 $T = \lambda/c$ 이면, 광선의 줄무늬 변화는 $\Delta N = \Delta t \times T^{-1}$ 이며, 회전에 의하여 영향을 받는 위

상변화³는

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta N = 2\pi \frac{\Delta t_{sum}}{T} = \frac{8\pi A}{c\lambda} \Omega \quad (2)$$

이 된다. 이 위상변화는 각속도 Ω 에 비례한다. 감도를 높이기 위하여 빛이 폐회로 주위를 여러번 통과하도록 만든다. m 배의 폐회로 루프에서는 위상변화가 m 배로 된다. 즉,³

$$\Delta\phi = m \frac{8\pi A}{c\lambda} \Omega = \frac{4\pi LR}{\lambda c} \Omega \quad (3)$$

광섬유 간섭계를 설계할 때 위상변화는 $L = m \times 2\pi R$ 이고, $A = \pi R^2$ 이다. 식 (3)과 같이 간섭계의 위상변화는 광섬유의 길이 L과 구성반경 R에 비례하므로 감도를 높이기 위하여 간섭 길이를 길게 할 필요가 있으며, 이러한 Sagnac 간섭계의 위상변화를 이용하여 외부 음향 주파수를 효과적으로 감지할 수 있을 것이다. 또한, 광섬유 간섭계의 길이 L을 늘리면 이론적으로 측정감도는 향상되므로 이의 실험적 검증도 필요하다고 판단된다.

광섬유 센서로는 일반적으로 감도가 좋은 맨드릴(mandrel)형 센서⁴를 이용한다. 그러나, 맨드릴형은 탐지할 면적이 넓은 구조물, 즉 격자형 혹은 펜스와 같은 구조물에는 적합하지 않다. 격자형 구조물의 음압을 효과적으로 감지할 수 있는 것이 분포형 광섬유 센서(distributed fiber optic sensor)이다. 이는 구조물에 광섬유를 단순 부착함으로써 별도의 메카니즘(mechanism) 없이 분포형 센서를 제작할 수 있다.

3. 시스템의 구성

외부 음향 주파수를 탐지하기 위하여 Sagnac 간섭계를 구성하고, 상용 광섬유를 격자형으로 분포시켜 분포형 센서망을 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 구현하고 이를 실험하였다.

실험에 사용된 광섬유는 코어(core)가 9.3 μ m, 클래딩(cladding)이 125 μ m 이고, 아크릴 수지 보호피막을 포함한 전체 직경은 245 μ m 의 통신용 광섬유를 이용하였다. 광원은 파장이 1550nm인 레이저(DFB Fiber coupled laser source, THORLAB S3FC1550)를 이용하여 2×2 방향성 결합기(Directional coupler, E-TEK SMFC5250PL211)에 입력되도록 하였다. 방향성 결합기를 통과한 빛은 음향신호가 입력되는 격자형 센서를 거쳐 다시 방향성 결합기에서 반대 방향으로 돌아온 빛과 간섭을 일으키게 된다. 간섭을 일으킨 빛은 광검출기(InGaAs fiber optic photo detector, THORLAB D400FC-1GHz)에서 전기신호로 변환되며 오실로스코프(Oscilloscope, Tektronix TDS3012)와 주파수 스펙트럼 분석기(Frequency Spectrum Analyzer, RION

SA-76)를 이용하여 음향 주파수 신호를 분석하였다.

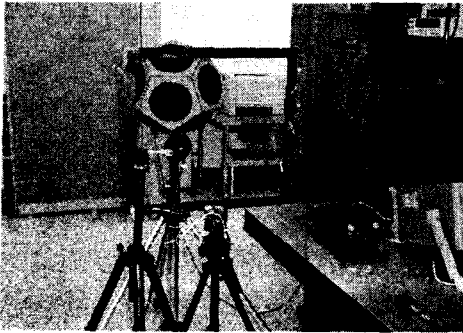


Fig. 2 Experimental set up

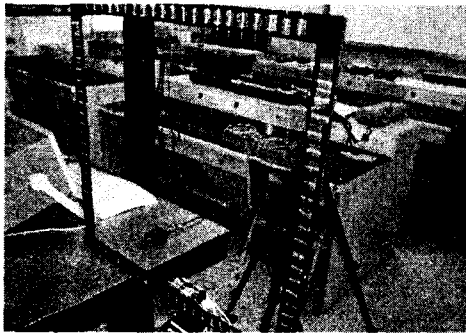


Fig. 3 Fiber optic sensor net

Fig. 3와 같이 격자형 센서는 가로×세로가 50cm×50cm 이고 격자 외부는 프레임으로 고정하였다. 외부 음원으로 팔각형 무지향성 스피커를 음원발생기로 구동하였다. 음원과 광섬유망과의 거리는 30cm를 유지하였다.

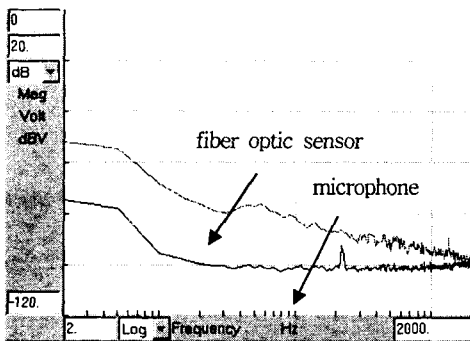


Fig. 4 Background noise

먼저, Fig. 4에는 구조물에 음원을 주지 않았을 때 광

섬유 센서(FOS, fiber optic sensor)와 마이크론이 잡은 신호를 보였다. 주파수 전구간에 대하여 평탄특성을 보이고 있다.

격자형 구조물은 주요 시설물의 외부 침입자 방지용 및 감시용으로 사용되는데, 침입자의 손으로 구조물을 흔들었을 때 진동 및 음향은 대부분 저주파이다. Fig. 5에는 이러한 형태의 신호를 보기 위하여 격자센서에 손뼉을 쳤을 때 광섬유 센서가 감지한 신호를 보였다.

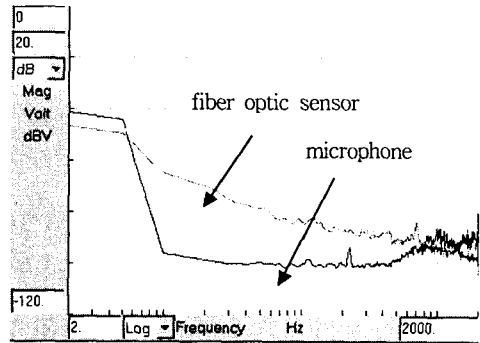


Fig. 5 Sound detection of hand impact

외부 주파수는 주로 1kHz 이하로 나타났다. Fig. 6에는 240Hz의 외부음향을 주었을 때 광섬유 센서망이 감지한 신호를 보인 것이다. Fig. 7에는 495Hz와 Fig. 8에는 1.445kHz의 외부 음향 신호에 대한 광섬유 센서망이 감지한 신호를 스펙트럼 분석한 것을 보인 것이다. 이는 본 실험에서 구현한 광섬유 센서망이 주요 구조물의 모니터링 시스템으로 사용 가능함을 확인시키는 것이다. Fig. 6에서 240Hz의 신호에 대한 감지특성은 오히려 마이크론보다 특성이 우수함을 알 수 있다. 실험실에서의 에코 특성과 장비의 잡음은 언제나 존재하기 때문에 스펙트럼상의 주파수는 다른 영역에서도 나타난다.

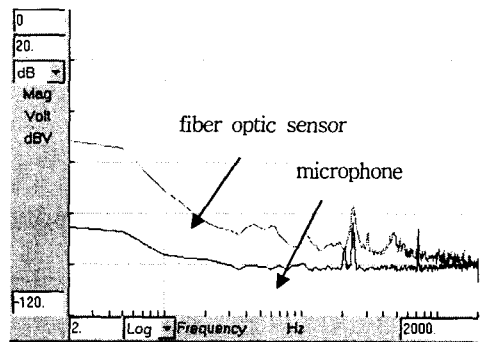


Fig. 6 Frequency spectrum of detected sound under external sound of 240Hz

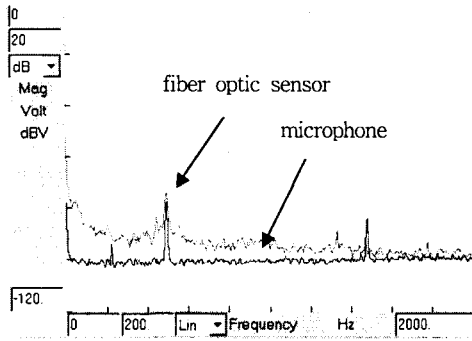


Fig. 7 Frequency spectrum of detected sound under external sound of 495Hz

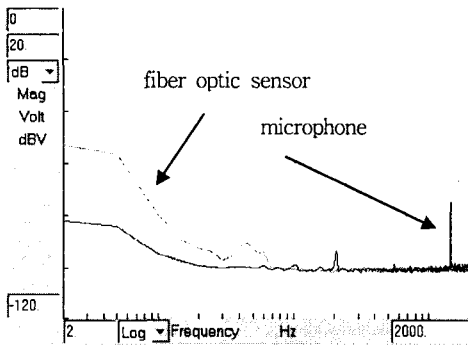


Fig. 8 Frequency spectrum of detected sound under external sound of 1.445kHz

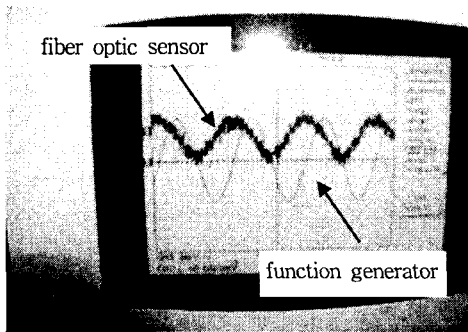


Fig. 9 Detected signal in time division

Fig. 9에는 외부 음원에 대한 광섬유 센서망이 감지한 것을 시간영역에서 보인 것이다. 그림에서 광섬유 센서망은 원래 음원 주파수 이외에 약간의 고주파 성분을 포함하고 있음을 알 수 있으며, 이는 실험실내의 각종 장비 소음과 에코 주파수 등이 합쳐진 것이라 판단된다. Fig. 9에서 구성된 광

섬유 센서망은 함수발생기 신호를 잘 복원함을 알 수 있다. 이론적인 면에서 본다면 외부 음원이 여현파와 정현파로 입사될 때 출력은 이에 따라 발생하는 것이 당연하다.

4. 결론

격자형 구조물의 구조건강진단(structural health monitoring)을 위한 기초연구로서 분포형 광섬유 센서를 개발하여 외부 음원 주파수를 탐지하고자 하였다. 이를 위하여 광섬유 센서망을 제작하고 이에 기지의 음원 주파수를 입력하고 이를 광섬유 센서를 이용하여 감지하는 실험을 수행하였다. 분포형 광섬유 센서를 설계·제작하여 이를 50cm×50cm 크기의 격자형 센서망에 적용하였다. 또한, 광섬유 간섭계로는 구성이 비교적 간단한 Sagnac형을 선택하였다. 격자 구조물에 사람에 의한 충격음원을 주었을 때 제작된 광섬유 센서는 저주파 음원을 잘 감지하였으며, 240Hz, 495Hz 및 1.445kHz의 외부 음원주파수를 또한 잘 감지함을 확인하였다. 이를 통하여 본 실험에서 구현된 분포형 광섬유 센서망은 외부 음원 주파수를 충분히 인식하여 감지함을 확인하였고, 구조물의 모니터링 시스템에 충분히 적용가능 하리라 판단되며, 향후 안전감시시스템 제작산업의 여러 분야에 그 응용이 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2002-000-00439-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Lyamshev, L. M. and Smirnov, Y. Y., 1983, "Fiber Optic Sensors(review)," Sov. Phys. Acoust., 29(3), pp. 169~180.
- (2) Jackson, D. A. and Jones, J. D. C., 1986, "Fiber Optic Sensors," OPTICA ACTA, vol. 33, no. 12, pp. 1469~1503
- (3) Lee, J., Kim, S., and Lee, J.-H., "Discharge Signal Detection in Insulating Oil Using the Optical Fiber Sagnac Interferometer," J. of the KIEE, Vol. 49C(11), pp. 622-626, 2000.
- (4) Lee, J., "Experimental Investigation of Acoustic Detection using Interferometric Fiber Optic Hydrophone," J. of KSNVE, Vol. 7, No. 6, pp. 931-936, 1997.
- (5) Guttinger, H. and Pfister, G., "Fiber-Optic Sensors and Technology in Security Systems," First International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 62-66, 1983.

- (6) Inaudi, D., "Field Testing and Application of Fiber Optic Displacement Sensors in Civil Structures," OSA Technical Digest Series, Vol. 16, pp. 596-599, 1997.
- (7) Leung, C., Chang, L., and Hsu, S., "Fiber Optic Line Sensing System for Perimeter Protection against Intrusion," 4th International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 113-116, 1986.
- (8) Feng, M. and Suzuki, H., "Optical Fiber Sensors using Vibration Wires," Proceedings of SPIE, Vol. 2360, pp. 223-226, 1994.
- (9) Bryson, C., "Interferometric Sensor System for Security Applications," Proceedings of SPIE, Vol. 2360, pp. 485-488, 1994.
- (10) Englund, M., Ipatti, A., and Karioja, P., "Fiber-Optic Security Monitoring Sensor," SPIE Vol. 3099, pp. 284-299, 1997.
- (11) Patsias, S. and Staszewski, W., "Damage Detection using Optical Measurements and Wavelets," Structural Health Monitoring, Vol. 1(1), pp. 5-22, 2002.