

분포형 광섬유 센서망을 이용한 외부 음향 주파수 탐지[#]

Detection of External Sound Frequency by Using the Distributed Fiber Optic Sensor Net

이 종 길[†]

Jongkil Lee

(2004년 1월 16일 접수 : 2004년 6월 22일 심사완료)

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

ABSTRACT

In this paper, to detect external sound frequencies on the latticed structure, fiber optic sensor net using Sagnac interferometer was fabricated and tested. The latticed structure was fabricated with a dimension of 50 cm in width and 50cm in height. The optical fiber of 50m in length was distributed and fixed on the surface of the latticed structure. Single mode fiber, a laser with 1,550 nm in wavelength, 2×2 coupler were used. External sound signal, 240 Hz, 495 Hz, 1,445 kHz, 2k Hz, applied to the fiber optic sensor net and the detected optical signals were compared to the detected microphone signals against time and frequency domains. 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. 서 론

음향을 탐지하는 방법으로 마이크로폰과 광섬유 센서를 들 수 있으나, 광섬유 센서를 이용한 음향의 탐지 기술은 최근에 기계, 항공, 해양 분야 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 Michelson, 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 결함 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. Inaudi⁽⁶⁾는 토목 구조물 특히 교량에 있어서 광섬유 변위 센서를 이용한 방법이 기존의 스트레인 게이지 방법보다 안전 모니터링에 적합함을 실험으로 구현하였다. Leung⁽⁷⁾ 등은 침입자의 감시를

[†] 책임저자 : 정희원, 안동대학교 기계교육과
E-mail : jlee@andong.ac.kr
Tel : (054) 820-5487, Fax : (054) 823-1766

[#] 본 논문은 2003 추계학술대회에서 우수발표논문으로 추천되었음.

위하여 모니터링 대상물 주변에 광섬유를 매설하여 이를 실험으로 성능을 검증하였다. 이 방법은 무게가 60 kg인 사람이 통과할 때의 하중을 다중모드 광섬유(multi-mode fiber)를 이용하여 감지하는 방식이다. Feng⁽⁸⁾ 등은 광섬유 센서 헤드(sensor head)를 길이가 한 줄인 와이어로 제작하고 프레임에 부착하여 외부 가진력을 주었을 때 이를 감지하는 시스템을 구현하였다. Feng⁽⁸⁾ 등의 방법은 센서부가 한 개의 와이어로 제작된 점이 기존의 연구와 차이가 있다.

Bryson⁽⁹⁾은 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. Englund⁽¹⁰⁾ 등은 스펙클(speckle) 방식을 이용하여 각종 구조물의 모니터링 방법을 연구하였는데, 주로 진자형 충격 시험기의 콘크리트 지반의 진동 감지, 느슨한 형태의 광섬유 네트(net)의 진동 감지, 발전기의 스테이터 코어(stator core) 진동 감지 등을 모니터링 하였다. 그 밖에 Patsias⁽¹¹⁾ 등은 광계측(영상) 및 웨이브렛(wavelet) 변환을 통하여 외팔보(0.6 × 0.025 × 0.001 m)의 결함 감지를 시도하였으나, 광섬유를 이용한 계측방법은 아니었다.

최근에 Lee⁽¹²⁾는 광섬유 센서망을 구현하여 외부 가진 진동 주파수를 탐지하였다. 이는 1.8 m × 1.8 m의 격자형 구조물에 광섬유를 부착하여 중앙 지점에서 가진을 시켜 가진 주파수를 효과적으로 감지하였다. 그러나 Lee⁽¹²⁾가 이용한 모델은 철선으로 제작된 펜스에 광섬유를 부착하여 실험하였다.

본 연구에서는 선행연구⁽⁶⁻¹²⁾에서 보여준 광섬유를 이용한 구조물의 진동량 측정방법과는 달리 광섬유만을 이용하여 격자형 음향센서를 제작하고 광섬유를 분포시킨 형태로서 외부 음향주파수를 탐지하고자 하였다. 이러한 탐지 방법은 문헌상으로 찾기 어려워 본 논문에서는 결과를 비교하기 어려웠다.

2. Sagnac 간섭계

분포형 광섬유 센서망을 구현하기 위한 방법으로 여러 가지 간섭계를 이용할 수 있지만 비교적 구현이

간단한 Sagnac 간섭계를 선택하였다. Sagnac 간섭계의 원리는 입사광을 둘로 나누고, 서로 반대방향으로 광폐회로를 통과시킨 후, 간섭시키는 것으로서 이의 원리를 Fig. 1에 보였다.⁽¹²⁾ 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 광검출기(photo detector)로 검출된다. 이때 각각의 광경로 차이에 비례하는 위상차가 발생하여 검출광의 세기에 변화가 일어나고 이를 측정함으로써 광섬유 센서에 가해진 물리량의 크기를 검출하게 된다.⁽¹²⁾

Fig. 1의 광섬유 루프에서 시계방향과 반시계 방향으로 진행하는 빛을 복소수로 표시할 수 있다. Fig. 1과 같이 폐회로의 반경이 R 이고, 각속도가 Ω , 접선속도가 v , 파장이 λ , 광속도가 c , 면적이 A 인 간섭계에 대하여 빛이 정방향과 반대방향으로 통과하는데 소요되는 전체 시간의 차, Δt 는⁽³⁾

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

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 위상변화⁽³⁾는

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

이 된다. 이 위상변화는 각속도 Ω 에 비례한다. 감도

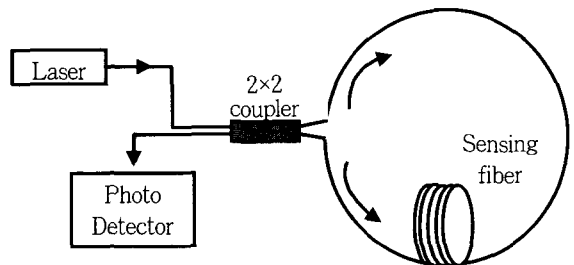


Fig. 1 Principle of the Sagnac interferometer

를 높이기 위하여 빛이 폐회로 주위를 여러 번 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 L 과 구성반경 R 에 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 L 을 늘이면 이론적으로 측정감도는 향상되므로 이의 실험적 검증도 필요하다고 판단된다.⁽¹²⁾

광섬유 센서로는 일반적으로 감도가 좋은 맨드릴형(mandrel)형 센서⁽⁴⁾를 이용한다. 그러나 맨드릴형은 탐지할 면적이 넓은 구조물, 즉 격자형 혹은 펜스와 같은 구조물에는 적합하지 않다. 주요 시설물의 안전 감시용으로 격자형 펜스가 이용된다. 이러한 펜스는 철선을 이용하여 구조물의 강도를 유지하고 있으나, 안전 감시용으로는 이러한 철선 대신에 광섬유 다발을 대체하여 이용할 수 있다. 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 μm , 클래딩(cladding)이 125 μm 이고, 아크릴 수지 보호피막을 포함한 전체 직경은 245 μm 의 통신용 광섬유를 이용하였다. 광원은 파장이 1550 nm인 레이저(DFB fiber coupled laser source, THORLAB S3FC-1550)를 이용하여 2×2 방향성 결합기(Directional coupler, E-TEK SMFC5250PL211)에 입력되도록 하였

다. 방향성 결합기를 통과한 빛은 음향신호가 입력되는 격자형 센서를 거쳐 다시 방향성 결합기에서 반대 방향으로 돌아온 빛과 간섭을 일으키게 된다.⁽¹²⁾ 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. 2와 같이 격자형 센서는 가로×세로가 50 cm×50 cm이고 격자 외부는 프레임으로 고정하였다. 광섬유만으로 격자형을 유지하기 위하여 제작시 심한 곡률이 생기지 않도록 주의하여야 한다. Fig. 3과 같이 외부 음원으로 팔각형 무지향성 스피커를 음원발생기로 구동하였으며 음원과 광섬유망과의 거리

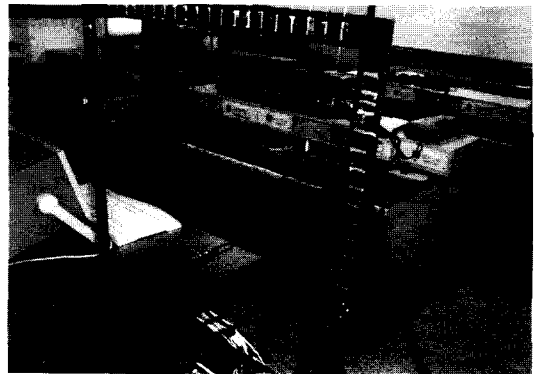


Fig. 2 Fiber optic sensor net



Fig. 3 Experimental set up

는 30 cm를 유지하였다.

먼저 Fig. 4에는 구조물에 음원을 주지 않았을 때 즉, 배경소음(background noise)을 광섬유 센서(FOS, fiber optic sensor)와 마이크로폰이 잡은 신호를 보였다. 마이크로폰은 주파수 전 구간에 대하여 평탄특성을 보이고 있으나, 광섬유 센서는 30~100 Hz에서 약간의 소음을 탐지함을 보이고 있다.

4. 실험결과

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

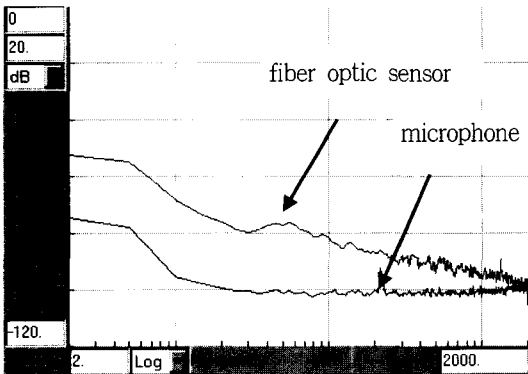


Fig. 4 Background noise

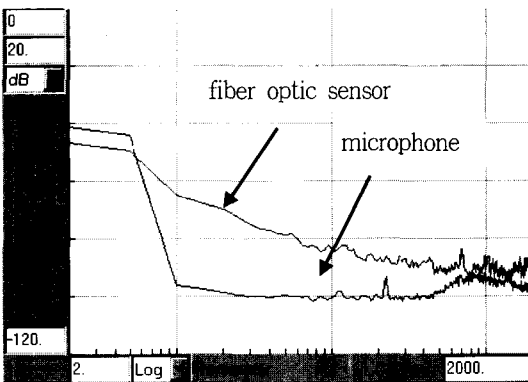


Fig. 5 Sound detection of hand impact

Fig. 5에서와 같이 충격소음에 대한 응답은 10 Hz~700 Hz까지는 광섬유 센서가 응답특성이 우수하나 700 Hz 이상의 고주파 영역에서는 마이크로폰의 감도가 조금 높음을 알 수 있다. 이러한 현상은 제작된 광섬유 망이 저주파에서 잘 감지되는 구조적 특성 때문인 것으로 해석된다. Fig. 6에는 광섬유 망을 손으로 만졌을 때 광섬유가 감지한 신호를 시간 영역에서 보인 것으로 이것은 일종의 저주파 진동 신호이다. 특히 대부분의 구조물의 안전 모니터링 방법은 Fig. 6과 같은 결과를 이용하여 스펙트럼 분석하면 침입자의 특성과 종류를 알 수 있을 것이다.

특정 음향 주파수에 대한 특성을 알아보기 위하여 임의의 음향 주파수를 이용하였다. 먼저, Fig. 7에는 240 Hz의 외부음향을 주었을 때 광섬유 센서망이 감지한 신호를 보인 것이다. Fig. 8에는 495 Hz와 Fig.

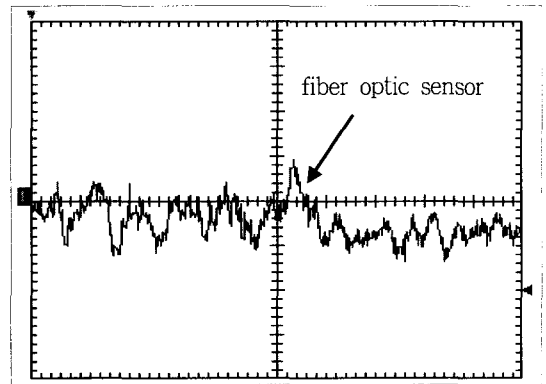


Fig. 6 Time response under hand touching(horizontal: 10 ms/div., vertical: 1 mV/div.)

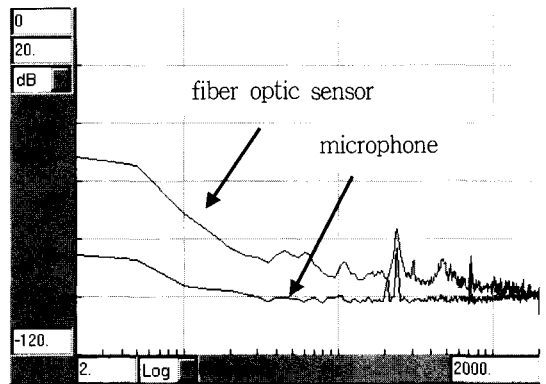


Fig. 7 Frequency spectrum of detected sound under external sound of 240 Hz

9에는 1.445 kHz의 외부 음압 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. 7에서 240 Hz의 신호에 대한 감지특성은 오히려 마이크로폰보다 특성이 우수함을 알 수 있다. 실험실에서의 에코 특성과 장비의 잡음은 언제나 존재하기 때문에 스펙트럼상의 잡음 주파수는 다른 영역에서도 나타난다. Fig. 8에는 1.45 kHz 근방 및 1.35 kHz 근방에서 각각 마이크로폰과 광섬유 센서가 잡음을 보이고 있다.

Fig. 10에는 2 kHz의 외부 음원 주파수에 대하여 광섬유 센서망이 감지한 것을 시간영역에서 보인 것이다. 2kHz의 음원 주파수는 함수발생기를 이용하여

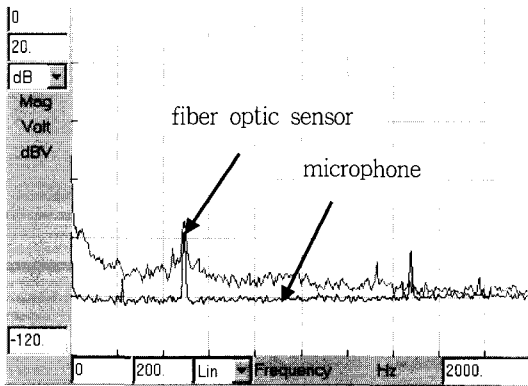


Fig. 8 Frequency spectrum of detected sound under external sound of 495 Hz

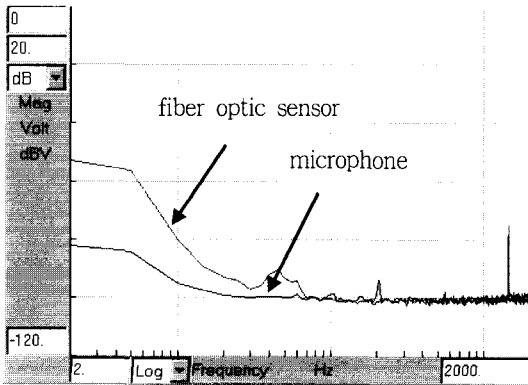


Fig. 9 Frequency spectrum of detected sound under external sound of 1.445 kHz

스피커에 입력되도록 하였으며, Fig. 10은 함수발생기 신호를 직접 오실로스코프에서 광섬유 센서 신호와 비교해 본 것이다. Fig. 10에서 광섬유 센서망은 원래 음원 주파수 이외에 약간의 고주파 성분 잡음을 포함하고 있음을 알 수 있으며, 이는 실험실내의 각종 장비 소음과 에코주파수 등이 합쳐진 것이라 판단된다. Fig. 10에서 구성된 광섬유 센서망은 함수발생기 신호를 잘 복원함을 알 수 있다. 이론적인 면에서 본다면 외부 음원이 여현파와 정현파로 입사될 때 출력은 이에 따라 발생하는 것이 당연하다.

5. 실험결과와 이론적 배경 및 토의

Fig. 10과 같은 특성은 Fig. 11과 같이 실험에 사용된 격자형 광섬유 망을 모델링함으로써 볼 수 있다. Fig. 11은 50 cm × 50 cm의 광섬유 격자를 표시한 것으로서 가로와 세로의 길이가 β인 사각형 격자이다.

Fig. 11에서 수평, 수직 축을 각각 x, y로 두고 연직 방향을 z 축으로 할 때 실제 음압에 의한 떨림은 z축으로 움직이게 된다. 여기서, T_x , T_y 는 각각 x방향과 y방향의 단위 길이당 장력이다. Soedel 등⁽¹³⁾은 수직축이 중력에 의하여 장력을 작용할 때 이의 진동 방정식을 유도하였으나, 본 논문에서는 수평 및 수직축이 T_x , T_y 의 장력하에 있고, 센서망이 $w(t)$ 의 외부 음향을 받고 있다고 가정하여 진동 방정식을 유도하였다. 따라서 z축으로의 운동방정식은

$$-T_x \frac{\partial^2 z(x, y, t)}{\partial x^2} - T_y \frac{\partial^2 z(x, y, t)}{\partial y^2} + \rho \ddot{z}(x, y, t) = u(t) \quad (4)$$

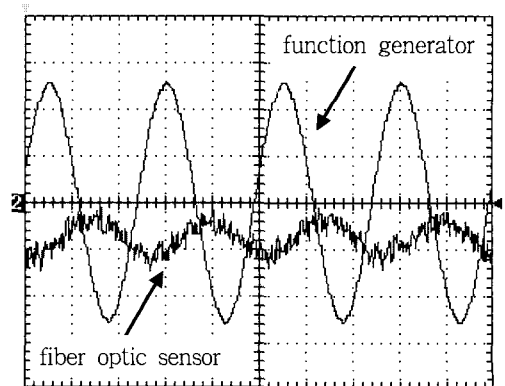


Fig. 10 Detected signal in time division(2 kHz)

으로 표현되며, $w(t)$ 는 외부 음향, ρ 는 단위 길이당 균일한 질량이다. 이다. 식 (4)의 편미분 방정식을 풀기 위하여 필요한 경계조건은

$$z(0, y, t) = z(\beta, y, t) = z(x, 0, t) = z(x, \beta, t) = 0 \quad (5)$$

이다. 만일 센서망에 작용하는 장력이 $T_x = T_y = T$ 이고, 외부에서 주는 음향을 $w(t) = ae^{i\Omega t}$ 이라 하면 식 (4)는

$$\frac{\partial^2 z(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x, y, t)}{\partial y^2} - \frac{\rho}{T} z(x, y, t) = -\frac{\rho}{T} e^{i\Omega t} \quad (6)$$

으로 표현된다. 여기서, a 는 상수, Ω 는 외부에서 주는 음향 주파수이다. 식 (6)의 편미분방정식의 $z(x, y, t)$ 는 확장이론(expansion theorem)을 이용하여 풀면⁽¹⁴⁾

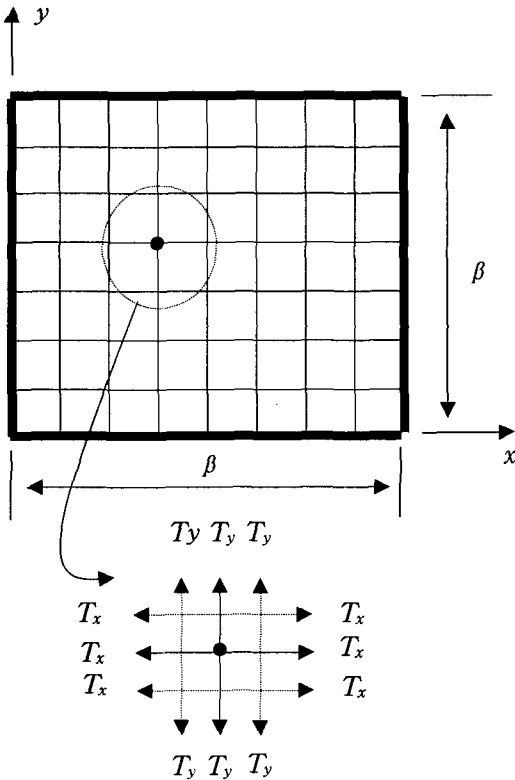


Fig. 11 Latticed structure under external sound

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}(x, y) \xi_{mn}(t) \quad (7)$$

여기서 m 및 n 은 상수, $W_{mn}(x, y) = 2/(\rho - 0.5\beta - 1) \sin(m^{\pi}x/\beta) \sin(n^{\pi}y/\beta)$, $\xi_{mn}(t)$ 는 모달좌표(modal coordinates)로서 다음과 같이 표현된다.

$$\xi_{mn}(t) = \frac{1}{\omega_{mn}} \int_0^t N_{mn}(\tau) \sin \omega_{mn}(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

여기서 만약 외부 음향이 $(x, y) = (\beta/2, \beta/2)$ 지점에 작용한다고 가정하면, $N_{mn}(t) = 2w(t)/(\rho - 0.5\beta - 1) \sin(m^{\pi}/2) \sin(n^{\pi}/2)$ 로 유도된다. 여기서 고유진동수, ω_{mn} 는

$$\omega_{mn}^2 = (1/\rho)[T_x(m\pi/\beta)^2 + T_y(n\pi/\beta)^2] \quad (9)$$

로 표현된다. 따라서 외부 음압이 $w(t) = ae^{i\Omega t}$ 인 식 (6)의 편미분 방정식의 해 $z(x, y, t)$ 는 다음과 같이 얻어진다.⁽¹⁴⁾ 즉,

$$z(x, y, t) = \frac{4}{\rho\beta^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(m\pi/2) \sin(n\pi/2)}{\omega_{mn}} \times \sin \frac{m\pi x}{\beta} \sin \frac{n\pi y}{\beta} \int_0^t e^{i\Omega\tau} \sin \omega_{mn}(t - \tau) d\tau \quad (10)$$

식 (10)은 시간 t 의 함수이며 광섬유 센서망에

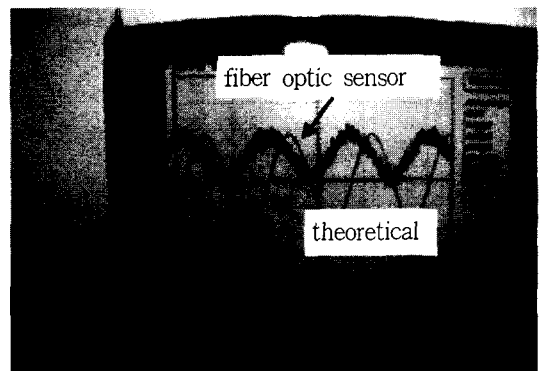


Fig. 12 Theoretical and experimental data(1 kHz)

$u(t) = ae^{i\omega t}$ 의 외부 음향이 가해지면 광섬유 센서망의 출력도 식 (10)에서와 같이 $ae^{i\omega t}$ 에 비례하는 해가 얻어진다. 이러한 외부 음향에 대한 광섬유 센서망의 응답특성을 실험으로 얻은 출력을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12는 1 kHz의 입력신호에 대한 광섬유 센서가 감지한 신호를 보였는데, 이론해석과 약간의 위상차는 있으며, 식 (10)에서 예측한 주파수 성분을 잘 검출함을 알 수 있다.

Fig. 12에서와 같이 본 실험에서 구현된 광섬유 센서망은 외부 음향 주파수를 잘 감지함을 보이고 있으며, 향후 구조물의 구조건강진단 분야에도 활용될 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 중요 시설물의 안전 감시와 구조물의 구조건강진단(structural health monitoring)을 위하여 격자형 광섬유 음향 센서를 제작하고 외부 음원 주파수를 탐지하고자 하였다. 이를 위하여 광섬유 센서망을 제작하고 실험에 편리한 임의의 음원 주파수, 240 Hz, 495 Hz, 1.445 kHz를 입력하고 이를 광섬유 센서를 이용하여 감지하는 실험을 수행하였으며, 측득된 결과는 마이크로폰이 탐지한 것과 비교하였으나, 마이크로폰의 성능과 광섬유 센서의 성능을 직접 비교하는 것은 아니었다. 왜냐하면 본 논문은 격자형 광섬유 센서가 외부 음향을 탐지할 수 있음을 보여주는 실험이기 때문이다. 현재까지의 문헌조사를 통하여 본 논문에서 제시된 격자형 광섬유 센서는 아직 발표된 것을 찾아보기가 어려웠다.

실험에서 분포형 광섬유 센서를 설계·제작하여 이를 50 cm × 50 cm 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, 240 Hz, 495 Hz 및 1.445 kHz의 외부 음원주파수를 또한 잘 감지함을 확인하였다. 그러나 외부 음원이 단일 주파수가 아닌 복수 주파수, 밴드주파수, 랜덤주파수 등의 경우에도 지속적인 실험이 필요하다. 본 연구에서 제시된 분포형 광섬유 센서는 성능면에서 마이크로폰 보다 떨어지지만 음향 센서로서의 적용 가능성이 있음을 확인하였고, 추가적인 연구를 통하여 그 성능을 향상

시킬 필요가 있다고 본다.

센서망의 이론해석을 통하여 광섬유 센서망에 $u(t) = ae^{i\omega t}$ 의 외부 음향이 가해지면 광섬유 센서망의 출력도 $ae^{i\omega t}$ 에 비례하는 해가 얻어짐을 확인하였다. 이러한 외부 음향에 대한 광섬유 센서망의 응답특성을 1 kHz의 입력신호에 대한 광섬유 센서가 감지한 신호를 보였는데, 예측한 이론결과와 크기 및 위상 면에서 차이가 있으나 동일 주파수 성분의 검출 측면에서는 잘 일치함을 알 수 있었다. 이론 해석과의 위상 및 크기를 직접 비교하기 위해서는 광섬유 센서에 사용된 각종 전자소자 및 광소자의 증폭특성을 별도로 규명해야 하는 어려운 점이 있어서 차후의 연구과제로 남겨두었다.

본 실험에서 구현된 분포형 광섬유 음향 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., Vol. 29, No. 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., 2000, "Discharge Signal Detection in Insulating Oil Using the Optical Fiber Sagnac Interferometer," J. of the KIEE, Vol. 49C, No. 11, pp. 622~626.
- (4) Lee, J., 1997, "Experimental Investigation of Acoustic Detection using Interferometric Fiber Optic Hydrophone." Transaction of Korean Society for Noise and Vibration, Vol. 7, No. 6, pp. 931~936.
- (5) Guttinger, H. and Pfister, G., 1983, "Fiber-

Optic Sensors and Technology in Security Systems," First International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 62~66.

(6) Inaudi, D., 1997, "Field Testing and Application of Fiber Optic Displacement Sensors in Civil Structures," OSA Technical Digest Series, Vol. 16, pp. 596~599.

(7) Leung, C., Chang, I. and Hsu, S., 1986, "Fiber Optic Line Sensing System for Perimeter Protection against Intrusion," 4th International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 113~116.

(8) Feng, M. and Suzuki, H., 1994, "Optical Fiber Sensors using Vibration Wires," Proceedings of SPIE, Vol. 2360, pp. 223~226.

(9) Bryson, C., 1994, "Interferometric Sensor System for Security Applications," Proceedings of SPIE, Vol. 2360, pp. 485~488.

(10) Englund, M., Ipatti, A. and Karioja, P., 1997, "Fiber-Optic Security Monitoring Sensor," SPIE Vol. 3099, pp. 284~299.

(11) Patsias, S. and Staszewski, W., 2002, "Damage Detection using Optical Measurements and Wavelets," Structural Health Monitoring, Vol. 1, No. 1, pp. 5~22.

(12) Lee, J., 2004, "Excited Vibration Frequency Detection of the Latticed Fence Structure using Fiber Optic Interferometric Sensor", J. of KSPE, Vol. 21, No. 5, pp. 142~148.

(13) Soedel, W., Zadoks, R. I. and Alfred, J. R., 1985, "Natural Frequencies and Modes of Hanging Nets or Curtains," J. of Sound and Vibration, Vol. 103, No. 4, pp. 499~507.

(14) Meirovitch, L. Principles and Techniques of Vibrations, Prentice Hall, 2000.