

# 간섭계형 광섬유 센서를 이용한 격자형 구조물의 외부 가진 진동수 탐지

이종길<sup>#</sup>

## Exciting Frequency Detection of Latticed Fence Structure Using Fiber Optic Interferometer Sensor

Jongkil Lee<sup>#</sup>

### ABSTRACT

In this paper, to detect exciting frequency on the latticed fence structure, fiber optic sensor using Sagnac interferometer was fabricated and tested. The latticed structure fabricated with dimension of 180 cm wide and 180 cm high, the optical fiber, 50 m in length, distributed and fixed on the latticed structure. Single mode fiber, a laser with 1,550 nm wavelength, and 3x3 coupler were used. Excited vibration signal applied to the latticed structure from 200 Hz to 1 kHz. The detected optical signals were compared to the detected acceleration signals and analyzed on the time and frequency domain. Based on the experimental results, fiber optic sensor using Sagnac interferometer detected exciting frequency, effectively. This system can be applied to the structural health monitoring system.

**Key Words** : Fiber optic sensor(광섬유 센서), Sagnac interferometer(Sagnac 간섭계), Latticed fence structure(격자형 펜스 구조물), Frequency spectrum(진동수 스펙트럼), Exciting frequency(가진 진동수)

### 기호설명

R = radius of the Sagnac closed loop  
 $\omega$  = angular velocity  
v = tangential velocity  
 $\lambda$  = wavelength of the light  
c = velocity of the light  
A = area of the Sagnac closed loop  
 $\Delta t$  = time difference of the Sagnac closed loop

T = period  
 $\Delta\phi$  = phase variation  
a = constant number  
L = total fiber length of the Sagnac closed loop  
2x2 = type of directional coupler

접수일 : 2003년 7월 31일; 게재승인일: 2004년 2월 20일  
교신저자: 안동대학교 기계교육과  
E-mail: jlee@andong.ac.kr, Tel: (054) 820-5487

## 1. 서론

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

지능 구조물의 모니터링(monitoring) 방법은 광섬유 센서를 이용한 진동계측이 주로 연구되고 있는데, 구조물의 결함 검사에도 이용되고 있다. Guttinger<sup>5</sup> 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<sup>6</sup>는 토목 구조물 특히 교량에 있어서 광섬유 변위 센서를 이용한 방법이 기존의 스트레인 게이지 방법보다 안전 모니터링에 적합함을 실험으로 구현하였다. Leung<sup>7</sup> 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 optical fiber)를 이용하여 감지하는 방식이다. Feng<sup>8</sup> 등은 광섬유 센서 헤드(sensor head)를 한 줄로 연속된 와이어로 제작하고 프레임에 부착하여 외부 가진력을 주었을 때 이를 감지하는 시스템을 구현하였다. Feng<sup>8</sup> 등의 방법은 센서부가 한 개의 와이어로 제작된 점이 기존의 연구와 차이가 있다.

Bryson<sup>9</sup>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<sup>10</sup> 등은 스펙클(speckle) 방식을 이용하여 각

종 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<sup>11</sup> 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 선행연구<sup>9, 10</sup>에서 보여준 광섬유를 이용한 구조물의 물리량 측정방법과는 다르게 Sagnac 간섭계를 이용하여 격자 구조물에 광섬유를 분포시킨 형태로서 외부 가진 진동수를 탐지하고자 하였다.

## 2. Sagnac 간섭계

Sagnac 간섭계의 원리는 입사광을 둘로 쪼개고, 서로 반대방향으로 광폐회로를 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.

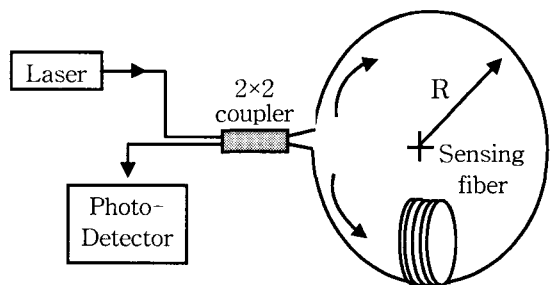


Fig. 1 Principle of the Sagnac interferometer

Fig. 1의 광섬유 루프에서 시계방향과 반시계 방향으로 진행되는 빛을 복소수로 표시할 수 있다.

Fig. 1과 같이 폐회로의 반경이 R이고, 각속도가  $\omega$ , 접선속도가 v, 파장이  $\lambda$ , 광속도가 c, 면적이 A인 간섭계에 대하여, 빛이 정방향과 반대방향으로 통과하는데 소요되는 전체 시간의 차,  $\Delta t$ 는<sup>3</sup>

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

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<sup>3</sup>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  $\omega$  에 비례한다. 감도를 높이기 위하여 빛이 폐회로 주위를 여러 번 통과하도록 만든다. a 배의 폐회로 루프에서는 위상변화가 a 배로 된다. 즉<sup>3</sup>,

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

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

광섬유 센서로는 일반적으로 감도가 좋은 맨드릴형(mandrel)형 센서<sup>4</sup>를 이용한다. 그러나, 맨드릴형은 탐지할 면적이 넓은 구조물, 즉 격자형 혹은 펜스와 같은 구조물에는 적합하지 않다. 격자형 구조물의 진동을 효과적으로 감지할 수 있는 것이 분포형 광섬유 센서(distributed fiber optic sensor)이다. 이는 구조물에 광섬유를 단순 부착함으로써 별도의 메카니즘 없이 분포형 센서를 제작할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 격자형 구조물의 외부

진동을 탐지하기 위하여 Sagnac 간섭계를 이용하였다. 상용 광섬유를 격자형 구조물 상에 분포시켜 분포형 센서를 구현하고 이를 실험하였다.

### 3. 시스템의 구성

사각 격자형 구조물의 외부 가진 주파수를 탐지하기 위하여 Sagnac 간섭계를 구성하고, 상용 광섬유를 격자형 구조물 상에 분포시켜 분포형 센서를 Fig. 2와 같이 구현하고 이를 실험하였다.

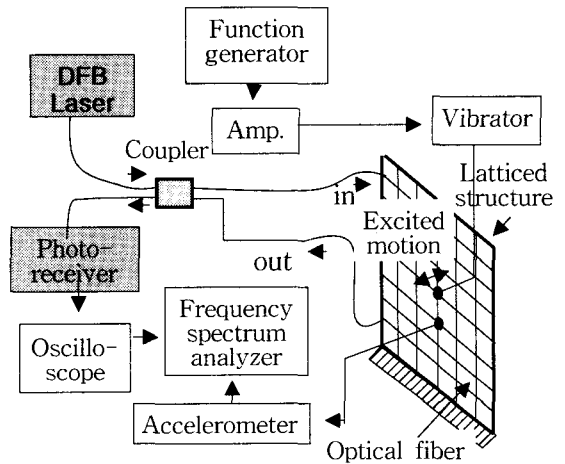


Fig. 2 Experimental setup

실험에 사용된 광섬유는 코어(core)가  $9.3\mu m$ , 클래딩(cladding)이  $125\mu m$  이고, 아크릴 수지 보호피막을 포함한 전체 직경은  $245\mu m$  의 통신용 광섬유를 이용하였다. 광원은 파장이  $1550nm$ 인 레이저(DFB fiber coupled laser source, THORLAB S3FC1550)를 이용하여 3×3 방향성 결합기(directional coupler, E-TEK SMFC5250PL211)에 입력되도록 하였다. 방향성 결합기를 통과한 빛은 진동신호가 입력되는 격자형 구조물을 거쳐 다시 방향성 결합기에서 반대방향으로 돌아온 빛과 간섭을 일으키게 된다. 간섭을 일으킨 빛은 광검출기(InGaAs photo-detector, THORLAB D400FC-1GHz)에서 전기신호로 변환되며 오실로스코프(Tektronix TDS3012)와 주파수 스펙트럼 분석기(RION SA-76)를 이용하여 가진 신호를 분석하였다.

Fig. 2에서와 같이 외부 가진(excited vibration)은

함수발생기(FG-7002C LG)의 특정 주파수 신호가 증폭기(B&K Type 2706)를 거쳐 가진기(B&K Type 4810)에 입력되도록 하였다. 가진기 인근에 가속도계(PCB)를 설치하여 광섬유의 응답신호와 비교토록 하였다. 본 실험에서 구현한 Sagnac형 간섭계 형태의 광섬유 격자형 시스템 구조물은 가로×세로가 180cm×180cm이며, 직경이 6mm인 철선으로 17×17 격자구조로 광섬유를 분포형으로 Fig. 2와 같이 격자에 고정시킨 형태이다. 광섬유 격자형 시스템에는 외부 접촉으로 인한 저주파 진동이 외부 가진 형태로 입력이 되며, 광섬유는 격자의 흔들림으로 인하여 위상변화가 발생하게 된다. 광섬유를 격자 모양으로 설치하기 위하여 광섬유를 프레임에 부착하고 레이저 입력에서 나오는 광을 방향성 결합기(3×3 coupler)로 균등분배하고 이 중 광섬유 격자를 통해 발생한 위상 변화는 방향성 결합기에서 간섭 현상을 일으킨다. Fig. 3 및 Fig. 4에는 실제 실험구성 사진을 보였다. Fig. 3에는 실제 구성된 격자형 구조물을 보였으며 Sagnac 간섭계의 구성을 위하여 150m의 광섬유를 이용하였다.



Fig. 3 Photograph of the experimental setup

Sagnac 간섭계의 구성은 FC/PC형의 연결 콘넥터(connector)를 이용하기 때문에 접속 손실이 많이 생겨 광섬유의 총 길이를 많이 늘릴 수 없다.

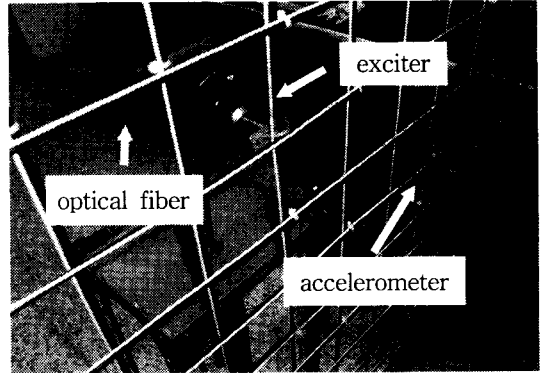


Fig. 4 Photograph of the exciter, optical fiber and latticed structure

#### 4. 가진 실험 및 결과 토의

외부 진동원으로 광섬유 격자 구조물의 중앙부에 가진기를 설치하였고, 임의 주파수 250Hz의 진동을 가진 시켰다. 가속도계를 부착하여, 분포형 광섬유 센서의 감지 신호와 비교토록 하였다. 먼저, Fig. 5에는 구조물에 가진을 시키지 않았을 때 광섬유 센서(FOS, fiber optic sensor)와 가속도계가 잡은 신호를 보였다. 주파수 전구간에 대하여 평탄특성을 보이고 있다.

격자형 구조물은 주요 시설물의 외부 침입자 방지용 및 감시용으로 사용되는데, 침입자의 손으로 구조물을 흔들었을 때 진동은 대부분 저주파이다. Fig. 6에는 이러한 형태의 신호를 보기 위하여 격자 구조물을 잡고 흔들었을 때 광섬유 센서가 감지한 신호를 보였다. 외부 주파수는 주로 50Hz 이하로 나타났으며, 저주파수 진동임을 확인하였다. 또한, 격자 구조물을 타고 넘어가는 현상을 보기 위하여 철선의 상단에 사람의 발로 비반복적 충격을 주었다. Fig. 7에는 이의 주파수 스펙트럼을 보인 것인데, 10~100Hz 사이의 저주파 성분을 확인할 수 있다. 이는 본 실험에서 구현한 광섬유 시스템이 주요 구조물의 모니터링 시스템으로 사용 가능함을 확인시키는 것이다.

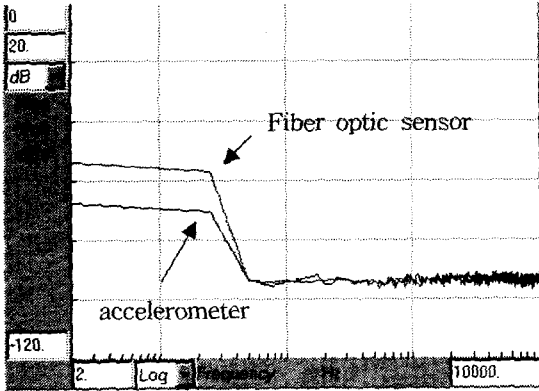


Fig. 5 Frequency spectra of no signal  
(log scale in horizontal axis)

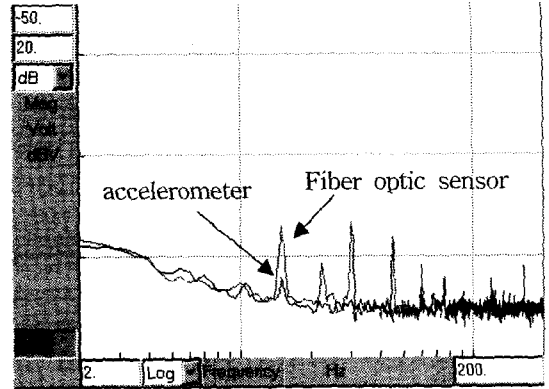


Fig. 7 Frequency spectra of kicking response  
(log scale in horizontal axis)

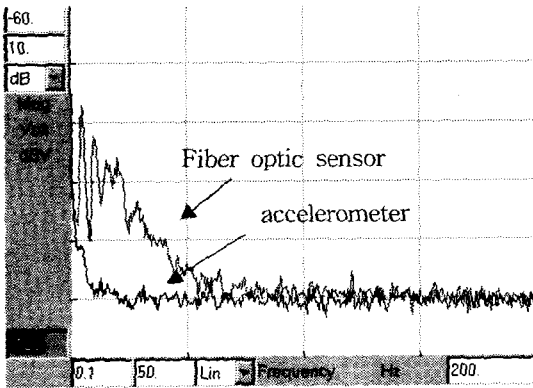


Fig. 6 Frequency spectra of handshaking response

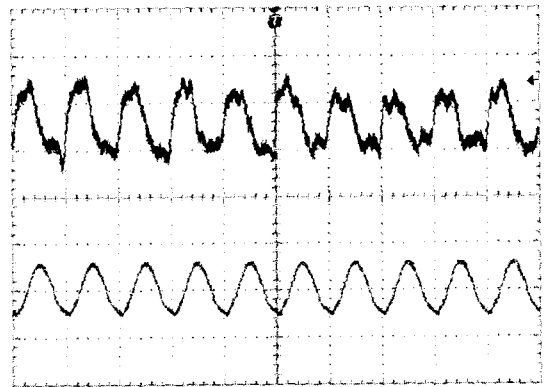


Fig. 8 Detected vibration signal under the 200 Hz  
vibration Ch. #1(upper) : Fiber-optic signal,  
Ch. #2(lower) : function generator signal

격자형 구조물에 200 Hz의 가진 주파수를 입력하여 광섬유 센서가 감지한 신호를 보았다. Fig. 8 및 Fig. 9에는 그 결과를 보였는데, 그림의 상단(upper channel)은 광섬유 센서의 출력신호이며 하단(lower channel)은 B&K 가진기에 입력된 200 Hz 신호이다. Fig. 8에서와 같이 광섬유 센서의 출력신호는 가진기에 입력된 신호보다 다소 찌그러진 형상이며 이는, 실험에 사용된 격자형 구조물의 진동 특성이라 볼 수 있다. 즉, 철선 각 부위의 용접상태, 프레임의 부차적인 진동 등이 입력되어 합해진 신호로 판단된다.

Fig. 9에는 200 Hz 가진신호에 대한 진동수 스펙트럼을 보였다. 그림에서와 같이 400 Hz, 600 Hz, 800 Hz에서 고조파 성분들(harmonics)이 검출되었으며, 200 Hz에서 가장 큰 진폭(dB)을 보였다. 이러한 고조파 성분은 부정확한 입력신호 때문에 기인한다.

Fig. 10에는 500 Hz 가진 신호에 대한 광섬유 센서에서 감지된 신호의 주파수 스펙트럼을 보였는데 가속도계 응답신호에서 6 kHz ~ 8 kHz 영역의 주파수성분이 검출되었다. 이는 사용된 가속도계의 고유진동 특성에서 기인된 것이라 판단된다.

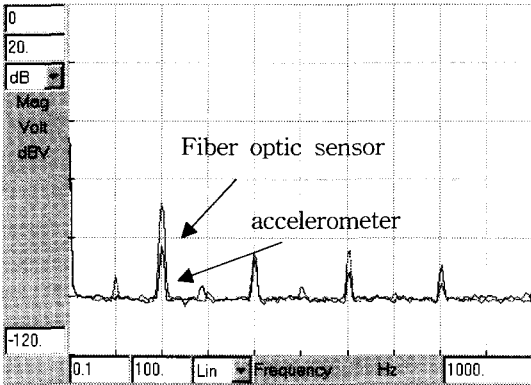


Fig. 9 Frequency spectrum of 200 Hz excitation response

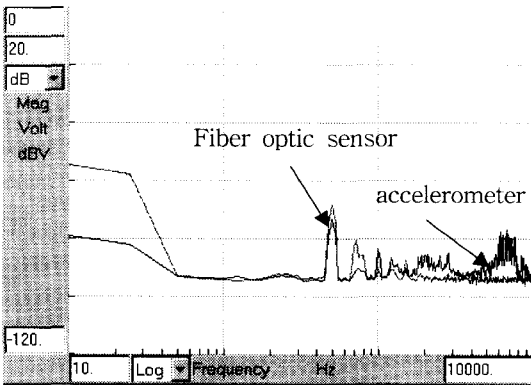


Fig. 10 Frequency spectra of 500 Hz excitation(log scale in horizontal axis)

Fig. 11에는 1 kHz의 가진신호에 대한 광섬유 센서의 응답특성을 주파수 영역에서 보인 것이다. 그림에서와 같이 광섬유 센서는 1 kHz 가진신호를 잘 감지함을 알 수 있다. Fig. 10과 비교하여 1 kHz의 가진신호에 대한 광섬유 센서의 응답특성은 5 kHz 이하의 영역에서 다른 주파수 성분이 검출되지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 특성을 이용하여 격자형 구조물의 고유진동수를 예측할 수 있다.

구조물의 주파수 응답 특성을 찾기 위하여 외부 가진 주파수를 0 Hz에서 수 kHz 까지 점차적으로 올리면서 응답특성을 관찰할 수 있으나 본 실험에서는 편의상 500 Hz ~ 1,000 Hz 범위에서 단계적으

로 변화시키면서 응답을 관찰하였다.

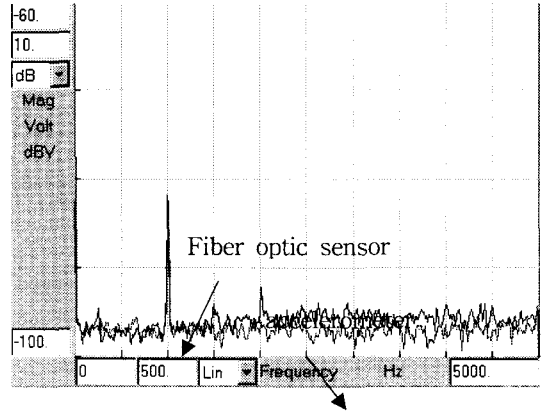


Fig. 11 Frequency spectra of 1 kHz excitation response

Fig. 12에는 가진 진동수에 대한 피크-피크(peak to peak) 진폭을 보였다. Fig. 12에서와 같이 외부 가진 주파수가 620 Hz 근방에서 높은 진폭이 감지되었으며, 상대적으로 600 Hz 및 900 Hz에서는 낮은 진폭을 보였다. 그림에서 B와 C는 각각 최대 및 최소 피크-피크 값을 표현한 것이다. 시간영역에서의 진폭은 시간에 따라 조금씩 변화하는데 이것이 B와 C로 표현되었다. 그림에서 두 개의 선도는 경향에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

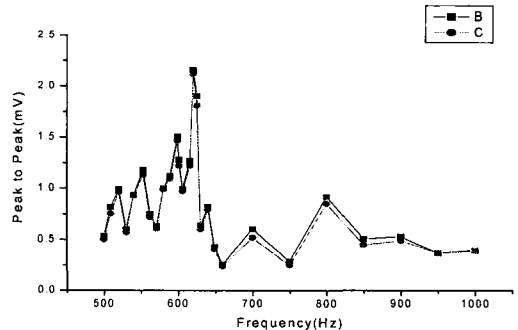


Fig. 12 Peak to peak response magnitude(mV) according to the excitation frequencies

실험에서 보인바와 같이 격자구조물에 설치된 분포형 광섬유 센서는 외부 가진 주파수를 잘 감지함을 확인하였으며, 본 시스템은 향후 외부진동이 주

입력원인 시설물의 안전 감시용에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

격자형 구조물의 구조건강진단(structural health monitoring)을 위한 기초연구로서 분포형 광섬유 센서를 활용하여 외부 가진 주파수를 탐지하고자 하였다. 이를 위하여 가진기를 이용하여 구조물에 기지의 진동 주파수를 입력하고 이를 광섬유 센서를 이용하여 감지하는 실험을 수행하였다. 분포형 광섬유 센서를 설계·제작하여 이를 180 cm×180 cm 크기의 격자형 구조물에 적용하였다. 또한, 광섬유 간섭계로는 구성이 비교적 간단한 Sagnac형을 선택하였다. 격자 구조물에 사람에 의한 충격진동과 흔들림 진동을 주었을 때 제작된 광섬유 센서는 저주파 진동을 잘 감지하였으며, 임의의 주파수인 200Hz, 500Hz 및 1kHz의 외부 가진주파수를 또한 잘 감지함을 확인하였다. 구조물의 주파수 응답특성을 찾기 위하여 외부 가진 주파수를 500 Hz ~ 1,000 Hz로 선택하여 이를 변화시키면서 응답을 관찰하였다. 실험 결과 외부 가진 주파수가 620 Hz 근방에서 높은 진폭이 감지되었다. 이를 통하여 본 실험에서 구현된 분포형 광섬유 센서는 외부 가진 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.

## 참고문헌

1. Lyamshev, L. M. and Smirnov, Y. Y., "Fiber Optic Sensors(review)," Sov. Phys. Acoust., Vol. 29, No. 3, pp. 169-180, 1983.
2. Jackson, D. A. and Jones, J. D. C., "Fiber Optic Sensors," OPTICA ACTA, Vol. 33, No. 12, pp. 1469-1503, 1986.
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, No. 11, pp. 622-626, 2000.
4. Lee, J., Yoon, H., Seol, J. and Nam, S., "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, I. 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, No. 1, pp. 5-22, 2002.