

양단이 지지된 Fabry-Perot 광섬유센서의 음압 감지 특성 연구

Sound Detection Characteristics Using Fabry-Perot Fiber Optic Sensor which Simply Supported in Structure

이 종 길*, 이 진 우**, 이 준 호**
(Jongkil Lee*, Chin-Woo Yi**, June-Ho Lee**)

*안동대학교 기계교육과, **호서대학교 전기정보통신학부
(접수일자: 2003년 7월 9일; 채택일자: 2003년 9월 16일)

본 연구에서는 소형화 및 경량화의 특성을 가진 Fabry-Perot형 간섭계를 구성하였다. 음향이 광섬유의 횡방향으로 감지되도록 센서 헤드부를 1 cm 정도로 제작하고 총 길이가 9.5 cm인 광섬유의 양단을 단순지지토록 하였다. 센서의 음향 감지특성을 관찰하기 위하여 무지향성 스피커를 이용하여 음향신호를 인가하였다. 횡방향으로 입력된 음향 신호를 광섬유 센서와 마이크로폰이 감지한 신호를 비교하였다. 1 kHz 이하의 신호에서는 광섬유 센서가 마이크로폰보다 감지 특성이 좋으나 2 kHz에서는 광섬유 센서의 감지 특성이 감소하였다. 이것은 제작된 광섬유 센서의 지지구조의 특성을 나타낸 것이며 실험을 통하여 Fabry-Perot 간섭계용 센서는 횡방향의 음향을 잘 감지함을 확인하였다. 이러한 형태의 센서는 지능구조물의 건강진단 모니터링 분야에도 적용가능하리라 판단된다.

핵심용어: 광섬유 센서, 페브리-페롯 간섭계, 음향신호, 주파수 스펙트럼

투고분야: 물리음향 및 광음향 분야 (9.7)

In this paper, fiber optic sensor using Fabry-Perot interferometer which had benefit of minimize and light-weight was used. The sensor head has 1cm in length, total length of fiber is 9.5 cm, and the sensor supported at both ends, simply. To analyze the acoustic characteristic non-directional speaker is used as a sound source. Acoustic applied in lateral direction and detected two signals were compared each other. Below 1 kHz fiber optic sensor has more sensitive than microphone, but in 2 kHz fiber optic sensor has less sensitive than microphone. This characteristic varies to the supporting system of fiber optic sensor. It was confirmed that the Fabry-Perot interferometric sensor detected acoustic signal, effectively. This kind of sensor can be applied to the structural health monitoring field of intellectual structure.

Keywords: Fiber optic sensor, Fabry-Perot interferometer, Acoustic signal, Frequency spectrum

ASK subject classification: Physical acoustics and photo-acoustics (9.7)

I. 서론

광섬유를 이용한 센서 제작 기술은 광섬유의 저손실화 및 다중화 기술의 발전과 더불어 이를 이용한 보다 효율적인 광간섭계의 개발이 이루어져 계측, 해양, 항공 등의 다양한 산업분야에 응용이 되고 있다[1,2]. 특히 광섬유 센서를 이용한 배열기술은 하나의 광섬유에 다수의 센서

를 연결할 수 있으며, 다양한 형태로 구성할 수 있다. 센서들 중 비교적 감도가 높고 특정 배열시스템에의 적용이 용이한 형태가 간섭계형 센서(interferometer sensor)로 알려져 있으며, 간섭계형 광섬유 센서 기술은 최근 전력 설비의 열화진단에도 많이 적용하고 있다.

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[3-9]. 지능 구조물의 모니터링 방

책임저자: 이종길 (jlee@andong.ac.kr)
730-749 경북 안동시 송천동 388
안동대학교 기계교육과
(전화: 054-820-5487; 팩스: 054-823-1766)

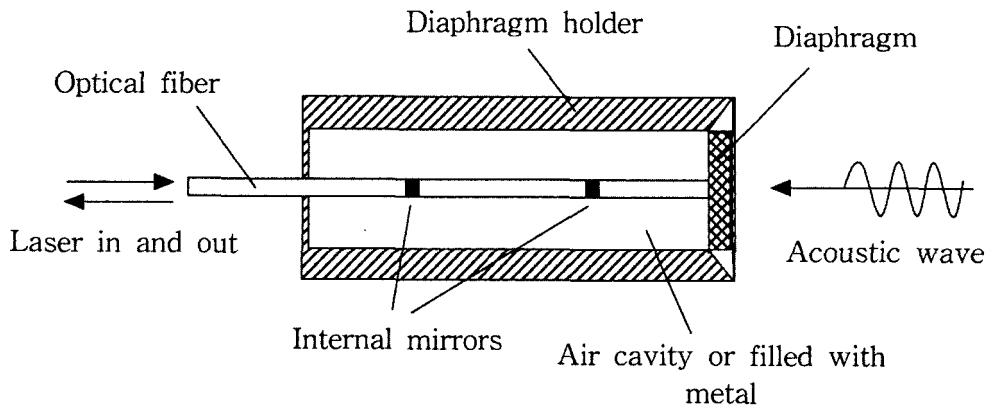


그림 1. 선행연구의 센서 헤드의 단면도[11-13]
 Fig. 1. Cross sectional view of the sensor head based on previous research[11-13].

법은 광섬유 센서를 이용한 진동계측이 주로 연구되고 있으며[3-8], 구조물의 결합 검사에도 이용되고 있다[9]. 광섬유 간섭계의 형태는 주로 Mach-Zehnder, Sagnac, Speckle, Fabry-Perot 등이 있으나, 센서 헤드부를 소형화할 수 있는 간섭계로 Fabry-Perot 간섭계가 널리 쓰이고 있다. Lee[10]는 Fabry-Perot 간섭계를 제작하고 이를 콘크리트 구조물의 여러 지점에 매설 및 부착하여 재하실험을 하였으며 구조물의 변형상태를 모니터링하였다. Park[11] 등은 Fabry-Perot 압력센서를 제작하여 두께가 $0.6\mu\text{m}$ 인 Si 박막에 접착하여 여러 가지 압력으로 감지특성을 실험하였다. Naono[12] 등은 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 두 반사막 사이의 길이가 0.075mm 이고 끝단에 다이어프램(diaphragm)이 설치된 구조의 광섬유 마이크로폰을 제작하여 실험하였다. Matsumoto[13] 등도 Naono[12] 등의 결과와 유사한 연구를 하였다. 기존의 음향센서로서의 Fabry-Perot 센서에 관한 연구는 주로 압력센서로 개발되고 있으며 그림 1과 같이 광섬유의 길이방향 즉 종방향(longitudinal direction)으로 압력이 가해지는 경우에 음향을 감지하는 구조이다. 그림 1에서와 같이 외부음향이 다이어프램에 가해지면 박막의 진동으로 종방향 압력이 발생하고 이것이 두 개의 반사막을 통과한 빛에 음향정보를 실어준다.

기존의 연구와는 달리 본 연구에서는 광섬유 센서 중 소형화 및 경량화를 이룰 수 있는 Fabry-Perot형 간섭계를 구성하고 음향이 광섬유의 횡방향(lateral direction)으로 감지되도록 센서 헤드부를 1cm 정도로 제작하고 광섬유의 양단을 단순지지토록 하였다. 제2장에서는 Fabry-Perot 간섭계의 원리를 설명하고 제3장에서는 이러한 형태의 센서구조를 지능구조물의 실시간 모니터링에 적용가능성을 보기 위하여 실험으로 관찰하였다.

센서 헤드부의 반사막은 단일모드 광섬유에 TiO_2 를 증착하여 제작하고 1550 nm의 레이저를 광원으로 사용하였다. 실험결과에 비추어 이러한 형태의 Fabry-Perot 간섭계 센서의 지지구조는 지능구조물의 모니터링에 적합할 것이라 사료된다.

II. Fabry-Perot 간섭계 센서

일반적으로 Fabry-Perot 간섭계 센서는 그림 2에서와 같이 일정간격 사이에 2개의 거울(mirror)을 단일모드 광섬유(single mode fiber) 내에 나란히 배치하여 구성한다.

Fabry-Perot 간섭계의 원리는 첫 번째 반사거울에서 반사되는 광과 첫 번째 반사거울을 통과하여 두 번째 거울에서 반사되는 광 사이의 경로차가 발생하고 광의 간섭현상이 발생하게 된다.

두 개의 반사거울의 반사율이 R_1, R_2 투과율이 각각 T_1, T_2 라 할 때 입력 광전력, P_i 와 출력 광전력 P_r 의 비를 반사율 R 로 표현하면 다음과 같다[10].

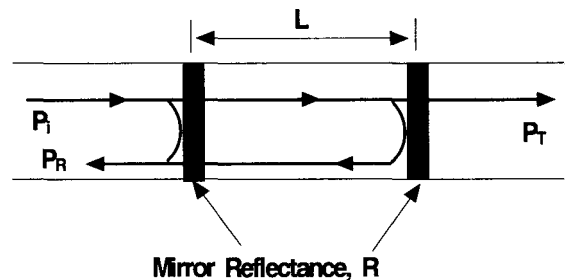


그림 2. 두 개의 반사막을 가진 페브리-페롯 간섭계
 Fig. 2. Fabry-Perot interferometer with two mirrors.

$$R = \frac{P_R}{P_i} = [R_1 + R_2 (T_1 - R_1)^2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \times (T_1 - R_1) \cos \phi] \times [1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi]^{-1} \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 간섭계에서의 왕복 광 위상차이며, 이는 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$\phi = \frac{4\pi n L \nu}{c} \quad (2)$$

여기서, c 는 광속도, n 은 굴절률, L 은 두 개의 거울 사이의 거리, ν 는 광주파수이다. 식 (1)에서 $R_1, R_2 \ll 1$ 이고, 거울에서의 광손실을 무시하면,

$$R = \frac{P_R}{P_i} = R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \times \cos \phi \quad (3)$$

로 표현된다. 만일 두 거울의 반사계수가 동일하면 ($R_1=R_2=R^*$), 식 (3)에서 광전력비 R 은

$$R = \frac{P_R}{P_i} = 2 R^* \left\{ 1 + \cos \left(\frac{4\pi n L \nu}{c} \right) \right\} \quad (4)$$

로 유도된다. 따라서 광전력비 R 은 광위상차 ϕ 즉, L, n, ν 의 변화에 따라 변하게 된다. L, n, ν 는 음압, 온도, 압력 등의 외부 환경의 변화에 민감하므로 이것을 이용하여 Fabry-Perot 간섭계 센서를 구성할 수 있다.

식 (4)에서와 같이 광전력비 R 의 크기는

$$R = \begin{cases} 0, & (\text{when } \cos \phi = -1) \\ 4 R^*, & (\text{when } \cos \phi = 1) \end{cases} \quad (5)$$

로 표현되며, 식 (5)는 두 거울의 반사계수의 값이 동일하다는 조건에서 유도되었으므로 이것은 광전력비의 최대값과 최소값의 차이를 가장 크게 하는 조건이므로 이것은 광간섭 무늬의 가시도 (visibility)를 높이는 데 중요한 변수가 된다.

광섬유 센서를 이용한 음압 탐지 기법은 특히 지능구조물의 모니터링과 같이 Fabry-Perot 간섭계 센서를 이용하여 광섬유 센서를 다중화 (multiplexing) 함으로서 공간내의 음원 추적을 하는데 적합할 것이다.

III. 음향 계측 실험 및 결과

양단이 고정된 Fabry-Perot 센서부의 공기 중 음향감지 특성을 보기 위하여 그림 3과 같이 실험장치를 구성하였다. 광원은 파장이 1550 nm인 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 음향 신호가 입력되는 센서 헤드 (Sensor head)를 거쳐 거울에 반사하여 다시 방향성 결합기에서 센서 헤드를 거치지 않은 빛과 간섭을 일으키게 된다. 간섭을 일으킨 빛은 광검출기 (InGaAs fiber optic photo detector, THORLAB D400FC-1 GHz)에서 전기신호로 변환되며 오실로스코프 (Oscilloscope, Tektronix TDS3012)와 주파수 스펙트럼 분석기 (Frequency spectrum analyzer, RION SA-76)를 이용하여 음향신호를 분석하였다.

그림 3에서와 같이 센서 헤드는 음향을 감지하는 부분

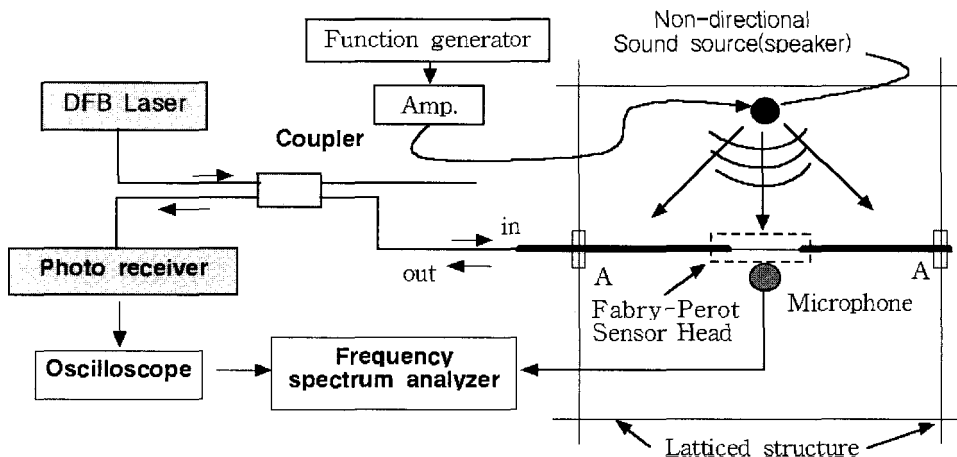


그림 3. 페브리-페롯 간섭계와 실험장치의 구성도
Fig. 3. Fabry-Perot interferometer and its experimental set-up.

이며 Fabry-Perot 간섭계 끝단에 설치된 센서부의 제작 공정을 그림 4에 보였는데, 단일모드 광섬유 (Single mode fiber optic)로 제작된 센서부 길이는 1 cm이며 그림 2와 같이 2개의 미러 (Mirror)를 설치하였고 가운데 부분을 접합 (Splicing)하였다. TiO_2 반사막 (mirror)은 가시광이나 적외선 영역에서 높은 굴절률과 적은 광손실, 그리고 광섬유 위에 증착시 부착성이 좋기 때문에 Fabry-Perot 간섭계의 반사막으로 주로 이용된다[10,11]. 본 실험에 사용된 센서 헤드부의 반사막은 TiO_2 를 광섬유 표면에 증착하여 제작하였다. 센서 헤드부는 표면의 피복 (Jacket)을 벗겨내고 클래딩 (Cladding)직경이 $125\ \mu\text{m}$ 이고 코어 (Core) 직경이 $10\ \mu\text{m}$ 인 광섬유로 그림 4와 같은 제조 공정을 거쳐 제작하였다. 따라서 센서 헤드부는 직경이 작고 표면에 피복이 입혀진 광섬유보다 강도가 약하기 때문에 실험에 주의하여야 한다. 그림 5에는 실제 제작된 센서 헤드부의 사진을 보였다.

Fabry-Perot 간섭계는 그림 3과 같이 제작하여 광학

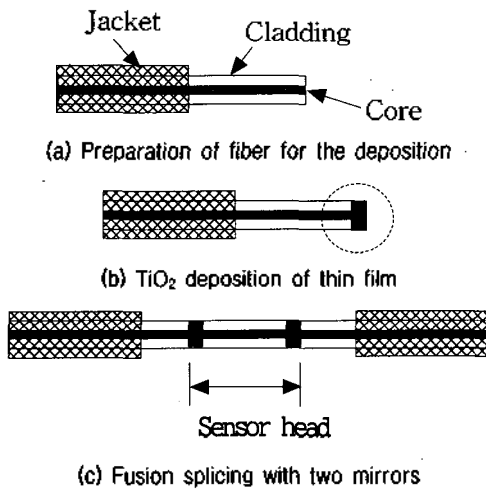


그림 4. 센서 헤드부의 제작공정도
Fig. 4. Fabrication process of the sensor head.

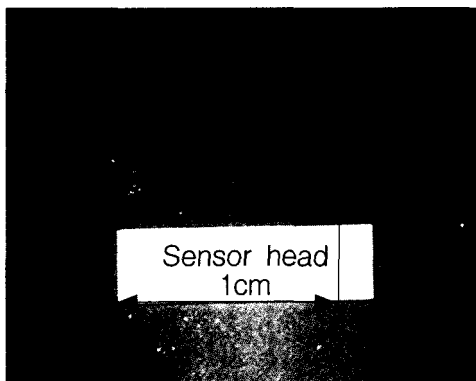


그림 5. 페브리-페롯 센서 헤드부의 사진
Fig. 5. Photograph of the Fabry-Perot sensor head.

테이블 위에 설치하고 외부에서 음원을 가하였다. 그림 3에서와 같이 외부 음원은 함수발생기 (Sweep/Function generator, FG-7002C LG)를 이용하여 증폭기 (Amplifier, VASCOM KFA-400)를 거쳐 직경이 45 cm인 12각형 무지향성 스피커 (Non-directional speaker, AVM D012)에서 음이 발생토록 하였다. 광섬유 센서의 감지 신호와 비교하기 위하여 마이크로폰 (Microphone, RION NL-15)을 센서 헤드에 근접하여 설치하고 두 신호를 비교하였다. 그림 6에는 실제 실험구성 사진을 보였다.

기존의 연구는 그림 1에서와 같이 음향이 광섬유 헤드의 길이방향으로 입사되는 것이나, 본 실험에서는 광섬유 헤드의 횡방향으로 음향이 입사되도록 하였다. 음향이 입사되면 광섬유 헤드는 그림 3과 같이 횡방향으로 압력을 받아 진동을 하게 되고 이 때문에 광섬유에 길이 변화가 발생한다. 이를 Fabry-Perot 간섭계가 감지하는 원리이다. 그림 3의 'A' 부분은 길이가 9.5 cm인 광섬유의 양단을 단순지지 (simply supported)하는 구조이다. 파장이 1550 nm인 레이저를 Fabry-Perot 간섭계에 공급하고 센서 헤드의 지지부에 인위적으로 손으로 접촉된 신호를 그림 7에 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 그림에 보인 두 신호는 접촉 전·후의 신호를 비교하여 보인 것이며 제작된 센서는 접촉신호에 민감함을 알 수 있다.

인간의 음성을 센서 헤드부에 인가하였을 때 광섬유 센서가 감지한 신호를 그림 8에 보였다. 그림의 두 신호는 인가 전·후의 신호를 비교하여 보인 것이다. 그림에서와 같이 200~600 Hz 대역과 1.4 kHz 대역에서 주파수가 감지되었다. 그림 9는 200 Hz의 음향신호를 무지향성 스피커에 인가하였을 때 광섬유 센서와 마이크로폰이 잡은 신호를 비교하여 보인 것이다. 200 Hz의 신호에서 광섬유 센서의 신호가 마이크로폰보다 성능이 좋은 것으로 평가되었다. 특히 저주파 대역에서의 감지성능이 우수함

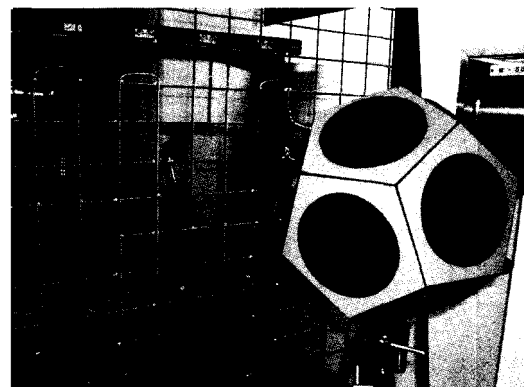


그림 6. 실험장치 사진
Fig. 6. Photograph of the experimental set up.

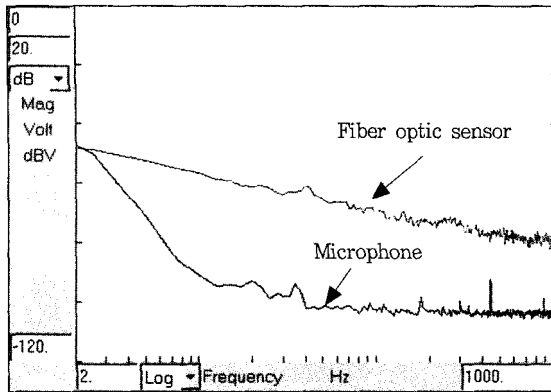


그림 7. 센서 접촉시 감지된 신호의 주파수 스펙트럼 (주파수 축은 로그 축)

Fig. 7. Frequency spectrum of detected signal using touching the sensor head (Frequency axis is log scale).

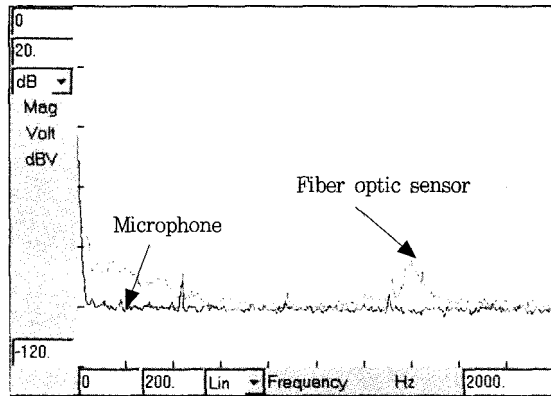


그림 8. 인간의 음성 주파수 스펙트럼

Fig. 8. Frequency spectrum of detected signal using human voice.

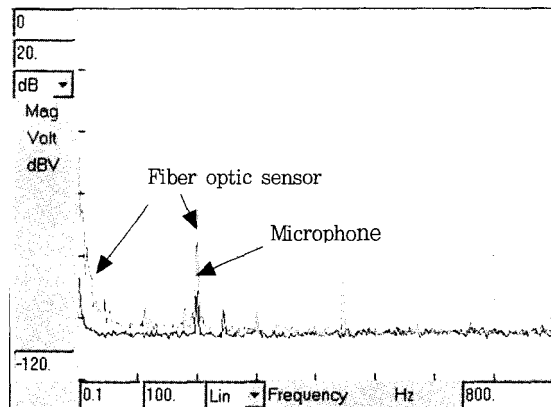


그림 9. 200 Hz의 입력신호에 대해 감지된 두 신호의 비교
Fig. 9. Comparison of the two detected signals under 200 Hz.

을 알 수 있다. 450 Hz 근방에서의 주파수는 실험실의 에코 주파수인 것으로 판단된다.

그림 10 및 그림 11에는 각각 1 kHz 및 2 kHz의 음향신호를 무지향성 스피커에 인가하였을 때 광섬유 센서와 마이크로폰이 잡은 신호를 비교하여 보인 것이다. 그림

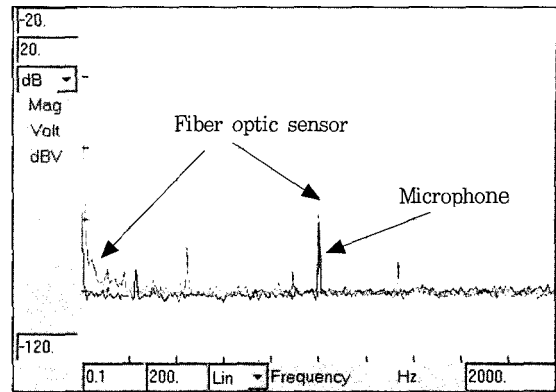


그림 10. 1 kHz의 입력신호에 대해 감지된 두 신호의 비교
Fig. 10. Comparison of the two detected signals under 1 kHz.

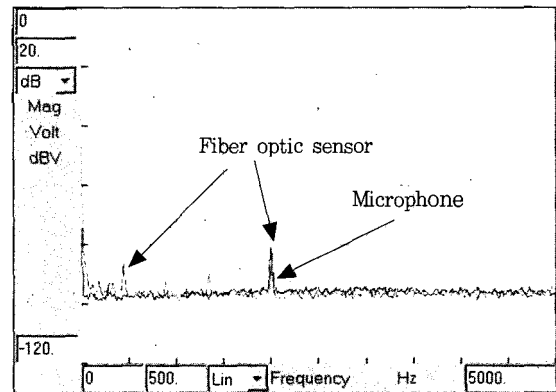


그림 11. 2 kHz의 입력신호에 대해 감지된 두 신호의 비교
Fig. 11. Comparison of the two detected signals under 2 kHz.

10에서와 같이 1 kHz의 신호에서 광섬유 센서의 신호가 마이크로폰보다 감지 특성이 좋은 것으로 평가되었다. 그러나 그림 11에서와 같이 2 kHz의 입력신호에는 광섬유 센서의 감지 특성이 마이크로폰보다 오히려 2~3 dB(V) 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 제작된 광섬유 센서의 감지 특성이 1 kHz 이하에서는 마이크로폰보다 우수하나 그 이상의 고주파 성분에서는 마이크로폰보다 떨어짐을 알 수 있다. 그림 2에 보인 바와 같이 광섬유 센서 헤드부는 양단이 단순지지된 구조이며 외부 주파수가 고주파일 때 모드 특성이 달라지는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

광섬유 센서의 감지특성의 예측을 위하여 실험에 사용된 센서 헤드부는 그림 12와 같이 센서가 양단이 단순지지되고 길이가 L인 선의 파동으로 볼 수 있다. 외부의 음향압이 원점에서부터 ξ 만큼 떨어진 위치에서 음원 주파수가 Ω 이고 크기가 F_0 인 $F(t) = F_0 e^{-i\Omega t}$ 로 입력되고 있을 때 광섬유의 파동 방정식은 다음과 같이 유도된다.

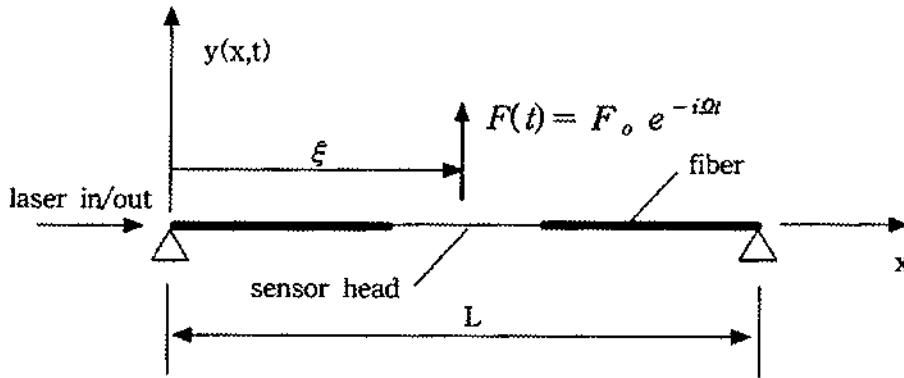


그림 12. 횡방향 음파에 대한 페브리-페롯 센서의 선의 응답 해석
Fig. 12. String response analysis of the Fabry-Perot sensor under lateral acoustic wave.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{F_0}{T} e^{-i\Omega t} \delta(x - \xi) \quad (6)$$

여기서, c 는 파속 (wave speed), T 는 광섬유의 장력의 크기이다. 편미분방정식 (6)의 해는

$$y(x, t) = e^{-i\Omega t} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (7)$$

으로 표현된다. 여기서 경계조건 ($y(0, t) = y(L, t) = 0$) 및 함수의 직교성을 이용하여 B_n 을 구하면

$$B_n = \frac{2c^2}{L} \frac{F_0}{T} \frac{\sin\left(\frac{n\pi\xi}{L}\right)}{\left\{\left(\frac{n\pi c}{L}\right)^2 - \Omega^2\right\}} \quad (8)$$

으로 되고, 따라서 $y(x, t)$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$y(x, t) = e^{-i\Omega t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2c^2}{L} \frac{F_0}{T} \frac{\sin\left(\frac{n\pi\xi}{L}\right)}{\left\{\left(\frac{n\pi c}{L}\right)^2 - \Omega^2\right\}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (9)$$

식 (9)에서와 같이 외부 음원이 $F(t) = F_0 e^{-i\Omega t}$ 일 때 광섬유 센서의 파동특성은 $e^{-i\Omega t}$ 에 종속적으로 움직이게 된다. 또한 식 (9)에서 고유진동수가 일정한 상태에서, n, c, L, T, F_0, ξ 등이 일정할 때 $y(x, t)$ 의 크기는 외부 음원주파수 Ω 가 커짐에 따라 값이 작아지는 특성이 있다. 그림 11에서와 같이 $\Omega = 2$ kHz의 음원이 발생할 때 광섬유 센서는 저주파 음원일 때보다 감지특성이 떨어짐을 알 수 있는데 이는 식 (9)의 분모항에서 Ω 가 커짐에 따른 $y(x, t)$ 의 크기가 감소하는 특성과 일치한다. 마이크로폰은 그림 11과 같은 배치가 아니기 때문에 식 (9)와

같은 특성은 없다고 본다.

그림 13에는 1 kHz의 주파수를 가진 $F(t)$ 를 광섬유 센서에 입력하였을 때 광섬유 센서와 마이크로폰이 감지한 신호를 시간축상에서 보였다. 그림 13에서와 같이 광섬유 센서는 식 (9)와 같은 특성을 보임을 확인할 수 있다.

본 연구에서와 같이 Fabry-Perot 간섭계용 센서는 길이가 1 cm 정도의 소형화, 경량화할 수 있으며, 좁은 공간에서의 활용도가 높을 것으로 판단된다. 특히 구조물의 건강진단 모니터링 (Structural health monitoring) 분야에도 적용가능성이 높다. 음향의 감지능력 측면에서 보면 마이크로폰보다 특정 주파수 대역에서는 우수한 감지 특성을 보이며, 이는 Fabry-Perot 센서 헤드의 설치조건, 즉 경계조건에 따라 달라질 수 있다. 이러한 종류의 센서 헤드는 삽입 센서 (Embedded sensor)로 가능하며, 복합구조물의 내부감시에도 효과적으로 활용할 수 있다고 판단된다.

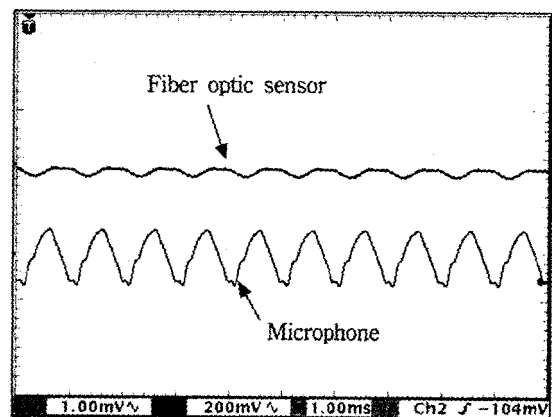


그림 13. 감지된 페브리-페롯 센서의 시간영역에서의 분석
Fig. 13. Time division analysis of detected signal using the Fabry-Perot sensor.

IV. 결론

Fabry-Perot 간섭계 센서는 일정간격 사이에 2개의 거울을 직경이 125 μm 인 단일모드 광섬유 내에 나란히 배치하여 구성하며 두 거울에서 반사되는 광 사이의 경로차를 이용하여 음향을 감지하는 방법이며 센서헤드의 크기를 소형화할 수 있는 장점이 있다. 선행 연구자의 Fabry-Perot 센서에 관한 연구는 주로 압력센서로 개발되고 있으며 광섬유의 길이방향 즉 종방향으로 압력이 가해지는 경우에 음향을 감지하는 구조이다.

그러나 본 연구에서는 소형화 및 경량화를 이룰 수 있는 Fabry-Perot형 간섭계를 구성하고 음향이 광섬유의 횡방향으로 감지되도록 센서 헤드부를 1cm 정도로 제작하고 광섬유의 양단을 단순지지토록 하였다. 본 연구에서는 한 개의 센서 헤드(감지부 길이 1 cm)를 가진 Fabry-Perot 간섭계를 구성하고 총 길이가 9.5 cm인 광섬유 센서의 양단은 프레임에서 단순지지되도록 하였다.

양단이 단순지지된 Fabry-Perot형 센서의 음향 감지 특성을 관찰하기 위하여 200 Hz, 1 kHz 및 2 kHz의 음향 신호를 무지향성 스피커에 인가하였으며 광섬유 센서와 마이크로폰이 잡은 신호를 비교하였다. 200 Hz 및 1 kHz의 신호에서 광섬유 센서의 신호가 마이크로폰보다 감지 특성이 좋은 것으로 평가되었다. 그러나 2 kHz의 입력 신호에는 광섬유 센서의 감지 특성이 마이크로폰보다 오히려 2~3 dB(V) 감소하였다. 이것은 제작된 광섬유 센서의 감지 특성이 1 kHz 이하에서는 마이크로폰보다 우수하나 그 이상의 고주파 성분에서는 마이크로폰보다 떨어짐을 나타낸 것이며, 광섬유 센서의 길이와 관련이 있어 보인다.

본 연구에서와 같이 Fabry-Perot 간섭계용 센서는 센서 헤드부의 길이가 1 cm 이하 정도로 소형화, 경량화할 수 있으며, 좁은 공간에서의 활용도가 높을 것으로 판단된다. 특히 구조물의 건강진단 모니터링 분야에도 적용 가능성이 높다. 음향의 감지능력 측면에서 보면 마이크로폰보다 특정 주파수 대역에서는 우수한 감지특성을 보이며, 이는 Fabry-Perot 센서헤드의 설치조건, 즉 경계 조건에 따라 달라질 수 있다. 이러한 종류의 센서 헤드는 삽입센서로 가능하며 복합구조물의 내부감시에도 효과적으로 활용할 수 있다고 판단된다. 그러나 실험에서와 같이 실제 센서로서의 활용을 위하여 사용 주파수 대역의 정확한 분석과 센서보호 장치의 개발이 선행되어야 하며 향후 이러한 분야의 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 (과제관리번호: 00-역-02) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

1. D. A. Jackson and J. Jones, "Fiber Optic Sensors," *OPTICA ACTA*, 33 (12), 1469-1503, 1986.
2. J. Lee, "Characteristics of 2-channel TDM fiber-optic sensor array," *Journal of the Korean Sensors Society*, 7 (5), 306-312, 1998.
3. M. Englund, A. Ipatti, and P. Karioja, "Fiber-optic security monitoring sensor," *SPIE*, 3099, 284-299, 1997.
4. H. Guttinger and G. Piester, "Fiber-Optic Sensors and Technology in Security Systems," *1st International Conference on Optical Fiber Sensors*, 62-66, 1983.
5. D. Inaudi, "Field Testing and Application of Fiber Optic Displacement Sensors in Civil Structures," *OSA Technical Digest Series*, 16, 596-599, 1997.
6. C. Leung, I. Chang, and S. Hsu, "Fiber Optic Line Sensing System for Perimeter Protection against Intrusion," *4th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 113-116, 1986.
7. C. Bryson, "Interferometric Sensor System for Security Applications," *SPIE*, 2360, 485-488, 1994.
8. M. Englund, A. Ipatti, and P. Karioja, "Fiber-Optic Security Monitoring Sensor," *SPIE*, 3099, 284-299, 1997.
9. S. Patsias and W. Staszewski, "Damage Detection using Optical Measurements and Wavelets," *International Journal of Structural Health Monitoring*, 1 (1), 5-22, 2002.
10. H. Lee, "Fabrication and characteristics of the multiplexed fiber-optic Fabry-Perot interferometric deformation sensor for the smart structure," Thesis, Kyungpook Nat'l Univ., 1998.
11. J. Park and M. Kim, "High performance fiber-optic Fabry-Perot Pressure sensor with Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ diaphragm," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, L1562-L1564, 1999.
12. H. Naono, M. Matsumoto, K. Fujimura, and K. Hattori, "Fiber-optic microphone using a Fabry-Perot interferometer," *9th Optical Fiber Sensors Conference*, 155-158, 1993.
13. M. Matsumoto, K. Fujimura, K. Hattori, and H. Naono, "Fiber-optic acoustic sensor based on Fabry-Perot interferometer," *Proc. of OFS '86*, 43-46, 1986.

저자 약력

● 이 종 길 (Jongkil Lee)

한국음향학회지 제21권 제7호 참조

● 이 진 우 (Chin-Woo Yi)

1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (학사)

1986년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학과 (석사)

1990년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학과 (박사)

1994년~ 현재: 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

● 이 준 호 (June-Ho Lee)

한국음향학회지 제21권 제7호 참조