

광섬유 마하젠더 간섭계를 이용한 침입자 감지 센서

Intrusion Sensor Using Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometer

박형준*, 송민호*[†]

Hyoung Jun Park* and Minho Song*[†]

초 록 광섬유 마하젠더 간섭계를 이용하여 넓은 범위에서 침입자를 상시 감지할 수 있는 센서시스템을 제작하였다. 충격에 의해서 생성되는 간섭신호의 변화를 푸리에 변환하고, 스펙트럼의 주파수와 피크 크기 변화를 관측하였다. 센서팔에 가해지는 충격의 속도변화에 따라 간섭계 출력의 주파수가 4.25 Hz/s/m 증가하였고, 질량이 증가함에 따라 최대 주파수 성분의 크기가 $4.11 \times 10^2 \text{ dB/kg}$ 의 비율로 변화함을 알 수 있었다.

주요어: 침입자 센서, 광섬유 센서, 마하젠더 간섭계

Abstract For the intruder detection, a buried fiber-optic sensor based on fiber-optic Mach-Zehnder interferometer is demonstrated. We buried the sensor arm in a styrene board and exerted pressure on it. The pressure-induced deformation speed has almost linear relationship with the output frequencies of the interference signals, and about 4.25 Hz frequency change per 0.01 m/s was obtained. Also it has been shown that the amplitude of frequency component increases according to the weight of mass.

Keywords: Intrusion Sensor, Fiber-Optic Sensor, Mach-Zehnder Interferometer

1. 서 론

최근, 물류단지나 산업, 연구, 군사시설 등의 보안수요가 크게 증가하고 있어, 적은 비용과 인력으로도 운용 가능한 효율적인 보안시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 기존의 보안시스템은 주로 적외선, 초음파, 자기장 센서 등을 이용하여 침입자를 경보하거나 CCD 또는 열화상 카메라 등을 이용하여 영상정보를 취득한다. 이러한 센서들은 비교적 저렴한 비용으로 정확한 경보신호를 얻을 수 있으나, 출입문이나 창문 등의 좁은 범위에 한정적으로 사용되며, 외부에 노출되어 있어 침입자가 쉽게 견제할 수 있는 단점을 갖고 있다. 또한 센서가 부착된 위치의 정보만을 얻게 되므로 넓은 범위에 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 대규모 시설을

효율적으로 감시하기 위해서는 구조물에 쉽게 매설, 또는 삽입되어 외부로 드러나지 않고, 단일점 센서가 아닌 분배형 구조를 가지는 센서의 형태가 바람직하다.

광통신의 전달매체로 사용되는 광섬유는 광신호를 전달할 뿐 아니라, 외부의 온도나 압력 등을 광신호의 위상변화로 바꾸어주는 센서의 역할을 동시에 수행할 수 있다. 구조물에 쉽게 삽입할 수 있어 노출이나 부식의 우려가 없고, 넓은 영역을 단일 광섬유라인으로 감지할 수 있으며, 전자기파 간섭이 심한 환경에서도 사용이 가능한 장점을 가지고 있다[1]. 따라서 광섬유를 이용한 다양한 침입자 센서들이 제안되었는데, 구부림, 스트레인, 압력에 따른 편광이나 광량의 변화를 측정하는 방법[2], 외부 물리량에 의한 Rayleigh 산란광을 감지하는 OTDR

(optical time domain reflectometer)[3,4]을 이용하는 방법, 외부 물리량에 의한 스펙트럼 패턴의 변화를 측정하는 레이저간섭계를 이용하는 방법[5]들이 있다. 각 방식마다 편광, 광량, 산란, 위상 등의 서로 다른 광학적 성질을 이용하는데, 각자 장단점을 가지고 있으므로 적용하고자 하는 응용에서 요구되는 센서시스템의 민감도와 범위 등에 따라 적합한 방식을 선정하거나 2가지 이상의 방식을 혼용하는 방법을 사용해야 한다.

본 논문에서는 Mach-Zehnder(MZ) 간섭계를 이용하여 넓은 범위에서 높은 민감도로 침입자 경보를 발생시킬 수 있는 감지 센서 시스템을 구성하였다. 센서 팔에 가해지는 힘의 크기와 속도에 따른 검출신호의 변화를 주파수 분석을 통하여 해석하고 환경적인 외란으로부터 침입자 정보를 분리하여 판단할 수 있는 기준을 제시하였다.

2. 본 론

2.1. Mach-Zehnder (MZ) 간섭계

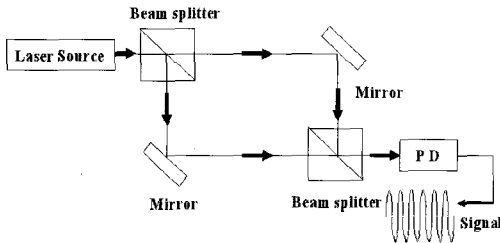


Fig. 1 Mach-Zehnder (MZ) interferometer

Fig. 1은 벌크(bulk)형 광학소자를 이용하는 MZ 간섭계의 구성도이다. 광원은 50:50의 분리비를 갖는 빛 가르개를 지나 각각의 거울로 향한다. 거울에서 반사된 두 광신호는 두 번째 빛 가르개에서 일부가 결합되어 PD(photo diode)에서 간섭신호를 생성한다. 간섭계 양팔 사이의 경로차가 광원파장의 정수배가 될 경우 보강간섭이 발생하여 PD 출력은 최대가 되고, 경로차가 반파장의 홀수배가 되면, 상쇄 간섭이 발생하여 출력이 최소가 된다. 이러한 벌크형태의 MZ간섭계는 침입자 센서의 구성에 직접적으로 적용하기 어렵지만 동일한 형태의 간섭계를 광섬유를 이용하여 구성하면 외부의 진동이나 온도 등에 민감하게 반응하는 센서시스템을 만들 수 있다. 간섭계의 양쪽 팔을 구성하는 광섬

유가 물리량에 반응하여 그 굴절률과 길이가 변화하여, 간섭계 두팔의 광경로차를 변형시키고 그에 따라 출력위상이 변화되는 것이다. Fig. 2는 본 논문에서 구성한 광섬유 MZ 간섭계 침입자 센서의 구성도이며 간섭계의 PD 출력은 기술한 간섭이론에 따라 다음 식과 같이 표현된다[6].

$$I = I_0 \left\{ 1 + \cos \left(\frac{2\pi n d}{\lambda} \right) \right\} \quad (1)$$

위식에서 I_0 는 초기 입사광의 세기, n 은 광섬유의 굴절률, d 는 간섭계 팔길이 차이, 그리고 λ 는 입사광의 파장이다.

2.2. 센서 실험

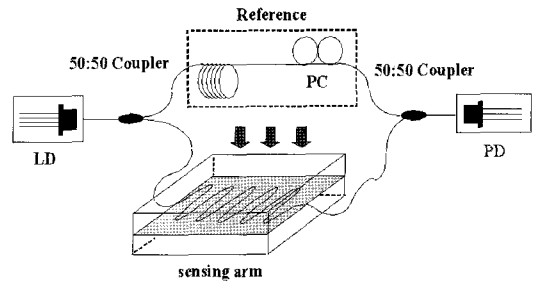


Fig. 2 Schematic of MZ interferometer intrusion sensor system (LD: laser diode, PC: polarization controller, PD: photo diode)

Fig. 2의 센서시스템에서 광원은 중심파장과 출력파워가 각각 1550 nm, 2.0 mW인 캔타입 Fabry-Perot (FP) 레이저 다이오드(LD)를 사용하였고, 간섭계는 2개의 50:50 분리비를 가지는 2×2 광섬유 커플러를 용착 접속하여 구성하였다. 기준팔에는 편광 조절기를 두어 간섭신호의 크기를 최적화하였으며, 방음 발포수지로 감싼 후 알루미늄 케이스로 봉하여 기준팔에는 환경적인 외란이 가해지지 않도록 하였다. 센서팔은 10 cm 두께의 발포수지 보드사이에 두어 보드에 가해지는 충격이 센서팔에 균등하게 전해질 수 있도록 설치하였다. 센서팔에 충격을 가하면 광섬유의 굴절률과 물리적인 길이에 변화를 주어 식 (1)과 같은 사인파형태의 간섭신호가 PD에서 검출된다. 간섭신호의 관측만으로도 매우 단순한 형태의 침입자 센서 기능을 수행할 수 있으나, 시간축상의 신호만으로는 충격이 가해지는 속도나 크기에 따른 차이를 구별할 수 없으며 온도나 진동

등의 환경적 외란에 의한 출력변화를 구분할 수 없다. 이러한 문제는 간섭계 출력을 주파수 분석하여 해결할 수 있는데, 외부 충격의 속도가 증가할수록 간섭신호의 생성속도가 빨라져서 PD 출력의 주파수가 증가하고, 충격량이 클수록 생성되는 간섭신호의 수가 증가하여 해당 주파수 성분의 크기 또한 증가하기 때문이다.

센서의 출력을 주파수 분석하기 위하여 간섭계의 출력을 컴퓨터로 읽어 들인 후 Labview 프로그래밍을 이용한 FFT (fast Fourier transform) 연산을 수행하였다. Fig. 3은 센서팔에 가해지는 다양한 형태의 물리량 변화에 따른 PD 출력신호와 그 FFT 스펙트럼을 표시한 것이다. Fig. 3(a)는 센서팔을 온도보상 패키징하여 최대한 안정된 상태로 유지한 경우이며 푸리에 스펙트럼은 주변의 환경적 요인에 의한 저주파 성분만을 나타낸다. Fig. 3(b)는 온도보상 패키징을 하지 않은 경우이며, 주변의 온도변화에 따라서 불규칙하게 변화하는, 광섬유 간섭계에서 가장 흔하게 관측할 수 있는 출력의 형태이다. 광섬유의 길이를 매우 짧게 구성하거나 온도보상 패키징을 통하여 Fig. 3(a)와 같이 변화의 정도를 약화시킬 수는 있으나, 기본적으로 출력변화를 완전히 제거하는 것은 불가능하므로, 능동제어를 통한 안정화회로를 이용하여 불규칙한 출력변화를 억제하기도 한다[7]. Fig. 3(c)는 센서팔에 순간적으로 강한 충격을 가한 경우에 얻어지는 간섭신호이며, 짧은 시간에 많은 잡음과 간섭신호가 발생하였고 FFT 스펙트럼에서도 고대역의 주파수 성분이 다수 감지된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(d)는 무게를 알고 있는 원통형 추로 일정한 조건하에서 압력을 가할 때 발생한 출력신호이다.

2.3. 고찰

Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이 MZ간섭계는 가해지는 물리량이나 충격의 형태에 따라 다양한 출력변화를 보여준다. 효율적인 침입감시를 위해서는 환경적인 요인이나 기타 경보신호를 발생시킬 수 있는 노이즈에 의한 출력변화를 구분할 수 있어야 하므로 충격의 형태가 출력에 미치는 영향을 분석하여 이로부터 정확한 경보의 기준을 제시하는 것이 중요하다. 제한하는 MZ 간섭계센서의 경우 패키징의 형태나 충격이 가해지는 센서팔의 범위, 또는 충격의 형태 등 출력에 영향을 미치는 매우 다

양한 변인이 존재하지만 정량적인 기준제시를 위하여 각 변인을 크게 단순화한 실험을 수행하였다. 서로 다른 질량의 원통형 추를 실에 매단 후, 스테핑 모터를 이용하여 등속도 충격이 센서에 가해지도록 구성하여 여러 차례 반복 실험을 수행하였다.

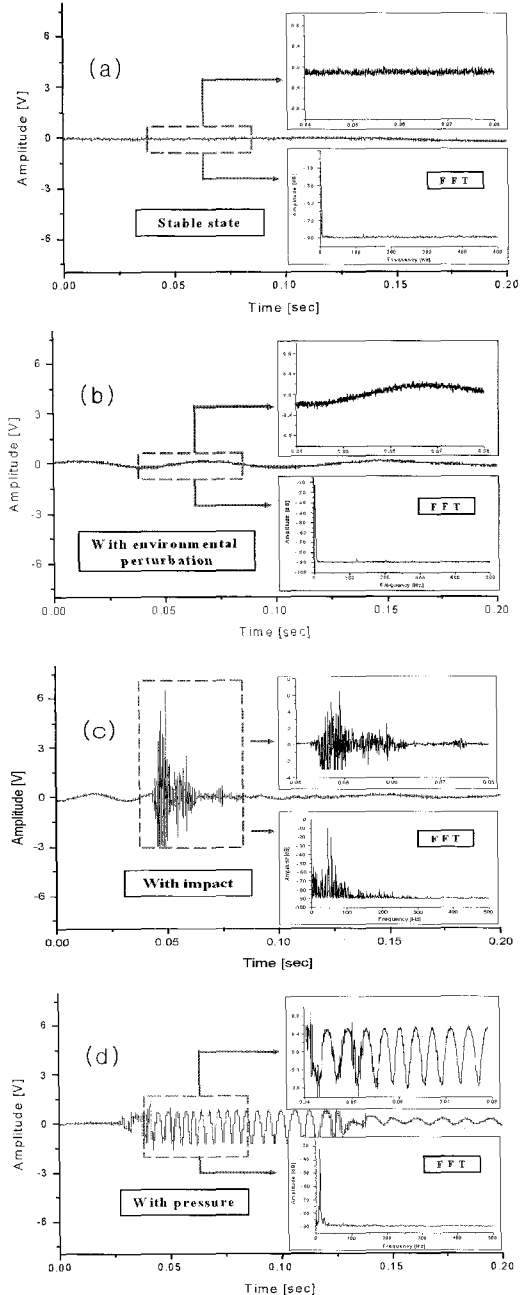


Fig. 3 MZ interferometer outputs and their FFT spectra. (a: 안정된 상태, b: 환경적 요인에 의한 출력의 변화, c: 불규칙한 충격을 가한 경우, d: 일정한 속도로 압력을 가한 경우)

Fig. 4는 10 g의 원통형 추를 이용하여 0.04 m/sec의 속도로 센서팔에 충격을 가했을 때 얻은 간섭계의 출력 파형중 중심 부분만을 표시한 것이다. 센서팔에 가해지는 충격으로 인해서, 간섭계의 광경로 차이가 발생하고 그에 따라 간섭무늬가 식 (1)과 같이 발생한 것이다.

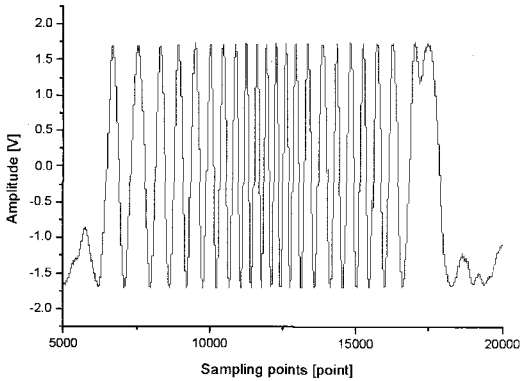


Fig. 4 MZ interferometer output (with pressure of a metal weight)

일정한 조건하에서 수행한 실험이므로 Fig. 3(c)와 달리 비교적 균일한 주파수 성분을 가지는 신호가 발생하였다. 추의 속도를 증가시키면 간섭신호의 발생속도가 따라서 커지는 경향을 확인할 수 있는데, 이러한 관계에 대한 정량적인 분석이 이루어진다면, 느리게 변화하는 환경적인 노이즈와 침입자 신호를 구분하는 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

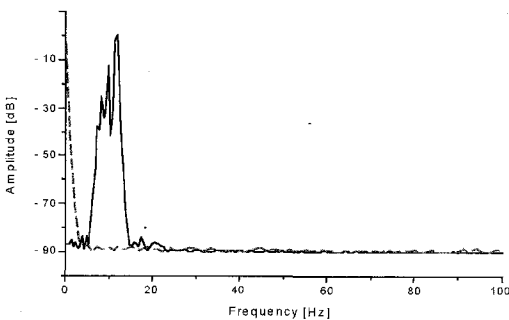


Fig. 5 FFT spectra of MZ interferometer outputs

충격이 가해지는 속도와 출력신호 주파수 사이의 정량적 관계를 도출하기 위하여 Fig. 4의 출력신호에 FFT 연산을 수행하고 그 출력 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 점선은 센서에 충격을 가하지 않은 상태의 스펙트럼으로, 약 5 Hz 이하에서

발생하는 주파수 성분은 주변의 환경적인 노이즈에 따른 것이다. 따라서 이 경우에 5 Hz 이하의 출력신호는 환경적 노이즈와 구분할 수 없게 된다. 충격이 가해진 경우에는 약 17 Hz에서 피크를 형성하고 있어 환경적 노이즈와는 확연히 구분되는 신호를 확인할 수 있다. 추의 속도가 출력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 0.04~0.2 m/sec의 범위에서 모터의 속도를 0.04 m/sec 단위로 증가시키며 피크 주파수의 변화를 관측하였다. 총 12회에 걸친 반복 실험의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험의 특성상 완벽하게 동일한 조건을 구현하는 것이 어려웠으나 충격의 속도에 대하여 피크 주파수가 대략 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있었다.

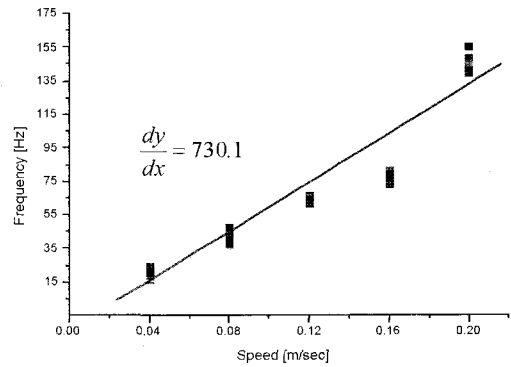


Fig. 6 Frequency variation according to velocity of a weight

변형속도와 출력 주파수의 관계가 선형적이라고 가정할 때, 그림의 결과로부터 추의 속도 v 와 출력 주파수 f 의 관계는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$f = 730.1v - 12.2 \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

간섭계의 출력은 추의 속도에 따라 그 주파수가 증가하지만, 해당 주파수 성분의 크기는 추의 질량에 영향을 받게 된다. 즉, 질량이 클수록 더 큰 광경로차를 유도하고 그에 따라 간섭신호의 피크수가 증가한다. 이는 주파수영역에서 신호의 크기증가로 이어지므로 동일한 속도를 가지는 조건하에서 무거운 추일수록 주파수축 신호의 피크 크기가 커지는 것이다. 추의 무게와 신호 크기의 관계를 정량적으로 분석하기 위해서, 속도를 0.04 m/s로 일정하게 유지한 채로 추의 무게를 10 g씩 증가시키면서 FFT 스펙트럼에서 피크의 크기 변화를 비교하는 반복 실험을 수행하였다.

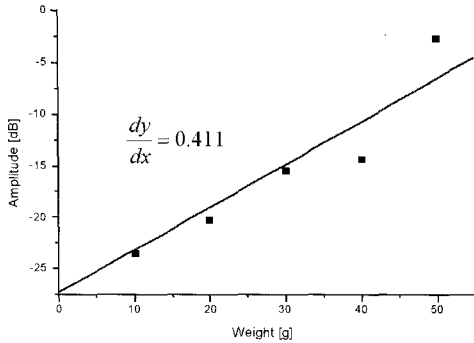


Fig. 7 Amplitudes of peak frequency component according to different weights

Fig. 7은 추의 질량에 따라 FFT 출력피크의 크기 변화를 그린 것으로 비교적 선형적인 관계이며 이를 피크의 크기 k 와 질량 m 의 관계식으로 아래 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$k = 0.411 \times m - 27.127 \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

Fig. 8은 추의 무게와 속도를 달리하며 충격량을 변화시키고, 각 경우에 검출된 신호를 주파수 변환한 후, 출력 주파수성분의 피크를 연결하여 선으로 표시한 것이다. 충격량이 증가함에 따라, 출력신호의 크기가 커지고, 고주파수 성분이 증가하는 것을 전체적인 경향으로부터 확인할 수 있다.

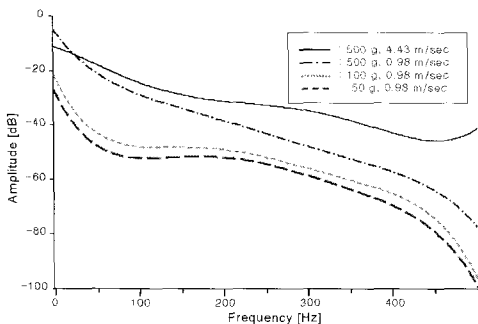


Fig. 8 Peak profiles of FFT spectra with different pressures

3. 결론

광섬유형 마하젠더 간섭계를 상시 침입자 감시시스템에 적용할 수 있는 가능성을 보였다. 실험을 통해, 센서에 가해지는 충격의 속도와 질량에 따라, 간섭신호의 주파수 성분이 일정한 패턴을 가지고

달라지는 것을 확인할 수 있었다. 충격의 속도에 따라 출력신호의 주파수가 증가하였으며, 동일한 속도를 갖는 조건에서는 질량에 따라서 주파수 성분의 피크 크기가 증가하였다. 광섬유 간섭계 센서 부분의 패키징 방법과 충격이 가해지는 범위의 조절에 따라서 출력 주파수와 그 크기변화가 달라질 것이므로, 사용목적에 따른 침입 감지 민감도를 조절 할 수 있을 것으로 판단된다. 제안한 센서는 넓은 범위에서, 간단한 구조와 저렴한 비용으로 침입자 감지에 적용될 수 있는 가능성이 매우 큰 센서로, 차후 실용적인 연구활동이 활발하게 이루어질 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Appl. Opt.*, Vol 18, No. 9, pp. 1445-1448, (1979)
- [2] M. Campbell, G. Zheng, P. A. Wallace and A. S. Holmes-Smith, "A distributed stress sensor based on a birefringent fiber Sagnac ring," *Proc. SPIE*, Vol. 2838, pp. 138-142, (1996)
- [3] J. Park and H. F. Taylor, "Fiber-optic intrusion sensor using coherent optical time domain reflectometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 6, pp. 3481-3482, (2003)
- [4] J. C. Juarez, E. W. Maier, K. N. Choi and H. F. Taylor, "Distributed Fiber-Optic Intrusion Sensor System," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 23, No. 6, pp. 2081-2087, (2005)
- [5] F. T. S. Yu, S. Yin, J. Zhang and R. Guo, "Application of a fiber-speckle hologram to fiber sensing," *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 22, pp. 5202-5203 (1994)
- [6] M. Song, S. Yin and P. B. Ruffin, "Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, Vol. 39, No. 7, pp. 1106-1111, (2000)
- [7] 김영환, 소철호, 권오양, "광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성파 신호 검출," *비파괴검사학회지*, Vol. 13, No. 4, pp. 32-41 (1993)