

논문 96-5-6-01

매설형 광섬유 침입자 센서

朴在熙*, 金明奎**, 孫炳基**

Buried Fiber Optic Intrusion Sensor

Jaehee Park*, Myung-Gyoo Kim**, and Byung-Ki Sohn**

요 약

외부 침입자를 감지하기 위한 높은 감도의 실질적인 매설형 광섬유 센서의 제작에 관하여 논의하였으며, 광섬유로 구성된 마이켈슨 간섭계 센서를 이용하여 본 실험을 수행하였다. 외부에서 인가된 무게와 위상변화 사이의 관계는 선형적이었고, 감지 야압을 모래 표면으로부터 8 인치 아래로 매설하였을 때, 센서 출력파형의 위상이 반주기가 이동하는데 필요한 압력과 길이의 곱은 약 $1.09 \text{ kPa} \cdot \text{m}$ 이었다. 본 실험으로부터 광섬유 센서의 감도는 매설된 광섬유 위를 걸어가는 사람과 그 위를 지나가는 수레 등을 감지하기에 충분히 높은 감도를 가진다는 결론을 얻을 수 있었다.

Abstract

The feasibility of producing a practical buried fiber optic sensor with high sensitivity for detecting intruders is demonstrated. Experiments were carried out with the use of an all fiber Michelson interferometer, the sensing arm of which was buried in sand. When the sensing arm was buried 8 inches deep in sand, the pressure length product required for a half fringe shift in the sensor output was $1.09 \text{ kPa} \cdot \text{m}$. The relation between the applied weight and the phase change was almost linear. Experimental results indicated that the sensitivity of the optical fiber sensor was sufficient to detect people on foot and vehicles passing over the buried fiber.

1. 서 론

침입자 경보시스템은 집으로 들어오는 도둑들과 휴전선을 넘어오는 간첩들을 감지하고, 군의 주요시설을 보호하기 위해서 널리 사용되고 있다. 대부분의 기존 침입자센서는 가격이 비싸고 외부에 노출되어 있고 침입자를 감지할 수 있는 지정학적 범위가 좁다. 반면에 광섬유 침입자 센서는 가격이 싸고, 숨기기 쉽고, 넓은 범위에서 침입자를 찾아낼 수 있다. 그래서 최근에 광섬유 침입자 센서 개발에 많은 연구원들이 관심을 보

이고 있다.

광섬유 센서는 기존의 센서에 비해 광섬유 그 자체가 신호전송로 역할을 겸할 수 있고 주위의 전자장에 의한 영향을 받지 않으며 내식성도 강할 뿐만 아니라 넓은 범위에서 높은 정밀도, 높은 감도, 빠른 응답특성 및 원격제어의 가능성 등과 같은 여러가지 장점을 가지고 있어 지금까지 꾸준히 개발되어 오고 있다^[1]. Davies and Kingsley^[2] 등은 단일모드와 다중모드 광섬유에 대한 광신호의 위상 변조방법을 제안하였다. 광섬유는 종방향으로 기계적인 응력이 가해질 때, 광섬유의 길이, 직경 그리고 그 굴절률이 변화한다. 이러한 변화는 결국 위상변조 효과를 가져오게 하는데, Bucaro and Dardy^[3] 등은 이러한 위상변화 효과를 이용한 광섬유 수중음향기로의 가능성을 증명하였다. 이들의 실험에서는, 길게 감은 광섬유가 물 속에서 전달

* 삼성전기 주식회사 광기기 연구개발센터
(Opto-Mechatronics Research & Development Center, Samsung Electro-Mechanics Co., LTD)

** 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.)

<접수일자 : 1996년 6월 17일>

되는 음향파에 그대로 노출되었다. 여러편의 논문은 물속에서 전달되는 감지하기 위한 다른 형태의 광섬유 센서를^{4, 5)} 제안하였고, 음향파가 센서에 미치는 영향을 이론적으로 해석^{6, 7)}하였으며, 최적화된 감도를 얻기 위한 연구^{8~10)}도 수행되었다. 이러한 연구에서 기술한 모든 센서들은 음향파의 압력(acoustic wave pressure)을 검출하기 위해 개발되어 왔다.

본 연구에서는 땅 속에 매설된 광섬유를 이용한 외부 침입자 감지를 위한 실질적인 매설형 광섬유 경보 시스템화의 가능성에 대한 연구결과를 나타내었다. 이러한 실험은 광섬유 축과 수직하게 압력을 인가함으로써 발생된 매설형 광섬유 간섭계 센서의 출력파형의 위상변조를 이용한 것이다. 본 연구에서 구성한 매설형 센서는 3-dB 광결합기를 가진 광섬유로 이루어진 마이켈슨 간섭계를 사용하였다. 매설형 센서의 감지아암은 압력에 반응하여, 외부에서 압력이 인가될 때, 광섬유의 굴절률과 그 길이의 변화를 가져오게 된다. 이러한 변화는 광섬유를 따라 진행되는 빛의 위상이동을 일으키게 되어, 최종적으로 마이켈슨 간섭계의 출력 파형의 변화를 가져오게 된다.

출력파형의 위상변화를 검출하기 위해서 전류변조시 레이저의 주파수변화(frequency chirping)^{11, 12)} 현상을 이용했으며 광검출 감도를 높이기 위해 반사막형성기술¹³⁾을 이용하여 간섭계의 아암 끝 단면에 반사막을 형성시켰다.

II. 광섬유 마이켈슨 간섭계

마이켈슨 간섭계는 레이저의 가간섭 거리(coherent length) 혹은 레이저 출력의 광스펙트럼을 측정하기 위해 사용되어 왔고, 높은 감도를 가지는 온도센서¹⁴⁾와 압력센서¹⁵⁾로 이용되어 왔다.

광섬유 마이켈슨 간섭계는 3-dB 광섬유 결합기, 외부의 물리적·광학적·화학적 변화에 노출되어 있는 감지아암, 기준아암. 그리고 두 개의 광섬유 거울로 구성되어 있다(그림 1). 입사광은 광섬유 결합기에 의해 두 부분으로 분리된다. 한 부분은 감지아암 그리고 다른 한 부분은 기준아암을 통하여 입사된 광을 전송하게 된다. 두 아암의 끝까지 전송된 빛은 아암 끝에 있는 광섬유 거울에 반사되어 다시 송신부로 되돌아오며 광섬유 결합기에서 만나 서로 간섭을 일으킨다.

간단화하기 위해서, 사용된 광섬유와 3-dB 광섬유

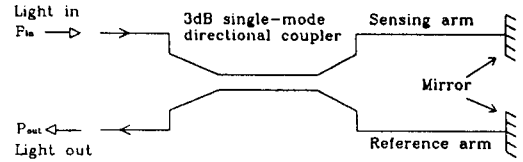


그림 1. 광섬유 마이켈슨 간섭계

Fig. 1. Fiber optic Michelson Interferometer.

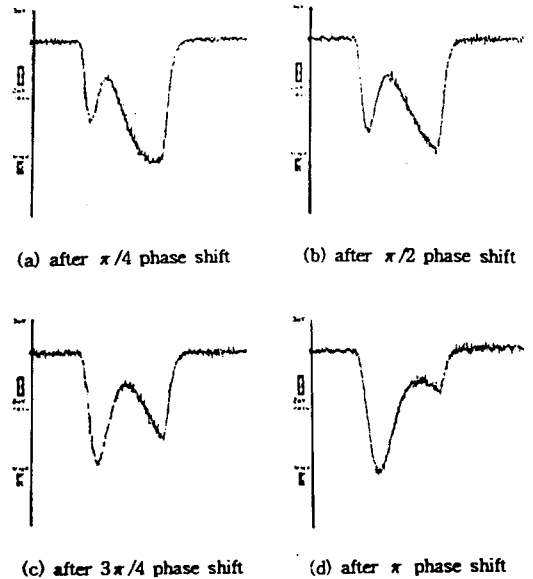


그림 2. 광섬유 마이켈슨 간섭계의 출력파형

Fig. 2. Output waveform of a Michelson Interferometer.

결합기는 각각 광손실이 없고, 두 광섬유 거울의 반사율 또한 각각 R 로 동일하며, 그리고 반사된 두 빔 사이의 공간거리 차가 레이저의 가간섭 거리보다 매우 작다는 가정을 하였다. 광섬유 마이켈슨 간섭계의 광출력전력은

$$P_{out} = 0.5RP_{in}(1 + \cos \Delta\Phi) \quad (1)$$

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2)$$

이다. 여기서 P_{in} 은 광입력 전력, $\Phi_1 = 4\pi nL_1/\lambda$ 와 $\Phi_2 = 4\pi nL_2/\lambda$ 는 각각 감지아암과 기준아암에서의 왕복 위상차, n 은 광섬유의 유효 굴절률, L_1 과 L_2 는 각각 감지아암 및 기준아암의 길이, 그리고 λ 는 광원의 사용 파장이다. 왕복 광 위상차($\Delta\Phi$)는, 감지아암과 기준아암 사이의 광 경로차에 의존한다. 그러

므로, 마이켈슨 간섭계의 출력 신호전력은 광 경로 차이의 상승 여현파(raised cosine) 함수형태를 가진다.

그림 2는 펄스 구동시, 레이저의 주파수 chirping 효과를 보여주는 간섭계 센서의 출력파형을 위상변화에 따라 나타낸 것이다. 외부의 물리적 변화량은 출력파형의 위상변화량으로부터 측정되고 출력파형의 진폭변화량으로부터 계산된다.

III. 센서제작 및 실험

1. 센서 제작

광섬유 마이켈슨 간섭계 센서는 단일모드 광섬유와 광결합기를 사용하여 제작되었다. 센서의 감지아암과 기준아암은 광섬유를 전기적인 방전에 의한 용융접합기를 사용하여 광결합기에 연결함으로써 만들어졌다. 감지아암과 기준아암 중 길이가 긴 아암을 센서출력에서 간섭현상이 관찰될 때까지 반복적으로 잘라냈다. 큰 진폭을 가지는 센서출력을 얻기 위해서 두 아암의 끝부분에 광섬유 거울^[11]을 붙였다. 이때 만들어진 센서의 감지아암의 길이는 약 42 인치이고 기준아암의 길이는 약 43 인치였다.

2. 실험장치의 구성

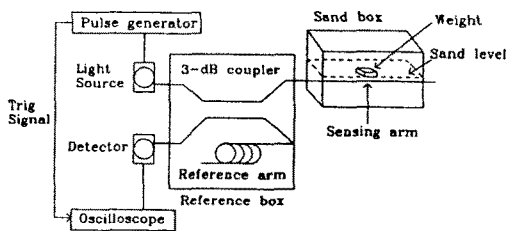


그림 3. 예비 실험장치
Fig. 3. Setup for testing sensor.

매설형 광섬유 센서의 실험장치의 개략도를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 모래는 잘 건조된 상태의 모래를 사용하였으며, 이 실험에서 준비된 모래상자의 가로는 36 인치, 세로는 30 인치, 그리고 그 깊이는 22 인치이다. 모래상자는 지면으로부터 8 인치 높이까지 모래로 가득 채웠었다. 또한, 모래상자의 측면에는 지

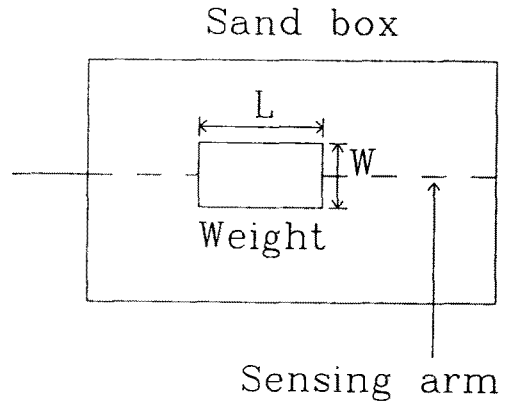


그림 4. 모래상자의 윗 그림
Fig. 4. Top view of sand box.

면으로부터 위로 8 인치정도 높이에 작은 구멍을 만들었다. 이 작은 구멍을 통하여 모래상자 안으로 센서의 감지아암을 수평으로 삽입하였다. 기준아암은 알루미늄 박스와 스티로폼 박스를 사용해서 외부 노이즈로부터 보호하였다. 사용된 광원은 1.3 um의 레이저 다이오드(Lasertron, model QLM 1300SM, USA)로 펄스 구동시켰으며, 센서의 출력은 광 검출기(PIN receiver module : PCO model RTZ, USA)를 통해 검출되고, 이 신호가 오실로스코프에 나타나게 된다.

광섬유 축에 대해 수직인 방향으로 압력을 인가함으로써 센서의 응답특성을 측정하였다. 감도를 조사하기 위해서 첫째, 센서를 높이 1 인치까지 모래로 덮었다. 둘째, L=14 인치×W=7 인치 크기의 2 파운드짜리 빈 상자를 센서 아암(그림 4) 위에 직접 올려 놓았다. 셋째, 센서출력파형의 반주기 이동(결과적으로 π 라디안의 위상 변화)이 관찰될 때까지 모래를 빈 상자 속에 채워 나갔다. 마지막으로 감지아암 위에 놓여진 모래상자의 무게를 측정하였다. 그리고 센서의 감지아암이 모래표면 아래로부터 5 인치와 8 인치의 깊이에 묻혔을 때, 센서의 응답특성을 측정하였다.

III. 결과

모래 위에 놓인 상자 아래에 있는 감지아암의 부분만 인가압력의 영향을 받는다는 가정하에(그림 5) 실험 압력감도가 계산되었다. 센서출력 파형의 위상을 π 라디안 변화시키기 위해 필요한 단위 길이당 압력변화는

$$\Delta PL = \frac{2 \times \Delta F}{w} \quad (3)$$

이다. 여기서 ΔF 는 출력파형의 위상을 π 라디안 변화시키는 모래 위에 놓인 상자의 무게, w 는 상자의 세로 길이이다.

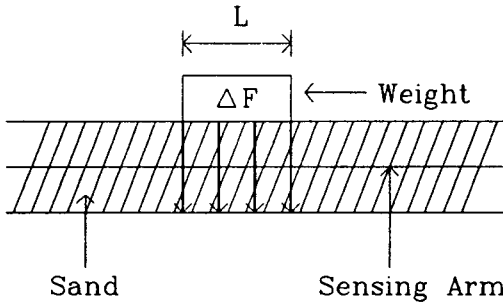


그림 5. 모래 상자속에 놓여 있는 센서 감지 아암에 인가된 힘의 분포

Fig. 5. The applied force distribution of the sensor sensing arm in the sand box.

감지 아암이 5인치 깊이로 묻혔을 때 센서출력의 반주기 이동을 위해 필요한 무게는 3.62 kg이며 단위길이당 압력변화(ΔPL)는 0.394 kPa·m이다. 8인치 깊

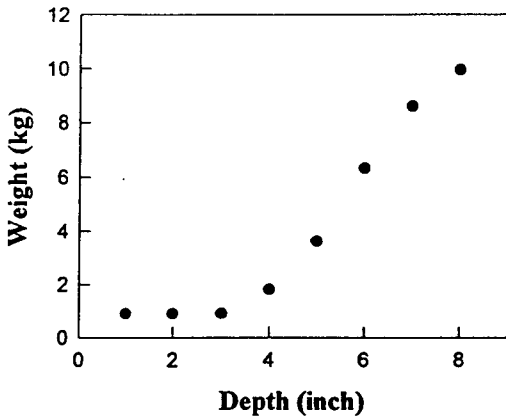


그림 6. 깊이의 함수로 나타낸 반파장 간섭무늬 이동을 위한 무게 (출력파형의 위상을 π 라디안 변화를 위한 무게)

Fig. 6. The weight for shifting a half fringe in interference pattern as a function of depth.

이로 묻혔을 때, 필요한 무게는 9.97 kg이며 단위길이당 압력변화는 1.09 kPa·m이다. 여기서 계산된 결과는 단순한 가정하에서 이루어진 것이다.

그림 6은 출력파형의 위상을 π 라디안 변화를 일으키기 위해 요구되는 무게를 감지아암이 묻혀있는 깊이에 따라 나타낸 것이다.

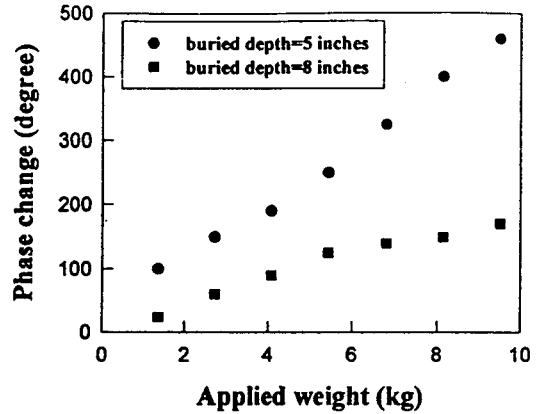


그림 7. 광섬유를 모래 표면에서 밑으로 5 인치와 8 인치 깊이에 묻혔을 때의 외부에서 인가한 무게에 따른 위상변화

Fig. 7. The phase change as a function of weight when the fiber was buried at 5 inches and 8 inches below the surface of sand.

그림 7은 모래 표면으로부터 밑으로 5 인치와 8 인치에 광섬유의 감지아암을 묻혔을 때 출력파형의 위상변화를 무게의 함수로 나타낸 것으로 무게와 위상변화 사이의 관계는 거의 선형적이었다.

IV. 결론

본 실험에서는 외부의 침입체를 감지하기 위한 매설형 광섬유 센서를 제작하고 외부에서 인가된 압력에 대한 응답특성을 조사하였다.

출력파형의 위상 이동은, 마른 모래 속에 묻은 광섬유에 인가된 압력에 의해서 일어나게 된다. 인가된 압력과 위상변화 사이의 관계는 거의 선형적이었고 광섬유의 묻힌 깊이가 증가할수록 압력감도는 감소하였다. 예를들면, 50 인치×50 인치의 면적을 가진 구두를 신고 있는 150 파운드의 사람이 한 발로 서 있을 때 약

22 kPa의 압력이 발생한다. 그 사람이 8 인치 깊이의 모래에 매설된 약 12 인치 길이의 광섬유위에 서 있을 때 센서출력은 6π 라디안 정도의 위상변화를 기대할 수 있다. 이러한 감도는 모래속에 묻혀있는 광섬유를 가로지르는 사람과 수레 등을 감지하기에 충분히 큰 값이다. 감지야암의 길이가 길지않기 때문에 실험중에 편광현상에 의한 신호 fading 현상이 나타나지 않았으며 매우 긴 감지야암을 사용할 경우 편광에 의한 신호 fading 현상이 나타나기 때문에 depolarizer(무편광 광섬유 소자)를 사용하면 편광효과를 제거 할수 있다. 만약 광섬유가 흙, 시멘트, 젖은모래 등에 묻었다면 마른모래에서 측정된 것과는 다른 압력감도를 가질 것으로 예상된다. 본 실험에서 사용된 마이켈슨 간섭계는 사람, 차, 그리고 기타 다른 침입자에 대한 위치를 결정할 수는 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 구조의 실험장치를 개발할 필요가 있다. 또한, 동물과 인간을 구별하고, 잘못된 경보율을 줄이기 위해서는, 부호분석(signature analysis) 기술과 디지털 신호 처리 기술이 필요로 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Giallorenzi, J. Bucaro, A. Dandridge, G. sigel, J. Cole, S. Rashleigh, and R. Prist, "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 20, pp. 626-665, 1982.
- [2] D. Davies and S. Kingsley, "Method of phase modulating signals in optical fibres: application to optical telemetry systems," *Electron. Lett.*, vol. 11, pp. 21-22, 1974.
- [3] J. A. Bucaro, H. Dardy, and E. Carome, "Fiber-optic hydrophone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62, pp. 1302-1304, 1977.
- [4] P. G. Cielo, "Fiber optics hydrophone: improved strain configuration and environmental noise protection," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 938-940, 1979.
- [5] J. A. Bucaro and T. A. Hickman, "Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 938-940, 1979.
- [6] G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 1445-1448, 1979.
- [7] B. Culshaw, D. E. N. Davies, and S. A. Kingsley, "Acoustic sensitivity of optical fibre waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 13, pp. 760-761, 1977.
- [8] N. Lagakos and J. A. Bucaro, "Pressure desensitization of optical fibers," *Applied Optics*, vol. 20, pp. 2716-2720, 1981.
- [9] N. Lagakos, E. U. Schnaus, J. H. Cole, J. Jarzynski, and J. A. Bucaro, "Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 683-689, 1982.
- [10] G. B. Hocker, "Fiber optics acoustic sensors with composite structure: an analysis," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 3679-3683, 1979.
- [11] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, "Time-dependent thermal effects in current-modulated semiconductor lasers," *Electron. Lett.*, vol. 17, 1981.
- [12] A. Dandridge and L. Goldberg, "Current-induced frequency modulation in diode lasers," *Electron. Lett.*, vol. 18, 1982.
- [13] C. E. Lee, R. A. Atkins, and H. F. Taylor, "Reflectively tapped fibre transversal filters," *Electron. Lett.*, vol. 23, pp. 596-597, 1987.
- [14] M. Corke, A. D. Dersey, and D. A. Jackson, J. D. C. Jones, "All-fiber Michelson thermometer," *Electron. Lett.*, vol. 19, pp. 471-472, 1983.
- [15] T. Valis, E. Tapanes, and R. M. Measures, "Localized fiber optic strain sensors embedded in composite materials," *Proceedings: Fiber Optic Smart Structures and Skins II*, SPIE, vol 1170, pp. 495-504, 1989.

 著 者 紹 介

**朴 在 熙**

1962년 2월 17일생. 1984년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사).

1992년 Texas A&M 대학 전기공학과 졸업(공학석사). 1995년 Texas A&M 대학 전기공학과(공학박사).

1984년 3월~1990년 3월 국방과학

연구소 근무. 1995년 10월 ~현재 삼성전기주식회사. 주관

심분야 : 광통신, 광센서, 광학계설계, 광학계평가

金 明 奎

『센서학회지 제 4권 제 2호』 논문95-4-2-04, p. 28 참조.
현재 경북대학교 대학원 박사과정.

孫 炳 基

『센서학회지 제 1권 제 1호』 논문92-10, p. 92 참조.
현재 경북대학교 전자전기공학부 교수, 센서기술연구소장.