

단일 모드 광섬유의 간섭계 센서를 이용한 温度測定 (Temperature Measurement Using Single-Mode Fiber Interferometric Sensor)

金德洙*, 李相濤**, 姜玟鎬**, 朴漢奎***

(Duk Soo Kim, Sang Ho Lee, Min Ho Kang and Han Kyu Park)

要 約

본 연구에서는 단일모드 광섬유에서의 온도에 의한 위상변조 현상을 분석하고 단일모드 광섬유 간섭계를 이용한 온도센서를 설계, 제작하여 그 온도특성을 조사하였다.

설계한 fiber-optic 온도센서는 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 위상감지형 고감도 센서로서 온도변화는 간섭무늬의 이동으로써 측정되어졌다.

간섭계에 의한 측정에서 중요한 문제중의 하나는 온도뿐만 아니라 모든 피측정 물리량의 변화방향에 따른 간섭무늬의 이동갯수와 이동방향을 동시에 측정하는 것이다. 이를 위해 다중모드 광섬유를 이용한 배열 검출기를 제작하여 매우 간편하게 간섭무늬의 이동갯수와 이동방향을 측정하였다.

Abstract

In this paper, temperature-induced optical phase shifts in single-mode fibers are studied both analytically and experimentally. Temperature sensor using single-mode fiber interferometer is designed and the temperature sensitivity of the sensor system is investigated.

This fiber-optic temperature sensor which employs the Mach-Zehnder arrangement is a high sensitivity sensor of phase detection type. In this type, temperature changes are observed as a motion of an optical interference fringe pattern.

In the measurements using interferometer, one of the important problems is to detect simultaneously the number and direction of fringe displacement resulting from physical perturbations (temperature, pressure, etc.). To realize this, the array detector using multi-mode fiber is designed.

By this array detector the number and direction of fringe displacement is measured very conveniently.

*正會員, 金星半導體株式會社

(Gold Star Semiconductor, Ltd.)

**正會員, 韓國電氣通信研究所

(Korea Electrotechnology and Telecommunications Research Institute)

***正會員, 延世大學校 工科學科 電子工學科

(Dept. of Electron. Eng., Yon Sei Univ.)

接受日字: 1984年 4月 10日

I. 序 論

1970년 미국의 Corning 유리회사에서 최초로 광섬유를 제작한 이래 1980년대에 이르러 경이적인 저손실 광섬유를 제작하여 통신분야에 혁신을 가져오게 되었다.

광통신 분야에 지대한 공헌을 했던 광섬유는 1977년부터 광섬유의 특성을 이용하여 온도, 압력, 음향 등을 측정하는 계측기로서의 연구가 활발하게 진행되어

왔다.⁽¹⁾⁽²⁾

광섬유를 이용한 sensor technology⁽³⁾는 기존의 계측 방법들에 비해 감도(sensitivity)가 높고 피계측 현상에 따라 구조를 다양하게 구성할 수 있는 등 많은 장점이 있다. 또한 측정가능한 분야가 온도⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 압력⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 가속, 음향, 회전, 전자장 등 매우 다양하기 때문에 이들의 정밀측정 및 telemetry에서의 응용이 크게 기대되고 있다.

지금까지 연구되고 있는 수십여 가지에 달하는 광섬유 센서는 sensing 원리에 의해 amplitude sensor, polarization sensor 및 interferometric (phase) sensor로 구분할 수 있다.

Amplitude sensor는 광섬유를 통과하는 빛의 강도(intensity)를 physical perturbation(온도, 압력등)에 의해 직접 변조하는 방식으로 구성이 간단한 반면 검출 감도가 양호하지 못한 단점이 있다. polarization sensor는 광섬유내의 빛의 편광상태가 광섬유에 가해진 physical perturbation에 의해 변화되는 것을 이용한 것으로 검출감도가 좋으나 외부의 영향을 받기 쉽다.

세번째의 interferometric sensor는 단일모드 광섬유를 사용해야 하고 시스템이 복잡한 반면 감도가 높고 응용분야가 넓기 때문에 가장 많이 연구되고 있는 방식이다.

본 연구에서는 단일모드 광섬유를 통과하는 빛의 위상이 온도에 의해 변조되는 것을 이론적으로 분석한 후, 실제로 단일모드 광섬유 간섭계를 이용한 온도센서를 설계 제작하여 상온부근에서 온도를 측정해 보았다. 이 온도측정 과정에서 현재까지 간섭계 센서의 중요한 연구문제로 남아있는 검출기 부분의 신호처리를 위해 다중모드 광섬유를 이용한 배열 검출기를 구성하여 측정하였다.

II. 광섬유에서의 온도에 의한 위상변조

광섬유 내에서 광파의 위상은

$$\phi = n l 2\pi / \lambda \tag{1}$$

로 표현할 수 있으며, 이에 대한 온도의 영향은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta T l} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{n}{l} \frac{dl}{dT} + \frac{dn}{dT} \right) \tag{2}$$

여기서 l : 광섬유 길이

ΔT : 온도 변화량

Δφ : 위상 변화량

λ : 사용 광파장

n : 광섬유의 굴절율

이며, 광섬유 직경효과는 무시되었다.

위의 식(2)는 특정한 light source 및 광섬유에 대해

우변의 값이 상수가 되므로 위상변화는 온도에 대해 비례하는 특징을 가짐을 알 수 있다. 예를 들어,

$$\frac{1}{l} \frac{d\phi}{dT} = 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}, \quad \frac{dn}{dT} = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$n = 1.456 \quad \lambda = 0.6328 \times 10^{-6} \text{m}$$

와 같은 He-Ne laser source와 fused silica fiber를 사용하는 경우

$$\frac{\Delta \phi}{l \Delta T} = 107 \text{ radians}/^\circ\text{C} - \text{m}$$

의 온도감도 특성이 구해지며 이 값을 단위 길이당 단위 온도당 간섭무늬 이동 갯수로 나타내면 17fringes/°C-m와 같다.

III. 신호검출 및 처리

간섭계를 이용한 온도센서에서 온도의 변화량은 간섭무늬의 이동갯수를 셈으로써 측정한다. 그런데 온도의 증감을 추적하고, real time control system으로 이용하기 위해서는 증감에 따른 간섭무늬의 이동방향도 동시에 측정되어야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 광섬유 배열 검출기를 설계 제작하였다.

1. 간섭무늬 검출원리

그림 1은 간섭무늬 광강도 분포와 간섭무늬의 이동 갯수 및 이동방향을 검출하기 위한 배열 검출기의 위치를 나타낸 것이다.

간섭무늬의 광강도 분포는 dc + 정현파의 제곱 형태로 나타내어 지는데 dc 성분은 간섭무늬 이외에 주위의 빛에 의해서도 실리게 된다.

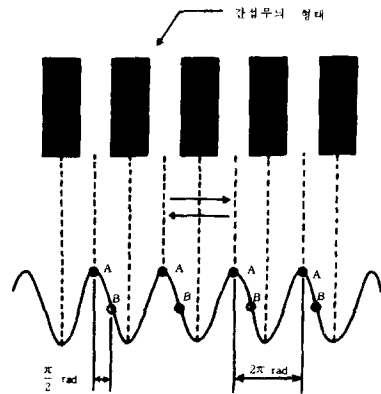


그림 1. 간섭무늬와 검출기의 위치
Fig 1. Interference pattern and location of detector.

검출기 A간의 간격은 2π rad이며 검출기 B는 A로부터 π/2 rad 간격으로 배열한다. 이상과 같이 광검출

기를 배열하면 간섭무늬의 이동방향(화살표)에 따라 검출기 A 및 B에서 받는 신호는 위상이 $\pi/2$ 만큼 달라진다. 즉,

가) 간섭무늬가 왼쪽으로 움직이면 검출기 B에서 받는 신호는 검출기 A에서 신호보다 얻는 $\pi/2$ 만큼 위상이 빠르다.

나) 간섭무늬가 오른쪽으로 움직이면 검출기 A로부터의 검출기 신호가 B에서 받는 신호보다 $\pi/2$ 만큼 위상이 빠르다.

따라서 A, B 두 검출기에서 받는 신호의 위상차이를 위상비교기 등으로 찾아내면 간섭무늬의 이동방향을 알 수 있다. 간섭무늬의 이동갯수는 검출기 A 또는 B에서 받은 신호를 pulse 신호로 바꾼 후 pulse counter로 측정하면 된다.

2. 광섬유 배열 검출기의 제작

간섭무늬를 검출하기 위한 배열 검출기는 코아/크래딩/coating/NA가 각각 $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}/250\mu\text{m}/0.2$ 인 언덕형 다중모드 광섬유를 사용하여 제작하였다.

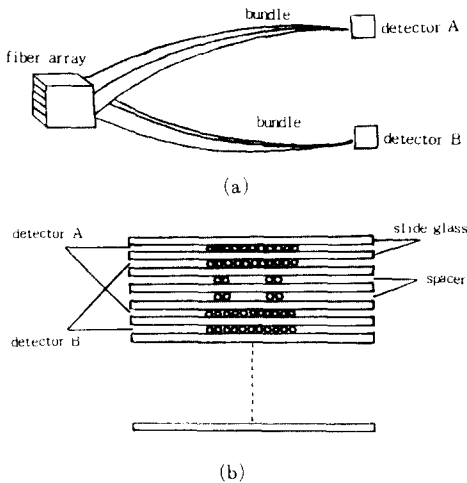


그림 2. 광섬유 배열 검출기
(a) 광섬유 배열 검출기의 구조
(b) 광섬유 배열 단면

Fig. 2. Fiber array detector.
(a) Structure of fiber array detector.
(b) Fiber array section.

그림 2의 (a)는 광섬유 배열 검출기의 구조를 나타낸 것이다. 여러가닥의 광섬유를 사용하여 한쪽 끝에서 2차원 배열구조를 구성하고, 다른쪽에서는 배열 검출기의 검출기 A와 B에 해당하는 광섬유들을 따로 묶어 다발을 구성한 다음 각각 수광면적이 큰 silicon photodiode에 결합하였다.

광섬유 배열부분을 자세히 나타내면 그림 2의 (b)와 같다. $200\mu\text{m}$ 두께의 현미경용 슬라이드 유리판을 이용해 광섬유를 배열하였으며 검출기 사이의 간격을 위해 spacer층을 넣었다. 또한 검출효율을 높이기 위해 배열의 각 line은 15개의 광섬유를 사용하고 6층의 array를 만들었다.

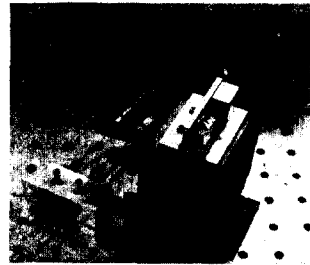


그림 3. 제작된 광섬유 배열 검출기
Fig. 3. Fabricated fiber array detector.

그림 3은 제작된 광섬유 배열 검출기의 전체 모양이다.

IV. 시스템 구성 및 실험

1. 시스템 구성

단일모드 광섬유 간섭계를 이용한 온도측정 시스템을 그림 4와 같이 설계 구성하였다.

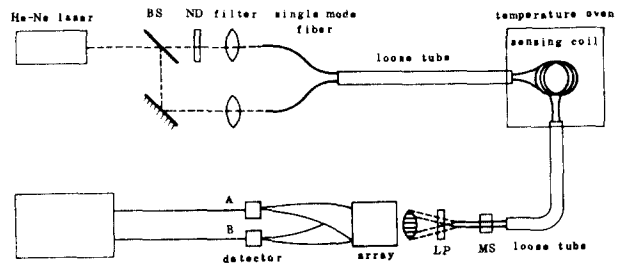


그림 4. 온도측정 시스템 구성
Fig. 4. Structure of temperature measurement system.

광원으로는 5 mW He-Ne laser($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)를 사용하였으며 간섭무늬의 선명도^[8]를 높이기 위해 직선 편광기와 N. D. filter를 사용하였다. 레이저에서 나온 빔은 beam splitter에 의해 두 빔으로 나누어져 각각 대물렌즈를 통해 코아/크래딩이 $4\mu\text{m}/100\mu\text{m}$ 인 단일모드 광섬유에 입사되어진다. sensing coil은 직경 6cm로 하고 참조용 광섬유와 측정용 광섬유의 길이차

는 1m로 했다. 광섬유 arm부분은 두 광섬유를 loose tube에 넣어 외부의 영향을 차단하였다.

위상변화가 광섬유의 길이에 비례하기 때문에 주위 환경에 의한 간섭무늬 요동을 줄이기 위해서 sensing coil이외의 arm부분에서는 참조용 광섬유와 측정용 광섬유의 길이를 정확히 일치시켰다. temperature oven 안에는 니크롬선으로 만든 가열장치를 넣고 oven밖에 있는 가열조절기(heating controller)로 광섬유에 가해지는 온도를 조절하였다.

Oven 안의 온도를 측정하기 위해 디지털 온도계를 oven에 부착시켰으며 크래딩 모드를 제거하기 위해 광섬유 출력단에서 cladding mode stripping을 하였다.

간섭무늬를 형성하기 위해 가능한 한 광섬유 출력단을 광섬유 축방향과 나란하게 밀착시켰으며, 형성된 간섭무늬는 간섭무늬의 간격을 고려하여 제작한 광섬유 배열 검출기에 정확히 matching시켰다. 온도변화에 따른 간섭무늬의 이동은 광섬유 배열 검출기에 연결된 detector A 및 detector B를 거쳐 strip chart recorder로 관측하였다. 신호처리를 digital로 하는 경우 비교기(comparator)를 사용하여 pulse신호로 변환을 한 다음, 두 신호를 이용해 위상비교기에서 간섭무늬의 이동방향을 검출하고 up/down counter로 변화량을 측정하면 된다.

이상의 전체 시스템을 레이저 빔 정렬 및 광입사 부분, sensing coil부분, 광섬유 출력단 정렬부분 및 배열 검출기 정렬부분으로 나누어 부분적으로 설계 제작하였다. 또 온도변화 측정을 위해서 temperature oven을 구성하였다.

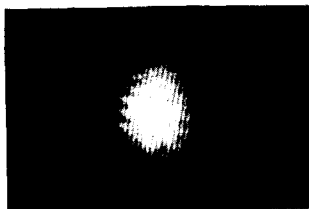


그림 5. 간섭무늬의 사진
Fig. 5. Photography of interference fringe.

2. 결과 및 고찰

온도측정 시스템의 광섬유 출력단에서 생긴 간섭무늬의 모양이 그림 5에 있으며, 그림 6은 온도를 증가하면서 간섭무늬의 이동을 strip chart recorder로 기록해 본 것이다.

그림 6에서 신호A와 신호B는 각각 검출기A와 B에서 받은 신호로써 두 신호의 위상차에 의해 온도의 증

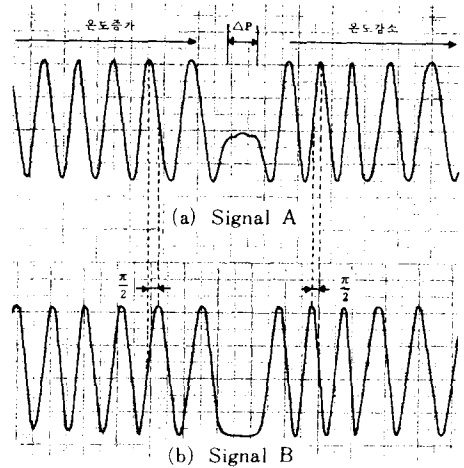


그림 6. 온도 변화에 따른 간섭무늬 이동
Fig. 6. Fringe displacement with temperature variation.

감이 판정된다. 즉, 온도가 증가하는 경우 신호A의 위상이 신호B의 위상보다 $\pi/2$ 빠르던 것이 ΔP 를 경계로 온도가 감소하면서 반대로 신호A의 위상보다 신호B의 위상이 $\pi/2$ 더 빨라짐을 알 수 있다. 여기서 ΔP 의 크기는 온도조정 과정에서의 온도증감 변환시간을 나타내 주며, 이상적인 경우로 온도증감 변환시간이 제로라 하면 ΔP 의 간격은 존재하지 않을 것이다. 또한 매끄럽지 못한 온도증감 변환과정에서 생긴 조그마한 noise가 신호A의 ΔP 내에 존재해 있다.

실제로 온도측정 시스템의 감도를 살펴보기 위해 온도를 상온부근($26^{\circ}\text{C} \sim 43^{\circ}\text{C}$)에서 변환시켜 가며 간섭무늬의 이동갯수를 측정할 것이 표 1에 있다.

그림 7은 이것을 그래프로 나타낸 것이며 이 온도구간에서 평균 온도감도를 구해보면

$$\frac{191}{17^{\circ}\text{C}} = 11.23 \text{ fringes}/^{\circ}\text{C} - \text{m}$$

임을 알 수 있다.

표 1. 온도변화에 따른 간섭무늬 이동갯수
Table 1. Number of fringe displacement with temperature variation.

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	26	28	30	35	40	43
No. of F. D.	0	22	44	91	158	189

이 값은 실험에 사용한 광섬유의 정확한 파라메타 값을 알 수 없어 이론적인 값과 비교할 수 없으나 광섬유를 이용하여 온도를 측정할 수 있다는 (2)식을 뒷받침 해주는 좋은 결과라 하겠다.

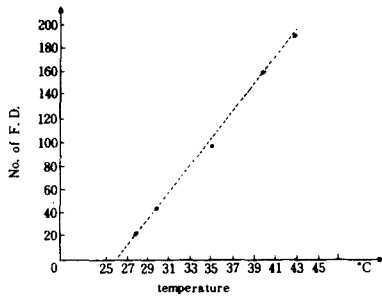


그림 7. 온도변화에 따른 간섭무늬 이동갯수
 Fig. 7. Number of fringe displacement with temperature variation.

V. 結 論

본 연구에서는 단일모드 광섬유에서의 온도에 의한 위상변조 현상을 분석하고 실제로 단일모드 광섬유 간섭계를 이용한 온도 측정장치를 설계 제작하여 실험하였다.

온도측정 시스템은 단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하였으며, 신호검출을 위해 다중모드 광섬유를 이용한 배열 검출기를 제작하였다. 제작된 배열 검출기는 strip chart recorder의 결과에서 보는 바와 같이 우수한 성능을 보여 주었으며, 이 배열 검출기는 온도측정 이외에도 간섭계를 사용한 다양한 측정 시스템에 이용될 수 있다.

실험에서 측정된 온도감도는 26°C~43°C에서 약 11 fringes/°C-m를 나타내었다. 더 높은 온도감도는 광섬유에 온도에 민감한 물질을 coating해 줌으로써 얻어질 수 있으며 앞으로 이와같은 단일모드 광섬유 간섭계를 온도센서로 응용하기 위해서는 적절한 광섬유 coating, noise 관계, packaging 및 calibration 등이 남아있는 연구과제라 하겠다.

본 연구에서 제작한 단일모드 광섬유 간섭계는 압력변화의 측정에도 사용할 수 있으며 신호검출 방식에서 heterodyne 검출을 사용하면 위상변화가 극히 미소한 음향신호의 검출에도 사용할 수 있을 것으로 본다.

參 考 文 獻

- [1] D.E.N. Davies et al., *Development and Potential of Optical Fiber Sensors*. IFOC, pp. 120-129, 1981-1982.
- [2] Charles M. Davis, *An Introduction to Fiberoptic Sensors*. Fiberoptic Technology, pp. 112-115, Feb., 1982.
- [3] T.G. Giallorenzi et al., *Optical Fiber Sensor Technology*. IEEE J. Quantum Electronics, pp. 625-665, 1982.
- [4] N. Lagakos et al., "Temperature-induced optical phase shifts in fiber," *Appl. Opt.*, vol. 20, pp. 2305-2308, 1981.
- [5] G.B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Appl. Opt.*, vol. 18, pp. 1445-1448, 1979.
- [6] C.B. Butter and G.B. Hocker, "Fiber optics strain gauge," *Appl. Opt.*, vol. 17, pp. 2867-2869, 1978.
- [7] R. Hughes and J. Jarzynski, "Static pressure sensitivity amplification in interferometric fiber-optic hydrophones," *Appl. Opt.*, vol. 19, pp. 98-107, 1980.
- [8] S. Nemoto, *Enhancement of Fringe Visibility in a Fibre Interferometer*. Optical and Quantum Electronics, pp. 137-141, 1983.