

## 원격 측정을 위한 간섭형 광섬유 센서 시스템과 그의 압력 센서 응용

예 윤 해\*, 정 환 수\*, 나 도 성\*

## Fiber-Optic Interferometric Sensor System for Remote Sensing and Its Application to Pressure Sensing

Yun Hae Yeh\*, Hwan Soo Jung\*, and Doh Sung Lah\*

## 요 약

간섭형 광섬유 센서의 경우 소자의 구성만 적절히 바꾸어 다른 종류의 측정에도 사용될 수 있다는 점에 착안하여 여러 종류의 센서를 동시에 신호처리할 수 있는 원격 다중화 광섬유 센서 시스템을 구현하였다. 구현된 센서 시스템의 신호처리는 간단한 광학 구성으로 원격 다중화 측정이 가능하도록 광섬유 Fabry-Perot 간섭형 센서 배열을 가정하여 피측정량의 변화에 의한 간섭 무늬의 수만 카운트하는 디지털 신호처리로 구성되었다. 광섬유의 광학 효과에 대한 데이터를 종합함으로써 센서 시스템에 부착할 센서를 구현하기 위해 적합한 광학효과를 선택하는 기준을 제시하였으며, 한 예로서 반경 4.3 cm의 원형 다이아프램 중앙에 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 부착하여 광섬유의 스트레인 광학 효과를 이용하게 구성된 압력센서 1개를 센서 시스템에 연결하여 간섭형 광섬유 압력 센서 시스템을 구성하였다. 압력센서의 동작을 수조실험에서 확인함으로써 압력의 원격 측정이 가능함을 보였으며, 수조 실험의 결과 2 m의 측정범위에서 오차는  $\pm 3.6$  cm 이내인 것으로 나타났다.

## Abstract

This paper describes a multiplexed-multivariate fiber-optic interferometric sensor system with remote sensing capability. Signal processor of the implemented sensor system is designed as a digital fringe counter that is well adapted to the signal processing of the remote fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor array. By summing up the reported optical data of the optical fiber, a guideline for choosing the optical effect suitable for a specific measurand is presented. As an example, a pressure sensing device that utilizes the strain-optic effect of the optical fiber by attaching it onto a stainless steel diaphragm of which diameter is 4.3 cm, is built and attached to the sensor system. The changes in optical phase difference of the fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor while filling a water tank 2 meters high, was counted by the half-fringe counting signal processor. Test results showed that the measurement error is less than  $\pm 3.6$  cm over the measured range of 2 meters.

## 1. 서론

\* 경희대학교 전자공학과 및 레이저공학 연구소  
(Department of Electronics Engineering and  
Institute for Laser Engineering Kyung Hee  
University)

※ 본 연구는 1995년도 한국해양연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

<접수일자 : 1996년 8월 27일>

광섬유의 등장과 함께 첨단 센서를 향한 한가지 접근 방법으로 시도되고 있는 것이 전기적 및 화학적으로 불활성 매질인 광섬유를 통하여 측정에 필요한 에너지원을 공급하고 동시에 측정대상 파라미터의 정보를 받아들일 수 있는 광섬유 센서로서, 이 센서는 기존의 센서에 비해 내부식성, 넓은 동작범위, 원격 측정, 전자파 간

섭에 대한 내성 및 다중화 능력 등의 장점을 가지고 있다. 이들 중 간섭형 센서는 측정변수가 다른 경우에도 동일 형태의 신호를 출력하므로 신호처리를 공유하여 한가지 이상의 측정량을 여러 지점에서 동시에 측정하도록 구성될 수 있으며, 센서의 감도 또한 탁월하다. 간섭형 센서가 고가이기 때문에 야기되는 문제는 고가의 광원과 광검출기를 포함하는 광학 시스템을 여러 개의 센서가 공유하는 다중화 센서 시스템으로 구성함으로써 해결될 수 있으므로 다중화 간섭형 센서는 변화량의 고감도 측정에 경쟁력 있는 센서라고 할 수 있다<sup>[1-3]</sup>.

다중화 광섬유 센서시스템은 두개 이상의 센서로 구성된 센서배열(sensor array)이 한두 가닥의 광섬유를 이용하여 광원 및 신호처리장치에 연결된 센서시스템을 말하며, 다중화 센서에 대한 연구의 주된 관심은 센서간의 혼신(crosstalk)과 사용 광부품의 수를 적게 유지하면서 연결된 센서의 수를 최대화하는데 있다. 다중화 센서 시스템을 구성할 때 센서로서 Fabry-Perot(FP)형 이외의 간섭계를 이용할 경우 센서당 최소 2개 이상의 광부품을 추가해야 하며, 그에 따라 광의 이용 효율 또한 낮은 단점이 있다<sup>[3]</sup>. 그러나 FP 간섭계를 센서로 취할 경우에는 그림 1에서와 같이 한 가닥의 광섬유로 신호처리장치와 센서배열을 연결할 수 있을 뿐만 아니라 간섭계에서의 반사광만으로도 신호처리가 가능하므로 광부품을 추가하지 않고도 센서를 추가할 수 있다. 다중화 센서시스템에서 센서배열로부터의 출력신호는 각 센서의 신호가 서로 섞여 있는 상태이며, 따라서 특정 센서의 신호를 분리해 내기 위해 TDM, WDM 등과 같은 다중화 방식을 사용한다. FP 센서배열의 경우에는 TDM 다중화 방식이 주로 사용되나 이 경우 광원 측에 가까운 센서의 반사율이 변하면 후단의 센서에 대한 입사광의 세기가 변하게 되어 센서간의 혼신을 피할 수 없으며, 이 문제는 FP형 다중화 센서가 다른 구조에 비해 갖는 중요한 단점으로 지적된다.

다중화 간섭형 센서에서 주로 사용되는 Mach-Zehnder(MZ) 간섭계의 경우 신호처리용으로 위상 변조기를 사용할 수 있기 때문에 passive homodyne<sup>[1]</sup>, synthetic heterodyne<sup>[4]</sup> 등과 같은 일반적인 신호처리 기법을 사용할 수 있다. 그러나 FP 간섭계를 센서로 채용하는 경우 대개 간섭계의 길이가 짧기 때문에 위상변조기를 사용하는 것이 사실상 불가능하며, 사용 가능한 신호처리 기술 또한 지극히 제한되어 있다. 상용

화된 FP 간섭형 센서의 대부분은 공극길이(cavity length)가 아주 작은 extrinsic FP 간섭형 센서로서 압력, 온도, 굴절률 등의 측정을 위한 용도로 개발된 것이다<sup>[5]</sup>. 그러나 이 경우에는 간섭계가 간섭을 위한 소자라기보다는 입사광에 대한 스펙트럼 변조 소자로 사용되기 때문에 센서의 동작범위가 제한되어 일반적인 의미에서의 간섭형 센서로는 볼 수 없다.

다중화 간섭형 센서 및 이의 신호처리에 관한 연구는 수중 음향과의 측정을 위한 응용을 목적으로 미 해군 연구소를 중심으로 주로 연구되어 왔으며<sup>[4,8]</sup>, 여기서는 센서의 가격보다는 혼신을 피하면서 고감도를 달성하는 것이 주된 목적인 까닭에 Mach-Zehnder (MZ) 간섭계를 주로 사용하였다. 국내에서도 유사한 방식으로 수중 음향과의 측정을 위한 다중화 센서가 한국과학기술원에서 연구된 바 있으나<sup>[9]</sup>, 신호처리를 포함한 다중화 간섭형 센서 시스템에 대한 연구는 선진국의 답습에 지나지 않을 정도로 미미하다.

광섬유 센서의 장점중 하나인 원격 측정능력을 갖춘 광섬유 센서를 위해서는 간섭계의 구성과 상관없이 센서와 신호처리부를 연결하는 광연결선에 가해지는 주변환경의 변화에 의한 영향을 피하거나 없앨 수 있는 신호처리를 구비해야 한다. FP형 센서시스템에서는 광연결선 주변환경의 변화가 센서배열에 도달하는 광의 세기에만 영향을 미치며, 간섭 무늬의 수를 세는 방식의 신호처리는 간섭계에 도달하는 입력광의 세기 변화에 영향을 받지 않으므로 TDM 방식의 원격 다중화 FP형 센서시스템에서는 간섭무늬의 수를 세는 방식의 신호처리를 채용하여 센서간의 혼신과 광연결선 주변환경의 영향을 동시에 제거할 수 있고, 이 경우에 수반되는 측정 분해능의 감소는 센서의 감도를 높임으로써 보완할 수 있다.

본 논문에서는 간섭형 광섬유 센서의 다중화 능력을 경제적으로 실현할 수 있는 디지털 신호처리를 갖춘 원격 다중화 FP형 센서시스템의 가능성에 대한 연구결과를 기술하였다. 이러한 실험은 측정변수에 대한 최적의 광학 효과를 선택하기 위해 기존 데이터를 종합하여 감지방식을 결정하고, 멀리 떨어져 위치해 있는 센서 배열로부터의 출력을 측정변수로 바꾸기 위한 신호처리를 구성함과 동시에 실험적으로 검증하는 과정을 포함하며, 광섬유 압력센서의 경우를 예제로 이러한 과정이 수행되었다.

II. 광섬유의 광학 효과와 감지방식의 선정

그림 1의  $S_i (i=1, 2, \dots, N)$ 은 각각 거울 내장형 FP 광섬유 간섭계를 나타내며<sup>[10]</sup>, 간섭계를 이루는 두 거울사이의 간격이  $L$ 일 경우 두 거울에서 반사된 반사파 간의 위상차  $\phi$ 는, 광섬유 코어의 굴절률이  $n$ , 광 주파수가  $\nu$ , 그리고 진공 중에서 빛의 속도가  $c$ 일 때,  $\phi = 4\pi nL\nu/c$ 로 계산된다. 광원의 간섭길이 (coherence length)가  $2nL$ 보다 훨씬 크고, 거울의 반사율이 각각  $R_1$  및  $R_2 (R_1, R_2 \ll 1)$ 인 경우 간섭계의 반사율  $R$ 은

$$R \sim R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi \quad (1)$$

로 근사된다.

광섬유가 다양한 종류의 측정변수의 변화를 경험할 때 광섬유의 굴절률 및 길이가 변하며, 따라서 식(1)로 표현된 간섭계의 반사율도 변하게 된다. 광섬유의 굴절률과 길이가 변하게 하는 이들 물리적 효과들은 광탄성 효과(photo-elastic effect), 열광학 효과(thermo-optic effect) 및 열팽창, 그리고 스트레인 광학효과(strain-optic effect) 등으로 분류될 수 있다. 따라서 간섭계를 특정 변수에 대한 센서로 사용하고자 할 경우 우선 측정변수에 대해 감도가 높은 광학효과를 이용하는 것이 필요하며, 측정변수가 아닌 요소들에 대해서는 영향을 받지 않도록 구성하여야 한다. 아래에서는 효율적인 FP 간섭형 광섬유 압력센서를 얻기 위해  $L=1.5\text{ cm}$ 인 광섬유 FP 간섭계에 대해 관련된 광학효과의 크기를 계산함으로

써 압력센서를 위한 감지 메카니즘을 선정하고자 하였다. 압력의 세기는 물의 높이를 기준으로 하였으며, 모든 계산에서 광원의 파장은  $1.3\ \mu\text{m}$ 로 가정하였다.

광섬유의 재료인 용융 실리카의 경우 약 4,000 기압까지의 압력범위에서 선형적인 광탄성 효과를 가지며, 이에 의한 굴절률의 변화는  $9.2 \times 10^{-4} / \text{kbar}$ 로 보고되었다<sup>[11]</sup>. 그리고 스트레인 광학효과는 1,000  $\mu\text{S}$ (microstrain)까지 선형성이 우수하며, 스트레인 광학효과를 이용할 수 있는 범위는 10,000  $\mu\text{S}$ 까지인 것으로 알려져 있다.<sup>[12]</sup> 광섬유의 주변온도가 변할 경우 광섬유는 열팽창과 열광학 효과를 동시에 경험하게 되며, 열팽창에 의한 길이 변화와 열광학 효과에 의한 굴절률의 변화는 파장이  $0.6328\ \mu\text{m}$ 인 빛에 대해서  $(1/L)(dL/dT) = 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ,  $dn/dT = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 의 비율을 따르는 것으로 알려져 있으며<sup>[13]</sup>,  $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$ 의 경우에도 비슷한 값으로 측정되어 열효과와 파장에 대한 의존성이 크지 않은 것으로 알려져 있다.<sup>[14]</sup>

파장  $1.3\ \mu\text{m}$ 의 광원을 채용한 광섬유 센서 시스템이  $L = 1.5\ \text{cm}$ 인 광섬유 FP 간섭계를 센서로 채택한 경우 높이 1 [cm]의 물에 의한 수압,  $\Delta T [^\circ\text{C}]$ 의 온도변화 및  $\epsilon [\mu\text{S}]$ 의 스트레인이 동시에 센서에 가해질 때 간섭계가 경험하는 위상차의 변화량  $\Delta\phi$ 는 발표된 데이터로부터 아래와 같이 계산된다.<sup>[11-14]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \Delta\phi_p + \Delta\phi_T + \Delta\phi_\epsilon \\ &= 1.332 \times 10^{-4} \ell + 1.6425 \Delta T + 6.3675 \times 10^4 \epsilon \quad [\text{rad}] \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 첫번째 항은 광탄성효과, 두번째 항은 열효과, 그리고 마지막 항은 스트레인 광학효과에 의한 위상차의 변화량이며, 이로부터  $0.1\ ^\circ\text{C}$ 의 온도변화에 의한 열광학 효과는 100 m이상의 수압변화에 의한 광탄성 효과의 크기에 상응하는 것을 알 수 있고, 따라서 광탄성 효과를 이용한 압력측정은 불가능하다는 결론을 얻을 수 있다. 광섬유 간섭계를 이용한 압력측정을 위해서는 스트레인 광학효과를 이용할 수 있으며, 이를 위해서는 광섬유 FP 간섭계를 다이아프램에 부착함으로써 측정압력의 변화에 의해 다이아프램이 받게되는 스트레인을 광섬유에 전달하는 것이 필요하다. 이를 위해 그림 2의 압력셀을 제작하였으며, 이 압력셀의 윗부분은 스테인레스(SUS 27) 재질의 다이아프램으로 구성되었다. 다이아프램의 가장자리가 강체에 고정된 압

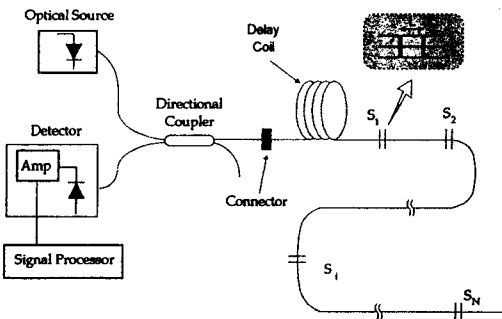


그림 1. 다중화 FP 센서시스템의 구조.

Fig. 1. Configuration of multiplexed FP sensor system.

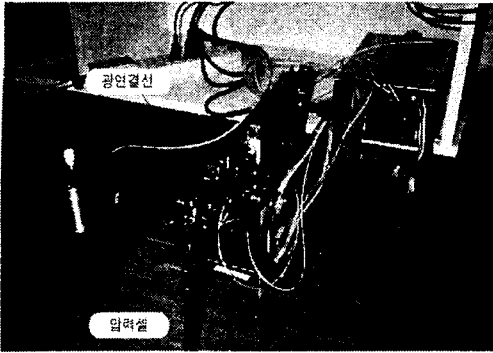


그림 2. 광섬유 커넥터가 연결된 압력셀의 사진.

Fig. 2. Photograph of the pressure cell with fiber pigtail.

력셀을 깊이가  $\ell$  cm인  $20^\circ\text{C}$ 의 물 속에 두었을 때 다이아프램이 받게되는 인장응력은 원판의 중심부근에서

$$G = 2.47 \times 10^{-10} \left(\frac{r}{t}\right)^2 \ell \quad (3)$$

로 주어진다<sup>[15]</sup>. 여기서  $r$ 과  $t$ 는 각각 다이아프램의 반경과 두께,  $G$ 는 원판 중심부에 가해지는 스트레인으로 다이아프램에 부착된 광섬유에 그대로 가해질 때 광섬유가 받게될 스트레인, 즉 식(2)에서의  $\varepsilon$ 이 된다.

### III. FP 간섭계 센서의 신호처리

간섭계의 광경로차는 측정량 뿐만 아니라 그의 주변 환경요소의 변화에도 영향을 받으며, 따라서 간섭계의 출력은 간섭계에 도달하는 입사광의 상태뿐만 아니라 간섭계 주변환경의 영향도 받게 된다. 간섭계 센서가 가질 수 있는 오차요인으로는 센서부분에서의 환경요인의 변화, 광섬유내 유도광의 편광상태 변화, 광섬유에 가해지는 비틀림이나 구부림, 진동 등에 의한 광로 및 광세기의 변화, 광원의 세기 및 광주파수의 변화 등을 들 수 있다. 간섭계 센서에서는 이들 오차신호를 측정신호와 구별하는 것이 쉽지 않으며, 따라서 광섬유 센서의 연구는 이들 오차신호를 따로 분리해냄으로써 원하는 신호를 찾아낼 수 있도록 하는 광학회로의 구성과 그에 적합한 신호처리 방식의 개발에 초점이 맞추어져 있다.

FP형 간섭계 센서의 경우 센서와 광학시스템과의 연결선상에 가해지는 온도 및 압력 등 주변환경의 변화는 두 간섭파에 공통으로 작용하여 서로 상쇄되므로 광섬유 도파관의 주변환경변화에 의한 위상오차는 피할 수 있다. 따라서 측정점과 계측점이 멀리 격리되어있는 원격센서로 구성된 경우에도 FP형 간섭계 센서의 출력은 광원의 특성, 센서의 환경변화, 그리고 연결선의 손실변화의 영향만을 받는다. 반도체 광원의 경우 동작온도와 동작전류가 변하면 광원의 세기 뿐만 아니라 광주파수도 변하게 되며(chirping), 일반형  $1.3 \mu\text{m}$  레이저 다이오드(LD)의 경우 발진 주파수의 동작온도와 동작전류에 대한 의존성은 각각  $70 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ ,  $2 \sim 7 \text{ GHz}/\text{mA}$  정도인 것으로 알려져 있다<sup>[16]</sup>.

FP 간섭형 센서의 신호처리를 설명하기 위해 간섭계에서의 광위상차,  $\phi$ 를 상수항,  $\phi_0$ 와 광원의 주파수 변화에 의한 위상항,  $\Delta\phi_\nu$ 를 포함시켜 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다<sup>[17]</sup>.

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_T + \Delta\phi_P + \Delta\phi_\varepsilon + \Delta\phi_\nu \quad (4)$$

여기서 광위상차를 측정신호  $\varepsilon$ 의 변화에 의한  $\Delta\phi_\varepsilon$ 와 그의 원치 않는 물리량 즉, 온도 및 압력 등의 변화에 의한 잡음항  $\Delta\phi_N$ , 그리고 광원의 광주파수  $\nu$ 의 변화에 의한  $\Delta\phi_\nu$ 의 합으로 나누어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_\varepsilon + \Delta\phi_N + \Delta\phi_\nu \quad (5a)$$

$$\Delta\phi_\nu \approx \frac{4\pi nL}{c} \Delta\nu \quad (5b)$$

상수항과 위상잡음의 합을  $\phi_0 + \Delta\phi_N = \delta$ 으로 정의한 후  $\Delta\nu$ 를  $\Delta\phi_\nu = \pi/2$ 의 조건을 만족하도록 광원의 구동전류를 이용하여 chirping의 량을 조절한 후 스위칭하면 ON일 때의 위상차는  $\phi_{ON} = \delta + \Delta\phi_\varepsilon + \pi/2$ 가 되고, OFF일 때에는  $\phi_{OFF} = \delta + \Delta\phi_\varepsilon$ 이 된다. 따라서 간섭계를 이루는 두 거울의 반사율이 같고, 1보다 충분히 작을 때 간섭계로부터의 반사출력  $I_D(t)$ 는

$$I_D(t) \propto \begin{cases} 1 + \cos(\delta + \Delta\phi_\varepsilon) & (\text{OFF 시}) \\ 1 - \sin(\delta + \Delta\phi_\varepsilon) & (\text{ON 시}) \end{cases} \quad (6)$$

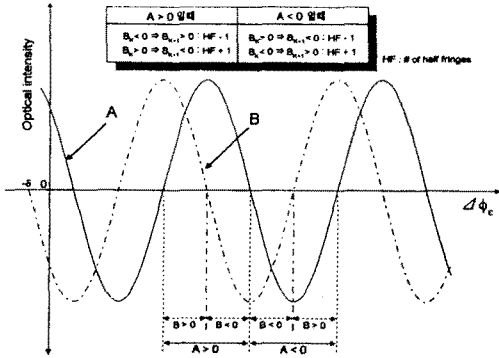


그림 3. 신호처리의 동작원리도

Fig. 3. Drawings for the explanation of the fringe counting.

와 같이 되어 서로 위상차가  $\pi/2$ 가 되는 두 특성곡선을 얻을 수 있다.

그림 3은 식(6)에서  $I_D(t)$ 의 진폭을 뺀 값을 도식화한 것으로 A는 LD의 chirping이 ON일 때의 특성곡선이며, B는 OFF일 때의 특성곡선으로 FP 간섭형 센서의 신호처리를 설명하기 위해 추가하였다. chirping이 OFF일 때 k번째 LD변조펄스에 대한 출력신호(k번째 출력으로 정의함)를  $B_k$ , k+1번째 출력을  $B_{k+1}$ , 그리고 chirping이 ON일 때 k번째 출력을  $A_k$ , k+1번째 출력을  $A_{k+1}$ 이라고 했을 때 i)  $A_k$ 와  $A_{k+1}$ 가 같은 부호를 가질 경우  $B_k$ 의 부호와  $B_{k+1}$ 의 부호가 다르면, 그림 3의 규칙에 따라 half fringe(HF)의 수를 +1로 하거나 -1로 하고, ii) 이외의 경우에는 HF의 수에 변동이 없는 것으로 판정할 수 있다. 여기서 A의 부호와 B의 부호는 k번째와 k+1번째 변조펄스 기간동안 동시에 둘다 바뀌어서는 안되며, 이는 최대측정속도에 대한 제한이 있음을 의미한다. 즉, HF의 수를 세기 위한 조건은 A의 부호가 k번째 레이저 변조펄스가 가해진 시점에서 k+1번째 레이저 변조펄스가 가해질 때까지 피측정량의 변화에 의한 위상변화량  $\Delta\phi_\epsilon$ 이  $\pi/2$ 보다 작아야만 한다. 따라서 레이저의 변조주파수(변조펄스의 반복율)가  $f_{mod}$ 일 경우 측정물리량의 변화에 의한 광위상 변화속도는 다음의 조건에 의해 제한된다.

$$\frac{\Delta\phi_\epsilon}{\Delta t} < \frac{\pi}{2} f_{mod} \quad (7)$$

#### IV. 센서 시스템의 제작 및 특성 측정

센서 시스템의 블록 구성을 그림 4에 나타내었다. 광원으로 사용된 LD (Lasertron사, QLM3S855)는 LD 구동부에 의해 동작온도가 제어되고, 직류 바이어스와 함께 펄스가 인가되어 펄스 변조된다. 변조된 광출력은 광섬유 결합기(DC, 50:50)를 거쳐 FP 간섭계로 전송되며, 간섭계에 도달한 빛은 간섭계의 반사율에 비례한 양만큼 반사된 후 다시 DC를 거쳐 광검출기에서 전기신호로 변환된다. 광섬유 단면에서의 원치 않는 반사광은 광섬유의 종단에서 광섬유를 으깨어 무시할 수 있는 수준으로 낮추었다. 발진파장  $1.3 \mu\text{m}$ 이고, 문턱전류가 32 mA인 LD는 바이어스 전류 26 mA에 반복률이 312.5 kHz이고, 폭이 50 ns인 12 mA의 전류펄스로 구동하였으며, LD의 동작온도는 열전 냉각기(thermoelectric cooler-TEC)를 이용하여 22 °C(오차 범위  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )로 고정하였다. FP 간섭계는 스퍼터링(RF magnetron sputtering) 장치를 이용하여 광섬유 단면에  $\text{TiO}_2$ 를 코팅한 광섬유를 코팅하지 않은 광섬유와 용융접착(fusion splicing)한 후 접착부위에서 1.5 cm 떨어진 지점에서 광섬유를 자르고, 여기에 다시  $\text{TiO}_2$ 를 코팅한 광섬유를 용융접착하여 만들었으며, 거울의 반사율은 용융접착시 3.5 %가 되게 조절하였다<sup>[10]</sup>. 스트레인 광확효과를 압력측정에 이용하기 위해 다이아프램을 갖는 압력셀을 제작하였으며, 다이아프램은 두께  $t = 0.4 \text{ mm}$ 의 스테인레스 원판으로서 원판의 반경은  $r = 4.3 \text{ cm}$ 이다. 압력셀의 몸체는 두께를 1 cm로 설계하여 수압에 의한 스트레인이 원판 다이아프램에만 가

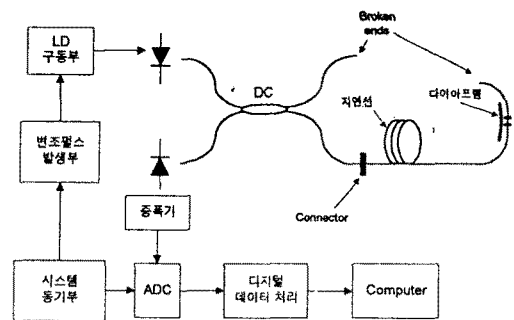


그림 4. 센서시스템의 블록구성도.

Fig. 4. Block diagram of the pressure sensor system.

해지도록 설계하였다. 측정압력에 의해 다이아프램에 인가된 스트레인을 센서인 광섬유 간섭계에 전달시키기 위해 코팅을 제거한 광섬유 FP 간섭계를 cyanoacrylate를 사용하여 원판의 중심부에 부착하였다.

코팅이 제거된 광섬유가 미끄럼 없이 다이아프램에 단단히 접착되고 화학반응이 발생하지 않았다고 가정할 경우 광섬유가 받는 스트레인은 다이아프램이 받는 스트레인과 동일하며, 다이아프램 표면에 접착된 광섬유내를 진행하는 광파의 광로차 변화량은 광섬유의 길이 방향으로 가해지는 스트레인 성분만의 함수인 것으로 알려졌다<sup>[18]</sup>. 따라서 압력셀에 부착된 간섭계에서 위상차의 총 변화량은 식(3)의  $G$ 를 식(2)의  $\epsilon$ 에 대입함으로써 얻을 수 있으며, 여기서 광탄성 효과의 크기는 열광학 및 스트레인 광학효과에 비해 무시할 수 있으므로 고려하지 않았다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_T + \Delta\phi_P = 1.643 \Delta T + 0.1818 \ell \quad (8)$$

압력센서의 특성을 수조에서 측정할 때 수온의 변화가 0.1 °C인 경우 열광학효과에 의한 오차는 수위 0.9 cm에 해당하며, 따라서 수온의 변화가 0.1 °C이내인 경우 열광학 효과는 측정 오차  $\pm 0.9$  cm범위 내에서 무시할 수 있다.

그림 4의 블록 구성도에서 LD 구동부는 레이저 직류전류원, 스위칭 전류원, 그리고 TEC 제어기로 구성되어 있으며, 변조펄스발생기는 LD를 펄스구동하기 위한 변조펄스의 발생장치이다. 광검출기의 출력신호는 증폭된 후 A/D변환기에서 디지털 신호로 변환되고, 변환된 디지털 데이터는 디지털 데이터 처리부에서 가공된 후 컴퓨터에 공급되어 앞에서 기술한 바 있는 신호처리를 거쳐 압력정보로 변환된다.

신호처리와 관련된 하드웨어는 범용성을 강조하여 개인용 컴퓨터(PC)를 기본 시스템으로 구성되었으며, 측정량의 종류에 관계없이 모든 간섭형 센서에 사용이 가능하도록 설계되었다. 신호처리에서는 측정신호의 변화방향과 함께 HF의 수를 카운트하며, 감도를 더 높이기 위해서 HF를 더욱 세분화하는 것도 가능하다<sup>[19]</sup>. 이를 위해 신호처리 관련 하드웨어는 시스템 동기부의 신호에 동기되어 동작하며, 제어프로그램을 통하여 LD 변조 및 스위칭의 제어, 센서배열을 따라 위치별 센서 신호의 수집과 디스플레이, 그리고 인터럽트 제어 등의 기능을 수행한다.

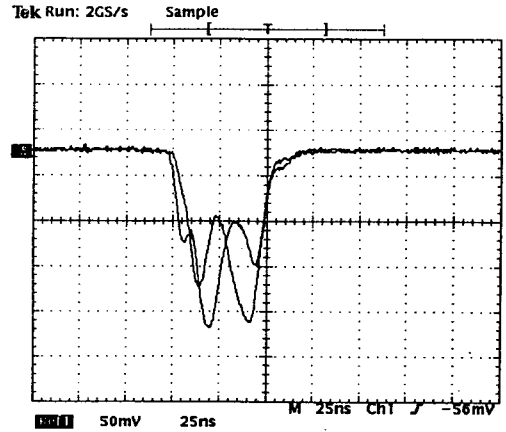


그림 5. 간섭계 출력의 오실로스코프 파형.

Fig. 5. Oscilloscope trace of the interferometer output.

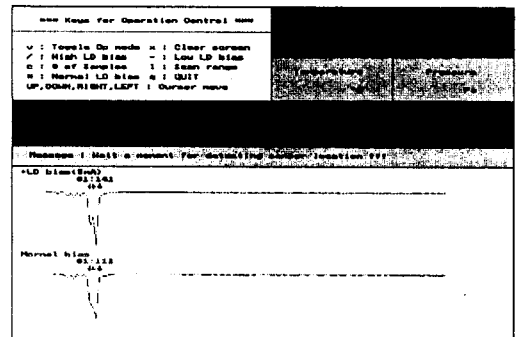


그림 6. 실행화면의 일례로서 센서위치의 결정.

Fig. 6. Determination of the sensor position.

식(6)에서와 같이  $\pi/2$ 의 위상차를 가진 두 간섭출력을 얻기 위해 를 만족하는 크기의 chirping을 유도할 수 있도록 스위칭 전류의 량을 조절하고, 구동 프로그램을 이용하여 LD 구동부의 구동전류 스위칭회로를 ON/OFF 하였다. 그림 5는 구동전류 스위칭이 ON 및 OFF일 때의 간섭계 출력파형을 오실로스코프상에 겹쳐 출력한 것이며, 그림 6은 제어프로그램의 실행 화면으로 정상 바이어스(스위칭 OFF, 아래)와 증가된 바이어스(스위칭 ON, 위)상태에서 센서배열을 따라 위치별 센서 신호의 파형을 하반부에서 보인 것이다. 현재 실행 화면은 센서시스템이 광원으로부터 12.5 (=25 ÷ 2) m 지점에 1개의 센서를 확인하였다는 것을 보여주며, HF의

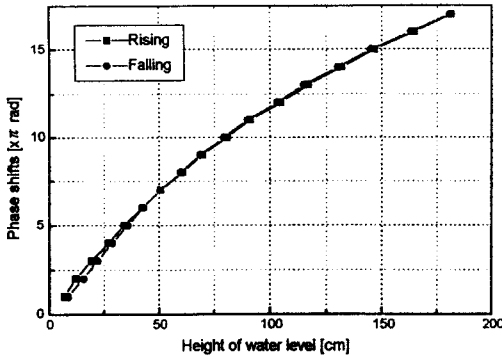


그림 7. Fringe counting 만에 의한 측정데이터.  
Fig. 7. Measured data with fringe counting only.

수를 카운트하기 위한 적정 샘플링 포인트를 결정한 모습이다. 그림 6과 같이 센서갯수와 위치결정이 완료 되면 센서위치로 결정된 시점에서의 광신호를 샘플링하여 해당 센서신호의 진폭을 검출하는 과정에 들어가며, 이 과정에서는 LD모듈내의 TEC를 이용하여 LD의 동작온도를 변화시키고, 이때 유도된 chirping을 이용한다. 각 센서에 대해 측정된 진폭은 식(6)의 출력으로부터 규준화된  $\cos(\delta + \Delta\phi_e)$  와  $-\sin(\delta + \Delta\phi_e)$  를 계산하는데 사용되며, 이로부터 HF의 수를 카운트 하게된다.

방수처리한 압력셀을 직경 25 cm, 높이 2 m인 아크릴 수조에 넣어두고, 물을 급수/배수하면서 수압의 변화에 의한 광섬유 FP 간섭계 압력센서의 특성을 실험하였다. 이때 물의 흐름에 의한 수위측정 오차를 최소화하기 위해 수위변화의 속도는 가능한한 줄였다. 그림 7은 수위 변화량을 HF의 수로써 측정한 결과로서 저수위에서 고수위로의 상승시 측정 데이터와 고수위에서 저수위로의 하강시 데이터간에 최대 3.6 cm의 오차가 관측되었다. 측정데이터를 이용하여 상승시 및 하강시의 수위( $l$ , 단위: cm)와 위상차 변화량의 관계를 2차 다항식으로 근사했을 때 식(9)를 얻을 수 있으며, 식(9)의 두 관계식간에는 미소한 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 이들 오차는 수조 바닥에 위치한 급/배수구에서 물의 흐름, 급수한 물의 온도와 수조내 물 온도의 차이에 의한 열광학 효과, 그리고 광원의 발진 주파수의 드리프트에 기인한 것으로 이들 중 열광학 효과와 광원의 발진 주파수 드리프트에 의한 오차는 보상용 기준간섭계를 사용하여 제거할 수 있다.<sup>[19]</sup> 이를 위해서는 기준간섭계를 다이아프램에 부착하되 스트레인

변화를 받지 않게 합과 동시에 열 그리스(thermal grease)로 열접촉을 향상시킨 후 열광학 효과와 광주파수의 드리프트에 의한 시스템의 위상잡음 성분만을 측정하고, 압력센서의 판독값으로부터 기준간섭계의 판독값을 빼주는 과정을 추가하여야 한다.

$$\Delta\phi_{measured} = \begin{cases} 0.0227 + 0.1628 l - 5.6403 \times 10^{-4} l^2 & (\text{상승}) \\ -0.5518 + 0.1785 l - 6.6834 \times 10^{-4} l^2 & (\text{하강}) \end{cases} \quad [rad] \quad (9)$$

주위 고정 지지형 다이아프램이 받는 응력이 등분포 하중 P에 비례한다고 가정했을 때 수위 측정에 사용된 압력센서는 측정된 하중의 범위( $P \leq 0.2 \text{ kg/cm}^2$ )내에서 선형적 관계, 즉 식(8)의  $\Delta\phi = 0.1818 l$  [rad]을 만족해야하나 측정된 결과는 식(9)로서 두 값 사이에는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 사용 데이터가 갖는 오차, 간섭계의 부착위치에서 발생한 편차, 그리고 방수처리에 사용된 실리콘이 다이아프램에 일부 고착되어 발생한 복합적 결과로 추측된다.

### V. 결론

신호처리장치와 센서배열을 한가닥의 광섬유로 연결할 수 있는 다중화 간섭형 센서시스템을 개발하고, 이에 연결될 수 있는 센서의 예로서 스트레인 광학 효과를 이용한 광섬유 압력센서를 제작하여 센서의 특성을 측정하였다. 다중화 센서시스템을 위한 신호처리기는 PC를 기반으로 구성되었으며, 센서로 사용되는 간섭계의 종류에 무관하게 TDM 방식의 다중화를 취하는 센서배열에서 간섭무늬의 수만 카운트함으로써 센서를 직결한 경우에도 센서간의 혼신을 무시할 수 있도록 하였다. 제작된 압력센서의 특성을 측정한 결과 수위변화와 위상변화량의 관계는 이미 발표된 데이터로부터 예측한 관계와 기울기에서 10 % 내외의 차이를 보였으며, 상당량의 비선형 특성도 갖고 있는 것으로 나타났다. 현재의 압력 센서시스템은 간섭계의 열광학 효과와 광주파수의 드리프트 영향을 받을 수 있으며, 이는 보상용 기준 간섭계를 사용하여 제거하는 것이 가능하다. 제작된 압력센서를 수조에서 측정한 결과 수위로 환산한 압력측정오차의 최대값은 2 m의 측정범위에서  $\pm 3.6 \text{ cm}$ 이었다.

## 참고문헌

- [1] T. G. Giallorenzi, J.A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Siegel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-18, pp. 626-665, 1982
- [2] A. D. Kersey and A. Dandridge, "Distributed and Multiplexed Fibre-Optic Sensor Systems," J. IERE, vol. 58, pp. S99-S111, 1988.
- [3] B. E. Jones, "Optical Fibre Sensors and Systems for Industry," J. Phys. E:Sci. Instrum., vol. 18, pp. 770-782, 1985.
- [4] J. H. Cole, B. A. Danver, and J. A. Bucaro, "Synthetic-Heterodyne Interferometric Demodulation," IEEE J. Quantum. Electron., vol. 18, pp. 694-697, 1982.
- [5] L. C. Gunderson, "Fiber Optic Sensor Applications Using Fabry-Perot Interferometry," SPIE vol. 1267, pp. 194-204, 1990.
- [6] K. R. Farmer and T. G. Digges Jr., "A Miniature Fiber Sensor Keeps Pressure Under Control," Photonics Spectra, Aug. 1996. pp. 128-129.
- [7] Photonics Inc., "Fiberoptic Multisensor System, model METRICOR 1450," ad leaflet, 1995.
- [8] J. A. Bucaro and T. R. Hickman, "Measurement of Sensitivity of Optical Fibers for Acoustic Detection," Appl. Opt., vol. 18, pp. 2926-2929, 1980.
- [9] 안준태, 김병윤, "광섬유 간섭계형 센서 어레이의 구성 및 특성 조사," 한국광학회지, 제5권, pp. 152-157, 1995.
- [10] C. E. Lee and H. F. Taylor, "Interferometric Optical Fibre Sensors Using Internal Mirrors," Electron Lett., vol. 24, pp. 193-194, 1988.
- [11] K. Vedam, E. D. D. Schmidt, and R. Roy, "Nonlinear Variation of Refractive Index of Vitreous Silica with Pressure to 7 kbars," J. Am Cer. Soc., vol. 49, pp. 531-535, 1966.
- [12] T. Valis, D. Hogg, and R. M. Measures, "Fiber Optic Fabry-Perot Strain Gauge," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 227-228, 1990.
- [13] G. B. Hocker, "Fiber-Optic Sensing of Pressure and Temperature," Appl. Opt., vol. 18, pp. 1445-1448, 1979.
- [14] Y. Yeh, C. E. Lee, R. A. Atkins, and H. F. Taylor, "Fiber Optic Sensor for Substrate Temperature Monitoring," J. Vac. Sci. Technol., vol. A8, pp. 3247-3250, 1990.
- [15] OMEGA Inc., The OMEGA instrum. and reference yearbook, vol. 7, C-29(1991).
- [16] A. Dandridge and L. Goldberg, "Current-Induced Frequency Modulation in Diode Lasers," Electron. Lett., vol. 18, pp. 302-304, 1982.
- [17] 예운해, "디지털 호모다인 검출방식을 이용한 간섭형 광섬유 센서의 신호처리," 한국광학회지, 제 6권, pp. 62-69, 1995.
- [18] J. S. Sirkis and H. W. Haslach, Jr., "Interferometric Strain Measurement by Arbitrarily Configured, Surface-Mounted, Optical Fibers," J. Lightwave Technol., vol. 8, pp. 1497-1503, 1990.
- [19] 예운해, "간섭형 광섬유 센서의 신호처리 기법," 한국광학회지, 제6권, pp. 365-372, 1995.

## 著 者 紹 介

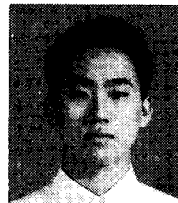
## 예 운 해

『센서학회지 제6권 제2호』 논문 97-6-2-03, p. 105 참조.  
현재 경희대학교 공과대학 전자공학과 부교수.



## 정 환 수

1967년 9월 6일생, 1994. 2 경희대 전자공학과 학사, 1996 동대학원 전자공학과 석사. 1997 - 현재 대우 고등기술연구원 방산기술연구 센터, 관심분야 : 광섬유 센서



## 나 도 성

1972년 8월 17일생, 1995. 2 경희대 전자공학과 학사, 1995. 9 - 현재 동대학원 석사과정, 관심분야 : 광섬유 광학(센서).