

## 광섬유를 이용한 센서

鄭 信 一

釜山水産大學 電子通信工學科 助教授

### I. 序 論

인체 내부의 관찰을 화상 계측이라 본다면 광섬유를 계측에 응용한 것은 통신에서의 응용보다 그 역사가 앞섰다고 볼 수 있다. 즉 1927년 경에 유리 섬유와 다발로 광학적 영상을 전송하자는 발표가 있었고 1950년대에는 내시경으로의 실용화가 있었다. 그러나 당시 광섬유의 손실은 대단히 커서 그다지 주목을 받지 못했다.

1970년에 처음으로 20dB/km 정도의 저손실의 광섬유가 개발된 이래 지금은 극저손실이며 광대역 특성의 광섬유가 개발되어 있다. 광섬유는 저손실, 대용량 등의 우수한 전송특성 뿐만 아니라 소형, 경량, 휨성 등의 기계적 성질, 절연성, 무유도성 등의 전기적 성질, 내화, 내수, 내부식성 등의 화학적 성질 등의 많은 장점을 가지고 있다. 유전체 선로인 광섬유가 갖는 이러한 특성은 이를 통해 전송되는 광의 성질과 함께 계측 분야에서 센서로서도 널리 이용될 수 있는 잇점이 된다.

센서로서의 이용에 중요한 장점으로는 우선 센서에 전원 공급이 필요하지 않아 강한 전자파가 발생 되고 전기 신호의 사용이 위험한 장소에서도 사용이 가능하다. 또한 광을 사용하므로 비접촉적이며 비파괴적인 측정이 가능하다. 광섬유의 기계적 특성을 이용하여 센서를 소형화할 수 있고 각종 유용한 형태의 구조를 융통성 있게 만들 수 있다.

이러한 여러 장점들에 의해 광섬유 센서는 1976년 S. A. Kinsley에 의해 처음 제안된 이래 그 역사는 비록 짧지만 60여종 이상의 많은 연구가 발표되어 있다. 따라서 본고에서는 광섬유 센서의 기본 원리를 설명하고 현재까지 발표된 대표적인 광섬유 센서의 종류와 구성 형태에 대해 개요를 기술하고자 한다.

### II. 광섬유 센서의 원리

광섬유를 센서로서 활용하는 방법은 크게 두가지로

나눌 수 있다. 첫째는 광섬유의 구조적 크기, 모양, 굴절률 등이 물리적인 외부 자극, 즉 음향, 압력, 온도 등에 의해 전송선로로서의 파라미터인 위상정수, 감쇠정수, 전파모드, 편파면 등이 변화되는 성질을 직접 이용한 센서 소자로서의 응용이다. 둘째는 광섬유는 단지 광신호의 도파로로 이용하여 비접촉적 및 비파괴적인 광학적 측정에 응용하거나 다른 광학적 변화를 갖는 센서를 광섬유에 부착한 센서 전송로로서의 응용이다.

이러한 광섬유 센서의 기본 구성 형태를 도시하면 그림 1과 같다. 그림 1의 A형은 광섬유를 센서로서 이용한 형태이고 B, C, D형은 센서 전송로로 사용한 형태이다.

광섬유 센서는 외부 자극에 따라 광의 파라미터인 위상, 강도, 편파면의 변화를 주로 이용한다. 따라서 광섬유 센서를 광이 변조되는 형태에 따라 위상센서, 강도센서, 편광센서로 분류한다.

#### 1. 위상 센서

위상 센서는 주로 광섬유를 센서로 직접 이용하며 외부 자극에 의해 광섬유의 기계적 변형, 굴절률 및 광속의 변화에 의해 생기는 위상차가 효과를 이용한다. 따라서 대부분의 응용에 단일모드 광섬유와 코히어런트한 레이저 광을 이용한다.

위상변화는 직접 측정이 곤란하므로 적당한 간섭계를 구성하여 사용하는데, 주로 Mach-Zehnder, Sagnac, Fabry-Perot, 및 Michelson 간섭계를 응용하여 구성된다. 시스템 구성이 복잡한 단점이 있으나 감도가 가장 높아 많이 연구되고 있는 방식이다.

##### 1) Mach-Zehnder 간섭계형

이 간섭계의 구조는 그림 2와 같다. 코히어런트한 광이 beam splitter 1에 의해 두개의 다른 광로를 가지며 beam splitter 2에 의해 두 광선이 합쳐진다. 한 광

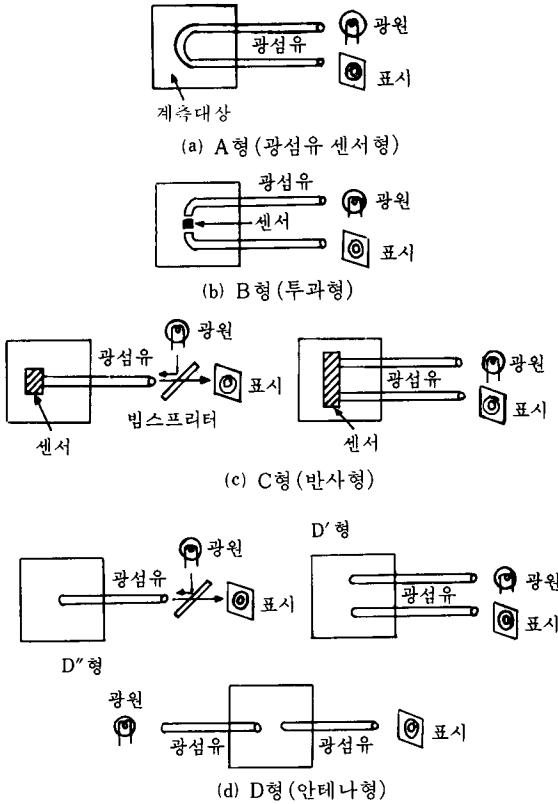


그림 1. 광섬유 센서의 기본구성 형태

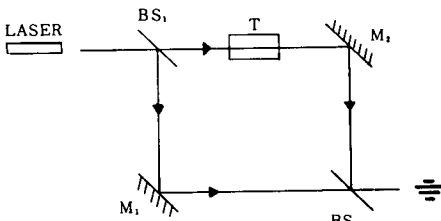


그림 2. Mach-Zehnder 간섭계의 원리

로에 굴절율이 다른 물질이 있다면 광로차가 생겨 간섭현상이 생기는 원리를 이용한다.

이를 광섬유로 구성하면 그림 3과 같다. 레이저로 부터의 광은 beam splitter 또는 광coupler에 의해 두 광섬유에 입력된다. 기준 광섬유계는 외부자극이 미치지 않도록 차단하고 센서 광섬유계는 측정하고자 하는 신호계에 둔다. 즉 외부자극이 센서 광섬유계에 작용하면 광섬유의 파라미터가 변하여 기준 광섬유계를 통과한 광과 위상차가 생겨 간섭무늬의 변화가 생긴다.

2) Sagnac 간섭계형

이 간섭계의 구조는 그림 4와 같다. 서로 반대 방향

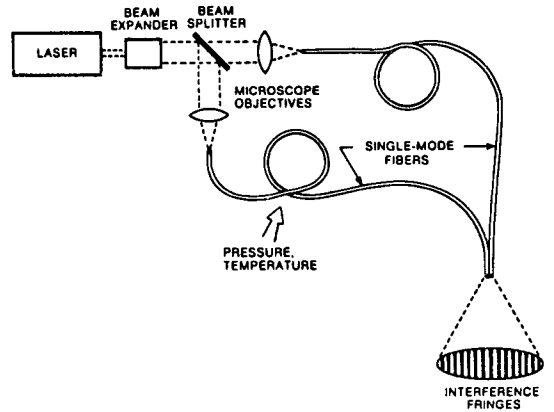


그림 3. 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계

으로 회전하는 두 광은 계의 회전에 의해 상대적인 광속이 달라 위상차가 발생한다는 Sagnac 효과를 응용한 광 gyroscope는 이미 항행용으로 널리 이용되고 있다. 그림 4에서 보이는 바와같이 계가  $\Omega$ 의 각속도로 회전할 때 두 광의 광행 시간차  $\Delta t$ 는 식(1)과 같다.

$$\Delta t = 4A\Omega / C^2 \quad (1)$$

여기서 A는 폐광로에 둘러 싸인 면적이고 C는 광속이다.

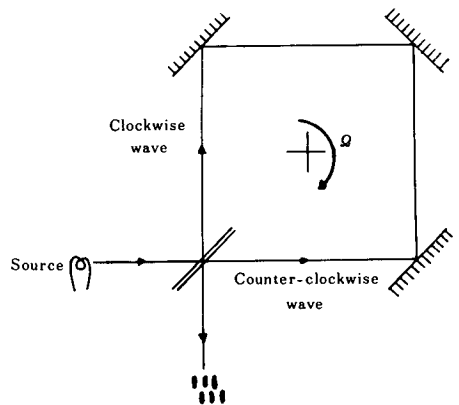


그림 4. Sagnac 효과를 이용한 광 gyroscope

3) Fabry-Perot 간섭계형

구조는 그림 5와 같다. 이는 multiple beam 간섭계이며 두 반투명 평면판 내에서 다중 반사가 생겨 간섭현상이 발생한다. 두 평면 반사판 내에 들어 있는 물

질의 굴절율 또는 반사판 간의 간격에 따라 위상차는 식(2)와 같다.

$$\delta = \frac{4\pi n h \cos \theta}{\lambda_0} + \frac{\phi}{\pi} \quad (2)$$

여기서 n은 굴절율, h는 반사판 사이의 간격,  $\theta$ 는 반사각도,  $\phi$ 는 반사판에서 반사될 때 생기는 위상차이다.

이 간섭계의 원리를 이용하여 광섬유의 양단에 반사판을 부착하면 광섬유를 직접 센서로 응용할 수 있다.

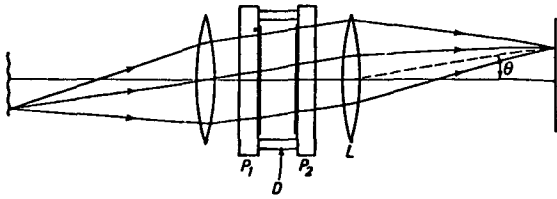


그림 5. Fabry-Perot 간섭계의 구조

4) Michelson 간섭계형

이 간섭계는 Mach-Zehnder 간섭계와 같이 두 광로차에 의한 간섭현상을 이용하는데 다른 점은 같은 광로를 통해 빛이 반사되어 오는 것이다.

광섬유로 구성하려면 각 광섬유의 끝단에 반사판을 부착하거나 절단면 자체를 반사면으로 이용한다.

2. 강도 센서

이 센서는 외부 자극에 따른 광의 강도 변화율이

용하므로 그 측정이 용이하며 다중 모드 광섬유와 LED의 사용이 가능하여 소자 선택이 위상 센서에 비해 까다롭지 않다. 설계자의 아이디어에 따라 다양한 형태로 고안될 수 있어 그 응용 분야가 가장 넓다. 일반적으로 위상 센서에 비해 감도가 떨어지나 기존 기술의 센서와는 대응될 정도까지 개발되어 있다.

강도 센서는 특히 기본 구성 형태로는 그림1에서 보인 모든 형의 것이 응용되어 있으며 광섬유의 이용면에서 분류하면 그림 6 과 같다. 즉 광섬유의 내부 효과를 이용한 센서로서의 응용과 광도파로로 만 이용한 복합 센서로의 응용이다.

3. 편광(분극) 센서

광파도 전자파이므로 외부 전자장에 의해 광섬유를 통과하는 광의 편파면이 회전하게 되는 현상을 이용한다. 이 방식은 구성이 간단하며 검출 감도가 좋고 응답 속도가 빠른 장점이 있다.

그 원리는 그림 7에 보이는 바와 같다.

Ⅲ. 광섬유 센서의 종류

이상에 언급한 원리들을 이용한 광섬유 센서에 대하여 최근까지 발표된 것들을 계측 대상에 따라 분류하고 대표적인 것들에 대해 예를 보이도록 하겠다.

1. 음향, 압력, 응력 및 진동 센서

광섬유 센서 중에서 가장 많이 발표가 되어 있으며 특히 수중 음파 탐지를 위한 hydrophone에 대한 많

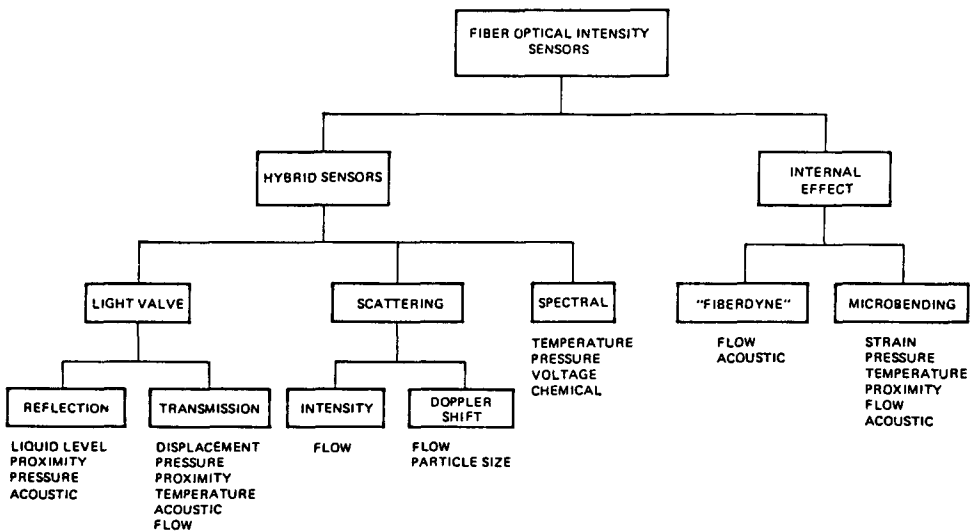


그림 6. 광섬유 강도 센서의 분류

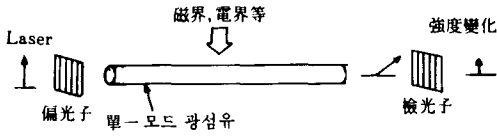


그림 7. 편광 센서의 원리

은 연구가 발표되어 있다.

그림 8은 Mach-Zehnder 간섭계의 원리를 이용한 광섬유 hydrophone이다. 광섬유는 외부 압력에 따라 길이 변화와 elasto-optic 효과에 의한 굴절을 변화가 생긴다. 따라서 수중의 센서 광섬유를 통과하는 광은 음압에 따라 위상이 변하여 기준 광섬유의 광과 합쳐질 때 간섭 무늬가 변하게 된다.

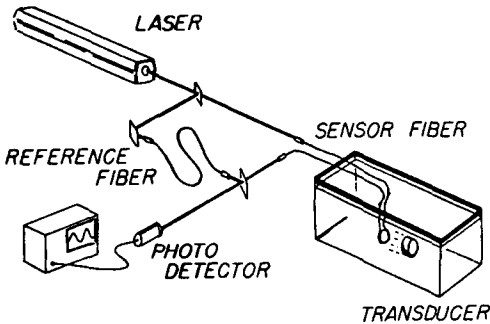


그림 8. 광섬유 hydrophone

Fabry-Perot 간섭계의 원리를 이용한 음향 센서의 구조는 그림 9와 같다. 이는 Mach-Zehnder 방식에 비해 외부 잡음에 강하며 multiple beam 간섭현상을 이용하므로 검파가 용이하나 반사면 간격의 2 배 이상인 코히어런스 거리를 갖는 광원이 필요하다. 이 조건을 완화하기 위하여 같은 길이의 기준 광섬유계를 사용한다. 감도를 높이기 위해 여기서는 음파에 변형이 큰 원통에 광섬유를 감아서 사용한다.

다음은 강도 센서의 형태로서 광섬유의 microband에 의해 생기는 손실 현상과 진동에 의한 손실 현상을 이용한 센서가 각각 그림 10과 그림 11에 보이고 있다. 강도 센서 중에서 광섬유를 센서 전송로로 이용한 예는 다음과 같다.

그림 12는 Central Florida 대학의 R. L. Philips에 의해 제안된 것으로 near-total-internal-reflection (NTIR) 센서라 불리는 음향 센서이다. 광섬유의 끝단의 반사율이, 음압에 따라 물의 굴절률이 변하여, 바

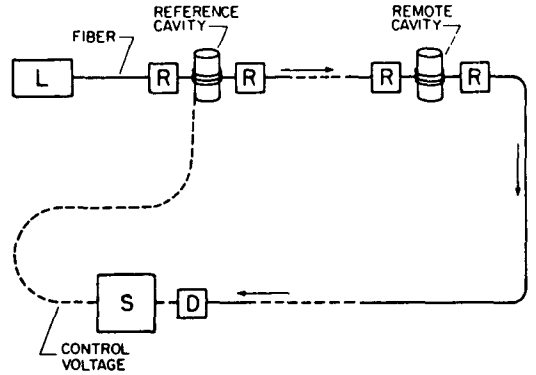


그림 9. Fabry-Perot 간섭계형 음향센서:

L; 광원, R; 반사경, S; 제어회로, D; 광검출기

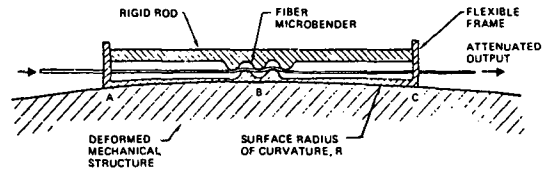


그림 10. Micro band형 압력센서

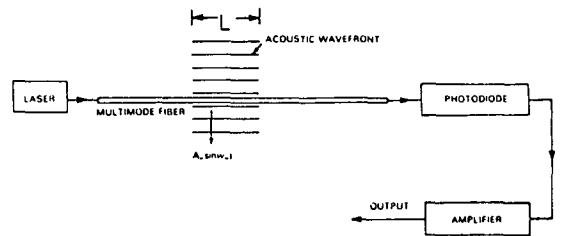


그림 11. Fiberdyne형 음향 센서의 원리

뀌어 지는 원리를 이용한다.

그림 13은 Sperry 연구소에서 제안된 것으로 frustrated-total-internal-reflection (FTIR) 센서라 불리는 센서이다. 한쪽 광섬유의 변위에 의해 전달되는 광량이 달라진다.

그림 14는 광섬유에 diaphragm을 부착하여 음파의 진동에 따른 강도 변화를 이용한 송화기의 예이다.

또한 편광 현상의 원리를 이용한 것이 그림 15에 보이고 있다. Piezo-optic 유리에 외부 자극이 가해질 때 편파면의 방향 변화를 측정하면 된다.

### 2. 온도 센서

온도는 열전대 등에 의해 간단히 측정할 수 있으나 금속체의 사용이나 전원 공급이 불가능한 경우 및 화

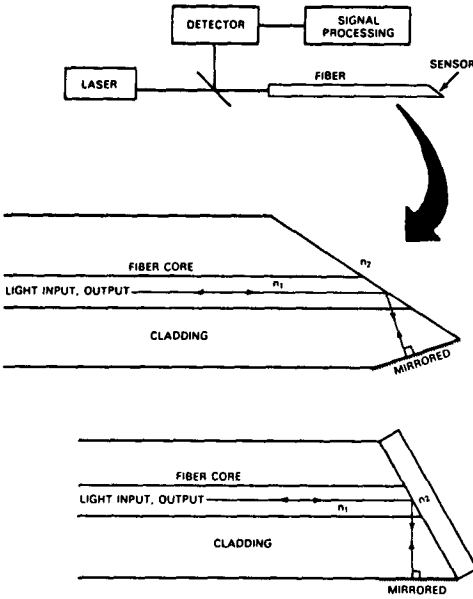


그림12. NTIR 센서의 원리

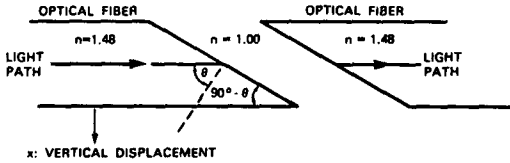


그림13. FTIR 센서의 원리

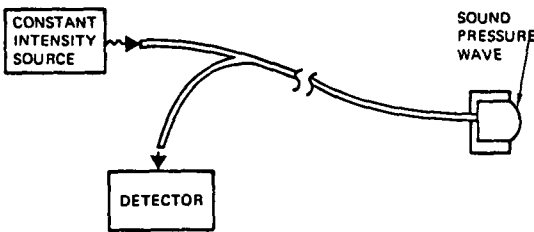


그림14. 광섬유 microphone의 원리

학적 용액 내에서의 경우 광섬유 센서는 대단히 유용하다.

광섬유는 앞서의 압력에 의한 변화와 같이 온도에 대해서도 길이와 굴절율 등이 식 (3) 과 같이 변한다.

$$\frac{\phi \Delta}{\phi \Delta T} = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) + \frac{1}{\Delta T} \left[ E_z - \frac{n^2}{2} \left[ (P_{11} + P_{12}) \epsilon_r + P_{12} \epsilon_z \right] \right] \quad (3)$$

여기서 n은 core의 굴절율,  $\epsilon_z$ 는 축방향 응력,  $\epsilon_r$ 은 축에 수직 방향의 응력,  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ 는 광탄성 계수이다.

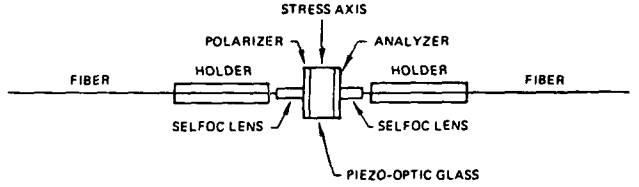


그림15. 편광 현상을 이용한 압력센서

그러므로 광섬유를 온도 센서로 직접 이용하여 압력 센서에서 사용한 것과 같은 형태로 간접계형을 구성할 수 있다. 그러나 압력 등의 영향을 줄이기 위해 금속 물질 등으로 광섬유에 외피를 입힐 필요가 있으며 반대로 금속의 열팽창 특성을 이용할 수 있어 감도를 높일 수 있다.

강도 센서형으로는 그림13의 구조에 광섬유에 바이메탈이나 열팽창 재료를 연결하여 변위가 생기도록 할 수 있다. 또한 그림15에서 piezo-optic 유리 대신에 온도에 따라 광손실 특성이 바뀌는 액정과 같은 재료를 사용한 강도 센서형 센서도 있다.

### 3. 전압, 전류, 전장, 자장 센서

광섬유는 전자파나 전기적 펄스에 대해 간섭이 거의 없으므로 이 분야의 센서로는 faraday 효과에 의한 편광 특성을 이용하는 것 이외에는 광섬유 자체만으로 센서로서 직접 이용한 것은 거의 없다. 따라서 광섬유에 magneto-optic 또는 electro-optic 물질로 피막을 입히거나 접촉시켜 센서로 이용한다. Piezoelectric 원통에 광섬유를 감아 Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 전압 센서가 그림16에 보인다. Piezoelectric 원통에 전압이 인가 되면 변형이 생기고 결과적으로 광섬유의 변형에 의해 위상 변화가 생긴다.

그림17은 강도 센서의 예로서  $Bi_{12}GeO_{20}$  단결정체의 Faraday와 Pockels 효과에 의해 복굴절 현상을 이

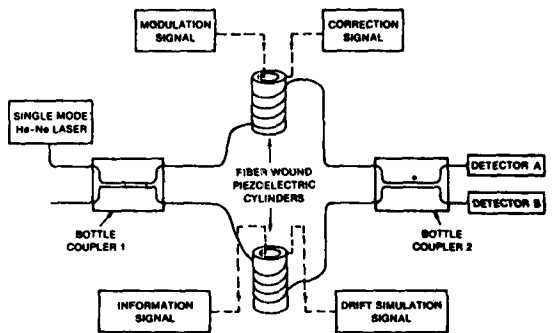


그림16. 간섭계형의 전압센서

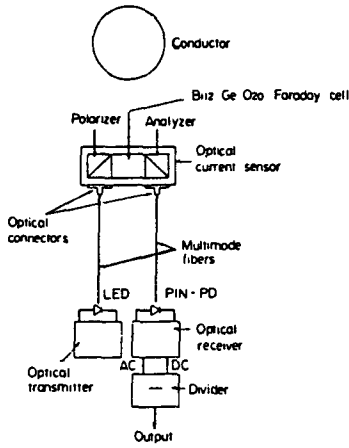


그림 17. 광섬유 전류 센서

용한 전류, 센서이다. 또한 그림 18과 같이 Pockels cell 로 구성하면 전압 센서가 된다.

그림 19는 광섬유를 직접적인 전류 센서로 이용한 예 로서 광섬유의 길이 방향으로 외부 자장이 인가될 때 진행광의 편파면이 회전하는 Faraday 효과를 이용한 편 광 센서형이다. 편파면의 회전은 식 (4)와 같이 광전파 로  $h$ 를 따라 자장을 선적분한 것에 비례한다.

$$\Delta\phi = V \int H \cdot dh \quad (4)$$

여기서  $V$ 는 물질의 Verdet 상수로서 자장의 세기와 광전파 거리에 따라 물질내에서 광편파면의 회전량이 된다. 대부분의 통신용 silica 광섬유는 대략  $1.5 \times 10^{-2}$  degree/A 정도로 작다.

이 방식은 특히 0 ~ 1000A 영역의 대전류 측정에서 다른 전기적 방식에 비해 장치가 간단하며 단락 등의 전기적 위험이 없어 유용하게 이용된다. 또한 감도를 높이거나 다른 전류영역에서의 응용을 위하여 광섬유 에 상자성 물질 등의 특수재료를 첨가하는 방법으로 Verdet 상수가 큰 광섬유 제작에 대한 연구도 되고 있

4. 회전 및 가속도 센서

회전에 대한 센서는 그림 4에서 보인 광의 sagnac

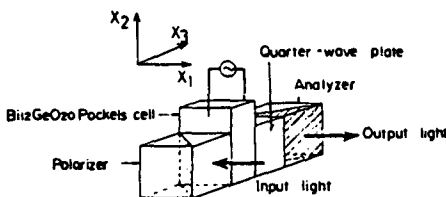


그림 18. 전압측정을 위한 Pockels cell의 구성

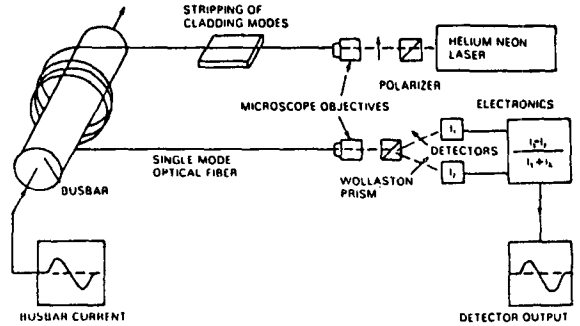


그림 19. 편광현상을 이용한 전류센서

효과를 이용한 sagnac 간섭계의 원리를 이용한다. 이 를 광섬유로 대체하여 구성한 광섬유 gyroscope는 그 림 20과 같다.

$\Omega$ 의 회전 각속도에 대해 서로 반대 방향으로 진행 하는 파의 sagnac 위상차는 식 (5)와 같이 광섬유의 turn 수  $N$ 과 광섬유로 둘러싸인 면적  $A$ 에 비례한다.

$$\phi_s = \frac{8\pi N A \Omega}{\lambda C} \quad (5)$$

그러므로 광섬유의 극저손실 특성을 이용하여 turn 수 를 대단히 크게까지 할 수 있어 감도를 높일 수 있다. 최근 시간당 0.05도의 회전까지 측정가능한 광섬유 gyroscope가 발표되어 있으며 Lin과 Giallorenzi의 몇 가지 해석적인 연구에 의하면 거의 양자잡음의 영역 이 되는  $10^{-3}$ 도/시간 정도의 회전까지도 측정 가능하 게 될 것이라 한다. 또한 광섬유를 사용함으로써 소형 이고 가벼운 안정한 gyroscope가 구성될 수 있어 경 량화가 요구되는 항공기나 우주선 등의 비행제어용으 로 유용하게 이용될 수 있다.

가속도 센서의 예로는 그림 21에 보이는 바와 같은 Michelson 간섭계의 원리를 이용한 것이 있다.

광coupler에 의해 레이저광은 두 광섬유에 입력되고 질량에 달린 광섬유의 각 끝단에서 광이 반사되도록

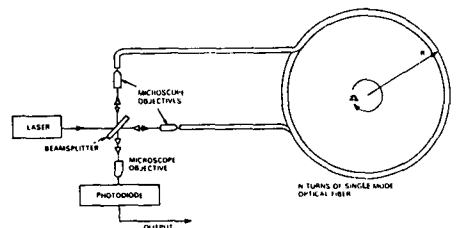


그림 20. 광섬유 gyroscope의 구성

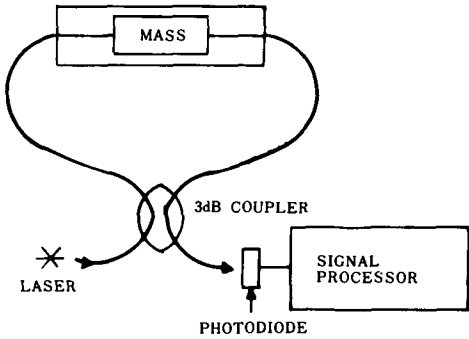


그림21. 광섬유 가속도 센서의 구성

만들어진다. 질량이 달린 고정된 광섬유의 축방향으로 가속도가 생기면 한쪽 광섬유는 늘어나고 다른쪽은 줄어들어 광로차가 생기고 결과적으로 광coupler에서 합쳐진 광의 간섭무늬가 변화된다.

그림22는 강도센서의 원리를 이용한 가속도 센서로서 두 광섬유 사이에 광의 결합손실이 바뀌는 성질을 이용한 것이다. 즉 가속도에 의해 질량이 달린 광섬유가 이동하여 다른 쪽 광섬유에 전달되는 광의 강도가

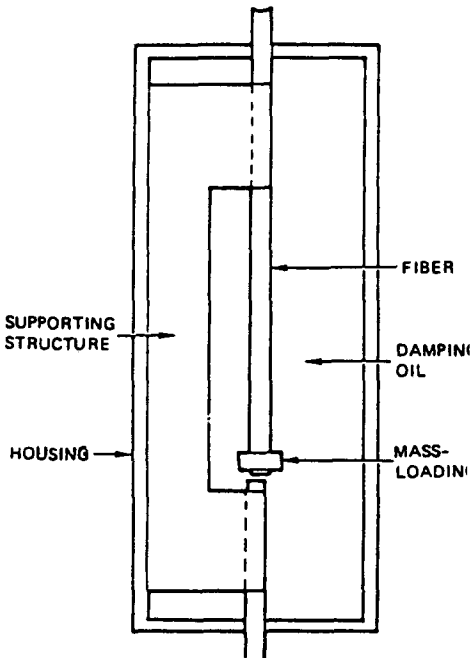


그림22. 강도 변조를 이용한 가속도 센서

변조된다. 이 구조는 이미 hydrophone으로도 응용되어 있다.

그림23은 epoxy resin, diallylphthalate polymer (DAP) 또는  $LiN_6O_8$ , 단결정체와 같은 투명한 물질의 광탄성효과에 의한 편광특성을 이용한 가속도 센서이다. 이 단결정체에 그림과 같이 다른 중력체를 부착하면 외부 가속력에 의해 변형이 생겨 복굴절성이 생긴다. 그러므로 선형 편파면의 광이 타원형 분극광으로 바뀌고 검광자에 의해 편광량이 측정된다.

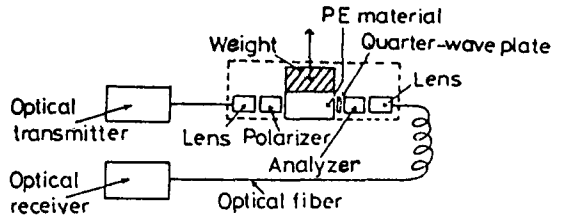


그림23. 편광특성을 이용한 가속도 센서

5. 기타의 센서

지금까지 설명한 센서 이외에도 광섬유에 방사선에 민감한 재료를 혼입하여 방사선 센서로 응용된 것도 있으며 발표에는 아직 적으나 화학량의 계측에도 광섬유는 유용할 것이다. 그것은 광섬유가 각종 화학물질에 대하여 내부식성이 커서 분광기술과 함께 사용되면 유력한 수단이 될 수 있다. 또한 설명된 광섬유 센서의 구조를 조금 변형하면 응력, 변위, 유속, 수위, 유량 등의 각종 센서로 사용 가능하며 이미 발표된 것도 여러 편이 된다.

이미 설명된 것들과 함께 요약 정리하면 표 1과 같다.

IV. 結 論

광섬유를 이용한 각종 센서의 기본적인 구성형태, 원리 및 구조들에 대하여 살펴 보았다. 특히 센서는 계측대상, 주변 환경, 사용목적에 따라 요구조건이 각각 다르고 개별적이기 때문에 광의 고유한 성질들과 광섬유의 우수한 각종 특성들을 잘 이용하면 그 응용분야는 더욱 넓어지게 될 것이다.

또한 광통신 기술과 관련되는 광소자 기술, integrated optics 기술, 광정보처리 기술 등, 광과 관계되는 전반적인 기술의 발달과 함께 완전히 광학적인 센서 시스템으로 구현되어 미래의 종합적인 광 정보시스템의 실현에도 크게 기여할 수 있게 될 것이다.

표 1. 분야별 광섬유센서의 대표 예

No.	측 정 량	센서의 형태*	기본 구성요소	원 리	특 징	참 고 문 헌
1	압 력	C	액 정	감압액정에 의한 광산란	혈관내	Opt. and Laser Tech. (1976) No. 6, 117
2	응 력	A	단일모드 광섬유 He-Ne 레이저	외곡에 의한 광로차 변화	협공간	Appl. Opt. 17 (1978) No.18, 2867
3	유 량	A	단일모드 광섬유 He-Ne 레이저	위상변화	미소센서	Electron. Lett. 15 (1979) No.18, 570
4	굴 곡	A	Plastic 광섬유 Ar 레이저	감쇠량 변화	유연성	Opt. and Laser Tech. (1976) No.12, 251
5	음 향	A	단일모드 광섬유 Ar 레이저	굴절률 변화	수 중 고감도	J. Acoust. Soc. Am. 62(1977) No. 2, 1303
6	회 전 (각속도)	A	단일 모드 광섬유 He-Ne 레이저	SAGNAC 효과	항행체 고감도	SPIE 77 (1976) 110
7	진 동	A	진동막 단일모드 광섬유 He-Ne 레이저	감쇠량변화에 의한 강도 변조	협공간	Appl. Phys. Lett. 30 (1977) No. 2, 94
8	온 도	A	단일모드 광섬유에 의한 Mach-Zender 간섭계	광로차 변화	협공간	Appl. Opt. 18 (1979) No. 9, 1445
9	전 압	B	LiNbO <sub>3</sub> , LiTaO <sub>3</sub> , 광섬유	Piezo효과	고압하	Opt. and Laser Tech. (1977) No.12, 273
10	전 류	A	단일모드 광섬유	Faraday 효과	고압하	Appl. Phys. Lett. 34 (1979) No.11, 768
11	전자계강도	C	미소분극 LED 광섬유	광 Telemetry	전자계하	Microwave J. (1977) No. 4, 35
12	전압펄스	B	단펄스레이저 이산화산소 광섬유지연선로	Kerr효과 광지연	고분해능	Appl. Opt. 15 (1976) No. 6, 1404
13	광전자계	D	단일모드 광섬유	이 광속간섭	광전자계 Probe	Appl. Opt. 17 (1978) No.12, 1965
14	광 펄 스	D	광섬유지연 시스템	광 Sampling	고분해능	IEEE J. Quant. Elec. (1974) No. 11, 642
15	방 사 선	A	특수 광섬유	방사선에 의한 감쇠량 변화	광역검지	SPIE 77 (1976) 88

\* 그림 1. 참고

參 考 文 獻

[1] 朴漢奎, “광섬유 센서기술,” 電子工學會雜誌, 第 11卷 第 3號, pp. 41-46, 6月 1984年.

[2] 根本 俊雄, 光ファイバ・活用の基礎, オーム社, pp. 26-40, 1981.

[3] T.G. Giallorenzi, J.A. Bucaro, A. Dandridge, G.H. Sigel, Jr., J.H. Cole, S.C. Rashleigh, and R.G. Priest, “Optical fiber sensor technology,” *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no.4,

pp. 472-511, Apr., 1982.

[4] D.E.N. Davies and B. Culshaw, Development and potential of optical fiber sensors, *IFOC Handbook & Buyers Guide*, pp. 120-129, 1981-1982.

[5] P. Sothcott. “Optical fiber technology special applications,” *Elec. Comm* vol. 56, no.4, pp. 423-430, Apr., 1981.

[6] B. Culshaw and I.P. Giles, “Frequency modulated heterodyne optical fiber Sagnac interferometer,” *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no.4, pp.



- 536-539, Apr., 1982.
- [7] D.L. Franzen and E.M. Kim, "Long optical-fiber Fabry-Perot interferometers." *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 23, pp. 3991-3992, Dec., 1981.
- [8] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh, and T. Ose, "Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no. 10, pp. 1612-1621, Oct., 1982.
- [9] R. Kashyap and B.K. Yayar, "An all single-mode fiber Michelson interferometer sensor," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. LT-1, no.4, pp. 619-624, Dec., 1983.
- [10] S. Yao and C.K. Asawa, "Fiber optical intensity sensors," *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, vol. SAC-1, no. 3, pp. 562-565, Apr., 1983.
- [11] A.M. Smith, "Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 1, pp. 52-56, Jan., 1978.
- [12] Y. yen, R. Ulrich, "Birefringence measurement of fiber-optic devices," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 15, pp. 2721-2725, Aug., 1981.
- [13] J.A. Bucaro, H.D. Dardy, E.F. Carome, "Fiber-optic hydrophone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62, no. 5, pp. 1302-1304, Nov., 1977.
- [14] N. Lagakos, E.U. Schnaus, J.H. Cole, J. Jarzynski, & J.A. Bucaro, "Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no.4, pp. 529-535, Apr., 1982.
- [15] P.G. Cielo, "Fiber optic hydrophone: improved strain configuration and environmental noise protection," *Appl. Opt.* vol. 18, no.17, pp. 2933-2937 Sep., 1979.
- [16] N. Lagakos, W.J. Trott, T.R. Hickman, J.H. Cole, and J.A. Bucaro, "Microbend fiber-optic sensor as extended hydrophone," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no.10, pp. 1621-1626, May, 1982.
- [17] W.B. Spillman, Jr., and D.H. McMahon, "Frustrated-total-internal- reflection multi-mode fiber-optic hydrophone," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 1, pp. 113-117, Jan., 1980.
- [18] R.P. Depaula, L. Flax, J.H. Cole and J.A. Bukaro, "Single-mode fiber ultrasonic sensor," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no.4, pp. 526-529, Apr., 1982.
- [19] G.B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Appl. Opt.*, vol. 18, no.9, pp. 1445-1448, May, 1979.
- [20] A.J. Rogers, "Optical temperature sensor for high voltage application," *Appl. Opt.*, vol. 21, no.5, pp. 882-885, Mar., 1982.
- [21] K. Kyuma, S. Tai, T. Sawada and M. Nunoshita, "Fiber-optic instrument for temperature measurement," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no.4, pp. 522-525, Apr., 1981.
- [22] D.A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge, and A.B. Tveten, "Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 17, pp. 2926-2929, Sep., 1980.
- [23] K.P. Koo and G.H. Sigel, Jr., "An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVF2) film in a single-mode fiber interferometer." *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, no. 4, pp.516-521, Apr., 1982.
- [24] K. Kyuma, S.Tai, M. Nunoshita, N. Mikami, and Y. Ida, "Fiber-optic current voltage sensors using a Bi<sub>12</sub> GeO<sub>20</sub> single crystal," *IEEE J. Lightwave Tech.* vol. LT-1. no.1, pp. 93-97, Mar., 1983.
- [25] W.C. Goss, R. Goldstein, M.D. Nelson, H.T. Fearnhaugh and O.G. Ramer, "Fiber-optic rotation sensor technology," *Appl. Opt.*, vol 19, no. 6, pp.852-858, 1980.
- [26] G.A. Rines, "Fiber-optic accelerometer with hydrophone applications." *Appl. Opt* vol.20, no.19, pp. 3453-3459, Oct., 1981.
- [27] S. Tai, K. Kyuma, and M. Nunoshita, "Fiber-optic acceleration sensor based on the photoelastic effect," *Appl. Opt.* vol. 22, no.11, pp. 1771-1774, Jun., 1983.
- [28] A.D. Kersey, D.A. Jackson and M. Corke, "High-sensitivity fiber-optic accelerometer," *Electronics Letters*, vol. 18, no. 13, pp. 559-561, Jun., 1982. \*