

광섬유 센서기술 : 원리 및 응용

송 정 태*, 이 경 식**

(*대우공업전문대 전자과 전임강사, **성균관대 공대 전자공학과 부교수)

1. 서 론

1970년 미국의 코닝글라스사(Comning Glass Company)에서 광섬유가 최초로 제조된 이래 광섬유는 통신분야에 많은 공헌을 해오고 있다. 1976년 Kinsley, Davies 등에 의해 광섬유를 이용한 전기적 위상변이 효과가 발표된 이후로 광섬유 특성을 이용한 센서연구가 많이 진행되어 왔다[1, 2].

즉, 광파이버의 실현과 반도체 레이저와 발광 및 수광 다이오드의 성능 향상에 의하여 광파이버 응용 계측 기술이 현저하게 진보하여 그 다양성과 실현성도 두드러지게 증가되었다. 이것은 레이저와 수광소자 등의 광소자의 개발, 마이크로컴퓨터를 비롯한 전자기술의 진보, 또한 최근의 전력계통과 철강, 석유 화학 등의 각종 공업 플랜트의 대규모화, 고도화에 따른 고품위의 계측 제어 시스템에 대한 수요의 증대에 의한 것이다. 이에 따라서 광대역, 저손실, 고절연성, 내잡음성, 안전방폭성 등이 우수한 광파이버를 신경망으로 하는 광파이버 응용 계측 제어 시스템이 공장자동화에 있어서 중요한 역할을 담당하게 될 것이다. 이의 설계와 제어를 위해 가장 중요한 부분은 정보 수집을 하는 센서 즉, 광섬유 센서이다. 따라서 온도, 압력, 진동, 음향, 전계, 자계, 속도, 회전 각속도 등 많은 종류의 광섬유 센서의 연구 개발이 미국, 일본, 유럽 및 국내의 여러 기관에서도 지속적인 연구가 진행되고 있으며, 부분적으로 서서히 실용화되어 가고 있다[3, 4].

2. 광섬유 센서의 개념과 분류

2.1 광섬유 센서의 개념

광섬유 센서는 종래의 전기식 센서와는 달리 단순히 센싱 소자로서의 기능만이 아니라 계측신호 정보 전송으로서의 기능과 더불어 광과 전기신호 변환의 기능을 가지고 있어서, 오히려 광섬유 응용 계측장치라고 하는 것이 적절하다.

이러한 광섬유 센서는 광 및 광섬유가 가지고 있는 무유도성, 절연성, 방폭에 대한 안정성 등의 특징을 가진 계측계

를 구성할 수 있고 마이컴, 미니컴에 대표되는 전자 기술과의 정합에도 우수하다. 즉, 광섬유 센서는 컴퓨터와 연결함으로써 계측한 정보를 수집, 처리, 분석할 수 있으며 공장 자동화 또는 전력계통의 계측 및 감시 보호 등의 목적으로 적용시킬 수 있다. 그림 1에 광섬유 센서를 이용한 이상적인 계측제어 시스템의 개념도를 나타낸다.

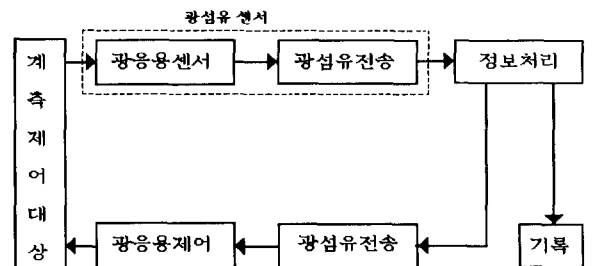


그림 1. 광센서를 이용한 계측 제어시스템 개념도

2.2 광섬유 센서의 분류

광섬유 센서를 광섬유의 구성 및 이용법에 의해 분류하면 대략 표 1같이 크게 분류할 수 있다.

2.2.1 광섬유 전송로형 센서(광학식 센서)

광섬유 전송로형(광학식) 센서는 표 1, 표 2에 열거한 많은 종류의 광기능 재료와 기계적(구조적) 변화에 의한 광학식 센서를 장착한 구성이다. 광섬유는 단순히 강도 변조된 광신호의 전송로로서 이용되며 주로 다중모우드와 bundle 광섬유가 이용된다. 광원과 수광소자로서는 각각 LED, PIN-PD가 주로 이용된다. 이때, LED의 광출력을 일정하게 유지하는 것이 특히 중요하다. 이 방식의 센서는 구성이 간단하고 신뢰성이 높은 등 우수한 특징을 가지고 있어 이미 많은 종류의 센서가 실용화되고 있다.

2.2.2 광섬유 Pick Up Probe 형 센서

가장 많이 실용화되어 있는 Pick Up Probe형 센서는 계

표 1. 광섬유 센서 기술의 분류

	(a)광섬유 전송도형 센서(광학식 센서)	(b)광섬유 Pick-up Probe 형 센서	(c)광섬유 기능형 센서
계측원리	· 광탄성효과 · 전기광학효과 · 자기광학 효과 · 광흡수 및 방사효과 · 마이크로 밴드 손실 · 광로차단	· 레이저 도플러 효과 · 발열체의 방사 · Image 광섬유	· 간섭현상 - Mach Zender 간섭계 - Michelson 간섭계 - Sagnac 간섭계 · 광섬유 자기광학 현상
광변조	광강도	광주파수 · 광강도	광위상(광강도)
구성예	광섬유 온도계	광섬유 레이저 도플러 속도계 (LDV)	광섬유 레이저 자이로
센서 재료	개별 광부품	광섬유	광섬유
특징	· 구조간단 · 고신뢰성	· 비접촉 · 고감도	· 초고감도

측 대상에서 방사된 광정보, 또는 광원에서 beam splitter를 통하여 probe에서 조사하여 계측대상에서 반사되어 산란된 광정보를 광섬유를 probe로 pick up하여 광수신기로 전달하는 방식으로 단일모우드형, 다중모우드형 또는 bundle형 등의 각종 광섬유가 광섬유 probe로써 이용된다. 이 방식의 대표적인 센서에는 광섬유 레이저 도플러 속도계(Fiber-Optic Laser Doppler Velocimeter : LDV)와 광섬유 방사 온도계 등이 있고, 비접촉, 고정밀도라고 하는 광응용 계측의 특징을 이용하고 있다.

2.2.3 광섬유 기능형 센서

광섬유 기능형 센서는 광섬유 중의 도파광의 속성이 계측 대상에 의해 변화를 받아 도파광의 위상, 편광, 강도가 변조되는 것을 이용한다. 광의 위상과 편광의 변화를 이용하는 경우에는 단일 모드 광섬유와 편광 유지 광섬유가 이용되고, 광의 강도 변화를 이용하는 경우에는 주로 다중 모드 광섬유가 이용된다. 광원으로서로는 주로 He-Ne 레이저 또는 반도체 레이저가 이용되고 수광소자로서는 PD나 APD 등이 이용된다.

특히 광의 위상 변화를 이용하는 센서에는 각종 광섬유 간섭계를 구성하여 광 호모다인법 또는 광 헤테로다인법에 의해 신호를 검출하기 때문에 초고감도의 계측이 기대되어 최근 활발한 연구 개발이 진행되고 있다. 이를 위해 기능형 광섬유의 개발을 포함하여 현재 많은 광섬유 기능형 센서가 개발단계에 있으나 가장 실용화에 가까운 것은 광섬유 레이저 자이로스코프(FOG)이다. 표 2에 많은 종류의 계측 물리량에 대한 대표적인 광섬유 센서의 광학현상을 표시하였다.

3. 광섬유 센서의 방식, 종류 및 원리

3.1 광섬유 센서의 방식

현재까지 연구되고 있는 대부분의 광섬유 센서는 크게

표 2. 계측 물리량에 따른 광섬유 센서의 광학현상

계측물리량	광 변 조	광 학 현 상
전류 · 자계	편 광	Faraday 효과
	위 상	간섭현상(자기왜)
전압 · 전기	편 광	Pockels 효과
	위 상	간섭현상(전왜)
온 도	광 강 도	차폐판에 의한 광로차단 반도체의 투과율 변화
	광강도 · 스펙트럼	형광의 반사 강도변화 발열체의 방사
	편 광	복굴절 변화
각 속 도	위 상	Sagnac 효과
속도 · 유속	주 파 수	도플러 효과
진 동 가 속 도	광 강 도	마이크로 밴딩 손실 차폐판에 의한 광로 차단 다이아프램에 의한 반사 강도 변화
	편 광	광탄성 효과
압 력	위 상	간섭 현상
	주 파 수	도플러효과

다음의 두 가지 방식에 의해 광센서 신호를 검출할 수 있다. 즉, 위상센서(phase sensor)방식과 광강도 센서(intensity sensor)방식인데, 이의 대략적인 분류를 그림2에 나타내었다. 이의 대표적인 센서의 구성, 원리 및 응용에 등에 대해 살펴본다.

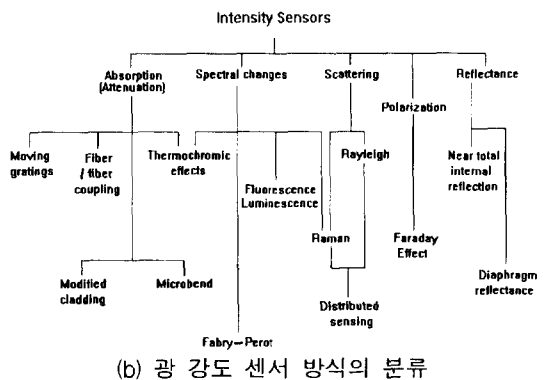
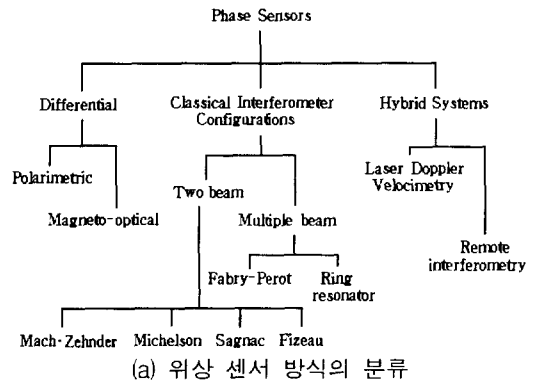


그림 2. 광섬유 센서의 방식

3.2 광섬유 센서의 종류 및 원리

정현파로 진동하면서 도파하는 광파의 전계 Vector E 는 다음 식으로 표현된다.

$$E = E_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

광섬유 센서에서는 (1)식에 있어서 다음의 네 가지가 외부의 물리량(센서 대상)에 대해 변조되는 것을 이용한다. 즉, 네 가지란

- ① 광강도 ($|E_0|^2$)의 변화
- ② 편광 (E_0 의 방향 등)의 변화
- ③ 주파수(ω)의 변화
- ④ 위상(φ)의 변화

를 의미한다.

지금부터는 대표적인 광센서의 종류 및 원리에 대해 살펴본다.

3.2.1 간섭계

간섭계(Interferometer)에는 Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac 간섭계 등 여러 가지가 있으나, 여기서는 이 세 가지 간섭계에 대한 개략적인 원리 및 응용예를 살펴본다.

3.2.1.1 Mach-Zehnder 간섭계

그림 3에 Mach-Zehnder 간섭계의 구성도를 나타내었다. 광검출기 PD1, PD2에서 측정되는 빛의 전계 성분은 각각 다음과 같이 나타난다.

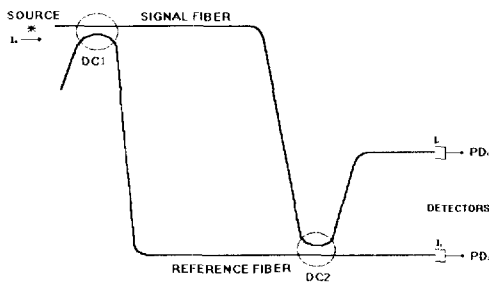


그림 3. Mach-Zehnder 간섭계 (DC:Directional Coupler)

$$E_1 = k_{2c} \exp(i\varphi_r) k_{1c} E_0(\tau_r) + k_{2r} \exp(i\varphi_s) k_{1r} E_0(\tau_s)$$

$$E_2 = k_{2r} \exp(i\varphi_r) k_{1c} E_0(\tau_r) + k_{2c} \exp(i\varphi_s) k_{1r} E_0(\tau_s) \quad (2)$$

여기서 s, r은 각각 signal arm과 reference arm을 나타내며 k_{1r} , k_{1c} 는 방향성 결합기(DC₁, DC₂)의 결합계수이며 첨자 t는 광원으로부터 다른쪽 arm을 거치지 않고 광검출기까지 직접 통과하는 빔을 의미하며 c는 결합기를 경유하여 통과하는 빔을 의미한다. 그리고 φ_r , φ_s 는 각 arm의 위상지연을 의미하며 전계, 자계 등 외부 물리량에 의해서

변화한다. 마지막으로 τ_r , τ_s 는 빛이 광원으로부터 검출기까지 진행하는데 걸리는 시간이며, E_0 는 광원으로부터 간섭계에 입사되는 빔의 전계의 크기이다.

한편 빛의 세기 I 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \langle E \cdot E^* \rangle \quad (3)$$

따라서 광검출기 1, 2에서 검출되는 빛의 세기는 다음 식(4)와 같다.

$$I_1 = I_0 [k_{1c}^2 k_{2c}^2 + k_{1r}^2 k_{2r}^2 - 2k_{1c} k_{2c} k_{1r} k_{2r} \gamma \cos(\varphi_r - \varphi_s)]$$

$$I_2 = I_0 [k_{1c}^2 k_{2c}^2 + k_{1r}^2 k_{2r}^2 + 2k_{1c} k_{2c} k_{1r} k_{2r} \gamma \cos(\varphi_r - \varphi_s)] \quad (4)$$

여기서 k 은 이상적인 3dB 2×2 광섬유 결합기에서 빛이 결합기를 경유하여 통과할 때 $\pi/2$ 만큼의 위상지연이 발생하는 것을 의미한다. 식(4)는 식(5)와 같은 간섭무늬의 선명도(visibility) V 를 이용하여 간단히 표현할 수 있다.

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$$= \frac{2k_{1c}k_{2c}k_{1r}k_{2r}}{k_{1c}^2k_{2c}^2 + k_{1r}^2k_{2r}^2} \gamma \quad (5)$$

$$I_1 = I_0 [1 - V \cos(\varphi_r - \varphi_s)]$$

$$I_2 = I_0 [1 + V \cos(\varphi_r - \varphi_s)] \quad (6)$$

여기서, γ 는 광원의 코히어런스 정도를 나타내는 파라미터로써 간섭계에서 사용하는 광원의 경우 충분히 코히어런트 하기 때문에 1로 가정할 수 있다. 식(5)에서 알 수 있듯이 광검출기 1, 2에서의 빛의 세기는 서로 π 의 위상변화를 가지며 각 arm에서의 위상차에 의해 변하게 된다. 또한 간섭계의 출력은 간섭무늬의 선명도가 클수록 증가함을 볼 수 있는데 선명도는 간섭정도를 결정짓는 중요한 요소이며 시스템의 감도를 높이는 데 중요한 요인이 된다. 식(4)에서 알 수 있듯이 가장 큰 선명도를 얻기 위해서는 각 arm을 진행하는 빛의 크기가 동일한 비율이 되도록 조절해야 한다.

이러한 간섭계를 구성하여, 온도, 압력(음압), 전계, 자계, 진동, 가속도 등의 물리량을 감지할 수 있으며 이의 응용의 한 예로서 그림 4와 같은 Mach-Zehnder형 간섭계로 자계 센서가 있으며 실험 결과 최소 감지 자장이 $\sim 1.0 \times 10^{-7}$ Oe(rms)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 정도가 됨을 알 수 있다[5].

3.2.1.2 Michelson 간섭계

그림 5에 Michelson 간섭계의 구성도를 나타내었다. 이 간섭계는 앞의 Mach-Zehnder 간섭계와 측정원리는 비슷하

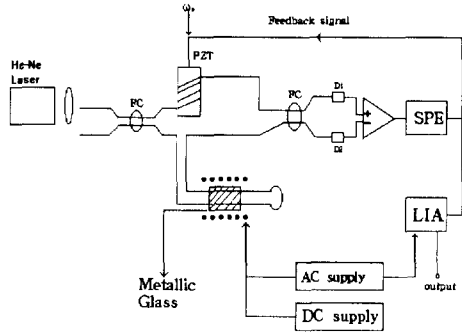


그림 4. Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 고감도 자체 센서 (FC : 광섬유 결합기 , PZT : Piezoelectric Translator, D₁,D₂ : 포토다이오드 , SPE : 신호 처리 전자부, LIA : Lock-in Amplifier)

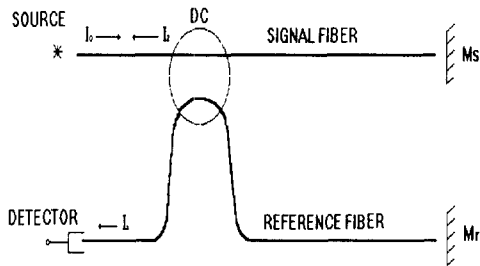


그림 5. Michelson 간섭계

나, 광섬유의 끝이 반사될 수 있도록 만들기 때문에 방향성 결합기 (DC)가 한 개면 충분하고 경로차 $\Delta L=2(L_1-L_2)$ 가 된다. 여기서 L_1 은 신호 광섬유, L_2 는 기준 광섬유의 길이이다. 앞의 Mach-Zehnder 간섭계 경우와 비슷한 분석에 의해

$$E_1 = k_c m_s \exp(i\varphi_s) k_i E_0(\tau_s) + k_r m_r \exp(i\varphi_r) k_c E_0(\tau_r)$$

$$E_2 = k_i m_s \exp(i\varphi_s) k_i E_0(\tau_s) + k_c m_r \exp(i\varphi_r) k_c E_0(\tau_r)$$

(7)

따라서,

$$I_1 = I_0 [1 + V \cos(\varphi_s - \varphi_r)]$$

$$I_2 = I_0 [1 - V \cos(\varphi_s - \varphi_r)]$$

(8)

$$\text{여기서, } V = 2m_s m_r \gamma / (m_s + m_r)$$

(9)

으로 표시할 수 있다.

여기서, m_s 와 m_r 은 신호광섬유 및 기준 광섬유 끝단에서 각각 반사되는 반사계수를 뜻한다. 즉, 선명도(V)는 방향성 결합기의 광결합 정도와는 무관하고 광섬유 끝단의 반사를

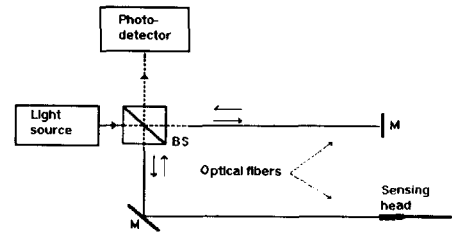


그림 6. Michelson 간섭계로 구성된 온도센서

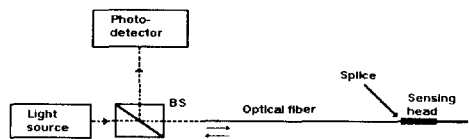


그림 7. Fabry-Perot 간섭계

과 광원의 코히어런스에 의해 결정된다. 따라서 Michelson 간섭계를 구성할 때 주의해야 할 점을 광원으로 되돌아가 입력되는 빛에 대한 영향을 고려해 줘야 한다. 이는 광원의 잡음을 일으키게 하는 요인이 되며, 특히 LD(레이저 다이오드)를 사용할 때는 주의해야 하므로 광 아이솔레이터를 사용하여 극복할 수 있다. 그림 6에는 Michelson 간섭계로 온도 센서를 구성한 예를 나타내고 있다.

한편, 광섬유의 양끝을 거울 M으로 코팅시켜 무한정 반사가 일어나면서 간섭현상에 의해 외부 물리량을 감지하는 것을 Fabry-Perot 간섭계라 하며 이의 구성을 그림 7에 나타내었다.

3.2.1.3 Sagnac 간섭계

각회전이나 각속도의 정확한 측정이 항공기, 군사장비, 산업계, Robotics 등에서 많이 요구되고 있다[6]. 최초의 구성은 1963년 Davis 등에 의해 고안된 He-Ne 레이저 자이로스코프이다[7].

3.2.1.3.1 Sagnac 효과

폐회로로 구성된 간섭계에서 빛이 서로 역방향으로 진행할 때, 이 시스템을 회전시키면 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이에 간섭무늬가 검출된다. 이러한 효과를 Sagnac 효과라 하고, 1913년 G. Sagnac이 발표한 간섭계를 Sagnac 간섭계라 한다[8].

이의 효과를 설명하기 위해 그림 8에서와 같이 레이저 광원은 BS에 의해 CW 방향으로 진행하는 광(P₁)과, CCW 방향으로 진행하는 광(P₂)로 분리되고 360° 회전한 P₁, P₂는 BS에 의해 다시 결합되어 PD로 입사된다. 이 때, 광학계

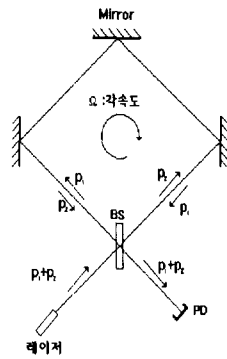


그림 8. Sagnac 효과(BS : Beam Splitter PD : 수광소자)

전체가 광로의 중심축 주위를 CW방향으로 각속도 Ω로 회전하면, 회전 방향과 같은 방향인 P₁은 정지하고 있을 때보다도 긴 거리를 진행하며, 역으로 반대방향인 P₂는 짧은 거리를 진행한다. 두 광파간의 경로차 ΔL 은

$$\Delta L = \frac{4A}{C} \Omega \quad (10)$$

이고, 이것에 대한 위상 이동

$$\Delta \phi_s = \frac{8\pi A}{\lambda_0} \Omega \quad (11)$$

으로 나타나며, 이 효과를 Sagnac 효과라고 한다. 여기서 λ₀는 레이저 빔의 공기 중에서의 파장이며, A는 광선으로 둘러싸여진 면적이다. 이 위상차를 검출하면 회전 각속도 Ω를 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 그 데이터를 적분 등의 처리를 하면 회전각이나 방위의 측정도 가능하다.

3.2.1.3.2 광섬유 자이로스코프

항공기나 인공위성 등의 이동체를 안전하고 정확하게 목적지로 유도하기 위해서는 고정밀도의 위치 제어 센서와 항법 장치가 필요하다. 광섬유 자이로스코프는 종래의 기계식 자이로스코프와 비교하여, 가동부분이 없고, 기동 시간이 짧고, 고직선성, 저소비전력 및 구조가 간단하다는 등의 특징이 있다. 전술한 Sagnac 효과를 이용한 광섬유 자이로스코프의 한 예를 그림 9에 나타내었다.

여기서, 광섬유를 이용한 위상 변조기를 만들기 위해 PZT를 광섬유 센싱코일 근처에 두어 광섬유의 길이 l 이나 스트레스에 의한 굴절률 n의 변화에 의해 위상을 변조시킨다[9]. 이는 압전(piezoelectric)물질로 만들어진 원통에 광섬유를 수십바퀴 정도 감아서 만든다. 이 원통에 전압을 가해 주면 원통이 반경 방향으로 수축 및 팽창이 되어 광섬유의 광로의 길이가 변화하게 되며 위상이 변조된다. 이 때의 전체 위상 변화는

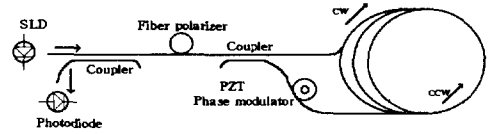


그림 9. 광섬유 Gyroscope (SLD : Super Luminescent Diode)

$$\Delta \phi = k_0 n \Delta l + k_0 l \Delta n \quad (12)$$

이다. 단, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ 이다.

즉, (12)식에서 위상 변화는 광섬유의 길이 변화와 코어 굴절률 변화에 의한 것으로 나타난다. 또한, 그림9의 수광소자에서 검출되는 출력전류

$$I = I_0 + I_0 [J_0(\phi_m) + 2 \sum_k J_{2k}(\phi_m) \cos 2k\omega_m t] \cos \phi_s + I_0 [2 \sum_k J_{2k-1}(\phi_m) \cos (2k-1)\omega_m t] \sin \phi_s \quad (13)$$

으로 나타난다[10].

이러한 광섬유 자이로스코프를 구성하여 0.1~1° /h의 미소한 회전 속도량도 감지할 수 있다.

3.2.2 광강도 센서

3.2.2.1 편광 변조 센서

3.2.2.1.1 자기광학 효과

1845년 Michael 과 Faraday는 강한 자계에 의해서 유리가 광학적으로 활성화됨을 발견하였다. 이러한 자기 광학 효과가 광섬유 내에 얼마나 있는지를 검출하기 위해 그림 10과 같은 실험장치를 구성할 수 있다. 그림 10과 같이, 일정한 방향으로 편광된 빛이 광섬유 내를 통과할 때, 이 빛의 진행 방향으로 자계가 인가되면 편광각이 회전하게 되며, 이러한 자기광학 효과를 파라데이효과라고 한다. 편광각의 회전량은

$$\Omega = V \int_l H \cdot dL \quad (14)$$

으로 표시된다. 여기서 V는 버데상수이며, l은 자계의 영향을 받는 광섬유의 길이이다

신호처리에 의해서 다음의 식으로 표시되는 값

$$R = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (15)$$

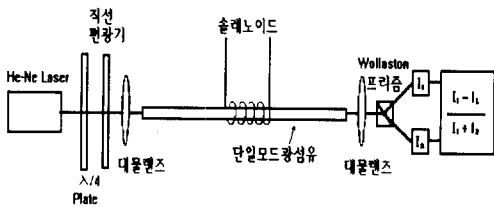


그림 10. 단일 모드 광섬유의 파라데이 효과

를 구할 수 있으며, R은 자계에 의해 편광각이 회전한 정도를 상대적으로 나타내는 파라미터이다.

또한 여기서 구한 R은 편광각의 회전량 Ω 와 광섬유의 복굴절률 δ 와 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$R \approx 2\Omega \left(\frac{\sin \delta}{\delta} \right) \quad (16)$$

이를 응용하여 광섬유를 센서 자체로 사용한 많은 예를 표 3에 나타내었다.

표 3. 광섬유를 전류(자계) 센서로 사용한 예

Author	Sensor fiber	Remarks
Smith, 1978	SM	
Papp and Harms, 1980	SM	
Donati and Annovazzi-Lodi, 1984	SM	unlinked coil
Kersey, 1986	lo-bi SM	heterodyne detection
Annovazzi-Lodi and Donati, 1987	lo-bi SM	unlinked coil
Rutgers, 1987	lo-bi SM	lightning currents
Kreidl, 1987	400 μ m multimode	field test
Laming, 1987a	spun bow-tie	active temp. stab.
Laming, 1987b	spun bow-tie	passive temp. stab.
Chatrefou, 1987	lo-bi SM	double pass sensor
Veeser et al., 1984	SM	5 mega-amps
Chandler, 1986	twisted SM	plasma current
Lassing, 1987	lo-bi SM	plasma current
Bohmet, 1994	lo-bi SM	sagnac

표 4. 결정 등을 전류(자계) 센서로 사용한 예

Author	Sensor material	Sensor shape
Kyuma et al., 1982	flint glass	linear
Kyuma et al., 1983	BGO	linear
Sato et al., 1983	flint glass	circular
Kuroda, 1985	flint glass	linear
Shibuya and Ono, 1985	BSO/ZnSe	linear
Mitsui et al., 1986	BSO/ZnSe	linear
Kanoi et al., 1986	BC	circular
Ohashi et al., 1987	flintglass/BC/BSO	both types
Rochford et al., 1994	YIG	rectangular

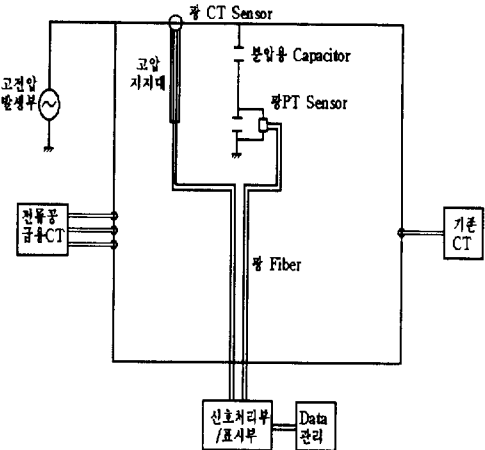


그림 11. 광센서의 현장 실험 구성도

이외에도 다중모드 광섬유를 단지 광의 전송로로써 사용하고, 결정 등에서 일어나는 자기 광학효과를 이용하여 전류 센서로 구현한 예도 많이 있으며, 몇 가지 예를 표 4에 나타내었다. 그림 11에는 BSO($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) 결정을 이용하여 154kV에 흐르는 전류를 실제 현장에서 1600A까지 측정 실험한 광전류 센서의 현장 구성도를 나타내고 있다[11]. 실험한 결과 측정 오차는 비선형특성을 보정하지 않은 경우는 약 $\pm 5\%$, 보정한 경우 약 $\pm 1\%$ 이내의 값을 얻을 수 있었다.

3.2.2.1.2 전기광학 효과

어떤 종류의 결정에 전계를 인가하면 전계 강도에 비례하는 굴절률 변화가 생기는데 이러한 현상을 전기광학 효과라고 하며, 일명 Pockels 효과라 한다. 만일 길이가 L이고 전기 광학 계수가 γ_{41} 인 $\sqrt{3}m$ 에 속하는 결정, 예를 들면 BGO_{12} 에 전계 E를 $\langle 110 \rangle$ 방향으로 인가해 줄 때 $\langle \bar{1}10 \rangle$ 방향으로 진행하는 두 성분 사이에 생기는 위상차 δ 는

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 \gamma_{41} EL = \pi \frac{V_a}{V_\pi} \quad (17)$$

으로 표시된다[12]. 여기서 V_π 는 반파장 전압으로써 $\lambda_0/2n_0^3\gamma_{41}$ 와 같고, $V_a (=EL)$ 은 인가 전압이다.

또한 수광 소자에서의 광 강도 P는

$$P = P_0 \left(1 + \sin \frac{\pi V_a}{V_\pi} \right) \quad (18)$$

으로 나타낼 수 있다 위 식에서 P_0 는 인가전압이 0일 때의 광강도이다. 이때, 주로 사용하는 다중 모드 광섬유는 광의 전송로로써만 사용하고 결정을 센서로 이용한다.

표 5에 이의 대표적인 예를 나타내었다. 최근에는 일체형 광전류 전압 센서로 국내에서 그 연구 결과가 발표된 바 있다[13].

표 5. 결정을 전압(전계) 센서로 사용한 예

Author	Crystal	Range	Linearity	Remarks
Hamasaki et al., 1980	BSO	300 V	1%	
Kyuma et al., 1983	BGO ₂₀	200 V	0.5%	
Tada, 1983	BSO	1400 V	good	온도보상
Kuroda, 1985	BGO ₂₀	44 kV	—	1%accuracy GIS tested
Shibuya and Ohno, 1985	BSO	600 V	0.5%	
Mitsui et al., 1986	BSO	500 V	good	multilayer structure
Kanoi et al., 1986	BGO ₁₂	500 V	0.2%	transverse field
Chatrefou and Meytueix, 1987	—	18 kV	—	0.2% accuracy
Lec, 1990	BGO ₁₂	수KV	good	온도보상

GIS - Gas (SF₆) insulated substation
 BGO₁₂ = Bi₄Ge₃O₁₂, BGO₂₀ = Bi₁₂GeO₂₀

3.2.2.2 광 온도 센서

기존의 온도센서는 온도에 관한 정보가 전기적인 신호로 나타나기 때문에 전자기파의 영향을 많이 받는데 비해, 광 온도센서는 이의 영향을 전혀 받지 않으므로 기존의 센서로 측정할 수 없는 곳의 온도 측정이 가능하다. 즉, 고주파를 이용한 가열장치, 고전압 장치 등의 온도 측정에 탁월한 기능을 발휘한다. 이는 공간적으로 측정하고자 하는 범위에 따라 분포형 센서(distribution sensor)와 국소형 센서(point sensor)로 분류하며, 여기서는 국소형 광온도 센서만 설명한다.

3.2.2.2.1 광로 차단형 온도 센서(limit 형 센서)

광섬유를 이용한 photo-interruptor의 중간에 차단판으로 바이메탈이나 수은주 등을 두어, 설정온도 이상이 되면 광로를 차단하는 비교적 원리가 간단한 방식이다. 이런 종류의 광섬유 온도 센서를 그림 12에 나타내었다.

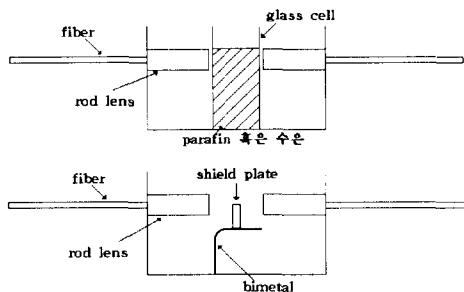
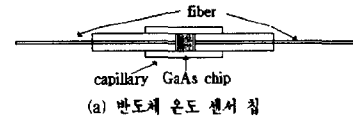


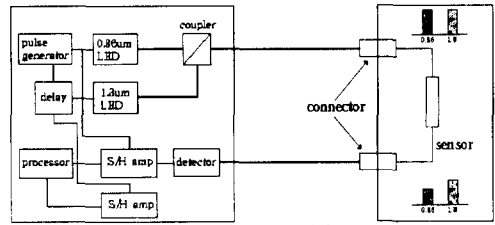
그림 12. 광로차단형 센서

3.2.2.2.2 광 강도 변조식 온도 센서

전술한 limit형 센서와는 달리 실제로 온도를 계측하기



(a) 반도체 온도 센서 칩



(b) 결계 센서 구성도

그림 13. 투과광 변조 방식 센서의 구성

위한 광섬유 온도센서로서 광로내에 온도에 따라 투과율이 연속적으로 변화한다. 파장 0.83μm의 AlGaAs LED를 광원으로 사용하고 반도체 결정칩을 감지부로 사용한다. 투과광 변조 방식의 온도 센서를 구성한 예를 그림 13에 나타내었다.

이는 반도체 결정이 온도에 따라 흡수하는 파장의 변화를 이용하는 것으로, 온도가 상승함에 따라 흡수단이 장파장 쪽으로 이동한다. 따라서 수광소자에 입사되는 빛의 세기가 온도에 따라 변하게 된다. 여기서 주목할 점은, 외부 온도 변화에 대해 흡수단의 이동과는 무관한 파장대(1.3μm LED)를 참조광으로 사용하여 광 경로상에서의 손실의 변화를 보상할 수 있도록 하였다. 이와 비슷한 형광(발광) 센서 방식도 있으며, 이러한 원리를 이용하여 이미 광 온도 센서를 상품화시킨 예를 표 6에 나타내었다.

표 6. 상품화된 광온도 센서

Principle (Manufacturer)	Semiconductor absorber (Mitsubishi Electric, Japan)	Semiconductor photoluminescence (ASEA Innovation, Sweden)	Phosphor A (Luxtron, US)	Phosphor B (Luxtron, US)
Range(°C)	-20 to 150	0 to 200	20 to 240	20 to 400
Accuracy(°C)	±2.0	±1.0	+2.0	+2.0
Sensor diameter(mm)	2	0.6 이상	0.7	1.6
Time constant(sec)	0.5	0.3	0.25	-
Fiber type	Silica:100μm core	Silica:100μm core	Polymer clad:40μm core	Silica fiber
Maximum fiber length(m)	300	500	100	300
Light source	AlGaAs LED	AlGaAs LED	Halogen lamp	Halogen lamp

이외에도 뜨거운 물체에서 방출하는 흑체복사량을 광섬유를 통해서 신호처리 함으로써 온도를 측정하는 광온도 센서가 있다. 분포형 광 온도 계측기는 후방산란 (back

-scattering) 되는 광을 이용하여 온도를 분포적으로 측정하는 장치로서, 고전압 전력계통 현장 등에 주로 응용되고 있다.

3.2.3 LDV(Laser Doppler Velocimeter)

레이저 광을 움직이는 물체의 입자에 조사하면, 산란광의 주파수가 조사광의 주파수로 부터 shift하는 현상을 Doppler 효과라 하고 이를 이용하여 속도 측정장치를 만든 것을 LDV라 한다. 이때, 후방 산란광의 도플러 주파수 f_D 는

$$f_D = \frac{2|\nu|}{\lambda_0} \cos \theta \quad (19)$$

으로 나타낼 수 있다 θ 는 레이저광과 피측정체의 속도 ν 와의 이루는 각도이다. 이의 응용으로 각종 속도 장치를 구성할 수가 있고, 특히 미쓰비시 등의 회사에서는 광섬유 LDV를 이미 상품화시켜 동맥 혈류 계측 장치로 널리 사용되고 있다.

3.2.4 기타 광응용 센서

앞에서 살펴본 센서 외에도 광섬유 응용 센서는 그 계측 분야가 다양하다. 그 분야로는, 가스, 풍향, 풍속, 수위, Strain, 압력(음압), 변위, 진동 등이 있으며, 항공기에 광섬유를 신경망처럼 설치하여 항공기의 정상 상태를 감지하는 Smart Sensor도 연구되고 있다[14]. 표 7에 현재 적용되거나 연구되고 있는 각 분야에서의 광섬유 센서의 응용에 대한 개요를 나타내었다.

표 7. 광섬유 센서의 응용 분야

분 야	목 적	광파이버 센서에 의한 계측항의 예
전 력	전력계측 기기 상태 감시	전압, 전류(광PT, 광CT) 자체/전압, 자체/전류, 온도, 진동
	송전선 감시 침입 감시 화로 내부 감시	온도, 번개 감지 이미지 센서, 진동 이미지 센서
기 계 공 업	공정, 제품 관리	치수, 형상, 위치, 표면 형성
	제어 위치 결정 외관 검사 동작인식 프로세스량 계측	속도, 회전각, 이동량 손상검사, 평활도 변위, 진동, 가속도 온도, 유속
석유화학공업	프로세스량 계측 및 온도 감지	온도, 압력, 유량, 레벨 가스감지, 기포누설, 열, 광, 연기감지
교 통		속도, 가속도, 위치
의 료		온도, 혈압, 혈류

4. 결 론

지금까지 광섬유 센서의 원리와 응용에 등을, 중요한 센서 중심으로 살펴보았다. 종합하면, 광섬유 센서는 비접촉

계측, 고속, 고정밀도, 무유도성, 고절연성, 경량, 소형 및 내잡음성 등의 특징 외에도, 광섬유 전송계와 광정보 처리계 등의 다른 광시스템과의 정합성도 우수하다. 또한, 최근에는 각종 공장, 전력계통, 의료시스템 등 이 대규모화, 복잡화, 자동화, 무인화됨에 따라 계측 정보가 증가되고 다양화되고 있다. 따라서, 기존의 전기 전자식 센서와 전기 케이블을 이용한 계측 제어 방식으로는 계측하기 어려운 환경에서도 광섬유 센서를 사용하면 보다 신뢰성이 높고 고품질의 계측 제어가 가능하므로, 국내외의 여러 산업체, 연구기관, 학교 등에서 기초 기술부터 응용 기술까지 폭넓게 연구개발이 진행되고 있고, 이의 현장적용이 서서히 진행되고 있다[15, 16].

앞으로, 각 종 광소자와 전자소자의 집적화 (광소자 집적회로 등)도 점차적으로 진행될 것으로 예상되며, 광센서의 신뢰성과 성능의 향상, 다기능화, 인텔리전트화가 진행될 것으로 예상된다. 또한, 광 A/D 변환, 광공간 병렬처리 등의 기능을 가진 광 정보 처리 기술을 바탕으로, 광정보 처리 및 축적(광 Memory), 광 에너지 전송, 광 Actuator 등의 기술이 개발되면, 광계측, 광전송 기술과 함께 종합적인 광계측 제어시스템이 조만간 실현될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Culshaw, D.E.N. Davies, and S.A. Kingsley, "Multimode Optical Fiber Sensors," Physics of Fiber Optics, Vol. 2, pp. 512-528, 1981
- [2] T. Mitski, et al., "Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic Field Sensors," IEEE SM442-8, 1986
- [3] K. Bohnert, H.Brandle and G.Frosio, "Field Test of Inteferometric Optical Fiber High-Voltage and Current Sensors," 10th OFS Conference, pp. 16, 1994
- [4] A.D.Kersey, M.J.Marrone, K.P.Koo and A.Dandr-idge, "Optically Demodulated Interferometric Sensor System," 10th OFS Conference, pp. 343-346, 1994
- [5] Kyung S. Lee , Hyun S. Kang , Moo Y. Park, "Fiber Optic magnetostrictive transducers for magnetic field sensing," Optical Eng., PP. 3577-3582, 1995
- [6] J.D.Nuttal, "Requirements for Gyroscopes for Inertial Navigation", IEEE Proc.J.Vol. 132, pp. 250-254, 1985
- [7] Aronowitz, F., "The laser gyro," in Laser Applications, edited by Monte Ross, Academic Press, New York, PP. 113-200.
- [8] G. Sagnac, C.R.Acad. Sci. 95, 708, 1913
- [9] R.P. De Paula and E.L. Moore, SPIE. 478, pp. 3, 1984
- [10] Cancellieri, "Single-Mode Optical Fiber Measurement," pp. 294, 1993
- [11] 송정태, 김정진, 송우성, 김충식, 이광철, 전승익, "광응용 전류 전압계의 현장실험," 대한전기학회, 하계학술

- 대회 논문지(B), pp. 794~798, 1992
- [12] Kyung S. Lee, "Electrooptic Voltage sensor : birefringence effects and compensation methods," Appl. Opt., PP. 4453-4461, 1990
- [13] 김영수, 김요희, 조홍근, "일체형 광전류 전압 센서 제작 및 특성," 제3회 광전자공학 학술회의 논문집, pp. 244~246, 1996
- [14] E.H. Urruti, P.E. Blaszyk, and R.M. Hawk, "Optical Fibers for Structural Sensing Applications," Proc. SPIE 986, 158, 1988
- [15] P.A. Nicati and Ph. Robert, "Stabilized Sagnac Optical Fiber Current Sensor Using One Phase and Two Amplitude Modulations," 8th OFS Conference, pp. 402, 1992
- [16] Kiyoshi Kurosawa and Satoru Yoshida, "An Optical Fiber Type Current Sensor Using the Faraday Effect of the Flint Glass Fiber," 10th OFS Conference, pp. 25, 1994

저 자 소 개



송정태(宋玎台)

1958년 5월 26일생. 1982년 2월 한국항공대 통신공학과 졸업. 1984년 2월 연세대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1983년 12월~1993년 2월 LG전선(주) 광 시스템 연구실 선임 연구원. 1993년 3월~현재 대우공업전문대 전자과 전임강사. 관심분야: 광센서, LASER, 자동제어 및 산업전자.



이경식(李景植)

1955년 2월 22일생. 1979년 2월 성균관대 전자공학과 졸업. 1978년 12월~1980년 8월 한국통신기술연구소(현. 전자통신연구소) 근무. 1982년 2월 University of Colorado (Boulder)대 석사. 1985년 8월 University of Colorado대 박사학위 취득(Electrical Engineering dept.). 1985년 9월~1986년 8월 University of Colorado대 연구원. 1986년 9월~1988년 7월 미국립표준연구소(NIST) 근무. 1988년 7월~1990년 2월 미 TACAN Corp. 근무. 1990년 3월~1994년 3월 성균관대 전자공학과 조교수. 1994년 4월~현재 성균관대 전자공학과 부교수. 관심분야: 광통신, 광센서, photonic devices 등.