



기술정보

광섬유센서의 적용기술

(Properties and Applications of Optical Fiber Sensor)

박한규
(Han-Kyu Park)
(연세대학교 전자공학과 교수)

I. 서론

1960년대 레이저가 발명되면서부터 계측 및 통신 분야에 새로운 장이 열리게 되었다. 특히 계측 분야에 있어서 광의 역할은 지대하다고 할 수 있다. 기존의 전기적 혹은 기계적 센서에서는 전자기적 유도 현상, 기계적 마모등의 문제점 이외에도 측정 정밀도 등의 신뢰성이 떨어 진다는 단점을 지니고 있으나

광계측의 도입은 이런 문제점들을 쉽게 해결해 줄 뿐 아니라 비접촉식 혹은 원격 계측(Remote Sensing)을 가능하게 한다.

현재 광 계측 기술은 미소 변위, 거리, 가속도, 전류, 압력, 온도 등의 기본 물량들을 비접촉으로 정밀하게 측정하는 분야 뿐만아니라, 공장 자동화, 항공기, 기초 과학, 의료, 군사 분야에도 많이 응용되고 있으며, 최근에는 첨단 전자 공학과 광 기술을 접목하여, 데이터를 실시간으로 처리할 수 있는 정밀

표 1. 광계측기의 종류 및 특성

기본물량	광 계 측 기 의 종 류	특 성
길 이	간접계 광펄스자연법 기하광학법	nm~수Km 분해능: 0.08 μm
미소변위 진 동	Moire 간섭계, 홀로그래피 간섭계 스펙클 간섭계	분해능=수 μm
속 도	Laser Doppler Velocimeter (LDV)	
각종물량	광섬유 센서	* 표2참조
온 도	Optical Pyrometer, 광섬유 센서	
입 자	회절법: Fraunhofer 회절	0.1-1000 μm
회 전 각 속 도	광 자이로스코프 (Optical Gyroscope) 광섬유 자이로스코프	감도: 10 ⁻⁵ / hr 감도: 10 ⁻⁴ / hr
표면 profile	optical profilometer 간접계 기하광학법	
기 다	삼차원 형상(Tomography, 홀로그래피 간섭계 등) 두께, 선폭(광 주사법) 영상인식(광 패턴인식) 부품성능(Twyman-Green 간섭계)	

광섬유센서의 적용기술
광계측기도 개발되고 있다.

본 고에서는 이러한 광계측 분야 중에서, 일반적인 광섬유 센서의 원리를 간략히 기술하고 특히 광유향 센서를 중심으로 원리 및 기본 특성을 기술하고자 한다.

II. 광계측기

일반적으로 광계측 분야는 그 종류가 다양하고 전자적 혹은 역학적 계측이 곤란한 분야에서도 계측이 용이하며, 그들의 계측정밀도가 대단히 높다. 표1은 여러가지 광계측기의 종류 및 그 특성을 정리하였다.

모런 최근에는 빛을 유도시킬 수 있는 광섬유 및 박막 도파로와 레이저를 이용한 여러 종류의 센서가 개발되고 있다. 여기에는 전류, 전압 센서, 유속 센서, 진동 센서, 입력 센서, 변위 센서, 두께 센서, 회전 각 센서 등이 있다. 표 2에 광섬유를 이용한 광 계측기의 종류에 대해 정리하였다.

표 2. 광섬유 응용 센서의 종류 및 구분

계측물리량	광 변 조		광 현 상
전류, 자계	편 위	광 상	파라데이 효과 간섭현상
	편 위	광 상	Pockels 효과 간섭현상
온 도	광 강 도		차폐판에 의한 광로 차단, 반도체의 흡수율변화, 열광방사
	광 강 도, 스펙트럼		반열체의 방사
각 속 도	편 위	광 상	부굴절변화 Sagnac 효과
	주 파 장	수 파 장	도플러 효과 마이크로 밴드 수식
사 가 속 도	편 위	광 상	차폐판에 의한 광로 차단 다이아그램에 의한 방사각도 변화
	편 위	광 상	광탄성 효과 간섭현상
기 타	편 위	광 상	굴절률의 변화 굴절률의 변화
	공해 계측기 의료용 계측기 (전압, 온도 등) 사중 삼입용, 군사용 계측기		

III. 광섬유 센서

본고에서는 표 2에 열거한 여러가지 광섬유 응용 센서 중 비교적 많이 사용되고 있는 것들에 관해 그 원리와 특성을 간단히 기술하고자 한다.

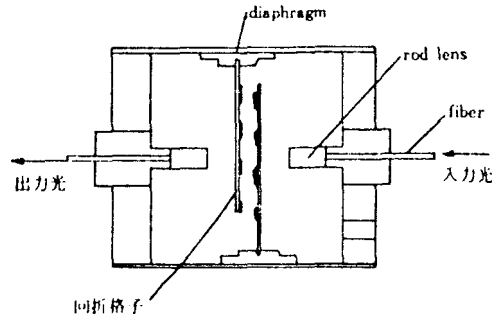


그림 1. 압력 센서

A. 압력 센서

그림 1은 광섬유로부터 조사되는 광을 Grin 로드 렌즈에 의해 빙행광이 되도록 한 다음 두 개의 서로

근접한 회절 격자를 투과하여 다시 광섬유로 입사시킴으로써 압력에 따른 회절 격자의 변위에 의해 발생하는 투과광의 세기 변화로부터 diaphragm에 가해진 압력을 계측하는 센서이다.

B. 온도 센서

온도 센서는 광섬유의 경로에 흡수재(absorber), 액정(liquid crystal), 또는 형광체를 놓아서 만들거나, 광섬유 자체를 transducer로 만든다. 이중 광섬유를 이용한 경우, 온도의 변화 ΔT 는 빛이 광섬유를 통과해 나가면서 위상의 변화량 $\Delta\phi$ 를 만든다. 위상 변화량은 쉽게 간섭계로 검지할 수 있으며, 위상 변화량은

$$\Delta\phi / \Delta T = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right)$$

로 주어지며, 실리카 광섬유인 경우에 굴절률의 변화가 우세하다. 또한 최근에는 광경로에 반도체 흡수체(semiconductor absorber)를 놓고, 온도의 변화에 따른 반도체의 Bandgap의 변화를 이용하여, 이때 흡수되는 광량으로부터 온도의 변화를 감지하는 센서가 개발되고 있다.

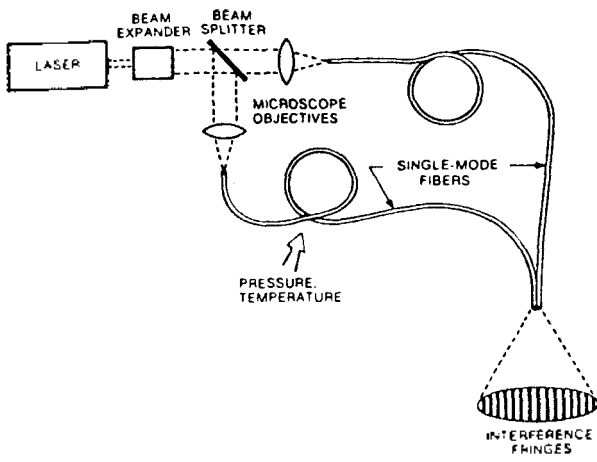


그림 2. 일반적인 온도 센서

C. 광섬유 자이로스코프

회속도 Ω 로 회전하는 간단한 Sagnac 간섭계를 그림 3에 보였다. 광원에서 나온 빛은 광분할기(Beam splitter) B를 거쳐 한 빔은 광경로 BCDAB를 따라 시계 방향(CW)으로 회전하고, 다른 한 빔은 BADCB를 따라 반시계 방향(CCW)으로 회전한다. 이 두 빔은 B에서 합해져서 간섭 무늬 검출면 F에 입사 된다.

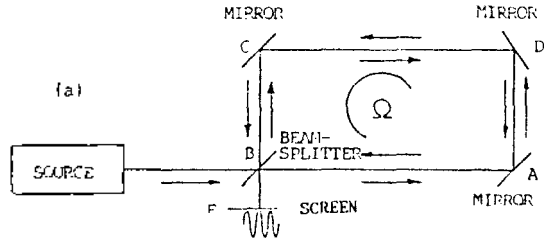


그림 3. Sagnac 간섭계

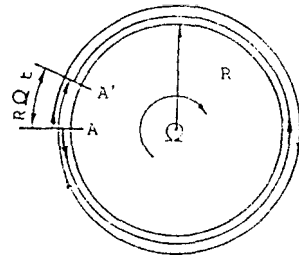


그림 4. 폐광로 원형 간섭계

이 때 위상차를 도출하기 위하여 그림 4와 같은 폐광로 원형 간섭계를 생각하면, 간섭계가 Ω 로 회전할 때 점 A에서 CW 빛 CCW로 출발한 두 빔이 다시 출발점인 A'에 도달할 때까지 광로의 길이는

이 때 위상차를 도출하기 위하여 그림 4와 같은 폐광로 원형 간섭계를 생각하면, 간섭계가 Ω 로 회전할 때 점 A에서 CW 빛 CCW로 출발한 두 빔이 다시 출발점인 A'에 도달할 때까지 광로의 길이는

$$L_{cw} = 2\pi R + R\Omega t_{cw} = C t_{cw}$$

$$L_{ccw} = 2\pi R - R\Omega t_{ccw} = C t_{ccw}$$

로 주어지며, 따라서 두 빔의 전파 시간차 Δt 는

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = \frac{4\pi R^2 \Omega}{C^2 - R^2 \Omega^2} \approx \frac{4\pi R^2 \Omega}{C^2} \quad (R\Omega \ll C)$$

이 된다. 따라서, 간섭 무늬 이동수는

$$Z_f = \frac{4A}{C\lambda_n} \Omega$$

광섬유센서의 적용기술

로 주어지며, 여기서 A는 간섭계의 패광도로 둘러싸인 면적이며 λ_0 와 C는 각각 진공에서의 빛의 파장과 속도이다.

결국 이동한 간섭 무늬의 수를 계산함으로써 각속도를 측정할 수 있다.

D. 광자계 센서

광섬유 전류 센서는 광섬유 속을 진행하는 빛이 여러 요인에 의해 마치 광학적으로 균일하지 않은 매질속을 진행 할 때와 같은 복굴절을 일으키는 현상을 이용하여 전류 측정용 센서를 구성한다.

일반적으로 광섬유 속을 진행하는 선형 편광된 빛은 유도된 전기장, 혹은 자기장에 의한 Pockels 효과 및 Faraday 효과에 의해 편광각이 회전하는데 이를 이용하여 상대적인 전류 측정이 가능하게 된다. 그림 5는 광자계 센서의 구성도로, 자장내에 놓여 있는 광섬유를 편광된 빛이 통과하면 편광각이 회전하게 되며, 이 회전된 양은 전류 크기에 비례한다. 그리고 검광자를 통과한 빛의 세기를 측정함으로써 전류의 상대적인 크기를 측정할 수 있다.

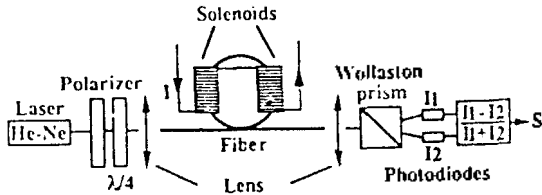


그림 5. 광 자계 센서

E. 광전압 센서

BSO를 이용한 광전압 센서의 일반적인 구성도는 그림 6과 같다. 그림에서와 같이 4개의 광소자로 구성되어 있으며, 여기서 선형 편광자는 랜덤한 입사빔을 선형 편광된 빛광원으로 바꾸어 주며, $\lambda/4$ 는 선형 편광된 직교 성분을 $\pi/2$ 만큼 위상 지연시켜주는 위상 지연기로서 광을 어느 각도에서나 일정한 크기로 만든다.

BSO poekel 결정의 양면에 투명 전극(Transparent electrode)을 입히고 두 전극 사이에 전압을 인가하면 광의 전파 방향과 동일한 방향의 전계가 생기며, 센서에 인가된 전압에 따라 결정을 통과하는 빛은 원편광에서 타원 편광으로 바뀐다.

이 때 출력단의 광세기 T는

$$T = T_0(1 + \pi \frac{V}{V\pi})$$

이 되며, 여기서 V : 인가 전압, $V\pi$: 반파장 전압이다.

따라서 광 세기 T를 측정함으로써 인가 전압 V를 알 수 있다.

IV. 광음향 센서

음향등의 분포 측정이 가능한 광섬유 센서는 1970년대 후반부터 연구되었으며, 이미 상용화된 센서도 많이 있다. 이러한 광섬유를 이용한 광음향 센서

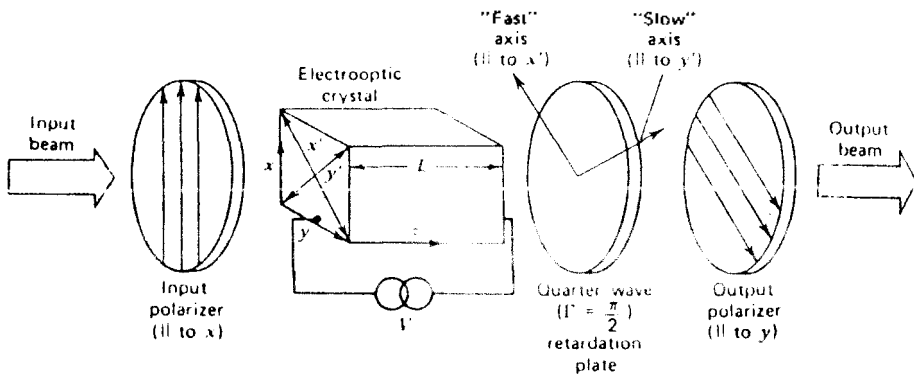


그림 6. 광전압 센서의 구성도

의 기본적인 원리는 음파가 매질속을 전파해 나갈 때, 주기적인 압력의 변화를 매질내에 주게 되므로 매질의 굴절율이 변하게 되며, 여기에 광학적 간섭계를 이용하여 음파의 굴절 여부를 감지하게 된다.

개발 초기의 광음향 센서는 음파가 수중에 전파해 나갈때 광을 직접 조사하는 방식을 취했으나, 이 방법은 이론적으로는 타당하지만 레이저의 섭동 등에 의한 시스템 잡음 및 레이저 빔의 직접 조사에 관계되는 여러가지 문제 때문에 신호의 검파에 많은 제약이 있었다.

그러나 그후 레이저 빔의 전송로로 광섬유를 사용함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있었다.

광섬유를 사용하여 센서를 구성할 경우 일반적으로 편광 상태를 이용한 편광형 센서(polarimetric sensor)와 두 빔(기준빔과 신호빔)간의 간섭 현상을 이용한 간섭계 센서(interferometric sensor)로 구분한다.

본 고에서는 광음향 센서를 구성함에 있어서 가장 보편적인 Mach-Zehnder 간섭계 센서의 일반적인 원리 및 특성에 관해 기술한다.

A. Mach-Zehnder 간섭계의 구성

일반적으로 음파 센서는 Mach-Zehnder 간섭계로 구성되는데 이를 그림 7에 보였다.

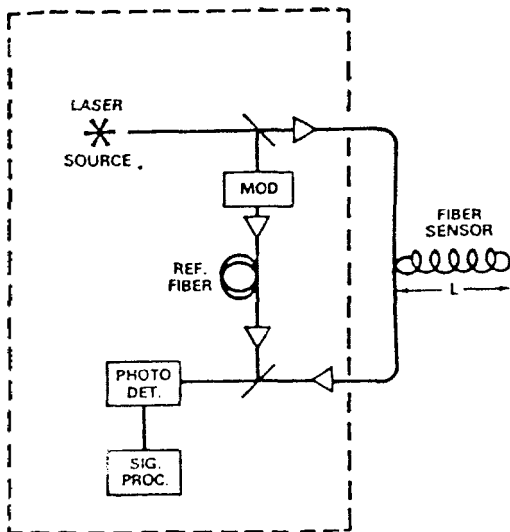


그림 7. Mach-zehnder 간섭계

Laser에서 나온 빔은 둘로 나누어져, 그 중 한 빔은 기준 Arm으로 전파되고, 다른 한 빔은 음파장(Acoustic Field)에 놓여 있는 신호 Arm으로 전파하게 된다. 기준 Arm에는 빔의 주파수를 천이시키거나(예, Bragg Cell) 위상을 변조시키는(예, PZT Stretcher) 소자가 필요하다.

두 빔은 광검출기 상에서 서로 간섭을 일으키며, 이 간섭 신호로 부터 적절한 복조 과정을 거치면 신호 Arm에서 발생한 위상 변화량을 검지할 수 있게 된다. 복조 방식으로 FM 판별법, 안정화된 호모다인(Stabilized Homodyne), 합성 헤테로 다인(Synthetic Heterodyne) 등 여러가지 방식이 있다.

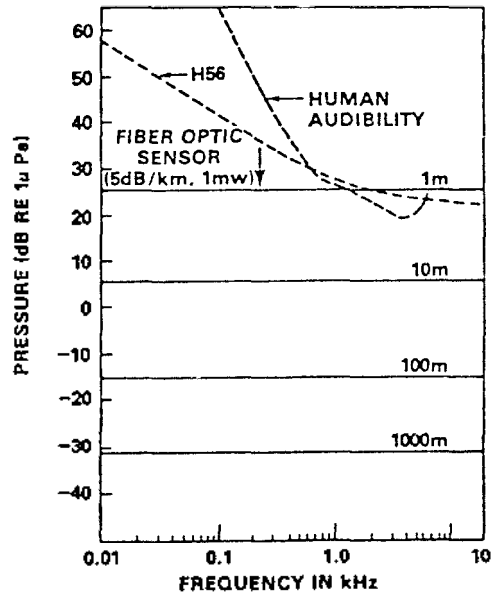


그림 8. 주파수에 따른 임계 감지도

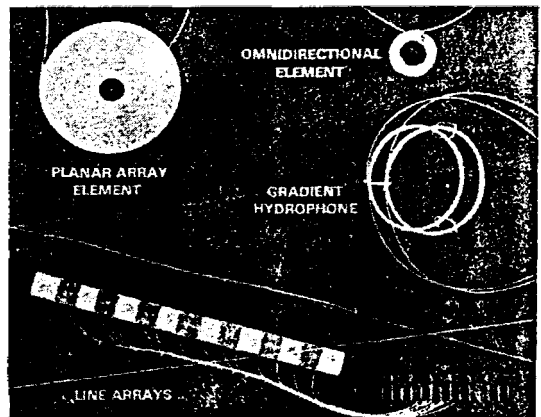


그림 9. 여러 가지 광섬유 음향 센서

광섬유센서의 적용기술

신호대 잡음비가 산탄 잡음(Shot Noise) 등에 의해 결정된다고 하였을 때 간섭계형 센서가 측정 가능한 감도를 그림 8에 보였으며 임계 감도(Threshold Detectivity)를 비교하기 위하여 인간의 귀와 기존의 PZT 센서의 감도를 함께 나타내었다. 그림 8에서 감지 가능한 음압은 광섬유의 길이가 증가함에 따라 작아짐을 알 수 있다.

그리고 광섬유 음향 센서가 갖고 있는 특징 중의 하나로 기하학적인 유연성을 들 수 있는데 그림 9에 그 예들을 보였다.

왼쪽 위의 센서는 평면형으로 가볍고 유연하다. 그리고 왼쪽 아래의 것은 array 센서로 음파의 파장보다 훨씬 길게 만들 수 있으며, 따라서 방향성 수신기로 적절하다. 오른쪽에 있는 센서는 기준 Arm과 신호 Arm을 근접시켜, 음압을 측정하는 것이 아니라 음압이 경도를 측정함으로써 음파의 전파 방향을 감지할 수 있다.

B. 주파수대의 분류

빛의 전파해 나가면서 음파에 의한 위상 변조는 보통 주파수대를 3영역으로 나누어서 고찰하게 된다.

주파수대는 특별한 센서의 구성을 통하여 분류하는 것이 타당하며(예를 들면, 반경 d를 갖는 광섬유를 반경 D가 되는 루프로 이루어진 센서). 크게 저주파수대, 중간 주파수대, 그리고 초고주파대로 나눈다.

저주파대는 음파의 파장이 루프의 반경 D보다 훨씬 작은 영역으로, 음파는 광섬유에 가해지는 정수압(Hydrostatic Pressure)을 변화시킨다.

중간 주파수대는 음파의 파장이 반경 D와 비슷하지만 광섬유의 반경 d보다는 훨씬 작은 영역으로, 이 때는 음파의 전파 방향으로의 압력의 경도가 중요한 인자가 된다.

마지막 주파수대 : 고주파수대(High Frequency)로 음파의 파장이 광섬유 반경 d보다 작거나 같은 영역이다. 이 때는 광섬유의 단면에 따른 탄성 스트레인 분포(Elastic Strain Distribution)는 이방성이 되며, 따라서 전파 모우드를 고려하여야만 한다.

그리고 광섬유에서의 빛의 위상에 따른 압력 감도

는 $\Delta\phi / \phi \Delta P$ 로 정의 되며, 여기서 $\Delta\phi$ 는 압력의 변화량 ΔP 에 기인한 위상 변화량이다.

따라서 압력의 변화량 ΔP 가 광섬유의 축방향의 스트레인 ϵ_z 와 방사 방향으로의 스트레인 ϵ_r 을 야기시켰다면, 이 때의 상대적인 위상 변화량은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \epsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11}+P_{12}) \epsilon_r + P_{12}\epsilon_z]$$

여기서, P_{11} 과 P_{12} 는 광섬유의 광탄성 계수(elasto-optic Coefficient)이고 n은 코어의 굴절률이다. 위 식의 첫째 항은 광섬유의 길이의 변화에 따른 위상 변화항이고, 둘째와 셋째 항은 코의 굴절률 변화에 의한 위상 변화항이다.

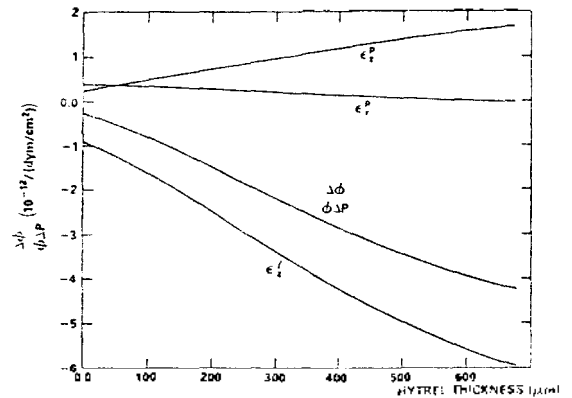


그림 10. 폴라스틱 코팅 두께에 따른 감도의 변화

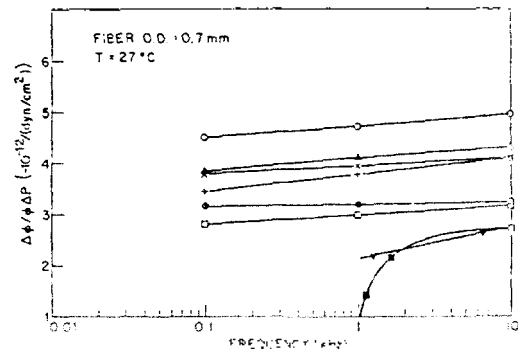


그림 11. 탄성 중합체에 따른 감도의 변화
○Teflon TFE I, ▲Teflon TFE II, × polypropylene 7823, +high density polypropylene, ● nylon, □ Hytel 7241, ▼ hard UV curable acrylate, and ■ soft UV curable acrylate.

a) 저주파대에서의 음파 감도

광섬유 센서의 크기가 수인치 정도 일때, 주파수대는 수 kHz 정도이며, 그림 10에 상용화되어 있는 단일 모우드 광섬유에 플라스틱 코팅 두께를 다르게 했을 때의 압력 감도의 변화를 나타내었다.

그림 11는 100Hz에서 10kHz 주파수대에서 광섬유의 탄성 중합체(Elastomer)에 따른 광섬유의 음파 감도를 나타내었다.

그림에서 센서의 감도는 하드 코팅일수록 주파수의존도가 상대적으로 낮아짐을 알 수 있으며, Soft UV로 코팅한 센서일 경우 2 kHz 이하에서 감도가 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 하지만 이 때는 저주파대에서는 음파 필터로, 고주파대에서는 음향 센서로 사용할 수가 있다.

b) 중간 주파수대의 응답 특성

이 경우 음향 센서의 응답 특성은 센서 소자의 기하학적인 구조에 따른다.

그림 12에 코팅의 두께에 따른 음향 센서의 감도를 보였다.

c) 초음파대에서의 응답 특성

반경 a인 등방성 매질의 광섬유가 z축 방향으로 놓여 있고 이 때 음파가 x 축 방향으로 전파하고 있을 때[그림 13], 음파에 의한 스트레인은 광섬유내를 전파하는 빛의 위상을 변화시킨다.

저주파대에서의 스트레인은 광섬유 단면을 따라

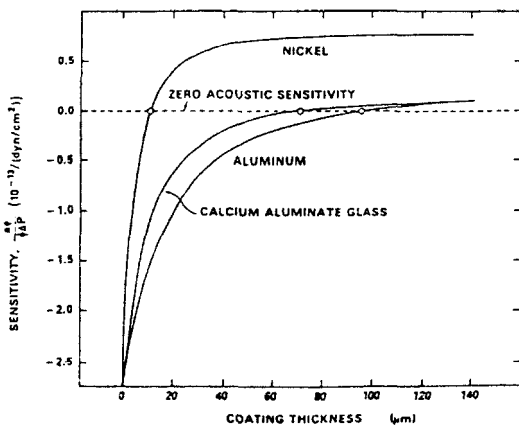


그림 12. 플라스틱 코팅 두께에 따른 감도의 변화

균일하지만, 고주파대에서는 더 이상 균일하지 않으며, 따라서 빛의 편광 상태를 고려하여야만 한다. 이 경우 광섬유는 선형 지연기로 모델링할 수 있다.

그림 13은 ka(k : Wave number, a : 광섬유의 반경)와 두 편광 상태의 위상 천이량과의 관계를 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 위상 천이 관계가 Radial Resonance(ka=6.0)를 기준으로 수직 편광파는 감소하는 반면, 수평 편광파는 증가하는 양상을 보인다. 그림 14에 음파에 의해 야기된 복굴절량과 파수(Wave Number)와의 관계를 보였다.

그림에서 보는 바와 같이 ka가 증가함에 따라 복굴절 효과가 급격히 증가하며, MHz 대에서는 음파에 의해 야기된 복굴절량을 음파의 변화 메커니즘으로 이용할 수 있다. 음파에 의해 야기된 복굴절

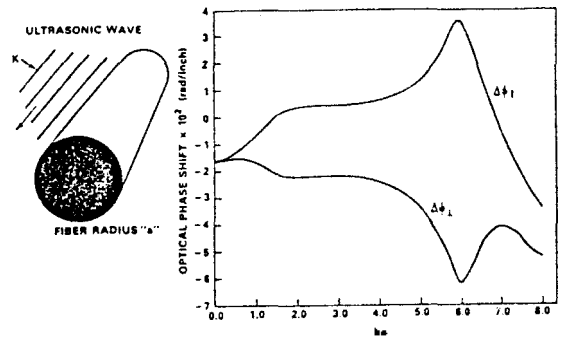


그림 13. 편광 모우드에 따른 ka와 위상 천이량과의 관계

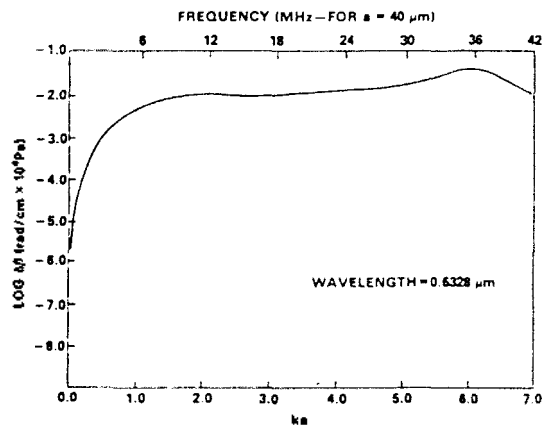


그림 14. 복굴절량과 ka와의 관계

량의 변화량에 바탕을 둔 센서는 두 편광 상태를 이용하여, 입력광은 광축에 대해45°로 입사시킨다. 그리고 출력단에 검광기를 사용하여 발생한 복굴절의 변화량을 측정한다.

C. 광섬유 Hydrophon

그림 15는 광섬유 Hydrophone의 한 예를 보였다. 정압(Static pressure)과 음압이 높은 경우 acousto-optic 결합 계수가 작기 때문에 측정 가능한 위상 천이를 발생시켜야 한다. 더구나 위상 천이는 앞에서 언급한 것처럼 압력과 상호 작용 길이에 영향을 받는다. 따라서 fluid 안에 손실이 작은 광섬유 코일을 넣으므로써 실질적인 상호 작용 길이를 크게하여 음파 감지도를 높일 수 있다.

그림 15에서 기하학적인 구조는 이중 광섬유 광로를 갖는 간섭계 형태를 취하고 음파장은 여러 주파수대에서 PZT를 구동시키므로써 발생한다.

그림 16은 여러개의 능동 센서를 사용하여 감지되는 광섬유 Hydrophone Array 센서의 구성도이다.

각 센서부는 partially-reflecting joint에 의해 다음 단으로 연결되며 RF 펄스에 의해 구동된 Bragg 소자는 광학적 펄스쌍 f_1 과 f_2 를 발생시킨다. 전송된 광 펄스 신호는 Array로 전파되고, 광의 일부분은 각각의 partially-reflecting joint에 의해 뒤로 반사된다.

이러한 두 반사광은 광검출기에 의해 Mix 되며 위상의 광학적 경로차에 의존하는 헤테로다인 신호를 발생시킨다. 이 방식을 사용하면 앞에서 설명한 방식보다 감도를 향상시킬 수 있으며 최근의 연구

동향은 고출력의 single mode gas 레이저 및 partially-reflecting Splices, 주파수 천이 등의 문제점을 개선하는 방향으로 연구되고 있다.

D. 문제점 및 향후 동향

기존의 센서는 Coupling 상에서의 잡음 및 주변 광학 장비 등에 의한 삽입에 의해서 S/N 비가 낮았다. 그러나 지금은 집적화된 광학 장비에 의해 크기를 대폭 줄였을 뿐만아니라, 광원과 광섬유간의 Coupling 상에서의 잡음등을 줄여 S/N 비가 많이 향상되었다.

실제로 음파장에 직접 사용하기 위하여 센서를 패키지화한 예를 그림 17에 보였다. 시스템을 패키지화 하고 성능을 향상시키기 위해서는 레이저 다이오드의 적주파 감응을 줄이고, 편광 유지 광섬유 및 광결합기의 개발에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 보이며, 그리고 센서의 바이어스 및 드리프트 문제 등도 해결해야 할 것이다.

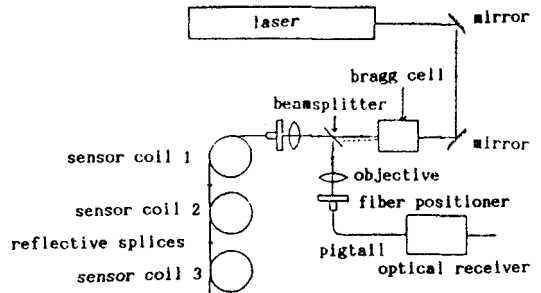


그림 16. 광섬유 Hydrophone Array

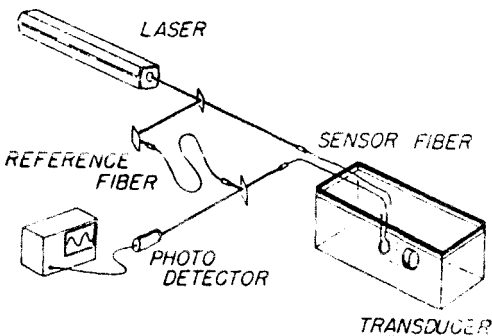


그림 15. 광섬유 Hydrophone 구성도

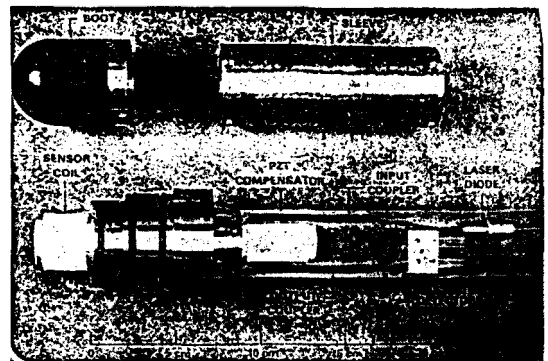


그림 17. 패키지화된 광섬유 음향 센서

V. 결 론

본고에서는 광계측 분야중에서 광섬유 센서에 대한 원리와 그 특성에 관해서 간략하게 살펴 보았다.

현재 광계측 분야는 전자 기술과 광학 기술을 접목해서 그 응용 분야가 확장되는 추세에 있고 여러 산업에 파급 효과가 큰 기술로 간주된다. 그러

나 우리나라의 경우 선진국의 광계측 분야의 신장율에 비교하면 아직 시작에 불과하고 연구 초기 단계에 있는 실정이다.

따라서 광계측기를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 현실에 비추어 볼 때 이 분야의 활성화 방안은 국가 정책적 차원에서 지원되어야 할 것이며, 관련 산업간의 유기적 결합이 필요하다고 하겠다.

筆者紹介

- ▲朴 漢 奎(정회원) 1941년 6 월21일생
- 1960. 3 - 1964. 2. : 연세대학교 공과대학공학사
- 1966. 8 - 1968. 7 : 연세대학교대학원 공학석사
- 1973. 9 - 1975. 6 : 불란서 파리 6 대학교(소르본느대학교) 공학박사(Ph. D)
- 1979 - 1980 : 스탠포드대학교 전자공학과 객원교수
- 1976 - 현재 : 연세대학교 전자공학과 교수
- 1989 - 현재 : 한국통신학회 부회장
- 1989 - 현재 : 21세기 위원회 과학기술분과 위원
- 1985 - 현재 : 문교부 학술진흥위원회 위원 및 공학분과 위원장
- 1990 - 현재 : 한국과학기술단체총연합회 이사