

# 光纖維의 非通信 分野 應用

崔 相 三 · 宋 桂 休

金 明 昱 · 鄭 教 龐

(韓國科學技術院 應用光學 研究室)

■ 차 례 ■

- 1. 광섬유의 기초
- 2. 像傳送 및 光傳送
- 3. 광섬유 감지기에의 응용
  - 3.1 광섬유 음파 탐지기
  - 3.2 광섬유 자기 측정기
  - 3.3 광섬유 회전율 측정기
  - 3.4 광섬유 가속도 측정기
  - 3.5 광섬유 편광성 감지기
  - 3.6 진폭성 감지기
- 참고문헌

광섬유에 대한 연구는 통신 시스템의 情報傳達 용량을 높이려는 기본 발상에서 출발하였다. 따라서 먼저 제 1 장에서 통신에의 응용을 중심으로 한 광섬유의 역사와 기초 사항을 간단히 살펴보고, 제 2 장, 제 3 장에서 본 해설의 주제인 비통신 분야 응용에 대해 기술한다.

## I 광섬유의 기초<sup>1), 2)</sup>

1960년대 이전에도 광파를 이용한 통신에 대한 관심이 있어 왔으나, 광원과 광파를 진행시키는 매개체 문제로 인해 비 현실적인 것으로 생각하였다. 1960년의 레이저 발명에 잇따른 1962년 반도체 레이저의 발진 성공과 1966년 Silica Glass 를 전송 매체로 쓸 수 있다는 Kao 의 논문은 새로운 가능성을 보여 주었다. 1970년에 미국의 Corning 유리 회사는 Silica 로 만들어 지고 광손실이 20dB/km 이하인 광섬유를 최초로 제조하여 광섬유의 연구·개발에 박차를 가하는 계기를 마련하였다.

그 후 미국 일본을 중심으로 한 세계 각국에서 많은 연구가 진행되어 광섬유의 손실이 거의 이론적 극한치인 0.2dB/km에 도달하게 되고, 광원 및 광검출기에 대한 난점도 거의 해결을 보게 되었다. 그래서 현재 전세계에 수 백개의 상용 통신 시스템이 이미 설치되었고, 미래의 정보화 사회의 도래에 대비

하여 현재의 동선을 이용한 통신 시스템을 광통신 시스템으로 대체중에 있다. 또한 선진국에서는 대서양, 태평양의 해저 케이블 설치를 시작하여 1990년 이전의 상용화를 계획하고 있다.

한편, 광섬유를 통신에 이용하는 연구와는 별도로, 감지기와 상전송을 비롯한 비통신 분야에 대한 응용 연구도 활발히 진행되어 왔는데 다음 장에서 상세하게 논의한다.

광섬유는 투명한 유전체로 만들어진, 길고 가느다란 선으로, 가시 광선 또는 적외선 영역의 빛을 유전체 경계면의 전반사 현상을 이용하여 유도시키는 역할을 한다. 중심부에 빛이 유도되는 코어와 그 외부에 굴절율이 약간 작은 클래딩이 있고, 바깥에 표면 손상을 막기 위해 피복을 입힌다. 광섬유를 분류해 보면 코어의 굴절율 분포에 따라 굴절율이 일정한 step-index 광섬유와 중심으로 갈수록 굴절율이 서서히 증가하는 graded-index 로 나누고, 한편 모드(빛이 전파되는 제적)의 수에 따라 단일 모드(single-mode) 광섬유와 다중 모드(multi-mode) 광섬유로 나눈다. 다중 모드의 경우 주로 graded-index 형태를 취하는 데 모드간의 분산(dispersion)으로 인해 단일 모드 광섬유 보다 대역폭이 작은 반면에 제조와 설치상의 편리함 때문에 수년전까지 대부분의 통신 시스템에 사용되었다. 그러나 더욱 큰 정보 전달 용량에 대한 필요성이 증가하고, 단일 모

드 광섬유가 수년전부터 집중적으로 연구·개발되어, 현재 설치되는 시스템은 대부분이 단일 모드 광섬유를 채택하고 있다.

광섬유의 중요한 2대 특성은 손실과 분산이다. 손실은 광신호가 광섬유 내를 전파됨에 따라 얼마나 감쇄되는가를 나타내고, 분산은 광펄스의 폭이 증가하는 정도를 표시하여 정보 전달 용량 즉, 대역폭을 결정한다. 이 두가지 특성이 광통신 시스템의 설계에 지대한 영향을 미친다. 광섬유의 손실을 유기시키는 현상으로서서는 재료의 흡수 현상과 산란 및 복사 현상을 들 수 있다. 재료 흡수란 광전력이 광섬유내에서 일부 열로 유실되는 현상이며, 주 요인은 금속이온 불순물과 수분에 의한 흡수이다. 산란에 의한 손실은 주로 Rayleigh 산란에 의하며, 밀도 및 성분의 국부적 불균일성에 의해 생긴다. 복사 현상은 광섬유의 구조적 결함에 기인하며, 그 예로서 코어·클래딩 경계면의 불균일성, 반경의 변화, 광섬유의 구부러짐 등이 있다. 광통신의 파장으로는  $0.8\mu\text{m}$ ,  $1.3\mu\text{m}$ ,  $1.5\mu\text{m}$  근방이 쓰이는 데, 이것이 손실과 밀접한 관련이 있다.  $0.8\mu\text{m}$  파장에서는 손실이 세 파장중에서 가장 크지만 광원과 광검출기의 개발이 앞서 있어서 시스템이 제일 먼저 실용화 되었다. 그 후 사용 파장이  $1.3\mu\text{m}$  로 옮겨지고, 현재  $1.5\mu\text{m}$  시스템에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있는 것은 궁극적으로 최저 손실 파장을 사용하여 중계구간의 거리를 최대화하는데 있다. 분산 특성을 크게 나누면 색분산과 모드간 분산이 있다. 색분산은 광원 파장이 이상적인 단색광이 아니고 유한한 범위를 가져서 서로 다른 파장의 빛이 광섬유 내에서 다른 속도로 진행하기 때문에 생기는 데, 재료 분산과 도파로 분산으로 이루어진다. 모드간 분산은 일정한 파장에서 다중 모드 광섬유의 경우에 여러 모드 간의 전파 속도 차에 기인한다. 단일 모드 광섬유는 색분산만 있는 반면, 다중 모드 광섬유는 색분산과 모드간 분산이 동시에 있게되나 색분산이 훨씬 작아서 주로 모드간 분산에 의해 영향을 받는다. 따라서 단일 모드 광섬유의 대역폭이 훨씬 큰 값을 갖는다.

Silica 광섬유의 제조법은 광섬유와 굴절률 분포는 같고 크기만 다른 preform을 합성하는 공정과 preform에서 실제 광섬유를 녹여 뽑아내는 drawing 공정으로 대별된다. 각국에서 처음부터 preform 제조법 개발에 역점을 두어와서, MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition), OVPO (Outside Vapor Phase Oxidation), VAD (Vapor Phase Axial Deposition) 방법 등 세 종류의 합성 방법이

제안되었다. MCVD 법은 1974년 Bell 연구소의 Mac Chesney 에 의해 개발되어 현재 세계적으로 가장 많이 사용된다. 이 방법에서는 가열된 glass 관내에  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$  등의 가스를 산소와 함께 흘려 보낸다. 그러면 산화 반응에 의하여 생긴 glass 미립자가 관내벽에 부착, 퇴적되어 glass 층이 형성된다. 처음에는 클래딩 층, 다음에는 코어 층을 만든 후, collapse 과정에 의해 중심부의 빈 공간을 없애 투명한 유리관을 만든다. 이 방법은 정밀한 굴절률 분포 제어가 가능해서 고 품질화에 많은 역할을 해왔으나, 코어 중심부의 굴절률이 떨어지고 양산성이 결여된 약점을 지니고 있다. OVPO 법은 미국의 Corning 유리 회사에서 개발한 기술로서, 막대 모양의 중심 재료(보통 graphite) 표면에 MCVD 법과 동일한 화합물을 붙여 넣어 glass 의 미립자 층을 얻는다. 다음에 graphite 막대를 빼낸 후 전기로에서 가열하여 preform을 만들고, MCVD 법과 같은 Collapse 과정을 거쳐 최종적인 preform을 만든다. 이 방법은 비교적 대형의 preform을 만들 수 있으나, 길이에 제한이 있고 양산성에 문제가 있다. VAD 법은 glass 합성을 축 방향으로 행하는 것으로 preform의 길이 방향으로 연속 제조할 수 있다는 것이 최대의 장점이다. 따라서 preform의 길이가 가장 커서 양산에 적당한 방법이라고 말할 수 있다. 이 방법에서는 공간적으로 dopant 의 농도 분포를 만들어 시간적으로 동시에 굴절률 분포를 형성하므로 종래의 방법과는 판이하다. 또한 코어 중심부에 굴절률의 떨어짐이 없어서 특성의 향상에 기여할 수 있다.

광섬유의 광특성 측정은 제조된 광섬유의 광학적, 구조적 성질을 정확히 규명하는 과정이다. 광섬유는 그 구조가 미세하므로 제조시에 구조를 확인하기가 어려우며 또한 원하던 특성과 다른 점이 생기기 쉽다. 따라서 정확한 특성 측정은 우수한 광섬유를 제조하는 데 매우 중요하다. 손실 측정은 광섬유의 출력단에서의 광전력을 입력단에서의 광전력의 비율로 나타냄으로써 가능해진다. 출력단에서 나오는 광전력을 측정하기는 쉬우나, 입력단에 결합된 광전력을 측정하기는 어렵다. 따라서 보통 주어진 길이의 광섬유를 통과해온 광전력을 측정하고, 다음에는 광섬유의 입력단 조건을 그대로 유지시켜서 입력단으로부터  $1 \sim 2\text{m}$  길이로 광섬유를 잘 절단한 다음, 나오는 빛의 전력을 측정하여 기준치로 삼는다. OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) 은 거리에 따른 손실 계수의 측정을 가능하게 하는 장치로서 또한 광섬유의 균열이 생기거나 결함(fault)이 생긴

지점을 진단하는 데에도 유용하다. OTDR은 광섬유 내에서 Rayleigh 산란에 의하여 후방으로 산란된 광전력을 측정하여 손실 계수를 산정함으로써 비파괴적으로 손실 계수를 측정할 수 있으며, 광섬유의 출력단에서의 측정이 필요없고 케이블로 만들어진 광섬유에 직접 사용이 가능하다는 장점이 있다. 광섬유의 분산 특성 또는 대역폭 측정 방법은 크게 나누어 두 가지가 있다. 즉 시간 영역에서 측정하는 임펄스 응답의 측정과 주파수 영역에서의 전달 함수의 측정이다. 시간 영역 측정에서는 아주 짧은 광펄스를 광섬유의 한쪽 끝에 입사시키고, 광펄스가 광섬유의 전체 길이를 통과한 후 분산에 의하여 넓어진 광펄스를 다른 한 끝에서 응답 속도가 빠르고 감지가 좋으며 선형 특성을 가진 광검출기를 사용하여 측정하고, 또한 입력단에서 광섬유를 1~2m로 절단한 후에 광펄스를 측정하여 기준 파형으로 사용한다. 주파수 영역 측정에서는 연속 발진하는 빛을 정현 함수적으로 변조하여 광섬유에 입사시켜서 광섬유를 통과한 후의 광전력의 변화를 측정함으로써 전달 함수를 구한다.

② 像傳送 및 光傳送<sup>3,4)</sup>

광섬유를 사용한 상전송에 관한 것은 오래전부터 많은 사람들의 호기심의 대상이 되었다.

원통형의 투명체에서 반복적인 全反射에 의해 빛이 전달될 수 있다는 것은 아주 오래전부터 알려져

왔다. 따라서 전자적 장치가 전혀없이 근거리에서 임의의 곳으로 전달하는 기술은 오래전부터 시도되었다. 전자적 장치를 전혀 사용하지 않고 임의의 상(image)를 전송할 수 있는 방법으로는 광섬유 다발(Fiber Bundle)에 의한 방법이 있다.

1930년 독일의 Lamm이 석영섬유 배열을 이용하여 간단한 상을 전달하는 것을 처음 시도한 것으로 알려졌으며 그 후 1951년 화란의 A. C. S. Van Heel 과 영국의 H. H. Hopkins 와 N. S. Kapany 가 본격적으로 유리섬유 다발을 이용한 상전송에 관한 연구를 했다.

상전송에 사용되는 광섬유 다발은 그 양단면에서 광섬유들의 위치가 완전히 동일해야만 하는데 이러한 광섬유 다발을 Coherent fiber bundle 이라고 부른다. Coherent 한 광섬유 다발은 수중 및 원자로 내부, 사람에게 해로운 개스가 들어 있는 곳 등의 원격탐사나, 내시경과 같은 의료기등 인체내부와 같이 협소하고 굴곡진 곳 또는 고온 고압 기타 가혹한 환경을 가진 곳의 상황을 시각적으로 직접 알 수 있다는데 큰 잇점이 있다.

최근 광통신에 관한 기술이 개발되어 광섬유의 광손실이 대폭개선되므로서 화상전송 특성이 좋고 분해능이 높은 화상전송 장치를 값싸게 보급할 수 있게 되었다.

상전송용 광섬유 다발 제작시 통신용 광섬유와의 차이점에 대하여 알아보자 .

상전송용 광섬유는 통신용과는 달리 단위 시간당

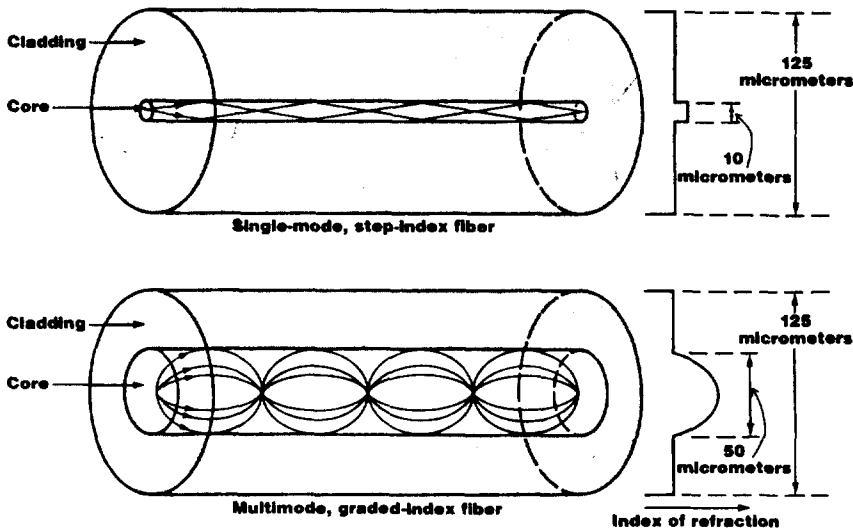


그림 1. 다중모드 광섬유와 단일모드 광섬유의 구조

정보량의 크기가 중요하지 않으므로 광섬유의 분산 특성에 대하여 고려하지 않아도 된다. 즉 광섬유의 굴절율 분포는 중요하지 않다. 가장 고려해야 할 사항은 광섬유 다발은 많은 광섬유 소선들이 밀집하여 있으므로 소선들간에 서로 간섭하는 효과가 크게 나타날 염려가 있다. 즉 소선과 소선과의 구별이 불분명해지는 경우이다. 마치 전화에 있어서 混線과 같이 한소선의 코어에서 빠져나간 빛이 다른 소선의 코어로 들어가게 되면 전송되는 화상의 分解能이 떨어지게 되어 본래의 화상을 제대로 재현할 수 없게 된다. 이것은 원하는 바가 아니다. 따라서 상전송을 목적으로 할 때 제일 고려해야 할 사항이다. 또한 코어와 클래딩의 비가 가급적 코어가 크면 클수록 좋다. 그러나 클래딩이 너무 얇으면 빠져나가는 빛의 양이 증가하게 되어 문제가 된다. 또한 각각의 소선들이 가능한한 많은 빛을 받아 들일 수 있게 하는 것이 좋다.

이와 같은 조건들을 만족시키기 위해서는 광섬유의 Numerical Aperture 를 크게 하는 것이 좋다. Numerical Aperture 를 크게 하면 전달되는 빛의 양이 증가 하고 광섬유를 빠져나가는 빛의 양이 줄어들므로 소선들 사이의 간섭효과를 줄일 수 있다. 또한 Numerical Aperture 가 크므로 해서 소선들의 굵기가 가늘어져도 다중모드 광섬유가 되게 하여 구부러짐에 의한 광손실을 낮추어 상전송용 광섬유다발의 휘는 반경을 작게할 수 있다. 소선의 굵기가 가늘수록 분해능을 높이는 데는 유리하지만 위와 같은 고려할 경우 코어의 직경은 수  $\mu\text{m}$  정도가 되어야 한다.

Numerical Aperture 를 크게 하는 것은 코어를 이루는 재료와 클래딩을 이루는 재료 사이의 굴절율의 차이를 크게 하는 것인데 Numerical Aperture 를 크게 하는 데는 광섬유를 이루는 재료의 굴절율의 변화폭과 굴절율차에 의한 열팽창 계수의 차에 의한

제작상의 제약이 다르게 되어 어쩔 수 없이 코어를 빠져 나가는 빛이 생기게 된다. 이와 같은 빛의 영향을 줄이기 위하여 클래딩층이나 그 바깥에 빛을 흡수하는 층을 만들어 준다. 이 흡수층은 주로 광섬유 재질에 금속이온을 불순물로 첨가하여 만들고 있다.

다음으로 고려할 사항은 소선의 배열이다. 상전송용 광섬유 다발의 가장 중요한 성질은 양단면에서의 각 광섬유 소선의 배열이 동일해야 한다는 것이다.

이와 같은 배열을 얻는 방법에는 여러가지가 있다. 균일하게 드럼에 감아 자르는 법, 압축공기를 이용하는 방법, 물의 흐름을 이용하는 방법등 여러가지가 알려져 있으나 어떤 방법이 가장 효율적인지는 잘 알려지지 않았다.

위에서 설명한 방법으로 제작된 광섬유는 광학계와 결합시켜 내시경 또는 Fiberscope 등으로 제작된다. 상품으로 제작된 Fiber Scope 는 소선의 수가  $1\text{mm}^2$  당 3000~5000개 이고 可視角度는  $3^\circ \sim 95^\circ$  정도이다. 굴곡반경은 의료용으로 제작된 경우는 수 cm 까지이다. 사용길이는 1m정도 부터 100m정도까지이다.

또한 이러한 Fiber 제조 기술을 이용하여 micro channel plate 를 제작하여 image intensifier 와 night vision 과 같은 군사 산업용 장비 또는 Picosecond Scale 에서의 시간측정등 초고속에 사용되

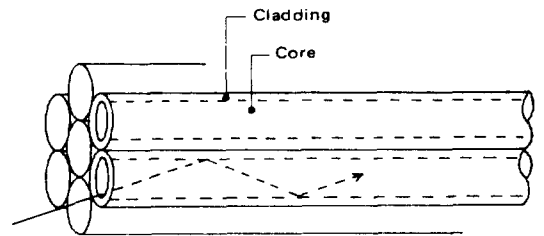


그림 2. 광섬유 다발의 구조

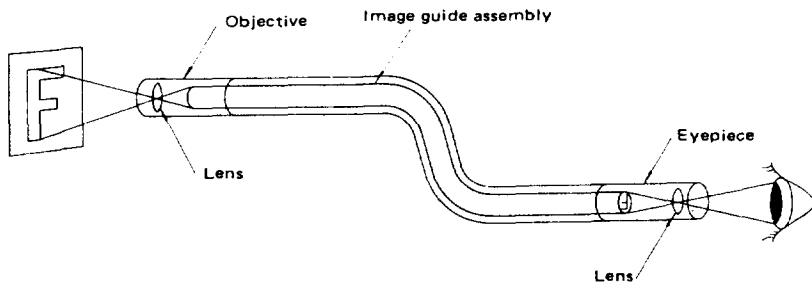


그림 3. Fiberscope의 상전송 원리도

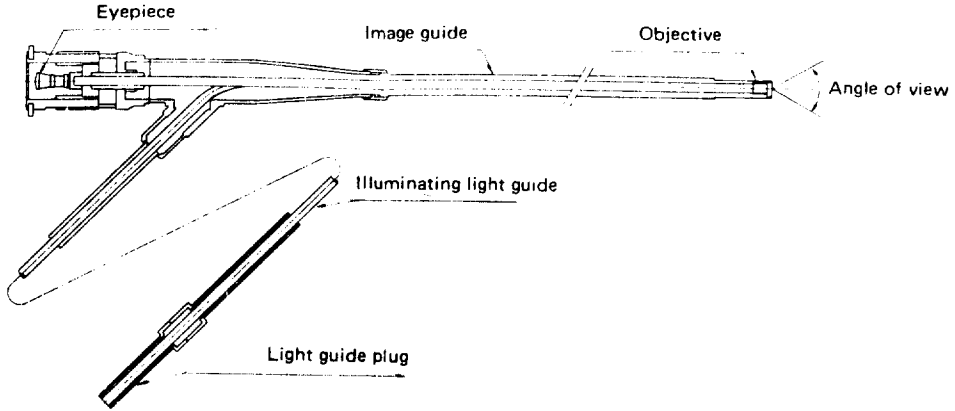


그림 4. Fiberscope의 구조

는 streak camera 등에 사용하고 있다.

광전송용으로 제작되는 광섬유에서 고려해야 할 가장 큰 점은 광손실이다. 광손실을 극소화하는 것이 가장 중요하다. 또한 많은 광량을 받아들일 수 있게 해야 한다.

광전송용으로 제작된 광섬유는 局所 조명용으로 만들어져 내시경이나 Fiber Scope 의 상전송용 광섬유와 함께 많이 이용되고 있다. 또한 대형건물의 중심부나 지하실 같은 곳에 태양광을 광섬유를 이용하여 조명하는 방법도 시도되고 있다.

수술 또는 금속의 절단 용접등에 쓰이는 Argon laser, CO<sub>2</sub> laser, YAG laser 등의 대출력 광전송에도 광섬유를 이용한 광전송이 시도되고 있다. 이때 광섬유의 흡수에 의한 광손실이 광섬유 자체를 발열시키거나 광섬유의 구조에 변형을 주어 광전송에 이상이 생기는 경우가 있으므로 광섬유 제작시 광섬유 구조의 불균일성, 불순물에 의한 광손실에 주의하여야 한다.

### ③ 광섬유 감지기에서의 응용

광섬유 감지기(Fiber-optic sensor)는 음파, 압력, 회전, 자기장, 온도, 가속도 등의 외부 신호를 광섬유를 통과하는 빛의 위상, 크기, 편광 상태 등의 변화로 바꾸어 그 변화를 측정함으로써 그 외부 신호를 측정하는 장치를 말한다. 이러한 광섬유 감지기는 통신용 광섬유, 특히 단일 모드 광섬유의 개발과 집적 광학 소자(fiber-optic directional coupler, electro-optic modulator, acoustooptic modulator 등) 및 laser diode, photodiode detector 등의 발전에 힘

입어 최근 크게 발전하였다.

기존의 감지기와 비교할 때, 광섬유 감지기가 가지는 최대 장점은 감지력을 가진 transducer로서의 광섬유의 길이를 길이에 따른 손실이 허용하는 범위 내에서 마음대로 길게 취할 수 있기 때문에 단순히 길이를 늘임으로써 감지기의 감도를 크게 높일 수 있다는 점이다. 그 밖에도 요즘 크게 발전한 laser diode와 photo detector 및 몇 가지 광학 소자들로 구성되어 용도에 따라서는 기존 감지기보다 구조가 간단하고, 가벼우며, 제작 비용도 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 또한 대부분의 광섬유 감지기에서 그 응답이 광학적인 process로 일어나기 때문에 응답시간이 매우 짧고, 유전체인 유리섬유로 만들어졌기 때문에 주변 전자파에 의한 간섭이나 전기적 단선의 위험이 없어 고전압 등의 외부 조건에서도 안정한 동작을 할 수 있다.

이상과 같은 장점을 가지고 있는 반면 단점으로는 첫째 응답의 선형성(linearity)이 기존의 감지기보다 떨어지는 것들이 많다. 둘째로 광원인 laser가 시간에 따라 변동(fluctuation과 drift)하는 단점이 있다. 또한 광섬유 자체도 온도 및 압력의 변화에 매우 민감하게 변화해서 전파하는 빛의 위상 및 편광이 달라지기 때문에 誤測을 유발시키기 쉽다는 단점을 가지고 있다.

광섬유 감지기를 그 원리에 따라 분류하면, 첫째로 간섭계의 원리를 단일모드 광섬유에 이용한 간섭성 감지기(interferometric sensors)와, 둘째 외부 신호에 의해 단일모드 광섬유에 복굴절(birefringence)을 유도시켜 통과하는 빛의 편광 상태를 변화시키는 편광성 감지기(polarization sensors), 세째로

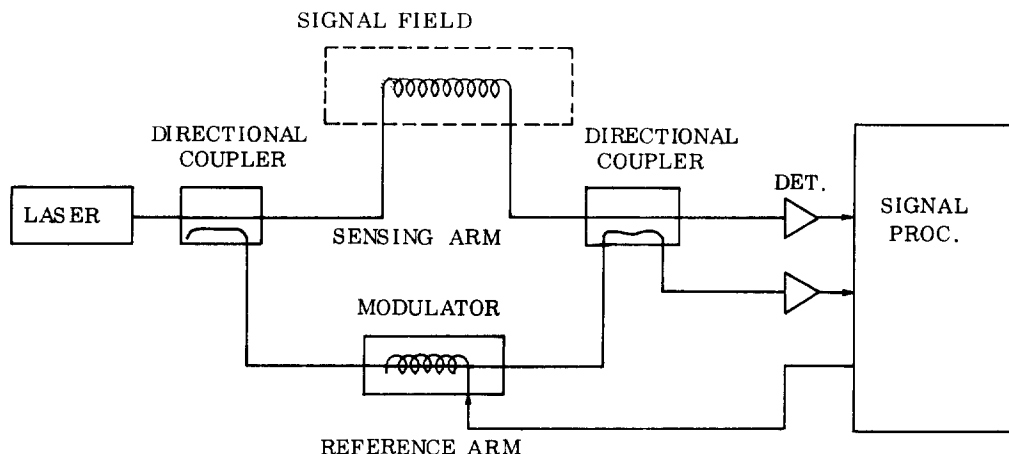


그림 5. 광섬유 음파 탐지기의 기본 구조

외부 신호에 의해 다중 모드 광섬유를 통과하는 빛 에너지를 변조시켜 측정하는 진폭성 감지기 (amplitude sensors)로 나눌 수 있다. 첫째로 간섭성 감지기에는 Michelson 간섭계의 원리를 각각 이용하는 음파 탐지기, 회전을 측정기, 가속도계가 있다.

### 3.1 광섬유 음파 탐지기

광섬유 음파탐지기 (Fiber-optic acoustic sensor)의 기본 구조는 그림 5와 같고 그 원리는 다음과 같다.<sup>5)</sup> Laser diode에서 나온 빛을 directional coupler를 통하여 감응 경로 (sensing arm)와 기준 경로 (reference arm)의 단일 모드 광섬유로 분리 입사시킨다. 감응 경로의 광섬유는 음파에 의한 음압에 의하여 길이의 변화가 생기게 된다. 그러므로 감응 경로를 통해 photo diode 쪽의 directional coupler에 도달하는 빛의 위상이 변화하게 되고 기준 경로를 통과해 온 빛과 간섭을 일으키게 된다. 이때 기준 경로의 광섬유에 외부 음압의 변화에 민감한 인장 수축 반응을 보이는 중합체의 접착성 (polymer compliant) jacketing 을 하면 감도를 크게 높일 수 있다.<sup>6)</sup>

이상과 같은 기본 구조에 효율적인 신호처리 기술을 위해 여러가지 변조방식을 채택한다. 그 변조 방식으로 Passive homodyne detection,<sup>7)</sup> DC-phase tracking homodyne detection<sup>8)</sup>, AC-phase tracking homodyne detection<sup>9)</sup>, true heterodyne detection<sup>10)</sup>, Synthetic heterodyne detection<sup>11)</sup> 등이 개발되었다.

이러한 광섬유 음파 탐지기를 기존의 고성능 piez-

oelectric 음파 탐지기와 그 threshold 감응성, 즉 탐지 능력만을 비교한다면 광섬유 1m만으로도 기존의 음파 탐지기를 능가하는 광섬유 음파 탐지기 제작이 가능하고, 광섬유 길이 100m 또는 그 이상으로 취하면 그보다 약 40~50 dB 높은 감도의 음파 탐지기를 기대할 수 있다.<sup>12)</sup>

이러한 간섭성 음파 탐지기의 감응 주파수는 100~2000 Hz로 잡고 있다. 이때, 음원의 주파수가 높아지면 감응 경로의 광섬유의 기초학적 모양에 따라 그 특성이 달라지며, 더욱 주파수가 높아져 초음파의 대역에 들어서면 광섬유 단면에 고르게 음압이 가해지지 않게 되어 단일 모드 광섬유에 복굴절 (birefringence)을 유도하게 된다. 그리하여 복굴절을 유도하는 초음파의 탐지를 위해서는 간섭성감지장치 가 아닌 편광성 감지장치가 요구된다.

### 3.2 광섬유 자기 측정계

위의 Mach-Zehnder 간섭계의 원리를 똑같이 이용하는 감지기로, 음파 탐지기의 polymer-compliant jacket 대신 자기 수축성 (magnetostrictive) jacket을 취하면 위의 음파 탐지기는 자기장 감지기 (magnetic field sensor)가 된다. 자기 수축성 물질이란 Nickel, 철, Cobalt 또는 그들의 합금들로서, 자기장이 가해지면 수축하는 성질을 가지고 있는 물질을 말한다. 최근에는 Metglass로 불리기 시작한 무형질 (amorphous)의 자기 수축성 물질이 개발되어 광섬유 jacketing을 할 수 있게 되었다.<sup>13)</sup>

앞에서 언급한 DC-phase tracking homodyne detection 방식을 채택한 길이 1m의 광섬유 자기

장 측정기로서 약  $10^{-9}G$ 의 자기장 측정이 가능하게 되었다. 현재 최고의 자기 측정 감도를 가지는 SQUID (superconducting quantum interference device)의 측정 감도가  $10^{-11} \sim 10^{-12}G$  정도이므로 길이 1000 m의 광섬유라면 이와 맞먹는 광섬유 자기장 측정계의 제작이 가능해진다. 그러나 SQUID를 동작시키기 위해서는  $4 \sim 5^{\circ}K$ 의 초저온 장치가 요구되기 때문에 그 실용성과 비용면에서는 SQUID가 광섬유 자기장 측정기보다 못하다고 할 수 있다. 그러므로 일반 고감도 자기 측정기의 측정 범위인  $10^{-5} \sim 10^{-10}G$ 에서의 광섬유 자기 측정기는 그 실용 가치가 매우 높다고 할 수 있다.

3.3 광섬유 회전을 측정기

Sagnac 간섭계의 원리는 그림 6과 같은 광섬유 회전율 측정기 (fiber-optic gyroscope)에 응용된다. laser diode에서 나온 빛은 directional coupler를 통과하여 단일 모우드 광섬유의 loop를 양쪽 방향으로 진행한다. 이때 loop가 회전하면 Doppler 효과와 Sagnac 효과가 일어나, 회전방향으로 진행되는 빛과 그 반대 방향으로 진행되는 빛이 directional coupler에 도착하면 두 빛의 위상차가 생기게 된다. 여기서 directional coupler의 남은 한 가지에 photodetector를 두어 그 간섭된 빛의 세기를 측정하면 회전율의 측정이 가능하다.<sup>14)</sup>

이와 같은 광섬유 gyro는 다른 간섭성 광섬유 감지기와 달리 같은 광섬유를 빛이 양쪽으로 진행하기 때문에 간섭성 감지기의 일반적인 문제점 이외에 다음과 같은 두 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫째로는 아무 광학 변조 장치가 없는 정지 상태의 광섬유 gyro의 photo-detector는 극대의 출력을 내게 되므로, 미소한 회전에 대해서는 그 감도가 영이 되어 버린다. 그러므로 비가역적인 (non-reciprocal) 영준

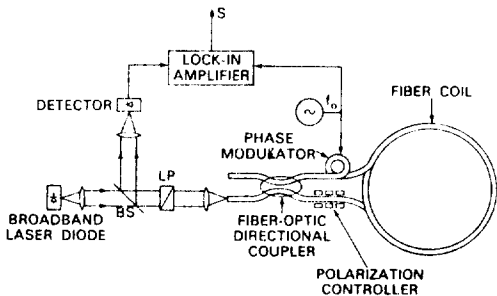


그림 6. 광섬유 gyroscope의 기본 구조

위 자기장 bias  $\pi/2$  rad이 필요하게 되어 여러 가지 방법이 제안되었다. 그 중 laser diode를 정현파로 변조시켜 그의 제 2차 harmonics의 진폭을 측정하여 회전율을 유추하는 방법이 효과적으로 이용되고 있다.<sup>15)</sup> 둘째로 Rayleigh 산란에 의한 후면 산란광은 피할 수 없는 잡음을 구성하므로, 이러한 Rayleigh 산란이 가장 적은 파장 대역인  $1.3 \mu m$  또는  $1.5 \mu m$ 의 laser diode의 사용이 바람직하다.

이와 같이 개발된 광섬유 gyro의 감도는 시정수 (time constant) 1초로 측정할 때 약  $0.5^{\circ}/h$  정도로서<sup>16)</sup>, 기존의 고감도 gyro에는 미치지 못하나, 구조적으로 간단하고, 제작비용이 적게 들기 때문에 많은 실용이 기대된다.

3.4 광섬유 가속도 측정기

Michelson 간섭계의 원리를 이용하는 대표적인 감지기로 광섬유 가속도 측정기 (fiber-optic accelerometer)를 들 수 있다. 그림 7에서 보는 바와 같이 추의 양쪽에 단일 모우드 광섬유를 접착시키고 양쪽에서 팽팽히 당긴다. 이때 추에 붙이는 광섬유의 단면은 반사가 잘 일어날 수 있도록 처리해 주고 두 광섬유 가락을 모아 directional coupler를 통해 한 쪽쪽에서는 laser diode로 빛을 공급하고 한 쪽에서는 반사하여 돌아온 빛을 간섭시켜 photo detector로 측정하는 것이다. 이렇게 구성된 가속도계의 감도는 약  $10 \mu m/sec^2$ 가 보고되었으<sup>17)</sup>, 매우 적은 길이

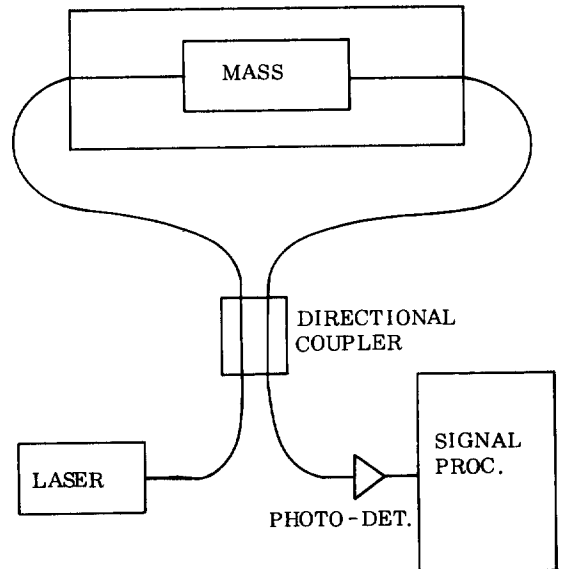


그림 7. 광섬유 가속도계의 기본 구조

의 광섬유 만으로도 높은 감도를 얻을 수 있고 구조가 매우 간단하기 때문에 광섬유 감지기 중 가장 큰 시장성을 가지고 있는 것으로 지목되고 있다.

지금까지 간섭성 광섬유 감지기에 대해 알아보았다. 이들 간섭성 감지기에 공통적으로 대두되는 문제점으로 편광상태의 control 이 매우 중요하다. 간섭을 일으키는 두 경로의 빛의 편광 상태가 같지 않으면 간섭이 일어나지 않게 된다. 그러므로 편광상태의 변화를 일으키지 않는 편광 유지(polarization-holding) 단일 모드 광섬유의 사용이 바람직하며<sup>18)</sup>, directional coupler 또한 그 편광 상태를 그대로 유지시켜 간섭시키는 것이 요구되어 개발되고 있다.<sup>19)</sup>

### 3.5 광섬유 편광성 감지기

본래 단일 모드 광섬유는 편광 방향이 서로 orthogonal 한 두 개의 mode 를 전파시키는데, 이때 광섬유가 복굴절 성질(birefringence)을 가지게 되면 이러한 두 특성 편광(eigen-polarization) mode 의 전파 상수의 차이가 생기게 된다. 이때 위상 전파 속도의 차이가 생기는 두 mode 가 선형 편광 mode 들이면 선형 복굴절(linear birefringence)이라 부르고, 원형 편광 mode 들이면 원형(circular) 복굴절이라 부르며, 이들 두 가지 복굴절이 중첩되면 타원(elliptical) 복굴절이라고 부르고 이때의 특성 편광 mode 들은 타원 편광이 된다. 여기서 선형 복굴절은 광섬유의 비대칭적 구조(예 : 타원형 core) 또는 눌림, 휨 등의 외부적인 stress와 온도에 따른 내부적인 stress의 발생에 의해 생겨나게 된다. 반면 원형 복굴절의 원인으로는 꼬임과 자기장에 의한 Faraday 효과가 있다. 그러므로 그 편광 상태의 변화를 측정함으로써 그와 같은 압력, 온도, 자기장, stress 등의 측정이 가능하게 된다. 앞에서 살펴본 간섭성 감지기와 비교해 볼때 비간섭성 감지기들은 간섭성 감지기들보다 대체로 감도면에서는 떨어지나 사용하는 광학 기재가 간섭성 감지기보다 간단하고 광학적 정렬이 훨씬 용이하다. 일례로 자기장을 측정하는 광섬유 자기장 측정기에 있어서 Faraday 효과로 자기장을 측정하는 편광성 광섬유 자기 측정

기<sup>20)</sup>는 비록 감도는 간섭성 자기 측정기보다 훨씬 떨어지지만 사용기재가 간단하므로 大電流의 측정시에는 매우 유용하다. 또한 기존의 대전류 측정기와 달리 금속성 자재가 필요없으므로 전기적 단선의 위험이 없어서 대전력 자동 차단기의 전류 감지기로서 매우 유망하다.

지금까지 간섭성 감지기와 편광성 감지기와 같이 단일 모드 광섬유를 사용하는 감지기에 대해 알아보았다. 이들은 단일 모드 광섬유를 사용하기 때문에 광학적 정렬과 접합(splicing)등에 어려움이 따르는 단점이 있다. 반면 외부 영향에 의해 광섬유를 통과하는, 또는 coupling 되는, 빛의 세기에 변화를 주는 형태의 진폭성 감지기(amplitude sensor)는 거의 대부분 다중 모드 광섬유를 사용하기 때문에 상대적으로 조작성이 훨씬 용이하고 구조가 훨씬 간단하다는 장점을 가지고 있다.

### 3.6 진폭성 감지기

진폭성 감지기에는 빛의 변조를 유도하는 방식에 따라 미소 굴절 감지기(microbend sensor)<sup>21)</sup>, coupled-waveguide sensors<sup>10)</sup>, 변위형 감지기(displacement sensor)<sup>22)</sup>, frustrated-total-internal-reflection (FTIR) sensors<sup>23)</sup>, frustrated-near-internal-reflection (FNIR) sensors<sup>24)</sup> 등 여러 가지 sensor가 있다. 이 중에서 가장 널리 이용되는 미소 굴절 감지기의 기본 구조는 그림 8과 같다.

외부로부터의 압력의 변화는 그림에서와 같은 deformer에 전달되어 광섬유에 미소 굴절량의 변화를 유도하여 광섬유의 굴절 손실에 변화를 주게 된다. 이러한 deformer와 다중 모드 광섬유는 일반 통신용 광섬유와는 달리 굴절 손실이 효율적으로 일어날 수 있도록 설계되어야 한다. 그림에서 deformer 의 굴절 주기는 3 ~ 6 mm 정도로서, 도파모드와 방사모드의 전파 상수들이 갖는 위상 주기의 차와 같은 값이 되도록 취하면 가장 민감한 감지기를 얻을 수 있다.<sup>25)</sup>

이외에도 앞에 열거한 많은 종류의 진폭성 감지기와 기타 광섬유 감지기 및 본 장에서 취급한 내용

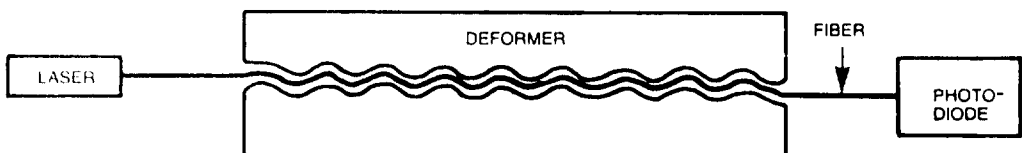


그림 8. 미소 굴절 감지기의 기본 구조



중 미비한 점의 참고 문헌의 열거는 참고 문헌 (26)을 참고해 주기 바란다.

이들 광섬유 감지기는 1970년대 통신용 광섬유와 개발에 따라 곧이어 발전을 시작했으며, 앞으로 각종 광섬유 소자의 개발에 따라 계속 발전하리라 추측된다. 또한 독립된 감지기보다는 종합기계 (예 : robot, 자동제어장비)의 감지부에 더욱 널리 이용되리라 기대된다. 참고로 1980년도 광섬유 감지기의 미국 시장 규모는 239만 달러였으며 그들의 조사에 따르면 1990년도에는 약 5840만 달러로 예상하고 있음을 밝힌다. 이로 미루어 볼때 한국에서의 광섬유 개발이 수준에 올라서 있는 현재, 광섬유 감지기의 개발에 연구소와 기업이 협력하여 관심을 가지고 연구한다면 좋은 성과를 거두리라고 추측되는 바이다.

참 고 문 헌

- 1) S. E. Miller and A. G. Chynoweth, ed., Optical Fiber Telecommunications, Academic, New York, 1979.
- 2) 姜 玫 鎬, 申 相 永, 光 纖 維 通 信 概 論, OHM 社, 1981.
- 2) N. S. Kapany, Fiber Optics, Academic, New York, 1967.
- 4) 광전자 및 정밀 공업 계측 기술개발에 관한 연구, 한국 과학 기술원, 1984.
- 5) J. H. Cole, R. L. Johnson, and P. B. Bhuta, J. Acoust. Soc. Amer., 62, 1136, 1977.
- 6) N. Lagacos, E. U. Schnaus, J. H. Cole, J. Jarzynski, and J. A. Bucaro, IEEE J. Quantum Electron., QE-18, 683, 1982
- 7) S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, and K. Koo, Appl. Opt., 21, 689, 1982.
- 8) D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge, and A. B. Tveten, Appl. Opt., 19, 2926, 1980.
- 9) I. J. Buch, "Acurate phase Measurement System for a fiberoptic interferometer" in Dig. Conf. on Lasers and Electroopt., IEEE/OSA, Washington, DC, June 10-12, 1981.
- 10) J. A. Bucaro and J. H. Cole, "Acousto-optics-sensor development," in Proc, EASCON 1979, IEEE Pub. 79CH1476-1 AES pp. 572-580.
- 11) J. H. Cole, B. A. Danver, and J. A. Buccaro, IEEE J. Quantum Electron. QE-18, 694, 1982.
- 12) J. A. Bucaro and T. A. Hickman, Appl. Opt., 18, 938, 1979.
- 13) K. P. Koo and G. H. Sigel, Jr., Opt. Lett., 7, 334, 1982.
- 14) V. Vali and R.W. Shorthill, Appl. Opt., 15, 1099, 1976.
- 15) R. Ulrich, Opt. Leff. 5, 173, 1980.
- 16) R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and J. Tekippe, Opt. Lett., 8, 644, 1983.
- 17) A. B. Tveten, A. Dandridge, C. M. Davis, and T. G. Giallorenzi, Electron. Lett., 16, 855, 1980.
- 18) W. K. Burns, R. P. Moeller, C.A. Villarruel, and M. Abebe, Opt. Lett., 8, 540, 1983.
- 19) B. K. Nayar and D. R. Smith, Opt Lett., 8, 543, 1983
- 20) S. C. Rashleigh, Opt. Lett., 6, 19, 1981.
- 21) N. Lagacos, T. Litovitz, P. Macedo, R. Mohr, and R. Meister, Appl. Opt., 20, 167, 1981.
- 22) W. B. Spellman, Jr. and R. L. Gravel, Opt. Lett., 5, 30, 1980.
- 23) W. B. Spellman, Jr. and D. H. McMahon, Appl. Opt. 19, 113, 1980.
- 24) R. L. Phillips, Opt. Lett., 5, 318, 1980.
- 25) L. Jeunhomme and J.P. Pocholle, Appl. Opt., 14, 2400, 1980.
- 26) T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh, R. G. Priest, IEEE J. Quantum Electron. QE-18, 616, 1982. 626
- 27) L. Vanmeter, Int. Fiber Opt. Commun. J. 2, 19, 1981.