

# 광섬유 센서 및 이를 이용한 광계측 시스템

조재철\*, 최상삼

한국과학기술연구원 (K.I.S.T.)

## I. 서론

광섬유를 이용하여 각종 물량을 정밀하게 측정하는 기술은 공장자동화, 로봇틱스, 항공우주 산업등에 큰 활용이 기대되고 있다. 이 광섬유 센서는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- .고감도
- .전자적 간섭이 전혀 없음
- .화재 위험이 전혀 없음
- .측정범위가 넓음
- .극소 및 본포 계측이 가능함
- .저가격

광섬유 센서에 대한 연구는 미국, 일본, 영국등을 중심으로 진행되어 그동안 각종 기본물량의 계측에 이용되는 광섬유 센서에 대한 논문 발표가 상당량 있었는데 이들 가운데 산업에 이용성이 큰 센서를 열거하면 다음과 같다.

- .회전각도 센서(fiber gyroscope)
- .온도 센서
- .압력 센서
- .유속 센서(fiber LDV)
- .전류, 전압, 자장 센서
- .화학 센서(pH, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> 등의 측정)
- .음향 센서(hydrophone)
- .가속도 센서
- .변위 센서

최근에는 광섬유 센서들 여러이 형태로 구성하여 여러 장소에서의 기본물량의 변화를 동시에 계속하거나 서로 다른 여러가지 물량들을 동시에 측정하는 본포형 광섬유 센서 시스템에 대한 연구가 진행되어 온도, 압력, 음향등의 본포계측에 대한 연구가 발표된바 있다. 또한, 집적광학 기술을 이용하여 광섬유 센서 및 본포형 센서 시스템에 사용되는 주요 광소자들을 제조하여 변위, 유속, 회전각도 등을 계속하는 광섬유 센서의 I.O.화에 대한 시도가 이루어지고 있다.

그동안 연구된 광섬유 센서 가운데 온도와 압력 계측용 센서가 가장먼저 실용화 되었으며, 주로 광섬유 코어내의 빛의 세기 변화나 센싱 부분에 형광물질을 부착하여 온도에 따른 형광 파장 본포 및 형광의 life time 변화로부터 온도를 계속하는 방법이 사용되고 있다. 이러한 센서에 비하여 감도가 훨씬 높고 선형성이 좋은 간섭형 광섬유 센서에 대한 실용화는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 우선 광섬유 센서에 대한 기본 이론을 전개하고 계측신호의 처리기술에 대해 간단히 예들들

어 설명하고 중요한 몇가지 센서에 대한 예를 들어 광섬유를 이용한 센서의 구조 및 계측원리에 대해 간단히 설명하기로 한다. 다음으로는 광섬유 센서에 필요한 광소자에 대해 기술하겠으며 최근에 연구가 진행되고 있는 광섬유 센서용 광 I.O. 소자 및 센서의 I.O.화의 예로서 gyroscope와 간섭계에 대한 시도에 대하여 설명하고자 한다. 끝으로, 본포형 광섬유 센서 시스템의 한 예로서 시간분할방식(time division multiplexing method)에 의한 본포 계측에 대해 기술하고 최근의 state of the art와 일본에서 추진중인 이 분야 project의 최종 demonstration 계획에 대해 간단히 설명하겠다.

## II. 기본 이론

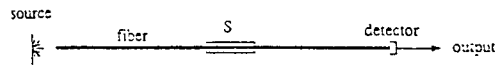


Fig.1 Basic sensor scheme. S: sensing element

그림 1에서 빛이 광섬유 내부에서 유도될 때 센싱부분 S에서 외부의 물량 변화에 따라 빛의 위상이나 세기 변화가 발생되어 이를 검출기에서 감지하는 방법으로 기본물량의 변화를 계속하는 것이 가장 기본적인 광섬유 센서의 계측원리이다. 그러나, 이외에도 광섬유 끝단에 어떤 물질을 부착시켜 이물질의 형광 특성 변화를 감지하여 계속하는 방법도 있다.

이 계측 방법에는 크게 두가지로 구분된다. 즉, 빛의 세기 변화를 이용하는 intensity sensor와 빛의 간섭을 이용하는 phase sensor 이다. Intensity sensor는 다시 그림 2와 같이 extrinsic인 경우와 intrinsic인 경우로 구분된다.

그림 2에서 extrinsic 인 경우는 센싱부분에서 광섬유 자체에서의 변화가 아닌 다른 변화에 의해 빛의 세기가 변화하는 경우이며 반면에 intrinsic 인 경우에는 광섬유 자체의 변화에 기인하여 유도광의 세기가 변화하는 경우이다. 이를 도표로 구성하면 그림 3과 같다.

Intensity sensor에는 액면준위, oil pollution, 압력, 온도 스윗치, 가속도, 변위, 온도, 농도 등을 계속하는 센서들이 있다. 그림 4는 이러한 intensity sensor의 구조이다.

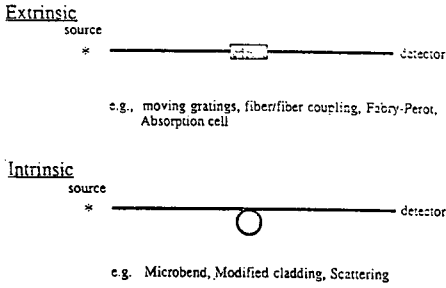


Fig. 2 Intensity sensor

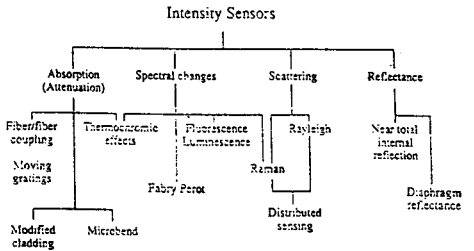


Fig. 3 Sensing method of intensity sensors

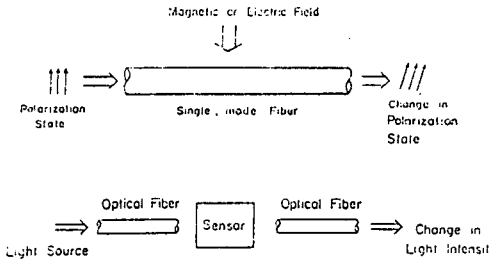


Fig. 4 Structure of intensity sensors

그림 5는 modified cladding intensity sensor 로써 센싱 부분의 광섬유 클래딩을 제거하여 이부분에 액체가 닿으면 코어주위의 굴절을 변화가 발생하여 이부분에서 유도광의 일부가 빠져나가거나 아니면 그반대로 더 잘 유도되어 세기 변화가 발생하는 원리를 보여준다.

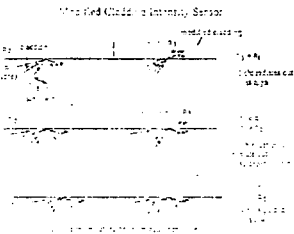
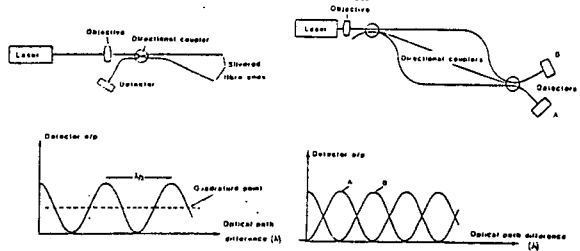


Fig. 5 Modified cladding intensity sensor

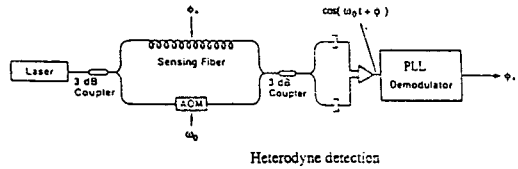
간섭형 광섬유 센서 즉, phase 센서는 Mach-Zehnder 간섭계, Michelson 간섭계, Fabry-Perot 간섭계, ring resonator 등의 형태로 광섬유를 구성하여 센싱 부분에서의 유도광의 위상변화를 감지하는 방법이 사용된다. 그림 6은 Mach-Zehnder 간섭계와 Michelson 간섭계 형태로 fiber coupler 를 이용하여 구성한 예이다.



Bulk and fiber Michelson configurations with transfer function. Bulk and fiber Mach-Zehnder configurations with transfer function.

Fig. 6 Configuration of fiber interferometer

간섭센서에는 음향[1], 전자장[2], 회전각도[3], 가속도[4], 변위, 온도[5], 유속 등을 계속하는 것이 있다. 간섭센서의 경우에는 그림 6의 하단에서 보듯이 물량변화의 증감방향을 구별하지 못하게 되어 있으며 두광의 편광방향의 불일치에 따른 신호 fading 현상이 발생된다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 heterodyne 법과 synthetic heterodyne 법등이 있다.



Heterodyne법은 진동수  $\nu_1, \nu_2$  (단,  $\nu_2 - \nu_1 \ll \nu_1$ )를 갖는 두개의 빛을 간섭계의 두 arm으로 각각 진행시켜 간섭시키는 방법으로 두 arm의 초기 광로정 일치한다면 입사광의 세기를  $P_0$  라 할 때 간섭에 의한 빛의 세기 변화는

$$\langle P(t) \rangle = \frac{P_0}{2} \langle | e^{i2\pi\nu_1 t} + e^{i(2\pi\nu_2 t + \phi)} |^2 \rangle$$

$$= P_0 \{ 1 + \cos(2\pi\Delta\nu t + \phi) \}$$

단,  $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$

으로 되어  $\Delta\nu$  진동수를 갖는 정현파의 위상변화  $\phi$  가 물량변화에 의해 발생하는 유도광의 위상변화가 되어 이 정현파의 위상변화에 따른 이동방향을 감지하면 물량변화의 증감변화를 판단할 수 있다. 그러나 이방법은 서로 근접한 진동수를 갖는 빛을 발생시키기 위하여 Bragg cell이 이용되는데 이로인하여 광학적 배열이 어려워지고 부피도 커지는 문제가 발생한다. 이를 개선하기 위한 방법으로 synthetic heterodyne법이 제안되었다. 이방법은 간섭계의 한 경로에 유도광의 위상변화를 진동수  $\Delta\nu$ 의 정현파형태로 가하고 두빛을 간섭시키는 원리를 사용하고 있다. 그림 7은 이방법의 한 예이다.

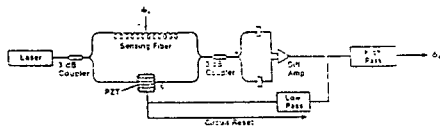


Fig.7 Synthetic heterodyne method

여기서 시간에 따른 물량변화율에 대응되는 진동수  $\nu_0$ 는  $\Delta\nu$  보다 매우 작다고 가정한다. 간섭에 의한 빛의 세기변화는

$$P(t) = P_0 \{ 1 + \cos[A \sin(2\pi\Delta\nu t) + \phi(t)] \}$$

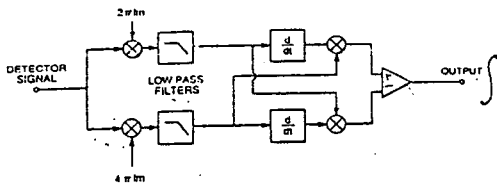
단, A = modulation amplitude

가 되며 이를 다시 정리하면

$$P(t) = P_0 \left\{ 1 + J_0(A) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(A) \cos(4n\pi\Delta\nu t) \right. \\ \left. \times \cos \phi(t) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(A) \sin((2n-1)2\pi\Delta\nu t) \right. \\ \left. \times \sin \phi(t) \right\}$$

단,  $J_n(x)$ 는 n번째 1st kind Bessel 함수

가 된다. 이 신호를 아래와 같은 신호처리과정을 거치면



출력단의 amplifier 전에서의 두 신호  $S_1, S_2$ 는

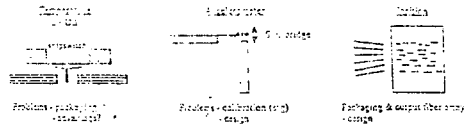
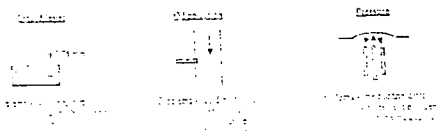
$$S_1 \propto -J_1(A) \cdot J_2(A) \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \sin^2 \phi(t)$$

$$S_2 \propto J_1(A) \cdot J_2(A) \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \cos^2 \phi(t)$$

가 되어 이를 서로 빼주면 위상변화의 시간변화율을 얻게 되며 이를 적분하면 위상변화  $\phi(t)$ 를 알 수 있다. [6-8]

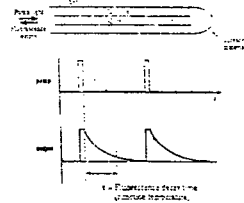
### III. 광섬유 센서의 예

#### 1. Extrinsic intensity sensor

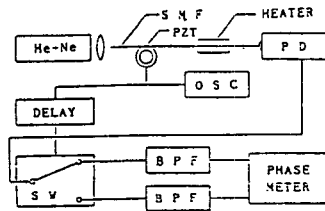


#### 2. Fluorescence decay time intensity sensor

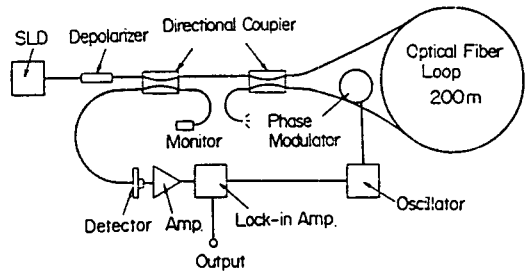
Fluorescence Decay Time Intensity Sensor



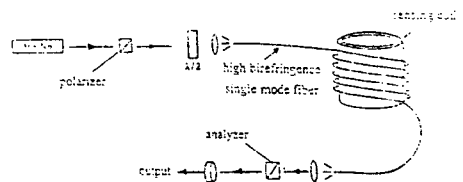
#### 3. 온도 센서



#### 4. Fiber gyroscope



#### 5. Polarimetric fiber sensor



#### V. 센서용 광소자

광섬유 센서를 구성하는데 사용되는 소자는 크게 광섬유 형태와 집적광학(I.O.) 형태의 두가지로 구분된다. 광섬유 형태의 소자에는 fiber coupler, phase modulator, polarization controller, fiber amplifier, polarizer, frequency shifter, mode converter 등이 있다.

##### 1. Fiber coupler

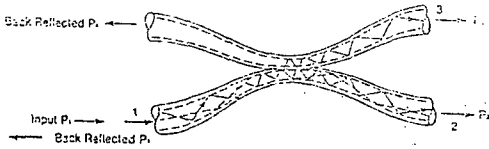


Fig.8 2x2 fiber coupler

두개의 광섬유 코어를 서로 빛의 파장 정도로 근접시키면 한쪽 광섬유 코어에 유도되던 빛의 일부 또는 전부가 근접한 다른 광섬유 코어내부로 전이되는 현상을 이용하거나 아니면 다중모드 광섬유와 같이 두 코어를 서로 용융 밀착시켜 유도광의 일부를 다른 광섬유 코어로 분리시키는 방법을 이용하면 광결합을 마음대로 조절하여 마치 광분할기와 같은 기능을 하도록 할 수 있다. 이 방법으로는 광섬유 센서 구성에 있어서 가장 필수적인 광소자이다.

##### 2. Phase modulator

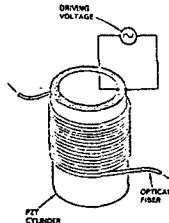


Fig.9 Fiber type phase modulator[9]

그림 9는 광섬유 형태의 위상변조기의 구조이다. 원통형 PZT 양면에 전압을 가하면 PZT의 팽창·수축에 따라 광섬유가 늘어나거나 압력을 받게 된다. 늘어나는 효과로 유도광의 광도정이 증가하게 되고 압력에 의해서는 반대로 광도정이 감소하게 되는데 후자는 전자에 비하여 단지 1/5 정도의 효과를 갖기 때문에 전반적으로는 전압이 증가하면 광도정이 증가하게 된다. 따라서, 정현파 전압변화를 주면 유도광의 위상 변조가 발생된다. 이 방법으로는 최대 100kHz 진동수 까지 위상 변조가 가능하다.

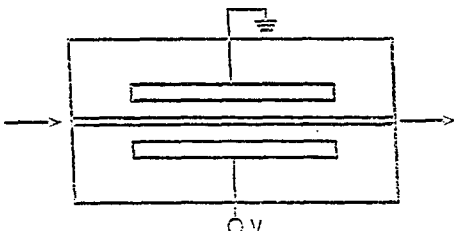


Fig.10 I.O. type phase modulator

그림 10은 I.O. 형태의 위상변조기이다. LiNbO<sub>3</sub> 기판 위에 박막도파로를 구성하고 이곳에 그림 10 처럼 전압을 가하게 되면 전압에 따라 박막도파로 내부의 굴절률 변화가 발생하며 이로인하여 위상이 변조된다. 수식으로는

$$\Delta\phi = \pi(n_0^3 r_{33} E L) / \lambda$$

단,  $n_0$ =굴절율,  $E$ =전장,  $L$ =전극길이,  $\lambda$ =파장

로 표현된다. 결국 유도광의 광도정이 변화하게 된다. 이 방법으로는 100GHz 까지도 위상변조가 가능하며 향후 coherent 광통신에서도 사용이 가능한 광소자이다.

##### 3. Polarization beamsplitter

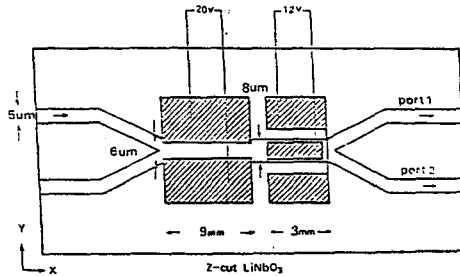
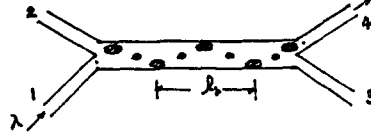


Fig.11 I.O. type polarization beamsplitter

그림 11처럼 LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 단일 모드와 two 모드 박막도파로를 형성시키고 이위에 Al 전극을 구성시키면 two 모드 영역에서 진행되는 두 모드들이 서로 간섭하여 두 모드간의 전파속도차에 대응되는 빛의 세기 변화 즉, beat가 아래와 같이 형성된다.



이현상과 Al 전극배열을 그림 11 처럼 구성하면 TE 모드와 TM 모드가 동시에 Port1에 입사했을 때 각각 port3과 port4로 분리되어 진행할 수 있다.

##### 4. TE⇌TM mode converter

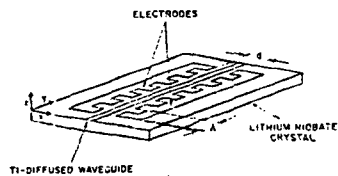


Fig.12 Electro-optic TE⇌TM mode converter[10]

그림 12처럼 LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 단일모드 박막도파로를 구성하고 도파로축을 따라 가해주는 전압 변화의 주기를 TE와 TM mode의 전파속도에 대응되는 beat length와 같도록 구성시키면 이로인해 도파로 내부의 굴절율이 도파로축을 따라 역시 beat length와 같은 주기로

변화하기 때문에 TE, TM mode간의 광고환 현상이 발생한다. 이 교환 상수 K는

$$K = \alpha(\pi/2\lambda)n_0^3 r_{51} V/d$$

단, V=전압, d=beat length,  
 $n_0$ =도파로의 평균 굴절율  
 $\lambda$ =빛의 파장  
 $\alpha$ =기하학적 상수

으로 주어진다. 따라서, 이론적인 변환효율  $\eta$ 는

$$\eta = \frac{\sin^2\{KL[1+(\delta/K)^2]^{1/2}\}}{1 + (\delta/K)^2}$$

단,  $\delta = \frac{1}{2}\Delta\beta$   
 $\Delta\beta$ =TE, TM 모드간의 전파상수차  
 $L$ =도파로의 길이

으로 주어진다.

### 5. Polarization controller

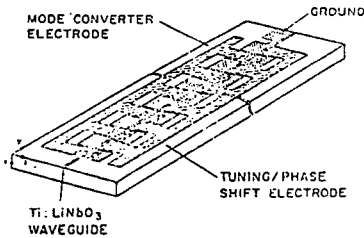


Fig.13 Structure of polarization controller[11]

이광소자는 앞에서 설명한 위상 변조기와 TE, TM mode converter를 서로 결합시킨 것이라고 할 수 있다. 그림 13에서 폭이 좁은 전극형태의 부분이 mode converter이며 넓은 부분이 위상변조기이다.

이광소자는 입사광이 편광된 경우는 이편광방향을 임의로 조절할 수 있는 동시에 타원 편광된 빛이 입사하는 경우에도 출사광이 편광되도록하면서 그편광 방향을 임의로 조절할 수 있다.

### 6. Polarizer[12]

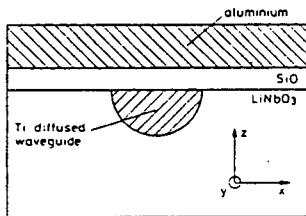


Fig.14 Cross section of a multilayer TE0 polarizer

그림 14에서 TM 모드는 Al 박막에 의해서 도파로 내부를 진행하면서 점점 흡수되어 버리기 때문에 결국 TE 모드만이 남게 된다.

### 7. Frequency shifter[13]

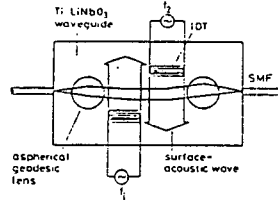


Fig.15 Structure of frequency shifter

그림 15는 두개의 acousto-optic modulator로 이루어진 frequency shifter이다. 이는 fiber gyroscope 등에 사용될 목적으로 제작되었는데 장점으로는 insertion loss가 기존 방법에 비하여 상당히 작다는 데에 있다. 이경우 유도장의 진동수는 두개의 A.O. modulator의 rf 주파수 차만큼 변이된다.

### v. 광섬유 센서의 I.O.화의 예

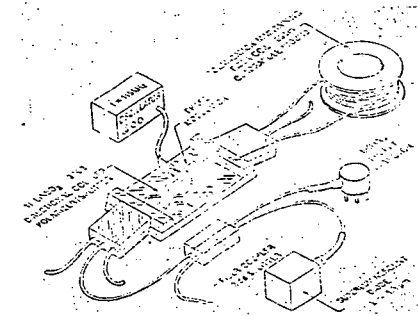


Fig.16 Fiber-gyroscope의 I.O.화 [14]

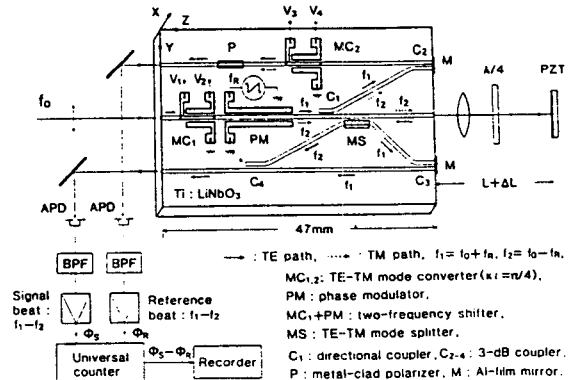


Fig. 17 Schematic view of the proposed integrated-optic heterodyne interferometer in 3-propagating LiNbO3 used for accurate displacement measurement.

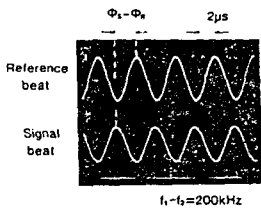


Fig. 18 Reference and signal beats of  $f_1-f_2$  ( $=200\text{kHz}$ ) obtained by using the fabricated optical IC.

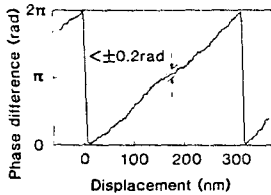


Fig. 19 Phase difference  $\phi_S-\phi_R$  versus the displacement  $\Delta L$  of a PZT used as the object.

그림 16는 앞에서 설명한 synthetic heterodyne 법에 의해 신호처리를 하는 fiber gyroscope에 사용되는 위상 변조기와 S/N율을 향상시키기 위해 사용되는 편광 분할기를 집적광학 기술에 의해 대체한 예이다.

그림 17은 heterodyne 법으로 변위를 측정하는 경우로 광섬유를 사용하지 않았으나 도파로에서 출사된 광을 광섬유에 입사시킨 후  $\lambda/4$  판과 이동거울이 있는 위치까지 광을 유도시키는 방법도 있다. 여기서는 frequency shifter, polarizer, polarization beamsplitter, phase modulator, coupler등을 하나의  $\text{LiNbO}_3$ 판위에 구성시킨 예이다.[15]

## VI. 분포형 광섬유 센서 시스템

여러개의 광섬유센서를 array형태로 구성하여 동시에 여러장소에서의 물량변화를 계속하는 방법으로는 frequency division multiplexing(FDM)[16], coherent multiplexing[17], time division multiplexing(TDM)[18], wavelength division multiplexing(WDM)등이 있다. 이 가운데 가장 많이 사용되는 TDM법에 대해서 설명하기로 한다.

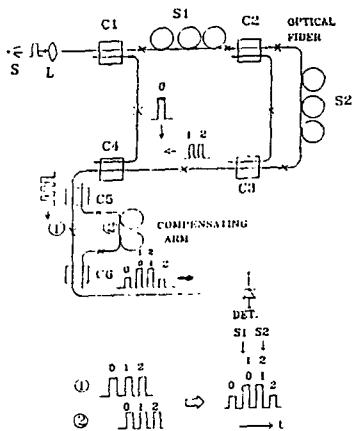


Fig. 20 Configuration of two sensor array system by TDM.  $C_i$ :fiber coupler,  $S_i$ :fiber sensor,  $x$ :splicing point.

그림 20은 두개의 광섬유 센서로 이루어진 경우의 한 예이며 센싱 arm과 기준 arm 사이의 길이차를 보정하기 위해 compensating arm이 사용된다. 이 TDM 방식에

서는 100 nsec 이하의 광펄스를 센서 어레이 시스템에 입사시키게 된다. 이 광펄스는 주로 고속 광변조가 가능한 수십 nsec의 rise time을 갖는 음향광학 광변조기에 의해 발생된다. 우선 광펄스의 폭을  $\Delta t$ 라고 하고 센싱 arm의 길이를 그림 20에서처럼 fiber coupler  $C_4$ 를 지나온 후에 3개의 광펄스 간의 시간차가  $\Delta t$ 가 되도록 설정하여 시스템을 구성하였다고 가정한다. 이러한 가정하에 이 3개의 광펄스가 compensating arm을 지나갈 때 경로 (1)과 (2) 간에  $\Delta t$ 만큼의 시간차를 갖도록 compensating arm의 길이를 정확히 조절하여 구성하였다고 가정하면 그림 20에서와 같이 두 광펄스들이 서로 중첩되게 할 수 있다. 따라서, 광펄스 1과 광펄스 0의 중첩에 의한 간섭신호로부터 광섬유 센서  $S_1$ 에서의 광로차의 변화를 계속할 수 있으며, 광펄스 2와 광펄스 1의 중첩에 의해 광섬유 센서  $S_2$ 에서의 광로차 변화를 계속할 수 있다. 이 광펄스들을 광검출기로 검출하고 이로부터의 출력 전압변화를  $\Delta t$ 시간을 주기로 시간 분할하여 sampling 하게되면 동시에 센서  $S_1$ 과  $S_2$ 의 변화량을 계속할 수 있게 된다.

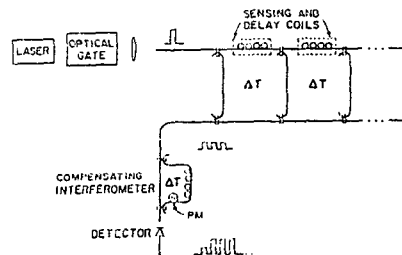


Fig. 21 Configuration for TDM

그림 21은 일반적인 경우 즉, 여러개의 센서로 이루어진 경우이다. 물론 각 센서는 이 경우 간섭센서가 되며 synthetic heterodyne 법으로 신호 처리하기 위해서는 단지 compensating interferometer의 delay용 fiber coil 부분에 phase modulator를 위치시키면 된다.

## VII State of the art

- \* Intensity 형 온도센서, 분포형 온도센서 (DTS) 시판중 (ex. York사 제품 :DTS)
- \* 형광물질의 형광 수명시간의 온도에 따른 변화를 이용한 온도센서 시판중
- \* BSO 결정을 이용한 전압 센서 시판중
- \* Fiber-LDV 시판중 ( 의료용 )
- \* 공업용 fiber-gyroscope 시판중 ( 분해능:20°/hr )
- \* Fiber-gyroscope 경우 Honeywell사에서 분해능 0.02°/hr 달성
- \* 일본의 경우 시장 점유율 매년 25%씩 증가

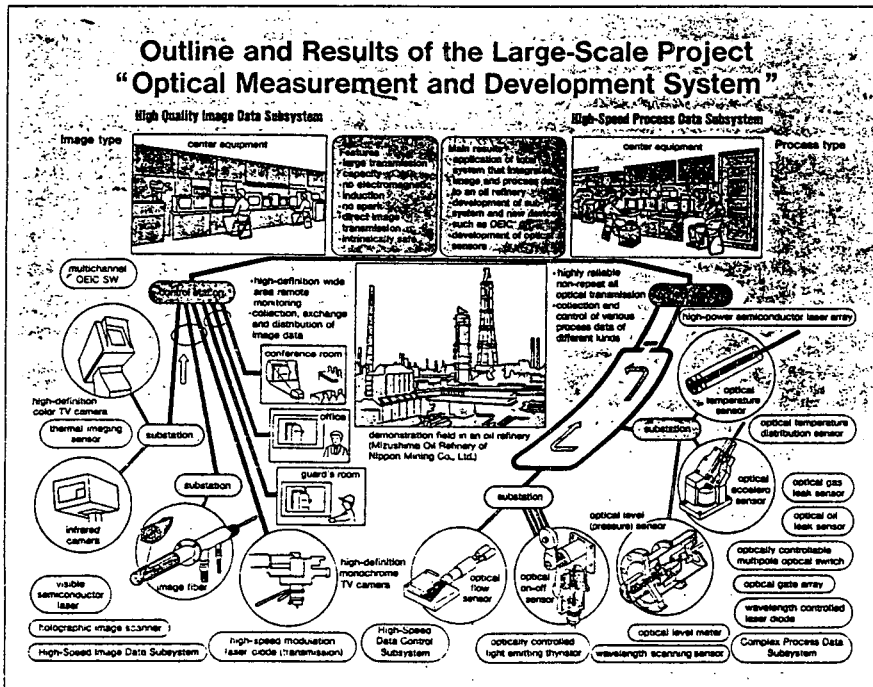
\* 본포형 센서 시스템의 최근 연구예

1. Multiplexed fiber optic hydrophone array (6개 센서), in England
2. Distributed liquid sensor using eccentrically clad fiber (길이 420 m)
3. Multipoint remote detection of inflammable gases
4. 각 방법에 대한 실험 예

Multiplexing	Sensors (#)	Noise ( $\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	Crosstalk (dB)	Lab.
Frequency	3	1000	-35	UCL (\$7)
Time	2	20	*	Plessey (\$5)
Coherence	1	-000)	-	Stanford (\$6)
Coherence	2	70	-40	NRL (\$6)
Time	2	10	-50	Stanford (\$7)
Frequency	4	20	-60	NRL (\$7)
Time	3	20	-50	NRL (\$7)
Time	3	10	-30	NRL (\$7)

- (4) A.B.Tveten, A.Dondridge, C.M.Davis, and T.G.Giallorenzi, *Electron. Lett.*, Vol.16, pp.854-855, 1980
- (5) K.Kyuma, S.Tai, T.Sauada, and M.Nunoshita, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.QE-18, pp.676-679, 1982
- (6) A.Dondridge, A.B.Tuetem, and T.G.Giallorenzi, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.QE-18, pp.1647-1653, 1982
- (7) A.D.Kersey, A.C.Lewin, and D.A.Jackson, *Elect. Lett.* Vol.20, pp.368-370, 1984
- (8) B.Y.Kim and H.J.Shaw, *Proc. of the Soc. of Photo-Opt. Inst. Eng.*, Vol.478, pp.142-148, 1984

\* 최근의 일본 광섬유 센싱 project 최종 demo 안



References

- (1) J.A.Bu-aro, H.D.Dardy, and E.Carome, J. *J.Acoust. Soc. Amer.* Vol.62, pp.1302-1304, 1977
- (2) S.C.Rashleigh, *Opt. Lett.*, Vol.6, pp.19-21 1981
- (3) R.A.Bergh, H.C.Lefere, and H.J.Shaw, *Opt. Lett.*, Vol.6, pp.198-200, 1981

- (9) D.E.N.Davies and S.A.Kingsley, *Elect. Lett.*, Vol.10, pp.21-22, 1974
- (10) R.C.Alferness, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.36, pp.513-515, 1980
- (11) R.C.Alferens and L.L.Buhl, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.47, pp.1137-1139, 1985
- (12) J.P.G.Bristow, A.C.G.Nutt, and P.J.R.Laybourn, *Elect. Lett.*, Vol.20, pp.1047-1048, 1984
- (13) H.Shimizu, R.Ishikawa, and K.Kaede, *Elect. Lett.*, Vol.22, pp.334-335, 1986

- (14) M. Papuchon and C. Puech, Proc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Vol. 157, pp. 218-223, 1978
- (15) H. Noda, M. Haruna, and H. Nishihara, IOOC '89 Tech. Digest, Vol. 2, p. 169, 1989
- (16) I. Sakai, J. Opt. & Quant. Elect., Vol. 18, pp. 279-289, 1986
- (17) J. L. Brooks, R. H. Wentworth, R. C. Youngquist, M. Tur, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, IEEE J. Lightwave Tech., Vol. LT-3, pp. 1062-1072, 1985
- (18) Edward L. Ginzton Lab. Report, No. 4214, p. 91