

논문 2000-9-2-02

구조물의 변형률 측정을 위한 광섬유 TR-EFPI 센서의 개발  
권일범, 최만용, 문한규, 김민수

Development of Fiber Optic Total Reflected Extrinsic Fabry-Perot  
Interferometric Sensor for Structural Strain Measurement

Kwon, Il-Bum, Choi, Man-Yong, Moon, Hahngue, and Kim, Min-Soo

요약

광섬유 TR-EFPI(total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric) 센서가 빌딩, 교량, 항공기 등의 구조물의 변형률을 측정하기 위하여 개발되어졌다. 기존의 광섬유 EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometric) 센서는 그 신호가 변형률의 변화에 따라 정현파 형태로 출력되기 때문에 변형률의 증가 또는 감소를 구별하기 어렵다. 또한 절대 변형률은 이러한 단순한 광섬유 EFPI 센서로는 측정이 불가능하다. 본 연구에서는 변형률의 크기와 방향을 측정하기 위해서 광섬유 EFPI 센서를 전반사형 탐촉자로 개조한 광섬유 TR-EFPI 센서를 구성하였다. 이 광섬유 TR-EFPI 센서의 탐촉자는 모세유리관 안에 공기간극을 이루는 단일모드 광섬유(single mode fiber)와 거울코팅 광섬유(mirror coated fiber)에 의하여 구성된다. 이 광섬유 TR-EFPI 센서의 광출력 신호로부터 변형률의 크기와 방향을 결정하기 위하여 필요한 정보를 얻을 수 있다. 광섬유 TR-EFPI 센서로부터 구한 변형률과 전기저항형 변형률 게이지에 의한 변형률을 비교하기 위하여 광섬유 TR-EFPI 센서를 구성하고 알루미늄보 위에 전기저항형 변형률 게이지와 동일한 위치에 적용하여 만능시험기를 사용하여 하중 증가-감소에 따른 변형률 측정 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 광섬유 TR-EFPI 센서에 의하여 구한 변형률은 전기저항형 변형률 게이지에 의한 변형률과 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

Fiber optic TR-EFPI(total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric) sensor was developed to measure the strain of structures, such as building, bridge, aircraft, etc. It has been difficult to distinguish the increase and decrease of the strain from the conventional fiber optic EFPI sensor because their signals only have a sinusoidal wave pattern related to the change of strain. Also, the absolute strain could not be measured by the simple fiber optic EFPI sensor. In this study, in order to measure the magnitude of strain with the direction of strain, the fiber optic sensor was simply constructed with the total reflected EFPI sensor probe. This probe was manufactured with a single mode fiber and a mirror coated fiber in a silica glass capillary tube. The output signal of this fiber optic TR-EFPI sensor can give the information about the magnitude and the direction of strain. The loading-unloading test was performed by the universal testing machine with aluminum beam specimen to compare the strain from fiber optic TR-EFPI sensor with the value from electrical strain gauge. In the result of this experiment, the strain from fiber optic TR-EFPI sensor had a good agreement with the values from the electrical strain gauge.

한국표준과학연구원 산업측정표준부 (Division of  
Industrial Metrology, Korea Research Institute of  
Standards and Science)

<접수일자 : 1999년 12월 6일>

I. 서론

광섬유 센서를 이용하여 구조물의 안전을 감시하

기 위하여 변형률의 변화를 측정하는 일반적인 방법에는 광의 세기를 이용하는 방법과 광섬유를 전파하는 광의 위상을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 광섬유에 외부로부터 변형률이 인가되면 광섬유를 진행하는 빛에 손실을 가하게 된다. 광 검출부에서는 손실된 광 강도를 직접 검출하기 때문에 신호처리가 단순하며 구조도 간단하다는 장점이 있다. 그러나 측정감도가 낮은 단점을 가지고 있다. 광의 위상을 이용하는 경우 단일 광원에서 입사된 레이저 광은 광섬유 결합기(fiber coupler)를 통해 서로 다른 광섬유를 전파하게 된다. 외부로부터 변형률의 작용에 따라 광경로 상에 변화를 겪은 광과 그렇지 않은 광이 다시 하나의 광섬유에서 만날 때 서로 다른 위상차로 인하여 보강간섭과 상쇄간섭을 통하여 광 간섭 파형을 만들게 된다. 위상차를 이용하는 센서이기 때문에 감도가 뛰어나지만 물리량 환산을 위하여 간섭 위상의 크기 및 증감 방향을 알아야 구조물의 변형률의 증감 방향을 검출할 수 있게되는 어려움이 있다.<sup>11,21</sup>

이러한 광섬유 간섭형 센서 중에서 EFPI (외부 페브리-페로 간섭형 : extrinsic Fabry-Perot interferometric) 센서는 소형으로 구조물의 변형률 측정을 위하여 개발된 센서 형태이나, 단일 방향으로의 변화량은 용이하게 측정할 수 있지만, 방향이 변하는 변형률을 측정하기는 매우 어렵기 때문에 이러한 문제점을 보완하기 위한 연구가 진행되었다<sup>3,41</sup>. Murphy, K. A. 등은 두 개의 EFPI 센서를 한 조로 구성하여 변형률의 방향이 변화하는 시점을 감지하는 광섬유 센서(quadrature phase-shifted EFPI sensor)를 사용할 수 있음을 보였다<sup>31</sup>. 이러한 두 개의 EFPI 센서를 한조로 제작하여 사용하는 구조의 광섬유 센서는 하나의 EFPI 센서로는 구별하기 어려운 0°의 위상에서 방향 변화를 다른 EFPI 센서의 출력신호를 이용하여 감지함으로써, 작동방향 변화 위치를 알 수 있게 하였다. 그러나, 광원과 수광부가 2 조가 있어야 하고 현재 방향을 알려면 방향 변화 위치를 계속적으로 확인해야 하기 때문에 사용에 효율적이지 못하다는 단점을 가진다. 다른 연구로는 스펙트럼 분석을 통한 절대 측정을 수행하는 절대측정 EFPI (absolute EFPI) 센서로 스펙트럼 상에 발생하는 간섭 프린지를 이용하여 절대 측정을 수행하지만, 스펙트럼 분석기에서 요구되는 스캐닝 시간이 필요하기 때문에 준정적 측정에만 적합하다는 문제점이 있었다<sup>41</sup>. 따라서 기존의 광섬유 EFPI 센서에서 두 개

의 EFPI 탐촉자를 한 조로 사용하거나, 스펙트럼 신호를 분석하는 번거로움 없이 구조물의 변형률을 측정하기 위한 새로운 광섬유 TR-EFPI(total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric) 센서를 개발하게 되었다.

본 연구에서는 광섬유 TR-EFPI 센서를 개발하고 외부 물리량으로 대표적인 구조물의 변형률 변화 크기와 방향을 부가적인 광학 부품 또는 스펙트럼 등의 신호처리를 위한 부수적인 장비가 필요없이 간편한 디지털 계산에 의하여 알아낼 수 있도록 하였다. 이 TR-EFPI 센서 탐촉자는 한 개의 단일모드 광섬유(single mode fiber)와 한 개의 거울코팅 광섬유(mirror coated fiber)를 모세 유리관 안에 고정하여 공기간극을 형성함에 의하여 만들어진다. 구조물의 변형률을 측정하는 실험을 위하여 알루미늄 시험편의 표면에 광섬유 TR-EFPI 센서와 전기저항형 변형률 게이지를 부착하고, 만능시험기를 사용하여 하중을 증감시키면서 변형률의 변화를 측정하도록 하였다.

## II. 작동 원리

광섬유 TR-EFPI 센서는 Fig. 1과 같이 구성된다. 광원인 레이저 다이오드(LD)에서 빛이 단일모드 광섬유(SMF: single mode fiber)에 입사되면 광섬유를 따라 입사광( $I_{in}$ )이 2×2 광섬유 연계를 통과하여 Fig. 1의 타원 안에 도시된 탐촉자에 도달하게 된다. 탐촉자는 입사광을 전달하는 단일모드 광섬유와 공기간극을 이루면서 위치한 거울코팅 광섬유(MCF: mirror coated fiber)가 나란히 위치되도록 하는 모세 유리관(glass capillary tube)으로 구성된다. 단일모드 광섬유를 진행하여 이 탐촉자에 도달한 입사광은 단일모드 광섬유 끝단에 도달한 입사광의 약 97%는 공기간극으로 투과되고 나머지 약 3%는 1차 반사되어 되돌아가는 빛( $I_{out}$ )이 된다. 한편 공기간극으로 투과된 빛은 공기간극을 진행하면서 거울코팅 광섬유를 만나게 되고, 2차 반사를 일으킨 후 다시 원래의 단일모드 광섬유로 입사된다. 기존의 EFPI 센서는 거울코팅 광섬유 대신에 다중모드 광섬유를 사용하여 공기간극을 형성하여 공기 간극 안의 빛이 반사되도록 하였다. 그 결과 광출력 신호에는 광간섭에 의한 신호만 출력되고 광출력 신호의 신호 수준의 변화가 거의 발생하지 않아서 변형률의 방향을 구별할 수 없었던 것이다. 거울코팅 광섬유

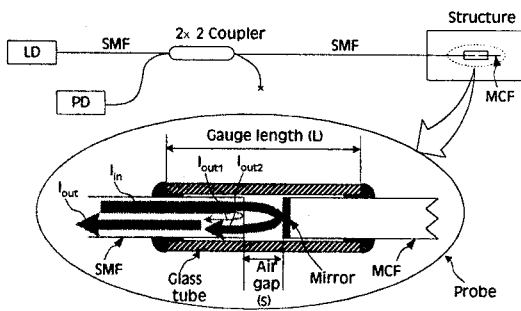


그림 1. 광섬유 TR-EFPI 센서의 개념도

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic TR-EFPI (total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric) sensor.

에서 반사되어 되돌아 와서 2차로 단일모드 광섬유에 입사되는 빛( $I_{out2}$ )은 처음에 반사된 빛( $I_{out1}$ )과 단일모드 광섬유에서 만나게 된다. 만약 탐촉자의 공기간극( $s$ )의 길이변화( $\Delta s$ )를 야기하는 탐촉자가 접촉되어 있는 구조물의 변형률이 탐촉자에 주어지면, 그에 따라 공기간극을 지나는 빛( $I_{out2}$ )의 광경로( $2s$ )를 변화시켜 2차 반사광( $I_{out2}$ )과 1차 반사광 ( $I_{out1}$ ) 사이의 위상차가 변화하게 된다. 그에 따라서 광검출기(PD)에서 출력받는 광출력 신호에는 외부에서 가해진 변형률 즉 변형률에 비례하는 상쇄 또는 보강 간섭이 발생하여 Fig. 2와 같이 변형률에 비례하는 정현파 형태의 광출력 신호를 얻게된다. 여기서 광섬유 TR-EFPI 센서에 의한 구조물의 변형률은 Fig. 1에서 광섬유 탐촉자의 모세유리관에 고정된 단일모드 광섬유와 거울코팅 광섬유 사이의 게이지 길이( $L$ )와 외부에서 가해지는 변형에 따라 변화되는 길이( $\Delta L$ )의 비, 즉  $\Delta L/L$  으로 표시되는 량을 의미한다. 이때 게이지 길이의 변화량  $\Delta L$ 은 공기간극의 변화량  $\Delta s$ 와 동일하므로 광출력 신호로부터 공기간극의 길이변화를 구하게 되면 변형률을 구할 수 있게되는 것이다. 한편 변형률이 증가하는 경우 공기간극이 증가하여 공기간극 사이를 통과하는 빛은 광확산(light spreading)에 의한 광 손실이 발생함에 따라 광출력 신호의 신호 수준(signal level)이 감소하는 경향을 보인다. Fig. 2에는 이와같이 구조물의 변형률을 측정하기 위하여 적용된 전기저항형 변형률 게이지(ESG: electrical strain gauge)와 광섬유 TR-EFPI 센서에 의한 출력 신호를 비교하여 도시하였다. 구조물의 변형률이 감소하는 경우, 즉 ESG 신호가 감소하는 구간에서는 광섬유 TR-EFPI 센서의 공기간극 길이는 감

소되고 그에 따라 광 손실이 감소되므로 광신호의 신호수준이 증가하게 될 것이다. 이와는 반대로 구조물의 변형률이 증가하는 경우, 즉 ESG 신호가 증가하는 구간에서는 광섬유 TR-EFPI 센서의 공기간극 길이가 증가되어 광 손실이 증가되므로 광신호의 신호 수준이 감소하게 될 것이다. 따라서 변형률의 크기 및 방향을 이러한 광출력 신호의 정현파의 개수와 광출력 신호의 신호 수준의 변화를 관찰함에 따라 결정할 수 있다.

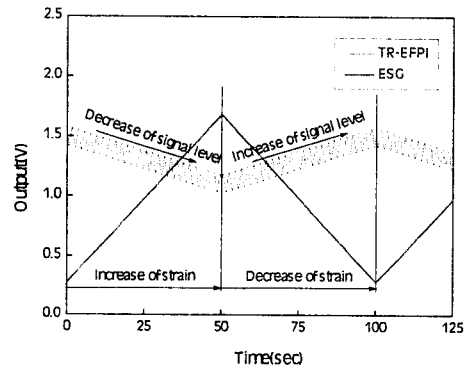


그림 2 광섬유 TR-EFPI 센서와 전기저항형 변형률 게이지(ESG)의 출력 신호

Fig. 2. Output signals from fiber optic TR-EFPI sensor and electrical strain gauge(ESG).

### III. 광출력 신호의 특성

#### 1. 광출력 신호에 대한 이론

광섬유 TR-EFPI 센서는 Fig. 1과 같은데, 광섬유 탐촉자의 외부에서 변형이 가해져 광섬유 사이의 공기간극  $s$ 의 길이가 변화하면 광검출기(PD)에서 측정되는 광출력 신호는 입력광이 공기간극에서 겪게되는 광 손실 및 간섭에 따른 효과를 갖게된다. 이러한 광섬유 TR-EFPI 센서의 광출력 신호의 수치 해석은 다음과 같은 절차에 의하여 수행하게 된다<sup>[5]</sup>. 광섬유 TR-EFPI 센서의 광경로 1 ( $I_{out1}$ 의 빛이 겪는 광경로)과 광경로 2 ( $I_{out2}$ 의 빛이 겪는 광경로)는 전자파이론의 맥스웰 방정식의 해로 각각의 광경로가 겪는 상황에 따라 반사계수  $r$ 과 투과계수  $t_1, t_2$ 를 사용하여 아래와 같이 표현할 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 r \cos(kx_1 - \omega t) \\ E_2 &= E_0 t_1 t_2 L_2 \cos(kx_2 - \omega t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 전파상수로  $2\pi n/\lambda$ 이다. 광경로 1은 단일모드 광섬유 끝단에서 반사되는 빛에 대한 광경로이고, 광경로 2는 공기간극을 진행하여 거울코팅 광섬유를 만나서 되돌아오는 빛의 광경로를 표시한다. 따라서 공기간극을 지나서 빛은 광 손실을 경험하게되는데 이 량이  $L_2$ 이다. 광경로 2에 대한 식은 단일모드 광섬유에서 공기간극으로 투과되고, 다시 단일모드 광섬유로 입사되므로 각각에 대한 투과 계수  $t_1, t_2$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \\ t_2 &= \frac{2n_2}{n_1 + n_2} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 광섬유의 굴절률  $n_1$ 은 1.46, 공기의 굴절률  $n_2$ 는 1을 사용하여 계산하면,  $t_1 = 1.187$ ,  $t_2 = 0.813$ 으로 값이 결정된다. 또한 광경로 1에 대한 식은 단지 단일모드 광섬유 끝단에서 반사만 되므로 반사계수  $r = 3\%$ 를 사용한다.

위와 같이 두 광경로를 겪는 빛의 간섭 및 손실에 따른 광출력 신호는 위 식 (1)의 대수합의 내적(inner product)으로 광경로차  $x_2 - x_1$ 는 공기간극  $s$ 가 되므로 아래 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} E^2(s) &= (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* \\ &= E_0^2 \{ r^2 + t_1^2 t_2^2 L_2^2 + 4rt_1 t_2 L_2 \cos(2ks) \} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식 (3)의 광출력 신호를 입력광  $E_0$ 의 제곱에 대하여 정규화하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= E^2(s) / E_0^2 \\ &= r^2 + t_1^2 t_2^2 L_2^2 + 4rt_1 t_2 L_2 \cos(2ks) \end{aligned} \quad (4)$$

광손실  $L_2$ 는 두 광섬유가 공기간극을 갖고 있을 때 광 손실을 계산하는 접합 손실형 모델(splice loss based model)을 사용하여 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>. 광섬유의 내부를 진행하는 광 모드의 개수를 결정하는 규격화 주파수(normalized frequency)는 아래와 같이 계산된다<sup>[7]</sup>.

$$V = \frac{\pi a}{\lambda} NA \quad (5)$$

여기서  $NA$ (numerical aperture)는 광섬유의 고유

값으로 일반적인 단일모드 광섬유의 경우 0.1의 값을 갖는다<sup>[8]</sup>. 또한  $a$ 는 광섬유의 코어 지름으로 7.9  $\mu\text{m}$ 의 광섬유를 본 연구에서는 적용하였으며, 광원은 1315 nm 파장의 레이저 다이오드를 사용하였다.

단일모드 광섬유의 경우 광섬유 내부의 spot size  $\omega_0$ 는 Marcuse의 방법<sup>[9]</sup>에 의하면

$$\omega_0 = \frac{a}{2} \left( 0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (6)$$

로 구해진다. 또한 Rayleigh 거리  $x_R$ 은

$$x_R = \frac{\pi n \omega_0^2}{\lambda} \quad (7)$$

이다. 따라서 식 (4)에서 광출력 신호를 계산하는데 필요한 광손실  $L_2$ 는 접합 손실형 모델에 의하면 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L_2(s) = \sqrt{\frac{1}{1 + (0.5 \cdot 2s/x_R)^2}} \quad (8)$$

따라서 식 (8)을 식 (4)에 대입하면 구조물의 변형률 ( $\varepsilon = \Delta L/L$ )에 의한 광섬유 TR-EFPI 센서 탐촉자의 공기간극  $s$ 의 변화 ( $\Delta s = \varepsilon L$ )에 따른 광출력 신호를 계산에 의하여 구할 수 있게된다.

## 2. 광출력 신호의 위상차와 변형률의 관계

광섬유 TR-EFPI 센서로부터 광출력 신호를 취득하여 구조물의 변형률을 구하기 위해서는 광출력 신호의 위상차와 변형률 관계식을 사용한다. 센서 탐촉자의 외부에서 작용하는 변형에 따른 공기간극  $s$ 의 변화량  $\Delta s$ 는 탐촉자의 게이지 길이 변화  $\Delta L$ 과 동일한 량이 변화하므로 간섭 위상차  $\Delta \phi$ 와의 관계는 식 (4)로부터 다음 식 (9)와 같이 주어진다<sup>[10]</sup>.

$$\Delta \phi = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \Delta s = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \Delta L \quad (9)$$

$\lambda_0$ 는 진공에서의 레이저의 파장이므로 식 (9)에서 실험에서 사용된 레이저 다이오드의 파장  $\lambda_0 = 1315$  nm와 공기의 굴절률  $n \approx 1$ 을 대입하면 다음 식 (10)이 된다.

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = \frac{4\pi n}{\lambda_0} = 0.9556 \times 10^7 \text{ (rad/m)} \quad (10)$$

변형률에 대한 수식으로 식 (10)을 변환한다. 센서에서 얻어지는 광출력 신호의 정현파 반주기의 개수에 해당하는 위상차 계수(phase difference parameter)를  $m$ 이라 정의하면 위상차  $\Delta\phi$ 는  $m\pi$ 라고 할 수 있으며, 게이지 길이  $L$ 에 대하여 변형률은  $\epsilon = \Delta L/L$ 이므로 식 (10)을 변형률로 나타내면 다음과 같은 식이 된다.

$$\epsilon = \frac{\lambda_0 m}{4L} = G \frac{m}{L} = 3.2876 \times 10^{-7} \frac{m}{L} \quad (11)$$

위 식에서  $L = 1 \text{ cm}$ 일 때  $m = 1$ 로 하면 변형률  $\epsilon$ 은  $32.9 \times 10^{-6}$ 으로 광신호의 정현파 반주기를 계수할 때의 변형률 감지도(strain sensitivity)이다. 따라서, 광섬유 TR-EFPI 센서의 감지도는 게이지 길이에 따라 식 (11)을 이용하여 상수로 결정이 되며 광출력 신호로부터 정현파 반주기 개수에 해당하는 위상차 계수(phase difference parameter)를 구하면 변형률을 계산할 수 있다. 이러한 광섬유 TR-EFPI 센서의 안정도는 식 (11)에서 알 수 있는 것처럼 광원의 파장에 의존하므로, 본 연구에서 사용하는 레이저 다이오드의 파장 안정도<sup>11)</sup>가 약 0.23%이므로 이 파장 안정도만큼의 변형률 오차가 발생할 수 있다.

### 3. 광출력 신호의 분석

TR-EFPI 센서의 광출력 신호 특성을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 광섬유 축을 정렬할 수 있는 광섬유 접속기를 정밀한 광섬유 정밀이송장치(precise optical fiber translation device)로 사용하였다. 이 정밀이송장치 위에 단일모드 광섬유와 거울코팅 광섬유를 위치시킨 후에 공기간극을 변화시키면서 신호특성을 관찰하였다. 그 결과 Fig. 4와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. Fig. 4에는 공기간극의 길이를 단순히 증가시키면서 광출력 신호를 광검출기(PD)에 의하여 전기신호로 바꾼 후 디지털 저장 스코우프(Tektronix, TDS3034)를 사용하여 얻은 실험적인 광출력 신호와 식 (4)에 의하여 계산된 광출력 신호가 함께 도시되어 있다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 공기간극의 증가에 따라 광손실이 발생하여 광출력 신호의 신호 수준이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4에서 확대 곡선을 보면 광간섭에 의한 신호가 정확하게 출력됨을

확인할 수 있다. 이러한 신호특성으로부터 광섬유 TR-EFPI 센서의 외부에서 작용하는 변형률이 공기간극을 증가시키는 방향으로 작용하면 Fig. 4와 동일한 형태의 광출력 신호를 얻게됨을 알 수 있다. 만약 변형률이 공기간극을 감소시키는 방향으로 작용한다면 광손실이 감소하여 광출력 신호의 수준이 증가하는 방향으로 출력될 것이다. 따라서 변형률의 크기는 광간섭 신호인 정현파 신호의 위상차 계수에 의하여 결정하고, 변형률의 증가 및 감소 방향은 광출력 신호수준의 변화를 관찰함에 의하여 판정할 수 있다. 또한 구조물의 절대변형률은 광신호의 신호 수준에 의하여 판정할 수 있을 것이다. 이와 같이 광출력 신호의 신호 수준 변화 및 간섭 신호를 유효하게 얻을 수 있는 공기간극의 간격 영역은 Fig. 4에서 보면 약 0 ~ 200  $\mu\text{m}$ 인 것을 알 수 있다.

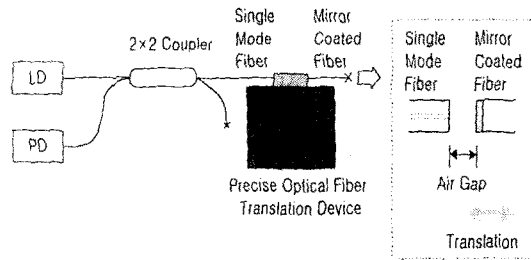


그림 3. 정밀이송장치를 이용한 광섬유의 정렬  
Fig. 3. Alignment of fibers on precise optical fiber translation device.

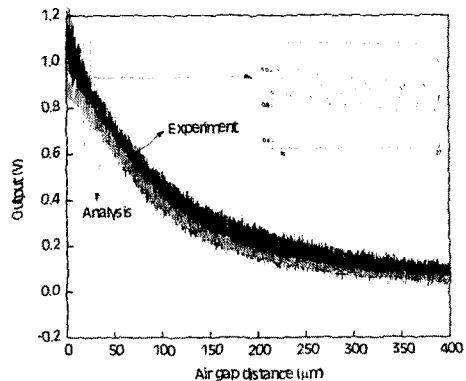


그림 4. 광섬유 TR-EFPI 센서 광출력 신호의 특성  
Fig. 4. Characteristics of optical signal output of fiber optic TR-EFPI sensor.

#### IV. 센서 탐촉자의 제작

광섬유 TR-EFPI 센서의 탐촉자 제작은 단일모드 광섬유, 거울코팅 광섬유, 모세 유리관을 준비하여야 한다. 단일모드 광섬유는 광원의 파장에 의하여 코어직경을 적합한 것으로 선정하면 된다. 본 연구에서는 1300 nm 파장의 광원에 적합한 약 8  $\mu\text{m}$ 의 코어직경을 갖는 (주) LG광통신의 단일모드 광섬유를 사용하였다. 거울코팅 광섬유는 순도 약 99%의 금이나 은을 증착제로 하여 진공증착기 안에 증착체의 위치와 수직하게 광섬유 단면을 위치시켜 코팅두께 약 0.8 nm로 증착시켜 제작한다. 광섬유의 외경이 125  $\mu\text{m}$ 이므로 모세 유리관의 내경은 광섬유의 외경보다 조금 큰 내경 약 130 ~ 140  $\mu\text{m}$ 이고 외경은 약 300  $\mu\text{m}$ 인 것을 사용하였고, Fig. 5와 같은 현미경이 장착된 제작도구에 의하여 제작하였다. 모세 유리관의 내경이 광섬유의 외경보다 너무 크면 모세 유리관 내부에서 단일모드 광섬유의 단면이 거울코팅 광섬유의 반사면과 평행하지 못하고 기울어지면 공기 간극 내부를 진행하는 빛이 거울코팅 광섬유에서 반사되어 단일모드 광섬유로 돌아오지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 모세 유리관의 직경은 광섬유의 외경보다 약간 큰 것을 사용하는 것이 매우 중요하다<sup>[12]</sup>. 센서 탐촉자는 Fig. 1과 같이 두 개의 광섬유, 즉 단일모드 광섬유와 거울코팅 광섬유를 광섬유의 외경(약 125  $\mu\text{m}$ )보다 약간 큰 내경(약 300  $\mu\text{m}$ )을 갖는 모세 유리관에 삽입하여 두 광섬유를 정렬하게 된다. 광섬유의 단면은 거울 역할을 해야 하므로 단면에 이물질이 묻거나, 광섬유가 모세 유리관에 닿아 상하지 않도록 Fig. 5와 같이 광섬유를 정밀하게 이송할 수 있는 특별한 미세 이송 장치(micro-translator)가 필요하다. 이러한 탐촉자 제작을 위한 미세 이송 장치는 광섬유와 모세 유리관을 고정하는 부분, 모세 유리관을 3축으로 미세조정하는 부분과 모세관의 단면을 관찰할 수 있는 현미경으로 구성된다.

광섬유 TR-EFPI 센서 탐촉자의 제작은 Fig. 6에서와 같은 순서에 의하여 제작된다. 모세 유리관은 아세톤으로 깨끗이 닦은 후 제작하고자 하는 게이지 길이보다 약 4~5 mm 길게 화이트 날을 이용하여 수직으로 절단한다. 단일모드 광섬유는 약 60 cm 정도로 절단하여 광섬유 탈피기(Clauss, CFS-1)를 사용하여 피복을 제거하고 이물질이 남아 있지 않도록 아세톤을 이용하여 깨끗이 닦아낸다. 광섬유의 단면 절단은 광섬유

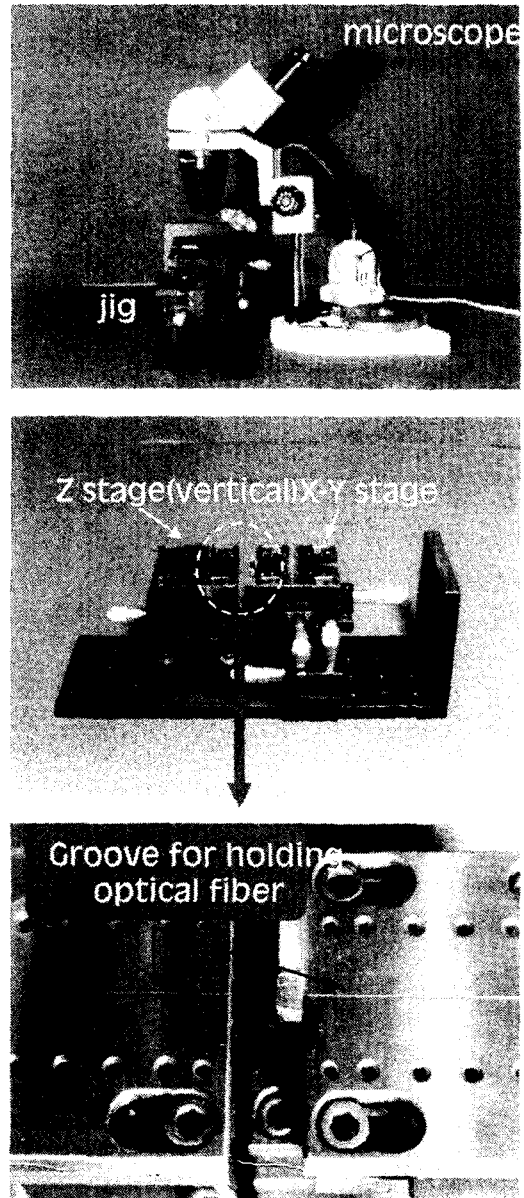


그림 5. 광섬유 TR-EFPI 센서 탐촉자를 제작하기 위한 미세 이송 장치

Fig. 5. Micro-translator for manufacturing the probe of TR-EFPI sensor.

절단기(Fujikura CT-03)를 이용하여 잘라낸 후 현미경을 이용하여 단면의 수직 여부와 이물질의 부착여부를 검사하여 이상이 있는 경우에는 위의 과정을 반복 수행한다. 그 후에 모세 유리관을 미세 이송 장치에 Fig. 6 (1)의 지그 A의 V 홈에 위치시킨 후 스카치 테이프

를 이용하여 고정한 후, 반대편에 수직으로 절단된 단일모드 광섬유를 Fig. 6 (2)와 같이 고정한다. 현미경의 낮은 배율( $\times 30$ )로 미세 이송 장치를 사용하여 최대로 모세 유리관을 광섬유에 접근시킨 후 높은 배율( $\times 60$ )을 사용하여 광섬유의 단면이 모세 유리관에 닿지 않도록 주의하며 미세 이송 장치를 이용하여 모세 유리관에 삽입하고 광섬유가 모세 유리관의 끝단부터 약 7 mm 정도 삽입되어 위치하도록 한다. 모세 유리관과 광섬유의 접착은 CIBA-GEIGY 사의 5분 경화 에폭시(epoxy)를 사용하였다. 완전히 경화가 끝난 후 모세 유리관의 광섬유가 삽입되지 않은 반대편을 게이지 길이 10 mm 보다 약간 더 길게 약 14 mm 정도로 바이트 날을 사용하여 절단한다. 이렇게 절단한 모세 유리관의 반대쪽 부분에 대해서 단일모드 광섬유를 삽입했던 때와 같은 과정으로 Fig. 6 (4)와 같이 거울코팅 광섬유를 삽입한다. 공기 간극은 약 20 ~ 30  $\mu\text{m}$  정도 유지한 후 에폭시를 사용하여 접착시킨다. 에폭시 접착제는 모세 유리관 위에 묻히면 모세유리관 안으로 약 2 mm 정도 흘러 들어가므로 게이지 길이는 약 10 mm로 조정된다. 이러한 탐촉자 제작과정을 거쳐서 Fig. 7과 같은 탐촉자를 제작하였으며 PIKA 독취 현미경을 사용하여 10  $\mu\text{m}$  정도의 정확도로 게이지 길이를 측정하였다.

V. 변형률 측정 실험 및 분석

광섬유 TR-EFPI 센서의 탐촉자는 게이지 길이  $L = 10.21 \text{ mm}$ 로 제작하여 구조물의 변형률 측정 실험을 위하여 Fig. 8과 같이 길이는 290 mm, 폭은 25 mm, 두께는 5 mm인 알루미늄 시험편 위에 에폭시를 사용하여 시험편의 중앙 부위에 부착하였다. 전기저항형 변형률 게이지는 게이지 길이 5 mm의 Kyowa 제품을 광섬유 센서 옆에 부착하였다. 변형률 측정 실험은 이 알루미늄 시험편을 Fig. 9와 같은 만능시험기에 설치하여 하중을 증감시키면서 수행하였다. 만능시험기는 1 mm/min의 속도로 변위를 제어하면서 하중을 증가시켰다가 다시 감소시키도록 작동시켰다. 광섬유 센서의 신호는 광검출기(Lasertron, QDFT-005)를 사용하여 전기신호로 바꾸고, 변형률 게이지 신호와 함께 A/D 변환기를 통하여 PC에서 신호를 취득하였다.

그 결과 Fig. 10과 같은 광출력 신호와 변형률 게이지에 의한 출력 신호를 얻을 수 있었다. Fig. 10에서 변형률 증가와 함께 공기 간극에서 광 손실이 발생하

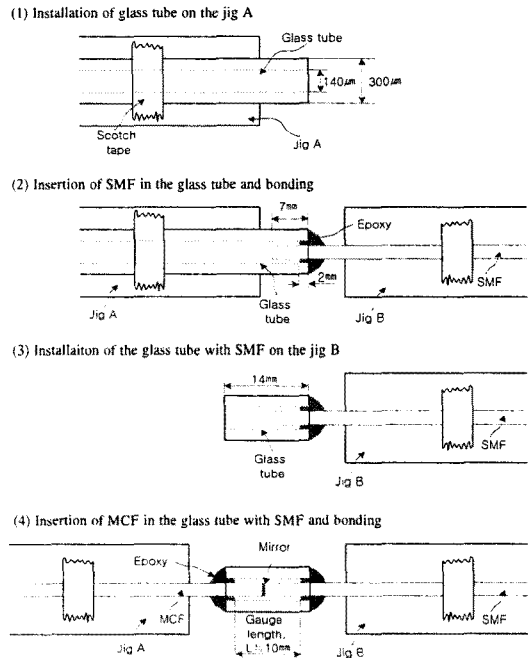


그림 6. 광섬유 TR-EFPI 센서의 탐촉자 제작 과정  
Fig. 6. Manufacturing procedure of the probe of fiber optic TR-EFPI sensor.

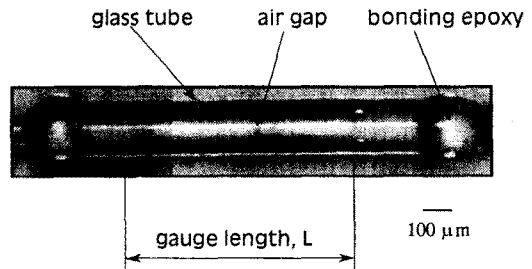


그림 7. 제작된 광섬유 TR-EFPI 센서 탐촉자  
Fig. 7. Manufactured probe of fiber optic TR-EFPI sensor.

여 광출력 신호의 신호 수준이 감소함과 동시에 간섭 파형이 출력됨을 볼 수 있다. 또한 변형률이 감소하면 다시 공기 간극 안에서의 광 손실이 회복되어 광출력 신호의 신호 수준이 높아지고 있음을 볼 수 있다.

광출력 신호로부터 변형률을 구하기 위한 디지털 신호처리 프로그램의 처리 순서는 Fig. 11과 같다. 광섬유 센서가 작동하기 전에 초기화를 통하여 초기에 발생할 광출력 신호의 정현파 한주기의 최대점( $I_{max}$ )과

최소점( $I_{min}$ )을 구하고 기준점( $I_{ref0}$ )을 최대점과 최소점의 중간점으로 구한다. 그후 센서를 작동시키면 Fig. 11에서처럼 광출력 신호를 한 시점에 한 개씩 취득하여 신호를 처리하게 된다. 먼저 광출력 신호 한 주기에 대한 기준점은 Fig. 11에 표시된 것처럼 최대점과 최소점 사이의 중간점으로 결정한다. 그후 현 시점에서 얻어진 한 개의 광출력 신호( $I$ )가 기준점보다 높으면 1로 하고, 그렇지 않으면 -1로 설정하여 정현파 신호를 구형파(rectangular wave) 형태(SD)로 바꾼다. 그 후 위상차 계수,  $m$  값을 결정하는 단계에서는 이러한 구형파가 1에서 -1 또는 -1에서 1로 바뀌는 시점인가를 검사한다. 만약 구형파 한 주기가 끝나는 시점이면 SD가 변화하는 것으로 판정이 되며 그에 따라 기준점의 변화를 검토한다. 이 기준점의 변화 여부를 검토하는 과정은 미리 초기화되어 갖고 있던 기준점과 현재의 기준점을 비교하여 그 값이 0보다 크다면 광출력 신호의 신호 수준이 증가한 것을 의미하고, 이러한 신호 수준의 증가는 변형률이 감소하는 경우이므로  $m$  값의 변화량 ( $Dm$ )을 -1로 설정하고, 전의 기준점보다 현재의 기준점이 작은 경우에는  $Dm$ 을 1로 설정한다. 그 후 새로운  $m$  값은  $m_0 + Dm$ 으로 계산되므로 변형률의 크기 및 증감을 구할 수 있게되었다. 만약 현 시점에서 구형파 한 주기가 변하는 시점이 아니라면  $m$  값은 변동이 없게 되어  $m$  값은  $m_0$ 로 프로그램에서 처리된다. 그후 변형률의 계산은 구해진  $m$  값에 게이지 상수  $G^*$ 를 곱하면 결정된다. 그후 센서가 STOP되지 않으면 현재 상태에서의 구형파 한 주기안에서의 최대점과 최소점을 갱신하는 작업을 하게된다. 이러한 과정은 다음 시점에서 광출력 신호 ( $I$ )를 다시 입력받아 처리하는 과정이 계속 반복되면서 변형률을 실시간으로 계산하게 된다. 광섬유 TR-EFPI 센서의 광출력 신호인 Fig. 10으로부터 변형률을 계산하기 위하여 식 (11)에 본 연구에서 제작된 탐촉자의 게이지 길이 10.21 mm를 대입하면 다음과 같은 게이지 상수  $G^*$ 를 얻게 된다.

$$\epsilon = G^* m = 3.2876 \times 10^{-7} \frac{m}{10.21 \times 10^{-3}} = 32.20 \times 10^{-6} m$$

Fig. 11과 같은 디지털 신호처리 프로그램에 의하여 Fig. 10의 광출력 신호를 입력시켜 위상차 계수  $m$ 을 구하고, 게이지 상수  $G^*$ 를 곱하면 광섬유 센서에 의한 변형률을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 광섬유 TR-EFPI 센서에 의한 변형률과 변형률 게이지에 의한 변형률을 Fig. 12에 도시하였다. 그런데 변형률이 감소

하는 구간에서는 이 게이지 상수  $G^*$ 를 적용하면 변형률 게이지와 약간의 차이를 보였다. 그래서 변형률이 감소하는 경우에는 새로운 게이지 상수  $34.776 \times 10^{-6}$ 를 구하여 변형률 게이지의 값과 일치할 수 있도록 하였다. 이와 같이 게이지 상수가 변형률 증가 구간과 감소 구간에서 차이가 발생하는 원인은 광섬유 센서를 알루미늄 시험편에 접착한 에폭시 접착제의 점소성 특성으로 인하여 알루미늄의 변형률이 감소할 때 광섬유의 공기간극 길이가 감소하도록 에폭시 접착제가 거동하여야 하는데 그렇지 않기 때문에 나타나는 현상으로 사려된다. 따라서 향후에는 이러한 점소성 특성이 최소화된 접착제를 적용하여 변형률 측정을 편리하게 할 필요가 있다. 또한 접착제 특성에 따른 광섬유 센서의 변형률 측정을 위한 게이지 상수의 변화에 대하여 반복적인 변형률 측정에 대하여 조사해야 할 것이다.

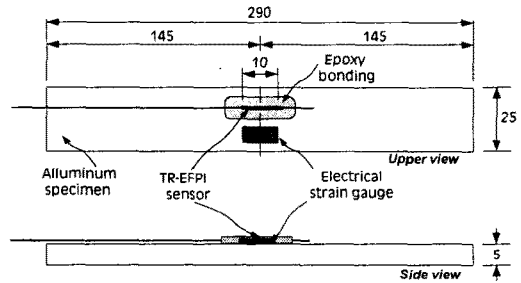


그림 8. 광섬유 TR-EFPI 센서와 전기저항형 변형률 게이지를 접착한 알루미늄 시험편.

Fig. 8. Aluminum specimen with fiber optic TR-EFPI sensor and electrical strain gauge.

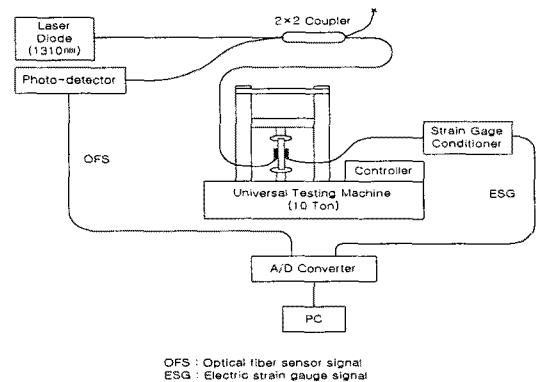


그림 9. 광섬유 TR-EFPI 센서의 변형률 측정장치 셋업  
Fig. 9. Experimental setup for measuring the strain by fiber optic TR-EFPI sensor.



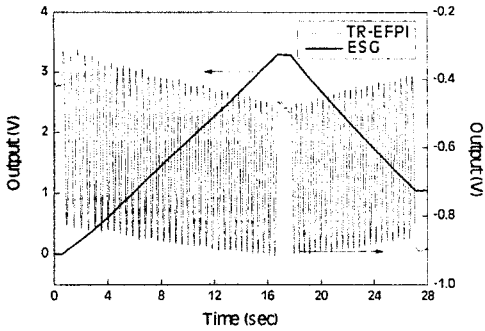


그림 10. 광섬유 TR-EFPI 센서와 전기저항형 변형률 게이지로부터 얻어진 출력 신호들

Fig. 10. Output signals from TR-EFPI and electrical strain gauge.

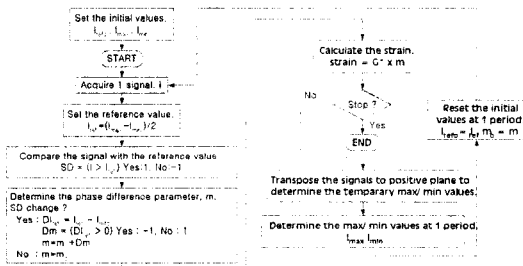


그림 11. 광출력 신호로부터 변형률을 계산하는 디지털 신호처리 프로그램의 흐름도

Fig. 11. Flow chart of digital signal processing program to calculate the strain from optical output signal.

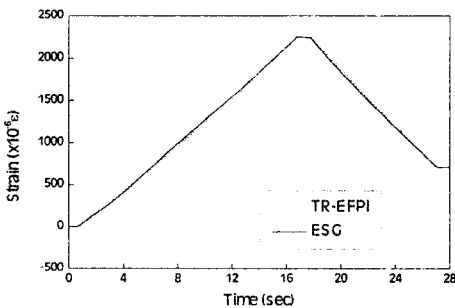


그림 12. 광섬유 TR-EFPI 센서와 전기저항형 변형률 게이지에 의한 변형률의 비교

Fig. 12. Comparison of strains from fiber optic TR-EFPI sensor and electrical strain gauge.

## VI. 결론

구조물의 변형률을 측정하기 위한 광섬유 TR-EFPI 센서를 개발하기 위하여 광출력 신호 특성을 수치 해석 및 실험을 통하여 조사하고, 단일모드 광섬유와 거울코팅 광섬유를 모세 유리관에 삽입한 탐촉자를 제작하여 외부 물리량으로 변형률을 가하면서 광출력 신호 변화를 관찰하였다. 이러한 연구를 통하여 광섬유 TR-EFPI 센서는 변형률의 크기 및 방향을 측정할 수 있는 광출력 신호에 신호 수준의 변화 및 간섭과형을 동시에 출력함을 확인하였다. 또한 변형률을 측정하기 위한 유효 공기간극의 길이는 약 200  $\mu\text{m}$  이하임을 알 수 있었다. 만능시험기를 사용한 변형률을 측정하는 실험을 통하여 개발된 광섬유 TR-EFPI 센서가 전기 저항형 변형률 게이지와 함께 변형률을 잘 측정할 수 있음을 보였다. 또한 변형률이 증가할 때와 감소할 때 변형률을 계산하기 위한 게이지 상수가 다름을 알 수 있었다. 향후 이러한 변형률 증감에 따른 게이지 상수 차이가 발생하는 원인 및 센서의 반복특성에 대한 정밀한 검토를 수행할 예정이다.

## VII. 참고문헌

- [1] R. O. Claus, J. C. Mckeeman, R. G. May and K. D. Bennet, "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications," *Proc. of ARO Smart Materials, Structures and Mathematical Issues Workshop*, pp. 29-38, 1988.
- [2] I. B. Kwon, C. G. Kim, and C. S. Hong, "A digital signal processing algorithm for structural strain measurement by a  $3 \times 3$  passive demodulated fiber optic interferometric sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, No. 4, pp. 433-440, August 1999.
- [3] K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar and R. O. Claus, "Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors," *Optics Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 273-275, 1991.
- [4] V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus, T. A. Tran and J. A. Greene, "Absolute strain and

- temperature measurements using high finesse EFPI cavities," *FEORC Fiber Optics Review Conference*, Blacksburg, VA, April, 1994.
- [5] R. E. Wagner, and C. R. Sandahl, "Interference effects in optical fiber connection," *Applied Optics*, vol. 21, no. 8, pp. 1381-1385, 1982.
- [6] D. Marcuse, "Loss analysis of single mode fiber splices," *Bell syst. tech. J.*, vol. 56, no. 5, pp. 703-718, 1977.
- [7] T. Okoshi, *Optical fibers*, Academic press, Inc., pp 65-67, 1982.
- [8] J. P. Powers, *An introduction to fiber optic systems*, Aksen associates, pp. 26-28, 1993.
- [9] H. Kohelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Applied optics*, vol. 5, pp. 1550-1567, 1966.
- [10] R. O. Claus, "Optical fiber sensors for smart materials characterization," *Proceedings of the ICCM 2nd conference*, pp. 699-710, 5-8 June 1994.
- [11] *Lasertron product guide*, pp. 19-20, 1998.
- [12] S. H. Kim, J. J. Lee, D. C. Lee, and I. B. Kwon, "A study on the development of transmission - type extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor," *J. of Lightwave technology*, vol. 17, no. 10, pp. 1869-1874, 1999.

---

著 者 紹 介

---



**권 일 범**

1963년 5월 12일생. 1987년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업(공학사). 1989년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1997년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학박사). 1989년~1992년 포항산업과학연구원 강재연구부. 1997~현재 한국표준과학연구원 산업측정표준부 시설안전계측연구센터 선임연구원. 주관심분야 : 광섬유 센서 개발 및 응용, 구조안전 감시기술, 인공지능 응용



**최 만 용**

1957년 2월 20일생. 1979년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1982년 한양대학교 대학원 계측공학전공(공학석사) 1983년 동경대학 대학원 1985년 한양대학 대학원 계측공학전공(공학박사) 1986년 1월부터 현재까지 한국표준과학연구원 시설안전계측연구센터 책임연구원. 주관심분야 : 계측모델연구, 센서 및 계측기기 설계, 현장계측 기술, 상시감시기술, 센서신뢰성시험기술



**문 한 규**

1942년 7월 8일생. 1965년 서울대학교 조선항공학과 졸업(공학사). 1973년 존스홉킨스대학교 역학과 졸업(공학박사). 1978 - 현재 한국표준과학연구원 산업측정표준부 시설안전계측연구센터. 주관심분야: 재료 및 구조물의 파손방지기술.



**김 민 수**

1971년 5월 12일생. 1997년 전북대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1999년 전북대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1999년~현재 한국표준과학연구원 인턴연구원. 주관심분야 : 광도파로, 광섬유 센서 개발 및 응용