

논문 2000-9-3-02

광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서의 개발

권일범, 김치엽, 김민수, 이왕주

Development of Optical Frequency Modulated Fiber Optic Interferometric Sensor

Il-Bum Kwon, Chi-Yeop Kim, Min-Soo Kim, and Wang-Joo Lee

요약

광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서가 변위, 변형률 및 힘 등의 물리량을 측정하기 위하여 개발되어졌다. 일반적인 광섬유 간섭형 센서는 물리량에 따라 단지 정현파 형태의 신호를 보이기 때문에 물리량의 증감을 구별하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 물리량의 증감 방향을 구별하면서 물리량을 측정하기 위하여 단지 톱니파형으로 변조시킨 광원만을 사용하는 광섬유 마이켈슨 센서를 구성하였다. 센서 출력은 일정한 정현파가 출력되도록 조절되어졌다. 출력신호는 일정 시간 간격동안 파형의 개수를 계수함에 의하여 처리되어졌다. 변형률은 파형 개수 변화량에 변형률을 구하기 위한 게이지 상수만을 곱함에 의하여 계산되었다. 이 센서의 변형률 측정 성능을 검토하기 위하여 광섬유 센서와 전기저항형 변형률 게이지가 부착된 알루미늄 시험편을 사용하여 만능시험기로 반복하중을 가하여 변형률의 증감을 측정하는 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 광섬유 센서에 의하여 측정된 변형률 변화량이 전기저항형 변형률 게이지의 변화량과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor was developed to sense the mechanical quantities, such as displacement, strain, force etc. It has been difficult to distinguish whether the increase of the mechanical quantities or the decrease of the quantities measured by the conventional fiber optic interferometric sensors because their signals only have a sinusoidal wave pattern related to the change of mechanical quantities. In this study, in order to measure the mechanical quantities with the distinction of the changing direction of the quantities, the fiber optic Michelson interferometric sensor was simply constructed by the laser light modulated with saw tooth wave pattern. The output signal of the sensor was controlled as the sinusoidal wave. The signal processing was based on the counting of the wave number of the output signal during constant time duration. The strain was determined by the cumulative value of the wave number produced by the gage factor. In order to verify the strain measurement capability of this sensor, the strain increase-decrease test was performed by universal testing machine installed with the aluminum specimen bonded with the fiber optic sensor and electrical strain gage. In the result of the test, the strain from the fiber optic sensor had a good agreement with the values from the electrical strain gage.

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

<접수일자 : 1999년 12월 17일>

1. 서론

광섬유 센서를 이용하여 물리량의 변화를 검출하는 방법에는 광의 세기를 이용하는 방법과 광섬유를

전파하는 광의 위상을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 광섬유에 외부 물리량이 인가되면 광섬유를 진행하는 빛에 손실을 가하게 된다. 검출부에서는 손실된 광량을 직접 검출하기 때문에 신호처리가 단순하며 구조도 간단하다는 장점이 있다. 그러나 측정 감도가 낮은 단점을 가지고 있다. 광의 위상을 이용하는 경우 단일 광원에서 입사된 레이저 광은 광섬유 연결계를 통해 서로 다른 광섬유를 전파하게 된다. 외부 물리량의 변화를 겪은 광과 그렇지 않은 광이 다시 하나의 광섬유에서 만날 때 서로 다른 위상차로 인하여 보강간섭과 상쇄간섭을 통하여 간섭파를 만들게 된다. 위상차에 의한 센서이기 때문에 감도가 뛰어나지만 물리량 환산을 위하여 간섭 위상의 크기 및 증감 방향을 알아야 물리량의 증감 방향을 검출할 수 있게되는 어려움이 있다.¹¹⁻¹³⁾

이러한 간섭계의 위상 변화 절대량 및 방향을 알아내기 위해서는 광섬유 센서의 간섭 구간내에 위상변조기를 장치하고 호모다인, 헤테로다인 등의 방법으로 신호처리하여 위상을 추적하는 것이 필요하다.¹⁴⁾ 광섬유 간섭 센서의 신호처리에 대해서는 Taylor¹⁵⁾ 등에 의하여 다양한 방법이 개발되어 왔다. Giliani 등¹⁶⁾은 광섬유 간섭 센서를 이용하여 넓은 대역의 동적 측정을 위하여 디지털 복조(digital demodulation)를 위하여 마크-첸드 간섭계를 두어 위상 변조하였다. 또한 Hilbert transform에 의하여 신호잡음을 제거하였다. Andrew 등¹⁷⁾은 광섬유 센서 신호의 선형화를 위하여 DC부터 고주파 신호까지 처리 할 수 있는 시스템을 개발하였다. 아날로그 회로가 위상 추적을 통하여 1.92도의 분해능으로 위상을 측정하였다. 국내에서는 예운해¹⁸⁾에 의한 간섭형 광섬유 센서의 신호처리기법에 관한 연구에서는 주파수 처평에 의한 광원 변조를 통하여 광소자를 사용하지 않고 물리량을 검출할 수 있도록 하였다. 이상과 같은 광섬유 간섭 센서로부터 외부물리량의 방향과 크기를 알아내기 위한 신호처리는 예운해의 신호처리 기법 외에는 대부분 모두 광섬유 회로에 부가되는 부품들이 있고 전자회로가 구성되어야 하는 번거로움이 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서를 개발하여 외부 물리량의 변화 크기와 방향을 간편하게 알아낼 수 있도록 하였다. 이 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서는 광원의 주파수를 변조하여

간섭계 출력에 정현파 반송파를 얻게 하는 방식으로 구현된다. 이러한 센서를 구성한 후 만능시험기에 의하여 변형률 증가-감소 실험을 통하여 알루미늄 시험편에 설치된 광섬유 센서가 변형률을 잘 측정할 수 있는지 실험하였다.

2. 작동 원리

광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서는 Fig. 1과 같이 구성된다. 광원인 레이저 다이오드(LD)에 톱니파형의 구동전류를 인가하면 톱니파형으로 주파수 변조된 레이저 빛이 발생하여 광섬유에 입사되면 광섬유를 따라 입사광이 2x2 광섬유 연결계를 통과하여 기준광섬유와 감지광섬유를 지나게 된다. 이 때 구조물에 접촉되어 외부 물리량으로 구조물의 변형률이 발생하게 되면 감지 광섬유의 길이변화를 가져오게 되어 감지광섬유를 지나는 광경로를 변화시킨다. 이에 따라 기준광섬유에서 되돌아 나오는 빛과 감지광섬유에서 되돌아 나오는 빛 사이에는 광경로차가 발생하게 되고 두 빛이 2x2 광섬유 연결계에서 만나게 되면 보강 또는 상쇄간섭을 일으키게 된다. 그 결과 Fig. 1의 광검출기에 출력되는 정현파의 주파수가 변형률의 변화율에 비례하여 주파수 변조가 Fig. 2와 같이 발생하게 된다. Fig. 2에서 보면 변형률이 없는 경우의 일정시간 간격안의 구형파의 개수와 변형률이 증가하는 경우의 구형파의 개수 및 변형률이 감소될 때의 구형파의 개수가 변화하게 된다. 따라서 이러한 광섬유 센서 출력신호인 정현파 신호를 구형파로 변환한 후 일정시간 간격동안 그 개수를 계수함에 의하여 외부 물리량 즉 변형률을 알아낼 수 있다.

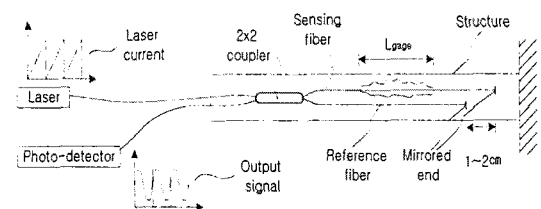


그림 1. 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서의 개념도.
Fig. 1. Schematic diagram of optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor.

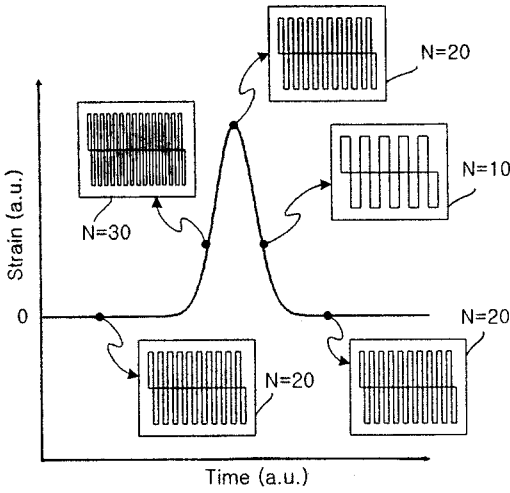


그림 2. 변형을 변화에 따른 광섬유 센서의 구형과 신호.
Fig. 2. Rectangular signals from fiber optic sensor according to the strain change.

위와 같은 광섬유 마이켈슨 간섭 센서의 측정원리를 수식적으로 표현하면 다음과 같다. 일반적으로 광섬유 간섭계 센서에 생기는 위상차 $\Delta\phi$ 는 식 1과 같이 외부물리량 (ΔL)과 비례하므로 각 간섭계 센서 고유의 위상차 $\Delta\phi$ 와 외부 물리량과의 비례 상수를 알고 간섭계 출력 세기로부터 위상차 $\Delta\phi$ 를 구하면 외부물리량의 크기를 알 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L \quad (1)$$

그러나 간섭계 위상차가 $\Delta\phi$ 일 때 간섭계의 출력 세기 I 는 출력세기와 위상차가 비례하지 않을뿐더러 I 와 $\Delta\phi$ 의 증감 방향 또한 일치하지 않으므로 간섭계 출력으로부터 직접 위상차 $\Delta\phi$ 를 구할 수 없다. 이것을 해결하기 위하여 보통 간섭계에 일정한 위상 변조를 하는 방법이 널리 쓰이고 있다.

한 가지 방법으로써 입력광원으로 레이저 다이오드를 사용하는 경우에 구동 전류를 주기적으로 변조시키는 방법이 있다. 만일 Fig. 1과 같이 변조주파수 f_m 에 맞추어 구동전류를 문턱 전류 이상에서 톱니파 형태로 변조시키면 출력 광주파수는 역시 근사적으로 톱니파 형태로 변하는데 이것을 수식으로 나타내면 빛의

주파수를 ν 라 할 때 시간 $T (= 1/f_m)$ 의 주기로

$$\nu(t) = \nu_o + \alpha(t - t_o) \quad (2)$$

가 된다. 여기서 ν_o 는 전류 변조가 시작되는 시점의 광주파수이고 α 는 사용되는 레이저 다이오드 고유의 상수로서 레이저의 특성과 구동 전류의 변화율에 관련되는 양이며 t_o 는 전류 변조가 시작되는 시점이다. 이 주파수 변조된 빛을 길이차 ΔL 을 갖는 두 광경로를 가진 간섭계에 입사시켜 두 광경로를 지나게 한 후 간섭을 시키면 간섭하는 두 빛은 Δt 만큼 서로 다른 시간에 광원에서 나온 빛이므로 주파수차가 발생하게 된다. 여기서

$$\Delta t = \frac{n\Delta L}{c} \quad (3)$$

이고 n 은 광섬유의 유효 굴절률, c 는 진공에서의 빛의 속도이다. 식 3을 식 2에 대입하면 간섭하는 두 광의 주파수차 $\Delta\nu$ 는

$$\Delta\nu = \alpha \frac{n\Delta L}{c} \quad (4)$$

가 되고 $\Delta\nu$ 만큼 주파수가 차이나는 두 빛이 간섭한 결과 간섭 출력 I 는 레이저 구동 전류를 변조하기 위한 주기 $T (T = 1/f_m)$ 의 시작과 끝 부분을 제외한 대부분의 시간동안

$$I \propto I_o [1 + \cos(2\pi\Delta\nu t + \Delta\phi)] \quad (5)$$

의 형태가 되며 주기 T 의 처음과 끝 부분에서만 급격한 위상 변화와 세기 변화를 겪게 된다. 이 때 주어진 ΔL 에 대하여 전류 변화율을 적당히 조절하여

$$\Delta\nu \cdot T = 1 \quad (6)$$

이 되도록 하면 Fig. 3 (a)와 같이 역시 주기 T 의 처음과 끝 부분에서만 급격한 변화가 생기고 처음과 끝 부분에서 조금 떨어진 곳에서는 서로 연속되는 듯한 형태를 얻을 수 있는데 이것을 중심 주파수가 f_m 인 대역 통과기를 거치면 Fig. 3 (b)와 같이

$$I \propto I_o [1 + \cos(2\pi f_m t + \Delta\phi)] \quad (7)$$

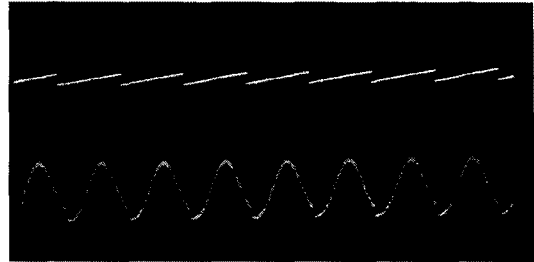
로 표시되는 외부물리량에 의해 위상이 변조되고, 레이저 구동 주파수와 같은 주파수 f_m 을 가지는 완전한 반송파 형태의 간섭계 출력을 얻을 수 있음이 이미 알려져 있다. 이것은 또한 식 6이 엄밀히 만족되지 않더라도 성립함이 알려져 있다.^[4] 식 7로 표시되는 간섭계 출력은 널리 사용되는 FM 복조 기술로 먼저 $d/\Delta\phi dt$ 를 얻은 다음 적분하여 외부물리량에 의해 발생한 $\Delta\phi$ 를 정확히 구할 수 있으나 그에 따른 전자회로가 추가되어야 한다. 식 7과 같은 형태의 신호를 얻을 수 있는 다른 방법으로는 간섭계 내에 위상 변조기를 설치하고 적당한 위상 변조를 가하는 방법이 있으나 이 방법도 광섬유 회로에 부가적인 장치를 설치해야 하며 변조를 위한 충분한 광섬유 길이가 있는 경우만 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 간섭계 센서에서 광원을 주기적으로 위상을 변조함에 의하여 식 7과 같은 간섭계 출력을 얻은 경우에 측정하고자 하는 물리량에 의한 위상차가 2π 라디안 이상이고 최대 허용 오차 범위가 2π 라디안인 경우에 일정 시간 동안 간섭 무늬 개수를 계수하는 것만으로 물리량의 크기를 알 수 있는 간편한 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서를 개발하고 이를 이용하여 구조물의 변형률을 측정하였다.

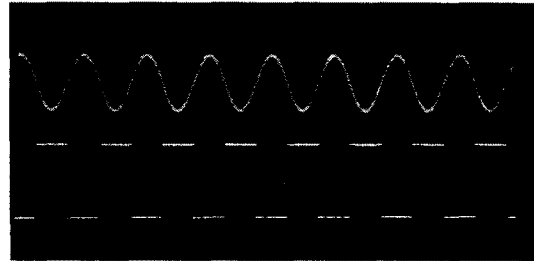
식 7을 보면 코사인 항의 전체 위상이 2π 라디안 변화할 때마다 간섭 출력은 0 점을 두 번 지나게 된다. 만약 I_{ac} (I 의 교류 성분)의 상승 또는 하강 곡면에서 0점을 교차(zero crossing)하는 개수 N 을 시간 $t-\tau$ 에서 t 까지 계수하면 외부물리량에 의한 영향이 없을 경우 $N_o(t) = [f_m \cdot \tau] = N_o$ 로 일정하고 외부물리량에 의한 영향이 있는 경우에는 $N(t) = [f_m \tau + \frac{1}{2\pi} \{\Delta\phi(t) - \Delta\phi(t-\tau)\}]$ 가 된다. 여기서 $[x]$ 는 x 보다 작은 최대 정수이다. $\Delta N(t) = N(t) - N_o$ 를 구하면 이것은 시간 $t-\tau$ 와 t 시간 사이에 외부물리량에 의해 생긴 위상 변화가 2π 라디안의 몇 배로 발생하였는지를 나타낸다. 따라서 τ 시간동안 측정 오차는 2π 라디안이 된다. 외부물리량으로 대표적인 구조물의 변형률을 광섬유 센서의 파형개수 ΔN 으로부터 구하는 식은 다음과 같다.

$$\epsilon = G \sum \Delta N_f \tag{8}$$

위와 같은 식에서 ΔN 을 일정시간 간격 τ 동안 구한 다음 누적하여 게이지 상수 G 를 곱하면 변형률을 구할 수 있게된다.



(a)



(b)

그림 3. 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서의 신호들 : (a) 톱니파형 입력 전류와 광섬유 센서의 출력 신호, (b) 여과된 광섬유 센서의 출력 신호와 구형파로 변환된 신호

Fig. 3. Signals of optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor: (a) Laser current of sawtooth wave pattern and output signal of fiber optic interferometric sensor, (b) Filtered fiber optic interferometric signal & transformed rectangular signal.

3. 센서시스템 및 탐측자의 제작

광섬유 센서는 일반적으로 다음과 같은 다섯 부분으로 이루어진다. 즉 광원으로 쓰이는 레이저, 광섬유에 빛을 입사시키는 부분, 간섭을 발생시키는데 필수적인 광분할 및 결합 부분, 간섭 신호를 전기적 신호로

바꾸어 주는 부분 및 데이터 취득 부분으로 구성된다. 본 연구에서 광섬유 마이켈슨 간섭형 센서의 제원은 표 1과 같고 전체 구성은 Fig. 1과같이 제작하였는데 간략하게 설명하면 다음과 같다. 광원은 1310 nm의 파장을 갖고 출력이 최대 0.2 mW인 Lasertron사의 DIL 레이저 다이오드를 사용하였다. 광섬유의 내부를 전파하는 빛을 분할하고 결합하는 장치인 광섬유 양방향 연계기 (fiber optic bidirectional coupler)는 E-tek 사의 제품(광분할비 50:50)을 사용하였다. 단일모드 광섬유는 LG 전선의 광섬유를 사용하였다. 광섬유 센서의 출력 광은 Newfocus 사의 model IR-DC 광검출기를 사용하여 광신호를 전기신호로 변환하였다.

Table 1. Specification of optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor

Component	Specification	Manufacturer
Light source (DIL diode laser)	0.2 mW Power 1310 nm Wavelength	Lasertron
Photo-detector	DC-125 MHz Bandwidth 40 V/mA Typical current gain 800-1800 nm Wavelength range	Newfocus IR-DC model 1811
Fiber optic coupler	50:50 Dividing ratio 0.3dB Loss	E-Tek
Single mode optical fiber	125 μm Cladding diameter 8 μm Core diameter 1.46 Refractive index $P_{11} = 0.121, P_{12} = 0.270$ 0.17 Poisson's ratio	LG cable

광섬유 센서의 탐촉자는 광섬유의 끝단면을 수직으로 자른후 입사된 빛이 반사되어 되돌아 나올 수 있도록 진공증착법에 의하여 반사율이 0.5 이상이 되도록 금으로 0.8 nm 이상의 두께로 거울코팅(mirror coating)한다. 이 거울코팅된 광섬유를 게이지 길이만큼 길이차를 두면서 감지선과 기준선을 나란히 에폭시순간 접착제로 접착한다. 광섬유 게이지 길이를 정확하게 측정하기 위하여 0.01 mm의 정밀도를 갖는 PIKA 독륜 현미경을 사용하여 게이지 길이를 측정하게 되면 마이켈슨 센서 탐촉자의 제작은 완료된다.

4. 변형률 측정 실험

광섬유 센서가 부착된 알루미늄 보는 Fig. 4와 같

이 제작하였다. 거울코팅된 광섬유는 게이지 길이만큼 길이차를 두고 에폭시 접착제를 사용하여 알루미늄보 표면 위에 접착하였다. 또한 전기저항형 변형률 게이지가 광섬유 게이지 길이와 같게 하여 광섬유 부착 위치와 평행하게 Fig. 4와 같이 부착하였다.

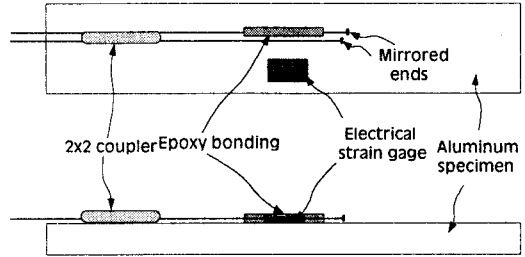


그림 4. 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서와 전기저항형 변형률 게이지가 부착된 알루미늄 시험편.

Fig. 4. aluminum specimen with optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor and electrical strain gage.

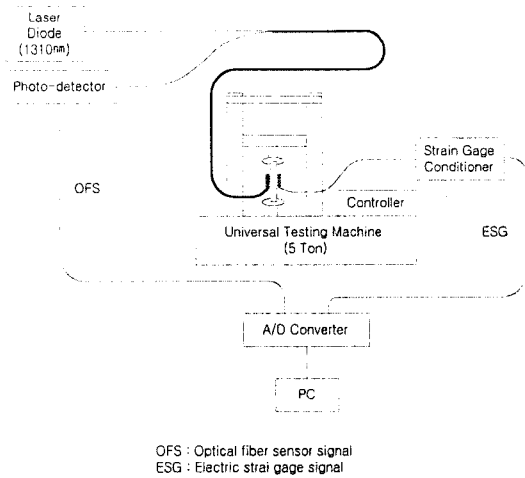


그림 5. 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서가 부착된 알루미늄 시험편의 변형률 증감 실험을 위한 장치.

Fig. 5. Experimental setup for strain increase-decrease test of aluminum specimen with optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor.

알루미늄 보의 하중 증가-감소 실험을 위한 장치는 Fig. 5와 같다. 광섬유 센서 신호는 광검출기에 의

하여 광신호를 전기신호로 변환하고, 변형률 게이지 신호와 함께 A/D 변환기를 통과시킨 후 PC에서 데이터를 취득하여 분석하였다. 하중 증가-감소 실험을 수행하기 위하여 전기 모터식 재료 시험기인 10 ton 용량의 만능시험기를 사용하였다. 시험편에 접착된 광섬유는 양방향 연계기의 광섬유와 전기 아크 용접기(electric arc fusion splicer)를 사용하여 연결한 후 만능시험기에 시험편을 설치한다. 하중 증가-감소 실험은 만능 시험기를 약 1 mm/min으로 변위제어(stroke control)하면서 실험을 수행하였다.

5. 신호 처리 및 실험 결과의 분석

광섬유 센서와 전기저항형 변형률 게이지를 설치한 알루미늄 시험편을 만능시험기에 설치한 후 하중을 증가시켰다가 다시 감소시키는 실험을 수행하여 시험편의 변형률을 측정하였다. 그 결과 Fig. 6 (a)와 같은 광출력 신호를 얻을 수 있었는데 정현파 진폭의 변화가 발생하는 원인은 기준광섬유를 비롯하여 광섬유 연계기 이후의 외부영향이 완전하게 배제되어야 하는 광섬유 부분에 편광 방향의 변화 등이 발생하여 신호 맥놀이 (signal beating) 현상이 나타난 것으로 보인다. 그러나 광섬유 센서의 이러한 출력 신호에서 외부 물리량 즉 변형률 변화에 따른 파형의 개수 변화만을 계수하면 되므로 센서 신호로는 문제가 없다. 이 광섬유 센서의 광출력 신호에는 약간의 신호잡음이 있으므로 대역통과여과기를 사용하여 여과하면 Fig. 6 (b)와 같은 정현파 신호를 얻게된다. 이 정현파 신호를 0을 기준으로 하여 신호 데이터 값이 0보다 크면 +1로 하고, 0보다 작으면 -1로 하여 구형파로 만들면 Fig. 6 (c)를 얻게 된다. 이 구형파는 변형률 등의 외부 물리량에 따라 시간축 상에서 좌측 또는 우측으로 흐르게되는 것이다. 따라서 일정시간 간격동안 이 구형파의 개수를 계수하면서 그 변화 개수만을 누적하게 되면 외부 물리량 즉 변형률을 구할 수 있게 된다.

만능 시험기에 의하여 알루미늄 보의 하중 증가-감소에 의한 변형률 측정 실험결과 Fig. 7과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 변형률게이지에 의한 변형률 값과 광섬유 센서에 의한 변형률 값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

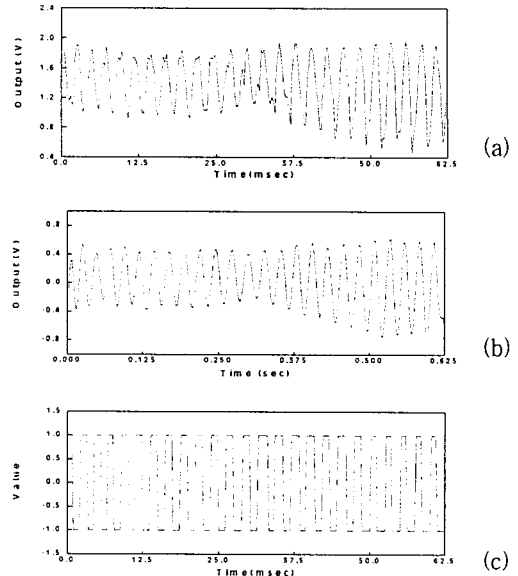


그림 6. 신호처리 절차 : (a) 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서의 신호, (b) 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서의 대역여과 신호, (c) (b)에서의 신호를 구형파로 변환한 신호

Fig. 6. Signal processing procedure : (a) Signal of optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor, (b) Band pass filtered signal of optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor, (c) Transformed rectangular signal of optical frequency modulated fiber optic interferometric sensor.

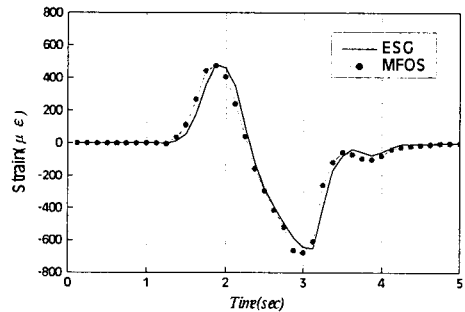


그림 7. 전기저항형 변형률 게이지의 변형률과 광섬유 센서의 변형률의 비교.

Fig. 7. Comparison of the strain from fiber optic sensor with the strain from electrical strain gage.

6. 결 론

광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서를 개발하기 위하여 광주파수 변조를 하면서 광출력 특성을 조사하고, 탐촉자를 제작하여 외부 물리량으로 변형률을 가하면서 광출력 신호 변화를 관찰하였다. 이러한 연구를 통하여 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서는 외부 물리량의 크기 및 방향을 측정할 수 있는 반송파 형태의 신호를 출력하면서 외부 물리량 변화에 비례하는 주파수 변화를 보임을 알 수 있었다. 만능 시험기를 사용한 변형률을 측정하는 실험을 통하여 개발된 광주파수 변조 광섬유 간섭형 센서가 전기 저항형 변형률 게이지와 함께 변형률을 잘 측정할 수 있음을 보였다.

7. 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*, 1988, pp. 29-38.

[2] I. B. Kwon, C. G. Kim, and C. S. Hong, "A digital signal processing algorithm for structural strain measurement by a 3×3 passive demodulated fiber optic interferometric sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, No. 4, August 1999, pp. 433-440.

[3] 이동춘, 이정주, 권일범, "광강도형 광섬유센서를 이용한 강구조물의 균열진전 감시," 대한기계학회는 문집 A권, 제 23 권, 제 5 호, 1999, pp. 743-750.

[4] D. A. Jackson, "Mono-mode optical fibre interferometers for precision measurement," *J. of Physics, E: Instrument Science and Technology*, Vol. 18, 1985, pp. 981-1001.

[5] C. E. Lee, H. F. Tayler, A. M. Markus, E. Udd, "Optical Fiber Fabry-Perot Embedded Sensor," *Optics Letters*, Vol. 21, No. 21, 1989, pp. 1225-1227.

[6] L. C. Giulianelli, A. B. Buckman, R. M. Walser, and M. F. Becker, "Digital Demodulation Scheme for Wide Dynamic Range Measurements with a Fiber Optic Interferometer," *SPIEs Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 2191, Feb. 1994, pp. 314-323.

[7] J. P. Andrews and J. A. McClintock, "Interferometric Optical Sensor Readout System," *SPIEs Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 1918, Feb. 1993, pp. 187-195.

[8] 예운해, "간섭형 광섬유 센서의 신호처리기법," 한국광학회지 제 6 권, 제 4 호, 1995, pp. 365-372.

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 포

항산업과학연구원 강재연구부. 1997~현재 한국표준과학연구원 산업측정표준부 시설안전계측연구센터 선임연구원. 주관심분야 : 광섬유 센서 개발 및 응용, 구조안전 감시기술, 인공지능 응용



김 치 엽

1957년 1월 20일생. 1984년 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1984년 3월-1986년 6월 금성사 연구소 회로설계연구. 1986년 7월부터 현재까지 한국표준과학연구원 시설안전계측연구센터 선임연구

원. 주관심분야 : 센서 및 계측기기 설계, 광섬유 센서 개발 및 응용, 현장계측 기술, 상시감시기술



김민수

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

유 센서 개발 및 응용



이왕주

1963년 3월 10일생. 1986년 서울대학교 물리학과 졸업(이학사). 1988년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학석사). 1999년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사). 1988년-1993년 현대전자 반도체연

구소. 1999~현재 한국과학기술원 전자전산학부 선임연구원. 주관심분야 : 광섬유 센서 개발 및 응용, CMOS OEIC 설계