

3×3 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨 간섭센서에 의한 구조물의 변형률 측정

권일범* · 강현규** · 김천곤*** · 홍창선***

(1997년 3월 25일 접수)

Structural Strain Measurement Using a 3×3 Passive Demodulated Fiber Optic Michelson Interferometric Sensor

I. B. Kwon, H. K. Kang, C. G. Kim and C. S. Hong

Key Words : 3×3 Passive Demodulated Fiber Optic (3×3 수동변조 되풀이 광섬유), Michelson Interferometric Sensor (마이켈슨 간섭센서), Digital Signal Processing (디지털 신호 처리), Strain Measurement (변형률 측정)

Abstract

The measuring method of structural strain by a 3×3 passive-demodulated fiber optic interferometric sensor was developed to implement the real-time monitoring of structural status. A 3×3 fiber optic Michelson interferometric sensor was constructed to sense the value and the direction of structural strain. This sensor was applied on the cantilevered aluminum beam to experiment the sensing of the structural deformation. The digital signal processing was programmed by LabVIEW to determine the structural strain from the fiber optic signals. This program was verified by various simulated fiber optic signals. Finally, the structural strain was well determined by this developed program from real fiber optic signals.

기 호 설 명

\vec{E}_{a_j} : j 광섬유 내부를 진행하는 빛의 전기장의 진폭

\vec{k} : 전파상수

λ_0 : 진공중을 진행하는 빛의 파장

n : 광섬유의 굴절률

ω : 빛의 주파수

δ : 위상이동량

I_0 : 광섬유에 입사된 빛의 광강도

ϕ : 위상

G : 변형률 감지도

ϵ : 변형률

m : 위상차계수

1. 서 론

교량이나 건물 등의 대형 구조물이 노후화하게 되면 광범위한 결함이 발생하게 되므로 구조물을 검사하고 보수해야 한다. 광범위한 결함은 초기의 불량설계, 설계방법이나 하중조건의 변화에 따른 재료와 시공상의 문제로 발생하게 된다. 이러한 문제점은 연속적으로 발생하므로 단기간의 보수로는 그러한 문제점을 해결할 수 없는 경우가 많다. 따라서 실시간으로 구조물의 상태를 모니터링하는 방법이 필요하게 되었다. 구조물의 내부 또는 외부에

*한국표준과학연구원 방재기술연구센터

**한국과학기술원 대학원 항공우주공학과

***회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

센서(sensor)와 작동기(actuator)를 설치하여 구조물 스스로 외부의 환경변화 및 구조물 내부의 상태변화를 감지하고 요구되는 동작을 행할 수 있도록 하는 스마트 또는 지능구조물(smart/intelligent structure)에 관한 연구가 미국 등을 중심으로 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 스마트구조 기술을 위한 스마트 센서로는 압전재료⁽²⁾와 ER유체⁽³⁾를 이용하는 경우가 있으나 교량이나 건물 등과 같은 대형 구조물을 적절하게 모니터링하기 위해서는 구조물에 광범위하게 배열될 수 있는 센서가 필요하다. 광섬유 센서 시스템은 이렇게 광범위하게 분산되어 구조물에 삽입(embedding)하거나 부착하여 사용할 수 있어서 대형 구조물의 안전을 모니터링하기 위한 센서로 적합하다.⁽⁴⁾ 광섬유 센서는 여러 형태가 있으나 변형률과 파손을 측정하기에 적합한 광섬유 간섭센서를 많이 사용한다. 광간섭 방식에 의한 광섬유 센서는 전자기파의 영향을 받지 않으며 센서배열을 구성하여 구조물의 여러 장소에서 원하는 물리량을 동시에 감지할 수 있는 특성 등을 갖고 있기 때문에 구조물의 변형과 파손에 따른 신호를 취득하는 센서로 적합하다.⁽⁵⁾ 또한 광섬유 센서 한 개로부터 여러 정보를 동시에 획득할 수 있다. 국내의 광섬유 스마트구조 관련 연구는 광섬유 삽입 복합재 구조물의 기계적 거동에 관한 연구⁽⁶⁾와 복합재 구조물의 변형 및 파손에 따라서 광섬유 센서 신호를 고찰한 연구⁽⁷⁾가 있었다. 이러한 광섬유 간섭센서는 단일모드의 빛을 이용하게 되며 외부로 부티의 변형이 광경로를 변화시켜 광위상차 변화를 발생하게 되고, 이량을 검출하여 변형률을 측정하는 센서이다. 따라서 이 센서는 매우 민감하여 구조물의 변형 및 파손을 검출할 수 있게 되는 것이다. 그러나 광섬유 간섭센서의 신호는 변형률변화의 증감에 대하여 정현파 형태로 출력되므로 변형의 방향을 구별하기 어려운 단점을 갖고 있다. 수동변조 되풀이 광섬유 간섭센서는 이와같은 변형의 방향을 구별하기 어려운 단점을 해결하기 위하여 제시된 방법으로 2개의 광섬유 신호를 취득하게 되는데, 두 신호는 일정하게 위상이동(phase shift)량을 갖고 있어서 이 두 신호의 선후(lead-lag)를 판별함에 의하여 구조물의 변형의 방향을 판별할 수 있게 만든 센서 구성방법이다.

수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨센서⁽⁸⁾는 1991년 캐나다의 토론토대학에 있는 항공우주 연구팀의 Measures그룹에 의하여 3×3 광섬유 연계기를 사

용하여 처음 구성되고 수동변조 되풀이를 위한 전기회로를 구성하여 실험하였다. 이 연구에서는 마이켈슨센서 신호의 단점인 신호맥놀이(signal beating), 신호표류(signal drifting)를 감소시키기 위하여 광섬유를 새롭게 피복을 입혔다. 그러나 신호맥놀이와 표류는 광섬유 센서에 가해지는 변형률의 절대량이 커지면 광섬유의 굴절률 변화로 방지하기 어려운 본원적인 특성이다. 이러한 단점을 해결한 센서로 광섬유 외부 패브리-패로 센서에 의한 수동변조 되풀이방법이 제시되었는데 Virginia Tech.의 광섬유 전자광학 연구센터의 Murphy에 의하여 개발되었다.⁽⁹⁾ 그러나 이 센서 탐촉자(probe)는 구조변형률 상한이라고 할 수 있는 1%의 변형률 영역까지 신호를 안정적으로 일정하게 유지시키지 못하는 단점을 갖고 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 3×3 광섬유 마이켈슨센서를 사용하면서 신호에 나타나는 신호맥놀이 및 표류현상을 극복하고 구조물의 변형률을 구해낼 수 있는 디지털 신호처리방법을 연구하게 되었다.

본 연구에서는 수동변조 되풀이 광섬유 간섭센서로 3×3 광섬유 마이켈슨센서를 구성하고 외팔보 형태의 알루미늄보에 부착하여 실험하였다. 또한 광섬유 센서 신호로부터 변형률 값과 방향을 결정하기 위한 신호처리 프로그램을 LabVIEW 환경을 사용하여 개발하고 여러가지 광섬유 신호를 사용하여 검증하였다. 또한 실험을 통하여 구성된 수동변조 되풀이 광섬유 간섭센서 시스템으로부터 신호를 취득하고 실시간으로 변형률 값과 방향을 측정하였다.

2. 3×3 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨 간섭센서의 변형률 측정원리

광섬유의 구조는 Fig. 1과 같다. 광섬유에서 빛

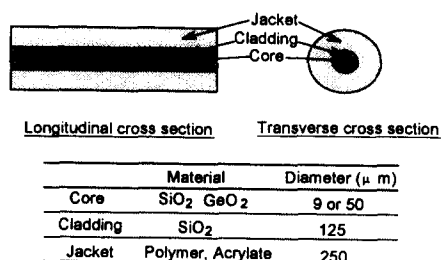


Fig. 1 Structure of optical fiber.

이 전파되는 부분은 코어로 단일모드 광섬유는 코어의 직경이 4 또는 8 μm 이다. 그 바깥은 클래딩(cladding)이라고 하는 굴절률이 코어보다 약간 낮은 재료로 직경은 125 μm 로 구성된다. 클래딩의 역할은 코어로 전파되는 빛이 광섬유 내부에서 전 반사되어 광섬유가 굽혀지더라도 광섬유 내부의 빛이 외부로 누출되지 않도록 한다. 그 외부는 폴리머 계통의 재료로 광섬유의 파손을 방지하게 된다. 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨센서의 변형률 측정원리 및 변형률 방향 판별방법은 다음과 같다.

2.1 광섬유 마이켈슨센서의 변형률 측정원리

광섬유 마이켈슨센서의 변형률 측정원리는 Fig. 2와 같은 시스템의 광섬유 내부를 진행하여 광섬유 연결기를 통과하는 빛의 전기장방정식(electric field equation)을 사용하면 쉽게 설명할 수 있다. 광섬유 연결기를 진행하고 거울도금을 만나서 반사되어 다시 되돌아 오는 빛은 다음과 같은 진폭과 위상을 갖는 전기장방정식으로 표현이 가능하다.

$$\vec{E}_0 = \vec{E}_0 e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \delta_1)} \quad (1)$$

여기서, \vec{E}_0 는 빛이 광섬유 연결기를 통과하면서 분할된 전기장의 진폭이며, \vec{k} 는 전파상수이고 $\frac{2\pi n}{\lambda_0}$ 로 표시되며, λ_0 는 진공중을 진행하는 빛의 파장이고, n 은 광섬유의 굴절률이다. \vec{x} 는 빛이 진행하는 경로의 길이이며, ω 는 빛의 주파수를 가리킨다. 하첨자 j 는 감지광섬유를 1로, 기준광섬유를 2로 표시하기 위한 첨자이다. 좌변의 하첨자 l 은 광검출기 1과 2를 표시하기 위한 첨자이다. δ 는 광섬유 연결기를 통과하면서 발생한 위상이동량(phase shift)이다. 3×3 광섬유 연결기는 레이저 다이오드로부터 빛이 입사된 후 연결기를 통과하면서 다른 광섬유로 전파될 때는 위상이동이 발생한다. 이 위상이동량은 3×3 광섬유 연결기의 제작과정에 따라 다르게 된다. 편광을 고려하지 않고 빛이 마이켈슨센서인 광섬유 두 가닥과 인덱스 매칭 액체로 들어가는 섬유로 $\frac{1}{3} : \frac{1}{3} : \frac{1}{3}$ 로 분할되는 경

우 $\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02} = \vec{E}_{03} = \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{3}}$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{11} &= \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{3}} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 - \omega t)} \\ \vec{E}_{12} &= \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{3}} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 - \omega t + \delta_1)} \end{aligned} \quad (2)$$

윗 식에서 위상이동은 두 빛 사이의 상대 위상이동으로 표시하여 한쪽 빛에만 그 량을 표시하였다. 한편 광검출기 2로 되돌아 나오는 빛의 전기장 방정식은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{21} &= \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{3}} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 - \omega t)} \\ \vec{E}_{22} &= \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{3}} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 - \omega t + \delta_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

경로 1과 경로 2에서 되돌아 나오는 빛이 광섬유 연결기에서 만나서 간섭을 일으킬 경우 광강도는 다음과 같이 표현된다.

$$I_l \propto (\vec{E}_{11} + \vec{E}_{12}) \cdot (\vec{E}_{11} + \vec{E}_{12})^* \quad (4)$$

여기서, $*$ 는 복소수의 공액(conjugate)을 의미한다. 따라서 광검출기 1로 출력되는 광강도는 식 (2)와 (3)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} I_1 &\propto \frac{1}{3} \vec{E}_0^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i + \delta_1}) e^{-\omega t} \right\} \\ &\quad \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i - \delta_1}) e^{\omega t} \right\} \\ &= \frac{1}{6} \vec{E}_0^2 e^{-\omega t} e^{\omega t} (e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i + \delta_1}) \\ &\quad \cdot (e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i - \delta_1}) \\ &= \frac{1}{6} \vec{E}_0^2 \{ 2 + e^{2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) i + \delta_1} + e^{-2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) i - \delta_1} \} \\ &= \frac{1}{3} \vec{E}_0^2 \{ 1 + \cos(2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) + \delta_1) \} \\ I_1 &= \frac{1}{3} I_0 \{ 1 + \cos(2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) + \delta_1) \} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, I_0 는 광섬유에 입사되어 연결기에서 분할되기 직전의 광강도이다. 같은 방법으로 광검출기 2에서 광강도를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_2 &\propto \frac{1}{3} \vec{E}_0^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i + \delta_2}) e^{-\omega t} \right\} \\ &\quad \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i - \delta_2}) e^{\omega t} \right\} \end{aligned}$$

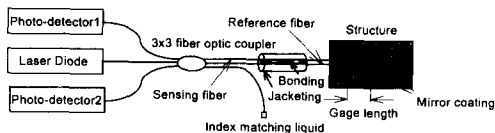


Fig. 2 Schematic diagram of 3×3 passive-demodulated fiber optic Michelson sensor.

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{6} \vec{E}_0^2 e^{-\omega t} e^{\omega t} (e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i + \delta_2}) \\
&\quad \cdot (e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 i} + e^{-2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 i - \delta_2}) \\
&= \frac{1}{6} \vec{E}_0^2 \{2 + e^{2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) i + \delta_2} + e^{-2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) i - \delta_2}\} \\
&= \frac{1}{3} \vec{E}_0^2 \{1 + \cos(2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) + \delta_2)\}
\end{aligned}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} I_0 \{1 + \cos(2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) + \delta_2)\} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 광출력신호 I_1 과 I_2 의 위상(phase)과 광경로의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = 2k(x_2 - x_1) = \frac{4\pi n}{\lambda_0} L \quad (7)$$

윗식은 구조물의 변형에 따라 광섬유의 광경로 L 이 변화하게 되면 광강도의 위상 ϕ 가 변화함을 보이는 식이다. 두 광출력신호의 위상이 외부의 변형에 대하여 동일한 위상을 갖고 변화하게됨을 볼 수 있다. 또한 광강도 식 (5)와 (6)을 비교하여 보면 두 광출력신호 사이의 위상이동량의 차 δ 는 다음으로 쓸 수 있는데, 이 량은 두 광섬유 출력신호 사이의 일정한 위상이동이 된다.

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 \quad (8)$$

윗식의 위상이동량 δ 는 변형의 방향이 변화하게 되면 부호가 바뀌게 된다. 이러한 부호변화는 두 광섬유 출력신호 사이의 신호가 바뀌는 것을 의미하는데, 이 신호를 검출함에 의하여 변형률의 방향을 판별할 수 있게 된다.

2.2 광섬유 마이켈슨센서의 변형률과 위상차의 관계

단일모드 광섬유(single mode optical fiber)는 변형을 받으면 변형률-광(strain-optic) 효과에 의하여 광섬유의 내부를 전파하는 빛의 위상차가 변화하게 된다. 3차원 변형률 장에 놓인 광섬유의 내부를 전파하는 빛의 위상차 변화량 $\Delta\phi$ 는 광섬유 변형량 ΔL 과 Sirkis와 Haslach⁽¹¹⁾의 식에 의하면 광섬유에 축방향 하중(axial loading)만 작용하는 것으로 가정하였을 때 다음의 식 (9)를 얻었다.

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \quad (9)$$

여기서, n 은 광섬유 코어의 굴절률이고, λ_0 는 진공속에서 빛의 파장을 가리킨다. P_{ij} 는 변형률-광텐서(strain-optic tensor)이며, 광섬유가 등방성이

고 균질인 경우 P_{11} 과 P_{12} 성분만 존재한다. 식 (8)에서 실험에서 얻어지는 광출력신호의 정현파 반주기의 갯수를 m 이라 하면 위상차 $\Delta\phi = m\pi$ 라고 할 수 있으며, 게이지길이 L 에 대하여 변형률은 $\epsilon = \Delta L/L$ 이므로 식 (9)를 변형률로 나타내면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned}
\epsilon &= \frac{\Delta\phi}{\frac{4\pi n}{\lambda_0} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} L} \\
&= \frac{\Delta\phi}{\frac{4\pi n}{\lambda_0} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} L} \\
&= G \frac{m}{L} \quad (10)
\end{aligned}$$

윗 식에서 G 는 광섬유의 재료광학적 특성과 광원의 파장에 의하여 결정되는 값으로 광위상차 계수 m 으로부터 변형률을 계산하기 위한 변형률 감지도(strain sensitivity)이다. 본 연구에서 사용한 삼성전자(주)의 단일모드 광섬유는 변형률-광텐서의 값이 주어지지 않아서 본 연구에서는 실험적으로 변형률 감지도 G 값을 결정하였다.

2.3 광섬유 마이켈슨센서의 변형률 감지도의 결정

광섬유 마이켈슨센서의 신호로부터 변형률을 구하기 위한 식 (10)을 사용하기 위해서는 변형률 감지도 G 값을 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 시험편의 외부에 접착한 광섬유 센서로 인장시험을 통하여 전기저항형 변형률 게이지의 값과 광섬유 센서의 위상차계수 m 을 비교하여 변형률 감지도의 값을 결정하였다. 인장시험을 10번 수행하여 구해진 변형률 감지도를 평균하여 얻은 0.343×10^{-6} 을 광섬유 마이켈슨센서의 변형률 감지도로 사용하였다. 만약 광섬유 마이켈슨센서의 게이지길이가 10 mm라면 식 (10)으로부터

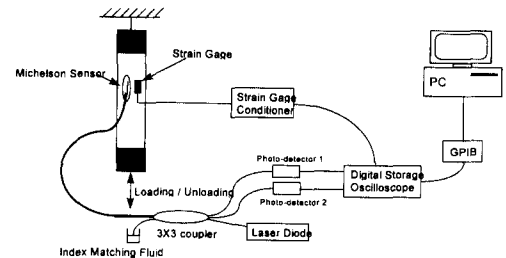


Fig. 3 Schematic diagram of tensile test for determining the gage factor of fiber optic Michelson sensor.

$$\begin{aligned}\text{변형률} &= 0.343 \times 10^{-6} \times m / (10 \times 10^{-3}) \\ &= 0.343 \times 10^{-4} \times m\end{aligned}$$

이 되어 광섬유 마이켈슨센서의 출력신호의 정현파 반주기 갯수 m 이 1일 때 변형률은 0.00343%가 될 수 있다.

3. 광섬유 신호처리 알고리즘의 구성

3×3 광섬유 마이켈슨센서 신호로부터 변형률의 값과 방향을 판별하는 알고리즘을 다음과 같이 구성하였다. 먼저 변형률 값을 구하기 위하여 두 신호중 1개를 선택하여 기준선을 교차하는지 판별하고 교차하면 위상차 $\Delta\phi$ 를 변형의 방향에 따라 증가 또는 감소시키게 된다. 변형의 방향을 구별하기 위해서는 Fig. 4와 같이 기준선을 교차하는 두 신호의 선후를 판별하여 선후가 바뀌면 변형의 방향이 바뀌는 것으로 처리하게 된다. 수동변조 되풀이 방법에 의한 변형률 측정을 위한 디지털 신호처리 수준을 정리하면 다음과 같다.

- (a) 두 개의 광섬유 센서 신호 취득
- (b) 두 개의 광섬유 센서 신호의 기준선 설정
- (c) 두 개의 광섬유 센서 신호의 기준선 교차여부 판별
- (d) 변형 방향판별을 위하여 두개의 광섬유 신호의 기준선 교차 선후가 바뀌는지 검사
- (e) 변형률 계산을 위한 신호가 기준선 교차일때
- (e-1) 두 광섬유 기준선 교차의 선후가 바뀌지 않은 경우 정현파 갯수 m 을 1 증가
- (e-2) 두 광섬유 기준선 교차의 선후가 바뀌는

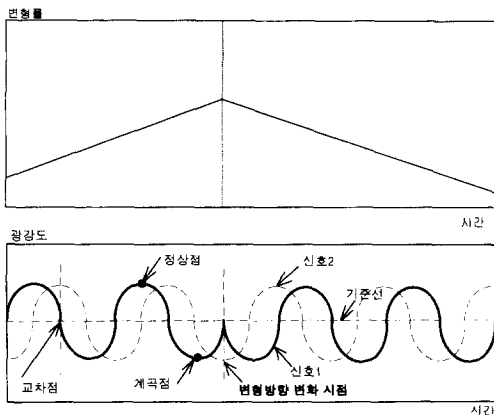


Fig. 4 Relation between strain direction and signals of 3×3 passive-demodulated fiber optic Michelson sensor.

경우 정현파 갯수 m 을 1 감소

- (f) 변형률 계산을 위한 신호가 기준선 교차 아니면 m 은 변화없음.
- (g) 변형률-정현파갯수 관계식으로부터 변형률 계산
- (h) 기준선 교차일 때만 기준선의 위치를 재설정 (기준선 교차일 때 그 바로전의 정현파 반주기의 최대 또는 최소값을 기준으로 기준선을 재설정)
- (i) 데이터 취득 끝이 아니면 (a)~(h)까지 반복

4. 신호처리 프로그램의 검증

광섬유 마이켈슨센서 신호에는 Fig. 5와 같이 신호잡음(signal noise), 정현파 신호의 기준선이 떠다니는 신호표류, 정현파 신호의 진폭이 증감하는 신호맥놀이현상이 발생한다. 이러한 광섬유 마이켈슨센서의 이러한 신호특성에도 불구하고 안정적으로 구조물의 변형률을 구해내기 위하여 신호처리 프로그램을 LabVIEW를 사용하여 구성하였다. 광섬유 마이켈슨센서 신호의 이러한 특성을 모사한 여러가지 광섬유 신호를 만들고 신호처리 프로그램을 수행시켜 보았다. Fig. 6은 신호잡음도 없고 그 외의 신호표류나 맥놀이도 없는 신호에 대하여 수행시켜 본 결과로 신호 1이 위상차 변화량을 구하기 위하여 사용되었고, 신호 2는 변형률 방향을 판별하기 위하여 위상이동의 선후를 판별하기 위한 신호로 사용되었다. Fig. 6에서 신호 2로 표시된 시점, 즉 시간이 35초인 시점에서 변형률의 방향이 바뀌어 두 신호의 기준선 교차 선후가 바뀌고 있음을 볼 수 있다. 이 그림에서 구성된 신호처리 프로그램이 구조 변형률과 방향을 잘 구해내고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7은 광섬유 신호에 20%의 백색 신호잡음이 존재하는 경우의 신호처리 결과가

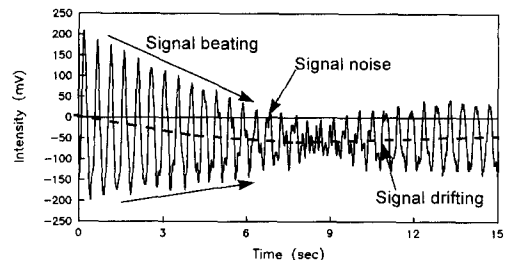


Fig. 5 Signal characteristics of fiber optic Michelson sensor.

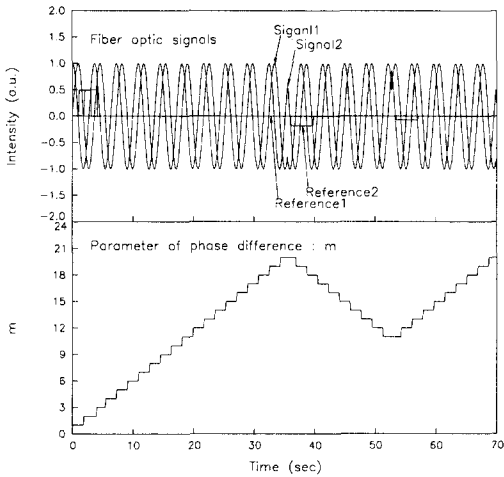


Fig. 6 Signal processing by fiber optic signals with no noise.

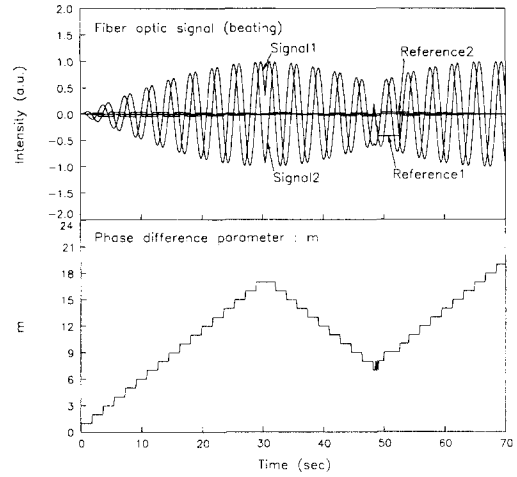


Fig. 8 Signal processing by fiber optic signals with beating.

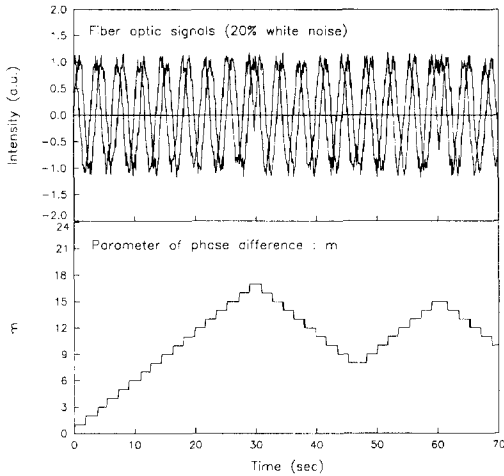


Fig. 7 Signal processing by fiber optic signals with 20% white noise.

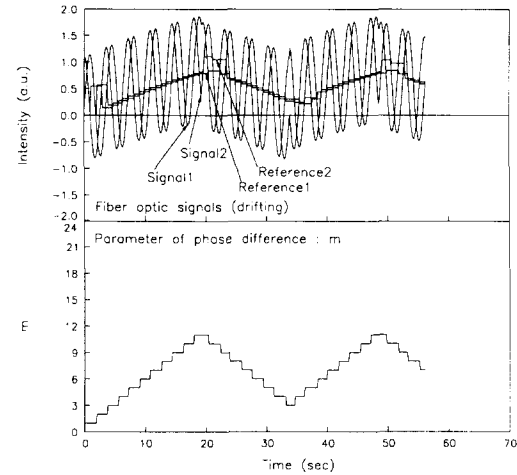


Fig. 9 Signal processing by fiber optic signals with drifting.

다. 구조 변형률의 값에 해당하는 위상차 계수 m 과 그 방향을 잘 구해내고 있음을 확인할 수 있다. 신호맥놀이현상이 있는 신호에 대하여 구성된 프로그램은 Fig. 8과 같이 구조 변형률의 값과 방향을 잘 구별해내고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9는 광섬유 센서 신호에 표류현상이 있는 경우로 기준선을 광섬유 출력신호의 반주기마다 바꾸고 있기 때문에 위상차 계수 m 의 계산에 오차가 발생하지 않고 잘 검출하고 있으며, m 의 방향도 잘 판별하고 있음을 알 수 있다. 이상과 같이 새로 개발된 신호처리 알고리즘은 마이켈슨센서 신호의 신호잡음, 맥놀이 및 표류현상의 발생에 무관하게 구조물의 변형률의

값과 방향에 해당하는 m 값과 방향을 잘 검출하고 있음을 확인하였다.

5. 3×3 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨 센서 신호처리 실험

광섬유 센서에 의한 구조물의 변형률의 크기 및 방향을 구하기 위한 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 광섬유 센서 시스템을 구성한다. Fig. 2에서 광섬유 센서 탐촉자는 광섬유의 끝단을 기울도검출하고 구조물에 부착하게된다. 광원인 레이저다이오드에서 빛이 광섬유에 입사되면 3×3 광섬유 연결기를 통과하면서 3갈래로 빛이 분할되는데, 그 중에서 2개

는 기준광섬유와 감지광섬유로 입사되고 탐촉자 끝단에서 거울을 만나 반사되게 된다. 이 반사된 두 빛은 다시 3×3 광섬유 연결기를 만나면 간섭을 일으키게 되어 광검출기 1, 2로 검출될 때는 변형률에 비례하는 정현파 광신호를 출력하게 된다. 이렇게 구성된 광섬유 센서로부터 출력되는 정현파 광신호를 개발된 신호처리방법으로 실시간으로 처리하게 된다.

5.1 광섬유 마이켈슨센서 탐촉자의 제작

광섬유 마이켈슨센서의 탐촉자(probe)는 구조물의 광섬유의 끝단면을 수직으로 자른 후 입사된 빛이 반사되어 되돌아 나올 수 있도록 진공증착법에 의하여 반사율이 높은 금으로 거울도금(mirror coating)한다. 이 거울 도금된 광섬유를 게이지 길이 만큼 길이차를 두면서 감지선과 기준선을 나란히 에폭시 순간 접착제로 접착한다. 광섬유 게이지 길이를 정확하게 측정하기 위하여 0.01 mm의 정

밀도를 갖는 PIKA 독취 현미경을 사용하여 게이지 길이를 측정하게 되면 마이켈슨센서 탐촉자의 제작은 완료되게 된다.

5.2 실험장치 및 방법

광섬유 센서 시스템은 Table 1과 같은 사양으로 구성되었다. 광원은 Lasertron사의 1305 nm의 파장을 갖고 광섬유가 붙어있는 레이저다이오드를 사용하였다. 광섬유 아이솔레이터는 광원으로 다시 돌아오는 빛이 레이저다이오드로 입사되지 않도록 차단하는 역할을 하는 것으로 E-tek 제품을 사용하였다. 광섬유는 삼성전자(주)의 통신용 단일모드 광섬유를 사용하였으며, 3×3 광섬유 연결기는 3 dB 손실을 갖는 E-tek 제품을 사용하였다. 광검출기는 Lasertron사의 광섬유가 붙어있는 제품을 사용하였다. 외관보 형태의 알루미늄 보실험을 통하여 구조물의 변형을 광섬유 센서로 측정할 수 있도록 Fig. 10과 같이 구성하였다. 거울도금된 광섬유

Table 1 Specification of 3×3 passive-demodulated fiber optic Michelson sensor system.

Component	Parameter	Value	Manufacturer (Model)
Laser Diode	Rated CW output power	0.25 mW	Lasertron (QLM35655)
	Wavelength range	1280~1320 nm	
	Modulation current	10~40 mA	
Isolator	Center wavelength	1310 nm	E-Tek (PIFI51AO11100)
	Polarization dependent loss	0.03 dB	
	Return loss	65/65 dB	
Fiber optic coupler	Operating wavelength	1310 nm	E-Tek (SMFC5400AS210)
	Typical excess loss	0.3 dB	
Photodetector	Responsivity @ 1300 nm	0.89 A/W	Lasertron (QDFT005)
	Bandwidth, -3 dB	9.5 MHz	
	Sensitivity	-55.6 dBm	
Optical fiber	Coating diameter	250 μ m	Samsung electronics (1300 Single mode diber)
	Cladding diameter	125 μ m	
	Mode field diameter	9.5 μ m	
	Cut-off wave length	1305 nm	
	Refractive index	1.469	
Precision current source	Output current range	0~200 mA	Newport (PCS 100)
	Operating temperature	0~50°C	

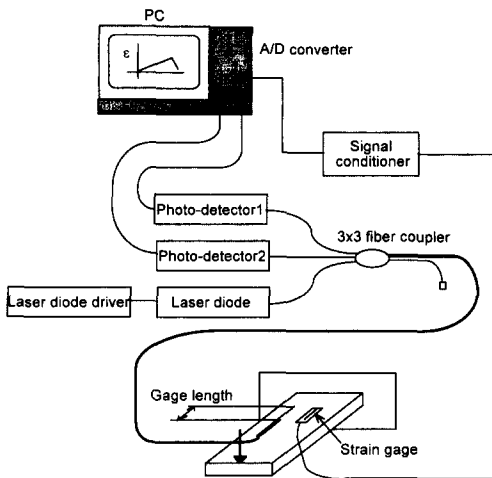


Fig. 10 Experimental setup for cantilevered aluminum beam test with 3×3 passive-demodulated fiber optic Michelson sensor.

는 게이지 길이만큼 길이차를 두고 에폭시 접착제를 사용하여 알루미늄보 위에 접착되었다. Fig. 2에서와 같이 광섬유 마이켈슨센서 시스템을 구성하게 되는데 감지광섬유와 기준광섬유는 외부 영향을 최소화하기 위하여 두 선을 접착한 후 전기 피복신 안에 삽입하였다. 또한 전기저항형 변형률 게이지가 광섬유 게이지 길이와 같게 5 mm로 하여 광섬유 부착위치와 평행하게 Fig. 10과 같이 부착되었다. 광검출기 1과 2의 신호 및 변형률 게이지 신호를 조절하는 신호조절기 이후의 신호는 모두 AD 변환기를 거쳐 PC로 데이터를 실시간으로 취득하여 광섬유 신호처리 프로그램을 사용하여 변형률을 구할 수 있도록 하여 변형률 게이지에 의한 변형률과 비교하였다. 실험의 수행은 외팔보의 자유단을 마이크로미터로 일정하게 변형을 가하여 구조변형을 발생시키고 광섬유 센서와 변형률 게이지 신호를 취득함에 의하여 수행되었다.

5.3 실험결과와 고찰

디지털 신호처리 알고리즘의 유효성을 보이기 위하여 광섬유 마이켈슨센서의 신호를 실시간으로 취득하면서 신호처리 알고리즘을 사용하여 처리한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 신호 1과 2는 Fi. 10의 광검출기 1과 2에서 각각 검출된 신호로 위상이동량이 일정하게 발생하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 이 신호로부터 고안된 신호처리 알고리즘을 적용하여 신호처리하면 변형률을 계산하기 위한 위상

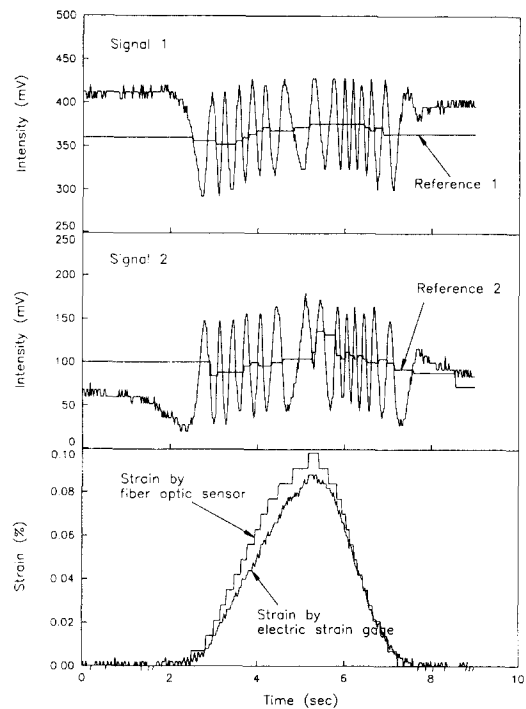


Fig. 11 Signal processing by real fiber optic signals.

차계수 m 을 구할 수 있다. Fig. 11에서 변형의 방향이 바뀌게 되면 신호 1과 2의 기준선을 교차하는 신호가 바뀌고 있음을 확인할 수 있으며 이것을 검출하여 변형의 방향을 바꿔주기 위하여 m 의 값을 증가 또는 감소시켜 준다. 식 10의 변형률과 위상차 m 과의 관계를 이용하여 m 에 게이지상수 G 를 곱하고 게이지길이 L 을 나누면 바로 변형률이 됨을 알 수 있다. Fig. 11에서 광섬유 센서에 의한 변형률의 최대값이 변형률 게이지에 의한 변형률의 값보다 큰 원인은 광섬유센서가 외팔보의 중립축으로부터 변형률 게이지보다 광섬유의 반경만큼 멀리 위치하여 실제로 변형률이 많이 발생하기 때문이다. Fig. 11로부터 광섬유 센서에 의한 변형률 계산이 변형률 게이지에 의한 변형률과 비교하여 구조물의 변형률의 크기와 방향을 잘 구하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 구조물의 변형률의 크기와 방향을 구하기 위하여 개발된 광섬유 센서의 신호처리 알고리즘이 잘 작동됨을 확인할 수 있다.

6. 결 론

대형 구조물의 구조 안전성을 감지하기 위한 센

서로 3×3 수동변조 되풀이 광섬유 센서를 구성하고 구조 변형률을 결정하기 위한 디지털신호처리 방법을 개발하였다. 개발된 신호처리 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 광섬유 마이켈슨센서의 여러 신호에 대하여 신호처리를 수행하였다. 또한 실시간으로 광섬유 마이켈슨센서를 취득하고 구조 변형률을 구하는 시스템을 구성하여 신호처리 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 3×3 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨 간섭 센서를 구성하고 변형률과 광섬유 위상차관계를 규정짓는 게이지상수를 실험적으로 결정하였다.

(2) 수동변조 되풀이 광섬유 센서 신호로부터 구조물의 변형률을 결정하기 위한 디지털 신호처리 방법을 새롭게 개발하여 광섬유 마이켈슨센서 신호에 나타나는 신호잡음, 신호맥놀이, 신호표류에 무관하게 구조물의 변형률 값 및 방향을 결정할 수 있음을 확인하였다.

(3) 3×3 수동변조 되풀이 광섬유 마이켈슨 간섭 센서의 신호를 실시간으로 취득하고 변형률을 계산하는 디지털 신호처리 알고리즘을 시험하였는데 구조 변형률의 값과 방향을 잘 검출함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구과제인 “지능 복합재 구조 기술 개발(과제번호 : 93-0700-02-01-3),” 연구의 일환으로 수행되었으며 한국과학재단의 관계자 여러분께 감사드립니다. 한국과학기술원 물리학과 광섬유 실험실의 김승관, 이봉완, 김효상님을 비롯하여 실원 여러분의 적극적인 조언과 협조에도 감사드립니다. 또한 광섬유 마이켈슨센서 제작에 협조하여 주신 한국과학기술원의 선임기술원 배성순님에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi Seung-Bok and Kim, Myung-Suk, 1996, “Robust Vibration Control of Smart Structures via Discrete-Time Fuzzy Sliding Modes,” *Transactions of the KSME*, Vol. 20, No. 11, pp. 3560~3572.
- (2) Lee Chul-Hee and Choi, Seung-Bok, 1996, “Robust Tracking Control of Smart Flexible Structures Featuring Piezofilm Actuators,” *Transactions of the KSME*, Vol. 20, No. 5, pp. 1498~1507.
- (3) Choi Seung-Hoon, Choi Young-Tae and Choi Seung-Bok, 1996, “Modeling and Control of an Engine Mount Using ER Fluids and Piezoactuators,” *Transactions of the KSME*, Vol. 20, No. 2, 1996, pp. 500~510.
- (4) Culshaw, B., Michie, C., Gardiner, P. and McGown, A., 1996, “Smart Structures and Applications in Civil Engineering,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, No. 1, pp. 78~86.
- (5) Claus, R. O., Mckeeman, J. C., May R. G. and Bennet, K. D., 1988, “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.
- (6) Lee, D. C., Yoon, S. J., Lee, J. J. and Hong, C. S., 1995, “A Study on the Mechanical Characteristics and Damage Detection of Composite Laminates with embedded Optical Fiber Sensors,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 8, No. 2, pp. 61~72.
- (7) Kwon, I. B., Kim, Z. G., Kim, C. G. and Hong, C. S., 1996, “Simultaneous Sensing of the Strain and the Matrix Cracking Failure of a Composite Beam Using an Embedded Fiber Optic Michelson Sensor,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 9, No. 2, pp. 74~84.
- (8) Valis, T., Tapanes, E., Liu, K. and Measures, R. M., 1991, “Passive-Quadrature Demodulated Localized Michelson Fiber-Optic Strain Sensor Embedded in Composite Materials,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 535~544.
- (9) Murphy, K. A., Gunther, M. F., Vengsarkar, A. M. and Claus, R. O., 1991, “Quadrature Phase-shifted, Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors,” *Optics Letters*, Vol. 16, No. 4, pp. 273~275.
- (10) Lo, Y. and Sirkis, J. S., 1993, “Passive Demodulation Techniques for Optical Fiber Sen-

- sors," Proceedings of the SEM 50th Conference, pp. 576~586.
- (11) Sirkis, J. S. and Haslach, H. W., 1991, "Complete Phase-strain Model for Structurally Embedded Optical Fiber Sensors," *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 2, pp. 3~24.