

論文 90-27-5-18

단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 스트레인 게이지의 동적특성

(Dynamical Characteristics of a Fiber-Optic Strain Gauge
by a Single-Mode Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometer)

李 基 完*, 洪 鳳 植**

(Kee Oan Lee and Bong Sik Hong)

要 約

본 논문은 스트레인 측정을 위한 단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계에 대하여 설명하였다. 높은 분해능과 넓은 측정 범위를 가진 광섬유 스트레인 게이지가 구현되었다. 동적반응을 확인하기 위하여 주파수 5-50Hz 범위의 $1\mu\epsilon$ 이하인 스트레인 측정이 반도체 스트레인 게이지와 비교되었다.

기계적 분석과 PZT-플레이트, 광섬유 내의 위상변환 및 반도체 스트레인 게이지에 대하여 이론적으로 서술하였다. 광섬유 스트레인 게이지와 반도체 스트레인 게이지의 출력신호에 대한 동적특성은 일치하는 것으로 나타났다. 결과는 본 시스템이 $1\mu\epsilon$ 이하의 낮은 스트레인의 동적측정에 매우 유용함을 보였다.

Abstract

A single mode fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for the measurement of strain is described. A fiber-optic strain gauge with great resolution and wide measurement range is realized.

In order to verify the dynamic response, the measurements of strain below $1\mu\epsilon$ with frequency range 5-50Hz are compared with a semiconductor strain gauge.

We report theoretical evaluation for mechanical analysis, PZT-plate, the phase change in a fiber-optic strain gauge and a semiconductor strain gauge. The dynamical characteristics of a fiber-optic strain gauge and a semiconductor strain gauge output signal show equivalent behavior.

This result is shown in very good usage as the dynamical measurement of the low strain below $1\mu\epsilon$ by this system.

I. 서 론

광섬유 스트레인 게이지는 1978년 Butter와 Hocker^[1]에 의해, 정적인 배열 상태에서의 광섬유가 연속 모드에 놓여 있을때, 간섭성 줄무늬 이동계산을 통하여 제시되었다. 한편 고분해능을 가진 계측에서는

*正會員, 大田機械廠

(Daejeon Machine Depot)

**正會員, 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Choongnam Nat'l Univ.)

接受日字: 1990年 2月 9日

필연적으로 2π rad.의 광 위상 변화에 따른 단일 광 파장(λ)의 광로 변화가 일어나서 계측 범위를 제한한다. 이러한 문제를 극복하기 위한 일련의 방법인 간섭 위상 추적 신호 처리법이 개발되어왔다.

이들 방법중에는 능동위상 보상법^[2]인 호모다인(homodyne)법과 헤테로다인(heterodyne)^[3,4]법 등이 있으며, 이 기법들은 시스템이 초기화될 때 측정치의 절대값이 복원되지 않는 단점이 있다. 이러한 문제들은 특히 스트레인이나 온도, 압력 등의 준 정상 상태에서의 측정에 대한 간섭계 센서 개발에 장애가 되고 있다.

따라서 광섬유 간섭계는 이들 문제점을 해결하고, 측정감도를 최대로 유지시켜주기 위한 직각조건(quadrature condition)이 요구된다. 본 연구에서는 Jackson과 Dandridge^[2] 등이 제시한 위상 변조기 이용법^[5]을 기본으로 단일모드 광섬유 간섭계가 직각조건에서 동작하도록 하는 신호 안정화회환 회로인 위상 동기 루프 회로로 구성되어 위상 추적 호모다인 감지 시스템 및 광학장치 배열을 설계하였다. 설계된 시스템은 계측 광통로상의 PZT-플레이트 한편에 계측 광섬유를 접착하여 광섬유 스트레인 게이지로 이용하고, 다른 한편에는 반도체 스트레인 게이지를 접착하여 두 측정자료를 비교하였으며, 이론적 분석과의 관계도 보였다. 동적 특성을 측정하기 위하여 PZT-플레이트에 신호 발생기를 연결하여 5-50Hz 사이의 주파수를 가진 신호의 특성을 조사하였다. 스트레인 변화의 특성은 $1\mu\epsilon$ 이하의 변화를 주측정대상으로 하여 동적 실험을 실시하였다.

II. 시스템 구성

Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 시스템은 광원인 레이저광이 광섬유 결합기에 의해 둘로 갈라진 후, 하나는 계측 광통로를 따라 진행하게 되고, 다른 하나는 외부의 측정 대상으로부터 영향을 받지 않는 기준 광통로를 진행하도록하여, 다시 이들 두 광파가 결합기를 통하여 신호 안정화 회환회로에서 출력을 검출하도록 되어있다. 여기서는 위상 추적 호모다인 감지시스템으로 구성된 PTDC(dc phase tracking)^[6] 방식을 채택하였다.

시스템 장치의 구성도를 그림I에 보인다. 광학장치는 단일모드 광섬유의 입출력단에 편극기를 부착하고 직각조건을 유지시키기 위한 PZT 위상 변조기를 삽입하여 높은 분해능과 넓은 측정범위를 갖는 Mach Zehnder 간섭계 배열로 구성하였다.^[7] 회환 안정화 회로출력의 하나는 PZT 위상변조기에 회환되어 시

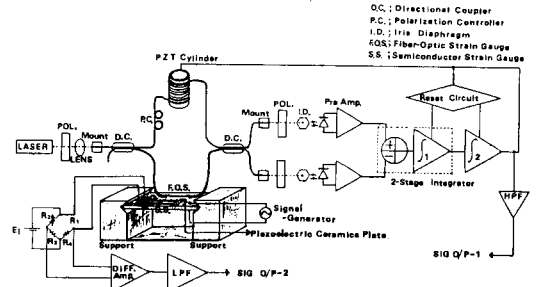


그림 1. Mach-Zehnder 간섭계 시스템의 구성도
Fig. 1. Block diagram of the Mach-Zehnder interferometer system.

스템을 안정화시키며, 다른 하나는 저주파 잡음을 제거하기 위한 고역필터(HPF, $f_o:5\text{Hz}$)를 통하여 최종 광섬유 스트레인 게이지 출력신호(SIG O/P-1)를 검출하고 있다.

III. 광섬유 스트레인 게이지 장치

그림 1 하단부에 광섬유 스트레인 게이지 장치를 보인다. 그림에서의 실험장치는 동적 특성을 측정하기 위해 고안된 장치이며, 동적 스트레인을 여기시키는 진동소자인 PZT-플레이트(channel, 5500Navy II) 상에 단일모드 광섬유(Jacket을 벗겨낸 LTI,F1506, 길이 5mm)와 반도체 스트레인 게이지(EDI, ESU-060-350)을 동일한 접착제(MM, M-Bond 200)로 접착하고, PZT-플레이트 양단은 금속(Al)재질로 V자형 홈을 파서 경첩(hinge)지지가 되도록 하였다.

비교용 반도체 스트레인 게이지는 휘트스톤 브리지(wheatstone bridge)를 거쳐 차동증폭기(gain:830)와 저역필터(LPF, gain:1, $f_o:50\text{Hz}$)를 통한 출력단에서 최종신호(SIG O/P-2)를 검출하여 SIG O/P-1과 비교된다.

광섬유 스트레인 게이지의 반응은 변형을 가한 광섬유의 길이에 직접 비례하게 된다. 여기서 센서 광섬유중 능동 소자 부분을 제외한 리드(lead) 광섬유는 전위 교정 오차를 일으키는 스트레인 장(strain field)에 놓이게 되므로, 광섬유 센서의 동적 특성실험에서 제일 중요한 문제는 감지하는 광섬유 센서의 부분과 리드 광섬유가 격리되어야 한다는 것이다. 본 연구에서는 리드 광섬유를 지지대의 위치에 예폭시로 고정시키고, PZT-플레이트의 진동은 플레이트 상에서만 일어나도록 지지대를 경첩대 경첩으로 제작하였다. 제작된 지지대는 광섬유 센서 부분과 리드 광섬유 간의 차단역할을 하게된다.

IV. 이론적 배경

1. 기계적 해석

광섬유 스트레인 게이지에서의 위상변화를 이론적으로 해석하기 위해서는 진동중의 플레이트에 대한 스트레인 상태를 서술할 필요가 있다. 광섬유는 플레이트의 변형상태와 똑같이 증속되는 것으로 본다. 경첩내 경첩으로 연결된 플레이트는 진동을 일으키는 힘의 축방향에 따라 힘을 받게 되고, 플레이트상의 작용점에서 벤딩 모우먼트 (bending moment) M이 적용된 것으로 보면, 평형 전단응력 $Q=dM/dx$ 가 된다. 여기서 X는 플레이트와 평행한 좌표가 된다. 이들 응력상태로부터 변형상태가 일어났을때, 약정된 부호를 사용하여 스트레인 벡터 S_j 는 다음과 같이 표시된다.⁸⁾

$$S_j = \begin{bmatrix} s_{xx} \\ -\mu s_{xx} \\ -\mu s_{xx} \\ 0 \\ s_{xz} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 μ 는 포아송율이고, s_{xx} 와 s_{xz} 는 공간과 시간에 증속하는 스트레인 분력이다. 이들 값들은 경첩으로 연결된 플레이트의 진동해석에서 얻어진다. 일반적으로 시스템의 진동상태는 운동중인 플레이트의 모드에 대한 중첩 (super position)으로 표현된다. 주파수 ν 로 진동중인 플레이트(길이: ℓ) 중앙점에서의 변위값을 $U(\ell/2, \nu)$ 라 놓으면, 좌표X와 주파수 ν 에서 Z방향내 플레이트 변위의 시간증속 운동은 다음과 같이 주어진다.⁹⁾

$$S(x, t) = U\left(\frac{\ell}{2}, \nu\right) \sin\frac{\pi}{\ell}x \sin 2\pi\nu t \quad (2)$$

$U(\ell/2, \nu)$ 의 값은 고전적 공진운동과 관계된 공진주파수 ν_r 에 근접된 주파수 ν 에 의존한다. 식(2)로부터 M와 Q에 관한 식을 간단히 얻을 수 있고, s_{xx} 와 s_{xz} 에 대한 식도 간단히 얻을 수 있다.

특히, $U(\ell/2, \nu)$ 의 스펙트럼 분력의 항인 s_{xx} 에 관한 식은 다음과 같다.

$$s_{xx}(x, \nu) = \frac{a}{2} \cdot \frac{\pi^2}{\ell^2} \cdot U\left(\frac{\ell}{2}, \nu\right) \sin\frac{\pi}{\ell}x \cdot \sin 2\pi\nu t \quad (3)$$

여기서 a는 플레이트의 두께를 나타낸다.

2. PZT-플레이트

발진 소자인 PZT-플레이트는 Z 방향으로 전극을 가하고 X방향에 따른 길이 변화에 비하여 양단면적

변화는 아주 작다고 가정할때, 축 Y와 Z는 이용하지 않는 1차원으로 생각할 수 있다.

응력분력 (stress components) T와 장분력 (field components) E를 독립변수로 놓고 압전 (piezoelectric) 방정식을 구하면 다음과 같다.¹⁰⁾

$$\begin{aligned} S_1 &= S_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 &= d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 S_1 은 X방향의 스트레인 분력, D_3 는 Z방향의 전기적 변위 (electric displacement), d_{31} 은 압전 상수, S_{11}^E 는 정수 E에 있어서의 탄성 콤프라이언스 (compliance), ϵ^T 는 정수 T에 있어서의 유전율 분력을 나타낸다. Newton의 방정식을 이용하여 파동방정식의 응용형을 유도해보면,

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \frac{\partial T_1}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \quad (5)$$

여기서 dx, dy, dz 는 구성요소의 미소체적, ρ 는 밀도 (density), ξ_1 은 X방향의 변위를 나타낸다.

$S_1 = \partial \xi_1 / \partial x$ 이므로, 식(4)로부터 치환하면,

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{1}{S_{11}^E} \cdot \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} - \frac{d_{31}}{S_{11}^E} \frac{\partial E_3}{\partial x} \quad (6)$$

전계면은 X에 대해 독립적인 E_3 를 만들기 때문에 등전위면이 된다. 그러므로 $\partial E_3 / \partial x = 0$ 이 되고,

$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \cdot S_{11}^E} \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} = (\nu_b^E)^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} \quad (7)$$

여기서 ν_b^E 는 정수 E일때 플레이트 내의 종파 (longitudinal waves)에 대한 속도이다. E_3 가 정현파이면, $E_3 = E_0 e^{j\omega t}$ 가 되며,

$$\xi_1 = [A \sin(\omega x / \nu_b^E) + B \cos(\omega x / \nu_b^E)] e^{j\omega t} \quad (8)$$

플레이트의 길이를 ℓ 이라하면, 0와 ℓ 에서 자유면에 대해 응력 T_1 은 제로가 되어야하고, 식(4)와 (8)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{\nu_b^E d_{31}}{\omega} E_0, B = \frac{\nu_b^E d_{31} E_0 [\cos(\omega \ell / \nu_b^E) - 1]}{\omega \sin(\omega \ell / \nu_b^E)} \quad (9)$$

그래서,

$$\xi_1 = \frac{\nu_b^E}{\omega} \sin \frac{\omega x}{\nu_b^E} + \frac{[\cos(\omega \ell / \nu_b^E) - 1]}{\sin(\omega \ell / \nu_b^E)} \cos \frac{\omega x}{\nu_b^E} d_{31} E_0 e^{j\omega t} \quad (10)$$

과 같이 된다. 여기서 ω 는 각주파수 ($2\pi\nu$)를 나타낸다.

PZT-플레이트의 신장변화 $\Delta \ell(\nu)$ 는 $\partial \xi_1 / \partial x$ 이므로, 식(10)으로부터 계산하면 $\Delta \ell(\nu)$ 의 값은,

$$\Delta \ell(\nu)_p = \frac{\partial \xi_1}{\partial x} = \left[\cos \frac{\omega x}{\nu_b^e} - \frac{[\cos(\omega \ell / \nu_b^e) - 1]}{\sin(\omega \ell / \nu_b^e)} \sin \frac{\omega x}{\nu_b^e} \right] d_{31} E_{\phi}^{\nu} \mu \quad (11)$$

와 같이 된다.

3. 광섬유 스트레인 게이지

진동중인 광섬유 스트레인 게이지를 통한 광계(light field) 전파의 전체 위상변조 $\Delta \phi(\nu)$ 는 광섬유 센서의 전체 동작길이 ℓ 에 대한 각 무한소의 광섬유 소자(element) 변화를 적분하여 얻어진다.⁽¹¹⁾

$$\Delta \phi(\nu) = \int_0^{\ell} \frac{d\phi(x, \nu)}{dx} dx \quad (12)$$

위상 변조는 주로 노정 신장(伸張)과 굴절을 변화에 기인한다. $d\ell$ 을 광섬유의 미분 신장, $d\beta$ 를 단일모드 전파 벡터의 미분 변화라고하면, 유도된 미분 위상 변화 $d\phi$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$d\phi = \beta \cdot d\ell + \ell \cdot d\beta \quad (13)$$

여기서 $\beta = (2\pi/\lambda_0)n$ 으로 표시되는 값이며, 광섬유에 대한 단일모드 전파전파 벡터를 말한다. ℓ 은 진동을 가한 광섬유의 길이, n 은 광섬유 코어의 굴절율이다. 코어-클래딩 굴절을 차는 매우 작아서 Z-편극된 광에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ell \cdot d\beta = -\frac{1}{2} \ell \cdot \beta_0 n^3 d\left(\frac{1}{n^2}\right) Z \quad (14)$$

여기서 $\beta_0 = (2\pi)/\lambda_0$ 이며 자유공간 전파전파 벡터이다. 그리고 광전파 방향에서의 광학적 indicatrix 미분변화 $d(1/n^2)$ 의 함수에 관한 표현 dn 을 고려하면, 식(13)은 다음과 같이 된다.

$$d\phi = \beta \cdot d\ell - \frac{1}{2} \ell \beta_0 n^3 d\left(\frac{1}{n^2}\right) Z \quad (15)$$

미분 신장 분력 $d\ell$ 은,

$$d\ell = s_{xx} dx \quad (16)$$

가 되며, 광학적 표시 행렬 $d(1/n^2)$ 의 미분변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

동방성 균일 물질에 대한 스트레인 광학 tensor P_{ij} 를 고찰해 보면,⁽¹²⁾

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \quad (17)$$

무한소의 길이 dx 에 대해 길이 ℓ 을 표준화시킨 굴절을 변화는,

$$d\left(\frac{1}{n^2}\right)_x = \frac{dx}{\ell} \sum_{j=1}^6 P_{ij} S_j \quad (18)$$

과같이 된다. 식(18)은 X 방향에서의 Z-편극된 빛살 전파에 대한 것과, S_j 에 관한 표현식(1)에 의하면 다음과 같이 표시된다.

$$d\left(\frac{1}{n^2}\right)_z = \frac{1}{\ell} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] S_{xx} dx \quad (19)$$

S_{xx} 에 대한 표현식(3)과 식(15), (16), (19)에 의하여 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$d\phi(x, \nu) = \beta \cdot \frac{\pi^2}{\ell^2} \cdot \frac{a}{2} \cdot \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \cdot U\left(\frac{\ell}{2}, \nu\right) \cdot \sin \frac{\pi}{\ell} \cdot x \cdot dx \quad (20)$$

식 (20)을 다시 적분 표현으로 바꾸어보면,

$$\Delta \phi(\nu)_s = \beta \cdot \frac{\pi^2}{\ell^2} \cdot \frac{a}{2} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \cdot U\left(\frac{\ell}{2}, \nu\right) \cdot \int_0^{\ell} \sin \frac{\pi}{\ell} \cdot x \cdot dx \quad (21)$$

여기서 $\Delta \phi(\nu)_s$ 는 steel 플레이트인 경우의 위상변화이다.

식(21)은 위상변화가 플레이트의 진동진폭 U 에 비례하고, 또한 플레이트의 기하학적 파라메타들인 a, ℓ 과, 광섬유 광학적 파라메타들인 $n, P_{11}, P_{12}, \mu, \ell$ 에 따르게됨을 나타낸다. 또한 광섬유 스트레인 게이지 신호와 반도체 스트레인 게이지를 비교한 위상차 $\Delta \phi$ 와, 마이크로 스트레인 $\mu \epsilon$ 사이의 관계를 밝혀주는 유용한 식이된다. $\mu \epsilon$ 값은 스트레인 게이지의 동작 길이와 전체 신장(elongation)간의 비로서 정의되고, 계수 10^6 으로 곱해진 값이다.

광섬유 전체의 길이변화 $\Delta \ell$ 과 식(21)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \ell(\nu)_s = \frac{\pi^2}{\ell^2} \cdot \frac{a}{2} \cdot U\left(\frac{\ell}{2}, \nu\right) \int_0^{\ell} \sin \frac{\pi}{\ell} \cdot x \cdot dx \quad (22)$$

여기서 $\Delta \ell(\nu)_s$ 는 steel 플레이트인 경우의 길이변화이다.

주파수 ν 에서의 steel 플레이트에 대한 광섬유 마이크로 스트레인은 다음과 같이 얻어진다.

$$\mu \epsilon(\nu)_s = 10^6 \frac{\Delta \phi(\nu)_s}{\beta \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \ell} \quad (23)$$

PZT-플레이트 발진소자에 대한 위상변화 $\Delta\phi(\nu)$ p는 식(1)과 (2)로 부터 얻어진다.

$$\Delta\phi(\nu)_p = \beta \cdot \left[\cos \frac{\omega X}{\nu_b^k} - \frac{[\cos(\omega\ell/\nu_b^k) - 1]}{\sin(\omega\ell/\nu_b^k)} \sin \frac{\omega X}{\nu_b^k} \right] d_{31} E_0 e^{i\omega t} \cdot \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu (P_{11} + P_{12})] \right\} \quad (24)$$

PZT-플레이트 상에서의 광섬유 마이크로 스트레인 $\mu\epsilon(\nu)$ p는 결과적으로 다음과 같다.

$$\mu\epsilon(\nu)_p = 10^6 \frac{\Delta\phi(\nu)_p}{\beta \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu (P_{11} + P_{12})] \right\} \ell} \quad (25)$$

4. 반도체 스트레인 게이지

반도체 스트레인 게이지는 높은 게이지율, 높은 피로수명, 높은 안정성 및 소형으로 제작할 수 있는 장점이 있기 때문에 여러분야에 유용하다. 그러나 온도에 대한 변화가 심하고, 단결정 물질로서 그 저항

표 1. 광섬유, PZT-플레이트, 반도체 스트레인 게이지의 제특성 파라메타
Table 1. Fiber, PZT-plate and semiconductor strain gauge characteristic parameter.

분 류	내 역	파 라 메 타
단일모드 광섬유	<ul style="list-style-type: none"> • 제작사 및 모델 • 광섬유 직경 • 코아 직경 • 자켓 직경 • 감 쇠 율 • 파 장 • 탄 성 율 • 포아송율 (μ) • 평균 굴절율 (n) • 전파상수 (β) • 진동 동작 길이 (ℓ) • 광 탄성 지수 (P_{11}) • 광 탄성 지수 (P_{12}) • 광 탄성 지수 (P_{44}) 	Lightwave Technologies, Inc., F1506 125×3 [μm] 5.6×0.5 [μm] 500×50 [μm] 15 [dB/Km, max] 630 [nm] 7.2×10 ¹⁰ [m ⁻¹] 0.17 1.456 1.446×10 ⁷ [m ⁻¹] 5×10 ⁻³ [m] +0.121 +0.270 -0.074
반도체 스트레인 게이지	<ul style="list-style-type: none"> • 제작사 및 모델 • 형태 • 저항값 • 게이지율 • 저항 온도지수 • 게이지율 온도지수 • 게이지 동작 길이 • 규격 (길이×폭) 	Entran Devices, Inc., ESU-060-350 U-Type 350 [Ω] ±130 +6%/100°F -10%/100°F 1.52×10 ⁻³ [m] 2.29×0.46×10 ⁻³ [m]
PZT-플레이트	<ul style="list-style-type: none"> • 제작사 및 모델 • 형태 • 압전상수 (d_{33}) • 압전상수 (d_{31}) • 포아송율 (μ) • 무게 • 기계적 품질계수 (Q) • 전계 $E_3 = v/t = 1\text{v/mil}$ 인가시 • 탄성상수 (Y_{11}^E) • 탄성상수 (Y_{33}^E) • 규격 (폭×길이×두께) • 밀도 (density) (ρ) 	Channel Industries, Inc., Channel 5500 Navy II. Plates 400×10 ⁻¹² [m/V] -185×10 ⁻¹² [m/v] 0.3 3.2 [g] 75 S ₁ = 7.3 [$\mu\text{in/in}$] 6.4×10 ¹⁰ [N/m ²] 5.2×10 ¹⁰ [N/m ²] 0.5×1×0.05 [in] 7.6×10 ³ Kg/m ³

값이 스트레인에 의해서 50-100%까지 변화하는 성질 때문에 취급시 주의가 필요하다. 반도체 스트레인 게이지는 게이지의 감도가 게이지에 대한 스트레인의 함수관계를 가지고 있다. 따라서 스트레인을 받지않은 상태에서의 온도계수를 결정하는 방법으로서, 접촉하지 않은 게이지의 저항을 측정하면된다. 스트레인 측정시, 게이지의 저항과 브리지 공급전압에 의한 자기가열을 피하여 주의해서 측정하면 최적의 자료가 얻어진다. 본 연구에서의 브리지 공급전압은 건전지 1.3V_{DC}를 이용하였다.

다음표 1은 이상의 이론적 배경에서 언급된 포현식에 관한 특성 파라메타들을 보인다. 위상변화 신호가 동등한 $\mu\epsilon$ 의 스트레인 값으로 변환된 결과는 실험 및 고찰에서 보인다.

V. 실험 및 고찰

광학장치 시스템은 진동을 흡수시키는 테이블상에 장착하고, 불필요한 음향잡음과 열잡음을 차폐하기 위해 은박지로 장치를 싸운후 실험을 실시하였다.

PZT-플레이트 자체의 주파수 특성은 플레이트에 가변주파수 정현파를 인가하고, 한쪽 광검출기에 LIA(lock-in amplifier, EG & G, model 5206)을 연결하여 그 출력을 측정하였다. 이때 시스템의 케환회로는 동작시키지 않은 상태이다. 그림2에 실험결과를 보인다.

1KHz 근방에서 공진현상이 일어나며, 1KHz 이상의 주파수에서는 출력이 급격히 저하되는 현상을 나타낸다. 이 현상은 플레이트상에 부착된 광섬유 스

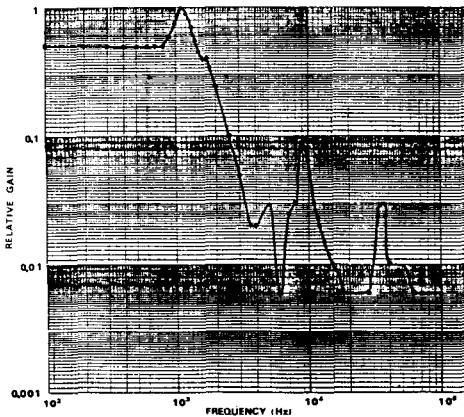


그림 2. PZT-플레이트의 주파수 응답
Fig. 2. Frequency response of a PZT-plate.

트레인 게이지의 동작 길이가 PZT 플레이트 길이 25.4mm 중 약 5mm 부분에만 부착되어 일어나는 특성으로 PZT 플레이트의 공진현상이다.

그림 3은 PZT-플레이트에 32V_{p.p} 정현파(5Hz)를 인가시켰을때, 광섬유 스트레인 게이지 출력(그림위)과 반도체 스트레인 게이지의 출력(그림아래)을 나타낸다. 인가신호의 발진 주파수에 따라 정확히 반응하고 있음을 볼 수 있다.

플레이트상의 동작점인 측정지점에서의 진동진폭은 신호발진기의 진폭에 따라 변화하며, 스트레인 게이지는 그 변화량을 정확히 감지하고 있다.

플레이트 인가전압 변화에 대한 광섬유 스트레인 게이지의 비례감도는 그림 4에 보였다.

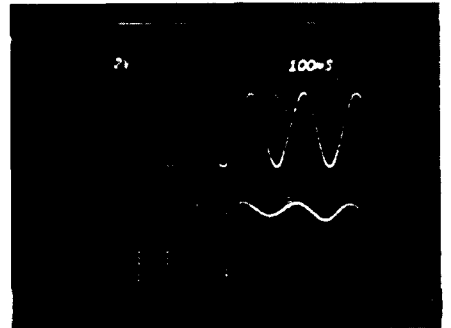


그림 3. 광섬유 스트레인 게이지(위)와 반도체 스트레인 게이지(아래)의 주파수 응답
Fig. 3. Frequency response of a fiber-optic strain gauge(Upper trace) and a semiconductor strain gauge(Lower trace).

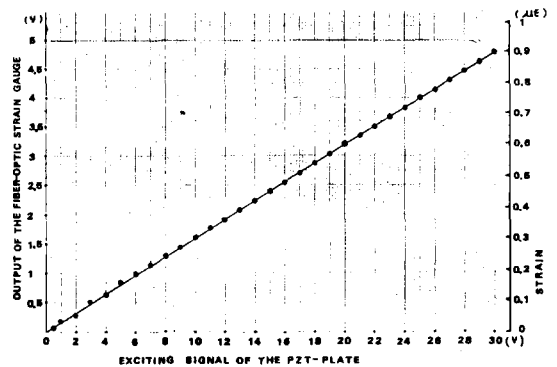


그림 4. 광섬유 스트레인 게이지의 비례감도
Fig. 4. Sensitivity of a fiber-optic strain gauge.

광섬유 스트레인 게이지의 변화량은 동시에 비교 측정된 반도체 스트레인 게이지출력(브리지와 차동 증폭기및 저역필터)의 SIG 0/P-2에서 측정된 량을 스트레인으로 환산하여 나타낸 량이다.

1 $\mu\epsilon$ 이하의 측정량에서 그 선형도가 잘 유지됨을 알 수 있다. 반도체 스트레인 게이지에 대한 스트레인 량의 환산과 0.1 $\mu\epsilon$ 이하의 낮은 변화량은 Digital Strain Indicator (M. M사-P-350A)를 이용하여 그 자료를 보정하였다. 그림 1 하단부의 반도체 게이지 측정브리지 중 R₂는 정밀 디케이드 가변저항 (M. M사, V/E-40)을 사용한 것으로 출력의 영점조정을 위한 것이다.

광섬유 스트레인 게이지의 측정시스템에 대한 최저 측정레벨은 무발진시 신호대 잡음율이 1이되는 출력 전압을 측정할 것으로 그 결과를 그림 5에 보인다.

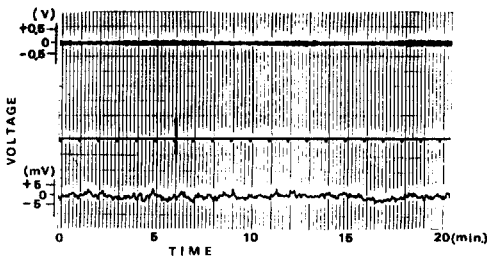


그림 5. 무발진 신호때의 광섬유 스트레인 게이지 (위)와 반도체 스트레인 게이지 (아래)의 출력신호

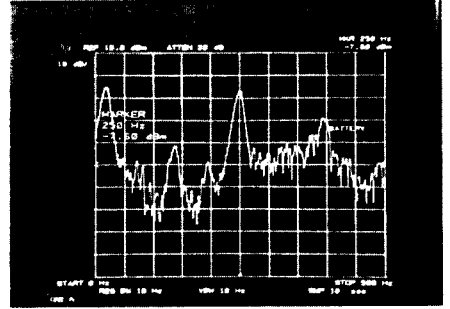
Fig. 5. Output signal of a fiber-optic strain gauge (Upper trace) and a semiconductor strain gauge (Lower trace) at non-exciting signal.

광섬유 스트레인 게이지는 $\pm 0.1V$ (0.02 $\mu\epsilon$) 이내, 반도체 스트레인 게이지는 $\pm 4mV$ (Gain:830, $\pm 0.2\mu$ 의 값을 나타낸다. 이들 결과로부터 광섬유 스트레인 게이지에 대한 본 시스템의 최저 측정레벨은 반도체 스트레인 게이지보다 스트레인 량으로 약 10배 정도의 높은 분해능을 가지고 있음을 알 수 있다.

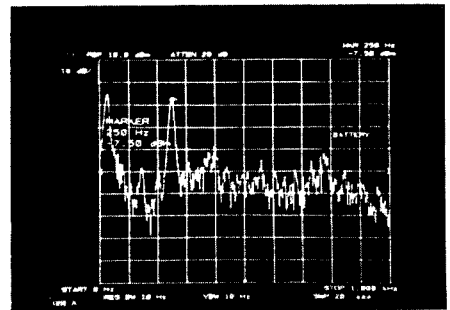
시스템의 잡음동작은 PZT-플레이트에 5Vp.p 정현파 (250Hz)를 인가하여 스펙트럼 어날라이저 (H. P. model 8568B)를 이용, SIG 0/P-1에서 그 파형을 측정하였다.

그림 6 (A), (B)에 그 결과를 보인다.

그림 6 (A)의 250Hz의 신호는 밴드폭 10Hz내 위상 동기 루프회로의 출력에서 -7.6dBm (0.4mV rms) 진



(a)



(b)

그림 6. 시스템의 잡음 스펙트럼

- (a) 10dBm/div., 50Hz/div., 10Hz 밴드폭, 맨 좌측이 0Hz,
 - (b) 10dBm/div., 100Hz/div., 10Hz 밴드폭, 맨 좌측이 0Hz
- (-7.6dBm (A) 과 -7.5dBm (B) 실효치 신호가 각각 250Hz에서 인가됨.)

Fig. 6. Noise spectrum of the system.

- (a) 10dBm/div., 50Hz/div., 10Hz bandwidth, 0Hz at left edge,
 - (b) 10dBm/div., 100Hz/div., 10Hz bandwidth, 0Hz at left edge.
- (Each of -7.6dBm (a) and -7.5 dBm (b) rms signal has been applied at 250Hz)

폭을 가지며, 시스템의 위상 변환이득 (1.46rad/V)에 의해 0.6m rad. 실효치로 반응한다. 20Hz 구간에 있는 파고치는 스펙트럼의 초기화 표시오차이다. 200Hz와 500Hz 사이의 10Hz 밴드폭 잡음은 320 μV rms 간격으로 변화하였으며, 이때는 실험실 건물내의 중앙 난방시스템이 동작중일때의 경우이므로 잡음이 높게 나타난 것으로 판단된다. 그림 6 (b)는 중앙난방 시스템의 출구를 폐쇄하고나서 측정된 잡음 출력이며 그림 (a)에 비하여 250Hz 신호 출력 주위의 1KHz 까지 주파수 성분중 현저한 잡음 감소현상을 보인다. 광섬유 스트레인 게이지에 대한 이론적 감

도한계는 Jackson^[13] 등에 의해 계산되었으며, 최소위상이동은 10^{-7} rad이고, 최소감지 $\mu\epsilon$ 는 $10^{-7}\mu\epsilon$ 에 해당되는 값으로 나타났다.

이상의 측정자료에서의 잡음은 저주파 음향잡음이 대부분 기인된 것으로 사료된다.

그림 7은 플레이트 인가전압 30Vp.p 일때 반도체 스트레인 게이지와 광섬유 스트레인 게이지와의 비교 출력자료를 시간축에 따라 기록기로 그려낸 동적 특성 자료이다. 반도체 스트레인 게이지와의 비교값이 광섬유 스트레인 게이지에서도 정확히 일치됨을 보여준다. 또한 광섬유 센서의 선형도가 더 우수함을 나타낸다.

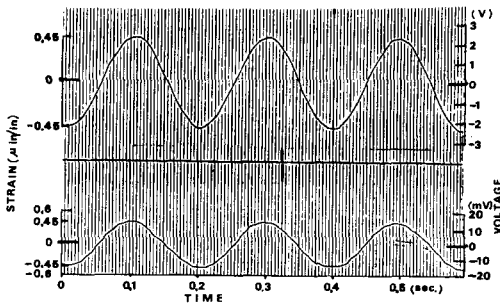


그림 7. 반도체 스트레인 게이지(아래)와 광섬유 스트레인 게이지의 동적 특성 곡선

Fig. 7. Dynamic characteristics curve of a semiconductor strain gauge (Lower trace) and a fiber-optic strain gauge (Upper trace).

IV. 결 론

본 연구에서는 광섬유 스트레인 게이지와 반도체 스트레인 게이지와의 동적특성을 실험적으로 측정비교 분석하였다. 이론적 배경으로는 PZT-플레이트를 발진소자로 이용하여 진동중인 광섬유에 대한 위상 변화대 스트레인 변화를 도출하였다. PZT-플레이트의 이용은 실험중 외부잡음이 개선된 상태에서 $1\mu\epsilon$ 이하의 동적특성 실험을 실시할 수 있었다.

실험결과, 두 스트레인 게이지로 측정된 스트레인 변화량은 잘 일치됨을 확인하였다. 광섬유 센서가 반도체 스트레인 게이지보다 약10배 정도의 분해능을 가지고 있음을 알았다. 광섬유 센서는 미세한 스트레인의 동적측정 뿐만 아니라, 측정동작 길이에 대한 가변이 용이하고, 전·자기적 잡음에 강하기 때

문에 매우 유용하다. 현재의 연구에서는 리드광섬유에 대한 음향방향과 진동동에 대한 잡음감도의 개선 및 측정신호의 자료처리를 개선시킬 필요가 있다. 광섬유 스트레인 게이지의 감도는 본 실험을 통하여 다른 어떤 센서보다 우수함을 보였고, 이론적 한계는 측정개선의 가능성을 지적하였다.

參 考 文 獻

- [1] C.D. Butter and G.B. Hocker, "Fiber-optics strain gauge," *Appl. Opt.*, vol. 17, pp. 2867-2869, 1978.
- [2] D.A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A.B. Tveten, "Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezo electrically stretched coiled fiber," *Appl. Opt.*, vol. 19, pp. 2926-2929, 1980.
- [3] J.H. Cole, B.A. Danver and J.A. Bucaro, "Synthetic heterodyne interferometric demodulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, pp. 694-697, 1982.
- [4] D.A. Jackson, A.D. Kersey, M. Corke and J.D.C. Jones, "Pseudo-heterodyne detection scheme for optical interferometers," *Electron. Letts.*, 18, pp. 1081, 1982.
- [5] D.E.N. Davies and S. Kingsley, "Method of phase-modulating signals in optical fibers: Application to optical-telemetry systems," *Electron. Letts.*, 10, pp. 21-22, 1974.
- [6] T.G. Giallorenzi, J.A. Bucaro, A. Dandridge, G.H. Sigel, J.H. Cole, S.C. Rashleigh and R.G. Priest, "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, pp. 626-665, 1982.
- [7] 이기완, 홍봉식, "단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 안정화를 위한 위상 추적 제한 보상기의 설계," 대한전자공학회, 논문지, 제26권, 제12호, pp 137-143, 1989.
- [8] S. Timoshenko and S.H. Goodier, *Theory of Elasticity*, New York: McGraw Hill, pp. 213-257. 1951.
- [9] S. Timoshenko and D.H. Young, *Vibration Problems in Engineering*, Princeton, N.J.: Van Nostrand, pp. 297-341, 1955.
- [10] W.P. Mason, *Physical Acoustics, principles and methods*, Academic press, vol. I-part A, pp. 225-226, 1964.
- [11] C. Liguori and M. Martinelli, "Integral phase modulation properties of a single-

- mode optical fiber subject to controlled vibration," *Appl. Opt.*, vol. 20, pp. 4319-4343, 1981.
- [12] J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals*, New York: Clarendon, pp.236-259, 1967.
- [13] D.A. Jackson, A. Dandridge and S.K. Sheem, "Measurement of small phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer," *Opt. Letts.*, vol. 5, no. 4, pp. 139-141, 1980.

著 者 紹 介

李 基 完 (正會員) 第26卷 第12號 參照
현재 대전기계창 선임연구원

洪 鳳 植 (正會員) 第26卷 第12號 參照
현재 충남대학교 산업대학원
장