

단일 모드 광섬유 스트레인 게이지

이 기 관

김 병 교

국방 과학 연구소

Single-Mode Optical Fiber Strain Gauge

Kee-Oan Lee

Byung-Kyo Kim

Agency for Defense Development

ABSTRACT

A single mode optical fiber strain gauge subjected to the excited PZT-plate is presented which was obtained using a Mach-Zehnder interferometer. This paper has been performed the considerations to the experimental situation in which the dynamical behavior of a optical fiber strain gauge is illustrated. A comparison is reported between the dynamic response of a optical fiber strain gauge and the semiconductor strain gauge in the frequency range 5-50Hz. This result is shown in very good usage as the dynamical measurement of the low strain below $1\mu\epsilon$ by this system.

1. 서 론

광섬유 스트레인 게이지는 1978년 Butter 와 Hocker⁽¹⁾에 의해 캔틸레버 빔(cantilever beam)을 이용하여 광학적으로 간섭하는 줄무늬 운동에 의한 정적(static) 스트레인(strain)을 측정하여 제시 되었으며, 그 실험치는 단위 광섬유 길이와 스트레인에 대한 줄무늬의 이동에 관한 이론적 계산치와 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였다. 그런데, 그 분해능을 가진 계측에서는 필연적으로 2π rad.의 광 위상 변화에 따른 단일광파장(λ)의 광로 변화가 일어나서 계속 범위를 제한하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위한 일련의 방법으로 간섭 위상 추적 신호 처리법이 연구되어 왔다.

본 연구에서는 Jackson과 Dandridge⁽²⁾등이 제시한 위상 변조기 이용법⁽³⁾을 기본으로 단일모드 광섬유 간섭계가 직각조건에서 동작 하도록 하는 신호 안정화 궤환 회로인 위상 동기 루프 회로로 구성하여, 위상 추적 호모다인(homodyne) 감지시스템 및 광학 장치 배열을 설계하였다. 설계된 시스템은 계속 광통로상의 PZT-플레이트 한쪽에 계속 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 주 측정 대상으로 하여 동적 실험을 실시하였다.

2. 시스템 구성

Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 시스템은 광원인 레이저광이 광섬유 결합기에 의해 둘로 갈라진 후, 하나는 계속 광통로를 따로 진행하게되고, 다른 하나는 외부의 측정 대상으로부터 영향을 받지 않는 기준 광통로를 진행하도록하여, 다시 이들 두 광파가 결합기를 통하여 신호 안정화 궤환회로에서 출력을 검출하도록 되어있다.

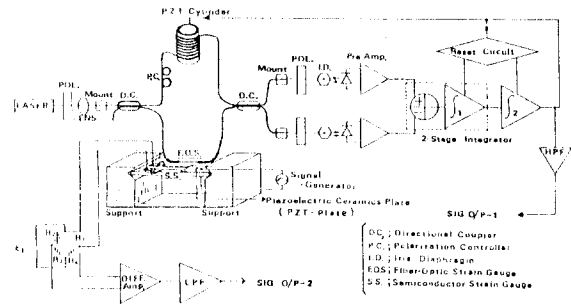


그림 2.1. Mach-Zehnder 간섭계 시스템의 구성도

Fig. 2.1. Block diagram of the Mach-Zehnder interferometer system.

시스템 장치의 구성도를 그림 2.1에 보인다. 광학장치는 단일모드 광섬유의 입출력단에 편광기를 부착하고 직각조건을 유지시키기 위한 PZT 위상 변조기를 삽입하여 높은 분해능과 넓은 측정범위를 갖는 Mach-Zehnder 간섭계 배열로 구성하였다. (4) 궤환 안정화 회로출력의 하나는 PZT 위상 변조기에 궤환되어 시스템을 안정화시키며, 다른 하나는 저주파 잡음을 제거하기 위한 고역필터(HPF, $f_o=5Hz$)를 통하여 최종 광섬유 스트레인 게이지 출력신호(SIG O/P-1)를 검출하고 있다.

3. 광섬유 스트레인 게이지 장치

그림 2.1하단부에 광섬유 스트레인 게이지 장치를 보인다. 그림에서의 실험장치는 동적 특성을 측정하기 위해 고안된 장치이며, 동적 스트레인을 여기서키는 진동소자인 PZT-플레이트(Channel, 5500 Navy II) 상에 단일모드 광섬유(Jacket을 벗겨낸 LTI, F1506, 길이 5mm)와 반도체 스트레인 게이지

(EDI, ESU-060-350)을 동일한 접착제(MH, H-Bond 200)로 접착하고, PZT-플래이트 양단은 금속(Al)재질로 V자형 홈을 파서 경첩(hinge)지지대가 되도록 하였다. 비교용 반도체 스트레인 게이지는 휘트스톤 브리지(wheatstone bridge)를 거쳐 차동증폭기(gain:830)와 저역필터(LPF, gain:1, fo:50Hz)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 고정 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 예폭시도 고정시키고, PZT-플래이트의 진동은 플래이트 상에서만 일어나도록 지지대를 경첩대 경첩으로 제작하였다.

4. 이론적 배경

가. PZT-플래이트

PZT-플래이트 상에 접착된 광섬유 스트레인 게이지의 위상 변화를 이론적으로 해석하기 위해서는 진동중의 PZT-플래이트에 대한 스트레인 상태를 서술할 필요가 있다. PZT-플래이트는 Z 방향으로 전극을 가하고 X 방향에 따른 길이 변화에 비하여 양단면적 변화는 아주 작다고 가정할때, 즉 Y와 Z는 이용하지않는 1차원으로 생각할 수 있다.

응력분력(stress components) T와 장분력(field components)E를 독립변수로 놓고 압전(piezoelectric)방정식을 구하면 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 &= d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

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

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \frac{\partial T_1}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \quad (4.2)$$

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(4.1)로부터 치환하면,

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{1}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{\partial E_3}{\partial x} \quad (4.3)$$

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

$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \cdot s_{11}^E} \cdot \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} = (\nu_b^E)^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} \quad (4.4)$$

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

$$\xi_1 = [A \sin(\omega x / \nu_b^E) + B \cos(\omega x / \nu_b^E)] e^{j\omega t} \quad (4.5)$$

플래이트의 길이를 L이라하면, O와 L에서 자유면에 대해 응력 T_1 은 제로가 되어야하고, 식(4.1)과 식(4.5)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{\nu_b^E d_{31}}{\omega} E_0, \quad B = \frac{\nu_b^E d_{31} E_0 [\cos(\omega L / \nu_b^E) - 1]}{\omega \sin(\omega L / \nu_b^E)} \quad (4.6)$$

그래서,

$$\xi_1 = \frac{\nu_b^E}{\omega} \left[\sin \frac{\omega x}{\nu_b^E} + \frac{[\cos(\omega L / \nu_b^E) - 1]}{\sin(\omega L / \nu_b^E)} \cos \frac{\omega x}{\nu_b^E} \right] \cdot d_{31} E_0 e^{j\omega t} \quad (4.7)$$

과 같이 된다. 여기서 ω 는 각주파수($2\pi\nu$)를 나타낸다. PZT-플래이트의 신장변화 $\Delta L(\nu)$ 는 $\partial \xi_1 / \partial x$ 이므로, 식(4.7)로부터 계산하면 $\Delta L(\nu)$ 의 값은,

$$\Delta L(\nu) = \frac{\partial \xi_1}{\partial x} = \left[\cos \frac{\omega x}{\nu_b^E} - \frac{[\cos(\omega L / \nu_b^E) - 1]}{\sin(\omega L / \nu_b^E)} \sin \frac{\omega x}{\nu_b^E} \right] \cdot d_{31} E_0 e^{j\omega t} \quad (4.8)$$

와 같이 된다.

나. 광섬유 스트레인 게이지

진동중인 광섬유 스트레인 게이지를 통한 광계(light field) 전파의 위상변조 $\Delta \phi(\nu)$ 는 광섬유 센서의 전체 동작길이 l에 대한 각 무한소의 광섬유 소자(element) 변화를 적분하여 얻어진다.⁽⁶⁾

$$\Delta \phi(\nu) = \int_0^l \frac{\partial \phi(x, \nu)}{\partial x} dx \quad (4.9)$$

위상 변조는 주로 노정 신장과 굴절을 변화에 기인한다. dl을 광섬유의 미분 신장, dβ를 단일 모드 전파 벡터의 미분 변화라고하면, 유도된 미분 위상 변화 dφ는 다음과 같이 표시된다.

$$d\phi = \beta \cdot dl + l \cdot d\beta \quad (4.10)$$

여기서 $\beta = (2\pi / \lambda_0) n$ 으로 표시되는 값이며, 광섬유에 대한 단일모드 전파전파 벡터를 말한다. l은 진동을 가한 광섬유의 길이, n은 광섬유 코어의 굴절율이다. 코어크레딩

굴절을 차는 매우 작아서 Z-편극된 광에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$l \cdot d\beta = -\frac{1}{2} l \cdot \beta_0 \cdot n^3 \cdot d\left(\frac{1}{n^2}\right)_z \quad (4.11)$$

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 d_n 을 고려하면, 식(4.10)은 다음과 같이 된다.

$$d\phi = \beta \cdot dl - \frac{1}{2} l \cdot \beta_0 \cdot n^3 \cdot d\left(\frac{1}{n^2}\right)_z \quad (4.12)$$

미분 신장 본력 dl 은,

$$dl = s_{xx} \cdot dx \quad (4.13)$$

가 되며, 광학적 표시 행렬 $d(1/n^2)$ 의 미분변화는 다음과 같이 구할 수 있다. 등방성 균일 물질에 대한 스트레인 광탄성계수 P_{ij} 를 고찰해 보면, (7)

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

무한소의 길이 dx 에 대해 길이 l 을 표준화시킨 굴절을 변화는,

$$d\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \frac{dx}{l} \sum_{j=1}^6 P_{ij} s_j \quad (4.15)$$

과같이 된다.

식(4.15)는 X방향에서의 Z-편극된 빛살 전파에 대한 것과 스트레인 텐서(tensor)에 관한 참고 문헌(8)의 표현식에 의한 다음과 같이 표시된다.

$$d\left(\frac{1}{n^2}\right)_z = \frac{1}{l} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \cdot s_{xx} \cdot dx \quad (4.16)$$

여기서, 길이 L 을 가진 Steel 플레이트의 경우(9)를 살펴 보면 플레이트의 중앙점($L/2$)에 여진기(exciter)로 진동을 가했을때, 주파수 ν 로 진동중인 steel 플레이트 중앙점에서의 변위 값을 $U(L/2, \nu)$ 라 놓고, 플레이트 주진동 모드 $\gamma=1$ 일때, $U(L/2, \nu)$ 의 스펙트럼 본력항인 S_{xx} 에 관한 식은 다음과 같다. (9)

$$s_{xx}(x, \nu) = \frac{t_0}{2} \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \cdot U\left(\frac{L}{2}, \nu\right) \sin \frac{\pi}{L} \cdot x \cdot \sin 2\pi \nu t \quad (4.17)$$

여기서 t_0 는 플레이트의 두께이다.

S_{xx} 에 대한 표현식(4.17)과 식(4.12), (4.13), (4.16)에 의하여 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$d\phi(x, \nu) = \beta \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \frac{t_0}{2} \cdot \left[1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]\right] \cdot U\left(\frac{L}{2}, \nu\right) \cdot \sin \frac{\pi}{L} \cdot x \cdot dx \quad (4.18)$$

식(4.18)을 다시 적분 표현으로 바꾸어보면,

$$\Delta\phi(\nu)_s = \beta \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \frac{t_0}{2} \cdot \left[1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]\right] \cdot U\left(\frac{L}{2}, \nu\right) \cdot \int_0^l \sin \frac{\pi}{L} \cdot x \cdot dx \quad (4.19)$$

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

식(4.19)는 위상변화가 플레이트의 진동진폭 U 에 비례하고, 또한 플레이트의 기하학적 파라미터들인 t_0, L 과, 광섬유 광학적 파라미터들인 $n, P_{11}, P_{12}, \mu, l$ 에 따르게됨을 나타낸다. 또한 광섬유 스트레인 게이지 신호와 반도체 스트레인 게이지를 비교한 위상차 $\Delta\phi$ 와, 마이크로 스트레인 $\mu\epsilon$ 사이의 관계를 밝혀주는 유용한 식이 된다. $\mu\epsilon$ 값은 스트레인 게이지의 동작 길이와 전체 신장(elongation)간의 비로서 정의되고, 계수 10^6 으로 곱해진 값이다.

광섬유 전체의 길이변화 Δl 과 식(4.19)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta l(\nu)_s = \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \frac{t_0}{2} \cdot U\left(\frac{L}{2}, \nu\right) \int_0^l \sin \frac{\pi}{L} \cdot x \cdot dx \quad (4.20)$$

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

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

$$\mu\epsilon(\nu)_s = 10^6 \frac{\Delta\phi(\nu)_s}{\beta \left[1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]\right] \cdot l} \quad (4.21)$$

PZT-플레이트 발진소자에 대한 위상변화 $\Delta\phi(\nu)_p$ 는 식(4.8)과(4.19)로부터 얻어진다.

$$\Delta\phi(\nu)_p = \beta \cdot \left[\cos \frac{\omega x}{\nu_b E} - \frac{[\cos(\omega L/\nu_b E) - 1]}{\sin(\omega L/\nu_b E)} \sin \frac{\omega x}{\nu_b E} \right] \cdot d_{31} E_0 e^{j\omega t} \cdot \left[1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]\right] \quad (4.22)$$

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

$$\mu\epsilon(\nu)_p = 10^6 \frac{\Delta\phi(\nu)_p}{\beta \left[1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]\right] \cdot l} \quad (4.23)$$

다. 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 값이 스트레인에 의해서 50-100%까지 변화하는 성질 때문에 취급시 주의가 필요하다. 따라서 스트레인을 받지않은 상태에서의 온도계수를 결정하는 방법으로는, 접촉하지 않은 게이지의 저항과 브리지 공급전압에 의한 자기가열을 피하여 주의해서 측정하면 최적의 자료가 얻어진다. 본 연구에서의 브리지 공급전압은 전전지 1.3Vdc를 이용하였다.

다음표4.1은 이상의 이론적 배경에서 언급된 표현식에 관한 특성 파라미터들을 보인다. 위상변화 신호가 동등한 $\mu\epsilon$ 의 스트레인 값으로 변환된 결과는 실험 및 고찰에서 보인다.

표 4.1. 광섬유, PZT-플레이트, 반도체 스트레인 게이지의 제특성 파라미터.

Table 4.1. Fiber, PZT-Plate and semiconductor strain gauge characteristic parameter.

분류	내역	파라미터
단입모드 광섬유	· 제작사 및 모델	Lightwave Technologies, Inc., F 1506
	· 광섬유 직경	125×3 [μm]
	· 코어 직경	5.6×0.5 [μm]
	· 클래딩 직경	54.0×50 [μm]
	· 감쇠율	15 [dB/km, max]
	· 곡률 반경	630 [mm]
	· 안정성	7.2×10^{10} [m^{-1}]
	· 포아송율 (μ)	0.17
	· 평균 굴절율 (n)	1.456
	· 전파상수(β)	1.446×10^7 [m^{-1}]
	· 진동 동작 길이(L)	5×10^{-3} [m]
	· 광 탄성 계수(P_{11})	+ 0.121
	· 광 탄성 계수(P_{12})	+ 0.270
	· 광 탄성 계수(P_{44})	- 0.074
	반도체 스트레인 게이지	· 제작사 및 모델
· 형태		U-Type
· 저항값		350 [Ω]
· 게이지율		+ 130
· 저항 온도지수		+ 6 % / 100°F
· 게이지율 온도지수		- 10 % / 100°F
PZT-플레이트	· 제작사 및 모델	Channel Industries, Inc., Channel 5500 Navy II, Plates
	· 형태	Plates
	· 압전상수(d_{33})	400×10^{-12} [m/v]
	· 압전상수(d_{31})	- 185×10^{-12} [m/v]
	· 포아송율 (μ)	0.3
	· 무게	3.2 [g]
	· 기계적 품질계수(Q)	75
	· 관계 $E_3/v/t-1$ V/mil 인가시	$S_1=17.3$ [$\mu\text{in/in}$]
	· 탄성상수 (Y_{1E})	6.4×10^{10} [N/m ²]
	· 탄성상수 (Y_{3E})	5.2×10^{10} [N/m ²]
	· 규격(폭×길이×두께)	$0.5 \times 1 \times 0.05$ [in]
	· 밀도 (density)(ρ)	7.6×10^3 kg/m ³

5. 실험 및 고찰

광학장치 시스템은 진동을 흡수시키는 테이블상에 장착하고, 불필요한 음향잡음과 열잡음을 차폐하기위해 은박지로 장치틀 띄운후 실험을 실시하였다.



그림 5.1. 광섬유 스트레인 게이지 (그림위)와 반도체 스트레인 게이지 (아래)의 주파수 응답.

Fig. 5.1 Frequency response of a optical fiber strain gauge (Upper trace) and a semiconductor strain gauge(Lower trace).

그림5.1은 PZT-플레이트에 32Vpp 정현파(5Hz)를 인가시켰을때, 광섬유 스트레인 게이지 출력(그림위: 0.4 $\mu\epsilon$ /div.)과 반도체 스트레인 게이지의 출력(그림아래: 2 $\mu\epsilon$ /div.)을 나타낸다. 인가신호의 발진 주파수에 따라 정확히 반응하고 있음을 볼 수 있다.

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

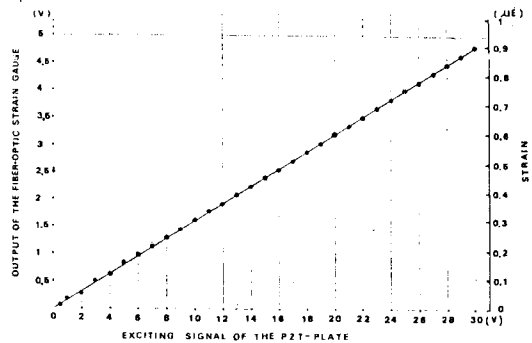


그림 5.2. 광섬유 스트레인 게이지의 비례감도

Fig. 5.2. Sensitivity of a optical fiber strain gauge.

플레이트 인가전압 변화에 대한 광섬유 스트레인 게이지의 비례감도는 그림5.2에 보였다.

광섬유 스트레인 게이지의 변화량은 동시에 비교 측정된 반도체 스트레인 게이지출력(브리지와 차동증폭기 및 저역필터)의 SIG O/P-2에서 측정된 값을 스트레인으로 환산하여 나타난 망이다.

1 μ e 이하의 측정량에서 2%이하의 선형도를 얻었다. 반도체 스트레인 게이지에 대한 스트레인 량의 환산은 Digital Strain Indicator(M.M사:P-350A)를 이용하여 그자료를 보정하였다.

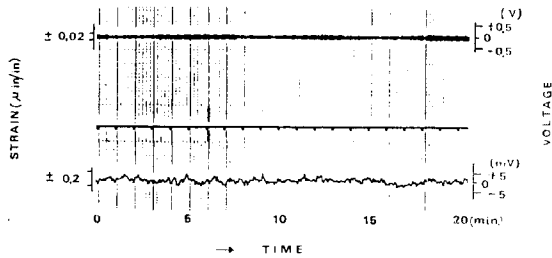


그림 5.3. 무발진 신호때의 광섬유 스트레인 게이지(그림 위) 반도체 스트레인 게이지(그림아래)의 출력 신호.

Fig. 5.3. Output signal of a optical fiber strain gauge (Upper trace) and a semiconductor strain gauge (Lower trace) at non-exciting signal.

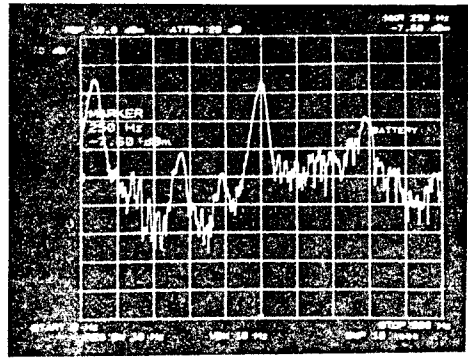
광섬유 스트레인 게이지의 측정시스템에 대한 최저측정레벨은 무발진시 신호대 잡음율이 1이되는 출력 전압을 측정 한 것으로 그 결과를 그림5.3에 보인다.

광섬유 스트레인 게이지는 $\pm 0.1V(0.02\mu e)$ 이내, 반도체 스트레인 게이지는 $\pm 4mV(0.2\mu e)$ 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.

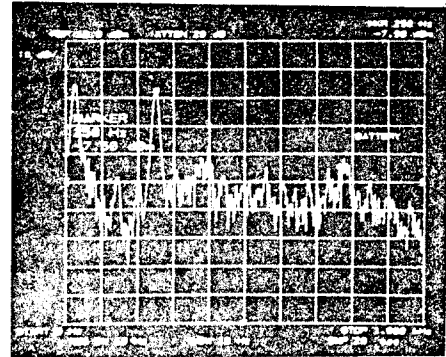
시스템의 잡음동작은 PZT-플레이트에 5Vpp정현파(250Hz)를 인가하여 스펙트럼 어날라이저(H.P.model: 8568B)를 이용, SIG O/P-1에서 그 파형을 측정하였다.

그림5.4(A),(B)에 그 결과를 보인다.

그림5.4(A)의 250Hz의 신호는 밴드폭 10Hz내 위상동기 루프회로의 출력에서 -7.6dBm(0.4 mVrms)진폭을 가지며, 시스템의 위상 변환이득(0.88 rad/V)에의해 0.35 mrad.실용치로 반응한다. 20Hz 구간에 있는 파고치는 스펙트럼의 초기화 표시오차이다. 200Hz와 500Hz 사이의 10Hz 밴드폭 잡음은 3 20 μ Vrms 간격으로 변화하였으며, 이때는 실내 잡음 교란과 실내온도(26 \pm 1 $^{\circ}$ C)의 조건에서 얻어진 자료이므로 비교적 높은 잡음이 나타 난 것으로 판단된다. 그림5.4(B)는 실험 장비 이외의 전원을 끄고, 실내등을 소등 시킨 상태에서 측정된 잡음 출력이며, 그림(A)에 비하여 250Hz 신호 출력 주위로부터 1KHz 까지 주파수 성분중 현저한 잡음 감소현상을 보인다. 이상의 측정자료에서의 잡음은 저주파 음향잡음이 대부분 기인된 것으로 사료된다.



(A)



(B)

그림 5.4. 시스템의 잡음 스펙트럼.

(A) 10 dBm/div., 50Hz/div., 10Hz 밴드폭, 맨 좌측이 0Hz,

(B) 10 dBm/div., 100Hz/div., 10Hz 밴드폭, 맨 좌측이 0Hz,

(-7.6 dBm(A)과 -7.5 dBm(B) 실용치 신호가 각각 250Hz에서 인가 됨).

Fig. 5.4. Noise Spectrum of the system.

(A) 10 dBm/div., 50Hz/div., 10Hz bandwidth, 0Hz at left edge.

(B) 10 dBm/div., 100Hz/div., 10Hz bandwidth, 0Hz at left edge.

(Each of -7.6 dBm(A), and -7.5 dBm(B) rms signal has been applied at 250Hz)

그림5.5는 플레이트 인가전압 30Vpp 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.

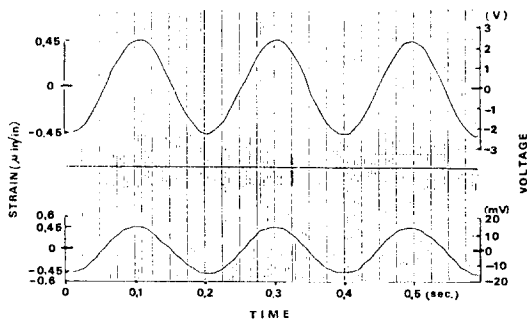


그림 5.5. 반도체 스트레인 게이지(그림 아래)와 광섬유 스트레인 게이지의 동적특성 곡선

Fig. 5.5. Dynamic characteristics curve of a semiconductor strain gauge (Lower trace) and a optical fiber strain gauge (Upper trace).

6. 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 개선했던 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 때문에 매우 유용하다. 현재의 연구에서는 리드광섬유에 대한 음향영향과 진동동에 대한 잡음감도의 개선 및 측정신호의 자료처리를 개선시킬 필요가 있다. 광섬유 스트레인 게이지의 감도는 본 실험을 통하여 다른 어떤 센서보다 우수함을 보였다.

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) 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.
- (4) 이기완, 홍봉식, "단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 안정화를 위한 위상 추적회로 보상기의 설계," 대한전자공학회, 논문지, 제26권, 제12호, pp. 137-143, 1989.
- (5) W.P. Mason, *Physical Acoustics, principles and methods*, Academic press, vol. I-part A, pp.225-226, 1964.
- (6) C. Liguori and M. Martinelli, "Integral phase modulation properties of a single-mode optical fiber subject to controlled vibration," *Appl. Opt.*, vol. 20, pp.4319-4323, 1981.
- (7) J.F.Nye, *Physical Properties of Crystals*, New York: Clarendon, pp.236-259, 1967.
- (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