

논문 2001-10-1-02

투과형 EFPI 광섬유 센서를 이용한 변형률 및 온도의 측정

김상훈*, 이정주*, 허중수**

Strain and Temperature Measurement using Transmission-type
EFPI Optical Fiber Sensors

Sang-Hoon Kim*, Jung-Ju Lee*, and Jeung-Soo Huh**

요 약

외인성 패브리-페롯 간섭계(EFPI) 광섬유 센서는 민감도와 분해능이 우수하며, 다른 종류의 광섬유 센서에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 EFPI 광섬유 센서는 단지 프린지 개수만을 계산하여 측정량을 얻기 때문에 측정 방향을 구별하기 어렵다. 본 논문에서는 측정방향의 구분을 위한 추가적인 기능과 기존의 EFPI 광섬유 센서와는 다른 측정 시스템을 갖는 투과형 외인성 패브리-페롯 간섭계(TEFPI) 광섬유 센서를 개발하였다. 그리고 이를 이용하여 변형률 및 온도를 측정하였다.

Abstract

The extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) optical fiber sensor shows good sensitivity and resolution, and has many advantages over optical fiber sensors of other types. However, this EFPI optical fiber sensor has a disadvantage that the distinction of measuring directions is difficult due to the measurement method by using only fringe counting. In this paper, the transmission-type extrinsic Fabry-Perot interferometric (TEFPI) optical fiber sensor was developed, which has been improved by the additional function and whose measuring system is different from that of the conventional EFPI optical fiber sensor. Then the application result of the TEFPI optical fiber sensor to the strain and temperature measurement was explained in detail.

1. 서 론

광섬유 센서는 전자기파의 영향을 받지 않기 때문에 전기적인 센서를 사용하기 어려운 대상에 적용이 가능하며, 크기가 작아 복합재료나 콘크리트 구조물과 같은 측정대상중송신이 가능한 장점을 가지고 있으며, 변형률, 온

도 측정, 구조물의 건전성 감시, 충격과 진동의 감지 등 측정 가능한 물리량이 다양하다.^[1]

일반적으로 간섭계형 광섬유 센서는 광 강도형 광섬유 센서^[2]에 비해 감도와 분해능이 우수하며, 브레그 그레이팅(Bragg grating) 광섬유 센서^[3]에 비해 간단하고 저렴하게 시스템을 구성할 수 있다. 패브리-페롯(Fabry-Perot)^[4] 간섭계 광섬유 센서는 하나의 광섬유 내에서 기준 광 경로와 측정 광 경로를 모두 포함하기 때문에, 기준 광섬유를 이용하는 마크젠더(Mach-Zehnder)^[5]와 마이켈슨(Michelson)^[6] 간섭계 광섬유 센서에 비해 외란의 영향을 적게 받는다. 또한 측정부가 작아 측정 대상에 대한 국부적인 측정이 가능하며, 간섭 매질의

* 한국과학기술원 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 경북대학교 공대 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Engineering, Kyung-pook National University)

<접수일자 : 2000년 8월 24일>

종류에 따라 내인성(intrinsic)과 외인성(extrinsic)으로 구분된다.

패브리-페롯 간섭계 광섬유 센서를 포함한 대부분의 간섭계형 광섬유 센서는 측정량의 결정에 있어서 간섭에 의해 발생하는 프린지의 개수만을 이용하므로 측정방향의 구분이 어려운 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해서 2개의 EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer) 시스템을 이용하는 quadrature phase-shifted EFPI 광섬유 센서^[7]와 스펙트럼 분석을 통해 절대측정이 가능한 AEFP(absolute EFPI) 광섬유 센서^[8]가 제안되었다.

본 연구에서는 단일 센서 신호 자체에서 측정방향의 정보를 얻어 기존의 방법보다 간단하고 효과적으로 측정 방향을 구별할 수 있는 투과형 구조의 EFPI 광섬유 센서에 대한 개발 내용과 이를 이용한 변형률 및 온도의 측정, 검증 결과를 소개한다.

II. 투과형 EFPI 광섬유 센서의 원리

그림 1의 투과형 EFPI (Transmission-type EFPI, TEFPI) 광섬유 센서 구조에서는 레이저 다이오드로부터 단일모드 광섬유1에 입사된 빛이 센서부로 전달되어, 모세유리튜브로 구성된 공기간극에서 단일모드 광섬유2로 한번에 투과되는 경로1과 양쪽의 광섬유 끝단에서 반사 후 광섬유2로 투과되는 경로2에 의해 간극길이 2배에 해당하는 경로차가 발생하게 된다. 이는 광섬유2를 통해 전달, 수광부에서 관찰된다. 센서부가 부착된 측정대상의 변형에 의해 공기 간극길이가 변하면, 광 경로1과 2의 경로차가 변하게 되고 이로 인해 수광부에서는 간섭프린지가 나타나게 된다. 이러한 간섭신호의 관찰은 Wagner와 Sandahl^[9]에 의해 레이저 다이오드와 LED 광원에서의 단일모드와 다중모드 광섬유에 대해 설명된 바 있다.

일반 반사형 EFPI 광섬유 센서의 구조는 투과형 EFPI 광섬유 센서와 유사하지만 광섬유2가 반사면만을 제공하는 다중모드 광섬유이며 센서로의 입사광과 출력광이 모두 광섬유1을 통해서만 진행된다. 또한 광 경로에 있어서도 반사형 EFPI 광섬유 센서에서는 광섬유1의 끝단에서 바로 반사된 빛과 공기간극으로 진행 후 광섬유2의 끝에서 반사되는 빛을 이용하여, 두 경로 모두 공기간극을 통과하는 투과형 EFPI 광섬유 센서와 차이가 있다.

광섬유를 통해 전달되는 빛은 광섬유의 코어 내에서만

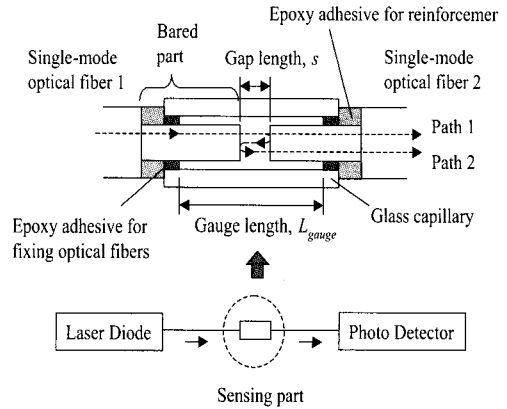


그림 1. 투과형 EFPI 광섬유 센서의 구조

Fig. 1. Structure of the TEFPI optical fiber sensor

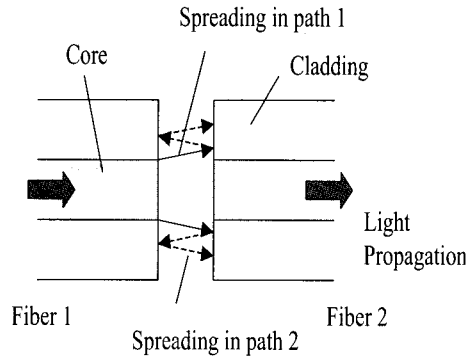


그림 2. 공기 간극에서의 광 퍼짐 손실

Fig. 2. Optical spreading loss in the air gap

진행하므로, 그림 2와 같이 간극에서 퍼지며 전파되는 빛은 반대편 광섬유로 전달될 때 광 손실이 발생하며 간극길이가 커질수록 광 손실량도 증가하게 된다. 기존의 반사형 EFPI 광섬유 센서와는 다른 투과형 구조에서는 공기 간극을 통과할 때 발생하는 빛의 퍼짐에 의한 광 손실이 두 경로 모두에서 일어나므로, 간극 길이 변화에 대한 광량의 변화가 크게 나타난다. 이러한 센서 간극길이 변화에 의한 간섭현상과 빛의 퍼짐 광 손실 경향을 이용하여 간극길이 변화량과 그 방향을 측정해 낼 수 있다.

일반적으로 빛의 진행은 맥스웰 방정식을 기반으로 하는 파동방정식의 해로써 식(1)과 같이 조화파의 형태로 나타낼 수 있다.

$$E(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

여기에서 ω 는 각진동수이고, k 는 전파상수로 광원의

파장 λ 에 대해 $2\pi/\lambda$ 의 관계를 갖는다.

투과형 EFPI 광섬유 센서의 광 경로1과 2에 대한 파동방정식은 광섬유와 공기 경계면에서의 반사 혹은 투과에 대해서 프레넬 방정식의 반사계수, 투과계수를 적용하여 표현될 수 있다. 진폭에 대한 반사계수를 r 이라 하고 광섬유에서 공기로의 진폭에 대한 투과계수를 t_1 , 공기에서 광섬유로의 투과계수를 t_2 라고 할 때, 센서 간극을 한번에 통과하는 광 경로1은 t_1 과 t_2 의 영향을 받으며 각 경계면에서 반사 후 통과하는 광 경로2는 t_1 , t_2 및 r^2 에 의해 진폭의 영향을 받는다. 두 경로의 파동 방정식은 센서 간극길이의 2배에 해당하는 $2s$ 의 경로차에 의한 간섭 형태로 대수적인 방법을 이용하여 정리된다. 광 강도는 파동방정식으로 표현되는 전기장의 제곱에 비례하므로, 광 손실이 없는 광 강도 E_0^2 에 대한 센서에서 발생하는 광 강도 $E^2(s)$ 의 비인 투과율은 다음과 같이 표현된다.

$$T(s) = \frac{E^2(s)}{E_0^2}$$

$$= t_1^2 t_2^2 \{ L_1^2(s) + r^4 L_2^2(s) + 2r^2 L_1(s) L_2(s) \cos(2ks) \} \quad (2)$$

위 식에서 $L_1^2(s)$ 와 $L_2^2(s)$ 는 각각 두 광 경로가 공기 간극을 통과할 때 발생하는 빛의 퍼짐에 의한 광 강도의 손실 비율을 나타낸다.

Marcuse는 중복적분을 이용한 두 단일모드 광섬유 간의 전달효율 식에 가우시안 근사를 적용하여, 두 광섬유의 결합에서 발생할 수 있는 spot size의 차이, 횡 방향 치우침, 두 광섬유 사이의 간극, 기울어짐에 의한 광 손실을 수식적으로 정리하였다.^[10] 투과형 EFPI 광섬유 센서의 간극에서 발생하는 광 손실을 Marcuse의 결과를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta(s_p) = \frac{1}{1 + (0.5s_p/x_R)^2} \quad (3)$$

위 식에서 x_R 은 Rayleigh 거리, s_p 는 광 경로가 공기 간극을 통과할 때의 경로 길이를 나타낸다. s_p 는 광 경로 1인 경우 간극길이 s 와 같고 광 경로2인 경우 $3s$ 에 해당하게 되므로, $L_1^2(s)$ 는 $\eta(s)$, $L_2^2(s)$ 는 $\eta(3s)$ 로 표현된다. 식(3)의 간극에서 빛의 퍼짐에 의한 광 손실을 식(2)의 센서 투과율에 대입하여 투과형 EFPI 광섬유 센서의 해석을 수행할 수 있다.

그림 3은 투과형 EFPI 광섬유 센서의 해석 결과와 두 단일모드 광섬유의 간극길이를 정밀 이송장치를 이용하여 변화시켰을 때 관찰된 실험 결과를 비교한 것으로, 해석 결과와 실험결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 특히 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 의 영역에서 일정한 간섭프린지 진폭과 선형성이 우수한 신호수준의 변화가 나타났다. 이러한 특성의 투과형 EFPI 광섬유 센서의 신호에서 간섭프린지의 개수를 이용하여 측정량을 결정할 수 있으며, 감쇄하는 신호 수준으로 인장방향, 증가하는 신호수준으로 압축방향을 알 수 있게 된다.

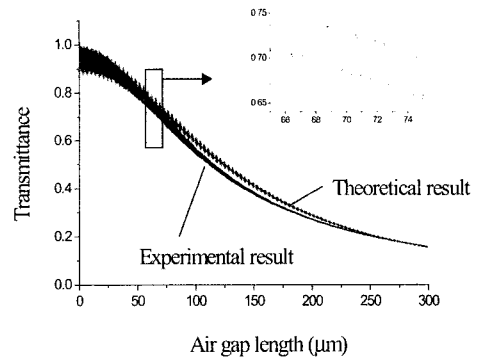


그림 3. 이론에 의한 센서 투과율과 실험에 의한 투과율의 비교

Fig. 3. Comparison of theoretical and experimental transmittance

III. 투과형 EFPI 광섬유 센서를 이용한 측정

1. 변형률의 측정

변형률의 측정을 위해 투과형 EFPI 광섬유 센서를 제작, 실험을 수행하였다. 투과형 EFPI 광섬유 센서의 광섬유 1, 2로는 코어, 클래딩, 피복 직경이 각각 $7.9 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$ 인 단일모드 광섬유가 사용되었으며, 광섬유 끝부분의 피복을 벗기고 광섬유 수직절단기를 이용하여 측 방향에 수직하게 절단한 후 $128 \sim 130 \mu\text{m}$ 내경, $300 \sim 350 \mu\text{m}$ 외경의 모세유리관에 삽입하여 그림 1과 같이 구성하였다. 모세유리관 내의 두 광섬유 초기 간극길이를 $70 \mu\text{m}$ 정도가 되도록 설치하고 유리관의 양끝에서 에폭시 접착제를 이용하여 고정하였다. 이때 일부의 에폭시 접착제가 스며들어가게 되며, 그림 1에서와 같이 접착제에 의해 고정되지 않는 모세유리관의 내부길이 L_{gauge} 가 실제 외부

물리량 변화를 전달하여 측정을 수행하는 측정길이를 정의된다. 간극길이 변화에 의해 수광부에서 발생하는 투과형 EFPI 광섬유 센서 간섭프린지의 P-V(peak-valley) 발생회수를 N 이라고 하면, 측정되는 변형률은 식(2)의 간섭프린지를 의미하는 마지막 항으로부터 식(4)과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \frac{N\lambda}{4L_{gauge}} \quad (4)$$

표 1. 제작된 투과형 EFPI 광섬유 센서
Table 1. Fabricated TEFPI optical fiber sensors

Sensors	Gauge Length (mm)	Resolution (% ϵ)
1	4.53	7.26×10^{-3}
2	5.11	6.43×10^{-3}
3	5.43	6.05×10^{-3}
4	9.92	3.31×10^{-3}
5	11.38	2.89×10^{-3}
6	12.02	2.74×10^{-3}

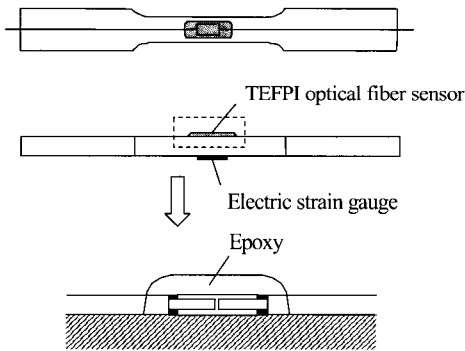


그림 4. 투과형 EFPI 광섬유 센서와 스트레인게이지가 부착된 시험편

Fig. 4. Test specimen with attached TEFPI optical fiber sensor and electric strain gauge

실험에는 파장 1315nm의 단일모드 레이저 다이오드가 광원으로 사용되었다. 표 1과 같이 4.53mm에서 12.02mm까지의 측정길이를 갖는 센서가 제작되었으며, 그림 4와 같이 인장시험편의 한쪽 표면에 에폭시를 이용하여 부착되었다. 인장 시험편의 반대쪽 같은 위치에는 투과형 EFPI 광섬유 센서의 비교, 검증용 위해서 Kyowa사의 저항형 스트레인 게이지를 설치하였다.

센서가 부착된 인장시험편은 유압식 인장시험기 MTS를

이용하여 valley의 하중이 0인 삼각파의 하중형태로 반복하였다.

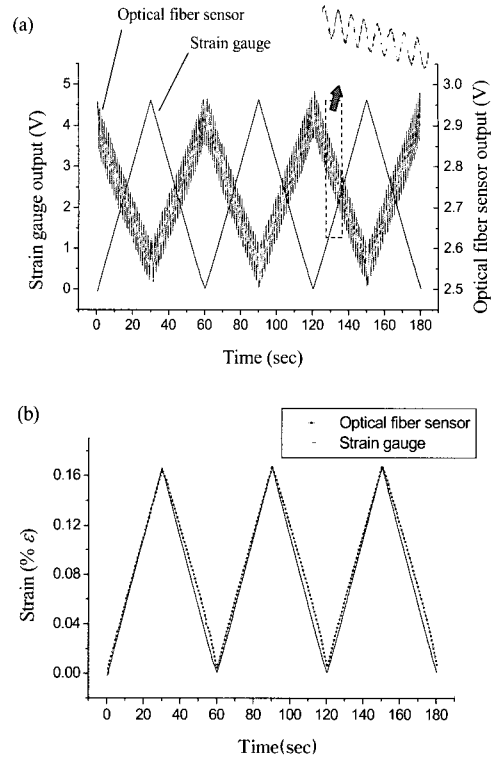


그림 5. 투과형 EFPI 광섬유 센서를 이용한 변형률 측정 결과

- (a) 광섬유 센서와 스트레인게이지의 출력 신호
- (b) 광섬유 센서와 스트레인게이지에 의해 측정된 변형률의 비교

Fig. 5. Result of the strain measurement by using the TEFPI optical fiber sensor

- (a) Output signals of the optical fiber sensor and strain gauge
- (b) Comparison of strain measured by the optical fiber sensor and strain gauge

그림 5(a)는 광섬유 센서와 스트레인 게이지의 출력신호의 비교한 것이다. 스트레인 게이지의 신호는 변형률에 비례하는 반면, 광섬유 센서의 신호는 해석 및 그림 3의 결과에서와 같이 인장방향 변형률에 대해서 신호의 수준이 감소하면서 간섭프린지가 발생하며, 압축방향 변형률에 대해서는 반대의 경향을 보였다. 그림 5(b)는 신호의 수준변화에 의한 측정 방향과 식(4)에 의한 변형률 측정을 이용하여 광섬유 센서의 출력신호를 변형률로 변환한

것으로, 스트레인 게이지를 이용하여 측정한 값과 일치하는 것을 알 수 있다.

2. 온도의 측정

온도는 변형률과 함께 광섬유 센서를 이용하여 측정할 수 있는 대표적인 물리량의 하나로서, 변형률 측정에서 발생할 수 있는 온도에 의한 오차를 보상하기 위해 이용될 수도 있다. 일반적인 반사형 패브리-페롯 광섬유 센서를 이용하는 온도 측정에 대한 연구는 다른 형태의 광섬유 센서와 복합하여 사용, 변형률과 온도의 동시 측정으로 진행되고 있다.^[11]

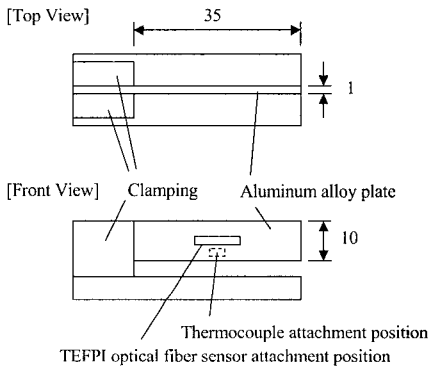


그림 6. 온도측정을 위한 광섬유 센서 장치 (단위:mm)
Fig. 6. Optical fiber sensor device for temperature measurement (unit:mm)

온도의 측정은 그림 6과 같이 작은 크기의 알루미늄 판에 투과형 EFPI 광섬유 센서를 에폭시 접착제를 이용하여 부착, 온도 변화에 의한 열팽창으로부터 전달되는 센서의 간극길이 변화를 이용하여 수행되었다.

측정대상에 부착된 광섬유 센서에서 응력 σ 과 온도 T 의 변화에 의해 발생하는 간섭프린지의 위상 변화는 식 (5)와 같다.

$$\Delta\phi = \left(\frac{\partial\phi}{\partial\sigma}\right)_T \Delta\sigma + \left(\frac{\partial\phi}{\partial T}\right)_\sigma \Delta T \quad (5)$$

온도만을 측정할 때에는 외부로부터의 응력이 전달되지 않으므로, 식(5)의 오른쪽 첫번째 항은 측정대상과 광섬유 센서의 모세유리관 사이의 열팽창계수의 차이로 발생하는 열응력에 의한 위상변화를, 두 번째 항은 온도변화에 의한 위상변화를 의미한다. 투과형 EFPI 광섬유 센서의 위상차는 센서 간극길이 s 와 $\phi = 2ks$ 의 관계가 있다. 이를 식(5)의 오른쪽 항에 대입한 후, 열응력은 모세

유리튜브, 알루미늄 판, 센서부착에 사용한 에폭시 간의 유연도법(flexibility method)^[12]을, 센서간극길이의 온도에 관한 편미분 항은 모세유리튜브 내 구속되지 않은 광섬유의 열팽창을 고려하여 유도할 수 있다. 센서 간극길이의 응력에 대한 편미분은 간극길이와 변형률의 관계로부터 정리될 수 있다. 광섬유와 에폭시가 알루미늄 판에 비해, 센서의 초기간극길이 s_0 가 측정길이 L_{gauge} 에 비해 충분히 작다고 가정하면, 위의 관계로부터 식(5)은 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta\phi = 2kL_{gauge}(\alpha_H - \alpha_T - \alpha_F)\Delta T \quad (6)$$

식(6)에서 α_H , α_T , α_F 는 각각 알루미늄 판, 모세유리튜브, 광섬유의 열팽창계수이다. 투과형 EFPI 광섬유 센서의 간섭프린지 P-V 발생회수가 N 일 때 측정되는 위상은 πN 으로 나타낼 수 있고, 식(6)으로부터 간섭프린지를 이용하여 온도를 측정할 수 있는 관계를 얻어낼 수 있다.

$$\Delta T = \left[\frac{\lambda}{4L_{gauge}(\alpha_H - \alpha_T - \alpha_F)} \right] \cdot N \quad (7)$$

그림 6과 같이 구성된 측정장치를 가열로에 넣어 85℃까지 온도를 증가시킨 후 냉각하였다. 각 열팽창계수 값은 표 2와 같으며, 제작된 광섬유 센서의 측정길이 L_{gauge} 는 14.94mm로 0.96℃의 온도분해능을 갖는다.

표 2. 온도측정에 이용되는 재료의 열팽창계수
Table 2. Coefficient of thermal expansion (CTE) of materials used in the temperature measurement

Material	CTE
Aluminum alloy 6061-T6 (measuring plate)	24×10^{-6}
Quartz glass (capillary tube)	5.5×10^{-7}
Optical fiber	0.5×10^{-6}

그림 7은 투과형 EFPI 광섬유 센서와 열전대를 이용하여 측정된 온도변화를 비교한 것이다. 변형률의 측정과 마찬가지로 간섭프린지의 P-V발생회수를 이용하여 식(7)의 온도변화를 결정하고 출력신호 수준의 증감방향으로부터 온도변화의 증가, 감소를 구분하였다. 그 결과 투과형 EFPI 광섬유 센서의 측정온도는 열전대의 측정온도에 근접함을 확인할 수 있었으며, 55℃ 정도의

온도변화지점에서 2°C 정도의 차이를 보였다. 일반적으로 열전대는 작은 크기의 비드를 측정부로 이용하기 때문에 측정범위가 작은 반면, 광섬유 센서는 측정길이가 상대적으로 길기 때문에 평균적인 측정을 수행하게 된다. 이로 인하여 열전대와 투과형 EFPI 광섬유 센서의 온도 측정값 간에 다소 오차가 발생한 것으로 보인다.

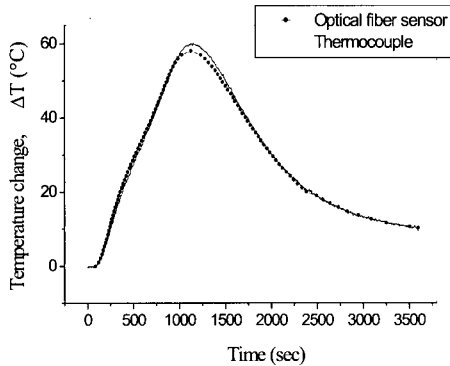


그림 7. 광섬유 센서와 열전대에 의해 측정된 온도 변화

Fig. 7. Temperature change measured by the optical fiber sensor and thermocouple

IV. 결 론

본 연구에서는 기존의 반사형 EFPI 광섬유 센서와는 다른 투과형의 구조를 갖는 EFPI(TEFPI) 광섬유 센서의 원리와 이를 이용한 변형을 및 온도의 측정 방법을 제시하였다. 투과형 EFPI 광섬유 센서의 간섭프린지는 출력 신호 수준 변화와 동시에 나타나기 때문에 간섭프린지 진폭의 신호수준에 대한 크기 비를 나타내는 가시도(visibility)는 반사형 EFPI 광섬유 센서에 비해 작은 값을 갖는다. 이는 센서 시스템에서 발생할 수 있는 잡음에 다소 취약함을 의미하지만, 본 연구의 실험 결과에서 간섭프린지는 측정을 수행하기에 충분함을 확인할 수 있었다. 또한 투과형 EFPI 광섬유 센서는 제작 및 센서 시스템 부품, 신호처리 면에서 기존 EFPI 광섬유 센서의 측정 방향 구별을 위한 방법보다 우수하다.

본 연구의 온도 측정 실험결과로부터 투과형 EFPI 광섬유 센서는 상온에서 85°C 정도의 온도 범위까지의 사용에 지장이 없음을 확인할 수 있었다. 하지만 광섬유 센서의 제작 및 부착에 사용한 에폭시 접착제는 고온에서 불

안정한 거동을 보이기 때문에, 추후 이에 적절한 접착제나 접착방법을 고안한다면 보다 넓은 범위에서의 온도 측정이 가능할 것이다. 또한 이러한 온도측정 방법은 변형률의 측정에 있어서 온도에 의한 오차를 보상할 수 있는 방법으로 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J. Dakin and B.Culshaw, Optical Fiber Sensors: Principles and Components, Artech House, 1988.
- [2] R.A. Badcock and G.F. Fernando, "Fatigue damage detection in carbon fiber reinforced composites using an intensity-based optical fiber sensor," SPIE Proceedings of Smart Structures and Materials 1995: Smart Sensing Processing and Instrumentation, vol. 2444, pp. 422~431, 1995.
- [3] Y. J. Rao, D.J. Webb, D.A. Jackson, L. Zhang and I. Bennion, "High-resolution, wavelength-division-multiplexed in-fiber Bragg grating sensor system," Electronics Letters, vol 32, iss 10, pp. 924~926, 1996.
- [4] T. Valis, W. D. Hogg and R. M. Measures, "Composite material embedded fibre-optic Fabry-Perot strain rosette," SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins III, vol. 1370, pp. 154~161, 1990.
- [5] C.D. Butter and G.B. Hocker, "Fiber optic strain gauge," Applied Optics, vol. 17, pp. 2867~2869, 1978.
- [6] K. Liu, S.M. Ferguson and R.M. Measures, "Damage detection in composite with embedded fiber optic interferometric sensor," SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins II, vol. 1170, pp. 205~210, 1989.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] R.E. Wagner and C.R. Sandahl, "Interference Effects in Optical Fiber Connection," Applied Optics, vol. 21, no. 8, pp. 1381~1385, 1982.
- [10] D. Marcuse, "Loss Analysis of Single-mode Fiber Splices," The Bell System Technical Journal, vol. 56, no. 5, pp. 703~718, 1977.

[11] H. Singh and J.S. Sirkis, "Simultaneously Measuring Temperature and Strain using Optical Fiber Microcavities," Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 4, pp. 647~653, 1997.

[12] J. M. Gere and S.P. Timoshenko, Mechanics of Materials, Third Edition, Chapman & Hall, 1992.

著 者 紹 介



김 상 훈

1974년생

1997년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(학사)

1999년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)

현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
주관심분야: 광섬유 센서, 지능형 구조물

이 정 주

『센서학회지 제7권 4호』 논문 98-7-4-08, p.285 참조

현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수

허 증 수

센서학회지 제 7권 4호 논문 98-7-4-08, p285참조
현재 경북대학교 금속공학과 교수