

광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정

강동훈* · 강현규 · 류치영 · 홍창선 · 김천곤

Thermal Strain and Temperature Measurements of Structures by Using Fiber-Optic Sensors

Dong Hoon Kang, Hyun Kyu Kang, Chi Young Ryu, Chang Sun Hong

KEY WORDS : Thermal strain(열변형률), Optical fiber(광섬유), EFPI(패브리-페로 간섭계), FBG(브래그 격자)

ABSTRACT

Two types of fiber-optic sensors, EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer) and FBG(fiber Bragg grating), have been investigated for measurement of thermal strain and temperature. The EFPI sensor is only for measurement of thermal strain and the FBG sensor is for simultaneous measurement of thermal strain and temperature. FBG temperature sensor was developed to measure strain-independent temperature. This sensor configuration consists of a single-fiber Bragg grating and capillary tube which makes it isolated from external strain. This sensor can then be used to compensate for the temperature cross sensitivity of a FBG strain sensor. These sensors are demonstrated by embedding them into a graphite/epoxy composite plate and by attaching them on aluminum rod and unsymmetric graphite/epoxy composite plate. All the tests were conducted in a thermal chamber with the temperature range 20-100°C. Results of strain measurements by fiber-optic sensors are compared with that from conventional resistive foil gauge attached on the surface.

1. 서론

복합재료는 비강성, 비강도가 금속재료에 비해 매우 높고 피로특성이 우수하므로 항공우주구조물에 많이 적용되고 있다. 특히, 인공위성, 발사체 등의 구조물은 무게당 비용이 높기 때문에 무게를 절감할 수 있는 재료뿐만 아니라 그들이 운영시 받는 반복적인 열하중으로부터 구조물의 안정성 문제를 보장하기 위해 높은 비강도, 비강성 그리고 낮은 열팽창계수를 갖는 재료를 필요로 한다. 그러므로 복합재 구조물이 신뢰성을 갖고 구조물에 적용되기 위해서는 복합재료의 열변형 특성에 대한 많은 연구와 실질적인 변형 검출방법이 요구된다.

그러나 기존의 변형 검출방법인 변형률 게이지

는 현장에서 사용하는데 있어서 많은 제약과 단점을 내포하고 있다. 이는 변형에 대한 정보를 직접적으로 전기신호로 변화하여 주기 때문에 전기적으로 절연이 되지 않거나 전자기파의 영향을 받는 환경에서는 사용이 어렵게 된다. 그래서 기존의 방법보다 효율적이고 실시간으로 구조물의 건정성을 검사하기 위해 새로운 방법이 요구되고 있다.

광섬유 센서는 기존 센서에 비해 많은 장점을 가지고 있는 센서로서 현재 구조물의 변형[1]뿐만 아니라 열변형률과 온도측정을 위해 많은 연구[2]가 진행되고 있다. 하지만, 기존의 연구는 열변형률을 측정함에 있어 변형률만을 광섬유 센서로 측정하고 온도는 주로 열전대로 측정된 경우가 많았다. 그러므로, 광섬유 센서를 이용하여 열변형률과 온도를 동시에 측정하는 방법에 대한 개발이 중요하다.

본 연구에서는 근래에 지능구조물에 많이 적용되고 있는 EFPI 센서와 FBG 센서를 사용하여 열하중이 가해질 때 구조물의 열변형과 온도를 측정할

* 한국과학기술원 항공우주공학과

수 있는지 확인해 보았다.

2. 측정원리

2.1 EFPI 센서를 이용한 열변형률 측정

광섬유 코어의 굴절률(1.449)과 공기의 굴절률 (1)의 차이에 의해 광섬유의 단면과 공기가 접하는 부분에서는 부분적인 반사가 일어나게 된다. 공기와 광섬유의 단면에서는 약 4%의 부분반사가 생기고 광 간섭형 센서인 EFPI 센서는 이 4%의 반사를 이용하여 구성하며 변형이 가해짐에 따라 발생하는 간섭무늬와 변형률의 관계는 최종적으로 다음과 같은 식 (1)로 표시된다[3].

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{N\pi}{0.9629 \times 10^7 L} \\ &= 3.263 \times 10^{-7} N/L \end{aligned} \quad (1)$$

하지만, 본연구와 같이 구조물에 적용하여 열 변형률을 측정하는 실험에서는 유리관 내부의 광섬유 자체의 열팽창에 의한 오차를 보정해야 한다. 그러므로, 광섬유의 열팽창에 의한 변형률 차이를 보정하면 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\varepsilon = 3.263 \times 10^{-7} N/L + 0.5 \times 10^{-6} \Delta T \quad (2)$$

2.2 FBG 센서를 이용한 열변형률 측정

광섬유에서 브래그 그레이팅은 광섬유의 코어 부분에 새겨진 굴절률이 주기적으로 변하는 격자이다. 이러한 격자는 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우 브래그 조건에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 그레이팅 부분에서 반사되며 나머지 파장 부부는 그냥 통과하게 된다. 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 스트레인 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라지며 변형률과의 관계는 식 (3)과 같다[4].

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon] \quad (3)$$

하지만 본 연구와 같이 FBG 센서가 구조물에 적용되어 열변형만을 받는 경우에는 식 (3)에서

$\varepsilon = 0$ 가 되고 센서의 부착이나 삽입으로 인한 영향을 고려하면 최종 파장 이동은 식 (4)와 같다 [5].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \xi \Delta T + (1 - p_e) \cdot (\alpha_{str} \Delta T) \quad (4)$$

식 (7)에서 $\alpha_{str} \Delta T$ 는 측정하고자 하는 구조물의 열변형률 $\varepsilon_{thermal}$ 이므로 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\varepsilon_{thermal} = \frac{1}{1 - p_e} \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - \xi \Delta T \right] \quad (5)$$

2.3 FBG 온도 센서를 이용한 온도 측정

FBG 센서를 이용한 온도 측정을 위해 Fig. 1 과 같은 새로운 형태의 FBG 센서를 고안하였다. 그림에서와 같이 광섬유의 브래그 격자 부분이 유리 튜브로 둘러 쌓여 있기 때문에 센서가 구조물에 부착 혹은 삽입된 경우라도 브래그 격자 부분은 항상 변형이 없는 상태로 유지되며 단지 온도에 의해서만 브래그 파장의 이동이 생기게 됨을 알 수 있다. 그러므로 식 (3)에서 $\varepsilon = 0$ 가 되어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{(\alpha + \xi)} \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right) \quad (9)$$

따라서 온도는 브래그 반사파장의 변화량만 측정하면 구할 수 있다.

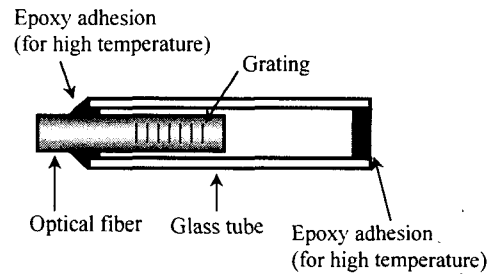


Fig. 1 FBG temperature sensor.

3. 실험 결과 및 분석

본 실험에 앞서 예비 실험으로 FBG 온도 센서의 온도특성 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 경계조건을 자유단 상태로 하였으며 값의 비교를 위해 다른 FBG 센서 하나와 함께 실험하였다. 실험 장치는 Fig. 2 와 같고 얻어진 온도 특성 관계는 Fig. 3 과 같다.

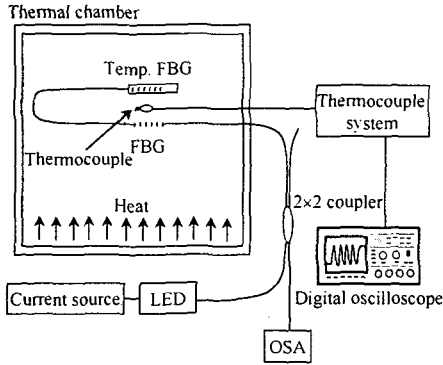


Fig. 2 Test for temperature characteristics of FBG strain and FBG temperature sensors.

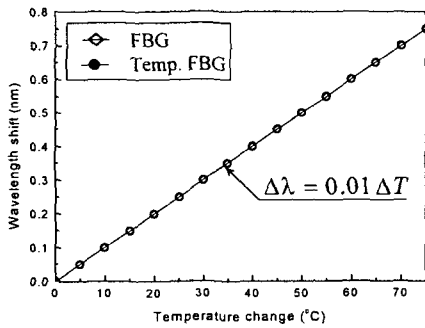


Fig. 3 Wavelength shift of FBG and FBG temperature sensor.

Fig. 3 에서 FBG 온도 센서는 외란의 영향이 없고 100°C 에 1nm 에 해당하는 선형 적인 파장 이동을 보여 역환산을 통해 온도 센서로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

열변형률을 측정하는 광섬유 센서에 대한 측정값의 정량적인 신뢰성을 확인하기 위해 열팽창 계수 값이 알려져 있는 알루미늄($\alpha \approx 23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 시편에 대해 EFPI 센서를 시편의 표면에 부착하여 상온에서 100°C 까지의 온도 범위에 대한 열변형률을 측정하고 함께 부착한 변형률 게이지로부터 측정된 열변형률 값과 열팽창 계수에 의해 계산된

값을 비교하는 실험을 수행하였다. 이 때 기준 게이지를 티타늄 실리케이트에 부착하여 하프 브리지를 구성함으로써 게이지 자체의 온도 효과를 보상하였다[6]. EFPI 센서를 이용한 실험의 경우 각 센서 신호는 Fig. 4 에 표시된 바와 같이 각 센서의 신호 취득 시스템을 거쳐 최종적으로는 GPIB 카드를 통해 컴퓨터로 신호를 전송하고 소프트웨어인 Docuwave 를 이용해 신호를 취득하였다.

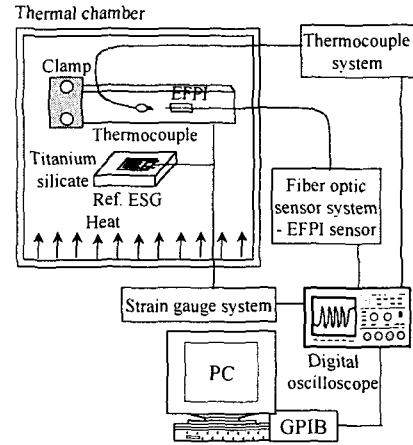


Fig. 4 Schematic of thermal strain measurement for aluminum specimen using EFPI sensor.

EFPI 센서와 달리 FBG 센서를 이용한 실험에서는 Fig. 5 와 같이 열전대가 아닌 FBG 온도 센서를 사용하여 온도를 측정하였으며 전기 용착을 통해 변형률 센서와 한 광섬유에 구성하여 온도와 변형률을 동시에 측정하였다. 실험 데이터는 25°C 부터 100°C 까지 5°C 간격으로 취득하였다.

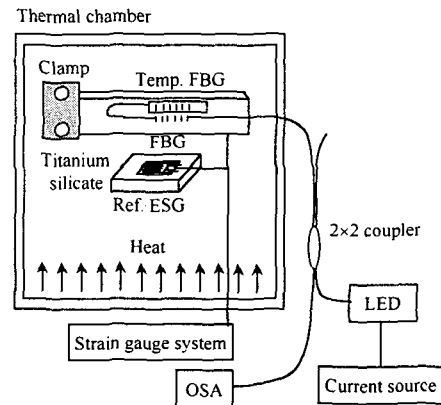
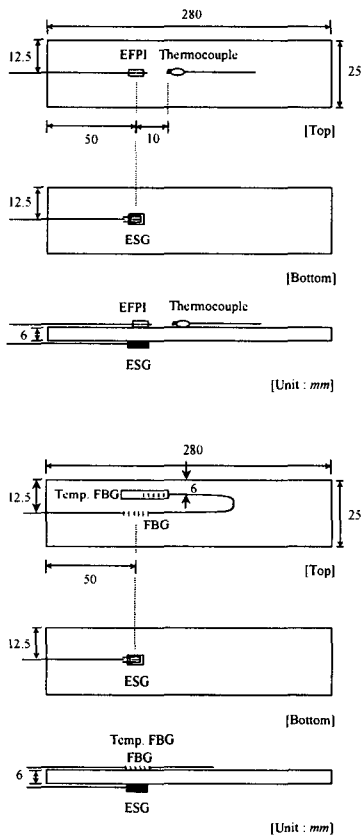


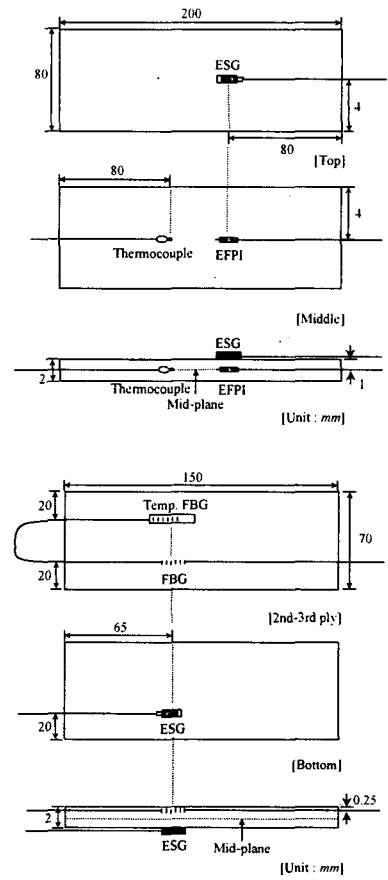
Fig. 5 Schematic of thermal strain measurement for aluminum specimen using FBG strain and FBG temperature sensors.

직교 적층 시편과 비대칭 적층 시편의 열변형을 및 온도 측정 실험도 알루미늄 시편의 경우와 마찬가지로 EFPI 센서의 경우 Fig. 4, FBG 센서의 경우 Fig. 5 의 실험 장치를 사용하였다. 사용된 시편은 $[0_4/90_4]_S$ 적층과 $[0_4/90_4]_T$ 적층 이며 (주) 한국화이바의 CU-125NS graphite/epoxy 프리프레그 테이프를 사용하여 제작하였다. 각 시편의 경계조건은 알루미늄과 직교 적층 시편의 경우 한 면 단순지지 하였고 비대칭 시편의 경우에는 자유단 상태로 하였다. 각 시편의 형상과 센서의 삽입, 부착위치는 Fig. 6 과 같다.

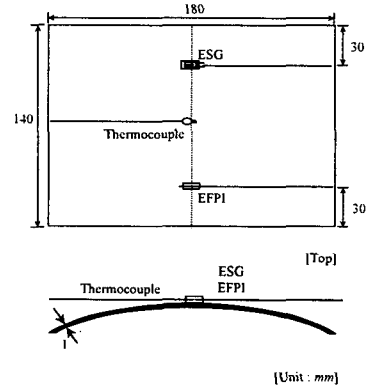
실험에 사용된 광 분석기는 Anritsu 사의 MS9710B 이며 변형률 게이지는 5mm 의 게이지 길이를 가지는 TML 사의 QFLA-5-11 고온용 게이지를 사용하였다. FBG 센서는 QPS 사와 IBSEN 사의 페이스-마스্ক를 이용해 한국통신의 엑시머 레이저로 직접 제작 하였으며 FBG 온도 센서의 유리 튜브는 직경 140~145 μm 로 하였다.

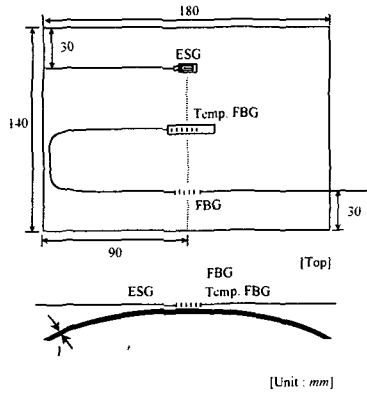


(a) Aluminum specimen.



(b) $[0_4/90_4]_S$ specimen.



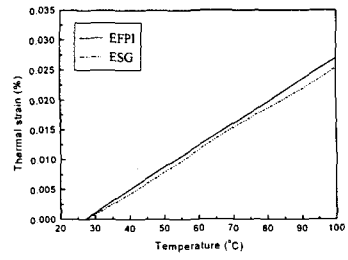


(c) $[0_4/90_4]_T$ specimen.

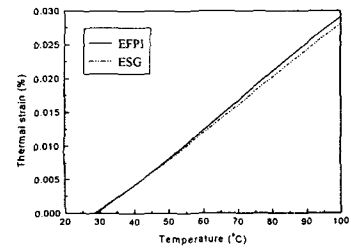
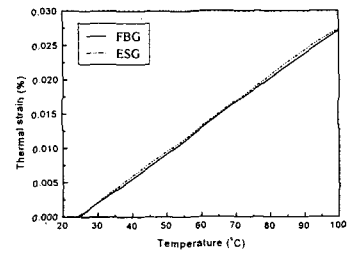
Fig. 6 Configurations of specimens.

Fig. 6 에서와 같이 알루미늄 시편과 비대칭 시편의 경우에는 각 센서를 표면에 부착하였고 직교 적층의 시편의 경우에는 시편에 삽입하였다. 또, 모든 시편에 변형률 게이지를 부착하여 광섬유 센서로 취득한 값과 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 EFPI 센서가 부착된 시편은 모두 열전대(K-type)를 사용하여 온도를 측정한 반면 FBG 센서가 부착된 시편은 모두 FBG 온도 센서를 사용하여 온도를 측정하였다.

위의 시편에 대한 열변형률 측정 실험의 결과는 Fig. 7 과 같다.



(b) Thermal strain of $[0_4/90_4]_S$ specimen.



(c) Thermal strain of $[0_4/90_4]_T$ specimen.

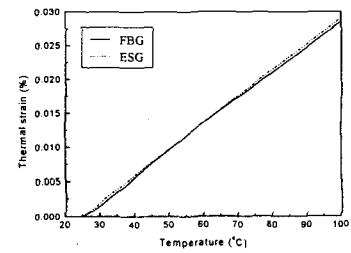
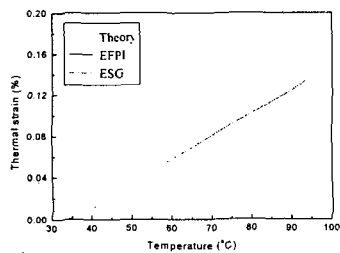
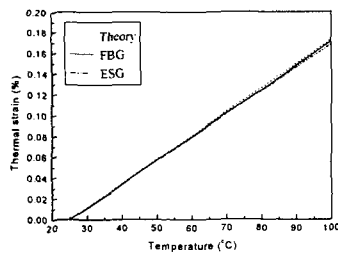


Fig. 7 Thermal strain of each specimen.



(a) Thermal strain of aluminum specimen.

실험을 통해 얻어진 각 시편에 대한 열변형률은 Table.1 과 같으며 값은 단위 온도에 대한 값으로 나타나 있다.

Sensor Specimen	EFPI	ESG	FBG	ESG
Aluminum	22.91	22.42	22.80	22.44
	Difference	2.19%	Difference	1.60%
[0 ₄ /90 ₄] _S	3.70	3.51	3.57	3.65
	Difference	5.41%	Difference	2.19%
[0 ₄ /90 ₄] _T	-4.05	-3.90	-3.81	-3.87
	Difference	3.85%	Difference	1.55%

[Unit : $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$]

Table. 1 Thermal strain per unit temperature.

4. 결론

본 연구에서는 열하중이 가해질 때 구조물의 열변형률과 온도를 측정할 수 있는지 확인해 보았다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다. FBG 센서는 100°C의 온도 변화에 대해 브래그 파장이 1nm 만큼 선형적으로 이동함을 실험을 통해 확인하였다. 이로부터 외란의 영향을 받지 않으며 삽입이나 부착이 가능한 FBG 온도 센서를 고안하였다. 알루미늄 시편을 통한 열변형 실험으로부터 광섬유 센서 신호의 정량적인 신뢰성을 가질 수 있었고 [0₄/90₄]_S 적층 시편을 통한 실험으로부터 복합재료에 대한 적용과 센서 삽입의 영향이 없음을 알 수 있었고 [0₄/90₄]_T 적층 시편을 통한 열변형 실험으로부터 실제 구조물과 같이 곡률이 존재하는 구조에도 적용이 가능함을 확인하였다. 위의 사실로부터 FBG 센서와 FBG 온도 센서를 한 광섬유로 연결하여 구조물의 열변형률과 온도를 동시에 측정할 수 있는 시스템이 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

(1) 강현규, 박중완, 류치영, 홍창선, 김천곤,

“광섬유 센서 신호의 실시간 디지털 처리에 의한 구조물의 동적 변형률 측정”, 한국항공우주학회지, 제 26 권, 제 2 호, 1998, pp. 47-59.

(2) Yuan LB and Zhou LM, “Temperature-compensated fibre optic strain sensor using the differential white-light interferometric technique”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 9, No. 8, 1998, pp. 1174-1179.

(3) 박중완, 경우민, 류치영, 강현규, 홍창선, 김천곤, 진승문, “복합재 보의 층간분리 좌굴과 진전시 광섬유 센서의 신호특성에 관한 연구”, 한국항공우주학회지, 제 26 권, 제 1 호, 1998, pp. 70-78.

(4) C. Y. Ryu, C. S. Hong, C. G. Kim, S. B. Lee, S. S. Choi, “Strain measurement of the laminated composites using attached fiber Bragg grating sensor”, *Proc. of the 3rd Optoelectronics and Communications Conference*, pp. 272-273, Japan, 1998.

(5) Sirkis, J.S., “Unified approach to phase-strain-temperature models for smart structure interferometric optical fiber sensor : Part I, Development”, *Optical Engineering*, 1993, pp. 752-761.

(6) “Measurement of thermal expansion coefficient using strain gages”, *Measurements Group TECH NOTE*, TN-513-1, 1986.