

論文

변형률 전달성을 고려한 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입 적용 기법 개발

강동훈*, 강현규**, 김대현*, 홍창선***, 김친곤****

Development of Embedding Methods of Fiber Bragg Grating Sensor under Consideration of Strain Transfer

D. H. Kang*, H. K. Kang**, D. H. Kim*, C. S. Hong***, C. G. Kim****

ABSTRACT

It is known that recoating or protection with glass-tube can prevent FBG sensor from being affected by birefringence. However, the effect on the strain transfer of such treatment has not been verified yet. Three types (uncoated, recoated and glass-tube protection) of FBG sensors are fabricated to verify the effect on the strain transfer of each treatment. The strain from each sensor embedded into a graphite/epoxy composite specimen was compared with that of ESG attached on the surface through the tensile test. And the signal characteristics of each sensor were also compared using the tensile test of a tapered aluminum specimen which was under the state of strain gradient.

초 록

광섬유 센서의 복굴절 현상을 방지하기 위해 리코팅이나 유리 튜브를 이용하여 보호하는 방법이 있다. 하지만, 이와 같은 처리를 하였을 경우 센서의 변형률 전달성에 대한 검증이 아직 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 세가지 형태(재킷이 벗겨진, 리코팅을 한, 유리 튜브로 보호한)의 광섬유 브래그 격자 센서를 제작하여 그라파이트/에폭시 복합재료 적층시편의 인장 실험을 통해 변형률 전달성을 검증하였다. 광섬유 센서는 삽입 적용하였고 표면에 부착한 변형률 게이지와 값을 비교하였다. 그리고 변형률 구배가 존재하는 경사진 알루미늄 시편의 인장 실험을 통해 각 센서의 신호 특성을 비교하였다.

1. 서 론

복합재료는 비강성, 비강도가 금속재료에 비해 매우 높고 피로특성이 우수하므로 인공위성, 발사체 등과 같은 항공우주구조물에 많이 적용되고 있다.

기존의 변형률 검출 방법인 변형률 게이지는 변형에 대한 정보를 직접적으로 전기신호로 변환하여 주기 때문에 전기적으로 절연이 되지 않거나 전자기파의 영향을 받는 환경에서는 사용이 어렵다는 단점이 있다. 그래서 기존의

방법보다 효율적이고 실시간으로 구조물의 건전성을 검사하기 위해 새로운 방법이 요구되고 있다.

광섬유 센서는 기존 센서에 비해 많은 장점을 가지고 있는 센서로서 현재 구조물의 변형[1]뿐만 아니라 열변형률과 온도측정을 위해서도 많은 연구[2-3]가 진행되고 있다. 그 중에서도 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)는 변형률과 온도의 함수인 반사파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도등을 간단히 측정할 수

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 삼성전자(주) 메모리사업부

*** 한국과학기술원 항공우주공학전공

**** 한국과학기술원 항공우주공학전공, 교신전자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

있고 또한 현재 개발된 광섬유 센서 중 다중화(multiplexing)에 가장 효율적으로 사용될 수 있는 센서로 인정되고 있다 [4].

하지만, FBG 센서가 복합재료에 삽입 적용될 경우 여러 가지 원인으로 복굴절(birefringence) 현상이 발생할 수 있고 이는 FBG 센서의 피크(peak)가 갈라지는 현상으로 연결되어 센서 적용에 한계가 발생한다[5]. 그러므로 FBG 센서가 높은 해상도를 갖기 위해선 정확한 반사파장의 측정이 중요하며 이를 위해선 복굴절 현상이 발생하지 않도록 해야 한다.

최근 FBG 센서의 복굴절을 방지하기 위한 방법으로 격자 부분에 리코팅을 하거나 유리 튜브속에 격자 부분을 넣는 방법이 많이 사용되고 있다. 하지만 이렇게 제작된 FBG 센서의 경우 변형률이 센서로 완전하게 전달되는지에 대한 검증이 필요하다. 그리고, 실제 구조물에서는 응력 집중, 구조물의 기하학적 형태 등에 의해 변형률 구배가 있을 수 있으므로 이러한 경우 센서 신호에 대한 검증 또한 필요하다.

본 연구에서는 재킷이 벗겨진 FBG 센서, 리코팅한 FBG 센서 그리고 유리 튜브로 보호한 FBG 센서와 같이 세 가지 형태로 FBG 센서를 제작하여 다음의 두 실험을 수행하였다. 첫 번째로 각 센서를 일방향 복합재료에 삽입 적용한 후 인장 실험을 통해 변형률을 측정하고 같은 지점에 부착한 변형률 게이지로부터 취득된 변형률 값과 비교하는 실험을 통해 변형률 전달성을 확인하였다. 두 번째로는 실제 구조물에서처럼 변형률 구배가 있는 알루미늄 시편에 대한 인장 실험을 통해 각 센서가 나타내는 신호 특성을 비교해보았다.

2. FBG 센서의 변형률 감지 원리

광섬유 브래그 격자는 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시킬 경우 다음과 같이

$$\lambda_B = 2 n_e \Lambda \quad (1)$$

브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 나머지 파장 부분은 그냥 통과하게 된다. Fig. 1은 이 과정을 나타내고 있다.

식 (1)에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다. 그러므로, 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면

이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

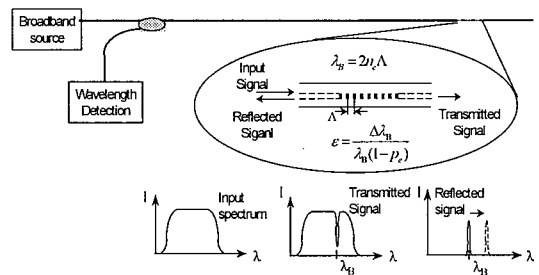


Fig. 1 FBG sensor encoding operation.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_e) \Delta \epsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서 p_e 는 광탄성 상수이고 p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이며 n 은 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비이다. 본 연구에서와 같이 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차가 없는 상태에서 구조물의 변형률 측정한다면 식 (2)에서 $\Delta T = 0$ 으로 가정할 수 있으므로 식 (2)는 식 (4)

$$\epsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

와 같이 되어 구조물의 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구해진다. 또한 브래그 반사파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않는 파장 분할 다중화의 특성으로 인해 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 동시에 여러 지점의 변형률 측정이 가능하다.

3. 센서 및 시편 제작

실험에 사용된 세 종류의 광섬유 브래그 격자 센서는 각각 다음과 같이 제작되었다. 첫 번째는 재킷이 벗겨져 있는 격자 부분에 아무런 처리도 하지 않은 경우이다. 두 번

제는 재킷이 벗겨져 있는 격자 부분에 아크릴레이트(acrylate)로 리코팅을 한 경우이고 이 때 리코팅을 위해 사용된 장비는 VYTRAN 사의 VYT-200-c recoater 이다. 세 번째로는 격자 부분을 퀴츠(quartz) 재질의 유리 모세관 속에 삽입한 경우이다. 광학 현미경을 이용하여 브래그 격자 부분을 유리 튜브 속에 삽입한 후 튜브의 양쪽 끝단은 상온경화 에폭시로 접착하였다. 사용된 튜브의 내경과 외경은 각각 $128\mu\text{m}$, $280\mu\text{m}$ 이다. 각 센서의 모습은 Fig. 2 와 같다.

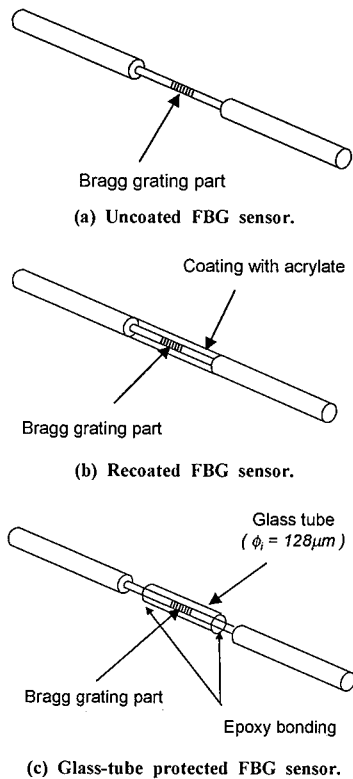
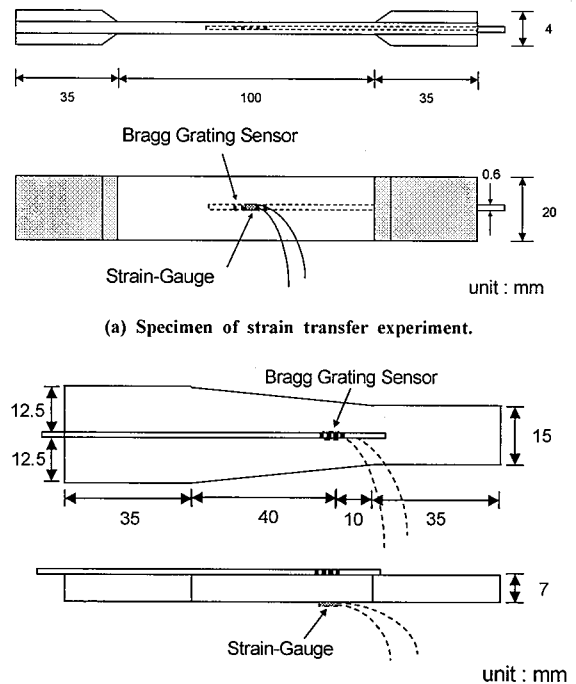


Fig. 2 Three types of FBG sensors.

실험에 사용된 모든 FBG 센서는 IBSEN 사의 피치간격 1061.58 nm 인 위상마스크(phase mask)를 이용하여 90 %의 반사율을 가지도록 MPB 사의 ASX-750 엑시머 레이저로 직접 제작하였다.

본 연구에서 수행한 두 가지 실험(변형률 전달성 실험, 변형률 구배에 따른 센서의 신호 특성 실험)에 사용된 시편의 제작은 다음과 같다.

변형률 전달성을 알아보는 실험에 사용된 시편은 (주)한국화이버의 CU-125NS graphite/epoxy 프리프레그 테이프를 사용하여 $[0_w\{0\}/0_8]_T$ 으로 적층하여 제작하였다. '{}'는 광섬유 센서가 삽입된 위치를 나타내고 안의 숫자는 센서의 삽입 방향을 나타낸다. 시편의 끝단에는 성형 과정 중 광섬유 센서를 보호하고 광섬유 센서를 실험 장치와 연결하기 위해 직경 0.6 mm 의 스테인리스 튜브를 삽입하여 보강하였다. Fig. 3(a)에서 광섬유 센서는 시편의 중립면에 삽입하였고 같은 지점의 시편 표면에는 변형률 게이지를 부착하였으며 실험 결과의 신뢰성을 위해 각 센서의 종류에 따라 세 개씩의 시편을 제작하였다.



(b) Specimen of strain gradient experiment.

Fig. 3 Configuration of specimens.

그리고, 변형률 구배에 대한 광섬유 센서의 신호특성을 알아보는 실험에 사용된 시편은 알루미늄 6061을 사용하여 제작하였고 Fig. 3(b)와 같이 센서가 부착될 부분을 경사지게 함으로써 인장력에 따라 시편에 변형률 구배가 발생하도록 제작하였다. 광섬유 센서는 FM-73 접착 필름을 이용하여 시편의 중심선에 부착하였고 반대면에는 변형률 게이지를 부착하였다.

두 실험에 사용된 변형률 게이지는 모두 TML 사의 게이지 길이가 5 mm인 FLA-5-11-II 단축 게이지이다. 제작된 시편들의 자세한 형상은 Fig. 3 과 같다.

4. 실험 결과 및 분석

변형률 전달성 실험은 인스트론에서 1 mm/min 의 변위 제어로 인장을 가하면서 시편이 최종 파단에 이르기까지 수행하였다. 구성된 실험 장치는 Fig. 4와 같다.

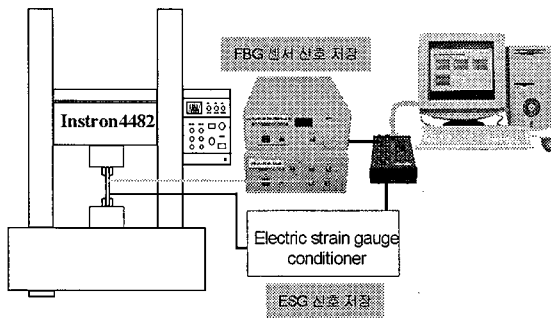


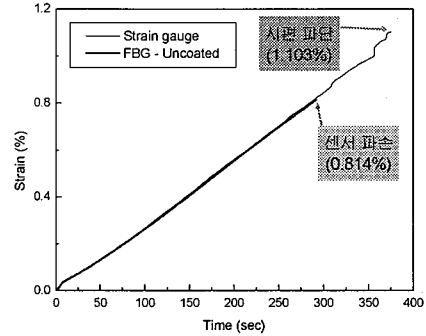
Fig. 4 Experimental setup.

Fig. 4에서처럼 인장을 받는 동안 광섬유 센서 신호는 FBG 센서 시스템을 통해, 변형률 게이지 신호는 컨디셔너를 거친 후 컴퓨터의 DAQ 보드를 통해 컴퓨터에 동시에 저장되도록 하였다. 실험을 통해 취득된 결과는 Fig. 5 와 같다.

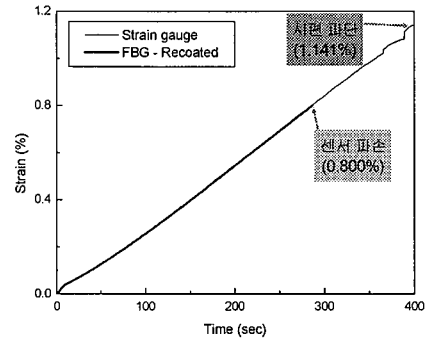
Fig. 5의 (a), (b), (c)에서는 각 센서에 따른 세 가지 시편 중 1번 시편에 대한 결과 그래프를 보여주고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 센서에 리코팅이나 유리 튜브와 같은 처리를 하더라도 센서가 파손되기 전까지 변형률을 잘 전달함을 알 수 있다. 그러나, 세 가지 경우 모두 시편이 파단에 이르기 전에 광섬유 센서가 먼저 파손되는 경향을 보였는데 이는 FBG 센서를 제작할 때 피복 제거기(jacket stripper, Clauss CFS-1)를 사용하여 광섬유의 재킷을 벗기는 과정에서 클래딩에 생긴 미소 결함(scratch) 들이 시편이 인장력을 받음에 따라 균열로 진전했기 때문이다. 이를 검증하기 위해 재킷을 벗긴 광섬유의 표면에 대하여 SEM(scanning electron microscope) 사진 촬영을 하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 광섬유의 재킷을 벗기는 과정에서 클래딩 표면에 2~20 μ m 정도의 미소 결함들이 생겼음을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 재킷을 벗길 때 가열장치(heat gun)를 이용해 열을 가하는 방법과

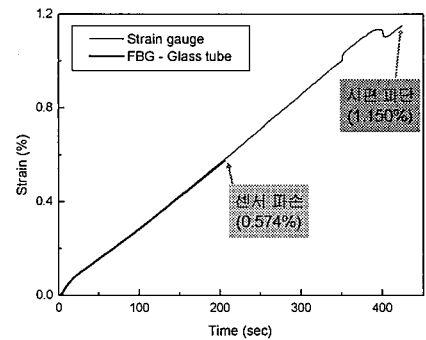
클로로포름과 같은 화학약품을 이용해 재킷만을 녹이는 방법이 있다.



(a) Uncoated FBG sensor (specimen #1).



(b) Recoated FBG sensor (specimen #1).



(c) Glass-tube protected FBG sensor (specimen #1).

Fig. 5 Results of strain transfer experiment.

변형률 구배가 있을 때 각 센서의 신호 특성을 알아보는 실험에서는 Fig. 7에서 나타난 결과에서 알 수 있듯이 리코팅 처리된 센서의 경우에는 시편에 가해지는 인장력이 증가함에 따라 격자의 피크가 갈라지는 현상을 보였다. 이와

같은 현상은 시편에 발생한 변형률 구배에 의해 일정했던 격자의 간격이 구배를 갖게 되었기 때문이다. 그 결과, 광섬유 센서의 피크가 여러 개가 되어 Fig. 8에서와 같이 측정된 변형률 값에서 오차가 발생하였다. 또한, 격자 부분에 아무런 처리도 하지 않은 FBG 센서 역시 리코팅한 FBG 센서의 경우와 같은 경향을 보였다.

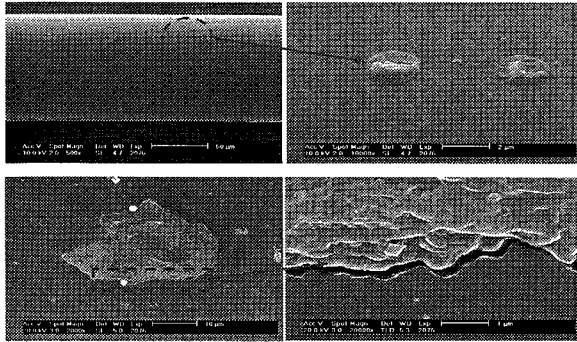
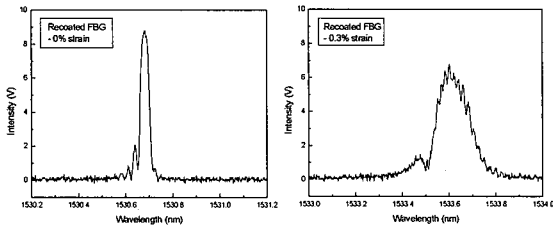
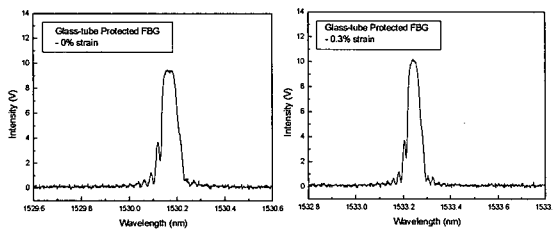


Fig. 6 SEM photograph of stripped optical fiber.



(a) Recoated FBG sensor.

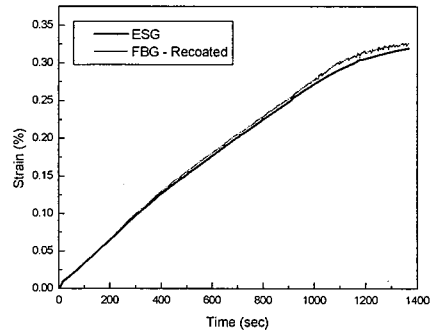


(b) Glass-tube protected FBG sensor.

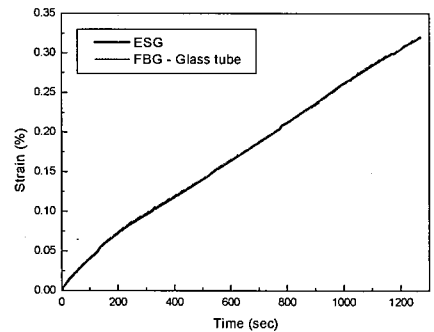
Fig. 7 Signal characteristics of FBG sensors.

하지만, 유리 튜브로 보호한 센서의 경우에는 격자 부분이 유리 튜브 속에 있어 시편에 발생한 변형률 구배가 격자에는 영향을 주지 않기 때문에 피크의 갈라짐 없이 센서 신호가 잘 유지되었다. 그 결과, 광섬유 센서로 측정한 변형

률 값 역시 변형률 게이지로부터 측정한 값과 잘 일치하였다.



(a) Recoated FBG sensor.



(b) Glass-tube protected FBG sensor.

Fig. 8 Strain results of FBG sensors.

5. 결 론

본 연구에서는 FBG 센서의 격자 부분에 리코팅을 하거나 유리 튜브로 보호한 경우 각 센서의 변형률 전달성과 변형률 구배가 있을 때 각 센서의 신호특성을 알아보았다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

복굴절 현상을 막기 위해 FBG 센서의 격자 부분에 리코팅이나 유리 튜브 삽입과 같은 처리를 하더라도 센서의 변형률 전달성에는 전혀 문제가 없었다.

그리고, 변형률 구배가 있을 때 격자 부분에 아무런 처리도 하지 않은 FBG 센서나 리코팅한 FBG 센서의 경우에는 시편에 발생한 변형률 구배로 인해 격자 간격에 구배가 발생하여 센서 신호의 피크가 갈라지는 현상을 보였고, 그 결과 정확한 변형률의 측정이 어려웠다. 하지만, 유리 튜브로 보호한 FBG 센서의 경우에는 격자 부분이 유리 튜브

속에 있어 변형률 구배의 영향을 받지 않아 센서 신호의 피크가 갈라짐 없이 잘 유지되었다.

이를 통해 유리 튜브로 보호한 FBG 센서를 사용할 경우 복굴절 및 변형률 구배로 인한 영향을 막을 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 국제공동연구과제로 수행한 것이며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) 강현규, 박중완, 류치영, 홍창선, 김천곤, "광섬유 센서 신호의 실시간 디지털 처리에 의한 구조물의 동적 변형률 측정," *한국항공우주학회지*, 제26권, 제2호, 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) 강동훈, 강현규, 류치영, 홍창선, 김천곤, "광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정," *한국항공우주학회지*, 제 28권, 제 8호, 2000, pp. 61-68.
- 4) Meltz G, "Overview of fiber grating-based sensors," *Proc. of SPIE*, Vol. 2838, 1996, pp. 2-22.
- 5) 이정률, 류치영, 강현규, 김대현, 구본용, 강동훈, 홍창선, 김천곤, "복합재 평판 내부에 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입안정성과 신호 특성에 관한 연구," *한국복합재료학회 추계학술대회 논문집*, 2000, pp. 238-244.