

# 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합 적층판 내부의 층별 변형을 측정

류치영\* · 박종완 · 강현규 · 김대현 · 구본용 · 홍창선  
한국과학기술원 항공우주공학과

## 1. 서 론

복합재 구조물은 외부로부터 받는 극한 하중, 충격 하중 및 피로 하중 등에 의하여 파손 및 손상이 발생한다. 복합재 구조물이 하중을 직접 감당하는 일차 구조물(primary structure)에 사용되기 위해서는 높은 신뢰성과 안전성을 확보해야 하며, 이를 위해서는 하중이력에 따른 구조물의 변형상태와 손상상태 및 손상진전에 따른 구조물의 설계변수 즉 강성, 강도 등의 변화를 적절히 모니터링 할 수 있어야 한다. 이를 위해서 구조물의 변형상태 및 파손여부를 감지하고 능동적으로 대처할 수 있는 기능을 구조물 자체에 부여하는 연구의 필요성이 대두되었으며 이러한 구조물을 일컬어 스마트 구조물이라 한다[1]. 스마트 구조물의 기술이 항공기 및 우주 구조물 등에 적용된다면 구조물이 보다 경량화되고 구조물의 파손을 미연에 방지할 수 있다.

스마트 구조물의 신경계로 이용되는 광섬유 센서는 기존의 다른 센서와는 달리 전자기장의 영향을 받지 않고, 센서의 크기를 매우 작게 구성할 수 있으며, 복합재 구조물에 광섬유 센서의 삽입 시 구조물에 영향을 주지 않으며 높은 해상도와 다량의 정보 수송능력이 있는 등 많은 장점과 잠재적 가능성을 가지고 있다. 기존의 스마트 구조물에 널리 쓰이고 있는 광섬유 센서로는 간섭을 이용한 방법으로 구성된 센서로서 마흐젠더, 마이켈슨, 패브리-페로 등이 있고 이러한 간섭계는 변형률에 기인한 경로차에 의한 간섭 신호로부터 변형률을 측정한다[2]. 그런데 이러한 간섭을 이용한 센서들은 동시에 여러 지점을 측정하는 multiplexing의 적용에 효율적이지 않고 센서로부터의 출력신호 처리과정에도 많은 어려운 문제점 등을 내포하고 있다. 최근에 개발된 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)는 외란인 변형률과 온도의 함수인 반사파장의 변이

를 측정함으로써 변형률과 온도 등을 간단히 측정할 수 있으므로 현재 개발된 광섬유 센서 중 multiplexing에 가장 효율적으로 사용될 수 있는 센서로 인정되고 있다[3]. 본 연구에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 동시 다점 변형 측정 센서로 이용할 수 있도록 파장 이동 광섬유 레이저(wavelength-swept fiber laser, WSFL)를 광원으로한 센서 시스템을 구성하여 시스템 성능 평가 실험을 하였다. 또한 굽힘 하중을 받는 복합 적층판의 내부 층별 변형을 구배를 센서로 동시에 측정하는 실험을 수행하였다.

## 2. FBG 센서의 변형을 감지 원리

광섬유 브래그 격자는 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우 다음과 같이

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

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.

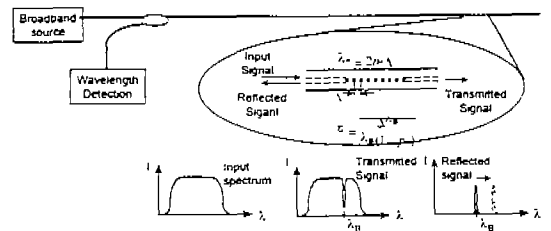


Fig. 1 Fiber Bragg grating sensor wavelength-encoding operation.

식 (1)에서  $n_e$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다. 그러므로 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형을 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형을 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

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

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

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

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

와 같이되어 구조물의 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구해진다. 이와 같이 광섬유 브래그 격자 센서는 그 측정량이 브래그 반사파장의 변화량이기 때문에 측정이 간단하고 명확하며 광섬유 격자의 광 반사파장의 선포이 좁기 때문에 분해능이 높은 센서를 구성할 수 있다. 또한 브래그 반사 파장이 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 변형을 측정이 가능하다.

### 3. FBG 센서 시스템의 구성

본 연구에서는 광원으로 파장 이동 광섬유 레이저를 사용하여 센서 시스템을 구성하였다. 파장 이동 광섬유 레이저는 비교적 최근에 개발된 광 소스로서 연속하여 수십 nm에 걸쳐서 반복적으로 레이저 출

력 파장이 나올 수 있도록 내부에 가변 패브리-페로 필터를 포함하고 있다[4]. 파장 이동 광섬유 레이저 출력을 광섬유 격자 센서들에 입사한 후 센서에서 반사되어 돌아온 시간 영역에서의 신호는 파장 영역으로 상사시킬 수 있으므로 변형을 측정에 이용이 가능하다. 파장 이동 광섬유 레이저는 모든 레이저 출력이 좁은 파장영역에 집중되어 있고 이렇게 집중된 레이저가 광대역으로 움직이므로 출력 파워가 매우 커서 신호대 잡음비를 매우 효율적으로 높일 수가 있다. 또한 넓은 가용 파장대를 가지면서도 어블첨가 광섬유 레이저에 가변 패브리-페로 필터를 복조기로 이용한 센서 시스템 보다 훨씬 높은 정도의 분해능을 가지는 등 우수한 장점들이 있다. 파장 이동 광섬유 레이저에 포함된 가변 패브리-페로 필터는 인가 되는 변조 전압에 대해 비선형적으로 거동할 수 있으므로 본 연구에서는 반사된 빛의 골간의 간격이 정확히 1 nm가 되는 패브리-페로 에탈론을 직접 제작하여 신호 처리에 스케일(scale)로 이용하였다. 또한 브래그 파장이 1529.44 nm인 광섬유 브래그 격자를 기준으로 설정하여 실제 변형을 측정에 이용되는 센서들의 파장 변이 측정 시 이용하였다. 그림 2는 파장 이동 광섬유 레이저에 패브리-페로 에탈론과 기준 광섬유 브래그 격자를 부가하여 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 구성한 개략도이며, 그림 3은 가변 패브리-페로 필터에 인가하는 변조전압에 대해 패브리-페로 에탈론의 반사신호와 기준 광섬유 브래그 격자의 반사 신호를 나타낸 것이다.

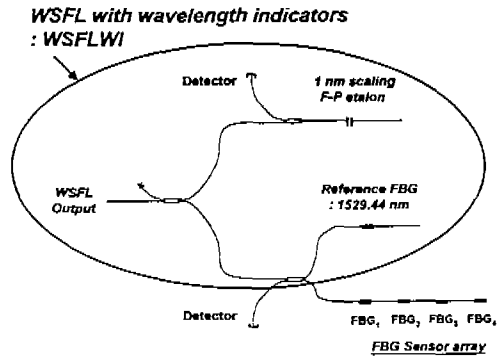


Fig. 2 FBG sensor array with reference FBG and 1 nm scaling F-P etalon.

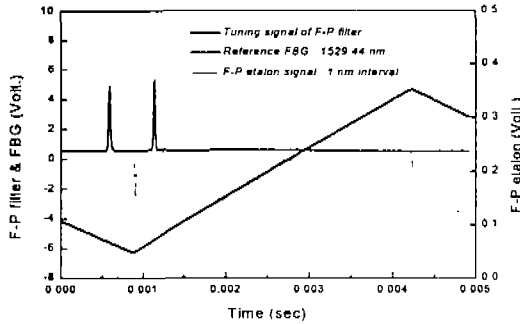


Fig. 3 Tuning signal of F-P filter and optical signal of the reference FBG and an F-P etalon.

구성된 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 검증하기 위하여 다음과 같이 준정적 변형률을 받는 경우에 대해 변형률을 측정하는 실험을 수행하였다. 준정적 변형률을 측정하기 위하여 중심파장이 1552.35 nm 인 브래그 격자가 중심부분에 새겨진 길이 1 m 인 광섬유를 0.01 mm의 변위계어를 할 수 있는 마이크로 포지셔너 위에 부착하였다. 그 후 0.05 %의 단계별도 변형률 증분을 가하여 가해진 변형률과 구성된 센서 시스템으로 측정된 변형률을 비교하였다. Fig. 4는 센서 시스템에 의해 구해진 변형률 선도이다. 결과에서 보면 가해진 변형률과 센서로부터 취득된 변형률은 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 변형이 가해지지 않은 상태에서 변형률 선도를 확대하면 시스템의 해상도는 0.005 %임을 알 수 있다. 이것은 신호의 one bit error이며 실험에 사용된 데이터 취득 보드 (data acquisition board)인 A/D 변환기의 샘플링 주파수 한계에 의해 결정되어진다.

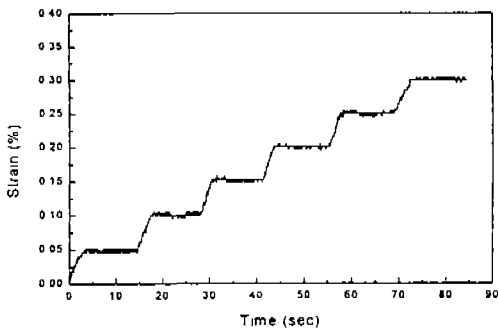


Fig. 4 Experimental result for the quasi-static measurement.

#### 4. 실험결과 및 고찰

복합재 보의 두께에 따른 층별 변형률을 측정하기 위하여 4점 굽힘 실험을 수행하였다. 시편제작에 사용된 프리프레그는 (주) 한국 카이본사의 CU-125 NS를 사용하였으며 5개의 광섬유 브래그 격자 센서를 적층판 내부에 삽입하였고 적층순서는 { }를 광섬유 삽입각도로하여  $[0_2/\{0\}/0_2/\{0\}/0_2/\{0\}/0_2/\{0\}/0_2]_T$ 로 적층하였으며 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서는 순서대로 FBG1, FBG2, FBG3, FBG4, FBG5이다. 성형 후 시편은 Fig. 5와 같이 절단하였으며 시편 위, 아래면에는 스트레인 게이지를 부착하였다. 4점 굽힘 시험 시 지지경간은 120 mm 이고 하중경간은 40 mm로 하였다. 시험은 INSTRON사의 만능시험기(Model No. 1350)를 이용하여 일정 변위제어 6 mm/min로 실험을 수행하였다. Fig. 6은 파장영역에서 본 광섬유 브래그 격자 센서들의 출력신호이며 굽힘 하중을 받음에 따라 파장 영역에서 서로 겹쳐지는 상황이 발생하면 안되므로 각 센서들의 중심파장을 변형 방향에 따라 적절히 배치하였다. 4점 굽힘시험에서와 같이 순수 굽힘 하중하에서 두께에 따른 변형률 구배는 복합재 보가 매우 얇고 변형량이 크지 않으므로 선형으로 가정할 수 있다. 그러므로 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서와 표면에 부착된 스트레인 게이지에서 측정된 변형률의 비는 보의 중립면으로부터 두께 비와 같다. Fig. 7은 스트레인 게이지와 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서들로부터 측정된 시간에 대한 변형률 선도이다. 굽힘하중을 받을 때 중립면 아래에 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서 FBG2, FBG3, FBG4, FBG5는 각각 두 층 차이를 두고 삽입되었으며 ESG2도 FBG5의 두 층 위 적층판 표면에 부착되어 있다. 센서들간의 위치와 스트레인 게이지는 같은 비율의 두께에 해당되는 층에 있으므로 Fig. 7에서 보듯이 변형률의 비도 두께 비에 선형적으로 비례하여 측정되었다. 약간의 오차는 성형과정 중에 광섬유 브래그 격자의 삽입 위치가 경화 압력이나 잉여 수지의 유동 등으로 인해 이동하였기 때문에 발생한 현상으로 생각된다. Fig. 8은 실시간 프로그램에 의해서 굽힘 시험 중 광섬유 브래그 격자 센서들로부터 측정되는 변형률을 실시간으로 처리하여 컴퓨터 화면상에 그려진 선도를 나타낸 것이다.

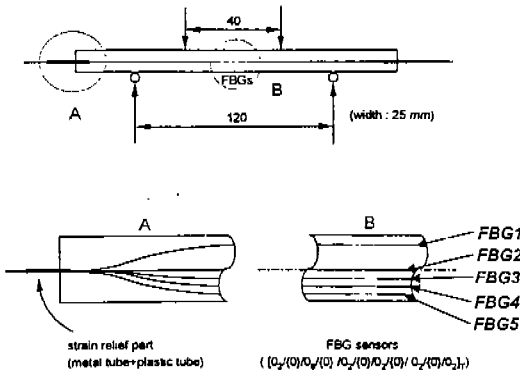


Fig. 5 Configuration of the specimen for 4-point bending test.

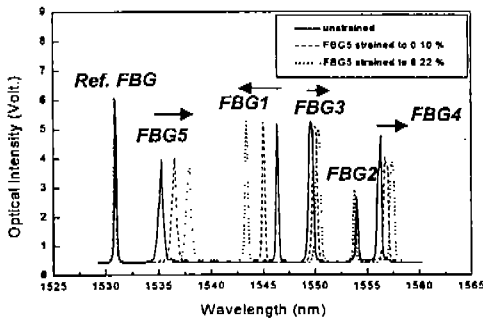


Fig. 6 Bragg wavelength shift of FBG sensors.

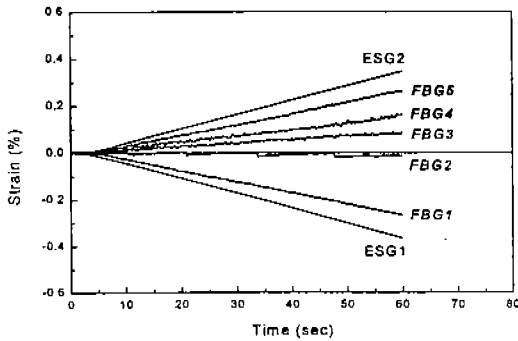


Fig. 7 Surface strains measured by ESGs and internal strains of composite laminate measured by FBG sensors.

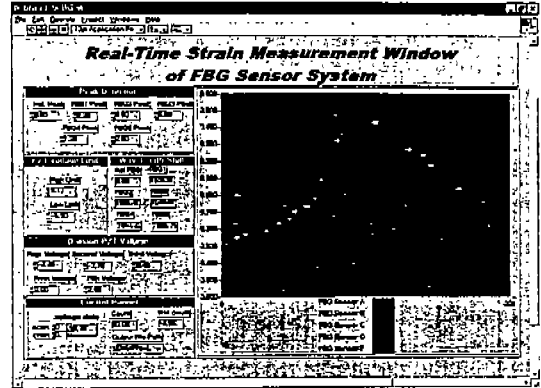


Fig. 8 Real-time strain measurement window.

## 5. 결 론

과장 이동 광섬유 레이저를 광원으로 하여 패브리-페로 에달론과 기준 광섬유 브래그 격자로 센서 시스템을 구성하였다. 광섬유 브래그 격자 센서들로 복합 적층 구조물 내부의 변형률을 모니터링 하였으며 이러한 연구로부터 일반 센서로는 불가능하였던 복합 적층 구조물 내부의 거동도 동시에 여러 지점에서 실시간으로 모니터링할 수 있는 가능성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술재단이 지원하는 특정연구과제(96-0200-05-01-3)로 수행한 것이며 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. B. Culshaw, *Smart Structures and Materials*, Artech House, 1996.
2. 박중완, 류치영, 권일범, 홍창선, 김천근, "EFPI 센서를 이용한 복합 적층판의 변형을 측정," 한국항공우주학회지, 제 24 권, 제 1 호, 1996, pp. 95-105.
3. G. Meltz, "Overview of Fiber Grating-Based Sensors," SPIE, Vol. 2838, 1996, pp. 2-22.
4. S. H. Yun, D. J. Richardson and B. Y. Kim, "Interrogation of Fiber Grating Sensor Arrays with a Wavelength-Swept Fiber Laser," *Opt. Lett.* Vol. 23, No. 11, 1998, pp.843-845.