

# 광섬유 브래그 격자 센서의 게이지 길이에 따른 신호 특성

강동훈\*·김대현\*·방형준\*·홍창선\*·김천곤\*

## Signal Characteristics of Fiber Bragg Grating Sensor with Gage Length

D. H. Kang, D. H. Kim, H. J. Bang, C. S. Hong and C. G. Kim

**Key Words:** FBG(Fiber Bragg Grating), Gage Length, Signal Characteristics

### Abstract

A new fabrication method of FBG sensor with gage length shorter than 10 mm is introduced using the reflection prism with special coating on the surface. It is verified that the bandwidth of FBG sensor increases exponentially as the gage length of it decreases. The transverse stress and strain gradient induced by local stress concentration which occurs during curing has an influence on the FBG sensor with gage length of 2 mm less than that of 10 mm.

### 1. 서 론

최근 스마트 구조물에 대한 관심이 높아지면서 그 감지계로서 광섬유 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)는 다른 광섬유 센서에 비해 다중화(multiplexing) 성능이 우수하여 더욱 각광 받고 있다. FBG 센서는 변형률과 온도의 함수인 반사 파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도 등을 측정하는데 이와 같이 FBG 센서는 피크(peak) 신호의 변이를 측정함으로써 외란의 양을 계산하는 복조(demodulation) 기법을 가지고 있기 때문에 센서 신호의 피크 형상을 잘 유지하는 것이 매우 중요하다.

한편, FBG 센서는 횡방향 응력(transverse stress)이나 복합재료의 강화 섬유(reinforcing fiber)에 의한 광섬유의 굽힘(micro-bending) 등에 의해 복굴절(birefringence) 현상이 발생할 수 있고 이는 FBG 센서의 피크가 갈라지는 현상으로 연결되어 센서 적용에 한계가 발생한다[1]. 뿐만 아니라, 응력 집중(stress concentration) 등에 의해 유발된 변형률 구배(strain gradient) 역시 격자의 피치 간격을 변화시켜 결과적으로 센서 피크의 갈라짐을 초래할 수 있다[2].

그러므로, 복굴절 현상과 변형률 구배로부터 FBG 센서 피크의 갈라짐 현상을 방지하기 위한 여러 가지 연구가 수행되었다[3].

하지만, FBG 센서의 헤드 부분을 유리 모세관으로 보호하는 기존의 방법은 우선 센서의 제작이 어렵고 다중화에 어려움이 따른다는 단점이 있었다. 그러므로 위의 문제점들에 대한 근본적인 해결책으로 기존의 FBG 센서에 비해 짧은 게이지 길이를 갖는 FBG 센서에 대한 필요성이 대두되었다.

\* 한국과학기술원 항공우주공학전공

일반적으로 FBG 센서는 위상 마스크(phase mask) 법으로 제작되며 상용 위상 마스크는 길이가 10 mm, 25.4 mm의 두 가지로 제작되기 때문에 기존의 위상 마스크로 짧은 게이지 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하기 위한 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 경사면에 특수 코팅이 되어있는 프리즘을 이용하여 기존의 10 mm 위상 마스크로 짧은 게이지 길이를 갖는 FBG 센서의 제작방법에 대해 알아보았고 기존 센서에 비해 새롭게 제작된 FBG 센서가 갖는 신호특성을 살펴보았다. 또, 두 가지 종류의 복합재료를 오토클레이브(autoclave)에서 성형하는 동안 센서에 작용하는 복굴절 효과에 대해 센서가 나타내는 신호특성을 관찰하였다.

## 2. FBG 센서의 제작 과정

### 2.1 위상 마스크법

브래그 격자는 Hill 등[4]에 의해 1978년 처음 보고된 이래 1989년 Meltz 등[5]에 의한 두 광선 홀로그래픽 조사 방법(two-beam holographic exposure)을 거쳐 Hill 등[6]에 의한 위상 마스크법이 생산성을 높일 수 있어 최근까지 FBG 센서 제작에 가장 많이 사용되고 있다. Fig. 1은 위상 마스크 법에 의한 브래그 격자의 형성 원리를 보여주고 있다.

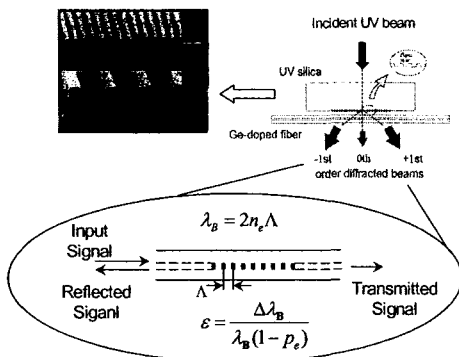


Fig. 1 Grating fabrication method using a phase mask.

위 그림에서 위상 마스크는 일종의 회절광학소자(diffractive optical element)로서 격자 형성용 자외선을 통과시켜 공간에 따른 위상차를 유도하여 자외선 빛의 간섭 무늬를 광섬유 코어 내에 형성시킨다. 이렇게 형성된 광섬유 코어의 유효 굴절률과 위상 마스크에 의한 회절 무늬의 간격에 의해 브래그 반사 파장이 결정된다. 센서 제작을 위한 각 장치들의 모습은 Fig. 2와 같다.

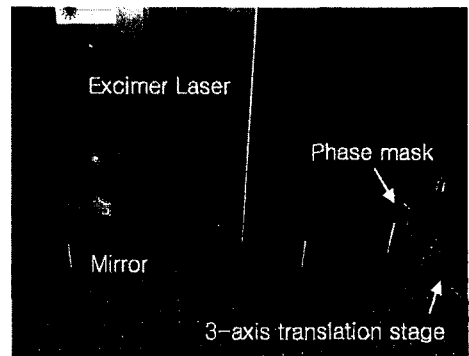


Fig. 3 Fabrication equipments of FBG sensor.

### 2.2 반사 프리즘을 이용한 센서 제작법

고정된 게이지 길이를 가지는 위상 마스크를 이용하여 위상 마스크의 게이지 길이보다 짧은 게이지 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하기 위해 248 nm의 파장영역에 대해 99 %이상의 반사율을 갖는 특수 코팅이 된 프리즘을 이용하였다.

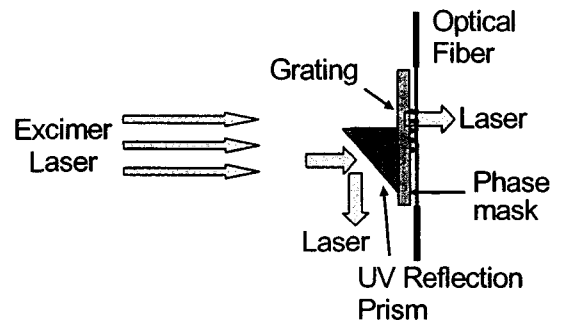


Fig. 3 Fabrication method of FBG sensor with short gage length.

Fig. 3과 같이 프리즘을 이용하여 엑시머 레이저가 위상 마스크로 입사하는 부분의 일부를 차단함으로써 게이지 길이가 짧은 FBG 센서를 제작하였다. 센서 제작에 사용된 반사 프리즘의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of reflection prism

	Specifications
Material	Fused Silica
Size	0.5"×0.5"×0.5"
Coating	R>99.0%, At $\lambda=248\text{nm}$
Model	KRF-RAP-050-UV
Producer	Korea Electro-Optics Co, LTD.

FBG 센서는 IBSEN 사의 피치 간격 1061.58 nm 인 위상 마스크를 이용하여 게이지 길이가 10 mm, 5 mm, 2 mm인 세 가지 경우에 대해 모두 90 %의 반사율을 가지도록 MPB 사의 ASX-750 엑시머 레이저로 직접 제작하였다.

### 3. 시편 형상 및 실험 장치

두 가지 종류의 복합재료를 오토클레이브에서 성형하는 동안 FBG 센서가 받는 복굴절 영향에 의해 FBG 센서가 나타내는 신호특성을 알아보기 위한 시편을 제작하였다.

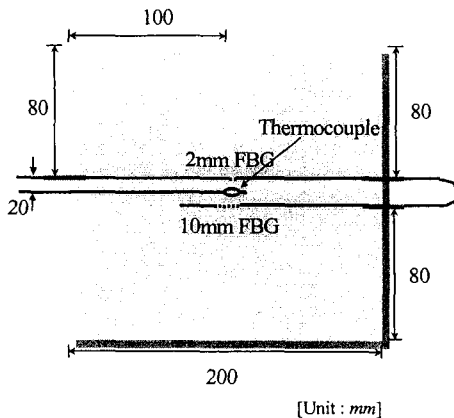


Fig. 4 Configuration of composite specimen.

Fig. 4와 같이 시편의 중앙에 10 mm, 2 mm의 게이지 길이를 갖는 FBG 센서를 한 쌍섬유로 연결하여 복합재료에 삽입하였다. 사용된 복합재료는  $[90_s/(0)/90_s]$ 의 적층각을 갖는 그라파이트/에폭시 (graphite/epoxy)와  $[4\text{plies}/(0F)/4\text{plies}]$ 의 적층각을 갖는 200E-glass 이다. 적층각 표기에서 '{}'는 FBG 센서의 삽입 위치와 방향을 나타낸다. 사용된 복합재료 중 일방향 프리프레그(prepreg)인 그라파이트/에폭시의 경우 강화섬유의 직경과 프리프레그 테이프 한 장의 두께는 각각 7  $\mu\text{m}$ , 0.125 mm이고, 직물 프리프레그인 200E-glass의 경우 각각 10  $\mu\text{m}$ , 0.18 mm이다. 복합재료의 성형을 위한 경화 사이클(curing cycle)과 실험 장치의 모습은 각각 Fig. 5, Fig. 6과 같다.

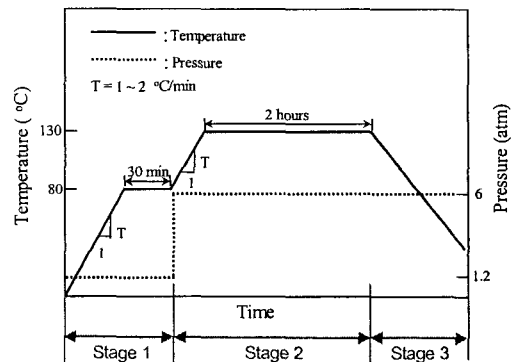


Fig. 5 Curing cycle of composites in the autoclave molding.

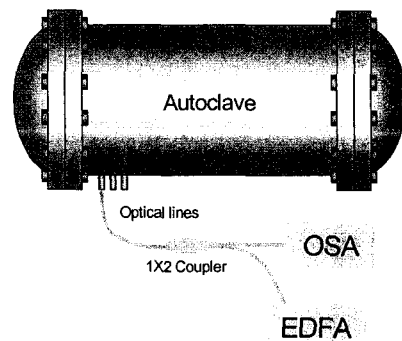


Fig. 6 Experimental setup.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

위상 마스크와 반사 프리즘으로 제작된 세 가지 종류의 FBG 센서에 대해 분광분석기(Optical Spectrum Analyzer, OSA)를 이용하여 신호의 특성을 알아보았다. 각 경우의 3-dB 대역폭(bandwidth)은 Fig. 7과 같다.

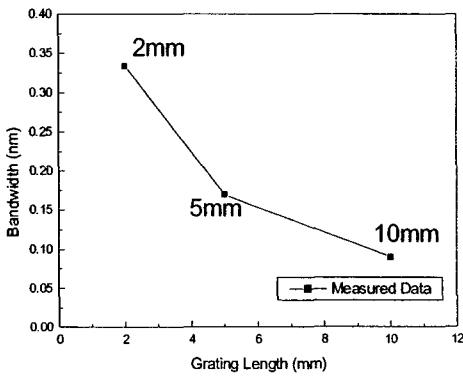


Fig. 7 3-dB bandwidth of FBG sensors.

각 게이지 길이에 대해 5개의 FBG 센서를 제작하여 측정된 평균값을 표시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 같은 반사율(90%, 10dB)을 갖도록 FBG 센서를 제작할 경우 게이지 길이가 줄어들어 따라 대역폭이 지수 함수적으로 증가하는 경향을 보였다. 분광 분석기에 나타난 FBG 센서 신호의 형상은 Fig. 8과 같다.

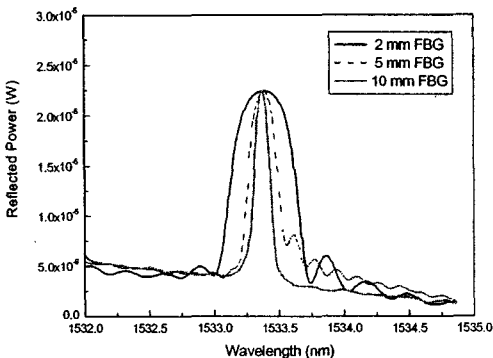


Fig. 8 Reflected signals of FBG sensors.

Fig. 7에서처럼 10 mm의 게이지 길이를 갖는 FBG 센서에 비해 5 mm 게이지 길이의 FBG 센서는 3-dB 대역폭이 약 1.9 배, 2 mm 게이지 길이의 FBG 센서는 약 3.7 배의 넓은 대역폭을 갖게 되므로 정해진 파장영역 내에서 센서를 다중화 할 경우 한 센서로 측정 가능한 범위가 줄어들게 된다. 또, 게이지 길이가 짧아질수록 엑시머 레이저를 더 많이 조사해야 하므로 센서 제작 시간이 길어지고 Fig. 8에서 알 수 있듯이 센서의 사이드 로브(side lobe)가 더 발달한다.

다음으로 두 가지 종류의 복합재료에 삽입된 다른 게이지 길이를 갖는 FBG 센서들이 복합재료의 오토클레이브 성형과정동안 발생하는 복굴절 현상에 의해 그래파이트/에폭시([90<sub>s</sub>/0)/90<sub>s</sub>) 시편의 경우 Fig. 9와 같은 신호 특성을 보였고 200E-glass([4plies/0F)/4plies]) 시편의 경우에는 Fig. 10과 같은 신호 특성을 보였다.

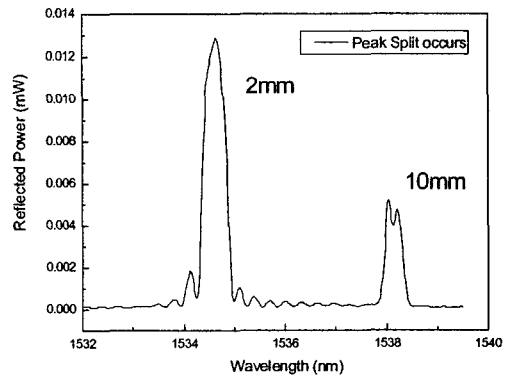
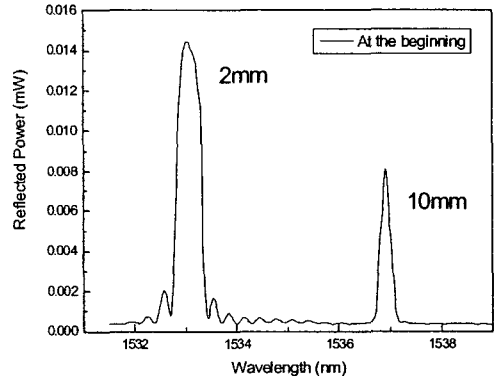


Fig. 9 Signal characteristics of [90<sub>s</sub>/0)/90<sub>s</sub>] graphite/epoxy specimen.

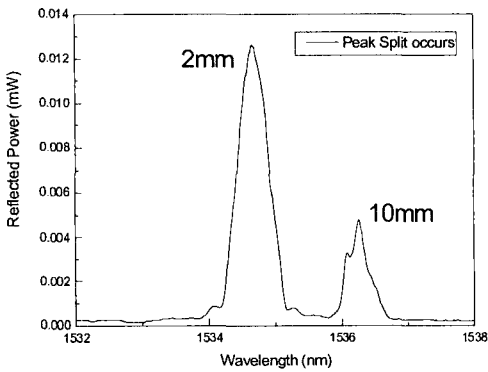
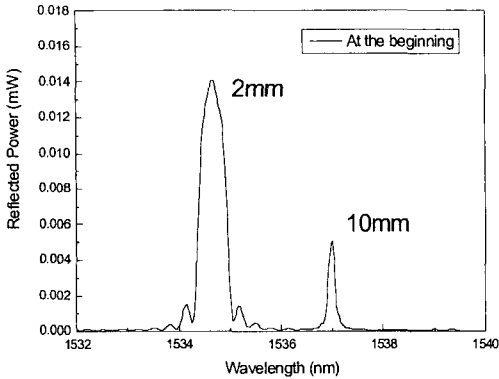


Fig. 10 Signal characteristics of [4plies/(OF)/4plies] 200E-glass specimen.

Fig. 9의 경우 성형과정동안 게이지 길이 10 mm의 FBG 센서는 피크가 갈라진 반면 게이지 길이 2 mm의 FBG 센서는 전 성형과정을 통하여 센서의 피크가 갈라지지 않았다. 그 이유는 게이지 길이가 길수록 복합재료의 강화섬유에 의해 더 큰 횡방향 응력을 받게 되고 복합재료 내부에 삽입 시 발생하는 응력 집중에 의한 변형률 구배의 영향도 더 많이 받기 때문이다.

Fig. 10에서처럼 그라파이트/에폭시 시편보다 더 큰 횡방향 응력과 응력 집중으로 인한 변형률 구배가 작용하는 200E-glass 복합재료 시편의 경우에도 마찬가지로 게이지 길이 10 mm의 FBG 센서는 피크가 갈라진 반면 게이지 길이 2 mm의 FBG 센서는 전 성형과정을 통하여 센서의 피크가 갈라지지 않았다.

이러한 결과로부터 복합재료에 FBG 센서를 삽입 적용할 경우 게이지 길이 10 mm의 FBG 센서

는 강화 섬유와 나란하게 적용해야하는 제약이 있는 반면 게이지 길이 2 mm의 FBG 센서는 강화 섬유의 방향과 무관하게 임의의 방향으로 센서를 삽입 적용할 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 게이지 길이 2 mm의 FBG 센서도 위의 두 가지 복합재료보다 더 큰 직경의 강화섬유를 갖거나 직물 프리프레그의 굴곡(waviness)이 더 커질 경우 마찬가지로 센서의 피크가 갈라질 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 위상 마스크 법으로 FBG 센서를 제작할 경우 표면이 특수 코팅된 반사 프리즘을 이용하면 게이지 길이가 10 mm 보다 짧은 FBG 센서를 제작할 수 있다.
2. 같은 반사율을 갖는 FBG 센서의 경우 게이지 길이가 짧을수록 센서 신호의 대역폭은 지수함수적으로 증가한다. 게이지 길이 10 mm의 FBG 센서에 비해 5 mm의 경우 약 1.9 배, 2 mm의 경우 약 3.7 배의 넓은 대역폭을 갖게 된다.
3. FBG 센서를 복합재료에 삽입 적용할 경우 게이지 길이 10 mm의 FBG 센서에 비해 게이지 길이 2 mm의 FBG 센서는 성형과정동안 발생하는 횡방향 응력과 응력 집중에 의한 변형률 구배의 영향을 덜 받는다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁연구과제의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 이정률, 김천근, 홍창선, "복합재 평판에 삽입된 광섬유 브래그 격자의 스펙트럼 특성과 응력유도복굴절," 한국복합재료학회지, 제15

권, 제3호, 2002, pp. 30-38.

- (2) M. LeBlanc, S. Y. Huang and R. M. Measures, "Fiber optic Bragg intra-grating strain gradient sensing," *SPIE*, Vol. 2444, 1995, pp. 136-147.
- (3) 강동훈, 김대현, 홍창선, 김천곤, "광섬유 브래그 격자의 내부 변형을 구배로 인한 신호특성," *한국복합재료학회지*, 제15권, 제4호, 2002, pp. 32-36.
- (4) K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides : application to reflection filter fabrication," *Applied Physics Letters*, Vol. 32, No. 10, 1978, pp. 647-649.
- (5) G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Optics Letters*, Vol. 14, 1989, pp. 823-825.
- (6) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 10, 1993, pp. 1035-1037.