

## 論文

# 다양한 격자 길이를 갖는 광섬유 브래그 격자 센서의 제작 기법과 격자 길이에 따른 반사 스펙트럼 특성 연구

강동훈\*, 홍창선\*\*, 김천곤\*\*\*

## The Fabrication Method of Fiber Bragg Grating Sensor with Various Grating Length and Signal Characteristics of Reflected Spectra with Grating Length

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

### ABSTRACT

Among many fiber optic sensors, FBG sensors are being studied more actively than any other sensor due to good multiplexing capabilities. Recently, the application fields of FBG sensors are mainly focused on the composite materials through embedding rather than attaching on the surface. However, there are many limitations on the embedding FBG sensors into composite materials because of the birefringence effects which is induced when FBG sensors are not embedded parallel to the reinforcing fiber. In this study, the fabrication method of FBG sensors with various grating length that are easy to fabricate with good multiplexing capabilities and more stable from the birefringence effects are investigated. The signal characteristics of the FBG sensors are also verified through the cure monitoring of 2 kinds of composite materials.

### 초 록

여러 광섬유 센서 중에서, FBG 센서는 다중화의 큰 장점으로 인해 다른 광섬유 센서에 비해 더 활발히 연구가 진행되고 있다. 최근, FBG 센서의 적용 연구는 부착 보다는 복합재료 내부에 삽입 적용되는 경우가 많아지고 있다. 하지만, FBG 센서의 삽입 시 복합재료의 강화섬유와 평행하지 않게 삽입할 경우 발생하는 센서의 복굴절 현상으로 인해 삽입에 많은 제한이 있었다. 본 연구에서는 제작이 간편하고 다중화에 영향을 받지 않으며 복합재료 내부에 삽입 시 복굴절의 영향으로부터 보다 안정한 다양한 격자 길이의 FBG 센서 제작 기법에 대해 연구하였다. 그리고, 2 가지 종류의 복합재료에 대한 성형 모니터링을 통해 제작된 센서의 신호 특성에 대해 고찰하였다.

**Key Words:** 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating), 격자 길이(grating length), 신호 특성(signal characteristics), 복굴절(birefringence)

### 1. 서 론

최근 스마트 구조물에 대한 관심이 높아지면서 그 감지재로서 광섬유 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 다른 여러 광섬유 센서에 비해 다중화가 용이

하다는 큰 장점을 가지고 있는 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating sensor, FBG sensor)는 변형률과 온도의 함수인 반사파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도 등을 간단히 측정할 수 있다. 뿐만 아니라, FBG 센서는 크기가 작아 물성값에 영향을 주지 않고 구조물에 삽입이 가능

\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)



### 3. FBG 센서 제작

FBG 센서의 제작 방법은 Meltz에 의해 개발된 홀로 그래픽 방법[7] 등 여러 가지가 있지만 현재 Hill이 고안한 위상 마스크에 의한 제작 방법[8]이 대량 생산에 적합하고 제작 방법이 간단해 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 상용 위상 마스크의 경우 격자의 길이가 고정되어 있으며 일반적으로 10 mm를 가진다. 본 연구에서는 센서 제작 시 레이저가 통과하는 위상 마스크의 격자 부분을 조절함으로써 다양한 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하였다. 이를 위해 엑시머 레이저의 파장 대역과 같은 248 nm의 빛을 99 %이상 반사하는 반사 프리즘을 이용하여 위상 마스크를 통과하는 빛의 양을 조절함으로써 격자 길이를 조절하였다. 센서 제작을 위한 장치의 모습은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서와 같이 3축 이송장치와 CCD 카메라를 이용해 위상 마스크와 반사 프리즘과의 간격을 조절함으로써 제작된 FBG 센서의 격자 길이를 임의로 조절할 수 있다.

실험에 사용된 반사 프리즘의 사양은 Table 1과 같다. 표에서 알 수 있듯이 프리즘의 경사면에는 248 nm의 파장에 대해 99% 이상의 반사율을 가지는 특수 코팅이 되어 있다. 그러므로, 입사된 레이저 중에서 프리즘이 반사하지 않는 부분에 대해서만 레이저가 위상 마스크에 도달하게 되고 결과적으로 FBG 센서의 격자 길이를 조절할 수 있다.

FBG 센서의 격자 길이에 따른 반사 스펙트럼을 알아보기 위해 격자 길이가 각각 10 mm, 5 mm, 2 mm인 세 가지 FBG 센서를 제작하였다. 센서는 IBSEN의 위상 마스크와 MPB사의 ASX-750 엑시머 레이저를 이용하여 10 dB (90%)의 반사율을 가지도록 제작하였다.

제작된 FBG 센서의 반사 스펙트럼을 분광 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 이용하여 확인한 결과 Fig. 3과 같이 격자의 길이가 감소할수록 신호가 더 넓어졌다. 정량적인 확인을 위해 90%의 같은 반사율을 가지도록 제작된 FBG 센서의 FWHM (full width half maximum) 값을 측정해 보았다. 측정 결과 Fig. 4와 같이 격자의 길이가 감소할수록 FWHM 값은 지수 함수적으로 증가하여 10 mm FBG에 비해 5 mm FBG의 경우 1.9 배, 2 mm FBG의 경우 3.7 배의 값을 보였다.

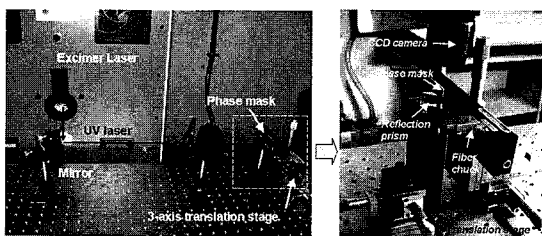


Fig. 2 Experimental setup for the fabrication of FBG sensors with various grating length.

Table 1 Specifications of the 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.

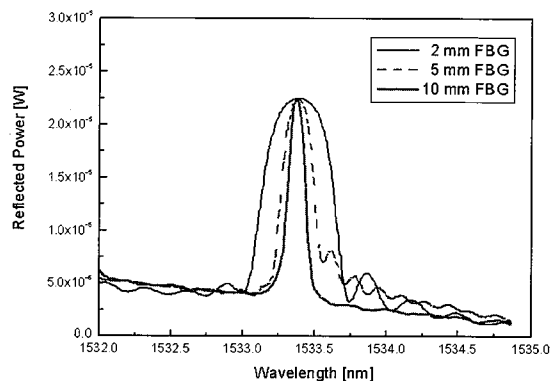


Fig. 3 Signal characteristics of FBG sensors with various grating length.

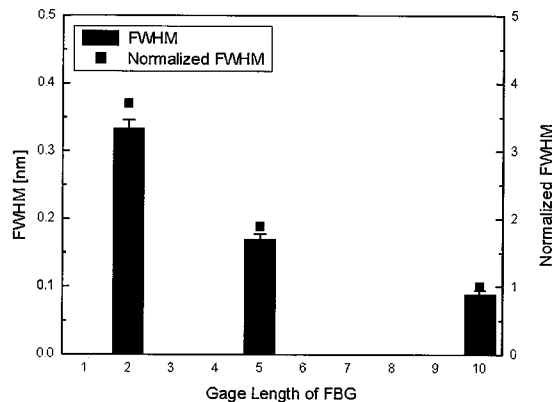


Fig. 4 FWHM of FBG sensors with grating length.

### 4. FBG 센서의 재료상수 측정

FBG 센서는 기계적인 변형률에 대한 파장 이동량의 상관 관계를 나타내는 광탄성 상수와 온도 변화에 대한 파장 이동량의 상관 관계를 나타내는 열광학 계수, 그리고 센서 자체의 열팽창 계수의 세 가지 상수값에 의해 외란에 대한 중심 파장의 이동량이 결정되며 이들 값은 FBG 센서의 재료상수이다. 일반적으로, germanosilicate glass의 경우 광탄성 상수는 대략 0.22의 값을[9], 열광학 계수는  $8.3 \times 10^{-6}$  정도의 값을[10] 가지지만 정확한 변형률의 측정을 위해서는 제작된 센서에 대한

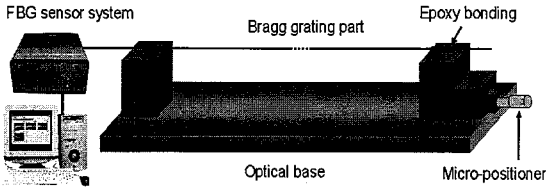


Fig. 5 Experimental setup for the measurement of photo-elastic constant.

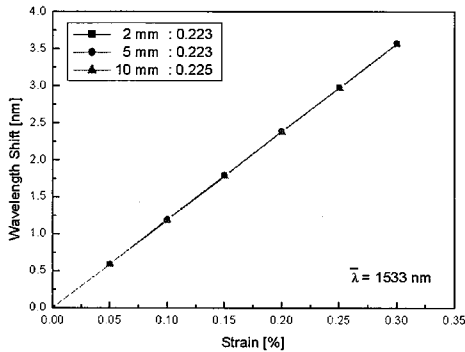


Fig. 6 Wavelength shift of FBG with grating length at elevated strain.

이 값의 측정이 요구된다. 본 연구에서는 FBG 센서의 격자 길이가 변함에 따른 광탄성 상수와 열광학 계수 측정 실험을 수행하였다.

#### 4.1 광탄성 상수 측정

기준값이 될 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서와 5 mm, 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서에 대해 광탄성 상수를 측정하는 실험을 수행하였다.

실험 장치는 Fig. 5와 같이 중간 부분에 격자가 새겨진 길이 50 cm인 광섬유를 10  $\mu$ m까지 변위 제어가 가능한 정밀한 마이크로 포지셔너(micro positioner)에 에폭시로 부착하여 고정시켰다. 그 후 광섬유의 축 방향으로 인장 변형을 0.250 mm 즉, 0.05%씩 증가시키면서 변형률 값이 0.3%가 될 때까지 각 단계에서 브래그 격자 센서의 반사 신호로부터 중심파장의 변화를 측정하였다.

FBG 센서의 신호는 1  $\mu$ e의 해상도를 갖는 IS-7000 (FiberPro Co.) FBG interrogation system을 이용해 측정하였으며 결과는 Fig. 6과 같다.

결과를 보면 가해진 변형에 대해 중심 파장의 변화는 매우 선형적이며 격자 길이에 관계없이 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 측정 결과로부터 각 격자 길이에 대한 광탄성 상수를 계산하면, 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서는 0.225, 5 mm와 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서의 경우 모두 0.223으로 측정되었으며 두 값의 차이는 실험 오차로 생각된다. 즉, FBG 센서의 광탄성 상수는 게이지 길이와는 함수 관계가 없음을 확인하였다.

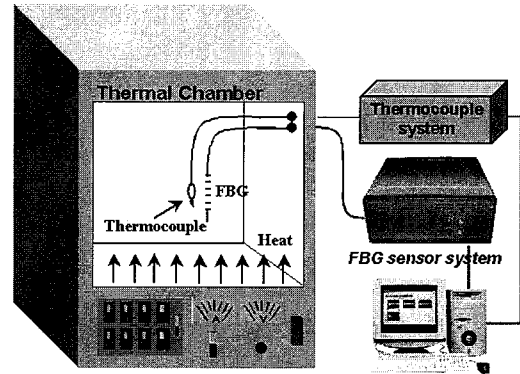


Fig. 7 Experimental setup for the measurement of thermo-optic coefficient.

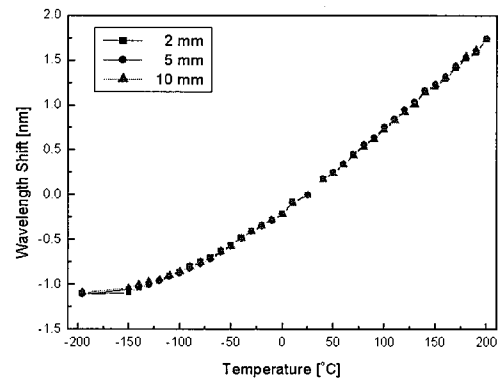


Fig. 8 Wavelength shift of FBG sensors with temperature.

#### 4.2 열광학 계수 측정

식 (2)에서  $\epsilon=0$  으로 가정하게 되면 식 (2)는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다. 식 (5)에서 광섬유의 열팽창 계수, 온도변화와 파장 이동량을 측정하게 되면 열광학 계수를 구할 수 있다.

$$\xi = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} - \alpha_f \quad (5)$$

앞서 말한  $\epsilon=0$  조건을 구현하고 자중에 의한 영향을 제거하기 위해 열챔버(thermal chamber) 내에 자유단(strain free) 상태로 FBG 센서를 열전대(thermocouple)와 함께 위치시켰다. -196°C에서 200°C까지 온도의 변화에 따른 FBG 센서의 파장 이동량을 측정하였다. 냉매로는 액체질소를 이용하였고 200°C에서 -150°C까지는 단계적으로 온도를 변화시켰으며 -196°C에서는 액체질소에 직접 담그는 방법을 사용하였다. 실험에 사용된 장치의 모습은 Fig. 7과 같으며 측정된 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 FBG 센서는 온도 변화만을 받는 경우 온도변화에 따른 파장 이동이 상온 영역에서 200°C까지는 선형적인 관계를

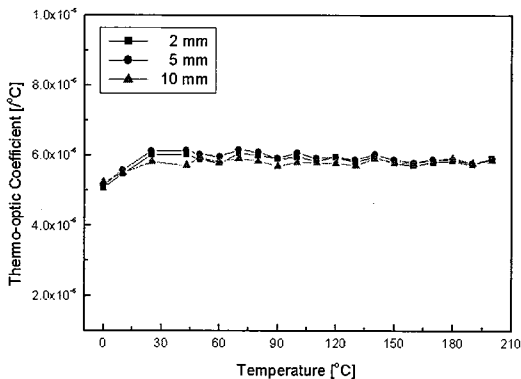


Fig. 9 Thermo-optic coefficient of FBG with grating length at elevated temperature.

보이지만 상온에서 저온 영역으로 갈수록 온도가 감소함에 따라 비선형성이 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 격자 길이에 대해서는 함수관계가 없었으며, 실험 결과에서와 같이 FBG 센서는 온도 변화에 대해 각 온도 구간마다 다른 파장 이동특성을 나타내었다.

한편, 다른 물질과 마찬가지로 광섬유 또한 온도에 따라 열팽창 계수 값이 변하므로 식 (5)에서 정확한 열광학 계수의 측정을 위해선 온도에 따른 열팽창 계수값의 측정이 선행되어야 한다. 일반적으로 광섬유는 실리카 계통의 제질로 구성되어 있어 광섬유의 종류에 따른 차이가 적기 때문에 본 연구에서는 문헌에서 알려진 값[11]을 사용하여 열광학 계수를 계산하였다. 결과는 Fig. 9와 같다.

결과에서 알 수 있듯이 상온에서 온도가 증가함에 따른 열광학 계수는  $6.0 \times 10^{-6}$  정도의 값으로 거의 변화 없었으며 온도가 감소할수록 열광학 계수는 점차 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 격자의 길이와 관계없이 공통적으로 나타났다. 한편, 0°C 이하의 온도에 대해서는 참고문헌에 열팽창 계수 값이 없어 열광학 계수를 구할 수 없었다.

## 5. 복합재료의 성형 후 잔류 열응력에 대한 FBG 센서의 신호 특성

복합재료에 FBG 센서를 삽입 적용할 경우 발생하는 잔류 열응력에 대한 FBG 센서의 신호 특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 잔류 열응력의 차이에 따른 신호 특성을 분석하기 위해 graphite/epoxy와 200E-glass/epoxy fabric 복합재료 시편에 FBG 센서를 삽입하여 성형 모니터링을 수행하였다. 시편에는 각각 2 mm, 5 mm, 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 파장 분할 다중화의 방법으로 한 라인으로 일체화 하여 제작하였으며 Fig. 10과 같이 시편의 중앙에 온도 측정을 위한 열전대와 함께 삽입하였다.

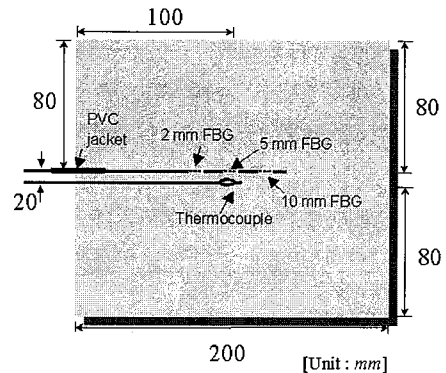


Fig. 10 Configurations of test specimens and positions of embedded sensors.

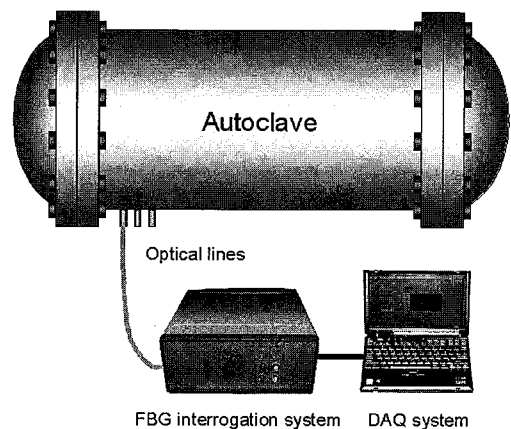


Fig. 11 Experimental setup for cure monitoring.

Graphite/epoxy의 경우 강화 섬유는 직경이 7  $\mu\text{m}$ , 한 층의 두께가 0.125 mm이며 200E-Glass/Epoxy fabric의 경우 강화 섬유는 직경이 10  $\mu\text{m}$ , 한 층의 두께가 0.18 mm이다. 또, 적층순서는 각각  $[0_2/\{0\}/90_4/0_2]_T$ ,  $[4\text{plies}/\{OF\}/4\text{plies}]_T$ 와 같으며 '{ }'는 센서가 삽입된 층을 나타내고 '{ }'안의 숫자는 센서가 삽입된 방향을 나타낸다.

실험 장치는 Fig. 11과 같이 오토클레이브(autoclave) 내부에 FBG 센서가 삽입된 복합재료 시편을 위치시키고 광섬유를 외부로 연결하여 복합재료의 성형 과정동안 변형률과 반사 스펙트럼을 동시에 모니터링 하였다. FBG 센서의 변형률 정보는 10 초 간격으로 측정하였으며 반사 스펙트럼 신호는 Fig. 12와 같은 복합재료의 성형 과정을 통해 2 단계까지는 각 과정의 시작과 끝 부분에서, 즉 1st raising, 1st holding, 2nd raising, 2nd holding 지점에서 취득하였으며 3 단계 과정 동안에는 매 15°C 간격으로 취득하였다.

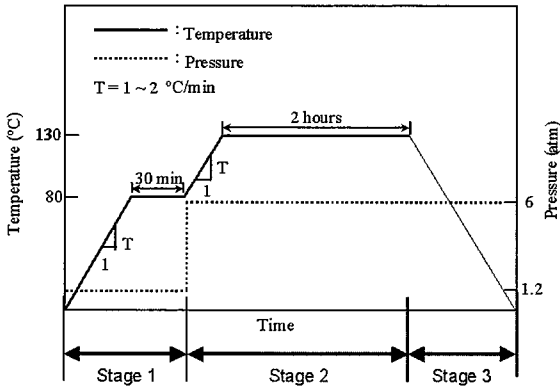


Fig. 12 Typical curing cycle of composite materials.

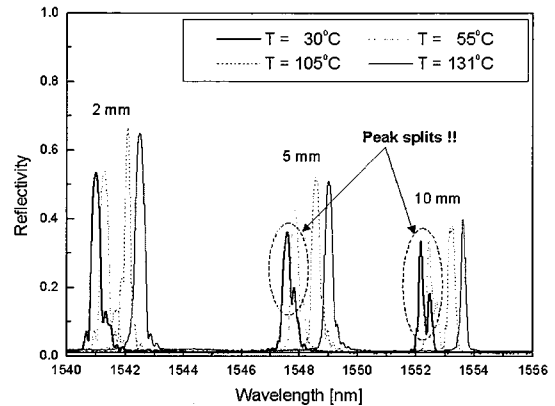


Fig. 14 FBG spectra during the cool down stage of graphite/epoxy laminate.

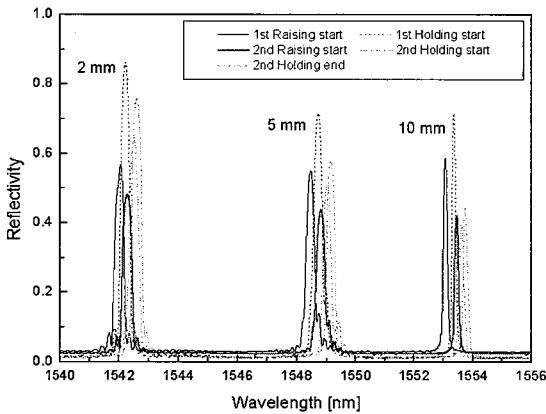


Fig. 13 The change of FBG spectra during the stage 1 and 2 with each step.

먼저, 2 단계까지 각 단계별 반사 스펙트럼 형상은 Fig. 13과 같이 세 가지 종류의 FBG 센서 모두 피크 신호가 잘 유지되었다. 왜냐하면, 2 단계까지는 복합재료의 온도가 상승해 수지 점성이 낮아지게 되며 복합재료에는 온도 상승으로 인한 인장 변형이 작용하기 때문이다.

하지만, 2 단계 이후 냉각 과정을 거치면서 수지의 경화가 일어나게 되면 복합재료에는 압축응력이 작용하게 되고 강화섬유와 수직하게 삽입된 FBG 센서에는 횡방향 응력이 작용한다. 이로 인해 시편 내부에 삽입된 FBG 센서에는 복굴절이 발생하여 센서의 피크 신호는 갈라지게 된다. 3 단계에서의 각 온도에 따른 반사 스펙트럼 형상은 Fig. 14와 같다. FBG 센서에 작용하는 횡방향 응력은 Fig. 14와 같이 격자 길이가 길수록 더 크게 작용하며 센서 신호의 피크 갈라짐 또한 더욱 크게 발생한다. 한편, 10 mm, 5 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서와 달리 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서는 경화가 끝난 후에도 피크 갈라짐 현상이 발생하지 않았다.

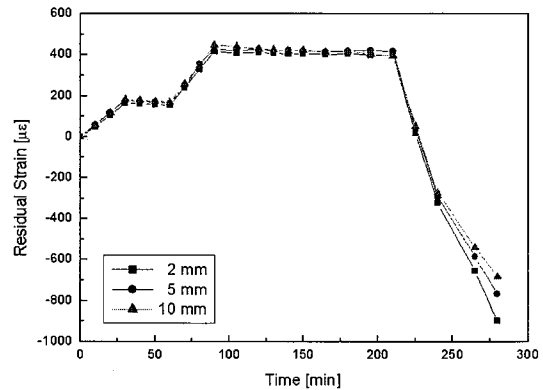


Fig. 15 Residual strains measured by FBG sensors with different grating length.

FBG 센서의 이러한 피크 갈라짐 현상은 변형률 측정 오차의 원인이 되며 Fig. 15에서 보는 것처럼 피크 갈라짐이 클수록 측정 오차 또한 커지게 된다. 삽입된 각 FBG 센서로부터 측정된 변형률 값은 2 mm FBG 센서의 경우  $-897.9 \mu\epsilon$ , 5 mm의 경우  $-767.7 \mu\epsilon$ , 10 mm의 경우  $-683.0 \mu\epsilon$ 의 값을 나타내 피크 갈라짐이 발생하지 않은 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서에 비해 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서는 약  $200 \mu\epsilon$  이상의 오차를 보였다. 변형률 값을 FWHM의 중간값을 피크 신호의 파장값으로 하여 환산하여 계산하였다.

한편, graphite/epoxy 시편에 비해 강화 섬유의 크기가 더 크고 한 층의 두께가 더 두꺼운 200E-glass/epoxy fabric 시편의 경우는 경화 시 더 큰 잔류 열응력이 발생하여 센서에는 더 큰 횡방향 응력이 작용한다. Fig. 16은 시편의 경화 전, 후의 FBG 센서 반사 스펙트럼의 형상을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 5 mm와 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서에 graphite/epoxy 시편의 경우에 비해 더 큰 복굴절이 작용

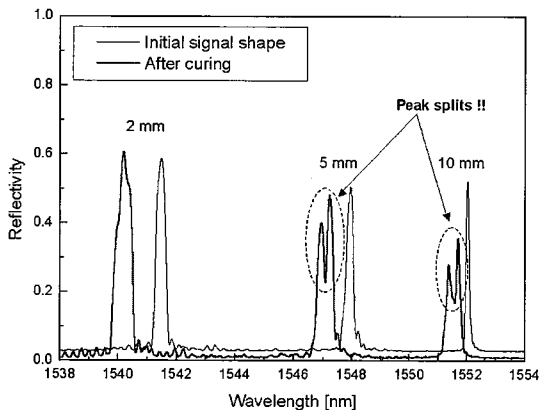


Fig. 16 FBG spectra before and after processing 200E-glass/epoxy fabric laminate.

하여 피크 갈라짐 정도가 증가하였다. 하지만, 2 mm 게이지 FBG 센서의 경우 센서 피크 형상으로부터 횡방향 응력에 의한 영향은 받고 있지만 피크 값을 취득하는 데 영향을 미치는 정도는 아니었다. 성형 전, 후의 파장 신호로부터 측정된 잔류 변형률은 2 mm, 5 mm, 10 mm 각 격자 길이에 대해  $-1066.9 \mu\epsilon$ ,  $-730.0 \mu\epsilon$ ,  $-414.2 \mu\epsilon$ 를 보여 오차가 더 크게 발생하였다. 변형률 값에서 알 수 있듯이 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서에 비해 5 mm, 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서들은 graphite/epoxy 시편에 비해 상대적으로 더 큰 차이를 보였다.

두 복합재료의 성형 모니터링을 통해 FBG 센서의 격자 길이가 짧아지면 복합재의 강화섬유에 의한 복굴절의 영향이 감소하게 됨을 확인하였다. 그러므로, 횡방향 응력이 커질수록 더 짧은 격자 길이를 갖는 FBG 센서의 사용이 필요하다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 FBG 센서가 복합재료 내부에 강화섬유와 수직한 방향으로 삽입 적용되었을 경우 FBG 센서에 작용하는 횡방향 응력으로 인해 생기는 복굴절 현상과 이로 인한 FBG 센서의 신호 특성을 알아보았다. 그리고, 복굴절의 영향으로부터 보다 안정적인 센서의 제작을 위해 FBG 센서의 격자 길이를 조절하여 센서를 제작할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

FBG 센서가 복합재료 내부에 강화섬유와 수직하게 삽입 적용될 경우 강화섬유의 횡방향 응력에 의한 복굴절 현상이 발생한다. 복굴절의 정도는 강화섬유의 크기에 영향을 받으며 FBG 센서에 작용하는 복굴절의 양은 FBG 센서

의 격자 길이가 짧아질수록 감소한다.

FBG 센서의 격자 길이를 조절하기 위해 특수 코팅된 반사 프리즘을 이용하여 다양한 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하였다.

FBG 센서는 격자 길이가 짧아짐에 따라 반사 스펙트럼의 형상은 지수 함수적으로 넓어진다. 하지만, 광탄성 상수는 게이지 길이에 따라 변함이 없으며 열광학 계수는 온도에 대해 비선형적인 관계를 가진다.

이를 통해 FBG 센서의 격자 길이를 조절하면 복합재료 내부에 수직한 방향으로 삽입 적용되어 센서 신호의 피크 갈라짐 없이 정확한 변형률의 취득이 가능하다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소에서 지원하는 위탁연구과제로 수행한 것이며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) E. Udd, K. Corona, K. T. Slattery and D. J. Dorr, "Fiber grating system used to measure strain in a 22ft composite utility pole," *Proc. of SPIE*, Vol. 2721, 1996, pp. 125-137.
- 2) H. K. Kang, D. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Simultaneous monitoring of strain and temperature during and after cure of unsymmetric composite laminate using fiber optic sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, No. 1, 2003, pp. 29-35.
- 3) 이정률, 김천곤, 홍창선, "복합재 평판에 삽입된 광섬유 브래그 격자의 스펙트럼특성과 응력유도복굴절," 한국복합재료학회지, 제15권, 제3호, 2002, pp. 30-38.
- 4) K. S. C. Kuang, R. Kenny, et al., "Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, 2001, pp. 1379-1387.
- 5) A. D. Kersey, M. A. Davis and H. J. Patrick, et al., "Fiber grating sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, 1997, pp. 1442-1462.
- 6) 강동훈, 강현규, 김대현, 홍창선, 김천곤, "변형률 전달성을 고려한 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입 적용 기법 개발," 한국복합재료학회지, 제14권, 제6호, 2001, pp. 32-37.
- 7) 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, No. 15, 1989, pp. 823-825.
- 8) K. O. Hill, B. Malo and F. Bilodeau, et al., "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.

- 9) E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, 1995.
- 10) A. Othonos, A. T. Alavie, S. Melle, S. E. Karr, R. M. Measures, *Optical Engineering*, Vol. 32, 1993, pp. 2841-2845.
- 11) N. P. Bansal and R. H. Doremus, *Handbook of Glass Properties*, Academic Press, 1986.