

## 광섬유 FBG 센서의 시간 분할 다중화를 위한 반사 신호의 분석

### Reflection Signal Analysis for Time Division Multiplexing of Fiber Optic FBG Sensors

김근진\*, 권일범\*<sup>†</sup>, 윤동진\*, 황두선\*\*, 정영주\*\*

Geun-Jin Kim\*, Il-Bum Kwon\*<sup>†</sup>, Dong-Jin Yoon\*, Dusun Hwang\*\* and Youngjoo Chung\*\*

초 록 대형 구조물의 넓은 영역에 분포된 변형률이나 온도를 모니터링하기 위하여 광섬유 FBG(fiber Bragg grating:브래그 격자) 탐측자를 사용하는 광섬유 FBG 센서가 사용된다. 본 논문에서는 광섬유 한개의 라인에 다수의 FBG 탐측자를 사용하기 위하여 시간 분할 다중화와 파장 분할 다중화를 복합화한 다중화 기술을 제안한다. 일반적으로 광섬유 FBG 센서는 기본적으로 파장 분할 다중화 방식으로 작동되므로 본 연구에서는 시간 분할 다중화에 대한 특성을 고찰한다. 광섬유에 직렬로 연결된 FBG 탐측자들의 반사도에 따른 반사광의 세기와 그 위치를 이론적으로 계산하고 실험결과와 비교한다. 이론적인 계산에 따르면 5개의 FBG 탐측자의 반사도를 적절하게 선정함에 의하여 한개의 광섬유 라인에 설치하여 각각의 FBG 탐측자에서 되돌아오는 반사광의 세기를 균일하게 얻을 수 있음을 확인한다. 이러한 결과를 실험으로 확인하기 위하여 반사도가 13%, 16%, 25%, 40%, 80%인 FBG 탐측자를 제작하고, 시간 영역에서 각각의 FBG 탐측자에서 되돌아오는 반사 신호를 관찰한다. 실험 결과는 신호잡음의 영향으로 이론적인 결과와 차이가 있지만, 복합 다중화 기법의 사용 가능성을 증명하는 5개의 FBG 탐측자의 반사 신호를 모두 보인다.

주요용어: FBG 센서, 시간 분할 다중화, 반사도, 반사광의 세기, FBG 탐측자

**Abstract** Fiber optic sensor using fiber Bragg grating(FBG) probes is used for monitoring strain and temperature distributed on the wide surfaces of large structures. In this paper, in order to use many FBG probes in one optical fiber line, we propose a complex multiplexing technology which is composed of two techniques, one is time division multiplexing and another is wavelength division multiplexing. However, we only investigate the characteristics of time division multiplexing because FBG sensors basically can be operated by wavelength division multiplexing. We calculate the optimal reflectivities and the lengthwise location of five FBG probes in serial connection in order to obtain the unique reflected intensities from the FBG probes. We fabricate five FBG probes with the reflectivities of 13%, 16%, 25%, 40% and 80%, which are determined by the theoretical calculation, and observe the signal reflected from each FBG in the time domain from the experiment. There are differences between experimental and theoretical results caused by the signal noise and the differences of reflectivities of FBG probes. But the experimental results shows the reflected signals of five FBG probes which prove the availability of complex multiplexing.

**Keywords:** FBG Sensor, Time Division Multiplexing, Reflectivity, Intensity of Reflected Light, FBG Probe

1. 서론

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating : FBG) 센서는 광섬유가 가지고 있는 낮은 전파 손실, 내구성, 전파 방해에 무관한 장점을 이용하기 때문에 효율성과 정밀도가 높은 센서로서, 여러 분야의 물리적, 화학적, 생물학적 등의 환경변화를 측정하는 기술로 관심이 높다[1]. 광섬유 센서 시스템으로 여러 지점의 상태를 탐지하기 위하여 다수의 탐측자를 설치하여 센싱할 수 있는 다중화(multiplexing) 방식이 사용되며, 최근의 다중화 방식은 온도, 변형률, 압력 센서를 동시에 측정하는 시스템이나, 다수의 센서 설치 및 관리가 필요한 시스템에 널리 사용되고 있다[2-5]. 특히 광섬유 FBG 센서를 통한 다중 점 측정을 위하여 파장 분할 다중화와 시간 분할 다중화 방식 등을 비롯한 다양한 다중화 연구가 진행되어 왔다[6-8]. 파장 분할 방식의 다중 광섬유 격자 센서 시스템은 광섬유 격자의 브래그 파장 반치폭과 응력 및 온도에 따른 브래그 파장의 가변 영역을 한정된 파장 대역내의 광원을 사용할 경우에 센서의 개수를 늘리는데 한계가 있다. 또한 시간 분할 방식의 시스템은 피크 중첩에 따른 브래그 격자의 반사도를 고려해야 하기 때문에 센서의 개수에 한계가 있다. 따라서 시간 분할 방식과 파장 분할 방식을 복합화한 다중화 시스템을 구현하면 더 많은 다중점을 감지할 수 있다. 즉, 센서 탐측자마다 구동되는 파장 영역과 시간 영역을 할당하여 각각의 신호를 구별하면서 사용할 수 있게 된다. 본 논문에서는 이 다중화 복합 시스템에서 시간 분할 다중화 특성에 관한 내용을 다루었으며, 시스템 특성에 따른 보완해야 할 문제점들을 살펴 보았다[9]. 이론적인 계산을 통하여 시간 분할 방식에서 5개 정도의 FBG를 사용할 수 있을 것으로 판단되어 광섬유 한 라인에 광섬유 FBG 센서 탐측자를 5개 설치하고 시간 영역에서 각각의 FBG 탐측자로부터 반사광의 세기를 획득하고 분석하는 연구를 수행하였다.

2. 광섬유 FBG 센서의 원리

광대역 폭 스펙트럼(broadband spectrum)을 광섬유에 입사시킬 경우, Fig. 1과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 특정 파장 성분만이 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장

성분은 그냥 통과한다. 이 특정 파장을 브래그 파장이라 하며, 이것은 식(1)으로 정식화된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

식(1)에서  $n_{eff}$ 은 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고,  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 따라서 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 스트레인 등의 외부 물리량을 가할 경우 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 이러한 원리를 이용하여 변형률, 온도 및 압력 등의 물리량을 측정하는 센서로 많이 사용된다.

3. 시간 분할 다중화의 원리

시간 분할 다중화는 펄스광의 신호를 시간 영역(time domain) 상에서 시간 차이를 이용하여 구분하면서 측정하는 방식이다. Fig. 2(a)는 FBG 센서 탐측자를 이용한 시간 분할 다중화 시스템의 구성도이다.

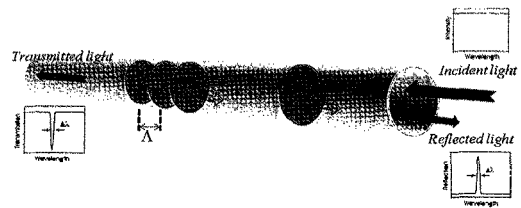
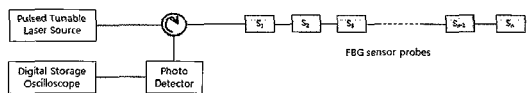
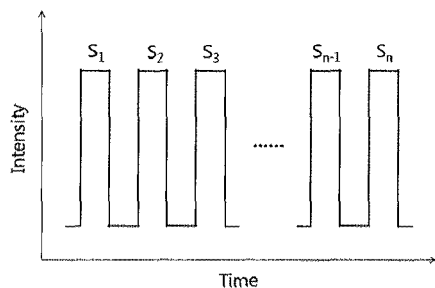


Fig. 1 Schematic of fiber optic FBG sensor system



(a) Schematic of TDM system



(b) Signal in time domain

Fig. 2 Time division multiplexing of fiber optic FBG sensor system

시간축 상에서 각각의 센서 탐촉자로부터 되돌아오는 반사 신호를 구별하기 위해서는 우선 광원을 펄스 형태로 만들어 주어야 하며, 펄스와 탐촉자 간의 간격을 고려해 구별할 수 있도록 설치되어 작동되어야 한다. 따라서 시간 영역 상에서의 신호 측정을 하기 위하여 펄스구동장치와 오실로스코프가 필요하다. Fig. 2(b)는 시간 영역에서의 신호 스펙트럼을 나타낸 것이며, 이처럼 신호의 구분을 통하여 탐촉자를 구분할 수 있다.

#### 4. FBG 탐촉자의 반사광 세기의 이론적인 계산

광섬유 FBG 센서의 탐촉자인 FBG가 Fig. 3과 같이 광섬유에 직렬로 설치되었을 때 입력되는 펄스 광원은 각각의 FBG  $R_1$ 과  $R_2$ 로부터  $I_1$ 과  $I_2$ 의 광세기를 반사한다.

Fig. 3에서  $I_1$ 과  $I_2$ 는 반사도가 각각  $R_1$ 과  $R_2$ 인 두 격자에서 반사되어 출력되는 신호의 세기이며, 이것은 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = I_0 R_1, \quad I_2 = I_0 (1 - R_1)^2 R_2 \quad (2)$$

또한,  $n$ 번째 격자에서 반사되는 출력 신호의 세기를 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$I_n = I_0 R_n \prod_{k=1}^{n-1} (1 - R_k)^2 \quad (2)$$

식(3)을 이용하여 반사도에 따른 각각의 반사되는 출력 신호의 세기를 비율적으로 계산할 수 있으며, Fig. 4는 모든 격자들의 반사도를 12%로 동일하게 하여 반사된 신호의 세기를 그래프로 나타낸 결과이다.

이론적인 계산을 통해 격자의 반사도를 동일하게 입력하였을 경우, 센서의 수가 늘어날수록 출력되는 첫신호와 끝신호의 세기 차이가 커지게 됨을 알 수 있다( $I_1 > I_2 > \dots > I_n$ ). 이러한 결과는 다수의 센서를 광섬유 한개의 라인에 설치할 때, 광섬유 라인 후단에 설치한 FBG 센서 탐촉자의 신호가 미약해져서 신호 검출의 어려움이 존재하여 다수의 센서 탐촉자를 설치하는데 제한이 발생하는 것을 의미한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 모든 반사 신호의 세기가 균일하게 되도록, 각 격자들의 반사도를 조정하는 방안을 제시하였다. 즉, 식(3)에서 센서 탐촉자의 반사광의 신호 세기  $I_n$ 을 동일한 값으

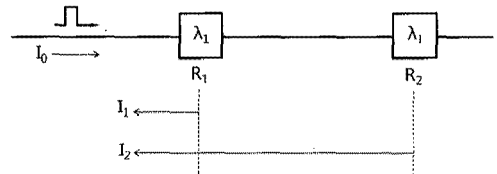


Fig. 3 Reflection from FBG probes

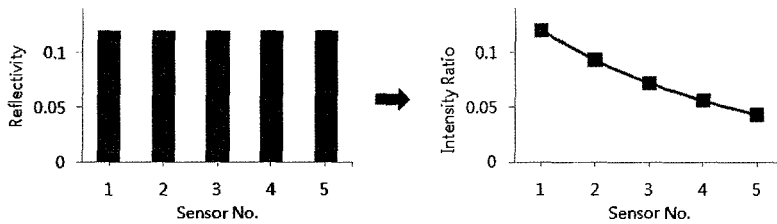


Fig. 4 Intensity ratio calculation of five FBG probes with 12% reflectivity

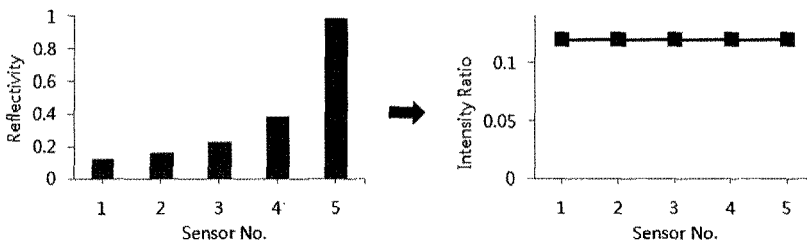


Fig. 5 Intensity ratio calculation of five FBG probes with 12%, 16%, 23%, 38%, 99% reflectivity

로 가정하고 식을 정리하면 식(4)를 얻게 된다. 따라서 FBG 센서 탐촉자의 반사도를 식(4)로부터 구하면 FBG 센서 탐촉자의 출력 신호세기를 균일하게 얻을 수 있게 된다.

$$R_n = \frac{R_{n-1}}{(1 - R_{n-1})^2} \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 첫번째 FBG 센서 탐촉자의 반사도를 12%로 할 때 각각 16%, 23%, 38%, 99%로 광섬유의 첫번째 FBG 센서 탐촉자의 후단에 설치하면, 그에 따른 FBG 센서 탐촉자들의 출력 신호의 세기는 Fig. 5처럼 얻어진다.

### 5. FBG 탐촉자 반사광 획득 실험

시간 분할 방식에 의하여 광섬유 FBG 센서의 작동을 모사하기 위하여 Fig. 6과 같이 구성하였다. 센서 시스템은 광원부, 광수신부, 탐촉자부로 구성하였다. 광원부는 파장을 가변시킬 수 있도록 광섬유 패브리 페로 여과기와 이 여과기를 제어하는 제어기 및 펄스광을 만들기 위한 광전변환기와 펄스 발생기로 구성하였다. 탐촉자부는 광섬유 FBG 소자를 사용하여 한개의 광섬유 라인에 여러 개의 탐촉자를 설치하였다. 광수신부는 각각의 FBG 탐촉자로부터 반사되는 신호를 시간 영역에서 구별되도록 100 mega-sampling/sec보다 빠르게 데이터를 수신하기 위하여 고속 광검출기와 디지털 오실로스코프로 구성하였다.

광섬유 FBG 탐촉자의 반사도에 따라 출력되는 반사 신호의 세기를 이론값과 비교하였다. 시간 분할 다중화 방식의 신호 취득 가능성 확인을 위하여

광섬유 한 라인에 동일한 브래그 파장을 갖는 5개의 광섬유 FBG 탐촉자를 직렬로 설치하여 시스템을 구성하고, 시간 영역 상에서 5개의 FBG 탐촉자를 사용할 수 있음을 보이는 실험을 수행하였다.

#### 5.1. 동일한 반사도를 갖는 FBG 탐촉자의 반사광의 세기 측정

동일한 브래그 파장( $\lambda_1$ )과 반사도를 가진 두 FBG 탐촉자를 한개의 광섬유 라인에 일렬로 설치하였다. 센서 작동은 펄스폭 50 ns의 펄스광을 광섬유 내부로 진행시키면서 시간 영역에서 FBG 탐촉자로부터의 반사 신호를 취득하도록 하였다. FBG 탐촉자의 반사도는 각각 30%로 동일하게 제작하였고, 두 탐촉자 사이의 거리는 10 m 정도 떨어져 있도록 설치하였다. FBG 제작은 KrF 엑시머 레이저를 이용하였으며, 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)를 이용하여 해상도 0.1 nm, 파장 범위는 10 nm 로 설정하고 반사도를 측정하였다.

Fig. 7은 FBG 탐촉자 두개의 신호의 세기를 측정된 결과로 첫번째 펄스와 두번째 펄스 신호는 각각 두개의 FBG 탐촉자로부터 반사된 신호이다. 각각의 펄스 신호의 세기인  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 3.3 mV, 1.6 mV로 나타났다. 이 값은 식(3)을 통한 이론값  $I_1 : I_2 = 2 : 1$ 에 근사함을 알 수 있다.

#### 5.2. 동일한 반사광 세기 획득을 위한 FBG 탐촉자의 반사도 조정

광섬유 FBG 탐촉자 부터 반사되는 신호를 동일하게 얻을 수 있도록 FBG 탐촉자의 반사도를 조정

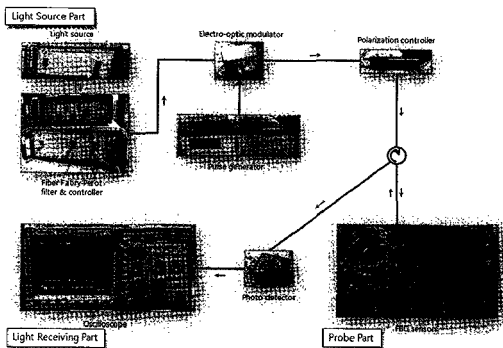


Fig. 6 Experimental setup of multiplexed fiber optic FBG sensor system

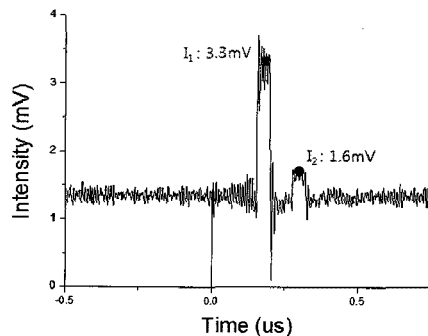


Fig. 7 Intensities of reflected lights of two FBG probes with 30% reflectivity

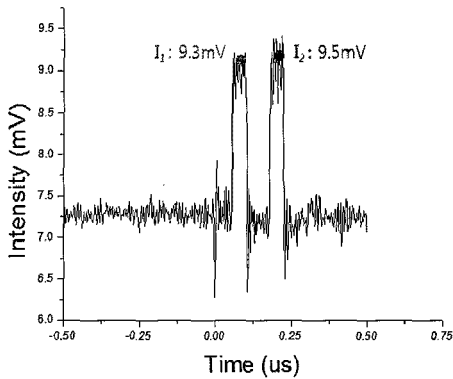


Fig. 8 Intensities of reflected lights of two FBG probes with 20%, 30% reflectivity

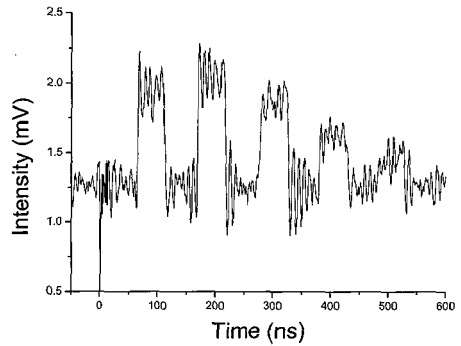


Fig. 9 Intensities of reflected lights of five FBG probes with 13%, 16%, 25%, 40% and 80% reflectivity

하여 실험을 구성하였다. 동일한 브래그 파장의 두 격자의 반사도를 식(4)를 통해 각각 20%, 30%로 제작하였다. Fig. 8은 광섬유 FBG 탐촉자의 반사 신호의 세기를 측정된 결과이며  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 9.3 mV, 9.5 mV로 구해졌다. 이러한 결과는 이론 식으로부터 구한 9.4 mV와 비교하면 상당히 근사한 결과임을 알 수 있다.

5.3. 5개의 FBG 탐촉자의 반사신호 측정

FBG 탐촉자 5개를 한줄의 광섬유에 직렬로 연결하고 그 반사 신호를 취득하여 센서 작동이 가능한지를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이론 식(4)를 이용하여 FBG 탐촉자 5개로부터 동일한 반사광의 세기비(intensity ratio) 12%를 얻기 위한 FBG 탐촉자 각각의 반사도를 계산하여 보면 각각 12%, 16%, 23%, 38%, 99%로 결정되었다. 이 수치는 SNR과 신호간 간섭 등을 고려하여 반사도를 최대치로 설정한 값이다. 그러나 FBG 탐촉자를 제작하는 과정에서 발생하는 여러 요인으로 인하여 실제로 제작된 FBG 탐촉자의 반사도는 13%, 16%, 25%, 40%, 80%이었다. Fig. 9는 광섬유 FBG 탐촉자의 반사 신호의 세기를 측정된 결과이며, 이러한 제작된 FBG 탐촉자의 반사도를 이론식에 대입하여 각각의 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비를 계산하여 나타낸 것이 Fig. 10(검정선)이다. 또한 실제 실험값과 비교하기 위하여 제작된 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비를 Fig. 10(빨간선)에 보였다. 실험에서 입사광의 세기는 6.7 micro-W이었다.

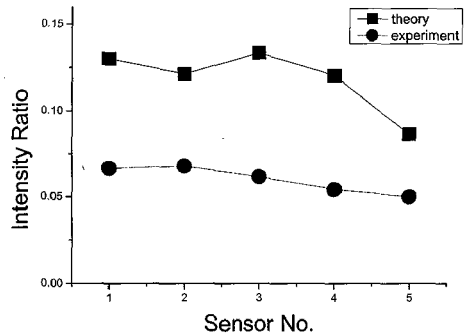


Fig. 10 Comparison of theory and experiment about intensity ratios of reflected lights of five FBG probes

이론적인 결과보다 실험에서 반사광의 세기비가 전반적으로 낮게 보이는데, 이것은 이론 계산에서는 FBG 탐촉자를 설치할 때 발생하는 광손실이 없다고 가정하고 있어서 실제 실험값과 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 또한 3번째 FBG 탐촉자를 기준으로 첫번째와 두번째 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비와 비교하여 네번째와 다섯번째 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비가 작게 나타나서 전체적인 경향은 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이론값은 2번째 FBG 탐촉자의 세기비가 첫번째와 세번째 FBG 탐촉자의 세기비보다 작았으나 실험값은 오히려 두번째 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비가 가장 크게 나타났다. 이러한 차이는 각각의 FBG 탐촉자 들의 브래그 파장  $\lambda_1$ 이 정확히 동일하게 제작되지 않아서 생긴 오차로 추정된다. 또

한 시스템 잡음의 영향과 거리에 따른 신호의 손실로 반사 신호가 이론적인 계산과 차이가 있었다. 현재 시스템의 신호 대 잡음비 개선 및 거리에 따른 신호의 손실 보완에 관한 연구가 계속 진행 중이다. 이론적인 결과와 차이가 보이지만, 시간 영역에서 FBG 탐촉자 5개의 반사광 세기 신호를 모두 얻을 수 있었다.

이론적인 결과보다 실험에서 반사광의 세기비가 전반적으로 낮게 보이는데, 이것은 이론 계산에서는 FBG 탐촉자를 설치할 때 발생하는 광손실이 없다고 가정하고 있어서 실제 실험값과 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 또한 3번째 FBG 탐촉자를 기준으로 첫번째와 두번째 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비와 비교하여 네번째와 다섯번째 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비가 작게 나타나서 전체적인 경향은 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이론값은 2번째 FBG 탐촉자의 세기비가 첫번째와 세번째 FBG 탐촉자의 세기비보다 작았으나 실험값은 오히려 두번째 FBG 탐촉자의 반사광의 세기비가 가장 크게 나타났다. 이러한 차이는 각각의 FBG 탐촉자 들의 브래그 파장  $\lambda_B$ 이 정확히 동일하게 제작되지 않아서 생긴 오차로 추정된다. 또한 시스템 잡음의 영향과 거리에 따른 신호의 손실로 반사 신호가 이론적인 계산과 차이가 있었다. 현재 시스템의 신호 대 잡음비 개선 및 거리에 따른 신호의 손실 보완에 관한 연구가 계속 진행 중이다. 이론적인 결과와 차이가 보이지만, 시간 영역에서 FBG 탐촉자 5개의 반사광 세기 신호를 모두 얻을 수 있었다.

## 6. 결 론

광섬유 FBG 센서의 파장 분할 다중화뿐만 아니라 시간 분할 다중화를 모두 사용하는 복합 다중화 기법의 가능성을 탐색하기 위하여 파장 분할 다중화를 제외한 시간 분할 다중화 기법에 대한 연구를 수행하였다. 광섬유 한개의 라인에 동일한 브래그 파장을 갖는 FBG 탐촉자 5개를 설치하여 그 반사광을 획득하고 신호 특성을 분석하였다.

FBG 탐촉자의 반사도에 따른 반사광의 세기를 이론적으로 계산할 수 있도록 수식을 만들었으며 실험적으로 반사광의 세기를 측정 한 결과, 이론값에 근사함을 확인하였다. FBG 탐촉자의 반사광의

세기를 동일하게 하기위해 FBG 탐촉자의 반사도를 각각 다르게 조정하는 방안을 제시하였다. FBG 탐촉자의 반사도가 각각 20%와 30%인 두개의 FBG 탐촉자를 제작하여 반사광의 세기를 확인한 결과 두 반사광의 세기는 이론값과 근사하게 측정됨을 확인하였다. 최종적으로 시간 영역상에서 5개의 균일한 반사광을 획득할 수 있는지 확인하기 위하여 동일한 반사광의 세기를 얻을 것으로 이론 계산에서 확인한 12%, 16%, 23%, 38%, 99%의 반사도를 갖는 FBG 탐촉자를 5개 제작하여 센서 시스템을 작동시키면서 그 신호를 획득하였는데 이론값과 약간의 차이는 있었지만 5개 반사광 모두 잘 획득할 수 있어서 시간 분할 다중화 기법을 사용하여 5개의 FBG 탐촉자를 사용할 수 있게 되었음을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문 연구는 지식경제부의 신재생에너지 연구 개발 프로그램에 의해 지원받아 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] A. D. Kersay, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins and M. A. Putnam, "Fiber grating sensors," J. Lightwave Technol. Vol. 15, pp. 1442-1463, (1997)
- [2] 정달우, 권일범, 최낙삼, "광섬유 센서를 이용한 구조물 안전 모니터링 기술", 비파괴검사학회지, 제25권, 제5호, pp. 356-361, (2005)
- [3] 권일범, 김치엽, 서대철, "광섬유 OTDR 센서의 탐촉자", 비파괴검사학회지, 제25권, 제5호, pp. 350-355, (2005)
- [4] L. Zhang, Y. Liu, J. A. R. Williams and I. Bennion, "Enhanced FBG strain sensing multiplexing capacity using combination of intensity and wavelength dual coding technique," IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 11, pp. 1638-1640, (1999)
- [5] A. D. Kersey and W. W. Morey, "Multi-element Bragg-grating based fiber-laser strain sensor," Electron. Lett. Vol. 29, No. 11,

- pp. 964-966, (1993)
- [6] S. Abad and M. López-Amo, "Fiber Bragg grating - based self-referencing technique for wavelength-multiplexed intensity sensors," *Optics Lett.* Vol. 27, No. 4, pp. 222-224, (2002)
- [7] X. Wan, and H. F. Taylor, "Monitoring and multiplexing technique for interferometric fiber optic sensors using a linearly chirped Er:Fiber laser," *Appl. Opt.* Vol. 41, pp. 7607-7611, (2002)
- [8] Po Zhang, H. H. Cerecedo-Nunez, B. Qi, G. Pickrell and Anbo Wang, "Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg grating-based sensor system," *Optical Engin.* Vol. 42, No. 6, (2003)
- [9] D. A. Jackson, A. B. L. Ribeiro, L. Reekie, and J. L. Archambault, "Simple multiplexing scheme for fiber-optic grating sensor network," *Optics Lett.* Vol. 18, pp. 1192-1194, (1993)