

논문 2012-50-3-17

# 가변 페브리-페로 필터와 FBG를 이용한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서

( An Intensity Based Self-referencing Fiber Optic Sensor  
Using Tunable Fabry-Perot Filter and FBG )

최 상 진\*, 반 재 경\*\*

( Sang-Jin Choi and Jae-Kyung Pan )

## 요 약

본 논문에서는 자기기준 특성을 가지는 광세기 기반 광섬유 센서 구조를 제안하고 실험적으로 구현하여 성능을 제시한다. 제안하는 광섬유 센서는 광대역 광원(BLS), fiber Bragg grating (FBG), 가변 페브리-페로(Fabry-Perot) 필터, LabVIEW 프로그램으로 구성된다. 제안한 자기기준 광섬유 센서의 이론적인 해석을 통하여 측정 변수( $X$ )와 보정 변수( $\beta$ )를 정의하고, 이를 바탕으로 전달함수( $H$ )를 구한다. 또한 실험을 통하여 이론적인 해석의 타당성을 제시한다. 제안한 광섬유 센서 구조는 광대역 광원의 출력 광세기가 0 dB, 3 dB, 6 dB 감소해도 측정결과에 영향을 미치지 않는 자기기준 특성을 가진다. 또한 다른 특성의 FBG를 사용하여도 측정 가능하므로, 제안한 광섬유 센서 구조는 임의의 규격을 가진 FBG를 사용할 수 있다. 광원의 광세기가 감소하였을 때와 세 가지 다른 특성의 FBG 쌍을 이용하여 측정된 결과 이론적인 값과 잘 일치함을 보였다. 따라서 제안한 광섬유 센서는 자기기준 특성과 구성하는 FBG의 규격이 비교적 엄격하지 않아도 되는 장점을 가진다.

## Abstract

In this paper, we have proposed and experimentally demonstrated an intensity-based self-referencing fiber optic sensor. The proposed fiber optic sensor consists of a broadband light source (BLS), fiber Bragg grating (FBG), tunable Fabry-Perot (F-P) filter, and LabVIEW program. We define the measurement parameter ( $X$ ) and the calibration parameter ( $\beta$ ) to determine the transfer function( $H$ ) of the self-referencing fiber optic sensor, and the validity of the theoretical analysis is confirmed by experiments. The self-referencing characteristic for the proposed system has been validated by showing that the measurement parameter ( $X$ ) is invariant for BLS optical power attenuations of 0 dB, 3 dB, and 6 dB. Also, the measured result is irrelevant to the FBGs with different characteristics. This means that the proposed fiber optic sensor offers the flexibility for determining the FBGs needed for implementation. Experimental results for the proposed fiber optic sensor are in good agreement with a theoretical analysis for BLS optical power attenuations and for three FBG pairs with different characteristics. So, the proposed fiber optic sensor has several benefits, including the self-referencing characteristic and the flexibility to determine the FBGs.

**Keywords** : fiber optic sensor, self-referencing, intensity based, FBG, tunable F-P filter

## I. 서 론

\* 학생회원, \*\* 평생회원, 전북대학교 전기공학과,  
전북대학교 스마트그리드 연구센터  
(Department of Electrical Engineering, Smart Grid  
Research Center, Chonbuk National University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로  
한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.  
(2011-0010473), (2012-0009151)

접수일자:2012년7월11일, 수정완료일:2013년2월19일

광섬유 센서 기술은 광전자 및 광섬유 통신 산업의  
성장과 더불어 다양한 구조를 가지고 발달해 왔고, 광  
네트워크와 연동되어 실시간적으로 측정정보를 처리 가  
능하며, 민감도가 매우 좋고, 크기가 작으며, 전자파장  
애(EMI)에 강한 특성을 보인다. 또한 광섬유 센서는 다

양한 형태의 측정요소를 측정할 수 있고, 임의의 공간적인 분포를 가질 수 있는 장점으로 인하여 최근에는 신재생에너지 구조물, 대형 건물, 석유 및 가스 산업 분야, 교량 등의 구조물 건전성 모니터링에 다양한 방식으로 적용되고 있다<sup>[1]</sup>.

광섬유 센서는 측정원리에 따라 스트레인 및 온도 변화에 따른 fiber Bragg grating (FBG)의 반사파장 변화를 이용하는 FBG 센서 방식, 사그낙(Sagnac) 간섭계 및 페브리-페로 간섭계 구조를 이용하는 광섬유 간섭계 방식 그리고 측정요소와 광세기 변화의 관계를 이용하는 광세기 기반 광섬유 센서 방식으로 구분할 수 있다<sup>[2]</sup>. 전기 잡음과 장기 계측이 어려운 스트레인 게이지 센서의 단점을 보완하기 위하여 다중 FBG 센서를 적용한 저속용 자동계측 시스템이 발표되었으며<sup>[3]</sup>, 단일모드 광섬유와 중공광섬유(HOF)를 이용하여 기존의 간섭계의 단점을 보완한 제작이 간편하고 물리량의 변화에 높은 민감도를 갖는 광섬유 간섭계를 구현한 연구가 수행되었다<sup>[4]</sup>. 광세기 기반 광섬유 센서는 일반적으로 입력 광의 세기와 광섬유 센서헤드 신호를 포함한 출력 광의 세기를 이용하므로 간단한 구조와 저비용 구성 등으로 초기에 개발되었다. 비교적 저렴한 광원 이용, 복잡하지 않은 검출 구조, 다양한 변수 측정 가능 등으로 여전히 많은 센서 응용분야에서 사용되고 있다. 하지만 광세기 기반 광섬유 센서가 가지는 고유한 하나의 문제점은 광원의 광세기 변화 또는 광을 전달하는 구성요소에서 일어나는 불규칙한 손실로 인한 측정 오차를 유발하는 것이다<sup>[5]</sup>.

광세기 기반 광섬유 센서는 불규칙한 광세기 변화에 무관한 자기기준 특성과 다지점 측정이 가능한 구조에 대한 다양한 연구가 다음과 같이 이루어졌다. 연속 순환하는 광섬유 루프에 광 펄스열을 입력시켜 측정지점에서 광세기 변화가 일어난 후 되돌아오는 지연시간을

이용하여 다지점 측정이 가능한 구조<sup>[6]</sup>, 칩(chirp) 주파수로 광세기를 변조하고 각각의 광섬유 센서헤드를 연결하는 광섬유 길이에 따른 지연시간을 이용하여 다중화 기능을 가지는 광섬유 센서 구조<sup>[5]</sup>, 두 주파수로 광세기 변조하고 링 공진기(ring resonator)로 구성되어 자기기준 특성을 가진 광섬유 센서 구조<sup>[7-8]</sup>, RF로 변조된 광원의 위상이 광섬유 센서헤드에서의 변화량을 lock-in 증폭기로 측정하고, 파장 분할 다중화기와 FBG를 이용하여 다중화 특성을 가지는 구조가 발표되었다<sup>[9-10]</sup>.

본 논문에서는 광원 또는 구성요소에서 일어나는 불규칙한 광세기 변화에 무관한 자기기준 특성을 가지는 측정 변수를 이용하는 새로운 구조의 광섬유 센서를 제안한다. 제안한 구조는 기존의 광세기 기반 광섬유 센서에 비하여 비교적 단순한 측정 변수를 제시함으로써 간단한 구성과 측정 절차를 가진다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안한 광세기 기반 광섬유 센서의 동작원리를 바탕으로 이론적으로 해석하고, 측정 변수와 보정 변수를 제시한다. III장에서는 제안하는 구조를 구현하여 이론적으로 제시한 결과를 실험을 통하여 검증하고, 광원 또는 구성요소에서 일어나는 불규칙한 광세기 변화와 FBG 특성 변화에 따른 자기기준 성능을 제시한다. 마지막으로 IV장에서는 결론을 맺는다.

## II. 제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서

본 장에서는 제안하는 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서의 동작원리를 바탕으로 이론적으로 해석한다. 그림 1의 제안하는 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서는 광대역 광원(Broadband Light Source; BLS), 광 서큘레이터, FBG, 가변 페브리-페로 필터와 LabVIEW 프

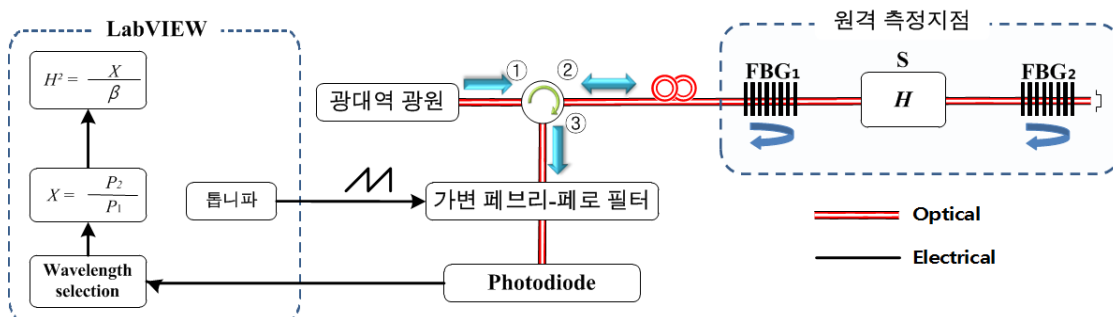


그림 1. 제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구조  
Fig. 1. Schematic diagram of the proposed intensity based self-referencing fiber optic sensor.

로그그램으로 구성된다. 광대역 광원의 출력 과장범위는 가변 페브리-페로 필터와 구성하는 FBG의 Bragg 반사과장을 포함하는 것으로 가정한다.

광대역 광원에서 나온 광은 광섬유 ①, 광 서큘레이터, 광섬유 ②를 거쳐서 원격 측정지점에 위치한 FBG<sub>1</sub>과 광세기 기반으로 측정하는 광섬유 센서헤드 S와 FBG<sub>2</sub>로 들어간다. 원격 측정지점에 도달한 광은 FBG<sub>1</sub>의 Bragg 반사과장에 해당하는 광을 반사하고 나머지 과장의 광은 FBG<sub>1</sub>과 광섬유 센서헤드 S를 통과한 후 FBG<sub>2</sub>에 도달하여 FBG<sub>2</sub>의 Bragg 반사과장에 해당하는 광은 반사된다. FBG<sub>2</sub>에서 반사된 광은 다시 광섬유 센서헤드 S와 FBG<sub>1</sub>을 지나 광 서큘레이터에 의해 광섬유 ③으로 진행한다. 광섬유 ③으로 나온 광은 LabVIEW 프로그램으로 통과과장을 선택하는 가변 페브리-페로 필터를 이용하여 FBG<sub>1</sub>에 의해 반사된 광  $P_1$ 과 FBG<sub>2</sub>에 의해 반사된 광  $P_2$ 를 구한다.

FBG<sub>1</sub>에서 반사된 광세기  $P_1$ 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 = P_{in} \cdot K_{C1-2} \cdot K_{fiber1}^2 \cdot R_1 \cdot K_{C2-3} \cdot K_{f-p} \quad (1)$$

여기서  $P_{in}$ 은 입력 광세기,  $K_{C1-2}$ 는 광 서큘레이터 포트 ①에서 포트 ②로 진행할 때 발생하는 손실,  $K_{fiber1}$ 은 광 서큘레이터 포트 ②와 FBG<sub>1</sub> 사이의 광섬유 손실,  $R_1$ 은 FBG<sub>1</sub>의 반사도,  $K_{C2-3}$ 는 광 서큘레이터 포트 ②에서 포트 ③으로 진행할 때 발생하는 손실,  $K_{f-p}$ 은 가변 페브리-페로 필터를 통과할 때 발생하는 손실이다. 그림 1에서 광대역 광원과 광 서큘레이터 포트 ① 사이의 광섬유와 광 서큘레이터 포트 ③과 가변 페브리-페로 필터 사이의 광섬유 길이는 짧다고 가정하여 손실을 무시하였다.

FBG<sub>2</sub>에서 반사된 광세기  $P_2$ 는 광섬유 센서헤드 S에서 일어나는 광세기 변화에 대한 정보를 가진 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 = P_{in} \cdot K_{C1-2} \cdot K_{fiber1}^2 \cdot K_{FBG1}^2 \cdot K_{fiber2}^2 \cdot R_2 \cdot K_{C2-3} \cdot K_{f-p} \cdot H^2 \quad (2)$$

여기서  $K_{FBG1}$ 은 FBG<sub>2</sub>의 Bragg 반사과장 대역의 광이 FBG<sub>1</sub>을 통과할 때 발생하는 스펙트럼 손실,  $K_{fiber2}$ 는 FBG<sub>1</sub>과 FBG<sub>2</sub> 사이의 광섬유 손실,  $R_2$ 는 FBG<sub>2</sub>의 반사도,  $H$ 는 광섬유 센서헤드 S의 전달함수

이다.

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 측정 변수  $X$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X = \frac{P_2}{P_1} = \frac{K_{fiber2}^2 \cdot K_{FBG1}^2 \cdot R_2}{R_1} \cdot H^2 = \beta \cdot H^2 \quad (3)$$

여기서  $\beta$ 는  $H=1$ 일 때 측정 변수  $X$ 로 주어지는 보정 변수(calibration parameter)로서 식 (4)로 주어진다.

$$\beta = \frac{K_{fiber2}^2 \cdot K_{FBG1}^2 \cdot R_2}{R_1} \quad (4)$$

식 (4)에 주어진 보정 변수  $\beta$ 는 그림 1의 FBG<sub>1</sub>과 FBG<sub>2</sub>의 반사도 및 스펙트럼 손실특성, 원격 측정지점에 있는 광섬유 손실특성에 따라 결정된다.

그림 1의 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서를 구성할 때는 광섬유 센서헤드에 측정량이 가해지지 않은 상태에서 보정 변수  $\beta$ 를 결정한다. 보정 변수  $\beta$ 가 결정되면 식 (1)의  $P_1$ 과 식 (2)의  $P_2$ 를 측정하여 측정 변수  $X$ 를 구하고, 식 (3)을 이용하여 광섬유 센서헤드 S의 전달함수  $H$ 를 구할 수 있다.

광원의 불규칙한 광세기 변화에 대한 제안한 광섬유 센서의 성능을 알아보기 위하여 식 (1)의 입력 광세기  $P_{in}$ 이  $P_{in} + \Delta P_{in}$ 으로 변화할 때 측정 변수  $X$ 와 보정 변수  $\beta$ 를 구한다. 입력 광세기가  $P_{in} + \Delta P_{in}$ 로 변화할 때 FBG<sub>1</sub>에서 반사된 광세기  $P_1'$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1' = (P_{in} + \Delta P_{in}) \cdot K_{C1-2} \cdot K_{fiber1}^2 \cdot R_1 \cdot K_{C2-3} \cdot K_{f-p} \quad (5)$$

이 때 FBG<sub>2</sub>에서 반사된 광세기  $P_2'$ 은 식 (6)과 같다.

$$P_2' = (P_{in} + \Delta P_{in}) \cdot K_{C1-2} \cdot K_{fiber1}^2 \cdot K_{FBG1}^2 \cdot K_{fiber2}^2 \cdot R_2 \cdot K_{C2-3} \cdot K_{f-p} \cdot H^2 \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 이용하여 입력 광세기가 변할 때 측정 변수  $X' = \frac{P_2'}{P_1'}$ 을 구하면 식 (3)과 동일하고, 또한 보정 변수  $\beta$ 도 식 (4)와 같음을 알 수 있다. 따라서 입력 광세기가  $P_{in} + \Delta P_{in}$ 로 변하여도 측정 변수  $X$ 와 보정 변수  $\beta$ 가 변화하지 않기 때문에 제안한 광세기 기반 광섬유 센서는 자기기준 특성을 가진다.

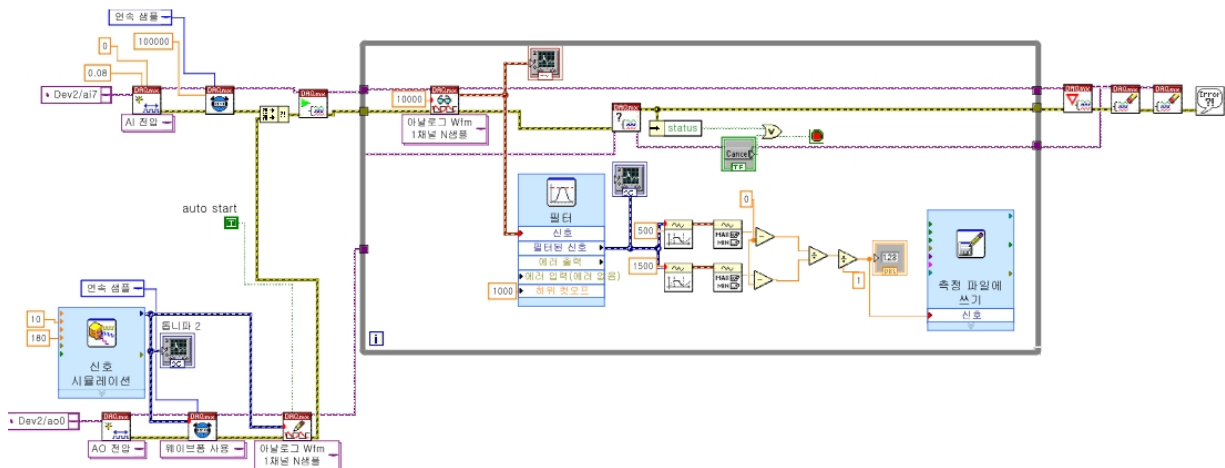


그림 2. 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구현을 위한 LabVIEW 프로그램  
Fig. 2. LabVIEW program for the proposed intensity based self-referencing fiber optic sensor.

제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서는 다음과 같은 세 가지 특성을 가진다. 첫째, 광세기 변화에 따른 자기기준 특성을 가지기 때문에 반사파장의 변화를 이용하는 FBG 센서 구조에서 필요한 기준 FBG가 필요하지 않고, 입력 광이 변화하여도 측정할 수 있다. 둘째, 제안한 광섬유 센서를 구현할 때 식 (4)와 같이 보정 변수  $\beta$ 가 사용하는 FBG<sub>1</sub>과 FBG<sub>2</sub>의 특성에 의하여 결정되기 때문에 임의의 규격을 가진 FBG를 사용할 수 있다. 셋째, 광세기 기반 광섬유 센서헤드의 구조를 측정량에 따라 다양하게 설계할 수 있기 때문에 민감도 및 측정범위를 조절할 수 있다는 장점을 가진다.

### III. 구현 및 측정

본 장에서는 제안한 광섬유 센서 구조를 구현하고, II장에서 이론적으로 제시한 광원에서 일어나는 불규칙한 광세기 변화가 측정결과에 미치는 영향과 FBG 특성 변화에 따른 제안한 광섬유 센서의 성능을 실험을 통하여 검증한다.

#### 1. 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구현

그림 1에서 제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서의 구현을 위한 광대역 광원의 출력파장은 1528~1603 nm, 출력 광세기는 21 dBm, 출력 광세기 안정도는 0.01 dB, 스펙트럼 광세기 안정도는 0.04 dB, 스펙트럼 평탄도는 1.95 dB이며, 광 서큘레이터의 동작범위는 1530 ~ 1570 nm이고 포트 ①에서 포트 ②로의 삽입 손실은 0.62 dB, 포트 ②에서 포트 ③으로의 삽입 손실은 0.49 dB이다. 가변 페브리-페로 필터의 동작범위는

1523~1567 nm이고, 바이어스 전압에 따른 통과되는 파장은 3.3~6.4 nm/V로 변하며 통과되는 파장의 FWHM은 0.12 nm이다.

광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 측정을 위한 LabVIEW 프로그램을 그림 2와 같이 구성하였다. 가변 페브리-페로 필터는 인가되는 바이어스 전압에 따라 특정한 파장의 광을 통과시키는 역할을 함으로 LabVIEW 프로그램을 통해 톱니파 형태의 바이어스 전압을 생성하여 DAQ 카드를 통해 가변 페브리-페로 필터에 인가하였다. FBG에서 반사되어 가변 페브리-페로 필터를 통과한 광은 photodiode(PD)를 통해 전기적 신호로 변환되어 DAQ 카드를 통해 LabVIEW 프로그램으로 입력된다. 측정은 10k samples/s의 속도로 수행되며, 1회 측정에 1k sample이 활용된다. 따라서 1초에 10회 측정이 가능하다.

PD와 DAQ 카드에서 발생하는 잡음을 감소시키기 위하여 차단주파수가 1 kHz인 LPF를 적용하였으며, FBG<sub>1</sub>과 FBG<sub>2</sub>에서 반사된 광세기  $P_1$ 과  $P_2$ 는 온도에 의한 FBG 반사파장의 변화를 고려하여 충분히 구별되도록 각각 분리하였다. 신호처리 과정은 각 FBG에서 반사된 광세기를 식 (3)에 적용하여 측정 변수  $X$ 를 구하고, 식 (4)의 보정 변수  $\beta$ 를 이용하여 광섬유 센서헤드 S의 전달함수를  $H$ 를 구한다.

#### 2. 기준 광섬유 광 감쇄기 구성

그림 1과 같이 제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구조에서 두 개의 FBG 사이에는 strain, 압력 또는 힘에 따라 광세기의 변화를 일으키는 광섬유 센서헤드 S가 필요하다. 제안한 구조의 성능을 알아보기 위하

여 양방향으로 동일한 광세기 변화를 일으키는 광섬유 광 감쇄기가 필요하나 상용화된 광섬유 광 감쇄기를 구하지 못하여 그림 3과 같은 광섬유 광 감쇄기를 구성하여 기준 광섬유 광세기 변화 소자로 이용하였다. 구성된 광섬유 광 감쇄기는 직경 20 mm의 원기둥 형태의 나사에 광섬유를 감아서 매크로 벤딩 광세기 손실을 이용하였다.

그림 3과 같이 구성된 광섬유 광 감쇄기에서 발생하는 광 감쇄 특성을 그림 4에 나타내었다. 그림 4의  $\circ$ 는 광섬유 광 감쇄기에서 일어난 광세기 감소를 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer; OSA)를 이용하여 측정된 결과이며 한 바퀴 당 약 0.746 dB의 광 감쇄 특성을 나타내었다. 이를 이용하여 그림 4의  $\bullet$ 으로 표시된 곡선과 같이 제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구조의 센서헤드 전달함수 기준 값( $H^2$ )을 구하였다. 제안한 광섬유 센서 성능을 파악하는 실험에서 그

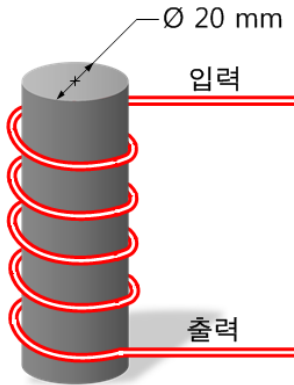


그림 3. 광섬유 매크로 벤딩 손실을 이용한 가변 광섬유 광 감쇄기 구조

Fig. 3. A schematic of variable optical attenuator using fiber macro-bending loss.

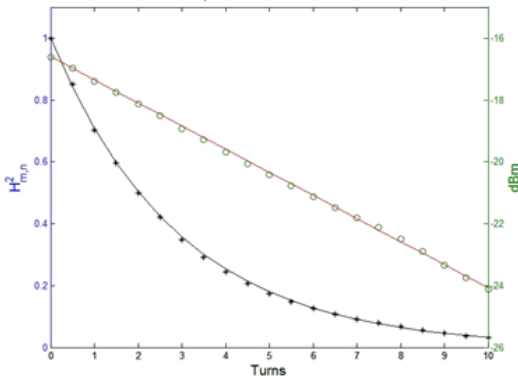


그림 4. 그림 3의 광섬유 광 감쇄기를 이용하여 측정된  $H^2$  특성

Fig. 4. The characteristic of the measured  $H^2$  using variable optical attenuator in Fig. 3.

림 4의 검은 실선으로 표현된 전달함수 기준 값( $H^2$ )을 기준으로 하여 측정결과와의 타당성을 결정한다.

3. 측정

제안한 광섬유 센서 구조가 광원 또는 구성 소자에서 일어나는 불규칙한 광세기 변화에 무관한 자기기준 특성을 가지는 것을 확인하기 위하여 그림 1의 광섬유 센서 구조에서 광대역 광원과 광 서클레이터 사이에 가변 광 감쇄기를 삽입하여 입력 광세기가 0 dB, 3 dB, 6 dB 감쇄하는 세 가지 경우에 대하여 그림 3의 광 감쇄기의 감은 수에 따른  $H^2$  측정결과를 그림 5에 나타내었다. 측정에 사용된 FBG의 특성과 식 (3)과 식 (4)에 의해 계산된  $\beta$  값은 표 1의 첫 번째 경우(Case 1)에 나타내었다. 그림 5는 광원 또는 구성 소자에서 광세기 변화가 일어나더라도 측정결과가 그림 4에 보인 광섬유 센서 구조의 센서헤드 전달함수 기준 값( $H^2$ )에 잘 접근함을 보인다. 이는 제안하는 시스템이 자기기준 특성을

표 1. 실험에 사용된 FBG 특성

Table 1. Characteristics of FBGs used in the experiment.

Cases	FBG <sub>1</sub>			FBG <sub>2</sub>			$\beta$
	$\lambda_c$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$R_1$ (%)	$\lambda_c$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$R_2$ (%)	
Case 1	1546.09	0.49	79.54	1548.04	0.48	77.09	0.910
Case 2	1556.69	0.18	80.00	1546.09	0.49	79.54	0.762
Case 3	1548.04	0.48	77.09	1550.42	1.54	94.65	0.878

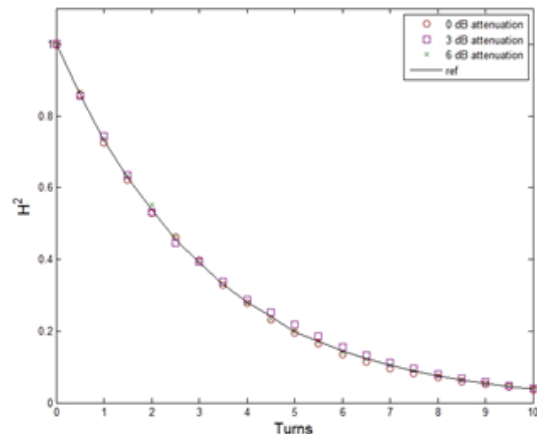


그림 5. 입력 광원이 0 dB, 3 dB, 6 dB 감쇄할 때 그림 3의 광 감쇄기의 감은 수에 따른  $H^2$  측정결과

Fig. 5. The measured  $H^2$  versus the number of winding turns of optical attenuator in Fig. 3 for three attenuation cases of input optical power (0 dB, 3 dB, 6 dB).

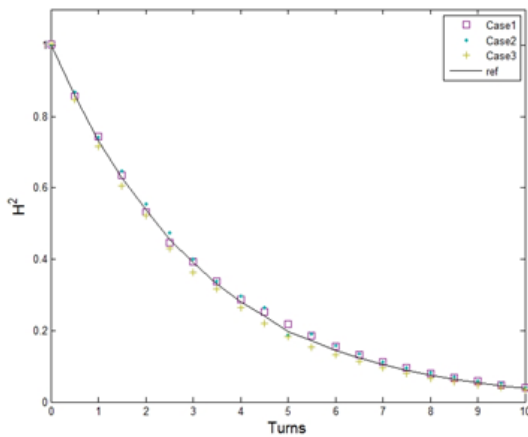


그림 6. 표 1에 나타낸 세 가지 FBG 특성이 주어질 때 그림 3의 광 감쇄기의 감은 수에 따른  $H^2$  측정결과

Fig. 6. The measured  $H^2$  versus the number of winding turns of optical attenuator in Fig. 3 for three cases in Table 1.

가지는 것을 나타낸다.

FBG 특성 변화에 따른 제안한 광섬유 센서 구조의 성능을 확인하기 위하여 그림 1의 시스템에 표 1의 세 가지 특성이 다른 FBG 쌍을 사용한 측정결과( $H^2$ )를 그림 6에 나타내었다. 측정에 사용된 FBG의 특성과 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구한  $\beta$ 는 표 1에 나타내었다. 그림 6은 FBG 특성이 변하더라도 그림 4에 보인 광섬유 센서 구조의 센서헤드 전달함수 기준 값 ( $H^2$ )에 잘 접근함을 보인다. 다양한 특성의 FBG를 사용하더라도 초기에 보정 변수  $\beta$  값만 결정하면 동일한 측정결과를 얻을 수 있음을 보이는 바 사용하는 FBG 특성을 나타내는 규격이 엄격하지 않아도 됨을 보여준다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구조를 제안하고 동작원리를 바탕으로 이론적인 해석을 통하여 측정 변수와 보정 변수를 제시하였다. 제안된 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서 구조는 광대역 광원의 출력 광세기가 0 dB, 3 dB, 6 dB 감소해도 측정결과에 영향을 미치지 않는 자기기준 특성을 가지고 있으며, 측정에 사용되는 FBG의 반사중심파장( $\lambda_c$ ), FWHM( $\Delta\lambda$ ), 반사도가 달라도  $\beta$  값만 조절하면 일정한 측정결과를 얻을 수 있음을 보였다. 이는 제안한 광세기 기반 자기기준 광섬유 센서가 광원의 광세기 변화

에 따른 자기기준 특성을 가지고, 임의의 규격을 가진 FBG를 사용할 수 있으며, 광세기 기반 광섬유 센서헤드의 구조를 측정량에 따라 다양하게 설계함으로써 민감도 및 측정범위 등을 조절할 수 있다는 장점을 가진다. 향후 제안한 광섬유 센서 구조의 다중화 방식을 설계하고 구현할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] José Miguel López-Higuera, Luis Rodríguez Cobo, Antonio Quintela Incera, and Adolfo Cobo, "Fiber optic sensors in structural health monitoring," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 587-608, Feb. 2011.
- [2] S. Yin, P. Ruffin, and F. Yu, Fiber Optic Sensors, 2nd Ed., *CRC Press Taylor & Francis Group*, pp. 1-14, 2008.
- [3] 이호준, "다중 광섬유 브래그 격자 센서를 적용한 저속용 자동계측 시스템," *전자공학회논문지*, 제41권 SD편, 제1호, 21-27쪽, 2004년 1월
- [4] 황진경, 이종형, 안진수, 김길환, 이상배, 이경식, "중공 광섬유를 이용한 광섬유 간섭계 스트레인 센서," *대한전자공학회 학술대회*, 제32권, 제2호, 163-164쪽, 서울대학교, 한국, 2009년 11월
- [5] R. A. Perez-Herrera, D. A. Pereira, O. Frazão, J. M. Castro Ferreira, J. L. Santos, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. M. Baptista, and M. Lopez-Amo, "Optimization of the frequency-modulated continuous wave technique for referencing and multiplexing intensity-based fiber optic sensors," *Measurement*, vol. 44, no. 1, pp. 230-237, Jan. 2011.
- [6] W. B. Spillman and J. R. Lord, "Self-referencing multiplexing technique for fiber-optic intensity sensors," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 5, no. 7, pp. 865-869, July 1987.
- [7] C. Vázquez, J. Montalvo, and P.C. Lallana, "Radio-frequency ring resonators for self-referencing fibre-optic intensity sensors," *Opt. Eng. Lett.*, vol. 44, pp. 1-2, 2005.
- [8] C. Vázquez, J. Montalvo, D. S. Montero, and J. M. S. Pena, "Self-referencing fiber-optic intensity sensors using ring resonators and fiber bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 22, pp. 2374-2376, Nov. 2006.
- [9] J. Montalvo, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, C. Vázquez, and J. M. Baptista, "Electrical FIR filter with optical coefficients for self-referencing WDM intensity sensors," *IEEE Photon. Technol.*

*Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 45-47, Jan. 2008.

[10] Julio Montalvo, Orlando Frazão, José Luis Santos, Carmen Vázquez, and José Manuel Baptista, "Radio-frequency self-referencing technique with enhanced sensitivity for coarse WDM fiber optic intensity sensors," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 5, pp. 475-482, Jan. 2008.

— 저 자 소 개 —



최 상 진(학생회원)  
 2011년 전북대학교 전기공학과  
 학사 졸업.  
 2011년~현재 전북대학교 대학원  
 전기공학과 석박사 통합  
 과정  
 <주관심분야 : 광섬유 센서 응용>



반 재 경(평생회원)-교신저자  
 1980년 연세대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1982년 연세대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 1987년 연세대학교 전자공학과  
 박사 졸업.  
 1987년~현재 전북대학교 전기공학과 교수  
 2011년~현재 전북대학교 스마트그리드 연구센터  
 센터장  
 <주관심분야 : 광섬유 센서 응용, WSN을 이용한  
 구조물 건전성 모니터링 기술 등>