

# Fabry-Perot 필터를 이용한 가변 광섬유격자의 반사파장 자동조절

중신회원 반재경\*, 준회원 김지도\*, 전금수\*\*

## An Automatic Control of Reflective Wavelength of TFBG Using Fabry-Perot Filter

Jae Kyung Pan\* *Lifelong Member*, Ji Do Kim\*, Keum Soo Jeon\*\* *Associate Members*

### 요 약

본 논문에서는 광섬유격자 반사파장의 중심값을 자동으로 조절하기 위한 시스템을 제안하고 구현한 내용을 기술한다. 제안한 시스템은 Fabry-Perot 필터와 컴퓨터에 연결된 스텝 모터로 제어되는 외팔보 구조로 구성된다. 외팔보의 두께 변화와 밀대의 미는 위치에 따른 주어진 광섬유격자 반사파장의 스펙트럼 모양과 중심값의 변화를 살펴본다. 제안한 시스템은 광섬유격자에 압축 또는 인장을 가함으로써 0.01 nm 분해능으로 광섬유격자 반사파장의 중심값을 제어할 수 있다. 본 시스템은 광섬유격자 주위 환경 조건의 변화에도 원하는 반사파장을 유지하는 특성을 가진다.

**Key Words** : Fabry-Perot filter, cantilever, fiber Bragg grating(FBG), compression/extension

### ABSTRACT

In this paper, we propose and describe our implementation of an automatic control system for the center wavelength of a fiber Bragg grating. The proposed system consists of a Fabry-Perot filter and cantilever structure controlled by a step motor interfacing computer. We consider the change of the center wavelength and the reflective spectrum shape for a given FBG according to the translation distance of the push stick and the cantilever thickness variation. The proposed system can control the center wavelength of a FBG with a resolution of 0.01 nm by applying compression or extension to the FBG. The proposed system has characteristics that keep the desired wavelength of the FBG with a variation of environmental conditions.

### 1. 서 론

광섬유격자(Fiber Bragg Grating; FBG)는 광섬유 코어 내 굴절률의 변화주기에 따라 특정한 파장의 빛을 선택적으로 반사시키거나 통과시키는 특성을 가지고 있는 소자로서 가볍고 전력소모가 작으며 전기기계적 면역성과 온도 및 기계적 뒤틀림 등에 매우 민감하게 작용한다<sup>[1]</sup>. 이러한 특성으로 인하여

FBG는 광섬유센서 및 광통신 분야 등에서 매우 유용하게 이용되고 있다. 광섬유센서를 이용한 상시 감시 시스템에는 대형 구조물, 댐, 교량 등의 안전 진단 시스템, 암반이나 콘크리트 벽면의 균열부 변위 측정, 비행기, 건축물에 발생하는 유체·유발 진동 여부 측정 시스템 등이 있다<sup>[2]</sup>. 또한 광통신 분야에서는 주로 WDM기술 중 광신호 분배기 소자와 OADM(Optical Add-Drop Multiplexer)에서 특정한

※ 이 논문은 2007년도 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2007-521-D00339)

\* 전북대학교 전기전자컴퓨터공학부 (pan@chonbuk.ac.kr, silvajjang@chonbuk.ac.kr), \*\* 두산전자 (keumsoo@doosan.com)

논문번호 : #KICS2008-09-419, 접수일자 : 2008년 9월 24일, 최종논문접수일자: 2009년 3월 13일

파장의 신호를 전송망의 중간에서 분기/결합하는 시스템에서 필수적인 소자이다<sup>3)</sup>. 응용분야에 따라서는 온도변화와 같은 주변 환경의 변화에도 반사특성이 안정된 FBG가 필요한 반면 DWDM 분야의 신호라우팅, OADM, 그리고 분산보상 등과 같은 분야에서는 FBG의 반사파장을 변화시킬 수 있는 가변 광섬유격자(Tunable Fiber Bragg Grating; TFBG)가 요구된다.

본 논문에서 다루는 TFBG는 FBG가 인장/압축, 온도, 비틀림, 자기장 등에 의해 반사파장이 변하는 성질을 이용하여 원하는 반사파장을 얻는 것이다. TFBG의 구현은 FBG 반사파장을 변화시키는 요인 중에서 인장/압축과 온도 변화에 의한 특성 변화를 주로 이용한다. 온도에 의한 열적변형 방법은 구조가 간단하고 가격 효율이 좋은 장점이 있는 반면 반사파장 변화가 작고 변화하는데 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다<sup>3)</sup>. 인장/압축을 이용한 방법은 큰 부피 및 물리적인 움직임으로 인하여 광섬유 재료 파손 위험이 있지만 튜닝 범위가 넓고 제어가 편하여 TFBG 방식 중에서 많이 사용되고 있다<sup>4)</sup>. 인장/압축을 이용한 물리적인 방법은 로테이션 스테이지를 이용한 방법<sup>4)</sup>, FBG의 한쪽은 고정하고 반대 방향에서 물러나 지지대 등을 움직여 인장/압축하는 외팔보 방법<sup>5)</sup>과 추방향 인장/압축 방법<sup>6)</sup> 등이 있다.

본 논문에서는 TFBG 반사파장의 중심값을 원하는 값으로 자동조절하기 위한 광섬유격자 반사파장 자동조절 시스템을 제안하고 구현한다. 제안한 시스템은 Fabry-Perot (F-P) 필터 및 구동회로, 외팔보 구조물, 외팔보 구조물을 제어하는 컴퓨터 등으로

구성된다. 스텝모터로 제어하는 외팔보 구조물로 FBG를 인장/압축하고, FBG 반사파장 중심값 자동조절 프로그램을 구현하여 원하는 반사파장으로 조절하도록 하였다. 이러한 소자는 DWDM 광통신 시스템의 신호 라우팅이나 FBG를 포함하는 OADM 구조 등에 쓰일 수 있다.

본 논문은 II절에서 FBG 반사파장 자동조절 시스템을 제안하고, III절에서 스텝모터를 이용한 인장/압축 외팔보 구조를 소개하고, IV절에서 외팔보 곡률에 따른 반사파장 변화를 나타내며, V절에서 FBG 반사파장 자동조절을 위한 프로그램과 실험결과를 보인다. 끝으로 VI절에서 결론을 맺는다.

## II. 제안하는 FBG 반사파장 자동조절 시스템

본 논문에서 제안하는 FBG 반사파장 자동조절 시스템은 그림 1과 같이 광원, 기준 FBG, F-P 필터 및 구동회로, 스텝모터로 제어되는 외팔보 구조물, 측정 신호를 입력하고 스텝모터를 제어하기 위한 컴퓨터 등으로 구성된다. 광대역광원(Broadband Source; BBS)에서 나온 광이 3-port 광 서큘레이터를 거쳐 두 개의 기준 FBG에서 반사파장에 해당하는 광을 반사하고 나머지 광은 인장/압축을 통하여 반사파장을 변화시킬 수 있는 TFBG에 도달하여 여기에 해당하는 파장을 반사하여 광 서큘레이터의 port 3로 나온다. port 3으로 나온 광은 흡니파 신호로 구동되는 F-P 필터를 거쳐 광검출기로 들어가서 전기적인 신호로 바뀐다. 이와 같이 검출된 신호는 DAQ(Data Acquisition) 카드를 통해 컴퓨터로 입력하는데 입

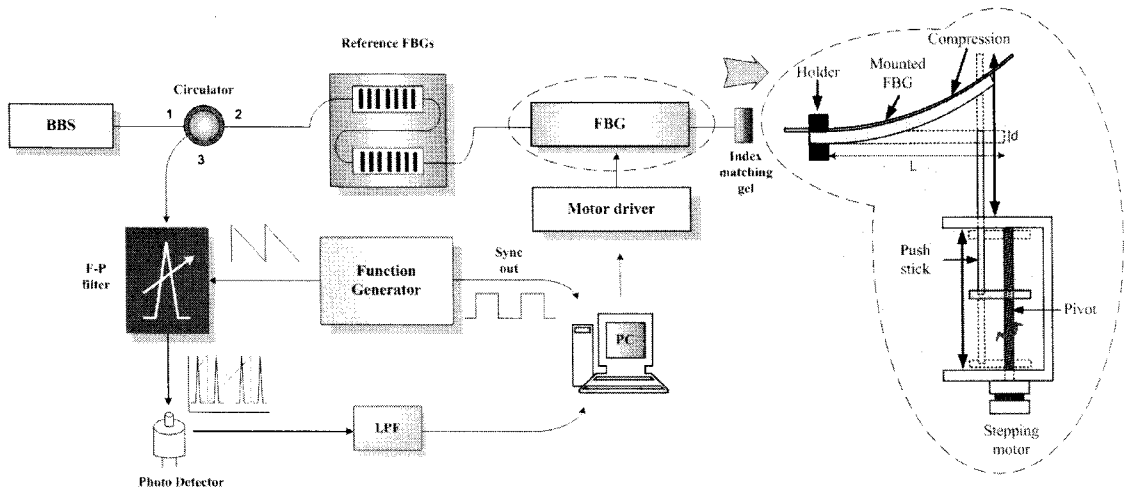
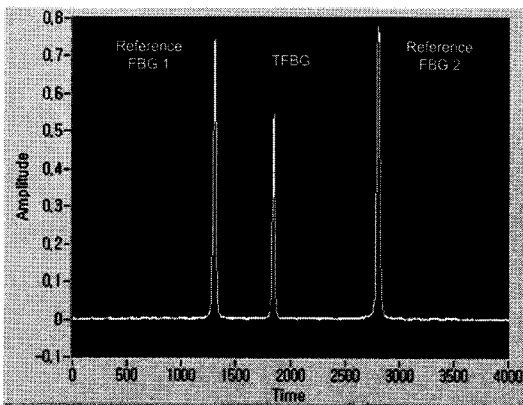


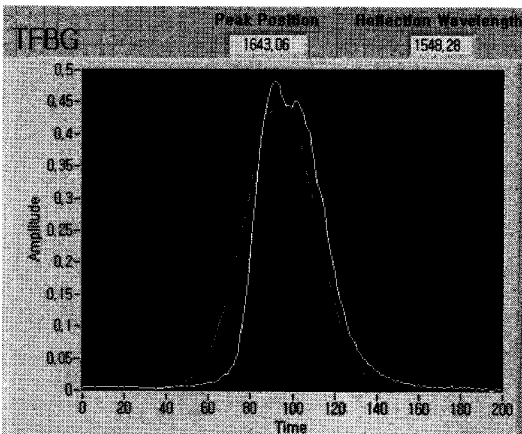
그림 1. 제안하는 FBG 반사파장 자동조절 시스템 구조도

력된 신호를 그림 2 (a)에 나타내었다. 그림 2 (a)의 왼쪽과 오른쪽의 신호는 각각 여기에서 이용한 두 기준 FBG의 반사파장값 1543.55 nm와 1553.55 nm를 나타낸다. 가운데 있는 신호가 측정하고자 하는 TFBG의 반사파장을 보여준다. 기준 FBG의 반사파장 값에 따라 F-P 필터를 구동하는 톱니과의 모양을 결정한다. 그림 2 (a)의 기준 FBG 반사파장값을 기준으로 하여 측정된 TFBG 반사파장값을 계산할 수 있다. 측정된 FBG 반사파장 중심값을 읽기 위하여 여기에서는 그림 2 (b)와 같은 가우시안 커브 피팅을 이용하였다. 이러한 측정 절차는 V절의 반사파장 자동조절 프로그램을 구현하는데 적용된다.

본 논문에서 사용한 광대역광원은 Agilent 83438A 제품으로 기준 FBG 반사파장을 커버할 수 있는  $1550 \pm 20$  nm에서 피크 파장값을 가지며 3 dB 대역폭이 52 nm이다. 사용한 F-P 필터는 테라링크사의



(a) 두 기준 FBG를 포함한 검출 신호



(b) 측정된 TFBG 반사파장의 가우시안 커브피팅

그림 2. F-P 필터를 이용하여 읽은 FBG 반사파장 중심값

TFM-C 모델로써 MEMS 기술로 제작되어 기존의 제품보다 환경적인 영향에 따른 불규칙적인 변화가 적다. F-P 필터 사양은 구동전압 0~10 V에서 패스 밴드의 파장이 선형적으로 변하고 C-밴드(1567 nm~1523 nm)의 파장범위를 가진다. 또한 FSR(Free Spectral Range)이 91.4 nm, 광섬유 결합손실이 3.5 dB 이하이다.

### III. 스텝모터를 이용한 인장/압축 외팔보 구조

본 논문에서 설계/제작한 스텝모터로 정밀한 인장/압축을 가할 수 있는 외팔보 구조를 그림 3에 나타내었다. FBG는 탄성력 및 복원력이 비교적 좋은 강철 판에 고정시켜 스텝모터가 회전할 때 구조물의 밀대를 움직여 인장/압축이 가해지도록 하였다. FBG에 원하는 인장/압축을 가하기 위해 스텝모터의 회전수와 회전방향을 결정하여 Labview 프로그램을 실행한다. Labview 프로그램은 DAQ 카드(NI사의 PCI-6221)와 연결된 DAQ 커넥터(BNC 2120)를 이용하여 스텝모터를 제어한다. DAQ 커넥터의 DIO(Digital I/O) 포트에 방향과 회전수에 관계된 부분과 스텝모터의 모터 드라이브를 연결시키면 원하는 펄스 수만큼 스텝모터를 제어하여 정회전·역회전 하게 된다. 이 때 회전축에 연결된 밀대가 회전 운동을 왕복 운동으로 바꾸어 FBG를 인장/압축하게 된다.

실험에 사용한 스텝모터는 오리엔탈 PK243-01A로 기본스텝은 1.8°, 최대정지토크는 1.6 kg/cm, 정격전류 0.95 A, 코일저항은 4.2 Ω이다. 스텝모터가

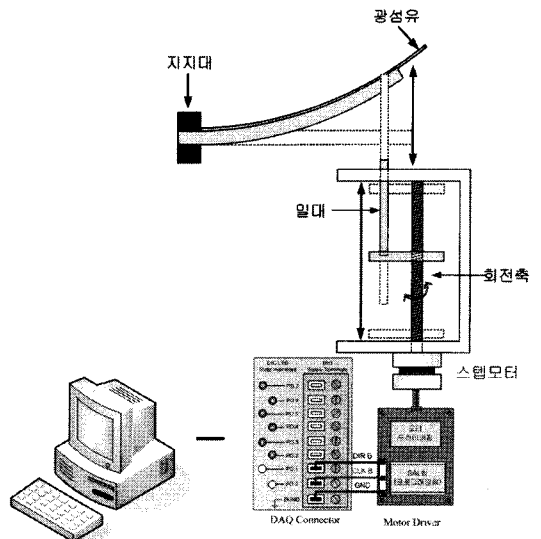


그림 3. 스텝모터를 이용하여 인장/압축을 가하는 외팔보 구조

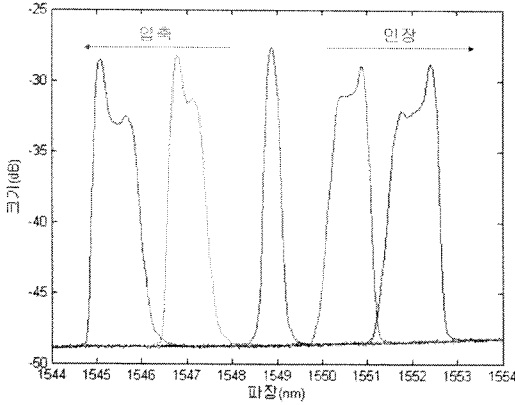


그림 4. 인장/압축에 따른 FBG 반사파형 변화

1회전할 때 밀대의 회전축은 1피치 만큼 이동하고 실험에 쓰인 나사는 1피치가 1.5 mm이다.

스텝모터의 회전수를 계산한 후 TFBG에 정밀한 인장/압축을 가해주면 TFBG의 반사파장을 정확히 측정할 수 있다. DAQ 카드는 F-P 필터를 이용하여 기준 FBG와 TFBG 반사파장을 아날로그 I/O port로 읽으면서, 동시에 DIO 포트에 스텝모터를 제어한다. 실험에 사용한 FBG는 반사파장의 중심값이 1548.86 nm 이며 스텝모터를 이용하여 외팔보에 인장/압축을 가했을 때 FBG 반사파장의 변화를 그림 4에 나타내었다. FBG의 반사파장은 인장/압축에 따라 반사파장의 중심값 및 스펙트럼의 모양이 변화함을 볼 수 있다.

#### IV. 외팔보 곡률에 따른 반사파장 변화

그림 3의 외팔보 구조물에서 FBG가 부착된 외팔보 부분을 그림 5에 나타내었다. 밀대가 이동한 거리와 외팔보가 밀대에 의하여 균일하게 구부러진다고 가정한다. 인장/압축이 가해지지 않은 외팔보의 밀대위치를 X축에, 밀대가 미는 방향을 Y축에 대응시켜 관계식을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$X^2 + \left(Y - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (1)$$

여기에서 X는 외팔보의 고정된 위치로부터 밀대까지의 거리, Y는 밀대로 밀거나 당긴 거리, x는 곡률,  $\frac{1}{x}$ 은 곡률반경이다. 식 (1)의 X를 10 cm까지, Y를 4 cm까지 변화시키면서 그래프로 나타내면 그림 6과 같으며, 이는 밀대의 위치와 밀고 당

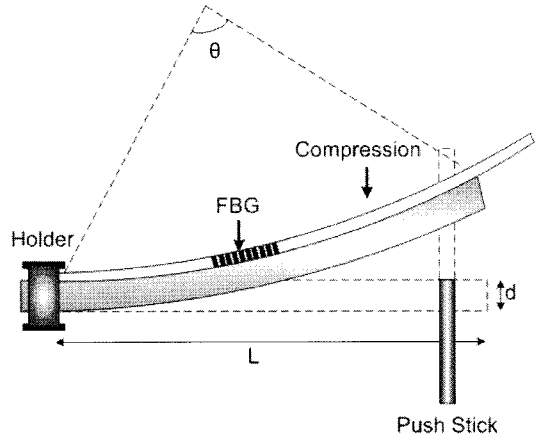


그림 5. 외팔보를 이용한 FBG 인장/압축 개략도

긴 거리에 따른 곡률을 보여준다.

그림 5의 외팔보를 이용한 인장/압축 구조에서 발생하는 스트레인은 식 (2)와 같다<sup>[7]</sup>.

$$\epsilon_d = \mp \frac{d \cdot \theta}{L}, L \neq 0 \quad (2)$$

여기에서  $\epsilon_d$ 는 인장값이고,  $\mp$ 는 인장/압축, L은 밀대에서 미는 위치, d는 외팔보 두께,  $\theta$ 는 외팔보의 휘어진 정도를 나타내며  $xL$ 로 주어진다. 외팔보 두께에 따른 FBG 반사파장 중심값 변화량  $\Delta\lambda$ 는 식 (3)으로 주어진다.

$$\Delta\lambda = (1 - \rho_e) \cdot \epsilon_d \cdot \lambda_B \quad (3)$$

여기에서  $\lambda_B$ 는 인장/압축이 가해지지 않았을 때 Bragg 파장, 광탄성계수  $\rho_e = 0.22$  이다. 식 (2)를

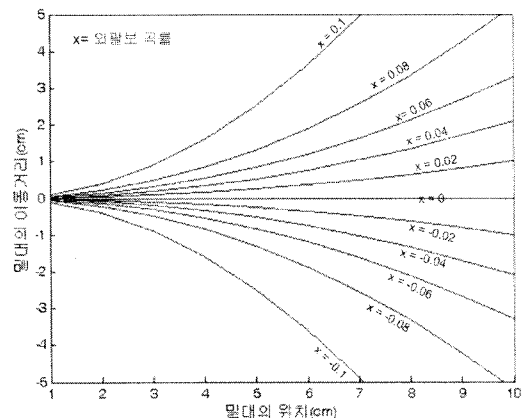


그림 6. 밀대의 위치 및 이동거리에 따른 곡률값 변화

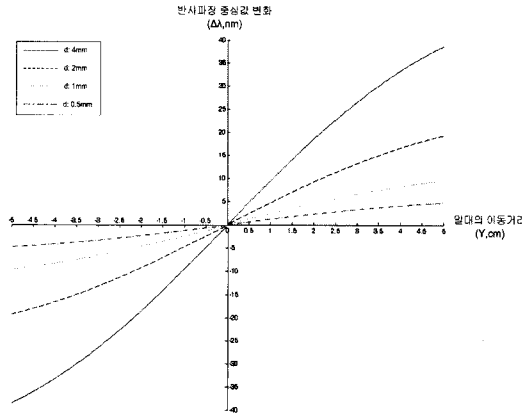


그림 7. 외팔보 두께와 밀대의 이동거리에 따른 FBG 반사파장 중심값 변화

식 (3)에 대입하면 식 (4)와 같다.

$$\Delta\lambda = \mp (1 - \rho_e) \cdot x \cdot d \cdot \lambda_B \quad (4)$$

그림 5에서 밀대의 미는 위치 X를 10 cm로 하고 식 (1)을 정리하여 식 (4)에 대입하면 식 (5)와 같이 밀대의 이동거리(Y)에 따른  $\Delta\lambda$ 를 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda(nm) = \mp \frac{1.56 Y(nm) \cdot d(nm) \cdot \lambda_B(nm)}{10^{16} + Y^2(nm)} \quad (5)$$

식 (5)에  $\lambda_B = 1550nm$ 로 하고 외팔보 두께를 변화시키면서 밀대의 이동거리에 따른 FBG 반사파장 중심값 변화를 그리면 그림 7과 같다. 실험을 통하여 두께에 따른 파장변화를 알아보기 위하여 두께가 1 mm, 6.7 mm, 11.2 mm인 외팔보를 제작하였다. 제작한 외팔보 각각에 대하여 L=9.6 cm 인 곳을 밀대로 밀어서 이동한 거리에 따른 FBG 반사파장의 중심값을 측정된 결과 그림 7에 보인 변화와 비슷한 경향을 보였다. 두께에 따른 파장변화를 측정된 결과 외팔보 두께가 두꺼워질수록 반사파장의 중심값 변화가 크고 반사파장 모양의 왜곡이 커짐을 확인하였다.

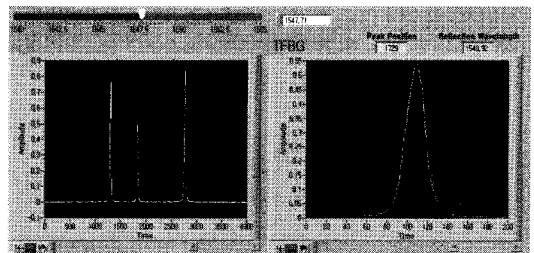
### V. 반사파장 자동조절 프로그램

본 논문에서 제안하는 시스템은 F-P 필터를 이용하여 FBG 반사파장 중심값을 읽고 스텝모터로 외팔보를 인장 또는 압축하여 원하는 FBG 반사파장

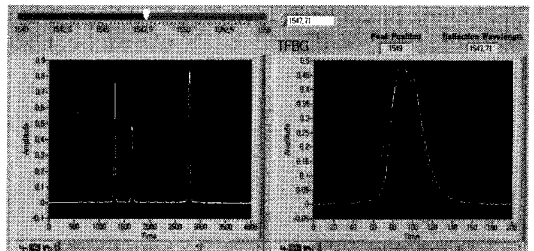
중심값을 자동으로 찾아간다. 이러한 과정은 FBG의 반사파장을 F-P 필터를 이용하여 시간축에서 실시간으로 보여주는 프로그램과 외팔보를 인장 또는 압축하기 위한 스텝모터 제어 프로그램으로 구성된다.

그림 8은 Labview 프로그램을 이용하여 F-P 필터로 읽은 FBG의 반사파장을 시간축에서 실시간으로 보여주는 front panel이다. 그림 8(a)는 사용자 인터페이스 부분으로 FBG 반사파장 자동조절 프로그램이 동작하기 전을 보여주고, 슬라이드 바 또는 직접입력을 통하여 원하는 FBG 반사파장 중심값을 입력한다. 톱니바퀴 신호로 구동되는 F-P 필터를 이용하여 FBG의 반사파장을 시간축으로 읽고, 읽은 신호의 중심을 구하기 위하여 신호에 가우시안 커브 피팅을 적용한다. 이와 같이 얻은 FBG 반사파장 중심값을 입력한 반사파장 중심값과 비교하면서 F-P 필터로 측정된 반사파장 중심값이 같아질 때까지 외팔보를 구동하는 스텝모터의 밀대를 이용하여 외팔보에 인장 또는 압축을 가한다. 그림 8(a)와 (b)는 원하는 FBG의 반사파장 중심값을 1547.71 nm로 설정하고 본 논문에서 제안한 반사파장 자동조절 프로그램이 동작하기 전과 후를 보여준다.

그림 9는 반사파장 자동조절 프로그램 흐름도를 나타낸다. 입력된 TFBG의 반사파장 중심값은 다층 시퀀스 구조를 이용하여 시간축 값을 파장축 값으로 변환한다. 양쪽의 기준 FBG(1543.55 nm, 1553.55 nm)



(a)



(b)

그림 8. FBG 반사파장 자동조절 시스템 동작 전과 동작 후 (a) 동작 전 (b) 동작 후

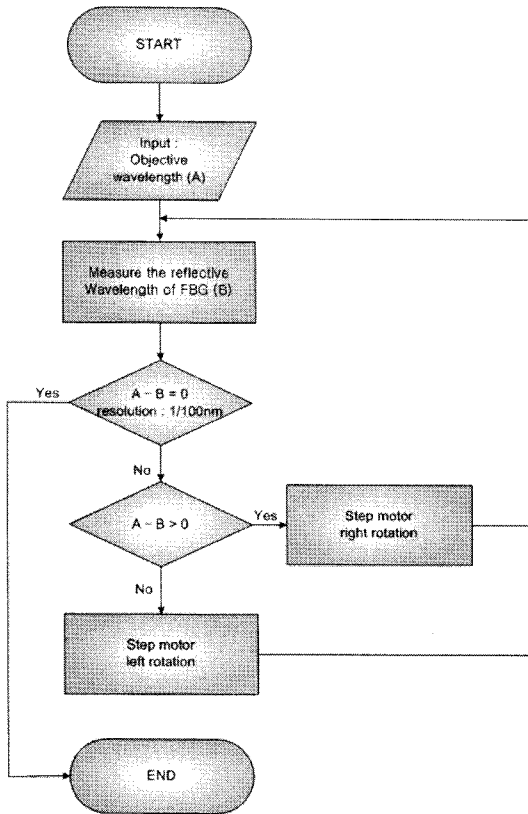


그림 9. FBG 반사파장 자동조절 프로그램 흐름도

간격은 10 nm이다. 측정되는 FBG의 반사파장 중심값은 10 nm를 10 개로 구분한 공간 중에서 하나에 위치하게 된다. 위치한 파장값 구간에서 case문을 이용하여 선택한 후 다시 이 값을 10 개로 나누어 위치를 찾으면 1/10 nm까지 측정할 수 있다. 1/10 nm까지 찾은 파장값에서 다시 10개로 나누어 찾으면 1/100 nm까지 찾는다. 이 측정값과 원하는 목표값을 비교하여 두 값이 같다면 프로그램은 원하는 FBG 반사파장 중심값을 찾은 것이다. 하지만 같지 않다면 파장측값과 목표값을 비교하여 측정값(파장측값)이 작으면 스텝모터를 왼쪽으로 회전시켜 FBG를 인장하고, 측정값이 크면 스텝모터를 오른쪽으로 회전시켜 FBG를 압축한다. 연속적으로 인장 또는 압축한 후 목표값과 비교해 값이 같아지면 프로그램은 정상적으로 원하는 FBG 반사파장 중심값을 찾은 것이다.

제안한 TFBG 반사파장 자동조절 시스템은 읽는 과정에서 사용한 기준 FBG의 반사파장 변화, F-P 필터 및 튜브파를 발생하는 신호 발생기 등에서 오차가 발생할 수 있다. F-P 필터를 이용하여 광섬유

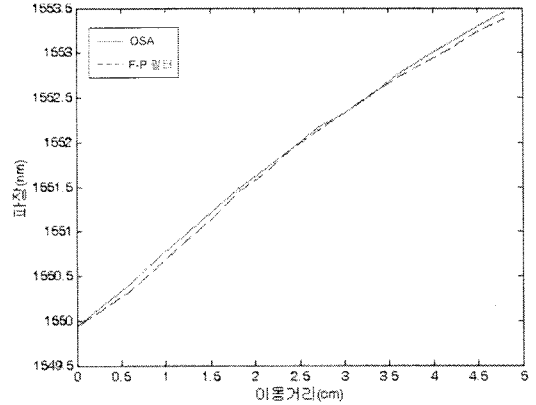


그림 10. 외팔보 인장에 따른 FBG 반사파장 측정비교 (OSA 와 F-P 필터)

반사파장을 측정할 때 생기는 오차를 알아보기 위하여 여기에서 구현한 시스템으로 측정된 피크 파장값과 광스펙트럼 분석기로 측정된 피크 파장값을 비교한다. 측정대상은 본 실험실에 준비된 10개의 FBG에 대하여 OSA로 1번 측정하고, F-P 필터를 이용하여 5번을 측정한다. F-P 필터로 측정시 측정 변동폭은 최대 0.03 nm이고 OSA로 측정한 결과와 비교할 때 최대오차는 0.09 nm를 보였다.

본 논문에서 제안한 시스템에 적용했을 때 F-P 필터 측정오차를 알아보기 위하여, 외팔보 두께가 1 mm인 FBG를 인장하면서 F-P필터로 측정된 값과 OSA로 측정된 값을 그림 10에 나타내었다. F-P필터로 측정된 값과 OSA로 측정된 값은 매우 비슷함을 알 수 있고 최대오차는 0.08 nm 정도이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 TFBG 반사파장의 중심값을 원하는 값으로 자동조절하기 위한 반사파장 자동조절 시스템을 제안하고 구현하였다. 제안한 시스템은 F-P 필터 및 구동회로, 외팔보 구조물, 외팔보 구조물을 제어하는 컴퓨터 등으로 구성된다. 이 시스템은 스텝모터로 제어하는 외팔보 구조물로 FBG를 인장 또는 압축하고, FBG 반사파장 중심값 자동조절 프로그램을 구현하여 자동으로 원하는 반사파장으로 조절되도록 하였으며, 실험 결과 원하는 FBG 반사파장으로 잘 조절됨을 확인하였다.

제안하는 시스템은 스텝모터를 이용한 외팔보 구조물과 F-P 필터를 이용하는 반사파장 자동조절 프로그램에서 오차가 발생할 수 있다. 외팔보 구조물에서 발생하는 오차는 구조물에 사용하는 나사의

피치값과 기계적인 오차에 따라 다르게 나타난다. 또한 F-P 필터를 이용하여 반사파장의 중심값을 읽는 과정에서 생기는 최대 측정오차는 0.08 nm이고, 반사파장 자동조절 프로그램의 분해능은 0.01 nm이다. 또한 FBG를 부착한 외팔보의 두께와 밀대의 위치에 따른 FBG 반사파장 중심값의 변화를 구하고, 실험을 통하여 외팔보 두께가 두꺼워질수록 반사파장 중심값 변화가 크지만 반사파장 모양의 왜곡이 심함을 확인하였다.

참고 문헌

[1] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings : Fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Artech House, Inc., 1999.

[2] A.D. Kersey, M.A. Davis, "Fiber Grating Sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1462, Aug. 1997.

[3] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, 1999.

[4] Y. W. Song, D. Starodubov, Z. Pan, Y.Xie, A. E. Willner, and J. Feinberg, "Tunable WDM dispersion compensation with fixed bandwidth and fixed passband center wavelength using a uniform FBG," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 8, pp. 1193-1195, Aug. 2002.

[5] T. Imai, T. Komukai, and M. Nakazawa, "Dispersion tuning of a linearly chirped fiber Bragg grating without a center wavelength shift by applying a strain gradient," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 845-847, June 1998.

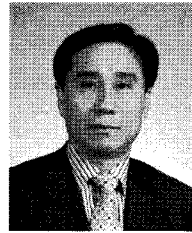
[6] N. Mohammad, W. Szyszkowski, W. J. Zhang, E. I. Haddad, W. Jamroz, and R. Kruzelecky, "Analysis and development of a tunable fiber Bragg grating filter based on axial tension/

compression," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 8, pp. 2001-2013, Aug. 2004.

[7] C. S. Goh, M. R. Mokhtar, S. A. Butler, S. Y. Set, and K. Kikuchi, "Wavelength tuning of fiber Bragg gratings over 90 nm using a simple tuning package," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 557-559, Apr. 2003.

반재경 (Jae Kyung Pan)

중신회원



1980년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업  
 1982년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
 1987년 8월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)  
 1987년 5월~현재 전북대학교 전

기전자컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 실내무선광통신, 광통신 소자 및 시스템

김지도 (Ji Do Kim)

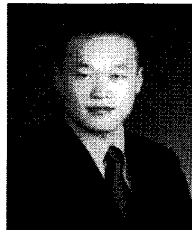
준회원



2006년 2월 전주대학교 정보시스템과 졸업  
 2008년 8월 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
 <관심분야> 광통신 소자 및 시스템

전금수 (Keum Soo Jeon)

준회원



1995년 2월 전북대학교 전기공학과 졸업  
 1997년 2월 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
 2004년 2월 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)  
 현재 두산전자 선임연구원

<관심분야> LED 패키지, 광 PCB