

# 도파로 어레이 격자를 이용한 광섬유 브래그 스트레인 센서의 반사파장 신호 복원 기술

서준규 · 김경조 · 오민철<sup>†</sup>

부산대학교 전자공학과 나노바이오광소자연구실  
Ⓣ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

이상민 · 김영제 · 김명현

부산대학교 조선해양공학과 선체용접강도실험실  
Ⓣ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2007년 11월 9일 받음, 2008년 2월 4일 수정본 받음)

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: FBG)를 이용한 스트레인 센서는 출력 값으로 브래그 반사 파장의 변화를 제공하게 된다. 본 논문에서는 브래그 격자 스트레인 센서에서 출력되는 빛을 도파로 어레이 격자(arrayed waveguide grating: AWG)에 입력시켜서 파장의 변화를 측정하는 방법을 제안한다. FBG에 스트레인이 가해지게 되면 브래그 반사 파장이 이동하게 되어 AWG를 지나서 출력 되는 채널별 광 파워가 변하게 되며, 이 값들의 조합으로 구해지는 centroid 값을 계산하면 브래그 반사 파장과 인가된 스트레인 값을 얻을 수 있다. 브래그 격자의 반사 스펙트럼의 대역폭이 centroid 값에 미치는 영향을 고려하여 3-dB 대역폭이 5.4 nm인 chirped FBG를 사용하였으며, 저항 측정방식의 기존 스트레인 센서와 비교하여 오차범위가 2% 이내인 결과를 확인 하였다. FBG 센서를 외팔보에 부착하여 진동에 따른 스트레인 값을 실시간으로 측정한 결과 진동 주파수 17.8 Hz, damping 시상수 0.96 초를 얻을 수 있었다.

주제어: Optical strain sensor, Fiber Bragg grating (FBG), Arrayed waveguide grating (AWG), Chirped fiber grating, Wavelength interrogation

## I 서 론

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: FBG)는 코어의 굴절률을 주기적으로 변조하여 특정 파장의 빛을 반사시키는 소자로서 광섬유와의 연결 손실이 작고 파장 선택도가 높으며 편광에 무관한 특성 등으로 현재 전 세계적으로 광통신 소자로 널리 사용되고 있다. 최근에는 FBG를 센서에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, FBG 센서는 강한 자기장이 존재하는 환경에서도 동작이 가능하며 산화 현상이 없으므로 장시간 사용시에도 동일한 특성을 얻을 수 있다. 또한 극한 온도 환경에서도 오동작 없이 사용할 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 FBG 센서는 건물이나 교량의 변형을 측정하기 위한 스트레인 센서에 널리 이용되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 최근에는 스트레인 범위를 향상시키기 위하여 실리카 재질의 광섬유 보다 더 작은 영의 계수(Young's modulus)를 가지는 폴리머 광도파로와 폴리머 광섬유(polymer optical fiber)를 이용한 스트레인 센서에 대한 연구도 진행되고 있다.<sup>[3,4]</sup>

FBG 센서를 이용하여 LNG(liquefied natural gas) 선박의 저장탱크 단열재 내부 변형률을 측정하기 위한 시스템의 개발을 목적으로 하고 있다. LNG는 대표적인 친환경 에너지 자원으로 각광받고 있으며 그 소비량이 급속히 늘어 나고 있다. 소비량이 증가함에 따라 대량의 LNG를 안전하게 운반할

수 있는 LNG 선박의 중요성이 커지고 있다. LNG 선박 단열재는 LNG 용액을 채우고 비우는 반복적인 과정에서 파라수축과 팽창이 반복적으로 일어나게 되어 균열이 발생할 가능성이 생긴다. 또한 LNG 용액이 저장탱크의 일부분 만을 채운 부분적재 상태에서, 용액의 출렁거림으로 인한 슬로싱(sloshing) 현상으로 인해 단열재에 충격 하중이 발생하게 된다. FBG 센서는 125 μm의 작은 외경을 가지므로 단열재 내부에 삽입이 용이하며, 수직방향으로 작용하는 압력으로 인한 스트레인을 측정할 수 있다. 또한 LNG저장온도인 -162℃에서도 안정적으로 동작할 수 있으므로 순간적으로 강한 충격을 받는 LNG 선박 단열재 내부 변형률을 측정하기에 적합하다.

FBG 센서에서 반사되는 광 신호는 인가된 스트레인의 정도에 따라 출력파장이 변하게 된다. 이러한 파장변화는 광파장 분석기(optical spectrum analyzer: OSA)를 이용하여 정확하게 측정할 수 있으나, 센서의 응용범위를 넓히기 위해서는 보다 간단한 방법으로 빠르게 파장변화를 측정하는 방법이 반드시 개발되어야 한다. 입력된 파장 변화를 출력 광 파워의 변화로 바꾸어 주기 위해서는 파장 의존성이 있는 마흐-젠더 간섭계나 페브리트-페롯 필터를 이용하면 된다.<sup>[5,6]</sup> 특히 간단한 엣지 필터(edge filter)를 이용하는 방법이 제안되고 있으나 파장을 측정할 수 있는 범위가 제한적이며 스트레인 측정 시 브래그 반사파장을 엣지 필터의 중심파장에 맞추어 주어야 하는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해

<sup>†</sup>E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

WDM 광통신 소자로 이용되는 도파로 어레이 격자(arrayed waveguide grating: AWG)를 이용하는 방법이 제안되었다.<sup>[7,8]</sup> AWG 를 이용한 방법은 응답속도가 빠르며 브래그 반사파장의 초기 값을 지정하지 않아도 되며 다수의 센서를 이용하여 동시에 측정이 가능한 특징을 지니고 있다. 본 연구에서는 AWG 소자를 이용하여 FBG센서의 브래그 반사파장을 고속으로 측정하는 실험을 수행 하였다. 기존의 OSA와 같은 고가의 장비를 사용하지 않고도 브래그 반사 파장의 변화를 측정 할 수 있다. FBG센서를 외팔보에 부착하여 스트레인을 인가 하였으며, 이때 발생하는 출력광을 AWG에 입사 시킨 후 AWG 출력 채널들의 광 파워를 측정하고 이로부터 centroid 값을 계산하여 출력광의 파장을 찾게 된다. 측정된 결과 값을 기존의 저장측정 방식 스트레인 센서로 측정한 값과 비교하여 광 센서의 특성을 확인 하였다. 측정 오차를 줄이기 위하여 반사대역폭이 넓게 제작된 chirped FBG를 이용한 실험도 수행하였다. 그리고 제작된 시스템의 응답속도를 확인하기 위하여 빠른 속도로 진동하고 있는 외팔보에 걸리는 스트레인도 측정해 보았다.

**II. 광섬유 스트레인 센서의 구조 및 동작원리**

FBG센서는 광섬유 격자에 가해진 외부 물리량(온도, 스트레인, 압력, 휨, 비틀림 등)에 의해 발생하는 브래그 격자 파장의 변화를 측정하여 가해진 물리량에 대한 정보를 알아내는데 이용하는 소자이다.<sup>[2,7,9]</sup> 인가된 외부 물리량에 의해 광섬유 격자의 주기나 굴절률의 변화가 발생되면 브래그 반사 파장의 변화가 일어난다. 브래그 반사파장의 변화는 광섬유 격자에 가해진 물리량에 선형적으로 비례하므로 반사파장의 변화를 측정하면 가해진 물리량의 정보를 계산해 낼 수 있다. FBG 센서에 가해지는 스트레인  $\Delta\epsilon$ 에 의한 브래그 격자 파장이동  $\Delta\lambda_B$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\epsilon \tag{1}$$

스트레인에 의한 파장변화는 식 (1)로 주어지며  $P_e$ 은 광 탄성 계수(effective photo-elastic coefficient)로서 스트레인에 의한 광 굴절률 변화로 인해 발생한다. 광 탄성 계수는 silica fiber의 경우 약 0.22가 되며 스트레인에 대한 파장의 반응도는 식 (1)에 의해 1550 nm에 대하여 1.12 pm/ $\mu\epsilon$ 이 된다.

FBG에서 반사되는 광의 파장을 측정하기 위한 AWG를 이용한 측정 시스템은 그림 1과 같이 구성된다. 광원으로 1500 nm부터 1600 nm파장의 발광대역을 가진 superluminescent light emitting diode(SLED)를 사용하였다. FBG에 입사된 빛 중에서 브래그 반사되어 돌아온 빛은 circulator를 통과하여 AWG로 입력된다. AWG는 빛의 파장에 따라 출력 채널이 결정되는데 FBG에서 반사된 빛은 파장과 대역폭에 따라 몇 개의 출력 채널로만 국한되어 나오게 된다. 본 실험에서 사

용된 AWG는 16개의 출력 채널을 가지며 채널 간격이 0.8 nm 이고 균일도가 2.1 dB이며 동작파장 대역이 1548-1561 nm인 특성을 가진다. AWG의 출력은 데이터 수집(data acquisition: DAQ) 장비를 사용하여 출력 단 각 채널의 광 파워 변화를 실시간으로 측정된다.

AWG의 출력단에 광 검출기를 연결하면 각 채널의 출력을 전기적인 신호로 변환할 수 있으며 빠른 신호의 변화도 측정이 가능하다. 각 채널에서 측정된 값들을 이용하여 아래의 식과 같이 centroid 값을 구하게 된다.<sup>[10]</sup>

$$Centroid = \frac{\sum i \times V_i}{\sum V_i} \tag{2}$$

이때  $i$ 는 출력 채널의 번호이며  $V_i$ 는  $i$ 번째 출력 채널에서 측정된 전압을 의미한다. 브래그 반사된 광이 여러 개의 AWG 채널을 통하여 출력될 때 centroid 값을 구하면 반사파장 피크의 위치를 알 수 있다. 이렇게 구해진 반사파장 값으로부터 초기값과의 변화를 계산하면 인가된 스트레인을 구할 수 있다.

**III. 광섬유 스트레인 센서 제작 및 특성 측정 결과**

광섬유에 반복적으로 동일한 스트레인을 인가해 주기 위하여 그림 2에서 보이고 있는 외팔보(cantilever) 형태의 구조물에 FBG를 부착하였다. 광섬유 외부에는 광섬유를 보호하기

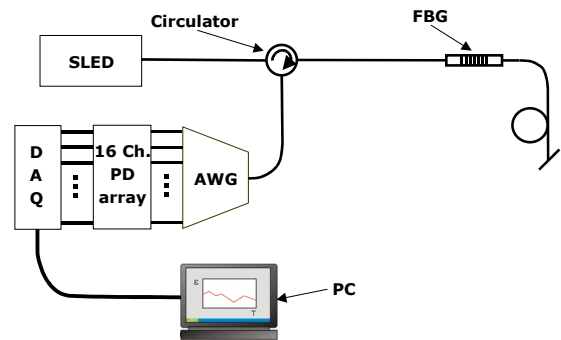


그림 1. 스트레인 센서의 반사파장 변화를 측정하기 위한 도파로 격자형 파장분석기의 구조도.

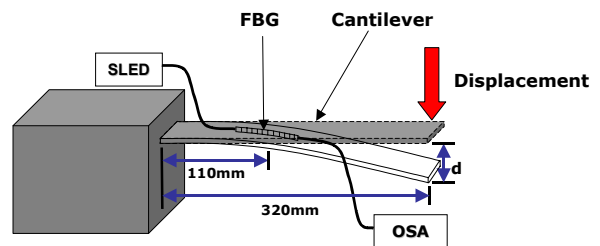


그림 2. 외팔보에 FBG를 부착하여 외팔보를 수직으로 늘려서 FBG에 힘을 가하여 스트레인을 발생시키는 실험 장치.

위한 버퍼층이 코팅되어 있다. 브래그 격자가 새겨진 부분에 버퍼층이 있을 경우 스트레인을 인가하게 되면 광섬유와 버퍼층 사이에 미끄럼짐 현상이 발생하여 측정되는 스트레인 값이 실제의 스트레인 보다 작게 나타난다. 이러한 영향을 방지하기 위해 본 실험에서는 아세톤을 사용하여 버퍼층을 제거한 후 스트레인 게이지에 사용되는 에폭시를 이용하여 외팔보에 FBG를 부착시켰다. 외팔보에 수직으로 변위를 d만큼 인가하게 되면 이에 비례하여 FBG에 힘이 가해져서 스트레인이 발생한다. 측정 장치의 동작을 확인하기 위하여 OSA를 통하여 스트레인에 따른 투과파장(transmission spectrum)을 그림 3에서와 같이 측정해 보았다. 외팔보에 0 mm부터 5 mm 간격으로 45 mm까지 수직방향으로 변위를 인가 하였을 때 브래그 격자의 투과파장이 선형적으로 장파장 쪽으로 이동하는 것을 확인 하였다. 브래그 격자 반사 파장의 피크 위치는 투과파장의 측정으로도 확인이 가능하다.

스트레인 발생시 브래그 반사 파장의 변화로 인해서 나타나는 AWG출력의 변화를 OSA를 이용하여 확인해 보았다. 외팔보에 스트레인을 인가하여 브래그 반사 파장이 1556.51 nm에서 1557.76 nm까지 이동하는 동안 AWG의 출력 채널 12, 13, 14번에서 나오는 빛을 OSA로 측정하여 그림 4(a), (b), (c)에서 각각 보이고 있다. 채널 12번을 측정한 그림 4(a)에서는 스트레인이 증가 함에 따라 스펙트럼이 장파장 쪽으로 이동하다가 사라지게 되며, 이때 채널 13번, 그림 4(b)에서 점점 큰 신호로 나타나게 된다. 이후 스트레인이 더 증가하게 되면 채널 13번의 신호도 점차 약해지면서 채널 14번, 그림 4(c)에서 신호가 나타남을 볼 수 있다.

AWG는 실리카 광도파로를 이용하여 제작되어 편광의존도가 무시될 정도로 작게 나타난다. 실험에서 사용된 AWG는 편광에 따른 손실차이가 0.5 dB 이하로 나타났으며 실험 도중 편광조절기를 사용하지 않고도 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

광 검출기를 이용하여 AWG각 출력 채널의 파워를 측정하

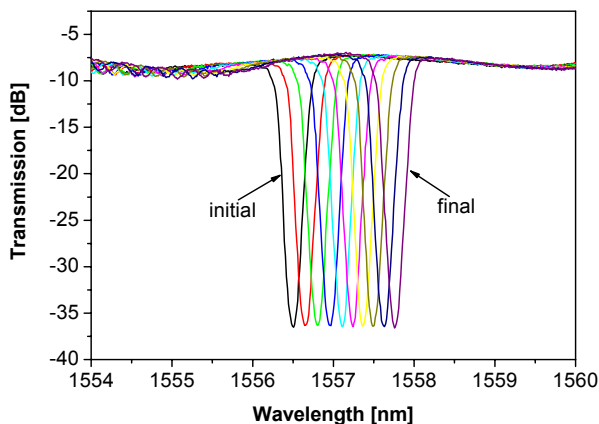


그림 3. 외팔보를 수직방향으로 0 mm부터 5 mm간격으로 45 mm까지 늘렸을 때 발생하는 스트레인에 의해 브래그 반사 파장이 장파장 쪽으로 이동하는 스펙트럼 변화.

고 centroid 값을 구하게 되면 OSA를 사용하지 않고도 브래그 반사 파장을 구할 수 있다. AWG출력 채널 16개의 광 파워를 동시에 측정하기 위하여 16채널 광 검출기 어레이를 사용하였다. 외팔보를 이용하여 스트레인을 발생시키면서 AWG 출력 파워로부터 계산하여 구한 centroid 값을 그림 6에서 보이고 있다. 일반적인 FBG의 경우 브래그 반사 3 -dB 대역폭이 0.5 nm 이하로 제작되어 있으며 이러한 FBG를 이용하여 centroid측정을 하게 되면 그림 5(a)에서와 같이 선형적인 응답 특성을 얻기가 어렵다. FBG의 반사파장 대역폭이 좁아서 AWG의 한 채널로만 광출력이 나오는 경우에는 반사파장 변화가 생기더라도 centroid 값이 변하지 않는 문제가 발생한다. 이러한 문제점은 반사 대역폭이 넓은 chirped FBG를 이용하여 해결 가능하다. 이 경우 반사된 파장은 여러 개의 AWG출력 채널로 나아가게 되며 미세한 파장변화 만으로도 여러 채널간의 출력값 변화를 일으켜서 centroid 값을 선형적으로 변하게 만든다. 3 -dB 반사 대역폭이 5.4 nm인 chirped FBG를 이용하여 측정된 선형적인 센서 특성을 그림 5(b)에서 보이고 있다. 비교측정을 위하여 기존의 저항측정 방식의 스트레인 게이지를 외팔보에 함께 부착하여 측정하였다. Centroid 계산을 통해 브래그 반사파장의 변화를 복원하였으며 이를 다시 스트레인 값으로 변환하여 스트레인 게이지에서 측정된 스트레인 값과 비교하였다. 그림 6에서 보인 바와 같이 두 종류의 센서를 이용한 측정 값이 거의 정확하게 일치함을 볼 수 있었다. AWG를 이용한 파장 측정 방식의 장

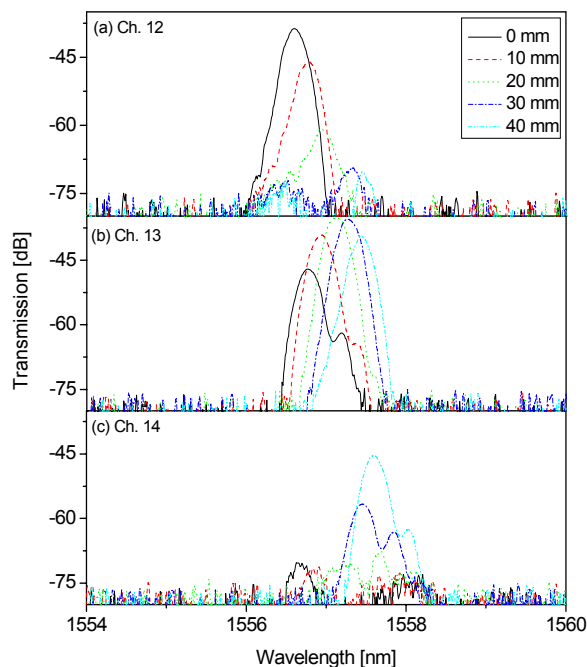
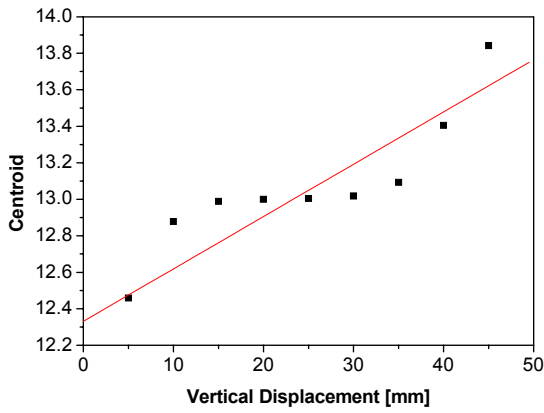
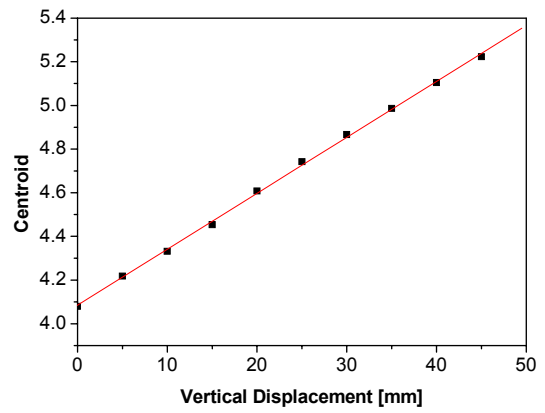


그림 4. 스트레인 발생시 AWG출력의 스펙트럼 변화 (a) 채널12 (b) 채널13 (c) 채널14: 브래그 반사 파장이 이동함에 따라 AWG 출력 채널에서의 스펙트럼이 채널 12에서 채널 14로 이동함을 관측함.



(a) 0.5 nm 3-dB 대역폭을 갖는 경우



(b) 5.4 nm 3-dB 대역폭을 갖는 chirped FBG를 이용하여 선형적인 응답특성을 얻은 결과

그림 5. 외팔보 수직 변위에 따른 FBG 스트레인 센서의 출력으로부터 얻은 centroid 계산값.

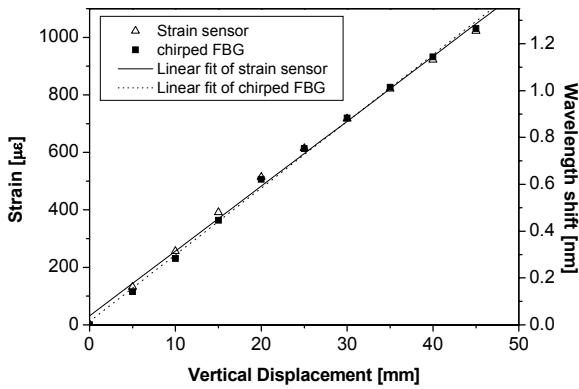


그림 6. 광섬유 브래그 격자 센서와 스트레인 게이지를 이용하여 측정된 스트레인 값의 비교 결과.

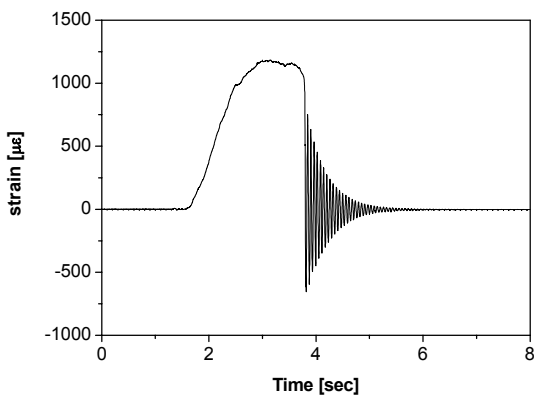


그림 7. 외팔보에 인가된 동적 스트레인 측정결과로서 진동주파수 17.8 Hz, damping에 의한 시상수 0.96초를 관측함.

점을 부각 시키기 위하여 고속으로 변하는 스트레인을 측정하는 실험을 수행하였다. 위에서 설명한 외팔보에 초기 변위를 50 mm만큼 인가한 뒤 외팔보를 놓아주면 damped oscillation 과정을 거치면서 일정 시간이 지난 후 원위치로 돌아오게 된

다. 그림 7에서는 이 과정에서 발생하는 동적 스트레인의 측정값을 보이고 있다. 초기에 1200  $\mu\epsilon$ 의 스트레인이 인가된 후 외팔보의 움직임에 따라 광섬유가 인장(tensile strain)과 수축(compressive strain)을 반복하면서 스트레인의 크기가 점차 줄어들어 안정적 상태가 되는 것을 확인할 수 있다. 스트레인의 변화로부터 측정된 외팔보의 진동주파수는 17.8 Hz로 나타났으며 damping에 의한 시상수는 0.96초가 되었다. AWG를 이용한 파장 측정 장치의 속도 한계는 DAQ 장치의 sampling 속도에 달려 있으며, 최대 측정 가능한 스트레인의 범위는 AWG의 채널 간격과 채널 숫자에 의해 결정된다. 본 연구에서 사용한 DAQ 장치는 20 kHz의 sampling이 가능하며, AWG는 채널간격이 0.8 nm이고 16개의 출력 채널을 가지므로 12.8 nm의 파장변화를 측정할 수 있으며 이는 약 10,000  $\mu\epsilon$ 에 해당한다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 AWG 소자를 이용하여 브래그 반사파장을 실시간으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 외팔보 구조를 이용하여 FBG에 스트레인을 인가하고 이에 따른 브래그 반사 파장의 변화를 AWG 소자를 이용하여 측정하였다. FBG 스트레인 센서의 성능평가를 위하여 저항 측정방식의 기존 스트레인 센서를 이용한 결과와 비교하였으며, 측정치의 오차가 2% 미만으로 정확하게 나타남을 확인하였다. AWG 소자를 이용한 파장 측정 과정에서 브래그 반사 대역폭 측정 결과에 미치는 영향을 파악하였으며 대역폭이 5.4 nm인 chirped FBG를 도입하여 센서의 응답특성을 선형적으로 만들 수 있었다. AWG 파장측정 시스템의 장점인 고속 측정 특성을 검증하기 위하여 진동하는 외팔보에서 발생하는 스트레인을 측정하여 진동주파수 17.8 Hz, damping시상수는 0.96초를 얻을 수 있었다. 실험에서 사용된 AWG파장 측정 장치는 20 kHz의 고속측정과 10,000  $\mu\epsilon$ 의 스트레인 값을 측정 가능하

다. 반사 대역폭이 넓은 Chirped FBG를 사용하여 스트레인 측정의 정밀도를 향상 시켰으나 넓은 대역폭으로 인해 여러 개의 FBG를 다중화 시키기 힘든 단점을 가진다. 제안된 구조의 파장 분석 기술을 적용하여 여러 지점의 물리량을 동시에 측정하고자 하는 경우에는 광스위치를 이용한 시간 분할 다중화 방법이 적합할 것이다. 고성능 저가격 광소자의 개발은 FBG 센서와 출력파장 모니터링 시스템의 점진적인 단가 하락을 불러올 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 2006년 교육인적자원부 학술진흥재단 기초연구 지원사업(KRF-2006-311-D00709), BK21 프로그램과 2006년 Sea Grant 연구개발 사업의 지원으로 수행하였습니다.

### 참고문헌

- [1] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [2] W. L. Schulz, E. Udd, J. M. Seim, and G. E. McGill, "Advanced fiber grating strain sensor systems for bridges, structures, and highway," *Proc. SPIE.*, Vol. 3325, pp. 212-221, 1998.
- [3] Z. Xiong, G. D. Peng, B. Wu, and P. L. Chu, "High tunable Bragg grating in single-mode polymer optical fibers," *IEEE*

- Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, No. 3, pp. 352-354, 1999.
- [4] B. Bhola, H. C. Song, H. Tazawa, and W. H. Steier, "Polymer microresonator strain sensors," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17, No. 4, pp. 867-869, 2005.
- [5] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 16, pp. 1370-1372, 1993.
- [6] M. Song, S. Yin, and P. B. Ruffin, "Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, Vol. 39, No. 7, pp. 1106-1111, 2000.
- [7] A. Hongo, S. Kojima and S. Komatsuzaki, "Application of fiber Bragg grating sensors and high-speed interrogation techniques," *Struct. Control Health Monit.*, Vol. 12, pp. 269-282, 2000.
- [8] Y. Sano, and T. Yoshino, "Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 21, No. 1, pp. 132-139, 2003.
- [9] C. Y. Lin, L. A. Wang, and G. W. Chern, "Corrugate long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 19, No. 8, pp. 1159-1168, 2001.
- [10] D. C. C. Norman, D. J. Webb, and R. D. Pechstedt, "Interrogation of fiber Bragg grating sensors using an arrayed waveguide grating," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 16, pp. 691-698, 2005.

## Wavelength Interrogation Technique for Bragg Reflecting Strain Sensors Based on Arrayed Waveguide Grating

Jun-Kyu Seo, Kyung-Jo Kim, and Min-Cheol Oh<sup>†</sup>

*Nano-Bio Photonics Lab., Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan (Busan), 609-735, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr*

Sang-Min Lee, Young-Jae Kim, and Myung-Hyun Kim

*Ship Welding Strength Lab, Naval Architecture and Ocean Engineering Dept, Pusan National University, Pusan (Busan), 609-735, Korea*

(Received November 9, 2007, Revised manuscript February 4, 2008)

Fiber-optic strain sensors based on Bragg reflection gratings produce the change of reflection spectrum when an external stress is applied on the sensor. To measure the Bragg reflection wavelength in high speed, an arrayed waveguide grating device is incorporated in this work. By monitoring the output power from each channel of the AWG, the peak wavelength corresponding to the applied strain could be obtained. To enhance the accuracy of the AWG wavelength interrogation system, a chirped fiber Bragg grating with a 3-dB bandwidth of 5.4 nm is utilized. The high-speed response of the proposed system is demonstrated by measuring a fast varying strain produced by the damped oscillation of a cantilever. An oscillation frequency of 17.8 Hz and a damping time constant of 0.96 second are obtained in this measurement.