

## 광섬유 브래그 격자 다중화 센서 패키징 기술에 관한 연구

이 상 매<sup>†</sup>

부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

### Packaging Technology for the Optical Fiber Bragg Grating Multiplexed Sensors

Sang Mae Lee<sup>†</sup>

Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

(Received November 27, 2017; Corrected December 14, 2017; Accepted December 20, 2017)

**초 록:** 본 연구에서는 선박이송용 트레슬의 표면에 부착할 수 있는 광섬유센서 패키지를 설계하고 파장다중분할방식에 기초한 센서 네트워크를 설계한 후, 모의 트레슬 유닛을 이용한 실험을 통하여 트레슬의 구조적 건전 모니터링을 위한 스마트 트레슬의 가능성을 확인하였다. 광섬유 브래그 격자 센서는 알루미늄 관으로 만들어진 원통형으로 패키징 되었다. 또한, 패키징 된 광섬유 센서를 폴리머 튜브에 삽입 한 후, 튜브 내부에 에폭시를 충전하여 센서가 해수에 대한 부식저항과 내구성을 갖도록 하였다. 패키지 된 광섬유 센서는 0.2 MPa 하의 수압테스트를 통하여 해수에서의 사용에 대한 신뢰성도 검증되었다. 트레슬의 변형에 관한 유한 요소 해석에 의해 얻어진 트레슬 부재의 변위가 큰 곳을 중심으로 트레슬에 부착할 브래그 격자의 수와 위치를 결정하였다. 최대 하중이 가해지는 트레슬 부재의 변형은  $\sim 1000 \mu\epsilon$ 의 변형율로 분석되었으며, 그 때 트레슬에 걸리는 최대 하중으로 인한 센서의 브래그 파장 변화는  $\sim 1,200 \text{ pm}$ 으로 계산되었다. 유한 요소 해석에서 얻은 결과에 따라 센서의 브래그 파장 간격을 3~5 nm로 결정하여 트레슬에 하중이 가해 졌을 때 센서 사이의 브래그 격자 파장값이 겹치지 않도록 설계하였다. 5개의 광섬유센서 패키지로 구성된 센서 모듈 5개를 연결하면 브래그 격자 센서 50개가 네트워크 될 수 있으므로, 브래그 격자 파장 검출기의 광원 중심 파장이 1550 nm에서 150 nm 광학 창 내에서 모두 검출될 수 있도록 하였다. 모의 트레슬 유닛에 부착 된 5개의 광섬유 센서 패키지의 브래그 파장 이동은 광섬유 루프 미러를 사용하는 브래그 격자 파장검출기에 의해 잘 검출되었으며, 그 때 검출된 브래그 격자 센서의 값은 최대 변형률이 약  $235.650 \mu\epsilon$ 로 측정되었다. 센서 패키징과 네트워크의 모델링 결과는 실험 결과와 서로 잘 일치하였다.

**Abstract:** The packaged optical fiber Bragg grating sensors which were networked by multiplexing the Bragg grating sensors with WDM technology were investigated in application for the structural health monitoring of the marine trestle structure transporting the ship. The optical fiber Bragg grating sensor was packaged in a cylindrical shape made of aluminum tubes. Furthermore, after the packaged optical fiber sensor was inserted in polymeric tube, the epoxy was filled inside the tube so that the sensor has resistance and durability against sea water. The packaged optical fiber sensor component was investigated under 0.2 MPa of hydraulic pressure and was found to be robust. The number and location of Bragg gratings attached at the trestle were determined where the trestle was subject to high displacement obtained by the finite element simulation. Strain of the part in the trestle being subjected to the maximum load was analyzed to be  $\sim 1000 \mu\epsilon$  and thus shift in Bragg wavelength of the sensor caused by the maximum load of the trestle was found to be  $\sim 1,200 \text{ pm}$ . According to results of the finite element analysis, the Bragg wavelength spacings of the sensors were determined to have 3~5 nm without overlapping of grating wavelengths between sensors when the trestle was under loads and thus 50 of the grating sensors with each module consisting of 5 sensors could be networked within 150 nm optical window at 1550 nm wavelength of the Bragg wavelength interrogator. Shifts in Bragg wavelength of the 5 packaged optical fiber sensors attached at the mock trestle unit were well interrogated by the grating interrogator which used the optical fiber loop mirror, and the maximum strain rate was measured to be about  $235.650 \mu\epsilon$ . The modelling result of the sensor packaging and networking was in good agreements with experimental result each other.

**Keywords:** optical fiber Bragg gratings, sensor packaging, sensor network, structural health monitoring, smart trestle

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: smlee@pusan.ac.kr

© 2017, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

광섬유 센서(Optical fiber sensor)는 가볍고, 원격조정 모니터링이 가능하며 전자기파에 대한 간섭 면역성(Electromagnetic Immunity)으로 인한 전자기적 노이즈가 없고 전기식 센서에 비해 정확도 및 신호안정성이 뛰어나는 등의 이점을 가지며, 전기적 및 변형률과 온도 등을 측정하는 기계적 변환기로 사용될 수 있기 때문에 많은 주목을 받고 있는 센서이다.<sup>1)</sup> 또한 부식이 없어 내구성이 강하고 전기합선 등의 염려가 없으므로 물속에서도 사용이 용이하다. 특히 광섬유 센서 중에서도 브래그 격자(Bragg grating) 센서는 저가이며 절대 매개변수로서의 파장을 직접 코딩할 수 있는 장점으로 인하여 파장분할다중화(WDM, wavelength division multiplexing)에 의한 센서의 다중화 망 구축에 매우 효율적인 센서이다.<sup>2)</sup>

광 패키징 기술을 통하여 광섬유 브래그 격자 센서 망을 교량, 건물, 기계, 풍력 날개, 항공기 등의 구조물에 구축하여 건전성 모니터링에 활용하려는 연구가 매우 활발한 실정이다.<sup>3-6)</sup> 이러한 센서를 구조물에 설치하기 위하여는 광섬유와 PCB와의 커플링 기술을 필요로 하는 광 PCB<sup>7)</sup>나 광원과 광원을 전달하는 핸드피스를 필요로 하는 광이미징 기술<sup>8)</sup> 등에 핵심적으로 필요한 광패키징 기술과 마찬가지로 광손실을 줄이며 성능의 신뢰성을 확보할 수 있는 광패키징 기술의 도입이 필요하다.

브래그격자센서 망 구축에는 다중파장분할방식(WDM, wavelength division multiplexing)과 시분할방식(TDM, time division multiplexing)의 두가지 주요한 기술을 사용할 수 있다. 시분할방식은 센서간에 반사되는 펄스 사이의 시간지연 차를 이용하여 센서 망을 구축하는 반면, 다중파장분할방식에서는 브래그격자 센서의 동적 파장 변화 범위(전형적으로 수 nm)에 걸친 광원의 광대역의 크기에 의해서 최대 브래그격자 센서의 수가 결정된다. 본 연구에서의 광센서망 구축은 다중파장분할방식을 적용하고자 하며, 다중파장분할방식과 상응하는 편광유지광섬유 루프간섭계(polarization-maintaining fiber loop mirror)를 이용하는 브래그격자센서 신호검출 방식을 적용하려고 한다.

해양 구조물 중에 선박을 실어 이송하는 일반 트레슬(trestle)은 조류와 부력에 의한 선박과 트레슬의 재도킹 작업등을 빈번히 수행해야 하며, 급격한 편하중으로 인한 트레슬의 과다변형과 선박손상으로 수명 단축을 초래하므로 정확한 실시간 하중모니터링이 필요하다. 센서가 패키징된 스마트 트레슬은 정확한 실시간 하중 모니터링이 가능하며, 하중 및 필요정보 데이터베이스 구축이 가능하며, 안전사고를 감소하고 선박 및 장비수명을 연장하며 작업성도 향상되는 장점이 많다.

본 연구에서는 선박 이송용 해양 구조물인 트레슬에 걸리는 하중 측정 및 실시간 모니터링을 위하여 광섬유센서를 트레슬에 고정하는 광패키징 기술과 광섬유 센서 망

구축 및 센서 신호 검출 기술에 관하여 연구하며, 광섬유 센서 중에서 양산이 쉽고 정확도가 높은 브래그 격자 센서를 이용하는 구조물의 실시간 건전도모니터링 기술에 관하여 연구 하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 광섬유 브래그 격자 센서의 원리

실리카 광섬유 코어에는 클래딩보다 굴절률을 높이기 위하여 보통 0.05%의 게르마늄을 첨가하는데 광섬유 코어에 강한 자외선을 간섭형태로 조사하면, 간섭무늬의 밝은 부분은 게르마늄의 결합구조가 변형되면서 광섬유 코어의 굴절률이 주기적으로 변화되게 되어 브래그 격자를 형성하게 된다.

광섬유 브래그 격자는 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특징을 가진다. 결합 모드 이론(couple mode theory)에 의하면,<sup>9-12)</sup> 브래그 격자를 형성하고 있는 광섬유의 코어에 가두어진 두 개의 서로 다른 방향으로 전파되는 파동의 전기장은 각각  $R(z)=A(z)\exp(j\delta z-\phi/2)$ 와  $S(z)=B(z)\exp(-j\delta z+\phi/2)$ 로 표현된다. 여기서  $\delta$ 는

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = \beta - \beta_D = 2\pi n_{eff} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) \quad (1)$$

이다. 이 때  $\beta=(2\pi/\lambda)n_{eff}$ 는 모드 전파 상수(mode propagation constant)이다. 수식(1)로부터 모드 전파 상수가 위상 정합 조건(phase matching condition)을 만족할 때, 즉 격자 주기  $\Lambda$ 에서 아주 미약한 격자 ( $\delta n_{eff} \rightarrow 0$ )일 때의 브래그 격자의 파장을 수식(2)에 나타내었다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2)$$

여기서  $\lambda_B$ 는 광섬유 브래그 파장이며,  $n_{eff}$ 는 광섬유 도파로의 유효굴절률이며,  $\Lambda$ 는 브래그 격자의 주기이다. 마찬가지로 결합모드 방정식을 풀면 브래그 격자의 위상정합조건을 만족할 때의 브래그 격자의 반사도를 수식 (3)에 의하여 계산할 수 있다.<sup>13)</sup>

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (3)$$

여기서  $\kappa$ 는 커플링 상수(coupling constant)이며  $L$ 은 브래그 격자의 길이이다. 브래그 격자의 유효변형률 변화와 온도 변화에 의한 브래그 파장의 변화는 수식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>14)</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda} = (1-p_e)\epsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (4)$$

여기서  $p_e$ 는 광섬유 도파로의 유효광탄성상수(effective photo-elastic constant)이며,  $\epsilon$ 는 광섬유 길이 방향의 변형

**Table 1.** Experimental parameters of SMF28 optical fiber Bragg grating sensor.

Items	Value	Remarks
Photoelastic coefficient ( $p_e$ )	0.22	
Thermal expansion coefficient ( $\alpha$ , $^{\circ}\text{C}$ )	$0.55 \times 10^{-6}$	
Thermo-optic coefficient ( $\zeta$ , $^{\circ}\text{C}$ )	$6.6 \times 10^{-6}$	
Strain sensitivity of Bragg grating (pm/ $\mu\epsilon$ )	$\sim 1.2$ pm/ $\mu\epsilon$	at 1550 nm
Temperature sensitivity of Bragg grating (pm/ $^{\circ}\text{C}$ )	$\sim 13$ pm/ $^{\circ}\text{C}$	at 1550 nm

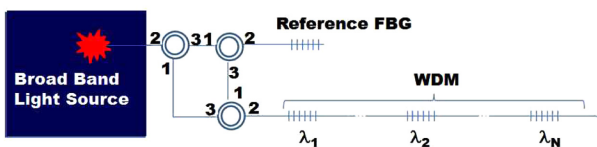
율(longitudinal strain),  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $\zeta$ 는 열광계수(thermo-optic coefficient),  $\Delta T$ 는 브래그 격자 센서에 작용하는 온도변화이다. SMF28(single mode fiber)광섬유를 사용할 경우 전형적인 광섬유 및 브래그 격자(Bragg grating)의 상수 값들을 Table 1에 제시하였다.

수식(4)에서 보는 바와 같이 브래그 격자에 외력이 가해지면, 광섬유 브래그 격자의 유효굴절률(effective refractive index)이나 길이의 변화로 인하여 브래그격자로 입사된 후 반사되어 되돌아 오는 브래그 파장이 변화(shift)하므로 그 반사되는 브래그 파장의 변화를 측정함으로써 온도나 인장, 또는 압력, 구부림 등을 감지할 수 있다.

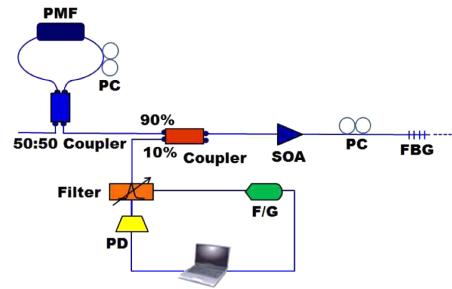
**2.2. 광섬유 브래그격자의 망 및 인터러게이터 설계**

본 연구에서의 광섬유 브래그 격자 센서의 다중화 모듈은 광대역 광원을 고려한 다중파장분할 통신방식으로 했다. CWDM (coarse wavelength division multiplexing)은 1270 nm에서 1610 nm까지 사용하는 반면, DWDM (Dense WDM)은 1525-1565 nm (C band), 또는 1570-1610 nm (L-band)에서 사용된다. 광섬유는 1550 nm 파장을 중심으로 150 nm (15THz) 폭에서 광세기의 감쇠가 가장 적기 때문에 광섬유 브래그 격자 센서도 이 대역으로 사용했다. DWDM(Dense WDM)은 0.8 nm까지 채널 간격으로 다중분할 할 수 있지만 본 연구에서는 구축된 센서 망의 센서들 간에 구조물의 특정부위의 과도한 변형에 상응하는 브래그 파장의 과다 이동으로 인하여 야기될 수 있는 인접한 다른 센서의 브래그 파장과 중복을 피할 수 있도록 센서의 브래그 파장 간격을 결정하였다. 즉 센서 간의 브래그 파장 간격을 트레슬의 최대하중에 의하여 변위될 센서의 브래그 공진 파장의 변화량에 따라 설계하였다.

트레슬 유닛에 5개의 광섬유 브래그 격자 센서가 부착



**Fig. 1.** Schematic drawing of multiplexed optical fiber Bragg grating sensors.

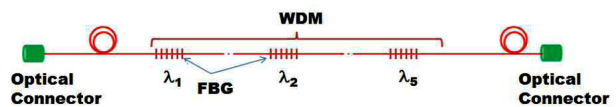


**Fig. 2.** Schematic drawing of optical interrogator for Bragg grating sensors.

될 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서 모듈 형태로 설계하였다. 전체 트레슬에 들어갈 광섬유 브래그격자센서 개수는 광원의 대역폭을 고려하여 모두 50개(5개/트레슬유닛 × 트레슬유닛 10개)로 설계하였다. 각 브래그 격자 사이의 거리는 트레슬 유닛의 부재길이에 따라 정했다. Fig. 1에 파장분할다중화 방식에 기초한 광섬유 브래그격자 센서 망을 나타내었다. 하나의 광섬유에 50개의 브래그 격자 센서를 연결할 수 있도록 센서망을 구성하였다.

다중화 브래그 파장의 인터러게이터(Bragg wavelength interrogator)의 선형 광섬유 레이저 모듈을 구성하고 있는 광원은 1550 nm 중심파장대역에서 3dB선폭이 150 nm파장범위를 가진다. 파장가변필터(tunable wavelength filter)는 1550 nm 대역에서 150 nm의 필터링 범위를 가지는 제품(Lambda Quest사)을 사용하였으며, 1 kHz의 속도로 구동하기 위해서 LabView 소프트웨어 프로그램으로 제어하였다. 제작된 선형 광섬유 레이저 모듈을 이용한 센서 시스템은 신호대잡음비가 50dB이상이며, 분해능은 0.05 nm 이다.

선박용 광센서 시스템용 선형 광섬유 레이저 모듈을 Fig. 2와 같은 시스템으로 구현하였다. 레이저 모듈의 구성은 SOA (semiconductor optical amplifier)로부터 발진되어진 광원이 광섬유 격자에서 특정파장의 반사 신호로 되돌아 와 SOA를 지나면서 광 증폭이 되어, 50:50 방향성 결합기(directional coupler)와 편광유지광섬유(polarization maintaining optical fiber), 편광조절기(polarization controller)로 구성된 루프미러(loop mirror) 간섭계로 들어간 광섬유 격자 반사신호는 광섬유 격자와 간섭계형 미러 사이를 무수히 많이 반복하게 된다. 편광유지섬유로 구성된 루프미러 간섭계와 광섬유 격자 사이의 공진기를 반복한 광신호가 SOA에 의해 증폭되어 커플러를 통해 파장가변필터로 필터링된 후, 광검출기(photodetector)를 통해 광전변환



**Fig. 3.** Sensor module design of the optical fiber Bragg grating sensor.

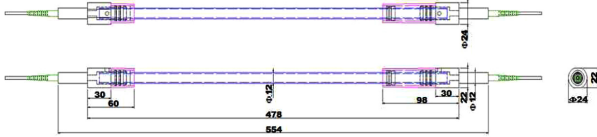


Fig. 4. CAD drawing for sensor packaging for smart trestle structure.

되어 컴퓨터 화면에 디스플레이 된다.

2.3. 광섬유 브래그격자 센서의 패키징 설계

Fig. 3은 트레슬 유닛에 부착될 광섬유 센서의 모듈을 도식한 것이다. 1개의 트레슬 유닛에 5개의 광섬유 브래그 격자 센서가 어레이된 광섬유센서 모듈로 설계된다. 트레슬 유닛이 여러 개로 조립되면서 센서 모듈도 광컨넥터를 통하여 연결되어 단일 광섬유에 연속적으로 WDM 방식으로 50개의 광섬유 브래그 격자 센서 파장이 연속적으로 증가하도록 다중화 된다.

광섬유 센서의 패키징은 광섬유 센서를 트레슬의 부재 표면에 부착했을 때 트레슬에 걸리는 변위가 광섬유에 제대로 전달될 수 있는 구조로 설계해야 한다. 광섬유 브래그 격자 센서의 패키징 가능성을 시험해 보기 위하여 광섬유를 삽입할 수 있는 튜브를 먼저 설계하고, 튜브가 들어갈 수 있는 두 개의 플랜지 형태의 지지판을 가진 광섬유 튜브 홀더를 설계하였다. 계속하여 홀더에 좌우로 관통하는 구멍을 만들어 광섬유를 끼우고, 홀더의 윗면에서 수직으로, 좌우로 관통하는 구멍과 만나도록 만들어진 구멍 속으로 접착제를 흘려서 광섬유를 고정하여 광섬유 패키지부품이 가능하도록 센서 패키지를 설계하였다. 이때 광섬유 패키지 홀더의 플랜지 부분은 측정구조물에 부착되어진다.

광섬유 브래그 격자 센서 예비 패키지 연구 결과를 기초로 하여 광섬유 브래그격자 센서 패키지를 트레슬에 부착하기 위한 패키지 설계 도면을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 보여진 도면과 같이 본 연구에서의 센서 패키

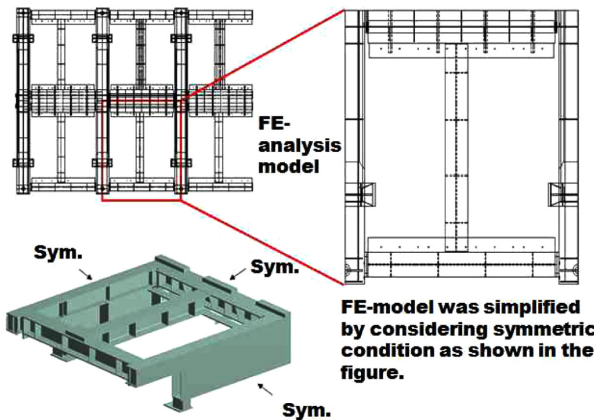


Fig. 5. CAD modelling for finite element simulation of the trestle structure.

Table 2. Material properties of cast iron used in the finite element analysis of the trestle.<sup>15)</sup>

Material	Young's modulus (E, GPa)	Yield strength ( $\sigma_y$ , MPa)	Tensile strength ( $\sigma_{TS}$ , MPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )
Cast Iron	180	790	1000	0.26

지의 길이는 500 mm이며, 광섬유를 보호하기 위한 알루미늄 튜브에 결합된 고정지그와 트레슬을 나사 체결 또는 아크 용접으로 결합되도록 구성하였다.

광섬유 브래그격자 센서를 트레슬에 안정되게 부착하기 위하여, 부착위치에 따른 트레슬의 하중변위 유한요소 해석을 행하였다. Fig. 5에 트레슬의 도면과 유한요소 모델링을 위한 CAD 도면을 나타냈다. 유한요소법에 의한 변형 해석에는 ANSYS (V12.1) 소프트웨어가 사용되었다. 이때 유한요소해석에 사용된 트레슬의 재료는 주철(Cast Irons)이며 재료상수는 Table 2에 표시하였다.

광섬유 브래그 격자 센서의 하중 측정을 캐리브레이션하기 위하여 광섬유 브래그 격자 센서 파장 검색장비와 컴퓨터를 연결하였다. 컴퓨터에서 광섬유 브래그 격자 센서 파장 검색장비를 조종 및 작동하여, 광섬유센서에서 브래그 격자 센서 파장 검색 장비로 들어오는 데이터들로부터 하중-변형을 곡선을 결정하고, 트레슬의 CAE해석으로부터 나온 결과를 이용하여 하중 대 변형을 곡선을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 광섬유 브래그 격자 센서 특성화

EDFA 광원(LiComm)과 0.05 nm 분해능의 파장 분석기(ANDO)를 사용하여 본 연구에서 사용된 SMF28 광섬유 브래그 격자 센서의 반사도를 측정하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용된 SMF28 광섬유 브래그 격자 파장의 반사도는 1554 nm에서 ~25dB이며 반치전폭(FWHM, full width at half maximum)은 ~0.1 nm로 측정되었다.

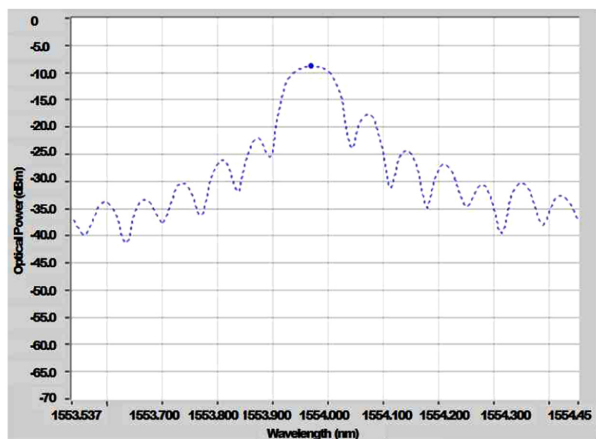


Fig. 6. Reflectivity of optical fiber Bragg grating sensor.

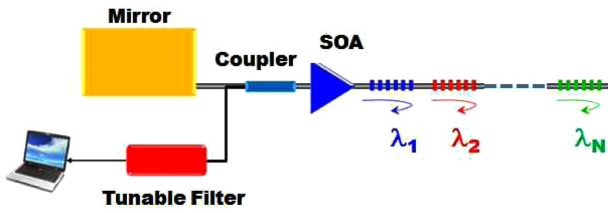


Fig. 7. Schematic drawing of the optical interrogator for multiplexed optical fiber Bragg grating sensors.

3.2. 광섬유 브래그격자의 망 및 인터레이터

Fig. 9에 본 연구에서 실제 적용된 광섬유 브래그격자 센서의 파장 분할 다중화(WDM, wavelength division multiplexing) 망을 나타내었다. 스마트 트레슬을 구현하기 위해 광섬유 브래그 격자 센서의 파장 간격을 계산하고 설계에 적용하였다. 센서의 변형을 민감도는  $\sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$  이며, 센서의 길이가 500 mm 이므로 센서의 최대변형율을  $\sim 3,000\mu\epsilon (\sim 3 \times 10^{-3})$  으로 계산하여 설정하면 브래그 격자의 공진파장 이동은  $\sim 3.6 \text{ nm}$ 이다. 따라서 구조물의 변형 시 센서간 브래그 파장의 중복을 피하기 위하여 센서의 브래그 파장 간격을 3~5 nm 설정하여 센서 망을 구축하였다. 브래그 격자 인터레이터의 광원 파장범위가 150 nm 값을 고려하여 50개의 브래그 격자 센서 망 구축이 가능하였다.

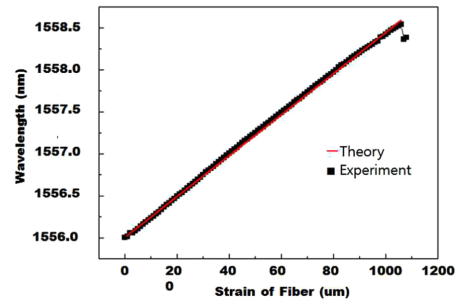
Fig. 7은 Fig. 2에서 설계된 브래그격자 신호검출장치의 도식도이다. 편광유지섬유로 구성된 루프리더 간섭계와 광섬유 격자 사이의 공진기를 반복한 광신호가 SOA에 의해 증폭되어 커플러를 통해 파장가변필터로 필터링되고, 광검출기(photodetector)를 통해 광전변환되어 컴퓨터 화면에 디스플레이 되었다.

사용된 광원은 1550 nm 대역의 SOA(Inphix사)이며, 모듈은 전원장치(power supply)로 작동되었다. 이때, 사용된 1550 nm 대역의 파장가변필터(Lambda Quest사)의 속도는 임의신호발생기(function generator)를 통해 제어되었다.

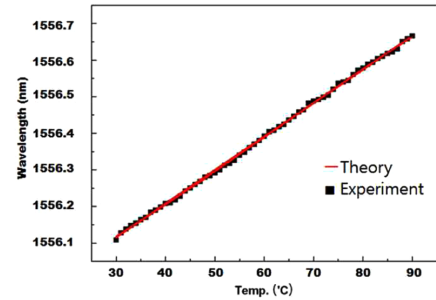
3.3. 광섬유 브래그격자 센서의 패키징

Fig. 4에서 보여준 도면의 사양대로 패키지 된 센서는 500 mm의 길이를 가지며 광섬유를 보호하기 위한 알루미늄 구조체에 고정을 위한 지그를 부착하여 트레슬과 나사체결 또는 용접이 가능하도록 되어 있다. 알루미늄 튜브 내에 실장된 광섬유 센서는 설치 후 양쪽 고정나사를 풀어 실제 계측이 가능할 수 있도록 되어 있으며, 센서 값의 영점은 설치 후 고정나사를 풀었을 때 값으로 하였다.

광섬유 브래그 격자 센서 패키지부품의 하중에 대한 변위 값 측정은 브래그 격자 파장 검색장비와 컴퓨터계산으로 실시하였다. 컴퓨터에서 브래그 격자 파장 검색장비를 조종하고, 작동시키며 광섬유센서에서 브래그 격자 파장 검색 장비로 들어오는 데이터들로부터 하중에 대한 변형율의 곡선을 구했다. 이후에 트레슬의 CAE해석으로



a) Stretching



b) Heating

Fig. 8. Shift in Bragg wavelength of the optical fiber Bragg grating sensor.

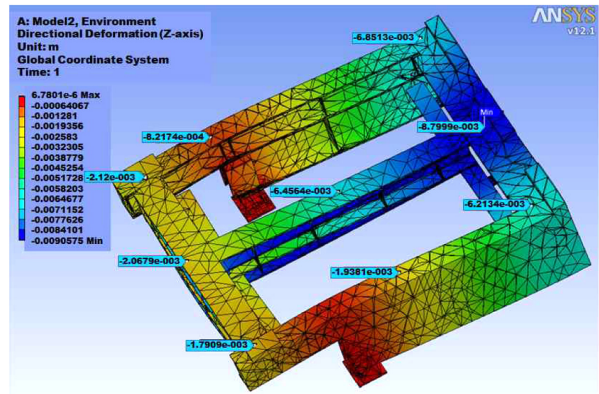
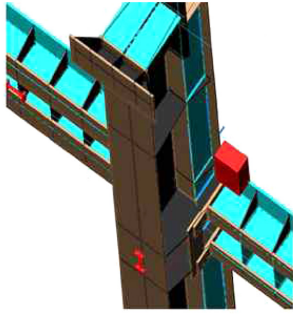


Fig. 9. Displacement of trestle analyzed by finite element simulation.

하중에 대한 변형을 곡선을 계산하였다. 여기서 광섬유 센서 패키지부품의 변형율 민감도와 온도 민감도는 각각  $\sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 과  $\sim 15 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 로 계산되었고, 이들 값은 일반 브래그 격자 센서의 값과 일치하였다.

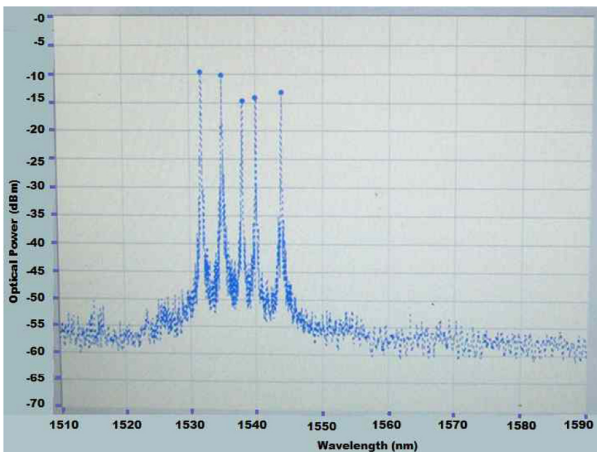
광섬유 브래그격자 센서의 트레슬 부착위치의 결정을 위한 유한요소해석은 트레슬이 좌우 대칭형 구조인 점을 고려하였다. 대칭선을 중심으로 절단하고, 선박이 트레슬의 상부에 위치한다고 가정한 다음에, 예상되는 편하중을 중요 지점에 가중하면서 해석을 행하였다. 시뮬레이션 결과 단위면적당 1MN (100ton)의 하중이 걸릴 시 약 4.4 MPa의 압력이 작용하는 것으로 계산되었으며, 최대 하중을 단위 면적당 1MN으로 설정 시 변할 수 있는 변위는 Fig. 9와 같은 결과로 나타났다.



**Fig. 10.** Design for array of the sensor attached on the bottom of the trestle.

시뮬레이션 결과 발생할 수 있는 최대변형은 약 9 mm로 예상되고 한 축의 길이를 10 m로 가정했을 때, 변형율은 약  $10^{-3}$ 이므로 브래그 격자 파장의 이동(shift in Bragg wavelength)은  $\sim 1,200$  pm 정도 일어난다. 따라서 기존에 설계된 광섬유 브래그 격자 센서의 동작범위에서 충분히 감지가 가능한 것을 알 수 있다. 또한 기존의 설계에서 트레슬의 최대변형율을  $\sim 3,000 \mu\epsilon (\sim 3 \times 10^{-3})$ 으로 가정했을 경우보다 1/3만큼의 변형율이 발생하므로 광섬유 센서의 브래그 격자 파장의 이동도  $\sim 3,600$  pm의 1/3인  $\sim 1,200$  pm로 예상되기 때문에 실제 센서 망 구축을 위한 센서 수는 50개의 세배인 150개가 가능함을 보여주고 있다. Fig. 10에 보인 바와 같이 각 트레슬 유닛마다 5개의 광섬유 브래그 격자 센서를 부착하고 설치할 수 있도록 설계했다.

Fig. 11은 모의 트레슬 유닛의 무 부하 조건에서 검출된 브래그 격자 센서 패키지의 분광신호를 보여주고 있다. 5개의 광섬유 브래그 격자 센서의 신호검출이 가능하였으므로 트레슬에 센서 패키지 부착이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 센서 위치별로 하중을 가해 모의 트레슬을 변형시키면서 편하중 발생위치정보와 편하중에 의한 변형율을 값을 확인할 수 있었다. 이 과정에서 최대 변형율이 235.650  $\mu\epsilon$  정도의 변형에서 안정하게 센서 패키징이 작



**Fig. 11.** Interrogated spectra of Bragg wavelengths for the trestle unit without loading.

동함을 확인하였다.

스마트 트레슬용 패키지는 해수환경을 고려하여 방수 및 수압에 대한 내구성이 필요하다. 따라서, 광센서 재료는 원래 내수 특성을 가지고 있지만 내 수압에 대한 내구성 및 광섬유를 보호하기 위해 둘러싸고 있는 알루미늄 구조의 내구성을 향상시키기 위해 센서에 부착된 고정지그와 트레슬 구조물을 볼트로 결합하였다.

해수에 대한 내수 특성을 향상시키기 위하여 폴리머 튜브로 봉합한 뒤 내부를 에폭시로 채워 센서가 외력으로 부터 안전하도록 하였다. 10~20 m 해수 아래 0.2 MPa (2Bar)압력 조건에서 센서의 오작동 및 파손 유·무를 평가하기 위해 최적 설계로 제작된 광섬유 브래그 격자 센서 패키지부품을 챔버에 장입한 뒤 0.2 MPa로 가압하여 1시간동안 방치한 뒤 작동 유·무를 검토하였다. 수압을 가하기 전·후에 스마트 트레슬용 패키지부품은 안정하게 작동되었고, 실제 인위적 인가 하중상태에서도 안정되게 작동하는 것을 확인하였다.

트레슬에 센서 패키지를 용접으로 고정하여 스마트 트레슬 부품상태에서의 작동가능성도 검토하였다. 검토 결과 광섬유 브래그 격자 센서의 패키징과 센서망의 정확성과 신뢰성이 확인 되었으며, 트레슬의 실시간 건전모니터링이 가능함을 확인하였다.

광섬유 브래그 격자 센서 패키지 설계, 센서의 모듈화 및 패키징, 센서 망 구축과 인터레이터 구성, 패키지의 내구성 및 신뢰성 평가 등에 대한 이론적 모델링과 실험적 검증 과정 등 일련의 연구를 통하여 구조물에 충분히 적용할 수 있는 신뢰성 있는 패키징 부품을 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 얻어진 광센서 패키징 기술은 스마트 트레슬을 구현하는데 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 트레슬의 표면에 광섬유센서를 부착했을 때 트레슬에 걸리는 변위가 광섬유에 제대로 전달될 수 있도록 광섬유센서 패키지를 설계 하였으며, 광센서 패키지 5개를 모듈화하여 트레슬에 부착할 수 있도록 하였다. 트레슬의 유한요소 변형 해석에서 최대 하중에 대하여  $\sim 1000 \mu\epsilon$ 의 변형 결과를 얻었으며, 그에 따른 브래그 파장의 이동은  $\sim 1,200$  pm로 계산 되었으므로 브래그 격자 센서들의 파장 간격을 3~5 nm로 설정하였으며, 그 결과를 기초로 파장다중분할방식에 의하여 50개의 브래그 격자 센서 망을 설계할 수 있었다. 다중센서 망 구축에 따른 브래그 격자 센서들의 신호를 측정하기 위하여 1550 nm 중심파장대역에서 3dB선폭이 150 nm 파장범위인 광원과 편광유지광섬유 루프미러를 기초로 한 브래그 격자 센서의 파장 인터레이터를 구성하여 컴퓨터 화면에 디스플레이 하였다.

제작된 모의 트레슬 유닛에 광섬유 브래그 격자 센서

패키지 5개를 부착한 후 센서의 작동 및 성능 측정을 통하여 모의 트레슬 유닛의 하중상태를 실시간 모니터링 할 수 있었으며, 그 때 최대 변형율은 235.650  $\mu\epsilon$  정도로 측정되었다. 광센서 패키지에 대한 0.2 MPa 압력하의 수압 테스트를 통하여 해수에서의 사용에 대한 신뢰성도 검증하였다. 실제 트레슬에 광센서 패키지를 용접으로 부착하여 작동가능성을 확인하였다. 이상의 연구결과를 토대로 트레슬의 실시간 하중상태를 모니터링할 수 있는 스마트 트레슬 구현의 가능성을 확인하였다.

본 연구의 결과물은 건축물 및 교량, 터빈블레이드, 원자력 플랜트, 기타 극한 환경에서 사용되는 구조물의 구조조건성 진단 및 모니터링에의 활용이 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 한국연구재단에서 부여한 과제번호: NRF-2014R1A1A2059472), 그리고 산업통상자원부의 나노금형기반 맞춤형 융합제품 상용화지원센터구축과제(과제번호:N0002310) 지원에 의하여 이루어진 것임.

### References

1. F. T. S. Yu, and S. Yin, "Fiber optic sensors", New York: Dekker, ch. 2 and 4, 124 (2002).
2. 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. Lightw. Technol., 15(8), 1442 (1997).
3. A. Ghoshal, M. J. Sundaresan, M. J. Schulz, and P. F. Pai, "Structural health monitoring techniques for wind turbine blades", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 85(3), 309 (2000).
4. G. Marsh, "In-service monitoring of turbine blades", Reinforced Plastics, 52(5), 24 (2008).
5. M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. Chakraborty, K. Dasgupta, and D. K. Bhattacharya, "Fiber Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications", Sensors and Actuators A: Physical, 147(1), 150 (2008).
6. C. Fernández-Valdivielso, I. R. Matías, and F. J. Arregui, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material", Sensors and Actuators A: Physical, 101(1-2), 107 (2002).
7. W. T. Yang, S. W. Cho, M. Y. Jeong, and H. S. Choi, "NIR Fluorescence Imaging Systems with Optical Packaging Technology", J. Microelectron. Packag. Soc., 21(4), 25 (2014).
8. J. H. Ryu, D. M. Kim, E. S. Kim, and M. Y. Jeong, "Optical PCB and Packaging Technology," J. Microelectron. Packag. Soc., 18(1), 7 (2011).
9. J. E. Sipe, L. Poladian, and C. M. de Sterke, "Propagation through nonuniform grating structure", J. Opt. Soc. Am. A., 11(4), 1307 (1994).
10. R. Kashyap, "Fiber Bragg Gratings", Chapter 4, Academic Press, (1999).
11. T. Erdogan, "Fiber grating spectra", Journal of Lightwave Technology, 15(8), 1277 (1997).
12. K. O. Hill, and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview", J. Lightwave Technol., 15, 1263 (1997).
13. N. I. Tawfik1, W. S. Eldeeb, M. B. El\_Mashade, and A. E. Abdelnaiem, "Optimization of uniform fiber Bragg grating reflection Spectra for maximum Reflectivity and Narrow Bandwidth", 5(2), 53 (2015).
14. A. Azhari, R. Liang, and E. Toyserkani, "A novel fibre Bragg grating sensor packaging design for ultra-high temperature sensing in harsh environments", Meas. Sci. Technol., 25, 075104 (2014).
15. E. R. Parker, "Materials Data Book", Cambridge University Engineering Department, pp. 11-12, (2003).