

선체 응력 모니터링을 위한 FBG 센서에 대한 연구

김유미¹ · 이남권¹ · 이승환¹ · 배동명² · 유윤식^{1,3,+}

Study on FBG Sensors for Hull Stress Monitoring

Yu-Mi Kim¹, Nam-Kwon Lee¹, Seung-Hwan Lee¹, Dong-Myung Bae², and Yun-Sik Yu^{1,3,+}

Abstract

Vessels receive stress during their navigations as well as during their cargo operations. This stress may cause damages to the hull and may result in accidents. So the hull stress monitoring system(HSMS) is recommended in order to prevent these accidents. In this paper, we manufactured fiber Bragg grating(FBG) sensor and the model ship for towing tank experiments. The strain characteristics of the model ship on the water wave were measured through the towing tank experiment. The FBG sensors and electric strain gauges were attached on the connection jig, and then the characteristics of the FBG sensor were compared with those of the electric strain gauge. The strain of model ship was increased according to the increment of the amplitude of water wave. In particular, the largest strain was measured in the center of the model ship. As the wave period increased, the strain of model ship was decreased.

Keywords : Fiber Bragg Grating, FBG Sensors, Fiber Optic Sensor, HSMS

1. 서론

선박은 중량 및 시간에 따라 변동하는 파랑외력과 같은 피로하중에 의해 지속적으로 변형을 받는 구조물로서, 사고가 발생하게 되면 인적, 경제적 손실뿐만 아니라 엄청난 환경오염을 일으키게 된다 [1]. 이와 같은 사고를 방지하기 위해 국제해사기구(IMO ; International Maritime Organization)에서는 1994년 이후 20,000 DWT(Dead-weight Ton)이상의 화물선에 실시간으로 선체의 운동 상태 등을 살펴볼 수 있는 선체응력 감시시스템인 HSMS의 설치를 권고하였다[2]. 이후 HSMS에 대한 적용 기준들이 생겨나면서 LBSG(Long Based Strain Gauge)와 같은 전기식 센서를 이용한 시스템을 설치하고 있다. 그러나 전기식 센서의 경우 연결하는 케이블이 복잡하며 신호 대 잡음비가 크다는 단점과 부식 및 전자기적 영향 등 외부환경에 민감하다는 문제점을 가지고 있다. 그래서 이러한 전기식 센서의 문제점을 보완할 수 있는 광섬유 센서를 이용한 HSMS이 더 효과적이라고 할 수 있다[1,3]. 광섬유를 이용하여 센서를 구성하는 경우 광섬유의 직경이 작고 유연하여 원하는 크기의 센서를 쉽게 구성할 수 있다.

또한 빛을 이용하기 때문에 감도가 매우 뛰어나고 전자기적인 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다[4, 5]. 대표적인 광섬유 센서로는 A-EFPI(Absolute Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)센서와 광섬유 브래그 격자(FBG ; Fiber Bragg Grating)센서 등이 있다. 그중에 FBG 센서는 A-EFPI 센서에 비해 구조가 단순하고 제작공정이 간단하며 대량생산이 용이하다는 장점을 가지고 있어 많이 사용하고 있다[6, 7].

본 연구에서는 FBG 센서를 이용한 HSMS을 실제 선박에 적용해 보기 전에 선박의 거동상태와 유사한 환경에서 센서의 특성을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 이를 위해 실제 선박을 축소한 모형선을 제작하였고 모형선에 센서를 부착한 후 수조 실험을 통해 일반 수면파에 대한 모형선의 응력 특성을 확인하였다.

2. 이론

2.1 광섬유 브래그 격자

광섬유의 주성분은 실리카로 되어있는데 FBG는 광섬유 코어에 게르마늄(Ge)과 같은 불순물을 첨가한 후 자외선 광을 통해 주기적으로 굴절률을 변화시켜 격자를 새긴 것이다. FBG는 Fig. 1과 같이 광대역 광원을 입사시키면 광섬유 코어 부분의 일정 주기의 굴절률 변화에 의해 브래그 조건에 맞는 브래그 파장만을 반사시키고 그 나

¹부산IT융합부품연구소(Convergence of IT Devices Institute Busan)
²부경대학교 조선해양시스템공학과(Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University)
³동의대학교 방사선학과(Radiological Science, Dong-Eui University)
⁺Corresponding author: yuys@deu.ac.kr
(Received : Apr. 24, 2012, Accepted : May 16, 2012)

머지 부분은 그대로 통과시키며, 광섬유 격자를 통해 반사되는 파장을 브래그 파장이라고 한다. 다음 식(1)은 브래그 파장을 결정하는 브래그 조건식을 나타낸다[8-10].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

여기서 λ_B 는 브래그 파장이며, n_{eff} 는 광섬유의 유효 굴절률, Λ 는 제작된 격자 간격이다. 식(1)로부터 브래그 파장은 유효 굴절률과 브래그 격자 주기의 함수임을 알 수 있다.

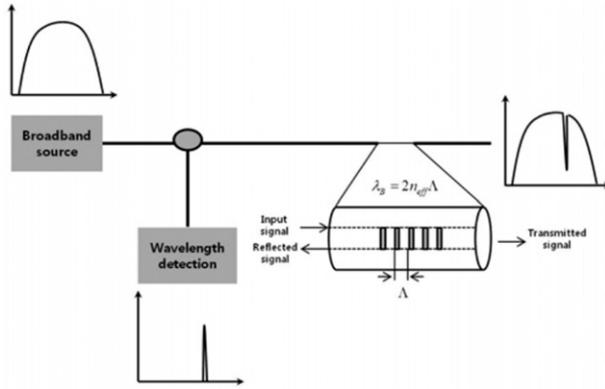


Fig. 1. Operating characteristics of Bragg gratings.

유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 FBG 에 온도나 변형을 가하면 브래그 파장이 달라진다. 이때 브래그 파장의 변화량은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (2)$$

P_e 는 광탄성 상수이며, $\Delta\varepsilon$ 은 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량, α 는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수이며, ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화 그리고 ΔT 는 광섬유 격자에 가해진 온도 변화량이다. 이 때, 온도변화를 무시할 수 있다고 가정($\Delta T = 0$) 하면 변형률과 브래그 파장의 관계를 식(3)와 같이 표현할 수 있다. 이로부터 브래그 반사 파장의 변화량 측정을 통해 변형률을 측정할 수 있다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{(1 - P_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

2.2 위상마스크 방법

FBG는 위상마스크 방법을 이용하여 제작하였다. 1993년 Hill[11] 등이 고안한 위상마스크는 일종의 회절 광학 소자로서 자외선 광을 통과시키며 공간에 따른 위상차가 유도하여 간섭무늬를 광

섬유 코어내에 형성시키면서 격자를 생성시키는 소자이다. 입사된 광은 0 차, ± 1 차 그리고 고차 회절을 시키는데 이때 0 차 회절 효율이 아주 작도록 위상마스크가 제작되어야 한다. Fig. 2와 같이 위상마스크의 골의 깊이($D_{PM:Phase Mask}$)를 조절함으로써 위상마스크에 수직으로 인가된 자외선 광의 0 차 회절을 수 % 이내로 하고, ± 1 차 회절을 최대로 하여 이 광들을 이용하여 광섬유 코어에서 간섭을 일으켜 광섬유 격자가 생성되도록 하는 방법이다[12].

FBG는 KrF 엑시머 레이저(248 nm)와 위상마스크를 이용하여 직접 제작하였으며, Fig. 3은 FBG 제작 시스템이다.

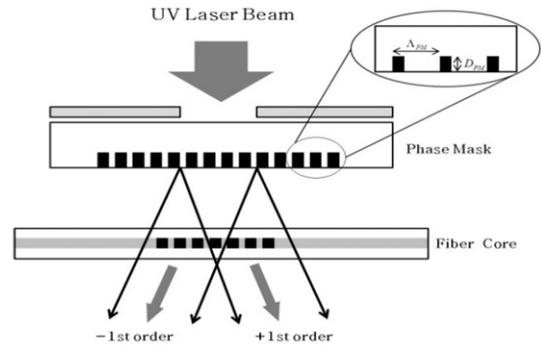


Fig. 2. Principles of optical fiber grating manufacture using a phase mask.

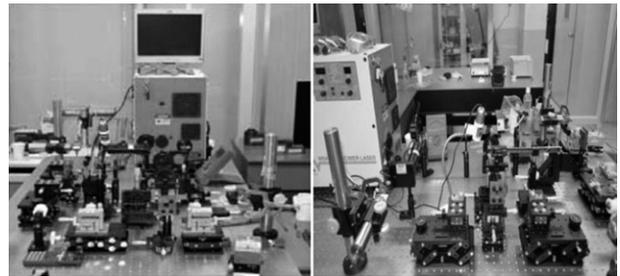


Fig. 3. Fiber Bragg grating manufacturing system.

3. 실험 방법

3.1 모형선 및 연결 지그 제작

모형선은 벌크선을 실측하여 제작하였으며, 파장에 의한 선체의 인장·수축의 영향력을 극대화하기 위하여 총 4개의 블록으로 나누어 제작한 후 연결 지그를 이용해 연결하는 형태로 제작되었다. 모형 선박의 주요치수는 Table 1에 나타나 있으며, Fig. 4는 제작된 모형선의 실물이다.

4개의 블록을 연결하는 지그의 재질은 아크릴이며, 이는 수면에 의한 응력을 원활히 선체에 전달하며 받기 위함이다. 모형선의 거동을 측정하기 위한 센서를 연결 지그에 부착하였다.

Table 1. Principal dimensions of the model ship

사 양	치 수
Length	1.800 m
Breadth	0.315 m
Depth	0.172 m



Fig. 4. The model ship composed of 4 blocks.

다음 Fig. 5은 연결 지그에 대한 개략도이다.

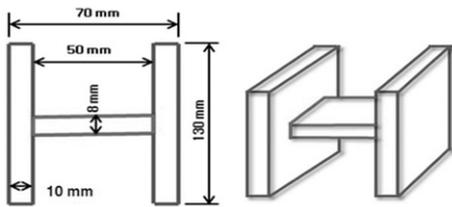


Fig. 5. Schematic diagram of connection jig.

3.2 모형선의 선체 응력 측정

3.2.1 모형선의 응력 특성 측정을 위한 FBG 센서 및 전기식 센서 부착

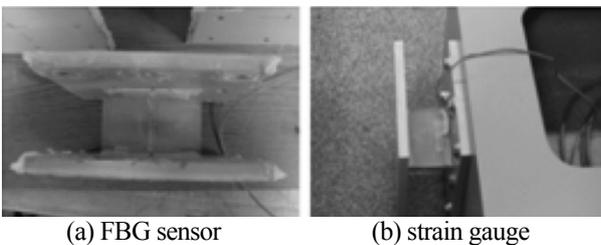


Fig. 6. Sensors attached on the connection jig.

수면파에 대한 선박의 응력 특성을 측정하기 위해 모형선의 연결 지그에 센서를 부착하였다. FBG 센서의 특성을 측정함과 동시에 기존에 사용되고 있는 전기식 센서와의 특성 비교를 하기 위해 두 종류의 센서를 모두 부착하였다. Fig. 6은 연결 지그에 부착된 FBG 센서와 전기식 센서의 모습이다. 연결 지그의 크기가 협소하여 두 종류의 센서를 같은 면에 부착하지 못하고 서로 반대면에 부착하였

다. 따라서 FBG 센서와 전기식 센서의 응력 특성은 서로 반대로 나타날 것으로 예상할 수 있다.

선수부의 연결 지그에 부착한 센서를 1번으로 지정하였고, 중앙부를 2번, 선미부를 3번으로 지정하여 실험하였다. Fig. 7은 모형선에 부착된 센서의 위치를 보여주고 있다.

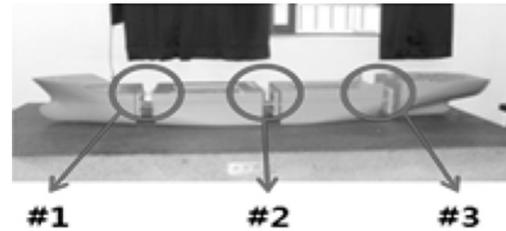


Fig. 7. The position of sensors attached on the model ship.

3.2.2 예인 수조 및 조파 장치 제원

선박의 운항상태와 유사한 환경에서 모형선의 응력 특성을 측정하기 위해 부경대학교 수조실험동에서 실험을 수행하였다. Table 2는 예인 수조 및 조파 장치의 제원이고, Fig. 8은 예인 수조와 조파 장치를 보여주고 있다.

Table 2. Towing tank and wave generator specifications

Towing Tank	
Length	40.00 m
Breadth	2.50 m
Depth	1.50 m
Wave Generator	
Maximum Wave Height	0.25 m

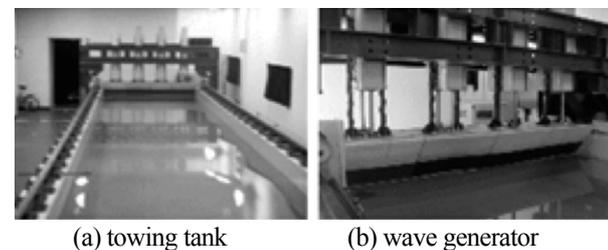


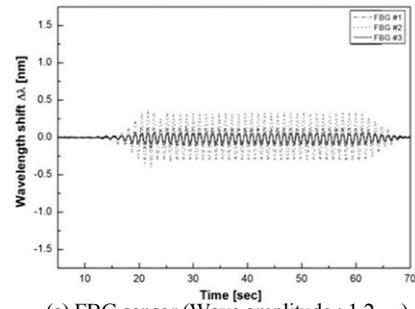
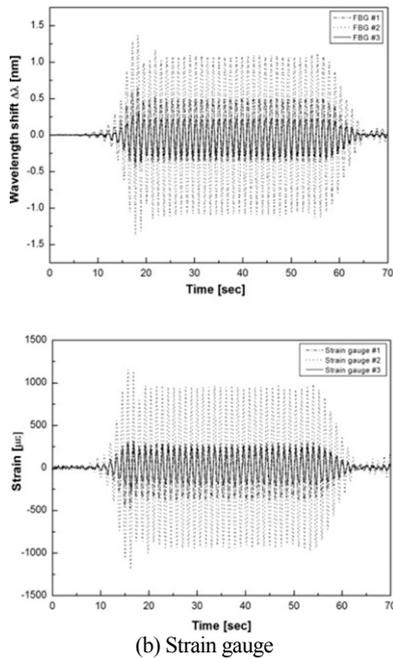
Fig. 8. Towing tank and wave generator.

4. 실험 결과

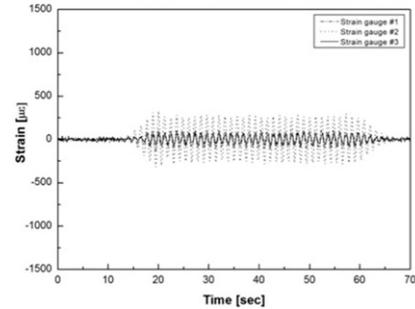
4.1 FBG 센서와 전기식 센서와의 특성비교

수면파에 의한 모형선에 받는 응력의 영향력을 FBG 센서와 전기식 센서의 특성을 서로 비교해 보았다. 연결 지그에 부착된 두 센서가 서로 반대면에 부착되어 있기 때문에 응력 특성은 반대의 특성이 나올 것을 예측할 수 있다. Fig. 7와 같이 3개의 연결 지그에 각각 FBG 센서와 전기식 센서를 부착한 후 조파 장치를 이용하여 40 초 동안 수면파를 발생 시킨 후 응력 특성을 측정하였다. Fig. 9은 그 결과를 보여주고 있다. 이 때 발생시키는 수면파의 주기(wave period)는 1.2 초로 하였고, 수면파의 파고(wave amplitude)는 4.2 cm 로 하였다. 수면파가 모형선에 도달하기 전까지는 응력 변화가 거의 없지만 수면파가 도달하면 서서히 압축, 인장이 계속 교대로 일어나며 가해지는 응력의 크기가 증가하다가 최고치에 도달한 후 다시 조금 감소하여 안정화된 응력 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 전기식 센서의 경우 응력 값이 양수이면 인장력을 받고 있고, 음수이면 압축이 가해진다는 의미이다. FBG 센서의 경우 브래그 반사파장이 장파장으로 이동하여 파장이동 값이 양수이면 인장력을 받고 있는 것이고, 반대로 브래그 반사파장이 장파장으로 이동하여 파장이동 값이 음수이면 압축이 가해진다는 의미이다. 다음 Fig. 7에서 보면 FBG 센서와 전기식 센서의 응력 특성이 서로 반대로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 예상한 것처럼 FBG 센서와 전기식 센서가 각각 연결 지그의 반대면에 부착되어 있기 때문이다. 센서 위치에 따른 응력 특성을 보면 선체 중앙부에 해당하는 2번 센서가 응력을 가장 많이 받고 있는 것을 알 수 있다. 선수, 선미부에 해당하는 1,3번 센서는 2번 센서에 비해 응력의 크기가 작지만 선수부에 해당하는 1번 센서가 2번에 비해 응력의 크기가 다소 큰 것을 확인할 수 있었다.

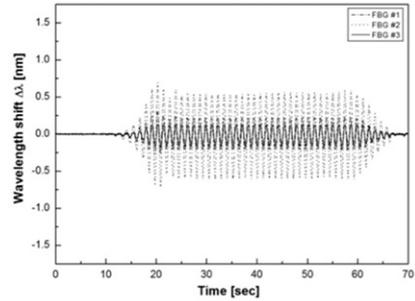
4.2 파고에 따른 응력 특성



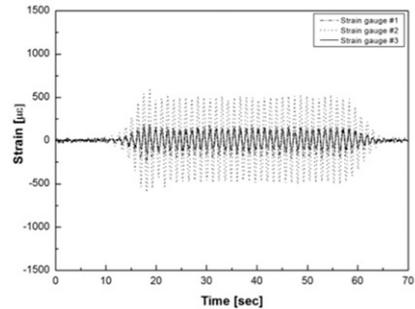
(a) FBG sensor (Wave amplitude : 1.2 cm)



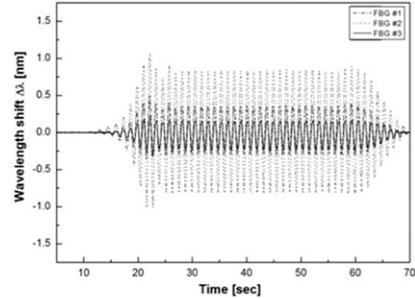
(b) Strain gauge (Wave amplitude : 1.2 cm)



(c) FBG sensor (Wave amplitude : 2.2 cm)

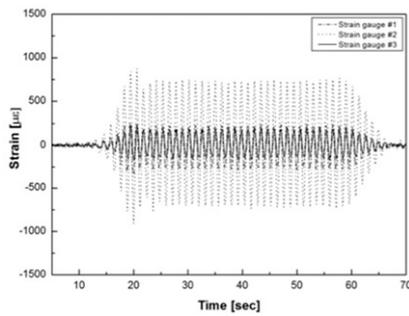


(d) Strain gauge (Wave amplitude : 2.2 cm)



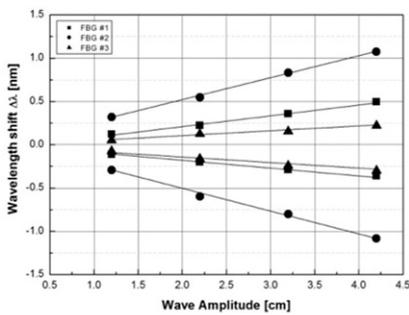
(e) FBG sensor (Wave amplitude : 3.2 cm)

Fig. 9. Experimental results of FBG sensors and strain gauges attached on the model ship which is exposed to water wave.

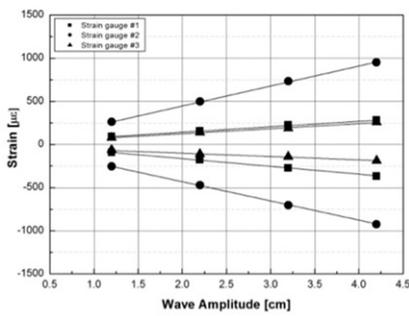


(f) Strain gauge (Wave amplitude : 3.2 cm)

Fig. 10. Experimental results of FBG sensors and strain gauges at various wave amplitude (Wave period : 1.2 sec).



(a) FBG sensor



(b) Strain gauge

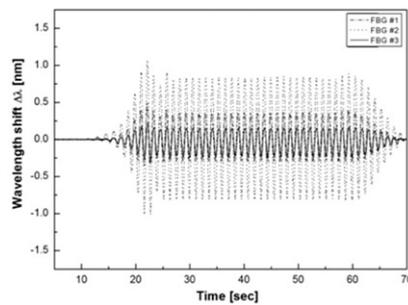
Fig. 11. Strain characteristics upon the increase of wave amplitude.

선박이 항해 중에 파도를 헤쳐 나갈 때 파고가 클수록 더 큰 응력을 받을 것이라 예상할 수 있다. 따라서 모형선이 파고의 크기에 따라 어떤 특성을 보이는지 실험을 통해 확인하였다. 예인 수조에서 수면파의 파고는 조파 장치에서 제어하는 수면파의 파고에 따라 달라진다. 수면파의 주기는 1.2 초로 고정하고, 파고를 1.2 cm 에서 3.2 cm 까지 1cm 씩 증가시키면서 응력 특성을 측정하였다. 앞의 실험과 마찬가지로 FBG 센서와 전기식 센서의 특성을 모두 측정하였으며 Fig. 10에서 그 결과를 보여주고 있다. 두 종류의 센서 모두 비슷한 측정결과를 보여주고 있으며 파고가 커짐에 따라 센서에 가해지는 응력의 세기가 점차적으로 커짐을 알 수 있다. 파고에 따른 응력 특성을 쉽게 알 수 있도록 크기가 최고치를 지난 후 안정화 되었을 때의 값을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 표시하였다. 센서

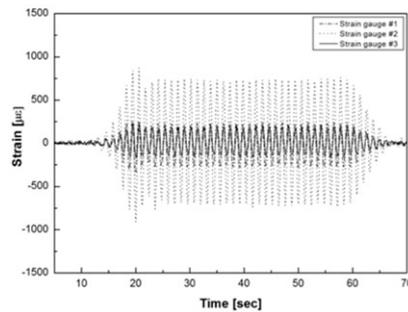
위치와 관계없이 파고에 따른 응력의 크기가 선형적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 중앙부에 해당하는 2번 센서에서의 응력의 세기가 가장 크게 나타나며, 파고에 따른 증가율도 가장 큰 것을 알 수 있었다.

4.3 파장에 따른 응력 특성

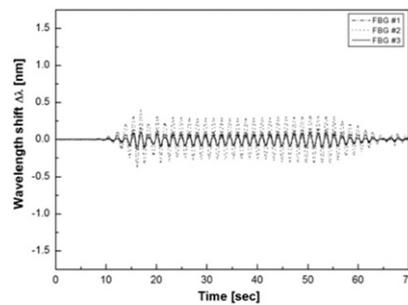
앞의 실험결과 파고가 커질수록 모형선에 가해지는 응력의 크기가 증가함을 알 수 있었다. 다음은 수면파의 주기 변화에 따라 모형선에 가해지는 응력의 특성이 어떻게 변화하는 지를 알아보기 위해 파고를 고정한 채 주기를 증가시키면서 응력 특성을 측정해 보았다. 파고는 3.2 cm 로 고정했을 때, 수면파의 주기를 1.2 초, 1.6 초, 2.0 초로 변화시키면서 응력 특성을 측정해본 결과 주기가 길어질수록 모형선에 가해지는 응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.



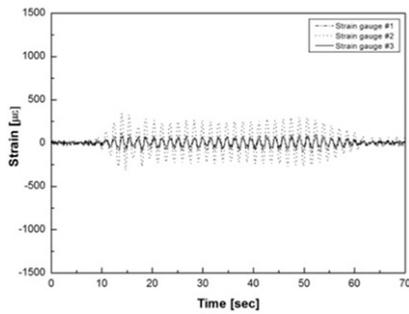
(a) FBG sensor(Wave period : 1.2 sec)



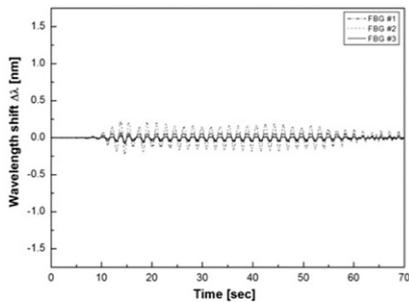
(b) Strain gauge(Wave period : 1.2 sec)



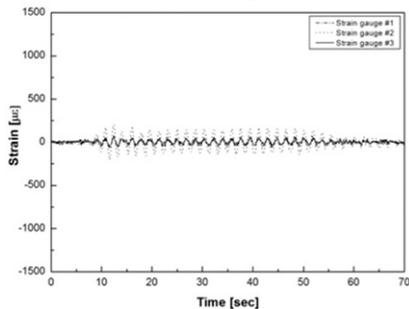
(c) FBG sensor(Wave period : 1.6 sec)



(d) Strain gauge(Wave period : 1.6 sec)



(e) FBG sensor(Wave period : 2.0 sec)



(f) Strain gauge(Wave period : 2.0 sec)

Fig. 12. Experimental results of FBG sensors and strain gauges at various wave period (wave amplitude : 3.2 cm).

5. 결론

FBG 센서를 이용하여 선체의 응력을 지속적으로 모니터링할 수 있는 선체응력 감시시스템을 개발하기 위한 모형선을 이용한 모의 실험을 하였다.

위상마스킹 방법으로 제작된 FBG 센서를 모형선에 부착한 후 수조실험을 통해 모형선의 선체 응력을 측정하였다. 모든 실험에서는 FBG 센서와 전기식 센서를 모두 부착하여 특성을 비교분석하였다. 측정 결과, FBG 센서와 전기식 센서 모두 유사한 특성을 보였으며, 수면파에 대한 응력 특성은 파고가 커짐에 따라 센서에 가해지는 응력의 변화가 증가되었으며, 특히 중앙부에 설치한 센서의 응력의 세기가 가장 크게 나타났다. 수면파의 주기를 변화시켰을 때, 주기가 길어질수록 모형선에 가해지는 응력은 감소하는 것을 알 수 있었다.

FBG 센서를 이용하여 실제 운항되는 선박과 유사한 환경에서 모형선의 선체 응력 특성을 측정한 결과들로부터 FBG 센서가 전기식

센서와 유사한 값을 도출하며, 센서의 다중화 및 전자기적 영향을 받지 않는 장점에서 HSMS에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음.(과제번호 2011AA110)

REFERENCES

- [1] Y. J. Kim, "A Study for the measurement of global loads on ship structure using fiber optic sensors", Pusan National University, Master's Thesis, 2008.
- [2] IMO, "Recommendation for the fitting of hull stress monitoring system", *MSC/Circ 646*. June, 1994.
- [3] K. Lindermann, J. Odland, and H. J. Strege, "On the application of hull surveillance system for increased safety and improved structural utilization in fough weather hovik, Norway : Det norske veritas", *Puplication*, no. 105-Febr, 1978.
- [4] Sang Bae Lee, "Fiber grating sensor technology", *Mechanics and Materials*, vol.14, no.4, pp.16-24, 2002.
- [5] K. R. Shohn, "Novel long-period fiber grating devices for monitoring the deformation of ship hull", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 31, no. 6, pp. 761-767, 2007.
- [6] R.O.Claus, J.C.Mckeeman, R.G.May, and K.D. Bennet, "Optical fiber sensors and signal processing for smart materials and structures application", *Proc. of ARO Smart Materials, Structures and Mathematical Issues Workshop*, pp. 29-38, 1988.
- [7] I.B.Kwon, C.G.Kim, and C.S.Hong, "A digital signal processing algorithm for structural strain measurement by a 3×3 passive demodulated fiber optic interferometric sensor", *Smart Materials and Structures*, vol. 8, no. 4, pp. 433-440, 1999.
- [8] T. Erdogan, "Fiber grating spectra", *IEEE J, Lightwave technol.*, vol. 15, no. 8, pp.1277-1294, 1997.
- [9] K.O.Hill and G.Meltz, "Fiber bragg grating technology fundamentals and overview", *IEEE J. Lightwave technol.* vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, 1997.

[10] J.-S. Heo, Man-Sub Kim, and Jung-Ju Lee, “Development flexible force sensor using fiber bragg grating”, *J. Kor. Sensors soc.*, vol. 15, no. 4, pp. 251-256, 2006.

[11] K.O.Hill, B.Malo, F.Bilodeau, D.C.John, and J.Albert, “Bragg gratings fabricated in monomode Photosensitive optical fiber by UV exposure

through a phase mask”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, 1993.

[12] G. T. Jang, “A study on destructive pattern in FBG sensor application and variation of shear steel ratio by reinforced concrete beams”, Kyung-pook National University, Master’s Thesis, 2006.



김유미 (Yu Mi Kim)

- 2012년 동의대학교 IT융합학과(공학석사)
- 2012년 ~ 현재 부산IT융합부품연구소 선임연구원



이남권 (Nam Kwon Lee)

- 2006년 경북대학교 전자공학과(공학박사)
- 2008년 ~ 현재 부산IT융합부품연구소 선임연구원



이승환 (Seung Hwan Lee)

- 2009년 동의대학교 물리학과 (이학박사)
- 2008년 ~ 현재 부산IT융합부품연구소 선임연구원



배동명 (Seung Hwan Lee)

- 부경대학교 조선해양시스템공학과 교수
- 부경대학교 교무처장



유윤식 (Yun Sik Yu)

- 1992년 부산대학교 물리학과 (이학박사)
- 현재 동의대학교 방사선학과 교수
- 2008년 ~ 현재 부산IT융합부품연구소 연구소장