

대형선박의 액체 탱크용 수위 모니터링 센서 시스템 연구

손경락† · 김진욱* · 조석제** · 심준환***

(원고접수일 : 2009년 2월 17일, 원고수정일 : 2009년 3월 12일, 심사완료일 : 2009년 3월 18일)

A Study on the Tank Liquid-Level Monitoring Sensor Systems for Large Scaled Vessels

Kyung-Rak Sohn† · Jin-Wook Kim* · Seok-Je Cho** and Joon-Hwan Shim***

Abstract : A fiber-optic liquid level sensor based on bending cantilever beam has been proposed. A fiber Bragg grating (FBG) embedded in the cantilever beam is used to sensing elements. The basic concept is elongation and constriction of the FBG corresponding to the liquid level variation. The best FBG position on the cantilever for obtaining the high sensitivity was 4 cm from the fixing point. When the liquid level moves up and down vertically, the Bragg wavelength is linearly shifted. But, the wavelength sensitivity of the FBG installed on the upper side of cantilever was four times better than that of the FBG equipped in the lateral side due to the difference of unit strain applied to the FBG. Intensity demodulation using the low-cost edge filter is used to interrogate the Bragg wavelength through converting the wavelength signals into the optical intensity ones. Experiment results show that the electrical output is exponentially proportional to the liquid level. But, it should be overcome for applying to the ships.

Key words : Fiber optic sensors (광섬유 센서), Fiber Bragg gratings (광섬유 브래그 격자), Liquid-level sensors (수위레벨센서), Optical intensity modulation (광세기 변조)

1. 서 론

액상으로 저장되어 있는 물질의 양을 측정하기 위한 방법으로 수위 센서 시스템이 개발되어 다양한 형태로 적용되고 있다. 특히 연료저장 탱크나

화학적 처리 공정이 요구되는 곳에서는 수위측정 센서가 필연적으로 수반된다. 이러한 목적으로 광범위하게 선박에 사용되고 있는 여러 종류의 수위 측정 시스템은 기계적 방법, 전기적 방법, 초음파 또는 빛을 이용하는 방법으로 개발되었다. 현재 전

† 교신저자(한국해양대학교 컴퓨터 제어전자통신공학부, E-mail:krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4312)

* 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과

** 한국해양대학교 컴퓨터 제어전자통신공학부

*** 한국해양대학교 컴퓨터 제어전자통신공학부, E-mail:jhsim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4811

기적 원리를 이용한 수위 측정 센서 방법이 널리 이용되고 있다. 그러나 전기적인 방법은 측정하고자 하는 액체가 도전성이 있거나, 또는 사용 환경이 폭발 위험성이 있는 경우 사용상의 제약이 따른다. 광섬유를 이용한 센서의 경우 이러한 한계점을 쉽게 극복할 수 있는 차세대 센서의 핵심기술이다. 광섬유의 경우 재료가 실리콘 다이옥사이드로 절연체이므로 전기적 영향을 받지 않고 불꽃이나 화염을 일으킬 염려가 전혀 없다. 그리고 센서를 직렬로 장거리에 걸쳐 설치해야 할 경우 기존의 구리선보다 쉽게 설치할 수 있고, 경량이며, 다루기가 쉽다. 여러 개의 센서를 동시에 설치하는 다중화에 대한 방법도 매우 쉽게 해결된다^[1-2].

수위 측정을 위한 방법으로 광섬유 센서를 이용한 연구는 비교적 최근의 일로서 광섬유와 프리즘을 조합한 방법^[3], 광섬유의 측면을 연마하여 소산장 (Evanescent field)을 이용하는 방법^[4]이 발표되었고, 캔틸레버와 FBG를 조합한 사례는 2005년 중국의 T. Guo 연구그룹에서 발표^[5]하였다. T. Guo 연구그룹이 제안한 것은 U자형 금속 캔틸레버에 FBG (Fiber Bragg grating)를 부착하여 수위를 측정하는 시스템으로서 수위 변화에 따른 광 신호 세기 변화를 이용하였다. 그러나 수위가 상승하고 하강할 때 광 신호 세기 응답이 대칭적으로 나타남에 따라 수위의 상승과 하강을 구별할 수 없다는 단점을 가지고 있었다.

본 논문에서는 폴리프로필렌 봉에 임베디드된 광섬유 격자 센서를 제작하여 탱크의 수위 변화를 측정할 수 있는 시스템을 제안하였으며 수위의 증가와 감소를 구별할 수 있음을 보이고, 수위의 변화가 광섬유 센서의 변형률에 미치는 영향을 조사하였다. 광섬유 브래그 격자의 광 신호를 처리하기 위하여 광 밴드패스 필터와 광 검출기를 사용하였고, 수위의 변화는 광세기 변조를 통해 획득하였다. 광전변환을 통해 전압의 입력된 신호는 GUI 형의 LabVIEW 프로그램을 이용하여 실시간으로 데이터를 확인 및 저장할 수 있는 프로그램으로 구현하였다.

2. 캔틸레버형 FBG 센서 및 센서위치 최적화

1545.2nm의 중심파장을 갖는 FBG를 직경이 8mm인 폴리프로필렌에 부착하여 수직 변형에 가장 민감하게 변하는 위치를 찾고자 하였다. 수위 변화에 대한 FBG의 반응이 최적인 위치에 센서를 부착하는 것이 높은 민감도를 얻을 수 있는 방법이므로 센서 위치 최적화를 위한 실험이 필요하였다. Fig. 1은 FBG의 위치에 따른 변형을 측정을 위한 실험도이다. 3dB 결합사를 통하여 광원을 입사하면 FBG에서 특정한 파장의 빛이 반사되고 이를 광 스펙트럼 분석기로 측정한다.

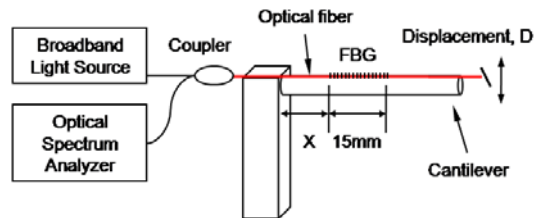
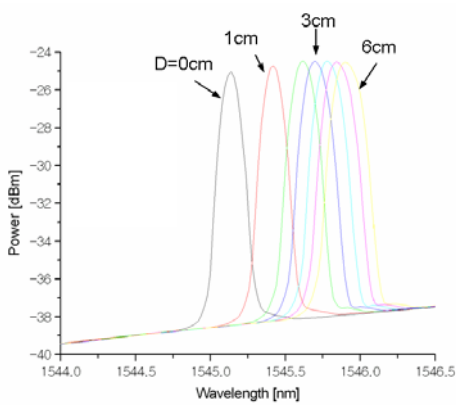


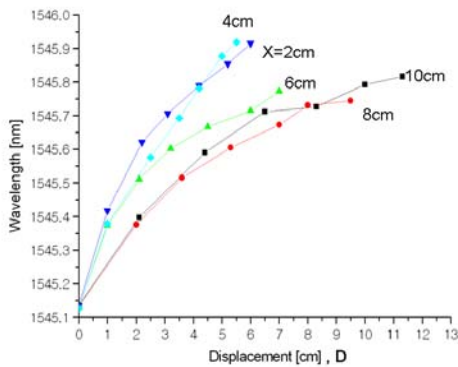
Fig. 1 Experimental set-up for obtaining the optimized FBG position

Fig. 2는 캔틸레버의 상하변위 D에 대하여 센서의 위치를 고정점에서 2cm 씩 이동시키면서 측정한 중심파장의 이동정도를 분석한 결과이다. Fig. 2(a)는 센서위치가 고정점에서 4cm에 위치했을 때 상하변위 D에 대한 반사 스펙트럼이다. D가 커질수록 격자의 주기가 늘어남에 따라 중심파장이 장파장으로 이동하고 있다.

Fig. 2(b)는 가장 민감도가 높은 위치를 보기 위한 실험결과를 센서의 위치 X와 변위 D에 대하여 중심파장의 천이정도를 비교한 그래프이다. FBG 끝단의 위치가 고정점 (X=0)에서 4cm 정도에 위치했을 때 상하변위의 변화에 대한 중심파장의 천이전도는 1.5nm/mm 로 가장 민감하게 반응하는 위치임을 확인할 수 있다. 실험결과로부터 본 연구에서는 FBG의 설치 위치를 고정점에서 4cm에 위치할 수 있게 제작하였다.



(a) Shift in reflection spectra according to the up and down displacement. (X=4cm)



(b) Shift in center wavelength versus vertical displacement of the cantilever in terms of the FBG position installed.

Fig. 2 Measured reflection spectra

3. 수위 검출 모니터링 시스템의 구현

3.1 임베디드된 FBG 센서 구조

FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발을 위해 FBG가 임베디드된 캔틸레버를 제작하였다. 먼저 전체길이가 1000mm이고 구경이 8mm인 캔틸레버를 준비한 후 고정점에서 400mm 되는 부위에 길이 50mm, 깊이 2mm의 V-홈을 낸다. 이 때 깊이가 일정하고 수직으로 홈이 형성되도록 정밀하게 가공하였다. 홈을 깨끗이 닦은 후 FBG를 V-홈에 삽입 후 완전히 부착되도록 광 접

착제를 바르고 자외선으로 30분 이상 경화시켰다. Fig. 3은 제작된 수위 검출용 캔틸레버의 구조를 보여주고 있다.

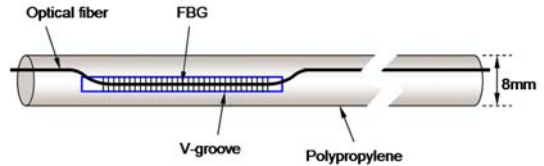


Fig. 3 Schematic of the cantilever being embedded a FBG

3.2 광섬유 센서 복조기술

광섬유 센서에 대한 복조기술은 FBG 센서의 브래그 반사파장을 직접 측정하는 방법과 브래그 파장의 변이를 광량 변화로 변환하여 간접적으로 측정하는 방법인 광 세기복조 방법으로 나눌 수 있다. 일반적으로 브래그 반사파장은 광 스펙트럼분석기나 파장 계측기를 사용하면 쉽게 반사파장 측정을 할 수 있으나 실시간으로 측정하기에는 부적합하며 고가의 장비이므로 현장에서 사용하기에는 어려움이 많다. 이에 브래그 반사 파장을 빠르고 정확하게 측정하기 위해 여러 가지 복조기술이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 에지필터를 이용하여 출력광세기 변조를 하게 된다. FBG에서 반사되어 온 광 스펙트럼은 에지필터의

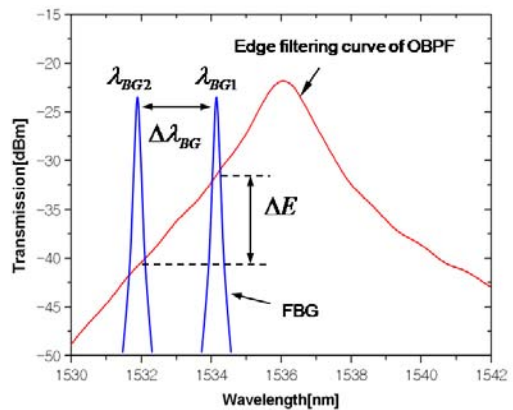


Fig. 4 Basic principle of intensity modulation using edge filters (OBPF: Optical bandpass filter)

특정파장에 위치하게 되는데 이때 필터 응답 곡선에 의해서 출력광 세기가 결정된다. 만약 브래그 파장 λ_{BG1} 이 λ_{BG2} 로 이동한다면 출력광의 세기는 ΔE 만큼 줄어들게 된다. 수위의 변화에 따라 캔틸레버가 상하로 움직이면 FBG의 주기가 변하게 되고 브래그 파장의 이동을 유발하게 되는데 이것은 출력광의 함수로 주어지므로 복조기로 적용하였다. 본 실험에서는 에지필터로 선형영역이 넓은 대역투과필터를 사용하였다.

3.3 LabVIEW 기반 실시간 수위 모니터링 시스템 구조

Fig. 5는 LabVIEW 기반 실시간 수위 모니터링 시스템의 개략도를 보여준다. 광대역 광원 (Broadband light source)이 2×1 coupler (2 입력 1 출력 광 결합기)로 입사되면 광섬유 격자에서 브래그 조건을 만족하는 반사광 (λ_{BG})은 2×1 coupler의 다른 포트에 나온다. 여기에 광 밴드패스 필터 (OBPF)를 설치하여 광세기 변화를 측정할 수 있도록 구성하였다. 일반적으로 광 밴드패스 필터의 투과 스펙트럼은 브래그 파장의 대역보다 훨씬 넓으며 Fig. 4와 같은 선형 예지영역을 제공한다. Fig. 5에서 탱크의 뜨게 (Float)가 수위에 의한 부력을 받게 되면 폴리프로필렌 봉에 임베디드된 광섬유 격자에 변형이 가해지게 되어 브래그 파장이 변하게 되고 이 파장은 밴드패스 필터 투과 스펙트럼의 한쪽 경사면을 따라서 움직인다. 이때

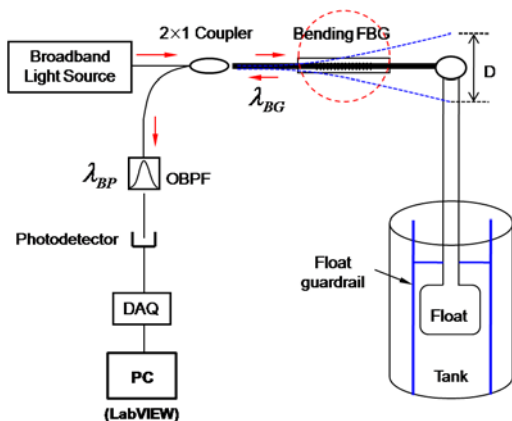
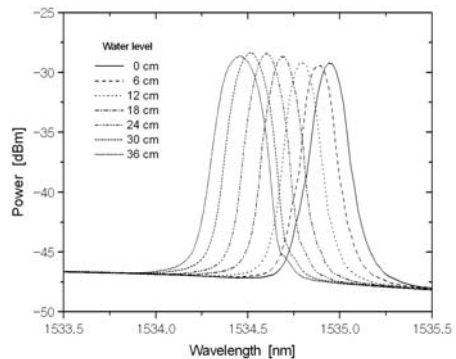


Fig. 5 Schematic of Liquid-level monitoring system based on LabVIEW.

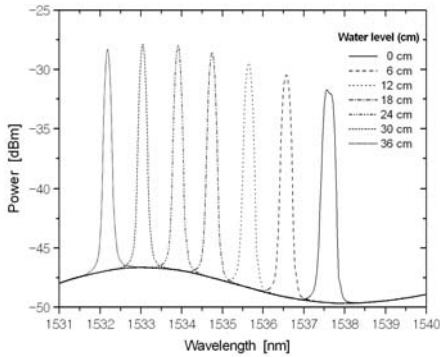
광 검출기 (Photo-detector)에서 광 전력을 전기적인 신호로 바꾸게 된다. 본 연구에서 사용한 광 검출기는 2.5GHz 이상의 3dB 대역폭을 가지는 InGaAs PIN 형이다. 광전 변환된 전기적인 신호는 데이터 인식 보드 (DAQ)와 연결되어 LabVIEW로 구성된 신호처리 프로그램에서 분석하여 PC에서 그 결과를 나타낸다. 최종 모니터링 화면에는 입력되는 전기적인 신호를 처리하여 실제 수위가 동시에 표시될 수 있도록 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

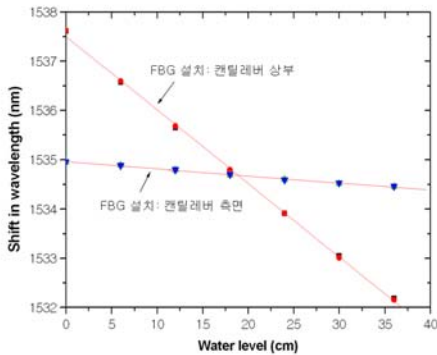
Fig. 6은 물탱크의 높이변화에 대한 FBG 파장의 천이정도를 나타낸 실험 결과이다. FBG 센서의 반응도를 측정하기 위하여 물 높이를 40 cm 까지 조절할 수 있는 탱크를 자체 제작하여 사용하였으며 높이를 7구간으로 나누어서 상하 반복실험을 수행하였다. 이때 FBG 센서 부착 위치는 캔틸레버의 측면과 상부로 하였으며 결과를 비교하였다. Fig. 6(a)는 측면 FBG에 대한 파장천이정도를 보여주며 35pm/cm 의 파장 민감도를 얻었다. 그러나 반사파의 스펙트럼 폭이 넓어짐을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 상부 FBG에 대한 경우 150pm/cm 의 파장민감도를 보였으며 반사 스펙트럼이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 실험결과로부터 물 높이 변화에 대한 파장 천이의 정도는 Fig. 6(c)과 같이 측면 FBG 보다는 상부 FBG가 4배 이상 민감하게 반응함을 보였으며 스펙트럼도 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.



(a) FBG is installed on the side of the cantilever



(b) FBG is installed in the upside of the cantilever



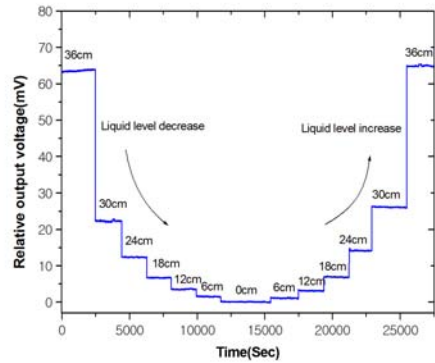
(c) Water level sensitivity in terms of the FBG position.

Fig. 6 Shift in FBG wavelength according to the water level change

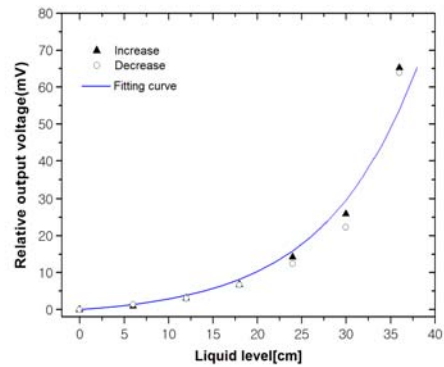
Fig. 7(a)은 Fig. 5에서 구현된 모니터링 시스템을 이용하여 액체의 높이 변화를 측정된 결과를 보여준다. 일정수위를 30분 동안 유지하면서 입력되는 광전 변환된 신호를 처리하도록 하였으며 수위는 4cm씩 변화시켰다. 수위가 높은 상태에서는 상대적으로 전기적인 신호의 변화가 크게 나타나지만 탱크의 바닥에 가까이 갈수록 민감도가 떨어진다. 이것은 캔틸레버에 부착된 FBG의 주기변화가 수위변화에 둔감해지기 때문이다.

수위 변화에 대한 전기신호의 크기를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 수위의 증감에 관계없이 비슷한 전기적인 신호가 출력되는 것으로 보아 FBG의 주기변화가 대칭적으로 나타남을 알 수 있다. 이러한 정보를 이용하여 입출력관계를 규정하는 식을 유도

하고 시스템에 적용하면 실제의 수위 변화를 측정할 수 있다.



(a) Electrical sensing signal during the water-level change



(b) Electrical amplitude versus liquid level
Fig. 7 Plots showing the performance of the real-time liquid level monitoring system

5. 결 론

본 논문에서는 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템에서 수위 레벨 변화를 실시간으로 측정할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 개발하였다. FBG 센서의 위치별 파장편이 정도를 측정하여 센서의 위치를 고정점에서 4cm 되는 곳에 설치하였으며 폴리프로필렌 봉에 임베디드 형태로 삽입하여 제작하였다. 센서의 위치는 캔틸레버의 측면보다는 상하부가 유리함을 밝혔고 민감도는 4배 이상 차이가 남을 보였다. 수위변화에 따른 반사 신호는 에지 필터(edge filter)를 사용하여 광

세기 변조를 이용할 수 있도록 하였다. 모니터링 시스템은 LabVIEW를 기반으로 구현하였으며 수위 변화에 대한 전기적인 신호의 변화가 실시간으로 관측될 수 있게 하였다.

그러나 본 논문에서 개발된 수위 모니터링 시스템을 대형선박 또는 액체 저장고의 수위를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 시스템으로의 적용하기 위해서는 수위변화에 대한 광 신호 세기의 변화가 비선형적으로 나타나는 현상을 보완해야 한다. 만약 수위변화를 파장의 이동을 이용하여 구현할 경우 선형성을 얻을 수 있지만 신호처리가 복잡하고 가격이 수배 이상 증가하는 단점이 있다. 향후 연구에서는 수위변화에 대한 광신호세기의 변화의 비선형성을 개선하고자 한다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 NURI 항만물류사업단 산학연관과제로 수행된 연구입니다.

참고문헌

[1] J. A. Morris and C. R. Pollock, "A digital fiber-optic liquid level sensor", J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 7, pp. 920-925, 1987.

[2] 김진욱, 손경락, 심준환, "선박적용을 위한 광섬유 브래그 격자형 수위 모니터링 센서 시스템", 후기학술발표대회, 한국마린엔지니어링학회, PP. 167~168, 2008

[3] C. Yang, S. Chen, and G. Yang, "Fiber optical liquid level sensor under cryogenic environment", Sens. Actuators A, Vol. 94, pp. 69-75, 2001.

[4] M. Lomer, J. Arrue, C. Jauregui, P. Aiestaran, J. Zubia, and J. M. Lopez-Higuera, " Lateral Polishing of bends in plastic optical fibers applied to a multipoint liquid-level measurement sensor", Sens. Actuators A, Vol. 137,

pp. 68-73, 2007.

[5] T. Guo, Q. Zhao, Q. dou, H. Zhang, L. Xue, G. Huang, and X. Dong, "Temperature-insensitive fiber Bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever beam", IEEE Photon Technol. Lett., Vol. 17, No. 11, pp. 2400-2402, 2005.

저 자 소 개



손경락(孫慶洛)

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학 석사), 2002년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2007년 1월~2008년 1월 University of New South Wales 연구교수, 2003년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 조교수



김진욱(金鎭旭)

2007년 2월 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사), 2009년 2월 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)



조석제(趙奭濟)

1982년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1988년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1991년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 1991년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 교수



심준환(沈俊煥)

1991년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1998년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2003년 8월~2005년 2월 텍사스주립대(알링톤소재) 연구교수, 1998년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 부교수