

## 울돌목 시험조류발전소 구조물 안전감시시스템 구축에 관한 연구

이 진학<sup>1)</sup>, 박 우선<sup>2)</sup>, 박 진순<sup>3)</sup>, 이 광수<sup>4)</sup>

### Study on Building a Structural Health Monitoring System for Uldolmok Tidal Current Power Plant

Jin-Hak Yi, Woo-Sun Park, Jin-Soon Park, Kwang-Soo Lee

**Keywords** : Uldolmok, Tidal Current Power Plant, Structural Health Monitoring System, Smart Sensor

**Abstract** : In this paper, we described the fundamental concepts of proposed structural health monitoring system for Uldolmok Tidal Current Power Plant focusing on the use of smart sensors including fiber bragg grating sensors and macro fiber composite sensors. The structural health monitoring system can play an important role to maintain the structural safety for offshore structures like as bridges and high-rise buildings. In the case of tidal current power plant, the monitoring system is much more important since the structures are usually constructed at the site with severer environmental loadings such as high current speed.

#### Subscripts

FBG : fiber bragg grating  
LCC : life cycle cost  
MFC : macro fiber composite  
PVDF : poly vinylidene fluoride  
PZT : Pb-Zr-Ti  
SHM : structural health monitoring  
TCPP : tidal current power plant

#### 1. 서 론

울돌목(진도수도)을 비롯하여 장죽수도, 맹골수도 등 국내 서남부해안에 풍부하게 존재하고 있는 조류에너지를 적극적으로 활용하여 이들로 부터 전력을 생산함으로써, 탄소배출량 저감에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대하고 있다. 현재 국내에서는 울돌목에 시험조류발전소를 건설하고 있으며, 과거 수 년 동안 효율이 높은 발전설비를 개발하기 위한 적극적인 연구개발을 수행하고 있다. 이러한 발전설비 개발에 대한 활발한 연구와는 달리 구조적인 측면에서의 연구는 비교적 최근 시작되었다고 할 수 있다. 구조적인 측면에서

볼 때, 조류에너지가 풍부하다는 것은 곧 빠른 유속의 조류가 존재한다는 것을 의미하고 있으며, 이는 구조물에 큰 조류력이 상시 작용하고 있음을 의미한다. 현재 울돌목에서는 최대 6.5m/sec, 13knot의 유속이 발생하고 있으며, 따라서 이러한 유속에 의한 큰 조류하중이 발생하고, 이에 대하여 효과적으로 하중을 지반으로 전달할 수 있는 구조형식의 개발이 필요하다. 또한 이러한 하중에 대하여 구조적 안전성을 확보하는 것이 전체 발전시설의 유지관리를 위하여 매우 중요하게 된다. 울돌목 시험조류발전소가 건설될 예정인 울돌목 지점은 유속이 빠르고, 퇴적층이 거의 없는 단단한 암반지반이 대부분이다. 따라서 자켓 구조물의

- 1) 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원  
E-mail : yijh@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7811 Fax : (031)408-5823
- 2) 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원  
E-mail : wspark@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6325 Fax : (031)408-5823
- 3) 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임기술원  
E-mail : jpark@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7805 Fax : (031)408-5823
- 4) 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원  
E-mail : kslee@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6300 Fax : (031)408-5823

파일 근입을 위한 충분한 직경의 RCD 천공 작업이 어려우며, 자켓을 일시 거치한 후, 자켓파일을 근입하는 방식의 시공이 고려되고 있다. 또한 이러한 해상작업을 수행할 수 있는 시간이 매우 제한적이고, 해상작업에 따른 어려움이 많아 충분한 안전성 확보를 위해서는 구조물 제작뿐만 아니라 시공 및 유지관리가 매우 중요하다고 할 수 있다.

최근 기상청에서 예보한 바 있는 슈퍼태풍이 발생하거나, 혹은 울돌목을 지나가는 선박이 구조물에 충돌하게 되는 경우, 신속한 구조 안전성 평가가 중요하며, 이러한 특수상황에서의 안전성 감시뿐만 아니라 상시 안전성을 감시하는 시스템(SHM System)이 필요하다. 최근까지는 주로 교량이나 고층빌딩과 같은 시설물의 SHM 시스템에 대하여 많은 연구가 이루어졌으며, 조류발전소와 같은 해양구조물에 대한 안전감시 시스템은 그 적용사례가 극히 제한적이며, 따라서 앞으로 해결해야 할 문제가 많이 존재하고 있다[1][2]. 해양구조물에 대한 SHM 시스템은 육상의 시스템과는 달리 항상 해수에 노출될 수 있기 때문에 이러한 환경에 대하여 내구성이 뛰어난 센서, 케이블 및 계측장비 등을 사용하여야 하며, 또한 설치 시에도 해수로 인한 어려움이 많다. 이 논문에서는 이러한 기술적인 어려움을 해결하고, 울돌목 시험조류발전소에 대한 SHM 시스템 구축을 위하여 사용하고 있는 스마트 센서에 대하여 중점적으로 설명하고자 한다.

## 2. 구조물 안전감시시스템 개념

울돌목 시험조류발전소 구조물의 안전감시시스템은 다음의 Table 1과 Fig. 1에 제시되어 있는 것과 같이 유속 및 터빈의 회전수 등과 같이 발전과 관련된 항목과 함께 변형률, 가속도 등과 같은 구조물의 응답을 동시에 계측하도록 계획되었다. 일반적인 교량 구조물에서 최근 가속도 계측을 통한 교량의 모드특성을 활용하는 것에 관한 연구가 활발한 것과 달리 Table 1에서 보면 변형률 계측을 위하여 총 10 지점에서의 변형률을 기존 센서와 함께 FBG 센서를 이용하여 상호보완적으로 계측하고 있으며, 따라서 이 시스템에서는 변형률 계측을 중심으로 구조물 응답을 계측하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 변형률에 의한 응답이 더욱 효과적인 것은 교량이나 빌딩과 같은 구조물이 차량이나 바람에 의하여 예측이 불가능한 하중을 받고, 또한 구조물 자체의 고정하중에 비하여 하중의 크기가 작기 때문에 활하중에 의한 변형률 응답이 작고, 따라서 계측잡음 등에 의하여 변형률 응답이 큰 의미를 가지기 어려운 경우가 많으나, 울돌목 시험조류발전소의 경우 상대

적으로 조류에 의한 활하중이 크게 작용하고 있으며, 또한 조류의 유속 및 방향은 이미 알고 있기 때문에 하중과 응답의 관계가 비교적 명확하게 드러나기 때문이다. Fig 2는 벽파항에서 센서를 설치하고 있는 모습이다.

Table 1. Items for Measurement System

Properties	Number of Sensors
Acceleration	10EA (X-4, Y-4, Z-2)
Strain (Conventional)	8EA
Strain (FBG-type)	10EA
Impedance(MFC Sensor)	6EA
Inclination	2EA (Rx, Ry)
Current velocity	1EA (H-ADCP)
Torque	6EA (3EA/Axis)
RPM	2EA (1EA/Axis)
Temperature	2EA (Atmosphere/sea)

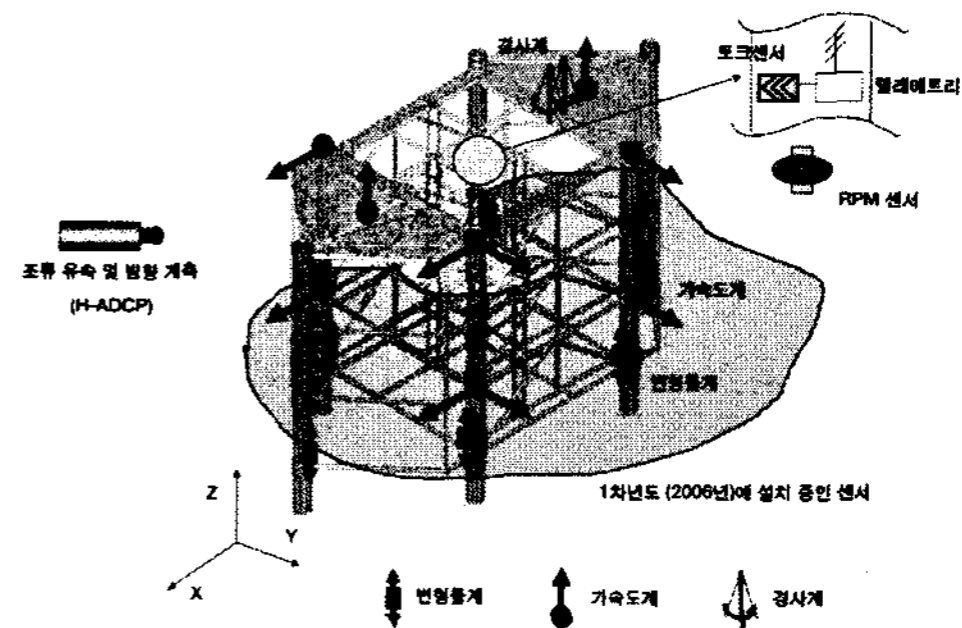


Fig 1. Layout of SHM System for Uldolmok TCPP

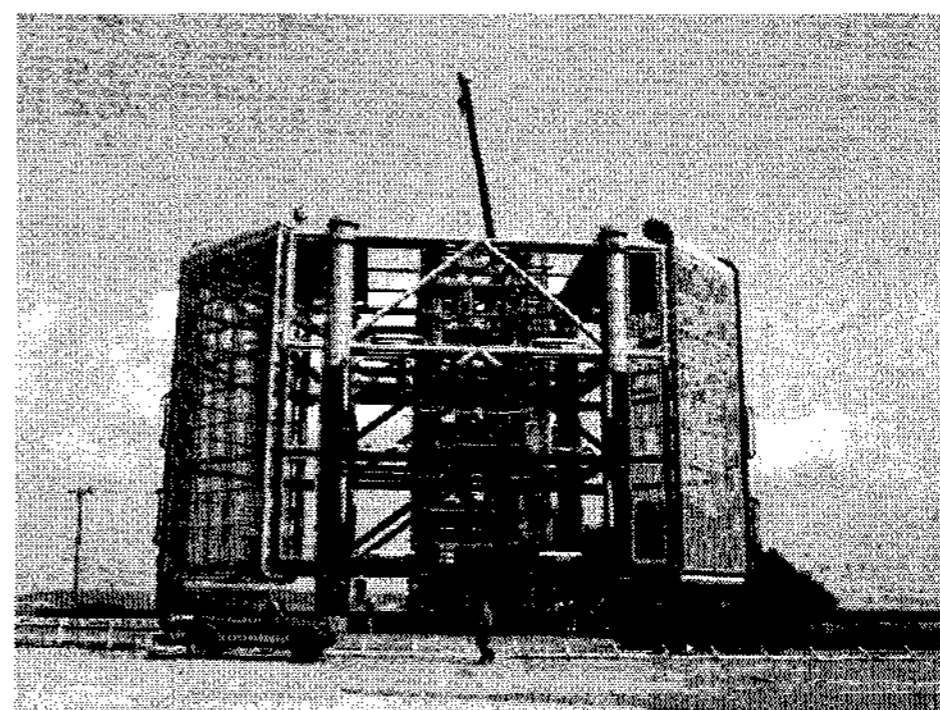


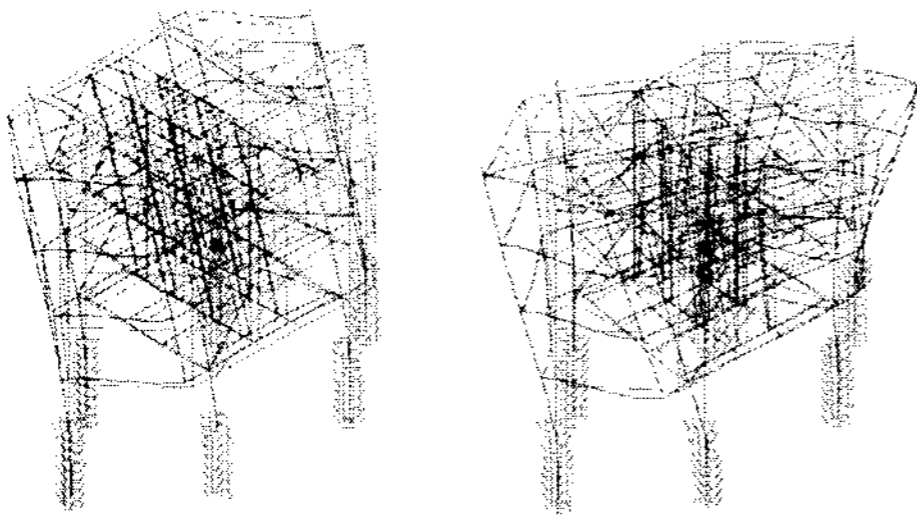
Fig 2. Jacket Structure of Uldolmok TCPP

## 3. 구조 안전성 감시를 위한 계측시스템

### 3.1 가속도 및 변형률 계측

다음 Fig. 4는 울돌목 시험조류발전소 구조물의 진동모드를 SAP2000을 이용하여 구한 결과이다. 그림에서 보여준 진동모드는 각각 1차의 굽힘

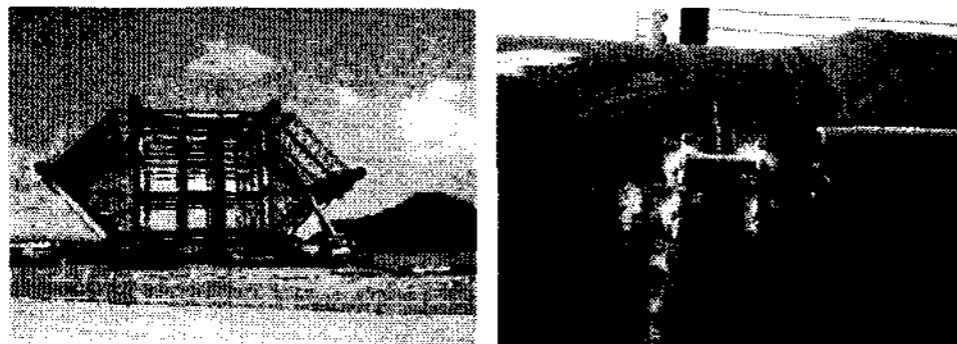
모드(bending mode)와 비틀림 모드(torsional mode)이며, 각각 1.39Hz와 2.70Hz로 계산되었다. 이러한 진동모드는 구조물의 형상 및 강성 등에 의하여 결정된다. 따라서 자켓 레그 및 주요 구조부재에 구조적인 손상이 발생하는 경우(즉 구조물의 형상 또는 강성에 변화가 발생하는 경우), 진동특성이 변하게 되어, 고유진동수 및 모드형상에도 변화가 발생하게 되며, 이러한 변화로부터 손상지점 및 손상정도를 평가할 수 있다. 이러한 진동모드를 평가하기 위하여 이 연구에서는 총 8개의 가속도계를 사용하고자 하였다. 가속도계는 DL기준으로 DL-5.7m 지점에 X-방향 2개, Y-방향 2개를 설치하고, 상부 Deck에서 같은 방식으로 4개의 가속도계를 설치하고자 하였다.



(a) 1st bending mode (1.39Hz) (b) 1st torsional mode (2.70Hz)  
**Fig. 4 Example of Vibration Modes for Uldolmok TCPP**

한편 조류력에 의한 변형률은 일반적인 건축 구조물의 풍하중에 의한 결과와 마찬가지로 자켓 레그의 하부에서 크게 발생하며, 이러한 변형률은 조류의 유속과 유향에 따라 결정되며, 진동모드와 마찬가지로 구조물에 손상이 발생하면, 변형률의 크기 및 경향이 변하게 된다. 이러한 변화로부터 구조물의 안전성을 감시할 수 있게 된다.

다음의 그림 2는 가속도계 및 변형률계를 설



(a) Jacket Structures (b) Jig for strain gauges



(d) Case for accelerometers (d) Case for strain gauges

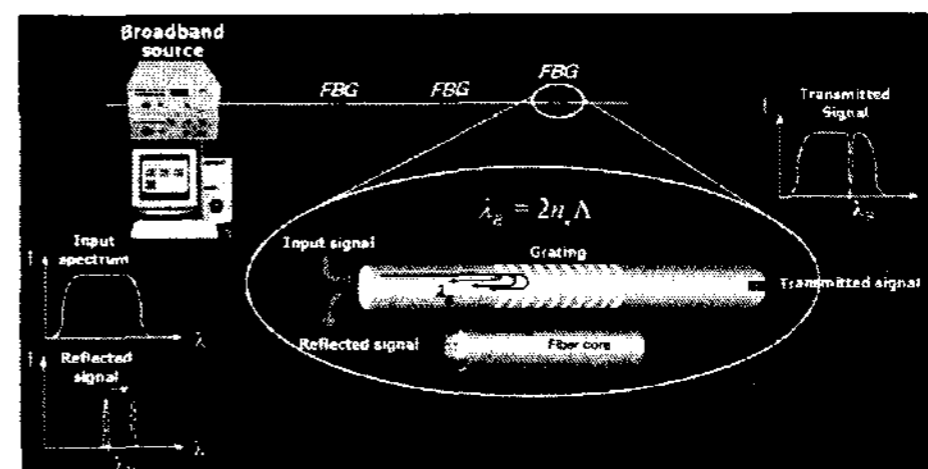
**Fig. 5 Example of Vibration Modes for Uldolmok TCPP**

치하기 위한 지그 및 보호케이스, 배관 등을 보여 주고 있는 그림이다. 변형률계의 경우 자켓구조물이 현장에 설치되기 이전에 육상에서 모든 설치 작업이 완료될 수 있으며, 가속도계의 경우 충격에 민감하기 때문에 파일 항타작업이 끝난 후 잠수부에 의하여 설치작업이 이루어지게 된다. 타도가 심하고 시야확보가 어려운 수중에서 가속도계 설치를 용이하게 하고, 가속도계용 케이블을 보호하기 위하여 보호케이스 및 배관이 육상작업에 의하여 설치되었다.

### 3.2 광섬유 FBG 센서

광섬유 FBG 센서 (Fig. 6)는 광섬유 자체에 레이저를 이용하여 임의의 파장을 갖는 브레그 격자를 만들고, 광섬유의 한 쪽 끝에서 광대역의 파장을 갖는 빛을 발생시켜 그 격자를 통과하게 될 때 브레그 격자의 파장은 반사되어 돌아오고 그 이외의 파장은 통과되어 진행되는 특성을 이용한 센서로써, 격자가 새겨진 부위에 임의의 변형이 발생하게 되는 경우, 그 변형에 의하여 격자 사이의 간격이 줄어들거나 늘어나게 되므로 반사되는 빛의 파장에 변화가 생기게 된다. 이러한 변화를 읽음으로써 격자 지점에서의 변형률을 측정할 수 있게 되며, 이 격자 부위를 어떻게 처리하느냐에 따라 가속도, 파압, 변위 등 다양한 물리량을 측정할 수 있게 된다. 이러한 광섬유 FBG 센서는 하나의 광섬유 가닥의 여러 부분에 각기 다른 파장의 브레그 격자를 새김으로써 여러 지점에서의 물리량을 측정할 수 있는 다지점 측정이 가능한 장점이 있으며, 또한 전기가 아닌 광을 이용함으로써 전자기적인 간섭에 의한 측정잡음이 없고, 구리도선이 아닌 유리재질의 광섬유를 사용함으로써 해수에 의한 재료 손실이 없는 장점 있다. 이러한 장점과 함께 유리로 되어 있음으로 인하여 취성이 강하며, 구리도선과 같이 다루기가 쉽지 않은 단점이 있어 최근까지 많은 장점에도 불구하고 활용이 되지 못하였으나 최근 이러한 단점을 극복한 광섬유 케이블 및 센서가 개발되어 중국, 일본, 미국, 유럽 등 여러 나라에서 활발한 적용이 이루어지고 있다.

이 연구에서는 광섬유 FBG 센서를 자켓 레그 하부에 설치하고 또한 하나의 레그에 대해서는 다중계측 성능을 평가하기 위하여 세 지점에서의 변형률을 측정할 수 있도록 하였다.



**Fig. 6 Schematic diagram of FBG sensor []**

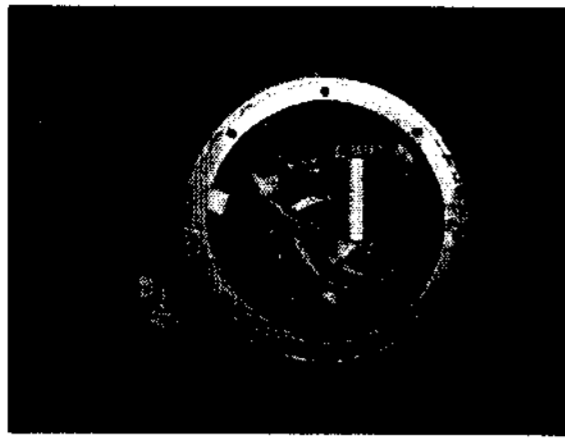


Fig. 7 Installation of FBG-type strain sensor

### 3.3 MFC(Macro Fiber Composite) 센서

MFC 센서는 물리적인 신호를 전기적인 신호로, 전기적인 신호를 물리적인 신호로 변환하는 압전센서의 한 종류로써, 최근 그 적용 연구가 매우 활발한 압전센서이다. MFC 센서는 강성이 큰 PZT 센서와는 달리 매우 유연하여 곡면을 가진 구조물에 대한 적용이 용이하며, 계측잡음이 큰 PVDF에 비해서는 신호의 증폭비가 크고, 계측잡음이 작아 압전센서 중 가장 우수한 성능을 가지고 있다고 할 수 있다. MFC 센서를 다양하게 이용할 수 있는데, 이 연구에서는 자켓 레그의 하부에 MFC 센서를 한 개씩 부착하여 Impedance를 측정함으로써 균열, 부식 등의 재료손상을 검출할 수 있도록 하였다. 다음의 Fig. 8은 NASA에서 개발한 MFC센서를 보여주고 있으며, Fig. 9는 알루미늄 판에 대하여 부식이 있는 경우 MFC 센서를 이용하여 이를 검출한 예를 보여준 것이며, Fig. 10은 자켓 레그 하부에 부착한 MFC 센서를 보여주고 있는 것이다.



Fig 8. NASA Macro-Fiber Composites Actuator []

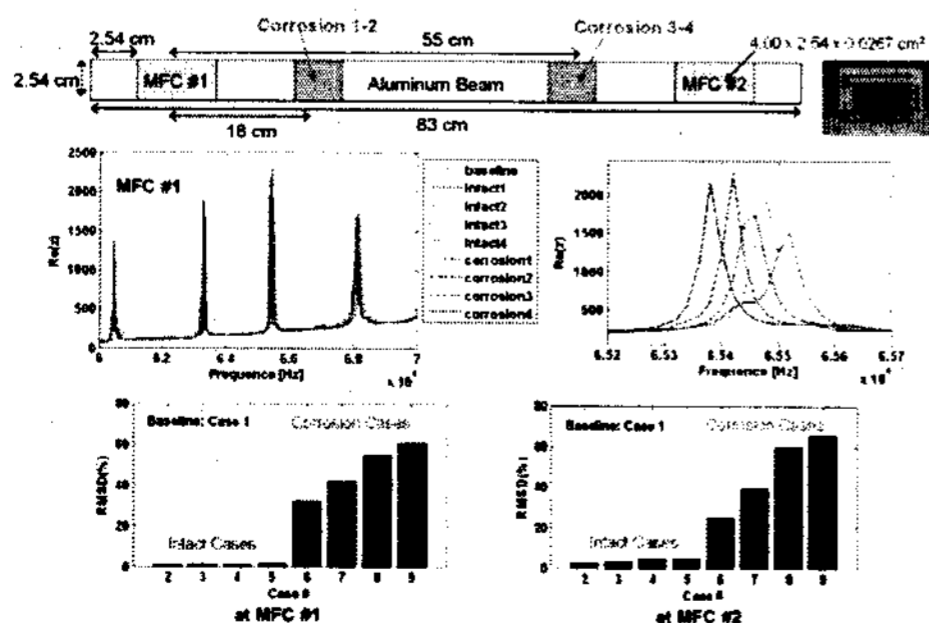
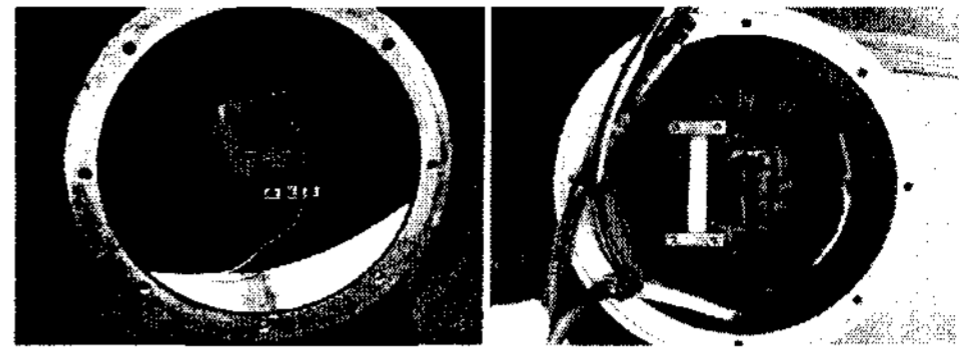


Fig 9. MFC Sensor for corrosion detection []



(a) MFC Sensor

(b) Protection of MFC Sensor and Installation of KM-100B

Fig 10. Installation of MFC Sensor

### 4. 결 론

이 논문에서는 울돌목시험조류발전소에 대한 구조물 안전감시시스템 구축에 관한 내용을 정리하였으며, 향후 이러한 시스템 구축에 의하여 안전한 구조물 유지관리가 이루어질 수 있도록 할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부 조력조류에너지 실용화 기술개발 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

### References

- [1] L. Ren, H.-N. Li, J. Zhou, D.-S. Li, and L. Sun, (2006) "Health monitoring system for offshore platform with fiber Bragg grating sensors," *Optical Engineering*, 45(8), pp.
- [2] R. Rolfes, W.-J. Gerasch, G. Haake, J. Rietz, S. Zerbst (2006) "Early Damage Detection System for Towers and Rotor Blades of Offshore Wind Turbines," *Proc. of Third European Workshop on Structural Health Monitoring*, July 5-7, 2006
- [3] H. Park, S. Shin, K. Koo, and C. Yun, 2007, "Modal flexibility-based damage detection technique for online structural health monitoring using smart FBG sensors," *Proc. of Smart Structures and Materials and NDE for Health Monitoring and Diagnosis*, 18-22 March, San Diego, USA.
- [4] S. Park, B.L. Grisso, D.J. Inman, C-B Yun (2007) "MFC-Based Structural Health Monitoring Using a Miniaturized Impedance Measuring Chip for Corrosion Detection," *Research in Nondestructive Evaluation*. 18(2), pp. 139-150.
- [4] W. Wilkie, D. Inman, J. High, R. Williams, 2004, "Recent developments in NASA piezocomposite actuator technology," *Proc. of 9th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 14-15 Jun. 2004.