

센서를 이용한 해양구조물의 유지관리 방안

이흥수^{1*}, 김영석¹, 이용범², 박태서²
(주)다음기술단¹, 우리기술주식회사²

The Maintenance Method of Marine Structures using Sensor

Heung Su Lee^{1*}, Young Seok Kim¹, Yong Beom Lee², Tea Seo Park²

Abstract : 해양구조물은 항시 염해환경에 노출되어 있기 때문에 내구성이 문제가 되므로 구조물에 대한 유지관리가 중요하지만, 해양구조물의 수중부에 대한 접근이 쉽지 않아 구조물 유지관리에 어려움이 있는 실정이다. 해양구조물을 유지관리하는 방안으로는 구조물 시공시에 부재 내부 철근이나 강재에 부식 저항성이 뛰어난 광섬유 센서를 부착하여 구조물의 상태를 상시 관리하는 방안과 소나센서를 이용하여 필요시 구조물 표면상태를 점검하는 방안이 활용가능하다.

Key Words : Marine Structure(해양구조물), FBG Sensor(FBG 센서), SONAR(소나), Maintenance(유지관리)

1. 개요

해양구조물은 항시 염해환경에 노출되어 있으며, 구조물의 수중부는 접근이 어려워 구조물의 상태를 확인하기 어려운 상황이다. 태풍, 충격, 지진 등에 의해 구조물 수중부에 손상이 발생하는 경우, 적절한 시기에 손상을 파악하고 보수보강하는 등 지속적으로 유지관리를 수행하지 않으면 보강이 어려운 상황에 처하거나 구조물이 붕괴될 수도 있다.

해양구조물을 유지관리하는 방법으로 구조물 내부 철근이나 강재에 부식 저항성이 뛰어나고 반영구적으로 사용이 가능한 광섬유센서 중에서 FBG센서를 설치하여 구조물의 거동을 실시간으로 파악할 수 있다. 또한 구조물 수중부의 표면상태를 확인하기 위해 잠수부 투입없이 소나 센서를 이용하여 구조물의 표면상태를 확인하여 손상을 파악하고 보수보강 방안을 수립할 수 있다.

본 논문에서는 해양구조물을 유지관리하는 방안으로 FBG센서를 이용하여 시설물의 상태를 정량적으로 파악하고, 소나센서를 이용하여 구조물 표면상태를 파악하여 효율적인 유지관리를 수행할 수 있는 방안에 대해 살펴보고자 한다.

2. FBG 센서의 특징

FBG(Fiber optic Bragg Grating) 센서는 광섬유 센서의 일종으로 광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절률이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리에 있으며, 광섬유 코어(Core)로 입사된 빛은 굴절률이 높은 코어층과 굴절률이 낮은 클래딩(Cladding)층의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다.

FBG 센서는 전기식 센서에 비해 부식에 대한 저항성이 뛰어나고, 전자기장에 의한 간섭을 받지 않으며, 케이블 하나에 여러 개의 센서 연결이 가능한 특징이 있다.

FBG 변형률 센서의 변위 측정구조는 Fig. 1과 같으며, 길이의 변화에 따라 L 에서부터 $L + \Delta L$ 까지 신축성 있게 광섬유 변형률 센서의 길이 변화가 가능하면서 부착된 구조물의 정확한 변형률 측정이 가능하다.

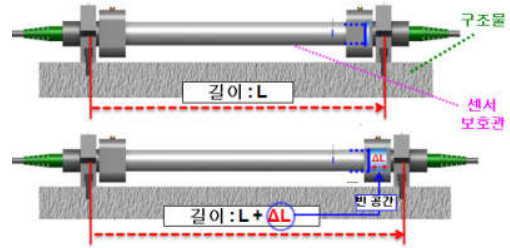


Fig. 1 Fiber Optic Bragg Grating Strain Sensor

3. 센서 최적화 및 안전등급 검토

3.1. 구조물 거동 분석

해양구조물인 잔교식 안벽의 거동을 실시간으로 확인하기 위해 FBG 센서를 설치할 때, 센서가 구조물의 거동을 올바르게 나타낼 수 있도록 부재력 또는 변형이 최대가 되는 부분에 센서를 부착하기 위해서 구조물의 거동을 해석적으로 분석한다. 구조해석은 구조물 해석시에 많이 사용되고 있는 유한요소해석 프로그램인 Midas Civil을 이용하여 해석한다. 해석을 위한 모델링은 Fig. 2와 같다.

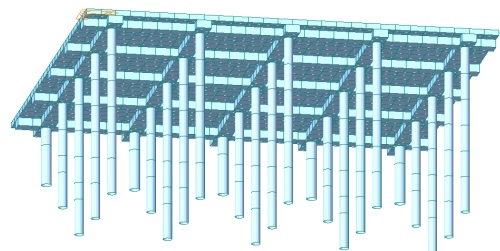
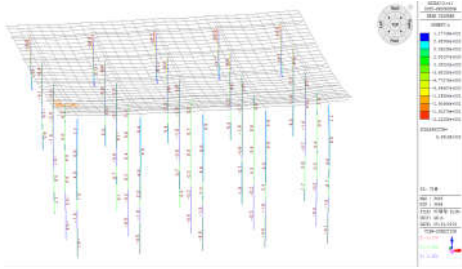
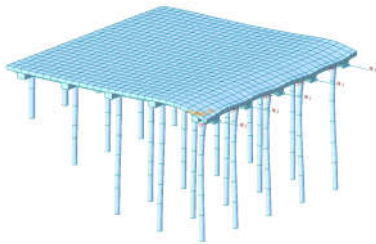


Fig. 2 Modeling of Landing Pier

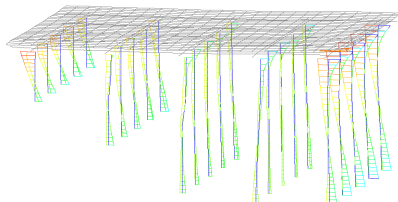
구조해석 결과를 분석해보면, 자중과 상재하중 등 고정하중은 육지쪽에 있는 파일 상단에 최대부재력을 발생시키고, 파력과 선박충격 등 사용중에 발생하는 하중과 지진을 포함한 하중조합에 의한 최대부재력은 바닷가쪽 파일 상단에서 가장 큰 부재력이 발생하고 있다. 파력 등 파일에 작용하는 하중에 의한 최대변형은 바닷가 방향 파일 중간부분에서, 선박충격 등 상부구조에 작용하는 하중에 따른 최대변형은 파일상단에서 아래방향으로 파일길이의 30% 정도 되는 부분에서 발생하고 있다. 발생한 부재력과 변형 거동을 보았을 때, 변형을 센서는 파일 상단, 파일상단에서 길이의 30% 정도 아래부분, 파일 중간부분 중에서 부착하는 것이 적합한 것으로 검토되었다.



(a) Bending Moment Diagram by Self-weight



(b) Displacement Diagram by Ship Impact Force



(c) Maximum Bending Moment Diagram by Load Combination

3.2. 안전등급 산정

강도설계법과 허용응력설계법에 따른 안전성 평가 계산식은 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\text{강도설계법} = \frac{\text{설계모멘트}}{\text{작용모멘트}} \quad (1)$$

$$\text{허용응력설계법} = \frac{\text{허용응력}}{\text{검토응력}} \quad (2)$$

강도설계법에 의한 검토시는 각 부재의 설계모멘트와 작용모멘트의 비가 1.0 이상인 경우 그리고 허용응력설계법의 경우는 허용응력과 검토응력의 비가 1.0 이상인 경우를 “a”로 설정하였으며, 1.0 미만, 0.9 미만, 0.75 미만의 경우를 각각 “c”, “d”, “e”로 설정하였

다. 따라서, 설계기준을 만족하는 경우 모두 “a”를 적용하고, 만족시키지 못하는 경우는 “c” 이하를 적용하였으며 “b”는 평가기준에서 제외하였다(MOLIT, KISTEC, 2011).

Table 1 Safety Factor by Structure Analysis

Marks	Safety Factor
a	more 1.0
c	more 0.9 ~ under 1.0
d	more 0.75 ~ under 0.9
e	under 0.75

$$\frac{f_c}{f_{ca}} + \frac{f_{bd} + f_{bl}}{f_{ba}} \leq 1.0 \quad (3)$$

여기서, f_c 는 축하중에 의한 응력이고, f_{ca} 는 허용압축응력이며, f_{ba} 는 허용휨응력이고, 휨응력은 고정하중에 의한 휨응력 f_{bd} 와 활하중 외력에 의한 휨응력 f_{bl} 로 구분된다. f_{bl} 은 FBG 변형을 센서를 파일에 부착하여 측정된 파일 변형률에 강재의 탄성계수를 곱하여 실시간 응력을 얻을 수 있다.

발생된 변형률이 임계치에 도달하면 안전등급이 변경된다.

Table 2 Strain Rate Threshold according to Safety Grade

Mark	Safety Factor	Strain Threshold of f_{bl}
a	more 1.0	-
c	more 0.9 ~ under 1.0	$[(1.0 - \frac{f_c}{f_{ca}}) \times f_{ba} - f_{bd}] \div E = \epsilon$
d	more 0.75 ~ under 0.9	$[(\frac{1}{0.9} - \frac{f_c}{f_{ca}}) \times f_{ba} - f_{bd}] \div E = \epsilon$
e	under 0.75	$[(\frac{1}{0.75} - \frac{f_c}{f_{ca}}) \times f_{ba} - f_{bd}] \div E = \epsilon$

4. 소나 센서의 적용

4.1. 일체화 전동지그

소나 센서를 이용해 구조물 표면상태를 점검하는 방법으로 사이드스캔소나가 있다. 사이드스캔소나는 예인식으로 보트에 연결하여 촬영하는 방법이며, 이를 이용해 수중구조물의 벽체를 점검할 때 원하는 단면을 점검하기 어려운 단점을 갖고 있다. 이로 인하여 점검 소요시간이 증가하여 수중점검의 효율성이 떨어지고, 수중점검 데이터의 신뢰도가 저하되는 경우가 생긴다. 이를 개선하기 위하여 점검각도를 제어할 수 있는 2MHz 소나의 일체화형 전동지그를 적용하였다.

전동지그는 점검용 보트에 장착하여 소나를 운영하는 시스템으로 컨트롤 박스를 이용하여 점검보트 위에서 2MHz 소나의 점검각도를 제어할 수 있다. 전동지그에 연결된 제어시스템은 컨트롤 박스의 조이스틱을 통해 조작되며 컨트롤 박스의 화면에 현재 변경한 각도가 표시되게 된다. 점검자는 이를 확인하여 수중점검에 필요한 촬영각도를 정확히 변경 가능하다. Fig. 4는 2MHz 소나용 전동지그를 운용하는 모습이다.



(a) 컨트롤 콘솔 조작 (각도조정)



(b) 2MHz 소나 제어

Fig. 4 Electric jig to control scan area of 2MHz sonar

4.2. 2MHz 소나 분해능

고해상도인 2MHz 소나는 설계에 의한 이론상 분해능은 7.5mm인데, 실험을 하여 소나의 분해능을 확인하였다. 제작된 시편의 간격을 소나 이미지로 구분가능한지 여부에 따라 분해능을 확인하는 방법으로 실험하였다. 현재 운용 중인 1MHz급의 소나와 비교 실험을 하였으며, 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Resolution test in field

1MHz Sonar 시편간격 3cm	2MHz Sonar 시편간격 1.0cm

1MHz 소나는 실험 결과 분해능이 최대 3cm로 나타났으며, 고해상도 2MHz 소나는 설계 목표인 10mm 이하의 분해능이 나오는 것을 확인하였다. 따라서, 고해상도 2MHz 소나는 수중구조물 손상 및 세굴 조사에서 기존 1MHz 급 소나에 비해 정밀한 조사가 이뤄질 것으로 판단된다.

5. 결론

해양구조물 수중부에 대한 안전점검시에 잠수사를 투입하여 수중부에 대해 직접 외관조사를 하거나, 수중

원격제어장비(ROV) 또는 수중음향탐지기(SONAR)를 가지고 이미지에 기반하여 조사하는 방법을 주로 사용하고 있다. 하지만 탁도와 환경의 영향으로 인해 수중 구조물의 손상 파악이 어려우며, 태풍, 충격, 지진 등에 의해 손상이 발생해도 즉각적이고 정량적으로 파악하기가 어려운 상황이다. 이를 해결하기 위해 해양구조물 수중부에 FBG 센서를 부착하여 시설물의 거동을 실시간으로 계측하여 구조적 안전성 평가가 가능하다.

파일에 작용하는 응력은 고정하중에 의한 응력과 활하중에 의한 응력으로 구분되는데, 고정하중에 의한 응력은 구조해석을 통해 산정하고 활하중에 의한 응력은 FBG 센서에서 획득된 변형률을 응력으로 환산하여 계산하였다. 고정하중에 의한 응력과 활하중에 의한 응력을 더하여 파일의 발생응력이 산정되며, 이를 허용응력과 비교하여 파일의 안전성을 평가하게 된다.

해양구조물 수중부 표면상태를 점검할 수 있는 소나 센서인 고해상도 2MHz 소나의 분해능을 확인하기 위해 시편의 간격을 조절하며 분해능을 확인하였다. 1MHz 소나는 실험결과 분해능이 최대 3cm로 나타났으나, 고해상도 2MHz 소나는 10mm 이하의 분해능이 나와 자세한 구조물 손상 확인이 가능한 것으로 나타났다.

FBG 변형률 센서의 데이터를 분석하면 실시간으로 수중부 파일의 거동을 확인하고 안전성을 평가하는 유지관리가 가능하며, 고해상도 2MHz 소나를 이용하면 위험지역에 잠수사 투입없이 해양구조물 표면상태를 점검하는 유지관리가 가능하다.

참고문헌

- 1) Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2014), Ports and Harbors Design Code
- 2) Kim, Y.S., Lee, H.S., Park, C., Choi, S.S.(2017), A Study for Optimum Survey Method of Underwater Structure Using the Dual Sonar Sensor, Journal of Sensors. Volume 2017, Article ID 9206898, 10 pages
- 3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) and Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC) (2011), Specific Guidelines of Safety Inspection and Precise Safety Diagnosis of Port
- 4) Heungsu Lee, Sangsik Choi, Youngseok Kim, Jonghwa Yi(2017), A Basic Study on Sensor Location Design for Safety Evaluation of Landing Pier, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Conference, Vol. 19, No.2, 409-410
- 5) Yi, J.H., Park, C., Lee, H.S., Kim, Y.S.(2016), A method development of correctly SONAR image distortion for diagnosis in underwater structure, Korean Society of Civil Engineers, KSCE 2016 CONVENTION PROGRAM, 248-249