

FBG 센서를 이용한 잔교식 안벽 구조물의 안전성 평가에 대한 연구

이흥수^{1*}

A Study on the Safety Evaluation of the Landing Pier Structure Using FBG Sensor

Heung-Su Lee^{1*}

Abstract: The underwater structures of landing pier are not easy to access and it is difficult to check the damage. Lately, typhoons and earthquakes have occurred frequently, which may cause damage to underwater structures of landing pier. In this study, to prevent collapse of underwater structures and to maintain systematically, the application method of FBG sensors and safety evaluation methods were studied. In order to confirm the application of the FBG sensor to the circular steel pipe used as a pile on the landing pier, we conducted laboratory tests and confirmed that the FBG sensor should be applied by welding. As a result of structural analysis of the landing pier structure, the optimal position of FBG sensor confirmed. The stresses on the dead load were calculated by structural analysis, the stresses on the live load were calculated by using the data obtained from the FBG sensor, and then the stress acting on the pile was calculated by adding the two stresses. The calculated stress was compared with the allowable stress to evaluate the safety of the pile. This study was carried out as a basic study to find a way to evaluate the safety of the landing pier in real time.

Keywords: Landing pier, Underwater structure, FBG sensor, Maintenance, Safety evaluation

1. 개 요

센서를 항만시설물 유지관리에 활용하는데 있어 센서 계측값의 임계치를 설정하고 임계치 초과여부를 확인하여 시설물 거동의 이상유무를 판단하고 있는데, 이것은 단순히 시설물에 설치된 센서에 의해 계측된 값을 보여주는 정도이다. 관리자는 발생된 값을 확인하여 시설물이 문제가 있다는 것은 알 수 있지만, 시설물의 상태가 어떤 상태이고 어떤 조치를 취해야 하는지는 발생값을 가공하여 시설물의 안전성을 별도로 확인하는 과정이 추가되어야 한다. 항만시설물에 태풍, 충격, 지진 등이 작용하여 시설물에 손상이 발생하면 시민의 안전을 확보하기 위해서는 즉각적이고 적절한 보수보강이 필요하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 잔교식 안벽에 설치된 센서를 이용하여 시설물의 상태를 정량적으로 상시 파악하여 즉각적인 보수보강을 수행할 수 있는 방법에 대한 기초 연구를 수행하고자 한다.

2. 센서를 이용한 항만시설물 유지관리

항만시설물에 대한 유지관리는 ‘시설물의 안전 및 유지관리에 대한 특별법’에 근거한 점검 및 진단으로 항만 시설물의 안전성 평가를 실시하고 있는데, 점검 및 진단조사 방법으로 대부분이 육안조사를 이용해 실시하고 있다. 또한, 항만시설물 수중부에 대해서는 정기점검이 없으며, 정밀점검도 잔교식과 널말뚝식은 6년에 1회, 중력식은 10년에 1회를 실시하도록 하고 있다(MOF, 2015). 그러나 최근들어 이상기온으로 위협적인 태풍이 발생하고 지진의 발생 빈도가 증가하고 커지는 등 환경이 변화하고 있는데, 태풍이나 지진 발생 시 마다 항만시설물의 수중부 점검이 곤란한 상황이다. 즉, 수중부에 대한 상시점검 곤란으로 즉각적인 손상파악이 불가하여 항만시설물의 안전을 담보할 수 없는 상황이다. 따라서, 항만시설물 수중부에 대한 상시적이고 정량적이며 즉각적인 점검 방법이 필요하다.

지금까지 대부분의 국내 수중점검은 잠수부를 활용한 재래식 방식으로 이루어지고 있는데, 잠수병 때문에 작업시간이 극히 제한되어 정밀한 점검이 어렵고, 해상조건이 열악할 경우 작업의 효율성이 떨어지는 문제가 발생하고 있다. 잠수부 작업시에 일반적으로 수심 20m에서 8시간 근무시간 중 2시간 밖에는 잠수작업을 할 수 없어 나머지 6시간 이상은 잠수병 예방을 위해 휴식을 취해야하기 때문에, 수중작업의 효율성이 상당히 떨어지는 실정이다. 잠수부에 의한 조사는 시설물

¹정회원, (주)다움기술단 연구소장

*Corresponding author: heungsu1324@daum.net

Daum engineering Co., Ltd.

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

표면에 해조류, 조개나 따개비 등 해양생물이 많이 붙어있어 표면을 관찰할 수가 없어 유지관리 점검에 한계가 있는 상황이다. 또한 관리자가 작업과정을 직접 확인하지 못하고 작업자인 잠수부에만 의존하며 진행된 진단은 부실진단의 가능성을 내포하고 있는 상황이다.

따라서, 항만시설물 수중부의 유지관리를 위한 안전성과 효율성이 확보된 안전성 평가 방법 개발이 필요하다. 항만 시설물 수중부의 상태를 상시점검이 가능하게 된다면 항만 시설물의 갑작스런 파괴에 따른 인명 손실과 경제적 손해를 예방할 수 있게 된다. 이를 해결하기 위해 항만시설물에 센서를 부착 또는 매립하여 상시로 시설물의 상태를 점검할 수 있다면, 시설물을 육안으로 조사하지 않고도 시설물에 발생하는 변위와 변형 등을 알 수 있게 됨에 따라 육안 조사 시 보다 즉각적이며 상시적으로 시설물의 상태를 파악할 수 있으며, 육안에 의한 상태점검보다 정량적인 결과 도출이 가능하여 항만시설물의 효율적인 점검이 가능하게 된다. 센서를 이용한 유지관리 기술은 항만시설물에 대한 안전성 평가 플랫폼 기반에서 상시점검을 통해 상시 유지관리가 가능하게 되는 통합적인 시설관리가 되므로 관련 산업을 보호하고 복구에 따른 경제적 손해를 선제적으로 제거하게 되는 장점을 갖게 될 것이다.

3. FBG 센서의 적용성

3.1 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. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카(Silica) 유리로 이루어져 있으며, 그 구조는 굴절률이 높아지도록 저마늄(Ge)을 첨가한 광섬유 중심(core)부분과 그 중심을 보호하는 클래딩(cladding) 부분으로 구성되어 있다. 광섬유격자 소자(FBG)는 브래그의 법칙에 근거하여 저마늄이 첨가된 광섬유 코어 부분이 자외선에 노출되면, 굴절률이 증가하게 되는 현상을 이용하여 광섬유 격자를 개발하여 광통신이나 광섬유센서로 뛰어난 성능을 나타내는 새로운 소자로 개발되었다. FBG 센서는 전기식 센서에 비해 부식에 대한 저항성이 뛰어나고, 전자기장에 의한 간섭을 받지 않으며, 케이블 하나에 여러 개의 센서 연결이 가능한 특징이 있다(L. Murawski, 2012).

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.

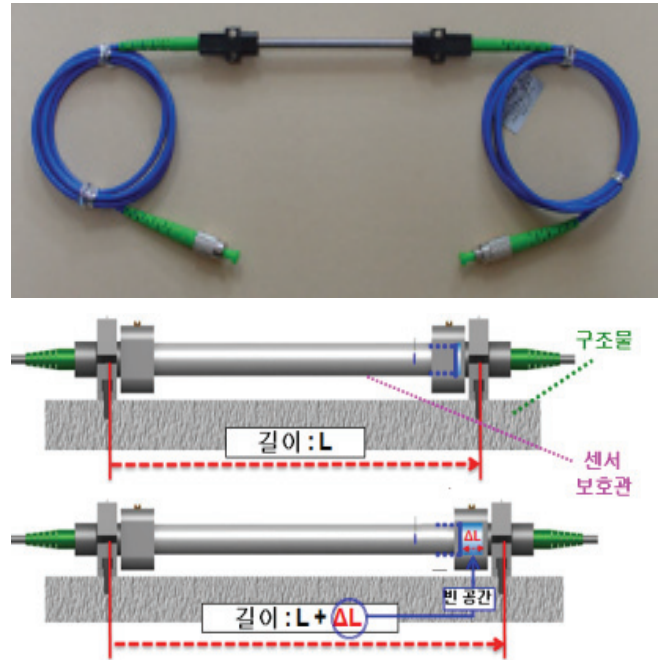


Fig. 1 Fiber Optic Bragg Grating Strain Sensor

3.2 실험방법

FBG 센서를 항만시설물 잔교식 안벽에 적용하기 위해 일반적으로 사용되는 전기저항식 센서와 비교실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용하는 FBG 센서의 성능을 검증하기 위해 잔교식 안벽의 파일로 사용되는 원형 강관에 FBG 센서와 전기저항식 센서를 부착하여 외력에 의한 변화량을 각각 계측하여 비교·검토하였다. 전기저항식 센서는 접착제를 이용하여 부착하고, FBG 센서는 원형강관에 대한 적절한 부착방법을 확인하기 위해 2가지의 부착 방법을 사용하였다. 하나는 원형강관에 연결하기 위해 수중작업임을 감안하여 시공성을 향상시키기 위해서 현장용접이 없는 띠장을 이용하여 설치하는 방법과 용접을 하는 방법을 비교하였으며, H빔에 FBG 센서의 적용성을 확인하기 위해 용접으로 부착하여 실험을 수행하였다.

원형강관에 대한 시험체는 띠장을 사용한 것 2개와 용접한 것 1개를 제작하였고, H빔에 대한 것은 1개를 제작하였다. 시험체 종류와 상세 내용은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 시험체 가력 모습이다. 가력장치는 1000kN의 액추에이터를 사용하였으며, 원형강관 시험체의 가력부와 지점부에는 새들을 두어 국부적인 변형을 방지하고 정확한 가력이 가능하도록 하였다.

Table 1 The Detail of Specimens

Item	Installation Method	Specification	Sensor Type
Circular Steel Tube Band Connection		D318.5 / L=2700mm Number of Specimens = 2ea	Electric Sensor 2EA FBG Sensor 1EA
Circular Steel Tube Welding Connection		D318.5 / L=2700mm Number of Specimens = 1ea	Electric Sensor 2EA FBG Sensor 1EA
H Beam Welding Connection		H250 / L=2700mm Number of Specimens = 1ea	Electric Sensor 3EA FBG Sensor 1EA

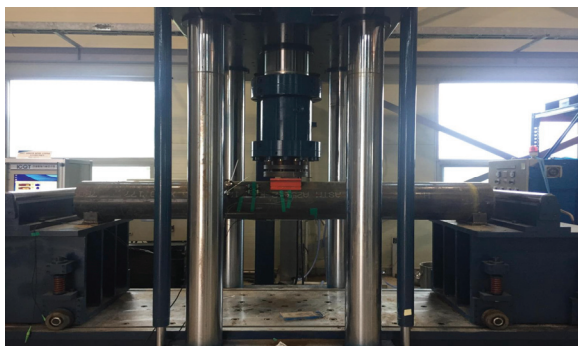


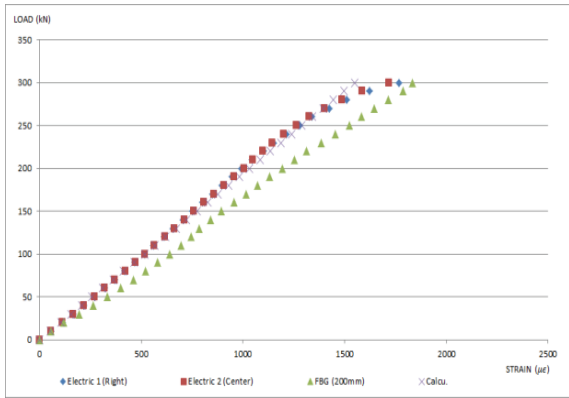
Fig. 2 Test Setup

3.3 실험결과

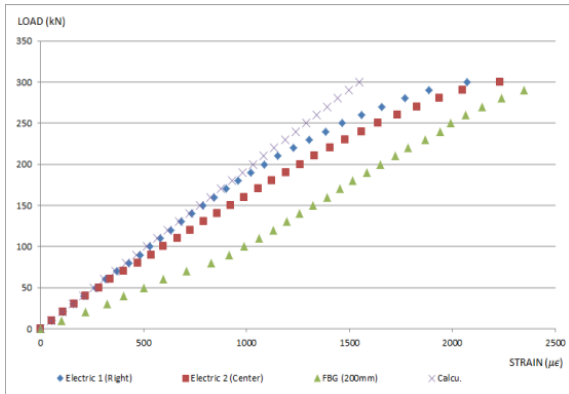
실험결과 그래프는 Fig. 3에 나타내었다. 원형강관과 H빔은 SS400 강재를 사용하였으며, SS400 강재의 항복변형률은 $1150 \mu\epsilon$ 정도이다. 그래프에는 전기저항식 센서 및 FBG 센서의 계측값과 함께 하중에 따라 계산된 변형률을 같이 표시하여 비교할 수 있도록 하였다.

원형강관 띠장 시험체인 (a)와 (b)를 보면, 전기저항식 센서는 계산값에 근접하지만 FBG 센서는 계산값과 다른 결과를 나타내고 있어 띠장에 변형이 발생되는 것으로 나타났다. 발생한 변형률을 보면 계산된 값과 FBG 센서의 계측값이 오차가 많이

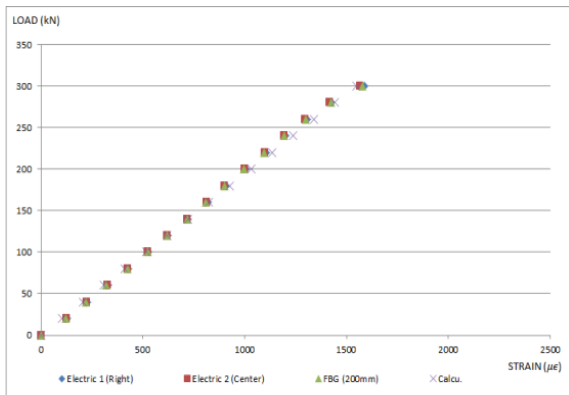
발생하고 있어 원형강관에 띠장을 적용하기는 어려운 것으로 보인다. 원형강관에 용접으로 FBG 센서를 부착시킨 (c)는 전기저항식 센서와 FBG 센서의 발생값이 계산값과 동일하게 발생하고 있어 원형강관에 FBG 센서를 용접으로 부착시키는 것이 적절함을 알 수 있다. H빔에 용접으로 FBG 센서를 부착시킨 (d)는 전기저항식 센서와 FBG 센서의 발생값이 계산값과 동일하게 발생하고 있으며, 끝에서 다르게 나타나지만 이것은 항복 이후 파괴에 따른 거동으로 H빔에도 FBG 센서를 용접으로 부착하는 것이 적절한 것으로 나타났다.



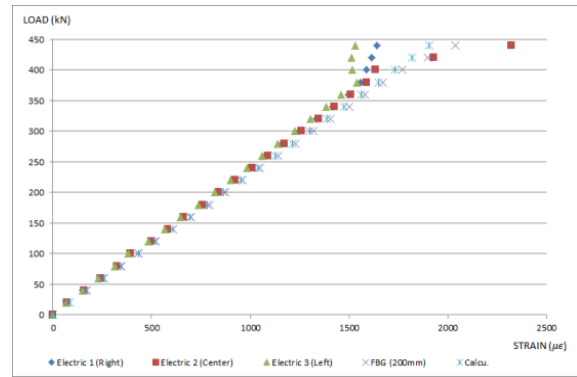
(a) Circular Steel Tube - Band Connection 1



(b) Circular Steel Tube - Band Connection 2



(c) Circular Steel Tube - Welding Connection



(d) H Beam - Welding Connection
Fig. 3 Experimental Results

4. 센서 위치 최적화

항만시설물 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. 4와 같다.

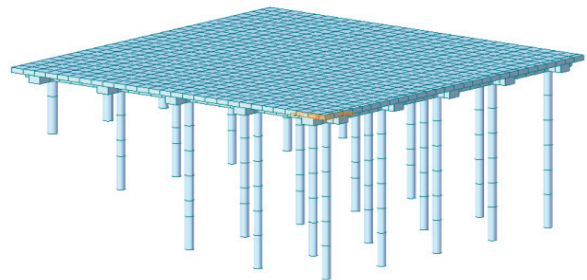
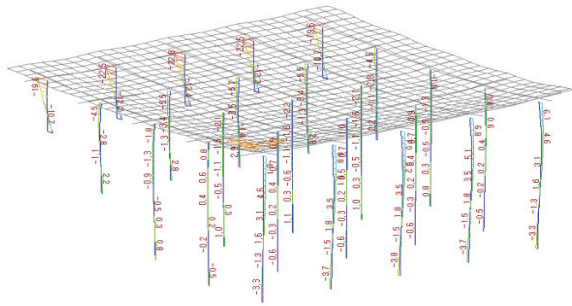
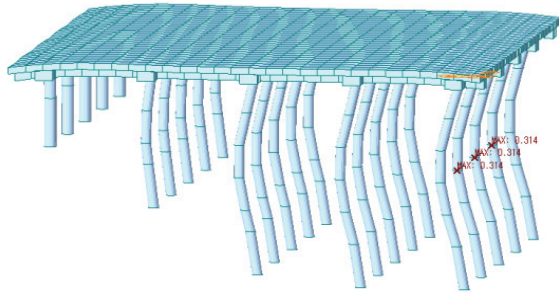


Fig. 4 Modeling of Landing Pier

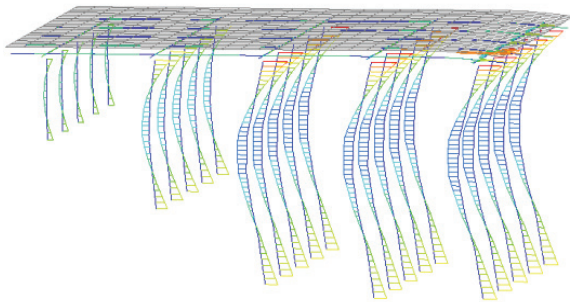
구조해석 결과를 분석해보면, 자중과 상재하중 등 고정하중은 육지쪽에 있는 파일 상단에 최대부재력을 발생시키고, 파력과 선박충격 등 사용중에 발생하는 하중과 지진을 포함한 하중 조합에 의한 최대부재력은 바닷가쪽 파일 상단에서 가장 큰 부재력이 발생하고 있다. 파력 등 파일에 작용하는 하중에 의한 최대변형은 바닷가 방향 파일 중간부분에서, 선박충격 등 상부 구조에 작용하는 하중에 따른 최대변형은 파일상단에서 아래 방향으로 파일길이의 30% 정도 되는 부분에서 발생하고 있다. 발생된 부재력과 변형 거동을 보았을 때, 변형률 센서는 파일 상단,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



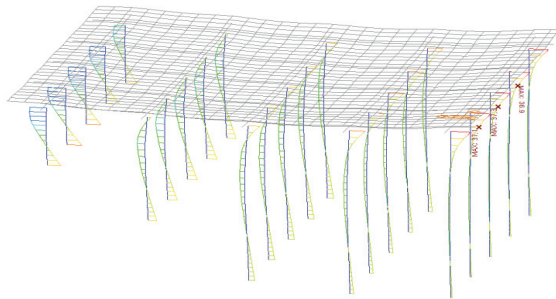
(a) Bending Moment Diagram by Self-weight



(b) Displacement Diagram by Wave Power



(c) Bending Moment Diagram by Wave Power



(d) Maximum Bending Moment Diagram by Load Combination

Fig. 5 Member Forces and Displacement

5. 실시간 안전성 평가 방안

대한민국은 “시설물의 안전관리에 관한 특별법(Special Act on Safety Management of Public Facilities)”이 1995년에

공포되어 법에 의해 관리되고 있다. 항만시설물인 잔교식 안벽 역시 대상시설물에 해당된다. 잔교식 안벽은 상부의 콘크리트 바닥판, 가로보 및 세로보 그리고 하부구조의 강관 또는 콘크리트 파일로 구성되어 있다. 잔교식 안벽은 연직방향 하중을 받는 교량과 유사한 구조를 갖고 있으나 선박의 접안력, 계류력, 조류 및 파랑에 의한 측방향 하중을 받는 구조물이다.

잔교식 안벽의 상부구조와 하부구조에 대한 안전성 평가는 철근콘크리트 부재는 강도설계법에 따라 작용(극한)모멘트와 설계모멘트의 비를 고려하여 계산하고, 강재로 된 하부구조는 허용응력설계법에 따라 발생응력과 허용응력의 비를 고려하여 Table 2의 기준에 따라 검토 및 평가하는 것을 원칙으로 한다. 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 각각 “a”, “d”, “e” 로 설정하였다. 따라서, 설계기준을 만족하는 경우 모두 “a”를 적용하고, 만족시키지 못하는 경우는 “c” 이하를 적용하였으며 “b”는 평가기준에서 제외하였다(MOLIT, KISTEC, 2011).

Table 2 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

상태평가는 외관조사 및 내구성조사로 이루어지는데, 항만 시설물 수중부에 대한 외관조사는 잠수부가 수행하여야 하므로 점검이 쉽지 않고, 정성적 평가로 평가자의 주관적 견해가 반영되는 단점이 있으며, 안전점검이 6년마다 간헐적으로 이루어지고 있는 실정이다. 태풍과 지진발생에 의한 손상이나 선박 접안 시 충격 등에 의해 구조물이 손상될 우려가 있는데, 여러 가지 원인에 의해 손상이 발생해도 확인이 되지 않고 있어 갑작스러운 시설물의 붕괴로 인해 이용자의 안전이 위협받게 되므로 실시간 계측을 통해 구조물의 거동 및 안전성을 평가할 필요가 있다.

잔교식 안벽에서는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 따라 파일의 안전성을 검토하여 안전성평가가 수행되므로, 파일에 발생하는 변형률을 이용하여 실시간으로 구조물에 발생하는 응력을 산정하고 파일의 허용응력과 비교하여 구조물의 안전성을 평가하고자 한다.

잔교식 안벽 파일에 작용하는 축력과 모멘트에 의한 응력에 대한 검토는 세부지침에 따라 식 (3)과 같이 수행한다.

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

여기서, f_c 는 축하중에 의한 응력이고, f_{ca} 는 허용압축응력이며, f_b 는 모멘트에 의한 응력으로 수평력에 의해 발생하며, f_{ba} 는 허용휨응력이다. f_c 는 축응력으로 자중과 상재하중에 의한 고정하중에 해당되며, 휨응력인 f_b 는 고정하중에 의한 휨응력 f_{bd} 와 활하중 외력에 의한 휨응력 f_{bl} 로 구분되며, 이것을 식으로 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이와같이 휨응력을 고정하중과 활하중에 의한 응력으로 구분함에 의해 FBG 센서에서 얻어진 계측값을 이용하여 실시간 안전성 평가가 가능해진다.

$$f_b = f_{bd} + f_{bl} \quad (4)$$

f_c 와 f_{bd} 로 표현되는 고정하중에 의한 응력은 구조해석을 통해 산정하고, f_{bl} 로 나타내는 시설물 사용 중에 발생하는 파력, 조류력, 지진력 등 활하중에 의해 발생하는 응력을 계산하여 실시간 응력을 산정할 수 있게 된다.

$$\frac{f_c}{f_{ca}} + \frac{f_{bd} + f_{bl}}{f_{ba}} \leq 1.0 \quad (5)$$

Table 3 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	$[(1.000 - \frac{f_c}{f_{ca}}) \times f_{ba} - f_{bd}] \div E = \epsilon$
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	$[(\frac{1}{0.75} - \frac{f_c}{f_{ca}}) \times f_{ba} - f_{bd}] \div E = \epsilon$

f_{bl} 은 FBG 변형률 센서를 파일에 부착하여 측정된 파일 변형률에 강재의 탄성계수를 곱하여 실시간 응력을 얻을 수 있다. 따라서, Table 2에 따라 각 등급의 임계치 변형률 값을 Table 3과 같이 산정할 수 있다. 발생된 변형률이 임계치에 도

달하면 안전등급이 변경된다.

6. 결론

항만시설물 수중부에 대한 안전점검시에 잠수사를 투입하여 수중부에 대해 직접 외관조사를 하거나, 수중원격제어장비(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 잔교식 안벽 수중부에 FBG 센서를 부착하여 시설물의 거동을 실시간으로 계측하여 안전성을 평가하는 방법에 대한 기초 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 수중 환경에 적합한 FBG 센서를 용접으로 부착하는 방법의 적절성을 확인하고, 수중부 파일의 안전성 평가를 위해 FBG 센서를 이용하여 실시간 안전성을 평가하는 방안을 검토하였다. 잔교식 안벽에 대해 구조해석을 실시한 결과, 파력 등 파일에 작용하는 하중에 의한 최대변형은 해측 방향 파일 중간부분에서, 선박충격 등 상부구조에 작용하는 하중에 따른 최대변형은 파일상단에서 주로 발생하고 있다. 발생 부재력과 변형 거동을 보았을 때, 변형률 센서는 파일 상단, 파일상단에서 파일 길이의 30%되는 부분과 파일 중간부분에 부착하는 것이 적합한 것으로 검토되었다.

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.

안전성 평가 등급에 따라 임계치 값을 설정하고, FBG 변형률 센서의 데이터를 분석하여 실시간으로 수중부 파일의 안전성을 평가하는 방법을 연구하였다. 이로써 실시간으로 관리자의 PC나 스마트폰을 통해 확인할 수 있으며, 각 부재의 임계치에 도달했을 때 즉각적인 대응과 사고 예방이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원에서 지원하는 미래해양산업기술개발사업(20160217)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Gwanghee Heo, Woosang Lee, Chinok Lee, Joonryong Jeon, Dongjin Sohn(2011), Development of Smart Wireless Measurement System for Monitoring of Bridges, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 15, No.2, 170-178
2. 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
3. Heungsu Lee, Youngseok Kim, Jonghwa Yi, Chul Park, "A Fundamental Study for Real-Time Safety Evaluation System of Landing Pier Using FBG Sensor", *World Academy of Science Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol:12, No:4, 2018, pp.407-410
4. Hosun Kim, Hwasup Jang, Dongwoon Yang(2012), Impact Factor Analysis of Response Adjustment Factor of PSC Composite Bridge Using Optical Fiber Sensor, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No.1, 35-43
5. L. Murawski, S. Opoka, K. Majewska, M. Mieloszyk, W. Ostachowicz, "Investigations of Marine Safety Improvements by Structural Health Monitoring Systems", *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 6 No. 2, 2012, pp.223-229
6. 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
7. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2014), Ports and Harbors Design Code
8. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2015), Safety Inspection and Specific Guidelines of Port Facilities

Received : 10/17/2018

Revised : 12/10/2018

Accepted : 12/19/2018

요 지 : 잔교식 안벽의 수중부는 접근이 쉽지 않아서 손상확인이 어려운 곳인데, 최근들어 태풍과 지진이 빈번하게 발생하고 있어 잔교식 안벽 수중부 구조물의 손상 누적으로 인한 붕괴가 우려되는 상황이다. 잔교식 안벽의 붕괴를 방지하고 체계적으로 유지관리하기 위한 방안으로 FBG 센서를 이용한 적용 방법과 안전성 평가 방법을 연구하였다. 잔교식 안벽에 파일로 사용되는 원형 강관에 대한 FBG 센서의 적용 방안을 확인하기 위해 실내실험을 실시하고, 센서를 용접하여 부착하는 방법으로 적용해야 하는 것을 확인하였다. 잔교식 안벽에 대한 구조해석을 수행하여 FBG 센서를 부착하기 위한 최적의 부착위치를 확인하였다. 고정하중에 대한 응력을 구조해석을 하여 계산하고, FBG 센서를 통해 얻은 데이터를 이용하여 활하중에 대한 응력을 계산한 다음에 두 응력을 더해서 파일에 작용하고 있는 응력을 계산하였다. 계산한 응력을 허용응력과 비교하여 파일의 안전성 평가를 수행하였다. 본 연구는 잔교식 안벽의 안전성을 실시간으로 평가하는 방안을 찾기 위한 기초 연구로 수행되었다.

핵심용어 : 잔 교식 안벽, 수중구조물, FBG 센서, 유지관리, 안전성 평가
