

콘크리트 부유식 구조물 합체의 건전성 평가

박수용* · 김민진** · † 서영교

* 한국해양대학교 해양공간건축학과 교수, ** (주)스틸플라워 연구원, † 한국해양대학교 해양공학과 교수

Integrity Estimation for Concrete Pontoon of Floating Structure

Soo-Yong Park* · Min-Jin Kim** · † Young-Kyo Seo

† Department of Architecture and Ocean Space, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

* Steel Flower Co., Ltd, Busan 612-020, Korea

† Department of Ocean Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문은 구조물의 동적특성인 모드형상과 고유진동수를 이용한 손상탐지와 유효 물성치 추정을 통하여 콘크리트 축소모형과 실제 콘크리트 부유식 구조물 합체의 건전성을 평가하였다. 손상탐지의 경우 콘크리트 축소모형에 대한 동적실험을 수행하여 모드형상을 추출한 후 손상탐지기법에 적용하여 실용성을 증명하였다. 또한 실제 콘크리트 부유식 구조물 합체의 모드형상 및 고유진동수를 실험을 통하여 구한 후 구조계추정기법을 이용하여 콘크리트의 유효 물성치를 추정하였다. 손상탐지기법을 이용하여 축소모형의 손상부재를 정확히 찾아 내었으며, 구조계추정기법을 이용하여 실제 콘크리트 부유식 합체의 현재 유효 물성치를 추정하였다.

핵심용어 : 콘크리트 부유식 구조물, 모드형상, 고유진동수, 손상탐지기법, 구조계추정기법

Abstract : This paper presents damage detection and estimation of stiffness parameter on a concrete scale model and a real structure of concrete pontoon using dynamic properties such as mode shapes and natural frequencies. In case of damage detection, dynamic impact test on a concrete scale model is accomplished to extract mode shapes and the practicality is verified by utilizing a damage detection technique. And the stiffness parameter of a real structure of concrete pontoon was estimated via system identification technique using the natural frequencies of the structure. The results indicate that the damaged elements of the scale model are found exactly using damage detection technique and the effective stiffness property of the real structure of concrete pontoon can be estimated by system identification technique.

Key words : concrete pontoon of floating structure, mode shape, natural frequency, damage detection technique, system identification technique

1. 서 론

부유식 해상공항, 여객터미널, 마리나 리조트, 선착장, 플랜트구조물, 플로팅건축물, 인공섬 등 해안과 항구 지역 공간개발과 에너지개발의 증가를 충족시키기 위해서 부유식 구조물은 상당한 가능성을 제공하며 이를 채용한 부유식 구조물은 이미 많은 지역에 건설되어 사용되고 있다. 부유식 구조물은 이동이 가능하고 증설, 확장, 철거가 용이하며 매립식 방법에 비하여 경제적인 특성을 가지고 있으며 지진에 대하여 상대적 안전성이 높다는 장점도 가지고 있다. 뿐만 아니라 해양환경에 따른 적절한 계류장치 설계로 지역에 크게 영향을 받지 않고 설치가 가능하다(Jung and Jung, 1999).

하지만 부유식 구조물은 해상에 위치하므로 고정하중과 활하중 등의 일반하중과 함께 바람, 조류, 온도하중 등을 포함

하는 환경외력이 작용되며, 특수하중으로 계류력, 접안 및 충돌력 등이 작용한다(Tsinker, 2004). 이러한 환경외력은 장시간동안 구조물에 축적되어 구조물의 강성저하, 손상 등을 일으킬 가능성이 있다. 부유식 구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위해서는 현재 상태를 파악하여 적절한 보수·보강 시기를 결정하고, 잔존 수명을 예측하는 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 부유식 구조물의 건전성평가를 위하여 첫째, 축소모형을 제작하여 두 가지 형태로 손상을 주고 손상탐지기법(Damage Detection Technique)을 이용하여 손상을 탐지하였다. 둘째, 실제 부유식 구조물에서 현장실험을 통하여 대상구조물의 동적 특성을 추출한 후 구조계추정기법(System Identification Technique)을 이용하여 대상 구조물의 유효 물성치를 추정하였다.

* 종신회원, sypark@hhu.ac.kr 051)410-4588

** 연회원, kmj250@steelflower.co.kr 051)745-3038

† 교신저자 : 연회원, yseo@hhu.ac.kr 051)410-4683

2. 이론적 배경

일반적으로 구조물이 손상을 받으면 진동특성(모드형상, 고유진동수)도 변화한다. 이러한 점을 기초로 구조물의 건전성을 평가할 수 있으며, 모드형상을 이용한 플레이트 손상탐지 기법(Choi and Stubbs, 1997)과 대상구조물에서 측정한 동특성 중 고유진동수를 이용하여 실제 구조물을 대표하는 수학적 모델을 구축하는 구조계추정기법(Stubbs and Osegueda, 1990)을 요약하면 다음과 같다.

2.1 플레이트 손상탐지 이론

Choi and Stubbs(1997)가 개발한 손상탐지 기법은 모드형상에 따른 모달 변형에너지를 이용하여 바닥판의 손상을 평가할 수 있는 방법으로 손상지표는 다음과 같이 유도하였다.

바닥판의 경우 i 번째 모드에서의 모달 변형에너지는 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 식 (2)의 k 는 바닥판의 휨강성, A 는 바닥면적, w 는 바닥판의 연직방향 모달변위, ν 는 포아송비, E 는 탄성계수를 나타낸다.

$$U_i = \frac{1}{2} \iint k \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right] dA \quad (1)$$

$$k = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

위의 식을 j 번째 부재에 관하여 다시 쓰면, 식 (3)과 같다.

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \iint k_j \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right] dA_j = k_j \gamma_{ij} \quad (3)$$

식 (3)을 다시 손상된 구조물에 대응되는 변수 (*)로 표시하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, i 번째 모드에서의 j 번째 부재의 모달 변형에너지를 F_{ij} 라 하면 식 (5)와 같다.

$$U_{ij}^* = k_j^* \gamma_{ij}^* \quad (4)$$

$$F_{ij} = U_{ij} / U_i \quad (5)$$

모달 변형에너지 비의 변화를 나타내면 식 (6)과 같이 표현할 수 있으며, 여기서 강성의 변화인 α_j 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF_j \approx -F_j \alpha_j \quad (6)$$

$$\alpha_j = \frac{dk_j}{k_j} = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} \quad (7)$$

j 번째 부재의 손상지수 $\beta_{ij} = k_j/k_j^*$ 로 표현할 수 있으며, 앞의 식들을 토대로 손상지수는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 NM 은 모드 수, NE 는 바닥판의 부재 수를 의미한다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{i=1}^{NM} \left(\gamma_{ij}^* / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij}^* \right) + 1}{\sum_{i=1}^{NM} \left(\gamma_{ij} / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij} \right) + 1} \right] \quad (8)$$

손상지수를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 다양한 기법을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 여러 가지 방법들 가운데 패턴인식을 이용한 손상탐지 알고리즘을 사용하였다(Park, 2003). 부재 손상의 그룹 분류를 위해 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Pearson 기준(Gibson and Melsa, 1975)을 사용하였으며 다음과 같은 두 가지 경우의 가설을 설정할 수 있다.

- (1) 가설 H_0 - 구조물 내 j 번째 부재에 손상이 없음
- (2) 가설 H_1 - 구조물 내 j 번째 부재에 손상이 있음

손상위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있으며 각 부재로부터 구한 손상지수 값을 확률변수로 고려하여 표준화된 손상지수로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (9)$$

여기서 μ_β 와 σ_β 는 각각 손상지수 β_j 의 평균과 표준편차를 나타낸다. 만일 $Z_j \geq 3$ 이면 가설 H_1 을 택하여 구조물에 손상이 있음을 결정하고 $Z_j < 3$ 이면 손상이 없음을 결정한다. 이때 기준값 3은 가설테스트의 신뢰도가 99%임을 의미한다.

2.2 구조계추정기법 이론

Stubbs and Osegueda(1990)이 개발한 구조계추정기법은 고유치와 부재 강성의 상관 관계를 이용하여 구조물의 현재 상태를 대표하는 유한요소 모델을 만드는 것으로 요약하면 다음과 같다. 만일 $\lambda_i (i=1, \dots, N)$ 가 어떤 구조시스템에서 고유치이고 그 시스템이 $m_k (k=1, \dots, Q)$ 개의 질량과 $k_j (j=1, \dots, R)$ 개의 구조부재, 즉 강성으로 구성되어 있다고 하면 λ_i 는 질량과 강성의 함수로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_i = \lambda_i(k_1, \dots, k_R; m_1, \dots, m_Q) \quad (10)$$

i 번째 고유치의 미세편차 $\delta \lambda_i$ 는 강성과 질량의 미세편차의 합으로

$$\delta\lambda_i = \sum_{j=1}^R \frac{\partial\lambda_i}{\partial k_j} \delta k_j + \sum_{k=1}^Q \frac{\partial\lambda_i}{\partial m_k} \delta m_k \quad (11)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 δk_j 와 δm_k 는 각각 부재 강성의 미세편차와 부재 질량의 미세편차를 나타낸다. Z_i 를 $\delta\lambda_i/\lambda_i$ 로, K_i 와 M_i 를 각각 i 번 째 모달 강성과 모달 질량으로 정의하고 $\lambda_i = K_i/M_i$ 를 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$Z_i = \frac{\delta\lambda_i}{\lambda_i} = \sum_{j=1}^R F_{ij}\alpha_j - \sum_{k=1}^Q G_{ik}\beta_k \quad (12)$$

여기서, $F_{ij} = \frac{k_j}{K_i} \frac{\partial K_i}{\partial k_j}$, $G_{ik} = \frac{m_k}{M_i} \frac{\partial M_i}{\partial m_k}$, $\alpha_j = \frac{\delta k_j}{k_j}$, $\beta_k = \frac{\delta m_k}{m_k}$ 이다. 만일 시스템의 질량은 변하지 않는다고 가정하면 식 (12)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_i = \sum_{j=1}^R F_{ij}\alpha_j \quad (13)$$

벡터 Z_i 는 두 시스템(실제 구조물과 유한요소 모델)간의 고유진동수 제곱의 분수적 차이를 나타내는 변수로

$$Z_i = \{z_1 z_2 \dots z_n\}^T \quad (14)$$

$$z_n = \frac{\overline{\omega_n^2} - \omega_n^2}{\omega_n^2} \quad (15)$$

이다. 여기서 ω_n 은 계측 고유진동수이고 $\overline{\omega_n}$ 은 유한요소 모델의 고유진동수를 나타낸다. $F_{ij} = \frac{k_j}{K_i} \frac{\partial K_i}{\partial k_j}$ 행렬은 강성의 변화와 고유치 변화의 상관관계를 나타내는 강성 민감도 행렬로 행렬의 크기는 $n \times R$ 이다. $\alpha_j = \frac{\delta k_j}{k_j}$ 행렬은 두 시스템간의 강성의 차이를 나타내는 $R \times 1$, 행렬이다. 식 (13)을 행렬식으로 다시 정리하면

$$Z = F\alpha \quad (16)$$

따라서 두 시스템간의 강성의 차이 α 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = F^{-1}Z \quad (17)$$

여기서 F^{-1} 은 F 의 역행렬이다. 식 (17)을 이용하여 두 시스템간의 강성의 차이를 구할 수 있으며, $Z \approx 0$ 혹은 $\alpha \approx 0$ 로 수렴할 때의 유한요소 모델이 현재 구조물을 대표하는 수

학적 모델이라고 할 수 있다.

3. 축소모형 실험을 통한 손상탐지

3.1 축소모형 및 실험장비

부유식 구조물의 축소모형은 수조의 크기, 흡수, 부력 등을 고려하여 100cm × 50cm × 12cm의 크기와 1cm의 두께로 제작하였다. 축소모형의 재질은 콘크리트이고, 속을 비워 물에 뜰 수 있도록 하기위해 아이소핑크를 삽입하여 제작하였다. 콘크리트 양생이 끝난 후 수조에 띄운 모습은 Fig. 1과 같다.

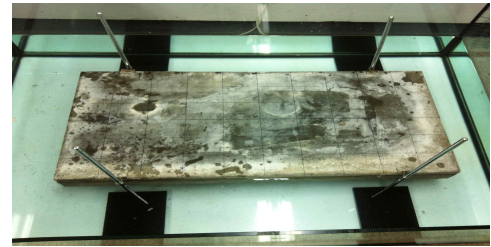


Fig. 1 Scale model of concrete pontoon

강제 진동 시험을 수행하기 위해 사용된 장비는 Fig. 2와 같이 임팩트 해머, 8채널 데이터 로거(LMS SCM01), 노트북 컴퓨터, 가속도계로 구성된다. 가속도계는 PCB사의 ICP type으로 ±10g 까지 계측이 가능한 가속도계(PCB 333B40)를 사용하였다.



Fig. 2 Test instrumentation

3.2 실험순서 및 방법

축소모형의 손상 시뮬레이션에 따른 손상위치의 추정은 손상 전 계측한 주파수 응답함수로부터 모드형상을 추출(Fig. 3 참조)하고 손상을 모사한 뒤 다시 손상 후의 모드형상을 추출하여 진행하였다. Fig. 4에 손상경우 및 손상위치 추정 절차를 나타내었다. 두 가지 형태의 손상 시나리오 중 첫 번째는 균열에 의한 손상이다. 손상 전 축소모형의 몇 번의 강제 진동 시험이 끝난 후 축소모형의 좌측 하단부에 균열이 발견되었고 이 균열을 첫 번째 손상 시나리오로 손상을 탐지하였다. 두 번째 손상의 경우는 33번 부재 중앙에 가로방향 10cm,

세로방향 5cm로 절단하여 십자모양으로 손상을 주었다. 두 가지 형태의 손상모습은 Fig. 5와 같으며 손상위치는 Fig. 6과 같다.

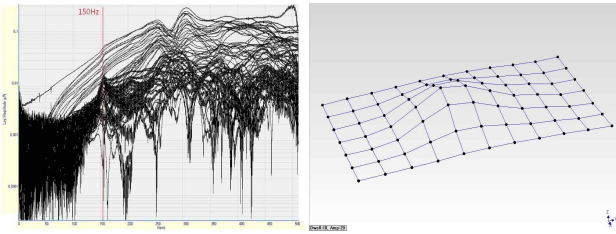


Fig. 3 Frequency response function and mode shape before damage

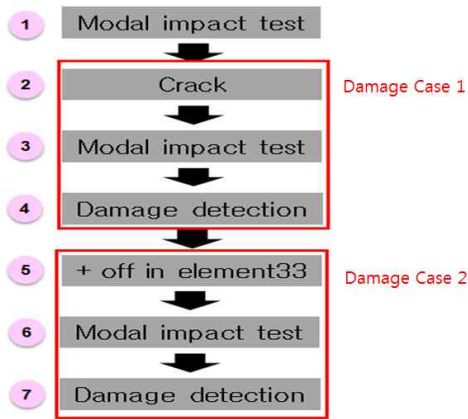


Fig. 4 Steps for damage detection

손상경우 2의 손상 전 데이터는 손상경우 1의 손상 후 데이터를 이용하였으며, 다음과 같은 방법으로 손상위치를 추정하였다.

- 가. 각 부재의 손상지표 β_j 를 식(8)을 이용하여 계산한다.
- 나. 표준화된 손상지표 Z_j 를 식(9)로부터 계산한다.
- 다. 식(9)에서 구한 Z_j 값으로부터 그 부재에 손상이 있는지 없는지를 99% 신뢰도의 가설테스트로 판별한다. 즉, $Z_j \geq 3$ 이면 부재 j 에 손상이 있다고 판별하고, $Z_j < 3$ 이면 부재 j 에 손상이 없다고 판별한다.



Fig. 5 Simulated damage

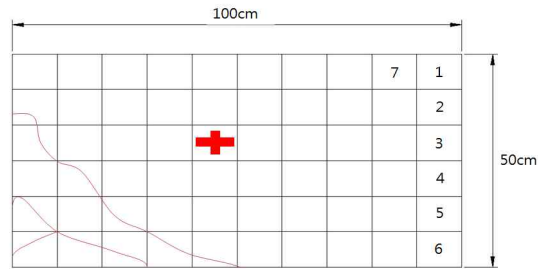


Fig. 6 Locations of damage

3.3 손상위치 추정 결과

손상위치 추정 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 표준화된 손상지표 Z_j 를 살펴보면 손상경우 1에서는 균열부재인 59번, 60번 부재의 표준화된 손상지표 Z_j 가 3을 넘었으며, 손상경우 2에서는 십자손상에 해당되는 부재 33번 부재의 표준화된 손상지표 Z_j 가 3으로 손상 부재로 판별된다.

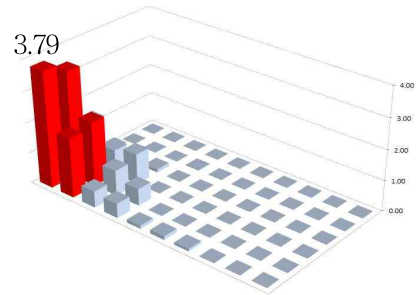


Fig. 7 Result of Case 1

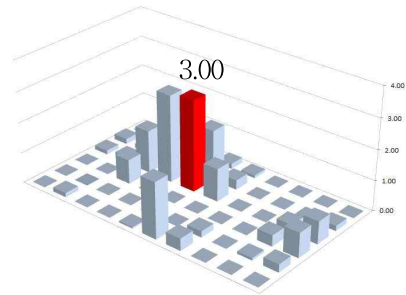


Fig. 8 Result of Case 2

4. 현장실험을 통한 유효 물성치 추정

4.1 대상구조물 개요

현장실험을 위하여 실제 부유식 구조물은 구조물의 크기, 계류형식, 실험의 용이성 등을 고려하여 전남 여수시 화양면 용주리 호두항에 위치한 부잔교로 선정하였으며 구조물의 전경 및 개요는 Fig. 9 및 Table 1과 같다.

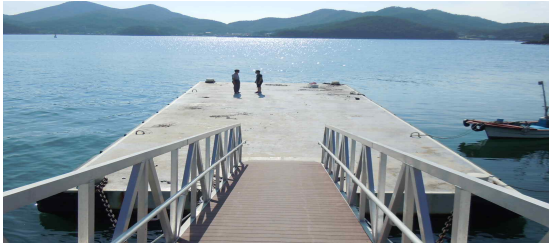


Fig. 9 View of test structure

Table 1 Outline of test structure

Location	전남 여수시 화양면 용주리
Size	8.0 × 25.0 × 2.0 (m)
Mooring	Chain

4.2 동적실험 방법 및 결과

대상구조물에서 강제 진동 시험을 하기 위하여 Fig. 10과 같이 구조물을 총 35개의 노드로 나누고, 7개의 가속도계를 부착하여 임의의 한 점에서 임팩트해머로 수직방향의 일정한 힘으로 타격하여 각 노드점의 가속도응답을 계측하였다. 총 5set의 실험을 진행하였으며, 실험장비는 3.1절의 내용과 동일하나 현장실험에서는 큰 구조물에서 진동을 일으킬 수 있는 대형 임팩트해머(PCB, 1mv/lbf)를 사용하였다.

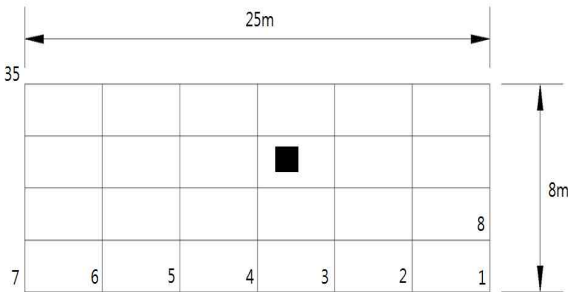
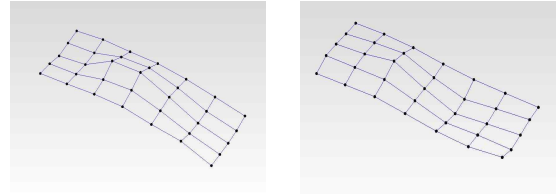


Fig. 10 Locations of nodes and impact point

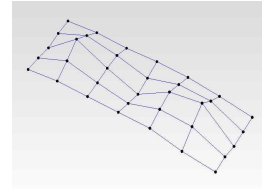
임팩트 해머로 가진하여 얻어진 충격파와 가속도계에서 얻어진 출력응답을 FFT를 거쳐 주파수 응답함수를 추출하였으며 모드 분석 프로그램을 이용하여 구조물의 모드형상 및 고유진동수를 추출하였다. 추출된 구조물의 고유진동수와 모드형상은 Fig. 11과 같다.

4.3 유한요소 모델 수정과정을 통한 유효 물성치 추정

실험을 통하여 추출된 3개의 고유진동수를 이용하여 콘크리트의 유효 물성치를 구조계추정기법을 통하여 추정하였다. 유한요소 모델은 실제 대상구조물의 도면을 바탕으로 상용프로그램인 ANSYS AQWA를 이용하여 모델링하였다.



(a) Mode 1(6.54 Hz) (b) Mode 2(8.98 Hz)



(c) Mode 3(11.5 Hz)

Fig. 11 Mode shape and natural frequency

유한요소 모델의 구축은 다음과 같이 진행하였다. 첫째, 콘크리트 내 철근은 모델링을 하지 않고 대신 철근콘크리트 단위중량(2,400kg/m³)을 사용하였다. 둘째, 체인의 두께는 도면에 제시되어 있었으나 정확한 인장력을 알 수 없어, 구조물을 Static해석 한 후 총 질량을 구하여 1개의 단위 길이 당 인장력의 값은 구조물의 총 질량을 4로 나누어 입력하였다. 콘크리트 부유체는 Fig. 12와 같고, 물과 구조물의 경계조건 및 체인계류 모델은 Fig. 13에 나타내었다. 수치해석 모델은 총 10,867개의 노드, 5,230개의 요소로 구성되어 있으며, 보 및 기둥부재는 solid 요소, 상하부 바닥 및 외벽은 plate 요소를 사용하여 모델링하였다.

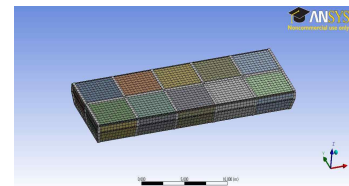


Fig. 12 Finite element model of concrete pontoon

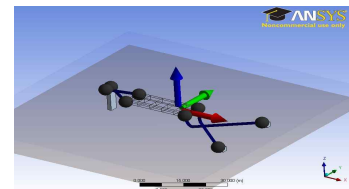


Fig. 13 Boundary and chain mooring

2.2절에 소개한 민감도 행렬 F 를 구하기 위해서는 우선 초기 재료 물성치를 가정한 수치해석 모델을 만든 후 고유치 해석을 하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 초기 재료 물성치의 값으로 콘크리트 탄성계수는 KCI-2007의 C24에 강도에 해당하는 2.6964E+10N/m², 단위중량은 2,400kgf/m³, 프야송

비는 0.167을 사용하였고 자유진동 해석 결과는 Fig. 14와 같다.

초기 재료 물성치 입력결과 3개의 모드형상에 따른 고유진동수는 각각 5.88 Hz, 8.21 Hz, 10.38 Hz로 추출 되었으며 실제 실험결과와 비교하면 Table 2와 같다.

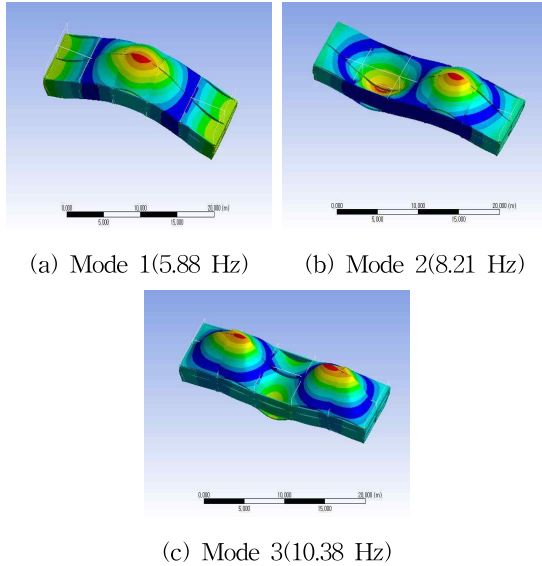


Fig. 14 Mode shape and natural frequency of finite element model

Table 2 Comparison of frequencies between test and finite element analysis

Frequency of Target Structure (Hz)		Frequency of Initial FE model (Hz)		Error Rate(%)
Mode 1	6.54	Mode 1	5.88	10.09
Mode 2	8.98	Mode 2	8.21	8.57
Mode 3	11.50	Mode 3	10.38	9.74

구조계추정기법을 토대로 Fig. 15의 절차와 같이 유한요소 모델을 수정하여 구조물의 유효 물성치를 추정하였다.

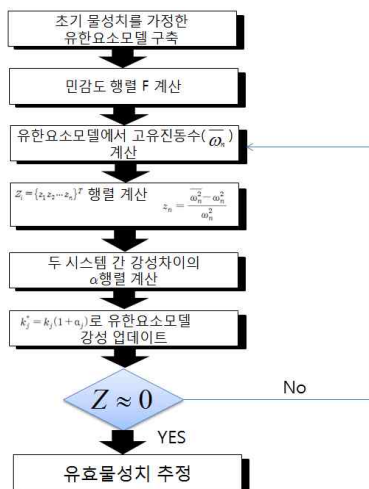


Fig. 15 Steps for system identification

Table 3 Result of system identification

Mode	Frequency of Initial FE model (Hz)	Updated Frequencies (Hz)		Frequency of Target Structure (Hz)	Error Rate(%)	
		Iter.1	Iter.3		Initial	Final
1	5.88	5.88	6.49	6.54	10.09	0.76
2	8.21	8.21	9.07	8.98	8.57	-1.00
3	10.38	10.38	11.47	11.5	9.74	0.26

Modulus of Elasticity (N/m ²)	Initial Value	Updated Value		Augmentation of Elastic Modulus(%)
		Iter.1	Iter.3	
	2.6964E+10	2.6964E+10	3.2911E+10	22.06

Table 3에 나타난 바와 같이 초기 재료 물성치를 가정한 수치해석 모델의 고유진동수와 현장실험에서 추출한 고유진동수와의 오차율은 8.57~10.09%이었으나 3번의 수정 과정을 거친 수정 고유진동수와의 오차는 0.26~1.00%로 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 두 시스템 간의 Z벡터가 0에 가까이 수렴한 것으로 이때의 수치해석 모델의 탄성계수는 3.2911E+10 N/m²이다. 따라서 콘크리트 탄성계수의 유효 물성치는 초기 가정한 값보다 22.06% 증가하였음을 알 수 있다.

실제 부유식 구조물은 C35이상의 고강도 콘크리트로 설계되며 본 연구 대상물에 구조계추정기법을 적용한 결과 추정되는 콘크리트 강도는 C45에 근사한 값으로 건전한 상태에 있다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 부유식 구조물의 건전성을 평가하기 위하여 동적데이터를 이용한 손상탐지기법과 구조계추정기법을 부유식 구조물에 적용 하였다. 손상탐지기법의 적용성을 검증하기 위해 축소모형 실험을 실시하였다. 축소모형 실험은 두 가지 형태의 손상을 모사하였고 손상부위를 모두 정확하게 탐지하였으며, 구조계추정기법의 적용성을 검증하기 위해 현장실험 및 유한요소 모델을 통하여 대상 구조물의 유효 물성치를 추정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 구조물의 동적특성인 모드형상을 이용한 손상탐지 기법은 부유식 구조물의 손상부위를 결정함에 있어 유용하게 사용할 수 있다.
2. 축소모형 실험 결과 콘크리트의 강성에 비해 구조물의 크기가 작아 모드형상을 1개만 추출할 수 있었지만, 1개의 모드형상만으로도 손상을 정확하게 탐지할 수 있었다.

3. 구조계추정기법 절차에 따라 총 3번의 반복과정을 통하여 수치해석의 고유진동수가 실제 구조물의 고유진동수와 거의 일치하였으며, 이때의 구조물의 유효 물성치를 추정하였다. 본 연구의 대상 구조물은 건전한 상태를 유지하고 있다.

4. 본 연구는 단순한 부유식 구조물에 적용하였으며 복잡하고 규모가 더 큰 실제 부유식 구조물에 적용할 수 있는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(10 RTIP B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Choi, S. and Stubbs, N.(1997), "Nondestructive Damage Detection Algorithms for 2D Plates", SPIE Proceedings: Smart Structures and Materials, Vol. 3043, pp. 193-204.
- [2] Gibson, J. D. and Melsa, J. L.(1975), Introduction to Nonparametric Detection with Applications, Academic Press.
- [3] Jung, T. Y. and Jung, J. H.(1999), "Floating Structure for Ocean Space Utilization", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 8, No. 1, pp. 6-12.
- [4] Park, S. Y.(2003), "Linkage of Damage Evaluation to Structural System Reliability", Journal of Steel Structures, Vol. 15, No. 1, pp. 41-50.
- [5] Stubbs, N. and Osegueda, R.(1990), "Global Non-destructive Damage Evaluation in Solids", International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 5, No. 2, pp. 67-79.
- [6] Tsinker, G. P.(2004), Port Engineering : Planning, Construction, Maintenance, and Security, John Wiley & Sons.

원고접수일 : 2013년 7월 24일
심사완료일 : 2013년 9월 12일
원고채택일 : 2013년 9월 16일