

# 케이슨식 방파제 지반-구조 경계부 손상식별을 위한 실험적 모드분석

이소영\* · 이소라\*\* · 김정태\*

\*부경대학교 해양공학과

\*(주)오션스페이스

## Experimental Modal Analysis for Damage Identification in Foundation-Structure Interface of Caisson-type Breakwater

So-Young Lee\*, So-Ra Lee\*\* and Jeong-Tae Kim\*

\*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*Ocean Space Inc., Busan, Korea

**KEY WORDS:** Caisson 케이슨, Breakwater 방파제, Foundation-structure interface 지반-구조 경계부, Scouring 세굴, Modal analysis 모드 해석, Dynamic behavior 동적 거동

**ABSTRACT:** This paper presents an experimental modal analysis of a caisson-type breakwater to produce basic information for the structural health assessment of a caisson structure. To achieve the objective, the following approaches are implemented. First, modal analysis methods are selected to examine the modal characteristics of a caisson structure. Second, experimental modal analyses are performed using finite element analyses and lab-scale model tests. Third, damage scenarios that include several damage levels in a foundation-structure interface are designed. Finally, the effects of damage on the modal characteristics are analyzed for the purpose of utilizing them for damage identification.

### 1. 서 론

최근, 지구 온난화로 인하여 초대형 태풍 내습 및 이상파랑 현상의 빈도가 증가하고 있다. 이는 구조물의 관점에서는 환경 하중의 가중화로 이어진다. 특히, 방파제 구조물은 이러한 환경 하중에 직접적으로 노출되어 있다. 국내의 항만구조물은 주로 50년 빈도를 기준으로 설계되었지만, 이를 벗어나는 하중이 발생하면서 많은 피해가 발생하였다. 태풍 ‘매미(2003)’와 ‘사오마 이(2006)’에 의해 국내 항만 및 일본의 여러 항에서 방파제 일부 구간 유실, 파손, 사석마운드 붕괴 등의 피해가 발생한바 있다(항만 및 해안위원회, 2003; 황인섭 등, 2007). 가거도항의 경우는 태풍 ‘무이파(2011)’에 의해 약 200억 원의 피해가 발생하였고, 2차 피해방지를 위한 100년 빈도 태풍대비 비용으로 약 600억 원의 복구비가 소요될 예정이다. 이와 같이 구조물에 피해가 발생하면, 복구비용 뿐만 아니라 필요에 따른 추가적인 구조물의 설치에 많은 비용이 소요된다. 방파제에 잠재적인 손상이 존재하는 경우 피해의 규모는 더욱 가중된다. 국토해양부(2006)는 이러한 피해를 최소화하기 위하여 방파제의 안전진단 기준을 수립하였다. 그러나 안전진단 방법은 비파괴검사법에 의존하고 있어 수중에 존재하는 손상의 탐지는 어렵다. 따라서 구조물에 대한 제한된 접근 조건을 극복할 수 있는 방파제 구조물의 건전성평가에 관한 연구가 필요하다.

한편, 1970년대 이후로 구조물의 건전성평가에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히, 구조물의 진동특성을 이용한 연구가 꾸준히 수행되고 있다(Adams et al., 1978; Stubbs and Osegueda, 1990; Doebbling et al., 1998; Kim et al., 2003). 이와 같은 연구는 손상 전·후의 진동특성 변화로부터 손상의 위치 및 크기를 식별한다. 이를 위해서는 대상 구조물의 기본적인 동적거동 특성에 대한 분석이 필요하다. 그러나 방파제 구조물의 경우 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진응답해석 정도의 연구만이 이루어지고 있으며(김두기 등, 2005; Chang et al., 2000; Inoue et al., 2003), 극히 일부에서 중력식 항만 구조물의 진동응답 분석 연구가 수행되었다(이소영 등, 2009; 이소영 등, 2010). 따라서 방파제 구조물의 손상유형 및 손상 유형에 따른 동적거동의 특성을 분석하는 연구가 필요하다.

방파제의 구조형식에는 경사식, 직립식, 혼성식 방파제가 있다. 혼성식 방파제는 경사제 위에 직립벽을 설치한 것으로서 경사식, 직립식을 혼합한 형태이다. 이 중 케이슨은 시공성 및 경제성 면에서 우수하여 대규모 항만건설에 주로 이용되고 있다(최영박 등, 2000). 케이슨식 방파제의 안전성에 큰 영향을 미치는 손상에는 케이슨 구조체의 침하, 전도, 활동 등이 있으며, 이는 기초 사석 교란 및 세굴에 의해 야기된다. 이에 따라 기초사석의 손상 및 구조거동특성에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 케이슨식 방파제의 건전성평가를 위한

기본 연구로서 기초사석 손상에 대한 케이슨의 실험모드 분석을 수행하였다. 이를 위해 첫째, 케이슨 방파제의 모드분석을 위한 모드특성 분석 기법을 선정하였다. 둘째, 유한요소해석 및 모형 실험을 통해 모형케이슨의 실험모드 특성을 분석하였다. 마지막으로, 모형케이슨에 대한 기초사석 손상시나리오를 구성하고, 손상 전·후의 모드특성변화를 분석하여 케이슨 진동응답에 기초사석 손상 현상의 반영 여부를 검토하였다.

## 2. 모드특성 분석 기법

본 연구에서는 케이슨식 방파제의 동적거동 특성 분석을 위하여 파워스펙트럼밀도, 고유진동수 및 모드형상을 이용하였다. 기초사석손상에 관한 모드특성 분석을 위하여 파워스펙트럼 밀도는 상관계수를, 모드형상은 모드보증지수를 사용하였다.

### 2.1 파워스펙트럼밀도 및 상관계수

구조물에 작용하는 입력하중  $u(t)$ 와 이에 대한 구조응답  $v(t)$  사이에는 식 (1)과 같은 관계가 성립한다(Paz and Leigh, 2004).

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = u(t) \quad (1)$$

여기서,  $m$ ,  $c$ ,  $k$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 강성계수를 나타내며,  $\dot{v}(t)$ 는 속도,  $\ddot{v}(t)$ 는 가속도를 나타낸다. 식 (1)은 시간영역에 관한 식으로서 고속 푸리에 변환(Fast fourier transform, FFT)을 통해 주파수영역으로 변환된다. 본 연구에서는 계측된 신호의 노이즈 영향을 최소화하기 위하여 파워스펙트럼밀도(Power spectral density, PSD)를 사용한다. PSD는 식 (2)와 같이 Welch의 방법을 통해 계산된다.

$$S(f) = \frac{1}{n_d T} \sum_{i=1}^{n_d} |Y_i(f, T)|^2 \quad (2)$$

여기서,  $Y_i(f, T)$ 는 등분된  $i$ 번째 가속도 신호의 FFT(Fast fourier transform) 결과이다. 손상으로 인한 구조시스템( $m$ ,  $c$ ,  $k$ )의 변화는 구조응답의 변화로 이어지고, PSD 분석을 통해 손상에 의한 구조응답의 주파수 특성의 변화를 볼 수 있다.

손상에 의한 PSD의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 상관계수(Correlation coefficient, CC)를 이용하였다. 어떤 구조물에서 정의되는 두 개의 독립된 PSD,  $S_1(f)$ 와  $S_2(f)$ 를 확률변수 취급하면 두 PSD간의 상관계수  $CC_{S_1 S_2}$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Bendat과 Piersol, 1993).

$$CC_{S_1 S_2} = \frac{E[S_1 S_2] - \mu_{S_1} \mu_{S_2}}{\sigma_{S_1} \sigma_{S_2}} \quad (3)$$

상관계수 CC 값은 -1에서 1의 범위를 가지며, 두 PSD가 일치할 경우 CC 값은 1을 나타낸다. 상관성이 떨어질수록 1과 먼 값을 나타내며, 상관성이 일정 수준(통계적 하한 관리치) 이하로 떨어지면 구조 상태에 변화가 발생한 것으로 본다.

### 2.2 주파수영역분해법 및 모드보증지수

본 연구에서는 구조물에 대한 가진(입력) 외력에 대한 계측 자료 없이, 단지 구조물의 동적 응답(출력) 자료만 사용하여 케

이슨 구조물의 진동 특성을 분석하는 기법을 사용하였다. 이 같은 구조계의 출력 응답신호만을 이용한 모드특성치 추출기법에는 Random decrement 기법, 주파수영역분해(Frequency domain decomposition, FDD) 기법, 확률론적 부공간구명법(Stochastic subspace identification, SSI) 등을 들 수 있으며(Yi and Yun, 2004), 본 연구에서는 소요 해석시간이 짧고 정확도가 높은 FDD 기법을 이용하여 케이슨 구조물의 모드특성을 추출하였다.

주파수영역 분해법은 계측된 구조응답( $v$ )의 상호상관스펙트럼( $S_{vv}$ )을 식 (4)와 같이 특이치 분해(Singular value decomposition, SVD)하여 고유진동수와 모드형상을 추출한다.

$$S_{vv}(\omega) = \tilde{U}(\omega)^T \Sigma(\omega) \tilde{V}(\omega) \quad (4)$$

여기서,  $\tilde{U}$ ,  $\tilde{V}$ 는 유니터리 행렬(Unitary matrix) 행렬이고,  $\Sigma$ 는 특이 행렬(Singular matrix)이다. 특이치( $\sigma_i$ )의 피크가 발생하는 주파수가 구조계의 고유진동수이며, 이 주파수에 해당하는  $\tilde{U}$ 의 열벡터를 취하여 모드형상  $\phi_i$ 를 구할 수 있다(Brinker et al., 2001).

구조 상태 변화에 의한 모드형상의 변화를 구조 상태 변화 전후 모드형상들 사이의 선형 상관성으로 분석하기 위하여 식 (5)과 같이 모드보증지수(Modal assurance criterion, MAC)를 이용하였다(Ewins, 2000).

$$MAC(\phi_i, \phi_i^*) = \frac{[\phi_i^T \phi_i^*]^2}{[\phi_i^T \phi_i][\phi_i^{*T} \phi_i^*]} \quad (5)$$

여기서  $\phi_i$ 와  $\phi_i^*$ 는 각각 손상 전·후의  $i$ 번째 모드형상벡터이다. MAC은 모드형상의 직교특성을 이용한다. 만약, 두 모드가 같다면 MAC은 1의 값을, 일치하지 않는다면 1보다 작은 값이 계산된다.

## 3. 유한요소 해석을 통한 케이슨의 모드특성 분석

### 3.1 유한요소모델 및 케이슨의 모드 특성

유한요소 해석을 통한 케이슨 구조물의 모드특성 분석을 위하여 Fig. 1과 같이 모형케이슨의 유한요소모델을 작성하였다. 유한요소해석을 위해 범용 구조해석 프로그램 SAP2000(CSi Berkeley, 2001)을 이용하였다. 유한요소모델은 실제 케이슨 방파제의 설치조건을 고려하여 케이슨(Caisson), 피복사석(Armor gravel), 기초마운드(Foundation mound)로 구성하였다. 이때, 속채움 사석과 상치콘크리트는 고려되지 않았다. 세 부분의 재료 물

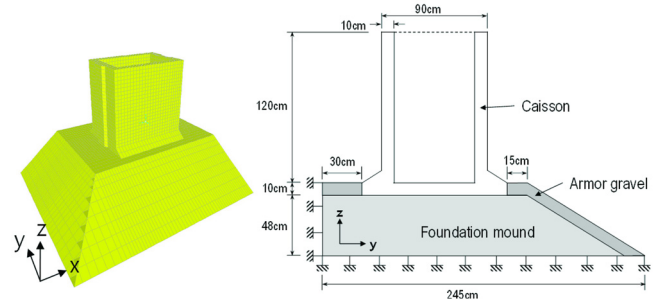


Fig. 1 Caisson FE model and its geometry and boundary condition

**Table 1** Material properties of caisson FE model

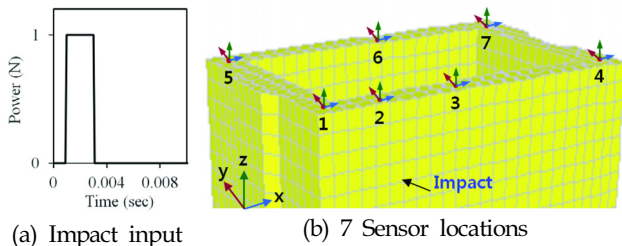
	Caisson	Armor gravel	Foundation mound
Material type	Concrete	Gravel	Sand
Mass density (Ton/m <sup>3</sup> )	2.5	2.1	2
Elastic modulus (MPa)	18,000	12	35
Poisson's ratio	0.18	0.25	0.325

성치는 Table 1과 같이 케이슨은 콘크리트로, 피복사석은 자갈, 기초마운드는 모래의 물성치로 입력하였다.

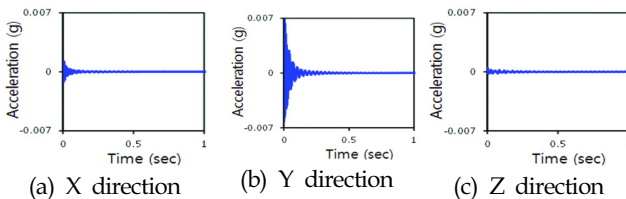
케이슨 유한요소모델의 가속도응답 추출을 위하여 강제진동 해석을 수행하였다. 이때, 가진 위치 및 가속도응답 추출 위치는 실제 케이슨 방파제 구조물의 조건을 반영하여 가진이 가능한 위치, 계측센서의 설치 가능한 위치로 선정하였다. 가진 함수로서 Fig. 2(a)와 같이 1N 크기에 0.002초의 지속시간을 갖는 충격 가진 함수를 y방향으로 입력하였다. 그리고 Fig. 2(b)와 같이 총 7개의 위치에서 3축 방향에 대한 가속도응답을 추출하였다. 이때의 샘플링 주파수는 1kHz이다. 추출된 가속도응답 중 3번 위치에서의 응답을 Fig. 3에 나타내었다. Y방향 충격가진에 대한 가속도응답의 크기는 y, x, z 순으로 민감도가 큰 것으로 나타났다.

모형케이슨 유한요소 모델의 모드특성 분석을 위하여 먼저, 가속도응답으로부터 식 (2)의 Welch 과정을 통해 PSD를 계산하였다. 추출된 PSD를 Fig. 4에 나타내었다. 0-200Hz의 주파수 범위 내에서 5개의 Peak가 두드러지게 나타났다. 각 Peak의 주파수는 29.5Hz, 47.9Hz, 89.8Hz, 107.4Hz, 167Hz이다.

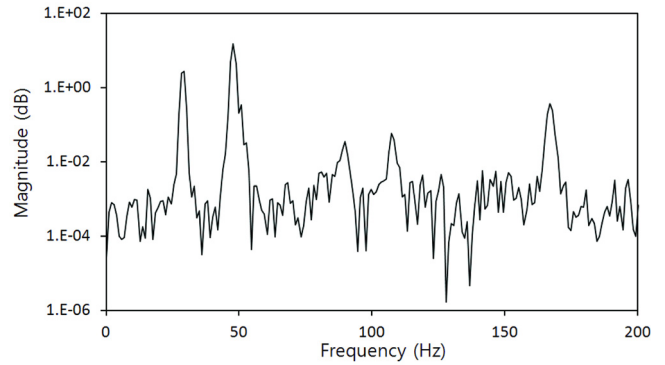
다음으로, FDD기법을 이용하여 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다. Fig. 3의 가속도 응답으로부터 상호상관스펙트럼을 구하고 식 (4)를 이용하여 특이치 분해를 수행하였다. 분해된 특이치 행렬을 Fig. 5에 그래프로 나타내었다. 0-200Hz의 주파수 범위 내에서 4개의 모드를 선정하였다. 특이치( $\sigma_i$ )의 peak 주파



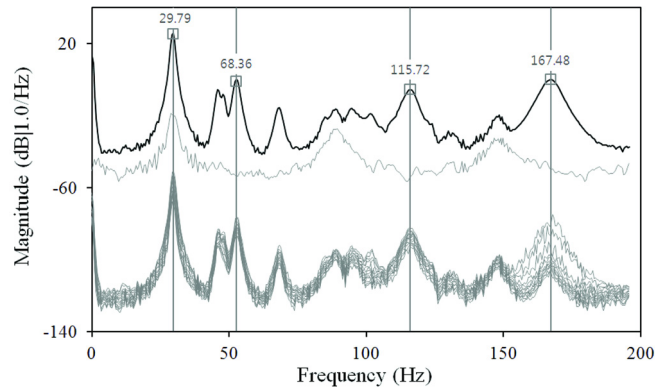
**Fig. 2** Impact and measuring points of FE model



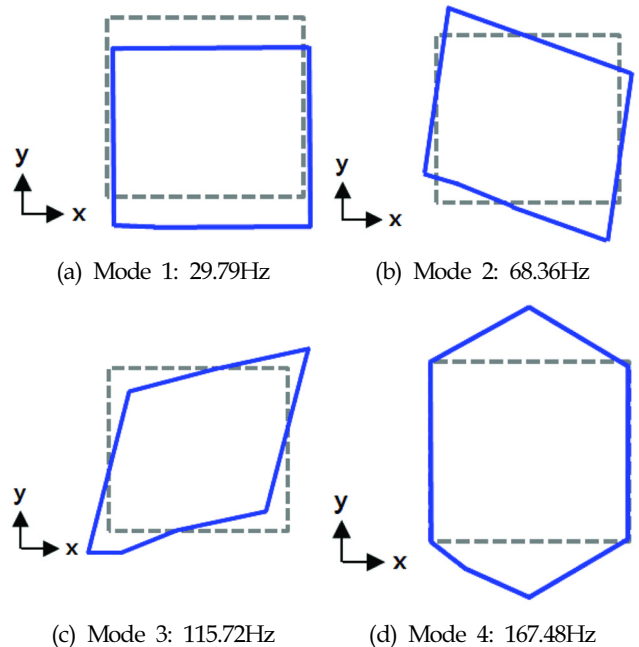
**Fig. 3** Acceleration responses of caisson FE model



**Fig. 4** Power spectral density of caisson FE model



**Fig. 5** Singular values of FDD procedure for caisson FE model



**Fig. 6** Natural frequencies and mode shapes of caisson FE model

수로부터 고유진동수를 얻고, 이에 대응되는 유니타리 행렬( $\tilde{U}$ )의 열벡터를 취하여 모드형상을 추출하였다. 추출된 4개 모드의 고유진동수 및 모드형상은 Fig. 6과 같다. 케이슨 구조체의 변형거

동을 기준으로, 모드 1과 모드 2는 강제모드(케이슨은 강제운동, 기초마운드는 변형체 운동)로 나타났으며 모드 3과 모드 4는 변형체모드(케이슨과 기초마운드 모두 변형체 운동)로 나타났다.

3.2 지반-구조 경계부 손상에 따른 모드 특성 분석

본 연구에서는 케이슨 방파제의 손상에 따른 모드특성 분석을 위하여 기초사석 손상에 관한 시나리오를 구성하였다. 기초사석 손상은 주로 세굴에 의해 발생하며, 실제 케이슨식 방파제의 주요 손상유형 중 하나이다. 본 연구에서는 이러한 기초사석 손상으로 지반-구조 경계부의 기초사석 유실을 고려하였다. 세굴의 진행도에 따라 4개의 경우로 구분하였다. 손상 모사를 위해 유실된 사석에 해당하는 요소를 제거하는 방법을 사용하였다. 손상이 표현된 유한요소모델의 지반-구조 경계부 형상은 Fig. 7과 같다.

지반-구조 경계부 손상에 대한 PSD의 변화를 분석하였다. 앞서 설명한 PSD 추출 과정을 통해 손상시나리오별 PSD를 추출하였다. 이때, 케이슨으로부터 추출된 가속도 응답 중 전면벽 상부 중앙(3번 계측점)에서 충격 가진의 방향과 동일한 방향 y 방향에서 추출된 응답을 이용하여 분석하였다. 손상시나리오별 PSD를

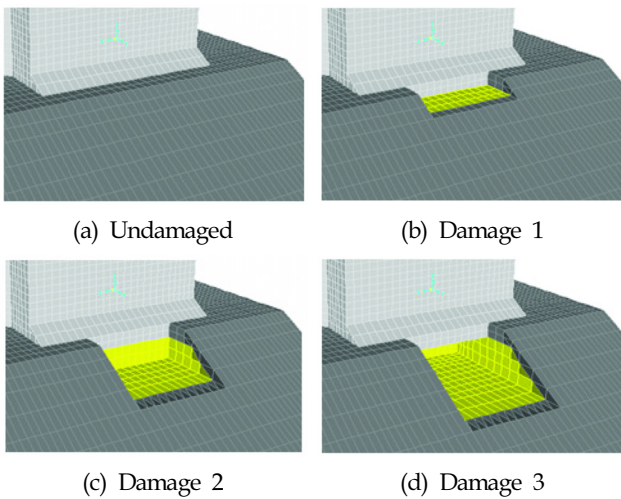


Fig. 7 Inflicted damages in foundation-structure interface of caisson FE analysis

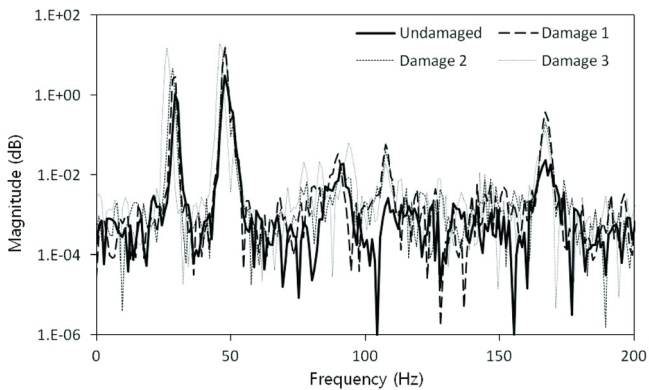


Fig. 8 Power spectral densities of caisson FE model for 3 damage cases

Fig. 8에 나타내었다. 지반-구조 경계부의 손상이 심화됨에 따라 특정 주파수 대역의 peak가 왼쪽으로 이동하였다. 이러한 PSD의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 식 (3)의 상관계수를 이용하였다. PSD의 상관계수를 분석한 결과, 비손상(Undamaged) 경우를 기준으로 손상 1(Damage 1), 손상 2(Damage 2), 손상 3(Damage 3)의 PSD 상관계수는 각각 0.950, 0.884 및 0.148이다. 비손상 상태와 손상상태 사이의 PSD 변화가 존재함을 확인하였으며, 손상이 심화됨에 따라 상관계수의 값이 감소하였다.

다음으로, 손상에 대한 고유진동수 및 모드형상 변화를 분석하였다. 고유진동수 및 모드형상 추출을 위해 Fig. 2(b)의 7개 계측점에 관한 3축 가속도 응답을 사용하였다. 모드 특성 추출을 위해 식 (4)의 FDD 기법을 이용하였다. 손상에 따른 고유진동수 변화는 Table 2와 같다. 손상의 크기가 증가함에 따라 고유진동수가 감소하는 경향을 보였으며, 특히 모드 1의 변화가 가장 크게 나타났다. 이는 PSD 분석에서 peak이 왼쪽으로 이동하는 것과 유사하다. 지반-구조 경계 손상에 대하여 강제모드인 모드 1과 모드 2의 고유진동수 변화가 크게 나타났으며, 모드 1이 가장 민감하게 변화하였다. 그리고 모드형상 분석을 위하여 식 (5)의 MAC을 이용하였다. Fig. 9에 모드형상 분석 결과를 나타내었다. 손상이 심화됨에 따라 MAC 값이 점차 감소하였다. 모드 2의 변화가 가장 크게 나타났으며, 손상 발생에 의해 모드형상의 선형 상관성의 변화가 가장 큰 것을 의미한다.

4. 모형실험을 통한 케이슨의 모드특성 분석

4.1 실험구성 및 케이슨의 실험모드 특성

실험을 통한 모형케이슨의 모드특성 분석을 위하여 충격 가진 실험을 수행하였다. 대상 모형케이슨 구조물은 Fig. 10과 같다. 이는 부산 신항 안벽용 케이슨의 1/20 축소모형이며, 3절의 모

Table 2 Natural frequency changes due to damage in FE analysis

Damage Scenario	Natural Frequency (Hz)			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Undamaged	29.79	68.36	115.72	167.48
Damage 1	28.81	67.87	115.72	166.50
Damage 2	28.32	67.38	115.72	167.48
Damage 3	26.86	66.90	116.70	167.48

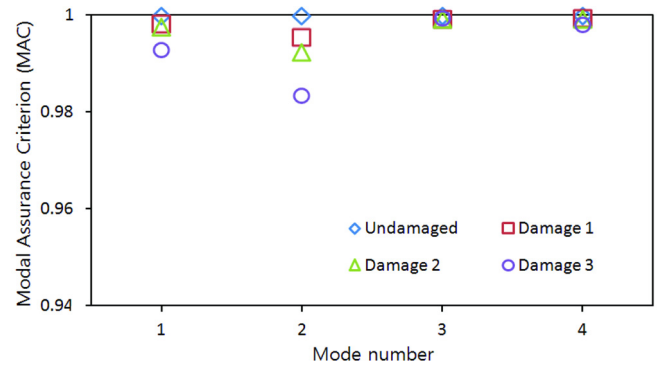


Fig. 9 MAC values of mode shapes of FE analysis

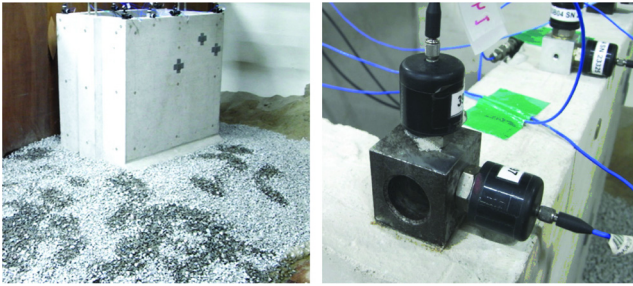


Fig. 10 Lab-scaled caisson setting on foundation mound

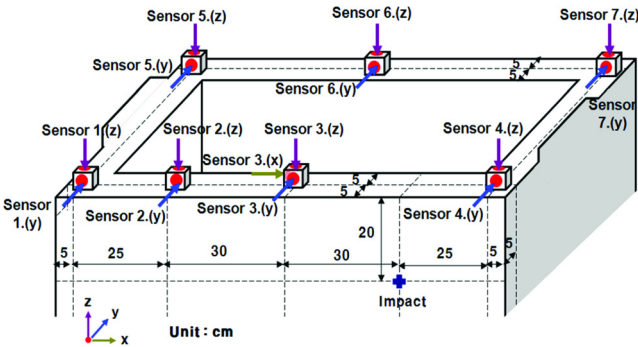


Fig. 11 Geometry of impact and sensors in the lab-tests

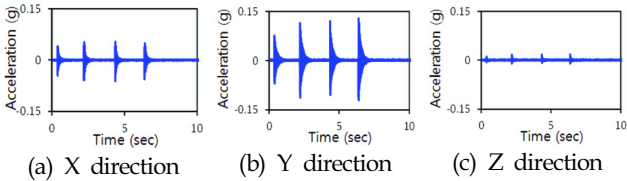


Fig. 12 Acceleration responses of lab-scaled caisson structure

형케이스 유한요소모델에 적용된 크기와 동일하다. 케이스 방파제의 기초마운드를 모사하기 위하여 실험소 바닥에 모래를 쌓고 자갈로 피복하여 기초마운드를 구성하였다. 모형케이스는 이 같은 기초마운드 위에 거치되었다.

모형케이스의 진동응답을 얻기 위해 고무해머를 이용하여 케이스의 전면벽에 랜덤 충격 가진을 수행하였다. 충격 가진 응답의 계측을 위하여 케이스 상부에 15개의 가속도계를 설치하였다. 가진과 가속도계 설치의 위치 및 방향을 Fig. 11에 나타내었다. 가진 위치 및 계측 위치는 유한요소모델의 것과 각각 대응된다. 1kHz의 샘플링 주파수로 계측하였으며, 모형케이스의 가속도응답은 Fig. 12와 같다. y방향의 가진에 대하여 가속도응답의 크기가 y, x, z축 순으로 민감도가 크게 나타났고, 유한요소 해석 결과와 동일하였다.

모형실험에서 계측 분석한 PSD, 고유진동수 및 모드형상을 분석하여 모형케이스의 모드특성을 분석하였다. Welch 과정을 으로부터 가속도응답의 PSD를 추출하였다. 이때, 앞서 기술한 유한요소해석에서와 같이 Fig. 11의 3번 위치에서 계측된 y방향의 응답을 이용하였으며, Fig. 13과 같이 PSD를 추출하였다. 170.9Hz에서 가장 큰 peak가 존재하며, 그 이외에도 28.3Hz, 81.5Hz 등의

주파수 대역에 Peak가 발생하였다.

다음으로, 고유진동수 및 모드형상 추출을 위하여 FDD 기법을 이용하였다. FDD 과정 중 추출된 특이치 행렬을 Fig. 14에 도시하였다. 특이치의 Peak 중, 3.1절의 유한요소모델의 모드형상에 각각 대응되는 4개의 Peak를 선정하였다. 각각의 Peak에 해당하는 4개의 고유진동수와 모드형상을 Fig. 15에 도시하였다. 모드 2를 제외한 3개의 모드의 고유진동수는 유한요소 해석 결과와 5%이내의 오차로 매우 근사하게 나타났다. 모드 2의 경우, 비교적 큰 오차가 발생하였는데, 구조-지반 모델의 오류에 기인한 것으로 사료되며, 향후의 추가적인 모델개선(Model update) 과정을 통해 모델오류를 최소화해야 한다.

4.2 지반-구조 경계부 손상에 따른 실험모드 특성 분석

지반-구조 경계의 손상에 대한 모드 특성변화 분석을 위하여 Fig. 16과 같이 손상시나리오를 구성하였다. 3.2절의 유한요소모델의 손상시나리오와 같이 세굴에 의한 기초사석 유실로서 지반-구조 경계부 손상을 고려하였다. 모형실험에서 손상을 모사하기 위하여 피복사석(자갈)과 기초마운드(모래)를 점차 제거해 가면서 4 단계의 손상을 표현하였다.

손상시나리오에 대하여 각 8회의 가속도응답을 계측하였다. 계측된 가속도응답으로부터 PSD 분석을 수행하였다. 이때, 유한요소 해석의 경우와 동일하게 전면벽 상부 중앙에서 계측된 y방향 응답을 이용하였다. 앞서 기술한 방법을 이용하여 손상시나리오별 PSD를 추출하였다. 각각의 손상상태에서 첫 번째로 계측된 응답의 PSD를 Fig. 17에 도시하였다. 손상의 발생에 따라

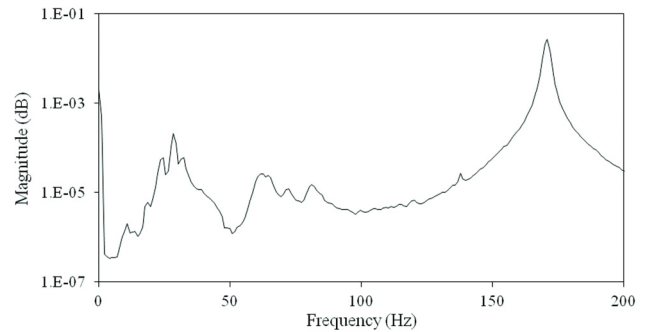


Fig. 13 Power spectral density of lab-scaled caisson

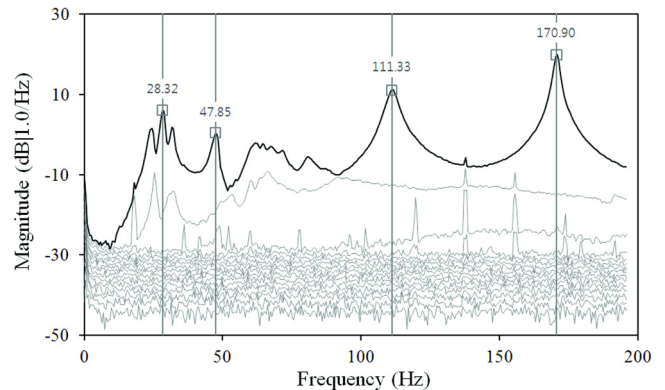


Fig. 14 Singular values of FDD procedure for lab-scaled caisson

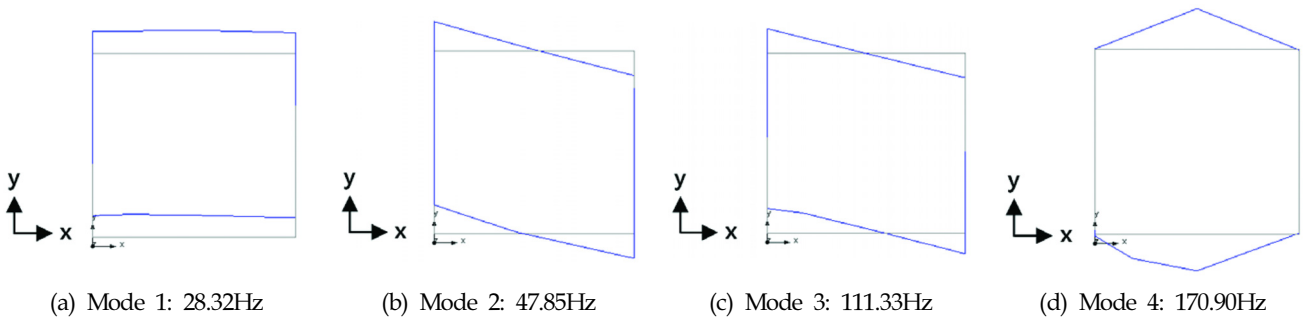


Fig. 15 Natural frequencies and mode shapes of lab-scaled caisson

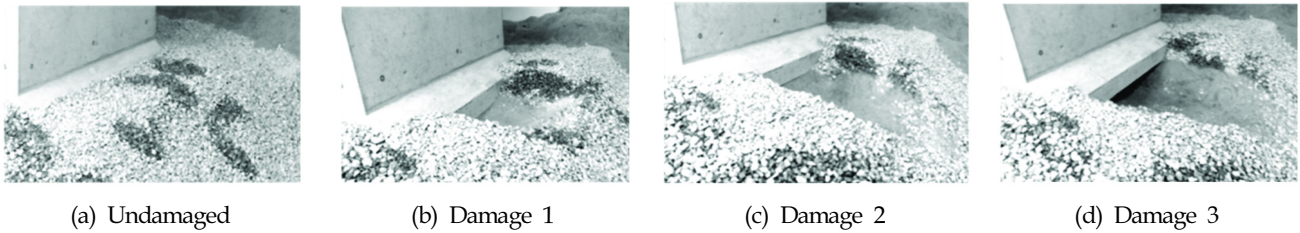


Fig. 16 Inflicted damages in foundation-structure interface of lab-scaled caisson

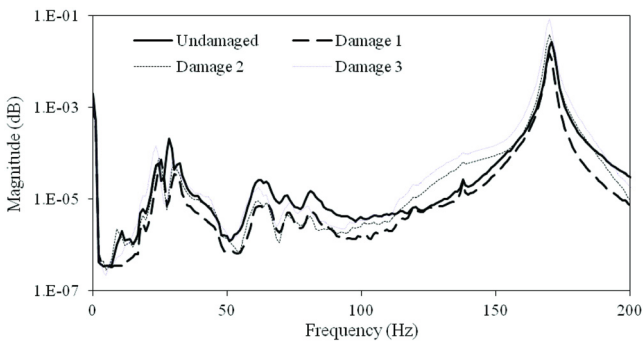


Fig. 17 Power spectral densities of lab-scaled caisson for 3 damage cases

PSD의 Peak의 주파수 변화가 발생하였지만, 유한요소 해석의 경우만큼의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다. 식 (3)의 상관계수를 이용하여 PSD의 변화를 정량적으로 분석하였다. PSD의 상관계수 분석 결과, 비손상 경우를 기준으로 손상 1, 손상 2, 손상 3의 PSD 상관계수는 각각 0.908, 0.897 및 0.878이다. 각각의 상관계수 값은 동일한 손상상태에서 측정된 8개의 데이터로부터 추출된 상관계수 값의 평균치이며, 손상이 심화됨에 따라 상관계수의 값이 감소하였다.

다음으로, 지반-구조 경계부 손상에 대한 고유진동수 및 모드형상 변화를 분석하였다. 이를 위해 Fig. 11의 7개 측정점에서 취득된 가속도응답을 이용하였으며, 앞서 기술한 FDD 기법을 사용하여 추출하였다. 손상에 따른 고유진동수의 변화를 Table 3에 정리하였다. 손상이 발생함에 따라 모드 2와 모드 4는 고유진동수가 감소하였으며, 모드 1과 모드 3은 증가하였다. 모드 2를 제외한 3개 모드는 손상의 심화에 따른 변화는 나타나지 않았다. 반면, 모드 2에서는 손상의 심화에 따라 점차적인 고유진동수가 변화가 발생하였다. 모드형상의 상관성 변화를 위하여 모드형

상의 MAC 값을 계산하였다. 모드 별 MAC 값의 변화를 Fig. 18에 도시하였다. 손상이 심화됨에 따라 MAC 값이 감소하였으며, 고유진동수의 결과와 다르게 모드 1의 변화가 크게 나타났다. 즉, 지반-구조 손상에 대하여 모드 1의 선형 상관성의 변화가 가장 크게 나타났다. 유한요소해석 결과와 모형실험 결과를 분석해 볼 때, 지반-구조 경계부의 손상은 변형체 모드에 비해 강체모드에 상대적으로 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

Table 3 Natural frequency changes due to foundation damage in lab-scaled caisson

Damage Scenario	Natural Frequency (Hz)			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Undamaged	28.32	47.85	111.33	170.90
Damage 1	29.79	47.85	112.31	169.92
Damage 2	29.79	46.88	112.31	169.92
Damage 3	29.79	45.41	112.31	169.92

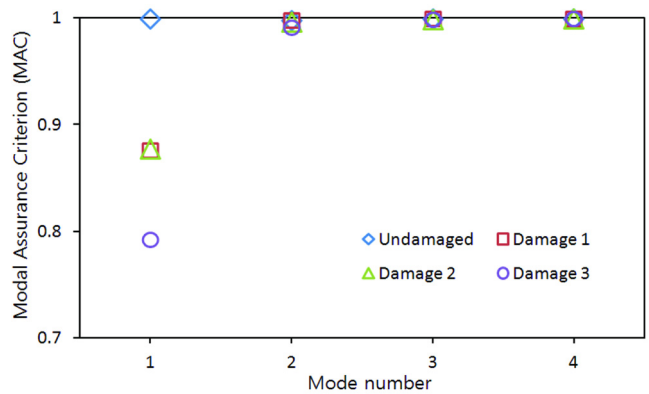


Fig. 18 MAC values of mode shapes of lab-scaled caisson

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 케이슨식 방파제의 지반-구조 경계부 손상에 대한 케이슨의 실험모드 분석을 수행하였다. 이를 위해 먼저, 케이슨 방파제의 모드분석을 위한 기법으로서 파워스펙트럼의 상관계수, 고유진동수, 모드형상의 모드보증지수를 선정하였다. 다음으로, 유한요소해석 및 모형실험을 통해 모형케이슨의 실험모드 특성을 분석하였다. 기초사석 위에 거치된 케이슨은 케이슨 구조체의 변형 거동 기준으로 볼 때, 강체모드와 변형체모드가 존재하였다. 마지막으로, 모형케이슨의 기초마운드 손상으로서 지반-구조 경계부 손상시나리오를 구성하고, 손상 전·후의 모드특성변화를 분석하여 케이슨 진동응답에 기초사석 손상 현상의 반영 여부를 검토하였다. 그 결과, 지반-구조 경계부 손상의 발생 및 정도의 심화에 따라 파워스펙트럼의 상관계수가 감소하였다. 또한, 고유진동수 및 모드형상 분석 결과로서 강체모드에 관한 모드가 상대적으로 손상에 의한 변화가 큰 것으로 나타났다. 이로서 케이슨 구조체의 진동응답이 지반-구조 경계부(기초사석부) 손상 현상을 반영함에 따라 케이슨 진동응답을 이용한 기초부의 손상평가의 가능성을 제시하였다. 케이슨의 기초부의 손상평가 기술을 실제 케이슨식 방파제 구조물에 적용하기 위해서는 지반-구조물의 상호해석을 통해 구체적인 기초부 손상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0004253)의 일부로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 국토해양부 (2006). 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침: 항만, 국토해양부 & 한국시설안전관리공단.
- 김두기, 류희룡, 서형렬, 장성규 (2005). "가진 주파수성분에 따른 항만구조물의 지진응답특성에 관한 연구", 한국해양공학학회지, 제17권, 제1호, pp 41-46.
- 이소영, 김정태, 김현태 (2010). "사석마운드가 손상된 케이슨식 방파제의 진동기반 구조진전성 모니터링", 한국해양공학학회지, 제24권, 제1호, pp 89-98.
- 이소영, 김정태, 김현태, 박우선 (2009). "가속도 계측을 통한 항만시설용 케이슨 구조체의 동적응답 분석", 한국해양공학학회지, 제23권, 제1호, pp 114-121.
- 최영박, 윤태훈, 지흥기 (2000). 해안과 항만공학, 제1판 문운당, 서울.
- 항만 및 해안위원회 (2003). "태풍 매미에 의한 해상 및 항만 피해 현황과 대책", 대한토목학회지, 제51권, 제10호, pp 28-38.
- 황인섭, 홍성대, 김희대 (2007). "해외항만 태풍피해와 복구 방안", 대한토목학회지, 제55권, 제10호, pp 103-110.
- Adams, R.D., Cawley, P., Pye, C.J. and Stone, B.J. (1978). "A Vibration Technique for Non-destructively Assessing the Integrity of Structures", Journal of Mechanical Engineering Science, Vol 20, pp 93-100.
- Brinker, R., Zhang, L and Andesen, P. (2001). "Modal Identification of Output-only Systems using Frequency Domain Decomposition", Smart Materials and Structures, Vol 10, pp 441-445.
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1993). Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York.
- Chang, C.Y., Mok, C.M., Wang, Z.L., Settgest, R., Waggoner, F., Ketchum, M.A., Gonnermann, H.M. and Chin, C.C. (2000). "Dynamic Soil-Foundation-Structure Interaction Analysis of Large Caissons", Technical Report MCEER-00-0011, University at Buffalo, New York.
- CSi Berkeley (2001). SAP2000 version 10.0.7, Computers and Structures. Inc., California.
- Doebbling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B. (1998). "A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods", The Shock Vibration Digest, Vol 30, No 2, pp 91-105.
- Ewins, D.J. (2000). Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd ed., Research Studies Press LTD., Hertfordshire.
- Inoue, K., Kiura, M., Otsuka, N., Yoshida, N. and Sasajima, T. (2003). "Numerical Analysis of the Earth Pressure during Earthquake on the Gravity Type Quay Wall", Proc. of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp 250-254.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Stubbs, N. (2003). "Damage Identification in Beam-type Structures: Frequency-based Method vs Mode-Shape-based Method", Engineering Structures, Vol 25, pp 57-67.
- Paz, M. and Leigh, W. (2004). Structural Dynamics: Theory and Computation, 5th ed., Kluwer Academic Publishers, Norwell.
- Stubbs, N. and Osegueda, R. (1990). "Global Nondestructive Damage Evaluation in Solids", International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol 5, No 3, pp 67-79.
- Yi, J.H. and Yun, C.B. (2004). "Comparative study on Modal Identification Methods using Output-only Information", Structural Engineering and Mechanics, Vol 17, No 3-4, pp 445-456.

2011년 10월 17일 원고 접수

2012년 2월 10일 심사 완료

2012년 2월 13일 게재 확정