

손상된 해안 케이슨-지반 시스템의 유사파동가진 기반 진동특성 모니터링

팜엔곡랜 · 정소미* · 김정태†

국립부경대학교(학생) · *국립부경대학교(박사후 연구원) · †국립부경대학교(교수)

Vibration Feature Monitoring of Damaged Caisson-Foundation System based on Pseudo-Wave Excitation

Ngoc-Lan PHAM · Somi JUNG* · Jeong-Tae KIM†

Pukyong National University(student · *postdoctoral researcher · †professor)

Abstract

In this study, a novel vibration characteristic monitoring technique based on pseudo-wave excitation is presented to identify damage in caisson-foundation system, most of which are located in underwater environments. Firstly, a theoretical approach is presented to model vibration responses of caisson-foundation system. Secondly, a lab-scale vibration experiment is performed on a model caisson-foundation system. Changes in vibration characteristics are measured before and after foundation damage and are analyzed in modal domain accordingly. Finally, the changes in vibration characteristics induced by the foundation damage are quantitatively analyzed through changes in frequency responses caused by the damage.

Key words : Pseudo-wave, Vibration feature, Caisson-foundation, Modal analysis

I. 서론

해안구조물은 시간이 지남에 따라 지진 및 폭풍 해일 등 혹독한 환경 조건에 지속적으로 노출된다. 대표적인 수중 구조물인 케이슨 방파제 시스템은 상부 콘크리트, 수중 케이슨 및 기초로 구성되며, 장기간 공용 후 기초의 침하, 전도 및 활동 등 안정성을 저해하는 문제가 발생한다(Goda, 1994; Brunn, 2005). 또한, 수중 케이슨은 폭풍 해일의 영향으로 심각한 균열이나 채움재 누출 등의 손상이 유발될 수 있다. 통상의 해안 케이슨-지반 시스템은 수중 영역 접근이 어려워 구조적 무결성을 평가할 수 있는 혁신적인 방법

이 필요하다.

기존의 연구에서는 진동 기반 기법(vibration-based method)을 사용하여 파도-구조물-지반 간 상호 작용 특성의 변화를 분석하였으며, 수면 위 제한된 영역에 설치된 최소한의 센서만으로 케이슨-지반 시스템의 구조 특성을 모니터링하는 연구를 시도하였다. 또한, 탄성 기초 모델에 강체 모델을 적용하여 파도에 노출된 케이슨 유형 방파제의 동적 반응을 조사하였다(Lee et al., 2012). 특히 Lee et al.(2013)은 진동 기반 기법을 적용하여 케이슨-기초 경계면에서 발생한 손상을 감지하였다. Huynh et al.(2013)은 현장 진동 측정과 결합된 단순화된 분석적 접근 방식을

† Corresponding author : 051-629-6585, idis@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023-2025)에 의해 연구되었음.

사용하여 케이슨-지반 시스템의 손상도를 평가하였다. Lee et al.(2019)은 기초 지반 손상이 발생한 케이슨-지반 시스템에서 파랑과 수위 등의 변화가 진동특성에 미치는 영향을 정량화하는 모니터링 체계를 제시하였다. 이러한 연구에도 불구하고, 수중 구조물-지반 시스템을 평가할 때 해안 환경에 내재된 복잡성과 현장 매개변수와 관련된 불확실성을 극복하기 위한 연구는 부족한 현실이다.

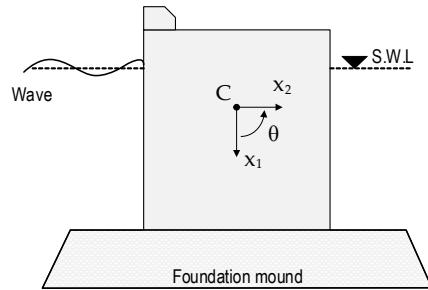
본 연구에서는 구조시스템의 대부분이 수중 환경에 있는 케이슨-지반 시스템의 손상을 식별하기 위한 새로운 방식의 유사파동 가진(pseudo-wave excitation) 기반의 진동특성 모니터링 기법을 제시하였다. 연구 접근법으로는 첫째로, 수중 구조물 시스템에 발생한 손상을 수중 위의 구조영역의 유사손상(pseudo damage)으로 묘사하는 이론적 접근법을 제시하였다. 둘째로, 실제 수중 케이슨-지반 시스템을 대상으로 모형구조물을 제작하고 진동계측 실험을 수행하였다. 실험대상의 수중영역인 기초 지반부에 손상을 도입하여 손상 전후의 진동특성의 변화를 계측하였으며, 이에 따른 진동특성의 변화를 분석하였다. 마지막으로, 지반 손상이 유발하는 진동특성의 변화를 주파수 응답(frequency response)과 피크 주파수(peak frequency)의 변화를 통해 정량적으로 분석하였다.

II. 연구 방법

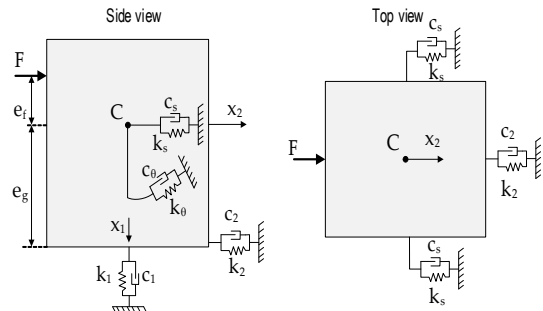
1. 케이슨-지반 시스템의 단순화 모델

Huynh et al.(2013)는 해석적 모델을 활용하여 탄성 기초 위의 강체 콘크리트 본체의 거동을 조사하였으며, 이를 바탕으로 개념적 모델이 개발되었다. 이후 Lee et al.(2019)은 이 접근 방식을 더욱 발전시키기 위해 케이슨-기초 시스템의 거동을 시뮬레이션하는 단순화된 모델을 제안하였다. [Fig. 1]은 단순화된 3자유도(3-DOF) 모델이며

케이슨은 면내 충격을 받는 2차원 구조물로 간주되었고, 면외 운동은 해석에서 생략되었다.



(a) 3 DOFs model



(b) Analytical mass-spring model

[Fig. 1] Simplified caisson-foundation model.

[Fig. 1]과 같이 케이슨의 3자유도는 heave(x_1), sway(x_2), roll(θ)이다. 세 가지 동작에 해당하는 질량은 각각 m_1 , m_2 , m_θ 이다. 충격력 F 는 각각 heave, sway, roll 동작을 따라 $F_1(t)$, $F_2(t)$, $M(t)$ 로 분해된다. [Fig. 1(b)]는 케이슨-기초 시스템의 해석적 질량-스프링 모델로서 케이슨은 지반과 주변 물에 비해 변형이 최소화되므로 탄성 반공간 기초 위의 강체로 간주된다(Huynh et al. 2013). 케이슨의 거동은 heave(k_1 , c_1), sway(k_2 , c_2) 및 roll(k_θ , c_θ)로 스프링과 감쇠기로 모델된다. 또한, 스프링과 대시포트 사이의 sway(k_s , c_s)는 케이슨-지반 간의 상호 작용을 대표하며, 케이슨 양쪽에 대해 대칭이라고 가정하였다.

자유물체도의 하중 평형 조건을 통해 운동방정식은 식(1)과 같이 행렬 표기법으로 유도되었다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & -e_g c_2 \\ 0 & -e_g c_2 & c_\theta + e_g^2 c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & -e_g k_2 \\ 0 & -e_g k_2 & c_\theta + e_g^2 k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ M(t) \end{bmatrix} \dots (1)$$

여기서, e_f 와 e_g 는 각각 충격력 F 로부터 케이슨 질량중심까지의 편심거리 및 케이슨 질량중심으로부터 하단까지의 편심이다.

Huynh et al.(2013)는 식(1)을 사용하여 기초 손상과 케이슨 질량 변화 사이에 관계가 있다고 분석하였다. 본 연구에서는 이 같은 관계로부터 유사손상을 정량화하였다. Δc_1 , Δc_2 , Δk_1 , Δk_2 는 기초 손상의 존재를 나타내는 스프링과 감쇠기의 변화이다. 케이슨 질량 변화(즉, 유사손상)는 heave(Δm_1), sway(Δm_2), roll(Δm_θ) 운동에 해당하는 세 가지 질량 성분의 변화로 분해된다. 아울러 손상에 따라 케이슨의 질량중심의 위치(Δe_g)와 충격하중의 편심(Δe_f) 또한 변하게 된다.

2. 유사파동가진 기반 진동모니터링 기법

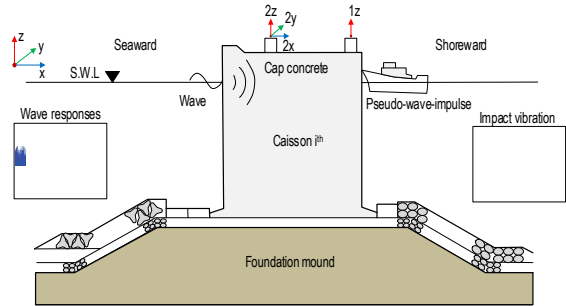
[Fig. 2]는 수중에 잠긴 케이슨-기초 시스템에서 유사파동가진(pseudo-wave-excitation)을 사용한 진동 모니터링 실험 설정을 나타낸다. 사석 마운드 기초에 설치된 케이슨은 전면에서 파동 전파력을 받으며, 해당 파동은 일련의 케이슨 합체를 따라 순차적으로 전달된다. 파동 에너지의 손실이 없다고 가정하여 모든 케이슨에 동일한 파동 에너지가 전달되는 것으로 본다.

일련의 케이슨 시스템의 진동특성을 분석하기 위해 유사파동 충격을 정확하게 모사하여야 한다. 이 과정은 세 단계로 구성된다.

첫 번째 단계에서는 케이슨-지반 시스템의 진동 응답(vibration response)을 측정하기 위해 [Fig. 2]와 같이 구조물 상부에 여러 개의 가속도계를 설치한다. 각 케이슨의 거동을 완전히 식별하기 위해 x , y , z 방향으로 가속도계를 설치하며, 실

제 현장 적용을 고려하여 16채널 신호 계측기를 활용해 3개 케이슨의 진동 응답을 동시에 계측하였다. 이를 위해 케이슨 하나당 5개의 가속도계를 할당하였다.

[Fig. 3(a)]와 같이 케이슨의 진동 응답은 해당 케이슨(Caisson i)과 그 인근 케이슨들에 일련의 인공 충격을 가하여 계측한다. 즉, 케이슨 i 의 가속도 응답(acceleration response)은 해당 케이슨 i 에 대한 충격과 좌우 인접 케이슨($i-1$ 및 $i+1$)의 응답으로 수집한다. [Fig. 3(a)]에 모사된 것과 같이 일련의 충격은 i 번째 케이슨에 설치된 가속도계의 진동 응답으로 계측된다.

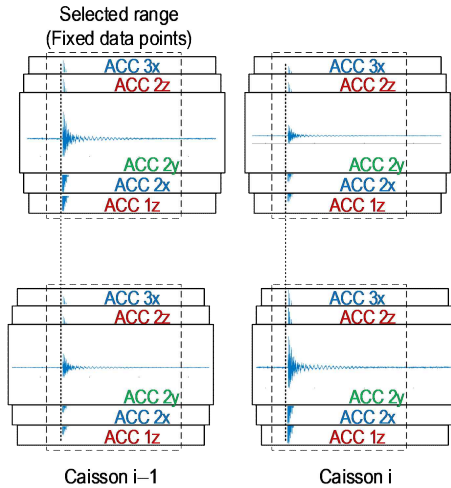
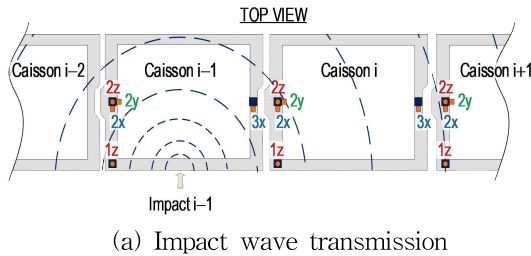


[Fig. 2] Schematic of vibration test.

두 번째 단계에서는 충격 가진에서 계측된 가속도 응답을 동기화한다. 케이슨 i 에 적용된 충격 하중은 기초와 전단 키를 통해 서로 연결된 인접 케이슨 $i-1$ 및 $i+1$ 로 전달된다. [Fig. 3(b)]는 가속도 신호를 동기화하는 체계로서, 케이슨 $i-1$ 과 케이슨 i 에서 수집된 진동 응답을 충격 시점 기준으로 동기화한 예이다.

마지막 단계에서는 각 케이슨에 대해 동기화된 가속도 응답을 중첩하여 분석한다. 진동 응답의 중첩은 신호의 동기화와 함께 진행된다. [Fig. 3(b)]와 같이 중첩된 가속도 응답은 해당 케이슨에 가진이 된 경우에 크게 발생한다. 예를 들어, 케이슨 $i-1$ 에 충격을 가한 경우 해당 케이슨의 가속도 응답이 다른 두 케이슨보다 크게 나타나며, 케이슨 i 에 충격을 가한 경우 역시 케이슨 i 의 가

속도 응답이 다른 두 케이슨보다 크게 계측된다. 전체적으로 3개의 케이슨 각각에 충격 하중을 가하고, 각 케이슨에 설치된 5개의 가속도 센서를 통해 3개 세트의 진동 응답을 계측하였다.



[Fig. 3] Pseudo-wave-excitation vibration responses.

3. 진동특성 추출기법

주파수 영역 분해(Frequency Domain Decomposition, FDD) 기법은 Yi et al. (2013)에 의해 해안구조물의 진동 모니터링에 적용되었으며, 강체 케이슨의 진동특성 분석에 효과적으로 활용되었다. 이 기법은 진동 응답을 일련의 독립적인 단일 자유도 시스템으로 분해하는 방식으로, 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 교차 스펙트럼 밀도(Cross-Spectral Density, CSD)

행렬($S_{yy}(\omega)$)에 적용하여 시스템의 고유진동수(natural frequency)와 모드 형상(mode shape)을 분석한다. FDD 기법은 네 가지 단계로 적용된다. 첫 번째 단계에서는 구조물에 설치된 n 개의 센서로부터 수집된 가속도 응답을 기반으로 CSD 행렬을 계산한다. CSD 행렬의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$S_{yy}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \dots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \dots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

두 번째 단계에서는 CSD 행렬을 특이값 분해하여 단위 행렬($U(\omega)$, $V(\omega)$) 및 대각 행렬($\Sigma(\omega)$)로 분리한다. CSD 행렬의 대칭성으로 인해 단위 행렬 $U(\omega)$ 와 $V(\omega)$ 는 동일하며, 대각 행렬은 내림차순으로 정렬된 특이값 $\sigma(\omega)$ (Singular Value, SV)을 포함한다. 이때 첫 번째 값인 $\sigma_1(\omega)$ 는 시스템의 가장 큰 동적 에너지를 나타낸다. CSD 행렬의 분해 결과는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{yy}(\omega) = U(\omega)^T \Sigma(\omega) V(\omega) \dots\dots\dots (3)$$

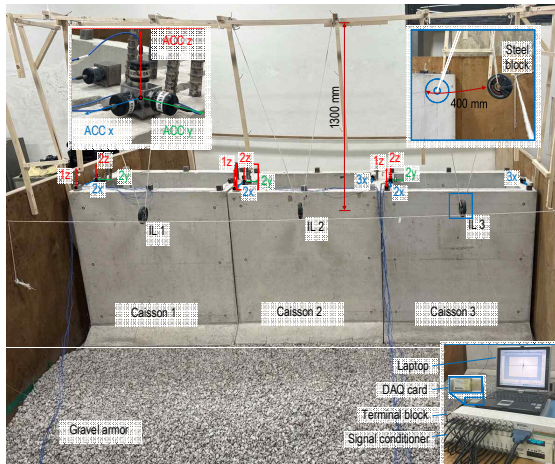
세 번째 단계에서는 특이값 스펙트럼에서 피크 주파수를 선택하여 고유진동수를 식별한다. 마지막 단계는 해당 주파수에서 첫 번째 특이 벡터(singular vector)를 추출하여 모드 형상을 결정한다. 케이슨 시스템을 감쇠가 작은 선형 구조 시스템으로 간주할 때, 특이값 스펙트럼 상에서는 뚜렷한 공진 피크(resonance peak)를 보인다.

4. 케이슨-기초 시스템 모형 실험

[Fig. 4]는 실험실 조건에서 케이슨-기초 시스템에 대한 진동 실험 설정이다. 3개의 콘크리트 케이슨 합체가 기초 마운드(100mm의 자갈층) 위

에 배치되었으며, 전단 키를 사용하여 정렬되었다. 가속도계는 케이슨 상단의 강철 큐브를 통해 x, y 및 z 방향으로 배치되었다. 길이 1300mm인 로프에 매달린 강철 블록을 사용하여 3개의 충격 하중(즉, IL 1, IL 2 및 IL 3)을 가진하였다.

15개의 가속도계(모델 PCB 393B04)로 15초 동안 1kHz의 샘플링 속도로 가속도 응답이 측정되었다. 사용된 PCB 393B04 가속도계의 사양은 1) 민감도 10mV/g, 2) 측정범위 $\pm 500g$, 3) 주파수 범위 1 ~ 10kHz 및 4) 작동 온도 $-54^{\circ}C \sim +482^{\circ}C$ 이다. 각 케이슨에 5개의 가속도계가 3개 방향을 따라 배치되었으며, x 방향에 2개의 센서(2x 및 3x), y 방향에 1개의 센서(2y), z 방향에 2개의 센서(1z 및 2z)가 설치되었다. 데이터 수집 시스템은 PCB Piezotronics 모델 481A, BNC 2090A, DAQ 카드로 구성되었다.

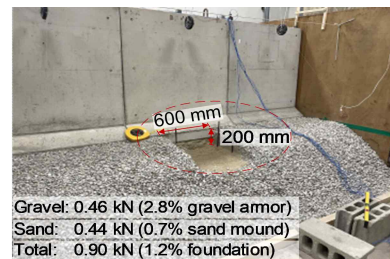


[Fig. 4] Experimental setup for caisson model.

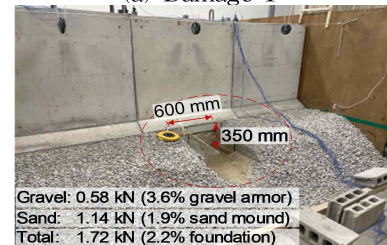
가속도 응답은 5개의 양상블을 사용하여 3개의 케이슨(즉, IL 1, IL 2 및 IL 3)에 걸쳐 순차적인 충격 하중에서 수집되었으며, 앞서 설명된 원리에 따라 동기화되고 중첩되었다. [Fig. 4]와 같이 매달린 충격 추의 드롭-스윙을 통해 충격하중의 재현성을 확보하고자 하였다. 각 센서로부터 손상 사례당 5개의 응답(4096개의 데이터 포인트)

이 계측되었다.

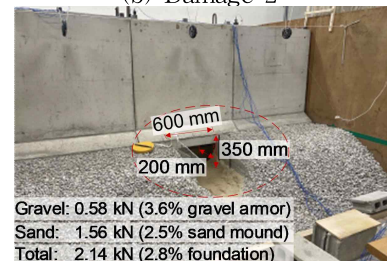
먼저 비손상 경우에 대해 실험을 수행하였으며, 기초에서 자갈 층과 모래 층 일부를 제거하여 3 단계의 기초 손상을 설정하여 모사하였다. [Fig. 5]와 같이 손상 폭은 케이슨 폭의 절반(600mm)으로 선정하였으며, Damage 1은 자갈 0.46kN과 모래 0.44kN을 제거하여 모사하였다. Damage 2는 두께 150mm의 추가 층을 제거하여 발생했으며, 총 0.58kN 자갈과 1.14kN 모래가 제거되었다. Damage 3는 기초-케이슨 경계면으로 확대되었다. 파넌 구멍 깊이가 200mm일 때 추출된 총 모래는 1.56kN 및 자갈 0.58kN으로 모사되었다.



(a) Damage 1



(b) Damage 2



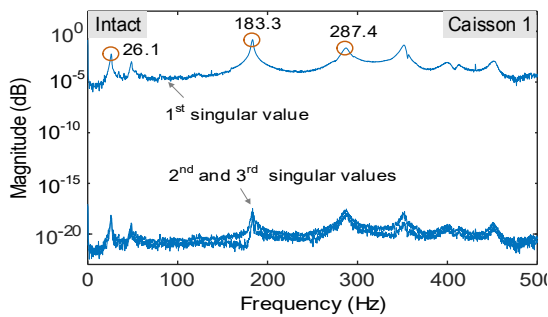
(c) Damage 3

[Fig. 5] Three foundation damage levels.

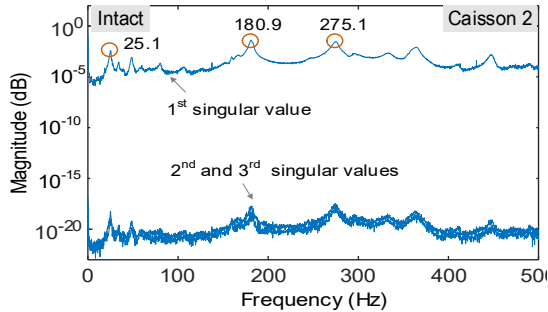
III. 연구 결과

1. 비손상 케이슨 시스템의 진동모드 분석

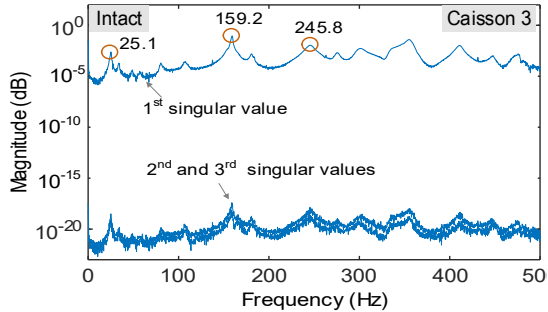
단일 측정에서 가속도 응답은 15초 동안 수집되었다. 세 개의 별도 충격 하중에서 측정한 가속도 응답은 동기화를 통해 정렬되었으며, 4096 개 데이터 포인트(충격 하중 이전 1000개, 이후 3096개)를 포함하는 이동 창(windowing)을 적용하여



(a) Caisson 1



(b) Caisson 2



(c) Caisson 3

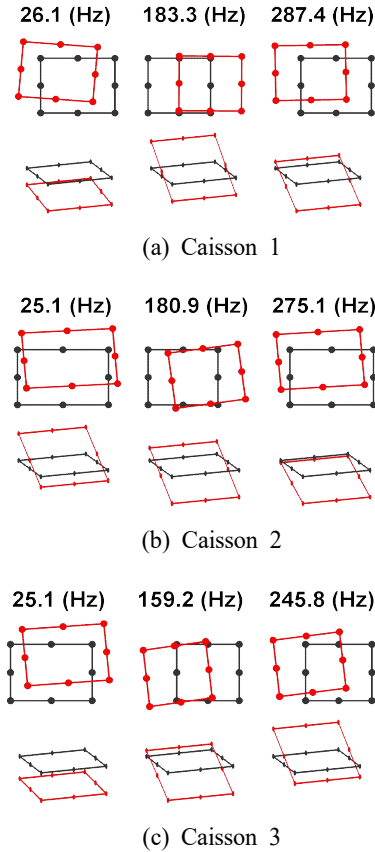
[Fig. 6] SV responses of caisson system.

분석에 활용하였다. 시각화를 위해 데이터 포인트의 하위 집합(예: 900~1500)을 선택하여 도시하였다. 세 개의 충격 하중에 대해, 단일 가속도계 센서의 응답을 동기화하여 분석에 활용하였다. 각 케이슨에는 다섯 개의 가속도계 센서가 설치되었으며, z 방향 가속도의 크기가 x 방향보다 작았고, 두 방향 모두 y 방향보다 작게 나타났다.

FFD 기법을 사용하여 중첩된 응답으로부터 SV 응답을 추출하였다. [Fig. 6]는 케이슨 시스템의 다섯 개의 가속도계(즉, 1z, 2z, 2x, 3x 및 2y)에서 동시에 계산된 세 개의 가장 큰 SV 응답을 표시한 것이다. 주파수 영역에서 첫 번째 SV가 두 번째 및 세 번째보다 우세하게 관찰되었다. 이때 첫 번째 SV에 해당하는 특이 벡터는 시스템의 모드 형상을 잘 반영하며, 시스템의 동적 거동을 대표한다. 각 SV 응답은 2048개의 데이터 포인트로 구성되었으며, 이 중 세 개의 피크 주파수가 선택되어 케이슨의 진동특성이 식별되었다. 케이슨 1의 경우, 모드 1, 2, 3에 대한 피크 주파수는 각각 26.1Hz, 183.3Hz, 287.4Hz로 나타났다. 케이슨 2는 각각 25.1Hz, 180.9Hz, 275.1Hz의 피크 주파수를, 케이슨 3은 각각 25.1Hz, 159.2Hz, 245.8Hz의 피크 주파수를 보였다. 일렬 배열된 케이슨 함체는 기하학적 구성 및 재료적 특성 차이로 인해 서로 다른 피크 주파수를 발생시킨 것으로 해석된다.

[Fig. 7]은 세 개의 케이슨 함체에서 식별된 세 가지 모드 형상을 보여준다. 5개의 가속도계에서 동시에 계산된 특이값을 바탕으로 모드 형상이 추출되었으며, 이는 기초 지반의 변형 운동과 케이슨 함체의 강체 운동을 가정하여 식별되었다. 모드 형상은 xy 평면 내 운동과 z 방향의 수직 운동을 보여준다. 케이슨 1의 첫 번째 모드는 z 방향의 상하 운동과 xy 평면의 활동 및 전도를 포함한다. 두 번째 모드는 y 방향의 활동과 z 방향의 롤링 운동을 포함하며, 세 번째 모드는 x 및 y 방향 모두에서의 활동과 z 방향의 롤링 운동을 포함한다. 케이슨 2는 세 모드 모두에서 xy

평면 운동과 롤링 운동을 보였다.

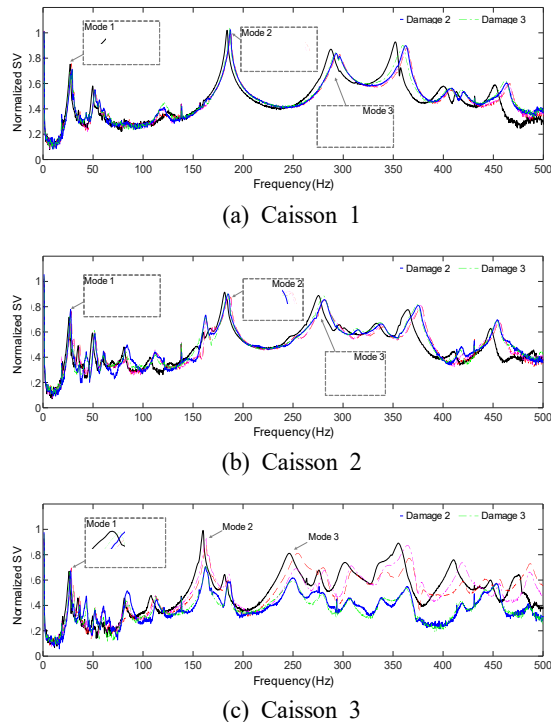


[Fig. 7] Mode shapes of caisson system.

2. 손상된 케이슨 시스템의 진동모드 분석

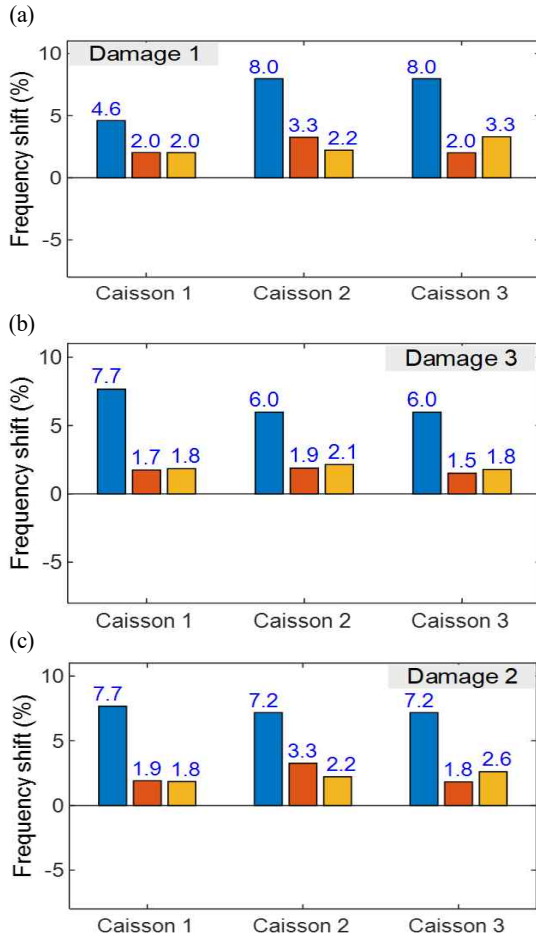
[Fig. 5]와 같은 기초 지반에 가해진 세 단계의 손상에 대해 케이슨 1-3의 진동 응답은 [Fig. 8]과 같이 계측되었다. 이때 지반 손상은 케이슨 2 하부의 기초 마운드에 도입되었다. 케이슨 2의 정규화된 SV 응답은 기초 손상으로 인해 변화 추세를 보였다. 모드 1의 경우 최대 주파수는 비손상 상태에서 27.3Hz였고, 손상 3에서는 25.9Hz까지 감소하였다. 모드 2의 경우 최대 주파수는 손상 1에서 186.8Hz로 증가한 다음 손상 3에서 183.8Hz로 감소하였다. 모드 3의 경우 기초 손상으로 인해 최대 주파수의 변화는 상대적으로 작

았다. [Fig. 8(a)]와 같이 케이슨 1의 진동 응답은 세 가지 손상 사례에서 작은 변화를 보였으며, [Fig. 8(c)]와 같이 케이슨 3에서 진동 응답의 상당한 변화가 관찰되었다. 손상 2와 손상 3으로 인해 피크 주파수와 그 크기가 감소하였다.



[Fig. 8] Frequency responses of caisson system with 3 levels of foundation damage.

[Fig. 9]는 지반 손상이 유발한 진동 응답 특성의 변화를 모드 1-3의 피크 주파수의 변화로부터 관찰한 결과이다. 지반 손상이 직접 도입된 케이슨 2는 주파수 이동 추세가 명확하였다. 손상 정도가 증가함에 따라 모드 1-3의 피크 주파수는 감소하는 패턴으로 분석되었다. 케이슨 3의 피크 주파수도 이와 유사한 피크 주파수 변화 추세를 보였다. 이는 케이슨-지반 시스템에서 케이슨 함체 사이의 구조적 연동이 있음을 의미한다. 케이슨 1은 모드 2와 3에서만 피크 주파수가 일관되게 감소하는 반면, 모드 1은 이 패턴을 따르지 않았다.



[Fig. 9] Damage-induced frequency shift.

IV. 결론

본 연구에서는 수중 환경에 있는 케이슨-지반 시스템의 손상을 식별하기 위한 새로운 방식의 유사파동 가진 기반의 진동특성 모니터링 기법을 제시하였다. 첫째로, 수중 구조물 시스템에 발생한 손상을 수중 위의 구조영역의 유사손상(pseudo damage)으로 모사하는 케이슨-지반 시스템의 진동특성 응답 모델을 제시하였다. 둘째로, 실제 수중 케이슨-지반 시스템을 대상으로 모형 구조물을 제작하고 실험실 환경에서 진동계측 실험을 수행하였다. 케이슨 기초 지반부에 손상을

도입하여 손상 전후의 진동특성의 변화를 계측하였으며, 이에 따른 진동특성의 변화를 분석하였다. 마지막으로, 지반 손상이 유발하는 진동특성의 변화를 주파수 응답 및 피크 주파수의 변화를 통해 정량적으로 분석하였다.

실험결과와 분석을 통해, 제시된 진동계측 모델이 케이슨-지반 시스템의 손상 유발 특성 변화를 정확히 감지할 수 있음을 확인하였다. 케이슨-지반 시스템의 진동 응답은 지반을 통한 케이슨 함체 간의 진동 응답 연동성이 존재하며, 이로 인해 단일 케이슨에 인접한 지반 손상의 영향은 인근 케이슨의 진동 응답에 영향을 미쳤다.

지반 손상과 케이슨 함체 사이의 상대적 거리가 각 케이슨 함체의 진동 응답의 변화에 미치는 영향은 추가적인 상세 연구가 필요하다고 사료된다. 또한, 향후 연구에서는 실구조물에서 발생 가능한 복합 환경요소(조류, 유체 비선형성 등)에 대한 고려가 병행되어야 할 것이다.

References

- Brunn P(2005). Port structures, wharves, quays, terminals, and mooring devices. *Journal of Coastal Research*. 46, 139~158.
<https://www.jstor.org/stable/25737343>
- Goda Y(1994). Dynamic response of upright breakwater to impulsive force of breaking waves. *Coastal Engineering*, 22, 135~158.
[https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)90051-5)
- Huynh TC, Lee SY, Kim JT, Park WS and Han SH(2013). Simplified planar model for damage estimation of interlocked caisson system. *Smart Structures and Systems*, 12(3-4), 441~463.
https://doi.org/10.12989/sss.2013.12.3_4.441
- Lee SY, Nguyen KD, Huynh TC, Kim JT, Yi JH and Han SH(2012). Vibration-based damage monitoring of harbor caisson structure with damaged foundation-structure interface. *Smart Structures and Systems*, 10(6), 517~546.
<https://doi.org/10.12989/sss.2012.10.6.517>
- Lee SY, Huynh TC, Kim JT, Yoon HS and Han

- SH(2013). Vibration characteristics of gravity-type caisson breakwater structure with water-level variation. *Int Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 1~10.
<https://doi.org/10.1155/2013/261396>
- Lee SY, Huynh TC, Dang NL and Kim JT(2019). Vibration characteristics of caisson breakwater for various waves, sea levels, and foundations. *Smart Structures Systems*, 24(4), 525~539.
<https://doi.org/10.12989/sss.2019.24.4.525>
- Yi JH, Park WS, Lee SY, Huynh TC, Kim JT and Seo CK(2013). Evaluation of vibration characteristics of an existing harbor caisson structure using tugboat impact tests and modal analysis. *Int Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 1~11.
<https://doi.org/10.1155/2013/806482>
-
- Received : 16 April, 2025
 - Revised : 16 May, 2025
 - Accepted : 26 May, 2025