

오륙도 케이슨 방파제의 파랑하중조건에서의 진동특성 분석

이소영 · 김정태[†]부경대학교 스마트인프라기술연구소(연구원) · [†]부경대학교(교수)

Vibration Characteristics of Oryuk-do Caisson Breakwater for Wave Conditions

So-Young LEE · Jeong-Tae KIM[†]Smart Infrastructure Technology Research Institute in PKNU(researcher) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

Vibration characteristics of a gravity-based caisson breakwater is investigated for various wave conditions. Firstly, operational modal analysis methods are selected to identify vibration modes from output-only dynamic responses. Secondly, a finite element model of an existing caisson-foundation breakwater system is established by using a structural analysis program, ANSYS. Thirdly, forced vibration analyses are performed on the caisson breakwater system for wave-induced dynamic pressures. For the wave flow, the wave pressure acting on the system is obtained from wave field analysis. Fourthly, vibration modes of the caisson-foundation system are identified from the forced vibration responses by combined use of the operational modal analysis methods. Finally, vibration characteristics of the caisson breakwater system are investigated for the various waves. Vibration responses are interpreted for a few wave scenarios to analyze changes in modal parameters induced by wave conditions.

Key words : Vibration characteristics, Caisson breakwater, Wave condition, Modal parameters

I. 서론

기존의 진동모니터링 기술은 주로 육상구조물을 대상으로 개발 및 적용되어 왔다. 항만구조물의 경우, 구조물의 진동계측 사례도 드물며, 구조물의 기본적인 진동거동특성이 명확히 규명되어 있지 않다. 다만, 방파제 구조물의 해석모델 개발을 위한 연구에서 해석모델의 검증에 대해 진동 실험이 몇 차례 수행되었다. Gao et al.(1988)은 직립 방파제에 대한 해석모델 검증을 위하여 실제 방파제 구조물로부터 진동을 계측하고 주파수 특성을 분석하였다. 13,000톤 급 케이슨 구조체의

진동응답을 얻기 위하여 6톤 용량의 가진장치를 이용하여 충격 가진을 수행하였다. Goda(1994)는 직립 방파제에 대한 해석모델 검증을 위하여 모형 방파제 구조물로부터 하중에 대한 변위 응답을 계측하고 주파수특성을 분석하였다.

국내에서는 관련 연구로서, 부경대학교와 한국해양과학기술원의 연구팀이 오륙도 방파제에 대하여 진동계측 실험을 수행하였다(Lee et al., 2012; Yoon et al., 2012; Yi et al., 2013). 가진 방법으로선박의 접안 충격하중과 파랑유발 상시 진동의 두 경우에 대한 실험을 수행하였다. 부경

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

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

대학교 연구팀은 오륙도 방파제 축소 모형에 대한 진동실험을 수행하였다(Lee et al., 2013; Lee and Kim, 2015). 이를 통해, 현장에서 조절하기 어려운 파랑조건과 수위조건을 변화시켜 모사하고 모형 방파제 시스템의 진동특성 변화를 분석하였다.

이와 같이 기존의 연구에서는 방파제의 구조응답을 얻기 위해 주로 충격가진 기법이 적용되었으며, 일부 연구팀에 의해 파랑유발 상시진동응답의 계측이 시도되었다. 이처럼 큰 가진력의 적용은 방파제 구조의 국부적 손상 및 전역적 안정성의 저하를 유발할 수 있다. 이에 따라, 파랑유발 상시진동을 이용한 방파제 진동응답의 모니터링 기술 개발에 대한 연구가 필요하다.

구조 동역학 이론에 따르면 구조물의 진동응답은 외력에 대한 대상 구조시스템의 특성으로 정의된다. 구조물의 구조특성은 구조물의 응답 및 외력의 관계로부터 추정할 수 있다. 그러나 상시진동의 경우 외력을 정의하기 어려우며, 이에 따라 출력자료만을 이용하는 진동특성 추출 기법에 관한 연구가 수행되었다(Brinker et al., 2001; Yi and Yun, 2004). 주파수 영역 분해법(frequency domain decomposition, FDD)을 이용하여 구조물의 모드특성을 추출하고, 주파수 분해능이 모드추출 결과에 미치는 영향을, 상시 진동응답에서도 구조물의 모드특성 추출이 가능함을 보였으며, 진동응답의 측정 데이터 개수가 모드특성 추출결과에 미치는 영향을 분석하였다.

상기의 연구들과 같이 여러 구조물의 형태에 대하여 진동계측 자료 기반의 모드특성 추출 기법에 대한 적용이 이루어졌으나, 방파제 구조물의 경우 Lee et al.(2012) 및 Yi et al.(2013)의 연구에서 상시진동응답 분석을 적용한 것 이외에는 적용 사례가 전무하다. 이에 따라, 제한적인 센서 위치에서의 파랑유발 상시진동응답을 계측하고, 이를 통해 방파제의 케이슨-지반 시스템의 진동특성을 대표하는 모드특성치를 추출할 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 부산 오륙도 중력식 케이슨 방

파제를 대상으로 여러 파랑 하중하의 진동특성 변화를 분석하였다. 첫 번째로, 출력자료 기반 동적 응답으로부터 모드특성치를 추출할 수 있는 기법을 선정하였다. 두 번째로, 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 실존하는 케이슨 방파제의 유한요소모형을 구성하였다. 세 번째로, 파랑 흐름이 케이슨 외벽에 작용하는 동 압력을 해석하였으며, 파랑 유발 동적 압력을 받는 케이슨 방파제의 강제진동해석을 수행하였다. 네 번째로, 주파수 영역 분해법을 이용하여 케이슨 방파제의 진동모드 특성을 분석하였다. 마지막으로, 파랑의 변화를 모사하였으며, 각각의 파랑조건에 대한 진동응답 특성의 변화를 분석하였다.

II. 연구 방법

1. 대상 케이슨 방파제

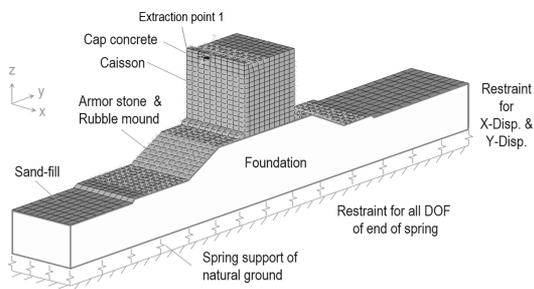
[Fig. 1]은 연구의 대상인 부산 오륙도 방파제이다. 오륙도 방파제는 북동-남서 방향으로 설치되어 있으며, 남동측으로 입사하는 파랑으로부터 부산항을 보호하는 역할을 한다. 방파제의 총 길이는 1,004 m이며, 50개의 케이슨 합체의 배열로서 구성되었다. 최근 추가적인 월파랑 제어를 목적으로 케이슨 상부에 파라펫 구조물이 시공되어 천단고가 약 5 m 증가되었다.



[Fig. 1] Oryuk-do breakwater of Busan, Korea.

오륙도 케이슨 방파제의 설계 자료는 Yi et al.(2013)에 상세되었다. 방파제는 수중조건 하에 있으며, 케이슨, 상치 콘크리트, 파라펫, 사석마운드, 피복사석, 모래치환 지반, 자연 지반으로 구성된다. 케이슨 내부는 격벽구조로 이루어져 있으며 격실 내부는 속채움재로 채워져 있다. 부가적인 구성요소로는 소파효과 및 사석이탈 방지를 위한 테트라포트, 근고블록이 있다. 상치 콘크리트, 케이슨, 테트라포트 및 근고블록은 콘크리트 재료로, 사석마운드 및 피복사석은 2가지 종류의 다른 크기의 쇄석으로 이루어져 있다. 또한 모래치환 지반과 케이슨의 속채움재는 모래로 이루어져 있다.

케이슨 방파제의 유한요소모델은 [Fig. 2]와 같이 생성되었다. 유한요소 해석을 위하여 ANSYS 소프트웨어를 사용하였다. 유한요소모델은 <Table 1>과 같이 상치콘크리트, 케이슨, 피복사석, 모래치환 지반, 자연지반으로 구성된다. 자연지반은 지반 스프링으로 치환하였으며, 지반 스프링 상수(k_s)는 탄성균등 압축계수(C_u)로서 나타낼 수 있으며, 본 유한요소 모델에서는 자연지반의 탄성균등 압축계수로서 12.5 kg/cm³를 취하였다.



[Fig. 2] Finite element model of Oryuk-do caisson breakwater.

경계조건으로서 케이슨 부분을 제외한 양쪽 끝 y-z 단면과 모래치환 지반의 양쪽 끝 x-z 단면의 x 축 및 y 축 방향 변위 자유도를 구속하였다. 또한 모래치환 지반에 적용된 스프링 요소의 절점의 모든 자유도를 구속하였다. 수중 조건을 모

사하기 위하여 식 (1)과 같이 Westergaard의 동수 질량 환산식을 이용하였다.

$$M_w = \int_{h_1}^{h_2} \frac{7}{8} \rho_w \sqrt{H_w h} dh \dots \dots \dots (1)$$

여기서, M_w 는 동수 질량, ρ_w 는 물의 밀도, H_w 및 h 는 각각 자유 수면으로부터 지반까지의 거리 및 동수압 작용점까지의 거리이다. 이때의 수위(H_w)는 22.19 m 로 고려되었다. 각 수심 (h)에 해당하는 동수질량을 계산하여 케이슨의 전면 및 배면의 벽면에 해당하는 절점에 각각 적용하였다.

<Table 1> Material properties of FE model

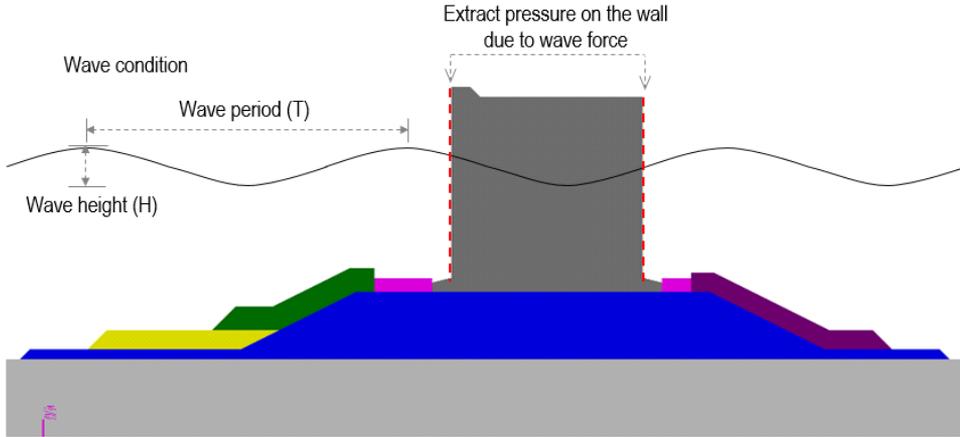
	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Mass density (kg/m ³)	Spring constant (kg/m/m ²)
Cap concrete	2.80E+04	0.2	2,500	-
Caisson	2.80E+04	0.2	Concrete 2,080 Sand-fill 2,000	-
Armor stone	140	0.3	1,500	-
Rubble mound	140	0.3	2,100	-
Sand-fill	66.5	0.325	1,620	-
Natural ground	-	-	-	12.5E+06

2. 파랑 조건에 따른 진동특성 분석

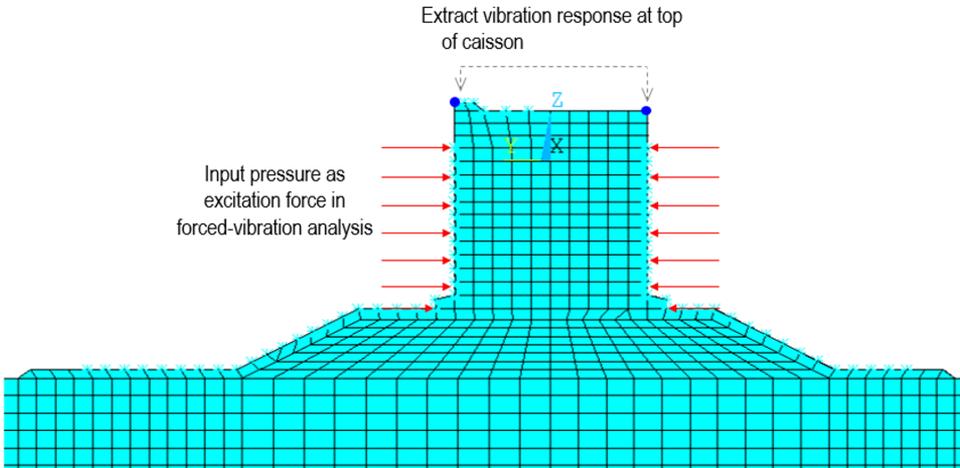
파랑하중에 대한 진동해석을 위하여 [Fig. 3]과 같이 파랑-구조 연동해석을 수행하였다. 구조해석을 위해 ANSYS 14.5를 사용하였으며, 파랑유동 해석을 위해 Flow-3D 11.2를 이용하였다. 파랑-구조 연동해석을 위해 파랑해석을 통해 계산된 파력을 구조해석의 가진 하중으로 적용하였다.

방파제 제간부에 대한 파랑하중을 고려하기 위

오륙도 케이슨 방파제의 파랑하중조건에서의 진동특성 분석



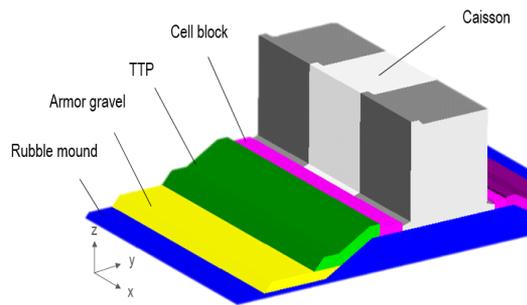
(a) Wave flow analysis of Flow-3D



(b) Structural analysis of ANSYS

[Fig. 3] Coupling analysis of wave and structure.

하여 3개 케이슨 합체에 대한 케이슨 방파제 시스템을 블록화하여 설치하고, 3개 케이슨 중 가운데 케이슨으로부터 파압 데이터를 추출하였다. [Fig. 4]와 같이 파랑장내의 방파제 구조물은 케이슨, 근고블록, 테트라포트, 피복사석, 사석마운드로 구성되며, 3개 케이슨에 합체로 구성된 방파제의 총 길이는 60 m이다. 방파제 구조물은 경사블록 위에 설치되었다. 압력추출이 필요한 구간인 케이슨과 가까울수록, 정수면과 가까울수록



[Fig. 4] Wave field modeling in Flow 3D.

조밀하게 격자를 구성하였다.

방파제 블록 및 경사블록은 강체로 모델링되어 파랑에 의한 변위는 고려되지 않는다. 케이슨 방파제는 조파경계로부터 1,500 m 떨어진 위치에 배치하였다. 파랑장의 크기는 5,000 m(길이) × 600 m(폭) × 95 m(높이)로 설정하였다. 파랑장의 경계에서 발생하는 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 파랑장의 폭 및 길이를 충분히 크게 설정하였다. 케이슨 방파제를 거치할 위치에 설계파의 파랑 특성이 발현될 수 있도록 높이 60 m, 길이 1000 m의 경사 블록을 설치하였다.

케이슨-지반 시스템의 진동특성 분석을 위하여 <Table 2>와 같이 두 개의 파랑 조건에 대해 고려하였다. 첫 번째 파랑은 오류도 방파제의 설계파이며, 두 번째 파랑은 설계파보다 작은 파고 및 짧은 주기 특성을 갖는 미소 파를 임의로 선정하였다. 설계 파 및 미소 파에 대해 케이슨 벽면에 작용하는 수평 파력은 각각 406.6 MN/m 및 7.6 MN/m 이며 미소 파의 파력은 설계파의 약 2%의 크기이다.

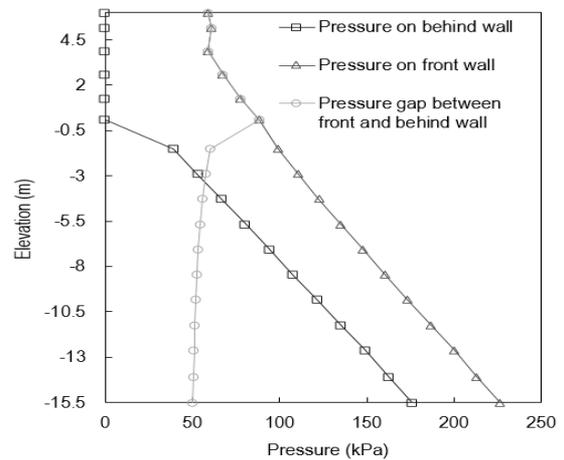
<Table 2> Wave force scenarios of breakwater

Scenario	Wave height	Wave period	Wave force
Design wave	6 m	15 sec	406.6 MN/m
Small wave	1.5 m	8 sec	7.6 MN/m

III. 결과 및 고찰

케이슨 전면벽에 파봉이 위치할 때에 대한 순간적인 압력의 수직분포는 [Fig. 5]와 같다. 방파제에 월파가 발생하지 않는 경우, 배면벽에는 정수압이 작용하며, 전면벽에는 정수압과 파랑에 의한 동수압이 동시에 작용한다. 통상, 정적해석 시에는 전면벽과 배면벽에 작용하는 정수압은 상쇄되어 고려하지 않는다. 본 연구에서는 정수압 및 동수압을 모두 고려하였으며, 전면벽 및 배면벽에 작용하는 압력의 차이는 동수압으로 고려할

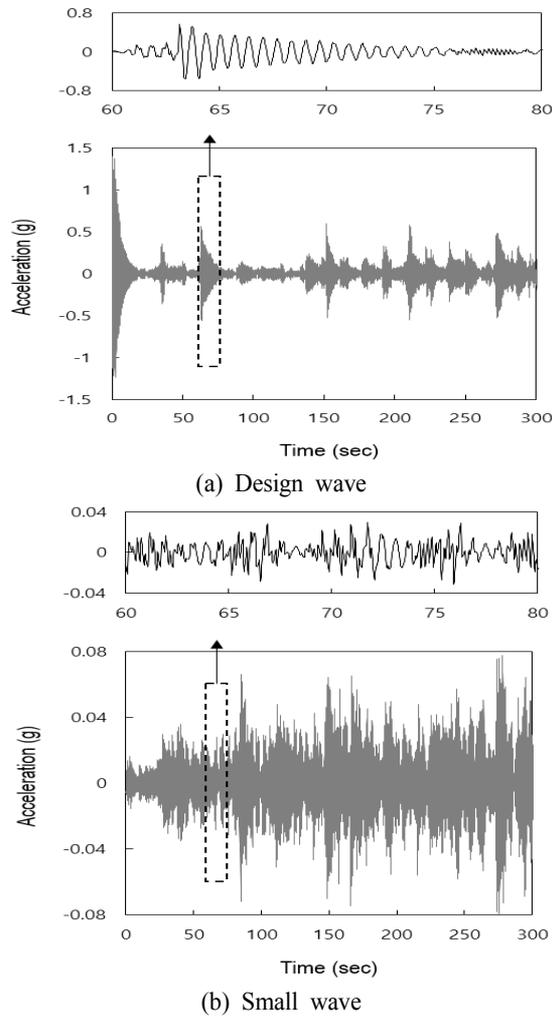
수 있다. [Fig. 2]의 케이슨의 상부위치(Extraction point 1)에서 변위 응답을 추출하였다. 파랑하중에 대한 변위 응답은 수평방향(y-direction) 응답이 연직방향(z-direction) 응답보다 크게 발생하였다. 설계 파(파고 6 m, 주기 15 sec)에 의한 수평방향 및 연직방향의 최대 변위 응답은 각각 23.2 mm, 10.1 mm로 발생하였으며, 수평방향이 연직방향에 비해 약 2.3배 크게 나타났다. 또한 미소 파(파고 1.5 m, 주기 8 sec)에 의한 수평방향 및 연직방향의 최대 변위 응답은 각각 4.27 mm, 1.83 mm로 발생하였으며, 수평방향이 연직방향에 비해 약 2.3배 크게 나타났다. 설계 파에 대해 2%의 파력을 갖는 미소 파에 대한 변위 응답은 설계 파의 약 18%의 크기로 나타났다.



[Fig. 5] Wave pressures on caisson wall.

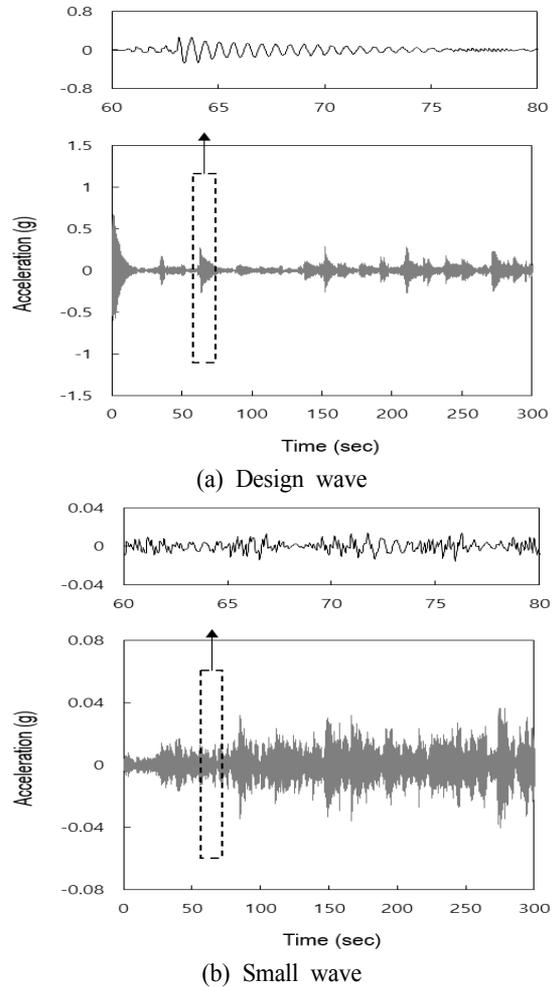
케이슨의 상부위치에서 추출된 가속도 응답을 [Fig. 6]과 [Fig. 7]에 도시하였다. 설계 파의 경우, 수평방향의 최대 가속도 응답 크기는 1.40 g이며, 연직방향의 경우 0.68 g로 수평방향 가속도 응답의 크기가 연직방향 응답에 비해 약 2배 크게 발생하였다. 미소 파에 대한 가속도 응답은 쇄파가 없는 파랑의 반복적인 작용에 의해서 발생한 것으로 볼 수 있다. 미소 파의 경우, 수평방향의 최대 가속도 응답 크기는 0.08 g이며, 연직방향의 경우 크기는 0.04 g로 수평방향 가속도 응답의

크기가 연직방향 응답에 비해 약 2배 크게 발생하였다. 설계 파에 대해 2%의 파력을 갖는 미소 파에 대한 가속도 응답은 설계 파에 대한 응답의 약 5.7% 정도의 크기로 나타났다.



[Fig. 6] Acceleration responses of y-direction on caisson wall.

[Fig. 6], [Fig. 7]과 같이 분석된 파랑하중을 [Fig. 2]의 유한요소 모델에 적용하여 강제진동해석을 수행하였다. [Fig. 8]과 같이 측정된 가속도 응답의 주파수 영역 분석을 통해 설계 파와 미소 파에서의 진동모드 특성을 추출하였다. 설계 파



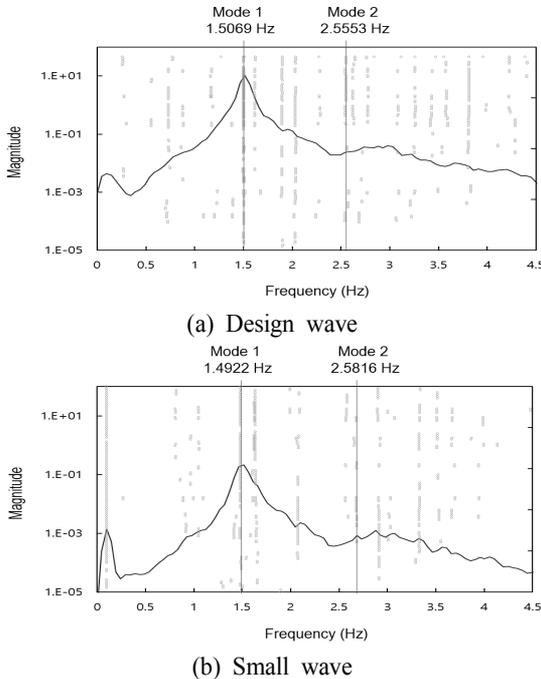
[Fig. 7] Acceleration responses of z-direction on caisson wall.

의 경우, 모드 1은 1.5069 Hz, 모드 2는 2.5553 Hz에서 식별되었으며, 모드 감쇠는 각각 2.64%, 0.55%로 식별되었다. 미소 파의 경우, 모드 1은 1.4922 Hz, 모드 2는 2.5816 Hz에서 식별되었으며, 모드 감쇠는 각각 2.38%, 0.54%로 식별되었다. 파랑 시나리오별 케이슨 유한요소모델의 모드특성 추출 결과를 <Table 3>에 비교하였다. 종합적으로 설계 파에 대한 경우에 비해 미소 파의 모드특성 추출결과가 다소 차이가 있지만 파랑의 크기가 설계파 파력의 약 2% 정도에 해당하는 경우에도 진동특성치 추정을 위한 충분한 가진력

이 작용함을 확인할 수 있다.

<Table 3> Modal parameters of breakwater subjected to two wave conditions

Scenario	Natural frequency (Hz)		Damping ratio (%)	
	Mode 1	Mode 2	Mode 1	Mode 2
Design wave	1.5069	2.5553	2.64	0.55
Small wave	1.4922	2.5816	2.38	0.54



[Fig. 8] Modal parameter extraction using frequency-domain analysis

IV. 결론

본 연구에서는 파랑하중을 받는 오류도 케이슨 방파제를 대상으로 파랑응답의 주파수 영역 분석을 통해 진동특성 변화를 추정하는 기법을 제시

하였다. 방파제에 가해지는 파랑하중에 대한 자료 없이 진동응답 자료만으로 진동모드 특성치를 추출할 수 있는 출력기반 기법을 선정하였다. 구조해석 프로그램인 ANSYS 14.5를 사용하여 부산항 오류도 케이슨 방파제의 구조-지반 유한요소 모델을 구성하였다. 또 Flow-3D 11.2 프로그램을 사용하여 파랑 흐름이 케이슨 외벽에 작용하는 동압력을 해석하였으며, 측정된 동적 과압을 케이슨 외벽에 적용하여 케이슨 방파제의 가속도 응답을 분석하였다. 계측된 가속도 응답을 출력기반의 주파수 영역 분석법을 통해 고유진동수와 감쇠계수 등의 진동모드 특성을 분석하였다. 마지막으로, 파랑의 변화를 모사하였으며, 각각의 파랑조건에 대한 진동응답 특성의 변화를 분석하였다. 방파제 설계과와 미소파를 대상으로 진동 특성치를 추정하였으며, <Table 3>과 같이 두 경우 모두 진동특성치가 유사하게 분석되었다.

References

Brincker R, Zhang L and Andersen P(2001) “Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition”, *Smart Materials and Structures*, 10, 441~445.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/10/3/303>

Gao M, Dai GY and Yang JH(1988), “Dynamic studies on caisson-type breakwaters”, *Proceedings of 21st Conference on Coastal Engineering*, Torremolinos, Spain, 2469~2478.
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780872626874.184>

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)

Lee SY, Kim JT and Yi JH(2012) “Vibration characteristics of real caisson-type breakwater by wave-induced micro-vibration monitoring”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(1), 69~74.
<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.1.069>

- Lee SY, Huynh TC, Kim JT, Yoon HS and Han SH (2013). "Vibration characteristics of gravity-type caisson breakwater structure with water-level variation", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 1~10.
<https://doi.org/10.1155/2013/261396>
- Lee SY and Kim JT(2015). "Effect of foundation damage and water-level change on vibration modal parameters of gravity-type caisson structure", *Science China Technology Sciences*, 58(2), 316~329.
<https://doi.org/10.1007/s11431-014-5748-1>
- Yi JH and Yun CB(2004). "Comparative Study on Modal Identification Methods using Output-only Information", *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3-4), 445~464.
http://dx.doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.445
- 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", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 1~11.
<https://doi.org/10.1155/2013/806482>
- Yoon HS, Lee SY, Kim JT and Yi JH(2012), "Field Implementation of Wireless Vibration Sensing System for Monitoring of Harbor Caisson Breakwaters," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 1~9.
<https://doi.org/10.1155/2012/597546>
-
- Received : 20 April, 2021
 - Revised : 24 May, 2021
 - Accepted : 10 June, 2021