

# 기존 원형케이슨방파제에 신규 원형케이슨 추가설치에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향 평가

## Wave Structure Interaction by Installation of New Circular Caissons on Old Circular Caisson Breakwater

박민수\*  
Min Su Park\*

**요 지 :** 기존 케이슨방파제의 안정성을 높이기 위해 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 신규 케이슨을 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 본 연구에서는 기존 원형케이슨 전면 또는 후면에 신규 원형케이슨이 추가 설치될 경우 파와 구조물간의 상호작용 영향을 분석하기 위해 고유함수전개법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위해 Williams and Li의 수치 해석결과와 비교를 수행하였으며, 추가로 설치되는 원형케이슨의 다양한 변수에 따른 개별 원형케이슨에 작용하는 파력 및 파쳐오름 특성을 분석하였다.

**핵심용어 :** 고유함수전개법, 원형케이슨, 파와 구조물간의 상호작용, 파력, 파쳐오름

**Abstract :** The design and the construction are carried out by installation of new caissons on the back or the front of old caissons to increase the stability of old caisson breakwater. In this study, we use the eigenfunction expansion method to analyze the effects of wave structure interaction when new circular caissons are installed on the back or the front of old caissons. The comparison of numerical results between present method and Williams and Li is made, and the wave force and the wave run-up acting on each circular caisson are calculated for various parameters by considering the wave structure interaction.

**Keywords :** eigenfunction expansion method, circular caisson, wave structure interaction, wave force, wave run-up

## 1. 서 론

지구온난화로 해수면이 상승하고 케이슨방파제의 설계파도 상향됨에 따라 기존 케이슨방파제의 활동 및 전도 등에 대한 안정성을 높이기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 하지만, 현재 이러한 케이슨의 설계는 정립된 방법이 없어 설계자의 판단에 따라 다양하게 수행되고 있어, 신규 케이슨 추가 설치에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 및 파쳐오름 특성 평가는 매우 중요하다.

원형실린더에 대한 준해석적 해(Semi-analytical Solution)가 고유함수전개법을 이용하여 처음으로 제안되었고(Spring and Monkmeyer(1974)), Linton and Evans(1990)는 이 해를  $N$ 개의 해저 고정 원형실린더(Bottom-mounted circular cylinder)에 확장하여 단순화 시켰다. 1개의 원형실린더 회절 특성에 기초한 대수 방정식을 계산하여 3차원 선형 회절문제에 대한 정확한 해결법이 고유함수전개법을 이용하여 제안되었

으며(Kagemoto and Yue(1986)), 수정 평면파 방법(Modified Plane Wave Method)이 McIver and Evans(1984)에 의해 개발되어 다양한 케이스에 적용되기도 하였다(McIver, 1987; Williams and Demirbilek, 1988; Willimas and Abul-Azm, 1989; Williams and Rangappa, 1994). 또한, 끝이 잘린 원형실린더(Truncated vertical cylinder)에 대한 동적상호작용에 대한 연구가 고유함수전개법을 이용하여 많은 학자들에 의해 수행되어졌다(McIver, 1984; Kim, 1993; Yilmaz, 1998; Siddorn and Eatock Taylor, 2008; Park et al., 2010, 2013). 비록, 고유함수전개법은 원형 구조물 수치해석에 주로 이용되고 있지만, 원기둥에 의한 파의 산란문제는 해안 및 해양공학 분야에서 해석해가 존재하는 대표적인 문제로 MacCamy and Fuchs(1954)에 의해 해석해가 구해진 이후로 수치해석 방법의 검증용으로 널리 이용되고 있다(Cho, 2004).

Park(2019)은 다수의 원형케이슨으로 구성된 기존 방파제 후면에 신규 원형케이슨이 추가로 설치될 경우 파와 구조물간의 상호작용에 의해 각 원형케이슨에 작용하는 파력 특성

\*한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원(Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0289, Fax: +82-31-910-0121, mspark@kict.re.kr)

을 고유함수전개법을 이용하여 분석하였다. 수치해석결과 기존 원형케이스 후면에 신규 원형케이스를 추가로 설치한 2열 원형케이스 방파제인 경우 첫 번째 피크점과 마지막 피크점 사이에 원형케이스의 개수증가에 따라 피크점이 추가로 발생하였으며, 입파사의 주기가 짧은 단파에서는 파력이 서서히 증가하지만 주기가 긴 장파에서는 파력이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 기존 원형케이스 방파제에 추가로 설치되는 원형케이스의 다양한 변수들(원형 케이스 배치, 설치간격 등)에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의해 개별 원형케이스에 작용하는 파력 특성을 엄밀하게 검토하기 위해 3차원 선형 포텐셜이론 기반의 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 우선, 본 수치해석의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위해 4개의 원형실린더로 구성된 해양구조물에 작용하는 파력 및 파처오름을 Williams and Li(2000)의 수치해석결과와 비교하였다. 일반적으로 케이스에 작용하는 파력 및 케이스 저면에 작용하는 양압력은 파처오름과 밀접한 관련이 있으므로 추가로 설치되는 원형케이스의 다양한 변수들에 따른 개별 원형케이스에 작용하는 파처오름 특성도 분석하였다.

## 2. 수치해석 이론

고유함수전개법을 이용하여 불투과성 원형케이스 방파제에 대한 파와 구조물간의 상호작용 영향을 검토하기 위해 수심이  $d$ 인 해저면 바닥에  $N$ 개의 원형케이스에 대한 수치해석 모델을 Fig. 1과 같이 설정하였다. 원형케이스는 반지름이  $a_j$ 이며, 해석의 편의를 위하여 Fig. 1과 같이 공간상에 고정된 좌표계  $(x, y, z)$ 와  $N$ 개의 원형케이스의 중심에 고정된 좌표계  $(r_j, \theta, z)$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ 를 도입한다.  $j$ 번째 원형케이스의 중심 좌표는  $(x_j, y_j)$ 이고,  $j$ 번째 원형케이스 중심에 대한  $l$ 번째

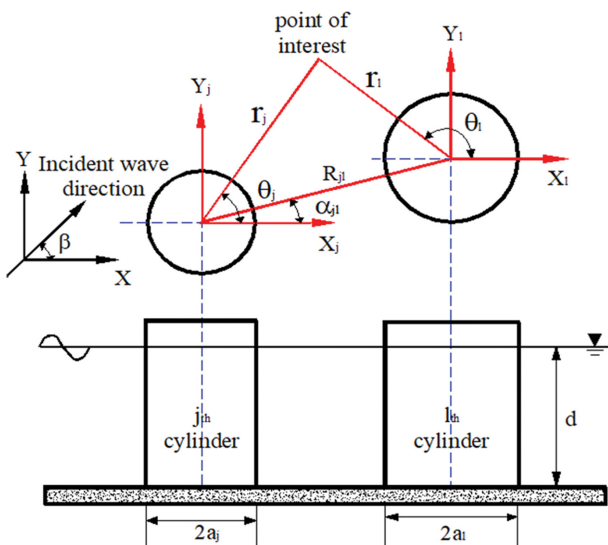


Fig. 1. Definition sketch of numerical model for a circular caisson breakwater.

원형케이스 구조물 중심의 상대 위치는  $(R_{jl}, \alpha_{jl})$ 로 표현할 수 있다(Park, 2019).

일정한 수심에 원형케이스가 해저면 바닥으로부터 수면까지 직립으로 놓여있으며 입사파가 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다면 3차원 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \text{Re} \left\{ -\frac{igH}{2\omega} \phi(r, \theta) f(z) e^{-i\omega t} \right\} \quad (1)$$

여기서, 입사파는 규칙파로 진폭은  $H/2$ 이고,  $f(z) = \frac{\cosh kz}{\cosh kd}$ 이며,  $k$ 는 파수(Wavenumber)로 분산식  $\omega^2 = g \tanh kd$ 을 만족한다.

파랑 포텐셜  $\phi(r, \theta)$ 은 입사파와  $N$ 개의 원형케이스 구조물들에 의한 산란파의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \phi_I + \sum_{j=1}^N \phi_S^j \quad (2)$$

입사파가  $x$ 축의 양의 방향으로  $\beta$ 의 각도를 이루면서 들어올 때 식(2)의 입사파를  $j$ 번째 원형케이스의 중심에 고정된 좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_I = I_j = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr_j) e^{in(\pi/2 + \theta_j - \beta)} \quad (3)$$

여기서  $I_j (= e^{ik(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta)})$ 는 공간상에 고정된 좌표계의 원점과  $j$ 번째 원형케이스의 중심간의 위상차이를 나타내는 함수이고  $J_n$ 은 제1종 Bessel 함수이다.  $j$ 번째 원형케이스로부터 발생하는 산란파는 2차원 Helmholtz 방정식과 무한원방에서의 방사조건식(Radiation condition)을 만족해야 하며 주어진 경계치 문제의 해는 아래와 같다.

$$\phi_S^j = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) e^{in\theta_j} \quad (4)$$

여기서  $H_n$ 는 제1종 Hankel 함수이며,  $H_n(kr_j) = J_n(kr_j) + iY_n(kr_j)$

이고  $Y_n$ 은 제2종 Bessel 함수이다.  $Z_n^j = \frac{J_n'(ka_j)}{H_n'(ka_j)}$ 로 정의되며,

윗첨자  $j$ 는 함수의 미분을 뜻한다.

전체영역에서의 파랑 포텐셜은 식(3)과 (4)를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = I_j \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr_j) e^{in(\pi/2 + \theta_j - \beta)} + \sum_{j=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) e^{in\theta_j} \quad (5)$$

$N$ 개의 원형케이스들 사이의 상호작용을 고려하기 위하여  $j$ 번째 원형케이스 주위의 파랑 포텐셜을 살펴보면, 입사파에 의한 파랑 포텐셜과  $j$ 번째 원형케이스에 의하여 산란된 파랑 포텐셜 그리고 주위의 나머지 원형케이스( $l = 1, 2, \dots, N, l \neq j$ )에 의하여 산란된 파랑 포텐셜들의 합으로 구성되어 있다. 이러한 물리적 현상을 수학적으로 표현하기 위하여 Graf의

Bessel 함수 덧셈정리(Additional theorem)를 사용한다(Linton and Evans, 1990; Maniar and Newman, 1997; Kim, 1993).

덧셈정리를 이용하면 전체영역에서의 파랑 포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi(r_j, \theta_j) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left\{ I_j e^{in(\pi/2-\beta)} J_n(kr_j) + A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) + \sum_{l=1}^N \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{jl}) e^{i(m-n)\alpha_{jl}} J_n(kr_j) \right\} e^{in\theta_j} \quad (6)$$

식(6)은  $r_j < R_{jl}$  일 때 성립하는 식이다. 식(6)에서 우변의 첫 번째 항은 순수한 입사파를 뜻하고, 두 번째 항은  $j$ 번째 원형케이스는 자체에 의한 산란파를 나타내며, 세 번째 항은  $j$ 번째 원형케이스를 제외한 인접한 원형케이스들에 의해 산란된 파가  $j$ 번째 원형케이스 구조물에 미치는 영향을 나타낸다(Park, 2019).

원형케이스 벽면에서의 경계조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial r_j} = 0 \quad \text{on } r_j = a_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

식(6)을 식(7)에 대입하여 정리하며 미지수  $A_n^j$ 에 대한 대수방정식을 아래와 같이 얻을 수 있다(Linton and Evans, 1990; Kim, 1993).

$$A_n^j + \sum_{l=1}^N \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{jl}) e^{i(m-n)\alpha_{jl}} = -I_j e^{in(\pi/2-\beta)} \quad j = 1, 2, \dots, N, -\infty < n < \infty \quad (8)$$

식(8)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수  $m$ 을  $-M$ 부터  $M$ 까지  $2M+1$ 개를 취한다. 따라서 대수방정식의 미지수의 개수는  $N \times (2M+1)$ 이며 식(8)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$A_n^j + \sum_{l=1}^N \sum_{m=-M}^{m=M} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{jl}) e^{i(m-n)\alpha_{jl}} = -I_j e^{in(\pi/2-\beta)} \quad j = 1, 2, \dots, N, m = -M, \dots, M \quad (9)$$

식(9)을 풀어 미지수  $A_n^j$  ( $j = 1, 2, \dots, N, n = -M, \dots, M$ )을 수치적으로 구할 수 있으며, 원형케이스에 작용하는 파력은 구해진 미지수를 각 속도 포텐셜에 대입하고 원형케이스 표면에 대하여 아래와 같이 적분하여 구할 수 있다.

$$F_x^j = -\frac{\rho g H a_j}{2k} \tanh k d \int_0^{2\pi} \eta(a_j, \theta_j) \cos \theta_j d\theta_j \quad (10)$$

$$F_y^j = -\frac{\rho g H a_j}{2k} \tanh k d \int_0^{2\pi} \eta(a_j, \theta_j) \sin \theta_j d\theta_j \quad (11)$$

원형 케이스 외부 전체영역에서의 파형과  $j$ 번째 원형케이스 벽면에서의 파쳐오름(Wave run-up)은 다음과 같다.

$$|\eta(x, y)| = \frac{H}{2} \left| e^{ikr \cos(\theta-\beta)} + \sum_{j=1}^N \sum_{n=-M}^{n=M} A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) e^{in\theta_j} \right| \quad (12)$$

$$|\eta^j(a_j, \theta_j)| = \frac{H}{2} \left| \sum_{n=-M}^{n=M} \frac{-2iA_n^j}{k\pi a_j H_n(ka_j)} e^{in\theta_j} \right| \quad (13)$$

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 4개의 원형실린더로 구성된 해양구조물에 작용하는 전체 파력의 합 및 개별 원형실린더 벽면에서의 파쳐오름(Wave run-up)을 나타낸다. Williams and Li(2000)는 고유함수전개법을 이용하여 투과성 원형실린더로 구성된 구조물에 작용하는 파력 및 파쳐오름 특성뿐만 아니라 불투과성 원형실린더에 작용하는 파력에 대해서는 Chakrabarti(1987)의 수치해석결과와 비교하였으며 개별 불투과성 원형실린더에 작용하는 파쳐오름을 상세하게 분석하였다. 본 연구에서는 Williams and Li(2000)의 불투과성 원형실린더의 해석해와 비교하여 본 연구에서 사용된 고유함수전개법의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 수치해석에서 수심( $d$ )은 원형실린더의 반지름( $a$ )을 기준으로  $d/a$ 비가 5이며, 각 원형실린더의 중심 좌표는  $(-2a, 2a)$ ,  $(2a, 2a)$ ,  $(2a, -2a)$ ,  $(-2a, -2a)$ 이고 시계방향으로 1~4로 구분하였다. 입사파랑은  $x$  축을 중심으로  $0.0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45.0^\circ$  방향으로 입사한다고 설정하였고 고유모드의 개수( $M$ )는 10으로 고정하였다. Fig. 2에서  $x$  축은 파수에 원형실린더의 반지름을 곱한 값을 나타내고 있으며  $y$  축은  $\rho g H a^2$ 으로 나눈 무차원화된 파력을 나타낸다. 또한 Fig. 3에서  $x$  축은 Fig. 1의 각 원형케이스의 중심 좌표( $x_j, y_j$ )에서 반 시계방향으로 측정된  $\theta_j$  각도를 나타내고 있으며  $y$  축은 입사하는 파랑의 파고( $H$ )로 나눈 무차원화된 파쳐오름을 나타내고 있다. 그림에서 파와 구조물의 상호작용 영향으로 전체 구조물에 작용하는 파력 및 개별 원형실린더의 파쳐오름은 입사

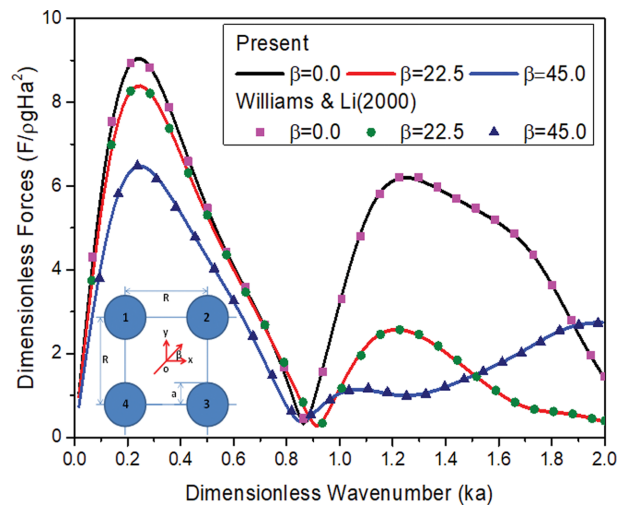


Fig. 2. Dimensionless total wave force in x-direction on a four cylinder array with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$  for  $\beta = 0.0^\circ$ ,  $\beta = 22.5^\circ$  and  $\beta = 45.0^\circ$ .

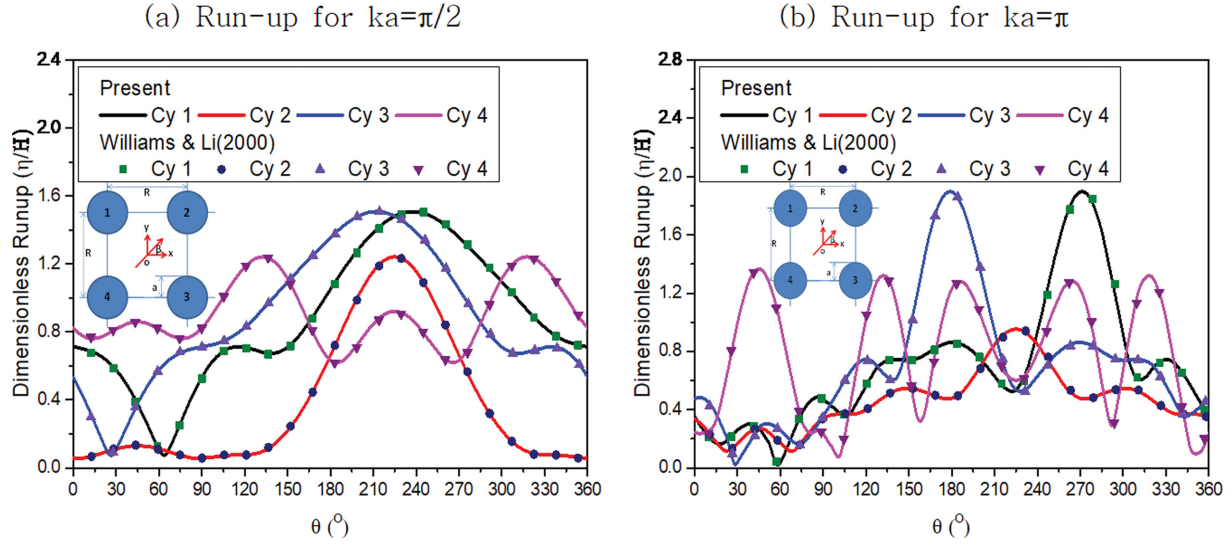


Fig. 3. Dimensionless wave run-up on outer wall of each cylinder for four cylinder array with  $d/a=5$ ,  $R/a=4$ ,  $\beta=45.0^\circ$ : (a)  $ka=\pi/2$ , (b)  $ka=\pi$ .

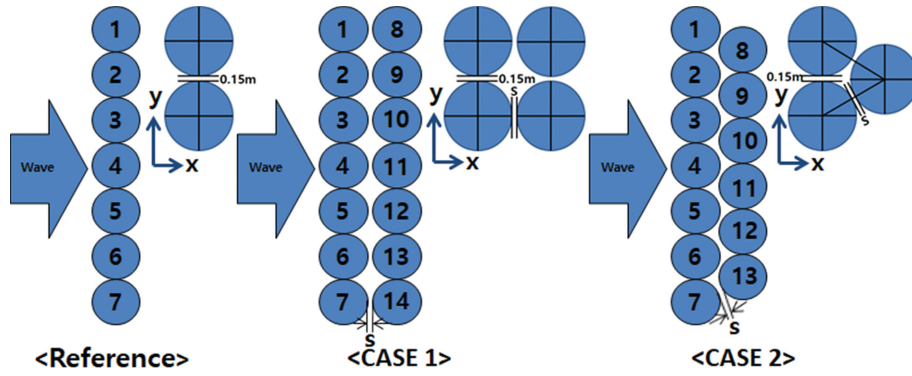


Fig. 4. Definition sketches for numerical cases.

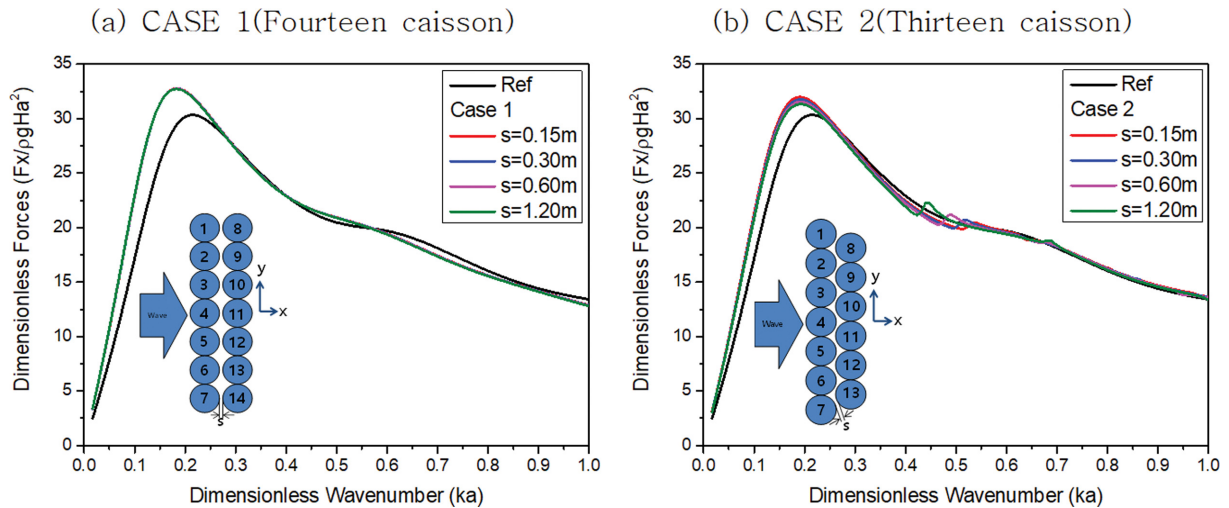


Fig. 5. Dimensionless total wave force in x-direction on breakwater with  $d/a=2$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

하는 파랑의 각도와 파수(규칙파)에 따라 다양한 패턴을 나타내었으며, 본 연구의 수치해석결과는 Williams and Li(2000)의 해석해와 좋은 일치를 보였다.

기준 원형케이스는 방파제에 추가로 설치되는 원형케이스의 다양한 변수들(원형 케이스 배치, 설치간격)에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향을 엄밀하게 검토하기 위해 Fig. 4와



같이 해석케이스를 설정하였다. 수치해석에서 기존 원형케이슨 7개로 구성된 방파제를 기준케이스(Reference)로 설정하였으며 기존 개별 원형케이슨간의 간격은 항만 및 어항공사 표준시방서에서 제시하는 5,000톤 이상 케이슨의 거치허용 오차인 0.15 m로 고정하였다. 모든 수치해석 케이스에서 수심은 원형케이슨의 반경( $a = 10$  m)을 기준으로  $d/a$ 비가 2이고 Case 1과 Case 2에서는 기존 원형케이슨과 신규로 설치되는 원형케이슨의 설치간격( $s$ )에 따른 상호작용 영향을 분석하기 위해 총 4가지( $s = 0.15$  m,  $s = 0.3$  m,  $s = 0.6$  m,  $s = 1.2$  m)로 구분하였다.

Fig. 5는 개별 원형케이슨에 작용하는 파력들을 모두 합한 전체 구조물에 작용하는 파력을 나타낸다. 그림에서 전체 구조물에 작용하는 파력은 기존 및 신규 원형케이슨간의 설치간격 변화에 따라 거의 차이가 발생하지 않았으며 4개의 원형실린더가 인접하게 설치된 해양구조물( $R/a = 2$ )에 작용하는

파력특성을 나타낸 Chakrabarti(1987)의 해석결과와도 유사한 경향을 보이고 있다.

하지만 본 연구 대상구조물인 방파제인 경우에는 각각의 원형케이슨이 독립 거동을 하기 때문에 개별 원형케이슨에 작용하는 파력특성 평가는 매우 중요하다. 기존 원형케이슨과 신규 원형케이슨간의 설치간격에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의한 개별 케이슨에 작용하는 파력특성을 분석하기 위해 Fig. 6~12는 입사파랑 전면에 위치한 원형케이슨들에 작용하는 파력을 나타내었으며 Fig. 13~19는 후면에 위치한 원형케이슨들에 작용하는 파력을 나타내었다. 개별 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 명확히 파악하기 위해 수치해석에서 입사파의 입사각은  $x$  축과 평행하게 입사하는 0도에 대해서만 고려하였으며 중심에 위치한 원형케이슨을 기준으로 상부측과 하부측에 위치한 개별 원형케이슨에 작용하는 파력은 동일하므로 본 연구에서는 하부측에 위치한 원형케이

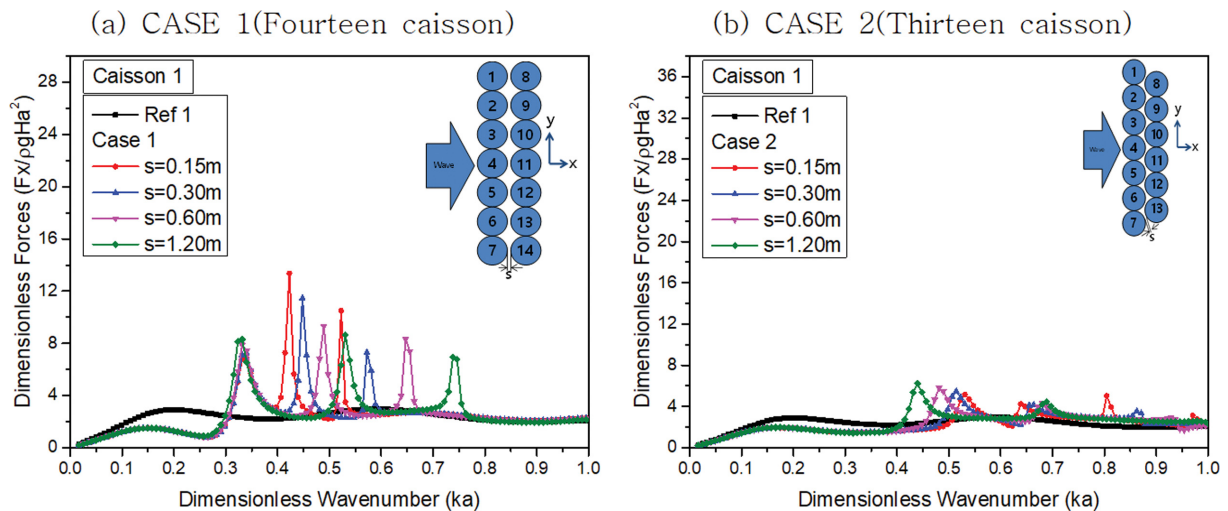


Fig. 6. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 1 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

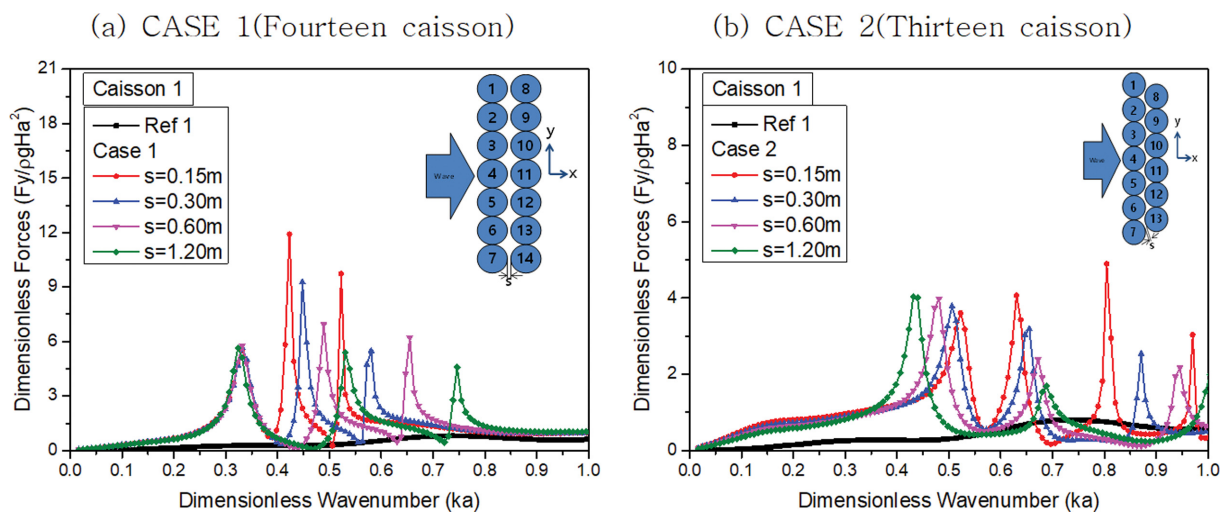
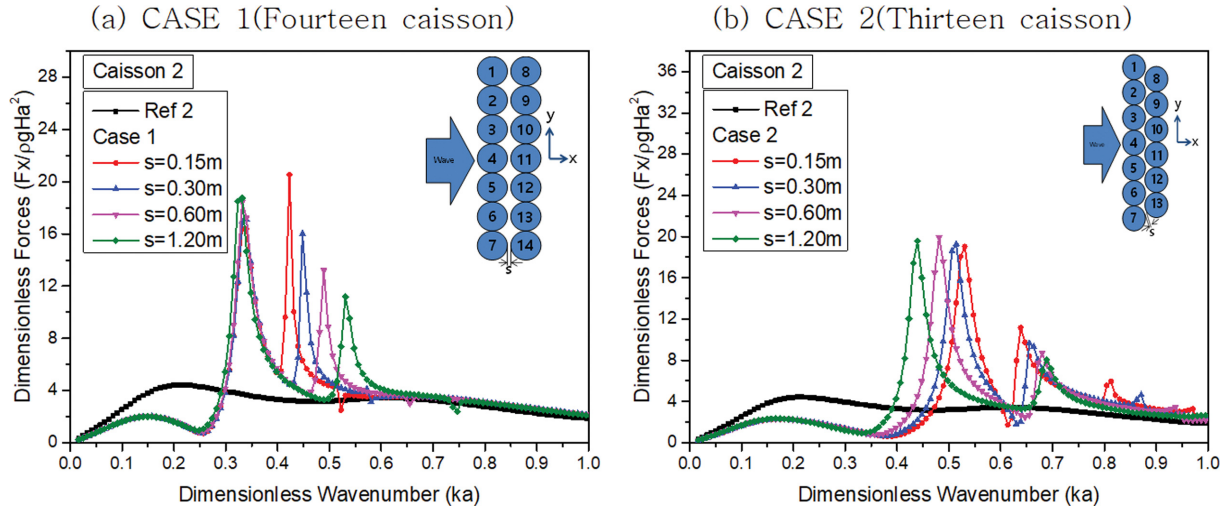
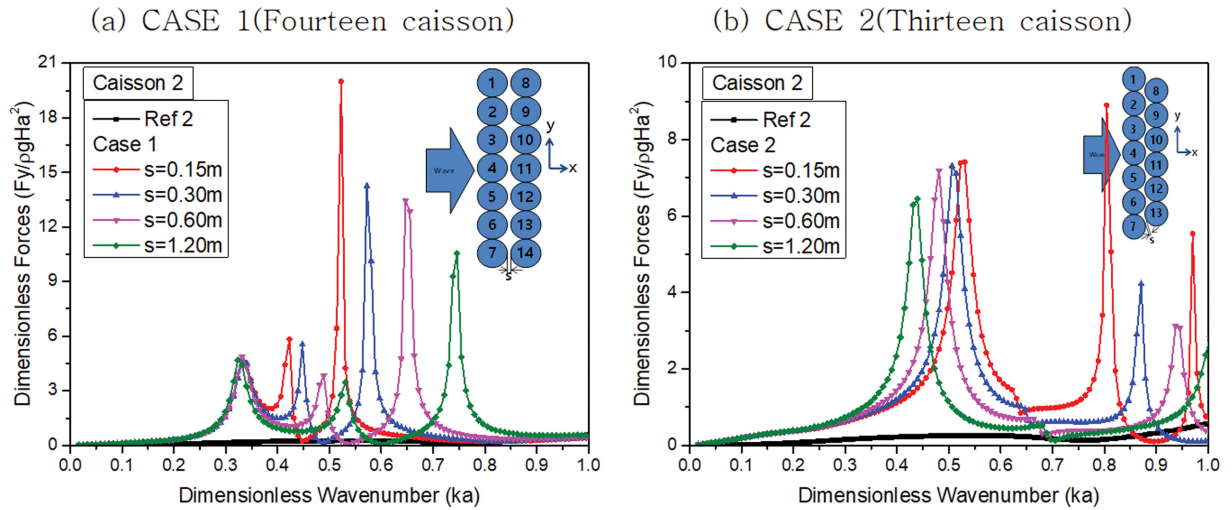


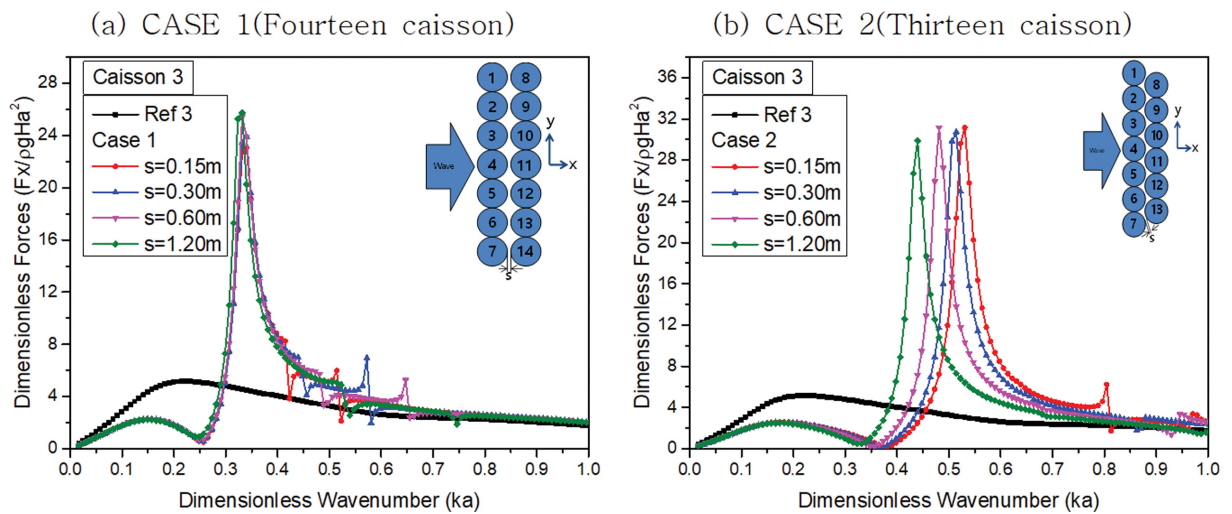
Fig. 7. Dimensionless wave force in y-direction on caisson 1 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).



**Fig. 8.** Dimensionless wave force in  $x$ -direction on caisson 2 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).



**Fig. 9.** Dimensionless wave force in  $y$ -direction on caisson 2 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).



**Fig. 10.** Dimensionless wave force in  $x$ -direction on caisson 3 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

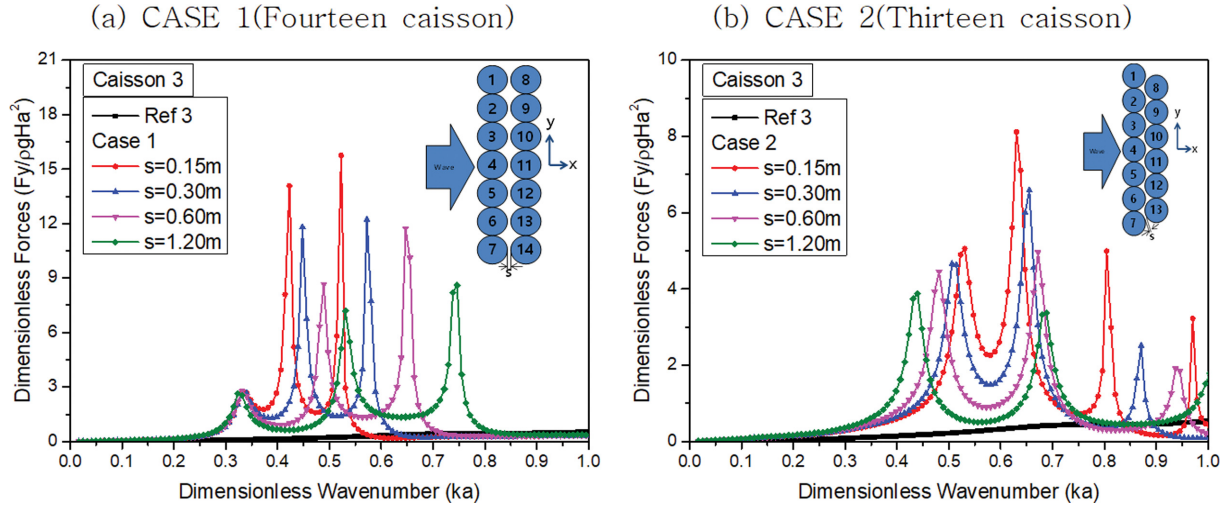


Fig. 11. Dimensionless wave force in y-direction on caisson 3 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

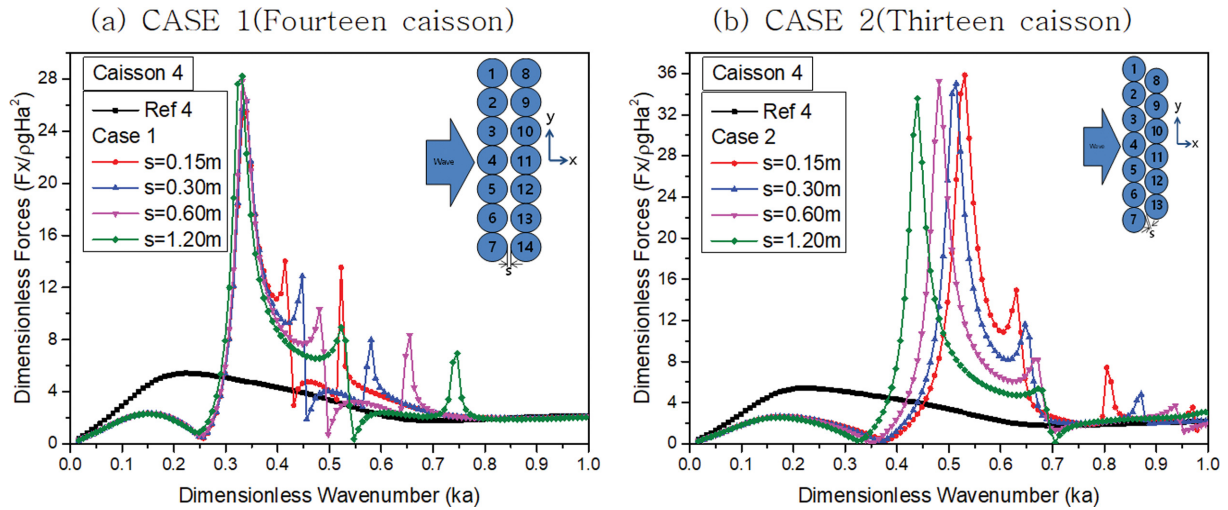


Fig. 12. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 4 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

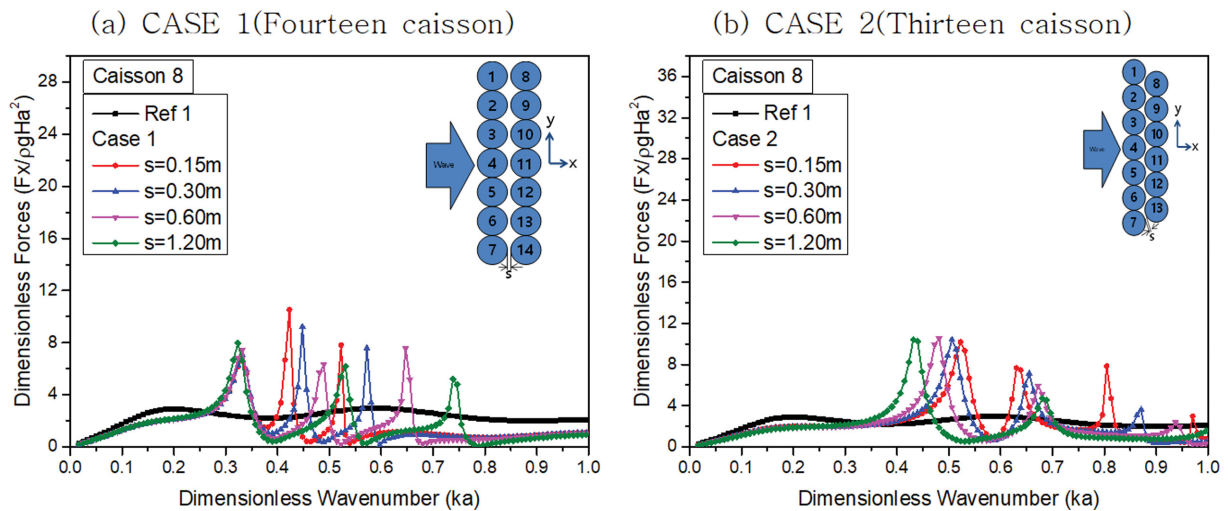


Fig. 13. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 8 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).



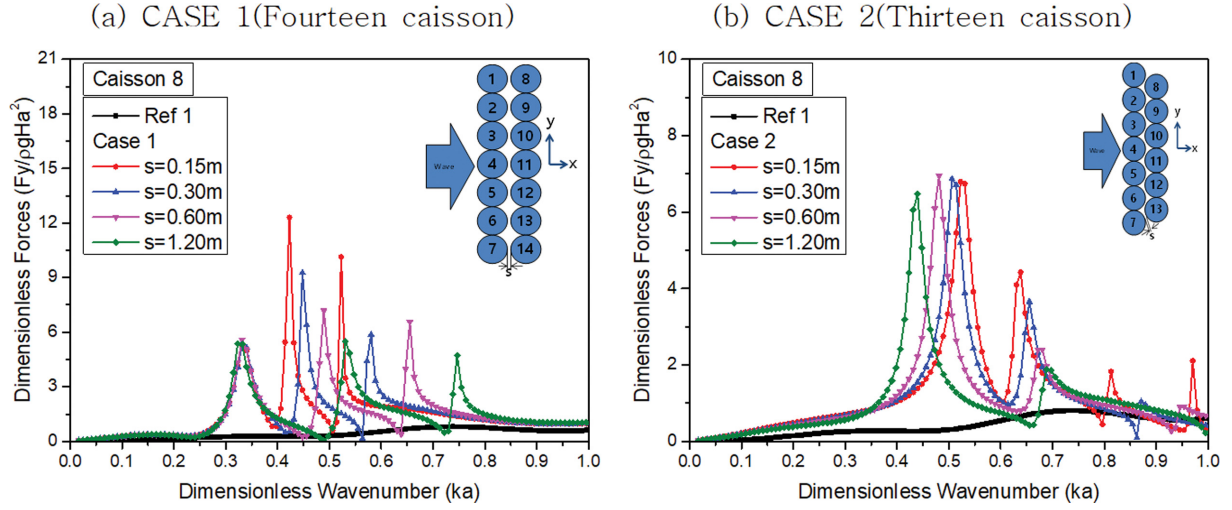


Fig. 14. Dimensionless wave force in y-direction on caisson 8 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

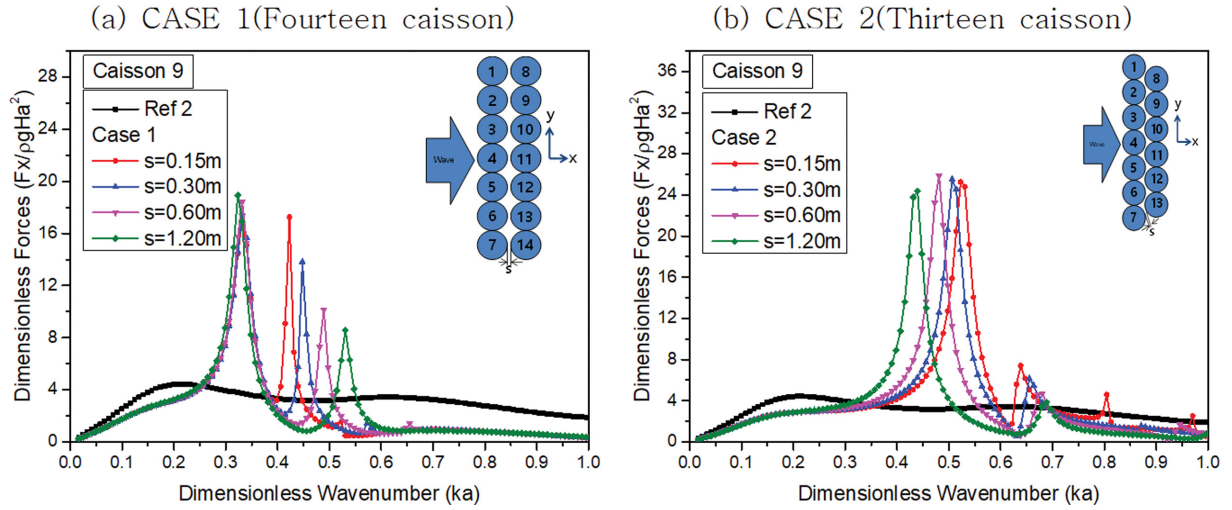


Fig. 15. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 9 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

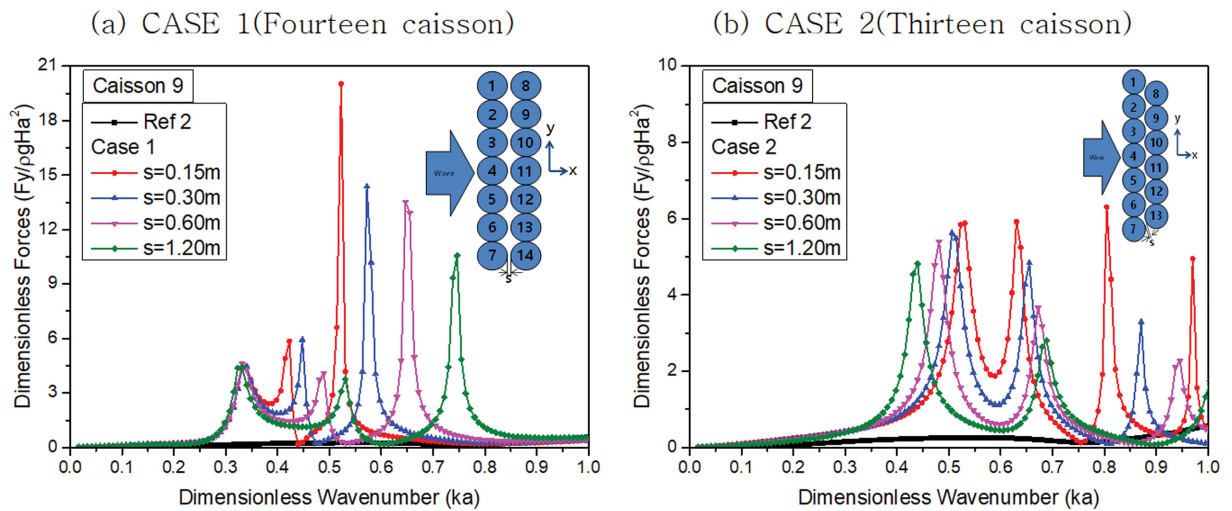


Fig. 16. Dimensionless wave force in y-direction on caisson 9 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).



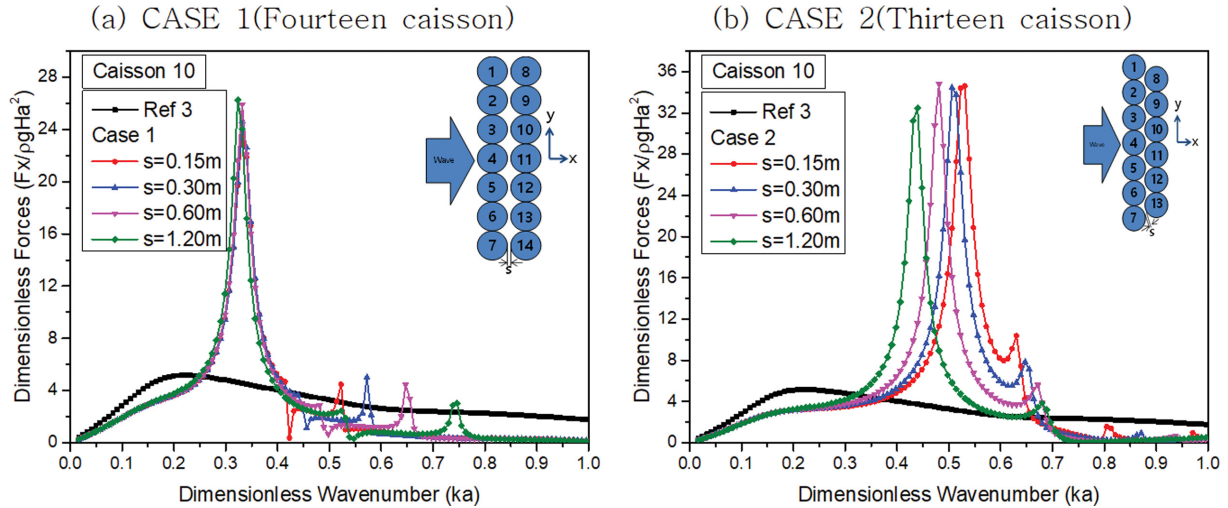


Fig. 17. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 10 with  $d/a=2$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

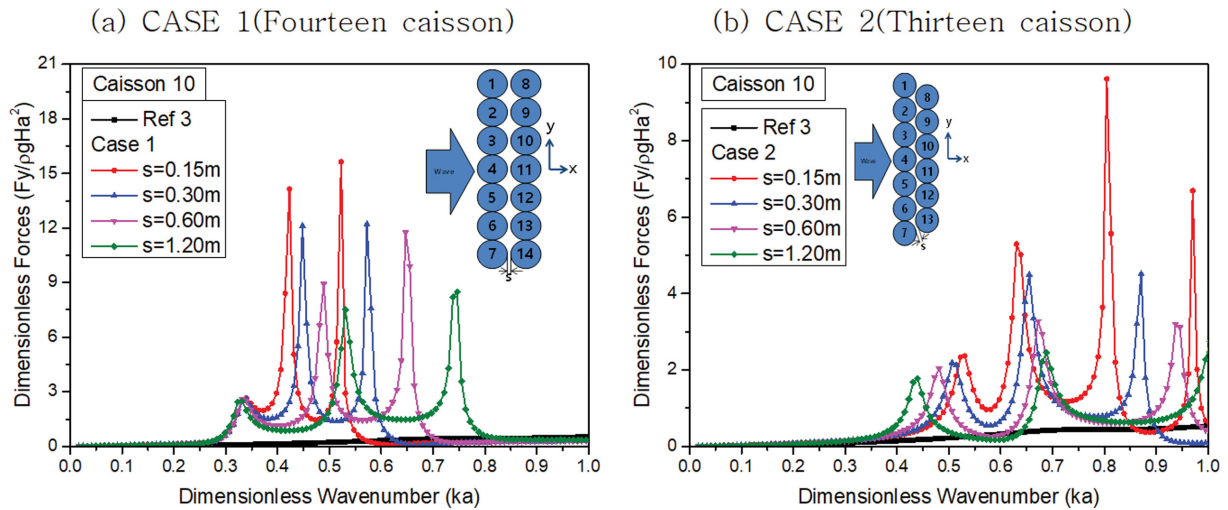


Fig. 18. Dimensionless wave force in y-direction on caisson 10 with  $d/a=2$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 (fourteen caisson), (b) CASE 2 (thirteen caisson).

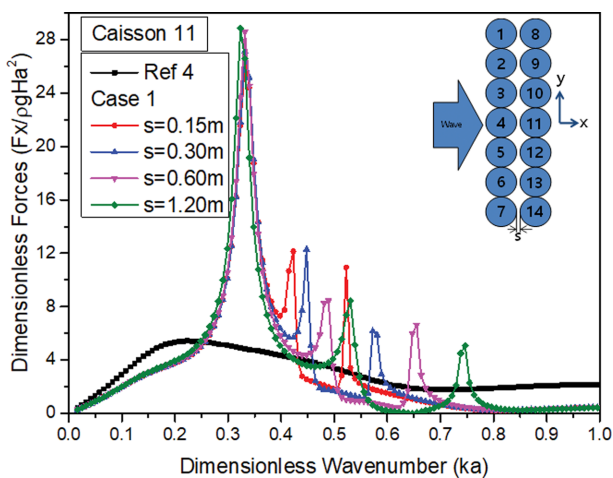


Fig. 19. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 11 of CASE 1 with  $d/a=2$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

스들에 작용하는 파력은 나타내지 않았다. Table 1과 2는 각 케이스별 중앙에 위치한 4번 원형케이스의  $x$  방향 파력의 피크값이 발생된 시점에서의 파수( $ka$ ), 주기( $T$ ), 파장( $L$ )을 보여 주고 있다.

기존 원형케이스와 동일한 크기 및 개수의 신규 원형케이스가 전면 또는 후면에 추가로 설치된 CASE 1인 경우 전면에 위치한 원형케이스들에 작용하는  $x$  방향 파력은 파수( $ka$ )가 0.3 이하에서는 기준케이스보다 작은 파력의 영향을 받고 있으며 전체 계산영역에서 3번의 피크값을 나타내고 마지막 피크 이후부터는 기준케이스와 유사한 파력분포 특성을 보이고 있다. 특히 파수 0.15 이하까지는 파력이 서서히 증가하다가 이후 감소하여 파수 2.5 부근에서 최저값을 보이고 이후 급격하게 증가하여 첫 번째 피크값을 가진다. 하지만 후면에 위치한 원형케이스들에 작용하는  $x$  방향 파력은 파수 0.3 이하까지 서서히 증가하여 기준케이스보다 낮은 파력값

**Table 1.** Peak point of circular caisson 4 for CASE 1

Peak point	$s = 0.15$ m			$s = 0.30$ m			$s = 0.60$ m			$s = 1.2$ m		
	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)
1	0.340	14.146	184.769	0.340	14.146	184.769	0.332	14.456	189.398	0.332	14.456	189.398
2	0.415	11.947	151.516	0.448	11.218	140.285	0.481	10.597	130.613	0.523	9.939	120.243
3	0.523	9.939	120.243	0.581	9.188	108.228	0.655	8.431	95.897	0.746	7.725	84.183

**Table 2.** Peak point of circular caisson 4 for CASE 2

Peak point	$s = 0.15$ m			$s = 0.30$ m			$s = 0.60$ m			$s = 1.2$ m		
	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)	Wave number (ka)	Wave period (T)	Wave length (L)
1	0.531	9.821	118.368	0.514	10.062	122.192	0.481	10.597	130.613	0.440	11.389	142.931
2	0.630	8.662	99.684	0.647	8.506	97.129	0.664	8.358	94.695	0.672	8.287	93.524
3	0.805	7.363	78.101	0.871	7.011	72.148	0.937	6.710	67.040	0.995	6.480	63.135

을 나타내고 이후 급격하게 증가해 초기 피크값을 나타내며 전면에 위치한 원형케이스들에 작용하는 파력 특성과는 다른 형태를 보이고 있다. 전면과 후면에 위치한 원형케이스에 작용하는  $x$  방향 파력은 원형케이스들의 설치간격 변화에 따라 초기 피크값은 유사한 파수부근( $ka = 0.34$ )에서 발생하였으며 전면과 후면에 위치한 원형케이스의 초기 피크에서의  $x$  방향 파력은 거의 유사한 값을 가지고 외곽(1, 8 원형케이스)에서 중심부(4, 11 원형케이스)로 이동할수록 크게 증가하는 경향이 나타났다. 파수 0.3 이상인 부근에서 전면에 위치한 원형케이스의  $x$  방향 파력은 기준케이스보다 높은 값을 보이고 있지만 후면에 위치한 원형케이스의  $x$  방향 파력은 피크값을 가지는 파수부근을 제외하고는 기준케이스의 파력보다 상당히 작은 파력분포 특성을 보이고 있다. 전면 및 후면에 위치한 원형케이스들에 작용하는  $y$  방향 파력은 기준케이스보다 높은 값을 보였는데 이는 원형 케이스의 개수 증가에 따른 파와 구조물의 상호작용 영향에 의한 것으로 판단된다. 계산된 파수범위에서 중앙에 위치한 4번과 11번 원형케이스에 작용하는 파력이 가장 큰 값을 나타내었으며 최대 피크값은 기준케이스의 최대 파력과 비교해 약 5.09배 큰 파력의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 기존 원형케이스 방파제의 전면 또는 후면에 신규 원형케이스가 설치될 경우 두 케이스들에 의해 단처진 유체영역이 존재하며, 입사파의 주파수와 단처진 유체의 고유주파수가 일치될 경우 수면이 상하로만 진동하는 Helmholtz 공진이 발생하여 특정 주기에서 증폭비가 크게 발생된 것으로 볼 수 있다. Cho and Kim(2020)은 입사파의 주파수와 OWC 파력발전장치내 유체의 고유주파수가 일치되어 수면이 상하로 진동하는 모드를 피스톤 고유모드라 정의하였다. 즉 기존 케이스방파제의 안정성을 향상시키기 위해 신규 케이스를 기존 케이스방파제의 전면 또는 후면에 설치하는 것이 특정 파수에서는 방파제의 안정성을 더욱 악화시킬 수 있는 공진이 발생되므로 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것

으로 판단된다.

기존 원형케이스와 동일한 크기지만 개수가 하나 적은 신규 원형케이스가 후면에 추가로 설치된 CASE 2인 경우 전면에 위치한 원형케이스들에 작용하는  $x$  방향 파력은 CASE 1의 파력분포와 유사하게 장파지역에서는 파력이 서서히 증가하다 감소하였으며 파수( $ka$ ) 0.35 이후 급격하게 증가하면서 초기 피크값을 나타내었다. CASE 1인 경우에는 원형케이스의 설치간격 변화에 관계없이 초기 피크값이 유사한 파수범위에서 발생하였으나 CASE 2인 경우에는 설치간격 변화에 따라 서로 다른 파수에서 초기 피크값이 발생하는 특이한 현상을 보였다. 또한 CASE 1의 경우에는 계산된 파수범위에서 설치간격 변화조건에 따라 뚜렷하게 3번의 피크값이 나타났으나 CASE 2인 경우에는 설치간격이 커질수록 마지막 피크값이 작아져 설치간격이 1.2 m에서는 마지막 피크값이 발생하지 않는 것처럼 나타났다. 이는 Table 1과 2에서 알 수 있듯이 설치간격이 증가할수록 피크점 발생 파수간의 간격이 멀어지는 현상 때문이며 특히 CASE 2가 파수간의 간격 변화가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. CASE 2의 경우도 초기 피크발생 이후부터는 전면에 위치한 원형케이스의  $x$  방향 파력은 기준케이스보다 높은 값을 보이고 있지만 후면에 위치한 원형케이스의  $x$  방향 파력은 피크값을 가지는 파수부근을 제외하고는 기준케이스의 파력보다 상당히 작은 파력분포 특성을 보였다. 계산된 파수범위에서 CASE 2의 중앙에 위치한 4번 원형케이스에 작용하는 최대 피크값의  $x$  방향 파력은 CASE 1보다 약 1.25배 크게 나타났으며 이는 기준케이스의 최대 파력보다 약 6.36배 큰 값이다.

각 케이스별 피크값이 발생된 파수에서 입사하는 파랑과 원형케이스들간의 상호작용영향을 분석하고자 Fig. 20과 21에 원형케이스의 설치간격( $s$ )이 1.2 m인 경우 원형케이스 주변의 파형을 나타내었다. 모든 케이스에 대해 전면에 위치한 원형케이스들과 후면에 위치한 원형케이스들 사이에 파랑이 증폭

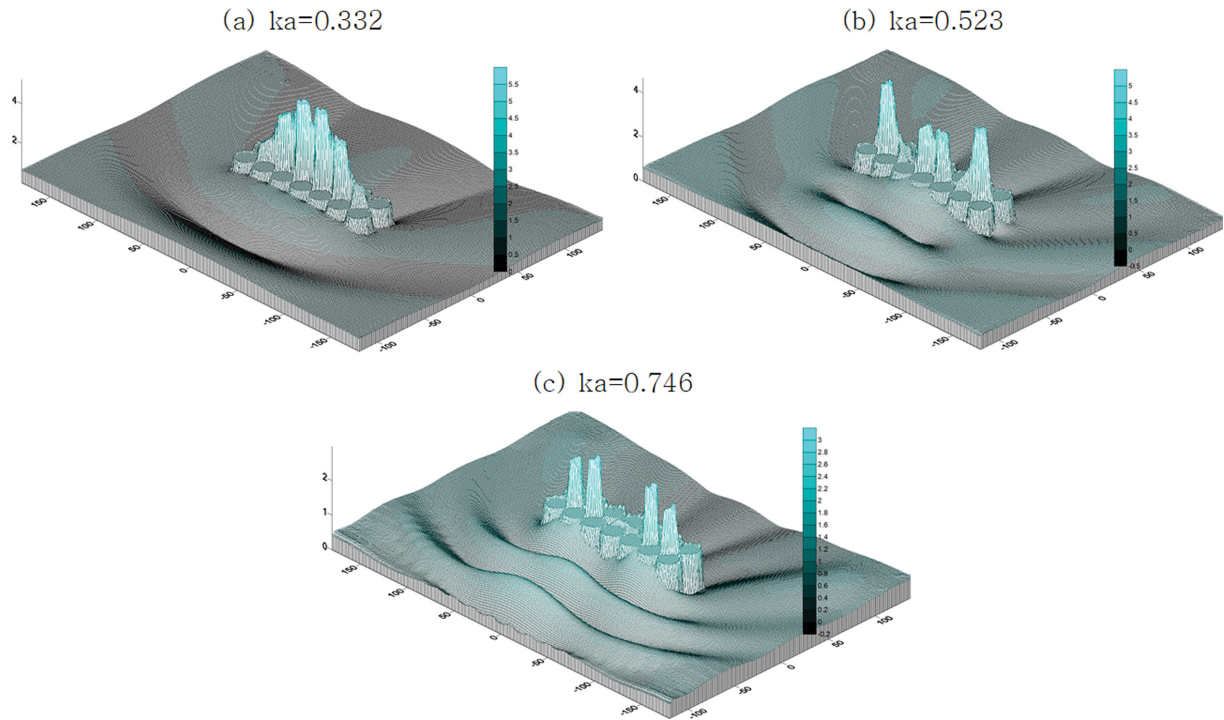


Fig. 20. Dimensionless free surface elevations ( $\eta/H$ ) for CASE 1 (fourteen caisson) for  $d/a=2$   $s=1.2$  m and  $\beta=0.0^\circ$ : (a)  $ka=0.332$ , (b)  $ka=0.523$ , (c)  $ka=0.746$ .

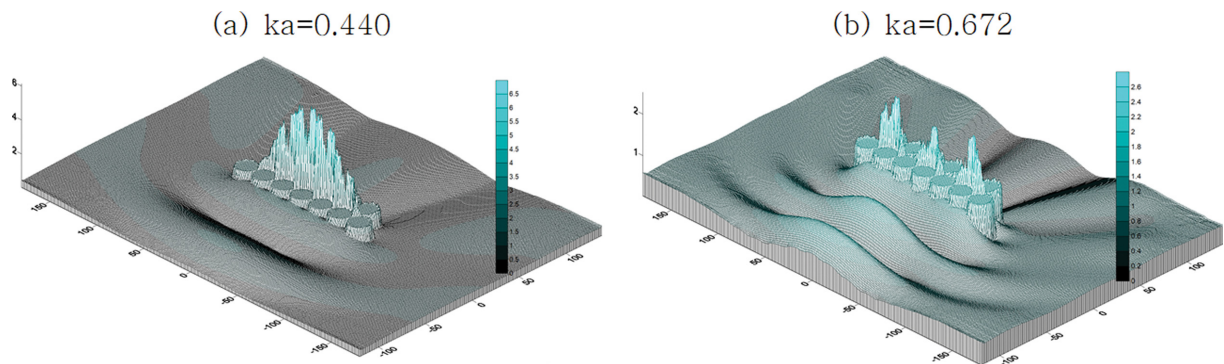


Fig. 21. Dimensionless free surface elevations ( $\eta/H$ ) for CASE 2 (thirteen caisson) for  $d/a=2$   $s=1.2$  m and  $\beta=0.0^\circ$ : (a)  $ka=0.440$ , (b)  $ka=0.672$ .

되는 중복파(Standing wave) 현상이 발생하였으며 파수가 증가할수록 중앙에 위치한 원형케이슨 주변에 집중적으로 발생 하던 중복파가 외곽에 위치한 원형케이슨의 주변에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉 전면을 통과한 입사파가 후면에 위치한 원형케이슨에 의해 반사되면서 이 반사파와 전면 원형케이슨을 통과한 입사파의 중첩으로 중복파가 발생하는 것이다.

케이슨 방파제의 안정성을 검토하기 위해서는 케이슨 저면에 작용하는 양압력을 산출하여야 한다. 항만 및 어항 설계 기준·해설에서는 설계계산에 사용되는 파고를 이용하여 양압력을 계산하도록 되어있다. 본 연구의 원형케이슨들이 1열로 배치된 기준케이슨의 경우에는 양압력을 이 설계기준을 이용하여 계산할 수 있지만 CASE 1과 CASE 2의 경우에는 설

계기준 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고자 CASE 1과 CASE 2인 경우 입사하는 파랑에 의해 개별 케이슨에 작용하는 파치오름(Wave run-up)을 Fig. 22~29에 나타내었다. 그림에서 개별 케이슨에 작용하는 파치오름 값은 중앙에 위치한 4번 원형케이슨을 기준으로 초기 피크값 발생 이후 최소 파력이 발생하는 파수에서의 파치오름을 입사하는 파고( $H$ )로 나누어 무차원화하여 나타내었다. 그림의 가로축은 Fig. 1의 개별 원형케이슨의 중심좌표에서  $x$  축을 중심으로 반 시계방향으로 측정된 각도( $\theta$ )를 의미한다. 모든 케이스에 대해 전면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파치오름은 원형케이슨의 설치간격에 관계없이 입사파 방향의 정면에 위치한 120도에서 240도 부근까지는 기준케이슨의 파치오름과 유사한 값이 나타났다. 이는 120도에서 240도



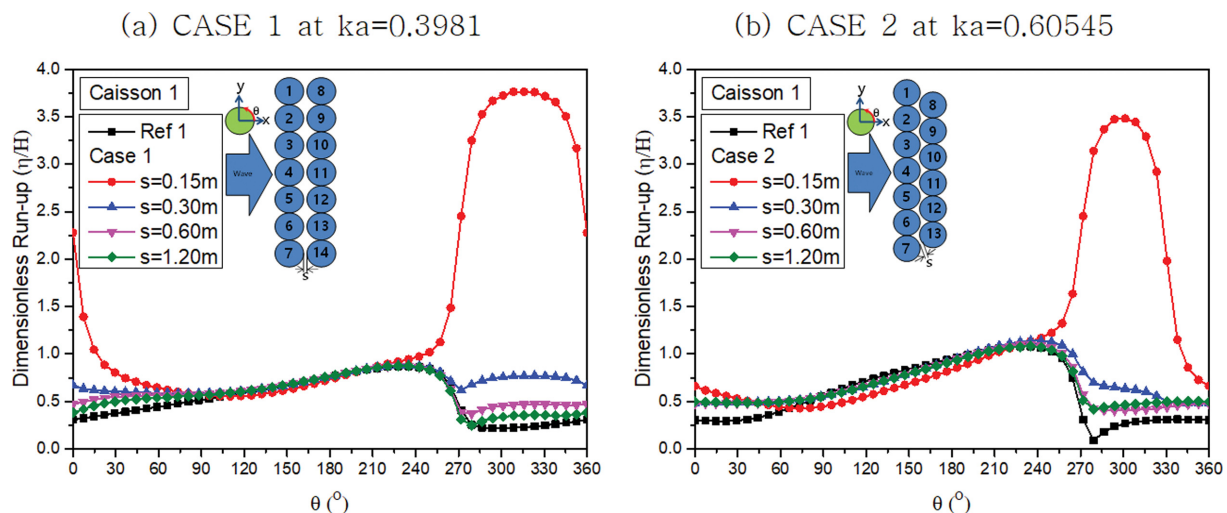


Fig. 22. Dimensionless wave run-up on caisson 1 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .

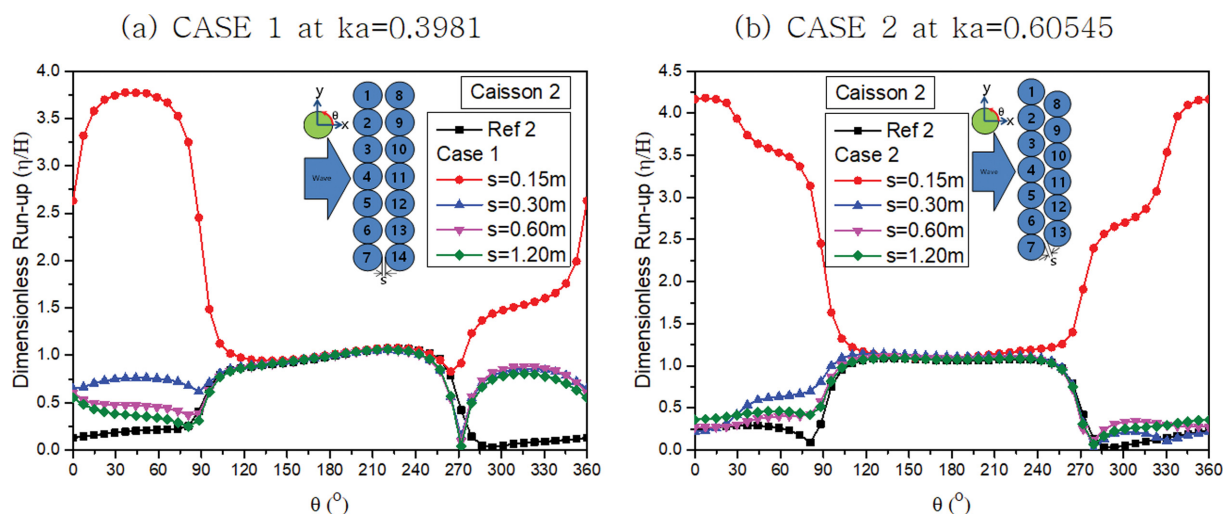


Fig. 23. Dimensionless wave run-up on caisson 2 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .

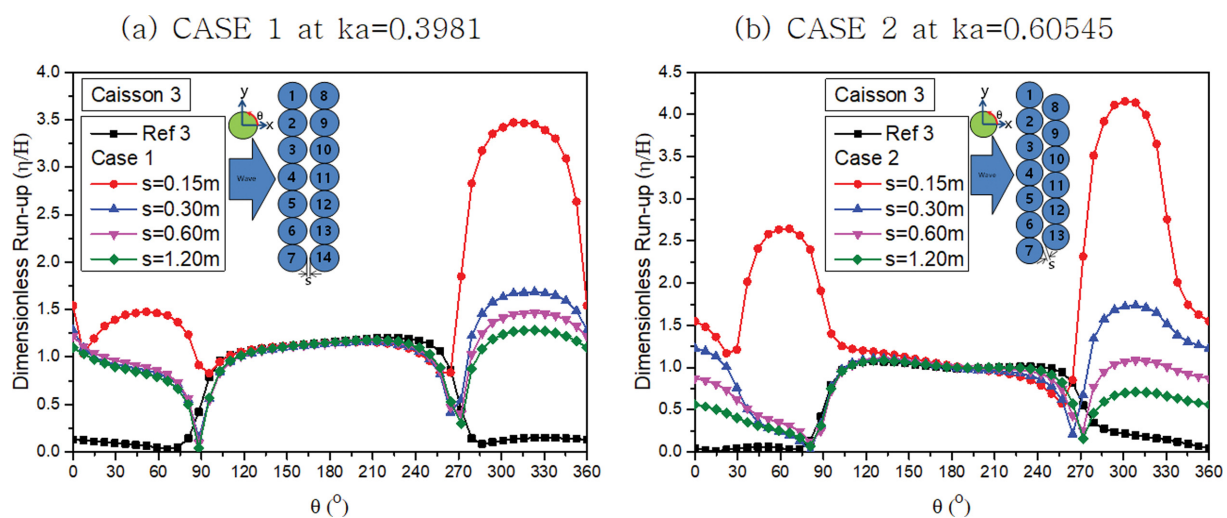


Fig. 24. Dimensionless wave run-up on caisson 3 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .



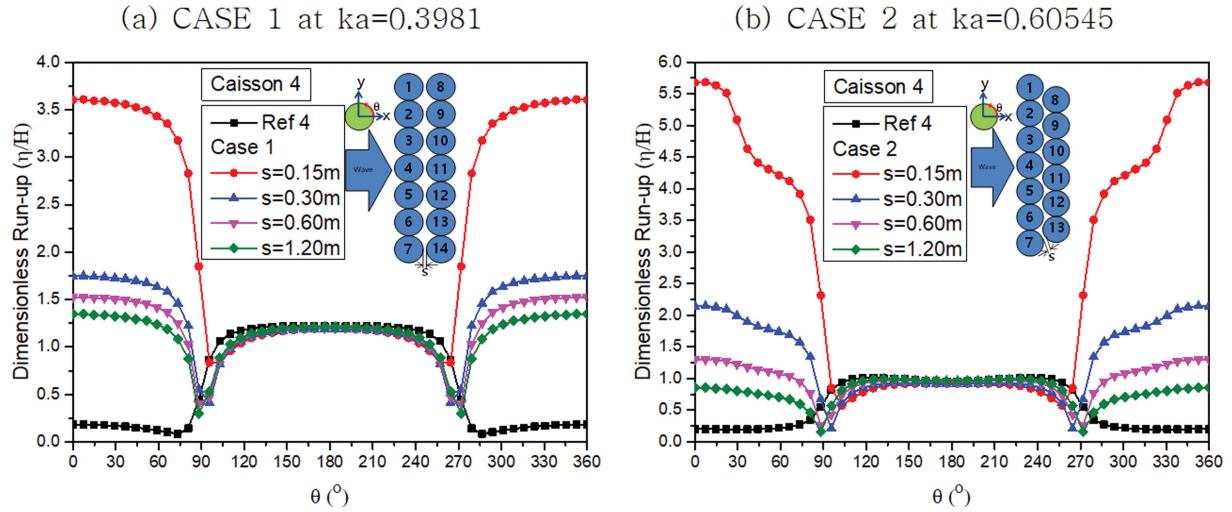


Fig. 25. Dimensionless wave run-up on caisson 4 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .

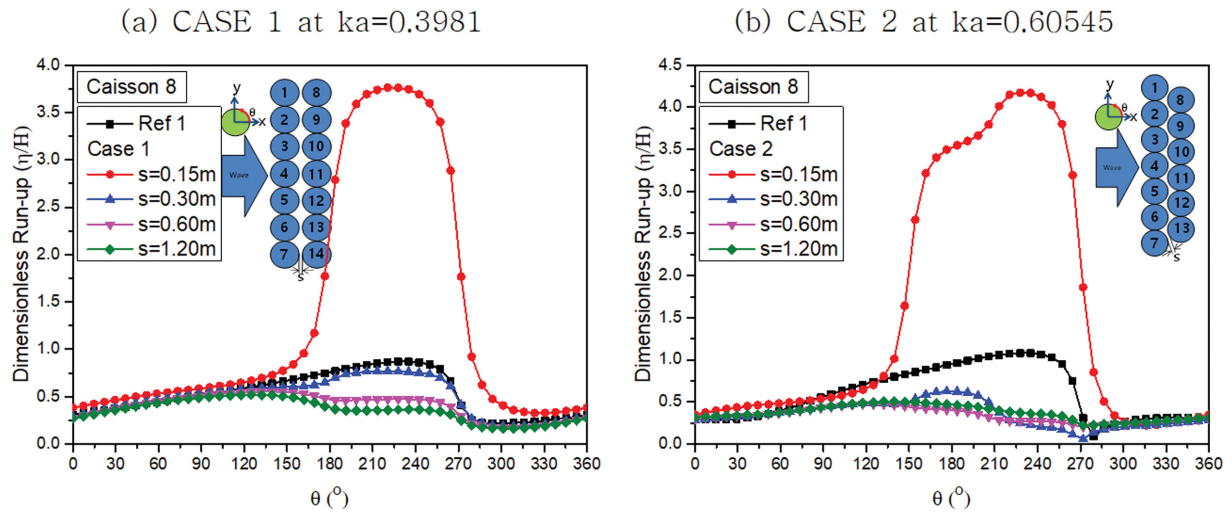


Fig. 26. Dimensionless wave run-up on caisson 8 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .

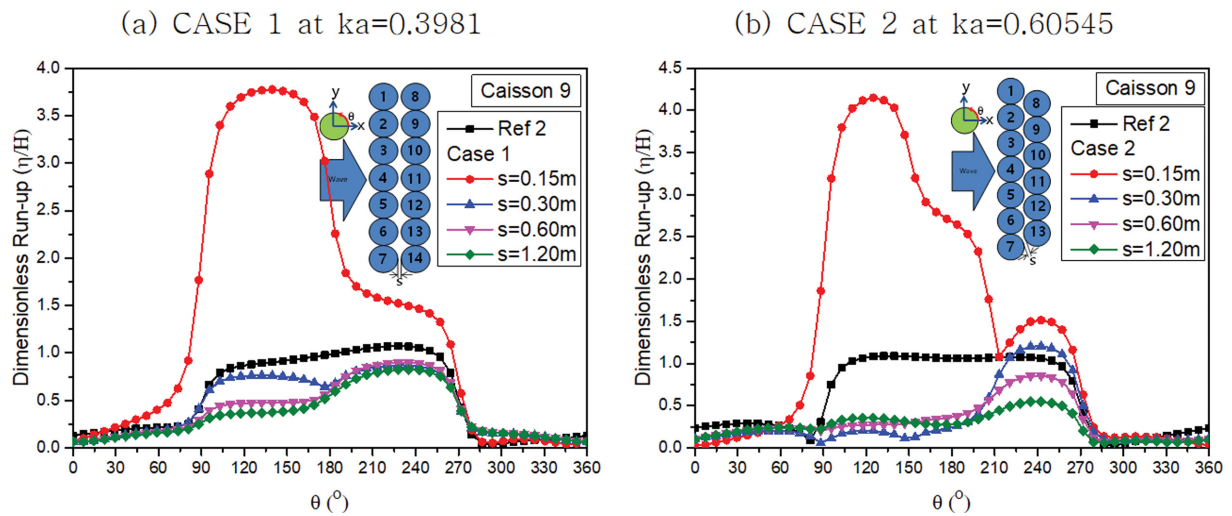


Fig. 27. Dimensionless wave run-up on caisson 9 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .

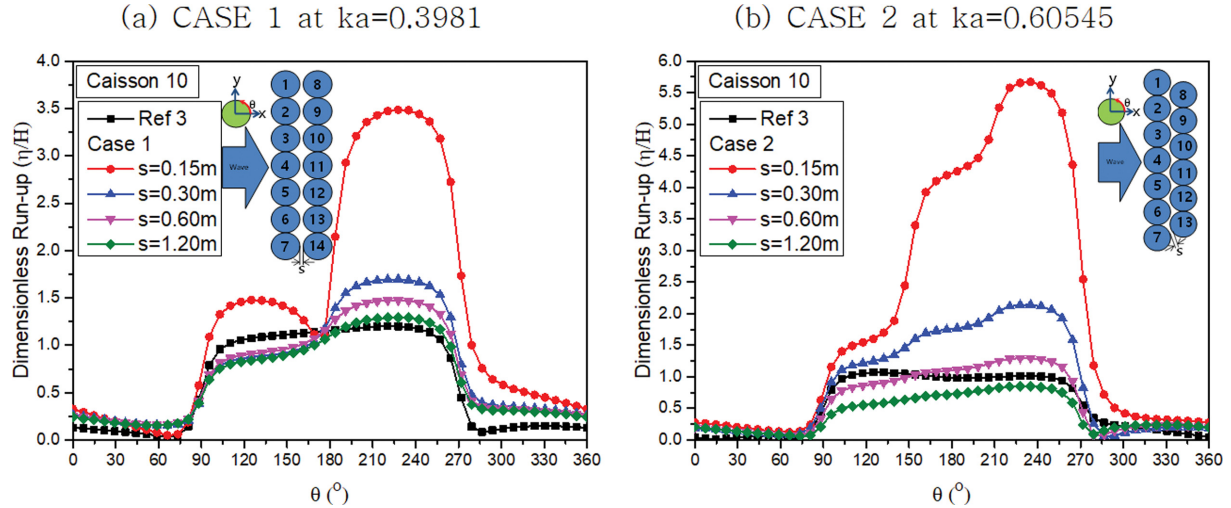


Fig. 28. Dimensionless wave run-up on caisson 10 with  $d/a = 2$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: (a) CASE 1 at  $ka = 0.3981$ , (b) CASE 2 at  $ka = 0.60545$ .

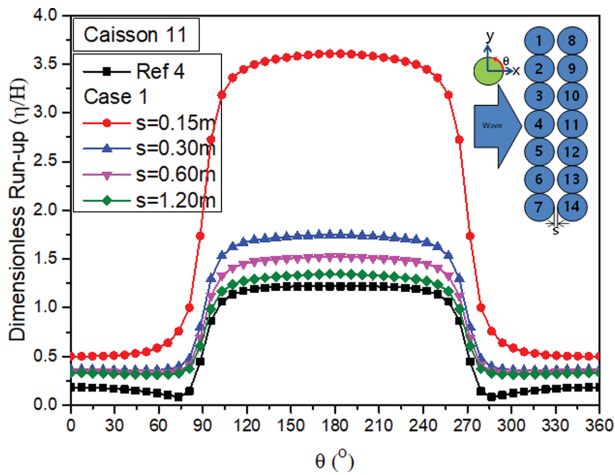


Fig. 29. Dimensionless wave run-up on caisson 11 of CASE 1 with  $d/a = 2$ ,  $ka = 0.3981$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

부근까지는 후면에 위치한 원형케이슨과 입사파간의 상호작용 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그 외 각도에는 상호작용의 영향이 나타났으며 원형케이슨의 설치간격이 좁을수록 상호작용 효과는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 설치간격이 0.15 m인 경우를 제외하고는 전면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파치오름 형상은 서로 유사한 형태를 보이고 있다. 후면에 위치한 원형케이슨들에 작용하는 파치오름은 상호작용 영향으로 기준케이스와는 다른 형태를 보이고 있으며 전면에 위치한 원형케이슨의 파치오름 특성과 유사하게 설치간격이 좁은 0.15 m에서 가장 큰 값을 나타내었다. 항만 및 어항 설계기준·해설에서는 케이슨 저면에 작용하는 양압력은 외해측 값이 크고 내해측 값은 0인 삼각형 분포로 작용한다고 명시하고 있다. 기준케이슨에 작용하는 파치오름은 삼각형 분포와 유사한 형태를 보였으나 2열의 원형케이슨으로 구성된 CASE 1과 CASE 2에서는 전혀 다른 형태의 분

포를 보이고 있다. 따라서 기존 원형케이슨의 전면 또는 후면에 신규 케이슨을 추가 설치할 경우에는 파와 구조물간의 상호작용 영향 평가는 선행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존 케이슨의 안정성을 높이기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 경우 신규 케이슨 추가 설치에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의해 각 케이슨에 작용하는 파력 및 파치오름 특성을 분석하였다. 사용된 3차원 선형 포텐셜 이론을 기초로한 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)의 높은 정확성과 신뢰성은 Williams and Li(2000)의 수치해석 결과와의 비교를 통해 검증되었다. 기존 원형케이슨과 동일한 크기 및 개수의 신규 원형케이슨이 전면 또는 후면에 추가로 설치된 CASE 1인 경우에는 원형케이슨의 설치간격( $s$ ) 변화에 관계없이 초기 피크값이 유사한 파수범위에서 발생하였으나 개수가 하나 적은 신규 원형케이슨이 후면에 추가로 설치된 CASE 2인 경우에는 설치간격 변화에 따라 서로 다른 파수에서 초기 피크값이 발생하는 특이한 현상을 보였다. 또한, 설치간격이 증가할수록 피크점 발생 파수간의 간격이 멀어지는 현상이 나타났으며 특히 CASE 2가 파수간의 간격 변화가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 계산된 파수범위에서 중앙에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파력이 가장 큰 값을 나타내었으며 최대 피크값은 기준케이스의 최대 파력보다 상당히 크게 증가하였다. 즉 기존 케이슨방파제의 안정성을 향상시키기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨방파제의 전면 또는 후면에 설치할 경우 입사파의 주파수와 원형케이슨들에 의해 단차진 유체영역의 고유주파수 일치로 공진이 발생되어 특정 파수에서는 방파제의 안정성이 악화 될 수 있어 이에 대한 추가적인 검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

전면에 위치한 원형케이스들과 후면에 위치한 원형케이스들 사이에 파랑이 증폭되는 증복파(Standing wave) 현상이 발생하였으며 이로 인해 케이스 저면에 작용하는 양압력 분포가 삼각형 분포가 아닌 전혀 다른 형태를 보여주었다. 일반적으로 구조물 사이의 간격이 있는 경우 좁아진 틈으로 유속이 빨라지면서 박리 현상이 생기고 후면의 복잡한 와류가 발생되어 입사 에너지가 손실되는 효과가 발생된다. 본 연구의 포텐셜이론은 이러한 점성에 의한 에너지 손실을 고려하지 못해 실제 보다 큰 피크 파력값이 발생할 수 있으며, 실제 방파제 설계에 사용되는 설계파고는 매우 높아 선형파 이론의 적용범위를 벗어날 수도 있다. 하지만 고유함수전개법은 해양구조물의 초기설계 단계에서 수치해석방법으로 많이 사용되는 선형 포텐셜이론으로 본 연구의 결과는 기존 원형케이스의 전면 또는 후면에 신규 케이스를 추가로 설치할 경우 반드시 파와 구조물간의 상호작용 영향 평가가 수행되어야 함을 보여주었다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 안전한 항만 구축 및 관리기술 개발사업인 “재해안전항만 구축 기술개발(20180323)” 과제를 통해 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Chakrabarti, S.K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structure*. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- Cho, I.H. (2004). Wave control by an array of porous dual cylindrical structures. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18, 7-14 (in Korean).
- Cho, I.H. and Kim, J. (2020). Correlation of reflection coefficient and extracted efficiency of an oscillating water column device in front of a seawall. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32, 242-251 (in Korean).
- Kagemoto, H. and Yue, D.K.P. (1986). Interactions among multiple three-dimensional bodies in water waves; An exact algebraic method. *Journal of Fluid Mechanics*, 166, 189-209.
- Kim, M.H. (1993). Interaction of waves with N vertical circular cylinders. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 119, 671-689.
- Linton, C.M. and Evans, D.V. (1990). The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 215, 549-569.
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954). Wave forces on Piles: A Diffraction Theory. Tech. No 69, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Bord.
- Maniar, H.D. and Newman, J.N. (1997). Wave diffraction by a long array of cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 339, 309-330.
- McIver, P. (1987). Mean drift forces on arrays of bodies due to incident waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 185, 469-482.
- McIver, P. (1984). Wave forces on arrays of floating bodies. *Journal of Engineering Mathematics*, 18, 273-285.
- McIver, P. and Evans, D.V. (1984). Approximation of wave forces on cylinder arrays. *Applied Ocean Research*, 6, 101-107.
- Park, M.S., Koo, W.C. and Choi, Y.R. (2010). Hydrodynamic interaction with an array of porous circular cylinders. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2, 146-154.
- Park, M.S., Jeong, Y.J. and You, Y.J. (2013). Water wave interactions with array of floating circular cylinders. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27, 51-62 (in Korean).
- Park, M.S. (2019). Characteristics of wave forces by installation of new circular caisson on the back of old circular caisson. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31, 395-402 (in Korean).
- Siddorn, P. and Eatock Taylor, R. (2008). Diffraction and independent radiation by an array of floating cylinders. *Ocean Engineering*, 35, 1289-1303.
- Spring B.H. and Monkmeyer, P.L. (1974). Interaction of plane waves with vertical cylinders. *Proceeding of the Fourteenth Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen Denmark, 107, 1828-1847.
- Williams, A.N. and Abul-Azm, A.G. (1989). Hydrodynamic interaction in floating cylinder arrays; Part II-wave radiation. *Ocean Engineering*, 16, 217-264.
- Williams, A.N. and Demirbilek, Z. (1988). Hydrodynamic interaction in floating cylinder arrays; Part I-wave scattering. *Ocean Engineering*, 15, 549-582.
- Williams, A.N. and Li, W. (2000). Water wave interaction with an array of bottom-mounted surface-piercing porous cylinders. *Ocean Engineering*, 27, 840-866.
- Williams, A.N. and Rangappa, T. (1994). Approximate hydrodynamic analysis of multi-column ocean structures. *Ocean Engineering*, 21, 519-573.
- Yilmaz, O. (1998). Hydrodynamic interactions of waves with group of truncated vertical cylinders. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 124, 272-279.

Received 27 August, 2020

Revised 22 September, 2020

Accepted 23 September, 2020