

# 기존 방파제에 투과성 이중 원형케이슨 추가설치에 따른 파랑 특성 분석 Characteristics of Wave by Additional Installation of Porous Dual Circular Caissons on the Existing 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 방파제 전면 또는 후면에 신규 투과성 이중 원형케이슨이 추가 설치될 경우 파와 구조물간의 상호작용 영향을 분석하기 위해 고유함수전개법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 투과성 이중 원형케이슨은 해수교환 방파제로 내부는 불투과성 원형실린더로 외부는 일정한 공극률을 가진 투과성 원형실린더로 제작된다. 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위해 Sankarbabu et al.의 수치 해석결과와 비교를 수행하였으며, 추가로 설치되는 투과성 이중 원형케이슨의 다양한 변수에 따른 개별 원형케이슨에 작용하는 파력 및 파쳐오름 특성을 분석하였다.

**핵심용어 :** 고유함수전개법, 투과성 이중 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 existing caissons to increase the stability of existing caisson breakwater. In this study, we use the eigenfunction expansion method to analyze the effects of wave structure interaction when new porous dual circular caissons are installed on the back or the front of existing breakwater. The porous dual circular caisson which consisting of a porous outer cylinder circumscribing an impermeable inner cylinder is one type of seawater exchanging breakwater. The comparison of numerical results between present method and Sankarbabu et al. is made, and the wave force and the wave run-up acting on each porous dual circular caisson are calculated for various parameters by considering the wave structure interaction.

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

## 1. 서 론

항내 수질환경을 개선하기 위한 목적으로 항내·외로 해수 교환이 가능한 투과성 방파제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유공방파제는 케이슨 전면과 후면에 유공벽 또는 슬릿을 설치하고 벽 사이에 유수실을 두어 입사파가 유공벽을 통과할 때 발생하는 제트류와 유수실 내부에서의 난류에 의해 입사파의 에너지를 소멸시키는 형태의 해수교환 방파제이다. 일본 항만기술연구소에서는 외부는 투과성 원형실린더로 내부는 불투과성 원형실린더로 제작하여 입사파의 에너지를 부분적으로 투과시키면서 반사파의 에너지를 줄일 수 있고, 동시에 항내·외로 해수교환이 가능한 이중 원형케이슨 방파제를 개발하여 몇 개의 항에 시공하였다(Tanimoto et al., 1992; Tanimoto and Takahashi, 1994; Ojima et al., 1994).

Wang and Ren(1994)은 내부는 불투과성 원형실린더로 외부는 일정한 공극률을 가지는 원형실린더로 구성된 1개의 투과성 이중 원형실린더에 작용하는 파랑특성을 분석하기 위해 투과성 원형실린더 벽면 전후의 압력차는 벽을 통과하는 물 입자의 속도에 선형적으로 비례한다는 Darcy 법칙을 적용하였다. Zhong and Wang(2006)은 Isaacson(1983)과 Wang and Ren(1994)의 연구를 바탕으로 1개의 투과성 이중 원형실린더에 의한 고립파(Solitary wave)의 회절문제를 분석하였다. Sankarbabu et al.(2007, 2008)과 Cho(2004)는 다수의 투과성 이중 원형실린더에 의한 파와 구조물간의 상호작용 영향을 분석하기 위해 유체영역을 1개의 외부영역과  $N$ 개의 내부영역으로 나누어 각 영역에서의 해를 독립적으로 구한 뒤 외부영역과 내부영역이 만나는 경계면에서 정합조건식을 적용하여 완전한 해를 구하는 고유함수전개법을 사용하였으며,

\*한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원(Corresponding author: 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)

이때  $N$ 개의 투과성 이중 원형실린더들 사이의 상호작용 영향을 고려하기 위해 Linton and Evans(1990)가 사용한 Bessel 함수의 덧셈정리(Addition theorem)를 적용하였다.

최근 지구온난화로 해수면이 상승하고 케이스방파제의 설계파도 상향됨에 따라 기존 케이스방파제의 활동 및 전도 등에 대한 안정성을 높이기 위해 신규 케이스를 기존 케이스 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 하지만 해수교환 방파제인 경우 이러한 설계사례에 대한 수치해석 결과 및 설계 방법이 존재하지 않아 설계자의 판단에 따라 다양하게 수행되는 문제점이 발생되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 투과성 이중 원형케이스 방파제에 추가로 설치되는 투과성 이중 원형케이스의 다양한 변수들(이중 원형케이스 배치, 설치간격 등)에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의해 개별 투과성 이중 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 투과성 이중 원형실린더로 구성된 해양구조물에 작용하는 파력 및 파치오름을 Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석 결과와 비교하였다. 일반적으로 케이스에 작용하는 파력 및 케이스 저면에 작용하는 양압력은 파치오름과 밀접한 관련이 있으므로 추가로 설치되는 투과성 이중 원형케이스의 다양한 변수들에 따른 개별 이중 원형케이스에 작용하는 파치오름 특성도 함께 분석하였다.

## 2. 수치해석 이론

Sankarbabu et al.(2007, 2008)과 Cho(2004)가 제안한 수치해석이론을 바탕으로 투과성 이중 원형케이스 방파제에 대한 파와 구조물간의 상호작용 영향을 검토하기 위해 수심이  $d$ 인 해저면 바닥에  $N$ 개의 투과성 이중 원형케이스에 대한 수치해석 모델을 Fig. 1과 같이 설정하였다. 투과성 이중 원형케이스는 2개의 원형케이스가 동심원상에 놓인 형태로 내부 원형케이스는 불투과성 재료로 반지름이  $b_j$ 이며, 외부 원형케이스는 일정한 공극률을 가진 투과성 재료로 반지름이  $a_j$ 이다.

Fig. 1과 같이 공간상에 고정된 좌표계  $(x, y, z)$ 와  $N$ 개의 투과성 이중 원형케이스의 중심에 고정된 좌표계  $(r_j, \theta, z)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ 를 도입한다.  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스의 중심 좌표는  $(x_j, y_j)$ 이며,  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 중심에 대한  $l$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물 중심의 상대 위치는  $(R_{jl}, \alpha_{jl})$ 로 표현할 수 있다.

입사파는 규칙파로 진폭은  $H/2$ 이며, 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다면 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \text{Re} \{ \phi(r, \theta, z) e^{-i\omega t} \} \quad (1)$$

또한, 일정한 수심에 투과성 이중 원형케이스 구조물이 바다

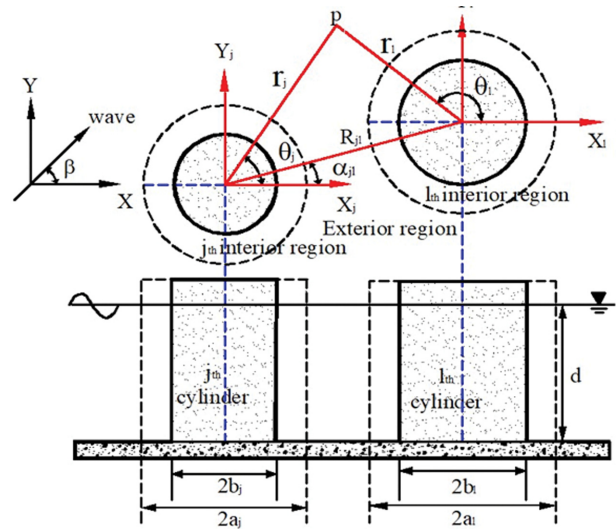


Fig. 1. Definition sketch of numerical model for a porous dual circular caisson breakwater.

으로부터 수면까지 놓여있기 때문에 3차원 속도포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi(r, \theta, z) = -\frac{igH}{\omega^2} \eta(r, \theta) f(z) \quad (2)$$

여기서,  $f(z) = \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd}$ 이며,  $k$ 는 파수(Wavenumber)로 분산식  $\omega^2 = gk \tanh kd$ 을 만족한다.

Fig. 1과 같이 유체영역을 외부 투과성 원형케이스의 바깥 영역인 외부영역과 외부 투과성 원형케이스와 내부 불투과성 원형케이스로 둘러싸인  $N$ 개의 내부영역으로 나눈다.

입사파가  $x$ 축의 양의 방향으로  $\beta$ 의 각도를 이루면서 들어올 때  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물의 중심에 고정된 좌표계에서의 입사파형은 아래와 같다.

$$\eta_{in} = I_j \sum_{n=-\infty}^{\infty} (i)^n J_n(kr_j) e^{in(\theta_j - \beta)} \quad (3)$$

여기서  $J_n$ 은 제 1종 Bessel함수이고  $I_j (= e^{ik(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta)})$ 는 공간상에 고정된 좌표계의 원점과  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물의 중심간의 위상차이를 나타내는 함수이다.  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물로부터 발생하는 산란파는 2차원 Helmholtz 방정식과 무한원방에서의 방사조건식(Radiation condition)을 만족해야 하며 주어진 경계치 문제의 해는 아래와 같다.

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

여기서  $H_n^j$ 는 제1종 Hankel 함수이다.  $Z_n^j = J_n'(ka_j)/H_n'(ka_j)$ 로 정의되며, 뛯첨자  $n$ 은 함수의 미분을 뜻한다. 외부영역에서의 파형식은 입사파와  $N$ 개의 투과성 이중 원형케이스 구조물들

에 의한 산란파의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta^{(0)} = \eta_{in} + \sum_{j=1}^N \eta_j^i = I_j \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} (i)^n J_n(kr_j) e^{in(\theta_j - \beta)} + \sum_{j=1}^N \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} e^{in\theta_j} A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) \quad (5)$$

$j$ 번째 투과성 이중 원형케이스는 구조물 주위의 파형은 입사파에 의한 파형과  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스는 구조물에 의하여 산란된 파형 그리고 주위의 나머지 투과성 이중 원형케이스는 구조물( $l = 1, 2, \dots, N, l \neq j$ )에 의하여 산란된 파형들의 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 외부영역에서의 파형식은 다음과 같이 쓸 수 있다(Cho, 2004).

$$\eta^{(0)}(r_j, \theta_j) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left\{ I_j(i)^n e^{-in\beta} J_n(kr_j) + A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{lj}) e^{i(m-n)\alpha_{lj}} J_n(kr_j) \right\} e^{in\theta_j} \quad (6)$$

윗식은  $r_j < R_{lj}$ 일 때 성립하는 식이다. 식(6)에서 우변의 첫 번째 항은 순수한 입사파를 뜻하며, 두 번째 항은  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스는 구조물 자체에 의한 산란파를 나타내고, 세 번째 항은  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스는 구조물을 제외한 인접한 투과성 이중 원형케이스는 구조물들에 의해 산란된 파가  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스는 구조물에 미치는 영향을 나타낸다.

$N$ 개의 내부영역에서의 파형식은 2차원 Helmholtz 방정식을 만족하고 불투과성 내부 원형케이스는 구조물 벽면( $r_j = b_j$ )에서  $\partial\eta^{(0)}/\partial r = 0$ 이므로 내부영역의 파형식은 다음과 같다.

$$\eta^{(i)}(r_j, \theta_j) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} B_n^j \left\{ J_n(kr_j) - \frac{J_n'(kb_j)}{Y_n'(kb_j)} Y_n(kr_j) \right\} e^{in\theta_j} \quad (7)$$

식(6)과 (7)에 주어진 미지수  $A_n^j, B_n^j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ )는 외부영역과 내부영역이 만나는 경계면에서 적용될 정합조건식으로부터 구해진다. 외부영역과 내부영역이 만나는 투과성 경계면에서 법선 방향의 속도가 서로 같다는 정합조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial\eta^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial\eta^{(i)}}{\partial r} \text{ on } r_j = a_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

식(6), (7)을 윗식에 대입하여 정리하며 아래와 같은 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$I_j(i)^n e^{-in\beta} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{lj}) e^{i(m-n)\alpha_{lj}} \quad (9)$$

$$= - \frac{S_n}{Y_n'(kb_j) J_n'(ka_j)} B_n^j - A_n^j$$

여기서  $S_n = J_n'(kb_j) Y_n'(ka_j) - J_n'(ka_j) Y_n'(kb_j)$ 이다.

투과성 경계면인 외부 원형케이스는 구조물에서의 유체입자의 법선방향 속도는 투과성 경계면 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙으로부터 나머지 경계조건식을 얻을 수 있다(Isaacson et al., 1998; Yu, 1995).

$$\frac{\partial\eta^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial\eta^{(i)}}{\partial r} = ikG(\eta^{(i)} - \eta^{(0)}) \quad (10)$$

on  $r_j = a_j \quad j = 1, 2, \dots, N$

여기서  $G(= G_r + iG_i)$ 는 공극률 계수(Porous parameter)로 복소수 값을 가지며 실수부  $G_r$ 는 박리에 의한 에너지 손실효과를 허수부  $iG_i$ 는 속도와 압력사이의 위상차와 밀접한 관련이 있는 유체의 관성효과를 나타낸다. Sankarbabu et al.(2008)와 Cho(2004)는 실수부가 허수부보다 크다고 가정하여 실수 값의  $G$ 를 적용하였으므로 본 연구에서도 동일하게 사용하였다. 앞서 유도한 외부영역과 내부영역의 해를 식(10)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$I_j(i)^n e^{-in\beta} J_n(ka_j) + A_n^j Z_n^j H_n(ka_j) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{lj}) e^{i(m-n)\alpha_{lj}} J_n(ka_j) = B_n^j \left\{ J_n(ka_j) - \frac{J_n'(kb_j)}{Y_n'(kb_j)} Y_n(ka_j) \right\} + \frac{i}{G} \left\{ J_n'(ka_j) - \frac{J_n'(kb_j)}{Y_n'(kb_j)} Y_n'(ka_j) \right\} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

식(9)와 (11)에서 미지수  $B_n^j$ 를 소거하면 미지수  $A_n^j$ 에 대한 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$A_n^j Z_n^j \left\{ \frac{H_n'(ka_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k b_j} H_n'(kb_j)}{J_n'(ka_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k b_j} J_n'(kb_j)} \right\} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{lj}) e^{i(m-n)\alpha_{lj}} = - I_j(i)^n e^{-in\beta} \quad (12)$$

식(12)에 주어진 대수방정식을 풀어  $A_n^j$ 을 구하면 내부영역에서의 미지수  $B_n^j$ 는 식(9)와 (12)으로부터 아래와 같이 주어진다.

$$B_n^j = \frac{Z_n^j \frac{2G}{\pi k b_j} Y_n'(kb_j)}{J_n'(ka_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k b_j} J_n'(kb_j)} A_n^j \quad (13)$$

식(12)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수  $m$ 을  $-M$ 부터  $M$ 까지  $2M+1$ 개를 취한다. 따라서 대수방정식의 미지수의 개수는  $N \times (2M+1)$ 이다. 식(12)

을 풀어 미지수  $A_m^j (j=1, 2, \dots, N, m=-M, \dots, M)$ 을 수치적으로 구할 수 있다.

투과성 이중 원형케이스에 작용하는 파력은 구해진 미지수를 각 속도 포텐셜에 대입하고 원형케이스 표면에 대하여 적분하면  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물의 외부 투과성 원형케이스에 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$F_o^j = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} \frac{J_1'(ka_j)S_1}{J_1'(ka_j)S_1 + \frac{2iG}{\pi ka_j} J_1'(kb_j)} \left( A_{-1}^j \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} A_1^j \right) \times \left( \frac{4\rho g A \tanh kd}{k^2 H_1'(ka_j)} \right) \quad (14)$$

식(14)에서 상단은  $x$  방향의 파력을, 하단은  $y$  방향의 파력을 나타낸다.  $j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물의 내부 불투과성 원형케이스에 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$F_I^j = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \left( B_{-1}^j \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} B_1^j \right) \times \left( \frac{4\rho g A \tanh kd}{k^2 Y_n'(kb_j)} \right) \quad (15)$$

$j$ 번째 투과성 이중 원형케이스 구조물의 외부 투과성 원형케이스 벽면에서의 파쳐오름(Run-up)과 내부 불투과성 원형케이스 벽면에서의 파쳐오름은 아래와 같다.

$$\eta^{(o)}(a_j, \theta_j) = \sum_{n=-M}^{n=M} A_n^j Z_n^j \left[ H_n'(ka_j)S_n + \frac{2iG}{\pi ka_j} H_n'(kb_j) \right] e^{in\theta_j} \quad (16)$$

$$\eta^{(I)}(b_j, \theta_j) = \sum_{n=-M}^{n=M} \frac{2B_n^j e^{in\theta_j}}{\pi kb_j Y_n'(kb_j)}$$

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서 사용된 수치해석 방법의 정확도와 신뢰성을 확보하고자 Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석결과와 비교를 수행하였다. Sankarbabu et al.은 투과성 이중 원형실린더에 작용하는 파력 및 파쳐오름(Wave run-up)의 정확도를 수치해석

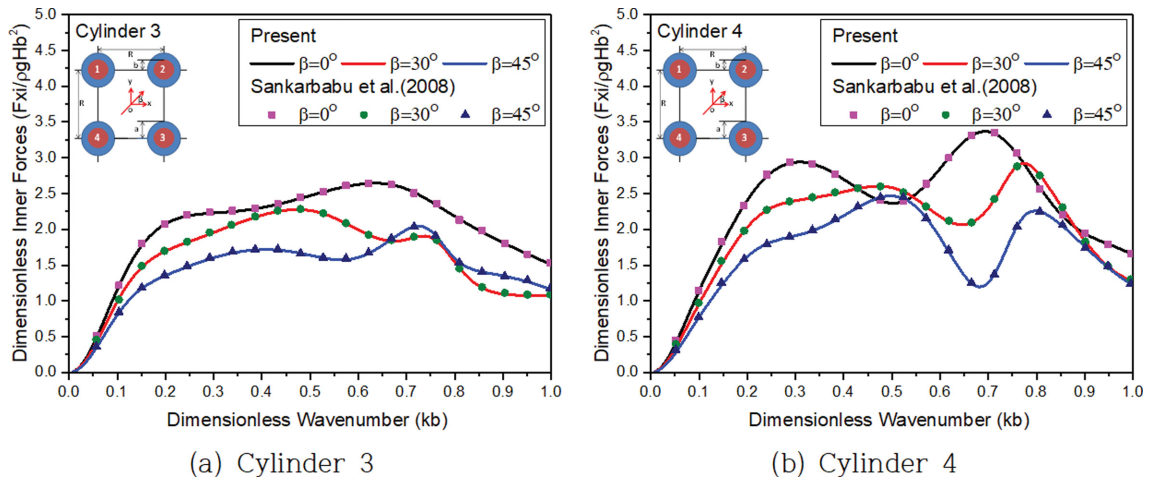


Fig. 2. Comparison of dimensionless wave force in x-direction on the individual inner cylinders for various incident wave angles with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$ ,  $b/a = 0.5$  and  $G = 1.0$ .

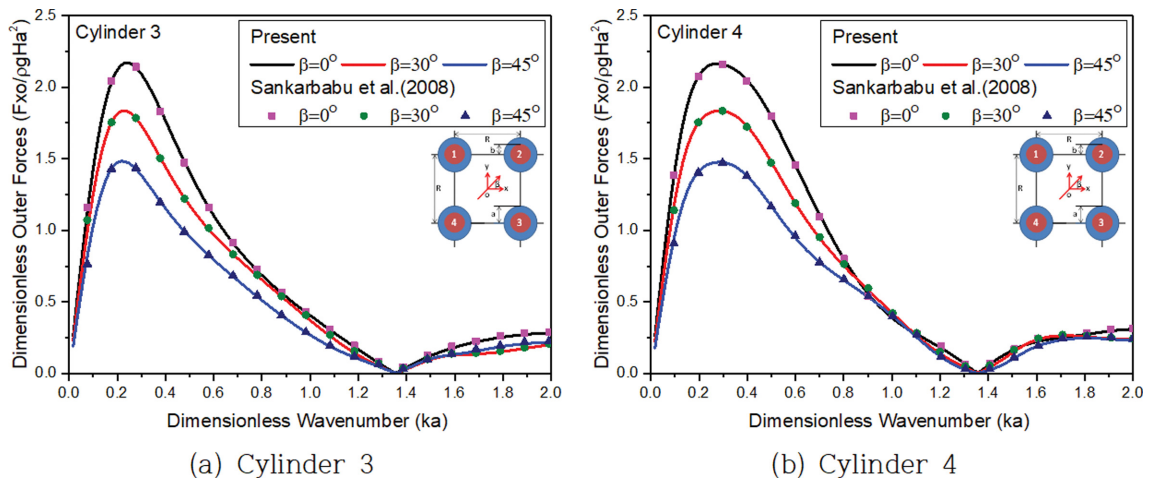


Fig. 3. Comparison of dimensionless wave force in x-direction on the individual outer cylinders for various incident wave angles with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$ ,  $b/a = 0.5$  and  $G = 1.0$ .



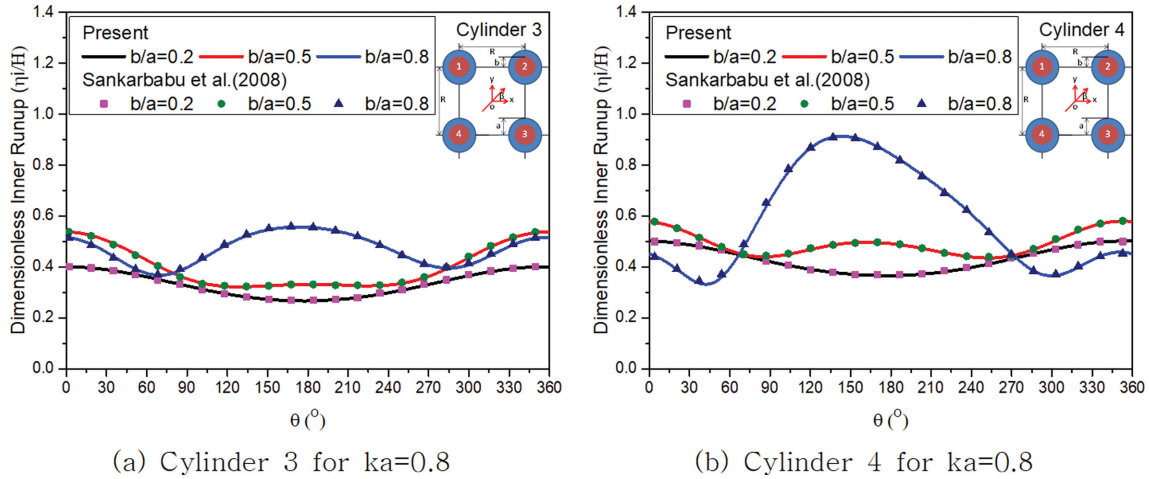


Fig. 4. Comparison of dimensionless wave run-up on the individual inner cylinders for various  $b/a$  ratios with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$ ,  $\beta = 0.0^\circ$  and  $G = 1.0$ .

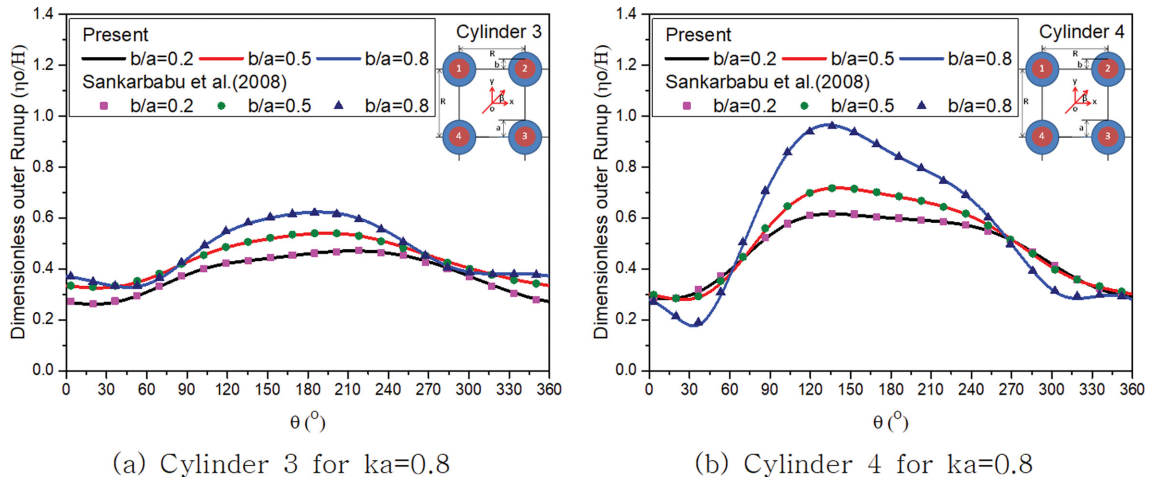


Fig. 5. Comparison of dimensionless wave run-up on the individual outer cylinders for various  $b/a$  ratios with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$ ,  $\beta = 0.0^\circ$  and  $G = 1.0$ .

결과(Wang and Ren, 1994) 및 수치실험결과(Vijayalakshmi, 2005)와 비교를 통해 입증하였고 다양한 변수조건(외부 투과성 원형실린더의 투과율( $G$ ), 내부 불투과성 원형실린더와 외부 투과성 원형실린더의 반지름비( $b/a$ ), 투과성 이중 원형실린더간의 간격비( $R/a$ ))에 따른 투과성 이중 원형실린더에 작용하는 파력 및 파쳐오름을 분석하였다. Figs. 2와 3은 4개의 투과성 이중 원형실린더로 구성된 해양구조물인 경우 입사파의 각도변화에 따른 개별 투과성 이중 원형실린더에 작용하는 파력을 나타내고 있으며, Figs. 4와 5는 외부 투과성 원형실린더와 내부 불투과성 원형실린더간의 반지름 크기변화에 따른 파쳐오름을 보여주고 있다. 수치해석에서 수심( $d$ )은 외부 투과성 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  $0.0^\circ$ ,  $30.0^\circ$ ,  $45.0^\circ$  방향으로 입사한다고 설정하였고 고유모드의 개수( $M$ )는 10으로 고정하였다. Figs. 2와 3에서  $x$ 축은 파수에 원형실린더의 반지름(내부:

$b$ , 외부:  $a$ )을 곱한 값을 나타내고 있으며  $y$ 축은 내부 원형실린더인 경우  $\rho g H b^2$ 으로 외부 원형실린더인 경우  $\rho g H a^2$ 으로 나눈 무차원화된 파력을 나타낸다. 또한 Figs. 4와 5의  $x$ 축은 Fig. 1의 각 원형케이스의 중심 좌표  $(x_j, y_j)$ 에서 반 시계 방향으로 측정된  $\theta_j$  각도를 나타내고 있으며  $y$ 축은 입사하는 파랑의 파고( $H$ )로 나눈 무차원화된 파쳐오름을 나타내고 있다. 그림에서 파와 구조물의 상호작용 영향으로 개별 투과성 이

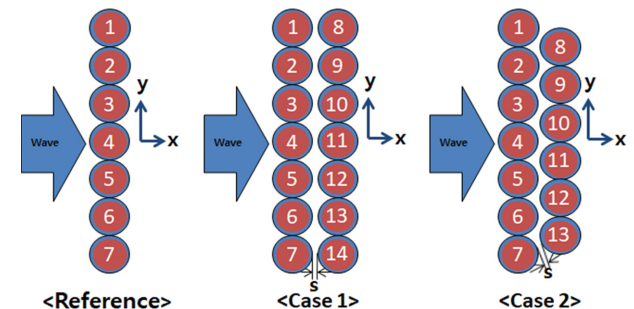


Fig. 6. Definition sketches for numerical cases.

중 원형실린더에 작용하는 파력 및 파처오름은 입사하는 파랑의 각도와 파수(규칙파)에 따라 다양한 패턴을 나타내었으며, 본 연구의 수치해석결과는 Sankarbabu et al.(2008)의 해석해와 좋은 일치를 보였다.

투과성 이중 원형실린더를 일렬로 배열하여 만든 구조물은 입사파의 에너지를 부분적으로 투과시키면서 반사파의 에너지를 줄일 수 있는 해수교환 방파제의 한 종류로 보고 이에 대한 파랑제어 효과를 Cho(2004)와 Sankarbabu et al.(2008)은 분석하였다. 하지만 일렬로 배열된 기존 투과성 이중 원형케이스 방파제의 안정성을 높이기 위해 신규 투과성 이중

원형케이스를 기존 방파제 전면 또는 후면에 추가로 설치된 경우에 대한 수치해석 결과는 현재까지 존재하지 않는다. 본 연구에서는 기존 투과성 이중 원형케이스 방파제에 추가로 설치되는 투과성 이중 원형케이스의 다양한 변수들(투과성 이중 원형케이스 배치, 설치간격)에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향을 엄밀하게 검토하기 위해 Fig. 6과 같이 해석케이스를 설정하였다. 수치해석에서 기존 투과성 이중 원형케이스 7개로 구성된 방파제를 기준케이스(Reference)로 설정하였으며 Case 1과 Case 2에서는 기존 투과성 이중 원형케이스와 신규로 설치되는 투과성 이중 원형케이스의 설치간

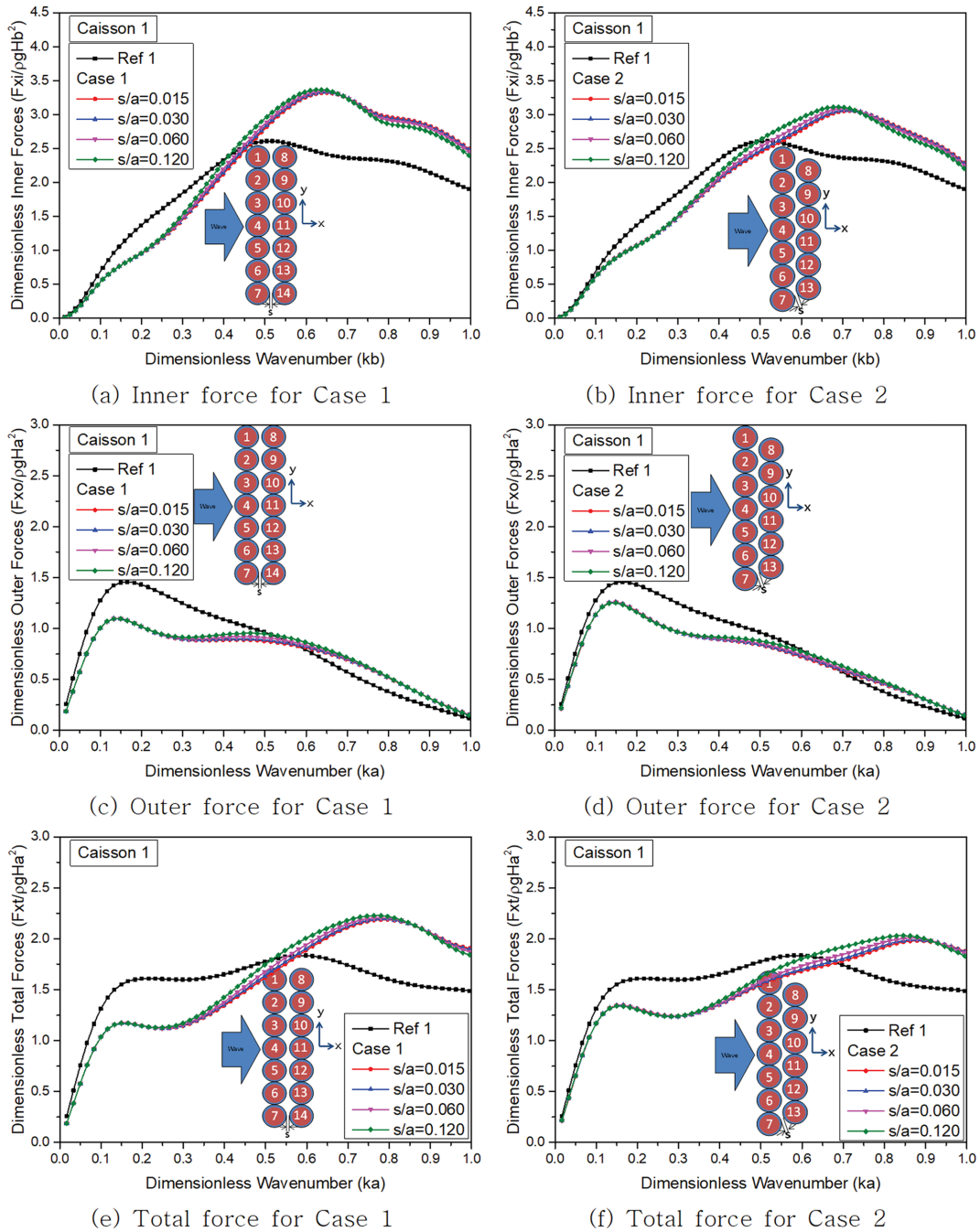
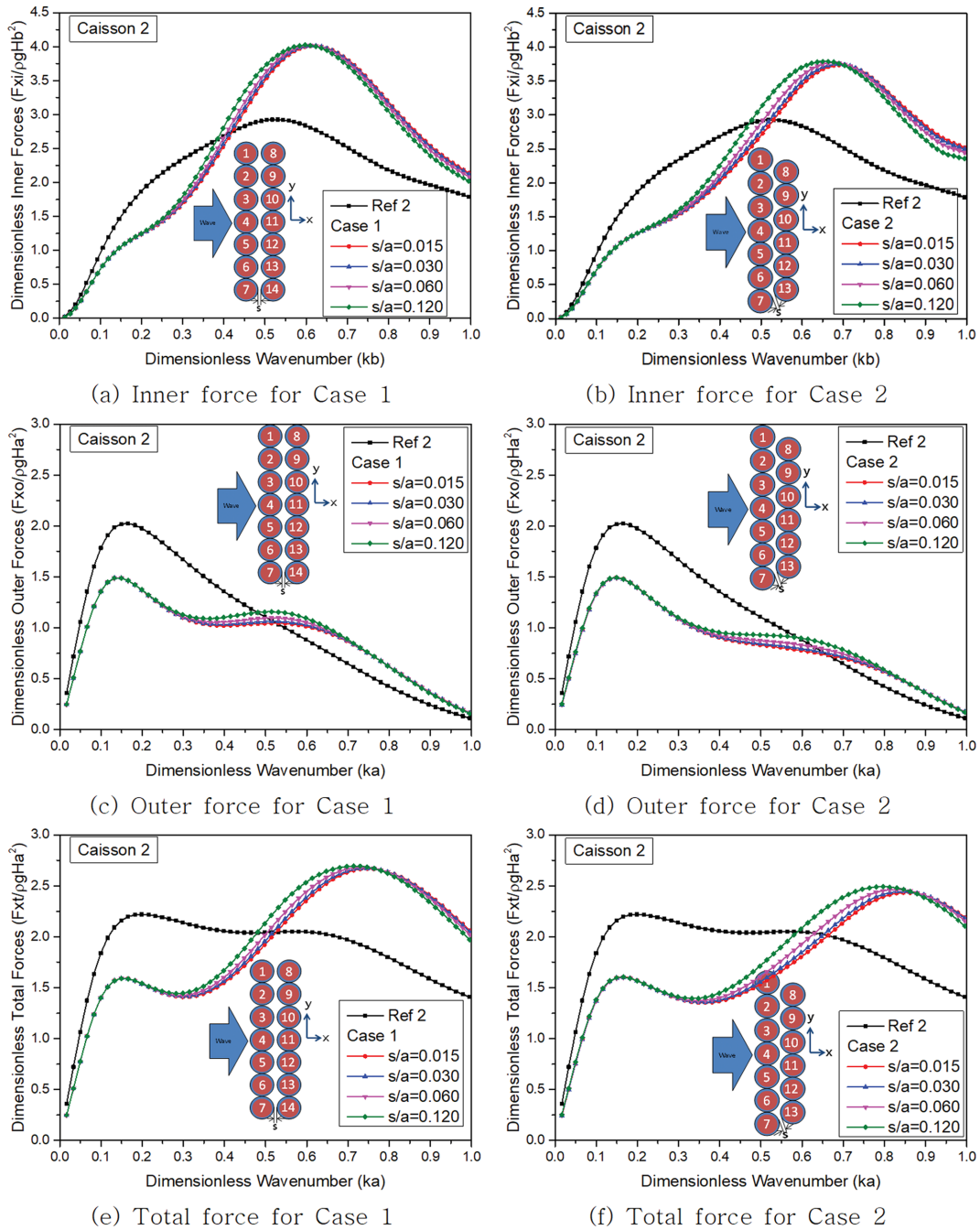


Fig. 7. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 1 with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

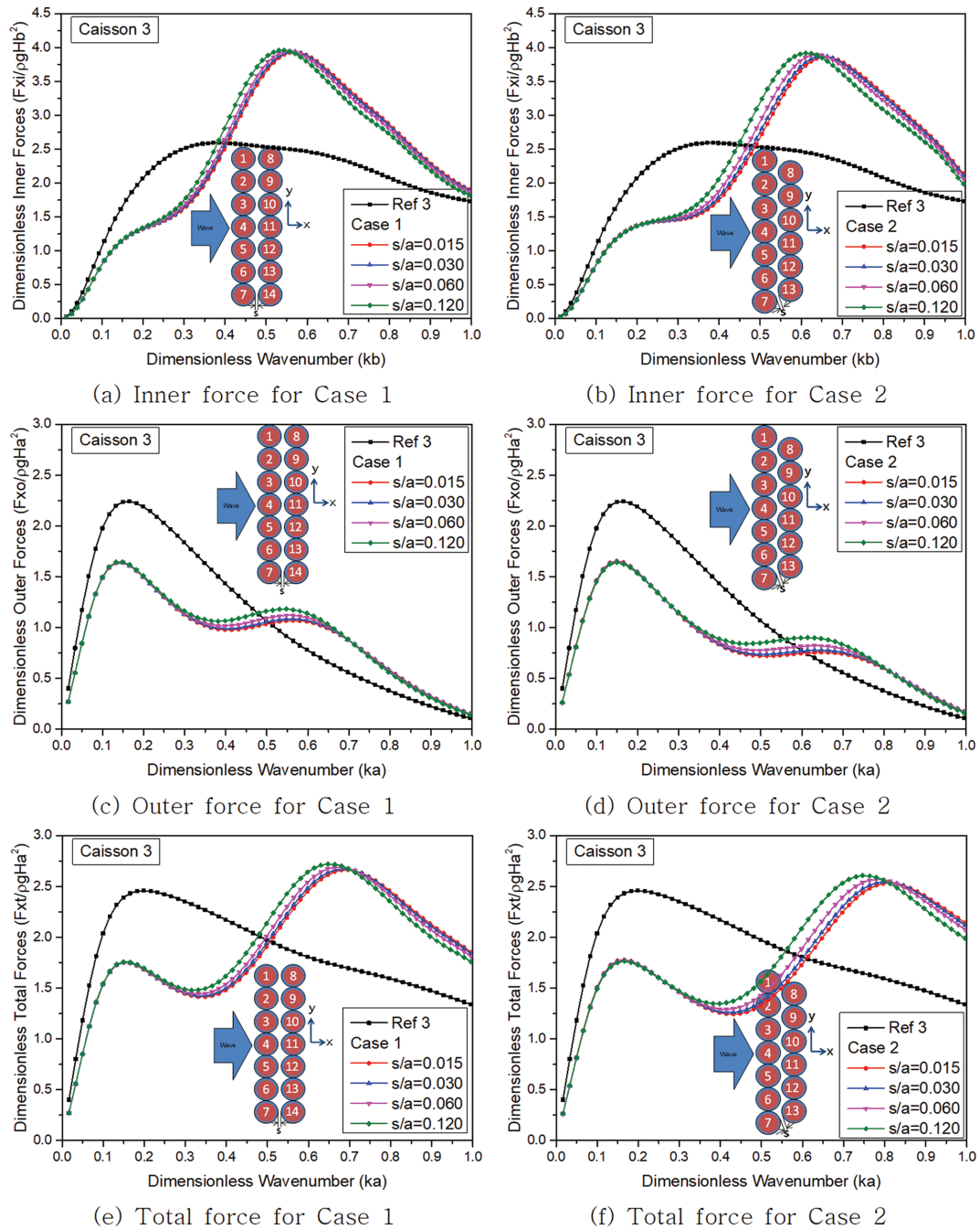
격 비( $s/a$ )에 따른 상호작용 영향을 분석하기 위해 총 4가지 ( $s/a = 0.015, 0.03, 0.06, 0.12$ )로 구분하였다. 모든 수치해석 케이스에서 수심은 원형케이슨의 반경( $a = 10$  m)을 기준으로  $d/a$  비가 2이고 기존의 불투과성 증력식 케이슨과 유사하게 활동 및 전도에 대한 안정성을 확보하고자 내부 불투과성 원형실린더와 외부 투과성 원형실린더의 반지름비( $b/a$ )는 0.8로 설정하였다. 또한 Cho(2003)가 수행한 수리모형실험결과 10 개의 투과성 원형실린더(공극율 = 0.093, 투과율( $G$ ) = 0.698)로 구성된 방파제인 경우 전면에서의 파랑 진폭비는 0.7 이하이고 후면에서의 파랑 진폭비는 대략 0.2로 나타났다. 이

값을 반사율과 투과율로 환산하면 반사율은 0.35 이하이고 투과율은 0.1로 해수교환 방파제로 우수한 소파효율을 보인다고 설명하고 있어 본 연구에서도 외부 투과성 원형실린더의 투과율( $G$ )은 0.698로 설정하였다.

방파제인 경우에는 각각의 투과성 이중 원형케이슨이 독립 거동을 하기 때문에 개별 투과성 이중 원형케이슨에 작용하는 파력특성 평가는 매우 중요하다. 기존 투과성 이중 원형케이슨과 신규 투과성 이중 원형케이슨간의 설치간격 비에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의한 개별 케이슨에 작용하는 파력특성을 분석하기 위해 Figs. 7~10은 입사파랑 전



**Fig. 8.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 2 with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.



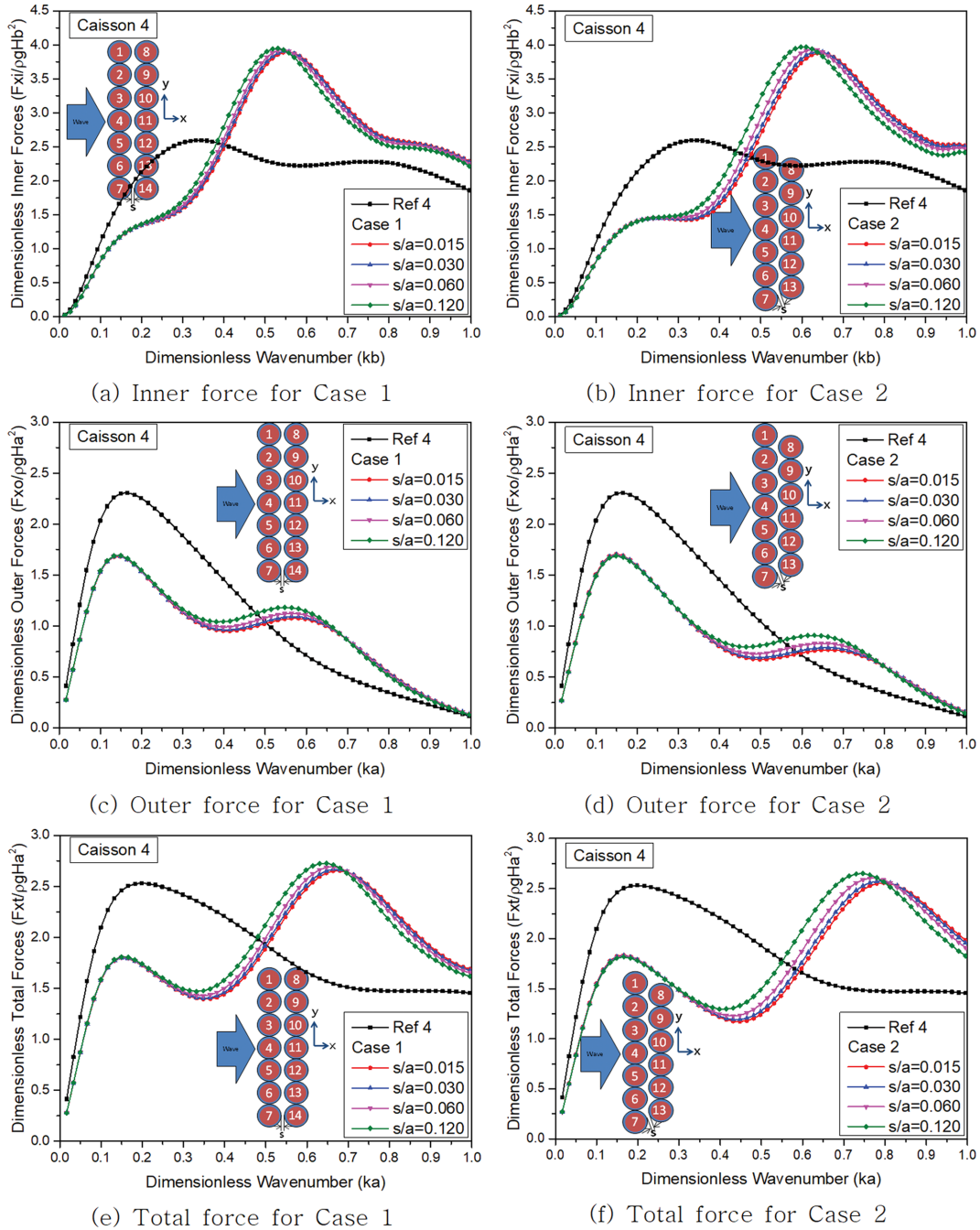
**Fig. 9.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 3 with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

면에 위치한 투과성 이중 원형케이스들에 작용하는 파력을 나타내었으며 Figs. 11~14는 후면에 위치한 투과성 이중 원형케이스들에 작용하는 파력을 나타내었다. 개별 투과성 이중 원형케이스에 작용하는 파력특성을 명확히 파악하기 위해 수치해석에서 입사파의 입사각은  $x$ 축과 평행하게 입사하는  $0^\circ$ 에 대해서만 고려하였으며 중심에 위치한 투과성 이중 원형케이스를 기준으로 상부측와 하부측에 위치한 개별 투과성 이중 원형케이스에 작용하는 파력은 동일하므로 본 연구에서는 하부측에 위치한 이중 원형케이스들에 작용하는 파력은 나타내지 않았다. 또한 입사파의 입사각이  $0^\circ$ 인 경우  $x$ 축 방향

의 파력이 구조물 안정성 평가에 주요외력으로 작용하므로 본 연구에서는  $x$ 축 방향으로 작용하는 파력만을 비교 및 검토하였다.

Case 1과 Case 2인 경우 각 개별 케이스에 작용하는 파력 특성은 매우 유사한 형태를 보이고 있으며 외측에 위치한 투과성 이중 원형케이스들(1번, 8번)에 작용하는 파력보다는 중앙에 위치한 투과성 이중 원형케이스들(4번, 10번, 11번)에 작용하는 파력이 높게 나타났다. 약 0.55 이하인 파수( $ka$ )영역에서 전면에 위치한 투과성 이중 원형케이스들(1~4번)에 작용하는 파력은 기준케이스의 파력보다 낮게 나타나고 있으며



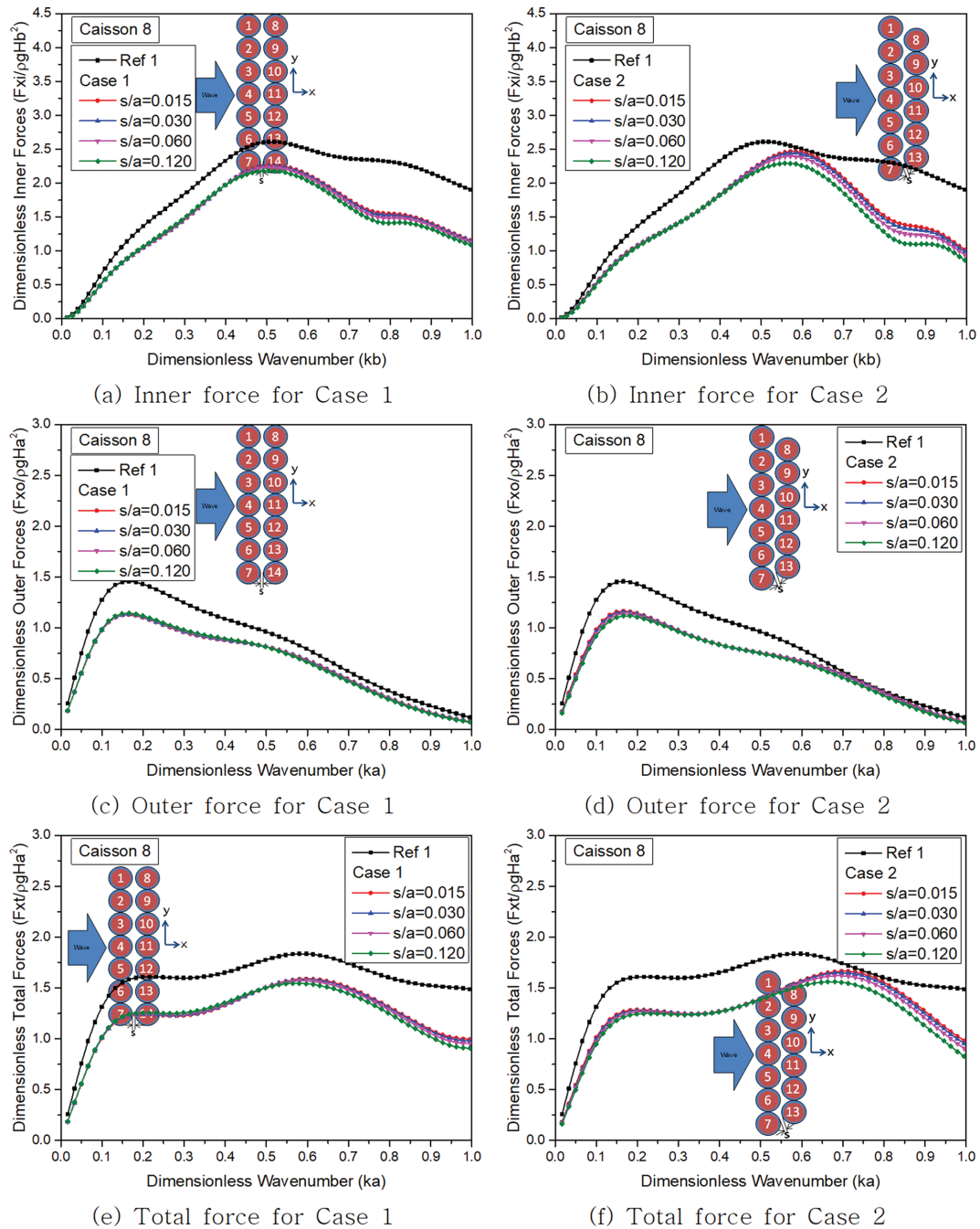


**Fig. 10.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 4 with  $d/a = 2$ ,  $b/a = 0.8$ ,  $G = 0.698$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

파수 약 0.3 이하까지는 신규 및 기존 투과성 이중 원형케이슨의 설치간격 비( $s/a$ ) 변화에 따라 차이가 발생되지 않았으나 이후부터는 차이가 발생되기 시작하였다. 기준케이스인 경우 내부와 외부에 작용하는 파력을 합한 전체파력이 파수 약 0.2 부근에서 최대값을 가지고 이후 파수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 Case 1인 경우 파수 약 0.15 부근과 0.65 부근에서 피크값이 나타났으며 Case 2인 경우에는 파수 약 0.15 부근과 0.75 부근에서 피크값이 나타났다. 특이한 것은 Case 1과 Case 2 모두 첫 번째 피크값 보다는 두 번째 피크값이 크며 파력이 가장 높게 나타난 4번 케이

슨의 최대 파력값을 기준케이스와 비교하면 Case 1에서는 약 7.7% 높고 Case 2에서는 약 4.6% 높은 값을 보였다. 일반적으로 태풍 등의 극한 파랑조건이 장파인 것을 감안할 때 신규 투과성 이중 원형케이슨을 추가로 설치한 Case 1과 Case 2인 경우가 극한 파랑조건(장파)에 대해서는 구조물의 안정성을 향상시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 후면에 위치한 투과성 이중 원형케이슨인 경우 Case 1과 Case 2의 두 번째 전체 파력 피크값이 발생하는 파수범위에서 각 케이스별 중앙에 위치한 케이스는 11번(Case 1)과 케이스 10번(Case 2)의 파력이 기준케이스의 전체파력보다 높게 나타나고 있으나 그



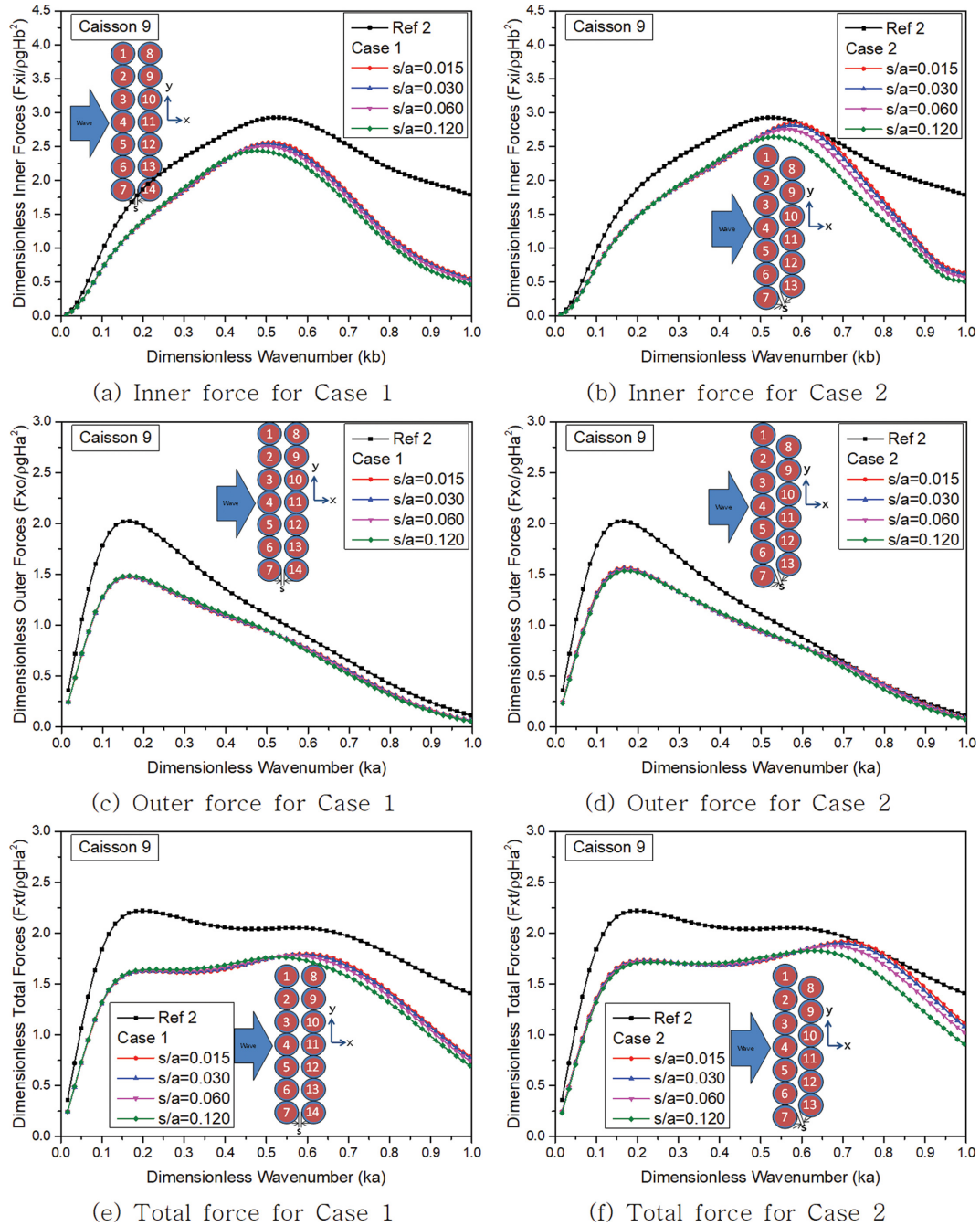


**Fig. 11.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 8 with  $d/a = 2$ ,  $b/a = 0.8$ ,  $G = 0.698$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

외 케이스들은 기준케이스보다 낮은 파력값을 보이고 있다. 특이한 점은 파수 약 0.15에서 0.6 부근 사이에 외파에 위치한 케이스에 작용하는 전체파력은 파수의 변화에 따라 파력분포 특성에 변화가 생기지만 중앙에 위치한 케이스는 파력분포의 변화가 거의 없다는 것이다. 또한, Case 1과 Case 2 모두 파수 약 0.6 이상인 단파지역에서만 신규 및 기존 투과성 이중 원형케이스간의 설치간격 비( $s/a$ ) 변화에 따라 파력분포의 변화가 발생되지만 0.6 이하의 장파지역에서는 변화가 발생되지 않았다. 따라서 장파의 영향이 크게 발생하는 지역에서는 1열 배열의 투과성 이중 원형케이스들을 설치하

는 것보다는 2열 배열의 투과성 이중 원형케이스를 설치하는 것이 방파제의 안정성을 향상시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다.

본 연구에서는 Case 1과 Case 2인 경우 입사하는 파랑에 의해 최대 전체파력이 발생하는 파수에 대해 투과성 이중 원형케이스 4번, 10번, 11번에 작용하는 파쳐오름(Wave run-up)을 Figs. 15와 16에 나타내었다. 기준케이스인 경우 내부 케이스에 작용하는 파쳐오름은 입사파 방향 정면에 위치한 180도에서 최대값을 나타내고 60도 부근까지 서서히 감소하여 이후 파쳐오름의 변화가 미소하게 발생하였으며 외부 케



**Fig. 12.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 9 with  $d/a = 2$ ,  $b/a = 0.8$ ,  $G = 0.698$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

이슨에 작용하는 파치오름은 125도 부근에서 최대값을 가지고 60도 부근까지 급격히 감소하다 이후 감소폭이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이는 항만 및 어항 설계기준-해설에서 제시하는 케이슨 저면에 작용하는 양압력이 외해측 값이 크고 내해측 값은 0인 삼각형 분포와 유사한 것을 확인할 수 있다. 하지만 Case 1과 Case 2인 경우 내부 및 외부 케이슨에 작용하는 파치오름은 입사파의 정면인 180도에서 피크값을 나타내고 90도까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있으며 특이한 것은 내부 케이슨에 작용하는 파치오름은 0도에서 최대값이 발생하였다. 그리고 Case 1보다는 Case

2에서 전면에 위치한 투과성 이중 원형케이슨에 작용하는 파치오름이 높게 나타났으며 케이슨간의 설치간격 비( $s/a$ )가 좁을수록 입사파의 정면(180도)에서 낮은값을 가지고 반대로 케이슨의 뒷면(0도)에서는 높은값을 나타내었다. 따라서 2열로 배열된 투과성 이중 원형케이슨에 작용하는 양압력은 항만 및 어항 설계기준-해설에서 제시하는 삼각형 분포를 적용하는데 한계가 있는 것을 알 수 있다. 후면에 위치한 투과성 이중 원형케이슨들(10번, 11번)에 작용하는 파치오름은 기준케이슨과 유사한 패턴이 나타났으며 케이슨간의 설치간격 비가 좁을수록 높은 값을 나타내었다.

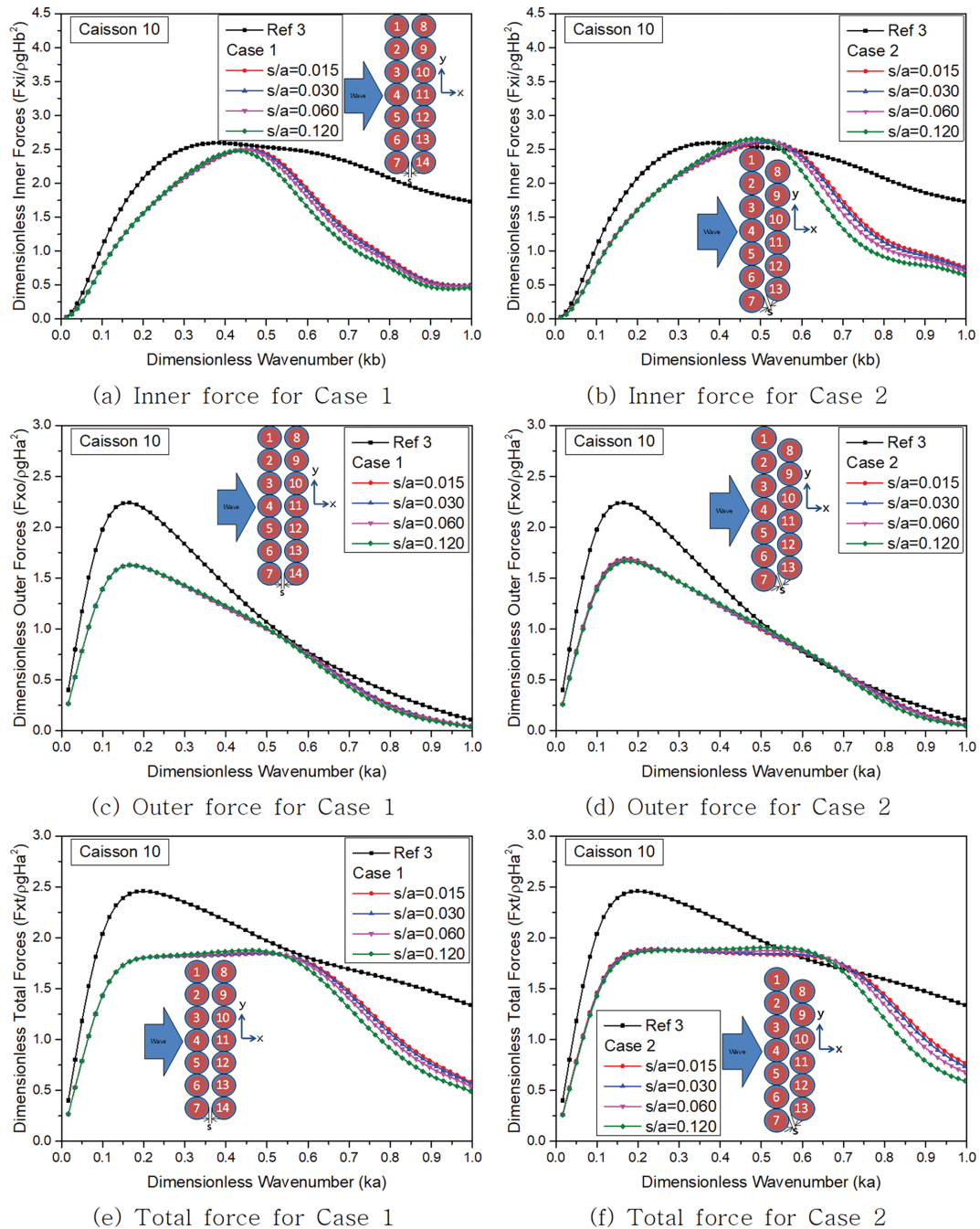
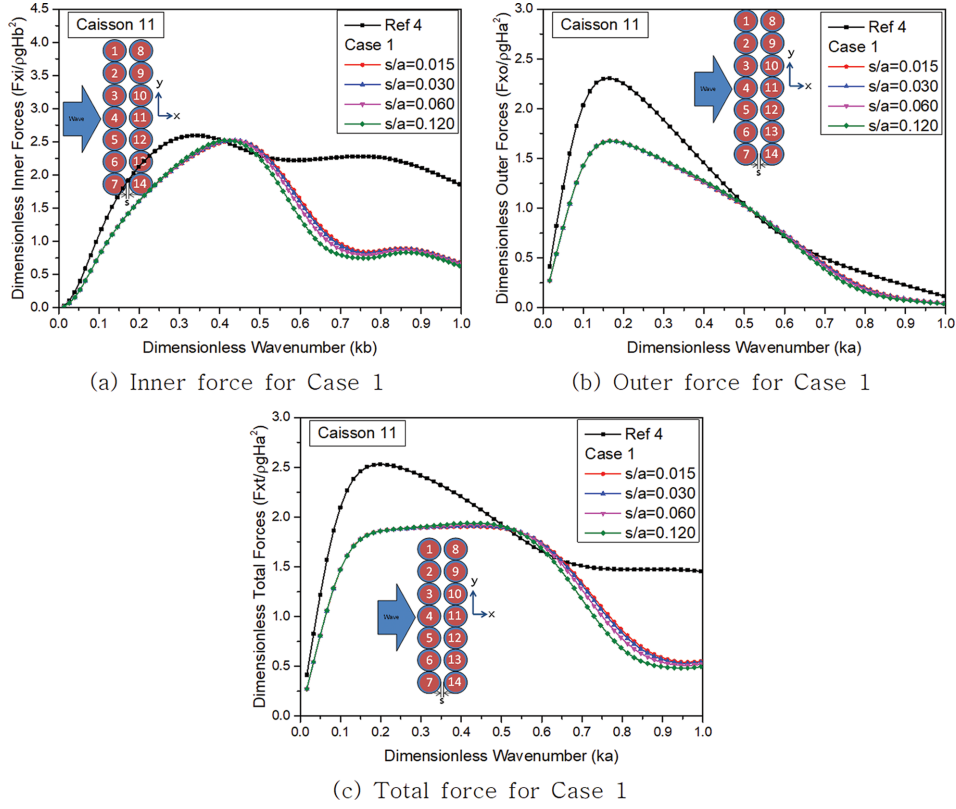


Fig. 13. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 10 with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.

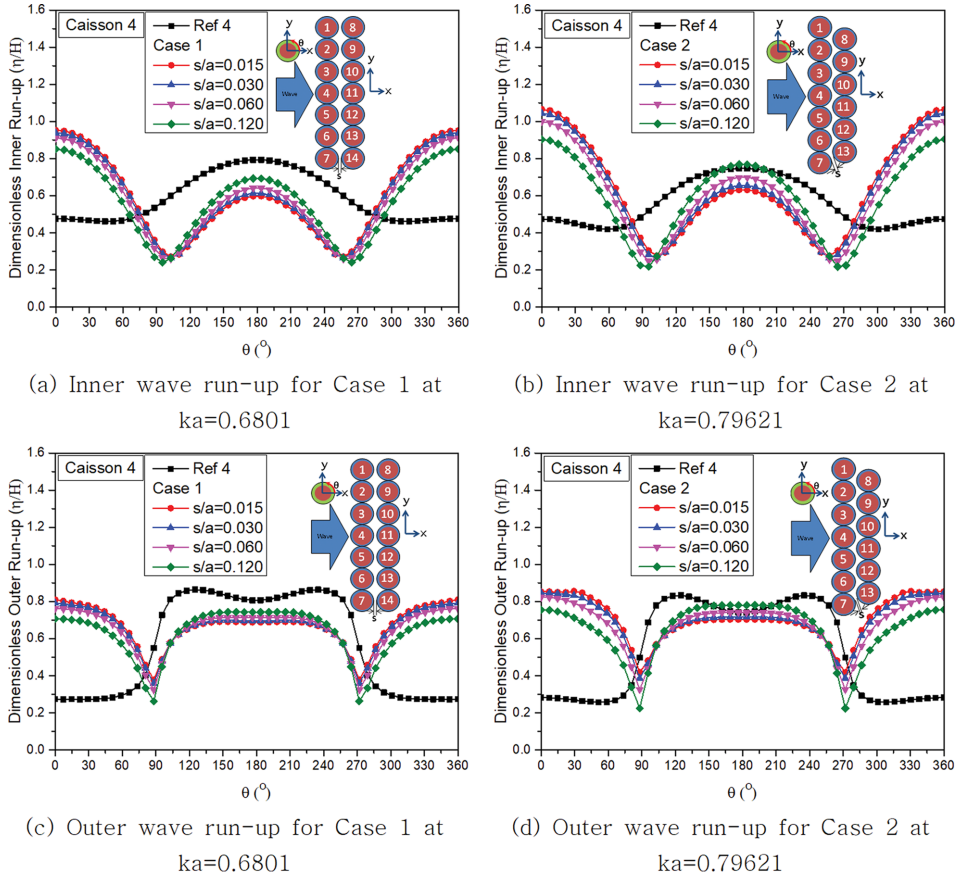
#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존 투과성 이중 원형케이스의 안정성을 높이기 위해 신규 투과성 이중 원형케이스를 기존 케이스 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 경우 신규 케이스 추가 설치에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의해 각 개별 투과성 이중 원형케이스에 작용하는 파력 및 파처오름 특성을 분석하였다. 사용된 3차원 선형 포텐셜 이론을 기초로 한 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)의 높은 정확성과 신뢰성은 Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석 결과

와의 비교를 통해 검증되었다. 1열 배열의 기준케이스인 경우 장파지역에서 최대 파력값이 발생하고 입사파랑이 단파일수록 파력값이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 2열 배열의 Case 1과 Case 2인 경우 장파와 단파지역에서 한번씩 피크 파력값이 발생되었으며 장파보다는 단파에서 최대 파력값을 가지는 특이한 형상을 보였다. 일반적으로 태풍 등의 극한 파랑조건이 장파인 것을 감안할 때 신규 투과성 이중 원형케이스를 추가로 설치하는 것이 극한 파랑조건(장파)에 대해서는 방파제의 안정성을 향상시킬 수 있다. 후면에 위치한 투과성 이중 원형케이스에 작용하는 파력은 중심부에 위치한 케이스

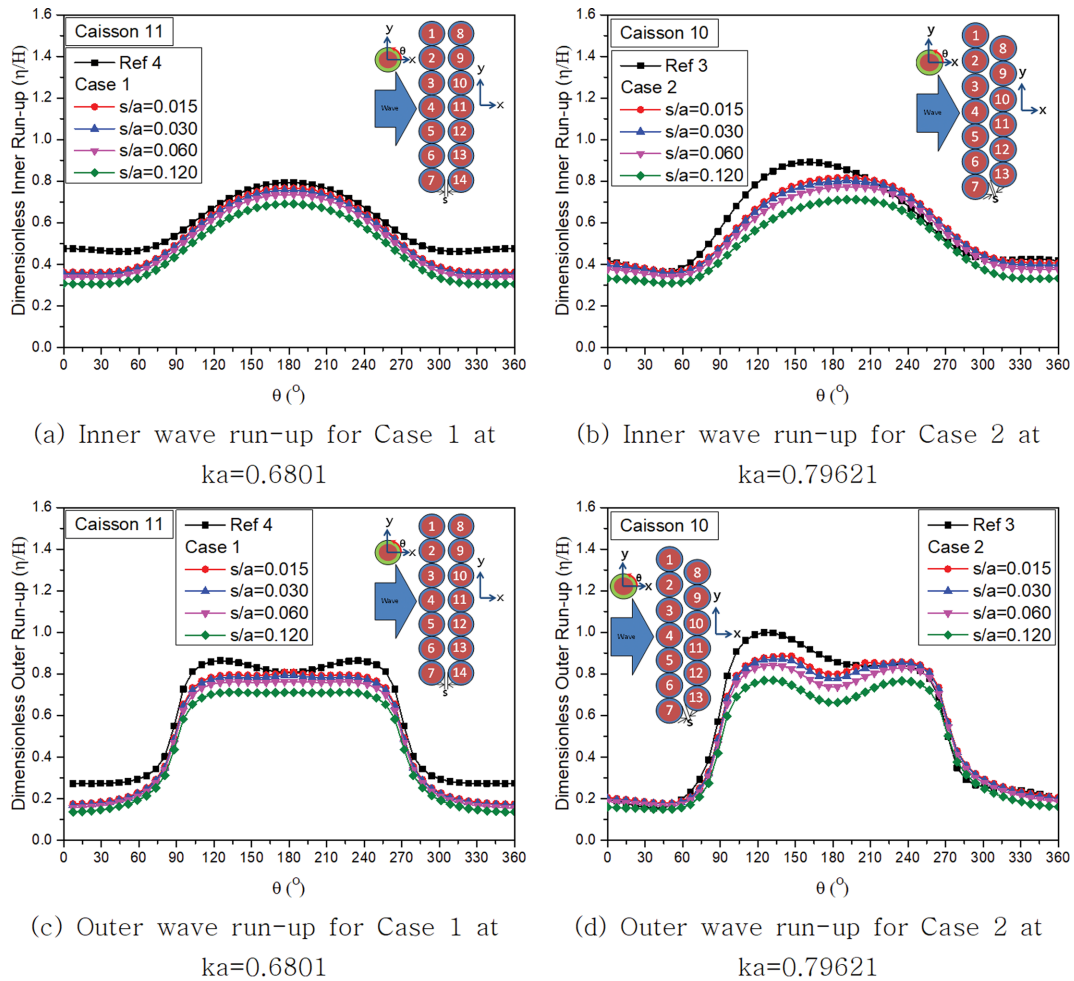


**Fig. 14.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 11 with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.



**Fig. 15.** Dimensionless wave run-up on caisson 4 with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row.





**Fig. 16.** Dimensionless wave run-up with  $d/a=2$ ,  $b/a=0.8$ ,  $G=0.698$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various distances between the first row and the second row: caisson 11 for case 1 and caisson 10 for case 2.

에서 가장 높게 나타났으며 중심부에서 멀어질수록 파력은 줄어들었다. 또한 장파영역에서 외곽에 위치한 케이스에 작용하는 파력은 파수의 변화에 따라 파력분포 특성에 변화가 생기지만 중앙에 위치한 케이스는 파력분포의 변화가 거의 없었으며, 단파지역에서만 신규 및 기존 투과성 이중 원형케이스간의 설치간격 비( $s/a$ ) 변화에 따라 파력분포의 변화가 발생되었다. 따라서 장파의 영향이 크게 발생하는 지역에서는 1열 배열의 투과성 이중 원형케이스들을 설치하는 것보다는 2열 배열의 투과성 이중 원형케이스를 설치하는 것이 방파제의 안정성을 향상시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다. Case 1 과 Case 2 모두 후면에 위치한 케이스의 파쳐오름은 기준케이스와 유사한 패턴이 나타났으나, 전면에 위치한 케이스의 파쳐오름은 케이스의 후면(0도)에서 최대값이 발생하였다. 즉, 전면에 위치한 투과성 이중 원형케이스에 작용하는 양압력은 항만 및 어항 설계기준-해설에서 제시하는 삼각형 분포를 적용하는데 한계가 있다. 고유함수전개법은 해양구조물의 초기 설계 단계에서 수치해석방법으로 많이 사용되는 선형 포텐셜 이론으로 실제 방파제 설계에 사용되는 파고는 고파랑으로 비선형성이 매우 커서 선형파이론의 적용범위를 벗어날 수도 있

지만, 기존 투과성 이중 원형케이스의 전면 또는 후면에 신규 케이스를 추가 설치할 경우에는 파와 구조물간의 상호작용 영향 평가가 반드시 선행되어야 할 것으로 판단되었다.

## 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

- Cho, I.H. (2003). Wave control by an array of N bottom mounted porous cylinders. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 15(4), 232-241 (in Korean).
- Cho, I.H. (2004). Wave control by an array of porous dual cylindrical structures. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(5), 7-14 (in Korean).
- Isaacson, M. (1983). Solitary wave diffraction around large cylin-



- der. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 109(1), 121-127.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G. (1998). Wave interactions with vertical slotted barrier. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 124, 118-126.
- 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.
- Maniar, H.D. and Newman, J.N. (1997). Wave diffraction by a long array of cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 339, 309-330.
- Ojima, R., Owaki, T., Yamagata, N. and Komoto, Y. (1994). Field sliding test of double cylinder caisson breakwater. *Proceedings of International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction, Japan*, 691-706.
- Sankarbabu, K., Sannasiraj, S.A. and Sundar, V. (2007). Interaction of regular waves with a group of dual porous circular cylinders. *Applied Ocean Research*, 29, 180-190.
- Sankarbabu, K., Sannasiraj, S.A. and Sundar, V. (2008). Hydrodynamic performance of a dual cylindrical caisson breakwater. *Coastal Engineering*, 55, 431-446.
- Tanimoto, K., Hiroshi, E. and Takahashi, S. (1992). Field experiments on a dual cylindrical caisson breakwater. *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering, Italy*, 1625-1638.
- Tanimoto, K. and Takahashi, S. (1994). Japanese experience on composite breakwaters. *Proceedings of International Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, Japan*, 1-24.
- Vijayalakshmi, K. (2005). Hydrodynamics of a perforated circular caisson encircling a vertical cylinder. Ph.D Thesis, Indian Institute of Technology Madras, India.
- Wang, K.H. and Ren, X. (1994). Wave interaction with a concentric porous cylinder system. *Ocean Engineering*, 21(4), 343-360.
- Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by porous breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121, 275-282.
- Zhong, Z and Wang, K.H. (2006). Solitary wave interaction with a concentric porous cylinder system. *Ocean Engineering*, 33, 927-949.

---

Received 20 October, 2020

Revised 5 November, 2020

Accepted 12 November, 2020