

# 원형케이슨들간의 공극률 변화에 따른 2열 배치 원형방파제에 작용하는 파랑 특성 분석

## Characteristics of Wave on Circular Breakwater of Double Array by Various Porous Coefficients among Circular Caissons

박민수\*  
Min Su Park\*

**요 지 :** 기존 케이슨방파제의 안정성을 높이기 위해 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 신규 케이슨을 설치하여 보강하는 경우 박리에 의한 에너지 손실효과와 케이슨과 케이슨 사이의 공극률 변화에 따른 개별 원형케이슨에 작용하는 파력 및 파치오름 특성 평가는 중요하다. 본 연구에서는 고유함수전개법에 투과성판에서의 속도는 판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 이용하여 원형케이슨들간의 공극률 계수 변화에 따른 2열 배치된 원형방파제에 작용하는 파랑 특성을 분석하였다. 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위해 Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석결과와 비교를 수행하였으며, 다양한 변수에 따른 개별 이중 원형케이슨에 작용하는 파력 및 파치오름 특성을 나타내었다.

**핵심용어 :** 고유함수전개법, 공극률 계수, 이중 원형케이슨, 파력, 파치오름

**Abstract :** In order to increase the stability of existing breakwater, new caissons are installed on the back or the front of existing caissons. It is very important to evaluate wave force and wave run-up according to the change of porosity among caissons and the energy loss due to separation effects. In this study, we use the eigenfunction expansion method with Darcy's law, which describes the flow of a fluid through a porous plate, to analyze the characteristics of wave on circular breakwater of double array for various porous coefficients. To verify the numerical method, the comparison between present results and Sankarbabu et al. (2008) is made. The wave force and the wave run-up acting on each dual cylindrical caisson are calculated for various parameters by considering the energy loss and the change of porosity.

**Keywords :** eigenfunction expansion method, porous coefficient, dual cylindrical caisson, 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, 이러한 케이슨의 설계는 정립된 방법이 없어 설계자의 판단에 따라 다양하게 수행되고 있어, Park (2020)은 기존 원형케이슨 방파제에 추가로 설치되는 원형케이슨의 다양한 변수들(원형 케이슨 배치, 설치간격 등)에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향에 의해 개별 원형케이슨에 작용하는 파력 특성을 3차원 선형 포텐셜이론 기반의 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 이용하여

분석하였다. 수치해석결과 케이슨들에 의해 단쳐진 유체영역에서 입사파의 주파수와 단쳐진 유체의 고유주파수가 일치되어 수면이 상하로만 진동하는 Helmholtz 공진으로 특정 주파수에서 증폭비가 크게 발생되었다. 이는 구조물 사이의 간격이 있는 경우 좁아진 틈으로 유속이 빨라지면서 유체입자가 물체표면에서 떨어져 나가는 박리(Separation)현상이 생기고 박리점 이후 역압력구배에 의한 역방향 속도로 후면에 소용돌이 형태의 복잡한 와류가 발생되어 입사 에너지가 손실되는 효과가 나타나는데 이러한 점성에 의한 에너지 손실이 고려되지 못한 것으로 생각할 수 있다. 또한 케이슨과 케이슨 사이에는 사석 등이 채워져 공극률의 변화가 발생되므로 이에 대한 추가적인 검토도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고자 케이슨

\*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, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0289, Fax: +82-31-910-0121, [mspark@kict.re.kr](mailto:mspark@kict.re.kr))

과 케이슨 사이에 투과성판(Porous plate) 효과를 적용하였다. 대부분의 선행 연구들은 투과성판에서의 속도는 판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 이용하는데, 이때 공극률 계수(Porous coefficient)는 복소수 값을 가지며 항력 계수(Drag coefficient)라 부르는 실수부는 박리에 의한 에너지 손실을 나타내며, 관성 계수(Inertial coefficient)라 부르는 허수부는 속도와 압력차의 위상차를 나타낸다. 이때 실수부가 허수부에 비하여 아주 크다면 위상차는 없게 되고 공극률 계수는 실수값을 취한다(Cho, 2002). 3차원 선형 포텐셜이론 기반의 고유함수전개법에 Darcy 법칙을 적용하여 투과성 원기둥에 의한 파랑변형문제를 다룬 논문들로는 Wang and Ren(1994), Williams and Li(2000), Cho(2003, 2004), Sankarbabu et al.(2007, 2008), Park et al.(2010)의 연구논문들이 있다. 본 연구에서는 Park(2020)의 수치해석결과에서 고려되지 못한 박리에 의한 에너지 손실효과와 케이슨과 케이슨 사이에 채워진 사석 등의 공극률 변화를 적용하고자 내부는 불투과성 원형케이슨으로 외부는 일정한 공극률을 가지는 원형케이슨으로 구성된 이중 원형케이슨을 이용하였으며 이때 투과성 원형케이슨 벽면에서의 경계조건에는 Darcy 법칙을 적용하였다. 우선, 본 수치해석의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위해 4개의 이중 원형실린더로 구성된 해양구조물에 작용하는 파력 및 파처오름을 Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석 결과와 비교하였다. 원형케이슨들간의 공극률은 외부 투과성 원형케이슨 벽면의 공극률로 고려되었으며, 이 공극률 변화에 따른 2열 배치 원형케이슨 방파제에 대한 파와 구조물간의 상호작용 영향을 분석하고 개별 이중 원형케이슨에 작용하는 파력 및 파처오름 특성을 도출하였다.

## 2. 수치해석 이론

박리에 의한 에너지 손실효과와 원형케이슨들간의 공극률 변화에 따른 2열 배치 원형방파제에 대한 파와 구조물간의 상호작용 영향을 검토하기 위해 본 연구에서는 Sankarbabu et al.(2007, 2008)과 Cho(2004)가 제안한 수치해석이론을 바탕으로 이중 원형케이슨을 이용하였다. 이중 원형케이슨은 2개의 원형케이슨이 동심원상에 놓인 형태로 내부 원형케이슨은 불투과성 재질이고 외부 원형케이슨은 일정한 공극률을 가진 투과성 재질로 구성된다. Fig. 1은 수심이  $d$ 인 해저면 바닥에 내부 원형케이슨의 반지름은  $b_j$ 이고 외부 원형케이슨의 반지름은  $a_j$ 인  $N$ 개의 이중 원형케이슨에 대한 수치해석 모델을 보여주고 있다.

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

입사파는 규칙파로 진폭은  $H/2$ 이며, 주파수  $\omega$ 를 갖고 조

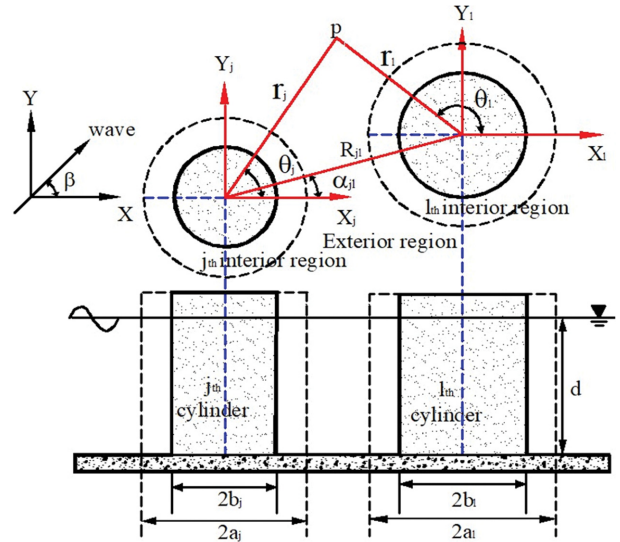


Fig. 1. Definition sketch of numerical model for a dual circular caisson breakwater.

화운동을 한다면 속도포텐셜은 다음과 같다.

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

또한, 일정한 수심에 이중 원형케이슨 구조물이 바닥으로부터 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,  $g$ 는 중력가속도이고  $f(z) = \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd}$ 이며,  $k$ 는

파수(Wavenumber)로 분산식  $\omega^2 = gk \tanh kd$ 를 만족한다.

유체영역은 Fig. 1과 같이 외부 투과성 원형케이슨의 바깥 영역인 외부영역과 외부 투과성 원형케이슨과 내부 불투과성 원형케이슨으로 둘러싸인  $N$ 개의 내부영역으로 나뉜다. 입사파가  $x$ 축의 양의 방향으로  $\beta$ 의 각도를 이루면서 들어올 때  $j$ 번째 이중 원형케이슨 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 Bessel 함수이고  $I_j (= e^{ik(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta)})$ 는 공간상에 고정된 좌표계의 원점과  $j$ 번째 이중 원형케이슨 구조물의 중심간의 위상차이를 나타내는 함수이다.  $j$ 번째 이중 원형케이슨 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  $A_n^j$ 은 미지수이고  $H_n$ 은 제1종 Hankel 함수이다.  $Z_n^j$

$= J'_n(ka_j)/H'_n(ka_j)$ 로 정의되며, 뒷첨자  $n$ 은 함수의 미분을 뜻한다. 외부영역에서의 파형식은 입사파와  $N$ 개의 이중 원형케이스는 구조물들에 의한 산란파의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$j$ 번째 이중 원형케이스는 구조물 주위의 파형은 입사파에 의한 파형과  $j$ 번째 이중 원형케이스는 구조물에 의하여 산란된 파형 그리고 주위의 나머지 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 Bessel함수 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).

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

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

$$\eta^{(0)}(r_j, \theta_j) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^j \left\{ J_n(kr_j) - \frac{J'_n(kb_j)}{Y'_n(kb_j)} Y_n(kr_j) \right\} e^{in\theta_j} \quad (7)$$

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

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

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

$$I_j(i)^n e^{-in\beta} + \sum_{l=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{lj}) e^{i(m-n)\alpha_{lj}} = - \frac{S_n}{Y'_n(kb_j) J'_n(ka_j)} B_n^j - A_n^j \quad (9)$$

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).

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

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

여기서  $G(= G_r + iG_i)$ 는 공극률 계수(Porous coefficient)로 복소수 값을 가지며 실수부  $G_r$ 은 박리에 의한 에너지 손실 효과를 허수부  $iG_i$ 는 속도와 압력사이의 위상차와 밀접한 관련이 있는 유체의 관성효과를 나타낸다. Sankarbabu et al. (2008)은 실수부가 허수부보다 크다고 가정하여 동점성 계수( $\mu$ )와 길이에 대한 재료상수( $\gamma$ )를 이용하여  $G = \rho \omega \gamma / (\mu k)$ 로 정의하였다. 또한, Cho(2002)는 실수값의 공극률 계수( $G$ )와 공극률( $P$ ) 사이에는 선형관계가 성립함을 이론해석과 모형실험을 통하여 입증하고 관계식( $b = 57.63P - 0.9717$ ,  $b = 2\pi G$ )을 정립하였다. 따라서 본 연구에서도  $G$ 와 공극률( $P$ )을 Cho(2003)가 제안한 관계식을 이용하여 정의하였으며, 외부 투과성 원형케이스 없이 내부 불투과성 원형케이스만 구성된 이중 원형케이스에 대해서는  $G \rightarrow \infty$ 로 표기하였다.

$$G = 9.172P - 0.155 \quad (11)$$

앞서 유도한 외부영역과 내부영역의 해를 식(10)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$I_j(i)^n e^{-in\beta} J_n(ka_j) + A_n^j Z_n^j H_n(ka_j) + \sum_{l=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{lj}) e^{i(m-n)\alpha_{lj}} J_n(ka_j) = B_n^j \left\{ J_n(ka_j) - \frac{J'_n(kb_j)}{Y'_n(kb_j)} Y_n(ka_j) \right\} + \frac{i}{G} \left\{ J'_n(ka_j) - \frac{J'_n(kb_j)}{Y'_n(kb_j)} Y'_n(ka_j) \right\} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

식(9)와 (12)에서 미지수  $B_n^j$ 를 소거하면 미지수  $A_n^j$ 에 대한 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$A_n^j Z_n^j \left\{ \frac{H'_n(ka_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k b_j} H'_n(kb_j)}{J'_n(ka_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k b_j} J'_n(kb_j)} \right\} \quad (13)$$

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

식(13)에 주어진 대수방정식을 풀어  $A_n^j$ 을 구하면 내부영역에서의 미지수  $B_n^j$ 는 식(9)와 (13)으로부터 아래와 같이 주어진다.

$$B_n^j = \frac{Z_n^j \frac{2G}{\pi k b_j} Y_n'(k b_j)}{J_n'(k a_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k b_j} J_n'(k b_j)} A_n^j \quad (14)$$

식(13)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(13)을 풀어 미지수  $A_m^j$  ( $j=1, 2, \dots, N, m=-M, \dots, M$ )을 수치적으로 구할 수 있다.

이중 원형케이슨에 작용하는 파력은 구해진 미지수를 각 속도 포텐셜에 대입하고 원형케이슨 표면에 대하여 적분하면  $j$ 번째 이중 원형케이슨 구조물의 외부 투과성 원형케이슨과 내부 불투과성 원형케이슨에 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$F_O^j = -\frac{1}{2} \left[ \begin{matrix} i \\ 1 \end{matrix} \right] \frac{J_1'(k a_j) S_1}{J_1'(k a_j) S_1 + \frac{2iG}{\pi k a_j} J_1'(k b_j)} \left( A_{-1}^j \left[ \begin{matrix} - \\ + \end{matrix} \right] A_1^j \right) \quad (15)$$

$$\times \left( \frac{4\rho g A \tanh kd}{k^2 H_1'(k a_j)} \right)$$

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

식(15)에서 상단은  $x$  방향의 파력을, 하단은  $y$  방향의 파력을 나타낸다.  $j$ 번째 이중 원형케이슨 구조물의 외부 투과성 원형케이슨 벽면에서의 파쳐오름(Run-up)과 내부 불투과성 원형케이슨 벽면에서의 파쳐오름은 아래와 같다.

$$\eta^{(o)}(a_j, \theta_j) \quad (16)$$

$$= \sum_{n=-M}^{n=M} A_n^j Z_n^j \left[ H_n'(k a_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k a_j} H_n'(k b_j) \right] \frac{J_n'(k a_j)}{J_n'(k a_j) S_n + \frac{2iG}{\pi k a_j} J_n'(k b_j)} e^{in\theta_j}$$

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

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

Sankarbabu et al.(2008)은 이중 원형실린더에 작용하는 파력 및 파쳐오름(Wave run-up)의 정확도를 수치해석결과(Wang and Ren, 1994) 및 수리실험결과(Vijayalakshmi, 2005)와 비교를 통해 입증하였고 다양한 변수조건(외부 투과성 원형실

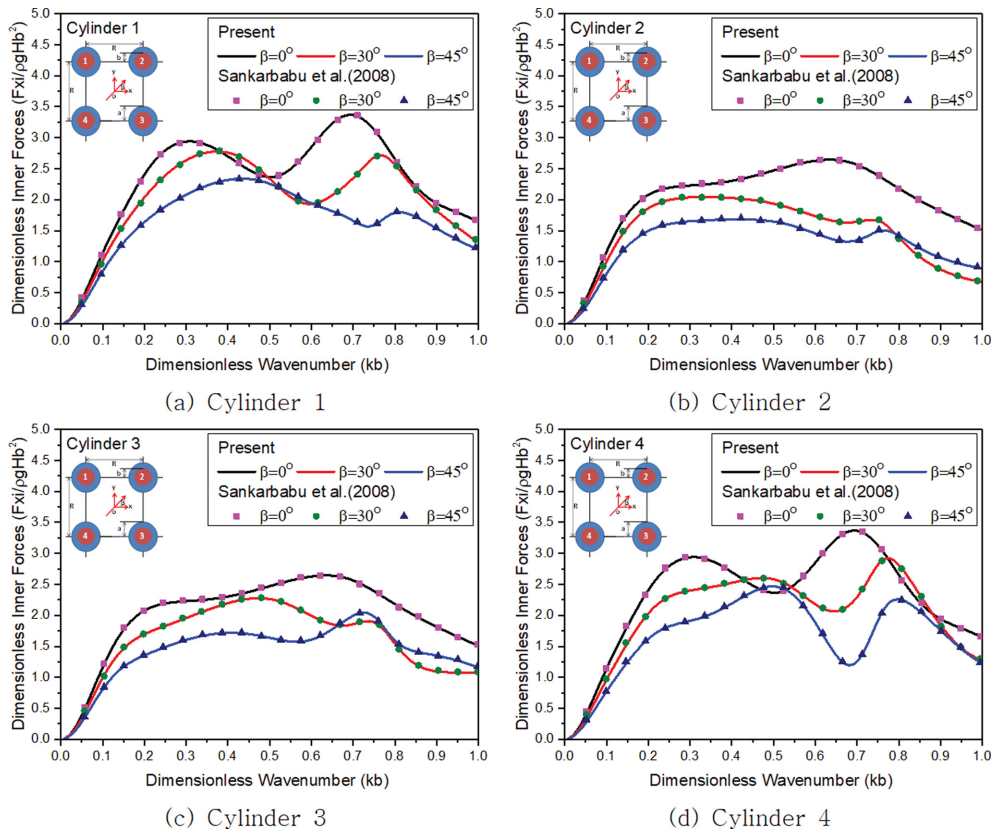
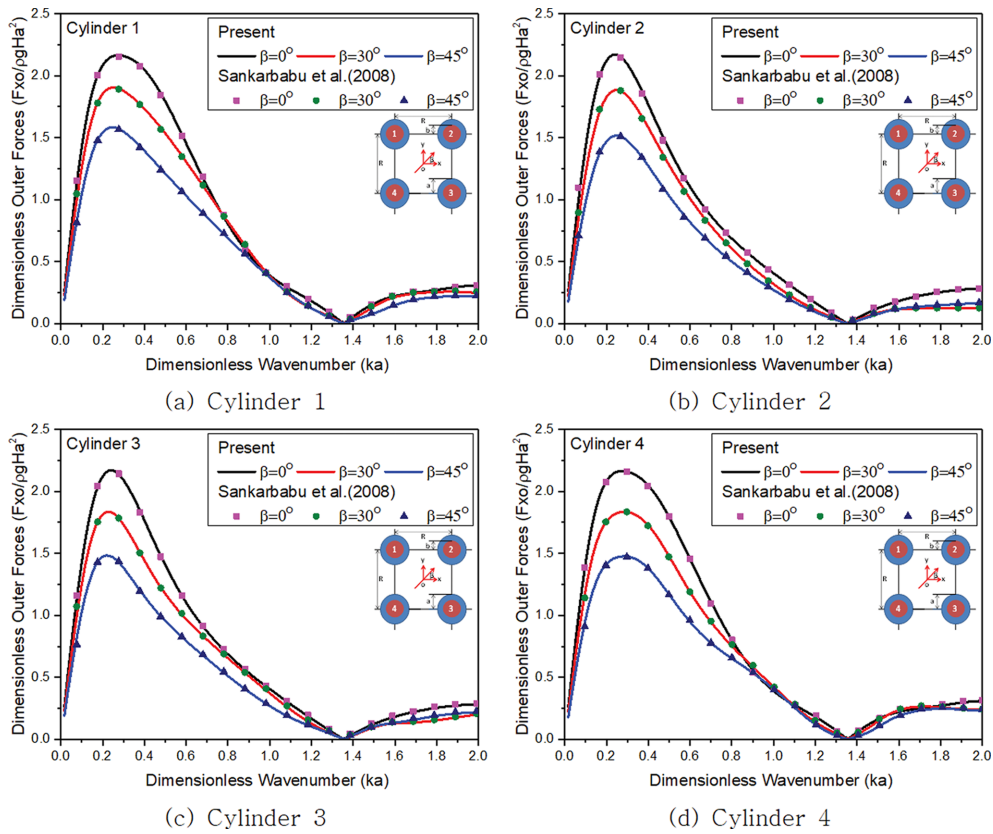
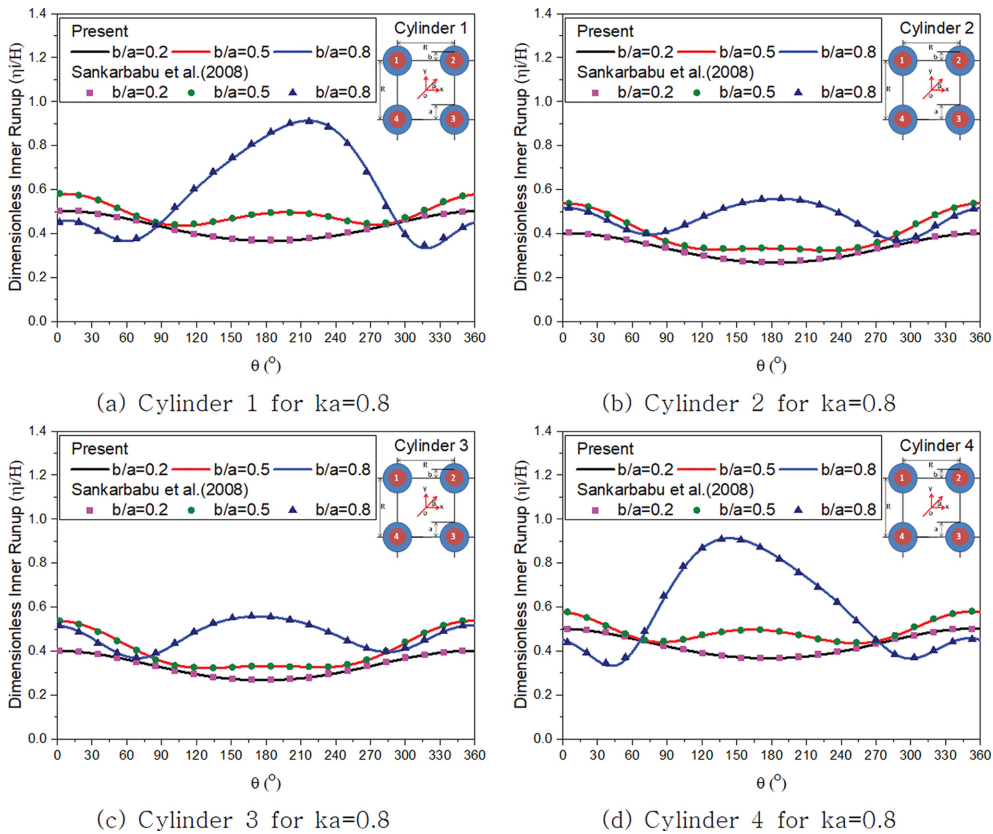


Fig. 2. Comparison of dimensionless wave force in x-direction on the individual inner cylinders in group of dual cylinders for various incident wave angles with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$ ,  $b/a = 0.5$  and  $G = 1.0$ .

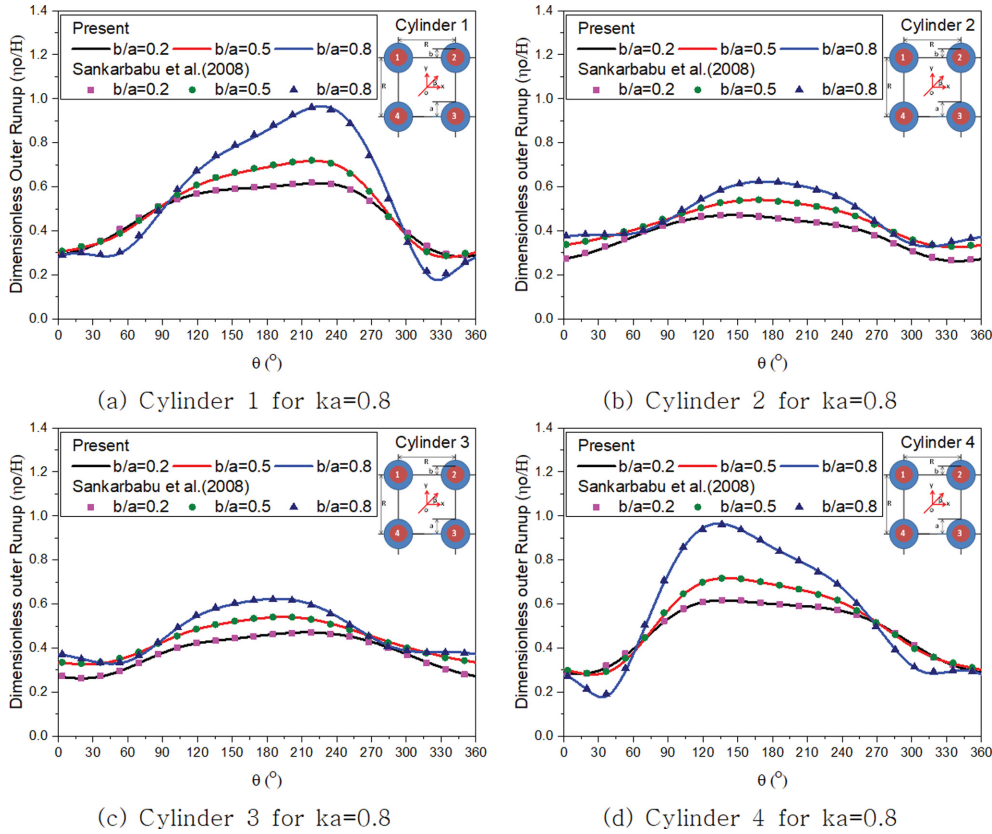




**Fig. 3.** Comparison of dimensionless wave force in x-direction on the individual outer cylinders in group of dual cylinders for various incident wave angles with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$ ,  $b/a = 0.5$  and  $G = 1.0$ .



**Fig. 4.** Comparison of dimensionless wave run-up on the individual inner cylinders in group of dual cylinders for various  $b/a$  ratios with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$  and  $G = 1.0$ .

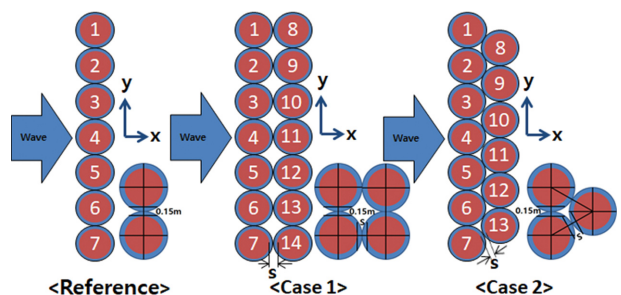


**Fig. 5.** Comparison of dimensionless wave run-up on the individual outer cylinders in group of dual cylinders for various  $b/a$  ratios with  $d/a = 5$ ,  $R/a = 4$  and  $G = 1.0$ .

린더의 투과율 계수( $G$ ), 내부 불투과성 원형실린더와 외부 투과성 원형실린더의 반지름 비( $b/a$ ), 투과성 이중원형실린더간의 간격 비( $R/a$ )에 따른 이중 원형실린더에 작용하는 파력 및 파쳐오름을 분석하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 수치 해석 방법의 정확도와 신뢰성을 확보하고자 Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석결과와 비교를 수행하였다. Figs. 2와 3은 4개의 이중원형실린더로 구성된 해양구조물인 경우 입사파의 각도변화에 따른 개별 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 Williams and Li(2000)와 Cho (2004)의 논문을 바탕으로 10으로 고정하였다. Figs. 2와 3에서  $x$ 축은 파수에 원형실린더의 반지름(내부:  $b$ , 외부:  $a$ )을 곱한 값을 나타내고 있으며  $y$ 축은 내부 원형실린더인 경우  $\rho g H b^2$ 로 외부 원형실린더인 경우  $\rho g H a^2$ 로 나눈 무차원화된 파력을 나타낸다. 또한 Figs. 4와 5의  $x$ 축은 Fig. 1의 각 원형케이슨의 중심 좌표  $(x_j, y_j)$ 에서 반 시계 방향으로 측정된  $\theta$  각도를 나타내고 있으며  $y$ 축은 입사하는 파랑의 파

고( $H$ )로 나눈 무차원화된 파쳐오름을 나타내고 있다. 그림에서 파와 구조물의 상호작용 영향으로 개별 이중 원형실린더에 작용하는 파력 및 파쳐오름은 입사하는 파랑의 각도와 파수(규칙파)에 따라 다양한 패턴을 나타내었으며, 본 연구의 수치해석결과는 Sankarbabu et al.(2008)의 해석결과와 매우 좋은 일치를 보였다.

본 연구에서는 원형케이슨 사이에 간격이 있는 경우 좁아진 틈으로 유속이 빨라지면서 박리 현상이 생기고 후면의 복잡한 와류가 발생되어 입사 에너지가 손실되는 효과와 케이슨과 케이슨 사이에 채워진 사석 등의 공극률 변화를 고려하고자 내부는 불투과성 원형케이슨으로 외부는 일정한 공극률을 가지는 원형케이슨으로 구성된 이중 원형케이슨을 이용하였다. Fig. 6은 수치해석케이스를 보여주고 있으며, 항만 및



**Fig. 6.** Definition sketches for numerical cases.

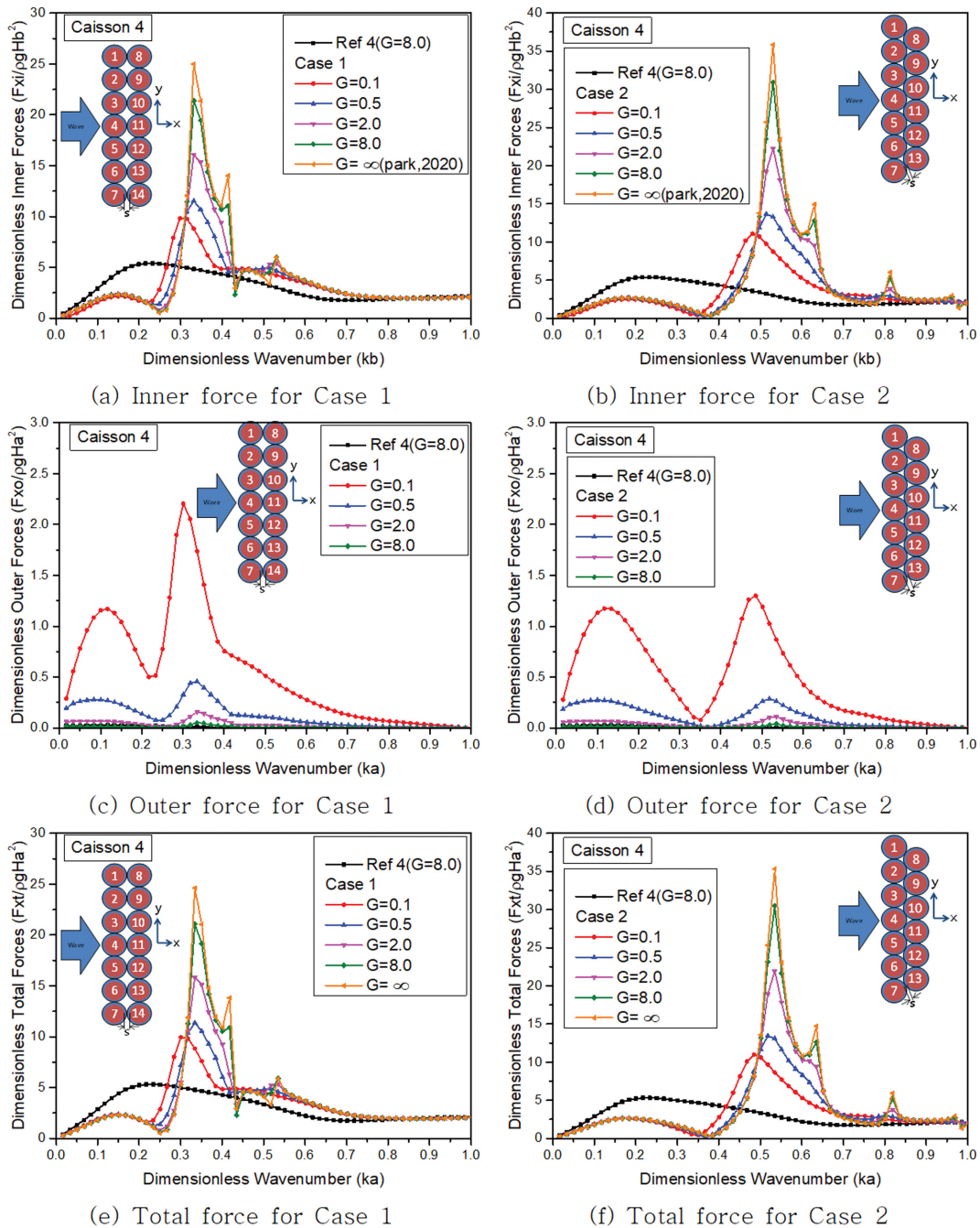
**Table 1.** Porous parameter and porosity of outer circular boundary

Porous parameter ( $G$ )	Relation function	Porosity ( $P$ )
0.1	$G = 9.172P - 0.155$	0.02780
0.5		0.07141
2.0		0.23495
8.0		0.88912

어항공사 표준시방서에서는 5,000톤 이상 케이슨의 거치허용 오차를 0.15 m 이하로 제시하고 있어, 내부 불투과성 원형케이슨과 외부 투과성 원형케이슨 사이의 간격은 0.075 m(=0.15/2)로 설정하였다. 수치해석에서 8.0의 공극률 계수( $G$ )를 가지

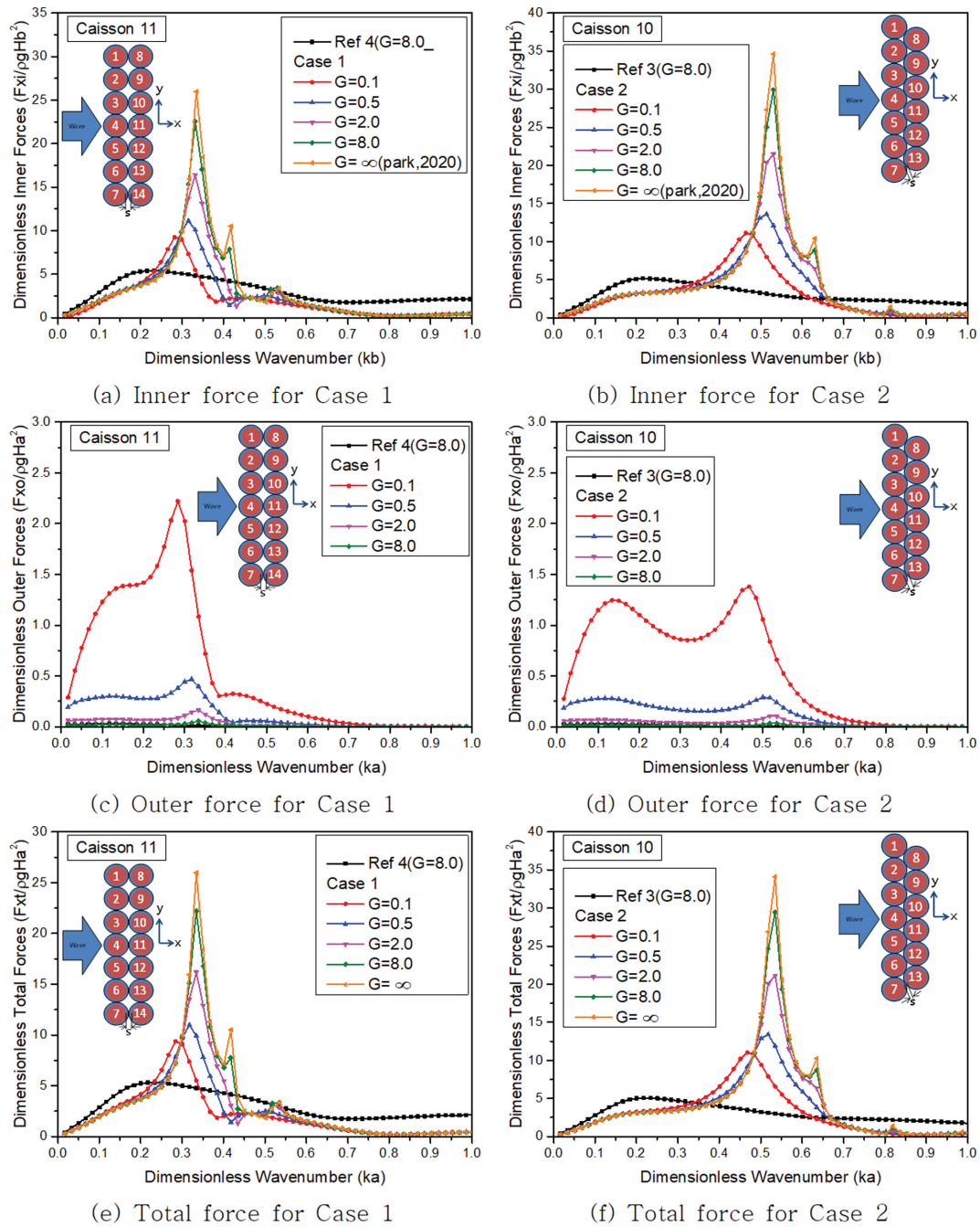
는 기존 이중원형케이슨 7개로 구성된 방파체를 기준케이슨(Reference)로 설정하였으며 Case 1과 Case 2에서 외부 투과성 원형케이슨의 공극률은 Table 1에 나타난 것처럼 총 4가지로 분류하였다. 또한 모든 수치해석 케이스에서 수심은 내부 원형케이슨의 반경( $b = 10$  m)을 기준으로  $d/b$  비는 2이고, Park(2020)이 기수행한 수치해석결과와 비교하기 위해 외부 투과성 원형케이슨 없이 내부 불투과성 원형케이슨만 구성된 이중 원형케이슨에 대해서는  $G \rightarrow \infty$ 로 표기하였다.

개별 이중 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 명확히 파악하기 위해 수치해석에서 입사파의 입사각은  $x$ 축과 평행하게



**Fig. 7.** Dimensionless wave force in x-direction on caisson 4 with  $d/b = 2$ ,  $b/a = 10/10.075$ ,  $s/b = 0.015$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall.





**Fig. 8.** Dimensionless wave force in x-direction with  $d/b = 2$ ,  $b/a = 10/10.075$ ,  $s/b = 0.015$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall: caisson 11 for case 1, caisson 10 for case 2.

입사하는 0도에 대해서만 고려하였으며, Park(2020)의 수치 해석결과 배열중앙에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파력이 가장 높게 나타나며 중앙에서 멀어질수록 파력이 줄어드는 경향을 보였으므로 본 연구에서도 중앙에 위치한 이중 원형케이슨에 작용하는 파력을 중심으로 검토를 수행하였다. Figs. 7과 8은 외부 투과성 원형케이슨의 공극률 변화에 따른 기존 이중 원형케이슨과 신규로 설치되는 이중 원형케이슨간의 설치간격 비( $s/b = 0.015$ )가 매우 좁은 경우에 대한 파력분포 특성을 보여주고 있으며, Figs. 9와 10은 설치간격 비( $s/b = 0.12$ )가 가장 넓은 경우의 파력분포 특성을 보여주고 있다. 모

든 케이스에 대해 외부 투과성 원형케이슨에 작용하는 파력은 공극률이 증가할수록 파력이 감소하는 경향을 보이고 있으며  $G$ 가 2.0 이상인 경우에는 구조물에 작용하는 파력이 미소한 것으로 나타났다. 내부 원형케이슨과 외부 원형케이슨에 작용하는 파력을 합한 전체 파력은 피크값들이 발생하는 파수영역을 제외하면 장파지역( $ka \leq 0.25$ )과 단파지역( $ka \geq 0.8$ )에서 외부 투과성 원형케이슨의 공극률 변화에 관계없이 유사한 값을 가지는 특이한 현상이 발생되었다. 이는 장파에서 외부 투과성 원형케이슨의 공극률 변화에 관계없이 파력이 유사하게 발생된 기존 연구결과들(Williams and Li(2000), Cho

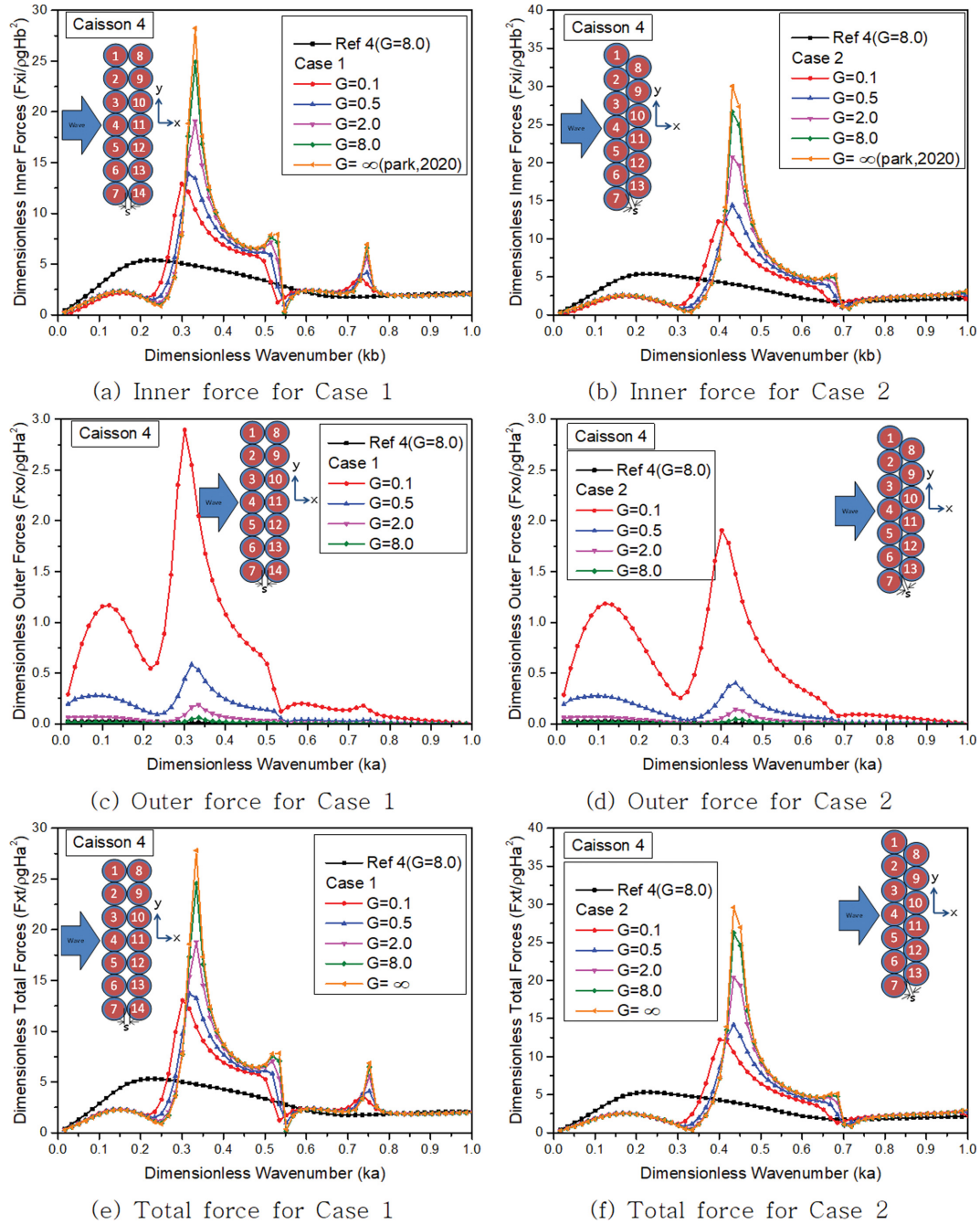


Fig. 9. Dimensionless wave force in x-direction on caisson 4 with  $d/b = 2$ ,  $b/a = 10/10.075$ ,  $s/b = 0.12$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall.

(2003))과 유사한 경향을 보이고 있으며, 단파에서는 외부 투과성 원형케이슨에 작용하는 파력이 매우 작기 때문이다. Case 1과 Case 2의 모든 해석조건에서 공극률 계수가 8.0인 경우에는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 판( $G = \infty$ )이 놓여 있는 Park(2020)의 수치해석 결과와 매우 유사한 파력분포 형태를 보여주고 있는데, 이는 공극률이 증가하면 박리현상에 의한 에너지 손실효과가 상실되는 것을 보여준다. 공극률 변화에 따른 최대 전체파력의 피크값이 발생된 파수와 파력값을 Tables 2와 3에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 Case 1인 경우에는 최대 피크값이 파수 0.33 부근( $s/b =$

0.015, 0.12)에서 발생되고 있으며 Case 2인 경우에는 파수 0.53 부근( $s/b = 0.015$ )과 0.43 부근( $s/b = 0.12$ )에서 발생되어 태풍 등의 극한파랑조건이 장파인 것을 감안할 때 Case 1보다는 Case 2가 장파지역에서 보다 방파제의 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 외부 투과성 원형케이슨의 공극률 감소는 이중 원형케이슨에 작용하는 전체 파력을 눈에 띄게 감소시킬 수는 있지만, 케이슨들에 의해 단차진 유체영역에서 입사파의 주파수와 단차진 유체의 고유주파수가 일치되어 수면이 상하로만 진동하는 Helmholtz 공진 주파수 변화에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.



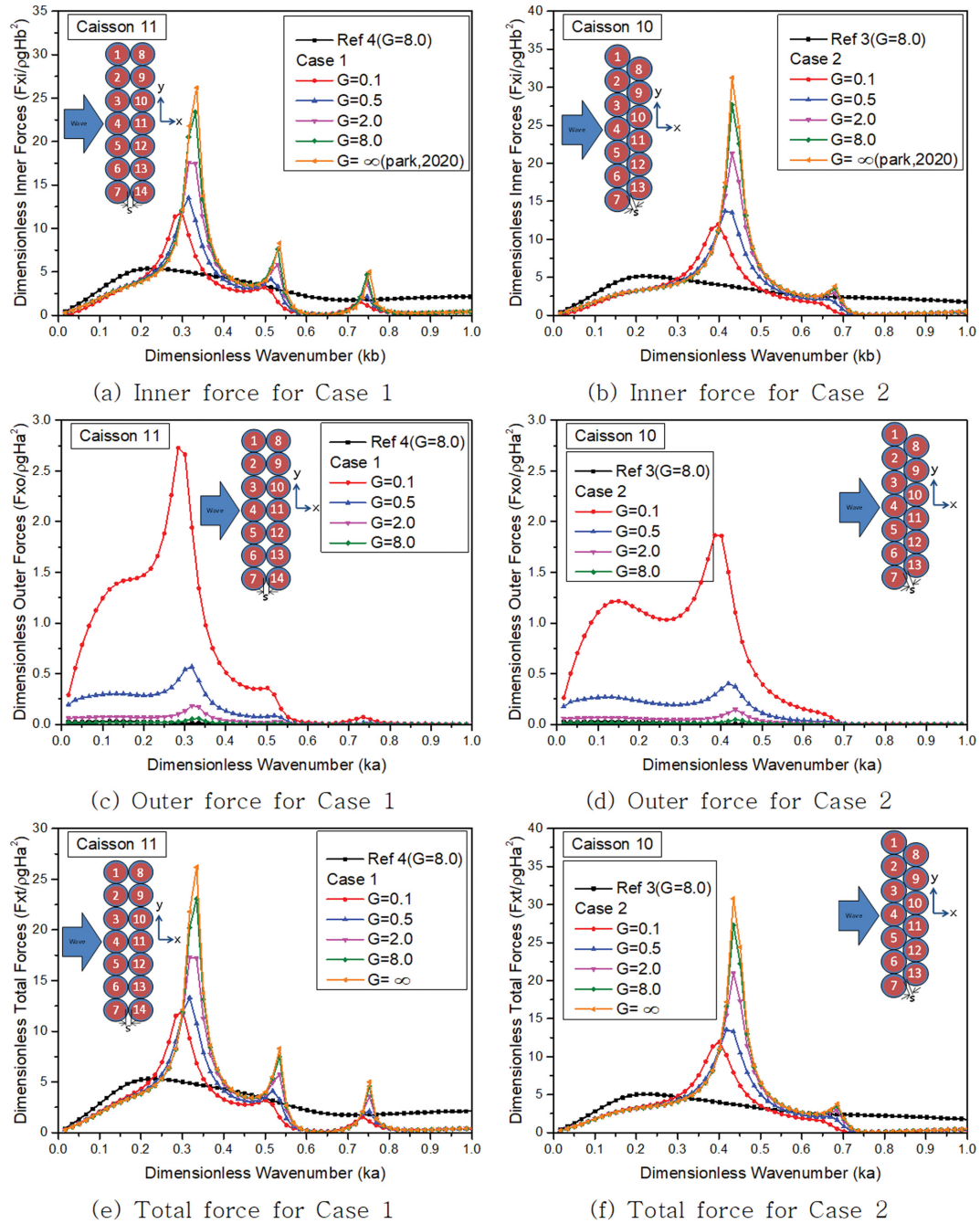


Fig. 10. Dimensionless wave force in x-direction with  $d/b = 2$ ,  $b/a = 10/10.075$ ,  $s/b = 0.12$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall: caisson 11 for case 1, caisson 10 for case 2.

케이슨 방파제의 안정성을 검토하기 위해서는 케이슨 전면 에 작용하는 파력 산출도 중요하지만 이와 더불어 케이슨 저 면에 작용하는 양압력도 같이 산출되어야 한다. 항만 및 어 항 설계기준-해설에서는 설계계산에 사용되는 파고를 이용하여 양압력을 계산하며 이 파고는 케이슨에 작용하는 파치오름(Wave run-up)과 밀접한 관련을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 입사하는 파랑에 의해 개별 이중 원형케이슨에 작용하는 파치오름을 Figs. 11~14에 나타내었다. 그림에서 개별 케이슨에 작용하는 파치오름 값은 중앙에 위치한 4번 원형케이슨을 기준으로 초기 피크값 발생 이후 최소 파력이 발생되는 파수에서의 파치오름을 입사하는 파고(H)로 나누어 무

차원화하여 나타내었다. 모든 케이스에 대해 전면 에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파치오름은 외부 투과성 원형케이슨의 공극률 변화에 관계없이 입사파 방향의 정면에 위치한 120도에서 240도 부근까지는 기준케이슨의 파치오름과 유사한 값 이 나타났다. 이는 120도에서 240도 부근까지는 후면에 위치한 원형케이슨과 입사파간의 상호작용 영향을 받지 않는 것 을 확인 할 수 있다. 하지만 그 외 각도에서는 뒷면에 위치한 원형케이슨의 영향으로 기준케이슨보다는 높은 파치오름 값을 가지고, 공극률의 감소와 더불어 파치오름 값도 감소하 는 것을 알 수 있다. 또한 공극률이 8.0인 경우 내부 원형케이슨에 작용하는 파치오름은 공극률이 무한대인 값과 동일한

**Table 2.** Wave number and wave force at maximum peak point for  $s/b = 0.015$ 

Porous parameter ( $G$ )	Caisson 4 of Case 1			Caisson 4 of Case 2		
	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)
0.1	0.3008	9.9363	-59.629	0.4846	10.9814	-68.895
0.5	0.3342	11.3784	-53.770	0.5180	13.4552	-61.888
2.0	0.3342	15.8337	-35.668	0.5347	21.9340	-37.872
8.0	0.3342	21.0818	-14.345	0.5347	30.4650	-13.709
$\infty$	0.3342	24.6126	0.000	0.5347	35.3048	0.000

Porous parameter ( $G$ )	Caisson 11 of Case 1			Caisson 10 of Case 2		
	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)
0.1	0.2841	9.3723	-63.896	0.4679	11.0397	-67.629
0.5	0.3175	10.9738	-57.726	0.5180	13.3884	-60.742
2.0	0.3342	16.1765	-37.684	0.5347	21.1419	-38.007
8.0	0.3342	22.2014	-14.475	0.5347	29.4712	-13.584
$\infty$	0.3342	25.9589	0.000	0.5347	34.1037	0.000

**Table 3.** Wave number and wave force at maximum peak point for  $s/b = 0.12$ 

Porous parameter ( $G$ )	Caisson 4 of Case 1			Caisson 4 of Case 2		
	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)
0.1	0.3008	13.0369	-53.099	0.4010	12.2268	-58.657
0.5	0.3175	13.6940	-50.735	0.4345	14.1857	-52.033
2.0	0.3342	18.8002	-32.365	0.4345	20.4245	-30.938
8.0	0.3342	24.5440	-11.701	0.4345	26.2382	-11.280
$\infty$	0.3342	27.7966	0.000	0.4345	29.5740	0.000

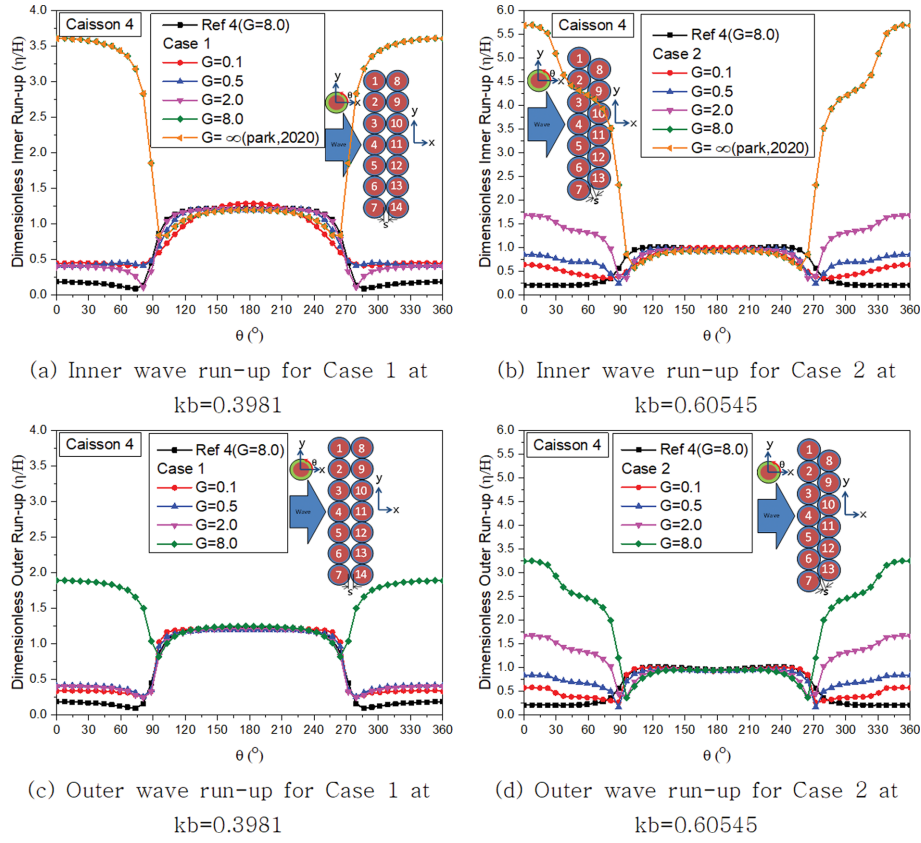
Porous parameter ( $G$ )	Caisson 11 of Case 1			Caisson 10 of Case 2		
	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)	Wave number ( $ka$ )	Wave force ( $F_{xt}$ )	Difference (%)
0.1	0.3008	11.9811	-54.247	0.4010	11.9337	-61.227
0.5	0.3175	13.3360	-49.073	0.4178	13.5271	-56.050
2.0	0.3175	17.3168	-33.871	0.4345	20.9754	-31.851
8.0	0.3342	23.0459	-11.993	0.4345	27.3016	-11.297
$\infty$	0.3342	26.1863	0.000	0.4345	30.7786	0.000

값을 가지며 이중 원형케이슨간의 설치간격이 좁은 경우( $s/b = 0.015$ )가 넓은 경우( $s/b = 0.12$ )보다 파치오름이 매우 높게 나타났다. 후면에 위치한 원형케이슨들에 작용하는 파치오름은 공극률이 0.5 이하이면 기준케이스보다 낮게 나타났으나 설치간격이 넓은 Case 2에서는 공극률 변화에 관계없이 기준케이스보다 작은 파치오름 값을 갖는 특이한 현상이 발생되었다. 이중 원형케이슨간의 설치 간격이 좁은 경우 공극률 8.0 이상에서는 내부 원형케이슨에 작용하는 파치오름이 눈에 띄게 상승되었으나 그 외 공극률에 대해서는 파치오름이 감소하였으며 Case 1인 경우에는 거의 유사한 값을 가진다. 이는 구조물 사이의 간격이 있는 경우 좁아진 틈으로 유속이 빨라지면서 발생하는 박리(Separation)현상과 구조물 후면의 복잡한 와류로 인한 입사 에너지 손실 효과가 고려되었기 때문으로 생각된다. 따라서 기존 원형케이슨의 전면 또는 후면에 신규 케이슨을 추가 설치할 경우에는 파와 구조물간의 상

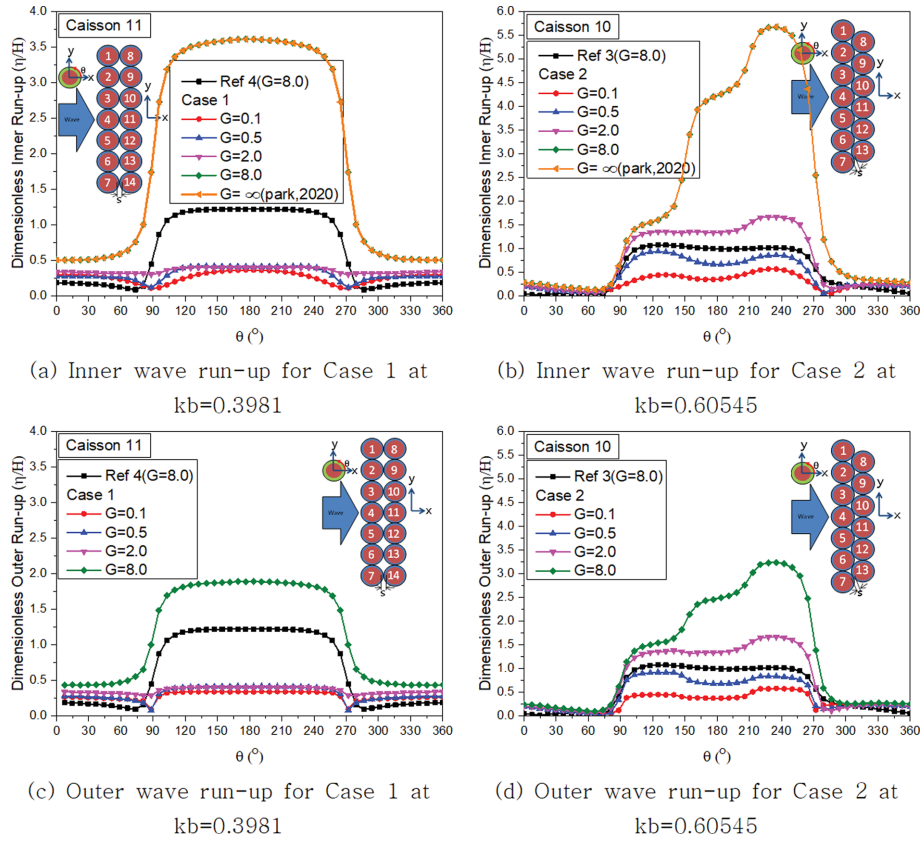
호작용 영향평가와 더불어 박리현상에 의한 에너지 손실효과도 같이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

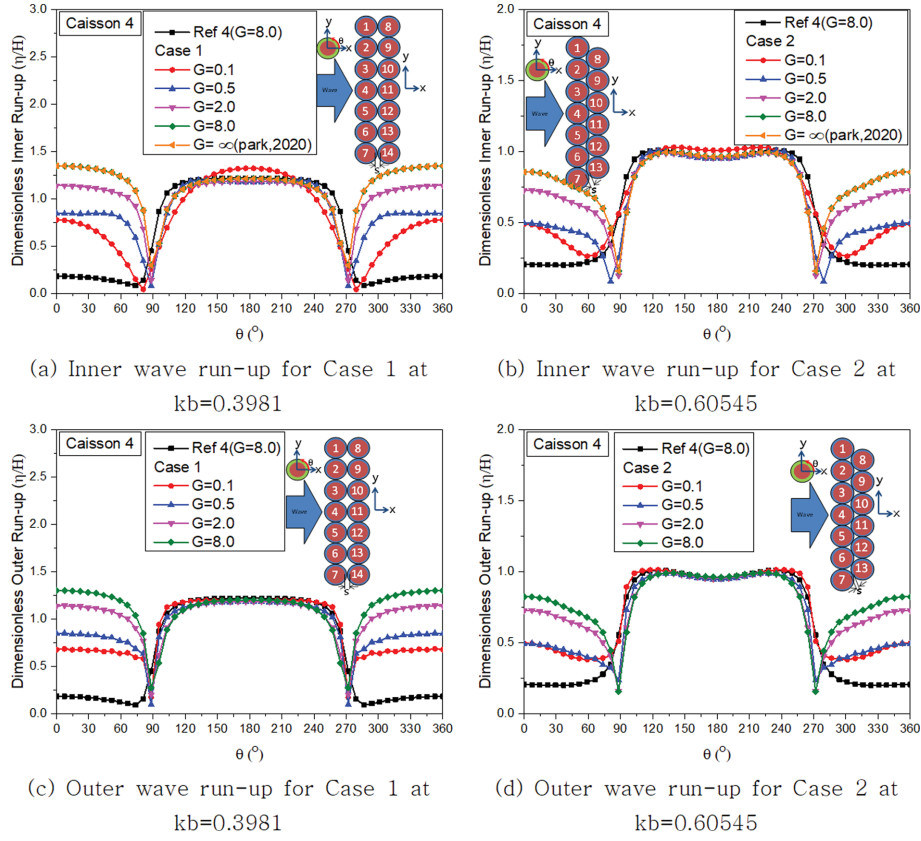
본 연구에서는 기존 원형케이슨의 안정성을 높이기 위해 신규 원형케이슨을 기존 원형케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 경우 박리에 의한 에너지 손실효과와 케이슨과 케이슨 사이의 공극률 변화에 따른 개별 원형케이슨에 작용하는 파력 및 파치오름 특성을 분석하였다. Sankarbabu et al.(2008)의 수치해석 결과와의 비교를 통해 3차원 선형 포텐셜 이론을 기초로한 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)에 투과성판에서의 속도는 판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 적용한 수치해석 방법은 높은 정확성과 신뢰성은 갖는 것을 확인하였다. Case 1인 경



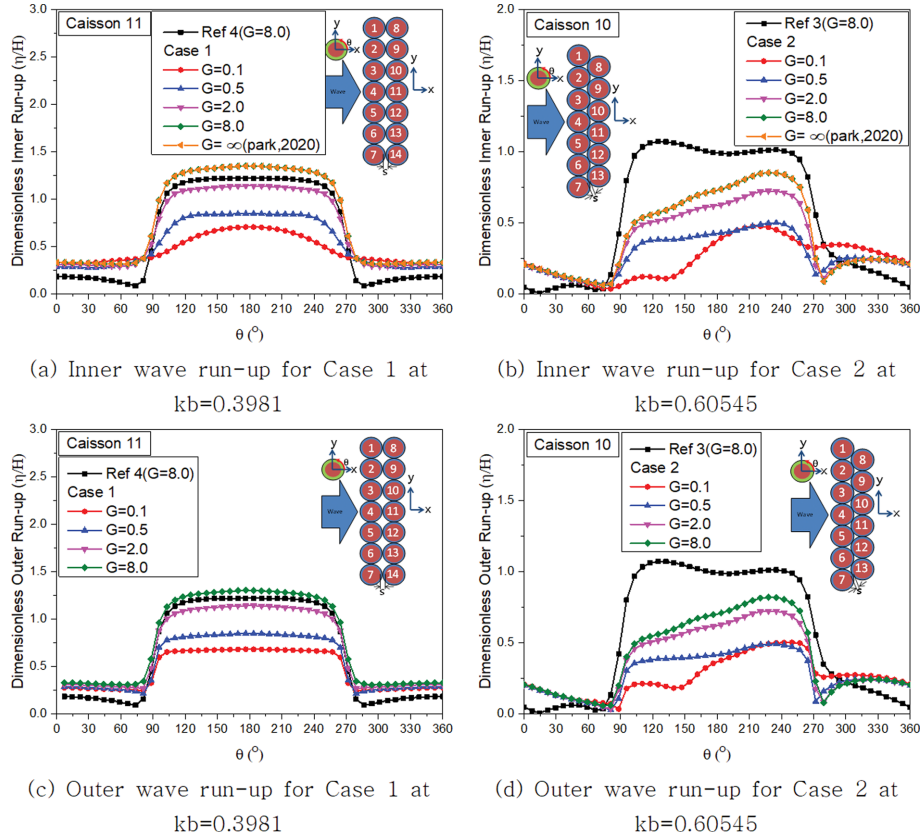
**Fig. 11.** Dimensionless wave run-up on caisson 4 with  $d/b=2$ ,  $b/a=10/10.075$ ,  $s/b=0.015$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall.



**Fig. 12.** Dimensionless wave run-up with  $d/b=2$ ,  $b/a=10/10.075$ ,  $s/b=0.015$  and  $\beta=0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall: caisson 11 for case 1, caisson 10 for case 2.



**Fig. 13.** Dimensionless wave run-up on caisson 4 with  $d/b = 2$ ,  $b/a = 10/10.075$ ,  $s/b = 0.12$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall.



**Fig. 14.** Dimensionless wave run-up with  $d/b = 2$ ,  $b/a = 10/10.075$ ,  $s/b = 0.12$  and  $\beta = 0.0^\circ$  for various porous parameters of outer wall: caisson 11 for case 1, caisson 10 for case 2.

우에는 최대 피크값이 장파부근에서 발생되었으며 Case 2인 경우에는 단파부근에서 발생되어 태풍 등의 극한파랑조건이 장파인 것을 감안할 때 Case 1보다는 Case 2가 방파제의 안정성을 향상시키는데 보다 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 외부 투과성 원형케이슨의 공극률 감소는 이중 원형케이슨에 작용하는 전체 파력을 저감시킬 수 있지만, 케이슨들에 의해 단처진 유체영역에서 입사파의 주파수와 단처진 유체의 고유 주파수가 일치되어 수면이 상하로만 진동하는 Helmholtz 공진 주파수 변화에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이중 원형케이슨간의 설치 간격이 좁은 경우 공극률 8.0 이상에서는 내부 원형케이슨에 작용하는 파처오름이 눈에 띄게 상승되는 중복파(Standing wave) 현상이 발생하였으나 공극률이 감소할수록 중복파 현상은 발생되지 않았다. 이는 박리 현상과 입사 에너지 손실 효과가 고려되었기 때문으로 생각된다. 따라서 기존 원형케이슨의 전면 또는 후면에 신규 케이슨을 추가 설치할 경우에는 파와 구조물간의 상호작용 영향평가와 더불어 박리현상에 의한 에너지 손실효과도 같이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 방파제 설계에 사용되는 극한 파랑조건은 비선형성이 강한 고파랑임을 감안할 때 본 연구에선 사용된 선형이론 기반의 고유함수전개법과 차이가 발생할 수 있으므로 향후 이에 대한 추가적인 수리실험 및 수치 해석적 검토가 필요하다.

## 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. (2002). Wave absorbing characteristics of a horizontal submerged punching plate. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14(4), 265-273 (in Korean).
- 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., 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.
- Park, M.S. (2020). Wave structure interaction by installation of new circular caissons on old circular caisson breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(5), 307-321 (in Korean).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by porous breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121, 275-282.

Received 19 November, 2020

Revised 3 December, 2020

Accepted 4 December, 2020