

기존 원형케이슨 후면에 신규 원형케이슨 설치에 따른 파력특성 분석 Characteristics of Wave Forces by Installation of New Circular Caisson on the Back of Old Circular Caisson

박민수*
Min Su Park*

요지 : 기존 케이슨의 안정성을 높이기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 본 연구에서는 고유함수전개법을 이용하여 원형케이슨으로 구성된 기존 방파제 후면에 신규 원형케이슨이 설치될 경우 각 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 분석하였다. 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위해 상용화 프로그램인 ANSYS AQWA의 수치 해석결과와 비교를 수행하였으며, 원형 케이슨 추가 설치에 따른 파와 구조물의 상호작용 영향을 고려하여 각 원형케이슨에 작용하는 파력을 산출하였다.

핵심용어 : 고유함수전개법, 원형케이슨, ANSYS AQWA, 파와 구조물 상호작용, 파력

Abstract : In order to increase the stability of old caissons, the design and the construction are performed by installation of new caissons on the back of or on the front of old caissons. In this study, we use the eigenfunction expansion method to analyze the characteristics of wave forces when new circular caissons are installed on the back of old caissons. The comparison of numerical results between eigenfunction expansion method and ANSYS AQWA is made and the wave force acting on each circular caisson is calculated by considering the wave-structure interaction effect.

Keywords : eigenfunction expansion method, circular caisson, ANSYS AQWA, wave-structure interaction, wave force

1. 서 론

지구온난화로 해수면이 상승함에 따라 기존 케이슨 방파제의 설계파도 상향되었으며 이로 인해 케이슨의 활동 및 전도 등에 대한 안정성이 하향되었다. 최근 하향된 기존 케이슨의 안정성을 높이기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 하지만, 현재 이러한 케이슨의 설계는 정립된 바가 없어 설계자의 판단하에 다양하게 수행되고 있으므로, 신규 케이슨 추가 설치에 따른 케이슨에 작용하는 파력특성 평가는 매우 중요하다.

원기동에 의한 파의 산란문제는 해양공학 분야에서 해석해가 존재하는 대표적인 문제로 McCamy and Fuchs(1954)에 의해 해석해가 구해진 이후로 수치해석 방법의 검증용으로 널리 이용되어 왔다(Cho, 2004). Spring and Monkmeyer(1974)는 처음으로 유체를 선형 포텐셜 흐름이라 가정하고 원형 실린더에 대한 준해석적 해(Semi-analytical Solution)을 고유함수전개법을 이용하여 제안하였고, Linton and Evans(1990)는 이 해를 N개의 해저 고정 원형 실린더(Bottom-mounted circular

cylinder)에 확장하여 단순화 시켰다. Kagemoto and Yue(1986)는 고유함수전개법을 이용하여 1개의 원형 실린더 회절 특성에 기초한 대수 방정식을 계산하여 3차원 선형 회절문제에 대한 정확한 해결법을 개발하였으며, McIver and Evans(1984)에 의해 수정 평면파 방법(Modified Plane Wave Method)이 개발되어 다양한 케이스에 대하여 적용되기도 하였다(McIver, 1987; Williams and Demirbilek, 1988; Willimas and Abul-Azm, 1989; Williams and Rangappa, 1994). 비록, 고유함수전개법은 원형 구조물 이외에는 적용 한계가 있지만, 끝이 잘린 원형 실린더(Truncated vertical cylinder)에 대한 동적 상호작용에 대한 연구가 현재까지 고유함수전개법을 이용하여 많은 학자들에 의해 수행되어지고 있다(McIver, 1984; Kim, 1993; Yilmaz, 1998; Siddorn and Eatock Taylor, 2008; Park et al., 2010, 2013).

본 연구에서는 다수의 원형케이슨으로 구성된 기존 방파제 후면에 신규 원형케이슨이 설치될 경우 파와 구조물간의 상호작용에 의해 각 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 분석하기 위해 3차원 선형 포텐셜 이론을 기초로한 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 이용하였다. 특히, N개

*한국건설기술연구원 인프라안전연구본부(Corresponding author: 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)

의 원형 케이슨들 사이의 상호작용을 고려하기 위하여 Linton and Evans(1990)가 사용한 Bessel 함수의 덧셈정리(Addition theorem)를 기반으로 포트란 소스코드를 작성하여 수치해석을 수행하였다. 우선, 본 수치해석의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위해 1열로 배열된 원형케이슨에 작용하는 파력은 상용화 프로그램인 ANSYS AQWA의 수치 해석결과와 비교를 수행하였다. 하지만 ANSYS AQWA 프로그램은 매쉬 요소수에 한계(최대 18,000요소)가 있으며 구조물간의 간격에 따라 매쉬 사이즈가 결정되기 때문에 2열로 배열된 원형케이슨에 작용하는 파력을 ANSYS AQWA로 수치해석을 수행할 경우 막대한 수치해석 시간이 소요되고, 적용 가능한 원형케이슨의 개수도 제한적이다. 따라서 2열로 배열된 원형케이슨(원형 케이슨 3개, 5개, 7개로 구성된 기존 방파제 후면에 추가로 원형 케이슨이 설치되었을 때)인 경우 본 연구에서 제안된 수치해석 방법을 이용하여 각 원형케이슨에 작용하는 파력을 산출하고 파와 구조물의 상호작용 영향도 살펴보았다.

2. 수치해석 이론

Linton and Evans(1990)가 제안한 수치해석이론을 바탕으로 원형케이슨 방파제에 대한 파와 구조물간의 상호작용 영향을 검토하기 위해 수심이 d 인 해저면 바닥에 N 개의 원형케이슨에 대한 수치해석 모델을 Fig. 1과 같이 설정하였다. 원형케이슨은 불투과성 재질로 반지름이 a_j 이며, 해석의 편의를 위하여 Fig. 1과 같이 공간상에 고정된 좌표계(x, y, z)와 N 개의 원형케이슨의 중심에 고정된 좌표계(r_j, θ, z), $j = 1, 2, \dots, N$ 를 도입한다. j 번째 원형케이슨의 중심 좌표는 (x_j, y_j) 이다. j 번째 원형케이슨 중심에 대한 l 번째 원형케이슨 구조물 중심의 상대 위치는 (R_{jl}, α_{jl}) 로 표현할 수 있다. 입사파는 규칙파로 진폭은 $H/2$ 이며, 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 한다

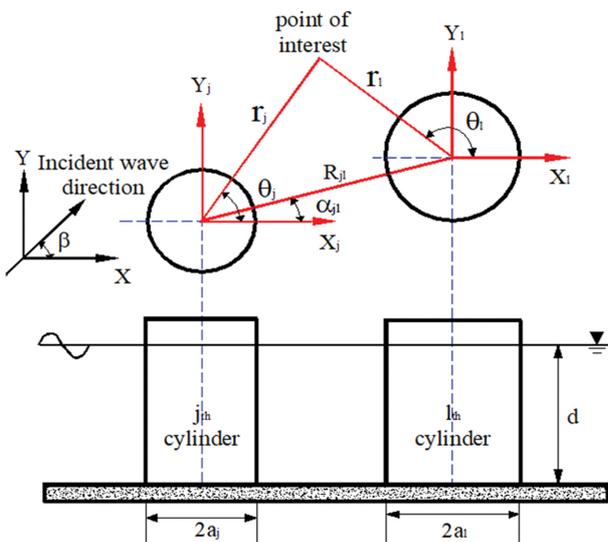


Fig. 1. Definition sketch of numerical model for a circular caisson breakwater.

면 속도포텐셜은 다음과 같다.

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

또한 일정한 수심에 원형케이슨이 바닥으로부터 직립으로 수면까지 놓여있기 때문에 3차원 속도포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서, $f(z) = \frac{\cosh kz}{\cosh kd}$ 이며, k 는 파수(Wavenumber)로 분산

식 $\omega^2 = gk \tanh kd$ 을 만족한다.

입사파의 진폭으로 무차원화된 파형식 $\eta(r, \theta)$ 은 입사파와 N 개의 원형케이슨 구조물들에 의한 산란파의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \eta_I + \sum_{j=1}^N \eta_S^j \tag{3}$$

입사파가 x 축의 양의 방향으로 β 의 각도를 이루면서 들어올 때 식(3)에서 입사파는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_I = e^{ikr \cos(\theta-\beta)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} (i)^n J_n(kr) e^{in(\theta-\beta)} \tag{4}$$

여기서 J_n 은 제1종 Bessel 함수이다. 식(4)를 j 번째 원형케이슨의 중심에 고정된 좌표계에서 표현하면 아래와 같다.

$$\eta_I = I_j \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} (i)^n J_n(kr_j) e^{in(\theta_j-\beta)} \tag{5}$$

여기서 $I_j (= e^{ik(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta)})$ 는 공간상에 고정된 좌표계의 원점과 j 번째 원형케이슨의 중심간의 위상차이를 나타내는 함수이다. j 번째 원형케이슨으로부터 발생하는 산란파는 2차원 Helmholtz 방정식과 무한원방에서의 방사조건식(Radiation condition)을 만족해야 한다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + k^2\right) \eta_S^j = 0 \tag{6}$$

$$\sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik\right) \eta_S^j \rightarrow 0 \text{ as } kr \rightarrow \infty \tag{7}$$

위에 주어진 경계치 문제의 해는 아래와 같다.

$$\eta_S^j = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} e^{in\theta_j} A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) \tag{8}$$

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 파형식을 식(3), (5), (8)을 이용하면 다음과 같다.

$$\eta = I_j \sum_{n=-\infty}^{\infty} (i)^n J_n(kr_j) e^{in(\theta_j-\beta)} + \sum_{j=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\theta_j} A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) \quad (9)$$

N 개의 원형케이슨들 사이의 상호작용을 고려하기 위하여 j 번째 원형케이슨 주위의 파형을 살펴보면, 입사파에 의한 파형과 j 번째 원형케이슨에 의하여 산란된 파형 그리고 주위의 나머지 원형케이슨($l = 1, 2, \dots, N, l \neq j$)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 전체영역에서의 파형식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta(r_j, \theta_j) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ I_j(i)^n e^{-in\beta} J_n(kr_j) + A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{jl}) e^{i(m-n)\alpha_{jl}} J_n(kr_j) \right\} e^{in\theta_j} \quad (10)$$

식(10)은 $r_j < R_{jl}$ 일 때 성립하는 식이다. 식(10)에서 우변의 첫 번째 항은 순수한 입사파를 뜻하며, 두 번째 항은 j 번째 원형케이슨 자체에 의한 산란파를 나타내며, 세 번째 항은 j 번째 원형케이슨을 제외한 인접한 원형케이슨들에 의해 산란된 파가 j 번째 원형케이슨 구조물에 미치는 영향을 나타낸다.

원형케이슨 벽면에서의 경계조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial r_j} = 0 \text{ on } r_j = a_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

식(10)을 식 (11)에 대입하여 정리하며 미지수 A_n^j 에 대한 대수방정식을 아래와 같이 얻을 수 있다(Linton and Evans, 1990; Kim, 1993).

$$A_n^j + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{jl}) e^{i(m-n)\alpha_{jl}} = -I_j(i)^n e^{-in\beta} \quad j = 1, 2, \dots, N, -\infty < n < \infty \quad (12)$$

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)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$A_n^j + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N \sum_{m=-M}^M A_m^l Z_m^l H_{m-n}(kR_{jl}) e^{i(m-n)\alpha_{jl}} = -I_j(i)^n e^{-in\beta} \quad j = 1, 2, \dots, N, m = -M, \dots, M \quad (13)$$

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

원형케이슨에 작용하는 파력을 구하기 위해 구해진 미지수를 각 속도 포텐셜에 대입하고 원형케이슨 표면에 대하여 아래와 같이 적분한다.

$$F_x^j = -\frac{\rho g H a_i}{2k} \tanh kd \int_0^{2\pi} \eta(a_j, \theta_j) \cos \theta_j d\theta_j \quad (14)$$

$$F_y^j = -\frac{\rho g H a_i}{2k} \tanh kd \int_0^{2\pi} \eta(a_j, \theta_j) \sin \theta_j d\theta_j \quad (15)$$

따라서, j 번째 원형케이슨에 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$F_x^j = -\frac{i \rho g H \tanh kd}{k^2 H_1'(ka_j)} (A_{-1}^j - A_1^j) \quad (16)$$

$$F_y^j = -\frac{\rho g H \tanh kd}{k^2 H_1'(ka_j)} (A_{-1}^j + A_1^j) \quad (17)$$

식(16)은 x 방향의 파력을, 식(17)은 y 방향의 파력을 나타낸다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 2는 4개의 원형실린더로 구성된 구조물에 작용하는 파력을 나타내며, 계산결과는 Linton and Evans(1990)의 해석해와 비교하였다. 수치해석에서 수심 d 를 기준으로 원형실린더의 반지름 비(a/d)는 0.5이며, 각 원형실린더의 중심 좌표는 $(-d, d), (d, d), (d, -d), (-d, -d)$ 이고 시계방향으로 1~4로 구분하였다. 파랑은 실린더 4번 방향으로 입사한다고 설정하였고 각 실린더 중심좌표간의 거리(R)는 $2a$ 이며, 고유모드의 개수(M)는 10으로 고정하였다. 그림에서 x 축은 파수에 원형실린더의 반지름을 곱한 값을 나타내고 있으며 y 축은 $k^2 H_1'(ka)/4\rho g A \tanh kd$ 를 곱한 무차원화된 파력을 나타낸다. 그림에서 1번 실린더와 3번 실린더에 작용하는 파력이 동일

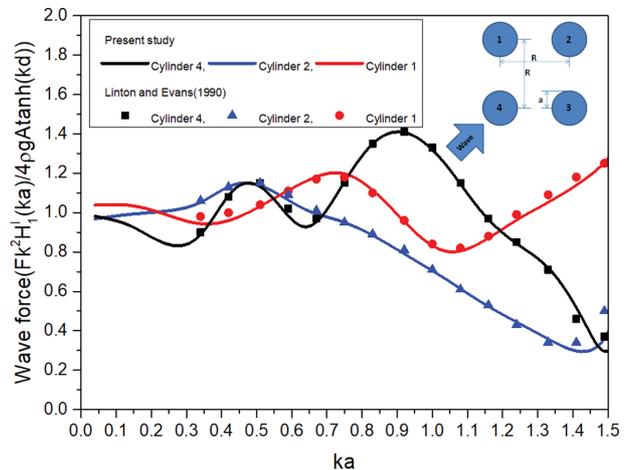


Fig. 2. Wave force for a group of four cylinders situated at the vertices of square ($a/d = 0.5, R/d = 2.0, \beta = \pi/4$).

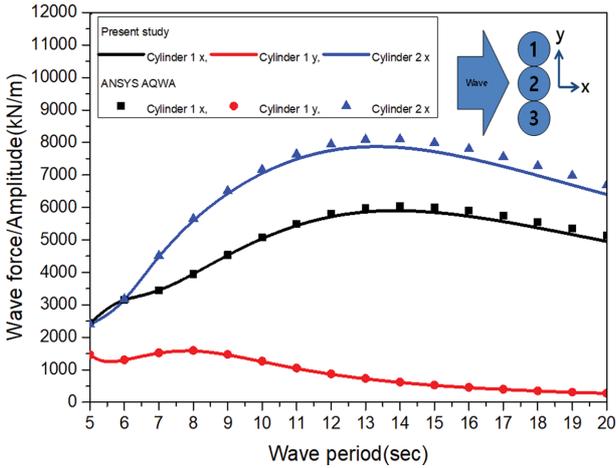


Fig. 3. Wave force for a group of three circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

하기 때문에 3번 실린더에 작용하는 파력은 나타나지 않았다. 파와 구조물의 상호작용 영향으로 각 실린더에 작용하는 파력은 입사하는 파랑의 파수(규칙파)에 따라 다양한 패턴을 나타내었으며, 본 연구의 계산결과는 Linton and Evans(1990)의 해석해와 좋은 일치를 보였다.

3개의 원형 케이슨으로 구성된 방파제 후면에 추가로 원형 케이슨을 설치할 경우 각각의 원형 케이슨에 작용하는 파력 특성을 검토하기 위해 Fig. 3에서와 같이 3개의 원형케이슨 방파제에 작용하는 파력을 상용화 프로그램인 ANSYS AQWA 결과와 비교하여 제안된 수치해석 방법의 정확도를 검증하였다. 수치해석에서 원형케이슨의 반경은 10 m이며 수심은 15 m이고, 원형케이슨간의 간격은 항만 및 어항공사 표준시방서에서 제시하는 5,000톤 이상 케이슨의 거치허용 오차인 150 mm이다. 본 연구에서 제안된 수치해석 방법은 ANSYS AQWA와 매우 좋은 일치를 보이고 있어 매우 정확도 높은 수치해석이 가능한 것을 확인할 수 있다. Fig. 4와 5는 3개의 원형케이슨 방파제 후면에 추가로 원형케이슨이 설치된 경

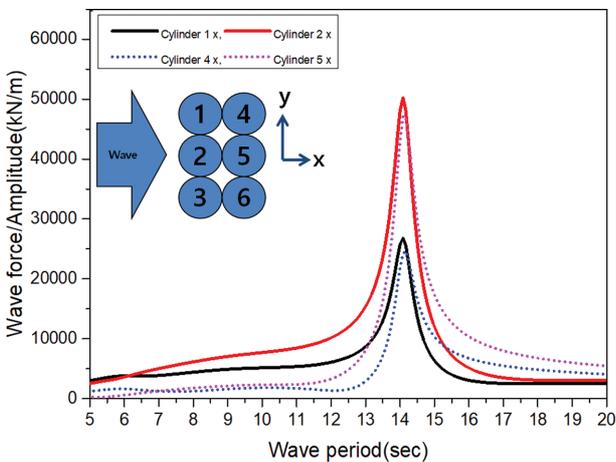


Fig. 4. Wave force of x direction for a group of six circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

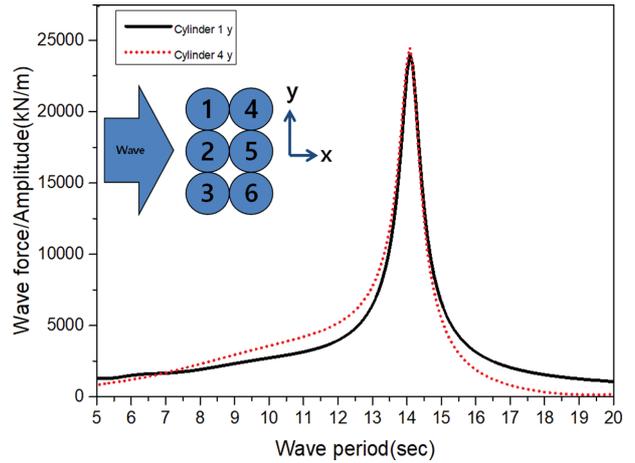


Fig. 5. Wave force of y direction for a group of six circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

우 각각의 원형케이슨에 작용하는 x 방향과 y 방향의 파력을 나타내고 있다. 각각의 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 명확히 파악하기 위해 수치해석에서 입사파의 입사각은 x 축과 평행하게 입사하는 0도에 대해서만 고려하였다. 그림에서 x 축은 입사파의 주기를 나타내고 y 축은 원형 케이슨에 작용하는 파력을 입사파의 진폭($H/2$)으로 나눈 값을 나타낸다. x 방향, y 방향으로 작용하는 파력은 주기 14초 부근에서 피크 값을 나타내고 있으며 중앙에 위치한 2번, 5번 원형케이슨에 작용하는 x 방향의 파력이 외곽에 위치한 1번, 4번의 원형케이슨보다 큰 값을 나타내고 있다. 입사파가 x 축과 평행하게 입사하기 때문에 중앙에 위치한 2번, 5번 원형케이슨에 작용하는 y 방향의 파력은 제로값을 가진다. Fig. 6은 후면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파력을 전면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파력으로 나눈비를 나타내고 있다. 여기서 파력비가 1.0은 전면 원형케이슨에 작용한 파력과 후면 원형케이슨에 작용하는 파력이 동일한 것을 의미한다. 그림에서 x 방향의 파력비는 피크값을 가지는 주기 14초 부근에서 1.0을

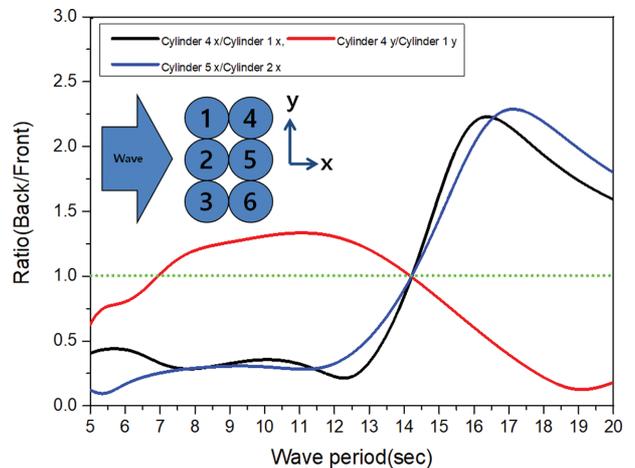


Fig. 6. Ratio of wave force for a group of six circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

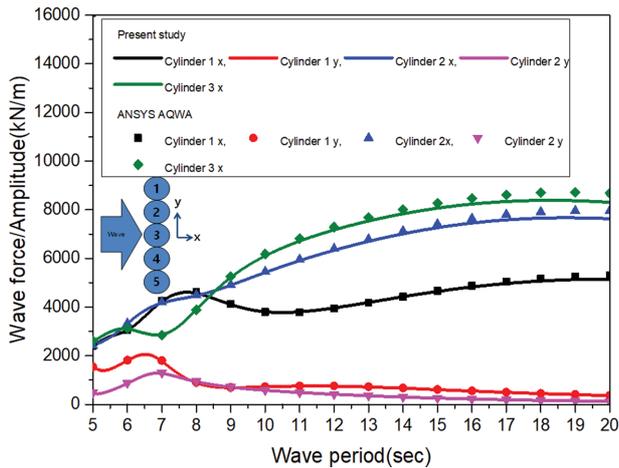


Fig. 7. Wave force for a group of five circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

나타내고 있으며, 주기 14초 부근 이전에는 전면 원형케이슨에 작용하는 파력이 크지만 14초 부근 이후부터는 후면 원형케이슨에 작용하는 파력이 눈에 띄게 상승하는 것을 확인할 수 있다. y 방향의 파력비는 x 방향의 파력비와는 상반된 경향을 보이고 있다. 기존 원형케이슨 후면에 신규 원형케이슨을 설치하여 기존 케이슨의 안정성을 향상시킬 경우 주기가 짧은 파랑에 대해서는 안정성을 확보할 수 있다. 하지만, 일반적으로 극한파랑조건(태풍 등)의 주기가 장주기인 것을 감안할 때 후면에 설치된 원형케이슨의 안정성은 상당히 낮아져 전면에 설치된 원형케이슨보다 후면에 설치된 원형케이슨의 전도 및 활동이 발생할 수 있다.

Fig. 7에 5개의 원형케이슨 방파제에 작용하는 파력을 상용화 프로그램인 ANSYS AQWA 결과와 비교하여 제안된 수치해석 방법의 정확도를 검증하였다. 수치해석조건은 3개의 원형케이슨과 동일하며 원형케이슨의 개수 증가에 따른 구조물과 파랑의 상호작용 영향에 의한 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 검토하였다. 3개의 원형케이슨과 비교해 5개의 원

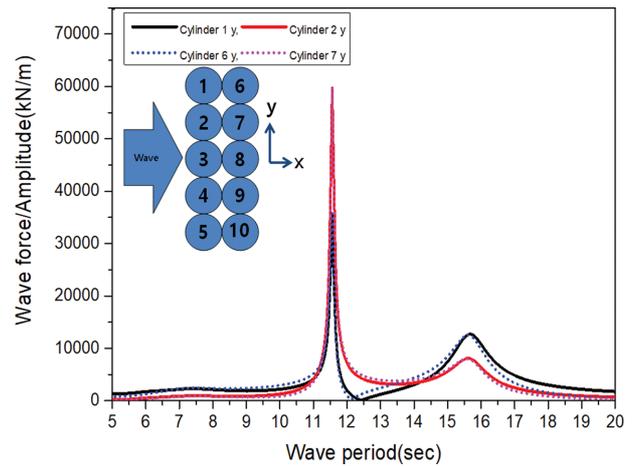


Fig. 9. Wave force of y direction for a group of ten circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

형케이슨의 경우 중앙에 위치한 케이슨에 작용하는 파력이 단주기 영역(6초~8.5초)에서 변화가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 8와 9는 5개의 원형케이슨 방파제 후면에 추가로 원형케이슨이 설치된 경우 각각의 원형케이슨에 작용하는 x 방향과 y 방향의 파력을 나타내고 있다. 원형케이슨의 개수가 증가할 경우 주기 11.5초 부근과 15.5초 부근에서 피크가 발생하였으며 중앙에 위치한 원형케이슨에 작용하는 파력이 큰 값을 가지며 중앙에서 멀어질수록 원형케이슨에 작용하는 파력은 감소하였다. 중앙에 위치한 원형케이슨 3번에 작용하는 파력을 5개의 원형케이슨이 1열 배치된 경우(Fig. 7)와 2열로 배치된 경우(Fig. 8) 대해 비교해 보면 후면에 추가로 원형케이슨이 설치되기 전에는 최대 약 800 kN/m의 파력이 작용한다. 하지만 후면에 원형케이슨이 설치되면 초기 피크값이 발생되기 전까지는 대략 800 kN/m의 파력이 작용하고 피크값 이후부터는 파력이 눈에 띄게 증가하였다. 이는 파와 구조물의 상호작용 영향으로 원형케이슨 3번을 통과한 파랑이 후면에 위치한 원형케이슨 7번, 8번, 9번에 의해 다시 반사되

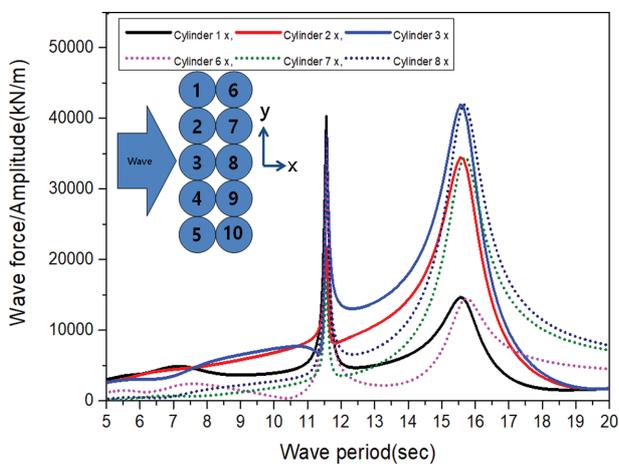


Fig. 8. Wave force of x direction for a group of ten circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

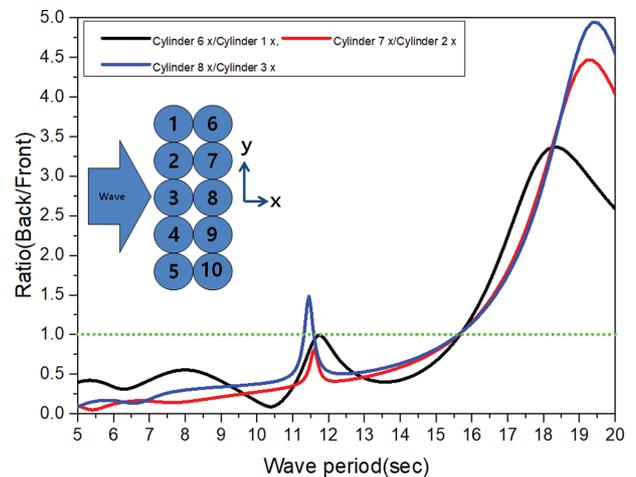


Fig. 10. Ratio of x direction for a group of ten circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

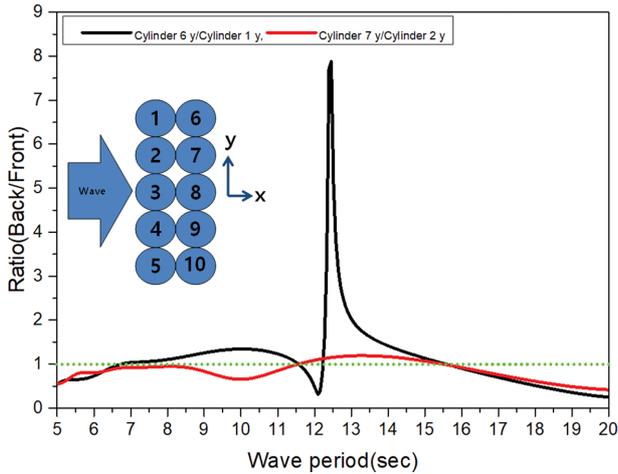


Fig. 11. Ratio of y direction for a group of ten circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

면서 파력이 크게 증가한 것으로 판단할 수 있다. 후면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 x 방향의 파력을 전면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 x 방향 파력으로 나눈비를 Fig. 10에 나타내었다. 첫 번째 피크에서 8번 원형케이슨에 작용하는 파력이 전면에 위치한 3번 원형케이슨에 작용하는 파력보다 높은 값을 나타내지만 그 외 원형케이슨들은 전면에 위치한 원형케이슨 보다 낮은 값을 보이고 있다. 하지만 두 번째 피크 이후부터는 후면에 위치한 모든 원형케이슨이 전면에 위치한 원형케이슨보다 상당히 높은 파력의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 3개의 원형케이슨 후면에 추가로 원형케이슨을 설치한 Fig. 6번과 매우 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 11은 y 방향의 파력비를 보여주고 있는데, 7번 원형케이슨에 작용하는 파력은 첫 번째 피크주기와 두 번째 피크주기 사이에서 전면에 위치한 2번 원형케이슨에 작용하는 파력보다 큰 값을 가지지만 그 외 주기에 대해서는 작은 값을 나타내었다. 맨 끝에 위치한 6번 원형케이슨에 작용하는 y 방향의 파력은 첫 번째 피크주기(11.5초)보다는 12.5초에서 1번 원형케이슨에 작

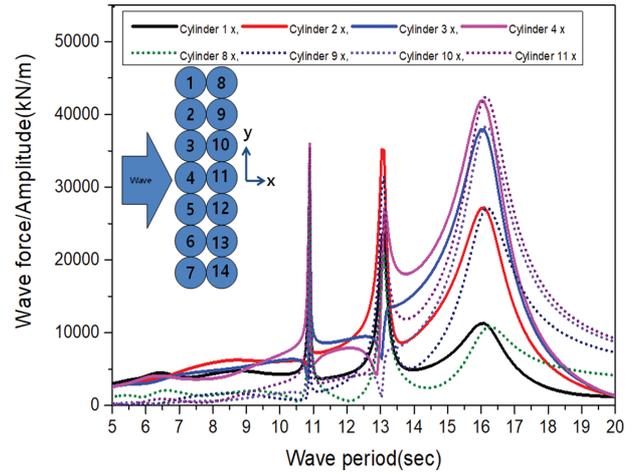


Fig. 13. Wave force of x direction for a group of fourteen circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

용하는 파력보다 8배 정도가 증가하고 이후 점차 감소하여 두 번째 피크주기 이후부터는 전면에 위치한 1번 원형케이슨보다 낮은 파력의 영향을 받았다.

원형케이슨의 개수증가에 따른 파력특성을 보다 면밀히 검토하기 7개의 원형케이슨에 작용하는 파력을 Fig. 12에 나타내었다. 원형케이슨의 개수가 증가할수록 단주기 영역에서 파와 구조물의 상호작용 영향으로 원형케이슨에 작용하는 파력 특성이 변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13과 14는 7개의 원형케이슨 방파제 후면에 추가로 원형케이슨이 설치된 경우 각각의 원형케이슨에 작용하는 x 방향과 y 방향의 파력을 나타내고 있다. 원형케이슨의 개수가 증가할수록 피크값의 발생 빈도도 같이 증가하고 있다. 5개의 원형케이슨의 후면에 추가로 원형케이슨이 설치된 경우(Fig. 8과 9)와 비교해 보면 첫 번째 피크주기가 11.5초 부근에서 11초 부근으로 이동하고, 5개의 원형케이슨 마지막 피크주기가 15.5초 부근에서 16초 부근으로 나타났다. 특이한 것은 첫 번째 피크점과 마지막 피크점 사이에 원형케이슨 개수증가에 따라 피크점이 추

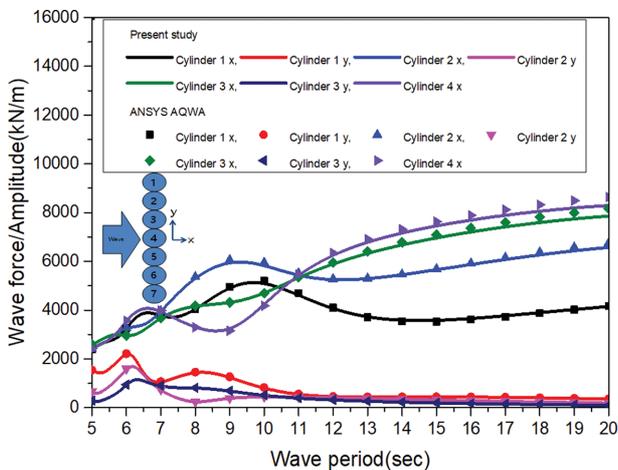


Fig. 12. Wave force for a group of seven circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

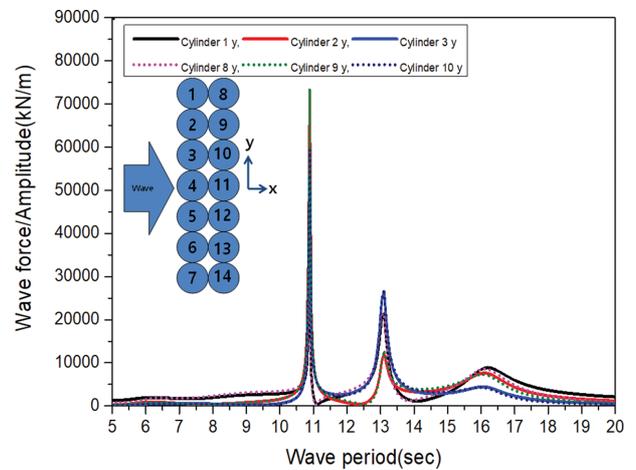


Fig. 14. Wave force of y direction for a group of fourteen circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

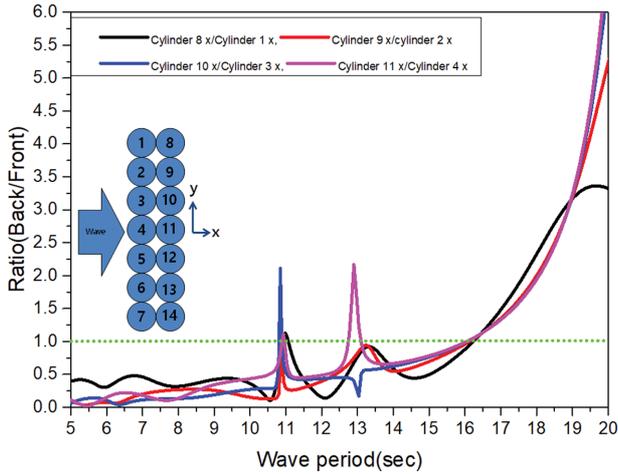


Fig. 15. Ratio of x direction for a group of fourteen circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

가로 발생하는 것이다. 이는 파와 구조물간의 상호작용 영향을 고려한 기존 논문(Linton and Evans, 1990; Cho, 2004)들의 원형실린더 주변 파형분포를 나타낸 그림은 보면 원형실린더가 서로 근접해있는 경우 인접한 원형실린더 사이로 입사파가 통과할 때 특정주파수에서 파쳐오름이 증가하는 현상과 관련이 있다. 즉 전면에 위치한 원형케이슨 사이로 통과한 입사파가 다시 후면에 위치한 원형케이슨에 의해 반사되면서 전면 케이슨과 후면케이슨 사이 공간에서 파랑이 중첩되어 구조물에 작용하는 파력이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 원형케이슨의 개수가 증가할수록 전면 케이슨과 후면 케이슨 사이 공간개수도 같이 증가하여 원형케이슨 개수증가와 더불어 피크점이 추가로 발생하는 것이라고 생각할 수 있다. 또한 공간개수가 증가할수록 공간간의 상호작용으로 피크점의 발생주기도 변화한 것으로 판단된다. 앞의 경우와 유사하게 첫 번째 피크발생 이전까지는 파력이 서서히 증가하지만 피크발생 이후에는 파력이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 후면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 x 방향의 파력을 전면에 위치한 원형케이슨에 작용하는 x 방향 파력으로 나눈비를 Fig. 15에 나타내었다. 첫 번째, 두 번째 피크에서 중앙에 위치한 11번 원형케이슨에 작용하는 파력이 전면에 위치한 4번 원형케이슨에 작용하는 파력보다 높은값을 나타낸다. 하지만 그 외 원형케이슨들은 전면에 위치한 원형케이슨보다 낮은값을 보이고 있다. 세 번째 피크이후부터는 후면에 위치한 모든 원형케이슨이 전면에 위치한 원형케이슨보다 상당히 높은 파력의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 3개 및 5의 원형케이슨 후면에 추가로 원형케이슨을 설치한 앞의 조건과 매우 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 16은 y 방향의 파력비를 보여주고 있는데, 10번 원형케이슨에 작용하는 파력은 두 번째 피크주기와 세 번째 피크주기 사이에서 전면에 위치한 3번 원형케이슨에 작용하는 파력보다 큰값을 가지지만 그 외 주기에 대해서는 작은값을 나타내었다. 9번 원형케이슨에 작용하는 파력은 첫 번째 피크이후 증가하다가 두 번째

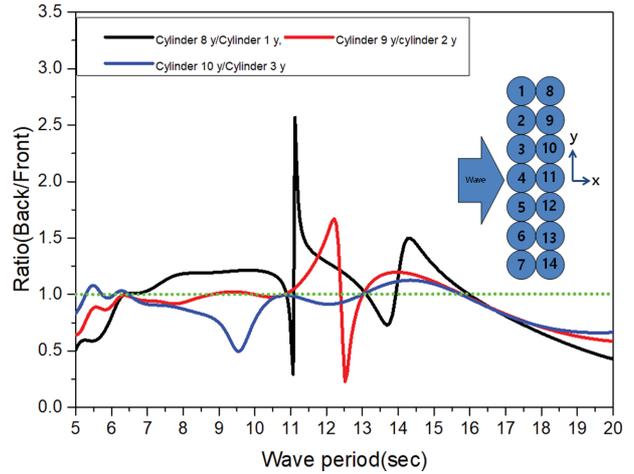


Fig. 16. Ratio of y direction for a group of fourteen circular caissons ($a = 10$ m, $d = 15$ m, $R = 20.15$ m, $\beta = 0$).

피크이전 급격히 감소하고 다시 증가하는 특이한 현상이 발생하였다. 맨 끝에 위치한 8번 원형케이슨에 작용하는 y 방향의 파력은 첫 번째 피크주기와 마지막 피크주기 사이에 다양한 변곡점이 발생하였다. 이는 원형케이슨의 개수가 증가할수록 구조물과 파랑의 상호작용 영향으로 원형케이슨에 작용하는 파력특성이 상당히 복잡해지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

기존 케이슨의 안정성을 높이기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 하지만, 신규 케이슨 추가 설치에 따른 각 케이슨에 작용하는 파력특성을 평가하기 위해서는 파와 구조물간의 상호작용 영향이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 다수의 원형케이슨으로 구성된 기존 방파제 후면에 신규 원형케이슨이 설치될 경우 파와 구조물간의 상호작용에 의해 각 원형케이슨에 작용하는 파력특성을 3차원 선형 포텐셜 이론을 기초로한 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 이용하여 분석하였다. 1열로 배열된 원형케이슨 방파제에 작용하는 파력을 상용화 프로그램인 ANSYS AQWA의 수치 해석결과와의 비교를 통해 본 연구의 수치계산 결과는 높은 정확성과 신뢰성을 나타내었다. 따라서 개발된 수치해석 프로그램은 다수의 원형케이슨으로 구성된 방파제에서 파와 구조물간의 상호작용 영향평가에 적용이 가능하다. 1열의 원형 케이슨으로 구성된 방파제에서 원형 케이슨의 개수가 증가할수록 파와 구조물의 상호작용은 장파장에서는 미소하게 나타났으나 단파장에서는 파형 변화가 크게 나타났다. 기존 원형 케이슨 후면에 신규 원형케이슨을 설치한 2열 원형 케이슨 방파제인 경우 첫 번째 피크점과 마지막 피크점 사이에 원형케이슨 개수증가에 따라 피크점이 추가로 발생하였다. 또한, 첫 번째 피크발생 이전까지는 파력이 서서히 증가하지만 피크발생 이후에는 파력이 급격히 증가하는 것을 확

인할 수 있다. 기존 원형케이슨 후면에 신규 원형케이슨을 설치하여 기존 케이슨의 안정성을 향상시킬 경우 주기가 짧은 파랑에 대해서는 안정성을 확보할 수 있다. 하지만, 일반적으로 극한파랑조건(태풍 등)의 주기가 장주기인 것을 감안할 때 후면에 설치된 원형케이슨의 안정성은 상당히 낮아져 전면에 설치된 원형케이슨보다 후면에 설치된 원형케이슨의 전도 및 활동이 발생할 수 있다. 따라서, 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 케이슨을 설치할 경우 파와 구조물간의 상호작용 영향을 고려한 각 케이슨에 작용하는 파력 특성평가는 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 안전한 항만 구축 및 관리기술 개발사업인 “재해안전항만 구축 기술개발(20180323)” 과제와 한국건설기술연구원의 지역협력사업인 “연근해용 파력발전시스템 실증연구(20190493-001)” 과제를 통해 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 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).
- 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).
- 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 Demirebilek, Z. (1988). Hydrodynamic Interaction in Floating Cylinder Arrays; Part I-Wave Scattering. *Ocean Engineering*, 15, 549-582.
- 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 18 November, 2019

Revised 10 December, 2019

Accepted 19 December, 2019