

부유식 복합발전 플랫폼내의 다수 파력발전기 배치를 위한 상호작용 해석

이혜빈¹ · 조일형^{2,†} · 김경환³ · 홍기용³¹제주대학교 풍력특성화협동과정²제주대학교 해양시스템공학과³한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트연구부

Interaction Analysis on Deployment of Multiple Wave Energy Converters in a Floating Hybrid Power Generation Platform

Hyebin Lee¹, Il Hyoung Cho^{2,†}, Kyong-Hwan Kim³ and Keyyong Hong³¹Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University, Jeju 63243, Korea²Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea³Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

본 연구에서는 부유식 풍력-파력 복합발전 플랫폼 안에 설치된 다수 파력발전기의 현 배치안을 부체 간의 상호 간섭효과를 고려하여 평가하였다. 다수 부체가 수면 위에 떠 있는 경우, 순수한 입사파와 함께 인접한 부체에 의해 발생하는 산란파와 방사파의 영향으로 인해 다수 부체 간의 상호작용 과정은 매우 복잡하다. 다수 파력발전기 배열에 따른 회절 및 방사 문제의 상호작용 해석을 위하여 고유함수전개법을 적용하였다. 해석해의 타당성을 검증하기 위하여 상용 프로그램인 WAMIT으로부터 계산된 수치계산 결과와 비교하였다. 다수 부체 간의 상호 간섭효과를 나타내는 q-factor를 이용하여 복합발전 플랫폼내의 24기 파력발전기의 현 배치안에 대한 전체 성능을 평가하였다.

Abstract – In this study, the present deployment of the multiple wave energy converters (WECs) in a floating wind-wave hybrid power generation platform was estimated considering the interaction effect among WEC buoys. The interaction processes of multiple buoys were very complex, since scattered and radiated waves from each buoy affected the others in the array. The interaction analysis of the diffraction and radiation problem by the array of WECs was applied by matched eigenfunction expansion method (MEEM). The analytical solutions were compared with the results of numerical calculation based on WAMIT. The overall performance of 24 WECs installed in the hybrid power generation platform was evaluated by the q-factor representing the interaction effect among buoys.

Keywords: Wave energy converter(파력발전기), Extracted power(추출파워), Scattered wave(산란파), Radiated wave(방사파), Eigenfunction expansion method(고유함수전개법), Interaction effect(상호간섭효과)

1. 서 론

제주도 차귀도 인근 해역에 설치 예정인 부유식 풍력-파력 복합발전 플랫폼은 Fig. 1a와 같이 4기의 풍력 터빈으로부터 8MW, 24기의 파력발전기로부터 2MW의 전기를 생산하여, 총 10MW 이상의 발전량을 목표로 하는 복합발전 시스템이다. 4기의 풍력 터빈을 하나의 부유 구조물에 배치하기 위해서는 풍력 터빈 간의 간섭효과를 최소화하여 발전량을 극대화하는 배치가 고려되어야 한다. 따라서 간섭효과를 줄임과 동시에 구조적 안전성을 높이기 위하여 풍

력 터빈을 반 잠수식 플랫폼(150 m×150 m)의 네 기둥 위에 하나씩 배치하였다. 그러나 풍력 터빈을 통과하면서 발생하는 후류의 영향으로 주변 풍력터빈에 부정적인 영향을 미친다. 한편 파력발전기 간의 상호 간섭효과는 다수 파력발전기가 놓인 위치에 따라 전체 추출파워는 증가할 수도, 감소할 수도 있다. 따라서 파력발전기의 현 배치안에 대한 엄밀한 평가를 내리기 위해서는 다수 부체 간의 상호작용에 의한 간섭효과를 고려하여 24기의 파력발전기의 수직운동 변위와 이로부터 발생하는 추출파워를 정확히 예측해야 한다. 현 설계 단계에서 제안된 배치안은 Fig. 2와 같이 플랫폼 각 모서리에 6기씩 총 24기가 배치된 형태이다.

[†]Corresponding author: cho0904@jejunu.ac.kr

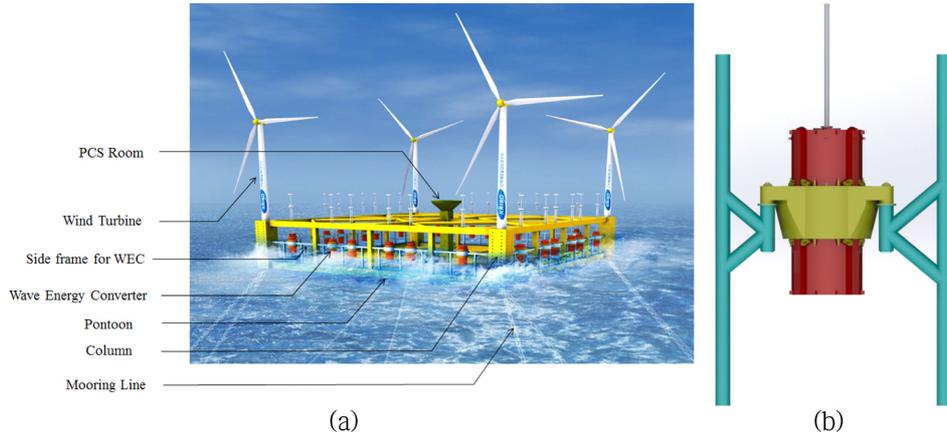


Fig. 1. Conceptual design of hybrid power generation platform and designed WEC.

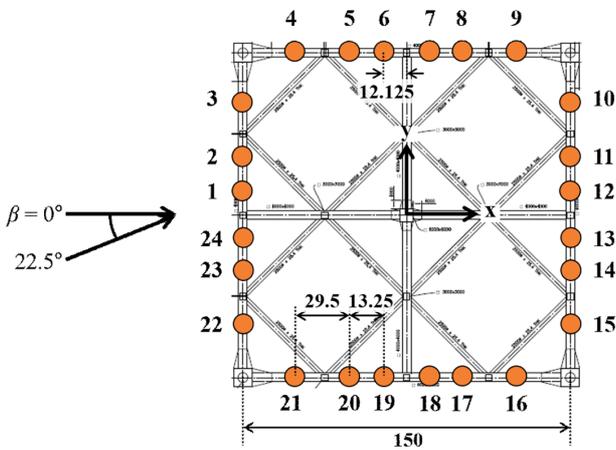


Fig. 2. Configuration sketch for present deployment of WECs and incident wave headings (β).

Kagemoto and Yue[1986]는 단일 부체에 대한 해석해가 존재할 때 적용 가능한 상호작용 이론(interaction theory)을 제안하여 다수 부체에 대한 회절문제를 처음으로 풀었다. Murai *et al.*[1999]은 다수 부체로 지지되는 대형 부유 구조물에 Kagemoto and Yue[1986]의 상호작용 이론을 적용하였다. Linton and Evans[1990]는 해저면에 고정된 다수의 원기둥에 의한 회절문제를 해석하였다. Yilmaz and Incecik[1998]는 Kagemoto and Yue[1986]의 상호작용 이론을 일정한 흡수를 갖는 다수의 원형 부체의 배열 문제로 확장하여 파기진력과 동유체력을 구하였다. Yilmaz *et al.*[2001]은 4개의 고정된 부체로 지지되는 반 잠수식 플랫폼에 대한 회절과 방사문제를 풀어 플랫폼 주변의 수면 변위를 구하고 모형실험 결과와 비교하였다. Siddorn and Taylor[2008]는 수면 위에 떠 있는 다수 부체에 의한 방사문제와 회절문제를 주파수 영역에서 풀어 파기진력과 동유체력을 구하였다. Child and Venugopal[2010]은 점 흡수식 파력발전기가 여러 개 배열되어 있을 때 입사파와 다수 파력발전기 사이의 상호작용 문제를 해석하여 파력발전기의 최적 배열을 연구하였다. 다수 파력발전기의 상호작용 해석에 대한 수치계산 연구로 Taghipour and Moan[2008]은 21기의 파력발전기를 탑재한 플랫폼과 각 파력

발전기의 운동을 연성하여 해석하였다. 이때 21기 파력발전기와 플랫폼 하부 구조물 간의 상호간섭 효과를 고려하여 상대 수직운동 변위를 구하고 이로부터 추출파위를 계산하였다. Lee *et al.*[2016]은 WAMIT 상용코드를 사용하여 풍력-파력 복합발전 플랫폼에 적용하여 플랫폼의 하부구조물과 다수 파력발전기 간의 간섭효과가 플랫폼의 운동 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 입사파와 다수 파력발전기 간의 상호작용을 고려한 회절과 방사문제를 풀어 각 파력발전기의 파기진력과 수직운동 변위 그리고 추출파위를 구하였다. 해석방법으로 Kagemoto and Yue[1986]가 제안한 상호작용 이론에 기반을 둔 Child and Venugopal[2010]와 Cho[2016]의 해석방법을 사용하였다. 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 해석하는 상용코드인 WAMIT의 수치계산 결과와 비교 하였다. 다수 파력발전기 간의 상호 간섭효과를 나타내는 q-factor를 이용하여 현재의 배치안에 대한 종합적인 평가를 내렸고 이를 기반으로 최적의 배치안을 검토하고자 한다.

2. 문제의 정식화

수심이 h 로 일정한 수면 위에 반경이 a 이고, 흡수가 d 인 동일한 형태의 파력발전기가 Fig. 2와 같이 복합발전 플랫폼 안에 다수 배열되어 있고, 입사파가 입사각 β 를 가지고 진행할 때 파력발전기 간의 상호 간섭효과를 고려하여 각 파력발전기의 수직운동 변위와 추출파위를 구하였다. 이때 파력발전기의 수직운동을 제외한 다른 운동 모드는 구속되었다고 가정하였고 Fig. 1b의 파력발전기를 감싼 원통 가이드 실린더의 영향은 무시하였다.

Fig. 3과 같이 공간상에 고정된 좌표계(X, Y, z)와 각 파력발전기의 중심에 고정된 좌표계(r_j, θ_j, z), $j = 1, 2, \dots, 24$ 를 도입한다. j 번째 파력발전기의 중심의 좌표는 (x_j, y_j) 이다. i 번째 파력발전기의 중심에 대한 j 번째 파력발전기의 중심의 상대 위치는 (R_{ij}, α_{ij}) 로 표현할 수 있다. 선형포텐셜 이론을 가정하여 도입한 속도포텐셜을 시간과 공간의 함수로 분리하면 $\Phi(r, \theta, z, t) = \text{Re}\{\phi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}\}$ 로 쓸 수 있다. 공간의 함수인 $\phi(r, \theta, z)$ 는 아래와 같은 경계치 문제를 만족한다.

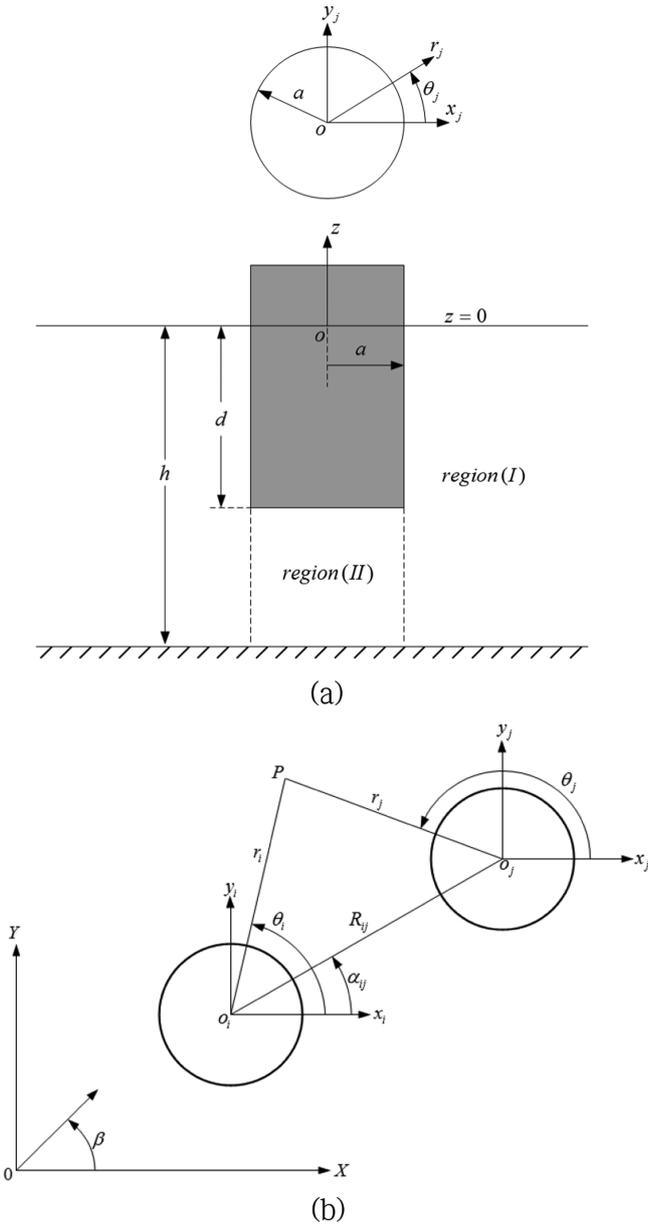


Fig. 3. (a) Side view of buoy and (b) plan view of multiple buoys and coordinate systems.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial r_j} = 0, \text{ on } r_j = a, -d \leq z \leq 0, j = 1, 2, \dots, 24 \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = w_j, \text{ on } z = -d, 0 \leq r_j \leq a, j = 1, 2, \dots, 24 \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ on } z = -h \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0, \text{ on } z = 0, r_j \geq a, j = 1, 2, \dots, 24 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도이며, $w_j (= -i\omega \xi_j)$ 는 j 번째 파력발전기의 수직 운동 속도로 복소수 값을 갖는다. 속도포텐셜 $\phi(r, \theta, z)$ 은 입사포

텐셜(ϕ^i)과 산란포텐셜(ϕ^s) 그리고 방사포텐셜(ϕ^r)의 합으로 표현된다. 산란포텐셜과 방사포텐셜은 아래와 같은 방사 경계조건식을 만족한다.

$$\lim_{k_1 r_j \rightarrow \infty} \sqrt{r_j} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r_j} - ik_1 \phi \right) = 0 \quad (2)$$

여기서 k_1 는 입사파의 파수이다.

2.1 입사포텐셜

입사파가 진폭(A)과 주파수(ω)를 가지고 x 축과 β 의 입사각도를 가지고 진행할 때 j 번째 파력발전기의 중심에 고정된 좌표계(r_j, θ_j, z)에서 입사포텐셜을 나타내면 다음식과 같다.

$$\phi_j^i = -\frac{igA \cosh k_1(z+h)}{\omega \cosh k_1 h} \Lambda_j \sum_{n=-\infty}^{\infty} (i)^n J_n(k_1 r_j) e^{in(\theta_j - \beta)} \quad (3)$$

여기서 $\Lambda_j (= e^{ik_1(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta)})$ 는 공간 고정 좌표계(OXY)의 원점과 j 번째 파력발전기의 중심(x_j, y_j) 간의 위상차를 나타내는 함수이다. 입사포텐셜을 공간함수와 계수로 분리하여 벡터식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_j^i = -\frac{igA}{\omega} \mathbf{a}_j^T \boldsymbol{\psi}_j^i \quad (4)$$

여기서 윗첨자 T 는 전치행렬을 나타낸다. 벡터식 \mathbf{a}_j 와 $\boldsymbol{\psi}_j^i$ 의 원소들은 다음과 같다.

$$(\mathbf{a}_j)_m^n = \begin{cases} (i)^n \Lambda_j e^{-in\beta}, & m = 0 \\ 0, & m \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$(\boldsymbol{\psi}_j^i)_m^n = \begin{cases} J_n(k_1 r_j) e^{in\theta_j} \frac{N_{10}}{\cosh k_1 h} f_{10}(z), & m = 0 \\ I_n(k_{1m} r_j) e^{in\theta_j} f_{1m}(z), & m \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 J_n, I_n 는 각각 제1종 Bessel함수와 변형된 Bessel함수를 나타낸다.

식 (6)에서 고유값($k_{10} = -ik_1, k_{1m}, m=1,2,\dots$)은 선형분산식($k_{1m} \tan k_{1m} h = -\omega^2/g$)을 만족하며, 고유함수 $f_{1m}(z)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$f_{1m}(z) = N_{1m}^{-1} \cos k_{1m}(z+h), m = 0, 1, 2, \dots$$

$$(N_{1m})^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin 2k_{1m} h}{2k_{1m} h} \right) \quad (7)$$

식 (7)에 정의된 고유함수 $f_{1m}(z)$ 는 아래와 같은 직교성(Orthogonality)을 만족한다.

$$\frac{1}{h} \int_{-h}^0 f_{1m}(z) f_{1n}(z) dz = \delta_{mn} \quad (8)$$

여기서 δ_{mn} 는 $n=m$ 일 때 1이고, $n \neq m$ 일 때 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta함수이다.

2.2 산란포텐셜

산란포텐셜을 구하는 해석방법으로 고유함수 전개법을 적용하였다. 고유함수 전개법을 적용하기 위하여 유체영역을 Fig. 3a와 같이 영역 (I)과 영역 (II)로 나눈다. 영역 (I)은 $r_j \geq a, -h \leq z \leq 0$, 영역 (II)은 $0 \leq r_j \leq a, -h \leq z \leq -d$ 로 정의된다.

영역 (I)의 산란포텐셜은 Laplace방정식과 함께 자유표면, 해저면, 방사 경계조건식을 만족한다. i 번째 파력발전기에 의한 산란포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_i^s = -\frac{igA}{\omega} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{im}^n \frac{K_n(k_{1m}r_i)}{K_n(k_{1m}a)} f_{1m}(z) e^{in\theta}, \quad (9)$$

여기서 제2종 변형된 Bessel함수 K_n 는 $m=0$ 일 때 $K_n(-ix) = \frac{1}{2}\pi i^{n+1} H_n(x)$ 로 바뀌며, 이때 H_n 는 제1종 Hankel함수이다.

입사포텐셜과 마찬가지로 산란포텐셜을 공간함수와 계수로 분리하여 벡터식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_i^s = -\frac{igA}{\omega} \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\psi}_i^s \quad (10)$$

여기서 공간 함수 $\boldsymbol{\psi}_i^s$ 의 원소들은 다음과 같다.

$$(\boldsymbol{\psi}_j^s)_m = \frac{K_n(k_{1m}r_j)}{K_n(k_{1m}a)} f_{1m}(z) e^{in\theta}, \quad m \geq 0 \quad (11)$$

다수 파력발전기 간의 상호 간섭효과를 고려하기 위하여 i 번째 파력발전기에 의해 산란된 파는 나머지 파력발전기($j=1,2,\dots,24, i \neq j$)에게 입사파로 작용한다. 산란포텐셜 $(\boldsymbol{\psi}_i^s)_m$ 을 입사포텐셜 $(\boldsymbol{\psi}_j^s)_m$ 로 표현하기 위하여 아래 주어진 Graf의 Bessel함수의 덧셈정리(additional theorem)를 사용한다(Linton and Evans[1990]; Maniar and Newman [1997]; Kim[1993]).

$$e^{in\theta} H_n(k_1r_i) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(k_1r_j) H_{n+l}(k_1R_{ij}) e^{i(n+l)\alpha_{ij}} e^{il(\pi-\theta)}, \quad m=0$$

$$e^{in\theta} K_n(k_{1m}r_i) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l(k_{1m}r_j) K_{n+l}(k_{1m}R_{ij}) e^{i(n+l)\alpha_{ij}} e^{il(\pi-\theta)}, \quad m \geq 1 \quad (12)$$

식 (12)을 이용하여 $i \neq j$ 인 모든 파력발전기에 대하여 $\boldsymbol{\psi}_i^s$ 를 $\boldsymbol{\psi}_j^s$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$(\boldsymbol{\psi}_i^s) = \mathbf{T}_{ij} (\boldsymbol{\psi}_j^s) \quad (13)$$

여기서 전달함수 \mathbf{T}_{ij} 의 원소는 다음과 같다.

$$(\mathbf{T}_{ij})_{mm}^{nl} = \begin{cases} \frac{\cosh k_1 h}{N_{10} H_n(k_1 a)} H_{n-l}(k_1 R_{ij}) e^{i\alpha_{ij}(n-l)}, & m=0 \\ \frac{K_{n-l}(k_{1m} R_{ij})}{K_n(k_{1m} a)} e^{i\alpha_{ij}(n-l)} (-1)^l, & m \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

식 (13)을 식 (10)에 대입하면 i 번째 파력발전기에 의한 산란된 파는 j 번째 파력발전기에 입사파로 작용함을 나타내는 영역 (I)의 산란포텐셜은 아래와 같다.

$$\phi_i^s|_j = -\frac{igA}{\omega} \mathbf{A}_i^T \mathbf{T}_{ij} \boldsymbol{\psi}_j^s \quad (15)$$

i 번째 파력발전기의 영역 (II)에서의 속도포텐셜은 변수분리법을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_i^D = -\frac{igA}{\omega} \hat{\mathbf{A}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D, \quad 0 \leq r_i \leq a, -h \leq z \leq -d \quad (16)$$

식 (16)의 행렬 $\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D$ 의 원소는 다음과 같다.

$$(\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D)_m = \begin{cases} \left(\frac{r_i}{a}\right)^{lm} e^{in\theta}, & m=0 \\ 2 \frac{I_n(\lambda_m r_i)}{I_n(\lambda_m a)} \cos \lambda_m(z+h) e^{in\theta}, & m \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

여기서 $\lambda_m = m\pi/(h-d)$ 는 영역 (II)에서의 고유값이다.

2.3 방사포텐셜

방사포텐셜은 입사파가 없는 상태에서 파력발전기의 수직운동으로 생성된 파형을 나타내는 속도포텐셜이다. i 번째 파력발전기의 수직 운동에 의한 영역 (I)의 방사포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_i^R = -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \sum_{m=0}^{\infty} R_{im} \frac{K_0(k_{1m}r_i)}{K_0(k_{1m}a)} f_{1m}(z)$$

$$= -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i^T \boldsymbol{\psi}_i^R, \quad r_i \geq a \quad (18)$$

여기서 $\hat{\xi}_i (= \xi_i/A)$ 는 무차원화된 수직운동의 복소진폭이다.

산란포텐셜과 마찬가지로 i 번째 파력발전기의 수직운동으로 생성된 방사파는 나머지 파력발전기($j=1,2,\dots,24, i \neq j$)에 입사파로 작용한다. 따라서 2.2절과 동일한 방법으로 Graf의 덧셈정리를 이용하여 식 (18)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\phi_i^R|_j = -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i^T \mathbf{T}_{ij} \boldsymbol{\psi}_j^R, \quad r_i \geq a \quad (19)$$

같은 방법으로 i 번째 파력발전기의 영역 (II)에서의 방사포텐셜을 나타낸 식은 다음과 같다.

$$\phi_i^R = -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \left[\tilde{R}_i^P + \tilde{R}_{i0} + 2 \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{R}_{im} \frac{I_0(\lambda_m r_i)}{I_0(\lambda_m a)} \cos \lambda_m(z+h) \right]$$

$$= -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i [\tilde{\mathbf{R}}_i^P + \tilde{\mathbf{R}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D], \quad 0 \leq r_i \leq a \quad (20)$$

여기서 $\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D = (\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D)_m^0$ 이며, $\tilde{R}_i^P = \frac{\omega^2}{2g(h-d)} \left[(z+h)^2 - \frac{r_i^2}{2} \right]$ 는 영역 (II)의 특별해이다.

2.4 산란 방정식

i 번째 파력발전기에 입사파로 작용하는 속도포텐셜은 먼 외해로부터 들어오는 순수한 입사파와 자신을 제외한 나머지 파력발전기로부터 발생한 산란파와 방사파의 합으로 표현할 수 있다.

$$\phi_i^j = -\frac{igA}{\omega} \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{i \neq j}^{i=1}^{i=24} (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i)^T \mathbf{T}_{ij} \right] \boldsymbol{\psi}_j^s \quad (21)$$

식 (21)의 입사파의 계수 $\left[\mathbf{a}_j + \sum_{i \neq j}^{24} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i) \right]$ 와 식 (10)의 산란 파의 계수 \mathbf{A}_i 사이에는 회절 전달 행렬(diffraction transfer matrix) \mathbf{B}_j 에 의해 아래와 같은 식이 성립한다.

$$\mathbf{A}_j = \mathbf{B}_j \left[\mathbf{a}_j + \sum_{i \neq j}^{24} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i) \right], \quad j = 1, 2, \dots, 24 \quad (22)$$

여기서 행렬 \mathbf{B}_j 는 단일 파력발전기에 대한 회절문제를 풀어 구할 수 있다(Cho[2016]).

영역 (II)에 대해서도 같은 방법을 적용하면 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{A}}_j = \tilde{\mathbf{B}}_j \left[\mathbf{a}_j + \sum_{i \neq j}^{24} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i) \right], \quad j = 1, 2, \dots, 24 \quad (23)$$

2.5 운동방정식

j 번째 파력발전기의 영역 (II)에 대한 속도포텐셜은 회절포텐셜과 방사포텐셜의 합으로 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_j = -\frac{igA}{\omega} \left\{ \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{i \neq j}^{24} (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i)^T \mathbf{T}_{ij} \right] \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D + \hat{\xi}_j (\tilde{\mathbf{R}}_j^P + \tilde{\mathbf{R}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D) \right\} \quad (24)$$

j 번째 파력발전기에 수직방향으로 작용하는 유체력($F_j^H = \text{Re} \{ f_j^H e^{-i\omega t} \}$)을 구하기 위하여 동압력을 j 번째 파력발전기의 바닥면에 따라 적분한다.

$$\begin{aligned} f_j^H &= i\omega \rho \int_0^{2\pi} \int_0^a r_j \phi_j(r_j, \theta_j - d) dr_j d\theta_j \\ &= \rho g A \left\{ \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{i \neq j}^{24} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i)^T \mathbf{T}_{ij} \right] \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D + \hat{\xi}_j \tilde{\mathbf{Y}}_j^R \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{Y}}_j^D = \int_0^{2\pi} \int_0^a r_j \tilde{\psi}_j^D(r_j, \theta_j - d) dr_j d\theta_j$

$$= \begin{cases} \pi a^2, & m = 0, n = 0 \\ 4\pi(-1)^m \frac{a I_1(\lambda_m a)}{\lambda_m I_0(\lambda_m a)}, & m \geq 1, n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{Y}}_j^R &= \int_0^{2\pi} \int_0^a r_j \tilde{\mathbf{R}}_j^P(r_j, -d) dr_j d\theta_j + \tilde{\mathbf{R}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \\ &= \frac{\omega^2 \pi}{2g(h-d)} \left((h-d)^2 a^2 - \frac{a^4}{4} \right) + \tilde{\mathbf{R}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \end{aligned}$$

식 (25)에서 입사파에 의한 j 번째 파력발전기에 작용하는 파기진력을 추출하면 다음과 같다.

$$f_j^E = \rho g A \left(\mathbf{a}_j^T + \sum_{i \neq j}^{24} \mathbf{A}_i^T \mathbf{T}_{ij} \right) \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \quad (26)$$

j 번째 파력발전기에 대한 수직방향 운동방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$[-\omega^2 m_j - i\omega(b_j + c_{PTO}) + \rho g \pi a_j^2] \xi_j = f_j^H \quad (27)$$

여기서 m_j 와 b_j 는 각 파력발전기의 질량과 점성감쇠계수이다. c_{PTO} 는

PTO 감쇠계수로 모든 파력발전기에서 같은 값을 갖는다.

식 (25)를 식 (27)에 대입하여 정리하면

$$\sum_{i \neq j}^{24} [\mathbf{R}_i^T \mathbf{T}_{ij} \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D] \hat{\xi}_i + W_j \hat{\xi}_j + \sum_{i \neq j}^{24} [\mathbf{T}_{ij} \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D]^T \mathbf{A}_i = -\mathbf{a}_j^T \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \quad (28)$$

여기서 $W_j = \tilde{\mathbf{Y}}_j^R + \frac{1}{\rho g} [\omega^2 m_j + i\omega(b_j + c_{PTO}) - \rho g \pi a_j^2]$.

행렬식 (22)와 (28)을 풀어 미지수 $\hat{\xi}_i, \mathbf{A}_i (i = 1, 2, \dots, 24)$ 를 구하고 영역 (II)에서의 완전한 해는 식 (23)을 이용한다. 각 파력발전기의 시간평균 추출파워는 다음과 같다.

$$\bar{P}_j(\omega, \beta) = \frac{1}{2} c_{PTO} \omega^2 A^2 \left| \frac{\xi_j(\omega, \beta)}{A} \right|^2 \quad (29)$$

24기 파력발전기의 상호 간섭효과를 나타내는 인자로 본 연구에서는 아래와 같이 정의된 q-factor를 사용하였다.

$$q(\omega, \beta) = \frac{\sum_{j=1}^{24} \bar{P}_j(\omega, \beta)}{24 \times \bar{P}_{\text{single}}(\omega)} \quad (30)$$

여기서 q-factor가 1보다 큰 다수 파력발전기 간의 상호 간섭효과가 전체파워를 증가시켜 긍정적인 영향을 주는 반면에 1보다 작은 값은 반대의 경우로 상호 간섭효과가 에너지 추출에 부정적인 영향을 나타냄을 의미한다.

3. 계산결과 및 고찰

다수 파력발전기 배열에 대한 상호작용 해석에 앞서 단일 파력발전기(반경 $a = 2$ m, 흘수 $d = 5$ m)에 대한 해석해와 상용코드인 WAMIT을 이용한 수치계산 결과를 비교하였다. 계산에 사용한 z 축 방향의 고유함수 개수는 20개이며, θ 축 방향의 고유함수의 개수는 11개이다. 한편 WAMIT 계산에서 사용한 격자수는 각 파력발전기

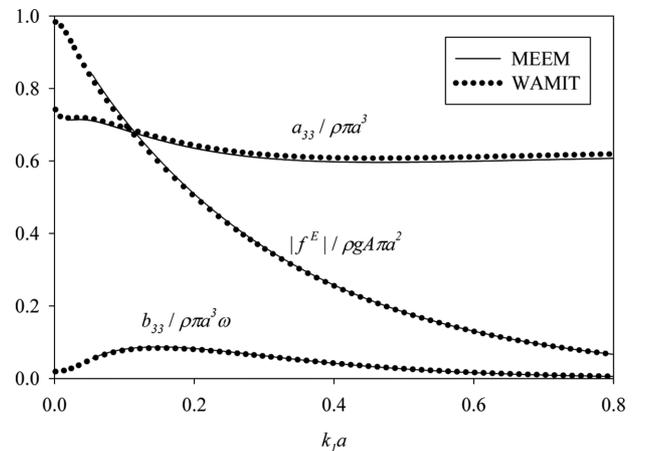


Fig. 4. Non-dimensional wave exciting forces, added mass and radiation damping coefficients for single WEC ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m).

당 160개이다. Fig. 4는 무차원화된 부가질량과 감쇠계수 그리고 파기진력을 무차원화된 파장(k_1a)에 따라 그린 그림이다. 여기서 실선은 고유함수전개법(MEEM)을 이용한 해석 결과이며, 기호는 WAMIT을 이용한 수치계산 결과이다. 부가질량이 해석해에서 약간 작게 나타나는 것을 제외하곤 두 결과는 서로 잘 일치하였다.

Fig. 5와 6은 단일 파력발전기의 수직운동 RAO(response of amplitude operator)와 시간평균 추출파워를 보여준다. 이때 입력값으로 사용한 단일 파력발전기의 질량은 64.4 ton이며, 자유감쇠실험을 통하여 구한 점성감쇠계수는 9,968 kg/s이다. PTO 감쇠계수(c_{PTO})는 12,090 kg/s이다. 단일 파력발전기의 수직운동 진폭은 $k_1a = 0.28$ 에서 공진으로 인해 입사파의 진폭에 비하여 1.5배 이상 증폭하는 것을 보여준다. 파력발전기의 감쇠력을 고려하지 않고 계산한 수직운동 공진주파수는 1.26 rad/s이지만, 점성감쇠력과 PTO 감쇠력을 고려한 파력발전기의 수직운동 공진주파수는 저주파수 영역으로 이동하여 $k_1a = 0.28$ 에 해당하는 1.18 rad/s로 나타났다. Fig. 6에서 보듯이 PTO를 통하여 추출되는 파워도 $k_1a = 0.28$ 부근에서 최대값(21 kW/m²)을 보인다. Fig. 4와 마찬가지로 해석해와

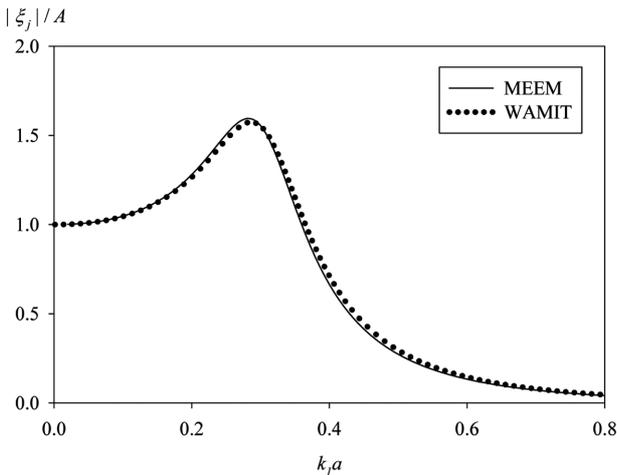


Fig. 5. Heave RAO for single WEC ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m).

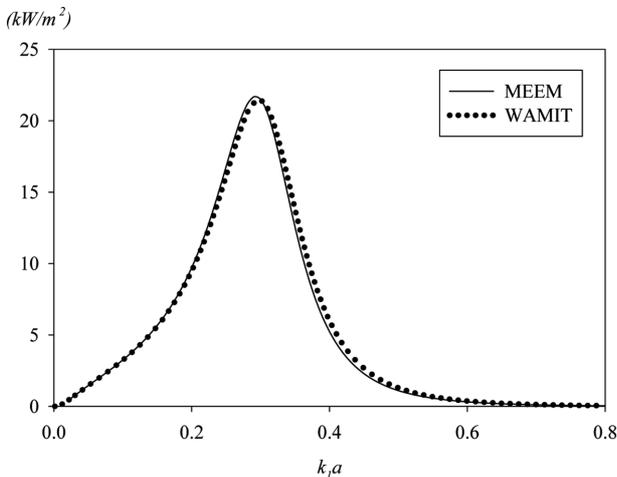


Fig. 6. Extracted power from single WEC ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m).

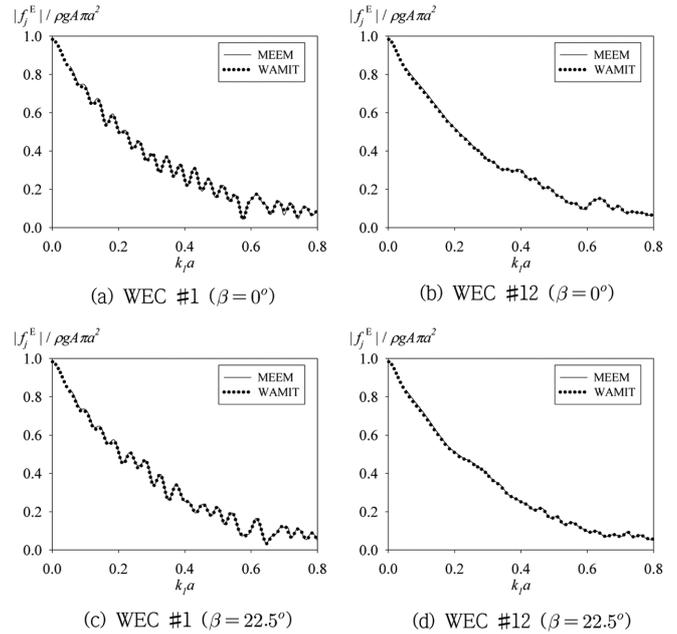


Fig. 7. Non-dimensional heave exciting forces on WEC #1 and #12 as function of non-dimensional wavelength and incidence angle ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m).

수치해는 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 7은 Fig. 2에 도시된 24기의 파력발전기 배치안에 대하여 상호 간섭효과를 고려하여 구한 수직방향 파기진력을 보여주고 있다. 24기 파력발전기중에서 입사파의 전면에 놓인 1번과 후면에 놓인 12번 파력발전기를 대푯값으로 선정하여 그렸다. 실선은 해석해의 결과이며, 점선은 WAMIT을 이용한 수치계산 결과이다. 파의 입사각도(β)는 x축에 평행한 0°와 차귀도 해역의 주 파향에 해당하는 22.5°로 잡았다. 단일 파력발전기의 경우와 달리 발전기 간의 상호 간섭효과로 무차원화된 파장에 따른 파기진력의 변동성이 잘 나타나고 있음을 보여준다. 특히 입사파의 전면에 위치한 1번 파력발전기에서 그 현상이 뚜렷이 나타났다. 그러나 입사각도에 따른 파기진력의 차이는 크게 나타나지 않았다. 앞선 그림에서 살펴본 단일 파력발전기의 결과와 동일하게 해석하는 수치계산 결과를 잘 따라가고 있음을 확인하였다.

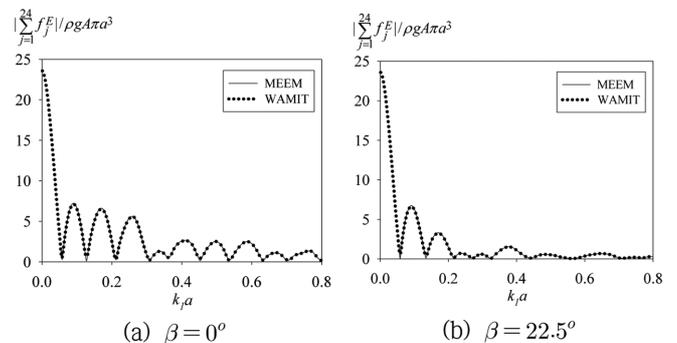


Fig. 8. Non-dimensional total wave exciting forces on an array of 24-WECs as function of non-dimensional wavelength and incidence angle ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m).

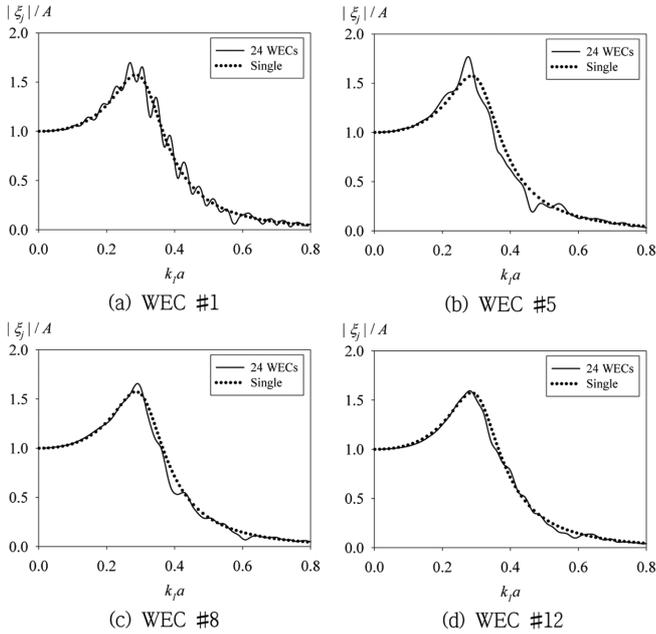


Fig. 9. Heave RAOs of each WEC in an array of 24-WECs as function of non-dimensional wavelength ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m, $\beta = 0^\circ$).

Fig. 8은 24기 파력발전기에 작용하는 파기진력을 모두 합한 결과를 보여준다. 해석 결과와 WAMIT 계산결과는 잘 일치함을 보여준다. 입사파가 장파인 $k_p a$ 값이 작은 영역에서는 입사각도의 차이는 파기진력의 총합에 큰 영향을 주지 않으나 $k_p a$ 가 0.15보다 큰 영역에서는 $\beta = 0^\circ$ 인 경우가 $\beta = 22.5^\circ$ 인 경우에 비하여 파기진력의 총합의 크기가 다소 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9와 10은 파의 입사각도가 0° 와 22.5° 일 때, 24기의 파력발전기중에서 대푯값으로 잡은 1번, 5번, 8번, 12번 파력발전기의 수직운동 RAO와 단일 파력발전기의 수직운동 RAO를 비교하여 보여주고 있다. 모든 입사각도에 대해서 24기의 파력발전기의 수직운동 RAO는 단일 파력발전기의 수직운동 RAO에 비해 파장에 따른 변동성이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 특히, 입사각도 $\beta = 0^\circ$ 일 때는 입사파가 가장 먼저 도달하는 1번 파력발전기의 수직운동 RAO가 파장에 따른 변동성이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 상대적으로 입사파의 전면부에 위치한 1번과 5번 파력발전기에 비해 입사파의 후면부에 위치한 8번과 12번 파력발전기의 수직운동 RAO 값이 줄어든 것도 알 수 있으며, 입사각도 $\beta = 22.5^\circ$ 일 때는 8번 파력발전기의 수직운동 RAO의 값이 공진주파수에서 단일 파력발전기의 수직운동 RAO에 비해 줄어드는 경향을 보였다. 특히, 5번 파력발전기의 경우, 입사각도 $\beta = 0^\circ$ 일 때에 비하여 $\beta = 22.5^\circ$ 일 때 파장에 따른 수직운동의 변동성이 다소 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 파의 입사각도가 0° 일 때, 각 파력발전기를 통하여 추출되는 단위 진폭당 시간평균 파워 $\bar{P}_j(\omega, \beta)/A^2$ 와 단일 파력발전기를 통하여 추출되는 단위 진폭당 시간평균 파워를 보여주고 있다. 추출파워는 수직운동 RAO의 제곱에 비례하기 때문에 입사파의 파장에 따른 수직운동 RAO가 상대적으로 크고 변동성이 컸던 1번

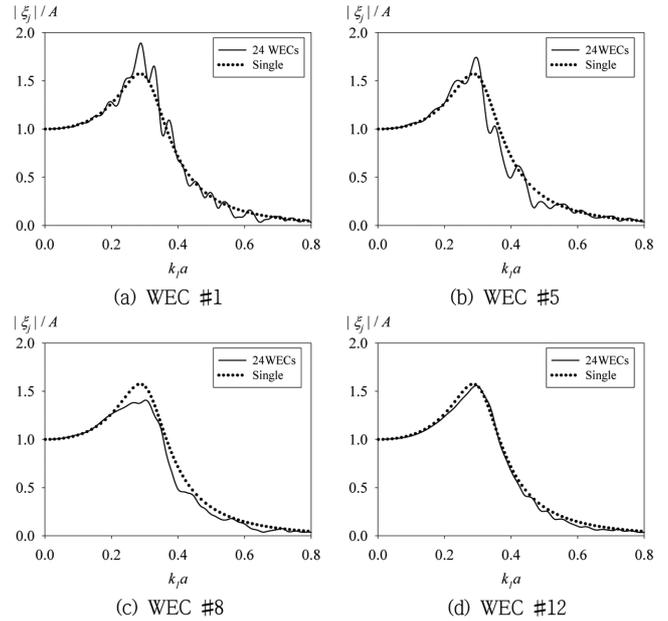


Fig. 10. Heave RAOs of each WEC in an array of 24-WECs as function of non-dimensional wavelength ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m, $\beta = 0^\circ$).

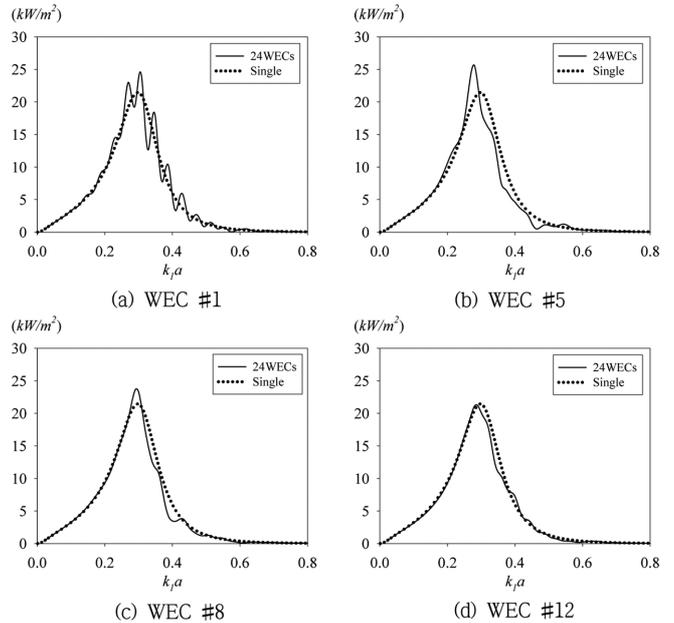


Fig. 11. Extracted Power of each WEC on the array in the case of $\beta = 0^\circ$ (solid line: 24 WECs, dotted line: Single WEC).

파력발전기는 다른 위치에 있는 파력발전기들에 비하여 추출파워의 크기와 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다. 또한 비교적 입사파의 전면부에 위치한 1번과 5번 파력발전기를 통하여 추출되는 파워는 단일 파력발전기의 추출파워보다 더 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 1번과 5번 파력발전기에는 순수한 입사파 이외에도 주변에 위치한 다른 파력발전기로부터 산란된 파와 방사된 파가 또 다른 입사파로 작용하여 수직운동을 증가시키고 그 결과 추출파워를 증

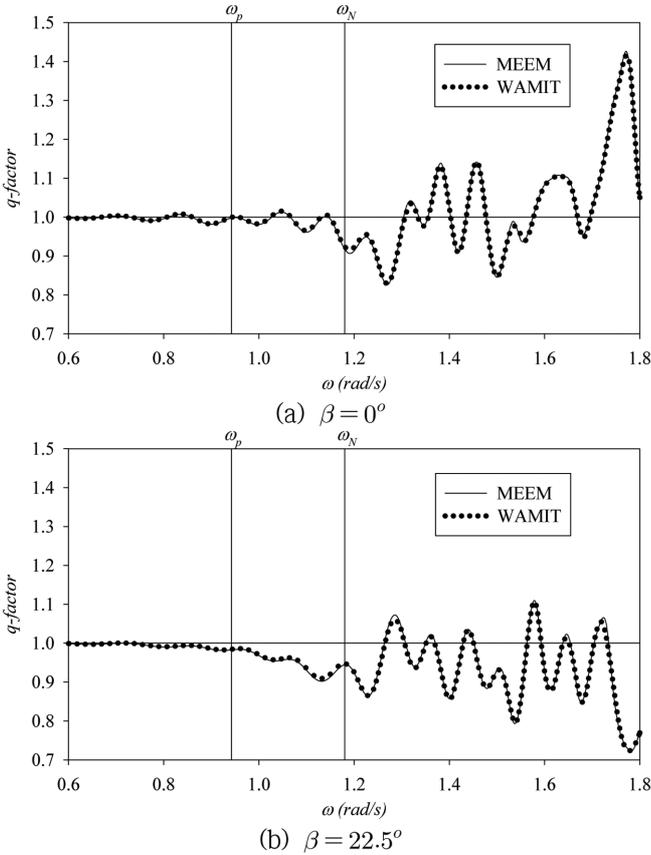


Fig. 12. Variation of q-factor as function of non-dimensional wave-length and incidence angle ($a = 2$ m, $d = 5$ m, $h = 80$ m).

가시켰기 때문이다. 이에 반해 상대적으로 입사파의 후면부에 위치한 8번과 12번 파력발전기를 통하여 추출된 파워는 전면부에 위치한 파력발전기로부터 추출된 파워보다 작은 값을 보였다. 이와 같이 다수 부체의 상호작용 효과는 파력발전기가 놓여진 위치에 따라 수직운동과 추출파워를 증가시킬 수도 감소시킬 수 있다. 대체적으로 입사파의 전면부에 위치한 파력발전기의 추출파워가 후면부에 놓인 파력발전기의 추출파워보다 높은 편이다.

Fig. 12는 q-factor를 입사파의 주파수 ω 에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 12a는 파의 입사각도가 0° 일 때의 q-factor이며, Fig. 12b는 파의 입사각도가 22.5° 일 때의 q-factor이다. 그림에서 q-factor가 1을 기준으로 입사파의 주파수에 따라 큰 변동성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 복합발전 플랫폼의 설치 예정 해역인 차귀도에서 3년간 측정된 파랑자료를 토대로 얻은 파랑스펙트럼에서 에너지가 가장 많이 밀집한 피크 주파수(ω_p)는 0.94 rad/s이며, 입사파와 공진으로 파력발전기의 수직운동이 크게 증폭될 것으로 예측되는 수직운동 공진주파수(ω_N)는 1.18 rad/s이다. 파력발전기를 통하여 추출된 파워는 파랑에너지가 많이 분포된 피크 주파수와 공진주파수에서 높은 값을 보일 것으로 예측된다. 따라서 현 배치안에 대한 종합적인 평가를 내리기 위하여 두 대표 주파수에서의 q-factor의 값을 기준으로 삼았다. 먼저 피크 주파수에서는 q-factor가 입사각도에 따라 1과 같거나 1보다 약간 작은 값을 보였다. 또한 파력발전기의 수직

운동 공진주파수에서는 q-factor가 입사각도가 0° 일 때와 22.5° 일 때 모두 1보다 작지만 0.9 이상의 값을 보였다. 이로부터 현 배치안은 상호 간섭효과로 인해 파랑에너지 추출효율을 다소 떨어트릴 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 풍력-파력 복합발전 플랫폼 내의 24기 파력발전기 간의 상호 간섭효과를 고려하여 회절과 방사문제를 풀어 각 파력발전기의 수직운동 변위와 추출파워를 구하였다. 해석 결과는 WAMIT를 사용한 수치계산 결과와 비교하였고 두 결과가 서로 잘 일치함을 확인하였다. 24기 파력발전기 간의 상호 간섭효과로 파력발전기가 플랫폼 내에 놓여진 위치에 따라 수직운동과 추출파워가 달라짐을 확인하였다. 대체적으로 입사파의 전면부에 위치한 파력발전기에서 수직운동 변위가 크기뿐만 아니라 상호 간섭효과를 나타내는 파장에 따른 변동성도 더 크게 나타났다. 그 결과 입사파의 전면부에 위치한 파력발전기의 추출파워는 단일 파력발전기보다 큰 값을 보였다. 파력발전기가 입사파의 후면부에 위치할 때의 추출파워는 전면부에 위치할 때와 비교하여 감소하는 경향을 보였다.

24기 파력발전기의 현 배치안에 대한 성능을 평가하기 위하여 각 파력발전기에서 추출된 파워의 총합을 같은 수의 단일 파력발전기가 갖는 총 파워로 나눈 q-factor를 사용하였다. 설치 예정 해역의 파랑스펙트럼의 피크 주파수 주변에서는 q-factor가 1에 가까운 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 한편 파력발전기의 공진주파수인 1.18 rad/s에서는 q-factor가 입사각도 0° 와 22.5° 일 때 모두 1보다 작은 결과를 보였다. 이러한 결과는 파력발전기 간의 상호 간섭효과와 영향만을 고려하여 계산된 것이므로 플랫폼 하부구조물을 계산에 포함시킬 경우 q-factor에 어떠한 변화가 나타날지에 대한 추가 연구도 필요하다.

지금까지 다수의 파력발전기 간의 상호 간섭효과를 고려하여 수직운동과 추출파워를 구하였다. 그러나 플랫폼의 하부구조물과 계류시스템의 영향은 고려하지 않았다. 향후 계류된 플랫폼의 하부구조물과 다수 파력발전기 간의 상호 간섭효과를 고려한 추출파워의 예측과 함께 전체 추출파워를 높일 수 있는 최적의 파력발전기의 배치안에 대한 검토가 요구된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Child, B.F.M. and Venugopal, V., 2010, “Optimal configuration of wave energy device arrays”, Ocean Eng., Vol. 37, No. 6,

- 1402-1417.
- [2] Cho, I.H., 2016, "Diffraction and radiation of waves by an array of multiple buoys", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 30, No. 3, 151-160.
- [3] Kagemoto, H. and Yue, D.K.P., 1986, "Interactions among multiple three dimensional bodies in water waves: an exact algebraic method", *J. Fluid Mech.*, Vol. 166, 189-209.
- [4] Kim, M.H., 1993, "Interaction of waves with n-vertical circular-cylinders", *J. Waterway Port Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 119, No. 6, 671-689.
- [5] Lee, H., Bae, Y.H. and Cho, I.H., 2016, "One-way coupled dynamic analysis of floating platform with wave energy converters", *J. Ocean and Wind Energy*, Vol. 3, No. 1, 53-60.
- [6] Linton, C.M. and Evans, D.V., 1990, "The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders", *J. Fluid Mech.*, Vol. 215, 549-569.
- [7] Maniar, H.D. and Newman, J.N., 1997, "Wave diffraction by long arrays of cylinders", *J. Fluid Mech.*, Vol. 339, 309-330.
- [8] Murai, M., Kagemoto, H. and Fujino, M., 1999, "On the hydro-elastic responses of a very large floating structure in waves", *J. Marine Sci. Technol.*, Vol. 4, 123-153.
- [9] Siddorn, P. and Taylor, R.E., 2008, "Diffraction and independent radiation by an array of floating cylinders", *Ocean Eng.*, Vol. 35, 1289-1303.
- [10] Taghipour, R. and Moan, T., 2008, "Efficient frequency-domain analysis of dynamic response for the multi-body wave energy converter in multi-directional waves", *Proc. 8th ISOPE*, Vancouver, Canada.
- [11] Yilmaz, O. and Incecik, A., 1998, "Analytical solutions of the diffraction problem of a group of truncated vertical cylinders", *Ocean Eng.*, Vol. 25, No. 6, 385-394.
- [12] Yilmaz, O., Incecik, A. and Barltrop, N., 2001, "Wave enhancement due to blockage in semi-submersible and TLP structures", *Ocean Eng.*, Vol. 28, No. 5, 471-490.

Received 31 March 2016

Revised 2 June 2016

Accepted 8 June 2016