Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 35, No. 3: 589-597/ June, 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.3.0589

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Coastal and Harbour Engineering **해안 및 항만공학**

케이슨방파제 부착 OWC-MB 복합형 파력발전시스템 성능해석

서지혜* · 박우선** · 이중우***
Seo, Ji Hye*, Park, Woo-Sun**, Lee, Joong Woo***

Performance Analysis of OWC-MB Hybrid Wave Energy Harvesting System Attached at Caisson Breakwater

ABSTRACT

Wave energy harvesting system using OWC(Oscillating Water Column) and MB (Movable Body) attached at the caisson breakwater was studied. This system was suggested to maximize wave energy extraction using resonant phenomena of oscillating water column and buoy in wave channel (Park et al., 2014). Not only incident waves but also reflected waves from the breakwater can be used as sources of exciting force for harvesting wave energy efficiently. Using Galerkin finite model based on the linear wave theory (Park, 1991), the performance of the system was evaluated for various damping ratios of power take off system. Numerical results show that the proposed system is excellent in efficiency compared with that of conventional system and the performance of the system is governed by the resonance of oscillating water column in the wave channel. In addition, the additional efforts to minimize viscous damping was found to be necessary because viscous damping occurring in the channel and around the moving buoy is significant in generation efficiency.

Key words : Wave energy converter, Resonance, Linear induced generator, Caisson breakwater, FE analysis

초 록

기존 케이슨방파제 외해 측에 수로를 설치하고 수로 내에 부유체를 설치한 파력발전시스템에 대해서 연구하였다. 이 시스템은 중복파를 기진력으로 활용하고, 수로 내 수주와 부유체의 공진현상을 이용하여 에너지 추출효율 극대화할 목적으로 제안되었다(Park et al., 2014). 선형파 이론에 기초한 Galerkin 유한요소 모델(Park, 1991)을 이용하여 제안된 발전시스템의 성능을 평가한 결과, 기존의 타 시스템에 비하여 우수한 발전효율을 보임과 수로 내 수주의 공진현상이 성능에 지배적인 영향을 미침을 확인하였다. 또한, 수로와 부이 주변에서 발생하는 유체 점성감쇠가 발전효율에 미치는 영향이 커 이를 최소화하는 노력이 필요한 것으로 평가되었다.

검색어 : 파력발전장치, 공진, 선형발전기, 케이슨 방파제, 유한요소해석

1. 서 론

지구온난화로 환경문제가 부각되고 화석연료의 고갈에 대한 위기감이 높아지면서 전 세계적으로 신재생에너지 개발에 대한 관심이 고조되고 있다. 그 중에 해양에너지는 지구의 3분의 2를 차지하는 바다에 존재하는 무한 청정의 자연 에너지원이라는 점에서 많은 주목을 받고 있다. 해양에너지원으로는 조력, 조류, 파력, 해수온도차 등을 들 수 있으며, 영국과 일본을 포함한 해양 선진국들은 이러한

* 정회원 · 한국해양과학기술원 연안공학연구본부 연구원 (Korea Institute of Ocean Science and Technology · jhseo@kiost.ac.kr)
** 정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 연안공학연구본부 책임연구원
(**Corresponding Author** · Korea Institute of Ocean Science and Technology · wspark@kiost.ac.kr)
*** 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Korea Maritime and Ocean University · jwlee@kmou.ac.kr)

Received January 16, 2015/ **revised** April 21, 2015/ **accepted** April 28, 2015

Copyright ⓒ 2015 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해양에너지를 중요한 신재생에너지중의 하나로 인식하고 오래전부터 관련기술개발을 수행하고 있다. 삼면이 바다인 우리나라도 조력, 조류, 파력 등 풍부한 해양에너지원을 갖고 있어 이의 상용화에 대한 관심이 높다. 그 중 파력에너지는 연안을 따라 650MW에 달하는 막대한 부존량을 보이는 것으로 평가되고 있어 이의 상용화를 위한 노력이 지속되고 있다(Choi and Lee, 2007; Hong, 2012).

파력발전이 상용화의 가장 큰 걸림돌은 낮은 경제성이라고 할 수 있다. 막대한 하부지지구조물 설치비용과 불규칙하고 낮은 효율로 경제성을 확보하지 못해 상용화에 이르지 못하고 있는 것이 현실이다. 많은 연구자들이 이러한 문제점을 극복하기 위하여 다양한 형식의 파력발전시스템을 제안하여 왔고(Brooke, 2003; Charlier et al., 1993; Engström, 2011; Eriksson et al., 2005; Evans, 1976; McCormick, 2013; Salter, 1974), 일부는 실용화단계에 근접하고 있지만(Drew et al., 2009; Chen et al., 2013; Falcão, 2010; Khan et al., 2009), 상용화를 위해서는 아직 해결해야 할 난제가 많은 것이 사실이다.

본 연구에서는 기존의 방파제를 파력발전시스템의 지지구조물로 활용하여 경제성을 제고하고, 수주의 공진과 물체의 공진을 이용하여 에너지 추출효율을 증대시키기 위하여 고안된 방파제 부착형 OWC-MB 복합형 파력발전시스템(Park et al., 2014)에 대해서 연구하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 발전시스템에 대한 기본 개념도를 Fig. 1에 제시하였다(Seo and Park, 2013). Case① 은 부체에 직접 Stator(또는 Rotor)을 부착하고, 수로에 Rotor(또는 Stator)를 고정하여 발전하는 방식이고, Case②는 부체 내에 발전기를 두어 상대운동으로 발전을 하는 방식이다. 이러한 방식은 공진효과를 이용하게 되므로 효율증대를 기대할 수 있으며, 기존의 구조물을 지지구조로 활용하므로 공사비를 대폭 절감하고 방파제 상부에서 유지관리를 용이하게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 방파제 전면 해상은 입사파와 반사파가 같이 존재하기 때문에 중복파압을 기진력을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 발전시스템의 성능을 평가하기 위해 발전시스템과 파동의 상호작용해석은 Park(1991)이 개발한 Galerkin 유한요소 모델을 확장하여 제안된 발전시스템의 성능을 평가하였다. 이 모델은 파동장을 등매개변수 요소로 모형화하고, 무한 경계면에서의 방사경계조건은 무한요소로 처리하고 있다.

2. 문제의 정식화

2.1 파동장 수식화

진폭이 A이고 진동수가 ω인 정현파가 수심 h에 위치한 파력발전시스템에 입사하는 경우의 동유체력 산정문제를 정식화하기 위하여 입사파고 및 구조물의 거동이 미소하다는 가정을 하고 원점이 정수면에 위치한 직교좌표계를 사용하였다. 유체를 비압축성, 비점성, 비회전류로 가정하는 선형파이론을 적용하면, 파동장은 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜, Φ로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2\Phi(x,\ z,\ t)=\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}=0 \tag{1}$$

여기에 추가적으로 입사파고 및 구조물의 거동이 미소하다는 가정을 하면, 정수면(S_f) 및 유동장의 바닥면(S_d), 물체의 표면(S_b)에서의 경계조건은 아래와 같이 선형으로 나타내지며, 구조물의 운동은 방파제에 부착된 수로 내에 설치되므로 상하운동(heave)만으로 나타낼 수 있다.

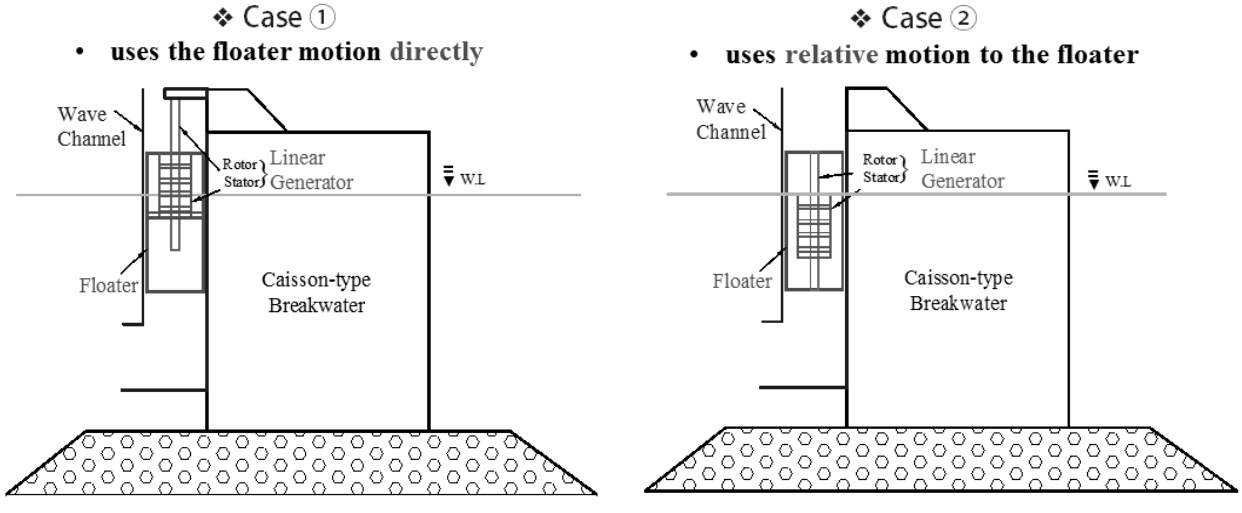


Fig. 1. Concept of the Proposed Wave Energy Converter (WEC) Systems

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g}\Phi \quad \text{on} \quad S_f \tag{2a}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on} \quad S_d \tag{2b}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_n \quad \text{on} \quad S_b \tag{2c}$$

여기서, V_n은 부이 운동에 관련한 항으로 부이표면에서 유체영역으로 향하는 수입자의 법선속도성분을 의미하며, g는 중력가속도를 나타낸다.

파동을 조화운동한다고 가정하면 속도포텐셜 Φ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \mathrm{Re}\left[\phi(x,z)e^{-i\omega t}\right] \tag{3}$$

여기서, 속도포텐셜 ϕ는 입사파에 의한 성분(ϕ_0), 회절파에 의한 성분(ϕ_4), 부이의 수직운동에 의해 발생하는 방사파에 의한 성분(ϕ_2)으로 구성되며 입사파는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 이는 파랑분산식을 만족한다.

$$\phi_0 = i\frac{gA}{\omega}\frac{\cosh[k_0(z+h)]}{\cosh(k_0 h)}e^{ik_0 x} \tag{4}$$

이 중 회절파 및 방사파에 의한 포텐셜은 구조물 표면으로부터 퍼져나가므로 무한경계면에서 다음의 Sommerfeld(1994) 방사경계조건을 만족하여야한다.

$$\lim_{r\to\infty}\left(\frac{\partial}{\partial r} - ik_0\right)\phi_j = 0 \quad \text{for } j = 2, 4 \tag{5}$$

여기서, k_0는 입사파의 파수(wave number)를 의미하며, $r = |x|$, $i = \sqrt{-1}$ 이다.

상기의 경계치문제는 입사파와 회전파가 관련되는 회절문제(diffraction problem)와 부이 운동에 의한 방사파에 관련되는 방사문제(radiation problem)로 분리할 수 있다. 즉, Eq. (2c)는

$$\frac{\partial(\phi_4 + \phi_0)}{\partial n} = 0 \quad \text{for} \quad \phi_4 \tag{6a}$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = i\omega\zeta_F \quad \text{for} \quad \phi_2 \tag{6b}$$

으로 분리된다. 여기서, ζ_F = 부이의 연직운동 복소진폭을 나타낸다.

파동에 의한 동수압은 다음의 선형화된 Bernoulli 방정식에 의하여 계산할 수 있으며,

$$p = -\rho\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \mathrm{Re}\left[i\omega\rho(\phi_0 + \phi_4 + \phi_2\zeta_F)e^{-i\omega t}\right] \tag{7}$$

부이에 작용하는 힘은 이를 적분함으로써 구할 수 있다.

$$F = -\int_{S_b} p n_2 dS_b = \mathrm{Re}\left[(\overline{F_w} + \overline{F_r}\zeta_F)e^{-i\omega t}\right] \tag{8}$$

여기서,

$$\overline{F_w} = -i\omega\rho\int_{S_b}(\phi_0 + \phi_4)n_2\, dS_b \tag{9a}$$

$$\overline{F_r} = -i\omega\rho\int_{S_b}\phi_2\, n_2\, dS_b \tag{9b}$$

부이의 운동에 관련한 힘, $\overline{F_r}$은 부가질량 계수, μ와 파랑감쇠계수, λ로 다음과 같이 표시된다.

$$\overline{F_r} = -\omega^2\mu - i\omega\lambda \tag{10}$$

여기서,

$$\mu = \frac{1}{\omega^2}\mathrm{Re}[\overline{F_r}] \tag{11a}$$

$$\lambda = \frac{1}{\omega}\mathrm{Im}[\overline{F_r}] \tag{11b}$$

Re[·]와 Im[·]는 괄호안 값의 실수부와 허수부를 의미한다.

2.2 Galerkin 기법을 이용한 파동장 해석

Galerkin 기법을 이용하면, 상기의 회절 및 반사문제는 통상의 유한요소로 이산화할 수 있다. 즉, 파동장을 Fig. 2와 같이 적당한 요소로 분할하고, 각 분할된 요소내의 포텐셜, ϕ_j를 절점포텐셜, $\{\phi_j^e\}$와 형상함수, $\{N^e\}$로 보간하여 다음과 같이 나타낸 후,

$$\phi_j = \{N^e\}^T\{\phi_j^e\} \quad \text{for} \quad j = 2, 4 \tag{12}$$

Galerkin 기법을 이용하면 상기의 경계치 문제는 다음과 같은 선형 대수방정식으로 변환된다.

$$\sum_e \{R^e\} = \sum_e \int_{\Omega^e} \{N^e\} \nabla^2 \phi_j \, d\Omega^e \tag{13a}$$

$$\sum_e \left(\left[K_{\phi\phi}{}^e \right] \left\{ \phi_j^e \right\} - \left\{ f_\phi^e \right\} \right) = \{0\} \tag{13b}$$

여기서, $\left[K_j^e \right]$는 각 요소의 시스템 행렬, $\left\{ f_j^e \right\}$는 하중벡터로 다음과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} \left[K_{\phi\phi}{}^e \right] = \int_{\Omega^e} & \left[\left\{ \frac{\partial N_\phi^e}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial N_\phi^e}{\partial x} \right\}^T \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{\partial N_\phi^e}{\partial z} \right\} \left\{ \frac{\partial N_\phi^e}{\partial z} \right\}^T \right] d\Omega^e \\ & - \int_{S_f^e} \frac{\omega^2}{g} \left\{ N_\phi^e \right\} \left\{ N_\phi^e \right\}^T dS_f^e \end{aligned} \tag{14a}$$

$$\left\{ f_\phi^e \right\} = \int_{S_b^e} \left\{ N_\phi^e \right\} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} dS_b^e \tag{14b}$$

본 연구에서는 전체 유체요소영역은 2차 형상함수를 갖는 8절점 등매개변수요소(isoparametric element)를 사용하여 모형화하였다. 무한요소영역은 방사조건을 효율적으로 모형화하기 위해 수직방향으로 6절점 등매개변수요소를 사용하였고, 각 요소의 시스템행렬을 Gauss적분공식을 사용하여 구성하였다(Park, 1991).

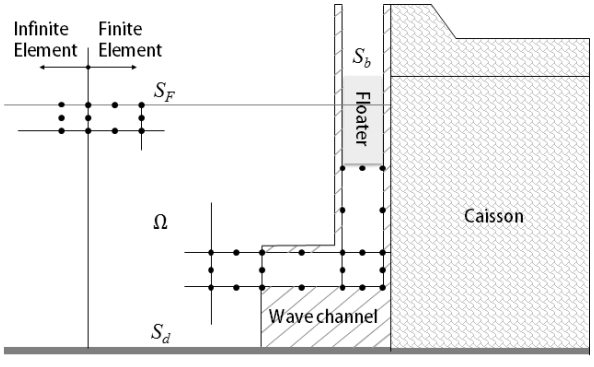


Fig. 2. Conceptual Finite Element Mesh Including Infinite Elements

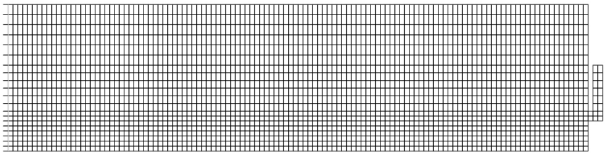


Fig. 3. Finite Element Mesh for Numerical Experiments

Fig. 3에 발전시스템과 파의 상호작용 해석에 사용한 유한요소망도를 제시하였다. 2,148개의 유한요소와 20개의 무한요소로 사용하였으며 총 절점 수는 7,594개이다. 파랑 거동의 중첩을 확인하기 위한 이산화된 유체영역에서의 파장 당 최소 요소수는 54개로, 일반적으로 2차 요소에서는 4개, 선형 요소에서 20개가 필요한 것에 비추어 볼 때 매우 충분하다고 할 수 있다.

2.3 운동방정식

입사파에 대한 파력발전시스템 내 부이의 수직운동은 발전기 내 영구자석의 수직운동을 유발하며 이에 의하여 발전하게 된다. 발전성능평가를 위해 발전장치(Power Take-Off, PTO)를 Fig. 4와 같이 1자유도 스프링-질량-감쇠계수 시스템으로 모델화하여 파랑과의 상호작용 해석을 실시하였다(Seo et al., 2014).

Case①의 운동방정식은 다음과 같이 구성되며,

$$\left(M_F + \mu \right) \ddot{\zeta}_F + \left(\lambda + c_G + c_F \right) \dot{\zeta}_F + k_F \zeta_F = F_w \tag{15}$$

Case②의 운동방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$\left(M_F + m_G + \mu \right) \ddot{\zeta}_F + m_G \ddot{\zeta}_G + \left(\lambda + c_F \right) \dot{\zeta}_F + k_F \zeta_F = F_w \tag{16a}$$

$$m_G \ddot{\zeta}_G + c_G \left(\dot{\zeta}_G - \dot{\zeta}_F \right) + k_G \left(\zeta_G - \zeta_F \right) = 0 \tag{16b}$$

여기서, $\ddot{\zeta}_F$, $\dot{\zeta}_F$와 ζ_F는 각각 부이의 수직방향 가속도, 속도, 변위를 의미하며, $\ddot{\zeta}_G$, $\dot{\zeta}_G$와 ζ_G는 발전기의 수직방향 가속도, 속도, 변위를

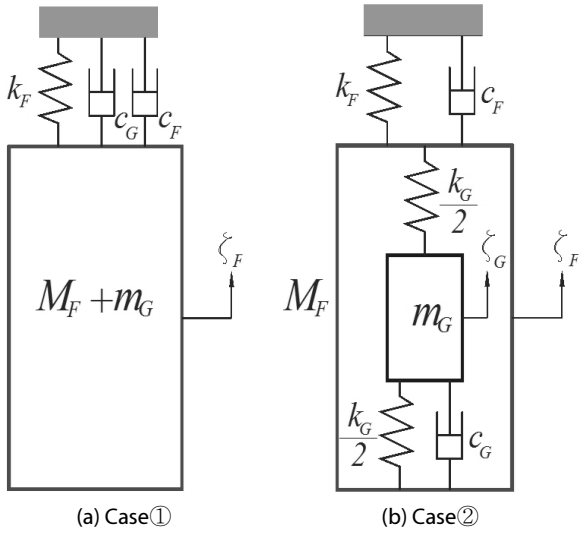


Fig. 4. Simple Models for the PTO System

나타낸다. M_F와 m_G는 부이와 발전기의 질량을, μ는 수중에서의 움직임에서 기인되는 부이의 부가질량을 의미한다. k_F와 k_G는 부이와 발전기의 강성계수를, λ는 파랑감쇠계수를 나타내며 c_F는 수로 내 부이 운동에 관련한 유체 점성에 기인한 감쇠계수를, c_G는 파력발전추출과 연관되는 발전기의 감쇠계수를 의미한다. 파력에너지변환에서 선형유도발전기(Linear Electric Generator, LEG)로 대표되는 발전기의 감쇠계수는 Omholt(1978)을 시작으로 많은 연구(Ivanova et al., 2005; Mueller et al., 2002; McCormick, 2013)들이 수행한 바 있다.

2.4 추출 파랑에너지 산정

선형인 전체 발전시스템은 주파수영역에서 다음과 같이 운동방정식의 해를 나타낼 수 있다.

$$\text{Case①: } \zeta_F = \mathrm{Re}[\overline{\zeta_F} e^{-i\omega t)}] \tag{17a}$$

$$\zeta_G = \mathrm{Re}[\overline{\zeta_G} e^{-i\omega t)}] \tag{17b}$$

또한, 발전기와 부이의 상대변위(ζ_L)는 다음과 같다.

$$\text{Case②: } \zeta_L = (\zeta_G - \zeta_F) = \mathrm{Re}[\overline{\zeta_L} e^{-i\omega t)}] \tag{18}$$

상기 식을 이용하여 발전시스템의 운동방정식 Eqs. (15) and (16)을 다시 정리하면 다음과 같이 부이와 상대운동의 복소진폭을 구할 수 있다.

Case①:

$$\overline{\zeta_F} = \frac{\overline{F_w}}{-\omega^2(M_F+\mu) - i\omega(\lambda + c_G + c_F) + k_F} \tag{19a}$$

Case②:

$$\overline{\zeta_F} = \frac{\overline{F_w}}{-\omega^2(M_F+\mu) - i\omega(\lambda + c_F) + k_F + \dfrac{(\omega^2 m_G)^2}{-i\omega c_G + k_G}}$$

$$\overline{\zeta_G} = \frac{-\omega^2 m_G - i\omega c_G + k_G}{-i\omega c_G + k_G}\,\overline{\zeta_F}$$

$$\overline{\zeta_L} = \frac{-\omega^2 m_G}{-i\omega c_G + k_G}\,\overline{\zeta_F} \tag{19b}$$

여기서, $\overline{F_w}$는 파력, F_w의 복소진폭을 의미한다.

이와 같이 구성된 발전시스템으로부터 얻을 수 있는 최대파워는 각각 부이와 발전기의 상대속도($\dot{\zeta_L}$)가 가장 클 때 및 부이의 운동이 가장 클 때 발생한다. 부이와 발전기의 운동변위로부터 시간평균 파워(P_G) 및 한주기당 발전효율(η_G)를 구하면 아래와 같다.

$$\text{Case① : } P_G = \frac{1}{2} c_G \omega^2 |\overline{\zeta_F}|^2 \tag{20a}$$

$$\text{Case② : } P_G = \frac{1}{2} c_G \omega^2 |\overline{\zeta_L}|^2 \tag{20b}$$

$$\text{Case①,② : } \eta_G = \frac{P_G\, T_w}{\frac{1}{2}\rho g A^2 L} \tag{21}$$

여기서, T_w는 입사파의 주기이다.

3. 수치해석 및 결과

3.1 모델의 해석조건

입사파의 주기와 같은 주기로 조화운동을 하는 발전시스템에 이중공진 효과를 발생시키기 위하여 기존 방파제가 설치된 해역의 지배적인 유의주기와 발전시스템의 고유주기가 근접하도록 모델을 설계하였다.

제안된 발전시스템의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 5에 보인 바와 같이 수심 15m에 설치된 케이슨 방파제 외해 측에 적용하는 것으로 하였으며, 최대효율을 목표로 하는 파랑조건은 기존의 케이슨방파제에 내습하는 통상파를 기준으로 이에 근접한 주기 7초, 파고 2m로 설정하였다. 수로의 폭은 1.0m로 하였으며, 부체의 단위 폭 당 질량은 5,000kg, 발전기의 질량은 Cho and Kweon (2011)의 논문을 참조하여 부이의 2%인 100kg으로 설정하고, Case① 방식은 부이의 강성계수(k_F)및 감쇠계수(c_F)를 수로의

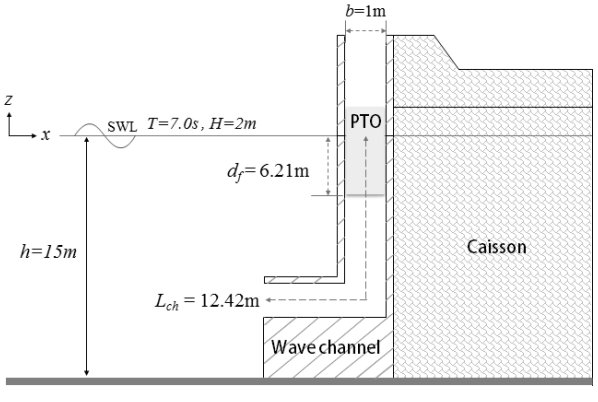


Fig. 5. Analytical Model of WEC

고유주기(T_{ch})와 일치시킨 경우를 해석하였고, Case② 방식은 부이와 연성된 발전기 스프링 강성(k_G)이 목표 파랑조건인 7초에서 발전기 공진이 발생하도록 설정한 경우(Case②-1)와 부이의 공진주기인 5초에 맞춘 경우(Case②-2)로 각각 고려하였다(Table 1).

3.2 파력발전시스템 성능평가

3.2.1 수로 내 공진

수로 내 공진효과를 확인하기 위하여 수로 내의 수위진폭과 수로 내 부이의 운동진폭으로 Fig. 6에 나타내었다. 참고로 방파제 전면에서의 수위변동도 같이 제시하였다. 종축은 진폭의 비이며, 횡축은 입사파의 주기이다. PTO장비 없이 수로만 있는 경우(Fig. 6(a))의 해수면 수위진폭을 보면 입사파의 주기와 수로의 고유주기가 일치하는 부근(7초)에서 수로 공진효과로 인해 진폭이 약 27배 상승함을 알 수 있다. 파력발전을 위한 부이가 있는 경우(Fig. 6(b))는 부이의 연직운동진폭(Case①)이 수위 증폭과 유사한 결과를 보이고 있으나 수로 내 수주를 형성하는 유수량의 차이로 인해 공진조건이 부이 자체의 공진주기(5초) 방향으로 약간 이동되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Specifications for the Test Cases

Design parameter		Case ①	Case ②-1	Case ②-2
d_f(m)		6.21		
b (m)		1.0		
g (m/s^2)		9.806		
ρ (kg/m^3)		1,025		
M_F (kg/m)		5,100	5,000	
m_G (kg/m)		100		
$k_F = \rho g b$ (N/m^2)		10,051		
$k_G = m_G\omega_G^2$ (N/m^2)		-	79	
Resonant Period	Channel (s) $T_{ch} = 2\pi/\sqrt{g/L_{ch}}$	7		
	Floater (s) $T_f = 2\pi/\sqrt{g/d_f}$	5		
	LEG (s) $T_G = 2\pi/\sqrt{m_G/k_G}$	-	7	5

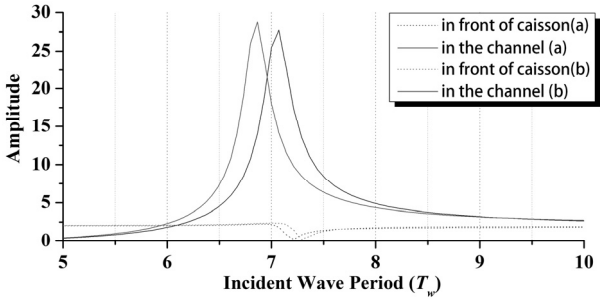


Fig. 6. Comparison with Amplitude of Surface Elevations & Vertical Displacement ((a) Except PTO System, (b) Case① with 0% Damping Ratio)

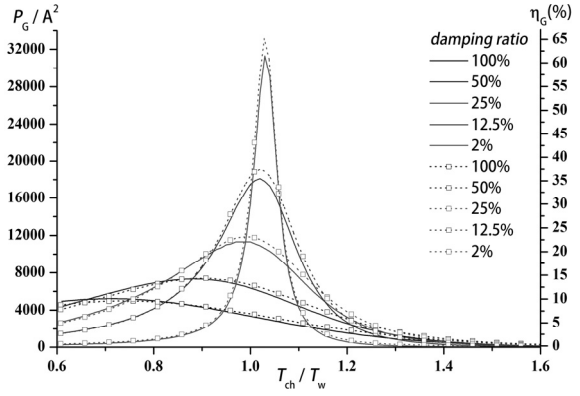
3.2.2 시간평균파워 및 효율

제안된 파력발전시스템의 성능을 파악하기 위하여 시간평균파워 및 효율의 변화를 살펴보았다. 발전에 관련된 감쇠를 임계감쇠의 2~100% 범위 내에서 변화시키며 해석을 수행하였다. Case①의 경우는 PTO 시스템에 의한 임계감쇠($c_{PTO} = 2\sqrt{(M_F + m_G)k_F}$ 내에서 Case②의 경우에는 LEG에 의한 임계감쇠($c_G = 2m_G\omega_G$) 내에서의 성능을 살펴보았다.

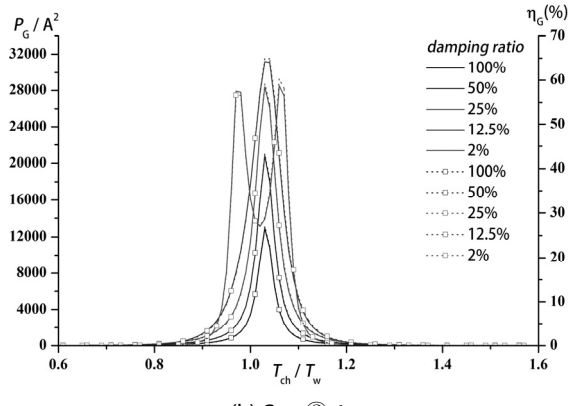
수로 내 부이의 운동에 관련한 유체 점성감쇠는 임계감쇠($c_F = 2\sqrt{M_F k_F}$)를 고려하여 감쇠비를 0%로 한 경우에 대한 결과는 Fig. 7에 제시하였고, 5%로 한 경우에 대한 결과는 Fig. 8에 제시하였다. 즉, Figs. 7(a) and 8(a)는 Case①인 경우로, 도시된 범례의 감쇠율은 $c_{PTO} = c_{(F+G)}$를 의미하며, Figs. 7(b, c) and 8(b, c)는 Case②인 경우로 범례의 감쇠율은 c_G을 의미한다. Fig. 7(a)는 c_F가 0%인 경우로 $c_{PTO} = c_G$로 고려할 수 있으므로, 발전관련 감쇠계수 c_G의 변화에 따라 발전효율이 직접적으로 영향을 받음을 볼 수 있는 반면, Fig. 8(a)는 c_F가 5%인 경우로 $c_{PTO} \neq c_G$이며, 수로 및 부이 주변에서의 유체점성에 의한 감쇠의 영향에 비선형성이 고려되지 않은 상태이다.

Fig. 7에 나타낸 시간평균 파워(P_G) 및 효율(η_G)의 변화를 비교하여 살펴보면 해석한 3가지 케이스 모두 목표한 파랑조건 부근에서 공진효과로 높은 성능을 보임을 확인할 수 있으며, 특히, Case②-2에 대한 결과인 Figs. 7(c) and 8(c)를 살펴보면 감쇠율 2% 곡선에서 보이는 두 개의 공진영역은 채널의 공진효과가 발전기의 공진효과보다 중요함을 알 수 있다. 또한, 발전파워 및 효율은 발전에 따른 감쇠비에 민감하게 거동하고, 최적의 감쇠비가 존재함을 알 수 있다. Case①과 ②를 비교해 보면 Case①의 곡선이 상대적으로 폭이 넓음을 알 수 있다. 실제 해상의 파랑은 다양한 주파수 성분의 파랑으로 구성된 불규칙파이므로 Case①이 상대적으로 발전에 유리하다고 볼 수 있다. Fig. 7(b)의 감쇠율 2% 곡선을 보면 타 결과와는 달리 특이한 경향을 보이는데, 이는 발전기의 공진에 의해 부이의 움직임이 제한되는 동조질량효과에 의한 것으로 판단된다. 감쇠율이 증가함에 따라 발전기의 공진현상이 급격하게 감소하여 동조질량효과 또한 감소한다. 따라서 이러한 현상은 감쇠율 2% 이하일 경우에만 찾아볼 수 있었다.

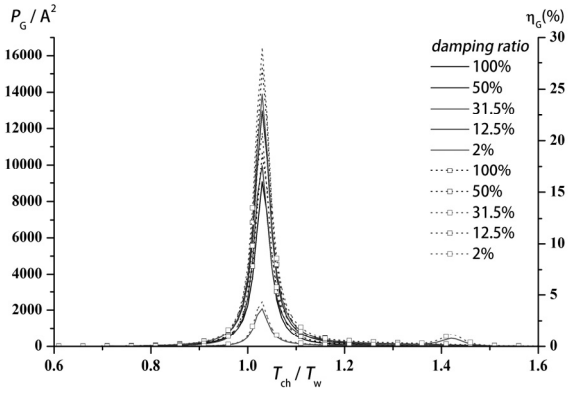
실제와 유사할 것으로 판단되는 5% 감쇠비에 대한 결과인 Fig. 8을 살펴보면 전체적인 경향은 0% 감쇠비일 때와 크게 다르지 않으나 최대 파워와 효율이 많이 감소됨을 알 수 있다. 이 결과는



(a) Case①

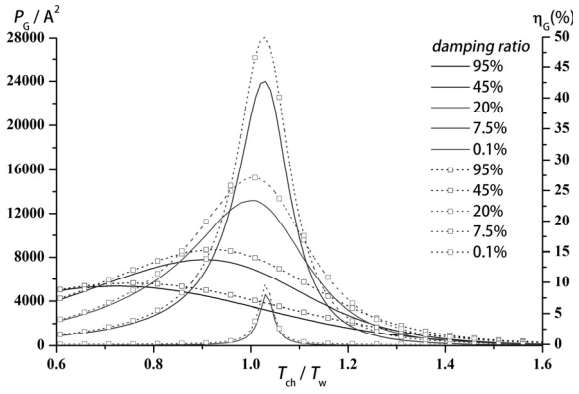


(b) Case②-1

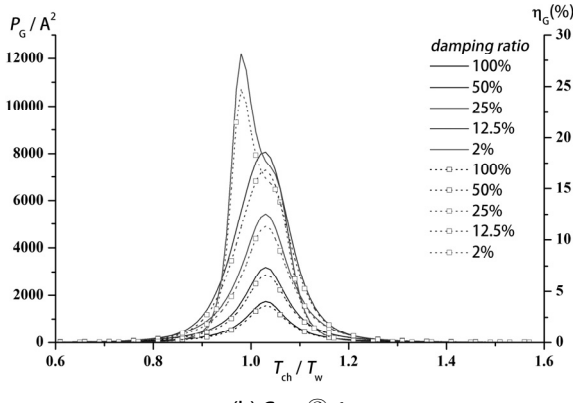


(c) Case②-2

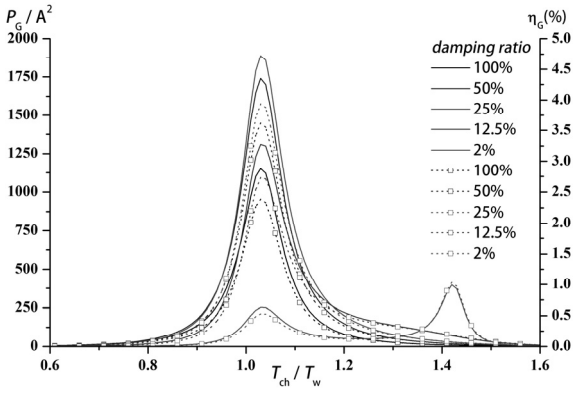
Fig. 7. Time-Averaged Power and Efficiency with Respect to Non-Dimensionalized wave Period in Case of c_F 0% (Solid : P_G, Dot : η_G)



(a) Case①



(b) Case②-1



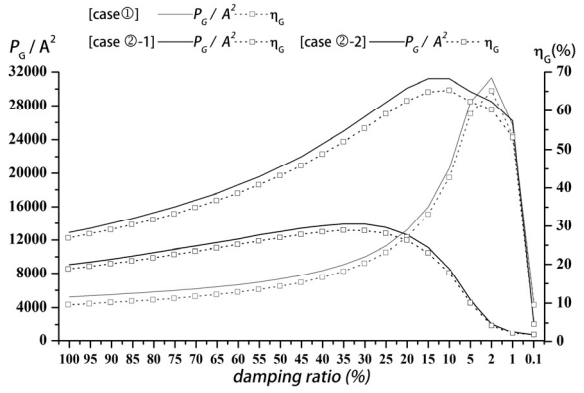
(c) Case②-2

Fig. 8. Time-Averaged Power and Efficiency with Respect to Non-Dimensionalized wave Period in Case of c_F 5% (Solid : P_G, Dot : η_G)

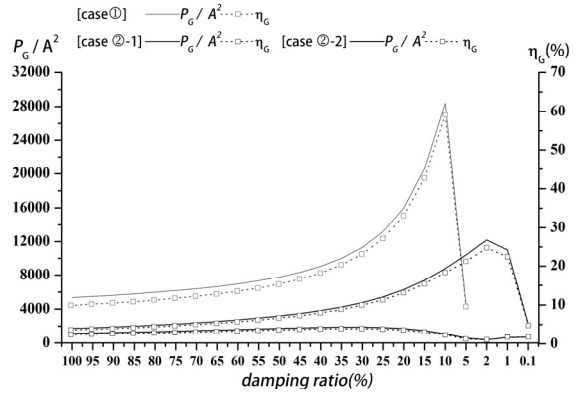
수로와 부이 부근에서 발생하는 유체 점성감쇠가 중요하다는 것을 의미한다. 즉, 발전효율을 높이기 위해서는 이 감쇠의 영향을 최소화 하는 것이 필요하며, 발전기의 합리적인 설계를 위해서는 이의 영향을 적절히 고려해야 만 한다는 것을 의미하는 것이다.

Fig. 9는 수로 및 부이의 유체점성에 의한 감쇠비를 0%로 한 경우와 현실적인 5%를 가정한 경우의 발전기 감쇠율 변화에 따른 시간평균 파워와 효율의 최대값의 변화를 나타낸 것이다. 두 경우를 비교해 보면 발전 효율이 크게 감소함을 알 수 있다. 특히, 성능이 급격이 떨어졌고, 최고의 효율을 보이는 발전기 감쇠비 조건도 변함을 알 수 있다. 특히, 상대운동을 이용하는 Case②가 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

부이의 공진조건을 수로의 공진조건을 일치시켜 부체의 운동을

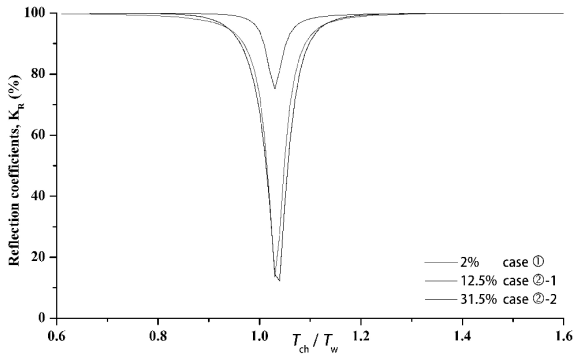


(a) Damping Ratio (c_F) 0%

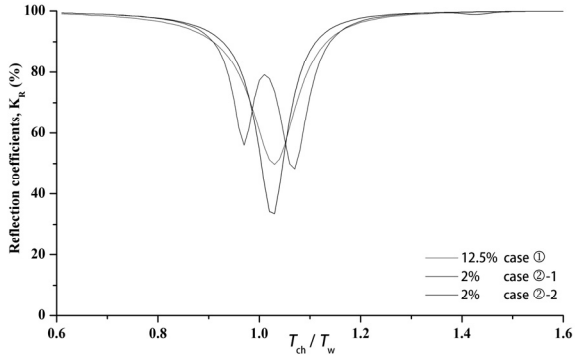


(b) Damping Ratio (c_F) 5%

Fig. 9. Maximum Efficiency & Time-Averaged Power with Respect to Damping Ratios of the Linear Generator (Solid : P_G, Dot : η_G)



(a) Damping Ratio (c_F) 0%



(b) Damping Ratio (c_F) 5%

Fig. 10. Maximum Reflection Coefficients with Respect to Damping Ratios of the Linear Generator

직접 발전에 활용하는 Case①의 경우가 가장 우수한 성능을 보이고, 발전기의 공진조건을 수로의 공진조건에 일치시킨 Case②-1이 그 다음, 그리고, 발전기의 공진조건을 부이의 공진조건에서 일치시킨 Case②-2가 제일 낮은 수준의 성능을 보임을 확인하였다. 특히, 유체의 점성감쇠의 영향을 고려하는 경우에는 그 차이가 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있었다.

3.2.3 반사율

Fig. 10에 해석한 3가지 시스템의 반사율(K_R)을 제시하였다. 각 케이스 별로 최대 효율을 보이는 발전기 감쇠비 조건에서의 반사율을 도시한 것으로 일반적인 유공방파제의 반사율 곡선과 흡사함을 알 수 있다. 최고의 발전효율을 보이는 조건인 수로의 공진조건 부근에서 최고의 소파효과를 보임을 알 수 있다. 반사파에 대한 입사파의 진폭크기의 비인 반사율 K_R은 마찰과 박리 등에 따른 에너지 손실이 무시되므로 유체의 점성효과를 무시할 경우 $\sqrt{1-\eta_G}$로 표시되어, 효율이 최대가 되는 조건에서 반사율이 최저가 되게 된다.

Fig. 10으로부터 제안된 파력발전시스템이 기존의 유공방파제 내의 유수실과 같은 역할을 할 수 있어 기존 유공방파제의 장점중의 하나인 전면해상에서의 어선 등의 항행에 도움을 줄 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존 방파제를 활용하여 파력발전을 효율적으로 할 수 있는 새로운 시스템에 대해서 연구하였다. 수심 15m에 설치된 방파제에 주기 7초, 파고 2m를 대상으로 파력발전 시스템을 설계하여 성능해석을 실시하였다. 수치해석결과, 수로의 공진이 발전효율에 지배적인 영향을 줌을 알 수 있었으며, 상대적인 운동보다 직접 부이의 운동을 이용하는 것이 에너지 추출 효율이 높아짐을 알 수 있었다. 또한, 상대운동을 이용하는 경우에는 발전기의 공진조건을 수로의 공진조건에 맞추는 것이 부이의 공진조건에 맞추는 것보다 유리함을 확인하였다. 발전관련 감쇠계수 c_G의 변화에 따라 발전효율이 직접적으로 영향을 받으며, 최적의 감쇠조건이 있음을

확인하였다.

수로 및 부이 주변에서의 유체 점성에 의한 감쇠의 영향을 파악하기 위하여 감쇠비 5%에 대해 해석한 결과, 그 영향이 무시할 수 없을 정도로 큼을 알 수 있었다. 따라서, 점성감쇠를 최소화하기 위한 노력과 최소화된 감쇠를 고려한 적절한 발전량 추정에 대한 노력도 필요하다고 할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 순수 공진효과를 입증하기 위하여 발전을 제외하여 해석을 실시하였으며, 추후 발전기 감쇠 발생 및 변화에 따른 부이의 거동 실험을 실시하여 LEG 운동자인 영구자석과 부이의 연성 운동방정식에 대한 비교·검토로부터 발전량 예측이 필요하다.

현재 적용한 선형모델의 한계를 최대한 해결하기 위하여 발전에 중요한 영향을 미치는 공진조건 부근에서의 유체의 점성감쇠를 부체에 부착된 댐퍼로 모형화하여 해석하였으며 댐퍼의 감쇠계수는 수리모형실험 등에 의해서 추정이 가능할 것으로 판단된다. 보다 정밀한 해석을 위해 Navier Stokes 방정식 등을 이용한 후속연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 한국해양과학기술원의 기본연구사업인 '해중터널 실용화를 위한 핵심기술개발(PE99321)'의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

António, F. de O. Falcão. (2010). "Wave energy utilization: A Review of the Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14. pp. 899-918.

Brooke, J. (2003). *Wave energy conversion*, Elsevier, Amsterdam.

Charlier, R. H. and Justus, J. R. (1993). *Ocean energies*, Elsevier, Amsterdam.

Chen, Z., Yu, H., Hu, M., Meng, G. and Wen, C. (2013). "A review of offshore wave energy extraction system." *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-9.

Cho, I. H. and Kweon, H. M. (2011). "Extraction of wave energy using the coupled heaving motion of a circular cylinder and linear electric generator." *Journal of Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 6, pp. 9-16 (in Korean).

Choi, Y. D. and Lee, Y. H. (2007). "The state of research and development of the wave power technologies." *Journal of Korean Society of Solar Energy*, Vol. 6, pp. 17-24.

Drew, B., Plummer, A. R. and Sahinkaya, M. N. (2009). "A review of wave energy converter technology." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 223, pp. 887-902.

Engström, J. (2011). *Hydrodynamic Modelling for a Point Absorbing Wave Energy Converter*, Ph.D. Dissertation, Acta Universitatis Upsaliensis.

Eriksson, M., Isberg, J. and Leijon, M. (2005). "Hydrodynamic modelling of a direct drive wave energy converter." *Int. J. of Engrg Sci*., Vol. 43, pp. 1377-1387.

Evans, D. V. (1976). "A theory for wave-power absorption by oscillating bodies." *J. Fluid Mech*., Vol. 77, pp. 1-25.

Hong, K. Y. (2012). "The status of wave power generation technology and future prospects." *Proceedings of Korean Society of Ocean Science and Technology*, pp. 98-106 (in Korean).

Ivanova, I. A., Bernhoff, H., Ågren, O. and Leijon, M. (2005). "Simulated generator for wave energy extraction in deep water." *Ocean engineering*, Vol. 32, No. 14, pp. 1664-1678.

Jahangir, K. and Gouri, S. B. (2009). *Ocean energy: Global technology development status*, No. T0104, Powertech Labs for the IEA-OES.

Jeong, S. T., Park, W. S. and Lee, H. C. (2002). "Finite element analysis for multiple floating breakwaters." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 14, No. 4 pp. 257-264 (in Korean).

McCormick, M. E. (2013). *Ocean wave energy conversion*, Courier Dover Publications.

Mueller, M. and Baker, N. J. (2002). "A low speed reciprocating permanent magnet generator for direct drive wave energy converters." *Proceedings of International Conference on Power Electronics Machines and Drives*, pp. 468-473.

Park, W. S. (1991). *Reliability analysis of tension leg platforms for wave loadings*, Korea advanced institute for science and technology (KAIST), Ph.D. Dissertation, p. 144.

Park, W. S., Yi, J. H. and Seo, J. H. (2014). *Wave power generation apparatus employing linear generator*, Korean patent, 10-1421462.

Salter, S. H. (1974). "Wave power." *Nature*, Vol. 249, No. 5459, pp. 720-724.

Seo, J. H. and Park, W. S. (2013). "Wave power extracting system with linear induced generator attached to an existing vertical breakwater." *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 1 p. 749 (in Korean).

Seo, J. H. and Park, W. S. (2014). "Wave power extracting system with multi-resonators attached to vertical breakwaters." *The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers*.

Shin, S. H. and Hong, K. Y. (2011). "The state-of-the-art and key performance indicators for commercial use of the wave energy utilization technologies." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 59, No. 5, pp. 55-62 (in Korean).

Sommerfeld, A. (1949). *Partial differential equations in physics (Vol. 1)*, Academic Press, New York.