

공기감쇠계수 이론해와 수치조파수조를 이용한 진동수주형 파력발전장치 구조물의 최적형상과 성능해석을 위한 수치 해석 연구

김동민¹ · 민은홍¹ · 구원철^{2,*}
¹인하대학교 조선해양공학과 대학원생
²인하대학교 조선해양공학과 교수

Numerical Study on the Optimal Shape and Performance of an Oscillating Water Column Using Analytic Air Damping Coefficients and Numerical Wave Tank

Dong-Min Kim¹, Eun-Hong Min¹, and Weoncheol Koo^{2,*}

¹Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea
²Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약

본 연구에서는 진동수주형 파력발전장치(Oscillating water column: OWC)의 에너지추출효율을 파악하기 위해 구조물 형상에 대한 매개변수 해석연구를 수행하였다. 다양한 챔버 크기에 적용이 가능한 이론해를 이용하여 챔버내 공기감쇠 계수를 제시하고 이를 OWC에 적용하였다. 선형 포텐셜 이론에 기반을 둔 이차원 시간 영역 수치조파수조를 이용하여 이론해로 구한 공기감쇠계수를 적용한 OWC의 에너지 추출 효율을 구하고, 기존에 제시한 공기감쇠 계수 적용 연구 결과와 비교 검증을 수행하였다. OWC의 형상 매개변수 해석을 통해 챔버내 에너지추출효율을 계산하고 해상환경에 따른 최적의 형상조건을 제시하였다.

Abstract – In this study, parametric studies were conducted on the body shape to improve the energy extraction efficiency of an oscillating water column (OWC). Using the analytical solution applicable to various chamber sizes, the air damping coefficient in the chamber was presented and applied to the OWC. The energy extraction efficiency of OWC with the analytic air damping coefficients was obtained using a two-dimensional time-domain numerical wave tank (NWT) based on the linear potential theory, and comparative verification was performed with the results of the previous study. Through the analysis of the shape parameters of OWC, the energy extraction efficiency in the chamber was calculated and the optimal shape conditions according to the ocean environment were suggested.

Keywords: Wave energy converter(파력발전장치), Oscillating water column(진동수주), Numerical wave tank(수치조파수조), Analytic air damping coefficient(공기감쇠계수 이론해), Energy extraction efficiency(에너지추출효율)

1. 서 론

전 세계적으로 화석에너지의 점진적인 고갈과 이산화탄소 배출로 대변되는 기후 변화와 환경 문제 등으로 인해 새로운 친환경 재생 에너지에 대한 관심이 급증하고 있다(Kim *et al.*[2018]). 그 중에서도 에너지원이 풍부함과 동시에 무한한 발전이 가능하고 다른 에너지원과 비교하여 환경문제를 최소화 할 수 있는 해양 파력 에너

지를 활용하기 위한 다양한 파력발전장치(Wave energy converter) 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Koo *et al.*[2012]). 파력발전기 개발에 대한 최근 연구로는, Kim *et al.*[2016]은 점흡수식 수직 진자형 파력발전장치에 대한 운동 및 에너지 추출효율에 대한 실험적 연구를 수행하여 장치의 형상뿐만 아니라 흡수 변화에 따라 에너지 추출효율이 변하는 것을 확인하였다. Park *et al.*[2018]은 경계요소법 기반 수치해석을 이용하여 감쇠판이 부착된 부유식 파력-해상풍력의 연계형 복합발전이 가능한 대형 부유식 반잠수식 구조물에 대한 개념설계 및 실험적 연구를 수행하여 감쇠판이 구조

*Corresponding author: wckoo@inha.ac.kr

물의 운동을 효과적으로 저감시킬 것이라고 제시하였다. Joe and Yu[2018]는 웨이브 글라이더 메커니즘을 활용한 파력발전 시스템을 제안하였고, 그에 따른 발전장치의 성능과 최적 설계방안에 대해 연구하였다. 또한, Kim *et al.*[2019]는 제주 서부 해역에 최적화된 비대칭 형상 파력발전 로터의 선형 거동에 대한 수치 및 실험적 연구를 수행하였다.

해양파력을 이용한 발전방식은 파랑에 의한 장치의 운동으로서 파랑에너지를 흡수하는 방법과 파랑의 변형을 이용하는 방법으로 분류할 수 있다(Kim *et al.*[2007]). 전자의 경우에는 파랑의 상하 운동이나 회전운동에 의해 발생하는 구조물의 기계적 운동으로부터 생성되는 에너지를 변환하는 가동물체(Movable body)형이나 파랑의 운동으로부터 공기챔버(Air chamber) 내에서 물이나 공기의 흐름을 에너지로 변환하는 진동수주(Oscillating water column)형 발전장치가 있으며, 해안 사면 또는 제방으로부터 율과 시킨 파와 해수면의 높이차를 통해 생성되는 위치에너지를 변환하는 율과(Overtopping)형 발전장치 등이 있다.

이와 같은 발전방식 중에서 가장 활발히 오랫동안 연구가 진행되었고, 일부 설치되어 시험운용의 경험이 축적되어있는 진동수주형 파력발전장치는 입사하는 파랑에너지를 1차 변환을 통해 물이나 공기의 흐름과 같은 역학적 에너지로 변환하고, 이를 공기터빈(Air turbine)을 통해 전기적 에너지로 2차 변환한다. 공기터빈은 일반적으로 챔버 노즐에서 공기의 흡입과 배출 과정에서도 일정하게 한 방향으로만 회전하여 정류와 원동기 기능을 동시에 수행할 수 있는 웰스터빈(Wells turbine)이나 임펄스 터빈(Impulse turbine)을 주로 사용한다.

파력에너지 추출효율에 직접적으로 중요한 영향을 미치는 공기 챔버의 크기와 터빈의 효율을 계산하기 위해, Sarmento and Falcao [1985]는 선형 포텐셜 이론을 기반으로 하여 공기챔버 너비에 따른 터빈계수 C 를 정의하고 그에 따른 진동수주형 파력발전장치의 에너지 추출효율을 분석하는 해석적 연구를 수행하였다. 또한, Sarmento[1992]는 선형연구에 기초하여 실험적 연구를 수행함으로써 기존 해석 결과와의 에너지 추출효율을 비교분석하였다. 이는 각각의 서로 다른 챔버 크기에 대한 해석해를 확립한 것으로, 이론적으로는 다양한 OWC 챔버 크기에 대해 적용이 가능한 계수이다. Liu *et al.*[2010]은 혼합 오일러-라그랑지안법(Mixed Eulerian-Lagrangian)에 기초한 DBIEM(Desingularized Boundary Integral Equation Method) 기반의 이차원 진동수주형 파력발전장치 해석을 통해, Sarmento and Falcao[1985]의 해석해와 비교하고 구조물(스카트)의 흡수에 따른 에너지 추출효율 분석하였다.

본 연구에서는 진동수주형 파력발전장치의 에너지추출효율을 향상시키기 위한 기초연구로서 목적하는 해상조건에 대하여 OWC의 여러 형상 매개 변수 해석을 통한 에너지추출효율을 신속하게 분석할 수 있는 수치해석 도구를 제시하고자 하였다. 해석방법으로는 경계요소법(BEM: Boundary Element Method) 기반의 이차원 시간 영역 수치조파수조(Numerical wave tank)를 사용하였다. 경계요소법은 포텐셜 이론을 기반으로 한 비선형 자유표면파 유동에 대

한 수치기법으로서, 최근까지 다양한 해양파-구조물간의 상호작용 해석등 해양유체역학 분야에서 여전히 중요한 수치해석 모델로 활용되고 있으며, 특히 OWC와 같이 최근에 활발히 연구되는 해양에너지 발전 구조물 성능해석 등에 빈번하게 사용되고 있다. 일정요소법(Constant panel method)과 더불어 각 요소의 비선형성을 고려한 고차경계요소법(HOBEM; Higher-Order Boundary Element Method)을 이용한 OWC에 대한 여러 연구들도 최근까지도 활발히 연구가 진행되고 있다(Belibassakis *et al.*[2020]).

수치해석을 통한 최적의 OWC 형상 선정과 효율 계산을 위해 다양한 크기의 챔버에 대해 공기 감쇠 계수, 즉 기체 유동에 의한 에너지 추출 계수를 파악하는 것은 상당한 어려움이 있다. 기존에는 실험결과와 비교하여 시행착오(Trial and error)방법을 통해 수치계산의 공기 감쇠계수를 정하였으나, 본 연구에서는 다양한 챔버 형상에 대한 공기 감쇠 계수의 이론해를 수치조파수조에 적용하는 기법을 제시함으로써, 기존의 방법에 비해 OWC 초기 최적화 모델을 선정하는데 효율적인 방법을 제시하였다. 저자들이 파악한 바로는, 수치조파수조 기법에 이론해의 공기감쇠계수를 적용하여 쉽고 빠르게 OWC 챔버 효율과 최적 형상을 계산하는 연구결과는 매우 드물거나 제한적이었다. 따라서, 보다 신속하게 OWC 형상에 대한 매개변수 해석을 수행하여 OWC 최적화 모델 선정 및 성능을 해석할 수 있는 수치해석 기법을 제시하였다는 점에 연구적 의미가 있다.

해석결과의 타당성을 검증하기 위해 Sarmento and Falcao[1985]에서 제시한 공기챔버 너비에 따른 터빈계수(공기감쇠계수)를 적용하여, Sarmento and Falcao[1985]와 Liu *et al.*[2010]의 계산 결과와 비교하여 수치해석 결과의 정확성을 검증하였다. 또한, 목적하는 해상조건에 따른 최적의 OWC형상과 이에 부합하는 챔버 공기감쇠계수를 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 경계 값 문제(Boundary Value Problem)

본 연구에서는 포텐셜 유동 이론을 기반으로 한 이차원 시간 영역 수치 조파 수조기법을 이용하였다. 수치조파수조나 경계요소법을 이용한 OWC 계산은 기존 여러 연구 결과들에서 확인할 수 있기에, 본 논문에서는 경계조건과 수치해석 기법에 대해 간략하게 소개하였다. 경계조건식 등은 비선형항을 모두 포함하여 작성하였으나, 이 중 본 연구에서는 선형식만을 고려하여 계산을 수행하였다. 계산영역내의 유체 유동을 비압축성, 비점성, 비회전성의 포텐셜 유동으로 가정하였다. 이때 계산영역은 좌측 입사 경계면과 정수면($z=0$)의 교점을 원점으로 하는 직교 좌표계를 사용 하였다. 유체 유동은 연속방정식을 만족하며, 비압축성 유동일 경우 전체 계산 영역에 대한 지배 방정식으로 라플라스 방정식(Laplace equation)이 성립한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

자유표면은 해수와 대기가 공존하는 경계층으로서, 이를 수치적으로 표현하기 위해서는 두 가지 자유수면 경계조건(동역학적, 운

동학적)을 만족해야하며 아래와 같이 비선형 경계조건으로 나타낼 수 있으며, 선형계산 시 2차항으로 표현되는 비선형항은 무시한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 - \frac{P_a}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla\phi \cdot \nabla\eta + \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 각각 자유표면에서의 동역학적, 운동학적 경계조건이다. g 는 중력가속도, ρ 는 물의 밀도이다. P_a 는 자유수면에서는 0이지만, 공기챔버 내부의 자유수면에서는 압력이 존재하며, 공기 챔버 너비와 조건에 따라서 공기감쇠계수가 변할 수 있다. 운동학적 자유표면은 유체 입자가 자유표면을 벗어날 수 없고, 항상 자유 표면과 같은 위치에 있어야 한다는 조건($z = \eta$)을 만족해야한다. 또한 해저 바닥면 경계조건과 우측 벽면 경계조건은 평평하고 불 투과성 조건을 가정하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

좌측 입사파 경계면은 선형 유체 입자 속도를 입사파 속도 포텐셜로 나타내어 경계조건에 식 (5)와 같이 대입하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = n_x \frac{\partial \phi}{\partial x} = n_x \frac{gAk \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

여기서, A 는 파의 진폭(Wave amplitude), k 는 파수(Wave number), h 는 수심, ω 는 입사파의 주파수이고 n_x 는 x 방향의 법선벡터이다.

위와 같은 경계조건과 함께 지배방정식인 라플라스 방정식을 풀기 위해 그린 함수(Green function)를 사용하여 지배방정식을 경계 적분 방정식(Boundary Integral Equation)으로 변환하고, 일정 패널 법(CPM: Constant Panel Method)을 통해 각 요소(Element)를 이산화 하고 이를 수치적으로 해석하였다.

$$\alpha\phi_i = \iint_{\Omega} \left(\phi_j \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} - G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right) ds \quad (6)$$

$$G(x_i, z_i, x_j, z_j) = \frac{1}{2\pi} \ln R_1 \quad (7)$$

여기서 α 는 입체각으로서 CPM기법에서 경계면에서는 -0.5가 되며, $G(x_i, z_i, x_j, z_j)$ 는 이차원에서 라플라스 방정식을 만족하는 그린 함수이다. R_1 은 경계면에 위치한 각 소스점(Source point)과 필드점(Field point)과의 거리이다.

본 연구에서는 선형 계산만을 다루었으나, 여기서 비선형 자유표면 계산에 대해 간단히 언급하고자 한다. 비선형 해석시 입사하는 파랑에 대하여 매 단위 시간마다 변하는 자유표면을 재현하기 위해 혼합 오일러-라그랑지안(Mixed Eulerian-Lagrangian)기법을 사용한다. 이때 자유표면의 경계조건은 전미분식($\delta/\delta t = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla$)을 통해 변형 시키고, 자유표면의 노드 속도(\vec{v})가 유체 입자 속도($\nabla\phi$)와 동일($\vec{v} = \nabla\phi$)하다고 가정하면 아래와 같은 자유표면 경계조건이

성립하게 된다.

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \nabla\phi \cdot \vec{v} - \frac{P_a}{\rho} \Rightarrow \frac{\delta \phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 - \frac{P_a}{\rho} \quad (8)$$

$$\frac{\delta \eta}{\delta t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} - (\nabla\phi - \vec{v}) \cdot \nabla\eta \rightarrow \frac{\delta \eta}{\delta t} = \nabla\phi \quad (9)$$

2.2 공기챔버 내부의 공기감쇠효과

OWC 공기챔버 내부의 자유표면의 변위에 따라 챔버 내부에 공기 압력이 발생한다. 발생된 공기 압력은 챔버 상단부 입구(Air nozzle)에 설치되는 터빈을 통해 전기에너지로 변환된다고 가정하였다. 본 연구에서는 Koo *et al.*[2010]에서 수행한 진동수주 챔버 모델링을 기반으로, 공기 압력의 조절을 통해 챔버내의 에너지 변환 효율을 향상시키기 위해 Sarmento and Falcao[1985]의 이론해를 공기 챔버 계수로 적용하여 그에 따른 에너지 변환 효율을 분석하였다.

공기감쇠계수(C)는 Sarmento and Falcao[1985]에서 제시한 터빈계수로서 아래와 같이 나타낼 수 있다. 이는 챔버내의 공기압과 이를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환 계수와 유사한 의미를 가진다.

$$C = \left\{ \frac{\tanh Kh}{Ka} [(u - \xi)^2 + 4m^2 \sin^4 Ka] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

여기서 K 는 파수, h 는 수심, a 는 공기챔버의 폭이다. u 는 공기챔버 내부 자유표면에서의 공기유량이며 ξ 는 압축성 공기의 스프링효과로서 본 연구에서는 0을 적용하였다. m 은 $(1 + \alpha h \operatorname{cosech}^2 Kh)$ 과 같으며 이때 α 는 ω^2/g 와 같다.

Fig. 1은 Sarmento and Falcao[1985]에서 제시한 해석해를 수심 및 공기챔버 너비의 변화에 따라 계산한 터빈계수(C)를 나타낸 것이다. 계산된 터빈계수는 공기챔버의 너비와 수심에 따라 변화하며,

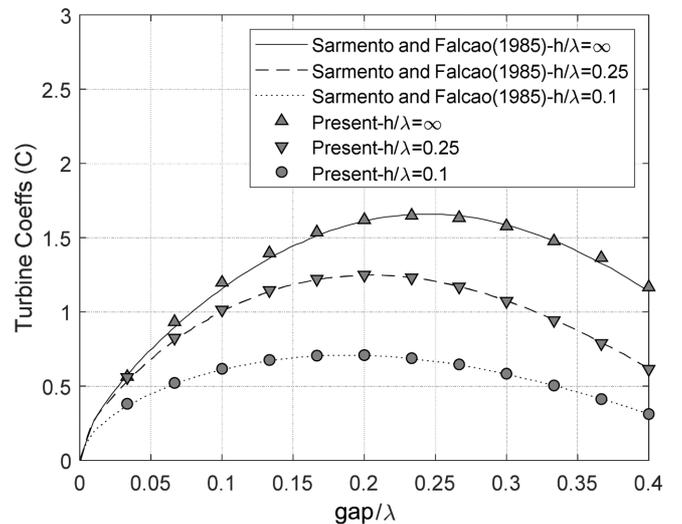


Fig. 1. Comparison of various turbine coefficients as a function of relative chamber width and relative water depth.

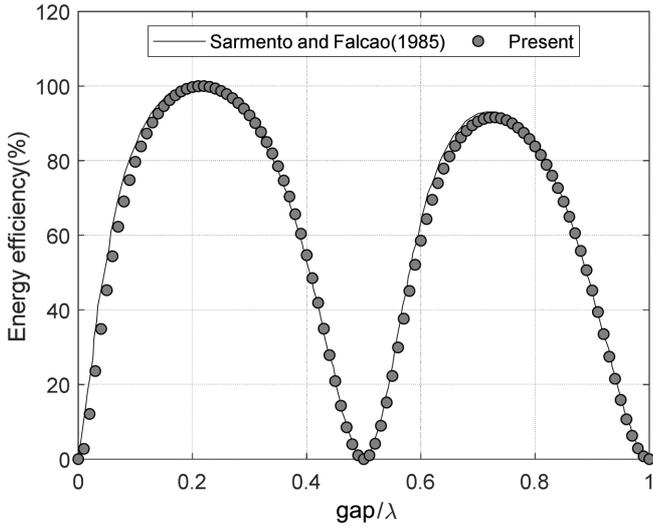


Fig. 2. Comparison of energy extraction efficiency as a function of relative chamber width ($C=1.628$, Deepwater condition).

본 수치계산에서 획득한 터빈계수는 기존 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2는 무한수심 조건에서 최대값을 가지는 터빈계수, $C=1.628$ 을 적용하여, 입사파장 대비 공기챔버 폭에 따른 에너지 추출효율을 계산한 것이다. 이론값과 본 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 계산된 에너지 추출효율은 챔버의 상대 폭에 따라 변하며, 입사파장 대비 약 20% 일 때 챔버내에서 최대 에너지 추출효율을 가지는 것으로 확인되었다.

챔버 내부에서의 공기 압력의 변화 $P_a(t)$ 는 공기챔버 내 공기의 체적변화에 의해 발생하는 것으로 가정하게 되면 Boyle법칙에 기초한 다음의 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$P_a(t) = \frac{\rho(g/a)^{1/2}}{C} Q(t) = \frac{\rho(g/a)^{1/2}}{C} A_d U_d(t) \quad (11)$$

여기서 $Q(t)$ 는 공기챔버에서 추출되는 유량이고, A_d 는 챔버 상단부 덕트의 투영면적이다. $U_d(t)$ 는 매 단위 시간마다 터빈을 통해 외부로 빠져 나가는 공기의 흐름속도이며 이는 비압축성 공기조건과 관련하여 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = A_d \cdot U_d(t) \quad (12)$$

여기서 $\Delta V = V_i - V_{i-\Delta t}$ 는 공기챔버 내부의 공기체적 변화량이다. 식 (11)과 (12)의 연산을 통해 얻을 수 있는 매 단위 시간마다의 공기 압력은 식 (13)과 같으며, 이를 식 (2)에서 선형항만 고려한 식에 대입하여 단위 시간마다 공기압력에 의한 자유표면의 변위를 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_a(t) = \left(\frac{g}{a}\right)^{1/2} \frac{\rho \Delta V}{C \Delta t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{\rho} \left(\frac{g}{a}\right)^{1/2} \frac{\rho \Delta V}{C \Delta t} \quad (14)$$

2.3 에너지 효율 분석

본 연구에서는 수치조파수조 내 진동수주형 파력발전 시스템을 통해 발생하는 추출 에너지와 입사하는 파랑의 에너지를 비교하였다. 입사하는 파랑의 에너지는 파 진폭의 제곱에 비례하고 에너지 유동은 파랑에너지와 그 전달 속도, 즉 군속도(Group velocity)의 연산으로 나타낼 수 있다. 진동수주형 파력발전장치가 모사된 포텐셜 유동기반의 수치조파수조 계산영역에서는 입사파 에너지 플럭스(식 15), 구조물에 의해 반사되는 반사에너지 플럭스(식 16), 공기챔버에 의해 추출되는 에너지(식 17) 등 총 세 가지 에너지 요소가 존재한다.

$$E_i C_g = \frac{1}{2} \rho g A_i^2 C_g \quad (15)$$

$$E_R C_g = \frac{1}{2} \rho g A_R^2 C_g \quad (16)$$

여기서, E_i , E_R 은 각각 입사파 에너지와 반사 에너지를 나타내며, C_g 는 군속도, A_i , A_R 은 각각 입사파 진폭과 반사파 진폭이다. 공기챔버 내에서 추출되는 평균 에너지유동은 공기압력과 연산으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \int_0^a P_a \vec{z} dx = P_a a \vec{z} \quad (17)$$

여기서 \vec{z} 는 매 단위 시간마다 챔버내 자유표면의 평균 수직 속도이며, 공기챔버 내 한 파주기(1 T)에서 단위 시간마다 추출되는 에너지 플럭스는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} F dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_a a \vec{z} dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{\rho(g/a)^{1/2}}{C} U_d A_d^2 U_d dt \quad (18)$$

최종적으로 공기챔버 내에서 추출되는 에너지 (Energy flux)는 식 (19-1)와 같이 본 연구에서 적용한 공기감쇠 계수(C)를 포함한 단순식으로 나타낼 수 있다. 위 결과는 Koo *et al.*[2010]에서 제시한 공기 압력에 의한 터빈의 에너지 추출식(식 19-2, AP)과 같으며, 두 식의 유사성을 통해 식 (19-3)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다. 여기서 C_{dm} 은 Koo *et al.*[2010]에서 제시한 공기챔버와 덕트간의 부피비 계수(=추출계수)이며, 이는 일종의 시행착오(Trial and error) 형식으로 구한 값이며, C_{dm} 이 증가함에 따라 덕트 내 공기 유속이 증가하고 공기챔버 압력이 커지면서 그에 따른 파력에너지양이 증가한다는 것을 제시하였다. C_{dm} 은 최종적으로 실험 결과와 비교하여 정확한 값을 구할 수 있다.

따라서 본 연구에서 적용한 공기감쇠 계수 이론해(C, 터빈계수)와 기존 연구의 C_{dm} 과의 관계식을 통해, 본 연구에서 제시하는 다양한 챔버 크기에 적용할 수 있는 터빈계수 이론해의 타당성과 확장성을 확인하고자 하였다.

$$DR = \frac{1}{2} \frac{\rho(g/a)^{1/2}}{C} A_d^2 U_0^2 \quad (19-1)$$

$$AP = \frac{1}{2} C_{dm} A_d U_0^2 \quad (19-2)$$

$$C_{dm} = \frac{\rho}{C} \left(\frac{g}{a}\right)^{1/2} A_d \quad (19-3)$$

유체에서 에너지 보존이 충족 되려면 공기챔버에 의해 발생하는 반사 에너지 플럭스와 추출되는 에너지 플럭스의 합이 입사하는 파랑에너지 플럭스와 같아야 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2} \rho g A_i^2 C_g = \frac{1}{2} \rho g A_R^2 C_g + \frac{1}{2} \frac{\rho}{C} \left(\frac{g}{a}\right)^{1/2} A_d^2 U_0^2 \quad (20)$$

최종적으로 계산되는 에너지추출효율은 식 (21)과 같다.

$$e = \frac{DR}{E_i C_g} \quad (21)$$

2.4 인공 감쇠 영역

유한한 길이의 계산 영역을 가지고 있는 이차원 수치조파수조는 입사하는 파랑이 구조물 반사로 인해 불필요한 반사파가 발생할 수 있다(Kwon *et al.*[2019]). 특히, 반사파가 입사파 경계면으로 되돌아 오면, 계산 영역내로 입사 파랑을 일정하게 유지하기가 어려워진다. 본 연구에서는 불 투과성인 조파(입사파) 경계면에 반사되어 되돌아 오는 파랑의 영향을 최소화하기 위해 $\phi_n - \eta$ 타입의 감쇠항에 램프함수(식 24)를 적용하여 자유표면 경계조건에 추가하였다(식 22, 23). 감쇠항이 적용되는 구간인 인공 감쇠 영역(Artificial damping zone)은 계산영역 내 좌측 조파 경계면으로부터 입사파장의 2배 길이까지 이다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - \frac{P_a}{\rho} - \mu_1 \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} - \frac{\partial \phi^*}{\partial n} \right) \quad (22)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \mu_2 (\eta - \eta^*) \quad (23)$$

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_{0i} \left[1 - \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{l-x}{l_d} \right) \right\} \right] & \text{for } x < l \\ 0 & \text{for } x \geq l \end{cases} \quad (24)$$

여기서 $\partial \phi^* / \partial n$, η^* 는 반사파가 포함되지 않은 속도 포텐셜 미분값 및 자유표면 변화에 대한 이론값이며, μ_{0i} 는 인공 감쇠 계수로 $\mu_{02} = k\mu_{01}$ 의 관계를 갖는다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치 모델링 및 검증

본 연구는 고정식 진동 수주형 파력발전장치(OWC)의 에너지추출효율을 향상시키기 위한 기초 연구로서, 챔버 구조물 형상에 이론해 터빈 계수를 적용하여 챔버의 물리적 변수에 대한 매개변수 해석을 수행하여 OWC 파력발전장치의 효율에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 3은 OWC 모델이 적용된 이차원 시간 영역 수치조파수조의 전체 계산영역을 도식화 한 것이다. 여기서 d , B 는 각각 공기챔버의 스커트(skirt)의 흘수(draft)와 두께(thickness)를 나타내

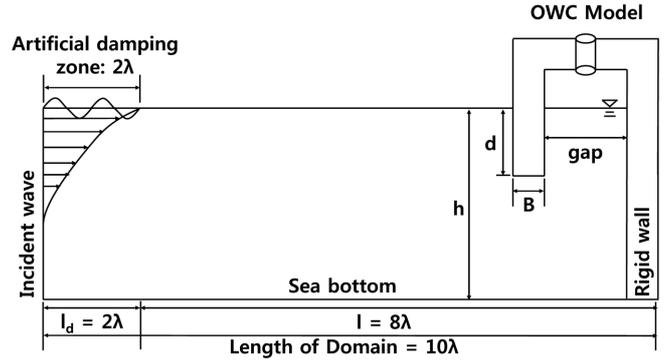


Fig. 3. Overview of computational domain for an Oscillating Water Column.

며, gap 은 공기챔버의 너비(폭)를 나타낸다. 본 연구에서는 시간에 따른 자유표면의 변위를 수치적으로 정확하게 재현하기 위해 수렴도 평가를 수행하였고, 입사파의 한 파장당 자유표면의 노드 개수를 40개, 시간 간격은 $T/64$ 로 설정하였다.

Table 1은 앞서 언급한 Liu *et al.*[2010]이 수행한 OWC모델의 제원을 나타낸 것이며, Fig. 4는 터빈계수(C)를 포함한 모든 동일한 제원으로 계산된 에너지추출효율을 두 선행연구의 결과와 비교한 것이다. 흘수가 $0(d/\lambda=0)$ 인 한계 조건에서 에너지추출효율은 기존결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Characteristics of numerical model (Liu *et al.*, 2010)

Parameter	Value
Wave length ($=\lambda$)	2 m
Water depth	1 m
Turbine Coefficient (C)	1.628
Column width ($=B$)	0.05λ
Wave height	0.01λ
Draft (d)	0

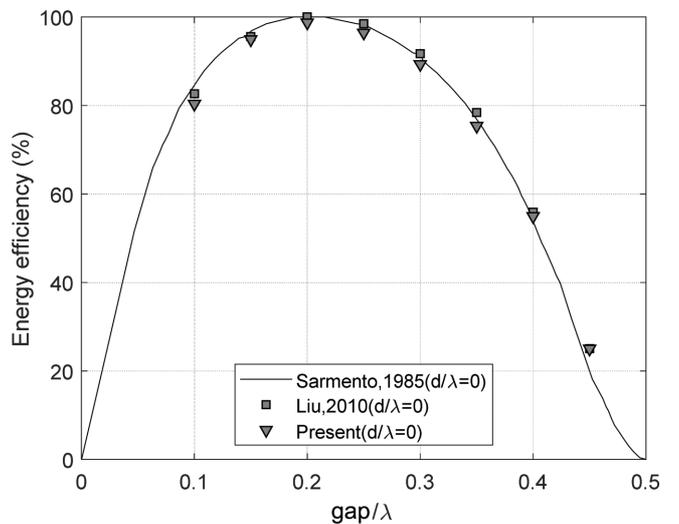


Fig. 4. Comparison of energy extraction efficiency as a function of relative chamber width ($C=1.628$, $d=0$, deep water condition).

3.2 수치모델에 따른 매개변수연구

일반적으로 한반도 주변 해역의 평균 유의파고와 유의파주기는 각각 0.5~2.0 m, 4~6초로 알려져 있다. 본 연구에서는 이를 고려한 파고 1 m, 파주기 4초를 목표 파랑조건으로 설정하였으며, 수심은 바닥면의 형상에 따른 영향을 고려할 수 있는 중층수(Intermediate water) 깊이구간인 10 m($h/\lambda=0.4054$)로 설정하였다. 그에 따른 공기감쇠계수는 정해진 수심에 따라 변화하는 터빈계수이며, 이때 Sarmiento and Falcao[1985]의 이론해를 통해 계산된 이론상 최대 에너지추출효율을 갖는 터빈 계수 값($gap/\lambda=0.2$ 조건에서)은 Fig. 5의 계산 결과를 통해 $C=1.574$ 인 것을 알 수 있다. Fig. 5는 입의의 공기감쇠계수($C=0\sim 5$)에 대한 에너지 추출효율을 나타낸 것으로, 감쇠계수가 1.574 보다 작으면 효율이 급격히 떨어지지만, 감쇠계수가 최댓값보다 크면 효율이 서서히 감소함을 알 수 있다.

입사하는 파랑에너지 플럭스에 대한 OWC의 각 요소별 에너지 플럭스와 총 에너지 플럭스의 합을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 이때 각 요소별 에너지 플럭스는 입사파랑 에너지 플럭스로 나눈 무차원화 된 값을 %로 나타내었다. 고정된 OWC 구조물에 의해 발생하는 에너지는 챔버내 공기압력으로 인해 추출되는 파력에너지와 반사파 에너지가 존재하며, 두 에너지 플럭스의 합은 입사파 에너지 플럭스와 같은데, 이는 계산 영역내에서 에너지가 일정하게 유지되는 것으로 판단할 수 있으며, 수치 계산의 신뢰성을 확인할 수 있다.

앞서 언급한 Fig. 5와 같이 수치 해석 결과 검증을 위해 사용한 제한적인 흘수 조건($d=0$)과 스킨트($B=0.05\lambda$)에서의 에너지추출효율은 이상적인 값이기 때문에, 본 연구에서는 Table 2의 제원과 같이 한반도 주변 해역의 평균적인 해상환경을 가정하여 에너지추출효율을 계산하였다. 이때 스킨트의 흘수와 두께의 크기는 입사파장으로 나눈 무차원화 된 값을 사용하였고, 챔버 노즐(Air Nozzle)의

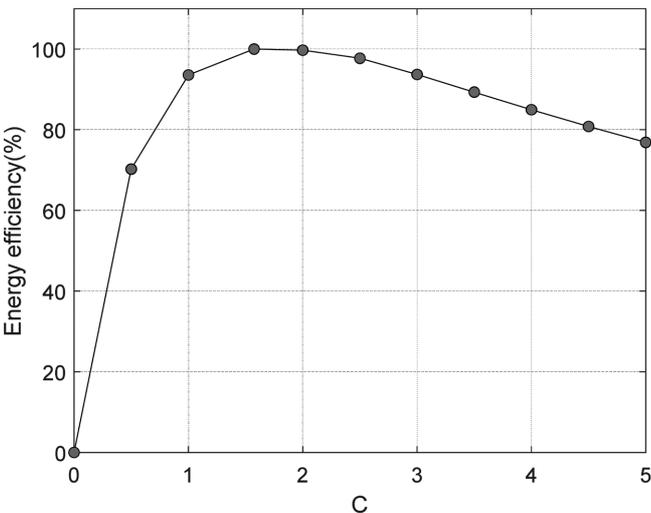


Fig. 5. Comparison of energy extraction efficiency according to various air damping coefficients (C), ($gap/\lambda=0.2$, $h/\lambda=0.4054$, $B=0.05\lambda$, $d=0$).

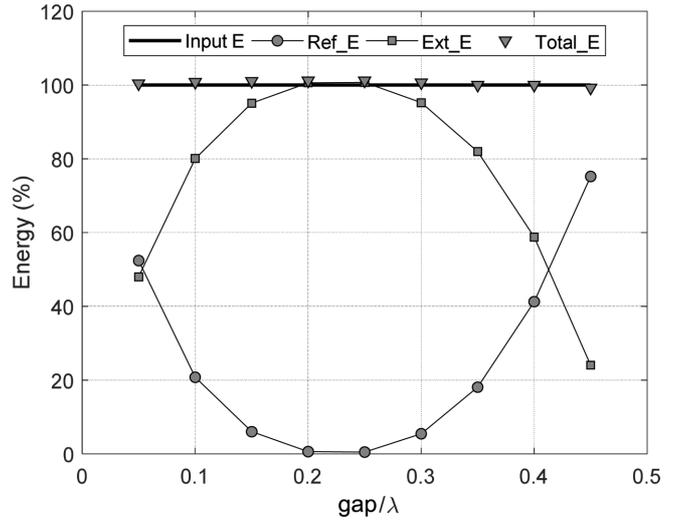


Fig. 6. Energy conservation for an OWC according to dimensionless chamber length (gap/λ) ($C=1.574$).

Table 2. Characteristics of Numerical Models

Dimension	
Air damping Coefficient (C)	1.574
Air Nozzle	1 m
Water depth (h)	10 m
Wave period (sec), λ (m)	4 sec, 24.67 m
Wave height	1 m
Wave amplitude (A_1)	0.5 m
Chamber width (gap/λ)	0.2
Skirt thickness (B/λ)	0 ~ 0.2 (5 cases)
Skirt draft (d/λ)	0 ~ 0.2 (5 cases)

투영 면적은 진동수주형 챔버에서 사용되는 웰스터빈이나 임펄스 터빈을 설치할 수 있을 충분한 크기로 가정하였다. 따라서 챔버 내의 공기가 압축되면서 발생할 수 있는 열 변화 등은 무시하였다.

본 연구에서는 스킨트의 형상 변화에 따른 진동 수주형 파력발전 장치의 에너지추출효율을 추정하였다. Fig. 7은 각각 스킨트 두께와 흘수 변화에 따른 에너지추출효율을 계산한 것이다. 이때 입사파장 대비 공기챔버의 폭(gap/λ)은 최대 에너지효율에 근접한 0.2를 사용하였고, 에너지추출효율은 공기챔버에 의해 추출되는 에너지에 입사파 에너지로 나눈 무차원화 된 값을 사용하여 %로 나타내었다. 계산된 에너지추출효율은 스킨트의 두께(B)와 흘수(d)가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 구조물의 두께와 흘수의 크기가 증가하면서 입사하는 파랑이 구조물에 의해 반사되어 공기챔버 내에서 추출되는 에너지효율이 상대적으로 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9에서는 OWC 챔버 구조물의 각 변수들에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 공기감쇠계수의 유무, 즉 Open 챔버 조건(터빈 계수 = 0)과 노즐을 통한 공기압 발생 조건(터빈 계수 = 1.574 조건)에 따른 챔버내 자유표면의 변위를 조사하였다. 파력에너지의

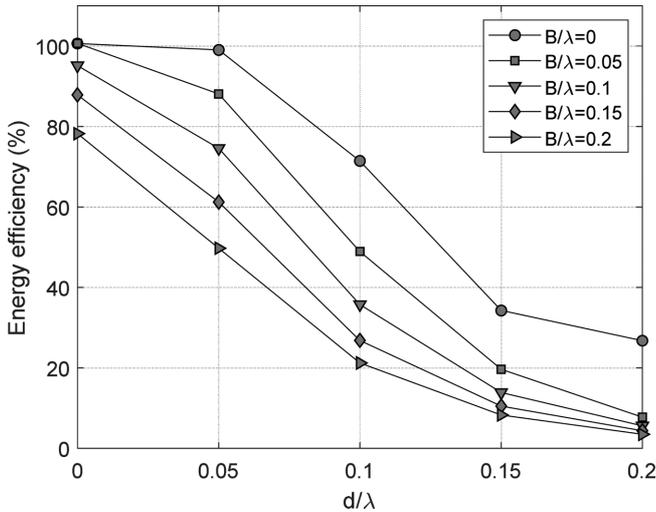


Fig. 7. Variation of energy extraction efficiencies according to skirt thickness (B/λ) and draft ratios (d/λ) ($C=1.574$).

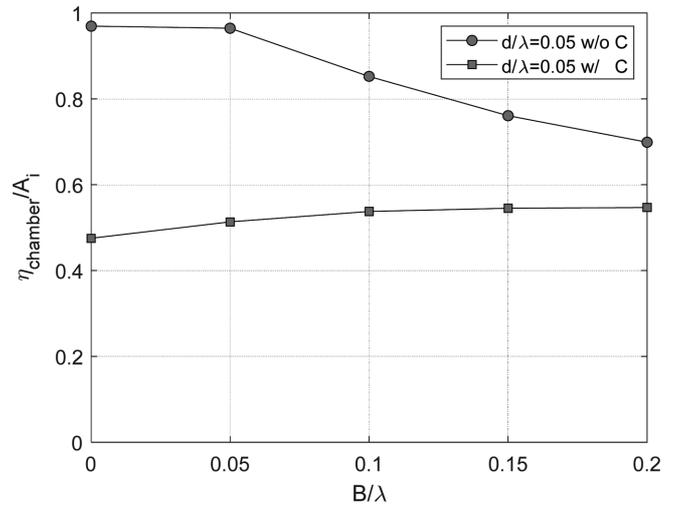


Fig. 9. Chamber wave elevations for various skirt thickness ratios (B/λ) ($d/\lambda=0.05$, $C=1.574$).

추출량은 터빈계수의 유무에 따른 챔버 자유수면 변화의 차이만큼 가능하다고 판단할 수 있다.

매개변수 해석은 챔버 폭에 대한 최대 에너지 추출효율을 가지는 터빈계수를 이론해를 통해 먼저 구한 후, 다른 변수에 대한 영향을 파악하고자 스킵트 폭 비율($B/\lambda=0.05$)과 흘수비($d/\lambda=0.05$)중 하나를 고정하고 다른 한 변수를 변화시키면서 각 변수의 영향을 파악하였다. Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 통해 공기감쇠계수가 적용되지 않은 Open 챔버에서 흘수비가 0.05이하 일 때 자유표면의 변위가 최대인 것을 알 수 있고, 공기감쇠계수가 적용되었을 때는 약 50% 감소하여 그 차이만큼 에너지추출효율이 크게 증가함을 판단할 수 있다. 이와 같은 방법을 통해 OWC 구조물의 물리적 크기 변수가 에너지 추출효율에 미치는 영향을 파악하고 챔버 구조물의 구체적인 형상을 정할 수 있다. 실제로 진동 수주형 파력발전장치를 설계하고 설치

하기 위해서는 추출되는 에너지 효율뿐만이 아니라 구조물의 형상에 따른 구조적 안정성을 고려해야 한다. 본 연구는 제시한 수치해석 방법을 통해 목적하는 해상조건에서의 OWC 최적 형상을 결정하기 위한 기초 정보를 보다 간편하게 계산 및 제공할 수 있다는 점에 의의가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 선형 포텐셜 유동 이론에 기반한 이차원 시간 영역 수치조파수조 기법을 이용하여, 진동수주형 파력발전장치의 에너지추출효율을 계산하였다. OWC 챔버 구조물의 에너지추출효율을 간편하게 파악할 수 있도록 챔버 형상에 따른 공기감쇠계수의 이론해를 수치조파수조에 적용함으로써 목표 해상 조건에 대한 OWC의 에너지추출효율은 계산하고 비교하였다. 이는 기존의 시행착오 방법이나, 실험결과와의 최종 비교를 통한 공기 감쇠 계수를 확정하는 복잡한 과정을 거치지 않고, 이론적 터빈 계수를 수치조파수조에 바로 적용함으로써 OWC 초기 최적화 모델을 선정하고 효율을 계산하는데 유효한 방법임을 제시하였다.

선행연구의 이론해를 바탕으로 한 해상조건에서 최대 에너지 효율은 입사파장 대비 챔버 폭이 0.2임을 확인하였다. 또한, 한반도 주변 해역의 평균적인 해상환경 조건을 대입하고, 챔버 폭에 대한 최대 에너지 추출 효율을 가지는 터빈계수의 이론해를 먼저 구한 후, 다양한 챔버 스킵트 두께비와 흘수비의 변화에 따른 에너지추출효율을 분석하여, 스킵트 두께비와 흘수비가 0.05 이하일수록 에너지 추출량이 상대적으로 커짐을 확인하였다.

본 연구에서는 기존의 터빈계수 이론해를 수치조파수조 기법에 적용하여 OWC 챔버 내 복잡한 유동과 구조물 형상에 따른 에너지 추출량 및 효율을 비교적 간단히 계산할 수 있도록 하였고, 목적하는 해상조건에 따른 구조물의 최적형상 및 효율을 보다 신속

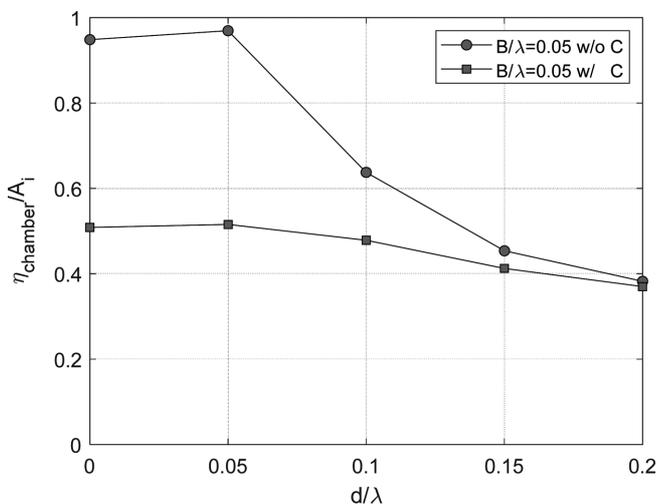


Fig. 8. Chamber wave elevations for various skirt draft ratios (d/λ) ($B/\lambda=0.05$, $C=1.574$).

하게 결정할 수 있는 수치해석 틀을 제시하였다. 이는 챔버내 복잡한 유동 현상을 정밀하게 묘사하는 수치해석(CFD)이나 많은 비용과 시간을 소요하는 실험을 수행하기 전에 비교적 간편하게 OWC 구조물 최적형상을 결정하는데 기초자료를 제공할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업의 지원을 받았습니다(NRF-2018R1D1A1B07040677). 또한, 이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임(2020년 미래 해양플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업, 과제번호 : P0012646).

References

- [1] Belibassakis, K., Magkouris, A. and Rusu, E., A BEM for the hydrodynamic Analysis of Oscillating Water Column Systems in Variable Bathymetry, *Energies*, 13(13), 1-22.
- [2] Joe, H.G. and Yu, S.C., 2018, Study on Mobile Wave Energy Harvesting System Utilizing Wave Glider Mechanism, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 32(5), 393-401.
- [3] Kim, D.G., Poguluri, S.K., Ko, H.S. Lee, H.B. and Bae, Y.H., 2019, Numerical and Experimental Study on Linear Behavior of Salter's Duck Wave Energy Converter, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 33(2), 116-122.
- [4] Kim, J.H., Kim, Y.T. and Lee, Y.H., 2007, Wave power generation system using marine energy, *J. of Fluid Machinery*, 10(1), 65-76.
- [5] Kim, J.H., Jo, H.J., Hwang, J.H., Jang, M.S., and Lee, B.S., 2018, Experimental Study on Efficiency of Floating Vertical Axis Wind Turbine with Variable-Pitch, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 32(3), 202-207.
- [6] Kim, S.J., Koo, W.C., Min, E.H., Jang, H.Y., Youn, D.H. and Lee, B.S., 2016, Experimental Study on Hydrodynamic Performance and Wave Power Takeoff for Heaving Wave Energy Converter, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 30(5), 361-366.
- [7] Koo, W.C., Kim, M.H. and Choi, Y.R., Kim, 2010, Numerical Analysis of Chamber Flow and Wave Energy Conversion Efficiency of a Bottom-mounted Oscillating Water Column Wave Power Device, *J. of SNAK.*, 47(3), 388-397.
- [8] Koo, W.C., Kwon, J.S., Kim, J.D., Kim, S.J., Kim, M.W. and Choi, M.K., 2012, Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Wave Energy Converter, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 26(3), 33-38.
- [9] Kwon, D.S., Kim, S.J. and Koo, W.C., 2019, A Parametric Study of the Wave-Generation Performance of a Piston-Type Wave Maker, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 33(6), 504-509.
- [10] Liu, C.R., Huang, Z.H., Law, A.W.K. and Geng, N., 2010, A Numerical Study of Wave Energy Converter in the Form of an Oscillating Water Column Based on a Mixed Eulerian-Lagrangian Formulation, in *proc. of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2010*, Shanghai, China, 589-596.
- [11] Park, S.W., Kim, K.H. and Hong, K.Y., 2018, Conceptual Design of Motion Reduction Device for Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation Platform, *J. of Ocean Eng. Technol.*, 32(1), 9-20.
- [12] Sarmiento, A.J.N.A. and Falcao, A.F. de O., 1985, Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction, *J. of Fluid Mech.*, 150, 467-485.
- [13] Sarmiento, A.J.N.A., 1992, Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices, *Exp. Fluids*, 12, 286-292.

Received 8 July 2020

1st Revised 21 August 2020, 2nd Revised 7 September 2020

3rd Revised 26 October 2020

Accepted 27 October 2020