

## 몰수형 진자판을 이용한 파력발전장치의 성능해석

조일형<sup>†</sup>

제주대학교 해양시스템공학과

# Performance Analysis of Wave Energy Converter Using a Submerged Pendulum Plate

Il Hyoung Cho<sup>†</sup>

Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

### 요 약

본 연구에서는 몰수형 진자판을 이용한 파력발전장치의 성능 향상을 위한 파라메트릭 해석을 수행하였다. 선형포텐셜 이론에 기반을 둔 고유함수전개법을 사용하여 파기진 모멘트와 동유체 모멘트를 구하고, 파랑중 진자판의 회전운동 변위와 시간평균 추출파워를 구하였다. 이때 추출파워의 최대값을 주는 최적의 PTO감쇠계수를 제시하였다. 회전 운동하는 진자판으로부터 얻는 추출파워의 최대값은 시스템의 공진주파수에서 일어나며 진자판의 높이와 두께가 증가할수록 최대값은 증가하고 공진폭이 확장된다. 진자판 끝단에 설치된 계류로프는 부하상태에서 복원모멘트를 높이고 설치해역의 파랑과 공진이 유발하는데 활용된다. 천수역에 적합한 몰수형 진자판을 이용한 파력발전장치는 에너지 추출과 동시에 파를 차단하는 방파제의 기능을 동시에 지니고 있다.

**Abstract** – The parametric study was performed for performance enhancement of wave energy converter(WEC) using a submerged pendulum plate. The wave exciting moment and hydrodynamic moment were obtained by means of eigenfunction expansion method based on the linear potential theory, and then the roll response of a pendulum plate and time averaged extracted power were investigated. The optimal PTO damping coefficient was suggested to give optimal extracted power. The peak value of optimal extracted power occurs at the resonant frequency. The resonant peak and its width increase, as the height and thickness of a pendulum plate increase. The mooring line installed at the end of the pendulum plate is effective for extracting wave energy because it can not only induce the resonance with the waves of the installation site but also increase the restoring moment in case of PTO-on. The WEC using a rolling pendulum plate suitable for the shallow water acts as breakwater as well as energy extraction device.

**Keywords:** Pendulum Plate(진자판), Wave Energy Converter(파력발전장치), Extracted Power(추출파워), Eigenfunction Expansion Method(고유함수전개법), PTO Damping Coefficient(PTO 감쇠계수)

### 1. 서 론

진자판을 이용한 파력발전장치는 가동물체형(Terminator Type) 파랑에너지 변환장치의 한 종류이다. 파랑중 진자판은 회전축을 중심으로 회전운동을 하고, 이는 2차 변환장치내의 유압모터를 작동시켜 전기를 생산한다. 진자판을 이용한 파력발전장치는 완전히 잠긴 몰수형과 수면을 통과하는 관통형 두 종류가 있다. 두 종류 모두 수심 10 m에서 20 m사이인 해안 근처에 설치되는 천수용이다. 이러

한 유형의 파력발전장치로 현재 상용화 단계에 와 있는 대표적인 파력발전장치로 Oyster(Whittaker and Folley[2012])와 WaveRoller(Lucas *et al.*[2012])가 있다. 특히, 관통형인 Oyster는 2000년대 초반부터 Aquamarine Power사에 의해 개발되었다(Whittaker *et al.*[2007]; Whittaker and Folley[2012]). 실물 크기의 Oyster 2기가 2009년과 2011년에 스코틀랜드 Orkney에 위치한 EMEC(European Marine Energy Centre)에서 실험실 실증 실험을 마쳤다. 국내에서는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 현재 개발 중에 있는 부유식 진자형 파력발전장치가 있다. 수실내에 위치한 관통형 진자판을 통하여 파랑에너지는 운동에너지로 변환되며, 회전식 유압펌프를 통과한

<sup>†</sup>Corresponding author: cho0904@jejunu.ac.kr

유압은 유압모터를 작동시켜 전기에너지를 추출한다. 이러한 형상을 갖는 부유식 진자형 파력발전장치에 대한 파랑응답과 추출파워는 수치 및 실험적 연구를 통해 검증된 바가 있다(Nam *et al.*[2011], Park *et al.*[2012], Nam *et al.*[2012]).

파력발전장치의 연구 및 개발의 역사를 살펴보았을 때, 진자판을 이용한 파력발전장치에 대한 관심은 최근에 와서 높아졌다. 이는 심해역과 비교할 때 천수역에서 이용 가능한 파랑에너지의 밀도가 상대적으로 낮다고 알려졌기 때문이다. 그 이유는 파가 해안에 가까워짐에 따라 수심이 점점 알아지면서 많은 양의 파랑에너지가 바닥에서의 마찰과 수면에서의 쇄파로 소멸된다. 그러나 마찰과 쇄파에 의한 천수역에서의 입사 파고의 제한은 입력 에너지의 크기를 일정하게 유지시켜 파력발전장치의 부하율을 높이는데 기여한다. 또한 천수역에서 수심 변화에 따른 굴절현상으로 파정선(Wave Crest Line)은 등 수심선과 거의 평행해진다. 따라서 천수역에서의 파의 진행방향은 심해역과 달리 분산되지 않고 방향성을 유지하여 에너지 집중 효과를 가져온다. 이러한 이유들로 Whittaker and Folley[2012]는 에너지 추출 측면에서 심해역과 천수역 사이에는 큰 차이가 없다고 주장하였다.

파랑중 운동하는 진자판의 동유체역학적 특성은 몇몇 저자들에 의해 포텐셜 이론을 사용하여 해석적으로 연구되었다. Evans[1970]는 운동변위가 작다는 가정 아래에서 몰수형 진자판에 작용하는 회절력을 구하였다. 진자판에 의한 파의 방사문제는 2차원 조파수조 한쪽 끝단에 설치한 조파판에 대한 연구를 확장한 것이다(Dean and Dalrymple[1984]; Falnes[2002]). Evans and Porter[1996]는 몰수형 진자판의 동유체역학적 문제를 풀어 수심과 진자판 높이의 비에 따른 부가 관성모멘트 및 방사감쇠계수에 대한 해석해를 얻었다. 3차원 수면 관통형 진자판에 대한 회절문제는 방파제 연구와 관련하여 여러 저자들에 의해 다루어졌다. Penney and Price[1952]는 두께를 무시한 직립판에 의한 투과율과 반사율에 대한 근사해를 구하였다. Queen's 대학 연구진은 진자판을 이용한 파력발전장치에 대한 많은 연구들을 수행하였다(Whittaker *et al.*[2007]; Folley *et al.*[2007]; Whittaker and Folley[2012]). 이로부터 유체역학적 효율이 우수한 수면 관통형 진자판의 중요성을 강조하였고, 이는 Oyster 개발로 이어졌다. 특히, 다른 파력발전장치와 달리 진자판을 이용한 파력발전장치는 진자판의 회전운동에 영향을 주는 점성효과의 중요성을 무시할 수 없다. 입사파에 가진 주파수의 작동 범위내에서 공진이 발생하면, 공진으로 크게 증폭된 진자판의 과도한 운동 변위와 속도가 장치의 구조적 불안정성을 유발하고 진자판 끝단에서 큰 와류를 배출하므로 주의가 요구된다. 몰수형 진자판을 이용한 파워 추출에 대한 모형실험은 PTO(Power Take-Off)장치를 구현하기 위하여 와 전류 브레이크(Eddy Current Brake)를 사용하여 실시되었다(Lopes *et al.*[2009]; Henriques *et al.*[2011]). 관성모멘트와 정유체 복원모멘트 제어를 통한 진자판 파력발전장치의 유체역학적 효율 향상에 대한 실험적 연구가 Lin *et al.*[2012]에 의해 수행되었다.

본 연구에서는 파랑중 몰수형 진자판의 회전운동을 통하여 얻을

수 있는 추출파워의 극대화를 위하여 여러 설계변수들을 바꿔가면서 최적의 설계 값을 도출하는 파라메트릭 해석을 실시하였다. 선형 포텐셜이론에 근거한 고유함수전개법을 사용하여 회절과 방사 포텐셜을 구하는 과정을 2.1절과 2.2절에 소개하였다. 몰수형 진자판의 회전운동 특성과 추출파워 그리고 효율은 2.3절에서 살펴 보았다. 3장에서는 몰수형 진자판 파력발전장치의 여러 설계변수(진자판의 두께와 높이, 계류삭의 강성계수)등이 효율에 미치는 영향과 에너지 추출과 동시에 방파제로의 활용 가능성에 관한 여러 계산 결과들을 제시하였고, 끝으로 중요한 결론들을 4장에서 언급하였다.

## 2. 문제의 정식화

몰수형 진자판을 이용한 파력발전장치의 성능을 해석하기에 앞서 유체는 비압축성, 비점성이며, 유동은 비회전성이라 가정하여 속도 포텐셜을 도입하였다. 진자판의 폭( $W$ )은 진자판의 높이( $d$ )와 두께( $t$ )에 비하여 무한히 길다고 가정하였다. 입사파는  $x$ 축의 양의 방향으로 진행하며, 주파수  $\omega$ 를 갖고 시간에 따라 조화운동을 한다면 속도포텐셜과 회전운동 변위는 아래와 같이 시간과 공간 함수로 분리하여 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\Phi(x, z, t) &= \text{Re}\{\phi(x, z)e^{-i\omega t}\}, \\ \theta(t) &= \text{Re}\{\theta_0(\omega)e^{-i\omega t}\},\end{aligned}\quad (1)$$

여기서  $\theta_0$ 은 회전운동의 복소진폭이다.

전체 속도포텐셜  $\phi(x, z)$ 는 아래와 같이 회절포텐셜과 진자판의 회전운동에 의한 방사포텐셜의 합으로 표현할 수 있다.

$$\phi(x, z) = -\frac{ig}{\omega}A\phi_D(x, z) - i\omega\theta_0\phi_R(x, z),\quad (2)$$

여기서  $A$ 는 입사파의 진폭이며,  $\phi_D$ ,  $\phi_R$ 는 각각 회절과 방사 포텐셜이다.

식 (2)에서의 회절과 방사 포텐셜은 2차원 Laplace방정식과 자유표면 경계조건, 바닥 경계조건, 방사 경계조건을 만족한다.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi_{D,R} = 0, \\ \frac{\partial \phi_{D,R}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_{D,R} = 0 \quad \text{at } z = h, \\ \frac{\partial \phi_{D,R}}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0, \\ \frac{\partial \phi_{D,R}}{\partial x} \mp ik\phi_{D,R} \rightarrow 0, \quad \text{as } kx \rightarrow \pm\infty, \end{cases}\quad (3)$$

### 2.1 회절문제

해석방법으로 유체영역을 진자판을 경계로 2개의 영역으로 나누고, 각 영역에서 속도포텐셜을 구하고 부족한 경계조건으로부터 생기는 미지수는 진자판이 놓여 있는 정합면( $x=0$ )에서 두 영역의 해를 정합시켜 완전한 해를 구하는 고유함수전개법을 사용하였다. 회절포텐셜은 식 (3)와 함께 진자판에서의 경계조건식( $\frac{\partial \phi_D}{\partial x} = 0$ )을 만족한다. 회절포텐셜을 변수분리법을 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_D^{(1)}(x, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} [e^{-k_n x} \delta_{no} + a_n e^{k_n x}] f_n(z), \quad x \leq 0, \\ \phi_D^{(2)}(x, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} e^{-k_n x} f_n(z), \quad x \geq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\delta_{no}$ 는  $n=0$ 일 때 1이고  $n$ 이 0보다 크면 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta함수이다. 윗식에서  $n=0$ 일 때를 진행 모드(Propagating Mode)라 부르며,  $n$ 이 0보다 클 때를 비진행 모드(Evanescient Modes)로 진자판으로부터 멀어짐에 따라 지수함수 형태로 사라지는 항이다. 고유함수  $f_n(z)$ 는 다음과 같다.

$$f_n(z) = \frac{\cos k_n z}{\cos k_n h}, \quad \text{with } k_n \tan k_n h = -\frac{\omega^2}{g}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

여기서  $k_0 = -ik$ 이다.

두 영역이 만나는 정합면( $x=0, 0 \leq z \leq h$ )에서 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_D^{(1)}}{\partial x} = \frac{\partial \phi_D^{(2)}}{\partial x} = u_d(z) = \sum_{n=0}^{\infty} u_{dn} f_n(z). \quad (6)$$

식 (4)를 윗식에 대입하여 정리하면 미지수  $a_n, b_n$ 을  $u_{dn}$ 으로 표현할 수 있다.

$$a_n = \delta_{no} + \frac{u_{dn}}{k_n}, \quad b_n = -\frac{u_{dn}}{k_n}. \quad (7)$$

윗식을 식 (4)에 대입하여 각 영역에서의 속도포텐셜을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_D^{(1)}(x, z) &= (e^{ikx} + e^{-ikx})f_0(z) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{dn}}{k_n} e^{k_n x} f_n(z), \quad x \leq 0, \\ \phi_D^{(2)}(x, z) &= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{dn}}{k_n} e^{-k_n x} f_n(z), \quad x \geq 0, \end{aligned} \quad (8)$$

미지수  $u_{dn}$ 을 구하기 위해 영역 (1)과 영역 (2)의 해를 정합시키자. 먼저  $x=0, d \leq z \leq h$ 에서 영역 (1)과 영역 (2)의 속도포텐셜은 서로 같아야 한다( $\phi_D^{(1)} = \phi_D^{(2)}$ ).

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{dn}}{k_n} f_n(z) = -f_0(z). \quad (9)$$

윗식의 양변에 고유함수  $f_m(z)$ 을 곱하고  $d$ 부터  $h$ 까지  $z$ 에 대하여 적분하면 다음과 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{e_{nm}(d)}{k_n} u_{dn} = -e_{0m}(d), \quad (10)$$

여기서  $e_{nm}(d) = \int_d^h f_n(z) f_m(z) dz$  이다.

진자판( $x=0, 0 \leq z \leq d$ )에서 다음과 같은 경계조건식을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial \phi_D^{(1)}}{\partial x} = \frac{\partial \phi_D^{(2)}}{\partial x} = \sum_{n=0}^{\infty} u_{dn} f_n(z) = 0. \quad (11)$$

윗식의 양변에  $f_m(z)$ 을 곱한뒤 0부터  $d$ 까지 적분한 뒤 고유함수의 직교성 성질을 적용하면 다음과 같다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{N_n \delta_{nm} - e_{nm}(d)\} u_{dn} = 0, \quad (12)$$

여기서  $N_n = \int_0^d f_n^2(z) dz$  이다.

대수방정식 (10)과 (12)을 더하면 최종적으로 풀어야 할 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left( \frac{1}{k_n} - 1 \right) e_{nm}(d) + N_n \delta_{nm} \right\} u_{dn} = -e_{0m}(d). \quad (13)$$

대수방정식 (13)을 풀어  $N+1$ 개의 미지수  $u_{dn}$ , ( $n=0, 1, 2, \dots, N$ )을 구한다. 구한 결과를 식 (8)에 대입하면 각 영역에서의 회절포텐셜을 구할 수 있다. 진자판에 작용하는 파기진 모멘트( $M_E(t) = ARe \{m_E(\omega) e^{-i\omega t}\}$ )는 동압력을 진자판의 표면을 따라 적분하여 구해진다.

$$m_E(\omega) = \rho g \int_0^d z [\phi_D^{(1)}(0, z) - \phi_D^{(2)}(0, z)] dz. \quad (14)$$

고정된 진자판에 의한 반사율과 투과율은 다음과 같다.

$$R = 1 + \frac{i u_{d0}}{k}, \quad T = -\frac{i u_{d0}}{k}. \quad (15)$$

## 2.2 방사문제

앞 절에서는 고정된 진자판에 의한 파의 회절문제를 살펴보았다. 이 절에서는 진자판의 회전운동에 의한 방사문제(Radiation Problem)를 살펴보겠다. 방사문제에 대한 경계치 문제는 식 (1)과 함께 진자판에서 경계조건식( $\frac{\partial \phi_R}{\partial x} = z$ )을 만족해야 한다. 해석방법으로 앞 절과 같이 유체영역을 2개의 영역으로 나누고, 인접한 영역의 해를 정합시켜 해를 구하는 고유함수 전개법을 사용하였다. 각 영역에서 방사포텐셜은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_R^{(1)}(x, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{k_n x} f_n(z), \quad x \leq 0, \\ \phi_R^{(2)}(x, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} B_n e^{-k_n x} f_n(z), \quad x \geq 0, \end{aligned} \quad (16)$$

(2.1)절과 같은 방법으로 두 영역이 만나는 정합면( $x=0, 0 \leq z \leq h$ )에서 속도가 같다는 정합조건식  $\frac{\partial \phi_R^{(1)}}{\partial x} = \frac{\partial \phi_R^{(2)}}{\partial x} = \sum_{n=0}^{\infty} u_{rn} f_n(z)$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_R^{(1)}(x, z) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{rn}}{k_n} e^{k_n x} f_n(z), \quad x \leq 0, \\ \phi_R^{(2)}(x, z) &= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{rn}}{k_n} e^{-k_n x} f_n(z), \quad x \geq 0, \end{aligned} \quad (17)$$

정합면( $x=0, d \leq z \leq h$ )에서 속도포텐셜은 같아야 한다는  $\phi_R^{(1)} = \phi_R^{(2)}$ 을

적용하면 아래와 같은 대수 방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{e_{nm}(d)}{k_n} u_{rn} = 0, \quad (18)$$

끝으로 ( $x=0, 0 \leq z \leq d$ )에서 물체경계조건식( $u_r(z) = \sum_{n=0}^{\infty} u_{rn} f_n(z) = z$ )로부터 두 번째 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{N_n \delta_{nm} - e_{nm}(d)\} u_{rn} = \int_0^d z f_m(z) dz. \quad (19)$$

대수방정식 (18)과 (19)을 더하면 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^N \left\{ \left( \frac{1}{k_n} - 1 \right) e_{nm}(d) + N_n \delta_{nm} \right\} u_{rn} = \int_0^d z f_m(y) dz. \quad (20)$$

대수방정식 (20)을 풀어  $u_{rn}$  ( $n=0,1,2,\dots,N$ )를 구한다. 구한 결과를 식 (17)에 대입하여 각 영역에서의 방사포텐셜을 구할 수 있다.

진자판의 회전운동에 의한 동유체 모멘트( $M_R(t) = \text{Re}\{m_R(\omega)e^{i\omega t}\}$ )는 다음과 같다.

$$m_R(\omega) = \rho \omega^2 \theta_0 \int_0^d z \{ \phi_R^{(1)}(0, z) - \phi_R^{(2)}(0, z) \} dz. \quad (21)$$

동유체 모멘트( $m_R$ )은 부가 관성모멘트(Added Moment of Inertia)와 방사감쇠계수(Radiation Damping Coefficient)의 합으로 표현된다.

$$m_R(\omega) = (a_{55}\omega^2 + i\omega b_{55})\theta_0. \quad (22)$$

### 2.3 운동방정식

진자판의 회전운동 변위를 구하기 위해 아래와 같은 운동방정식을 풀어야 한다.

$$I_y \ddot{\theta}(t) = M_E(t) + M_R(t) + M_h(t) + M_m(t) + M_{PTO}(t), \quad (23)$$

여기서  $I_y$ 는 진자판의 관성모멘트,  $M_h(= -C_{55}\theta(t))$ 는 정유체 복원모멘트,  $M_m(= -C_m\theta(t))$ 는 계류로프에 의한 복원모멘트를 뜻한다.

진자판의 두께가 진자판의 폭과 높이에 비하여 작고, 진자판의 질량이 균일하게 분포되어 있다고 가정하면 진자판의 단위 폭당 관성 모멘트와 복원모멘트 계수는 다음과 같다. 이 경우 진자판의 무게중심( $z_g$ )과 부력중심( $z_b$ )은  $d/2$ 이다.

$$\begin{aligned} I_y &\approx \frac{1}{3} \rho_f t_f d^3, \\ C_{55} &= \rho g t_f dz_b - \rho_f t_f dz_g = \frac{1}{2} \rho g t_f d^2 \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right), \\ C_m &= 2K \sin^2 \beta z_m, \end{aligned} \quad (24)$$

여기서  $\rho_f$ 는 진자판의 밀도이며  $K$ 는 계류로프의 강성계수이다.  $\beta$ 는 계류로프와  $z$ 축이 이루는 각도이며  $z_m$ 는 계류점의 위치이다.

$M_{PTO}$ 는 PTO(Power Take-off)시스템에 의한 감쇠 모멘트로 진자판의 회전운동 변위와 선형적으로 변한다고 가정하면 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$M_{PTO} = -b_{PTO} \dot{\theta}(t). \quad (25)$$

여기서  $b_{PTO}$ 는 PTO 감쇠계수이다.

식 (23)을 주파수영역에서의 운동방정식으로 바꿔 시간 항을 제외하면 진자판의 회전운동 복소진폭은 다음과 같다.

$$\theta_o = \frac{A m_E(\omega)}{-\omega^2 (I_y + a_{55}) - i\omega (b_{55} + b_{PTO}) + (C_{55} + C_m)}. \quad (26)$$

PTO 감쇠계수와 진자판의 운동속도의 제곱에 비례하는 단위 폭당 시간평균 파워는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{P}(\omega) &= \frac{1}{2} \omega^2 b_{PTO} |\theta_o|^2, \\ &= \frac{1}{2} \omega^2 b_{PTO} \frac{A^2 |m_E(\omega)|^2}{[-\omega^2 (I_y + a_{55}) + C_{55} + C_m]^2 + \omega^2 (b_{55} + b_{PTO})^2}. \end{aligned} \quad (27)$$

윗식에서 시간평균 파워가 최대값을 갖도록 식  $\partial \bar{P} / \partial b_{PTO} = 0$ 을 만족하는 최적의 PTO 감쇠계수를 구하면 다음과 같다.

$$\tilde{b}_{PTO} = \sqrt{\frac{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 (I_y + a_{55})^2 + \omega^2 b_{55}^2}{\omega}}. \quad (28)$$

여기서  $\omega_0$ 는 회전운동의 비감쇠 고유주파수(Undamped Natural Frequency)로 아래와 같다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_{55} + C_m}{I_y + a_{55}(\omega_0)}}. \quad (29)$$

식 (29)는 초기값  $\omega_0 = \sqrt{(C_{55} + C_m)/I_y}$ 을 가지고 주파수 별로 미리 구한 부가질량  $a_{55}(\omega)$ 을 가지고 축차법(Iteration Method)을 사용하여 계산된다.

최대 추출파워를 얻기 위해서는 각 입사파의 주파수에 대하여  $\tilde{b}_{PTO} = b_{55}$ 와 공진조건( $\omega = \omega_0$ )을 동시에 만족하여야 한다(Falnes [2002]). 이 조건은 식 (28)에 주어진 최적의 PTO 감쇠계수가 진자판의 운동 진폭만을 최적화했다면 진자판 운동 진폭과 함께 위상도 최적화하였을 때 얻어지는 조건이다. 따라서 식 (28)을 사용하여 얻은 추출파워와 효율의 상한계(Upper Bound)를 이룬다.

식 (28)을 식 (26)에 대입하면 PTO-on상태에서의 진자판의 회전운동 변위를 구할 수 있으며, 식 (27)에 대입하면 시간평균 파워를 구할 수 있다. 시간평균 파워를 단위 폭당 입사파의 평균 파워로 나누면 아래와 같이 최적의 효율을 구할 수 있다.

$$\eta_{opt}(\omega) = \frac{\bar{P}_{opt}(\omega)}{\frac{1}{2} \rho g A^2 C_g}, \quad (30)$$

여기서  $C_g$ 는 파의 군속도(Group Velocity)이다.

진자판의 회전운동을 허용한 상태에서 반사율과 투과율은 다음 식과 같다.

$$R_f = R + \frac{i\omega^2 u_{r0}(\theta_0)}{gk} \left( \frac{\theta_0}{A} \right), T_f = T - \frac{i\omega^2 u_{r0}(\theta_0)}{gk} \left( \frac{\theta_0}{A} \right). \quad (31)$$

여기서  $R, T$ 는 식 (15)에 주어진 고정된 진자판에 의한 반사율과 투과율이다.

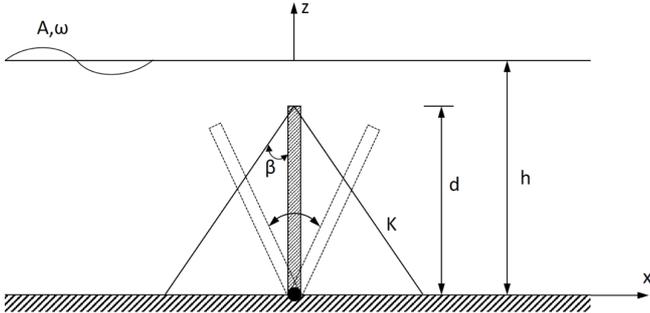


Fig. 1. Definition sketch of a rolling pendulum plate.

### 3. 계산결과 및 고찰

Fig. 2는 진자판이 고정되어 있을 때 진자판의 높이 변화에 따른 반사율( $R$ )과 투과율( $T$ )을 보여주고 있다.  $x$ 축은 무차원화된 주파수  $\omega\sqrt{h/g}$ 로 잡았다. 수심이 10m로 고정되었을 때 4개의 무차원화된 진자판의 높이( $d/h$ )에 대하여 살펴보았다. 예상대로 진자판의 높이가 커질수록 반사율은 커지고 투과율은 줄어드는 경향을 보이고 있다. 진자판의 높이에 관계없이 무차원화된 주파수  $\omega\sqrt{h/g}=1.0$  근처에서 반사율은 최대값을, 투과율은 최소값을 보이고 있다.

Fig. 3은 진자판의 무차원화된 높이가  $d/h=0.8$ 로 고정되어 있을 때 부가 관성모멘트, 방사감쇠계수, 파기진 모멘트에 대한 2차원 해석해와 3차원 수치해를 비교하였다. 여기서 굵은 실선은 고유함수 전개법을 사용한 2차원 해석해의 결과이며, 기호는 WAMIT를 사용한 수치계산 결과이다(Gomes *et al.*[2015]). 진자판의 폭이 증가할수록 3차원 수치해는 점점 2차원 해석해에 가까워져  $W/h=20$  일 때 해석해에 수렴한다. 해석해를 구할 때 사용한 고유함수의 개수는 50개이며 이후 모든 계산에서 동일한 값을 사용하였다. 진자판의 폭이 작아 3차원 효과가 큰 경우에 부가 관성모멘트와 방사감쇠계수는 주파수에 따라 큰 변화가 없다. 무차원화된 파기진 모

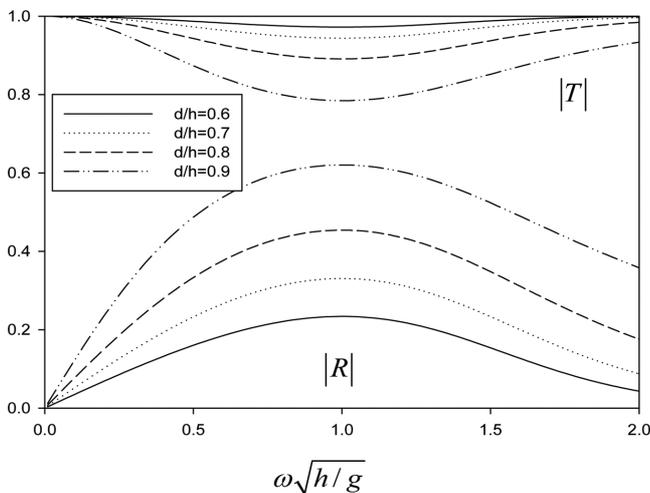


Fig. 2. Reflection and transmission coefficients of a fixed pendulum plate as a function of pendulum's height  $d/h$  for  $K/\rho gh \rightarrow \infty$ ,  $h=10$  m.

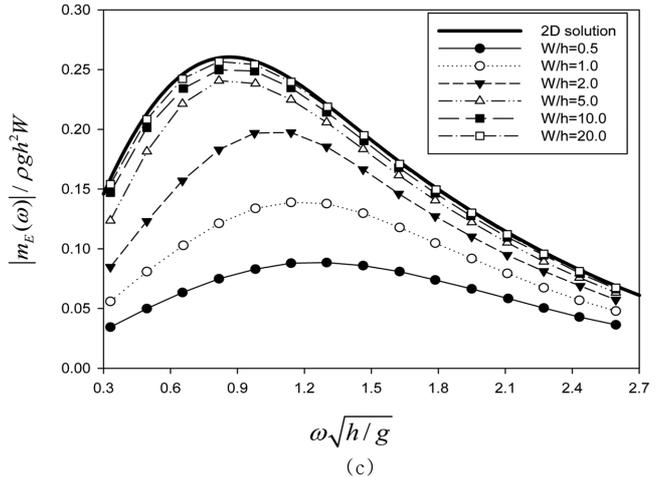
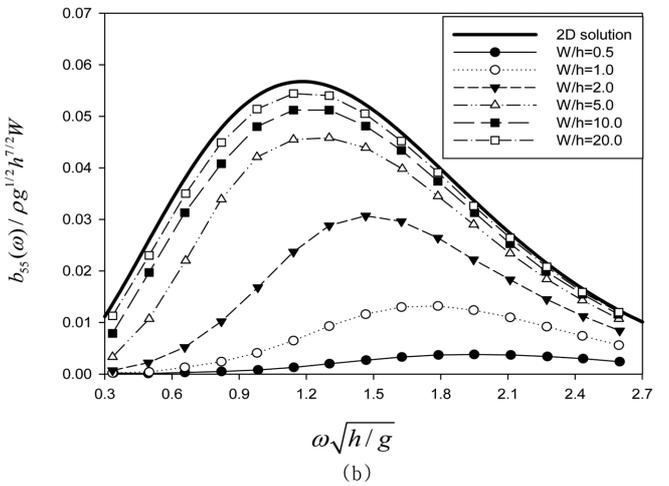
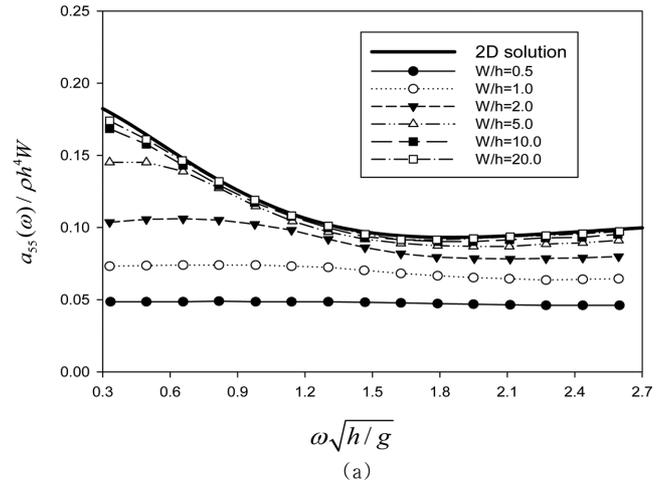
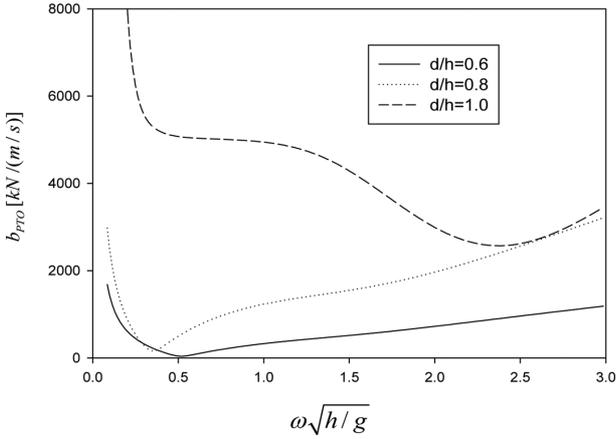


Fig. 3. Non-dimensional roll added moment of inertia(a), radiation damping coefficients(b), wave exciting moment(c) for  $d/h=0.8$ ,  $t_f/h=0.0$ ,  $h=10$  m: Lines are for present MEEM solutions and symbols are for Gomes(2015)'s WAMIT solutions.

멘트 곡선은 최대값을 주는 특정 주파수가 저주파수영역으로 다소 이동한 것을 제외하곤 방사감쇠계수 곡선과 유사하다. 방사감쇠계수와 마찬가지로 진자판의 폭이 증가할수록 파기진 모멘트의 최대값은 커지는 경향을 보여주고 있다.

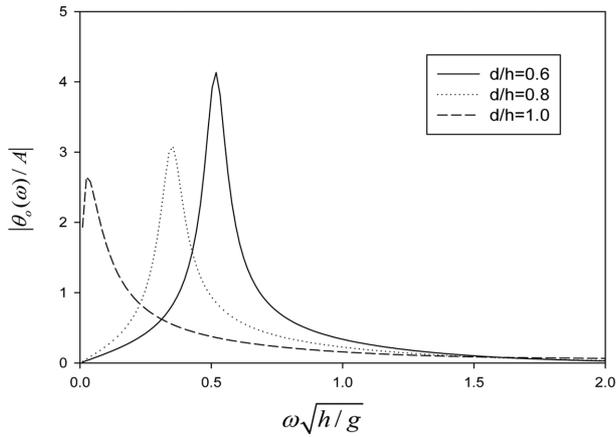


**Fig. 4.** Optimal PTO damping coefficient as a function of pendulum's height  $d/h$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $K/\rho gh = 0$ , and  $h = 10$  m.

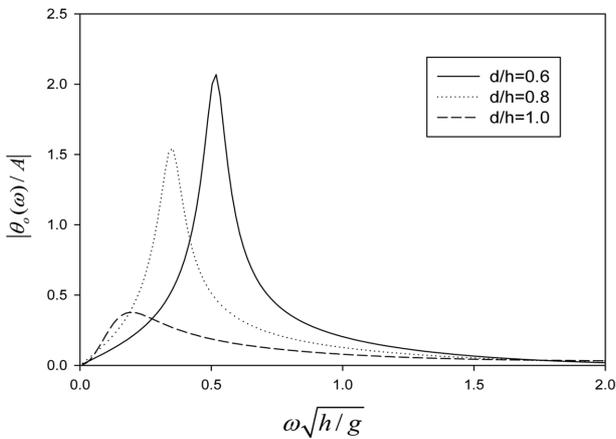
Fig. 4는 추출파워의 최대값을 주는 최적의 PTO감쇠계수( $\tilde{b}_{PTO}$ )를 주파수와 진자판의 높이에 따라 살펴보았다. 진자판이 수면아래 잠긴깊이  $d/h = 0.6, 0.8$ 일 때, 최적 PTO감쇠계수는 저주파수와 고주파수영역에서 큰 값을 갖고 어떤 특정 주파수에서 최소값을 갖는 특징을 보인다. 이때 최소값을 주는 특정 주파수는 진자판의 회

전운동 고유주파수( $\omega\sqrt{h/g} = 0.5183, 0.3539$ )와 일치한다.  $d/h = 1.0$ 인 경우, 최적의 PTO감쇠계수( $\tilde{b}_{PTO}$ )는 앞선  $d/h = 0.6, 0.8$ 과 달리 회전운동 변위가 큰 고유주파수에서 최소값을 갖지 않고 비교적 큰 값을 갖는다. 이 결과는  $d/h = 1.0$ 일 때 회전운동 공진주파수 주변에서 꽤 큰 추출파워를 얻을 수 있음을 의미한다.

Fig. 5는 PTO-on과 PTO-off 상태에서 회전운동 변위를 주파수에 따라 그린 그림이다. PTO-on일 때 사용한 PTO감쇠계수로 최적의 값( $\tilde{b}_{PTO}$ )을 취했다. 계산에서 사용한 무차원화된 진자판의 두께는  $t_f/h = 0.1$ 이고, 진자판 재질의 밀도는 해수의 밀도보다 가벼운  $\rho_f/\rho = 0.25$ 이다. 회전운동 RAO 곡선에서의 피크값은 회전운동 고유주파수에서 발생한다. 진자판의 높이가 증가할수록 방사감쇠력의 증가로 공진주파수는 저주파수영역으로 이동하고, 피크값은 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 또한 PTO장치 설치로 인해 PTO감쇠력이 발생하여 공진주파수에서의 회전운동 변위의 피크값이 약 1/2로 줄어들었다. PTO장치 설치로 줄어든 만큼의 진자판의 운동 에너지가 전기에너지로 변환된다. 현재 사용중인 포텐셜 이론에서 고려치 못한 점성 감쇠력이 추가되면 공진주파수에서의 피크값은 지금보다 더 줄어들 것으로 예상된다. 보통 점성 감쇠력은 자유감

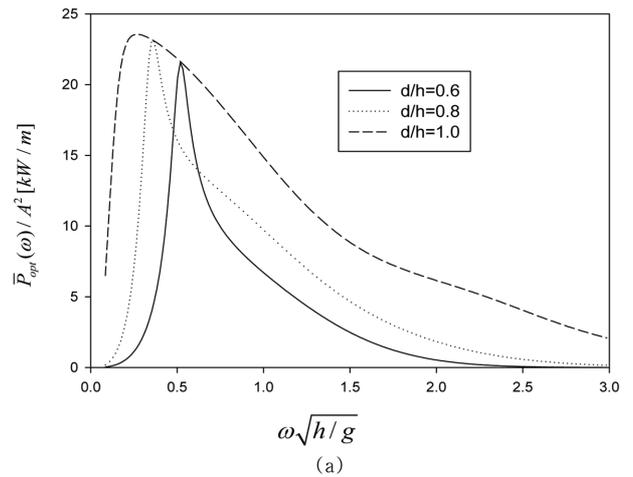


(a) PTO-off

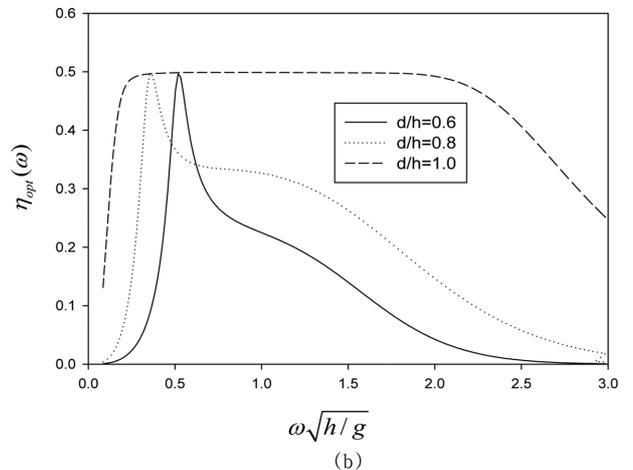


(b) PTO-on

**Fig. 5.** Roll motion amplitude as a function of pendulum's height  $d/h$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $K/\rho gh = 0$ , and  $h = 10$  m.

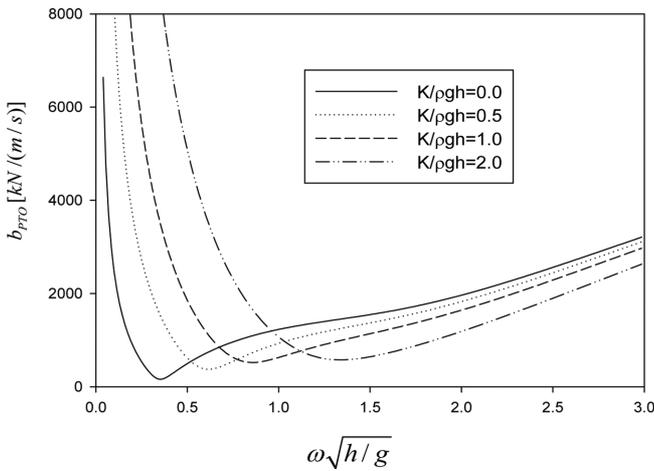


(a)



(b)

**Fig. 6.** Optimal time averaged extracted power(a) and efficiency(b) as a function of pendulum's height  $d/h$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $K/\rho gh = 0$ , and  $h = 10$  m.



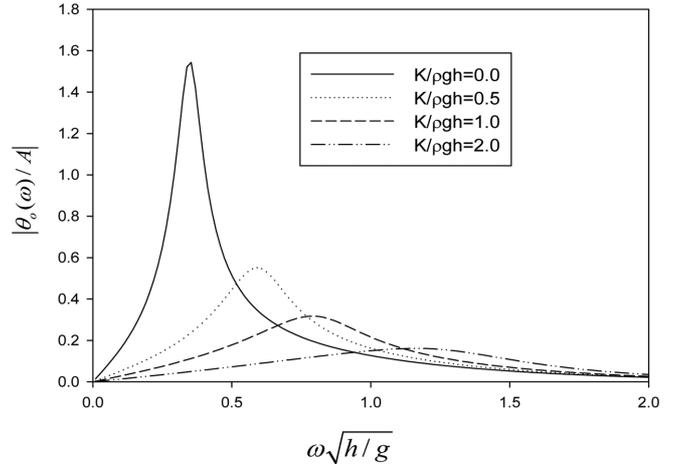
**Fig. 7.** Optimal PTO damping coefficient as a function of mooring stiffness  $K/\rho gh$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $z_m/d = 1.0$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $d/h = 0.8$ , and  $h = 10$  m.

최실험(Free Decay Test)을 통하여 구할 수 있으나 본 연구에서는 고려치 않았다.

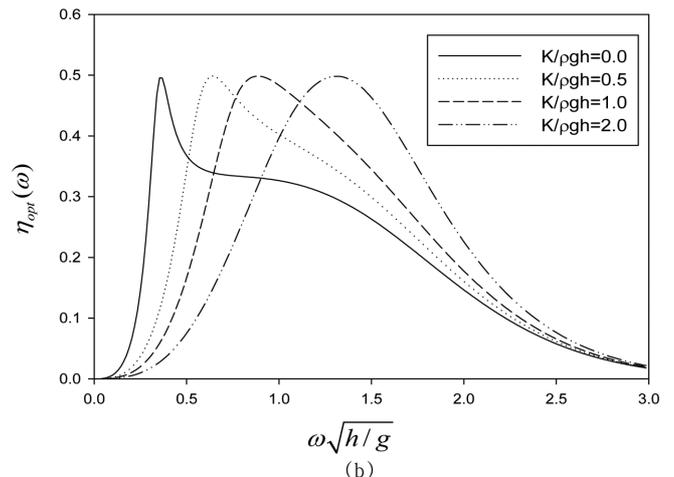
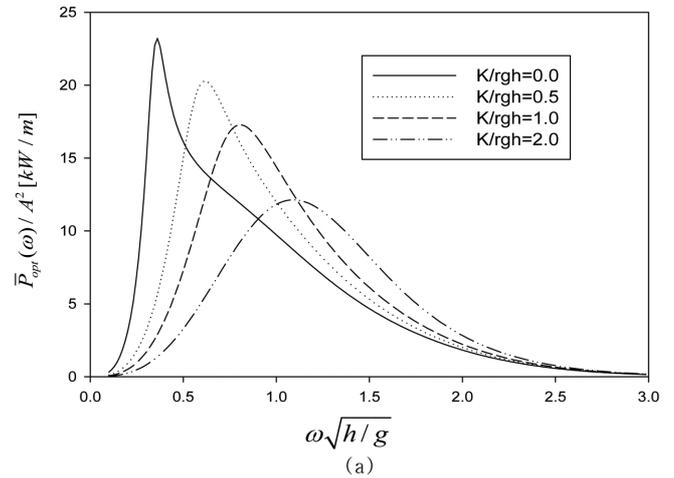
Fig. 6은 Fig. 5와 같은 계산조건하에서 시간평균 추출파워와 효율을 주파수에 따라 살펴보았다. 이때 PTO감쇠계수는 최적의 값( $\tilde{b}_{PTO}$ )을 사용하였다. 추출파워와 효율의 피크값은 진자판의 회전운동 공진주파수에서 발생하였다. 진자판의 높이가 증가할수록 추출파워의 피크값은 증가하며 공진폭도 넓어지는 경향을 보여주고 있다. 특히,  $d/h = 1.0$ 에서의 효율 곡선을 살펴보면  $0.3 < \omega\sqrt{h/g} < 2.0$ 은 꽤 넓은 주파수 범위내에서 약 50%의 높은 추출 효율을 유지하고 있음을 보여주고 있다. 이는 설치해역의 파랑스펙트럼의 주파수 분포특성과 관계없이 많은 양의 파랑에너지를 추출할 수 있음을 의미한다.  $d/h = 1.0$ 에서의 파워 추출의 우수성으로 진자판을 이용한 파력발전장치는 수심이 깊은 심해역 보다는 수심이 낮은 천해역에 설치하는 것이 바람직하다.

Fig. 7은 진자판의 무차원화된 높이가  $d/h = 0.8$ 일 때 진자판 끝단 ( $z_m = d$ )에 연결한 계류로프의 강성계수( $K/\rho gh$ ) 변화에 따른 최적의 PTO감쇠계수( $\tilde{b}_{PTO}$ )를 살펴보았다. 계류로프의 설치각도는  $\beta = 45^\circ$ 이다. Fig. 4에서 살펴보았듯이 회전운동 고유주파수에서  $\tilde{b}_{PTO}$ 는 최소값을 갖는다. 계류로프의 강성계수가 증가함에 따라 복원모멘트가 늘어나 회전운동 고유주파수는 고주파수영역으로 이동한다. 몰수형 진자판 끝단에 설치한 계류로프는 2가지 이유로 필요하다. 먼저 PTO장치가 연결된 부하 상태에서 진자판이 수직축을 중심으로 원활한 회전운동을 하기 위해서는 짧은 시간내에 평형상태로 되돌아와야 하며 이때 큰 복원모멘트가 필요하다. 두 번째로 계류로프의 강성계수를 조절하면 회전운동 고유주파수를 설치해역의 파랑스펙트럼의 피크주파수에 일치시켜 공진을 유발할 수 있어 더 많은 전기에너지를 추출할 수 있다.

Fig. 8은  $d/h = 0.8$  이고 PTO장치를 연결하지 않았을 때, 계류로프의 강성계수의 변화에 따른 회전운동 변위를 보여주고 있다. 앞서 언급하였듯이 회전운동 변위의 피크값을 나타내는 공진주파수

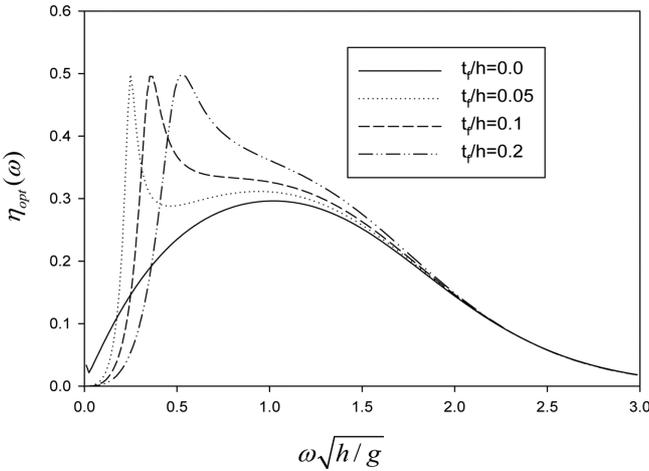


**Fig. 8.** Roll motion amplitude in case of PTO-on as a function of mooring line stiffness  $K/\rho gh$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $z_m/d = 1.0$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $d/h = 0.8$ , and  $h = 10$  m.



**Fig. 9.** Optimal extracted power(a) and efficiency(b) as a function of mooring line stiffness  $K/\rho gh$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $z_m/d = 1.0$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $d/h = 0.8$ , and  $h = 10$  m.

의 위치는 PTO감쇠계수가 최소값을 보이는 주파수와 일치한다. 예 상대적으로 계류로프의 강성계수가 클수록 공진주파수에서의 회전운동



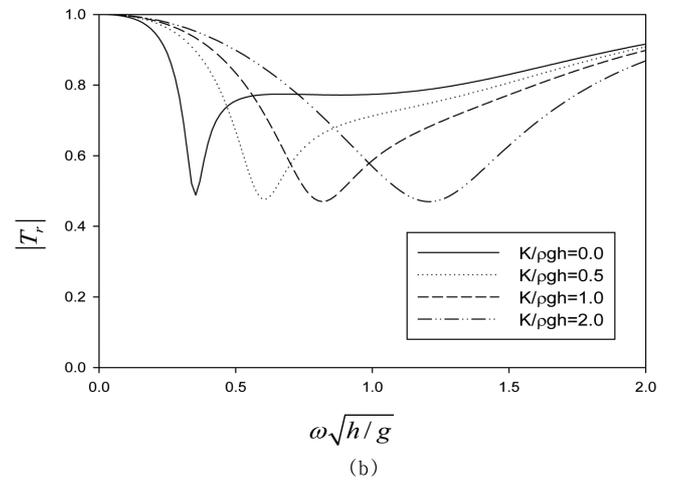
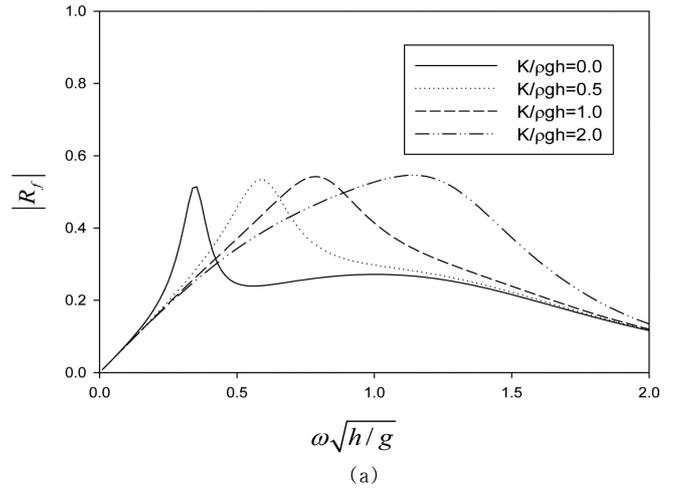
**Fig. 10.** Optimal efficiency as a function of pendulum's thickness  $t/h$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $d/h = 0.8$ ,  $K/\rho gh = 0$ , and  $h = 10$  m.

피크값은 줄어들며 공진주파수는 고주파수영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 공진조건을 강제로 맞추기 위하여 너무 큰 강성을 갖는 계류로프를 설치하면 공진주파수에서의 회전운동 변위가 크게 줄어들어 파워 추출 측면에서 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

Fig. 9는 같은 조건아래에서 최적의 PTO감쇠계수를 적용하였을 때 얻을 수 있는 추출파워와 효율을 주파수에 따라 그렸다. 예상대로 강성계수가 큰 경우, 회전운동 변위가 줄어들어 공진주파수에서의 추출파워는 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 그러나 계류로프의 강성계수 증가는 에너지를 추출할 수 있는 주파수 범위를 확대시키는 이점을 지니고 있다. 효율 곡선은 살펴보면 최대 효율은 공진주파수에서 발생하며 계류로프의 강성계수에 관계없이 최대값은 0.5이다.

Fig. 10은  $d/h = 0.8$ ,  $K/\rho gh = 0.0$ 에서 진자판의 두께 변화에 따른 효율을 살펴보았다. 현 해석모델에서 부가 관성모멘트와 방사감쇠계수를 구할 때 진자판의 두께의 영향을 무시하였다. 따라서 진자판의 두께 변화는 진자판의 관성모멘트와 정유체 복원모멘트에만 영향을 준다. 식 (24)에서  $t_f/h = 0$ 은 진자판의 관성모멘트와 정유체 복원모멘트를 무시한 경우이다. Fig. 10에서 진자판의 두께를 고려한 경우 최대 효율이 50%인 반면에 두께를 무시하였을 때 최대 효율은 30%보다 낮게 나타났다. 두께가 증가할수록 회전운동 공진주파수가 고주파수영역으로 이동하며 공진 폭도 넓어지는 것을 볼 수 있다. 시스템의 구조적 안정성뿐만 아니라 에너지 추출증가를 위하여 진자판의 두께는 늘릴 필요가 있다.

물수형 진자판은 파랑에너지를 흡수하는 발전장치의 기능뿐만 아니라 파도를 차단하는 방파제 기능을 동시에 수행한다. 이를 살펴보기 위하여 최적의 PTO감쇠계수를 적용하였을 때 계류로프의 강성계수 변화에 따른 진자판의 회전운동을 고려한 반사율과 투과율을 Fig. 11에 나타내었다. 강성계수가 클수록 진자판의 회전운동을 구속하므로 반사율은 증가하고 투과율은 감소하는 파 차단제의 기능을 잘 수행하고 있음을 보여주고 있다. 주파수에 따라 다소 차



**Fig. 11.** Reflection(a) and transmission(b) coefficients of a rolling pendulum plate as a function of mooring line stiffness  $K/\rho gh$  for  $\rho_f/\rho = 0.25$ ,  $t_f/h = 0.1$ ,  $z_m/d = 1.0$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $d/h = 0.8$ , and  $h = 10$  m.

이를 보이지만  $\omega\sqrt{h/g} = 1.25$ 에서 투과율은 약 0.5을 보이고 있다.

### 4. 결 론

진자판의 폭( $W$ )이 증가할수록 3차원 수치해(부가 관성모멘트, 방사감쇠계수, 파기진 모멘트)는 2차원 해석해에 점점 가까워져  $W/h = 20$ 일 때 해석해에 수렴함을 보여주었다. 물수형 진자판을 이용한 파력발전장치로부터 최대 파워추출을 얻기 위한 최적의 PTO감쇠계수( $\tilde{b}_{pto}$ )는 진자판의 회전운동 공진주파수에서 최소값을 갖는다. 최적의 PTO감쇠계수를 적용하여 구한 공진주파수에서의 회전운동 변위는 PTO감쇠력으로 인해 무부하 상태와 비교하여 약 1/2로 줄어들었다. 예상대로 진자판의 높이가 증가할수록 추출파워의 피크값도 커지고 공진폭도 더 넓게 나타났다. 따라서 진자판을 이용한 파력발전장치는 수심이 깊은 심해역 보다는 수심이 낮은 천해역에 설치해야 효과적이다.

PTO장치가 연결된 부하 상태에서 진자판이 수직축을 중심으로 원활한 회전운동을 하기 위해서는 진자판은 빠른 시간내에 평형상

태로 되돌아와야 한다. 본 연구에서는 복원모멘트를 키우는 방안으로 일정한 강성계수를 갖는 계류로프를 진자판 끝단에 설치하였다. 설치된 계류로프의 강성계수를 조절하면 회전운동 고유주파수를 설치해역의 파랑스펙트럼의 피크주파수와 일치시킬 수 있어 공진으로 증폭된 진자판의 회전운동 에너지로부터 더 많은 전기에너지를 추출할 수 있는 장점도 가지고 있다. 계류로프의 강성계수가 클수록 회전운동 변위가 줄어들어 공진주파수에서 추출파워는 줄어드나 에너지 추출이 가능한 주파수 범위는 확대되었다. 최대 추출효율은 계류로프의 강성계수와 관계없이 약 0.5로 나타났다. 진자판의 두께가 증가할수록 회전운동 공진주파수가 고주파수영역으로 이동하며 공진폭이 넓어졌다. 따라서 구조적 안정성 확보뿐만 아니라 에너지 추출증가를 위하여 진자판의 두께는 어느 정도 확보해야 한다.

몰수형 진자판은 파랑에너지를 흡수하는 발전장치의 기능뿐만 아니라 파도를 차단하는 방파제의 기능을 동시에 수행한다. 특히 계류로프의 강성계수가 클수록 진자판의 회전운동을 구속하여 마치 고정된 수직판과 같이 투과파를 줄이는 파 차단제의 역할을 수행하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20163010071690).

## References

- [1] Dean, R.G and Dalrymple, R.A., 1984, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific, Singapore.
- [2] Evans, D., 1970, "Diffraction of water waves by a submerged vertical plate", *J. Fluid Mech.*, Vol. 40, 433-451.
- [3] Evans, D.V. and Porter, R., 1996, "Hydrodynamic characteristics of a thin rolling plate in finite depth of water", *Appl. Ocean Res.*, Vol. 18, 215-228.
- [4] Falnes, J., 2002, *Ocean Waves and Oscillating Systems :Linear Interactions Including Wave Energy Extraction*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [5] Folley, M., Whittaker, T.J.T., Henry, A., 2007, "The effect of water depth on the performance of small surging wave energy converter", *Ocean Eng.*, Vol. 34, 1265-1274.
- [6] Gomes, R.P.F., Lopes, M.F.P., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Falcao, A.F.O., 2015, "The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves", *Ocean Eng.*, Vol. 96, 86-99.
- [7] Henriques, J.C.C., Lopes, M.F.P., Lopes, M.C., Gato, L.M.C., Dente, A., 2011, "Design and testing of a nonlinear power take-off simulator for a bottom-hinged plate wave energy converter", *Ocean Eng.*, Vol. 38, 1331-1337.
- [8] Lin, C.C., Chen, J.H., Chow, Y.C., Tzang, S.Y., Hou, S.J., Wang, F.Y., 2012, "The experimental investigation of the influencing parameters of flap type wave energy converters", *Proceedings of the Fourth International Conference on Ocean Energy*, Dublin, Ireland.
- [9] Lopes, M.F.P., Henriques, J.C.C., Lopes, M.C., Gato, L.M.C., Dente, A., 2009, "Design of a nonlinear power take-off simulator for model testing of rotating wave energy devices", *Proceedings of the Eighth European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden.
- [10] Lucas, J., Livingstone, M., Vuorinen, M., Cruz, J., 2012, "Development of a wave energy converter(WEC) design tool—application to the WaveRoller WEC including validation of numerical estimates", *Proceedings of the Fourth International Conference on Ocean Energy*, Dublin, Ireland.
- [11] Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, K.-B., Park, J., Shin, S.-H., 2011, "Numerical analysis on wave-induced motion of floating pendulum wave energy converter", *J. Korea Society Ocean Eng.*, Vol. 25, No. 4, 28-35.
- [12] Nam, B.W., Hong, S.Y., Shin, S.H., Hong, S.W., Kim, K.B., 2012, "Prediction of the hydrodynamic performance of the floating pendulum wave energy converter in regular and irregular waves", *Proc 22nd Int Offshore and Polar Eng Conf*, Rhodes, Greece, ISOPE, 607-612.
- [13] Park, J.Y., Shin, S.H., Hong, K.Y., Kim, S.H., 2012, "Study on the wave response and efficiency of a pendulum wave energy converter", *Proc 22nd Int Offshore and Polar Eng Conf*, Rhodes, Greece, ISOPE, 601-606.
- [14] Penney, W.G. and Price, A.T., 1952, "The diffraction theory of waves and the shelter afforded by breakwaters", *Philos. Trans. R.Soc. Lond.*, Vol. 244A, 236-253.
- [15] Whittaker, T.J.T. and Folley, M., 2012, "Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster", *Philos. Trans. R. Soc.*, Vol. 370A, 345-364.
- [16] Whittaker, T.J.T., Collier, D., Folley, M., Osterried, M., Henry, A., Crowley, M., 2007, "The development of Oyster—a shallow water surging wave energy converter", *Proceedings of the Seventh European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal.

Received 7 March 2017

1st Revised 8 April 2017, 2nd Revised 28 April 2017

Accepted 15 May 2017