

선형발전기가 탑재된 파랑에너지 추출장치 설계 I. 파력 부이 설계

김정록·배윤혁·조일형[†]
제주대학교 해양시스템공학과

Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator Part I. Design of a Wave Power Buoy

Jeong Rok Kim, Yoon Hyeok Bae and Il Hyoung Cho[†]

Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

요 약

선형발전기와 연성된 원통형 부이의 수직운동으로부터 파랑에너지를 추출하는 파력발전장치의 설계과정을 소개하였다. 최대 파워는 최적조건($c_{PTO}=b_T, \omega = \omega_N$)에서 발생하며, 공진조건시 부이의 수직운동 고유주파수와 속도스펙트럼의 피크 주파수를 일치시키지 않고 의도적으로 고유주파수를 15%크게 설정하면 추출파워의 최대값을 더욱 높일 수 있다. 이러한 방법을 통하여 추출 파워의 증가와 함께 부이의 흘수를 낮추고 동시에 PTO 감쇠력을 줄일 수 있기 때문에 발전장치 제작 비용을 낮출 수 있는 부수적인 효과를 얻을 수 있었다.

Abstract – Design procedure of WEC (wave energy converter) using the heaving motion of a floating cylinder-type buoy coupled with LEG (linear electric generator) system is introduced. It is seen that the maximum power can actually be obtained at the optimal conditions ($c_{PTO}=b_T, \omega = \omega_N$). Then, based on the developed theory, several design strategies are proposed to further enhance the maximum PTO (power take off), which includes the intentional mismatching with the heave natural frequency, which is 15% higher value than the peak frequency of input velocity spectrum. By using the intentional mismatching strategy, the generated power is actually increased and the corresponding draft as well as the required PTO damping value is significantly reduced, which is a big advantage in manufacturing the WEC with practical LEG (linear electric generator) system.

Keywords: Wave Energy Converter(파력발전장치), Heave Motion(수직운동), Linear Electric Generator(선형발전기), Power Take-Off(파워추출장치), Resonance(공진)

1. 서 론

화석 연료의 고갈에 따른 최근 오일 값의 상승은 세계 경제에 좋지 않은 영향을 줄 뿐만 아니라 화석연료를 이용한 발전방식은 이산화탄소의 배출 증가로 이어져 심각한 지구 환경문제를 초래하고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 화석연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지원이 요구되며, 대체 에너지원의 확보를 위하여 세계 각국은 신재생에너지의 연구·개발을 빠르게 확대해 나가고 있다. 여러 신재생에너지 중 에너지 밀도가 가장 높은 파력발전은 최근 많은 학자들에 의해 연구되고 있다. 일반적으로 파력발전은 해수면에 존재하는 파랑에너지로부터 전기에너지를 생산하는 발전방식을 일

컬으며, 변환방법에 따라 크게 4가지로 분류된다. ①파도에 의해 운동하는 부이(Buoy)로부터 전기를 추출하는 가동물체형, ②진동하는 수주(Water Column)에 의해 발생하는 공기흐름을 이용하여 발전하는 진동수주형(Oscillating Water Column), ③파랑에 의하여 발생하는 동압력으로 수중물체를 움직여 발전하는 수중압력형, 그리고 ④ 발전장치 상부로 월파된 해수의 위치에너지를 이용하여 터빈을 돌려 발전하는 월파형이 대표적인 발전방식이다. 이 중에서 가동물체형은 1차 변환을 통하여 파랑에너지로부터 변환된 부유체의 운동에너지를 전기에너지로 변환하기 위해서 선형발전기(Linear Electric Generator)를 사용한다. 선형발전기는 부가적인 기계장치 없이 가동자인 영구자석과 고정자인 코일로 구성되며, 영구자석과 코일의 상대운동이 클수록 많은 양의 전기에너지를 생산할 수 있다. 따라서 대부분의 가동물체형 발전장치는 상대운동을 최대화하기 위하여 입

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

사파와 공진이 일어나도록 부이의 형상을 설계한다. 선형발전기의 설치는 부이의 운동을 저감시키는 PTO(Power Take-Off) 감쇠력으로 모델링되어 운동방정식내에 표현된다.

입사파의 파장에 비하여 작은 크기를 갖는 부이의 운동을 이용하여 발전하는 방식을 점 흡수식(Point absorber) 발전방식이라 부르며 1970년도부터 많은 연구가 진행되고 있다. 이때, 부이의 운동을 극대화하기 위하여 입사파의 주파수와 공진이 일어나도록 부이의 형상을 설계한다(Budal and Falnes[1975], French[1979]). 부이의 운동에너지로부터 전기에너지를 추출하기 위한 PTO장치로는 유압(Hydraulic)을 이용하는 방식과, 선형발전기(Linear Electric Generator, LEG)를 이용하는 방식이 있다. 유압을 이용하는 방식은 부이와 연결된 피스톤의 운동으로 유기된 2개의 저장조내의 유체의 압력차이로 유압모터를 돌려 발전하는 간접적인 방식인 반면에, LEG방식은 영구자석과 코일의 상대운동으로부터 직접 전기를 생산하는 직접적인 방법으로 최근에 많은 관심을 받고 있다.

수직 원기둥과 입사파와의 상호작용 문제는 Miles and Gilbert [1968]가 처음으로 연구한 이후로 수면위에 떠 있는 원기둥에 대한 산란문제는 Garrett[1971]에 의해 다루어 졌고, 방사문제는 Tung [1979], Yeung[1981], Evans[1976]에 의해 해석되었다. Cho and Kweon[2011]은 파랑중 원기둥과 선형발전기가 서로 연성되어 있을 때, 추출되는 파워를 구하였다. Grilli *et al.*[2007]은 원기둥내에 선형발전기가 탑재된 파력발전장치에 대하여 ①입사파에 대한 원기둥의 운동해석, ②원기둥 운동에 대한 LEG 시스템의 동적해석, ③LEG 시스템으로부터 전기적 출력결정 등을 중심으로 해석과 모형실험을 수행하여 소형(3~4와트) 파력발전장치를 개발하였다.

본 연구에서는 선형발전기와 연성된 부이의 수직운동으로부터 에너지를 추출하는 파력발전장치의 효율을 극대화하도록 부이의 최적 형상을 설계하는 과정을 살펴보았다. 에너지 흡수장치로 원통형 부이가 선택되었다. 이전의 연구결과와 마찬가지로 공진조건을 만족할 때 그리고 PTO감쇠계수가 방사감쇠계수와 점성감쇠계수의 합과 같을 때 추출파워는 최대가 된다. 이때 불규칙파중 공진조건을 만족하기 위해서 부이의 수직운동 고유주파수와 속도스펙트럼의 피크 주파수를 일치시키지 않고, 의도적으로 고유주파수를 15% 크게 설정하여 추출 파워의 최대값을 더욱 높일 수 있다. 이러한 방법을 통하여 최대 파워의 향상과 함께 부이의 흡수를 낮추고 동시에 PTO 감쇠력을 줄이는 부수적인 효과를 얻을 수 있었다.

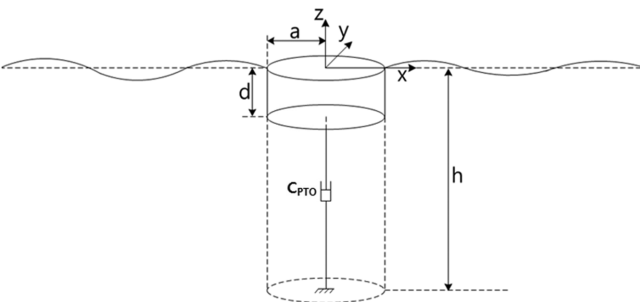


Fig. 1. Definition sketch of a WEC in waves.

2. 파력부이 설계

선형포텐셜이론 아래에서 주파수 영역에서 선형발전기와 연성된 부이의 운동방정식을 유도하고 이를 풀어 부이의 수직운동 변위와 선형발전기 설계에 필요한 부이의 파워를 구하였다. 운동방정식내의 부가질량(Added Mass)과 방사감쇠계수(Radiation Damping Coefficient) 그리고 파기진력(Wave Exciting Force)을 구하기 위해 고유함수전개법(Matched Eigenfunction Expansion Method)을 사용하였다. 해석모델은 반경 a , 흡수 d 인 부이로 수심이 h 인 수면 위에 떠 있다고 가정한다. 파도에 따라 부이는 전후/수직/중 운동을 하는데, 본 연구에서는 다른 운동모드는 구속하고 수직운동만을 고려하였다. 포텐셜이론을 가지고 구할 수 없는 부이의 수직운동시 발생하는 와류나 마찰에 의한 점성효과를 고려하기 위하여 자유감쇠실험(Free-Decay Test)을 실시하였다.

선형포텐셜이론 아래에서 입사파를 주파수 ω 을 갖는 규칙파라 가정하면 속도포텐셜은 $\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}[\phi(x, y, z)e^{-i\omega t}]$ 라 할 수 있다. 전체포텐셜은 식 (1)과 같이 입사포텐셜(ϕ_0), 산란포텐셜(ϕ_1), 그리고 방사포텐셜(ϕ_3)의 합으로 표현된다.

$$\phi(x, y, z) = A[\phi_0(x, y, z) + \phi_1(x, y, z)] - i\omega\xi\phi_3(x, y, z), \quad (1)$$

여기서 A 는 입사파의 진폭이며, ξ 는 부이의 수직운동 복소진폭이다.

질량 m 인 부이가 파랑중 수직운동을 할 때, 운동방정식은 Newton의 제 2법칙으로부터 다음과 같다.

$$m\ddot{\zeta}(t) = F_{ex}(t) + F_{rad}(t) + F_{res}(t), \quad (2)$$

여기서 부이의 수직운동 변위는 $\zeta(t) = \text{Re}\{\xi e^{-i\omega t}\}$ 이며, $F_{ex}(t) = \text{Re}\{X_3 e^{-i\omega t}\}$ 수직방향 파기진력이다. $F_{rad}(t)$ 는 동유체력으로 가속도에 비례하는 부가질량력($-a_{33}\ddot{\zeta}$)과 속도에 비례하는 방사감쇠력($-b_{33}\dot{\zeta}$)의 합으로 표현된다. $F_{res}(t) (= -\rho g S \zeta)$ 는 정유체력이며, 여기서 $S(=\pi a^2)$ 는 부이의 수선면적이다.

식 (2)로부터 주파수영역에서의 수직운동의 RAO(Response Amplitude Operator)는 아래식과 같다.

$$\left| \frac{\xi}{A} \right| = \frac{|X_3|^2}{\sqrt{[\rho g S - \omega^2(m + a_{33})]^2 + (\omega b_{33})^2}}, \quad (3)$$

여기서 a_{33} , b_{33} , X_3 는 부이의 형상과 주파수의 함수이다.

부이의 수직운동 비감쇠 고유주파수(Undamped Natural Frequency)는 아래와 같다.

$$\omega_N = \sqrt{\frac{\rho g S}{m + a_{33}(\omega_N)}}. \quad (4)$$

식 (4)는 주파수 별로 미리 구해 놓은 부가질량 $a_{33}(\omega)$ 을 가지고 축차법(Iteration Method)을 사용하여 계산된다.

부이의 운동에너지로부터 전기에너지를 추출하기 위해서는 선형발전기를 연결하는데, 이때 부이와 함께 움직이는 영구자석의 운동방향과 반대방향으로 작용하는 PTO감쇠력이 존재한다. 본 연구에

서는 편의상 PTO 감쇠력이 영구자석의 운동속도에 선형적으로 비례한다고 가정한다.

$$F_{PTO} = -c_{PTO}\dot{\zeta}, \quad (5)$$

여기서 비례상수 c_{PTO} 를 PTO 감쇠계수라 부르며, 선형발전기의 고정자(코일)와 가동자(영구자석)의 형상과 코일의 감긴 횟수, 구동 주파수와 밀접한 관련이 있다.

부이와 선형발전기가 연결되었을 때 식 (3)안에 PTO감쇠력을 포함시켜야 하며, 또한 식 (3)에서는 고려하지 않았던 점성감쇠력($F_{vis} = -b_{vis}\dot{\zeta}$)을 함께 고려하면, 전체 감쇠계수는 방사감쇠계수와 점성감쇠계수의 합으로 표현되고, PTO 감쇠계수와 전체 감쇠계수의 비를 b_T 라 하면 다음식과 같다.

$$b_T = b_{33} + b_{vis}, \quad f = \frac{c_{PTO}}{b_T}. \quad (6)$$

점성감쇠계수는 $b_{vis} = 2\rho g \kappa S / \omega_N$ 로 정의되며, 무차원화된 점성계수 κ 는 자유감쇠실험을 통하여 실험적으로 구한다.

선형발전기와 연결된 부이의 수직운동 RAO는 다음과 같다..

$$\left| \frac{\xi}{A} \right| = \sqrt{\frac{|X_3|^2}{[\rho g S - \omega^2(m + a_{33})]^2 + [\omega b_T(1+f)]^2}}. \quad (7)$$

시간평균 파워는 아래와 같다.

$$\frac{\bar{P}}{A^2} = \frac{1}{2} f b_T \omega^2 \left| \frac{\xi}{A} \right|^2. \quad (8)$$

식 (7)로부터 공진조건($\omega = \omega_N$)에서 파워 \bar{P} 는 다음과 같다.

$$\frac{\bar{P}}{A^2} = \frac{1}{2} \frac{|X_3|^2 f}{b_T (1+f)^2}, \quad (9)$$

여기서 $f/(1+f)^2$ 는 $f=1$ 일 때 최대값 1/4을 갖는다. 즉, PTO 감쇠계수가 방사감쇠계수와 점성감쇠계수의 합과 같을 때($c_{PTO} = b_T$) 최대 파워가 된다.

$$\frac{\bar{P}_{max}}{A^2} = \frac{1}{8} \frac{|X_3|^2}{b_T}. \quad (10)$$

시간평균 최대 파워 \bar{P}_{max} 와 단위 폭을 갖는 입사파의 평균 파워의 비는 다음과 같다.

$$w_{max} = \frac{\frac{1}{8}|X_3|^2 A^2 / b_T}{\frac{1}{2}\rho g A^2 C_g} = \frac{|X_3|^2}{4\rho g C_g b_T}, \quad (11)$$

여기서 C_g 는 군속도(Group Velocity)이다.

시간평균 파워 \bar{P} 와 단위 폭을 갖는 입사파의 평균 파워의 비는 취득폭(Capture Width)라 부르며 기호로 C_w 로 쓴다.

$$C_w = \frac{\bar{P}}{\bar{P}_{max}} \frac{|X_3|^2}{4\rho g C_g b_T} = \eta_{mech} \frac{|X_3|^2}{4\rho g C_g b_T}, \quad (12)$$

여기서 $\eta_{mech}(=\bar{P}/\bar{P}_{max})$ 는 추출 파워와 최대 파워의 비로 기계적인 효율을 나타내며, 공진조건($\omega = \omega_N$)을 만족하고 동시에 $f=1.0$ ($c_{PTO} = b_T$)이 충족되면 $\eta_{mech} = 1$ 이 된다. 또한 C_w 가 최대값을 갖기 위해서는 X_3 가 최대가 되어야 하며, b_T 는 최소가 되어야 한다.

불규칙 파랑중 수직운동 스펙트럼과 파워 스펙트럼은 다음과 같이 주어진다.

$$S_{\xi}(\omega) = \left| \frac{\xi}{A} \right|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega),$$

$$S_{\sqrt{\bar{P}}}(\omega) = \frac{\bar{P}(\omega)}{A^2} \cdot S_{\zeta}(\omega) \quad (13)$$

$S_{\zeta}(\omega)$ 는 파 스펙트럼으로 JONSWAP 스펙트럼인 경우에 다음식과 같다.

$$S_{\zeta}(\omega) = \beta \frac{H_{1/3}^2 \omega_p^4}{\omega^5} \exp\left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right]}, \quad (14)$$

$$\text{with } \beta = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} (1.094 - 0.01915 \ln \gamma),$$

여기서 $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_p(=2\pi/\omega_p)$ 는 피크주기이며, $\omega < \omega_p$ 일 때 $\sigma = 0.07$, $\omega \geq \omega_p$ 일 때 $\sigma = 0.09$ 이다. γ (Peak Factor)는 1부터 7사이의 값을 갖는데, 평균 JONSWAP 스펙트럼인 경우는 $\gamma = 3.3$, P-M (Pierson-Moskowitz) 스펙트럼인 경우는 $\gamma = 1.0$ 을 선택한다.

불규칙 파랑중 부이의 수직운동 유의 진폭(Significant Amplitude)과 추출파워의 R.M.S.(Root Mean Square)는 다음과 같다.

$$(\xi)_{1/3} = 2 \sqrt{\int_0^{\infty} S_{\xi}(\omega) d\omega},$$

$$\sqrt{\bar{P}}_{1/3} = 2 \sqrt{\int_0^{\infty} S_{\sqrt{\bar{P}}}(\omega) d\omega}. \quad (15)$$

3. 모형실험

모형실험은 길이 20 m, 폭 0.8 m, 깊이 1.0 m인 제주대학교 2차원 조파수조에서 실시하였다. 수조 한끝에는 피스톤 타입의 조파기(Wavemaker)가 설치되어 있고, 반대편에는 유공판 소파장치가 놓여져 있다. 모형실험을 자유감쇠실험과 파랑중 부이의 수직운동실험으로 나누어 실시하였다. 실험모형은 축척비 1/16인 부이로 반경 0.125 m, 흘수 0.35 m이며, 설치 수심은 0.6 m이다. 식 (4)로부터 구한 수직운동 고유주파수는 $\omega_N = 4.818$ rad/s이다. 자유감쇠실험은 정수면에서 수직방향으로 실험모델에 일정 힘을 가한후, 일순간 가해진 힘을 제거하면 복원력에 의해 발생하는 자유운동을 계속함으로써 수행된다. 이때 부이는 유체의 점성효과로 시간에 따라 운동변위가 줄어들게 되며, 감소되는 정도를 측정하여 점성감쇠계수를 구한다. Fig. 2는 수직운동에 대한 자유감쇠실험 결과를 보여주고 있다. 부이는 수직운동의 고유주파수를 가지고 주기운동을 한다. 측정된 고유주파수는 계산결과보다 약간 작은 4.689 rad/s이며, 초기 운동변위의 4개의 피크값들을 추출하여 식 (16)에 대입하면 무차원화된 점

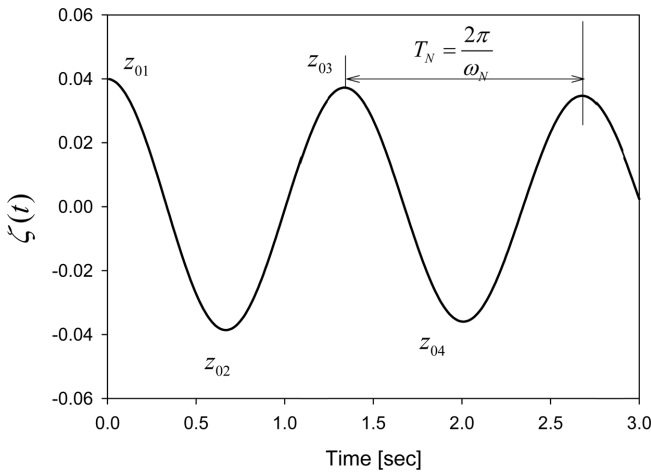


Fig. 2. Time series of heave free-decay test.

성감쇠계수 $\kappa(=0.053)$ 값을 계산하고 이로부터 구한 점성감쇠계수는 $b_{vis} = 10.813 \text{ kg/s}$ 이다. 자유감쇠실험은 점성감쇠 뿐만 아니라 부이의 운동에 의한 방사감쇠도 함께 포함하고 있으므로 순수한 점성감쇠 계수를 구하기 위해서는 측정된 값에서 방사감쇠계수를 빼야 한다.

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \ln \left\{ \frac{z_{01} - z_{02}}{z_{03} - z_{04}} \right\}. \quad (16)$$

파랑중 부이의 운동실험은 자유감쇠실험에서 사용한 동일한 모형에 대하여 실시하였으며, 부이 내부에 가속도계를 부착하여 수직운동변위를 계측하였다. Fig. 3(a)는 조파수조내에 설치된 부이와 계측장비의 전체 구성도를 보여주고 있다. 조파기로부터 4.8m 지점에 파고계를 설치하여 입사파를 계측하였으며, Fig. 3(b)는 조파수조에 설치된 부이의 사진이다. 운동실험은 규칙파에 대해서 입사파 주기 1.0~1.4초 사이를 적절히 분할하여 총 8case에 대해서 수행하였다. 파경사(Wave Steepness)는 0.01-0.02사이의 값을 사용하였다.

4. 계산결과 및 고찰

Fig. 4는 축척비 1/16인 반경 0.125 m, 흘수 0.35 m인 부이의 수

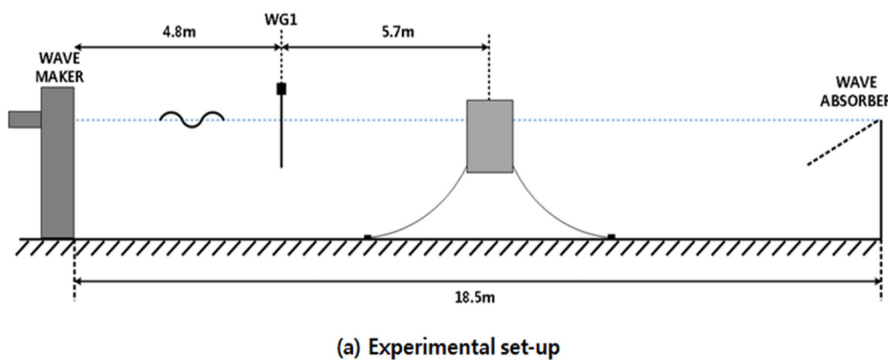


Fig. 3. Experimental set-up and circular cylinder buoy.

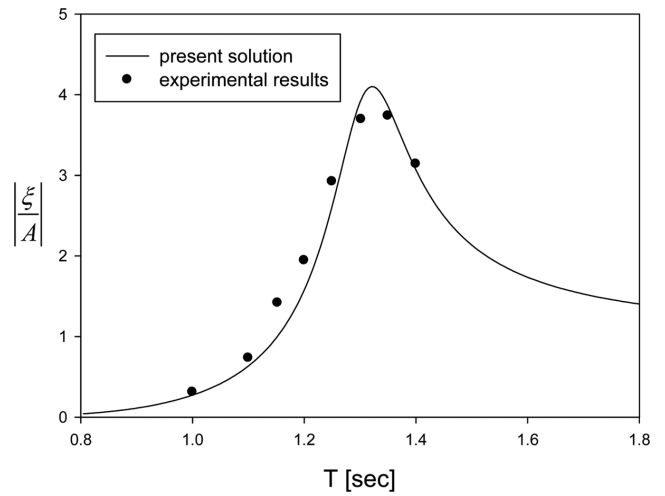


Fig. 4. Comparison of heave RAO between the analytic solution and experimental results.

직운동 RAO(Response Amplitude Operator)를 해석결과와 실험결과를 비교한 그림이다. 실선은 자유감쇠실험으로부터 구한 점성감쇠계수를 포함한 해석결과이며, 동그라미 기호는 실험결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 자유감쇠실험을 통하여 구한 점성감쇠계수를 포함한 해석결과는 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 축척비 1/16인 모형에 대한 자유감쇠실험으로부터 구한 무차원화된 감쇠계수 $\kappa = 0.053$ 는 실험역 부이의 운동해석에도 그대로 적용하였다.

Fig. 5는 선형발전기 없이 자유롭게 떠 있는 실험역 부이의 수직운동 RAO를 부이의 흘수를 바꿔가면서 살펴보았다. 설치수심은 80 m이며, 반경은 2 m이다. 점성감쇠계수는 축척비 1/16인 실험모형을 가지고 자유감쇠실험으로부터 얻은 $\kappa = 0.053$ 를 사용하였다. 4개의 흘수($d=4,5,6,7 \text{ m}$)에 대한 고유주파수는 각각 1.37, 1.26, 1.17, 1.09 rad/s이다. 흘수가 커질수록 피크값을 보이는 공진주파수가 저주파수 영역으로 이동하며 공진폭도 좁아지는 것을 볼 수 있다. 또한 공진주파수의 위치는 고유주파수와 잘 일치하며 공진주파수에서 수직운동 RAO값이 약 3.3으로 나타났다.

Fig. 6는 선형발전기를 연결하였을 때의 수직운동 RAO를 그렸다.

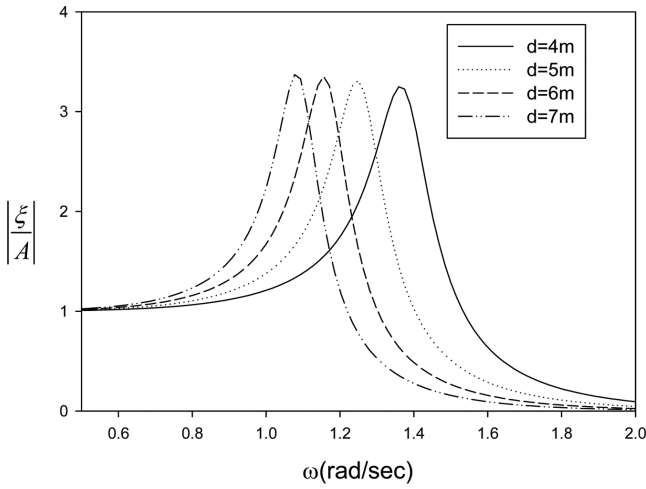


Fig. 5. Heave RAO of a buoy in case of disconnected generator ($c_{PTO}=0$) as a function of draft and wave frequency for $h=80$ m, $a=2.0$ m, $\kappa=0.053$.

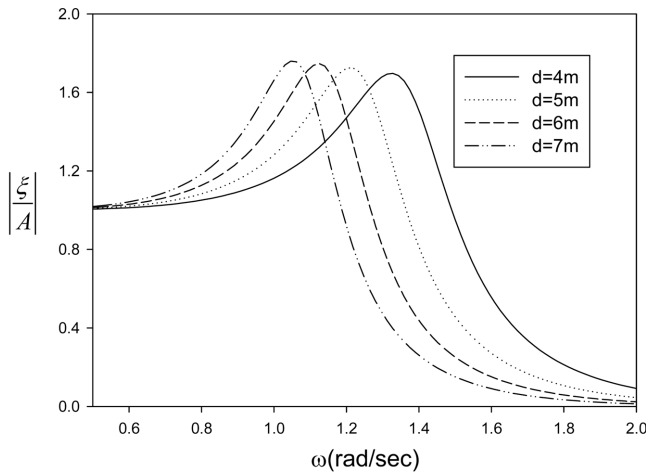


Fig. 6. Heave RAO of a buoy under the optimal condition ($c_{PTO}=b_T$) as a function of draft and wave frequency for $h=80$ m, $a=2.0$ m, $\kappa=0.053$.

선형발전기의 PTO 감쇠계수(c_{PTO})는 최대 파워가 추출되는 $c_{PTO}=b_T$ 로 선정하였다. 즉, PTO 감쇠계수가 방사감쇠계수와 점성감쇠계수의 합과 같을 때 추출 파워는 최대가 된다. PTO 감쇠계수의 추가로 수직운동 RAO의 최대값이 3.3에서 1.8로 줄어든 것을 볼 수 있다. 공진주파수 부근에서 피크값은 줄어들었지만 그외 나머지 주파수영역에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 계산조건하에서 무차원화된 시간평균 파워와 취득폭을 주파수에 따라 살펴보았다. 이때 PTO 감쇠계수는 최적조건($c_{PTO}=b_T$)을 따른다. 흘수가 가장 작은 $d=4$ m에서의 파워와 취득폭의 피크값이 가장 높고 공진폭도 가장 크다. 따라서 가장 큰 파워를 추출할 수 있을 것으로 예상되지만, 검토할 사항으로 파워의 피크값 주변 주파수 범위내에 설치해역의 파랑에너지가 많이 분포하거나 발생 빈도수가 높아야 한다. 이를 살펴보기 위하여 유의 파고 3.0 m, 피크주기 6.67초를 JONSWAP스펙트럼에 적용한 파랑스펙트럼과 파랑스펙트럼에 주파수의 제곱을 곱하여 구한 속도스펙

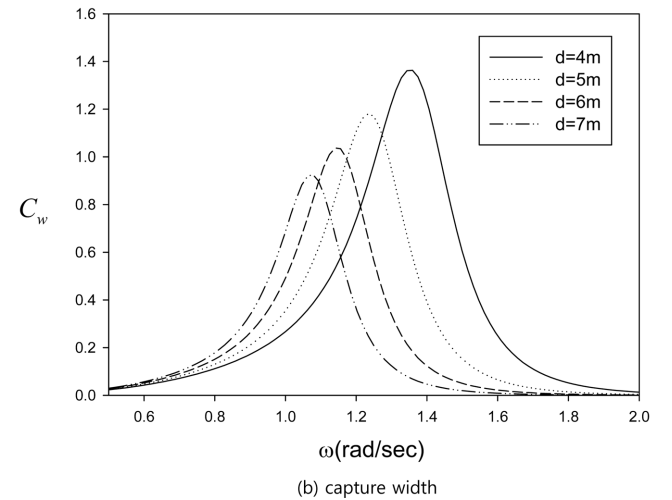
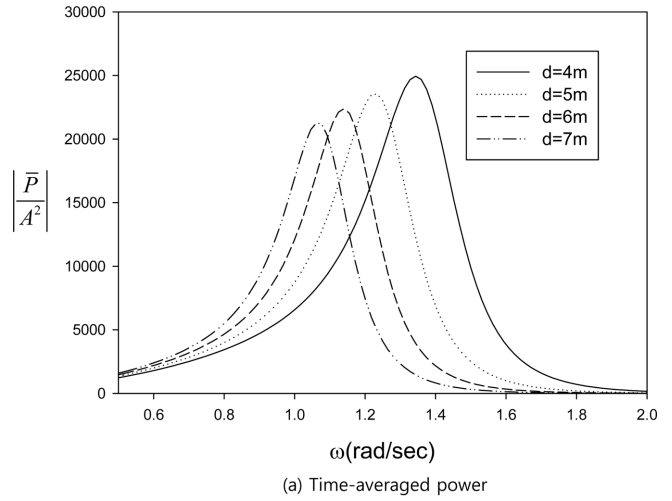


Fig. 7. Time-averaged power and capture width under the optimal condition ($c_{PTO}=b_T$) as a function of draft and wave frequency for $h=80$ m, $a=2.0$ m, $\kappa=0.053$.

트럼을 함께 그렸다. 그림에서 속도스펙트럼의 피크 주파수는 파랑스펙트럼보다 고주파수 영역으로 약간 이동함을 볼 수 있다. 실제로 PTO파워는 부이의 운동속도의 제곱에 비례하므로 부이의 수직운동 고유주파수를 파랑스펙트럼의 피크 주파수에 일치시키는 것보다 속도스펙트럼의 피크 주파수에 일치시키는 것이 타당하다. 또한 피크 주파수를 기준으로 양쪽의 에너지 분포는 비대칭적이고 고주파수영역내에 에너지가 더 많이 분포되어 있다. 따라서 속도스펙트럼의 피크 주파수보다 다소 높은 값에 부이의 수직운동 고유주파수를 일치시키면 공진효과를 극대화시킬 수 있다. 실제 계산으로 유의파고($H_{1/3}$)가 3 m, 피크 주기(T_p)가 6.67초인 불규칙파를 대상으로 부이의 수직운동 스펙트럼과 추출된 파워스펙트럼에 대한 계산을 수행하였다.

Fig. 8의 속도스펙트럼의 피크 주파수는 1.08 rad/s이다. 이 값은 앞에서 살펴본 흘수 7.0m인 부이의 수직운동 고유주파수 1.09 rad/s와 아주 가깝다. 그러나 흘수 7 m에서 파워가 최대가 되지 않으며, 이보다 다소 높은 주파수(흘수 5 m)인 1.26 rad/s에서 최대 파워가 발생한다. Fig. 9a는 파랑스펙트럼에 부이의 수직운동 RAO의 제곱

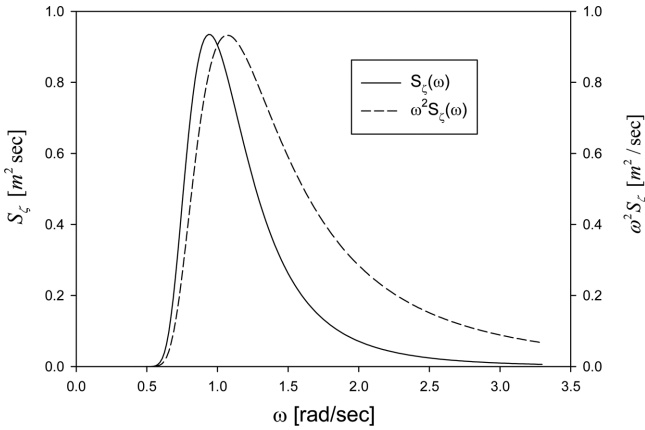


Fig. 8. JONSWAP wave spectrum and corresponding velocity spectrum for $H_{1/3}=3.0$ m, $T_p=6.67$ sec, $\gamma=1.0$.

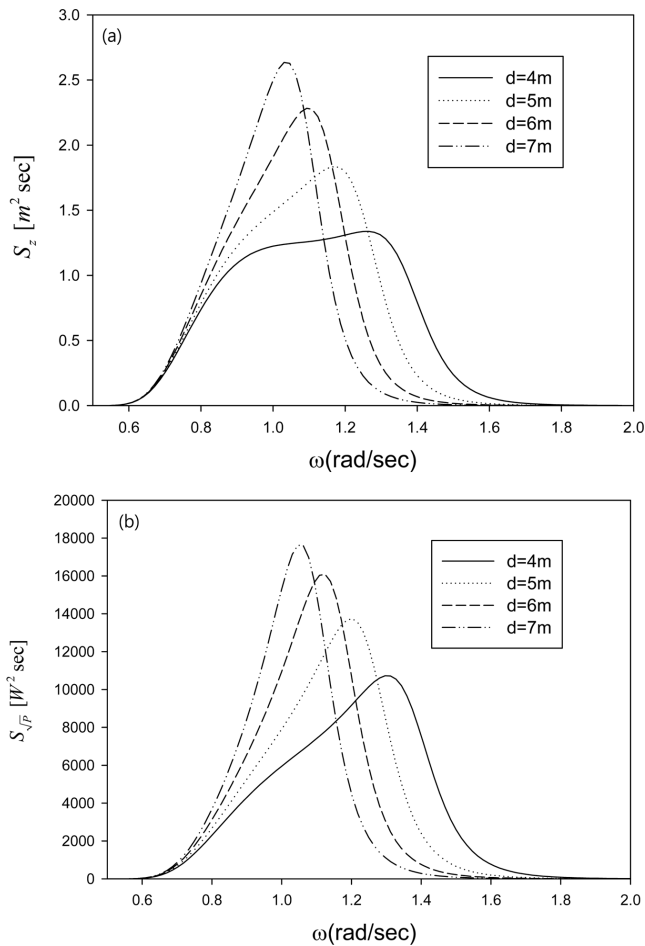


Fig. 9. (a) Heave motion spectrum and (b) square root power spectrum under the optimal condition ($c_{PTO}=b_T$) as a function of draft and wave frequency for $H_{1/3}=3.0$ m, $T_p=6.67$ sec, $a=2.0$ m, $\kappa=0.053$.

을 곱하여 구한 부이의 운동스펙트럼을 보여주고 있다. 파랑스펙트럼의 피크 주파수는 0.94 rad/s이다. 흘수가 커질수록 운동스펙트럼 곡선의 최대값은 증가하는 대신에 주파수 폭은 좁아지는 특징을 보이고 있다. Fig. 9b는 파랑스펙트럼에 무차원화된 시간평균 파워를

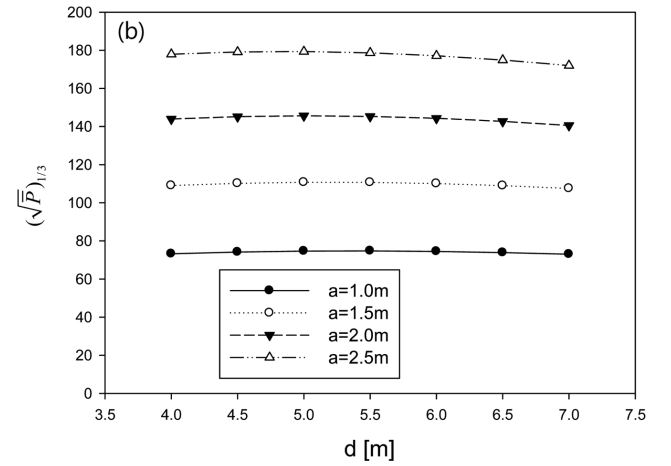
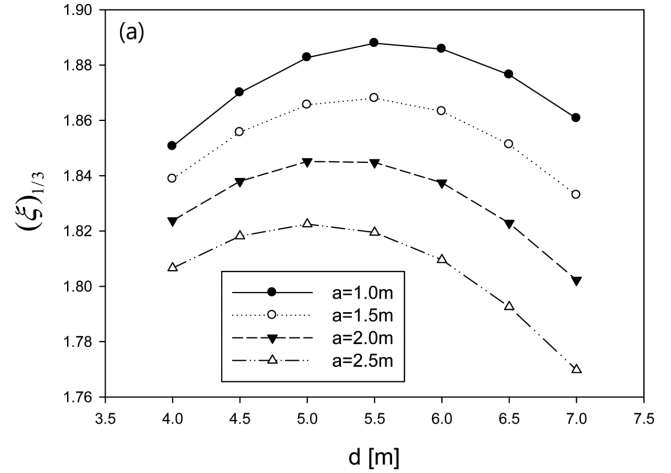


Fig. 10. (a) Significant heave amplitude and (b) significant amplitude of square root power under the optimal condition ($c_{PTO}=b_T$) as a function of draft and radius of a buoy for $H_{1/3}=3.0$ m, $T_p=6.67$ sec.

곱하여 얻은 파워스펙트럼을 보여주고 있다. 부이의 흘수가 커질수록 파워스펙트럼의 피크값은 점점 증가하며 주파수 폭은 다소 줄어드는 경향을 보이지만 운동스펙트럼과 같이 감소 폭은 크지 않다. 실제로 운동과 파워의 대푯값은 운동스펙트럼과 파워스펙트럼 곡선 내의 면적이다.

Fig. 10은 Fig. 9에 보여준 운동스펙트럼과 파워스펙트럼을 적분하여 운동의 유의진폭($\xi_{1/3}$)과 추출 파워의 R.M.S. ($\sqrt{P}_{1/3}$) 값을 부이의 흘수와 반경을 변화시키면서 살펴보았다. 흥미로운 결과로 부이의 반경이 증가할수록 운동진폭은 줄어드는 반면에 파워의 R.M.S.는 일정한 비율로 증가함을 볼 수 있다. 반경이 1.0 m와 1.5 m인 경우 최대 유의진폭은 $d=5.5$ m에서, 반경이 2.0 m와 2.5 m인 경우 최대 유의진폭은 $d=5.0$ m에서 일어난다. 그러나 파워의 R.M.S. 값은 흘수 변화에 큰 영향을 받지 않으며 대략 $4.5\text{ m} < d < 5.5\text{ m}$ 범위내에서 최대 파워를 준다. 부이의 고유주파수를 속도스펙트럼의 피크 주파수와 일치시키기 보다는 약 15%정도 큰 값을 갖도록 부이의 흘수를 설계하는 것이 바람직하다. 이론적으로 반경 2.0 m, 흘수 5.0 m 일 때, 145 W의 R.M.S. 파워를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

파랑중 선형발전기가 연결된 부이의 수직운동을 이용한 에너지 변환시스템을 설계하였다. 먼저 자유감쇠실험을 통하여 구한 점성 감쇠계수를 포함한 계산결과와 모형실험결과를 비교하였고 서로 잘 일치함을 확인하였다. 최대 파워를 추출할 수 있는 최적조건($c_{PTO}=b_T$)에서 주어진 파랑조건(유의파고 3.0 m, 피크 주기 6.67초)에서 운동 스펙트럼과 파워스펙트럼을 구하고 각 스펙트럼의 면적을 적분하여 운동의 유의진폭과 추출 파워의 R.M.S. 값을 부이의 형상(직경, 흘수)을 바꿔가면서 살펴보았다. 부이의 고유주파수와 속도스펙트럼의 피크 주파수의 비가 1.15일 때 파워의 R.M.S. 값이 최대임을 밝혔다. 이로부터 부이의 흘수를 정할 때 수직운동의 고유주파수를 속도스펙트럼의 피크 주파수보다 약 15%정도 크게 잡는 것이 추출 파워를 극대화하는데 유리하다는 결론을 얻을 수 있었다. 부이의 반경이 증가할수록 운동의 유의진폭은 줄어드는 반면에 파워의 R.M.S.는 일정한 비율로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 파워의 R.M.S.값은 흘수 변화에 큰 영향을 받지 않는다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Budal, K. and Falnes, J., 1975, “A resonant point absorber of ocean wave power”, *Nature*, Vol.256, 478-479.

- [2] 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”, *J. KSOE*, Vol.25, No.6, 9-16.
- [3] Evans, D.V., 1976, “A theory for wave-power absorption by oscillating bodies”, *J. Fluid Mech.*, Vol.77, 1-25.
- [4] French, M.J., 1979, “A generalized view of resonant energy transfer”, *J. Mech. Engng. Science*, Vol.21, 299-300.
- [5] Garrett, C.J.R., 1971, “Wave forces on a circular dock”, *J. Fluid Mech.*, Vol.46, 129-139.
- [6] Grilli, A.R., Merrill, J., Grilli, S.T., Spaulding, M.L., Cheung, J., 2007, “Experimental and numerical study of spar buoy-magnet/spring oscillators used as wave energy absorbers”, *Proc. 17th Intl. Conf. Offshore and Polar Eng.*, No.2007-JSC-569.
- [7] Miles, J.W. and Gilbert, F., 1968, “Scattering of gravity waves by a circular dock”, *J. Fluid Mech.*, Vol.34, 783-793.
- [8] Tung, C.C., 1979, “Hydrodynamic forces on submerged vertical circular cylindrical tanks under ground excitation”, *Appl. Ocean Res.*, Vol.1, 75-78.
- [9] Yeung, R.W., 1981, “Added mass and damping of a vertical cylinder in finite-depth waters”, *Appl. Ocean Res.*, Vol.3, No.3, 119-133.

2014년 4월 4일 원고접수

2014년 5월 15일 심사수정일자

2014년 5월 16일 게재확정일자