

상하 운동 반구형 파력 발전기의 최적 형상 조건 수치해석

김성재¹·구원철^{2,†}·허경욱³·허상환²

¹울산대학교 조선해양공학부

²인하대학교 조선해양공학과

³삼성중공업 거제조선소

Numerical Study on Shape Optimization of a Heaving Hemisphere Wave Energy Converter

Sung-Jae Kim¹, Weoncheol Koo^{2,†}, Kyung-Uk Heo³ and Sanghwan Heo²

¹School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

²Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

³Geoje Shipyard, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

요 약

가동 물체형 점흡수식 반구형 파력발전장치의 수면하 형상에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 매개변수로는 반구의 반지름과 흘수를 사용하였고, 각 조건에 따른 반구의 상하운동응답을 분석하여 최적의 반지름과 흘수사이의 관계를 추정하였다. 또한 최대 파력 에너지를 추출하기 위해 PTO 시스템으로 인한 추가 감쇠 계수를 부유체의 방사 감쇠 계수와 동일하게 지정하였다. 부유체의 운동응답 스펙트럼과 추출 파워 스펙트럼을 입사파 스펙트럼 침두 주파수의 변화에 따라 구하였다. 이를 통해, 가용 파 에너지 추출량의 침두 주파수가 입사파 스펙트럼의 침두 주파수보다 약 20% 클 때, 최대 파워 실효치를 갖는 것을 알 수 있었다.

Abstract – Parametric study on submerged body shape of an oscillating hemisphere point absorber was conducted to predict the optimal relation between radius and draft of the body. As an additional damping due to power take-off system, the optimal damping same as wave radiation damping was applied to the PTO system to produce the maximum wave power. Body response spectrum and power spectrum were obtained for various peak frequencies on wave spectra. It was found that the maximum power can be generated when the peak frequency of available wave power was 20% greater than that of wave spectrum.

Keywords: Point absorber(점 흡수식), Hemisphere(반구체), Power take-off(동력 인출장치), Peak frequency(침두 주파수), Response spectrum(운동응답 스펙트럼), Root mean square of power(파워 실효치)

1. 서 론

최근 지구 온난화와 이로 인한 이상 기후 문제를 해결하기 위한 이산화탄소의 배출 억제와 항구적인 에너지원에 대한 미래적 수요를 충족하기 위해 신재생 에너지에 대한 관심과 연구가 활발하게 진행되고 있다. 신재생 에너지원 중 파력 에너지는 지구상에 가장 많은 면적을 차지하는 해양에서 바람과 기압의 차이 등으로 발생하는 친환경 에너지원이며 고갈되지 않는 무한한 청정 에너지원으로서 유럽을 중심으로 활발한 연구가 진행 중이며, 삼면이 바다로 둘러

싸인 한반도의 특성상 우리나라에서도 미래적 에너지원 확보 차원에서 관심이 고조되고 있는 에너지원이다. 파력 발전 장치는 작동 원리에 따라 대체로 가동물체형, 진동수주형, 월파형 등으로 구분된다. 가동물체형 파력발전기는 해수면의 움직임을 부체의 동력전달 장치(PTO: Power take-off) 시스템에 직접 전달하는 방식으로 그동안 다양한 형상의 발전기 개발이 시도되어 왔다. 이 같은 발전 방식은 다른 방식에 비해 상대적으로 큰 에너지 효율을 가지지만, 파도의 외력에 발전기의 주요부가 직접 노출되어 구조물의 내구성 등의 문제를 해결해야 하는 단점을 가지고 있다(Hong [2012]). 점흡수식(Point absorber)은 가동 물체형 발전기중 가장 보편적인 방식으로 입사파장에 비해 작은 크기 부유체들의 파랑 중 운동응답을

[†]Corresponding author: wckoo@inha.ac.kr

이용하여 발전하는 방식이다. 이러한 점 흡수식 파력 발전 장치는, 입사파를 부유체의 운동에 의해 완벽하게 흡수 또는 반사할 수 있는 Salter's duck의 개념을 발전시켜, 1970년도부터 많은 연구가 진행되어 오고 있다. Evans[1976]는 이론해를 이용해 원형 실린더와 반구모양 부체의 운동 응답을 나타내었고, Budal and Falnes[1975]은 수학적 유도를 통해서 다양한 부체 형상에서의 에너지 추출 효율을 계산하였다. 이때 최대 상하 운동 응답을 얻기 위해 입사파의 주파수를 부유체 고유주파수에 맞추어 설계하였다. 또한, Budal[1977]과 Evans[1979]등은 다수의 점 흡수식 파력 발전 장치들 간의 상호작용을 이론적으로 연구하였다. 최근에, Cho and Kweon[2011]은 두 개의 수직 연결 원기둥 형태의 점 흡수식 선형 파력 발전장치를 고유함수 전개법을 이용하여 계산하였다. 이때, 최대 파력 에너지 추출을 위해, 원기둥 부유체의 수직운동 고유주파수를 입사파 속도 스펙트럼의 첨두 주파수(Peak frequency)보다 약 10% 크게 설계해야 함을 계산하였다. 또한, Kim et al.[2014]은 원기둥 부유체의 흡수 변화에 따른 추출 파워를 분석하였고, 이를 토대로 부유체의 흡수 결정은 수직운동 고유주파수가 파 속도스펙트럼 첨두 주파수 보다 약 15% 정도 클 때가 유리하다는 것을 밝혔다. 이는 최대 추출 파워를 가지는 원기둥 점 흡수식 파력발전장치를 설계할 때, 부유체 형상에 따른 최적의 조건이 존재함을 의미한다.

본 연구에서는 네덜란드의 Wave star(Hansen and Kramer [2011])와 유사한 형태의 반구형 점 흡수식 파력발전 장치의 최적 형상 설계를 위해 반구체의 흡수와 반지름 등 수면하 형상 조건에 따른 매개변수 계산을 수행하여 부유체의 수직운동 공진주기 및 운동 특성을 분석하였다. 부유체의 운동 해석을 위해 포텐셜 유동 기반의 주파수 영역 운동 해석 프로그램(WAMIT)을 사용하여, 유체 방사 문제(Radiation problem)의 계산을 통한 부유체 부가질량과 파랑 감쇠 계수를 산정하였으며, 산란 문제(Diffraction problem)를 통해 부체의 외력을 계산하였다. 또한, 최대 파 에너지 추출량을 계산하기 위해 첨두 주파수가 다른 입사파 스펙트럼을 적용하여 부유체 운동 응답 스펙트럼을 계산하고, 최대 추출 파력을 예측하였다. 이를 통해, 최적 형상의 반구형 부유체 고유주파수와 입사파 스펙트럼 첨두 주파수, 그리고 가용 파 에너지 추출량 첨두 주파수와의 관계를 파악하였다.

2. 수치 해석 모델 및 계산 방법

본 연구에서 파랑중 부유체 운동응답 계산을 위해 사용된 해양 유체 동역학 프로그램(WAMIT)은 속도 포텐셜을 이용하여 라플라스 방정식을 지배방정식으로 비점성 유체영역을 경계 요소법으로 계산하는 수치해석 도구이다(Lee and Newman[2012]). 또한, 본 프로그램의 사용 적합성과 계산 결과의 검증에 위해 이차원 수치파동수조 기법의 자체 프로그램을 독립적으로 사용하여 비교하였다. 이 수치 방법은 포텐셜 유동 계산의 경계요소법 기반 프로그램이지만, 파랑 그린 함수(Wave green function)법을 이용한 WAMIT과 달리 랭킨 소스(Rankine source)법을 이용하여 물체 표면뿐만 아니라,

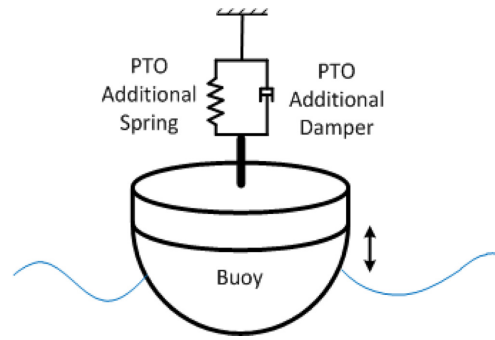


Fig. 1. Numerical model of hemisphere point absorber wave energy converter.

계산 영역 전체 경계면을 모두 포함하여 계산하기 때문에 해지면의 변화에 따른 부체 운동의 영향이나 시간 영역 해석을 통한 비선형 자유수면의 효과 등을 모두 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다 (Koo and Kim[2004]). 본 연구에서는 삼차원 유체동역학 프로그램의 계산 결과 검증을 위해 수평 실린더의 상하 운동 RAO(Heave RAO)를 계산하고, 실린더 길이가 증가함에 따라 이차원 수평 실린더 계산 값에 수렴하는지를 파악하여 본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램 계산해의 정확성을 검증하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 반구형 부유체 파력발전기의 수치 모델을 나타낸다. 반구체 형상에 따른 수직운동을 확인하기 위해 부유체 흡수(d)와 반지름(r)을 형상 매개 변수로 지정하고 각 계산 조건을 Table 1에 나타내었다. 부유체의 부가질량과 파랑 감쇠 계수를 계산하기 위한 방사문제에서 부유체의 강제 수직 운동 주파수의 범위를 0.1~10.1 rad/s로 하고 0.2 rad/sec 간격으로 계산하였다. 중심은 무한수심으로 고정하였다. 반지름 0.6 m, 흡수 0.3~0.6 m 인 반구체에 PTO장치를 수치 모델링하여 불규칙파에 대한 부유체 수직 운동응답과 파 에너지 추출량을 계산하였다.

PTO 시스템은 Fig. 1과 같이 일반적으로 추가감쇠력과 추가 강성력을 이용해서 나타낼 수 있다. PTO시스템의 감쇠 계수가 포함된 부유식 파력 발전기의 운동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$(M + m_a)\ddot{z} + (C + C_{PTO})\dot{z} + Kz = F \tag{1}$$

여기서, M , K 는 부유체 자체 질량과 수직 운동에 따른 강성 계수이고, m_a , C , F 는 부유체 수직 운동에 의한 부가질량과 파랑 감쇠

Table 1. Calculation conditions of various shapes of hemispheres

Various cases		
Radius (r) [m]	Draft (d) [m]	Mass [kg]
0.600	0.300	140.494
	0.400	233.052
	0.500	338.961
	0.600	451.098
0.300	0.300	56.1277
0.400		84.2213
0.500		112.376
0.600		140.494

계수, 그리고 부유체에 작용하는 외력을 나타낸다. C_{PTO} 는 PTO 시스템으로 인한 추가적인 감쇠계수를 의미한다. Evans[1976]와 Budal[1977]은 각각 이론해를 이용하여 최대 파 에너지 추출량을 갖는 추가 감쇠계수(C_{PTO})와 강성계수(K_{PTO})를 추정하였다 ($C_{PTO} = C$, $K_{PTO} = \omega^2(M + m_o) - K$). 하지만, 이 조건을 만족하기 위해서는 PTO에 의한 추가 강성계수가 경우에 따라 음수 또는 0이 될 수도 있기 때문에 PTO 시스템에 대한 본 연구의 수치모델링은 추가 감쇠력만을 이용하였다.

본 연구에서 사용한 반구형 부유체는 입사파 주파수 ω 와 같은 주파수로 조화 운동을 하기 때문에 구조물의 상하방향 변위를 $z = z_0 e^{i\omega t}$ 로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 부유체 운동으로 인한 시간평균 파워를 구하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{P}{A^2} = \frac{1}{2} C_{PTO} \omega^2 \left| \frac{z_0}{A} \right|^2 \quad (2)$$

여기서 P 는 시간평균 파워를 의미한다. 계산에서 입사파 진폭(A)는 1로 설정하였다. 또한, 불규칙파에 대한 부유식 파력 발전기의 운동 응답 및 이에 따른 파력 추출 계산을 위해 입사파 조건으로 PM 스펙트럼을 사용하였다. PM 스펙트럼은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{5}{16} H_{1/3}^2 \omega_p^4 \omega^{-5} e^{-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^4} \quad (3)$$

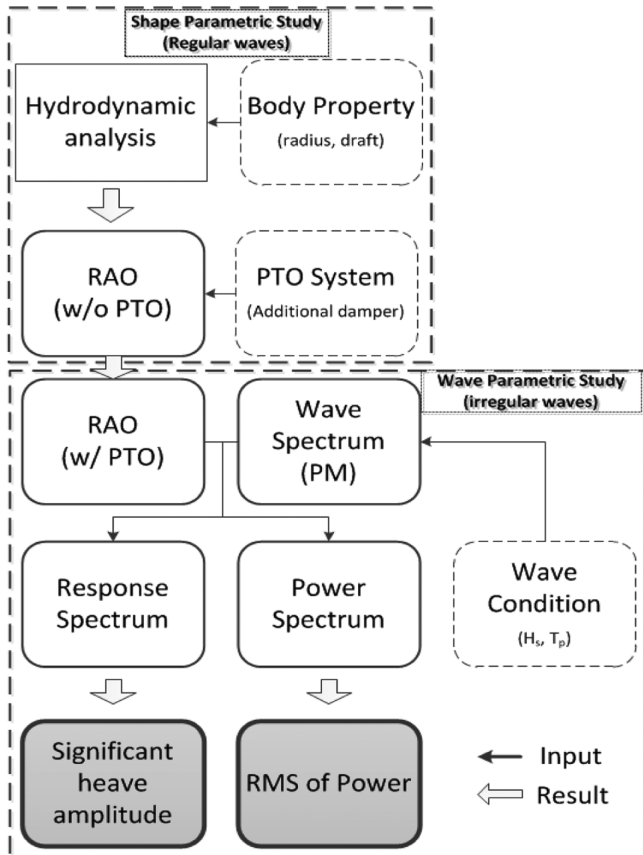


Fig. 2. Calculation procedure of wave power and body motion.

여기서 $H_{1/3}$ 과 ω_p 는 유의 파고와 침두 주파수(Peak frequency)를 나타낸다. 입사파 스펙트럼을 이용하여 부유체의 상하운동 응답 스펙트럼(식 4)과 추출 파워 스펙트럼(식 5)을 계산할 수 있고, 또 이를 이용하여 유의 진폭(Significant heave amplitude) (식 6)과 추출 파워 RMS(Root mean square) (식 7)를 구할 수 있다. 본 계산식들은 원형 실린더 형태의 부유식 파력 발전기의 효율을 계산한 Cho and Kweon [2011]과 동일한 계산 과정을 따랐다. Fig. 2는 본 연구의 전체적인 계산 과정을 도식화 하여 나타내었다.

$$S_z(\omega) = \left| \frac{z_0}{A}(\omega) \right|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega) \quad (4)$$

$$S_{\sqrt{P}}(\omega) = \left| \frac{P(\omega)}{A^2} \right| \cdot S_{\zeta}(\omega) \quad (5)$$

$$z_{a1/3} = 2 \sqrt{\int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega} \quad (6)$$

$$P_{RMS} = \int_0^{\infty} S_{\sqrt{P}}(\omega) d\omega \quad (7)$$

3. 수치 해석 결과 및 해석

본 연구에서 사용한 삼차원 수치 해석 프로그램의 결과 검증을 위해, 구조물의 모델 요소 수에 따른 계산 값의 수렴도를 확인하였다. Fig. 3는 지름 1.2 m, 홀수 0.6 m인 반구체를 이용하여 계산하였으며, 결과 비교에서 구조물의 요소 수가 약 192개 이상이면 상하 운동 RAO가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정밀한 계산 결과를 얻기 위해 모델 요소 수 300 개를 사용하여 계산하였다. 또한, Fig. 4에서 삼차원 반원 실린더의 상하운동 RAO를 계산하고 이를 이차원 계산 값과 비교하였다. 이는 반원 실린더의 길이 증가에 따라 이차원 결과 값과의 수렴도를 파악하기 위함이다. 반원 실린더의 지름은 1.2 m이고 길이가 10 m 일 때 실린더 양 끝단의 삼차원 효과가 거의 나타나지 않고 이차원 계산 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 계산 결과를 토대로 본 연구에서 사용한 유체 동역학 프로그램의 사용 적정성과 계산 결과의

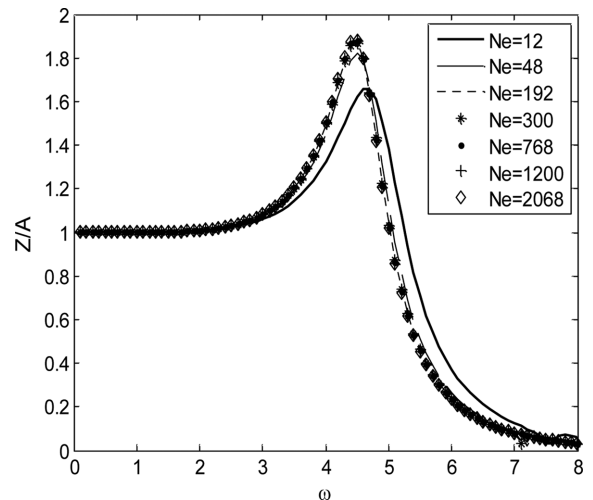


Fig. 3. Convergence test for the number of body elements.

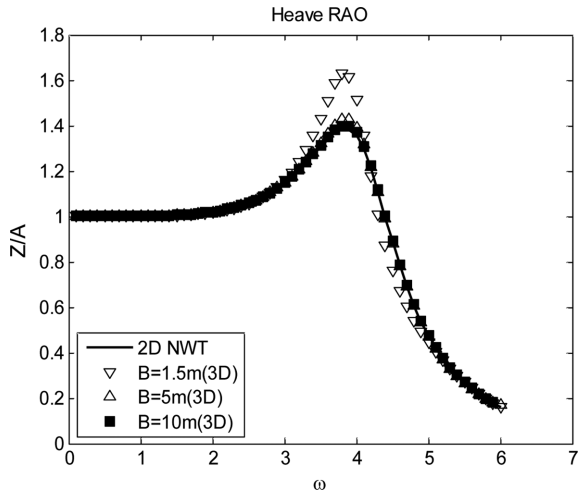


Fig. 4. Comparison of heave RAOs of a circular cylinder between 3D results (WAMIT) and a 2D results (NWT) (B : Breadth of circular cylinder).

정확성을 검증하였다.

Fig. 5(a)는 반지름이 고정된 상태($r=0.6$ m)에서 반구형 부유체의 다양한 흘수변화에 따른 상하 운동 응답의 비교이고, Fig. 5(b)는 흘수를 고정시키고($d=0.3$ m) 반지름을 변화시켜 계산한 상하 운동 응답을 나타내고 있다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 각각 반지름($r=0.6$ m)과 흘수가 고정된 상태($d=0.3$ m)에서의 파랑 감쇠 계수를 나타낸다. 부유체의 흘수가 감소함에 따라 질량이 감소하여 부유체의 수직운동 고유주파수는 점점 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 각 공진주파수에서의 최대 상하 운동 응답 값은 감소한다. 이는 Fig. 5(c)에 의하면 흘수가 감소함에 따라 파랑 감쇠 계수가 증가로 파랑 감쇠력이 대체로 증가하기 때문이다. 최소 흘수인 0.3m일 때는, 다른 조건에 비해 부체 질량과 침수 면적의 차이가 현격하기 때문에 파랑 감쇠력 변화에 차이가 있다. 따라서 본 연구의 반구형 부유체의 최대 상하 운동은 부유체 흘수가 반지름과 같을 때 나타난다. 또한, 흘수가 고정된 상태에서 부체 반지름이 증가하는 경우(Fig. 5(b))는 부체 수

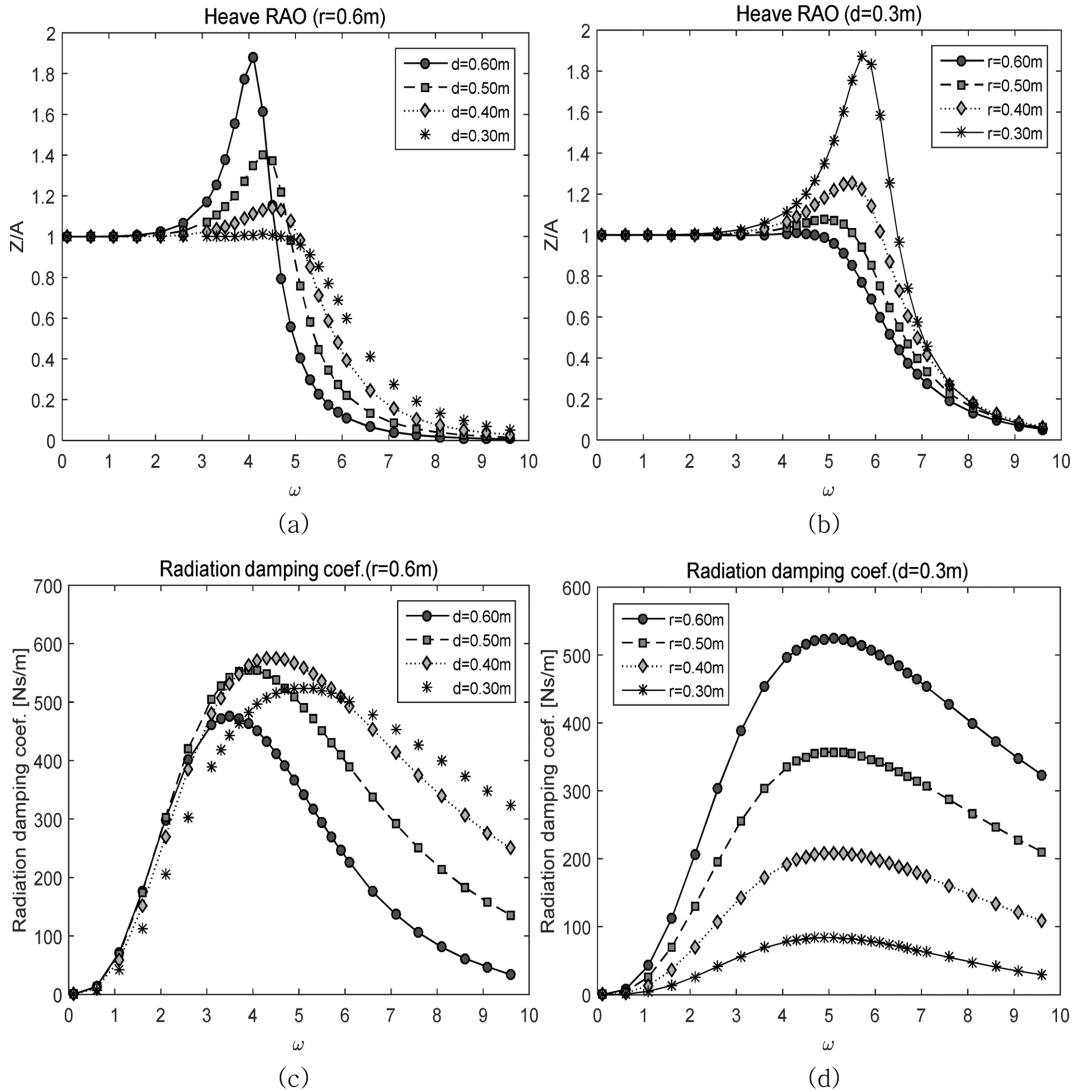


Fig. 5. Comparisons of heave RAOs and radiation damping coefficients for various radii and drafts of a hemisphere (a), (c) Various drafts with fixed radius ($r=0.6$ m), (b), (d) Various radii with fixed draft ($d=0.3$ m).

선면과 부유체 중심선과의 거리($r-d$)가 증가함을 의미한다. 이때 전체적인 상하 운동 응답은 감소하고 공진 주파수는 큰 변화가 없는데, 이는 Fig. 5(d)에서와 같이, 고정된 흘수에서 반지름의 길이가 길어짐에 따라 파랑 감쇠 계수가 증가하기 때문이다. 이와 같은 비교를 통해, 부유체 반지름에 대한 흘수의 상대적 크기에 따라 파랑 감쇠 계수가 변화하고 이로 인해 공진주파수에서 최대 상하 운동값이 변함을 알 수 있다. 이 현상을 좀 더 명확하게 밝히기 위해 Fig. 6에서 부유체 흘수와 반지름의 비(d/r)에 따른 상하운동 응답을 조사하였다. 흘수와 반지름이 같은 경우($d/r=1$), 공진주파수에서 상하운동의 최대값은 대체로 입사파 진폭의 1.8배인 것을 알 수 있고(Fig. 6(a)),

흘수와 반지름의 비가 작은 경우($d/r=0.8$), 그 크기가 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 흘수와 반지름의 비가 같은 경우 반지름의 크기와 무관하게 최대 상하 운동의 크기는 대체로 일치함을 의미한다. 또한, 두 경우 모두 반지름의 크기가 증가할수록 질량이 증가하므로 공진 주파수는 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)은 부유체에 설치된 PTO 시스템에 의한 추가 감쇠(C_{PTO})를 적용한 부유체 상하 운동 RAO와 이때 사용된 PTO 추가 감쇠 계수 값을 각 주파수별로 나타내었다. 여기서 PTO에 의한 추가 감쇠의 경우, 최대 에너지 추출 효율을 위해 방사 감쇠계수와 동일하게 적용하였다(Optimal damping, $C_{PTO}=C$). 추가 감쇠항의 영

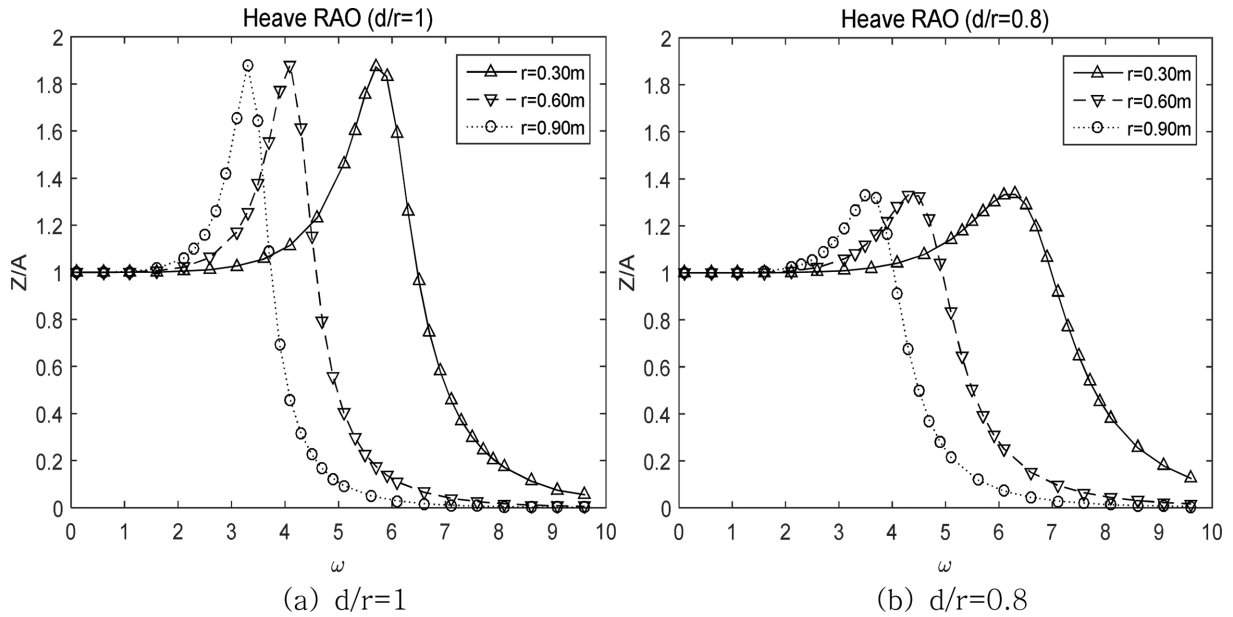


Fig. 6. Comparisons of heave RAOs for various ratios of draft to radius.

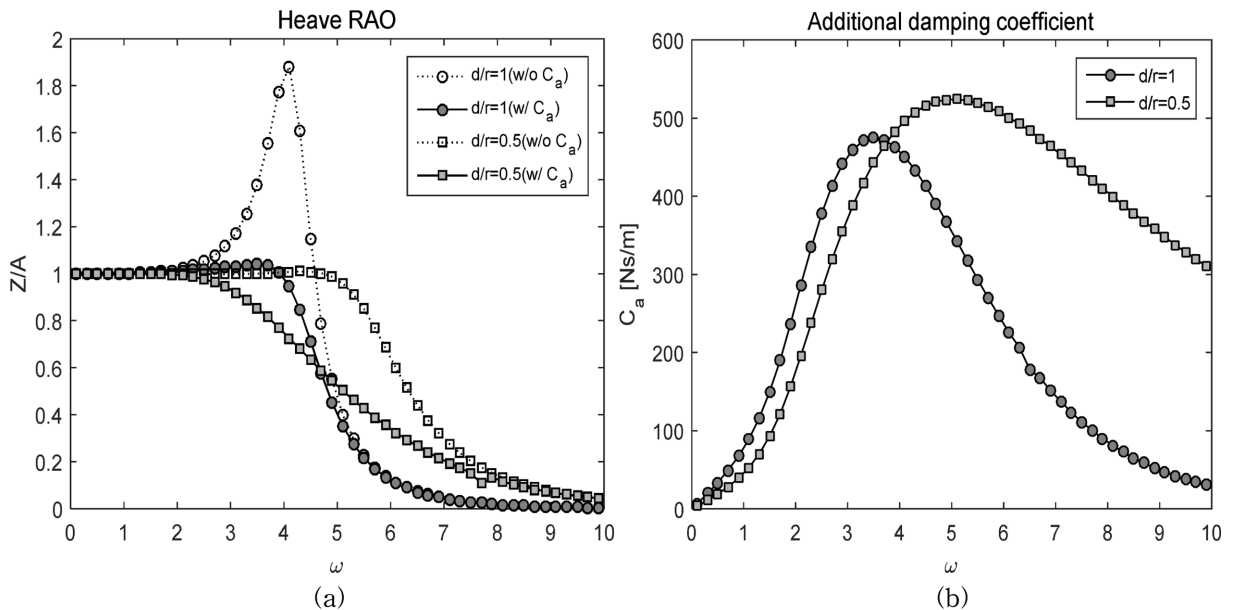


Fig. 7. Comparison of heave RAOs(a) with additional damping due to PTO system and additional damping coefficients on $r = 0.6\text{ m}$.

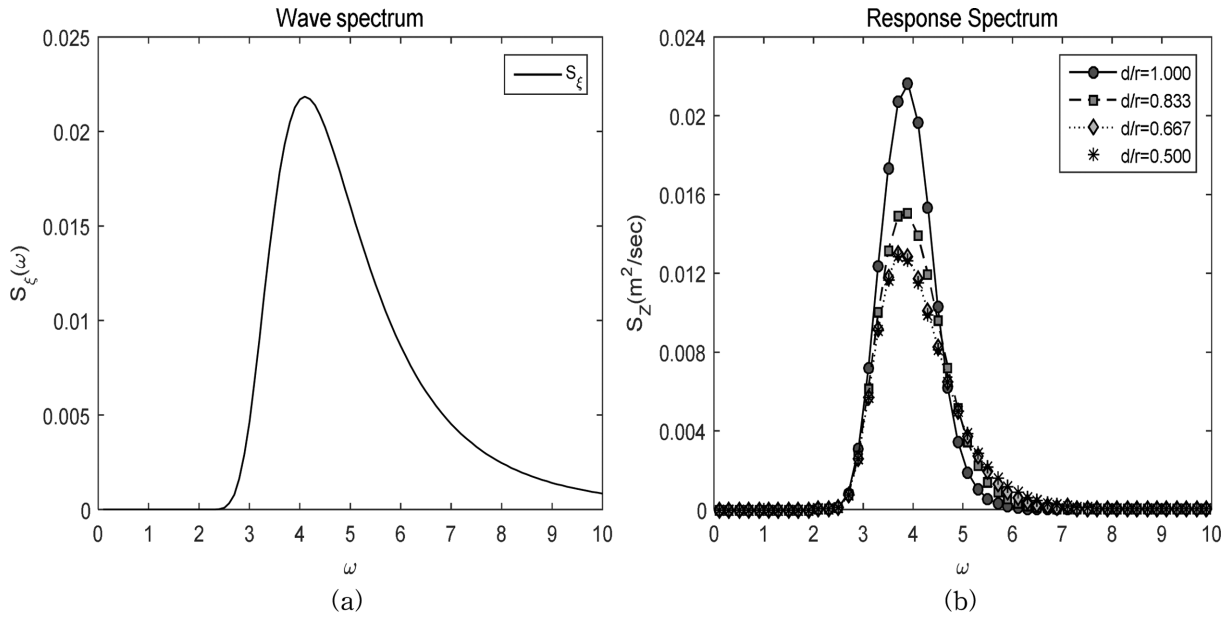


Fig. 8. Incident wave spectrum (PM spectrum) and response spectra on various body shape ratios ($\omega_p = 4.1$ rad/s, $H_s = 1.0$ m).

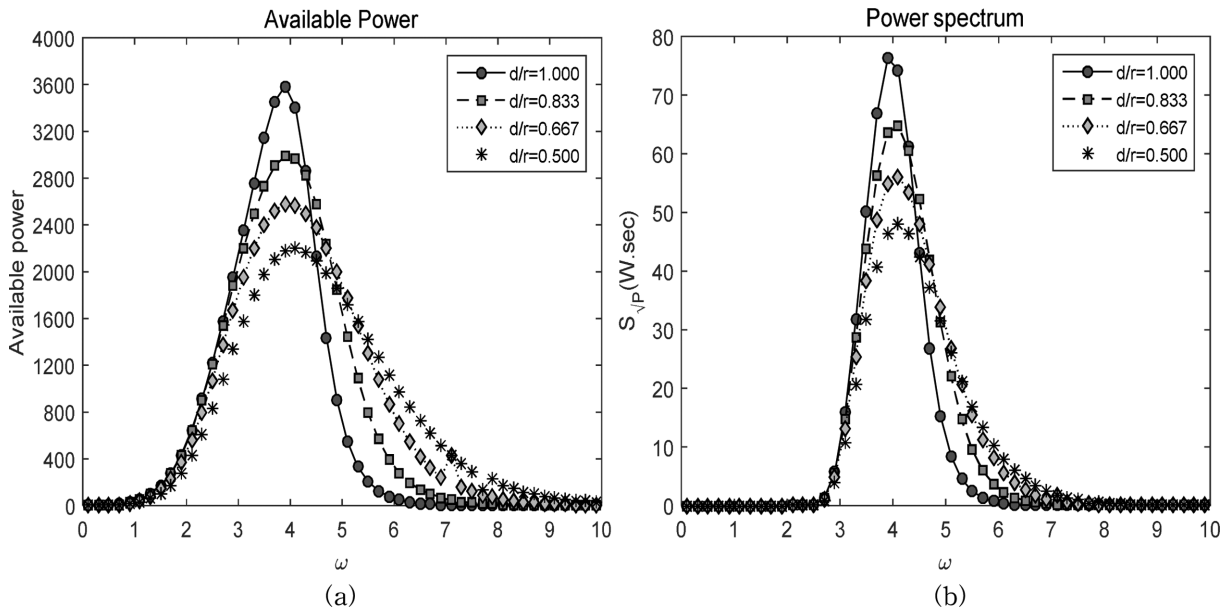


Fig. 9. Comparison of available powers and power spectra on various drafts ($r = 0.6$ m, $H_s = 1.0$ m, $\omega_p = 4.1$ rad/s).

향으로 공진주파수에서 상하운동 RAO가 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 공진주파수에서 흡수와 반지름 비가 1일 때 RAO가 입사파 진폭의 1.8배 정도였으나, PTO에 의한 추가 감소로 인해 RAO 최대값이 입사파 진폭과 거의 비슷한 수준까지 감소하였고, 공진현상이 전혀 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 목표 해역의 입사파 스펙트럼과 부유체 상하 운동 응답 스펙트럼을 나타내고 있다. 입사파 스펙트럼의 경우 H_s 가 1.0 m, ω_p 는 4.1 rad/s의 PM 스펙트럼이고(식 3), 반구형 부유체의 상하 운동 스펙트럼은 정규파에 대한 상하 운동 RAO(Fig. 7)와 입사파 스펙트럼(Fig. 8(a))을 이용하여 계산하였다. 불규칙파에 대한 부유체의 상하 운동 응답은 흡수와 반지름의 비(d/r)가 클수록 증가함을 알

수 있다. 또한 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수가 4.1 rad/s이나 운동 응답 스펙트럼(Fig. 8(b))의 첨두 주파수는 이보다 약간 작은 3.7~3.9 rad/s 으로 계산되었다. 이는 불규칙파의 파고가 낮아 파 스펙트럼의 값이 상대적으로 작고 응답 스펙트럼의 경우 RAO의 제곱에 입사파 스펙트럼을 계산하기 때문에 RAO의 영향이 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 PTO 시스템으로 인한 가용 추출 에너지양(시간 평균 파워)과 추출파워 스펙트럼을 부유체 각 형상비에 따라 식 (2)와 식 (5)을 이용하여 입사파 주파수별로 비교한 결과이다. Fig. 9(a)에서 부유체 흡수(d)가 증가함에 따라 최대 가용 추출 에너지양이 증가하지만, 첨두 주파수(ω_{p0})가 작아지며, 최대값을 갖는 주파수의 폭이

Table 2. Peak frequency and maximum value of available power on various shape ratios

Draft / Radius (d/r)	Peak frequency of available power (ω_{p0}) [rad/s]	Max. available power at ω_{p0} [W]
1.000	3.9	3585
0.833	4.0	2989
0.667	4.0	2584
0.500	4.1	2195

감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5(c)의 파랑 감쇠계수와 동일한 PTO 에너지 추출 계수를 사용하였기 때문에, 파랑 감쇠 계수 변화와 동일하게, 부유체 흡수 증가에 따라 첨두 주파수가 감소하고 그 폭이 작아지는 것으로 판단된다. 또한, 첨두 주파수에서 부유체 운동 응답은 흡수가 클수록 증가하기 때문에(Fig. 5(a)), 부유체 운동 속도의 제곱에 비례하는 최대 가용 에너지량은 오히려 증가함을 알 수 있다. Table 2는 가용 파 에너지가 최대가 되는 첨두 주파수(ω_{p0})와 그 때의 가용 에너지 값을 나타내었다. 식 (5)에서 가용 파 에너지와 입사파 스펙트럼을 이용하여 구한 추출파워 스펙트럼은 전체적으로 Fig. 8(b)의 운동응답 스펙트럼과 비슷한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 시간 평균 파워의 영향이 입사파 스펙트럼의 영향보다 크기 때문이다.

Fig. 10은 부유체 운동 응답 스펙트럼과 추출파워 스펙트럼을 이용하여 부유체의 유의 진폭(z_s)(식 6)과 추출파워 실효치(RMS, P_s)(식 7)를 입사파 스펙트럼 첨두 주파수(ω_p)를 변화시켜가면서 계산하였다. x축은 최대 시간 평균 파워가 발생하는 첨두 주파수(ω_{p0})와 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수(ω_p)의 비로 나타내었다. 이는 PTO에 의한 추가 감쇠력이 부유체 고유진동수와 상하운동응답, 그리고 가용 파 에너지 추출량(시간 평균 파워) 등에 상당한 영향을 미치

기 때문에 추출 파워 실효치에 직접적인 영향을 미치는 가용 파 에너지량과 입사파 스펙트럼과의 관계를 확인하고자 함이다. 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수가 증가함에 따라(ω_{p0}/ω_p 감소) 부유체의 유의 진폭은 대체로 감소하지만 흡수와 반지름 비가 1인 경우를 제외하면 흡수에 대한 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 10(a)). 이는 PTO의 추가 감쇠력으로 인해 고주파수 영역에서의 상하 운동 응답 또한 매우 작기 때문이다. 추출 파워 실효치 (Fig. 10(b))는 대체로 d/r 비가 클수록 증가하고, ω_{p0}/ω_p 가 1.2일 때 최대 파워 실효치를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 가용 파 에너지(Fig. 9(a))의 경우 분포가 협대역이고 입사파 스펙트럼의 경우 첨두 주파수를 기준으로 고주파수 영역이 저주파수보다 더 큰 면적(에너지)을 가지기 때문에, 입사파의 첨두 주파수가 가용 파 에너지 추출량의 첨두 주파수보다 약간 작게 설정하여 더 많은 파 에너지를 가지는 고주파수 영역과 적절하게 조합될 때 최대 파 에너지를 추출할 수 있음을 의미한다. 이를 통해 PTO 시스템의 최대 에너지 산출 조건은 가용 파 에너지 추출량의 첨두 주파수(ω_{p0})를 기준으로 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수(ω_p)가 약 20% 작을 때 발생함을 알 수 있다. 또한 파워 실효치의 경우 흡수와 반지름의 비가 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있는데 ω_{p0}/ω_p 가 0.9 이상에서 흡수비가 클수록 큰 파워 실효치를 가짐을 알 수 있었다. 그러나 0.9 이하에서는 오히려 흡수비가 클수록 파워 실효치가 작아지는 현상도 발생함을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 반구형 부유체 파력발전기의 최적 형상 설계를 위해서는 입사파 스펙트럼 첨두 주파수와 시간평균 파워 첨두 주파수와의 최적 관계를 찾는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 11은 위의 Fig. 10의 계산에서 입사파 유의 파고의 변화에 따른 부유체의 유의 진폭과 추출 파워의 변화를 비교한 것이다. d/r=1인 경우, 파고 변화에 따른 부유체 유의 진폭과 추출 파워는 Fig.

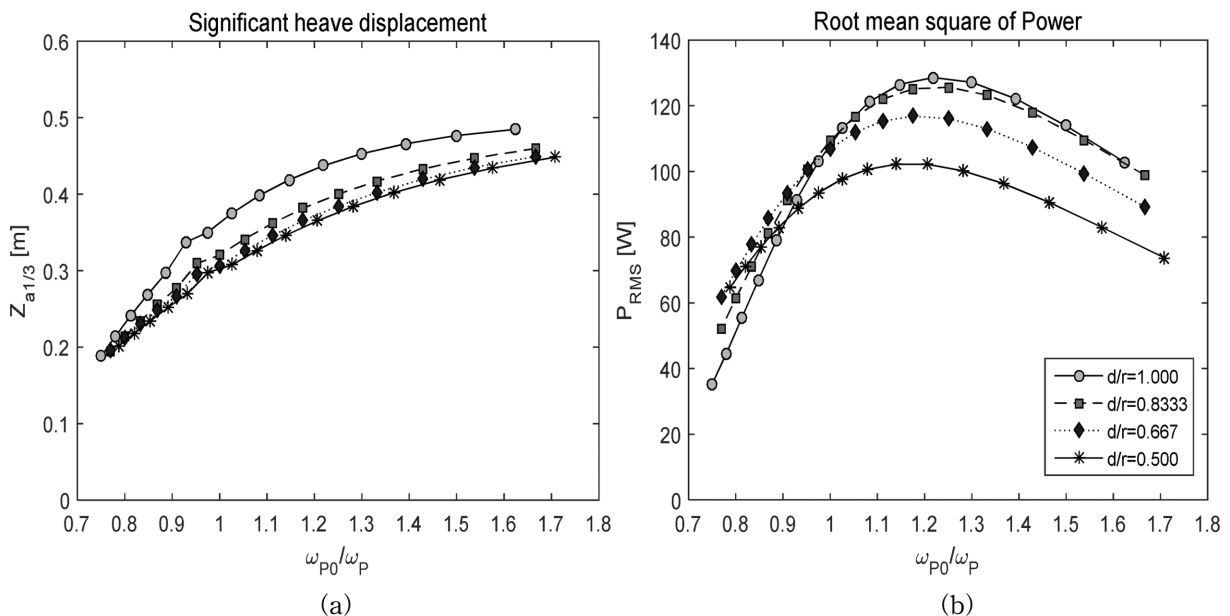


Fig. 10. Comparison of significant heave amplitudes and RMS of powers for various body shape ratios ($r = 0.6$ m, $H_s = 1.0$ m).

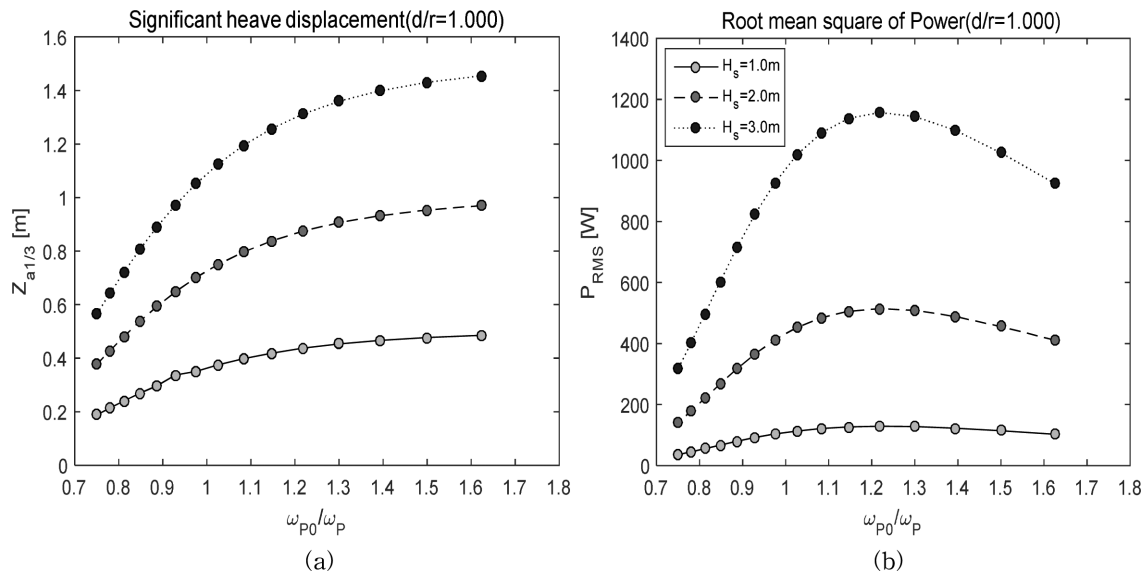


Fig. 11. Comparison of significant heave amplitudes and RMS of powers for various significant wave heights ($r = 0.6$ m, $d/r = 1.000$).

Table 3. Various ratios for the maximum wave power RMS

d/r	ω_0 / ω_{p0} for max. AP (available power)	ω_{p0} / ω_p for max. P_{RMS}	ω_0 / ω_p for max. P_{RMS}	Maximum P_{RMS} [W] ($H_s = 1.0$ m)
1.000	1.077	1.219	1.313	128.5
0.833	1.150	1.212	1.438	125.7
0.667	1.250	1.176	1.471	116.8
0.500	1.341	1.171	1.528	102.4

10의 경향과 거의 일치하며, 추출 파워의 최대값 역시 가용 에너지 추출량(시간평균 파워)의 첨두 주파수(ω_{p0})가 입사파 스펙트럼 첨두 주파수(ω_p)의 약 1.2배에서 최대가 됨을 확인 할 수 있다.

최대 에너지 추출을 위한 부유체 설계 조건의 용이한 적용을 위해, 부유체 공진주파수와 시간평균 파워 첨두 주파수, 그리고 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수를 Table 3에서 비교하였다. 시간 평균 파워 첨두 주파수와 입사파 스펙트럼 첨두 주파수의 비는 약 1.2로 홀수비에 따른 영향이 적지만, 부유체 공진주파수(ω_0)와 가용 파 에너지 추출량 첨두 주파수(ω_{p0})와의 비는 약 1.0~1.3배로 홀수비에 따른 영향이 크다. 이는 반구형 구조물의 특성상 홀수의 변화로 인해 유체동역학적 계수에 많은 영향을 주기 때문으로 판단된다. 결과적으로 부유체 공진주파수가 입사파 스펙트럼 첨두 주파수의 약 1.3~1.5배일 때 최대 파워 실효치를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 같은 결과 비교를 통해, 상하 운동하는 반구형 부유체 파력 발전 장치의 최적화 형상은 대상 해역의 파 스펙트럼 첨두 주파수 보다 약 30~50% 더 큰 공진 주파수에서 최대 에너지를 추출할 수 있는 파력발전 시스템을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 반구형 점흡수식 기동물체형 파력발전장치의 홀수와 반지름 등 형상 매개 변수에 대한 상하 운동 특성을 분석하였고, PTO에 의한 감쇠 효과를 최적 감쇠식($C_{PTO} = C$)를 이용하여 불

규칙파에서 최대 에너지 추출 조건을 계산하였다. 본 연구를 통해, 홀수와 반지름의 비가 1일 때 반구형 부유체의 최대 상하 운동 응답이 발생하고 홀수와 반지름의 비가 동일한 경우, 공진주파수 변화와 무관하게 최대 상하 운동 응답 값이 대체로 일치하는 것을 확인하였다.

PM스펙트럼을 적용하여 불규칙 파랑 중 반구형 부유체의 운동 응답 스펙트럼과 파워 스펙트럼을 계산하고 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수 변화에 따른 부유체 상하 운동 유의 진폭과 추출 파워 실효치를 비교하였다. 홀수비 증가에 따라 추출 파워 실효치는 증가하고, 최대 파워 실효치는 입사파 첨두 주파수가 가용 파 에너지(시간평균 파워) 첨두 주파수보다 약 20% 정도 작을 때, 또는 부유체 공진 주파수가 입사파 스펙트럼 첨두 주파수 보다 약 30~50% 더 클 때 발생함을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 반구형 부유체 파력 발전기의 최적 형상 설계를 위해서는 공진 주파수와 입사파 스펙트럼의 첨두 주파수, 그리고 시간 평균 파워 첨두 주파수와의 최적 관계를 찾는 것이 매우 중요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 과제입니다(2013T100200066). 또한, 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성).

References

- [1] Budal, K. and Falnes, J., 1975, "A resonant point absorber of ocean-wave power". *Nature*, Vol. 257, 478-479.
- [2] Budal, K., 1977, "Theory for absorption of wave power by a system of interacting bodies", *J. Ship Research*. Vol. 21, 248-53.
- [3] 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. ocean eng. and technology*. Vol. 25, No. 6, 9-16.
- [4] Evans, D.V., 1976, "A theory for wave-power absorption by oscillating bodies", *J. Fluid Mech.*, Vol. 77, 1-25.
- [5] Evans, D.V., 1979, "Some theoretical aspects of three-dimensional wave energy absorbers" *Proc. 1st Symp. on Ocean Wave Energy Util.*, Gothenburg, Sweden, Oct. 30 - Nov. 1.
- [6] Hansen, R.H. and Kramer, M.M., 2011, "Modelling and Control of the Wavestar Prototype", *The 9th European Wave and Tidal Energy Conf.*, Southampton, UK, Sep. 5-9.
- [7] Hong, K., 2012, "파력발전 국내외 기술현황 및 미래 전망; Current state and future development of technology of wave energy converter", *Pro. Joint Conf. KAOSTS.*, Daegu, Korea. May. 31-Jun. 1.
- [8] Kim, J.R., Bae, Y.H. and Cho, I.H., 2014, "Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator Part I. Design of a Wave Power Buoy", *J. KSMEE*. Vol. 17, No. 2, 146-152.
- [9] Koo, W. and Kim, M.H., 2004, "Freely floating-body simulation by a 2D fully nonlinear numerical wave tank", *Ocean Eng.*, Vol. 31, 2011-2046.
- [10] Lee, C.H. and Newman, J.N., 2012, "WAMIT User's Manual", Ver 7.0, WAMIT, Inc, MA, USA.

Received 26 June 2015

1st Revised 27 July 2015, 2nd Revised 19 August 2015

Accepted 20 August 2015