

## 점흡수식 파력발전장치의 초기 크기 설계에 관한 수치해석 연구

김병수 · 하윤진 · 박지용<sup>†</sup>

선박해양플랜트연구소 친환경해양개발연구본부 선임연구원

### Numerical Analysis on Initial Sizing of Point Absorber Wave Energy Converter

Byung-Soo Kim, Yoon-Jin Ha, and Jiyong Park<sup>†</sup>

Senior Researcher, Eco-friendly Ocean Development Research Division,  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 이중부유체 점흡수식 파력발전장치를 실린더 형상으로 단순화하여 국내 해역환경에 적합한 초기 크기 선정에 대한 해석을 수행하였다. 초기 크기를 선정하기 위해서는 발전량 및 에너지변환 효율, 경제성, 제작성, 공간 활용성 등 다양한 고려 요소가 있으나, 본 연구에서는 발전량 및 에너지변환 효율 측면에 집중하여 초기 크기를 선정하였다. 먼저, 규칙파 중 실린더의 직경 및 흘수 변화에 따른 발전량 및 에너지변환 효율 변화 추이를 확인하였다. 직경이 클수록 파랑에너지 흡수효율이 증가하였고, 흘수가 작을수록 발전량 측면에서 유리하였다. 또한, 국내 동해와 제주 해역 환경에서의 예상 발전량 및 에너지변환 효율을 산출하였다. 발전량은 동해가 더 높았으나, 에너지변환 효율은 제주 해역이 더 유리하였다. 추가로 상위 파랑에너지 조건에서의 예상 발전량을 추정하여 일반적인 상황에 대비하여 극한 상황에 요구되는 발전기 용량을 확인하였다. 마지막으로, 장치 제작비용을 고려한 적정 파력발전장치 크기를 제안하였다. 이를 통해 국내 해역환경에 적용이 가능한 점흡수식 파력발전장치의 초기 크기 선정하였고, 이를 활용하여 추후 세부적인 설계 최적화 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract** – In this study, a two-body point-absorber wave energy converter is simplified into a cylindrical shape to analyze the initial sizing suitable for the marine environments in Korea. When selecting the initial dimensions, various factors, such as power generation, energy conversion efficiency, economic feasibility, manufacturability, and spatial efficiency, should be considered. This study focused on power generation and energy conversion efficiency. First, the effects of cylinder diameter and draft on power generation and energy conversion efficiency are examined under regular wave conditions. As the diameter increased, the wave energy absorption efficiency improved, while a smaller draft was advantageous in terms of power generation. Additionally, the expected power generation and energy conversion efficiency are computed for the Korean marine environments. Although power generation was higher in the Donghae, energy conversion efficiency was more beneficial in Jeju region. Also, the expected power generation under extreme wave energy conditions was estimated to compare the change in generator capacity requirements for both typical and extreme scenarios. Finally, the size of wave energy converter is proposed considering the manufacturing costs. Through this process, the initial dimension of point-absorber wave energy converters applicable to Korean marine environments is established. Further detailed design optimization study could be made based on these results.

**Keywords:** Point absorber WEC(점흡수식 파력발전장치), Initial sizing(초기 크기 설계), Power absorption efficiency(발전효율), Estimated power(예상 발전량)

#### 1. 서 론

최근 지구온난화가 가속화됨에 따라 전 세계적으로 2050년 탄소 중립 달성을 목표로 하는 정책들이 제시되고 있다. 탄소중립을 달

<sup>†</sup>Corresponding author: jypark@kriso.re.kr

성하기 위해서는 현재의 에너지원을 신재생에너지로 대체하는 것이 핵심이며 해양에너지는 대표적인 신재생에너지 중 하나이다. IEA-OES 보고서(IEA-OES[2006])에 의하면 전세계 해양에너지 부존 잠재량은 약 93,100TWh/년으로 추정하고 있으며 파력에너지가 약 8,000~80,000TWh/년 정도로 큰 비중을 차지하고 있다. 국내의 경우, 파력에너지 부존잠재량은 약 6,500MW 정도로 추산된다. 이에 따라 미래의 에너지원인 파력발전에 관한 연구가 지속적으로 필요한 실정이다(Choi *et al.*[2017]).

파력발전장치는 파랑에너지를 흡수하는 1차 에너지변환 방법에 따라 진동수주형(oscillating water column), 월파형(overtopping), 가동물체형(oscillating body) 파력발전으로 구분된다. 진동수주형 및 월파형 파력발전은 대규모 파력 발전을 목적으로 설계되는 반면, 가동물체형 파력발전은 소형화가 가능하기에 수중 감시 시스템 구축, 항로 부이 운용, 해상 통신 등과 같은 소규모 에너지를 요구하는 경우에 활용된다. 특히 점흡수식(point-absorber) 파력발전 방식은 가동물체형 파력발전 방식 중 가장 널리 활용되는 방식으로 국외에서는 이미 연구가 많이 진행 중이다(Beatty [2015]; Tao *et al.*[2021]; Guo *et al.*[2022]; Azam *et al.*[2023]).

가동물체형 파력발전장치의 설계에 관한 연구들은 국내외에서 널리 수행되고 있다. De Backer[2009]에서는 슬래밍 현상, 스트로크, 제어력 등에 대한 제약 조건을 두고 실린더 크기 및 형상에 따른 파랑에너지 흡수량을 비교한 바가 있으며, Blanco *et al.*[2015]에서는 다양한 제약조건을 부여하고 유전알고리즘을 활용해 스페인 인근 해역에 대해 최적설계를 수행한 바가 있다. 이외에도 설계 변수에 따른 비용 변화를 고려한 최적설계 연구(Piscopo *et al.*[2017])나 주어진 파력발전장치에 대해 최적의 발전량을 보이는 해역을 선정하는 연구(Bozzi *et al.*[2013]) 등도 존재한다. 미국의 Ocean Power Technology(OPT)社は 점흡수식 파력발전장치 파워부이(PowerBuoy)를 설계하였으며(Mekhiche and Edwards[2014]), 미국 뉴저지 일대에서 실증시험을 수행한 바가 있다. OPT 사에서는 이런 연구결과를 바탕으로 실제로 파워부이(PowerBuoy) 시제품을 운용하고 있으며, 미 해군도 이에 큰 관심이 있다.

국내에서는 가동물체형 파력발전장치에 대한 연구개발이 아직 초기 단계에 있다. Kim *et al.*[2015]에서 반구 형태 점흡수식 파력발전 장치에 대해 설계변수에 따른 파워 스펙트럼을 비교한 바가 있다. Ha *et al.*[2021]에서는 Salter-duck 로터 기반의 파력발전장치의 비선형적인 운동특성을 연구한 바 있다. Yun *et al.*[2024]에서는 점성유체해석 도구와 다중동역학 해석도구를 연성하여 점흡수식 파력발전장치인 NREL RM3 모델의 발전량을 추정할 바가 있다. 한편, 국내 해역에서 실증시험을 수행하기 위해서는 국내 해역환경에 알맞은 점흡수식 파력발전장치를 설계할 필요가 있다.

본 연구에서는 실린더 형태의 점흡수식 파력발전장치에 대해 초기 크기 설계에 관한 연구를 수행하였다. 실린더의 직경 및 흡수 변화에 따른 1차 에너지변환 효율을 주파수영역 유체성능 해석 프로그램 AdFLOW를 통해 분석하였다. 국내 동해 지역과 제주 해역환경에서 발전량이 최대가 되는 최적의 에너지변환장치(Power Take-Off; PTO) 감쇠계수를 도출하고, 이를 바탕으로 예상발전량을 추정하였다. 최종적으로 파력발전장치의 면적대비 발전량 비교를 통해 국내 해역에서의 최적의 파력발전장치 크기를 선정하였다.

## 2. 해석 조건 및 방법

### 2.1 대상 모델 및 대상 해역

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 기존에 연구된 OPT社의 파워부이(PowerBuoy) 형태의 점흡수식 파력발전장치를 대상으로 초기 크기 설계를 진행하였다. 파워부이(PowerBuoy)는 상하운동을 통해 파랑에너지를 흡수하는 원환 형태의 부유체와 부유체의 운동을 구속시켜주는 스파로 구성된다. 스파의 경우는 하단부에 damping plate를 포함하고 있으며, 이는 스파의 공진 주기를 파랑 대비 상대적으로 긴 주기로 이동시키고, 점성감쇠 증가를 통해 스파 운동을 저감하는 목적이 있다. 본 연구에서는 스파 구조물이 고정된 상태를 가정하여 부유체 자체만의 초기 크기 설계에 대한 연구를 진행하였다. 원환 형태의 부유체가 단독으로 운동하는 경우 원환 내부 유동이 유체동역학계수값을 변화시켜 운동응답에 영향을 미친다. 하

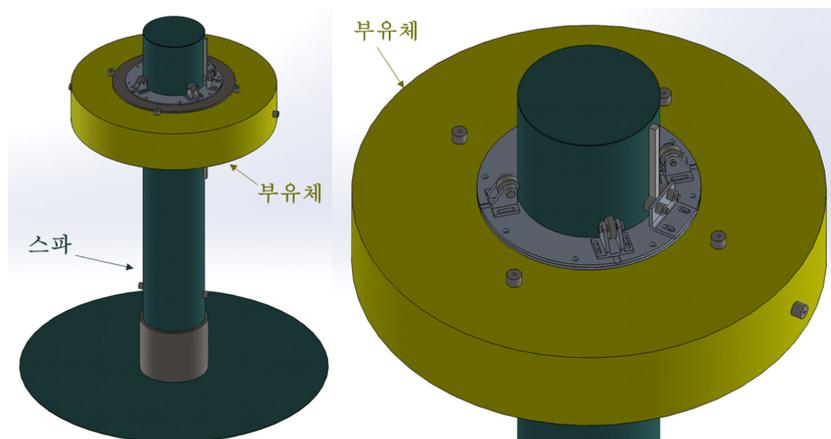


Fig. 1. PowerBuoy Wave Energy Converter (left), increased view of floater (right).

지만 파워부이(파워부이(PowerBuoy)는 스프 구조물이 중간에 위치하기 때문에 내부 유동에 의한 변화 값이 크지 않다고 가정하였다. 이에 본 연구에서는 원환 형태의 부유체를 실린더 형태로 단순화하여 해석하였다.

설계에 있어 실린더 형상은 직경( $D$ )와 흘수( $h$ )만을 설계변수로 가지며, 본 연구에서는 기존 부이의 크기를 토대로 두 설계변수의 범위를 선정하였다. 직경은 0.5[m] 간격으로 2.0~4.0[m] 범위, 흘수는 0.05[m] 간격으로 0.4~0.6[m]의 범위의 초기 크기를 고려하였으며, 질량 및 관성변수들은 설계변수 변화에 맞게 수정하였다. 동해는 울산 인근 해역, 제주는 제주 서쪽 선박해양플랜트연구소 파력시험장 인근 해역 지역을 대상 해역으로 선정하였다. 두 해역 각각에 대해 기존에 확보된 파 빈도분포표(wave scatter diagram)를 활용하였다. 수심은 본 대상모델을 추후 외해에 설치하는 것을 목표로 하고 있기에 깊은 수심(deep sea) 조건을 가정하였다.

## 2.2 해석기법

점흡수식 파력발전장치의 설계안 평가를 위해서 설계변수 변화에 따른 규칙과 중에서의 발전량( $P_{abs}$ ) 및 에너지변환효율( $\eta_{abs}$ )을 이용하여 대상 해역에서의 발전량( $P_{wave,irr}$ )을 분석하였다. 규칙과 중 발전량 계산을 위해서는 부유체의 상하동요 운동응답( $z$ )이 필요하다. 상하동요 운동은 상하동요 운동이 선형적이고 다른 방향의 운동과 독립적이라는 가정하에 식 (1)의 운동방정식을 통해 계산할 수 있다. 여기서  $m$ 은 부유체의 질량,  $w$ 는 파랑의 각진동수,  $B_{PTO}$ 는 PTO 시스템의 감쇠계수이며, 계산에는 추가로 부유체의 부가질량계수(added mass coeff.,  $A_{33}$ ), 감쇠계수(damping coeff.,  $B_{33}$ ), 복원력계수(restoring coeff.,  $C_{33}$ ), 파랑기진력(wave excitation force,  $F_{ex}$ ) 등의 유체동역학적 계수들이 요구된다. 해당 유체동역학적 계수들은 자체프로그램인 AdFLOW를 통해 계산하였다. AdFLOW는 Choi *et al.*[2001]을 바탕으로한 Green 함수 기반 주파수 영역(frequency-domain) 해석 프로그램으로 이미 부유식 해양구조물 운동응답 해석에 널리 사용된 바가 있다(Ha *et al.*[2019]; Ha *et al.*[2021b]; Park *et al.*[2023]). 해당프로그램은 퍼텐셜(potential) 기법을 바탕으로 하기에 점성에 의한 효과는 고려되지 않는다. 한편, 파랑에 의한 힘( $F_{wave}$ )은 파랑의 각진동수에 따른 조화함수 형태( $F_{wave}(w) = F_{ex}e^{-im}$ )로 표현 가능하며, 이에 상하동요 운동도 같은 진동수의 조화함수 형태( $z(w) = z_0e^{-im}$ )로 표현된다. 이를 통해 상하동요 운동은 식 (2)와 같다.

$$(m + A_{33}(w))\ddot{z}(w) + (B_{33}(w) + B_{PTO})\dot{z}(w) + C_{33}z(w) = F_{wave}(w) \quad (1)$$

$$z_0 = \frac{F_{ex}}{-w^2(m + A_{33}(w)) - iw(B_{33}(w) + B_{PTO}) + C_{33}} \quad (2)$$

규칙과 중 발전량은 계산된 운동응답과 주어진  $B_{PTO}$  값을 통해 식 (3)으로 계산된다. 여기서  $A$ 는 파 진폭을 의미한다. 식 (2)와 식 (3)을 종합하면 규칙과 중 발전량은  $B_{PTO}$ 에 대한 함수이다. 이에 따라 각 규칙과 주기에 대해 발전량이 최대가 되는 최적의  $B_{PTO}$  값이

존재하며, 식 (4)와 같다. 해당 식에서 최적감쇠계수는 실린더의 유체동역학적인 계수에 대한 함수로 주어지기에, 실린더의 형상 크기 변화에 따른 영향이 반영된 최적값이다.

$$P_{abs}(w) = \frac{1}{2}B_{PTO}w^2 \left| \frac{z_0}{A} \right|^2 A^2 \quad (3)$$

$$B_{PTO} = \sqrt{B_{33}(w)^2 + \frac{1}{w^2}(-m + A_{33}(w))w^2 + C_{33}}^2 \quad (4)$$

파력발전장치에 입사되는 규칙파의 전체에너지 플럭스( $P_{wave}$ )는 단위길이당 파랑에너지 플럭스( $p_{wave}$ )와 파력발전장치 직경의 곱으로 계산된다. 규칙파의 단위길이당 파랑에너지 플럭스는 깊은 수심 조건에서 식 (5)로 주어지며, 여기서  $\rho$ 는 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $c_g$ 는 군속도(group velocity),  $k$ 는 파수(wave number),  $T$ 는 파랑 주기를 의미한다. 에너지변환효율은 식 (6)과 같이 입사된 에너지 대비 발전량으로 계산된다.

$$p_{wave}(w) = \frac{1}{2}\rho g A^2 c_g = \frac{1}{4}\rho g A^2 \frac{w}{k} = \frac{\rho g^2 A^2 T}{8\pi} \quad (5)$$

$$\eta_{abs} = \frac{P_{abs}(w)}{P_{wave}(w)} = \frac{P_{abs}(w)}{P_{wave}(w)D} \quad (6)$$

최종적으로, 대상 해역에서의 발전량 및 에너지변환효율을 계산할 수 있다. 실제 해상은 불규칙한 형태이기에 직접적인 해석이 어려우나, 선형성을 가정한 경우 규칙과 해석결과 중첩을 통해 계산할 수 있다. 불규칙파는 일반적으로 파랑스펙트럼(wave spectrum)이나 파 빈도분포표 등으로 표현되며, 본 연구에서는 파 빈도분포표를 활용하였다. 앞서 선형가정에 따라 불규칙과 중 발전량( $P_{wave,irr}$ )은 각 침두주기 및 유의파고에서의 발전량( $P_{wave,irr}(i, j)$ )의 합으로 계산된다. 여기서,  $T_e$ 는 에너지 주기(energy period),  $H_g$ 는 유의파고(significant wave height), 그리고  $i, j$ 는 각각  $i$ 번째 침두주기와  $j$ 번째 유의파고를 의미한다.  $P_{wave,irr}(i, j)$ 는 각 침두주기 및 유의파고에서의 파랑에너지 플럭스( $P_{wave,irr}$  식 (7))에 앞서 계산된 규칙파랑 중 에너지변환효율( $\eta_{abs}(i, j)$ ) 및 파랑빈도( $C(i, j)$ )를 곱하여 계산할 수 있다. 최종적으로 식 (8)과 같이 불규칙과 중 발전량이 계산된다.

$$P_{wave,irr}(w) = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e D}{64\pi} \quad (7)$$

$$P_{wave,irr} = \sum_{i,j} P_{wave,irr}(i, j) = \sum_{i,j} P_{wave,irr}(i, j) \eta_{abs}(i, j) C(i, j) \quad (8)$$

## 3. 해석 결과 및 분석

해석에 앞서 패널에 대한 수렴도 해석을 통해 수치해석 결과를 검증하였다. 해석에 사용된 패널의 모습은 Fig. 2와 같다. 직경 3.0[m], 흘수 0.5[m] 실린더에 대해 상하동요 운동응답을 비교하였으며, 해당 결과는 Fig. 3(a)과 같다. 패널이 약 200개 이상에서 운동응답 결과에 큰 차이가 없음을 확인하였으며, 본 연구에서는 패널 수 1400개 조건으로 계산을 수행하였다. Fig. 3(b)에는 사용된

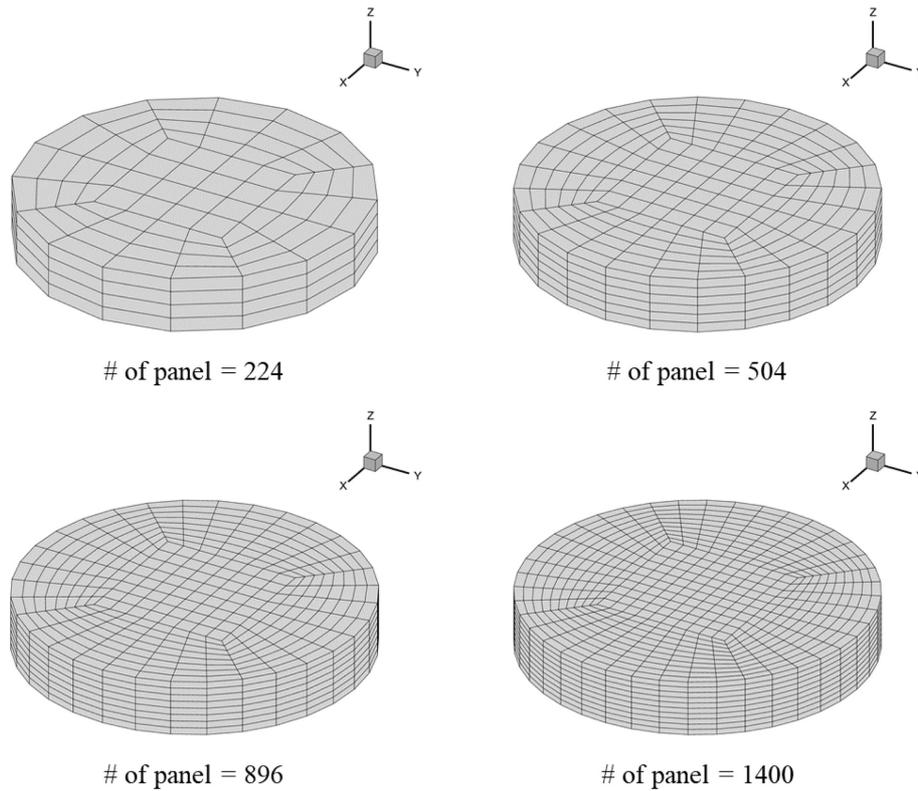


Fig. 2. Example Panel for AdFLOW simulation ( $D = 3.0$  [m],  $h = 0.5$  [m]).

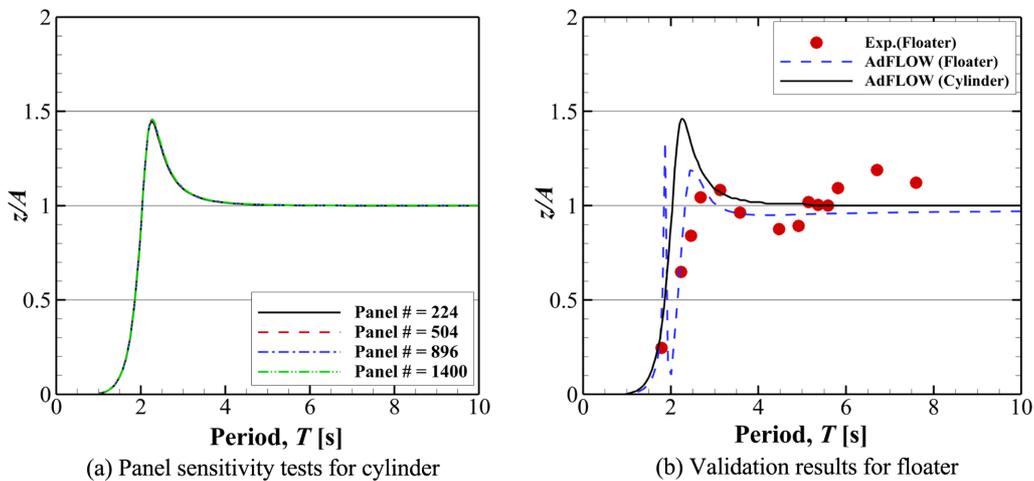


Fig. 3. Verification and validation results for AdFLOW program.

수치기법 검증을 위해 부유체의 운동응답을 모형시험 결과와 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 4에는 실린더 크기변화에 따른 패널 모습을 보여준다.

실해역에 대한 파력발전장치의 발전량 분석을 수행하기 위해 규칙파(regular wave) 중 실린더 직경 및 흘수 변화에 따른 운동성능 및 발전량의 경향성을 분석하였다. Fig. 5에는 직경 및 흘수 변화에 따른 실린더의 유체동역학 계수들과 PTO에 의한 감쇠계수가 없는 경우의 운동응답 특성을 나타내었다. Fig. 5의 (a)~(c)는 흘수 0.5[m]

에 대해 직경을 2.0[m]에서 4.0[m]까지 변화시킨 결과이며, (d)~(f)는 직경 3.0[m]에 대해 흘수를 0.4[m]에서 0.6[m]까지 변화시킨 결과이다. 직경이 증가함에 따라 부가질량계수( $A_{33}$ )의 증가량(Fig. 5(a))이 복원력계수( $C_{33}$ ) 증가량보다 크고 이에 따라 실린더의 상하동요 운동 공진주기가 장주기 방향으로 이동하는 경향(Fig. 5(c))을 확인할 수 있다. 직경이 증가함에 따라 감쇠계수( $B_{33}$ )도 증가하는 경향을 보이며, 이에 의해 공진 위치에서의 운동응답의 최대 진폭이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 흘수의 경우, 흘수가 증가함

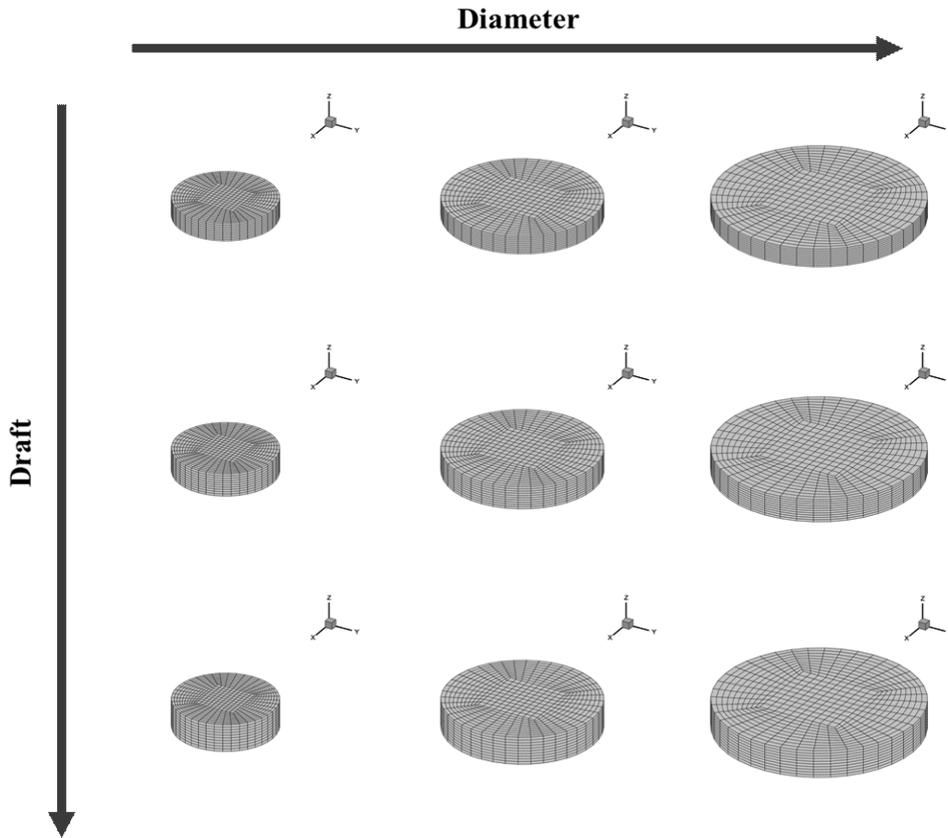


Fig. 4. Example panel for different cylinder sizes.

에 따라 운동응답의 공진주기는 장주기로 이동한다. 이는 흡수가 증가함에 따라 실린더 자체의 질량은 증가하지만, 실린더의 수선면적에 비례하는 복원력계수는 동일하게 유지되었기 때문이다. 감쇠계수는 감소하기 때문에 운동응답의 최대 진폭은 증가하는 경향이 나타났다.

PTO 시스템에 의한 감쇠계수를 반영한 결과는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 6에는 흡수 0.5[m]에 대해 직경 변화에 따른 최적 감쇠계수(Fig. 6(a)), 실린더 운동응답(Fig. 6(b)), 발전량(Fig. 6(c)) 및 발전효율(Fig. 6(d))을 나타내었다. 직경 증가에 따라 유체동역학적 계수의 증가량이 상대적으로 커지고, 결과적으로 최적감쇠계수 값이 증가하는 경향을 보인다. 직경에 따른 실린더의 운동응답 변화는 실린더 단독 운동응답(Fig. 5(c))과 동일한 경향을 보인다. 다만 PTO에 의한 추가감쇠의 영향으로 인해 기존의 실린더 단독 운동응답에 대비하여 운동응답의 최대진폭 값이 확연하게 줄어들며, 파랑 주기가 긴 경우에 대해서는 운동응답이 약 70% 수준임을 확인할 수 있다. 발전량의 경우 직경 증가에 따라 증가하였다. 발전량은 식 (3)과 같이 최적감쇠계수와 운동응답에 대한 함수이기에 최적감쇠계수의 증가에 의한 영향이 운동응답의 증가에 의한 영향보다 큰 것을 알 수 있다. 가장 큰 직경 조건인 4.0 [m]의 경우에는 파랑주기 약 4.5초에서 약 25 kW 정도의 최대 발전량을 보이며, 가장 작은 직경 조건인 2.0[m]의 경우에는 약 8 kW 정도의 발전량을 보인다. 실린더 크기에 의한 효과를 고려한 발전효율의 경우, 본 연

구에 사용된 직경 조건범위에 대해서 최대값 기준 약 40%~50% 정도의 효율을 보이며, 해당 효율은 유체 점성에 의한 효과와 PTO 시스템의 기계적 마찰력에 의한 효과가 고려되지 않은 효율이다. 발전효율의 최댓값은 직경이 작은 경우 가장 큰 값을 가지나, 직경이 증가할수록 장주기 파랑에너지 흡수 효율이 향상하는 것을 확인할 수 있다. 곧, 대상 해역 조건에 따라 최적의 효율을 보이는 직경 크기가 있음을 알 수 있다.

마찬가지로, Fig. 7에는 직경 3.0[m]에 대해 흡수 변화에 따른 최적감쇠계수(Fig. 7(a)), 실린더 운동응답(Fig. 7(b)), 발전량(Fig. 7(c)) 및 발전효율(Fig. 7(d))을 나타내었다. 흡수에 따른 PTO 최적감쇠계수의 경우 앞서 확인하였듯이 유체동역학적 계수가 약간 감소하나 그 변화가 크지 않기 때문에, 직경이 변할 때에 비하여 상대적으로 변화가 작다. 운동응답은 실린더 단독 해석과 동일하게 흡수가 증가할수록 공진주기에서 운동응답이 컸다. 발전량은 공진주기 부근인  $T = 2[\text{sec}]$ ~ $3[\text{sec}]$  부근을 제외한 대부분의 주기에서 흡수가 작은 경우 발전량이 최대 2% 더 많았으나 전반적으로 그 차이가 크지는 않았다.  $T = 2[\text{sec}]$  이전의 주기에서는 작은 흡수에서의 운동응답 크기의 영향으로 발전량이 더 많았으며,  $T = 3[\text{sec}]$  이후에는 운동응답의 영향보다는 최적감쇠계수의 크기에 의한 영향으로 작은 흡수에서의 발전량이 더 많았다. 공진주기 부근에서는 흡수 증가에 따른 운동응답 증가량의 영향이 컸으며, 이에 일시적으로 발전량과 발전효율이 증가하였다. 본 연구에 사용된 조건에서

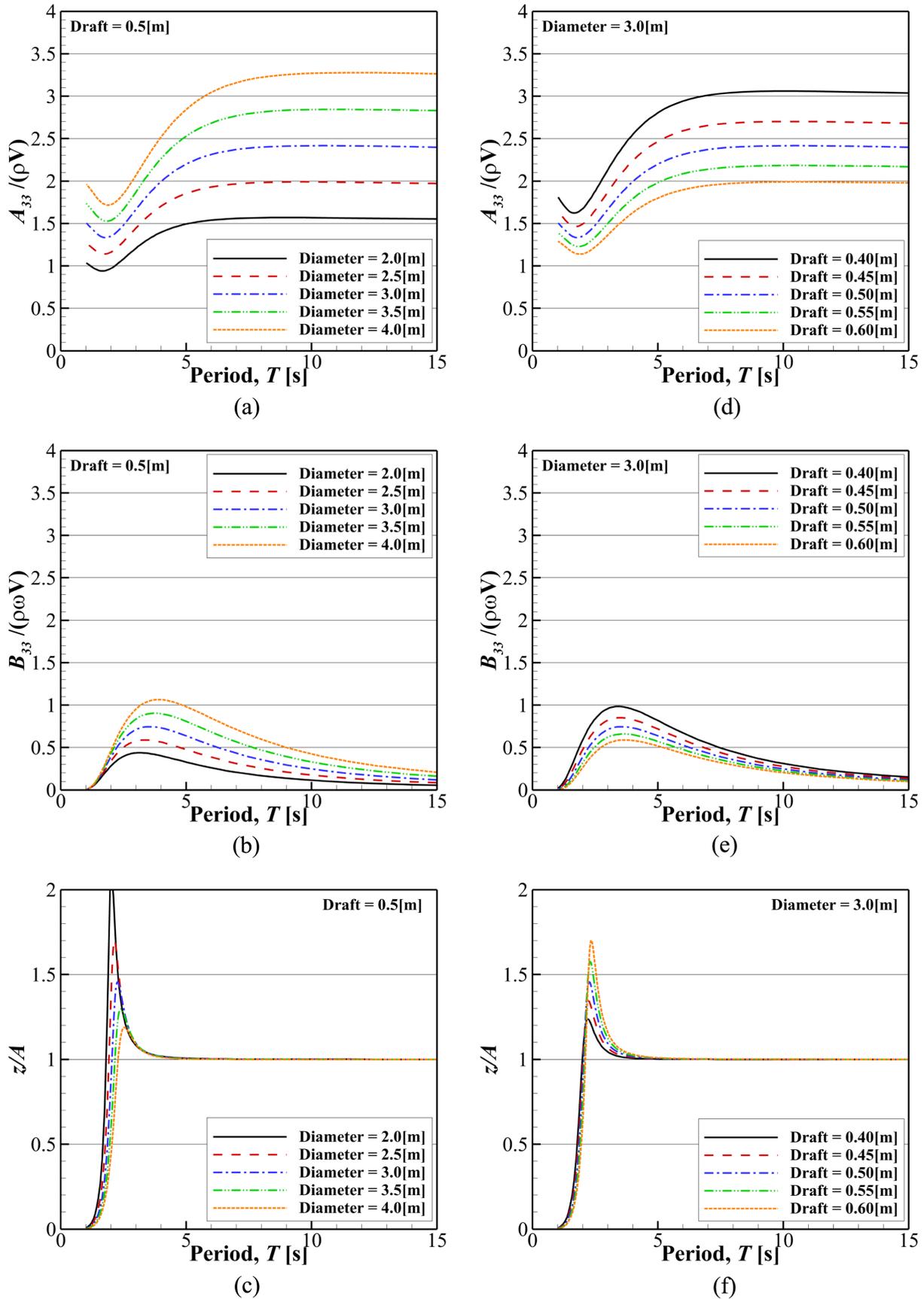


Fig. 5. Changes in hydrodynamic coefficients and motion response depending on cylinder diameter(draft = 0.5[m]) and draft(diameter = 3.0[m]).

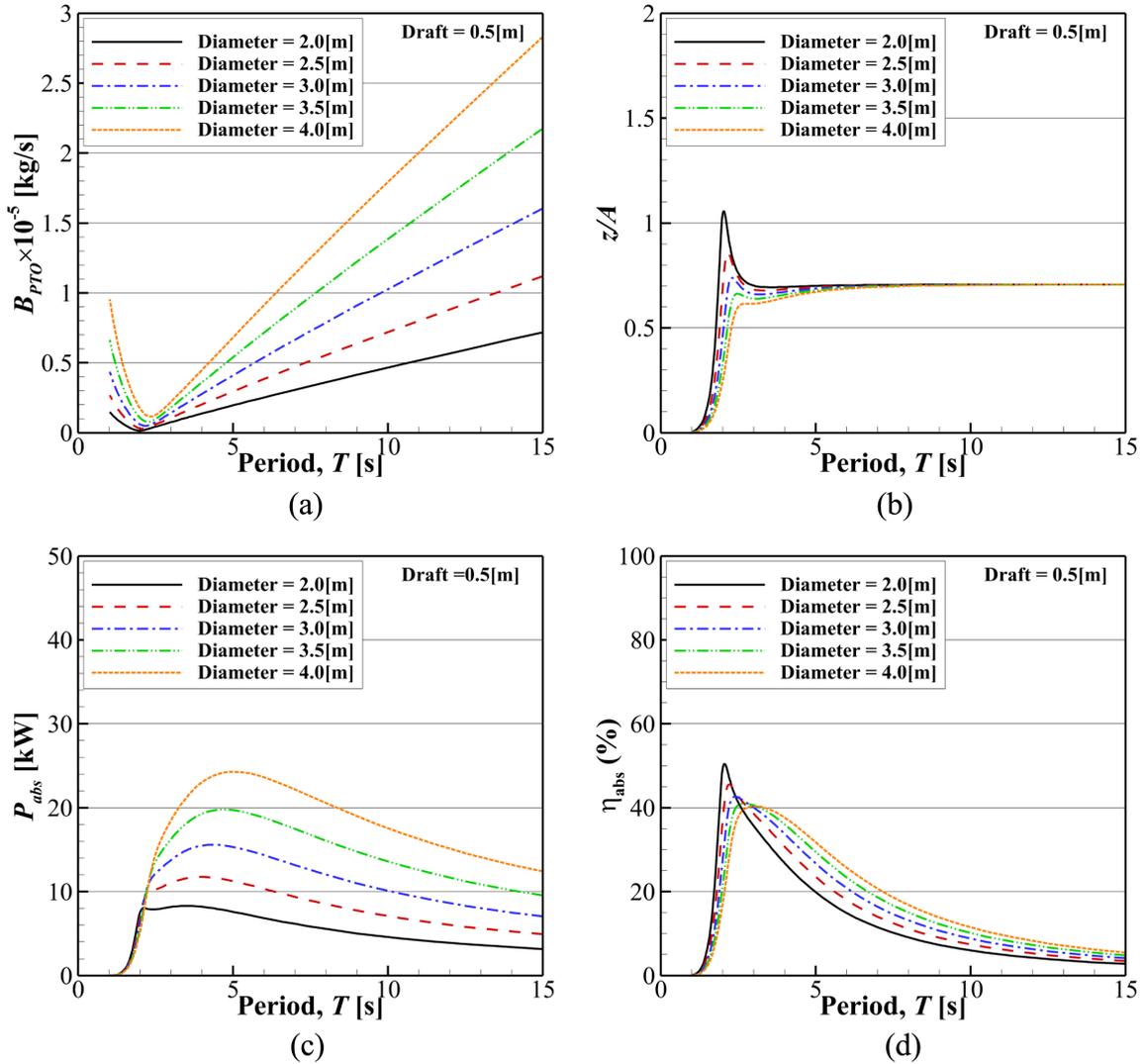


Fig. 6. Changes in (a) optimal PTO damping, (b) motion response, (c) power production, and (d) absorption efficiency depending on cylinder diameter (draft = 0.5[m]).

최대발전량은 약 16 kW 수준이며, 최대효율은 약 40~45% 정도 수준임을 확인할 수 있다.

최종적으로 실제 국내 해역환경에서 파력발전장치 크기 산정을 위한 발전량 계산을 수행하였다. 실린더 형상별 발전량 계산에 앞서, 고정된 PTO 감쇠계수를 적용한 경우의 발전량과 최적 PTO 감쇠계수 제어를 적용한 경우의 발전량을 비교하였다. 고정된 PTO 감쇠계수를 적용한 경우에는 발전량이 최대가 되는 최적의 PTO 감쇠계수( $B_{pto,opt}$ ) 값이 존재하며, 이에 따라 고정 PTO 감쇠계수 값의 범위는 파랑주기 2초에서 15초 구간의 규칙과 조건에 대해 유도되는 최적 PTO 감쇠계수(식 (4))의 최댓값 및 최솟값을 기준으로 변화시켜가며 최적값을 파악하였다. Fig. 8에는 직경 3.0 [m], 흘수 0.5[m] 실린더에 대해 동해 및 제주 해역에서의 고정된 PTO 감쇠계수 값에 따른 발전량 변화(Fixed  $B_{pto}$ )와 최적 PTO 감쇠계수 제어(Optimal  $B_{pto}$ )에 따른 발전량 값을 나타내었다. 고정 PTO

감쇠계수를 적용한 경우에는 최적 제어를 적용하였을 때의 발전량에는 도달하지 못하나, 이에 근접한 발전량을 보였다. 본 연구에서는 최적 제어를 가정하여 발전량을 추산하였다.

Table 1과 Table 2에는 본 연구에서 사용된 실린더 형상에 대해 각각 동해 및 제주 해역에서의 최대 발전량 및 발전효율 값을 나타내었으며, Fig. 9부터 Fig. 12까지는 해당 값을 그래프로 나타내었다. 도표 및 그래프를 통해 확인할 수 있듯이, 직경이 크고 흘수가 작을수록 발전량이 많고 발전효율이 높았다. 특히 흘수의 경우에는 해당 범위의 변화 내에서는 발전량에 큰 영향을 주지 않았다. 이는 규칙파에서의 경향과 동일한데, 불규칙파에 대한 해석이 앞서 규칙파 중 발전효율을 바탕으로 중첩하여 계산되었기 때문이다. 보다 실제에 가까운 해석을 위해서는 형상 변화에 따른 점성효과와 파고의 증가에 따른 비선형적인 운동응답 변화를 반영할 필요가 있다. 동해와 제주 두 해역에 대해서 발전량을 비교하면, 동해 해역

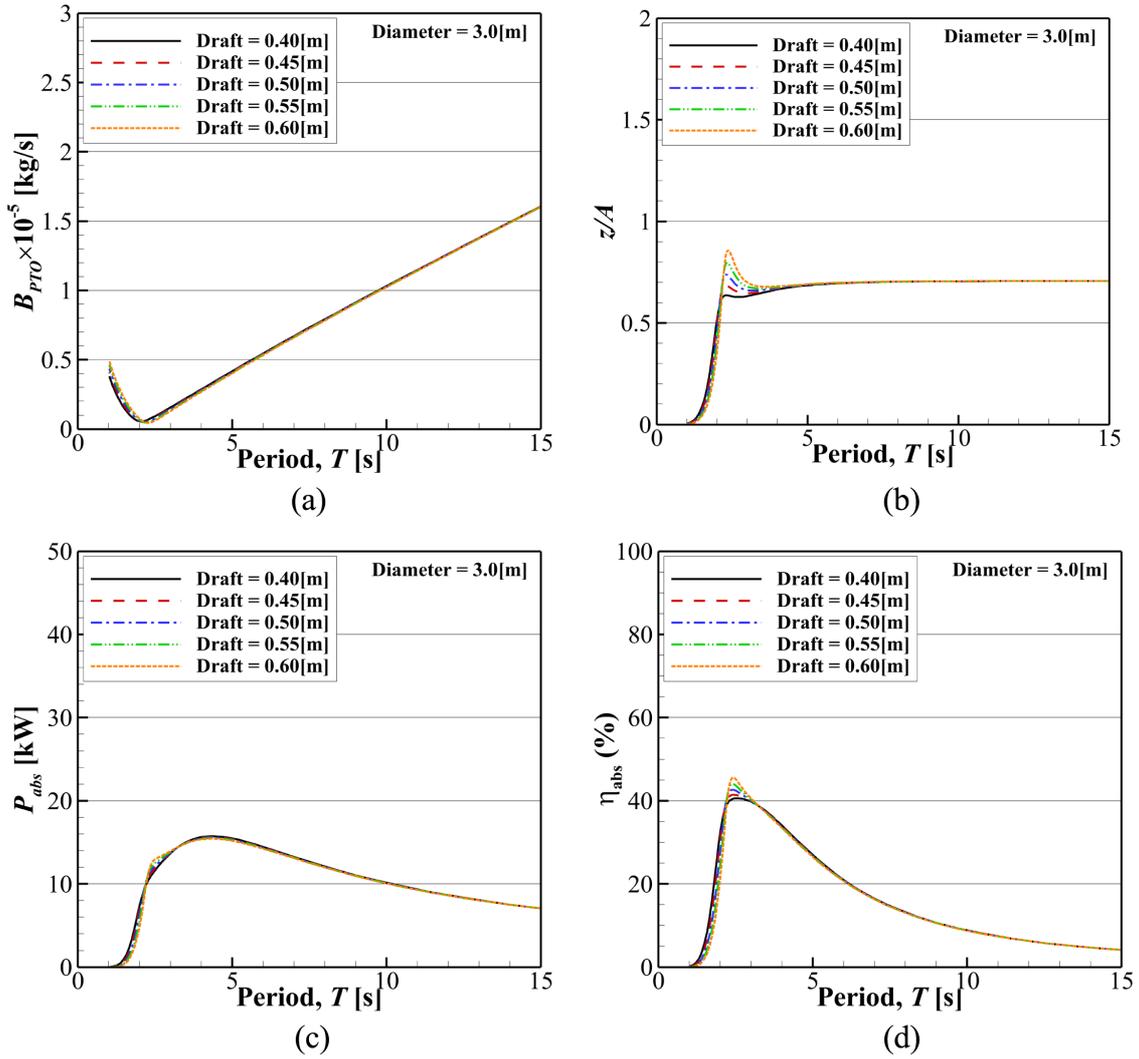


Fig. 7. Changes in (a) optimal PTO damping, (b) motion response, (c) power production, and (d) absorption efficiency depending on cylinder draft (diameter = 3.0[m]).

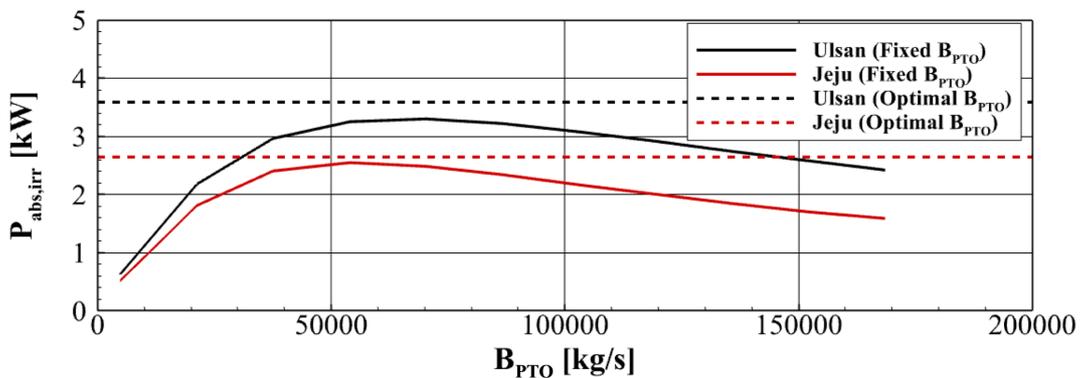


Fig. 8. Example of power absorption change depending on PTO damping.

이 제주 해역보다 약 30%가량 발전량이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 동해 해역에서 대파고 파랑의 빈도가 제주 해역보다 높아서 파랑에너지가 더 크기 때문이다. 한편, 발전효율 측면에서는

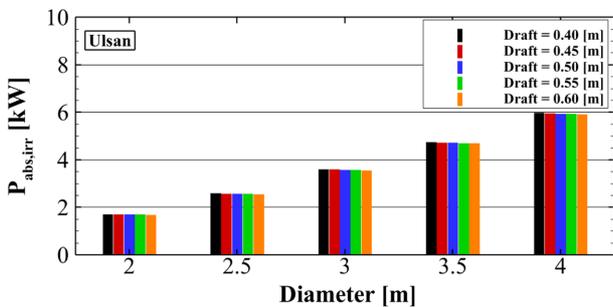
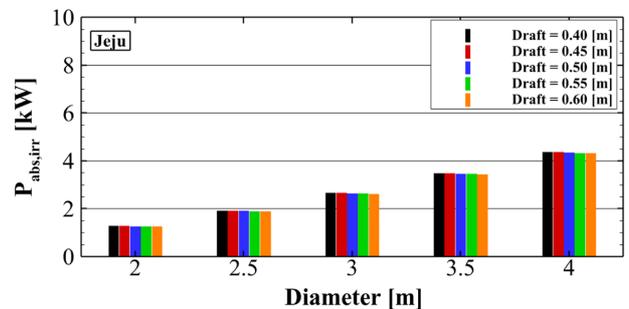
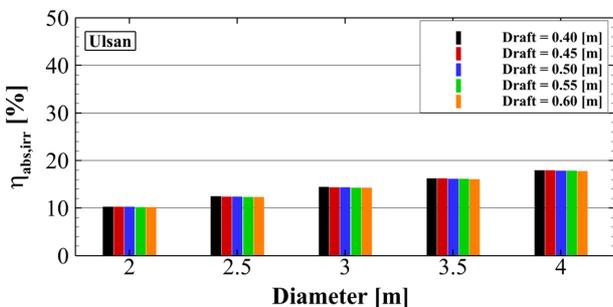
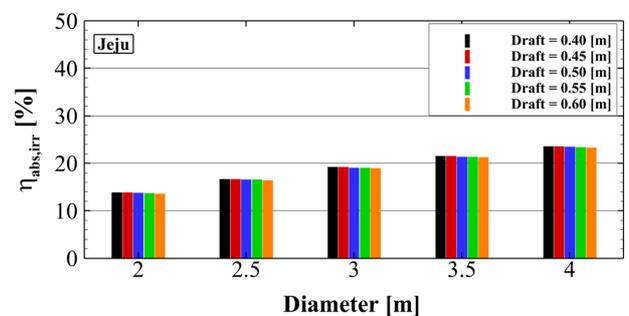
제주 해역에서의 효율이 약 4~5%가량 더 높았다. 이는 동해 해역에서의 파랑에너지가 더 큰 것에 대비하여 발전량이 크지 않다는 것을 뜻하며, 추가적으로 제주 지역에서의 파랑에너지 주기가 부유

**Table 1.** Power absorption [kW] and efficiency for different cylinder (Donghae, Optimal PTO damping)

	Diameter [m]					
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
Draft [m]	0.40	1.716 (10.32%)	2.591 (12.47%)	3.603 (14.45%)	4.736 (16.28%)	5.974 (17.97%)
	0.45	1.710 (10.29%)	2.583 (12.43%)	3.593 (14.41%)	4.723 (16.24%)	5.960 (17.93%)
	0.50	1.705 (10.25%)	2.575 (12.39%)	3.583 (14.37%)	4.711 (16.19%)	5.946 (17.88%)
	0.55	1.699 (10.22%)	2.567 (12.35%)	3.573 (14.33%)	4.700 (16.15%)	5.932 (17.84%)
	0.60	1.694 (10.19%)	2.560 (12.32%)	3.564 (14.29%)	4.688 (16.11%)	5.918 (17.80%)

**Table 2.** Power absorption [kW] and efficiency for different cylinder (Jeju, Optimal PTO damping)

	Diameter [m]					
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
Draft [m]	0.40	1.283 (13.89%)	1.928 (16.69%)	2.667 (19.24%)	3.484 (21.55%)	4.366 (23.62%)
	0.45	1.278 (13.83%)	1.920 (16.63%)	2.657 (19.17%)	3.473 (21.48%)	4.353 (23.55%)
	0.50	1.272 (13.77%)	1.913 (16.56%)	2.647 (19.10%)	3.461 (21.40%)	4.340 (23.48%)
	0.55	1.267 (13.71%)	1.906 (16.50%)	2.638 (19.04%)	3.450 (21.34%)	4.327 (23.41%)
	0.60	1.262 (13.65%)	1.898 (16.44%)	2.629 (18.97%)	3.439 (21.27%)	4.314 (23.34%)

**Fig. 9.** Power absorption [kW] for different cylinder (Donghae, Optimal PTO damping).**Fig. 11.** Power absorption [kW] for different cylinder (Jeju, Optimal PTO damping).**Fig. 10.** Efficiency [%] for different cylinder (Donghae, Optimal PTO damping).**Fig. 12.** Efficiency [%] for different cylinder (Jeju, Optimal PTO damping).

체의 공진 주기와 더 유사하여 상대적으로 운동 증가 효과가 더 크기 때문이다.

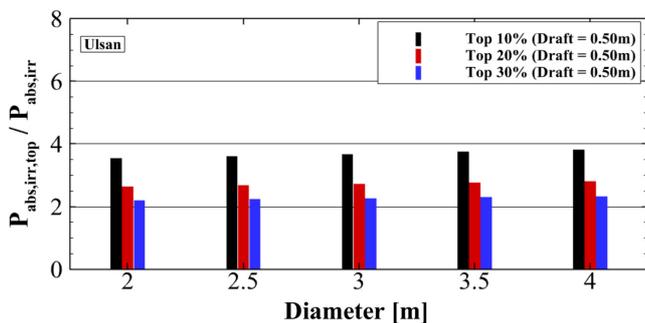
Table 3과 Table 4에는 각각 동해 및 제주 해역에 대해 상위 10%, 20%, 30%의 에너지를 가지는 파랑이 연속적으로 입사할 때의 받

**Table 3.** Power absorption [kW] from top 10%, 20%, and 30% wave energy depending on cylinder size (Donghae, Optimal PTO damping)

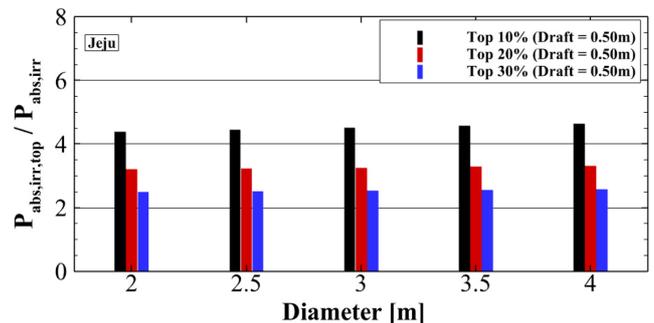
		Diameter [m]				
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Draft [m]	0.40	10%: 6.08	10%: 9.35	10%: 13.25	10%: 17.73	10%: 22.75
		20%: 4.53	20%: 6.95	20%: 9.81	20%: 13.10	20%: 16.76
		30%: 3.79	30%: 5.80	30%: 8.17	30%: 10.87	30%: 13.86
	0.45	10%: 6.07	10%: 9.33	10%: 13.22	10%: 17.69	10%: 22.71
		20%: 4.52	20%: 6.93	20%: 9.79	20%: 13.07	20%: 16.73
		30%: 3.78	30%: 5.79	30%: 8.15	30%: 10.84	30%: 13.83
	0.50	10%: 6.05	10%: 9.31	10%: 13.19	10%: 17.66	10%: 22.67
		20%: 4.51	20%: 6.91	20%: 9.77	20%: 13.04	20%: 16.69
		30%: 3.77	30%: 5.77	30%: 8.13	30%: 10.81	30%: 13.80
	0.55	10%: 6.04	10%: 9.29	10%: 13.16	10%: 17.62	10%: 22.62
		20%: 4.49	20%: 6.90	20%: 9.75	20%: 13.01	20%: 16.66
		30%: 3.76	30%: 5.76	30%: 8.11	30%: 10.79	30%: 13.77
	0.60	10%: 6.03	10%: 9.27	10%: 13.14	10%: 17.59	10%: 22.58
		20%: 4.48	20%: 6.88	20%: 9.72	20%: 12.98	20%: 16.62
		30%: 3.75	30%: 5.74	30%: 8.09	30%: 10.76	30%: 13.74

**Table 4.** Power absorption [kW] from top 10%, 20%, and 30% wave energy depending on cylinder size (Jeju, Optimal PTO damping)

		Diameter [m]				
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Draft [m]	0.40	10%: 5.63	10%: 8.58	10%: 12.03	10%: 15.93	10%: 20.22
		20%: 4.10	20%: 6.22	20%: 8.69	20%: 11.45	20%: 14.48
		30%: 3.19	30%: 4.84	30%: 6.74	30%: 8.88	30%: 11.21
	0.45	10%: 5.61	10%: 8.55	10%: 11.99	10%: 15.88	10%: 20.16
		20%: 4.09	20%: 6.20	20%: 8.66	20%: 11.42	20%: 14.44
		30%: 3.18	30%: 4.82	30%: 6.72	30%: 8.85	30%: 11.18
	0.50	10%: 5.60	10%: 8.53	10%: 11.96	10%: 15.84	10%: 20.11
		20%: 4.07	20%: 6.18	20%: 8.63	20%: 11.39	20%: 14.40
		30%: 3.17	30%: 4.80	30%: 6.70	30%: 8.82	30%: 11.14
	0.55	10%: 5.58	10%: 8.50	10%: 11.92	10%: 15.79	10%: 20.05
		20%: 4.06	20%: 6.16	20%: 8.60	20%: 11.35	20%: 14.36
		30%: 3.16	30%: 4.79	30%: 6.68	30%: 8.80	30%: 11.11
	0.60	10%: 5.56	10%: 8.47	10%: 11.89	10%: 15.75	10%: 20.00
		20%: 4.04	20%: 6.14	20%: 8.58	20%: 11.32	20%: 14.32
		30%: 3.15	30%: 4.77	30%: 6.66	30%: 8.77	30%: 11.08



**Fig. 13.** Normalized power absorption from top 10%, 20%, and 30% wave energy depending on cylinder diameter (Donghae, Optimal PTO damping).



**Fig. 14.** Normalized power absorption from top 10%, 20%, and 30% wave energy depending on cylinder diameter (Jeju, Optimal PTO damping).

전량을 나타내었다. Fig. 13과 Fig. 14에서는 홀수 0.5[m] 조건에 대해서 상위 파랑에너지 조건에 대해 계산된 발전량을 전체 파빈도분포표를 바탕으로 계산된 발전량 값(Table 1 및 Table 2의 값)으로 무차원화하여 그래프로 나타냈다. 동해해역에서의 상위 10%,

20% 및 30%의 파랑에너지 조건에 대한 발전량은 기존에 대비해 각각 3.8배, 2.8배 및 2.3배 증가하였다. 반면, 제주해역은 각각 4.6배, 3.3배, 2.6배 증가하였다. 해당 결과를 바탕으로 실제 실증 시에는 예상발전량에 대비하여 충분히 안전계수가 높은 발전기를 채

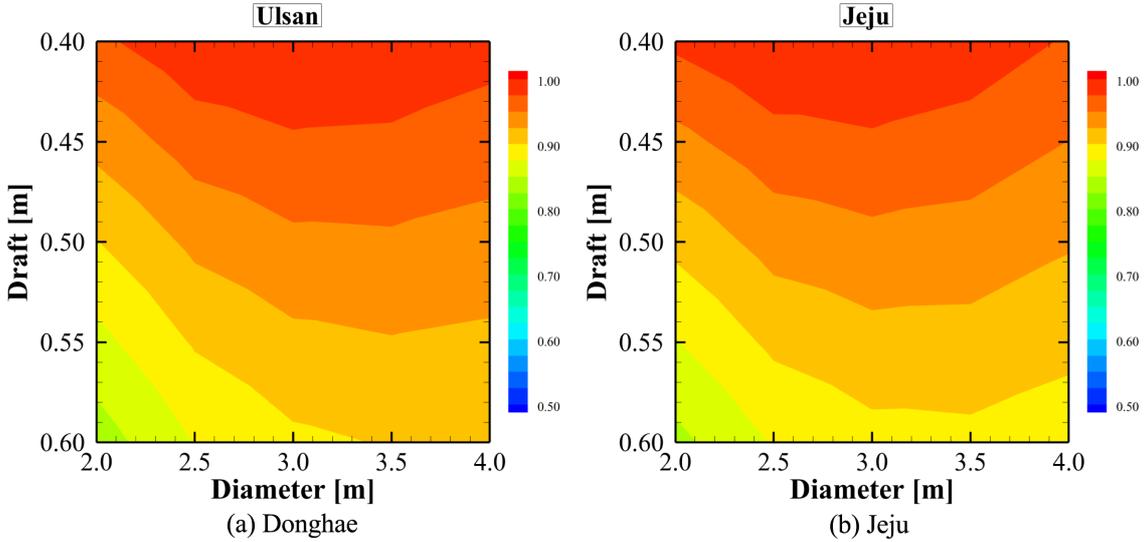


Fig. 15. Normalized power absorption per area depending on cylinder diameter.

택해야함을 확인할 수 있다. 한편, 직경이 증가할수록 무차원화된 발전량은 증가하는 경향을 보였으나, 큰 차이는 없었다.

발전량 및 효율측면에서는 부유체의 직경이 큰 것이 유리한 것으로 나타났으나, 실제 구조물의 비용적인 측면을 고려할 필요가 있다. 실린더 구조물이 철판으로 구성된 경우를 가정하면, 제작 비용은 실린더 구조물의 면적에 비례한다고 가정할 수 있다. 이를 통해 비용 대비 발전량을 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{P_{abs}}{\pi(D^2/2 + DT)} [\text{kW/m}^2] \quad (9)$$

Fig. 15에서는 동해 및 제주 해역에서 직경 및 흘수 변화에 따른 비용 대비 발전량을 최댓값 기준으로 무차원화하여 비교하였다. 직경의 경우, 직경이 작으면 발전량이 적으나 제작비용이 상대적으로 적고, 직경이 크면 발전량이 많으나 제작비용이 상대적으로 증가하기 때문에 비용과 발전량을 모두 고려하였을 때 최적이 되는 크기가 존재한다. 본 연구에 사용된 실린더 형상에 대해서는 두 해역 모두에서 3.0[m]인 경우 비용 대비 발전량이 최대인 것으로 나타났다. 흘수의 경우, 흘수가 증가함에 따라 발전량이 감소하고 제작 비용 또한 증가하기에 흘수가 작을수록 유리한 것으로 나타났다. 다만 흘수가 작은 경우에 대해서는 실린더 양쪽 끝단에서 비선형적인 현상이 발생할 것이기에 이를 위해서는 더 고도화된 해석기법이 요구된다. 이상의 해석을 통해 초기 설계 단계에서는 직경 3.0[m], 흘수 0.4[m]인 형상이 두 해역에서 가장 효율적임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이중부유체 점흡수식 파력발전장치의 부유체 부분을 실린더 형태로 단순화하여 국내 해역 조건에 적합한 초기 크

기 설계를 수행하였다. 먼저, 규칙과 중 설계변수인 직경과 흘수에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 실린더 직경이 작은 경우 발전효율의 최댓값은 가장 컸으나 직경이 큰 경우에 전반적으로 파랑에너지 흡수효율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 실린더 흘수는 작은 것이 발전량 측면에서 더 유리하나, 공진 주기 부근에서는 일시적으로 흘수가 더 큰 것이 유리한 것을 확인할 수 있었다.

다음으로, 동해 및 제주 해역에서 계측된 파 빈도분포표를 활용하여, 실린더 형상별로 두 해역에서 예상되는 발전량을 도출하였다. 발전량은 동해해역이 더 높으나 발전효율은 제주해역이 더 좋은 것을 확인하였으며, 규칙과 조건과 동일한 경향성을 확인할 수 있었다. 또한, 상위 파랑에너지 조건에 대해서 발전량을 추정하여 실제 실증 설계에 참고할 수 있는 값들을 제시하였으며, 상위 10% 파랑에너지에 대해서는 최대 4배이상의 발전기 용량이 필요한 것을 확인하였다.

마지막으로 비용적인 측면을 고려하여 최적의 효율을 보이는 실린더 크기를 선정하였다. 직경의 경우 최적의 효율을 보이는 값이 존재하였으며, 흘수의 경우 흘수가 작을수록 유리한 경향을 보였다. 초기 크기 설계 이후 연구에서는 스파와 부유체의 상대 운동에 의한 효과, 점성에 의한 효과, 파고 및 형상에 따른 비선형적인 운동 특성 변화 등을 고려하여 목표 발전량에 적합한 최적화된 설계값을 도출할 필요가 있다.

#### 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구(과제 번호: KRIT-CT-23-026, 미래 기술 적용형 통합수중감시 특화연구센터)이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Azam, A., Ahmed, A., Yi, M., Zhang, Z., Tan, X. Ali, A. and Li, N., 2023, A self-stabilizing point absorber wave energy converter with a top-shaped buoy and non-linear power take-off for oceanographic applications, *Ocean Eng.*, 288(1).
- [2] Beatty, S.J., 2015, Self-reacting point absorber wave energy converters, Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Univ. of Victoria, Canada.
- [3] Blanco, M., Moren-Torres, P., Lafoz, M. and Ramirez, D., 2015, Design Parameter Analysis of Point Absorber WEC via an Evolutionary-Algorithm-Based Dimensioning Tool, *Energies*, 8, 11203-11233.
- [4] Bozzi, S., Miquel, A.M., Antonini, A., Passoni, G and Archetti, R., 2013, Modeling of a Point Absorber for Energy Conversion in Italian Seas, *Energies*, 6, 3033-3051.
- [5] Choi, S., Park, Y., Lee, J., Nam, J. and Park, K., 2017, Renewable energy, find answer from ocean(신재생에너지, 해양에서 답을 찾자), KMI Trend Analysis Weekly Report, 41.
- [6] Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S., 2000, An analysis of second-order wave forces on floating bodies by using a higher-order boundary element method, *Ocean Eng.*, 28(1), 117-138.
- [7] De Backer, G., 2009, Hydrodynamic design optimization of wave energy converters consisting of heaving point absorbers, Ph.D. dissertation, Dept. Civ. Eng., Ghent Univ., Belgium.
- [8] Guo, B., Wang, T., Jin, S., Duan, S., Yang, K. and Zhao, Y., 2022, A review of point absorber wave energy converters, *J. Mar. Sci. Eng.*, 10(10), 1534.
- [9] Ha, Y.J., Park, J.Y., Shin, S.H. and Bae, Y.H., 2019, Evaluation of Generating Power in Low Wave Height for Asymmetric Rotor using Frequency Domain Analysis, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22(4), 253-261.
- [10] Ha, Y.J., Park, J.Y. and Shin, S.H., 2021a, Numerical study of non-linear dynamic behavior of an asymmetric rotor for wave energy converter in regular waves, *Processes*, 9(8), 1477.
- [11] Ha, Y.J., Kim, K., Nam, B.W. and Hong, S.Y., 2021b, Experimental study for characteristics of slamming loads on bow of a ship-type FPSO under breaking and irregular wave conditions, *Ocean Eng.*, 224.
- [12] IEA-OES, 2006, Annual Report 2006, Ocean Energy Systems.
- [13] Kim, S.J., Koo, W., Heo, K.-U. and Heo S., 2015, Numerical Study on Shape Optimization of a Heaving Hemisphere Wave Energy Converter, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18(4), 254-262.
- [14] Mekhiche, M. and Edwards, K.A., 2014, Ocean Power Technologies PowerBuoy<sup>®</sup>: System-Level Design, Development and Validation Methodology, in proc. of the 2<sup>nd</sup> Mar. Energy Technol. Symp., Seattle, WA, USA.
- [15] Park, B., Jung, S., Seo, M.G., Kim, J., Sung, H.G. and Park, J.C., 2023, Investigation of Low-Frequency Pitch Motion Characteristics for KRISO Standard Offshore Structure (K-Semi) Moored with a Truncation Mooring System, *J. Mar. Sci. Eng.*, 11(10), 1842.
- [16] Piscopo, V., Benassai, G., Della Morte, R. and Scamardella, A., 2017, Towards a cost-based design of heaving point absorbers, *Int. J. Mar. Energy*, 18, 15-29.
- [17] Tao, J., Hann, M., Greaves, D. and Shi, H., 2021, Numerical study of a point absorber wave energy converter with different power take-off systems, *Ocean Eng.*, 242.
- [18] Yun, S.M., Shin, H.S. and Park, J.C., 2024, Two-Way Coupling Simulation of Fluid-Multibody Dynamics for Estimating Power Generation Performance of Point Absorber Wave Energy Converters, *Energies*, 17(4), 930.

---

Received 14 December 2024

1st Revised 26 January 2025, 2nd Revised 10 February 2025

Accepted 11 February 2025