

# SPH 및 구조해석에 기반한 월파수류형 파력발전기 하부구조물 최적 설계

안성환\* · 이종현\*\*\* · 김근곤\*\*\* · 강동훈\*\*

\* 경상국립대학교 해양시스템공학과 박사과정, \*\* 경상국립대학교 해양시스템공학과 교수,

\*\*\* 경상국립대학교 해양시스템공학과 석사과정

## Optimal Design of Overtopping Wave Energy Converter Substructure based on Smoothed Particle Hydrodynamics and Structural Analysis

Sung-Hwan An\* · Jong-Hyun Lee\*\*\* · Geun-Gon Kim\*\*\* · Dong-hoon Kang\*\*

\* Ph. D Candidate, Dept. of Ocean System Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ

\*\* Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ

\* MS Candidate, Dept. of Ocean System Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ

**요 약** : OWEC(Overtopping Wave Energy Converter)은 월파된 파도를 이용한 파력발전시스템이라한다. OWEC의 성능 및 안전성은 파고, 주기 등 파도의 특성에 의해 영향을 받는다. 따라서 해역 특성에 따른 OWEC의 최적 형상과 구조안전성에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 울릉읍 연안 해양 환경 데이터를 이용하였으며, SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 입자법 해석을 통해 기존 케이슨 하부 구조에 변화를 준 모델 4개를 비교하여 월파 효율을 분석하였다. 그 결과, 하부 구조의 변경 및 경량화가 가능함을 확인하였다. 최적화 해석을 통해 설계 하중에 내하력을 가지는 하부 구조인 새로운 트러스형 구조를 제안하였다. 이후 부재 직경 및 두께를 설계변수로 하는 사례 연구를 통해 허용응력조건 하에서 구조 안전성의 확보를 확인하였다. 주기적인 파랑 하중을 받기 때문에 제안하는 구조의 고유 진동수와 해당 해역의 파주기를 비교하였으며, 1년 재현 주기의 파랑을 하중으로 한 조화응답해석을 수행하였다. 제안하는 하부 구조는 동일 가진력에서 기존 설계 대비 응답의 크기가 감소하였으며, 기존 대비 32% 이상의 중량 절감을 수행하였다.

**핵심용어** : 월파수류형 파력발전기, 에너지 효율, 입자기반 수치해석, 구조해석, 최적화설계

**Abstract** : OWEC (Overtopping Wave Energy Converter) is a wave power generation system using the wave overtopping. The performance and safety of the OWEC are affected by wave characteristics, such as wave height, period. To mitigate this issue, optimal OWEC designs based on wave characteristics must be investigated. In this study, the environmental conditions along the Ulleungdo coast were used. The hydraulic efficiency of the OWEC was calculated using SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) by comparing 4 models that changed the substructure. As a result, it was possible to change the substructure. Through design optimization, a new truss-type structure, which is a substructure capable of carrying the design load, was proposed. Through a case study using member diameter and thickness as design variables, structural safety was secured under allowable stress conditions. Considering wave load, the natural frequency of the proposed structure was compared with the wave period of the relevant sea area. Harmonic response analysis was performed using wave with a 1-year return period as the load. The proposed substructure had a reduced response magnitude at the same exciting force, and achieved weight reduction of more than 32%.

**Key Words** : Overtopping Wave Energy Converter, Energy efficiency, Smoothed Particle Hydrodynamics, Structural analysis, Design optimization

\* First Author : [tig01129@gnu.ac.kr](mailto:tig01129@gnu.ac.kr), 055-772-9190

† Corresponding Author : [gnujhlee@gnu.ac.kr](mailto:gnujhlee@gnu.ac.kr), 055-772-9194

## 1. 서론

2016년 파리기후변화협약을 통해서 주요 배출국들은 온실가스 배출량을 2030년까지 온실가스 25~65%까지 감축을 목표로 정하였다. 이에 따라 전세계적으로 석유, 석탄을 대신하여 신재생에너지 개발에 노력을 기울이고 있다. 신재생에너지의 종류 중 하나인 해양에너지는 활용 가능한 에너지의 종류는 다양하며 육상과 비교해서 대형, 대규모 단지 건설에 필요한 부지확보가 쉽고, 소음 및 자연환경 파괴 등의 문제점도 적다. 대한민국의 경우 바다와 접하는 곳이 많고 특히, 조력과 파력에서 각각 6,500MW, 해수온도차 발전에서 4,000MW, 조류 1,000MW 등 높은 잠재량을 보유하고 있다(Korea Maritime Institute, 2017).

파력발전기의 종류는 가동물체형, 진동수주형, 월파수류형 등이 있다. 월파형 파력발전기는 각 층으로 월파 되는 파도의 운동에너지를 위치에너지로 변환하여 터빈을 회전시키는 방식이다. 월파수류형 파력발전기는 월파되는 파도의 유량에 따라 발전에 직접적으로 영향을 준다. 이에 연구자들은 유량에 영향을 주는 파력발전기의 형상에 관한 연구를 진행 중이다. Kofoed(2005)는 설계한 파력발전기의 형상을 모형실험을 통해 검증하였다. Liu et al.(2009) 파력발전기 사면 형상을 3가지 형상을 비교하여 최적의 형상을 제안하였다. Park et al.(2011) 모형실험을 통해 월류 파력발전기의 최적 운용방법을 제시하였다. Victor et al.(2011)에서는 설계변수에 따른 파력발전기의 효율성을 수치계산을 통해 비교 검증하였다. Jungrungruentaworn and Hyun(2017)에서는 다단식 월파형 파력발전기의 유입구의 여러 설계 변수에 따른 월파성능을 분석하였다. Mustapa et al.(2019)에서는 제안한 파력발전기 형상을 3D해석결과를 검증하였다.

앞서 소개한 기존 연구의 경우 파력발전기 상부구조물의 형상을 설계하고 에너지 효율을 기준으로 형상을 검증하였다. 본 논문은 파력발전기 하부구조물의 형상에 따른 에너지 효율에 대해서 분석하였고, 이에 따라 변경되는 하부구조물의 구조 안전성에 대해서 검증하였다. 파력 발전기 형상 연구에 앞서 대한민국 연안의 파 특성에 관한 연구 및 대상 해역을 선정하였다(Kim et al., 2022). 대상 해역 선정 후 파력 발전기의 설계 변수를 변경하여 시뮬레이션을 시행하였다. 이를 통해 월파형 파력발전기 하부 최적 설계안을 도출하였다.

## 2. 해석 기법

본 장에서는 월파형 파력발전기 설계 및 해석 시뮬레이션에 사용한 SPH기법, 최적화설계 기법과 설계하중 등에 대해

서 설명하겠다.

### 2.1 SPH method Kernel function

SPH기법은 Lagrangian 식 방법을 이용하여 유체를 질량, 밀도, 압력, 속도 등의 물성치 가진 입자로 표현하는 수치해석 기법이다. 유체 입자의 물리량은 가중치 함수의 적분을 통해 추정하고 관련 식은 식(1)과 같고, SPH법의 기본 방정식은 식(1)을 이산화한 형태로 근사하며 식(2)와 같이 나타낸다.

$$F(r) = \int F(r') W(r-r',h) dr \quad (1)$$

$$F(r) = \sum_j F(r_j) \frac{m_j}{\rho_j} W(r-r_j,h) \quad (2)$$

여기서  $F(r)$ 는  $r$ 지점에서의 물리량을 의미하며,  $r'$ 은 임의의 위치벡터를 나타낸다.  $j$ 는 입자  $r$  주변의 개별 입자를 나타내고  $m_j$ 와  $\rho_j$ 는 각각 입자  $j$ 의 질량과 밀도를 나타낸다.

$W(r-r',h)$ 는 Smoothing length  $h$ 를 사용한 Kernel function이며 다음과 같이 정의된다.

$$W(\mathbf{r},h) = a_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서  $\mathbf{r}$ 은  $r-r'$ 로 입자  $r$ 과 주변 입자  $r'$ 사이의 거리를 나타낸다.  $q$ 는  $r/h$ 로 입자 사이의 무차원 거리이다.  $a_D$ 는 2차원의 경우  $10/7\pi h^2$ 이고 3차원의 경우  $1/\pi h^3$ 이다.

### 2.2 Allowable Stress design criteria

구조물의 안전성에 대한 결과를 평가하기 위한 기준으로 허용응력 조건(DNV, 2015)을 사용하였다. DNV 코드는 해양 구조물의 구조 설계를 위한 원칙, 기술 요구 사항 및 지침을 제공하며, 해양구조물 설계자, 공급자, 구매자 및 규제 기관의 가이드라인 역할을 수행합니다. 또한, 코드는 모든 유형의 강철 해상 구조물에 적용가능하기 때문에 DNV 코드를 선정하였다. 허용응력 조건은 설계하중 하에 발생하는 등가응력이 부재의 허용응력을 초과하지 않을 시 안전하다고 판단하는 조건이다. API-RP-2A-WSD 강관 부재의 허용 인장 및 압축응력 산정식은 다음과 같다.

$$F_t = 0.6F_y \quad (4)$$

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{5/3 + \frac{3(kl/r)}{8C_c} - \frac{(kl/r)^3}{8C_c^2}} \quad (5)$$

여기서,  $F_t$  는 허용 인장 응력,  $F_y$  는 항복 강도를 나타내고,  $F_a$  는 허용 압축 응력,  $C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y}\right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $E$ 는 탄성계수,  $k$ 는 유효 길이 계수로서 트러스 레그의 경우 1.0,  $l$ 은 브레이스 간 거리,  $r$ 은 회전 반경을 나타낸다.

### 3. 하부 구조 형상 변수에 따른 효율 분석

#### 3.1 SPH simulation

파력발전기에 적용할 해석은 Kim et al.(2022)을 통해 분석한 해석들 중에서 고정식 파력발전기의 설치가 가능한 울릉도로 선정하였다. 해석에 사용한 파도 조건은 울릉도의 10년 주기파의 유의파고와 100년 주기의 최대파고를 1/10축적하여 사용하였다. 유의파고는 월파 성능을 확인하기 위하여 선정하였고, 최대파고는 구조안전성 해석에 사용하는 하중을 계산하기 위해 사용하였다. Table 1에 사용한 파도의 조건을 나타내었다.

기준 모델은 An et al.(2022), Victor et al.(2011), Vicinanza et al.(2012)의 모델을 기초로 환경조건을 적용하여 설계하였고 Fig. 1과 Table 2에 도면과 치수를 나타내었다. 파력발전기의 하부구조물에 대한 영향을 확인하기 위해 설계변수로서 파력발전기의 하부지지부의 길이를 6m 간격으로 감소시켜 설계하였다. 변형 모델의 형상과 치수를 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 1. 10 & 100-year wave conditions of each scales

	10y Significant		100y Maximum	
	1/1 scale	1/10 scale	1/1 scale	1/10 scale
Wave Height [m]	2.8	0.28	4.24	0.424
Wave Period [s]	7.37	2.33	7.72	2.44

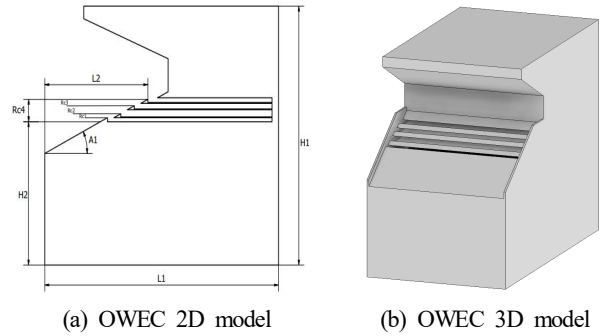


Fig. 1. Geometry of OWEC design model.

Table 2. Design parameters of OWEC

Design Parameters	OWEC	Design Parameters	OWEC
Length of Bottom L1 (m)	3.6	Height of Reservoir Rc1 (m)	0.05
Length of Ramp L2 (m)	1.15	Height of Reservoir Rc2 (m)	0.1
Height of OWEC H1 (m)	3.25	Height of Reservoir Rc3 (m)	0.2
Water depth H2 (m)	1.8	Height of Reservoir Rc4 (m)	0.28
Angle of Ramp (°)	35	Reservoir slot w (m)	0.1

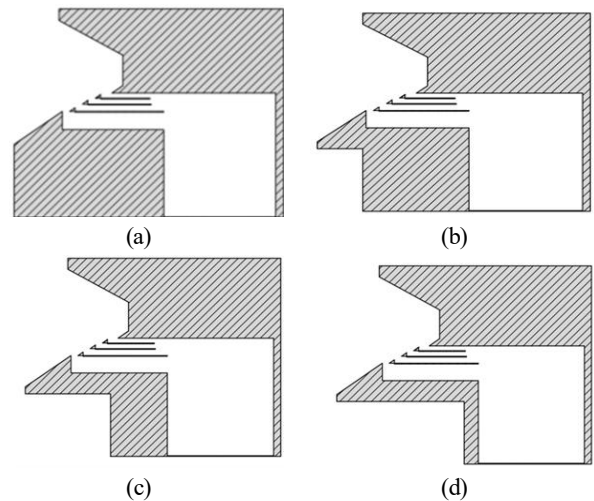


Fig. 2. Design changed models (a) Original (b) Model\_1 (-6m) (c) Model\_2 (-12m) (d) Model\_3 (-18m)

SPH 및 구조해석에 기반한 월파수류형 파력발전기 하부구조물 최적 설계

Table 3. The parameters of design change models (Model 1~4)

Design Parameters	Model <sub>1</sub>	Model <sub>2</sub>	Model <sub>3</sub>	Model <sub>4</sub>
Length of Bottom, L1 (m)	3.6	3.0	2.4	1.8
Length of Ramp L2 (m)	1.15	1.15	1.15	1.15
Height of Reservoir Rc1 (m)	0.05	0.05	0.05	0.05
Height of Reservoir Rc2 (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Height of Reservoir Rc3 (m)	0.2	0.2	0.2	0.2
Height of Reservoir Rc4 (m)	0.28	0.28	0.28	0.28
Particle Parameters	Model1	Model2	Model3	Model4
Particle distance (m)	0.005			
Particle number of Fixed	22650	22864	22984	23104
Particle number of Moving	1443	1443	1443	1443
Particle number of Fluid	1235916	1255179	1276659	1298139
Particle number of Total	1260009	1279486	1301086	1322686

본 연구에서는 2차원 수치구조를 생성하여 연구를 진행하였다. Fig. 3과 같이 피스톤에서 파력발전기 사이의 거리는 8m이고 수심은 1.8m로 구성하였다. 파력발전기 이후 3m 구간은 반사파의 영향을 줄이기 위해 소파 영역으로 지정하였다.

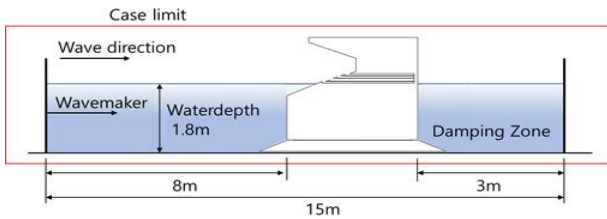


Fig. 3. Geometry of 2-Dimensuional tank.

3.2 수치해석 결과

파력발전기의 성능비교는 에너지 효율성을 기준으로 하였다. Margheritini et al.(2009)에서 제시한 4개의 월파수류형 파력발전기의 에너지효율 중에서 월파에 대한 에너지 효율을 나타내는 hydraulic efficiency를 사용하였다. hydraulic efficiency는 월파된 위치에너지와 입사파의 운동에너지의 비로 관계

식은 다음과 같다.

$$\eta_{hydr} = \frac{P_{crest}}{P_{wave}} \tag{6}$$

$$P_{crest} = \sum_{j=1}^n \rho g q_j R_{c,j} \tag{7}$$

$$P_{wave} = \frac{1}{8} \rho g H^2 c \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(kd)} \right] \tag{8}$$

$P_{crest}$ 는 각각 j번째 층에 유입되는 유체의 위치에너지의 총합을 나타내고,  $P_{wave}$ 는 파력발전기로 오는 파도의 운동에너지이다.  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $c$ 는 파도의 위상속도,  $H$ 는 파고,  $d$ 는 수심,  $k$ 는 파수,  $q_j$ 와  $R_{c,j}$ 는 j번째 층의 유량과 해수면위 높이를 나타낸다. 유량은 1주기를 기준으로 측정하여 평균값을 사용하였다.

해석결과를 Table 4에 나타내었다. 해석결과 하부구조물의 길이를 감소함에 따라 월파된 유량과 Hydraulic efficiency가 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 이는 미미한 차이로 파력발전기 성능에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. Model 3번을 기준으로 상부구조물을 지지할 하부구조물에 대한 설계가 필요하다. 이에 파력발전기에 작용하는 파도에 대한 하중을 계산하기 위해 100년 주기 최대파고를 조건으로하여 해석을 수행하였다. 램프의 사면과 수직한 구역(Fig. 4)의 하중을 측정하였고 Table 5에 나타내었다. 하중 측정 방법은 입사화된 모형의 하중 측정 지점에서 식(3)의 Kernel function 범위 내의 주변 유체입자들의 가속도 및 방향을 계산하여 하중을 측정하였다.

Table 4. Hydraulic efficiency of each models

	$\eta_{hydr,1}$	$\eta_{hydr,2}$	$\eta_{hydr,3}$	$\eta_{hydr,4}$	$\eta_{hydr,all}$
Original	0.107	0.158	0.080	0.023	0.367
Mdoel_1	0.107	0.160	0.090	0.010	0.367
Model_2	0.112	0.158	0.083	0.009	0.362
Model_3	0.114	0.161	0.076	0.009	0.360

Table 5. Force acting on the Ramp and Vertical wall

Axis	Ramp [N]	Vertical wall [N]
X	1270	917.51
Y	0	0
Z	-2510	-291.84

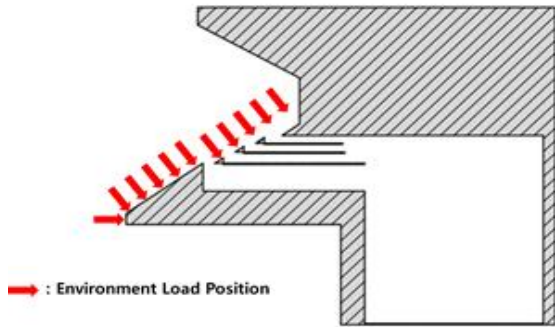
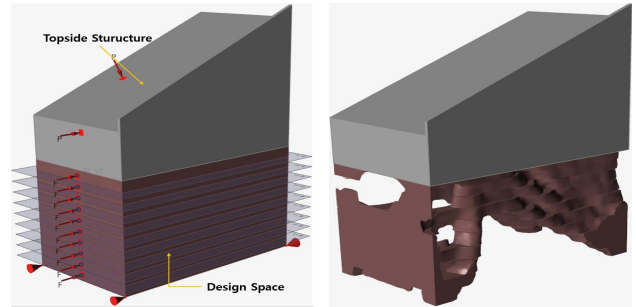


Fig. 4. Position of environment load.



(a) 3D base structure model (b) 1<sup>st</sup> shape optimization

Fig. 5. Structure design.

## 4. 하부구조물 설계 및 안전성 평가

### 4.1 Optimization of OWEC Models

해석 목표인 하부 구조 형상의 중량 절감 및 구조 안전성 확보를 위해 설계 변경이 이루어지는 디자인 영역을 아래 Fig. 5-(a)의 붉은색 영역과 같이 설정하였다. 디자인 영역에 대한 최적화 해석은 Altair 사의 inspire 상용 프로그램을 사용하였다. 설계하중의 적용은 디자인 영역을 단위 길이별로 구분하여 집중하중 형태로 부여하였다. 최적화를 위한 형상 변수로 디자인 영역의 체적비를 조절하였으며, 그 결과 Fig. 5-(b)와 같이 3차원 모델 하부구조물의 지지 구조에 대한 초기 개념 설계안을 도출할 수 있었다(1차 형상 최적화).

1차 최적화 해석 결과를 바탕으로 재설계를 수행하여 Fig. 6과 같은 변형된 트러스 구조를 가진 하부 구조를 설계하였다. 최적화의 목적함수인 최대 강성 및 최소 질량을 만족하기 위한 2차 형상 최적화를 수행하였다(Fig. 7). 2차 최적화 결과 하부구조물의 자체 중량을 줄이면서 설계 하중에 대해 강성을 가지는 설계 모델을 확인할 수 있었다. 재설계된 해석 모델을 바탕으로 기존 체적비의 변경에 따른 경향성을 분석하기 위해 30~50%까지 10% 단위로 중량을 절감한 Line Body로 이루어진 변형된 트러스 구조물을 제작하였다. 본 연구의 형상 최적화 해석의 경우 기존 트러스 구조에서 설계 하중에 대한 내하력이 낮은 부재들이 목적함수를 만족하기 위해 제거된다. 그러므로, 추가적으로 트러스 구조의 레그 및 브레이스의 지름과 두께에 대한 설계와 안전성 평가를 수행하여야 한다.

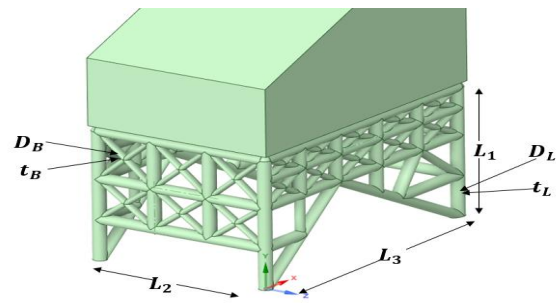


Fig. 6. Initial design model and design parameters.

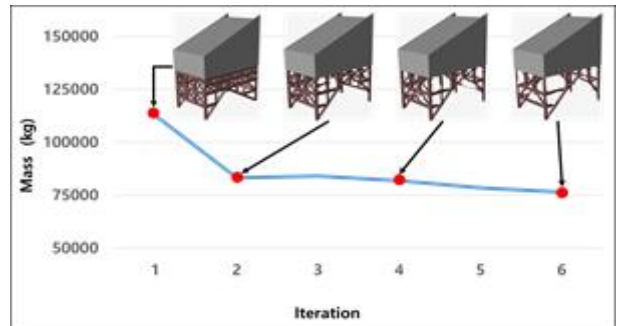


Fig. 7. Shape optimization results by iteration.

하부 구조물의 레그와 브레이스 직경과 두께를 변수로 한 체적비 별 사례 연구를 수행하였다. Case 별 변수는 아래 Table 6에 나타내었다.  $D_L$ 은 하부구조물의 Main leg의 직경을 나타내고,  $D_B$ 는 하부구조물의 Brace의 직경이다.  $t_L$ 과  $t_B$ 는 각각 Main leg와 Brace의 두께이다. 또한, 구조해석에서 사용한 Line element 모델링 모식도를 Fig. 8에 나타내었다.

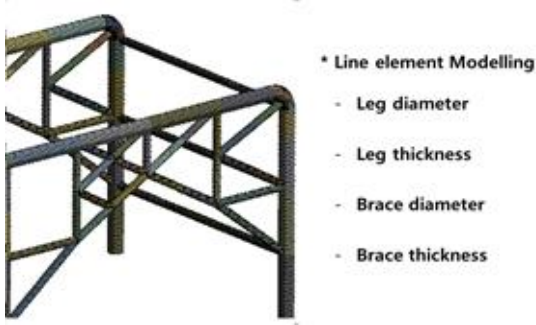


Fig. 8. Line element modelling.

Table 6. Considered scenarios with respect to parameters of the members

Case	Volume [%]	$D_L$ [mm]	$D_B$ [mm]	$t_L$ [mm]	$t_B$ [mm]
Case 1	50				
Case 2	40	1000	500	25	10
Case 3	30				
Case 4	50				
Case 5	40	300	150	50	20
Case 6	30				

#### 4.2 Load Conditions

하부구조물의 형상 최적화를 수행하기 위해 구조물이 설치되는 환경에서의 설계 하중을 산정하였다. 설계 하중은 설비 위치에 해당하는 여러 환경 조건에서의 하중을 계산하여 조합하였으며, 그 때의 환경은 최악의 상태의 환경 조건을 적용하였다. 구조물이 설치되는 환경에서 지지구조물은 풍력, 파력, 조류력, 해류력 등의 환경하중과 상부구조물의 자중 등 다양한 하중이 적용되는 상황에서 구조적 안전성을 만족하여야 한다. 최악의 환경 하중을 적용하기 위해 Table 1의 100년 주기 최대파고 및 파주기를 이용하여 유체 입자의 속도 및 가속도 벡터 성분을 계산하였다. 모리슨 식(식 9-10)을 통해 100년 재현주기의 파랑하중을 계산하였다(KR, 2014).

$$F = F_D + F_I \quad (9)$$

$$F_D = \left(\frac{\gamma}{2g}\right) DC_D U_n |U_n| \quad (10)$$

$$F_I = \left(\frac{\gamma}{g}\right) \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) C_M a_n \quad (11)$$

여기서,  $F_D$ 는 단위 길이 당 항력 벡터,  $F_I$ 는 단위 길이 당 관성력 벡터,  $\gamma$ 는 유체의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $D$ 는 속도의 가로 성분 방향에 대한 부재의 투영폭,  $C_D$ 는 항력계수,  $U_n$ 은 부재 축에 수직인 유체의 속도벡터 성분,  $C_M$ 은 단위 길이 당 유체중량에 근거한 관성력 계수,  $a_n$ 은 유체가속도의 부재 축에 수직인 가속도 성분을 나타낸다.

유체입자의 속도 및 가속도 벡터 성분 계산은 천해역에서의 선형파 이론(식12~15)을 적용하여 계산하였다.

$$u = \frac{\pi H}{T(kd)} \cos(\theta) \quad (12)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(\theta) \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2(kd)} \sin(\theta) \quad (14)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos(\theta) \quad (15)$$

여기서,  $u$ 는 유체 입자의 수평 속도 성분,  $w$ 는 유체 입자의 수직 속도 성분,  $H$ 는 파고,  $T$ 는 파주기,  $k$ 는 파수,  $d$ 는 수심을 나타낸다.

해류속도는 설치 위치에서 예측되는 대표적인 조건으로서 적용하였으며, 해류와 파도가 겹쳐서 작용할 때 해류속도는 전체 하중을 계산하기 전에 파도가 유발한 입자속에 벡터적으로 합성한다. 해류력 산정에 대한 식(식16-17)은 아래와 같다.

$$F_L = C_L \left(\frac{\gamma}{2g}\right) V^2 A_1 \quad (16)$$

$$F_D = C_D \left(\frac{\gamma}{2g}\right) V^2 A_1 \quad (17)$$

여기서,  $F_L$ 은 단위 길이 당 전향력,  $C_L$ 은 양력 계수,  $V$ 는 국부 해류속도,  $A_1$ 은 힘의 방향에 수직인 평면에 대한 단위 길이 당의 투영 면적,  $F_D$ 는 단위 길이 당 전향력,  $C_D$ 는 항력계수를 나타낸다.

API-RP-2A-WSD에 근거하여, Table 7에 구조물에 작용하는 하중들을 나타내었다.



Table 7. Loads applied to the substructure

Marine conditions		
Wave	$H_{max}$ (m)	4.24
	$T_P$ (s)	7.72
Current	$U_C$ (m/s)	1.65
Ave. water depth	$h$ (m)	20
Ave. water temp.	$T$ (°C)	4.8
Wind	-	-
Sea ice	-	-
Subsidence	-	-
Load		Value
1.Static Load		32.1E+6 [N]
	7 [m]	2.1E+5 [N]
	9 [m]	2.7E+5 [N]
2.Hydro-Static load		
	11 [m]	3.3E+5 [N]
	13 [m]	3.9E+5 [N]
	15 [m]	4.5E+5 [N]
3.Current Load		884.8 [N/m]
4.Wave Load		1,780 [N/m]

4.3 Structural analysis

최적화 해석 결과의 정확성을 확보하기 위해 구조 정해석을 수행하였다. 설계 변수로는 위의 Table 4의 Case에 따라 구분하였으며, 구조 해석을 위해 부여한 경계조건 및 하중 조건은 아래 Fig. 9와 같다.

경계조건으로는 실제 구조물의 Foundation Pile 고정을 고려하여 레그 최하단 지지점의 모든 병진 및 회전 자유도를 구속하였다. 또한 상부구조물의 자중을 -z 방향으로 부여하였으며, 파력과 해류력은 방향 성분별로 합산한 뒤 파가 진행하는 방향인 -x 방향으로 부여하였다. 그리고 해수면 하 높이 별 정수압을 계산하여 구조물의 위치별 포인트에 인가함으로써 환경하중을 재현하였다.

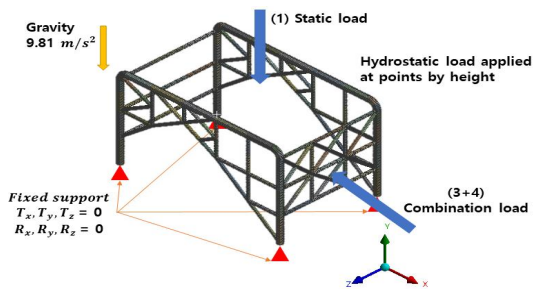


Fig. 9. Boundary and loading conditions imposed on the substructure model.

4.4 Dynamic characteristic analysis

설치 해역의 파랑 에너지는 구조물에 동적 반응을 야기시킬 수 있다. 이는 구조물에 작용하는 하중을 증폭시켜 구조물의 파손을 초래한다. 파력발전기 하부구조물에 대한 구조 동특성 분석법으로 모달해석과 조화응답해석을 수행하였다. 설치 해역의 환경 하중에 의한 동적 영향을 파악하고자 모달 해석을 수행하여 제안된 최적 형상 구조물의 고유진동수를 계산하였다.

조화응답해석에서는 파력발전기 하부구조물의 모드 형상 확인 결과, 파랑하중과 해류하중이 적용되는 방향에 대한 주요 모드는 2차 모드임을 확인하였으며, 그에 해당하는 주파수를 조화응답해석의 관심 영역으로 지정하였다. 정상하중조건은 울릉도 1년 재현 주기의 유의파고와 파주기를 바탕으로 유체 입자 가속도를 계산하여 조화응답해석의 가진력으로 적용하였다. 감쇠의 영향은 보통 일반적인 기계 시스템 내 결합 조건이 존재할 경우 3~5%의 감쇠 효과를 고려하므로, 5%의 감쇠비를 적용하였다.

4.5 Discussion

해석 결과 구조물의 축 방향 인장 및 압축응력은 Table 8과 Fig. 10에 나타났으며, 모든 Case에서 API-RP-2A-WSD에서 제안하는 허용 인장응력과 압축응력을 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다. 주요 부재에서 발생한 수직응력의 지배적인 하중은 상부구조물의 자중으로 판단되며, 약 41.3MPa의 인장응력이 상부 레그에서 발생하였다. 최대 압축응력의 경우 상부구조물의 자중에 의해 트러스 레그에서 발생하며, 체적비를 감소시킨 Case 별로 압축응력은 증가하는 경향을 보이나 허용 압축응력을 초과하지 않았다.

Table 8. Structural safety assessment result (unit: MPa)

Case	$F_{tension}$	$F_{comp}$	$F_t$	$F_a$	Remark
Case 1	55	56			O.K.
Case 2	41	57			O.K.
Case 3	96.9	64			O.K.
Case 4	87	96.9	150	147	O.K.
Case 5	41	97			O.K.
Case 6	45	106			O.K.

Table 8의 Case 1, 3, 4에서 41.3MPa를 초과하는 인장응력은 부재 연결부 끝단에서 발생한 것을 확인할 수 있으며, 선요소로 제작한 하부구조물의 연결부에서 기하학적 불연속으로 인한 특이 값(Singularity Value)이 발생한 것으로 판단하

SPH 및 구조해석에 기반한 월과수류형 파력발전기 하부구조물 최적 설계

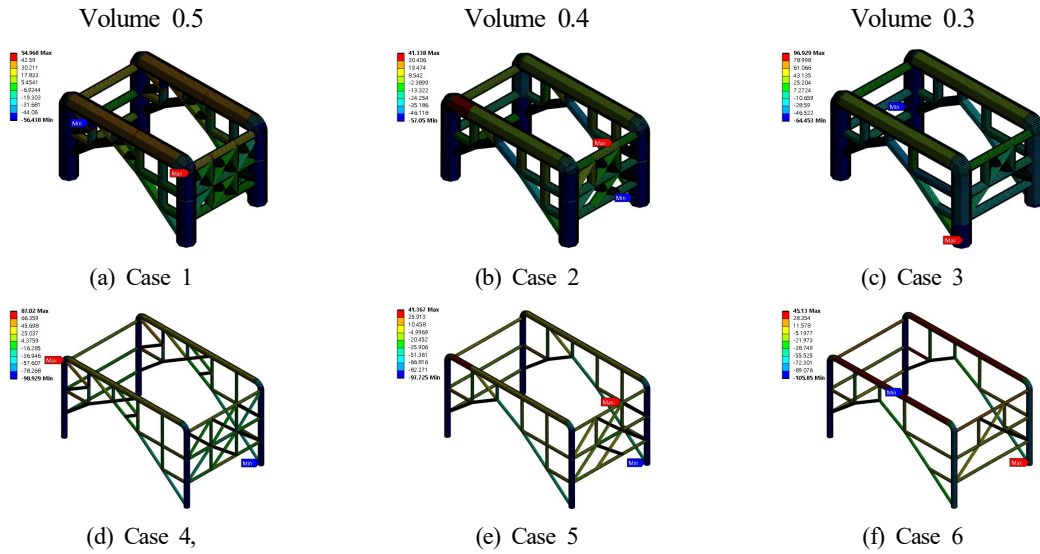


Fig. 10. Result of stress analysis.

여 무시하였다. 모든 사례에서 허용 인장응력 및 압축응력을 초과하지 않는 것은 Fig. 6의 초기 설계 모델이 강건 설계되었기 때문이다. 이는 하부 구조의 레그 및 브레이스 설계 변수를 추가 해석하여 경제성을 더욱 확보할 수 있으리라 판단된다.

중량 절감을 적용하기 전 초기 모델과 최적 모델 case 6 두 가지 형상으로 모달 해석을 수행하여, 최적화 수행 이후 구조물의 고유진동수의 변화 추이를 파악하였다(Table 9, Fig. 11). 설계한 구조물의 고유진동수는 설치 해역에서 10년간 예측된 파랑 데이터의 파주기에 일치하지 않으며, 이는 제안된 구조물이 공진을 회피할 수 있도록 설계되었음을 확인할 수 있었다.

정상하중조건은 1년 이하의 재현 주기를 사용하며 일반적으로 피로해석에 적용한다. 울릉읍의 1년 재현 주기 유의파고와 파주기를 통해 유체 입자 가속도를 계산하여 조화응답 해석의 가진력으로 적용하였다. 감쇠비의 경우 일반적인 기계 결합 조건에서 보통 3~5%의 감쇠 효과를 고려하므로 5%를 적용하였다. Fig. 12의 조화응답해석 결과, 초기 모델의 경우 2.784 Hz의 주기에서 가장 큰 응답이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그 응답 값으로는 6435.6 mm/s<sup>2</sup>의 가속도가 발생하며 Phase angle은 -92.833°가 나타났다. 최적 형상 모델의 경우 1.37 Hz의 주기에서 가장 큰 응답이 발생하였으며 그 응답 값으로는 3175.4 mm/s<sup>2</sup>의 가속도가 발생하였다. Phase angle은 -92.771°에서 나타나는 것을 확인하였다. 결과적으로 최적 설계를 통해 하부 구조의 중량을 절감하였으며, 동일 가진력에 대해 그 응답의 크기를 감소하였다.

Table 9. Modal analysis result (unit: Hz)

Model Type	Mode	Natural frequency
Initial Model	1 <sup>st</sup> mode	1.3
	2 <sup>nd</sup> mode	2.78
	3 <sup>rd</sup> mode	8.1
Case 6	1 <sup>st</sup> mode	0.99
	2 <sup>nd</sup> mode	1.37
	3 <sup>rd</sup> mode	7.77

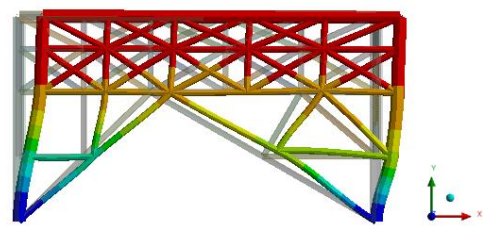


Fig. 11. Case 6 2<sup>nd</sup> Mode shape result.



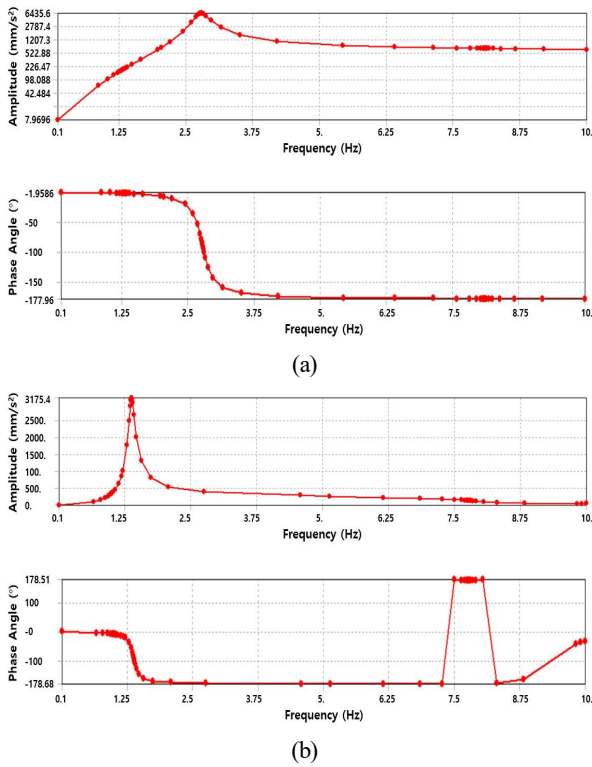


Fig. 12. Harmonic response analysis results (a) initial model (b) Case 6.

## 5. 결론

본 논문은 월파수류형 파력 발전기의 하부 형상을 변형시켜 그에 따른 에너지효율의 변화와 구조안전성에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하였다. 울릉도의 해석 데이터를 기반으로 입자기반 해석 프로그램을 통해 기존 케이스 구조인 Model 1을 기준으로 하부 구조 형상을 변화시킨 모델 3개를 설계하여 상부 구조 월파 성능 검증을 시행하였다. 그 결과 설계 모델의 최대 월파 효율 차이는 0.7%이며, 하부 구조의 변경이 상부 월파 효율에 영향을 주지 않음을 확인하였다. 이는 하부구조물의 경량화가 가능함을 의미한다.

최적화 해석 프로그램을 통해 기존의 콘크리트 케이스 구조가 아닌 상부구조물의 자중을 효과적으로 분산시킬 수 있는 변형된 트러스 구조 형상을 도출하였다. 최적화 해석의 목적함수(중량 절감 및 강성 확보)를 만족하였는지 확인코자 정적 구조해석을 통한 환경하중 및 상부 구조물의 자중에 대한 구조 안전성 평가를 수행하였다. 구조해석은 부재 직경 및 두께를 변수로 하여 사례 연구를 수행하였으며, 그 결과 모든 케이스에서 허용 인장 응력 150MPa, 항복 강도 147MPa를 초과하는 응력이 발생하지 않음을 확인하였다. 그

중에서 Case 6의 경우 초기 최적 설계안 대비 36.3 t의 강재를 절감하였으며, 기존 대비 32.18%의 무게 절감을 확인하였다.

모달 해석을 통해 설계한 구조물의 고유 진동수를 확인하였으며, 관심 모드 형상에 대한 주파수 영역이 설치 해석의 가진 주파수 범위에 해당하지 않으므로 공진을 회피하도록 설계되었음을 확인하였다. 또한 조화응답해석을 통해 동일 가진력에 대해 초기 모델보다 구조물의 응답의 크기가 감소함을 확인하였다.

하지만, 설계 변수의 다양성이 부족하고 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성 확보가 필요하다. 향후 여러 설계변수에 대한 적용 및 해석 모델의 다양화를 통한 연구가 필요할 것이며, 모형실험을 통한 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성 확보가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(지역대학우수과학자지원사업, No. 2021R111A3057230).

## References

- [1] An S. H., G. G. Kim and J. H. Lee(2022), The Effect of Hydraulic Efficiency on the Design Variables of an Overtopping Wave Energy Converter. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 28(1), pp. 168-174.
- [2] Det Norske Veritas(2015), *Helicopter Decks*, DNV-OS-C101.
- [3] Jungrungruentaworn, S. and B. S. Hyun(2017), Effects of Structure Geometry on Energy Harvesting Efficiency of Multi-Stage Overtopping Wave Energy Converters. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 20(3), pp. 136-144.
- [4] Kim G. G., S. H. An and J. H. Lee(2022), Review of the Optimal Locations of Coastal Sea Area for Operating Wave Energy Converter in Korea. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 46(4), pp. 1-7.
- [5] Kofoed, J. P.(2005), Model testing of the wave energy converter Seawave Slot-Cone Generator.
- [6] Korea Maritime Institute(2017), *KMI Trend analysis Vol. 41*.
- [7] Korean Register(KR)(2014), *Rules for the Classification of Fixed Offshore Structures*.
- [8] Liu, Z., B. S. Hyun, and J. Y. Jin(2009), 2D Computational analysis of overtopping wave energy convertor. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(6), pp. 1-6.

- [9] Margheritini, L., Vicinanza, D., and Frigaard, P.(2009), SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renewable Energy*, 34(5), pp. 1371-1380.
- [10] Mustapa, M. A., O. B. Yaakob, and Y. M. Ahmed(2019), Numerical Simulation of the Overtopping-Ramp Design of a Multistage Overtopping Wave Energy Breakwater Hybrid Device, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(1), pp. 4902-4911.
- [11] Park, J. Y., S. H. Shin, and K. Y. Hong(2011), Experimental Study for Overtopping Performance and Control System of Overtopping Wave Energy Converter, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 14(1), pp. 11-18.
- [12] Vicinanza, D., Margheritini, L., Kofoed, J. P., and Buccino, M. (2012), The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments. *Energies*, 5(2), pp. 193-226.
- [13] Victor, L., P. Troch, and J. P. Kofoed(2011), On the effects of geometry control on the performance of overtopping wave energy converters. *Energies*, 4(10), pp. 1574-1600.

---

Received : 2023. 12. 06.

Revised : 2023. 12. 27.

Accepted : 2023. 12. 29.