

월파수류형 파력발전구조물의 상부 사면 설계변수에 따른 수력학적 효율 영향 연구

안성환* · 김근곤** · 이종현***†

*, ** 경상국립대학교 해양시스템공학과 석사과정, *** 경상국립대학교 해양시스템공학과 교수

The Effect of Hydraulic Efficiency on the Design Variables of an Overtopping Wave Energy Converter

Sung-Hwan An* · Geun-Gon Kim** · Jong-Hyun Lee***†

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

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

요약 : 월파된 파도를 이용한 파력발전시스템을 월파수류형 파력발전기 OWEC(Overtopping Wave Energy Converter)라고 한다. OWEC의 성능은 발전 시스템은 특성상 파도의 파고와 주기의 영향을 받는다. 파도는 해양에 따라 파고, 주기, 파도 방향 등의 특성이 다르고 이러한 파도의 다양한 특성 때문에 OWEC는 안정적인 전력을 생산하기 어렵다. 따라서 각 바다의 특성에 따른 OWEC의 적절한 형상에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 입자법을 사용하여 OWEC의 램프 설계가 hydraulic efficiency에 미치는 영향을 확인했다. 총 10개의 모델을 설계하였으며, 선택된 매개변수에 따라 램프의 설계 파라미터를 선택하고 사면의 형상을 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과로부터 구한 유량을 기초로 hydraulic efficiency를 산출하였다. 계산된 hydraulic efficiency를 바탕으로 각 변수가 사면의 형상에 따른 월파 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 본 연구에서는 특정 해역에 따른 OWEC 램프의 적절한 형상에 대한 방향을 제시하였다.

핵심용어 : 월파수류형 파력발전기, 다단식, 입자기반 수치해석, 2차원 수치해석, 사면각도

Abstract : In a wave power generation system, the overtopping system is known as an overtopping wave energy converter (OWEC). The performance of an OWEC is affected by wave characteristics such as height and period because its power generation system is sensitive to those characteristics; these, as well as wave direction, depend on the sea. As these characteristics vary, it is hard for the OWEC to produce power in a stable manner. Therefore, it is necessary to find an appropriate shape for an OWEC, according to the characteristics of the sea it is in. This research verified the effect of the design of the OWEC ramp on the hydraulic efficiency using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) particle method. A total of 10 models were designed and used in simulations performed by selecting the design parameters of the ramp and changing the attack angle based on those parameters. The hydraulic efficiency was calculated based on the rate of discharged water obtained from the analysis result. The effect of each variable on the overtopping performance according to the shape of the ramp was then confirmed. In this study, we present suggestions for determining the direction for an appropriately shaped OWEC ramp, based on a specific sea area.

Key Words : Overtopping Wave Energy Converter (OWEC), Multi-stage, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), 2D-Numerical Analysis, Slop angle

1. 서론

2015년 파리기후변화협약을 통해서 주요 배출국들은 온실가스 배출량을 2030년까지 온실가스 25~65%까지 감축을

목표로 정하였다. 이에 따라 각국에서는 탄소 배출량이 높은 석유, 석탄을 대신해서 탄소 배출량이 낮은 신재생에너지 개발에 노력을 기울이고 있다. 국내의 경우 바다와 접하는 곳이 많고 특히, 해양에너지 중 파력발전 활용에서 강점을 가지고 있다. 파력발전기의 종류는 가동물체형, 진동수주형, 월파수류형 등이 있다.

* First Author : tig01129@gnu.ac.kr, 055-772-9190

† Corresponding Author : gnujhlee@gnu.ac.kr, 055-772-9194

월과수류형 파력발전기는 각 층으로 월과 되는 유량에 따라 발전에 직접적으로 영향을 준다. 이에 연구자들은 파력발전기의 형상 변화에 따라 변하는 유량에 초점을 맞추었다. Kofoed(2005)는 모형실험을 통해 파력발전기의 형상에 따른 각 층의 유량을 측정하였다. Nam et al.(2008)는 부유식 월과형 파력발전기의 수치해석 결과와 실험 결과를 비교 검증하였고, Liu et al.(2009)는 파력발전기 사면 형상을 직선형과 포물선형을 비교하여 최적의 형상을 제안하였다. Park et al.(2011)은 암초형 월류 파력발전 시스템을 모형실험을 통해 최적 운용방법을 제시하였다. Victor et al.(2011)에서는 파력발전기의 형상 별 효율성을 이론적 계산을 통해 비교 검증하였다. Jungrungruengtaworn and Hyun(2017)에서는 단단식 월과형 파력발전기의 유입구의 크기, 파력발전기의 잠긴 깊이에 따른 월과성능을 분석하였다. Mustapa et al.(2019)에서는 3D해석결과를 바탕으로 Sea Slot-Cone Generator(SSG)의 사면 형상을 제안하였다.

유체와 구조물의 상호작용을 위한 기법 연구들이 수행되고 있다. 그 중 입자기반 수치해석 기법인 Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)은 Lucy(1977), Gingold and Monaghan(1977)에 의해 개발되었으며, 주로 우주물리학 연구를 위해 제안되었다. Monaghan and Gingold(1983)은 SPH 기법에서 유체의 점성을 나타내기 위해 인공점성을 적용하여 해석하였다. Sweple et al.(1995)은 탄성체에 적용하였고, Monaghan and Kocharyan(1995)은 다중상 흐름을 해석하였다. Monaghan(1994)과 Morris et al.(1997)은 비압축성으로 가정된 유체흐름의 거동을 해석하였다. Mosqueira et al.(2002)과 Colominas et al.(2004)은 댐 붕괴 현상, 해수면과 같은 자유수면형의 유체거동을 해석하였다. Crespo et al.(2007)은 고정된 벽 입자와 지배방정식을 공유하는 동적 경계 입자 기법을 사용하여 파랑의 경감 현상에 대하여 3차원으로 모의하였다. Didier and Neves(2012)는 SPH 기법을 이용하여 선형파를 생성하였으며, 반사파 흡수 시스템을 적용하여 반사파를 감소시켰다.

본 연구는 해안에 설치되는 월과수류형 파력 발전기의 상부 사면의 형상을 변형시켜 그에 따른 월과 되어 유입되는 유량의 변화와 에너지효율의 변화에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 기법은 입자 기반 유체 유동 해석법 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)를 이용한 입자 기반 해석 프로그램인 DualSPHysics를 사용하였고 파력 발전기 형상 연구에 앞서 파의 생성과 유량의 정확성에 대한 프로그램 검증 과정을 수행하였다(Crespo, 2020). 검증 과정을 거친 후 파력 발전기의 상부 사면 각도의 변화를 주고 시뮬레이션을 시행하였다. 이를 통해 각도에 따른 유량과 효율의 영향도를 검토하였다.

2. SPH 기법

2.1 Kernel function

SPH기법은 Lagrangian 식 방법을 이용한 입자 기반 해석법으로 유체를 입자로 표현하며 이때 각각의 입자들에 질량, 밀도, 압력, 속도 등의 물성치를 가진다. 유체 입자의 물리량은 가중치 함수의 적분을 통해 추정하고 관련 식은 아래와 같다.

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

여기서 $F(r)$ 는 r' 지점에서의 물리량을 의미하며, r 은 입자의 위치벡터, $W(r-r', h)$ 는 완화 거리(smoothing length) h 를 사용한 Kernel function이며 다음과 같이 정의된다.

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

위 식에서 r 은 $r-r'$ 로 서로 다른 두 입자사이의 거리를 나타낸다. q 는 r/h 으로 입자 사이의 무차원 거리이다. 2차원의 경우 $10/7\pi h^2$ 이고 3차원의 경우 $1/\pi h^3$ 이다. SPH법의 기본 식은 식(1)을 이산화한 형태로 근사하며 아래와 같다.

$$F(r) = \sum_b F(r_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(r-r_b, h) \quad (3)$$

b 는 개별 입자를 나타내고 m_b 와 ρ_b 는 각각 입자 b 의 질량과 밀도를 나타낸다.

2.2 운동방정식과 상태방정식

SPH 기법에서 유체의 움직임을 나타내는 Navier-Stoke 방정식은 시간 t 에 대한 유체의 움직임을 나타낸 식으로 아래와 같다.

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + v_0 \nabla^2 v \quad (4)$$

여기서 $-\frac{1}{\rho} \nabla P$ 는 압력을 $v_0 \nabla^2 v$ 는 점성 응력, g 는 중력 가속도를 나타낸다. Navier-Stoke 방정식에서 유체의 거동을

결정하는 점성 항을 나타내기 위해 인공 점성 항을 적용하며 본 연구에서는 Monaghan(1992)에서 제안한 아래의 식을 사용한다.

$$\frac{dv_a}{dt} = \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \cdot \rho_a} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (5)$$

여기서 P 와 ρ 는 각각 a 와 b 지점의 압력과 밀도이다. Π_{ab} 는 점성 항으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha c_{ab} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & v_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0 & v_{ab} \cdot r_{ab} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $r_{ab} = r_a - r_b$ 와 $v_{ab} = v_a - v_b$ 으로 각각 입자의 위치와 속도를 나타낸다. $\mu_{ab} = h v_{ab} \cdot r_{ab} / (r_{ab}^2 + \eta^2)$ 으로 나타내며 $\eta^2 = 0.01h^2$ 이다. $c_{ab} = 0.5(c_a + c_b)$ 으로 평균 음속이고 a 는 0.01으로 주어진다. SPH기법에서 비압축성 유체에 대해서 해석을 시행할 때 유체는 아주 작은 압축성을 가진다고 가정을 해야 한다. Monaghan et al.(1999)에서 제시한 상태방정식은 다음과 같다.

$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (7)$$

여기서 $\gamma=7, b = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ 으로 나타내고 $\rho_0 = 1000 \text{kg/m}^3$ 으로 기준 밀도이다. c_0 는 $c_0 = c(\rho_0) = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}$ 으로 나타내며 기준 밀도에서의 음속이다.

3. 월파수류형 파력발전기 모델 선정

본 연구에서는 파력발전기의 상부 사면의 형상을 변화하여 이에 따른 hydraulic efficiency의 영향도를 분석하기 위해 상부 사면의 설계변수에 변화를 주었다. hydraulic efficiency는 파력발전기로 월파되는 유체의 에너지효율을 나타내는 값으로 파력발전기 성능 평가에서 사용되는 값이다. 기준 모델은 Jungrungruentaworn and Hyun(2017b), Victor et al.(2011), Margheritini et al.(2012)의 모델을 기초로 설계하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 파력발전기의 설계변수는 수면 위 파의 유입 높이 R_c , 램프의 횡방향 길이 L , 램프의 각도 θ , 유입구

의 길이인 w 가 있고 본 연구에서는 R_c 와 L 을 기준으로 θ 의 값을 변경하여 연구를 진행하였다.

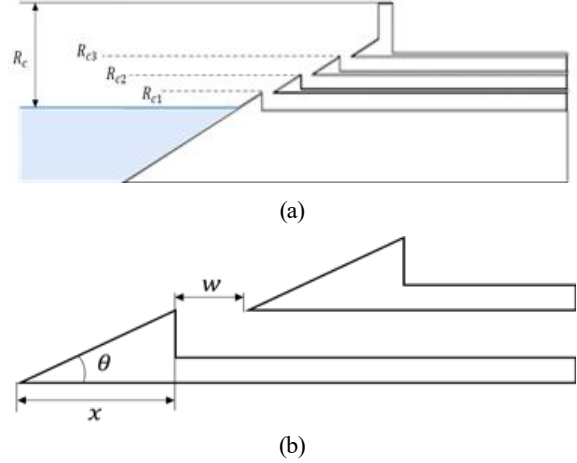


Fig. 1. Position of OWEC model design variables (a) Position of R_c (b) Position of x, w, θ .

R_c 의 길이와 L 의 길이를 각각 고정 후 사면의 각도 θ 를 $20^\circ \sim 40^\circ$ 까지 5° 씩 변경하여 총 모델 10개를 설계하였다. 자세한 제원과 형상은 Table 1과 Fig. 2에 표시하였다.

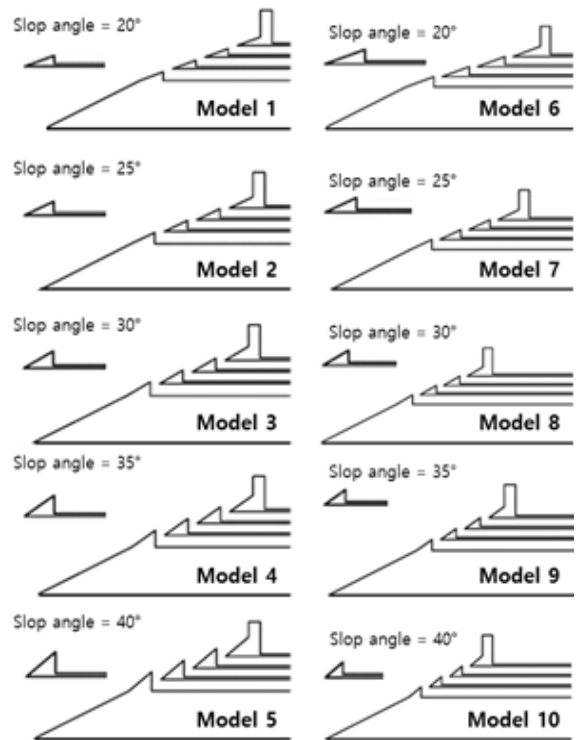


Fig. 2. Shape of models.

Table 1. Specification for the model data

Wave condition	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
θ [°]	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40
x [mm]	100	100	100	100	100	137	107	86	71	60
w [mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
R_{c1} [mm]	36	46	58	70	84	50	50	50	50	50
R_{c2} [mm]	86	96	108	120	134	100	100	100	100	100
R_{c3} [mm]	136	146	158	170	184	150	150	150	150	150

4. 해석 결과 및 분석

4.1. 해석조건

본 연구에서는 2차원 수치수조를 생성하여 연구를 진행하였다. Fig. 3과 같이 피스톤에서 파력발전기 사이의 거리는 18m이고 수심은 2m로 구성하였다. 월파수류형 파력 발전기는 해안에 설치, 운용되기 때문에 연안의 파의 특성을 표현해야 하며 이를 가장 잘 나타내는 피스톤 타입의 조파기를 선정하였다. 피스톤 타입의 조파기의 움직임은 다음과 같이 나타낸다(Connell and Cashman, 2016).

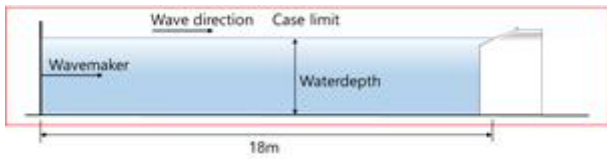


Fig. 3. Initial geometry of water tank with OWEC model.

$$e(t) = \frac{S_0}{2} \sin(\omega t + \delta) \quad (8)$$

조파기의 시간에 따른 변위 $e(t)$ 에 따라 움직이며 ω 는 파의 진동수를 나타낸다. δ 는 초기 상태이며 본 논문에서는 0으로 설정하였다. S_0 는 조파기의 진폭을 나타내며 파고 H 와의 관계식 Eq. (9)와 천수영역의 분산 관계식 Eq. (10)을 적용을 통해 구할 수 있다. d 는 수심, k 는 파수를 나타낸다.

$$\frac{H}{S_0} = \frac{2\sinh^2(kd)}{\sinh(kd)\cosh(kd) + kd} \quad (9)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (10)$$

본 연구에서 사용한 파도 조건은 Liu et al.(2009)와 Jungrungruentaworn and Hyun(2017)에서 사용한 설계파를 이용하였고 제원은 Table 2와 같다. 해석에 사용하는 파도는

주기 6초, 파고 2m의 파도를 1/10 축소한 주기 1.897초 파고 0.2m를 사용하였다.

Table 2. Wave condition

Wave condition	1/1 scale	1/10 scale
Wave period [s]	6	1.879
Wave height [m]	2	0.2
Wave length [m]	56.207	5.512
Water Depth [m]	20	2

4.2 결과분석

파력발전기의 성능비교는 에너지 효율성을 기준으로 한다. Margheritini et al.(2009)에서 제시한 파력발전기의 에너지효율의 종류로는 hydraulic efficiency, Reservoir efficiency, Turbines efficiency, Generator efficiency, Overall efficiency 5가지로 본 논문에서는 월파성능을 나타내는 hydraulic efficiency를 사용하였다. hydraulic efficiency는 월파의 에너지와 입사파의 에너지의 비로 관계식은 다음과 같다.

$$\eta_{hydr} = \frac{P_{crest}}{P_{wave}} \quad (11)$$

P_{crest} 는 유체의 위치에너지, P_{wave} 는 파의 에너지로 다음과 같다.

$$P_{crest} = \sum_{j=1}^n \rho g q_j R_{c,j} \quad (12)$$

$$P_{wave} = \frac{\rho g^2}{64\pi} TH^2 \quad (13)$$

여기서 g 는 중력가속도, T 와 H 는 각각 파의 주기와 파고이다. q_j 와 $R_{c,j}$ 는 각각 번째 층의 평균 유량과 높이이다. 유량은 1주기를 기준으로 측정하여 평균값을 사용하였다.

과력발전기 사면 형상의 변화에 따른 영향도 분석은 hydraulic efficiency와 유량을 기준으로 분석하였다. 기준 모델의 hydraulic efficiency와 유량 값을 기준으로 하여 x값을 고정으로 형상변형을 한 Model 1~5번, 값을 고정으로 형상변화를 한 Model 6~10번을 각각 비교하여 영향도를 분석하였다. Fig. 4는 각층의 평균 유량을 비교한 그래프이며, Fig. 5는 전체 hydraulic efficiency를 기준모델과 비교한 그래프이며 마지막으로 Fig. 6은 각층의 hydraulic efficiency를 나타낸 값이다.

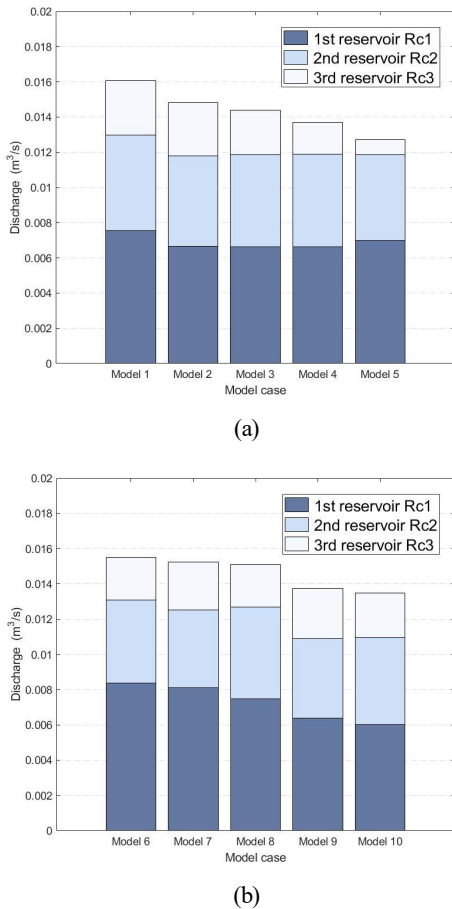


Fig. 4. Partial discharge of each reservoir of model (a) Model 1~5, (b) Model 6~10.

Fig. 4(a)는 각 모델의 층별 평균 유량을 나타낸 것이다. 전체 유량은 Model 1번이 가장 크고 각도가 커질수록 감소하는 추세이다. 1번째 층과 2번째 층의 경우 모델별 유량은 큰 차이를 보이지 않는다. 각도가 작은 모델의 경우 3번째 층의 유량은 크지만, 각도가 증가할수록 유량이 점점 작아진다.

Fig. 4(b)에서는 사면의 경사각이 Model 8번까지는 유량의 차이가 크지 않지만, Model 9, 10번에서는 유량이 감소하는 추세를 보인다. 각층별 유량을 비교해보면 1번째 층 유량의

변화는 각도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 2번째와 3번째 층에서 각도의 변화에 따라 일정한 유량의 변화를 보이지는 않는다.

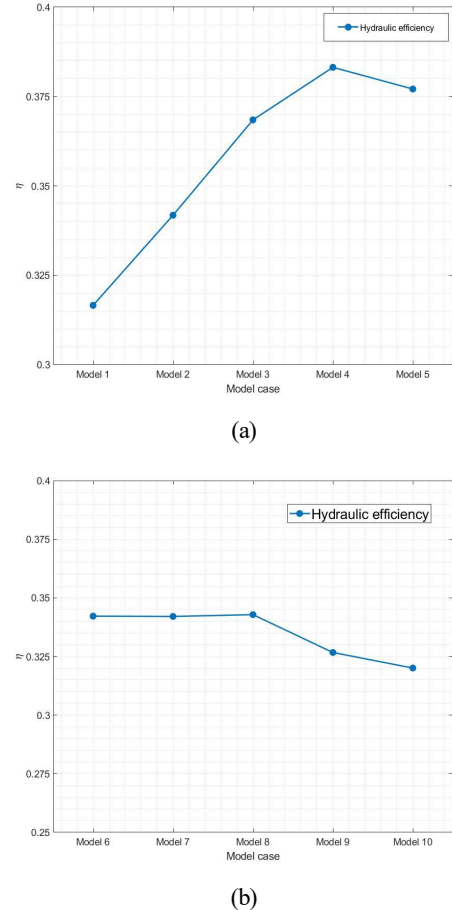


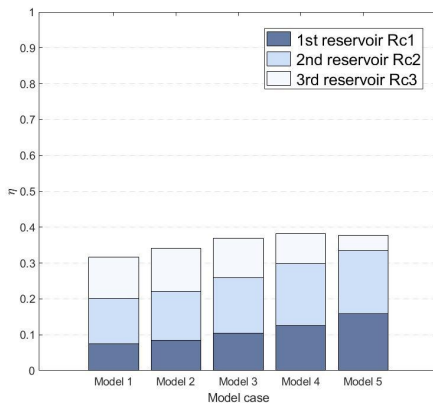
Fig. 5. Overall hydraulic efficiency of model (a) Model 1~5, (b) Model 6~10.

길이를 고정된 모델들의 전체 수압 효율 Fig. 5-(a)은 각도가 증가할수록 효율이 향상하지만, Model 5번에서 감소하는 경향을 보인다. 가장 낮은 효율을 보인 형상은 Model 1번으로 31%이며 가장 높은 효율을 보여준 Model 4번의 효율은 38%이다. 유량의 측면에서는 Model 1번이 가장 좋은 성능을 보이지만 각도가 증가함에 따라 높이가 증가하여 전체 hydraulic efficiency에서 Model 4번의 효율이 가장 높은 것을 보인다.

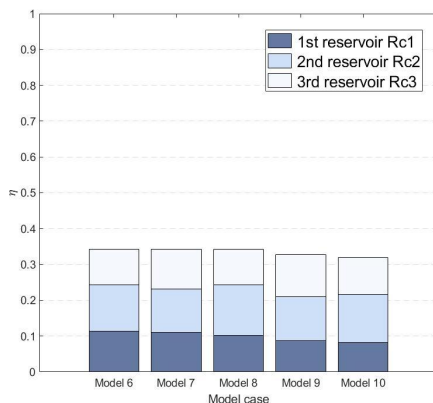
Fig. 6(a)의 각 층별 효율을 비교했을 때 1번 층과 2번 층은 각도가 증가할수록 효율이 증가하지만, 3번째 층의 경우 각도가 증가할수록 작아지는 경향을 보인다. 1~2번 층의 경우 유입 유량의 크기에서 큰 차이는 없지만 각도의 상승에 따른 유입 높이의 증가로 높은 효율을 보인다. 반면, 3번째 층은 유입 높이가 가장 높지만 유량의 감소로 낮은 효율을 보인다.

높이를 고정한 모델별 전체 수압 효율 Fig. 5-(b)를 보게 되면 32~34%의 효율을 가진다. Model 1~3번에서는 효율의 차이는 크게 발생하지 않지만, Model 4번부터 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. Model 6~10번의 각층별 수압 효율 Fig. 6-(b)를 비교했을 때 각도의 변화에 따라 1번째 층에서는 점차 감소하는 경향을 보이지만 2번째와 3번째 층에서는 각도에 변화에 따라 일정한 변화를 보여주지 않는 것을 보였다. 이는 유량의 변화와 동일한 경향을 보이며 물의 유입 높이가 고정일 때 유량의 변화에 따라 영향이 큰 것을 보인다.

x값을 고정했을 때 각도가 증가함에 따라 효율이 증가하는 반면 일정 각도를 넘어가면 유량의 감소로 효율이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 각도가 증가함에 따라 R_c 의 길이가 증가하여 효율에 영향을 준 것으로 보였다. 반면 R_c 의 값이 고정되어 있을 때 각도가 증가함에 따라 사면의 길이가 감소하게 되고, 이에 따라 유량의 변화는 발생하지만, 효율에 큰 영향을 주지는 않는 것을 보였다.



(a)



(b)

Fig. 6. Partial hydraulic efficiencies of each reservoir of model (a) Model 1 ~ 5, (b) Model 6 ~ 10.

5. 결론

본 논문에서는 월과 수류형 파력발전 기의 상부 사면 형상의 변환에 따라 유량과 hydraulic efficiency에 미치는 영향을 알아보기 위해 입자 기반 해석 기법인 SPH 기법을 사용하여 해석을 수행하였다. 사면의 각도를 변형시켜 10개의 모델을 설계하여 해석을 진행하였다. 해석 결과를 바탕으로 hydraulic efficiency를 계산하여 형상 변화에 따른 영향도를 분석하였다. 세부 사항은 다음과 같다.

- 기준 모델을 기반으로 사면의 수평 방향 길이, 높이 길이를 고정하고 사면의 각도를 20°~40°에서 5°씩 변화를 주어 총 10개의 모델을 설계했다.
- 시뮬레이션에서는 T=6s, H=2m의 파를 1/10 축적한 T=1.879s, H=0.2m를 사용하여 해석을 수행하고 각 층별 유량을 측정하였다. 해석된 유량을 바탕으로 전체 hydraulic efficiency와 각 층별 hydraulic efficiency를 통해서 영향도를 분석하였다.
- 해석 결과를 통해 Model 1~10번의 유량과 hydraulic efficiency의 영향도를 분석하였다. 램프의 횡방향 길이(L)를 고정한 모델의 경우 각도가 증가함에 따라 효율이 증가하는 반면 40°에서는 유량의 감소로 효율이 감소하는 것을 확인하였다. 파의 유입 높이(R_c)를 고정한 모델의 경우 20°~30°에서는 유량과 효율에서 차이를 보이지 않지만 35° 이후부터 유량과 효율 모두 감소하는 것을 확인하였다.

본 논문에서 시뮬레이션을 통해 설계변수에 따른 영향도는 향후 월과 수류형 파력 발전기 설계에 지침이 될 것으로 기대된다. 하지만, 본 논문은 2차원 현상을 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션 결과이기 때문에 3차원 현상에 대한 시뮬레이션과 모형실험 등의 향후 후속 연구가 진행 되어야한다.

감사의 글

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

References

- [1] Colominas, I., L. Cueto-Felgueroso, G. Mosqueira, F. Navarrina, and M. Casteleiro(2004), A particle numerical approach based on the SPH method for Computational Fluid Mechanics.

- [2] Connell, K. O. and A. Cashman(2016), Development of a numerical wave tank with reduced discretization error. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, pp. 3008-3012.
- [3] Crespo, A. J. C., M. Gómez-Gesteira, and R. A. Dalrymple (2007), 3D SPH simulation of large waves mitigation with a dike. *Journal of Hydraulic Research*, 45(5), pp. 631-642.
- [4] Crespo, A. J. C.(2020), DualSPHysics Wiki. <https://github.com/DualSPHysics/DualSPHysics/wiki>.
- [5] Didier, E. and M. G. Neves(2012), A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 22(03).
- [6] Gingold, R. A. and J. J. Monaghan(1977), Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 181(3), pp. 375-389.
- [7] 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.
- [8] Kofoed, J. P.(2005), Model testing of the wave energy converter Seawave Slot-Cone Generator.
- [9] 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.
- [10] Lucy, L. B.(1997), Numerical Approach to Testing The Fission Hypothesis, *Astronomical Journal*, Vol. 82, pp. 1013-1024.
- [11] Monaghan, J. J. and R. A. Gingold(1983), Shock simulation by the particle method SPH. *Journal of computational physics*, 52(2), pp. 374-389.
- [12] Monaghan, J. J.(1992), Smoothed particle hydrodynamics. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 30(1), pp. 543-574.
- [13] Monaghan, J. J.(1994), Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics*, 110(2), pp. 399-406.
- [14] Monaghan, J. J. and A. Kocharyan(1995), SPH simulation of multi-phase flow. *Computer Physics Communications*, 87(1-2), pp. 225-235.
- [15] Monaghan, J. J., R. A. Cas, A. M. Kos, and M. Hallworth (1999), Gravity currents descending a ramp in a stratified tank. *Journal of Fluid Mechanics*.
- [16] Morris, J. P., P. J. Fox, and Y. Zhu(1997), Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH. *Journal of computational physics*, 136(1), pp. 214-226.
- [17] Mosqueira, G., L. Cueto-Felgeroso, I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro(2002), SPH approach for free surface flows in engineering applications. 5th World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria, July, pp. I-345.
- [18] 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.
- [19] Nam, B. W., S. H. Shin, K. Y. Hong, and S. W. Hong(2008), Numerical simulation of wave flow over the spiral-reef overtopping device. In *The Eighth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*. OnePetro.
- [20] Park, J. Y., S. H. Shin, and K. Y. Hong(2011), Experimental Study for Overtopping Performance and Control System of Overtopping Wave Energy Convertor, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 14(1), pp. 11-18.
- [21] Sweigle, J. W., D. L. Hicks, and S. W. Attaway(1995), Smoothed particle hydrodynamics stability analysis. *Journal of computational physics*, 116(1), pp. 123-134.
- [22] 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 : 2021. 12. 24.

Revised : 2022. 02. 14.

Accepted : 2022. 02. 25.