



다수의 부유체로 구성된 파력발전장치의 설계

김옥현^{a*}, 이재국^b

Design of a Wave Power Generator with Multiple Buoys

Ock Hyun Kim^{a*}, Jae Kuk Lee^b^a School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chungbuk National University,
1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk-do, 28644, Korea^b Graduate School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chungbuk National University,
1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk-do, 28644, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 November 2017
Revised 29 December 2017
Accepted 9 January 2018

Keywords:

Wave power
Multi-buoys
Electric generator
Renewable energy
Ocean wave

ABSTRACT

A new type of wave power generator is proposed in this paper. It consists of a body and multiple buoys with link mechanisms. The body and buoys are designed such that the body remains stationary, while the buoys move up and down in response to the waves. The link mechanisms convert the relative motion between the body and buoys into a driving torque in one direction for the power generator. The advantage of the proposed system is that it can adopt general rotary generators and provide a better quality of the generated electric power through the cooperation of the multiple buoys, compared with a single big reciprocating buoy. Computer simulations have been done to estimate capability of electrical power generation. The maximum electric output power has been found by optimizing some design parameters and evaluated.

1. 서론

우리나라는 에너지 자원 절대부족 국가이며, 주력 발전인 원자력 발전의 안전성 우려와 화력발전의 미세먼지 발생 등 문제로 인해 친환경 신재생에너지원에 대한 관심이 고조되고 있다. 국내외적으로 각광받고 있는 신재생 에너지원으로는 풍력, 조력, 태양광, 파력 등이 있으며 그 중 파력에너지는 지구의 절반이상을 차지하는 바다에 아주 넓게 분포되어 있다. 게다가 우리나라는 3면에 긴 해안선과 많은 도서가 산재해 있기 때문에 바다로 접근하기가 용이하다. 파력발전장치는 특별한 연료 없이 반영구적으로 작동이 가능하며 밤낮, 한사와 관계 없이 24시간 사용가능하다는 장점이 있다.

파력발전장치는 크게 고정식과 부유식, 직접 구동식과 간접구동

식으로 구분된다^[1]. 고정식은 연안에 시설물을 건설하여 발전하는 방식이며^[2] 부유식은 부유체를 바다에 띄워 발전하는 방식이다^[3,6]. 직접 구동식은 파력 에너지에 의해 상하로 움직이는 부유체의 운동을 발전기의 회전자 운동으로 변환시켜 전기 에너지를 얻는 방식이다^[3,4]. 간접 구동식은 파력에너지를 공압, 유압 등으로 변환시켜 저장한 후 발전기를 돌리는 방식이다^[5,6]. 고정식은 막대한 시설비용이 들어가는 단점이 있으며, 간접 구동식은 시스템이 복잡해지고 발전효율이 저하되며 태풍과 같은 자연재해에 취약할 수 있는 단점이 있다.

본 연구에서 제시하는 파력발전장치는 부유식, 직접구동식이다. 이 방식의 경우 1기당 1개의 부유체를 사용하는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 다수의 부유체를 사용한다. 각각의 부유체는 파도에

* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2447

Fax: +82-43-267-2447

E-mail address: ohkim@chungbuk.ac.kr (Ock Hyun Kim).

따라 제각기 상승 하강운동을 하면서 발전기를 회전시키게 된다. 대형 1개의 부유체를 사용하는 경우 발전기에 가해지는 회전력이 파도의 주기로 간헐적인 반면 본 연구의 다수의 부유체를 사용하는 방식은 각각의 부유체가 랜덤하게 상승 하강 운동하며 이 운동이 합쳐져 발전기 회전력을 발생시키므로 상대적으로 발전기에 가해지는 회전력이 일정하게 되는 장점을 갖는다. 또한 부유체를 상대적으로 소형화 할 수 있으므로 주 파도뿐 아니라 작은 일령임에도 반응할 수 있는 장점이 있다.

일반적인 직접구동형 부유식 파력발전장치는 선형발전기(linear motion generator)를 채택한다. 부유체의 파도에 의한 상하운동을 그대로 발전기 회전자 운동으로 바꾸기 위함이다. 그러나 선형발전기는 다양하게 상용화 되어있지 않으므로, 이 경우 특별히 설계된 선형발전기를 제작해야 하는 어려움이 있으며 회전자의 왕복 운동에 따라 발전 전력이 크게 변동한다. 이에 비해 본 연구에서 제시한 장치는 보다 일반적인 회전형 발전기를 사용하므로 상용화 제품을 사용하기에 유리하며, 또 회전지는 일방향 회전을 하므로 회전자의 관성에 의해 보다 일정한 전력을 생산할 수 있는 장점이 있다.

2. 파력 발전장치 구성

2.1 구조

본 논문에서 연구개발 하고자 하는 파력발전장치는 Fig. 1과 같다. 그림에서 소형부유체(buoy)는 속이 비어있고 단면적이 큰 물체로 파도에 의한 부력변화에 민감하게 반응하여 파도와 함께 상하운동을 한다. 이 상하운동에 따라 소형 부유체에 연결된 아암(arm) 끝단의 축(shaft)이 왕복비틀림회전을 하게 된다. 이것으로 헤드(head) 내부에 설치된 발전기를 회전시켜 발전하게 된다. 그림에서는 편의상 4개의 소형부유체를 그렸으나, 더 많은 개수의 부유체도 가능하다. 헤드(head), 기둥(column), 안정판(plate), 무게추(weight)이 서로 고정되어 발전장치의 몸체를 이룬다. 기둥은 단면적이 작고 속이 비어있으며, 안정판은 발전장치몸체가 운동할 때 해수의 저항력을 발생시켜 운동을 억제한다. 무게추는 발전장치 몸체가 수직으로 자세를 유지하게 하는 역할을 한다. 이들 구성요소들의 부력과 자중을 고려한 적절한 설계를 통하여 해수면이 기둥에 위치되도록 한다. 파도에 의한 해수면 높이 변화 ΔH 와 부력 변화 ΔB 의 관계식은 아래와 같다.

$$\Delta B = \text{해수비중} \times \text{단면적} \times \Delta H \quad (1)$$

발전장치의 몸체는 질량이 매우 크고, 해수면과의 접촉 단면적이 작으므로 $\Delta B/\Delta H$ 값이 작게되어 파도에 상대적으로 둔감하게 된다. 이에 비해 소형부유체는 질량이 작으나 상대적으로 단면적을 크게 설계함으로써 $\Delta B/\Delta H$ 값이 크게되어 파도에 민감하게 된다.

즉 파도에 의해 몸체는 상대적으로 적게 움직이나, 부유체는 파도에 따라 민감하게 크게 상하운동 하게된다. 이와같은 원리로 소형 부유체와 발전장치 몸체 사이에는 상대운동이 발생되며, 마치 바다 위에 움직임이 적은 발전 장치몸체둘레에 여러 개의 소형부유체가 파도에 따라 상하운동을 하면서 아암의 크랭크 축(shaft)을 계속하여 방향을 바꿔가며 비틀고 있는 형국이 된다.

2.2 동력 전달 기구

Fig. 1의 헤드(head) 내에는 Fig. 2에 보인 바와 같은 발전기와 구동장치가 구비되어있다. 그림에서 소형 부유체(buoy)가 상승(하강)운동함에 따라 크랭크축의 끝에 고정된 베벨기어(bevel gear)가 회전하게 되고, 링기어(ring gear), 위성기어(planet gear)를 거쳐 태양기어(sun gear)를 회전시키며 태양기어는 발전기의 로터 축에 연결되어 발전기를 회전시킨다. 부유체가 상승과 하강할 때 모두 발전기를 회전시킬 수 있도록 하고, 각 부유체의 운동이 타 부유체의 운동에 간섭을 일으키지 않도록 하며, 발전기가 한 방향으로 회전되게 하기 위한 기구부를 고안하였으며 Fig. 3에 보였다.

Fig. 3에서 베벨기어(9, bevel gear)는 연결된 우측 아래에 있는 부유체(3, buoy)가 상승할 때에만 동력을 전달 하도록 라켓이 구비되어있다. 평기어(10, spur gear)은 연결된 부유체가 하강할 때에만 동력을 전달하도록 라켓이 구비되어있다. 각 부유체에 같은

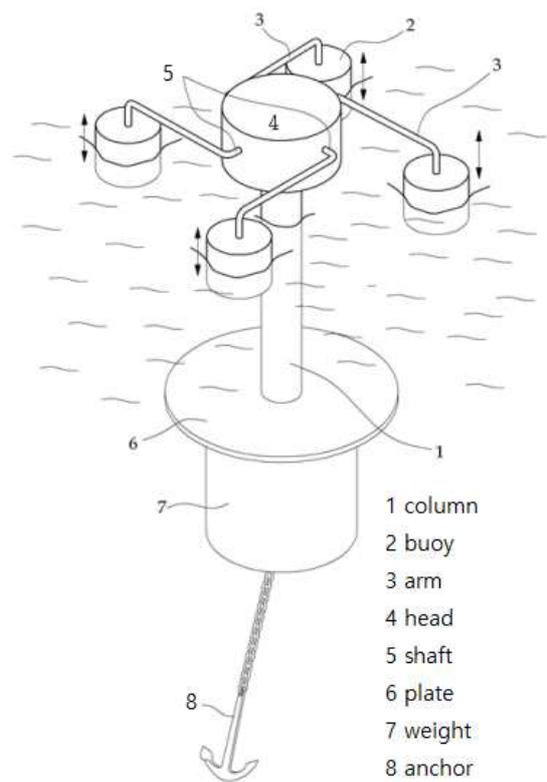


Fig. 1 Construction of a wave power generator

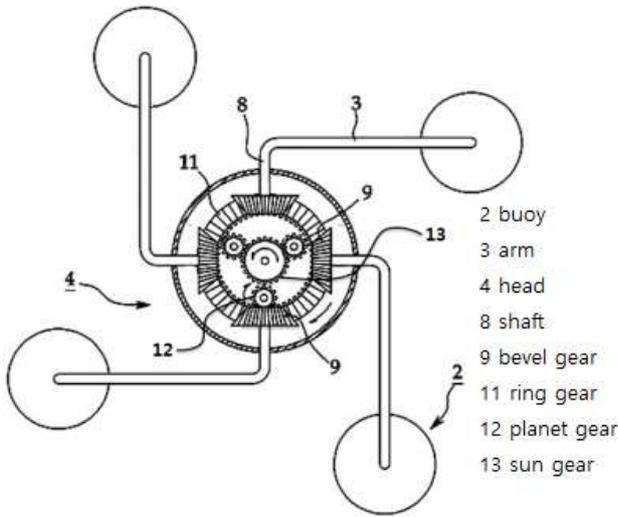


Fig. 2 Mechanism to rotate a power generator

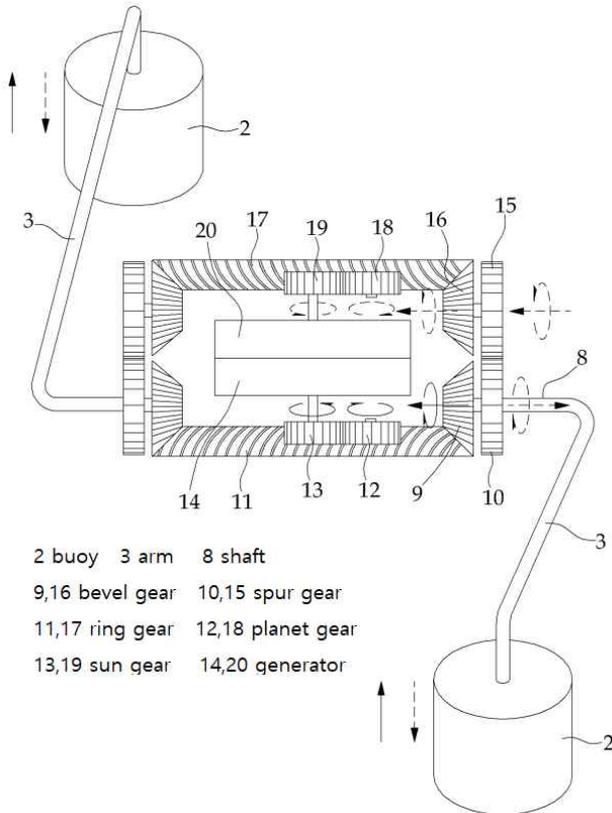


Fig. 3 Side view of the mechanism

방식의 라켓이 베벨기어와 평기어에 구비된다. 이제 우측 아래의 부유체가 상승하면 베벨기어(9, bevel gear)가 회전력을 발생시켜 링기어(11, ring gear), 위성기어(12, planet gear), 태양기어(13, sun gear)를 회전시키므로 아래쪽 발전기(14, generator)를 회전시킨다. 이제 그 부유체가 하강할 때에 베벨기어(9, bevel gear)는 구비된 라켓에 의해 동력전달을 하지 못하며 평기어(10, spur gear)이 회전력을 발생시켜 한 몸체로 되어있는 윗쪽 평기어(15,

spur gear)와 베벨기어(16, bevel gear)를 통해 위쪽 발전기(20, generator)을 회전시킨다. 이와 같은 기구에서 부유체의 상호 간섭 여부를 검토할 때, 해당 베벨기어와 평기어에 같은 방식의 라켓이 구비되어 있으므로 상호 부유체의 운동에 의해 간섭받지 않음을 알 수 있게 된다. 즉, 부유체들이 각기 상승 또는 하강 할 때에는 동일한 발전기를 같은 방향으로 회전시키게 되며, 서로 어긋나게 하나가 상승, 다른 것이 하강할 때에도 서로 방해하지 않으며 발전기를 회전시키게 된다.

3. 해석 모델 및 이론식

3.1 파도

본 논문에서 제시한 파력발전 장치의 발전용량을 예측하기 위하여 이론해석을 수행한다. 이를 위해 파도의 수학적 표현이 필요하다.

파도를 살펴보면 거의 일정한 주기로 밀려오는 주 파도와 밀려오는 주 파도 사이에 상대적으로 작은 높이와 빠른 주기로 일렁이는 부 파도로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 다음 절에 주 파도와 부 파도에 관한 수학적 표현을 구하였다.

3.1.1 주 파도

Fig. 4에서 보인 바와 같이 주 파도는 조화함수 모양의 파도가 주기적으로 지나가는 것으로 보았다. 파고와 파도의 주기는 국립해양조사원(KOOPS)의 통계보고서를 근거로 하여 파고(h_m)는 1.5 m, 파도의 기본주기(T_w)는 7.5 sec로 정하였다. 파도의 주기는 기본주기의 10% 범위 내에서 랜덤하게 변한다고 가정하였다. 파도의 속도(V_m)는 1.5 m/s로 하였으며, 주 파도의 폭(W_m)은 파고(h_m)의 1.2배로 가정하였다. 파도의 파장(m)은 V_m 와 T_w 의 곱이 된다. 이 때 주 파도의 함수식 $x_m(t)$ 은 한 주기 안에서 아래와 같이 결정된다.

$$x_m(t) = -\frac{h_m}{2} \cos \omega_m t + \frac{h_m}{2}, \quad 0 < t \leq \frac{2\pi}{\omega_m} \quad (2)$$

$$x_m(t) = 0, \quad \frac{2\pi}{\omega_m} > t \geq T_w$$

where, $\frac{2\pi}{\omega_m} = \frac{W_m}{V_m}$

3.1.2 부 파도

부 파도, 즉 일렁임은 Fig. 5에서 보인 바와 같이 싸인파가 진폭과 주기가 바뀌면서 연속적으로 나타나는 것으로 모델링 하였다. 진폭 h_s 는 주 파도의 파고(h_m)의 0 ~ 0.1배 사이에서 랜덤값이

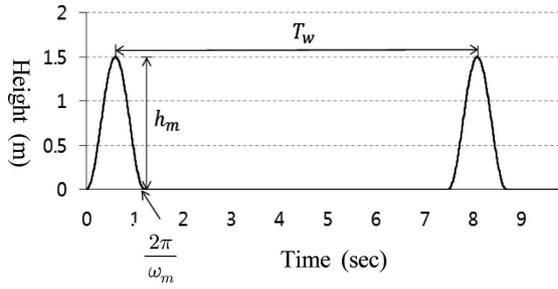


Fig. 4 Model of main wave

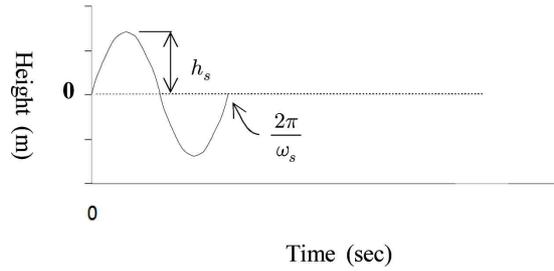


Fig. 5 Model of sub wave

되는 것으로 하였고, 주기(T_s)는 0 ~ 2초 사이에서 랜덤값을 가지는 것으로 하였다. 부 파도의 식은 아래와 같이 쓰여진다.

$$x_s(t) = h_s \sin \omega_s t \quad (3)$$

where, $T_s = \frac{2\pi}{\omega_s}$

상술한 바와 같이 파도의 현재 높이, $x(t)$ 는 위에서 정의된 주 파도와 부 파도의 합으로 모델링된다.

$$x(t) = x_m(t) + x_s(t) \quad (4)$$

3.2 구조물

Fig. 6는 본 연구에서 제시한 파력발전 기구의 동역학적 해석을 위한 단순화된 모델이다. 이제 하나의 부유체가 라켓에 의해 상승시에만 발전하는 경우를 생각하자. $x(t)$ 는 현재의 파도 높이이다. L 은 아암의 길이이며 θ_1 은 아암의 해수수평면으로부터 상승회전 각이다. J_1 은 Fig. 3을 참조하여 평기어(10, spur gear)로부터 위성기어(12, planet gear)까지의 동력전달부와 아암과 부유체의 θ_1 에 관한 등가관성모멘트이며, J_2 는 태양기어와 발전기 회전자에 대한 등가회전관성모멘트이다. 그림에서 부유체가 파도에 의해 상승하면 좌측 끝이 J_1 에 라켓을 통해 고정된 아암이 J_1 을 회전시킨다. 이때 라켓에 의해 한쪽방향으로만 회전시키게 된다. 이와 같이 단순화된 모델의 자유물체도를 그리면 아래의 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 이 자유물체도로부터 회전모멘트-각가속도의 관계식을 적용하면 아래의 식을 얻는다.

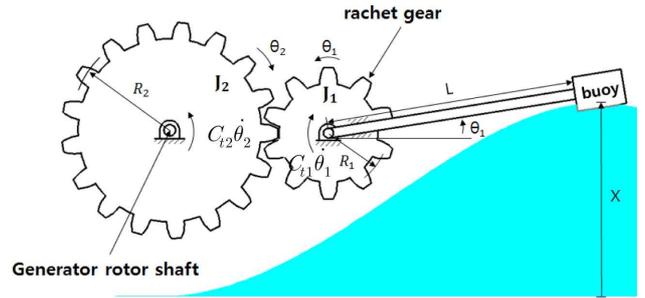


Fig. 6 Schematic of a wave power generating system

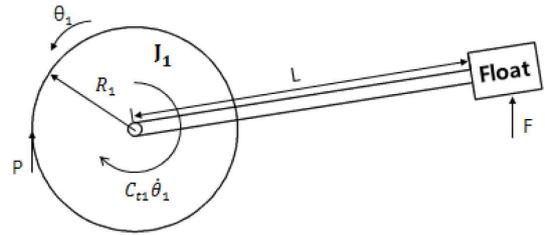


Fig. 7 Free body diagram of J_1

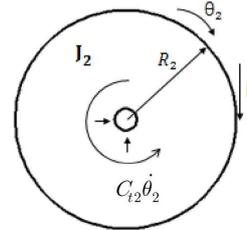


Fig. 8 Free body diagram of J_2

$$-R_1P + \rho g A L (x - L\theta_1) - C_{11}\dot{\theta}_1 = J_1\ddot{\theta}_1 \quad (5)$$

$$R_2P - C_{12}\dot{\theta}_2 = J_2\ddot{\theta}_2$$

윗식에서 P 는 J_1, J_2 접촉점의 접촉력이며, ρ 는 바닷물의 질량밀도, g 는 중력가속도, A 는 부유체의 단면적, C_{11} 은 J_1 의 회전댐핑계수, C_{12} 는 J_2 의 회전댐핑계수이다.

이제 부유체가 상승할 때만 동력을 전달하는 라켓의 효과를 생각하면,

$$\text{when } R_1\dot{\theta}_1 < R_2\dot{\theta}_2, \quad P = 0 \quad (6)$$

발전기에 의한 발전전력은 발전기 회전자 축에 가해지는 토크와 회전각속도의 곱에 효율 η 를 곱한 값이 된다. 회전각속도는 코일이 자속을 끊는 속도이므로 전압에 관계되며, 토크는 이때 발생하는 힘에 의한 것이므로 전류의 크기에 관계된다.

$$\text{Power} = \eta \cdot \text{Torque} \cdot \dot{\theta} = \eta \cdot C_{12}\dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_2 = \eta C_{12}\dot{\theta}_2^2 \quad (7)$$

4. 수치 해석

앞의 식 (2)~(7)의 비선형 미분방정식의 수치해를 구함으로써 본 연구에서 제시한 파력발전기의 대체적인 발전용량을 평가하고, 주요 설계변수의 영향을 알아보았다.

J_1 이 J_2 에게 동력을 전달하고 있는 상태인 식 (5)의 경우를 생각하자. 이때 $\theta_2 = \theta_2 \cdot R_1 / R_2$ 임을 고려하여 한 개의 식으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$J_e \ddot{\theta}_1 + C_e \dot{\theta}_1 + K_e \theta_1 = \rho g A L \cdot x(t) \tag{8}$$

where, $J_e = J_1 + J_2 \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$

$$C_e = C_{t1} + C_{t2} \left(\frac{R_1}{R_2}\right), K_e = \rho g A L^2$$

이제 감쇄비를 다음과 같이 정의 한다.

$$\zeta_{w1} = \frac{C_{t1}}{2\sqrt{J_e K_e}}, \zeta_{w2} = \frac{C_{t2}}{2\sqrt{J_e K_e}} \tag{9}$$

주요 설계변수로서 파도의 주기에 대한 발전기의 회전속도를 결정하는 R_2/R_1 와 발전기의 발전특성을 결정하는 ζ_{w2} 를 선택하였으며 이들 값의 변화에 따른 발전전력의 변화를 구하였다. 모든 초기 조건을 0로 하여 파도가 10번 지나갈 동안의 발전전력을 구하여 그 평균을 구하였다.

수치해석에서 사용한 파라메타 값은 실제 적용할 수 있는 값의 범위로 설정하였으며 그 값을 Table 1에 보였다. 수치해석 결과는 Fig. 9에 보였다. 그림의 결과는 본 해석에서 설정한 파라메타 값에 대하여 $R_2/R_1=0.136$, $\zeta_{w2}=0.495$ 에서 최대 발전전력 1,144 W를 보이고 있다.

5. 토론

본 연구 4절의 수치해석 결과에 따르면 본 연구에서 제시한 파력발전의 경우 부유체 1개가 상승할 때만 동력을 발생시킬 때 최대 1,144 W의 전력을 생산할 것으로 추정되었다. 본 연구에서 아암의 길이를 1.5 m로 하였으므로 파력발전기가 차지하는 평면 면적은 약 $1.5 \times 1.5 = 2.25 \text{ m}^2$ 이다. Fig. 3에서 제시한 바와 같은 장치로써 상승 및 하강운동 모두 발전에 이용하고 부유체를 4개를 사용하는 파력발전기 1기의 발전용량을 예측해보자. 설계단계에서 제작 후 실제 출력을 정확히 예측하는 것은 어려운 일이

Table 1 Parameters for numerical analysis

Symbol	Name	Value
ρ (kg/m ³)	mass density of sea water	1,024
L (m)	length of arm	1.5
A (m ²)	cross section area of a buoy	0.8
J_1 (kg·m ²)	rotary inertia of mechanism	536
J_2 (kg·m ²)	rotary inertia of generator	27
C_{t1} (Nm·s)	damping coeff. of mechanism	1,543

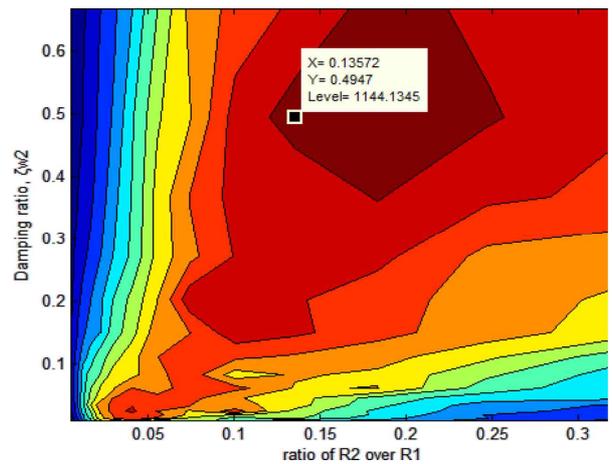


Fig. 9 Generated power by single buoy with single generator. $\eta=1$

므로 보수적으로 이론해석결과의 50%로 출력을 가정하면 총 발전량은 단위 면적 1 m²당 4,576 W가 되며 이 값은 태양광 발전⁷⁾에 비해 면적당 발전량은 약 20배 이상, 기존 파력발전기에⁸⁾ 인용되는 4 MW/km²를 상회한다.

6. 결론

본 연구에서는 다수의 부유체로 구성되는 파력 발전 장치를 고안하였으며 발전 용량을 이론적으로 해석하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 다수의 부유체가 파도에 의해 상승 하강하며 서로 방해함이 없이 회전형 발전기를 한 방향으로 돌리는 협력이 되도록 하는 기구장치를 제시하였다.
- (2) 다수의 부유체를 이용한 발전은 대형 1개의 부유체를 이용한 왕복운동에 의한 발전에 비해 균일한 발전이 가능하여 발전 품질이 우수하며, 상용의 회전식 발전기를 사용할 수 있는 장점을 갖는다.
- (3) 본 이론해석 따르면, 제시한 파력발전장치를 4개의 부유체로 구성하고, 본 발전장치의 실제 구현시의 출력을 이론해석결과의 50%인 것으로 보수적으로 가정할 때, 1 m² 당 4,576 W를 생산하

여 태양광 발전에 비해 20배 이상, 기존의 파력발전장치의 출력수준을 다소 상회하는 것으로 추정된다.

References

- [1] Drew, B., Phummer, A. R., Sahinkaya, M. N., 2009, A Review of Wave Energy Converter Technology, Proc. IMechE, 223: A 887-902.
- [2] Lee, K. H., Park, J. H., Back, D. J., Cho, S., Kim, D. S., 2011, Discussion on Optimal Shape for Wave Power Converter Using Oscillating Water Column, J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23:5 345-357.
- [3] Kim, J. R., Bae, Y. H., Cho, I. H., 2014, Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator Part I. Design of a Wave Power Buoy, J. of Korean Society for Marine Environment and Energy, 17:2 146-152.
- [4] Choi, Y. H., Lee, C. J., Hong, D. S., 2012, Dynamic Design of a Mass-Spring Type Translational Wave Energy Converter, J. of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21:1 182-189.
- [5] De O. Falcão, A. F., 2007, Modelling and Control of Oscillating-body Wave Energy Converters with Hydraulic Power Take-off and gas Accumulator, Ocean Engineering, 34:14-15 2021-2032
- [6] Kim, S. J., Koo, W. C., Min, E. H., Jang, H., Youn, D., Lee, B., 2016, Experimental Study on Hydrodynamic Performance and Wave Power Takeoff for Heaving Wave Energy Converter, J. of Ocean Engineering and Technology, 30:5 361-366.
- [7] So, S. H., Choi, J. Y., Yu, G. J., Jung, Y. S., Choi, J. H., 2004, A Study on Performance Analysis of 3kW Grid-Connected PV Systems, J. of Korean Solar Energy Society, 24:2 9-15.
- [8] Ryu, H. J., Hong, K., Shin, S. H., Kim, S. H., Kim, Y. D., 2011, Study on Analysis of Wave Energy Sources and Wave Energy Density Map of the Korean Sea Area, Proc. of KAOSTS, 1464-1468.