

복수 연결된 부유체-균형추식 파력발전장치의 전력량에 관한 연구

이성범¹ · Kesayoshi Hadano² · 문병영[†]

(원고접수일 : 2014년 3월 11일, 원고수정일 : 2014년 7월 8일, 심사완료일 : 2014년 7월 17일)

A study for electric power of float-counterweight wave energy converter

Sung-Bum Lee¹ · Kesayoshi Hadano² · Byung-Young Moon[†]

요약: 화석 연료의 고갈로 인해 신재생 에너지에 관한 관심이 날로 증가하고 있다. 그 중에서도 예측 가능성이 높고 이용 가능한 양이 풍부한 파력에너지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 부유체-균형추식 파력발전장치는 진동 타입과 비교해 구조 강도가 증진된 장치이며, 부유체의 포면에 웨이브 챔버라 불리는 격벽을 설치하여 파도가 오직 상하운동만을 하도록 만들었다. 본 논문은 주로 병렬 연결된 파력 발전장치의 발전량에 중점을 두고, 그 발전량을 계산하였다. 그 결과, nl/L 의 값이 증가할수록, 더 많은 전력량이 발생하고, $nl/L = 0.40$ 이상이 되었을 때, 상시 연속적인 발전량이 얻어진다는 것을 알 수 있었다. 이 연구를 통해서, 실제 해역 조건에 유리한 유수실을 설계하는데 기본 자료로 활용할 수 있다.

주제어: 파력 발전 장치, 발전량 추정, 발전장치 설계, 부유체 진동

Abstract: As a result of the exhaustion of fossil fuel, interest about renewable energy is increasing day by day. Inter alia, study for wave power energy of which the calculability is high and the available amount is abundant is going along actively. As a float-countweight wave energy converter is equivalent improved structural strength compared with oscillating body type. we made the wave only in order to up and down motion by setting up bulkhead which is called wave camber at the outside of float. This paper mainly focuses on generation amount of plural connected float-counterweight wave energy converter and we calculate the amount. The result, we confirmed that the more a numerical value of nl/L increases, the more amount of electricity rises and also when it is over $nl/L = 0.40$, it is possible to get continuous generation. Through this study, we can use as basic data for design of wave chamber on advantageous condition at the real seas and by way of estimation for generation amount.

Keywords: wave energy converter, wave chamber, generation amount, Design of WEC, Floating Motion

1. 서론

화석 연료의 고갈과 환경문제에 관한 규제가 강화됨에 따라 신재생 에너지에 대한 관심이 날로

높아지고 있다. 이 중 해양에너지는 태양광이나 풍력발전과 비교해 예측 가능성이 높고 안정적이며, 에너지 밀도는 공기의 약 800배로 이용 가능량이 풍부하다. 해양에너지를 이용하는 발전으로는 파

[†] Corresponding Author: Department of Naval Architecture, Gunsan National University, 558 Daehangro, Gunsan 573-701, Korea, E-mail: moonby20@gmail.com, Tel: 063-489-1854

1 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: space489@naver.com, Tel: 063-469-1854

2 Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi University, E-mail: khadano@yamaguchi-u.ac.jp, Tel: 0836-85-9317

력, 조석, 해류, 조류, 온도차, 염분의 농도차 등이 있으며, 그 중에서 파력에너지를의 세계적인 부존량은 약 2TW(Tera Watt)로 추정되고 있다. 현재 파력 발전은 상용화에는 이르고 있지 못하나, 연안 해역 적용기술을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 보다 대규모 자원 개발이 가능한 외해역 적용기술의 개발도 증가하고 있어 2015년 경에는 본격적인 상용화가 시작될 전망이다[1]. 이처럼 발전가능성이 높은 파력발전은 변환방식에 따라 가동물체형, 진동수주형, 월파형으로 구분할 수 있다.

부유체-균형추식 파력발전장치는 가동물체형 파력발전의 구조강도를 개선한 장치로 부유체의 외주부에 수조실로 불리는 격벽을 만들어 물결을 수조실의 하부로부터 유입시켜 전력발생의 동력원인 수면의 상하운동만을 일으키도록 하였다.

이와 관련한 기존 연구로는 Kesayoshi Hadano 외 [2] 부유체-균형추식 파력발전장치의 우수실 실험을 통해 수조실에 의한 증폭효과를 확인할 수 있었으며 수면 상하운동만으로 부유체의 가동이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 복수 연결된 부유체-균형추식 파력발전장치의 발생 전력량 평가를 실행하였다. 이를 통해, 실제 해역 조건에 유리한 우수실을 설계하고 전력량 평가 등의 기본 자료로 활용하고자 한다.

2. 부유체-균형추식 파력발전장치의 역학

2.1 부유체-균형추식 파력발전장치의 설명

Figure 1과 같이 부유체-균형추식 파력발전장치는 풀리, 와이어, 카운터웨이트, 로터 컨버전(라켓 기구 내장), 변속기, 발전기로 구성되는 파력 에너지 변환 장치이다. 플로트와 카운터웨이트를 와이어의 양단에 연결해, 플로트와 카운터웨이트를 와이어의 양단에 연결해, 플로트를 수면에 띄워 놓으면 물결의 힘에 의해 플로트가 상하 운동을 하게 되고, 와이어에 연결된 풀리가 반전 반복 운동을 하게 된다. 그 반전 반복 운동이 로터 컨버전에 의해 한 방향의 회전으로 변환되고, 변속기에 의해

주기가 증폭되어 전력을 획득하게 된다. 이 방식은 가동물체(부유체)의 동력을 변환하고 전달하는 기계 부분을 구조적으로 분리하여 설치나 유지보수를 용이하게 하였으며, 매우 단순한 구조로 저비용의 설치가 가능하다는 이점이 있다.

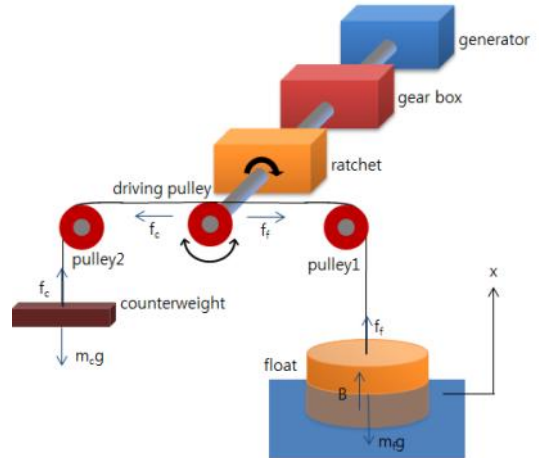


Figure 1: Mimic diagram of float-counterweight wave energy converter

2.2 부유체-균형추식 파력발전장치의 역학

부유체-균형추식 파력발전장치의 역학 모델은 무부하-정지 상태에서의 플로트와 카운터웨이트의 균형식, 가동상태에서의 플로트의 운동방정식, 회전체의 운동방정식, 발전기 관련 역학으로부터 주로 구성된다.

2.2.1 플로트의 무부하 정지상태에서의 균형식

플로트의 무부하-정지 상태에서의 균형식은 다음과 같이 주어진다. 식 (1)의 M_c 는 카운터웨이트의 질량, M_f 는 플로트의 질량, D_f 는 플로트의 직경, ρ_w 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도, h 는 플로트의 흘수이다. 이 식은 연직방향의 균형에 대해 세울 수 있으며, 플로트와 카운터웨이트에 연결한 와이어의 장력은 서로 동일하다는 관계로부터 성립되고 있다[3].

$$M_f g = \frac{1}{4} \pi \rho_w g D_f^2 h + M_c g \quad (1)$$

2.2.2 플로트의 가동상태에서의 운동방정식

(1) 플로트가 일부 몰수시($0 \leq h + x_w - x_f \leq H_f$)

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi \rho_w D_f^2 g (h + x_w - x_f) - M_f g + \frac{1}{8} C_D \rho_w \left| \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) - \pi D_f^2 - \frac{1}{4} C_M D_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2} \quad (2)$$

Figure 2는 플로트가 일부 몰수한 상태를 표현한 것이다. 식 (2)의 우변 제1항은 와이어 장력, 제2항은 플로트에 작용하는 부력, 제3항은 플로트에 작용하는 중력, 제4항은 물과 플로트의 상대운동에 의해 플로트가 받는 형상 저항, 제5항은 플로트가 유체 중에서 가속하는데 필요한 추가적인 힘, 부가 질량을 나타낸다. 일부 몰수상태일 때 발전이 용이하다.

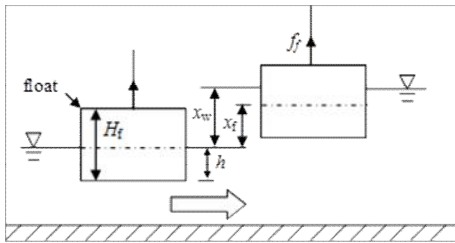


Figure 2: State of partially sunken float

(2) 플로트의 전체 몰수 시($h + x_w - x_f > H_f$)

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi \rho_w D_f^2 g H_f - M_f g + \frac{1}{8} C_D \rho_w \left| \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) - \pi D_f^2 - \frac{1}{4} C_M D_f^2 \rho_w H_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} \quad (3)$$

식 (3)의 우변의 의미는 식 (2)와 같다.

(3) 플로트가 공중에 매달렸을 시($h + x_w - x_f < 0$)

$$M_f \cdot \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f - M_f g \quad (4)$$

2.2.3 회전체의 운동방정식

Figure 3는 구동폴리의 반시계방향으로 회전할 때 와이어의 장력의 움직임에 대한 운동에 대한 것을 표현한 것이다. 회전체의 운동방정식은 식 (5)로 주어진다. θ 는 회전체의 무부하정지 상태에서부터 반시계방향의 회전각, I 는 회전체 전체의 관성 모멘트, C 는 기계 전체의 점성 감쇠 계수, τ 는 발전기에 의해 구동 폴리가 받는 반시계방향의 토크, f_c 는 카운터웨이트에 의한 장력, R_m 는 구동폴리의 반경이다. 좌변 제1, 2항은 각각의 운동량 미분, 기계 전체의 점성에 의한 감쇠를 나타낸다. 또 플로트 하강 시에만 구동 폴리가 회전하기 때문에, 식 (5)의 τ 은 항상 정이 된다[4]. (식 (7) 참조)

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + (f_c - f_f) R_m \quad (5)$$

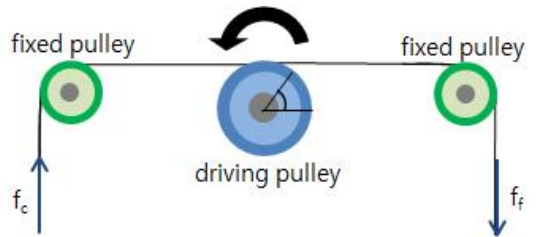


Figure 3: Block diagram of a body of revolution

또한, 카운터웨이트의 상승량을 x_c 로 하면, 카운터웨이트의 운동방정식은 식 (6)으로 주어진다.

$$M_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} = f_c - M_c g \quad (6)$$

2.2.4 발전기 관련 역학

발전기 관련 역학으로서 토크 τ , 발생 전압 e , 발생 전력 P_G 는 식 (7), (8), (9)로서 표현된다. i 는 발전기에 발생하는 전류, G 는 기어비, k_τ 는 토크 계수, k_e 는 유도 발전 계수, r 은 정, e 는 식 (8)이 되어, 상승 시에는 $\tau=0$, $e=0$ 이 된다.

$$\tau = -Gk_\tau i \quad (7)$$

$$e = Gk_e \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

$$P_G = r \cdot i^2 = r \left(\frac{-Gk_e}{r} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (9)$$

플로트 변위 x_f 와 카운터웨이트 변위 x_c , 플리의 회전각 θ 에는 다음과 같이 관계가 있다.

$$x_f = R_m \theta \quad (10)$$

$$x_c = -R_m \theta \quad (11)$$

2.2.5 최종적인 계산식

(1) 플로트가 일부 몰수 시

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{I}{R_m} + (M_f + M_c)R_m + \frac{\rho_w \pi C_M D_f^2}{4} (h + x_w - X_f)R_m \right\} \\ & \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2 k_\tau k_e}{r} \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho_w g \pi}{4} D_f^2 R_m \theta \\ & = \frac{\rho_w g \pi}{4} D_f^2 x_w + \frac{1}{8} \rho_w \pi C_D D_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \\ & \cdot \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (12) \end{aligned}$$

(2) 플로트의 전체 몰수 시

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{I}{R_m} + (M_f + M_c)R_m + \frac{\rho_w \pi C_M D_f^2}{4} R_m \right\} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \\ & \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2 k_\tau k_e}{r} \right) \frac{d\theta}{dt} = \frac{\rho_w g \pi}{4} D_f^2 x_w + \frac{1}{8} \rho_w \pi C_D D_f^2 \\ & \cdot \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (13) \end{aligned}$$

(3) 플로트가 공중에 매달렸을 시

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{I}{R_m} + (M_f + M_c)R_m \right\} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \\ & \cdot \left(C + \frac{G^2 k_\tau k_e}{r} \right) \frac{d\theta}{dt} = (M_c - M_f)g \quad (14) \end{aligned}$$

2.3 계산 조건

이론식에서의 물결의 조건은 정현파를 가정한 다. 파고를 H , 물결의 진동수를 w 라 하면, 수면 변동은 식 (15), 초기조건은 식 (16)으로써 주어진다.

$$x_w = \frac{H}{2} \cos(wt) \quad (15)$$

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \frac{d\theta}{dt} \Big|_0 = 0 \quad (16)$$

여기서, 식 (16)의 초기 시간은 수면이 최고 지점일 때를 나타낸다. 소정의 물결과 초기조건에 대하여 계산하여 θ 의 시계열을 요구하면, R_m 를 도입했을 경우의 시시각각 $\dot{\theta}$ 와 $\ddot{\theta}$ 를 얻을 수 있고, 발생 전력 등 역화제량의 시계열을 구할 수 있다.

3. 복수 연결시의 평가

부유체-균형추식 파력발전 장치는 플로트가 중력에 의해 하강하는 경우에만 발전하고 있다. 본 연구에서는 부유체-균형추식 파력발전장치를 복수 연결시키는 일을 제안함으로써 발생 전력의 상태를 평가해 본다. 장치 제원으로서, 일본 야마구치 대학 해양환경공학 연구실과 함께 시모노세키의 인공섬 부근의 조건으로 계산 및 평가를 실시하였다.

3.1 계산에 이용하는 장치 제원

복수 연결 시의 발생전력의 평가를 실시하기 전에, 안정된 발생전력의 상태를 살펴보기 위해서, Table 1과 같은 장치의 제원을 이용한다. 이 장치는 일본의 미즈비시중공업(주) 나가사키 연구소의 내항성능 시험 수조이며 평균 수심은 3.2m, 폭은 30m, 길이는 160m이다.

Table 1: Parameters of equipment

제원	명칭	기호와 단위	수치
부유체	밀도	$\rho_f (kg/m^3)$	745.7
	높이	$H_f (m)$	0.7
	직경	$D_f (m)$	2
	흘수실	$h (m)$	0.4
	흘수량	h/H_f	0.5714
카운터웨이트	질량	$M_f (kg)$	1680
	질량	$M_c (kg)$	150
구동 풀리	반경	$R_m (m)$	0.18
	관성모멘트	$I (kg \cdot m^2)$	0.123
기어 박스	기어비	G	41.36
발전기	유도발전계수	$k_s (V/rpm)$	0.7639
	토오크계수	$k_t (N \cdot m/A)$	0.7639
	부하 저항	$r (\Omega)$	0.666
기계부분	점성감쇠계수	$C (N \cdot m \cdot s)$	1470

3.2 파랑 조건

계산에 이용하는 물결 조건은 시모노세키의 인공섬 부근의 물결 조건을 이용한다. 파랑정보의 취득에는 나우파스[5] (일본 국토교통성 항만국 전국항만 해양 파랑 정보)를 이용했으며, 시모노세키의 인공 섬에서 가장 가까운 기타큐슈 아이노시마의 2011년도 파랑 데이터를 사용한다. 일본해는 물결의 힘이 동기일 때 크므로 **Table 2**의 파랑데이터를 이번 전력 평가의 물결 조건으로 이용한다. **Table 2**에 있는 하늘색 표기 부분은 발생 빈도 1.0% 이상~10%미만, 황색 표기 부분은 발생 빈도 10%이상~20%미만을 나타낸다. 파고 H 는 **Table 2**에서 발생빈도의 10%의 물결이 집중하고 있는 0.5m, 주기는 5s로 결정하였다.

Table 2: Wave data of Ainosima island (12:1-2)

파고(m)	-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
3.01-3.5	0	0	0	0	0	0
2.51-3	0	0	0	0	0	0
2.01-2.5	0	0	0	0	0.294574	0.015504
1.76-2.00	0	0	0	0.232558	0.635659	0.062016
1.51-1.75	0	0	0	1.844961	0.403101	0
1.26-1.5	0	0	0.031008	2.96124	0.418605	0
1.01-1.25	0	0	3.937984	3.891473	0.217054	0
0.76-1.00	0	0.031008	11.64341	3.705428	0.046512	0
0.51-0.76	0	4.418605	16.04651	3.503876	0.139535	0
0.26-0.5	0.821705	15.73643	15.62791	3.922481	0.093023	0
-0.25	3.193798	4.790698	1.224806	0.108527	0	0

3.3 유수실의 선정

본 장치를 복수 연결하는 경우, 플로트가 받는

수면 변동의 시간적인 엇갈림을 이용해 연속적인 수면 상하운동이 일어날 수 있도록 복수 연결된 장치의 플롯 부분에 유수실을 설치하고 각 수조 실 안 플로트의 운동방정식을 계산한다. 그러나, 순수한 복수 연결 시, 유수실 효과에 따른 물결의 증폭율과 발전 시간의 원활화 및 발생 전력의 증가량을 평가하기 위해 파랑 조건은 무시한다.

3.4 복수 연결 시 계산 조건

물결 가장 위쪽의 플로트는, 적당한 물결의 봉우리에서 초기 시각 $t = 0$ 으로 가동을 개시하지만, 복수 연결 시 n 번째 플로트에서의 초기 시각은 $t = nl/c$ 로 가동을 개시하는 것으로 한다. 여기서, l 은 플로트 간의 거리, c 는 파속을 나타낸다[6].

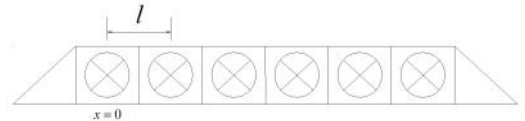


Figure 5: Mimic diagram in wave chamber

물결 가장 위쪽의 플로트 위치를 $x = 0$ 이라 하였을 때 물결의 수면 변위는 식 (17)과 같으며, 물결 가장 위쪽의 n 번째 플로트 위치를 $x = nl$ 이라 하였을 때의 수면 변위는 식 (18)과 같다.

$$x_{w1} = \frac{H}{2} \cos \frac{2\pi}{T} t \tag{17}$$

$$x_{wn} = \frac{H}{2} \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{1}{c} nl \right) \tag{18}$$

장치 제원의 플로트 직경 D_f 는 2m, 유수실간 거리 l 은 3m로 결정하였다.

3.5 전력량 평가

부유체-균형추식 파력발전장치의 역학 모델과 계산 조건 및 물결 조건 그래프에서 세로축은 발생 전력 PG(kw)를 가로축은 시간 T(s)를 나타내고 있으며, 범례는 유수실폭·파장비 nl/L 이다. 여기에서 n 은 장치의 복수 연결 개수이다.

Figure 6-7의 발생 전력 그래프를 보면, 물결의

처음 일 주기의 값이 다른 발생 전력값과 정합성이 잡히지 않은 것은, 플롯트의 초기의 움직임이 과도현상에 의해 비정상 상태였다고 생각되므로, 평가에 포함시키지 않는다. 장치단체로부터 4 연결 시까지의 평가로 Figure 6을 보면, $nl/L = 0.08$ 일 때, 피크의 발생 전력은 0.46kw 이며, $nl/L = 0.16$ 일 때, 80kw , $nl/L = 0.24$ 일 때, 0.95kw , $nl/L = 0.32$ 일 때, 0.98kw 인 것을 알 수 있다.

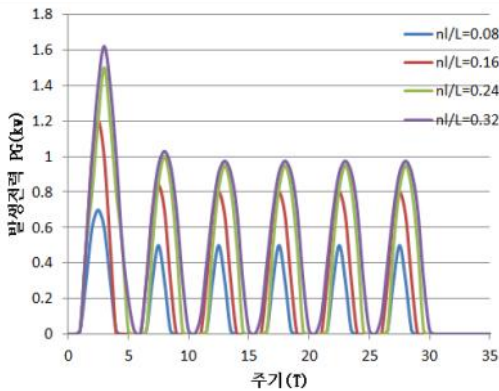


Figure 6: Electric power when $nl/L=0.08\sim 0.32$

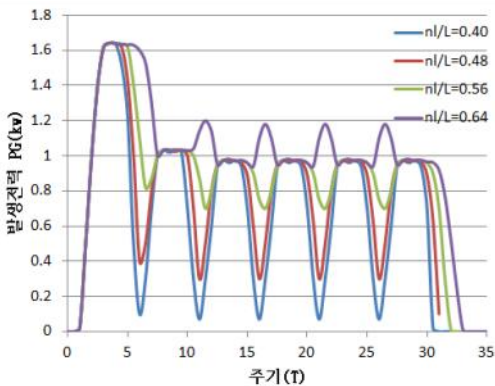


Figure 7: Electric power when $nl/L=0.40\sim 0.64$

연결수의 증가에 수반해 발생 전력의 물결이 커지고 있으며 이는, 물결 가장 위쪽의 장치로부터 발생 전력의 물결이 거둬들여 합쳐졌기 때문이다. 장치 단체에서 4연결 시까지는, 상시 발전이 행해지지 않았으나 5연결 시, 즉 $nl/L = 0.40$ 에서는 상시 연속적인 발전이 행해진다는 것을 알 수 있다.

또, $nl/L = 0.56$ 인 시점까지는 발생 전력의 피크치가 0.98kw 이상으로 커지지 않고 있으며, $nl/L = 0.64$ 시점에서의 최소 발전량은 0.98kw 인 것을 알 수 있다.

이와 같이, 복수 연결에서의 가동을 실시하면 발전기의 로스가 회피되어 효율적으로 발생 전력을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 소수의 복수 연결에서는, 연속적인 전력 공급이 어렵겠으나 발생 전력의 증가는 전망된다. 또, 연속적으로 상시 발전할 수 있는 조건은, 물결의 상태에 따라서 장치의 연결 개수가 다르겠지만, 대략 5연결 시인 $nl/L = 0.40$ 이상의 값이라고 고찰할 수 있다.

4. 결 론

복수 연결된 파력발전장치의 발생 전력에 대한 역학적인 평가를 진행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 복수 연결에 의한 발생 전력의 증가는, 각 플롯트에 발생하는 전력의 공진에 의해 증폭하게 된다는 것을 알게 되었다. 즉, nl/L 의 값이 커지는 만큼 총 발전량은 증가해 복수 연결에 의한 발전량의 향상이 전망된다.

2) $nl/L = 0.32$ 까지는, 발생전력이 0kw 일 때가 일정시간 계속되어 상시 발전이 가능하지는 않지만, 발생 전력의 증가는 전망된다.

3) $nl/L = 0.40$ 이상에서는, 상시 발전되고 있어 본 장치의 복수 연결에 의한 연속적인 발전이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4) $nl/L = 0.56$ 인 시점까지는, 최대 발생 전력치가 0.98kw 이상으로 커지지 않고 있는 것이 확인되었다.

5) $nl/L = 0.64$ 인 시점에서는, 발전량의 최소치로 항상 0.98kw 가 전망되며 최대의 발생 전력량이 한층 더 증가한 것을 확인할 수 있다. 이것은 물결 가장 위쪽의 평가 개시로부터 이 주기 눈의 발생 전력의 물결이 서로 겹쳐졌기 때문이다.

이번 연구로 복수 연결 시 발전량의 증가를 확인할 수 있었으며, 연결된 장치의 수가 증가할수록 상시 발전이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 향후

는 군산 앞바다의 파랑조건 데이터를 이용하여 역학적 검토를 한 뒤 이를 근거로 해 실증 실험을 실시할 예정이다.

후 기

본 연구는 전라북도 R&D지원사업의 지원(2013하A25)과 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과 (No. 2013H1B8A2023237)의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] “Agency for natural resources and energy ministry of economy,” Proceedings of the Trade and Industry, 2008.
- [2] K. Hadano, B. Y. Moom, S. B. Lee, J. S. Park, and J. S. Park, “The experimental study about kinetic change of water surface in the chambers for wave energy converter,” Journal of the Korean Society for Fluid Machinery, vol. 17 , no. 2, pp. 41-47, 2014.
- [3] New Energy and Industrial Technology Development Organization(NEDO): New Energy Guide Book, 2008.
- [4] B. Watanabe and C. Suknang: Wave Power in the 21st Century as a Clean Development [From the Application to the Principle], the power company, 2005.
- [5] <http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-jyo/kaisy/index.htm>, Accessed October 4, 2011.
- [6] S. Haenghwan, Natural Energy Utilization Studies Aim to Playback of the Global Environment(Revised), Power Corporation, pp. 161-194, 1999.