

파도를 이용한 광대역 진동에너지 하베스터에 대한 연구

한기봉¹ · 이형우[†]

(원고접수일 : 2013년 8월 7일, 원고수정일 : 2013년 8월 27일, 심사완료일 : 2013년 9월 6일)

The research of wide band vibration energy harvester using ocean wave

Ki-Bong Han¹ · Hyoung-Woo Lee[†]

요약: 기존의 진동에너지 하베스터는 한 주파수에서의 공진현상을 이용하여 에너지를 얻기 때문에 고정된 단일 주파수를 갖는 진동에너지로부터 전기에너지를 변환하는데 최적이지만 다양한 주파수를 포함하고 있는 파도와 같은 상하진동 에너지원으로부터 전기에너지를 얻는 데에는 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 파도가 갖는 무한한 상하진동 에너지로부터 전기에너지를 얻는 광대역 진동에너지 하베스터를 연구하였다. 광대역 진동에너지 하베스터는 부양체와 진동에너지 하베스터가 각각 파도에너지가 갖는 중심주파수에서 공진이 발생되도록 구성되어있다. 그 결과 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터는 한 주파수에서만 진동에너지를 전기에너지로 변환할 때 효율을 극대화할 수 있는 반면, 제안한 방법은 다양한 주파수를 포함하고 있는 파도에너지로부터 전기에너지로 변환할 때 효율을 극대화 할 수 있는 장점을 가진다.

주제어: 광대역, 진동에너지 하베스터, 부양체, 전기에너지, 공진

Abstract: In general, existed vibration energy harvester is optimum in electronic energy gleaned from vibration energy with fixed single frequency, because it is using resonance. But it is limit in electronic energy gleaned from ocean wave energy with variant frequency.

This paper studied for width band vibration energy harvester that obtains electronic energy from ocean wave with infinite vibration energy in order to solve it. It is composed of buoy to occur resonance in the center frequency of ocean wave energy and the vibration system to occur resonance in the same frequency.

As a result, existed vibration energy harvester using resonance maximized electronic energy conversion efficiency in single frequency, while proposed width band vibration energy harvester has merit that maximized electronic energy conversion efficiency in ocean wave with variant frequency.

Keywords: Width band, Vibration energy harvester, Buoy, Electronic energy, Resonance.

1. 서론

최근 환경오염 및 에너지문제가 심각하게 대두되면서 해양 에너지에 대한 관심이 크게 부각되고 있다. 해양에너지로부터 전기에너지를 얻는 데에는 다양한 방법들이 있는데 바닷물의 상하운동인

파도에너지를 이용하여 전기를 얻는 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2].

이 중 가동물체형 발전방식이 다른 발전방식에 비해 에너지변환효율이 높으나 바다표면에 설치해야하기 때문에 넓은 표면적을 차지하는 단점을 가

[†] Corresponding Author: Department of Mechatronics Engineering, Jungwon University, 85, Munmu-ro, Goesan-eup, Goesan-gun, Chungbuk, 367-700, Korea, E-mail: leehwoo@Jwu.ac.kr, Tel: +8243-830-8940

¹ Department of Mechatronics Engineering, Jungwon University, E-mail: kbhan@Jwu.ac.kr, Tel: +8243-830-8265

지고 있다. 최근 이러한 단점을 해결하기위해서 부표를 바닷물 표면에 띄우고, 바다 밑 바닥에 설치된 선형 발전기를 그 부표에 연결시켰다[3]. 이 방식은 바다의 생태환경에 미치는 영향과 설치 시 바다표면적은 많이 줄일 수 있으나 발전효율은 크게 개선되지 않았다. 파도에너지를 전기에너지로 변환하는 효율을 높이기 위한 방식으로는 공진을 이용한 진동에너지 하베스터가 있다. 이는 파도에너지가 갖고 있는 주파수와 진동 에너지 하베스터를 구성하고 있는 진동시스템의 고유진동수를 일치시켜 발생하는 공진을 이용하는 방식이다[4][5]. 특정한 하나의 주파수에서의 에너지 이용 효율은 높지만 파도에너지가 가지는 다양한 주파수들과 동시에 일치시키는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제점을 보완하기위해서 부양체와 2자유도진동발전시스템을 일체로 구성한 2자유도 파력진동발전 시스템을 제안하였다[6]. 공진에 의해 각각의 질량과 권선사이의 상대속도가 증폭되고, 또한 질량과 질량사이의 연성이 영구자석과 권선사이의 상대속도에 영향을 준다는 사실을 이용하여 발전효율을 증가시켰다. 그러나 2자유도 파력진동발전 시스템의 구조가 복잡하고, 파도 에너지가 갖는 주파수가 공진주파수사이에 있다면 발전효율을 극대화할 수 없다.

이러한 단점을 극복하기위하여 파력 발전기를 구성하는 부양체와 진동시스템에 대하여 연구하였다[7]. 파도에너지가 갖는 중심주파수와 부양체 그리고 진동시스템의 고유진동수를 동시에 일치시켜 진동시스템이 파도에너지가 갖는 주파수대역에서 작동됨을 보였지만 에너지 수확에 대한 구체적인 연구가 없었다.

본 논문에서는 에너지 수확을 위해서 부양체와 진동에너지 하베스터가 결합된 다양한 주파수를 포함한 파도의 상하 운동에너지로부터 전기에너지를 얻는 방법을 제안하였다. 이 방법은 파도에너지가 가지는 중심주파수와 부양체와 파도로 구성된 시스템의 고유진동수 및 진동에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템의 고유진동수를 동일하게 진동에너지 하베스터를 설계함으로써 시시각각 변하는 광대역 주파수를 갖는 파도에너지로부터 전기

에너지로의 변환효율을 증가시키는 것이다.

2. 파도를 이용한 광대역 진동형 에너지 하베스터의 모델링

2.1 파도를 이용한 광대역 진동형 에너지 하베스터의 구조

Figure 1은 다양한 주파수를 포함하는 파도에너지로부터 전기에너지를 얻는 광대역 진동에너지 하베스터의 구성을 나타낸다. 파도를 이용한 광대역 진동에너지 하베스터는 내부진동에너지 하베스터를 보호하면서 부양 및 파도에너지를 진동에너지 하베스터로 전달시키는 역할을 하는 하우징인 부양 체와 부양체로부터 진동에너지를 받아 전기에너지로 변화시키는 부양체 내부에 진동발전기 그리고 부양체를 항상 중력 방향으로 향하게 하는 무게추로 구성되어있다. 여기서 진동발전기는 1자유도 진동시스템과 진동시스템을 구성하는 진자인 영구자석과 영구자석 주위의 권선코일로 구성되어 있다. 부양 체는 바닷물의 상하운동에너지를 증폭시켜 진동시스템에 전달하고, 상하운동을 전달 받은 영구자석은 주변에 감겨있는 권선과 상대운동을 발생시켜 운동에너지를 전기에너지로 변환시킨다.

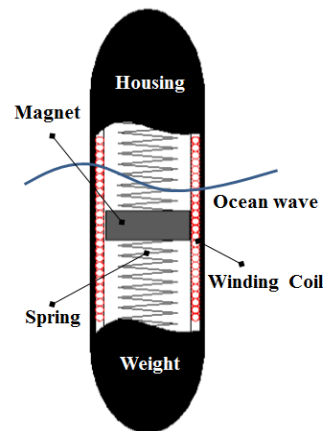


Figure 1: The schematic of wide band vibration energy harvester using ocean wave

2.2 에너지 하베스터를 구성하는 부양 체의 모델링

Figure 2는 에너지 하베스터를 구성하는 부양 체의 자유물체 도를 나타낸다[7]. 여기서 $w(t)$, $y_B(t)$ 는 각각 파도의 운동변위, 부양 체의 상하 운동 변위를 나타내고, A , M_B , g 는 각각 부양 체의 단면적, 부양 체의 질량, 중력가속도를 나타낸다.

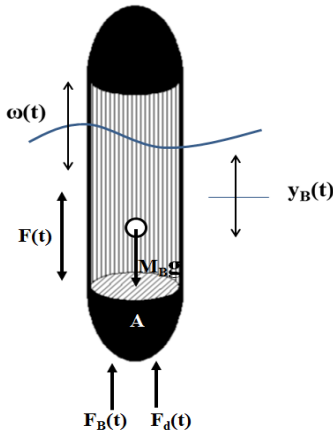


Figure 2: The free body diagram of buoy that consisted of energy harvester

Figure 2에서 바닷물 위에 떠있는 부양 체를 수학적 모델 식으로 나타내며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum F(t) &= M_B \ddot{y}_B(t) = M_B g - F_B(t) - F_d(t) \\ &= M_B g - \gamma A ((y_B(t) - \Delta y_B) - w(t)) \\ &\quad - \nu (\dot{y}_B(t) - \dot{w}(t)) \\ \Leftrightarrow M_B \ddot{y}_B(t) + \nu (\dot{y}_B(t) - \dot{w}(t)) \\ &\quad + \gamma A (y_B(t) - w(t)) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 γ , ν 는 각각 바닷물의 비중, 바닷물과 부양 체의 표면사이에 작용하는 점성계수이고, $M_B g = \gamma A \Delta y_B$ 을 나타낸다. 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_B \ddot{z}_B(t) + \nu \dot{z}_B(t) + \gamma A z_B(t) = -M_B \ddot{w}(t) \quad (2)$$

여기서 $z_B(t)$ 는 $y_B(t) - w(t)$ 이다. 식 (2)에서 부양 체와 바닷물로 구성된 시스템의 고유 진동수는 다음과 같다.

$$w_{nB} = \sqrt{\frac{\gamma A}{M_B}} \quad (3)$$

식 (3)에서 파도에너지가 갖는 주파수와 시스템 고유진동수 w_{nb} 가 일치할 때, 부양 체와 바닷물사이에 공진이 발생한다.

2.3 파도를 이용한 광대역 진동형 에너지 하베스터의 등가모델

Figure 3은 파도의 상하운동에너지로부터 전기를 얻는 광대역 진동에너지 하베스터의 등가 모델을 나타낸다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

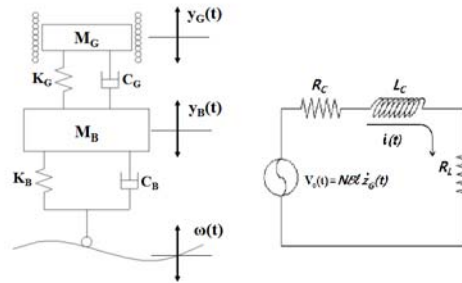


Figure 3: Simplified equivalent model of wide band vibration energy harvester using ocean wave

$$\begin{aligned} M_B \ddot{y}_B(t) + \nu (\dot{y}_B(t) - \dot{w}(t)) + \gamma A (y_B(t) - w(t)) \\ + C_G (\dot{y}_B(t) - \dot{y}_G(t)) + K_G (y_B(t) - y_G(t)) = 0 \\ M_G \ddot{y}_G(t) + C_G (\dot{y}_G(t) - \dot{y}_B(t)) \\ + K_G (y_G(t) - y_B(t)) + NBl i(t) = 0 \\ NBl (\dot{y}_G(t) - \dot{y}_B(t)) - R_C i(t) - L_C \frac{di(t)}{dt} \\ - R_L i(t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 M_G, C_G, K_G 는 각각 영구자석이 질량, 스프링상수, 감쇠계수이고, $y_G(t), i(t), N, B, l$ 은 각각 영구자석의 변위, 진동발전기의 권선코일의 수, 자속의세기, 1회 권선코일의 길이를 나타낸다.

여기서 $y_B(t) - w(t), y_G(t) - y_B(t)$ 을 각각 $z_B(t), z_G(t)$ 로 놓으면 식 (4)은 다음과 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned} M_B \ddot{z}_B(t) + \nu \dot{z}_B + \gamma A z_B(t) - C_G \dot{z}_G(t) - K_G z_G(t) &= -M_B \ddot{w}(t) \\ M_G \ddot{z}_G(t) + M_G \ddot{z}_B(t) + C_G \dot{z}_G(t) + K_G z_G(t) &+ NBl i(t) = -M_G \ddot{w}(t) \\ NBl \dot{z}_G(t) - R_C i(t) - L \frac{di(t)}{dt} - R_L i(t) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 $z_B(t)$ 는 파도와 부양 체사이의 상대 변위이고, $z_G(t)$ 는 부양 체와 영구자석사이의 상대 변위를 나타내고, $NBl \dot{z}_G(t)$ 는 Faraday 법칙에 의하여 부하저항이 없을 때 에너지 하베스터의 양단에 걸린 기전력 $V_o(t)$ 을 나타낸다.

본 연구에서는 먼저 파도에너지가 갖는 중심주파수와 부양 체와 바닷물로 구성된 시스템의 고유진동수 w_{nB} 을 일치시킨 다음, 진동시스템의 고유진동수를 w_{nB} 에 일치시켰다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$w_{nB} = w_{nG} = \sqrt{\frac{\gamma A}{M_B}} = \sqrt{\frac{K_G}{M_G}} \quad (6)$$

식 (6)에서 w_{nG} 은 진동시스템의 고유진동수이다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 파력을 이용한 광대역 진동 에너지 하베스터의 발전효율을 극대화하기위해서 먼저 파도에너지가 갖는 주파수와 부양 체와 바닷물로 구성된 시스템의 고유진동수를 동일하게 하고, 이

를 진동발전기를 구성하는 진동시스템의 고유진동수와 일치시킨다. 이와 같은 동 흡진기(dynamic vibration absorber)원리를 적용하여 일정 광대역에서 작동하는 진동시스템을 설계하고, 이 진동시스템을 이용하여 광대역 진동 에너지 하베스터를 제안함으로써 파도에너지가 갖는 광대역 주파수대역에서도 효율적인 발전을 가능하게 하는데 있다. 이를 위해 부양 체와 바닷물로 구성된 시스템고유진동 w_{nB} 와 진동에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템의 고유진동수 w_{nG} 을 각각 3.14rad/sec로 동일하게 설계하였다. 이때 파도의 상하운동을 이용한 광대역 진동에너지 하베스터를 구성하는 시스템의 매개변수는 Table 1과 같다.

Table 1: The system parameters of vibration energy harvester using ocean wave

M_B	500kg	M_G	50kg
ν	157.1 N-s/m	C_G	5.1 N-m/s
γA	4934.8 N/m	K_G	492.98 N/m
N	200회	B	0.6T
l	0.47m	L	18H
R_C	75Ω	R_L	75Ω

본 논문에서는 광대역 진동에너지 하베스터의 발전효율을 검증하기위해서 파도에너지가 갖는 중심주파수에서 공진을 일으키는 기존 진동에너지 하베스터와 비교하였다.

Figure 4는 진동에너지 하베스터에 75Ω이 연결되었을 때 상하 운동하는 파도의 가속도에 대한 전류의 주파수응답특성을 나타낸다. 여기서 광대역 진동에너지 하베스터는 2.73rad/sec와 3.6 rad/sec 부근에서 각각 2개의 공진이 발생함을 알 수 있고, 기존 진동에너지 하베스터는 3.28rad/sec주파수 부근에서 공진이 발생함을 알 수 있다. 또한 2.3rad/sec에서 4.1rad/sec사이 대역에서 광대역 진동 에너지 하베스터가 기존 진동에너지 하베스터의 최대주파수응답 값 보다 큼을 알 수 있다.

광대역 파력을 이용한 광대역 진동에너지 하베스터이 발전성능을 알아보기 위해 파도의 파형을

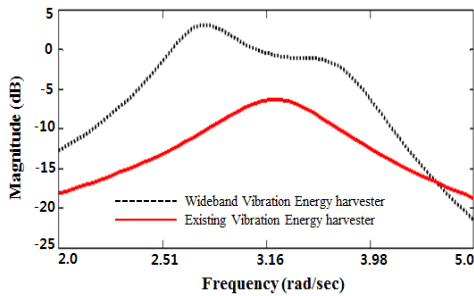


Figure 4: Frequency response function of current when load resistance is 75Ω

다음과 같이 가정하여 시간 역에서 시뮬레이션을 수행하였다.

$$w(t) = 0.01\sin 4.1t - 0.03\sin 3.80t + 0.05\sin 3.14t - 0.1\sin 2.88t + 0.3\sin 2.3t \quad (7)$$

식 (7)에서 파도가 갖는 주파수대역은 2.3rad/sec ~ 4.1rad/sec이고 중심 주파수는 3.14rad/sec이다[7].

Figure 5는 식 (7)을 이용하여 시뮬레이션을 한 파도의 파형을 나타낸다. 여기서 파도의 최대높이 w_{p-p} 는 0.73m이고, 파고의 RMS값은 0.23m이다.

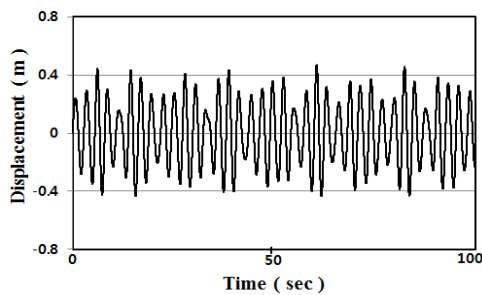


Figure 5 : The shape of ocean wave

Figure 6은 무 부하저항상태에서의 에너지 하베스터의 양단에 걸린 전압을 나타낸다. 여기서 제안한 광대역 진동에너지 하베스터와 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터의 양단에 걸린 전압의 RMS값은 각각 426V와 211V임을 알 수 있다. 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터는 파도

의 상하운동 에너지가 직접 진동에너지 하베스터의 진동시스템에 전달되어 하우징에 고정된 권선과 진동자인 영구자석사이의 상대운동을 일으키는 반면에 제안한 광대역 진동에너지 하베스터는 식 (5)에서 보는바와 같이 파도의 상하운동 에너지가 부양 체에 전달되어 부양 체의 상하운동을 공진현상에 의해 증폭시키고, 증폭된 부양체가 갖는 운동 에너지를 진동에너지 하베스터로 전달되어 하우징에 고정된 권선과 진동자인 영구자석사이의 상대운동을 훨씬 크게 발생시키는 것으로 사료된다.

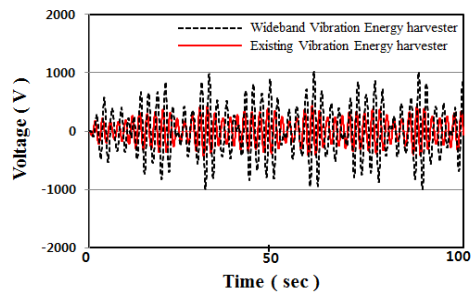


Figure 6: Voltage of open circuit

Figure 7은 제안한 광대역 진동에너지 하베스터와 기존 진동에너지 하베스터에 부하저항(75Ω)을 연결했을 때 각각의 부하저항에 걸리는 전압을 나타낸다. 여기서 제안한 광대역 진동에너지 하베스터와 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터에 연결된 각각의 부하저항에 걸린 전압의 RMS값은 140V, 54V임을 보여준다. 이때 진동에너지 하베스터에서 발생된 기전력은 권선과 부하저항에 전류를 흐르게 하고, 권선 내에 흐르는 전류는 역기전력을 발생하여 권선과 영구자석사이의 상대속도를 줄임과 동시에 권선과 부하저항을 통과하면서 전압강하가 발생한 것으로 사료된다.

Figure 8은 본 논문에서 제안한 광대역 진동에너지 하베스터와 기존 진동에너지 하베스터에 부하저항(75Ω)을 연결했을 때 각각의 회로에 흐르는 전류를 나타낸다. 여기서 광대역 진동에너지 하베스터에서 발생하는 기전력에 의해 흐르는 전류의 RMS값은 2.0A인데 비해 기존 진동에너지 하베스터는 0.8A임을 보여 준다.

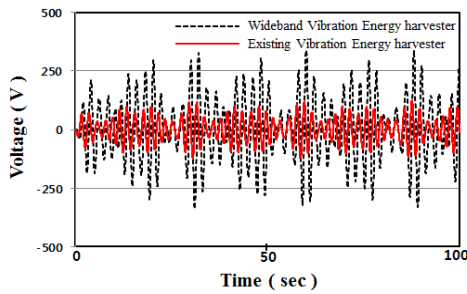


Figure 7: Voltage of closed circuit with load resistance (75Ω)

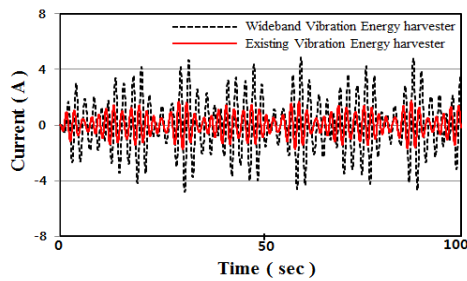


Figure 8: Current of closed circuit with load resistance (75Ω)

Figure 7, 8에서 발생된 전압과 전류를 종합해 보면 본 논문에서 제안한 광대역 진동에너지 하베스터와 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터에 출력된 평균 전력 값은 각각 282W, 41W임을 알 수 있다. 따라서 다양한 주파수를 갖는 파도에너지로부터 전기에너지를 얻는 데에는 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터에 비해 제안한 광대역 진동에너지 하베스터가 성능이 좋을 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다양한 주파수를 포함하는 파도가 가지고 있는 상하운동 에너지로부터 전기에너지를 얻는 광대역 진동에너지 하베스터를 제안하였다. 제안한 광대역 진동에너지 하베스터의 발전 성능을 알아보기 위하여 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터와 성능을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터는 주파수 3.28rad/sec부근에서 1개의 공진을 일으키지만, 제안한 광대역 진동에너지 하베스터는 2개의 주파수 2.73rad/sec와 3.6 rad/sec부근에서 각각 공진을 일으킴을 알 수 있고, 또한 제안한 광대역 진동에너지 하베스터가 가지는 두 공진 주파수사이에서의 출력 값은 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터의 공진지점에서의 출력 값 보다 크음을 알 수 있다.

2) 다양한 주파수(2.3~4.1rad/sec)를 포함하는 파도에너지에 대한 기존 공진을 이용한 진동에너지 하베스터와 광대역 진동에너지 하베스터에서 출력되는 평균 전력 값은 각각 41W, 282W임을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제안한 광대역 진동에너지 하베스터는 기존 해안가에 설치된 부표에 장착하여 전원을 얻을 수 있고 향후 다양한 주파수를 가진 파도의 상하운동에너지로부터 전기에너지를 얻기 위한 연구에 크게 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Keyyong Hong, Seung-Ho Sin, and Do-Chun Hong, "Wave energy absorption efficiency of pneumatic chamber of OWC wave energy converter", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 173-180, 2007 (in Korean).
- [2] Seung-Ho Shin and Keyyong Hong, "The state-of-the-art and key performance indicators for commercial use of the wave energy utilization technologies," The Korean society of Civil Engineering, vol. 10, no. 5, pp. 55-62, 2011 (in Korean).
- [3] Rafael Waters, "Energy from ocean waves full scale experimental verification of wave energy converter," Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations From the Faculty of Science and Technology 580, 2008.
- [4] C. R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, "Electromagnetic generator micro

generator,” *As sensor & Transducers Journal*, vol. 103, no. 4, pp. 109-121, 2009.

- [5] Ki-Bong Han and Hyoung-Woo Lee, “The research of the hybrid power generation with two degree of freedom using ocean wave,” *Journal of the Korean Society of marine Engineering*, vol. 35, no. 6, pp. 861-866, 2011 (in Korean).
- [6] Ki-Bong Han and Hyoung-Woo Lee, “The research of vibration power generation with two degree of freedom using ocean wave,” *Journal of the Korean Society of marine Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 1028-1034, 2011 (in Korean).
- [7] Hong-Chan Lee, Kyung-Soo Yea, Sung-il Hwang, Ki-bong Han, “Study on the buoy and vibration system in broadband ocean wave power generator”, *Journal of the Korean Society of marine Engineering*, vol. 36, no. 6, pp. 708-787, 2012 (in Korean).