

# 하이브리드형 파력발전시스템의 유입구 형상 연구

† 오진석 · 장재희\*

† 한국해양대학교 기관공학부 교수, \*한국해양대학교 기관공학부 대학원

## A Study on Entrance Section of Hybrid Wave Power Generation System

† Jin-Seok Oh · Jae-Hee Jang\*

† Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

\* Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 최근 해양시설물용 파력발전시스템은 본래 기능과 연계한 하이브리드 형태로 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 이 중 방파제에 설계된 진동 수주형 파력발전시스템의 경우, 기존의 방파제의 기능에 더불어 터빈을 통해 파랑에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기능을 갖는다. 이러한 형태의 발전 시스템은 해수를 손실 없이 최대한 많이 유입되도록 하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 유입구 형상에 따른 파력발전시스템의 출력 특성에 대해 기술하였다. 또한 일반적인 해양 구조물인 방파제에 부착된 진동수주형 웰즈터빈 모델을 시뮬레이션 하여 유입구 곡면 각도에 따라 변화하는 유입량과 해수속도 그리고 그에 따른 웰즈터빈의 출력을 측정하였다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 에너지 변환 효율을 높이기 위한 유입구 형상을 제안하였다.

**핵심용어** : 파력 발전, 해양 시설물, 방파제, 웰즈터빈, 유입구 형상, 유동계수

**Abstract** : Recently, many studies about the wave power generation system for the marine structure as the hybrid form in linked with the original features have been made of. Of these, the wave power generation system using oscillating water column(OWC) has function to convert wave energy to electrical energy with original function of the break water structure. In this type of generation system, it is important to make the flow of sea water as much as possible without loss. Output characteristics of wave power generation system depending on entrance section were described in the paper. Also, flow quantity changing with entrance section, velocity of sea water and output of wells turbine were measured by simulating OWC wells turbine model in break water, one of the general marine structure. Finally, entrance section was suggested to enhance the energy conversion efficiency based on the results of simulation.

**Key words** : Wave generation, Ocean facilities, Breakwater, Wells turbine, Entrance section, Flow coefficient

### 1. 서론

해양에너지시스템은 대용량 발전시스템으로 대부분 연구되어 왔다. 최근에는 해양구조물의 고유기능과 연계한 하이브리드형 해양에너지 발전시스템과 관련된 연구개발이 많이 수행되고 있다. 특히 우리나라의 경우 삼면이 바다로 둘러싸여있는 점과 연안 해역을 중심으로 방파제 구조물이 많이 설치되어 있는 점에서 외해와 연안 해역에 모두 적용할 수 있는 진동수주형 파력발전 시스템이 적합하다.

본 연구에서는 방파제 기능을 가진 해양구조물에 적합한 파력발전시스템에 대하여 기술하고자 한다. 특히 방파제에 설계된 진동수주형 파력발전시스템은 방파제의 고유 기능과 더불어 파고를 에너지로 변환 시키며 파랑의 주기적 특성에 따라 연속적인 에너지 변환을 기대할 수 있다는 장점이 있다. 진

동수주형 파력발전 시스템은 유입되는 해수의 양에 따라 출력이 변화하며 따라서 파랑에너지의 효율적 활용을 위해서는 방파제에 유입되는 파도에 에너지를 최대한 흡수할 수 있는 유입구 형상에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존 유입구에 곡률이 적용된 트럼펫형 입구형상을 제시하고 곡률의 각도에 따른 에너지 변환효율을 살펴보고자 한다. 또한 웰즈터빈의 발전특성을 바탕으로 유입구 형상에 따른 시뮬레이션 결과를 분석하여 해양구조물에 설치되는 파력발전시스템의 효과적인 형상 및 시스템 설계조건을 제안하고자 한다.

### 2. 파력발전시스템 설계

본 연구에서는 다양한 해양구조물 중에서 방파제에 설치하

† Corresponding author : 종신회원, ojs@kmou.ac.kr 051)410-4283

\* 연회원, jjh799@naver.com 051)410-4866

여 운영할 수 있는 파력발전시스템을 설계하고, 이를 실험을 통하여 성능을 평가하고자 한다. 설계과정에서 가장 중점을 둔 것은 발전효율을 높일 수 있는 유입구 구조를 고려했던 것이다.

본 연구에서 설계하고자 하는 파력발전시스템은 Fig. 1과 같은 발전특성을 고려한 구조를 가지고 있다.

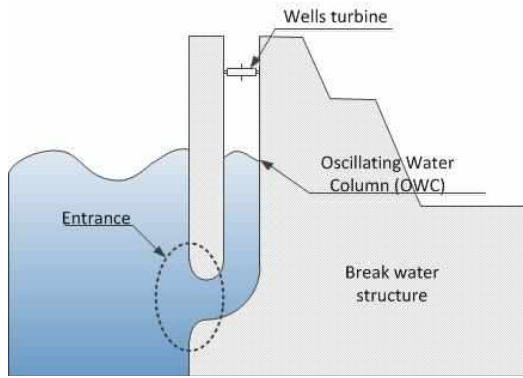


Fig. 1 Wave power generation system structure

본 파력발전시스템은 해수유입구, 진동수주 챔버, 웰즈터빈으로 구성되어 있다. 유입구를 통해 들어온 해수는 진동수주 챔버 내에서 왕복운동을 하게 되며 주기적인 공기 압력 차를 발생시킨다. 공기 압력 차이에 의해 발생한 공기 흐름이 웰즈터빈을 지나면서 전기 에너지로 변환된다. 이 시스템은 해수 유입구 형상에 따라 출력이 달라지는 것이 특징이며, Fig. 1과 같이 터빈을 설치하여 특성을 실험하였다. 설치된 터빈의 효율  $\eta$ 은 식 (1)과 같다.

$$\eta = \omega T / \Delta p Q_R \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 토크,  $\omega$ 는 터빈각속도,  $Q_R$ 은 유동비(flow rate),  $\Delta p$ 는 로터(rotor)를 통과한 전체 압력강하를 나타낸다. 식 (1)에서 터빈출력에 영향을 주는 것은 유입구 형상에 따른 유동비이다. 본 연구에서는 기존의 유입구 형상을 트럼펫형으로 설계하여 유입손실을 최소화하고자 한다. 유입구 형상에 따른 유동비는 Fig. 2와 같이 (a), (b), (c) 세 가지 유입구 형상을 대상으로 설계과정에서 검토하였다.

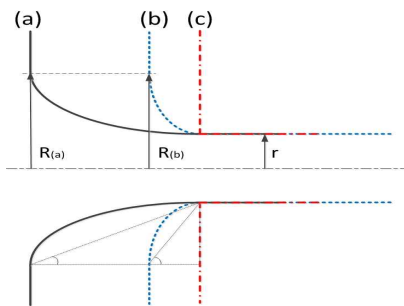


Fig. 2 Type of the entrance section

(c)는 입구 형상에 곡률이 적용되지 않은 기존의 유입구 형상이고, (a)와 (b)는 입구 직경 및 내부 실린더 직경은 동일하되 입구 곡면의 각도를 변화시켜 곡률에 따른 손실을 비교할 수 있도록 하였다. 또한 (a)와 (b)는 공통적으로 타원형의 유입 곡률을 갖지만 (a)는 x축이 긴 타원형으로, (b)는 y축이 긴 타원형으로 대표된다. Table 1은 유입구 형상의 치수를 나타내었다.

Table 1 Dimension of entrance section

	(a)	(b)	(c)
Radius of trumpet-shaped (R)	0.15	0.15	-
Radius of cylinder (r)	0.1	0.1	0.1
Angle of curved surface	25°	60°	-

유입구 형상과 입구 곡면 각도에 따라 해수의 유입량에 영향을 미치게 되는데 이를 식 (2)와 같이 유동계수  $K$ 로 나타낼 수 있다.

$$K = \sqrt{\frac{p_v}{p_h}} \quad (2)$$

$$p_v = \frac{V^2}{2g}, \quad p_h = p_v + h_{loss} \quad (3)$$

$$h_{loss} = k \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

$K$ 는 속도에 의한 압력인  $p_v$ 와 속도압과 압력손실의 합인 정압  $p_h$ 로 나타낼 수 있으며, 속도압과 정압은 식 (3)와 같이 각각 표현된다. 또한  $h_{loss}$ 는 유입 손실로, 식 (4)와 같이 표현된다. 여기서,  $V$ 는 유입속도,  $g$ 는 중력가속도,  $k$ 는 유입손실 계수이다. 주어진 식 (2), 식 (3), 식 (4)를 정리하면 유동계수  $K$ 는 식 (5)으로 표현 가능하다.

$$K = \sqrt{\frac{1}{1+k}} \quad (5)$$

유입구 형상에 따라 유입손실계수  $k$ 는 0.01에서 0.5 사이의 값을 갖게 된다. 손실이 전혀 없는 이상적인 유입구의 경우는 유동계수  $K=1$ 이 된다.

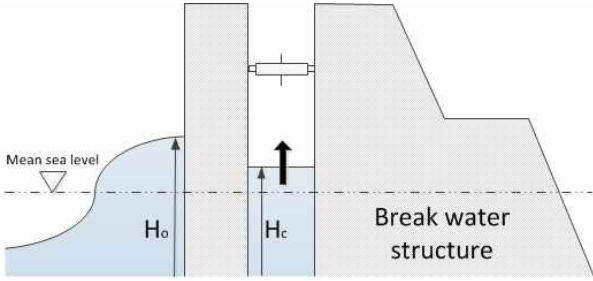


Fig. 3 Changes of wave height in the cylinder due to the external wave

Fig. 3은 파력발전시스템 구조의 일부를 도시한 것으로, 외부파에 따른 실린더 내부의 수면 높이 변화를 나타내고 있다. 외부파가 발생하면 외부 수면 높이와 실린더 내부의 수면 높이의 차이가 생긴다. 수면의 높이차로 발생한 압력차는 해수의 이동을 발생시키며 유입구에서 해수의 속도는 식 (6)과 같다.

$$V_T = \sqrt{2g \times \Delta H} \quad (6)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $\Delta H$ 은 외부파와 실린더 내부파 간의 높이 차이이다. 유동비는 기본적으로 유입속도와 면적의 곱인  $Q = V \times A$  으로 표현되며 이 때 형상에 따른 유동계수  $K$ 를 고려하여 트럼펫 형의 유동비  $Q_T$ 를 구하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 변화한 내부파의 높이  $H_T$ 는 식 (8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_T = K \cdot (\pi \cdot R^2) \cdot V_t \quad (7)$$

$$H_T = \frac{1}{\pi r^2} \int Q_T dt \quad (8)$$

식 (8)은 유입량과 내부파의 높이가 비례하는 것을 나타내고 있다.  $V_T$ 는 트럼펫형 유입구에서 해수 속도,  $r$ 은 실린더 형의 내부반경,  $R$ 은 트럼펫형의 내부반경,  $t$ 는 시간이다. 터빈의 효율을 나타내는 식 (1) 및 식 (7), 식 (8)을 이용하여 토오크  $T$ 를 유도하면 식(9)와 같다.

$$T = \frac{1}{\omega} \eta \Delta p Q_T \quad (9)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_{air} V_T^2 \left\{ 1 - \left( \frac{A_r}{A_c} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

식 (10)은 로터를 통과한 압력강하를 나타내며,  $A_c$ 는 내부 실린더의 단면적,  $A_r$ 은 로터의 단면적을 나타낸다. 또한 식 (9)로부터 웰즈터빈의 출력  $P$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \eta \cdot \Delta p \cdot Q_T \quad (11)$$

식 (11)에 의하면 동일한 웰즈터빈에 대하여 출력  $P$ 는 압력강하  $\Delta p$ 와 유동비  $Q_T$ 의 영향을 받게 된다. 이중 유입구 형상에 영향을 받는 변수는 유동비로 유동계수  $K$ 에 따라 달라지는 것을 식 (7)에서 확인할 수 있다. 유입구 형상별 출력 특성을 알아보기 위해 Fig. 2에서 제한한 유입구 형상에 따라 유동계수  $K$ 를 다르게 하여 시뮬레이션에 적용하였다.

### 3. 시뮬레이션

본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 원통형 유입구 및 타원형 유입구를 대상으로 기존의 파력발전시스템 구조와 새롭게 제안하는 구조의 특성에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

일반적으로 유입구 형상에 따른 유입손실계수  $k$ 는 곡면 반경과 유로직경의 비율에 따라 다양한 값을 갖는다. 유입구 곡면이 타원이면 유입손실계수는 0.01에서 0.05의 범위를 가지며, 곡률이 적용되지 않은 유입구의 경우 유입손실계수는 0.5가 된다. Table 2는 Fig. 2에 도시된 유입구 형상을 대상으로 한 유동계수와 입구 및 내부 실린더 면적을 나타낸 표이다.

Table 2 Flow coefficient

	(a)	(b)	(c)
flow coefficient ( $K$ )	0.99	0.88	0.66
area of entrance ( $A_t$ )	0.07	0.07	0.03
area of cylinder ( $A_c$ )	0.03	0.03	0.03

외부파는  $h_o \sin \omega t$ 로 가정하였으며, 해수 및 공기는 비압축성으로 고려되었다. 그 외 시뮬레이션 환경은 Table 3과 같다.

Table 3 Simulation condition

Parameter	Value
Incident wave height (m)	0.13
Wave period (sec)	2
Depth of water (m)	0.7
Radius of trumpet-shaped (m)	0.15
Radius of cylinder (m)	0.1
Radius of rotor (m)	0.05
Turbine efficiency	0.4
Wells Turbine	8 blades

Fig. 4는 Table 3에 주어진 조건을 적용하여 유입량에 대해 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다.

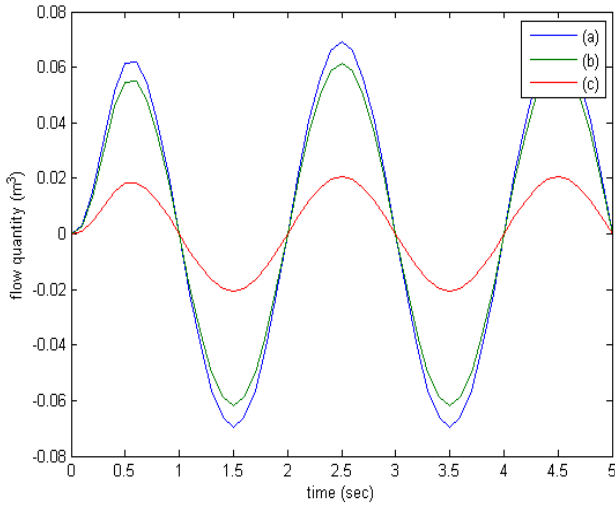


Fig. 4 Flow quantity of trumpet-shaped entrance

그래프 상에서 첫 번째 나타나는 파봉이 두 번째 파봉보다 작은 것은 외부의 파동에너지가 충분히 전달되지 않은 상태이기 때문으로, 0초 근처에서 유입량에 서서히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유입량이 양수인 부분은 실린더 내부로 해수가 유입되었다는 것을 의미하며, 음수 부분은 실린더 내부에서 외부로 해수가 유출된 것을 의미한다.

동일한 입구 면적에 대해 트럼펫형의 유입량은 유동계수  $K$ 의 영향을 받는다. 유입구 형상에 따른 유동계수가 가장 큰 (a)에서 유입량이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. (a)의 경우 입구에 곡률이 적용되지 않은 (c)보다 약 3.4배 높은 유입량을 나타내고 있다.

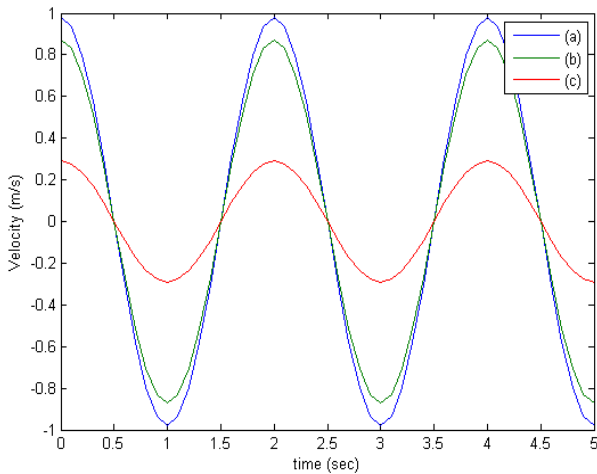


Fig. 5 Inlet velocity

Fig. 5는 입구에서의 해수 유입 속도  $V_T$ 를 나타낸다. (a)의 경우 (b)와 비교하여 약 1.1배, (c)와 비교하여 약 3.4배 빠른 것으로 나타난다.

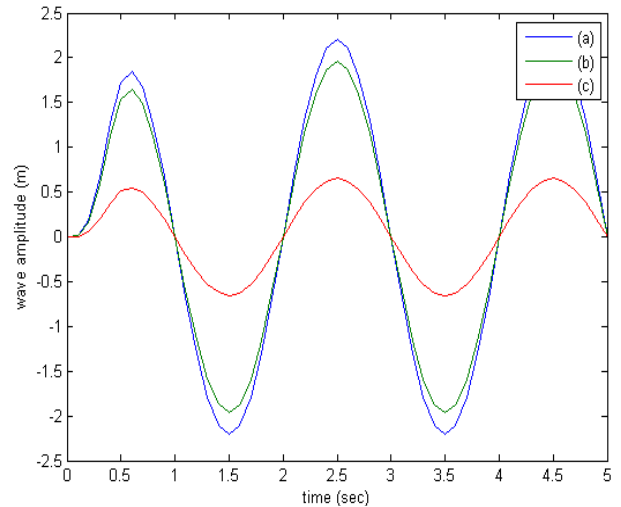


Fig. 6 Wave amplitude in cylinder

Fig. 6은 내부 실린더에서 파진폭  $H_T$ 를 나타낸다. 유입량과 유사한 형태로 파봉의 높이가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 높이 또한 유동계수가 가장 큰 (a)에서 가장 높게 나타난다.

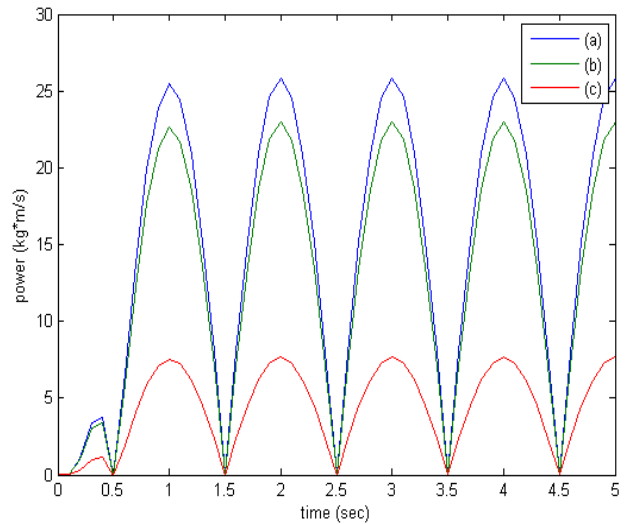


Fig. 7 Output of wells turbine

Fig. 7은 유입구 형상에 따른 웰즈터빈의 출력을 나타내고 있다. 한 방향으로만 회전하도록 설계된 웰즈터빈의 특성상 웰즈터빈의 출력은 해수 및 실린더 내부 공기의 유동 방향에 상관없이 양수로 나타난다. 또한 출력이 유입량의 변화량에 비례하는 것을 알 수 있다. 이 그래프에서도 유동계수가 가장 큰 (a)에서 출력이 가장 크게 나타났다.

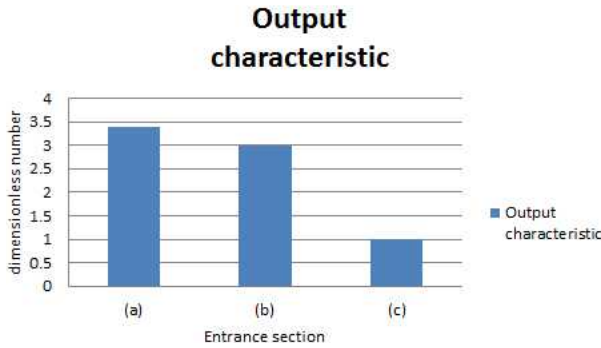


Fig. 8 Output characteristic

Fig. 8은 웰즈터빈의 출력특성을 무차원수를 이용하여 나타낸 그래프이다. 각 유입구 형상별로 시뮬레이션한 웰즈터빈의 최대 출력 값을 (c)의 최대 출력 값으로 나누어 몇 배의 효율을 보이는지 도시하고 있다. (a)는 곡률이 적용되지 않은 (c)보다 3.4배 높은 출력 특성을 보이며, (b)는 (c)보다 3배 높은 출력 특성을 보인다. 시뮬레이션 결과를 통해서 유입구에 곡률이 적용될 경우 기존의 유입구 형상보다 높은 효율을 얻을 수 있으며, 곡률이 적용된 동일한 입구면적의 경우 25°로 곡면 각도가 작은 유입구 형상에서 더 높은 효율을 보이는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존의 해양 구조물과 결합된 파력발전시스템의 효율적인 설계를 제안하기 위하여 방파제에 설계된 진동수주형 파력발전 시스템과 유입구 형상을 선정하여 고찰하였다. 또한 유입구 형상 별 다른 유동계수를 시뮬레이션에 적용하여 해수 유입량과 웰즈터빈의 출력을 통해 차이를 비교하였다.

동일한 유입구 면적 및 내부 실린더 면적에 대하여 곡면 각도를 25°와 60°로 설정한 유입구, 그리고 곡률이 적용되지 않은 유입구 총 세 가지를 비교한 결과, 웰즈터빈의 출력은 유동계수의 영향을 받으며, 유동계수가 크게 나타나는 25°의 타원형 입구가 가장 많은 유입량과 높은 출력을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

곡면각도가 작을수록 유동계수가 크게 나타나는 경향이 있으나, 각도가 작아질수록 각도 차이에 따른 효율의 차이 또한 작아지게 된다. 따라서 향후 연구에서는 25°의 유입구 곡면 각도 근처에서 최적효율을 도출해 내기 위한 연구가 필요할 것이다. 또한 유동계수는 실험값에 의존하는 경향이 크므로 실제 실험 또한 병행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업과 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

#### References

- [1] Bae, H. J., Yang, W. H., Kim, J. O. and Son B. S.(2003), "A Study on the Reduction of Entry Loss by Inner Structure in Square Hood in Industrial Ventilation System", Korea J. Sanitation, Vol. 18, No. 3, pp. 27-34.
- [2] Carija, Z., Kreanicevic, L., Banic, V. and Cavrak, M.(2012), "Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion", Engineering Review, Vol. 32, No. 3, pp. 141-146.
- [3] Choi, Y. D., Kim, C. G., Kim, Y. T. and Lee Y. H.(2008), "A Study on the Nozzel Shapes of a Cross-Flow Type Hydro Turbine for Wave Power Generation", Journal of the Korean Society for Fluid Machinery, Vol. 11, No. 3, pp. 30-35.
- [4] Choi, Y. D. and Lee, Y. H.(2007), "An Overview and Current Status of Reserch and Development of Wave Power", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 6, No. 1, pp. 17-24.
- [5] Darabi, A. and Poriavali, P.(2007), "Guide Vanes Effect of Wells Turbine on OWC Wave Power Plant Operation", Proceedings of the World Congress on Engineering Vol. 1, pp. 2-4.
- [6] Dorrell, D. and Hsieh, M.(2008), "Performance of Wells Turbines for use in Small-Scale Oscillating Water Columns", Process of the Internatinal Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 18, No. 1, pp. 393-400.
- [7] Senturk, U. and Ozdamar, A.(2011), "Modelling the Interaction between Water Waves and the Oscillating Water Column Wave Energy Device", Mathematical and Computational Applications, Vol. 16, No. 3, pp. 630-640.

원고접수일 : 2013년 8월 22일

심사완료일 : 2013년 11월 21일

원고채택일 : 2013년 11월 22일