

## 방파제 부착형 파력발전시스템의 터빈설치 방법에 따른 출력특성에 관한 연구

이헌석\* · 오진석\*\*

\*한국해양대학교 수중체특화연구센터

\*\*한국해양대학교 기관공학부

### Study of Power Output Characteristics of Wave Energy Conversion System According to Turbine Installation Method Combined with Breakwater

HunSeok Lee\* and Jin-Seok Oh\*\*

\*Under Vehicle Research Center, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

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

**KEY WORDS:** Breakwater 방파제, Oscillating Water Column 진동수주, Cross-flow turbine 횡류터빈, Wells turbine 웰스터빈, Waver power generation 파력발전

**ABSTRACT:** Many kinds of generation systems have been developed to use ocean energy. Among these, with the use of an oscillating water column (OWC) for power generation is attracting attention. The OWC-type wave power generation system converts wave energy into electricity by operating a generator turbine with the oscillating water level in a column of water. There are two ways to convert wave power into electricity using an OWC. One uses a cross-flow turbine using the water level inside the OWC. The other method uses the flow of air in a Wells turbine, which depends on the water level. An experiment was carried out using a 2-D wave tank in order to minimize the number of empirical tests. The design factors were taken from Koo et al. (2012) and the experimental environment assumed by free surface motion. This paper deals with characteristics of two types of wave energy conversion systems combine with a breakwater. One model uses an air-driven Wells turbine and a cross-flow water turbine. The other type uses a cross-flow water turbine. Wave energy converters with OWCs have mostly been studied using air-driven Wells turbines. The efficiency of the cross-flow turbine was about 15% higher than that of the other model, and the water level of the OWC internal chamber for the cross-flow water turbine and air-driven Wells turbine was less than about 40% lower than the one using only the cross-flow water turbine.

#### 1. 서 론

산업화 이후, OECD(Organization for Economic Co-operation and Development)에 속하는 국가를 중심으로 꾸준히 에너지 수요량은 증가해 왔다. 이에 따라 각 국가는 에너지 수요량을 충족하기 위해 발전시설을 확장해 왔다. 이러한 발전 시설의 대부분은 화력발전 또는 원자력 발전시설로 이루어져 있음에 따라 연소생성물로 인한 지구온난화와 환경오염 및 최근 일본의 후쿠시마 원전사고와 같은 방사능문제를 야기하고 있다. 이에 대응하기 위해 늘어나는 에너지 수요를 충족하고,

보다 안전한 에너지 생성을 위해 각 국은 신재생에너지 개발에 많은 관심을 두고 있다(Douglas Westwood, 2011; Wikimedia Foundation, 2013).

신재생에너지 가운데 해양에너지는 현재 많은 관심을 가지고 개발이 이루어지고 있으며, 그 개발 가능성과 파급성을 인정받고 있다(Sin and Hong, 2011). 해양에너지를 이용한 발전시스템은 바다의 수심에 따른 온도차를 이용한 해양온도차 발전시스템, 파도의 운동에너지를 이용한 파력발전시스템, 바다의 조수 간만의 차를 이용한 조력발전시스템 등이 있다(Douglas Westwood, 2011). 이 중 파도의 운동에너지를 이용한 파력발전시스템의 경

Received 18 September 2014, revised 25 June 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author Jin-Seok Oh: +82-51-410-8466, ojs@kmou.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KOSME 2014 in Busan.

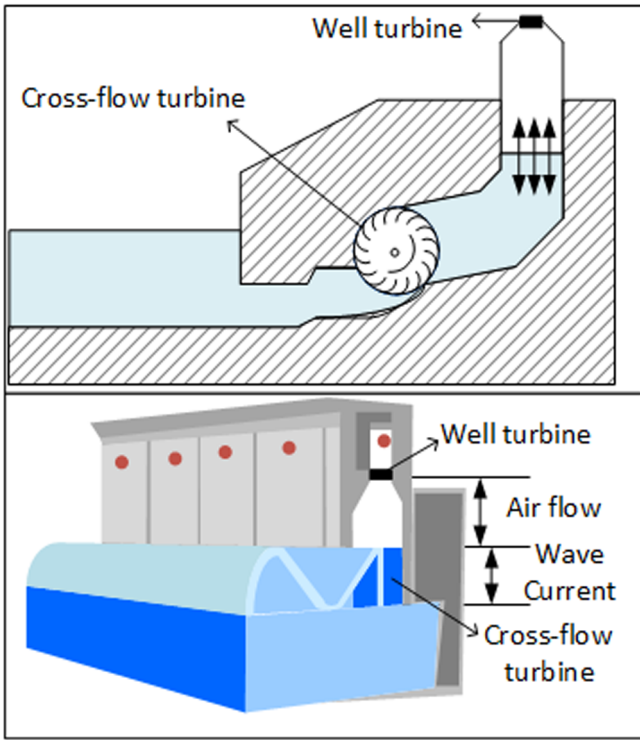


Fig. 1 Structure of wave energy conversion system combined with breakwater

우 파의 위치 및 운동에너지를 직접 또는 간접적으로 이용함에 따라 다른 형태의 에너지 변환 방법을 거친다. 파력에너지의 에너지 변환 방법에 따라 가동물체형, 월파/월류형, 진동수주형(Oscillating water column, OWC) 파력발전시스템 등이 있다. 이 가운데 방파제에 설치되어 파력에너지를 변환하는 시스템은 일반적으로 진동수주형 파력발전시스템이 적용된다(Sin and Hong, 2011; Morris-Thomas et al., 2007).

본 논문에서는 2차원 수조에 방파제 부착형 파력발전시스템의 축소모델을 설치하고, 방파제 축소모델에 설치된 터빈 수에 따른 특성에 대하여 분석하였다. 실험은 두 가지 모델을 바탕으로 실험하였으며, 첫 번째 모델은 진동수주에 횡류터빈만 설치한 경우, 두 번째 모델은 방파제 부착형 파력발전시스템의 진동수주에 횡류터빈과 웰터빈을 모두 설치한 경우이다. Fig. 1은 방파제 부착형 파력발전시스템의 구조를 나타낸다. 본 연구 수행 방법 설정 및 실험결과 평가를 위하여(Koo et al. 2012; Han, 2012, Oh and Han, 2012)의 논문을 참고하였다.

## 2. 파력발전시스템

### 2.1 진동수주형 파력발전시스템

파력에너지를 보다 편리하게 사용하기 위해 전기에너지로 변환하여 사용되어지고 있다. 이러한 파력에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 대표적인 장치로는 진동수주형(OWC) 파력발전이 있다(Oh and Han, 2012; Cho and Kim 1998). OWC를 이용한 파력발전은 OWC내부의 유체의 흐름 또는 내부 유체의 흐

름에 따라 발생하는 공기압의 변화를 터빈 등의 장치를 이용하여 운동에너지로 변환한 후 사용자가 최종적으로 원하는 전기 에너지로 변환되는 2가지 변환과정을 거치게 된다. OWC 내부 진동수주의 운동을 터빈의 운동에너지로 변환하는 방법은 크게 2가지 방법으로 나뉘게 된다. 첫째, OWC 내부 수위를 횡류터빈을 이용하여 직접 회전에너지로 변환하는 방법. 둘째, OWC 내부의 수위변화로 인해 발생하는 공기실 왕복류를 웰터빈을 이용하여 회전에너지로 변환하는 방법이 있다. 각각의 방법에 사용된 횡류터빈 및 웰터빈은 유체의 흐름의 방향과 무관하게 한 방향으로 회전하므로, 장비를 간소화 할 수 있는 장점이 있다.

### 2.2 파력에너지

파력에너지는 파의 높이와 파주기에 따라 영향을 받는다. 파고(Wave height,  $H$ )는 파의 골(Trough)에서 마루(Crest)까지의 높이를 뜻하며, 파주기는 골(마루)에서 다음 파도의 골(마루)까지의 시간을 의미한다. 파랑이 가진 총 에너지  $E_A$ 는 다음식과 같이 위치에너지  $E_P$ 와 운동에너지  $E_K$ 의 합으로 나타낼 수 있다 (Mc.Cormik and David, 1981; Yoon et al., 2006).

$$E_A = E_P + E_K = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda d \tag{1}$$

식 (1)에서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $d$ 는 파의 폭,  $\lambda$ 는 파장을 의미한다. 해수의 파고를  $H$ 일 때, 진동수주 입구형상에 의한 유입구 손실이 없다고 가정하면 진동수주 내부의 파고  $H_0$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0 = kH \tag{2}$$

$k$ 는 진동수주 내부파고가 외부파고에 비례할 때 비례상수를 나타낸다. 외부 환경 및 진동수주 유입구에 따른 에너지 손실이 없을 때, 진동수주 내부 수면의 수직방향 변위 및 속도가 항상 일정한 값(평균값)을 가진다고 가정을 하면 수직변위  $W_D$  및 속도  $W_S$ 는 각각 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$W_D = \frac{H_0}{2} \cos(ut) \tag{3}$$

$$W_S = \frac{dW_D}{dt} = -\frac{uH_0}{2} \sin(ut) \tag{4}$$

진동수주 내부 해수의 흐름이 상승시간 또는 하강시간 동안 흐르는 해수의 유량  $Q$ 는 연속방정식을 이용하여 진동수주 내부 단면적  $D$ 와 진동수주 내부의 수위 변화의 속도  $W_S$ 의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = DW_S \tag{5}$$

진동수주 해수 유입구에 따른 손실과 터빈에 의한 에너지 손실이 없다고 가정하였을 때, 횡류터빈과 웰터빈 각각의 출력

은 식 (6)과 식 (7)으로 나타낼 수 있다

$$P_C = \rho g Q H_O K_C \quad (6)$$

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A W_S K_W \quad (7)$$

$A$ 는 챔버의 단면적,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도를 나타내며,  $K_C$ 와  $K_W$ 는 횡류터빈과 웰스터빈의 출력계수를 나타낸다. 파력에너지 부분에서의  $K_C$ 와  $K_W$ 는 각 터빈의 출력계수로 터빈설계에 따라 달라지는 부분이다. 따라서 본 논문에서  $K_C$ 와  $K_W$ 를 고려하지 않고 동일 항을 양 변에 나누어 주면 각 출력은 다음 식 (8)과 식 (9)와같이 나타낼 수 있다.

$$P_C = \rho g D \quad (8)$$

$$P_W = \frac{\rho A}{4} \quad (9)$$

이때, 공기의 밀도는  $0.001226g/cm^3$ , 물의 밀도는  $1g/cm^3$ 이므로 중력가속도  $g(9.8m/s^2)$ 를 곱하여도 횡류터빈의 출력이 웰스터빈의 출력의 약 80배 이상이므로 각 챔버 또는 수주단면적의 넓이 비가 80배 이상 나지 않는 이상 횡류터빈의 출력이 웰스터빈보다 크음을 확인할 수 있다. 따라서 같은 조건에서 횡류터빈의 에너지가 웰스터빈이 받는 에너지 보다 많음을 확인할 수 있다.

### 3. 축소모형실험

#### 3.1 실험조건

방파제 부착형 파력발전 축소모형장치를 2차원 조파수조에 설치하여 실험을 진행하였다. Scale model의 설계지수는 논문(Koo et al., 2012)를 참조하였으며, 추후 실 방파제 부착형 파력발전 설치 위치로 적절한 해상을 검토 중에 있다. 조파수조의 크기는 길이 18m, 높이 1.4m, 폭 1.2m이며 조파수조에 설치된 조파기는 천해(Shallow water)를 생산하기에 적합한 피스톤 패들(Piston paddle)Type으로 구성되어 있다(Yoon et al., 2006). 조파수조의 조파기는 실험을 위해 파를 생성한다. 실험을 위한 파는 파고 0.13m, 파주기 2sec, 수심 0.7m 하에 실행되었으며 조파기로부터 방파제 부착형 파력발전 축소모형장치까지의 거리는 15m이다. 본 연구에 적용된 파고 및 파주기는 동일한 환경에서 실험된 논문(Han, 2012; Oh et al., 2009; Oh and Han, 2012)을 참조하여 가장 출력(효율)이 높은 실험 환경을 적용하였다.

Table 1은 방파제 부착형 파력발전 축소모형 실험을 위한 실험환경을 나타낸다.

#### 3.2 실험장치

실험을 위해 축소형 방파제 부착형 파력발전 모형을 제작하였다. 제작한 축소형 모형은 길이 0.98m, 높이 1.2m, 폭 0.98m의

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Values
2-D wave tank length	18 m
2-D wave tank high	1.4 m
2-D wave tank width	1.2 m
Flow area	429 mm × 155 mm
Wave Height ( $H_O$ )	0.13 m
Wave period ( $T$ )	2 sec
Depth of water ( $h$ )	0.7 m

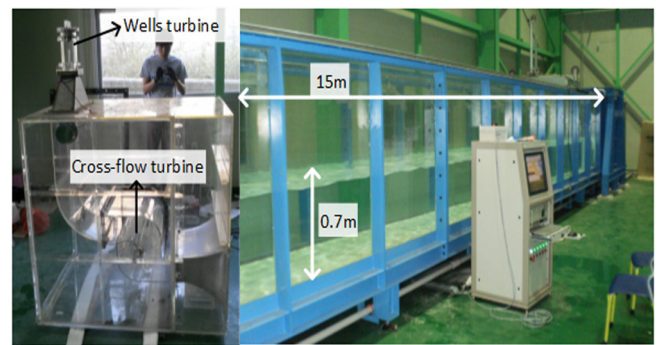


Fig. 2 Experimental setup of wave energy conversion system combined with breakwater

직육면체의 아크릴을 사용하여 제작되었다. 유입구 형상은 이심률이 0.884477인 타원형 형상을 적용하여 유입구로부터 발생하는 에너지 손실을 최소화 하였다(Oh and Han, 2012). Fig. 2는 방파제 부착형 파력발전 모형실험장치의 계통도를 나타낸다.

방파제 부착형 파력발전 모형장치는 유체 유입구, 횡류터빈, 진동수주, 웰스터빈으로 구성되어 있다. 실험모형의 유입구 뒤편에 유체의 흐름에 따라 회전하는 횡류터빈이 설치되어 있어 유체의 흐름으로부터 운동에너지로 변환을 한다. 횡류터빈 뒤로 진동수주로부터 발생하는 공기압에 변화에 따라 회전하는 웰스터빈이 설치되어 있어 횡류터빈을 거친 파로부터 에너지를 변환하도록 되어있으며, 탈부착이 가능하도록 구성하였다.

파로부터 횡류터빈과 웰스터빈이 흡수하는 에너지양을 확인하기 위하여 토크미터를 설치하여야 하나, 토크미터의 가격이 고가이므로 본 연구에서는 소형 영구자석 직류모터를 사용하여 출력을 비교하였다. 소형 직류모터를 터빈과 커플링으로 연결하였으며, 연결된 직류모터의 분당 회전수 및 출력단에 저항을 설치하여 전압값과 전류값을 측정하여 에너지양을 측정하였다. 영구자석 발전기의 유기 기전력은 회전속도에 비례하게 된다. 이에 따라 웰스터빈은 회전속도가 500RPM 이상 비교적 고속으로 회전하여 증속 없이 발전기와 터빈 축을 연결한 반면, 횡류터빈은 회전속도가 웰스터빈에 비해 현저히 낮으므로 발전기에 유기되는 기전력을 높이기 위해 기어 비를 1:10으로 적용하여 10배 증속시켜 설치하였다. Fig. 3의 (A)와 (B)는 축소모형에 설치된 횡류터빈 및 웰스터빈이며, Table 2는 설치 터빈의 사양을 나타낸다.

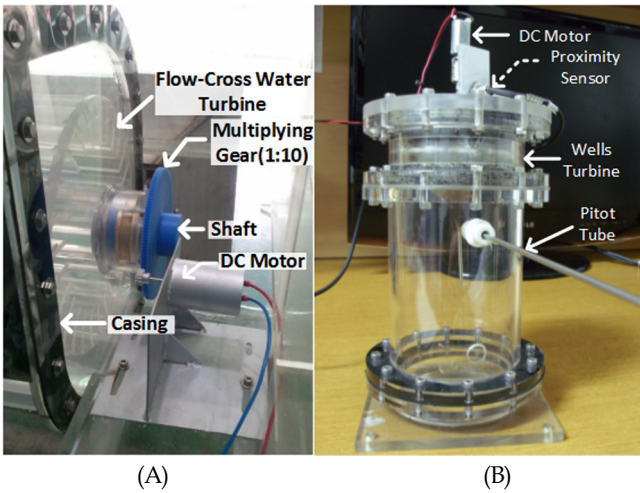


Fig. 3 Cross-flow turbine & Wells turbine

Table 2 Turbine Specification & Experimental Model

Parameters	Values
Number of wells turbine blade	8
Number of cross-flow turbine blade	26
Cross-flow turbine gear ratio	1:10
Cross-flow turbine blade angle	13.8 °
Experimental Case	
Only use Cross-flow turbine	Case (A)
Cross-flow turbine + Wells turbine	Case (B)

3.3 데이터 수집 장치

실험을 위해 방파제 부착형 파력발전 축소모형을 제작하였으며, 실험 데이터 수집 및 실험 결과 분석을 위하여 NI사의 LabVIEW와 CompactRIO를 이용하였다. Fig. 4는 데이터 수집

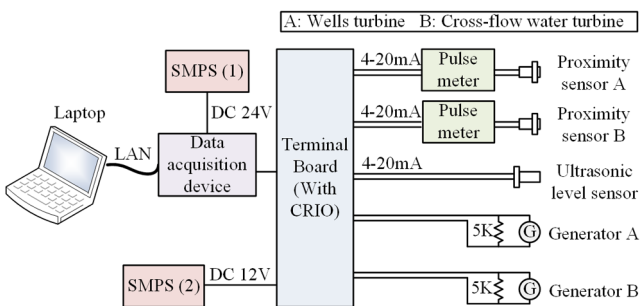


Fig. 4 Data acquisition system

Table 3 List of acquisition data

Items	Installation
RPM	Wells turbine
	Cross-flow turbine
Volatage	Wells turbine
	Cross-flow turbine
Water Level	Inside of OWC chamber

장치의 구성도를 나타내며, 데이터 수집 항목 및 설치 위치는 Table 3과 같다.

5. 실험결과

Table 1 및 Table 2의 실험조건에 따라 방파제 부착형 파력발전시스템에 설치되는 터빈의 종류를 변경시켜가며 실험을 진행하였다. 다음 Fig. 5와 Fig. 6은 터빈 설치 개수에 따른 횡류터빈과 웰스터빈의 RPM 변화를 파력발전 시스템 안정화시점까지 나타낸 것이며(약 40초), Fig. 7은 안정화된 이후 시간에 따른

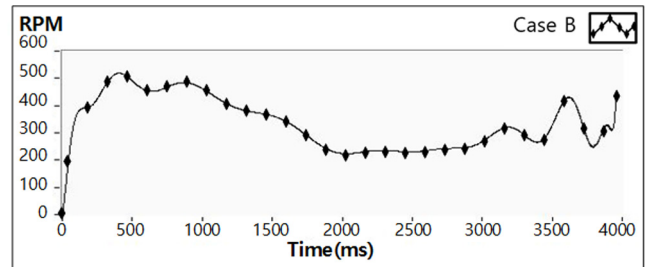


Fig. 5 RPM of wells turbine

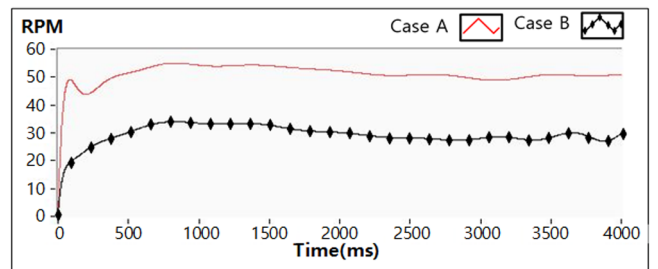


Fig. 6 RPM of cross-flow turbine

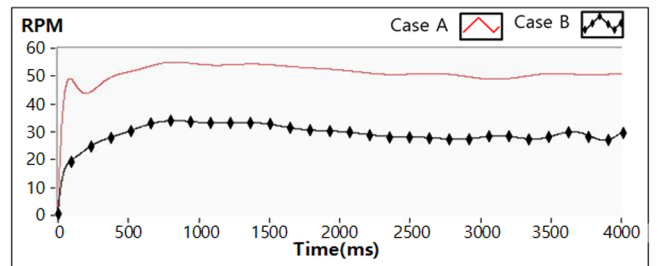


Fig. 7 Vertical displacement inside the OWC

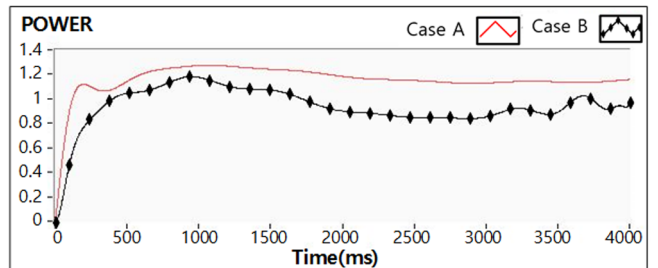


Fig. 8 Comparison of generating power

**Table 4** Results of Experiment

	Cross flow turbine RPM	Wells turbine RPM	Total ceneration power (Dimensionless number)	OWC inside water max. velocity [m/s]
Case (A)	47	-	0.95	0.5
Case (B)	29	312	1.1	0.3

진동수주 내부 수위변화를 나타낸 것이다(+는 기준수면 위를 나타내며, -는 기준수면 아래를 나타낸다.). Fig. 8은 횡류터빈과 웰스터빈에 설치되어있는 발전기로부터 생산되는 전력량을 쉽게 비교하기 위하여 출력( $W$ )의 비를 무차원수로 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6에 따르면, 횡류터빈 단독으로 설치하였을 경우 횡류터빈과 웰스터빈 두 개의 터빈을 설치한 경우보다 횡류터빈 RPM이 약 1.6배 빨리 회전함을 확인할 수 있으며, Fig. 8에 따라 출력되는 발전량 또한 횡류터빈과 웰스터빈 두 개의 터빈을 설치한 것에 비하여 횡류터빈만 설치한 경우 출력이 약 14% 높게 나타남을 확인하였다. 그러나 횡류터빈만 설치한 경우 다른 경우보다 진동수주 내부 수위의 변위가 약 40% 이상 높게 나타남을 확인할 수 있다. 아래 Table 4는 실험결과를 나타낸다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 방파제 부착형 파력발전시스템에 설치되는 터빈 개수에 따른 진동수주 내부 수위 변위 및 발전량에 영향에 대하여 확인하였다. 일반적으로 외부 환경이 동일할 때 밀도가 높은 수중에서 작용되는 횡류터빈이 흡수하는 에너지양이 많음을 식 6과 식7을 통하여 알 수 있다. 그러나 현재 안전상의 문제와 높은 파고에 대한 진동수주 내부의 수위변화에 대응하기 위해 ‘ㄱ’형의 OWC를 적용하고 있으나, 급격한 수위변화에 침수현상 등이 발생하여 문제점을 야기하고 있다. 본 연구를 통하여 횡류터빈과 웰스터빈을 함께 사용함으로써 하나의 파력발전시스템을 사용한 발전시스템에 비하여 OWC 내부 수위변화를 낮춤으로써 보다 유사한 출력을 가지며 보다 높은 안전성을 갖출 수 있는 방파제 부착형 파력발전 시스템을 구축할 수 있음을 확인하였다.

차후, 실 해역 방파제에 파력발전 시스템을 적용하여 터빈 개수가 파력 발전량에 미치는 영향에 대하여 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

Cho, I.H., Kim, M.H., 1998. Interactions of a Horizontal

Flexible Membrane with Oblique Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 356(4), 139-161.

Douglas Westwood, 2011. *The World Wave and Tidal Market Report*. 2011-2015.

Han, S.H., 2012. A Study on Output Characteristics of Wave Energy Conversion System Combined with Breakwater Depending on Geometry of Seawater Entrance Section. *Korea Maritime and Ocean Univ. Mater's paper*.

Koo, W.C., Kwon, J.S., Kim, J.D., Kim, S.J., Kim, M.W., Choi, M.K., 2012. Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Waver Energy Converter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(3), 33-38.

Mc.Cormick, M.E., David, L., 1981. *Ocean Wave Energy Conversion*. John Wiley & Sons, Inc, 61-71, 146-147.

Morris-Thomas, M.T., Irvin, R.J., Thiagarajan, K.P., 2007. An Investigation into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129(4), 273-278.

Oh, J.H., Suh, K.D., Lee, D.Y., 2009. Relationship between Significant Wave Height and Period in Coasts of Korean Peninsula. *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers Conference*, 18, 69-72.

Oh, J.S., Han, S.H., 2012. Inlet Geometry Effect of Wave Energy Conversion System. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(9), 2793-2798.

Sin, S.H., Hong, K.Y., 2011. Wave Power Technology Developments and Commercialization Requirements. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), 27-36.

Wikimedia Foundation, 2013. *Renewable Energy*. [Online] Available at: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy)> [Accessed 12 Aug. 2014].

Yoon, S.B., Kim, M.S., Jo, B.S., Lee, C.K., Lym, D.J., Kim, J.G., 2006. *Fluid Mechanics*. Hyungseul Publisher.