

# 수평판 설치에 따른 방파제형 파력 발전 시스템의 영향에 대한 연구

정성영\* · † 오진석

\* 한국해양대학교 기관공학과, † 한국해양대학교 기관공학부 교수

## The Study on the Effects of Breakwater Energy Conversion System by Horizontal Plate Installation

Sung-Young Jung\* · † Jin-Seok Oh

\*Division of Mechatronics Engineering Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

† Division of Marine System Engineering Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약 :** 최근 전 세계적으로 고유가 상황이 지속됨에 따라 신재생에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 해양에너지는 그 양이 매우 많고 밀도가 높기 때문에 활용성이 높다. 특히 우리나라의 경우 삼면이 바다로 둘러싸여있기 때문에 해양에너지원이 매우 풍부하다. 본 논문은 해양에너지를 전력으로 변환하는 시스템중 하나인 방파제형 파력발전 시스템에 수평판 설치를 통한 발전 효율 향상에 관하여 서술하였다. 기존의 방파제형 파력발전 상부에 수평판을 설치함으로써 시스템의 전력변환효율을 향상시킬 수 있으나 아직까지 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡하다. 본 논문에서는 조파수조 실험을 통하여 수평판이 방파제형 파력발전 시스템에 미치는 영향에 대해 분석하고, 본 시스템에 적합한 수평판 설치에 대해 제안한다.

**핵심용어 :** 방파제, 수평판, 에너지 변환 시스템, 신재생에너지, 웰스/횡류 터빈

**Abstract :** Due to the oil price is increasing continuously, active researches on sources of renewable energy has been invigorated. Above all, ocean energy has high-usability because of ocean current has high density and large quantity compared to the wind energy. In this paper, efficiency enhancement of the wave power generation was described through horizontal plate installation at the break water wave power generation system that converts the ocean energy into electricity. The power-conversion efficiency can be improved by horizontal plate installation at existing system, but there has been insufficient studies domestically. The purpose of this paper is to analyze about the effects of the horizontal plate installation on the breakwater wave power generation system by wave basin experiment and to propose a position of horizontal plate installation.

**Key words :** Breakwater, Horizontal Plate, Energy Conversion System, Renewable Energy, Wells/Cross-Flow Water Turbine

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 고유가 상황이 지속되고, 지구환경에 대한 국제적 관심이 높아지면서, 안정적이고 깨끗한 미래 에너지원의 확보가 국가적 차원에서 주요한 과제로 부각되고 있다. 이에 따라 세계 각국은 화석연료를 대체하기 위한 신재생 에너지 개발에 많은 투자를 하고 있다.

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있으며, 특히 서해안의 조석현상이 강하게 발생하기 때문에 해양 에너지의 밀도가 높다. 이러한 해양 에너지를 이용하여 전력을 생산하는 방법에는 조력, 조류력, 파력, 해수온도차 등 다양한 방법이 있으며,

각 분야에서 활발한 연구가 수행되고 있다. (Ministry of Trade, 2005), (Subba Rao, 2009), (Bayram, A., 2000), (McCormick ME, 1974)

해양 에너지 전력 생산 시스템중 하나인 방파제형 파력발전 시스템은 입사파가 챔버 내부 수면의 변화를 발생시키고, 이로 인해 발생하는 공기의 유동과 수위의 변화가 내부에 설치된 터빈을 회전시킴으로써 에너지를 생성하는 방법으로, 추가적인 설치 공간이 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다.

다음 Fig. 1은 방파제형 파력 발전 시스템의 구조를 나타내고 있다.

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

\* whswo85@nate.com 051)410-4866

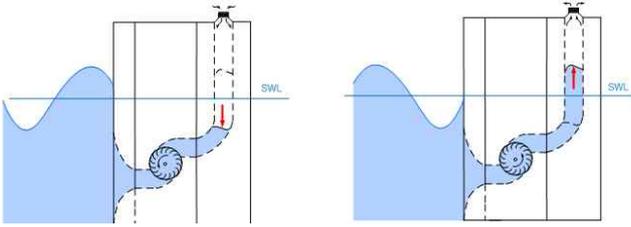


Fig. 1 Model structure of breakwater wave power generation system

방파제형 파력 발전 모델은 Masuda Y.와 Miyazaki, T에 의해 처음 제안되었고,(Masuda Y, 1979) 그 후 Whio et al.등에 의해 실험적인 연구가 진행되었다.(Washio, Y., 2000) 또한, 울산대학교에서는 고정식 파력 발전기를 2차원 완전 비선형 수치과 수조를 이용하여 시간 영역에서 해석함으로써 챔버와 덕트간 부피비에 따른 가용 파력 에너지를 계산하였으며,(Weon-Cheol Koo, 2010) 챔버 스킵트 홀수와 슬로프 각의 변화, 챔버의 공기압 영향 등 각 변수에 대한 영향에 대해 비교 분석하였다.(Weon-Cheol Koo, 2012) 한국해양대학교에서는 방파제형 파력발전의 유입구 형상에 따른 에너지 변환 효율에 대한 연구를 진행하였다.(Jin-Seok Oh, 2012)

현재까지 입력파 파장, 유체이동 속도, 유입구 형상등에 대한 수학적 모델링 및 실험은 많은 연구를 통해 밝혀졌으나, 수평판 위치에 따른 실험은 현재까지 수행된 바 없다.

본 논문은 방파제형 파력발전 시스템의 전력 생산량 향상을 위한 방법 중 하나인 수평판 최적 위치 설계에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 수행하기 위해 G. Orer, A. Ozdamar의 논문을 참고하였다.(G. Orer, 2007)

## 2. 수평판의 연구 동향 및 모델링

### 2.1 방파제 파력 발전용 수평판

현재, 조류 발전 시스템에서 터빈 상부에 수평판을 설치함으로써 터빈으로 유입되는 해수의 유속을 높이는 방법에 대한 이론적 연구가 진행되고 있으며, 방파제형 파력 발전 경우에도 수평판을 이용하여 전력량 생산 향상에 관한 이론적 연구가 수행되었다.(G. Orer, 2007) Fig. 2는 수평판을 설치한 조류 발전 시스템의 개념도이다.

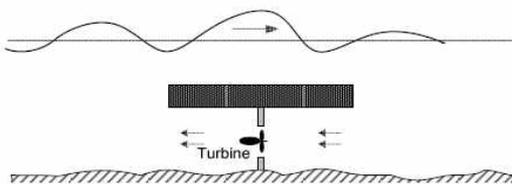


Fig. 2 Current power generation system with horizontal plate

그러나, 현재까지 연구내용을 확인한 결과 수평판 설치에 관한 연구들은 현재까지 이론적 연구를 중심으로 수행되었으며, 실제로 방파제형 파력발전 시스템에 수평판을 설치하여 실험을 진행한 연구 결과는 확인되지 않았다.

### 2.2 수평판의 수학적 모델링

방파제형 파력발전 시스템에서 입력 에너지는 유체의 흐름이 가지고 있는 에너지가 압력으로 변화하면서 나타난다. 즉, 수평판 설치에 의해 발생하는 입력 에너지 변환 효율은 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{flow}}{P_{wave}} \quad (1)$$

이때  $P_{flow}$ 는 유체의 흐름이 가지고 있는 에너지이며,  $P_{wave}$ 는 유체의 파가 가지고 있는 에너지를 나타낸다.  $P_{flow}$ 와  $P_{wave}$ 는 다음 식과 같다.

$$P_{wave} = \frac{1}{16} \rho g H_i^2 \frac{\lambda}{T} b \left[ 1 + \frac{4\pi d}{\lambda} \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)} \right] \quad (2)$$

$$P_{flow} = \frac{1}{2} \rho b h v_x^3 \quad (3)$$

이때  $d$ 는 유체의 깊이를 나타내며,  $\lambda$ 는 입력파의 파장,  $H_i$ 는 입력파고,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $T$ 는 주기,  $b$ 는 수평판의 폭,  $h$ 는 수평판의 높이,  $v_x$ 는 유체의 이동속도를 나타낸다.

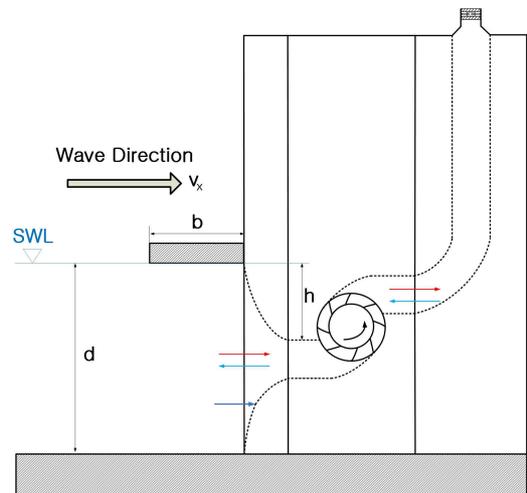


Fig. 3 Breakwater energy conversion system model variable

위 두 식을 정리하여 에너지 변환 효율  $\eta$ 로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\eta = \frac{8hv_x^3}{gH_i^2 \frac{\lambda}{T} [1 + \frac{4\pi d}{\sinh(\frac{4\pi d}{\lambda})}]}$$

식 (4)에 따르면, 에너지 변환 효율은 수평관 위치에 비례함을 확인할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 방파제형 파력발전 시스템 실험을 위한 하드웨어 구성

방파제형 파력발전 시스템의 모형은 크게 유입구, 횡류터빈, 웰스터빈으로 구성되어 있으며, 파가 가지고 있는 에너지를 최대한 흡수하기 위해 횡류터빈에서 1차 에너지 변환을 수행하고, 남은 에너지를 웰스터빈을 통하여 2차 에너지 변환을 수행하도록 구성하였다.

횡류터빈은 소형 수력발전에서 사용되는 터빈의 한 종류로서 타 터빈에 비해 회전속도와 효율이 낮지만, 구조가 간단하기 때문에 수리가 간편하고 환경에 강인한 특성을 가지고 있다.

웰스터빈은 파력발전에서 주로 사용되는 터빈으로 공기 압력 차로 에너지를 얻는다. 비교적 속도가 빠르며, 공기 흐름방향과 상관없이 한 방향으로 회전하는 장점을 가지고 있다.

수평관과 유입구를 통해 방파제형 파력발전 모형으로 입력된 에너지는 1차적으로 횡류터빈에 의해 전기에너지로 변환된다. 이때, 유체가 가지고 있는 에너지는 밀도가 매우 높지만, 속도가 느리기 때문에 횡류터빈을 이용하여 변환하며, 유체가 방파제형 파력발전 모형으로 인해 발생하는 공기의 흐름은 속도가 빠르지만, 밀도가 낮으므로 웰스터빈에서 변환함으로써 전력변환 효율을 향상시킨다.

본 연구에서는 방파제형 파력발전 시스템 모형을 제작하여 조파수조에서 실험을 진행하였다. 다음 Fig. 4는 수평관 위치에 따른 방파제형 파력발전 시스템 실험 개념도를 나타내고 있다.

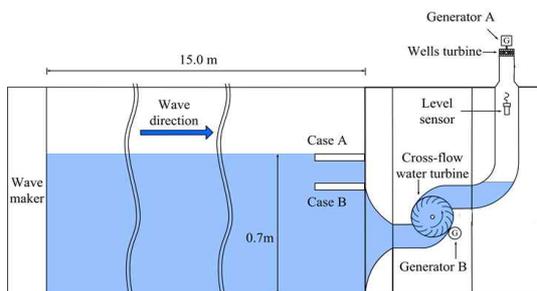


Fig. 4 The scheme of breakwater wave power generation system experiment by horizontal plate

방파제 유입구를 통해 들어온 유체는 웰스터빈과 횡류터빈을 회전시키게 된다. 방파제 파력발전 시스템은 터빈과 발전기를 연결하여 전력을 생산하지만, 본 실험에서 사용된 축소형 모형은 발전기를 연결할 정도의 충분한 에너지가 생성되지 않기 때문에 발전기를 대신하여 작은 DC 모터를 터빈과 연결하고, 연결된 DC 모터의 회전수를 검출하여 수평관 설치 위치에 따른 에너지 변환 효율을 분석하였다.

이때 DC 모터의 회전수는 방파제 파력발전 시스템의 유입 유량과 직접적인 관계에 있고, DC 모터의 외부에서 동일한 마찰저항이 발생하기 때문에 각 실험 결과간의 상호 비교는 가능한 것으로 판단된다.

다음 Fig. 5는 웰스터빈과 횡류터빈을 나타내며, Fig. 6은 방파제형 파력발전 시스템 모형을 나타낸다.

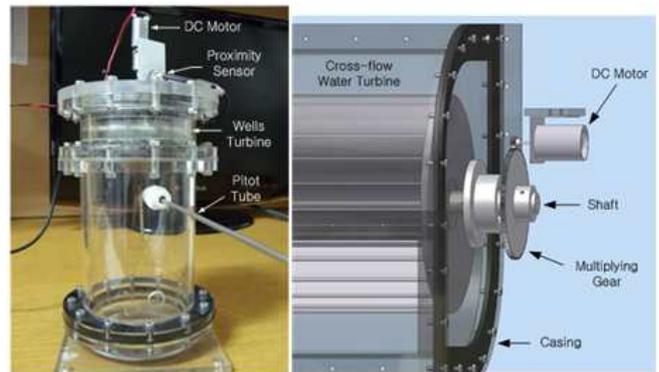


Fig. 5 Wells/Cross-flow water turbine



Fig. 6 Model of breakwater wave power generation system

### 3.2 실험 데이터 수집을 위한 시스템 구성

수평판 설치 위치에 따른 에너지 변환 효율을 측정 및 분석하기 위해 다양한 데이터를 수집하였다. Table 1은 실험 데이터 측정 항목을 나타낸 것이다.

Table 1 The table of experiment data

Variable	Name	Installation point	Sensor
Time	Time	-	-
RPM1	RPM	Wells turbine	Proximity sensor
RPM2		Crossflow turbine	
Motor1	Motor voltage	Wells turbine	DC Motor
Motor2		Crossflow turbine	
Ultra1	Inner wave height	Inner oscillating water column	Ultrasonic sensor

웰스터빈과 횡류터빈의 RPM을 펄스미터를 통해 측정하였으며, 각 터빈의 모터 전압을 측정하였다. 또한 방파제형 파력 발전 시스템 모형의 내부과고 1개를 측정하였다. 실시간 데이터 수집은 NI의 PAC인 cRIO와 LabVIEW를 이용하여 수행하였다.

### 3.3 방파제형 파력발전 시스템 실험을 위한 환경조건

방파제형 파력발전 시스템에 수평판이 미치는 영향을 분석하기 위해 조파수조를 이용하여 실험을 진행하였다. Fig. 7은 실험을 위해 조파수조에 방파제형 파력발전 모형이 설치된 사진이다.

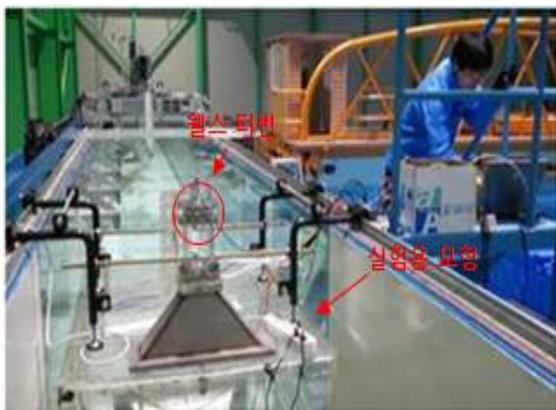


Fig. 7 Water tank and model installation for experiment

조파수조에 설치된 수평판은 가로 0.8m, 세로 0.2m, 두께 0.01m의 아크릴 판을 이용하였으며, 높이는 수면을 기준으로 6 종류의 실험을 수행하였다.

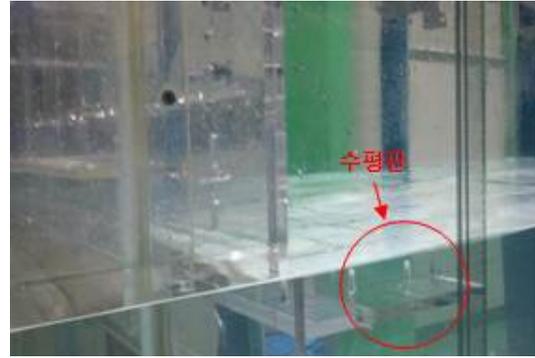


Fig. 8 Horizontal plate

Table 2 Experimental conditions

Variable	Value
Wave height	0.13m (Average)
Wave period	2 sec
Water depth	0.7m
Water inlet angle	45°
Turbine	Crossflow turbine + Wells turbine
Horizontal plate	Not Install (A)
	+0.15m (B)
	+0.06m (C)
	0m (D)
	-0.06m (E)
	-0.15m (F)

\* 유입과고는 평균 0.13m로 약 ±0.03m 오차가 발생함

## 4. 실험 결과

Table 2의 실험 조건에 따라 수평판 설치 위치를 수면을 기준으로 하여 실험을 진행하였다. 다음 Fig. 9와 Fig. 10은 수평판 설치 위치에 따른 횡류터빈과 웰스터빈의 RPM 변화를 파력발전 시스템 안정화 시점까지 나타낸 것이며(약 50초), Fig. 11은 안정화된 이후 시간에 따른 챔버 내부 수위의 변화를 나타낸 것이다. (+는 수면 위를 나타내며, -는 수면 아래를 나타낸다.)

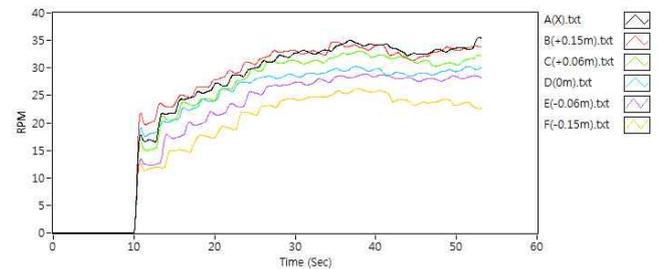


Fig. 9 Cross-flow water turbine RPM by horizontal plate

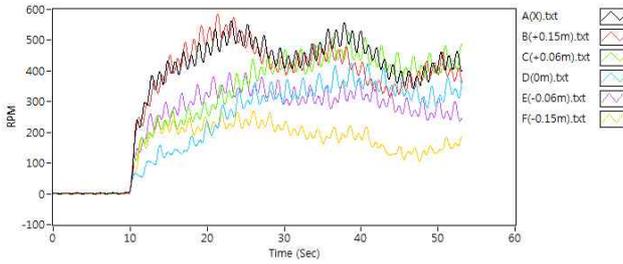


Fig. 10 Wells water turbine RPM by horizontal plate

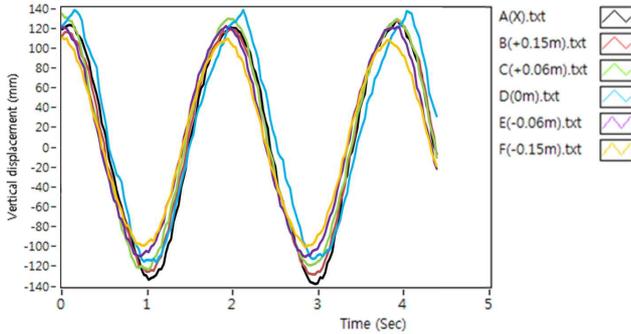


Fig. 11 Water level inside the chamber

다음 Table 3은 수평판 위치에 따른 터빈의 RPM과 Voltage의 평균값을 나타낸 것이다.

Table 3 Turbine RPM and Voltage by horizontal plate

Plate type	Wells RPM	Cross RPM	Wells(V)	Cross(V)
A	333.538	29.369	0.246	0.719
B	361.408	29.348	0.268	0.719
C	353.254	29.232	0.261	0.716
D	296.232	27.881	0.219	0.688
E	256.415	26.021	0.187	0.642
F	161.674	20.859	0.115	0.524

Table 3에 따르면, 횡류터빈은 수면을 기준으로 -0.15m 위치에 수평판을 설치하는 경우 RPM이 가장 낮게 나타나며 수면 위에 설치하는 경우 횡류터빈의 RPM에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 웰스터빈은 수평판 높이가 수면에서 +0.15m 떨어진 경우에 RPM이 가장 높게 나타나며, 수평판이 수면 -0.15m에 설치하는 경우 RPM이 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

위 실험 결과를 종합하면, 방파제형 파력발전 시스템에서 수평판을 수면 +0.15m에 수평판을 설치하는 경우 약 10%의 전력 생산량 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 기존의 방파제형 파력발전 시스템에 수평판이 미치는 영향에 대해 실험 및 데이터 분석을 위해 방파제형

파력발전 시스템 모형을 제작하였으며, 조파수조에서 실험을 수행하였다.

실험 수행결과 수평판을 수면 +0.15m에 설치했을 때 횡류터빈과 웰스터빈의 RPM이 설치하지 않는 경우보다 약 10% 향상되었으며, 수평판을 수면 밑에 설치하는 경우 설치하지 않는 경우보다 RPM이 낮아짐을 확인하였다.

일반적으로 외부 환경이 동일할 때 터빈의 RPM은 터빈이 가지고 있는 에너지와 비례하므로 본 실험결과 수면에서 +0.15m에 설치했을 때 효율이 가장 높으며, 이러한 결과는 2.2의 수식 (4)의 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

차후, 실제 방파제에 파력발전 시스템을 적용하여 발전량에 수평판이 미치는 영향에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 일반연구지원사업의 ‘방파제 겸용 파력발전 시스템의 성능향상을 위한 연구’와 해양수산부의 지원으로 수행한 ‘해양에너지 전문인력 양성사업’의 연구결과임.

### References

- [1] Bayram, A.(2000), "Experimental study of a sloping float breakwater", Ocean Engineering, Vol. 27, pp. 445-453.
- [2] G. Ozer, A. Ozdamar.(2007), "An Experimental Study on the Efficiency of the Submerged Plate Wave Energy Converter", Renewable Energy, Vol 32, pp. 1317-1327.
- [3] Oh, J. S, Han, S. H.(2012), "Inlet geometry effect of wave energy conversion system", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, No. 9, pp. 2793-2798.
- [4] Masuda Y. and Miyazaki, T.(1979), "Wave Power Electric Generation Study in Japan", Proc. of Wave and Tidal Energy Symposium, British Hydrodynamics Research Associates, Paper C.
- [5] McCormick ME(1974), "Analysis of a wave-energy conversion body", J Hydronaut, Vol. 8, pp. 77-82.
- [6] Ministry of Trade, Industry and Energy Republic of Korea New&Renewable Energy(2005),"New& Renewable Energy Whitepaper"
- [7] Subba Rao, Kiran G. Shirlal, Roobin V. Varghese, K.R. Govindaraja(2009), "Physical model studies on wave transmission of a submerged inclined plate breakwater", Ocean Engineering, Vol. 36, 1199-1207.
- [8] Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Furuyama, H. And Fujita, T.(2000), "The Offshore Floating Type Wave Power Device 'Might Whale' Open Sea Test", Proc. of the 10<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conf., Vol. 1, ISPOPE, Seattle, USA, pp. 373-380.

- [9] Koo, W. C, Kwon, K. S, Kim, J. D, Kim, S. J, Kim, M. W and Choi, M. K.(2012), "Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Wave Energy Converter", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 26, No. 3, pp. 33-38.
- [10] Koo, W. C, Kwon, Kim, M. H and Choi, Y. R.(2010), "Numerical Analysis of Chamber Flow and Wave Energy Conversion Efficiency of a Bottom-mounted Oscillating Water Column Wave Power Device", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 47, No. 3, pp. 388-397.

---

원고접수일 : 2013년 7월 17일  
심사완료일 : 2013년 12월 5일  
원고채택일 : 2013년 12월 10일