

# 파랑 에너지 변환을 위한 월파제어구조물의 월파랑 산정 실험

신승호\* · 홍기용\*

\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템기술연구본부

## Experimental Study on Wave Overtopping Rate of Wave Overtopping Control Structure for Wave Energy Conversion

SEUNG-HO SHIN\* AND KEYYONG HONG\*

\*Ocean Engineering Research Department, Marine and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Wave Energy 파랑에너지, Wave Power Generation 파력발전, Wave Overtopping 월파, Wave Overtopping Structure 월파구조물, Wave Energy Converter 파랑에너지 변환장치

**ABSTRACT:** Wave energy has been considered to be one of the most promising energy resources for the future, as it is pollution-free and an abundant natural resource. However, since it has drawbacks of non-stationary energy density, it is necessary to change the wave energy into a simple concentrated energy. Progressive waves in a coastal area can be amplified, swashed, and overtopped by a wave overtopping control structure. By conserving the quantity of overflow in a reservoir, the kinetic energy of the waves can be converted to the potential energy with a hydraulic head above the mean sea level. The potential energy in the form of a hydraulic head can be utilized to produce electric power, similar to hydro-electric power generation. This study aims to find the most optimal shape of wave overtopping structure for maximum overtopping volume of sea water; for this purpose, we carried out the wave overtopping experiment in a wave tank, under both regular and irregular wave conditions.

### 1. 서 론

해양에는 파랑, 조류, 수온 등의 다양한 에너지원이 존재하며 이들 에너지의 추출에 관한 연구는 대체 에너지 확보에 대한 필요성이 부각되면서 최근 활발히 진행되고 있다.

해양의 재생 가능한 청정 에너지를 이용하는 발전(發電) 기술은 환경오염뿐만 아니라 화석 연료의 과도 사용으로 인한 자원 고갈 문제를 극복할 수 있는 새로운 에너지 개발 기술의 하나로 인식되고 있으며(홍석원, 1998), 이중 해양을 대표하는 파랑 에너지는 전 지구의 모든 해역에 폭넓게 분포하고 있어 가용 에너지원이 풍부하고 이를 추출하기 위한 장치의 설치 가능 해역이 광범위하여 활발히 연구가 진행되고 있는 자원의 하나이다. 더불어 반도의 지리적 특성을 가진 우리나라 연안 해역에서도 최근 한반도 해역의 파랑 에너지 분포 특성에 관한 조사(송무석 등, 2004), 파력발전을 전제로 한 파랑 에너지 분포 특성에 관련한 연구(홍기용 등, 2004; 류황진 등, 2004) 등 파랑 에너지 이용 가능성을 확인하기 위한 연구가 진행되었다.

파력발전의 실용화 관점에서 직면하고 있는 가장 어려운 문제는 파랑 에너지의 변동성 극복과 경제성 확보로 여겨진다. 실제 해역에서의 파랑은 불규칙성을 특징으로 하며 따라서 파랑 에너지

추출로부터 얻어지는 전기 에너지도 상대적으로 큰 변동성을 지니고 있다. 파랑의 운동 에너지를 기계장치의 운동으로 직접 변환하고 이를 발전에 활용하는 가동 물체형 파력발전방식(Yemm, 1999)과 수면의 상하 운동을 공기실의 압축·팽창으로 유도되는 공기 흐름으로 전환하여 이를 다시 전기 에너지로 변환하는 진동 수주형 파력발전방식(홍석원 등, 2001; Osawa et al., 2004) 등은 에너지 변환효율 측면에서 상대적으로 유리함에도 불구하고 파랑 에너지의 변동성이 발생 전력에 반영되는 단점을 가지고 있다. 반면에 월파형 파력발전은 파랑의 진행방향 전면에서 사면을 두어 파랑 에너지를 위치 에너지로 변환하여 저수함으로써 평균해면과의 수두차를 형성(1차 변환)하고, 이를 저수지 하부에 설치한 수차 터빈으로 발전(2차 변환)하는 파력발전 방식이며, 따라서 상대적으로 발생 전력의 변동성이 작고 제어가 용이한 이점이 있다(Nielsen and Kofoed, 1997).

본 연구는 월파를 이용한 파력발전 시스템에서 파랑을 대상으로 한 주어진 해역환경에 대해 보다 많은 월파랑을 얻을 수 있는 월파제어구조물의 형상을 도출하기 위한 실험적 연구로서, 파력발전을 전제한 월파제어구조물의 개념적 설계 요소를 도출하고 2차원 수리모형 실험을 통하여 구조물 형상 파라미터인 비천단고( $h_e/H$ ), 비수로길이( $l/L$ ) 및 사면 경사( $\cot \phi$ )에 대한 무차원 월파랑( $Q/HL$ ) 변화를 분석하였다.

제1저자 신승호 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7584 shinsh@moeri.re.kr

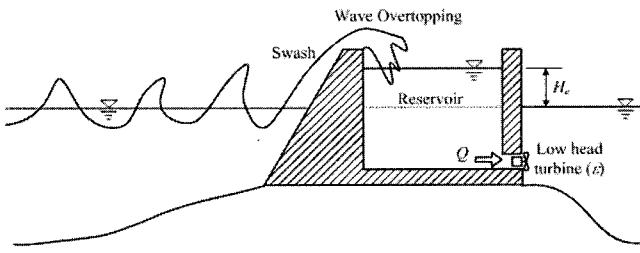


Fig. 1 Schematic diagram of wave over topping generation

## 2. 월파제어구조물의 개념적 설계

월파형 파력발전 방식은 새로운 개념의 파력발전 방식이지만 기본적으로는 댐에 의한 발전과 유사하다. 즉 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 파의 에너지를 파 수렴제 등으로 집중시켜 사면을 따라 쳐오르도록 유도하고 배후의 유수지로 월파시켜 저수함으로써 유수지 내의 위치 에너지로 변환(1차 변환)한 후, 일반적인 수력발전과 마찬가지로 낙차를 이용하여 전력으로 변환(2차 변환)하는 것이다. 이때 사면을 가진 구조물은 파고의 증폭을 촉진시켜 입사파의 월파가 원활히 이루어지도록 하는 월파제어구조물로서의 역할을 담당하게 된다. 이러한 개념을 토대로 한 월파제어구조물은 주어진 파랑 조건에서 최대 월파 유량을 획득할 수 있도록 설계되어야 할 것이다.

### 2.1 월파 특성을 지배하는 월파제어구조물의 파라미터

외해로부터 입사하는 파랑 조건에 대해 파의 최대 증폭을 및 최대 월파 유량을 지배하는 월파제어구조물의 단면 2차원 지배 파라미터는 Fig. 2와 같다.

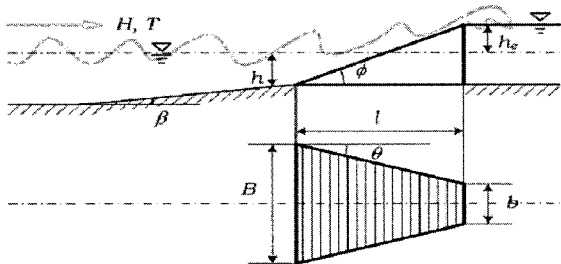


Fig. 2 Dominant parameters concerned with wave overtopping structure

Fig. 2에서 구조물의 설치 해역의 선정과 관련된 파라미터는,

- $h$  : 월파제어구조물의 설치 수심
- $\tan \beta$  : 월파제어구조물이 설치된 저면의 해저경사
- $H$  : 입사파의 파고
- $T$  : 입사파의 주기
- $\Delta h$  : 설치 대상해역의 조위변화(조차)

이며, 단면 2차원 월파제어구조물의 형상과 직접적으로 관련된 파라미터는 다음과 같다.

- $\tan \phi$  : 월파제어구조물의 사면 경사
- $l$  : 월파제어구조물의 수로 길이
- $h_e$  : 월파제어구조물의 천단고

#### (1) 설치 수심 ( $h$ )

월파제어구조물의 설치 수심은 재체 자체의 건설비용, 유지보수의 용이성 및 육상과의 연계 방안 등과 밀접한 관련을 가질 뿐만 아니라 월파제어구조물에 작용하게 될 파의 특성 변화에도 긴밀히 연관되어 있다.

외해로부터 입사되는 파는 심해역에서 천해역으로 전파되어 옴에 따라 수심의 영향을 받아 파장이 점진적으로 짧아지며 파고는 증폭된다(천수효과). 천수효과로 인해 파는 입사파고의 1.3 배 정도의 수심에 이르기까지 증폭되지만 그 이후부터는 쇄파하기 시작하며 에너지의 소산이 일어난다. 따라서 월파제어구조물은 천수효과를 최대도로 받는 쇄파점 부근이 파랑 에너지의 최대 이용이라는 측면에서 유리하다.

#### (2) 월파제어구조물이 설치된 저면의 해저경사 ( $\tan \beta$ )

대부분의 실패역은 외해로부터 연안으로 접근할수록 수심이 점차 알아지는 경사 저면을 형성하고 있으며, 이는 천수효과로 인한 파고의 증폭이라는 관점에서 유리하게 작용할 수 있다.

#### (3) 설치 대상해역의 조위변화 ( $\Delta h$ )

조차는 월파제어구조물의 천단고( $h_e$ ) 변화에 관계하여 제체를 월파하는 개개의 파에 대한 월파 유량 변동에 직접적인 영향을 미친다. 상시 발전을 목표로 하는 경우에는 가능한 한 조차가 적은 해역을 선택하는 것이 바람직하지만, 발전 방식에 따라 월 혹은 연 단위의 시간 스케일로 판단하면 전체 월파 유량에 대한 영향은 그다지 크지 않다. 즉 특정 시간대에 한정하여 발전하여 이용토록 할 목적이라면 조차가 적지 않은 해역에서도 적용할 수 있다. 예를 들면, 반일주조를 가진 우리나라 해역의 경우, 조차를 고려하며 비교적 높은 천단고의 구조물을 설치하고, 만조시 상대적으로 낮아진 천단고를 이용하여 배후에 충분히 저수한 다음, 저조시 외부의 수위가 낮아졌을 때, 상대적으로 높아진 유수지의 수위를 이용하여 한정된 시간동안 고효율의 발전을 행한다는 관점이라면, 조차가 비교적 높은 해역에서도 활용이 가능하다.

#### (4) 월파제어구조물의 사면 경사 ( $\tan \phi$ )

월파제어구조물의 사면 경사는 구조물 전면에서 집적된 파를 사면을 통하여 재차 증폭시키고 수렴자의 질량수송 속도를 증가 시킴으로서 월파를 용이하게 하는 결정적인 형상 요소이다. 사면 경사는  $\tan \phi$  가 최적 경사보다 큰 경우, 월파제어구조물의 반사율이 1에 접근하게 되며 증폭파의 형성과 함께 구조물 전면에서의 연직 방향의 유속이 커짐으로서 파고 증대라고 하는 순효과가 기대되지만, 반대로 수평 유속 성분이 감소하게 되어 월파 유량이 감소하는 결과를 초래할 수 있다. 반면에 최적 경사보다 작은 경우는 반사율이 감소하여 수평 유속 성분은 길어지지만 월파제어구조물의 수로 길이가 길어져 저면 마찰에 의한 에너지 손실과 수로 내에서의 쇄파현상이 동반되어 월파 유량의

저하가 나타날 수 있다. 최대 월파 유량을 얻기 위해서는 월파 제어구조물의 최적 사면 경사를 도출할 필요가 있다.

(5) 월파제어구조물의 수로 길이 ( $l$ )

월파제어구조물의 수로 길이는 구조물의 경사( $\tan \phi$ )와 직접적으로 관계되는 요소이다. Miyae and Temisao(1984)는 무차원 월파 에너지와 수로 길이의 관련성을 조사하는 실험으로부터 외해 입사파의 파장이 수로 길이의 6~7배 이상이 되면 월파 효과가 현저히 저하됨을 제시하였다.

(6) 월파제어구조물의 천단고 ( $h_e$ )

천단고는 입사파고와의 관계로 파악되어야 한다. Komatsu et al.(1991)은 실험을 통하여 외해 입사파의 파형경사( $H/L$ )가 5.27%인 경우에 대해 무차원 월파 유량과 비천단고( $h_e/H$ )와의 관계를 조사하여 월파 유량이 비천단고의 증가에 따라 단조감소함을 보였다. 또한 Miyae and Temisao(1984)는 실험을 통해 비천단고가 2 이하에서는 월파 유량이 거의 일정하다는 결론을 얻고 있다. 즉 조건에 따라서는 천단고가 작다고 단순히 월류량이 증가하리라 판단하기는 어려운 경우가 존재할 수 있으며, 반드시 외해로부터의 입사파 조건과 연계하여 천단고를 결정해야 하리라 본다.

2.2 기존 연구에서 제시하는 최적의 월파 조건

일반적으로 각종 항만 및 연안에서는 배후 시설물의 보호를 주목적으로 방파제 등과 같은 구조물을 건설하는 경우가 대부분이며 따라서 해당 구조물의 월파 관련 연구에 있어서도 월파를 저지하는 방향의 검토가 다수를 차지한다. 그러나 본 연구에서는 이와는 달리 보다 많은 월파를 유도할 수 있는 형상 요소를 도출해야 한다.

최대 월파 유량 획득을 목적으로 구조물의 구조적 형상과 지배 파라미터와의 관계를 조사한 시도는 그다지 많지 않지만, 과거 몇몇의 연구로부터 제시된 최적 월파 조건을 살펴보면 다음과 같다.

Shigemitsu et al.(1979)은 파랑 양수발전에 관한 실험적 연구를 통해 수렴제의 수렴각( $\theta$ )=18.5°, 월파제의 사면 경사( $\tan \phi$ ) = 1/1.5의 경우 최대 월파 유량을 얻는다고 보고하고 있다.

Research Institute for Ocean Economics(1980)은 신 파력발전 시스템 개발과 관련한 실험으로부터 수렴 에너지의 회수율 및 수렴제의 경제성을 고려하여 수렴각 = 30°, 사면 경사 = 1/1.3, 수렴제의 폭비( $b/B$ ) = 1/5를 제안하였으며, Hirose et al.(1987)은 수렴각 = 30°, 사면 경사 1/1.5, 수로 폭비 = 1/4.2, 1/7.4, 1/1을 검토하여 월파 현상 자체가 비선형성이 큰 현상이므로 일반화하기 어렵다고 언급하면서, 수렴부의 설치 유무에 대한 효과는 일반적인 경향을 찾기가 어렵지만, 주기와는 관련되어 있다는 결론을 내고 있다.

한편, Miyae and Temisao(1984)는 무차원 월파량과 무차원 월파 에너지를 도입하여 지배 파라미터와의 관계를 조사하였는데, 그는 결론으로 사면 경사 =  $1/\sqrt{3}$ , 수로 폭비 = 1/6이 최적임을 지적하고, 천단고, 수로 길이 등의 제반 조건이 모두 만족

될 때, 에너지 변환 효율은 25~30%가 되어 월파 발전 방식의 유효성을 확인했다고 밝히고 있다. Komatsu et al.(1991)은 구조물을 통해 월파된 유량을 다시 심층으로 보내어 인공적으로 용승류를 발생시키는 실험을 통하여 Miyae and Temisao(1984)와 유사한 결론을 얻었으며, 정량적 평가를 위해 도입한 무차원 월파량( $Q/HL$ ,  $Q$ 는 월파량)의 유효성을 보고하였다.

Table 1은 이들 연구에서 제시한 최적 조건 가운데에서 월파형 파력발전 시스템을 다룬 본 연구와 직접 관련되는 지배 파라미터를 정리한 것이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 각 연구에서는 서로 다른 최적의 조건을 제시하고 있어, 월파제어구조물을 통한 파력발전을 구상하는 본 연구의 목적에 맞추어 새로이 검토되어야 할 필요성이 있으며 여기서는 월파제어구조물의 단면 2차원 최적 형상을 도출하기 위해 2차원 월파실험을 수행하였다.

Table 1 Optimal conditions for wave overtopping structure in past studies

Past studies	Dominant parameters		
	$\theta$ [deg.]	$\tan \phi$	$b/B$
Shigemitsu et al.(1979)	18.5	1/1.5	1/6.25
RIOE(1980)	30	1/3	1/5
Miyae and Temisao(1984)	-	$1/\sqrt{3}$	1/4.2, 1/7.4
Hirose et al.(1987)	30	1/1.5	1/6
Komatsu et al.(1991)	-	$1/\sqrt{3}$	$\geq 1/6$

3. 최적 형상 도출을 위한 월파 실험

본 실험은 월파제어구조물의 2차원 단면 형상에 대한 모형실험으로서, 월파를 이용한 파력발전시스템에서 파랑을 대상으로 한 주어진 해역환경에 대해 보다 많은 월파 유량을 획득할 수 있는 월파제어구조물의 최적 형상 파라미터를 도출하기 위한 것이다.

3.1 실험 장치 및 방법

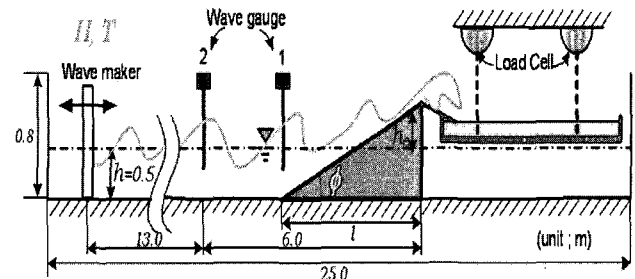


Fig. 3 Experimental setup for wave overtopping experiments

최대 월파 유량을 얻기 위한 월파제어구조물의 2차원 단면형상 실험은 길이 25m, 폭 0.6m, 깊이 0.8m의 2차원 단면 수로에서 수행되었다.

본 실험에서는 수심 8m에 설치되는 월파제어구조물을 상정하고, 실험에서의 축척을 1/16 Froude 상사를 기준으로 하였다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 실험 수조 내의 수심은 0.5m로 설정하였으며, 월파제어구조물의 설치 해저면 경사의 효과를 배제하여 구조물 형상 자체만의 변화에 의한 월파 유량 변화를 파악하기 위해 수평 해저면(저면 경사 = 0) 조건을 부여하였다.

조파기로부터 생성되는 입사파의 계측을 위해서는 조파판의 중심 위치로부터 13.0m 지점에 용량식 파고계(wave gauge 2)를 설치하였으며, 입사된 파가 월파제어구조물을 손상하기 직전의 파 계측을 위해서는 각 월파제어구조물의 외해측 끝단에 용량식 파고계(wave gauge 1)를 설치하였다.

월파제어구조물을 손상하여 천단을 월파하는 유량의 정량적 계측을 위하여, Fig. 3과 같이 월파하는 유량을 담기 위한 저수 용기를 배후에 설치하고 구조물의 침투를 월류하는 수위가 저수 용기로 흘러 들어갈 수 있도록 도수로(導水路, 폭 20cm)로 연결하였으며, 저수 용기는 용량 50kg의 load cell 2개에 연결하여 저수되는 유량의 경시변화를 파악할 수 있도록 하였다.

한편, 매 실험에서 파고계에 의한 수위변동 및 월파 유량의 계측은 조파 개시와 동시에 시작하여 구조물 배후의 저수 용기가 저수 한계에 달할 때까지 실시되었다.

3.2 입사파 조건

Table 2는 본 실험에서 부여한 입사파 조건으로서, 구조물 모형과 동일한 1/16의 Froude 상사를 기준으로 선정된 파고 0.03125m, 0.0625m, 0.125m와 주기 1.0s, 1.25s, 1.5s를 조합한 9가지 종류이며, 불규칙파는 유의파고 0.0625m, 0.125m와 유의파주기 1.0s, 1.25s, 1.5s를 조합한 6가지 종류의 JONSWAP 스펙트럼을 생성하여 부여하였다.

Table 2 Incident wave conditions for wave overtopping experiments

Wave height <i>H</i> (m),	Period <i>T</i> (s)	Wave length <i>L</i> (m)	Wave steepness <i>H/L</i>	Relative water depth, <i>h/L</i>
0.03125 (regular wave only)	1.00	1.54	0.020	0.32
	1.25	2.27	0.014	0.22
	1.50	2.90	0.011	0.17
0.0625	1.00	1.54	0.041	0.32
	1.25	2.27	0.028	0.22
	1.50	2.90	0.021	0.17
0.125	1.00	1.54	0.081	0.32
	1.25	2.27	0.055	0.22
	1.50	2.90	0.043	0.17

3.3 월파제어구조물의 2차원 단면 형상 조건

월파제어구조물의 형상은 2.2절에서 검토한 기존의 연구들(Shigemitsu et al., 1979; RIOE, 1980; Miyae and Temisao, 1984; Hirose et al., 1987; Komatsu et al., 1991)에서 서로 달리 제시되었던 최적 월파 구조물 형상 조건(Table 2)을 참고로 Fig. 2에서 제시하는 월파제어구조물 요소 중, 단면 2차원 형상 파라미터인 수로 길이(*l*), 사면 경사( $\tan \phi$ ) 및 구조물의 천단고

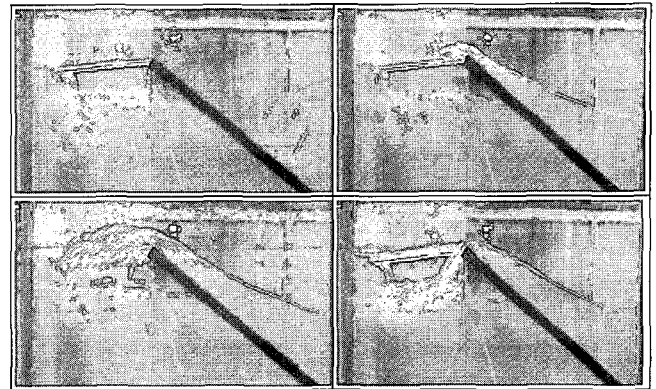


Fig. 4 Wave overtopping structure and overtopping(regular wave condition)

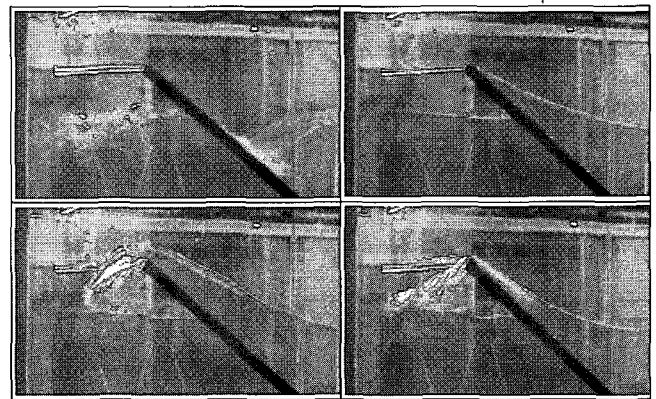


Fig. 5 Wave overtopping structure and overtopping(irregular wave condition)

( $h_e$ )에 대해 Table 3에 제시한 8가지 종류의 형상 조건으로 선정·검토하였다.

Table 3 Experimental conditions of shape parameters of wave overtopping control structures

CASE No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Freeboard height, $h_e$ (m)	0.13			0.19				
Gradient of inclined ramp, $\cot \phi$	1.5	3	$\sqrt{3}$	1:1	1.5	3	$\sqrt{3}$	1
Length of ramp, <i>l</i> (m)	0.94	1.88	1.08	0.63	1.03	2.06	1.19	0.69

3.4 계측 결과의 취득

Fig. 4는  $H = 0.0625m$ ,  $T = 1.25s$ 의 규칙파를 입사시킨 경우, Table 3의 Case 1 조건( $l = 0.94m$ ,  $\cot \phi = 1.5$ ,  $h_e = 0.13m$ )에서 월파하는 양상을 나타낸 것이다. 조파판으로부터 입사해온 파는 구조물의 사면으로부터의 반사파와 중첩되어 구조물 전면에서 부분 중복파를 형성하며 파고의 증폭이 나타나고 곧이어 월파하기 시작한다. Fig. 4의 좌상단은 구조물 사면에서 형성된 보아(bore)가 월파제어구조물의 침투를 향해 진행되는 형상을

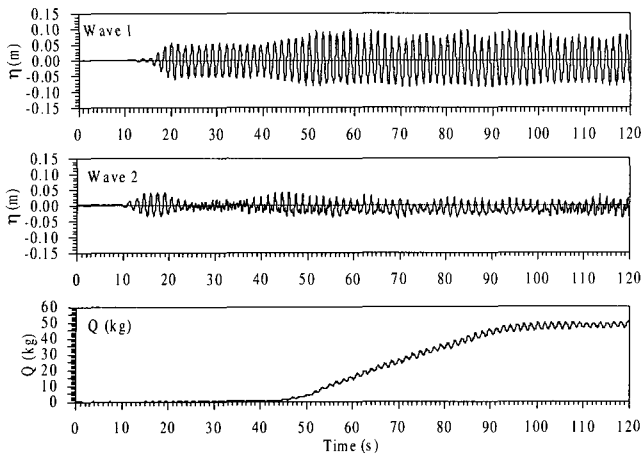


Fig. 6 One experimental result of Case 1 ( $l = 0.94\text{m}$ ,  $\cot \phi = 1.5$ ,  $h_e = 0.13\text{m}$ ) in the regular wave condition ( $H_s = 0.0625\text{m}$ ,  $T_s = 1.5\text{s}$ )

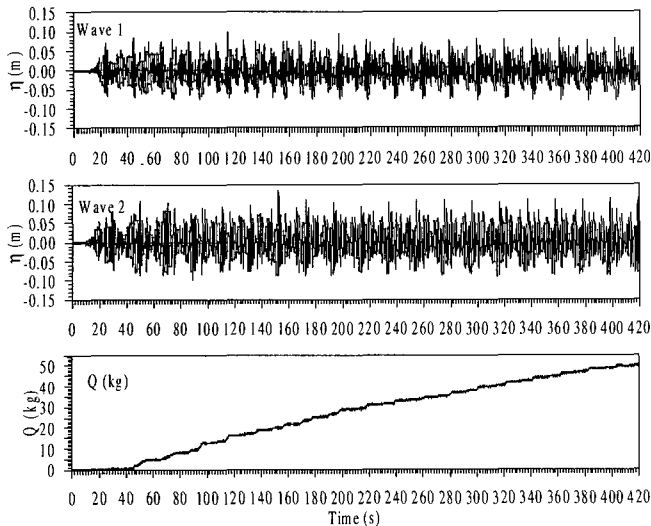


Fig. 7 One experimental result of Case 1 ( $l = 0.94\text{m}$ ,  $\cot \phi = 1.5$ ,  $h_e = 0.13\text{m}$ ) in the irregular wave condition ( $H_s = 0.0625\text{m}$ ,  $T_s = 1.25\text{s}$ )

보여주며(phase 1), 수상단에서는 구조물을 타고 소상하여 월파하기 시작하는 수피의 모습을 관찰할 수 있다(phase 2). 좌하단은 사면으로부터 소상된 수피가 최대 월파하는 순간을 나타내고 있으며(phase 3), 우하단은 월파한 수피의 일부가 도수로를 통해 저수 용기로 흘러 들어가는 양상이 나타나 있다(phase 4).

Fig. 5은 Fig. 4와 동일한 구조물 형상 조건에  $H_s = 0.0625\text{m}$ ,  $T_s = 1.25\text{s}$ 의 불규칙파를 부여한 실험 양상을 나타낸다. 불규칙파에 대한 실험은 JONSWAP 스펙트럼을 토대로 생성된 파랑 스펙트럼을 부여한 것으로서, 규칙파에 대한 실험(예를 들면 Fig. 4)에서 수조 내 파랑장이 정상 상태의 파랑 조건이 형성된 이후부터 매 주기마다 규칙 바르게 월파하는 것과는 달리, 입사하는 불규칙파의 각 성분파고가 월파제어구조물의 천단을 월파하는 조건을 만족할 때 마다 월파하게 되는 것이 특징적이다.

그러나 월파하는 경우는 제체 전면에서 보아(bore)가 형성되고 사면을 소상하여 결국 월파하는(phase 1~phase 4) 등 규칙파와 거의 동일한 양상을 보였다.

Fig. 6 및 7은 실험에 의해 획득된 시계열 자료를 나타내는 예로서 각각 Case 1 조건 ( $l = 0.94\text{m}$ ,  $\cot \phi = 1.5$ ,  $h_e = 0.13\text{m}$ )에 대해 규칙파 ( $H_s = 0.125\text{m}$ ,  $T_s = 1.5\text{s}$ ,  $H_s = 0.125\text{m}$ ,  $T_s = 1.5\text{s}$ ) 및 불규칙파 ( $H_s = 0.125\text{m}$ ,  $T_s = 1.25\text{s}$ )를 입사파로 한 경우이다. 파고계 1, 2 및 load cell에 의해 계측된 수위 변동치와 월파 유량 ( $Q$  [kg])의 시계열 변화는 Fig. 6, 7의 상(wave 1, 월파제어구조물의 외해측 끝단), 중(wave 2, 조파판으로부터 13.0m 지점), 하단 ( $Q$  [kg], 저수 용기의 누적 유량)에 각각 배치하였다.

Fig. 6에서 파고계 1, 2의 수위 변동치는 위상 및 변화 폭에 있어 서로 달리 나타나며 이는 각 파고계의 설치 위치가 상이함에 그 원인이 있다. 조파판으로부터 입사해오는 파는 구조물의 사면으로부터의 반사파와 서로 중첩되어 부분 중복파를 형성하게 되고 수조 내 길이 방향으로 입사파의 주기에 따라 각기 서로 다른 형태의 부분 중복파를 나타낸다. 즉 규칙파의 경우, 구조물의 전면에서 형성되는 파형은 항상 중복파의 복(envelope)이 위치하게 되고, 다른 위치에서는 입사되는 파의 주기 및 구조물의 사면 경사에 따라 중복파 모드의 복이 되기도 하고 절(node)이 되기도 한다. 이 같은 현상은 규칙파의 경우 더욱 두드러졌으며, 본 연구의 규칙파에 대한 모든 실험의 수위 변동기록에서도 동일하였다.

한편, Fig. 6의 Wave 2 계측 결과에서는 규칙파의 패턴이 다소 왜곡되어있다. 이는 능동제어 조파를 하지 않는 유한 길이의 수조 실험에서 모형으로부터의 반사파가 조파판에서의 재반사로 이어져 파형에 왜곡 및 장주기 파가 형성된 것에 원인이 있다. 능동 조파제어 기능이 없는 본 수조 실험에서는 불가피한 사항이었으며, 주어진 동일 파랑조건에서 최대 월파유량을 획득할 수 있는 구조물을 선정하고자 하는 실험의 목적에 비추어 이러한 약간의 파형 왜곡은 최적 구조물 선정이라는 본 실험에 목적에 크게 어긋나지 않는다고 판단하였다.

Fig. 7에 나타낸 불규칙파의 조건 하에서는 월파 구조물 전면 수로 시작점의 수위변동(wave 1) 및 조파판으로부터 13m 떨어진 파고계의 수위변동(wave 2)에서 반사파로 인한 중복파 모드가 다소 나타나 있으며 wave 1의 위치보다 wave 2 위치에서 복(envelope)의 성향이 부각된 점을 알 수 있다.

월파제어구조물과 입사파의 조합에 의한 실험은 규칙파 실험 72종(월파구조물 8 case × 규칙파 조건 9종), 불규칙파 실험 48종(월파구조물 8 case × 불규칙파 조건 6종)이 이루어졌으며, 모두 Fig. 7과 같은 시계열 자료를 획득하였다.

#### 4. 실험 결과의 분석 및 토의

규칙파 및 불규칙파의 입사조건에 대해 획득된 시계열 월파 유량은 폭 0.2m의 도수로를 통해 저수 용기에 모아진 누적 유량,  $Q$  [kg]이다. 월파 유량의 분석을 위해 이를 단위 폭당 월파

유량의 변화율,  $Q$  [ $m^3/s/m$ ]로 환산하였으며(이후  $Q$ 는 월파 유량 변화율), 이때 고려된 시간은 월파 개시 후 용기에 수위가 저수되는 시각으로부터 용기의 저수 용량(50kg)을 넘치는 시각 까지로 하였다.

월파제어구조물의 단면 2차원 형상에 대한  $Q$ 는 입사파고 ( $H$ ), 파장( $L$ ), 월파제어구조물의 천단고( $h_e$ ), 수로 길이( $l$ ) 및 사면 경사( $\cot \phi$ )에 의존하는 것이라 사료된다. 또한  $Q$ 는 제체의 천단고에 단순히 의존하는 것이 아니라 입사파고의 상대적인 비에 따라 달리 나타나고, 입사파의 파장 또한 수로 길이에 대한 비로써 의존성을 나타낸다. 따라서 이들 간의 관계를 차원 해석을 통해 무차원 양으로 표시하면  $Q/HL$ 은

$$\frac{Q}{HL} = f\left(\frac{H}{L}, \frac{h_e}{H}, \cot \phi, \frac{l}{L}\right) \quad (1)$$

로 관계지을 수 있다. 본 연구에서는 비천단고( $h_e/H$ ), 비수로 길이( $l/L$ ) 및 사면 경사( $\cot \phi$ )에 대한 무차원 월파량( $Q/HL$ ) 변화를 분석하였다.

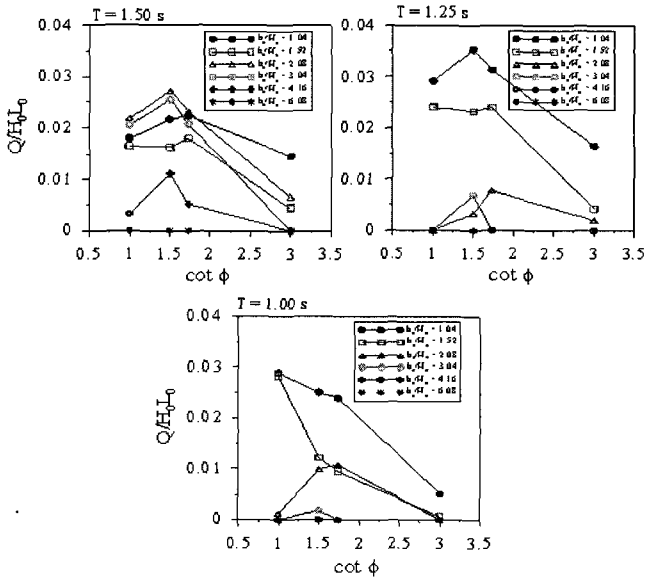


Fig. 8 Effect of the slope of wave overtopping structure in the regular wave conditions

Fig. 8은 규칙파에 대한 실험 결과를 정리한 것으로서 입사파의 주기가 1.50s, 1.25s, 1.00s에 대한  $Q/HL$ 을 비천단고를 파라미터로 하여 사면 경사에 대해 나타낸 것이다. 우선 본 실험에서 모든 입사파 주기에 대해 사면 경사가 3인 경우는 최저의 월파 유량을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 비천단고가 4.16이상인 경우 즉, 월파구조물의 천단고가 입사파고의 약 4배 이상이 되면 유의한 월파 유량을 얻기 어려워 월파형 파력발전 시스템으로서의 활용 가능성이 극히 적음을 시사하고 있다.

입사파의 주기에 있어서는 비천단고가 2.08 이하인 경우에 대해 주기 1.0s, 1.25s, 1.5s 모두에서 유의한 월파가 일어남을 알

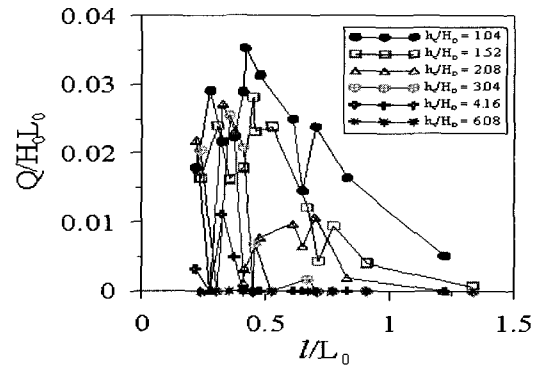


Fig. 9 Effect of the length of wave overtopping structure in the regular wave conditions

수 있으며, 주기가 길수록 보다 높은 비천단고에 대한 월파 유량도 기대할 수 있음을 알 수 있다.

비천단고가 1.52 이하에서는 전반적으로 모든 사면 경사에 대해 높은 월파량을 나타낸다. 주기 1.0s의 경우는  $\cot \phi = 1$ 일 때  $h_e/H \leq 1.52$ 에서, 주기 1.25s 및 1.5s에서는  $h_e/H = 1.52, 2.08, 1.5 \leq \cot \phi \leq \sqrt{3}$ 에서 최대 월파량이 나타난다. 이 같은

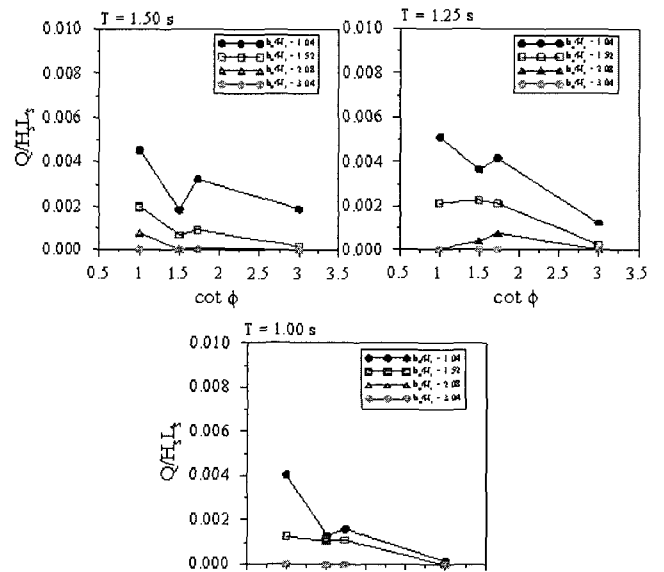


Fig. 10 Effect of the slope of wave overtopping structure in the irregular wave conditions

경향은 입사되는 파의 주기에 따라 구조물 전면에서 형성되는 중복파의 양상이 다소 달라지기 때문이라 사료되며 그러나, 전반적인 경향으로는  $\cot \phi = 1.52$ 에서 최대 월파량을 얻는 결과가 많아 보다 넓은 범위의 비천단고에 대응하기 위해서는  $\cot \phi = 1.52$ 의 경우가 유리하리라 본다.

Fig. 9는 입사파의 파장에 대한 수로 길이의 비에 따른 월파량을 검토한 것이다. 수로의 길이는 파장과 깊이가 관여하여 전면에서의 중복파 형성과 그에 따른 월파 유량 변화에 민감히 작용하리라 여겨진다. 그림에서 월파 유량은  $h_e/H \leq 2.08$ 에서 유의

한 값을 나타내고 있으며 특히  $l/L$  가 0.5 부근에서 높은 월파량을 나타낸다.

한편, Fig. 10는 불규칙파 실험에 대한 결과이다.

규칙파에 대한 실험 결과와 마찬가지로  $\cot \phi = 3$ 인 경우는 모든 실험 조건에서 최저의 월파량을 나타내고 있으나, 규칙파의 결과와는 달리  $\cot \phi = 1.5$ 에서 다소 낮은 월파량을 나타내는 경우가 있다. 이는 불규칙파의 입사로 인해 전면에서의 중복파 형성이 두드러지지 못함에 따라 중복파 형성을 통한 파고의 추가적 증폭이 그다지 일어나지 못함에 기인한 것이라 여겨진다.

전반적인 월파량에 있어 규칙파에 비해 적은 양을 기록하고 있으나,  $\cot \phi = 3$ 을 제외한  $\cot \phi = 1, 1.5, \sqrt{3}$  모두  $h_o/H \leq 2.08$ 의 경우 유의한 월파 유량이 얻어지고 있어 규칙파와 유사한 경향을 가진다고 볼 수 있다.

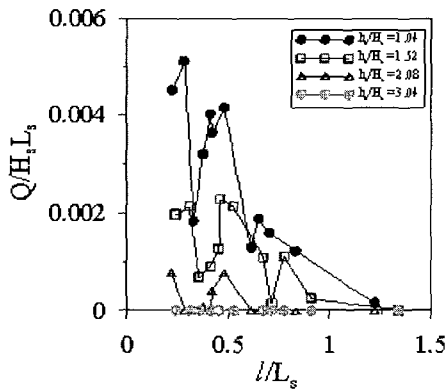


Fig. 11 Effect of the length of wave overtopping structure in the irregular wave conditions

Fig. 11은 불규칙파의 경우,  $l/L$  에 대한 무차원 월파량을 검토한 것이다.  $l/L$  이 0.25 부근에서 많은 월파량을 나타내는 경우가 있지만, 전반적으로 볼 때, 높은 월파량을 유지하기 위해서는 규칙파와 동일하게  $l/L = 0.5$  부근이 유리함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

월파를 이용한 파력발전 시스템에서 파랑을 대상으로 주어진 해역환경에 대해 보다 많은 월파량을 얻을 수 있는 월파제어구조물의 형상을 도출하기 위한 실험적 연구로서, 월파제어구조물의 개념적 설계 요소를 도출하고 수리 모형 실험을 통하여 비천단고( $h_o/H$ ), 비수로길이( $l/L$ ) 및 사면 경사( $\cot \phi$ )에 대한 무차원 월파량( $Q/H L$ ) 변화를 분석하였다. 수행된 실험 결과의 분석으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1)  $h_o/H \geq 4.16$ , 즉 구조물의 천단고가 입사파의 4.16배 이상인 경우는 유의한 월파 유량을 얻기 어렵다.
- (2) 월파 유량은  $h_o/H \leq 2.08$ ,  $l/L = 0.5$  부근에서 대부분 유의한 월파량이 나타난다.
- (3) 실험역에서 파랑의 집중도가 높아 현저한 중복파 형성이 기

대되는 연안에서는  $1.5 \leq \cot \phi \leq \sqrt{3}$ 에서 최대 월파량이 기대되며, 보다 넓은 대역의 천단고에 대응하기 위해서는  $\cot \phi = 1.5$ 가 유리하다.

(4) 불규칙파 입사의 경우는 규칙파의 경우에 비해 적은 월파량을 나타내지만, 대체적으로 규칙파에 대한 실험과 유사한 결과를 보인다고 할 수 있다.

본 연구에서는 월파제어구조물의 2차원 단면 형상에 대한 실험적 검토로 이루어졌지만, 차후 도출된 월파 유량에 대한 보다 면밀한 분석과 함께 파랑의 평면 집중도를 추가로 도입한 3차원 형상실험이 과제로 남으며 현재 후속 연구로 진행 중이다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부의 파력발전 실용화 연구개발과제와 산업자원부의 월파형 파력발전 기반기술 연구의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

류황진, 홍기용, 신승호, 송무석, 김도영 (2004). "SWAN 모델을 이용한 제주해역 장기 파랑분포 특성 연구", 한국해양환경 공학회지, 제7권, 제3호, pp 137-145.

송무석, 김도영, 김민, 홍기용, 전기천 (2004). "장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석", 한국해양환경공학회지, 제7권, 제3호, pp 152-157.

홍석원 (2001). "해양에너지 이용 파력발전(60kW)장치개발 IV", 한국전력연구원 Tec. Rep., TR.93GT17.T2001.579, p 291.

홍석원, 김현주, 강윤구 (1998). 해양 에너지 공학, 신기술, p 231.

홍기용, 류황진, 신승호, 홍석원 (2004). "파력발전 적지 선정을 위한 제주 해역 파랑에너지 분포특성 연구", 한국해양공학회지, 제18권, 제6호, pp 8-15.

Hirose, M, Abe, N. and Tsunoyu, M. (1987). "Power Generation Characteristics of Low-crown Overflow-type Breakwater", Proceeding of 2nd Sympo. of Wave Energy Utilization, JAMSTEC, pp 51-57(in Japanese).

Komatsu, T., Matsunaga, N., Fujita, K., Masuwa, K., Hosoyama, T. and Hashida, M. (1991). "A Study on the Gain of Water Head by Wave Overtopping", Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, pp 549-554(in Japanese).

Miyae, N. and Temisao, Y. (1984). "Experimental Study of Wave Energy Conversion of Converging Bank", 1st Sympo. on Wave Energy Utilization in Japan, pp 145-154(in Japanese).

Nielsen, A. and Kofoed, J. P. (1997). The Wave Dragon -Evaluation of a Wave Energy Converter, M. Sc. graduate report in Civil Eng., Aalborg Univ., Denmark, p 97.

- Osawa, H., Whashio, Y., Miyazaki, T., Hotta, H. and Miyazaki, T. (2004). Wave Energy Research and Development - Offshore Floating Wave Energy Device Mighty Whale -, JAMSTEC Report, p 386(in Japanese).
- Research Institute for Ocean Economics (1980). Development of New Wave Power Generation System, Technical Report of RIOE(in Japanese).
- Shigenitsu, K., Hayamizu, T. and Sekimoto, H. (1979). "Experimental Study on Wave Pumping Power Generation", Summary of 34th JSCE lecture, Part 2, pp 599-600(in Japanese).
- Yemm, R. (1999). "The History and Status of the Pelamis Wave Energy Converter", "Wave Power-Moving towards Commercial Viability", IMECHE Seminar, London, UK.
- 
- 2005년 6월 14일 원고 접수  
2005년 11월 10일 최종 수정본 채택