

## 진동수주형 파력발전장치 공기챔버의 파력에너지 흡수효율

홍 기용<sup>1)</sup>, 신 승호<sup>2)</sup>, 홍 도천<sup>3)</sup>

### Wave Energy Absorption Efficiency of Pneumatic Chamber of OWC Wave Energy Converter

Keyyong Hong, Seung-Ho Shin, Do-Chun Hong

**Key words** : Wave Energy Converter(파력발전장치), Oscillating Water Column(진동수주), Pneumatic Chamber(공기챔버), Energy Absorption Efficiency(에너지 흡수효율) Ocean Renewable Energy(해양 재생에너지)

**Abstract** : Oscillating wave amplitude in a bottom-mounted OWC chamber designed for wave energy converter is investigated by applying characteristic wave conditions in Korean coastal water. The effects of shape parameters of OWC chamber in a view of wave energy absorbing capability are analyzed. Both experimental and numerical approaches are adopted and their results are compared to optimize the shape parameters which can result in a maximum power production under given wave distribution. The experiment was carried out in a wave flume under 2-D assumption of OWC chamber. In numerical scheme, the potential problem inside the chamber is solved by use of the Green integral equation associated with the Rankine Green function, while outer problem with the Kelvin Green function taking account of fluctuating air pressure in the chamber. Air duct diameter, chamber width, and submerged depths of front skirt and back wall of chamber changes the magnitude and peak frequency of wave absorption significantly.

### 1. 서론

진동수주(OWC)형 파력발전은 최근의 파력발전 장치 개발에서 가장 활발한 연구가 이루어지고 있는 방식이다. 파력에너지 변환효율은 파력발전 장치의 성공적인 개발을 좌우하는 중요한 요소로, 진동수주형의 경우 1차에너지 변환장치인 공기챔버의 효율과 2차에너지 변환장치인 공기터빈의 효율로 구분된다. 공기챔버는 파력에너지를 공기챔버에 연결된 덕트 내 공기의 왕복운동으로 변환하며, 공기유동을 최대화하기 위해 외해로부터 공기챔버로 입사된 파랑의 공진을 이용한다. 공기챔버 내 파랑의 거동은 공기챔버의 형상과 덕트 및 공기터빈에 의한 에너지 감쇠에 따라 달라지므로, 최적의 효율을 얻기 위해서는 입사파 조건에 따른 공기챔버의 최적형상 설계가 이루어져야 한다.

공기챔버 최적설계의 주요 목적은 일정한 분

포를 갖는 파랑장에서 총량적인 관점에서 최대의 파랑에너지를 추출하는 것이다. 그러므로 최적의 공기챔버는 공진점에서의 파진폭이 클뿐만 아니라 효율적인 파랑대역이 넓어야 한다. 공기챔버에 의한 파력에너지 흡수는 진동수주 상부에 위치한 공기실의 기압과 챔버 내부 자유표면 운동이 서로 연계되어 있다. 공기실 압력에 의한 자유표면 교란을 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)로 다룬 기본 이론은 Falcao & Sarmiento(1980)에 의해 정립된 바 있으며, Hong et al.(2004)는 이를 부유식으로 확

- 1) 한국해양연구원 해양시스템안전연구소  
E-mail : kyhong@moeri.re.kr  
Tel : (042)868-7511 Fax : (042)868-7519
- 2) 한국해양연구원 해양시스템안전연구소  
E-mail : shinsh@moeri.re.kr  
Tel : (042)868-7584 Fax : (042)868-7519
- 3) 충남대학교 첨단수송체연구소  
E-mail : dchong@cnu.ac.kr  
Tel : (042)868-7588 Fax : (042)868-7519

장하였다. Holmes et al.(1995)는 모형시험을 통해 진동수주형 파력발전 공기챔버의 성능을 검증하였으며, Folley & Whittaker(2001)은 LIMPET 실증플랜트의 축소모형에 대한 실험을 수행하고 얻어진 결과를 LIMPET 플랜트에서 계측된 결과와 비교하여 차이를 지적하였다. 진동수주의 파력에너지 흡수효율에 관한 최근의 연구들 중에서 통상적인 선형과 이론의 적용을 뛰어넘어 비선형이론을 도입한 Clements(1996)의 연구와 진동수주의 해수면 거동을 이상유동으로 접근한 Mingham et al.(2004), 일정한 분포를 갖는 해상 상태에서 공기챔버의 총에너지 흡수량이 최대가 되는 공기챔버의 최적형상을 결정하는 통계적 접근법을 제시한 Weber & Thomas(2004)의 연구가 주목된다

본 연구는 고정식 진동수주형 파력발전장치 공기챔버의 파력에너지 흡수성능 최적화를 위해, 파력에너지 흡수효율을 지배하는 형상인자들의 영향을 체계적으로 분석하고자 수행되었다. 이차원 수조를 이용한 실험적 연구와 경계요소법에 기초한 수치적 연구가 병행되었다.

## 2. Hybrid 적분방정식에 의한 수치해법

이차원 착저식 진동수주형 공기챔버의 내부유동을 유한수심 조건에서 직교좌표계( $x, y$ )를 사용하여 표현한다(Fig.1).

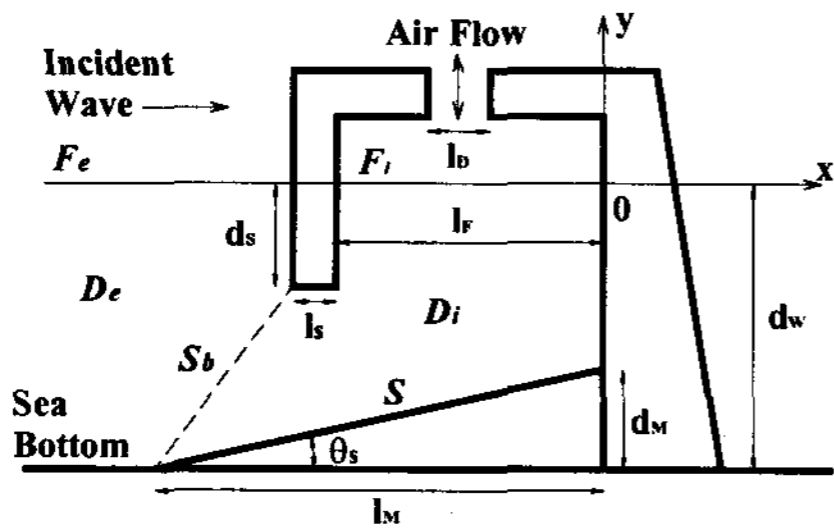


Fig. 1 Conceptual drawing of OWC chamber

OWC 챔버 구조물이 해역을 완전 차단하고 있으므로 구조물 내부에 입사파 에너지 흡수장치가 없으면 에너지는 전량 반사되며 이 때 OWC 챔버 구조물에 의한 산란파 에너지는 입사파 에너지와 같다. 2차원 규칙파중 고정식 구조물에 의한 산란파 포텐셜은 유한수심 2차원 Kelvin형 Green함수를 사용한 Green 적분방정식의 해로 구할 수 있다.

한편 입사파 에너지 흡수장치로서 상부 공기 챔버 덕트 내부에 공기터빈이 설치되면 챔버내부 공기압이 변하여 내부 자유수면에 영향을 주며 이를 고려한 산란파 에너지는 입사파 에너지에서 공기터빈이 흡수한 파 에너지를 뺀 것이 된다. 따라서 공기터빈이 흡수한 파 에너지를 이론적으로 추정하려면 OWC 파력흡수 구조물에 의한 산란파 포텐셜을 챔버 내부 공기압이 고려된 자유수

면 경계조건을 사용하여 해석하여야 한다.

고정식 착저형 OWC 파력흡수 구조물에 의한 산란파 포텐셜  $\psi$ 와 입사파 포텐셜  $\psi_0$ 의 합을 전체 포텐셜  $\Psi$ 라 하면,

$$\Psi = \psi + \psi_0 \quad (1)$$

착저형 구조물의 접수면  $S$ 에서  $\Psi$ 의 불투과성 접수면 경계조건으로부터 다음과 같은  $\Psi_S$ 의 접수면 경계조건을 얻는다.

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = -\frac{\partial \psi_0}{\partial n} \quad \text{on } S \quad (2)$$

한편 이차원 단면적  $l_F$ 인 챔버 내부 자유표면  $F_i$ 상부의 기체는 외부와 이차원 단면적  $l_D$ 인 덕트를 통해 연결되어 있다. 덕트 통과 기류의 평균 상대속도  $U_D$ 와 챔버내부 공기압력  $p_c$ 의 관계는 공기터빈에서 발생하는 압력강하 파라미터  $\gamma$ 를 도입하여 다음과 같이 선형적으로 가정할 수 있다.

$$\text{Re}[p_c e^{-i\omega t}] = \gamma \times \text{Re}[U_D e^{-i\omega t}] \quad (3)$$

$$U_D = \frac{1}{l_D} \int_{F_i} \frac{\partial \Psi(M)}{\partial y} dl \quad (4)$$

따라서  $\psi$ 의 자유표면 경계조건은 챔버 밖과 안에서 다음과 같다.

$$-k_0 \psi + \frac{\partial \psi}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{on } F_e \\ \alpha U_D & \text{on } F_i \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $\alpha = i\gamma\omega/\rho g$ 는 무차원 압력강하 파라미터이다.

가상경계면  $S_b$ 를 도입하여 유체영역을  $S_b$  좌측의 외부 무한영역  $D_e$ 와 우측의 내부영역  $D_i$ 로 나누고, 외부영역에는 Kelvin형 Green함수  $G$ , 내부영역에는 Rankine형 Green함수  $G_0$ 를 사용하여 각각 Green 정리를 적용하면 다음과 같은 2개의 Green 적분방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{2} - \int_{S_e \cup S_b} \psi \frac{\partial G_0}{\partial n} dl - \frac{1}{k_0} \int_{F_i} \frac{\partial \psi}{\partial n} \frac{\partial G_0}{\partial n} dl \\ + \int_{F_i \cup S_b} \frac{\partial \psi}{\partial n} G_0 dl \\ = - \int_{S_i} \frac{\partial \psi}{\partial n} G_0 dl - \frac{1}{k_0} \alpha q \quad \text{on } S_i \cup S_b \cup F_i \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{2} + \int_{S_e \cup S_b} \psi \frac{\partial G}{\partial n} dl - \int_{S_i} \frac{\partial \psi}{\partial n} G dl = \int_{S_i} \frac{\partial \psi}{\partial n} G dl \\ \text{on } S_e \cup S_b \end{aligned} \quad (7)$$

여기서

$$q = \frac{1}{l_D} \int_{F_i} \left( \frac{\partial \psi}{\partial n} + \psi_0 \right) dl \quad (8)$$

$$\chi = \int_{F_i} \frac{\partial G_0}{\partial n} dl \quad (9)$$

$S_b$ 에서의 정합조건은

$$\psi(M^+) = \psi(M^-) \quad M \text{ on } S_b \quad (10)$$

$$\frac{\partial \psi(M^+)}{\partial n} = \frac{\partial \psi(M^-)}{\partial n}, \quad M \text{ on } S_b \quad (11)$$

여기서 윗첨자 +, -는 각각  $S_b$ 의 안과 밖을 나타낸다. 적분방정식 (6)과(7)에 경계조건 (2)와 (5)를 대입하고 정합조건 (10)과 (11)를 적용하여 풀면 산란파 포텐셜  $\psi$ 를 얻을 수 있다

상기 연립 적분방정식들의 이산화 해법 및 압력강하 파라미터  $\gamma$ 를 적분방정식 우측에 보내어 파라미터 값의 변화에 따른 계산을 쉽게 할 수 있게 한 계산방법 등은 Hong et al.(2004)에 자세히 주어진다.

## 2. 파력에너지 흡수효율

선형 이론에 기초한 입사파의 속도 포텐셜은 다음과 같다.

$$\Psi_0 = \frac{a_0 \omega}{m_0} \frac{\cosh m_0(y+d_W)}{\sinh m_0 d_W} e^{im_0 x} \quad (12)$$

$$m_0 \tanh m_0 d_W = k_0, \quad k_0 = \frac{\omega^2}{g} \quad (13)$$

여기서  $d_W$ 는 수심,  $m_0$ 는 파수,  $a_0$ 는 입사파 진폭,  $\omega$ 는 원진동수이다.

공기챔버 내부의 해수면 변동은 다음으로 주어진다.

$$\zeta(M) = \frac{i\omega}{g} \Psi(M) + i \frac{\alpha}{\omega} U_D(M), \quad M \in F_i \quad (14)$$

선형과 이론에 의하면 무한 원방으로부터 들어오는 입사파에 의한 단위 폭당 파력의 시간평균  $P_0$ 는 다음과 같다.

$$P_0 = \frac{a_0^2}{2} \rho g C_g \quad (15)$$

여기서  $C_g$ 는 파의 군속도를 나타낸다.

$$C_g = \frac{\omega}{m_0} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2m_0 d_W}{\sinh 2m_0 d_W} \right) \quad (15)$$

공기챔버의 단위폭당 흡수된 시간평균 파력  $P_m$ 은 직접적분 방법(Near-field method)에 의해 다음처럼 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} P_m &= l_D \gamma \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \text{Re}[U_D e^{-i\omega t}] \text{Re}[U_D e^{-i\omega t}] dt \\ &= \frac{1}{2} l_D \gamma |U_D|^2 \end{aligned} \quad (16)$$

한편  $P_m$ 은 입사파의 시간평균 파력  $P_0$ 와 구조물에 의한 반사파의 시간평균 파력  $P_r$  간의 차이와 동일하므로 무한원방의 파력에너지 조사에 의해서도 구해질 수 있으며, 이를 무한원방 방법(Far-filed method)으로 구분하여 말한다.

$$P_r = \frac{a_0^2}{2} \rho g C_g (1 - |R|^2) \quad (17)$$

$$R = \frac{-k_0^2 d_W^2}{m_0^2 d_W^2 - k_0^2 d_W^2 + k_0 d_W} H(\pi) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} H(\beta) &= - \int_{S_i \cup S_b} \left( \frac{\partial \psi}{\partial n} - \psi \frac{\partial}{\partial n} \right) \\ &\quad \times \frac{\cosh m_0(y+d_W)}{\sinh m_0 d_W} e^{-im_0 x \cos \beta} dl \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $R$ 은 반사계수이고,  $H$ 는 Kochine 함수이다.

## 3. 공기챔버의 에너지 흡수율 모형시험

공기챔버의 형상계수에 따른 에너지 흡수효율 특성을 실험적으로 고찰하였다. 실험은 길이 25m, 폭 0.6m, 깊이 0.8m인 이차원 수조에서 수행되었다. 수조시험에 사용된 공기챔버 모형은 1/23의 축적비를 가지며, 조파기로부터 수조 길이 방향으로 20m 지점에 설치하였고, 모형시험 시 수조의 적용 수심은 0.5m이다.

공기챔버 내부 중앙에서의 해수면 변화를 와이어형 용량식 파고계를 사용하여 계측하였으며, 조파기 전면 5m와 10m 두 지점에서 입사파의 파고를 또한 계측하였다.

Table 1 Experiment conditions

case	$d_s$	$l_s$	$l_f$	$l_d$	$\theta_i$	$a_0$
1	2.5	1.0	1.5	1.5(open)	26.0	0.5
2	2.5	1.0	1.5	1.0	26.0	0.5
3	2.5	1.0	1.5	0.5	26.0	0.5
4	2.5	1.0	1.5	1.5(open)	26.0	0.375
5	2.5	1.0	1.5	1.0	26.0	0.375
6	2.5	1.0	3.0	3.0(open)	26.0	0.5
7	1.5	1.0	1.5	1.5(open)	26.0	0.5
8	1.5	1.0	1.5	1.0	26.0	0.5
9	2.5	2.0	1.5	1.5(open)	26.0	0.5
10	2.5	2.0	1.5	1.0	26.0	0.5
11	2.5	1.0	1.5	1.5(open)	36.8	0.5
12	2.5	1.0	1.5	1.0	36.8	0.5

OWC 챔버의 파력에너지 흡수효율에 대한 형상인자들의 영향을 규명하기 위한 모형시험 조건들이 Table 1에 주어진다. 챔버 전면 연직벽의 깊이( $d_s$ ) 및 두께( $l_s$ ), 챔버 폭( $l_f$ ), 챔버 바닥면의 기울기( $\theta_i$ ), 챔버 공기덕트의 작경( $l_d$ ) 등의 영향을 고찰하였으며, 파진폭( $a_0$ )을 변화시켜 파랑의 비선형 정도에 따른 변화를 살펴보았다.

#### 4. 수치해석 및 모형시험 결과의 고찰

실험에서 계측된 공기챔버 내의 파진폭들과 OWC 장치에 의한 파랑에너지 흡수율을 Green 적분방정식에 기초하여 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과들과 비교하고, 파주기에 따른 변화와 형상인자들의 효과들을 분석하였다. 실험에서 압력강하 계수의 측정이 어렵기 때문에, 수치 시뮬레이션을 압력강하 계수를 달리하여 반복하여 수행하고 결과를 모형시험 결과와 비교하였다.

덕트의 크기를 달리함으로써 압력강하 계수의 영향을 고찰한 결과들이 Fig.2에 보여진다. 공진주기들은 덕트의 크기에 거의 무관하나, 덕트 크기가 작아짐에 따라 정점 값이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 공기실 내 압력이 증가하여 자유수면의 움직임을 구속하기 때문이다. 큰  $d_s$ 를 갖는 경우1이 상대적으로 작은 경우7보다 챔버 내 해수면 운동 진폭이 커짐을 알 수 있으며, 효과적인 공진을 발생시키기 위해서는  $d_s$ 의 최적화가 필요함을 보여준다.  $d_s$ 의 값이 너무 작은 경우에는 챔버 내로 입사된 파력 에너지가 챔버 내에 가두어지지 못하고 대부분이 외해로 반사되며, 반대로 너무 큰 경우에는 챔버 내로의 입사 자체가 어렵게 된다.

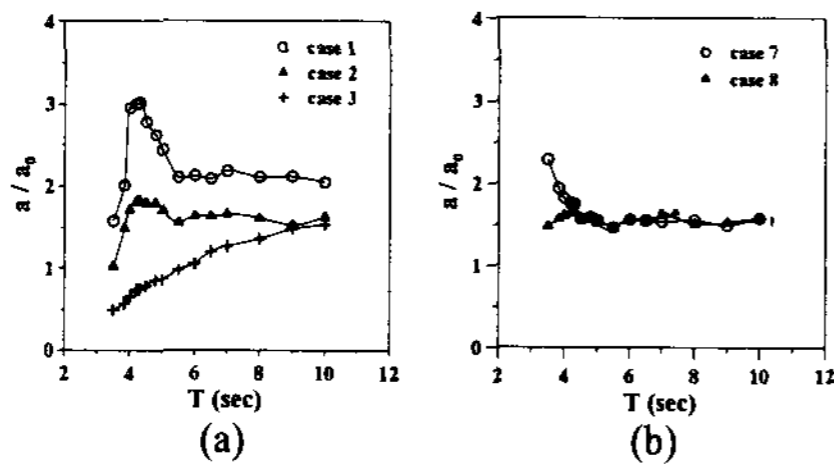


Fig. 2 Effects of air-duct dimension on relative wave amplitude distribution

수치계산에 의해 얻어진 챔버 내 상대 파진폭들과 실험결과를 비교하였다(Fig.3). 수치계산에서는 동일한 형상의 모델에 대해서는 압력강하 계수를 상수로 취급한다. 그러나, 실제로는 압력강하 계수는 입사파의 주기에 따라 변화하므로 실험 값과 수치계산 값은 서로 차이를 보여준다. 그럼에도 불구하고, 일반적으로 수치해석 결과들은 OWC형상인자들의 효과를 유사하게 보여준다.

동일한 모형에 대해 서로 다른 파고를 갖는 입사파를 적용한 결과들이 Fig.4에 도시되었다. 큰 입사파의 경우에 챔버 내 파고 값이 다소 감소하며, 비선형성의 증가에 따른 에너지 소산의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

챔버 폭의 영향이 Fig.5에 보여진다. 챔버 폭이 넓어지면, 공진주기가 길어지면서 단주기 영역에서의 챔버 내 상대 파고가 현저히 작아진다. 이러한 효과는 Fig.3(a)와 Fig.5(b)에 보여지는 수치해석 결과들을 통해서도 확인된다.

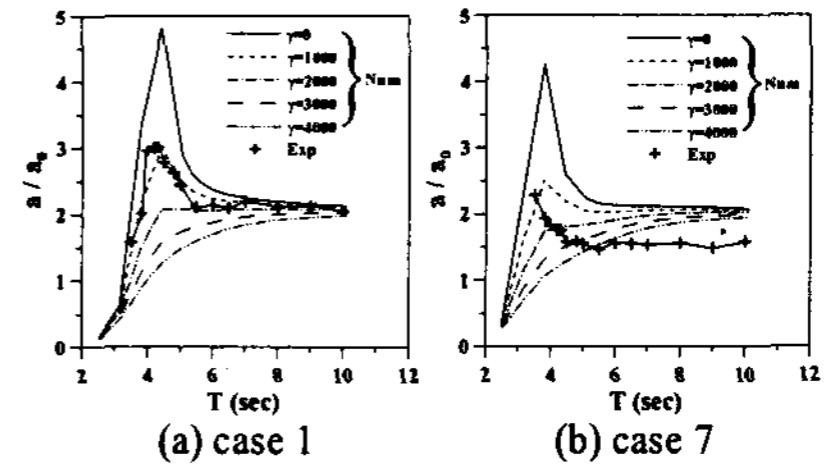


Fig. 3 Relative wave amplitudes computed with equivalent linear damping

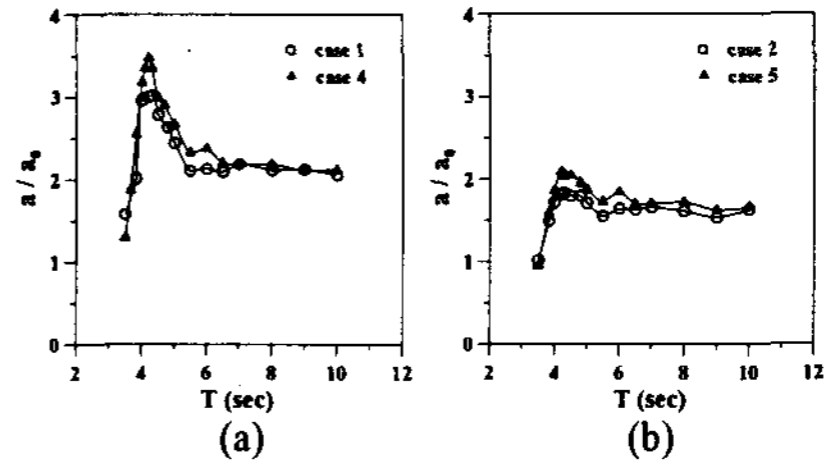


Fig. 4 Effects of nonlinearity of incident waves on relative wave amplitude distribution

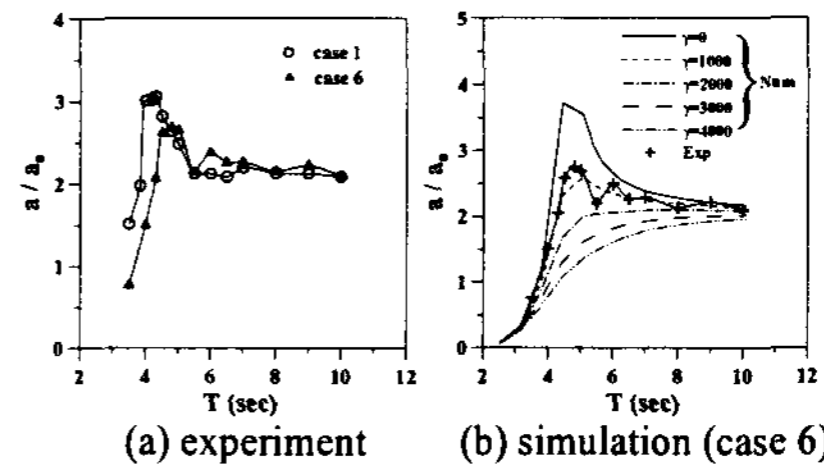


Fig. 5 Relative wave amplitude distribution corresponding to variation of chamber width and its comparison with numerical simulations

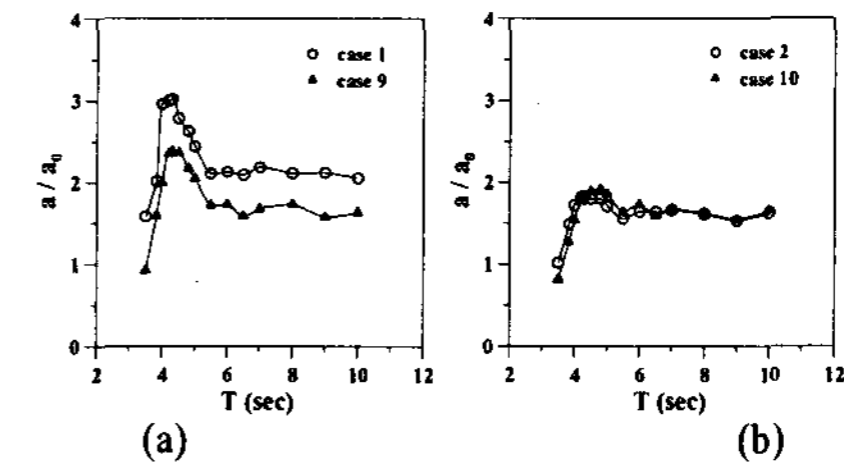


Fig. 6 Effects of chamber skirt thickness on relative wave amplitude distribution

챔버 전면 연직벽의 두께와 바닥면의 기울기의 영향이 Fig.6과 Fig.7에 각각 보여진다. 양형상인자들은 공진주기에 영향을 주고 있지 못하나, 두꺼운 연직벽면과 가파른 바닥은 덕트의 크기가 클 때는 입사파의 반사율을 증가시킨다. 그러나 이러한 경향은 덕트의 크기가 작을 때는 나타나지 않으며, 이는 파력 에너지 흡수효율에 대한 압력강하 계수의 지배적인 영향을 함축한다.

## 후기

본 연구는 해양수산부 해양수산연구개발사업의 일환으로 수행된 “파력에너지 실용화 기술 개발” 과 기본연구사업의 일환으로 수행된 “기상 재난과에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발” 과제의 연구성과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

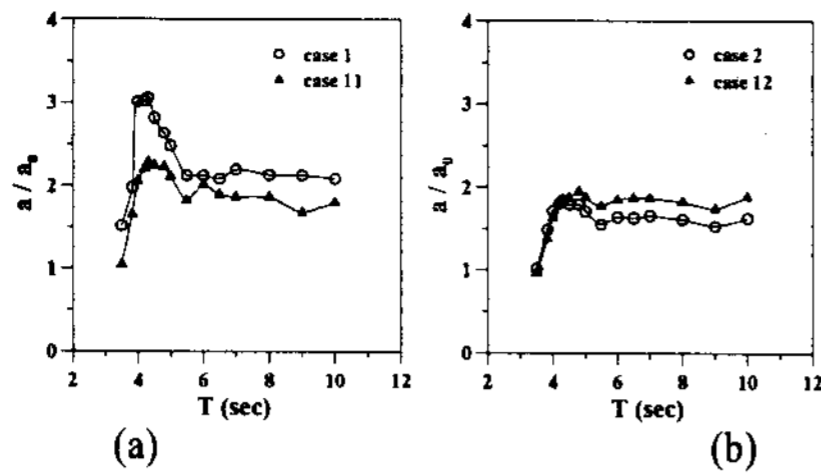


Fig. 7 Effects of bottom mount slope on relative wave amplitude distribution

## 4. 결론

이차원 진동수주형 파력발전 공기챔버의 파력에너지 흡수효율에 대한 실험적, 수치적 연구를 수행하였다. 이를 통해 OWC 챔버의 주요 형상인 자들인 챔버 전면 연직벽면의 깊이 및 두께, 챔버 폭, 바닥면 기울기의 흡수효율 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 공기챔버 압력강하계수 및 파랑의 비선형성 정도에 따른 변화를 살펴보았다. 이로부터 다음의 결론을 도출하였다.

1) 공기실 덕트의 크기가 작을수록 상대파고의 정점 값은 감소하는 경향을 보이지만, 공진주기는 변화하지 않는다.

2) 한주기당 공기의 유동량이 챔버 용적에 비해 작은 경우에는 공기실 내의 공기감쇠가 적다. 큰 챔버의 용적에 기인하여 자유수면 거동이 압력강하에 따른 영향을 적게 받기 때문이다.

3) 효과적인 공진을 유발하기 위해서는 챔버 내로 유입된 입사파의 가둠과 입사파의 입사량 및 반사량의 조절에 적합하도록 챔버 전면 연직벽면의 깊이가 최적화되어야 한다.

4) 챔버 폭이 넓어지면, 공진주기가 장주기 쪽으로 이동하며, 특히 단주기 영역에서는 현저한 상대파고의 감소를 유발한다.

## References

- [1] Evans, D.V., 1982, "Wave-Power Absorption by Systems of Oscillating Surface Pressure Distributions," *J Fluid Mech*, Vol 114, pp 481-499.
- [2] Falcão, A.F.deO. and Sarmento, A.J.N.A., 1980, "Wave Generation by a Periodic Surface Pressure and Its Application in Wave-Energy Extraction," *Proc 15th Int Cong Theo Appl Mech*, Toronto.
- [3] Folley, M. and Whittaker, T.J.T., 2001, "Initial LIMPET Trials Examining the Effect of Bathymetry," *Internal Report*, Queens University, Belfast, United Kingdom.
- [4] Holmes, B., Hurley, J., Lewis, T., Brito-Melo, A., Sarmento, A.J.N.A. and Falcão, A.F.deO., 1995, "1:25 Scale Testing of the Azores Pilot Plant," *Proc. European Wave Energy Symp*, pp 148-155.
- [5] Hong, D.C., Hong, S.Y. and Hong, S.W., 2004, "Numerical Study of the Motions and Drift Force of a Floating OWC Device," *Ocean Engineering*, Vol 30, pp 139-164.
- [6] Mingham, C.G., Qian, L., Causon, D.M. and Ingram, D.M., 2003, "A Two-Fluid Numerical Model of the LIMPET OWC," *Proc Fifth European Wave Energy Conf*, pp 119-125.
- [7] Weber, J.W. and Thomas, G.P., 2003, "Some Aspects of the Design Optimization of an OWC with regard to Multiple Sea States and Combined Object Functions," *Proc Fifth European Wave Energy Conf*, pp 141-148.