

## 연안고정식 파력발전 겸 OWC 방파제 성능연구

홍도천\* · 신승호\*\* · 홍기용\*\* · 홍석원\*\*

\*충남대학교 첨단수송체연구소

\*\*해양연구원 해양시스템안전연구소 해양플랜트연구사업단

## Study of Nearshore OWC Wave Power Absorbing Breakwater

DO CHUN HONG\*, SEUNG HO SHIN\* AND KEYYONG HONG\*\* AND SEOK WON HONG\*\*

\*Center for Advanced Transportation Vehicules, Chungnam National University, Daejeon, Korea

\*\*Offshore Plant Research Division, MOERI, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Hybrid Green integral equation 하이브리드 그린 적분방정식, OWC wave power device 진동수주식 파력발전장치, OWC breakwater 진동수주 소파제

**ABSTRACT:** The wave power absorbing performance of a bottom-mounted oscillating water column (OWC) chamber structure is studied. The potential problem inside the chamber is solved by making use of the Green integral equation associated with the Rankine Green function while the outer problem with the Kelvin Green function taking account of fluctuating air pressure in the air chamber. The absorbed wave power, wave elevation inside the chamber, reflection coefficient and wave loads are calculated for various values of a parameter related to the fluctuating air pressure. The present methods can also be used for the design of a OWC breakwater which can absorb and reflect the incoming wave energy at the same time.

### 1. 서 론

진동수주(OWC)에 의한 파 에너지 흡수는 진동수주 상부에 위치한 공기실의 기압과 챔버 내부 자유표면 유동이 서로 연계되어 있다. 공기실 압력에 의한 자유표면 교란을 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)으로 다룬 기본 이론은 이미 정립 된 바 있다(Falcão and Sarmiento, 1980). 본 연구에서는 해안에 설치되는 진동수주형 공기챔버 방파제의 성능을 2차원 선형파 이론으로 고찰하였다. 챔버 내부유동을 Rankine형, 외부유동을 유한수심 Kelvin형 Green함수로 표현하는 hybrid 적분방정식을 해석방법으로 사용하였고 챔버 내 압력강하에 따른 자유표면 경계조건을 적분방정식에 도입하여 처리하였다 (홍도천 등 1992; 홍도천과 김현주 2000; 홍도천 2002; Hong et al. 2004). 공기챔버 방파구조물 형식으로 해수유통을 허용하는 부유식 또는 재킷형 구조물도 가능하나 본 연구에서는 OWC 파력 흡수 방파제의 기본성능을 보기 위하여 해역차단식 구조물에 대하여 수치해석 및 수조실험을 수행하였다.

### 2. Hybrid 적분방정식에 의한 해법

직각좌표계에서  $y$ 축은 수직 상방,  $x$ 축은 교란되지 않은 해수면과 일치한다. 유체는 비점성, 비압축성이며 운동은 비회전성이라고 가정한다. 따라서 유체속도  $\vec{u}(x, y, t) = \nabla\phi(x, y, t)$ 로 표시된다. 선형파 이론을 사용하면, 수심이 균일한 해역에서 양의  $x$  방향으로 진행되는 입사파의 포텐셜은

$$\Phi_0 = Re\{\Psi_0 e^{-i\omega t}\}$$
$$\Psi_0 = -\frac{a_0 \omega \cosh m_0(y+H)}{m_0 \sinh m_0 H} e^{im_0 x} \quad (1)$$

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

위에서  $\Psi_0$  는 복소수로 표시된 입사파의 속도 포텐셜,  $a_0$  는 입사파의 진폭,  $g$  는 중력 가속도,  $H$ 는 수심,  $\omega$  는 원 진동수이며  $m_0$  는 유한수심에서의 파수(wavenumber)이다.

이러한 입사파 에너지는 마력의 단위 폭당 시간평균  $P_0$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

제1저자 홍도천 연락처: 대전광역시 유성구 궁동 220

042-868-7588 dchong@cnu.ac.kr

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho g C_g a_0^2$$

위에서  $C_g$ 는 파 에너지 전파속도이다.

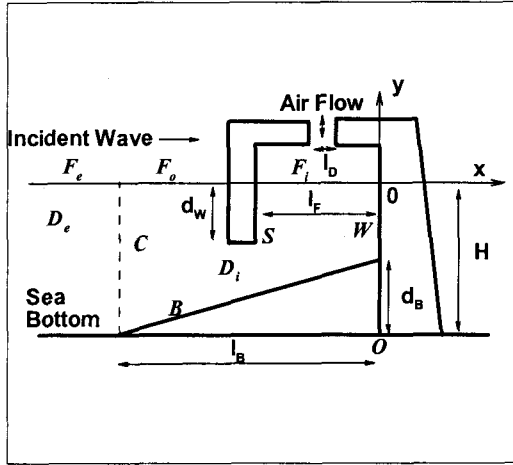


Fig. 1 Definition sketch of nearshore bottom-mounted OWC wave energy absorber

OWC 챔버 구조물이 해역을 완전 차단하고 있으므로 구조물 내부에 입사파 에너지 흡수장치가 없으면 에너지는 전량 반사되며 이는 OWC 챔버 구조물에 의한 산란파 에너지가 입사파 에너지와 같다는 것이다. 2차원 규칙파중 고정식 구조물에 의한 산란파 포텐셜은 유한수심 2차원 Kelvin형 Green함수를 사용한 Green 적분방정식의 해로 구할 수 있다. 한편 입사파 에너지 흡수장치로서 상부 공기챔버 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 챔버내부 공기압이 고려된 자유수면 경계조건을 사용하여 해석하여야 한다. Fig.1에서  $C$ 는 가상 경계면으로서 유체영역을  $C$  좌측의 외부 무한영역  $D_e$ 와 우측의 내부영역  $D_i$ 로 나눈다. 고정식 착저형 OWC 파력흡수 구조물에 의한 산란파 포텐셜  $\Psi_S$ 와 입사파 포텐셜  $\Psi_0$ 의 합은

$$\Psi_T = \Psi_0 + \Psi_S \quad (4)$$

착저형 구조물의 접수면은  $B \cup W \cup S$ 로 구성되었으며  $\Psi_T$ 의 불투과성 접수면 경계조건으로부터 다음과 같은  $\Psi_S$ 의 접수면 경계조건을 얻는다.

$$\frac{\partial \Psi_S}{\partial n} = -\frac{\partial \Psi_0}{\partial n} \quad \text{on } B \cup W \cup S \quad (5)$$

(3) 한편 2차원 단면적  $l_F$ 인 챔버 내부자유표면  $F_i$ 상부의 기체는 외부와 2차원 단면적  $l_D$ 인 덕트를 통하여 연결되어있다. 덕트통과 기류의 평균 상대속도  $U_d$ 와 챔버내부 공기압력  $P_C$ 의 관계는 공기터빈에서 발생하는 압력강하 파라미터  $\gamma$ 를 도입하여 다음과 같이 선형적으로 가정하면  $\Psi_S$ 의 자유표면 경계조건은 챔버 밖  $F_o \cup F_e$ 와 안  $F_i$ 에서 다음과 같다.

$$-k_0 \Psi_S + \frac{\partial \Psi_S}{\partial y} = \begin{cases} 0 & \text{on } F_o \cup F_e \\ \alpha U_d & \text{on } F_i \end{cases} \quad (6)$$

위에서  $\alpha = i \frac{\gamma \omega}{\rho g}$ 는 무차원 압력강하 파라미터이다

외부영역에는 Kelvin 형 Green함수, 내부영역에는 Rankine형 Green함수를 사용하여 각각 Green 정리를 적용하면 다음과 같은 2개의 Green 적분방정식을 얻는다.

$$\frac{\Psi_S(P)}{2} + \int_C \Psi_S(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n} dl = \int_C \frac{\partial \Psi_S(M)}{\partial n} G(P, M) dl = 0, \quad P \in C \quad (7)$$

$$\frac{\Psi_S(P)}{2} - \int_{B \cup W \cup F_i \cup S \cup F_o \cup C} \Psi_S(M) \frac{\partial G_0}{\partial n_i} dl = - \int_{B \cup W \cup F_i \cup S \cup F_o \cup C} \frac{\partial \Psi_S(M)}{\partial n_i} G_0 dl, \quad P \in B \cup W \cup F_i \cup S \cup F_o \cup C \quad (8)$$

$C$ 에서의 정합조건은

$$\Psi_S(M^+) = \Psi_S(M^-), \quad M \text{ on } C \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Psi_S(M^+)}{\partial n} = \frac{\partial \Psi_S(M^-)}{\partial n}, \quad M \text{ on } C \quad (10)$$

상기 연립 적분방정식들의 이산화해법, 특히  $\gamma$ 를 적분방정식 우측에 보내어 파라미터 값의 변화에 따른 계산을 쉽게 할 수 있게 한 계산방법 등은 참고문헌에 있다(Hong et al. 2004).

### 3. 반사계수, 파력흡수율 및 파 하중

양의 x방향으로 진행하는 선형 규칙파 중에 OWC 파력흡수 구조물이 해역을 차단하며 위치하므로  $x = -\infty$ 에서의 산란파가 반사파가 되며 투과파는 존재하지 않는다. 입사파 에너지 흡수 장치로서 상부 공기챔버 덕트 내부에 공기터빈이 설치되면 산란 파 또는 반사파에너지는 입사파 에너지에서 공기터빈이 흡수한 파 에너지를 뺀 것이 된다.  $x = -\infty$ 에서의 산란파의 복소진폭을 입사파 진폭  $a_0$ 로 나눈 것을 반사계수  $R$ 이라 하면 이는 다음식으로 표시된다.

$$R = \frac{K_0^2}{M_0^2 - K_0^2 + K_0} H(\pi) \quad (11)$$

$H(\pi)$ 는  $x = -\infty$ 에서의 Kochin함수이다. 공기터빈에서 흡수한 마력의 시간평균을  $P_m$ 이라 하면 에너지 보존법칙에 따라

$$P_m = \frac{1}{2} \rho g C_g a_0^2 (1 - |R|^2) \quad (12)$$

이를 무한원방 방법(Far-field method)을 사용하여 구한 흡수파 마력이라 한다. 따라서 파력흡수율  $E$ 은

$$E = (1 - |R|^2) \quad (13)$$

한편 공기터빈이 흡수한 파 마력의 시간평균  $P_T$ 는 다음과 같이 직접 산출될 수도 있다.

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{T} \int^T \gamma \operatorname{Re}[U_d e^{-i\alpha t}] l_d \operatorname{Re}[U_d e^{-i\alpha t}] dt \\ &= \frac{1}{2} \gamma l_d |U_d|^2 \end{aligned} \quad (14)$$

이를 압력 직접적분 방법(Near-field method)을 사용하여 구한 흡수파 마력이라 한다. 에너지 보존법칙에 따라  $P_m$ 과  $P_T$ 는 일치하여야 하며 이것이 수치적으로 확인되면 해석방법 및 수치계산상의 오류가 없다고 볼 수 있다.

한편 OWC 파력흡수 구조물은 파압력 및 챔버 내부 공기압력을 받는다.

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{p\} &= -\rho \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{Re}\{(\Psi_0 + \Psi_s) e^{-i\alpha t}\}, \\ p &= i\rho\omega(\Psi_0 + \Psi_s) \end{aligned} \quad (15)$$

$$p_C = \gamma U_d \quad (16)$$

이를 압력을 받는 접수면 및 접기면에 대하여 각각 적분하면

수압과 공기압에 의한 힘과 전도 모멘트를 얻는다.

$$\mathbf{F} = \int_{S_w} p \mathbf{n} dl, \quad \mathbf{M} = \int_{S_w} \overrightarrow{OM} \times p \mathbf{n} dl \quad (17)$$

$$\mathbf{F}_a = \int_{S_{air}} p_C \mathbf{n} dl, \quad \mathbf{M}_a = \int_{S_{air}} \overrightarrow{OM} \times p_C \mathbf{n} dl \quad (18)$$

위에서  $S_w$ 는 접수면  $B \cup W \cup S$ 이고 접기면  $S_{air}$ 는 챔버내부 자유수면의 면적에 해당한다.

### 4. 수치해석 및 수조 실험 결과

Table 1과 같은 모형에 대하여 수치 및 수조 실험을 하였다.

Table 1 Principal particulars of OWC chamber

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| $l_F$ | 1.5 m | $d_W$ | 2.5 m |
| $l_W$ | 1 m   | $d_B$ | 8 m   |
| $l_B$ | 16 m  | $l_D$ | 0.5 m |

상기 채원은 수심 16 m 해역에서 입사파 주기 4 - 5초 사이에 챔버 내부에서 OWC공진이 일어나도록 설계된 것이다. 압력강하 파라미터의 변화에 따른 공기챔버 방파제의 흡수 마력 및 제반성능을 Fig. 2에 도시하였다.

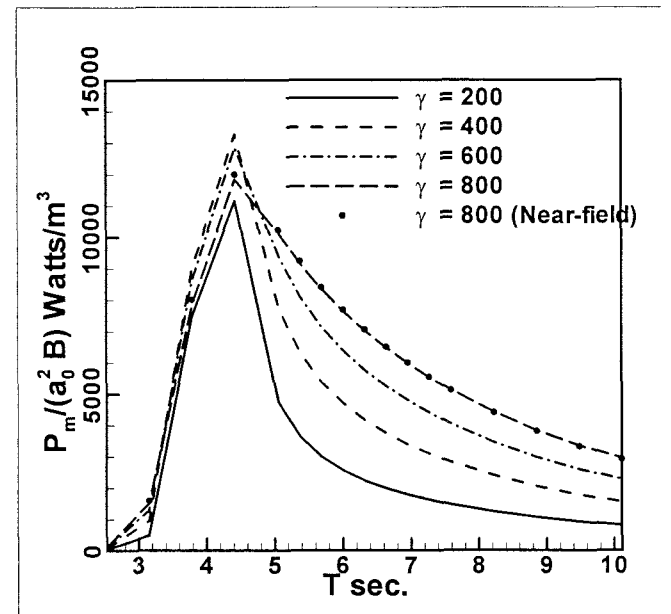


Fig. 2 Absorbed wave power for various pressure drop coefficients

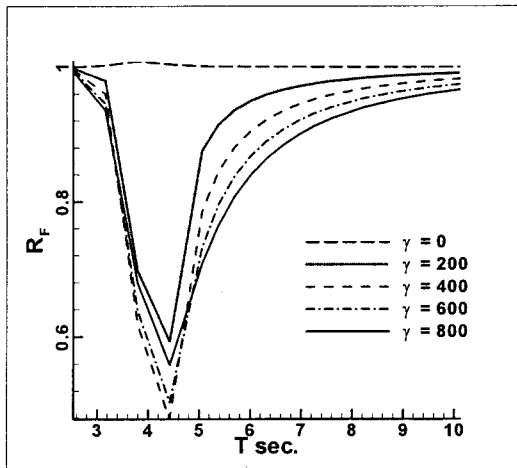


Fig. 3 Reflection coefficients for various pressure drop coefficients

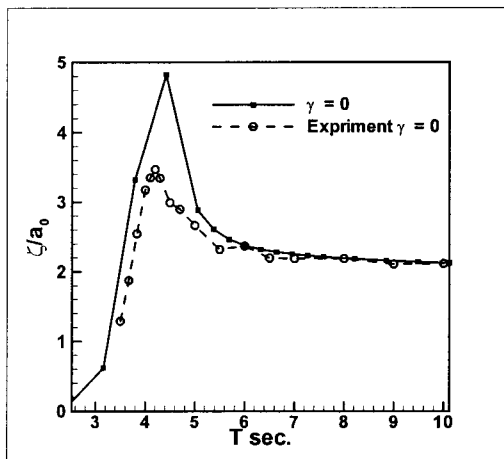


Fig. 4 Wave elevation inside the chamber

## 5. 결 론

진동수주형 공기챔버 파력발전장치의 주어진 모형에 대한 수치 및 수조실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 논문의 해석방법을 사용하여 진동수주의 공진주기가 입사파 주기에 동조되도록 해양형 OWC 파력발전 장치의 형상설계를 할 수 있다.
- (2) 동조 주기에서 최대 흡수파 마력이 나타나는 압력강하 파라미터의 값을 구하여 공기터빈 설계자료로 사용할 수 있다.
- (3) 선형과 이론하에서 near-field와 far-field 해석값이 정확히 일치하고 있으며 실험값과도 대체적으로 일치하고 있음을 보였다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 "파력발전 실용화 기술개발"과제의 일부로 수행되었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 홍도천, 현범수, 홍사영(1992). "부유식 OWC 챔버의 파랑중 거동특성 연구", 한국해양공학회지, 제 6권, 제1호, pp 43-51.
- 홍도천, 김현주(2000). "Hybrid 적분방정식을 사용한 Flap-Harbour 복합체 파 에너지 흡수효율 추정", 한국해양공학회지, 제 14권, 제2호, pp 1-7.
- 홍도천(2002). "부유식 OWC 챔버의 파중 운동해석", 한국해양공학회지, 제 16권, 제3호, pp 19-27.
- Falcão, A. F. de O. and Sarmiento, A. J. N. A.(1980), "Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction", 15th Int. Cong. Theo. Appl. Mech., Toronto
- 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.