

## 공기챔버형 부소파제의 투과 및 산란파 해석

홍도천<sup>†\*</sup>, 김현주<sup>\*\*</sup>, 홍사영<sup>\*\*</sup>

충남대 첨단수송체연구소\*  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*\*

### Numerical Study of Transmisson and Reflection Coefficients of a BBDB-Type Floating Breakwater

Do Chun Hong<sup>†\*</sup>, Hyeon Ju Kim<sup>\*\*</sup> and Sa Young Hong<sup>\*\*</sup>

Center for Advanced Transportation Vehicles, Chungnam National University\*  
Ocean Development System Lab., KRISO, KORDI\*\*

#### Abstract

The transmission and reflection coefficients of a BBDB-type floating breakwater in water of finite depth are studied taking account of fluctuating air pressure in the air chamber. The wave potential is calculated by a hybrid integral equation consisting of a Green integral equations associated with the Rankine Green function inside the BBDB and the Kelvin Green function outside. The transmission and reflection coefficients of the breakwater are obtained directly from the potential solution in the outer region.

※Keywords: Radiation-diffraction Problem(방사-산란파 문제), Water of Finite Depth (유한수심), Transmission and Reflection Coefficients (투과율 및 반사율), BBDB-type Floating Breakwater (BBDB형 부 소파제)

#### 1. 서론

진동수주(OWC)가 설치된 부유식 구조물을 소파장치로 활용하는 방안은 일본에서 초대형 부유 구조물의 유탄성 응답 감소(Shigemitsu et al. 2001) 또는 해양목장의 작업성능 향상 등을 위

하여 연구된 바 있으며 국내에서도 마산 원전항 부소파제 설계에 적용된 바 있다. 기존 방파제는 해저면에 설치되어 해수유통을 완벽히 차단하므로 초대형 부유구조물 전면에 설치할 경우 광범위한 해역의 환경이 영향을 받기 때문에 부적절 한 것으로 판단된다(이호영 등 2002). 한편 상자형 부소파제가 구축되어 방사파가 발생되지 않는 경우에 대한 소파특성에 대한 해석적 및 실험적 연구가 송무석 등(1998)에 의하여 체계적으로 수행된 바 있다.

접수일: 2004년 6월 28일, 승인일: 2004년 10월 5일

†주저자, E-mail: dchong@cnu.ac.kr

Tel: 042-868-7588

OWC의 형상이 L자인 BBDB(Backward Bent Duct Buoy)는 Masuda(1987)에 의하여 고안되었고 특정 주파수 구간에서 진행파 방향과 반대의 파 표류력(reverse drift force)이 발생함이 실험적 및 해석적으로 입증된 바 있다(McCormick and Sheehan 1992),(Hong et al. 2004a).본 논문에서는 파 에너지 흡수능력이 우수한 BBDB를 부소파제로 사용할 경우 무한원방 방사파와 산란파를 압력강하면에 의한 파에너지 흡수를 고려하여 해석하는 방법을 소개하고 수치계산결과도 표시하였다. Fig.1과 같이 L자형 덕트(backward bent duct)가 수면하에 있고 덕트를 띄워주는 부력체(Buoyancy module)는 상자형 구조물로서 덕트 상부에 설치된다. 내부에 위치한 OWC 상부 공기 챔버에 압력강하를 발생시키는 공기덕트가 있다. OWC가 설치된 부유식 구조물의 파중 3자유도 운동응답은 접수면에 작용하는 압력의 적분에 의하여 구해지는 부가질량계수, 파 감쇠계수, 파 기진력 계수에 더하여 OWC 공기 챔버 내부의 변동 기압이 내부면에 작용하는데 따른 힘 및 모멘트도 고려하여 구하여졌다. 유체압력 및 기체압력은 모두 압력강하 파라메터가 고려된 값이다.

2. 문제의 정식화

Fig. 1에 보인바와 같이 균일한 수심  $h$  인 해역에서  $y=0$  면을 접수면과 일치시킨 오른손 직각 좌표계  $(x, y)$ 에서 양의  $x$  방향으로 진행하는 입사파 중에 부소파제가 평균위치를 기준으로 운동하고 있다. 비점성 유체, 비회전성 유동을 가정하면 속도포텐셜  $\phi = Re\{\Psi e^{-i\omega t}\}$ 는 입사파 포텐셜  $\psi_0$ 와 산란파 및 방사파 포텐셜의 합이다.  $\psi_0$ 는 다음식으로 주어진다.

$$\psi_0 = -\frac{a_0 \omega}{m_0} \frac{\cosh m_0(y+h)}{\sinh m_0 h} e^{im_0 x} \quad (1)$$

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

위에서  $m_0$ 는 유한수심에서의 파수이다.

부유체는 입사파에 의하여 기진되어 원 진동수

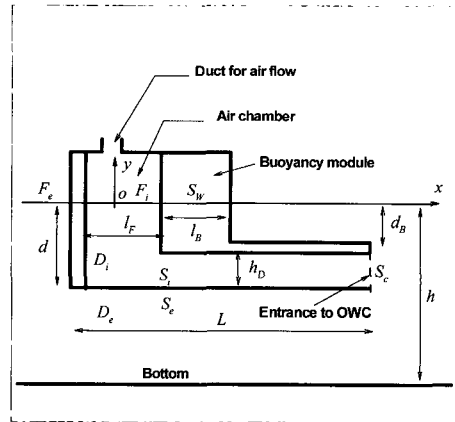


Fig. 1 Definition sketch

$\omega$ 로 미소진폭 단순조화운동을 한다. 접수면 및 밖을 향한 법선 벡터를 각각  $S_0, \vec{n}_0$ 라하고  $S_0$ 와 평면  $y=0$ 가 만나는 점을 부유체의 흡수선  $W$ 라 한다. 부유체의 3자유도운동은 다음과 같다.

$$\vec{a} = a_1 \vec{e}_1 + a_2 \vec{e}_2, \quad \vec{\theta} = a_3 \vec{e}_3 \quad (3)$$

산란파  $\phi_s$  및 방사파  $\phi_R$ 을 구하면 비정상 유동의 전체 포텐셜  $\psi$ 는 다음과 같다.

$$\psi = \psi_0 + \psi_s + \phi_R \quad (4)$$

$$\phi_R = -i\omega \sum_{k=1}^3 a_k \psi_k \quad (5)$$

산란파 및 방사파 포텐셜은 각각 파력흡수용 챔버 내부의 자유표면 변동압력에 기인한 속도포텐셜을 포함하여야 한다. 외부 대기압을 0이라 하고 덕트를 통과하는 수직 상방향 기류의 유속을  $U_d$ 라 할 때 챔버내부 기압  $p_C$ 와  $U_d$ 사이에서 다음 관계식을 가정한다.

$$0 - p_C = -\gamma \times U_d \quad (6)$$

여기서  $\gamma$ 는 압력강하 파라메터로서 실험에 의하여 결정될 수 있다.  $U_d$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$U_d = \frac{1}{A_d} \int_{F_i} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial y} + i\omega \vec{D} \cdot \vec{e}_2 \right) ds \quad (7)$$

위에서  $A_d$ 는  $F_i$ 의 단면적이고  $\vec{D}$ 는 평균위치가  $F_i$ 와 일치하는 평면의 운동변위이다.

이로부터 다음의 선형 자유표면조건이 도출된다.

$$-k_0 \Psi + \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \begin{cases} 0 & \text{on } F_e \\ \alpha U_d & \text{on } F_i \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $\alpha = \frac{i\omega \gamma}{\rho g}$ 는 무차원 압력강하 파라미터

이다.

이외의 경계조건은 잘 알려져 있는 산란-방사파 문제와 동일하다.

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n_0} = N_k \text{ for } k = 1, 2, 3, 4 \text{ on } S_0 \quad (9)$$

$$N_k = \vec{e}_k \cdot \vec{n}_0 \text{ for } k = 1, 2 \quad (10)$$

$$N_3 = (\vec{e}_3 \times \vec{OM}) \cdot \vec{n}_0, N_4 = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n_0} \quad (11)$$

$S_c$ 를 경계로 내부영역  $D_i$ 와 외부영역  $D_e$ 에 각각 Green정리를 적용하면  $\phi_k$ 에 관한 다음 Green적분방정식을 얻는다(홍도천 1991).

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k(P)}{2} &= \int_{S_i \cup S_c \cup F_i} \phi_k(M) \frac{\partial G_\alpha(P, M)}{\partial n_M} ds \\ &= - \int_{S_i \cup S_c \cup F_i} \frac{\partial \phi_k(M)}{\partial n_M} G_\alpha(P, M) ds, \\ &P \text{ on } S_i \cup S_c \cup F_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k(P)}{2} &+ \int_{S_e \cup S_c} \phi_k(M) \frac{\partial K(P, M)}{\partial n_M} ds \\ &= \int_{S_e \cup S_c} \frac{\partial \phi_k(M)}{\partial n_M} K(P, M) ds, \\ &P \text{ on } S_e \cup S_c \end{aligned} \quad (13)$$

위에서  $G_0$  및  $K$ 는 각각 Rankine 및 Kelvin Green 함수이다.

경계면  $S_c$ 에서의 정합조건은 다음과 같다.

$$\phi_k(P^-) = \phi_k(P^+), \quad \frac{\partial \phi_k(P^-)}{\partial n_P} = \frac{\partial \phi_k(P^+)}{\partial n_P} \quad (14)$$

적분 방정식 (12), (13)을 경계조건 (8) 및 정합조건과 연립하여 이산화하면 내, 외부영역이 연성된 선형대수방정식으로 변환되어 풀릴 수 있다(Hong et al. 2004b). BBDB가 넓은 수선면을 가지므로 (13) 식에 도입된 Kelvin Green 함수로 인한 특이파수 현상을 제거하려면 (13) 식을 improved Green integral equation으로 확장하여 풀어야한다(Hong 1987).

### 3. 운동 및 무한원방 파

부소파제의 운동은 통상적인 부유구조물에 작용하는 힘 및 모멘트의 평형조건식에 OWC 챔버에 기인한 외력을 더한 주파수 영역 운동방정식으로부터 얻는다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 [-\omega^2 m I_{jk} - \rho L^2 \omega^2 (M_{jk} + i B_{jk} + N_{jk}^c) \\ + \rho g L R_{jk}] a_j = \rho a_0 \omega^2 L^2 (E_j + E_j^c) \\ , j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (15)$$

양의  $x$  방향으로 진행하는 입사파 중에 있는 부유체에서 무한원방  $x = -\infty$  에서의 산란파에 의한 반사계수를  $R_4$ , 방사파의 각 성분에 의한 반사계수를  $R_k (k=1, 2, 3)$  라 하고,  $x = +\infty$  에서의 산란파 및 방사파에 의한 투과계수를  $T_4$  및  $T_k (k=1, 2, 3)$  로 표시하면

$$R_k = \frac{K_0^2}{(M_0^2 - K_0^2 + K_0)} H_k(\pi), k = 1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

$$T_k = \frac{K_0^2}{(M_0^2 - K_0^2 + K_0)} H_k(0), k = 1, 2, 3, 4 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} H_k(\beta) &= - \int_{S_i \cup S_c} \left( \frac{\partial \phi_k(M)}{\partial n_M} - \phi_k \frac{\partial}{\partial n} \right) \\ &\frac{\cosh M_0(Y+1)}{\sinh M_0} e^{-i M_0 X \cos \beta} dL, \\ &k = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (18)$$

부소파제에 의한 전체 반사계수  $R$  및 투과계수  $T$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$R = -R_4 + i \sum_{k=1}^3 A_k R_k \quad (19)$$

$$T = -i - T_4 + i \sum_{k=1}^3 A_k T_k \quad (20)$$

위에서  $A_k$ 는 입사파진폭으로 무차원화된 복소운동진폭이다.

#### 4. 수치계산 및 토의

Table 1에 보인 바와 같은 제원을 갖는 BBDB형 부소파제를 수치모델로 채택하였다. 수심은 20 m 이고  $x = -\infty$ 에서 파가 입사하는 경우를 다루었다. 유한수심에 해당하는 선형파 주기 3초-15초 구간에서 제계산이 수행되었다.

Fig. 2에 BBDB형 부소파제의 외형과 같이 길이 20m, 흘수 9m인 상자형 부소파제에 대한 투과 및 산란 계수를 본 BBDB형 부소파제의 성능과 비교하기 위하여 표시하였다.

Fig. 6에 부소파제의 투과계수를 표시하였다. 부소파제는 부유체이므로 장파에서 입사파와 같은 위상의 운동을 하기때문에 소파효과를 발휘하지 못하여 투과 계수가 1이된다. 본 수치모델의 크기가 길이 20m, 흘수 9m이므로 이 경우 주기 9초 이상의 입사파는 상자형이나 BBDB형 양자 모두에게 장파로 인식되어 투과 계수가 1로 됨이 Fig. 2 및 Fig. 6에 나타나 있다.

Figs. 3-5에 BBDB의 운동을 표시하였다. 14초 부근에서 압력강하 파라미터  $\gamma$ 가 커짐에 따라 운동이 감소됨을 보여준다. 이는 BBDB의 내부수주 운동공진이 14초 부근에서 일어남을 보여준다. 이때 부소파제의 운동과 수주운동의 위상차가 수주

Table 1 Principal particulars of a BBDB-type breakwater in meters

$L$	$d$	$d_B$	$l_B$	$l_f$	$h_D$
20	9	5	4	4	2

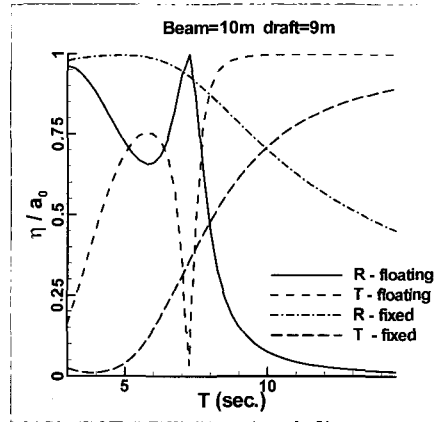


Fig. 2 Efficiencies of caisson-type breakwater

공진과 상승작용을 하여 압력강하 파라미터  $\gamma$ 가 커짐에 따라 강력한 운동감쇠력을 발휘하는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 운동감쇠 효과가 BBDB의 투과계수에는 별 영향을 주지 못하여 Fig. 6에 보인 바와 같이 압력강하 파라미터  $\gamma$ 값의 변화 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 압력강하 효과도 BBDB가 부유상태일 경우에는 그 기본크기가 입사파에 비하여 일정수준 이상일 경우에만 발휘될 수 있다는 것을 보여준다고 판단된다.

Fig. 7에는 부소파제가 파일에 의해 고정된 경우의 투과계수를 표시하였다. 부유상태의 BBDB와 달리 주기 10초-14초 구간에서 압력강하 파라미터  $\gamma$ 의 변화가 투과계수에 큰 영향을 줄 수 있다. 진동수주의 공진주기부근에서는  $\gamma=0$ 인 경우의 투과 계수가 가장 작은 것은 주목할 만한 사항이다.

#### 4. 결론

- 본 연구에서 다룬 BBDB형 부소파제는 일반적인 계류상태에서 상자형 부소파제와 별 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 공기침버 효과가 부유상태에서 발휘되기 어렵기 때문이다. 따라서 공기침버효과를 극대화 하기위하여 설

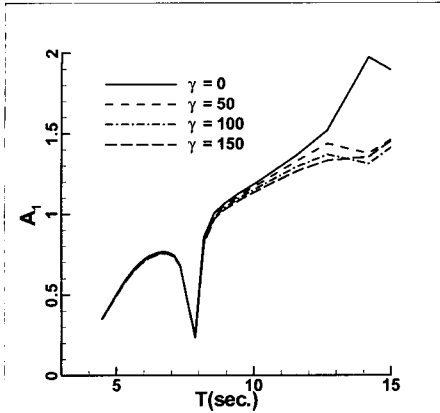


Fig. 3 Sway amplitude ratio of BBDB-type breakwater

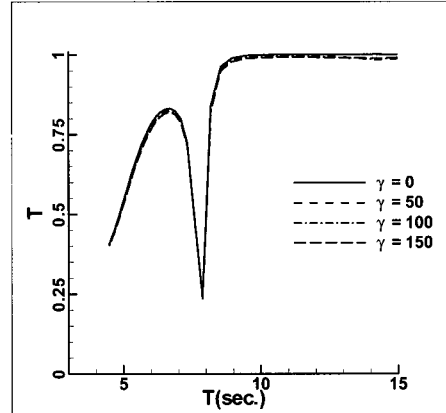


Fig. 6 Transmisson coefficient of floating BBDB-type breakwater

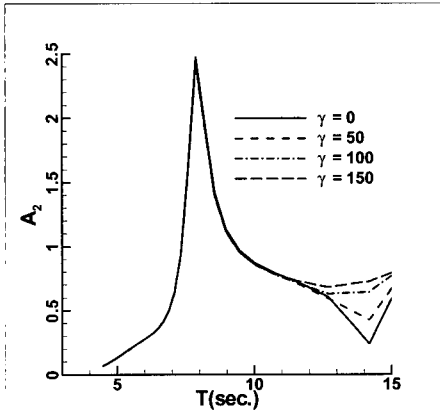


Fig. 4 Heave amplitude ratio of BBDB-type breakwater

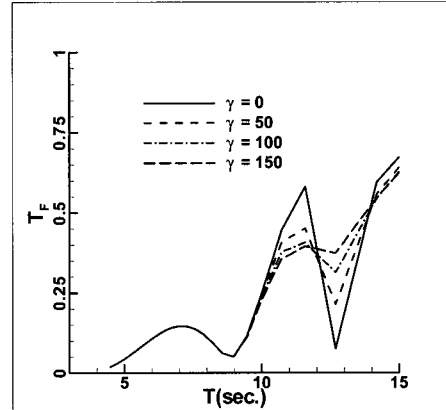


Fig. 7 Transmisson coefficient of fixed BBDB-type breakwater

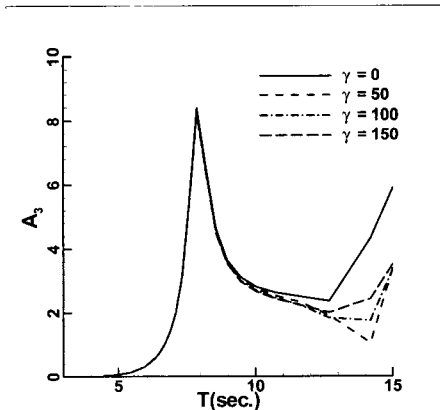


Fig. 5 Roll amplitude ratio of BBDB-type breakwater

치해역의 입사파 주기에 맞추어 OWC 및 부력체의 크기를 적절한 수준으로 키우는 한편 그 형상의 개선도 필요한 것으로 판단된다.

- BBDB 형상의 부소파제는 파일이나 특별한 계류장치에 의해 파중에 고정되었을때 강력한 소파효과를 발휘하는 것이 수치실험에 의해 보여졌다. 따라서 파중 운동이 작은 초대형 부유식 해상 구조물과 결합하여 사용할 경우 소파효과가 클 것으로 판단되며 또한 천해역 해양목장에서 고정식 BBDB를 소파제로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

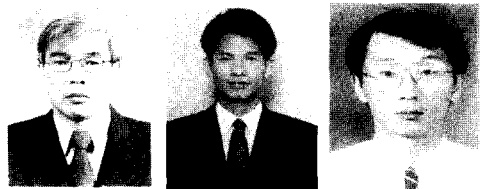
본 논문은 해양수산부가 지원하는 초대형 부유

식 해상구조물 기술 개발과제 중 2차원 공기챔버 방파제 해석 프로그램 개발 및 전남 다도해형 바다목장사업 중 부소파제의 소파성능 해석 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 송무석, 김도영, 이현엽, 조일형, 1998, “규칙파 중 수면근체에 고정된 상자형 방파제의 특성에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 2호, pp. 38-50
- 이호영, 광영기, 박종환, 2002, “속도 포텐셜 접속법과 특이점 분포법에 의한 방파제에 근접한 부유식 해상공항에 대한 유탄성 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 2호, pp. 11-18
- 홍도천, 1991, “진동수주의 증폭에 관한 연구,” 선박해양기술, 제6호, pp. 41-50
- Hong, D.C., 1987, "On the Improved Green Integral Equation applied to the Water-Wave Radiation-Diffraction Problem," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8
- Hong, D.C., Hong, S.Y. and Hong, S.W., 2004a, "Numerical Study of the Motions and Drift Force of a Floating OWC Device. Ocean Engineering," Vol. 31, No.2, pp.139-164.

- Hong, D.C., Hong, S.Y. and Hong, S.W., 2004b, "Numerical study on the reverse drift force of floating BBDB wave energy absorbers," Ocean Engineering, Vol. 31, No. 10, pp. 1257-1294.
- Masuda, Y., 1987, "Experiences in pneumatic wave energy conversion," Utilization of ocean waves ASCE, pp. 1-33.
- McCormick, M.E. and Sheehan, W.E., 1992, "Positive Drift of Backward-Bent Duct Barge," J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 1, pp. 106-111.
- Shigemitsu, H., Ogata, T., Kobayashi, H., Inoue, K., Fukuoka, T. and Takaoki, T., 2001, "Feasibility study of reducing wave load on pontoon-type Mega-Float structure," Proceedings of 20th OMAE, Rio de Janeiro, OSU5011



< 홍도천 > < 김현주 > < 홍사영 >