

# BBDB형 진동수주 파력발전장치의 운동 및 파랑표류력 연구

김진하\* · 류재문\*\* · 홍도천\*\* · 홍석원\*

\*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

\*\*충남대학교 선박해양공학과

## A Study on Motion and Wave Drift Force of a BBDB Type OWC Wave Energy Device

JIN-HA KIM\*, JAE-MOON LEW\*\*, DO-CHUN HONG\*\* AND SEOK-WON HONG\*

\*Ocean System Technology Department, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea

\*\*Naval Architecture & Ocean Engineering Department, Chungnam National University, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Oscillating water column 진동수주형 공기챔버, BBDB (Backward-bent duct buoy), Pneumatic damping coefficient 공기감쇠력계수, Regression analysis 분산회귀, Wave drift force 파랑표류력, Model test 모형시험, Numerical simulation 수치계산

**ABSTRACT:** The motion and wave drift forces of floating BBDB (backward-bent duct buoy) wave energy absorbers in regular waves are calculated, taking account of the oscillating surface-pressure due to the pressure drop in the air chamber above the oscillating water column, within the scope of the linear wave theory. A series of model tests has been conducted in order to verify the motion and time mean wave drift force responses in regular waves at the ocean engineering basin, MOERI/KORDI. The pneumatic damping through an orifice-type duct for the BBDB wave energy device are deducted from experimental research. Numerical simulation for motion and drift force responses of the BBDB wave energy device, considering pneumatic damping coefficients, has been carried out, and the results are compared with those of model tests.

### 1. 서 론

가동 물체에 의한 파랑에너지 흡수 관련연구는 1970년대 석유과동 이후 활발히 전개되어 선형과 이론에 근거한 연구가 수행되고 있다.

다양한 파력발전장치 방식중에서 진동수주 파력발전장치(Oscillating water column, OWC)가 가장 실용성 있는 방법으로 알려져 있다. 이는 파도에 의해 공기챔버내의 물이 상하로 진동함으로써 터빈이 설치되어 있는 덕트 사이로 공기가 왕복운동을 하는 것을 이용하는 개념으로 파랑에너지를 공기의 유동에너지로 1차 변환하고 이를 다시 공기 터빈을 사용하여 기계적인 회전 에너지로 2차 변환하는 개념이 사용된다.

Masuda 등(1993)은 이러한 진동수주 파력발전장치의 효율을 높일 수 있도록 BBDB(Backward bent duct buoy)형 진동수주 파력발전장치(이하 BBDB형 파력발전장치로 명기함)를 고안하였다. BBDB형 파력발전장치는 공기챔버가 상자형 부력체(Buoyancy module) 하부에 긴 수평방향의 덕트와 짧은 수직방향의 덕트가 L자형으로 설치되어 덕트 내부의 해수유동을 공기의 왕복유동으로 이용하여 발전하는 방식이다(Fig. 1).

BBDB형 파력발전장치는 원통형 진동수주(Circular type OWC) 방식에 비해 부유체의 상하동요뿐 아니라 종동요 및 전후운동에 기인한 내부 상대유동을 발생시키므로 입사파 주기와 동조영역이 상대적으로 넓다. 또한, 파랑중에 특정 입사파 주기에 대해 역 표류(Reverse drift)현상을 가지고 있어 계류설계 관점에서 장점이 있는 것으로 알려져 있다(McCormick et al., 1992; Masuda et al., 1993).

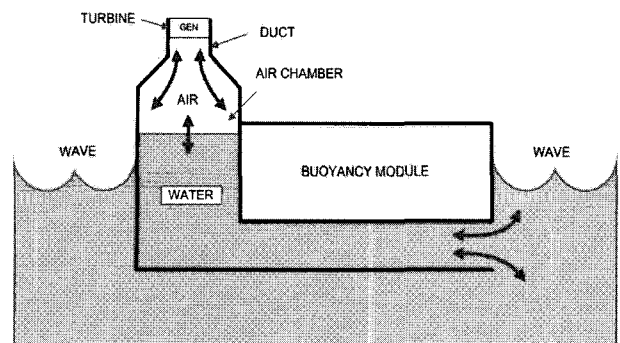


Fig. 1 BBDB type OWC wave energy device

OWC 파 에너지 흡수장치에는 진동수주 상부에 위치한 공기실 기압과 챔버 내부 자유표면 유동이 서로 연계되어 있으므로 공기챔버 내부압력에 의한 자유표면 교란을 자유표면

교신저자 김진하: 대전광역시 유성구 장동 35-1

042-868-7525 jhakim@moeri.re.kr

변동압력면(Free surface oscillating pressure patch)으로 다른 진동수주에 의한 파에너지 흡수 이론의 개발과 도입에 의하여 OWC 파 에너지 흡수장치에 관한 기본 이론이 정립된 바 있다(Evans, 1982; Sarmento and Falcão, 1985; Falnes and McIver, 1985).

자유표면 변동압력면과 압력강하 파라미터에 의한 파 에너지 흡수이론과 3차원 경계요소법을 이용해 3차원 OWC 파에너지 흡수장치의 운동, 파랑표류력 및 1차에너지 흡수효율 등을 해석적으로 구하는 방법이 개발되었다(Hong et al., 2004a ; Hong et al., 2004b).

이 방법은 운동 기진력으로 부유체에 작용하는 파랑기진력 뿐만 아니라 공기챔버 내부의 공기압에 의한 수직력도 포함시켰다. 공기압의 수직력에 있어 공기챔버내의 공기압력은 덕트를 통과하는 공기유속에 비례하는 것으로 가정하였으며 그 비례상수를 공기감쇠력계수로 취급하여 여러 가지 공기감쇠력계수에 대한 계산을 수행하여 감쇠계수에 대한 영향을 나타내었다. 그러나, 공기감쇠력계수는 파랑에너지를 공기의 운동에너지로 변환시켜주는 1차 변환효율을 결정하는 인자이므로 정확한 물리량의 산정이 중요하다.

본 논문에서는 BBDB형 진동수주 파력발전장치의 파랑중 운동 모형시험을 수행하여, 공기감쇠력계수를 산정하고 이를 추정할 수 있는 공식을 제안하여 공기감쇠력계수 모델링의 타당성을 검토하였다. 또한, 산정된 공기감쇠력 계수를 수치 계산에 적용하여 운동응답 및 파랑표류력 응답 특성을 실험 결과와 비교·분석하였다.

## 2. 이론해석

Fig. 2는 진동수주형 파력발전장치가 케이슨형태의 부력모듈에 취부된 BBDB형 파력발전장치의 수치모형의 종단면을 나타내고 있다. 그림에서  $F_i$  는 내부자유표면,  $F_e$ 는 외부자유표면,  $d$  는 흡수,  $d_B$  는 부력모듈의 흡수,  $l_f$  와  $l_B$  는 수직 및 수평덕트의 길이,  $h_D$  는 수평덕트 높이,  $S_W$  는 부력모듈의 수선면,  $L$  은 특성길이이다.

$xy$  평면을 정수면과 일치시킨 오른손 직각좌표계 ( $xyz$ )에서 원점  $O$  가 부유체의 수선면에 있고  $z$  축은 연직 상방을 가리킨다.

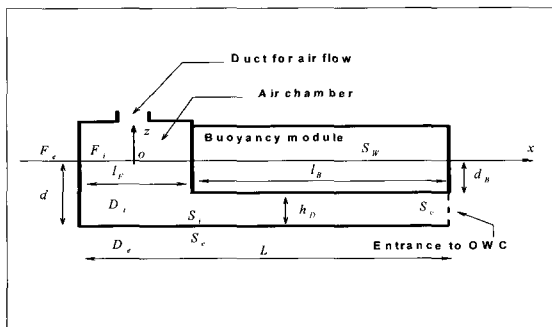


Fig. 2 Coordinate system and configuration of BBDB

유체는 비압축성, 유동은 비회전이고 표면장력을 무시하면 유속은 속도포텐셜의 구배로 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x,y,z,t) = Re\{\Psi(x,y,z)e^{-i\omega t}\} \quad (1)$$

$$v(x,y,z) = \nabla\Psi(x,y,z) \quad (2)$$

복소포텐셜  $\Psi$  는 라플라스 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2\Psi = 0 \quad (3)$$

크기가  $O(\epsilon)$ 인 미소진폭과 원진동수를 가진 속도포텐셜 로 정의되는 입사파(Airy wave)는 다음과 같다.

$$\Phi_0(x,y,z,t) = Re\{\psi_0(x,y,z)e^{-i\omega t}\} \quad (4)$$

$$\psi_0 = -\frac{a_0g}{\omega}e^{k_0|z+i(x\cos\beta+y\sin\beta)|} \quad (5)$$

여기서,  $a_0$  는 입사파 진폭,  $g$  는 중력가속도,  $\beta$  는 입사파 파향,  $k_0$  는 파수이다. 부유체의 한점  $M$  위치에서의 변위벡터는 식 (6)으로 표현된다.

$$Re[D(M)e^{-i\omega t}] = Re\left\{\sum_{q=1}^3 a_q e_q + \sum_{q=4}^6 a_q (e_{q-3} \times r)\right\} e^{-i\omega t} \quad (6)$$

$$r = (x_M - x_O)e_1 + (y_M - y_O)e_2 + (z_M - z_O)e_3 \quad (7)$$

여기서,  $a_q$  ( $q=1,2,\dots,6$ )는  $q$  운동모드의 복소진폭이다.

부유체와 OWC와의 상대운동에 의해 덕트를 통한 공기유동이 발생하며, 덕트를 통한 공기유동의 압축성을 무시하고, 단열 및 등엔트로피 과정을 가정하면 덕트를 통한 압력강하  $\gamma$  는 식 (8)과 같이 선형적으로 표현된다.

$$Re[p_c e^{-i\omega t}] = \gamma \times Re[U_d e^{-i\omega t}] \quad (8)$$

여기서,  $p_c$  는 공기챔버내 변동압력,  $\gamma$  는 등가선형감쇠,  $U_d$  는 부유체와의 상대운동으로 인한 공기유동의 수직평균속도이다. 덕트에서 상대공기유량은 내부자유표면  $F_i$  의 평균위치에서 동일하므로 식 (9)로 표현된다.

$$U_d = \frac{1}{A_d} \iint_{F_i} \left( \frac{\partial\Psi(M)}{\partial z} + i\omega D(M) \cdot e_3 \right) ds, \quad M \in F_i \quad (9)$$

여기서,  $A_d$  는 공기유동에 대한 덕트의 단면적이다.

식 (8)과 식 (9)를 이용하여 선형화된 자유표면, 바다, 물체표면, 무한원방의 경계조건을 내부 및 외부영역에 대해 각각 구한다.

비정상 유동의 전체 포텐셜  $\Psi$  는 입사파 포텐셜  $\psi_0$  과 방사파 포텐셜  $\psi_R$  및 산란파 포텐셜  $\psi_S$  의 합으로 식 (10)과 같이 표현된다(Hong et al., 2004).

$$\Psi = \psi_0 + \psi_R + \psi_7 \quad (10)$$

$$\Psi_R = -i\omega \sum_{q=1}^6 a_q \psi_q. \quad (11)$$

여기서,  $\psi_q$  ( $q=1,2,\dots,6$ )는  $q$  모드에서의 단위진폭운동에 대한 포텐셜이다.

외부영역  $D_e$  에 대해서는 Kelvin-type Green 함수, 내부영역  $D_i$  에는 Rankine-type Green 함수를 적용하고, 내/외부영역이 만나는  $S_c$ 에 정합조건(Matching boundary condition)을 적용해 적분방정식을 구하고, 경계요소법에 의해 적분방정식의 이산화를 통해 경계에서의 포텐셜을 구한다(Hong et al., 2004b).

변동압력  $p$  는 선형화된 베르누이 방정식을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{Re}(pe^{-i\omega t}), \quad p = i\rho\omega\Psi \quad (12)$$

식 (8)과 식 (9)로부터 공기챔버에서의 복소변동압력  $p_c$  는 다음과 같이 구해진다.

$$p_c = \frac{\gamma}{A_d} \left[ -i\omega \sum_{q=1,3,5} a_q (Q_q - K_q) + Q_7 - K_7 \right] \quad (13)$$

$p$  와  $p_c$  에 의해서 파랑기진력과 모멘트는 접수면 및 공기 챔버 접수면에 대해 적분함으로써 얻어진다. 주파수 영역에서 부유체의 일반화된 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{q=1}^6 [-\omega^2 m I_{pq} - \rho L^3 \omega^2 (M_{pq} + iB_{pq} + N_{pq}^C) + \rho g L^2 R_{pq}] a_q = \rho a_0 \omega^2 L^3 (E_p - E_p^C), \quad p=1,2,\dots,6 \quad (14)$$

여기서,  $m$  과  $I_{pq}$  는 질량과 관성력계수이며,  $M_{pq}$  는 부가질량계수,  $B_{pq}$  는 감쇠계수,  $E_p$  는 파랑기진력계수이고,  $N_{pq}^C$  와  $E_p^C$  는 공기챔버내의 압력에 기인한 무차원화된 계수이다.

Pinkster 와 Van Oortmerssen(1977)에 의해 제안된 직접압력적분법(Near field method)을 이용하면 시간평균 표류력  $F_d$  는 다음과 같이 구해진다.

$$F_d = -\frac{\rho g}{4} \oint_W \zeta_r \mathbf{f} n ds + \frac{\rho}{2} \iint_{S \cup S_i} \left\{ \frac{1}{2} |\nabla \Psi|^2 + \text{Re} [D \cdot \nabla (i\omega \Psi^*)] \right\} n ds + \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \sum_{q=4}^6 a_q^* e_{q-3} \times F_m \right\} - \frac{\rho g}{2} \left[ W_x \text{Re}(a_4 a_6^*) + W_y \text{Re}(a_5 a_6^*) + W_z \text{Re}(a_6 a_6^*) \right] e_3 \quad (15)$$

여기서, \* 는 공액복소수이며,  $F_m$  은 관성력,  $W_x$  와  $W_y$  는 각각 x 축과 y 축에 대한 수선면적 모멘트이고,  $\zeta_r$  는 수선면  $W$  에 대한 상대파고로서 식 (16)과 같다.

$$\zeta_r(M) = \frac{i\omega}{g} \Psi(M) + i \frac{a_0}{\omega} U_d - D(M) \cdot e_3, \quad M \in W \quad (16)$$

### 3. 모형시험

부유식 파력발전장치의 수치계산의 검증과 운동특성을 검토하기 위해 한국해양연구원 해양공학수조에서 운동 및 파랑 표류력 모형시험을 수행하였다.

BBDB형 파력발전장치는 공기챔버내부 OWC의 공진주기를 국내연안의 파도조건을 고려하여 파주기 4~5초대에 맞추어 설계하였다. 모형축척비는 해양공학수조 조파장치의 가용랑을 고려하여 1/4 로 선정하였다.

BBDB형 파력발전장치의 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. 공기덕트의 파랑중 오리피스(Orifice) 직경변화에 따른 변동압력과 풍속을 측정하기위해 오리피스 직경을 실선의 0.113m와 0.075m의 2가지로 하였다.

규칙파는 선수파(Head sea)조건에 대해 실선 주기 1.5초에서 5.5초 범위에서 생성하였으며, 수치계산을 통해 추정된 상하운동 및 종동요와 OWC 공진주기 부근에서 파고 변화에 대한 경향을 살펴보았다.

파고와 오리피스 직경변화에 따른 응답을 비교하기 위해 시험조건을 Table 2와 같이 3가지로 나누었으며, Fig. 3과 Fig. 4는 각각 해양공학수조의 모형설치 개략도와 설치사진을 보여주고 있다.

계측항목으로는 고정도 비접촉식 운동계측장치(RODYM6)로 6자유도 운동, 차압계와 열선풍속계를 이용하여 각각 변동압력과 오리피스 평균풍속을 계측하였다. 파랑표류력은 스포링과 와이어를 모형에 연결한 4점 계류시스템의 장력계를 이용해 구하였다.

Table 1 Main particulars of BBDB

Item	Symb.	Unit	Ship
Length over all	LoA	m	4.3
Length between perpendicular	L <sub>pp</sub>	m	4.3
Breadth	B	m	1.6
Draft	T	m	2.0
Displacement	△	m <sup>3</sup>	9.33
Longitudinal center of gravity (from midship to F.P(+))	LCG	m	-0.048
Center of gravity(C.O.G)	KG <sub>T</sub>	m	1.20
Metacentric height	GM	m	0.281
Roll natural period	Troll	sec	2.35
Radius of gyration roll	K <sub>xx</sub>	m	0.5
Radius of gyration pitch	K <sub>yy</sub>	m	1.0
Radius of gyration yaw	K <sub>zz</sub>	m	1.0

Table 2 Test conditions for BBDB model

Test condition	H1	H2	H3
Wave height[m]	Wave stiffness ( $H/\lambda = 1/50$ )	0.2m	0.2m
Mooring stiffness [kN/m]	14.858	5.755	5.755
Orifice dia.[m]	0.113	0.113	0.075

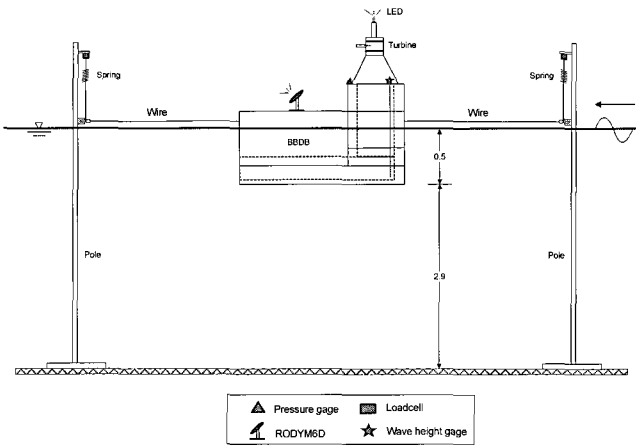


Fig. 3 Schematic view of BBDB setup

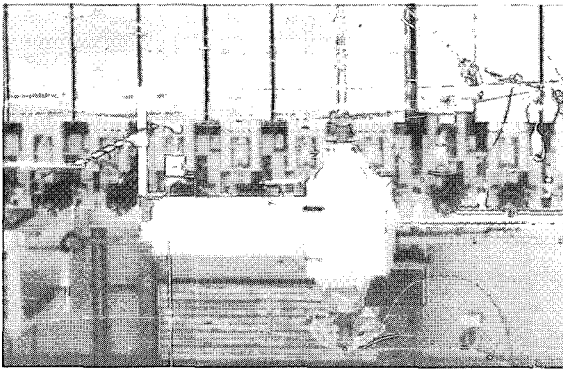


Fig. 4 BBDB setup in ocean engineering basin

#### 4. 공기덕트의 감쇠력 추정

공기덕트를 가지는 진동수주형 파력발전장치에서 공기유량의 특성을 정확히 모델링하는 것이 중요하나 공기가 덕트를 통하여 유동할 때 발생하는 점성항력으로 인해 공기유량은 챔버의 수면상승속도에 의한 체적변화율과 위상차를 가지며 작지만 존재하는 공기의 압축성으로 인하여 진폭도 다르게 되므로 공기유량을 이론적으로 규명하는 것이 매우 어렵다.

따라서, 공기감쇠력계수는 공기챔버내부의 공기유량을 모델링하지 않고 챔버내 공기압력  $p_c$  를 식 (8)과 같이 덕트 입구에서의 유속의 함수로 정의하였다.

공기감쇠력계수는 운동모형시험에서의 운동이 정상상태에

도달한 상태에서의 계측자료를 활용하여 Zero-up crossing 방법으로 상하운동의 1주기에 해당하는 계측 자료를 사용하여 구하였다.

식 (8)의 관계식으로부터 매순간 공기감쇠계수가 결정되기 때문에 이를 각 실험조건을 대표하는 공기감쇠력계수를 최소자승법(Least square method)으로 식 (17)과 같이 구하였다.

$$\gamma = \frac{\sum_{j=1}^n (U_{tj} P_{cj})}{\sum_{j=1}^n (U_{tj} U_{tj})} \quad (17)$$

여기서, 첨자  $j$ 는  $j$ 번째 계측신호를 의미하며  $n$ 은 전체 계측 개수이다.

이러한 관계로부터 단순화된 원통형 공기챔버 구조물의 방사문제 (Radiation problem)에 있어, 모형시험을 통해 공기챔버내 덕트에서의 공기감쇠력계수를 산정하고 이를 추정하는 공식을 제안한 바 있다(최학선 등, 2004).

그러나, 원통형 진동수주 파력발전장치가 상하운동에 의해서만 왕복공기유동이 발생하는 반면에 BBDB형 파력발전장치는 종방향과 횡방향의 덕트를 이용함으로써 전후, 상하 및 종동요 운동 등에 기인한 왕복공기유동이 발생한다.

또한, 원통형의 공기챔버와 덕트를 가진 원통형 파력발전장치와 달리 정사각형 공기챔버와 원통형의 오리피스스를 가지고 있다. 그러므로 BBDB형 파력발전장치의 이러한 특성을 고려한 공기감쇠력 계수의 추정공식이 필요하다.

따라서, BBDB형 파력발전장치의 운동모형시험을 통해 얻어진 공기감쇠력계수를 식 (18)과 같이 내부수면진폭과 주파수, 공기챔버와 덕트의 면적비(Solidity)의 함수로 전개하여 분산회귀(Regression)하는 추정공식을 제안하였다.

$$\beta' = r_1 + \frac{r_2}{\omega} + r_3 \omega' + r_4 \xi_a' + r_5 (A_n/A_c) + r_6 \frac{\xi_a'}{\omega} + r_7 \omega' \xi_a' + r_8 (\frac{1}{\omega}) (A_n/A_c) + r_9 \omega' (A_n/A_c) \quad (18)$$

여기서,  $\beta' = \gamma / (\rho_a \omega \xi_a)$ 은 상대수면변위의 진폭  $\xi_a$  과 주파수  $\omega$  에 대한 무차원 공기감쇠력계수,  $\omega' = \omega \sqrt{c_l/g}$ 은 상대수면변위에 대한 무차원 원진동수,  $A_n = \frac{\pi}{4} d_o^2$  는 직경  $d_o$ 의 오리피스 단면적,  $A_c = d_c^2$  는 한변길이  $c_l$ 의 정사각형 공기챔버의 단면적,  $\xi_a' = \xi_a/c_l$  는 공기챔버 상대수면변위  $\xi_a$  를 공기챔버의 한변의 길이  $c_l$  로 나눈 무차원 상대수면변위이다.

Table 3은 BBDB형 파력발전장치의 공기감쇠력계수를 식 (18)을 이용해 추정한 분산회귀계수(Regression coefficients)를 나타내었다.

Table 3 Regression coefficients

r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>5</sub>	r <sub>6</sub>	r <sub>7</sub>	r <sub>8</sub>	r <sub>9</sub>
228	-11	-624	196	-23522	-20	-496	1856	60890

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 오리피스 직경이 큰 H2 조건과 오리피스 직경이 작은 H3 조건에 대해 열선풍속계로 측정한 공기유속으로부터 식 (17)로부터 직접 산정한 공기감쇠력계수를 식 (18)을 이용해 분산회귀하여 구한 공기감쇠력계수와 비교하여 나타내었다.

여기서, 공기감쇠력계수는 공기밀도  $\rho_a$  와 파 주파수  $\omega$ , 파 진폭  $\zeta_a$  으로 나누어 무차원 하였다.

플러스(+)기호는 식 (17)을 이용해 실험으로부터 직접 구한 공기감쇠력계수이며 삼각형( $\Delta$ )은 상하운동 진폭과 주파수의 함수로 분산회귀한 공기감쇠력계수(최학선 등, 2004), 원형(O)은 식 (18)의 내부 수면변위의 진폭과 주파수를 함수로 분산회귀한 공기감쇠력계수이다.

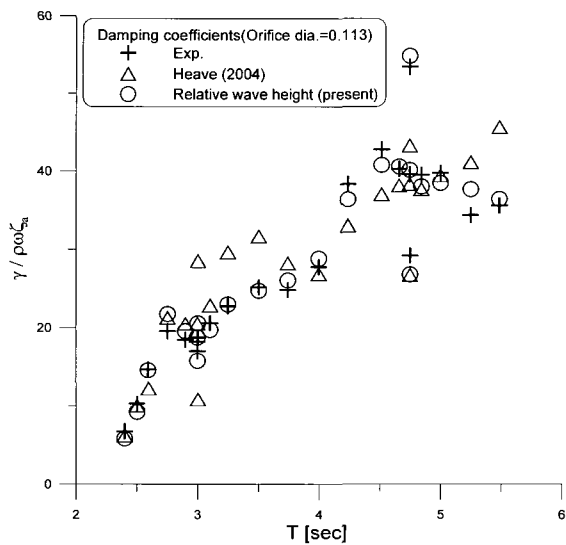


Fig. 5 Comparison of pneumatic damping coefficients (Orifice Dia.=0.113m)

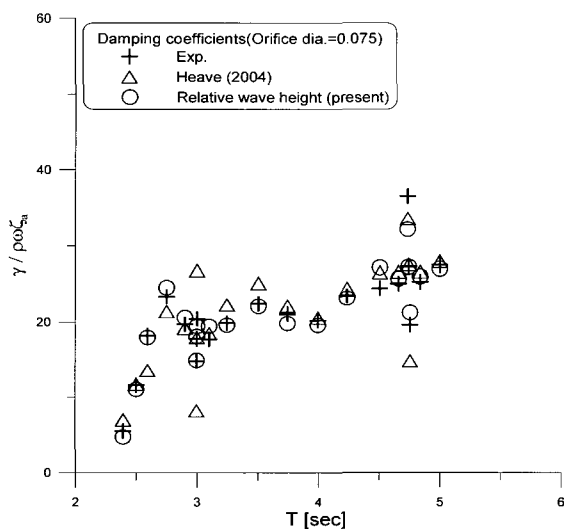


Fig. 6 Comparison of pneumatic damping coefficients (Orifice Dia. = 0.075m)

Fig. 5의 오리피스 직경이 큰 경우에 공기감쇠력계수는 약 2.8초까지 선형적으로 변화하며, 4초 이후의 장주기 영역에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. Fig. 6의 오리피스 직경이 작은 경우는 Fig. 5와 마찬가지로 약 2.8초까지 선형적으로 변화하고, 그 이후의 장주기에서 공기감쇠력계수의 일정하게 수렴되는 경향을 보이고 있다.

또한, 오리피스 직경이 작은 경우가 큰 경우와 비교해 장주기 영역에서 공기감쇠력계수가 약간 작게 나타났다.

식 (18)의 상대수면변위의 함수로 분산회귀한 결과가 상하운동변위로 분산회귀한 결과에 비해 식 (17)의 유속과 변동압력과의 관계로 직접구한 공기감쇠력계수에 보다 잘 일치하고 있다.

따라서, 본 논문에서 제안한 공기감쇠계수 모델링의 유효성을 검증하였다.

### 5. 결과 및 고찰

Fig. 7~Fig. 11은 BBDB형 파력발전장치의 모형시험을 통해 추정된 공기감쇠력계수를 수치계산에 적용하여 선수파중 운동 및 파랑표류력, 내부수면변위 응답등을 실험치와 비교하여 나타내었다.

그림에서 각 심볼은 Table 2에서 기술한 바와 같이 사각형( $\square$ )은 H1 조건, 원형(O)은 H2 조건, 삼각형( $\Delta$ )은 H3 조건 일때의 실험결과이다. 실선과 파선은 각각 오리피스가 큰 경우와 작은 경우에 대해 추정된 공기감쇠력계수를 고려한 수치계산 결과이다.

Fig. 7은 전후운동 응답을 나타내고 있다. 전후운동은 파진폭으로 나누어 무차원화 하였다.

전후운동에서는 파주기 약 4.7초까지 응답이 증가하는 경향을 보이고 있다. 파주기 2.5초, 3초와 4.75초의 종동요, 상하운동과 진동수주(OWC)의 공진주기에서 전후운동과의 간섭으로 약간의 극값이 나타나고 있다. 또한, 5초 이후에서 실험치가 계산치보다 큰 이유는 모형시험에서의 장주기에서의 계류복원특성에 기인한다.

그림에서 알 수 있듯이 파고, 계류강성 및 오리피스의 직경변화등에 따른 실험결과는 거의 동일하게 나타나고 있다.

또한, 공기감쇠력계수의 차이에 따른 운동응답의 변화는 크지 않다. 전체적인 경향은 공기감쇠력계수를 적용한 경우가 실험치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8은 상하운동 응답을 보여주고 있다. BBDB형 파력발전장치는 상하운동의 공진주기가 3.0초임을 알 수 있고, 계산치가 공진점에서 실험치보다 크게 나온 이유는 수치계산이 포텐셜이론에 근거하여 점성영향을 고려하지 않은 결과이다.

계산치와 실험치에서 오리피스의 직경변화에 따른 응답의 차이는 거의 없으며, 진동수주의 공진점의 주기가 잘 일치하고 있다. 공기감쇠력을 고려한 계산치가 실험치와 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 9는 종동요 응답을 보여주고 있다. 종동요 응답은 파기울기로 무차원하여 나타내었다. 전체 주기에 대해 실험치가

계산치보다 작게 나타나며, 종동요의 공진주기가 2.5초 임을 알 수 있다.

또한, 공진점에서는 계산치가 실험치보다 크게 나타나며, 이는 점성영향에 기인한다.

Fig. 10은 BBDB 모형의 파랑표류력 응답을 보여주고 있다. 파랑표류력은 해수밀도( $\rho$ ), 중력가속도( $g$ ), 파진폭의 제곱( $C_m^2$ )과 BBDB형 파력발전장치의 특성길이( $L$ )로 무차원 하였다.

운동응답과 마찬가지로 오리피스 직경변화에 따른 공기감쇠력계수의 변화에 따른 차이는 전 주파수에서 거의 나타나지 않는다.

계산치는 진동수주(OWC)와의 공진주기인 4.75초와 무관한 종동요와 상하운동의 공진주기 부근인 2.7초~3.6초 사이에 역 파랑표류력이 나타나고 있으나, 실험치에서는 역 파랑표류력이 계측되지 않았다.

이는 Masuda 등(1993)이 수행한 파랑중 BBDB형 파력발전장치의 하부형상별 파력흡수성능시험에서 역 파랑표류현상이 2차원 하부형상인 경우에만 발생되고 3차원 하부형상에는 나타나지 않은 시험결과와 일치한다.

그러므로, 이러한 계산치와 실험치의 차이는 모형시험에서 BBDB형 파력발전장치의 3차원 하부형상으로 인한 점성영향을 비점성, 비압축성의 이상유체에 기초한 포텐셜 이론을 적용한 본 수치계산에서는 고려되지 않은 결과로 생각된다.

Fig. 11은 공기챔버 내부의 진동수주의 상대파고를 보여주고 있다. 상대파고는 파 진폭으로 나누어 무차원 하였다.

파주기에 대한 실험치와 계산치에서의 극값(Peak value)이 종동요 2.5초, 상하운동 3.0초, OWC 공진주기 4.75초 부근에서 나타나고 있다.

진동수주의 공진주기에서는 오리피스 직경이 작은 경우가 오리피스에 의한 공기챔버내 압력강하에 의해 상대파고가 작게 나타나는 물리현상을 반영하고 있다. 공기감쇠력을 고려한 경우가 계산치와 실험치와의 전체적인 경향이 잘 일치하고 있다.

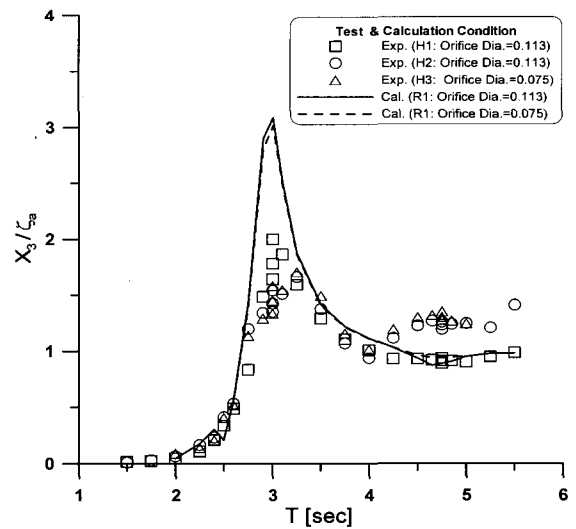


Fig. 8 Heave amplitude response of BBDB

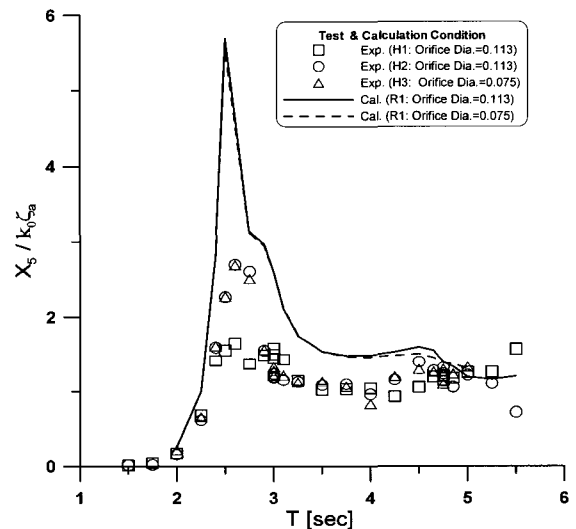


Fig. 9 Pitch amplitude response of BBDB

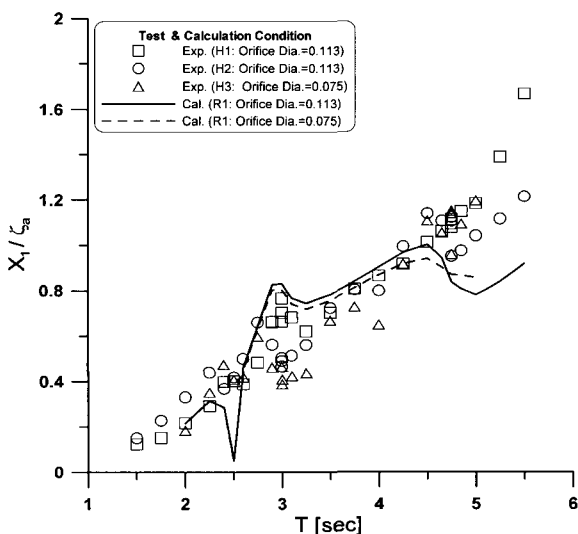


Fig. 7 Surge amplitude response of BBDB

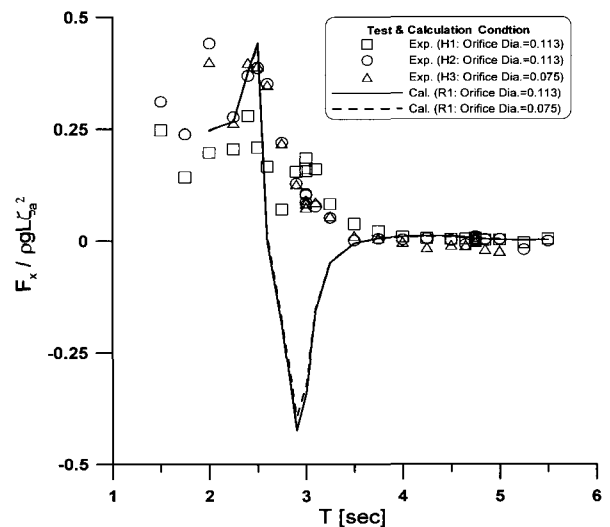


Fig. 10 Wave drift force of BBDB

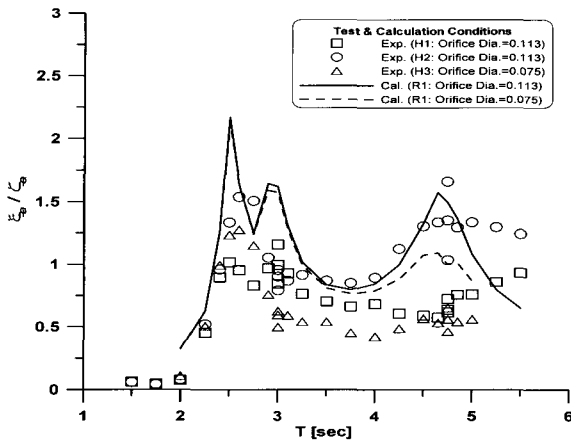


Fig. 11 Relative internal wave height of BBDB

### 6. 결론

본 논문을 통해 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 모형시험을 통해 공기챔버의 변동압력과 내부덕트내 유속과의 상관관계로부터 공기감쇠력계수를 추정하였다.
- (2) 추정된 공기감쇠력계수를 내부수면변위, 주파수, 공기챔버와 오리피스 단면적비 등의 함수로 분산회귀(Regression)한 결과, 공기감쇠력 모델링의 유효성을 확인할 수 있었다.
- (3) 본 논문에서 대상으로 한 BBDB형 파력발전장치의 경우는 상하운동 3.0초, 중동요 2.5초, 진동수주 4.75초의 공진주기 특성을 보임을 알 수 있었다.
- (4) BBDB형 파력발전장치의 운동 및 진동수주의 응답에 대해 공기감쇠력계수를 수치계산에 적용한 결과, 실험치와 좋은 상관관계를 나타냈다. 따라서, 본 수치계산은 파력발전장치의 초기설계단계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.
- (5) BBDB형 파력발전장치의 수치계산에서는 2.5초~3.5초 위에서 역 표류현상이 나타나지만 실험치에서는 나타나지 않았다. 이는 홀수하부의 3차원 형상에 따른 점성영향에 기인한 것으로 생각되며 향후, 홀수하부의 형상변화에 따른 역 표류현상의 추가연구가 필요하다.

### 후 기

본 논문은 해양수산부과제인 “파력에너지 실용화 기술개발(III)”과 한국해양연구원의 기본연구과제 “기상재난파에 의한 해양구조물 안정성 평가기술개발” 및 2003년도 석·박사 인력양성사업의 결과중 일부를 밝힙니다.

### 참 고 문 헌

최학선, 홍석원, 김진하, 류재문 (2004). “OWC형 파력발전 공

기챔버의 공기감쇠력 실험연구”, 한국해양공학회지 제18권, 제4호, pp 8-14.

홍석원 (2003). “한·인도 해양에너지개발 공동 연구”, 한국해양연구원 연구보고서(UCM00470 -2471).

Evans, D.V. (1982). “Wave-power Absorption by Systems of Oscillating Surface Pressure Distributions”, J. of Fluid Mech. Vol 114, pp 481-499.

Falcão, A.F. de O. and Sarmento, A.J. NA. (1980). “Wave Generation by a Periodic Surface Pressure and its Application in Wave-energy Extraction”, 15th Int. Cong. Theo. Appl. Mech., Toronto, pp

Falnes, J. and McIver, P. (1985). “Surface Wave interactions with Systems of Oscillating Bodies and Pressure Distributions”, Applied Ocean Research, Vol 7, No 4, pp 225-234.

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.

Masuda, Y. Xianguang L. and Xiangfan G., (1993). “High Performance of Cylinder Float BBDB and its Use in European seas”, Proc. 1993 European Wave Energy Symposium, pp 323-337.

McCormick, M. (1991). “A Theoretical Analysis of a Self-propelled Backward Bent Duct Wave Energy Conversion System”, MTS’91 Proc., Marine Technology Society.

McCormick, M. and Sheehan, W. (1992). “Positive Drift of Backward Bent Duct Barge”, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Vol 118, No 1, pp 106-111.

Pinkster, J.A. and van Oortmersen, G. (1977). “Computation of the First and Second Order Wave Forces on Oscillating Bodies in Regular Waves”, Proc. 2nd Int. Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, U.C. Berkeley, pp 136-159.

Sarmento, A. J. NA. and Falcão, A. F. de O. (1985). “Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction”, J. Fluid Mech. 150, pp 467-485.

2006년 2월 24일 원고 접수

2006년 4월 7일 최종 수정본 채택