

OWC형 파력발전 공기챔버의 공기감쇠력 실험 연구

최학선* · 홍석원* · 김진하* · 류재문**

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**충남대학교 선박해양공학과

An Experimental Study of Pneumatic Damping at the Air Chamber for an OWC-type Wave Energy Device

HARK-SUN CHOI*, SEOK-WON HONG*, JIN-HA KIM* AND JAE-MOON LEW**

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Pneumatic Damping 공기감쇠, OWC 진동수주, Oscillatory Duct Flow 관내왕복류, Experimental Study 실험연구

ABSTRACT: *Pneumatic damping through an orifice-type duct for an OWC-type wave energy device is studied experimentally. Forced oscillation tests are used to measure chamber pressure and velocity of air-flow through an orifice. Pneumatic damping coefficients are deducted from the experimental research, and the influence of frequency, heave amplitude, and orifice size are discussed. Finally, two formulas are proposed for the estimation of non-dimensional pneumatic damping coefficient by regression analysis. The proposed formula proves to be a reliable method for practical application.*

1. 서 론

에너지자원의 고갈과 화석에너지에 의한 환경오염 문제로 인하여 무공해 대체에너지 자원을 개발하기 위한 노력이 여러 분야에서 진행되고 있다. 이러한 노력 중의 하나로 기상현상에 의하여 지속적으로 발생하는 파랑이 가진 에너지를 이용하기 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있다 (홍석원 외, 2001, 2003). 한국에서도 파력에너지를 이용하려는 연구개발이 이루어지고 있으며(Hong et al., 2004) 향후, 파력에너지 이용 기술개발이 활성화 될 것으로 예상된다.

파력발전 장치에 대한 여러 가지 방식이 제안되고 있으나 가장 실용성이 있는 방법은 진동 수주방식 (Oscillating Water Column: OWC)으로 이는 파랑의 에너지를 공기챔버 내의 공기의 운동에너지로 1차 변환하고 왕복공기 흐름 중에서 작동하는 공기터빈을 이용하여 2차 변환하는 방식이다. 이 방식에서는 흡수되는 에너지의 양은 1차적으로 공기챔버의 크기와 형상에 좌우되며 2차적으로는 공기터빈의 효율에 좌우된다.

본 논문에서는 OWC형 파력발전장치의 1차 에너지 흡수량을 좌우하는 공기챔버의 최적설계를 위하여 공기챔버 내의 공기가 터빈이 설치되어 있는 덕트를 지날 때 발생시키는 항력에 대한 실험적인 연구결과를 제시하고자 한다. Hong and Kim(2004)은 이 항력을 덕트를 통과하는 공기의 유속에 비해

하는 것으로 가정하여 부유식 파력발전 장치에 대한 동적 거동을 연구한 바 있다. 그는 3차원 BEM과 공기감쇠력 모델을 사용하여 부유식 공기챔버의 파랑 중 응답, 파랑 표류력 및 1차 에너지 흡수효율을 추정하였다. 그러나 공기감쇠력 모델에 대하여는 정확한 물리량을 사용하지 않고 여러 가지 감쇠력계수에 대한 계산을 수행하여 감쇠계수에 따른 영향만을 보여주었다.

본 논문에서는 이상화한 모형에 대한 실험적 연구를 통하여 공기감쇠력계수를 추정하고 이를 공기챔버의 형상과 덕트 면적비 및 유동주기의 함수로 근사시켜서 Hong and Kim(2004)이 개발한 해석법에 적용함으로써 이론적인 해석법의 결과를 향상시키고자 한다.

2. OWC형 공기챔버 모형실험

2.1 OWC형 공기챔버의 특성

OWC형 파력발전장치는 파력에너지를 이용하여 공기챔버 내의 내부수면의 상하운동을 유발하고 이에 따라 발생하는 공기챔버 내 공기의 왕복운동을 이용하여 터빈을 구동하는 장치이다. 이때 터빈은 효율향상을 위하여 공기챔버 상부에 공기챔버 단면적보다 적은 면적을 가지는 덕트에 통상 설치된다.

이를 개념적으로 도시하면 Fig. 1과 같으며 공기가 덕트를 왕복할 때 오리피스 효과에 의하여 공기챔버 내부와 공기챔버 외부사이에 압력차가 발생한다. 이 압력차는 덕트에서의 공기의 유속, 유동주파수, 내부수면의 상대운동 변위 등의 함수가 된다. 이때 공기챔버 내의 압력을 P 라 하면,

제1저자 최학선 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7510 hschoi@kriso.re.kr

$$P = P_a + P_c \quad (1)$$

로 쓸 수 있으며 여기서, P_a 는 대기압이고 P_c 는 시간에 따라 변동하는 압력성분이다. 그리고 공기챔버 내의 질량보존을 고려한 연속방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt}(\rho_c A_c h) = \rho_c Q \quad (2)$$

여기서, ρ_c 는 챔버내부의 공기밀도, A_c 는 챔버의 단면적, h 는 챔버 높이이고 Q 는 덕트를 통한 공기의 유량이다. 또한, 공기의 상태방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_a}\right)^\gamma = \frac{P_a + P_c}{P_a} \quad (3)$$

여기서, γ 는 정적비열이고 ρ_a 는 외부공기의 밀도이다. 식(3)을 시간에 대하여 미분하면

$$\dot{\rho}_c = \frac{1}{\gamma} \frac{\dot{P}_c}{P_a + P_c} \rho_c \quad (4)$$

가 되며 이식을 식(2)에 대입하여 정리하면 다음이 얻어진다.

$$\dot{P}_c A_c h + \gamma A_c (P_a + P_c) \dot{h} = \gamma (P_a + P_c) Q \quad (5)$$

이제 공기챔버의 상하운동을 z (*고정식 OWC의 경우는 0이 됨) 공기챔버 내 수면변위를 ζ 라 하면 h 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h = h_0 + z - \zeta \quad (6)$$

여기서, h_0 는 공기챔버의 평균 높이이다.

다음은 시간에 따라 변화하는 물리량을 다음과 같이 복소수로 표시하고,

$$\begin{aligned} z &= z^* e^{i\omega t} \\ \zeta &= \zeta^* e^{i\omega t} \\ P_c &= P_c^* e^{i\omega t} \\ Q &= Q^* e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (7)$$

식(5)에 대입하여 1차 항까지만 정리하면 다음이 얻어진다 (홍석원 외, 2001).

$$P_c^* = \frac{\gamma P_a}{i\omega A_c h_0} [Q^* - i\omega A_c (z^* - \zeta^*)] \quad (8)$$

따라서 Q 가 공기챔버 내 수면의 상승속도 $(\dot{z} - \dot{\zeta})$ 에 의한 체적 변화량인 $A_c(\dot{z} - \dot{\zeta})$ 와 같다고 가정하면 P_c^* 는 0이 된다.

그러나 실제로는 공기가 덕트를 통하여 유동할 때 발생하는 점성항력으로 인하여 Q 는 챔버 내 수면상승속도에 의한 체적 변화량과 시간차(위상차)를 가지게 되며 또한 작지만 존재하는 공기의 압축성으로 인하여 그 진폭도 다르게 된다.

그러므로 Q 의 특성을 정확하게 모델링 하는 것이 중요하나 이를 이론적으로 규명하는 것은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 실험적인 연구를 통하여 Hong(2004)이 도입한 공기감쇠력계수를 규명하고자 하였다. 즉, Q 를 모델링 하지 않고 바로 P_c 를 덕트 입구에서의 유속의 함수로 다음과 같이 정의하여 정리하여 보았다.

$$P_c = \beta V_d \quad (9)$$

여기서, β 는 공기감쇠력 계수, V_d 는 덕트에서의 평균 유속이다.

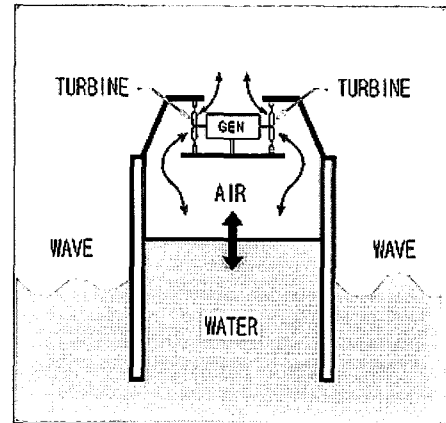


Fig. 1 : Configuration of OWC type generator

2.2 모형 및 계측항목

공기감쇠력계수 β 는 공기챔버의 형상, 덕트의 형상, 운동주파수, 운동 진폭 등의 함수가 되므로 이를 규명하기 위하여 단 순화된 공기챔버와 덕트의 모형을 설계하고 강제동요 장치에 의한 강제 동요 실험을 수행하였다.

먼저, 공기챔버는 내경 30cm, 두께 5mm의 원형 실린더로 선정하고 공기챔버의 높이는 30cm, 홀수는 15cm로 하였다. 공기 챔버의 하부는 개방되어 있으며 상부는 덮개를 설치하고 덮개 중앙에 오리피스를 설치하여 덕트의 역할을 대신하게 하였다.

오리피스는 직경 15mm, 20mm, 30mm 세 가지 종류로 하였으며 오리피스의 길이는 각각 직경의 5배로 하여 동일한 압력 차가 주어질 때 오리피스내의 최대 유속을 동일하게 하였다 (White,1974).

계측항목은 공기챔버의 상하운동 변위, 공기챔버 내부수면 변위, 공기챔버 내부의 압력, 오리피스에서의 공기의 유속, 공기 챔버에 작용하는 상하방향 힘으로 하였다. 상하운동 변위는

포텐쇼미터로, 내부수면 변위는 파고계로, 내부압력은 다이아프램식 압력계로, 공기유속은 hot-wire 유속계로, 힘은 1방향 load-cell 2개로 계측하였다. Fig. 2는 실험계측 시스템의 구성을 보여주며 Fig. 3은 계측된 계측신호의 예를 보여준다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 공기유속은 hot-wire로 계측하였기 때문에 유속의 방향을 알 수가 없어서 본 연구에서는 실험 결과의 1차 분석을 위하여 공기챔버 내의 압력이 음압이 되는 순간 공기가 챔버 안으로 유입되는 것으로 간주하여 이때의 공기유속을 음의 값으로 처리하였다.

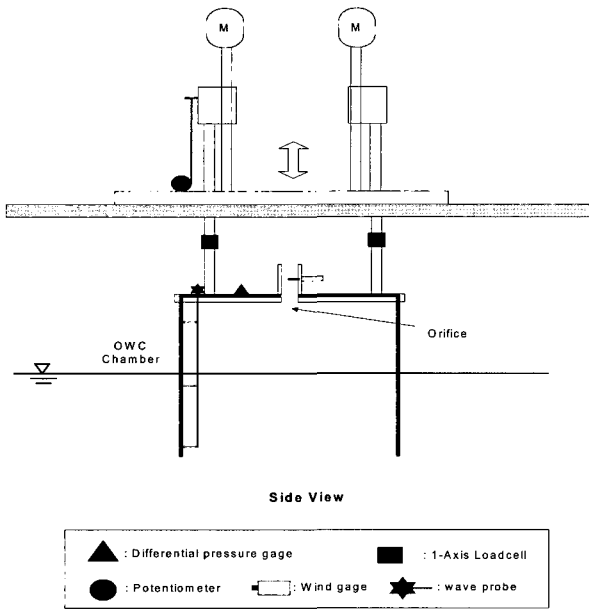


Fig. 2 Arrangement of measuring system

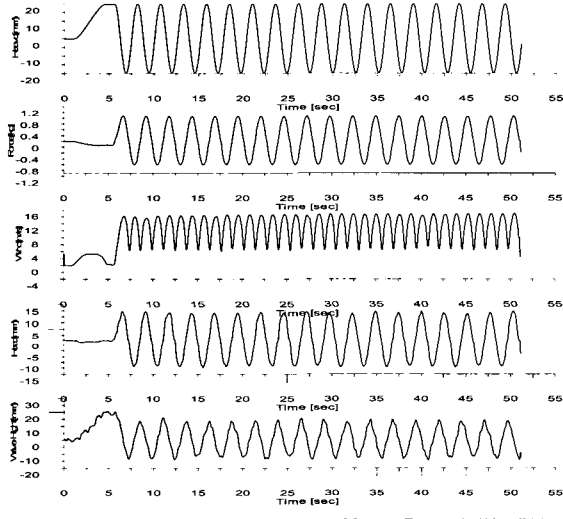


Fig. 3 Example of measured signal (f=0.4hz, Za=0.02m)

2.3 모형실험 조건

공기챔버의 형상, 상하운동 진폭, 상하운동 주파수 등이 미

치는 영향을 살펴보기 위하여 Table 1과 같이 강제동요 주파수는 0.1Hz로부터 0.9Hz까지, 강제동요 진폭은 1cm에서 2.5cm까지 변화시켜 보았다.

Table 1 Conditions of forced oscillation

Amplitude(cm)	Frequency(Hz)= $w/2\pi$
1.0	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9
1.5	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9
2.0	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9
2.5	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9

3. 공기감쇠력 계수

3.1 추정방법

강제동요운동이 정상상태에 도달한 상태에서의 계측자료를 활용하기 위하여 전체 실험시간의 1/3이 되는 시점으로부터 zero-up crossing 방법으로 상하운동의 1주기에 해당하는 계측자료를 사용하였다.

Fig. 4는 해석을 위하여 사용한 압력신호와 공기유속신호를 보여주며 여기서 공기유속의 부호는 공기압력의 부호를 따르도록 한 것이다. 식(9)의 관계로부터 매순간 공기감쇠계수가 결정되기 때문에 이를 각 실험조건을 대표하는 공기감쇠력 계수를 최소자승법(least square method)으로 다음과 같이 구하였다.

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n (V_j P_{cj})}{\sum_{j=1}^n (V_{dj} V_{dj})} \tag{10}$$

여기서, 첨자 j는 j 번째 계측신호를 의미하며 n은 전체 계측 개수이다.

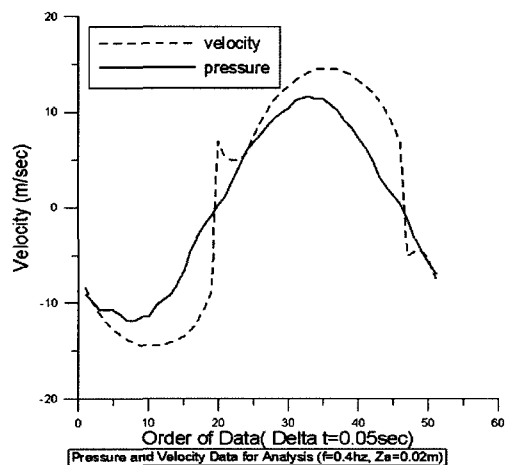


Fig. 4 : Data used for pneumatic damping estimation

3.2 해석결과 및 토론

공기감쇠력계수는 차원이 있으므로 이를 강제동요주파수와 강제동요 진폭으로 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$\beta = \beta / (\rho_a w z_a) \tag{11}$$

여기서, z_a 는 상하운동 진폭이며 ρ_a 는 공기밀도로 1.225kg/m^3 으로 하였다.

3.1.1 주파수의 영향

β 의 특성을 알아보기 위하여 먼저 강제동요 주파수에 대하여 정리한 결과를 Fig. 5 ~ Fig. 7에 수록하였다.

이로부터, 무차원 공기감쇠력계수는 주파수가 커지면 작아짐을 알 수 있으며, 저주파수 영역에서는 급격한 변화를 보이지만 고주파수 영역에서는 선형적으로 변화함을 보여준다. 선형적으로 변화하는 주파수 영역에서는 결국 공기감쇠력계수 자체는 주파수와 무관하게 된다. 즉, 고주파수 영역에서 감쇠력계수는 주파수와 무관하게 결정됨을 알 수 있다. 그러나 저주파수 영역에서는 큰 영향을 보이는 것을 알 수 있다.

이러한 주파수의 영향은 주파수의 역함수의 형태로 가정하여 볼 수도 있으며 Povov and Sankar(1995)가 변동유동 중에 오리피스 내부의 점성항력으로 인한 항력추정 시 사용한 해석적 표현인 다음의 함수로 생각하여 볼 수 있다.

$$f(w_n) = \frac{(4w_n - \sqrt{w_n})}{(2\sqrt{w_n} - 1)(4w_n - 2\sqrt{w_n} + 1)} \tag{12}$$

여기서,

$$w_n = \frac{wd^2}{32\nu} \tag{13}$$

이고, d 는 오리피스 직경이고 ν 는 공기의 동점성계수이다. 단, 식(12)은 아주 작은 주파수에 대하여는 맞지 않는 공식이며 w_n 이 0.25에서 무한대의 값을 주는 함수이다. 본 실험연구 범위에서는 w_n 이 0.3보다 크므로 이를 사용할 수 있다.

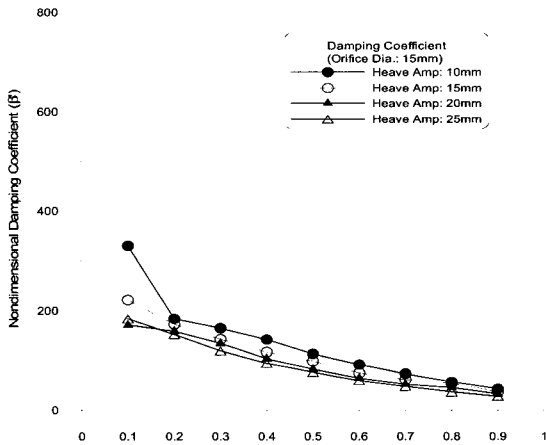


Fig. 5 β -freq. relation for orifice diameter=15 mm

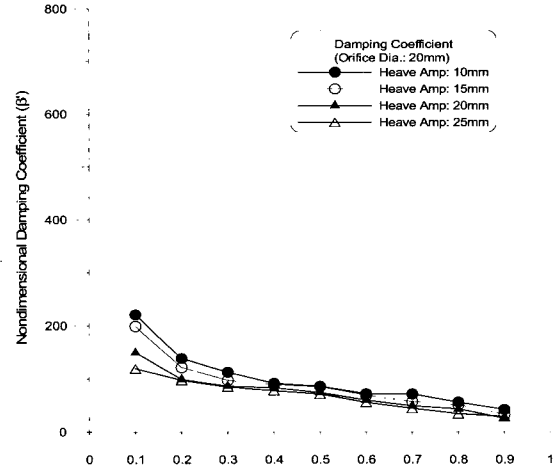


Fig. 6 β -freq. relation for orifice diameter=20 mm

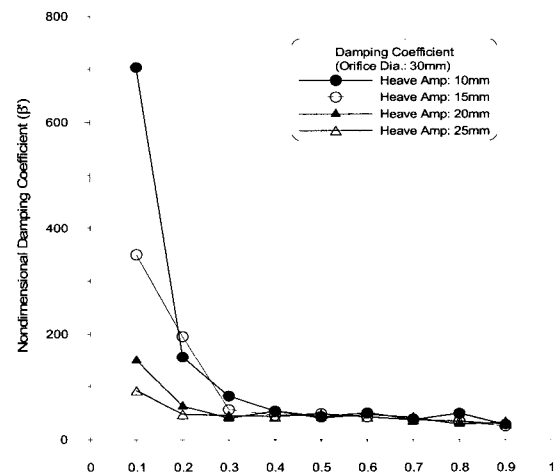


Fig. 7 β -freq. relation for orifice diameter=30 mm

Fig. 8은 식(12)을 도시한 것으로 $f(w_n)$ 은 본 연구실험 경향과 유사한 경향을 가지는 함수임을 알 수 있다.

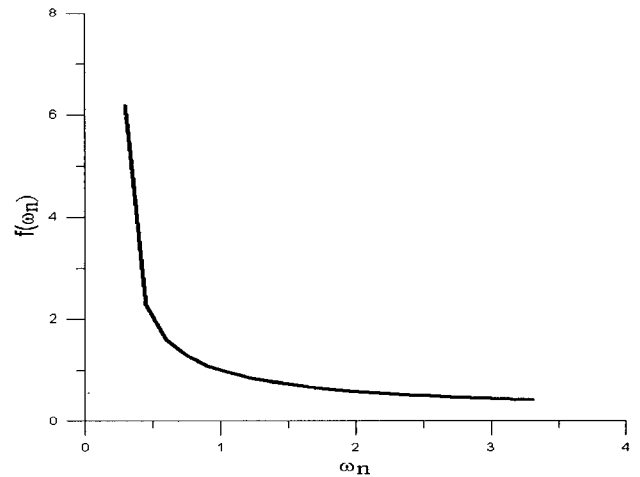


Fig. 8 Frequency effective function (Povov & Sankar)

3.1.2 운동진폭의 영향

다음으로 강제운동 진폭의 영향을 보기 위하여 Fig. 9 ~ Fig. 11에 운동진폭에 따른 무차원 공기감쇠력계수를 도시하였다.

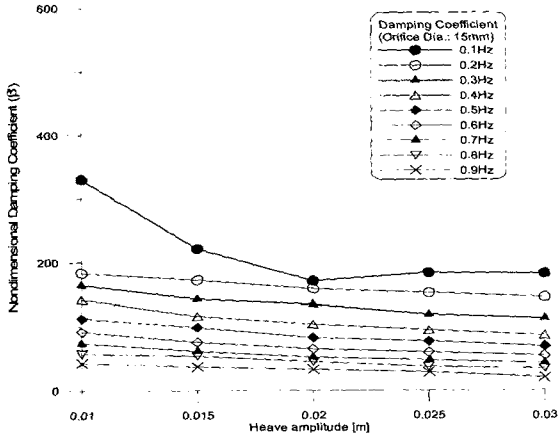


Fig. 9 β -amplitude relation for orifice diameter=15 mm

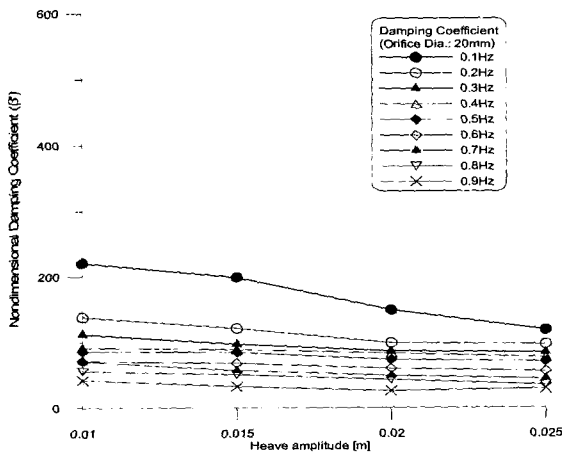


Fig. 10 β -amplitude relation for orifice diameter=20 mm

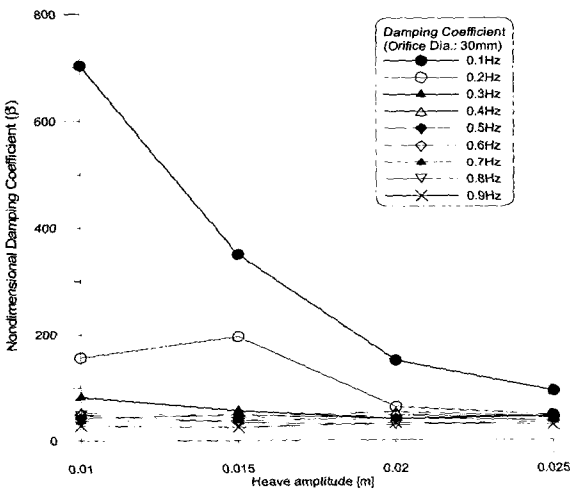


Fig. 11 β -amplitude relation for orifice diameter=30 mm

대체로 주파수가 0.1Hz, 0.2Hz인 저주파수의 경우(유속계측의 정도 감소)를 제외하고는 무차원 공기감쇠력계수가 운동진폭에 선형비례로 감소하는 것을 볼 수 있으나, 그 기울기는 매우 작음을 알 수 있다. 식(11)을 보면 이 기울기는 운동진폭의 제곱에 비례하는 비선형 항력에 기여하는 것임을 알 수 있다. 그리고 기울기가 음이므로 비선형 현상에 의해 공기감쇠력은 감소하게 됨을 알 수 있다.

결국, 공기감쇠력 β 는 운동진폭에 선형적으로 비례하며 운동진폭이 커지게 되면 비선형 현상에 의하여 그 값이 약간 작아지게 됨을 알 수 있다.

3.1.3 오리피스 직경의 영향

마지막으로 오리피스 직경의 영향을 알아보기 위하여 무차원 공기감쇠력계수를 오리피스 직경에 대하여 도시하여 Fig. 12 ~ Fig. 15에 제시하였다.

이로부터 오리피스의 직경의 영향도 주파수가 0.1Hz와 0.2Hz인 경우를 제외하면 대체로 선형적으로 감소하고, 기울기는 음이며 그 크기는 주파수가 커지면 감소함을 보여준다. 오리피스 직경이 커지면 오리피스를 통한 공기의 유속이 작아져서 공기감쇠력의 크기도 작아짐을 알 수 있다.

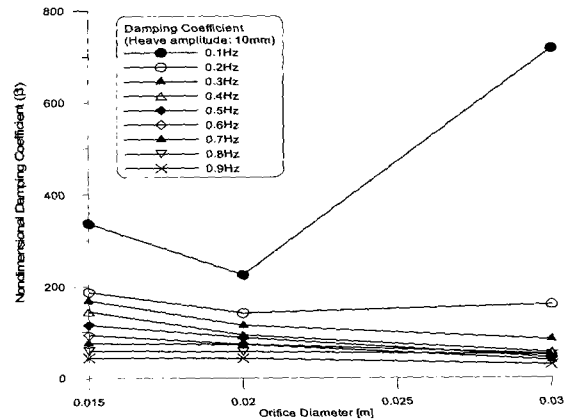


Fig. 12 β -orifice diameter relation for $z_a = 1.0$ cm

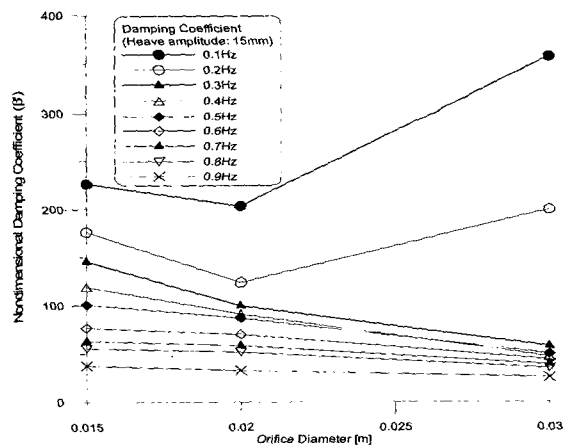


Fig. 13 β -orifice diameter relation for $z_a = 1.5$ cm

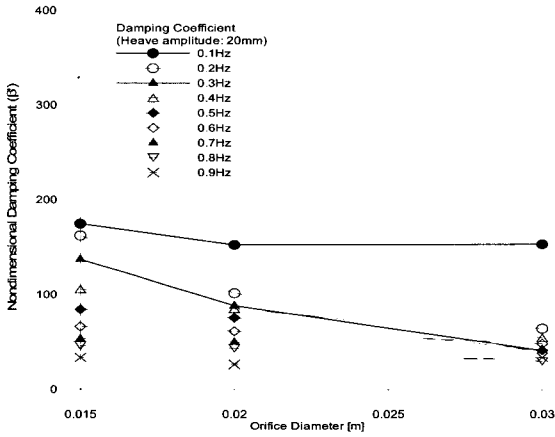


Fig. 14 β -orifice diameter relation for $z_a = 2.0$ cm

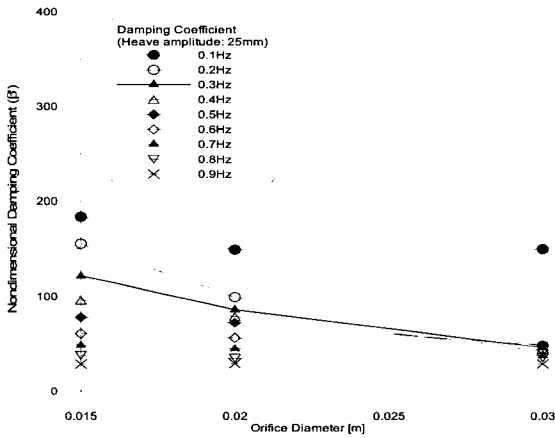


Fig. 15 β -orifice diameter relation for $z_a = 2.5$ cm

4. 공기감쇠력 추정 공식

지금까지 논의한 결과를 종합하여 공기감쇠력 계수를 추정할 수 있는 공식을 제안하기 위하여 무차원 공기감쇠계수가 주파수의 함수, 운동진폭의 함수 및 오리피스 직경의 함수의 조합으로 가정하여 실험을 수행한 모든 조건의 결과를 이용하여 최소 자승법으로 함수의 계수를 찾는 방법을 사용하였으며 함수의 형태는 다음의 2가지 경우를 고려하였다.

4.1 제1제안

무차원 공기감쇠계수를 다음과 같이 주파수함수와 운동진폭과 오리피스 직경의 선형함수의 곱으로 가정한 경우를 가정한다.

$$\beta = \left(\frac{c_1}{w} + c_2 + c_3 w' \right) (k_1 + k_2 z'_a + k_3 (d/D)^2) \quad (14)$$

여기서, $w' = w\sqrt{D/g}$ 로 무차원 원진동수이고 $z'_a = z_a/D$ 로 무차원 운동 진폭이며 D 는 공기챔버의 직경이다.

식(14)을 선형적인 방법으로 regression 할 수 없으므로 이를

전개한 형태인 다음 식에 대한 regression을 실시하였다.

$$\beta = a_1 + \frac{a_2}{w} + a_3 w' + a_4 z'_a + a_5 (d/D)^2 + a_6 \frac{z'_a}{w} + a_7 w' z'_a + a_8 \left(\frac{1}{w} \right) (d/D)^2 + a_9 w' (d/D)^2 \quad (15)$$

4.2 제2제안

2번째 방법은 Povov and Sankar(1995)가 사용한 주파수 영향함수 $f(w_n)$ 을 사용하는 것으로 다음과 같이 가정하여 regression을 수행하였다.

$$\beta = f(w_n) (k_1 + k_2 z'_a + k_3 (d/D)^2) \quad (16)$$

4.3 공기감쇠력계수 추정 결과 비교

주파수 0.1 Hz, 및 0.2Hz에 대한 실험 자료의 신뢰성이 낮으므로 이를 제외한 나머지 실험결과를 이용하여 위에서 제안한 2가지 방법에 대한 regression 해석을 최소자승법을 사용하여 수행하였으며 그 결과는 Table 2와 Table 3과 같다.

Table 2 Regression coefficient by 1st proposal

a1= 132	a4=-197	a7=68.5
a2= 332	a5=-4260	a8=-2868
a3=-115	a6=-149	a9=6738

Table 3 Regression coefficient by 2nd proposal

k1= 134	k2= -662	k3= 8120
---------	----------	----------

이와 같이 얻어진 공식의 정도를 비교하기 위하여 $d = 0.015m$, $D=0.3m$ 이고 $z_a = 0.02m$ 인 경우에 운동주파수에 따른 무차원 공기감쇠력 계수를 Table 4에 비교하여 보았다.

대체로 9개 파라미터를 사용한 첫 번째 공식은 전 주파수 영역에 걸쳐 좋은 일치치를 보이고 있음을 알 수 있어 이를 사용하면 무차원 공기감쇠력계수를 쉽게 추정할 수 있을 것이다.

그러나 첫 번째 공식은 복잡한 형태로 주어지는 문제점이 있다.

2번째 공식의 결과는 아주 작은 주파수인 0.1Hz에서는 실제 값보다 상당히 큰 값을 보이나, 주파수가 0.2Hz보다 커지는 영역에서는 대체로 일치하는 결과를 줌을 알 수 있다.

2번째 공식의 주파수 영향 함수는 식 (13)의 w_n 에 의하여 결정되며 따라서, 모형보다 길이 λ 배인 실제 파력발전 장치의 경우를 생각하면 w 는 $1/\sqrt{\lambda}$ 로 작아지는 대신 d 는 λ 배로 커지기 때문에 w_n 은 $\lambda^{1.5}$ 으로 커지게 되어 실험연구를 통하여 도출한 2번째 공식을 실제 파력발전 장치의 해석에 사용하여도 좋을 것이다.

Table 4 Comparison of non-dimensional pneumatic damping

주파수(Hz)	무차원 공기감쇠력계수 β		
	original	1st proposal	2nd proposal
0.1	171	244	539
0.2	159	161	166
0.3	134	126	115
0.4	104	104	90.6
0.5	82.5	86.1	76.2
0.6	65.0	70.9	66.5
0.7	52.3	57.1	59.4
0.8	45.1	44.2	54.0
0.9	32.8	31.9	49.7

5. 결 론

본 논문에서는 강제동요 모형시험을 통하여 공기챔버와 공기덕트를 가지는 파력발전 장치의 해석에 필요한 공기감쇠력 계수에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과를 정리하여 공기감쇠력계수를 추정하는 산식을 제안 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 고주파수 영역에서 공기감쇠력은 주파수의 영향을 크게 받지 않는다.
- (2) 공기감쇠력은 운동진폭에 비례하는 선형항과 운동진폭의 제곱에 비례하는 음의 비선형항의 합으로 표현된다.
- (3) 공기감쇠력은 오리피스 직경에 비례하는 선형항과 오리피스 직경의 제곱에 비례하는 음의 비선형항의 합으로 표현된다.
- (4) 무차원 공기감쇠력을 9개의 변수로 추정하는 추정산식이 제안되었으며 비교결과 매우 잘 일치하는 결과를 주고 있다.
- (5) 무차원 공기감쇠력을 Povov and Sankar가 제안한 주파수 영향함수를 도입하여 3개의 변수로 추정하는 추정산식이 제안 되었으며, 이 산식은 극저주파수 영역을 제외하면 비교적 잘 일치하는 결과를 주어 실제 파력발전 장치의 해석에 큰 무리 없이 사용할 수 있다.

한편, 본 연구의 실험결과를 활용하여 다음과 같은 향후 연구가 필요하다.

- (1) 공기챔버의 압력변화와 공기챔버 내부수면변위와의 관계를 규명하여 공기덕트를 지나는 유량의 크기와 위상차의 특성을 파악한다.
- (2) 부유체의 운동해석 기법과 연계하여 공기챔버 내 압력변화에 의하여 유기되는 조파저항 성분, 부가질량 성분을 연구하고, 본 연구에서 수행한 공기감쇠력 모델을 상세히 규명한다.

후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원한 “파력에너지 실용화 기술개발(1)” 연구로 수행된 연구결과와 일부이며, 본 연구결과와 해석을 위하여 많은 도움을 준 해양시스템안전연구소의 홍사영 박사에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- 홍석원 외 (2001). 해양에너지 이용 파력발전(60kW) 장치개발 IV, 전력연구원 보고서 (TR.93GT17.T2001-579).
- 홍석원 외 (2003). 한·인도 해양에너지 개발 공동연구, 한국해양연구원 연구보고서 (UCM00470-2471).
- Hong, S.W. and Kim, J.H. (2004). “Experimental Study of a Compliant Mooring System for a Floating OWC Device of Offshore Catenary Moorings”, Proc. of Int. Society of Offshore and Polar Engineers, Vol 1, pp 225-231
- 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 31, No 2, pp. 139-164
- Povov, G. and Sankar, S. (1995). “Modelling and Analysis of Non-linear Orifice Type Damping in Vibration Isolators”, J. of Sound and Vibration, Vol 183, No 5, pp 751-764.
- White, F.M. (1974). Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, Inc., New York.

2004년 6월 15일 원고 접수

2004년 7월 29일 최종 수정본 채택