

부유식 OWC 파력발전 챔버의 파 표류력해석

홍도천*·홍사영*·홍석원*

Mean Drift Force Acting on a Floating OWC Wave Power Device

Do-Chun HONG* · Sa-Young HONG* and Seok-Won HONG*

Key Words : OWC(진동수주), Wave Power(파력), Free surface oscillating pressure patch(자유표면 변동압력면), Matched Green Integral Equation(정합 그린 적분방정식), Time-Mean Drift Force(시간평균표류력)

Abstract

The drift force acting on a floating OWC chamber in waves is studied taking account of fluctuating air pressure in the air chamber. A velocity potential in the water due to the free surface oscillating pressure patch is added to the conventional radiation-diffraction potential problem. The potential problem inside the chamber is formulated by making use of the Green integral equation associated with the Rankine Green function while the outer problem with the Kelvin Green function. The drift forces as well as the chamber motions are calculated taking account of the air pressure in the chamber.

1. 서론

파 중에 위치한 구조물 내부의 진동수주(OWC)에 의한 파 에너지 흡수 연구를 위하여 진동수주 상부에 위치한 공기실의 기압과 내부 자유표면 유동을 연계시킨 자유표면 변동압력면이론이 개발된 바 있다[1][2]. 파중 계류된 부유체에 작용하는 시간평균 표류력은 계류시스템 설계에 필수적인 바 접수면 압력 직접적분법으로 구할 수 있다[3][4][5]. 본 연구에서는 3차원 부유식 구조물 내부에 OWC가 설치된 경우, 공기실 압력을 고려한 부유체 운동 및 표류력 추정을 위한 해석방법을 다루었고 이에 의한 수치시험 결과도 소개하였다[6][7].

2. 문제의 정식화

유체는 비 점성, 비 압축성이고 자유표면 F 와 부유체의 접수면 S 그리고 무한수심 사이의 영역을 점하며 여기에 중력이 작용하고 있다. (x, y) 평면을 정수면과 일치시킨 오른손 직각좌표계 (x, y, z) 에서 원점 O 가 평균위치에 있는 부유체의 수선면에 있고 z 축은 연직상방을 가리킨다. 유동을 비 회전이라 하면 유속은 Laplace방정식을 만족시키는 속도포텐셜로부터 구할 수 있다. 속도포텐셜을 $\Phi = Re\{\Psi e^{-i\omega t}\}$ 로 표시할 때 ψ_0 로 정의되는 입사파는 다음과 같다.

$$\psi_0 = -\frac{a_0 g}{\omega} e^{k_0[z + i(x \cos \beta + y \sin \beta)]} \quad (1)$$

위에서 a_0 는 $O(\epsilon)$ 인 미소진폭, $k_0 = \omega^2/g$ 는 파수이고 β 는 파의 입사각이다.

부유체는 입사파에 의하여 기진되어 원 진동수 ω 로 $O(\epsilon)$ 인 미소진폭 단순조화운동을 한다. S 상에서 유체영역으로 향한 법선 벡터를 \vec{n} , 평균위치에서의 이들을 S_0 , \vec{n}_0 라하고 S_0 와 평면 $z=0$ 가 만나는 선을 평균위치에 있는 부유체의 흡수선 W 라 한다. 부유체의 6자유도 운동은 $a_j = Re\{a_j e^{-i\omega t}\}$, $j=1, \dots, 6$ 로 표시된다.

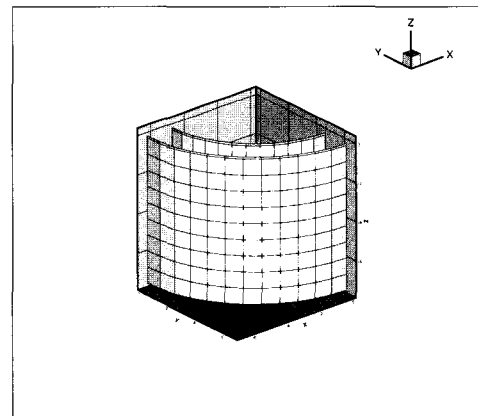


Fig. 1 OWC chamber configuration
(1/4 is discretized)

*한국해양연구원, KRISO, 해양개발시스템연구본부
dchong@kriso.re.kr sayhong@kriso.re.kr, swhong@kriso.re.kr

유동의 전체 포텐셜을 $\Psi = \phi_0 + \Psi_7 + \Psi_R$ 라 할 때 산란파 Ψ_7 및 방사파 Ψ_R 을 구하는 방사-산란과 문제는 잘 알려져있다. 그러나 원형 굴뚝형 부유체로서 증앙에 과력흡수용 공기실이 있고 굴뚝 둘레에 부력실이 있는 경우에는 공기실 상부 덕트를 통과하는 기류의 압력감소를 공기실 내부 자유표면 변동압력면으로 표현하여 기존의 방사-산란과 포텐셜에 더하여 이에 의한 속도포텐셜도 구하여야 한다.

자유표면 F 의 평균위치 수평면을 $F_0 = F_0^e \cup F_0^i$ 라 하고 F_0^e 를 외부, F_0^i 를 내부 수평면으로 정한다. 외부 대기압을 0이라 하고 덕트를 통과하는 수직 상방향 기류의 유속을 U_d 라 할 때 덕트의 수평 단면 S_d 를 기압 증감의 불연속면으로 가정하면 공기실 내부 기압 p_C 와 U_d 를 다음과 같이 관계지을 수 있다.

$$0 - p_C = -\delta U_d \quad (2)$$

여기서 δ 는 실험에 의하여 결정되는 인자이다.

공기실 내부 공기의 압축성이 무시할 정도이고 자유표면 운동변위가 미소량일 경우 동력학적 선형 자유표면조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-\rho \left(\frac{\partial \phi^C}{\partial t} + g \zeta^C \right) = p_C \quad \text{on } F_0^i \quad (3)$$

여기서 ϕ^C 는 공기실 내부기압에 기인한 자유표면 변동압력면에 의하여 수중에 유기된 속도포텐셜이며 ζ^C 는 ϕ^C 에 기인한 자유표면의 수직방향 변위이다.

U_d 는 내부 자유표면을 통과하는 물의 유량과 덕트를 통과하는 공기의 유량이 같으므로 다음 식으로 표시된다.

$$U_d = \frac{1}{A_d} \int_{S_C} [\xi - \vec{D} \cdot \vec{e}_3] ds \quad (4)$$

위에서 A_d 는 S_d 의 단면적이고 \vec{D} 는 평균위치가 F_0^i 와 일치하는 내부 수평면 S_C 의 운동변위이다. ξ 는 전체 포텐셜 ϕ 에 기인한 자유표면의 수직방향 변위로서 ϕ 에 대한 기하학적 선형 자유표면조건으로부터 구할 수 있다.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} + \xi = 0 \quad \text{on } F_0^i \quad (5)$$

공기실 덕트에서는 입사파, 산란파와 아울러 부유체의 상하동요가 내부 체적의 변화를 주므로 이에 의한 기류가 발생한다. 여기서 Ψ_7 및 Ψ_R 을 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\Psi_7 = \phi_7 + C_7 \phi^C \quad (6)$$

$$\Psi_R = -i\omega \left\{ \sum_{k=1}^6 a_k \phi_k + a_3 C_3 \phi^C \right\} \quad (7)$$

위에서 $\phi_k (k=1, \dots, 7)$ 는 기존의 방사-산란과 포텐셜이며 무한원방 방사조건을 만족시키고 자유표면 F_0 및 접수면 S_0 에서 각각 선형자유표면 및 접수면 경계조건을 만족시킨다.

$\phi^C = \text{Re} \{ (C_7 - i\omega a_3 C_3) \phi^C e^{-i\omega t} \}$ 로 놓고 위에 나온 관계식들을 (3)에 대입, 정리하면 다음과 같은 ϕ^C 의 내부자유표면 경계조건

$$(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z}) \phi^C = 1 \quad \text{on } F_0^i \quad (8)$$

및 $C_k (k=3, 7)$ 가 구하여 진다.

$$C_3 = \frac{\gamma(q_3 - A_C/A_d)}{(1 - \gamma Q)} \quad (9)$$

$$C_7 = \frac{\gamma(q_0 + q_7)}{(1 - \gamma Q)} \quad (10)$$

위에서 A_C 는 S_C 의 단면적이고 $\gamma = \frac{i\omega \delta}{\rho g}$ 는 무차원량이며 q_k 및 Q 는 각각 ϕ_k 및 ϕ^C 에 기인한 유동이 S_d 를 통과하는 평균속도이다. ϕ^C 도 기존의 방사-산란과 포텐셜과 같이 무한원방 방사조건을 만족시키며 외부 자유표면 경계조건은 ϕ_k 와 동일하다.

$$(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z}) \phi^C = 0 \quad \text{on } F_0^e \quad (11)$$

접수면에서는 다음과 같은 경계조건을 만족시킨다.

$$\frac{\partial \phi^C}{\partial n_0} = 0 \quad \text{on } S_0 \quad (12)$$

3. 적분방정식에 의한 포텐셜 해법

부유식 OWC 하부에 경계면 S_C 를 두어 이 안쪽을 내부영역 D^i , 바깥쪽을 외부영역 D^e 라 한다. 기존의 방사-산란과 포텐셜에 대한 적분방정식은 참고문헌과 같다[7].

외부영역 D^e 에 걸쳐 포텐셜 및 Kelvin-type Green함수 G 에 Green정리를 적용하고 경계조건을 대입, 정리하면 일반적인 Green적분방정식을 얻는다. 한편 Rankine Green함수 G_0 에 Green정리를 적용하고 경계조건들을 대입, 정리하면 (13)식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
& \frac{\psi^C(P)}{2} - \int \int_{S \cup S_c} \psi^C(M) \\
& \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} ds \\
& - \int \int_{F_0} [\psi^C(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} \\
& - k_0 \psi^C(M) G_o(P, M)] ds \\
& + \int \int_{S_c} \frac{\partial \psi^C(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) ds \\
& = - \int \int_{F_0} G_o(P, M) ds \quad (13) \\
& P \text{ on } S^i \cup S_c \cup F_0^i
\end{aligned}$$

D^e 와 D^i 간의 경계면 S_c 에서의 정합조건은 다음과 같다.

$$\psi^C(P^i) = \psi^C(P^e) \quad P \text{ on } S_c \quad (14)$$

$$\frac{\partial \psi^C(P^i)}{\partial n_p} = \frac{\partial \psi^C(P^e)}{\partial n_p} \quad P \text{ on } S_c \quad (15)$$

적분 방정식 (13)을 외부영역 Green적분방정식과 연립하여 정합조건 (14),(15)를 적용하고 이산화하면 내, 외부영역이 연성된 선형대수방정식으로 변환되어 풀릴 수 있다.

4. 운동방정식

구조물의 접수면에 작용하는 변동 수압은 베르누이 방정식으로 구하며 이로부터 입사파 및 산란파 포텐셜에 기인한 기진력, 방사파 포텐셜에 기인한 부가질량 및 파 감쇠력 등이 구하여진다. OWC 구조물의 경우에는 (2)식에 보인 바와 같이 공기실의 변동 기압 $p_c = \delta \times U_d$ 이 공기실 내부면에 작용하므로

$$U_d = q_0 + q_7 + C_7 Q - i\omega a_3 (q_3 + C_3 Q) \quad (16)$$

로 표시하면 다음 힘이 추가된다.

$$F_3^a = -\rho g \gamma a_3 N_{33} + E_3 \quad (17)$$

$$N_{33} = (q_3 + C_3 Q) A_C \quad (18)$$

$$E_3 = \delta (q_0 + q_7 + C_7 Q) A_C \quad (19)$$

한편 ϕ^C 에 의한 변동 수압은

$$p = i\rho\omega (-i\omega a_3 C_3 + C_7) \phi^C \quad (20)$$

이를 접수면에 걸쳐 적분하여 정리하면 결국 다음과 같은

힘 및 모멘트를 얻게된다.

$$L_j = \sum_{k=1}^6 H_{jk} a_k + K_j, \quad j=1, \dots, 6 \quad (21)$$

위에서 0이 아닌 항은 참고문헌과 같다[7].

통상적인 부유구조물에 작용하는 힘 및 모멘트의 평형 조건식에 OWC 공기실에 기인한 외력을 더하여 정리하면 다음과 같은 주파수 영역 운동방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^6 [-\omega^2 (mI_{jk} + \rho \Delta M_{jk}) - i\rho \Delta \omega^2 B_{jk} \\
& + \rho g L^2 R_{jk} + N_{jk}^C] a_j \\
& = \rho a_0 \omega^2 L^3 F_j + F_j^C, \quad j=1, \dots, 6 \quad (22)
\end{aligned}$$

위에서 $m, \Delta, I_{jk}, R_{jk}, M_{jk}, B_{jk}$ 및 F_j 는 각각 부유 구조물의 질량, 배수용적, 관성계수, 복원력계수, 부가질량계수, 파 감쇠계수 및 파 기진력계수로서 잘 알려져 있으며 L 은 구조물의 특성길이이고 0이 아닌 N_{jk}^C 및 F_j^C 는 참고문헌과 같다[7].

5. 시간평균 표류력

파 중에 계류된 부유 구조물에 작용하는 시간평균 표류력은 참고문헌에 의하면 다음 식의 파 주기에 대한 시간평균으로 구하여 진다[5].

$$\begin{aligned}
\vec{F}_d = & -\frac{\rho g}{2} \int_W \xi_R^2 \vec{n}_0 dl + \rho \int \int_{S_0} \left[\frac{1}{2} v^2 \right. \\
& + \vec{A} \cdot \nabla \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \left. \right] \vec{n}_0 ds + \vec{\theta} \times \vec{F}_{inertia} \\
& - \rho g (\theta_1 \theta_3 W_x + \theta_2 \theta_3 W_y) \vec{e}_3 \quad (23)
\end{aligned}$$

위 식의 세째 항에는 공기실 내부 변동 기압 이 공기실 내부면 S_0^C 에 작용하여 발생한 다음과 같은 힘도 포함된다.

$$\vec{F}_d^C = - \int_{S_0^C} p_c (\vec{n}_0 + \vec{\theta} \times \vec{n}_0) ds \quad (24)$$

6. 수치 시험

Fig. 1에 보인 바와 같은 부유식 OWC 구조물을 수치모델로 취하였으며 이 공기실의 주요제원은 참고문헌과 같다[7]. 파 입사각 90인 경우의 계산이 수행되었다.

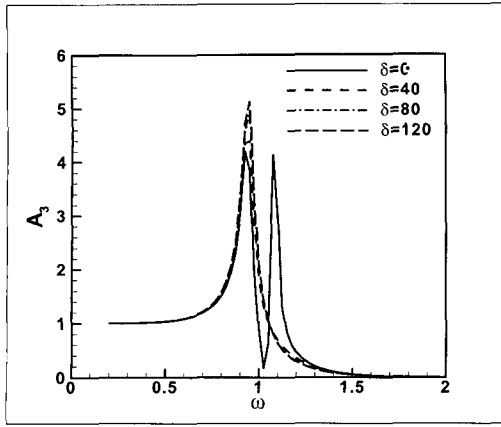


Fig. 2 Heave amplitude ratio

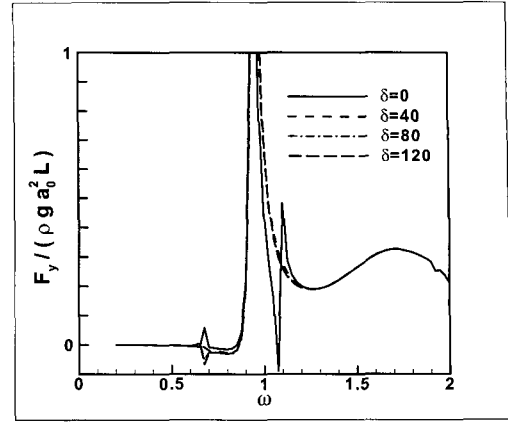


Fig. 4 Time-mean horizontal drift force

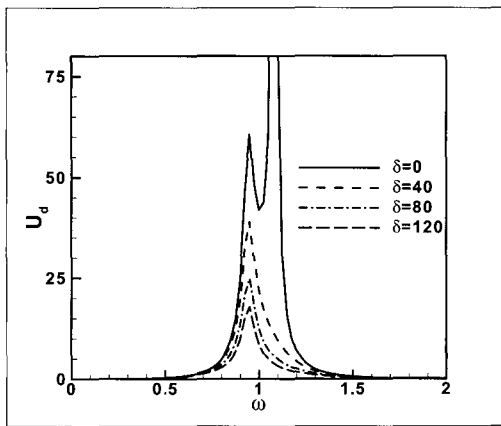


Fig. 3 Velocity of air flow in the duct

공기실 덕트 파라미터 δ 는 0, 40, 80, 120의 4개 값을 주었다. 복소 진폭비 $A_3 = |a_3/a_0|$ 가 Fig.2에 표시되었다. 공기실의 δ 값이 증가함에 따라 상하동요 응답이 급격히 감소함을 알 수 있다. Fig. 3에 $a_0\omega$ 로 무차원화 된 덕트 통과 기류속도를 표시하였다. Fig.4에 무차원 시간평균 표류력을 표시하였다. 특성길이 L 은 13m이다. 모든 결과에서 내부유동 및 부유체 동요의 공진에 기인한 2개의 극대 값을 볼 수 있다.

4. 결론

선형과 이론에 근거한 부유체 운동해석기법에 자유표면 변동압력면 이론을 도입하여 부유식 OWC 구조물의 파중 운동 및 시간평균 표류력 해석기법을 개발하였다. 이 결과는 anti-rolling 및 SES 운동제어 등에 활용될 수 있다.

후기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 한·인도 해양에너지 개발 공동연구 과제 결과의 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] Evans, D. V., Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions, *J. of Fluid Mech.* Vol 114(1982) pp. 481-499
- [2] Falnes, J. and McIver, P., Surface wave interactions with systems of oscillating bodies and pressure distributions, *Applied Ocean Research*, Vol. 7, No. 4(1985) pp 225-234
- [3] Pinkster, J. A. and van Oortmerssen, G., "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(1977)
- [4] Ogilvie, T. F., Second-order hydrodynamic effects on ocean platforms, *Proceedings of the International Workshop on Ship and Platform Motions*, U.C. Berkeley (1983) pp 205~265.
- [5] 홍도천, 부유식 해양구조물에 작용하는 시간평균 파 표류력에 관한 고찰, *한국해양공학회지*, 제16권 제3호(2002) pp 8-18
- [6] Hong, S. Y., Hong, S. W., Kim, J. W., Um, Y. C. and Hong, D. C., Development of an electrical power plant from ocean wave energy, *2nd European Wave Power Conference*, Lisbon(1995) pp 297-304
- [7] 홍도천, 부유식 OWC 챔버의 파중 운동해석, *한국해양공학회지*, 제16권 제3호(2002) pp 19-27