

다중 OWC 챔버 구조물의 운동해석

홍도천* · 홍사영 · 홍석원
한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

A Study on the Multiple OWC Chamber Motion in Waves

DO-CHUN HONG* · SA-YOUNG HONG and SEOK-WON HONG
Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon 305-343, Korea

KEY WORDS: Multiple OWC(다중 진동수주), Coupled Free Surface Oscillating Pressure Patches(연성 자유표면 변동압력면), Hybrid Green Integral Equation(정합 그린 적분방정식), Floating Body Motion in Waves(파 중 부유체 운동)

ABSTRACT: The motion of a floating body with multiple OWC chambers in waves is studied taking account of fluctuating air pressure in the chambers. The atmospheric pressure drop in one chamber is interrelated with the drop in the other chamber. Velocity potential in the water due to the free surface oscillating pressure patches is calculated by making use of the hybrid Green integral equation. The chamber motion in the frequency domain is calculated for various values of parameters related to the atmospheric pressure drop in the multiple chambers.

1. 서 론

파력흡수용 및 운동감쇠용 OWC 챔버가 각각 설치된 3차원 부유체의 운동해석에 대한 연구논문이 자유표면 변동압력면이론을 사용하여 발표된 바 있다(홍도천외, 2002). 본 연구에서는 앞서 무시되었던 다중 OWC 챔버간의 연성효과를 고려한 운동해석기법에 대하여 소개하였다.

2. 문제의 정식화

유체는 비 점성, 비 압축성이고 자유표면 F 와 부유체의 접수면 S 그리고 무한수심 사이의 구간 V 를 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. 크기가 $O(\epsilon)$ 인 미소진폭 a_0 , 원 진동수 ω 를 가지며 속도포텐셜 ϕ_0 로 정의되는 입사파(Airy wave)가 무한 원방에서 온다.

$$\phi_0 = \text{Re}\{\phi_0 e^{-i\omega t}\} \quad (1)$$

$$\phi_0 = -\frac{a_0 g}{\omega} e^{k_0[z + i(x \cos \beta + y \sin \beta)]} \quad (2)$$

여기서 g 는 중력가속도, $k_0 = \omega^2/g$ 는 파수이고 β 는 x 축으로부터 켄 파의 입사각이다.

부유체는 입사파에 의하여 기진되어 원 진동수 ω 로 $O(\epsilon)$ 인 미소진폭 단순조화운동을 한다. S 상에서 V 를 향한 법선 벡터를 \vec{n} , 평균위치에서의 S 및 \vec{n} 을 S_0, \vec{n}_0 라하고 S_0 와 평면 $z=0$ 가 만나는 선을 평균위치에 있는 부유체의 홀수선(Waterline) W 라 한다. 한편 부유체의 6자유도운동은 다음과 같이 표시된다.

$$a_j = \text{Re}\{ a_j e^{-i\omega t}\}, \quad j=1, \dots, 6 \quad (3)$$

입사파 포텐셜 ϕ_0 는 주어졌으므로 부유체의 존재에 기인한 산란파 Ψ_1 및 부유체의 6자유도 운동에 의한 방사파 Ψ_R 을 구하는 것이 문제의 핵심이 되며 비정상 유동의 전체 포텐셜 Ψ 는 이들의 합이다.

$$\Psi = \phi_0 + \Psi_1 + \Psi_R \quad (4)$$

제1저자 홍도천 연락처: 대전시 유성구 장동 171
042-868-7588 dchong@kriso.re.kr

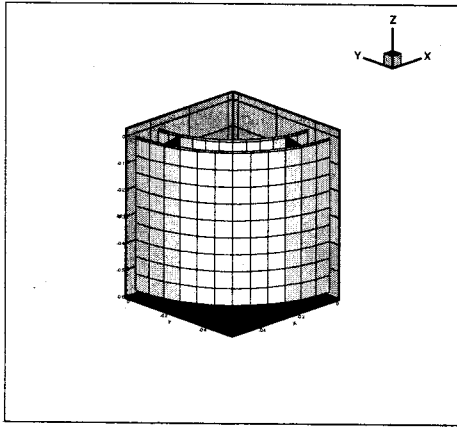


Fig. 1 OWC chamber configuration
(1/4 is discretized)

Fig.1에 보인 바와 같은 다중 부유식 OWC 구조물인 경우에는 통상적인 부유 구조물에 대한 산란파 및 방사파 포텐셜외에 각 챔버내부의 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)에 기인한 속도포텐셜을 도입하여야 한다. 그림에는 접수면만 표시되었으나 부력실이 분할된 것이 보이며 수직면 ($y0z$) 및 ($z0x$)가 대칭면이고 주 챔버와 횡요 및 종요 감쇠챔버의 상부 공기실에는 각각 덕트가 있어 이곳을 통과하는 기류의 압력감소를 초래한다.

이론의 전개를 위하여 자유표면 F 의 평균위치인 수평면 $z=0$ 을 F_0 라하고 이를 $F_0 = F_0^e \cup F_0^i$ 와 같이 구분한다. 여기서 F_0^e 는 부유체 외부의 수평면이고 $F_0^i = \sum_{k=1}^5 F_0^k$ 는 주 챔버와 좌우횡요 및 전후종요 감쇠챔버 내부수평면의 합이다.

부유식 OWC 챔버에 의하여 교란된 유동을 나타내는 포텐셜 Ψ_R 및 Ψ_7 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_7 = \psi_7 + \sum_{k=1}^5 C_k^i \psi_k^i \quad (5)$$

$$\Psi_R = -i\omega \left\{ \sum_{k=1}^6 a_k \psi_k + \sum_{k=1}^5 \left[a_k \sum_{l=1}^5 C_k^l \psi_k^l \right] \right\} \quad (6)$$

여기서 $\psi_k (k=1, \dots, 7)$ 는 기존의 방사-산란파 포텐셜이며 무한 원방 방사조건을 만족시키고 자유표면 F_0 및 접수면 S_0 에서의 경계조건은 참고문헌과 같다(홍도천외, 1987).

한편 ψ_k^l 은 챔버 내부 자유표면 변동 압력면 사이의 상호작용을 고려하여 단일 챔버의 경우와 유사한 논리를 전개하여 얻어지는 성분포텐셜으로서 운동모드를 아래첨자 ($k=1, 2, 3, 4, 5, 7$), 주 챔버와 좌우횡요 및 전후종요 감쇠챔버를 각각 윗첨자 ($l=1, 2, 3, 4, 5$)로 가지는 챔버 내부자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)에 기인한 속도포텐셜이다. 따라서 ψ_k^l 은 구조물의 k-mode 동요에 의하여 생성된 챔버 l 의 변동압력면에 기인한 속도포텐셜을 가리킨다.

각 챔버 l 에서 외부 대기압이 0일때 덕트를 통과하는 수직 상방향 기류속도 U_d^l 와 챔버 내부압력 p^l 는 다음과 같은 관계에 있다.

$$-\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta \right) = \delta^l \times U_d^l \quad \text{on } F_0^l \quad (7)$$

위에서 $U_d = \text{Re} \{ U_d e^{-i\omega t} \}$ 로 표시하면

$$U_d^l = \frac{1}{A_d^l} \int_{S_c^l} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} (\psi_0 + \Psi_7 + \Psi_R) - i\omega [-a_3 - a_4 y + a_5 x] \right\} ds \quad (8)$$

(7)식에 (8)를 대입하고 운동모드 및 산란파의 각 성분으로 분해하여 정리하면 변동압력면에 기인한 속도포텐셜 $\psi_k^l (k=1, 2, 3, 4, 5, 7 \text{ and } l=1, 2, 3, 4, 5)$ 에 대하여 다음과 같은 자유표면 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\left(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z} \right) \psi_k^l = \begin{cases} 0 & \text{on } F_0^m, \text{ for } l \neq m \\ 1 & \text{on } F_0^m, \text{ for } l = m \end{cases} \quad (9)$$

한편 ψ_k^l 도 $\psi_k (k=1, \dots, 7)$ 와 마찬가지로 무한원방 방사조건을 만족시켜야 한다.

(6)식의 계수 $C_k^l (k=1, 2, 3, 4, 5, 7 \text{ and } l=1, 2, 3, 4, 5)$ 는 (6)식과 (7), (8) 및 (9)식을 고찰하면 다음과 같은 연립방정식의 해로부터 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\sum_{k=1}^5 (\delta_{lm} - \gamma^l a_{km}^l) C_k^l = \gamma^m Q_{km}, \quad m=1, 2, \dots, 5 \quad \text{for } k=1, 2, \dots, 5 \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^5 (\delta_{lm} - \gamma^l a_{7m}^l) C_k^l = \gamma^m (Q_0 + Q_7)_m, \quad m=1, 2, \dots, 5 \quad (11)$$

여기서 δ_{lm} 은 kronecker delta, γ^l 은 다음과 같은 무차원 량이다.

$$\gamma^l = \frac{i\omega \delta^l}{\rho g}, \quad l=1, 2, 3, 4, 5 \quad (12)$$

위에서 δ^l 은 실험적으로 결정되어야 할 인자로서 각 챔버의 덕트를 기압의 불연속면으로 모델링할 경우 개입되는 파라미터이다.

한편 Q_{km} 및 a_{km}^l 는 각각 ψ_k 및 ψ_k^l 에 기인한 유동이 주 챔버 상부덕트 S_{7m}^l 을 통과하는 평균속도다. 구조물의 기하학적 및 동력학적 대칭조건을 고려하면 이들 중 0이 아닌 것은 다음과 같다.

$$Q_{km} = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \frac{\partial \psi_k}{\partial z} ds, \quad (k=2 \text{ and } m=2,3) \quad (13)$$

or $(k=1 \text{ and } m=4,5)$

$$Q_{3m} = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \left[\frac{\partial \psi_3}{\partial z} - 1 \right] ds, \quad m=1,2,5 \quad (14)$$

$$Q_{4m} = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \left[\frac{\partial \psi_4}{\partial z} - y \right] ds, \quad m=2,3 \quad (15)$$

$$Q_{5m} = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \left[\frac{\partial \psi_5}{\partial z} + x \right] ds, \quad m=4,5 \quad (16)$$

$$Q_{km} = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \frac{\partial \psi_k}{\partial z} ds, \quad k=0,7 \text{ and } m=1,2,5 \quad (17)$$

$$q_{1m}^l = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \frac{\partial \psi_1^l}{\partial z} ds, \quad l=4,5 \text{ and } m=4,5 \quad (18)$$

$$q_{2m}^l = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \frac{\partial \psi_2^l}{\partial z} ds, \quad l=2,3 \text{ and } m=2,3 \quad (19)$$

$$q_{3m}^l = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \left[\frac{\partial \psi_3^l}{\partial z} - \delta_{lm} \right] ds, \quad l=1,2,5 \text{ and } m=1,2,5 \quad (20)$$

$$q_{4m}^l = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \left[\frac{\partial \psi_4^l}{\partial z} - y \delta_{lm} \right] ds, \quad l=2,3 \text{ and } m=2,3 \quad (21)$$

$$q_{5m}^l = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \left[\frac{\partial \psi_5^l}{\partial z} + x \delta_{lm} \right] ds, \quad l=4,5 \text{ and } m=4,5 \quad (22)$$

$$q_{7m}^l = \frac{1}{A_d^m} \int_{S_c^c} \frac{\partial \psi_7^l}{\partial z} ds, \quad l=1,2,5 \text{ and } m=1,2,5 \quad (23)$$

위에서 $A_c^l (l=1,5)$ 는 챔버 l 의 내부수선면 S_c^l 의 면적이다.

3. 적분방정식에 의한 포텐셜 해법

부유식 OWC 챔버구조물의 주 챔버와 횡요 및 종요 감쇠챔버의 하부에 각각 수학적 경계면 $S_c^l (l=1,2,5)$ 를 두어 이 안쪽을 내부영역 $D^l = D^1 U D^2 U D^3$, 바깥쪽을 외부영역 D^c 라 한다. 접수면 S_0 를 챔버 외부 S_0^c 와 내부 S_0^i 로 구분할 때 S_0^i 는 주 챔버와 횡요 및 종요 감쇠챔버 내부에 위치한 접수면의 합

$S_0^i = \sum_{k=1}^5 S_0^k$ 이다. $\psi_k (k=1,2,5,7)$ 및

$\psi_k^l (k=1,2,3,4,5,7 \text{ and } l=1,2,5)$ 에 대한 해법은 참고문헌과 같다(홍도천외, 2002).

4. 운동방정식

접수면에 작용하는 변동 수압은 선형 비정상 포텐셜유동에 베르누이 방정식을 적용하여 구한다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \omega \operatorname{Re} \{ i \Psi e^{-i\omega t} \} \quad (24)$$

이로부터 입사파 및 산란파 포텐셜에 기인한 기진력, 방사파 포텐셜에 기인한 부가질량 및 파 감쇠력 등이 구하여지며 이 과정은 잘 알려져있다(홍도천외, 1987). 한편 챔버상부 변동 기압은

$$p_c^l = \delta \times U_d^l \quad \text{for } l=1,2,5 \quad (25)$$

여기서 각 챔버별로 덕트를 통과하는 기류의 평균속도 $U_d^l (l=1,2,5)$ 를 (A11)식을 윗첨자 $(l=1,2,5)$ 으로 표시된 5개의 챔버에 대하여 적용하여 구할 수 있다.

$$U_d^m = \sum_{k=1}^5 \left[-i\omega \sum_{k=1}^5 a_k (Q_{km} + C_k^1 q_{km}^l) + Q_{0m} + Q_{7m} + C_7^1 q_{7m}^1 \right] \quad (26)$$

(26)식을 (25)에 대입하면 기압을 구할 수 있고 이를 공기유동에 접한 챔버 내부면에 걸쳐 적분하면 힘 및 모멘트를 얻을 수 있다. 통상적인 부유구조물에 작용하는 힘 및 모멘트의 평형조건식에 OWC에 기인한 추가적인 외력을 더하여 정리하면 다음과 같은 주파수 영역 운동방정식을 얻는다.

$$\sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (mI_{jk} + \rho \Delta M_{jk}) - i\rho \Delta \omega^2 B_{jk} + \rho g D^2 R_{jk} + N_{jk}^c \right] a_j = \rho a_0 \omega^2 D^3 F_j + F_j^c, \quad j=1,5,6 \quad (27)$$

N_{jk}^c 및 F_j^c 가 OWC에 기인한 추가적인 외력에 의하여 발생한 항이다.

5. 수치 실험

부유식 OWC 챔버 구조물 수치모델의 주요제원은 참고문헌과 같다(홍도천외, 2002). 특성길이 D 는 외경길이 13 m 로 취하였다. 각 챔버의 덕트를 기압의 불연속면으로 모델링할 경우 개입되는 파라미터 $\delta^l (l=1,2,5)$ 은 0, 40, 80, 120의 4개 값을 주고 $\delta^2 = \delta^3 = \delta^4 = \delta^5$ 인 경우를 가정하였다. 주챔버의 δ^1 값이 0 및

120인 경우에 대한 OWC 구조물의 상하동요 복소 진폭비가 Fig.2 및 Fig.3에 각각 표시되었다.

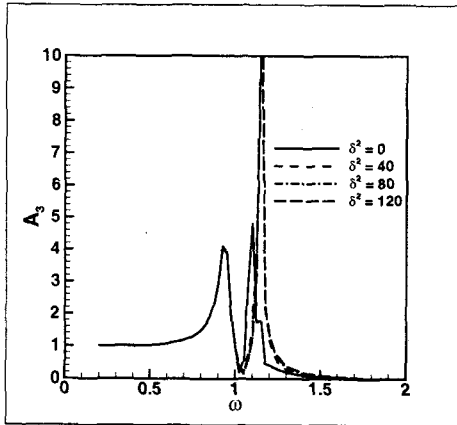


Fig. 2 Heave amplitude ratio with $\delta^1=0$

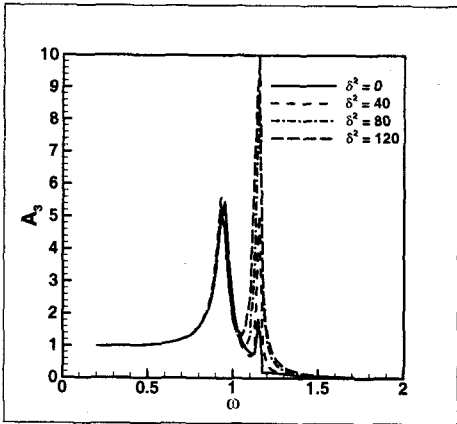


Fig. 3 Heave amplitude ratio with $\delta^1=120$

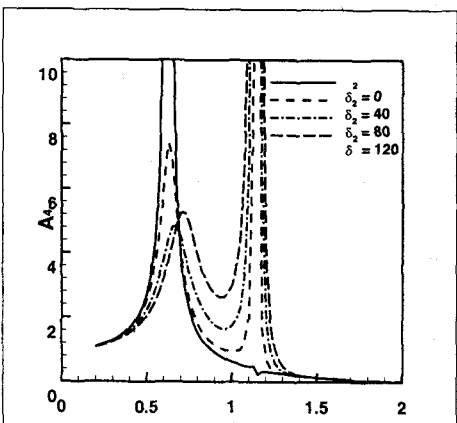


Fig. 4 Roll amplitude ratio

$\omega=0.9$ 부근의 부유체 고유공진은 δ^1 에 의하여 감소되지 않으나 $\omega=1.15$ 부근의 주챔버 내부유동 공진에 기인한 상하동요 진폭은 δ^1 의 증가에 의하여 감소됨을 알 수 있다. 그리고 감쇠챔버의 공기압 파라미터인 δ^2 의 변화는 상하동요에 별 영향이 없음을 보이고 있다. Fig. 4에 입사파의 기울기로 무차원화 된 횡요 복소진폭비가 표시되었다. 횡요응답은 주챔버와는 무관하다. $\omega=0.6$ 부근의 횡요 공진은 δ^2 의 증가에 의하여 감소됨을 알 수 있다. 그러나 $\omega=1.15$ 부근에서는 그 반대 현상이 일어남을 보여주고 있다.

6. 결 론

선형과 이론에 근거한 부유체 운동해석기법에 자유표면 변동압력 면 이론을 도입하여 부유식 OWC챔버의 파중 운동 해석기법을 개발하였다. 엄밀한 수치해석 기법에서는 적분방정식의 커널에 챔버 덕트에서의 기압의 불연속 파라미터가 개입되어 파라미터의 변화에 따른 계산에 많은 계산시간이 소요된다.

본 수치해석 기법은 적분방정식의 커널에 챔버 덕트에서의 기압의 불연속 파라미터가 개입되지 않으므로 많은 경우에 대한 계산을 비교적 단 시간에 수행할 수 있다. 그러나 본 기법에서는 특정주파수에서 포텐셜 값이 과대하게 계산될 수 있으며 챔버 내부유동의 공진범위가 넓은 것이 단점이 될 수 있으므로 앞으로 이에 대한 보완이 필요하다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 홍도천, 홍사영, 이상무(1987), "대형 해양구조물에 작용하는 파랑 하중에 관하여", 한국해양공학회지, 제1권 제1호, 1987
- 홍도천, 홍사영, 홍석원(2002), "부유식 OWC 챔버의 파중 운동 해석", 춘계한국해양공학회 논문집