

# 공기챔버 위치에 따른 폰툰형 초대형 구조물 유탄성응답 해석

홍사영\* · 경조현\* · 김병완\*  
\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

## Hydroelastic Analysis of Pontoon Type VLFS Considering the Location and Shape of OWC Chamber

SA-YOUNG HONG\*, JO-HYUN KYOUNG\* AND BYOUNG-WAN KIM\*  
\*Offshore Plant Research Division, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Hydroelastic analysis 유탄성해석, OWC chamber 진동수주 공기챔버, Finite element method 유한요소법, Mode superposition method 모드중첩법, Pontoon-type VLFS 폰툰형 초대형 구조물

**ABSTRACT:** A numerical investigation is made on the effects of the location and shape of the front wall of an OWC (Oscillating Water Column) chamber on the hydroelastic response of a VLFS. Most of the studies on the effects of an OWC chamber on the response of a VLFS have assumed the location of the OWC chamber to be at the front of the VLFS. In the present study, an OWC-chamber is introduced at an arbitrary position in relation to a VLFS to determine the influence of the location and shape of the OWC chamber on the hydroelastic response of the VLFS. A finite element method is adopted as a numerical scheme for the fluid domain. or the finite element method, combined with a mode superposition method, is applied in order to consider the change of mass and stiffness The OWC chamber in a piecewise constant manner. or the facilitated anefficient analysis of The hydroelastic response of the VLFS, as well as the easy modeling of different shape and material properties for the structure. Reduction of hydroelastic response of the VLFS is investigated for various locations and front wall shapes of the OWC chamber.

### 1. 서 론

해양공간은 육상공간과 함께 인간의 주요 활동무대로서 전통적으로 해상운송 및 교역의 통로로서, 어업 및 양식을 위한 공간으로 이용되어 왔다. 인구의 증가에 따른 경제활동 증대와 이로 인한 교역의 증가, 도시의 발달 등은 항만, 공항, 저장시설 등 사회 기간시설의 확장 및 신설을 가속화 하고 있으며 농지 및 공업용지의 부족을 초래해 왔다. 이에 대한 대응으로서 그동안 연안역에 대한 활발한 매립활동이 전개되었으며 그 결과 많은 용지가 확보된 반면 그에 비례하여 갯벌을 비롯한 생태계에 돌이킬 수 없는 악영향을 끼쳐 지금은 매립으로 인한 이익보다는 환경생태계 파괴로 인한 손해가 더 크다는 분석이 나오고 있는 실정이다. 이에 따라 친환경적인 해양공간 이용에 대한 관심이 높아지고 있으며 그 중 하나가 초대형 부유식 구조물을 이용하여 경제적이고 친환경적인 공간을 개발하는 것이다. 이에 대한 대표적 연구로서는 일본에서 1995년부터 2000년까지 길이 1km에 달하는 부유식 해상공항 실증구조물을 설계·해석·건조·운영에 이르는 전 과정을 수행하여 초대형 부유식 해상구조물의 기술적 가능성을 입증한 메가플로트 프로젝트를 들 수 있다.

해양공간이용 대형 복합플랜트 개발사업(정태영 등, 1995-1999), 초대형 부유식 해상구조물 기술개발(홍사영 등, 1999-2007) 등 친환경적인 해양공간 이용을 위한 기술개발 연구가 꾸준히 수행되었다.

매립과 비교할 때 초대형 구조물을 이용한 해양공간 이용의 장점은 구조물이 물 위에 떠있기 때문에 해저지형 및 수심의 영향을 거의 받지 않으므로 수심이 깊어질수록 경제적으로 유리하고 설치위치 선택에 있어서의 자유도가 크며, 구조물의 하부가 개방되어 있어 물의 흐름이 자유로와 상대적으로 환경영향이 작고, 구조물을 단위 부체 형태로 조선소에서 제작하여 현지에서 해상접합 시공을 하므로 공기가 짧고 건설공해가 없으며, 아울러 확장과 제거가 용이한 점 등이 있다. 한편 부유식 구조물은 파랑에 의한 동요를 하게 되는데 수 km 규모의 초대형 구조물은 일반 선박이나 해양구조물에 비해 상대적으로 구조강성이 약할 수밖에 없기 때문에 이를 고려하여 악천후 환경에서의 구조적 안전성과 작업성을 보증하는 것이 설계에 있어 매우 중요한 일이다. 따라서 초대형 구조물에 있어서는 구조물의 동적 거동과 파랑하중 산정에 있어 구조물의 변형을 고려하는 소위 유탄성해석이 필수적이며 이러한 이유로 지난 십 수 년 동안 보다 효과적이고 엄밀한 설계해석을 위한 다양한 유탄성해석기법이 개발되어 왔으며, 유체영역을 해석하는 관점에서는 고유함수전개법, 경계요소법, 유한요소법 등으로, 구조물을 해석하는 관점에서는 모드중첩법, 직접법 등으로 대별할 수 있는데 이에 대해서는 Kashiwagi(1999),

국내에서도 부유식 해양구조물에 관한 연구(신현경 등, 1993-1996),

교신저자 홍사영 : 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7521 sayhong@moeri.re.kr

Watanabe et al.(2004)이 체계적으로 분석한 바 있다.

폰툰형(Pontoon type) 구조물의 경우는 기본적으로 만내 또는 항내와 같이 정온한 해역을 가정한 구조물로서 수심이 깊거나 자연적인 정온해역이 아닌 경우에는 악천후 환경에서 예상되는 높은 구조응력을 감소시키기 위한 정온장치가 필요한데 매립 또는 케이슨을 이용한 기존의 착저형 방파제는 기술적, 경제적 문제뿐만 아니라 방파제 자체가 매립지와 같이 해수의 유동을 방해하기 때문에 초대형 구조물 본래의 환경 친화적 장점을 상쇄시키는 결과를 가져오게 된다. 따라서 초대형 구조물의 친환경적 장점을 살리기 위해서는 구조물 주위의 해수유동을 방해하지 않는 방파제가 필요하다. 이러한 목적으로 고안된 다양한 개념의 부유식 방파제는 단독형과 구조물 일체형으로 나눌 수 있다. 단독형 방파제로서 Takaki et al.(2002), Watanabe et al.(2003)은 몰수관 구조의 방파제를 제안하였으며 Hong et al.(2002)은 바닥에 개구부가 있는 고정식 방파제와 부유식 방파제의 성능을 비교하였다. 구조물 일체형 방파제로서 Takagi et al.(2000)은 단순한 형태의 블록을 구조물 벽에 부착하였으며, Maeda et al.(2001)은 OWC(Oscillating water column) 챔버 방파제의 성능을 검토하였으며 Kim et al.(2005)은 다양한 형태와 구조 강성을 갖는 링크구조가 초대형 구조물의 전면에 부착된 경우의 유탄성 응답특성을 해석하였다.

일체형 방파제는 단독형 방파제에 비해 우수한 성능을 나타내지만 초대형 구조물의 전면에 부착된 소파 구조물은 기본적으로 반사율을 높이는 개념이므로 파랑 표류력의 증가를 가져온다. 하지만 OWC 방파제의 경우는 50%이상의 소파율을 보인 반면 파랑 표류력은 크게 증가시키지 않는 것으로 나타났다(Maeda et al., 2001). OWC 챔버 방파제의 성능은 챔버형상 및 크기, 오리피스(Orifice) 크기, 초대형 구조물 본체와 연결기구 등에 영향을 받을 것이나 기존의 연구에서는 해석의 용이성을 위해 OWC 챔버의 형상과 무게변화를 무시하여 취급하였다. OWC 챔버에 대한 보다 실용적인 성능평가를 위해서는 OWC 챔버의 형상, 무게, 강성변화가 포함되어야 하며 아울러 구조물 본체와의 상대적인 위치와 연결기구에 대한 고려가 필요하다. Hong and Hong(2007)은 힌지구조로 연결된 OWC 챔버 방파제의 성능을 고찰하였으며 Hong and Kyung(2006)은 OWC 챔버의 전면부 벽 두께가 매우 크게 확장된 경우 방파제의 효과가 극대화됨을 보인 바 있다.

본 논문에서는 OWC 챔버의 위치 변화가 초대형 구조물의 응답감소에 미치는 영향을 고찰하였다. 유체영역은 유한요소법으로 이산화 하였으며 구조물 거동해석에는 모드중첩법을 사용하였으나 OWC 챔버의 질량 및 강성변화를 효과적으로 고려하고 OWC 챔버 연결기구의 모델링을 용이하게 처리할 수 있도록 구조물의 특성변화를 부분 상수값으로 가정하여 유한요소법을 적용하였다.

## 2. 수학적 정식화

### 2.1 경계치 문제

포텐셜유동 이론은 중력과 작용이 지배적인 구조물-파랑 상호작용과 진동수주(OWC: Oscillating water column) 유동해석에 효과적이므로 본 연구에서도 유체는 비점성, 비압축성이며

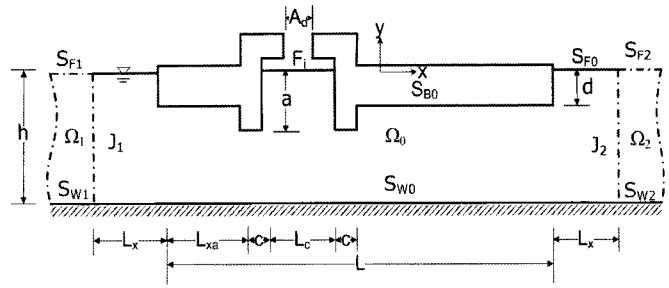


Fig. 1 Definitions of the computation domains

유동은 비회전성이라 가정하여 속도 포텐셜을 도입한다. 좌표계는 우수 직교좌표계이며 계산영역을 Fig. 1에 나타내었다. \$h\$는 수심을 나타내며 입사파 상류에서 정합경계는 \$J\_1\$, 하류에서의 정합경계는 \$J\_2\$이고, 자유표면은 \$S\_F\$, 바닥면은 \$S\_W\$이고 첨자 0, 1, 2는 각각 정합면의 내부, 좌우 외부를 나타낸다. 구조물 홀수는 \$d\$, 공기챔버의 홀수는 \$a\$, 구조물 전체 평균 침수면은 \$S\_{B0}\$, \$A\_o\$는 공기챔버 토출구(Orifice)의 단면적이다. 정합경계면은 구조물의 선단(Front end)과 후단(Rear end)에서 각각 \$L\_x\$만큼 떨어져 있으며 구조물의 전체길이는 \$L\$, 공기챔버 내부폭은 \$L\_c\$, 챔버 벽 두께는 \$c\$이고 \$L\_{xa}\$는 챔버 좌측벽 외부와 구조물 선단과의 거리이다.

표면장력은 무시하며 시간조화운동을 가정하여 속도 포텐셜을 다음과 같이 표시한다.

$$\Phi_j = Re\{\phi_j(x,y)e^{-i\omega t}\}, j = 0,1,2 \quad (1)$$

\$\omega\$는 입사파의 원진동수이며 \$\phi\_j\$는 영역 \$\Omega\_j(j=0,1,2)\$에서의 복소 속도 포텐셜이다. \$\phi\_j\$는 각 영역에서 라플라스 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi_j = 0 \text{ in } \Omega_j, j=0,1,2 \quad (2)$$

또한 자유표면과 해지면 그리고 정합면에서는 각각 다음의 경계조건을 만족한다(Hong and Kyung, 2006).

$$\phi_{jn} - K\phi_j = 0 \text{ in } S_{Fj}, j=0,1,2 \quad (3)$$

$$\phi_{jn} = 0 \text{ in } S_{Wj}, j=0,1,2 \quad (4)$$

$$\phi_0 = \phi_j \text{ on } J_j, j=1,2 \quad (5a)$$

$$\phi_{0n} + \phi_{jn} = 0 \text{ on } J_j, j=1,2 \quad (5b)$$

\$K\$는 \$\omega^2/g\$로 정의되는 무한수심에서의 파수이고 \$g\$는 중력가속도이다. 경계치문제의 해법으로 국소유한요소법이 사용되었다.

본 방법의 장점은 정합면에서의 방사경계처리를 고유함수 정합(Eigen-function matching)을 통해 수치적으로 엄밀하게 수행함으로써 상대적으로 작은 수치계산영역을 가지고 높은 정도의 방사조건을 만족시키는 데 있다(Bai, 1977; Bai and Yeung, 1974).

## 2.2 VLFS의 운동 방정식

OWC 챔버가 장착된 초대형 구조물의 동적 거동은 다음과 같이 Euler 보 방정식으로 이상화되었다.

$$m(x)W_{tt} + \frac{d^2}{dx^2} \left( EI(x) \frac{d^2 W}{dx^2} \right) = F \quad (6)$$

$W$ 는 수직변위이며  $EI$ 는 굽힘강성을,  $m$ 은 단위길이당 질량을  $F$ 는 입사파에 의한 외력을 나타낸다. 운동방정식을 해석하기 위해 모드중첩법을 적용하면 수직변위  $W$ 는 다음과 같이 모드함수  $u_j$ 의 선형합으로 표시된다.

$$W = \sum_{j=1}^N \xi_j u_j \quad (7)$$

$\xi_j$ 는  $j$  모드의 복소 진폭이며  $N$ 은 거동을 나타내기 위해 사용된 전체 모드의 수이다. 임의의 직교함수가 모드함수로 사용될 수 있으나, 본 연구에서는 양단 자유보 모드함수를 사용하였다. 시간조화운동을 가정한 초대형 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$(-\omega^2 M_{ij} + K_{ij}) \xi_j = X_i \quad (8)$$

식에서  $\omega$ ,  $M_{ij}$ ,  $K_{ij}$ ,  $X_i$ 는 각각 파주파수, 질량계수, 강성계수, 기진력 벡터를 나타낸다.

임의 위치에 설치된 OWC 챔버의 효과는 선형화한 압력강하로 표시되는 변형된 자유표면조건으로 고려되었다(Hong and Kyoung, 2006). OWC 챔버 내의 압력강하는 다음과 같이 선형화하였다.

$$Re[p_e e^{-i\omega t}] = \delta \times Re[U_d e^{-i\omega t}] \quad (9)$$

챔버 내의 압력강하 성분을 고려하여 주어진 자유표면조건을 정리하면 다음과 같다.

$$\phi_n - K\phi = \begin{cases} 0 & \text{on } F_c \\ \gamma U_d & \text{on } F_i \end{cases} \quad (10)$$

여기서  $\gamma = i \frac{\delta \omega}{\rho g}$ 이다. 전체 속도 포텐셜  $\phi$ 는 방사 포텐셜  $\phi_R = -i\omega \sum_j \xi_j \psi_j$ 과 산란 포텐셜  $\psi$ 의 선형합으로 표시된다. 방사 문제와 산란문제에 대한 최종식은 다음과 같다(부록 A 참조).

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \nabla \psi_j \cdot \nabla \delta \psi_i d\Omega - K \int_{F_i} \left( 1 + \frac{\gamma A_c}{A_d - \gamma A_c} \right) \psi_j \delta \psi_i dS - K \int_{S_i} \psi_j \delta \psi_i dS \\ = \left( -\frac{\gamma Q_{u_j}}{A_d - \gamma A_c} \right) \int_{F_i} \delta \psi_i dS + \int_{S_b} \psi_{n_j} \delta \psi_i dS \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \nabla \Psi_j \cdot \nabla \Psi_i d\Omega - K \int_{F_i} \left( 1 + \gamma \frac{A_c}{A_d - \gamma A_c} \right) \Psi_j \Psi_i dS \\ - K \int_{S_i} \Psi_j \Psi_i dS = \int_{S_b} \Psi_{n_j} \Psi_i dS \end{aligned} \quad (12)$$

$A_c$ 와  $A_d$ 는 각각 OWC 챔버의 단면적과 공기덕트(Orifice)의 단면적을 나타낸다.  $Q_{u_j}$ 는  $j$ 모드 운동으로 인한 공기유량이며  $\gamma = i\delta\omega/\rho g$ ,  $\rho$ 는 유체밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $\delta$ 는 선형 감쇠계수이다(Hong et al., 2004). 구조물의 물성이 각 구간에서 일정하다고 가정하여 유한요소법을 적용한 운동방정식은 다음과 같다(부록 B. 참조).

$$\begin{aligned} \left\{ (\rho g - m\omega^2) M_{ij} - \omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij} + K_{ij} + P_{ij} + \right. \\ \left. [-\rho g m_{ij} - (\tilde{m} - m)\omega^2 \tilde{M}_{ij} + \tilde{K}_{ij} + \tilde{K}_{ij} + \hat{K}_{ij}] \right\} \xi_j = X_i \end{aligned} \quad (13)$$

$m = \rho d$  ( $d$ 는 홀수),  $\tilde{m}$ 은 OWC 챔버의 질량이다. 운동 방정식의 질량 계수들은 식 (14)~(16)와 같이 정의된다. 적분구간은 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서  $e_i$ 는 적분구간을 나타낸 것으로 구조물의 길이의 반( $L/2$ )으로 정규화한 값이며 첨자가 달린  $a_i$ 는 대응되는 구간의 길이이다.

$$M_{ij} = \frac{L}{2} \int_{-1}^1 u_i u_j d\xi \quad (14)$$

$$\tilde{M}_{ij} = \frac{L}{2} \int_{e_3}^{e_6} u_i u_j d\xi \quad (15)$$

$$m_{ij} = \frac{L}{2} \int_{e_4}^{e_5} u_i u_j d\xi \quad (16)$$

강성행렬  $K_{ij}$ ,  $\tilde{K}_{ij}$ ,  $\tilde{K}_{ij}$ ,  $\hat{K}_{ij}$ 은 각각 구조물의 강성변화를 나타낸 것으로  $K_{ij}$ 는 일정 홀수를 갖는 구조물의 균일강성 계수들,  $\tilde{K}_{ij}$ 는 공기챔버부분의 강성계수들,  $\tilde{K}_{ij}$ ,  $\hat{K}_{ij}$ 는 각각 공기 챔버와 구조물의 후방과 전방 접합부의 강성을 나타내며 각각 식 (17)~(20)로 정의된다.

$$K_{ij} = EI_{VLFS} \left( \frac{L}{2} \right)^3 \int_{-1}^1 u_i'' u_j'' d\xi \quad (17)$$

$$\tilde{K}_{ij} = (EI_{OWC} - EI_{VLFS}) \left( \frac{L}{2} \right)^3 \int_{e_3}^{e_6} u_i'' u_j'' d\xi \quad (18)$$

$$\tilde{K}_{ij} = (EI_B - EI_{VLFS}) \left( \frac{L}{2} \right)^3 \int_{e_7}^{e_8} u_i'' u_j'' d\xi \quad (19)$$

$$\hat{K}_{ij} = (EI_A - EI_{VLFS}) \left( \frac{L}{2} \right)^3 \int_{e_1}^{e_2} u_i'' u_j'' d\xi \quad (20)$$

$E$ 는 영률을  $I$ 는 단면계수를 나타내며 첨자 VLFS, OWC, A, B는 각각 구조물, 공기챔버, 공기챔버 연결부의 물질 및 단면 특성을 나타낸 것이다.

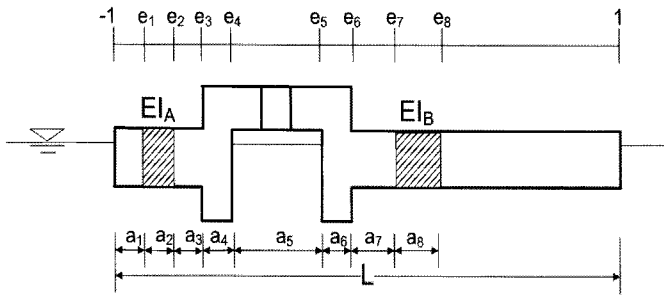


Fig. 2 Definition of integration intervals and bending rigidities

Table 1 Characteristic dimensions for computations

Ad	0.7 m	Lx	500 m
Lc	62.5 m	d	2 m
C	2 m	h	50 m
a	5 m, 15 m	L	1000 m
EI/unit length	7.5E10 N-m <sup>2</sup> /m		

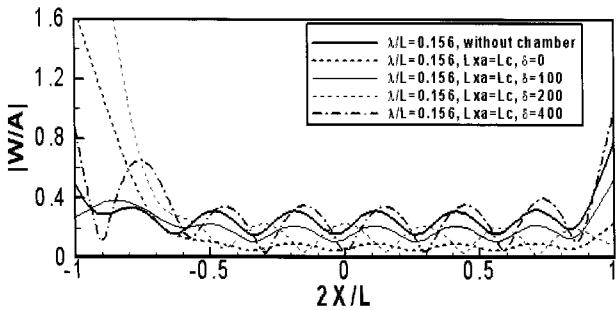


Fig. 3 Hydroelastic responses by varying the linear damping coefficient  $\delta$  with  $Lxa = Lc$  when  $\lambda/L = 0.156$

공기챔버효과를 고려한 파랑 기진력은 다음과 같다.

$$X_i = \frac{\delta Q}{A_d} \int_{F_i} u_i dS + i\omega \rho \int_{S_B} (\phi_0 + \phi_7) u_i dS, \quad (21)$$

$$P_{ij} = \frac{\delta}{A_d} [i\omega(Q_j - Q_{uj})] \int_{F_i} u_i dS \quad (22)$$

### 3. 수치계산 및 고찰

OWC 챔버의 위치와 형상효과를 살피기 위해 Maeda et al. (2001)의 모델과 동일한 구조물에 대해 계산을 수행하였다. 수심은 50m로 하였으며 파장비는  $\lambda/L=0.156, 0.313$ 의 두 경우를 살펴보았다.  $\lambda$ 는 파장을 나타내며 기타 주요 제원은 Table 1에 정리하였다(Fig. 1 참조).

공기챔버 방파제는 파주기에 따라 최적의 감쇠계수가 결정되는데 본 모델의 경우 방파제가 파도 전면에서 설치된 경우에 파장비  $\lambda/L=0.156$ 와  $0.313$ 에 대해 각각  $\delta=200$  과  $\delta=400$ 이 최적값으로 구해진 바 있다(Hong and Kyoung, 2006).

Fig. 3은 OWC 챔버가 공기챔버 폭 후방에 위치한 경우  $\lambda/L=0.156$ 일 때 최적 감쇠비가 챔버의 위치변화로 인한 간섭효과로 인해 달라지는 것을 보여주고 있으며 개방된 경우가( $\delta=0$ ) 최적의 효과를 갖는 것으로 나타났다. 횡축은 구조물의 길이 분포를 나타낸 것으로  $L/2$ 로 무차원화 하여 -1에서 1의 값을 갖도록 하였다. 종축은 유탄성 운동변위를 입사파 진폭으로 무차원화 하여 절대값을 취한 것이다. 이 때 최적효과 판단의 기준은 공기챔버 방파제 후방에서의 유탄성응답의 크기이다. 이 결과는 공기챔버의 위치변화에 따라 최적의 성능을 나타내는 공기챔버 감쇠계수가 크게 변함을 보여준다. Fig. 4는  $\lambda/L=0.313$ 일 때 공기챔버 위치가 공기챔버 폭 2배 후방에 위치한 경우로서 공기챔버 감쇠계수 변화에 따라 성능이 크게 달라지고 있는데  $\delta=200$ 일 때 최적의 효과를 갖는 것으로 나타났다. 이는 공기챔버의 최적감쇠계수 효과는 기본적으로 파장과 관계가 있지만 위치변화에 따라 그 최적값이 변화하는 것으로 실제 공기챔버 방파제 운용 시에는 이러한 특성변화를 고려할 수 있도록 하는 시스템의 고안이 필요함을 의미한다.

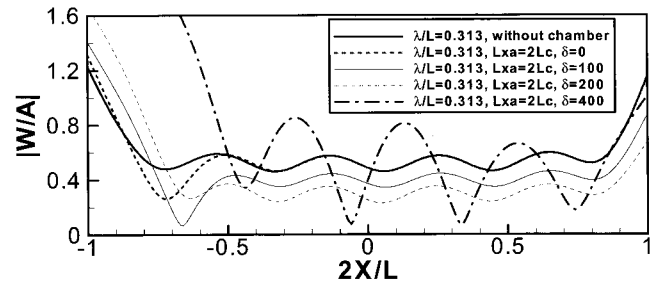


Fig. 4 Hydroelastic responses by varying the linear damping coefficient  $\delta$  with  $Lxa = 2Lc$  when  $\lambda/L = 0.313$

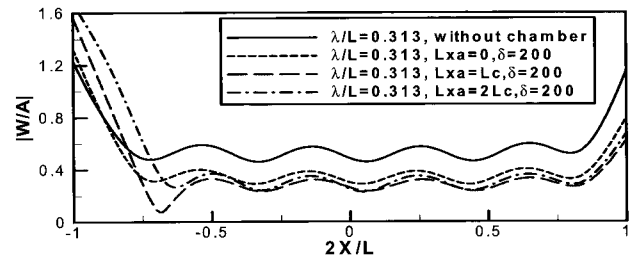


Fig. 5 Hydroelastic responses for various OWC chamber locations ( $\delta = 200, \lambda/L = 0.313$ )

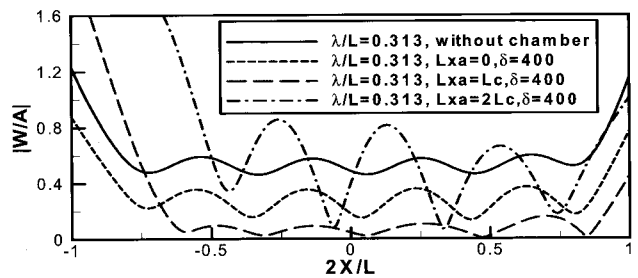


Fig. 6 Hydroelastic responses for various OWC chamber locations ( $\delta = 400, \lambda/L = 0.313$ )

Fig. 5와 Fig. 6은  $\lambda/L=0.313$ 일 때 주어진  $\delta$  값에서 공기 챔버의 위치 변화에 대한 응답감소효과를 보여주고 있다. Fig. 5는  $\delta=200$ 인 경우로서 공기챔버의 위치가 공기챔버 폭만큼 후방에 위치한 경우가 가장 우수한 성능을 나타내지만 위치 변화에 따른 성능변화의 폭은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 6은  $\delta=400$ 인 경우로서 공기챔버 위치가 공기챔버 폭만큼 후방에 위치한 경우가 가장 좋은 성능을 보이고 있으며 이 경우에는 위치변화에 따른 성능 차이가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 최적 공기챔버 감쇠계수가 적용된 경우로서 공기챔버 내의 진동수주의 공진유동에 의한 에너지 흡수에 따른 것으로 공진응답에서 감쇠계수의 영향이 크게 나타난 것이 물리적으로 타당하다고 사료된다. 최적 감쇠계수 상태에서 수심 50m의 연안에서는 비교적 장파인  $\lambda/L=0.313$ (파주기 16초)에서 구조물의  $4/5L$  이상에서 유탄성 응답이 70% 이상 감소하는 우수한 효과를 주는 것으로 나타났는데 이는 공기 챔버의 위치를 바꿈으로써 특히 장파 구간에서 부가적인 유탄성 응답 감소효과를 가져올 수 있음을 보여준다.

Fig. 7은 OWC 챔버 전면부의 구조물의 흡수변화, 강성변화에 의한 효과를 나타내고 있다.

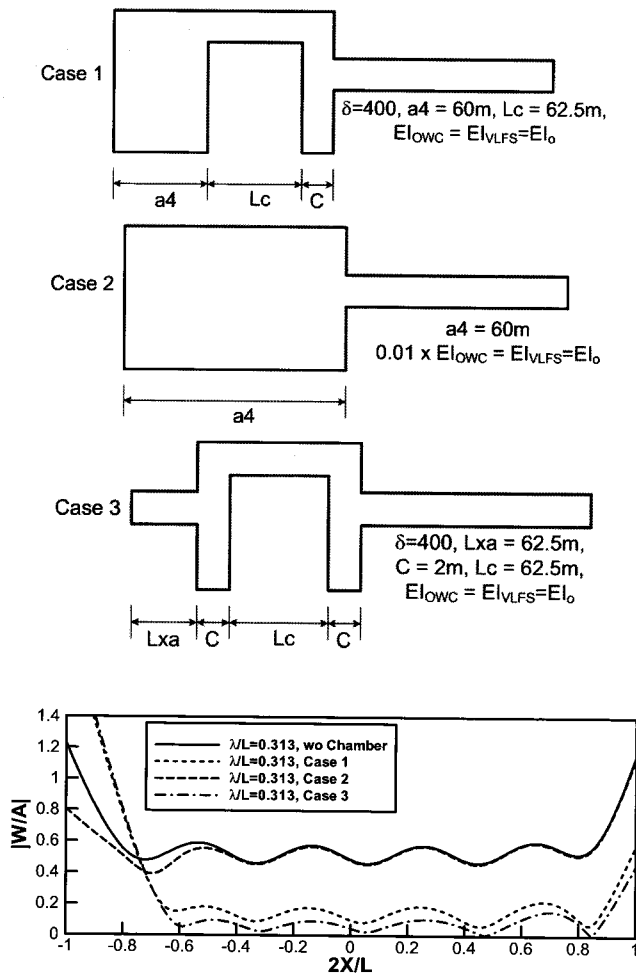


Fig. 7 Hydroelastic response of VLFS having OWC chamber with different front side shape for  $\lambda/L = 0.313$

결과에서 보면 OWC 챔버 전면부 구조물의 흡수 변화로 인한 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 OWC 챔버 전면부의 형상보다는 OWC 챔버의 위치변화에 따른 효과가 더 큼을 보여주는 것이다.

한편, 제안된 OWC 챔버 일체형 VLFS에 대한 모형시험 결과(김병완 등, 2007)와 본 논문에서 제안된 수치계산결과를 비교하였다. 모형시험에 사용된 구조물은 길이가 500m인 VLFS로서 흡수는 1.5m이며 단위 폭 휨강도는  $3.9655 \times 10^{10} \text{N}\cdot\text{m}$ 를 취하였다. 또한, 수심은 50m, 챔버의 폭  $L_c$ 은 20m, 챔버 벽의 흡수  $a$ 는 6m, 챔버의 두께  $c$ 는 6.1m, 전면부 판의 길이  $L_{xa}$ 는 30m를 택하였다. 입사파의 선형성을 유지하기 위해 파장 대비 파고의 비를 1/50이 되도록 하였다. 모형시험은 상사비를 1/100로 택하였으며 2차원 수조에서 수행되었다. 실험은 세 가지 모델에 대하여 수행되었으며, 모형시험에서 사용한 대략적인 모델의 모양을 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 9에서는 덕트단면적( $A_{duct}$ )과 공기챔버의 단면적( $A_{chamber}$ )의 비가 0.07인 경우에 모형시험에서 측정한 굽힘 응력을 수치계산결과와 비교한 것이다. 수치해석결과와 모형시험결과가 잘 일치하였으며, 전면부에 판을 부착한 경우(Case 3)에서 가장 낮은 응력을 보였다.

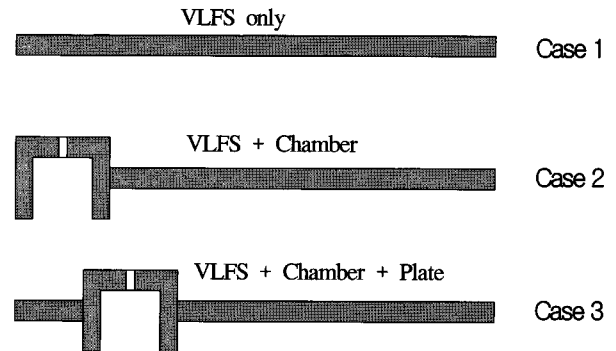


Fig. 8 Test cases of model experiment

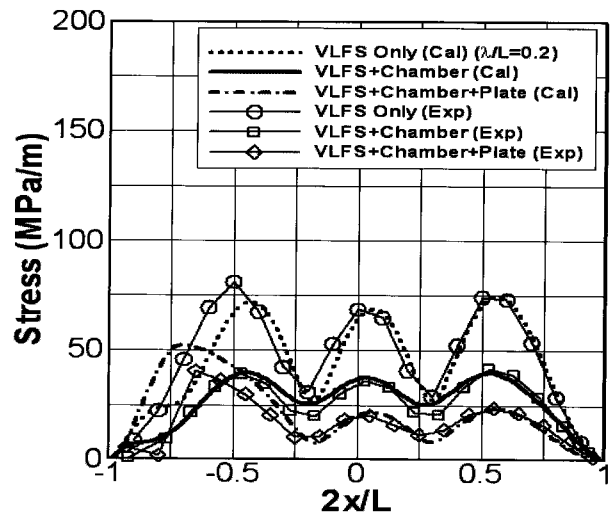


Fig. 9 Stress distribution of VLFS ( $A_{duct}/A_{chamber} = 0.07$ )

#### 4. 결 론

OWC 챔버 방파제가 초대형 구조물에 일체형으로 장착된 경우 OWC 챔버의 위치와 전면부 구조물의 형상 변화에 따른 유탄성 응답의 특성을 수치적으로 고찰하였다. 공기챔버의 위치로 인한 구조물의 강성, 질량분포 등의 변화를 효과적으로 취급하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 수치해석방법의 결과는 모형실험을 통해 검증하였으며 비교결과 매우 우수한 일치도를 나타내었다.

수치실험으로부터 OWC 챔버 방파제의 위치변화에 따라 방파제 부착으로 인한 소파성능이 민감하게 변화하는 결과를 얻었으며 기존의 개념과는 달리 OWC 챔버를 구조물의 선수부에서 일정거리 후방으로 이동시킬 경우 파도와 구조물, 공기 챔버의 상호작용으로 인해 상당히 장파인 경우에도 OWC 챔버 방파제 일체형 초대형 구조물의 유탄성 응답이 70% 이상 감소될 수 있는 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 "초대형 부유식 해상구조물 기술개발" 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

#### 부 록 A. 방사 포텐셜 및 산란파 포텐셜 해석법

OWC의 덕트를 통과하는 유체의 속도는 다음과 같이 산란파에 의한 성분( $U_d^R$ )과 방사파에 의한 성분( $U_d^D$ )으로 분리할 수 있다.

$$U_d = U_d^R + U_d^D \quad (A.1)$$

각각의 성분은 자유표면의 운동성분 및 구조물의 운동에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\phi_0$ 는 입사파 포텐셜이며,  $\phi_7$ 은 산란파 포텐셜을 의미한다.

$$U_d^R = -i \frac{\omega}{A_d} \delta \xi_j \int_{F_i} \left( \frac{\partial \phi_j}{\partial y} - u_j \right) dS \quad (A.2)$$

$$U_d^D = \frac{1}{A_d} \int_{F_i} \frac{\partial}{\partial y} (\phi_0 + \phi_7) dS \quad (A.3)$$

두 식에 의해 OWC 챔버내부에 작용하는 압력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_c = \delta U_d = \delta \frac{1}{A_d} [-i\omega \xi_j (Q_j - Q_{uj}) + Q_0 + Q_7] \quad (A.4)$$

여기서 유량함수  $Q$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$Q_j = \int_{F_i} \frac{\partial \phi}{\partial y} dS \quad (A.5a)$$

$$Q_{uj} = \int_{F_i} u_j dS \quad (A.5b)$$

$$Q_0 = \int_{F_i} \frac{\partial \phi_0}{\partial y} dS \quad (A.5c)$$

$$Q_7 = \int_{F_i} \frac{\partial \phi_7}{\partial y} dS \quad (A.5d)$$

한편 운동방정식에서 외력항은 공기챔버 내부에 작용하는 압력과 입사파랑에 의한 힘의 합으로 나타낼 수 있다. OWC 챔버 내부에서의 압력 적분시 법선벡터는 모드중첩법에서 구조물의 유탄성 응답성분이 되므로 파랑외력은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때  $n_i$ 는 물체경계면에서의 법선벡터이며,  $u_i$ 는  $i$ 번째 유탄성 응답모드가 된다.

$$\begin{aligned} X_i &= \rho \int_{F_i} \delta U_d u_i dS + i\omega \rho \int_{S_b} \phi_D n_i dS \\ &= \rho \frac{\delta}{A_d} [-i\omega \xi_j (Q_j - Q_{uj}) + Q] \int_{F_i} u_i dS \\ &\quad + i\omega \rho \int_{S_b} (\phi_0 + \phi_7) n_i dS \end{aligned} \quad (A.6)$$

구조물의 운동은 모드중첩법에 의해 해석되며, 이때 운동성분은 수직운동성분만을 고려한다. 따라서  $j$ 번째 운동모드에 의한 자유표면경계조건은 식 (10)과 식 (A.2)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial \psi_j}{\partial n} - K \psi_j = \frac{\gamma}{A_d} \{Q_j - Q_{uj}\} \quad \text{on } F_i \quad (A.7)$$

양변을 적분하여  $j$ 번째 운동모드에 의한 자유표면에서의 유량  $Q_j$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{F_i} \left( -K \psi_j + \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) dS &= \int_{F_i} \left( \frac{\gamma}{A_d} \{Q_j - Q_{uj}\} \right) dS \quad (A.8) \\ Q_j &= \frac{1}{1 - \gamma \frac{A_c}{A_d}} \left( -\gamma Q_{uj} \frac{A_c}{A_d} + \int_{F_i} K \psi_j dS \right) \end{aligned}$$

여기서  $Q_j = \int_{F_i} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} dS$  이다. 위 식을 자유표면식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &-K \psi_j + \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \\ &= \frac{\gamma}{A_d} \left( \frac{-\gamma Q_{uj} A_c}{A_d - \gamma A_c} \right) + \frac{\gamma}{A_d - \gamma A_c} \int_{F_i} K \psi_j dS - \gamma \frac{Q_{uj}}{A_d} \end{aligned} \quad (A.9)$$

주어진 자유표면조건식을 적용하여 범함수에 대입하고 정류치를 구하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j d\Omega - K \int_{F_i} \left( 1 + \frac{\gamma A_c}{A_d - \gamma A_c} \right) \psi_i \psi_j dS \\ & - K \int_{F_{zz}} \psi_i \psi_j dS \\ & = - \frac{\gamma Q_{uj}}{A_d - \gamma A_c} \int_{F_i} \psi_i dS + \int_{S_b} \psi_{nj} \psi_i dS \end{aligned} \quad (A.10)$$

한편, 산란파 문제에서는 OWC 챔버 내에서 식 (10)과 식 (A.3)에 의해 다음과 같은 자유표면경계조건을 갖는다. 이때 포텐셜  $\Psi$ 는 입사파 포텐셜  $\phi_0$ 와 산란파 포텐셜  $\phi_7$ 의 합이다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} = K\Psi + \gamma \frac{Q}{A_d}, \quad Q = \int_{F_i} \frac{\partial \Psi}{\partial n} dS \quad (A.11)$$

위 식을 챔버 내의 자유표면에서 적분한 후 유량  $Q$ 를 구하면 다음과 같다.

$$Q = \frac{1}{1 - \gamma \frac{A_c}{A_d}} \int_{F_i} K\Psi dS \quad (A.12)$$

이 식을 자유표면식에 대입한 후 정리하면 식(A.11)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} = K\Psi + \frac{\gamma}{A_d - \gamma A_c} \int_{F_i} K\Psi dS \quad (A.13)$$

마찬가지로 위식을 범함수에 대입하고 정류치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \nabla \Psi_i \cdot \nabla \Psi_j dV - K \int_{F_i} \left( 1 + \gamma \frac{A_c}{A_d - \gamma A_c} \right) \Psi_i \Psi_j dS \\ & - K \int_{F_{zz}} \Psi_i \Psi_j dS = \int_{S_b} \Psi_{nj} \Psi_i dS \end{aligned} \quad (A.14)$$

#### 부록 B. 운동방정식

단순 보로 이상화된 부유 구조물의 정적평형상태에서의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\{(\rho g - m\omega^2)M_{ij} + K_{ij}\}\xi_j = X_i \quad (B.1)$$

방사포텐셜 해석 후, 파랑감쇠계수와 부가질량항인  $-\omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij}$ 를 대입하고, OWC챔버 내부의 압력에 의한 복원항  $P_{ij}$ 를 대입하면 다음과 같다.

$$\{(\rho g - m\omega^2)M_{ij} - \omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij} + K_{ij} + P_{ij}\}\xi_j = X_i \quad (B.2)$$

한편, OWC챔버의 형상에 따른 질량  $\tilde{m}$ 고려와  $El_A$ ,  $El_B$  부분에서의 강성변화 등에 대한 고려를 위해 부분적분법을 적용하여 각항의 영향을 추가하였다.

$$\begin{aligned} & \{(\rho g - m\omega^2)M_{ij} - \omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij} + K_{ij} + P_{ij} + \\ & [-\rho g m_{ij} - (\tilde{m} - m)\omega^2 \tilde{M}_{ij} + \tilde{K}_{ij} + \tilde{K}_{ij} + \tilde{K}_{ij}]\}\xi_j = X_i \end{aligned} \quad (B.3)$$

#### 참고문헌

- 김병완, 홍사영, 경조현, 조석규, 유황진 (2007). "OWC 방과제 일체형 부유구조물의 응답특성에 관한 실험연구", 한국해양학회 추계학술대회논문집, pp 79-82.
- 신현경 등 (1993-1996). 부유식 해양구조물에 관한 연구, 울산대학교 보고서
- 정태영 등 (1995-1999). 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발사업, 한국기계연구원 보고서
- 홍사영 등 (1999-2007). 초대형 부유식 해상구조물 기술개발, 한국해양연구원 보고서
- Bai, K.J. (1977). "A Localized Finite-element Method for Steady Three Dimensional Free-Surface Flow Problems," Proc. 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, pp 1-10.
- Bai, K.J. and Yeung, R. (1974). "Numerical Solutions to Free Surface Flow Problems", Proc. 10th Symposium Naval Hydrodynamics, Office Naval Research, Cambridge, Mass., pp 609-647.
- 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, pp 139-164.
- Hong, S.Y., Choi, Y.R. and Hong, S.W. (2002). "Analysis of Hydro-elastic Response of Pontoon-type VLFS Coupled with Floating Breakwaters using a Higher-Order Boundary Element Method", Proc. 12th ISOPE Conference, pp 313-318.
- Hong, S.Y. and Kyoung, J.H. (2006). "Hydroelastic Response of VLFS Coupled with OWC-type Breakwater", Proc. 4th Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Wuxi, pp 245-254.
- Hong, D.C. and Hong, S.Y. (2007). "Hydroelastic Responses and Drift Forces of a Very Long Floating Structure Equipped with a Pin-connected Oscillating-water-column Breakwater System", Ocean Engineering, Vol 34, pp 676-708.
- Kashiwagi, M. (1999). "Research on Hydroelastic Responses of VLFS: Recent Progress and Future Work", Proc. 9th ISOPE Conference, Vol 1, pp 17-26.
- Kim, B.W., Kyoung, J.H., Hong, S.Y. and Cho, S.K. (2005). "Investigation of the Effect of Stiffness Distribution Shape on Hydroelastic Response of Very Large Floating

- Structures", Proc. 12th ISOPE Conference, pp 210-217.
- Maeda, H., Rheem, C-K, Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Ikoma, T., Fujita, N. and Arita, M. (2001). "Reduction Effects of Hydroelastic Responses on a Very Large Floating Structure with Wave Energy Absorption Devices using OWC System", Proc. 20th Offshore Mechanics and Arctic Eng.
- Takagi, K., Shimada, K. and Ikebuchi, T. (2000). "An Anti-motion Device for a Very Large Floating Structure", Marine Structure 13, pp 421-436.
- Takaki, M., Imai, Y. and Lee, S.M. (2002). "Reduction Effect of a Submerged Plate Toward Wave Exciting Forces Acting on a Very Large Floating Structure", Proc. 12th ISOPE Conference, Kitakyushu, pp 391-398.
- Watanabe, E., Utsunomiya, T. and Wang, C.M. (2004). "Hydroelastic Analysis of Pontoon-type VLFS : A Literature Survey", Engineering structures, Vol 26, pp 245-256.
- Watanabe, E., Utsunomiya, T., Kuramoto, M., Ohta, H., Tori, T. and Hayashi, N. (2003). "Wave Response Analysis of VLFS with an Attached Submerged Plate", IJOPE, Vol 13, No. 3, pp 190 -197.

---

2007년 11월 12일 원고 접수

2008년 1월 7일 최종 수정본 채택