

## 밀도가 상이한 두 유체층에서 부유체 동유체력 특성의 수치적 해석

김미근\*, 구원철†\*

울산대학교 조선해양공학부\*

### Numerical Analysis of Hydrodynamic Forces on a Floating Body in Two-layer Fluids

Migeun Kim\* and Weon-Cheol Koo†\*

School of Naval Architecture and Ocean Engineering\*  
University of Ulsan, Korea

#### Abstract

In this study, a radiation and a diffraction problems of a floating body in two-layer fluids were solved by the Numerical Wave Tank(NWT) technique in the frequency domain. In two-layer fluids, two different wave modes exist and the hydrodynamic coefficients can be obtained separately for each mode. The two-domain Boundary Element Method(BEM) in the potential fluid using the whole-domain matrix scheme was used to investigate the characteristics of wave forces, added mass and damping coefficients. The effects of the ratio of density and water depth in the lower domain were also evaluated and compared with given references.

※Keywords: Two-layer fluids(두 유체층), Surface wave mode(해면파 모드), Internal wave mode(내부파 모드), Two-domain boundary element method(Two-domain 경계 요소법), Numerical wave tank(수치 파동 수조), Radiation and diffraction problem(방사와 산란문제)

#### 1. 서론

전통적인 조선/해양공학적 관점에서 선박이나 해양 구조물 주위의 유동 해석은, 동일한 밀도의 유체장이 존재 한다는 가정에서 계산되고 또 예측

되어 왔다. 그러나 다양한 해양 환경 중에는 상이한 밀도차를 가진 유체들이 수치적으로 분포하는 경우들이 존재하는데, 거시적인 현상으로는 해양에서 온도 차이나 염분 변화 등으로 인한 표층수 (혹은 표층해류)와 저층수의 밀도 변화등이 있고, 미시적으로는 강하구의 담수 유입으로 인한 표층 해수의 염분차이 발생, 또는 유빙주위의 빙하로부터 용해된 표층 담수가 존재한다. 또한 특별한 경우로써, 유조선 사고 발생시 원유 유출로 인한 해수 표

---

접수일: 2010년 2월 22일, 승인일: 2010년 4월 26일  
\* 교신저자, wckoo@ulsan.ac.kr, 052-259-2767

면의 기름층 분포와, 연안이나 항구의 준설등으로 인한 진흙성분 저층류의 해저 유동 등이 존재한다.

밀도차가 있는 두 유체층에는 상부 유체층에서 전파되는 표면파 (Surface wave)와 유체 접선면 (Intersection)의 해양 내부파 (Internal wave)가 존재한다. 이 같은 해양 내부파는 지브로올터 해협 (Ziegenbein, 1969; Lacombe and Richez, 1982), 캐나다 British Columbia (Gargett, 1976), 태국 Andaman 해(Osborne and Burch, 1980), 그리고 China sea (Liu et al., 1998)등 세계 여러 곳에서 지속적으로 관측 보고 되고 있다. 우리나라 동해에서도 최대 25m의 진폭을 가진 내부파가 관측되었다 (Kim et al., 2001).

해양 내부파는 전 세계 해양에서 보편적으로 관측되는 물리적 현상이며, 그 진폭이 100m에 달할 만큼 큰 경우도 있기 때문에 깊은 흘수(draft)를 가지고 있는 해양구조물이나 선박에 영향을 미치게 된다. 따라서 해양 내부파가 해양 구조물등에 미치는 영향을 정확하게 이해하는 것은 매우 중요하다. 하지만, 아직까지 이에 대한 연구는 상당히 제한적이며, 몇몇 연구가 알려져 있을 뿐이다.

Osborne et al.(1978)은 드릴쉽의 심해 Drilling 시 라이저(Riser)에 미치는 내부파의 영향에 대해 연구를 수행하였고, Linton and McIver (1995)는 유한 수심의 두 유체층에서 내부파와 완전 침수된 수평 실린더와의 상호 작용에 대해 연구하였다. Yeung and Nguyen(1999)는 해양내부파와 사각 물체(Barge)의 방사(Radiation)와 산란(Diffraction) 문제를 위해 경계 적분법을 개발하였으며, Ten and Kashiwagi(2004) 와 Kashiwagi et al.(2006)도 유사한 방법으로 두 유체층에서의 2차원 부유체의 방사와 산란 문제를 계산 하였다.

해양 내부파는 밀도가 상이한 두 개의 유체층이 계산 영역임으로 해면파 모드(Surface wave mode)와 내부파 모드(Internal wave mode)가 존재하게 된다. 해면파 모드에서는 자유표면파와 유체층간 경계면에서 발생하는 내부파의 위상(phase)이 같으며 자유표면의 파고가 내부파고보다 크다. 이에 반해 내부파 모드에서는 자유표면과 경계면에서 발생하는 파의 위상이 반대이며, 표면 파고가 내부파고보다 작다 (Koo and Kim, 2009).

본 연구에서는 부유체가 존재하는 두 유체층에서 각 모드에 따라 부유체에 작용하는 파력, 부가질량 및 조파감쇠계수를 계산하고 그 특성을 분석하였다. 이를 위해, 경계 요소법(Boundary element method)을 기반으로 두 층의 계산 유체 영역이 존재하는 주파수 영역의 수치 파동 수조(Numerical wave tank)기법을 개발 적용하였다. 수치 파동 수조의 해저면과 유체층간 경계면은 모두 평평하다고 가정하였다. 또한 각 유체층의 밀도는 일정하며, 비점성, 비압축성, 비회전 유동으로 가정하여 라플라스 방정식을 지배 방정식으로 하였다. 그린함수(Green function)를 이용하여 지배 방정식을 경계 적분 방정식(Boundary integral equation)으로 변환하고, 각 유체 영역의 경계조건을 이용하여 전체 계산 영역에 대한 적분을 수행하였다.

또한, 밀도가 다른 두 유체층의 각 모드에서 부유체에 미치는 해양파의 영향을 조사하기 위해 입사파의 파장, 유체 수심 및 밀도비에 대한 매개변수 계산을 수행하여 각 변수에 따른 부유체 외력 및 거동 특성 변화 등을 조사하였다.

## 2. 수학적 모델과 공식화

### 2.1 지배방정식

계산 영역내의 유체는 비점성, 비압축성 그리고 비회전 유동으로 가정하여 유체 영역의 속도 포텐셜은 식 (1)과 같다.

$$\Phi(\vec{x}, t) = \text{Re}[\phi(\vec{x})e^{-i\omega t}] \quad (1)$$

유체 입자의 속도는 속도 포텐셜의 미분으로 나타낼 수 있고( $V = \nabla\phi$ ), 계산 영역은 연속 방정식을 만족하기 때문에 지배방정식은 라플라스 방정식(Laplace equation)이 사용되었다.

$$\nabla^2\phi^{(m)} = 0 \quad (2)$$

여기서  $m=1,2$ 는 각각 상부 유체영역, 하부 유체영역을 나타낸다.

지배방정식인 라플라스 방정식을 그린함수 (Green function)를 이용하여 아래 식(3) 과 같은 경계 적분 방정식으로 변환하여 각 경계면의 경계 조건을 대입하여 적분 방정식을 풀게 된다.

$$\alpha\phi_i^{(m)} = \iint_{\Omega_{(m)}} (G_{ij}^{(m)} \frac{\partial\phi_j^{(m)}}{\partial n} - \phi_j^{(m)} \frac{\partial G_{ij}^{(m)}}{\partial n}) ds \quad (3)$$

여기서 그린함수는  $G_{ij}(x_i, z_i, x_j, z_j) = -(1/2\pi)\ln R_1$  이며,  $\Omega_1, \Omega_2$ 는 각 계산 영역을 나타낸다. 각 영역은 라플라스 방정식을 만족하며, Solid angle( $\alpha$ )은 노드(node)가 경계면에 위치할 때 0.5의 값을 가진다. 또한  $R_1$ 은 소스점( $x_i, z_i$ )과 필드점( $x_j, z_j$ ) 사이의 거리를 나타내며, 소스와 필드점은 오직 같은 계산 영역 내에서 정의 된다. 다시 말해, 그린함수  $G_{ij}^{(1)}$ 는 오직 상부 유체영역내의 소스와 필드점에 의해 계산된다. 계산 영역의 개략적인 모습과 각 경계면의 기호는 Fig. 1에 나타내었다.

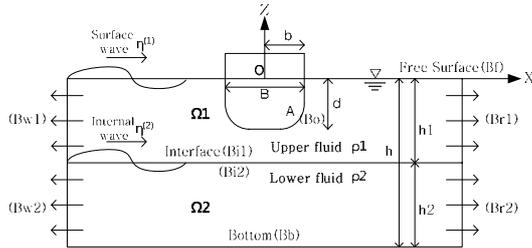


Fig. 1 Overview of computational domain( $\rho_1 < \rho_2$ )

### 2.2 경계 조건(Boundary conditions)

식 (3)의 경계 적분 방정식을 계산하기 위해서는 각 경계면의 조건을 만족하는 적절한 경계조건들이 필요하다. 주파수 영역하의 수치 파동 수조에서 부유체가 존재하는 경우, 산란(Diffraction) 문제의 경우는 입사파가 이미 부유체에 도달하여 정상상태를 유지한다는 가정하에, 계산 영역 좌우측 면에 방사(radiation) 경계 조건을 사용하여 파가 양쪽 수직 경계면에서 반사되지 않고 투과되도록 식(4)를 적용하였다.

$$\frac{\partial\phi^{(m)}}{\partial x} = ik\phi^{(m)} \quad (4)$$

여기서  $k$  는 자유표면과 유체층간 경계면에서의 파수를 나타낸다.

하부 유체 영역의 해저면(Sea bottom) 경계 조건은 유체 입자의 불투과성 조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial\phi^{(2)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } z = -h \quad (5)$$

자유표면의 경계 조건식은 운동학적(Kinematic) 조건과 동역학적(Dynamic) 조건의 조합으로 아래식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial\phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g}\phi^{(1)} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (6)$$

여기서  $\omega$  는 입사 주파수,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.

유체층간 경계면 조건은 경계면에서 수직 입자 속도가 같고(식 (7)), 각 유체 영역의 밀도비에 따라 표면 경계조건이 성립된다고 가정하여 (식 (8)) 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial\phi^{(1)}}{\partial z} = \frac{\partial\phi^{(2)}}{\partial z} \quad \text{on } z = -h1 \quad (7)$$

$$\rho_1 \left( \frac{\partial\phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g}\phi^{(1)} \right) = \rho_2 \left( \frac{\partial\phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g}\phi^{(2)} \right) \quad \text{on } z = -h1 \quad (8)$$

여기서  $\rho_1, \rho_2$ 는 각 유체층의 밀도를 나타낸다.

부유체의 경계 조건은 방사(Radiation)와 산란(Diffraction) 문제로 구분하여 각각 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\partial\phi_R^{(1)}}{\partial n} = V_n \quad \text{on } B0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial\phi_D^{(1)}}{\partial n} + \frac{\partial\phi_I^{(1)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } B0 \quad (10)$$

여기서  $V_n$ 은 각 운동 방향(sway, heave,

roll)의 법선 벡터 방향(n)의 속도를 나타내고,  $\phi_D^{(1)}$ 은 Diffraction potential을 나타낸다. 부유체의 각 운동 방향에 대한 방사 문제를 풀기 위해 부유체 경계조건( $V_n$ )에 각 운동 방향의 단위 속도를 대입하여 방사 포텐셜 ( $\phi_R^{(1)}$ )을 구할 수 있다. 또한 각 모드에 따른 입사파를 부유체 경계조건 (식 (10))에 대입하여 부유체의 산란 포텐셜 ( $\phi_D^{(1)}$ )을 구할 수 있다.

부유체 경계조건(식 (10))에 적용할 입사 포텐셜은 두 유체층에 대한 경계 적분 방정식과 경계 조건을 이용하여 Yeung and Nguyen (1999)이 계산한 속도 포텐셜(식 (11))을 사용 하였다.

$$\phi_I^{(1)} = \frac{iA \, ch1}{\omega k} [(\omega^2 \, th1 - gk) \cosh k(z+h1) - (\omega^2 - gk \, th1) \sinh k(z+h1)] \quad (11)$$

여기서  $A$ =입사파 진폭(Amplitude),  $ch1$ =cosh( $kh1$ ),  $th1$ =tanh( $kh1$ )이다. 입사파 진폭은 주 파수 영역 계산에서 단위진폭(1m)으로 고정 하였으며, 식 (11)의 파수( $k$ )를 각 모드에서 구하기 위해 식 (12)과 (13)을 사용하였다. 식 (12)는 해면파 모드, 식 (13)은 내부파 모드에서의 수정된 Dispersion relation이다 (Yeung and Nguyen, 1999).

$$\omega^2 = \frac{gk}{2(1+\gamma th1 \cdot th2)} (th1+th2) + \sqrt{(th1+th2)^2 - 4(1-\gamma)th1 \cdot th2(1+\gamma th1 \cdot th2)} \quad (12)$$

$$\omega^2 = \frac{gk}{2(1+\gamma th1 \cdot th2)} (th1+th2) - \sqrt{(th1+th2)^2 - 4(1-\gamma)th1 \cdot th2(1+\gamma th1 \cdot th2)} \quad (13)$$

여기서  $\gamma = \rho_1/\rho_2$ ,  $th1 = \tanh(kh1)$ ,  $th2 = \tanh(kh2)$ 이다.

### 2.3 유체 영역 계산

유체층간 경계면 조건으로부터 속도 포텐셜은 식 (14)와 같은 관계를 가지고 있다.

$$\gamma \phi^{(1)} = \phi^{(2)} + \frac{g(\gamma-1)}{\omega^2} \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} \quad \text{on } z = -h1 \quad (14)$$

위에서 언급한 각 유체 영역의 모든 경계 조건을 적용하여 경계 적분 방정식을 정리하면, 상부 유체와 하부 유체 영역의 적분 방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

#### 상부 유체 영역

$$\begin{aligned} & \int_{B_0} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - G_{ij}^{(1)} V_n \right] dl_{B_0} + \int_{B_1} \left[ \phi_j \left( \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - K G_{ij}^{(1)} \right) \right] dl_{B_1} \\ & + \int_{B_{01}} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(1)} \right] dl_{B_{01}} \quad (15) \\ & + \int_{B_{11}} \left[ \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \left( \frac{1-\gamma}{\gamma K} \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - G_{ij}^{(1)} \right) \right] dl_{B_{11}} \\ & + \int_{B_{21}} \left[ \phi_j \left( \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} \right) \right] dl_{B_{21}} + \int_{B_{11}} \left[ \phi_j \left( \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(1)} \right) \right] dl_{B_{11}} = 0 \end{aligned}$$

#### 하부 유체 영역

$$\begin{aligned} & \int_{B_{02}} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(2)} \right] dl_{B_{02}} + \int_{B_1} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} \right] dl_{B_1} \\ & + \int_{B_{22}} \left[ \phi_j \left( \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(2)} \right) \right] dl_{B_{22}} + \int_{B_{22}} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} \right] dl_{B_{22}} \\ & + \int_{B_{11}} \left[ G_{ij}^{(2)} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right] dl_{B_{11}} = 0 \quad (16) \end{aligned}$$

여기서  $\frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(m)}}{\partial n} = \frac{\partial G_{ij}^{(m)}}{\partial n} + (1/2)\delta_{ij}$ 이며,  $\delta_{ij}$ 는 Dirac delta 함수,  $K = \omega^2/g$  이다. 적분식의 경계면 기호는 Fig. 1에 표시되어 있다. 식 (15)와 식 (16)의 다섯 번째 적분영역(Bi2)과 (Bi1)은 두 유체층간 상호 작용을 의미한다. 상부 유체 영역의 첫 번째 적분영역(Bo)에서  $\int_{B_0} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - G_{ij}^{(1)} V_n \right] dl_{B_0}$  은 방사(Radiation) 문제를 풀기 위한 부유체 경계영역을 나타낸 것이며, 위 적분식을  $\int_{B_0} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} + G_{ij}^{(1)} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right] dl_{B_0}$  로 대체하면 부유체의 산란(Diffraction) 문제를 풀 수 있다. 각 유체 영역의 적분 방정식을 전체 영역(whole domain)으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{B_b} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} \right] dl_{B_b} \\
 & + \int_{B_f} \left[ \phi_j \left( \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - K G_{ij}^{(1)} \right) \right] dl_{B_f} + \int_{B_{b1}} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(1)} \right] dl_{B_{b1}} \\
 & + \int_{B_{b1}} \left[ \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \left( \frac{1-\gamma}{\gamma K} \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - G_{ij}^{(1)} \right) \right] dl_{B_{b1}} + \int_{B_{b1}} \left[ G_{ij}^{(2)} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right] dl_{B_{b1}} \\
 & + \int_{B_{b1}} \left[ \phi_j \left( \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(1)} \right) \right] dl_{B_{b1}} \quad (17) \\
 & + \int_{B_{b2}} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(2)} \right] dl_{B_{b2}} \\
 & + \int_{B_b} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} \right] dl_{B_b} + \int_{B_{b2}} \left[ \phi_j \left( \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} - ik G_{ij}^{(2)} \right) \right] dl_{B_{b2}} \\
 & + \int_{B_{b2}} \left[ \phi_j \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(2)}}{\partial n} \right] dl_{B_{b2}} + \int_{B_{b2}} \left[ \phi_j \left( \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \widetilde{G}_{ij}^{(1)}}{\partial n} \right) \right] dl_{B_{b2}} \\
 & = \int_{B_b} \left[ G_{ij}^{(1)} V_n \right] dl_{B_b}
 \end{aligned}$$

식 (17)의 마지막 항의 부유체 경계조건(25)에 각 운동 방향의 단위 법선속도벡터를 적용하여 전체 경계 적분 방정식을 풀면 방사 문제의 모든 경계면의 미지항을 구할 수 있다. 또한 마지막 적분식  $\int_{B_b} [G_{ij}^{(1)} V_n] dl_{B_b}$ 을  $\int_{B_b} \left[ -G_{ij}^{(1)} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right] dl_{B_b}$ 로 바꾸어 식 (11)에 표현된 입사파 포텐셜을 대입하여 전체 경계 적분 방정식을 풀면 산란 문제의 모든 경계면의 미지항을 구할 수 있다.

### 3. 결과 및 해석

#### 3.1 밀도비에 따른 영향( $\rho_1/\rho_2 = \gamma$ )

본 연구에서는 밀도가 상이한 두 유체층에서 부유체에 작용하는 외력과 부가질량의 특성을 파악하기 위해 주파수 영역의 수치 파동 수조를 개발하였으며, 유체의 밀도비와 수심비를 변화시켜 계산하였다. 본 연구에 사용된 부유체의 형상은 기존 연구 결과(Kashiwagi et al., 2006)와의 비교를 위해 2차원의 Lewis 형상을 사용하였으며  $b/d=0.833$ , 단면적(A) 비율  $A/(B*d)=0.9$ , 회전반경  $\kappa_{xx}=0.6b$ , 수면에서 무게중심까지의 거리  $\overline{OG}=0.45b$ 이다. 부가질량은  $\rho_2 b^2$ , 감쇠계수는  $\rho_2 b^2 \sqrt{g/b}$ 로 무차원화 하였다. 또한 파랑 기진력( $F_x, F_z$ )는

해면파 모드에서  $\rho_1 g a_1^{(1)} b$ , 내부파 모드에서  $\rho_1 g a_2^{(2)} b$ 로 무차원 하였다. 여기서  $a_1^{(1)}$ 는 해면파 모드에서 자유표면의 파진폭(wave amplitude)이고,  $a_2^{(2)}$ 는 내부파 모드에서 유체 경계층에서의 파진폭을 나타낸다.

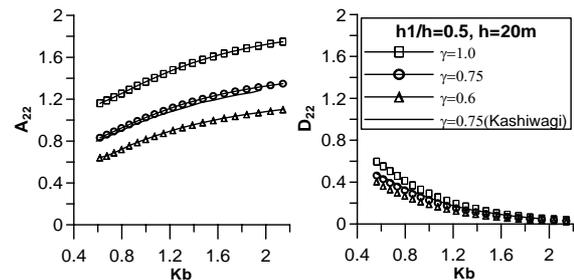


Fig. 2 Comparison of heave added mass (left) and damping coefficient (right) for various density ratios

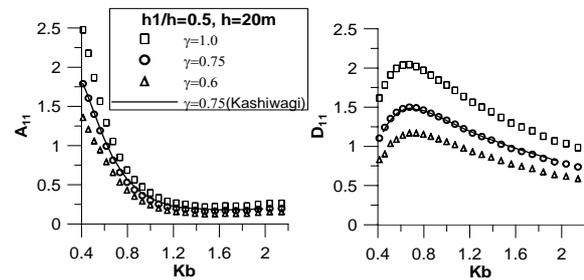


Fig. 3 Comparison of sway added mass (left) and damping coefficient (right)

Fig. 2에서 두 유체층의 밀도비에 따른 수직방향(heave)의 부가질량과 조파감쇠계수를 비교하였다. 밀도비가 작을 수록 (상부과 하부 유체층의 밀도차가 클수록) 부가 질량과 감쇠계수는 단일 유체층 계산결과( $\gamma=1.0$ )에 비해 감소함을 알 수 있다. 이는 부가질량과 감쇠계수의 값은 부유체 거동시 주변 유체로부터 받는 영향의 크기를 나타내기 때문에, 낮은 밀도에서는 작은 값을 갖게 된다. Fig. 3의 수평 방향(sway)에 대한 부가질량과 조파감쇠계수의 경우도 Fig. 2의 경우처럼 밀도비가 감소할수록 계산값도 감소한다. 밀도비

가  $\gamma=0.75$  인 경우 Ten and Kashiwagi (2004)의 결과와 본 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

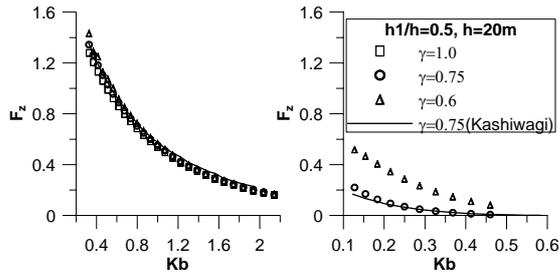


Fig. 4 Comparison of heave force for surface wave mode (left) and internal wave mode (right)

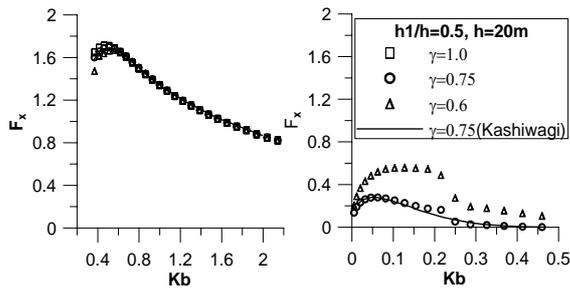


Fig. 5 Comparison of sway force for surface wave mode (left) and internal wave mode (right)

Fig. 4에서는 산란(Diffraction) 경계값 문제를 풀어 수직방향의 파력(heave force)를 각 밀도비에 따라 비교 하였다. 해면파 모드(좌측)에서는 밀도비에 따른 수직력의 변화가 매우 작지만, 내부파 모드(우측)에서는 밀도비가 작을수록(유체간 밀도차가 클수록) 수직력이 커짐을 알 수 있다. 이같은 원인은 내부파 모드에서 하부 유체의 영향이 상대적으로 크기 때문에, 밀도차가 큰 경우 밀도가 큰 하부 유체가 상부 유체에 많은 영향을 주기 때문

으로 풀이된다. Fig. 5의 수평력(sway force)의 경우에도 수직력과 동일한 경향을 나타낸다. 장파인 경우(Kb가 작은 경우)에는 해면파 모드에서 밀도차가 클수록 수직력은 약간 증가하고 수평력은 약간 감소함을 알 수 있다.

### 3.2 수심에 따른 영향

하부 유체의 수심변화에 따른 부유체의 영향을 조사하기 위해 상부 유체층의 깊이를 10m로 일정하게 유지하고, 밀도비를  $\gamma=0.75$ 로 고정하였다.

Fig. 6에 하층 수심 변화에 따른 수직방향의 부가질량과 조파감쇠계수를 입사파 전체 영역에서 계산하였다. 하부 유체의 수심이 깊을수록, 수직 방향의 물리값들은 대체로 감소함을 알 수 있다. 이는 수심이 깊을수록 해저면( $z=-h$ )의 영향이 감소함을 의미한다. 해저면이 얕을 수록 부가 질량은 증가하며, 감쇠계수도 증가한다. 하지만 그 차이는 약 10% 내외로 그리 크지 않다.

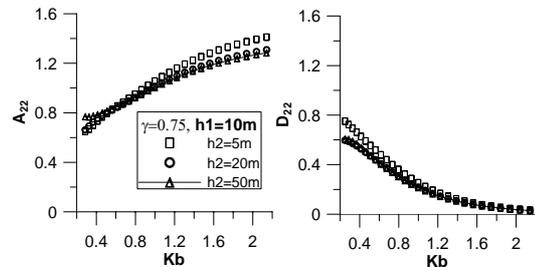


Fig. 6 Comparison of heave added mass (left) and damping coefficient (right) for various water depths of lower domain

수평방향의 부가질량과 감쇠계수의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 수평방향 부가질량의 경우 장파에서는 해저면이 깊을수록 약간 증가하는 것을 알 수 있고 이는 수직방향의 경우도 비슷한 경향을 보인다. 장파에서는 수심이 깊더라도 해저면의 영향을 받기 때문에

약간의 차이가 발생하는 것으로 보인다. 수평 방향의 감쇠계수는 해저면 깊이에 따른 변화가 그리 크지 않다.

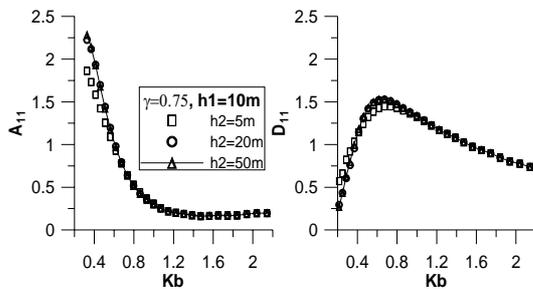


Fig. 7 Comparison of sway added mass (left) and damping coefficient (right)

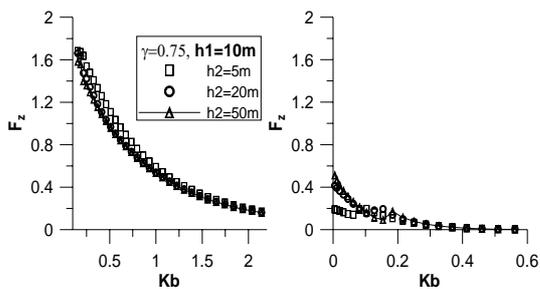


Fig. 8 Comparison of heave force for surface wave mode (left) and internal wave mode (right)

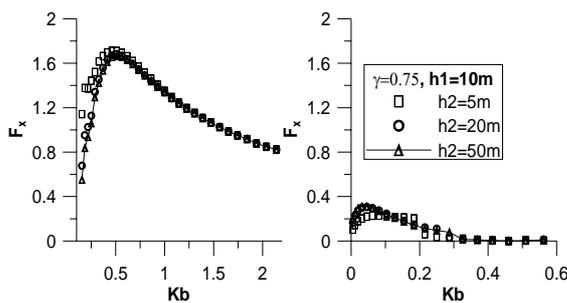


Fig. 9 Comparison of sway force for surface wave mode (left) and internal wave mode (right)

해저면 깊이에 따른 수직력(Fig. 8)과 수평력(Fig. 9)의 변화는 해저면이 얕을수록 해면파 모드에서

약간 증가함을 알 수 있다. 하지만 내부파 모드에서는 각각 감소한다. 또한 해저면의 영향이 장파에서 더 크기 때문에, 장파에서의 수직,수평력 변화량이 단파에서의 변화량보다 큰 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

주파수 영역의 2차원 수치 파동 수조 기법을 이용하여 밀도가 상이한 두 유체층에서 부유체의 각 운동에 대한 부가질량과 조파감쇠계수, 수직력 및 수평력을 계산하였다. 각 유체 영역을 만족하는 지배 방정식을 경계적분 방정식으로 변환하고 경계면을 만족하는 경계 조건을 개발 적용하여 적분 방정식을 계산 하였다. 유체층의 밀도비와 해저면 깊이 변화가 부유체에 미치는 영향을 살펴보기 위해 매개변수 계산을 수행하여 그 차이를 비교하였다.

본 연구 결과에 의해, 상부와 하부 유체층의 밀도차가 클수록 부가 질량과 감쇠계수는 감소함을 알 수 있다. 또한 해면파 모드에서 밀도비에 따른 수직력과 수평력의 변화가 매우 작지만, 내부파 모드에서는 유체간 밀도차가 클수록 수직, 수평력이 커짐을 알 수 있다. 이는 내부파 모드에서 하부 유체의 영향이 상대적으로 크기 때문이다.

해저면의 깊이에 따른 부유체의 부가질량과 감쇠계수의 변화는 하부 유체의 수심이 깊을수록, 수직 방향의 물리값들은 대체로 감소하지만 그 차이는 크지 않다. 또한 수평방향의 값들은 큰 변화가 없다. 하지만 장파의 경우 해저면의 영향으로 부가질량이 약간 증가함을 알 수 있다. 수직력과 수평력의 경우 장파인 경우를 제외하면 별다른 변화가 없음을 알 수 있다. 그러므로 하부 유체 수심 변화의 영향은 입사파와 해저면과의 상호작용의 크기에 따라 부유체의 물리량의 변화폭이 결정됨을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-331-D00722)이며, 현대중공업지원 울산대학교 SOTOP 프로젝트에서 연구비 일부를 지원 받았음(2008-B001).

## 참 고 문 헌

- Gargett, A.E., 1976, "Generation of Internal Waves in Strait of Georgia, British Columbia", Deep Sea Research, Vol. 23, pp. 17-32.
- Kashiwagi, M., Ten, I. and Yasunaga, M., 2006, "Hydrodynamics of a Body Floating in a Two-layer Fluid of Finite Depth. Part 2. Diffraction Problem and Wave-induced Motions", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 11, pp. 150-164.
- Kim, H.R., Ahn, S. and Kim, K., 2001, "Observations of Highly Nonlinear Internal Solitons Generated by Near-inertial Internal Waves off the East Coast of Korea", Geophys. Res. Lett, Vol. 28(16), pp. 3191-3194.
- Koo, W.C. and Kim, M.G., 2009, "Numerical Analysis of Internal Waves in Two-layer Fluids by a Two-domain Boundary Element Method", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 23(4), pp. 6-11.
- Lacombe, H. and Richez, C., 1982, "The Regime of the Strait of Gibraltar", Hydrodynamics of Semi-enclosed Seas, pp. 13-73, Elsevier.
- Linton, C.M. and McIver, M., 1995, "The Interaction of Waves with Horizontal Cylinders in Two-layer Fluids", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 304, pp. 213-229.
- Liu, A.K., Chang Y.S., Hsu, M.K. and Liang, N.K., 1998, "Evolution of Nonlinear Internal Waves in the East and South China Seas", Journal of Geophysical Research, Vol. 103(C4), pp. 7995-8008.
- Osborne, A.R. and Burch, T.L., 1980, "Internal Solitons in Adaman Sea", Science, Vol. 208, pp. 451-460.
- Osborne, A.R., Burch, T.L. and Scarlet, R.I., 1978, "The Influence of Internal Waves on Deep-Water Drilling", Journal of Petroleum Technology, Vol. 30(10), pp. 1497-1504.
- Ten, I. and Kashiwagi, M., 2004, "Hydrodynamics of a Body Floating in a Two-layer Fluid of Finite Depth. Part 1. Radiation Problem", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 9, pp. 127-141.
- Yeung, R.W. and Nguyen, T., 1999, "Radiation and Diffraction of Waves in a Two-layer Fluid", Proc. 22nd symposium of Naval Hydrodynamics, Washington, DC, pp. 875-891.
- Ziegenbein, J., 1969, "Short Internal Waves in the Strait of Gibraltar", Deep Sea Research, Vol. 16, pp. 479-487.



< 김 미 근 >

< 구 원 철 >