

# Radiation Problem Involving Two-layer Fluid in Frequency-Domain Numerical Wave Tank Using Artificial Damping Scheme

Eun-Hong Min\* and Weoncheol Koo\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

## 주파수 영역에서 인공감쇠기법을 활용한 복층 유체의 수치조파수조 방사 문제

민은홍\* · 구원철\*

\*인하대학교 조선해양공학과

**KEY WORDS:** Two-layer fluid 복층 유체, Barotropic mode 순압성 모드, Baroclinic mode 경압 모드, Frequency domain 주파수 영역, Radiation problem 방사문제, Artificial damping scheme 인공감쇠기법, Numerical wave tank 수치 조파 수조

**ABSTRACT:** There are two wave modes induced by an oscillating body on the free surface of a two-layer fluid: the barotropic and baroclinic modes. To investigate the generated waves composed of two modes, a radiation problem involving a heaving rectangular body was solved in a numerical wave tank. A new artificial damping zone scheme was developed and applied in the frequency-domain analysis. The performance of this damping scheme was compared with given radiation boundary conditions for various conditions. The added mass and radiation damping coefficients for the heaving rectangular body were also calculated for various fluid-density ratios.

### 1. 서 론

해양환경에 대한 연구를 수행할 때, 일반적으로 유체 밀도는 단일하다고 가정하지만, 실제 해양 내부는 여러 자연현상의 영향으로 수온이나 염분이 일정치 않아 밀도차가 존재하게 된다. 이때, 밀도가 서로 다른 유체층 사이에서 파가 발생하게 되는데 이를 통상 내면파(Interfacial wave)라고 한다. 즉, 해양내부 경계층에서 생성되는 파를 의미한다. 지구상 여러 곳에서 해양 내면파가 관측되고 있는데, 지브롤터 해협에서는 수십킬로미터의 파장을 갖는 내면파가 관측되기도 하였고(Alpers and Violette, 1993), 남중국해 동쪽 연안에서 SAR(Synthetic aperture radar)를 이용한 내면파 관측이 보고되었다(Liu et al., 1998). 특히, 우리나라에서도 15m 파고를 갖는 내면파가 동해안에서 관측되었고(Kim et al., 2001), 제주도 북동쪽에서도 내면파가 관측 보고 되었다(Kim and Won, 1999). 해양 내면파는 표층에서는 보이지 않지만, 파의 규모가 매우 커서 여러 해상 사고를 유발할 가능성이 충분하다. 예를 들어, 미국 핵잠수함 트레셔(USS Thresher)와 스콜피온(USS Scorpion)의 갑작스런 침몰 사건의 경우 아직까지

여러 가설들이 존재하는데, 그 중 내면파에 의한 영향이라는 가설이 유력하게 추측 되었다(Pinet, 1992). 이외에도, Osborne et al.(1978)은 내면파에 의해 심해시추선의 계류선 장력이 변하는 것을 조사하였다.

그러나 실제 해양 내면파의 경우 표면파와 달리 직접 눈으로 관측하기 어려우며, 내면파에 의한 부유체의 직접적인 피해나 구조물에 작용하는 영향을 명확히 알기 어렵고, 해저지형이나 해류 등의 영향을 받아 균일한 내면파의 특성을 파악하기 어렵다. 이에 따라, 해양 내면파의 물리적 특성과 영향을 파악하기 위해, 밀도가 상이한 유체층에 대한 여러 연구들이 수행되었다. Yeung and Nguyen(1999)는 복층 유체에서 삼 차원 물체에 대해 방사 및 산란문제를 풀기 위해 그린함수를 정의하여 경계 적분식을 개발하였고, 이후 유사한 연구가 꾸준히 진행 되었다(Ten and Kashiwagi, 2004; Kashiwagi et al., 2006; Kim and Koo, 2010).

유체가 밀도에 따라 복층으로 존재할 때, Barotropic 모드와 Baroclinic 모드라는 서로 다른 특징을 가지는 두 개의 해양파 모드가 존재한다(Yeung and Nguyen, 1999). 따라서 복층 유체에

Received 22 June 2016, revised 14 December 2016, accepted 16 December 2016

Corresponding author Weoncheol Koo: +82-32-860-7348, wckoo@inha.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

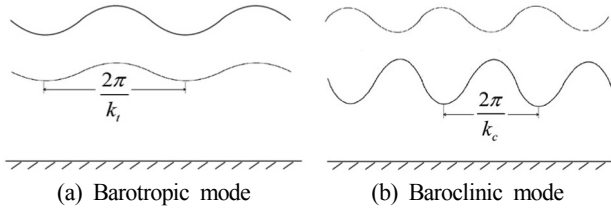


Fig. 1 Characteristics of two wave-modes in a two-layer fluid

대한 해양파 분산 관계식을 통해, 한 주파수에 각각의 모드에 해당하는 두 개의 파장을 얻을 수 있다. 이때, 일반적으로 Barotropic 모드에서의 파장이 Baroclinic 모드에 비해 길다. 두 해양파 모드의 주요 특징은 Fig. 1에 나타낸 것처럼, Barotropic 모드는 표면파고가 내면파고보다 더 크고 두 파의 위상이 같은 반면, Baroclinic 모드는 내면파고가 더 크고 두 파의 위상차는 180도 이다.

본 연구에서는 경계요소법을 기반으로 자체 개발한 주파수 영역의 수치조파수조를 이용하여, 복층 유체가 존재하는 상태에서 부유체의 상하동요에 따른 방사문제를 해석하였다. 방사문제 계산을 위해서는 적절한 방사경계 조건의 개발과 적용이 필수적인데, 기존 연구에서는 Barotropic 모드에서의 파수를 이용하여 수치조파수조 끝단의 방사 경계조건을 설정하였다(Kim and Koo, 2010). 그러나 부유체가 복층 유체 내에서 비교적 높은 주파수로 운동을 하게 되면 생성파는 일반적으로 Barotropic 모드가 우세하여 Baroclinic 모드는 거의 나타나지 않지만(Koo and Min, 2015), 낮은 주파수로 운동하게 되면 앞서 언급한 두 해양파 모드가 모두 존재하게 된다. 따라서 어느 한 모드의 파수로 방사조건을 설정하는 기존의 방사조건은 만족할만한 결과를 도출하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해, 주파수 영역에서 복층 유체가 존재하는 수치파동수조에 적용할 수 있는 인공감쇠영역 수치 모델링을 새롭게 개발하여 적용하였다.

수치 모델링에서 인공감쇠영역의 설치와 적용은 보통 시간영역 수치조파수조 계산에서 사용되지만, 이번 연구에서는 주파수 영역에 적용할 수 있는 수치 해석 모델링을 개발하여, 유체 영역내의 반사와 감쇠효과를 알아보고, 기존 계산결과(Ten and Kashiwagi, 2004)와 비교 검증하였다. 주파수영역에서 방사문제 해석을 통해, 복층 유체의 수면에서 운동하는 부유체의 부가질량 및 조파 감쇠계수를 각 유체층의 밀도비 변화에 따라 그 차이를 조사하였다.

수치 계산 모델링을 위해, 각 유체는 이상유체로 가정하고 지배방정식으로는 라플라스 방정식을 사용하였다. 또한, 계산 영역 내 해저면은 편평하다고 가정하였다.

## 2. 수학적 정식화

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 복층 유체에서 부유체 운동해석을 수행한 기존 연구들(Ten and Kashiwagi, 2004; Kim and Koo, 2010)과 비교하고자, 상하동요를 하는 이차원 Lewis 형상의 주상형 부유체를 사용하였으며 이에 대한 개략적인 모습을 Fig. 2에 나타내었다.

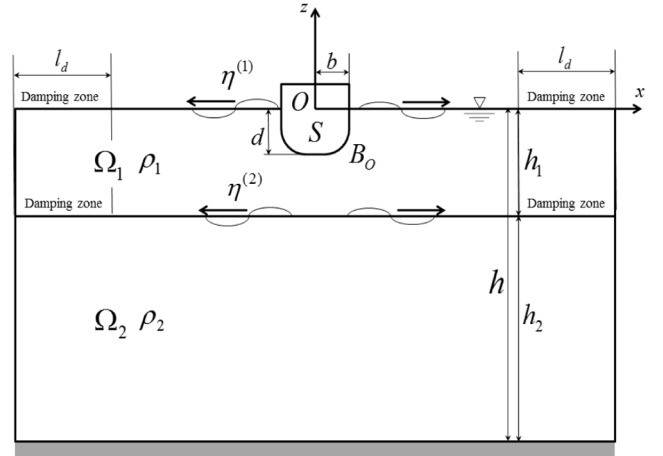


Fig. 2 Computational fluid domain for a two-layer fluid with an oscillating floating body

각 유체층은 비점성, 비압축성, 즉 이상유체로 가정하고, 비회전성 유동을 가정하여 유체 입자의 속도를 속도 포텐셜 ( $\Phi(\vec{x}, t) = \text{Re}[\phi(\vec{x})e^{-i\omega t}]$ )로 표현하였고, 각 유체층의 지배방정식으로 다음과 같이 라플라스 방정식을 사용하였다.

$$\nabla^2 \phi^{(m)} = 0 \quad \text{in } \Omega_m \quad (1)$$

여기서  $\Omega_m (m=1, 2)$ 은 각각 상부유체와 하부유체의 계산영역을 나타낸다. 위 지배방정식은 그린함수를 통해 식 (2)의 경계적분 방정식으로 변환될 수 있으며 각 경계면에 대한 경계조건을 이용하여 적분 방정식을 풀 수 있다.

$$\frac{1}{2} \phi_i^{(m)} = \iint_{\Omega_m} \left( G_{ij}^{(m)} \frac{\partial \phi_j^{(m)}}{\partial n} - \phi_j^{(m)} \frac{\partial G_{ij}^{(m)}}{\partial n} \right) ds \quad (2)$$

여기서 좌변은 필드점이 경계면에 위치할 때의 표면각 값을 고려하여 나타내었고, 우변의 그린함수는  $G_{ij} = -(1/2\pi) \ln R_{ij}$ 으로 표현된다. 이때,  $R_{ij}$ 은 동일한 유체밀도 영역 경계면에서 정의되는 소스점과 필드점 사이의 거리를 나타낸다.

### 2.2 경계 조건

복층 유체에 대한 수치모델링을 위해, 각 경계면에 대한 경계조건을 설정하였다. 본 연구에서는 부유체 운동 시의 유체 방사문제에 대하여 고려하였는데, 먼저 선형화된 자유표면과 유체 경계층에서의 동역학적 및 운동학적 경계조건을 나타내면 다음과 같다.

자유표면 경계 조건식

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g\eta^{(1)} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta^{(1)}}{\partial t} = \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \quad \text{on } z = 0 \quad (4)$$

복층 유체 경계면 조건식

$$\rho_1 \left( \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g\eta^{(2)} \right) = \rho_2 \left( \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + g\eta^{(2)} \right) \quad \text{on } z = -h_1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta^{(2)}}{\partial t} = \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} = \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} \quad \text{on } z = -h_1 \quad (6)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_1$ 와  $\rho_2$ 는 각각 상부유체와 하부유체의 밀도를 나타내며,  $\eta^{(1)}$ 와  $\eta^{(2)}$ 는 표면파고와 내면파고를 나타낸다. 자유표면 및 유체 경계면 이외의 계산 영역의 각 경계조건을 간략히 요약하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on the side wall} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } z = -h \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = V_n \quad \text{on } B_0 \quad (9)$$

식 (7)은 부유체 운동에 의해 생성된 파가 수면상의 인공 감쇠 영역에서 흡수된다는 가정 하에 양쪽 벽은 강벽(Rigid wall)조건을 사용하여 나타내었다. 마찬가지로, 바닥경계조건으로는 비 투과조건(No penetration)을 적용하여 식 (8)에 나타내었다. 식 (9)는 부유체의 경계 조건으로,  $V_n$ 은 부유체의 법선방향의 속도를 나타내며, 여기서는 수직 방향의 단위 속도를 대입하였다.

감쇠영역을 포함하고 있는 자유 수면과 유체 경계층의 경계 조건식에 관한 내용은 다음 2.3장에 기술하였다.

### 2.3 인공감쇠영역

본 연구에서는 복층 유체에서 생성된 파가 계산영역 양 끝단에서 반사되어 영역내로 재 유입되는 것을 방지하기 위해, 자유 수면과 두 유체 경계면에 인공 감쇠영역을 설치하였다. 선형화된 자유표면 경계조건식(식 (3)-(6))에 두 개의 감쇠항을 추가하고 해의 안정성이 확인된 Kim(2003)의 방법을 이용하여, 자유표면 경계면과 두 유체 경계면의 경계조건식을 다음과 같이 나타내었다.

자유표면 경계 조건식

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} + \mu_{11} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + \mu_{12} \Phi^{(1)} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (10)$$

복층 유체 경계면 조건식

$$\begin{aligned} & \rho_1 \left( \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} + \mu_{21} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + \mu_{22} \Phi^{(1)} \right) \\ & = \rho_2 \left( \frac{\partial^2 \Phi^{(2)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} + \mu_{21} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + \mu_{22} \Phi^{(2)} \right) \quad \text{on } z = -h_1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $\mu$ 는 감쇠항 계수로 감쇠영역내로 입사한 파의 진동수가 변하지 않는 조건  $\mu_{m1}^2 = 4\mu_{m2}$  ( $m = 1, 2$ )을 적용하였다(Kim, 2003). 따라서 식 (10)과 (11)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

자유표면 경계조건식

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = \frac{\omega^2}{g} \left[ 1 + i \frac{\mu_{11}}{\omega} - \left( \frac{\mu_{11}}{2\omega} \right)^2 \right] \phi^{(1)} \quad \text{on } z = 0 \quad (12)$$

복층 유체 경계면 조건식

$$\phi^{(1)} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{i}{\omega} \mu_{21} - \left( \frac{\mu_{21}}{2\omega} \right)^2 \right]} \frac{1 - \gamma}{\gamma K} \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} + \frac{1}{\gamma} \phi^{(2)} \quad \text{on } z = -h_1 \quad (13)$$

여기서  $\gamma = \rho_1/\rho_2$ ,  $K = \omega^2/g$ 을 나타내며,  $\omega$ 는 부유체의 운동 주파수를 나타낸다. 이때, 인공감쇠영역으로 진입한 파가 안정적으로 감쇠할 수 있도록 감쇠항 계수는 다음 식을 사용하였다.

$$\mu_{m1}(x) = \begin{cases} \mu_{0m} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} \left( \frac{x-l}{l_d} \right) \right) \right] & x > l \\ \mu_{0m} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} \left( \frac{x+l}{l_d} \right) \right) \right] & x < -l \\ 0 & -l \leq x \leq l \end{cases} \quad (14)$$

여기서  $l$ 은 부유체 중심에서부터 감쇠영역 시작점까지의 길이를 나타내고  $l_d$ 는 감쇠 영역의 길이를 나타낸다. 밀도 비( $\gamma$ )는 0.75, 전체 유체 깊이에 대한 상부 유체 깊이의 비( $h_1/h$ )는 0.5의 상태에서, 계산영역 중 감쇠영역이 포함되지 않은 자유수면 구간의 길이( $l_0 = l - b$ )에 대한 수렴도 검사 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 수렴도 검사에 사용된 부유체는 Fig. 2에 나타내었으며, 부유체의 반폭과 흡수비 ( $b/d$ )는 0.833, 단면적의 비 ( $S/(2b \times d)$ )는 0.9 이다. 세로축은 부유체의 상하운동 주파수에 따른 상하동요 부가질량( $A_{33}$ )과 감쇠계수( $D_{33}$ )를 나타내며, 이때 부가질량은  $\rho_2 b^2$ , 감쇠계수는  $\rho_2 b^2 \sqrt{g/b}$ 로 무차원화 하였다. 가로축은 자유수면 구간의 길이( $l_0$ )를 Barotropic 모드에서의 파장 길이( $\lambda_t$ )의 비로 나타냈다. 보통 Barotropic 모드에서 한 파장 정도의 길이이면 결과 값이 수렴하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는,  $l_0$ 를 Barotropic 모드에서의 파장의 2배로 설정하여 충분한 안정성을 확보하였다.

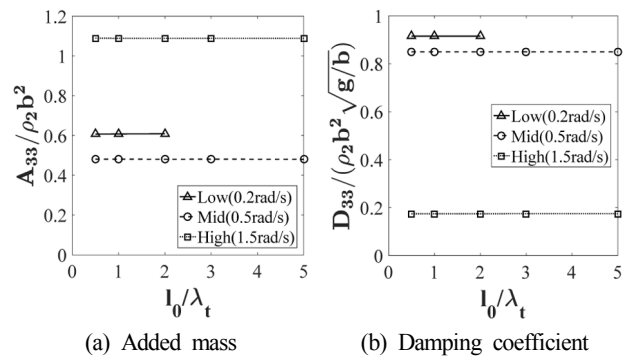
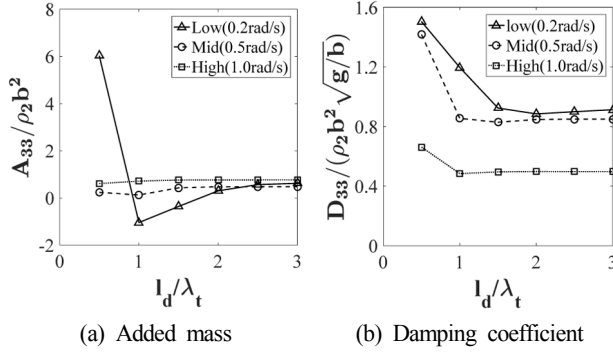


Fig. 3 Convergence tests of heave added-mass and damping coefficients for free surface length without artificial damping effect ( $h_1/h = 0.5$ ,  $\gamma = 0.75$ )



**Fig. 4** Convergence tests of heave added-mass and damping coefficients for length of artificial damping zone ( $h_1/h = 0.5$ ,  $\gamma = 0.75$ )

**Table 1** Optimal condition of an artificial damping zone for various body-motion frequencies

Body motion	Length of damping zone [ $l_d$ ]	Damping magnitude [ $\mu_{0m}$ ]
Low freq.	3 $\lambda_t$	2.0
Middle freq.	2 $\lambda_t$	1.5
High freq.	2 $\lambda_t$	1.5

또한,  $\mu_{0i}$ 는 감쇠계수의 크기(Magnitude)로서 수렴도 검사를 통해, 적절한 감쇠영역 길이와 계수 크기를 구하였다. 이때, 각 주파수 당 표면파와 내면파의 감쇠계수 크기는 같다고 가정하고( $\mu_{01} = \mu_{02}$ ) 수렴도 검사를 수행하였다.

Fig. 4는 부유체의 운동 주파수 별 인공감쇠영역 길이에 대한 수렴도 검사를 수행한 결과이다. 그래프의 세로축은 Fig. 3과 동일하게 무차원화 된 부가질량과 감쇠계수를 나타내며, 가로축은 감쇠영역 길이( $l_d$ )를 Barotropic mode에서 생성파장 길이( $\lambda_t$ )의 비로 나타냈다. 결과 비교를 통해, 각 운동 주파수에 따른 적합한 감쇠영역의 길이와 감쇠계수 크기는 Table 1과 같이 설정하였다.

## 2.4 유체 방사 문제

부유체의 상하동요 조건을 사용하여 계산한 부유체 방사포텐셜(Radiation potential)을 이용하여 부가질량(Added mass), 방사 감쇠계수(Radiation damping coefficient) 그리고 표면파고와 내면파고(Wave elevation)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{부가질량 } A_{33} = \text{Re} \left[ \rho_1 \int_{B_o} \phi^{(1)} n_3 ds \right] \quad (15)$$

$$\text{감쇠계수 } D_{33} = \omega \text{Im} \left[ \rho_1 \int_{B_o} \phi^{(1)} n_3 ds \right] \quad (16)$$

$$\text{표면파 } \eta^{(1)} = \frac{i\omega}{g} \phi^{(1)} \quad \text{on } z = 0 \quad (17)$$

$$\text{내면파 } \eta^{(2)} = \frac{i}{\omega} \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} \quad \text{on } z = -h_1 \quad (18)$$

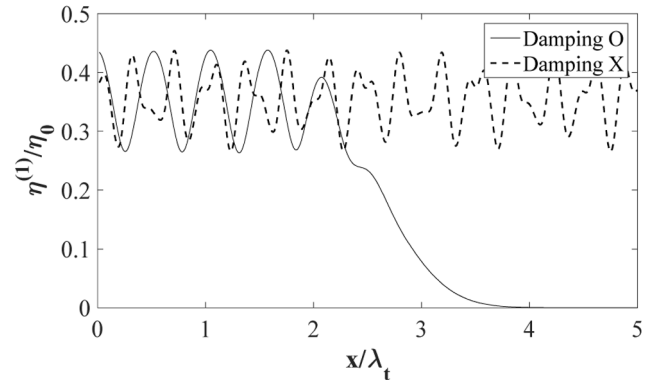
## 3. 수치 계산 결과

본 연구에서는 밀도가 다른 복층 유체에서 부유체 상하동요에 의한 방사문제를 주파수 영역에서 해석하였다. 계산 결과의 검증에 위해 Ten and Kashiwagi(2004)와 Kim and Koo(2010)의 결과와 비교하였다. 이때 부유체는 앞선 수렴도 검사에서 진행된 모델과 동일하다.

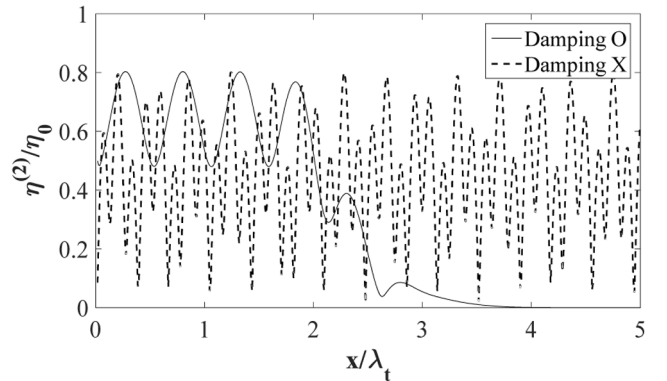
Fig. 5와 6은 표면파고와 내면파고의 정상상태(Steady state)를 정 위치별로 나타낸 그래프로써, 가로축과 세로축은 각각 Barotropic mode에서의 파장과 부유체의 운동 진폭 크기( $\eta_0$ )로 무차원화 하였으며, 기존 방사조건을 적용한 결과(Damping X: Kim and Koo, 2010)와 인공감쇠영역을 적용한 본 계산 결과(Damping O)를 비교하였다. 이때, 모든 계산 조건은 밀도 비( $\gamma = 0.75$ ), 수심( $h_1/h = 0.5$ )을 동일하게 두고 계산을 진행하였다.

기존 방사조건은 Barotropic 모드에서의 파수를 이용하여 진행파를 방사경계면에서 수치적으로 통과시키는 방법으로 방사 조건 경계식 ( $\partial \phi^{(m)} / \partial x = ik \phi^{(m)}$ )을 사용하였다.

부유체가 낮은 주파수로 운동하는 경우(Fig. 5), 상대적으로 긴 파장을 갖는 Barotropic 모드의 생성파와 상대적으로 짧은 파장을 갖는 Baroclinic 모드의 생성파가 혼합되어 진행하게 된다. 그러나 인공 감쇠영역에서 진행파를 모두 소멸시켜 계산 영역 양쪽 벽에서 반사되지 않기 때문에, 재 반사파로 인한 결과의

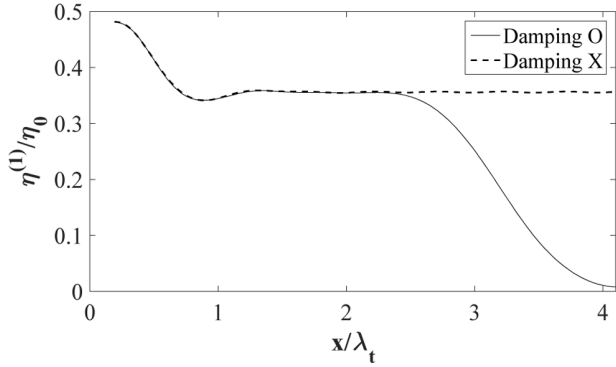


(a) Surface wave amplitude

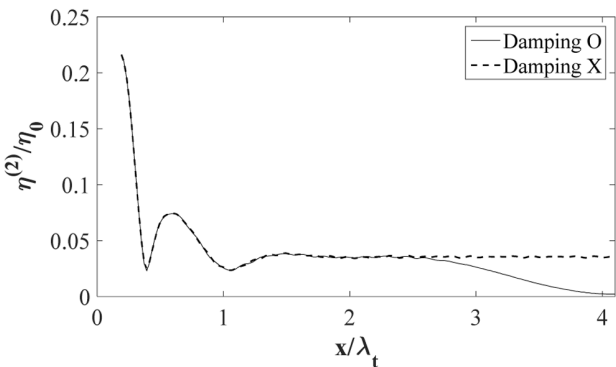


(b) Interfacial wave amplitude

**Fig. 5** Comparison of wave amplitudes induced by low frequency body motion (0.2 rad/s)



(a) Surface wave amplitude



(b) Interfacial wave amplitude

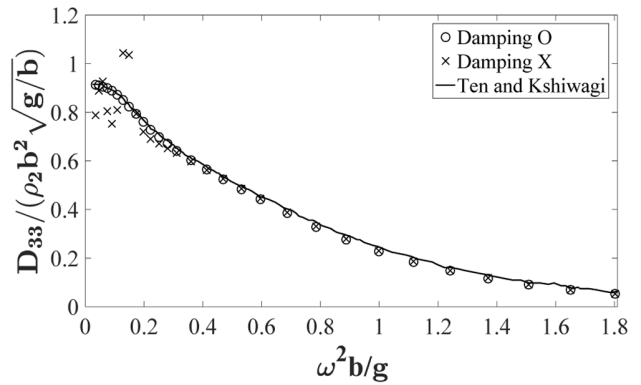
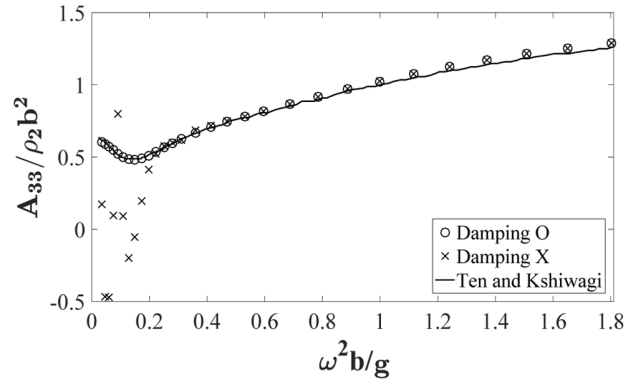
**Fig. 6** Comparison of wave amplitudes induced by high frequency body motion (1.5 rad/s)

간섭 없이 각 수면 위치별로 규칙적인 파고 변화 형태를 보이는 반면, 기존 방사조건을 적용한 경우는 파고 측정 위치에 따라 불규칙한 파고 형태를 나타낸다. 이는 다시 말해 생성된 파가 계산 유체영역 외부로 완전히 빠져 나가지 못하고 영역내로 재유입 되어 생긴 반사파들의 영향으로 볼 수 있다. 반면에 부유체가 고주파수 운동 시(Fig. 6), 두 방사조건에 따른 계산 결과가 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 부유체 운동 주파수가 증가할수록 생성파의 Barotropic 모드가 우세해져, 기존 방사경계 조건식도 유효하다고 판단된다. 인공감쇠영역을 적용한 결과는 계산영역 끝에서 파고가 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이는 진행파가 감쇠영역 내에서 효과적으로 제거됨을 보여준다. 따라서 본 연구에서 개발된 인공감쇠영역은 부유체 운동 주파수 변화와 무관하게 반사파의 감쇠가 복층 유체 내에서 효과적으로 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 부유체 운동에 의한 부가질량 및 방사감쇠계수를 기존 계산 결과(Ten and Kashiwagi, 2004)와 비교한 결과이다.

부유체 운동 주파수가 큰 영역에서는 모든 비교 결과들이 대체적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6에서 확인한 바와 같이, 고주파수 운동에서 Barotropic 모드가 우세한 파가 생성되기 때문에 이를 적용한 기존 방사 경계조건도 효과적임을 의미한다.

그러나 운동 주파수가 작을수록, 기존 방사조건을 적용한 결과는 상당한 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 부유체의


**Fig. 7** Comparison of heave added mass (upper) and damping coefficient (lower) ( $h_1/h = 0.5$ ,  $\gamma = 0.75$ )

저주파수 운동 시 발생하는 파가 Barotropic 모드와 Baroclinic 모드가 혼합되어 있기 때문에, 기존 방사 경계조건식으로는 진행파를 유체 영역 경계면에서 완전하게 통과시키지 못하기 때문이다. 하지만, 인공감쇠영역을 적용한 계산 결과는 부유체 운동 주파수와 무관하게 Ten and Kashiwagi(2004)의 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

그러나 주파수가 0에 가까워지게 되면, 수치조파수조의 계산 영역이 매우 커지게 되어, 본 연구에서 적용한 인공 감쇠영역의 역할과 무관하게 계산 값의 신뢰성이 떨어질 수밖에 없는 한계점이 존재한다.

Fig. 8은 인공감쇠영역을 적용한 상태에서, 두 유체의 밀도 차에 따른 부유체의 상하동요 부가질량과 방사감쇠계수를 비교하였다. 부가질량과 감쇠계수는 밀도비( $\gamma$ )가 작아질수록, 즉 유체 층간 밀도차가 클수록 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 이는, 부유체가 상부 유체에 위치하고 있어 상부유체의 밀도가 하부유체에 비해 상대적으로 작아지면서, 부유체 운동이 상하부 유체에 미치는 영향이 변화됨을 의미한다. 부유체 운동 주파수가 증가함에 따라 부가질량은 점점 증가하는 반면, 방사감쇠 계수는 감소하여 밀도 비에 의한 차이가 점차 작아지는 것을 볼 수 있다. 부가질량의 경우 저주파수 영역에서 주파수에 따른 변동이 생긴 후 계속 증가하는 모습을 보이는데, 이 변동이 일어나는 주파수 위치가 밀도비가 증가할수록 점점 작아져서 단일 층에서의 특징과 점차 비슷해지는 것을 확인할 수 있다. 방사감쇠 계수의 경우도 저주파수 영역에서 약간의 변동을 보인 뒤 계속해서 감소하는데, 밀도비가 증가할수록 변동이 생기는 주

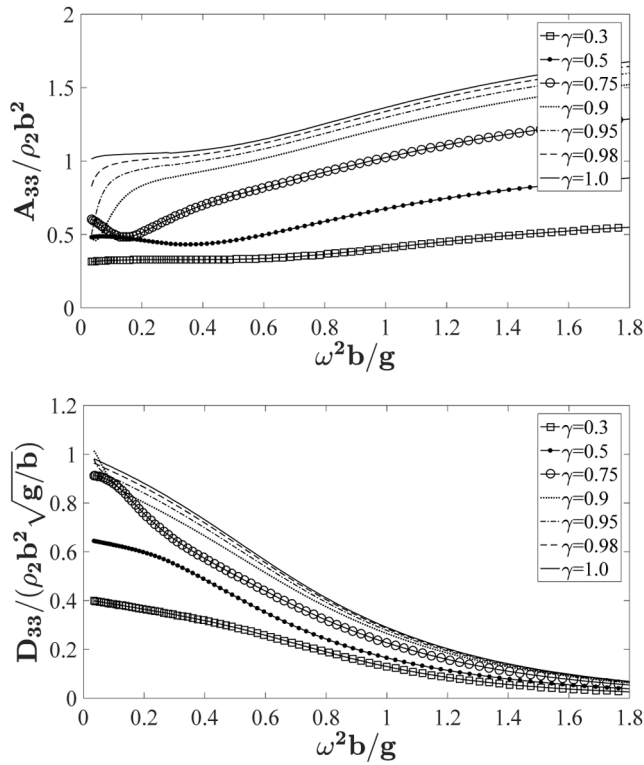


Fig. 8 Comparison of heave added mass (upper) and damping coefficient (lower) for various density ratios ( $h_1/h = 0.5$ ,  $d/h = 0.3$ )

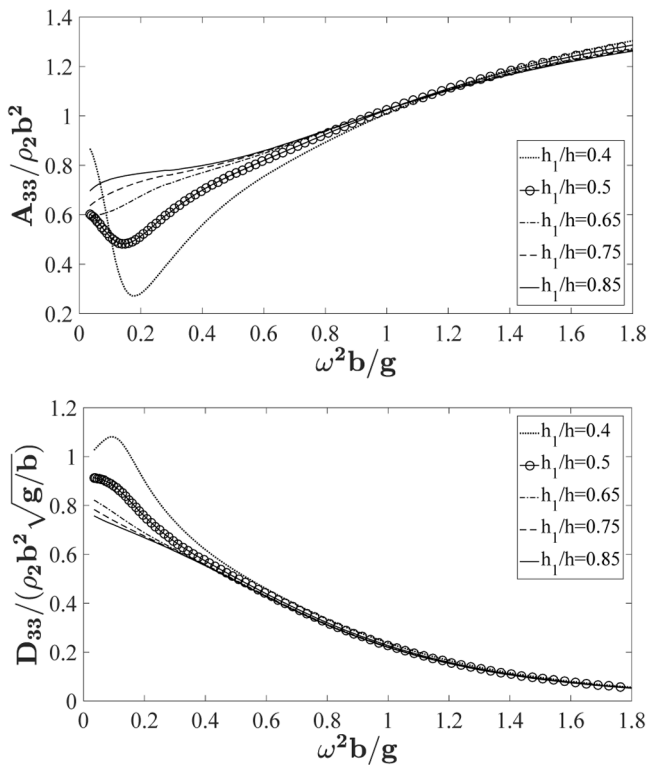


Fig. 9 Comparison of heave added mass (upper) and damping coefficient (lower) for various water depth ratios ( $\gamma = 0.75$ ,  $d/h = 0.3$ )

파수 위치가 작아지고 점점 단일 층의 결과로 수렴함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 전체 수심( $h$ )은 고정시킨 채, 상부 유체의 수심( $h_1$ )의 변화에 따른 부가질량과 방사감쇠 계수를 나타내었다. 저주파수 부근에서, 부가질량은 상하로 변동한 뒤 일정 값에 수렴하고, 방사감쇠 계수는 특정 주파수 근처에서 상승했다가 서서히 감소한다. 이러한 특징은 상부유체의 깊이가 얇아질수록 더 명확하게 나타나고, 이는 부유체와 두 유체의 경계면과의 거리가 상대적으로 가깝기 때문에 복층 유체의 특성을 더 잘 보여주는 것으로 보인다. 반면, 상부유체의 깊이가 일정 깊이 이상으로 증가하면 결과 값의 차이가 크지 않은 모습을 보인다. 또한, 주파수가 증가함에 따라, 부가질량이나 감쇠계수 모두 수렴 변화에 따른 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 9에서 확인된 저주파수 부근에서의 부가질량과 감쇠 계수의 변화는 두 해양파 모드가 혼합되어 진행되는 방사파의 특징으로 인해, 단일 층에서의 결과와 다른 특징을 보여주는 것으로 판단된다. 반면, 부유체 운동 주파수가 증가함에 따라 Barotropic 모드가 우세해져, 계수 값들의 변화는 상대적으로 완만하게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 경계 요소법 기반의 주파수 영역 이차원 수치 조파수조 기법을 이용하여, 복층 유체가 존재하는 계산영역에서 부유체의 상하동요시 발생하는 방사문제를 해석하였다. 부유체 운동으로 생성되는 파를 효과적으로 감쇠하기 위해, 주파수영역 계산에 적용할 수 있는 인공감쇠영역 경계 조건식을 개발 및 적용하여 그 효과를 검증하였다. 부유체는 이차원 Lewis 형상을 이용하였고, 상하동요에 따른 부가질량과 방사감쇠계수를 각각의 방사 경계조건에 따라 비교하였다. Barotropic 모드의 파수를 이용한 기존 방사 경계조건은, 부유체가 고주파수 운동 시에는 효과적이지만, 저주파수 운동 시에는 그 유효성이 제한적이다. 반면에, 인공감쇠영역을 적용시킨 결과는 부유체 운동 주파수와 무관하게 계산 영역내 반사파를 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 또한, 두 유체의 밀도비와 전체 수심에 대한 상부유체의 수심비에 따른 부유체의 부가질량과 방사감쇠 계수의 변화를 확인하였다.

각 유체의 밀도차가 클수록 부가질량과 감쇠계수는 대체로 감소함을 알 수 있었고, 저주파수 부근에서 변동 진폭이 증가하였다. 그러나 이러한 차이는 주파수가 증가할수록, 상부유체의 수심이 깊어질수록 변동폭이 감소하였다. 이 같은 이유는 부유체가 낮은 주파수 운동 시에는 두 해양파 모드가 혼합된 방사파가 생성되며, 높은 주파수 운동 시에는 Barotropic 모드에서의 생성파가 지배적이기 때문으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 개발 검증된 인공감쇠영역 경계조건을 적용한 수치모델링 방법은, 밀도가 다른 복층 유체에서 다양한 조건하에 생성되는 진행파의 모드별 특성을 주파수 영역 해석을 통해 정밀하게 파악하고 분석하는데 유용한 방법이 될 것이다.

## 후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력 양성). 또한, 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학의 지원을 받아 수행되었으며, 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2015 RID1A1A01057769).

## References

- Alpers, W., La Violette, P.E., 1993. Tide-generated Nonlinear Internal Wave Packets in the Strait of Gibraltar Observed by the Synthetic Aperture Radar aboard the ERS-1 Satellite. Proceedings of the First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment Published by ESA, Paris, France, ESA SP-359, 753-758.
- Kashiwagi, M., Ten, I., 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*, 11, 150-164.
- Kim, H.R., Ahn, S.Y., Kim, K., 2001. Observations of Highly Nonlinear Internal Solitons Generated by Near-inertial Internal waves off the East Coast of Korea. *Geophysical Research Letters*, 28, 3191-3194.
- Kim, M.G., Koo, W.C., 2010. Numerical Analysis of Hydrodynamic Forces on a Floating Body in Two-layer Fluids. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. 47(3), 369-376.
- Kim, T.L., Won, J.S., 1999. Observation of Internal Waves at Northern Region of Jeju Island Using SAR. *The Korean Society of Oceanography*, 4(1), 18-24.
- Kim, Y.H., 2003. Artificial Damping in Water Wave Problems II: Application to Wave Absorption. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 13(2), 94-98.
- Koo, W.C., Min, E.H., 2015. Numerical Analysis of Internal Waves According to Body Motion in Two-layered Fluids. *Proceeding of KAOSTS 2015 in Jeju, Korea*, 252-254.
- Liu, A.K., Chang, Y.S., Hsu, M.K., Liang, N.K., 1998. Evolution of Nonlinear Internal Waves in the East and South China Seas. *Journal of Geophysical Research*, 103, 7995-8008.
- Osborne, A.R., Burch, T.L., Scarlet, R.I., 1978. The Influence of Internal Waves on Deep-water Drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 30(10), 1497-1504.
- Pinet, P.R., 1992. *Oceanography: an Introduction to the Planet Oceans*. West Publishing Company, 571.
- Ten, I., 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*, 9, 127-141.
- Yeung, R.W., Nguyen, T., 1999. Radiation and Diffraction of Waves in a Two-layer Fluid. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington, D.C., 875-891.