Numerical Study for Experiment on Wave Pattern of Internal Wave and Surface Wave in Stratified Fluid

Ju-Han Lee^{ID*}, Kwan-Woo Kim^{ID*}, Kwang-Jun Paik^{ID*}, Won-Cheol Koo^{ID*} and Yeong-Gyu Kim^{ID**}

^{*}Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

^{**}Agency for Defense Development, Jinhae, Korea

성층화된 유체 내에서 내부파와 표면파의 파형 변화 실험을 위한 수치적 연구

이주한^{ID*} · 김관우^{ID*} · 백광준^{ID*} · 구원철^{ID*} · 김영규^{ID**}

^{*}인하대학교 조선해양공학과

^{**}국방과학연구소

KEY WORDS: 두 층 유체 Two-layer fluids, 표면파 Surface wave, 내부파 Internal wave, 수치 모사실험 Numerical simulation, 전산유체 역학 Computational fluid dynamics

ABSTRACT: Internal waves occur at the interface between two layers caused by a seawater density difference. The internal waves generated by a body moving in a two-layer fluid are also related to the generation of surface waves because of their interaction. In these complex flow phenomena, the experimental measurements and experimental set-up for the wave patterns of the internal waves and surface waves are very difficult to perform in a laboratory. Therefore, studies have mainly been carried out using numerical analysis. However, model tests are needed to evaluate the accuracy of numerical models. In this study, the various experimental conditions were evaluated using CFD simulations before experiments to measure the wave patterns of the internal waves and surface waves in a stratified two-layer fluid. The numerical simulation conditions included variations in the densities of the fluids, depth of the two-layer fluid, and moving speed of the underwater body.

1. 서 론

일반적으로 해양환경에 대한 연구를 수행할 때 유체의 밀도는 일정하다고 가정한다. 하지만 실제 해양에서는 수온, 염도 등의 차이로 인해 해수간 밀도차가 발생하게 되고 밀도의 불연속면이 생기게 된다. 이러한 밀도의 불연속면이나 바닷물의 밀도가 수직방향으로 변화하는 약층에서 일어나는 파도를 내부파라 부른다. 표면파는 공기와 맞닿은 상부 유체 표면에서 나타나는 파도이며, 해양 표면파와 내부파는 표면파 모드(Surface wave mode)와 내부파 모드(Internal wave mode)라고 불리는 두 가지 모드가 혼합되어 발생한다. 표면파 모드에서는 표면파와 내부파의 위상이 같으며, 내부파 모드에서는 표면파와 내부파가 서로 다른 위상을 가짐과 동시에 내부파의 파고가 표면파의 파고보다 크다.

해양 내부파는 평균적으로 100m 이상의 깊은 수심에서 발생하고 지속적으로 관측되고 있다. 특히 우리나라에서도 동해시 연안에서 Kim et al.(2001)이 수직 진폭이 25m에 이르는 내부파를 관측하였다. 이러한 내부파에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있는데, Koo and Kim(2009)는 내부파를 표면파와 내부파 영역을 경계요소법을 통하여 내부파를 구현하는 수치모델을 개발하였다. Ko et al.(2013)은 조파기를 이용하여 내부파 발생 실험을 통해 표면파 모드와 내부파 모드에서 발생하는 파형을 이론과 비교하였다. Lee and Hur(2014)는 서로 다른 밀도층 사이에서 발생하는 내부파를 해석하기 위하여 수치모델을 개발하였으며, 이후 개발한 모델을 바탕으로 내부파에 관한 수리모형 실험결과와 비교 검토하여 개발한 수치모델의 유효성 및 타당성을 확인하였다(Lee and Hur, 2016). 하지만 수중운동체를 통해 생성된 내부파에 관한 연구는 활발하게 진행되지 않고 있는데,

Received 23 January 2019, revised 30 May 2019, accepted 13 June 2019

Corresponding author Kwang-Jun Paik: +82-32-860-7331, kwangjun.paik@inha.ac.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4657-5806>

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KOSE 2108 in Incheon.

© 2019, 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.

Duncan(1983)은 길이 24m의 수조에서 수중익을 이동시켜 내부파 생성 실험을 수행하였으며, Robey(1997)는 성층화된 유체 내에서 구형상의 수중운동체를 통해 내부파 생성 실험 및 이론해와의 비교를 수행하였다.

실제 수중운동체의 경우 담수와 해수로 성층화된 유체 내에서 움직이므로 내부파와 표면파의 상호작용을 고려한 모형실험을 수행하기 위해서는 성층화된 유체 조건을 만드는 것이 중요하다. 상하부 유체에 밀도차를 발생시키는 방법으로 유체의 온도를 변화시키거나 해수와 유사한 밀도를 갖는 소금물을 사용하여 성층화시키는 방법이 있다. 하지만 두 방법 모두 상하부 유체가 쉽게 혼합되고 실험조건을 유지시키기 어려워 반복실험을 하기 어려운 단점이 있다. 성층화된 실험 조건을 만드는 방법 중 하나는 상부 유체로 식물성 기름을 사용하는 것이다. 식물성 기름을 사용할 경우 상하부 유체가 쉽게 혼합되지 않아 반복실험이 용이하고 주위에서 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 식물성 기름-담수 조건의 경우 담수-해수 조건에 비해 밀도차가 크고 식물성 기름의 점성이 담수에 비해 약 80~100배 가량 크기 때문에 점성 및 밀도차로 인해 발생할 수 있는 현상에 대해 사전조사가 필요하다.

본 연구에서는 이층 유체 모형실험에 앞서 담수 단일 조건, 식물성 기름-담수 조건, 담수-해수 조건에서 수중운동체의 속도, 밀도, 상하부유체의 깊이 비에 따른 내부파와 표면파의 특성에 대해 연구하였고, 상부유체로 식물성 기름을 사용했을 때 식물성 기름의 밀도 및 점성에 의해 식물성 기름-담수 조건과 담수-해수 조건에서 어떠한 차이가 발생하는지 분석하여 상부유체로서 식물성 기름의 적합성에 대해 수치해석을 통해 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 방법

수치해석을 위한 물리모델로 유체를 3차원 비정상 상태, 비압축성 유동으로 고려하였다. 지배방정식으로는 비압축성 유체의 유동을 나타내는 연속 방정식(Continuity equation)과 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) 방정식이 사용되었으며 식 (1)과 (2)와 같이 적분 방정식 형태로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho u_i n_i dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i u_j n_j dS = \int_S (\tau_{ij} n_j - p n_i) dS + \int_{\Omega} \rho b_i d\Omega \quad (2)$$

여기서 u_i 는 속도텐서, b_i 는 체적력의 텐서이다. ρ , p 는 밀도와 압력이며 τ_{ij} 는 점성과 난류에 의한 유효응력으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

난류 모델은 *Realizable k-ε* 모델을 사용하였고, 성층화된 유체 내에서 수치해석이 진행되기 때문에 유체간의 자유수면을

모사하기 위해서 비혼합 유체의 유동을 시뮬레이션 하는데 적합한 VOF (Volume of fluid) 모델을 사용하였다. VOF 모델에서 유체는 운동량 방정식을 공유하며 각 셀의 각 유체의 체적분율은 전체 영역에 걸쳐 계산된다. 유체의 체적분율을 α_m 로 나타내면 비어있는 경우($\alpha_m = 0$), 완전히 채워져 있는 경우($\alpha_m = 1$), 셀이 m^{th} 유체와 한 가지 또는 그 이상의 유체로 혼합되어 있는 경우 ($0 < \alpha_m < 1$)의 3가지 상태가 존재한다. 각 셀에서 모든 유체의 체적분율의 합은 반드시 1이 되어야 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{m=1}^N \alpha_m = 1 \quad (4)$$

α_m 의 값에 근거하여 밀도, 변위 등의 변수들은 각각의 검사체적에서 결정되며, $\alpha_m = 0.5$ 인 점을 이용하여 자유수면의 경계를 나타내었다.

2.2 수치기법 검증

수중운동체를 사용하면서 3차원 효과가 반영된 모형실험의 경우 벽면으로 인한 파의 반사 및 파 계측의 어려움 등 여러 요인으로 인해 모형실험이 쉽지 않아 비교적 많이 수행되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 VOF 모델을 이용한 수치해석 기법의 검증을 위해 2차원 조건에서 수중익을 이용해 모형실험을 진행한 Duncan(1983)의 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다.

Duncan(1983)의 실험에서 수조의 제원은 길이 24m, 폭 0.61m, 깊이 0.61m로 모형을 수조 밑에서 벨트와 벨트풀리, 모터 등으로 이동시켰다. 실험에 사용된 수중익의 형상은 NACA0012이며, 받음각은 5도이다. 날개 길이는 20.3cm, 최대 두께는 전연에서 6.1cm에서 2.54cm이며, 수중익의 폭을 60cm로 하여 3차원

(a) Grid system and boundary condition

(b) Coordinate system

Fig. 1 Numerical simulation conditions for the validation of numerical method

Fig. 2 Comparison of wave profiles at surface layer

효과가 일어나지 않게 하였다. 실험조건은 자유수면으로부터 잠긴 깊이 26.1cm, 23.6cm, 21.0cm, 19.3cm, 18.5cm, 15.9cm에서 0.8m/s로 수중익을 끌며 실험을 진행하였고, 수치해석 기법 검증을 위해 26.1cm 조건에서의 자유수면 파형과 수치해석에서의 파형을 비교하였다. 폭 방향에 정간 격자를 사용하고 격자계의 양 옆에 대칭(Symmetry) 경계조건을 사용하여 2차원 조건으로 해석을 진행하였다. 총 격자수는 25만개이고 격자계와 경계조건, 좌표축을 Fig. 1에 도시하였다.

수치해석에 의한 파형을 실험 결과와 Fig. 2에 비교하였다. 전체적인 파형은 실험과 잘 일치하는 것으로 보이나 파의 위상이 실험 결과와 계산 결과 사이에서 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 실험과 수치해석에 의해 얻어진 파의 파장에 식 (5)-(6)을 적용하여 파의 주기와 속도를 구하면 Table 1과 같다. 파의 파장은 첫 번째 파고부터 세 번째 파고까지의 거리를 측정한 뒤 2로 나누어 평균 파장을 구하였다.

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (5)$$

$$C = \frac{L}{T} \quad (6)$$

여기서 L 은 파장, g 는 중력가속도, h 는 수심, T 는 파의 주기 그리고 C 는 파의 속력을 나타낸다.

파의 속력과 수중익의 전진 속력이 CFD에서는 동일하게 나왔지만 실험값에서는 전진속도보다 파의 속력이 좀 더 빠르게 나타났다. 따라서 실험 결과와 계산 결과 사이의 파형 위상 차이는 여기서 비롯된 것이라고 생각할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 VOF 모델을 사용하여 격자계 및 경계조건을 3차원으로 확장시켜 이후의 해석을 진행하였다.

Table 1 Characteristics of wave profile

	Wave Length [m]	Period [s]	Velocity [m/s]
EFD	0.431	0.525	0.82
CFD	0.412	0.514	0.80

2.3 수중운동체

본 연구에서 사용한 수중운동체의 형태는 반구, 원기둥, 반타원체를 합쳐놓은 형상이다. 구(Sphere)를 수중운동체로 수치해석을 수행할 경우, 수중운동체 뒤의 불안정한 난류 유동으로 인해 계산 시간이 오래 소요되고 해석이 어려운 문제점이 발생했으며, 타원체 형상의 수중운동체로 수치해석을 수행할 경우, 유선형의 형태로 인해 수중운동체 주위 유동이 충분히 교란되지 않아 모형실험을 진행할 경우 예측 가능한 크기의 파가 생기지 않았다. 따라서 Fig. 3와 같이 총 길이 10cm, 반구 및 원기둥의 중앙 단면 지름이 2cm인 수중운동체를 제작하였고 제원은 식 (7)과 같다.

$$\begin{cases} (x-4)^2 + y^2 = 1 & (-5 \leq x < -4) \\ y = 1, y = -1 & (-4 \leq x \leq 0) \\ \frac{x^2}{25} + y^2 = 1 & (0 < x \leq 5) \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 3 The shape of a underwater body for simulation

2.4 수치해석 조건

본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어인 STAR CCM+ 13.02가 사용되었다. 향후 실험과의 비교를 위해 실제 제작 예정인 길이 5m, 폭 1.8m, 높이 0.8m인 이층유체 모형구조의 크기를 반영해 해석에 사용한 계산 영역과 경계조건을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)에 나타난 것처럼 Slip wall, Symmetry 조건을 사용해 길이 5m, 폭 0.9m, 높이 0.8m의 계산영역에서 수치해석을 진행하였으며, 수중운동체 후방의 타원체 형상으로 인해 후류가 복잡하게 생기지 않아 Symmetry 경계조건을 사용하여 격자수를

(a) Computational domain

(b) Configuration of a underwater body

Fig. 4 Set-up for numerical simulation in a stratified fluid

Table 2 Fluid properties for a stratified fluid

Fluid	Density [kg/m ³]	Dynamic viscosity [$Pa \cdot s$]
Fresh Water	1000	8.8871E-4
Sea Water	1025	8.8871E-4
Vegetable Oil	925	0.08871

감소시켜 계산시간을 줄여주었다. 바닥과 벽면의 경계조건은 수중운동체로 인해 생기는 표면파 및 내부파와 이층유체 모형 수조간의 영향을 확인하고자 Slip wall 조건을 설정해 주었다.

수중운동체의 속도, 상하부 유체의 밀도비, 깊이비에 따른 내부파 및 표면파의 파형 변화를 비교하기 위하여 다음과 같이 조건을 설정하였다. 수중운동체의 속도는 제작 예정인 이층유체 모형수조에서 현실적으로 실험 가능하고 파고계가 표면파 및 내부파의 파고를 측정할 수 있는 범위 내에서 두 가지 조건(0.5m/s, 0.8m/s)을 선정하였다. 본 연구에 사용된 유체의 종류는 담수, 해수, 식물성 기름 세 가지로 각 유체의 밀도 및 점성을 Table 2에 나타내었다.

식물성 기름의 점성은 담수의 점성보다 약 80~100배 정도 크기 때문에 본 해석에서는 식물성 기름의 점성을 담수 점성의 100배로 설정하여 해석을 수행하였다. 반면 해수의 점성은 수온, 염분, 밀도 등 여러 요인에 의해 달라지지만 담수-해수의 점성 차이는 식물성 기름-담수 정도로 크게 차이 나지 않기 때문에 상부유체로써 식물성 기름의 점성이 주는 영향을 분석하고자 해수의 점성은 담수와 같은 조건으로 설정하여 수치해석을 진행하였다. 또한 상부유체의 두께가 내부파 및 표면파에 미치는 영향을 보기위해 상부유체의 두께를 두 배로 키운 조건에 대해 해석을 진행하였다.

이렇게 정해진 조건들을 바탕으로 총 9가지의 수치해석을 진행하였고 각 조건들을 Table 3에 나타내었다. ρ_0 는 공기, ρ_1 은 상부유체, ρ_2 는 하부유체의 밀도를 나타내며 U 는 수중운동체의 속도, D 는 자유수면으로부터 수중운동체의 중심선까지의 거리를 나타낸다. h_1 은 상부유체의 두께, h_2 는 하부유체의 두께를 의미한다. Fig. 4(b)와 같이 유체 밀도차가 발생하여 성층화 되었을 때 식 (8)과 같은 임계 프루드수(Fr_n)가 존재한다.

$$Fr_n^2 = \frac{1}{2} + (-1)^{n+1} \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{(1-\gamma)h_1h_2}{(h_1+h_2)^2}} \quad (n=1,2) \quad (8)$$

여기서 γ 는 두 유체의 밀도비(ρ_1/ρ_2)이며, $n=1$ 일 때는 표면파

모드에서의 임계 프루드수(Fr_1)를 나타내고 $n=2$ 일 때는 내부파 모드에서의 임계 프루드수(Fr_2)를 나타낸다.

수중운동체의 이동속도에 의해 표현되는 프루드수(Fr)는 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며, 이 수중운동체의 프루드수(Fr)를 기준으로 구분하여 내부파 및 표면파의 파형 변화를 이론적으로 파악할 수 있다. 다시 말해 수중운동체의 프루드수(Fr)가 Fr_1 에 가까우면 표면파 모드, Fr_2 에 가까우면 내부파 모드가 우세하게 나타난다. 또한 수중운동체의 프루드수(Fr)가 Fr_1 를 넘을 경우 표면파에서 오로지 발산파만 나타나고, 마찬가지로 Fr_2 를 넘을 경우 내부파에서 발산파만 나타난다(Yeung and Nguyen, 1999).

$$Fr^2 = \frac{U^2}{g(h_1+h_2)} \quad (9)$$

(a) Single layer

(b) Two layers

Fig. 5 Grid systems for numerical simulation**Table 3** Simulation conditions for numerical simulation

Case	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_1 [kg/m ³]	ρ_2 [kg/m ³]	U [m/s]	D [cm]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	Fr_1	Fr_2	Fr
1		1000	1000					-		0.2393
2		1000	1025	0.5				0.9994	0.0360	0.2393
3		925	1000		4.5	2.5		0.9980	0.0632	0.2393
4		1000	1000					-		0.3829
5	1.184	1000	1025	0.8			42	0.9994	0.0360	0.3829
6		925	1000					0.9980	0.0632	0.3829
7		1000	1000					-		0.2329
8		1000	1025	0.5	7	5		0.9988	0.0482	0.2329
9		925	1000					0.9964	0.0847	0.2329

단일 및 복층 유체에서의 격자계를 Fig. 5에 도시하였고 격자의 크기는 수중운동체로 인해 발생하는 파장과 파고의 크기 및 격자수를 고려하여 $\Delta x=5\text{mm}$, $\Delta y=5\text{mm}$, $\Delta z=0.078125\text{mm}$ 로 설정하였다. 단층 조건의 경우 약 400만개, 복층 조건의 경우 약 653만개의 격자를 사용하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 밀도가 변화하는 경계층에 격자를 집중시켜 내부파 및 표면파를 예측할 수 있도록 하였고 Outlet에 1m의 Damping 영역을 설정하여 파의 반사사를 방지하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 밀도비 및 점성에 따른 변화

밀도비(ρ_1/ρ_2)에 따른 표면파 및 내부파의 변화를 알아보기 위하여 깊이와 속도가 같을 때 밀도가 다른 조건(Case 1, 2, 3)의 표면파와 내부파의 파형을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 담수

(a) $\rho_1/\rho_2 = 1$ (Case 1)

(b) $\rho_1/\rho_2 = 0.976$ (Case 2)

(c) $\rho_1/\rho_2 = 0.925$ (Case 3)

Fig. 6 Contour of surface wave and internal wave according to the density ratio ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm)

(a) $\rho_1/\rho_2 = 1$ (Case 1)

(b) $\rho_1/\rho_2 = 0.976$ (Case 2)

(c) $\rho_1/\rho_2 = 0.925$ (Case 3)

Fig. 7 Contour of z -direction induced velocity according to the density ratio ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm)

단일 조건(Case 1)과 담수-해수(Case 2)의 경우 표면파의 파형이 크게 차이나지 않지만 식물성 기름-담수 조건(Case 3)의 경우에는 파장과 파고는 유사하게 나타나고 전파길이가 짧아진 것을 확인할 수 있다. 또한 내부파의 경우 발산파와 함께 가로파가 발생하였는데 이러한 가로파는 표면파와 주기 및 파장이 같고 유사한 형태를 갖는 것을 알 수 있다. Case 2와 Case 3에서 수중운동체의 프루드수(Fr)는 0.2393으로 내부파 모드의 임계 프루드수(Fr_2)보다 크기 때문에 내부파에서 발산파만 나타나야 하지만, 내부파에 표면파와 유사한 형태의 가로파가 발생하였다. 이러한 파형발생의 원인을 분석하기 위하여 Case 1, 2, 3의 z 방향 유기속도를 Fig. 7에 나타내었다. 표면파에 발생한 z 방향 유기속도의 Upwash와 Downwash 영역이 내부파층에 영향을 미치면서 표면파의 파형이 내부파의 파형에 드러나게 되고 그로인해 내부파에 발산파와 가로파가 혼합되어 함께 나타나게 된다. 그리고 밀도비가 작아질수록 수중운동체 상단 z 방향 Downwash 유기속도가 미소하게 강해지는 것을 볼 수 있다. 또한 식물성 기름-담수 조건(Case 3)에서 다른 조건들에 비해 z 방향 유기속도가 후류에서 상대적으로 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 6(c)에서 표면파의 전파길이가 짧아진 것과 마찬가지로 식물성 기름의 점성이 표면파 및 내부파에 영향을 미친 것으로 판단된다.

상부유체인 식물성 기름의 점성의 영향을 확인하기 위하여 식물성 기름-담수 조건(Case 3)에서 모든 조건을 동일하게 유지하고 상부유체로 식물성 기름의 밀도와 담수의 점성을 갖는 가상유체를 사용하여 수치해석을 진행하였고, 표면파 및 내부파의 파형과 z 방향 유기속도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7과 Fig.

(a) Surface wave and internal wave

(b) z-direction induced velocity

Fig. 8 Contour of surface-internal wave and z-direction induced velocity at virtual fluid with density of vegetable oil and viscosity of fresh water ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm)

8(b)를 비교해 보면 밀도비가 작아질수록 z 방향 유속도가 다소 강해지는 현상을 보이며, Fig. 8과 Fig. 6(c), Fig. 7(c)를 비교했을 때, 점성이 작아지면 수중운동체 상단의 z 방향 유속도 분포는 유사하지만 표면파 및 내부파의 전파길이와 z 방향 유속도가 하류에서 비교적 느리게 감소한 결과를 보인다. Fig. 8(a)와 Fig. 6(b)의 내부파를 비교하면, 동일한 점성을 가진 경우 밀도차에 의해 내부파의 발산 각도가 증가하게 되고 파고도 증폭되는 경향이 나타났다.

밀도와 점성의 변화에 대한 파고변화를 자세히 보기 위하여 Fig. 9에 수중운동체 중심면($y=0$)에서 담수-단일 조건(Case 1), 담수-해수 조건(Case 2), 식물성 기름-담수 조건(Case 3)과 식물성 기름의 밀도에 청수의 점성을 갖는 가상유체-담수 조건의 표

Fig. 9 Comparison of the surface wave elevation according to the density ratio ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm, $y = 0$ cm)

Fig. 10 Comparison of the internal wave elevations ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm, $y = 0$ cm)

면파 파고 변화를 나타내었다. 표면파의 최대 파고는 가상유체-담수 조건이 가장 크게 나타났으며 담수-해수 조건(Case 2), 담수-단일 조건(Case 1), 식물성 기름-담수 조건(Case 3) 조건 순으로 파고가 크게 발생하였다. 이는 점성 차이가 적은 경우에는 밀도비가 작아질수록 수중운동체 상단의 z 방향 유속도가 강해지면서 파고변화로 이어진 것을 알 수 있다. 하지만 식물성 기름-담수 조건(Case 3)과 가상유체-담수 유체 조건을 비교해 보았을 때, 동일한 밀도비이지만 점성의 영향으로 식물성 기름-담수 조건(Case 3)에서 가상유체-담수 유체 조건보다 전체적으로 작은 파고가 발생한 것을 알 수 있으며 최대파고는 약 9.8% 감소하였다. 네 조건 모두 동일한 파장의 파가 발생하였고 밀도비가 다르더라도 비슷한 경향으로 파가 소산하지만 식물성 기름-담수 조건(Case 3)의 경우 가상유체-담수 조건에 비해 파가 보다 빠르게 소산되고 약 8L 이후로는 파가 발생하지 않았다.

Fig. 10은 수중운동체 중심면($y=0$)에서 담수-해수 조건(Case 2), 식물성 기름-담수 조건(Case 3), 가상유체-담수 조건의 내부파 파고 변화를 나타내었다. 내부파도 표면파와 마찬가지로 점성의 영향으로 인해 식물성 기름-담수 조건(Case 3)에서 가상유체-담수 조건 및 담수-해수 조건(Case 2)과 비교해 파가 상대적으로 빠르게 소산되며 표면파와 마찬가지로 약 8L 이후로는 파가 생기지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 가상유체-담수 조건을 식물성 기름-담수 조건(Case 3)과 비교해 보았을 때, 8L 전까지는 동일한 밀도에 의해 유사한 파형을 가지지만 점성의 영향으로 인해 파고 차이가 발생하였다. 8L 이후에는 표면파와 내부파의 상호작용으로 인해 발생하는 내부파의 파형 변화는 담수-해수 조건(Case 2)과 유사하게 나타나고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 상부유체의 점성이 표면파의 최대 파고 및 전파길이 감소에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

3.2 속도에 따른 변화

수중운동체의 속도에 따른 표면파 및 내부파의 파형변화를 관찰하기 위하여 Case 1, 2, 3와 같은 조건에서 수중운동체의 속도가 0.8m/s로 빨라진 조건(Case 4, 5, 6)에 대해 수치해석을 진행하였으며 그 결과로 나온 표면파와 내부파의 파형을 Fig. 11에 도시하였다. 수중운동체의 속도가 빨라지게 되면 수중운동

(a) $\rho_1/\rho_2 = 1$ (Case 4) (b) $\rho_1/\rho_2 = 0.976$ (Case 5) (c) $\rho_1/\rho_2 = 0.925$ (Case 6)

Fig. 11 Contour of surface wave and internal wave according to the density ratio ($U = 0.8$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm)

체의 프루드수(Fr)가 표면파 모드에서의 임계 프루드수(Fr_1)에 더 가까워지기 때문에 Case 2, 3에 비하여 내부파에 표면파의 파형이 보다 지배적으로 나타나게 되며 내부파에 발산파가 거의 나타나지 않는다.

Fig. 12는 Case 4, 5, 6의 z 방향 유기속도 분포를 나타냈는데 수중운동체의 속도가 빨라지게 되면 수중운동체 상단의 Downwash와 Upwash 영역이 크게 넓어지면서 내부파에 표면파의 영향이 상대적으로 커진 것을 볼 수 있다. 또한 수중운동체의 속도가 빠른 경우에는 밀도비가 작아져도 수중운동체 상단 z 방향 유기속도의 세기의 변화는 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

Fig. 13에 Case 4, 5, 6의 표면파와 내부파의 파고를 나타내었다. 최대파고는 식물성 기름-담수 조건(Case 6), 담수-해수 조건(Case 5), 담수 단일 조건(Case 4) 순으로 크게 나타났지만 그 차이가 크지 않았다. 수중운동체의 속도가 빨라지게 되면 점성이 크더라도 밀도비가 가장 작은 식물성 기름-담수 조건(Case 6)의

표면파의 최대파고가 가장 크게 나타났고 점성에 의해 발생하던 파의 소산이 비교적 천천히 일어나는 것을 보아 수중운동체의 속도가 빠른 경우에는 점성의 영향이 상대적으로 작아진다고 생각할 수 있다. 내부파는 상대적으로 큰 세기의 z 방향 유기속도 분포로 인해 표면파의 파형이 지배적으로 나타나게 되면서 표면파와 거의 동일한 파고와 파형을 가지게 되었고, 식물성 기름-담수 조건(Case 6)에서 표면파와 내부파 모두 5L 이후부터는 점성의 영향으로 인해 파가 조금씩 소산되는 모습을 보였으나 앞선 조건(Case 1, 2, 3) 보다는 그 정도가 덜한 것을 알 수 있다.

(a) $\rho_1/\rho_2 = 1$ (Case 4) (b) $\rho_1/\rho_2 = 0.976$ (Case 5) (c) $\rho_1/\rho_2 = 0.925$ (Case 6)

Fig. 12 Contour of z -direction induced velocity according to the density ratio ($U = 0.8$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm)

Fig. 13 Comparison of the surface wave and internal wave elevations ($U = 0.8$ m/s, $h_1 = 2.5$ cm, $y = 0$ cm)

3.3 깊이비에 따른 변화

수중운동체의 깊이에 따른 표면파와 내부파의 파형변화를 알아보기 위하여 앞선 조건(Case 1, 2, 3)에 비하여 상부유체의 두께가 두꺼워지면서 수중운동체의 깊이가 깊어진 조건(Case 7, 8, 9)에 대해 수치해석을 수행하였고 결과로 나온 표면파와 내부파를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14를 보게 되면 앞선 조건(Case 1, 2, 3)과 마찬가지로 담수-해수 조건(Case 8)의 표면파는 담수 단일 조건(Case 7)과 유사하게 나타났으며 식물성 기름-담수 조건(Case 9)의 경우 점성의 영향으로 인해 전파길이 줄어든 것을 볼 수 있다. 하지만 상부유체가 두꺼워짐에 따라서 내부파에 표면파의 영향이 줄어든 모습을 볼 수 있는데 담수-해수 조건(Case 8)의 경우 표면파의 가로파가 내부파에 희미하게 나타난 반면 식물성 기름-담수 조건(Case 9)의 경우 표면파의 가로파가 내부파에 나타나지 않고 내부파층에 발산파만 독립적으로 나타났다.

Fig. 14 Contour of surface wave and internal wave according to the density ratio ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 5$ cm)

Fig. 15 Contour of z-direction induced velocity according to the density ratio ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 5$ cm)

Fig. 16 Comparison of the surface wave and internal wave elevations ($U = 0.5$ m/s, $h_1 = 5$ cm, $y = 0$ cm)

Case 7, 8, 9의 z 방향 유속도 분포를 나타낸 Fig. 15을 보게 되면, 담수-해수 조건(Case 8)에서는 수중운동체의 후류에서 표면파층의 Downwash가 내부파층에 영향을 미치고 있지만 식물성 기름-담수 조건(Case 9)에서는 z 방향 유속도가 빠르게 소산되면서 수중운동체 후류에서는 거의 영향을 미치지 못하고 있는 것을 볼 수 있다.

이러한 경향은 표면파와 내부파의 파고를 나타낸 Fig. 16에서도 확인할 수 있는데, 담수 단일 조건(Case 7)과 담수-해수 조건(Case 8)의 경우 표면파가 거의 동일하게 나타났다. 식물성 기름-담수 조건(Case 9)의 경우 다른 조건과 유사한 표면파 파형을 가지고

있으나 빠르게 소산되는 현상을 볼 수 있다. 내부파의 경우 담수해수 조건(Case 8)은 표면파에 의해 내부파에 표면파와 같은 파장을 갖는 작은 파고 변화가 희미하게 발생하였지만 식물성 기름-담수 조건(Case 9)의 경우 표면파에 의한 파고 변화가 발생하지 않고 독립적으로 파가 발생한 모습을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 향후 이층유체 모형실험에 앞서 성층화된 유체 내에서 수중운동체에 의해 발생한 표면파 및 내부파의 특성에 대해 연구하였다. 또한 성층화된 유체에서 상부 유체로 식물성 기름을 사용하였을 경우 나타날 결과에 대해 살펴보았으며 다음과 같은 결론에 도달하였다.

상하층 유체의 밀도비가 작아질수록 수중운동체 상부 z 방향 유기속도의 세기가 커지게 되고, 그로인해 수중운동체 상부에서 발생하는 표면파의 최대 파고가 커지게 된다. 하지만 수중운동체의 속도가 빨라지거나 상부유체의 두께가 두꺼워지면 상부 유체와 하부유체의 밀도차로 인한 z 방향 유기속도의 변화가 작아져 밀도차가 나더라도 표면파의 최대 파고 크기가 크게 차이 나지 않는다.

또한 이층유체 모형실험시 상부유체로 식물성 기름을 사용할 경우 담수의 점성에 약 100배가량 되는 식물성 기름의 점성을 무시할 수 없다. 식물성 기름-담수 조건으로 모형실험을 수행할 경우 점성의 영향으로 인해 담수-해수 조건에 비해 최대파고 및 전파길이가 짧아지고 상부유체의 깊이가 깊어졌을 때 상대적으로 표면파와 내부파의 상호작용이 약화될 수 있다. 하지만 점성으로 인해 전파길이가 짧아지더라도 상부유체의 깊이가 깊지 않은 조건에서는 표면파와 내부파의 상호작용을 충분히 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 바탕으로 공기-식물성 기름-담수로 구성된 성층화된 이층 유체 내에서의 내부파와 표면파의 상호작용을 파악하기 위한 모형실험을 수행할 때, 수중운동체의 속도가 빠를 경우 점성에 의한 효과는 감소하지만 표면파의 영향이 내부파에 강하게 작용하여 내부파의 파형이 표면파와 동일하게 나타나게 되고, 표면파에서는 내부파의 특성이 나타나지 않을 수 있기 때문에 이층유체의 특성을 포착하기 어려울 수 있다. 반면에 상부유체의 깊이가 깊을 경우 식물성 기름의 점성으로 인해 서로 독립적인 파형이 발생할 수도 있다. 따라서 이러한 결과를 바탕으로 수중운동체의 속도 및 상부유체의 두께를 주의 깊게 선정해야 한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 위탁연구(UD170021DD) 및 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업(2018년 한-영 해양플랜트 글로벌 전문인력 양성사업, 과제번호 : N0001287)’의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Duncan, J.H., 1983. The Breaking and Non-breaking Wave Resistance of a Two-dimensional Hydrofoil. *Journal of fluid mechanics*, 126, 507-520. <https://doi.org/10.1017/S0022112083000294>
- Kim, H.R., Ahn, S.Y., Kim, H., 2001. Observation of Highly Nonlinear Internal Solutions Generated by Near-internal Waves off the East Coast of Korea. *Geophysical Research Letters*, 28(16), 3191-3194. <https://doi.org/10.1029/2001GL013130>
- Ko, D.H., Cho, Y.W., Choi, W.Y., 2013. A Laboratory Observation of Surface-and Internal Waves in Two-layered Fluids. *The Conference Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineering*, 389-392.
- Koo, W.C., 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*, 23(4), 6-11.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2014. Development of 3-D Hydrodynamical Model for Understanding Numerical Analysis of Density Current Due to Salinity and Temperature and Its Verification. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 34(3), 859-871. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.3.0859>
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2016. Characteristics of Surface and Internal Wave Propagation through Density Stratification. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 36(5), 819-830. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.5.0819>
- Robey, H.F., 1997. The Generation of Internal Waves by a Towed Sphere and Its Wake in a Thermocline. *Physics Fluids*, 9(11), 3353-3367. <https://doi.org/10.1063/1.869448>
- Yeung, R.W., Nguyen, T.C., 1999. Waves Generated by a Moving Source in a Two-layer Ocean of Finite Depth. *Journal of Engineering Mathematics*, 35(1-2), 85-107. <https://doi.org/10.1023/A:1004399917692>