

## CFD를 이용한 인공용승류 특성 연구 Flow Characteristic of Artificial Upwelling by CFD

이황기\* · 김종규\* · 이문옥\* · 김현주\*\* · 오다케 신야\*\*\*  
Hwang Ki Lee\*, Jongkyu Kim\*, Moon Ock Lee\*, Hyeon-Ju Kim\*\* and Shinya Otake\*\*\*

**요지** : 인공용승구조물은 흐름이 구조물에 의해 상승류와 배후면의 와류가 발생한다. 이때 저층수에 포함된 영양염이 표층으로 이동되고, 표층에선 플랑크톤 및 어류의 생태활동을 촉진시켜, 어업생산성을 향상시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 CFD를 이용하여 성층 상태를 고려한 인공용승류의 변화에 대하여 연구하고자 하였으며, 그 결과, 용승효과는 인공용승구조물의 최상부에서 가까울수록 좋은 효과가 나타났으며, 성층상태를 고려하지 않은 경우, 저층에서 표층으로 향하는 상승류 특성만 나타났으나, 성층상태를 고려한 경우, 상승류와 하강류가 반복되는 흐름특성을 확인 할 수 있었다.

**핵심용어** : 인공용승류, 수치실험, 와류

**Abstract** : The flowing caused by artificial upwelling structure occurs ascending water flowing and vortex of rear side. In this moment, plentiful nutrient in the bottom water moves to the surface of the water and makes those plankton and fishing ecology promoted so that the fishing productivity can be enhanced. In this study, the changes of the upwelling flowing is included in consideration of the conditions of stratification by using CFD. In the conclusion, the closer upwelling effect is from the artificial upwelling structure, the better effectiveness comes out. Regardless of the conditions of stratification, only the upwelling feature from the bottom to the surface was shown up. But considering the conditions of stratification, the repeated flowing feature between upwelling and downwelling was verified.

**Keywords** : artificial upwelling, numerical experiment, vortex

### 1. 서 론

일반적으로 용승(Upwelling)이란 바다 밑바닥에 있는 저층수가 표층으로 상승하는 흐름을 말하는 것으로 표층에서 바람 또는 해류 등에 의해 해수의 이동이 발생하였을 때 이를 채워주기 위한 흐름이 자연스럽게 발생하는 것을 의미한다(Han et al., 2008). 해양에서 용승류 해역의 면적은 전체 해양면적의 0.1% 밖에 되지 않지만 전체 어류생산량의 50%를 차지함으로써 어업생산의 중요한 부분을 차지한다(Ryther, 1969). 이러한 용승현상을 인위적으로 발생하게 하는 것이 인공용승 구조물이며 수중방파제등과 함께 해저에 설치되어 용승류를 만들어 내는 중요한 역할을 한다(Yanagi et al., 1991). 저층수에 포함된 풍부한 영양염의 유통으로 공급은 일차생산을 증가시키고 이에 따른 먹이 연쇄작용 및 어류 군집의 유도효과를 기대할 수 있다(Jeon et al., 2007).

한편, 인공용승구조물의 용승효과를 모의하기 위해 CFD를 이용한 흐름특성 연구는 진행되고 있으나, 층간 밀도를 고려한 인공용승류의 흐름특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 용

승유량은 성층의 강도에 따라 차이가 발생할 수 있으며 하층에 성층이 강하게 발달할 경우 용승류가 발생하기 어렵다, 따라서 본 연구에서는 CFD를 이용하여 층간 밀도를 고려한 성층상태에서 인공용승류의 변화에 대하여 연구하였다.

### 2. 자료 및 방법

#### 2.1 수치모델

본 연구에서는 층간 밀도를 고려한 인공용승류의 변화를 파악하기 위하여 CFD(Computational Fluid dynamics)인 Flow-3D(Flow Science, 1993)를 사용하였으며, FLOW-3D는 1960년대 미국 Los Alamos Lab에서 자유표면 연구의 시작으로 개발되었고 1985년 Version 1.0을 출시한 이래로 현재는 Version 11까지 상용화되고 있다. VOF(Volume of Fluid)와 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 기법을 기반으로 하는 범용 CFD 프로그램인 FLOW-3D는 자유표면 예측, 관수로 및 개수로의 유동, 퇴적물의 이동, 난류 모델 계산 등 그 활용범위가 광범위하다. 기본 방정식을 간

\*전남대학교 조선해양공학과(Corresponding author : Jongkyu Kim, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea, Tel:+82-61-659-7155, Fax:+82-61-659-7159, kimjk@jnu.ac.kr)

\*\*선박해양플랜트연구소 해수플랜트연구센터 (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Offshore Plant Research Division)

\*\*\*후쿠이현립대학(Fukui Prefectural University)

단히 소개하면 다음과 같다. 비압축성 유체로 가정했을 일반적인 연속방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (1)$$

여기서,  $A_x, A_y, A_z$ 는 각 방향에 대한 유체가 차지하는 셀의 면적,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u, v, w$ 는 각각  $x, y, z$ 의 유속성분이다. 그리고,  $\rho$ 는 질량소스에 대한 항이다. 그리고 운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 다음과 같이 몇 개의 항이 추가된 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \quad (4)$$

여기서,  $F_i$ 는 물체와 점성에 대한 가속도이고,  $RSOR$ 항은 밀도소스 항이다. 본 모델에서 자유수면은 유체의 체적함수 (VOF)에 대한 함수,  $F(x, y, z, t)$ 의 항으로 정의되며, 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial v}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial w}{\partial z}(FA_z w) \right\} = FDIF + FSOR \quad (5)$$

여기서,  $RSOR$ 항은 운동방정식에서 밀도소스항인  $RSOR$ 과 같으며, 식 (6)은 난류확산 항이다.

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad (6)$$

$V_F (= c_F \mu / \rho)$ 는 확산계수이고, 위 확산항은 서로 다른 유체 간에 난류 혼합이 발생하는 경우에만 의미를 갖는다. 자유표면을 포함하고 있는 비압축성 유체 문제의 경우,  $F$ 는 유체가 점유하고 있는 체적비율을 의미한다. 따라서  $F = 1$ 이면 계산 셀 내에 유체가 채워져 있는 것이고  $F = 0$ 이면 빈 공간을 의미한다.

### 2.2 수치실험

층간 밀도를 고려한 경우의 인공용승류 흐름특성 변화를 파악하기 위해 CFD인 Flow-3D(Version 11)을 사용하였으

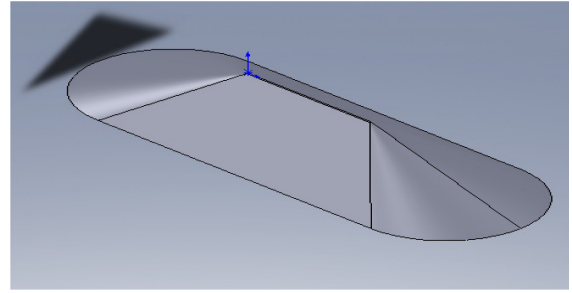


Fig. 1. Shape of Artificial Sea Mount.

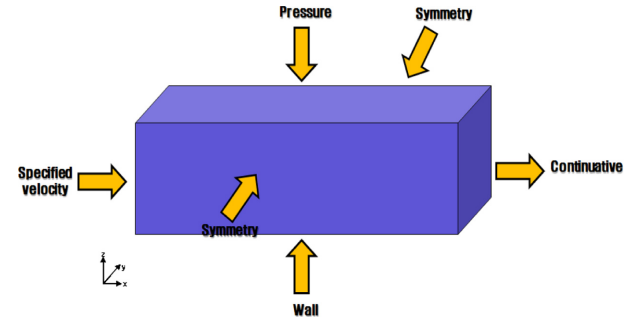


Fig. 2. Boundary Conditions.

며, 길이 42.5 m, 폭 120 m, 높이 17 m의 크기의 구조물을 3D CAD 프로그램을 이용하여 형상화 하였다(Fig. 1). 계산 영역의 크기는 610 × 300 × 70(m)이며, X-min과 X-max 경계에는 각각 유입과 유출경계 조건으로 하였다 Y-min과 Y-max 경계에는 흐름이 양쪽 경계에서 교란되지 않도록 대칭 조건으로 하였으며, Z-min과 Z-max 경계에는 각각 불투과성 조건과 자유수면 조건으로 하여 계산하였다(Fig. 2). 유속조건은 인공구조물 설치해역의 최강창조 및 낙조시의 유속을 고려한 0.5 m/s로 실험을 실시하였으며, 난류 모델은 RNG k-ε 모델을 사용하였다. 실험조건으로는 층간 밀도를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 흐름특성 변화에 대해 비교하였다(MLTMA, 2009).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유속에 의한 용승효과

수치실험의 결과로 얻어진 인공용승 구조물에 의한 흐름변화를 Fig. 3에 나타내었다. 인공용승 구조물에 의해 발생한 상

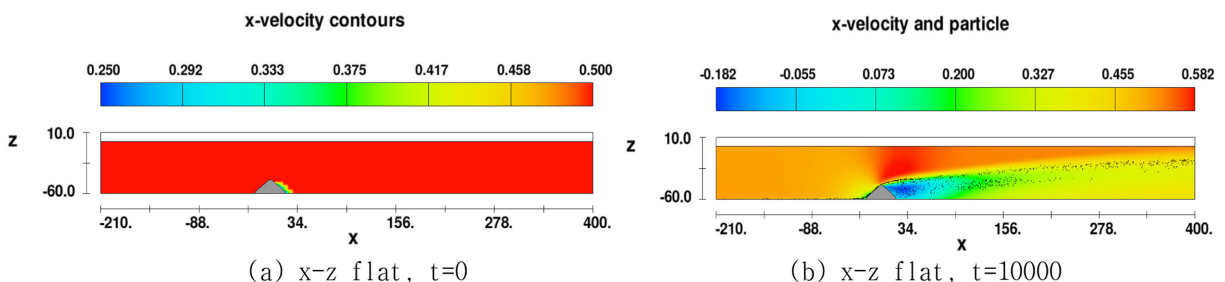


Fig. 3. Velocity Magnitude.

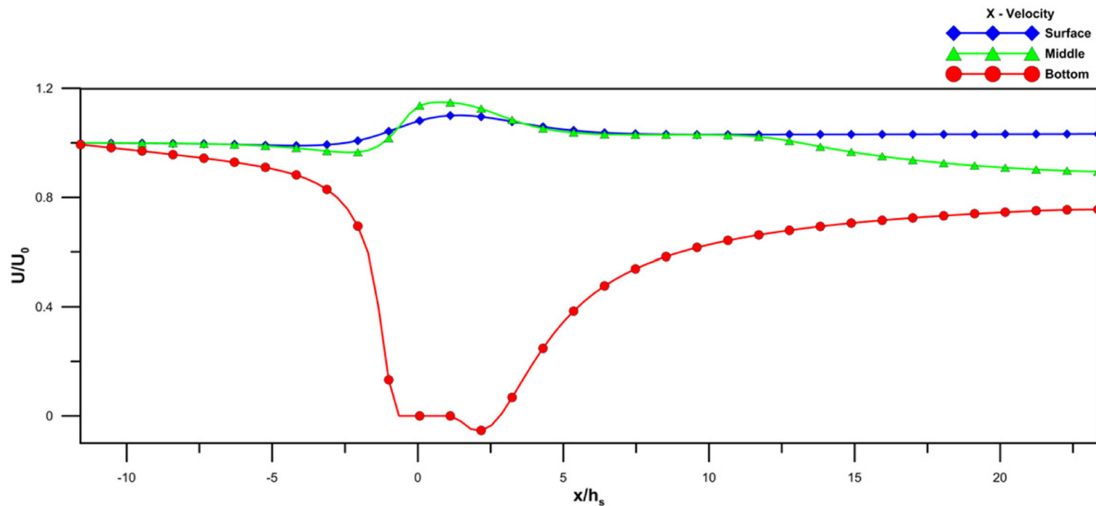


Fig. 4. X-Velocity Distribution.

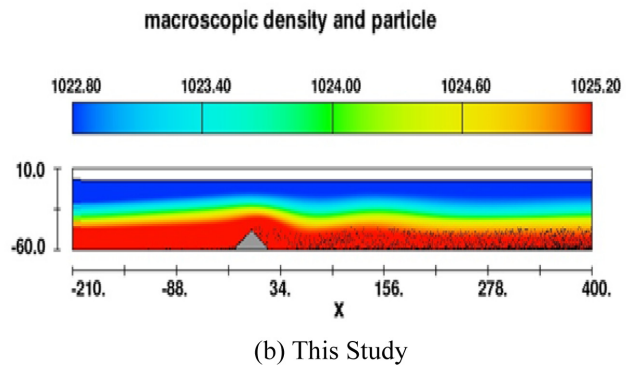
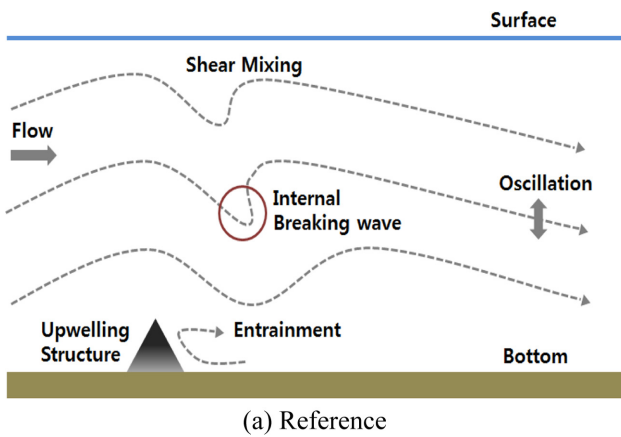


Fig. 5. Result of Numerical Experiment.

승류의 유속은 증가하였고, 인공용승 구조물 배후면에서는 와류구조를 파악할 수 있었다. Oh et al.(2011)은 기존연구에서 저층수에 포함된 영양염의 용승효과를 모의하기 위하여 Marker를 저층에 존재하는 것으로 가정하여 수치실험을 실시하였으며 본 연구에서도 10000개의 Marker를 이용하여 용승 효과를 모의하였다. 그 결과, 인공용승구조물에 의해 저층수에 포함된 영양염이 표층으로 수송될 것으로 판단된다.

유속에 의한 수평방향의 흐름변화를 표층, 중층, 저층으로 대별하여 Fig. 4에 나타내었다. 여기서  $U_0$ 는 유입경계의 초기유속,  $U$ 는 계산영역에서의 변동유속을 나타낸다. 표층, 중층, 저층은 수심의 20%, 50%, 80%를 고려하여 5 m, 30 m, 55 m에서의 유속분포를 나타내었다. 표층 유속은 인공구조물 상부에서 상승류의 영향으로 인해 유속이 증가하였으나, 인공용승구조물 배후면에서는 유속변화가 거의 나타나지 않았다. 중층 유속 역시 인공구조물 상부에서 상승류의 영향으로 유속이 증가하였으나 배후면에서는 유속이 감소하였다. 저층 유속은 무차원거리 약 0.25까지 유속이 감소하였으며 수평방향의 유속이 음의 값이 나타났다. 이는 인공용승구조물 설치에 따른 와류형성의 영향으로 판단된다.

### 3.2 층간 밀도를 고려한 용승효과

층간 밀도를 고려한 경우 수치실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 인공용승구조물은 전면부에서 인공용승구조물의 사면에 의해 표층으로 향하는 상승류가 발생하고 배후면의 저면에서는 입사되는 흐름과 반대방향의 회전류가 발생한다. 또한, 인공용승구조물 사면에 의해 표층으로 상승한 흐름은 인공용승구조물 배후면에서 하강과 상승을 반복하는 흐름특성을 보이며, 이러한 특성을 Honda(2006)는 인공용승구조물에 의한 지형성내부밀도과라 하였다. 본 연구에서도 인공용승구조물의 배후면에서 하강과 상승을 반복하는 흐름특성을 파악하였으며, 이러한 결과는 기존연구결과와 정성적으로 일치함을 확인하였다.

Fig. 6은 연구해역의 수심별 밀도 변화를 나타낸다. 표층에서 저층까지  $1022.8 \text{ kg/m}^3 \sim 1025.2 \text{ kg/m}^3$ 의 분포를 나타내었으며, 수심 20 m~40 m 사이에 밀도가 급변하는 밀도약층이 형성되어 있다. 따라서, 표층과 저층의 해수간 연직 혼합을 어렵게 하는 성층이 형성되어 저층수에 포함된 영양염의 표층으로 공급을 막아 어업생산성을 감소시킬 것으로 판단된다. 수치실험결과 밀도를 고려했을 경우 저층수에 포함된 영양염

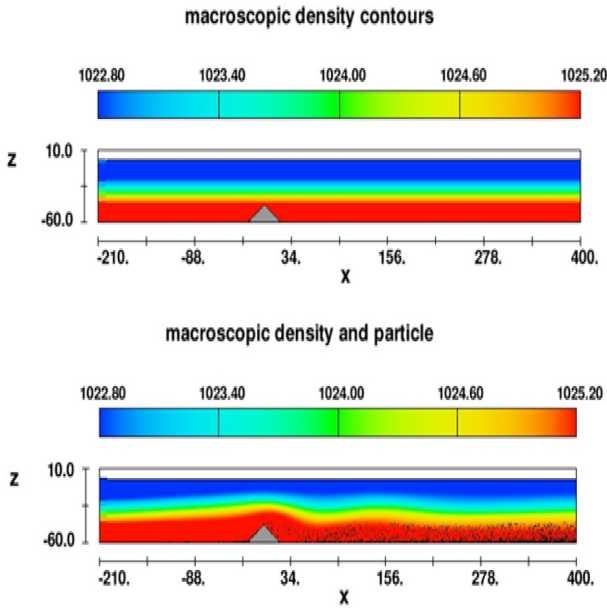


Fig. 6. Density Magnitude.

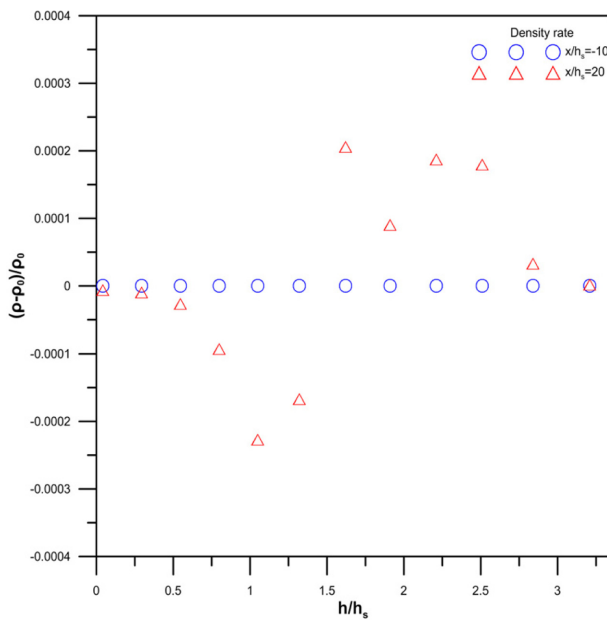
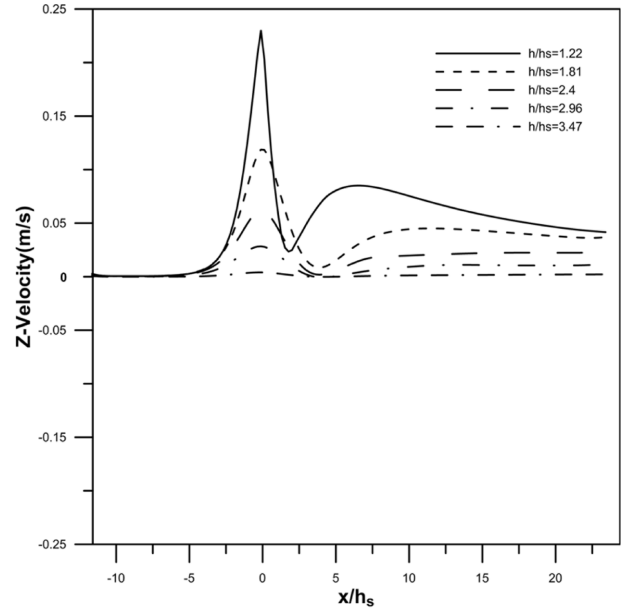


Fig. 7. Density Rate of Change.

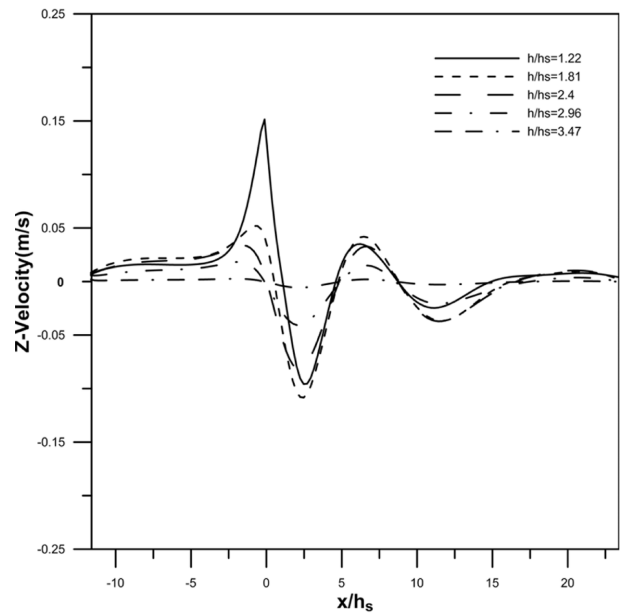
은 인공구조물에 의해 밀도약층이 형성된 수심까지 수송되지만, 밀도약층에 의해 표층까지는 수송되지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 용승구조물에 의한 혼합효과를 파악하기 위해 계산영역의 유입부와 유출부에서의 연직 방향의 밀도변화율을 나타내었다. 여기서  $h$ 는 해저면으로부터의 높이,  $h_s$ 는 구조물의 높이이며,  $\rho_0$ 와  $\rho$ 는 각각 초기밀도 및 인공구조물에 의한 혼합 후 밀도이다. 밀도변화율은  $\rho_0$ 가  $\rho$ 보다 클 경우 양의 값을 가지며,  $\rho_0$ 가  $\rho$ 보다 작을 경우 음의 값을 가진다.

그 결과 계산영역의 유입부인 무차원거리 -10에서는 밀도 변화가 나타나지 않았으나, 계산영역의 유출부인 무차원거리



(a) Upwelling Effect by Velocity



(b) Upwelling Effect Considering Density

Fig. 8. Vertical velocity.

20에서는 해저면으로부터 구조물 높이에 해당하는 수심까지 밀도 변화율이 감소하였고, 무차원 높이 2.5 수심까지 밀도 변화율이 증가하였다. 이는 인공용승구조물이 배후면 해수 혼합에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다.

Fig. 8은 수심( $h$ )과 구조물 높이( $h_s$ )의 비율에 따른 수직방향으로의 유속을 나타낸다. Fig. 8a의 경우,  $h/h_s = 1.22$ 인 영역에서 수직방향의 상승유속이 0.23으로 가장 좋은 용승효과를 나타내고 있으며, 용승효과는 구조물의 상부에서 가까운 영역일수록 잘 나타나며, 인공용승구조물로부터 수직방향으로 멀어질수록 용승효과가 저하될 것으로 판단된다. Fig. 8b의 경우, Fig. 8a와 같이  $h/h_s = 1.22$  영역에서 용승효과가 가장 좋

은 것으로 나타났으나, 수직방향의 상승유속이 0.15 m/s로 Fig. 8a보다 작게 나타났다. 또한 구조물의 배후면인  $x/hs = 1.2\sim 4.6$  영역에서는 하강류의 흐름을 보이고 있고 이러한 경향은 모든 수심에서 유사하게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구는 인공용승구조물의 용승효과를 모의하기 위해 CFD를 이용하여 층간 밀도를 고려한 인공용승류의 흐름특성 변화에 대하여 연구하였다. 기존에 진행된 사업을 바탕으로 길이 42.5 m, 폭 120 m, 높이 17 m의 크기의 구조물을 3D CAD 프로그램을 이용하여 형상화 하였다.

그 결과, 인공용승구조물에 의해 상승류의 유속이 증가하고 구조물 배후면에서의 와류구조를 파악할 수 있었다. 인공용승구조물 설치 시 배후면에 해수혼합에 영향을 미칠 것으로 판단되고, 용승효과는 인공용승구조물의 최상부에서 가까울수록 좋은 효과가 나타났으며, 수직방향으로 멀어질수록 용승효과가 저하될 것으로 판단된다.

층간 밀도를 고려하지 않았을 경우 가장 빠른 수직방향의 상승유속은 0.23 m/s로 나타났으나, 밀도를 고려했을 경우 가장 빠른 수직방향의 상승유속은 0.15 m/s로 나타났고  $x/hs = 1.2\sim 4.6$  영역에서는 하강류의 흐름을 확인할 수 있었다.

성층 강도에 따라 용승유량은 차이가 발생할 수 있으므로 향후 이와 유사한 수치실험을 실시할 경우 층간 밀도를 고려하여 실험을 실시해야 할 것으로 판단된다. 또한, 층간 밀도를 고려하여 성층계수의 변화 및 구조물 높이와 경사의 변화에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원하는 “해양심

층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

#### References

- Han, W.H., Cho, D.H. (2008). A Study on the flow characteristics around underwater triangular structure, The Korean Society of Marine Environment and Safety, 14(1), 21-27(in Korean).
- Jeon, Y.H., Lee, G.S., Kang, Y.K., Ryu, C.R. (2007). An experimental study for the falling test and upwelling effect of the artificial upwelling structures in flow field. Journal of Ocean Engineering and Technology, 21(4), 21-27(in Korean).
- Kurihara A. (2006). Unsteady numerical analysis of upwelling nutrient amount by artificial undersea mountains. Journal of Ocean Engineering, 53, 1306-1310.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009). Oceanic environmental research section: effect and estimation of artificial upwelling structures(VI), Research Center for Ocean Industrial Development, 1-338(in Korea).
- Oh, N.S., Choi, I.C., Kim, D.G., Jeong, S.T. (2011). The simulation of upwelling flow using FLOW-3D. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(6), 451-457(in Korean).
- Ryther, J. H. (1969). Photosynthesis and fish production in the sea: the production of organic matter and its conversation to higher forms of life vary throughout the world ocean. American Association for the Advancement of Science, 166(3901), 72-76.
- Honda, Y., Okayasu, A. (1991). Numerical analysis of vertical mixing by an artificial upwelling mound with conservative type B CIP method. Marine Pollution Bulletin, 23, 131-135.

Received 29 October, 2015

Revised 25 November, 2015

Accepted 1 December, 2015