

공극률 변화에 따른 인공용승류 특성

이황기 · 김영민 · 김종규[†]
전남대학교 조선해양공학과Flow Characteristics of the Artificial Upwelling Structure
by Porosity ChangeHwang Ki Lee, Young Min Kim and Jong Kyu Kim[†]

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약

인공용승구조물은 저층에 인공적으로 해중산(Sea Mount)을 설치하여, 저층수가 상층의 유평층(Euphotic Zone)으로 용승되도록 하는 구조물로 저층수에 포함된 풍부한 영양염의 공급은 일차생산을 증가시키고 이에 따른 먹이 연쇄작용 및 어류 군집 유도효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 인공용승구조물의 재료 및 형태에 따라 달라질 수 있는 공극률의 변화에 따른 흐름특성을 파악하고자 하였다. 그 결과, 공극률이 커질수록 상승유량은 작아졌고, 상승유량이 작아짐에 따라 하강유량도 작아지는 특성을 파악할 수 있었다. 인공용승구조물의 단위면적당 용승유량은 공극률이 10%일 때 가장 좋은 효율을 나타냈으며, 공극률이 20%일 경우에도 불투과성 인공용승구조물에 비해 좋은 효율을 보였다. 따라서 인공용승구조물의 최적단면을 설계할 경우 공극률을 20% 이하로 설계할 때 좋은 효율을 보일 것으로 판단된다.

Abstract – Artificial upwelling structure has been set up in sea mount. Bottom water can upwelling euphotic zone. Plentiful nutrient included in bottom water could not only enhance primary production but also expect food chain reaction and gathering fish. This study explain flowing features subject to porosity changes according to the material and shape of artificial upwelling structure. As a result, the upward flux is getting decreased while the porosity is increasing. And it figured out when the upward flux was decreased, the downward flux was also decreased. Furthermore, it was confirmed that the best efficiency of upwelling flux was shown up when the porosity was 10% according to the volume of artificial upwelling structure in case of 20% of porosity, it also has a good efficiency in comparison with impermeable artificial upwelling structure. Therefore, to build the artificial upwelling structure, It is encouraged to design it less than 20% of porosity for the best performance.

Keywords: Artificial Upwelling Structure(인공용승구조물), Porosity(공극률), Numerical Experiment(수치실험), Flow Characteristics(흐름 특성)

1. 서 론

해양에서 용승류 해역은 전체 해양면적의 0.1%밖에 되지 않지만 전체 어류생산량의 50%를 차지함으로써 어업생산의 중요한 부분을 차지한다. 용승류에 의해 저층수에 포함된 풍부한 영양염이 표층으로 공급될 경우 일차생산을 증가시키고 이에 따른 먹이 연쇄작용 및 어류 군집의 유도효과를 기대할 수 있으나(Ryther[1969]), 세계적으로 표층은 영양염이 고갈되어 있는 상태이며, 따라서 인공적으로 표층에 영양염을 공급하는 방안이 강구되어야 한다(Jung *et al.*

[2012]). 표층에 영양염을 공급하는 방안으로 용승현상을 인위적으로 발생하게 하는 것이 인공용승구조물이며, 이는 잠제 등과 함께 해저에 설치되어 용승류를 만들어 내는 중요한 역할을 한다(Yanagi and Nakajima[1991]).

일반적으로 인공용승구조물은 사면을 가진 삼각형상 구조물일 때, 용승효과가 가장 우수한 것으로 선행연구를 통해 알려져 있으며(Kim and Hwang[2006]), Han and Cho[2008]는 삼각형상 구조물을 대상으로 용승효과를 연구한 결과, 구조물 높이(h_s)와 수심(d)과의 관계에 따른 용승효과는 $h_s/d=0.5$ 에서 가장 높은 것으로 나타났다.

또한 Choe and Cho[2014]는 경사도가 다른 삼각형상구조물 주

[†]Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

위의 유동특성에 대해 연구하였으며, 경사도가 45°일 경우 구조물 배후면에서 상승하는 유속이 가장 높게 나타났다.

이와 같이 선행연구에서는 용승효과에 영향을 미치는 인공용승 구조물의 높이와 경사도에 관한 연구가 주를 이루고 있으나, 상대적으로 인공용승구조물의 공극률이 용승효과에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 인공용승구조물 적지 선정의 기본조건에 의해 선정된 남해안의 거제도 앞바다(N 34°36', E 128°30')에 시설된 인공용승구조물을 대상으로 하여 CFD(Flow-3D)를 이용한 인공용승구조물의 공극률 변화에 따른 흐름특성에 대해 연구하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 해양환경조건

연구해역은 북서·남동성분의 흐름이 주류를 이루고 있으며, 성층이 강하게 발달하는 하계의 평균유속은 0.5 m/s로 나타났고, 수온은 14.0~25.5 °C, 염분은 31.1~33.8 psu의 분포를 보였다. 연구해역은 북상하는 대마난류수와 남해안의 연안수가 만나 전선역을 이루는 해역으로 하계에 표층·중층에서는 고온, 저염의 분포를 보이고 저층에서는 고온·고염의 분포를 나타낸다(MLTMA[2009]). 한편, 인공용승구조물의 공극률 변화에 따른 흐름특성을 파악하기 위한 수치실험에 사용된 인공용승구조물의 크기와 해양환경조건은 선행연구를 참고하였다(Lee et al.[2015]).

2.2 수치모델

본 연구에서는 인공용승구조물의 공극률 변화에 따른 흐름특성을 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, 난류모델 계산 등 그 활용범위가 광범위하다. 기본방정식을 간단히 소개하면 다음과 같다. 비압축성 유체로 가정했을 때 일반적인 연속방정식은 식 (1)과 같다.

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} v \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} w \quad (4)$$

여기서, V_f 는 유체에 접하고 있는 체적, G_x, G_y, G_z 는 Body Acceleration 이고, f_x, f_y, f_z 는 Viscous Acceleration, b_x, b_y, b_z 는 구조물을 통과하면서 발생하는 손실을 나타낸다. 본 모델에서 자유수면은 유체의 체적함수(VOF)에 대한 함수, $F(x,y,z,t)$ 의 항으로 정의되며, 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial u}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial u}{\partial z}(FA_z w) \right\} = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (5)$$

여기서, R_{SOR} 항은 운동방정식에서 밀도소스항인 R_{SOR} 과 같으며, 식 (6)은 난류확산 항이다.

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_f} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_f A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_f A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_f A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad (6)$$

$v_f (=c_f \mu / \rho)$ 는 확산계수이고, c_f 는 상수로 역수는 Turbulent Schmidt Number로 불린다. μ 는 점도를 나타내며, 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.

수치해석에 사용된 난류모형은 RNG $k-\epsilon$ 모형을 적용하였으며, $k-\epsilon$ 모형은 주로 공학 분야에서 난류 경계층을 대상으로 많은 해석적인 측정을 통해 보정되어 난류에 대한 예측을 하는데 있어 유용하게 사용되고 있다. 그러나 실제 경험 값에 의해 보정된 상황과 매우 다른 난류현상에 적용하기 위해서는 많은 주의가 필요하다. 난류모형에서 가장 널리 사용되는 $k-\epsilon$ 모형은 k 에 대한 식 (7) ϵ 에 대한 식 (8)으로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i v_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P + G) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

여기서,

$$P = v_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G = \beta g_i v_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}$$

상기 식에서 와동점성계수 v_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$v_i = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

ϵ 에 대한 식 (8)은 경험상수 $c_{1\epsilon}, c_{2\epsilon}, \sigma_\epsilon$ 를 포함하는데 이 상수들은

단순 난류에 대한 해석 자료를 이용하여 결정한다. Yakhot 등(1992)에 의해 개발된 RNG $k-\epsilon$ 모형은 $k-\epsilon$ 모형에서 외동점성계수를 식 (9)로 나타낸 것과는 달리 식 (10)로 표현한다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \cdot \nabla_{iP} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ v_{eddy} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = v_i S^2 - \epsilon + \nabla \alpha \nu \nabla k \quad (11)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} v_i S^2 - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R + \nabla \alpha \nu \nabla \epsilon \quad (12)$$

여기서, R 은 변형률이며, 다음과 같다.

$$R = \frac{C_r \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2 \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3 k}$$

여기서, $\eta = Sk/\epsilon$, $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$ 이다(Flow Science[2007]).

2.3 수치실험

수치실험을 위한 계산영역의 크기는 $610 \times 300 \times 70(m)$ 이며, 3D CAD 프로그램인 SolidWorks를 이용하여 길이 42.5 m, 폭 120 m, 높이 17 m 크기의 인공용승구조물을 형상화하였다. 수치실험에 입력된 유속은 연구해역의 평균유속을 반영하여 0.5 m/s의 흐름이 일정하게 있는 것으로 가정하였으며, 인공용승구조물의 공극률을 0%에서 90%까지 10% 간격으로 대별하여 5,000 sec 동안 계산을 실시하였다.

경계조건으로 X-min과 X-max경계에는 각각 유입과 유출경계 조건으로 하였다. 또한 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. 1).

3. 결과 및 고찰

3.1 인공용승구조물에 의한 흐름특성

인공용승구조물에 의한 흐름특성을 Fig. 2에 나타내었다. 인공용

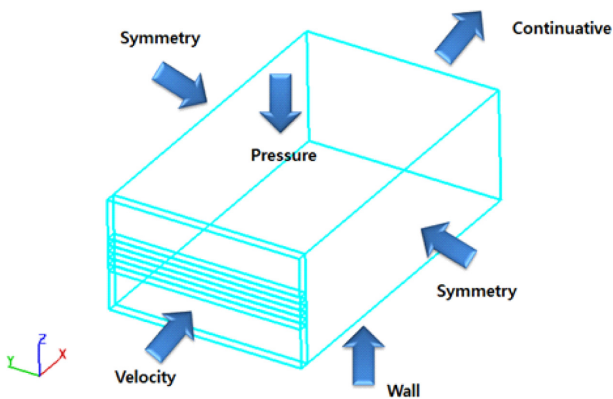
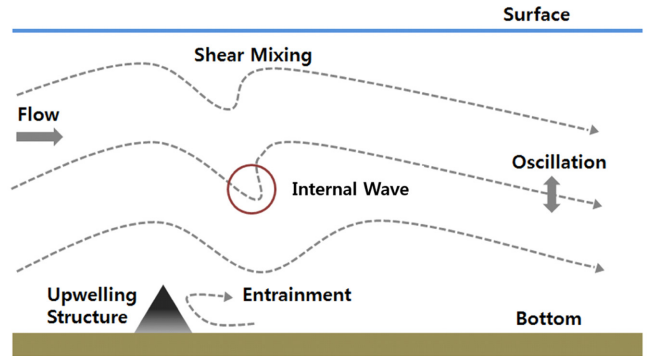
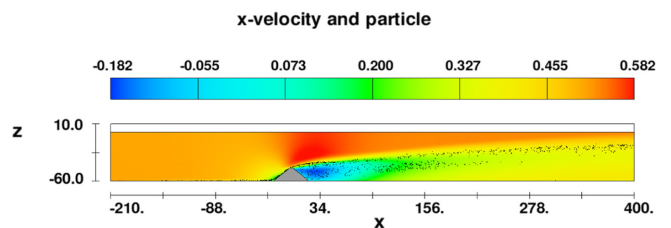


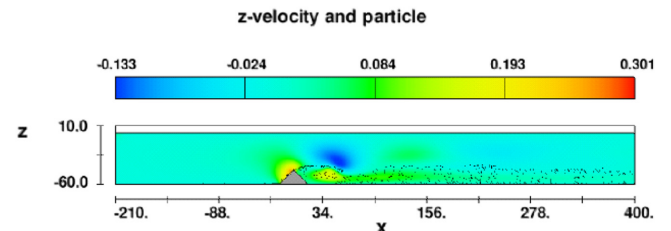
Fig. 1. Boundary conditions.



(a) Schematic diagram of flow characteristics by artificial upwelling structure



(b) Not considering the density of the layers(Unit : m/s)



(c) Considering the density of the layers (Unit : m/s)

Fig. 2. Flow characteristics by artificial upwelling structure.

승구조물은 전면부에서 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 흐름 특성을 보이며, 이러한 특성을 Honda and Okayasu[2012]는 인공용승구조물에 의한 지형성내부밀도파(Topographic Internal Wave)라 하였다(Fig. 2(a)). 층간 밀도를 고려하지 않은 경우 저층의 영양염은 표층까지 상승하였으나, 층간 밀도를 고려한 경우 인공용승구조물의 배후면에서 하강과 상승을 반복하는 흐름특성을 파악하였으며, 이러한 결과는 기존연구결과와 정성적으로 일치함을 확인할 수 있었다(Lee et al.[2015]).

저층(해저면으로부터 1 m 높이)에서의 Streamline을 Fig. 3에 나타내었으며, 그림에서 Symbol은 흐름방향을 나타낸다. 저층에서의 흐름은 인공용승구조물의 사면에 의해 상승하였으며, 상승한 흐름은 인공용승구조물 배후면에서 사면을 따라 하강하였다. 하강한 흐름은

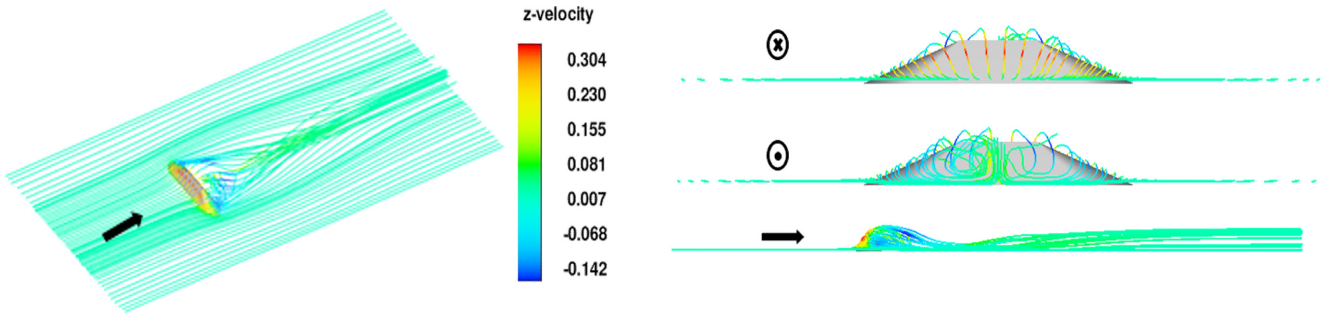


Fig. 3. Streamline distribution from the bottom layer(Unit : m/s).

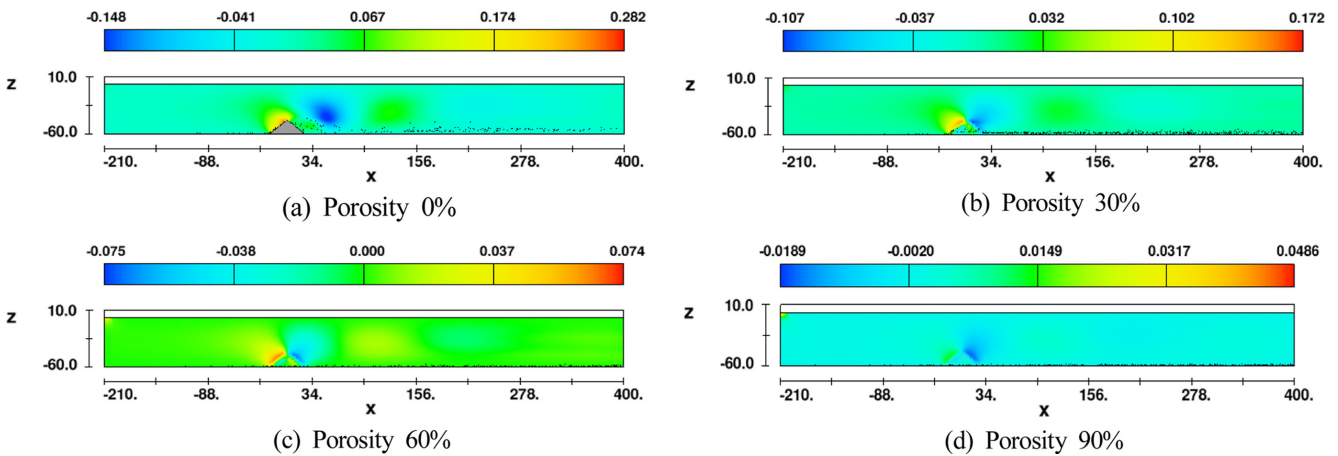


Fig. 4. Vertical flow distribution by porosity change.

인공용승구조물의 중심으로 모여들어 표층으로 상승하는 흐름특성이 나타났다.

3.2 인공용승구조물에 의한 흐름특성

용승효과는 저층수가 표층으로 향하는 것을 의미 한다(Choi *et al.*[2014]). 따라서, 연직방향의 유속 변화를 파악하는 것이 중요하다. Oh *et al.*[2011]은 기존연구에서 저층수에 포함된 영양염의 용승효과를 모의하기 위하여 Marker를 저층에 존재하는 것으로 가정하여 수치해석을 실시하였으며, 본 연구에서도 10,000개의 Marker를 이용하여 용승효과를 모의하였고 이때, Marker는 저층의 영양염과 해수의 비중이 같은 점을 고려하여 흐름에 의해서만 분산되도록 설정하였다(Fig. 4).

Fig. 5는 공극률 변화에 따른 용승효과를 나타낸다. 여기서, d 는 해저면으로 부터의 높이를 나타내고 h_s 는 인공용승구조물의 높이를 나타낸다.

연직방향의 유속이 가장 빠른 위치는 수평방향으로 구조물이 위치해 있는 x/h_s 가 0인 지점, 연직방향으로 d/h_s 가 1.05인 지점에서 가장 빠르게 나타났다. 즉 인공용승구조물 상부와 가까울 때 용승효과가 가장 높게 나타나고 인공용승구조물 상부와 멀어질수록 용승효과는 저하될 것으로 판단된다. 공극률이 0%인 불투과성 인공용승구조물의 경우 최대 연직방향 유속이 0.282 m/s로 나타났으며, 배후면에서 0.148 m/s의 하강하는 흐름이 나타났다. 공극률이 30%

인 인공용승구조물의 경우 최대 연직방향 유속이 0.172 m/s로 불투과성 인공용승구조물 보다 작게 나타났다. 또한, 공극률이 60%인 인공용승구조물의 경우 최대 연직방향 유속이 0.074 m/s로 나타났으며, 공극률이 90%인 경우 최대 연직방향 유속이 0.049 m/s로 나타났다. 이는 인공용승구조물의 공극률이 커질수록 용승효과가 작아짐을 나타낸다.

인공용승구조물 공극률 변화에 따른 효율을 Table 1에 나타내었다. 또한, 인공용승구조물에 의한 유량을 파악하기 위해 계산영역에서 구조물이 가장 높은 영역에 해당하는 폭 ± 9 m 영역에서의 상승유량과 하강유량을 파악하였으며, 유량계산영역을 Fig. 6에 나타내었다.

상승유량은 계산영역에서 0.01 m/s보다 큰 상승유속을 가진 격자에 해당 격자 크기와 상승유속을 곱하여 구해진 상승유량을 모두 더하여 계산했고, 하강유량은 -0.01 m/s보다 작은 하강유속을 격자 크기에 곱하여 구해진 하강유량을 모두 더하여 계산했다. 또한, 인공용승구조물에 단위면적당 용승유량을 계산하여 공극률 변화에 따른 용승효율을 파악하고자 했다. 여기서 인공용승구조물의 체적(S_v)은 유량계산영역에 포함된 인공용승구조물 체적을 사용했으며, 총 용승유량(T_U)은 상승유량에서 하강유량을 뺀 값으로 계산하였다.

그 결과, 공극률이 커질수록 상승유량은 작아졌고, 상승유량이 작아짐에 따라 하강유량도 작아지는 특성을 파악할 수 있었다. 또

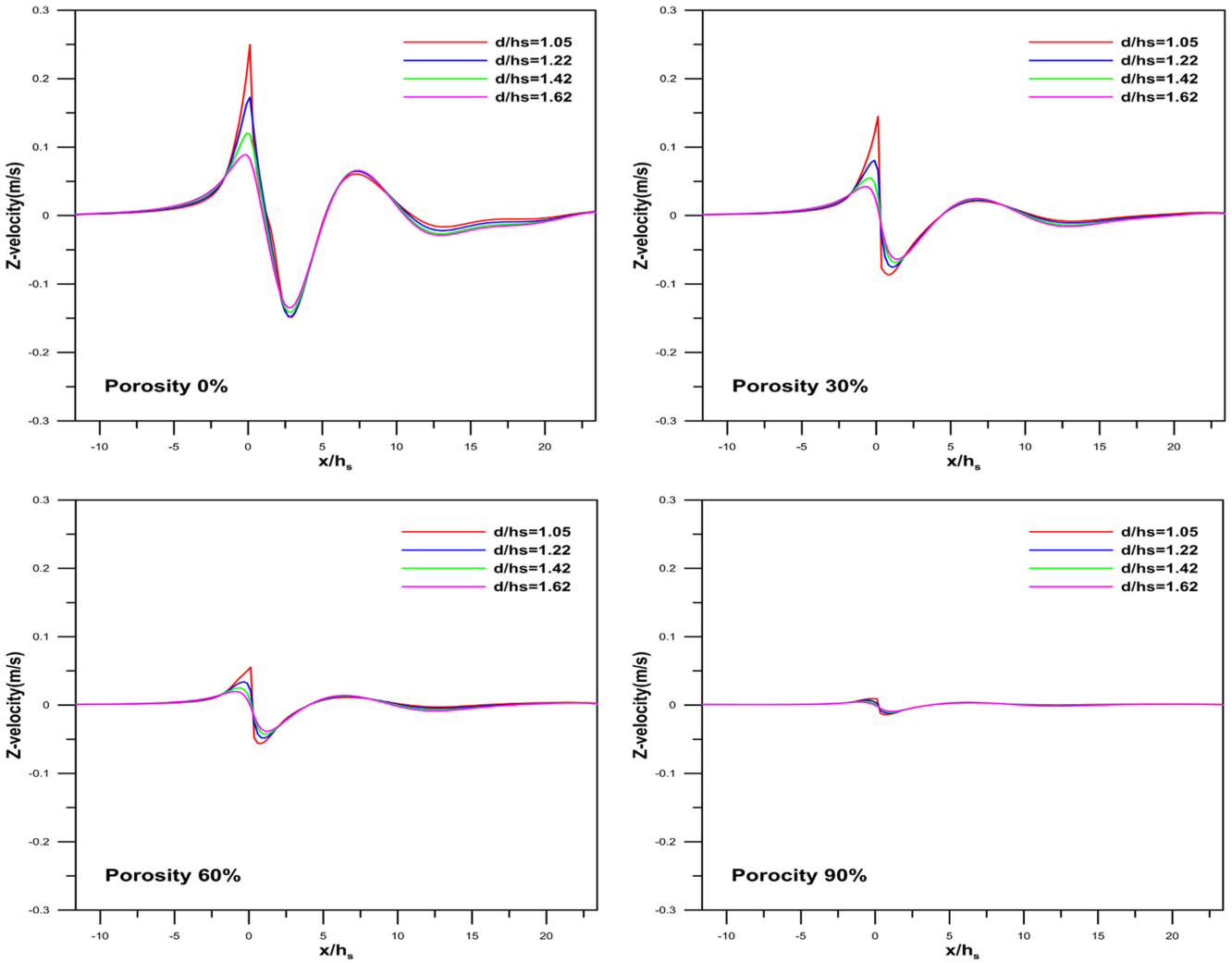


Fig. 5. Vertical velocity by change in porosity of the artificial upwelling structure.

Table 1. Upwelling efficiency according to the porosity changes

Porosity (%)	Upward flux	Downward flux (m ³ /s)	Total Upwelling flux	T _U /S _V
0	5045.28	4440.41	604.87	0.09
10	4023.83	2483.17	1540.66	0.26
20	2202.42	1651.88	550.54	0.11
30	1530.01	1445.48	84.53	0.02
40	1531.13	1555.83	-24.70	-0.01
50	1088.17	1177.48	-89.31	-0.03
60	686.79	830.99	-144.20	-0.06
70	321.65	570.55	-248.91	-0.13
80	135.12	305.87	-170.75	-0.13
90	28.08	66.93	-38.85	-0.06

한, 공극률이 40%이상일 경우는 상승유량보다 하강유량이 더 커지는 것으로 나타났다.

공극률이 없는 불투과성 인공용승구조물의 경우 상승유량은 5045.28 m³/s로 나타났고 하강유량은 4440.41 m³/s으로 나타났다.

공극률이 10%인 경우, 상승유량은 불투과성 인공용승구조물보다 작게 나타났지만, 하강유량이 크게 감소하여, 총 용승유량은 불투과성 인공용승구조물보다 높게 나타났다.

인공용승구조물의 단위면적당 용승유량은 공극률이 10%일 때

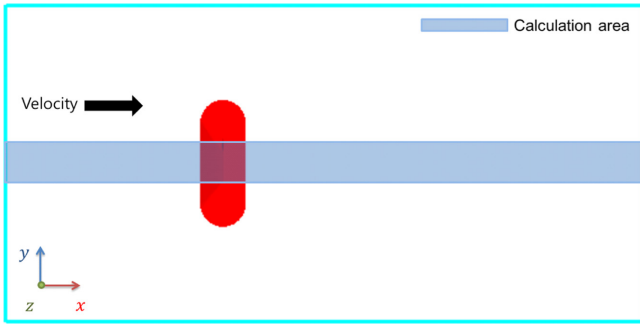


Fig. 6. Calculation area of upwelling flux.

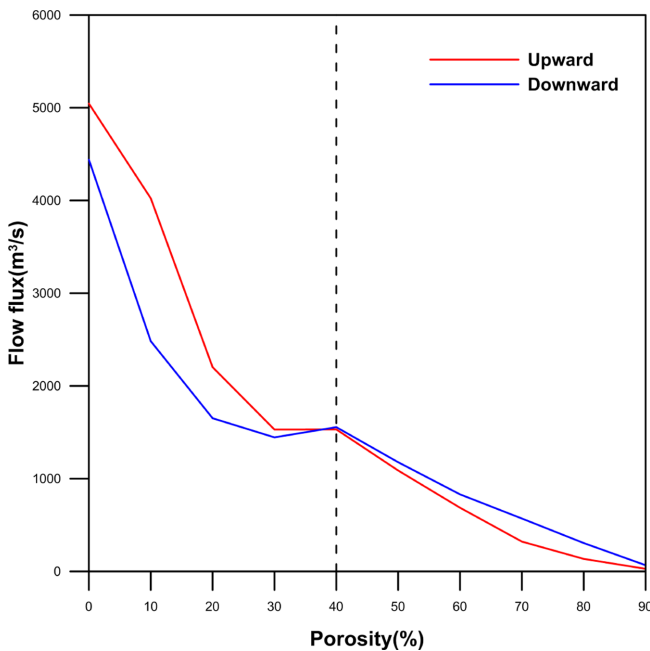


Fig. 7. Upwelling efficiency by porosity change.

0.26으로 가장 좋은 효율을 나타냈고, 공극률이 20%일 경우에도 불투과성 인공용승구조물에 비해 0.02정도 좋은 효율이 나타났다 ([Fig. 7] 참고).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 인공용승구조물의 재료에 따라 달라질 수 있는 공극률의 변화에 따른 흐름특성을 파악하고자 하였다. 기존에 진행된 사업을 바탕으로 길이 42.5 m 폭 120 m, 높이 17 m 크기의 구조물을 3D CAD 프로그램을 이용하여 형상화 하였고, 공극률을 0%~90%로 대별하여 실험을 실시하였다.

그 결과, 인공용승구조물에 의한 용승효과는 구조물의 상부와 가까울수록 크게 나타나며, 구조물 상부와 멀어질수록 저하될 것으로 판단된다.

구조물이 가장 높은 영역에 해당하는 폭 ± 9 m 영역에서의 유량은 공극률이 커질수록 상승유량이 작아졌고, 상승유량이 작아짐에 따

라 하강유량도 작아지는 특성을 파악할 수 있었다. 또한, 공극률이 40% 이상일 경우는 상승유량보다 하강유량이 더 커지는 것으로 나타났다.

인공용승구조물 단위면적당 총 용승유량은 공극률이 10%일 때 가장 좋은 효율이 나타났으며, 공극률이 30%이상일 경우 불투과성 인공용승구조물에 비해 효율이 낮게 나타났다. 따라서 인공용승구조물의 최적단면을 설계할 경우 공극률을 20% 이하로 고려하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 0.5 m/s의 일정한 유속조건에서 실험을 실시하였으나, 향후 왕복성 흐름 등 실험역의 해양환경특성을 고려한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 전남대학교 연구년교수연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Choe, S.B. and Cho, D.H., 2014, "Flow Characteristics Around Underwater Triangular Structure with Different Inclination", J. Korea Soc. Mar. Environ. Saf., Vol. 20, No. 6, 241-246.
- [2] Flow-3D' User's Manual Version 9.2, 2017, Flow Science Inc.
- [3] Han, W.H. and Cho, D.H., 2008, "A Study on the Flow Characteristics around Underwater Triangular Structure", J. Korea Soc. Mar. Environ. Saf., Vol. 14, No. 1, 21-27.
- [4] Honda, Y. and Akio, O., 2012, "Numerical Analysis of Vertical Mixing by an Artificial Upwelling Mound with Conservative Type B CIP Method", J. Japan Soc. Civil Eng., Vol. 68, No. 2, 1151-1155.
- [5] Jung, D.H., Lee, H.S., Kim, H.J., Moon, D.S. and Lee, S.W., 2012, "Key Technologies for Floating Type Artificial Upwelling System to Strengthen Primary Production", J. Ocean Eng. Technol., Vol. 26, No. 1, 78-83.
- [6] Kim, D.S. and Hwang, S.B., 2006, "The Variation of Current by the Building of Artificial Upwelling Structure (I)", J. Korea Soc. Mar. Environ. Saf., Vol. 12, No. 4, 301-306.
- [7] Lee, H.K., Kim, J.K., Lee, M.O., Kim, H.J. and Otake, S., 2015, "Flow Characteristic of Artificial Upwelling by CFD", J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., Vol. 27, No. 6, 419-423.
- [8] Research Center for Ocean Industrial Development, 2009, "Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009). Oceanic Environmental Research Section: Effect and Estimation of Artificial Upwelling Structures (VI)", 1-338.
- [9] Oh, N.S., Choi, I.C., Kim, D.G. and Jeong, S.T., 2011, "The Simulation of Upwelling Flow using FLOW-3D", J. Korea Soc. Coast. Eng., Vol. 23 No. 6, 451-457.
- [10] Jhon H. Ryther., 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”, Am. Assoc. Adv. Sci., Vol. 166, No. 3901, 72-76.

- [11] Yanagi, T. and Nakajima, M., 1991, “Change of Oceanic Conditions by the Man-Made Structure for Upwelling”, Mar. Pollut. bull., Vol. 23, 131-135.
- [12] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G., 1992, “Development of turbulence models for shear flows

by a double expansion technique”, Phys. Fluids A, Vol. 4, No. 7, 1510-1520.

Received 27 April 2017

Revised 17 May 2017

Accepted 19 May 2017