

## FLOW-3D 모형을 이용한 용승류 모의 The Simulation of Upwelling Flow Using FLOW-3D

오남선\* · 최익창\* · 김대근\*\* · 정신태\*\*\*

Nam Sun Oh\*, Ik Chang Choi\*, Dae Geun Kim\*\* and Shin Taek Jeong\*\*\*

**요 지** : 최근 용승류가 발생하는 지역에서 대규모 어장이 형성되는 원리를 이용하여 대규모 해양구조물을 건설하여 인공적으로 용승류를 발생시킴으로써 새로운 어장을 조성하는 사업이 일본과 한국에서 진행되고 있다. 이 연구에서는 FLOW-3D 모형을 이용하여 용승류 흐름을 모의하고자 하였다. 또한 FLOW-3D 모형에서 Marker의 이동을 이용하여 영양염의 용승현상을 판단할 수 있는 방법을 모색하고자 하였다. 연구결과 FLOW-3D 모형을 이용하여 용승효과를 사전에 정성적으로 판단하는 것이 가능하였다.

**핵심용어** : 용승류, FLOW-3D, 영양염, 어장

**Abstract** : Large scale fishing ground can be made by upwelling flow. Recently the fishing ground development projects, using artificial upwelling by large structure under the sea, are in progress in Japan and Korea. In this study upwelling flow is simulated with FLOW-3D model. Using the movement of marker in FLOW-3D, the method for simulating upwelling of nutrients was experimented. The results show that FLOW-3D model can evaluate upwelling effect before starting real project.

**Keywords** : Upwelling, FLOW-3D, Nutrients, Fishing ground

### 1. 서 론

최근 일본, 중국 등의 배타적 경제수역 선포, 조업규제강화 등으로 근해어장이 축소되고 있으며 우리나라의 연안역도 도시화, 산업화로 인한 산업 및 생활폐수 등의 유입으로 인하여 어장환경이 해마다 악화되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 국내외 어업여건의 변화에 능동적으로 대처하고 연안어업의 경쟁력을 확보할 수 있는 수산자원 개발과 관련한 기술이 절실히 요구되고 있다.

북남미의 캘리포니아, 칠레, 페루 등의 어장은 해양심층수가 용승하는 해역으로 용승류에 의하여 영양염이 풍부하게 공급되어 식물성 플랑크톤이 증가하고 이에 따라 거대한 어장이 형성되는 지역이다. 이들 지역은 해양 전체 면적의 0.1%에 지나지 않으나 세계 어획량의 1/2을 생산하는 곳으로 알려져 있다(金卷·鈴木, 2001). 이와 같이 보상심도보다 깊은 곳에 존재하는 해수가 유광층으로 용승하는 해역에서는 풍부한 영양염의 공급으로 비옥한 해역이 형성되어 식물성 플랑크톤과 해조류가 증식하므로 기초생산력이 증가한다. 그리고 식물성 플랑크톤과 해조류를 섭취하는 동물성 플랑크톤, 어류 등의 고차

적인 생물생산도 증가하여 좋은 어장이 형성된다(中, 2005).

최근에는 이와 같이 용승류에 의한 대규모 어장이 형성되는 원리를 이용하여 대규모 해양구조물을 건설하여 인공적으로 용승류를 발생시킴으로써 새로운 어장을 조성하는 사업이 진행되고 있다. 일본의 경우 4개 지구에서 사업이 진행중이며 이외에도 추가로 새로운 사업이 계획중이다. 우리나라의 경우에도 해양수산부에서 2004년부터 남해안 거제도 소매물도 앞바다에 블록을 이용한 대규모 구조물을 설치하여 인공용승류를 유도하는 사업이 진행중이다.

이와 같은 사업은 거액의 예산과 장기간의 시간을 필요로 하므로 사업의 계획은 사전에 면밀히 검토되어야 하며 사업의 효과는 충분히 검토되어야 한다. 그러나 전체 현상의 미케니즘이 복잡하여 사업에 의한 기대효과를 정확히 예측하기는 쉽지 않다. 따라서 우리나라의 경우 기초조사와 해수유동 수치모형 실험 등을 바탕으로 그 효과를 유추하고 사업을 진행하였다.

일반적으로 사업의 효과는 유속이 빠를수록 그리고 단면의 크기가 클수록 크게 되나 이에 따라 사업비는 커지게 된다. 따라서 사업의 시행에 따른 경제적 효과를 극대화하기 위해서는 최적의 위치를 선정하여야 하며 적절한 단면의 형상 및

\*목포해양대학교 해양시스템공학부

\*\*목포대학교 공과대학 토목공학과

\*\*\*원광대학교 토목환경공학과, 원광대학교 부설 공업기술개발연구소 연구위원 (Corresponding author: Shin Taek Jeong, Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang Univ., Shinyong-Dong 344-2, Iksan-Si, Challabuk-Do 570-749, Korea, stjeong@wonkwang.ac.kr).

규모를 결정하여야 한다. 이를 위해서는 사전에 사업 시행에 따른 기대효과를 예측할 수 있는 방법을 찾아야한다. 이 연구에서는 현장의 조건, 구조물의 형상 및 규모에 따른 기대 효과의 변화를 간접적으로 예측하기 위하여 영양염의 용승을 수치적으로 모의할 수 있는 방안을 강구하고자 하였다. 이와 같이 영양염의 변동을 모의할 경우 그 결과를 토대로 사업의 적절한 입지와 규모 등을 결정할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 용승효과의 정량화에 주 목적을 가지고 3차원 흐름의 거동을 모의할 수 있는 FLOW-3D 모형을 이용하였다. 또한 검사단면을 설정하고 검사단면에서 영양염 농도의 변화를 관찰하여 인공용승효과를 파악하고자 하였다. 이와 같은 연구는 향후 인공어장 조성사업이 추가로 실시될 때 본격적인 연구와 사업에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 국내외 기술개발 및 사업현황

대규모 해양구조물에 의한 인공용승류의 유도와 이에 따른 어장조성사업은 일본에서 처음 시작되었다. 일본의 경우 Nagasakiken(長崎) Ikitsukioki(生月沖) Hokushou(北松) 해역에서 처음 시범사업이 실시되었으며 1997년에서 2000년도에 걸쳐 시공이 되었다. 이후 일본의 수산기반정비사업에 의하여 Nagasakiken(長崎) 북부지구 Ukukita(宇久北)·Tsushimaoki(對馬沖)지역에서 2003년에서 2005년에 걸쳐 경량콘크리트 블록(석탄회 블록)을 이용하여 인공구조물을 시공하였다. 또한 사석을 이용하여 2005년에서 2006년에 걸쳐 Nagasakiken(長崎) 서부지구 Gotounishi(五島西)지역에, 2004년에서 2005년에 걸쳐 Kagoshimaken(兒島縣) Satsuma(摩)지구 Akuneoki(阿久根沖)지역에 인공구조물을 시공하였다.

국내의 경우 일반 사석, TTP, 이비블록의 구조양식에 대하여 2차원수조에서 실험을 통하여 인공 용승효과를 확인하였다(신 등, 2004). 인공 용승효과의 확인은 연직방향의 유속성분 변화와 연직방향 DO 변화의 측정을 통하여 이루어졌다. 그 결과 모든 경우에 대하여 연직방향의 유속성분이 수평방향의 유속성분보다 크게 유발됨을 확인하였고 DO의 측정치도 증가되는 효과를 확인하였다.

우리나라에서는 해양수산부(2005, 2006, 2007)에서 ‘인공 용승류를 이용한 어장환경 개선사업’ 과제의 일환으로 2004년부터 3년에 걸쳐 석탄회 콘크리트 블록을 이용하여 50억원의 예산을 들여 인공구조물을 시공하였다. 사업해역은 남해안의 거제도 소매물도 앞바다로 길이 93 m, 높이 18 m, 폭 45 m의 인공구조물을 시공하였다. 이 사업은 구조물의 효과를 평가하기 위하여 수치모델 등을 이용한 물리환경조사와 수질환경조사, 생물상 및 어류상을 조사하였으며, 자원량 조사를 위하여 구조물 설치전후에 대한 수중모니터링을 실시하였다. 또한 구조물의 해수반응을 평가하기 위하여 석탄회 콘크리트 블록의 안정성과 블록에서의 증금속 등 용출에 따른 해수반응을 조사하였다.

Table 1에 지금까지 시공된 일본과 우리나라의 인공용승류에 의한 어장 조성을 목적으로 한 인공구조물 시공사례를 비교하였다. 조성소재는 사석 또는 석탄회 콘크리트 블록을 이용하였으며, 사업해역의 수심은 약 60-90 m인 지역으로 나타났다. 조성된 인공구조물의 높이는 약 14-18 m 정도, 구조물의 길이는 90-130 m, 산정간 거리는 60-75 m로 나타났다.

## 3. 용승효과의 검토

### 3.1 용승효과의 평가순서 및 방법

인공구조물 건설에 의한 어장조성 사업의 수행을 위해서는 계획단계에서 구조물의 규모와 형상에 따른 사업의 효율성을 판단하는 것이 필요하다. 사업의 효율성을 판단하기 위해서는 구조물 시공에 따른 용승효과가 검토되어야 한다. 인공적인 용승효과를 직접적으로 예측하기는 어려우므로 보통 시공 전후의 영양염량의 변화를 예측하여 용승효과를 판단하게 된다. 즉 식물성 플랑크톤이 생존가능한 유광층내에서 수산물의 기초생산자인 식물성 플랑크톤의 증식에 필요한 영양염량의 변화를 예측함으로써 용승효과를 간접적으로 판단하게 된다. 수치모의를 수행하기 위하여 먼저 마운드의 형상과 계절변동 등의 기본조건과 유속, 밀도분포, 영양염농도분포 등의 경계조건을 설정한다. 그리고 수치해석 프로그램을 이용하여 용승과정을 모의하게 된다. 그리고 보상심도와 검사단면을 결정한 후 모

**Table 1.** Fishing ground construction using artificial upwelling in Korea and Japan

Location	Nagasakiken Ikitsukioki Hokushou	Nagasakiken Ukukita-Tsushimaoki	Nagasakiken Gotounishi	Kagoshimaken Satsuma Akuneoki	Geo-Je Island Somaemuldo
Material	Coal-plaster concrete block (6 ton/EA)	Coal-plaster concrete block (6 ton/EA)	rubble mound (1000 kg/EA)	rubble mound (500 kg/EA)	Coal-plaster concrete block (1900 kg/EA)
Depth	82 m	Ukukita 85 m Tsushimaoki 89 m	85 m	63 m	54 m-64 m
Section	Height 11.5 m Length 130 m Inclination 1 : 3	Height 15 m Top Width 60 m Length 126 m Inclination 1 : 2, 1 : 2.41	Height 15 m Top Width 75 m Length 150 m Inclination 1 : 2.5	Height 14 m Top Width 75 m Length 145 m Inclination 1 : 2.5	Height 17 m Length 90 m Width 50 m
Year	1997-2000	2003-2005	2005-2006	2004-2005	2004-2006

의된 결과를 바탕으로 용승되는 영양염량을 산정함으로써 간접적으로 용승효과를 검토하게 된다. 시뮬레이션을 실시하는 데에는 밀도효과, 비정상변동, 난류확산 등에 관하여 충분히 고려하고 실제 현상에 대응하는 수치모델링을 선택하는 것이 필요하다.

용승효과를 평가하기 위해서는 우선 보상심도를 설정한다. 보상심도는 식물성 플랑크톤에 의한 호흡소비와 광합성생산이 가능한 심도로 식물성 플랑크톤이 생식 가능한 한계가 된다. 따라서 용승효과를 평가는 보상심도 이내에 증가하는 영양염량을 평가함으로써 수행된다. 보상심도는 아래항목에서 현지 조사결과를 기초로 종합적으로 판단하여 결정하게 된다.

- 투명도의 2-3배의 심도
- 광량 감쇄율이 1%가 되는 심도
- 클로로필 a의 농도가 급격히 감소하는 심도

보상심도가 결정되면 영양염량의 변동을 조사하기 위한 검사단면을 결정한다. 검사단면은 마운드에서 흐름방향의 하류 측에 걸쳐 흐름축과 수직방향으로 보상심도 이내에 복수의 단면을 설정한다. 용승 영양염량의 산정은 검사단면에서의 영양염 농도차(용승후 농도-용승전 농도)와 검사단면에 걸친 평균유속 그리고 검사단면적과의 곱에 의하여 산정한다. 이렇게 계산된 검사단면에서의 용승 영양염량값들을 합함으로써 최종적인 용승효과를 평가하게 된다.

### 3.2 모형의 선정 및 개요

대상해역과 인공구조물의 단면을 입력자료로 하여 인공용승효과를 검증하기 위하여 수치해석을 실시하고자 한다. 대상해역의 시간에 따른 흐름변화를 모의하고 영양염의 변동을 산정하기 위해서는 3차원 해수유동 수치모형실험이 필요하다. 이 논문에서는 용승효과의 검증에 주목적을 가지고 3차원 흐름의 거동을 모의할 수 있는 FLOW-3D 모형을 이용하였다. 또한 검사단면을 설정하고 검사단면에서 영양염 농도의 변화를 관찰함으로써 인공용승효과를 검증할 수 있는지 알아보려고 한다.

#### 3.2.1 지배방정식

직교좌표계  $(x, y, z)$ 에서 비압축성 유체의 3차원 흐름을 해석하기 위한 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식으로 다음과 같다.

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

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

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

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

여기서,  $u, v, w$ 는  $x, y, z$  방향별 유체속도,  $V_F$ 는 체적비 (Volume fraction),  $A_x, A_y, A_z$ 는 각 방향별 유체 흐름을 위해 확보된 면적비 (Area fraction),  $\rho$ 는 유체 밀도,  $RSOR$ 은 질량생성/소멸 (Mass source/sink) 항,  $p$ 는 압력,  $G_x, G_y, G_z$ 는 방향별 체적력항,  $f_x, f_y, f_z$ 는 방향별 점성력항,  $b_x, b_y, b_z$ 는 다공질 매체에서 방향별 흐름 손실이다.

모형에서는 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 만족하는 VOF (volume of fluid) 함수,  $F(x, y, z, t)$ 를 정의한다.  $F$ 가 1인 경우는 검사체적에 유체가 가득한 상태를, 0인 경우는 검사체적에 유체가 없는 경우를 나타내는 것으로 자유수면에서는  $F$ 가 0과 1사이의 값을 가진다. 단위체적내에 포함하고 있는 유체의 체적은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서,  $FDIF$ 는 난류확산항이며,  $FSOR$ 은 연속·운동량방정식에서 유체의 질량생성으로 인해 변화되는 유체의 시간에 따른 체적변화율을 의미하며,  $F$ 는 자유수면을 포함하고 있을 때 유체가 차지하고 있는 체적비율을 의미한다.

운동방정식, 에너지, VOF함수의 수송방정식에 사용되는 확산항은 난류확산과 분자확산으로 구분할 수 있다. FLOW-3D에서 난류확산을 산정하기 위하여 제공하는 난류모형은  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , LES (Large Eddy Simulation) 모형이다. 본 연구에서는 실무적인 관점에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 RNG  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하였다. 난류확산을 산정하기 위한 난류운동에너지와 난류확산의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P + G + Diff - \epsilon \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \\ = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon (P + CDIS3 \cdot G) + DDif - \frac{CDIS2 \cdot \epsilon^2}{k}}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서,  $P$ 는 전단력항,  $G$ 는 부력(浮力)항,  $Diff, DDif$ 는 확산항,  $CDIS1, 2, 3$ 은 상수이다.

#### 3.2.2 수치모의 알고리즘

지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되는데, FLOW-3D는 유한차분법에 FAVOR 기법을 도입한 유한체적법의 접근법을 사용한다. 해석 영역을 격자로 나눈 후, 이 격자 단

위로 계산이 이루어지는데, 각 격자에 대해서 주어진 압력에 대해 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 Poisson 방정식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하고 그 후에 자유수면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용한다. FLOW-3D에서 사용하는 격자계는 Fig. 1과 같다.

격자계(grid system)의 구성시 격자망(mesh)과 지형(geometry)은 독립적으로 입력된다. 이는 Fig. 2의 FAVOR (Fractional Area and Volume Obstacle Representation)기법을 사용하는 것으로, 육면체 격자망에 구조물, 벽체 등의 지형정보가 포함된다.

체트, 비산, 파랑 등과 같은 자유수면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안(Lagrangian)방법보다 고정 오일러리안(Eulerian)방법을 사용하는 VOF 방법이 일반적이다. FLOW-3D에 사용하는 VOF 방법은 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 유한차분시 경계면의 Smearing을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유수면으로 가정함)사이의 운동을 기술할 수 있는 수치 해석 방법이다. Fig. 3에 VOF방법의 개념도를 나타내었다.

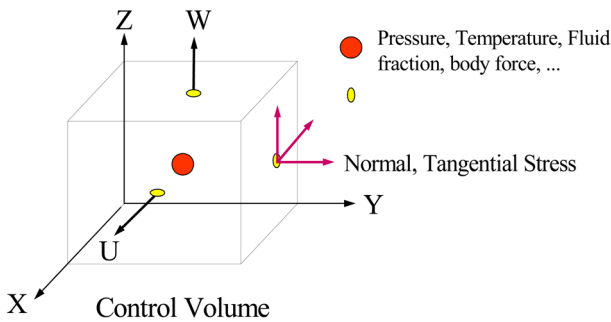


Fig. 1. The grid system in FLOW-3D.

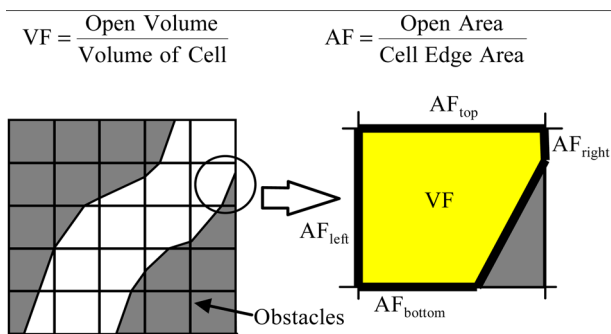


Fig. 2. Schematic diagram of FAVOR scheme.

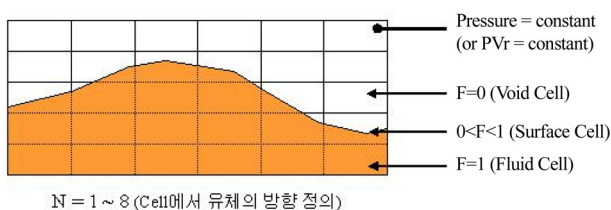


Fig. 3. Schematic diagram of VOF method.

지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR(successive over relaxation)법과 SADI(special alternating-direction, line implicit)법을 사용할 수 있다. 계산은 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산, (2) 연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복 계산, (3) 자유수면, 난류특성, 에너지 수송방정식을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

### 3.3 입력자료 및 단면의 설정

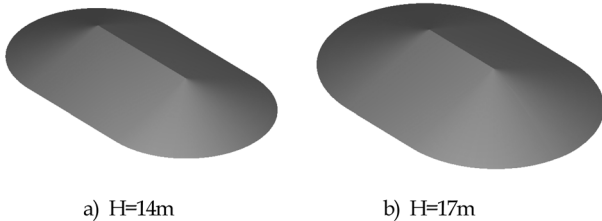
인공구조물의 단면은 조성소재에 따라 가능한 사면경사, 시공방법, 시공비용이 다르다. 단면형상에 따라 용승효과가 다르기 때문에 단면제원을 검토할때에는 사면경사, 높이, 연장을 여러곳 설정하여 각 설정단면에 대한 비용대비 효과분석을 실시하여 그 결과를 비교검토하여 최적단면을 결정하게 된다. 설정한 단면으로 목표한 결과를 얻을수 없는 경우에는 단면제원을 재설정하여 경우에 따라 마운드측과 조성지점을 재검토하는 것이 필요하다(武田 · 左々木, 2006).

이 연구는 선정된 모형으로 용승류 효과와 영양염의 변동을 모의하는 것을 목적으로 하였다. 따라서 기존에 진행된 사업을 근거로 임의의 입력자료와 단면을 설정하여 모형을 수행한 후 유속의 변화와 영양염의 변동을 검토하였다. 먼저 모델링의 기본 입력자료인 수심은 Table 1을 참조하여 60m로 가정하였으며 수심의 변화는 없는 것으로 가정하였다. 구조물의 형태는 기존 사업에 이용된 단면의 길이가 일본의 경우 126m~150m 이고, 해양수산부(2005)에서 구조물의 크기 확대의 필요성을 지적한 점을 고려하여 120m로 가정하였다. Table 1에서 사면경사는 사업에 따라 1:2~1:3의 분포를 보이므로 1:2.5로 가정하였다.

당연히 예상되는 결과로 지금까지의 연구결과에서 단면의 규모가 사업의 효과에 비례하는 것으로 지적되어 왔다(해양수산부, 2005). 그러나 단면의 규모가 늘어날수록 사업비는 기하급수적으로 증가하게 된다. 지금까지의 사업에서 단면의 규모를 결정하는 제일 중요한 인자의 하나인 단면의 높이는 일본의 시험사업을 제외하고는 14m~17m로 설계되었다. 따라서 이 연구에서는 단면의 높이 변화에 따른 인공용승 효과의 변화를 파악하기 위하여 단면의 높이를 14m와 17m 두 가지로 상정하여 인공용승의 효과를 검토하기로 한다. 지금까지의 가정을 바탕으로 계산하면 단면의 높이가 14m일 때 산정간의 거리는 50m이며, 단면의 높이가 17m일 때 산정간의 거리는 35m이다. 이와 같이 선정된 단면의 제원을 Table 2에 나타내었다. 또한 선정된 인공구조물 단면의 형상을 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 대상해역의 조류속은 해역에 따라 다르나 최대유속이 대략 2kn(1.04 m/s)정도인 점을 감안하여 0.5 m/s의 흐름이 일정하게 있는 것으로 가정하여 용승류 효과를 계산하였다.

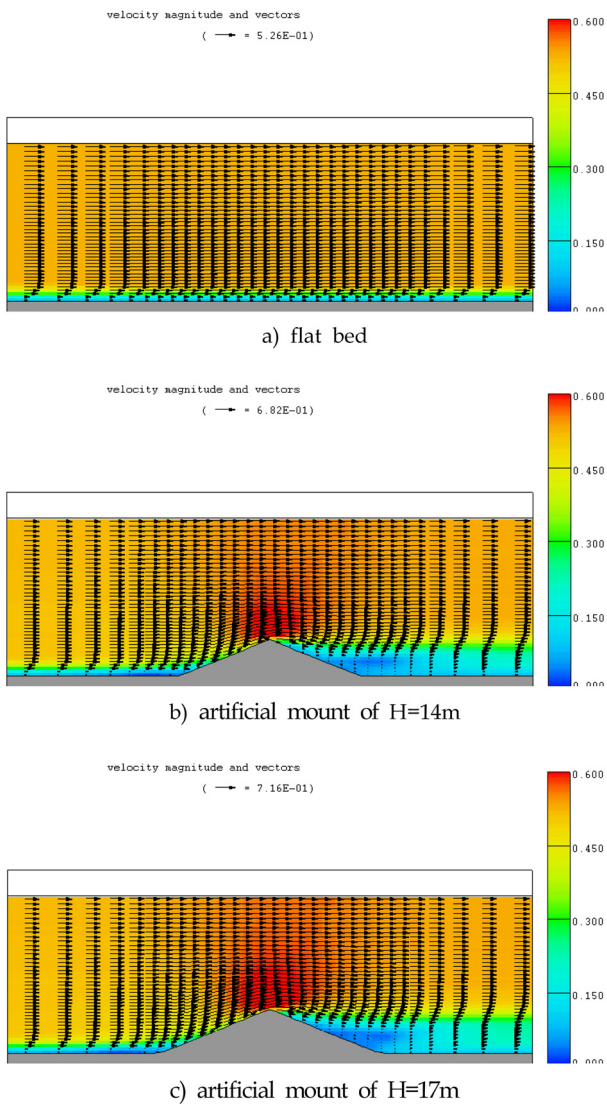
**Table 2.** Input dimensions of mount

Section	Size(m)	
Length	120	
Inclination	1:2.5	
Height	14	17
Top Width	50	35



a) H=14m                      b) H=17m

**Fig. 4.** The shape of artificial mount.



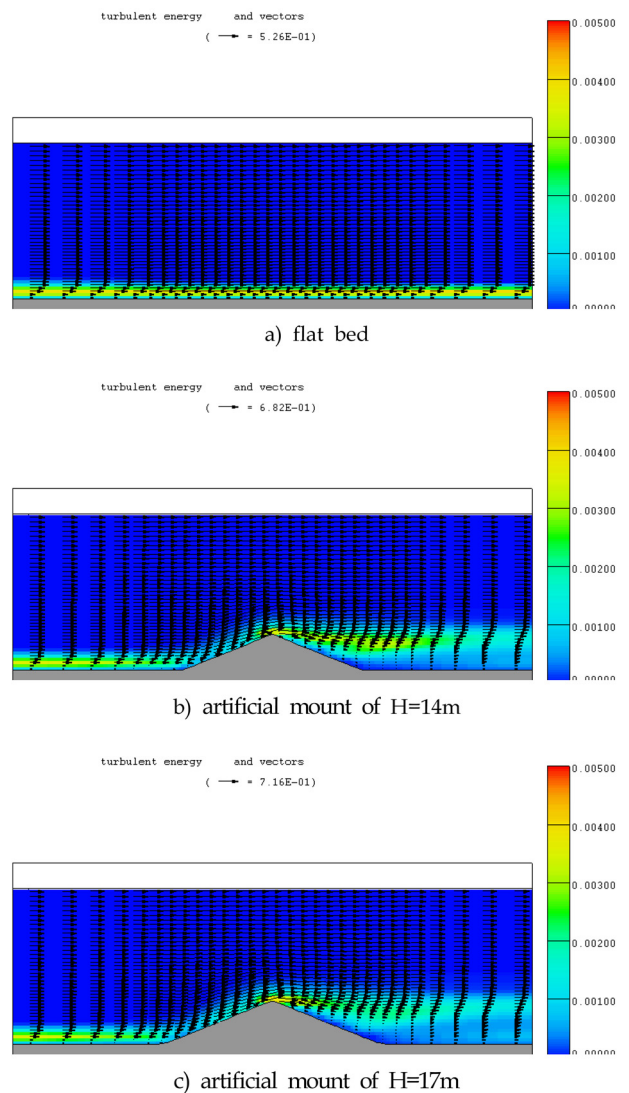
**Fig. 5.** Vector plot of current

#### 4. 모형의 적용 및 결과

3.3절에서 설정한 단면과 입력자료에 대하여 FLOW-3D모형을 이용하여 모델링을 수행하였으며 모델링의 영역은 1,000 m(x방향) × 500m(y방향) × 60 m(z방향)로 하였으며, x방향 60개, y방향 70개, z방향 50개의 가변격자를 이용하였다.

수치해석의 결과로 얻어진 유속벡터도를 원래 상태, 높이 H = 14 m 그리고 H = 17 m에 대하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 원래 상태에 비하여 구조물에 의하여 연직방향 흐름이 발생함을 확인할 수 있으며 H = 14 m일 때에 비하여 H = 17 m에서 더 큰 유속이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 난류에너지와 유속벡터도를 같이 표시한 그림이다. 그림에서 구조물을 통과하는 용승류에 의하여 난류에너지가 큰 값으로 변화되는 지역을 확인할 수 있다.

영양염의 용승현상을 간접적으로 모의하기 위하여 모형에서 Marker를 해저에 균등한 농도로 존재하는 것으로 가정하였다. 이와 같이 설정된 Marker는 인공구조물이 설치된 후 용승류에 의하여 상부로 이동하는 것으로 나타났으며 Fig. 7에 그 결과를 그림으로 나타내었다.



**Fig. 6.** Vector plot of turbulent energy.

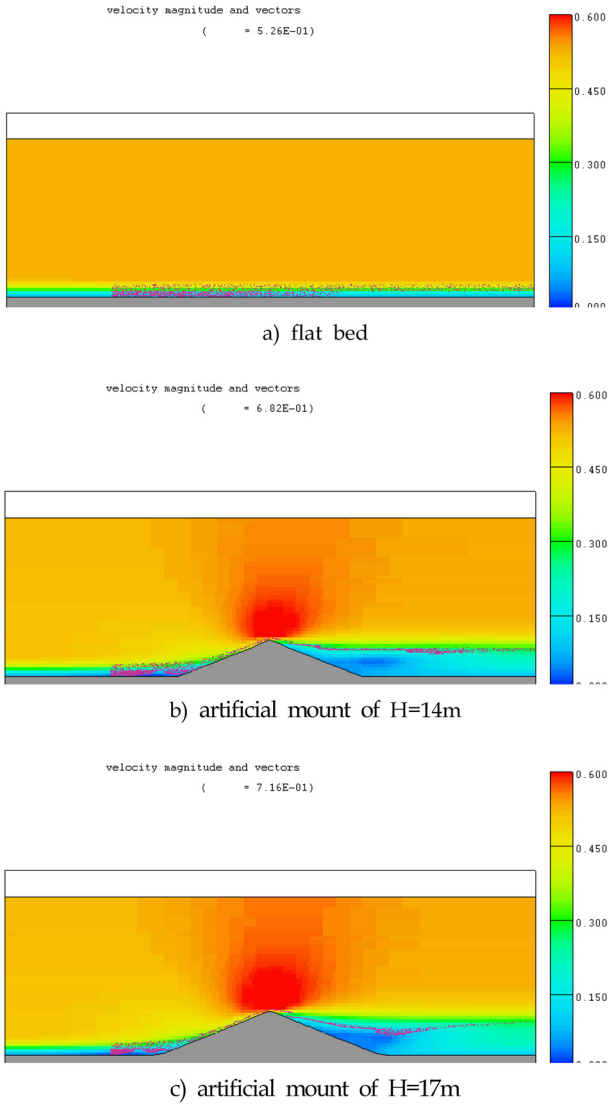


Fig. 7. Flow pattern of marker.

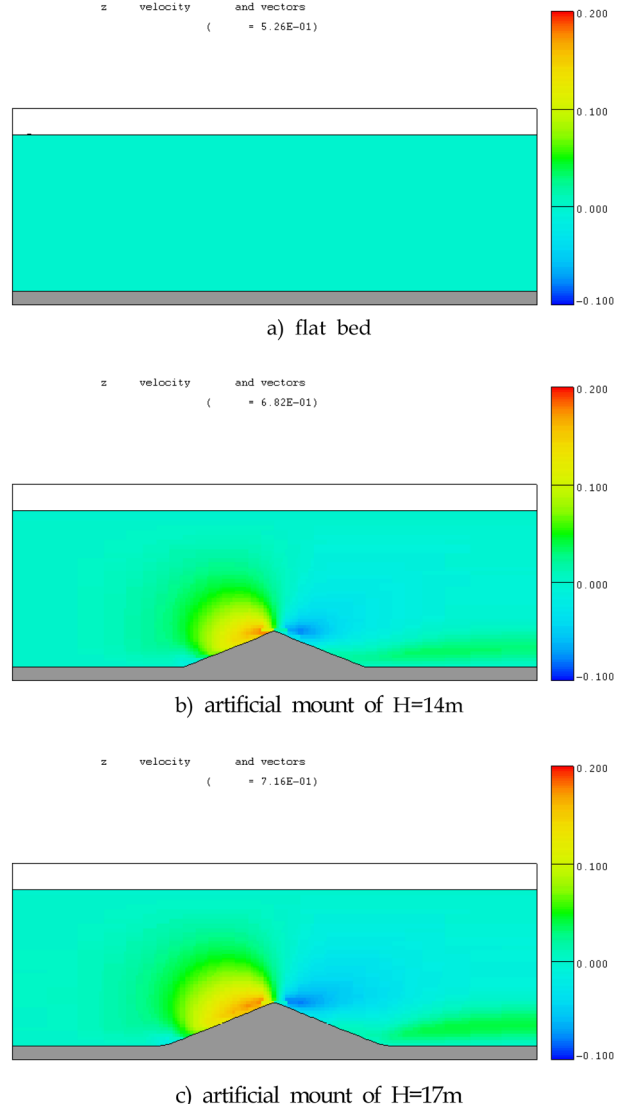


Fig. 8. Contour plot of vertical current.

Fig. 8은 모형에서 모의된 연직방향의 유속을 등고선으로 표시하였다. H=14m일 경우의 연직유속의 최대값은 0.204 m/s, H=17m일 경우의 연직유속의 최대값은 0.210 m/s로 나타났다. 연직 유속의 최대값은 구조물의 상승부에서 발생하였으며 수평속도의 약 40%정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 인공용승류사업의 효과를 사업이전에 판단할 수 있는 방법을 모색하고자 하였다. 인공용승류사업의 효과는 구조물의 크기가 클수록 용승효과가 커지며 단면의 형태와 위치 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 사전에 인공용승에 의한 효과를 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위하여 3차원 흐름의 거동을 모의할 수 있는 FLOW-3D모형을 선정하여 흐름의 변화를 고찰하고 영양염의 변동을 정성적으로 관찰함으로써 인공용승효과를 판단하고자 하였다.

대상해역의 흐름은 용승효과의 비교가 주된 목적이므로 흐름의 상태를 정상상태로 가정하였으며, 기존에 진행된 사업을 바탕으로 구조물의 적절한 단면 형상과 크기를 선택하였다. 사업비용과 사업에 따른 경제적 효과를 고려하여 대상단면의 형상과 크기 등이 결정되어야 하나 이 연구는 기초연구의 성격으로 기존 사업과 문헌 등을 참고하여 적절한 단면을 가정하였다.

선정한 모형을 이용하여 원래 상태, 구조물의 높이 14 m 그리고 17 m에 대하여 유속벡터도, 난류에너지의 변화를 확인할 수 있었다. 해저에 존재하는 영양염의 용승을 정량적으로 판단하기 위하여 해저에 Marker를 설정한 후 그 이동을 모의하였다. 그 결과 해저의 영양염이 상부로 이동하는 현상을 모의할 수 있었다.

해양수산부(2005)에서 실시한 인공용승류 사업에서는 대상해역의 선정, 대상단면의 변화에 대하여 구조물의 건설에 따른 영양염의 변동에 대한 예측이 이루어지지 않았다. 이 연구에서

수행한 결과는 향후 이와 유사한 사업을 수행할 경우 사업에 따른 효과 등을 비교할 때 사용될 수 있을 것이다. 또한 향후 용승효과를 정량적으로 판단할 수 있는 모형실험 또는 현장 실험 방법 등에 대한 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년도 호남지역 Sea Grant 사업단 연구개발 사업 과제와 한국해양과학기술진흥원 지원과제인 “해양에너지 전문인력 양성사업”의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

신정교, 김규한, 편종근 (2004). 인공리프의 용승류 발생효과에

관한 연구, 대한토목학회 정기학술대회논문집, 5548-5551.  
해양수산부 (2005). 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구 1차년도 보고서.

해양수산부 (2006). 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구 2차년도 보고서.

해양수산부 (2007). 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구 3차년도 보고서

金卷精一, 鈴木達雄 (2001). 沖合域における漁場造成の課題, 水産工学関係試験研究推進會議水産基盤部會報告書, 水産工学研究所, 23-41.

武田眞典, 左々木洋之 (2006). 人工海底山脈漁場造成現狀課題, 全國漁港漁場整備技術研究發表會講演集, 5, 105-120.

中島敏光 (2002). 海洋深層水の利用, 綠書房.

---

원고접수일: 2011년 10월 4일

수정본채택: 2011년 11월 1일

게재확정일: 2011년 11월 17일