

# $\sigma$ -좌표계에서 동수압 계산 수중벽체 인근흐름 수치모형실험

김효섭 · 유호준\* · 진재율\*\* · 장창환\*\*\* · 이정수 · 백승원

국민대학교 건설시스템공학과

\* ㈜지오시스템리서치 부설연구소

\*\* 한국해양과학기술원 연안재해재난연구센터

\*\*\* 특허청 심사1국 국토환경심사과

## Modeling Three-dimensional Free Surface Flow around Thin Wall Incorporation Hydrodynamic Pressure on $\sigma$ -coordinate

Hyo-seob Kim · Ho-jun Yoo\* · Jae-Yul Jin\*\* · Chang-hwan Jang\*\*\* · Jung-su Lee · Seung-won Baek

Department of Civil Engineering, kookmin university

\* Department of Coastal Oceanography and Engineering, Geosystem Research Corporation

\*\* Coast Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science Technology

\*\*\* Civil Engineering and Environment Examination Division, Korean Intellectual Property Office

### 요 약

물에 잠긴 얇은 벽은 잠재 사각형 블록의 극단적인 경우라고 할 수 있으며, 하천이나 해안지역에서 다양한 목적으로 사용될 수 있다. 잠재구조물의 얇은 벽 주위 흐름과 압력을 계산하기 위하여 동수압이 포함된  $\sigma$ -격자체계의 3차원 수치모형을 수행하였고, 그 주변의 유속 흐름을 파악하였다.  $\sigma$ -격자체계는 완경사 하상에 유동 시뮬레이션을 적용할 수 있는 강력한 장점을 가지고 있다. 반면에  $\sigma$ -격자체계는 하상에 날카로운 구조물들에 대한 해석에는 한계를 갖고 있다. 동압력 계산은 직교격자 시스템에서만 유효하다. CST3D시스템 내에 SOLA 기법을  $\sigma$ -격자체계에 맞게 수정하여 채택하였다. 모델은 2차원 수조에서의 1차원 전자자기식유속계를 통한 관측자료를 통하여 검증하였고, 정수압 가정의  $\sigma$ -격자체계 수치모형과의 비교를 통하여 정량적인 비교·검토를 수행하였다. 전체적으로 계산된 수평유속과 측정된 수평유속이 유사한 것으로 나타났다. 수치모형실험을 통한 관측자료의 결과를 수치모형이 10% 이내로 정확하게 모의하였고, 관측자료와 대조하였을시 와도의 분포를 유사하게 재현하였다. 수정 SOLA 방식을 채택하여 동수압이 고려되었고,  $\sigma$ -격자체계에 적용한 본 연구는 실제 관측자료를 잘 재현하였으며, 하구, 하천등의 구조물 주변에서의 유속분포를 검증할 시 매우 유용한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : CST3D, 시그마 격자체계수치모형, 동수압고려 수치모형

### Abstract

Submerged thin walls are extreme case of submerged rectangular blocks, and could be used for many purposes in rivers or coastal zones, e.g. to tsunamis. To understand flow characteristics including flow and pressure fields around a specific submerged thin wall a numerical model was applied which includes computation of hydrodynamic pressure on  $\sigma$ -coordinate.  $\sigma$ -coordinate has strong merits for simulation of subcritical flow over mild-sloped beds. On the other hand  $\sigma$ -coordinate is quite poor to treat sharp structures on the bed. There have been a few trials to incorporate dynamic pressure in  $\sigma$ -coordinate by some researchers. One of the previous approaches includes process of solving the Poisson equation. However, the above method includes many high-order terms, and requires long cpu for simulation. Another method SOLA was developed by Hirt et al. for computation of dynamic pressure, but it was valid for straight grid system only. Previous SOLA was modified for  $\sigma$ -coordinate for the present purpose and was adopted in a model system, CST3D. Computed flow field shows reasonable behaviour including vorticity is much stronger than the upstream and downstream of the structure. The model was verified to laboratory experiments at a 2DV flume. Time-average flow vectors were measured by using one-dimensional electro-magnetic velocimeter. Computed flow field agrees well with the measured flow field within 10 % error from the speed point of view at 5 profiles. It is thought that the modified SOLA scheme is useful for  $\sigma$ -coordinate system.

**Keywords** : CST3D, Sigma Coordinate, Hydrodynamic pressure

+ Corresponding author : cjang@korea.kr

### 1. 서론

유체의 흐름장은 일반적으로 3차원, 비정상류이다. 하천 흐름이나 해안에서의 흐름은 보통 자유수면을 가지면서 수평방향 흐름이 우세한 액체 흐름장이다. 이러한 흐름에서는 연직방향 흐름 성분이 약하며, 흐름장내에서의 압력의 분포가 수면에서의 대기압으로부터 직선적으로 압력이 증가하는 정수압 분포형에 가까운 특징이 있다. 이러한 수평방향우세 흐름장을 계산하기 위하여 여러 가지 유용한 기본방정식 및 수치적 계산 방법이 발달하여 왔다. 압력의 연직방향분포를 정수압분포와 같다고 가정하고 유속은 3차원 유속장 대신 임의의 수평위치에서 연직방향 적분 유속을 대상으로 하는 평면 2차원 기본방정식이 많이 사용되어 왔다. 이때, 수평유속의 연직방향분포는 임의의 분포에도 적용하는 경우도 있다. 등분포, 대수함수 분포 등의 형태로 가정하는 경우도 있으며, 수평방향의 연직방향 적분 유속, 수면 높이 또는 총 수심을 독립변수로 하여 연속방정식과 두 수평방향의 운동방정식이 구성되며, 세 식을 풀어 세 변수를 구하는 평면 2차원 문제가 된다.

평면(수평방향) 2차원 수심적분 흐름장 계산에서는 수평방향성분 유속의 연직방향분포가 외형적으로는 나타나 있지 않기 때문에 3차원적 흐름장 정보를 얻기 위하여서는 3차원 수치모형이 필요하다. 수평방향 성분유속이 연직방향으로 임의의 형태를 가질 수 있는 경우에 사용하기 위해서는 별도의 계산 단계가 필요하다. 새 계산시간에서의 수평방향 유속의 연직방향 분포를 계산하기 위하여서는 바로 전시간의 유속 분포, 수층간의 전단응력의 분포, 수표면(자유수면)과 저면(하천 또는 해안의 저면)에서의 전단응력, 수면경

사 정보등이 필요하다. 기본 방정식에 변수들의 연직 변화항과 연직방향유속항이 들어 있으므로 이의 수치적인 표현과 계산을 위하여 연직 방향으로 격자가 필요하다. 저면과 자유수면의 경사가 완만하다는 가정하에, 수평방향우세 흐름장을 계산하기 위하여서 연직방향으로 고정된 높이를 갖는 격자체계 ( $z$ -grid)와 연직방향의 격자수를 일정하게 유지하고, 실제의 격자의 높이는 흐름장이 변화하는데 따라서 변화하는  $\sigma$ -격자체계를 많이 채택하여 왔다.

$z$ -격자체계는 영역내의 계산과정이 엄격하여 수치적 오차를 최소화 할 수 있다는 장점이 있으나 자유수면이 격자의 경계면과 일치하지 않는 문제점과 저면을 계단과 같은 형상으로 표현할 수밖에 없다는 한계점이 있다.  $\sigma$ -격자체계는 자유수면에서의 수치적 계산이 비교적 단순하다는 점과 저면에서의 마찰응력과 수평유속을 취급하기가 용이하다는 장점이 있으나 연직방향으로 격자가 움직인다는 단점이 있다.  $\sigma$ -격자체계는 매 시간 격자의 높이가 변화하므로, 이에 맞추어 변수들을 잘 표현해야 하며, 격자의 시간 변화로 인한 수치적 오차도 감수해야 한다.  $\sigma$ -격자체계는 등류 또는 정상류인 경우에는 가변격자로 인한 오차는 무관하여진다. 따라서 본 연구에서는  $\sigma$ -격자체계를 선택하여 모형을 수립하기로 한다(Fig. 1참조).

연직방향으로 압력이 정수압 분포와 같다는 가정이 유효하지 않은 경우에는 일반적으로 동수압을 계산하여야 한다. 이때, 전수압에서 정수압을 제외한 동수압을 계산하는 과정 절차를 채택한 경우가 보통이다.  $z$ -격자체계에서 동수압을 계산하여 흐름장을 계산하는 기법은 다수 개발된 상태이며 대표적인 상업적 패키지 개발로는 FLOW3D(Flow Science, 2003), FLUENT(2005)등을 들 수 있다.

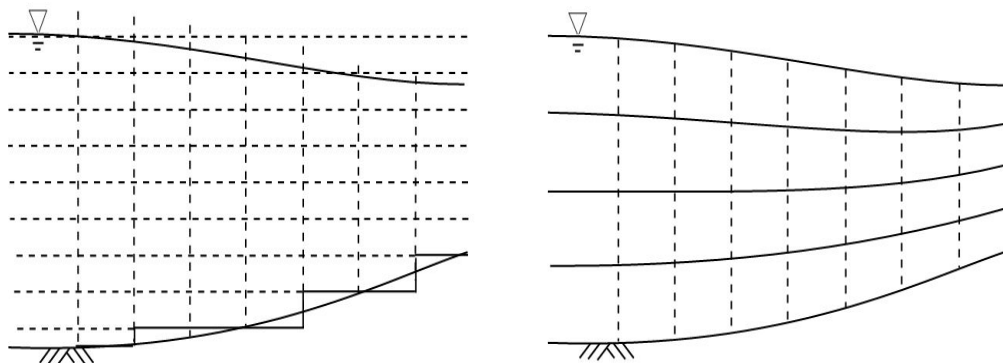


Fig. 1. Example of  $z$ -grid(Left) &  $\sigma$ -Grid(Right)

이에 비하여  $\sigma$ -좌표계에서는 동수압을 계산하는 기법을 개발한 사례가 일부에 그치고 있다.  $\sigma$ -좌표계는 가변격자체계의 한 종류이므로, 동압력 계산에 불리한 편이라고 할 수 있다. 선행연구로서  $\sigma$ -좌표계에서 동수압을 포함하여 풍성류, 조류, 밀도류, 계산을 수행한 바가 있지만, 연속방정식을  $\sigma$ -좌표계에 맞추어 변형한 후 동압력에 관하여 정리한 포아송식 채택은 2계 미분항을 포함한 다수의 부수적인 항이 생성됨과 동시에 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다 (Pengzhi, L., 2002., Bin, L. and Chris A.F., 2003., Pengzhi, L., 2006). 또한 단순한 수조내에서의 밀도류를  $\sigma$ -좌표계에서 동수압을 포함하여 모의한 바 있으나, 고계 미분항의 계산시간과 동압력의 영향을 확인하기 어려운 문제가 있다. 따라서 동수압을 계산하는 기법 중 본 연구에 적합할 것이라 판단되는 Hirt et al(1975)의 계산기법(SOLA)을 채택하여 수치모형을 수립하였다. Hirt.는 직선고정격자망에서 발산(divergence)을 계산하여 이를 조정하는 단계를 거치는 방법인 Solution Algorithm (SOLA)을 사용하여 동압력을 계산하였으며, 격자망이 유선에 가깝다는  $\sigma$ -좌표계의 초기가정을 고려한다면  $\sigma$ -좌표계에서도 사용 가능하다.

수치모형실험의 재현성을 검토하여 위하여 일반적인 정수압 계산기법 수치모형의 실험결과와 비교하여 동수압 계산에 따른 흐름장 변화를 비교하여 타당성을 검토하였다. 또한 수중벽체가 설치된 2차원 수리모형실험을 수행하였고 수치모형실험과 비교하였다.

$\sigma$ -좌표계에서 적용된 수치모형으로는 Coastal Sediment Transport Three Dimension (CST3D)중 동수압 계산을 포함하고 3차원 흐름장 재현이 가능한 CST3D-Full3D모듈을 사용하였다. CST3D는 기존에 상용모델인 Environmental Fluid Dynamic Code(EFDC)를 개선한 한국형 통합수치모형으로 파랑, 흐름장, 지형변화, 해안선 변형, 격자생성, 사용자편의 시스템이 구축되어 있고 현재 논문, 세미나등 다수의 대외발표를 통하여 사용성을 증대시키고 있다(김효섭등, 2013). CST3D는 해안, 해양, 항만, 하구등 다양한 지역에서의 특정외력의 재현이 가능하여 본 연구의 특성에 적합하기 때문에 본 연구에 사용하였다.

## 2. 기본 방정식

본 논문에 사용된 기본방정식 중 일부는 EFDC와 유사하다. 본 논문에서는 답수에 의한 영향 고려가 주 목적이 아니기 때문에, 밀도, 염도, 온도의 변화는

고려하지 않기로 한다. 해수 거동과 해수내의 물질의 이동을 기술하기 위한 모형의 지배방정식은 유체의 연속방정식, 유체의 수평·수직방향 운동방정식, 열·염 보존방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식이다. 열·염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. 유체 정역학적(hydrostatic) 가정과 Boussinesq 근사를 적용하여 기본방정식을 구성한다. 지배방정식은 수평면상에서의 직교·곡선 좌표와 연직방향에서의  $\sigma$ -좌표로 변환된다 (Tetra Tech, 2007a).

$$(x', y', z, t) \rightarrow (x, y, \sigma, t) \quad (1)$$

여기서  $x', y', z$  는 직교좌표계의 각각 두 수평직선축과 연직상방향축,  $t$  는 시간,  $\sigma$  는 연직상방향의 변환선 축이다. 이때 유체 속도의  $x$ 방향,  $y$ 방향의 성분  $u, v$  는 국소적으로 직교좌표계를 따르는 속도성분  $u^*, v^*$ 를 대신할 수 있다고 가정하여 대체하기로 한다. 즉  $u = u^*, v = v^*$ 이다. 수평면은  $z = \eta(x, y, t)$ 으로 표시하고, 저면은  $z = -d(x, y)$ 으로 표시하여 기본방정식을  $\sigma$ -좌표계로 나타낸 다음 모형의 기본방정식으로 사용한다.

### 2.1 연속방정식

연직방향축을 다음과 같이 정의하면 3차원 연속방정식은 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{z+d}{H} = \frac{z+d}{\zeta+d} \quad (0 \leq \sigma \leq 1) \quad (2)$$

$$\frac{\partial m\zeta}{\partial t} + \frac{\partial m_y H u}{\partial x} + \frac{\partial m_x H v}{\partial y} + \frac{\partial m w}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

여기서  $u, v$  는 각각 직교하는 곡선좌표계상에서의 수평 유속의  $x, y$ 방향 성분,  $m_x, m_y$  는 각각 곡선좌표계 임의거리  $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 계량 텐서(metric tensor)의 대각성분의 제곱근( $m = m_x m_y$ )이다. 또한  $w$  는 변환된 무차원 연직좌표계에서의 연직방향 유속성분,  $H$  는 총 수심( $=d+\zeta$ ),  $d$  는 기준면 하의 수심, 그리고  $\zeta$ 는 기준면으로부터 수면까지의 높이이다.

### 2.2 운동방정식

3차원 운동방정식 중  $x, y$ 방향은 다음과 같다.

$$\frac{\partial mHu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v u) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(m w u) - \left( m f + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) H v \quad (4)$$

$$= -m_y H \frac{\partial}{\partial x} (g\zeta + p) - m_y \left( \frac{\partial d}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial \sigma} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( m H^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + Q_u$$

$$\frac{\partial mHv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u v) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v v) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(m w v) - \left( m f + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) H u \quad (5)$$

$$= -m_x H \frac{\partial}{\partial y} (g\zeta + p) - m_y \left( \frac{\partial d}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial \sigma} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( m H^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + Q_v$$

여기서  $Q_u, Q_v$ 는 원천항,  $p$ 는 압력,  $f$ 는 Coriolis parameter,  $A_v$ 는 연직방향 와동점성계수,  $Q_u, Q_v$ 는 각각  $x, y$ 에서의 운동량의 source-sink 항이다. 운동량의 생성·소멸항으로는 수평방향 와동점성에 의한 수평 와동확산항이 있으며, 이는 모델격자보다 작은 규모(subgrid scale)의 유동특성을 대표한다.

또한, 수평 와동확산항은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_u = \frac{\partial}{\partial x} (2A_m \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} [A_m (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (6)$$

$$Q_v = \frac{\partial}{\partial y} (2A_m \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} [A_m (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (7)$$

여기서  $A_m$ 는 수평 와동점성계수이다.

수평 와동점성계수의 산정은 격자 크기와 유속 변형에 의해 결정되는 식을 이용한다(Smagorinsky, 1963).

$$A_m = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

여기서 상수  $C$ 는 0.10~0.20의 값이 사용되며, 계산 격자가 충분히 작은 경우 무시할 수 있고 격자의 크기가 작아질수록, 그리고 유속 경사가 작을수록 수평 와동점성계수가 감소한다.

### 2.3 수치기법

외부모드에서는 다음의 세 식이 기본방정식이 된다.

$$\partial_t \zeta + m^{-1} (\partial_x \bar{U} + \partial_y \bar{V}) = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \partial_t \bar{U} = & -m_x^{-1} m_y H g \partial_x \zeta - m_x^{-1} m_y H \partial_x p_s + m_x^{-1} m_y H g (\bar{b} \partial_x h - \bar{B} \partial_x H - 0.5 H \partial_x \bar{\beta}) \\ & - m_x^{-1} \sum_{k=1}^K \Delta_k (\partial_x (U_k u_k) + \partial_y (V_k u_k)) + m_x^{-1} \sum_{k=1}^K \Delta_k (m f + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) H v_k \\ & + m_y (\tau_{xz})_K - m_y (\tau_{xz})_0 + m_x^{-1} \bar{Q}_u \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \partial_t \bar{V} = & -m_x m_y^{-1} H g \partial_y \zeta - m_x m_y^{-1} H \partial_y p_s + m_x m_y^{-1} H g (\bar{b} \partial_y h - \bar{B} \partial_y H - 0.5 H \partial_y \bar{\beta}) \\ & - m_y^{-1} \sum_{k=1}^K \Delta_k (\partial_x (U_k v_k) + \partial_y (V_k v_k)) - m_y^{-1} \sum_{k=1}^K \Delta_k (m f + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) H u_k \\ & + m_x (\tau_{yz})_K - m_x (\tau_{yz})_0 + m_y^{-1} \bar{Q}_v \end{aligned} \quad (11)$$

$$\bar{U} = m_y H \bar{u}; \quad \bar{V} = m_x H \bar{v} \quad (12)$$

$$U_k = m_y H u_k; \quad V_k = m_x H v_k \quad (13)$$

$$\bar{b} = \left( \sum_{k=1}^K \Delta_k \beta_k \right) \quad (14)$$

$$\bar{B} = \left( \sum_{k=1}^K (\Delta_k \beta_k + 0.5 \Delta_k (z_k + z_{k-1}) b_k) \right) \quad (15)$$

이 식을 차분방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\zeta^{n+1} - \zeta^{n-1} + \theta(m)^{\zeta} (\delta_x^{\zeta} (\bar{U}^n) + \delta_y^{\zeta} (\bar{V}^n)) = 0 \tag{16}$$

$$\bar{U}^{n+1} = \bar{U}^n - \theta(m_x^{-1} m_y H)^u g \delta_x^u (\zeta^n) - \theta(m_x^{-1} m_y H)^u \delta_x^u p \tag{17}$$

$$+ \theta(m_x^{-1} m_y H)^u g (\bar{b}^u \delta_x^u d - \bar{B}^u \delta_x^u H - 0.5 H^u \delta_x^u \bar{\beta}) - \theta(m_x^{-1})^u \sum_{k=1}^K \Delta_k (\delta_x^u (U_k u_k) + \delta_x^u (V_k v_k))$$

$$+ \theta(m_x^{-1})^u \sum_{k=1}^K \Delta_k ((mf + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) H v_k)^u + \theta m_y^u ((\tau_{xz}^{n-1})_K - (\tau_{xz}^{n-1})_0)^u$$

$$+ \theta(m_x^{-1})^u \sum_{k=1}^K \Delta_k (\partial_x (m_y H r_{xx}^{n-1}) + \partial_y (m_x H r_{xy}^{n-1}) + \partial_y m_x H r_{xy}^{n-1} - \partial_x m_y H r_{yy}^{n-1})^u$$

$$\bar{V}^{n+1} = \bar{V}^n - \theta(m_x m_y^{-1} H)^v g \delta_y^v (\zeta^n) - \theta(m_x m_y^{-1} H)^v \delta_y^v p \tag{18}$$

$$+ \theta(m_x m_y^{-1} H)^v g (\bar{b}^v \delta_y^v d - \bar{B}^v \delta_y^v H - 0.5 H^v \delta_y^v \bar{\beta}) - \theta(m_y^{-1})^v \sum_{k=1}^K \Delta_k (\delta_y^v (U_k v_k) + \delta_y^v (V_k v_k))$$

$$- \theta(m_y^{-1})^v \sum_{k=1}^K \Delta_k ((mf + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) H u_k)^v + \theta m_x^v ((\tau_{yz}^{n-1})_K - (\tau_{yz}^{n-1})_0)^v$$

$$+ \theta(m_y^{-1})^v \sum_{k=1}^K \Delta_k (\partial_x (m_y H r_{yx}^{n-1}) + \partial_y (m_x H r_{yy}^{n-1}) - \partial_y m_x H r_{xx}^{n-1} + \partial_x m_y H r_{yy}^{n-1})^v$$

여기서 위첨자는 시간 변화이다. 위의 차분식은 반복 해법인 공액경사법(conjugate gradient method)을 이용하여 푼다(Madala and Piacsek, 1977., Hageman and Young, 1981). 계산된 수위와 수심평균 유속성분을 기초로 각 수평격자점에서 수평 유속성분의 연직방향 분포를 구한다.

상방향 움직임은 다음과 같다.

$$\hat{w}_k = \frac{\partial \eta}{\partial t} \frac{s_k}{H} \tag{24}$$

여기서  $H$ 는 총 수심,  $s_k$ 는 해저면으로부터  $k$ 번째 격자의 높이이다(Fig. 2. 참조).

### 2.4 동수압 계산 수치기법

연직방향의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_d}{\partial z} + Q_z + \Delta_{k+1,k}^{-1} ((Q_u)_{k+1} - (Q_u)_k) \tag{19}$$

여기서  $p_d$ 는 동수압이다. 확산항을 분리하고  $\sigma$ -좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial w}{\partial \sigma} = -\frac{1}{\rho H} \frac{\partial p_d}{\partial \sigma} \tag{20}$$

$$p = p_s + p_d \tag{21}$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial z} = -\rho g \tag{22}$$

$$w = w^* - \hat{w} \tag{23}$$

여기서  $p_s$ 는 정수압,  $w$ 는 흐름의 연직방향 성분,  $\hat{w}$ 는 연직격자경계선의 연직상방향 움직임 속도,  $w^*$ 는 고정층상의 흐름의 연직방향성분이다. 각 층별 연직

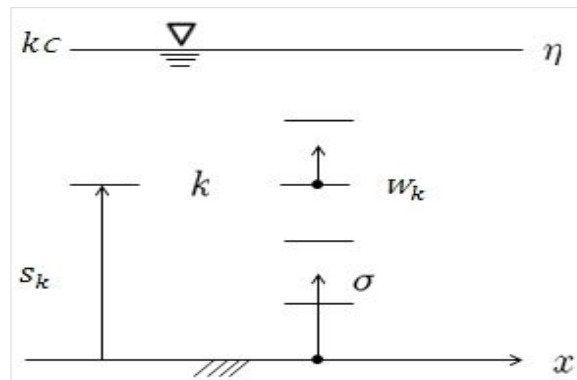


Fig. 2. Definition of vertical velocity component  $\omega$  on moving vertical grid

또한,  $\sigma$ -격자체계에서 국소적 발산(divergence)은 다음과 같다.

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{H} \frac{\partial \eta}{\partial t} \tag{25}$$

비압축성 유체에 대하여서는 발산이 항상 0이어야 하나, 수치오차로 인하여 0이 아닌 값이 발생한다. 일

시적으로 발생하는 수치적 발산은 유속장과 동압력장을 수정하여 발산 분포가 0이 되도록 조절하여야 한다.

$$D_{ij} = ((u \Delta y \Delta z)_{i+\frac{1}{2}} - (u \Delta y \Delta z)_{i-\frac{1}{2}} + (v \Delta x \Delta z)_{j+\frac{1}{2}} - (v \Delta x \Delta z)_{j-\frac{1}{2}} + (\hat{w} \Delta x \Delta y)_{k+\frac{1}{2}} - (\hat{w} \Delta x \Delta y)_{k-\frac{1}{2}}) / \Delta x \Delta y \Delta z + \frac{1}{H} \frac{\eta^{n+1} - \eta^n}{\Delta t} \quad (26)$$

완전직교 3차원 격자상에서 사용되어 온 동수압과 유속성분의 조정을 반복하는 기법을  $\sigma$ -격자계가 상호직교 축이란 가정하에 본 흐름장 모형에 채택한다. 압력장과 흐름장의 수정 값은 다음 식으로 구한다.

$$\Delta p_{ij} = - \frac{D_{ij}}{2 \Delta t} \frac{1}{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \quad (27)$$

$$\Delta u_{i+\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\Delta p_{i+1} - \Delta p_i) \quad (28)$$

$$\Delta u_{i-\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\Delta p_i - \Delta p_{i-1}) \quad (29)$$

$$\Delta v_{i+\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t}{\Delta y} (\Delta p_{j+1} - \Delta p_j) \quad (30)$$

$$\Delta v_{i-\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t}{\Delta y} (\Delta p_j - \Delta p_{j-1}) \quad (31)$$

$$\Delta w_{k+\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t}{\Delta z} (\Delta p_{k+1} - \Delta p_k) \quad (32)$$

$$\Delta w_{k-\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t}{\Delta z} (\Delta p_k - \Delta p_{k-1}) \quad (33)$$

여기서 아래첨자, 또는 위첨자가 생략된 변수는  $i, j, k, n$ 에 해당하는 값이다. 1회 전 영역에 대하여 유속장과 압력장을 조절하고 나면 발산이 완전 영에 이르지 못하고 새로운 발산장을 얻는다.

### 3. 수치모형실험 적용

#### 3.1 검증 : 수치모형의 적용 및 타 수치모형과의 비교

본 연구에서 제안된 기법을 적용하여 수치모형실험을 수행하였다. 수치모형실험에 사용된 모델로는 국가 과제의 연구결과로 개발된 Coastal Sediment Transport Three Dimension (CST3D)를 적용하였고, CST3D 흐름장 모듈 중 동수압 가정의  $\sigma$ -격자체계를 채택한 CST3D-Full3D모듈을 사용하였다. CST3D의 모델결과와 정밀하게 비교하여 위하여 정수압 가정의  $\sigma$ -격자체계 수치모형실험인 Environmental Fluid Dynamic Code(EFDC)를 선정하여 적용하였다. EFDC의 기본방정식 및 모델 구성등의 자세한 기법들은 다수의 논문과 국내·외 환경영향평가등을 통하여 검증되었기 때문에 생략한다.

수치모형실험의 실험조건은 다음과 같으며 각각의 수치모형의 실험안은 동일하다(Table. 1 참조). 수치모형은 가로 2m, 세로 0.8m, 높이 0.6m로 설정하여 80×3(240격자)로 구성하였고, 수직적으로는 24개층으로 구분하였으며 좌·우측의 2개 격자는 sponge layer로 설정하였다. 또한, 수중구조물 인근에서의 흐름장을 파악하기 위하여 수평적으로 80개의 격자 중 중간 부분에 높이 0.4m의 수중벽체 구조물을 설치하였다. 하류측 수심은 0.5m로 고정하였고, 상류측에 일정유량을 투입하여 흐름이 일정화 되었을 때 정상류에 이른 것으로 간주하였다. 계산을 시작하여 실제시간으로 약 10분이 경과하였을 때 정상류에 도달하였으며, 이때 CST3D의 수중구조물 연직선상위의 흐름장 수평유속은 0.23 m/s로 계산되었고, 하류측에서 시계방향 와류가 뚜렷하게 재현되었다. 동일한 실험조건으로 계산된 EFDC의 결과 수중구조물 연직선상위의 흐름장 수평유속은 0.34 m/s로 계산되었고, CST3D의 결과와 비교시 수중구조물 하류에서 와류는 재현되지 않으며 흐름장은 벽체에서 연직방향 아래로 흘러내리듯 재현되었다(Fig. 3 참조).

Table 1. Parameter for Numerical Experiment

Section		Substance
Purpose of experiment		• Validation of numerical experiment data and flow around the thin wall
Mesh system	Model range	• 2m × 0.8m × 0.6m
	Gird	• Horizontal : Regular Grid, Vertical : $\sigma$ -Gird(24Layer)
	Number of cell	• 80×3 (240 Cells)
Model condition	Model time	• 10 Min
	DT	• 0.0001 Sec
Model		CST3D_2014      EFDC

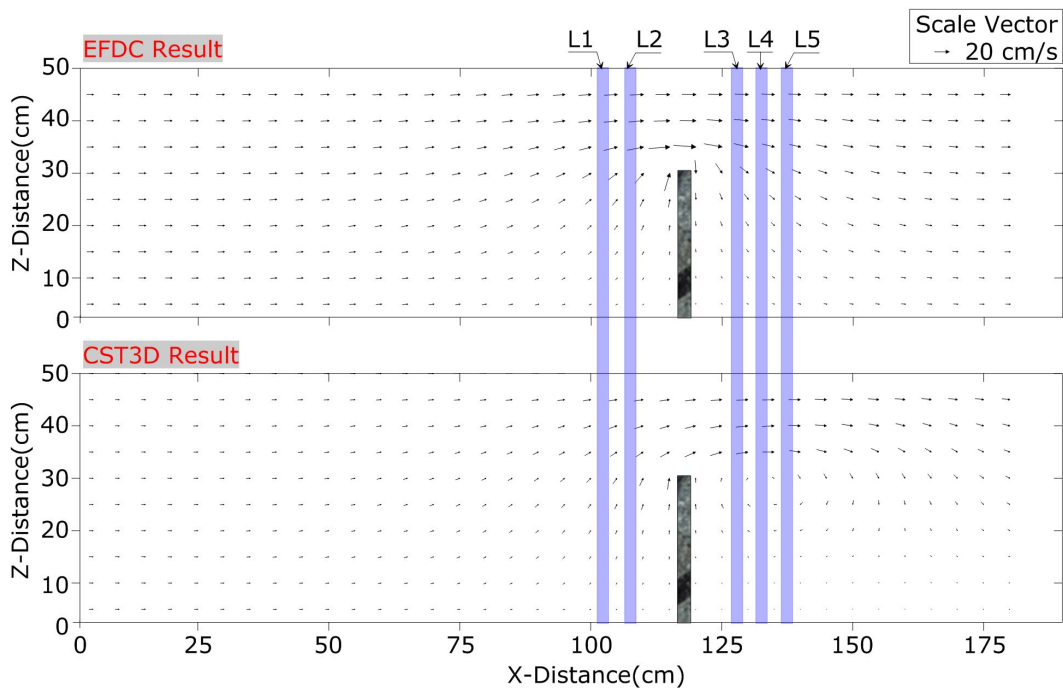


Fig. 3. Result of flow field model(CST3D, EFDC) and compared experiment data.

### 3.2 수중 벽체가 설치된 2차원 수리모형 구조물과의 비교

수치모형실험의 검증은 위하여 2차원 수리모형 구조물이 설치된 수리모형실험을 수행하였으며, 설치제 원으로는 다음과 같다(Table 2., Fig. 6. 참조).

수리모형실험은 가로 35m, 세로 0.8m, 높이 1m의 2차원 조파수조에서 수행하였으며, 조파수조 내에 설치된 수중구조물은 높이 0.4m, 두께 10mm의 크기의 아크릴로 제작하였으며, 흐름으로 인한 수평력으로 인한 미끄러짐(sliding)과 전도(overturning)을 방지하기 위하여 1m길이의 바닥판을 붙이고 그 위에 무거운 추를 두었다. 유속 측정은 kenek사의 1차원 유속계(LP1100)를 이용하여 측정 최소간격인 1초 간격으로 벽체 구조물 상류측에 L1~L2등 2열(벽체구조물과의 이격간격 15cm, 10cm)과 하류측에 L3~L5등 3열(벽체구조물과의 이격간격 10cm, 15cm, 20cm)을 포함한 총 5열에서 연직 2.5cm 간격으로 100개의 검증점을 선정하여 U 방향의 유속을 측정하였다(Table. 2, Fig. 3참조). 수리모형실험에 앞서 초기 정체 수위를 수조 내 0.5m로 유지하고 흐름이 정상상태(steady state)에 이르기까지 흐름을 부여하였다. 이 때 벽체 바로 상류측은 수심 약 0.52m, 바로 하류측은 수심 약 0.48m가 되었다.

유속 측정시 수리모형실험의 시각화를 위하여 비중이 작은 유색 플라스틱 구형물체를 투입하여 흐름장

의 형태를 파악하였고, 정상류에 도달했을때 시간의 변화에 따른 결과물의 일부를 Fig. 4.에 제시하였다. 측정결과, 벽체의 상류측에서의 수평 유속성분은 전반적으로 벽체 윗부분의 자유공간 쪽으로 흐르는 모양을 나타내고 수면에 가까울수록 유속이 커지는 경향을 나타낸다. 벽체 바로 인근에서의 저층부에서는 상층부와는 반대방향 즉, 상류방향의 역류가 미약하게 발생하였고, 수심규모 직경의 원통형 와류(vortex)가 생성되었다. 벽체의 하류측에서의 수평 유속성분은 빠른 속도로 하류 쪽으로 흐르며, 저층부에서는 반대방향의 역류가 발달하였다. 상류측에 비하여서 하류측의 와류는 훨씬 형태가 분명하고 와도(vorticity)가 큰 것을 수리모형실험을 통하여 측정하였다. 바닥면에서 발생하는 역류의 수평방향 유속 크기는 하류부 상층부의 유속의 약 30%에 달할 정도로 강하다. 즉, 벽체의 하류측에는 시계방향의 강한 와류가 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 4참조).

수리모형실험의 U 방향 유속측정은 각 각의 수치모형실험의 동일한 위치에서의 결과와 정량적으로 비교하여 결과를 제시하였다. 수리모형실험은 총 7번의 실험을 진행하였고, Data1~7은 수리모형실험 측정결과이다. 흐름의 형태가 일방향 흐름이고, 전층에서 동일하게 발생되어 전과되기 때문에 U 방향의 유속측정시 흐름방향과 반대방향인 (-)계측은 와의 형성이라고

판단해도 무방하다.

상류측의 흐름은 EFDC의 결과가 CST3D의 결과에 비하여 상대적으로 강하게 발생하였고, 저면에서의 흐름은 유사하다. 수리모형실험과의 비교하였을 때, CST3D의 모형결과가 수면인근에서 상당히 유사하며 저면에서는 수리모형실험에서 관측된 소규모 와 (Vortex)는 재현되지 않았다. 하류측의 수면인근의 모델 결과는 두 모델이 대부분 유사하나, 저면에서는 다른 양상을 보인다. EFDC의 모델 결과는 수중벽체 구조물에 흘러내리는 양상의 결과를 보인다. 이는 일반

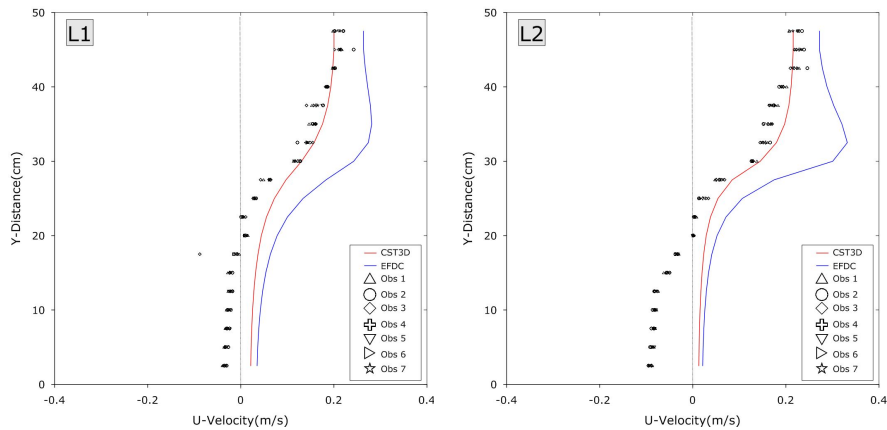
적인 정수압을 반영하는  $\sigma$ -격자체계의 모델 결과에 해당한다. CST3D 모델 결과는 수중벽체 구조물 후면에서 대규모의 와(Vortex)가 형성되고 구조물에서 점차 멀어질수록 그 형태는 명확해진다. 또한 수리모형 실험의 구조물 후면에서의 와의 형성 및 흐름장의 수직적인 분포를 비교하였을 때, CST3D의 모델결과가 매우 유사한 경향을 보인다. 결과적으로 동수압을 반영하는  $\sigma$ -격자 체계를 선정한 CST3D수치모형실험의 연구결과는 실제 관측자료의 양상을 잘 재현하였다 (Fig. 5참조).

Table 2. Specification of Velocimeter

Section	Substance
Model	• LP1100
Dimension	• Flow measure for 1 dimension
Range	• 0~200cm/s ( $\pm 0.02$ m/s)
Accuracy	• 0.5~1m/s ( $\pm 0.02$ m/s), 1~2m/s ( $\pm 0.04$ m/s), 2~4m/s ( $\pm 0.08$ m/s)
DT	• 1~60 Sec
Output File	• Real-time transmission to PC and LCD



Fig. 4. Observation flow on the submerged structure





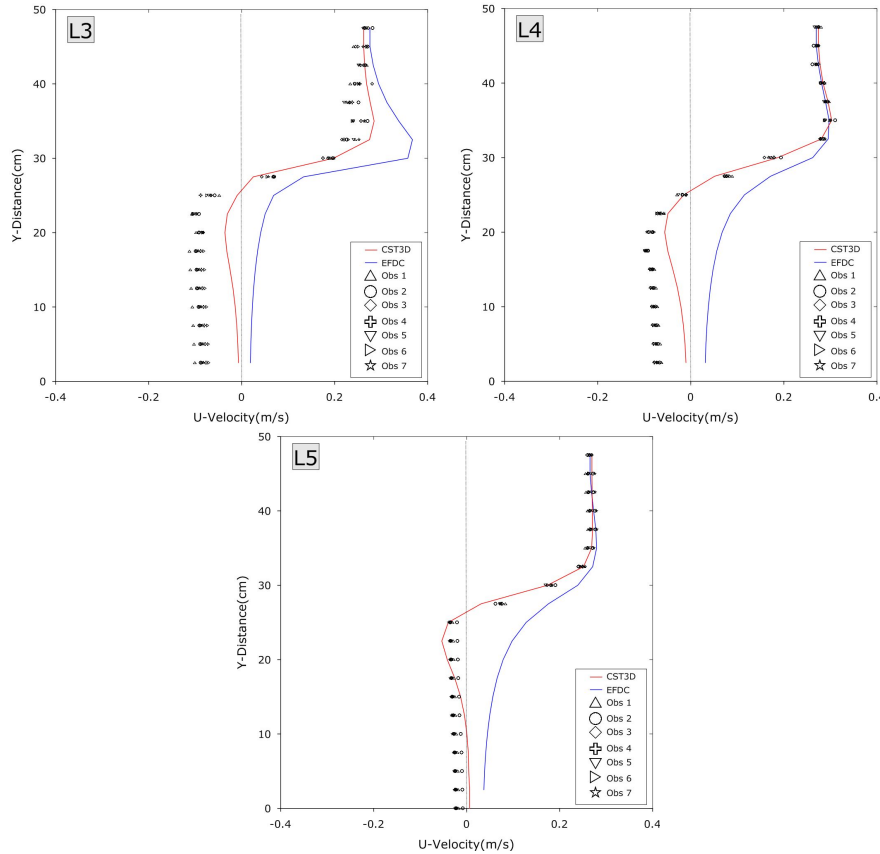


Fig. 5. Compared flow field model(EFDC, CST3D) and result of observation data

#### 4. 결론

전체적인 개수로 흐름의 특성을 살리기에 적합한  $\sigma$ -좌표계는 수면경사, 저면경사를 잘 반영할 수 있는 장점이 있으므로 본 연구에서는  $\sigma$ -좌표계를 사용하면서 동수압을 고려할 수 있도록 기존의 SOLA 기법을 변형하여 CST3D 수치모형에 반영하였고, 이를 수중 벽체 구조물이 설치된 상황에 적용하여 수리모형실험 및 일반적인 정수압 가정된  $\sigma$ -격자체계의 수치모형과 정량적인 비교를 수행하였다.

실험 결과, 얇은 연직 수중벽체 구조물이 수중에 잠겨있는 경우, 흐름장을 정확하게 수치적으로 계산하기 위하여서는 동수압을 반영하는 수치모형을 사용할 필요가 있다. 기존의 많은 3차원 모형은 정수압 가정을 채택하고 있으므로, 얇은 연직 수중벽체 구조물이 수중에 잠겨있는 경우 인근에서의 흐름장 예측에는 적합하지 않으며 실제의 흐름양상과 비교 시 다른양상을 보인다.

수중 벽체 인근에서의 흐름장을 계산한 결과 적절한 결과를 얻었으며, 이를 수리모형실험 자료와 비교한 결과, 수치모형실험의 유속장 계산결과 실제의 흐름특성을 매우 유사하게 재현하였으며, 관측자료와

매우 유사하였다.

결과적으로 본 수치기법이 와류를 포함하는 수직적인 흐름장 재현이 가능하며, 벽체 구조물 인근에서의 미세한 흐름장을 모의할 수 있음을 보인다. 하지만, 하구에서의 일반적인 형태를 이상격자에서 재현한 본 연구결과 이외에도, 실제 하천, 하구와 결합된 해양에서 잠체구조물, Sluce gate 주변에서의 방류, 유입등에 의한 흐름과 침·퇴적 거동변화등이 포함된 실험역의 적용 및 검증 또한 본 연구의 후속연구로 필요하다고 사료된다.

#### 감사의 글

본 논문은 해양수산부 및 한국해양과학기술진흥원의 연구과제인 ‘인공구조물 설치/제거에 의한 해양환경예측모델링 기술개발’, ‘연안침식대응기술개발(MIDAS)’의 연구 결과중의 일부입니다. 또한, 본 연구는 2014년도 국민대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다. 본 논문이 게재에 이르기까지 아낌없는 심사 및 조언을 해주신 익명의 심사위원님께서도 감사를 드립니다.

## References

- Bin, L., Chris A.F., 2003. Three-dimensional hydrodynamic model for free surface flow. *International Association of Hydraulic Research*, Vol. 41, No 4. pp. 367-377.
- Flow Science., 2003. Flow-3D. Theory manual. Los Alamos, NM.
- Fluent Inc., 2005. Manual. Lebanon, NH 3766.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1975. SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows. Los Alamos, NM.
- Kim, H., Lee, J., Jin, J., and Jang, C., 2013. A Practical Algorithm to Simulate Erosion of On-Shore Zone. *J. of Wetlands Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 423-430.[Korean Literature]
- Louis, A.H., David, M.Y., 1981. Applied Iterative Method, Academic Press, New York.
- Madala, R.A., Piacsek, S.A., 1977. A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans, *J. of Computational Physics*, Vol. 23, Issue 2, PP. 167 - 178.
- Musteyde, B.K., Roger, A.F., Lin .B., 2002. Three-dimensional numerical modeling of free surface flows with non-hydrostatic pressure. *International J. for Numerical Methods In Fluids*, Vol. 40, pp. 1145-1162.
- Pengzhi, L., 2006. A multiple-layer  $\sigma$ -coordinate model for simulation of wave structure interaction. *Computer & Fluids* 35, pp. 147-167.
- Pengzhi, L., 2002. A  $\sigma$ -coordinate three-dimensional numerical model for surface wave propagation. *International J. for Numerical Methods In Fluids*, Vol. 38, pp. 1045-1068.
- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, Part I: the basic experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 91, PP. 99-164.
- Tetra tech., 2007a. The Environmental Fluid Dynamic Code User Manual US EPA Version 1.01, Tetra Tech, Inc.

- 논문접수일 : 2013년 08월 13일
- 심사의뢰일 : 2013년 08월 19일
- 심사완료일 : 2014년 05월 06일