

3차원 하천/하구/해양 수리모델의 비교분석



이 정 우 |

한국건설기술연구원 수석연구원
jungwoo33@kict.re.kr



이 준 |

한국기후변화대응전략연구소 수석연구원
jlee0917@nate.com

1. 머리말

과거 경제발전 위주의 산업화전략은 1990년대 이후 각종 환경 문제로 우리에게 돌아오고 있다. 이러한 환경문제는 수질, 대기, 토양 등 환경문제 전 분야에서 일어나고 있으며 특히 수질문제는 지난 4대강 사업이후 더욱 더 사회적 이슈로 떠오르고 있다. 다양한 수질 문제 중 하천 수질 악화, 물의 흐름특성 변화, 그리고 기후변화 등은 국내 하천에서 녹조문제를 발생시키고 있다. 이에 따라 화학적/생물학적 또는 친 환경 생물소재를 이용한 녹조제거 방법이 다수 진행되어 왔다. 물리적인 방법으로써 준설 등을 통한 오염원의 직접적인 제거방법, 또는 하수종말처리장 설치를 통한 유입 오염원 농도 저감을 통한 잠정

적 녹조발생 제어 방법 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 직접적인 문제 해결방법이 아닌 문제발생을 미리 파악할 수 있는 경보시스템의 구축은 아직 미미한 실정이다. 녹조 경보 시스템의 일환으로 모델링 기법을 이용한 실시간 수리/수질 변화 파악은 생/화학적 조류제거 및 오염원 제어의 시기 및 장소를 최소화 할 수 있으며, 녹조발생 전에 미리 대처함으로써 각종 비용을 절감하고 향후 지속적인 대처를 가능하게 한다. 이러한 모델링 기법의 사용을 위해서는 수질모델과 함께 물의 흐름을 정확히 파악할 수 있는 수리모델의 사용이 필수적이다. 현재 국내에서는 다양한 수리/수질 모델이 사용되고 있다. 이들 모델은 시간적으로 정상상태 모델 과 비정상상태 모델로 구분할 수 있으며, 공간적으로는 1, 2, 3차원 모델로 구분할 수 있다. 기존의 국내 하천은 해양이나 호수와는 다르게 수심이 작고 (< 5 m) 폭이 좁은 (< 1 km) 특성을 갖고 있어 1차원 모델의 사용으로도 충분히 수리/수질현상을 나타낼 수 있었다. 또한 강우패턴이 일정하고 국토의 개발이 미미하였던 과거에는 정상상태 모델의 사용으로도 하천에서의 수질을 예측할 수 있었다. 그러나 4대강 사업 등으로 인하여 하천 내에 수심이 깊고 폭이 넓은 구간이 발생하여 기존의 1차원 모델로는 수리/수질 특성을 파악하는 것이 어렵게 되었다. 따라서 시간비용이 증가함에도

불구하고 컴퓨터 계산 능력의 발전 등에 힘입어 3차원 모델을 하천/하구에 적용하는 사례가 점차 늘고 있다. 이에 따라 하천/하구 및 해양의 흐름 분석에 널리 적용되고 있는 몇 개의 3차원 수리 모델에 대해 각각의 특징을 분석하고자 한다.

2. 3차원 수리모델의 종류와 특성

3차원 수리 모델은 다음과 같은 하천과 하구의 물리적 특징을 반영 할 수 있어야 한다: 조류 (tide)에 의한 영향, 바람에 의한 물의 순환 (upwelling/downwelling 포함), 강 또는 하천의 영향, 수평/수직 확산, 밀도 차에 의한 흐름 등. 또한 하천 수위의 변화를 예측해야 되므로 rigid-lid 모델은 검토 대상에서 제외하고 free surface 모델만을 검토 하였으며, 국내 하천/하구의 수심은 최대 40 m를 넘지 않으므로 hydrostatic assumption을 한 모델만으로도 충분 하다고 판단하였다. 위와 같은 조건으로 검토 대상을 압축하여 국내 하천/하구에 적용 가능한 3차원 수리 모델을 다음과 같이 선정하였다: (1) Curvilinear Hydrodynamics in 3 Dimensions (CH3D), (2) Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), (3) Regional Ocean Modeling System (ROMS), (4) Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM), (5) Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element model (SELFE), (6) Eulerian-Lagrangian Circulation model (ELCIRC). 이 외에도 다양한 모델이 사용 중이거나 개발 되고 있지만 시간적인 그리고 지면의 제약으로 인해 선정된 모델들만 비교 검토하였으며, 선정된 모델들을 요약하면 아래와 같고, 자세한 내용은 다음 장에서 다루기로 한다.

CH3D는 Dr. Peter Sheng에 의해 U.S. Army Corps of Engineers (USACE)을 위해 처음 개발 되었다. 이 모델은 상용프로그램으로써 USACE와

협약이 이루어 저야만 사용이 가능한 모델이기 때문에 사용에 어느 정도 제약이 있다. CH3D는 3차원 수리모델로써 수온과 염분을 모의 할 수 있으며, 조류 (tides), 바람, 수온과 염분 변화로 인한 밀도 차, 담수의 유입, 난류, 그리고 지구 자전 등에 의한 물의 수평/수직 혼합을 모의 할 수 있다. 또한 이 모델은 수질 모델인 CE-QUAL-ICM과 연결하여 사용할 수 있으며, 부유사 확산 (including cohesive and non-cohesive sediment)을 모의 할 수 있다.

EFDC는 Dr. John Hamrick 에 의해 Virginia Institute of Marine Science에서 개발 되었으며, 현재 U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)에서 개발을 담당하고 있다. 이 모델은 비상용프로그램으로써 GUI (Graphical User Interface)를 제외하고는 모든 사람이 사용 가능한 프로그램이다. CH3D와 마찬가지로 EFDC는 3차원 수리모델이며, 하천과 바다에서 모두 쓸 수 있도록 개발 되어 있다. 또한 EFDC는 자체적으로 수질 모듈을 갖고 있는 특징을 갖고 있다.

ROMS는 전신인 S-Coordinate Rutgers University Model (SCRUM)의 단점을 보완한 모델로써 현재 Dr. Hernan G. Arango 그룹 (in Rutgers University)에서 관리하고 있는 모델이다. ROMS는 비상용프로그램으로써 해양에서 가장 널리 이용되는 모델이며, 다양한 분야에 이용될 수 있도록 많은 모듈을 갖고 있는 장점을 갖고 있다. 또한 이 모델은 수직방향으로 'S' coordinate를 사용함으로써 수직방향 격자의 분포를 사용자 임의로 지정할 수 있는 장점을 갖고 있다.

FVCOM은 University of Massachusetts Dartmouth (UMASSD)와 Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)의 Dr. Changsheng Chen 그룹에서 개발한 모델로써 기존의 해양모델들과는 다르게 finite volume approach를 사용한 모델이다. 이 모델은 비상용 프로그램이며 비격자구조 (unstructured grid)

를 사용함으로써 복잡한 지형을 격자구조 (structured grid)보다 쉽게 표현할 수 있는 장점을 갖고 있다. FVCOM은 unstructured grid의 장점을 내세워 다양한 분야에서 사용되고 있다.

SELFE는 the Center for Coastal Margin Observation & Prediction (CMOP)의 Dr. Antonio M. Baptista 그룹에서 개발한 모델로써 비상용프로그램이다. SELFE는 이름에서 보듯이 semi-implicit method를 사용함으로써 모델의 속도개선을 시도하였고, FVCOM과 같이 unstructured grid를 사용하였다. 또한 수직방향으로 'Hybrid SZ-coordinates'를 사용하여 수심변화가 많은 지형에 적합하도록 개발되었다.

ELCIRC는 SELFE와 마찬가지로 Dr. Antonio M. Baptista 그룹에서 개발하였으며, 대부분의 경우 SELFE와 유사한 특징을 갖고 있다. 그러나 ELCIRC는 SELFE에 비하여 수직방향으로 'Z-coordinate'를 사용함으로써 복잡한 해저 지형을 표현하는데 한계가 있고, unstructured grid를 사용하지만 orthogonality가 필요한 단점을 갖고 있다.

3. 수리모델의 특징

앞에서 선정된 모델들은 다양한 분야에서 널리 사용되고 있고, 충분히 그 활용성이 이미 검증된 모델들이다. 그러나 앞에서 선정된 모델들은 각각 고유의 장/단점을 갖고 있어 특정 목적을 위해서는 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있는 모델이 분명 존재한다. 이번 장에서는 선정된 수리모델들이 각각의 물리 현상을 어떤 방법으로 해결해 나가는지를 기술하고자 한다. 그러나 모든 항목에 대한 기술 보다는 큰 틀에서의 공통점과 차이점을 보고자 한다. 따라서 좀 더 자세한 비교는 각각의 모델 개발 노트를 참고해야 될 것임을 밝힌다.

3.1. Physical formulation of models (모델의 기본 구성)

위에 선정된 모든 모델은 Navier-Stokes equation을 기본으로, 'free surface', 'hydrostatic', 'Boussinesq approximation', 그리고 'incompressible approximation'을 사용한다. 따라서 직교좌표계 (Cartesian coordinates)에서는 다음과 같은 공통된 일반적인 식을 사용한다.

Mass conservation in three dimensions:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Momentum equations in three dimensions:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uy)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vv)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(vv)}{\partial z} = \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

Free surface wave equation:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -H \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Salinity transport equation:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} = \quad (6)$$

$$K_{HS} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{VS} \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

Heat transport equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = K_{HT} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{VT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_r \frac{\partial \gamma}{\partial z} \quad (7)$$

Equation of state:

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (8)$$

여기서 t 는 시간, x, y, z 는 수평/수직 좌표계, u, v, w 는 유속 벡터, P 는 압력, ρ 는 물의 밀도, ρ_o 는 물의 기준 밀도, f 는 코리올리 상수, g 는 중력상수, A_H 는 수평 난류 확산 계수, A_V 는 수직 난류 확산 계수, η 는 수면 표고, H 는 수심 ($\eta + h$), \bar{u}, \bar{v} 는 수심평균 수평 유속, S 는 염분 농도, T 는 수온, K_{HS}, K_{HT} 는 염분과 수온의 수평 확산 계수, K_{VS}, K_{VT} 는 염분과 수온의 수직 확산 계수, Q_r 은 태양 복사, γ 는 태양 복사 소멸 상수를 나타낸다.

식 (1)은 ‘비압축성 질량보존 방정식’이다. 식 (2) - (4)는 3차원 운동량 방정식이며, 보다 정확한 표현으로는 ‘Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS) for an incompressible fluid’이다. 따라서 식 (2) - (4)에서 u, v, w 는 보다 정확한 표현으로는 ‘time averaged velocities’라고 할 수 있다. 식 (4)는 ‘hydrostatic equation’으로 정압가정 (hydrostatic assumption)을 통해 유도된 식이다. 오늘날 많은 모델들이 보다 정확한 계산을 위하여 ‘non-hydrostatic equation’을 이용하고 있지만 계산시간과 효율성이라는 측면에서 ‘hydrostatic equation’의 사용은 일반 하천/하구/해양 모델에 충분하다고 할 수 있다.

3.2. Surface and bottom boundary conditions (표면/바닥 경계 조건)

각각의 모델은 각각 다른 표면/바닥 경계 조건을 사용한다. 그러나 근본적으로는 같은 개념에서 유도된 것으로서 다음과 같은 식에서 유도된 식을 사용한다.

Surface boundary conditions:

$$A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{wx}}{\rho_o} \quad (9)$$

$$A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{wy}}{\rho_o} \quad (10)$$

$$K_V \frac{\partial S}{\partial z} = S_{z=0} (E_v - P_r) \quad (11)$$

$$K_V \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_b + Q_e + Q_s}{\rho_o c_p} \quad (12)$$

Bottom boundary conditions:

$$A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} \quad (13)$$

$$A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{by}}{\rho_o} \quad (14)$$

$$K_V \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

$$K_V \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

여기서 τ_{wx}, τ_{wy} 는 표면 전단 응력 (또는 바람의 응력), τ_{bx}, τ_{by} 는 바닥 전단 응력, E_v, P_r 는 표면 증발율과 강우율, Q_b, Q_e, Q_s 는 장파/잠열/현열 흐름, c_p 는 바닷물의 비열이다. 특히 바닥 전단 응력(τ_{bx}, τ_{by})은 다양한 방법으로 구해질 수 있으나, 일반적으로 아래와 같은 quadratic bottom drag law를 이용하여 계산된다.

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \rho |\vec{u}| (u, v) \quad (17)$$

여기서 C_d 는 마찰 계수이며, C_d 는 직접 주어진 값을 사용하기도 하지만 일반적으로 아래의 방법을 이용한다.

$$C_d = \max \left[\frac{k^2}{\ln^2 \left(\frac{z}{2z_o} \right)}, C_{d, \text{given}} \right] \quad (18)$$

여기서 k 는 von Karman 상수이며 값은 0.04이다. 식 (17)과 (18)을 사용해서 계산된 바닥 전단 응력(τ_{bx}, τ_{by})은 다음과 같이 로그 법칙(log law)을 통해서 유속에 영향을 주게 된다.

$$u_z = \frac{1}{k} \left(\frac{\tau_b}{\rho_o} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (19)$$

바닥 전단 응력과 마찬가지로 바람의 응력(wind stress) 또한 표면 전단 응력(surface stress)으로써 물 표면에 영향을 주게 되고, 이로써 물은 에너지를 얻게 된다. 대부분의 모델에서 바람의 응력은 다음과 같은 방법으로 계산된다:

$$(\tau_{wx}, \tau_{wy}) = \rho_a C_d |\vec{W}| (W_x, W_y) \quad (20)$$

여기서 τ_{wx}, τ_{wy} 는 수평방향 바람의 응력, ρ_a 는 공기의 밀도, C_d 는 마찰 계수(이것은 Eq. (17)의 C_d 와 다른 값이다), W_x, W_y 는 수면 상공 10 m에서의 풍속이다. 식 (20)에 나타나는 C_d 는 다양한 방법으로 구해질 수 있으며, 이는 각 모델에 따라 다소 차이가 있을 수 있다.

3.3. Horizontal coordinate (수평 격자 구조)

격자 구성에 있어서 horizontal coordinate는 크게 structured grid와 unstructured grid 두 가지로 나눌 수 있으며, boundary-fitted structured grid는 curvilinear grid와

orthogonal-curvilinear grid로 분류할 수 있다. Curvilinear grid 모델의 경우는 코드 내에서 u, v momentum 계산 시 격자의 휨 정도에 대한 보정이 이루어져 있기 때문에 격자 구성 시 orthogonality가 요구되지 않는다. 그러나 orthogonal grid는 격자 구성에 있어서 반드시 orthogonality가 유지되어야 하는 제한이 있다. 어떤 모델의 경우 curvilinear-orthogonal grid라는 표현을 사용하기도 하며, 이는 소스코드 내에 격자의 휨 정도를 표현하지 못하지만 어느 정도의 orthogonality를 유지한 경우 이에 따른 예러는 무시 가능하다는 것을 의미하기도 한다. 격자의 구성에 있어서 structured grid는 하천/해안선을 정확하게 묘사하기 힘든 제약이 있다. 그러나 unstructured grid의 사용은 이러한 제약을 없앴으로써 보다 정확하게 하천 및 해안선의 모양을 구현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이번 연구에서 검토하는 모델의 horizontal coordinate를 분류하면 다음과 같다: (1) CH3D - curvilinear grid, (2) EFDC - curvilinear-orthogonal grid, (3) ROMS - curvilinear-orthogonal grid, (4) FVCOM - unstructured grid, (5) SELFE - unstructured grid, (6) ELCIRC - unstructured grid.

3.4. Vertical coordinate (수직 격자 구조)

모델 격자의 vertical coordinate는 크게 z, sigma (σ , 또는 terrain following coordinate라고 불린다), 그리고 hybrid (z + sigma) coordinate로 나눌 수 있다. 'z coordinate'는 초기 (혹은 1세대) 해양모델에서 주로 사용되었으며, 최근 개발되고 있는 대부분의 모델은 'sigma (σ) coordinate'를 사용하고 있다. Sigma coordinate 사용의 최대 장점은 (1) 격자가 바닥 지형을 잘 구현할 수 있는 점과 (terrain following) (2) stretched grid를 사용함으로써

모의 격자수를 줄일 수 있음에 있다. 그러나 수심 변화가 심한 지형에 적용할 경우 압력 경사 항 (pressure gradient term)과 확산(diffusion term)항에서 에러가 발생하는 단점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 도식화 하면 Figure 1과 같다. Figure 1은 수심변화가 심한 지형에 sigma grid 를 사용한 예로써, 붉은 선은 등 밀도선(isopycnal) 을 나타낸다. 이 경우 이론적으로는 수심이 같은 인접한 지역의 밀도가 같기 때문에 물의 순환이 발생할 수 없는 예이다. 그러나 인접한 cell center의 밀도가 다르기 때문에 모델 내에서는 물의 순환이 발생하게 된다. 또한 급격한 수심변화로 인해 인접한 두 격자 사이에 강한 변온층 (thermocline)이 존재하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 sigma grid를 이용하는 모델은 pressure gradient를 z coordinate를 기준으로 계산하거나, 또는 higher order scheme을 사용한다. 그러나 이 문제는 현재까지는 완벽하게 제거할 수는 없는 것으로 알려져 있다 (Pietrzak et al., 2002). 이에 반해 z grid의 사용은 sigma grid에서 발생하는 에러가 발생하지 않는 장점을 갖고 있고, 수심이 깊은 곳에서는 많은 vertical layer가 필요하지만 수심이 낮은 지역에서는 적은 격자수가 필요한 장점을 갖고 있다. Sigma coordinate는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\sigma = \frac{(z - \eta)}{(\eta + h)} \quad (21)$$

이번 연구에서 검토하는 모델의 vertical coordinate를 분류하면 아래와 같다: (1) CH3D - sigma와 z coordinate, (2) EFDC - sigma coordinate, (3) ROMS - sigma coordinate (특히 “S” coordinate), (4) FVCOM - sigma coordinate, (5) SELFE - hybrid coordinate (z + sigma), (6) ELCIRC - z coordinate

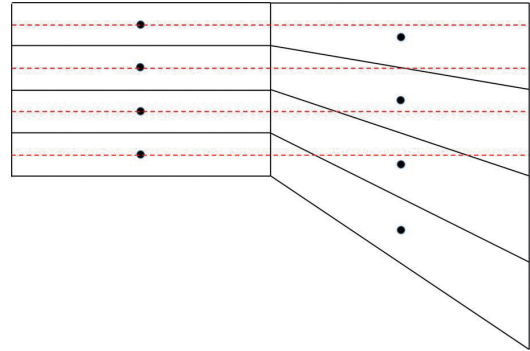


Figure 1. 수심변화가 심한 지형에 sigma grid 적용 시 발생하는 문제점. 검은 점은 cell center를 나타내며 붉은 선은 isopycnal을 나타낸다.

3.5. Turbulence closure model (난류 모델)

식 (1) - (8)은 우리가 알고자 하는 여덟 개의 항, 즉 $u, v, w, p, \rho, \eta, T, S$ 을 갖고 있다. 그러나 이들 외에도 수직 분자 확산 계수(vertical eddy viscosity, A_v)와 수직 확산 계수(vertical eddy diffusivity, K_v)가 미지수로 존재한다. 따라서 위의 8개 항을 8개의 식으로 풀기 위해서는 나머지 두 항 (vertical eddy viscosity와 diffusivity)에 대해서 정의를 해 주어야 한다; horizontal eddy viscosity와 diffusivity는 보통 외부적으로(externally) 제공하기 때문에 제외시킨다. 이를 위해 turbulence closure model이 사용되고 있으며, turbulence closure model의 기본 개념은 식 (2), (3), (6), 그리고 (7)에 사용된 eddy viscosity와 diffusivity를 정의 해 주는 것이다. 현재까지 많이 사용되고 있는 turbulence closure model은 one- or two-equation 모델 이다. 이 중에서도 가장 널리 사용되고 있는 모델은 Mellor-Yamada level 2.5 model (이후로 MY2.5로 표현함)와 $k-\epsilon$ 모델 (kinetic energy와 energy dissipation)이다. 이 외에도 다양한 종류의 two equation 모델이 존재한다

(e.g., $k-\omega$ (kinetic energy와 frequency of dissipation)). 이들 중 가장 간단한 zero equation model과 MY2.5에 대해 간략히 살펴 보도록 하자. Vaz and Simson (1994)는 여러 turbulence model을 비교 분석하여 이 중 zero-equation 모델들 중에서는 Pacanowski and Philander (1981)가 제안한 모델이 가장 정확하다고 결론 내었다. 이 모델은 아래와 같이 eddy viscosity와 eddy diffusivity를 계산한다.

$$A_V = \frac{a_0}{(1 + \alpha Ri)^n} + a_b \quad (22)$$

$$K_V = \frac{A_V}{(1 + \alpha Ri)} + k_b \quad (23)$$

여기서 a_b 와 k_b 는 소멸계수(background dissipation parameters), a_0 , α , 그리고 n 은 조절 가능한 인자(adjustable parameters), 그리고 Ri 는 gradient Richardson number로써 아래와 같이 정의된다.

$$Ri = \frac{\frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (24)$$

Pacanowski and Philander (1981)은 실측 데이터와의 비교분석을 통해 식 (22)과 (23)에서 최적의 값을 다음과 같이 정리했다:

$$\begin{aligned} a_0 &= 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \\ a_b &= 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \\ k_b &= 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \\ \alpha &= 5, \\ n &= 2 \end{aligned}$$

다음으로 MY2.5에 대해 살펴보자. MY2.5에서는 A_V 와 K_V 를 Richardson number (R_q)와 연관하여 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$A_V = \phi_A q l = 0.4 \left(\frac{1}{1 + 36 R_q} \right) \left(\frac{1}{1 + 6 R_q} \right) \left(\frac{1}{1 + 8 R_q} \right) q l \quad (25)$$

$$K_V = \phi_K q l = 0.5 \left(\frac{1}{1 + 36 R_q} \right) q l \quad (26)$$

$$R_q = -\frac{l^2}{q^2} \frac{g}{H} \frac{\partial b}{\partial z} \quad (27)$$

여기서 ϕ_A 와 ϕ_K 는 stability functions이고, l 은 turbulence length scale, 그리고 q 는 velocity scale로써 ($q^2 = u^2 + v^2 + w^2$) turbulence kinetic energy (K)의 두 배 값을 의미한다 ($k = \frac{q^2}{2}$). 또한 b 는 부력항(buoyancy)를, $b = -g \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o}$, 나타낸다. 위의 식에서 velocity scale (q)과 length scale (l)은 다음과 같은 식으로 표현 될 수 있다.

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = 2A_V M^2 - 2K_V N^2 - \frac{2q^3}{16.6l} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) \quad (28)$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} = 1.8l A_V M^2 - 1.8l K_V N^2 - \frac{Wq^3}{16.6} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z} \right) \quad (29)$$

여기서

$$M^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2,$$

$$N^2 = \frac{\partial b}{\partial z} = \frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

$$K_q = 0.2ql$$

$$W = 1 + \frac{1.33l^2}{(kL)^2} = 1 + \frac{1.33l^2}{(kl)^2}$$

여기서 N^2 은 Brunt-Vaisala frequency, k 는 von Karman 상수 ($k=0.4$)이다. 식 (28)과 (29)의 각 항의 물리적 의미는 다음과 같다.

$K_u M^2$ 은 'shear production of turbulent kinetic energy (TKE)', $K_b N^2$ 은 'TKE conversion into potential energy', $\frac{q^3}{16.6l}$ 은

‘viscous dissipation of TKE’를 나타낸다. 마지막으로 식 (25)와 (26)를 풀기 위해 다음과 같은 식을 사용한다 (Galperin et al., 1988).

$$\phi_A = \frac{0.393 - 3.085G_H}{1 - 40.803G_H + 212.469G_H^2}, \quad (31)$$

$$\phi_K = \frac{0.494}{1 - 34.676G_H} \quad (32)$$

여기서

$$G_H = -\frac{l^2}{q^2} N^2 = -\frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

이 식을 사용하는 데는 몇 가지 주의 사항이 있으며, 좀 더 자세한 내용은 Mellor and Yamada (1982)와 Galperin et al. (1988)을 참조하여야 될 것이다. 이 외에도 많은 Turbulence Closure Model이 존재하나 자세한 내용은 생략하도록 한다.

위에서 언급된 모델들은 각각 다른 turbulence closure model을 사용하고 있다. 이를 정리하면 다음과 같다. CH3D는 Aeronautical Research Associates of Princeton에서 개발한 second order closure model을 사용하고 있다. 이 모델은 다음과 같은 세 가지 버전을 갖고 있다: equilibrium closure, TKE (Turbulence Kinetic Energy) closure, and Reynolds Stress Model. EFDC는 Mellor–Yamada level 2.5 turbulence closure scheme을 사용하고 있으며, ROMS는 $k-\varepsilon, k-\omega,$ 그리고 MY2.5 모델을 사용한다. FVCOM은 독일의 Burchard 그룹에서 개발한 General Ocean Turbulence Model (GOTM)을 사용하고 있다. SELFE는 Generic Length Scale (GLS) turbulence closure scheme을 사용하고 있으며, ELCIRC는 zero-equation model by Pacanowski and Philander와 two-equation closure schemes

(예를 들면, Mellor–Yamada–Galperin, K-epsilon, Umlauf and Burchard)를 제공한다.

3.6. Treatment of Equations (방정식의 수치해석 방법)

각 모델은 continuity와 momentum equations을 풀 때 각각 다른 수치해석 방법을 사용한다. Fully explicit method(양해법)을 사용하는 모델들은 stability restrictions (즉, CFL condition)으로 인한 계산 시간 증분의 제약을 갖고 있다. 그러나 어떤 모델은 semi-implicit method를 사용함으로써 계산 시간에 가장 영향을 많이 미치는 항에서는 implicit method(음해법)를 사용하여 stability restrictions을 완화하는 방법을 사용하기도 한다. 또한 어떤 모델은 Eulerian–Lagrangian Method(ELM)을 사용함으로써 theta method와 마찬가지로 CFL condition을 제거할 수 있기 때문에 large time step을 사용할 수 있는 장점을 갖고 있기도 하다. 그러나 ELM은 질량보존(mass conservation) 문제를 갖고 있는 단점이 있고 (Oliveira and Baptista, 1998), 이 문제를 해결하기 위해 higher order scheme을 사용하기도 한다 (Zhang and Baptista, 2008).

일반적으로 explicit method를 사용하는 모델은 다음과 같은 stability condition이 요구되며 barotropic 항에 대한 stability condition은 다음과 같다:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta_{x,y}}{\sqrt{gh}} \quad (30)$$

여기서 g 는 중력상수이고, $\Delta_{x,y}$ 는 수평격자 크기, 그리고 h 는 수심을 나타낸다.

위에서 언급한 모델들에 대해 각각의 중요 특성을 요약하면 표 1과 같다.

표 1. General Features of Estuary/Ocean Models

	CH3D	EFDC	ROMS	FVCOM	SELFE	ELCIRC
Horizontal Coordinate	C-grid Curvilinear	C-grid Curvilinear – orthogonal	C-grid Curvilinear – orthogonal	Unstructured grid	Unstructured grid	Unstructured grid
Vertical Coordinate	Sigma	Sigma	Sigma (or S)	Sigma	Hybrid (z + sigma)	z
Time stepping	Semi-implicit ($0 \leq \theta \leq 1$)	Semi-implicit ($0 \leq \theta \leq 1$)	Fully explicit	Fully explicit (but Semi-implicit possible) ($0 \leq \theta \leq 1$)	Semi-implicit ($0 \leq \theta \leq 1$)	Semi-implicit ($0.5 \leq \theta \leq 1$)
Mode splitting	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
Discrete equations	FD	FD	FD	FV for the continuity and momentum	FE and FV	FV for the continuity FD for the momentum
Vertical turbulence	Equilibrium, TKE, Reynolds Stress Model	MY2.5	k- ϵ , k- ϵ , MY2.5	GOTM	GLS	zero and two equation models (MY2.5, GLS)
Wetting/ drying	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
한국하천/호소 에 적용 예	None	운암호, 용담호, 낙동강 등 다수	None	None	None	None
한국 해양에 적용 예	None	가로림만, 목포해역 등 다수	None	경기만, 시화호, Ideal case study	None	None

Note: FD = Finite Difference; FV = Finite Volume; FE = Finite Element; TKE = Turbulence Kinetic Energy model; MY2.5 = Mellor-Yamada Level 2.5; GOTM = General Ocean Turbulence Model; GLS = Generic Length Scale model


4. 맺음말

각종 수질문제로 인해 국내 하천 및 호소, 또는 해양에서 물의 물리적 이동현상에 대한 정확한 이해가 절실히 요구되고 있다. 현재 3차원 수리모델은 컴퓨터 성능의 향상으로 과거의 1차원 또는 2차원 수리모델의 한계를 극복하며 다양한 분야에 널리 이용되고 있다. 이러한 3차원 수리모델은 대부분 해양 모델에 기초를 두며, 각 모델에 따라 문제 해석을 위해 다양한 접근 방법과 각기 다른 모델의 틀을 갖고 있다. 이에 따라 각 모델들의 물리적 구성과 문제 해석의 방법에 대해 개괄적으로 정리해 보았다. 각각의 모델은 적용 대상과 적용 범위에 따라 장/단점이 분명

존재한다. 그러나 어떤 한 모델이 다른 모델에 비해 월등한 성능을 갖거나 모든 연구 영역에서 나은 성능을 갖지는 않는다. 따라서 적절한 모델의 선정은 연구의 목적에 따라 달라진다고 할 수 있다. 오늘날 앞서 언급한 모델들은 꾸준한 알고리즘의 업데이트와 유지/보수로 인해 특히 해양 분야에서 다각적으로 사용되고 있다. 그러나 인지하다시피 국내 연구진에 의해 개발된 모델은 전무하다고 할 수 있다. 이에 따라 하천/해양 모델링 연구 분야의 외국에 대한 기술의존도가 점점 높아져 가고 있으며, 이는 국내 모델링 분야의 인프라구조의 약화를 초래하고 있다. 이러한 현상은 장기적으로 기술의 종속화를 초래할 수 있기에 국내에서도 빠른 시일 내에 국내

연구진간의 협업과 정부의 지원으로 국내 실정에 맞는 하천/해양 모델의 개발이 필요하다고 판단된다.

5. 감사의 글

본 기고는 한국건설기술연구원의 기관고유 연구사업(2013-0328)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 

참고문헌

1. Galperin, B., L.H. Kantha, S. Hassid, A. Rosati (1988), A Quasi-equilibrium Turbulent Energy Model for Geophysical Flows, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 55-62.
2. Mellor, George L., Tetsuji Yamada (1992), Development of a turbulence colusre model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics*, 20 (4), 851-875.
3. Oliveira, A., A. M. Baptista (1998), On the role of tracking on Eulerian-Lagrangian solutions of the transport equation, *Advances in Water Resources*, 21 (7), 539-554.
4. Zhang, Yinglong, Antonio M. Baptista (2008), SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation, *Ocean Modeling*, 21, 71-96.