

# 동수역학모델의 민감도 분석을 통한 합류수로 흐름해석



**최 황 정**

국립환경과학원 한강물환경연구소  
박사후연구원  
hjeong0108@korea.k



**박 인 환**

한국건설기술연구원 수자원·하천연구소  
박사후연구원  
inhwanpark@kict.re.kr



**서 일 원**

서울대학교  
건설환경공학부 교수  
seoilwon@snu.ac.kr

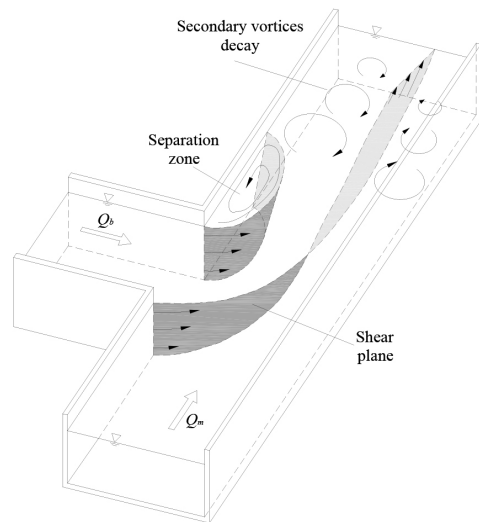


그림 1. 합류수로에서의 이차류 형상(Weber 등, 2001)

## 1. 서론

자연하천의 합류부에서는 유량차이, 흐름방향의 변화로 인해 흐름구조가 복잡하게 변화하게 된다. 이로 인해 정체점(stagnation point)이 형성되고 내측에 박리영역(separation zone)이 형성된다(그림 1). 본류와 지천의 이차류 형상이 반대로 생성되어 전단면(shear plane)이 발생한다. 합류부의 복잡한 흐름특성은 유사로 인한 사주형성과 식생

의 고착화를 야기하여 하류하천의 홍수소통에 많은 영향을 주고 있다. 이러한 합류수로의 동수역학적 중요성으로 인해 많은 연구자들이 수치모형을 활용하여 합류수로에서의 유동현상에 대한 연구를 진행한 바 있다.

국내외의 기관 및 연구자들이 사용하고 있는 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모형은 지류합류부의 수리적인 특성을 분석하는데 적용할 수 있다. 하지만 일반적으로 수치모형은 모의결과에 영향을 미치는 다양한 형태의 불확

실성을 내포할 수 있다. 따라서 EFDC 모형을 이용하여 지류합류부의 복잡한 흐름특성을 모의하기 위해서는 수치모의 결과에 영향을 미치는 입력자료와 매개변수를 합리적으로 결정해야 된다. 특히, 계산격자 간격과 시간간격, 동점성계수 등은 지류합류부의 수치모의 결과에 영향을 주는 인자들이며, 이에 대한 민감도 분석은 필수적이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 모형의 개요

EFDC 모형은 미국환경보호국(US EPA)의 지원을 받아 Virginia Institute of Marine Science의 Hamrick에 의해 1992년 처음 개발되었다. 이 모형은 다양한 분야에 적용 가능하며 하천, 호수, 저수지, 습지, 연안에 대해서 수리와 수질에 대한 3차원 모의가 가능하며, 유체의 이동, 염분 및 온도, 부유물질의 이동, 오염물질의 확산, 부영양화, 독성물질 이동 등을 수치 모의할 수 있다. 특히 댐 또는 암거 등의 구조물 해석뿐만 아니라 수심이 얇은 수체에서도 모의가 가능하여 인공습지 등에 적용할 수 있다.

### 2.2 모형의 매개변수

EFDC 모형의 동수역학(Hydrodynamic)모듈의 지배방정식은 시간 평균된 Navier-Stokes 방정식을 곡선-직교 수평 좌표계와 시그마 연직좌표계로 전환하여 유도하며,  $x, y$ 방향 운동방정식을 사용한다(Choi et al., 2017). EFDC 모형은 유한차분법을 이용하여 지배방정식을 이산화하기 때문에 수치적으로 안정적인 계산결과를 얻기 위해 식 (1)의 CFL (Courant-Fredrich-Lawyer)조건을 만족하는 범위에서 매개변수를 조정해야 한다.

$$Cr = \frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{v\Delta t}{\Delta y} \leq 1 \quad (1)$$

여기서,  $Cr$ 은 Courant 수,  $\Delta x, \Delta y$ 는 각각  $x, y$ 방향 격자크기,  $\Delta t$ 는 계산시간 간격이다. Eq. (1)에 따라 격자크기( $\Delta x, \Delta y$ )를 작게 구성한 경우, CFL조건을 만족시키기 위해  $\Delta t$ 도 충분히 작게 조절해야 수치적으로 안정적인 해를 얻을 수 있다. 또한 수평방향의 운동방정식에 포함된 동점성계수( $A_H$ )는 유속의 시간적, 공간적 변화에 영향을 미치며, 셀 Peclet수 조건에 따라 수치진동을 일으킬 수 있다(Jang and Song, 2016). 따라서 수치적으로 안정적인 해를 얻기 위해 격자크기와  $\Delta t, A_H$ 에 대한 검토가 필요하다.

구조물 주변과 지류합류부와 같이 복잡한 흐름 구조가 나타나는 구간에서는 준 3차원 흐름모의 결과가 필요하다. EFDC 모형은  $\sigma$ -좌표계를 이용하여 연직방향 격자를 구성하기 때문에 layer 수는 연속방정식과 운동방정식의 연직방향 이산화에 이용되며 유속의 연직분포 계산결과에 영향을 미친다. 또한 layer수에 비례하여 계산시간이 증가하기 때문에 적절한 layer수의 결정이 필요하다.

동수역학모형의 흐름해석결과는 EFDC 모형의 여러 해석모듈의 계산에 이용되기 때문에 정확한 흐름모의결과를 얻기 위한 변수들의 민감도분석이 필요하다. 표 1은 동수역학모형의 흐름계산결과에 영향을 미치는 변수들을 정리한 것이다. 동수역학모형의 지배방정식이 갖는 특성에 따라 계산결과에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 선택하였으며, 각 변수들을 변화시키며 수심 및 유속의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

표 1. 민감도 분석을 위한 매개변수 정리

Variables	Reason for selection	Analysis method
Grid size	Stability of numerical solution	Comparisons of depth and velocity by changing parameters
$\Delta t$		
$A_H$		
Number of Layer	Accuracy of quasi-3D simulations	

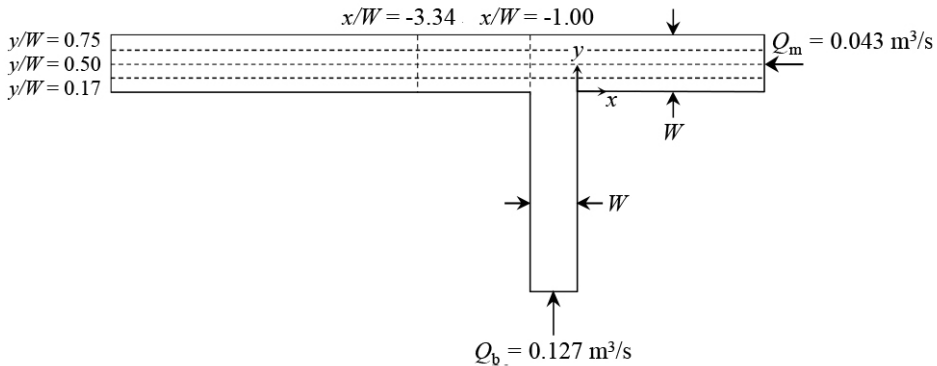


그림 2. 합류수로의 제원 (Weber et al. 2001)

### 3. 지류합류부 민감도분석 결과

복잡한 수리현상이 발생하는 합류수로에서 EFDC의 민감도 분석을 수행했고 대상수로는 그림 2와 같다. EFDC의 흐름해석 결과 및 수치해석의 안정성에 영향을 미치는 매개변수를 변화시키며 흐름모의결과를 비교했다. 본 연구에서는 수치해석의 안정성에 영향을 미치는 격자크기, 동점성계수를 민감도 분석을 위한 대상으로 선택했다. 그리고 준 3차원 흐름모의에 영향 미치는 Layer 수를 변화시키며 모의결과를 비교했다. 민감도 분석을 위한 수치모의조건은 표 2와 같다.

표 2의 조건에 따라 격자크기를 변화시키며 수치모의 결과를 비교했다. 수치모의에 이용한 격자크기는 안정적 수치모의를 위해  $Cr = 0.1$ 로 정하여  $\Delta t$ 를 변화시켰다. Fig. 3은 격자크기 변화에 따른 수심적분 된 유속크기의 컨투어를 도시한 결과이며, 모든 Case에서 합류부 하류의 좌안에 나타난 재순환류로 인해 수심이 감소된 것을 볼 수 있다. Case TGC와 TGF를 비교해보면 격자크기가 세밀한 경우 재순환류의 크기가 더 넓은 범위에 걸쳐 발생했다. 따라서 격자크기가 충분히 세밀하지 않은 경우 지류합류부에서 발생하는 이차류를 재현하지 못할 수 있다. 또한 재순환류로 인한 유사의 퇴적 등이 과소산정될 우려가 있다.

동점성계수( $A_H$ )가 수치모의결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 Case TGM의 격자를 이용하여 민감도 분석을 수행했다. EFDC 모형은 수평난류확산계수( $A_H$ )의 결정을 위해 수정된 Smagorinsky 모델을 이용하며, 사용자의 선택에 따라 고정된 값을 입력할 수 있다(Tetra Tech, 2007b). 본 연구에서는 격자크기 및  $\Delta t$ 에 의한 영향을 무시하기 위해  $A_H$ 를 고정된 값으로 입력하여 민감도 분석을 수행했다.

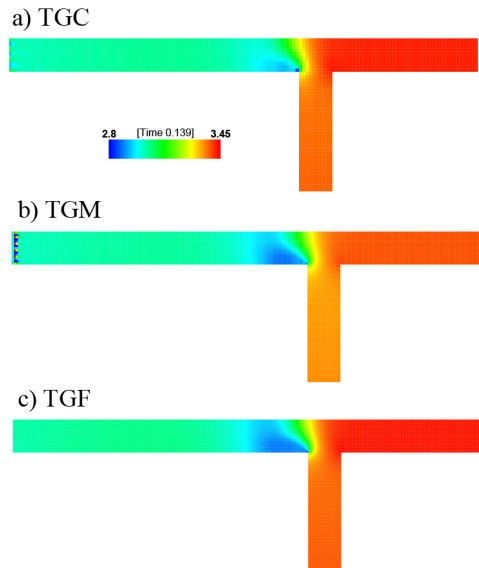


그림 3. 격자크기의 변화에 따른 수심모의결과 비교

표 2. 민감도 분석을 위한 매개변수 정리

Case	$\Delta x/W \times \Delta y/W$ (No. of grid)	$\Delta t(\text{sec})$	$A_H/hu^*$	Layer	Sensitivity analysis
TGC	0.100×0.100 (1251)	0.050	0.063	1	Grid size
TGM	0.075×0.075 (2220)	0.035			
TGF	0.050×0.050 (5004)	0.025			
TMA0	0.075×0.075 (2220)	0.035	0.006	1	Eddy viscosity
TMA1			0.063		
TMA2			0.638		
TMA3			6.386		
TML1	0.075×0.075 (2220)	0.035	0.063	1	No. of vertical layer
TML5				5	
TML10				10	
TML15				15	
TML20				20	

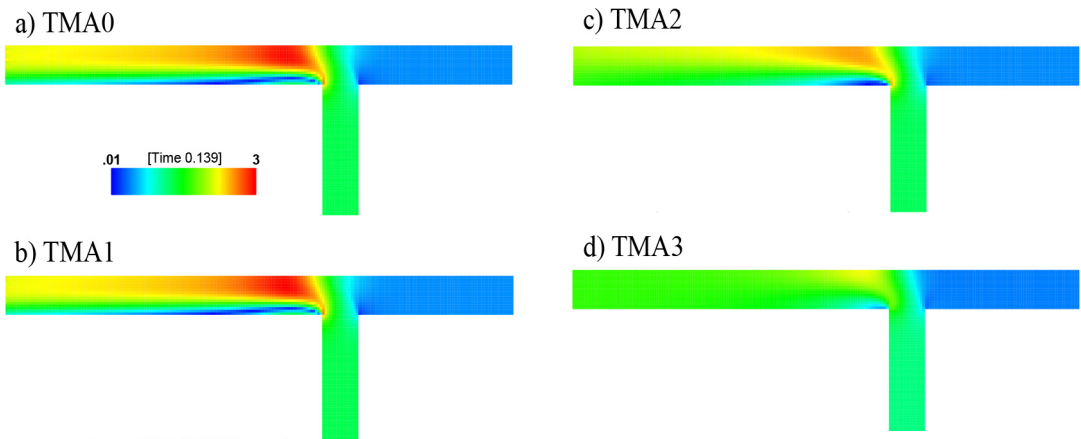


그림 4. 수평난류확산계수의 변화에 따른 유속분포 변화

$A_H$ 의 변화에 따른 유속크기의 변화를 그림 4에서 비교했다. 그 결과,  $A_H$ 의 증가에 따라 합류점 양안에서 전단면(shear plane)의 형성에 따른 유속편차가 발생하지 않았다. 그리고 Case TMA3에

서는 유속편차가 점차 감소하여 합류점 하류에서 재순환류가 발생되지 않았다.  $x/W = -1.0$ 에서 최대 유속은  $A_H$ 가 증가함에 따라 점차 감소되어 Case TMA1에 비해 Case TMA2와 TMA3의 최대

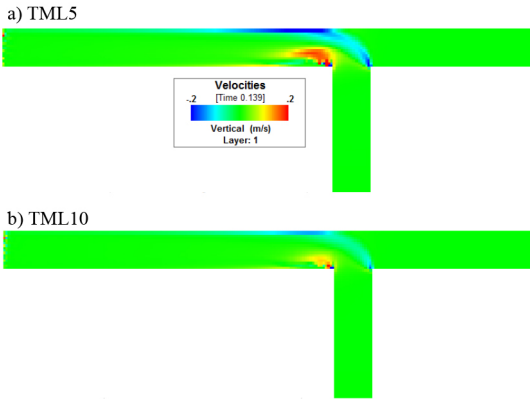


그림 5. Layer 수에 따른 바닥면 연직유속크기 비교

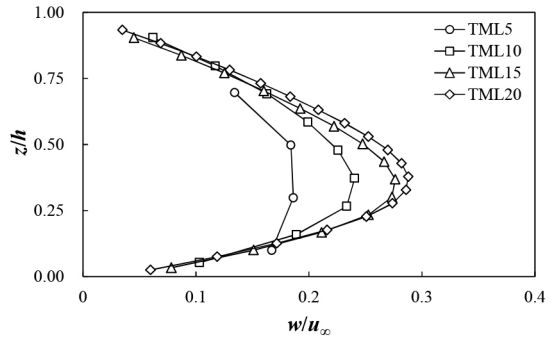


그림 6. 지류 합류부에서 Layer수에 따른 연직유속 크기 비교

유속이 각각 5.5%, 22.5%가 감소되었다. 따라서 고정된 수치격자에서  $A_H$ 의 과대산정으로 인한 오차를 줄이기 위해 확산수조건을 만족하는 범위에서  $A_H$ 를 결정할 필요가 있다.

EFDC 모형은  $z$  방향의 운동방정식을 정수압을 가정하여 풀이하며,  $\sigma$ -좌표계를 이용하기 때문에 Layer 수가 흐름해석결과에 영향을 미친다. 특히 합류수로에서는 3차원적 흐름거동이 나타나기 때문에 비교적 정확한 흐름해석결과를 얻기 위해 적합한 Layer수의 입력이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 표 2와 같이 layer 수의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하여 연직방향 유속크기( $w$ )에 미치는 영향을 비교했다.

그림 5는 합류부의 바닥면에서 Layer수에 따른  $w$  분포의 변화를 비교한 그림이다. 지류 합류부에서는 좌안에서 상승류가 발생하고 우안에서 하강류가 발생하는 현상이 동일하게 나타났다. 그러나 Case TML5의 연직유속이 Case TML10보다 더 큰 것으로 나타났다. EFDC는 Layer 수에 따라 연직격자를 등분하기 때문에 Layer수가 경우 동일한 수심에서 격자크기가 크게 계산된다. 따라서 Case TML10은 Case TML5보다 바닥면에 근접한 유속분포를 보여준다. 이에 따른 계산결과 차이를 비교하기 위해 그림 6에서 Layer수에

따른  $w$ 의 연직분포를 비교했다. layer수가 증가함에 따라 바닥면에 근접한 유속분포를 계산할 수 있으며, 유속의 연직편차 또한 증가했다. 그리고 Layer 수가 10개 이상 증가하는 경우 Layer 수 증가에 따른 연직유속분포의 변화가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 계산시간을 고려할 때 연직유속분포 계산결과와의 오차를 줄이기 위해서는 10개 이상의 Layer 수를 이용해야 할 필요가 있다.

그림 7은 재순환류가 발생하는 지류합류부에서 Layer수의 변화에 따른 횡 방향 유속의 연직분포를 비교한 그림이다. Case TML10의 경우, 지류 유입에 의해 발생하는 이차류를 더 정확히 나타냈으며, 재순환류로 인해 좌안에서 반시계 방향으로 발생하는 와류를 재현하고 있다. 반면, Case TML5에서는 유속구조의 변화가 비교적 잘 재현되지 않았다. 따라서 지류합류부에서 3차원적 흐름에 따른 유사의 이동을 고려하기 위해서는 충분한 연직 Layer수를 이용할 필요가 있다.

#### 4. 결론

격자크기에 대한 민감도 분석결과, CFL조건을

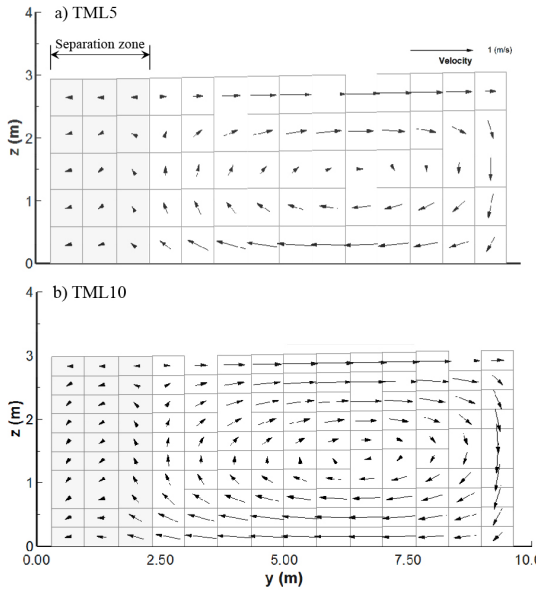


그림7. 지류합류부에서 이차류형상 비교

만족할지라도 격자해상도가 충분히 높지 않은 경우 유속은 과소산정, 수심은 과대산정 될 수 있음을 보여줬다. 그리고  $\Delta t$ 를 증가시키에 따라 유속의 공간적 변화가 점차 감소되었으며, 이는 주어진

격자에서 유속에 의한 이송보다 동점성계수에 의한 영향이 더 컸기 때문이다. 지류 합류부의 세굴에 영향을 미치는 연직유속은 layer 수의 변화에 따라 달라졌으며, layer 수가 증가함에 따라 연직유속이 증가한 후 점차 수렴했다. 따라서 계산 시간을 단축하기 위해 layer 수를 10개 이하로 모의할 경우, 합류부에서 세굴의 영향을 과대평가할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 준 3차원 모의를 위해 연직 layer를 동일한 간격으로 분할하였으나 정확한 연직유속분포를 모의하기 위해 바닥층에서 연직 layer를 더욱 세밀하게 분할할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 기사는 Choi et al. (2017)의 내용을 요약·정리한 내용이며, 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP2017-223; 실험을 통한 수질오염물질의 이송 및 확산 모의 검증 기법 및 적용).



### 참고문헌

Choi, H.J., Seo, I.W. and Park, I.H. (2017) Sensitivity Analysis of EFDC for the Flow Simulation of River Confluent, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 5, pp. 369–376.

Jang, J. and Song, C.G. (2016) Numerical Simulation of Dam Break Flow using EFDC model and Parameter Sensitivity Analysis, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 31, No. 4, pp. 143–149.

Tetra Tech, Inc. (2007a) *The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume 2: Sediment and Contaminant Transport and Fate*, pp. 7–8.

Tetra Tech, Inc. (2007b) *The Environmental Fluid Dynamics Code User Manual US EPA Version 1.01*, pp. 53–54.

Weber, L.J., Schumate, E.D. and Mawer, N. (2001) Experiments on Flow at a 90° Open-channel Junction, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 340–350.