

개수로 흐름에서 오염물질 거동의 3차원 수치모의

3D Numerical Simulations of Solute Transport in Open-Channel Flows

강형식¹⁾ · 최성욱²⁾

Kang, Hyeongsik · Choi, Sung-Uk

요 지

본 연구에서는 개수로 흐름에서의 오염물질 거동 특성에 대해 분석하였다. 이를 위해 개수로 흐름을 등류상태로 가정하여 3차원의 수직모형을 구성하고 운동량 방정식과 스칼라 수송방정식에서의 난류 혼합을 위해 레이놀즈응력 모형 및 GGDH 모형을 사용하였다. 개발된 모형을 이용하여 복단면 수로에서 오염물질이 점으로 주입된 경우에 대해 난류 흐름 및 오염물질의 농도 분포를 수치모의하고 기존의 실험 데이터와 비교하였다. 그 결과 개발된 모형이 개수로 흐름에서의 평균유속 및 난류구조, 오염물질의 농도 분포 등을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 특히, 이차흐름의 영향으로 인해 최대 농도 값의 위치가 거리에 따라 이동하는 것으로 나타났으며, 농도 분포 역시 정규분포에서 거리에 따라 점차 왜곡되는 것으로 확인되었다.

핵심용어: 오염물질, 이차흐름, GGDH 모형, 농도분포, 평균유속

1. 서 론

직선 개수로 흐름에서 발생되는 이차흐름은 그 크기가 주흐름방향 평균유속의 약 2-3%에 불과하지만, 평균유속, 난류구조, 오염물질의 이동에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 이차흐름의 생성 원인은 주로 난류의 비등방성이기 때문에, 개수로 흐름에서 오염물의 퍼짐 현상을 모의하기 위해서는 정확한 난류해석이 필요하다. 과거 개수로 흐름에서 난류 모형을 이용한 오염물 이송에 대한 연구로는 Simoes와 Wang (1997)과 Prinos (1992)를 들 수 있다. 그러나 이들의 연구에서는 등방성 난류 모형인 표준 $k-\varepsilon$ 모형을 이용하였기 때문에 오염물의 퍼짐에 대한 이차흐름의 영향을 계산에 반영할 수 없었다. 한편, Lin과 Shiono (1995) 및 Shiono 등 (2003)은 비선형 $k-\varepsilon$ 모형을 사용하여 복단면 수로에서의 평균농도 및 스칼라-흐름률을 계산하였다. 그 결과 이차흐름에 의해 평균농도 분포가 왜곡되는 것으로 나타났다. 그러나 이들 연구에서는 스칼라 수송방정식에서 스칼라-흐름률을 모형화하기 위해 난류확산개념을 이용하였는데, 난류확산개념은 스칼라-흐름률이 단순히 평균농도에 비례하며, 비례상수 역시 세 방향으로의 스칼라-흐름률에 동일하게 적용되기 때문에 스칼라-흐름률의 모든 성분을 정확히 예측하는 것은 불가능하다. 또한 상수의 난류 프란틀-슈미트 수 역시 아직 까지 일반적인 값이 제시된 바 없다.

본 연구의 목적은 개수로 흐름에서의 오염물질 거동 특성에 대해 분석하는 것이다. 이를 위해 등류의 3차원 수직모형을 구성하고 운동량 방정식과 스칼라 수송방정식에서의 난류 혼합을 위해 레이놀즈응력 모형 및 GGDH 모형을 사용하였다. 개발된 모형을 이용하여 복단면 수로에서 오염물질이 점으로 주입된 경우에 대해 난류 흐름 및 오염물질의 농도 분포를 수치모의하고 기존의 실험 데이터와 비교하였다.

1) 정희원·연세대학교 사회환경시스템공학부·연구교수 E-mail) kanghs@yonsei.ac.kr

2) 정희원·연세대학교 사회환경시스템공학부·교수 E-mail) schoi@yonsei.ac.kr

2. 수치모형

2.1 지배방정식

레이놀즈 수가 충분히 큰 경우 Navier-Stokes식을 시간평균하여 유도된 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\bar{u}_i' \bar{u}_j') + g_i \quad (1)$$

여기서 \bar{u}_i 는 시간 평균된 i -방향의 유속이며, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체 점성, g_i 는 중력가속도, $\bar{u}_i' \bar{u}_j'$ 는 레이놀즈응력이다. 또한 시간평균된 스칼라 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = - \left(\lambda \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} - \bar{u}_i' \bar{c}' \right) \quad (2)$$

여기서 \bar{c} 는 평균농도, λ 는 분자 확산계수, $\bar{u}_i' \bar{c}'$ 는 스칼라-흐름률이다.

2.2 난류모형

식 (1)의 운동량방정식에서 레이놀즈응력을 위해 6개의 편미분 방정식으로 구성된 다음과 같은 레이놀즈응력의 수송방정식을 해석하였다.

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = - \left(R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) + D_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

여기서 R_{ij} 는 레이놀즈응력($= \bar{u}_i' \bar{u}_j'$), D_{ij} 는 R_{ij} 의 확산항, Π_{ij} 는 압력-변형률 상관항, 그리고 ε_{ij} 는 R_{ij} 의 소멸항이다. 식(3)의 우변에서 난류확산항, 압력-변형률 상관항, 소멸항에 대해 각각 Mellor와 Herring(1973), Speziale 등(1991), 그리고 Hanjalic과 Launder(1972)가 제시한 모형을 사용하였다.

스칼라 수송방정식 식(2)에서 스칼라-흐름률을 해석하기 위해 다음과 같이 Daly와 Harlow(1970)가 제안한 GGDH 모형을 사용하였다.

$$\bar{u}_i' \bar{c}' = - C_c \frac{k}{\epsilon} \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \quad (4)$$

여기서 $C_c (=0.22)$ 는 경험상수이다.

3. 계산결과

계산 결과의 비교를 위해 복단면 개수로에 대한 Shiono 등(2003)의 실험 데이터를 이용하였으며, 실험 조건은 표 1과 같다. 주수로와 홍수터의 수심이 각각 $H = 0.11$ m와 $h = 0.055$ m, 주수로와 홍수터의 폭은 $B = 0.2$ m, $b = 0.1$ m, 바닥 경사는 $S = 5 \times 10^{-4}$ 이다. 염료 주입 위치는 $y = 0.1$ m과 $z = 0.108$ m이고, 염료 농도는 2500 ppb이며, 사용된 염료는 Rhodamine 6G로서 염료가 흐름에 영향을 미치지 않는 수동 스칼라(passive scalar)이다. 실험에 사용된 순간 유속 및 순간 농도 측정은 LDA(Laser Doppler Anemometer)와 LIF(Laser Induced Fluorescence)를 이용하여 흐름과 농도를 동시에 측정하였으며, 측정 위치는 염료 주입 위치로부터 하류 방향으로 1m 떨어진 단면이다.

그림 1은 복단면 개수로 흐름에서의 이차흐름 및 주흐름방향 평균유속 분포도를 보여준다. 그림에서 주흐름방향 유속은 단면 평균유속으로 무차원화 되었으며, 이차흐름 벡터도의 무차원화를 위해서는 주흐름방향으로의 최대유속이 이용되었다. 그림 1을 살펴보면 평균유속 분포 및 이차흐름의 패턴에 대한 수치모의 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 특히

주수로와 홍수터의 접합부에서 강한 쌍涡(twin vortex)가 형성되며, 이로 인해 평균유속 분포도가 자유수면 방향으로 부풀어져 있는 것을 볼 수 있다. 또한 계산된 이차흐름의 최대크기는 주흐름방향 유속 최대값의 약 2.8%인 것으로 나타났다.

그림 2는 평균농도 분포도이다. 그림에서 $z = 0.105$ m를 살펴보면, 평균농도의 최대 값이 염료 주입 위치로부터 이차흐름의 횡방향 유속과 동일한 방향인 오른쪽 방향으로 이동된 것을 볼 수 있으며, 최대 농도를 기준으로 오른쪽 영역이 왼쪽 보다 더 큰 농도 경사를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 염료 주입 위치인 $z = 0.108$ m와 멀어짐에 따라 좌우의 농도 경사가 점차 동일해지는 것으로 나타났다. 또한 수치모의에 의한 계산 결과가 이와 같은 현상을 잘 예측하고 있으며, 실험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 스칼라-흐름률 분포도이다. 그림을 살펴보면 최대 농도 지점에서 스칼라-흐름률이 영의 값을 갖으며, 영의 스칼라-흐름률이 발생되는 위치가 염료 주입 위치에서 오른쪽으로 이동된 것을 볼 수 있다. 특히, $z = 0.105$ m를 보면 스칼라-흐름률을 $\overline{c'v'}$ 의 양의 영역에서 $\overline{c'v'}$ 의 횡방향 경사가 음의 영역 보다 더 크게 발생되는데, 이는 평균농도 경사가 최대 농도점을 기준으로 좌우로 서로 다르기 때문이다. 또한 $z = 0.09$ m에서 수치모의 결과가 실험 결과에 비해 과도 산정하지만 전반적으로 계산결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 $z = 0.105$ m에서 주흐름방향 거리에 따른 평균농도 분포의 변화도이다. 그림을 살펴보면, 거리에 따라 평균농도의 최대 값이 감소하며, 농도 분포의 형태가 정규분포가 아닌 왜곡된 형태를 갖는 것을 볼 수 있다. 특히, 최대 농도가 발생하는 지점을 살펴보면 거리에 따라 오른쪽 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이와 같은 농도 분포의 왜곡 및 최대 농도 발생지점이 이동되는 이유는 이차흐름 때문인 것으로 판단된다. 그림 5는 거리에 따른 최대 농도 발생 지점의 이동을 보여준다. 그림을 살펴보면 염료 주입 위치로부터 하류 방향으로 최대 농도의 발생 지점이 이동하여 $x = 2.5$ m의 지점에서는 약 0.02 m 이동하였고, 그 이후 부터는 이동 거리의 변화가 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 수치모의를 통하여 개수로 흐름에서 오염물의 거동 특성에 대해 살펴보았다. 이를 위해 3차원 수직모형을 구성하고, 지배방정식에서의 난류 폐합 문제를 위해 레이놀즈 응력모형 및 GGDH 모형을 이용하였다. 개발된 모형을 이용하여 복단면 개수로에서 염료가 점으로 주입된 경우에 대한 난류 흐름 및 오염물 평균농도와 스칼라-흐름률을 계산하고 기존의 실험 결과와 비교하였다.

1. 복단면 개수로 흐름에서의 평균유속 및 이차흐름을 계산한 결과 기존의 실험 결과와 잘 일치하였으며, 계산된 평균농도 및 스칼라-흐름률 역시 개발된 모형이 잘 예측하는 것으로 나타났다.
2. 이차흐름에 의해 거리에 따라 최대 농도값이 발생되는 위치가 이동하는 것으로 나타났으며, 농도 분포 역시 정규분포가 아닌 왜곡된 형태를 갖는 것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

- Daly, B.J. and Harlow, F.H. (1970). "Transport equations in turbulence." *Physics of Fluids*, 13, 2634-2649.
Hanjalic, K. and Launder, B.E. (1972). "A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows." *Journal of Fluid Mechanics*, 52, 609-638.
Mellor, G.L. and Herring, H.J. (1973). "A survey of mean turbulent field closure." *AIAA Journal*, 11, 590-599.
Prinos, P. (1992). "Dispersion in compound open channel flow." *Hydraulic and Environmental Modeling*:

- Estuarine and River Waters, Ed. Falconer, Shiono, Mattew, Ashgate Publishing Ltd., 359-372.
- Shiono, K., Scott, C.F., and Kearney, D. (2003). "Predictions of solute transport in compound channel using turbulence models." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 41(3), 247-258.
- Simoes, F.J.M. and Wang, S.S.Y. (1997). "Numerical prediction of three dimensional mixing in a compound channel." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 35(5), 619-642.
- Speziale, C.G., Sarkar, S., and Gatski, T. (1991). "Modeling the pressure strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach." *Journal of Fluid Mechanics*, 227, 245-272.

표 1. 실험 조건

수심(m)	수로 폭	바닥 경사	염료주입위치		염료농도(ppb)
			y(m)	z(m)	
0.11(주수로)	0.1(주수로)	5×10^{-4}	0.1	0.108	2500
0.055(홍수터)	0.1(홍수터)				

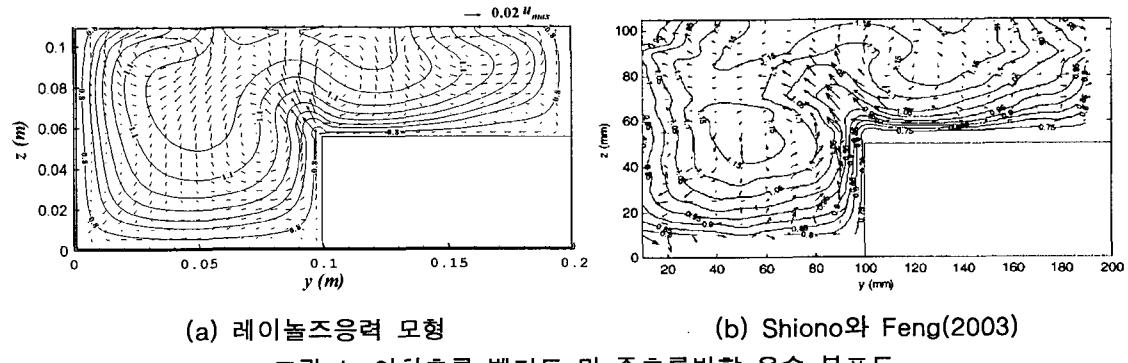


그림 1. 이차흐름 벡터도 및 주흐름방향 유속 분포도

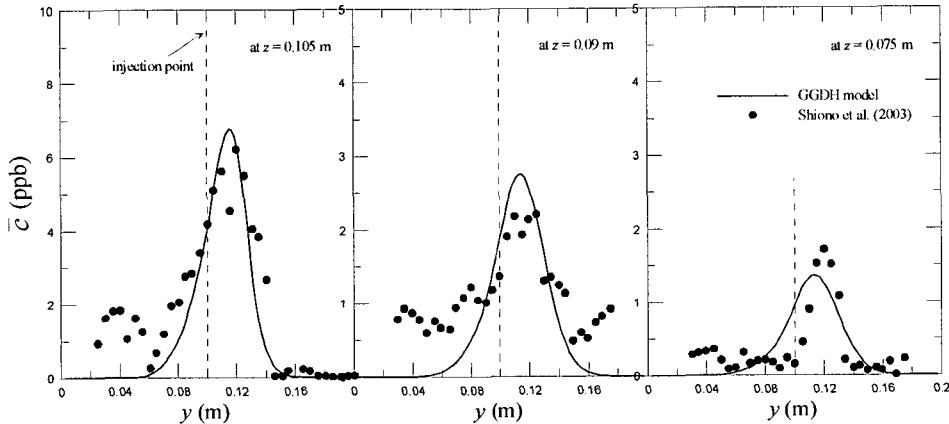


그림 2. 평균농도 분포도

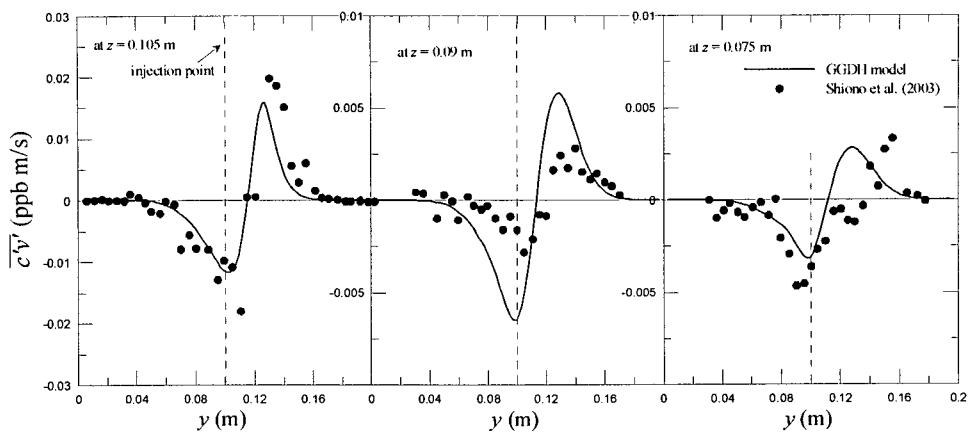


그림 3. 스칼라-흐름률 분포도

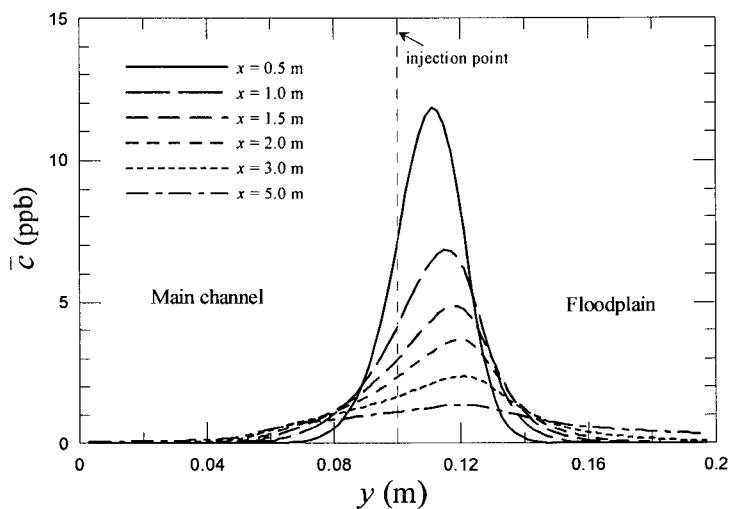


그림 4. 거리에 따른 평균농도 분포 변화

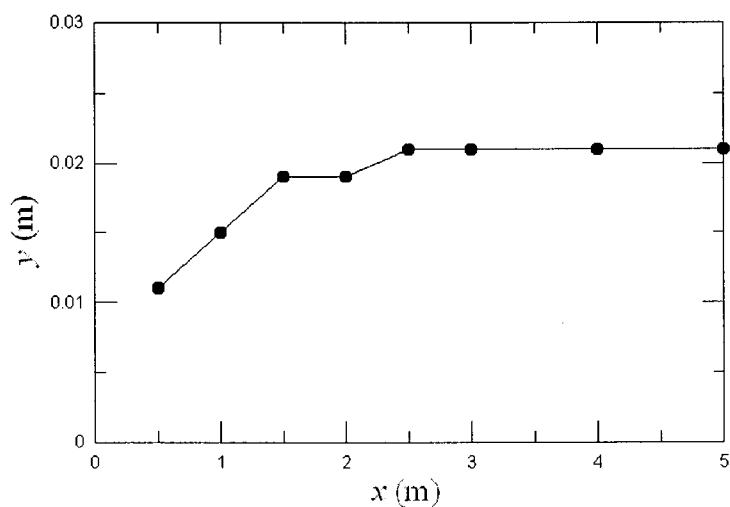


그림 5. 거리에 따른 최대 농도 발생 지점의 이동