

개수로에서 2차원 이송-분산 해석을 위한 시간분리 혼합 모형

정영재* · 서일원**

Jung, Youngjai*, Seo, Il Won**

Time-split Mixing Model for Analysis of 2D Advection-Dispersion in Open Channels

ABSTRACT

This study developed the Time-split Mixing Model (TMM) which can represent the pollutant mixing process on a three-dimensional open channel through constructing the conceptual model based on Taylor's assumption (1954) that the shear flow dispersion is the result of combination of shear advection and diffusion by turbulence. The developed model splits the 2-D mixing process into longitudinal mixing and transverse mixing, and it represents the 2-D advection-dispersion by the repetitive calculation of concentration separation by the vertical non-uniformity of flow velocity and then vertical mixing by turbulent diffusion sequentially. The simulation results indicated that the proposed model explains the effect of concentration overlapping by boundary walls, and the simulated concentration was in good agreement with the analytical solution of the 2-D advection-dispersion equation in Taylor period (Chatwin, 1970). The proposed model could explain the correlation between hydraulic factors and the dispersion coefficient to provide the physical insight about the dispersion behavior. The longitudinal dispersion coefficient calculated by the TMM varied with the mixing time unlike the constant value suggested by Elder (1959), whereas the transverse dispersion coefficient was similar with the coefficient evaluated by experiments of Sayre and Chang (1968), Fischer *et al.* (1979)

Keywords : Shear flow, 2-D advection-dispersion, Time-split Mixing Model, Dispersion coefficient, Mixing time

초 록

본 연구에서는 전단류 분산이 이송과 난류에 의한 확산의 결합에 의해 발생한다는 Taylor (1954)의 가정을 바탕으로 개념적 모형을 구성하고, 이를 3차원 개수로에 적용하여 오염물질의 혼합과정을 재현할 수 있는 시간분리 혼합모형(Time-split Mixing Model; TMM)을 개발하였다. 개발된 모형은 연산자 분리 기법(operator split method)과 유사하게 혼합과정을 종방향 혼합과 횡방향 혼합으로 분리하고, 유속 연직편차에 의한 농도분리과정과 난류확산에 의한 연직방향 혼합과정을 순차적으로 반복 계산함으로써 2차원 이송-분산을 재현한다. 수치모의 결과, 제안된 모형은 수로벽면에 의한 농도중첩 효과를 잘 반영하고 있으며, Taylor 구간 내에서 2차원 이송-분산 모형의 해석해와 거의 일치하고 있음을 확인하였다(Chatwin, 1970). 본 모형은 하상경사, 하폭 대 수심 비, 혼합시간 등의 변화에 따라 분산 정도를 달리 재현하고 있으며, 산정된 종분산 계수는 Elder(1959)가 제안한 상수값과는 달리 혼합시간에 따라 변화하는 양상을 나타냈다. 횡분산계수의 경우, Sayre와 Chang(1968), Fischer 등(1979)이 실험을 통해 제시한 값과 유사한 범위를 나타냈다.

검색어 : 전단류, 2차원 이송-분산, 시간분리 혼합모형, 분산계수, 혼합시간

* 미국 콜로라도주립대학 토목환경공학부 박사과정 (yjung1984@gmail.com)

** 정회원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · Prof., Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Korea · seoilwon@snu.ac.kr)

Received July 5 2012, Revised August 22 2012, Accepted February 18 2013

1. 서론

하천에 유입되는 오염물질은 하수처리장에서 방류관이나 개수로를 통해 지속적으로 유입되는 것이 일반적이지만, 하천 주변에 위치한 산업시설에서의 사고에 의한 독성물질 누출, 교량 또는 강변도로에서 차량 전복 사고 등에 의해 다량의 유해물질이 일시에 하천에 유입되기도 한다. 특히 이러한 오염원과 취수장이 인접한 구간에 위치해 있는 하천의 경우, 오염물질이 하폭방향으로 완전히 혼합되기 전까지 나타나는 2차원 혼합과정에 대한 이해가 오염사고 대응 및 수질관리 측면에서 매우 중요하다. 자연하천에서는 사행에 따른 유속구조의 불균일성, 하안 및 하상에서 발달하는 사수역(dead zone) 등으로 인하여 오염물질의 이송 및 분산 과정이 매우 복잡하게 나타나며, 하천의 지형적, 수리적 특성이 오염물질의 혼합거동에 미치는 영향을 정확하게 모의하기 위해서는 3차원 수치모형을 적용해야 한다. 그러나 대부분의 하천은 하폭 대 수심비가 매우 크고, 오염물질이 연직방향으로 완전히 혼합되는 시간이 매우 짧기 때문에, 혼합과정을 해석하는 데 있어서 3차원 이송-확산 방정식을 수심방향으로 평균해서 유도한 2차원 이송-분산 방정식을 지배방정식으로 채택하는 2차원 수치모형이 널리 사용되고 있다(Rutherford, 1994).

Taylor(1954)의 전단류 분산(shear flow dispersion) 이론은 개수로 및 하천에서 나타나는 오염물질의 분산 거동을 해석하는 바탕이 된다. 전단류란 3차원 흐름이 존재하는 수로에서 단면 내 위치에 따라 서로 다른 유속을 갖는 흐름을 말하며, 전단류 분산은 유속 차이에 의한 전단 이송과 난류 확산의 결합작용으로 발생하는 오염물질의 퍼짐 현상을 의미한다. 많은 연구자들이 Taylor(1954)의 전단류 분산 이론을 바탕으로 2차원 이송-분산 방정식을 유도하고, 수학적 또는 수치적 방법을 이용하여 2차원 혼합과정에 대한 해를 제시하였다(Fischer 등, 1979). McGruik과 Rodi(1978)는 하천의 흐름 상태와 하천의 양안에서 유입된 오염물질의 근역에서의 농도 분포를 계산하기 위한 2차원 수심평균 모형을 개발하였고, Fischer 등(1979)은 2차원 이송-분산 방정식에 포함된 분산계수를 종방향 유속 및 횡방향 유속의 연직방향 분포식과 농도경사의 삼중적분으로 산정하여 텐서(tensor) 형태로 정의하였으며, 3차원 흐름의 물리적 특성을 충분히 반영하여 2차원 혼합과정을 해석하였다. Alavian(1986)은 2차원 유속장에 국지 좌표계 변환 방법을 적용하여, 유속의 연직분포를 알지 못하는 경우에 2차원 수치모형에 필요한 텐서형 분산계수 산정방법을 제시하였다. Piasecki와 Katopodes(1999)는 Alavian(1986) 방식으로 분산계수를 산정하여 실제 자연하천에서의 2차원 이송-확산 모의를 수행하였다. Duan(2004)은 난류 Schmidt수를 보정계수로 이용하여 분산계수를 산정하고, 2차원 유효요소법(efficient element method)을 이용하

여 사행수로에서의 오염물질 이동 및 확산 거동을 모의한 후, 모의 결과를 Chang(1971)의 실험과 비교 분석하였다. 국내 연구로는 Lee와 Kim(2000)이 Holly-Preissmann기법을 이용하여 2차원 이송-확산 방정식에 대한 수치모의를 진행한 바 있으며, Lee와 Kim(2002)은 이송방정식의 수치오차 및 수치진동의 단점을 보완하기 위해 특성곡선법이 적용된 이송모형을 제안하였다. Han과 Kim(2000)은 텐서 형태의 분산계수를 포함하고 Petrov-Galerkin 기법을 이용한 유한요소모형을 개발하였으며, Kim과 Han(2000)은 2차원 흐름 및 오염확산 해석을 위한 유한요소 모형을 낙동강에 적용하고, 상용모형인 QUAL2E의 모의결과와 비교하여 실제 하천에의 적용성을 검증하였다. Seo와 Lee(2006), Seo 등(2008)은 Alavian 방식을 이용하여 텐서형 분산계수를 포함한 지배방정식의 해를 구하는 2차원 유한요소모형을 개발하였다. 그들은 수로 사행에 의해 나타나는 분산계수의 비균질성을 고려하였으며, 개발된 모형의 결과를 실험실 사행수로에서 수행된 추적자 실험 결과와 비교하여 2차원 유속장에서 계산된 텐서형 분산계수의 유효성을 검증하였다.

수치모형에서 오염물질의 분산 정도를 나타내는 매개변수로서 분산계수가 사용되며, 사용자가 지형 및 수리조건에 따라 적절한 분산계수 값을 입력하여 모의를 수행한다. 수치모의에 의한 농도 분포 결과는 분산계수의 영향을 크게 받을 뿐만 아니라, 수치분산 및 수치진동에 의한 오차에 따른 퍼짐효과도 포함하고 있다. 이에 대부분 기존 연구자들은 해의 정확도를 높이기 위한 수치기법의 개발 및 분산계수 산정 방법에만 치중하고 있어, 실제 물리 현상에 대한 이해를 간과하고 있다는 단점을 지닌다(Jeon 등, 2007). 또한 2차원 이송-분산 방정식을 지배방정식으로 하는 기존 수치모형들은 오염물질의 이송 작용을 수심방향으로 평균된 2차원 유속장을 바탕으로 묘사하기 때문에, 사행하천에서 발생하는 2차류와 같은 3차원적인 유속 구조가 오염물질의 혼합과정에 미치는 영향은 반영하지 못한다는 한계를 갖고 있다. 이러한 3차원적 유속구조에 의한 효과는 분산계수로 표현하여야 하는데, 이는 전단류 이송과 난류 확산이 균형을 유지한다는 Taylor(1954)의 가정에 기반을 두고 있기 때문에 Taylor구간에만 적용할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 기존 수치모형의 단점을 극복하고, 하천에서의 3차원적 흐름구조를 정확하게 표현할 수 있고 오염물질의 이송 및 분산과정을 보다 가시적으로 설명할 수 있는 물리적 모형의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 Taylor(1954)의 전단류 분산 이론을 바탕으로 개수로 및 하천에 순간적으로 유입된 보존성 오염물질의 2차원 이송 및 분산과정을 분산계수 입력 및 복잡한 수치적분 과정을 거치지 않고 설명할 수 있는 물리적 혼합모형인 시간분리 혼합모형(Time-split Mixing Model; TMM)을 개발하였다. 본 연구에서

Table 1. 2D advection-dispersion analysis methods

	Previous study	This study
Model	Taylor's 2D advection-dispersion model (Mathematical model)	Time-split mixing model (Arithmetic model)
Advection and pollutant separation by shear flow	Use partial differential equation for advection $\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = 0$	Represent separation of pollutant due to vertical profiles of shear flows in the x, y directions by simple displacements $c_{j+1}(z) = u_j(z)\Delta t \cdot c_j(z)$
Diffusion and dispersion	Use dispersion equation according to the Fick's law $\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right)$	Represent vertical diffusion by complete mixing in z direction $\bar{c} = \frac{1}{h} \int c(z) dz$
Total mixing effects	Use advection-dispersion equation $\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right)$	Describe advection-dispersion process by combining the shear flow separation in the longitudinal direction and turbulent diffusion in the vertical direction
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Solve PDE without interpretation of physical processes about advection and turbulent diffusion • Represents dispersion effects by vertical velocity distributions with dispersion coefficients • Can be applied only to Taylor period 	<ul style="list-style-type: none"> • Model the physical processes of shear flow advection and turbulent diffusion to induce the combining effect • Use the arithmetic method to solve separation effects by velocity deviations in vertical direction. Thus, dispersion coefficients are not needed to be inputted into the model. • Can be applied to both initial and Taylor periods

개발한 모형은 혼합현상에 대한 개념적 모형으로부터 유도된 수학적 모형(편미분 방정식 및 초기 경계조건)을 이용하지 않고, 물리적 이송 및 확산 현상을 산술적 연산과정으로 표현하는 산술 연산모형(arithmetic operation model)이라고 할 수 있다(Table 1). 본 모형에서는 연산자 분리 방법(operator splitting method)과 유사하게 오염물질의 퍼짐 현상을 종방향 혼합과 횡방향 혼합으로 분리하였으며, 각 방향의 혼합과정을 다시 전단류에 의한 이송과정과 난류에 의한 확산과정으로 분리하여 순차적으로 계산하는 순차혼합개념(sequential mixing concept)을 적용하여 연산을 수행하도록 모형을 축소하였다(Seo와 Son, 2006). Seo와 Son(2006)의 순차혼합모형은 1차원 모형으로서 오염물질의 연직, 하폭방향 혼합이 완료된 상황을 가정하여 종 방향 유속의 하폭방향 편차에 의한 분산만을 고려했다. 반면 본 연구에서 개발한 모형은 오염물질의 연직혼합만이 완료된 상황을 가정한 2차원 모형으로서 종, 횡 방향 유속의 연직분포를 이용했다. 그리고 종 방향 유속의 연직분포에 의한 흐름방향 분산, 횡 방향 유속의 연직분포에 의한 하폭방향 분산을 모두 고려했다. 이에 따라 본 모형은 수로에 유입된 오염물질의 퍼짐 현상을 유속의 연직방향편차에 의해 발생하는 오염원의 분리(separation)와 이후 발생하는 연직확산의 결합 효과로 설명하고, 오염물질의 전단 이송 및 수심방향 완전혼합(평균) 과정의 반복을 통해 시간에 따른 2차원 농도분포 변화를 계산하도록 개발되었다. 개발된 모형을 검증하기 위해, 기존의 2차원 이송-분산 모형의 해석해를 이용하여 동일한 조건에서 모의를 수행하고, 두 모형의 결과에 대한 비교 분석을 수행하였다. 또한 개발된 모형으로부터

얻은 2차원 농도분포 자료에 2차원 추적법(Baek 등, 2006)을 적용하여 다양한 수리 조건에서의 종분산계수 및 횡분산계수를 산정하고, 혼합시간 등에 대한 분산계수의 민감도 분석을 수행하였다.

2. 이론적 연구

2.1 전단류에 의한 2차원 분산 해석

유체의 흐름에서 보존성 오염원의 전단류에 의한 2차원 분산 해석은 난류에서의 3차원 이송-확산 방정식 유도로부터 시작된다. 보존성 물질이 유체 속으로 유입되는 경우, Fick의 제 1법칙에 따라 분자 확산에 의한 농도 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \tag{1}$$

여기서 c 는 공간 및 시간에 대한 함수로서 난류흐름에서의 순간적인 농도 값을 나타내며, D_m 은 분자확산계수, t 는 시간이고, i 는 방향 성분을 의미한다. 분자확산의 영향을 무시하고, 이송의 영향만을 고려한 농도변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (c u_i) = 0 \tag{2}$$

여기서 u_i 는 난류흐름에서의 방향성분에 대한 순간적인 유속을 의미한다. Eq. (1)과 Eq. (2)를 결합하고, 난류요동을 제거하기

위하여 Reynolds평균 법칙에 따라 시간에 대한 평균값을 취한다. 또한, 비례 상수로 적용되는 각 방향에 대한 난류확산계수 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 를 이용하여 아래와 같이 비압축성 난류 흐름에서 보존성 물질의 3차원 이송-확산 방정식을 유도할 수 있다(Fischer 등, 1979).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(uC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(vC_i)}{\partial y} + \frac{\partial(wC_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \quad (3)$$

여기서, C_i 는 난류요동을 제거하기 위해 시간 평균된 지점별 농도이며, u, v, w 는 x, y, z 방향으로의 시간평균유속을 나타낸다.

폭이 넓고 수심이 상대적으로 얇은 자연하천에서의 오염물질 혼합과정을 해석하는 경우, 위의 3차원 이송-확산 방정식을 수심방향으로 평균한 2차원 이송-분산 방정식을 지배방정식으로 채택한다. 시간 평균된 유속 u, v, w 와 농도 C_i 를 수심평균 값 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, C$ 와 수심방향에 따른 편차 u', v', w', C' 으로 분리하여 Eq. (3)에 적용한 후, 수심 h 를 따라 평균하면 2차원 이송-분산 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}C) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}C) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{h} \int_0^h u'C' dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{h} \int_0^h v'C' dz \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Taylor(1954)는 Eq. (4)의 우변의 3, 4번째 항인 유속편차와 농도편차의 곱에 대한 수심 평균항을 전단류 분산으로 해석하였으며, Eq. (5)와 같이 가정하였다(Fischer 등, 1979).

$$\frac{1}{h} \int_0^h u'C' dz = -D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (5a)$$

$$\frac{1}{h} \int_0^h v'C' dz = -D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (5b)$$

여기서, D_{xx} 는 종분산계수 D_L 로, D_{yy} 는 횡분산계수 D_T 로 표기할 수 있으며, D_{xy}, D_{yx} 는 고정 좌표계에서 2차원 이송-분산 방정식을 구성할 경우에는 무시된다. 또한, 실제 하천에 유입된 오염물질의 퍼짐 현상은 난류에 의한 확산보다 전단류에 의한 분산의 영향을 지배적으로 받기 때문에, 난류 확산계수를 소거하여 2차원 이송-분산 방정식을 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}C) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}C) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_T \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Fischer 등(1979)은 오염물질 유입 이후 초기구간에서는 오염물질의 이동이 Taylor의 가정을 따르지 않기 때문에 농도분포는 비대칭적으로 나타나며 농도분포곡선의 분산(variance)도 시간에 대해 선형적으로 증가하지 않는다고 밝힌 바 있다. 따라서 이 구간에서는 Taylor가정에 근거하여 유도한 Eq. (6)을 적용해서는 안 되는 것으로 제안하고 있다. 본 연구에서는 Chatwin(1970)이 제안한 공식을 이용하여 Taylor구간을 아래와 같이 산정하였다.

$$0.4 \frac{H}{0.067u^*} < t_2 < 0.4 \frac{W^2}{0.15Hu^*} \quad (7)$$

여기서 W 는 수로폭을 의미한다.

2.2 유속의 연직분포식

자연 하천에서의 분산 현상은 전술한 바와 같이 유속의 연직방향 불규칙성이 지배적인 영향을 미치게 된다. 특히, 사행하는 하천의 유속분포는 2차류(secondary current)로 인해 하폭 방향 및 연직방향을 따라 복잡한 유속구조를 나타낸다. 개수로에서 나타나는 흐름 방향 유속의 연직분포에 대한 추정식은 Prandtl(1952)의 혼합거리 이론을 바탕으로 여러 연구자들에 의해 제안되어 있다. Rozovskii (1957)는 흐름방향 유속의 연직분포를 로그식을 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$u(z) = \bar{u} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_h} \left(1 + \ln \frac{z}{h} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, κ 는 von Karman 상수, C_h 는 Chezy 계수, g 는 중력가속도, z 는 바닥으로부터의 거리를 의미한다. 한편 Odgaard(1986)는 멱승(power law) 형태를 사용하여 연직방향 거리에 따른 흐름방향 유속분포식을 제안하였다.

$$u(z) = \bar{u} \frac{m+1}{m} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/m} \quad (9a)$$

$$m = \frac{\kappa \bar{u}}{u^*} = \frac{\kappa C_h}{\sqrt{g}} \quad (9b)$$

여기서, u^* 는 마찰유속을 의미한다.

하천의 만곡부에서는 주흐름 방향에 수직인 단면에 2차류가 발생한다. 2차류는 주흐름 구조를 변화시키거나 만곡의 외측으로 주흐름의 최대유속선을 이동시키며, 오염물질의 횡방향 혼합을 더욱 활발하게 유도한다. 흐름 해석에 있어 2차류의 크기는 난류 점성형의 최대 30%까지 발생하며(Seo와 Song, 2010), 이는 오염

물질의 분산에 큰 영향을 미친다. 특히 하천에 유입된 오염물질이 하폭방향으로 완전히 혼합되기 전까지, 횡방향 분산과정에 있어 2차류의 영향은 매우 크기 때문에 횡방향 유속의 연직분포를 규명하기 위한 다수의 연구가 수행되었다. Rozovski(1957)는 u 유속의 연직 로그분포식과 전단응력의 연직분포를 이용하여 완전발달흐름 (fully developed flow) 상태의 횡방향유속의 연직분포식을 다음과 같이 제안하였다.

$$v_f(z) = \bar{u} \frac{1}{\kappa^2 r_c} \left[\int \frac{2 \ln(z/h)}{(z/h)-1} dz - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_h} \int \frac{\ln^2(z/h)}{(z/h)-1} dz \right] \quad (10)$$

여기서 r_c 는 수로의 사행반경을 의미한다.

de Vriend(1977)는 수심 평균한 흐름장 및 하상 전단력을 바탕으로 개발한 2차원 천수흐름 모형에서 주흐름의 영향을 받는 2차류의 유속분포식을 제안하였다. 이는 복잡한 하천 지형에 대한 적용성이 우수하며, 불규칙한 하상의 수로에서 관측된 유속결과와 잘 일치하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(de Vriend, 1977).

$$v_f(z) = -\frac{\bar{u}}{\kappa^2 r_c} h f_s \left(\frac{z}{h} \right) \quad (11)$$

$$f_s \left(\frac{z}{h} \right) = \left[\int \frac{2 \ln \frac{z}{h}}{\frac{z}{h}-1} dz + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_h} \int \frac{\ln^2 \frac{z}{h}}{\frac{z}{h}-1} dz \right] - 2 \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_h} \right) \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_h} \left(1 + \ln \frac{z}{h} \right) \right] \quad (12)$$

Odgaard(1986)는 연직단면에서 관측되는 2차류의 움직임을 원운동으로 가정하고, 연직방향을 따라 포물선분포를 갖는 난류점성계수를 이용하여 v 유속의 연직분포를 선형식으로 제안하였다.

이는 기존 제안식들과 달리 사행반경의 변동으로 인한 횡방향 순이송을 고려하여 v 유속의 수심평균 값 \bar{v} 를 포함하고 있다. 또한 2차류의 유속구조를 추정하는 데 간단한 해를 제공하지만, 바닥의 마찰 또는 난류에 의해 복잡하게 나타나는 v 유속의 연직변화를 충분히 반영하지 못한다는 단점을 지닌다(Seo와 Jung, 2010).

$$v_f(z) = \bar{v} + 2v_s \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

$$v_s = \bar{u} \frac{2m+1}{2\kappa^2 m} \frac{h}{r_c} \quad (14)$$

3. 모형의 개발

3.1 모형의 개념

본 연구에서는 전단류 분산이 이송과 난류에 의한 확산의 결합에 의해 발생한다는 Taylor(1954)의 가정을 바탕으로 개념적 모형을 구성하였다. 또한 이송 과정과 확산 과정이 순차적으로 발생한다는 가정을 도입하여 시간분리 혼합모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 개념적 모형의 요체는 다음과 같다. 3차원 수로에 순간적으로 유입된 연직 선 오염원은 종방향 유속에 의해 흐름방향을 따라 이동하고, 종방향 및 횡방향 유속의 연직편차에 의해 오염원이 종방향 및 횡방향으로 분리되는 현상이 일어난다. 또한, 유속의 연직편차에 의해 분리된 오염원은 난류에 의한 연직방향 확산으로 수심방향을 따라 완전히 혼합된다. 또한 본 모형에서는 혼합의 개념을 3차원 공간에 유입된 오염물질이 종방향으로 퍼지는 현상과 횡방향으로 퍼지는 현상으로 나누어 설명하였으며, 각 방향으로 퍼지는 현상은 상술한 비와 같이 전단류 이송과 난류 확산의 결합효과로 설명하였다(Fig. 1).

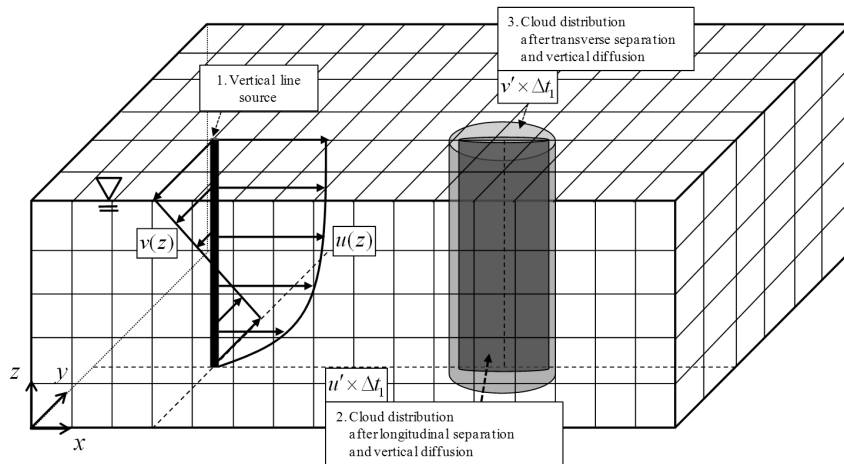


Fig. 1. Sequential mixing process in straight channel according to the TMM

본 연구에서는 혼합시간 (t_m)을 전단류에 의한 이송시간(Δt_1)과 난류에 의한 연직방향 확산시간(Δt_2)의 합으로 정의하였으며, 1회 의 혼합시간 동안 종방향 혼합 및 횡방향 혼합이 동시에 발생한다고 가정하였다. 본 연구에서는 연직방향 확산이 순간적으로 완료된다는 가정($\Delta t_2 = \Delta t_v \approx 0$)을 적용하여 혼합시간을 전단류에 의한 이송과정이 진행되는 시간으로 정의하였다. 혼합시간의 크기는 수로에 주입된 오염물질이 난류에 의해 연직방향으로 완전하게 혼합되는 데 소요되는 시간을 고려하여 계산하였다. 3차원 수로에 주입된 오염물질이 연직방향으로 혼합되는 데 소요되는 시간은 다음과 같이 나타낸다(Fischer 등, 1979).

$$t_m = \alpha \frac{H^2}{\epsilon_z} \quad (15)$$

여기서 연직방향을 따라 나타나는 농도편차의 크기가 수심 평균 농도와 비교하여 10 % 미만 크기를 나타내도록 하기 위해 비례 상수 α 를 0.1로 정한다(Fischer 등, 1979). Eq. (15)에 수심 평균한 연직방향 확산 계수 $\bar{\epsilon}_z$ 를 대입하여, 아래와 같이 혼합시간을 결정하였다.

$$\bar{\epsilon}_z = \frac{1}{H} \int_0^H \kappa w z \left(1 - \frac{z}{H}\right) dz = 0.067 H u^* \quad (16)$$

$$t_m = 0.1 \frac{H}{0.067 u^*} = 1.493 \frac{H}{u^*} \text{ (sec)} \quad (17)$$

3.2 3차원 개수로에서의 산술적 모형

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 3차원 직선 수로를 종방향 길이 Δx , 횡방향 길이 Δy , 연직방향 길이 Δz 의 격자들로 구성하고, 여기에 시간분리 혼합모형을 적용하였다. 본 모형에서는 오염물질의 이송 및 퍼짐 현상이 종, 횡방향 전단이송과 연직확산의 결합에 의해 나타난다. 모의영역 전체를 지배하는 유속장 부여 및 초기 농도 조건 설계 방법은 다음과 같다. 우선 종방향 유속 및 횡방향 유속의 다양한 연직분포에 근거하여, 연직방향을 따라 각 절점에 서로 다른 크기의 유속을 할당한다. 순간 주입된 선오염원의 초기농도는 C_0 로 주어지고, 나머지 영역의 초기농도는 모두 0으로 주어진다. 첫 번째 단계에서는 t_m 동안 종방향 및 횡방향으로 전단류 이송이 발생하는데, 이에 따라 초기 농도값이 주어진 절점에 할당된 유속과 혼합시간의 곱으로 계산된 거리만큼 이동한다. 두 번째 단계에서는 종방향 및 횡방향 이송이 완료된 후, 연직확산에 의해 오염물질이 수심방향으로 완전히 혼합되므로 연직방향의 모든 절점에 동일한 평균값이 할당되어 오염원이 종방향 및 횡방향으로 퍼지는 결과를 도출한다. 이후, 다음 혼합시간 동안에는 재할당된 농도분포를

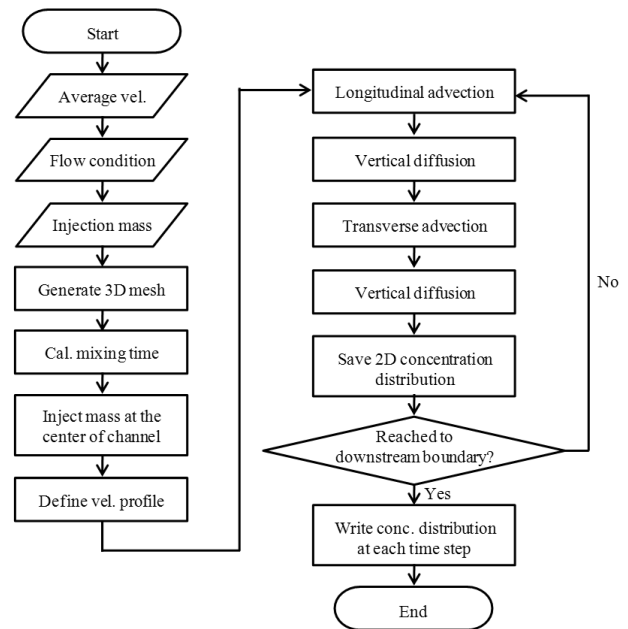


Fig. 2. Flowchart of the TMM

가지는 절점들이 다시 전단 이송되고, 연직방향 확산에 의해 평균값이 할당되면서 오염원의 혼합현상을 재현한다. 이를 통해 매 혼합시간마다 수심평균 농도분포 $C - (x, y)$ 를 얻을 수 있게 된다. 시간분리 혼합모형의 산술적 계산과정은 다음과 같으며 수치모형 흐름도를 Fig. 2에 도시하였다.

3.2.1 종방향 이송 및 분산

- (1) 연직방향을 따라 유속편차를 갖는 3차원 개수로의 전단흐름에 연직방향 선오염원 형태로 Fig. 3a와 같이 보존성 오염물질이 순간적으로 주입된다. 따라서 Fig. 3a-1과 같이 농도곡선이 Dirac delta함수와 같이 나타난다. 여기서 x 는 흐름방향, y 는 하폭방향, 그리고 z 는 연직방향을 의미한다.
- (2) 특정 y_1 지점에서 오염원은 연직방향 편차를 갖는 종방향유속에 의해 이송시간 Δt_1 동안 흐름 방향을 따라 이동한다(Fig. 3b).

$$C(x + u(z) \cdot \Delta t_1, y_1, z) = C(x, y_1, z) \quad (18)$$

- (3) 종방향 이송이 완료된 후, 연직방향확산이 순간적으로 발생한다. 본 모형에서는 각 x 좌표에 해당하는 수심평균 농도 값을 연직방향 절점에 균일하게 할당하는 것으로 수심 농도경사를 제거시킨다(Fig. 3c).

$$C(x, y_1) = \frac{1}{h} \sum_{z=0}^h C(x, y_1, z) \quad (19)$$

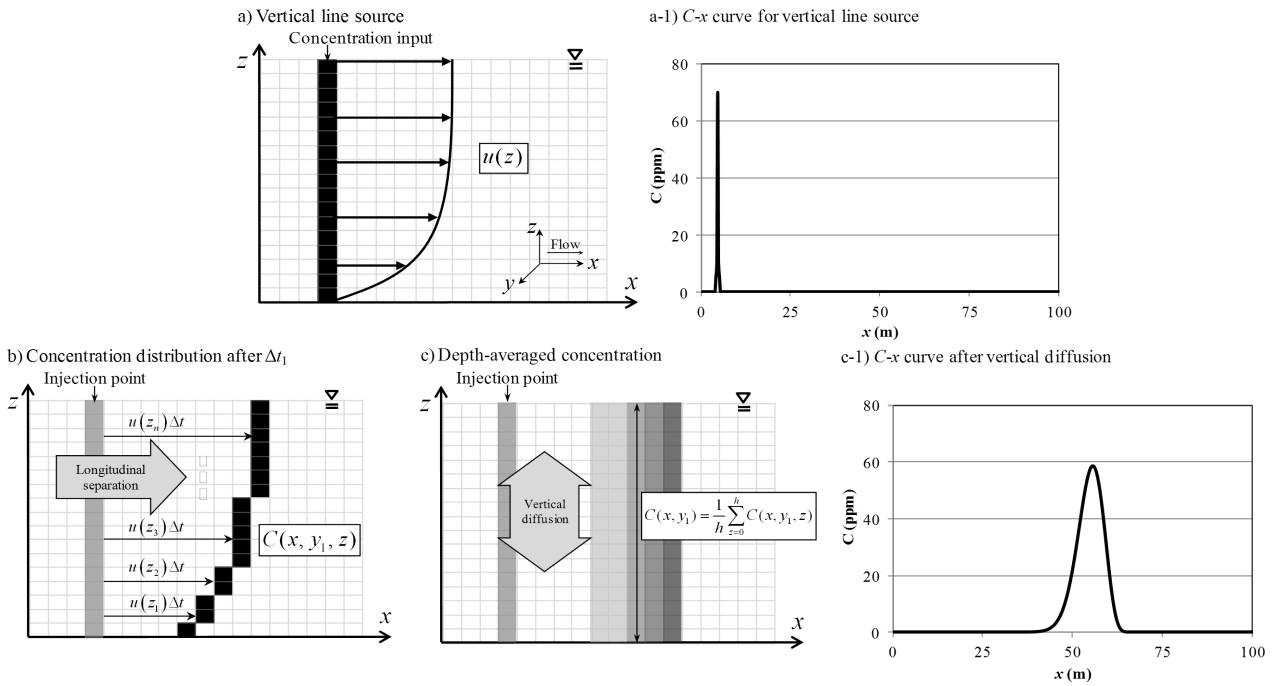


Fig. 3. Longitudinal advection by shear flow and vertical diffusion

(4) 종방향 이송 및 연직방향 확산의 결과, 선 형태로 주입된 오염원은 종방향유속의 연직편차만큼 종방향으로 퍼지게 되어 넓은 띠를 형성하게 된다. 따라서 Fig. 3a-1의 농고곡선이 Fig. 3c-1과 같이 변화하며 Taylor구간 내에서 비대칭적 분포를 갖게 된다.

3.2.2 횡방향 이송 및 분산

- (1) 종방향 혼합 계산이 완료된 후, 흐름방향에 수직인 연직단면을 기준으로 횡방향 혼합 계산을 진행한다(Fig. 4a).
- (2) 흐름방향에 수직인 연직단면을 살펴볼 때, 연직방향으로 균일한 농도분포를 갖는 선오염원은 연직방향 편차를 갖는 횡방향유속에 의해 이송시간 Δt_1 동안 하폭방향으로 이동한다(Fig. 4b).

$$C(x_1, y + v(z) \cdot \Delta t_1, z) = C(x_1, y, z) \quad (20)$$

- (3) 횡방향 이송이 완료된 후, 연직방향확산이 순간적으로 발생한다. 본 모형에서는 각 y좌표에 해당되는 수심평균 농도 값을 연직방향 절집에 균일하게 할당하는 것으로 수심 농도경사를 제거시킨다(Fig. 4c).

$$C(x_1, y) = \frac{1}{h} \sum_{z=0}^h C(x_1, y, z) \quad (21)$$

- (4) 횡방향 이송 및 연직방향 확산의 결과, 흐름방향에 수직인 단

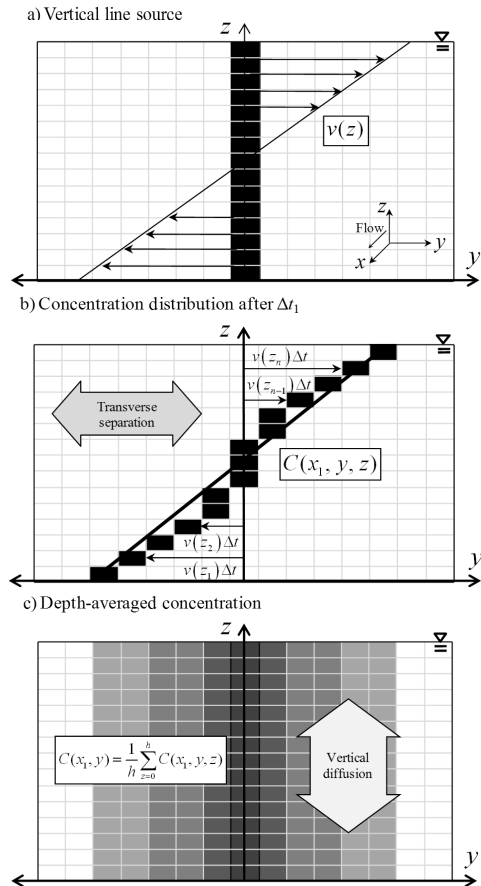


Fig. 4. Transverse advection by shear flow and vertical diffusion

면에서 선 형태를 나타내었던 오염원은 전단류에 의해 분산되어 하폭방향을 따라 넓은 띠가 형성된다.

3.2.3 종방향 및 횡방향 분산의 결합

- (1) 1회 혼합시간 동안 진행된 종방향 분산 및 횡방향 분산의 결합은 수심평균 과정을 통해 연직방향 농도경사가 모두 제거 되므로, 결과적으로 시간에 따른 2차원 농도분포를 제공한다. 그 결과, 초기에 주입된 오염원의 중심은 흐름방향으로 이송되며, 오염물질들이 종방향 및 횡방향으로 넓게 퍼져 오염운을 형성한다(Fig. 1).
- (2) 시간분리 혼합모형에서는 모의 횡수를 반복함에 따라 오염원이 더 넓게 퍼지게 되고, 궁극적으로 개수로에 주입된 선오염원의 이송 및 분산 과정에 대한 가시적인 해를 제공한다.

4. 수치 모의

4.1 모의영역 및 모의조건

본 연구에서는 시간분리 혼합모형을 적용하여 오염물질의 2차원 혼합과정을 모의하기 위해, 모의 대상영역을 설계하고, 다양한 수리 조건의 모의 Case를 구성하였다. 모의 대상영역은 하폭 4 m, 길이 2000 m 의 가상의 3차원 직선하천으로 가정하였다. 가상 수로의 양안에 위치한 벽면 경계에서는 흐름 및 농도 값이 반사되며, 하류단은 완전개방 경계조건(open boundary condition)으로 설계 하였다. 또한, 수로 바닥에서의 흐름은 무할 조건(no slip condition) 을 따르며, 바닥의 거친 정도를 반영하는 데는 Manning조도계수 n 값을 이용하였다. 가상수로에서의 유속분포는 하폭방향 및 흐름방향을 따라 균일하며, 연직방향으로만 변화한다고 가정하였으며, 3차원 격자에 u 유속은 Rozovskii(1957)의 로그분포식을, v 유속은 Odgaard(1986)의 선형식을 적용하였다. 본 모형에서 선택한 로그 분포식은 실제 하천에서 종방향유속의 연직분포에 대한 가장 일반적인 형태이기 때문에 선택하였으며, 횡방향유속 분포에 선형식을 사용한 이유는 다른 식에 비해 간단한 수식으로 이차류의 표현이 가능하기 때문에 시간분리 혼합모형의 적용에 용이하기 때문이다. Odgaard의 선형식은 직선수로에서 횡방향 유속의 수심평균은 0 이며, 사행반경 r_c 값이 존재하지 않아 v_s 를 정의하는 데 어려움이 따르므로, 본 연구에서는 직선수로에서의 수표면 횡방향 유속은 종방향 평균 유속의 5% 크기로 형성된다는 Thome 등(1983)의 현장실측 결과를 적용하여, 다음과 같이 횡방향 유속의 연직편차를 정의하였다.

$$v'(z) = v(z) - \bar{v} = 2v_s \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) = 0.1\bar{u} \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) \quad (22)$$

Table 2. Dispersion coefficients using the TMM

Case	W/H	\bar{u}/u^*	t_m (sec)	D_L/Hu^*	D_T/Hu^*
301	13.3	10.2	2.0	3.96	0.09
302	13.3	10.2	3.0	6.79	0.12
303	13.3	10.2	4.0	9.78	0.14
304	13.3	10.2	5.0	9.83	0.17
305	13.3	10.2	6.0	10.95	0.26
601	6.6	11.2	3.0	1.82	0.07
602	6.6	11.2	5.0	4.25	0.12
603	6.6	11.2	7.0	9.72	0.23
604	6.6	11.2	9.0	17.17	0.31
605	6.6	11.2	11.0	18.11	0.41

본 수치모의에서는 동일한 크기의 수로 폭에 평균 수심 및 평균 유속을 달리 하였으며, 조건의 변화에 따라 평균유속 대 마찰유속 비, 하폭 대 수심 비, 혼합시간 등이 다르게 나타났다. 또한 혼합시간 t_m 의 크기를 임의로 다르게 부여하여 모의조건을 수립하였다(Table 2).

4.2 모의 기능

수로에 주입된 오염물질이 전단류 및 난류에 의해 일정 시간이 흐른 뒤 오염운은 수로 벽면에 도달하여 수로 벽면 근처에서 반사에 의한 농도의 증첩 현상이 발생한다. 수로 벽면에 의한 반사 효과는 하폭이 충분히 넓지 않은 수로에서 횡방향 분산 정도를 결정하는 중요한 요소로서 2차원 이송 분산 과정을 해석하는 데 반드시 고려되어야 한다. 본 연구에서는 수로 경계로부터 수로 폭 길이만큼 떨어진 외부의 지점에 가상의 오염원을 입력하여, 벽면 반사에 의한 횡방향 농도분포 왜곡현상을 반영할 수 있도록 모형을 구성하였다(Fischer 등, 1979). 벽면의 반사효과를 고려하지 않은 경우와 반사 효과를 고려한 경우에 나타나는 횡방향 농도 분포를 비교한 결과, 모의 초기에는 반사효과에 의한 농도분포 왜곡이 수로 벽면 경계 근처에서 발생하지만, 시간이 경과하면 벽면 경계 근처뿐만 아니라 수로 중심선에서의 농도 값에까지 영향을 미치고 있음을 확인하였다(Fig. 6). 개발된 모형이 수로 벽면에 의한 반사 효과를 반영하는 기능은 질량 보존 법칙에 기반한 모의 수행을 가능하게 한다. 본 연구에서 사용하는 질량 M 에 의한 초기 농도 C_0 는 다음과 같이 산정하였다.

$$C_0 = C(x, y, 0) = M_0 \delta(x) \delta(y) = M_0 / \Delta x / \Delta y \quad (23)$$

본 연구에서는 식(24)를 이용하여 매 혼합시간 마다 전체 모의영역에 대한 농도자료를 공간 적분하여 모형의 질량 보존성을 검증하였다.

$$M = \iint C(x, y) dx dy \quad (24)$$

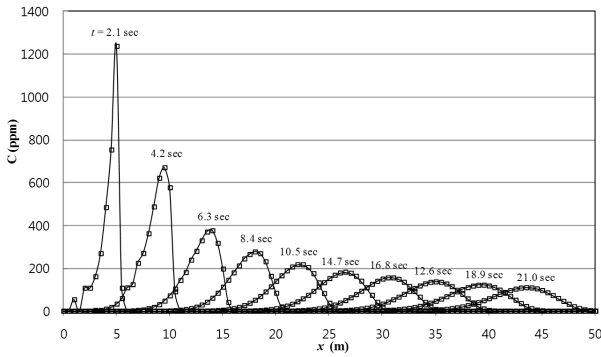


Fig. 5. Change of the C-x curve with time (Case 301)

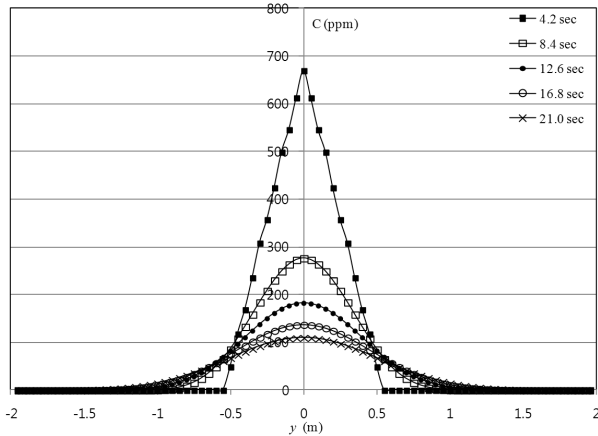


Fig. 6. Change of the C-y curve with time (Case 301)

5. 모의 결과

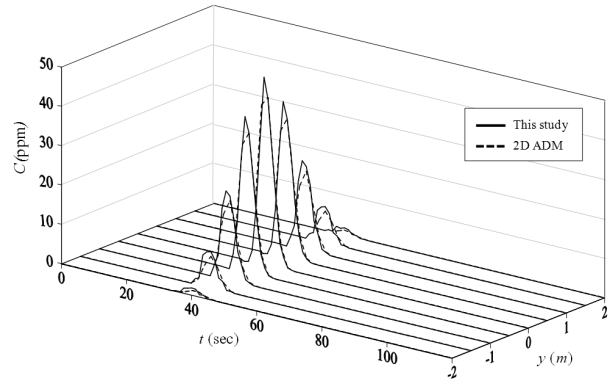
5.1 2차원 이송-분산 모형과의 비교

2차원 이송-분산 모형(2D advection-dispersion model: 2D ADM)은 개수로 및 자연하천에서 오염물질의 이동 및 혼합을 2차원적으로 해석하는 모형이며, 지배방정식은 Eq. (6)을 사용한다. 균일한(uniform) 2차원 흐름이 있는 직선수로 중앙에 질량 M의 점오염원이 순간적으로 주입되었을 때 이 모형의 해석해는 Eq. (25)와 같다(Fischer 등, 1979). 본 연구에서는 벽면반사효과를 나타내기 위해 Eq. (25)에서 무한대의 가상 오염원을 주입하는 대신 5개의 가상 오염원을 주입했다.

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi t \sqrt{D_L D_T}} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{4D_L t}\right) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(y+nW)^2}{4D_T t}\right) \right] \quad (25)$$

시간분리 혼합모형 모의 결과의 정확성을 검증하기 위해, 2차원 이송-분산 모형에 의한 해석해와 비교 분석하였다. Fig. 7은 Case

a) Concentration variation at x = 80 m



b) Concentration variation at x = 200 m

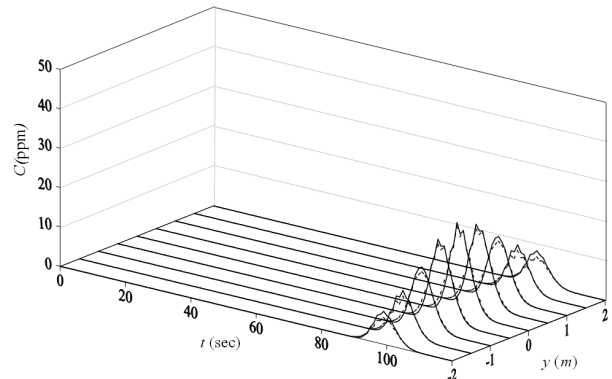


Fig. 7. Comparison of C-t curves by 2D ADM and TMM (Case 301)

301의 x = 80 m 및 x = 200 m 지점에서 두 모형에 의해 측정된 C-t 곡선을 다양한 y 지점에 대해 도시한 것이다. 그 결과, 두 모형의 모의 결과가 대체적으로 일치하나, 각 지점의 침투 농도 값은 두 모형에서 약간의 차이를 나타내고 있다. x = 80 m 지점에서 농도최대값은 수로의 중심에서 발생되며 시간분리 혼합모형의 경우 55.9 ppm, 2차원 이송-분산 모형은 52.2 ppm으로 나타났다. 그리고 x = 200 m 지점에서는 시간분리 혼합모형의 경우 22.4 ppm, 2차원 이송-분산 모형은 23.3 ppm으로 계산되어 시간분리 혼합모형의 침투 농도 값이 4% ~ 7% 더 크게 나타나고 있다.

두 모형에 의한 2차원 농도분포를 비교하기 위하여, C-(x, y) contour를 도시하여 분석을 수행하였다(Fig. 8). 2차원 이송-분산 모형은 모의 초기 구간부터 오염원의 농도 분포가 x축, y축을 기준으로 대칭적인 형태를 띠고 있는 반면, 시간분리 혼합모형에 의한 결과는 하류로 꼬리를 형성하는 농도분포를 보이고 있다. 이러한 현상을 자세히 알아보기 위해 Fig. 8의 수로 중심선을 따라 C-x 곡선을 Fig. 9에 도시하여 두 모의결과를 비교했다. 그 결과 두 모형의 농도최대값은 대체로 유사한 것으로 나타났으나 초기 구간(t = 10 sec)에서 시간분리 혼합모형의 농도곡선 형태가 비대칭적으로 나타남을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Taylor의 가정이

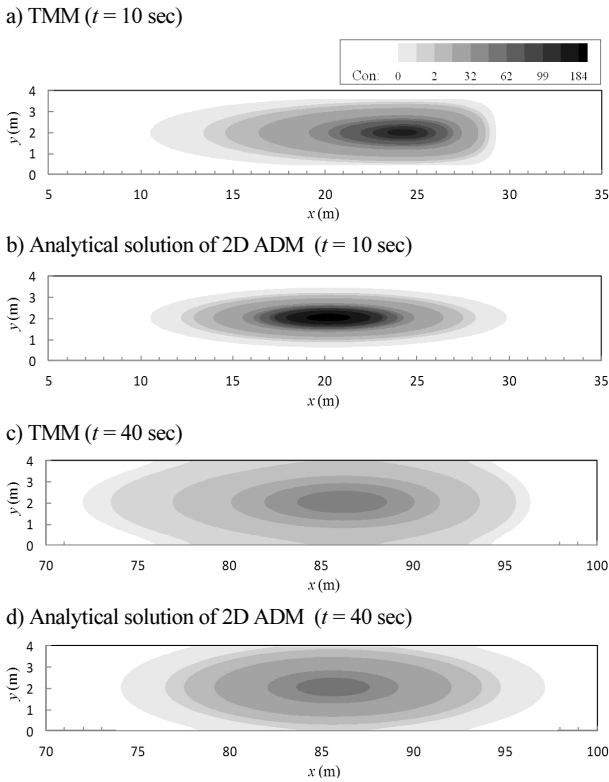


Fig. 8. Comparison of 2D concentration distributions (Case 301)

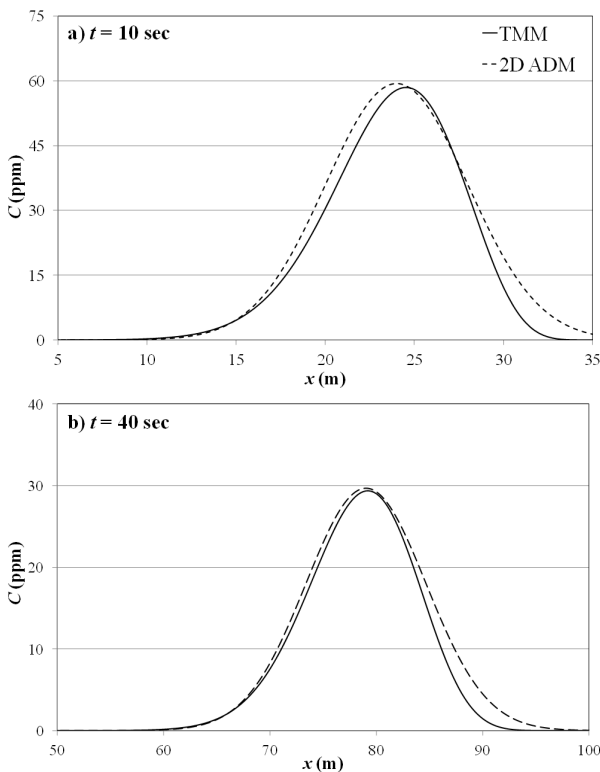


Fig. 9. Comparison of $C-x$ curves by 2D ADM and TMM (Case 301)

성립하지 않는 초기구간에서는 기존의 2D 이송-분산 모형이 부정확한 결과를 산출하고 있음을 보여주는 것으로써, 이 구간에서는 본 연구에서 개발한 시간분리 혼합모형이 보다 적합한 결과를 제시하는 것으로 판단된다. $t = 40$ sec 이후, 시간분리 혼합모형의 농도곡선이 점차 대칭적인 농도분포를 보이며, 2차원 이송-분산 모형의 결과와 일치해 감을 확인할 수 있다. 이를 통해, 본 연구에서는 개발된 모형이 3차원 유속분포를 기반으로 오염 물질의 물리적 혼합 과정을 가시적으로 재현할 수 있으며, 나아가서 초기구간 및 Taylor구간 모두 기존의 2차원 수치 모형(2D ADM)보다 정확한 해를 도출하고 있음을 확인할 수 있었다.

5.2 분산계수 산정

본 연구에서는 다양한 수리 조건에서 시간분리 혼합모형의 수치 모의를 수행하여 2차원 농도자료를 취득하고, 이 자료들에 분산계수 산정법 중의 하나인 2차원 추적법(two-dimensional routing procedure; Baek 등, 2006)을 적용하여 수리조건에 따른 분산계수를 산정하였다. 모멘트법의 단점을 극복하기 위해 개발된 2차원 추적법은 상류부에서 관측된 농도 자료를 Eq. (6)의 해석해에 기반한 추적식에 입력하여 하류부의 농도를 계산하고, 계산된 농도와 실측된 하류부 농도를 비교하는 시행착오 과정을 통해 최적 분산계수를 산정하는 방법이다. 동결 가정(frozen assumption; Fischer 등, 1979)을 바탕으로 시간에 따른 농도분포 $C-t$ 곡선을 이용하여 분산계수를 산정하는 시간적 추적식은 다음과 같다(Baek 등, 2006).

$$C(x_2, y, t) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C(x, \phi, \tau) U}{4\pi(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)\sqrt{D_L D_T}} \exp\left(-\frac{U^2(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau)^2}{4D_L(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right) \exp\left(-\frac{(y - \phi)^2}{4D_T(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right) d\tau d\phi \quad (26)$$

여기서 \bar{t}_1, \bar{t}_2 는 각각 오염물이 상류 및 하류지점을 지나는 평균시간을 의미한다. 2차원 추적법은 비정상상태의 오염장에서 취득된 농도자료를 가공 없이 분산계수를 산정할 수 있으며, 비선형 다중 회귀법 중 하나인 Gauss-Newton법(Bates와 Watts, 1988)을 이용하여 횡분산계수 및 종분산계수를 동시에 취득할 수 있다는 장점을 지닌다.

본 연구에서는 시간분리 혼합모형이 재현하는 분산 정도에 혼합시간이 미치는 영향을 확인하기 위해, 동일한 평균유속 및 수심, 조도계수를 적용하고, 혼합시간을 다양하게 변화시켜 모의를 수행하였다. 동일한 조건에 대해 혼합시간의 크기를 서로 다르게 적용한 모의 결과에서 분산계수의 변화는 매우 뚜렷하게 나타나고 있으며, 혼합시간이 증가할수록 종분산계수 및 횡분산계수는 선형적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 10). 시간분리 혼합모형의

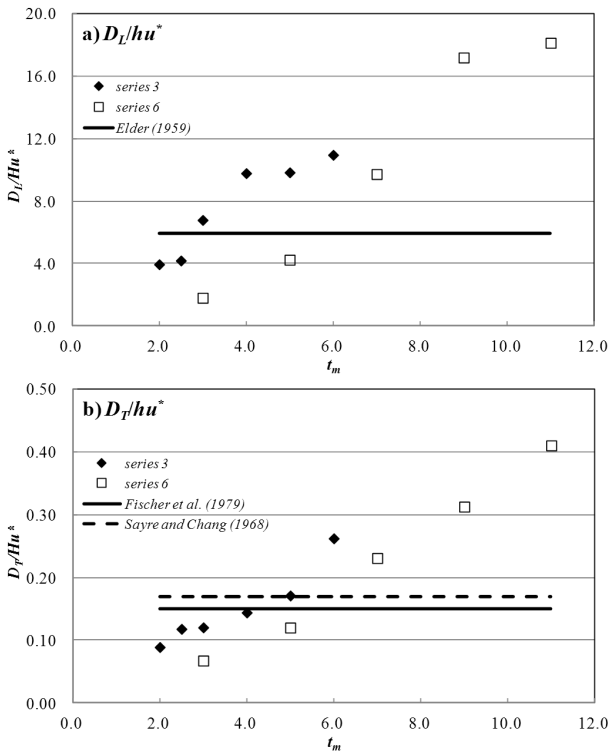


Fig. 10. Variation of dispersion coefficients according to mixing time

구성에 있어서, 혼합시간이 증가한다는 것은 오염물질의 혼합이 진행되는 시간 중 이송시간이 차지하는 비율이 확산시간에 비해 길어짐을 의미하고, 이는 오염물질의 종방향 및 횡방향으로의 분리를 증가시켜 분산을 활발하게 하는 결과를 가져오는 것으로 사료된다. 더욱 중요한 사실은 무차원 종분산계수가 Elder(1959)가 이론적으로 유도한 값($D_L / Hu^* = 5.93$)과 상이하게 나타난다는 점이다. Fig. 10a는 무차원 종분산계수가 t_m 이 증가할수록 증가하여 Elder 가 제안하는 값의 3배 이상까지 됨을 보여주고 있다. Baek 등(2006)은 사행수로에서의 추적자 실험을 통하여 D_L / Hu^* 가 Elder가 제시한 값의 6배까지 나타남을 보고한 바 있다.

6. 결론

본 연구에서는 전단류 분산이 이송과 난류 확산의 결합효과에 의해 발생한다는 Taylor(1954)의 전단류 분산 이론을 바탕으로, 오염물질의 물리적 2차원 혼합과정을 가시적으로 재현하는 시간분리 혼합모형을 개발하였다. 개발된 모형을 2차원 이송-분산 방정식을 지배방정식으로 사용하지 않고, 유속편차에 의한 농도분리와 난류에 의한 연직혼합 과정에 대한 개념을 3차원 직선 개수로에 직접 적용한 산술연산 모형이다. 본 모형에서는 직선수로에서의

혼합과정을 종방향 이송, 연직방향 확산, 횡방향 이송, 연직방향 확산으로 구성하고, 종방향유속의 연직분포는 Rozovskii(1957)의 로그식, 횡방향유속의 연직분포는 Odgaard(1986)의 선형식을 모형에 적용하였다. 개발된 모형을 검증하기 위해 기존 2차원 이송-분산 모형의 모의 결과와의 비교를 수행하였다.

시간분리 혼합모형은 수로벽면에 의한 농도중첩 효과와 질량 보존 법칙을 잘 따르고 있으며, Chatwin(1970)이 제시한 Taylor구간을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있었다. 농도분포를 분석한 결과, Taylor의 가정이 성립하지 않는 초기구간에서 2차원 이송-분산 모형에 의한 오염운은 대칭적인 농도분포를 나타내는 것과 달리 본 연구의 시간분리 혼합모형은 하류로 꼬리를 형성하는 왜곡된 분포를 나타내는 것으로 나타났다. 시간분리 혼합모형은 모의시간이 증가하여 Taylor구간에 도달한 후에는 대칭적인 농도 분포를 나타내어 2차원 이송-분산 모형 결과와 일치해감을 확인하였다. 이를 통해, 본 연구에서 개발한 시간분리 혼합모형이 초기구간 및 Taylor구간 모두에서 기존의 2차원 수치 모형보다 정확한 해를 도출하고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 시간분리 혼합모형을 이용하여 다양한 수리조건에서 모의를 수행하고, 모의결과를 통해 산정된 분산계수와 수리인자의 상관관계를 분석하였다. 동일한 수리조건에서 혼합시간이 증가할수록 종분산계수 및 횡분산계수가 뚜렷하게 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 개발된 모형을 이용하여 산정된 무차원 종분산계수는 Elder(1959)가 이론적으로 유도한 값의 3배 이상까지 증가하여, Baek 등(2006)이 사행수로 추적자 실험을 통해 확인한 분산계수의 거동과 유사한 결과를 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(11기술혁신C06), 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설) 사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소 및 건설환경종합연구소의 지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원해 준 기관에 감사를 표합니다.

References

- Alavian, V. (1986). "Dispersion tensor in rotating flows," *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 770-777.
- Baek, K. O., Seo, I. W. and Jung, S. J. (2006). "Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests," *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 132, No. 10, pp. 1021-1032.
- Bates, D.M. and Watts, D.G. (1988). *Nonlinear regression analysis and its applications*, John Wiley and Sons, New York.

- Chang, Y. (1971). *Lateral mixing in meandering channels*, Ph. D thesis, University of Iowa, USA.
- Chatwin, P. C. (1970). "The approach to normality of the concentration distribution of a solute in a solvent flowing along a straight pipe," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 43, No. 2, pp. 321-352.
- de Vriend, H.J. (1977). "A mathematical model of steady flow in curved shallow channels," *J. of Hydr. Res.*, IAHR, Vol. 15, No. 1, pp. 37-54.
- Duan, G. (2004). "Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels," *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 130, No. 10, pp. 964-976.
- Elder, J.W. (1959). "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 5, pp. 544-560.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Academic, New York.
- Han, K. Y. and Kim, S. H. (2000). "Advection-diffusion analysis in a river by Petrov-Galerkin method," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 20, No. 2B, pp. 251-259 (in Korean).
- Jeon, T. M., Baek, K. O. and Seo, I. W. (2007). "Development of an empirical equation for the transverse dispersion coefficient in natural streams," *Environ. Fluid Mech.*, Springer, Vol. 7, pp. 317-329.
- Kim, S. H. and Han, K. Y. (2000). "2-D Water quality analysis in Nakdong River by finite element method," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 20, No. 4B, pp. 525-533 (in Korean).
- Lee, J. K. and Kim, J. Y. (2000). "Numerical modeling of two-dimensional advection-diffusion equation," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 20, No. 3B, pp. 351-360 (in Korean).
- Lee, J. K. and Kim, K. K. (2002). "Behavior analysis of pollutant material by two-dimensional numerical model," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 22, No. 5B, pp. 639-648 (in Korean).
- McGuirk, J. J. and Rodi, W. (1978). "A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharges into open channel flow," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, No.4, pp. 761-781.
- Odgaard, A. J. (1986). "Meander-flow model I: development," *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1136.
- Piasecki, M. and Katopodes, N.D. (1999). "Identification of stream dispersion coefficients by adjoint sensitivity method," *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 714-724.
- Prandtl, L. (1952). *Essentials of Fluid Dynamics*, Hafner Publications, New York.
- Rozovskii, I. L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*, Academy of Science of Ukrainian, SSR.
- Rutherford, J.C. (1994). *River mixing*, John Wiley and Sons, Chichester, U.K.
- Sayre, W.W. and Chang, F. M. (1968). "A laboratory investigation of the open channel dispersion process for dissolved, suspended, and floating dispersants," *U.S. Geological Survey Professional paper 433-E*.
- Seo, I. W. and Jung, Y. J. (2010). "Velocity distribution of secondary currents in curved channels," *J. of Hydrodynamics*, Elsevier, Vol. 22, No. 5, pp. 617-622.
- Seo, I. W. and Lee, M. E. (2006). "Development of 2D advection-dispersion model with dispersion tensor considering velocity field," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 26, No. 2B, pp. 171-178 (in Korean).
- Seo, I. W., Lee, M. E. and Baek, K. O. (2008). "2D modeling of heterogeneous dispersion in meandering channels," *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 134, No. 2, pp. 196-204.
- Seo, I. W. and Son, E. W. (2006). "Development of sequential mixing model for analysis of shear flow dispersion," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 26, No. 4B, pp. 335-343 (in Korean).
- Seo, I. W. and Song, C. G. (2010). "Development of 2D finite element model for the analysis of shallow water flow," *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 30, No. 2B, pp. 199-209 (in Korean).
- Taylor, G.I. (1954). "Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 223, No. 1155, pp. 446-468.
- Thorne, C.R., Rais, S., Zevenbergen, L.W., Bradley, J.B. and Julien, P.Y. (1983). "Measurements of bend flow hydraulics on the Fall River at low stage," *WRFSL Report No. 83-9P*, Nat. Park Serv., 107C Natural Resources, Colorado St. Univ., Fort Collins, CO.