

입자추적방법을 이용한 다중저장대모형 개발

Development of Multiple Transient Storage Model Using Particle Tracking Method

정태성* / 서일원**

Cheong, Tae Sung / Seo, Il Won

Abstract

To evaluate behavior in representing solute transport in natural streams, the storage zone model of the axially periodic transient storage zones is developed. The periodic transient storage zone model and continuous storage zone model are verified using the parameters and the tracer concentration vs. time curves observed in laboratory channels. The periodic storage zone model best fit the measured concentration vs. time curves, while the continuous storage model fails to describe some fluctuations and the plateau region of the tail occurring in a discontinuous transient storage system. Dispersion data from Shingobee River, Minnesota, U. S. A. show that the concentration curves simulated by the proposed model fit the observed concentration curves well.

Keywords : transient storage zone, parameter estimation, particle tracking method, dispersion

요 지

본류대를 따라 저장대가 주기적으로 존재하는 다중저장대모형을 개발하고 자연하천의 혼합거동을 해석하였다. 개발된 모형 및 하나의 저장대를 갖는 기존의 저장대모형을 비교하기 위하여 모형실험 결과를 이용하였다. 본 모형을 이용하여 구한 농도분포는 모형실험에서 수집된 시간에 따른 농도분포를 잘 재현하는 반면, 연속적인 저장대를 갖는 기존모형은 불연속적인 저장대 구조로 인해 발생하는 농도분포의 부차적인 용기부분을 정확히 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 본 모형의 현장 적용성을 검토하기 위하여 새로운 모형을 미국 미네소타주에 위치한 Shingobee River에 적용하고 혼합거동을 해석한 결과 새로운 저장대 모형은 저장대가 존재하는 자연하천에서의 분산거동을 정확하게 모의하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 저장대, 매개변수추정, 입자추적모형, 분산

* UC Davis 공과대학 토목환경공학과 연구원
Research Assoc., Dept. of Civ. & Envir. Engrg., Univ. of Calif., Davis, CA 95616, U.S.A.
(E-mail : tcheong@ucdavis.edu)

** 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 152-742, Korea
(E-mail : seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

1. 서 론

자연하천에 존재하는 저장대로 인한 분류흐름과 저장 흐름간의 수리학적 혼합거동은 오염물질의 이송-분산 거동 및 생물/지형학적 반응 등에 영향을 미친다. 자연하천에 존재하는 저장대는 Table 1에 제시된 것처럼 사행에 의한 사수역, 불규칙한 河岸구조, 하상의 못-소 구조, 그리고 하상과 하안의 침투흐름 등과 같은 구조로 이루어져 있으며, 이들은 분류흐름을 따라서 불연속적으로 존재하며 저장대 (storage zone) 혹은 사대 (dead zone)로서의 역할을 수행한다. 저장대의 불연속성은 자연하천에서 수집된 오염물질의 시간에 따른 농도분포에 나타나는 부차적인 용기부분의 원인이 되기도 한다. 자연하천에 유입된 오염물질은 분류흐름을 따라서 이송-분산되며, 이들 오염물질이 저장대를 만나게 되면 저장대에 잠시 유입되었다가 다시 분류흐름으로 서서히 재 유입되는 혼합과정을 거치게 된다. 이러한 저장효과 때문에 자연하천에서 수집된 오염물질의 시간에 따른 농도분포는 상승 부는 경사가 급하고 하강 부는 경사가 완만하며 긴 꼬리를 갖는다 (정태성과 서일원, 2000a, b; Beltaos and Day, 1978; Valentine and Wood, 1979; Chatwin, 1980; Hart, 1995; and Alexander 등, 2001).

저장대가 존재하는 자연하천의 오염물질 혼합거동을 해석하기 위하여 전통적인 1차원 이송-분산 모형을 적용할 경우 적절치 못한 결과를 도출할 가능성이 높다

(Beltaos와 Day, 1978; Chatwin, 1980). 1차원 이송-분산 모형이 갖는 단점을 보완하고 오염물질의 일시적인 저장과 재 방출 효과를 모형에 재현하기 위하여 일정한 형태의 저장대가 분류흐름을 따라서 연속적으로 존재하는 저장대 모형을 개발하여 왔다 (Hays, 1966; Thackston과 Schnelle, 1970; Pedersen, 1977; Fischer 등, 1979; Nordin과 Troutman, 1980; Bencala와 Walters, 1983; Jackman 등, 1984; Kim 등, 1992; Seo와 Maxwell, 1992; Runkel과 Chapra, 1993; D'Angelo 등, 1993; Mulholand 등, 1994; 그리고 Fernald 등, 2001). 이들 모형은 분류흐름과 접하는 하상 혹은 하안에 하나의 연속적인 저장대를 가정하고 오염물질의 혼합거동을 해석하므로 저장대가 복잡하고 불연속적으로 존재하는 자연하천의 혼합거동을 정확히 재현하는데 한계가 있다. 자연하천의 혼합특성을 보다 정확히 재현하기 위하여 Beer와 Young (1983)은 사대가 연속적으로 존재한다고 가정하고 혼합거동을 해석하는 통합사대모형을 개발하였다. 그들은 분류흐름의 구분이 없는 저장효과가 일정한 사대를 연속적으로 배치하여 각각의 사대에서 구한 시간에 따른 농도분포를 단순히 합하는 방법으로 오염물질의 혼합거동을 재현하였는데, 이는 기존의 연속적인 저장대 모형을 개념적으로 확장한 것일 뿐 기존 모형과 결과적으로는 차이가 없다. Choi 등 (2000)은 자연하천의 분류흐름을 따라서 존재하는 크기가 다른 다수의 저장대를 재현하기 위하여 분류흐름 따라서

Table 1. Various Types of Transient Storage Zones Observed in Natural Streams

Storage Zone Type	Example	Residence Time	References
Streambed Sediment	Little Lost Man Creek	6-25 hours	Triska et al. (1993)
	Pinal Creek	1-25 min	Harvey & Fuller (1996)
	St. Kevin Gulch	6 hours	Harvey et al. (1996)
Hyporheic Flow (5 ≤m from stream)	North Fork Dry Run	0.3-46 hours	Castro et al. (1991)
	Little Lost Man Creek	3-130 hours	Triska et al. (1993)
	St. Kevin Gulch	80 hours	Harvey et al. (1996)
	Willamette River	0.16-82 hours	Fernald et al. (2001)
Hyporheic Flow (5 >m from stream)	North Fork Dry Run	6 days	Castro et al. (1991)
	Little Lost Man Creek	6-25 hours	Triska et al. (1993)
	Aspen Creek, Rio Calaveras	10 days	Wroblicky et al. (1998)
Beaver Dam Subsurface Flow Paths	Shingobee River	0.5-1.6 hours	Wroblicky et al. (1998)
Aquatic Vegetation Zone	Pinal Creek	4-35 min	Choi et al. (2000)
Periphyton-Colonized Films on Streambed	Little Lost Man Creek	3 min	Kim et al. (1990)

저장효과가 다른 2개의 저장대를 연속적으로 배치하고 자연하천의 혼합거동을 해석하는 복수저장대 모형을 개발하였다. 그들은 거리에 따라서 일정한 두 개의 저장대를 분류흐름을 따라 일정하게 배치함으로써 기존의 연속적인 저장대 모형에 비해 자연하천의 오염물질 혼합거동을 보다 정확히 재현할 수 있음을 밝혔다. 그러나 이들의 모형은 불연속적으로 존재하는 저장대로 인한 농도분포의 부차적인 용기부분을 재현하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 분류대를 따라 자연하천의 저장대 구조와 유사한 주기적 저장대를 사용함으로써 보다 정확히 오염물질의 혼합거동을 재현할 수 있는 다중저장대모형을 개발한다. 다중저장대모형은 거리에 따른 질량교환을 변화시키기 위하여 제형구조를 갖는 다수의 저장대가 분류대를 따라 일정 간격을 두고 존재한다고 가정하고 혼합 거동을 해석한다. 본 모형에서는 분류대와 저장대 간의 입자교환을 보다 효율적으로 재현하기 위하여 통계학적인 개념을 이용하여 오염물질 입자의 거동을 묘사하는 입자추적방법을 적용한다. 새로운 저장대 모형의 검증 및 기존의 연속 저장대모형과의 비교를 위하여 수리모형실험으로부터 수집된 농도분포 결과를 이용한다. 미국 미네소타주에 위치한 Shingobee River에서 현장실험을 수행하고 수집된 분산자료를 이용하여 본 모형의 현장 적용성을 검토한다.

2. 모형의 개발

2.1 개념적 모형

Fig. 1(a, b)에서 볼 수 있듯이 자연하천은 흐름이 비교적 빠른 여울 구간과 흐름이 비교적 느리며 어떤 구역에서는 흐름이 저장되기도 하는 소 구간이 반복되는 형태를 가지고 있다. 여울 구간에서의 오염물질 거동은 분류흐름을 따르는 이송과 분산거동이 지배적인 반면 소 구간에서는 분류흐름을 따르는 이송과 분산 거동 이외에 오염물질이 와 흐름을 따라 잠시 저장되었다가 다시 분류흐름에 재 유입되는 저장흐름이 중요한 역할을 수행한다. 이러한 저장효과 때문에 자연하천에서 실측된 농도분포 곡선은 상승 부는 경사가 급하고 하강 부는 긴 꼬리를 가진다. 더불어 중, 소규모의 하천과 같이 하류를 따라 저장대가 불규칙하게 존재하며, 크기 또한 각각 다른 경우, 구간에 따라 어떤 구간에서는 질량교환이 증가하기도 하고 어떤 구간에서는 질량교환이 감소하기도 하며 심지어 어떤 구간에서는 질량교환이 발생하지 않는다. 이러한 저장대의 불연속성으로 인한 질량교환의 불규칙한 증감 때문에 자연하천에서 실측된

농도분포 곡선은 상승 부는 경사가 급하고 하강 부는 긴 꼬리를 가지며, 일부는 부차적인 용기 (hump)가 발생하는 등 왜곡된 형태를 갖게된다.

본 연구에서는 자연하천의 혼합거동을 보다 정확히 재현하기 위하여 자연하천의 저장대 구조와 유사하게 분류흐름을 따라 Fig. 1(c)에 도시된 것과 같은 일정한 크기와 형태를 갖는 저장대를 주기적으로 배치함으로써 저장대가 존재하지 않는 구간과 저장대와 분류대가 동시에 존재하는 구간으로 분리하여 오염물질의 혼합거동을 재현할 수 있는 다중저장대모형을 개발하였다. 모형의 개발을 위하여 저장대가 존재하지 않는 구간에서의 이송과정은 확정론적인 방법으로 결정하였으며, 분산과정은 확률론적인 방법으로 결정하였다. 오염물질의 유입은 분류대 혹은 저장대 그리고 분류대와 저장대 동시에 유입이 가능하며, 저장대가 존재하지 않는 구간에서 오염물질 각 입자는 이송과 분산 과정을 거치면서 흐름을 따라 이동한다. 저장대가 존재하는 구간에서는 저장대 형상과 지체시간 등에 의해 각 지점에서 결정된 농도 차에 의해 오염물질 농도가 저장대 내에 유입되기도 하고 분류대 내로 재 유입되기도 한다. 이와 동시에 분류대 내에 존재하는 오염물질 각 입자는 저장대가 존재하지 않는 구간에서의 거동과 같은 이송과 분산과정을 거치면서 이동하며, 저장대 내에 존재하는 오염물질은 확산거동만을 하게 된다. 저장대 혹은 분류대로 유입되는 오염물질 각 입자의 위치는 유입되기 직전의 분류대 혹은 저장대 내에서의 위치에 지배를 받는다. 본 모형은 분류대를 따라서 일정한 형태의 저장대를 갖는 기존의 연속적인 저장대 모형 [Fig. 1(d)]과 다르게 분류대를 따라서 저장대 면적에 따른 분류대 면적비와 지체시간이 변화하므로 실제 자연하천에서 발생하는 것과 유사한 혼합거동을 재현할 수 있으며, 실측된 농도분포에 나타나는 것과 같은 농도분포의 이차적인 용기와 같은 왜곡현상을 재현가능 하다. 더불어 하천의 특성에 따라 본 연구에서 제시된 것과 다른 형태의 저장대 사용이 용이하며, 저장대 배치간격을 변경함으로써 보다 정확한 혼합거동 예측이 가능하다. 기존의 연속적인 저장대모형은 Fig. 1(d)에 도시된 바와 같이 일정한 크기의 저장대가 분류대를 따라 일정하게 존재하므로 전 구간 저장대 면적에 따른 분류대 면적비가 일정하며, 저장대 크기에 의해 결정되는 저장대 내에 오염물질이 머무는 지체시간 또한 일정하게 된다. 따라서 연속적인 저장대모형에서의 질량교환은 분류흐름을 따라 일정하게 이루어지므로 저장대의 불연속성으로 인한 자연하천에서 실측된 농도분포에 나타나는 것과 같은 농도분포의 부차적인 용기를 재현하는 것이 불가능하다.

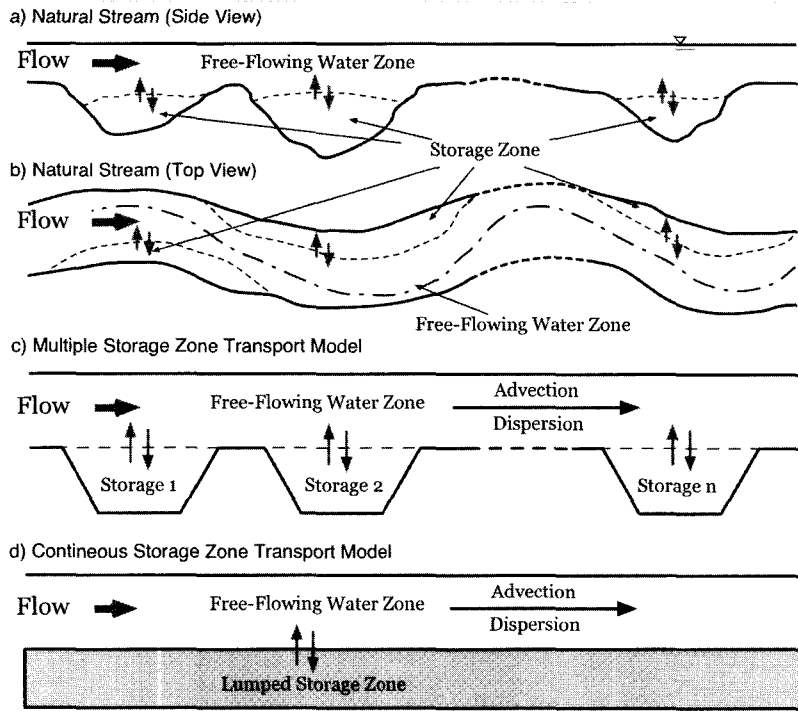


Fig. 1 Sketch of Conceptual Framework of the One and the Multiple Transient Storage Zone Model

2.2 수학적 모형

2.2.1 지배방정식 및 초기, 경계조건

저장대 모형은 분류대 방정식과 저장대 방정식 2개의 방정식으로 정의된다. 분류대내에 유입된 오염물질은 이송-분산 과정을 통해서 이동하며, 저장대는 와류 혹은 재 순환류를 갖는 유역으로서 저장대와 분류대 간의 질량교환은 난류유속변동과 농도 차에 의해서 이루어진다. 저장대내에서 오염물질이 완전 혼합되어 저장대내의 농도가 분류흐름에 수직인 방향으로 일정하다고 가정하면 저장대와 분류대 방정식은 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_f(x,t)}{\partial t} + \frac{Q}{A_f} \frac{\partial C_f(x,t)}{\partial x} &= \frac{1}{A_f} \frac{\partial}{\partial x} \left(A_f K_f \frac{\partial C_f(x,t)}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{q_L}{A_f} (C_L(x,t) - C_f(x,t)) \\ &+ \varepsilon(x) T^{-1}(x) (C_s(x,t) - C_f(x,t)) - \lambda_f C_f \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_s(x,t)}{\partial t} = T^{-1}(x) (C_f(x,t) - C_s(x,t)) - \lambda_s C_s \quad (2)$$

여기서 $C_f(x,t)$ 는 분류대 농도, Q 는 유량, A_f 는 분류대 면적, q_L 은 횡방향 유입유량, K_f 는 분류대 종분산계수, $C_L(x,t)$ 은 횡방향 유입농도, T 는 지체시간, $\varepsilon(x)$ 은 저장대 면적에 대한 분류대 면적비, λ_f 은 분류

대의 반응감소계수, $C_s(x,t)$ 는 저장대 농도, 그리고 λ_s 은 저장대내의 반응감소계수이다. Tsai and Holley (1979)는 저장대와 분류대간의 질량교환계수 k 를 제안하였다 ($= A_f/TP$). 여기서 P 는 분류대와 저장대가 접하는 면의 단면길이이다. 저장대 모형에 사용된 분류대 평균유속 $U_f(=Q/A_f)$ 은 일반적으로 전통적인 이송-분산모형에서 사용되는 평균유속 $U(=Q/A)$ 에 비해 크다. 저장대 모형에 사용된 분류대 종분산계수 K_f 는 추적방법 (Cheong과 Seo, 2003)을 이용하여 자연하천에서 수집된 시간에 따른 농도분포 자료로부터 결정될 수 있으며, 이 결과는 일반적으로 분류대와 저장대 모두가 고려된 전통적인 이송-분산모형의 종분산계수 결과에 비해 작다.

일정한 농도를 갖는 보존성 오염물질이 시간동안 일정하게 유입된 경우, 분류대와 저장대에서의 초기 조건은 다음과 같다.

$$C_f(x,0) = \alpha_0 \frac{M}{A_f} \delta(x) \quad C_s(x,0) = (1 - \alpha_0) \frac{M}{A_f} \delta(x) \quad (3)$$

여기서 M 은 오염물질 총질량, α_0 는 분류대내 유입된 오염물질의 질량비율, $(1 - \alpha_0)$ 는 저장대내 유입된 오염물질의 질량비율, $\delta(x)$ 는 Dirac delta함수. 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} C_f(x, t) \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \pm\infty \quad (4)$$

2.2.2 분자 확산 모형

거리 $x=0$, 시간 $t=0$ 일때 분류대내에 유입된 오염물질 각각의 입자들은 이송과 분산과정을 통해서 이동한 후 하류의 x 지점에 도달하게 된다. 이송과정은 확률론적인 방법으로 결정되며, 오염물질 각각의 입자들은 평균유속을 따라서 이동한다. 확산과정은 확률론적인 방법으로 결정되며, 입자들의 거동은 무작위 과정으로 표현된다. 확률통계학적 관점에서 오염물질의 이송-분산 과정을 표현해 보면, 개별 오염물질 입자가 각 방향으로 독립적이고 불규칙하게 이동한다고 가정할 수 있다 (Alonso, 1981). 이 때 오염물질 각각의 입자가 이송거동과 분산거동에 의해 종방향의 전후로 Δx 만큼 움직일 확률은 각각 $p^u(x) = p_a^u(x) + p_d^u(x)$ 와 $p^d(x) = p_a^d(x) + p_d^d(x)$ 가 되며, 이들의 합은 1이 된다: $p^u(x) + p^d(x) = 1$. 이 때 $p_a^u(x)$, $p_d^u(x)$ 는 각각 이송거동과 분산거동에 의해 상류방향으로 Δx 만큼 움직일 확률이며, $p_a^d(x)$, $p_d^d(x)$ 는 각각 이송거동과 분산거동에 의해 하류방향으로 Δx 만큼 움직일 확률이다. 오염물질 개별 입자가 종방향 지점에 위치할 확률은 총 평균이 $E_f(x) = E_a(x) + E_d(x)$, 총 분산이 $V_f(x) = V_a(x) + v_d(x)$ 인 정규분포를 갖는다. 이때 평균과 분산거동은 독립적

이며, $E_a(x)$ 는 이송평균, $E_d(x)$ 는 확산평균, $V_a(x)$ 는 이송에 의한 분산, $V_d(x)$ 는 확산에 의한 분산이다. 오염물질 각각의 입자들은 분류대 평균유속을 따라 이송하게 되는데, 하류방향으로만 흐름이 존재한다면, 이송과정을 통해 종방향의 상, 하류로 만큼 움직일 확률은 무차원 분류대 평균유속을 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_a^u(x) = 0 \quad (5)$$

$$p_d^d(x) = U_f \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6)$$

오염물질 입자의 종방향 이송에 의한 평균과 분산은 다음 식과 같다.

$$E_a(x) = -p_a^u(x) + p_a^d(x) = U_f \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7)$$

$$V_a(x) = E_a(x)^2 - [E_a(x)]^2 = 0 \quad (8)$$

확산에 의한 오염물질의 거동은 분류대 중분산계수에 의해 이루어지는데, 확산과정을 통해 종방향의 상, 하류로 Δx 만큼 움직일 확률은 무차원 확산유속을 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p_a^u(x) = \left(\frac{A_f(x)K_f(x) + A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (9)$$

$$p_d^d(x) = \left(\frac{A_f(x)K_f(x) + A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (10)$$

오염물질 입자의 종방향 확산에 의한 평균, $E_d(x)$ 과 종방향 확산에 의한 분산 $V_d(x)$ 는 다음과 같다.

$$E_d(x) = \quad (11)$$

$$\left(\frac{A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x) - A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

$$V_d(x) = \left(\frac{A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x) + 2A_f(x)K_f(x) + A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} - \left(\frac{A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x) - A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \right)^2 \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (12)$$

총 평균 $E_f(x)$ 는 이송에 의한 평균과 확산에 의한 평균의 합으로서 다음 식과 같다.

$$E_f(x) = \left(\frac{A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x) - A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} + U_f \right) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

$$= \left(\frac{1}{A_f} \frac{\partial(A_f K_f)}{\partial x} + U_f \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (13)$$

총 분산 $V_f(x)$ 는 다음 식과 같이 이송에 의한 분산과 확산에 의한 분산의 합으로서 나타낼 수 있다.

$$V_f(x) = \left(\frac{A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x) + 2A_f(x)K_f(x) + A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

$$- \left(\frac{A_f(x+\Delta x)K_f(x+\Delta x) - A_f(x-\Delta x)K_f(x-\Delta x)}{2A_f(x)\Delta x} \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2$$

$$= 2K_f \frac{\Delta t}{\Delta x^2} - \left(\frac{1}{A_f} \frac{\partial(A_f K_f)}{\partial x} \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \quad (14)$$

식 (14)에서 $\Delta t \gg \Delta x^2$ 이므로 총 분산은 다음과 같다.

$$V_f(x) = 2K_f \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (15)$$

입자추적모형에서 보존성 오염물질 각 입자의 이동 거리를 이송과 확산에 의한 것으로 분리한 후 이송 항을 확률론적인 것 (W)으로 결정하였으며, 확산 항은 무작위 과정으로 이동한다고 가정하고 확률론적인 것 (B)으로 결정하였다. Heemink (1990)은 다음과 같은 Fokker-Planck식을 이용하여 확률방정식을 수립 적분된 이송-분산 방정식으로 변환 가능함을 입증하였다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(WP) = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(B^2P) \quad (16)$$

여기서 P 는 확률밀도함수이다. 식 (16)에 $P = C_f$, $W = E_f(x)/\Delta t$, $B^2 = V_f(x)/\Delta t$ 을 대입하고 정리하면 저장대 지배방정식 (1)에서 저장대와 분류대간의 질량 교환과 횡방향 질량교환이 생략된 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + U_f \frac{\partial C_f}{\partial x} = \frac{1}{A_f} \frac{\partial}{\partial x} \left(A_f K_f \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \quad (17)$$

식 (17)이 오염물질 각 입자의 이송-확산과정이 일어난 후의 위치를 나타내는 물리적인 과정을 표현한 식이라면, 식 (16)은 오염물질 각 입자의 이송-분산과정이 일어난 후의 확률을 나타내는 확률적인 과정을 표현한 식이다. 식 (16)으로부터 시간 t 일 때 미소농도를 갖는 오염물질 입자가 x 지점에 존재할 확률을 구할 수 있으며, 이러한 과정을 많은 수의 오염물질 입자에 대해 반

복하여 적용하면, 오염물질 전체 입자가 x 지점에 존재할 확률을 구할 수 있다. x 지점에서의 오염물질의 농도는 그 지점에 존재하는 입자의 총량과 각각의 입자가 갖는 미소농도의 곱과 같으므로, 식 (16)으로부터 구한 확률에 투입한 오염물질의 미소농도를 곱하면 그 지점에서의 농도를 구할 수 있다. 따라서 이송-분산방정식으로 표현되는 물리적 과정 (17)은 통계적인 개념을 이용한 평균과 분산으로 표현될 수 있음을 식 (16)를 통해서 알 수 있다.

분류대 방정식 (1)의 오염물질 각 입자의 이동거리는 이송 항을 확률론적인 것으로 확산 항을 확률론적인 것으로 가정하고 결정하였다. 본 연구에서는 오염물질의 거동을 보존성 오염물질에 한정하였으며, 횡방향 유량 유입은 없는 것으로 가정하였다. 보존성 오염물질이 분류대내에서 Δt 시간 동안 머물 경우, 이송과 확산에 의한 오염물질 각 입자의 이동거리 N_b 는 다음 식과 같다.

$$N_b(\Delta t) = U_f \Delta t + B(\Delta t) \quad (18)$$

여기서 $B(\Delta t)$ 는 평균이 0이고 분산이 $2K_f \Delta t$ 인 브라운 거동으로 표현된다. 오염물질 입자의 이송거리는 확정론적인 것으로서 총 평균과 같다. 이 경우, $p_a^d(x)$ 는 1, $p_a^u(x)$ 는 0의 값을 가정하여 평균은 1, 분산은 0인 분포를 사용하였다. 오염물질 입자의 확산거리는 무작위 과정으로 이동한다고 보고 $p_a^d(x)$ 와 $p_a^u(x)$ 의 값 모두를 1/2로 같다고 가정하여 종방향 평균은 0, 분산은 $2K_f \Delta t$ 인 정규분포를 사용하였다. 식 (18)에 의해 각각의 입자는 Δt 시간 동안 이송 이동거리 $U_f \Delta t$ 에 확산

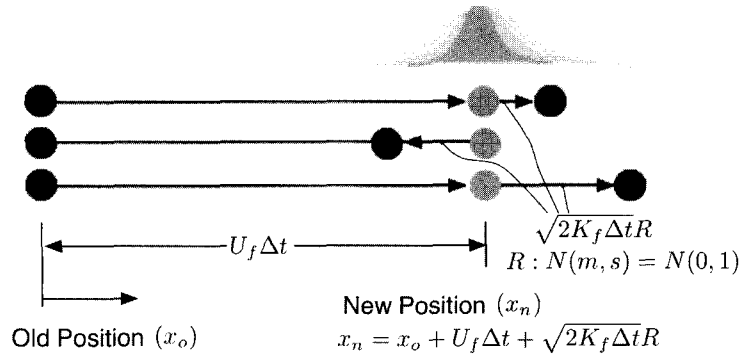


Fig. 2 Advection-Dispersion Mechanism of the Particle Tracking Method

이동거리 $\sqrt{2K_f \Delta t} \cdot R$ 를 더한 만큼 이동하게 되는데, 이런 과정을 반복함으로써 계산하고자 하는 시간에서의 각 입자의 위치를 계산할 수 있다 (Fig. 2). 여기서 R 은 평균이 0이고 표준편차가 1인 정규분포를 갖는 난수 (random number)이다. 이런 과정을 미소농도를 갖는 많은 수의 입자에 대해 반복한 후 고정격자 내에 포함된 입자의 개수를 구한다. 이렇게 구한 입자의 개수에 미소농도를 곱하면, 원하는 지점에서의 농도분포를 구할 수 있다.

2.2.3 본류대와 저장대간 질량교환

본류대내에서 이동하던 오염물질이 이송과 분산 과정을 거친 이후에 저장대를 만나게 되면 일정부분 저장대내로 유입되게 되는데, 저장대내로 유입되는 오염물질의 양은 본류대면적에 대한 저장대면적비, 본류대와 저장대간 농도 차, 그리고 지체시간의 영향을 받는다. 본류대에 존재하는 농도와 저장대내에 존재하는 농도 차를 $C_f(x, t) - C_s(x, t) \approx C_f(x, t)$ 이라면 저장대 지배방정식 (1-2)는 다음 식으로 단순화 할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f(x, t)}{\partial t} + U_f \frac{\partial C_f(x, t)}{\partial x} - K_f \frac{\partial^2 C_f(x, t)}{\partial x^2} = -\epsilon(x) T^{-1}(x) C_f(x, t) \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_s(x, t)}{\partial t} = T^{-1}(x) C_f(x, t) \quad (20)$$

초기조건 (3)과 경계조건 (4)를 이용하여 식 (19)의 해석 해를 구하면 다음과 같다.

$$C_f(x, t) = \frac{M}{A \sqrt{4\pi K_f t}} \exp \left[-\frac{(x - U_f t)^2}{4K_f t} - \epsilon(x) T^{-1}(x) t \right] = F(x, t) e^{-\epsilon(x) T^{-1}(x) t} \quad (21)$$

여기서 $F(x, t)$ 는 저장대와 본류대간의 농도교환을 제외한 본류대내의 농도분포를 표현한 식으로 전통적인 이송-분산방정식의 해석해와 같다. 저장대가 연속적으로 존재할 경우, 식 (21)에서 알 수 있듯이 저장대내로 유입되는 본류대 농도는 시간에 따라 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서와 같이 저장대가 불규칙하게 존재하는 경우에는 저장대가 존재하지 않는 구간이 존재하게 되고 이 구간에서는 저장대내로의 농도 유입이 존재하지 않게 된다. 본 연구에서는 저장대와 본류대간의 농도교환을 결정하기 위하여 오염물질이 이동한 총 시간에서 저장대가 존재하지 않는 구간(예: 여울 구간)을 이동하는데 소요된 시간을 제외한 시간 t_f 만을 이용하였다 ($= t - x_r / U_f$). 여기서 x_r / U_f 는 저장대가 존재하지 않는 구간을 이동하는데 소요된 시간이며, x_r 은 저장대가 존재하지 않는 구간 길이이다. 본류대내에서 이동하던 오염물질이 저장대를 만나면 일정부분 저장대내로 유입되게 되는데 이 때 저장대내로 유입되는 양은 농도교환을 제외한 본류대내의 농도, $F(x, t) e^{-\epsilon(x) T^{-1}(x) t}$ 를 제외한 농도이다. 이 농도를 $C_f(x, t)$ 로 가정하고 식 (20)에 대입하면 다음 식과 같은 거리 x , 시간 t 에서의 저장대 농도를 구할 수 있다.

$$C_s(x, t) = T^{-1}(x) t F(1 - e^{-\epsilon(x) T^{-1}(x) t}) \quad (22)$$

시간 Δt 이후의 본류대내에 존재하는 입자 개수와 저장대내에 존재하는 입자의 개수의 차이가 N_f 라고 하면, 식 (22)로부터 본류대에서 저장대로 유입되는 오염물질 입자의 개수는 $T^{-1}(x) \Delta t F(1 - e^{-\epsilon(x) T^{-1}(x) \Delta t})$ 가 됨을 알 수 있다. 이렇게 구한 입자의 개수에 미소농도를 곱하면, 원하는 지점에서의 농도가 된다. 본류대 농도

에 비해 저장대 농도가 큰 경우, 저장대 농도 일부분은 본류대로 재 유입되는데, 본류대내로 재 유입되는 오염물질의 양은 지체시간과 본류대와 저장대간 농도차의 영향을 받는다. 본류대내에 존재하는 농도와 저장대내에 존재하는 농도의 차이를 $C_s(x, t) - C_f(x, t) \approx C_s(x, t)$ 이라면 저장대 지배방정식 (1-2)는 다음 식으로 단순화 할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f(x, t)}{\partial t} + U_f \frac{\partial C_f(x, t)}{\partial x} - K_f \frac{\partial^2 C_f(x, t)}{\partial x^2} \quad (23)$$

$$= -\varepsilon(x) T^{-1}(x) C_s(x, t)$$

$$\frac{\partial C_s(x, t)}{\partial t} = T^{-1}(x) C_s(x, t) \quad (24)$$

저장대내에 유입된 농도분포가 시간 $t-x/U_f$ 만의 함수라고 가정하면, 초기조건 (3)과 경계조건 (4)를 이용하여 식 (24)의 해석 해를 구하면 다음과 같다.

$$C_s(x, t) = S(x, t) e^{-T^{-1}(x)(t-x/U_f)} \quad (25)$$

여기서 $S(x, t)$ 는 시간 $t=x/U_f$ 에서 저장대내에 존재하는 농도이다. 저장대내에 유입된 오염물질은 일정기간 이후에 다시 본류대로 재 유입되게 되는데 이 때 본류대내로 유입되는 양은 농도교환을 제외한 저장대내의 농도, $S(x, t)$ 에서 저장대내에 잔존하는 농도, $S(x, t) e^{-T^{-1}(x)(t-x/U_f)}$ 를 제외한 농도이다. 이 농도를 $C_s(x, t)$ 로 가정하고 식 (23)에 대입하면 다음 식과 같은 거리 x , 시간 t 에서의 저장대 농도를 구할 수 있다.

$$C_f(x, t) = \varepsilon(x) T^{-1}(x) t S (1 - e^{-T^{-1}(x)(t-x/U_f)}) \quad (26)$$

시간 Δt 이후의 본류대내에 존재하는 입자 개수와 저장대내에 존재하는 입자의 개수의 차이가 N_s 라고 하면, 식 (26)으로부터 저장대에서 본류대로 유입되는 오염물질 입자의 개수는 $\varepsilon(x) T^{-1}(x) \Delta t S (1 - e^{-T^{-1}(x) \Delta t})$ 가 됨을 알 수 있다. 이렇게 구한 입자의 개수에 미소농도를 곱하면, 원하는 지점에서의 농도가 된다. 본 연구에서는 종방향을 따라서 각 지점의 미소격자내에 포함된 오염물질 입자 개수를 구하고 각 지점에 존재하는 미소격자내에서만 농도교환에 따른 입자의 이동이 존재하도록 가정하였다. 본 연구에서는 격자 크기에 따른 오차를 최소화하기 위하여 충분히 많은 개수의 오염물질 입자를 이용하

였다 (서일원과 정태성, 1999).

3. 주기적인 저장대모형과 연속적 저장대모형 비교

새로운 저장대모형의 검증 및 새로운 저장대모형과 기존의 저장대모형과의 비교를 위하여, Seo와 Maxwell (1992)의 6개 series의 수리량 및 확산량 자료를 이용하였다. Seo와 Maxwell (1992)은 갈수기 하천에서의 분산 거동을 살펴보기 위하여 길이 49m, 폭 2.8m의 직사각형 수로에 갈수기 자연하천 시스템의 수로특성과 수리학적 상사법칙에 근거하여 소 길이는 4.9m, 여울길이는 2.4m, 소와 여울 폭은 1.8m, 소 구조의 평균 간격은 하폭의 6배, 그리고 여울폭-여울높이비는 14.4인 4개의 여울-소 연속구조(pool-riffle sequences)로 이루어진 모형을 제작하고 서로 다른 유량조건에서 6개 series의 수리량 및 분산 자료를 수집하였다. 6개 series중 1-3의 3개 series는 평평한 바닥조건에서 실험이 수행되었으며, 나머지 6-8의 3개 series는 여울구간 하상에 자갈이 놓여진 조건에서 실험이 수행되었다. 시간에 따른 농도분포는 오염물질 유입지점으로부터 27.4m 그리고 32.9m 떨어진 지점에서 측정이 이루어졌다. 저장대모형의 매개변수들은 모형에서 직접 측정되었거나 분산실험을 통해서 수집된 농도분포로부터 결정되었다. 본류대 평균 유속은 저장대내에서의 유속을 제외한 본류대만의 단면 평균유속이 측정되었다. 저장대는 흐름이 미미하거나 부유속이 발생하는계순환류 구역을 말한다. 본류대 단면적은 하천의 총 단면적에서 저장대 단면적을 제외하고 측정한 면적이다. 중분산계수는 Fischer 등 (1979)에 의해서 제안된 추적방법 (routing method)을 이용하여 실험에서 구한 농도분포를 최적화 하는 방법으로 결정되었다. 만약, 오염물질의 유입이 저장대내에서만 이루어져서 본류대내에서의 농도를 무시할 수 있다면 저장대 모형 방정식 (1)과 (2)는 다음과 같게 된다.

$$\frac{\partial C_s(x, t)}{\partial t} = \frac{k}{W_s} C_s(x, t) \quad (27)$$

여기서 W_s 는 저장대 폭이다. 식 (27)의 해석 해를 구하면 다음과 같다.

$$C_s(x, t) = -C_{s_0} e^{-k/W_s t} \quad (28)$$

여기서 C_{s_0} 는 시간 $t=0$ 일때 저장대내에 유입된 초기 농도이다. 질량교환계수는 저장대 지배방정식으로부터

구한 해석 해 (29)와 저장대에서 실측된 시간에 대한 저장대내의 농도분포, $C_s(x, t)$ 를 최적화 하는 방법으로 결정되었다. 질량교환계수를 Hays (1966)에 의해 제안된 다음 식에 적용하여 지체시간을 결정하였다.

$$T = \frac{A_s}{W_c k} \quad (29)$$

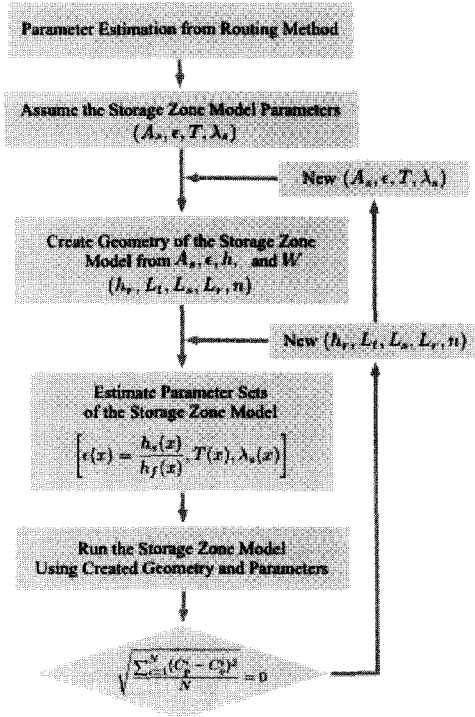


Fig. 3 Flowchart of the Transient Storage Zone Model.

여기서 W_c 는 분류대와 저장대가 접하는 면의 접선길이이다. 본 연구에서 사용된 수리량 자료 및 저장대모형 변수 자료들은 Table 2에 정리하여 수록하였다. 본 연구에서는 저장대모형의 매개변수를 추정하기 위하여 Fig. 3에 도시된 바와 같이 추적방법 (Cheong & Seo, 2002) 결과를 초기 치로 가정하고 계산 농도분포 결과와 실측 농

도분포 결과를 비교하는 방법으로 매개변수를 추정하였다. Fig. 3은 본 모형의 변수추정 및 농도분포 계산과정을 플로우차트로 나타낸 것으로 C_p^i 와 C_o^i 는 각각 계산 농도분포와 실측농도분포를 나타내며 N 은 계산에 사용된 시간에 따른 농도분포의 개수이다.

자연하천과 유사한 오염물질의 혼합거동을 재현하기 위하여 Fig. 4와 같은 4개의 저장대를 모형에 재현하였다. Fig. 4에서 L_s 는 소 길이 ($= 3.80 W$), L_r 은 여울 길이 ($= 1.25 W$), 그리고 L_t 는 소와 여울의 접선 수평길이 ($= 0.39 W$)이다. 여울높이 h_r 은 저장대면적에 대한 본류대면적비를 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$h_r = \frac{\epsilon h L_{sr}}{(L_s - L_t)} \quad (30)$$

여기서 h 는 수심 ($= h_f + h_r$), h_r 은 여울 높이, h_f 는 본류대 높이, 그리고 L_{sr} 은 본류대 길이 ($= L_p + 2L_t + L_r$)이다. 본 연구에서는 같은 모양을 갖는 저장대가 주기적으로 존재한다고 가정하고 4개의 저장대를 본류대와 접하는 면에 일정한 간격을 두고 배치하였다. 이때 저장대 개수는 하천 전체길이에 대한 본류대 길이 비로서 구해진다.

농도분포의 계산을 위하여 본 연구에서는 시간증분은 2sec, 총 입자개수는 150,000개를 사용하였다. 본류대 종분산계수는 본류대 전체구간에서 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였으며 거리에 따른 저장대 면적에 대한 본류대 면적비 $\epsilon(x)$ 는 하류를 따라 각 지점에서의 저장대 길이 h_s 와 본류대길이 h_f 의 비로 구해진다. 만약 k 가 일정하다면, 거리에 따른 지체시간 $T(x)$ 는 $\epsilon(x)/\alpha$ 로 구할 수 있다. 여기서 α 는 저장대 질량교환계수로서 k/h_f 이다. 본 연구에서는 저장대와 본류대간의 농도교환을 결정하기 위하여 오염물질이 이동한 총 시간에서 저장대가 존재하지 않는 구간을 이동하는데 소요된 시간을 제외한 시간 t_t 만을 이용하였다

Table 2. Hydraulic variables and observed parameters in the experiment (Seo & Maxwell, 1992)

Series	Q (m ³ /s)	d (m)		U _f (m/s)	U _s (m/s)	K _f (m ² /s)	T (sec)	ε	k (m/s)
		Pool	Riffle						
1	0.013	0.148	0.022	0.207	0.058	0.059	380.00	0.49	0.009
2	0.020	0.155	0.029	0.257	0.060	0.054	165.00	0.47	0.019
3	0.026	0.160	0.034	0.282	0.061	0.045	244.62	0.46	0.013
6	0.013	0.171	0.027	0.201	0.063	0.046	516.00	0.40	0.005
7	0.019	0.179	0.033	0.244	0.064	0.039	440.00	0.42	0.007
8	0.025	0.186	0.038	0.270	0.065	0.058	342.86	0.37	0.006

($= t - x(1 - L_{pr}/L_{sr})/U_f$). 여기서 L_{pr} 은 저장대 길이이다 ($= L_s + 2L_t$). 6개 series중 1과 8 두개의 series에 대해서 유입지점으로부터 27.4m 그리고 32.9m 떨어진 지점에서 본 모형과 기존의 저장대모형으로부터 계산된 농도분포를 실측치와 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 이 때 기존의 저장대모형에 사용된 변수들은 저장대 전체구간에 일정한 값을 적용하였다. 모형실험에서 실측된 농도분포 곡선은 상승 부는 경사가 급하고 하강 부는 긴 꼬리를 가지며, 일부는 부차적인 용기를

갖는 왜곡된 형태이다. 본류대를 따라 이동하던 오염물질이 저장대 크기가 큰 구간에 이르면 오염물질의 저장대 유입량이 증가하게 되어 본류대 내의 오염물질 농도가 감소하게 된다. 이 경우 본류대로 재 유입되는 오염물질의 양은 증가하게 되는데, 만약 본류대를 따라 이동하던 오염물질의 주체가 흐름이 빠른 여울구간에 이르러 오염물질의 주체가 빨리 이동한다면, 저장대로 유입되었던 오염물질이 빠르게 본류대 내로 재 유입하게 되어 오염물질의 증가가 일정 구간에서 더욱 커지게 되

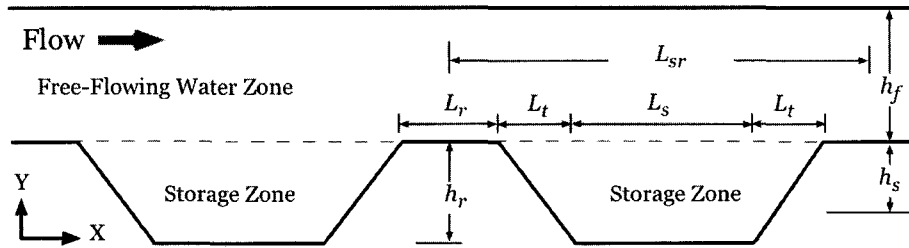


Fig. 4 Definition sketch of the Multiple Storage Zone

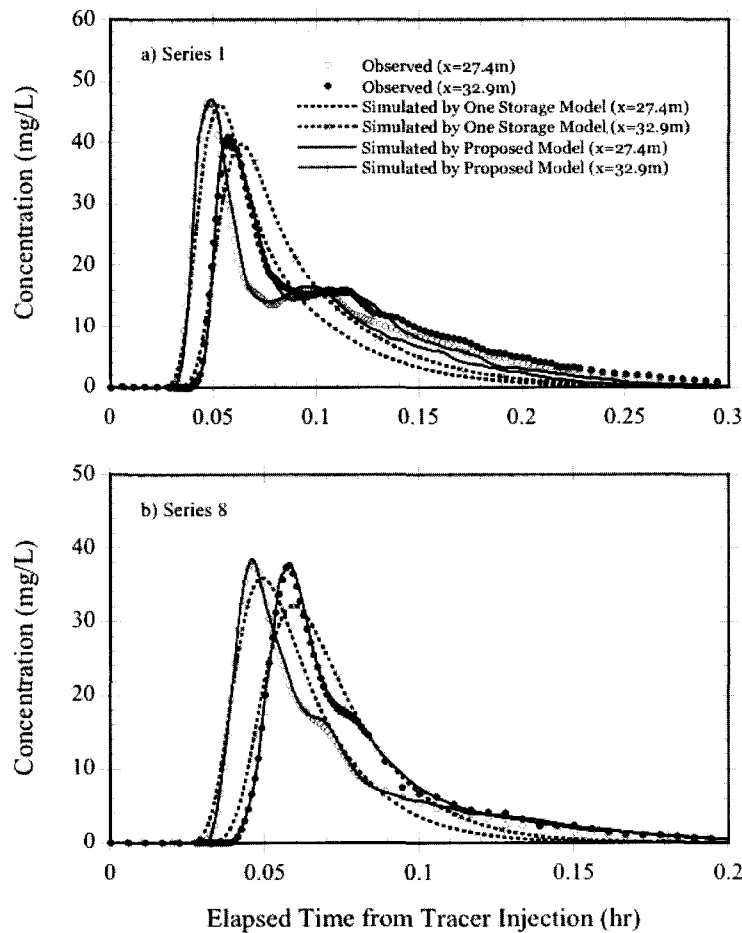


Fig. 5 Comparisons of Simulated Dye Concentration Distribution with Measured Data

므로 이 구간에서는 부차적인 용기가 발생하게 된다. 새로운 저장대모형으로부터 구한 농도분포는 전반적으로 실측농도분포를 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 침투농도 및 침투농도에 이르는 시간을 정확히 재현하는 것으로 나타났다. 특히, 저장대의 불연속성으로 인한 질량교환의 불규칙한 증감 때문에 발생하는 농도분포의 부차적인 용기를 정확히 재현하는 것으로 나타났다. 반면 연속적인 저장대 구조를 갖는 기존의 저장대모형은 실측 농도분포에 나타난 것과 같은 부차적인 용기를 재현하지 못하는 것으로 나타났다.

4. 모형의 적용

자연하천에서의 적용성을 검토하기 위하여 자연하천 특성이 잘 보존되어 있으며, 하상에 여울 소 구조가 잘 발달된 미국 미네소타주의 Shingobee River에서 하천 실험을 수행하였다. Shingobee River의 하폭은 3-4m, 수심은 0.12-0.50m, 그리고 하상경사는 0.0042이다. Fig. 6에 도시된 바와 같이 하천실험이 수행된 구간의 총 길이는 1256m이며, 하천의 하류를 따라서 165m, 293m, 580m, 그리고1256m의 4개 지점에서 시간에 따른 농도 분포의 측정이 수행되었다. 실험 수행 구간의 유량은 0.193m³/s이었다. 실험을 위하여 보존성 물질인 염화물 (Cl-) 용액을 이용하였다. 농도분포의 재현을 위하여 제형구조를 갖는 단순화된 60개의 저장대를 모형에 재현하였으며, 시간중분은 1min, 보다 정확한 계산을 위하여 입자개수는 300,000개를 사용하였다. 분류대 종분산 계수는 분류대 전체구간에서 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였으며 거리에 따른 저장대 면적에 대한 분류대 면적비 $\epsilon(x)$ 는 하류를 따라 각 지점에서의 저장대 길이와 분류대 길이 비로 구하였으며, 거리에 따른 지체

시간 $T(x)$ 는 $\epsilon(x)/\alpha$ 로 구하였다. 본 연구에서는 저장대와 분류대간의 농도교환을 결정하기 위하여 오염물질이 이동한 총 시간에서 저장대가 존재하지 않는 구간을 이동하는데 소요된 시간을 제외한 시간 t_t 만을 이용하였다 ($=t-x(1-L_{pr}/L_{sr})/U_f$).

본 연구에서는 저장대모형의 매개변수를 추정하기 위하여 추적방법 결과를 초기 치로 가정하고 계산 농도 분포 결과와 실측 농도분포 결과를 비교하는 방법으로 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수 결과를 정리하여 Table 3에 수록하였다. 본 모형을 적용하여 매개변수를 추정된 결과 분류대 평균유속 평균은 1.48m/s이었으며, 분류대 종분산계수 평균은 0.006m²/s이었다. 저장대 면적 A_s 및 저장대 질량교환계수를 결정하기 위하여 본 모형을 적용한 결과, 결정된 저장대 면적 범위는 0.24-0.5m², 평균은 0.35m², 표준편차는0.09m²이었다. 저장대 질량교환계수 범위는 4.91×10⁻⁵-9.90×10⁻⁵m/s 그리고 평균은 6.90×10⁻⁵m/s 및 표준편차는 2.60×10⁻⁶m/s이었다. 본 모형을 적용하여 결정된 저장대 면적에 대한 분류대 면적비의 범위는 0.21-0.27, 평균은 0.23, 표준편차는 0.03이었다. 저장대내에서의 지체시간을 결정하기 위하여 본 모형을 적용한 결과 범위는 0.19-1.35hr⁻¹ 그리고 평균은 0.27hr⁻¹ 및 표준편차는 0.06hr⁻¹이었다. 결정된 매개변수의 타당성을 검토하기 위하여 다음 식과 같은 Damkohler I (DaI) 값을 구하였다.

$$DaI = \frac{\alpha(1+\epsilon)L}{U} \quad (31)$$

여기서 L 은 하천실험이 수행된 구간의 총 길이이다. DaI 계수가 작아지는 경우는, 저장대 크기가 증가할 때 지체시간이 증가하고, 저장대 크기가 감소할 때 지체시

Table 3. Reach characteristics and parameters of the transient storage model in the lower Shingobee River, Minnesota, U. S. A.

River	Reach Length	Channel Cross-Sectional Area	U_f	K_f	T	ϵ	$\alpha(\times 10^{-4})$	DaI
Reach	L, m	A, m^2	m/s	m ² /s	hr		s ⁻¹	
a	165.1	1.460	0.134	0.046	0.25	0.21	0.31	0.36
b	286.4	1.843	0.107	0.031	0.35	0.27	0.50	0.75
c	600.0	1.170	0.167	0.066	0.21	0.21	0.24	1.18
d	686.0	1.290	0.152	0.130	0.19	0.25	0.32	1.73
ab	293.6	1.652	0.119	0.049	0.30	0.26	0.43	0.77
abc	580.0	1.491	0.132	0.053	0.27	0.22	0.33	1.24
abcd	1256.	1.441	0.136	0.093	0.34	0.21	0.30	1.85

간이 감소하는 경우이다. 즉, 결정된 매개변수의 DaI 계수가 작을수록 저장대의 크기 및 저장대내에 유입된 오염물질이 본류대에 재 유입되는데 소요되는 지체시간의 관계를 잘 설명하는 적합한 변수라고 할 수 있다. 본 모형을 이용하여 결정된 매개변수들의 DaI 계수를 계산한 결과 그 값이 0.36과 1.85의 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다. 본 모형을 이용하여 결정된 지체시간 결과를 Shingobee River와 같은 소규모 하천에서 결정

된 기존의 연구 결과와 비교했을 때 적절한 결과를 나타내는 것으로 나타났다 (Alexander 등, 2001).

새로운 저장대 모형의 적용성을 검토하기 위하여 본 연구에서 매개변수를 추정하고 시간에 따른 농도분포를 결정하였다. 새로운 저장대모형 결과와 실측 농도자료를 비교하여 Fig. 7에 도시하였다. 새로운 저장대모형은 전반적으로 Shingobee River에서 수집된 농도분포를 잘 재현하는 것으로 나타났다.

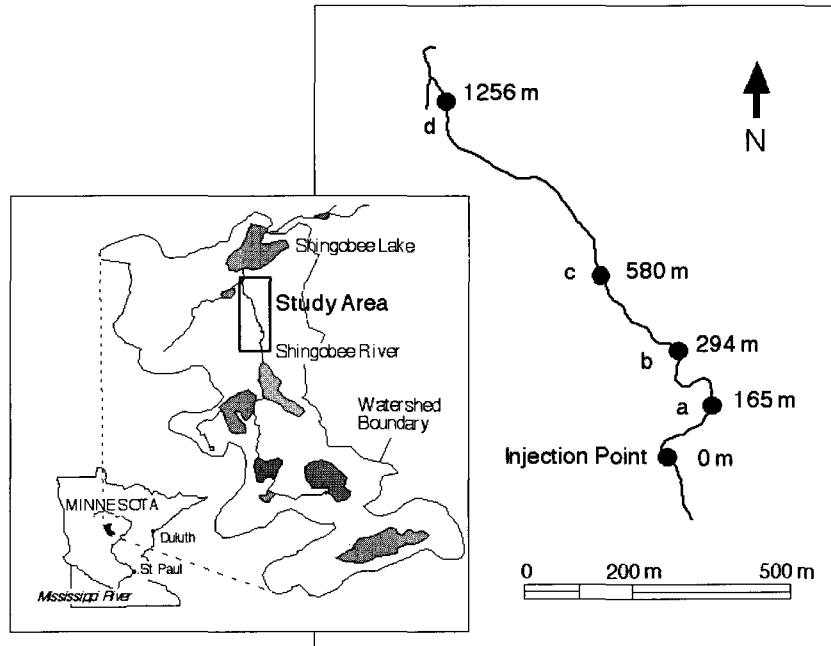


Fig. 6 Map of the Lower Shingobee River Site.

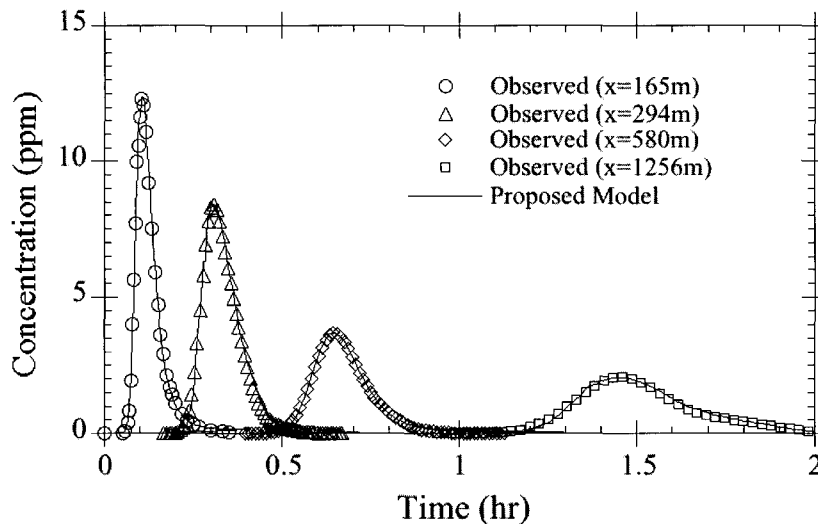


Fig. 7 Measured and Simulated Free Flowing Water Zone Dye Concentrations from Lower Shingobee River.

5. 결 론

자연하천의 혼합거동을 보다 정확히 재현하기 위하여 분류대를 따라서 다수의 저장대가 존재하는 새로운 저장대 입자추적모형을 개발하였다. 자연하천과 유사한 저장대를 모형에 재현하기 위하여 기존의 연구결과를 토대로 제형 구조의 저장대를 모형에 적용하였다. 새로운 모형의 검증을 위하여 모형실험에서 실측된 시간에 따른 농도분포 결과와 비교한 결과 모형실험 결과를 잘 재현하는 반면 기존의 단순한 저장대 모형은 농도의 부차적인 용기부분을 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 새로운 모형의 적용성을 검토하기 위하여 미국 미네소타주의 Shingobee River에서 하천실험을 수행하였다. 새로운 저장대 입자추적모형을 이용하여 시간에 따른 농도분포를 구하고 이를 실측치와 비교한 결과 본 연구에서 개발된 다중 저장대 입자추적모형이 자연하천의 혼합 거동을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 자연하천의 혼합거동을 보다 정확히 재현하기 위하여 자연하천과 유사한 저장대를 모형에 재현하기 위한 연구로서 제형구조가 아닌 삼각형 혹은 사각형 형태의 저장대 구조에 대한 모형 실험 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 서일원, 정태성 (1999). "2차원 Random-Walk모형을 이용한 자연하천의 횡 확산 해석" 한국수자원학회논문집, 제32권 제1호, pp. 61-70.
- 정태성, 서일원 (2000). "하천수질예측을 위한 저장대모형의 매개변수 결정". 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제5-A호, pp. 653-665.
- 정태성, 서일원 (2000). "하천수질예측을 위한 저장대모형의 매개변수 추정식 개발". 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제5-B호, pp. 667-678.
- Alonso, C. V. (1981). "Stochastic models of suspended-sediment dispersion." *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineering*, Vol. 107, No. HY6, pp. 733-757.
- Alexander, R. B., Fernald, P. J. W. Jr., and Landers, D. H. (2001). "Transient storage and hyporheic flow along the Willamette River, Oregon: Field measurements and model estimates". *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 1681-1694.
- Beer, T., and Young, P. C. (1983). "Longitudinal dispersion in natural streams". *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 109, No. 5, pp. 1049-1067.
- Beltaos, S., and Day, T. J. (1978). "A field study of longitudinal dispersion. *Canadian Journal of Civil Engineering*", Vol. 5, No. 4, pp. 572-585.
- Bencala, K. E., and Walters, R. A. (1983). "Simulation of solute transport in a mountain pool-riffle stream: A transient storage model". *Water Resources Research*, Vol. 19, pp. 718-724.
- Bhowmik, N. G., and Demissie, M. (1982). "Bed material sorting in pools and riffles". *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineering*, Vol. 108, No. HY10, pp. 1227-1231.
- Castro, N. M., and Hornberger, G. H. (1991). "Surface-subsurface water interactions in an alluviated mountain stream channel". *Water Resources Research*, Vol. 27, pp. 1613-1621.
- Chatwin, P. C. (1980). "Presentation of longitudinal dispersion data. *Proceedings of the Journal of the Hydraulics Division*", American Society of Civil Engineering, Vol. 106, pp. 71-83.
- Cheong, T. S., and Seo, I. W. (2002). "Parameter estimation of the transient storage model by routing method for river mixing processes". *Water Resources Research*, accepted.
- Choi, J., Harvey, J. W. and Martha, H. C. (2000). "Characterizing multiple timescales of stream and storage zone interaction that affect solute fate and transport in streams". *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 6, pp. 1511-1518.
- D'Angelo, D. J., Webster, J. R., Gregory, S. V. and Meyer, J. L. (1993). "Transient storage in application and Cascade mountain streams as related to hydraulic characteristics". *Journal of North America Benthic Society*, Vol. 12, pp. 223-235.
- Fernald, A. G., Wigington, P. J. J., and Landers, D. H. (2001). "Transient storage and hyporheic flow along the Willamette River, Oregon: Field measurements and model estimates". *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 1681-1694.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). *Mixing Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York, N.Y.
- Hart, D. R. (1995). "Parameter estimation and stochastic interpolation of the transient storage model for solute transport in stream". *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 323-328.

- Harvey, J. W. and Fuller, C. C. (1998). "Effect of enhanced manganese oxidation in the hyporheic zone on basin-scale geochemical mass balance". *Water Resources Research*, Vol. 34, pp. 623-636.
- Harvey, J. W., Wagner, B. J., and Bencala, K. E. (1996). "Evaluating the reliability of the stream tracer approach to characterize stream-subsurface water exchange". *Water Resources Research*, Vol. 32, pp. 2441-2451.
- Hays, J. R. (1966). Mass transport mechanisms in open channel flow. Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Vanderbilt University, Nashville, Tennessee.
- Heemink, A. (1990). "Stochastic modeling of dispersion in shallow water. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*", Vol. 4, pp. 161-174.
- Jackman, A. P., Walters, R. A., and Kennedy, V. C. (1984). "Transport and concentration controls for Chloride, Strontium, Potassium and Lead in Uvas Creek, a small cobble-bed stream in Santa Clara County, California", U.S.A. 2. Mathematical modeling. *Journal of Hydrology*, Vol. 75, pp. 111-141.
- Keller, E. A. and Melhorn, W. N. (1978). "Rhythmic spacing and origin of pools and riffles". *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 89, pp. 723-730.
- Kim, B. K., Jackman, A. P., and Triska, F. J. (1990). "Modeling biotic uptake by periphyton and transient hyporheic storage of nitrate in a natural stream". *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 2743-2752.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., and Miller, J. P. (1964). *Fluvial Process in Geomorphology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Mulholland, P. J., Steinman, A. D., Marzolf, E. R., Hart, D. R., and Deangelis, D. L. (1994). "Effect of periphyton biomass on hydraulic characteristics and nutrient cycling in streams. *Oecologia*", Vol. 98, pp. 40-47.
- Nordin, C. F., and Sabol, G. V. (1974). Empirical data on longitudinal dispersion. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations 20-74, Washington, D. C.
- Nordin, C. F., and Troutman, B. M. (1980). "Longitudinal dispersion in rivers: The persistence of skewness in observed data". *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 123-128.
- Pedersen, F. B. (1977). Prediction of longitudinal dispersion in natural streams. *Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Series Paper*, No. 14, Technical University of Denmark.
- Richards, K. S. (1976). "Channel width and riffle-pool sequence". *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 87, pp. 883-890.
- Runkel, R. L., and Chapra, S. C. (1993). "An efficient numerical solution of the transient storage equations for solute transport in small streams". *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 211-215.
- Seo, I. W., and Cheong, T. S. (2001). "Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 6, pp. 453-465.
- Seo, I. W., and Maxwell, W. H. C. (1992). "Modeling low-flow mixing through pools and riffles". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 10, pp. 1406-1423.
- Singh, K. P., and Broeren, S. M. (1985). "Basinwide instream flow assessment model to evaluate instream flow needs." Water Resources Center Research Report 197, University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Stall, J. B. and Yang, C. T. (1972). Hydraulic geometry and low streamflow regimen. Water Resources Research Reports 54, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Thackston, E. L., and Schnelle, J. Karl B. (1970). "Predicting effects of dead zones on stream mixing. Proceedings of the Journal of the Sanitary Engineering Division", American Society of Civil Engineering, Vol. 96, pp. 319-331.
- Trisca, F. J., Duff, J. H., Avanzino, R. J. (1993). "The role of water exchange between stream channel and its hyporheic zone in nitrogen cycling at the terrestrial-aquatic interface". *Hydrobiologia*, vol. 251, pp. 167-184.
- Valentine, E. M., and Wood, I. R. (1979). "Dispersion in rough rectangular channels". Proceedings of the Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineering, Vol. 105, No. HY12, pp. 1537-1553.
- Wroblicky, G. J., Campana, M. E., and Dahm, C. N. (1998). "Seasonal variation in surface-subsurface

water exchange and lateral hyporheic area of two stream-aquifer systems". *Water Resources Research*, vol. 34, No. 3, pp. 317-328.

(논문번호:03-44/접수:2003.04.28/심사완료:2004.03.04)