

하상변화가 있는 자연하천에서의 오염물질 거동해석을 위한 주기적저장대모형 개발

Development of Axially Periodic Transient Storage Zone Model for the Solute Mixing in Natural Streams and Rivers with Various Bottom Boundaries

정태성* · 서일원**

Cheong, Tae Sung · Seo, Il Won

Abstract

A new model, the periodic transient storage zone model, is developed to describe solute transport mixing in natural streams and rivers with various bottom boundaries. To assess the effects of storage zones structure on transient storage exchange, we analyze data from salt and dye injection experiments in a recirculating laboratory flume with four spatially periodic pool-riffle sequences characteristic of natural river systems under low flow conditions. Dye injections show that solute transport mixing controlled by surface shapes of both the bed and the side in channels. As no existing transient storage model could represent these effects, we developed a new axially periodic transient storage zone model that better represent the effects of channel characteristics in natural river systems. The new model is also fitted to data from salt tracer injection experiments in four reaches of the upper Sabin River, Texas, USA. The proposed model is in good agreement with the field experimental data.

Keywords : *transient Storage model, axially periodic transient storage zones, solute transport, laboratory experiments, field experiments, parameter estimation*

요 지

본 연구에서는 하상변화가 존재하는 자연하천에서의 물질거동을 해석하기 위한 주기적저장대모형을 개발하였다. 저장대 구조에 따른 저장효과를 살펴보기 위하여 자연하천의 특성을 고려한 4개의 주기적 여울-소 구조를 갖는 와 흐름에서 소금물과 염료를 이용하여 실험한 모형실험결과를 이용하였다. 염료실험 결과, 물질이동 및 혼합거동은 하상 및 하안의 구조에 영향을 받는 것으로 나타났다. 기존의 저장대분산모형이 주기적으로 변화하는 저장대 구조에 의한 이동 및 질량교환 효과를 정확히 재현하지 못하는 것에 비해서 경계변화에 따른 질량교환 효과를 보다 효과적으로 재현할 수 있는 주기적저장대모형은 모형 실험 결과를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 새로운 저장대모형을 미국 텍사스주의 Sabin River에 적용하였으며, 그 결과는 실험을 통해서 수집된 농도분포를 잘 재현하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 저장대모형, 주기적저장대, 물질거동, 모형실험, 하천실험, 변수추정

1. 서 론

자연하천에서의 물질거동해석을 위한 저장효과의 중요성은 잘 알려져 왔으며(Beltaos와 Day, 1978; Valentine과 Wood, 1979; Chatwin, 1980; Hart, 1995; Wörman 등, 1998; Alexander 등, 2001), 자연하천의 하상과 하안의 불규칙한 경계구조는 질량의 저장 및 교환에 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 왔다(Seo와 Maxwell, 1997, Cheong과 Seo, 2003). 자연하천의 저장대는 유체흐름을 일정기간 지체하는 물리적 효과를 수행하는데, 이러한 저장대에는 하천의 하상 및 하안의 잠공흐름, 하상과 수상식물 간의 간극흐름과 소의 와류 등이 포함될 수 있다. 하천에 유입된 물질이 하류로

이동하면서 저장대를 만나면 저장대 특성과 저장대와 분류 흐름대간 질량 혹은 농도 차에 의하여 일정량이 저장대로 유입되었다가 일정시간 이후에 분류흐름대로 재 유입된다. 이러한 저장대는 하안 혹은 하상을 따라서 연속적으로 존재하는 것이 아니라 불연속, 불규칙적으로 존재한다. 따라서, 하천 흐름 구간 중 저장대와 분류흐름대가 만나는 흐름구간에서는 저장흐름 및 질량교환이 발생하지만 분류흐름대만이 존재하는 흐름구간에서는 이송 및 분산효과만이 나타나게 된다.

지금까지 복잡한 자연하천의 흐름특성을 고려한 물질거동해석을 위해 수많은 모형이 개발되어왔는데, 그 중 단순저장대모형(Thackston and Schnelle, 1970; Bencala *et al.*, 1990; and Runkel *et al.*, 1996a, b)은 자연하천에서의 물질 거동 및

*정희원 · 한국수자원공사 수자원연구원 연구원(E-mail : tscheong@gmail.com)

**정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수(E-mail : seoilwon@snu.ac.kr)

혼합특성을 해석하기 위한 대표적인 모델이다 (Bencala, 1984; Castro and Hornberger, 1991; and Rutherford *et al.*, 1995). 단순저장대모형은 분류흐름대와 분류흐름대에 연속적으로 존재하는 저장대간의 총 물질교환을 계산하는 1차 정도의 단순한 물질교환모델로써 자연하천의 물질거동을 재현하는데 한계가 있다(Wörman 등, 1998; Cheong과 Seo, 2003).

저장대분산모형은 분류흐름대내의 분산과정과 분류흐름대와 저장대간 질량교환을 개념화하여 모형에 고려하였다 (Richardson과 Parr, 1988; Cerling 등, 1990; Wörman 등, 1998; Cheong과 Seo, 2003). 저장대분산모형은 단순저장대 모형과 같이 저장대가 분류흐름대를 따라서 일정하게 분포되어 있다고 가정하고 오염물질의 거동특성을 해석하나 수심 혹은 지형변화에 따른 흐름특성 변화 및 질량교환특성을 고려한 분산계수를 사용하여 분류흐름대의 질량분포를 변화시킴으로써 지형변화에 따른 질량교환 효과를 모형에 고려하였다. 자연하천의 물질거동을 해석하기 위하여 단순저장대 모형과 저장대분산모형은 현재까지 널리 사용되어 오고 있으나(Bencala과 Walters, 1983; Wörman 등, 1998; Johansson 등, 2000; Jonsson과 Wörman, 2001), 두 모델은 질량교환 효과를 적절히 재현하지 못하는 것으로 나타났다(Beer와 Young, 1983; Kim 등, 1992; Harvey 등, 1996; Choi 등, 2000; Wörman 등, 2002; Cheong과 Seo, 2003). 저장대분산모형의 단점을 보완하여 Beer and Young(1983)은 일정한 크기의 연속 저장대가 분류흐름대를 따라 존재한다고 가정하고 저장대와 분류흐름대간의 질량교환을 해석한 모형을 제안하였으며, Choi *et al.*(2000)는 시간에 따라 변화하는 질량교환을 고려한 저장대분산모형을 제안하였다.

기본교환모형은 자연하천에 존재하는 간극흐름을 포함한 저장대와 분류흐름간 물질거동을 해석하기 위해 개발되었는데, 계산결과는 모형실험자료에서 수집된 저장대와 분류흐름대간의 질량교환을 잘 재현하는 것으로 나타났다(Elliott와 Brooks, 1997b; Packman 등, 2000b). 본 모형에서는 분류흐름대의 분산을 해석하기 위하여 펌핑이론을 적용하였으며, 질량교환을 해석하기 위하여 유속, 하안 및 하상재료의 분포 및 재료에 따른 투수성, 그리고 질량교환을 설명하는 하천지형자료로부터 구한 개념적 함수 식을 사용하였다(Thibodeaux와 Boyle, 1987; Harvey와 Bencala, 1993; Huettel 등, 1996; Elliott와 Brooks, 1997a; Hutchinson과 Webster, 1998; Packman, 1999; Packman과 Brooks, 2001; Wörman 등, 2002). 하천지형재료의 특성이나 분포에 따른 질량교환 및 지체시간 등의 효과를 구명하기 위하여 Kasahara와 Wondzell(2003)은 MODFLOW와 MODPATH를 이용하여 질량교환모델을 개발하였으며, 그 결과 하천지형재료의 특성이나 분포는 질량교환과 지체시간에 지대한 영향을 미친다는 것을 밝혔다. 기본교환모형의 적용을 위해서는 하안 및 하상재료의 분포 및 재료에 따른 투수성 그리고 질량교환을 설명하는 개념적 함수 식 등 실질적으로 수집이 어려운 변수와 함수 식을 이용 함으로써 자료 수집이 어렵고 결과 또한 특정 하천에 한정될 수 밖에 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 저장대 배치 및 형태에 따른 저장효과를 살펴보기 위하여 자연하천 특성을 고려한 주기적 여울-소 구

조를 갖는 다양한 외류 흐름 모형실험에서 수집된 농도분포 결과를 이용하였다. 새로운 주기적저장대모형에서는 자연하천의 여울-소 구조 특성을 토대로 분류흐름대를 따라 저장대를 주기적으로 배치 함으로서 분류흐름대의 흐름구조를 주기적으로 변화시켜 자연하천과 유사한 분산특성을 모형에 재현하였으며, 자연하천 소 구조 특성을 토대로 모형에 저장대를 재현 함으로서 자연하천과 유사한 질량교환이 모형에서 이루어지도록 하였다. 저장대의 주기적 배치를 위하여 자연하천에서 수집된 여울-소 구조 특성자료와 저장대모형 변수 자료로부터 구한 경험 식을 이용하였다. 모형실험과 수치실험 결과를 통하여 저장대의 형태와 배치가 저장대 질량교환 및 흐름교환에 미치는 영향 및 저장대내의 질량지체시간에 미치는 영향을 구명하였다. 새로운 모델을 미국 Texas주의 Sabin River에 적용하여 주기적저장대모형의 매개변수를 산정하였으며, 4개 지점에서 수집된 농도분포 자료와 비교하였다.

2. 주기적저장대모형의 개발

저장대 질량교환은 불규칙한 하상의 전단흐름과 하상의 재료와 분포에 따른 저장대 질량교환 계수들의 영향을 받는다. Fig. 1과 같은 형태의 저장대가 분류흐름대를 따라 주기적으로 존재하는 하천의 경우, 분류흐름대 유속은 분류흐름대만이 존재하는 구간에서는 빠른유속이 분류흐름대와 저장대가 동시에 존재하는 구간에서는 느린유속이 나타나는 등 하천을 따라서 주기적으로 변화할 것이다. 이것은 분류흐름대의

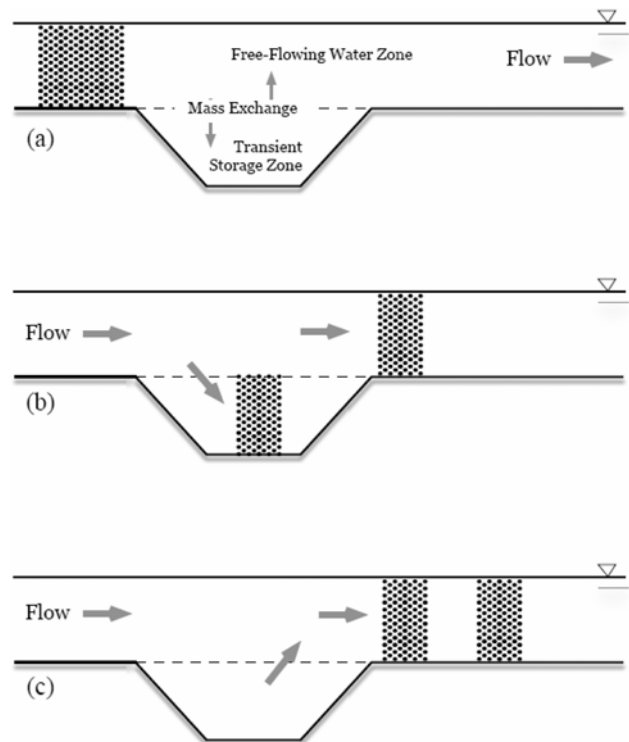


Fig. 1 The transient storage effect in a channel with free-flowing water zone and a number of bottom transient storage zones. (a) A solute of tracer being carried downstream on a flow. (b) At high velocity flow some of the particles are retrained in the transient storage zone. (c) The particles retrained in the transient storage zone reenter into the free-flowing water zone, but are separated from their previous main solute tracer.

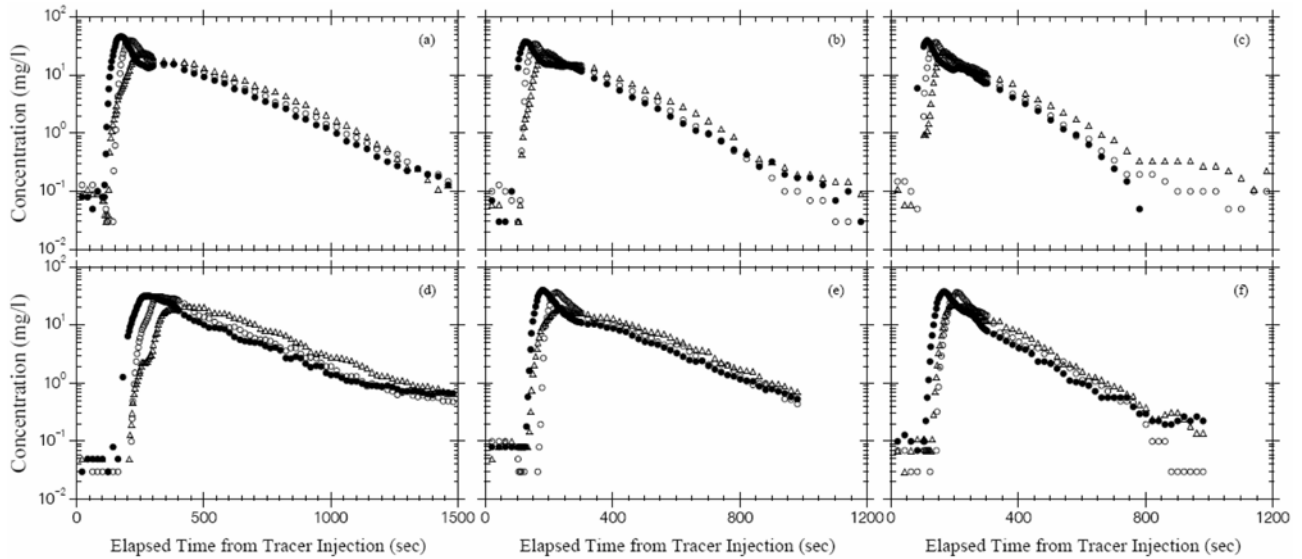


Fig. 2 The overall shape of concentration curves observed in laboratory channel. Series 1 (a), series 2 (b) and series 3 (c) are collected under smooth bed conditions. Series 6 (d), series 7 (e) and series 8 (f) are collected under rough bed conditions with gravel on the riffle sections. ● : Observed $x=27.4\text{m}$ in the free-flowing water zone; ▲ : Observed at $x=27.4\text{m}$ in the transient storage zone; and ○ : Observed at $x=32.9\text{m}$ in the transient storage zone. The shapes of particles distribution release back into the free-flowing water zone measured at $x=32.9$ is similar to the distributions retained in the transient storage zones measured at $x=27.4\text{m}$ in the transient storage zone.

모멘텀 변화가 주원인이며, 상대적으로 적은 모멘텀이 존재하는 저장대내에서는 주흐름의 반대방향으로 흐름이 발생하고 이로 인한 와 흐름에 의해 본류흐름과 저장대간 흐름교환이 발생한다. 수로 전체를 고려할 때 이러한 흐름교환은 주기적으로 발생하는 것으로 볼 수 있으며 이것은 저장대내에 심장을 설치하여 주기적으로 펄스흐름을 유도하여 본류흐름대로 유입하는 것과 같은 효과가 있다. 펄스흐름의 주기와 강도는 본류흐름대의 흐름유속과 분산 그리고 저장대의 형상 및 크기 그리고 본류흐름대와 저장대간에 존재하는 물질의 질량 혹은 농도 차 등에 의존 한다.

본류흐름대와 저장대간 질량교환은 이러한 펄스흐름과 더불어 질량 혹은 농도 차에 영향을 받게 되는데, Fig. 1a와 같이 본류흐름대에 유입된 물질은 하류를 따라 이동하며 유입물질 중 일부분은 저장대로 유입되고 대부분은 본류흐름을 따라 하류로 이동하게 된다(Fig. 1b). 본류흐름대를 따라서 이동하는 물질의 분포는 이송과 분산과정에 의존하게 되는데, 본류흐름대만 존재하는 구간에서는 물질이 빠르게 이동하며 분산이 커지고 본류흐름대와 저장대가 동시에 존재하는 구간에서는 물질이동이 느리고 분산도 작게 된다. 이러한 현상은 반복적으로 발생하며, 질량 혹은 농도분포는 거리에 따라 혹은 시간에 따라 각각 다른 분포를 갖는다. 이때 본류흐름대에 존재하는 질량 혹은 농도분포는 저장대로 유입되는 물질의 양에 영향을 미치며, 저장대내에 유입되었던 물질이 본류흐름대내로 재 유입되는 양에도 영향을 미치게 되는데, 이때 재 유입되는 물질의 양은 펄스흐름의 주기와 강도 등에 의존 한다(Fig. 1c). 펄스흐름의 주기가 클수록 본류흐름대를 따라 이동하던 물질과 저장대로부터 본류흐름대로 재유입된 물질의 이동거리는 커지며, 펄스흐름의 강도가 클수록 하류부의 질량 혹은 농도분포는 부차적인 용기 혹은 길고 두터운 꼬리 등의 양상을 보이게 된다. 만약 펄스흐름의 주기는 작으나 강도가 크다면 하류부 질량 혹은

농도분포는 부차적인 용기부분을 갖게 되며(Fig. 2의 400 sec시간에서의 농도), 펄스흐름의 주기가 크나 강도가 작으면 하류 부 질량 혹은 농도분포의 하류 부에는 길고 두꺼운 꼬리가 나타나게 된다(Fig. 2의 800sec 이후의 농도분포).

2.1 주기적저장대모형

주기적저장대모형은 본류흐름대 방정식과 저장대 방정식 2개의 방정식으로 정의된다. 저장대내에서 오염물질이 완전 혼합되어 저장대내의 농도가 본류흐름의 연직방향으로 일정하다고 가정하면 저장대와 본류흐름대 방정식은 다음과 같게 된다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C_f}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AK \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{Pk}{A} (C_s - C_f) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{Pk}{A_s} (C_f - C_s) \quad (2)$$

여기서 C_f 는 본류흐름대 농도, Q 는 유량, A 는 하천면적, P 는 본류흐름대와 저장대가 접하는 접선길이, K 는 종분산계수, k 는 질량교환계수, C_s 는 저장대 농도, x 는 종방향 거리, t 는 시간, 그리고 A_s 는 저장대 면적이다. 본 연구에서는 Tsai and Holley(1979)에 의해서 제안된 저장대와 본류흐름대간의 질량교환계수 $k(=A_s/TP)$ 를 사용하였다. 여기서 T 는 저장대 지체시간이다.

2.2 경계조건

일정한 농도를 갖는 보존성 오염물질이 순간적으로 유입된 경우, 본류대와 저장대에서의 초기 조건은 다음과 같다.

$$C_f(x, 0) = \beta_0 \frac{M}{A_f} \delta(x), \quad C_s(x, 0) = (1 - \beta_0) \frac{M}{A_f} \delta(x) \quad (3)$$

여기서 $C_f(x, 0)$ 는 본류흐름대내에 유입된 오염물질 초기농도, $C_s(x, 0)$ 는 저장대내 유입된 오염물질 초기농도, β_0 는 본류흐름대내 유입된 오염물질의 총 질량 M 에 대한 질

량비율, $1-\beta_0$ 는 저장대내 유입된 오염물질의 총 질량 M 에 대한 질량비율, 그리고 $\delta(x)$ 는 Dirac delta함수. 경계조건은 다음과 같다.

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

$$C_f(0, t) = 0 \quad (5)$$

2.3 수치모형

2.3.1 펄스흐름에 따른 분산거동

주기적저장대모형의 분류흐름대 방정식에 기술된 종방향 분산거동은 하천을 따라 균일하게 분포된 수평격자를 따라 확정론적인 방법으로 이송하고 확률론적인 방법으로 확산하는 입자추적모형을 사용하였다. 분류흐름대내에 유입된 오염물질 입자가 t 시간 이후에 x 지점에 도달하게 될 확률 $p(x, t)$ 는 Kramers-Moyal확장이론 (Risken, 1989)에 의해서 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \sum_{a=1}^{\infty} \frac{-1^a}{a!} \frac{\partial^a}{\partial x^a} \left[\frac{E(x^a)}{dt} p(x, t) \right] \quad (6)$$

여기서 $E(x)$ 는 균일격자상의 i 절점에 위치한 입자가 Δt 시간 이후에 절점 x 로 이동할 수 있는 평균예측거리이다. 입자이동은 흐름유속과 종분산계수 그리고 하천면적에 영향을 받으며 이들 각각의 변수들은 각각의 절점에서 기지의 값들이다. 입자의 분포를 결정하는 주요한 통계량 중 하나인 평균 $\langle x \rangle_i$ 은 Fokker-Planck방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle x \rangle_i = \left(U_i + \frac{\partial K}{\partial x} + \frac{K_i \partial A}{A_i \partial x} \right) \Delta t \quad (7)$$

만약 분산이 $\sigma_i^2 = \frac{2K_i}{\Delta x^2} \Delta t$ 와 같이 Fickian 분산을 따른다고 가정하면, n 시간에서의 λ 가능성을 갖는 i 주변절점 ($i-\lambda \dots i \dots i+\lambda$)에 위치한 입자들은 $n+1$ 시간 동안에 다음의 확률을 가지고 절점 i 로 이동할 수도 있다.

$$p(i, n+1) = \sum_{-\lambda}^{\lambda} p(i, n+1 | i-\lambda, n) p(i-\lambda, n) \quad (8)$$

만약 $\lambda=1$ 이라면 $n+1$ 시간 동안 이동한 입자가 각각의 절점 $i-1, i, i+1$ 에 위치할 확률 $p_{i-1}^{n+1}, p_i^{n+1}, p_{i+1}^{n+1}$ 은 다음과 같다.

$$p_{i-1}^{n+1} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{[AK]_{i+1}^n + 2[AK]_i^n + [AK]_{i-1}^n}{2A_i^n} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \left[\frac{[AK]_{i+1}^n - [AK]_{i-1}^n}{A_i^n} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\frac{U_i \Delta t}{\Delta x} + \frac{1}{2} \right) + \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \left(\frac{U_i \Delta t}{\Delta x} + 1 \right) \right] \right] \quad (9)$$

$$p_i^{n+1} = 1 - \frac{[AK]_{i+1}^n + 2[AK]_i^n + [AK]_{i-1}^n}{2A_i^n} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{[AK]_{i+1}^n - [AK]_{i-1}^n}{A_i^n} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} - \left(\frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right)^2 \quad (10)$$

$$p_{i+1}^{n+1} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{[AK]_{i+1}^n + 2[AK]_i^n + [AK]_{i-1}^n}{2A_i^n} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \left[\frac{[AK]_{i+1}^n - [AK]_{i-1}^n}{A_i^n} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\frac{U_i \Delta t}{\Delta x} - \frac{1}{2} \right) + \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \left(\frac{U_i \Delta t}{\Delta x} - 1 \right) \right] \right] \quad (11)$$

$n+1$ 시간단계 절점 i 에서의 질량을 DM_i^{n+1} 이라고 한다면 이때의 질량은 다음 식과 같이 n 시간단계 절점들 $i-1, i, i+1$ 의 질량에 각 절점의 확률을 곱한 값의 합으로 주어지게 된다.

$$DM_i^{n+1} = p_{i-1}^{n+1} M_{i-1}^n + p_i^{n+1} M_i^n + p_{i+1}^{n+1} M_{i+1}^n \quad (12)$$

여기서 DM_{i-1}^{n+1}, DM_i^n , 그리고 DM_{i+1}^n 은 시간단계 절점들 $i-1, i, i+1$ 의 질량이다. $n+1$ 시간단계 절점 i 에서의 분류흐름대 농도 $DC_{f_i}^{n+1}$ 는 식 (12)로부터 구한 질량변수를 이용하여 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$DC_{f_i}^{n+1} = p_{i-1}^{n+1} \frac{A_{i-1}^n}{A_i^{n+1}} C_{f_{i-1}}^n + p_i^{n+1} \frac{A_i^n}{A_i^{n+1}} C_{f_i}^n + p_{i+1}^{n+1} \frac{A_{i+1}^n}{A_i^{n+1}} C_{f_{i+1}}^n \quad (13)$$

여기서 $C_{f_{i-1}}^n, C_{f_i}^n$, 그리고 $C_{f_{i+1}}^n$ 은 n 시간단계 절점들 $i-1, i, i+1$ 에서의 분류흐름대 농도, A_{i-1}^n, A_i^n , 그리고 A_{i+1}^n 은 n 시간단계 절점들 $i-1, i, i+1$ 에서의 수로면적, 그리고 A_i^{n+1} 은 $n+1$ 시간단계 절점 i 에서의 수로면적이다.

2.3.2 분류흐름대와 저장대간 농도교환

저장대 농도교환을 모형에 재현하기 위하여 주기적저장대 모형 방정식의 해석 해를 다음과 같이 구하였다.

$$AC_{f_i}(t) = [AC_{f_0} + PkC_s(t)] \exp\left(-\frac{Pk}{A} \Delta t\right) \quad (14)$$

$$A_s C_s(t) = [A_s C_{s0} + PkC_f(t)] \exp\left(-\frac{Pk}{A_s} \Delta t\right) \quad (15)$$

여기서 C_{f_0} 는 분류흐름대내에 유입된 물질의 초기농도 그리고 C_{s0} 는 저장대내에 유입된 물질의 초기농도이다. 각 절점 간 거리가 일정하고 시간간격이 일정하다면 $n+1$ 시간단계 절점 i 에서의 분류흐름대 농도 $C_{f_i}^{n+1}$ 는 식 (14)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{f_i}^{n+1} = DC_{f_i}^{n+1} + C_{f_i}^n \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^n} \Delta t\right) + \frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} C_{si}^{n+1} \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} \Delta t\right) \quad (16)$$

여기서 C_{si}^{n+1} 는 $n+1$ 시간단계 절점 i 에서의 저장대 농도 그리고 P_i^n 은 n 시간단계 절점 i 에서의 분류흐름대와 저장대가 접하는 면의 접선길이이다. 각 절점 간 거리가 일정하고 시간간격이 일정하다면 $n+1$ 시간단계 절점 i 에서의 저장대 농도 C_{si}^{n+1} 는 식 (15)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{si}^{n+1} = C_{si}^n \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_{si}^n} \Delta t\right) + \frac{P_i^n k}{A_{si}^{n+1}} C_{f_i}^{n+1} \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_{si}^{n+1}} \Delta t\right) \quad (17)$$

여기서 C_{si}^n 는 n 시간단계 절점 i 에서의 저장대 농도이다.

2.3.3 펄스흐름에 따른 분산거동과 분류흐름대와 저장대간 농도교환 방정식의 결합

분류흐름대 질량교환방정식 (16)의 분류흐름대 농도 $C_{f_i}^{n+1}$ 를 구하기 위해서는 미지의 저장대 농도 C_{si}^{n+1} 를 먼저 계산하여야 한다. 흐름과 물질이동 사이의 상호관계를 연구하기 위하여 이 두 농도는 미지의 값이므로 반복작업을 통하여 오차를 최소화는 미지의 값을 결정하여야 하나, 이

방법은 계산시간 면에서 효율적이지 못하므로 본 연구에서는 두 방정식 (16-17)을 결합하는 다음과 같은 주기적저장대 모형을 구성하였다.

$$C_{f_i}^{n+1} = DC_{f_i}^{n+1} + C_{f_i}^n \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^n} \Delta t\right) + \frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} C_{s_i}^n \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} \Delta t - \frac{P_i^n k}{A_{s_i}^n} \Delta t\right) + \frac{(P_i^n)^2 k^2}{A_i^{n+1} A_{s_i}^{n+1}} C_{f_i}^{n+1} \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} \Delta t - \frac{P_i^n k}{A_{s_i}^n} \Delta t\right) \quad (18)$$

식 (18)에는 미지의 농도 $C_{f_i}^{n+1}$ 가 제거되지 않고 존재하여 두 방정식이 결합되기 전과 같이 반복작업이 필요하므로 식 (18)우측의 미지 값을 좌측으로 이동하고 정리하면 기지의 값만을 이용하여 펄스흐름에 따른 분산거동과 분류흐름대와 저장대간 농도교환을 계산할 수 있는 다음과 같은 주기적저장대모형이 개발된다.

$$C_{f_i}^{n+1} = \frac{DC_{f_i}^{n+1} + C_{f_i}^n \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^n} \Delta t\right) + \frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} C_{s_i}^n \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} \Delta t - \frac{P_i^n k}{A_{s_i}^n} \Delta t\right)}{1 + \frac{(P_i^n)^2 k^2}{A_i^{n+1} A_{s_i}^{n+1}} \exp\left(-\frac{P_i^n k}{A_i^{n+1}} \Delta t - \frac{P_i^n k}{A_{s_i}^n} \Delta t\right)} \quad (19)$$

2.4 주기적 하상변화 재현

자연하천과 유사한 오염물질의 거동 및 질량교환을 재현하기 위하여 분류흐름대를 따라 주기적으로 반복되는 소-여울 형태의 저장대를 모형에 재현하였다. 본 연구에서는 Fig. 3에 도시된 것과 같은 제형저장대를 모형에 주기적으로 배치하였다. 주기적저장대에 배치된 제형저장대 제원은 소-여울 하상구조를 갖는 자연하천에서 수집된 특성자료를 이용하여 구하였다(Singh과 Broeren, 1985; Bhowmik, 1979; Stall과 Yang, 1972). 주기적 저장대모형에 재현된 주기적저장대 제원 중 저장대 길이 $L_s=3.80W$, 저장대간 거리 $L_r=1.25W$, 저장대 경사면 길이 $L_t=0.39W$, 그리고 W 는 하폭이다. 주기적 저장대 모형의 중요한 변수 중 하나인 저장대 높이 h_r 은 분류흐름대와 저장대면적비를 이용하여 다음 식으로부터 구한다.

$$h_r = \frac{\epsilon h_s L_{sr}}{(1-\epsilon)(L_s + L_t)} \quad (20)$$

여기서 ϵ 는 분류흐름대와 저장대면적비 이다 ($=h_s p/hP$). Fig. 3에서 S_n 는 모형에 재현된 저장대 총수로서 총 하천길이 L_{sr} 를 저장대 길이로 나눈 값이다. 본 모형을 성공적으로 수행하기 위해서는 종분산계수, 저장대 질량교환계수, 분류흐름대와 저장대 면적비 등의 변수가 주어져야만 한다. 본 연

구에서는 추적방법을 이용하여 구한 매개변수를 초기치로 하여 주기적저장대를 모형에 재현하고 계산된 농도분포와 측정된 농도분포를 비교하는 방법으로 모형의 변수를 추정하였다. 이때 계산된 농도분포와 측정된 농도분포를 비교하기 위하여 결정계수 $R^2=1-(\sigma_r^2/\sigma_o^2)$ 를 사용하였는데, 결정계수가 일정한 값에 도달할 때까지 모형변수를 새롭게 가정하고 주기적저장대 모형에 재현하여 농도분포를 계산하는 과정을 반복한다. 본 연구에서는 최적화 기법으로서 robust 비선형 최적화 기법(Cheong and Seo, 2003)을 사용하였다.

3. 모형의 검증

주기적저장대모형의 검증 및 저장대분산모형과의 비교를 위하여, Seo와 Maxwell(1992)이 6가지의 다양한 수리조건에서 수집한 수리량 자료 및 농도 자료를 이용하였다. Seo와 Maxwell(1992)은 갈수기 하천에서의 분산 거동을 살펴보기 위하여 길이 49m, 폭 2.8m의 직사각형 수로에 갈수기 자연 하천 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 하상조건에서 실험이 수행되었다. 시간에 따른 농도분포는 오염물질 유입지점으로부터 27.4m 그리고 32.9m 떨어진 지점에서 측정이 이루어졌다. 주기적저장대모형의 매개변수들은 모형에서 직접 측정되었거나 분산실험을 통해서 수집된 농도분포로부터 결정되었다. 종분산계수는 Fischer 등 (1979)에 의해서 제안된 추적방법 (routing method)을 이용하여 실험에서 구한 농도분포를 최적화 하는 방법으로 결정되었다. 본 연구에서 사용된 수리량 자료 및 저장대모형 변수 자료들은 Table 1에 정리하여 수록하였다.

모형실험결과와 비교하기 위하여 주기적저장대모형의 시간 증분은 2초, 길이증분은 1 cm를 사용하였다. 모의를 위해서 모형실험에서 수집된 변수자료를 사용하였으며 종분산계수는 하도를 따라 일정한 것으로 가정하였다. 하도를 따르는 각 지점에서의 흐름면적은 hp 를 사용하였으며 저장대면적은 h_p 을 사용하였다. 주기적저장대모형의 검증을 위하여 6개 series중 1과 8두개의 series에 대해서 유입지점으로부터 27.4m 그리고 32.9m 떨어진 지점에서 본 모형과 저장대분

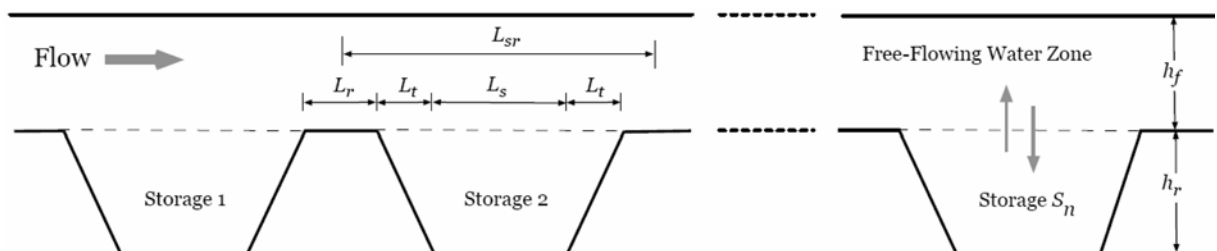


Fig. 3 Definition sketch of the free-flowing water zone and the transient storage zones of the periodic transient storage zone model

Table 1. Hydraulic variables and parameters observed in the experiment channel [Seo and Maxwell, 1992]

Series	Q	h, m		U*	U	K	ϵ	k
	m ³ /s	Pool	Riffle	m/s	m/s	m ² /s		m/s
1	0.013	0.148	0.022	0.058	0.108	0.048	0.47	0.007
2	0.020	0.155	0.029	0.060	0.140	0.054	0.45	0.012
3	0.026	0.160	0.034	0.061	0.156	0.045	0.45	0.014
6	0.013	0.171	0.027	0.063	0.123	0.046	0.39	0.004
7	0.019	0.179	0.033	0.064	0.146	0.039	0.40	0.006
8	0.025	0.186	0.038	0.065	0.173	0.045	0.36	0.007

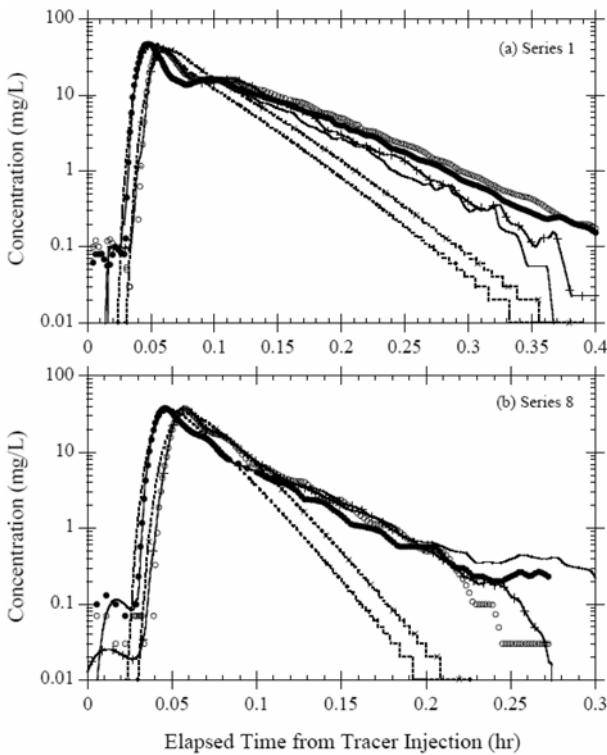


Fig. 4 Comparisons of simulated dye concentration distribution with measured data collected after instantaneous injection of a salt solution into laboratory channels under low-flow conditions through pool and riffle sequences. ○ : Observed at x=27.4m; ● : Observed at x=32.9m; - - - : Simulated by traditional transient storage model at x=27.4m; ···· : Simulated by traditional transient storage model at x=32.9m; - · - · : Simulated by proposed model at x=27.4m; and — : Simulated by proposed model at x=32.9m. While the traditional transient storage model fails to describe the secondary hump and the plateau region of the tail, the proposed model provides a good fit to the observed solute data for all reaches.

산모형으로부터 계산된 농도분포를 실측치와 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 모형실험에서 실측된 농도분포 곡선은 상승부는 경사가 급하고 하강부는 긴 꼬리를 가지며, 일부는 부차적인 용기부를 갖는 왜곡된 형태이다.

Series 1의 경우 분류흐름대와 저장대면적비가 0.47로 비교적 크며 흐름유속이 0.21 m/s로 상대적으로 느린 흐름조건을 갖는다. 이 경우, 오염물질 유입초기에 분류흐름대내에 확산이 상대적으로 적은 밀집된 농도가 존재하게 되고 이러한 농도가 비교적 크기가 큰 저장대를 만나면 많은 양의 농도

가 순간적으로 저장대내로 유입된다. 이때 유입되지 않은 대부분의 농도는 분류흐름을 따라 하류로 이동하게 되는데 농도분포의 확산도가 크지 않으므로 대부분의 농도가 저장대를 지나가는데 상대적으로 짧은 시간이 소요되어 저장대내에 유입되었던 많은 양의 농도 농도가 짧은 시간 안에 분류흐름대로 대부분 재 유입된다. 따라서 Series 1의 경우에는 저장대내에 유입되었던 농도가 짧은 저장기간(짧은 펄스주기) 이후에 분류흐름대로 많은 양의 농도(큰 펄스강도)가 재 유입됨으로써 하류부에서 수집된 농도분포에서 부차적인 용기부분이 나타난다. 이후 오염물질은 하류부로 이동하면서 이러한 펄스흐름과 농도교환을 반복하게 되는데, 농도분포의 확산이 증가하면 저장대로 유입되는 농도가 감소하게 되고 저장대로 유입되었던 농도가 분류흐름대로 재 유입되는 시간이 길어지게 되어 수집된 농도분포의 꼬리부분에 발생하는 편평부 혹은 농도분포의 긴 꼬리 형태로 나타난다.

Series 8의 경우 분류흐름대와 저장대면적비가 0.37로 비교적 작으며 흐름유속이 0.27 m/s로 상대적으로 빠른 흐름조건을 갖는다. 이 경우는 확산이 상대적으로 커지게 되므로 오염물질 유입초기에 분류흐름대내에 상대적으로 확산된 농도가 존재하게 되고 이렇듯 저장대내 유입가능성이 상대적으로 적은 농도가 비교적 크기가 작은 저장대를 만나면 적은 양의 농도가 단계적으로 저장대내로 유입된다. 이때 유입되지 않은 대부분의 농도는 분류흐름을 따라 하류로 이동하게 되는데 농도분포의 확산도가 커서 분류흐름대의 농도가 저장대를 지나가는데 상대적으로 긴 시간이 소요되어 저장대내에 유입되었던 적은 양의 농도 농도가 긴 시간 동안 단계적으로 분류흐름대로 재 유입된다. 따라서 Series 8의 경우는 긴 펄스주기와 작은 펄스강도에 의해 하류부에서 수집된 농도분포에서 부차적인 용기부분은 나타나지 않고 편평부 혹은 두터운 꼬리부가 나타나게 된다. 이후 오염물질은 하류부로 이동하면서 이러한 펄스흐름과 농도교환을 반복하게 되는데, 농도분포의 확산이 증가하면서 저장대로 조금씩 지속적으로 농도가 유입되었다가 농도가 감소하는 꼬리부분에서 일시적으로 재 유입되는 경우 Fig. 4(b)에서와 같이 농도분포의 꼬리부분에 부차적인 용기부가 발생할 수 있다.

주기적저장대모형으로부터 구한 농도분포는 전반적으로 실측농도분포를 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 침투농도 및 침투농도에 이르는 시간을 정확히 재현하는 것으로 나타났다. 반면 연속적 저장대 구조를 갖는 저장대분산모형은 실측 농도분포에 나타난 것과 같은 농도분포의 굴곡을 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 농도분포의 부차적인 용기

는 저장대의 불연속성으로 인한 본류흐름대와 저장대간 펄스흐름과 더불어 질량 혹은 농도 차의 불규칙성에 기인한다.

4. 모형의 적용

자연하천에서의 적용성을 검토하기 위하여 자연하천 특성이 잘 보존되어 있으며, 하상에 여울 소 구조가 잘 발달된 미국 텍사스주의 Sabin River에서 수행된 하천실험 자료를 이용하였다. Sabin River의 실험구간 하폭은 5.9-21.6m, 수심은 0.4-1.1m, 그리고 하상경사는 0.000258이며, Fig. 5에 도시된 바와 같이 하천실험이 수행된 구간의 총 길이는 86 km, 하천의 하류를 따라서 Farm Road 47 Wills Pont (22.0 km), State HWY 19 Emory(54.22 km), Farm Road 47 Grand Saline(68.87 km), US HWY 40 West Mineola (85.92 km)의 4개 지점에서 시간에 따른 농도분포의 측정이 수행되었다. 실험 수행 구간의 유량은 0.48-1.33 m³/s이며, 실험을 위하여 Rhodamine WT용액을 이용하였다. 주기적저장대 수치모형실험을 위하여 제형구조를 갖는 단순화된 1200개의 수치모형에 재현하였으며, 시간증분은 1 min을 사용하였다. 본 연구에서는 저장대모형의 매개변수를 추정하기 위하여 추적방법 결과를 초기치로 가정하고 계산 농도분포 결과와 실측 농도분포 결과를 비교하는 방법으로 최적의 매개변수를 산정하였으며, 산정된 매개변수 결과를 정리하여 Table 2에 수록하였다. 주기적저장대모형의 적용성을 검토하기 위하여 산정된 매개변수를 이용하여 시간에 따른 농도분포를 계산하였다. 계산된 새로운 주기적저장대모형 결과 및

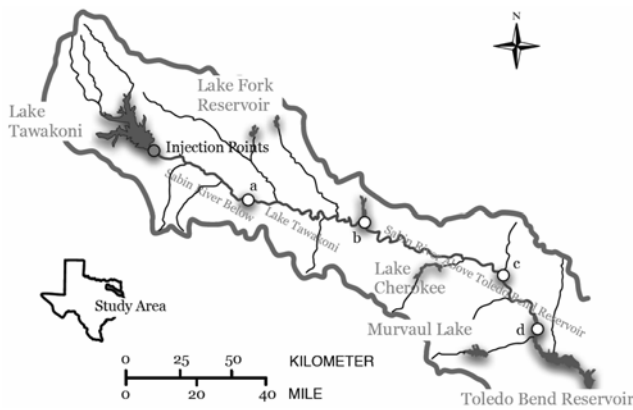


Fig. 5 Map of the upper Sabin River, Texas, U. S. A. The length of the total study reach is about 85.92km downstream of the tracer injection site with stations a, b, c, and d located at 22.0, 54.22, 68.87, and 85.92km downstream of the injection site, respectively.

Table 2. Reach characteristics and parameters of the transient storage model in the lower Shingobee River, Minnesota, U.S.A and in the upper Sabin River, Texas

River	L	A	U	K	ϵ	k (10^{-4})
	km	m ²	m/s	m ² /s		m/s
a	22.20	3.213	0.223	4.44	0.018	0.05
b	54.22	16.84	0.079	5.37	0.024	0.17
c	68.87	2.623	0.183	5.41	0.022	1.43
d	85.92	9.104	0.134	3.80	0.037	1.12

저장대분산모형 결과를 실측 농도자료와 비교하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에 도시된 바와 같이 Sabin River에서 수집된 농도분포는 부차적인 용기부분이 잘 나타나 있으며 저장대분산모형은 이러한 하강부의 부차적 용기부분을 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)의 경우 본류흐름대와 저장대면적비가 0.018로 가장 작으며 흐름유속은 0.223 m/s로 가장 빠른 반면 상대적

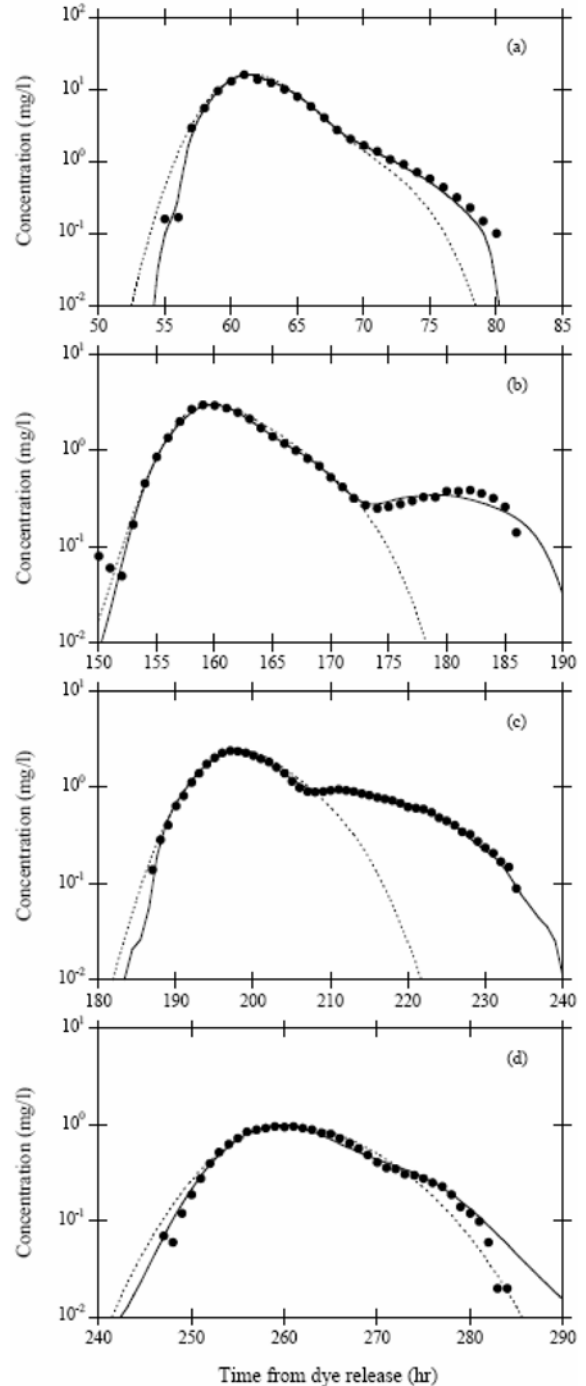


Fig. 6 The overall shape of concentration curves observed in Sabine River, TX. (a), (b), (c), (d) are collected in the Sabine River, TX, U.S.A. : Observed at $x = 22.20$ km, $x = 54.22$ km, $x = 68.87$ km, and $x = 85.92$ km respectively; - - - : Simulated by traditional transient storage model; and — : Simulated by proposed model. While the traditional transient storage model fails to describe the bimodal shape and tail region of the concentration curves, the proposed model provides a good fit to the observed solute data for all reaches.

으로 작은 종분산계수를 갖는 흐름조건이다. 이 경우는 저장대 크기가 작으므로 적은 양의 농도가 저장대로 유입되었다가 분류흐름대의 빠르게 이동하는 농도분포의 영향으로 펄스주기는 짧고 펄스강도는 작은 거동으로써 침투농도 근처에서 편평한 부분이 약하게 나타난다. Fig. 6(a)에 도시된 것과 같이 저장대분산모형은 침투부의 약한 편평부를 잘 재현하지 못하는 반면 주기적저장대모형은 실측농도를 잘 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)의 경우는 분류흐름대와 저장대면적비가 0.024로 비교적 크며 흐름유속은 0.079 m/s로 상대적으로 느린 반면 종분산계수가 상대적으로 큰 흐름조건이다. 이 경우는 저장대 크기가 비교적 크므로 많은 양의 농도가 저장대로 유입되었다가 분류흐름대의 넓게 확산하며 느리게 이동하는 농도분포의 영향으로 펄스주기는 길고 펄스강도는 강한, 즉 오랜 시간 저장대에 머물러 있다가 저장대의 농도가 한번에 분류흐름대로 재 유입되면서 꼬리 부분에 부차적인 용기부가 강하게 나타난다. 저장대분산모형은 꼬리부의 강한 부차적인 용기를 전혀 재현하지 못하는 반면 주기적저장대모형은 실측농도분포 꼬리부의 강한 부차적인 용기를 잘 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 6(c)의 경우 분류흐름대와 저장대면적비가 0.022로 Fig. 6(b)와 비슷하나 흐름유속이 0.183 m/s로 빠른 흐름조건을 갖는다. 이 경우는 저장대 크기가 비교적 크므로 많은 양의 농도가 저장대로 유입되었다가 분류흐름대의 확산하며 빠르게 이동하는 농도분포의 영향으로 펄스주기는 짧고 펄스강도는 강한, 즉 짧은 시간 저장대에 머물러 있다가 저장대의 농도가 한번에 분류흐름대로 재 유입되면서 침투농도 근처에서 부차적인 용기부가 강하게 나타난다. 저장대분산모형은 침투부의 강한 부차적인 용기를 전혀 재현하지 못하는 반면 주기적저장대모형은 침투부의 강한 부차적인 용기를 잘 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 6(d)의 경우 분류흐름대와 저장대면적비가 0.037로 가장 크며 흐름유속이 0.134 m/s으로 비교적 느린 흐름조건을 갖는다. 이 경우는 저장대 크기가 크므로 많은 양의 농도가 저장대로 유입되었다가 분류흐름대의 느리게 이동하는 농도분포의 영향으로 펄스주기는 길고 펄스강도는 강한, 즉 많은 양의 농도가 긴 시간 저장대에 머물러 있다가 저장대의 농도가 한번에 분류흐름대로 재 유입 되면서 꼬리 근처에서 강한 부차적인 용기부가 나타난다. Fig. 6(d)의 경우는 가장 하류 부에 위치한 관계로 비교적 많은 수의 위와 같은 농도교환 과정을 반복적으로 수행함으로써 해서 수집된 농도분포의 부차적인 용기부는 크지 않으며 반복적으로 나타난 것을 알 수 있는데, 저장대분산모형은 비교적 실측농도분포를 잘 재현하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

자연하천의 오염물질이동 및 질량교환을 보다 정확히 재현하기 위하여 분류대를 따라서 다수의 저장대가 주기적으로 존재하는 새로운 주기적저장대모형을 개발하였다. 주기적저장대모형의 분류흐름대와 저장대간 질량교환은 펄스흐름에 의한 펄스주기와 펄스강도로 설명될 수 있는데, 이들은 흐름과 분산 그리고 저장대와 분류흐름대 면적비와 더불어 질량 혹은 농도 차에 영향을 받는다. 자연하천과 유사한 저장대를

모형에 재현하기 위하여 기존의 하천조사 연구결과를 토대로 제형구조의 저장대를 수치모형에 주기적으로 배치하였다. 새로운 주기적저장대모형의 검증을 위하여 모형실험에서 실측된 시간에 따른 농도분포 결과와 비교하였는데, 새로운 주기적저장대모형은 실험결과를 잘 재현하는 반면 저장대분산모형은 농도의 부차적 용기부분과 꼬리의 편평부분을 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 새로운 주기적저장대모형의 적용성을 검토하기 위하여 미국 텍사스주의 Sabin River에서 수집된 시간에 따른 농도분포와 수치모의 결과를 비교한 결과 본 연구에서 개발된 주기적저장대모형이 자연하천의 오염물질이동 및 질량교환을 잘 재현하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 BK21사업(서울대학교 사회기반 건설 사업단)과 과학기술부 특정기초 연구비 지원(과제번호: R01-2006-000-11027-0; 과제명: 연안수질환경 개선을 위한 하천-해양 통합 해석기술 개발)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 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*, 37, pp. 1681-1694.
- Beer, T. and Young, P.C. (1983) Longitudinal dispersion in natural streams. *Journal of Environmental Engineering*, 109, pp. 1049-1067.
- Beltaos, S. and Day, T.J. (1978) A field study of longitudinal dispersion. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 5, pp. 572-585.
- Bencala, K.E. (1984) Interactions of solutes and streambed sediment 2. A dynamic analysis of coupled hydrologic and chemical processes that determine solute transport. *Water Resources Research*, 20, pp. 1804-1814.
- Bencala, K.E., McKnight, D.M., and Zellweger, G.W. (1990) Characterization of transport in an acidic and metal-rich mountain stream based on a Lithium tracer injection and simulations of transient storage. *Water Resources Research*, 26, pp. 989-1000.
- 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*, 19, pp. 718-724, 1983.
- Bhowmik, N.G. (1979) Hydraulics of flow in the kaskaskia river, Illinois. *Illinois State Water Survey Report of Investigation*, 91, Champaign, Illinois.
- Castro, N.M. and Hornberger, G.H. (1991) Surface-subsurface water interactions in an alluviated mountain stream channel. *Water Resources Research*, 27, pp. 1613-1621.
- Cerling, T.E., Morrison, S.J., Sobocinski, R.W., and Larsen, I.L. (1990) Sediment-water interaction in a small stream: Adsorption of ^{137}Cs by bed load sediments. *Water Resources Research*, 26, pp. 1165-1176.
- Chatwin, P.C. (1980) Presentation of longitudinal dispersion data. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 106, pp. 71-83, 1980.
- Cheong, T.S. and Seo, I.W. (2003) Parameter estimation of the transient storage model by routing method for river mixing processes. *Water Resources Research*, 39, pp. HWC 1-11.
- 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*, 36, 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*, 12, pp. 223-225.
- Dibble, D. and Bostrom, R.P. (1987) *Managing expert systems projects: factors critical for successful implementation*, ACM Press, New York, N.Y.
- Elliott, A.H. and Brooks, N.H. (1997a) Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bedforms: Theory, *Water Resources Research*, 33, pp. 123-136.
- Elliott, A.H. and Brooks, N.H. (1997b) Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bedforms: Laboratory experiments. *Water Resources Research*, 33, pp. 137-151.
- Fischer, H.B. (1968) Dispersion predictions in natural streams. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 94, pp. 927-943.
- Hart, D.R. (1995) Parameter estimation and stochastic interpolation of the transient storage model for solute transport in stream. *Water Resources Research*, 31, pp. 323-328.
- Harvey, J. and Bencala, K.E. (1993) Effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. *Water Resources Research*, 29, pp. 89-98.
- 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*, 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*, 32, pp. 2441-2451.
- Huettel, M., Ziebis, W., and Forster, S. (1996) Flow-induced uptake of particulate matter in permeable sediments. *Limnology and Oceanography*, 41, pp. 309-322.
- Hutchinson, P.A. and Webster, I.T. (1998) Solute uptake in aquatic sediments due to current-obstacle interactions. *Journal of Environmental Engineering*, 124, pp. 419-426.
- Johansson, H., Jonsson, K., Forsman, J., and Wörman, A. (2000). Retention of conservative and sorptive solutes in rivers-simultaneous tracer experiments. *Science of the Total Environment*, 266, pp. 229-238.
- Jonsson, K., and Wörman, A. (2000) Effect of sorption kinetics on the transport of solutes in streams. *Science of the Total Environment*, 266, pp. 239-247.
- Kasahara, T. and Wondzell, S.T. (2003) Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams. *Water Resources Research*, 38, pp. X 1-14.
- Kim, B.K.A., Jackman, A.P., and Triska, F.J. (1992) Modeling biotic uptake by periphyton and transient hyporheic storage of nitrate in a natural stream. *Water Resources Research*, 28, pp. 2743-2752.
- Mills, W.B. (1972) Travel time for solutes, upper sabin river basin, Texas, April 16-30, 1972. *U.S. Geological Open File Report*.
- 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.
- Packman, A.I. (1999) Scaling bedform-driven exchange between a stream and a finite stream bed. *Paper Presented at 28th International Association for Hydraulic Research Congress, Graz, Austria*.
- Packman, A.I. and Brooks, N.H. (2001) Hyporheic exchange of solutes and colloids with moving bed forms. *Water Resources Research*, 37, pp. 2591-2605.
- Packman, A.I., Brooks, N.H., and Morgan, J.J. (2000b) Kaolinite exchange between a stream and streambed: Laboratory experiments and validation of a colloid transport model. *Water Resources Research*, 36, pp. 2363-2372.
- Richardson, C.P. and Parr, A.D. (1998) Modified Fickian model for solute uptake by runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 144, pp. 792-809.
- Risken, H. (1989) *The Fokker-Plank equation-Methods of solution and application*, 2nd Ed., Springer-Verlag, Berlin.
- Runkel, R.L., Bencala, K.E. Broshers, R.E., and Chapra, S.C. (1996a) Reactive solute transport in streams, 1, Development of an equilibrium-based model. *Water Resources Research*, 32, pp. 409-418.
- Runkel, R.L., Bencala, K.E. Broshers, R.E., and Chapra, S.C. (1996b) Reactive solute transport in streams, 2, Simulation of a pH modification experiment. *Water Resources Research*, 32, pp. 419-430.
- Rutherford, J.C., Boyle, J.D. Elliott, A.H. Hatherell, T.V.J., and Chiu, T.W. (1995) Modeling benthic oxygen uptake by pumping. *Journal Environmental Engineering*, 21, pp. 84-95.
- Seo, I.W. and Maxwell, W.H.C. (1992) Modeling low-flow mixing through pools and riffles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118, pp. 1406-1423.
- Singh, K.P. and Broeren, S.M. (1985) Basinwide instream flow assessment model to evaluate in stream 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 regime. *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 American Society of Civil Engineering*, 96, pp. 319-331.
- Thibodeaux, L.J. and Boyle, J.D. (1987) Bedform-generated convective-transport in bottom sediments, *Nature*, 325, pp. 341-343.
- Tsai, Y.H. and Holley, E.R. (1979) Temporal and spatial moments for longitudinal mixing in prismatic channels with storage in separation zones. *Department of Civil Engineering Research Grant NSF-ENG-76-11220*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Valentine, E.M. and Wood, I.R. (1979) Dispersion in rough rectangular channels. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 105, pp. 1537-1553.
- Wörman, A., Forsman, J., and Johansson, H. (1998) Modeling retention of sorbing solutes in streams based on a tracer experiment using ⁵¹Cr. *Journal of Environmental Engineering*, 124, pp. 122-130.
- Wörman, A., Packman, A.I., Johansson, H., and Jonsson, K. (2002) Effect of flow-induced exchange in hyporheic zones on longitudinal transport of solutes in streams and rivers. *Water Resources Research*, 38, pp. 2-1-15.

(접수일: 2006.8.30/심사일: 2006.11.3./심사완료일: 2006.11.3)