

自然河川에서 汚染物質의 擴散 및 貯藏에 관한 연구 Investigation of Dispersion and Storage Processes of Pollutants in Natural Streams

徐 一 源* · 劉 大 率**
Seo, Il Won · Yu, Dae Young

Abstract

Mathematical models have been developed in which storage-release processes of pollutants are modeled to explain storage effect of variations of flow and channel geometry on mixing and transport of polluted releases in natural channels including low flow conditions. The models were tested by using the laboratory dispersion data. Comparisons between concentration-time curves predicted by using the proposed model incorporating two different submodels show that Storage-Diffusion Model seems to be superior in explaining physical processes inside the storage zone to the Storage-Exchange Model even though accuracies of simulation results by two models are about the same. The proposed model shows significant improvement over the conventional one-dimensional dispersion model in predicting natural mixing processes in open channels.

요 지

갈수기를 포함한 자연하천에서의 오염물질의 擴散 및 移動 거동을 정확하게 예측하기 위하여 하천수로의 존재하는 貯藏帶의 영향과 貯藏帶에서의 오염물질의 貯藏 및 再放出 과정을 보다 정확하게 설명할 수 있는 수학적 모형을 개발하였다. 수학적 모형은 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하고, 실험자료를 통해 검증하였다. 貯藏帶에서의 오염물질의 貯藏過程을 설명하기 위한 두 개의 서로 다른 貯藏過程 副模型을 결합시킨 모형의 모의결과, 두 모형의 정확도에 있어서는 서로 대등하지만, 貯藏-擴散 모형이 貯藏-交換 모형보다 貯藏 및 交換過程을 물리적으로 더욱 정확하게 표현할 수 있음이 밝혀졌다. 본 연구에서 개발된 貯藏-交換 모형과 貯藏-擴散 모형은 자연 하천으로 방류된 오염물질의 擴散 및 混濁특성을 예측하는 모형으로서 종래의 1차원 擴散模型에 비해 월등히 개선된 모형으로 판단된다.

* 서울대학교 공과대학 토목공학과, 조교수

** 서울대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

1. 서 론

대부분의 도시하수 및 산업폐수가 유입되는 자연 하천에는 항상 다양한 오염원으로부터의 여러 종류의 오염물질의 유입 위험성이 존재한다. 자연하천에 위험한 오염물질이 사고에 의해서 방출되었거나, 도시하수 및 공장폐수가 시간적 변화성을 갖고 방류되었을 경우, 오염물질의 縱擴散에 대한 정확한 이해가 필요하며 이러한 오염물질의 縱擴散 거동을 예측하기 위해서 Taylor(1954)에 의해 제안된 1차원 Fickian 확산모형이 널리 사용되어 왔다. 1차원 확산모형은 초기 및 경계조건들이 주어지는 경우에 해석적인 해를 용이하게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 실제 자연하천에서 수집된 오염물질의 농도분포곡선의 특성을 해석하는 데는 부적합하다는 지적을 받아왔다(Fischer et al., 1979). 자연하천에서 실제로 측정된 오염물질의 농도분포곡선은 Taylor에 의해 제안된 초기기간 후에도 농도분포의 分散이 비선형적인 거동을 보이고 있으며, 또한 오염물질의 농도-시간 분포곡선은 왜곡되어 나타나며, 농도분포곡선의 하강부에는 꼬리를 가지고 있음이 관찰되었다. 이러한 현상은 하천의 河床이나 河岸에 존재하는 貯藏帶 혹은 死帶가 오염물질의 일부를 일시 貯藏했다가 오염물질의 주체가 관측지점을 통과한 후에 서서히 本流로 재방출하는 메카니즘 때문에 일어나는 것으로 제안되어왔다.

그리하여 자연하천의 확산현상을 보다 적합하게 예측하기 위해서는 하천수로의 일부지역에 존재하는 貯藏帶의 영향이 포함되어야 한다고 Hays 등(1967)에 의해서 처음 제안된 이후, 윤태훈(1977), Valentine과 Wood(1979), Bencala와 Walters(1983), 그리고 Jackman 등(1984) 등 여러 연구자들에 의해 오염물질의 貯藏過程이 연구되었다. 그들이 제안한 소위 '死帶模型(dead zone model)'은 이러한 하천의 하상 및 하안에 존재하는 사대 혹은 저장대의 영향을 고려한 모형으로서 종래의 1차원 모형보다 개선된 것이었으나, 모형의 주요 매개변수를 실험에 의해서 직접 측정된 것이 아니라 측정자료에 모형을 최적 적합화시킴으로서

매개변수를 추정하였고 또한 貯藏帶에서 물질의 貯藏機構와 交換機構에 대한 정확한 수학적인 모형의 개발은 이루어지지 않았다.

Seo(1990), Seo와 Maxwell(1992)은 갈수기 하천의 수리학적인 특성 및 저장효과를 고려한 오염물질의 확산 및 수송거동의 예측을 위해서 수치해석적인 모의와 물리적 모형실험을 수행했다. 이들은 종래에 널리 사용해 왔던 1차원 Fickian 확산모형이 하상 및 하안에 다양한 불규칙성 및 요면이 존재하는 자연하천에서의 확산메카니즘을 서술하는데 부적합함을 보여 주었으며, 자연확산특성을 보다 적합하고 완전하게 설명할 수 있는 貯藏帶模型(storage zone model)을 개발하였다. 이들은 물리적 모형실험을 통해서 갈수기 하천에서 지배적인 河床形象인 웅덩이급여울(pool-riffle) 連續構造 등에 의한 河床의 불규칙성이 오염물질의 혼합 및 수송특성에 미치는 영향이 매우 지대함을 발견하였다.

본 연구의 주요목적은 갈수기를 포함한 자연하천에서의 오염물질의 擴散 및 移動 舉動을 예측하는데 필수적인 요소로 밝혀진 貯藏帶에서의 오염물질의 貯藏 및 再放出 과정을 보다 정확하게 설명할 수 있는 물리적인 이론과 수학적 모형을 개발하는데 있다. 개발된 수학적 모형은 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하고, 실험실에서 물리적 모형 실험을 수행해서 수집된 자료를 통해 검증하고자 한다.

2. 1차원 확산모형의 한계점

保存性: 오염물질에 관한 1차원 확산모형은

$$A \frac{\partial C}{\partial t} = -UA \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[KA \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (1)$$

이며, 여기서 A 는 흐름 斷面積, C 는 오염물질의 흐름 斷面 平均 濃度, U 는 흐름 斷面 平均 流速, K 는 縱擴散係數, t 는 시간, 그리고 x 는 평균 흐름 방향의 좌표이다.

위험한 오염물질이 자연하천에 사고에 의해서 방출되었거나, 도시하수 및 공장폐수가 시간적 변화

성을 갖고 방류되었을 경우, 초기조건은 유입된 오염물질 총량(M)이 순간적 또는 비교적 짧은 시간에 하천에 주입된다고 가정하여 유도하며, 또한 1차원 확산모형에서는 주입된 오염물질이 비교적 짧은 시간에 河川 全斷面에 걸쳐 완전 혼합이 일어난다고 가정한다. 상기가정이 유효하고 하천단면이 일정한 경우에 1차원 Fickian 확산방정식의 해석적인 해는 다음과 같다.

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi Kt}} \exp\left[-\frac{(X-Ut)^2}{4Kt}\right] \quad (2)$$

식 (2)로 표시되는 1차원 확산방정식의 해석적인 해, 즉 시간과 공간의 변화에 따른 오염물질의 농도분포곡선은 平均 $\mu=Ut$, 分散 $\sigma^2=4Kt$ 로 표시되는 確率密度函數를 갖는 정규분포이며, 어느 한 시점 $t=t$ 에서의 농도분포곡선 $C(x, t)$ 는 대칭적이고 鐘 模樣的 분포를 보인다. 그러나 자연하천에서 실제적으로 측정된 오염물질의 농도분포곡선은 식 (2)에 의해 예측되는 것보다 훨씬 왜곡되어 나타나며, 농도분포곡선의 하강부에 긴 꼬리를 가지고 있음이 관찰되었다.

3. 수학적 모형의 개발

3.1 개념적 모형

본 모형에서는 개념적으로 하천단면을 두개의 서로 상이한 영역인 本流帶(flow zone)와 貯藏帶(storage zone)로 분리한다(서일원, 1993; 서일원과 유대영, 1994). 본류대에서는 평균유속에 의한 移送과 縱擴散에 의해 오염물질이 수송된다고 가정한다. 저장대는 갈수기에 지배적인 하상구조인 웅덩이-급여울 連續構造나 기타 수로단면의 불규칙성에 의해서 수로바닥이나 兩岸에 생성되며, 渦流나 再循環流가 발생하는 영역으로서 본류대와의 접촉한 면에서 質量交換이 일어나고 있다고 가정한다. 웅덩이-급여울 連續構造는 連續된 웅덩이와 급여울로 구성된 하상형상으로서, 웅덩이는 하천구간 중의 수심이 깊고 물의 흐름이 느린 구간으로 오염물질이 移動하는 과정에서 오염물질의 일부를 貯藏

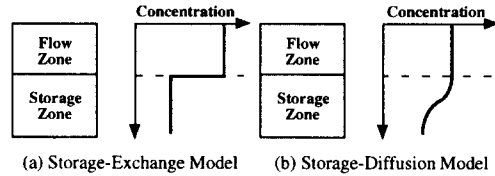


Fig. 1. Schematic Illustration of the Proposed Models

-再放出하는 기능을 가진 貯藏帶의 역할을 하며, 급여울은 수심이 얇고 물의 흐름이 매우 빠른 구간으로 오염물질의 평균 移送速度를 크게 증대시키는 것으로 밝혀진 바 있다(Seo, 1990).

본 연구에서는 저장대 내에서 물질의 저장 및 전달과정을 설명하기 위해서 두 개의 다른 副模型을 개발하여 본 모형에 결합시켜 저장효과가 지배적인 하천에서의 오염물질의 확산 및 저장거동을 예측하였다. 이렇게 결합된 모형을 각각 貯藏-交換 模型(Storage-Exchange Model)과 貯藏-擴散 模型(Storage-Diffusion Model)이라고 명명하였다(Fig. 1). 저장-교환 모형에서는 물질 저장 및 전달 기구로서 교환과정이 사용되었으며, 저장-확산 모형에서는 Fickian 확산과정에 의하여 물질 저장 및 전달 기구가 모형화되었다.

3.2 지배방정식

3.2.1 본류대 방정식

본 모형의 지배방정식은 수학적으로 본류대와 저장대의 물질수송을 규정하는 質量保存의 法則을 이용하여 유도된다. 흐름이 定常流일 경우에 본류대의 質量平衡式은

$$A_f \frac{\partial C}{\partial t} = -U_f A_f \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (K A_f \frac{\partial C}{\partial x}) - FP \quad (3)$$

이며, 여기서 A_f 는 본류대의 단면적, U_f 는 본류대에서의 평균유속, F 는 단위면적당 質量交換率, 그리고 P 는 橫方向 또는 鉛直方向의 본류대와 저장대사이의 潤邊이다. 즉 P 는 본류대와 저장대가 접촉하고 있는 변의 길이를 의미한다.

Table 1. Comparison between Storage-Exchange Model and Storage-Diffusion Model

	저장-교환 모형	저장-확산 모형
차원	약한 준 2차원 (本流帶와 貯藏帶 분리)	강한 준 2차원 (貯藏帶 내 2차원 농도장 계산)
유입 및 저장 과정	농도차이에 의한	난류확산에 의한
貯藏帶 내 농도분포	y방향으로 일정함	y방향으로 변함

3.2.2 저장대 방정식

貯藏-交換 模型: 본 모형에서는 저장대 내에서의 본류의 흐름과 垂直인 방향의 농도분포는 일정하다고 가정한다. 본류대와 저장대 간의 질량교환율은 질량교환계수와 두 영역 사이의 농도차이에 비례한다고 정의한다.

$$F = k(C - S) \quad (4)$$

여기서 k 는 질량교환계수이고 S 는 저장대에서 오염물질의 농도이다.

저장대 내에서의 물질저장 기구는 本流帶와는 달리, 평균유속에 의한 移送과 縱擴散에 의한 오염물질의 수송은 무시할 정도로 작으며 단지 渦流나 再循環流에 의해서 오염물질이 완전 혼합되어 저장대 내의 농도분포는 일정하다고 가정한다. 본류대와의 인접한 면에서 質量交換에 의한 sink/source 항만을 고려하면 저장대의 質量平衡式은

$$A_s \frac{\partial S}{\partial t} = FP \quad (5)$$

이며 여기서 A_s 는 본류의 평균흐름과 수직인 방향의 저장대 단면적이다. 즉 A_s 는 하천 단면적의 일부로서 종방향 흐름이 존재하지 않는 부분의 면적을 의미한다.

貯藏-擴散 模型: 본 모형에서는 저장대 내에서의 물질저장 기구로 본류의 흐름과 수직인 방향으로 Fickian식의 확산메카니즘이 지배적이라고 가정한다. 본류대와 저장대 간의 접촉면에서의 질량교환율 F 는 Fickian식의 확산율로 정의하며 이는 다음과 같다.

$$F = -\epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (6)$$

여기서 ϵ_y 는 저장대에서의 난류확산계수이고, y 는 본류의 흐름과 垂直인 방향좌표이다.

저장대에서는 평균유속에 의한 移送과 縱擴散에 의한 오염물질의 수송은 무시하고 본류의 평균흐름과 수직인 방향의 난류확산만이 지배적인 물질수송 기구라고 가정한다. Fickian식의 난류확산을 고려하면 저장대의 質量平衡式은

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad (7)$$

이며, 저장-교환 모형과는 달리 평균흐름과 수직인 방향의 확산항을 고려하기 때문에 y방향의 농도분포가 일정한 값 혹은 평균값이 되지 않고 Fig. 1에 표시한 것과 같이 농도경사를 갖는다. 따라서 저장-확산 모형의 경우에는 저장대 내에서 본류의 흐름과 수직인 방향(y)으로 Fickian식의 난류확산항을 고려하기 위해 흐름방향의 거리좌표와 이에 수직인 방향의 거리좌표의 농도분포를 계산하여야 하기 때문에 저장대 내에서 濃度場은 x, y 및 시간 t 의 함수가 된다. 저장-교환 모형과 저장-확산 모형의 차이점을 비교하여 Table 1에 수록하였다.

3.3 初期 및 境界條件

3.3.1 本流帶

순간적인 오염물질의 유입을 가정하면, Dirichlet型 초기조건은 다음과 같다.

$$C(0, x) = C_0 \quad -\frac{\Delta x}{2} \leq x \leq \frac{\Delta x}{2} \quad (8a)$$

$$C(0, x) = 0 \quad x = \text{elsewhere} \quad (8b)$$

여기서 C_0 는 $M/(A_{x=0} \cdot \Delta x)$ 이며, x 는 거리증분이다. 오염물질이 上·下流 방향 모두 무한한 공간으로 확산할 수 있을 때의 Dirichlet型 경계조건은 다음과 같다.

$$C(t, \pm\infty) = 0 \quad (9)$$

3.3.2 貯藏帶

貯藏-交換 模型: 저장-교환 모형의 경우 초기조건은 오염물질이 초기에 하천의 본류대에만 유입된다고 가정해서 유도한다. 이 경우, Dirichlet型 초기조건은 다음 식으로 표시된다.

$$S(0, x) = 0 \quad (10)$$

오염물질이 上·下流 方向 모두 무한한 공간으로 확산할 수 있을 때의 Dirichlet型 경계조건은 다음과 같다.

$$S(t, \pm\infty) = 0 \quad (11)$$

貯藏-擴散 模型: 저장-확산 모형의 초기조건은 저장-교환 모형의 경우와 같이 오염물질이 초기에 하천의 본류대에만 유입된다고 가정해서 유도한다. 이 경우, Dirichlet型 초기조건은 다음 식으로 표시된다.

$$S(0, x, y) = 0 \quad (12)$$

경계조건은 본류대-저장대사이의 接觸面에서의 오염물질 농도는 평균농도로 표시되는 본류대의 농도와 같다는 가정과 저장대의 y 방향 末端 (즉 河床이나 河岸)에서 물질이 출입할 수 없다는 Neumann型 경계조건으로 표시할 수 있다는 가정에 다음과 같이 나타낸다.

$$S(t, x, 0) = C(t, x) \quad (13a)$$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial y} \right|_{y=L_s} = 0 \quad (13b)$$

여기서 L_s 는 저장대의 y 방향 길이이다.

3.4 數値解析 方法

제안된 수학적 모형은 初期 및 境界條件의 복잡성, 모형매개변수의 불균일성 및 저장대에 의한 질량교환項의 존재로 기인해서 해석적인 해를 도출함이 불가능하다. 그리하여 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하는데, Seo(1990)에 의해서 실험된 여러가지 방법 중에서 수치확산등의 오차의 극소화와 아울러 계산시간등의 경제성도 상대적으로 우월함이 밝혀진 Stone과 Brian(1963)의 6점 有限差分法을 사용한다. Crank-Nicholson 陰解法에 기초한 이 방법은 안정성 제한 조건에 구애받지 아니하며, 切斷誤差가 $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$ 로서 다른 음해법의 切斷誤差 $O(\Delta t + \Delta x^2)$ 에 비해 높은 정도를 가지고 있다. 여기서 Δt 는 시간증분이다.

본류대 및 저장대 방정식의 시간 미분항 $\partial C/\partial t$ 는 分布形 後方差分으로 근사하였으며, 擴散項은 Crank-Nicholson식의 中央差分法을 사용하여 표시하였다. 본류대방정식의 移送項도 Crank-Nicholson식의 中央差分法을 사용하여 표시하였다. 확산모형에서 질량교환항은 중앙차분법을 사용하여 차분화하였으며, 저장대의 y 방향 말단경계(하상이나 하안)에서의 Neumann型 경계조건도 중앙차분법을 사용하여 차분화하였다. 이렇게 차분화시킨 항들을 본류대 및 저장대의 지배방정식에 대입한 후 모든 節點에 대해서 전개하면 線型 代數方程式이 되며 그 계수가 대칭 행렬식으로 표시되며, 이는 Gaussian소거법의 일종인 Thomas방법에 의해 해를 구할 수 있다. 제안된 모형에서는 본류대 및 저장대 방정식의 source/sink항으로 인해서 생성된 미지수 항을 처리하기 위해 추가적인 반복계산을 필요로 한다.

저장-확산 모형의 경우에는 모형의 疑似 2차원성이 저장-교환 모형에 비해 더욱 두드러지기 때문에 계산상 절차가 더욱 복잡하다. 본류대방정식의 해를 구하기 위해서는 x 방향의 모든 절점에서 저장대로부터의 질량교환률의 값이 필요하다. 그래서 저장대 방정식의 해를 먼저 구하여야 하는데,

이를 위해서는 본류대에서의 농도값이 저장대의 代數方程式의 경계조건으로서 필요하다. 그래서 본류대 농도의 초기 추정치를 사용해서 저장대 방정식의 해를 구하고 이를 사용하여 본류대 농도를 계산한 후 추정치와 계산한 값의 오차가 바람직한 오차 한계에 들어 올 때까지 반복계산을 수행한다. 본 연구의 경우 농도의 차를 무차원화한 값이 0.001 이내에 들어오도록 오차한계를 설정하였다. 저장-확산 모형의 경우 시간경과에 따른 농도분포를 계산하기 위하여 Δy 를 적절히 입력시켜야 하는데, 웅덩이나 급여울에 대하여 동일한 갯수의 y 중분을 사용하였을 경우 수치해가 불안정해지는 경우가 발생한다. 즉, 수심이 매우 작은 급여울에서는 수심을 10개이상의 y 중분으로 나누어 계산하였을 경우 수치해가 불안정하여지는데, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Δy 가 특정한 값 이하가 되는 경우에는 저장과정 부모형으로서 확산모형 대신에 교환모형을 사용하여 저장대의 농도를 계산하도록 모형을 구성하였다.

4. 모형의 적용 및 검증

4.1 모형의 적용

본 연구에서 개발된 모형을 검증하기 위해서 Seo(1990)에 의해서 수집된 실험자료를 이용하였다. 실험은 4개의 웅덩이-급여울 연속구조로 이루어진 실험실 모형에서 수행되었으며, 이의 기하학적인 형태는 이미 밝혀진 갈수기 자연하천시스템의 수로특성과 수리학적 相似法則에 근거하여 결정되었다. 서로 다른 유량조건에서 6개 군의 水理量 및 擴散量 자료를 수집되었는데, 1-3 군은 매끄러운 급여울조건에서 실험을 수행해서 수집한 자료이며, 6-8 군은 급여울 구간 상에 中央粒徑이 1.59cm인 강자갈을 1층 두께로 고르게 깔고서 실험을 수행해서 수집한 자료이다. 실험유량은 갈수기 유량조건을 재현하도록 결정되었다.

Seo와 Maxwell(1992)과 서일원(1993)은 본 실험자료를 분석한 결과, 오염물질의 저장효과를 가지는 저장대는 웅덩이의 경우 종래의 연구와는 달리 웅덩이 저층부에 연직면상에 재순환류 구역이

존재하지 않고, 불균일한 유속의 횡방향분포에 기인한 수평면상에 재순환류 구역이 존재함을 밝혔다. 또한 유속이 매우 빠른 급여울의 경우, 하상재료사이의 간극(interstices)에 존재하는 저장대가 저장효과를 가지고 있으나, 웅덩이 구간에 형성되는 대규모 와류에 의한 저장효과보다는 상당히 작은 것으로 구명한 바 있다.

수치모형에서는 실험모형의 웅덩이-급여울 連續構造를 흐르는 不均一한 흐름에 의해 생성된 再循環流帶에 의한 貯藏효과를 정확하게 재현하기 위해서, 수리학적 변수들(수심, 유속, 저장대면적)은 웅덩이와 급여울구간에서 한 개의 일정한 값을 가지는 것으로 가정하였고 웅덩이와 급여울사이의 遷移구간에서는 선형으로 변화하는 것으로 가정하였다. 질량교환계수와 난류확산계수도 상기가정을 따르는 것으로 하였으나, 종확산계수는 실험 전구간에 걸쳐 동일한 값을 사용하였다. 모형 모의에 사용한 水理量 및 擴散量 자료를 Table 2에 요약해서 나타내었다. Table 2에 수록한 모형 매개변수 중에서 저장대 내에서의 횡방향 난류확산계수, ϵ_v 는 실측된 자료가 없어서 일반적인 자연하천에서의 횡방향 난류확산계수 자료를 이용하여 추정하였다. Fig. 2에 실측된 무차원 횡방향 난류확산계수와 마찰인자의 함수간의 관계를 도시하였다. Fig. 2에서 이들 간의 근사적인 선형관계가 성립하고 있음이 관찰되며, 본 연구에서는 이러한 관계를 이용하여 횡방향 난류확산계수를 추정하였으며, 추정한 값을 Fig. 2에 다른 실측치와 함께 도시하였다. 모형의 입력자료로서 사용한 水理量 및 擴散量 자료는 실제 측정된 실측치를 사용하되 모형의 보다 나은 거동을 위하여 약간씩 조정된 값을 입력한 경우도 있었는데, 이러한 조정은 Seo(1990)의 민감도 분석 결과에 의거하여 볼 때 아주 미세한 것이었으며 또한 실측오차의 범위 내에 들어가는 정도여서 큰 문제가 없으리라 사료된다. 특히 A_s/A 의 경우, 두 모형에서 약간 다른 값을 사용하였는데 이러한 차이 역시 실측오차의 범위 내에서 들어가는 정도이며, 또한 Seo(1990)의 민감도 분석에 의하면 침투 농도값이 약 5% 내외로 변동하는 수준이라고 보고된 바 있다.

Table 2. Summary of Model Parameters Used in the Simulation

Series	Q (m ³ /s)	Depth(m)		K (m ² /s)	A _s /A		k (m/s)	ε _v (m ² /s)
		Pool	Riffle		Stroage-Exchange Model	Stroage-Diffusion Model		
1	0.0127	0.148	0.022	0.048	0.63	0.69	0.0064	0.00232
2	0.0204	0.155	0.029	0.054	0.61	0.67	0.0117	0.00604
3	0.0255	0.160	0.034	0.045	0.59	0.65	0.0137	0.00557
6	0.0130	0.171	0.027	0.046	0.41	0.43	0.0040	0.00121
7	0.0190	0.179	0.033	0.039	0.52	0.57	0.0064	0.00260
8	0.0249	0.186	0.038	0.045	0.43	0.45	0.0066	0.00204

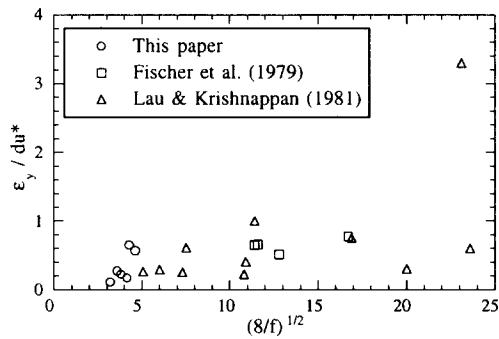


Fig. 2. Variation of Dimensionless Transverse Turbulent Diffusion Coefficient to Friction Factor

4.2 모의결과의 분석

웅덩이($x=27.4\text{m}$)와 급여울($x=32.9\text{m}$) 지점에서 모의에 의한 농도-시간 분포곡선과 실측된 농도-시간 분포곡선과 비교하여 Fig. 3에 도시하였다. 전체적인 곡선형태에 있어서, 제안된 모형에 의해서 예측된 농도-시간 분포곡선들이 1차원 확산모형에 의해서 예측된 농도-시간 분포곡선들보다 실측자료에 더욱 일치하고 있음을 알 수 있다. 저장-확산 모형과 저장-교환 모형 모두 실

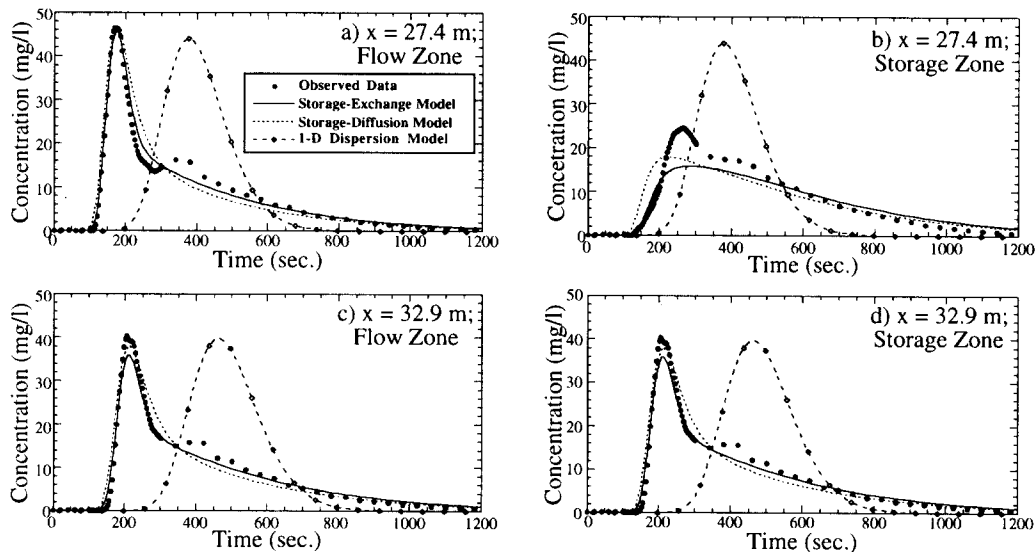


Fig. 3 Concentration-Time Distribution of Observed Data and Distributions Fitted by Stroage-Exchange, Storage-Diffusion Model and 1-D Dispersion Model(Series1)

측곡선을 매우 정확하게 예측하고 있다. 첨두농도의 경우, 제안된 모형은 실측자료에 매우 근사하게 예측하고 있으나, 1차원 확산모형은 많은 경우에 과대 예측하고 있다. 더욱 두드러지게 나타나는 사실은 제안된 모형은 첨두농도에 이르는 시간을 매우 정확하게 예측하고 있으나, 1차원 확산모형은 현저하게 과대 예측하고 있다는 것이다.

모형 모의에 의한 농도-시간 분포곡선 및 실측된 농도-시간 분포곡선의 통계학적 특성들을 Fig. 4에 도시하였다. 1차원 확산모형은 농도 분포곡선

의 도심의 평균이송시간은 실측치와 근사하고 있으나, 분산 및 왜곡도(skewness)는 매우 과소 예측하고 있다. 이에 비해 두 제안된 모형은 실측자료를 매우 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3에서도 밝혀진 바와 같이 첨두농도의 경우, 제안된 모형은 실측자료에 매우 근사하게 예측하고 있으나, 1차원 확산모형은 많은 경우에 과대 예측하고 있다. 나아가서 제안된 모형은 첨두농도에 이르는 시간을 매우 정확하게 예측하고 있으나, 1차원 확산모형은 현저하게 과대 예측하고 있음을 알 수 있

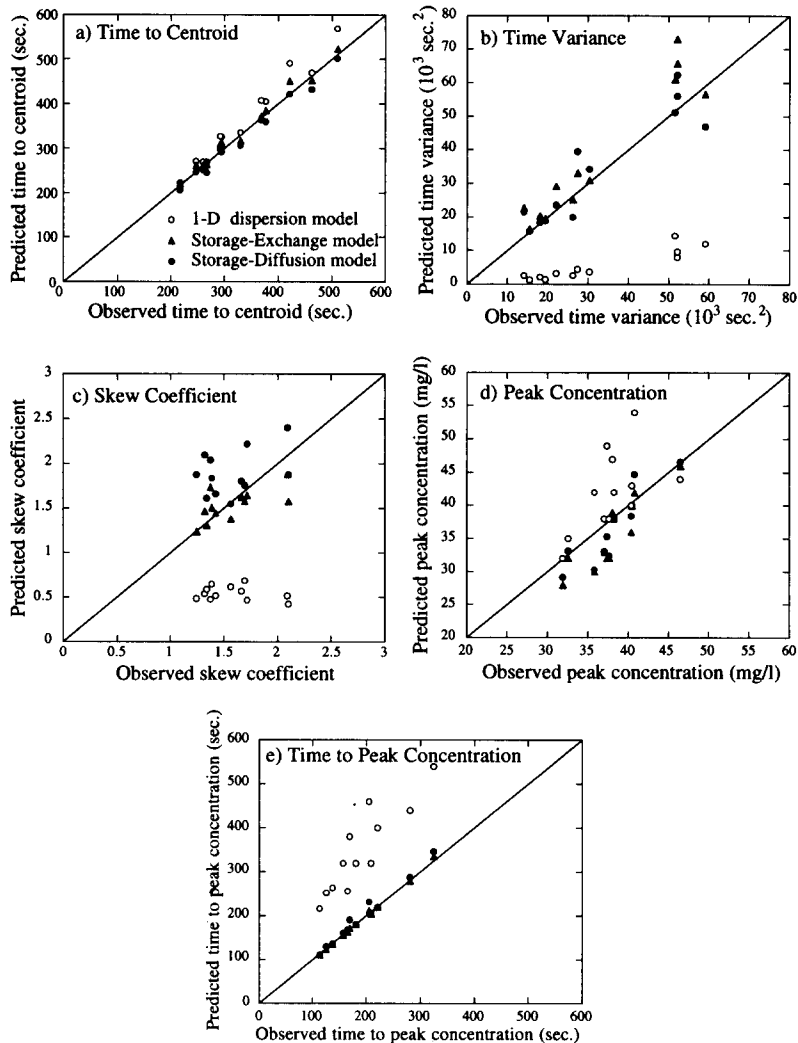


Fig. 4. Comparisons of Model Simulations with Observed Data

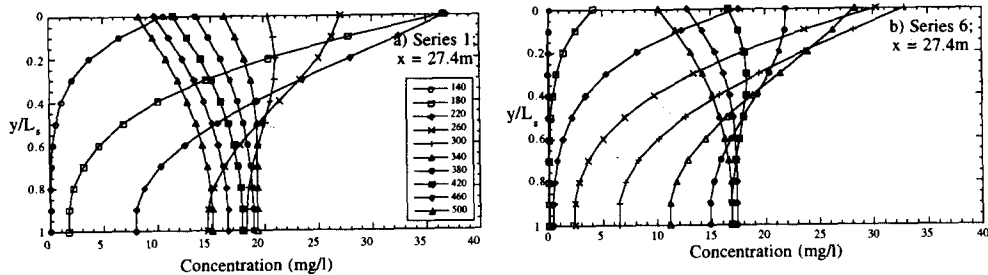


Fig. 5. Lateral Concentration Distributions Computed by Storage-Diffusion Model

다. 따라서 저장-확산 모형과 저장-교환 모형 모두 실측곡선을 매우 정확하게 예측하고 있다는 점에서 종래의 1차원 확산모형보다 모두 우수한 모형으로 사료된다.

Fig. 5에는 저장-확산 모형에 의한 웅덩이 구간의 중앙지점($x=27.4m$)에서의 저장대 내에서의 농도분포를 도시한 것이다. 시간의 경과에 따른 y 방향의 농도경사 분포를 살펴보면 초기에는 본류대와 저장대의 접촉면에서 농도가 높고 y 가 증가하는 방향으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 시간이 경과해서 본류대의 존재하는 오염물질의 주체가 지나간 후에는 접촉면에서의 농도가 낮고 y 가 증가하는 방향으로 농도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 저장-확산 모형에 의해 계산된 웅덩이 구간($x=23.2\sim 31.4m$)의 본류대와 저장대에서의 2차원적 농도분포를 시간의 경과에 따라 도시한 것이다. 본류대에서 확산이동하는 오염물질의 주체가 저장대와의 접촉면에 도달하면 저장대에 오염물질이 유입되기 시작하며, 유입된 물질이 시간이 경과함에 따라 저장대 내 깊숙한 지점까지 확산되는 과정을 보여주고 있다. 여기서 특기할 만한 사실은 본류대에 존재하는 오염물질의 주체가 지나간 후에도 저장대 상류단 및 하류단 내부의 깊숙한 지점에는 상대적으로 높은 농도를 계속 유지하고 있다는 점이다. 이는 저장대의 상류단 및 하류단과 접촉하고있는 본류대에서의 오염물질이 비교적 오랜 기간 동안 높은 농도를 유지하기 때문에 높은 농도를 가진 오염물질이 저장대로 유입되기 쉽고, 일단 유입된 물질은 종방향의 물질전달이 전혀 허용되지 않

기 때문에 그 지점에 계속하여 남아있기 때문이라 생각되는데 이에 대한 실험적 구명이 필요하다 하겠다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 두 모형이 1차원 확산모형보다 우수한 거동을 보이고 있으나 저장-확산 모형이 저장-교환 모형보다 오염물질의 貯藏 및 再放出 過程을 물리적으로 더욱 정확하게 표현할 수 있다는 점에서 더 큰 장점을 가지고 있는 것으로 생각된다. 본 연구에서 개발한 모형의 적용시 제한점은 저장-교환 모형과 저장-확산 모형 모두 모형매개변수가 1차원 확산모형보다 두 개씩 증가하여 이 변수들의 값을 실측하거나 또는 경험식에 의해 추정하여야 한다는 점이다. 서일원(1993)과 본 연구에서도 모형매개변수와 수리학적 인 변수(수심, 하폭, 유속, 마찰인자 등)들과의 관계를 일부 구명한 바 있으나, 이에 대한 보다 깊이 있고 체계적인 연구가 필요하다고 하겠다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 갈수기를 포함한 자연하천에서의 오염물질의 擴散 및 移動 거동을 예측하는 데 필수적인 요소로 밝혀진 貯藏帶에서의 오염물질의 貯藏 및 再放出 過程을 보다 정확하게 설명할 수 있는 물리적인 이론과 수학적 모형을 개발하였다. 개발된 수학적 모형은 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하고, 실험실에서 물리적 모형 실험을 수행해서 수집된 자료를 통해 검증하였다.

본 연구의 결과, 저장-교환 모형과 저장-확산 모형이 1차원 擴散模型에 비해서 웅덩이-급여울

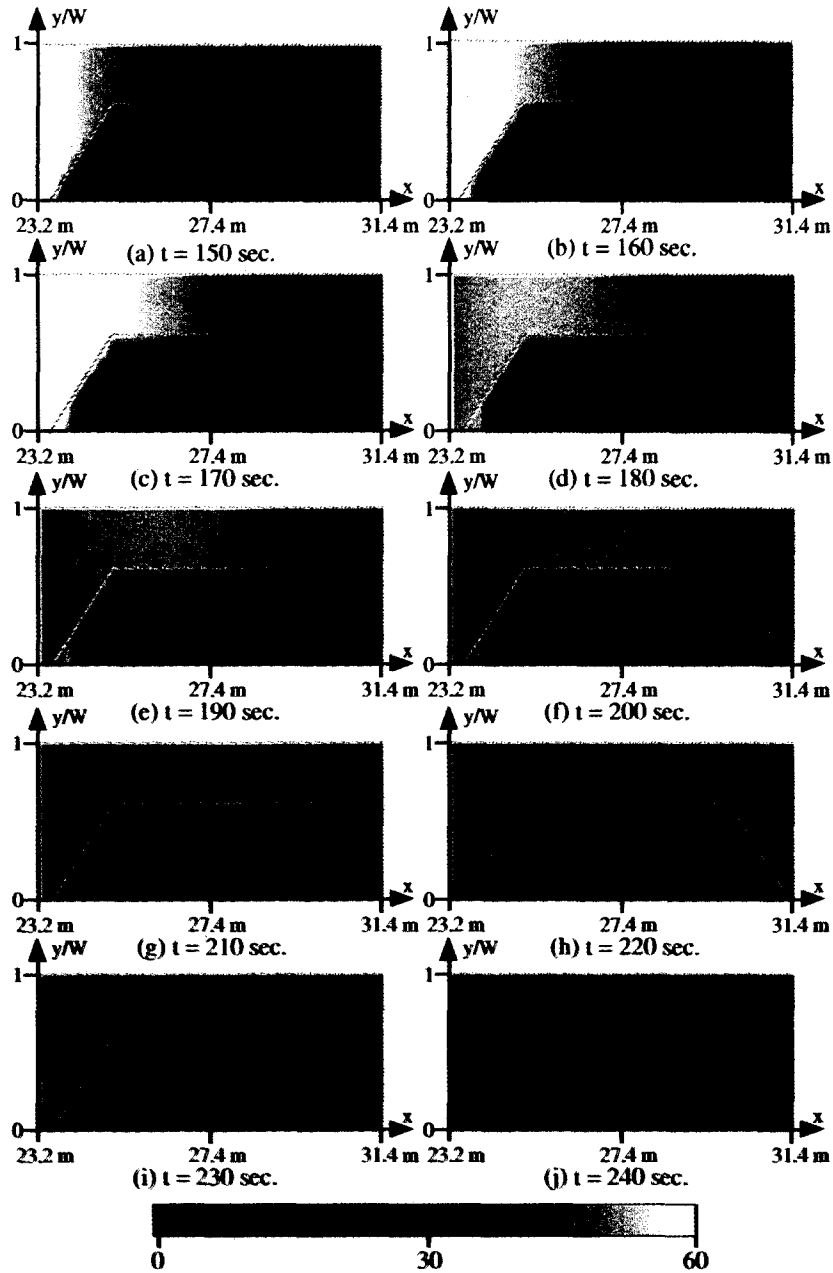


Fig. 6. Two-Dimensional Concentration Distributions Computed by Storage-Diffusion Model(Series 1)

連續構造를 흐르는 매우 불균일하고 복잡한 물의 흐름에 의한 再循環流帶에 의한 貯藏효과를 매우 정확하게 표현하고 있음을 구명하였다. 제안된 모델에 의해서 예측된 농도-시간 분포곡선과 실측자료와의 비교에서 나타난 사실은 전체적인 곡선형

태, 첨두농도 및 첨두농도에 이르는 시간 등의 예측에 있어서 만족할 만한 일치를 보이고 있다는 점이다. 저장-교환 모형과 저장-확산 모형을 비교하여 보면, 두 모형이 모두 1차원 擴散模型에 비해서 개선된 거동을 보이고 있다는 점에서는 두 모형이

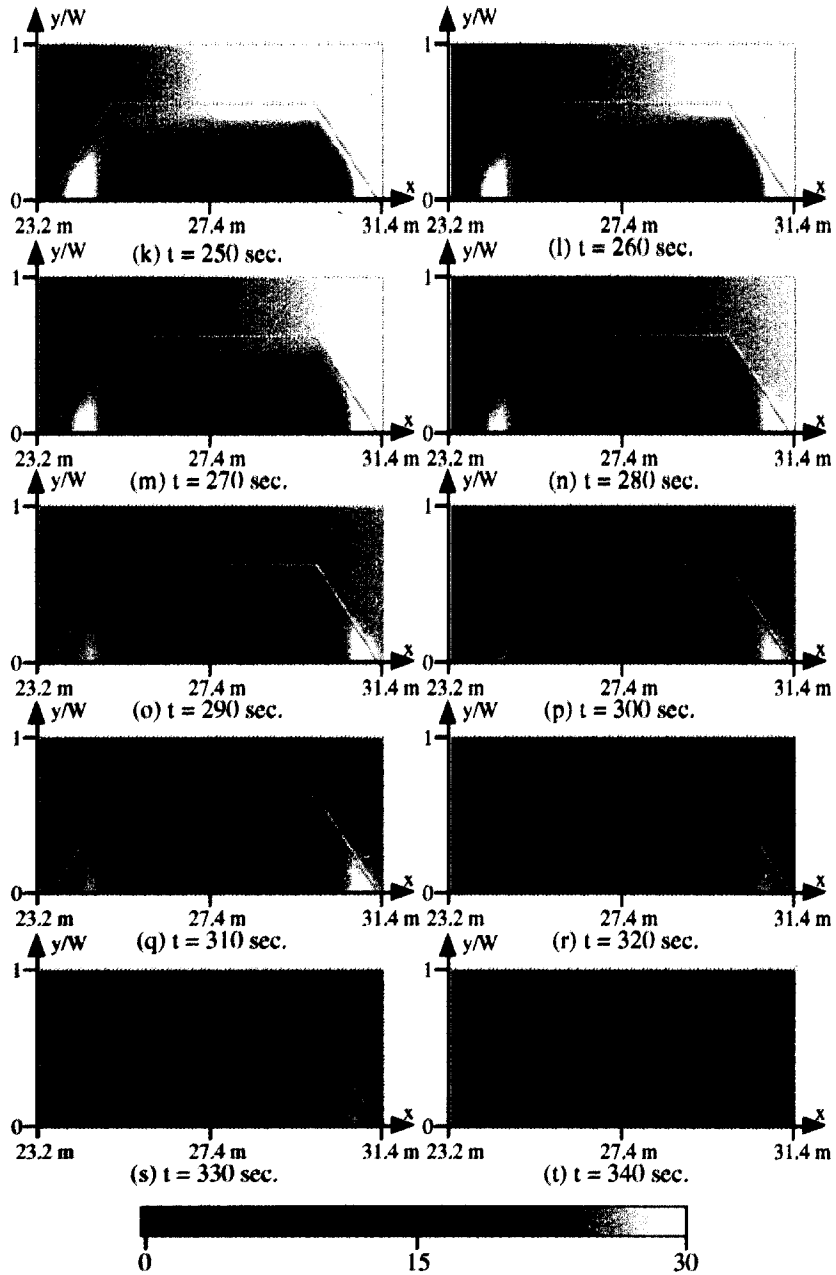


Fig. 6. (continued)

유사하다고 할 수 있으나, 저장-확산 모형이 저장-교환 모형보다 오염물질의 貯藏 및 再放出 과정을 물리적으로 더욱 정확하게 표현할 수 있다는 점에서 더 큰 장점을 가지고 있는 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 徐 源 (1993). “渇水期 河川에서의 汚染物質의 擴散 및 移動.” 상하수도학회지, 제7권, 제1호, pp. 29-36.
- 徐 源, 劉大寧 (1994). “自然河川에서 非保存性 汚染物質의 移動 및 變換 모의: 저장-변환 모형.” 대한토목학회 논문집, 제14권, 제4호, pp. 867-874.
- 윤태훈 (1977). “死帶를 갖는 自然河川에서의 縱方向 擴散.” 대한토목학회 논문집, 제25권, 제2호, pp. 77-84.
- Bencala, K.E., and Walters, R.A. (1983). “Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream: A transient storage model.” *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 718-724.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York, N.Y.
- Hays, J.R., Krenkel, P.A., and Schnelle, K.B. (1967). “Mass transport mechanisms in open-channel flow.” *Technical Report, No. 8*, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee.
- Jackman, A.P., Walters, R.A., and Kennedy, V.C. (1984). “Low-flow transport models for conservative and sorbed solute-Uvas creek studies.” *Water Resources Investigation Reports, No. 84-4041*, U.S.G.S.
- Lau, Y.L., and Krishnappan, B.G. (1981). “Modeling transverse mixing in natural streams.” *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 2, pp. 209-226.
- Seo, I.W. (1990). “Low flow mixing in open channels.” Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Seo, I.W., and Maxwell, W.H.C. (1992). “Modeling low flow mixing through pools and riffles.” *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 10, pp. 1406-1423.
- Stone, H.L., and Brain P.T. (1963). “Numerical solution of convective transport problems.” *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 681-688.
- Taylor, G.I. (1954). “The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe.” *Proceedings Royal Society of London, Series A*, Vol. 223, pp. 446-468.
- Valentine, E.M., and Wood, I.R. (1979). “Experiments in longitudinal dispersion with dead zones.” *J. Hydraulics Division*, Vol. 105, No. HY8, pp. 999-1016.

〈접수: 1995년 5월 23일〉