

## 자연하천에서 비보존성 오염물질의 이동 및 변환 모의: 저장-변환 모형

### Simulation of Transport and Transformation of Nonconservative Pollutants in Natural Streams: Storage-Transformation Model

徐一源\* · 劉大寧\*\*

Seo, Il Won · Yu, Dae Young

#### Abstract

The complex nature of low flow transport and transformation of nonconservative pollutants in natural streams has been investigated using a numerical solution of a proposed mathematical model that is based on a pair of mass balance equations describing the advection, dispersion, decay and mass exchange mechanisms in streams and in storage zones. In the present study, a mathematical model (named "Storage-Transformation Model") has been developed to predict adequately the non-Fickian nature of mixing and transformation mechanisms for decaying substances in natural streams under low flow conditions. Comparisons of the computed concentration-time curves with the measured data show that the Storage-Transformation Model yields better agreements in general shape, peak concentration and time to peak than the conventional 1-D dispersion model. The proposed model shows significant improvement over the 1-D dispersion model in predicting natural transport and transformation processes in streams through pools and riffles.

#### 요 지

유량이 매우 작은 渇水期에 자연하천으로 방류된 비보존성 오염물질의 이동 및 화학적, 생화학적 변환과정의 복잡성을 구명하기 위해서 이송, 확산, 변환 그리고 하천수로에 존재하는 貯藏帶에서 오염물질의 저장 및 교환과정을 규정하는 한 쌍의 방정식으로 이루어진 수학적 모형을 개발하고 이의 해를 수치해석적인 방법에 의해 구하였다. "저장-변환 모형"이라 명명된 본 수학적 모형은 渇水期 하천에서의 비보존성 오염물질의 혼합 및 변환 메카니즘의 비정규분포적인 특성을 보다 정확하게 예측할 수 있도록 개발되었다. 모형의 모의결과, 농도-시간곡선의 전체적인 형태, 첨두농도, 그리고 첨두농도에 도달하는 시간 등에 있어서 저장-변환 모형이 종래의 1차원 확산모형보다 실측자료에 더욱 정확하게 일치한다는 사실이 밝혀졌다. 본 연구에서 개발된 저장-변환 모형은 웅덩이-급여울 연속구조로 이루어진 하천에서의 오염물질의 이동 및 변환거동을 예측하는 모형으로서 1차원 확산모형에 비해 월등히 개선된 모형으로 밝혀졌다.

\* 정희원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과, 조교수

\*\* 서울대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

## 1. 서 론

濁水期 하천에서의 물의 흐름과 오염물질의 확산 및 이동특성은 平水期 또는 洪水期와는 판이하게 다르다. 특히 갈수기에는 하천의 수질오염이 더욱 심화되어서, 하천의 유량이 작은 경우에 도시하수와 공장 및 농업폐수가 방류되면 유입된 오염물질의 하천수에 의한 희석률이 낮아지며, 사고에 의한 오염물질 또는 도시하수 및 공장폐수 등의 유입에 의한 오염도 및 이에 따른 위험도가 하천 유량이 많은 平水期나 洪水期에 비해 월등히 높아진다. 더구나 수리학적인 면에서 고찰해 보면, 갈수기 하천에서 지배적인 河床形象인 웅덩이-급여울(pool-riffle) 연속구조 등에 의한 河床의 불규칙성이 비보존성 오염물질의 혼합 및 변환특성에 미치는 영향이 그 어느 때보다 지대하다.<sup>(1)</sup> 이러한 갈수기 하천의 수리학적 특성을 고려한 오염물질의 이동 및 변환특성에 관한 연구는 거의 수행되지 않은 실정이나, 최근에 이르러서 갈수기 하천의 수질기준 설정, 水中棲息處(aquatic habitat) 및 河川維持流量 등에 관한 연구가 수행되었으며, 갈수기 하천의 수리학적 특성 및 저장효과를 고려한 오염물질의 확산 및 이동거동에 대한 연구가 수행된 바 있다.<sup>(2,3)</sup>

비보존성 오염물질은 자연하천에는 유입되는 다양한 오염물질의 중요한 부분을 차지하는 것으로서, BOD, 방사능 물질, 영양소, 중금속, 제초제, 제충제 등이 이에 속하며, 이들이 하천에 방류되었을 경우 확산, 이동 등과 함께 화학적 반응 및 생화학적 변환을 하게 되므로 이들의 복잡한 거동을 예측하기 위해서는 河川動力學 뿐만 아니라 물질의 변환과정에 대한 보다 심도있고 완전한 인식과 이해가 요구된다.

본 연구에서는 갈수기 하천의 저장효과 등의 수리학적 특성을 고려해서 비보존성 오염물질의 확산, 이동 및 변환메카니즘을 포함하는 새로운 모형(저장-변환 모형)을 개발하여, 이를 현장자료를 통해서 검증하였다. 수학적 모형은 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하고, 현장자료 및 종래의 1차원 확산모형의 해와 비교, 검토함으로써 본 모형의 우수성을 입증하였다.

### 2. 1차원 확산모형

자연하천에 위험한 오염물질이 사고에 의해서 방

출되었거나, 도시하수 및 공장폐수가 시간적 변화성을 갖고 방류되었을 경우, 오염물질의 縱擴散(longitudinal dispersion) 거동을 예측하기 위해서 Taylor<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 1차원 Fickian 확산모형(one-dimensional Fickian dispersion model)이 널리 사용되어 왔다. 선형변환을 고려하는 경우 비보존성 오염물질에 대한 1차원 Fickian 확산모형은

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

이며, 여기서 C는 오염물질의 유수단면 평균농도(mg/l), U는 유수단면 평균유속(m/sec), A는 유수단면적(m<sup>2</sup>), K는 縱擴散係數(m<sup>2</sup>/sec), k<sub>r</sub>는 감소 또는 흡수계수(1/sec), t는 시간(sec), 그리고 x는 평균 흐름방향의 거리(m)이다.

1차원 확산모형은 자연하천의 유수단면적이 일정하고 초기 및 경계조건들이 주어지는 경우에 해석적인 해를 용이하게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 1차원 확산모형 유도시 Taylor가 가정된 전단류 이송과 횡확산이 평형에 도달할 수 있도록 오염물질이 유입된 후 충분한 시간(초기기간; initial period)이 경과한 후부터, 즉 오염물질이 유입된 지점으로부터 충분한 거리가 떨어진 하류 지점에서부터 적용할 수 있다는 제한성을 가지고 있다.<sup>(5)</sup> 이러한 제한성과 더불어 1차원 확산모형은 실제 자연하천에서 수집된 오염물질의 농도분포곡선의 특성을 해석하는데는 부적합하다는 지적을 받아왔다. 자연하천에서 실제로 측정된 오염물질의 농도-시간 분포곡선은 Taylor에 의해 제안된 초기기간 후에도 농도분포의 분산이 비선형적인 거동을 보이고 있으며, 또한 오염물질의 농도분포곡선은 왜곡되어 나타나며 농도분포곡선의 하강부에 긴 꼬리를 가지고 있음이 관찰되었다.<sup>(6,7)</sup> 이러한 현상은 하천의 河床이나 河岸에 존재하는 貯藏帶(storage zone)가 오염물질의 일부를 일시 저장했다가 오염물질의 主體가 관측지점을 통과한 후에 서서히 本流帶(flow zone)로 재방출하는 메카니즘으로 설명할 수 있다.

그리하여 자연하천에서의 확산현상을 보다 적합하게 예측하기 위해서는 하천수로의 일부지역에 존재하는 貯藏帶의 영향이 포함되어야 한다고 Hays 등<sup>(8)</sup>이 처음 제안한 이후 Valentine과 Wood,<sup>(9)</sup> Ben-cala와 Walters,<sup>(2)</sup> 그리고 Jackman 등<sup>(10)</sup>을 비롯한

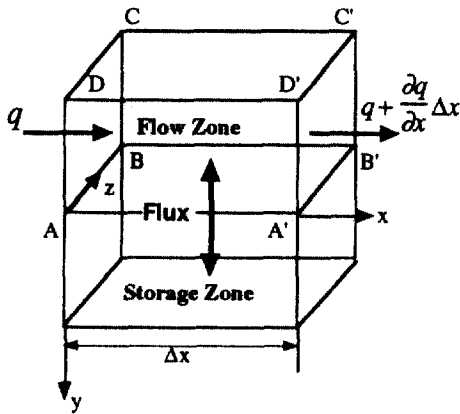


Fig. 1. Definition Sketch of the Storage-Transformation Model

여러 연구자들에 의해 오염물질의 저장과정이 연구되었다. 그들이 제안한 소위 '死帶모형(dead zone model)'은 하천의 河床이나 河岸에 존재하는 死帶 혹은 貯藏帶의 영향을 고려한 모형으로서 종래의 1차원 모형보다 개선된 것이었으나, 대부분의 경우 모형의 주요 매개변수를 실험에 의해서 직접 측정하는 것이 아니라 측정자료에 모형을 best-fit 시킴으로써 매개변수를 추정하였고 또한 貯藏帶에서 물질의 貯藏機構와 交換機構에 대한 정확한 수학적 모형의 개발은 이루어지지 않았다.

Seo,<sup>(11)</sup> Seo와 Maxwell,<sup>(3)</sup> 徐一源<sup>(12)</sup>은 갈수기 하천의 수리학적 특성 및 저장효과를 고려한 오염물질의 확산 및 이동거동의 예측을 위해서 수치해석적인 모의와 물리적 모형실험을 수행했다. 이들은 종래에 널리 사용해 왔던 1차원 확산모형이 하상 및 하안에 다양한 불규칙성 및 요면이 존재하는 자연하천에서의 확산메카니즘을 서술하는데 부적합함을 보여 주었으며, 자연하천에서의 확산특성을 보다 적합하고 완전하게 설명할 수 있는 貯藏帶模型(storage zone model)을 개발하였다. 이들은 물리적 모형실험을 통해서 웅덩이-급여울 연속구조 등에 의한 河床의 불규칙성이 오염물질의 혼합 및 이동 특성에 미치는 영향이 매우 큼을 발견하였다.

### 3. 저장-변환 모형의 개발

#### 3.1 개념적 모형

저장-변환 모형에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이

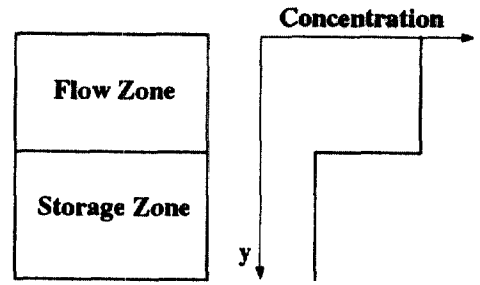


Fig. 2. Schematic Depiction of Storage Mechanisms in the Storage zone: Exchange Model

개념적으로 하천단면을 두개의 서로 상이한 구역인 本流帶와 貯藏帶로 분리한다. 本流帶에서는 평균유속에 의한 이송과 縱擴散에 의해 오염물질이 이동된다고 가정한다. 저장대는 갈수기에 지배적인 하상구조인 웅덩이-급여울 연속구조나 기타 수로단면의 불규칙성에 의해서 수로바닥이나 兩岸에 생성되며, 渦流(eddy)나 再循環流(recirculating flow)가 발생하는 구역으로서 본류대와 인접한 면에서 질량교환이 일어나고 있다고 가정한다. 웅덩이-급여울 연속구조는 연속된 웅덩이와 급여울로 구성된 河床形象으로서, 웅덩이는 하천구간 중의 수심이 깊고 물의 흐름이 느린 구간으로 오염물질이 이동하는 과정에서 오염물질의 일부를 저장-재방출하는 기능을 가진 貯藏帶의 대부분을 포함하며, 급여울은 수심이 얕고 물의 흐름이 매우 빠른 구간으로 오염물질의 평균 이송속도(advection velocity)를 크게 증대시키는 것으로 밝혀진 바 있다.

저장대 내에서의 물질의 저장 및 교환과정을 설명하는 모형을 저장모형이라 정의하고, 개발된 저장모형을 본류대모형과 결합시켜 저장-변환 모형을 완성하고, 이를 적용하여 저장효과가 지배적인 하천에서의 오염물질의 확산 및 이동 그리고 생화학적 변환거동을 예측한다. 본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 것과 같이 貯藏帶 내에서 본류의 흐름에 수직인 방향에 대한 농도변화는 없다고 가정하고 本流帶와 貯藏帶 사이의 질량교환율은 질량교환계수와 두개의 구역사이의 농도차이 혹은 농도경사의 곱으로 정의하는 교환모형(exchange model)을 적용한다.

本流帶와 貯藏帶에서의 비보존성 오염물질의 변환메카니즘은 물질의 종류에 따라 선형함수, 비선형함수, 지수함수, 또는 Monod함수 등의 다양한

Table 1. Comparison of Storage-Transformation Model with 1-D Dispersion Model

	1차원 확산모형	저장-변환 모형
지배방정식	식 (1)	식 (2) + 식 (3)
차원	1차원	준2차원 (本流帶와 貯藏帶 분리)
종확산과정	Fickian모형	本流帶-Fickian모형 貯藏帶-고려하지 않음
저장과정	고려하지 않음	교환모형
변환과정	선형모형	本流帶-선형모형 貯藏帶-선형모형

모형을 고려할 수 있다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서는 1차원수적인 감소 또는 흡수를 고려하는 선형 변환모형을 가정한다. 선형 변환모형에서는 오염물질이 감소 또는 흡수되는 시간적 변화율이 현재 존재하는 물질의 양과 비례한다고 가정한다. BOD의 생화학적 분해, 방사능 물질의 감쇠, 미량중금속의 흡착, 그리고 대장균이나 병원균의 감소 등의 메카니즘이 선형 변환모형으로 설명될 수 있는 대표적인 것들이다.

### 3.2 지배방정식

저장-변환 모형은 수학적으로 本流帶와 貯藏帶의 물질이동 및 변환메카니즘을 모형화하여 유도된다. 흐름이 定常流일 경우에 本流帶의 질량보존 방정식은

$$A_r \frac{\partial C}{\partial t} = -U_r A_r \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K A_r \frac{\partial C}{\partial x} \right) + kP(S-C) - A_r k_r C \quad (2)$$

이며, 여기서  $A_r$ 는 本流帶의 단면적( $m^2$ ),  $U_r$ 는 本流帶에서 단면 평균유속( $m/sec$ ),  $k$ 는 本流帶와 貯藏帶 사이의 질량교환계수 ( $m/sec$ ), 그리고  $P$ 는 횡방향 또는 연직방향의 本流帶와 貯藏帶 사이의 潤邊( $m$ ),  $S$ 는 貯藏帶에서의 오염물질 농도이다.

貯藏帶 내에서는 本流帶와는 달리, 평균유속에 의한 이송과 縱擴散에 의한 오염물질의 이동은 무시할 정도로 작으며 단지 渦流나 再循環流에 의해서 오염물질이 완전 혼합되어 貯藏帶 내의 농도가 본

류흐름에 수직인 방향으로 일정하다고 가정한다. 本流帶와의 인접한 면에서 질량교환에 의한 sink 또는 source 항만을 고려하면 貯藏帶의 질량보존 방정식은

$$A_s \frac{\partial S}{\partial t} = -kP(S-C) - A_s k_r S \quad (3)$$

이며, 여기서  $A_s$ 는 본류의 평균흐름과 수직인 방향의 貯藏帶 단면적( $m^2$ )이며  $A_s = A - A_r$ 이다.

상술한 저장-변환 모형의 특징을 종래의 1차원 확산모형과 비교하여 두 모형의 차이점을 Table 1에 나타내었다.

### 3.3 초기, 경계조건 및 1차원 확산모형의 해석

제한된 일정기간( $\tau$ ) 동안 초기농도  $C_0$ 인 오염물질이 유입된 경우에 초기 및 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다. 우선 本流帶에서 초기조건은 다음과 같다.

$$C(0, x) = 0, x > 0 \quad (4a)$$

$$C(t, 0) = C_0, 0 < t \leq \tau \quad (4b)$$

$$C(t, 0) = 0, t > \tau \quad (4c)$$

오염물질이 상하류 방향 모두 무한한 공간으로 확산할 수 있을 때 Dirichlet 경계조건은 다음과 같다.

$$C(t, \pm \infty) = 0 \quad (5)$$

貯藏帶에서의 초기조건은 오염물질이 초기에 하천의 本流帶에만 유입된다고 가정해서 유도한다. 이 경우에 초기조건은 다음 식으로 표시된다.

$$S(0, x) = 0 \quad (6)$$

오염물질이 상하류 방향 모두 무한한 공간으로 확산할 수 있을 때의 Dirichlet 경계조건은 다음과 같다.

$$S(t, \pm \infty) = 0 \quad (7)$$

상기한 초기 및 경계조건에 대한 1차원 확산모형의 해석하는 식 (1)에서 유수단면적  $A$ 가 일정한 경우 다음과 같이 유도된다.<sup>(13,14)</sup>

$$C(t, x) = \frac{C_0}{2} \exp\left(-\frac{k_r x}{U}\right) \left[ G(t) \operatorname{erfc}\left(\frac{x - Ut(1+H)}{\sqrt{4Kt}}\right) - G(t-\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{x - U(t-\tau)(1+H)}{\sqrt{4K(t-\tau)}}\right) \right] \quad (8)$$

여기서  $H = 2k_r K / U^2$ ,  $\operatorname{erfc}(z)$ 는 보충오차함수 (complementary error function)로서  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ 이며  $\operatorname{erf}(z)$ 는 오차함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\xi^2) d\xi \quad (9)$$

$G(z)$ 는 단위계단함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$G(z) = 1, z \geq 0 \quad (10a)$$

$$G(z) = 0, z < 0 \quad (10b)$$

식 (8)~(10)의 1차원 확산모형의 해석해는 본 연구에서 개발된 저장-변환 모형의 모의결과와 비교되었다.

### 3.4 수치해석 방법

본 연구에서 개발된 저장-변환 모형은 초기 및 경계조건의 복잡성, 모형매개변수의 불균일성 및 저장대에 의한 질량교환항의 존재로 기인해서 해석적인 해를 도출함이 불가능하다. 그래서 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하였는데, Seo<sup>(11)</sup>에 의해서 실험된 여러가지 방법 중에서 수치확산(numerical dispersion) 등의 오차의 극소화와 아울러 계산시간 등의 경제성도 상대적으로 우월함이 밝혀진 Stone과 Brian<sup>(15)</sup>의 6점 有限差分法을 사용하였다. Crank-Nicholson 陰解法에 기초한 이 방법은 안정성 제한조건에 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 精度를 가지고 있다. 여기서  $\Delta x$ 는 거리중분,  $\Delta t$ 는 시간중분이다.

本流帶 및 貯藏帶 방정식의 시간 미분항은 해당 절점 및 해당절점의 좌우 절점에서 차분을 수행하는 分布形 後方差分<sup>(11)</sup>으로 근사하였으며, 본류대방정식의 移送項과 擴散項은 Crank-Nicholson식의 中央差分法을 사용하여 표시하였다. 이렇게 차분화시킨 항들을 本流帶 및 貯藏帶의 지배방정식에 대입한 후 모든 절점에 대해서 전개하면 선형 對數方程式이 되며 그 계수가 삼중대각행렬식으로 표시되며, 이는 Gauss 소거법의 일종인 Thomas 방법에 의해 해를

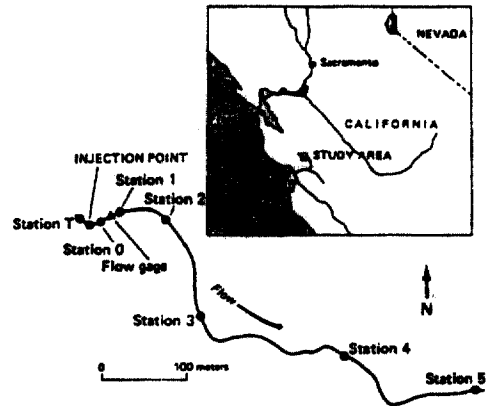


Fig. 3. Experimental Reach of Uvas Creek, Santa Clara County, California (After Avanzino et al., 1984)

구할 수 있다. 그러나 본 모형의 本流帶 및 貯藏帶 방정식에 존재하는 질량교환항으로 인하여 두 방정식의 우변에 미지수항이 생성되는데 이러한 미지수항을 처리하기 위해 다음과 같이 단계적인 계산을 수행한다.<sup>(11)</sup> 첫째, 식 (3)에서 우변의  $C$ 값을 추정하여 식 (3)의 해를 구한다. 둘째, 첫째 단계에서 구한 해, 즉  $S$ 값을 식 (2)의 우변에 대입하고 식 (2)의 해를 구한다. 셋째, 둘째 단계에서 계산한  $C$ 값과 첫째 단계에서 가정한  $C$ 값을 비교하여 그 차이가 본 연구에서 설정한 허용한계(tolerance limit) 내에 들어올 때까지 반복계산(iteration)을 수행한다.

## 4. 모형 모의

### 4.1 하천 실험자료

본 연구에서 개발된 저장-변환 모형을 검증하기 위해서 Avanzino 등<sup>(7)</sup>에 의해서 수집된 하천 실험 자료를 이용하였다. Avanzino 등<sup>(7)</sup>은 미국 캘리포니아주에 위치한 소규모의 산지하천인 Uvas Creek에서의 확산실험에 대한 결과를 상세히 기술하였다. Uvas Creek 자료는 Bencala와 Walters<sup>(2)</sup> 그리고 Bencala<sup>(16)</sup>의 오염물질 이동연구에도 사용된 바 있는 매우 유용한 하천 실험자료이다. 실험대상 하천은 전체 실험구간에 걸쳐서 蛇行하고 있으며, 河床이 매우 불규칙하고 연속적인 웅덩이-급여울 구조로 이루어져 있다(Fig. 3 참조). 본 연구에서 분석결과, 실험하천의 웅덩이-급여울 연속구조의 파장

Table 2. Summary of Stream Geometry Parameters Used in the Model Simulation (Unit: m)

하천폭	웅덩이-급여울 구조의 길이	웅덩이 길이	급여울 길이	천이구간 길이
3	20	8	4	4

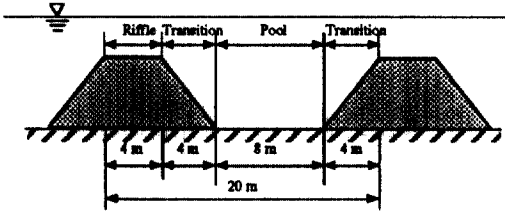


Fig. 4. Simplified Pool-Riffle Sequences

(웅덩이와 웅덩이간의 거리)은 하천 폭의 6~7배로 서, 이는 Leopold 등<sup>(1)</sup> 및 다른 연구자에 의해 밝혀진 자연하천의 웅덩이-급여울 연속구조의 파장특성 범위 내에 드는 것으로 밝혀졌다.

확산실험은 하천유량이 0.0125 m<sup>3</sup>/sec로서 매우 작은 하절기에 수행되었으며, 비보존성 오염물질을 대표할 추적물질로서 strontium이 사용되었다. 원래 strontium은 물속을 이동하면서 河床材料 및 流砂에 吸着(sorption)되었다가 일정시간이 경과한 후 脫着(desorption)되는 복잡한 변환과정을 보이지만, 본 연구에서는 이러한 吸着 및 脫着 과정에 소요되는 시간이 추적물질 主體가 물속을 이동하는 시간에 비하여 매우 길다는 가정하에 strontium의 변환과정을 간단한 선형 감쇠과정으로 근사하였다.

추적물질은 3시간 동안 일정한 농도로 주입되었으며 주입지점에서 약간 하류지점에서의 농도가 1.73 mg/l으로 측정되었고, 추적물질 주입전의 주변 하천수의 기저농도는 0.13 mg/l으로 측정되었다. 하류지점의 농도는 5개지점(주입지점에서 38, 105, 281, 433, 619 m 하류지점)에서 측정되었으나 본 연구에서는 추적물질의 질량감소가 매우 심한 최하류측점(619 m)을 제외한 4개 지점의 자료를 이용하여 개발된 저장-변환 모형을 검증하였다.

저장-변환 모형의 모의에 필요한 입력자료를 생성하기 위해서 실험하천의 지형자료를 Leopold 등<sup>(1)</sup>의 하천지형이론에 의거하여 분석한 결과 얻어진 하천지형자료를 Table 2에 요약해서 나타내었다.

또한 실험하천의 웅덩이-급여울 연속구조를 단순화하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. Table 2와 Fig. 4에서 단순화한 실험하천의 웅덩이-급여울 연속구조의 파장은 하천 폭의 6.7배가 된다.

#### 4.2 모의결과

저장-변환 모형에서는 웅덩이-급여울 연속구조를 흐르는 매우 불균일하고 복잡한 물의 흐름에 의한 이송 및 확산 그리고 再循環流帶에 의한 저장효과 및 화학적 변환을 정확하게 재현하기 위해서 모형의 입력자료로서 수리량 및 확산량 변수들이 웅덩이와 급여울에서 서로 다른 값을 갖는 것으로 모형화하였다. 즉, 수리학적 변수들(수심, 유속, 저장대면적)은 웅덩이와 급여울 구간에서 한 개의 일정한 값을 가지는 것으로 가정하였고 웅덩이와 급여울 사이의 천이구간에서는 선형으로 변화하는 것으로 가정하였다. 저장모형의 물질교환계수와 변환모형의 물질 흡수율도 상기가정을 따르는 것으로 하였으나, 종 확산계수는 전실험구간에 걸쳐 동일한 값을 사용하였다. 상기 가정에 따라 모형의 모의에 사용한 저장 및 변환 모형의 매개변수들을 Table 3에 요약해서 나타내었다. Table 3의 가중평균을 계산할 때 가중치는 상기 가정에 따라서 웅덩이 : 급여울의 비가 12 : 8이 된다.

형 모의에 의한 농도-시간 분포곡선을 실측된 농도-시간 분포곡선과 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 이 경우 저장-변환 모형의 모의에는 Table 3에 수록한 바와 같이 웅덩이-급여울 연속구조의 수리 및 확산특성을 고려해서 가변적인 입력자료를 사용하였고, 1차원 확산모형의 모의에는 貯藏帶에 의한 저장효과와 웅덩이-급여울 연속구조의 수리 및 확산특성을 무시하고 전실험구간에 걸쳐서 평균적인 입력자료를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 수리량 자료와 저장 및 변환 모형의 매개변수들은 모두 Avanzino 등<sup>(7)</sup>의 측정결과와 Bencala와 Walters<sup>(2)</sup> 그리고 Bencala<sup>(16)</sup>의 연구결과에서 도출된 값을 이

Table 3. Summary of Model Parameters Used in the Simulation

	Depth (m)	$A_s/A$	K (m <sup>2</sup> /sec)	k (m/sec)	$k_r$ (1/sec)
웅덩이	0.30	0.49	0.21	$1.2 \times 10^{-4}$	$0.3 \times 10^{-4}$
급여울	0.05	0.35	0.21	$0.2 \times 10^{-4}$	$0.1 \times 10^{-4}$
가중평균	0.20	0.43	0.21	$0.8 \times 10^{-4}$	$0.22 \times 10^{-4}$

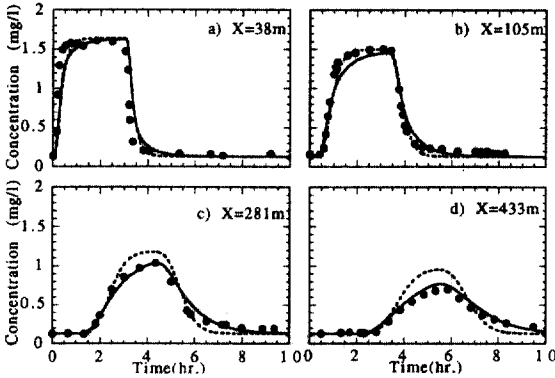


Fig. 5. Concentration-Time Distribution of Observed Dispersion Data and Distributions Fitted by 1-D Dispersion and Storage-Transformation Models; ... Observed Data; --- 1-D Dispersion Model; — Storage-Transformation Model

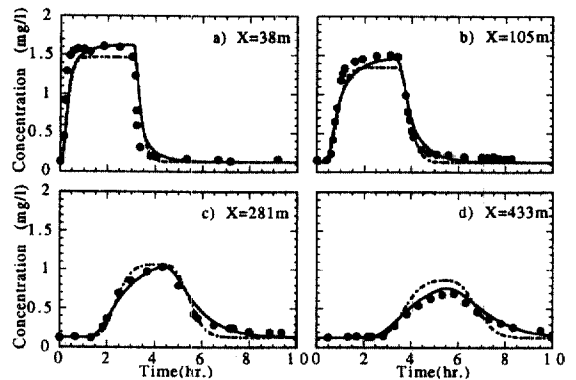


Fig. 6. Concentration-Time Distribution of Observed Dispersion Data and Distributions Fitted by Storage-Transformation Models; ... Observed Data; --- Storage-Transformation Model with Parameters of Uniform Channels; — Storage-Transformation Model with Parameters of Pool-Riffle Sequences

용하되 본 연구의 목적에 더욱 부합하도록 미세한 조정을 수행하였다.

대체적으로, 전체적인 곡선형태와 곡선하강부의 긴 꼬리부분의 모의에 있어서, 저장-변환 모형에 의해서 모의된 농도-시간 분포곡선들이 1차원 확산 모형에 의해서 모의된 농도분포곡선들보다 실측자료에 더욱 일치하고 있음을 알 수 있다. 침투농도의 경우, 저장-변환 모형은 실측자료에 매우 근사하게 모의하고 있으나, 1차원 확산모형은 과대 평가하고 있다. 더욱 두드러지게 나타나는 사실은 저장-변환 모형은 침투농도에 이르는 시간을 매우 정확하게 모의하고 있으나, 1차원 확산모형은 부정확하게 모의하고 있다는 것이다.

Fig. 6에는 웅덩이-급여울 연속구조의 특성을 고려한 입력자료를 사용하는 경우와 貯藏帶에 의한 저장효과는 고려하되 웅덩이-급여울 연속구조의 특

성을 무시하여 전실험구간을 均水路라고 가정하여 평균값을 사용한 경우의 저장-변환 모형의 모의결과를 비교하여 도시하였다. 전체적인 곡선형태와 곡선하강부의 긴 꼬리부분 그리고 침투농도에 이르는 시간의 모의에 있어서, 웅덩이-급여울 연속구조의 특성을 고려한 저장-변환 모형에 의해서 모의된 농도-시간 분포곡선들이 均水路로 가정한 저장-변환 모형에 의해서 모의된 농도분포곡선들보다 실측자료에 더욱 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 웅덩이-급여울 연속구조를 가진 하천에서의 확산 및 변환 거동이 균일한 수로에서의 확산 및 변환 거동과 현저한 차이가 있음을 보여주는 것으로서, 본 연구에서 개발된 저장-변환 모형이 웅덩이-급여울 연속구조를 가진 자연하천에서의 오염물질의 이동 및 변환 거동 해석에 있어서 개선된 모형임을 입증하는 사실이다.

## 5. 요약 및 결론

濁水期 하천에 유입된 비보존성 오염물질의 확산 및 혼합 그리고 화학적, 생화학적 변환특성을 구명하기 위해서 하천수로의 존재하는 貯藏帶에서의 오염물질의 저장과정 및 화학적 변환특성을 보다 정확하게 설명할 수 있는 수학적 모형을 개발하여 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하고, 현장실측 자료를 통해 검증하였다.

본 연구의 결과, 저장-변환 모형이 1차원 확산모형에 비해서 웅덩이-급여울 연속구조 등 불규칙적인 하상구조를 가진 하천에서의 오염물질의 확산 및 변환, 그리고 저장효과를 매우 정확하게 표현하고 있음이 밝혀졌다. 또한 웅덩이-급여울 연속구조가 하천에서의 확산 및 변환 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해서 두 개의 서로 다른 입력자료를 사용하여 저장-변환모형에 의한 모의를 수행한 결과, 웅덩이-급여울 연속구조를 가진 하천에서의 확산 및 변환 거동이 단면이 균일한 수로에서의 거동과 현저한 차이가 있음이 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서 개발된 저장-변환 모형은 웅덩이-급여울 연속구조 등 불규칙적인 하상구조를 가진 자연하천에서의 오염물질의 이동 및 변환 거동 해석에 있어서 유효히 개선된 모형으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구의 일부는 한국과학재단의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P., *Fluvial Processes in Geomorphology*, W.H. Freeman, San Francisco, California, 1964.
2. Bencala, K.E., and Walters, R.A., "Simulation of Solute Transport in a Mountain Pool-and-Riffle Stream: A Transient Storage Model", *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 3, 1983, pp. 718-724.
3. Seo, I.W., and Maxwell, W.H.C., "Modeling Low Flow Mixing through Pools and Riffles", *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 10, 1992, pp. 1406-1423.
4. Taylor, G.I., "The Dispersion of Matter in Turbu-

- lent Flow through a Pipe", *Proceedings Royal Society of London*, Series A, Vol. 223, 1954, pp. 446-468.
5. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, N.Y., 1979.
6. Godfrey, R.G., and Frederick, B.J., "Stream Dispersion at Selected Sites", *U.S. Geological Survey Professional Paper 433-K*, Washington, D.C., 1970.
7. Avanzino, R.J., Zellweger, G.W., Kennedy, V.C., Zand, S.M., and Bencala, K.E., "Results of a Solute Transport Experiment at Uvas Creek, September 1972", *U.S. Geological Survey Open-File Report 84-236*, Menlo Park, California, 1984.
8. Hays, J.R., Krenkel, P.A., and Schnelle, K.B., "Mass Transport Mechanisms in Open-Channel Flow", *Technical Report*, No. 8, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 1967.
9. Valentine, E.M., and Wood, I.R., "Experiments in Longitudinal Dispersion with Dead Zones," *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 105, No. 8, 1979, pp. 999-1016.
10. Jackman, A.P., Walters, R.A., and Kennedy, V.C., "Low-flow Transport Models for Conservative and Sorbed Solute-Uvas Creek Studies", *U.S.G.S. Water Resources Investigation Reports*, No. 84-4041, 1984.
11. Seo, I.W., Low Flow Mixing in Open Channels, thesis presented to the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 1990.
12. 徐一源, "濁水期 河川에서의 汚染物質의 擴散 및 移動", *대한상하수도학회지*, 제 7권 제 1호, 1993, pp. 29-36.
13. Thomann, R.V., and Mueller, J.A., *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row, New York, N.Y., 1987.
14. Rose, D.A., "Dilution and Decay of Aquatic Herbicides in Flowing Channels-Comments", *J. Hydrology*, Vol. 32, 1977, pp. 399-400.
15. Stone, H.L., and Brain P.T., "Numerical Solution of Convective Transport Problems", *A.I. Ch. E. Journal*, Vol. 9, No. 5, 1963, pp. 681-688.
16. Bencala, K.E., "Simulation of Solute Transport in a Mountain Pool-and-Riffle Stream With a Kinetic Mass Transfer Model for Sorption", *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 3, 1983, pp. 732-738.

(接受 : 1994. 2. 18)