

論 文

渇水期 河川에서의 汚染物質의 擴散 및 移動

Low Flow Pollutant Transport in Natural Rivers

徐 一 源

Seo, Il Won

Abstract

The complex nature of low flow mixing in natural channels has been investigated using both laboratory experiments and the numerical solution of a proposed mathematical model that is based on a set of mass balance equations describing the mixing and mass exchange mechanisms. Laboratory experiments, which involved collection of channel geometry, hydraulic, and dye dispersion test data, were conducted in a model of four pool and riffle sequences in a 49-m long tilting flume. The experimental results show that flow over the model pool-riffle sequences is highly non-uniform. Concentration-time curves are significantly skewed with long tails. Comparison between measured and predicted concentration-time curves shows good agreement in the general shape, peak concentration and time to peak. The proposed model shows significant improvement over the conventional one-dimensional dispersion model in predicting natural mixing processes in open channels under low flow conditions through pools and riffles.

1. 序 論

河川의 流量이 매우 작은 渇水期에 하천으로 방류된 汚染物質의 擴散 및 混合특성을 究明하기 위해서는 체계적이고 총체적인 河川水質汚染 연구가 필요하다. 渇水期 하천에서의 물의 흐름 및 汚染物質의 擴散특성은 平水期 또는 洪水期와는 판이하게 다르다는 것은 Miller와 Wenzel¹⁾ 등에 의해 보고된 바 있다. 특히 渇水期에는 하천의 水質汚染이 더욱 심화되어서, 하천의 流量이 작은 경우에 都市下水와 공장 및 농업廢水가 방류되면 유입된 오염물질의 稀釋率이 낮아지며, 사고에 의한 오염물질 또는 도시하수 및 공

장폐수 등의 유입에 의한 汚染度 및 이에 따른 危險度가 하천 流量이 큰 洪水기에 비해 월등히 높아진다. 더구나 水理學적인 면에서 考察해 보면, 갈수기 하천에서 지배적인 河床形象인 pool-riffle 連續構造 등에 의한 河床의 不規則性이 오염물질의 혼합 및 輸送특성에 미치는 영향이 그 어느 때보다 지대하다.¹⁾

상술한 이유로 인해서 평수기 또는 홍수기의 하천조건하에서 개발된 종래의 擴散模型은 갈수기의 하천에서 오염물질의 혼합 및 수송 거동을 예측하는 데 부적합하며 갈수기의 하천조건에 개선된 모형의 개발이 절대적으로 필요한 것이다. 최근에 이르러서 갈수기 하천의 수질기준 설정, 水中棲息處(aquatic habitat) 및 河川維持 流量 등에 관한 연구가 수행되었으나, 갈수기

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수

하천의 수리학적 특성을 고려한 오염물질의 확산 및 수송특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 自然水路에 유입된 다양한 오염물질의 확산 및 혼합메카니즘에 대한 기초적이고 근본적인 지식 및 이해의 향상과 이에 따라 개발된 모형은 수질오염관리의 수공학적인 측면이나 하천이나 수로에 방류된 위험한 오염물질의 혼합 및 수송특성을 분석, 예측하는 정부 관련기관 종사자가 오염물질이 전체 河川 水系에 미치는 물리학적, 생물학적 영향을 평가하는 데에 유용하게 이용될 것이며, 또한 수자원, 수질 정책결정자가 위험한 오염물질이 자연하천에 유입되었을 경우, 하천에 上水源을 가진 공공급수장의 운영 방침을 결정하는데에 이용될 수 있을 것이다.

자연하천에는 항상 다양한 汚染源으로부터의 다양한 종류의 오염물질의 유입 위험성이 존재한다. 또한 자연하천으로 대부분의 도시하수 및 산업폐수가 유입된다. 자연하천에 위험한 오염물질이 사고에 의해서 방출되었거나, 도시하수 및 공장폐수가 시간적 변화성을 갖고 방류되었을 경우, 오염물질의 縱擴散(longitudinal dispersion) 現象에 대한 정확한 이해가 필요하며 이러한 오염물질의 縱擴散 變動을 예측하기 위해서 Taylor²⁾에 의해 제안된 1차원 확산모형(one-dimensional dispersion model)이 널리 사용되어 왔다. 1차원 확산모형은

$$-\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

이며, 여기서 C 는 오염물질의 流水斷面 平均濃度, U 는 流水斷面 平均流速, K 는 縱擴散係數, t 는 시간, 그리고 x 는 평균 흐름의 방향이다. 1차원 확산모형은 初期 및 境界條件들이 주어지는 경우에 해석적인 해를 용이하게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 실제 자연하천에서 수집된 오염물질의 농도분포곡선의 특성을 해석하는 데는 부적합하다는 지적을 받아왔다. 갈수기의 자연하천에서 측정된 오염물질의 농도분포곡선은 Taylor에 의해 제안된 초기기간(initial period) 후에도 농도분포의 분산(variance)이 非線型적인 거동을 보이고 있음이 여러 연구자에 의해 밝혀진 바 있다.³⁾ 또한 오염물질의 농도-

시간 분포곡선(concentration-time curve)은 종래의 1차원 확산모형에 의해 예측되는 것보다 훨씬 歪曲되어 나타나며, 농도분포곡선의 下降部에 긴 꼬리를 가지고 있음이 관찰되었다. 이러한 현상은 하천의 河床이나 河岸에 존재하는 貯藏帶가 오염물질의 일부를 일시 貯藏했다가 오염물질의 主體가 관측지점을 통과한 후에 서서히 本流로 재방출하는 메카니즘으로 해석할 수 있다.

그리하여 Hays et al.⁴⁾, Valentine과 Wood⁵⁾, 그리고 Tsai와 Holley⁶⁾ 등에 의해 자연하천의 확산현상을 보다 적합하게 예측하기 위해서는 하천수로의 일부지역에 존재하는 저장대의 영향이 포함되어야 한다고 제안되었다. 그들이 제안한 소위 '死帶모형(dead zone model)'은 이러한 하천의 하상 및 하안에 존재하는 사대 혹은 저장대의 영향을 고려한 모형으로서, 종래의 1차원 모형보다 개선된 것이었으나, 대부분의 모형 실험이 갈수기의 자연하천의 하상구조등의 자연조건을 재현하지 않고 매우 단순하고 理想화된 하상형상에서 수행되었으며, 더욱이 Hays et al.,⁴⁾ Bencala와 Walters⁷⁾는 제안된 사대모형의 매개변수를 실험에 의해 직접 측정된 것이 아니라 측정자료에 모형을 best-fit시킴으로서 매개변수를 추정·도출하였다. 갈수기 하천에서 지배적인 河床形象은 pool-riffle sequences이며 이러한 河床의 不規則性이 오염물질의 혼합 및 輸送 특성에 미치는 영향은 지대하다.

본 연구의 주요 목적은 갈수기 하천에서의 자연 확산현상을 보다 정확하게 예측할 수 있는 數學的 模型을 개발하는 데 있다. 개발된 수학적 모형은 數值解析的인 방법에 의해 解를 구하고, 實驗室에서 物理的 模型 실험을 수행해서 수집된 資料를 통해 檢證하고자 한다.

2. 數學的 模型

본 모형(이후 '貯藏帶模型'(storage zone model)이라 名함)에서는 개념적으로 하천단면을 두개의 서로 상이한 zone인 本流帶(flow zone)와 貯藏帶(storage zone)로 분리한다. 本流帶에서

는 평균유속에 의한 移送(advection)과 縱擴散(longitudinal dispersion)에 의해 오염물질이 수송된다고 가정하며, 갈수기에 지배적인 하상구조인 pool-riffle sequences나 기타 수로단면의 불규칙성에 의해서 생성된 저장대는 渦流(vortex or eddy)나 再循環流(recirculating flow)가 발생하는 구역으로서 본류대와와의 인접한 면에서 質量交換이 일어나고 있다고 가정한다. 저장대내에서의 물질저장에카니즘으로서의 交換模型으로 일컫는 것으로서 저장대내에서 본류의 흐름과 垂直(perpendicular)인 방향의 농도분포는 일정하고 본류대와 저장대간의 질량교환은 두개의 zone 사이의 농도差異 혹은 濃度勾配에 비례한다고 가정한다.

본류대와 저장대의 물질수송에카니즘을 규정하는 支配方程式은 質量保存의 法則을 이용하여 유도된다.⁸⁾ 흐름이 定常流일 경우에 본류대의 質量平衡式은

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

이며, 여기서 A_f 는 본류대의 단면적, U_f 는 본류대에서의 평균유속, P 는 橫方向(transverse) 또는 鉛直方向(vertical)의 본류대와 저장대사이의 潤邊, k 는 質量交換係數, 그리고 S 는 저장대에서 오염물질의 농도이다. 저장대에서 오염물질의 농도를 縱方向 위치 (x)와 시간 (t)의 函數로서 표시하는 質量平衡式은

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

이며, 여기서 A_s 는 본류의 평균흐름과 수직인 방향의 저장대 단면적이다.

물리적으로 濃度場(concentration field)은 不 等(nonuniform), 非正常(unsteady)인데 반하여, 速度場(flow field)은 正常, 不等流로 취급된다. 제안된 수학적 모형은 初期 및 境界條件의 복잡성, 모형매개변수의 불균일성 및 저장대에 의한 source/sink項의 존재로 기인해서 解析的인 해를 도출함이 불가능하다. 그리하여 수치해석적인 방법에 의해 해를 구하고자 하는데, Seo⁸⁾에

의해서 실험된 여러가지 방법중에서 數值擴散(numerical dispersion) 등의 오차의 극소화와 아울러 계산시간 등의 경제성도 상대적으로 우월함이 밝혀진 Stone과 Brian⁹⁾의 6점 有限差分法을 사용한다. Crank-Nicholson 陰解法에 기초한 이 방법은 안정성 제한 조건에 구애받지 아니하며, 다른 음해법에 비해 높은 정도를 가지고 있다. 차분화된 편미분방정식은 대칭 행렬식으로 표시되며, 이는 Gaussian 소거법의 일종인 Thomas 방법에 의해 해를 구할 수 있다. 그러나 본류대 및 저장대방정식의 source/sink항으로 인해서 생성된 미지수항을 처리하기 위해 추가적인 반복계산(iteration)을 필요로 한다. 수치해석모형은 그 결과로서 오염물질의 농도분포 곡선과 농도분포 곡선의 평균통과시간(mean time of passage), 분산(variance) 및 왜곡계수(skew coefficient) 등의 통계학적인 변수와 첨두농도(peak concentration) 및 첨두농도에 이르는 시간(time to peak) 등의 계산·출력한다.

3. 實驗室模型 및 實驗結果

4개의 pool-riffle sequences로 이루어진 실험실 모형의 기하학적인 형태는 이미 밝혀진 갈수기 자연하천시스템의 水路특성과 수리학적 相似法則에 근거하여 결정되었다.⁸⁾ 그림 1에 可變傾斜水路에 제작된 실험실모형의 중요한 기하학적 특성과 제원을 표시하였다. 실험유량은 volumetric tank를 이용하여 측정하였다. 수로바닥과 수면의 높이는 표준 point gage를 사용하여 측정하였으며, 유속분포의 측정에는 英國製 Kent Miniflo meter (低速 sensor)를 사용하였다. 본 실험에서는 保存性 오염물질을 模擬하기 위해서 소금물 溶液(NaCl)을 사용하였다. 이 경우 소금물의 밀도가 周邊水보다 커지게 되므로 ethanol (C_2H_5OH)를 첨가하여 밀도를 보정하였다. 오염물질로서 사용된 소금물 濃度の 측정지(in-situ)에서의 직접 측정을 위하여 2개의 電極으로 이루어진 傳道率 probe와 8개의 채널을 가진 Techni-Pite 傳道率計를 사용하였다. 유속 및 농도자료의 수집 自動化를 위하여 A/D(analog-

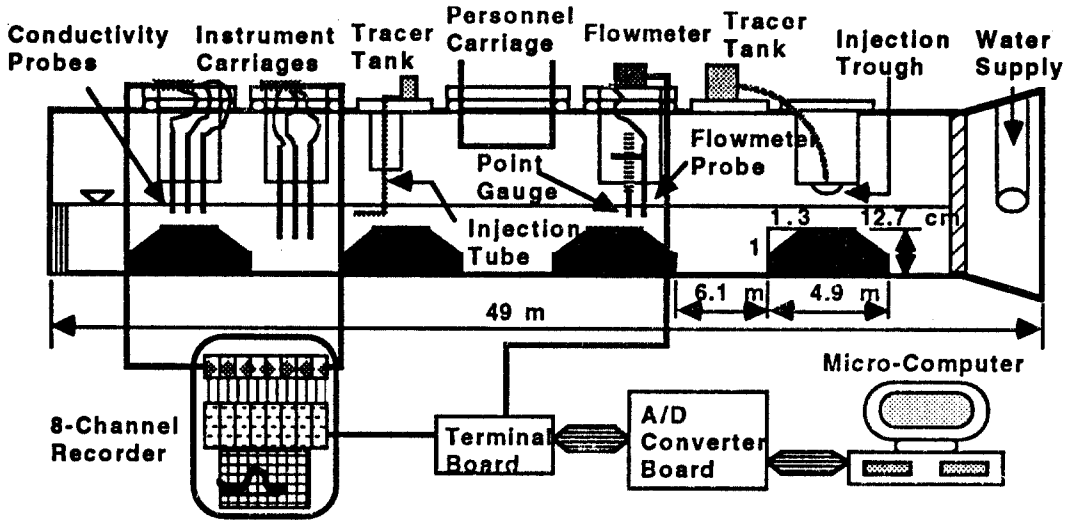


그림 1. 실험실모형과 실험設備 및 측정계기들의 설치상황

표 1. 水理量 및 擴散量 자료의 實驗區間 평균치

Series (1)	Q (m^3/s) (2)	Depth (m) (3)		U_f (m/s) (4)	u^* (m/s) (5)	K (m^2/s) (6)	λ (7)	k (m/s) (8)
		Pool	Riffle					
1	0.0127	0.148	0.022	0.207	0.058	0.059	0.49	0.0091
2	0.0204	0.155	0.029	0.257	0.060	0.054	0.47	0.0195
3	0.0255	0.160	0.034	0.282	0.061	0.045	0.46	0.0131
6	0.0130	0.171	0.027	0.201	0.063	0.046	0.40	0.0046
7	0.0190	0.179	0.033	0.244	0.064	0.039	0.42	0.0073
8	0.0249	0.186	0.038	0.270	0.065	0.058	0.37	0.0064

to-digital) 변환장치와 마이크로 컴퓨터로 이루어진 자동자료수집·분석 시스템을 구축하였다. 그림 1에 실험실 設備 및 측정계기들의 설치상황을 표시하였다.

서로 다른 유량조건에서 6개 series의 水理量 및 擴散量 資料를 수집하였다. Series 1-3은 매끄러운 riffle 조건에서 실험을 수행해서 수집한 자료이며, Series 6-8은 riffle 구간상에 中央粒徑이 1.59cm인 강자갈을 1층 두께로 고르게 깔고서 실험을 수행해서 수집한 자료이다. 水理量 및 擴散量 자료의 실험 區間 평균치를 유량별표 1에 요약해서 나타내었다.

실험자료를 분석한 결과, 모든 유량조건에서

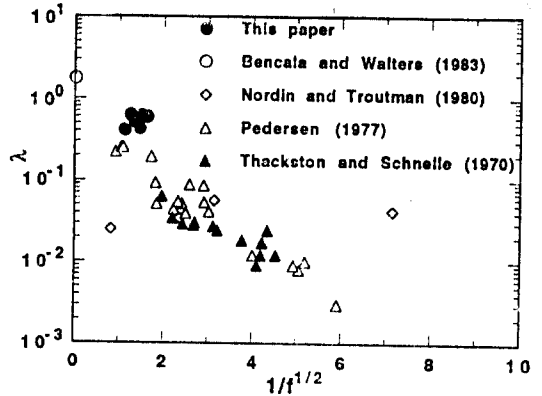


그림 2. 저장대단면적의 수로단면적에 대한 비 λ 와 Darcy-Weisbach의 摩擦因子 f 와의 관계

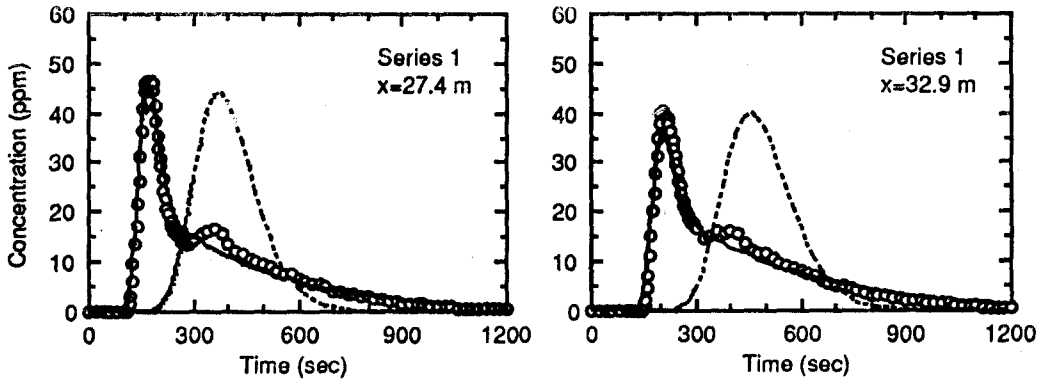


그림 3. 실측 농도-시간 분포곡선과 모형의 模擬결과와의 비교 :
 -○- 실측자료;1차원 확산모형; ——저장대모형

riffle 구간에서 측정된 流速의 橫方向 분포는 거의 均等하나, pool구간에서 측정된 流速의 橫方向 분포는 매우 不均一하고 복잡함을 알 수 있었다. Pool구간에서는 모든 유량조건에서 유속이 橫方向으로 변화하여, 水路의 한쪽 側壁 가까운 지점에서 最大가 되며 다른쪽 側壁으로 갈수록 점점 감소하여 負流速(negative velocity or velocity reversal)이 발생하는 zone을 형성하였다. 이러한 流速 構造는 pool구간의 한쪽 側壁 가까운 지점에 水平指向的으로 再循環流 zone의 존재함을 밝혀주는 것으로써, 이 zone이 물과 오염물질의 일부를 일시 貯藏하는 효과를 가진 저장대의 역할을 하게된다. 그림 2는 pool에 존재하는 이러한 저장대단면적의 수로단면적에 대한 비 (λ)를 先 研究者의 연구 결과^{3,7,10,11})와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2는 Bencala와 Walters⁷⁾에 의해 제시된 그림을 수정하고 본 실험에서 수집된 자료를 추가한 것이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 저장대단면적의 수로단면적에 대한 비 (λ)와 Darcy-Weisbach의 摩擦因子 f ($f = 8(u^*/U_f)^2$, 여기서 u^* =剪斷速度)의 函數사이에 명백한 線型 관계가 존재함을 알 수 있다. 이는 $f^{-1/2}$ 과 表面粗度의 水深에 대한 비의 對數사이에 線型 관계가 존재하는 것과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 측정된 流速의 鉛直方向(vertical)의 분포를 분석한 결과, pool의 低層에 유속이 매우 작은 zone은 존재하나 負流速

(negative velocity or velocity reversal)이 발생하는 zone은 존재하지 않음을 알 수 있었으며, 이는 pool구간의 低層部에 鉛直指向的으로 再循環流 zone의 존재하지 않음을 밝혀주는 것이다.

상류 및 하류 관측점 ($x=27.4m$ 와 $x=32.9m$, 여기서 x 는 追跡物(tracer)의 注入點으로부터 縱方向 거리를 나타낸다)에서 수집한 농도-시간 분포곡선중 일부를 1차원 확산모형과 저장대모형의 模擬결과와 비교하여 그림 3에 圖示하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 실측된 농도-시간 분포곡선은 현저하게 歪曲되어 나타나며 下降部에 긴 꼬리를 가지고 있음을 알 수 있다. 실측된 농도-시간 분포곡선의 上昇部는 대부분 매끄럽고 急한 傾斜를 이루며 증가하여 첨두농도

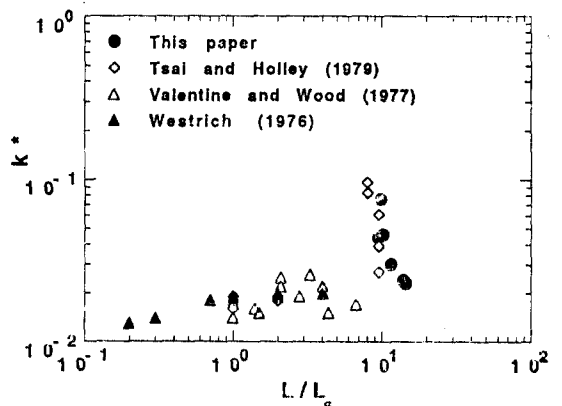


그림 4. 무차원 질량교환계수 k^* 와 저장대 길이의 저장대의 폭(또는 깊이)에 대한 비 L/L_s 와의 관계

에 이르나, 下降部는 부분적인 變動을 보이며 매우 완만한 경사로 감소함을 관찰할 수 있다. 이러한 부분적인 變動은 본류대와의 저장대내간의 질량교환이 불연속적이고 脈動的인 형식으로 일어나기 때문인 것으로 생각된다. Series 1-3의 매끄러운 riffle조건에서 수집한 농도-시간 분포곡선과 Series 6-8의 강자갈이 깔린 riffle 조건에서 수집한 농도-시간 분포곡선의 비교 분석에서

밝혀진 사실은 본 실험에서 사용된 크기와 형태의 하상재료 (bed material) 하에서는 riffle에서의 粒子에 의한 貯藏효과가 pool에서의 재순환류에 의한 貯藏효과에 비해 무시할 정도로 작은 것으로 나타났다.

저장대 방정식을 실측된 자료에 fitting해서 결정된 질량교환계수를 유량별로 표 1에 수록하였다. 그리고 그림 4에 무차원화한 질량교환계수

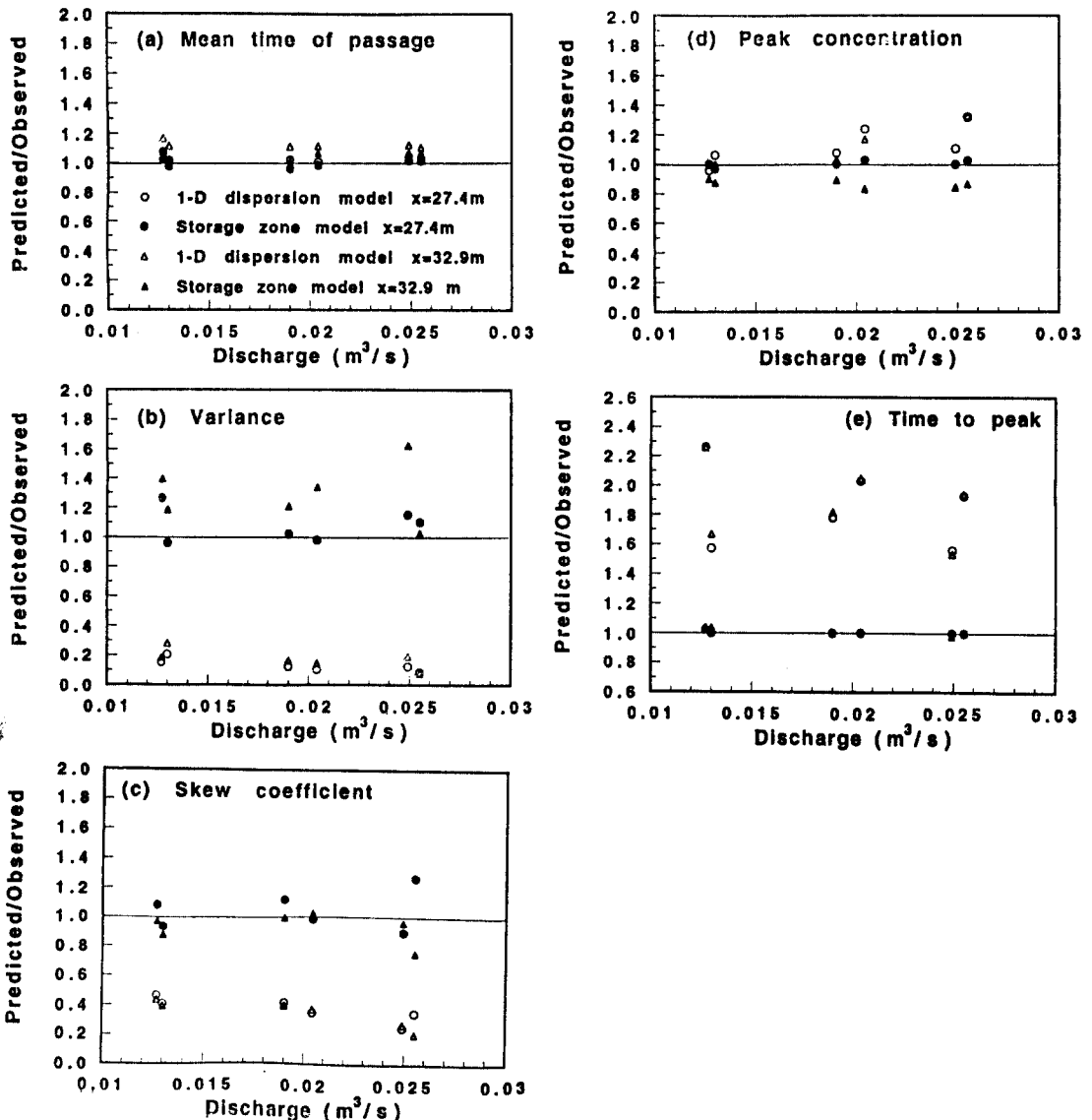


그림 5. 모형의 模擬결과와 실측자료와의 비교

($k^*=k/U_f$)와 저장대의 길이(L)의 저장대의 폭(또는 깊이, L_s)에 대한 비교의 관계를 나타내었다. 과거 자료들^{5,6,12)}과 비교해서 함께 圖示해 본 결과, 자료들이 다소 散漫함을 보이나 k^* 와 L/L_s 의 對數들 사이에 선형관계를 가정할 수 있음을 알 수 있다. 본 실험과 Tsai와 Holley⁶⁾의 pool-riffle sequences 조건에서의 무차원 질량교환계수가 이상적이고 단순화한 單一河床形象 조건에서의 무차원 질량교환계수보다 크게 나타나는 이유는 물이 연속적인 河床形象위를 흐르는 과정에서 야기되는 높은 亂流強度 때문인 것으로 사료된다.

4. 模型 模擬

모형 모의에 의한 농도-시간 분포곡선과 실측된 농도-시간 분포곡선과 비교하여 그림 3과 그림 5에 圖示하였다. 대체적으로, 전체적인 곡선 형태에 있어서, 저장대모형에 의해서 예측된 농도-시간 분포곡선들이 1차원 확산모형에 의해서 예측된 농도-시간 분포곡선들보다 실측자료에 더욱 일치하고 있음을 알 수 있다. 저장대모형에 의해서 예측된 농도분포 곡선의 분산 및 왜곡계수들은 실측자료에 매우 近似함을 보이고 있으나, 1차원 확산모형에 의해서 예측된 농도분포곡선의 분산 및 왜곡계수들은 실측자료에 비해 현저하게 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 침두농도의 경우, 저장대모형은 실측자료에 매우 近似하게 예측하고 있으나, 1차원 확산모형은 많은 경우에 過大 예측하고 있다. 더욱 두드러지게 나타나는 사실은 저장대모형은 침두농도에 이르는 시간을 매우 정확하게 예측하고 있으나, 1차원 확산모형은 현저하게 過大 예측하고 있다는 것이다.

5. 結 論

본 연구의 실험결과는 pool-riffle sequences 모형을 흐르는 물의 흐름은 매우 不均一하고 복잡함을 보여 준다. 또한 pool구간에 존재하는 再循環流 zone에 의한 貯藏효과 때문에 오염물질

의 확산거동도 1차원 확산모형에 의해 예측되는 과정보다 현저하게 왜곡되고 복잡함을 알 수 있다. 저장대모형에 의해서 예측된 농도-시간 분포곡선과 실측자료와의 비교에서 나타난 사실은 전체적인 곡선형태, 침두농도 및 침두농도에 이르는 시간 등의 예측에 있어서 만족할 만한 일치도를 보이고 있다는 점이다. 본 연구에서 개발된 저장대모형은 渇水期 하천으로 방류된 汚染物質의 擴散 및 混合특성을 예측하는 모형으로서 종래의 1차원 확산모형에 비해 월등히 개선된 모형으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. Miller, B.A., and Wenzel, H.G. (1985). "Analysis and Simulation of Low Flow Hydraulics." J. Hydraulic Engineering, ASCE, 111(12), 1429-1446.
2. Taylor, G.I. (1954). "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe." Proceedings Royal Society of London, Series A, 223, 446-468.
3. Nordin, C.F., and Troutman, B.M. (1980). "Longitudinal Dispersion in Rivers: The Persistence of Skewness in Observed Data." Water Resources Research, 16, 123-128.
4. 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.
5. Valentine, E.M., and Wood, I.R. (1977). "Longitudinal Dispersion with Dead Zones." Journal of Hydraulics Division, ASCE, 103 (9), 975-990.
6. Tsai, Y.H., and Holley, E.R. (1979). "Temporal and Spatial Moments for Longitudinal Mixing in Prismatic Channels with Storage in Separation Zones." Hydraulic Engineering Series, No. 35, University of Illinois, Urbana, Illinois.

7. 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*, 19(3), 718-724.
8. Seo, I.W. (1990). "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.
9. Stone, H.L., and Brain T.T. (1963). "Numerical Solution of Convective Transport Problems." *A.I. Ch. E. Journal*, 9(5), 681-688.
10. Pedersen, F.B. (1977). "Prediction of Longitudinal Dispersion in Natural Streams." Series Paper 14, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Copenhagen.
11. Thackston, E.L., and Schnelle, K.B., Jr. (1970). "Predicting Effects of Dead Zones on Stream Mixing." *Journal of Sanitary Engineering, ASCE*, 96, 319-331.
12. Westrich, B. (1976). "Simulation of Mass Exchange in Dead Zones for Steady and Unsteady Flow Conditions." *International Symposium on Unsteady Flow in Open-Channels*, Newcastle-upon-Tyne, England.