

저장대모형의 변수결정방법에 관한 연구

○정태성*, 서일원**

1. 서론

저장대모형은 복잡한 하천지형을 본류대와 저장대로 단순화하고 본류대와 저장대간의 질량교환은 난류유속변동과 농도차에 의해서 이루어진다고 가정하여 자연상태 하천에서와 유사한 오염물질의 이송 및 분산과정을 해석하므로 하천 수질 예측에 있어서 1차원 이송-분산모형에 비해 정확한 예측 및 평가 수단이 되리라 기대된다. 저장대 내에서는 오염물질이 완전 혼합되어 저장대 내의 농도가 본류흐름에 수직인 방향으로 일정하다고 가정하면 본류대와 저장대에서의 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

여기서 C_f 는 본류대 내에서의 농도, U_f 는 본류대 평균유속이며, K_f 는 본류대 종분산계수, C_s 는 저장대 내에서의 농도, ϵ 은 본류대 면적에 대한 저장대 면적비, t 는 시간, x 는 직각좌표계에서의 종방향 거리, 그리고 T 는 체류시간으로서 본류대를 따라서 흐르던 오염물질이 저장대에 포획되었다가 다시 본류대로 재 유입되는데 소요되는 시간을 말하는 것으로서 저장대의 면적을 본류대와 저장대 간의 질량교환계수와 저장대와 본류대가 접하는 단면의 길이의 곱으로 나눈 값과 같다.

저장대모형을 자연하천에 적용하여 오염물질의 거동을 예측하기 위해서는 저장대모형에 필요한 본류대 평균유속, 본류대 종분산계수, 체류시간 혹은 질량교환계수, 그리고 본류대 면적에 대한 저장대 면적비와 같은 매개변수를 입력해야만 한다. 자연하천에서 수집된 분산자료 (농도 분포 곡선)가 있는 경우, 저장대모형의 변수를 결정하는 방법은 이론적 방법, 경험적 방법, 그리고 수치적 방법이 있다 (정태성, 2000). 기존의 변수 결정방법들은 대부분 체류시간만을 결정하는 반면 Petersen (1977)과 Nordin과 Troutman (1980)의 방법은 저장대모형에 필요한 대부분의 변수를 결정하는 등 최근에 이르기 까지 많이 사용되는 방법이다.

본 연구에서는 기존에 제안된 변수 결정방법들의 적용한계를 제시하고, 새로운 변수결정방법을 개발하였다. 새로운 변수결정방법의 개발을 위하여 저장대모형의 해석해를 유도하고 유도된 해석해로부터 저장대모형의 변수를 결정하는 모멘트방법과 最尤度法을 개발하였다. 기존에 제안된 각각의 방법들에 대한 거동 비교와 새로운 변수결정방법의 검증은 위하여 모형실험 자료를 사용하였다. 검증된 변수결정방법을 적용하여 미국 전역의 32개 하천 62개 지점에서 저장대모형의 변수를 결정하였다. 변수 추정식의 개발을 위하여 이론적 연구를 통하여 평균유속과 종분산계수를 이용하여 본류대 평균유속과 본류대 종분산계수를 추정하는 추정식을 개발하였으며, 통계적 방법을 이용하여 질량교환계수와 본류대 면적에 대한 저장대 면적비의 추정식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 추정식의 결과를 검증하기 위해서 실측치와 함께 기존에 제안된 추정식의 결과를 비교 하였다.

2. 변수 결정방법 개발

오염물질이 순간적으로 유입된 경우의 Laplace 변환된 저장대모형 해석해는 다음과 같다 (정태성, 2000).

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사후과정 연구원

** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

$$\bar{C}_f(s, x) = \frac{U_f \left(\alpha_0 + \frac{\beta_0}{sT+1} \right)}{\sqrt{U_f^2 + 4K_f \left(1 + \frac{\varepsilon}{sT+1} \right) s}} \exp \left\{ \left(U_f - \sqrt{U_f^2 + 4K_f \left(1 + \frac{\varepsilon}{sT+1} \right) s} \right) \frac{x}{2K_f} \right\} \quad (3)$$

여기서 α_0 는 유입지점에서의 전체면적에 대한 본류대 면적비, β_0 는 유입지점에서의 전체면적에 대한 저장대 면적비, \bar{C}_f 는 시간에 대해서 Laplace 변환된 본류대 내에서의 농도이다. 확률변수 T 의 확률밀도 함수를 $C_f(t, x)$ 라고 할 때, 모멘트 발생함수, $M_T(-s)$ 는 다음과 같다.

$$M_T(-s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-st} C_f(t, x) dt = \bar{C}_f(s, x) \quad (4)$$

농도의 시간분포에 대한 모멘트는 모멘트 발생함수를 s 에 대하여 미분한 후 s 에 0을 대입하면 구할 수 있으며, 그 결과는 정태성 (2000)에 수록되어 있다. 본 연구에서 개발한 모멘트방법은 저장대 모형의 Laplace 변환된 해석해로부터 유도된 4개의 비선형 조건방정식과 자연하천에서 수집된 농도의 시간분포 자료로부터 구한 평균 도달시간, 분산, 왜곡도계수, 그리고 첨도계수를 같다고 가정하고 대상 하천의 각 측정점에서 저장대모형의 변수들을 결정하는 방법이다 (Kotegoda와 Rosso, 1997). 본 연구에서는 4개의 비선형 연립방정식으로부터 저장대모형의 매개변수들을 결정하기 위하여 모든 변수가 양수인 조건을 만족하면서 이상점의 효과를 최소화 할 수 있는 robust 비선형 조건방정식 해석 도구를 사용하였다 (Huber, 1981).

본 연구에서는 자연하천에서 수집된 농도의 시간분포 자료를 Laplace 변환자, s 에 따른 농도 자료로 변환하여 해석해를 이용해서 구한 농도분포 자료와 비교하는 방법으로 변수를 결정하기 위하여 最尤度法 (maximum likelihood method)을 개발하였다. Laplace 변환자, s_1, s_2, \dots, s_n 에 대한 농도분포가 주어져 있는 경우, 결정되어야 할 변수들, T_n 은 Laplace 변환된 해석해로부터 유도된 尤度函數를 최대화함으로써 결정된다. 이때 오염물질의 유입이 본류대에서만 이루어졌다고 가정하고 α_0 는 1, β_0 는 0의 값을 사용하였다. 본 연구에서는 저장대모형의 변수들을 구하기 위해서는 다음 식과 같은 대수尤度函數, $\ln L(T_n)$ 를 최대화하는 방법을 사용하였다 (Kotegoda와 Rosso, 1997).

$$\ln L(T_n) = n \ln U_f + \sum_{i=1}^n \ln \left[\sqrt{U_f^2 + 4K_f \left(1 + \frac{\varepsilon}{s_i T + 1} \right) s_i} \right]^{-1} + \frac{x}{2K_f} \sum_{i=1}^n \left(U_f - \sqrt{U_f^2 + 4K_f \left(1 + \frac{\varepsilon}{s_i T + 1} \right) s_i} \right) \quad (5)$$

最尤度函數의 해를 구하기 위하여 모든 변수가 양수인 조건을 만족하면서 정규성의 가정에 둔감하고 이상점의 효과를 최소화 할 수 있는 robust 비선형 조건방정식 해석 도구를 사용하였다.

3. 변수 결정방법의 검증

본 연구에서는 기존의 변수결정방법과 본 연구에서 개발된 변수결정방법의 비교를 위해서 Seo (1990)에 의해서 측정된 6개 series의 수리량 및 확산량 자료와 저장대모형의 변수 자료를 이용하였다. 저장대모형의 변수들은 모형에서 직접 측정되었거나 분산실험을 통해서 수집된 농도분포로부터 결정되었다. 본류대 평균유속은 저장대 내에서의 유속을 제외한 본류대만의 단면 평균유속이 측정되었다. 저장대는 흐름이 미미하거나 부유속이 발생하는 재순환류 구역을 말한다. 본류대 단면적은 하천의 총 단면적에서 저장대 단면적을 제외하고 측정된 면적이다. 종분산계수는 Fischer 등 (1979)에 의해서 제안된 추적방법 (routing method)을 이용하여 실험에서 구한 농도분포를 최적화시키는 방법으로 결정되었다. 질량교환계수는 저장대 지배방정식으로부터 구한 해석해와 저장대에서 실측된 농도분포를 최적화시키는 방법으로 결정되었다. 본 연구에서 사용된 수리량 자료 및 저장대모형 변수 자료들은 Table 1에 정리하여 수록하였다.

기존의 변수결정방법 및 본 연구에서 개발된 모멘트방법과 最尤度法을 사용해서 Seo (1990)에 의해서 수집된 농도의 시간분포 자료로부터 저장대모형의 변수들을 결정하고 이들의 결과를 Seo (1990)의 모형실험 실측치와 비교하여 Fig. 1에 도시하였다. 最尤度法 및 기존의 결정방법들은 실측치를 과대 혹은 과소 산정하는 반면 모멘트방법은 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 체류시간의 경우에는 Petersen (1977)의 결과가 비교적 정확하고, 본류대 면적에 대한 저장대 면적비의 경우에는 Nordin과 Troutman (1980)의 결과가 비교적 정확한 것으로 나타났다. 이 두 방법중에서 Nordin과 Troutman (1980)의 방법은 기존에 제시된 변수결정방법중 비교적 정확히 실측치를 재현하는 것으로

나타났으며, 저장대모형에 필요한 4개의 매개변수 모두를 결정할 수 있으므로 실측 농도자료가 있는 경우에는 이 방법을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 기존의 결정방법과 비교할 때, 모멘트방법의 결과는 Seo (1990)의 모형실험 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 最尤度法은 전반적으로 기존에 제안된 변수결정방법보다는 우수한 거동을 보이거나 본류대 종분산계수를 과대 산정하고 체류시간을 과소 산정하는 것으로 나타났다. 이는 농도의 시간분포 자료를 Laplace 변환하는 과정에서 발생하는 통계적 특성 변화 때문인 것으로 판단된다.

Table 1 Summary of Hydraulic and Parameters Data Sets Measured by Seo (1990)

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

변수결정방법들을 검증하기 위한 추가적인 방법으로 각각의 결정방법으로부터 결정한 변수들을 Seo (1990)에 의해 개발된 저장대 수치모형에 적용하고 각각의 농도 분포를 구하여 그 결과를 모형 실험 실측 농도분포와 비교하였다. 모멘트방법과 最尤度法은 본류대 평균유속을 과소 산정하기 때문에 실측농도에 비해 침투농도가 낮게 나타나는 것으로 나타났다. 最尤度法은 체류시간을 과소 추정함으로써 실측 농도분포에 비해 하강부의 꼬리부분이 상당히 짧은 것으로 나타났다. Petersen (1977) 그리고 Nordin과 Troutman (1980)의 결정방법은 본류대 종분산계수를 실측치에 비해 과대 산정하는 것으로 나타났는데, 이로 인해 농도분포의 분산이 실측치에 비해 증가된 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 저장대모형의 변수를 결정하기 위해서 모멘트방법과 最尤度法을 개발하였는데, Laplace 변환된 실측 농도분포 자료를 직접 실측치와 비교하는 最尤度法은 농도분포의 모멘트 식을 이용하는 모멘트방법에 비해 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 미국 전역의 자연하천에서 수집된 농도분포 자료로부터 저장대모형의 매개변수 실측치를 결정하기 위하여 모멘트방법을 사용하였다. 모멘트방법을 이용하여 변수 실측치를 결정하기 위하여 미국 전역의 32개 하천 62개 지점의 수리량, 지형 자료 및 농도의 시간분포 자료를 수집하였다. 국내하천의 경우, 분산실험이 수행된 하천이 거의 없는 실정이어서 국내하천의 분산자료는 전혀 수집하지 못하였다.

모멘트방법의 적용성을 검증하기 위하여 미국 전역의 27개 하천에서 수집한 축선별 농도분포를 이용하여 결정한 저장대모형의 변수들을 Seo (1990)에 의해서 개발된 저장대 수치모형에 적용하여 각 축선에서의 농도의 시간분포를 구하였다. 모멘트방법으로부터 구한 변수를 적용하여 구한 농도분포와 실측 농도분포의 침투농도에 이르는 시간과 농도분포의 침투농도에 이르는 시간을 비교한 결과 모멘트방법으로부터 구한 변수를 적용하여 구한 농도분포의 침투농도에 이르는 시간은 실측 농도분포의 침투농도에 이르는 시간과 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 농도분포의 침투농도는 실측 농도분포의 침투농도와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 자연하천에 유입된 오염물질의 분산거동을 해석하기 위해서 저장대모형을 적용할 필요가 있는 경우, 본 연구에서 개발된 모멘트방법을 사용하여 매개변수를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 변수 추정식 개발

1차원 분산모형의 평균유속과 저장대모형의 본류대 평균유속은 밀접한 연관성을 갖고 있는데, 본 연구에서는 이들을 비교하는 방법으로 본류대 평균유속에 대한 추정식을 개발하였다. 저장대 내에서 유속의 총변동량이 0이라면 저장대모형의 평균유속과 1차원 분산모형모형의 평균유속비는 다음 식과 같게 된다.

$$\frac{U_f}{U} = \frac{A_f + A_s}{A_f} = 1 + \epsilon \quad (6)$$

식(6)에서 저장대모형의 본류대 평균유속은 1차원 분산모형의 평균유속에 비해 $1 + \epsilon$ 의 비율만큼 크다는 사실을 알 수 있다. 1차원 분산모형의 분산 관계식과 저장대모형의 분산 관계식의 연관성을 이

용하여 분류대 중분산계수를 유도할 수 있으며, 그 결과는 다음 식과 같다.

$$K_f = K(1 + \varepsilon) - U^2 T \varepsilon \quad (7)$$

식(7)에서 저장대모형의 분류대 중분산계수는 1차원 분산모형의 중분산계수에 비해 작은 값을 갖는다는 사실을 알 수 있다. 분류대 평균유속 공식의 검증에 위하여 실측변수 자료들을 이용하여 식(6)로부터 구한 단면 평균유속을 실측치와 비교하여 Fig. 2(a)에 도시하였다. Fig. 2(a)에서 식(6)로부터 구한 단면 평균유속은 실측 단면 평균유속과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 하상에 존재하는 소여울 연속구조나 하천변의 완충지역 등에 의해 생성된 저장대 구조는 흐름 유속을 저하시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 이는 흐름이 미미하거나 거의 존재하지 않는 저장대 내의 유속을 제외한 분류대만의 평균유속은 저장대 내의 유속을 포함한 것보다 크다는 사실을 입증하는 것이다. 분류대 중분산계수 공식의 검증에 위하여 실측변수 자료들을 이용하여 식(7)로부터 구한 중분산계수와 추적방법을 이용해서 구한 중분산계수를 비교하여 Fig. 2(b)에 도시하였다. Fig. 2(b)에서 식(7)로부터 구한 중분산계수는 추적방법을 이용해서 구한 중분산계수와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 하상과 하상에 존재하는 저장대 구조는 오염물질의 혼합을 증가시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 이는 저장대를 제외한 분류대만의 중분산계수는 저장대를 포함하여 결정된 중분산계수보다 작다는 사실을 입증하는 것이다.

본 연구에서는 무차원 질량교환계수를 종속변수로 하고, 독립변수로서 하천의 저장대수심에 대한 분류대 수심비, h_f/h_s , 저장대 수심에 대한 저장대 길이비, L_s/h_s 를 선정하여 회귀식을 유도하였다. 이때 사용된 변수들 중 h_f 와 h_s 는 실측된 평균수심으로부터 분류대 면적에 대한 저장대 면적비를 이용해서 분리한 값들로서 이들 자료의 무차원화된 범위를 Table 2에 수록하였다. 33점의 자료에 One-Step Huber방법을 적용하여 유도한 회귀식은 다음과 같으며, 이때 본 추정식의 상관계수는 0.86으로 나타났다 (Maidment, 1993).

$$k^* = 0.013 \left(\frac{h_s}{\sqrt{h_f L_s}} \right)^{1.20} \quad (8)$$

Table 2 Range of Dimensionless Variables

Parameter	Deveration Data Sets			Verification Data Sets		
	Range	Median	Quartile	Range	Median	Quartile
k^*	0.0000015 -0.001020	0.000028	0.0000104	0.0000006 -0.000800	0.000034	0.0000163
$h_s / \sqrt{h_f L_s}$	0.0002 -0.055	0.0047	0.0015	0.0009 -0.062	0.0061	0.0018
ε	0.0020 -0.174	0.038	0.009	0.0010 -0.258	0.039	0.021
f	0.0160 -1.379	0.332	0.087	0.0340 -0.980	0.315	0.120

분류대 면적에 대한 저장대 면적비의 회귀식을 결정하기 위하여 분류대 면적에 대한 저장대 면적비를 종속변수로 하고, 독립변수로서 마찰계수, $1/\sqrt{f}$ 를 선정하였다. 본 연구에서 사용된 분류대 면적에 대한 저장대 면적비의 범위는 Table 2에 수록되어 있다. 33점의 자료에 One-Step Huber방법을 적용하여 유도한 회귀식은 다음과 같으며 본 추정식의 경우에 상관계수는 0.72이다.

$$\varepsilon = 0.103 (1/\sqrt{f})^{-2.22} \quad (9)$$

본 연구에서는 정규성의 가정에 둔감하고 이상점의 효과를 줄여 줌으로서 최소제곱법을 사용했을 때 영향을 미치는 이상치들의 효과를 보다 감소시킬 수 있는 robust방법 중 Huber (1981)에 의해 개발된 One-Step Huber방법을 사용하였다. 회귀식 유도 및 회귀식의 검증을 위하여 미국 전역에서 수집된 28개 하천 58점의 자료를 사용하였다. 이들 자료중 33점의 자료는 회귀식 유도에 사용하였고, 나머지 25점의 자료는 유도된 회귀식의 검증에 사용하였다. 자료의 분리 시 회귀식 유도와 검증에 사용한 2개의 자료군의 통계적 특성이 유사하도록 분류하였다 (Table 2). 또한 동일한 하천의 여러 점의 자료는 가능한 2개의 자료군으로 분리하여 사용하였다.

본 연구에서 유도한 추정식을 검증하기 위하여 전 절에서 서술한 바와 같이 추정식 유도에서 사용하지 않은 25점의 하천 자료를 사용하였다. 본 연구에서 개발한 무차원 질량교환계수 추정식의 거동을 상대적으로 비교하기 위하여 이미 분석한 바 있는 Petersen (1977)의 공식을 선정하여 실측치와 비교하였다. Fig. 3(a)는 Petersen (1977)과 본 연구에서 개발된 추정 공식들에 의해 계산된 추정치와 실측 질량교환계수를 1:1 대응으로 도시한 것이다. Fig. 3(a)에서 제안된 회귀식 결과는 대부분 실측치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Petersen (1977)의 공식은 대부분 과소 추정하는 것으로 나타났다. 본류대 면적에 대한 저장대 면적비 공식의 거동을 상대적으로 비교하기 위하여 Thackston과 Schenelle(1970) 공식과 Petersen(1977)의 공식을 선정하여 본 연구에서 개발한 공식과 함께 실측치와 1:1 비교하여 Fig. 3(b)에 수록하였다. Fig. 3(b)에서 제안된 회귀식 결과는 대부분 실측치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 자연하천에 적합한 저장대모형의 변수를 결정하기 위하여 이론적 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 Laplace 변환된 저장대모형의 해석해를 유도하고 이로부터 저장대모형의 변수를 결정하는 모멘트방법과 최우도법을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 변수결정방법의 검증을 위하여 모멘트방법과 最尤度法의 결과를 기존의 변수결정방법들의 결과와 함께 Seo (1990)의 모형실험 실측치와 1:1로 비교하는 방법과 이들을 이용해서 구한 변수들을 저장대 수치모형에 적용하고 농도분포를 구하여 실측 농도분포와 비교하는 방법을 사용하였다. 그 결과 최우도법은 Laplace 변환된 실측 농도분포 자료를 이용하는 Nordin과 Troutman (1980)의 결과에 비해 다소 실측치에 가까운 결과를 보였으나 본류대 종분산계수를 과대 산정하는 등 전체적인 경향은 Nordin과 Troutman의 결과와 비슷한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 모멘트방법은 기존의 변수결정방법 결과에 비해 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 모멘트방법을 사용해서 결정한 변수를 저장대 수치모형에 적용하고 농도분포를 구하여 실측 농도분포와 비교한 결과 오염물질의 이송 및 분산 거동을 잘 재현하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 모멘트방법을 이용하여 미국 전역에서 수집된 32개 하천 62개 농도의 시간분포 자료로부터 저장대모형의 변수 실측치를 결정하였다. 결정된 본류대 평균유속은 실측 평균유속에 비해 큰 것으로 나타났는데, 이는 자연하천에 존재하는 저장대 구조는 평균유속을 감소시키는 역할을 한다는 사실을 입증하는 것이다. 모멘트방법을 이용하여 결정한 본류대 종분산계수는 추적방법을 이용하여 구한 종분산계수에 비해 과소산정하는 것으로 나타났다. 이것은 자연하천에 존재하는 저장대는 자연하천에 유입된 오염물질의 분산을 증가시키는 역할을 한다는 사실을 입증하는 것이다. 모멘트방법을 사용하여 결정한 변수들을 저장대 수치모형에 적용하여 농도분포를 구하고 그 결과를 실측치와 비교한 결과 모멘트방법은 자연하천에서의 오염물질 분산특성을 대표하는데 보다 우수한 거동을 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 농도의 시간분포 자료가 존재하는 하천에서의 저장대모형 변수를 결정하고자 할 때 본 연구에서 개발된 변수결정방법을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

자연하천에 적합한 저장대모형의 변수들을 구하기 위하여 이론적 연구를 통하여 평균유속과 종분산계수를 구하는 공식을 제시하였다. 저장대모형의 변수중 질량교환계수와 저장대 면적비 추정식 개발을 위하여 모멘트 방법을 이용하여 계산한 저장대모형 변수 자료를 이용하였다. 이들 자료중 33개의 자료에 대하여 one-step Huber 방법을 적용하여 질량교환계수와 본류대 면적에 대한 저장대 면적비를 추정하는 회귀식을 유도하였다. 본 연구에서 유도한 회귀식들의 검증을 위하여 25개 지점의 자연하천에서 구한 저장대모형의 변수들과 비교한 결과 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 따라서 분산 자료가 없는 하천에 저장대모형을 적용할 경우, 본 연구에서 유도된 변수 추정식을 이용하여 변수를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- 정태성 (2000) 하천혼합예측을 위한 저장대모형의 매개변수 결정, 박사학위논문, 서울대학교.
 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.
 Huber, P. J. (1981) *Robust statistic*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y.

Kottogoda, N. T., and Rosso, R. (1997) *Statistics, probability, and reliability for civil and environmental engineers*. McGraw-Hill Companies, Inc.

Maidment, D. R. (1993) *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill.

Nordin, C. F., and Troutman, B. M. (1980) Longitudinal dispersion in rivers: The persistence of skewness in observed data. *Water Resources Research*, 16(1), 123-128.

Petersen, F. B. (1977) *Prediction of longitudinal dispersion in natural streams*. Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Series Paper No. 14, Technical University of Denmark.

Seo, I. W. (1990) *Low flow mixing in open channels*, Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Thackston, E. L., and Schnelle, Karl B. J. (1970) Predicting effects of dead zones on stream mixing. *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 96(SA2), 319-331.

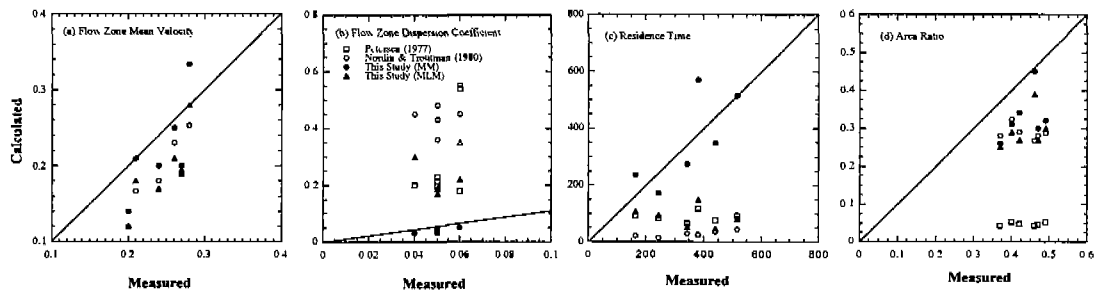


Fig. 1 Comparisons of Calculated Storage Zone Model Parameters with Measured Data

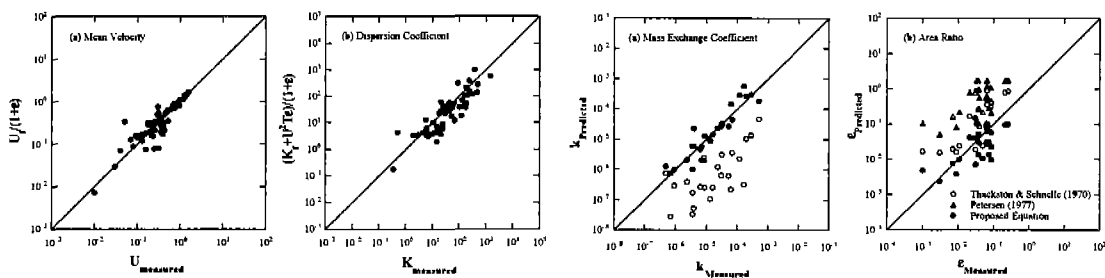


Fig.2 Comparisons of Calculated Mean Velocity and Dispersion Coefficient with Measured Values

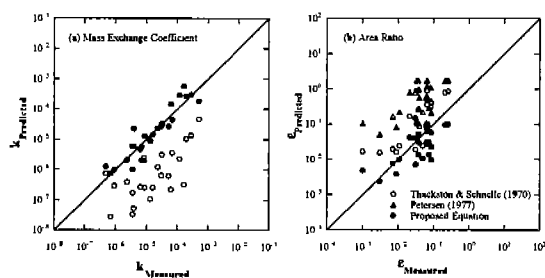


Fig. 3 Comparisons of Estimated Values of Storage Zone Model Parameters with Measured Value