

사고에 의하여 자연하천으로 방류된 비보존성 오염물질의 종확산

Dispersion of Nonconservative Contaminants Accidentally Released into Natural Streams

조 성 우* / 전 경 수**

Cho, Seong Woo / Jun, Kyung Soo

Abstract

A fractional step finite difference model for the longitudinal dispersion of nonconservative pollutants is applied to the Nakdong River to simulate the phenol spill accident which occurred on March, 1991. Prior to the dispersion calculation, the flow conditions are simulated to provide inputs to the dispersion model. An unsteady flow model based on Preissmann's four-point scheme is used for this purpose. Sensitivities of the dispersion calculation to empirical equations for dispersion coefficient and to the first-order decay coefficient are analyzed. The time to peak concentration at a downstream location is significantly different depending on the formula for the dispersion coefficient. Although the decay coefficient does not affect the shape of the temporal concentration distribution, the concentration values depend on the decay coefficient very significantly. An optimization technique is used to calibrate the dispersion model as well as the flow model. The time to the peak concentration is simulated for major positions of water intake along the Nakdong River.

keywords : Longitudinal dispersion, Nonconservative contaminants, The Nakdong River, Phenol spill accident, Numerical model

요 지

비보존성 오염물질의 종확산에 관한 단계분리 유한차분 모형을 낙동강에 적용하여, 1991년에 발생한 페놀누출 사고에 따른 종확산 모의계산을 수행하였다. Preissmann의 4점 음해법에 근거한 부정류 계산모형으로부터 산정된 계산결과를 종확산 모형의 입력자료로 사용하였다. 종확산계수의 산정을 위한 경험식 및 1차 반응의 감쇠 계수에 따른 종확산 계산결과와 민감도를 분석하였다. 하류 지점에서의 침투농도 발생 시각은 사용된 종확산계수 식에 따라 상당히 달라짐을 알 수 있었다. 또한 농도 분포형은 감쇠계수에 따라 변하지 않는 반면, 농도값은 감쇠계수에 상당히 좌우되는 것으로 나타났다. 최적화 기법을 사용하여 흐름 모형 및 종확산 모형을 보정하였으며, 낙동강에 위치한 주요 취수지점들에 대한 침투농도 발생시각을 모의하여 제시하였다.

핵심용어 : 종확산, 비보존성 오염물질, 낙동강, 페놀누출사고, 수치모형

* 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 대학원 졸업
Former Graduate Student, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ.

** 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ. (E-mail: ksjun@yurim.skku.ac.kr)

1. 서 론

인구의 증가와 도시집중, 산업화 등으로 인한 하천의 수질오염 문제는 날로 그 심각함을 더해, 이제는 수량의 문제를 능가할 정도의 관심과 우려의 대상이 되었다. 하천의 오염은 생활용수, 농업 및 공업용수 등의 용수공급원 그 자체의 오염뿐만 아니라 하천 생태계에 미치는 영향 또한 지대하다. 이러한 하천오염을 유발하는 오염원의 완전한 제거는 불가능하나, 이의 조절에 의한 적정수질의 유지 및 관리가 요구되고 있다. 이를 위해서는 수체에 유입되는 오염원이 하천의 수질에 미치는 영향을 정량적으로 평가 내지는 예측할 수 있는 수단이 필요하다. 이러한 수단의 하나가 수질모형으로서 물의 흐름, 오염원의 확산 및 여러 수질성분간의 상호반응 등 관련된 물리적, 화학적, 생물학적인 현상들을 수학적으로 나타내고, 이에 따른 계산을 수행하여 수질을 모의하게 된다.

하천수질오염 문제로서 생활하수, 공장폐수, 축산폐수 등 평상시의 지속적인 오염원의 발생에 의한 장기적인 수질문제와 사고 등으로 인한 독성물질 등의 일시적 방류에 따른 단기적인 수질문제로 구분할 수 있는데, 평상시에는 유역 내 점오염원 및 비점오염원과 하천의 수질관리가 공학적인 관심의 대상인 반면, 수질 사고 시에는 사고지점 하류에서의 가능한 피해상황을 정확하고 신속하게 예측함으로써 그에 대한 대책을 수립하는 것이 중요한 문제가 된다.

이와 같은 수질문제의 성격에 따라 적용되는 수질모형의 특성 또한 크게 달라진다. 일반적으로 수질모형은 흐름의 계산을 위한 흐름모형, 오염원의 물리적 확산을 계산하는 확산모형 및 수질 요소간의 상호작용을 모의하기 위한 반응모형 등 3개 부모모형으로 구성된다. 흐름계산 모형은 관심의 대상이 되는 수질문제의 성격에 관계없이, 수질계산에 앞서서 선행되어야 하는 필수적인 요소이다. 장기적인 하천 수질문제에서 관심의 대상이 되는 것은 주로 BOD, COD, DO, 질소 순환요소 및 인 순환요소 등 전형적인 수질항목들로서, 이 경우의 수질모형은 이들 수질항목의 종류와 그들의 상호반응을 나타내는 반응모형의 구조 및 그에 따른 반응계수의 값들이 수질모형을 결정하는 중요한 요소라 할 수 있다. 이 경우 관심이 되는 수질변동의 시간 단위는 비교적 커서 월별, 계절별 또는 연별 수질을 정상상태로 모의하게 되며, 따라서 종확산, 즉 전단류 확산이 차지하는 비중은 거의 없게 된다. 즉, 장기 수질 모

형의 경우에는 흐름모형과 함께 반응모형이 중요한 부분을 차지하는 반면 확산모형의 비중은 상대적으로 적다.

반면에 우발적인 사고 등으로 단시간에 배출된 오염원에 따른 하천수질의 계산모형에 있어서는 물리적 확산에 의해서 시간에 따라 급격히 변화하는 비정상 농도의 계산이 요구되므로 확산모형이 매우 중요한 부분을 차지하게 된다. 한편 이 때의 오염원은 평시에는 하천으로의 방류가 전혀 허용되지 않거나, 그 허용농도가 극소치인 주로 독성물질 등의 단일 오염물질이며, 따라서 서로 다른 오염 물질간의 반응 등을 모의하기 위한 반응모형은 대개 중요한 요소가 되지 않는다.

장기적인 수질변화를 모의하기 위한 계산모형에 관한 연구는 국내외적으로 매우 활발히 수행되어 왔으나, 단기간의 급격한 수질변동을 모의하기 위한 계산모형에 관한 연구는 많지 않은데, 이는 우발적인 수질사고가 자주 발생하는 것이 아니므로 그 활용성이 상대적으로 적기 때문이기도 하지만 시간에 따라 급격히 변화하는 비정상 수질을 정확히 계산하기 위해서는 정교한 확산모형이 요구되기 때문이기도 하다. 우발적인 오염원의 누출 사고는 자주 발생하는 것은 아니나, 일단 이러한 사고가 발생하게 되면 하류의 상수원 등에 심각한 위협을 초래할 수 있으므로 이에 대한 정확한 예측모형의 개발이 필요한 과제라 할 수 있다.

하천에서의 종확산을 정확히 모의하기 위해서는 수치진동이나 수치분산을 최소화할 수 있도록 1차원 종확산 방정식에 대한 적절한 수치모형이 요구된다. 이러한 계산모형으로서 보존성 오염물질의 종확산 계산을 위한 단계분리 또는 연산자 분리 유한차분 기법들이 Holly와 Preissmann(1977) 및 Holly와 Usseglio-Polatera(1984) 등에 의하여 개발된 바 있다. 이를 비보존성 오염물질의 종확산 계산에 적용할 수 있도록 확장한 계산모형이 비정상 수질모형인 CE-QUAL-RIV1(WES, 1990)이며, 유명관과 전경수(1999)는 CE-QUAL-RIV1 모형의 감쇠항에 대한 계산 방법을 개선한 모형을 수립하고 이를 정확해가 존재하는 비보존성 오염물질의 종확산 문제들에 적용하여, 그 결과를 정확해 및 CE-QUAL-RIV1 모형에 의한 계산결과와 비교함으로써 개선된 계산결과를 제시하였다.

본 연구에서는 자연하천에 관한 부정류 계산모형과 종확산 계산모형으로 구성되는, 오염물질 누출 사고시의 비정상 하천수질의 모의를 위한 계산모형을 수립하

고, 과거의 수질사고 사례와 각종 산업시설의 밀집 현황으로 미루어 볼 때, 국내 하천들 중 장래 수질사고의 가능성이 가장 크다고 할 수 있는 낙동강 수계에 모형을 적용하였다. 영남지방의 물 공급원인 낙동강 연안에서는 이미 각종 산업시설이 밀집되어 있고 앞으로 더욱 확장될 전망이다. 따라서 낙동강으로 방류되는 각종 오폐수에 따른 수질악화에 따라 적정수질 기준을 갖춘 각종 용수의 확보가 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 대구, 부산, 마산, 창원 등 영남권 대도시의 상수원이 낙동강 본류에서 취수되고 있는 점을 감안하면, 유역의 상류부인 구미, 김천, 왜관, 대구 등의 각종 산업시설에서 예기치 못한 방류나 사고로 인한 누출에 따른 독성오염물의 거동 해석을 위한 수질모형의 수립이 긴요한 시점이다(한건연과 김광섭, 1995). 특히, 1991년 3월에 발생한 폐놀 누출 사고 1994년 1월의 수질사고 등은 이러한 필요성을 더욱 증대시키고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 하천들 중 장래 수질사고의 가능성이 가장 크다고 할 수 있는 낙동강 수계를 모형의 적용 대상하천으로 하였다.

2. 계산모형

계산모형은 자연하천에 관한 흐름모형과 종확산 모형으로 구성된다. 종확산 모형에 앞서 흐름모형에 의한 계산이 수행되며, 그 결과로서 구해지는 각 지점에서의 평균유속 및 통수 단면적 등이 종확산 모형의 입력자료로 사용된다.

2.1 흐름 모형

하천 흐름계산 모형으로는 가장 일반적인 수리학적 모형으로서 Preissmann의 4점 음해법과 폐합형 double-sweep 알고리즘을 근간으로 하는 폐합형 부정류 계산모형을 사용하였다. 폐합형 수계에 관한 계산모형은 수치형 모형에 비하여 복잡한 대신에, 합류점 및 분기점, 지천 유입량 등 외부 유출입량의 처리가 간편하다는 장점이 있다.

폐합형 수계에 관한 계산모형의 지배 방정식은 수로 지배방정식과 절점 지배 방정식들로 구성된다. 수로 지배방정식은 하도형 흐름에 관한 것과 월류형 흐름에 관한 것으로 구분되는데, 하도형 흐름에 관한 수로 지배방정식은 다음식 (1) 및 (2)와 같은 연속방정식 및 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \quad (2)$$

여기서 $Q = Q(x,t)$ 및 $y = y(x,t)$ 는 각각 유량과 수위를 나타내며, A 와 K 는 흐름단면적과 통수능으로서 각각 y 의 함수이다. α 는 운동량 보정계수, g 는 중력 가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. 통수능 K 는 Manning의 조도계수(n)를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (3)$$

여기서 R 은 동수반경이다.

절점 지배방정식은 연속방정식 (4)와 등수위 조건식 (5)로 구성된다.

$$\sum_{k=1}^{L_j} Q_{j,k} + Q_{\text{ext}}(j,t) = 0, \quad j=1, \dots, J \quad (4)$$

$$y_{j,k} = y_j, \quad k=1, \dots, L_j; \quad j=1, \dots, J \quad (5)$$

여기서 J 는 절점의 총수, L_j 는 절점 j 에 연결된 수로의 총수이다. $Q_{j,k}$ 은 수로 k 로부터 절점 j 로의 유입량 또는 절점 j 로부터 수로 k 로의 유출량이며, $Q_{\text{ext}}(j,t)$ 는 시간 t 에서의 기지의 외부 유출입량으로서 지천 유입량, 상류단 경계에서의 유입량, 하류단 경계에서의 유출량 등이 여기에 포함된다. $Q_{j,k}$ 과 $Q_{\text{ext}}(j,t)$ 는 양의 값일 경우 절점에서의 유입량을, 음의 값일 경우 유출량을 각각 의미한다. $y_{j,k}$ 는 절점 j 와 k 를 연결하는 수로의 절점 j 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

하도형 흐름에 관한 수로 지배방정식을 Preissmann의 4점 음해법(Liggett과 Cunge, 1975; Cunge 등, 1980)에 의하여 차분화하면 수로상의 각 계산점에서의 수위 및 유량과 절점 수위에 관한 비선

형 연립방정식이 구성되며, 그 해는 Newton - Raphson 방법을 적용하여 구한다. Newton-Raphson 방법을 적용하여 구성되는 수위 및 유량 보정치에 관한 선형 연립방정식의 해법으로는 수로에 대한 forward sweep, 절점 수위 보정치의 계산 및 수로에 대한 return sweep으로 구성되는 폐합형 double-sweep 알고리즘을 사용한다. 계산모형에 관한 상세한 내용은 황의준과 전경수(1997) 및 황의준(1997)에 기술되어 있다.

2.2 정확산 모형

1차원 수로에서 흐름면적에 대하여 완전 혼합된 비보존성 오염물질에 관한 정확산 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(UAC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [DA \frac{\partial C}{\partial x}] - kAC \quad (6)$$

여기서 U는 단면평균 유속, D는 정확산계수, C는 오염물질의 농도이며 k는 생·화학적 반응에 의한 감쇠계수(decay coefficient)이다. 식 (6)의 우변 제 2항 -kC는 비보존성 물질에 관한 감쇠 항으로서 선형감쇠를 가정한 것이다. 식 (6)의 각 미분항을 전개하고 수로 흐름에 관한 연속방정식을 적용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC \quad (7)$$

여기서

$$u = U - \left[\frac{\partial D}{\partial x} + \frac{D}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right] \quad (8)$$

식 (7)은 U가 영이면 포물선형의, D가 영이면 쌍곡선형의 편미분 방정식이 된다. 식 (7)에는 포물선형과 쌍곡선형이 동시에 내재되어 있는데 이들 방정식이 갖는 물리적, 수학적 성질 및 그에 따른 적합한 수치해법 또한 다르므로, 각 항을 별도로 취급하여 해를 구하려는 것이 단계 분리, 또는 연산자 분리에 의한 접근방법이다. 즉, 식 (7)을 이송, 감쇠 및 확산에 관한 방정식인 다음 식 (9), (10) 및 (11)로 각각 분리하고, 이들 각각에 적합한 수치기법을 각각 1/3 시간 간격에

대하여 적용하여 순차적으로 계산하게 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + 3\bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

$$n\Delta t \leq t \leq (n + \frac{1}{3})\Delta t$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -3kC, \quad (10)$$

$$(n + \frac{1}{3})\Delta t \leq t \leq (n + \frac{2}{3})\Delta t$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 3\bar{D} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (11)$$

$$(n + \frac{2}{3})\Delta t \leq t \leq (n+1)\Delta t$$

여기서 \bar{u} 및 \bar{D} 는 시간준위 n과 n+1 사이에서의 u와 D의 평균치를 각각 나타낸다. 즉 이송, 감쇠 및 확산과정이 각각 1/3 시간간격에 대해서만 일어나는 것으로 하되, 이들 과정의 강도를 각각 실제의 세배로 함으로써, 결국 전체 시간간격(one time step)에 대해서는 실제와 같은 이송, 감쇠 및 확산이 일어나도록 하는 결과가 된다.

이상과 같은 계산모형은 비정상 수질모형인 CE-QUAL-RIV1(WES, 1990) 모형의 감쇠항에 대한 계산 방법을 개선한 것으로서, 유명관과 전경수(1999)는 오염물질이 불균일 흐름 내로 연속적으로 유입되는 경우 및 균일 흐름 내로 순간적으로 부하되는 경우에 대한 정확산 문제에 모형을 적용하여 그 결과를 정확해 및 CE-QUAL-RIV1 모형에 의한 계산결과와 비교한 결과, 감쇠계수가 커질수록 본 모형이 기존의 모형에 비하여 더욱 정확한 계산결과를 나타냄을 제시한 바 있다.

3. 계산모형의 적용

3.1 대상하천 구간

수립된 모형의 적용 대상하천으로서 낙동강 수계를 선정하였다. 낙동강 유역에는 각종 산업시설이 밀집되어 있어 예기치 못한 방류나 사고로 인한 오염물질 누출 가능성이 높고, 이러한 사고 시에 상수원 보호 등의 목적을 위해서는 정확산 계산모형이 필요하다. 특히

1991년 3월에 이미 페놀 누출 사고가 발생한 바 있어, 모형의 보정 등을 위한 관측자료가 부족하나마 가용한 곳이 이 지역이다. 따라서 본 연구에서는 국내 하천들 중 장래 수질사고의 가능성이 가장 크다고 할 수 있는 낙동강 수계를 모형의 적용 대상하천으로 하고, 1991년 3월에 발생한 페놀 누출 사고에 관한 모의모형을 구성하였다.

3.2. 흐름 계산모형의 적용

흐름 계산모형의 적용 대상 구간은 안동댐부터 낙동강 하구언까지의 총 연장 340 km 구간으로서 반변천, 미천, 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강, 청도천, 밀양천 등 13개의 주요지천 유입 지점을 내부경계로 포함한다. 그림 1은 모형의 구성을 나타내는 모식도로서 모형의 상류단인 안동댐, 하류단인 하구언 및 13개 지천의 유입지점에 각각 절점이 위치하도록 하였다. 따라서 흐름모형은 15개의 절점과 14개의 수로로 구성된다. 계산점의 총수는 744개로서 계산점간의 평균거리는 420 m이다. 각 계산점에서의 횡단면 자료는 건설부(1993)의 하천측량 자료를 사용하였다.

부정류 계산모형의 상·하류단 경계조건인 상류단 유량과 하류단 수위 및 내부경계인 지천 유입량은 일반적으로 시간에 따라 변화하도록 부여할 수 있다. 그러나 지천 유입량의 추정에 필요한 수위 관측소 자료로서 일별 자료만이 가용한 관계로, 종확산 모형 계산시에 요구되는 시간별 또는 그 이하의 시간 단위에 대한 지천 유입량의 산정은 사실상 불가능하다. 이러한 가용자료상의 제약점과 페놀 유출 사고 당시가 우기가 아닌 평시로서 유량변동이 그리 크지 않음을 감안하여 사고 기간 중의 평균 유량이 지천으로부터 계속적으로 유입되는 것으로 하여 흐름모형의 입력자료를 구성하였다. 이와 같이 경계조건을 일정한 값으로서 부여하면 부정류 계산모형에 의하여 수행된 실제 흐름계산의 결과는 부정류가 아닌 부동류가 된다. 이와 같은 흐름조건은 물론 부동류 계산모형을 사용하여 모의할 수도 있다.

상류단 경계조건인 안동댐 방류량은 1991년 페놀 누출 사고 기간인 3월 14일부터 23일까지의 기간 중 평균 방류량인 $37.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 하였으며, 하류단 경계조건인 낙동강 하구언 수위도 마찬가지로 El. 0.9 m로 일정하게 부여하였다. 각 지천 유입량의 산정을 위해서는 수위 관측 자료와 수위-유량 관계곡선이 필요하다.

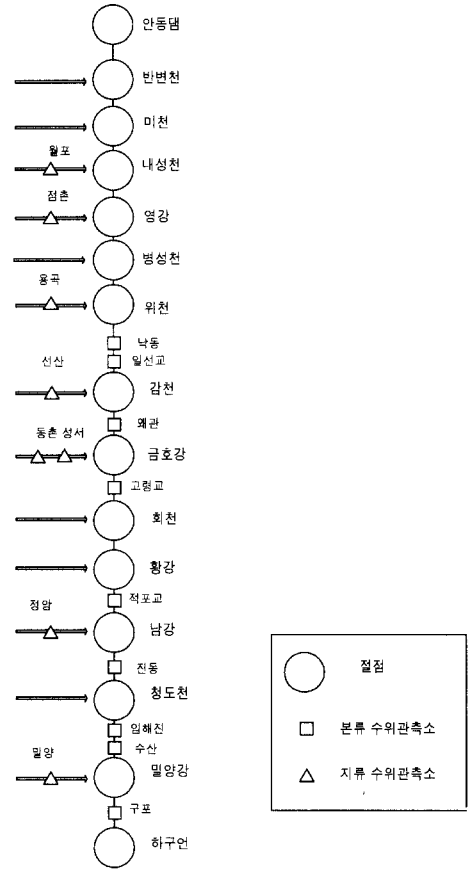


그림 1. 낙동강에 대한 흐름 계산모형의 모식도

그러나 이러한 자료가 가용한 곳은 일부 지천에 국한되기 때문에 다음과 같은 방법으로 지천 유입량 자료를 구성하였다. 우선 각 지천의 가장 하류단에 위치하며, 수위-유량 관계 곡선이 존재하는 8개 수위 관측소에서의 모의 계산기간인 1991년 3월 14일부터 3월 23일까지의 수위 관측치는 표 1에 정리된 바와 같다. 또한 이들 일별 수위값과 수위-유량 관계 곡선으로부터 각 관측 지점에서의 일별 유량을 산정하고, 일별 유량의 평균치를 산정하였다. 이와 같이 산정된 각 관측소에서의 평균유량을 배수유역 면적과 함께 표 2에 정리하였다.

지천 유입량이 배수유역 면적에 비례한다고 가정하고, 표 2의 자료를 사용한 회귀분석에 의하여 배수유역 면적과 지천 평균 유입량간의 관계식을 도출하였다. 동촌 지점의 경우에는 유역면적에 비하여 유량이 과도하게 큰 관계로(배수위의 영향으로 판단됨) 이상 자료

표 1. 각 지천별 수위 관측자료

수위관측소 (지천)	3/14	3/15	3/16	3/17	3/18	3/19	3/20	3/21	3/22	3/23	평균치
월포(내성천)	0.06	0.03	0.01	0.0	-0.02	-0.04	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
점촌(영강)	1.17	1.15	1.13	1.1	1.07	1.07	1.07	1.09	1.09	1.09	1.10
용곡(위천)	0.48	0.32	0.23	0.17	0.13	0.08	0.06	0.04	0.05	0.06	0.16
선산(감천)	1.58	1.55	1.53	1.55	1.5	1.49	1.47	1.45	1.42	1.4	1.49
동촌(금호강)	0.85	0.83	0.8	0.8	0.73	0.76	0.71	0.7	0.84	0.93	0.80
성서(금호강)	0.89	0.84	0.96	0.99	0.96	0.93	0.97	0.91	0.92	0.98	0.94
정암(남강)	1.58	1.55	1.5	1.48	1.48	1.49	1.5	1.49	1.48	1.49	1.50
밀양(밀양천)	1.15	1.15	1.14	1.14	1.14	1.13	1.13	1.13	1.15	1.17	1.14

표 2. 각 수위 관측소에 대한 평균유량 산정 결과

수위관측소	월포	점촌	용곡	선산	동촌	성서	정암	밀양
배수유역 면적(km ²)	1159	617	1317	990	1542	2105	3476	1369
평균유량(m ³ /s)	13.5	2.56	15.2	10.0	71.5	35.3	47.8	8.10

로 간주하여 회귀분석에서 제외하였다. 회귀분석 결과는 그림 2에 나타난 바와 같다. 이와 같이 도출된 다음의 회귀식을 사용하여, 미계측 지천을 포함한 13개 지천에 대한 유입량을 추정하였다.

$$Q_t = 0.013A_d \quad (12)$$

여기서 Q_t 는 지천 유입량(m³/s)을, A_d 는 배수유역 면적(km²)을 각각 나타낸다. 각 지천으로부터의 유입

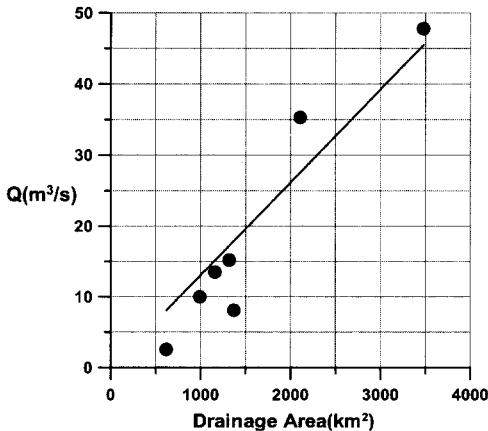


그림 2. 유역면적과 지천유량에 대한 회귀분석

량 추정결과는 표 3에 정리된 바와 같다.

그 밖의 입력자료로서 계산시간 증분은 1분, Newton-Raphson 반복계산 최대 수는 2회, Newton-Raphson 반복 계산 시 수위 및 유량 보정치의 수렴 범위는 각각 1 m³/s 및 1 cm, 차분식의

표 3. 각 지천별 평균 유입량 추정 결과

지천	배수유역 면적(km ²)	유입량(m ³ /s)
변변천	661	9.93
미천	538	8.08
내성천	1819	27.4
영강	965	14.5
병성천	607	9.10
위천	1583	23.8
감천	1137	17.1
금호강	2105	31.6
회천	939	14.1
황강	1331	30.3
남강	3476	63.4
청도천	421	6.30
밀양강	1494	22.4

시간 가중치와 운동량 보정 계수는 1로 하여 계산을 수행하도록 모형을 구성하였다.

흐름모형의 매개변수인 Manning 조도계수의 추정을 위한 목적함수로는 구포, 수산, 임해진, 진동, 적포교, 고령교, 왜관, 일선교, 및 낙동 등 본류 수위 관측 지점(그림 1 참조)에서의 수위 관측치와 계산치간의 오차 제곱합이 최소화되도록 하였다. 지천 수위 관측치의 경우와 마찬가지로 이들 본류의 수위 관측치 또한 사고 기간 중에 거의 일정한 값을 보였기 때문에 그 평균치를 계산된 수위와 비교하였다. 최적 추정 방법으로는 Gauss-Newton 방법에 Marquardt(1963)의 기법을 적용한 수정 Gauss-Newton 방법이 적용되었으며, 이를 위하여 상용 소프트웨어인 PEST(Doherty 등, 1994)가 사용되었다. 최적화 기법에 관한 상세한 내용은 Hill(1992) 등에 잘 기술되어 있다. 이와 같이 추정된 조도계수의 값은 0.0343이며, 제곱평균제곱근(RMS) 오차는 0.24 m이다. 각 지점에서의 수위 관측치와 계산치에 대한 비교결과는 표 4에 정리되어 있다.

흐름계산 모형에 의한 계산결과는 정확산 모형의 입력자료로 사용된다는 측면에서, 정확산 모형의 적용과 관련하여 다음 절에서 기술하기로 한다.

3.3 정확산 계산모형의 적용

앞에서 기술한 바와 같이 흐름계산 모형은 폐합형 부정류 계산모형인 반면, 정확산 모형은 단일 하도에 관한 모형으로 구성하였다. 부정류 계산모형을 구성하는 수로 중 필요한 부분을 배열시킴으로써 정확산 모형을 구성하도록 하였다. 여기서는 1991년의 페놀 누

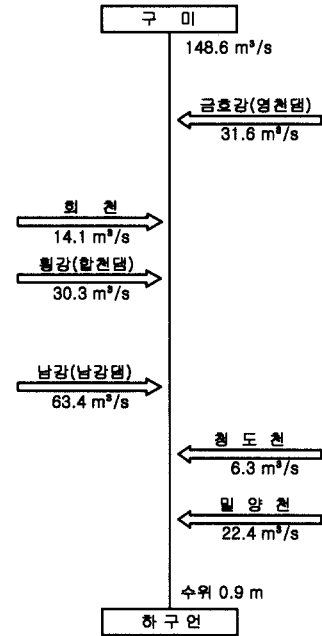


그림 3. 정확산 계산모형의 모식도

출 사고에 관한 모의모형의 구성이라는 관점에서 정확산 모형의 상류단은 흐름계산 모형의 경우와는 달리 구미 지점으로 하고, 하류단은 마찬가지로 낙동강 하구연으로 하여 총 214 km의 구간에 대한 모형을 구성하였다. 계산점의 총수는 471개로서 계산점간의 평균 거리는 446 m이다. 금호강, 회천, 황강, 남강, 청도천, 밀양천 등 6개 지천이 이 구간에 포함된다. 정확산 계산모형의 구성을 나타내는 모식도는 그림 3과 같다.

표 4. 추정된 조도계수에 따른 계산수위와 관측치의 비교

수위관측소	관측치(m)	계산치(m)	오차(m)	상대오차(%)
구포	1.198	1.210	-0.012	-1.75
수산	1.505	1.512	-0.007	-0.47
임해진	2.488	2.662	-0.174	-7.00
진동	3.639	3.811	-0.172	-4.73
적포교	7.084	7.331	-0.247	3.49
고령교	11.80	11.48	0.32	2.71
왜관	20.47	20.19	0.28	1.37
일선교	31.54	31.11	0.43	1.36
낙동	35.20	35.38	-0.18	-0.48

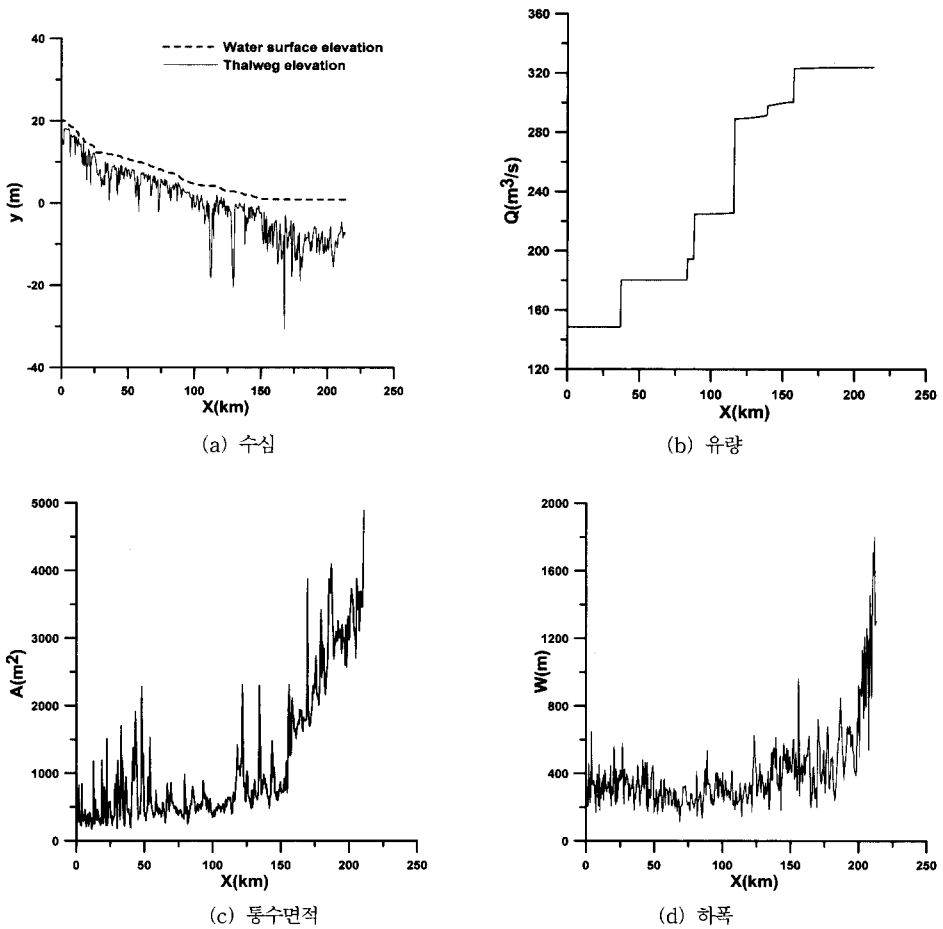


그림 4. 흐름계산 모형에 의하여 산정된 수리학적 입력자료

그림 4는 앞 절에서 기술된 흐름모형에 의하여 계산된 수위, 유량, 통수면적 및 하폭의 분포를 나타내고 있다. 이들 수리학적 변수들은 각 지점에 대한 종확산계수의 산정에 사용된다. 종확산계수는 흐름에 따라 결정되는 수리학적 매개변수로서, 간단하게는 원형 관수로 흐름(Taylor, 1954) 및 광폭 개수로 흐름(Elder, 1959)에 관한 해석적 연구로부터 불규칙한 자연하천에 이르기까지 종확산계수를 하천 단면의 형태특성 및 흐름과 관련된 변수들의 함수로서 나타내기 위한 많은 연구가 수행되어, 이 결과로 종확산계수에 관한 많은 경험식들이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 이들 식 중 McQuivey와 Keefer(1974), Liu(1977), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)에 의하여 각각

제안된 식 (13)-(16)을 적용하여 각 단면에서의 종확산계수를 산정하였다.

$$D = 0.058 \frac{dU}{S} \quad (13)$$

$$D = \beta \frac{U^2 W^2}{dU_*}, \quad \beta = 0.18 \left(\frac{U}{U_*} \right)^{1.5} \quad (14)$$

$$\frac{D}{dU_*} = 2.0 \left(\frac{W}{d} \right)^{1.5} \quad (15)$$

$$\frac{D}{dU_*} = 5.915 \left(\frac{W}{d} \right)^{0.620} \left(\frac{U}{U_*} \right)^{1.428} \quad (16)$$

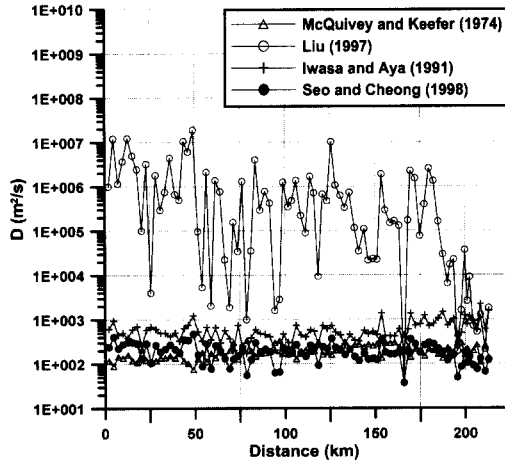


그림 5. 각 경험식에 의한 종확산계수 분포 산정결과와의 비교

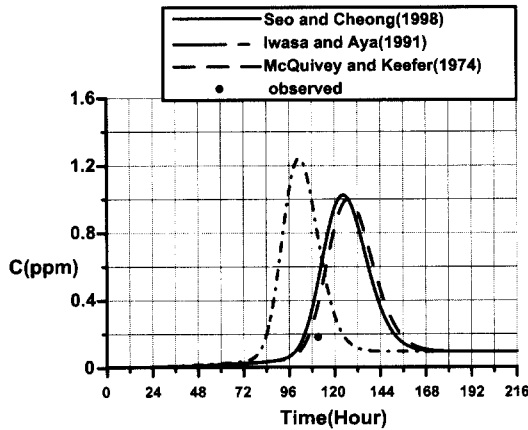


그림 6. 수산 지점에 대한 농도분포 계산결과(k = 0)

여기서 d 는 수심, W 는 하폭, S 는 하상경사이고, U_c 는 전단속도이다.

즉, 그림 4에 제시된 바와 같은 흐름모형의 계산결과를 사용하여 각각의 종확산계수 산정식에 의하여 종확산계수를 추정하였으며, 그 결과의 비교는 그림 5에 도시된 바와 같다. Liu(1977)의 산정식에 의한 계산결과가 변동폭이 지나치게 크고 다른 식들에 의한 결과와 큰 차이를 나타내는 반면, McQuivey와 Keefer(1974), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)에 의한 계산 결과는 단면에 따른 변화가 비교적 작은 안정적인 결과를 보임을 알 수 있다. 특히 McQuivey와 Keefer(1974) 및 Seo와 Cheong(1998)의 계산 결과는 서로 잘 일치하는 것으로 나타

났다.

1991년 폐늘유출 사고에 대한 언론기관, 환경단체 등의 조사기록에 기초하여 모형의 상류단인 구미에 1991년 3월 14일 22시부터 8시간 동안 30톤의 폐늘이, 이후 3월 20까지는 일 평균 2.5톤의 폐늘이 유출된 것으로 상류단 경계조건을 부여하여, 이 경우에 대한 모의계산을 수행하였다. 종확산계수의 산정식 중 다른 식들에 의한 결과와 큰 차이를 보이는(그림 5 참조) Liu(1977)의 식을 제외하고, McQuivey와 Keefer(1974), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하는 각 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

그림 6은 폐늘의 감쇠계수를 0이라 가정하여 계산된

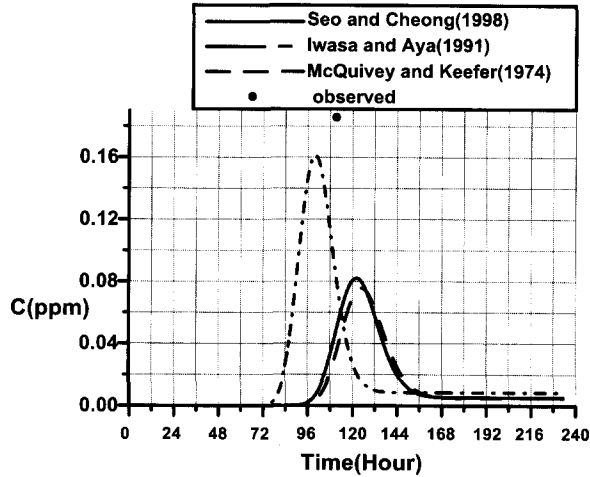


그림 7. 수산 지점에 대한 농도분포 계산결과(k = 0.5 1/day)

수산 지점(그림 1 참조)에서의 농도의 시간분포를 나타내고 있다. 그림에서 점으로 표시된 것은 이 지점에서 특정 시각에 관측된 농도 값을 나타내는 것이다. McQuivey와 Keefer(1974) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하여 계산된 농도분포가 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용한 경우에 비하여 상대적으로 서로 잘 일치함을 볼 수 있는데, 이는 이들 두 식에 의하여 산정된 종확산계수 분포가 서로 근사하다는 점에서(그림 5 참조) 기대되는 결과라 할 수 있다. Iwasa와 Aya(1991)의 식에 의하여 산정된 종확산계수를 사용하여 모의된 농도분포는 침투농도의 도달시

간(t_p)이 다른 두 식을 사용하는 경우에 비하여 24 시간 정도 짧은 것으로 나타나고 있다(표 5 참조). 수산 지점의 침투농도 도달시간이 약 120 시간인 점을 감안하면 24 시간의 차이는 약 20 %에 해당하는 상당한 것으로 판단된다.

폐놀의 감쇠계수는 대략 0.0 - 1.0 1/day의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 감쇠계수에 대한 계산결과와 민감도를 알아보기 위하여 감쇠계수를 0.5 1/day로 하여 모의 계산을 수행하였다. 그림 7은 역시 수산 지점에 대하여 계산된 농도의 시간분포를 실측치와 함께 나타내고 있다. 표 5는 감쇠계수 0.0 및 0.5 1/day의

표 5. 침투농도치 및 도달시간

a) 침투농도치

(단위 : ppm)

감쇠계수(day^{-1})	확산 계 수 식		
	McQuivey와 Keefer(1974)	Seo와 Cheong(1998)	Iwasa와 Aya(1991)
$C_p(k=0.0)$	1.00	1.03	1.24
$C_p(k=0.5)$	0.076	0.082	0.16
$C_p(k=0.0)e^{-0.5t}$	0.074	0.081	0.16

(b) 침투농도 도달시간

(단위 : hour)

감쇠계수(day^{-1})	확산 계 수 식		
	McQuivey와 Keefer(1974)	Seo와 Cheong(1998)	Iwasa와 Aya(1991)
k = 0.0	127.2	124.5	101.3
k = 0.5	124.8	122.2	99.8

표 6. 감쇠계수 추정결과 및 그에 따른 계산농도와 관측치의 비교

관측지점	관측일시	관측농도 (PPM)	계산농도(PPM)		
			확산계수식		
			McQuivey와 Keefer(1974)	Iwasa와 Aya(1991)	Seo와 Cheong(1998)
다 사	3. 17. 03:30	0.0035	0.1386	0.1533	0.1336
구 미	3. 18.	0.006	0.000	0.000	0.000
칠 서	3. 18. 13:00	0.25	0.2534	0.2012	0.2628
고령교	3. 19.	0.11	0.0769	0.0980	0.0699
다 사	3. 19.	0.0055	0.1264	0.1533	0.1217
수 산	3. 19. 13:20	0.188	0.0814	0.1893	0.0832
낙동대교	3. 22.-3. 24.	0.007	0.000	0.000	0.000
구지면		0.086	0.0777	0.0810	0.0629
RMS 오차			0.0711	0.0766	0.0740
감쇠계수 추정치			0.343	0.318	0.406

경우에 대하여 각각 계산된 농도분포로부터 침투농도 도달시간(t_p)과 침투농도의 값(C_p)을 요약한 것이다. 감쇠계수가 k 인 경우에 대한 농도분포는 감쇠계수가 영인 경우의 농도분포에 e^{-kt} 를 곱한 것과 같으므로 두 경우의 농도분포형은 일치해야 한다. 그림 6과 7을 비교해 보면 침투 농도의 발생 시각을 비롯하여 농도 분포의 모양은 거의 일치함을 알 수 있다. 표 5를 보면 침투 농도치 및 그 발생시각이 다소의 차이를 보임을 알 수 있는데, 이는 수치모형의 계산오차에 기인한다. 감쇠계수 0.5 1/day로 계산된 농도분포는 감쇠계수가 0인 경우에 비하여 약 10 %로 감소됨을 볼 수 있다. 즉, 농도분포의 모양은 감쇠계수에 무관하지만, 그 값들은 상당히 민감함을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 모형에 의한 계산결과는 감쇠계수에 상당히 민감하므로 모형의 보정을 위한 매개변수로서, 관측자료에 근거한 추정이 필요하다고 볼 수 있다. 당시 하천구간 내의 어떤 지점에서든 연속적인 측정자료가 없고, 다만 7개 지점에서의 순간 관측자료만이 가용한 관계로 이들 자료를 사용하여 감쇠계수의 추정을 수행하였다. 즉, 특정한 시각에서 특정 지점에서의 관측된 농도값들과 그에 상응하는 계산치들 간의 차의 제곱합이 최소가 되도록 감쇠계수를 추정하였으며, 조도계수의 추정시와 동일한 최적 추정기법을 사용하였다. 표 6은 종확산 계수식으로서 McQuivey와 Keefer(1974), Seo와 Cheong(1998) 또는 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용하는 각 경우에 대한 감쇠

계수 추정결과를 관측농도치(대구시 수돗물사태 시민단체 대책회의 진상조사 위원회, 1991)와 함께 정리한 것이다. 종확산의 산정을 위하여 어떤 식을 사용하더라도 계산치와 관측치의 오차가 상당히 크게 나타나고 있다. 또한 McQuivey와 Keefer(1974) 또는 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하는 경우에 대하여 계산된 농도분포가 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용하는 경우에 비하여 서로 잘 일치함에도 불구하고(그림 6 및 7 참조), 추정된 감쇠계수의 값들은 그러한 일관성을 나타내지 못하고 있다. 이는 감쇠계수의 추정이 연속적인 관측자료를 사용한 것이 아니기 때문에 농도분포의 유사성이 모형의 보정에 있어서 별 의미를 가질 수 없기 때문으로 판단되며, 또한 계산치와 관측치의 오차가 매우 커서 가용한 순간 관측자료를 사용하여 추정된 감쇠계수의 값 자체에는 별다른 의미를 부여할 수 없을 것으로 판단된다. 표 7은 각각의 종확산계수 식을 사용하는 경우에 대하여 산정된, 주요 지점에서의 침투농도 발생 시각을 정리한 것으로서 앞에서의 경우와 마찬가지로 McQuivey와 Keefer(1974) 또는 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하는 경우에 서로 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

4. 결 론

자연하천에 관한 부정류 계산모형과 종확산 계산모형으로 구성되는, 오염물질 누출 사고시의 비정상 하천 수질의 모의를 위한 계산모형을 수립하고, 낙동강 수계

표 7. 침투치농도와 침투치농도 도달시간

지 점	침투 농도도달시간(Hour)		
	확산 계 수 식		
	McQuivey와 Keefer(1974)	Seo와 Cheong(1998)	Iwasa와 Aya(1991)
대구취수장	31	26	21
칠서취수장	94	86	67
물금취수장	150	136	109

에 모형을 적용하여 1991년에 발생한 페놀 누출 사고에 대한 모의계산을 수행하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

우선 McQuivey와 Keefer(1974), Liu(1977), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)에 의하여 제안된 식들을 사용하여 종확산계수를 산정하여 비교한 결과, McQuivey와 Keefer(1974) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식에 의한 산정 결과가 비교적 서로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, Liu(1977)의 산정식에 의한 계산결과는 변동폭이 지나치게 크고 다른 식들에 의한 결과와 큰 차이를 나타내었다. 또한 하류 지점에 대하여 계산된 농도분포는 종확산계수 산정식으로 어떠한 식을 사용하는가에 큰 차이를 나타내었다. 종확산계수의 산정식에 따른 계산결과와 민감도는 매우 큰 것으로 나타났으며, 따라서 기존의 종확산계수 산정식 중 본 연구의 대상하천인 낙동강 수계에 가장 적합한 것을 선정하거나 새로운 산정식의 도출을 위해서는 연속적인 농도 관측자료가 필수적인 것으로 판단된다.

또한 페놀의 경우 계산된 농도값은 감쇠계수에 상당히 민감한 것으로 나타났으며, 따라서 가용한 관측자료를 사용하여 감쇠계수의 추정을 수행하였다. 종확산 계수식으로서 McQuivey와 Keefer(1974), Seo와 Cheong(1998) 또는 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용하는 각 경우에 대하여 최적화 기법을 사용하여 감쇠계수를 추정하였으나, 연속적인 관측자료가 아닌 순간 농도의 관측자료로부터 의미 있는 매개변수의 값을 추정하기는 어려움을 알 수 있었다. 결론적으로 자연 하천에서 비보존성 오염물질의 종확산 계수는 종확산 계수 및 감쇠계수에 모두 매우 민감하며, 또한 이러한 민감도는 대하천의 하류로 갈수록 증가하게 된다. 따라서 연속적인 농도 관측자료에 의거한 종확산계수 산정식의 개발 및 매개변수의 추정이 필요하며, 이러한 필요성은 낙동강의 경우뿐만 아니라 국내의 모든 대하천

에 대하여 공통적으로 해당된다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1993). 낙동강 수계 하천정비 기본계획.
 대구시 수돗물사태 시민단체 대책회의 진상조사 위원회 (1993). 대구시 페놀 오염사태 백서.
 유명관, 전경수 (1999). "비보존성 오염물질에 대한 종확산 방정식의 수치해법." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 607~616.
 한건연, 김광섭 (1995). "낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질해석 모형의 개발." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제1호, pp. 57~69.
 황의준 (1997). 한강 본류에 대한 부정류 계산모형, 석사학위논문, 성균관대학교.
 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제5호, pp. 549~559.
 Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pittman.
 Doherty, J., Brebber, L., and Whyte, P. (1994). PEST: *model-independent parameter estimation*. Watermark Computing.
 Elder, J.W. (1959). "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow." *J. Fluid Mech.*, Vol. 5, pp. 544~560.
 Hill, M.C. (1992). "A computer program (MODFLOW) for estimating parameters of

- a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression." *Open-File Report 91-484*, U.S. Geological Survey.
- Holly, F.M., Jr., and Preissmann, A. (1977). "Accurate calculation of transport in two dimensions." *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 103, No. 11, pp. 1259~1277.
- Holly, F.M., Jr., and Usseglio-Polatera, J.M. (1984). "Pollutant dispersion in tidal flow." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 110, No. 7, pp. 905~926.
- Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows." *Proc. Int. Symp. on Envir. Hydr.*, Hong Kong, pp. 505~510.
- Liggett, J.A., and Cunge, J.A. (1975). "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations." *Unsteady flow in open channels*, K. Mohmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, Colo., pp. 89~182.
- Liu, H. (1977). "Predicting dispersion coefficient of stream." *J. Envir. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 103, No. EE1, pp. 59~69.
- Marquardt, D.W. (1963). "An algorithm for least-square estimation of nonlinear parameters." *J. Soc. of Ind. and Appl. Math.*, Vol. 11, No. 2, pp. 431~441.
- McQuivey, R.S., and Keefer, T.N. (1974). "Simple method for predicting dispersion in stream." *J. Envir. Engrg. Div.*, Vol. 100, No. EE4, pp. 997~1011.
- Seo, I.W., and Cheong, T.S. (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 25~32.
- Taylor, G.I. (1954). "The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *Proc. Royal Society of London, Series A.*, Vol. 223, pp. 446~468.
- Waterways Experiment Station (1990). "CE-QUAL-RIV1: A dynamic, one-dimensional (longitudinal) water quality model for streams." *Instruction Report E-90-1*, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

(논문번호:00-022/접수:2000.03.30/심사완료:2001.01.31)