

한강하류부에서의 2차원 수질모형의 개발 및 적용

Development and Application of Two Dimensional Water Quality Model on the Downstream of Han River

한 건 연* / 이 을 래**
Han, Kun Yeun / Lee, Eul Rae

Abstract

The purpose of this study was to develop two dimensional contaminant transport numerical model by finite element method. The developed model system was tested for water quality analysis when contaminants from tributaries and sewage treatment plants flow into the main river. In this study, the model was to perform calibration for reasonable parameter production and verification for reliability and accuracy. And, the proposed model was applied on the downstream of Han river using calibrated parameters. These results represented real contaminant distribution profile along the channel, and produced the good agreement in comparing calculated value with measured value.

keywords : contaminant transport model, finite element method, calibration, verification

요 지

본 연구의 목적은 유한요소법에 의한 이차원 오염물 이송에 대한 동수역학적 수치모형을 개발하는 것으로서 개발된 모형을 이용하여 지류와 폐수처리장으로부터의 오염물이 주하도로 유입되는 경우에 대한 수질해석을 수행하였다. 본 연구에서는, 합리적인 매개변수산출을 위한 보정과 모형의 신뢰성과 정확도를 위한 검증은 수행하였다. 또한, 실제 유역인 한강하류부에 본 모형을 적용한 결과 하도를 따라서 실제적인 오염물 분포양상을 재현하였으며 계산값과 실측값의 비교에서 잘 일치하고 있었다.

핵심용어 : 오염물이송모형, 유한요소해석, 보정, 검증

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(E-mail : kshanj@knu.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Kyonggido 411-712, Korea

1. 서론

산업화와 인구의 증가는 공업용수와 생활용수 사용량의 급격한 증가를 유발했고, 이에 따라 자연수계에 대한 도시하수 및 공장폐수의 방류량도 늘어나고 있다. 또한, 최근 계속되는 가뭄의 영향으로 하천유지용수의 확보에 어려움이 발생되고 있어 하천 수질의 효율적인 관리가 어느 때 보다 절실히 요구되고 있는 실정이다. 한강 및 낙동강 등과 같이 우리 나라 대부분의 하천 연안에는 산업시설의 집중과 인구의 증가로 각종 산업폐수 및 도시하수가 대규모로 하천으로 유입되고 있고, 또한 하천의 중, 하류부에서는 이들 유역으로부터 상수원수를 취수하여 인근지역의 생활 및 공업용수로 사용하고 있다. 이로 인해 인접 취수장 또는 하류부 취수장에서 적정수질을 갖춘 용수확보의 어려움이 심각한 문제로 대두되고 있다.

특히, 한강 유역의 잠실수중보 상류부에서는 왕숙천을 통한 지류의 오염부하가 서울, 경기권 지역의 취수장이 위치한 수역으로 유입되고 있어 상수원수에 적합한 수질을 갖춘 수원확보를 위한 체계적인 수질관리의 필요성이 크게 요구된다. 하천에서 오염물질의 이송-확산을 위해 널리 적용되고 있는 1차원 유한차분모형은 비교적 합리적인 계산결과를 제공하고는 있으나 지류의 유입, 수중보의 설치, 취수장에서의 취수 등 경계조건이 복잡하고 흐름 및 오염물질의 거동이 다양하게 변화하는 구간에서는 1차원 해석만으로 흐름에 대한 수리학적 제반 현상들과 오염물질의 유동특성을 나타내기에는 많은 제약조건들이 상존하고 있다. 더욱이 평수시나 갈수시 하천으로 유입되는 대규모의 오염물질로 인한 수질 오염의 경우에 1차원 해석만으로는 지류유입부 주변 및 오염물질 방류구 주위에서 발생하는 확산현상 등의 해석에 어려움이 크다. 오염물질의 이송-확산 해석을 위한 2차원 모형에서 유한차분법, 유한요소법 등이 있을 수 있으나 유한요소법이 자연하도단면 및 수중보 등의 수공구조물의 기하학적 특성을 효과적으로 반영할 수 있고, 2차원 모형의 다차원으로서의 확장성이 뛰어난 뿐 아니라, 오염물질의 이송-확산 양상을 모의하기 위한 이동경계조건 등의 도입이 용이하기 때문에 유한차분법에 비해 장점을 가지게 된다.

하천에서의 이송-확산해석을 위한 유한요소법의 적용연구에 대해서 살펴보면 Genuchten과 Gray(1978)가 1차원 이송방정식에 대하여 선형보간 함수, 2차 보간함수, 3차 Hermitian 함수를 이용하여 수치해를 구

하였다. Katopodes(1984)는 Petrov-Galerkin 기법을 이용하여 개수로에서의 흐름해석을 수행하였으며, Gray와 Lynch(1979), Baker와 Soliman(1981), Kinmark와 Gray(1982), Hughes와 Brooks(1982), Malcherek와 Zielke(1994)는 이송-확산방정식에 대하여 Galerkin 기법의 다양한 변형형태를 사용하여 오차해석을 실시하였다.

국내에서는 한건연 등(1995)이 한강하류부에서의 수질해석을 위한 확정론적 수질모형을 개발하였으며, 울산만 오염도 모의를 위해 한국과학기술원(1981)에서 Leendertse 기법을 적용한 바 있으나, 아직까지 유한요소기법을 이용하여 자연하천에서 2차원 흐름해석과 이송-확산해석을 일관된 기법인 Petrov-Galerkin 기법에 의해 해석되어지고 적용된 사례는 미비한 실정이다.

2. 2차원 수질해석모형

2.1 기본방정식

오염물질이 연직으로 잘 혼합된 것으로 가정하면, 수심방향으로 평균된 2차원 이송-확산방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(pC)}{\partial x} + \frac{\partial(qC)}{\partial y} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(E_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(E_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + S = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 t =시간, x, y =직교좌표의 공간성분, h =수심, $p, q=x, y$ 방향의 단위유량, E_{xx}, E_{yy}, E_{yx} 그리고 E_{xy} =확산계수, S =오염물질의 생성/소멸항이다. 확산 tensor가 대칭형을 가지는 것으로 가정하면 확산계수는 식 (2)~(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{xx} = E_L \left(\frac{bb}{Q^2} \right) + E_T \left(\frac{aa}{Q^2} \right) \quad (2)$$

$$E_{yy} = E_L \left(\frac{aa}{Q^2} \right) + E_T \left(\frac{bb}{Q^2} \right) \quad (3)$$

$$E_{xy} = E_{yx} = (E_L - E_T) \left(\frac{ba}{Q^2} \right) \quad (4)$$

여기서 $Q = \sqrt{p^2 + q^2}$ 이며, E_L 과 E_T 는 흐름의 주축에 대한 흐름방향과 연직방향으로의 확산계수를 의미한다. 이러한 계수들의 값은 현장관측이나 보정과정의 결

과를 토대로 모형에 입력자료로 주어진다.

2.2 유한요소 수식화

식 (1)의 수치해석을 구하기 위해서 2차원 유한요소 방정식을 적용하였다. 하천의 흐름에 관해서는 질량이 송이 주로 이송항에 의해 지배되므로, 이송-확산방정식의 해를 구하기 위해 Petrov-Galerkin 기법을 적용하였다. 정리된 이송-확산 방정식의 형태는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{\Omega} N_*^T \left\{ \frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(E_{xx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(E_{yx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) \right] + S \right\} d\Omega = 0 \quad (5)$$

여기서 T는 전치행렬을 나타내며, $\hat{C} = N_a U_a$ 로서 N은 bilinear 형상함수, α 는 요소의 각 절점, Ω 는 대상구간의 면적을 나타낸다. 이 식에서의 가중함수, N_* 는 다음과 같다(Piasecki, 1999).

$$N_* = N + \frac{1}{\sqrt{15}} \left(p \frac{\partial N}{\partial x} + q \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad (6)$$

여기서 $\Delta x = 2 \left[\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2}$, $\Delta y = 2 \left[\left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2}$, ξ, η 는 기준좌표계에서 전환한 x, y방향으로의 국지좌표계이다.

감쇠항은 요소내에서 유량이 대각방향이나 벽면에 관계없이 동일하기 때문에 정확도에 의한 감쇠를 최소화하기 위해, Δx 와 Δy 는 항상 흐름 방향에 따라 정해지게 된다. 모형 수식화는 bilinear 사변형 요소를 기초로 형성되었기 때문에, 식 (5)에서 확산항의 미분차수를 줄이기 위해 부분적분이 적용된다.

수식화의 일관성을 유지하기 위해 방정식의 2차 미분항을 식 (7)과 같은 Green 정리를 이용함으로써 1차 미분항으로 감소시킬 수 있다.

$$\int \int \rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} dx dy = \oint \rho \frac{\partial \phi}{\partial x} dy - \int \int \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} dx dy \quad (7)$$

여기서 \oint 는 y방향을 따라 계산되는 선적분항으로서, 식 (5)에서 Green 정리의 적용하기 위해, $\rho = N_*$,

$$\phi = h \left(E_{xx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) \quad \text{또는}$$

$h \left(E_{yx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right)$ 를 고려할 수 있으며, 부분적분을 수행함으로써 임의의 요소에 대한 이송-확산 방정식을 식 (8)과 같이 기술할 수 있다.

$$\int_A N_*^T \left[\alpha (h\hat{C}) - \beta + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} + S \right] dA + \int_A N_*^T h \left(E_{xx} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} + E_{yx} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) dA = 0 \quad (8)$$

여기서 $\alpha = \frac{1}{\lambda \Delta t} + \frac{1-\lambda}{\lambda} \left(\frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} \right)^n$, $\beta = \alpha (h\hat{C})^n$, $\beta = \alpha (h\hat{C})^n + \frac{1-\lambda}{\lambda} \left(\frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} \right)^n$ 을 나타내며, 이는 시간함수에 대해서 차별화시킨 결과로서 λ 는 시간가중치이다. 일반적으로 생성/소멸항인 S는 수심 h와 유출입항 R의 관계로 표현할 수 있다. 본 모형에서 적용되어지는 수질항목에 대한 동역학적 반응을 고려하기 위해 생성/소멸항을 나타내는 식 (5)의 S를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = -hGC - hR \quad (9)$$

여기서 G=해당되는 수질항목만의 성장/감쇠율이고, R=전체 수질항목간의 상호 동역학적 반응에 의한 생성/소멸율이다.

3. 모형의 보정과 검증

3.1 수질 매개변수의 산정

모형의 해석을 위해 실측자료를 적용하여 모형에 포함된 수질 매개변수를 추정하게 되는 보정작업을 수행한 다음, 보정된 매개변수를 다른 조건에서 적용함으로써 검증과정을 수행하였다. 해석에서는 BOD, T-P 등에 대해 수행하였으며 적용된 매개변수로는 각각 BOD 탈산소계수(1/day)인 K_1 , BOD 침전계수(1/day)인 K_3 , 그리고 퇴적물의 산소요구율(mg/m²/day)인 K_4 를 추정하였다. 각 매개변수의 상호작용에 의한 생성/소멸항의 관계는 용존산소에 대한 식 (10)과 BOD에 대한 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$S_o = K_2(O^* - O) - K_1L - \frac{K_4}{d} - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \quad (10)$$

여기서

O = 용존산소의 농도 (mg/l)

O^* = 국지적인 온도와 압력에서의 용존산소의 포화 농도 (mg/l)

K_1 = 수온에 따라 변화하는 BOD의 탈산소율 (1/day)

K_2 = 수온에 따라 변화하는 재포기율 (1/day)

K_4 = 수온에 따라 변화하는 퇴적물의 산소요구율 (mg/m²/day)

α_5 = 단위 암모니아성 질소의 산화에 필요한 산소 소모율 (mg O/mg A)

α_6 = 단위 아질산성 질소의 산화에 필요한 산소소모율 (mg O/mg A)

L = 최종 BOD의 농도 (mg/l)

d = 수심 (m)

β_1 = 수온에 따라 변화하는 암모니아성 질소의 산화율 (1/day)

β_2 = 수온에 따라 변화하는 아질산성 질소의 산화율 (1/day)

N_1 = 암모니아성 질소의 농도 (mg N/l)

N_2 = 아질산성 질소의 농도 (mg N/l)

$$G_L = -K_1L - K_3L \quad (11)$$

여기서

L = 최종 BOD의 농도 (mg/l)

K_1 = 수온에 따라 변화하는 탈산소계수 (1/day)

K_3 = 수온에 따라 변화하는 침전율 (m/day)

각 매개변수에 대해 상한치, 하한치 및 기준치를 선정하여 1차원 수질해석 프로그램인 QUAL2E 에 의해

계산된 각 수질인자의 값을 산정하였다. 한강 본류부의 K_1 , K_3 및 K_4 를 구하기 위해 영향계수법(한건연 등, 1995)을 이용하였고, 최적매개변수 산정을 위해 최적화 기법의 하나인 BFGS 기법을 사용하였다. BFGS 기법은 Broyden, Fletcher, Goldfarb 및 Shanno 등이 개발한 최적화 알고리즘으로서 역 Hessian 매트릭스를 구하기 위한 식은 식 (12)와 같이 구성된다.

$$H^{i+1} = H^i - \left[\frac{H\Delta g\Delta n^T + \Delta n\Delta g^T H}{\Delta n^T \Delta g} \right]^i \left[\left(1 + \frac{\Delta g^T H \Delta g}{\Delta n^T \Delta g} \right) \frac{\Delta n\Delta n^T}{\Delta n^T \Delta g} \right]^i \quad (12)$$

여기서 H 는 Hessian 매트릭스의 inverse 값, i 는 반복계산 횟수, n 은 매개변수 벡터, g 는 경사벡터, Δ 는 두 개의 반복계산 시간값의 차이로서 $\Delta g = g^i - g^{i-1}$ 이다.

잠실수중보 상류부와 하류부에 대해서는 수중보 상류부의 수심의 증가와 유속의 감소현상으로 인하여 매개변수의 특성이 상이할 것으로 판단되기 때문에 수중보 상하류부의 구간에 대한 오염물질의 반응은 흐름방향과 함께 이루어지므로 상류부로부터 하류부로 진행하여 매개변수를 도출하였다.

모형의 보정과 검증을 위해 1998년 5월에서 12월까지의 환경부 수질관측자료(1998)를 이용하였다. 본 연구에서는 11월 15일의 수질측정자료를 이용하여 매개변수를 최적화기법에 의해 추정하였으며, 5월과 12월의 유량 및 수질조건에 대해 적용함으로써 검증을 수행하였다. 계산결과값과의 비교를 위해 팔당댐 직하류부, 구리, 암사, 구의, 딱도, 보광, 그리고 노량진의 7개의 지점을 선정하였다. 표 1은 모형의 보정을 위해 사용된 1998년 11월의 수질자료이고, 계산에 의한 최적의 매개변수값이 표 2에 나타나 있다. 그림 1은 1998년 11월의 BOD, T-P에 대한 모형의 보정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형의 계산값은 종단형상에 대해 실측치와 비교하여 잘 일치하고 있었다.

표 1. 1998년 11월 경계오염원자료

(단위 : mg/l)

	수온	DO	BOD	T-N	T-P	Org. N	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	Org. P	PO ₄ -P
팔당대교	14 °C	11.2	1.2	1.909	0.018	0.592	0.115	0.000	1.202	0.011	0.007
왕숙천	14 °C	8.9	3.6	8.858	0.148	4.498	0.912	0.000	3.448	0.093	0.055
중랑천	13 °C	9.4	22.3	10.896	0.384	3.047	2.250	0.000	5.599	0.242	0.142
탄천	17 °C	8.5	22.9	19.521	1.272	0.705	13.381	0.000	5.435	0.801	0.471

표 2. 최적 반응계수값

	K_1 (1/day)	K_3 (1/day)	K_4 (mg/m ² /day)
수중보상류	0.216	-0.05	2.846
수중보하류	0.316	-0.17	2.598

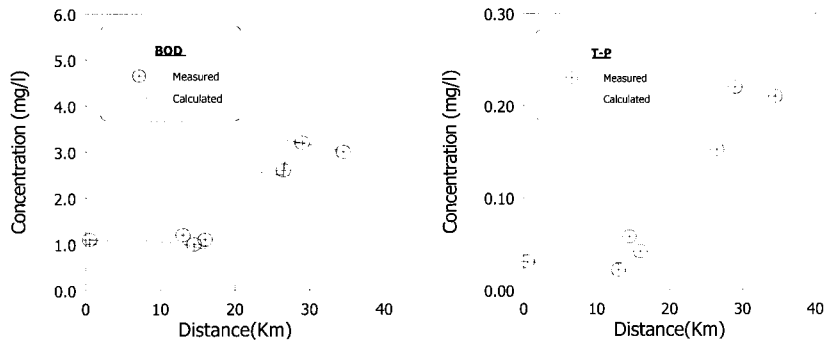


그림 1. 모형의 보정결과 (1998년 11월)

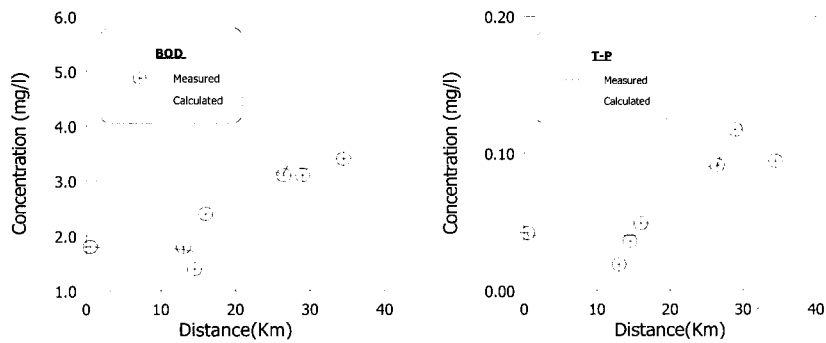


그림 2. 모형의 검증결과 (1998년 5월)

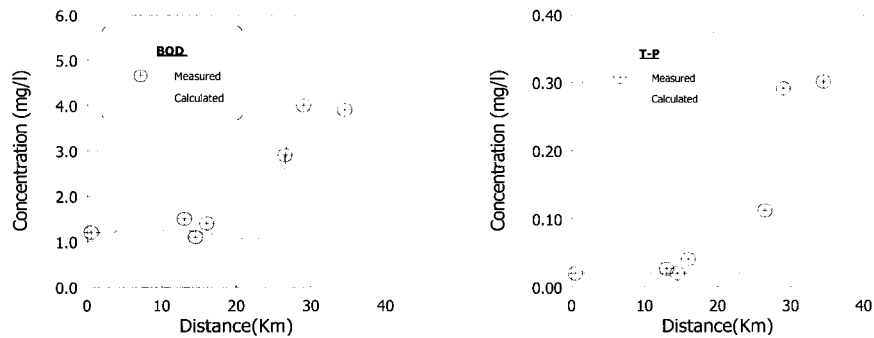


그림 3. 모형의 검증결과 (1998년 12월)

모형의 검증은 1998년 5월과 12월의 유량 및 수질 자료를 이용하여 수행하였으며, 팔당댐에서의 월별 유량조건은 각각 한국수문조사연보의 값을 사용하였으며, 5월 14일과 12월 15일의 지류의 유입경계조건은 환경부(1998)자료를 이용하였다. 산정한 매개변수값을 다른 유량과 오염원의 조건에 적용하였으며, 결과는 그림 2와 3에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 특정지점의 실측값과 모형에 의한 계산치가 비교적 잘 일치하고 있었다.

3.2 확산계수의 산정

하천으로 유입된 오염물질은 이송-확산 과정을 통하여 종방향, 횡방향 및 연직방향으로 이동된다. 하천 전 단면에 걸쳐서 완전 혼합된 후에는 종방향확산거동이 하류부 수질예측에 중요한 인자이다. 종방향확산계수는 유속분포, 조도, 하상형태, 하도형태 등에 따라서 그 특성이 크게 변화되고 있어서 종방향확산계수 추정에 사용되는 경험식으로부터 정확한 값을 얻기는 거의 불가능하다. 하천의 실측자료로부터 직접 사용할 수 있는 확산계수는 국내에서는 거의 없는 실정이기 때문에 확산계수에 관한 기존의 이론식 혹은 외국에서 개발된 경험공식에 의존하여 결정하여야 한다. 종방향확산계수 E_x 를 이론적으로 결정하는 방법은 Taylor(1954)에 의

해 처음 제안되었으며, 그 이후에 자연하천에서의 종방향확산계수를 추정하기 위하여 많은 식이 제안되었다. 종방향확산계수를 추정하는 많은 경험식 중 비교적 사용빈도가 높고 적용이 용이하고 이론적인 배경이 확고한 공식들은 표 3과 같다. 표 3에서 E_x = 종방향확산계수, R_h =동수반경, S_f =하상경사, d =수심, U =유속, U^* =마찰속도, B =하폭을 나타낸다. 종방향확산계수를 산정하기 위해 월평균 팔당댐 방류량자료와 수증보의 영향을 고려하여 부동류계산을 수행하였다. 유량조건은 각각 200 m³/s와 463 m³/s의 경우를 적용하였으며, 본 연구에서는 Parker(1961), McQuivey와 Keefer(1974), Iwasa와 Aya(1991), Seo와 Cheong(1998), Liu(1977)의 공식들을 이용하여 수행하였다. 표 4는 각 경우에 대해서 각 단면의 평균값을 취한 종방향확산계수의 결과를 나타낸 것이다. 그림 4는 각 경우에 대한 종단별 확산계수의 분포를 나타낸 것이다. 그림 4에서와 같이 Parker, McQuivey와 Keefer, 및 Seo와 Cheong의 결과값은 비슷한 양상을 보이고 있으나, Liu, Iwasa와 Aya의 식에 의해 산정된 값은 다른 경우와 비교하여 상당히 높게 계산되었으며, 변동폭도 크게 나타났다. 이는 윤세의 등(2000)에 의한 결과와도 일치하는 양상을 나타냈다. 따라서, 본 연구에서는 Parker, McQuivey와 Keefer, 그리고 Seo와 Cheong의

표 3. 종방향확산계수산정을 위한 경험식

(단위 : m²/s)

제안자	경험식
Parker(1961)	$E_x = 14.28 R_h^{3/2} \sqrt{2gS_f}$
McQuivey와 Keefer(1974)	$E_x = 0.058 d U / S_f$
Fisher(1975)	$E_x = 0.011 U^2 B^2 / (d U^*)$
Liu(1977)	$E_x = 0.18 (U^* / U)^{1.5} (U^2 B^2) / (d U^*)$
Magazine(1988)	$E_x = 75.86 (0.4U / U^*)^{-1.632} R_h U$
Iwasa와 Aya(1991)	$E_x = 2.0 (B/d)^{1.5} d U^*$
Seo와 Cheong(1998)	$E_x = 5.915 (B/d)^{0.62} (U / U^*)^{1.428} d U^*$

표 4. 종방향확산계수 산정결과

(단위 : m²/s)

	Parker(1961)	McQuivey and Keefer(1974)	Iwasa and Aya(1991)	Seo and Cheong(1998)	Liu(1977)
Q=200m ³ /s	36.3	38.0	6673.3	62.9	4101.9
Q=463m ³ /s	40.6	77.9	6934.5	147.0	5117.9

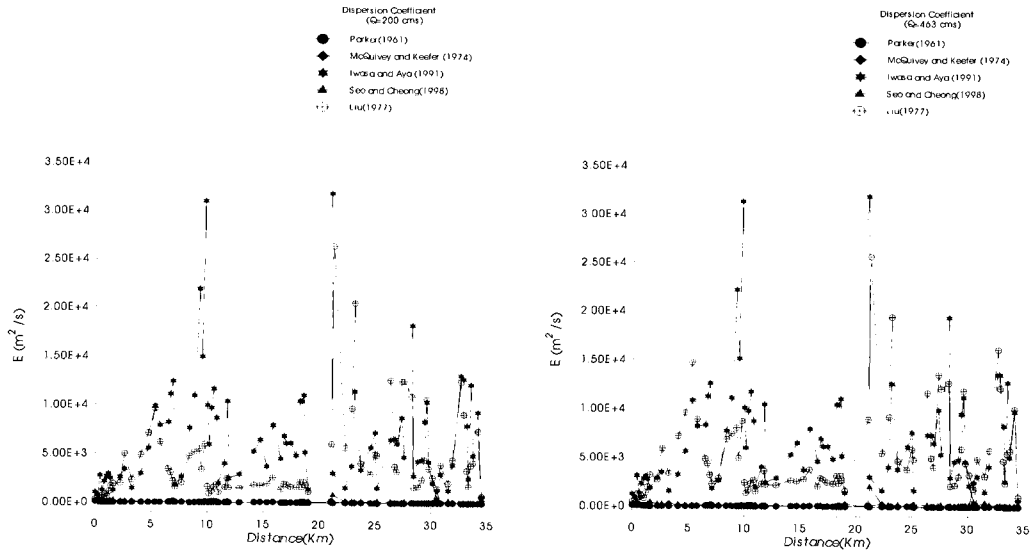


그림 4. 종방향확산계수 비교

결과값을 고려하였으며 실측값과 유사한 결과를 도출하는 값으로서 $70.0\text{m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다.

4. 실제하천에 대한 수질모형의 적용

4.1 적용구간 선정 및 적용절차

개발된 모형에 대해서 실제유역인 한강 하류부에 본 모형을 적용하여 해석을 실시하였다. 한강은 유역면적이 $26,219\text{km}^2$, 유로연장이 469.7km 로서, 서울과 경기도, 강원도를 포함하는 가장 큰 유역면적을 가지는 하천이다.

인구증가와 산업화의 진행으로 인해, 왕숙천을 포함한 여러 지류들의 오염도가 증가하면서 한강유역은 오염사고의 위험이 상존하고 있는 실정이다. 특히 잠실수중보 상류부에서는 다수의 취수장에서 상수원수를 취수하여 서울시, 경기도 지역의 생활 및 공업용수로 사용하고 있다. 따라서, 취수장의 효율적인 운영을 위한 오염도의 정확한 측정 및 수치모의와 함께 최적의 방류시스템에 의해 오염물을 제어하는 것이 시급한 문제로 대두되고 있다.

팔당댐에서 방류된 유량은 하류부의 각종 취수장, 하수처리장 및 지류 등으로 인하여 용수수요량과 유입수의 영향을 받으므로 구간별로 유하량이 변하게 된다. 한강유역의 구간별 유하량을 구하기 위하여 서울시가

산정한 적정 팔당댐 방류량인 $200\text{m}^3/\text{sec}$ 를 지정하였으며, 이는 갈수기의 한강 하류부의 오염원 분포해석에 적합한 값으로 판단된다.

4.2 2차원수질해석

4.2.1 동수역학적 흐름해석

실제하천의 복잡한 지형을 모의수행하기 위해서는 모형의 타당성 뿐만 아니라, 대상시스템에 대해 지형학적 특성이 정확하게 제시되어야 한다. 본 구간의 실제 측량자료인 x, y 축점을 이용하여, 모든 경, 위도 값은 중부도 원점을 기준으로 한 TM좌표로 변환시킴으로서 실제하천에 대한 원측척의 자료를 사용하였다. 그리고 하상고는 서울시 및 경기도 구간의 실측 하상단면 자료이다. 그림 5는 적용대상 하도구간에 대한 유한요소망을 나타내고 있다.

계산에 사용된 각 조건들은 절점 수 3,444개, 요소 수 3,146개, 경계절점의 수 615개를 적용하였다. 계산 시간 간격은 1.0시간이고, Manning의 조도계수는 한강분류구간에서는 균일하게 0.035를 적용하였으며(서울특별시, 1998), 중랑천은 0.031(의정부시, 1996), 왕숙천은 0.030(경기도, 1984), 탄천은 0.030(경기도, 1987)을 각각 지정하였다. 대상유역에 대한 초기유속은 0인 정적계산 조건으로부터 시작하였으며, 상류단 경계조건

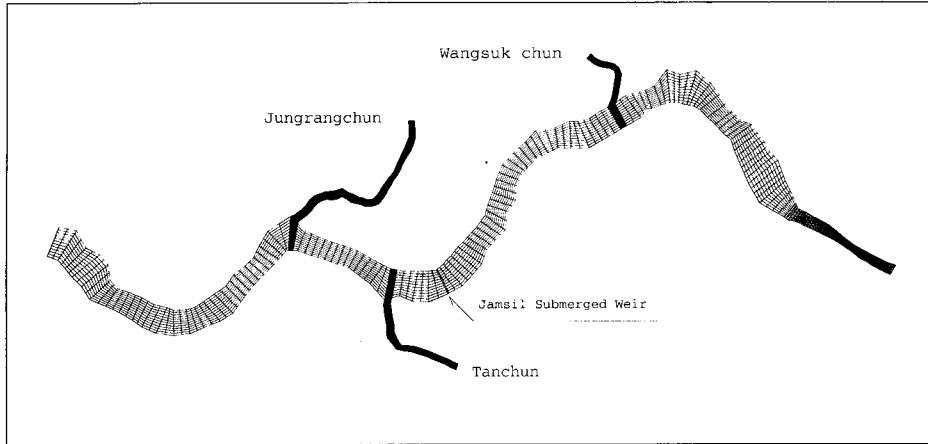


그림 5. 대상유역의 유한요소망

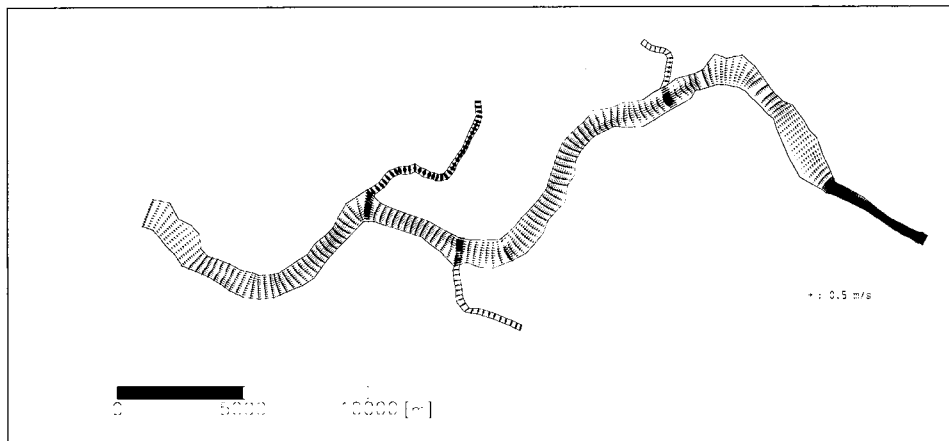


그림 6. 대상유역의 유속분포도

은 절점번호 1~12에서 서울시 산정유량에 대한 x, y 방향의 유량경계조건을 사용하였으며, 각 지류자료인 왕숙천, 탄천, 중랑천의 유입부 절점번호인 1285~1296, 2257~2268, 3181~3192에서는 한강분류의 물수지 분석에 의한 지류유입량을 고려하였다. 하류단 경계조건은 절점번호 3433~3444의 인도교 지점에서 관측된 평균유속자료로부터 도출된 수위를 이용하여 하류로 진행하면서 발생하는 유량의 변화값을 경계조건으로 사용하였다. 모의수행은 24시간이 경과한 후 정상상태에 도달하였다(한건연 등, 2001). 그림 6은 주어진 조건을 이용하여 수행한 유속분포의 결과이다. 만곡부의 영향에 의한 유속분포의 거동이 정성적으로 잘 재현되

고 있었다.

4.2.2 오염물질의 수질해석

적용대상 구간의 오염물질 확산모형에 대한 수행을 위해 실제 측정자료를 경계조건으로 하여 본 모형을 수행하였다. 흐름해석모형에서 얻은 유속분포 및 수위자료를 이용하여 2차원 오염물 확산해석을 실시하였다. 본 모형을 이용한 한강유역의 오염도를 계산하기 위해 환경부(1999) 자료를 이용하였고, 측정시기는 갈수기인 4월의 자료를 사용하였으며, 각각의 지천에 대한 경계조건값은 이 시기의 실제 측정값을 이용하여 한강의 주요지류인 하도흐름의 우안에 위치한 왕숙천과 중랑천,

표 5. 본류 및 주요지천의 오염원

(단위 : mg/l)

	수온	DO	BOD	Org. N	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	Org. P	PO ₄ -P	T-N	T-P
팔당댐 팔당대교	9 ℃	12.5	2.4	1.209	0.263	0.000	1.254	0.023	0.013	2.726	0.036
왕숙천 한강합류전	13 ℃	9.6	11.7	17.809	4.302	0.000	3.005	0.362	0.213	25.116	0.575
중랑천 중랑천교	15 ℃	8.4	8.1	2.318	3.900	0.000	2.960	0.265	0.156	9.178	0.421
탄천 대곡교	15 ℃	6.2	9.8	1.786	12.561	0.000	1.766	0.479	0.282	16.113	0.761

좌안에 위치한 탄천의 오염유입을 선정하여 모의하였다. 적용된 각각의 오염원 자료는 표 5와 같다.

본 모형의 수행결과 48시간이 경과 후 시간에 따른 농도의 변화가 발생하지 않는 정상상태에 도달하였다.

그림 7~9는 BOD, NH₃-N, Org. P의 오염원이 정상 상태에 도달한 후의 분포를 도시화한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 운동량의 영향을 받아서 각 지천에서의 오염원의 유입과 하도의 흐름방향에 의해 하도의 경

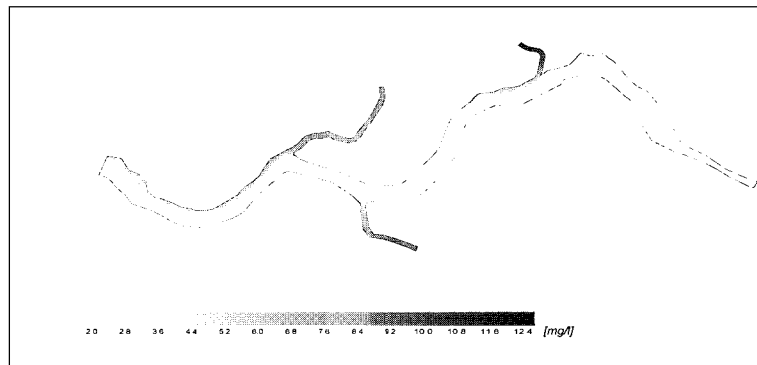


그림 7. BOD에 대한 모의 수행결과

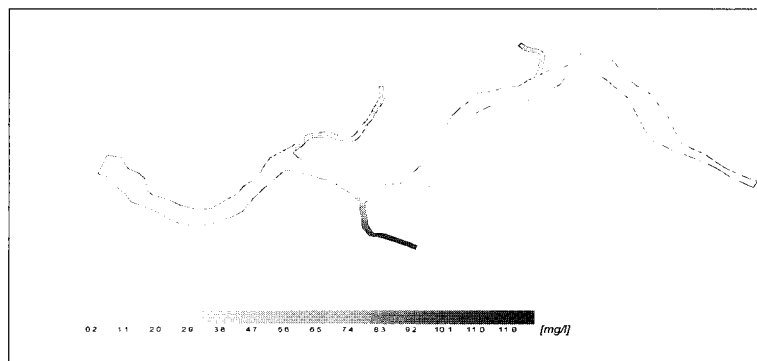


그림 8. NH₃-N에 대한 모의 수행결과

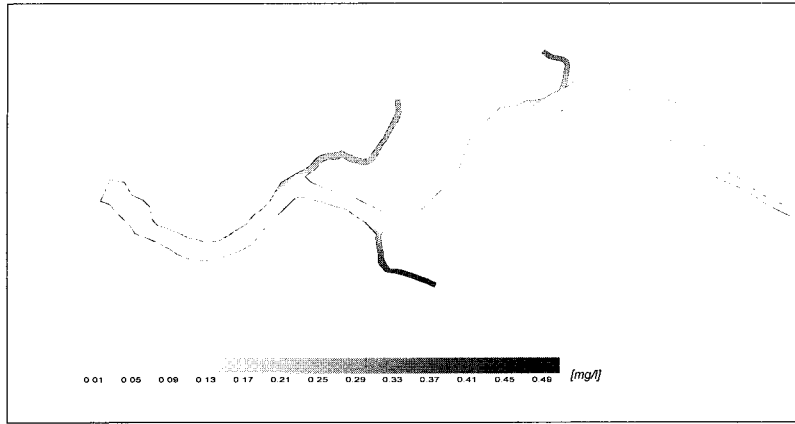


그림 9. Org. P에 대한 모의 수행결과

계면을 따라서 농도의 분포가 형성이 된 후, 시간이 경과하면서 하류부에서는 많은 유역에 오염원의 분포가 진행되었다.

특히 본 유역은 왕숙천의 오염도가 상당히 크며 하도의 흐름이 만곡부를 따라 하도의 우측으로 편향되기 때문에 강북지역의 오염원에 대한 영향이 심각하며 적정수질확보를 위한 합리적이고 적절한 조치가 수반되어야 할 것으로 판단되었다.

4.3 적용구간에서의 검증

산정된 각각의 매개변수를 대상구간에서 1998년 11월 3일의 실측자료를 이용하여 비교 및 검토를 수행하였다. 1998년 11월의 팔당댐의 방류량은 134~264 m³/sec로서 비교적 갈수량에 가까운 조건이었으며, 수질측정당시의 유량은 163m³/sec로 관측이 되었으며 동수역학적 흐름해석수행에 필요한 유입유량조건으로 사용하였다(한국수문조사연보, 1998).

본 연구의 대상유역인 한강 하류부에서의 오염도를 측정하기 위하여 잠실 수중보를 중심으로 하류 1개 단면, 상류 1개 단면을 선정하였다. 선정된 단면은 왕숙천 합류 직하류 단면, 반포대교 상류 단면이다. 각 단면에서 횡방향으로 약 10개 지점을 선정하여 수질을 측정하였다. 또한 본 모형의 수질해석수행을 위해 대상구간의 경계입력자료는 수질측정망운영계획(환경부, 1998)에 의한 오염원자료를 사용하였으며, 적용된 유입오염원자료는 표 1과 같다. 그림 10과 11은 실제 관측지점에서 모형의 수질해석 계산값과 관측값과의 횡단별 비교를 나타내고 있다. 하류부로 진행할수록 유속의 증가로 인

한 자정작용의 영향으로 주하도부에서 오염을 유발시키는 BOD는 하도의 양안부에 비해서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 표 6은 각 지점의 오염원에 대한 관측치 및 계산치의 분포범위를 나타내고 있다. 값들의 범위를 고려하여 각 지점에서의 오염원별 평균을 구해보면 관측값과 계산치는 왕숙천에서 DO는 5.24mg/l, 5.22mg/l, BOD는 1.15mg/l, 1.20mg/l, T-N은 0.43mg/l, 0.53mg/l, T-P는 0.075mg/l, 0.061mg/l이며 반포대교에서는 DO는 4.72mg/l, 5.16mg/l, BOD는 3.12mg/l, 3.15mg/l, T-N은 2.21mg/l, 2.33mg/l, T-P는 0.18mg/l, 0.16mg/l로서 지점별 횡단면을 평균한 1차원적인 개념으로는 상당히 일치하는 경향을 나타내고 있다. 또한 각 지점별 상대오차를 분석하기 위해서 식 (13)을 이용하여 관측치와 본 모형에서 계산된 값과의 상대오차를 산정하였다.

$$e = \left\{ \sum \left(\frac{O_i - X_i}{O_i} \right) \right\} / n \quad (13)$$

여기서 e = 상대오차, O_i = 관측값, X_i = 계산값, n = 자료의 수이다. 계산결과 DO, BOD, T-N, T-P에 대한 왕숙천에서의 상대오차는 0.01, 0.07, 0.32, 0.06을 나타내며, 반포대교에서는 0.09, 0.05, 0.15, 0.18 등을 나타내고 있다. 실질적으로 하천에서의 이차원 수질 측정을 위해서는 모든 지점에서 동시에 측정이 되어야 하며 이를 위해서는 상당한 시간과 노력이 요구되어야만 한다. 또한 특정한 수질관측지점에서 단지 하나의 수질대표치만을 채취함으로써 수심평균을 고려한 하천

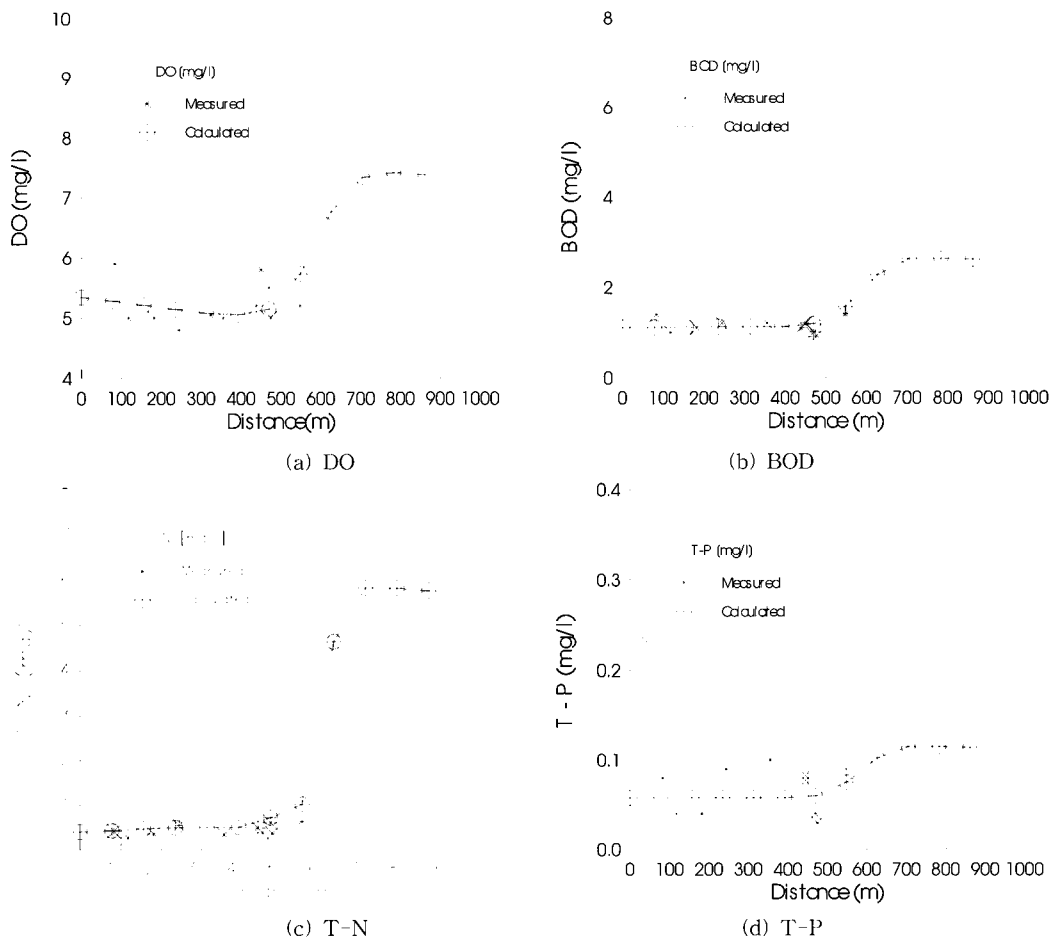


그림 10. 횡단별 관측값과 실측값의 비교(왕숙천 합류부)

에 대해서 수질을 대표할 수는 없으며 다양한 측정방법과 반복된 측정에 의해 측정오차를 감소시켜야만 하는 어려운 점이 있다. 또한 관측자의 숙달정도와 그 당시의 기후조건 및 장비의 오차 등과 같이 현장측정에는 다양한 관측오차를 내포하고 있으므로 보다 정교한 모형의 검증에 위해서는 더욱 체계적이고 과학적인 수질 측정이 요구되고 있는 실정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천에서의 2차원 이송-확산해석을 통한 오염물질의 거동을 파악하기 위해 Petrov-Galerkin 기법에 기초한 유한요소모형을 개발하였다. 수질해석 모형의 합리적인 매개변수 산정을 위하여 실제자료를 이용하여 보정작업을 수행한 후 모형의 적합성 검토를 위해서 한강 하류부의 수질해석을 수행하였

다. 모형의 보정과정을 위해서 한강 하류부에서 모의결과와 실측치를 이용하여 수행하였으며, 모형의 보정을 위해 최적화기법을 활용하여 수질오염에 영향을 미치는 수질 매개변수들을 도출하였다. 또한 현재 제시된 확산계수의 경험식을 비교 검토하여 본 유역에 적합한 오염분포의 확산계수값을 도출하였다. 도출된 다양한 수질매개변수인자료를 이용하여 한강 하류부에서의 2차원 이송-확산해석 결과 오염된 지류 유입에 따라 본류에서 오염물질의 농도분포가 각각 하도의 좌측 및 우측으로 편향되는 것으로 나타났다. 특히 오염도가 심한 왕숙천에서 유입하는 오염물의 영향으로 본류와 합류하는 지점에서는 우안부근에서 심각한 오염원의 분포를 확인할 수 있었다. 이에 따라 지류 등 대규모 오염원과 취수장이 공존하고 있는 이 구간에 대한 적정 수질확보를 위한 최적의 수질관리대책이 수반되어야 할 것으로 판단

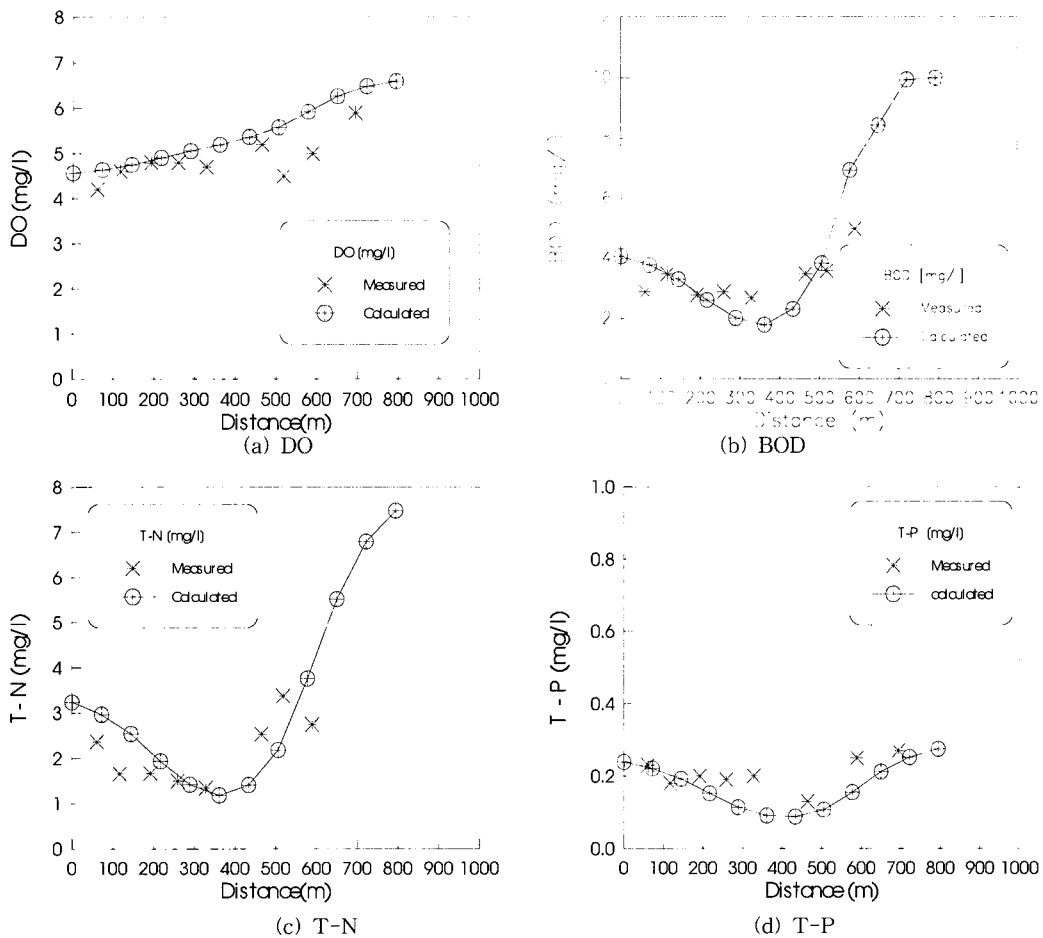


그림 11. 횡단별 관측값과 실측값의 비교(반포대교 상류부)

표 6. 오염원 분포 해석결과

(단위 : mg/l)

위치	DO		BOD		T-N		T-P	
	관측치	계산치	관측치	계산치	관측치	계산치	관측치	계산치
왕숙천 합류부	4.8~5.8	5.1~5.7	0.9~1.4	1.1~2.6	0.27~0.60	0.39~1.02	0.04~0.10	0.05~0.11
반포대교 상류부	4.2~5.9	4.6~6.4	2.8~5.0	1.8~11.3	1.34~3.37	1.18~7.47	0.13~0.27	0.09~0.28

되었다. 또한 본 모형의 계산결과를 대상구간의 주요지점에 대해서 실시한 수질측정치와 비교를 수행한 결과 잘 일치하고 있었으며, 이를 통하여 본 모형의 적합성을 확인할 수 있었다. 본 모형을 통한 해석결과는 대규모의 오염부하와 취수장이 공존하는 한강, 낙동강, 금강,

영산강 등 국내 주요하천 및 저수지 등에서 수자원의 수질관리 분야에 적극 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국과학재단의 특정기초연구

(과제번호 98-0601-04-01-3)에 의한 연구결과로서
지원당국에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1998, 1999). 한국수문조사연보.
경기도 (1984). 왕숙천 하천정비기본계획.
경기도 (1987). 탄천 하천정비기본계획.
서울특별시 (1998). 한강생태계조사연구.
윤세의, 한건연, 한정식, 김정수 (2000). "수리모형을
이용한 자연하천에서의 중확산계수 추정." 한국
수자원학회논문집, 제33권 제4호, pp. 407-417.
의정부시 (1996). 중랑천수계 하천정비기본계획
한국과학기술원 (1981). "울산공업단지 환경관리에
관한 연구." 한국과학기술원 연구보고서.
한건연, 이을래, 박재홍 (2001). "GIS와 연계한 한강
하류부에서의 동수역학적 수치모형의 개발." 한
국수자원학회논문집, 제34권, 제2호, pp. 107-118.
한건연, 송재우, 김상호, 백경원 (1995). "한강하류부
에서의 총질소와 총인에 대한 수질모의", 한국수
자원학회논문집, 제28권, 제4호, pp. 137-146.
한건연, 백경원, 송재우, 김상호(1995). "QUAL2E에
의한 한강 하류부에서의 수질해석", 대한토목학
회논문집, 제15권, 제2호, pp. 451-461.
환경부 (1998, 1999). 수질측정망 운영계획
Baker, A.J. and Soliman, M.O. (1981). "On the ac-
curacy and efficiency of a finite element tensor
product algorithm for fluid dynamics appli-
cation." *Computer Methods in Applied Me-
chanics and Engineering*, Vol. 27, pp. 215-237.
Fischer, H.B. (1975). Discussion of "Simple method
for predicting dispersion in streams." by
McQuivey, R.S. and Keefer, T.N., *Journal of
Environmental Engineering Division*, ASCE,
Vol. 101, No. EE3, pp. 453-455.
Gray, W.G. and Lynch, D.R. (1979). "On the
control of noise in finite element tidal
computations : A semi-implicit approach."
Computers and Fluids, Vol. 7, No. 1, pp.
47-67.
Genuchten, M.T. and Gray, W.G. (1978). "Analysis
of some dispersion corrected numerical
schemes for the solution of the transport
equation." *International Journal for Numerical*

Methods in Engineering, Vol. 2.
Hughes, T.J.R. and Brooks, A.N. (1982). "A
theoretical framework for Petrov-Galerkin
methods with discontinuous weighting func-
tions: application to the streamline-upwind
procedure." *Finite-Elements in Fluids*, Vol. 4,
(eds. R.H. Gallagher, et al.), London.
Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). "Predicting longi-
tudinal dispersion coefficient in open-channel
flows." *Proceeding of the International Sym-
posium on Environmental Hydraulics*, pp.
505-510.
Katopodes, N.D. (1984). "A dissipative Galerkin
scheme for open channel flow." *Journal of
Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 4,
pp. 450-466.
Kinnmak, I.P. and Gray, W.G. (1982). "Time-
weighting of the momentum equation in
explicit wave-equation models of surface water
flow." *Proceeding of the 4th International
Conference on Finite Elements in Water
Resources*, Germany.
Liu, H. (1977). "Predicting dispersion coefficient of
stream." *Journal of Environmental Engi-
neering Division*, ASCE, Vol. 100, No. 4, pp.
997-1011.
Magazine, M.K., Pathak, S.K., and Pande, P.K.
(1988). "Effect of bed and side roughness on
dispersion in open channels." *Journal of
Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 7,
pp. 766-782.
Malcherek, A. and Zielke, W. (1994). "Upwinding
and characteristics in FD and FE methods."
*Computer Modeling of Free-Surface and
Pressurized Flow*, (eds. Chaudhry, M.H. and
Mays, L.W.), Kluwer Academic Publishers, pp.
173-204.
McQuivey, R.S. and Keefer, T.N. (1974). "Simple
method for predicting dispersion in streams."
*Journal of Environmental Engineering
Division*, ASCE, Vol. 100, No. 4, pp. 997-1011.
Parker, F.L. (1961). "Eddy diffusion in reservoirs
and pipelines." *Journal of Hydraulic Division*,

- ASCE, Vol. 87, No. HY3, pp. 151-171.
- Piasecki, M. and Katopodes, N.D. (1999). "Identification of stream dispersion coefficient by adjoint sensitivity method." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 714-724.
- Seo, I.W. and Cheong, T.S. (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 25-32.
- Taylor, G.I. (1954). "Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *Proceedings of the Royal Society, London, England, Series A.*, Vol. 223, pp. 446-468.
- (논문번호:01-055·접수:2001.7.11/심사완료:2002.04.22)