

신뢰도 해석기법을 이용한 2차원 수질관리모형의 개발

Development of 2-D Water Quality Management Model by Using Reliability Analysis

김 상 호* / 한 건 연** / 김 원*** / 최 흥 식****

Kim, Sang Ho / Han, Kun Yeun / Kim, Won / Choi, Hung Sik

Abstract

A two-dimensional water quality management model, Unsteady/Uncertainty Water Quality Model(UUWQM), is developed for a hydrodynamic analysis, an advection-diffusion analysis, and a reliability analysis by using uncertainty technique. The model is applied to the 35 km reach of Sungju to Hyunpoong in the midstream of Nakdong River. 2-D hydrodynamic and water quality analyses are performed in this reach. Important input variables are decided by sensitivity analysis and verified by Monte Carlo method. Frequency distributions of water quality concentrations are computed from MFOSM method and Monte Carlo method at several locations in this study area. A water quality management system is constructed by calculating the violation probabilities of existing water quality standards.

keywords : Water Quality Analysis, Reliability Analysis, Finite Element Method, Petrov-Galerkin Method

요 지

하천에서 동수역학적 흐름해석 및 오염물질의 이송-확산 해석을 수행하고, 불확실도 해석기법을 이용하여 신뢰도 해석을 수행할 수 있는 2차원 수질관리모형인 UUWQM(Unsteady/Uncertainty Water Quality Model) 모형을 개발하였다. 본 모형의 실제 적용을 위해 낙동강 중류부의 성주에서 현풍까지 35km 구간에 대하여 2차원 동수역학적 흐름해석과 수질해석이 실시되었다. 민감도 분석을 통해 수질모형에 기여도가 큰 입력변수들을 결정하였고 Monte Carlo 기법을 통하여 검증을 실시하였다. 대상구간의 주요지점에 대해 MFOSM 기법과 Monte Carlo 기법을 적용하여 수질농도의 빈도분포도를 제시하였으며, 목표 수질농도에 대한 초과확률을 산정하여 신뢰도 해석을 수행할 수 있는 수질관리시스템을 구축하였다.

핵심용어 : 수질해석, 신뢰도 해석, 유한요소법, Petrov-Galerkin 기법

* 상지대학교 이공과대학 토목공학과 전임강사
Full-time Lecturer, Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea
(E-mail : kimsh@mail.sangji.ac.kr)

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources & Environmental Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea

**** 상지대학교 이공과대학 토목공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea

1. 서론

하천에서의 수질모형은 비교적 단순한 해석적 모형으로부터 매우 정교한 비정상 모형에 이르기까지 광범위하다. 하천에서 주된 수질변화 양상은 흐름방향에 대하여 발생하고, 따라서 단면 평균치를 취한 1차원 모형이 일반적으로 적절하다. 그러나 하천수계로 방류되는 하·폐수의 유입 및 두 개 하천의 합류부 등과 같은 국부적인 영역에 대한 해석에는 적용에 한계가 있다.

실제 자연현상에 부합하기 위한 수치모의는 비정상상태의 3차원 모형이 요구되지만 이에 대한 해석에는 상당한 노력과 시간이 요구된다. 특히, 하천에서 수심방향의 혼합은 종·횡방향의 혼합에 비해 빠르게 이루어지므로 수심방향에 대해 적분을 취한 2차원 모형을 이용함으로써 자연현상에 근접한 모의를 수행할 수 있다. 그러므로 하천에서의 동수역학 해석과 수질해석을 위해서 2차원 천수방정식과 이송-확산 방정식에 대한 수치해를 구하여야 한다.

이러한 2차원 수질해석모형뿐만 아니라 대부분의 모형은 실제 자연하천에 포함된 자연적인 변동성은 고려하지 않고 매개변수에 대한 확정론적 값을 통해서 수질관리대책을 수립하도록 구성되어 있다. 확정론적 모형에서의 수질관련 인자들은 평균값의 개념으로 모형에 대한 해석이 수행되어 오고 있다. 그러나 수질해석을 위한 대상수역 및 반응기구가 다양해지고, 그에 따라 매개변수도 복잡해지며 매개변수들간의 영향과 상호작용을 인식하는 것이 매우 어렵게 되었다. 따라서 이러한 매개변수들의 모형에 대한 민감도를 효과적으로 평가하고 그것들과 관련된 불확실성에 대한 정량화를 통하여 신뢰도 해석을 실시하고, 이를 실제 유역에서 활용할 수 있는 수질관리시스템의 구축이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 하천에서 흐름 및 오염물질의 2차원 이송-확산 해석을 위해서 Petrov-Galerkin 기법을 이용한 유한요소모형을 개발하고, 개발된 모형에 존재하는 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행하여 모형에 영향력이 큰 변수들을 결정하는 불확실성 해석을 실시하고자 한다. 그리고 이를 토대로 모의결과를 확률적으로 제시하여 신뢰도 해석을 수행할 수 있는 수질관리시스템인 UWQM(Unsteady/Uncertainty Water Quality Model) 모형을 개발하고자 한다.

하천에서의 수질모의에 대한 불확실성 해석은 수질관리분야에서 큰 관심을 불러일으키게 되어 미 환경보

호청(EPA)에서도 최근까지 위험도 평가에 대한 지속적인 연구를 수행하고 있다. 특히, O'Neill(1973), Dilks(1987) 그리고 Tiwari와 Habbie(1976) 등이 모형에 존재하는 오차의 정량화와 비교검토에 관한 연구를 수행한 바 있다. 수질모형의 불확실도에 관한 해석방법으로서 Monte Carlo 기법과 FOEA(First Order Error Analysis) 기법이 주로 사용되는데, Gardner 등(1981), Warwick와 Cale(1987), Tung과 Hathorn(1988), Warwick(1989) 등 이에 관한 많은 연구가 수행되었다. 이 분야에 대한 국내에서의 연구동향을 살펴보면, 박무종 등(1995)과 김형일 등(1998)은 한강유역에 RMA-4 모형을 이용하여 수질의 거동특성을 모의한 바 있으며, 한건연 등(1994, 1995)은 낙동강에서의 확정론적 및 추계학적 수질해석을 위해서 확장된 Streeter-Phelps 모형에 대한 Monte Carlo 해석을 실시하였으며, 한건연 등(1997)과 Han 등(2001)은 MFOSM 기법과 AFOSM 기법을 이용하여 낙동강과 한강 등에 대한 기준수질을 초과할 확률을 구하는 수질예보시스템을 구축한 바 있으나, 아직까지 국내에서는 2차원 수질모형에 대하여 매개변수가 가지는 오차를 정량적으로 분석하고, 이와 함께 신뢰도 기법을 이용한 수질예측 모형의 개발에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

2. 수질해석을 위한 2차원 유한요소모형

수체내에서 오염물의 거동을 나타내는 기본 방정식은 오염물의 이송과 감쇠과정을 정확하게 기술할 수 있어야 한다. 합리적인 초기조건과 경계조건을 가진 2차원 이송-확산방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 C 는 오염물질의 농도, R 은 오염물질의 생성 및 소멸항을 나타내며, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} 및 D_{yy} 는 확산계수이고, x 와 y 는 흐름방향 및 흐름의 횡방향, p 와 q 는 x , y 방향의 단위폭당 유량, h 는 수심을 나타내고 있다. 오염물질이 연속적으로 잘 혼합된 것으로 가정하면, Petrov-Galerkin 기법을 적용한 2차원 이송-확산 방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Heinz, 1989; Martin과 McCutcheon, 1999).

$$\int_{\Omega} N_*^T \left\{ \frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[h(D_{xx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y}) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[h(D_{yx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y}) + R \right] \right\} d\Omega = 0 \quad (2)$$

여기서 \hat{C} 는 계산되는 오염물질의 농도이고, T 는 전치행렬을 의미하며, 이 식에서의 가중함수 N_* 는 식 (3)과 같다(Piasecki와 Katopodes, 1999).

$$N_* = N + \frac{|p|\Delta x + |q|\Delta y}{\sqrt{15(p^2 + q^2)}} \left(p \frac{\partial N}{\partial x} + q \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad (3)$$

여기서 N 은 bilinear 형상함수이며, $\Delta x = 2 \left[\left(-\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2}$, $\Delta y = 2 \left[\left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 + \left(-\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2}$ 그리고 ξ, η 는 기존 좌표계에서 전환한 x, y 방향으로의 국지 좌표계이다. 여러 가지 수질항목에 대한 일반화된 동역학적 반응을 고려하기 위해 식 (1)의 R 은 식 (4)와 같이 각 구성요소에 대한 오염물질 자체의 성장/감쇠 및 다른 오염물질과의 상호작용에 의한 생성/소멸항으로 도입될 수 있다.

$$R = -hGC - hS \quad (4)$$

여기서 h 는 수심[L], C 는 오염물질의 농도[ML^{-3}], G 는 해당되는 수질항목의 성장/감쇠율[T^{-1}]을 의미하며, S 는 전체 수질항목간의 동역학적 상호반응에 의한 생성/소멸률[$ML^{-3}T^{-1}$]을 나타낸다. 표 1은 본 연구 모형에서 다룰 수 있는 수질항목들을 나타내고 있으며, 이러한 수질항목들을 모의하기 위해 질소, 인과 같은 영양물의 순환, 조류의 성장, 퇴적물의 산소요구량, 대기 중의 재포기 그리고 용존산소의 거동에 따른 영향 등을 고려하였다.

3. 신뢰도 기법을 이용한 UUWQM 모형의 구축

모형의 매개변수에 존재하는 불확실성은 모형의 구

조적 오차뿐만 아니라 실제 시스템의 환경조건 등의 자연적인 변동성에 의한 것일 수도 있다. 그러므로 모든 계수들에 대하여 하나의 확정론적 값을 사용하는 것 대신에 이들 계수들의 변동성이나 불확실성을 고려해주는 과정이 반드시 필요하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 모형내 불확실성에 대한 고려를 함으로써 하천수질에 대한 모형의 모의결과를 확률적으로 제시하는 신뢰도 해석을 수행하기 위해서 2차원 수질해석모형에 MFOSM 기법과 Monte Carlo 기법을 연계한 UUWQM(Unsteady/Uncertainty Water Quality Model) 모형을 개발하였다.

3.1 MFOSM 기법

FOSM(First-Order Second-Moment)기법을 이용한 신뢰도 분석방법은 오래 전 구조물의 안전도 분석에 사용된 이래로 Tang과 Yen(1972)에 의해 처음으로 수리시스템의 위험도 산정에 사용되었다. FOSM 이론은 Taylor 급수의 전개로부터 시작되는데 임의의 점 $P(X_{1p}, X_{2p}, X_{3p}, \dots, X_{np})$ 에서 $Y = G(x_i)$ 에 관한 Taylor 급수전개는 식 (5)와 같이 기술될 수 있다.

$$Y = G(x_{1p}, x_{2p}, x_{3p}, \dots, x_{np}) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ip}) \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - x_{ip})(X_j - x_{jp}) \left(\frac{\partial^2 G}{\partial X_i \partial X_j} \right)_p + \text{higher order terms} \quad (5)$$

여기서 첨자 p 는 전개점 P 에서 계산되는 것을 나타낸다. 일차 근사하는 Taylor 급수 전개식에서 2차 이상의 고차항을 절단함으로써 수식화시킬 수 있다. 이제 Taylor 급수가 변수의 평균값 $X_m = (x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}, \dots, x_{mi})$ 에 대해서 전개될 수 있으므로 Y 의 평균은 식 (6)과 같이, 종속변수에 대한 분산은 입력 매개변수들이 통계적으로 독립이라고 할 경우 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

표 1. 모의가능한 수질항목

Temperature	DO	BOD
Org-N	NH3-N	NO2-N
NO3-N	Org-P	PO4-P
Algae	Coliform	Arbitrary Non-conservative (I~VI)

$$E(Y) = G(x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}, \dots, x_{mn}) \quad (6)$$

$$Var(Y) = \sum_{i=1}^n Var(X_i) \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)^2_m \quad (7)$$

여기서 아래첨자 m 은 변수의 평균에서 계산되는 것을 의미한다. 이와 같이 일차 근사해가 평균값에서 전개한 불확실한 매개변수의 최초의 두 개 모멘트 즉, 평균과 분산만을 포함하고 있기 때문에 이러한 접근방법을 MFOSM(Mean First - Order Second - Moment)법이라 한다.

3.2 Monte Carlo 모의기법

Monte Carlo 모의수행은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합에 기초로 하여 실제 상황을 반복수행하는 모의발생 과정이며, 임의의 변수에 대해 상응하는 확률분포에 따라 발생하는 일련의 무작위 값을 사용하여 반복되는 모의수행 처리과정을 포함하고 있다. 이러한 처리과정을 반복함으로써 각 변수에 상응하는 값들에 대한 해의 변동성을 얻게 된다. 이러한 결과는 실제 관측치의 변동성과도 유사하기 때문에 Monte Carlo 모의수행의 결과는 통계학적으로 취급될 수 있고 통계적 예측과 추론은 적절하다고 할 수 있다.

본 연구에서 Monte Carlo 모의수행을 위하여 난수를 발생시키는 기본공식을 식 (8) 그리고 식 (9)와 같은 배수합동법(multiplicative congruential generator)을 이용하였다.

$$X_{i+1} = a X_i \pmod{m} \quad (8)$$

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (9)$$

여기서 $a = 16807$, $m = 2^{31} - 1$, (\pmod{m})은 modulus m 에 의한 나머지 값, X_i 는 균등난수를 발생시키기 위한 초기값, U_i 는 균등분포에 의한 난수를 나타내고 있다.

Monte Carlo 모의를 위한 모의횟수를 결정하기 위해 본 연구모형에서 사용되는 동일한 자료에 대해 모의 횟수만 증가시킨 자료들을 가지고 모의하여 임의지점에서 예측된 표준편차에 대한 모집단 평균의 95% 신뢰구간에 대한 범위를 그림 1과 같이 산정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 3000회의 모의수행을 실시하여 DO와 BOD에 대해 살펴본 결과 약 1000회 정도의 모의를 수행할 경우 계산결과의 수렴성을 확인할 수 있었다.

3.3 신뢰도 분석

자연 하천에 대한 수질모의를 통하여 여러 가지 매개변수들에 대한 불확실성을 고려하였을 경우에 관심 지점에서의 수질농도에 대해 하천수질의 환경 기준치에 대한 신뢰도 분석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 고려하고자 하는 수질항목에 대한 농도가 기준 농도를 위배할 확률에 초점을 두고 있기 때문에 위험도 또는 초과확률이라는 개념을 통한 신뢰도 분석을 수행하고자 한다.

일반적으로 위험도의 의미는 기준 수질농도를 초과할 확률을 의미하나, DO의 경우는 기준 수질농도보다 낮을 확률을 의미하고 있다. Monte Carlo 기법을 이

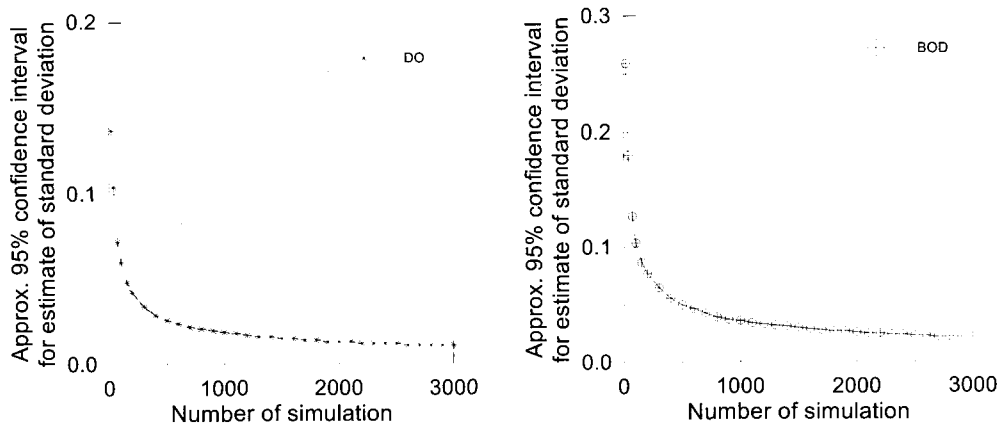


그림 1. Monte Carlo 모의에 대한 수렴특성

용한 초과확률의 산정은 식 (10)을 이용하게 된다.

$$P_e = \frac{\text{number of model outcomes with } Z < 0}{\text{total number of simulations}} \quad (10)$$

여기서 $Z = S - L$ 이며, S 는 기준 농도이고, L 은 모의수행된 농도를 의미한다. 이제 MFOSM 기법에 의한 초과 확률은 식 (11)에서와 같이, 신뢰도 지수 β 는 식 (12)와 같이 산정된다.

$$P_e = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (11)$$

$$\beta = \frac{E[R - \mu_o]}{\sigma_o} \quad (12)$$

여기서 σ_o 는 출력되는 수질항목의 농도에 대해 예측된 표준편차이고, μ_o 는 출력되는 수질항목의 농도에 대해 예측된 평균치이다. 그리고 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포에 대한 적분치를 나타낸다.

3.4 UUWQM 모형의 개발

본 연구에서는 Petrov - Galerkin 유한요소기법에 의한 흐름의 2차원 동수역학 해석과 오염물질의 2차원 이송 - 확산해석을 수행하는 수질해석모형인 UUWQM

(Unsteady/Uncertainty Water Quality Model) 모형을 개발하였다. UUWQM 모형은 하천에서의 2차원적인 DO - BOD 해석뿐만 아니라 질소, 인 등의 영향을 고려한 부영양화 해석, 비정상상태의 수질해석 등을 수행할 수 있도록 하였다. 또한 모형의 매개변수에 존재하는 불확실도를 고려한 신뢰도 해석을 수행함으로써 확률론적 수질예보시스템을 구축하고자 하였다. 그림 2는 이러한 확정론적 수질해석 모의와 함께 불확실도 모의를 통해 신뢰도 분석을 수행하기 위한 UUWQM 모형의 구조도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 38개의 부프로그램으로 구성되어 있으며, 프로그램에서 모의가능한 최대 절점수는 8000개, 최대 요소수는 7000개, 점오염원이 유입되는 최대 절점수는 100개이며, 이 외의 본 연구모형에 대한 특성을 다음과 같이 간단히 요약하였다.

- SI 단위 및 FSS 단위의 사용기능
- 다양한 형태의 유속자료 이용기능
- 정상 및 비정상 상태의 모의기능
- 경계조건 및 점오염원 입력자료의 처리기능
- 지형학적 자료 및 기상학적 입력자료의 처리기능
- GUI(Graphic User Interface) 시스템을 토대

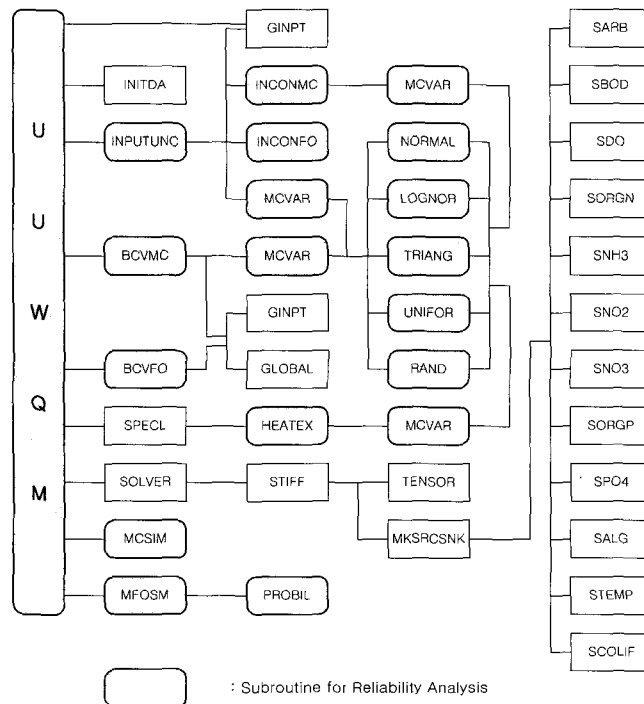


그림 2. UUWQM 모형의 구조도

로 한 다양한 모의결과 제시기능

- 입력 매개변수의 민감도 및 불확실도 분석기능
- 수질 기준값에 대한 신뢰도 분석기능

4. 낙동강 유역에 대한 적용

낙동강 유역은 유역면적 23,817 km^2 , 유로연장 521.5 km 로서 중류부에서는 대도시와 공업단지의 오폐수가 지류를 통하여 본류로 유입되면서 오염도가 크게 상승하고 있으며 하류부에서는 다량의 하천수가 상수원수로 사용되고 있는 실정이다. 특히, 최근에는 위천공업단지 조성계획에 따른 낙동강의 수질 문제는 지역간에 큰 논란을 불러일으키고 있다.

이러한 관심지역에 대한 2차원적 수질모의를 위하여 낙동강의 주요 오염원의 하나인 금호강을 중심으로 성주에서 현풍까지 35 km 구간을 모의 대상구간으로 설정하였다. 대상구간에 대한 하도자료의 구축을 위해 본 연구에서는 지리정보시스템(GIS)과 연계하여 수치지도

를 작성하였다. 이를 통하여 대상구간에 대한 우한요소망의 하상고를 얻을 수가 있었으며, 모형을 통한 대상구간의 모의결과를 GIS의 ArcView 환경하에서 구현이 가능하도록 하였다.

4.1 지형자료의 구축

본 연구에서는 수치지도작성작업규칙(건설교통부령 제 17호, 1995. 5. 29)에서 정하고 있는 규정에 따라 기본도의 벡터화를 실시하였고, 대상유역에 대한 3차원 지형자료를 구축하였다. 대상구간에 대한 기하학적 양상의 구성에 사용한 기초자료는 기존의 1/5,000 지형도 35매와 하천정비기본계획상 횡단도 등의 지형도를 사용하였다. 기본지형도에 대한 벡터화 작업을 완료한 후 생성된 coverage를 병합하여 대상유역에 대한 수치기본도를 완성하였다. 또한, 대상구간의 하도에 대한 실측자료의 구축을 위해 하천정비기본계획상의 횡단도를 낙동강 본류의 경우 67개 단면, 금호강의 경우 9개 단면

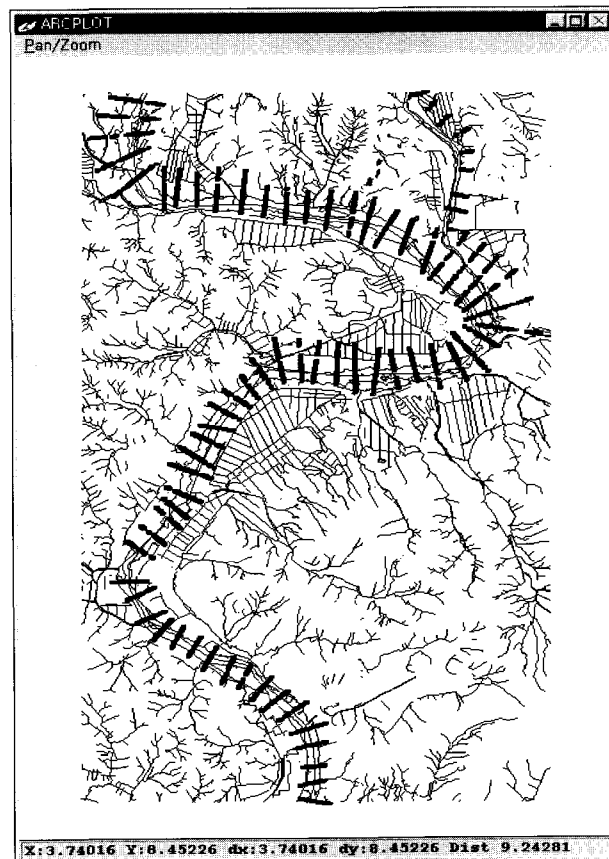


그림 3. 하도에 대한 횡단면 자료의 반영

을 지형자료에 반영하였는데 이를 그림 3에 나타내었다. 이 수치기본도와 횡단도의 관측자료를 기본도면으로 고려하여 대상구간에 대한 TIN(Triangulated Irregular Network)을 형성하였으며, 이를 이용하여 대상구간에 대해 Grid(Lattice)로 표현한 유역도를 ArcView상에서 도시가능하도록 하였다.

4.2 흐름 및 수질해석

대상구간에 대해 오염물질의 유입으로 인한 유동현상을 모의하기 위해서는 흐름에 대한 모형의 수행이 선행되어야 한다. 그림 3으로부터 대상유역에 평수기의 주수로에 대한 유한요소망을 형성하여 평수기 유량조건에 대한 흐름해석을 실시하였다. 흐름에 대한 모의결과가 전체구간에 대해 정상상태에 도달하게 되면 대상구

간의 흐름결과를 이용하여 DO, BOD, 수온, 유기질소, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 아질산성 질소와 같은 질소계열과 유기인, 용존성 인과 같은 인계열 등의 수질항목들에 대한 2차원 이송-확산해석을 실시하였다. 표 2는 흐름 및 수질해석을 위해 사용된 유량과 수질자료를 나타내고 있으며, 그림 4는 대상구간에 대해 24시간이 경과한 후 정상상태에 도달한 후의 BOD 농도에 대한 계산결과를 GIS의 ArcView 상에서 도시하기 위해 coverage를 변환하여 Lattice 자료로 구축함으로써 실제 지형자료와 함께 도시한 그림이다.

4.3 신뢰도 해석

모형의 입력 매개변수에 대한 불확실도 분석을 위해 표 3과 같이 입의의 5개 주요 지점을 선정하였다. 선정

표 2. 흐름 및 수질해석을 위한 경계조건

지 점	유량 (m^3/sec)	수온 ($^{\circ}C$)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)
낙동강 상류단	70.0	25.56	9.19	3.01	3.64	0.06
급호강 상류단	7.5	24.00	4.30	8.80	11.31	0.83

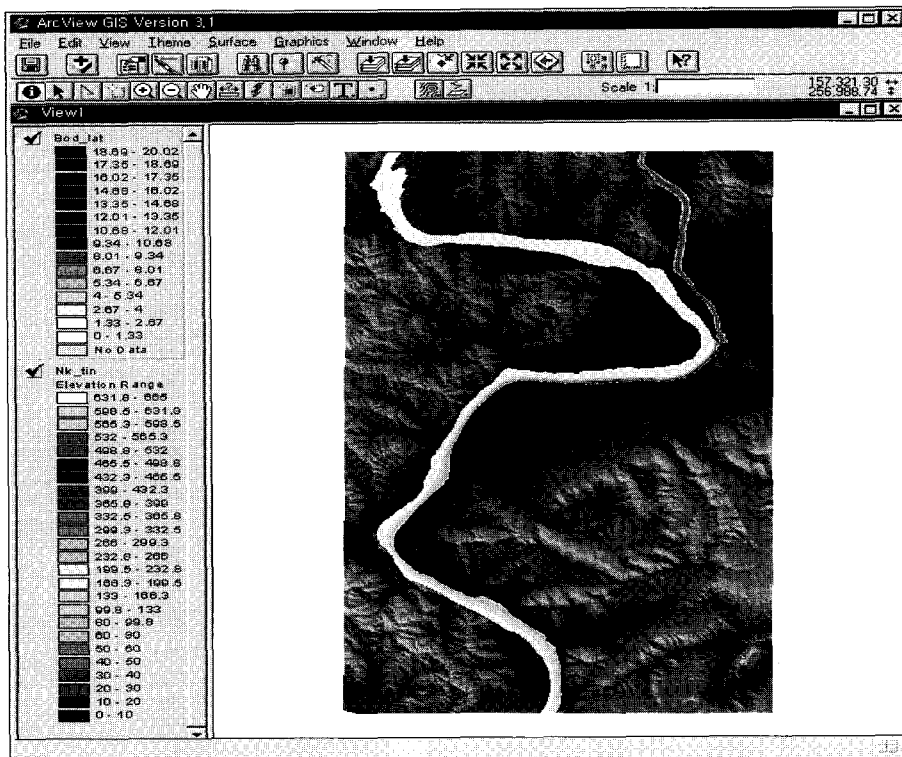


그림 4. ArcView상에서 도시한 BOD 농도분포도

표 3. 불확실성 해석을 위한 지점의 선정

지점 번호	절점 번호	금호강 유입부로부터의 거리	비 고
1	3128	3.13 km	
2	4550	6.50 km	
3	5173	9.81 km	
4	5997	13.94 km	고령교
5	7457	21.20 km	달성 취수장

표 4. 선정된 주요 입력 매개변수

변수명	설 명	변수명	설 명
DISPXD(1)	X방향 확산계수(그룹 1)	THET12	BOD 감쇠에 관한 온도계수
DISPYD(1)	Y방향 확산계수(그룹 1)	BET3	유기 질소의 암모니아성 질소 변환율
DISPXD(3)	X방향 확산계수(그룹 3)	BET1	암모니아성 질소의 아질산성 질소 변환율
BODU5	BOD의 5일 BOD 변환계수	BET4	유기 인 감쇠율
THET4	유기 질소의 감쇠에 관한 온도계수	K1	BOD 감쇠율
THET6	암모니아성 질소의 감쇠에 관한 온도계수	SIG6	BOD 침전율
THET9	유기 인의 감쇠에 관한 온도계수	K4	하상산소요구율

표 5. 주요 매개변수에 대한 기여도의 합

	DO	BOD	NH3-N	PO4-P
14개 주요 매개변수에 대한 기여도의 합(%)	97.629	98.982	99.518	100.00

된 지점에서의 출력결과를 살펴보기 위한 수질항목으로는 수질오염도를 나타내는데 가장 많이 사용되는 DO와 BOD, 부영양화와 관련성이 높은 질소와 인 계열 중에서 NH3-N, PO4-P와 같은 4개 수질항목에 대해 고려하였다. 이러한 수질항목에 대한 모형의 수행을 위해 고려된 전체 80여개의 입력 매개변수에 대한 불확실도는 기존 연구문헌에서 제시하고 있는 변동범위와 일반적인 입력 매개변수의 사용범위를 벗어나지 않는 정도에서 불

확실성을 지정하였다(Brown과 Barnwell, 1987).

입력 매개변수에 대한 불확실도를 고려하였을 경우 고령교 지점에서의 각 출력 수질항목에 대해 영향력이 큰 주요 입력 매개변수들을 결정하고자 하였다. 이를 위해 각 수질 항목이 전체 출력변수에 미치는 영향력인 기여도를 식 (13)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 분산요소는 입력변수의 분산에 민감도를 가중치 개념으로 고려해 준 것을 의미한다.

표 6. Monte Carlo 기법을 이용한 주요 매개변수의 검증

지점	입력매개변수	DO		BOD		NH3-N		PO4-P	
		평균 (mg/l)	변동계수	평균 (mg/l)	변동계수	평균 (mg/l)	변동계수	평균 (mg/l)	변동계수
1	주요	7.915	0.017	2.999	0.054	0.604	0.037	0.074	0.019
	전체	7.927	0.019	2.986	0.055	0.602	0.037	0.074	0.018
2	주요	7.895	0.019	3.010	0.057	0.585	0.041	0.073	0.021
	전체	7.908	0.020	2.996	0.058	0.583	0.040	0.073	0.020
3	주요	7.658	0.019	3.861	0.057	0.779	0.032	0.089	0.021
	전체	7.671	0.020	3.847	0.057	0.778	0.033	0.089	0.020
4	주요	7.213	0.020	5.649	0.051	1.177	0.016	0.125	0.013
	전체	7.229	0.021	5.630	0.051	1.176	0.016	0.125	0.014
5	주요	7.257	0.021	5.443	0.051	1.123	0.019	0.122	0.017
	전체	7.274	0.021	5.424	0.051	1.121	0.019	0.122	0.018

$$\text{Contribution (\%)} = \frac{\text{Component of Variance}}{\text{Total Variance}} \times 100 \quad (13)$$

일반적인 민감도 분석과 같은 불확실도 분석을 통해서 각 입력 매개변수의 영향을 완전하게 파악할 수가 없으며, 식 (13)과 같은 기여도를 이용함으로써 각 수질항목에 미치는 영향력을 산정할 수가 있다. 즉, 고려하고자 하는 네 개의 출력 수질항목의 분산에 영향력이 큰 14개의 주요 매개변수를 표 4와 같이 결정하였으며, 이러한 변수들을 이용하여 신뢰도 분석을 수행하고자 한다. 표 5는 각 출력변수에 대한 14개 주요 매개변수들에 대한 기여도의 합을 나타내고 있다.

기여도를 이용하여 결정된 14개의 주요 매개변수들에 대한 검증용 위해 모형의 입력 매개변수들을 모두 사용하였을 경우와 주요 매개변수들만을 사용하였을 경우에 대해 각각 Monte Carlo 모의를 수행하였다. 1000회의 모의수행을 통한 주요 수질변수들의 평균과

변동계수의 결과를 표 6에 제시하였다. 두 경우에 대한 모의결과는 부분적으로 약간의 차이는 있지만 전반적으로 거의 일치하고 있는 것으로 나타나 주요 입력 매개변수의 선정은 적절한 것으로 판단된다.

이러한 주요 입력매개변수들을 이용하여 낙동강에 대해 MFOSM 기법과 Monte Carlo 기법을 이용한 신뢰도 분석을 수행하기 위해 표 3에서 제시된 주요 지점 중에서 고령교 지점과 달성 취수장에서의 DO와 BOD에 대한 비초과확률과 초과확률을 산정하여 표 7, 8 및 그림 5, 6에 나타내었다. 이러한 결과를 이용하여 하천 상류의 여러 가지 수질변화 요소가 반영되었을 경우 주요 지점에서의 수질농도에 대해 발생가능 범위와 각 수질농도에 대한 초과 또는 비초과 확률을 정량적으로 제시해 줄 수가 있다.

또한, 각 기법을 통한 수질항목의 결과에 대한 빈도 분포를 찾아내기 위해 신뢰도 분석시 기준이 되는 농도별 초과확률에 Monte Carlo 기법에서 사용된 반복횟

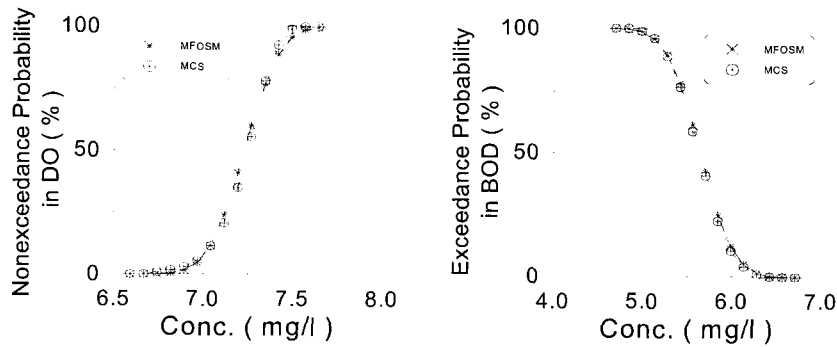


그림 5. 고령교 지점에서의 DO와 BOD의 확률곡선의 비교

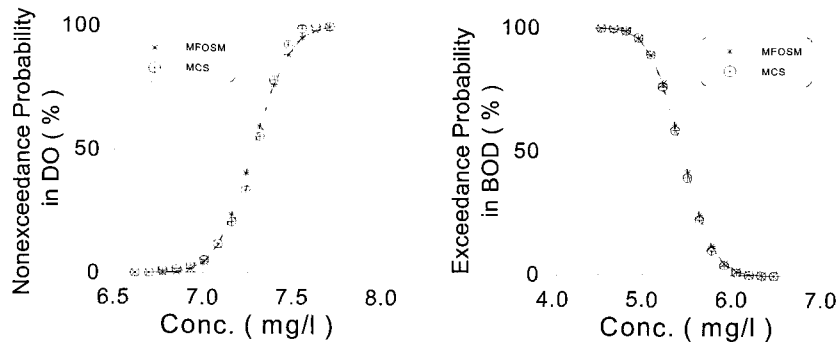


그림 6. 달성 취수장에서의 DO와 BOD의 확률곡선의 비교

표 7. 고령교 지점에서의 신뢰도 분석

DO에 대한 비초과확률(%)			BOD에 대한 초과확률(%)		
농도(mg/l)	MFOSM	MCS	농도(mg/l)	MFOSM	MCS
6.593	0.00	0.00	4.700	99.93	100.00
6.668	0.02	0.00	4.844	99.65	100.00
6.743	0.09	0.80	4.987	98.67	98.90
6.818	0.41	1.70	5.131	95.85	96.20
6.893	1.53	3.00	5.275	89.44	88.90
6.968	4.65	5.30	5.418	77.93	76.70
7.044	11.66	11.50	5.562	61.27	58.60
7.119	23.86	20.70	5.706	42.19	40.70
7.194	40.93	35.00	5.849	24.92	22.40
7.269	59.95	55.50	5.993	12.29	10.40
7.344	76.84	78.10	6.137	5.01	4.00
7.419	88.78	92.50	6.280	1.68	0.90
7.494	95.51	98.80	6.424	0.46	0.20
7.570	98.55	99.80	6.568	0.10	0.00
7.645	99.62	100.00	6.711	0.02	0.00

표 8. 달성 취수장에서의 신뢰도 분석

DO에 대한 비초과확률(%)			BOD에 대한 초과확률(%)		
농도(mg/l)	MFOSM	MCS	농도(mg/l)	MFOSM	MCS
6.620	0.00	0.00	4.527	99.93	100.00
6.697	0.02	0.00	4.666	99.65	100.00
6.774	0.09	0.90	4.804	98.68	99.00
6.851	0.42	1.60	4.943	95.85	96.20
6.929	1.56	3.00	5.082	89.40	89.50
7.006	4.68	5.40	5.221	77.72	76.60
7.083	11.53	12.00	5.359	61.06	58.90
7.161	23.72	20.80	5.498	41.91	39.70
7.238	40.59	33.60	5.637	24.52	22.60
7.315	59.45	55.50	5.776	12.00	10.10
7.393	76.51	78.20	5.914	4.88	4.10
7.470	88.50	92.60	6.053	1.61	1.10
7.547	95.33	98.80	6.192	0.43	0.10
7.624	98.44	99.80	6.331	0.09	0.00
7.702	99.58	100.00	6.469	0.02	0.00

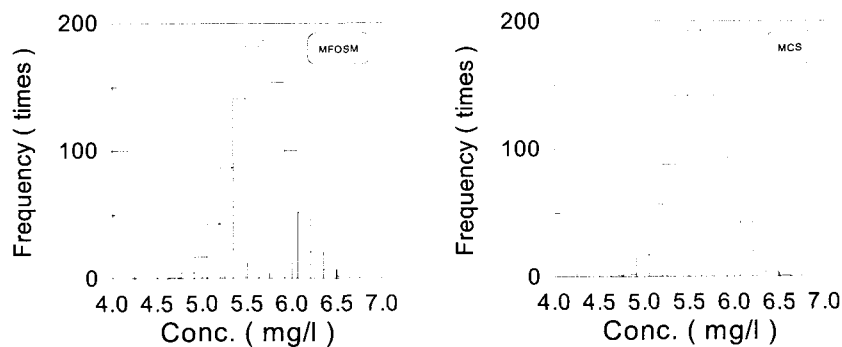


그림 7. 고령교 지점에서의 BOD에 대한 빈도분포도

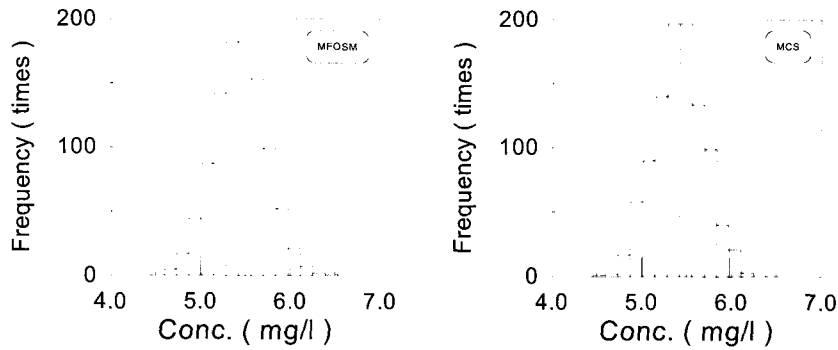


그림 8. 달성 취수장에서의 BOD에 대한 빈도분포도

수 1000회를 곱하여 각 농도에 대한 누가 빈도수를 구할 수 있다. 그 예로 BOD에 대해 살펴보면 고령교 지점과 달성 취수장에 대한 빈도분포도를 그림 7~8과 같이 구할 수 있다. 이러한 수질모의를 통하여 본 연구에서는 오염도가 높은 지류의 유입이나 점오염원을 통한 유출사고와 같은 경우에 오염물질의 이송-확산 특성을 파악함으로써 효과적인 대응방안을 마련하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천에서 흐름 및 오염물질의 2차원 이송-확산 해석을 위해서 유한요소모형을 개발하고, 이에 대한 불확실성 분석을 토대로 모의결과를 확률적으로 제시하여 신뢰도 해석을 수행할 수 있는 수질관리시스템인 UUWQM(Unsteady/Uncertainty Water Quality Model) 모형을 개발하였다.

본 모형은 수온, DO, BOD, 질소, 인, 조류, 대장균과 비보존성 물질 등 12가지 수질항목에 대하여 모의할 수 있고 점원 및 비점원 오염원, 정상 및 비정상 상태의 수질모의가 가능하도록 구성하였다. 또한 하천 수질모의에 대한 불확실성 해석을 수행하기 위해 MFOSM 기법과 Monte Carlo 기법을 적용하였으며, 기준 수질농도에 대한 확률적 평가를 제시하는 신뢰도 분석을 수행할 수 있는 수질관리시스템을 구축하였다.

실제 하천에 대한 수질모의를 위해 낙동강의 성주에서부터 현풍까지 35 km 구간에 대해 지리정보시스템 체계를 통한 하도자료를 구축하였으며, 2차원 동역학적 흐름해석과 오염물질의 2차원 수질해석을 실시하였다. 또한, 민감도 분석을 통하여 수질모형에 대해 기여도가

큰 입력 매개변수들을 결정하였고 Monte Carlo 기법을 통해 이에 대한 검증을 실시하였다. 수질모의에 대한 불확실성 해석을 위하여 MFOSM 기법과 Monte Carlo 기법을 적용하여 대상구간의 주요 지점에 대해 불확실성으로 인한 수질농도의 빈도 분포도를 제시하였으며, 목표 수질농도에 대한 초과확률을 산정하여 신뢰도 해석을 수행할 수 있는 수질관리시스템을 구축하였다.

참 고 문 헌

- 김형일, 이종설, 허준행, 조원철 (1998). "한강하류부에서의 오염물질의 거동특성 연구." **한국수자원학회 논문집**, 제31권, 제1호, pp. 85-93.
- 박무중, 김중훈, 윤용남 (1995). "준 3차원 확산모형을 이용한 감조하천내 오염물질의 거동특성 연구." **1995년 토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 248-251.
- 한건연, 김상호 (1997). "낙동강에서의 신뢰도 해석에 의한 수질예보시스템의 개발." **한국수자원학회 논문집**, 제30권, 제4호, pp. 411-420.
- 한건연, 송재우, 백경원, 김상호 (1995). "한강하류부에서의 총질소와 총인에 대한 수질모의." **한국수자원학회 논문집**, 제27권, 제1호, pp. 53-67.
- 한건연, 이정식, 김상현, 김홍태 (1994). "낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석." **한국수문학회 논문집**, 제27권, 제1호, pp. 53-67.
- Brown, R.T., and Barnwell. T.O. (1987). *Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E and QUAL2E-*

- UNCAS. EPA/600-3-87/007, U.S. Environmental Protection Agency.
- Dilks, D.W. (1987). *Analysis of water quality model uncertainty using a bayesian Monte Carlo method*. Ph.D. Dissertation, University of Michigan.
- Gardner, R.H., O'Neill, R.V., Mankin, J.B., and Carney, J.H. (1981). "A comparison of sensitivity analysis and error analysis based on a stream ecosystem model." *Ecological Modelling*, Vol. 12, pp. 177-194.
- Han, K.Y., Kim, S.H., and Bae, D.H. (2001). "A stochastic water quality analysis using reliability method." *J. of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 3, pp. 1-14.
- Heinz, S.C. (1989). "Modeling residual chlorine in Potomac Estuary." in *Estuarine and Coastal Modeling*, Spaulding, M.L.(ed.), ASCE, pp. 229-238
- Martin, J.L., and McCutcheon, S.C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, Lewis Publishers, pp. 678-689.
- O'Neill, R.V. (1973). "Error analysis of ecological models." in *Radionuclides in ecosystems*. Nelson, D.(ed.), USAEC-CONF.-710501, National Technical Information Division, Washington, D.C., pp. 898-908.
- Piasecki, M., and Katopodes, N.D. (1999). "Identification of stream dispersion coefficients by adjoint sensitivity method." *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 714-724.
- Tang, W.H., and Yen, B.C. (1972). "Hydrologic and hydraulic design under uncertainties." *Proc. of Inter. Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems*, Tucson, Arizona, NO. 2, pp. 868-882.
- Tiwari, J.L., and Hobbie, J.E. (1976). "Random differential equations as models of ecosystems: Monte Carlo simulation approach." *Math Bio-sciences*, Vol. 28, pp. 25-44.
- Tung, Y.K., and Hathorn, W.E. (1988). "Assessment of probability distribution of dissolved oxygen deficit." *J. of Env. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 114, No. 6, pp. 1421-1435.
- Warwick, J.J. (1989). "Interplay between parameter uncertainty and model aggregation error." *Water Resources Bulletin*, Vol. 25, No. 2, pp. 275-283.
- Warwick, J.J., and Cale, W.G. (1987). "Determining of likelihood of obtaining a reliable model." *J. of Env. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 1102-1119.

(논문번호:02-18; 접수:2002.4.09/심사완료:2002.08.16)