

농촌 유역 상단부의 소하천에서 수질예측모형의 개발

Development of a Water Quality Model for Streams in an Upland Agricultural Watershed

최혜숙* / 오광중** / 김상현***

Choi, Heay Sook / Oh, Kwang Joong / Kim, Sang Hyun

Abstract

A water quality model was developed for small stream at a upland agricultural watershed. A control volume method was employed to digest the severe variability of stream shape, water quality and discharge at small streams. We estimated optimum reaction coefficients and model structure using a random number generation technique. The index of agreement and coefficient of efficiency were introduced for the model calibration criterion. As the result, the reliability of model parameter estimation could be improved. The applicability of model was tested by a set of sampling results at Yongduckchun in Kimhae. The variability of water quality reaction coefficient was explored through the observed data and using the developed model.

keywords: water quality model, reaction coefficient, random number generation, small stream

요 지

농촌 소하천의 수리학적 및 수질특성을 반영한 모형을 개발하였다. 모형구조 설계시 제어체적 기법을 활용하여 하천 형상, 수질 및 유량의 변화가 심한 농촌 유역의 소하천에 대한 수질을 모의하였다. 개발한 모형에 난수발생 기법을 도입하여 최적 반응계수와 모형구조를 추정하였다. 또한 모형 보정기준의 일반화를 위해 동의지표와 효율 계수를 도입하여 매개변수추정의 신뢰성 향상을 도모했다. 모형의 적용성을 검증하기 위해 경남 김해시 한림면 용덕천에서 수질을 채취하여 분석하였다. 관측된 자료와 개발된 모형의 비교연구를 통해 대상유역의 소하천에서 일어나는 수질 반응계수들과 그 변동성을 추정하였다.

핵심용어 : 수질모형, 반응계수, 난수발생기법, 농촌 소하천

-
- * 부산대학교 환경공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Environmental Eng., Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea
 - ** 부산대학교 환경공학과 교수
Professor, Dept. of Environmental Eng., Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea
 - *** 부산대학교 환경공학과 조교수
Assistant Prof., Dept. of Environmental Eng., Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea

1. 서 론

유역 상단부에 있는 소하천은 하천의 형태와 수심이 불규칙적이며 유량과 유속의 변동이 극심하다. 농경배수, 축산폐수, 생활하수 등은 주요한 비점오염원들로서 별도의 처리시설이 부족하여 하천으로 직접 유입되므로 BOD, N, P 등 오염 부하량이 높으며 수질의 변동폭도 크다. 특히 축산폐수가 다량 유입되는 소하천에서는 얕은 수심에 높은 오염부하로 부영양화가 발생하기 쉽고 하상에 다량의 퇴적물이 축적된다. 국내에 사용되는 여러 수질모형들의 대부분은 외국에서 들여와 이러한 소하천의 특성에 맞는 모형이 부재한 상태이다. 따라서 본 연구의 목적은 첫째 농촌 소하천의 수질 오염을 제어 관리하기 위한 모형을 개발하고자 함에 있다. 둘째 개발 모형의 신뢰성 향상을 위해 매개변수 추정과정에 난수발생기법, 동의지표, 효율계수 등의 통계적 추정기법을 도입한다. 셋째, 개발된 모형의 적용을 위해 농업 및 축산유역의 소하천에서 수질을 채취하여 분석하고 모형 검증을 실시하였다.

2. 관련 연구

2.1 확정론적인 해석

하천수질해석을 위한 수학적 모형은 Streeter-Phelps(1925)가 하수처리장으로부터 방류되는 오염원의 자정능력을 평가하기 위해 개발한 이래로 많은 모형들이 개발되었다.

1973년에 암모니아 독성, 병원성 미생물, 부영양화 수중생물의 활동을 고려한 QUALII가 개발되었고, 1985년에는 QUALII가 가진 단점을 보완하여 유기질소의 변화과정, 조류성장의 영양물질로 암모니아 흡수를 첨가하고 총인을 유기인과 용존 무기인으로 분리하여 QUAL2E(Brown 과 Barnwell, 1987)가 개발되었고, 이 모형은 국내외적으로 하천모델로 널리 이용되고 있다. 그러나 QUAL2E는 부영양화 될 때 급증하는 조류의 생체량과 하상퇴적물로부터 질소의 용출이 고려되지 않았으며, 모형의 한계로 수량이 적고 오염원이 많은 하천에서의 실행에 어려움이 있다는 것이 지적되었다(Park과 Lee, 1996 ; 박석순, 1997). 따라서 단면과 유량의 변화가 많고 부영양화되기 쉬운 소하천에 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

이외에도 유한구획법을 이용하여 하천, 호수, 하구에 적합하도록 WASP 모델이 USEPA에 의해 1981년부터

개발되기 시작하여 지금까지 개선되어 오고 있다 (류재근 등, 1998). 현재 WASP5가 활용되고 있으며 수체이동을 다루는 DYNHYD와 일반수질을 다루는 EUTRO5 그리고 독성물질을 모의하는 TOXI5로 구성되어 있다. 또한 USEPA에서 유역모형과 하천모형을 통합하는 HSPF 모형을 1980년부터 개발하기 시작하여 발전되어지고 있다. 현재 HSPF는 유기물, 영양염류, 독성물질, 토사유출 등이 유역에서 강우로 유출되는 과정과 수체내에서 반응과정을 포함하고 있다 (Bicknell 등, 1993).

본 연구에서는 기존에 사용되는 수질모형들이 농촌 유역의 소하천의 변화를 모의하기에 적합하지 않은 점을 고려하여, 소하천의 형태적, 수리학적 특성에 따라 계산구간의 크기를 자유롭게 조절 가능하도록 한 모형 SSWQ (Small Stream Water Quality model)을 개발하였다. 여기에 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 수질인자의 변동성을 광범위하게 고려하였다. 또한 반응계수 추정의 신뢰성을 향상시키기 위하여 새로운 모형 보정기준을 도입하여 모의 결과의 신뢰도 향상을 도모했다.

2.2 확률론적인 해석

확정론적 수질해석 모형은 최대 오염 부하량, 비점 오염원 제어, 적정 수질확보 수단으로 이용되는데 수질 관련 인자들을 기술하는데 평균값 해석을 실시하고 있다. 그러나 모형자체가 수질변동기조를 기술하는데 있어서의 한계점과 각 매개변수들은 자연상태에서 많은 불확실성 내포하고 있어 해석결과에 대한 신뢰도 검증이 필요하다.

한편, 하천수질 변화의 무작위성을 표현하기 위하여 확률론적 모형이 개발되었다. USEPA는 QUAL2E 모형에 몬테카를로 기법과 일차오차 분석기법을 도입한 확률모형 QUAL2E-UNCAS를 개발하였다 (Brown과 Barnwell, 1987).

몬테카를로 기법은 특정 확률분포를 가지는 난수를 반복적으로 발생시켜서 모형에 포함된 변수값을 일정한 범위내에서 변화를 주는 기법이다(Ang과 Tang, 1975; William, 1992). 발생된 난수에 의해 각기 다른 변수 값으로 수질모의를 반복적으로 수행하면 난수값의 다양한 집합과 연관되어 결과들이 얻어진다. 모형 결과의 불확실성은 반복계산과정에서 미리 규정된 분포형으로부터 임의로 선정된 불확실한 모형입력을 사용하여 확률론적 모형의 시뮬레이션을 반복적으로 수

행함으로써 결정된다. 충분한 반복계산이 수행되었다면 임의의 지점 및 시간에 대한 모형결과와 빈도분포가 제시되는데 이것으로 통계적인 추정과 추론을 수행한다. 모형의 형태와 매개변수의 확률분포가 일치하면 계산된 표본들은 실측치의 표본과 통계적으로 유사하다.

3. 모형 개발

3.1 지배방정식의 전개

SSWQ는 하천을 크기를 달리할 수 있는 여러 개의 완전혼합반응조가 나열된 것으로 가정하여 물질 수지식을 수립하였다(그림 1). 이는 형상과 유량의 변화가 심한 소하천의 특성을 반영하여 수심, 하폭 등에 따라 연결된 제어체적의 크기를 자유롭게 조절할 수 있는 장점이 있다. 각 제어체적내의 물질의 농도는 같으며 이류, 확산, 내부 생성 및 소멸의 메카니즘을 고려하였다.

Reynolds 수송 정리를 이용하여 제어체적에서의 농도를 계산한다(Munson 등, 1996). $i-1$ 번째 제어체적에서 농도 C_{i-1} 가 i 번째 제어체적으로 유입되어 Δt 동안 체류하면서 농도 C_i 가 되어 $i+1$ 번째 제어체적으로 나아간다. 이러한 system을 설정하고 각각의 제어체적에서 질량보존의 원리를 이용하여 각 수질 인자들에 대한 변화를 모의하였다.

$$\frac{DB_{sys}}{Dt} = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dv + \int_{cs} b \rho \hat{n} \cdot U dA \quad (1)$$

여기서 B_{sys} 는 유체의 매개변수로 여기서는 질량, b 는 단위 질량당 B_{sys} 의 양으로 여기서는 B_{sys} 가 질량이므로 b 는 1, ρ 는 유체의 밀도 [M/L^3], \hat{n} 은 제어표면에 대한 단위벡터, U 는 속도벡터 [L/T], A 는 면적 [L^2]이다. 여기서 제어체적의 시간에 대한

변화율을 0이라 하면 좌변은

$$\frac{dB_{sys}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} (VC) = \frac{\partial V}{\partial t} C + \frac{\partial C}{\partial t} V = \frac{\partial C}{\partial t} V \quad (2)$$

식 (1)의 우변 첫째 항은 제어체적 내에서의 질량 변화율이고, $b=1$ 이다.

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} \rho dv = KC_i V + S_{source} V - S_{ink} V \quad (3)$$

식 (1)의 우변 둘째 항은 제어체적을 통과하는 질량의 유출입량이다.

$$\int_{cs} \rho \hat{n} \cdot U dA = \frac{D_i C_i A_i}{L_i} + Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} \pm \sum Q_b C_b \quad (4)$$

따라서 임의의 제어체적에서의 식은 아래와 같으며 기본방정식 (5)에 의해 각 제어체적에서 농도계산이 이루어진다.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \frac{D_i C_i A_i}{L_i} + Q_{i-1} C_{i-1} - Q_i C_i \pm \sum Q_b C_b \pm (K_i)_i C_i V_i \pm (S_i)_i V_i \quad (5)$$

여기서 Q_i 는 i 번째 제어체적의 유출입 유량 [L^3/T], C_i 는 i 번째 제어체적의 농도 [M/L^3], Q_b 는 외부로 유출/유입되는 유량, C_b 는 외부로 유출입되는 농도, D_i 는 i 번째 제어체적에서 확산계수 [L^2/T], A_i 는 제어체적 i 의 단면적 [L^2], L_i 는 제어체적 i 의 종방향 거리 [L], $(K_i)_i$ 는 i 번째 제어체적에서 j 반응의 반응속도상수 [$1/T$], $(S_i)_i$ 는 i 번째 제어체적에서 생성 및 소멸속도 [$M/L^3/T$],

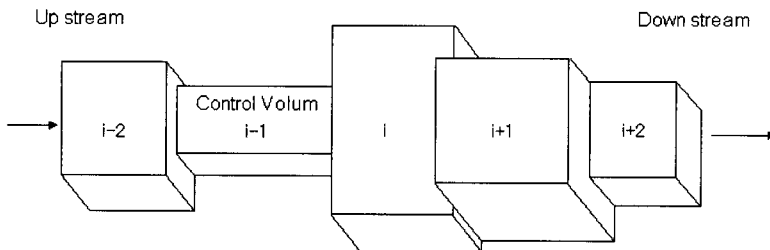


그림 1. 제어체적

표 1. 모형 방정식

수질인자	방정식
조류(chla)	$V_i \frac{dP_i}{dt} = Q_{i-1} P_{i-1} - Q_i P_i + Q_{i+1} P_{i+1} - Q_i P_i$ $+ \frac{D_h A_i (P_{i-1} - P_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (P_{i+1} - P_i)}{L_{hi}}$ $+ \mu_p P_i V_i - D_p P_i V_i - U_p P_i V_i / L_{vi}$
BOD	$V_i \frac{dBOD_i}{dt} = Q_{i-1} BOD_{i-1} - Q_i BOD_i + Q_{i+1} BOD_{i+1} - Q_i BOD_i$ $+ \frac{D_h A_i (BOD_{i-1} - BOD_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (BOD_{i+1} - BOD_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{IN_i} BOD_{IN_i} - K_B BOD_i V_i - U_B BOD_i V_i / L_{vi}$
유기인 (Organic P)	$V_i \frac{dOP_i}{dt} = Q_{i-1} OP_{i-1} - Q_i OP_i + Q_{i+1} OP_{i+1} - Q_i OP_i$ $+ \frac{D_h A_i (OP_{i-1} - OP_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (OP_{i+1} - OP_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{(IN)_i} OP_{(IN)_i} + D_p P_i F_{pp} V_i + K_{OP} OP_i V_i$ $+ (1 - R_{IP}) A_{Bi} V_{RP} - K_{OP} OP_i V_i - U_{OP} OP_i V_i$
PO ₄	$V_i \frac{dIP_i}{dt} = Q_{i-1} IP_{i-1} - Q_i IP_i + Q_{i+1} IP_{i+1} - Q_i IP_i$ $+ \frac{D_h A_i (IP_{i-1} - IP_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (IP_{i+1} - IP_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{(IN)_i} IP_{(IN)_i} + D_p P_i F_{pp} V_i + K_{OP} OP_i V_i + E_p P_i V_i$ $+ R_{IP} A_{Bi} V_{RP} - \mu_p P_i F_{pp} V_i - K_{IP} IP_i V_i - U_{IP} IP_i V_i$
유기질소 (Organic N)	$V_i \frac{dON_i}{dt} = Q_{i-1} ON_{i-1} - Q_i ON_i + Q_{i+1} ON_{i+1} - Q_i ON_i$ $+ \frac{D_h A_i (ON_{i-1} - ON_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (ON_{i+1} - ON_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{(IN)_i} ON_{(IN)_i} + D_p P_i F_{pm} V_i - K_{ON} ON_i V_i$ $- U_{ON} ON_i V_i + (1 - R_{AM}) A_{Bi} V_{RN}$
NH ₄ -N	$V_i \frac{dAM_i}{dt} = Q_{i-1} AM_{i-1} - Q_i AM_i + Q_{i+1} AM_{i+1} - Q_i AM_i$ $+ \frac{D_h A_i (AM_{i-1} - AM_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (AM_{i+1} - AM_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{(IN)_i} AM_{(IN)_i} + K_{ON} ON_i V_i - K_{AM} AM_i V_i$ $- \mu_p P_i P_{AM} F_{PN} V_i + E_p P_i F_{PN} V_i + R_{AM} A_{Bi} V_{RN}$
NO ₂ -N	$V_i \frac{dNI_i}{dt} = Q_{i-1} NI_{i-1} - Q_i NI_i + Q_{i+1} NI_{i+1} - Q_i NI_i$ $+ \frac{D_h A_i (NI_{i-1} - NI_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h K_i (NI_{i+1} - NI_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{(IN)_i} NI_{(IN)_i} + K_{AM} AM_i V_i - K_{NI} NI_i V_i$
NO ₃ -N	$V_i \frac{dNA_i}{dt} = Q_{i-1} NA_{i-1} - Q_i NA_i + Q_{i+1} NA_{i+1} - Q_i NA_i$ $+ \frac{D_h A_i (NA_{i-1} - NA_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (NA_{i+1} - NA_i)}{L_{hi}}$ $+ Q_{(IN)_i} NA_{(IN)_i} + K_{NI} AM_i V_i - \mu_p P_i (1 - P_{AM}) V_i$
DO	$V_i \frac{dDO_i}{dt} = Q_{i-1} DO_{i-1} - Q_i DO_i + Q_{i+1} DO_{i+1} - Q_i DO_i$ $+ \frac{D_h A_i (DO_{i-1} - DO_i)}{L_{hi}} + \frac{D_h A_i (DO_{i+1} - DO_i)}{L_{hi}}$ $+ R_{AR} (DO_s - DO_i) V_i - V_{SOD} A_{Bi}$ $+ F_p \mu_p P_i - F_r D_p P_i - F_c K_c BOD_i - F_{AM} K_{AM} AM_i - F_{NI} K_{NI} NI_i$

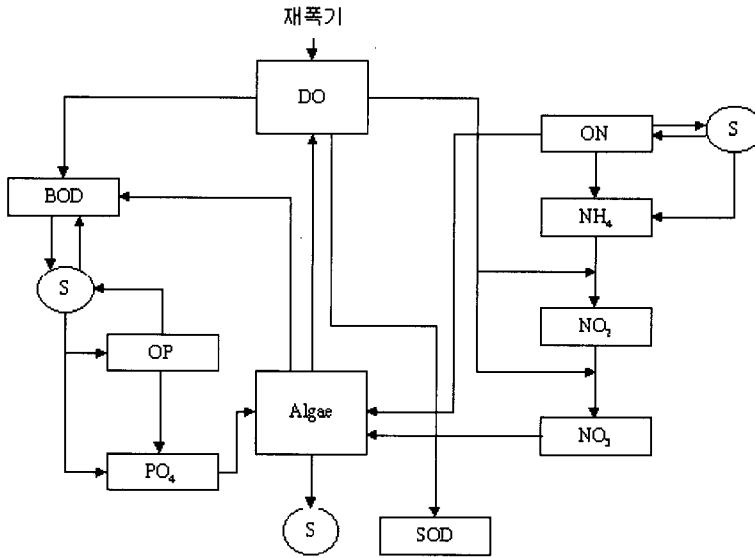


그림 2. 수질항목간의 관계

Algae : 조류, DO : 용존산소, BOD : 생화학적 산소요구량, ON : 유기질소,
 NH₄ : 암모니아성 질소, NO₂ : 아질산성 질소, NO₃ : 질산성 질소, OP :
 유기인, PO₄ : 인산염 인(무기인), S : 하천 바닥, SOD : 하상 산소요구량

V_i 는 i 번째 제어체적의 부피 [L^3]이다.

SSWQ에 포함된 주요 구성물질은 조류, BOD, DO, 유기질소, 암모니아, 아질산성 질소, 질산성 질소, 유기인, 무기인, 온도이다. 개별 수질항목에 대한 방정식과 각 구성물질들간의 관계는 표 1과 그림 2에 각각 나타내었다(Thomman 등, 1987). 표 1에서 보이듯이 각 방정식은 이류항, 확산항, 외부 유출입항, 생물학적 반응 기작, 내부소멸/생성항으로 이루어져 있다. QUAL2E와 비교하여서는 조류의 사멸량에 의한 오염물의 증가와 하상퇴적물로부터의 오염물의 용출량이 첨가되었다.

3.2 모형보정기준

자연현상을 모의하기 위한 모형들은 보정 과정을 통해 보정되어야 하는 수많은 인자들을 포함하고 있고 이들은 관측과 모의간의 차이가 최소화 될 때까지 값이 변동된다.

모형이 실제의 대상물을 얼마나 잘 모사하고 있는지의 정도를 판단하는 수단으로 가장 많이 쓰이는 결정계수(R^2)가 있다. 결정계수는 모형에 의해 설명될 수 있는 관측자료의 총 분산의 비율을 나타낸다. 이것은

0.0에서 1.0의 범위의 값으로 1에 근접할수록 모의가 실측치를 잘 기술하고 있음을 의미한다(Hogg와 Tanis, 1993).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right]^2 \quad (6)$$

여기서 N 은 관측 회수, O_i 는 i 번째 관측치, \bar{O} 는 관측평균, P_i 는 i 번째 예측치, \bar{P} 는 예측평균이다.

관측과 모의의 상관성에 기반을 둔 이 수단은 널리 쓰이고 있음에도 불구하고 극치값에는 과도하게 민감하고 모형예측과 관측간의 비례적인 차이에는 둔감하다. 이러한 한계로 인해 모형이 현상을 왜곡되게 기술할 수 있다는 점이 지적되었다(Willmott 등, 1985; Leagates와 McCabe 1999). 이를 극복하기 위해 제시된 대안적인 적합도 평가 수단에는 상대오차를 이용하는 효율계수 E (Nash와 Sutcliffe, 1970)와 동의지표 d (Willmott 등, 1985)가 있다.

Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 효율계수 E 는

수리모형의 수행력을 평가하기 위해 사용되어오고 있다. 효율계수 E 는 음의 무한대에서 1까지 값을 가지며 1에 가까울수록 근사한 모의임을 의미한다. 특히, 모형 평가의 관점에서 효율계수는 결정계수보다 관측치와 예측치의 평균과 분산의 차이에 민감하다.

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

Willmott 등(1985)은 상관성에 기초한 수단이 관측과 예측치의 평균과 분산의 차이에 덜 민감한 점을 극복하기 위해 동의지표 d 를 제안하였다.

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8)$$

$$= 1.0 - N \frac{MSE}{PE}$$

여기서 $MSE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2$ 는 평균제곱오차, $PE = \sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2$ 는 잠재적인 오차(potential error)로 각 관측과 모의값의 쌍

들에서 $(O_i - P_i)^2$ 의 최고값이다. 동의지표는 0.0에서 1.0까지 변하고 높은 값은 관측과 모의간에 더 나은 동이가 있음을 나타낸다. 효율계수와 동의지표가 결정계수에 비해서 향상되긴 하였지만 제곱차 때문에 극치에 대해서는 과도하게 민감하다.

4. 모형의 적용과 고찰

4.1 대상하천 유역

김해시 용덕천은 유역면적이 16.06km², 유역평균경사는 9.49%의 약한 경사이고, 전체 유로 연장은 5.4km 이다. 유역내에 포함된 인구수는 4,102명, 경작지 면적은 0.0456km², 축산 농가수는 194가옥이다. 하천을 따라 10개의 지류가 있고, 이곳을 통해 생활하수와 농경폐수가 유입되고 있다. 그러나 파악되지 않거나 지도상에 나타나지 않은 농업용수로의 취수와 비점오염원의 유입이 있어 모의의 불확실성 증가의 한 요인이 되고 있다.

대상유역을 지류의 유입으로 유량의 변화가 나타나는 지점과 하천의 형상이 크게 변하는 지점을 고려하여 수리학적 특성이 비슷한 구간으로 나누어, 그림 3에서 보듯이 20개의 제어체적을 구성하였다. 모의의 입력자료로 각 지류의 유입 유량과 오염물의 농도를

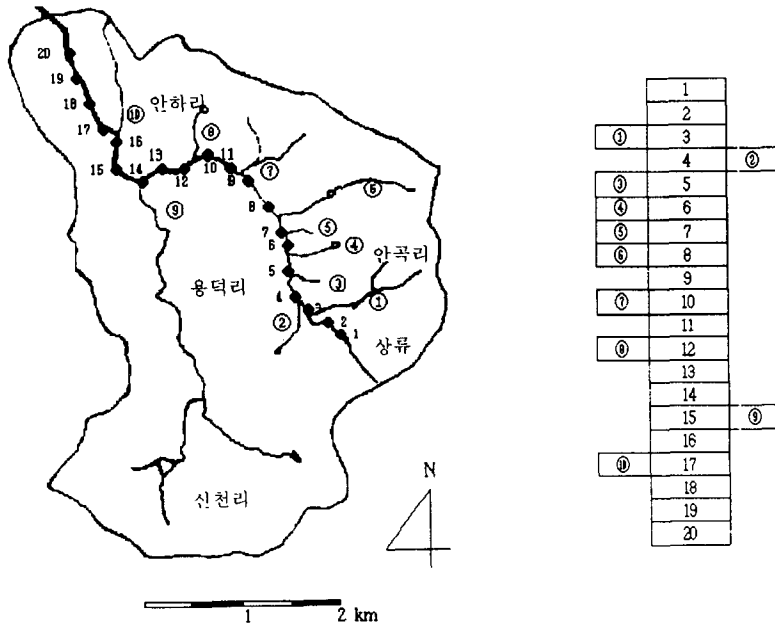


그림 3. 대상하천의 지형도(①~⑩은 지류, 1~20은 제어체적으로 나눈 구간)

표 2. 대상유역의 유량과 단면 자료

구간번호	구간길이 (m)	유 량(m ³ /sec)						단면적(m ²)		
		3월(1)	3월(2)	3월(3)	3월(4)	5월	7월	3월	5월	7월
1		0.0247	0.019	0.0178	0.02148	0.0053	0.00125	0.0378	0.0106	0.025
3	518.2	-	-	-	-	-	0.01824	-	-	0.096
4	719.0	-	-	-	-	0.0127	0.02462	-	0.0515	0.1065
5	944.8	-	-	-	-	0.0108	0.01925	-	0.0931	0.0367
6	1151.8	-	-	-	-	0.0055	0.00964	-	0.0660	0.1927
7	1378.1	0.077	0.083	0.0848	0.0901	0.0563	0.02262	0.274	0.3015	0.1840
8	1586.1	-	-	-	-	0.0183	-	-	0.04901	-
11	2173.7	0.113	0.085	0.1154	0.1133	0.0100	0.04880	0.387	0.1250	0.1632
14	2705.1	-	-	-	-	0.0131	-	-	0.0795	-
17	3331.3	-	-	-	-	0.0166	0.39775	-	0.0484	0.9823
20	3988.6	0.312	0.363	0.3177	0.3413	0.0687	0.09941	0.797	0.1494	0.4244
본류합류점	5432.9	0.399	0.337	0.3433	0.3624	0.04966	-	0.227	0.0758	-

- : 결측치

표 3. 모형의 보정을 위해 측정된 수질자료(3월)

구간 번호	조류 (mg/l)	BOD (mg/l)	유기인 (mg/l)	무기인 (mg/l)	유기질소 (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	온도 (°C)
1	0.01364	2.2	0.95	0.076	2.568	0.0	0.0	1.358	11.19	11.1
3	0.0113	1.4	0.62	0.049	0.0	0.0	0.0	1.656	9.99	10.8
7	0.01459	1.6	0.78	0.024	3.362	0.0	0.0	2.360	9.29	11.6
11	0.01342	1.45	0.55	0.038	4.482	0.0	0.0	2.626	9.09	11.4
14	0.01438	1.95	0.82	0.051	5.039	0.284	0.017	2.715	8.79	12.2
20	0.01246	3.65	1.10	0.041	5.506	2.104	0.134	2.698	7.99	13.6
본류합류점	0.01363	3.15	0.99	0.021	6.867	2.471	0.761	3.115	8.39	13.5

- : 결측치

표 4. 모형의 검증을 위해 측정된 수질자료(7월)

구간 번호	조류 (mg/l)	BOD (mg/l)	유기인 (mg/l)	무기인 (mg/l)	유기질소 (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	온도 (°C)
1	0.0125	0.252	0.650	0.000	4.217	0.239	0.084	1.648	7.40	18.9
3	0.0119	0.554	0.552	0.000	4.320	0.235	0.082	1.166	11.0	19.2
4	0.0108	1.359	0.997	0.000	3.731	0.288	0.236	3.294	6.5	20.1
5	0.0113	1.910	0.368	0.871	5.240	2.301	0.136	0.822	6.6	20.0
6	0.0125	3.171	0.746	0.000	4.435	0.246	0.121	1.763	6.0	21.5
7	0.0119	2.466	1.062	0.000	3.833	0.257	0.112	3.602	6.6	19.6
8	0.0109	0.755	0.981	0.000	4.101	0.452	0.292	2.641	6.7	19.3
11	0.0146	5.940	2.453	0.080	0.427	9.171	0.890	3.087	6.0	21.1
17	0.0157	5.688	1.680	0.085	3.323	2.272	1.347	3.620	6.3	21.2
20	0.0157	5.738	1.566	0.021	3.614	1.926	0.941	3.383	7.2	20.8
본류합류점	0.0162	5.336	2.553	0.095	0.018	9.070	0.962	3.597	6.4	20.8

사용하였는데, 이를 위한 유량과 수질자료는 99년 3월에 4회, 5월 1회, 7월 1회의 실측을 통해 획득하였다. 유량은 하천폭을 일정한격으로 나누어 유속을 측정하고 하천측량을 실시하여 단면과 유량을 산출하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 유량은 하천 길이를 따라 증감하는 어떠한 경향을 발견하기는 힘들다. 이는 이취수를 명확하게 알 수 없는 농업유역의 특성에 의한 것이다.

4.2 모형 보정 및 검증

실측자료를 적용하여 모형에 포함된 각종 반응계수를 추정하는 보정 작업과 보정된 반응계수의 적용성을 검증하는 작업이 수행되었다. 99년 3월의 4회 실측치를 사용하여 반응계수를 추정하였고 추정된 계수와 7월의 자료를 사용하여 검증을 수행하였다. 표 3과 4

에서 알 수 있듯이 3월의 경우 자류가 없는 곳이 있어 7월과 비교하여 관측에서 제외된 구간이 있었다. 그림 3의 18, 19, 20번 지점에서의 모의결과를 관측치와 비교하였다.

민감도 분석을 통해 반응계수들이 수질항목에 미치는 영향을 분석한 결과 각 수질항목은 전반적으로 그들의 분해계수에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 4는 각 반응계수에 대한 수질항목들의 변화정도를 표준화된 잔차로 나타내었다. 조류의 경우 성장속도, BOD는 분해속도, 유기인은 분해속도, PO₄는 유기인의 분해속도, 유기질소는 분해속도, 암모니아성 질소는 유기질소의 분해속도, 아질산성 질소는 암모니아성 질소의 산화속도, 질산성 질소는 아질산성 질소의 산화속도, 용존산소는 재포기 계수, 하상산소요구율에 민감하였다.

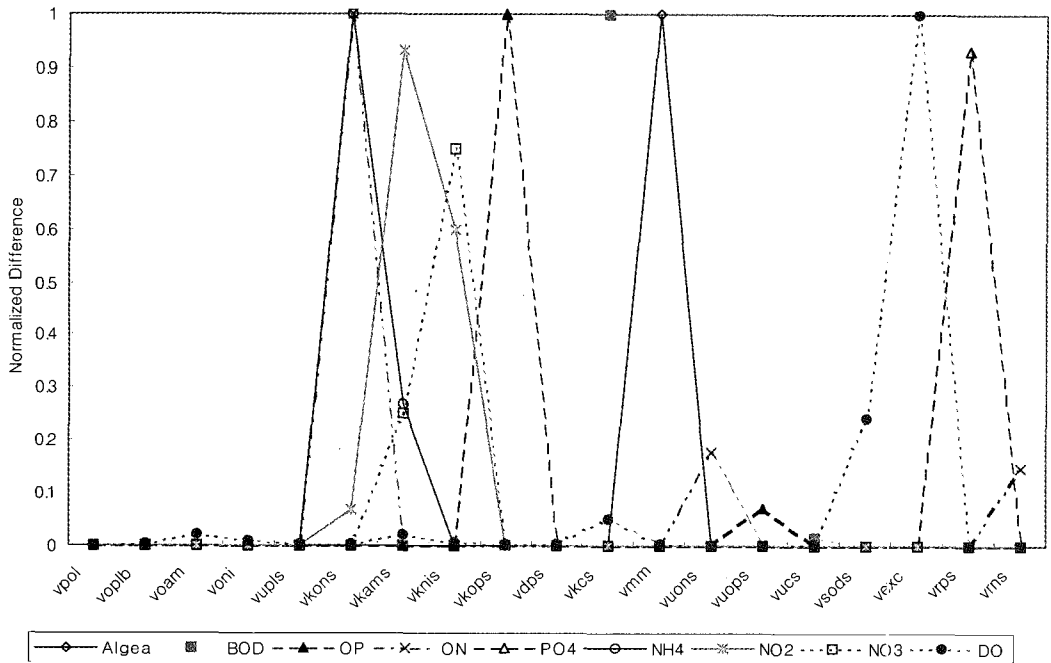


그림 4. 민감도 분석결과

(Algae : 조류, BOD : 생물학적 산소 요구량, OP : 유기인, ON : 유기질소, PO₄ : 무기인, NH₄ : 암모니아성 질소, NO₂ : 아질산성 질소, NO₃ : 질산성 질소, DO : 용존산소, VOPL : 조류의 광합성에 의한 산소의 생산율, VOPLB : 조류의 호흡에 의한 산소의 소모율, VOAM : 암모니아성 질소의 산화에 의한 산소의 소모율, VONI : 아질산성 질소의 산화에 의한 산소의 소모율, VUPLS : 조류의 침강속도, KONS : 유기질소의 분해속도, VKAMS : 암모니아성 질소의 분해속도, VKNIS : 아질산성 질소의 분해속도, VKOPS : 유기인의 분해속도, VDPS : 조류의 사멸속도, VKCS : BOD 분해속도, VMM : 조류의 성장속도, VUONS : 유기질소의 침강속도, VUOPS : 유기인의 침강속도, VUCS : BOD 침강속도, VSODS : 하상산소요구속도, VRPS : 하상 인의 용출속도, VRNS : 하상 질소의 용출속도)

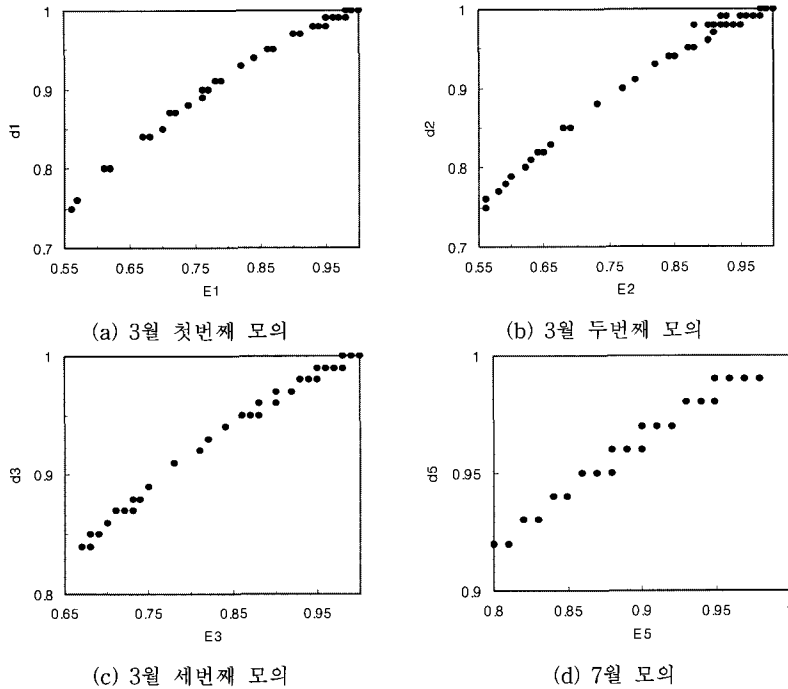


그림 5. BOD에 대한 효율계수와 동의지표의 상관관계(E: 효율계수, d: 동의지표)

표 5. 적정반응계수의 범위

반 응 계 수	QUAL2E		SSWQ		최적반응계수
	최소값	최대값	최소값	최대값	
조류의 침강속도(1/day)	0.15	1.83	0.13	1.5	1.0
조류의 성장속도(1/day)	1.0	3.0	0.8	2.4	1.5
조류의 사멸속도(1/day)	0.05	0.5	0.7	1.3	1.0
BOD 분해속도(1/day)	0.02	0.34	0.02	2.22	1.5
BOD 침강속도(1/day)	-0.36	0.36	-0.29	0.29	0.05
유기인 분해속도(1/day)	0.01	0.7	0.01	0.5	0.3
유기인 침강속도(1/day)	0.001	0.1	0.001	0.08	0.04
유기질소 분해속도(1/day)	0.02	0.4	0.02	0.4	0.2
유기질소 침강속도(1/day)	0.001	0.1	0.001	0.08	0.04
NH ₄ 의 분해속도(1/day)	0.1	1.0	0.01	0.27	0.15
NO ₂ 의 분해속도(1/day)	0.2	2.0	0.05	1.8	1.2
조류 광합성시 산소생산율(mgO/mg Algae)	1.4	1.8	1.4	1.8	1.6
조류 호흡시 산소감소율(mgO/mg Algae)	1.6	2.3	1.6	2.3	2.0
NH ₄ 산화시 산소소모율(mgO/mg N)	3.0	4	3	4	3.5
NO ₂ 산화시 산소소모율(mgO/mg N)	1.0	1.14	1.0	1.14	1.1
하상 산소 요구율(VSOD)(mgO/m ² day)	0.07	7.0	0.05	4.14	2.0
하상에서 인의 용출속도(mgN/m ² day)	*	*	0.01	0.1	0.05
하상에서 질소의 용출속도(mgP/m ² day)	*	*	0.01	0.1	0.05

* 범위가 따로 정해지지 않음.

난수를 발생시켜 반복적으로 모의된 결과들에 대해서 효율계수와 동의지표를 계산하여 적정 반응계수를 추정하였다. QUAL2E의 반응 계수 범위를 참고하여 몬테카를로 시뮬레이션으로 수질반응 계수들을 무작위 발생시켜 모의를 수행하고, 각 모의 결과에 대해 효율계수와 동의지표가 모두 70% 이상인 경우에 대해서 반응계수의 범위를 결정하였다. 최적 반응계수는 효율

계수와 동의지표가 가장 높은 경우의 값으로 정하였다. 그림 5는 19번 지점에서 BOD에 대해서 모의한 결과의 효율계수와 동의지표를 도시한 것이다. 이 둘은 선형상관은 아니나 일정한 상관을 가진다. 효율계수는 음의 값부터 1까지, 동의지표는 0부터 1까지의 범위 내에서 움직이는데 0.7 이하의 낮은 값을 갖는 반응계수들은 적정 반응계수 추정에서 제외시켰다.

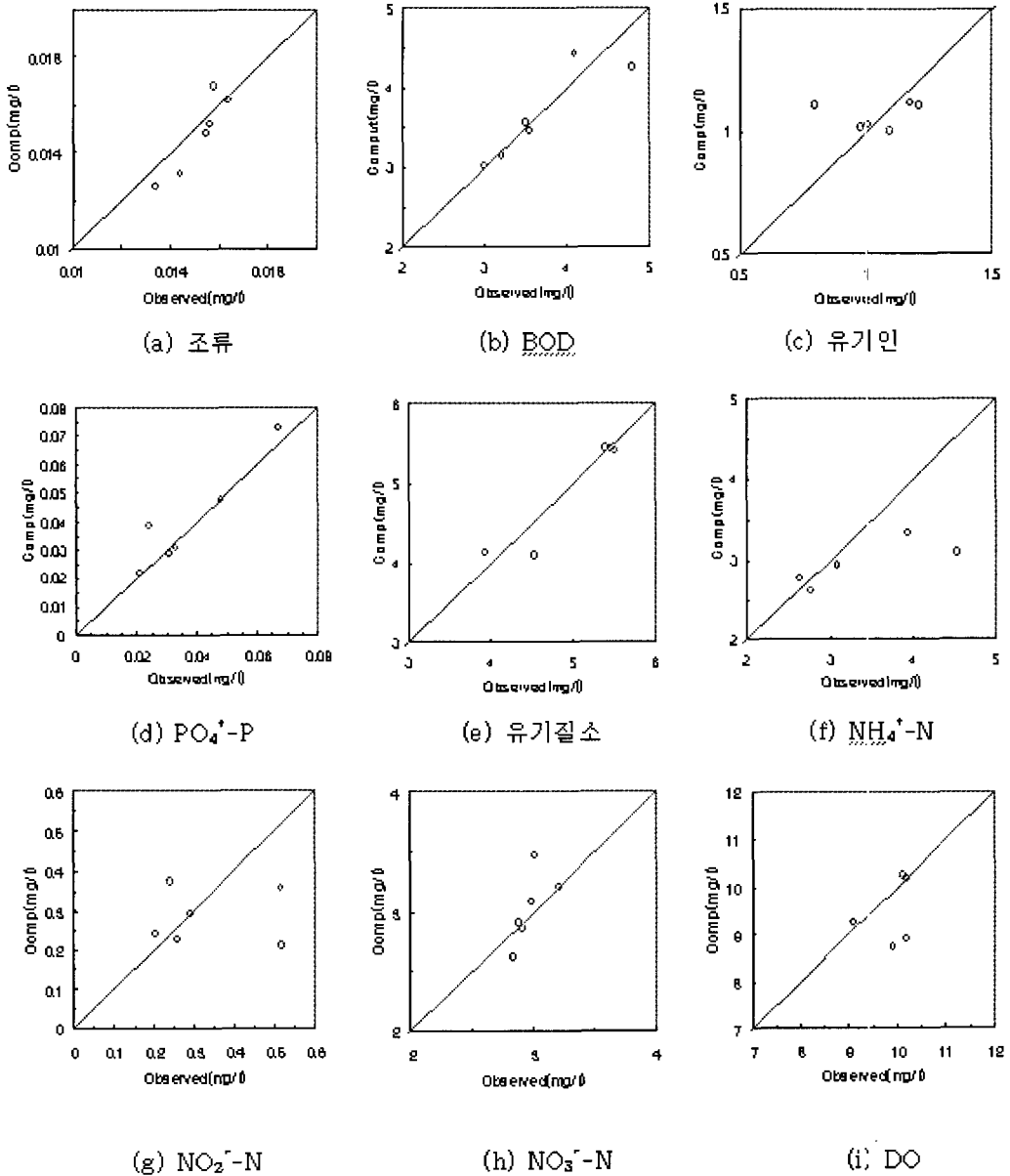


그림 6. 모형의 보정결과 ('99년 3월(4))

표 5는 효율계수와 동의지표가 70% 이상인 경우의 반응계수의 범위를 최대값과 최소값으로 나타내었다. 여기서 최적반응계수는 효율계수와 동의지표가 가장 높을 때의 반응계수 값이다. 결정된 반응계수로 '99년 3월에 세 차례에 걸쳐 측정된 수질 자료를 이용하여 모형을 보정하였고 3월의 네 번째 수질자료와 7월의 실측자료를 이용하여 모형을 검증하였다.

그림 6의 보정결과는 관측치와 모의치가 근접하게 일치하는 것으로 보인다. 그러나 그림 7의 검증 결과는 그림 6에 비해 관측과 모의의 일치정도가 낮음을 알 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 앞에서 지적하였듯이 유역으로 유출입되는 유량과 오염물의 양을 정확히 알 수 없는 것에서 기인하는 오차와 실측상의 오류에서 기인하는 것으로 볼 수 있다. 이를 극

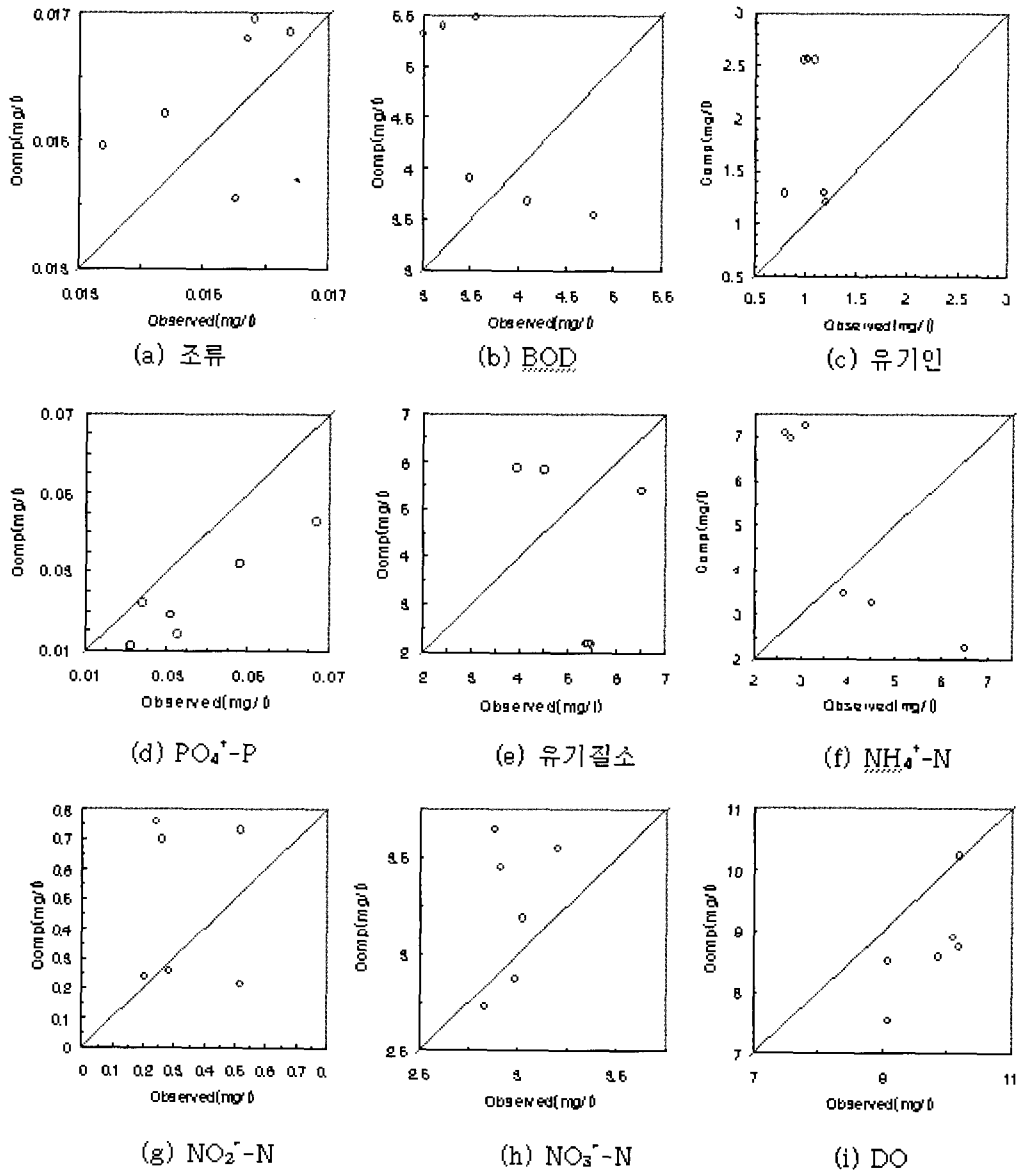


그림 7. 모형의 검증결과 ('99년 7월)

복하기 위해서는 유역의 오염원과 유역 특성에 대한 자세한 조사가 수반되어야 할 것으로 보인다.

5. 결 론

제어체적법을 이용하여 우리나라 농촌 소하천에 적합한 모형을 개발하여 이를 김해시 한림면의 용덕천 유역에 적용하였다. 반응계수에 대한 수질항목들의 민감도 분석을 실시하여 14개의 추정 반응계수를 선정하였다. 조류의 성장속도가 조류 농도에 주로 영향을 미치고, 질소 및 인의 순환 요소들은 각 요소들의 분해속도와 하상으로부터의 용출속도, BOD 및 DO는 BOD 분해속도, 재포기 계수, 하상산소요구를 등에 민감한 것으로 나타났다. 모형의 평가 수단으로 효율계수와 동의지표를 도입하여, 계수의 적정 범위를 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 산정하였다. 모형의 보정 과정에서 추정된 반응계수들을 검증시에 적용한 결과 모의와 관측의 일치정도가 낮았다. 이는 소하천은 큰 하천에 비해 유량의 변화나 오염물의 유입 등에 대해 민감한 반응을 보이기 때문인 것으로 보인다. 보다 정확한 수질의 모의를 위해서는 강우 사상의 영향, 지형에 대한 조사, 장기간 동안의 수질 자료들이 축적되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농림부의 '농어촌지역 수질 환경 개선을 위한 복합자동 연속측정 시스템 및 그의 응용기술 개발의 세부과제와 부산대학교 기성회재원 연구비의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 류재근, 신동석, 양형재, 박제철, 권경수 (1998). 낙동강 중장기 오염부하량 저감대책 -모델검증 및 보완방안. 수질연구부 보고서, 국립환경연구원
- 박석순 (1997). "하천 수질 모델의 원리와 활용 방법." 수질모델 Workshop 교재, 한국수자원 공사 수자원 연구소, pp. 33-49.
- Ang, A.H-S., and Tang, W.H. (1975). *Probability concepts in engineering planning and design*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Donigan, A.S., and Johanson, R.C. (1993). *Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF) : Users manual for release 10* EPA/600/R-93/174, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Brown, L.C., and Barnwell, T.O. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and user manual*. EPA/600/3-87/007, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Hogg, R.V., and Tanis, E.A. (1993). *Probability and statistical inference*. Macmillan Pub., Inc.
- Legates, D.R., and McCabe, Jr. G.J. (1999). "Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 233-241.
- Munson, B.R., Young, D.F., and Okiishi, T.H. (1996). *Fundamentals of fluid mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Park, S.S., and Lee, Y.S. (1996). "A multiconstituent moving segment model for the water quality prediction in steep and shallow streams." *Ecological Modelling*, Vol. 89, pp. 121-131.
- Thomann, R.V., and Mueller, J.A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. Haper Collins.
- Streeter, H.W., and Phelps, E.B. (1925). A study of the pollution and natural purification of the Ohio River, III, factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration, U.S. Pub. Health Serv., Pub. Health Bulletin NO. 146
- William, H.P. (1992). *Numerical recipes in FORTRAN 2nd edition*. Cambridge University Press.
- Willmott C.J., Ackleson, S.C., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. and Rowe, C.M. (1985).

Statistics for the evaluation and comparison of models, J. of Geophysical Research, Vol. 90, NO. C5, pages 8995-9005, Sep. 20

기 호

아래첨자 i : i 번째 제어체적

아래첨자 IN : 외부에서 들어오는 오염물

t : 시간 [T]

V : 부피 [L^3]

Q : 유량 [L^3/T]

A : 단면적 [L^2]

A_B : 바닥면적 [L^2]

D : 확산계수 [L^2/T]

L_h : 수평길이 [L]

L_v : 수직길이 [L]

K_x : x 의 분해속도 [day^{-1}]

U_x : x 의 침강속도 [day^{-1}]

P : 조류의 농도 [M/L^3]

μ_p : 조류의 성장속도 [day^{-1}]

D_p : 조류의 사멸속도 [day^{-1}]

BOD : CBOD 농도 [M/L^3]

OP : 유기인 농도 [M/L^3]

F_{pb} : 조류중 인의 비율

IP : 용존 무기인(PO_4) [M/L^3]

V_{RP} : 하상에서 인의 용출속도 [$\frac{M-O}{L^2 day}$]

R_{IP} : 전체 인중 무기인의 비율 [$\frac{M-IP}{M-P}$]

E_p : 조류의 배설속도 [day^{-1}]

ON : 유기질소의 농도 [M/L^3]

V_{RN} : 하상 질소의 용출속도 [$\frac{M-O}{L^2 day}$]

V_{RC} : 하상 탄소의 용출속도 [$\frac{M-O}{L^2 day}$]

F_{pm} : 조류중 질소의 비율 [$\frac{M-P}{M-Algae}$]

R_{AM} : 전체 질소중 암모니아성 질소의 비율
[$\frac{M-N}{M-N}$]

AM : 암모니아성 질소의 농도 [M/L^3]

NI : NO_2 의 농도 [M/L^3]

NA : NO_3 의 농도 [M/L^3]

DO : 용존산소 농도 [M/L^3]

R_{AR} : 재포기 계수 [day^{-1}]

V_{SOD} : 하상산소요구를 계수 [$\frac{M-O}{L^2 day}$]

F_p : 조류의 광합성에 의해 생산되는 산소량
[$\frac{M-O}{M-Algae}$]

F_r : 조류의 호흡에 의해 소모되는 산소량
[$\frac{M-O}{M-Algae}$]

F_C : 탄소의 산화에 소모되는 산소 [$\frac{M-O}{M-C}$]

F_{AM} : 암모니아성 질소의 산화에 소모되는 산소
[$\frac{M-O}{M-N}$]

F_{NI} : 아질산성 질소의 산화에 소모되는 산소
[$\frac{M-O}{M-N}$]

(논문번호:99-076/접수:1999.09.15/심사완료:1999.11.11)