

습지의 수질관리를 위한 연속교반탱크반응기 모델의 적용

Application of Continuous Stirred Tank Reactor Model for Water Quality Control and Management in Wetland Treatment

김 경 섭* / 안 태 진** / 김 민 수***

Kim, Kyung Sub / Ahn, Taejin / Kim, Min Su

Abstract

Continuous stirred tank reactor(CSTR) model which can be applied to control and management of the surface flow wetland is developed to simulate the water quality in this research. The model solution is obtained from the optimization model using the least-squares and 4th-order Runge-Kutta methods. The model is applied to simulate BOD and TSS in the wetland database of U.S. EPA, in which the hydraulic and water quality data are enough and the number of pond is just one for simple analysis of running results. The model is tested in two different cases, one constant volume case and another constant volume and flow rate case considering only reaction term, mass flux term and both reaction and mass flux terms respectively. It is found that the model simulates the real water quality very well with both reaction and mass flux terms rather than only reaction term and the settling velocity of TSS becomes 0.3~0.4 m/d. The model can be applied in wetlands treatment efficiently.

keywords : wetland, CSTR model, mass balance, optimization model, least-squares method

요 지

본 연구에서는 지표흐름 습지의 수질관리를 위하여 습지 내 오염물질을 적절히 모의할 수 있는 연속교반탱크반응기(CSTR) 모델을 구축하였다. 이 모델은 4차 Runge-Kutta법을 사용하고, 실측치와 계산치의 차이를 최소화 하는 최적화 기법으로 해를 구하며, 미국 EPA 습지 데이터베이스에 수록된 자료중 수질 및 수리자료가 충분하며, 분석이 용이한 하나의 수생대를 갖는 습지를 선택하여, 수질항목중 관심도가 높은 BOD, TSS (Total Suspended Solid)의 모의에 적용하였다. 습지의 체적이 일정할 경우와 체적 및 유량이 일정할 경우 각각에 대해 반응속도상수만을 고려할 경우, 물질흐름양만을 고려할 경우 및 반응속도상수와 물질흐름양 모두를 고려할 경우로 나누어 모의를 실시하였다. 모의 결과 기존의 반응속도상수만을 고려한 경우보다 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려하는 것이 실제현상을 잘 나타냈으며, 습지의 TSS 침강속도는 0.3~0.4 m/d의 값을 나타내는 것으로 파악되었다. 이 모델은 습지의 수질관리에 적절히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 습지, CSTR 모델, 물질수지, 최적화 모델, 최소자승법

* 국립환경대학교 환경공학과 교수

Professor, Dept. of Envir. Engrg., Hankyong National University, Ansong-si, Kyonggi 456-749, Korea
(e-mail: kskim@hknu.ac.kr)

** 국립환경대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Hankyong National University, Ansong-si, Kyonggi 456-749, Korea

*** 국립환경대학교 환경공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Envir. Engrg., Hankyong National University, Ansong-si, Kyonggi 456-749, Korea

1. 서론

환경은 자체 정화능력이 있어 어느 정도 외부 환경 압력에 견딜 수 있으나 환경압력이 자정능력을 초과하면 환경파괴 현상이 발생한다. 환경파괴의 하나인 오염된 하천 및 호소는 음용수로서의 가치를 상실하여 음용수 수질기준을 만족하기 위한 수처리 비용의 과다를 유발하며, 농업용수 및 공업용수 등의 수자원 이용에 적절치 않아 수확량 및 생산성의 감소를 초래하고 있다.

습지는 과거 수십 년 동안 도시 하수처리, 광산 배수처리, 도시 빗물처리, 농지 유출수처리, 매립지 침출수처리, 농업 폐수처리 등 수계의 수질보전을 위하여 다양하게 이용되어 왔다. 수질관리를 위한 습지 조성은 수문, 습지구조, 오염부하, 토양, 식생 등 다양한 요소가 고려되며 습지내 오염물질의 변화를 적절히 파악하는 것은 습지운영 및 관리에 매우 중요하다(Mitsch and Jorgensen, 2004; Mitsch and Gosselink, 2000; 양재삼과 정주영, 2002). 습지는 형태에 따라 자연습지(Natural Wetland), 지표흐름습지(Surface Flow Wetland), 지하흐름습지(Subsurface Flow Wetland)로 구분하며 지표흐름습지 및 지하흐름습지는 지수모델 및 통계모델 등으로 습지내 오염물 변화를 파악한다. 지수모델은 1차 반응속도상수를 사용하는 기법(Reed *et al.*, 1995; EPA, 1993), 배경농도를 반영하여 1차반응속도상수를 적용하는 기법(Kadlec and Knight, 1996; 남귀숙 등, 2005), BOD 모의에 고흡물 부분과 용존 부분을 분리하여 1차 반응속도상수를 적용하는 기법(EPA, 1999) 등이 있으며, 습지내 오염물 농도를 파악하기 위하여 일반화된 수질모의 모델을 이용하기도 한다. 통계모델은 일반적으로 유입농도, 수리 부하율 등을 매개변수로 하여 회귀식을 적용한다(윤춘경 등, 2000; 최지용, 2002).

본 논문에서는 습지 내에서 다양하게 변하는 오염물질의 실제적인 모의가 가능하도록 습지를 완전혼합이 일어나는 반응기로 가정하여, 기존에 적용된 1차 반응속도상수 이외에 습지내 수중생물 및 수생식물의 성장에 의해 영향을 받는 오염물질의 변화를 파악할 수 있는 물질흐름 및 침강 등의 오염물 기작을 고려한 연속교반탱크반응기 모델을 구축하여 이를 실제 습지에 적용하였다. 구축된 모델은 상미분방정식의 형태로 나타나며 해를 구하기 위하여 정확성이 입증된 4차 Runge-Kutta 법을 적용하였다(Chapra, 1997). 실측치와 계산치의 차이를 최소화하기 위하여 오차 제곱의 합이 최소가 되는 최적화 모델을 구성하여 습지 내 매개변수를 파악하였으며 이를 통하여 습지의 유출수 농도를 구하였다. 구

축된 연속교반탱크반응기 모델의 적용성을 파악하기 위하여 미국 EPA 습지 데이터베이스에 수록된 자료를 검토하였으며, 공개된 자료중 수질 및 수리자료가 충분하며, 분석이 용이한 하나의 수생대를 갖는 켄터키주 Benton시에 설치된 Benton Cattail 습지, 남캐롤라이나주 Central시에 설치된 Central Slough 습지, 캐나다 온타리오주 Cobalt시에 설치된 Cobalt 1 습지를 선택하였고, 수질항목중 관심도가 높은 BOD 및 TSS(Total Suspended Solid)의 습지내 변화를 파악하였다. 연속교반탱크반응기 모델 및 모델 적용은 다음과 같다.

2. 연속교반탱크반응기 모델

지표흐름 습지 내에서 오염물질의 변화는 주로 수중생물의 증식, 수생식물의 성장 및 퇴적에 의해 영향을 받는다. BOD의 경우 2차 처리수 이상의 물이 습지로 유입할 경우 침강 BOD를 무시할 수 있으므로 전자의 두 기작만을 고려하여 물질수지방정식을 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{d(Vc)}{dt} = W(t) - Qc - kVc - JA_s \quad (1)$$

여기서 t 는 시간 [T], V 는 체적 [L^3], c 는 농도 [ML^{-3}], $W(t)$ 는 유입부하량 [MT^{-1}], Q 는 유량 [L^3T^{-1}], k 는 1차 반응속도상수 [T^{-1}], J 는 물질흐름양 [$ML^{-2}T^{-1}$] 및 A_s 는 수표면적 [L^2]이다. 습지 체적 V 는 Eq. (2)로 파악가능하다.

$$\frac{dV}{dt} = Q_m - Q_{out} + G_{in/out} + P - ET \quad (2)$$

여기서 Q_m 은 유입유량 [L^3T^{-1}], Q_{out} 은 유출유량 [L^3T^{-1}], $G_{in/out}$ 는 지하수 유입/유출량 [L^3T^{-1}], P 는 강수량 [L^3T^{-1}] 및 ET 는 증발산량 [L^3T^{-1}]이다. TSS는 주로 침강에 의한 영향으로 정량화할 수 있으며 물질수지방정식은 Eq. (3)과 같다.

$$\frac{d(Vc)}{dt} = W(t) - Qc - vA_s c \quad (3)$$

여기서 v 는 침강속도 [LT^{-1}]이다. 상미분방정식 Eqs. (1)과 (2) 또는 (2)와 (3)을 연립하여 풀면 오염물질 농도를 구할 수 있으며, 유량 및 유입부하량은 시간에 따라 변하므로 연립방정식의 정확해를 구하기 힘들다. 이를 해결하기 위하여 수치해법이 필요하며 정확성이 입증된 4차 Runge-Kutta 법이 적용가능하다.

습지의 오염물질 농도변화는 BOD의 경우 매개변수 k 및 J , TSS의 경우 v 에 따라 결정되며 대상습지에 적합한 매개변수들은 최적화 모델을 구성하여 파악하였다. 최적화 모델은 적용이 간편한 최소자승법을 적용하여 실측치와 계산치의 차이를 최소화 하는 함수를 목적함수로 하였으며 Eq. (4)와 같이 주어진다.

$$\min z = \sum_{j=1}^L (\epsilon_j)^2 \quad (4)$$

여기서 j 는 실측농도, L 은 실측농도의 수, ϵ 는 실측치와 계산치의 오차이며 k , J 및 v 는 양의 값을 갖는 제약조건을 갖는다. 최적화 모델의 해는 다양한 기법을 사용하여 구할 수 있으나, 본 논문에서는 선형 및 비선형 모델에 광범위하게 사용되는 Microsoft Excel의 해 찾기 기능을 사용하여 구하였다.

3. 모델 적용

3.1 대상 습지

지표흐름 습지의 수질정화능력을 파악하기 위하여 미국 EPA 습지 데이터베이스(EPA, <http://www.epa.gov/owow/wetlands/watersheds/cwetlands.html>)에 수록된 자료를 활용하였다. 공개된 자료는 월별 자료이며 자료 가운데 수질 및 수리자료가 충분하며, 분석이 용이한 하나의 수생대를 갖는 습지를 선택하였다. 켄터키주 Benton시에 설치된 Benton Cattail 습지, 남캐롤라이나주 Central시에 설치된 Central Slough 습지, 캐나다

온타리오주 Cobalt시에 설치된 Cobalt 1 습지가 이에 해당하여 이를 선정하였으며(Table 1) 수질항목중 관심도가 높은 BOD, TSS(Total Suspended Solid)의 습지내 변화를 파악하였다. 습지의 수로화 방지를 위하여 습지의 길이/폭 비는 일반적으로 10이하를 권장한다(Mitsch and Jorgensen, 2004). Benton Cattail 습지 및 Central Slough 습지는 이를 만족하나, Cobalt 1 습지는 이를 만족하지 않는 것으로 나타났다.

3.2 BOD 분석

3.2.1 Benton Cattail

4차 Runge-Kutta법을 사용하고($\Delta t = 1$ 일) 최소자승법에 의한 Benton Cattail 습지의 유출농도를 구했으며 이를 실측치와 비교하였다. 습지의 강우, 증발산 및 지하 유·출입수 자료가 미비하여 습지의 체적이 일정할 경우(Fig. 1)와 체적 및 유량이 일정할 경우(Fig. 2)로 나누었으며, 각각의 경우에 대하여 반응속도상수만을 고려할 경우, 물질흐름양만을 고려할 경우 및 반응속도상수와 물질흐름양 모두를 고려할 경우로 세분화하여 모의를 실시하였다. 부가적으로 Benton Cattail 습지의 경우 모니터링 기간에 수심이 일정하게 유지되고 있어 습지 체적이 일정하다고 가정할 수 있으며, 유량 또한 일정하다고 가정하는 것은 실제와는 거리가 있지만 모델의 가용성을 파악하기 위하여 적용가능하다.

반응속도상수와 물질흐름양을 함께 고려할 경우 각 매개변수의 BOD에 대한 상대적 영향정도를 파악하기 위하여 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 체적이 일정할 경우에 한하여 1차 반응속도상수 및 물질흐

Table 1. Wetlands Specification

Wetland	Depth (m)	Area (ha)	Length (m)	Width (m)	Slope (%)	Flow rate (m ³ /d)
Benton Cattail	0.25	1.5	333	44	0.1	374
Central Slough	0.25	32	1159	330	0	5372
Cobalt 1	0.15	0.09	310	3	0	49

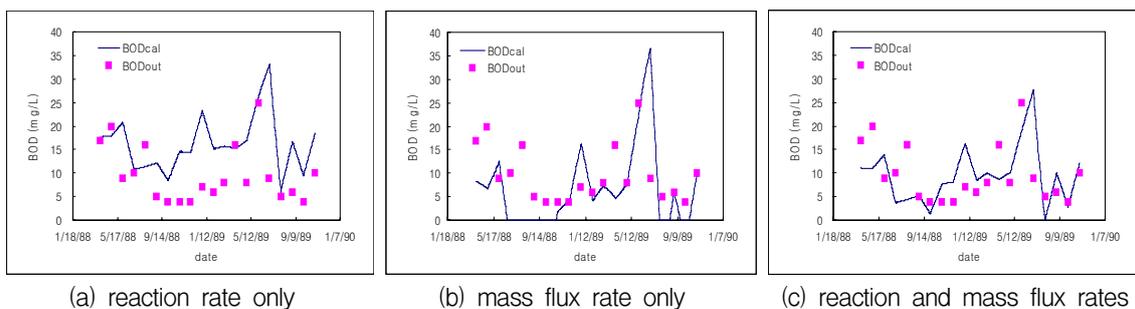


Fig. 1. BOD Concentration of Benton Cattail (constant volume)

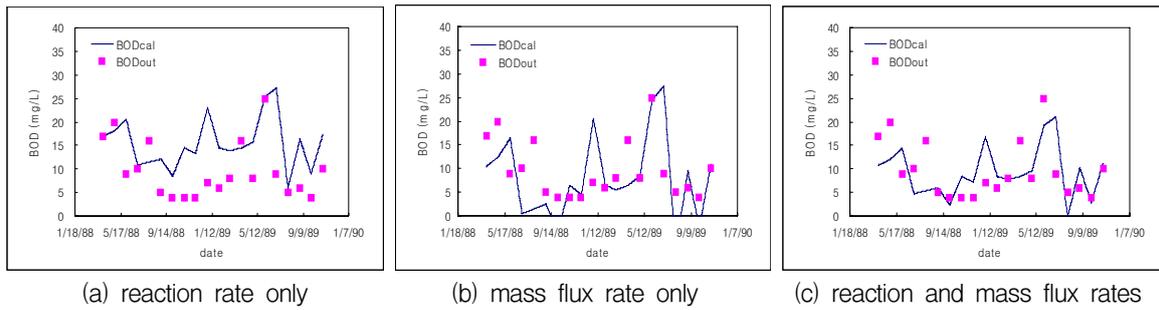


Fig. 2. BOD Concentration of Benton Cattail (constant volume & flow rate)

Table 2. Sensitivity Analysis of Benton Cattail

Measuring date	k sensitivity	J sensitivity
1988-03-31	0.104	0.117
1988-06-30	0.308	0.366
1988-09-30	0.837	0.970
1988-12-31	0.065	0.086
1989-03-31	0.127	0.153
1989-06-30	0.034	0.041
1989-09-30	0.399	0.442

를 양을 각각 $\pm 10\%$ 변화시키면서 정규화된 BOD 농도의 변화를 파악하였으며, J 가 k 보다 BOD에 더 영향을 미치는 것으로 파악되었다(Table 2).

Benton Cattail 습지의 실측치와 계산치의 차이 즉, 오차제곱의 합은 Table 3과 같다. 체적이 일정할 경우와 체적 및 유량이 일정할 경우 모두에서 반응속도상수와 물질흐름양을 함께 고려할 경우 오차가 제일 작음을 알 수 있다. 전체적으로 체적 및 유량이 일정하며 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려할 경우 오차

의 제곱이 최소이지만 실제 현상은 체적이 일정할 경우가 더욱 현실조건에 가까우므로 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려하여 체적이 일정할 경우에 적용하는 것이 적절할 것으로 파악되었다. BOD 계산치(BOD_{cal})와 BOD 실측치(BOD_{out})의 적합정도를 파악하기 위하여 체적이 일정한 경우에 대하여 BOD_{cal} 와 BOD_{out} 를 비교하여 보았다(Fig. 3). 그림에 보이듯이 (c)의 경우 즉, 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려할 때 계산치가 완전한 상관관계를 나타내는 직선상

Table 3. Sum of the Squares of the Errors (Benton Cattail)

unit : (mg/L)²

Case	Reaction rate only	Mass flux rate only	Reaction and mass flux rates
constant volume	1719.8	1669.8	914.6
constant volume & flow rate	1357.1	1133.8	683.1

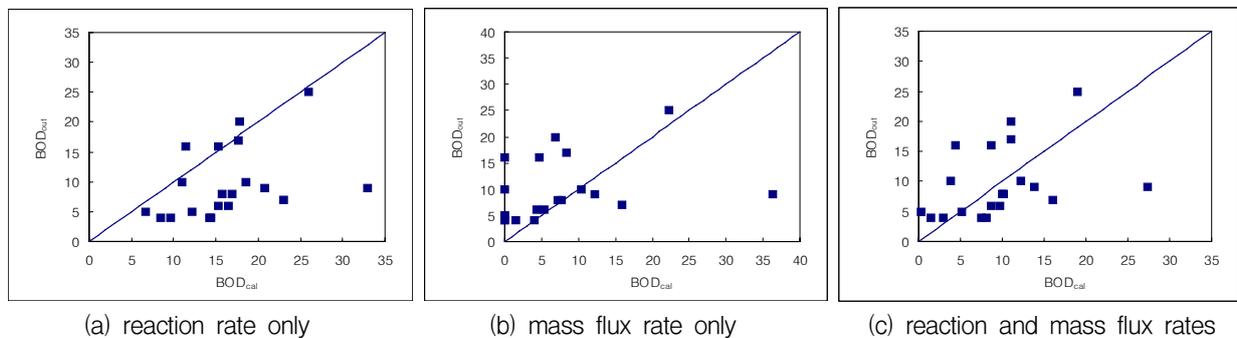


Fig. 3. Comparison between BOD Calculation(BOD_{cal}) and Measurement(BOD_{out}) in Benton Cattail (constant volume)

에 가까이 분포하는 것을 알 수 있으며, 계산치의 표준 오차($s_{BOD_{cal}/BOD_{out}}$)는 반응속도상수만 고려할 경우 9.775, 물질흐름양만 고려할 경우 9.631, 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려할 경우 7.126으로 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려할 때 제일 작은 것으로 나타났다. 일별 실측자료가 존재하는 등 자료의 대표성이 더욱 확보되면 실제적인 모의가 가능할 것으로 사료된다.

3.2.2. Central Slough

Central Slough 습지는 수심이 모니터링 기간 동안 변화하는 양상을 나타내지만 체적이 일정할 경우(Fig. 4)와 체적 및 유량이 일정할 경우(Fig. 5)로 나누어 Benton Cattail 습지와 같이 모의를 실시하였다. Benton Cattail 습지와 같이 체적이 일정할 경우와 체적 및 유량이 일정할 경우 모두에서 반응속도상수와 물질흐름양

을 다 고려할 경우 오차가 제일 작게 나타났다. Central Slough 습지는 유량변화가 심한 월자료가 다소 존재하여 유량이 일정하다고 가정하여 모의하는 것은 현실성과 거리가 있는 것으로 파악되었다.

3.2.3. Cobalt 1

Cobalt 1 습지는 수심자료가 없으며 체적이 일정할 경우(Fig. 6)와 체적 및 유량이 일정할 경우(Fig. 7)로 나누어 Benton Cattail 및 Central Slough 습지와 같이 모의를 실시하였다. Benton Cattail 및 Central Slough 습지와 같이 체적이 일정할 경우와 체적 및 유량이 일정할 경우 모두에서 반응속도상수와 물질흐름양을 다 고려할 경우 오차가 제일 작게 나타났다. Benton Cattail 및 Central Slough 습지와 다르게 전체적으로 체적이 일정하며 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려할 경우 오차 제공의 합이 최소로 나타났다.

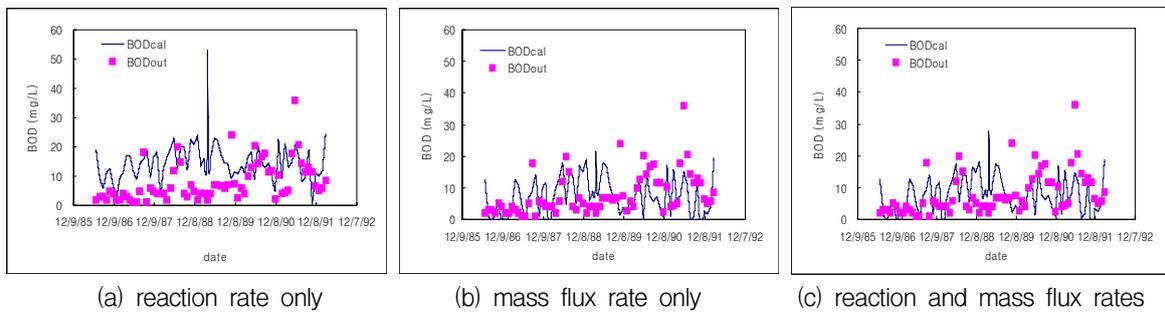


Fig. 4. BOD Concentration of Central Slough (constant volume)

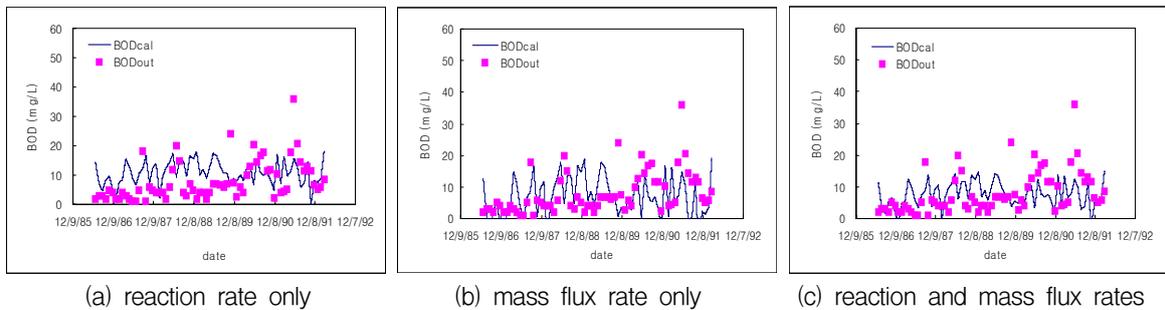


Fig. 5. BOD Concentration of Central Slough (constant volume & flow rate)

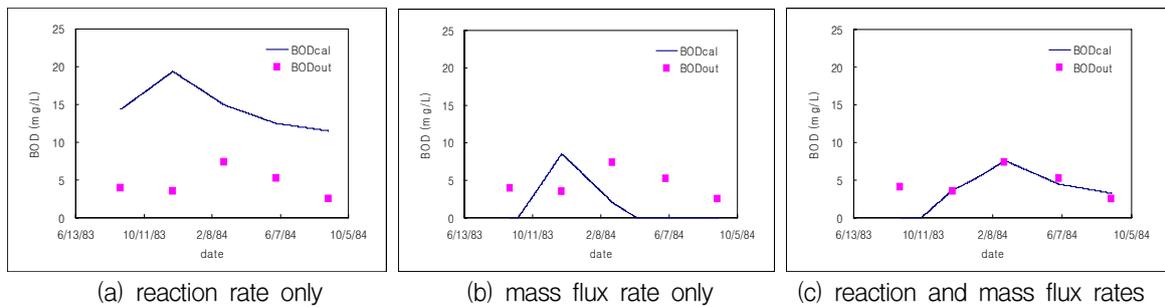


Fig. 6. BOD Concentration of Cobalt 1 (constant volume)

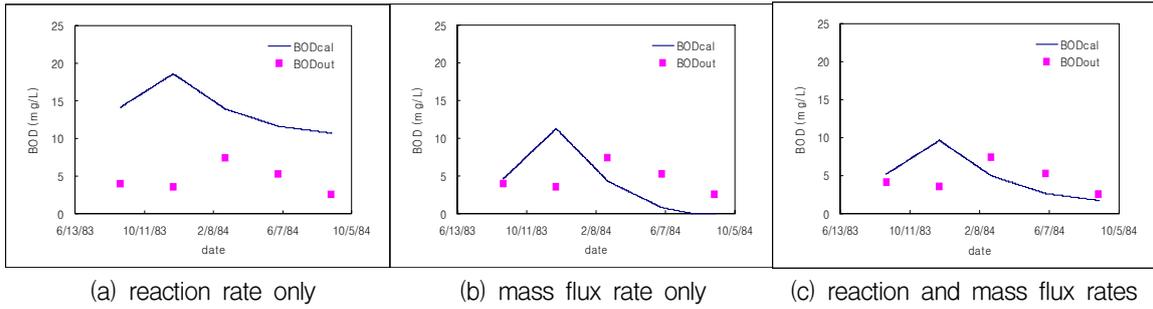


Fig. 7. BOD Concentration of Cobalt 1 (constant volume & flow rate)

체적이 일정할 경우 각 습지의 오차 제공의 함이 최소가 되는 반응속도상수 및 물질흐름양 각각의 역학계수는 Table 4와 같다. Cobalt 1 습지의 경우 반응속도상수 및 물질흐름양이 높게 추정되어 체적 및 유량이 일정할 경우의 수치를 함께 수록하였다.

3.3 TSS 분석

TSS는 침전가능한 부분과 분산부분 중 침강기작만을 고려하여 체적이 일정할 경우와 체적 및 유량이 일정할 경우에 대하여 모의하였으며 체적이 일정할 경우에 대한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에는

TSS 계산치(TSS_{cal}) 및 TSS 실측치(TSS_{out})와 함께 습지내로 유입하는 TSS(TSS_{in})를 함께 도시하였으며, 그림에 보이듯이 TSS_{out}는 습지내 오염물 기작보다 TSS_{in}에 크게 영향 받는 것으로 파악되었다. 실측치에 적용된 TSS의 침강속도는 Table 5와 같다. 침강속도는 체적이 일정하든 또는 체적 및 유량이 일정하든 상관없이 0.3~0.4m/d의 값을 나타내는 것으로 파악되었다. Benton Cattail, Central Slough, Cobalt 1 모두 점토정도의 크기를 갖는 입자로 구성된 것으로 분석되었다.

Table 4. Kinetics of BOD (constant volume)

Wetland	Reaction rate(/d)	Mass flux rate (g/m ² ·d)
Benton Cattail	1.494	7.821
Central Slough	0.098	2.695
Cobalt 1	2.438(1.457)	35.391(5.894)

note : parenthesis means the constant volume & flow rate case

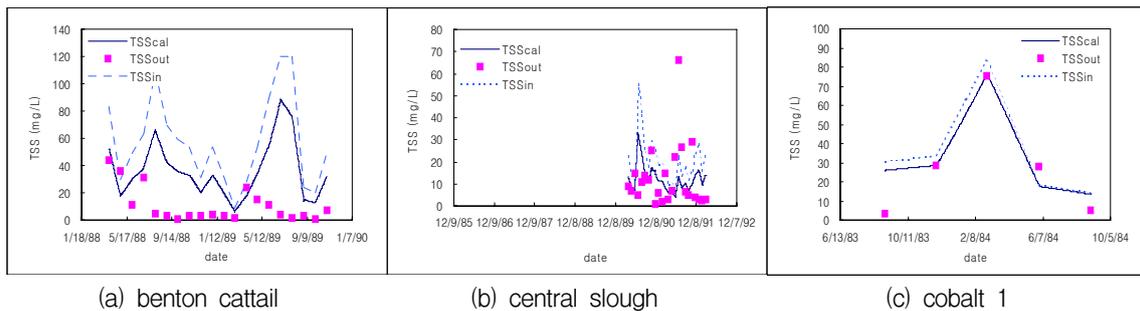


Fig. 8. TSS Concentration (constant volume)

Table 5. TSS Settling Velocity

Wetland	Settling velocity (m/d) (constant volume)	Settling velocity (m/d) (constant volume & flow rates)
Benton Cattail	0.391	0.391
Central Slough	0.312	0.394
Cobalt 1	0.371	0.352

4. 결 론

본 연구에서는 습지의 수질관리를 위하여 오염물질 거동을 파악하기 위한 연속교반탱크반응기 모델을 구축하였다. 해는 4차 Runge-Kutta법으로 구하며, 최소자승법을 활용하여 최적화된 매개변수를 파악하였다. 공개된 습지자료(Benton Cattail 습지, Central Slough 습지, Cobalt 1 습지)에 본 모델을 적용하였으며, 이를 통한 연구결과 및 장래연구방향을 서술하면 다음과 같다.

- 1) 습지의 BOD 모의 결과는 기존 논문에서 제시한 반응속도상수만을 고려할 경우보다 반응속도상수와 물질흐름량을 함께 고려할 경우 실제현상을 잘 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 BOD를 모의할 경우 반응속도상수와 물질흐름양 모두를 고려해야 적절한 수질관리를 수행할 수 있을 것으로 판단한다.
- 2) BOD 1차 반응속도상수는 체적이 일정할 경우 약 0.1~2.5/d로 파악되었으며, 이는 반응속도상수의 일반적 범위인 0.02~3.4/d안에 속하여 적절히 추정된 것으로 사료된다.
- 3) 전체적으로 습지의 체적 및 유량이 일정하며 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려할 경우 오차(실측치와 계산치의 차이) 제공의 합이 최소이지만, 체적이 일정할 경우가 더욱 현실 조건에 가까우므로 반응속도상수 및 물질흐름양 모두를 고려하여 습지 체적이 일정할 경우에 적용하는 것이 적절한 것으로 파악되었다.
- 4) 습지의 TSS 침강속도는 0.3~0.4m/d의 값을 나타내는 것으로 파악되어 점토 정도의 크기를 갖는 입자로 구성된 것으로 분석되었다.
- 5) TSS는 침전가능한 부분과 분산부분으로 분리하여 적용하면 현실성 있는 모의가 가능할 것으로 판단한다.
- 6) 습지를 완전혼합시스템으로 가정하기 어려운 경우 (길이/폭>10) 흐름을 고려한 오염물질 해석이 필요하며, 습지를 고도처리를 위하여 활용할 경우 BOD 및 TSS 이외에 영양물질인 총인, 총질소의 모의가 필요하다.
- 7) 월별자료를 활용하여 일별로 수질을 모의하는 것은 실제현상과 거리가 있으므로 일별 유량(강수량, 증발산량, 지하수 유입/유출량 포함) 및 수질 실측자료 등의 가용자료가 확보되면 더욱 실제적인 모의가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원 (06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 남귀숙, 배요섭, 김형중, 장정렬, 이광식 (2005). “농업용 저수지 수질개선을 위한 인공습지 설계·관리 요령(II)/인공습지의 설계 및 시공.” **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제7권, 제2호, pp. 7-26.
- 양재삼, 정주영 (2002). **인공습지**, 소화.
- 윤춘경, 권순국, 전지홍 (2000). “생활오수 처리를 위한 인공습지의 처리수 수질 추정식에 관한 연구.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제16권, 제4호, pp. 491-499.
- 최지용 (2002). “인공습지의 수질개선 효과 분석모델 개발.” **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제4권, 제1호, pp. 51-61.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill.
- EPA, Constructed Treatment Wetland System Description and Performance Database (<http://www.epa.gov/owow/wetlands/watersheds/cwetlands.html>)
- EPA (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. 832-R-93-008.
- EPA (1999). *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment*. 832-S-99-002.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*, CRC Press LLC.
- Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Mitsch, W. J. and Jorgensen, S. E. (2004). *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration*, John Wiley & Sons, Inc.
- Reed, S. C., Crites, R. W. and Middlebrooks, E. J (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd ed. McGraw-Hill.
- (논문번호:07-109/접수:2007.10.17/심사완료:2008.01.24)