

논 담수 내 미생물 농도의 시간적 모의를 위한 모델 개발

Development of the Temporal Simulation Model
for Microorganism Concentrations in Paddy Field

황세운*, 장태일, 박승우 (서울대)

Hwang, Sye Woon-Jang, Tea Il-Park, Seung Woo

abstract

The objective of this paper is to develop the microorganism concentration simulation model for the health related effect analysis while farmers and water managers reuse the wastewater for agricultural irrigation. This model consists of the CE-QUAL-R1 model and the CREAMS-PADDY model. The CE-QUAL-R1 model is the 1-D numerical model to analyze the water quality of the reservoir and the CREAMS-PADDY model is modified from CREAMS model for considering the hydrologic cycles in paddy field. This model was applied to examine the application by the observed data from 2003 in Byoungjum study area. From this research, the average root mean square error (RMSE) for the simulated concentration during the calibration period was 0.51 MPN/100ml and correlation coefficient (R^2) was 0.71. And the RMSE for the simulated concentration during the verification period was 0.46 MPN/100ml and R^2 was 0.73. This simulation results show that the coliform inflow concentrations by the wastewater irrigation wield great influence upon the temporal coliform concentrations in paddy field.

I. 서론

2003년말 현재 연간 64억톤의 하수처리수 중 약 5.4%인 3.4억톤을 재이용하고 있으나, 재이용율은 '01년 2.9%, '02년 4.3%에서 점차 증가하는 추세이지만 미국이나 호주 (재이용율 10%, 11%) 등 선진국에 비하여 아직 미흡한 상황이다 (환경부, 2004). 이에 환경부는 장래의 물부족 사태를 적절히 대응하고, 수질오염을 방지하기 위해서는 막대한 양으로 흘러보내는 하수처리수를 재이용할 수 있도록 권고기준을 마련하고 있으며, 2005년 중에 재이용수질 권고기준을 설정할 계획에 있다. 이와 함께 하수처리수를 농업용수, 공업용수, 그리고 환경용수 등으로 재이용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있어 대체수자원으로써 그 활용가치가 높아질 것으로 보인다.

하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 작물생육, 작물함유성분, 토양잔존물질, 보건위생 등에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그중 보건위생 상의 문제는 하수처리수의 재이용시 가장 중요하게 살펴보아야 할 문제이다. 이러한 관점에서 재이용에 따른 보건위생 문제는 세계적으로 그 중요성이 부각되고 있으며, 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서도 재이용시 작업상의 노출 문제를 규제하기 위한 수질기준을 제시한 바 있다 (Crook J., 2005).

생활환경의 개선과 환경위생 부분의 중요성이 더욱 강조되기 시작하면서부터 수질을 모의하는 모형 중에 미생물 모의를 포함하는 모형들이 개발되었고, 미생물 모의가 가능한 대표적 모형으로는 SWMM, HSPF, CE-QUAL, SWRRB 모형들이 있으며, 이들 모형의 기작은 대장균을 모의하여 미생물의 오염정도를 추정하는 방법으로 되어있다.

Gene Yagow (2001)은 HSPF 모형을 이용하여 버지니아주에 있는 9개의 유역에 대하여 대장균의 오염총량 (total Maximum daily loads, TMDL)에 대하여 연구한 바 있고, K.M.Brannan(2002)은 버지니아의 Big Otter 강에 대하여 오염총량제의 방법으로 대장균을 모의하였다. 한편, Texas 지방의 하천에서 대장균 농도의 모의를 HSPF 모형을 이용하여 수행하였다 (Sabu Paul, 2002). 또

한 Nathan J. Rice (2002)은 인디애나주의 농업 유역인 Honey Creek과 Hoagland Ditch의 두 유역에 대하여 대장균 오염원과 변이성에 대하여 연구하였다. 최근 대부분의 미생물 모델링과 관련된 연구들의 경향은 미생물의 지표로서 대장균을 택하고 있고, 대장균 모의의 방법은 오염총량제 모의방법을 이용하여 각 유역에 맞는 모형을 적용하고 있다.

본 연구에서는 재이용에 따른 보건위생상의 문제해결을 위하여 농업 대체용수내의 미생물 중 대장균을 대상으로 선정하고 논에서의 그의 거동과 주변 환경 인자에 대한 영향을 고려한 대장균 모의 모형을 개발하여 그 적용성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 모형의 구조

생활하수를 농업용수로 이용하기 위해서는 생활하수 안에 들어 있는 각종 병원균 등이 문제가 될 수 있으며, 각종 병원균들은 대장균의 존재량으로 추정할 수 있다. 대장균을 모의한 수질 모형들로는 SWMM, CE-QUAL-R1, CE-QUAL-RIV1 등이 있다. 이 중에서 1차원 모형으로 저수지의 수질을 분석하는 모델인 CE-QUAL-R1 모형 내의 대장균 모듈 부분을 미생물 모형으로 선정하였다. CE-QUAL-R1 모형은 미 공병단에서 저수지의 수질을 모의하기 위해 개발되었다. 이 모형은 저수지를 깊이방향으로 높이가 같은 여러 층(layer)으로 나누어 각 층별로 계산한 다음 각각의 층끼리 상호계산을 반복하여 저수지의 수질을 모의하는 대표적인 1차원 모형이다. 본 연구에서는 이를 이용하여 일반적으로 미생물의 지표로 쓰이고 있는 대장균의 생태를 모의하였으며, 모형의 대장균 모의기작 구조는 Fig. 1과 같다.

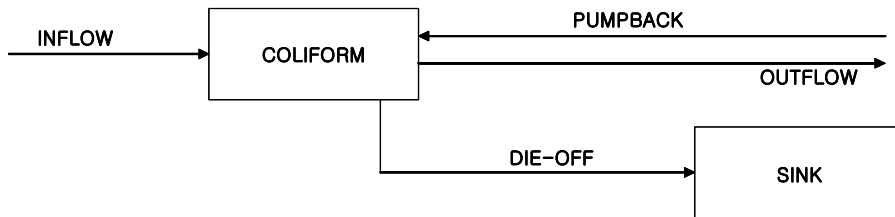


Fig. 1 A coliform change processes

우선, 대장균은 물에 포함되어 외부로부터 유입되고, 배출되기도 하며, 배출됐다가도 다시 재유입 되기도 한다. 한편, 시스템 내에서 대장균 자체적으로 생존함수에 따라 개체수가 변화된다. 또한 다른 층(layer)과의 상호작용에 의해 대장균의 개체수가 모의된다. 본 연구에 적용될 논인 경우에는 유입구로부터 관개수와 배출구로의 배출수, 배수로로부터 다시 재펌핑하는 것 등에 적용된다. 한편, 논은 저수지에 비해 수심이 매우 얇기 때문에 층(layer)을 하나로만 고려할 수 있다.

대장균 모형은 Decay 함수로 표현되고, 대장균 중 분원성 대장균군(fecal coliform)을 전체 대장균의 지표로 사용하며, 모형의 지배방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt}(VC) = \frac{d}{dz} \left(DA \frac{dC}{dz} \right) \Delta Z + \sum Q_{in} C_{in} + Q_p C_p - Q_0 C - KP^{(T-20)} VC \quad (1)$$

여기서, t는 시간, T는 온도, V는 체적, C는 대장균 군수, K는 대장균 상수를 각각 나타내며, z와 Z는 깊이, 그리고 Q_{in} , Q_p , Q_0 는 각각 유입량, 강수량, 배출량을 나타낸다.

위의 식에 따르면 대장균군수는 온도와 시간의 함수로 표현되며, 시간이 흐를수록 소멸되는 형태로 나타난다.

유입수와 배출수 등의 항목은 수문 기작 항목으로, 본 연구에서는 논에서의 미생물 모의를 목적

으로 하므로, 수질 모형으로 채택한 CREAMS-PADDY 모형 (서춘석, 2002)의 수문 기작을 이용하였다. CREAMS-PADDY의 수문 기작의 개념도는 Fig. 2와 같다.

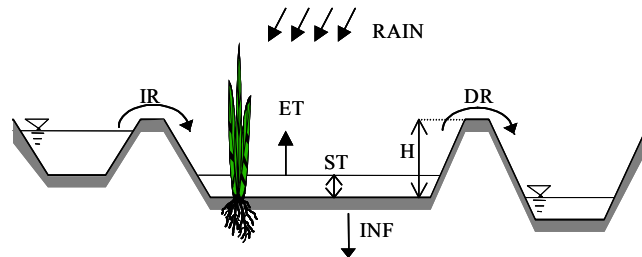


Fig. 2 Hydrologic circulation in paddy field

논에서의 수문기작은 물수지식으로 표현될 수 있고, 그 항목으로 강우량, 관개량, 침투량, 증발산량, 유출량 등으로 나타난다. 본 연구에서 미생물 거동 알고리즘은 수질 모형에서도 선정된 바 있는 CREAMS-PADDY 모형에 추가하여 그의 대장균의 기작을 적용하였고, 모형의 개요는 Fig. 3과 같으며, 미생물 부모형 모듈 변수는 Table 1과 같다.

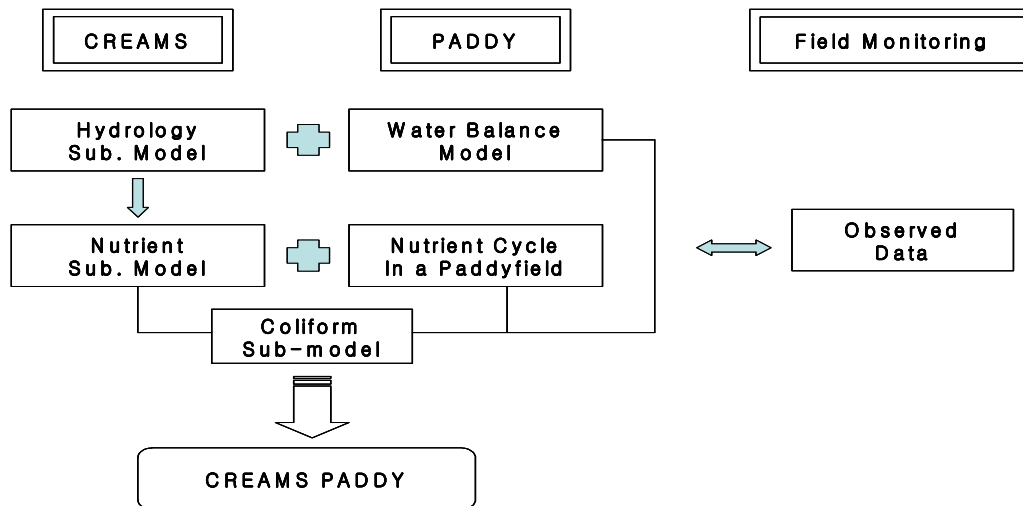


Fig. 3 Structure of modified CREAMS-PADDY model

Table 1 Program components of model

Computer Code	Unit	Explanation
COLIDK	hr ⁻¹	Maximum coliform decay rate (TCOLDK)
COLIF(I)	colonies/100ml	Coliform concentration in the I th layer (DCOLIF)
COLIN(J)	colonies/100ml	Inflowing concentration of coliforms in the J th tributary
DVOL(I)	m ⁻³	Volume of the I th layer, computed
MXQUAL(9)	gm ⁻³	Pumpback concentration of the J th constituent, computed
PBENTR/PHOURS	m ³ hr ⁻¹	Entrained water in the I th layer due to pumpback, computed
PHOURS	hr ⁻¹	Number of hours of pumpback (XTIME)
PBFLOW/PHOURS	m ³	Amount of pumpback plus entrained flow
Q10COL	dimensionless	Q ₁₀ formulation for coliform die-off
QHI(I)	m ³ hr ⁻¹	inflow rate to the I th layer, computed
QHO(I)	m ³ hr ⁻¹	Outflow rate from the I th layer, computed
SDZ(I)	m	Thickness of the I th layer
TEMP(I)	°C	Temperature in the I th layer [DTEMP]

2. 시험 포장

하수처리수 재이용에 따른 보건위생 영향 분석을 위한 시험포장은 경기도 수원시 병점에 위치하고 지하수 관개구인 대조구와 수원시 하수처리장의 방류수를 이용하는 4개의 처리구로 1) 지하수 (TP#1), 2) 황구지천의 하천수를 직접 양수하는 관행 관개수 (TP#2), 3) 하수처리장 방류 직전 지점에서의 방류수 (TP#3), 4) 하수처리장 방류수의 완속모래여과처리수 (TP#4), 5) 완속모래여과후 UV살균처리수 (TP#5) 등으로 구성하였다. 각 시험구의 크기는 4m×4m로 설계하였으며, 5처리 6반복으로 난수배치법을 적용하여 벼를 재배하였다. 시험포장의 공시품종은 수원 지방에서 널리 재배되고 있는 심추청으로 하였으며, 2002년부터 작물생육과 수문, 수질 모니터링을 수행하고 있다. 시비량은 기비로 질소질 44kg/ha, 인산질 35kg/ha를 시비하였다.



Fig. 4 Study area for wastewater reuse experiment

3. 모형의 보정과 검정

(1) 모형의 보정

2003년 6월~9월 관개기 동안 처리구별로 9회~11회의 샘플링을 통하여 관개수와 논 담수의 대장균 군수를 측정하였으며, 본 연구에서는 모형의 보정을 위해 처리구 TP#2와 TP#4에 대해 수집한 대장균 자료를 이용하였다. Fig. 5와 Fig. 6는 TP#2와 TP#4의 실측지와 모의치에 대한 산포도를 나타낸 것이다. 정리한 결과는 Table 3과 같으며, TP#2의 경우 결정계수 R^2 는 0.66, RMSE는 0.47로, TP#4의 경우 R^2 는 0.76, RMSE는 0.56으로 모의되었다.

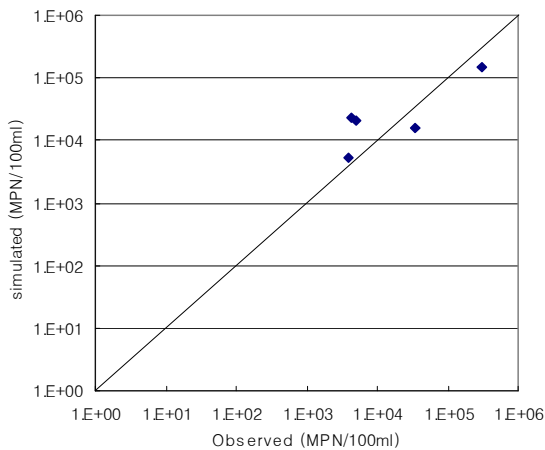


Fig. 5 Calibration result of the TP#2

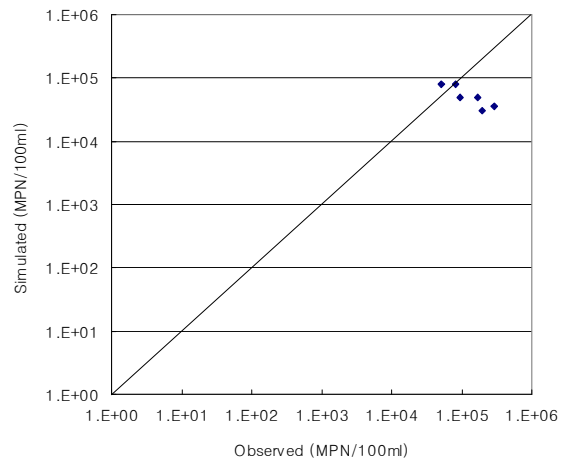


Fig. 6 Calibration result of the TP#4

Table 3 Calibration results of TP#2 and TP#4

Stations	Mean (MPN/100ml)		R^2	RMSE (MPN/100ml)
	Simulated	Observed		
TP#2	4.28	3.96	0.66	0.47
TP#4	5.10	4.70	0.76	0.56

(2) 모형의 검정

Fig. 7은 모의 결과와 실측치에 대해 산포도로 나타낸 것이며, Fig. 8은 모의치와 실측치를 비교한 것이다. 이는 본 연구에서 고려하지 않은 대장균 농도에 영향을 미치는 각종 환경인자들로 인한 경향이 없다고 판단되는 데이터를 제거하여 검정을 실시한 결과이다.

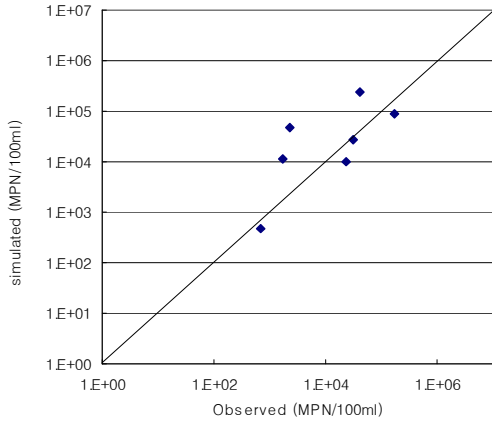


Fig. 7 Verification result of the TP#5

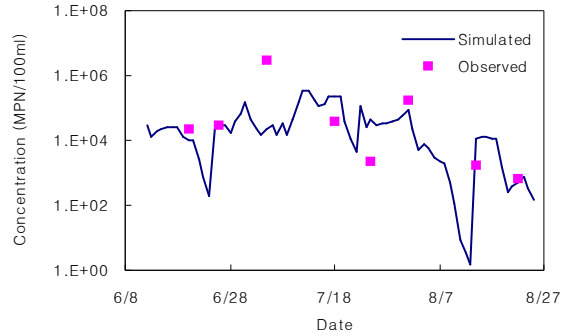


Fig. 8 Observed and simulated coliform of the TP#5

Table 4는 TP#5에 대해 검정을 수행한 결과를 정리한 것이며, 결정계수 R^2 는 0.73, RMSE는 0.46으로 모의되었다.

Table 4 Verification result of the TP#5

Stations	Mean (MPN/100ml)		R^2	RMSE (MPN/100ml)
	Simulated	Observed		
TP#5	4.32	4.13	0.73	0.46

III. 결과 및 고찰

Fig. 9~Fig. 10은 처리구별로 모의치와 실측치를 비교한 것이다. 각 처리구별 관개량과 시기를 함께 살펴보면, 관개에 의한 대장균의 유입이 대장균 군수에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

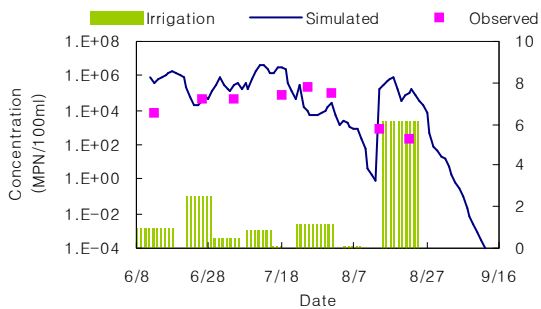


Fig. 9 Observed and simulated coliform of the TP#3

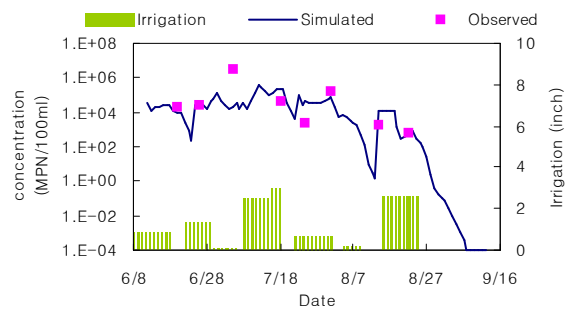


Fig. 10 Observed and simulated coliform of the TP#5

다음 Fig. 11은 실제 실험 논에 처리구별 관개량과 유입수의 대장균 군수를 이용하여 대장균 군수 변화를 모의한 결과이며, 지하수 관개구 (TP#1)의 대장균 농도 변화가 가장 낮게 나타났

며, 다음으로 완속모래여과후 UV살균처리수 관개구 (TP#5)의 대장균 농도가 낮게 나타났다. 그리고 하수처리수 관개구 (TP#3)가 대장균의 농도가 가장 높은 것으로 나타나 하수처리수의 농업용수 재이용시 여과 및 소독의 재처리가 필요한 것으로 나타났다.

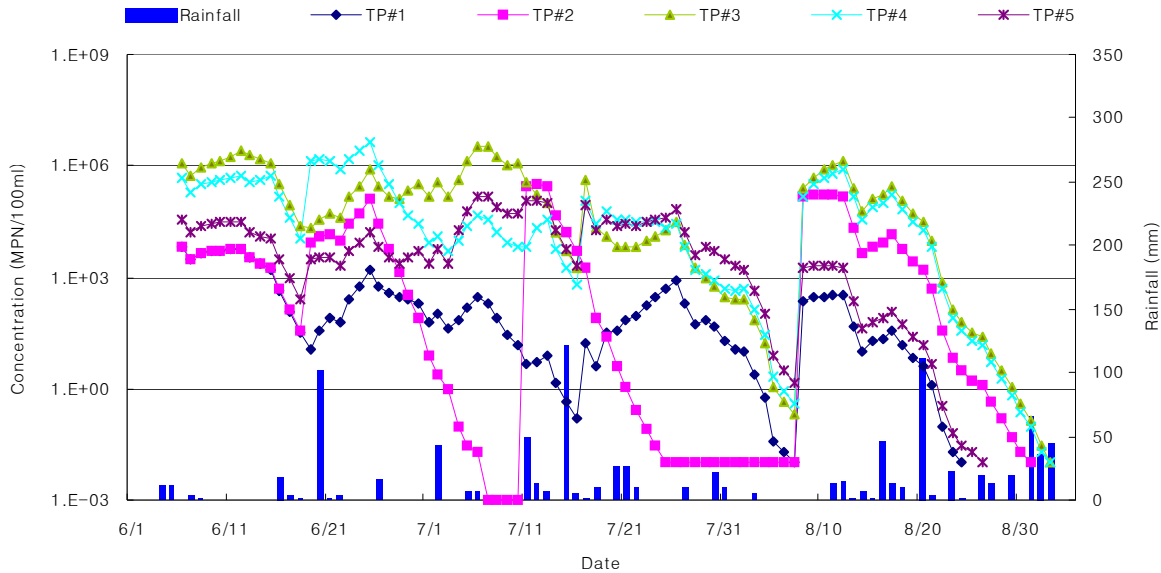


Fig. 11 Simulated temporal change of the microorganism concentrations

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 재이용에 따른 보건위생상의 문제해결을 위하여 농업대체용수내의 미생물 중 대장균을 대상으로 선정하고 그의 거동과 주변 환경 인자에 대한 영향을 고려하여 대장균 모듈을 개발하여 논에서의 대장균을 모의하였다. 본 모형은 CE-QUAL-R1 모형 내에서 대장균 모듈 부분에 논에서의 수문 기작을 고려한 CREAMS-PADDY 모형을 결합하여 구성하였으며, 처리구별 관측 데이터를 통하여 그 적용성을 평가하였다. 이로부터 하수처리수 재이용에 따른 시기별 대장균 농도 변화를 분석하였으며, 하수처리수의 농업용수 재이용시 여과 및 소독의 재처리가 필요한 것으로 나타났다.

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비지원(과제번호 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 과학기술부, 2004, 대체용수 활용기반 기술개발 최종 보고서
2. 서춘석, 박승우, 임상준, 윤광식, 김상민, 강문성, 2002. 관개 논에서의 영양물질 추정 모형의 개발, 한국농공학회지, 44(3), pp. 146-156.
3. 환경부, 2004. 하수처리수 재이용수질 권고기준 설정방안
4. Crook, J., 2005. Water reuse criteria in the U.S., International Symposium on Water Quality Standards and Guidelines for Wastewater Reuse (ISWQ-WR)
5. U.S. EPA, 2004. Guidelines for Water Reuse. EPA 625/R-04/108. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.