

농업용수 재이용에 따른 토양염분 추정틀 위한 SWAP 모형의 보정과 검정

Calibration and Validation of SWAP Model to Estimate the Soil Salinity of Reclaimed Wastewater Irrigation on Paddy Fields

장태일*, 성충현**, 박승우***

Tae Il Jang, Chung Hyun Sung, Seung Woo Park

요 지

본 연구에서는 하수재이용에 따른 토양에서의 염분변화를 추정하기 위하여 SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant) 모형을 선정하여 경기도 화성시 수원환경사업소 인근에 위치한 병점지구를 대상으로 모형의 적용성을 분석하였다. 실험에 사용한 관개용수는 1) 지하수(TR#1), 2) 하수처리장 방류수+여과+UV (TR#3)로 분류하여 실험에 사용하였다. 영농기간 동안 논으로 유입되는 총 유입수는 1,724.2 ~ 1,733.7 mm 범위였으며, 이 중 약 64%가 강우에 의해 공급되었고, 나머지는 관개에 의하여 유입되었다. 유입관개수의 EC는 지하수 관개수인 TR#1이 다른 처리구에 비해 작았고, TR#3의 경우 0.442~0.698 dS/cm의 범위를 보였다. 모형의 보정과 검정을 위해서 대상지구에 FDR(Frequency Domain Reflection)을 설치하여 토양수분함유량과 염분농도를 토심에 따라 일단위로 모니터링 하였다. 토양함수량의 보정기간 중 토심별(50, 100, 140 cm) RMSE는 TR#1에서 0.001 ~ 0.002 cm³ cm⁻³, TR#3에서 0.002 ~ 0.006 cm³ cm⁻³로 나타났으며, 검정기간 중 토심별 RMSE는 TR#1에서 0.003 ~ 0.064 cm³ cm⁻³, TR#3에서 0.001 cm³ cm⁻³로 나타났다. 토양염분의 보정기간 중 토심별 RMSE는 TR#1에서 0.001 ~ 0.023 ×10⁻³ dS m⁻¹, TR#3에서 0.028 ~ 0.045 ×10⁻³ dS m⁻¹로 나타났으며, 검정기간의 토심별 RMSE는 TR#1에서 0.018 ~ 0.037 ×10⁻³ dS m⁻¹, TR#3에서 0.004 ~ 0.014 ×10⁻³ dS m⁻¹로 적용성이 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : SWAP, 재이용, 토양수분, 토양염분, 전기전도도

1. 서 론

하수재이용은 안정적인 수량, 변동성이 작은 수온, 고농도의 비료성분 등의 이점에도 불구하고 환경호르몬, 지역 특성에 따른 높은 염분 농도 등의 수질 환경, 토양환경 및 보건위생 영향 등 대처해야 할 문제점 들 또한 내포하고 있다. 김(2004)에 의하면 하수재이용시 고농도의 비료성분으로 인하여 논에서의 TN과 TP의 오염부하량이 논에서의 저류특성을 고려하여도 포장단위에서는 약 200%, 유역전체에서는 약 10% 정도 증가하는 것으로 나타났으나 이는 물꼬 관리를 통한 제어로 저감될 수 있다. 또한 강 등(2007)과 Jang et al.(2008)은 하수재이용에 따른 안전성 평가와 수

* 정회원 · 서울대학교 농업생명과학연구원 · E-mail : uriduri7@snu.ac.kr
** 정회원 · 서울대학교 농업생명과학연구원 · E-mail : fpdlsao2@snu.ac.kr
*** 정회원 · 서울대학교 지역시스템공학과 교수 · E-mail : swpark@snu.ac.kr

확량 비교를 하였으며 재이용에 따른 문제점은 없다고 보고하였다. 지금까지 하수재이용시 관개수의 수질에 따른 수질 및 환경영향 등에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나 논에서의 토양내 염분에 대한 접근은 미흡한 실정이다.

토양 내 염분의 거동을 모의하기 위해서는 물, 토양, 그리고 작물과의 관계를 면밀하게 분석하여야 한다. 그러나 모니터링에 의한 관측은 인력과 장비 등의 문제로 어려운 것이 사실이며, SWAP(Soil- Water-Atmosphere-Plant) 모형은 이러한 문제점을 해결하고 수문분석 및 토양 내 염분모의를 보다 용이하게 한다.

따라서 본 연구에서는 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 토양 내 염분을 추정하기 위하여 농업수문모형인 SWAP 모형을 이용하였다. 이를 위하여 시험포장을 대상으로 수문, 수질, 지형, 작물 자료를 구축하고 모형의 보정과 검정을 통해 모형의 적용성을 평가하여 하수 재이용에 따른 토양 내 염분변화를 모의하였다.

2. SWAP 모형의 개요

SWAP 모형은 경작된 토양층에서 물과 염분 등을 포함한 물질에 대한 수지를 계산하는 농업수문학적 모형(Agro-hydrological model)이다(Van Dam, 2000). 본 모형은 결정론적이며 물리 기반형 모형으로 작물 성장과 관계된 표토의 열 흐름과 용질 이동, 다양한 형태의 포화 및 불포화수 흐름을 모의할 수 있으며, 일반적인 토양수 흐름방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)] - S_a(z) \quad (1)$$

여기서, $C(h)$ 는 $\partial\theta/\partial h$ 로 표현되며 물 용량(capacity)의 차이 (cm^{-1}), h 는 토양수 압력수두 (cm), z 는 수직 흐름의 좌표 (+ upward), K 는 토양수 압력수두의 함수로서의 불포화 수리전도도 (cm d^{-1}), S_a (d^{-1})는 뿌리에 의한 물의 흡수, θ 는 단위부피당 토양수 함량 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)를 말한다.

SWAP 모형은 특정한 경계조건과 토양 수리특성인 θ , h , K 의 관계를 알고 있을 때, Richard 방정식을 수치적으로 계산한다. θ 와 h 의 관계는 Van Genuchten(1987)이 제시한 식으로 설명할 수 있다.

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{[1 + \alpha h]^{\frac{n-1}{n}}} \quad (2)$$

여기서, θ_{res} 는 잔여 함수량 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{sat} 는 포화 함수량 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α (cm^{-1}), n (-)은 경험적 형상 인자이다. Mualem(1976)의 이론과 결합된 식 (3)은 θ 와 K 와의 다양한 관계를 설명하며 다음과 같다.

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{n/n-1})^{\frac{n-1}{n}}]^2 \quad (3)$$

여기서, K_{sat} 는 포화 수리전도도 (cm d^{-1}), λ 는 경험적 계수 (-), S_e 는 상대적 포화도 ($(\theta - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res})^{-1}$)를 말한다.

관개된 토양에서는 일반적으로 확산이 분산보다 느리기 때문에 확산은 무시되며, 총 염분 플럭스

스 밀도에 대한 운송-분산(convection-dispersion) 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[q L_{dis} \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial q C}{\partial z} \quad (4)$$

여기서, L_{dis} 는 분산 길이(dispersion length)라고 하며, 동역학적, 1차원적, 운송-분산 염분 이동에 유용하며, 불포화/포화 토양에서의 염분 스트레스로 인한 뿌리에 의한 물 흡수의 감소 모의를 가능케 한다.

최상위의 경계조건은 잠재 증발산량과 관개와 강우 플럭스에 의해 결정되고, 바닥 경계 조건은 깊은 지하수(지표에서 3 m 초과)에서는 자유 배수 조건을 가정하고, 얕은 지하수(지표에서 3 m 이내)에서는 측정된 지하수 깊이를 바닥 경계조건으로 한다.

3. 대상 지구

2.1 시험포장 및 자료구축

대상지구는 경기도 수원시 병점에 위치하며, 실험에 사용한 관개용수는 1) 지하수(TR#1), 2) 하수처리장 방류수(TR#2), 3) 하수처리장 방류수+여과+UV소독(TR#3)로 분류하여 관개하였다. 각 시험구의 크기는 5 m × 5 m로 설계하였으며, 3처리 4반복으로 난수배치법을 적용하여 벼를 재배하였다. 실험기간 중 연평균 강우량은 1,059 mm이며, 연평균 강우일수는 약 55일로 나타났다. 낙수기를 제외한 전체 관개기간 동안 현장 관리인에 의하여 매일 적정 담수심을 유지하도록 지속적으로 관리하였고, 관개 시작일은 5월 17일, 마지막 관개일은 9월 20일로 관측되었다.

대상지구는 일반적으로 관개에 많이 쓰이는 지하수와 재이용에 실제로 쓰이는 재이용수를 비교하기 위해서 TR#1과 TR#3을 선정하였다. 모형의 구동에 필요한 자료는 최저 및 최고 기온, 풍속, 강우, 습도, 태양복사에너지 등의 기상자료와 토성 및 토양 수리 특성과 관련한 토양의 물리·화학적 자료, 그리고 관개에 필요한 관개량과 수질에 관련된 자료가 모형의 보정과 검정에 사용되었다. 이들 각 자료는 일 자료 혹은 매주 또는 연간 5-6회 정도의 정기적인 모니터링을 통하여 수집하였다.

2.2 모형의 평가와 최적화

물의 흐름과 염분의 이동은 토양 수리특성인 $\theta(h)$, $K(h)$ 에 매우 민감하며, 본 연구에서는 이러한 매개변수의 보정을 위하여 매개변수의 최적화 프로그램인 PEST(Doherty et al., 2004)를 본 모형과 연계하였다.

최적화된 매개변수에 대해서 모의된 값과 측정된 값의 차이를 평가하기 위한 평균제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였다.

3. 모형의 보정과 검정

3.1 매개변수의 선정

모형의 보정과 검정을 위해서 대상지구에 FDR(Frequency Domain Reflection)을 설치하여 토양수분함유량과 염분농도를 일단위로 모니터링 하였다. 토양함수량과 토양염분의 자료기간은 TR#1의 경우 2008년 6월 11일부터 10월 2일까지이고, TR#3의 경우는 9월 9일까지로 각각 141개와 91개의 자료를 모형의 토양함수량의 검정과 보정에 사용하였다.

토양 수리특성 매개변수 중 θ_{sat} 와 K_{sat} 는 물리적인 특성을 반영하는 변수이기 때문에 측정 값을 활용하거나, 토심별 자료로 부족한 데이터는 문헌의 자료를 활용하여 선정하였다. θ_{res} 와 λ 의 경우 민감도 분석 결과 그 값이 매우 낮은 것으로 나타났으며, 다른 매개변수와 같이 문헌의 자료 및 PTF의 값을 활용하였다 (Van Dam and Malik, 2003). 모형의 보정에서는 앞서 기술한 매개변수를 제외한 불확실성이 큰 a 와 n 을 선정하여 최적화하였으며, Table 1은 그 결과를 정리한 것이다.

Table 1. Derived soil hydraulic parameters between TR#1 and TR#3

Soil layer (cm)	Texture	Soil hydraulic parameters											
		θ_{res} (cm ³ cm ⁻³)		θ_{sat} (cm ³ cm ⁻³)		K_{sat} (cm d ⁻¹)		a (cm ⁻¹)		λ (-)		n (-)	
		TR#1	TR#3	TR#1	TR#3	TR#1	TR#3	TR#1	TR#3	TR#1	TR#3	TR#1	TR#3
10-50	L	0.078	0.078	0.14	0.17	5.34	5.34	0.021	0.005	-2.97	-2.97	2.580	1.098
50-100	L	0.078	0.078	0.45	0.41	5.24	5.24	0.004	0.019	-2.37	-2.37	2.483	1.470
100-140	SL	0.067	0.067	0.30	0.28	4.45	4.45	0.015	0.005	-1.55	-1.55	1.499	1.480

토양에서의 염분의 거동을 모의하기 위한 매개변수 중 민감도가 높은 L_{dis} 를 선정하여 모형의 보정과 검정을 실시하였으며, 처리구별 및 토심별로 최적화 프로그램을 사용하여 최적화하였다. 처리구별 L_{dis} 는 TR#1과 TR#3에서 각각 토심에 따라 5.0 ~ 5.5와 5.5 ~ 50.0의 범위로 나타났다.

Table 2. Number of observations N and root mean square error RMSE of soil moisture contents θ and soil salinity EC (2008)

Treatment	Soil layer (cm)	Calibrated				Validated			
		No.	θ (cm ³ cm ⁻³)	EC (10 ⁻³ dS m ⁻¹)	No.	θ (cm ³ cm ⁻³)	EC (10 ⁻³ dS m ⁻¹)		
			RMSE	RMSE		RMSE	RMSE		
TR#1	50	57	0.002	0.023	57	0.003	0.037		
	100		0.002	0.023		0.003	0.037		
	140		0.001	0.001		0.064	0.018		
TR#3	50	45	0.002	0.033	46	0.001	0.004		
	100		0.002	0.045		0.001	0.014		
	140		0.006	0.028		0.001	0.004		

3.2 모형의 보정과 검정

3.2.1 토양함수량

Table 2는 모형의 보정 및 검정 결과를 정리한 것이며, 토양함수량의 보정기간 중 토심별 RMSE는 TR#1에서 0.001 ~ 0.002 cm³ cm⁻³, TR#3에서 0.002 ~ 0.006 cm³ cm⁻³으로 나타났으며, 검정기간 중 토심별 RMSE는 TR#1에서 0.003 ~ 0.064 cm³ cm⁻³, TR#3에서 0.001 cm³ cm⁻³로 나타났다. TR#1과 TR#3 모두 실측치가 일정한 수준의 수분함유량을 보이는데 반하여 모의치는 토심 100 cm에서 강우 이후에 다소 감소하는 경향을 보이는데, 이를 제외하면 전반적으로 모의가

실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

3.2.2 토양염분

토양염분의 보정기간 중 토심별 RMSE는 TR#1에서 $0.001 \sim 0.023 \times 10^{-3} \text{ dS m}^{-1}$, TR#3에서 $0.028 \sim 0.045 \times 10^{-3} \text{ dS m}^{-1}$ 로 나타났으며, 검정기간의 토심별 RMSE는 TR#1에서 $0.018 \sim 0.037 \times 10^{-3} \text{ dS m}^{-1}$, TR#3에서 $0.004 \sim 0.014 \times 10^{-3} \text{ dS m}^{-1}$ 로 나타났다. 토심 50cm에서는 TR#1의 보정기간 초반부에서 다소 높은 농도에서 감소하여 7월 초에 안정화되는 것으로 모의되었다. 토심 100cm와 토심 140cm에서는 처리구에 관계없이 일정한 수준을 유지하면서 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

3. 결 론

재이용에 따른 토양 내 염분을 추정하기 위하여 수문순환과 작물성장과의 관계를 고려한 SWAP 모형을 적용하였으며, 시험포장 자료를 이용하여 모형의 보정과 검정을 수행한 결과 적용성이 있는 것으로 평가되었다. 본 모형을 이용하여 재이용에 따른 토양 중 염분의 변화를 분석하였으며, 그 결과 유입수의 염분 농도가 높은 TR#3에서 상대적으로 높은 값을 보였으나 전체적으로 안전한 것으로 나타났다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 4-5-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김상민(2004). 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 영향 분석, 서울대학교 박사학위논문.
2. 강문성, 박승우, 김상민, 성충현(2004). 하수처리수의 재이용을 위한 벼 재배시험, 한국농공학회지, 46(1), pp. 75-86.
3. Jang, T, Park, S., Kim, H.(2008). Environmental effects analysis of a wastewater reuse system for agriculture in Korea, Water Science and Technology: Water Supply 8(1): pp. 37-42.
4. Van Dam, J.(2000). Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. Wageningen University, Netherlands.
5. Van Genuchten, M.(1987). A numerical model for water and solute transport in and below the root zone, Research Report no. 121, US Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Riverside California.
6. Mualem, Y.(1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research 12: 513-522.
7. Doherty, J., Brebber, L., Whyte, P.(2004). PEST: Model independent parameter estimation: user manual 5th edition. Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia.
8. Van Dam, J., Malik, R.(2003). Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India. Integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems, WATPRO final report, including CD-ROM. ISBN 90-6464-864-6.