



## 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의

### Effects of Reclaimed Wastewater Irrigation on Paddy Rice Yields and Fertilizer Reduction using the DSSAT Model

정한석\* · 성충현\*\*† · 장태일\*\*\* · 정기웅\*\* · 강문성\*\*\*\* · 박승우\*\*\*\*

Jeong, Han Seok · Seong, Choung Hyun · Jang, Tae Il · Jung, Ki Woong · Kang, Moon Seong · Park, Seung Woo

#### ABSTRACT

The objectives of this study were to assess the rice yields and evaluate fertilizer reduction effect of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) v4.5 model. The experimental plots were designed, which was located near the Suwon wastewater treatment plant in Gyeonggi-do, Korea. The rice yield, irrigation amount, irrigation water quality and soil data were monitored and collected between 2006 and 2009. The DSSAT model was calibrated and validated with observed data. The methods that were used to evaluate this model were the root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (nRMSE), and index of agreement (*d*). The values of RMSE, nRMSE, and *d* ranged from 145 to 789 kg ha<sup>-1</sup>, 3.0 to 13.3 %, and 0.90 to 0.95 for the calibration period, respectively and represented from 91 to 538 kg ha<sup>-1</sup>, 2.0 to 10.4 %, 0.94 to 0.98 for the validation period, respectively. Overall, this model showed good agreement with observed data of rice yields irrigated with reclaimed wastewater. The fertilizer reduction effect in paddy field of reclaimed wastewater irrigation was assessed about 60 % in 2008 and 40 % in 2009.

**Keywords:** Wastewater reuse; DSSAT; paddy rice yield; fertilizer reduction effect

#### 1. 서 론

환경부는 하수처리수의 재이용이 물 공급의 지역적 불균형 완화, 오염부하량 저감에 따른 하천수질개선, 저렴한 공급비용, 건천화된 도심하천의 수생태계 회복 및 친수공간 조성 등으로 가장 현실적인 대체수자원으로 주목하여, 2006년 신규 하수처리장에 하수처리수 재이용을 의무화하는 한편, 사업비를 국고에서 지원하여 12개 지역에 “하수처리수 재이용사업”을 추진하였다(MOE, 2007).

하수처리수의 농업용수 재이용은 물 부족을 해소하고 하수 중 비료성분을 활용함과 동시에 하천수의 수질을 개선하며 신규수

자원개발의 대체효과가 있다(Park, 2011a). 2010년 현재 하수처리수 농업용수 재이용 기술은 9개 지구, 총 관개면적 2,052 ha에 적용되어 연간 3 천만 m<sup>3</sup>의 수자원확보량을 보이고 있다(Park, 2011b). 하수처리수의 농업용수 재이용을 위해서는 하수재처리기술, 변화된 환경에서의 작물재배기술, 농작물의 생육 및 수질·토양·생태·보건위생 등을 포함하는 지속적인 환경영향 모니터링이 필요하다(Park, 2007).

하수처리수의 경우 고농도의 질소와 인 등의 비료성분을 함유하고 있어 농경지에 비료성분을 공급할 수 있는 장점이 있다. 하수처리수에 함유된 비료성분은 농경지에 유입되어 작물의 생육 등에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 농경지에서의 작물생육과 영양물질의 거동을 모의할 수 있는 작물생육모형을 이용하게 되면 장기간의 모니터링을 위한 시간과 노력을 효율적으로 이용할 수 있다.

작물생육모형은 작물의 광합성 같은 주요생리작용을 정량적으로 연구하기 위해 40여년 전부터 소개되기 시작하였다. 다양한 환경조건 하에서의 생장 및 발육의 종합적인 모의가 가능한 정도로 발전하였으며, 최근에는 주요 식량작물에 대해 실용수준의 모형들이 선보이고 있다(Sinclair and Seligman, 1996; Cho and Yun, 1999). 미국에서 개발되어 IBNSAT (International

\* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학전공  
 \*\* 서울대학교 농업생명과학연구원  
 \*\*\* Department of Biological & Agricultural Engineering, University of Georgia  
 \*\*\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원  
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4591  
 Fax: +82-2-873-8725  
 E-mail: fpdlsao2@snu.ac.kr

2011년 7월 4일 투고  
 2011년 7월 21일 심사완료  
 2011년 7월 21일 게재확정

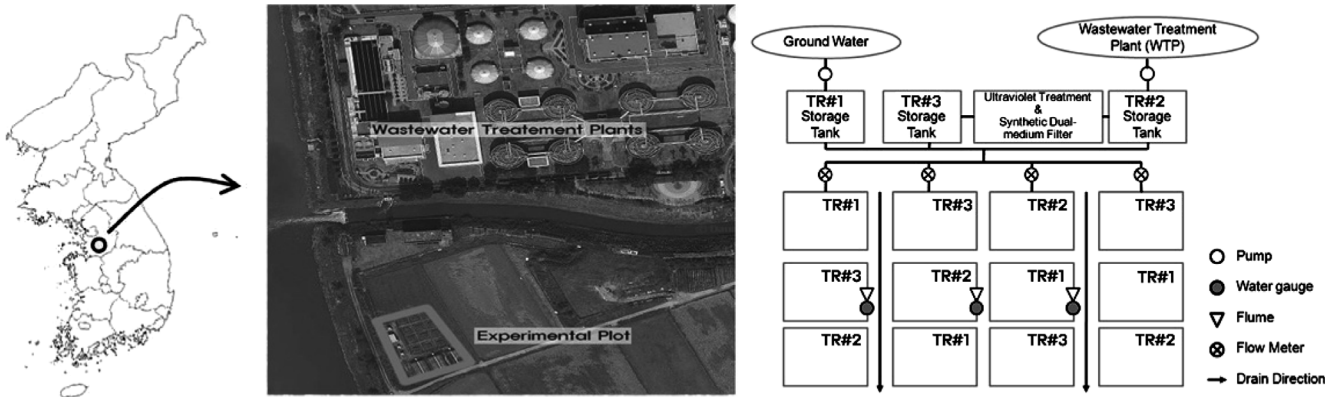


Fig. 1 Location of study area and schematic map of experimental plots including irrigation and monitoring system

Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer)사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)의 경우, 주요 식량작물의 생산 및 발육모의는 물론, 일련의 영농활동에 따른 영양물질의 거동도 파악할 수 있다 (Jones et al., 2003).

지금까지 DSSAT을 이용하여 여러 지역에서 식량작물의 생산량 및 토양환경 변화 등에 관한 연구가 다양하게 이루어져 왔다. 대표적으로 Liu et al. (2011)은 캐나다에서의 옥수수과 콩의 생산량 예측에 DSSAT의 적용성을 평가하고, 배수형태에 따른 지표하 질산태 질소의 손실을 모의하였으며, Martin et al. (2011)은 브라질에서의 사탕수수 매개변수를 추정하여 생산량을 모의함과 동시에 관개 시와 비관개 시 토양수분함량의 변화를 예측하였고, Sun et al. (2009)은 중국에서의 기후변화 시나리오에 따른 감자의 수확량 변화를 모의하였다. 국내의 경우에는 Shim et al. (2010)이 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측 등에 적용한 바 있다.

본 연구에서는 DSSAT (CERES-Rice 모형)을 이용하여 하수처리수의 농업용수재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 대한 적용성을 평가하고, 시비량 변화에 따른 논벼 수확량을 모의하여 농업용수 재이용에 따른 시비량저감효과를 평가하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험포장

하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의를 위한 시험포장은 경기도 화성시 진안동에 위치한 수원시 환경사업소 하수처리장 인근에 조성하여 2003년부터 2010년까지 8년간 운영되었다. 농림부의 지원으로 2006년에 재이용 시설이 설치된 수원시 환경사업소의 하수처리용량은 52 만 m<sup>3</sup>/일이며, 하수재이용량은 8 천 m<sup>3</sup>/일이다. 시험구는 관개수의 처리수준에 따라

지하수를 관개하는 대조구 (TR#1)와 하수처리장 방류수를 직접 이용하는 처리구 (TR#2), 하수처리장 방류수를 예코칩필터를 이용하여 여과처리한 후, UV소독과정을 거치는 처리구 (TR#3)로 구성하였다. 하수처리수의 관개수 이용에 따른 시험구의 배치는 이원분류방식인 난괴법 (Randomized complete block design)을 적용하였다. 난괴법은 각 집구마다 모든 처리가 배치되는 것으로서 집구간 차이는 커지지만 집구 내에서는 차이가 균일하게 되어 집구간 변이가 실험오차에 영향을 끼치지 않도록 하는 시험배치법이다 (Chae et al., 1991). 시험구의 크기는 5 m×5 m이며, 관개수의 처리수준별로 4반복하여 총 12개의 시험구를 조성하였다. Fig. 1은 시험포장의 위치와 시험구의 설계를 보여주고 있다.

### 2. DSSAT 모형

품종, 토양, 기상, 재배방식 등을 결합한 수확응용 모형인 DSSAT은 1982년 미국 IBSNAT 프로젝트에 의해 개발이 시작되었다. 토양수분모형과 토양 C/N모형 등을 이용한 다수의 작물생육모형을 포함한 DSSAT 모형은 작물생육 관리를 위한 의사결정지원시스템으로 벼, 옥수수, 콩 등을 포함한 20가지 이상

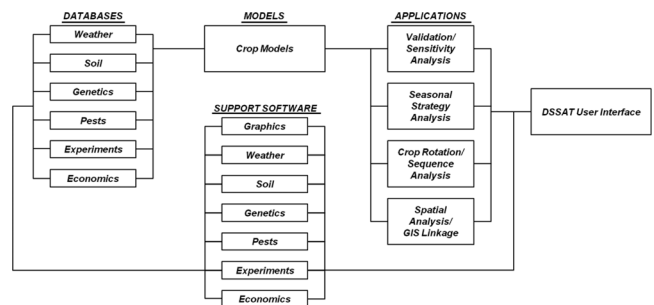


Fig. 2 Schematic diagram of DSSAT model (Jones et al., 2003)

의 작물생육 추정에 이용된다. 본 연구에서는 CERES기반의 토양모형과 최신의 토양수분모형을 통해서 CERES-Rice 작물생육모형을 이용하여 논벼 수확량을 모의하였다. Fig. 2는 DSSAT 모형의 개요를 보여주고 있다.

### 3. 모형입력자료

DSSAT 모형의 입력자료로는 기상, 토양, 관개량, 영농관리, 작물품종 등이 필요하다.

#### 가. 기상

본 연구의 기상자료는 시험포장으로부터 약 7.3 km 떨어진 수원기상관측소 일별 기상자료를 이용하였으며, 2006년부터 2009년까지 총 4개년 동안의 일별 기상자료를 수집하였다. 수집한 항목은 최고/최저기온, 평균풍속, 상대습도, 강수량, 태양복사량 자료이다. 수집한 기상자료는 DSSAT의 기상자료 입력 프로그램 (WeatherMan)에 의해 모형 입력자료로 구축하였다. 작물생육기간인 5월 중순부터 10월 초순까지의 월평균기온과 강수량은 2006년의 경우 22.1 °C, 1032.4 mm, 2007년의 경우 21.4 °C, 995.0 mm, 2008년의 경우 22.0 °C, 1098.8 mm, 2009년의 경우 21.6 °C, 1204.5 mm이었다.

#### 나. 토양

본 연구의 토양자료는 한국토양정보시스템 (KSIS) 토양지도와 시험포장 현장실측자료를 이용하였다. 한국토양정보시스템의 토양자료에는 토양통, 각 토층별 입경분포 및 수분장력 등을 포함하는 토양의 물리적 특성과 각 토층별 pH, 유기물 함량 및 염기치환용량 등을 포함하는 화학적 특성들이 있다. 아래의 Table

**Table 1 Physical and chemical properties of the soil in the experimental plots (adopted from Jang, 2009)**

Properties	Unit	TR#1	TR#2	TR#3
Sand	%	48.7	48.7	48.7
Silt		32.3	35.3	30.8
Clay		19.0	16.0	20.5
Texture class	-	Loam	Loam	Loam
Organic matter	%	1.74	2.11	1.82
pH (1:5)	-	5.55	5.52	5.53
CEC	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	13.09	12.11	13.29
EC	μS/m	0.473	0.319	0.524
TN	mg kg <sup>-1</sup>	850.0	930.0	950.0
TP		528.2	557.7	358.3
Ca		758.5	853.8	745.2
K		40.9	44.5	49.5

1은 시험포장 현장에서 실측한 토양의 물리적, 화학적 특성을 보여주고 있다.

이 외에도 2006년부터 2009년까지 이양 전, 논벼생육기, 수확 후 등 연 3~4회에 걸쳐 시험포장의 토양시료를 채취한 후, 서울대학교 농업과학공동기기센터 (National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에서 EC, 유기물함량, pH, TN, TP, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 등을 포함하여 16여 가지 항목에 대해 토양 및 식물체분석법 (NAAS, 2000)에 따라 시료분석을 실시하였다. NICEM에서 분석한 토양자료를 바탕으로 DSSAT모형의 초기 토양입력자료 (Initial Condition-Profile)를 결정하였다.

#### 다. 관개량

관개량은 씨레질 후부터 1주~2주 간격으로 시험구마다 설치되어있는 유량계를 통해서 실측하였다. Table 2는 각 년도별 관개량을 보여주고 있다. 2006년과 2007년이 다른 해에 비해 관개량이 보다 많은 것을 확인할 수 있으며, 특히 2006년에는 8월의 관개량이 약 290 mm 정도의 큰 값을 보이고 있다. 이는 당월의 강우량이 66.4 mm로 다른 년도의 강우량 (약 200~300 mm)에 비해 적어 상대적으로 관개를 많이 하였기 때문이다.

#### 라. 관개수질

시험포장의 수질 모니터링을 위해 이양 후부터 9월 말까지 1주~2주 간격으로 관개용수의 수질 시료를 채취하여 NICEM에서 pH, SS, TN, TP, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 등을 포함하여 20여 가지 항목에 대해 수질오염공정시험방법 (MOE, 2000)에 따라

**Table 2 Monthly irrigation amount during growing season between 2006 and 2009 (unit: mm) (adopted from Jung, 2011)**

Year	Treatment	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Total
2006	TR#1	68.9	185.9	0.0	298.8	315.0	0.0	868.6
	TR#2	15.9	196.1	50.1	310.4	326.0	0.0	898.5
	TR#3	42.9	202.8	0.0	281.2	330.7	28.0	885.6
2007	TR#1	158.5	163.7	171.8	175.1	127.2	0.0	796.4
	TR#2	117.2	291.8	144.2	218.4	116.2	0.0	887.8
	TR#3	141.7	250.2	124.8	188.1	109.2	0.0	814.1
2008	TR#1	43.8	10.48	119.0	146.8	199.3	0.0	613.7
	TR#2	39.2	145.6	133.8	123.3	224.9	0.0	666.9
	TR#3	41.2	133.8	67.4	185.8	195.0	0.0	623.2
2009	TR#1	77.9	192.0	51.6	184.8	96.7	0.0	603.0
	TR#2	63.2	154.3	71.9	300.5	104.3	0.0	694.2
	TR#3	111.5	212.9	94.0	119.3	78.1	0.0	615.8

시료분석을 실시하였다. Fig. 3은 2006년~2009년까지 논벼생육기간 동안의 관개용수의 TN과 TP 수질분석결과를 보여주고 있다. TN과 TP농도는 지하수 유입관개수에서 현저히 낮게 나타났고, 하수처리수와 재이용수 관개수의 수질은 서로 유사한 경향을 보였다.

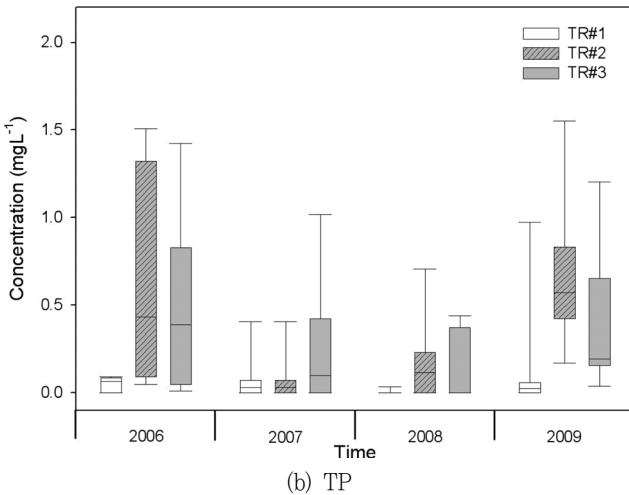
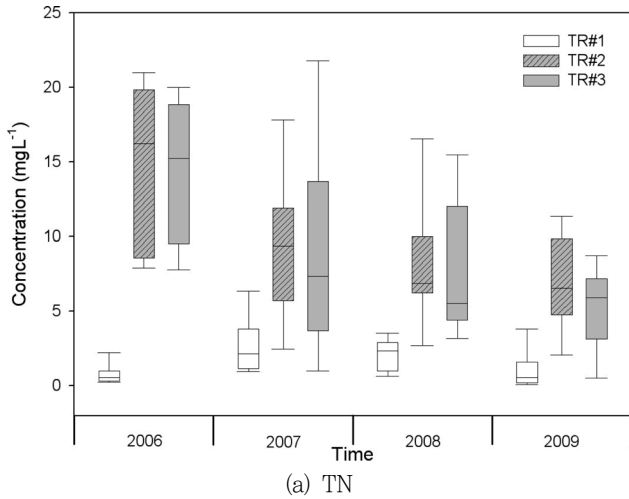


Fig. 3 TN and TP concentrations of irrigation water during growing season (2006~2009)

마. 영농관리

논벼 생육시험을 위한 공시품종은 수원 지방에서 널리 재배되는 충청벼로 하였으며, 중부지방에 대한 표준영농법에 따라서 재식거리를 30 cm×30 cm로 1주 3본씩 손이앙을 실시하였고, 재배 및 물 관리 방법 역시 작물시험장의 표준영농법을 적용하였다 (NICS, 1970). 시험포장 지역의 관행 시비량은 관개수의 특성상 영양물질이 충분하여 타 지역에 비하여 적다. 이를 바탕으로 대상지구의 경우, 기비 시에만 요소 (N 5.5 kg/10a), 용과린 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.5 kg/10a), 염화加里 (K<sub>2</sub>O 4.0 kg/10a)를 시비하였고 분얼비 및 수비는 적용하지 않았다. 이앙시기는 5월 중순부터 시작하고, 추수는 10월 중순에 이루어졌다.

바. 벼 품종모수

CERES-Rice를 어떤 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 실제 재배되고 있는 품종의 생장 및 발육 관련 유전적 특성을 모형에 반영시켜야 한다. 즉 벼의 발육 및 생장의 주요특성을 몇 개의 모수로 표현하고 각 품종별로 서로 다른 값을 부여하는 것이다. 따라서 생육모의의 성공을 위해서는 각 품종의 모수값을 정확하게 추정하는 일이 전제되어야 한다 (Kim et al., 2002).

DSSAT 모형의 CERES-Rice 작물생육모형에 필요한 품종모수는 논벼의 발육단계를 나타내는 P1, P20, P2R, P5가 있으며, 논벼의 수량생산잠재력을 결정하는 G1, G2, G3, G4가 있다. 여기서 P1은 기본영양생장기간, P20는 최적일장, P2R은 지연율, P5는 등숙기간, G1은 건물중당 최대립수, G2는 최대립중, G3는 IR64대비 상대분얼능력, G4는 온도반응성을 각각 나타낸다 (Singh et al., 1992).

4. 모형의 평가

모형의 평가는 시험포장에서 관측한 논벼 수확량을 토대로 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)와 정규화된 평균제곱근오차 (normalized Root Mean Square Error, nRMSE) (Loague and Green, 1991), 그리고 일치도 (Index of agreement, d) (Willmott et al., 1985) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. 정규화된 평균제곱근오차는 다음 식 (1)과 같다.

Table 3 Summary of cropping practices and basal fertilizer amount at the experimental plots between 2006 and 2009

Year	Cultivar	Ploughing and basal fertilization date	Transplanting date	Harvest date	Fertilizer application (kg ha <sup>-1</sup> )		
					N	P2O5	K2O
2006	Chucheongbyeo*	May 21	May 25	October 17	55	45	40
2007	Chucheongbyeo	May 14	May 17	October 24	55	45	40
2008	Chucheongbyeo	May 17	May 19	October 21	55	45	40
2009	Chucheongbyeo	May 16	May 20	October 20	55	45	40

\* *Oryza sativa* L. ssp. *japonica* cv. Chuchengbyeo

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2} \times \frac{100}{M} \quad (1)$$

여기서,  $P_i$ 와  $Q_i$ 는 각각 모의치와 실측치를 의미하며,  $n$ 은 자료쌍의 총 개수,  $M$ 은 실측치의 평균값을 의미한다.  $nRMSE$ 는 모의치와 실측치의 차를 %로 표현하며, 그 값이 10 % 미만일 경우 모형의 적용성이 탁월한 것으로, 10 % 이상 20 % 미만일 경우 좋은 것으로, 20 % 이상 30 % 미만일 경우 평범한 것으로, 30 % 이상일 경우 좋지 않은 모형으로 각각 고려된다 (Jamieson et al., 1991).

일치도 ( $d$ )는 0과 1사이의 값을 갖게 되며 다음 식 (2)와 같다. 일치도가 1에 가까울수록 모형이 적합한 것으로 평가된다.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i'| + |Q_i'|)^2} \quad (2)$$

여기서,  $P_i$ 와  $Q_i$ 는 각각 모의치와 실측치를 의미하며,  $n$ 은 자료쌍의 총 개수,  $|P_i'| = P_i' - M$ ,  $|Q_i'| = Q_i' - M$ 으로  $M$ 은 모의치의 평균값을 의미한다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 벼 품종모수의 보정

벼 품종모수를 보정하기 위해 2006년부터 2007년까지 시험 포장에서 실측된 논벼 수확량 자료를 이용하였다. 품종모수 추정 초기값은 기존의 연구결과 (Kim et al., 2002; Shim et al., 2010)를 바탕으로 단순시행착오법을 이용하여 보정하였다. 매개 변수의 보정에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차, 정규화된 평균 제곱근오차, 일치도 ( $d$ ) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. Table 4는 CERES-Rice 모형의 추정벼 품종모수에 대한 기존 연구결과와 보정된 품종모수를 보여주고 있다.

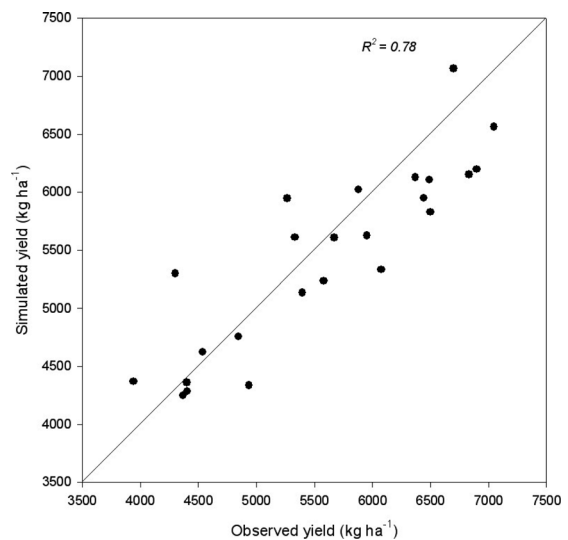
Table 5는 수확량 모의 결과와 그에 대한 통계적인 변량을 나타내고 있다. 단순시행착오법으로 보정된 품종모수를 이용한 모형

**Table 4 Genetic coefficients for calibrating and calibrated value of the Chucheonbyeo**

Classification	P1	P20	P2R	P5	G1	G2	G3	G4
Shim et al. (2010)	390.0	12.0	20.0	520.0	55.0	0.025	0.61	1.00
Kim et al. (2002)	200.0	11.5	105.0	465.0	65.0	0.026	0.60	1.00
Calibrated value	220.0	11.5	105.0	520.0	68.0	0.026	0.60	1.00

**Table 5 Comparison of observed and simulated yields for calibration period**

Year	Experimental plot	Yields (kg ha <sup>-1</sup> )		RMSE (kg ha <sup>-1</sup> )	nRMSE (%)	$d$
		Observed	Simulated			
2006	TR#1-1	4,536	4,624	145	3.0	0.95
	TR#1-2	5,396	5,136			
	TR#1-3	4,844	4,756			
	TR#1-4	4,400	4,361			
	TR#2-1	7,048	6,565	335	5.4	
	TR#2-2	5,672	5,607			
	TR#2-3	5,332	5,610			
	TR#2-4	6,700	7,065	322	5.8	
	TR#3-1	5,580	5,235			
	TR#3-2	5,952	5,625			
	TR#3-3	5,880	6,022			
	TR#3-4	5,264	5,946	378	8.6	
TR#1-1	4,404	4,285				
TR#1-2	3,940	4,369				
TR#1-3	4,368	4,250				
TR#1-4	4,936	4,337				
TR#2-1	6,832	6,152	477			7.3
TR#2-2	6,368	6,129				
TR#2-3	6,492	6,107				
TR#2-4	6,444	5,951				
TR#3-1	6,900	6,199	789			13.3
TR#3-2	6,076	5,333				
TR#3-3	4,300	5,300				
TR#3-4	6,500	5,828				



**Fig. 4 Scatter plots comparing observed and simulated yields for calibration period**

의 보정 결과를 평가한 결과 RMSE는 145~789 kg ha<sup>-1</sup>, nRMSE는 3.0~13.3 %, 일치도 (*d*)는 0.90~0.95의 범위로 모의된 수확량이 실측치를 잘 반영하는 것으로 분석되었다. Fig. 4는 수확량에 대한 모형의 보정 결과를 일대일로 보여주고 있다.

2. 모형의 검정

DSSAT 모형의 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의의 적용성을 평가하기 위해 2008년부터 2009년까지 시험포장에서 실측된 논벼 수확량 자료를 이용하여 보정된 품종모수를 통해 수확량을 모의하였다. 모형의 검정에 대한 평가는 보정에 대한 평가 방법과 동일하게 RMSE, nRMSE, 일치도 (*d*) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. Table 6은 모의한 수확량과 모형의 검정에 대한 통계적인 변량을 보여주고 있다. 모형의 검정 결과 RMSE는 91~538kg ha<sup>-1</sup>, nRMSE는 2.0~10.4 %, 일치도 (*d*)는 0.94~0.98의 범위로 모의된 수확량이

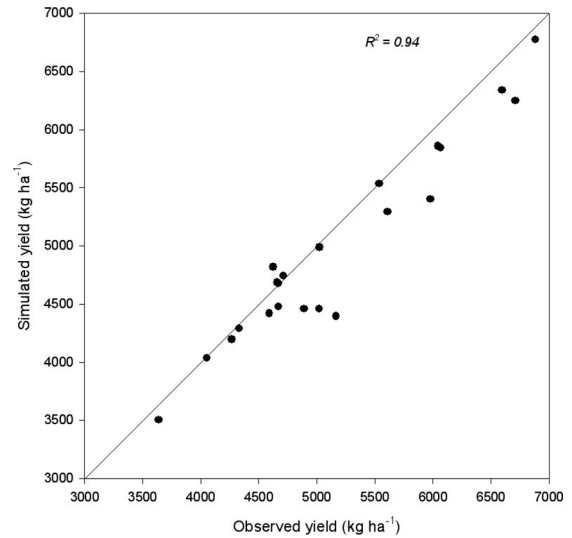


Fig. 5 Scatter plots comparing observed and simulated yields for validation period

Table 6 Comparison of observed and simulated yields for validation period

Year	Experimental plot	Yields (kg ha <sup>-1</sup> )		RMSE (kg ha <sup>-1</sup> )	nRMSE (%)	<i>d</i>
		Observed	Simulated			
2008	TR#1-1	5,020	4,461	290	6.8	0.98
	TR#1-2	4,052	4,035			
	TR#1-3	3,640	3,504			
	TR#1-4	4,268	4,198			
	TR#2-1	7,296	6,791	315	5.6	
	TR#2-2	4,672	4,477			
	TR#2-3	5,024	4,988			
	TR#2-4	5,612	5,294			
	TR#3-1	4,332	4,291	91	2.0	
	TR#3-2	4,712	4,744			
	TR#3-3	4,656	4,687			
	TR#3-4	4,592	4,421			
2009	TR#1-1	4,624	4,819	538	10.4	0.94
	TR#1-2	5,980	5,402			
	TR#1-3	5,168	4,395			
	TR#1-4	4,892	4,461			
	TR#2-1	6,712	6,248	286	4.4	
	TR#2-2	6,044	5,860			
	TR#2-3	6,596	6,340			
	TR#2-4	6,884	6,774			
	TR#3-1	-	4,957	129	2.4	
	TR#3-2	6,068	5,845			
	TR#3-3	4,672	4,678			
	TR#3-4	5,540	5,535			

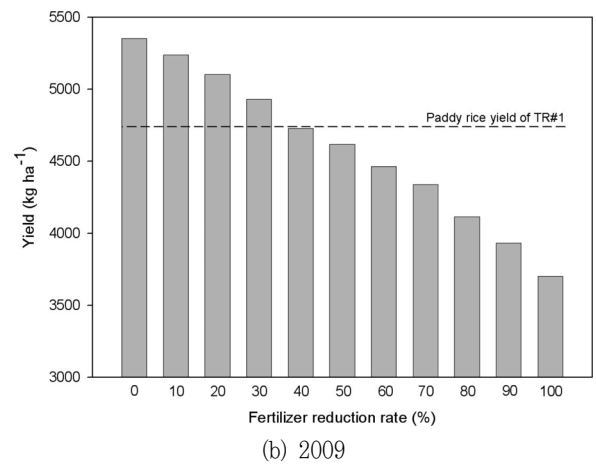
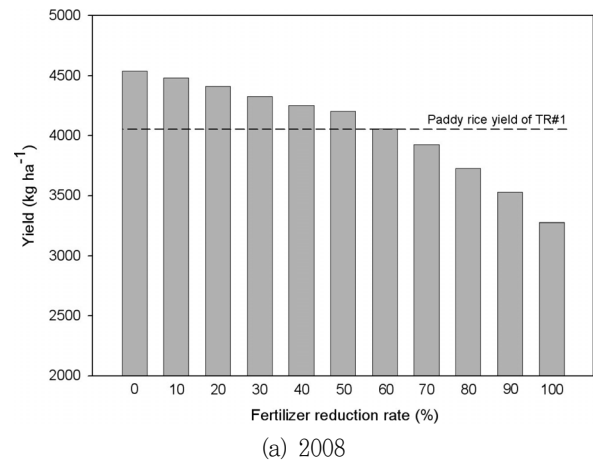


Fig. 6 Assessment results of the fertilizer reduction effect of wastewater reuse irrigation in paddy fields

실측치를 잘 반영하는 것으로 분석되었다. Fig. 5는 수확량에 대한 모형의 검정 결과를 일대일로 보여주고 있다.

### 3. 시비량 저감효과 모의

모형의 보정과 검정 결과에서 보듯이, DSSAT 모형은 하수 처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 적합한 것으로 나타났다. 따라서 본 모형을 통해 적정시비량을 Fig. 6에서 보는 바와 같이 추정하였고, 하수재이용에 따른 시비량 저감효과를 확인 할 수 있다. 지하수를 관개하는 TR#1과 하수 처리수를 안전하게 농업용수로 이용할 수 있게 처리한 TR#3의 수확량 모의의 비교를 통해서 2008년의 경우 60 %, 2009년의 경우 약 40 %의 시비량 저감효과를 확인할 수 있었다. 또한, Cho et al. (2006)은 라이시미터 실험을 통한 하수재이용 논벼 시험을 수행하였으며, 생활하수 재배구에서 현재의 표준시비량을 최대 50 %까지 저감시켜도 벼의 수확량은 최대 10 % 정도 밖에 감소하지 않는 것으로 조사되었다. 이는 포장단위에서 모의한 본 모형을 통한 시비량 저감효과와 유사한 결과를 보여주고 있다. 현재 관행적으로 시비되는 화학비료의 경우 수확량 증대를 목적으로 무분별하게 과용되고 있으며 (Yoon et al., 2003), 본 연구 결과를 바탕으로 재이용 지구를 비롯한 다양한 지구에 정량적인 시비가 이루어질 수 있을 것으로 보인다. 또한 이는 수환경 개선에도 기여할 것으로 기대된다.

## IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 경기도 화성시 진안동에 위치한 시험포장에서 2006년부터 2009년까지 모니터링한 논벼 수확량, 관개량, 관개수질, 토양성분 등을 이용하여 DSSAT 모형의 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 대한 적용성을 평가하고, 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 시비량 저감효과를 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 경기도 화성시 진안동에 위치한 시험포장에서 2006년부터 2009년까지 논벼 수확량, 관개량, 관개수질, 토양성분 등을 모니터링하여 DSSAT 모형의 입력자료로 구축하였으며, 기존의 선행연구를 바탕으로 DSSAT 패키지의 CERES-Rice 작물생육모형의 품종모수를 단순시행착오법을 통해 추정하였다.
2. 자료기간 동안 관측한 논벼 수확량을 이용하여 품종모수를 보정하였고, DSSAT 모형을 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 적용한 결과 실측치를 잘 반영하여, 그 적용성이 있는 것으로 평가되었다.
3. 본 모형을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 시비량 저감효과를 평가한 결과 40~60 %의 시비량 저감

효과가 있는 것으로 나타났으며, 이는 수환경 개선에도 기여할 것으로 보인다.

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 “새만금유역 농업비점오염 저감기법개발 공동연구 제4세부 「농업비점오염 저감을 위한 영농방법 개선기법 개발」 과제”의 일부 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Chae, Young Am, Goo, Ga Oak, Seo, Hak Soo, Lee, Young Man, 1991. Basic Biostatics, Hyangmoonsa, Seoul, Korea (in Korean).
2. Cho, Kyung Sook and Yun, Jin-II, 1999. Regional Crop Evaluation and Yield Forecast of Paddy Rice Based on Daily Weather Observation, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 1(1): 12-19 (in Korean).
3. Cho, J. Y., Park S. W., Son, J. G., Park B. J., Li, L. G., 2006. Rice Growth Response and Soil Quality by Domestic Wastewater Irrigation on Rice Paddy Field -Lysimeter experiment-, *Korean Sociey of Rural Planning*, 12(2): 49-56 (in Korean).
4. Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27: 337-350.
5. Jang T. I., 2009. Environmental effects of reclaimed wastewater irrigation on paddy fields. Doctoral Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
6. Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkense, U. Singh, A. J. Gijsman and J. T. Ritchie, 2003. The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.
7. Jung K. W. 2011. Effects of Reclaimed Wastewater Irrigation on Paddy Rice Growth and Yield. Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
8. Kim, Y. H., H. D. Kim, S. W. Han, J. Y. Choi, J. M. Koo, U. Chung, J. Y. Kim, and Jin I. Yun, 2002. Using

- Spatial Data and Crop Growth Modeling to Predict Performance of South Korean Rice Varieties Grown in Western Coastal Plains in North Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 4(4): 224-236 (in Korean).
9. Korean Soil Information System (KSIS), 2011. <http://asis.rda.go.kr>. Accessed 17 Feb 2011
  10. Liu, H. L., J. Y. Yang, C. S. Tan, C. F. Drury, W. D. Reynolds, T. Q. Zhang, Y. L. Bai, J. Jin, P. He, G. Hoogenboom, 2011. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model, *Agricultural Water Management* 98: 1105-1111.
  11. Loague, Keith and Richard E. Green, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application, *Journal of Contaminant Hydrology* 7: 51-73.
  12. Marin, F. R., Jones, J. W., Royce, F. Suguitani, C. Donzeli, J. L., Filho, W. J. P., Nassif, D. S. P., 2011. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane, *Agronomy Journal*, 103(2): 304-315
  13. Ministry of Environment (MOE), 2000. Official analytical methods for water pollution, Gyeonggi-do: Korea (in Korean).
  14. Ministry of Environment (MOE), 2007. A Guide to Wastewater Reuse, Gyeonggi-do, Korea (in Korean).
  15. National Academy of Agricultural Science (NAAS), 2000. Soil and plant analytical methods, Gyeonggi-do: Korea (in Korean).
  16. National Institute of Crop Science (NICS), 1970. Research report (paddy rice) (in Korean).
  17. Park S. W., 2007. Application of wastewater reuse system for agriculture (code#4-5-2). Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
  18. Park S. W., 2011a. Application of integrated technologies for wastewater reclamation and reuse system for agriculture (code#4-5-3). Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean)
  19. Park, S. W., 2011b. The present condition and outlook on agricultural reuse of reclaimed wastewater in Korea, A regular general meeting of Korea National Committee on Irrigation and Drainage: 105-132 (in Korean).
  20. Shim, Kyu-Moon, Roh, Kee-An, So, Kyu-Ho, Kim, Gun-Yeob, Jeong, Hyun-Ceol and Lee, Deog-Dae, 2010. Assessing Impacts of Global Warming on Rice Growth and Production in Korea, *Climate Change Research*, 1(2): 121-131 (in Korean).
  21. Sinclair, T. R. and Seligman, N. G., 1996. Crop modeling: from infancy to maturity, *Agronomy Journal* 88: 698-704.
  22. Singh, U., J. T. Ritchie, and D. C. Godwin, 1992. A User's Guide to CERES-Rice. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, USA.
  23. SUN, F., LIN, E., LI, J., XIONG, W., 2009. Study on Adaptation Measures of Potato Production by Using DSSAT Crop Model, *Chinese Journal of Agrometeorology*, 29(2): 127-133.
  24. Willmott, Cort J., Steven G. Ackleson, Robert E. Davis, Johannes J. Feddema, Katherine M. Klink, David R. Legates, James O'donnell, and Clinton M. Rowe, 1985. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5): 8995-9005.
  25. Yoon, C. G., Ham, J. H.. and Jeon, J. H., 2003. Mass balance analysis in Korean paddy rice culture. *Paddy and Water Environ.* 1(2): 99-106.