

논에서의 오염부하 예측을 위한 범용모형 개발

전지홍 · 윤춘경* · 황하선 · 윤광식¹

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹전남대학교 농업생명과학대학 농업과학기술연구소)

Water Quality Model Development for Loading Estimates from Paddy Field. Jeon, Ji-Hong, Chun-Gyeong Yoon, Ha-Sun Hwang and Kwang-Sik Yoon¹ (Department of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea, ¹College of Agriculture, Inst. Agri. Science & technology, Chonnam National Univ. Kwangju, 500-757, Korea)*

Water quality model applicable paddy field was developed using field experiment during 1999~2002. This model involves inputs from fertilization and sediment release as dirac delta function and continuous source function, respectively, and can simulate various processes such as ponded depth, surface drainage, total nitrogen concentration and total phosphorus concentration in a daily basis. The model was calibrated using data collected from field experiments which was irrigated with ground water and validated from field experiments which was irrigated with surface water. The nutrient concentration of surface water depended on the fertilization and dirac delta function can efficiently explain the valiance of nutrient concentration of surface water by fertilizer. As a result of calibration and validation, this model demonstrates good agreement. The model fit efficiencies (R^2) of ponded depth, surface concentration of TN and TP were 0.93, 0.98 and 0.95, respectively for calibration, and those of TN and TP were 0.99 and 0.70, respectively for validation. We can apply lake and reservoir model to analysis paddy field considered with shallow ponded system, but it will need so many parameters and have much uncertainty. Fortunately, paddy field have a series of cultural practices yearly basis, such as irrigation-fertilization-forced drain-harvest with a similar time, so simple model may explain the mechanism for paddy field. Water quality model for paddy field developed in this study is simply, needs little parameters, but appeared high applicability to evaluate paddy filed drainage. We recommend this model to estimate nutrient loading from paddy field and establish best management practice.

Key words : water quality model, paddy field, nitrogen, phosphorus, dirac delta function

서 론

최근 들어서는 비점오염이 수계에 미치는 영향에 대하여 점차 관심이 증대하고 있으며, 수질규제에 있어 점오염의 농도규제는 한계를 들어내고 있다. 미국의 경우

수질규제에 있어 점오염 뿐만 아니라 비점오염을 고려할 수 있는 TMDL (Total Maximum Daily Loadings)을 적용하고 있으며 우리나라의 경우도 이미 오염총량제를 4대강에 걸쳐 적용하고 있는 실정이다. 현재 우리나라 오염총량제의 적용에는 원단위를 적용하고 있으나, 비점오염의 유출량과 오염물질 배출량은 강우량에 크게 의

* Corresponding author: Tel: (02) 450-3747, Fax: (02) 446-2543, E-mail: chunyoong@konkuk.ac.kr

존하며, 특히 논외의 경우 강우량 뿐만 아니라 시비 및 농경배수에 의해 크게 영향을 받기 때문에 획일적인 원단위의 적용에는 무리가 있다. 우리나라 토지이용상태를 살펴보면 전체 면적의 64%가 임야로써 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 그 다음이 논으로써 전체면적의 12%로 인간의 활동이 이루어지는 토지이용으로써는 가장 많은 면적을 차지하고 있다. 현재 우리나라의 비점오염부하의 많은 양이 논에서 유출되는 것으로 간주하고 있으나 일부 연구자는 오히려 정화기능을 가지고 있다는 연구결과를 발표함으로써 서로 상반된 의견이 나오고 있다 (Eom, 2001; Lee, 2001; 권, 2002). 따라서, 합리적인 오염총량제 적용에 의한 수질개선효과를 기대하기 위해서는 논에서의 유출특성 파악이 선행되어야 한다.

논에서의 수문 및 수질반응 메카니즘은 매우 복잡하며, 그에 대한 정량적인 측정에는 많은 시간과 노력을 필요로 하며 논에서의 수문 및 오염부하 특성에 대한 연구는 근래에 들어서야 본격적으로 이루어지기 시작했다. 홍과 권 (1989), 그리고 신과 권 (1990)이 농경지 원단위 비점원오염에 대한 연구를 수행하여 수질관리 및 예측에 관한 기초자료를 제시하였으며, 오 (2000)가 강우시 농경지 배출수에 대한 영양물질의 농도를 분석하여 유출계수에 의한 부하량의 산정을 시도한 바 있다. 김 등 (1999)에 의해 광역논에서의 질소, 인의 농도와 오염부하량 특성에 대한 연구가 수행되었으며, 황 등 (2002)은 지하수 관개 필지논에서의 물질수지를 분석하였고, 윤 등 (2002)은 지하수 관개 광역논에서의 배출부하 특성을 고찰하였으며, 조 등 (2000)은 비영농기간 단일필지 논으로부터의 영양물질의 유출 부하량을 연구한 바 있다. 그리고, 윤 등 (2001, 2002)은 오수처리수의 농업용수 재이용에 대한 가능성을 제시한 바 있다. 논에서의 오염부하 모니터링 결과는 기상조건과 관리 방법 및 수원공에 따라 그 결과가 상이함을 알 수 있다.

논에서의 유출은 강우 뿐 아니라 인간의 조작에 의해 크게 좌우되기 때문에, 꾸준한 모니터링 뿐만 아니라 이를 이용하여 논에서의 수문 및 수질을 예측할 수 있는 모형개발은 논에서의 최적관리기법 수립과 우리나라 특성에 적합한 유역모형 개발을 통한 합리적인 오염총량제 적용에 반드시 필요한 과제라고 할 수 있다. 서 등 (2002)과 Chung *et al.* (2003)은 외국에서 개발된 CREAMS와 GLEAMS모형을 수정하여 논에서의 부하량을 예측할 수 있는 모형을 개발하였으나, 이들 모형은 수많은 입력자료를 필요로 한다. 그러나, 논에서의 영농활동은 유사한 기간에 해마다 반복적으로 이루어지며, 특히 주 유입원인 비료는 동일한 형태의 동일한 양이 투입되기 때문

에 보다 간단한 반응공식으로도 예측이 가능할 것으로 판단된다. USLE와 같이 간단하면서도 적용성이 인정된 모형이 세계적으로 널리 이용되고 있는 만큼, 손쉽게 적용할 수 있는 범용성 있는 모형개발 또한 중요한 것으로 생각된다.

본 연구에서는 경기도 여주군의 지하수 관개논의 2001년에서 2002년 영농기간 동안의 모니터링 자료와 전라북도 진안군의 지표수 관개논의 1999년에서 2000년 영농기간 동안의 모니터링 자료를 이용하여 논에서의 유출량 및 수질을 예측할 수 있는 모형을 개발함으로써 우리나라의 비점오염분야 및 오염총량관리에 도움을 주고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지역

진국대학교 부속농장 (경기도 여주군 가남면소재)을 선정하여 지하수 관개 필지논과 전라북도 진안군 마령면 평지리에 위치한 지표수 관개 필지논의 모니터링 자료를 축적하였으며 Fig. 1과 같다. 지하수 관개 필지논과 지표수 관개 필지논의 면적은 각각 2,520 m², 5,000 m²으로써 시험구의 유입구와 유출구에 각각 가로 30 cm, 세로 22 cm의 사각 weir를 설치하여 물꼬 높이를 조절하였으며 윗논에서의 유입과 지표유출량을 측정하였고, 지하수 관개 필지논의 경우 시험구내 자동수위계를 설치하여 논에서의 담수심과 관개수량을 측정하였으며, 직경 22 cm의 침투량계와 침투수 시료채취용 ceramic porus cup을 이용하여 침투수량 및 부하량을 측정하였다.

연구기간동안 영농활동은 Table 1과 같다. 지하수 관개논의 투여된 시비량은 농업과학기술원 고시 표준시비량을 따랐으며, 인과 칼륨은 전량 기비에 투여되었고, 질소는 기비, 이삭비, 분얼비로 각각 나누어 투여하였다. 지하수 관개논의 공시품종은 일품벼로써 5월 말경에 재식거리 15×30 cm로 1주 4본씩 기계이앙하였으며, 지표수 관개논의 공시품종은 화선찰벼이며 5월 25일에 재식거리 15×30 cm, 1주 당 3본씩 기계이앙을 실시하였다.

2. 모형개발

1) 지표유출

논은 담수상태로 유지되므로 이에 대한 물수지는 담수심의 변화량으로 표현되며 포장의 담수심 (W)은 다음과 같은 물수지 식으로 표현된다 (최 등, 2001).

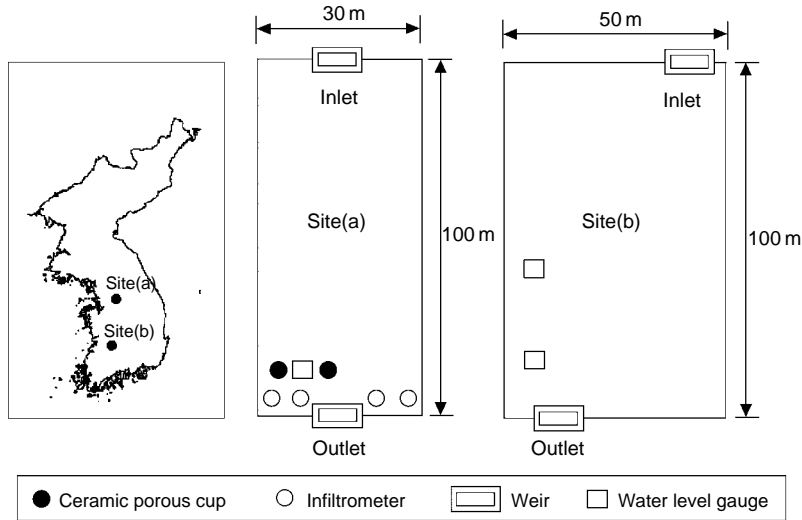


Fig. 1. Layout of study area and location of sampling stations

Table 1. Agricultural activities during the study period.

(a) paddy field with ground water irrigation

2001	2002	Agricultural activity	Remark
May 20	May 27	Plowing and basal fertilization	Phosphorus (19.64 kg/ha), Nitrogen (55.00 kg/ha)
May 29	May 27	Rice transplanting	15 × 30cm, four plants/hill
June 9	June 7	Tillering fertilization	Nitrogen (33.00 kg/ha)
July 17	July 26	Panicle fertilization	Nitrogen (22.00 kg/ha)
October 7	October 12	Harvest	-

(b) paddy field with surface water irrigation

1999	2000	Agricultural activity	Remark
May 22	May 20	Plowing and basal fertilization	Phosphorus (12.66 kg/ha*, 13.54 kg/ha**), Nitrogen (76.00 kg/ha*, 84.00 kg/ha**)
May 25	June 2	Rice transplanting	15 × 30 cm, three plants/hill
June 15	June 14	Tillering fertilization	Nitrogen (28.00 kg/ha)
July 30	July 23	Panicle fertilization	Nitrogen (1,8.00 kg/ha*, 28.00 kg/ha**)
October 2	October 10	Harvest	-

* is for 1999; **is for 2000

$$Pd_i = Pd_{j-1} + IR_{1j} + IR_{2j} + PR_j - (DR_j + ET_j + INF_j) \quad (1)$$

여기서, Pd_j = 당일 담수심 (mm), W_{j-1} = 전일 담수심 (mm), IR_{1j} = 당일 관개량 (mm), IR_{2j} = 당일 빗눈 유입량 (mm), PR_j = 당일 일 강우량 (mm), DR_j = 당일 지표배수량 (mm), ET_j = 당일 증발산량 (mm), INF_j = 당일 침투량 (mm)이며, 첨자 j 는 j 번째 일자를 나타낸다.

본 연구에서 개발된 모형의 수문해석 개념도는 Fig. 2와 같다. 논에서의 유입수량은 관개, 빗눈유입, 강우, 그리고 유출량에는 증발산량, 침투량, 지표유출로 구성되어 있으며 논에서의 담수심 예측은 식 (1)을 이용하였다.

증발량 산정에는 Penman-Montheith (Monteith, 1965)에 의해 산정된 잠재증발산량에 벼의 작물계수 (K_c) (김 등, 1994)를 곱하여 실제증발산량을 산정하였으며, 지표유출량과 침투량은 수심에 대한 계수를 곱하여 산정하였는데, 각각의 공식은 다음과 같다.

$$ET = PET \times K_c \quad (2)$$

$$DR = (Pd - D) \times a_1 \quad (3)$$

$$IF = Pd \times a_2 \quad (4)$$

여기서 ET = 실제증발산량 (mm) PET = 잠재증발산량 (mm), K_c = 작물계수, D = 물꼬 높이 (mm), DR = 지표배수

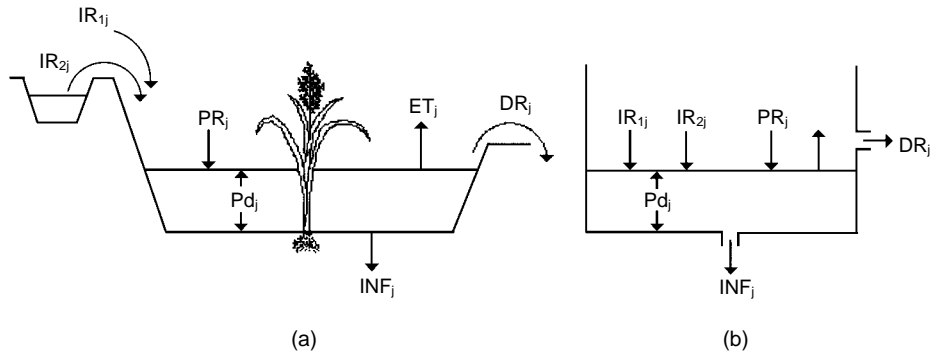


Fig. 2. Water balance concept in paddy field (a) and this model (b).

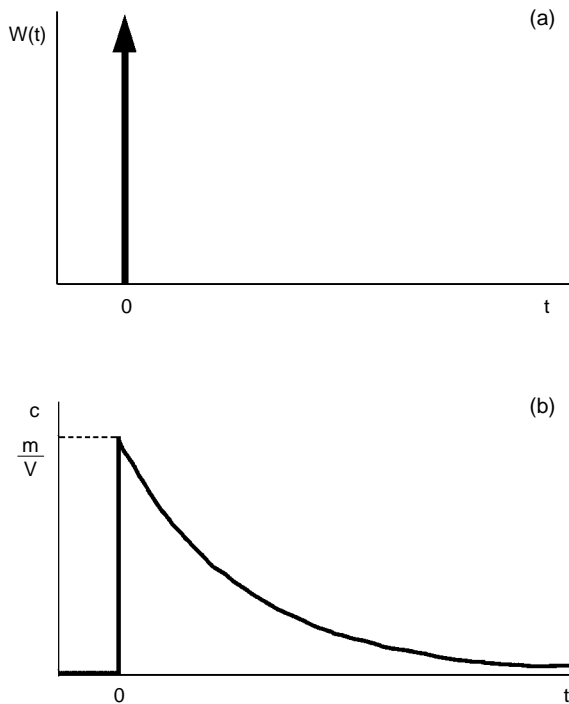


Fig. 3. Loading and concentration plot of impulse loading.

량 (mm), P_d = 답수심 (mm), a_1 = 지표유출계수, a_2 = 침투 유출계수이다. a_1 과 a_2 는 보정 인자로써, a_1 은 논에서의 유출고를, a_2 는 평상시 답수심의 변화를 기준으로 하여 시행착오법으로 보정인자를 결정하였다.

2) 수질

논에서의 주된 유입원인 비료는 영농기간동안 일정한 양이 일정한 기간에 거의 일정한 형태로 투입된다. 또한 영농초기의 관개와 영농후기의 완전낙수로 인하여 당해연도의 부하는 다음해의 수질에 미치는 영향이 작기 때문에,

관개-시비-낙수-수확과 같은 일련의 과정은 해마다 거의 일정한 경향을 가지면서 반복하는 것으로 생각하였다. 본 연구에서 개발된 모형은 다음과 같은 특징을 가진다.

- 논은 완전혼합반응조 (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR)로 가정하였다.
- 계산단위를 일별로 하는 daily continuous model이다.
- 주요 수질 항목은 부영양화에 영향을 주는 T-N과 T-P이다.
- 논에서의 영양물질의 주요 공급원은 비료와 바닥에서의 용출로 가정하였다.

(1) 시비에 의한 수질 모의

Dirac delta 함수 (혹은 impulse loading)은 상대적으로 짧은 시간에 다량의 오염물질이 유입되는 현상, 예를 들어 수계에 갑작스런 사고로 인한 오염원의 유출과 같은 현상을 해석하는데 많이 사용된다. 비료의 유입 또한 일시적으로 다량의 영양물질이 유입되므로 delta 함수로써 시비에 의한 농도변화에 모의가 가능할 것으로 판단하였다. Delta 함수는 $t=0$ 에서 무한히 길고 얇은 선의 형태를 가지며 면적은 1이 된다. 이는 다음과 같은 특성을 가지고 있다 (Fig. 3).

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0 \tag{5}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \tag{6}$$

순간적으로 수계로 유입되는 오염물질은 다음과 같이 표현한다.

$$W(t) = m\delta(t) \tag{7}$$

여기서, m 은 순간적으로 유입되는 오염물질의 양이며 delta 함수는 T^{-1} 의 차원을 가진다. 또한 1차 반응역학을 갖는 CSTR의 물질수지에 대한 정상상태 및 일반해는

$$\frac{dc}{dt} + \lambda c = \frac{W(t)}{V} \tag{8}$$

이때, 식 7을 식 8에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{dc}{dt} + \lambda c = \frac{m\delta(t)}{V} \tag{9}$$

이 식의 특수해는 다음과 같다.

$$c = \frac{m}{V} e^{-\lambda t} \tag{10}$$

이 해는 순간적으로 유입된 오염물질이 수계의 전체에 혼합되어 초기농도가 m/V 가 됨을 의미한다. 따라서 농도는 λ 의 값에 따라 지수적으로 감소하는 일반해(식 11)와 일치하는 것을 알 수 있다.

$$c = c_0 e^{-kt} \tag{11}$$

(2) 바닥에서 용출에 의한 수질모의

시비를 제외하고 고려되어야 할 항목은 주요 바닥에서의 용출이다. 즉, 비교적 수질이 양호한 관개수를 유입하였을 경우 논 표면수는 논바닥에서의 용출에 의한 기본농도(background concentration)을 가지게 되는데, 이는 수학적으로 continuous source 함수로써 표현할 수 있다. 이는 $t=0$ 에서 W 로 불연속성으로 상승하는 on-off 함수로써 다음과 같이 표현된다.

$$W(t) = 0, \quad t < 0 \tag{12}$$

$$W(t) = W, \quad t \geq 0 \tag{13}$$

여기서 W 는 바닥에서의 일정 수준의 부하 ($M T^{-1}$)이며, 특수해는 다음과 같다.

$$c = \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \tag{14}$$

이 해는 0에서 출발하여 새로운 정상상태의 농도에 접근한다. 식 14에서 시간이 ∞ 가 되었을 때 지수항이 매우 작아져 정상상태의 농도(식 15)와 같아진다.

$$c = \frac{W}{\lambda V} \tag{15}$$

따라서, 두 매개변수는 계단부하에 대한 반응을 나타내며, 정상상태가 되었을 때의 농도는 반응의 크기를 나타낸다(Fig. 4).

$$\bar{c} = \frac{W}{\lambda V} \tag{16}$$

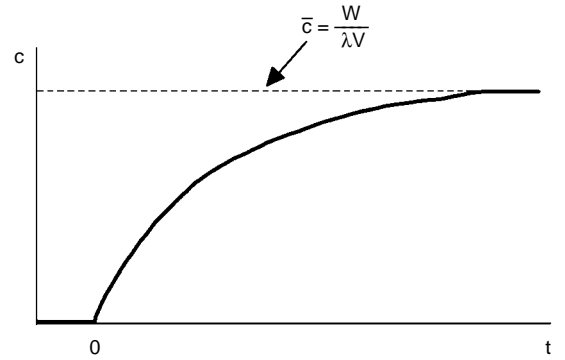


Fig. 4. Concentration plot of step loading.

그러나, 본 모형은 daily simulation model이기 때문에 식 14를 적용할 경우, 증발산이나 침투에 의해 담수체적이 작아지면 논에서의 농도는 지속적으로 증가하게 된다. 바닥에서의 용출은 일정농도에서 평행 상태를 유지하는 것을 감안해 볼 때, 본 모형에 적용하기 위해서는 바닥에서의 부하 W 를 고정시키는 것보다 정상상태의 농도를 고정시키는 것이 타당할 것으로 판단되어 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$c = \bar{c}(1 - e^{-\lambda t}) \tag{17}$$

3) 모형의 적용방법

위의 식을 이용하여 Fortran 프로그램으로 모형을 개발하였으며, 본 모형의 적용성을 평가하기 위하여 지하수 관개지역의 2001에서 2002년 동안 실측자료와 지표수 관개지역의 1999년에서 2000년 동안 실측된 자료를 이용하여 담수심, 지표유출고, TN과 TP의 표면수 농도에 대하여 보정 및 검증을 각각 실시하였다. 모형에 의한 예측치의 정량적인 평가를 위하여 평균오차(AE), root mean square error(RMSE, %), root mean square(RMS, %)와 Model fit efficiency(Nash-Sutcliffe coefficient, EF) 등과 같은 통계적인 분석을 실시하였다. EF는 예측치와 실측치의 1:1 plot에서의 근접정도를 나타내며 AE, RMSE, RMS, EF의 가장 이상적인 값은 0, 0, 0, 1이다. 각각의 공식은 다음과 같다(Nash and Sutcliffe, 1970; Loague and Green, 1991).

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i}{n} \tag{18}$$

$$RMSE = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n)^{1/2}}{\bar{O}} \times 100 \tag{19}$$

$$RMS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i}{n} \right)^{1/2} \times 100 \quad (20)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2} \quad (21)$$

여기서, P_i = 예측치, O_i = 실측치, n = 자료의 개수, \bar{P} = 예측치의 평균, \bar{O} = 실측치의 평균이다.

결과 및 고찰

1. 논에서의 물수지 분석 결과

연구기간동안의 지하수 관개논과 지표수 관개논의 물수지 분석결과는 Table 2와 같다. 본 연구기간 동안 논에서의 증발산량은 대략 500~700 mm 사이를 나타내었다. 침투량은 지하수 관개논의 경우 100 mm 미만이었고,

지표수 관개논의 경우 약 200~300 mm 사이를 나타내었으며, 이러한 차이는 토양의 특성에 영향을 받은 것으로 판단된다. 지표수 관개논과 지하수 관개논의 물관리기법에는 큰 차이를 나타내었다. 비교적 물이 풍부한 지표수 관개논의 경우 5월에서 8월까지 꾸준히 관개가 이루어졌으나, 물이 부족한 지하수의 경우 첫 두 달동안만 관개가 이루어졌으며, 그 이후에는 강우와 빗눈유입에 의해 담수심이 유지되었으며 중간낙수 이후의 관개는 강우에 의존하는 것으로 나타났다. 따라서 관개량은 지하수 관개논에 비해 지표수 관개논이 비교적 많은 양을 나타내었으며 이는 지표수 관개논의 높은 침투량에 대한 소비수량의 증가에 영향과 물이 부족한 지하수 관개논의 효율적인 물꼬 관리가 주 요인으로 판단된다.

2. 모형의 보정 및 검증

연구기간동안 지하수 관개논의 담수심과 유출고, 지표

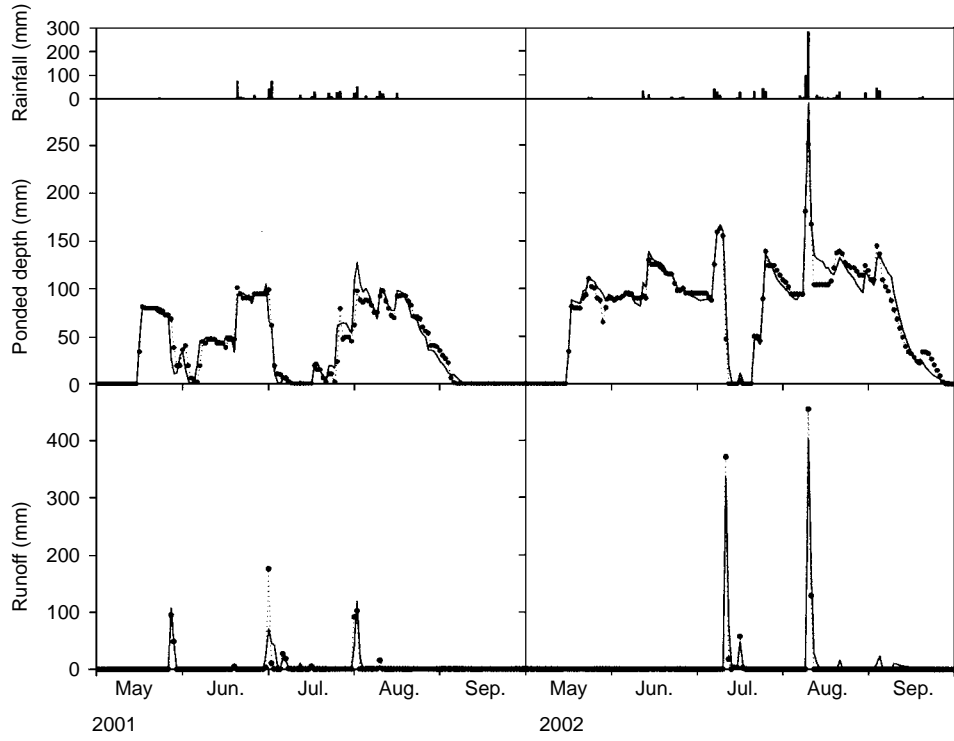
Table 2. Water balance analysis during growing season.

(a) paddy field with ground water irrigation

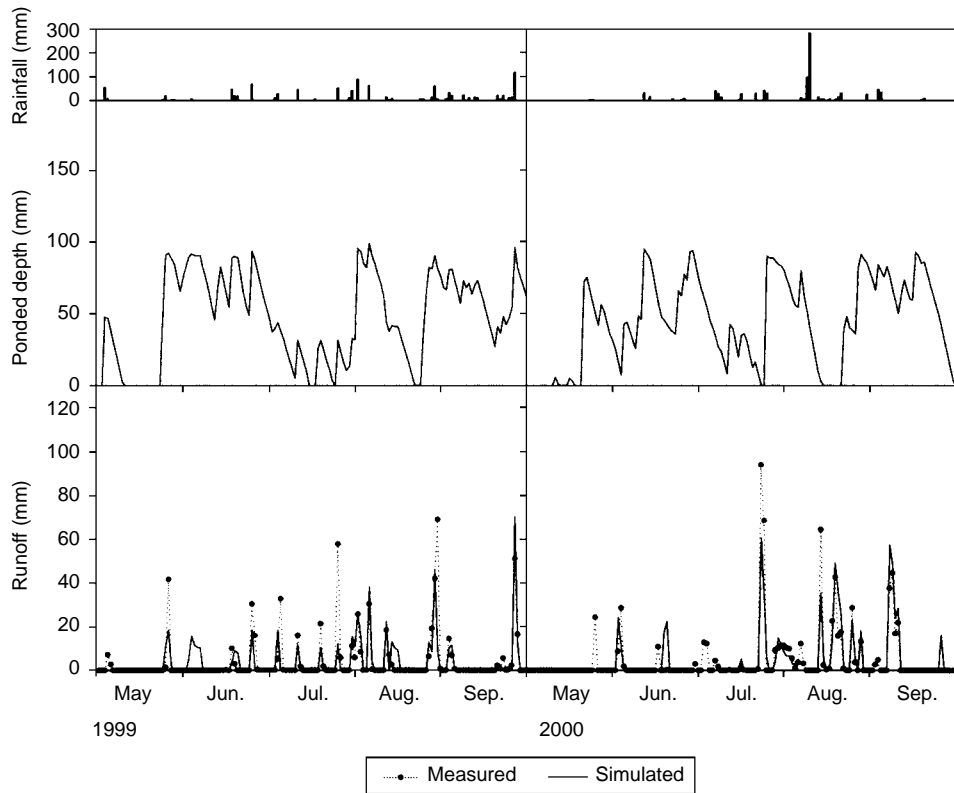
		Inflow (mm)				Outflow (mm)			
		IR ₁	IR ₂	PR	Sum	DR	ET	INF	Sum
2001	May	54.1	102.7	7.0	163.7	143.1	51.0	23.2	217.2
	Jun.	65.5	41.9	212.5	319.8	182.4	100.0	32.9	325.1
	Jul.	0.0	257.6	202.4	460.0	252.9	160.6	5.5	409.1
	Aug.	0.0	11.0	89.4	100.4	14.8	174.7	14.4	203.9
	Sep.	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sum	119.6	413.2	511.3	1043.9	593.2	486.3	76.0	1155.3
2002	May	151.7	0.0	7.0	158.7	0.0	58.6	23.1	81.7
	Jun.	61.6	0.0	61.4	123.0	0.0	111.9	33.8	145.7
	Jul.	0.0	461.6	217.2	678.8	452.9	137.1	13.8	603.8
	Aug.	0.0	325.6	531.6	857.2	583.3	135.0	14.9	733.3
	Sep.	0.0	0.0	48.2	48.2	0.0	85.2	7.4	92.6
	Sum	213.3	787.3	865.4	1865.9	1036.2	527.8	93.0	1657.1

(b) paddy field with surface water irrigation

		Inflow (mm)				Outflow (mm)			
		IR ₁	IR ₂	PR	Sum	DR	ET	INF	Sum
1999	May	160.2	—	96.0	256.2	53.0	108.2	72.5	233.7
	Jun.	147.7	—	160.3	308.0	59.7	107.8	77.2	244.7
	Jul.	96.1	—	285.6	381.7	292.1	131.1	45.4	468.6
	Aug.	162.0	—	218.8	380.8	210.1	118.5	49.5	378.1
	Sep.	0.0	—	268.8	268.8	86.2	85.6	65.5	237.3
	Sum	566.0	—	1,029.5	1,595.6	701.1	551.2	310.1	1,562.3
2000	May	32.7	—	39.6	72.3	0.0	50.2	25.0	75.2
	Jun.	115.2	—	255.6	370.7	74.2	132.6	60.2	267.1
	Jul.	94.6	—	279.4	374.0	198.7	189.1	48.0	435.8
	Aug.	155.3	—	347.6	502.9	283.3	191.0	40.4	514.7
	Sep.	15.3	—	291.4	306.7	145.0	119.1	61.0	325.1
	Sum	413.1	—	1,213.6	1,626.7	701.2	682.0	234.6	1,617.9

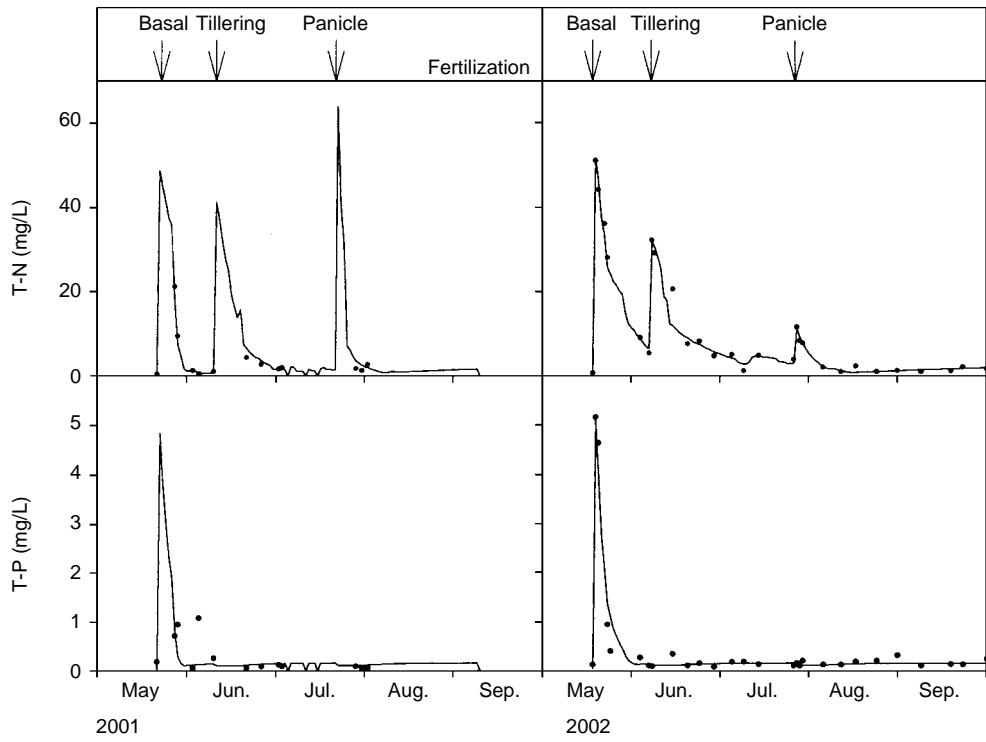


(a) Calibration and validation for ground water irrigation paddy field.

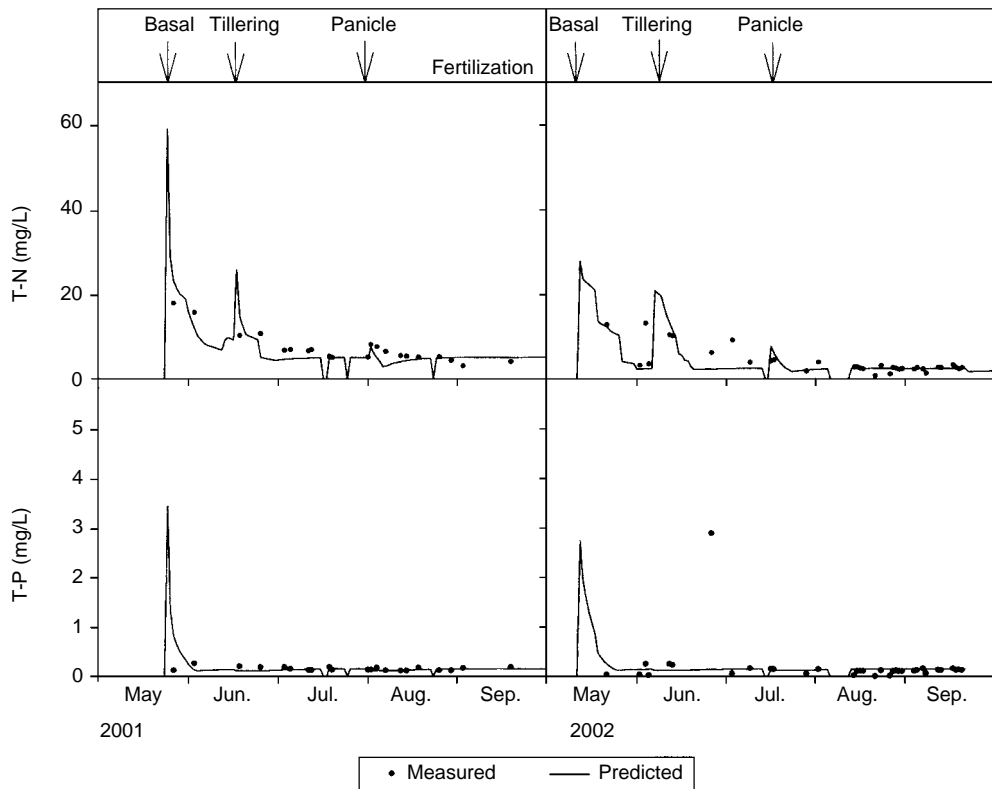


(b) Calibration and validation for surface water irrigation paddy field.

Fig. 5. Precipitation, observed and simulated pondered depth, and runoff from paddy field.



(a) Calibration and validation for ground water irrigation paddy field.



(b) Calibration and validation for surface water irrigation paddy field.

Fig. 6. Fertilization, observed and simulated T-N, and T-P concentration in surface water quality of paddy field.

수 관개논의 유출고에 대한 실측치와 예측치의 비교는 Fig. 5와 같다. 논에서의 담수심은 강우와 관개에 의해 유지되었으며, 지표유출은 낙수와 강우유출에 의해 발생하였다. 지표수 관개논의 경우 영농기간 동안 꾸준히 관개수가 공급되었으며 유출의 빈도가 상대적으로 많은 반면, 지하수 관개논의 경우 영농초기의 3~4회의 관개에 의해 담수심이 유지되었으며, 지표유출의 경우 발생 빈도가 낮았으며 강우에 의한 지표유출은 2001년과 2002년 모두 총 2회만 발생하였으며, 낙수에 의한 유출은 2001년에 두 번, 2002년에 한 번 각각 발생하였다. 모형의 예측결과 담수심이 실측된 지하수 관개논의 경우 정확한 담수심 예측을 통한 신뢰성 있는 유출고 예측이 가능하였다. 반면에 담수심 실측이 되지 않은 지표수 관개논의 경우 유출고를 기준으로 논둑높이와 낙수 시기를 결정하여 유출고를 예측하였으며, 논에서의 복잡한 수문기작을 감안해볼 때 단순한 모형임에도 불구하고 신뢰성 있는 예측이 가능하였다.

연구기간동안 논 표면수의 TN과 TP에 대한 실측치와 예측치는 Fig. 6과 같다. 논 표면수의 영양물질 농도는 비료에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 다량의 시비가 이루어지는 영농초기의 기비에 의해서 높은 TN과 TP 농도를 나타내었으며 시비 투여이후 농도는 급속히 감소하는 것으로 나타나 전형적인 Dirac delta 함수를 나타내었다. 인의 경우 영농초기 기비에 의해 전량이 투여되기 때문에 5월달에 높은 농도를 나타내었으나, 질소의 경우 기비, 이삭비, 추비로 각각 나누어 투여되기 때문에 최소한 5월과 6월달까지는 높은 농도를 나타내었다.

모형에 의한 예측치와 실측치의 통계적 분석 결과는 Table 3과 같다. 지하수 관개논에 대한 보정결과 담수심과 TN, TP 농도 예측에 대한 평균오차는 각각 0.81 mm, -0.11 mg/L, -0.06 mg/L였으며, 모형 효율 (EF)는 각각 0.93, 0.98, 0.95를 나타내었으며, 지표수 관개논에 대한 검증결과 TN, TP 농도 예측에 대한 평균오차는 각각 -0.53 mg/L, 0.02 mg/L였으며, 모형효율 (EF)는 각각 0.99, 0.70으로 나타나 본 연구에서 개발된 모형의 높은 적용가능성을 나타내었다.

본 모형의 보정 및 검증에 사용된 인자는 Table 4와 같다. 유출계수는 비교적 높은 값인 0.80을 가짐으로써 대상 지역의 지체시간이 매우 짧은 것으로 나타났다. TN의 기비, 분얼비, 이삭비에 대한 시비부하상수의 범위는 (m_1, m_2, m_3)는 각각 20~46 kg/ha, 17~33 kg/ha, 9~19 kg/ha로 나타나 실제 투입된 양과 차이를 나타내었으나 대부분의 경우 시비가 이루어지고 일정 시간이 지

Table 3. Model performance statistics for ponded depth, and surface TN and TP concentration data predicted with water quality model for paddy field.

	Ponded depth (mm)		TN (mg/L)		TP (mg/L)	
	Calibra-tion	Valida-tion	Calibra-tion	Valida-tion	Calibra-tion	Valida-tion
AE	0.81	-	-0.11	-0.53	-0.06	0.02
RMSE, %	16.45	-	21.88	47.35	52.49	249.91
RMS, %	11.48	-	1.99	2.52	0.24	0.38
EF	0.93	-	0.98	0.99	0.95	0.70

Table 4. The input parameter of water quality model for paddy fields.

Description	Symbol	Unit	Value
Water balance			
Runoff coefficient	a_1	-	0.80~1.00
Infiltration coefficient	a_2	-	0.008~0.015
Nitrogen			
Loading by fertilization (basal, tillering, panicle)	m_1, m_2, m_3	kg/ha	41~20, 17~34, 9.4~19
Decay rate of fertilization	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	-	0.04, 0.03, 0.17
Concentration by sediment	\bar{c}	mg/L	2.5~5.2
Sediment loading coefficient	λ_s	-	0.15
Phosphorus			
Loading by fertilization	m	kg/ha	2.4~5.8
Decay of fertilization	λ	-	0.2
Concentration by sediment	\bar{c}	mg/L	0.15
Sediment loading coefficient	λ_s	-	0.13

난 후 수질측정이 이루어졌으며, 시비가 이루어진 날을 기준으로 수질모니터링이 이루어진 지하수 관개논의 경우 각각 46 kg/ha, 34 kg/ha, 19 kg/ha를 나타내어 실제 투입된 양인 55 kg/ha, 33 kg/ha, 22 kg/ha와 유사한 범위의 값을 나타내었다. TP의 경우 실제 투입된 양보다 작은 값을 나타내었는데, 이는 시비에 의해 투여된 인은 수체에 전량이 녹아 용존상태가 되지 못하고 토양입자나 토양속의 금속화합물과 결합하여 침전된 것으로 판단된다. TN 감소계수인 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 각각 0.03~0.04, 0.03, 0.17을 나타내어 기비와 분얼비에서는 유사한 값을 이삭비에서는 다소 높은 값을 나타내었다. 이는 벼의 양분 흡수는 온도가 높고 자연광이 왕성할수록 증가하며 출수 전에 양분의 흡수속도가 최대치에 달하기 때문으로 생각된다(조 등, 1995). 논에서의 기본농도를 나타내는 \bar{c} 는 TN, TP 각각 2.5~5.2 mg/L, 0.15 mg/L로 나타나 TN

Table 5. Comparison of observed and simulated runoff, and TN and TP loading in control plot during rice culture periods.

(a) paddy field with ground water irrigation

	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		TN (kg/ha)		TP (kg/ha)		
		Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	
2001	May	7.0	143.1	151.2	24.64	21.58	1.13	0.94
	Jun.	212.5	192.2	141.2	0.15	2.71	0.01	0.20
	Jul.	214.0	243.1	281.7	2.67	5.46	0.05	0.35
	Aug.	87.8	14.8	11.3	0.00	0.00	0.00	0.02
	Sep.	3.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sum	524.3	593.2	585.4	27.45	29.86	1.19	1.51
			(1%)		(9%)		(25%)	
2002	May	7.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Jun.	61.4	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Jul.	217.2	452.9	484.2	21.84	18.97	0.55	0.72
	Aug.	531.6	583.3	637.1	11.37	6.30	0.70	0.82
	Sep.	48.2	0.0	102.5	0.00	1.52	0.00	0.14
	Sum	865.4	1036.2	1223.8	33.21	26.79	1.25	1.66
			(18%)		(19%)		(34%)	

(b) paddy field with surface water irrigation

	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		TN (kg/ha)		TP (kg/ha)		
		Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	
1999	May	96.0	53.00	34.40	7.79	8.84	0.05	0.36
	Jun.	160.3	59.65	94.38	6.43	8.62	0.11	0.11
	Jul.	285.6	193.13	126.46	11.98	7.34	0.26	0.17
	Aug.	218.8	210.07	186.36	10.01	8.21	0.26	0.25
	Sep.	268.8	86.162	96.76	3.49	5.03	0.16	0.14
	Sum	1029.5	602.02	538.36	39.70	38.03	0.84	1.03
			(11%)		(4%)		(23%)	
2000	May	76.6	24.27	0.00	3.12	0.00	0.01	0.00
	Jun.	221.4	52.96	81.42	2.58	2.02	0.13	0.11
	Jul.	316.8	257.88	160.62	5.09	3.48	0.12	0.19
	Aug.	377.2	245.44	221.53	6.07	5.50	0.24	0.33
	Sep.	221.0	120.70	160.18	2.98	4.00	0.18	0.24
	Sum	1213.0	701.25	623.75	19.84	15.00	0.67	0.87
			(11%)		(24%)		(30%)	

은 지역마다 다소 차이를 나타내었으나 TP의 경우 일정한 배경농도를 나타내었다.

3. 논에서의 월별 유출부하량

담수심과 유출고, 표면수의 TN 및 TP농도에 대하여 보정 및 검증된 모형을 이용하여 영농기간동안 논에서의 월별 유출고와 TN 및 TP 부하량에 대하여 실측치와 예측치의 비교는 Table 5와 같다. 영농기간동안의 예측된 유출고와 TN, TP 부하량에 대한 상대오차는 각각 1~18%, 8~19%, 17~34%를 각각 나타내었다. 특히 유출고에서 발생한 오차는 영양물질 부하량에 영향을 준 것으로 나타났다.

논에서의 부하량 예측을 위한 모형개발에서는 시비 이후의 논 표면수의 농도를 얼마나 잘 반영할 수 있는지가 매우 중요하다. 본 연구에서는 시비와 침전물에서의 용출 효과를 Dirac delta function과 continuous source function으로 해석하였으며, 모형의 보정 및 검증결과 모형의 높은 적용가능성을 나타내어 논에서의 비점오염 부하량 산정과 BMPs개발에 적극적으로 검토할 필요가 있다고 판단된다.

적 요

논은 우리나라 총 면적의 12%를 차지하며, 인간활동

이 이루어지는 토지이용 중 가장 많은 면적으로 비점오염분야에서 중요한 의미를 가진다. 논은 시비가 이루어지기 때문에 논표면수의 수질변화 폭이 매우 커 지표배수가 이루어지는 시점에 따라 논에서의 부하량에 큰 영향을 미치기 때문에 논에서의 오염부하량산정과 최적관리기법개발에 있어 확실적인 원단위 적용에는 한계가 있다. 뿐만 아니라 기존에 개발된 유역모형의 대부분은 논을 포함하고 있지 않거나 포함하더라도 논에서의 충분한 기작을 모의할 수 없어 우리나라의 적용에 있어서 제한점을 가지므로 앞으로의 합리적인 오염총량제 적용을 위해서는 논모형의 개발이 절실하다. 그러나 논은 담수라는 기능을 가지므로 유역모형과 같은 물리적인 반응보다는 수질모형과 같은 생화학적 반응이 우세하리라 판단된다. 논을 하나의 얇은 호소로 간주하여 호소모형의 적용이 가능하나 이를 위한 수많은 인자 결정에 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다. 그러나 논에서의 영농활동은 거의 유사한 시기에 해마다 반복적으로 일어나며, 동일한 양과 형태의 시비가 이루어지며 완전낙수에 의해 다음해의 수질에 영향을 거의 미치지 않으므로 오히려 간단한 반응공식으로도 충분한 해석이 가능하리라 판단된다. 본 연구에서는 이러한 형태의 영농활동이 이루어지는 논에서의 시비와 바닥에서의 용출에 의한 영향을 dirac delta function과 continuous source function을 이용하여 모형을 개발하여 지하수관개지역과 지표수관개지역을 대상으로 보정 및 검증결과 높은 적용가능성을 나타내었다. 앞으로의 연구방향은 논에서의 장기적인 모니터링과 여러 지역의 적용을 통한 논 모형의 충분한 검증을 실시함으로써, 논에서의 오염부하량 산정과 BMPs 개발 뿐 아니라, 기존의 유역모형에 연결함으로써 우리나라 오염총량제의 합리적인 적용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 4-5-1)에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

권순국. 2002. 논과 포장관개의 다원적 역할. 한국농공학회지. 44: 19-26.

- 김시원, 김철기, 이기춘. 1994. 농업수리학. 향문사, 서울.
- 김진수, 오승영, 김규성. 1999. 광역논에서의 질소·인의 농도와 오염부하량 특성, 한국농공학회지 41: 47-56.
- 서춘석, 박승우, 임상준, 윤광식, 김상민, 강문성. 2002. 관개논에서의 영양물질 추정 모형의 개발. 한국농공학회지 44: 146-156.
- 손정호, 정상욱. 2002. 담수심 처리가 논의 물수지에 미치는 영향. 한국농공학회지 44: 67-74.
- 신동석, 권순국. 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 한국환경농학회 9: 133-142.
- 오승영. 2000. 강우시 광역논에서의 유출부하 특성, 충북대학교 대학원 석사학위 논문.
- 윤춘경, 김병희, 전지홍, 황하선. 2002. 지하수 관개지역 논에서의 배출부하특성, 한국농공학회지 44: 116-126.
- 윤춘경, 함중화, 우선호, 김민희. 2001. 인공습지 오수처리수를 이용한 벼재배 실험, 한국농공학회지 43: 94-104.
- 조동삼, 고현관, 구연충, 박광호, 변중영, 안범헌, 신진철, 양원하, 이영희, 이은웅, 이철원, 황승구, 조용구, 허휘. 1995. 벼의 생리와 생태. 향문사, 서울.
- 조재필. 1998. 복합토지이용 특성의 농촌유역에 대한 농업비점오염모형의 적용. 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 최진규, 구자웅. 2001. 마령지구 필지 논으로부터 영농기 영양물질수지와 유출부하량. 한국농공학회지 43: 153-508
- 홍성구, 권순국. 1989. 농경지로부터의 오염물질 유출부하특성, 한국농공학회지 31: 92-102.
- 황하선, 윤춘경, 전지홍, 김병희. 2002. 저강우연도 지하수 관개 필지논에서 수도재배기간 동안의 물질수지, 한국농공학회지 44: 39-50.
- APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Ed. pp. 4: 99-153. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Bouman, B.A.M. and T.P. Tuong. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*. 49: 11-30.
- Cabangon, R.J., T.P Tuong and N.B. Abdullah. 2002. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seed rice production systems. *Agricultural Water Management*, 57: 11-31.
- Chae, J.C. 1998. Effect of tillage and seeding methods on percolation and irrigation requirement in rice paddy condition. *Korean J. of Crop Science*. 43: 264-268.
- Chapra, S.C. 1997. *Surface water-quality modeling*, McGraw-Hill, Inc., pp. 47-87.
- Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson and P.R. Newroth. 1993. *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*, 2nd Ed. Lewis Publishers.
- Counce, P.A., T.C. Keisling and A.J. Mitchell. 2000. A uniform objective and adaptive system for expressing rice

- development. *Crop Science*, **40**: 436-443.
- De Datta, S.K., W.P. Abilay and G.N. Kalwar. 1973. Water stress effects in flooded tropical rice. pp. 19-36. *In* Water Management in Philippine Irrigation Systems: Research and Operations, International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- Eom, K.C. 2001. Rice cultural practices in Asia. pp. 28-35. *In* Rice Culture in Asia, International Commission on Irrigation and Drainage, and Korean National Committee on Irrigation and Drainage, Korea.
- Hukkeri, S.B. and A.K. Sharma. 1980. Water-use efficiency of transplanted and direct-sown rice under different water management practices. *Indian J. of Agricultural Science*. **50**: 240-243.
- Kampen, J. 1970. Water loses and water balance studies in lowland rice irrigation. Ph.d. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY. 416pp.
- Khepar, S.D., A.K. Yadav, S.K. Sondhi and M. Siag. 2000. Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices. *Irrigation Science*. **19**: 199-208.
- Kitamura, Y. 1988. Water balance in tertiary development area with low and flat paddy land Case study in the Muda Irrigation Project area, Malaysia. *Irrigation Engineering Rural Planning*. **13**: 18-35.
- Lee, B.W. 2001. Rice cultural practices in Asia. pp. 36-54. *In* Rice Culture in Asia, International Commission on Irrigation and Drainage, and Korean National Committee on Irrigation and Drainage, Korea.
- Loague, K. and E.F. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.* **7**: 51-73.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* **10**: 282-290.
- Mishra, A., A.K. Ghorai and S.R. Singh. 1998. Rainwater, soil and nutrient conservation in rainfed rice lands in eastern India. *Agricultural Water Management*. **38**: 45-57.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. pp. 205-234. *In* The state and movement of water in living organism. XIXth Symposium. Soc. for Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press.
- Odhiambo, L.O. and V.V.N. Murty. 1996. Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. 1. Model development. *Agricultural Water Management*. **30**: 185-199.
- OPM. 2001. Statistical data of water management, commission on protection of the quality and supply of freshwater resources. Office of Prime Minister, Korea (in Korean).
- Chung, S.O., H.S. Kim and J.S. Kim. 2003. Model development for nutrient loading from paddy rice fields, *Agricultural Water Management*. in press.
- Yoon, C.G., J.H. Ham and J.H. Jeon. 2002. Reuse of reclaimed water for irrigation on paddy rice culture and its effect, *Journal of KSAE*. **44**: 14-24.
- Watanabe, T. 1992. Water budget in paddy fields. *In*: V.V.N. Murty and K. Koga (Editors), Soil and Water Engineering for Paddy Field Management, Proce. Of the Int. Workshop on Soil and Water Engineering for Paddy Field Management, Asian Institute of Technology, Bangkok, January 1992.
- Wu, R.S., J.S. Chang and K.M. Lin. 2001. A simulation model for investigation the effects of rice paddy fields on the runoff system. *Mathematical and Computer Modelling*. **33**: 649-658.

(Manuscript received 15 June 2003,
Revision accepted 20 August 2003)