

비점원오염모델을 이용한 논외 영농방법별 오염부하량 예측

한국헌*

한국농촌공사 농어촌연구원 생산자원연구소
(2007년 5월 23일 접수, 2008년 4월 18일 수리)

Estimation of the Pollutant Loads from Paddy Fields by Cultivation Practices Using a Non-point-source Model

Kuk-Heon Han (Rural Agricultural Infrastructure and Resources, Rural Research Institute, Ansan 426-825, Korea)

ABSTRACT: The objective of this study was to estimate the pollutant loads from paddy fields by cultivation practices using a non-point-sources models. One of them is CREAMS-PADDY model that was developed considering the water balance and mass balance of paddy fields. The CREAMS-PADDY model was applied to provide basic data to reduce runoff loadings under various scenarios such as various water management control and various fertilizer condition. The model was verified against T-N, T-P and runoff flow data collected during cropping periods at 2000. The model results agreed well with the measured data in verification. The results showed that the model could be used for estimating the runoff loadings from irrigated paddy fields by cultivation practices was possible. Comparison of simulated the standard height and the sluice management of T-N and T-P runoff loadings from paddy fields were +32.4%, +10.3% in 10 mm below the standard height, -29.2%, -35.9% in 20 mm above the standard height, 52.6%, 59.0% in 40 mm above the standard height, respectively. Comparison of simulated the standard fertilizer and the fertilizer control of T-N and T-P runoff loadings from paddy fields were -1.3%, -21.7% in reduction of conventional fertilizer 30%, -1.0%, -12.5% in reduction of standard fertilizer 30%, respectively. Therefore, reducing non-point-sources nutrient loading by reducing fertilization may not work well in the range of normal paddy rice farming practices, and instead it could be achieved by reducing surface drainage outflow.

Key Words: CREAMS-PADDY model, fertilizer condition, nutrient loadings, water management control, paddy fields

서 론

비점원오염은 강우강도나 지속시간과 같은 강우특성과 지표수의 수리·수문학적 특성과 연계되어 있으므로 이를 파악하기 위해서는 많은 어려움이 있다^{1,2)}. 그러나, 현재 우리나라에서 수질오염총량관리제는 전체적으로 원단위가 적용되고 있으나, 논외의 경우는 강수량뿐만 아니라 시비 및 농경배수 관리관행에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이의 확실적인 적용에는 무리가 따른다. 따라서, 합리적인 오염총량제 적용에 의한 수질개선효과를 기대하기 위해서는 논에서의 오염 배출 특성 파악이 선행되어야 한다.

논에서의 수문 및 수질반응 메카니즘은 매우 복잡하며, 그에 대한 정량적인 평가를 위한 모니터링은 많은 시간과 노력을 필요로 하여, 국내의 경우 논에서의 수문 및 오염부하 특성에 대한 연구는 근래에 들어서야 본격적으로 이루어지기 시작했다³⁻⁸⁾. 이들 논에서의 오염부하 모니터링 결과는 조사 지역의 수원공 종류, 기상조건, 시비시기 및 시비량, 관개 및 배수관리 관행 등의 조건과 샘플링 시기 및 추정방법에 따라 다르게 발표되고 있다.

따라서, 논에서의 농업비점오염물질의 유·출입 수지와 유출메카니즘에 대한 정량적인 평가와 더불어 논에서의 영양물질의 거동을 예측하여 유출부하량을 평가할 수 있는 모형의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 현재 많이 사용되고 있는 농업비점오염 전산모형은 밭을 대상으로 한 예측모형이기 때문에 논농사 중심인 우리나라의 현실과 상당한 차이를 나타내고 있어 예측모형을 직접 적용하는데는 많은 어려움이 있다.

*연락처:
Tel: +82-31-400-1762 Fax: +82-31-409-6055
E-mail: kuk0904@paran.com

일부 국내 연구자들은 모형을 수정하여 논에 적용하고 있으나, 논에서 영양물질의 물질순환 메커니즘이 밭과 근본적으로 다르기 때문에 데이터의 해석과 예측에 상당히 많은 오류를 범할 우려가 있다^{17,18)}.

논에서의 물질순환과정을 적용할 수 있는 모형으로는 Wada 등(1986), Shoji 등(1986)의 질소흡수기작모형^{9,10)}, Mori(1991)의 T-N, T-P의 이동기작모형이 있고¹¹⁾, Liwang 등(1999)은 담수토양에서 중질소를 이용하여 질소의 이동 및 변환 기작을 모니터링 하여 요소 비료의 가수분해, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 질산화 및 흡착, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 탈질 반응식 등을 구성하여 질소의 이동기작 모형을 만들었다¹²⁾. 海老瀬 등(1981)이 수문모형으로서 TANK 모형을 이용하여 강수시의 오염부하량의 해석을 실시하였다¹³⁾. 中村 등(1991)이 수문모형인 TANK 모형에 오염물질의 축적량을 포텐셜로 도입하여 유출량 계산식에 오염부하 계산식을 삽입하여 유역으로부터 유입하는 오염부하량을 일별로 예측하였다¹⁴⁾. 국내에서는 Kim 등(2002)은 TANK 모형에 오염부하 산정식을 추가하여 논에서의 유출량 변화에 따른 오염부하량을 예측하는 모형을 구성하여, 경기도 여주군 가남면 오산리에 위치한 건국대학교 실습농장의 필지 논 2,520 m^2 에 적용하였다¹⁵⁾.

CREAMS(Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) 모형은 미농무성 토양보전국에 의해서 개발된 모형이다. 이 모형은 단기 모의발생과정 장기 모의발생으로서 일별 모의발생을 실시할 수 있으며 유출, 토양유실 및 양분유실모형부분을 포함하고 있으며 등고선재배 등의 보전농법 등에 대한 영향을 고려할 수 있는 등의 기능을 가지고 있다. CREAMS 모형은 포장단위에 주로 적용되는 모형으로서 이를 유역에 적용할 수 있게 보완한 CREAMS-WT와 모형의 지하수부분이 개선된 GLEAMS 등의 모형 등이 개발되어 사용되고 있다. 국내에서 Kim 등(2001)은 GLEAMS 모형을 논에서의 담수추적에 의한 수문 부모형의 적용과 화학물질 부모형을 수정·보완하여 GLEAMS-PADDY 모형을 개발하여 충북 청원군 옥산면 소로리에 위치한 50.9 ha의 대상유역에 모형을 적용하여 매개변수 추정과 모형 검정을 실시하였다¹⁶⁾. Jin(1998)은 포장단위 농업비점오염 모형인 CREAMS 모형을 근간으로 하여 논 물수지 및 물질수지를 고려한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하였으며¹⁷⁾, Seo(2001)는 CREAMS-PADDY 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화 등에 대처할 수 있도록 개선하였으며, 또한 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식으로 개선한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하여, 정밀포장에 적용하여 논으로부터의 오염부하량 추정에 적용성이 있음을 밝혔다¹⁸⁾. 하지만, 현재, 논에 대해 모형의 적용성 검토 및 다양한 기상 조건 및 시비, 물관리 등에 대해 모형의 적용 결과는 미흡한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 개발된 논 오염부하 모형인 CREAMS-PADDY 모형을 검증하고, 다양한 기상·시비·물

관리 조건 등의 시나리오에 대해 모형을 적용함으로써 논에서의 오염부하 저감을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

CREAMS-PADDY 모형의 개요

본 연구에서 오염부하량을 모의하기 위해 이용한 모형은 CREAMS-PADDY 모형으로 본 모형은 1980년도에 미농무성 토양보전국에서 개발한 CREAMS(Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System) 모형¹⁹⁾을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화 등에 대처할 수 있고, 또한 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식으로 개선한 모형이다. 본 모형의 구성은 논에서의 물수지를 중심으로 한 수문모형(Hydrology Sub. Model)과 토양유실량을 모의하는 토양침식모형(Erosion Sub. Model), 질소 및 인의 거동을 예측하는 화학물질 모형(Nutrient Sub. Model)으로 되어있다¹⁷⁾.

시험포장 및 측정시설

본 연구에서 사용된 시험포장은 1995년 5월에 경지정리가 완료된 곳으로 전라북도 진안군 마령면 평지리에 위치하며, 축산폐수, 가정하수 및 산업폐수로부터 영향을 받지 않은 전형적인 수도작 농업지대로 시험포장 구축은 장변 100 m와 단변 50 m로서 면적은 5,000 m^2 이고, 본 시험포장의 토양은 지산미사질양토(Jisan Silt loam; fine loamy, mixed mesic family of Fluventic Haplaguepts)이다. 시험포장에 설치된 시설로는 강수량 측정을 위한 우량계 1조, 관개수량 측정을 위해 관개수 유입구 옆에 유량계 1조, 유출수량 측정을 위해 자기수위계 및 웨어시설 1조를 설치하여 웨어에서 유출되는 수위를 측정하는 다음 웨어유량공식을 이용하여 일별 유출수량을 산정하였으며, 기상자료는 증발산량을 산정하기 위해 일평균 온도, 풍속, 상대습도 및 일조시간 등을 전주기상대 관측자료를 수집·이용하였다. 시험포장의 자료는 1999년 5월 1일부터 2000년 9월 30일까지 모니터링 한 자료를 사용하였다.

시험포장의 운영

시험포장은 '99년도에는 5월 22일 논갈이를 하고 담수를 시킨 후, 5월 25일에 재식거리 15×30 cm, 1주 당 3본씩 기계이앙을 실시하였다. 시험포장의 재배품종은 화선찰벼이며, 10월 2일에 수확하였다. 비관개기간 동안에는 수확 후 벼짚을 전랑 논토양에 살포하고 비경운 상태로 두었다가 2000년 3월 22일에 1차 논갈이를 한 다음, 5월 20일에 2차 논갈이를 실시하였다. 2차년도(2000년)에는 6월 2일에 이앙을 실시하였으며, 10월 10일에 벼를 수확하였다.

시비시기 및 시비량은 5월 22일에 모내기 기비로 질소 76 kg ha^{-1} , 용성인비 29 kg ha^{-1} 그리고 염화가리 29 kg ha^{-1}

를 전층시비 하였으며, 6월 15일에 분얼비로 질소 28 kg ha⁻¹, 7월 30일에 수비로 질소 18 kg ha⁻¹를 시비하였으며, 2000년 3월 20일에 규산질비료를 2,000 kg ha⁻¹ 수준으로 시비하였다. 2000년도에는 5월 20일에 모내기 기비로 질소 84 kg ha⁻¹ 용성인비 31 kg ha⁻¹ 그리고 염화加里 31 kg ha⁻¹를 전층시비 하였으며, 6월 14일에 분얼비로 질소 28 kg ha⁻¹, 7월 23일에 수비로 질소 28 kg ha⁻¹을 시비하였다. 본 시험포장에 시비된 화학비료의 양을 농촌진흥청의 추천 시비량(N : P : K = 110 : 80 : 70 kg ha⁻¹)과 비교하면 질소의 경우 약 110~130% 그리고 인의 경우 약 40% 수준으로 시비되고 있었다.

시료채취 및 분석방법

시험지구에서의 논물 시료의 채취는 이양후부터 담수가 끝나는 9월까지 격주간격으로 채수하였으며, 유출수는 강우 시 유출이 발생할 때마다 2시간 간격으로 시험포장의 웨어 유출구에서 채수하여 4°C 이하의 온도에서 보관하여 분석시료로 사용하였다. 부유물질은 시료 1000 mL를 취하여 유리 섬유여지법으로, T-N은 수질시료 500 mL를 취하여 각각 환원증류-킬달법과 중화적정법으로 분석하였고, T-P는 수질시료 500 mL를 취하여 50 mL로 농축한 다음 ascorbic acid reduction법에 기준하여 분석하였다²⁰⁾.

다양한 논 관리 시나리오에 대한 모형의 적용

기존에 개발된 CREAMS-PADDY 모형을 1999년 모니터링 자료를 이용하여 모형의 매개변수를 추정·보정하였으며, 2000년 모니터링 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 그리고, 1993년부터 2002년까지(10개년) 전주기상대에서 관측한 일별 기상조건에 대해 논에서의 유출량을 모의하였으며, 다양한 논 관리 시나리오, 즉 물꼬관리, 시비조건, 물꼬관리 및 시비조건(복합조건)에 따라 논에서의 발생부하량을 모의하였다. 물꼬관리에 대한 모의는 표준 물꼬높이, 표준 물꼬높이에 여유고 10, 20, 30, 40 mm와 표준 물꼬높이보다 10 mm 낮은 경우에 대해 모의하였으며, 시비조건에 대해서는 농촌진흥청에서 제시한 표준 시비량과 모니터링 지구에서 실제 시

비량에 대해 10, 20, 30% 저감의 경우 그리고 표준 시비량에 대해 30% 저감의 경우에 대해 실시하였다. 물꼬관리 및 시비조건(복합조건)에 대해서는 표준 물꼬높이와 표준 시비량, 표준 물꼬높이와 실제 시비량, 표준 물꼬높이와 표준 시비량의 30% 저감, 표준 물꼬높이에 여유고 40 mm와 표준 시비량의 30% 저감의 경우에 대해 발생부하량을 모의하였다.

결과 및 고찰

시험포장의 물수지

논벼의 생육기간인 5월~9월까지의 강수량은 1,213.6 mm로 장마기간인 7, 8월기간 동안 집중호우로 인하여 내린 강수량은 627.0 mm로 전체의 51.7%로 관측되었으며, 30년 평균치 521.8 mm에 비해 약 20%정도 많은 강수량을 보였으며, 본 조사기간 동안에 특이한 강수특성은 9월에 291.4 mm의 강수량이 기록되었다는 점인데 30년 평균 강수량 134.6 mm에 비해 약 216%로 나타났다. 조사기간 동안 50 mm이상의 강수가 7회 왔으며, 100 mm이상 강수는 관측되지 않았다. 전주기상대 관측자료를 이용하여 구한 순별 증발산량과 침투수량은 Table 1과 같다.

관개수량은 시험포장의 관수로 유입구에 설치된 Φ50 mm 유량계를 이용하여 유입량을 측정하였으며, 매 관개시마다 bucketing을 통하여 유량을 보정하였는데, 조사기간 동안 관개량은 566.1 mm가 유입되었다. 유출수량은 논 말단에 설치한 웨어에서 유출되는 수위를 측정하여 다음, 웨어유량공식 $Q(L s^{-1}) = 894.3(0.592 + 0.11H) \times (0.01H + 0.001) \times 1.5$ 를 이용하여 유량을 산정하였는데, 조사기간 동안 시험지구의 유출량은 701.1 mm가 유출된 것으로 산출되었다. Table 1은 대상지구에서 관측 및 계산된 전체 포장의 물수지를 나타낸 것이다.

시험포장의 영양물질수지

조사기간 동안의 강수, 관개수, 논물, 유출수 등의 각 수질 항목별 농도에 대한 기술적 통계분석을 실시한 결과는 Table 2와 같다. 강수 중에 함유된 T-N과 T-P 농도는 동일지역에서도 시기별 변화를 보이는데, 시험기간 동안 T-N, T-P의 농도

Table 1. Water balance of the experimental paddy field during the study period.

(Unit : mm)

Month Item	May			June			July			August			September			Total
	F [*]	M ^{**}	L ^{***}	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L	
Rainfall	8.6	7.2	23.8	113.4	13.8	128.4	44.6	53.6	181.2	40.8	86.0	220.8	70.4	220.6	0.4	1,213.6
Irrigation	0.0	21.8	10.9	63.5	34.0	17.8	22.9	0.6	71.1	54.2	38.9	62.2	15.3	0.0	0.0	413.0
Drainage	0.0	0.0	0.0	32.9	30.3	11.0	15.7	18.5	164.6	67.6	84.5	131.2	24.3	120.7	0.0	701.2
Percolate	1.0	2.0	22.0	19.5	20.9	19.9	18.9	16.3	12.9	14.0	11.3	15.1	19.4	14.6	27.0	234.7
Evapotranspiration	1.0	11.6	37.4	44.3	51.4	36.9	54.4	56.8	77.9	65.0	64.3	61.7	40.7	44.1	34.3	682.0

*F : the First ten days, **M : the Middle ten days, ***L : Last : the last ten days

Table 2. Water quality constituents for experimental paddy fields (Unit : mg L⁻¹)

Year	Item	Rainfall		Irrigation water		Drainage water		Paddy water		Percolate	
		T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P
	No. of Samples	32		19		33		15		32	
2000	avg.	0.85	0.012	1.80	0.039	4.18	0.142	3.23	0.032	4.92	0.034
	max.	2.41	0.059	3.99	0.128	13.24	0.245	12.86	0.064	13.78	0.075
	min.	0.14	0.001	0.59	0.002	2.31	0.102	0.53	0.002	2.10	0.009
	S.D.*	0.62	0.011	1.06	0.039	2.81	0.039	3.50	0.020	2.45	0.018

*S.D. : Standard deviation

변화를 살펴보면, T-N, T-P의 평균농도는 각각 0.85, 0.012 mg L⁻¹이며, 관개수의 T-N, T-P 평균농도는 1.80, 0.039 mg L⁻¹로 강우시 수질보다는 농도가 높은 것으로 나타났다. 논물의 경우 T-N 농도는 0.53~12.86 mg L⁻¹의 범위로 평균 3.23 mg L⁻¹, T-P 농도는 0.002~0.064 mg L⁻¹의 범위로 평균 0.032 mg L⁻¹이다.

논에서 유출수의 수질은 평상시 영농관행에 의한 물빠기 시기와 강우시에 채수하여 측정하였다. 모내기 전 물빠기 수질은 기비의 영향으로 매우 높게 나타났는데 이는 물로터리 작업 후 기계이양을 위해 물을 빼는 관행 때문인 것으로 보인다. 유출수 농도를 살펴보면, T-N 농도는 2.31~13.24 mg L⁻¹이고 평균 4.18 mg L⁻¹, T-P 농도는 0.102~0.245 mg L⁻¹이고 평균 0.142 mg L⁻¹로 기비 시비 후 일시적으로 증가하였다가 점차 감소하는 경향이였다. 따라서 T-P의 경우는 기비 직후의 물관리에 따라서 그 배출량을 크게 줄일 수도 있을 것으로 사료된다.

시험포장의 물질수지를 산정한 결과, T-N의 총 유입부하량은 186.0 kg ha⁻¹로 강우 및 관개수에 용해되어 유입된 부하량은 각각 20.15, 25.85 kg ha⁻¹이며, 시비량은 140 kg ha⁻¹이다. 또한, 총 유출부하량은 지표유출부하량과 침투부하량으로 각각 51.23, 9.07 kg ha⁻¹이었으며, 총 유입부하량 기준 잔류량은 125.7 kg ha⁻¹로 작물흡수 및 탈질 등으로 유출되고 일부는 토양에 잔류된 것으로 판단된다. T-P의 총 유입부하량은 31.07 kg ha⁻¹로 강우 및 관개수의 유입부하량은 0.35, 0.72 kg ha⁻¹, 시비량은 30 kg ha⁻¹이며, 총 유출부하량은 1.64 kg ha⁻¹로 지표유출부하량이 1.6 kg ha⁻¹, 침투부하량은 0.4 kg ha⁻¹이다. 유입부하량 기준 잔류량은 29.43 kg ha⁻¹로 T-N의 경우와 같이 작물에 흡수되고 토양에 잔류된 것으로 판단된다(Table 3).

모형의 검증

모형의 검증을 위해 2000년 모니터링 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 수문 부모형의 경우 강우량 1,213.6 mm에 대하여 측정 유출량이 701.2 mm이었으며, 모의치는 815.1 mm로 나타났으며, 유출율은 67.2%이었다. 일별 유출량에 대한 결정계수(R²)는 0.8661, RMSE(Root Mean Square Error)는 11.93 mm, E²(Model efficiency)는 0.23이었다. Seo(2001)가 경기도 화성군 팔탄면에 위치한 기천 시험포장을 대상으로 모형의 검증을 실시한 결과 유출율은 77%로 본 검증보다는 높은 유출량을 보였으며, 결정계수는 0.95로 본 연구보다 상당히 높은 결정계수값을 나타내었으며¹⁸⁾, Jin 등(2002)이 서울대학교 농생대 시험포장 200 m²을 대상으로 모형을 적용한 결과 유출율이 37%가 유출된 것으로 조사하였는데 본 연구결과와 유출율의 경우 상당한 차이를 보이고 있었다²¹⁾. 배수에 의한 배출부하량은 이양시기와 장마시기에 배출된 양이 대부분을 차지한다. 이 중 이양시기에 배출되는 양은 고농도의 적은 유량이 배출되며 장마시기에는 농도는 높지 않으나 많은 유량이 배출되므로 총배출량에 기여하는 양이 크다. 유출수에 의한 유출부하량의 경우 측정 부하량은 T-N 51.23 kg ha⁻¹이었으며, 모의치는 54.88 kg ha⁻¹가 배출된다고 나타나 실측치에 비해 크며, 일별 배출부하량에 대해서 R²은 0.8875로 높게 나타났으며, RMSE는 1.524 kg ha⁻¹, E²는 0.573이었다. T-P의 경우는 측정 부하량이 1.6 kg ha⁻¹이었으며, 모의치는 1.31 kg ha⁻¹로 T-N과는 반대로 실측치에 비해 적었으며, 일별 배출부하량에 대한 R²은 0.9137, RMSE는 0.039 kg ha⁻¹, E²는 0.558이었다(Table 4). Fig. 1은 유출수에 대한 T-N, T-P의 측정치와 모의치의 일별부하량을 도시한 것이다.

Table 3. Nutrient balance of the experimental paddy fields during the study period. (Unit : kg ha⁻¹)

Year	Item	Inflow				Outflow		
		Rainfall	Irrigation	Fertilizer	Total	Drainage	Percolate	Total
2000	T-N	20.15	25.85	140.0	186.00	51.23	9.07	60.30
	T-P	0.35	0.72	30.0	31.07	1.60	0.40	1.64

Table 4. The verification result of observed and simulated nutrient runoff loading in drainage water

Item	Event mean load (kg ha ⁻¹)		R ²	RMSE*	Model efficiency
	Observed	Simulated			
T-N	51.23	54.88	0.8875	1.524	0.573
T-P	1.60	1.31	0.9137	0.039	0.558

*RMSE : Root Mean Square Error

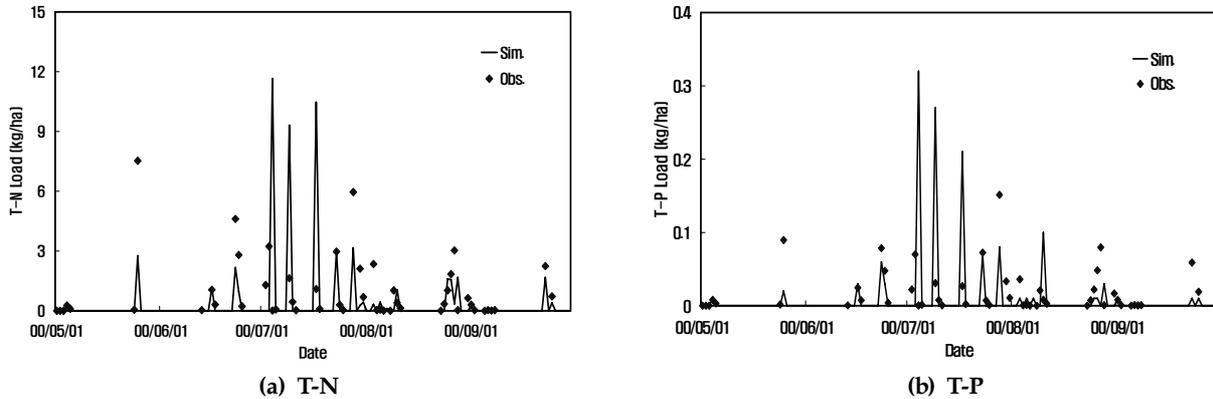


Fig. 1. The verification results of observed and simulated runoff loading of T-N and T-P in drainage water(Sim. : Simulated, Obs. : Observed).

물꼬관리에 따른 논의 발생부하량 모의

물꼬관리에 대해서 표준물꼬, 표준물꼬에 10, 20, 30, 40 mm를 높인 경우와 10 mm를 낮게 관리하였을 때 논의 발생 부하량에 대해 모의를 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 5와 같다. 물꼬관리에 따른 논의 유출량을 모의한 결과 기준 물꼬에 비해 10 mm 낮게 관리를 하였을 경우 유출량은 23.5%가 증가하였으며, 기준 물꼬에 비해 물꼬관리를 20 mm 높일 경우 유출량은 359.9 mm로 20.6% 감소가 가능하며, 물꼬 관리를 40 mm까지 상향 조정할 경우 유출량은 30.5%까지 감소가 가능하다(Table 5). Mishra 등(1998)의 3년간의 연구 결과에 따르면, 물꼬높이를 60~300 mm 범위사이에서 40 mm를 증가시킨 결과 물꼬 높이 60 mm에서는 전체 강우량의 57%를, 300 mm에서는 100%를 저류할 수 있는 것으로 나타났으며, 작물생산에는 현저한 영향을 미치지 않는다고 하였으며²²⁾, 손과 정(2000)은 담수심 처리가 논의 물수지에 미치는 영향을 고찰하였으며, 3년간의 연구결과 천수간단관

개는 심수간단관개에 비해 관개용수량을 17.7~46.6%범위 수준으로 절약할 수 있었으며, 천수간단관개는 전체 강우량의 68.9%를, 심수간단관개는 54.6%를 저류할 수 있으며, 벼 수확량에는 큰 차이가 없는 것으로 보고하였다²³⁾. 또한 Hatta (1967)와 Tabbal 등(1992)은 논 담수심을 매우 얇게 유지하거나, 토양만 포화시키거나, 습윤과 건조를 교대로 할 경우 전통적인 방법에 비해 관개수량을 40~70% 절감할 수 있다고 보고하였다^{24,25)}.

물꼬관리에 따른 논의 발생부하량을 모의한 결과 표준물꼬에 비해 10 mm 낮게 관리를 하였을 경우 오염부하량은 T-N의 경우 32.4%, T-P의 경우 10.3%가 증가하였으며, 표준 물꼬보다 물꼬관리를 20 mm 높일 경우 오염부하량은 T-N의 경우 29.2%, T-P의 경우는 35.9% 삭감이 가능하며, 물꼬 높이를 30 mm까지 상향 조정시는 T-N의 경우 41.5%, T-P는 48.7%까지 삭감이 가능하다. 물꼬 높이를 40 mm까지 상향 조정시는 T-N의 경우 52.6%, T-P는 59.0%까지 삭감이 가

Table 5. Result of simulated runoff loading at paddy field for the sluice management

Height of Sluice(H)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	T-N (kg ha ⁻¹)	T-P (kg ha ⁻¹)	Percentage of loading for S.H.(%)	
					T-N	T-P
Standard Height(S.H.)	1,032.0	453.1	16.57	0.39	100.0	100.0
H < S.H. - 10 mm	1,032.0	559.6	21.94	0.43	132.4	110.3
H ≥ 10 mm + S.H.	1,032.0	396.2	13.94	0.31	84.1	79.5
H ≥ 20 mm + S.H.	1,032.0	359.9	11.73	0.25	70.8	64.1
H ≥ 30 mm + S.H.	1,032.0	336.6	9.69	0.20	58.5	51.3
H ≥ 40 mm + S.H.	1,032.0	314.7	7.86	0.16	47.4	41.0

능한 것으로 모의되었다(Table 5). 논에서 물꼬높이를 높이는 것은 강우의 저류능을 증가시켜 지표배수를 통한 강우의 유출을 감소시킬 수 있는데, Yoon 등(2003)에 의하면 논 의 물꼬를 높여 지표배수를 최소화함으로써 상당한 영양물질 부하를 감소시킬 수 있다고 하였다²⁶⁾. 이상의 결과를 보면, 논에서의 영양물질 배출부하량을 감소시키기 위한 방법으로 관개용수의 절약과 논둑에 있는 배수물꼬의 높이 조절 등을 통해 영양물질 부하저감과 수질문제의 최소화 등을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

시비관리에 따른 논 의 발생부하량 모의

시비조건에 대해서는 표준시비와 모니터링 지구의 실사용량의 10, 20, 30% 저감의 경우와 표준시비에 대해 30% 저감의 경우에 대해 모의를 실시하였으며, 표준시비에 대해 시비관리시 논에서 영양물질 발생부하량에 대한 증감비율을 도출하였다. 시비관리에 따른 논 의 발생부하량을 모의한 결과, 표준시비의 경우 발생부하량은 T-N 48.02 kg ha⁻¹, T-P 1.52 kg ha⁻¹로 나타났으며, 시험지구의 실사용량에 대한 모의 결과는 54.88 kg ha⁻¹, 1.31 kg ha⁻¹로 모의되었는데, 표준시비량에 비해 T-N은 14.3%가 높게 T-P는 13.8%가 낮게 모의되었는데, 이는 시험지구의 시비량이 T-N의 경우 표준시비량의 110%, T-P는 60% 정도 시비하는 것에 기인하여 이 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 시험지구 시비량에 비해

10, 20, 30% 하향 시비하였을 경우를 모의한 결과, 표준 시비량의 경우에 비하여 T-N은 시비량의 경감에 따라 거의 차이가 없었으며, T-P의 경우는 실사용량의 10% 저감시에는 15.8%, 20% 저감시에는 17.8%, 30% 저감시에는 21.7% 정도가 감소하는 것으로 나타났다. 표준시비량에 비해 30% 하향 시비하였을 경우는 표준 시비량의 경우에 비하여 T-N의 경우는 1%, T-P는 12.5% 정도 저감이 가능한 것으로 모의되었다.(Table 6) Yoon 등(2003)이 시비량의 조건에 따른 영양물질의 유출특성을 조사한 결과, 시비량은 지표배수로 유출되는 영양물질의 손실에 큰 영향을 주지 않는다고 보고하였다²⁶⁾. 이상의 결과로 보면 물꼬관리의 모의결과와 비교하여 보면 시비관리에 의한 영양물질 손실은 상대적으로 적으므로 논에서의 영양염류의 저감을 위해서는 우선 물꼬관리를 통한 영양물질 유출 경감과 강우전 또는 강제낙수 전에 시비를 피하면 논에서의 유출부하량 경감을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

물꼬관리 및 시비관리(복합조건)에 따른 논 의 발생부하량 모의

물꼬관리 및 시비관리(복합조건)에 따른 논 의 발생부하량을 모의하고, 표준물꼬와 표준시비에 대한 물꼬관리 및 시비관리(복합조건)의 비율을 조사하였다. 그 결과는 Table 7과 같다. 표준물꼬와 표준시비에 대한 모의 결과를 기준으로 보고

Table 6. Simulated nutrients loading at paddy field by the fertilizer control

Fertilizer control	Amount of fertilizer (kg ha ⁻¹)		Rainfall (mm)	T-N (kg ha ⁻¹)	T-P (kg ha ⁻¹)	Percentage of loading for S.F.(%)	
	T-N	T-P				T-N	T-P
S.F.*	110.0	45.0	706.5	48.02	1.52	100.0	100.0
C.F.**	124.0	29.0	706.5	54.88	1.31	114.3	86.2
reduction of C.F. 10%	111.6	26.1	706.5	47.67	1.28	99.3	84.2
reduction of C.F. 20%	99.2	23.2	706.5	47.52	1.25	99.0	82.2
reduction of C.F. 30%	86.8	20.3	706.5	47.39	1.19	98.7	78.3
reduction of S.F. 30%	77.0	31.5	706.5	47.55	1.33	99.0	87.5

*SF : Standard fertilizer(RDA), **CF : Conventional fertilizer

Table 7. Result of simulated loading at paddy field for the sluice and fertilization management

Cultivated control	Runoff (mm)	T-N (kg ha ⁻¹)	T-P (kg ha ⁻¹)	Percentage of loading for S.H. and S.F.(%)	
				T-N	T-P
S.H.* and S.F.**	453.14	17.10	0.39	100.0	100.0
S.H. and C.F.***	453.14	16.57	0.39	96.9	100.0
S.H. + 40 mm	314.71	7.86	0.16	46.0	41.0
S.H. and reduction of S.F. 30%	453.14	16.24	0.39	95.0	100.0
above S.H. than 40 mm and reduction S.F. than 30%	314.71	7.55	0.16	44.2	41.0

*S.H. : Standard Height, **S.F. : Standard Fertilizer, ***C.F. : Conventional Fertilizer

표준물꼬에 시험지구 실사용량을 시비한 경우 T-N은 3.4%가 저감하였고, T-P의 경우는 저감효과가 없었다. 표준물꼬를 40 mm 만 높인 경우에는 T-N의 경우 54.0%, T-P의 경우 59.0%의 저감효과를 보였다. 표준물꼬와 표준시비에 대해 30%를 저감한 경우에는 T-N의 경우 5.0%가 저감하였고, T-P의 경우는 저감효과가 없었다. 표준물꼬를 40 mm 높이고 표준시비 30%를 저감한 경우 T-N의 경우 55.9%, T-P의 경우 59.0%의 저감효과를 보였는데, 표준물꼬만 40 mm 높이는 경우와 비교하여 보면, T-N의 경우는 약 5%정도의 감소효과가 있었지만, T-P의 경우는 감소효과가 없었다. 이로 보아 논에서의 발생부하량 저감을 위해서는 시비관리도 물론 중요하지만 물꼬관리가 오염부하 저감에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

결 론

우리나라 농업비점오염의 주를 이루고 있는 논에서의 오염물질의 배출부하량을 산정하기 위하여, 포장단위 비점오염모형인 CREAMS-PADDY 모형을 시험포장의 모니터링 자료를 이용하여 모형을 검증하였고, 다양한 논 관리 조건 즉, 물꼬관리, 시비관리, 물꼬관리와 시비관리를 동시에 실시하는 것에 대해 모의를 실시하여 논에서의 발생부하량 저감 효과를 분석하였다.

2000년 전북 진안군 마령면 진안리에 위치한 논에서의 배출부하량 자료에 대한 검정을 통하여 모형의 적용성을 평가하였는데, 수문 부모형의 경우 결정계수(R^2)는 0.8661, E^2 은 0.23이었으며, 유출수에 의한 유출부하량의 경우 T-N의 결정계수(R^2)는 0.8875, E^2 은 0.573이었으며, T-P의 경우 결정계수(R^2)는 0.9137로 실측값과 모의치가 유사하게 모의되었다. 또한, E^2 은 0.558로 모형의 효율도 0과 1 사이에 있으므로 안정적이라고 할 수 있다. 모형의 검증결과 관계기간인 5월에서 9월까지의 논에서의 영양물질 유출량은 2000년 전북 진안군 마령면 시험포장 논의 경우 강우량 1,213.6 mm에 대하여 T-N의 배출부하량은 54.88 kg ha^{-1} , T-P는 1.31 kg ha^{-1} 로 측정치에 비해 모의치가 약간 큰 값을 나타내었다.

검정된 모형을 이용하여 다양한 논관리 시나리오에 대해 배출부하량을 산정하였는데, 물꼬관리 경우 표준물꼬 높이를 30 mm까지 높일 경우 표준물꼬에 비해 T-N은 41.5%, T-P는 48.7%까지 삭감이 가능하였는데 반해, 표준시비량에 비해 30%를 감비하였을 경우 표준시비량에 대해 T-N 1%, T-P 16.4%가 저감하는 것으로 조사되었다. 그리고 물꼬관리와 시비관리를 동시에 실시한 경우, 즉 표준물꼬를 40 mm 높이고 표준시비 30%를 저감한 경우 T-N의 경우 55.9%, T-P의 경우 59.0%의 저감효과를 보였는데, 표준물꼬만 40 mm 높이는 경우와 비교하면, T-N의 경우는 약 5%정도 더 감소하는 효과가 있었지만, T-P의 경우는 감소효과가 없었다. 이로 보아 논에서의 발생부하량 저감을 위해서는 시비관리도 물론 중요하지만 물꼬관리가 오염부하 저감에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Cho, J. Y., Han, K. W. and Choi, C. H. (1999) Runoff loading of nitrogen and phosphorus with rainfall intensity from a paddy field, *Kor. J. Environ. Agric.* 18(2), 140-147.
2. Jeon, J. H., Yoon, H. G., Hwang, H. S. and Yoon, K. S. (2003) Water quality model development for loading estimates from paddy field, *Kor. J. Limnol* 36, 344-355.
3. Kim, J. S., Oh, S. Y. and Kim, K. S. (1999) Characteristics of concentration and load of nitrogen and phosphorus in paddy field areas, *J. Kor. Soc. Agric. Eng.* 41(4), 47-56.
4. Choi, J. K., Koo, J. W. Son, J. G., Yoon, K. S. and Cho, J. Y. (2001) Nutrient balance and runoff loading during cropping period from a paddy plot in maryeong irrigation district, *J. Kor. Soc. Agric. Eng.* 43(5), 153-162.
5. Kim, J. S., Oh, S. Y., Kim, K. S. and Kwon, S. K. (2001) Characteristics of pollutants concentration at paddy field areas during irrigation periods, *J. Kor. Soc. Agric. Eng.* 43(6), 163-173.
6. Shin, D. S. and Kwon, S. K. (1990) The concentration and Input / Output of nitrogen and phosphorus in paddy fields, *Kor. J. Environ. Agric.* 9(2), 133-141.
7. Yoon, C. G., Kim, B. H., Jeon, J. H. and Hwang, H. S. (2002) Characteristics of pollutant loading from paddy field area with groundwater irrigation, *J. Kor. Soc. Agric. Eng.* 44(5), 116-126.
8. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Choi, J. K. and Yoon, K. S. (2005) The comparison of water budget and nutrient loading from paddy field according to the irrigation methods, *Kor. J. Limnol* 38(1), 118-127.
9. Wada, G., Shoji, S. and Mae, T. (1986) Relationship between nitrogen absorption and growth and yield of rice plants. *JARQ* 20(2), 135-145.
10. Shoji, S., Ando, H. and Wada, G. (1986) Fate of nitrogen in paddy fields and nitrogen absorption by rice plants. *JARQ* 20(2), 127-134.
11. Mori, Y. (1990) A model for changes in the surface water nitrogen concentration in paddy fields. *Transaction of the ASAE* 146, 15-25.
12. Liwang, M., Lindau, C. W., Honpayoon, C., Burhan, W., Jang, B. C., Partick, W. H. and Selim, H. M. (1999) Modeling urea, ammonium, and nitrate transport and transformations in flooded soil columns.

- Soil Science* 164(2), 123-132.
13. 海老瀬, 替一他 (1981) タソクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析. *用水と廢水* 123(11).
 14. 中村良太, 中曹根英雄 (1991) 水質の日流出負荷量の解析に関する研究. *日本農業土木學會論文集* 151, 27-32.
 15. Kim, H. S., Chung, S. O., Kim, J. S. and Oh, S. Y. (2002) Prediction of nutrient loading from paddy fields (II) -Model application-, *J. Kor. Soc. Agric. Eng.* 44(5), 106-115.
 16. Kim, H. S., Jung, S. O. and Kim, J. S. (2001) Development of GLEAMS-PADDY model for nutrients loading simulation from paddy-field areas, *Proceedings of the 2001 annual conference, The Kor. Soc. of Agric. Eng., Jeonju*, 445-449.
 17. Jin, Y. M. (1998) Development of CREAMS-PADDY model for NPS pollutants loads from paddy fields, Master Thesis, Seoul National University, Seoul.
 18. Seo, C. S. (2001) Development of CREAMS-PADDY model for simulating pollutants from irrigated paddies, Master Thesis, Seoul National University, Seoul.
 19. Knisel, W. G. (1980) CREAMS : A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Report No26, USDA-SEA, Washington. D. C. USA.
 20. APHA, AWWA and WPCF (1985) Standard methods, 16th edition, American Public Health Association, Washington. D. C. USA.
 21. Jin, Y. M., Park, S. W., Kim, S. M., Kang, M. S. and Kang, M. G. (2002) Nutrient loads estimation at paddy field using CREAM-PADDY model, *J. Kor. Soc. of Rural Planning*, 8(1), 60-68.
 22. Mishra, A., Ghorai, A. K. and Singh, S. R. (1998) Rainwater, soil and nutrient conservation in rainfed rice lands in eastern India, *Agricultural Water Management* 38, 45-57.
 23. Son, S. H. and Chung, S. O. (2002) Effects of ponding depth treatment on water balance in paddy fields, *J. Kor. Soc. Agri. Eng.* 44(2), 67-74.
 24. Hatta, S. (1967) Water consumption in paddy field and water saving rice culture in tropical zone, *Japanese Tropical Agriculture* 22(3), 106-112.
 25. Tabbal, D. F. water-efficient irrigation technique for rice. In soil and water engineering for paddy field management, *Proceeding of the International workshop*, 146-159. January 1992. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
 26. Yoon C. G., Hwang, H. S., Jeon, J. H. and Ham, J. H. (2003) Analysis of nutrients balance during paddy rice cultivation, *Kor. J. Limnol* 36(1), 66-73.
-