



논에서의 비점오염부하 예측을 위한 엑셀기반의 PADDIMOD2 개발

Development of Excel Based PADDIMOD2 for Estimating Nonpoint Source Pollutant Loadings from Paddy Rice Fields

전지홍^{*,†}

Jeon, Ji-Hong

ABSTRACT

PADDIMOD2 was developed to estimate nonpoint source pollution from paddy rice fields. The PADDIMOD2 was enhanced to estimate runoff and pollutant load during non-growing as well as growing season and to be easily used for public by development of Excel based system. Nutrient concentration and hydrology were based on Dirac delta function and continuous source function, and tank model for growing season and Event Mean Concentrations (EMCs) and SCS-Curve Number method for non-growing season. The PADDIMOD2 consists of three main component (input data, parameters data, and output data) by including eight Excel spread sheets. As a result of model application, total precipitation and irrigation were 1,051.7 mm and 439.2 mm, respectively and surface runoff and water loss including infiltration and evapotranspiration were 463.0 mm and 947.9 mm, respectively. Annual nutrient loadings of T-N and T-P from study area were 6.7 kg/km²/day and 0.5 kg/km²/day, respectively. Development of PADDIMOD2 was focused on minimizing input data and maximizing user friendly system and is expected to be useful tool to evaluate various non-structure BMPs and estimate unit load from paddy rice fields for application at Korean TMDL.

Keywords: PADDIMOD; paddy rice field; nonpoint source pollutant; field scale model; excel based model

1. 서 론

수질오염총량제도가 하천수의 수질규제에 적용됨에 따라 비점오염부하량의 중요성이 강조되고 있다. 전체 부하량 중 비점오염부하량이 차지하는 비율은 2003년도부터 꾸준히 증가하여 2015년에 이르러서는 BOD기준으로 한강 70%, 낙동강 65%, 영산강 67%, 금강 68%에 이르러는 것으로 보고되고 있다 (Ministry of Environment, 2006). 이에 따라, 정부에서는 비점오염부하량을 저감시키기 위한 다양한 법적근거와 정책들이 제시되고 있다. 비점오염원은 점오염원과 달리 강우시 광범위한 토지로부터 유출되기 때문에 강우강도와 강우량, 토지피복 특성 등을 포함한 다양한 환경적인 요인에 영향을 받기 때문에 비점오염유출 특성을 파악하기에 많은 어려움이 있다. 비점오염원 중 다량의 시비가 이루어지는 농업비점오염원은 중요한 오염원으로 인식하고 있

다. 특히, 우리나라의 경우 논이 차지하는 비율이 높은 편인데, 4대강 권역별 논이 전체면적에 차지하는 비율은 2006년 기준으로 10~24%를 차지하고 있다. 농경지 중 논이 차지하는 비율은 57%이며, 우리나라 전체 면적을 기준으로 논이 차지하는 비율은 약 15%로 자연상태인 산림을 제외한 토지피복종류중 가장 많은 면적을 나타낸다. 따라서 우리나라의 비점오염원 관리에 있어 논은 중요한 의미를 가지고 있다. 우리나라의 경우 최근 들어서 논에서의 비점오염원 유출 특성에 대한 연구가 진행되었는데, Kwun and Shin (1990)은 농경지 원단위에 대한 연구를 수행하였으며, Rho and Ha (1999), Choi et al. (2001), Yoon et al. (2003)은 시비에 따른 논에서의 영양물질수지 분석에 대한 연구를 수행한 바 있어 논에서의 비점오염원에 대한 연구는 모니터링을 기반으로 한 물수지 혹은 물질수지 분석이 대부분이었다.

Jeon et al. (2006)의 연구결과에 따르면, 논 표면수의 영양물질 농도는 시비에 의해 그 변화폭이 매우 크기 때문에 논에서의 유출이 일어나는 시점에 따라 논에서의 비점오염원 물질 특히 영양물질 부하량에 크게 영향을 주게 된다. 따라서, 단기간에 수행된 모니터링 결과에 의한 논에서의 비점오염배출부하량을 일반화 하기에는 많은 한계점을 가진다. 논에서의 다양한 영

* 안동대학교 환경공학과 교수

† Corresponding author Tel.: +54-820-5093

Fax: +54-820-6197

E-mail: jhjeon@andong.ac.kr

2011년 5월 9일 투고

2011년 6월 9일 심사완료

2011년 6월 9일 게재확정

농활동에 따른 비점오염배출부하량을 보다 신뢰성 있게 정량화 하기 위한 방법으로 모델적용이 있다. 그러나 우리나라에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 유역모델의 대부분이 미국에서 개발되었기 때문에 논에 대한 모의가 어려운 실정이다. 논에서의 부하량 예측을 위한 모델개발에 대한 연구가 우리나라에서도 진행되었는데, Kim (1998)은 CREAMS 모형을 수정한 CREAMS-PADDY 모형을 개발하여 논에서의 물수지와 물질수지를 고려하여 오염부하량을 모의할 수 있도록 수정하였다. Jeon et al. (2004)은 논에서의 시비에 의한 영양물질 농도변화를 간단한 공식인 Dirac delta function을 이용하여 모의할 수 있는 PADDIMOD를 개발하고 경기도 여주군의 지하수관개논과 전라북도 진안군의 지표관개논에 대하여 모델의 적용성을 평가함으로써 최소의 입력자료를 이용하여 신뢰성 있는 모의결과 도출이 가능하였다. 그러나 PADDIMOD는 영농기간에 걸쳐 논에서의 영양물질 부하량 산정은 가능하나 비영농기간에서의 오염물질 부하량 산정이 불가능하다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 PADDIMOD를 영농기간뿐만 아니라 비영농기간동안의 논에서의 영양물질 부하량을 산정할 수 있도록 개선하였으며, 보다 사용자가 쉽게 사용하고 분석할 수 있도록 엑셀 버전의 PADDIMOD를 개발하였다.

II. 재료 및 방법

1. PADDIMOD 기본이론

PADDIMOD는 영농기간 동안의 논에서의 영양물질부하량을 산정할 수 있는 필지단위모델 (field scale model)이다. 논을 하나의 개념화된 저류탱크로 가정하여 물수지를 분석하며, 시비에 따른 논 표면수의 영양물질 농도를 모의한 후 유출량과 표면수의 농도를 곱하여 논에서의 영양물질 부하량을 산정한다. PADDIMOD의 물순환 기본 개념도와 물수지는 Fig. 1과 식 (1)과 같다 (Jeon et al, 2004).

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

여기서, W_j 는 담수심 깊이, W_{j-1} 계산 전 담수심 깊이, IR_{1j} 관

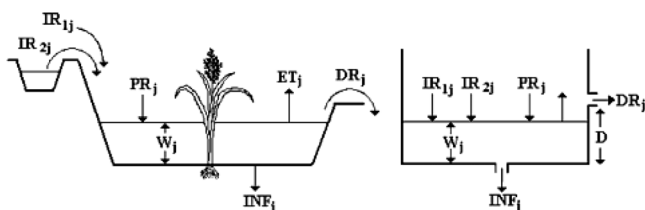


Fig. 1 Schematics of water budget components in PADDIMOD

개수량, IR_{2j} 윗논유입량, PR_j 강우량, DR_j 지표유출량, ET_j 증발산량, INF_j 침투량을 나타낸다.

지표유출량과 침투량은 담수심의 깊이와 각각의 유출공계수에 의해 계산되며 식 (2)~(3)과 같다 (Jeon et al, 2004).

$$DR = (W - D) \times a_1 \quad (2)$$

$$INF = W \times a_2 \quad (3)$$

여기서, W 는 담수심, D 논둑높이, INF 침투량, a_1 와 a_2 는 각각 지표유출공 및 침투공 계수를 의미한다.

PADDIMOD에 의한 논에서의 수질예측을 위해서는 다음과 같은 가정을 필요로 한다 (Jeon et al, 2004).

- 논은 완전혼합반응조 (continuously stirred tank reactor; CSTR)이다.
- 시비에 의한 영양물질 농도변화는 Dirac delta 함수를 따른다.
- 바닥에서의 용출은 continuous source 함수를 따른다.

Dirac delta 함수는 다량의 오염물질이 일시적으로 수계에 유입되었을 때 사용될 수 있는 함수로서 상대적으로 수질이 양호한 관개수에 특정기간의 시비에 의해 다량의 영양물질이 논에 유입되는 것이 Dirac delta 함수의 개념과 유사하며, 선행 연구에 의해 논에서의 시비에 의한 영양물질 변화가 Dirac delta 함수를 잘 따르는 것으로 나타났다(Jeon et al., 2004; Jeon et al., 2007). 다만, 선행연구결과 시비 투여 이후 초기농도는 전량으로 환원되지 않고 일부만 환원되는 것으로 나타났으며 이는 기비와 함께 논을 한번 갈아엎기 때문에 토양에 흡착될 것으로 판단되며 논 표면수 농도에 환원되지 않은 영양물질은 논 표면수의 기본농도와 시비이후 농도감소 경향으로 나타날 것으로 판단된다.

비교적 수질이 양호한 관개수가 유입될 경우, 논 바닥에서 어느 정도 용출이 일어나 논 자체의 기본농도는 가지고 있을 것으로 판단된다. 따라서, Dirac delta 함수만으로 해석할 경우 오랜 시간이 경과되면 농도는 0에 가까워지기 때문에 논 자체의 기본농도를 나타내기 위하여 continuous source 함수를 사용하였다 (Chapra, 1997). PADDIMOD의 수질해석에 사용되는 공식과 그 개념도는 식 (4)~(5)와 Fig. 2와 같다.

$$c = \frac{\gamma m}{V} e^{-\alpha t} \quad (4)$$

$$\bar{c} = \frac{W}{\beta W} \quad (5)$$

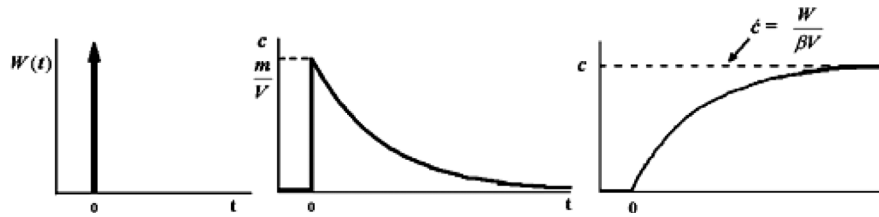


Fig. 2 Conceptual expression of the effect of fertilization and sediment (Jeon et al., 2004)

여기서, c 는 논 담수심 농도 (mg/L), m 은 논에서의 영양물질량 (g), V 는 논에서의 담수에 의한 체적 (m^3), t 는 경과시간 (day), α 와 β , γ 는 계수이다.

2. PADDIMOD2 개발

기존의 PADDIMOD는 도스프로그램으로 입력파일이 텍스트 파일 형태이기 때문에 모델을 처음 접하는 사람에게는 사용하기가 어렵고, 영농기간 동안의 부하량만 계산하기 때문에 다양한 관리 대책에 따른 연간 부하량 산정에 한계점을 가진다. 이러한 한계점을 개선하기 위해서 엑셀기반의 PADDIMOD2를 개발하였다.

가. 비영농기 영양물질 부하량 산정

영농기간과 비영농기간의 가장 큰 차이점은 담수상태와 시비의 유무이다. 즉, 논에서의 영농기간 동안의 유출 및 오염부하 특성은 담수상태에 시비가 이루어지기 때문에 다른 토지이용상태와 상이한 특성을 가지고 있으나, 비영농기간에는 담수가 이루어지지 않고 추가적인 시비가 이루어지지 않기 때문에 다른 토지이용상태와 유사한 유출 및 오염부하 유출특성을 갖는다. 따라서, 비영농상태의 논에서의 유출 및 오염물질 부하 특성은 기존의 개발된 유역모델에서 개발된 공식을 그대로 사용할 수 있다. PADDIMOD가 기존의 몇몇 논에서의 유출량 및 부하량 산정모델과 비교해서 가장 큰 장점은 최소의 입력데이터를 이용하여 논에서의 유출량 및 오염물질 부하량을 산정하는 것이다. 이러한 모델특성을 고려하여 논에서의 비영농기간 동안의 유출량 및 오염물질 부하량 산정에 있어서 비교적 최소의 데이터를 요구하고 널리 이용되는 유출곡선식 (Curve Number; CN)과 강우평균농도 (Event Mean Concentrations; EMCs)를 적용하여 논에서의 유출량 및 비점오염부하량을 산정하였다.

유출곡선식은 유역에서의 잠재최대저류량에 대한 실제저류량과의 비율이 잠재최대유출량에 대한 실제직접유출량 비율과 동일하다는 가정을 기초로 하고 있다 (NRCS, 1986). 유출곡선식에 의한 직접지표유출량은 식 (6)에 의해 계산된다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (6)$$

Table 1 Event mean concentrations of paddy rice fields during non-growing season

	BOD	COD	T-N	T-P
EMCs (mg/L)	1.50	6.27	4.71	1.14

$$S = 24.5 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (7)$$

여기서, Q 는 직접지표유출량, P 강우량, S 최대잠재저류량, CN 유출곡선이다. 비영농기간에 적용되는 논에서의 강우평균농도는 Jeon (2010)이 경상북도 안동시에 위치한 비영농기간의 논을 상대로 인공강우에 의해 측정된 자료를 활용하였다 (Table 1).

3. PADDIMOD2 적용

본 연구를 통해서 새롭게 개발된 엑셀기반의 PADDIMOD2 모델결과의 적절성을 테스트하기 위하여 경상북도 안동시 남선면 구미리 20번지에 위치한 논을 대상으로 가상의 시나리오를 적용하였다 (Fig. 3).

논둑의 높이는 대상지역에 직접 측정한 70 mm로 하였으며, 담수심은 최대 50 mm를 유지하는 것으로 가정하여 관개하였다. 증발산량은 인근의 안동기상청 기상자료를 이용하여 Penman Monteith에 의해 잠재증발산량을 계산하였으며 남부지방의 작물



Fig. 3 Study area

계수를 곱하여 논에서의 증발산량을 계산하였다. 비료는 분얼비 (55 kg-N/ha, 19.64 kg-P/ha), 이삭비 (33 kg-N/ha), 추비 (22 kg-N/ha) 각각 3회 투여하며, 투여량은 농촌진흥청의 추천 시비량으로 하였다. 모델인자는 PADDIMOD관련 선행연구에 의해 결정된 값을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. PADDIMOD2 구조

새롭게 개발된 PADDIMOD2는 3개의 데이터 카테고리로 구

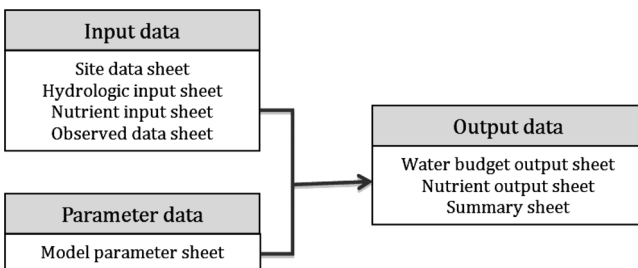


Fig. 4 Three main components and its sheets of the PADDIMOD2

분되며, 8개의 엑셀시트로 구성되어 있다 (Fig. 4).

가. Input data

입력자료에는 Site data, Hydrologic input, Nutrient input, Observed data sheet로 구성되어 있다. Site data에서는 적용 대상지역에 대한 면적, 토양배수그룹별 차지하는 면적에 대한 정보를 입력한다. Hydrologic input sheet에서는 일별 수문관련 자료(강수량, 관개량, 빗논유입량, 물꼬높이, 증발산)를 입력하는 곳이다.

Nutrient input sheet에서는 영양물질관련 입력자료(시비량, 관개수농도, 빗논유입농도, 강우농도)를 입력하는 곳이다. Observed data sheet에서는 담수심의 T-N, T-P 농도, 담수심 깊이, 유출고에 대한 실측자료를 선택적으로 입력하는 곳이다. 실측자료는 Parameter sheet에서 예측치와 실측치 그래프 비교 그래프를 나타낼 때 사용된다.

나. Parameters

Parameter sheet에서는 유출량 및 수질예측과 관련된 보정인자를 입력하는 곳이다 (Fig. 6).

보정인자는 크게 지표유출, 질소, 인, 비영농기간 인자로 구

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	PADDIMOD V2.0											
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field											
3	Developed by Environmental Engineering, Andong National University, Assistant Professor Ji-Hong Jeon											
4												
5	General Site Information											
6	Project Information											
7	Company/Org:	영동시 남산면										
8	Project:											
9	Jurisdiction:											
10	Scenario:	소수/50mm 양지										
11	Site Information											
12	Area (m2)	3994										
13	Soil Hydrologic Groups (% of Site Area)											
14	Group A	0.00%										
15	Group B	0.00%										
16	Group C	100.00%										
17	Group D	0.00%										
18	Totals OK											

(a) Site data sheet

	A	B	C	D	E
1	PADDIMOD V2.0				
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field				
3	Hydrologic Input Data				
4	Date	Rainfall (mm)	Irrigation (mm)	Input from upper field (mm)	Dike Height (mm)
5	1-Jan	0			
6	2-Jan	0			
7	3-Jan	0			
8	4-Jan	4.4			
9	5-Jan	0			
10	6-Jan	0			
11	7-Jan	0			
12	8-Jan	0			
13	9-Jan	0			
14	10-Jan	0			
15	11-Jan	0			
16	12-Jan	0			
17	13-Jan	0			
18	14-Jan	0			
19	15-Jan	0			
20	16-Jan	0			
21	17-Jan	0			
22	18-Jan	0			
23	19-Jan	0			

(b) Hydrologic input sheet

	A	B	C	D	E
1	PADDIMOD V2.0				
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field				
3	Agricultural Activity & Water Quality				
4	Date	Fertilization (kg/ha)		Irrigation Water Con'c (mg/L)	
5	1-Jan	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus
6	2-Jan				
7	3-Jan				
8	4-Jan				
9	5-Jan				
10	6-Jan				
11	7-Jan				
12	8-Jan				
13	9-Jan				
14	10-Jan				
15	11-Jan				
16	12-Jan				
17	13-Jan				
18	14-Jan				
19	15-Jan				
20	16-Jan				
21	17-Jan				
22	18-Jan				
23	19-Jan				

(c) Nutrient input sheet

	A	B	C	D	E
1	PADDIMOD V2.0				
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field				
3	Observed Data				
4	Date	Retained Water Depth (mm)	Runoff Depth (mm)	Nitrogen (mg/L)	Phosphorus (mg/L)
5	1-Jan				
6	2-Jan				
7	3-Jan				
8	4-Jan				
9	5-Jan				
10	6-Jan				
11	7-Jan				
12	8-Jan				
13	9-Jan				
14	10-Jan				
15	11-Jan				
16	12-Jan				
17	13-Jan				
18	14-Jan				
19	15-Jan				
20	16-Jan				
21	17-Jan				
22	18-Jan				
23	19-Jan				

(d) Observed data sheet

Fig. 5 Four spreadsheets in input data component

	A	B	C	D
1	PADDIMOD V2.0			
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field			
3	Parameters			
4				
5	Parameter	Value	Units	Symbol
6	Area	0.3694	ha	
7	Surface Runoff			
8	Infiltration Coefficient	0.04		
9	Runoff Rate	0.900		
10	Nitrogen			
11	Soluble rate for basal fertilization	0.85		
12	Soluble rate for tillering fertilization	0.85		
13	Soluble rate for panicle fertilization	0.85		
14	α for Basal Fertilization	0.12		
15	α for Tillering Fertilization	0.1		
16	α for Panicle Fertilization	0.3		
17	Upper limit of concentration from Sediment release	2.5		
18	Coefficient for sediment release	0.1		
19	Phosphorus			
20	Soluble rate for basal fertilization	0.3		
21	Soluble rate for tillering fertilization	1.00		
22	Soluble rate for panicle fertilization	1.00		
23	α for Basal Fertilization	0.3		
24	α for Tillering Fertilization	0.03		
25	α for Panicle Fertilization	0.17		
26	Upper limit of concentration from Sediment release	0.15		
27	Coefficient for sediment release	0.13		
28	Parameters for non-growing season			
29	CN for Hydrologic Soil A Group	69.1		
30	CN for Hydrologic Soil B Group	78.5		
31	CN for Hydrologic Soil C Group	85.8		
32	CN for Hydrologic Soil D Group	88.9		
33	Event Mean T-N Concentration	3.83		
34	Event Mean T-P Concentration	0.28		

Fig. 6 Parameter sheet of PADDIMOD2

	A	B	C	D	E
1	PADDIMOD V2.0				
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field				
3	Simulation Results: Water Budget				
4	Average CN Value		85.8		
5		Retained Water	Runoff Depth	Infiltration	
6	Date	Depth (mm)	(mm)	(mm)	
142	16-May	65.95	0.00	2.75	
143	17-May	65.31	0.00	2.72	
144	18-May	72.59	23.31	4.00	
145	19-May	68.67	0.00	2.86	
146	20-May	63.79	0.00	2.66	
147	21-May	59.35	0.00	2.47	
148	22-May	66.74	0.00	2.78	
149	23-May	72.75	24.74	4.06	
150	24-May	70.98	8.78	3.32	
151	25-May	68.95	0.00	2.87	
152	26-May	64.16	0.00	2.67	
153	27-May	59.48	0.00	2.48	
154	28-May	55.30	0.00	2.30	
155	29-May	50.91	0.00	2.12	
156	30-May	50.00	0.00	2.08	
157	31-May	50.00	0.00	2.08	
158	1-Jun	50.00	0.00	2.08	
159	2-Jun	50.00	0.00	2.08	
160	3-Jun	50.00	0.00	2.08	

(a) water budget output

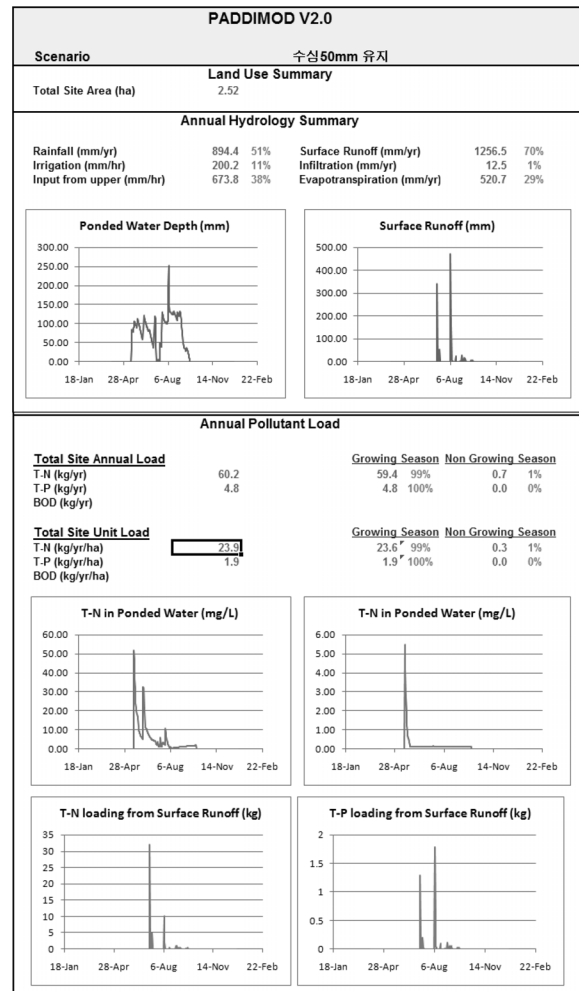
	A	B	C	D	E
1	PADDIMOD V2.0				
2	Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field				
3	Simulation Results: Water Budget				
4		Retained Water (mg/l)		Runoff Loading (kg)	
5	Date	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus
142	17-May	0.06	0.00	0.00	0.00
143	18-May	42.25	4.42	3.64	0.38
144	19-May	38.06	3.32	0.00	0.00
145	20-May	34.88	2.55	0.00	0.00
146	21-May	31.92	1.95	0.00	0.00
147	22-May	24.52	1.25	0.00	0.00
148	23-May	15.00	0.66	1.37	0.06
149	24-May	11.95	0.45	0.39	0.01
150	25-May	10.55	0.33	0.00	0.00
151	26-May	9.65	0.25	0.00	0.00
152	27-May	8.87	0.20	0.00	0.00
153	28-May	8.12	0.15	0.00	0.00
154	29-May	7.51	0.12	0.00	0.00
155	30-May	6.51	0.12	0.00	0.00
156	31-May	5.54	0.13	0.00	0.00
157	1-Jun	4.72	0.13	0.00	0.00
158	2-Jun	4.02	0.13	0.00	0.00
159	3-Jun	3.42	0.13	0.00	0.00
160	4-Jun	2.91	0.14	0.00	0.00

(b) Nutrient output

분할 수 있는데, 지표유출에서는 침투공과 유출공 계수를 입력하는 곳으로 영농기간 동안의 직접유출량을 계산하는데 사용된다. 질소와 인은 공통적으로 분얼비와 이삭비, 추비에 대하여 각각 용해율, Dirac delta함수의 α , continuous source 함수의 β 와 ϵ 를 입력한다. 비영농기간 인자에서는 비영농기간 논외의 토양배수상태에 따른 CN값과 비영농기간 논에서의 EMCs를 입력하는 곳이다. Parameter sheet에서는 담수심과 유출고, 논표면수의 질소와 인 농도에 대한 실측치와 예측치의 그래프들을 제공하기 때문에 모델 보정시 보정인자 입력과 동시에 실측치와 예측치를 비교할 수 있기 때문에 보정과정의 용이하다는 장점을 가지고 있다.

다. Output data

PADDIMOD2에 의해 모의된 결과는 water budget output, nutrient output, output summary sheets로 구성되어 있다.



(c) output summary

Fig. 7 Three spreadsheets in output data component

Water budget output에서는 수문관련 모의결과를 출력하는 곳으로 일별 담수심·지표유출·침투량에 대한 모의결과를 나타낸다. Nutrient output에서는 질소와 인에 대한 일별 담수농도·배출부하량을 계산하여 출력하는 곳이다. Output summary는 모의결과를 영농기/비영농기, 연단위로 요약해서 출력하는 곳으로 다양한 시나리오를 적용하였을 경우 연간 수문 혹은 부하량을 손쉽게 비교할 수 있게 하였으며, 모의결과를 그래프로 표현함으로써 보고서 작성에 보다 용이할 수 있도록 하였다.

2. 모의 결과

가. 수문모의결과

논둑높이 70 mm, 담수심 50 mm 유지시 PADDIMOD2에 의

Table 2 Annual hydrology summary

	Growing season	Non-growing season	Total
Rainfall	828.8	222.9	1,051.7
Irrigation	439.2	-	439.2
Subtotal	1,268.0	222.9	1,490.9
Surface runoff	439.2	23.8	463.0
Loss	828.8	119.1	947.9
Subtotal	1,268.0	222.9	1,490.9

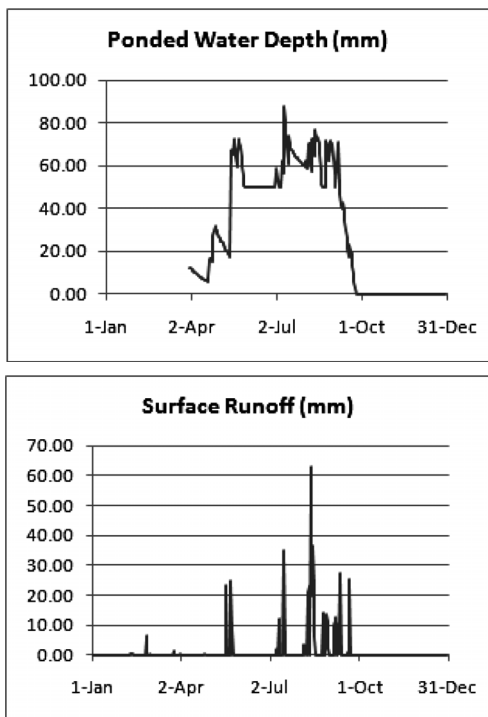


Fig. 8 Simulation results of ponded water depth and surface runoff by PADDIMOD2

한 수문모의결과는 Table 2와 같으며, 담수심과 지표유출고의 변화는 Fig. 8과 같다.

총 논으로 유입된 양은 1,484.1 mm로 강우량 1051.7 mm, 관개수량이 432.4 mm로 강우량이 전체 유입수량의 71 %를 차지하는 것으로 나타났다. 지표유출량은 463.0 mm으로 영농기간동안의 지표유출량은 439.2 mm, 비영농기간은 23.8 mm로 유출량의 대부분은 영농기간동안 발생하는 것으로 나타났다. 이는 비영농기간의 논은 논둑이 터져 있다 하더라도 논 경사각의 없으며, 추수시 논기계 바퀴에 의해 생성된 논바닥 자체의 요철에 의해 논이 저류할 수 있는 양이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다. 이에 반해 영농기간 동안에는 담수에 의해 토양은 이미 포화에 의해 침투가 발생하기 때문에 건조된 토양보다 침투율이 낮고, 중간낙수에 의한 유출이 발생하며, 관개수량은 영농기간에 유입되며 대부분의 강우가 영농기간에 발생하기 때문에 많은 양의 유출이 영농기간에 발생하는 것으로 나타났다. 영농기간 동안의 침투량은 363.3 mm, 증발산량은 524.6 mm 논에서의 물수지에서는 증발산량이 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

나. 영양물질부하 모의결과

연구대상지역 논에서의 연간부하량은 T-N, T-P 각각 9.0 kg/yr, 0.7 kg/yr인 것으로 나타났으며, 대부분의 부하량은 영농기간에 발생하는 것으로 나타났다 (Table 3).

이는 다량의 시비가 영농기간에 투여되어 일정기간동안 고농도의 영양물질을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 논 표면수의 농도는 영농기간 동안 항상 고농도를 유지하는 것이 아니며 시비이후 일정기간동안 고농도를 유지하기 때문에 논에서의 유출시기가 언제냐에 따라 논에서의 부하량에 큰 영향을 받을 것으로 판단된다 (Fig. 9).

Fig. 10은 본 연구를 통한 논에서의 T-N, T-P 배출 부하량을 나타내고 있다. Fig. 8의 지표유출그래프에서는 7월 이후 아시아 몬순 기후에 의해 높은 유출량을 나타내었으나, Fig. 10의 영양물질 부하량은 영농초기에 높은 부하량을 나타내고 있다. 이는 영농기간 초기에 시비가 이루어지며, 아시아 몬순기후에 의해 많은 유출량이 발생하는 시기에는 영양물질 농도가 대부분 바탕농도에 도달하기 때문인 것으로 판단되며 이는 다른 토지이용상태에 비해 비점오염부하의 독특한 유출특성을 나타내는 것으로 판단된다.

연구대상지역의 논에서의 부하량을 원단위로 환산한 결과는 Table 4와 같다. 우리나라 수질오염총량제에서 사용되고 있는 논에서의 질소 및 인 발생부하량은 각각 6.56 kg/km²/day, 0.61 kg/km²/day이며 본 연구에서 도출된 원단위는 각각 6.7 kg/km²/day, 0.5 kg/km²/day로 유사한 값을 나타내었다. 논에서의

Table 3 Nutrient loading from paddy rice field (kg/yr)

	Growing season	Non-growing season	Total
T-N	8.6	0.3	9.0
T-P	0.7	0.0	0.7

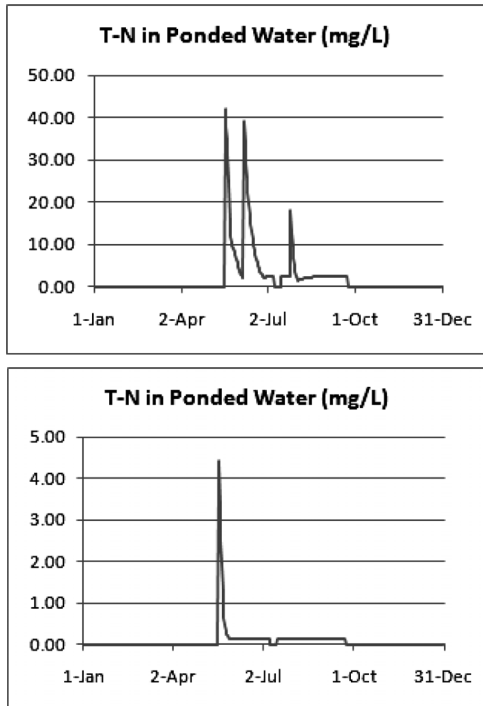


Fig. 9 Simulation results of T-N and T-P concentrations in ponded water depth by PADDIMOD2

부하량은 영농초기 다량의 시비가 이루어지는 시기에 영농관리를 어떻게 하느냐에 따라 그 부하량이 결정되어지기 때문에 본 연구에서 도출된 원단위와 수질오염총량제에서 사용하고 있는 원단위가 유사한 값을 나타내는 것에 대해서는 큰 의미를 가지지 않을 것으로 판단된다.

모델은 요구하는 입력자료와 출력되는 모의결과의 정도에 따라서 단순모델 (simple method), 중간모델 (mid-range model), 상세모델 (detail model)로 구분된다. 모델사용자는 가용할 수 있는 입력자료의 정도와 모델을 적용하고자 하는 목적을 고려하여 신중하게 모델을 선택해야 한다. 가용할 수 있는 입력자료가 매우 제한되어 있을 경우에는 상세모델에 의한 모의값이 단순모델에 의한 모의값보다 오히려 정확성이 떨어질 수 있다. 또한, 단순모델을 이용하여 시나리오별 우선순위 결정과 같은 평가가 가능함에도 불구하고 복잡한 모델을 적용하는 것은 때로는 시간과 노력의 낭비일수도 있다. PADDIMOD2는 요구되는 입력자료를 최소화하고 사용에 대한 편의성을 최대화 하는데 중점을 두었다. 따라서, 논에서의 영양물질 거동을 상세하게 파악하기

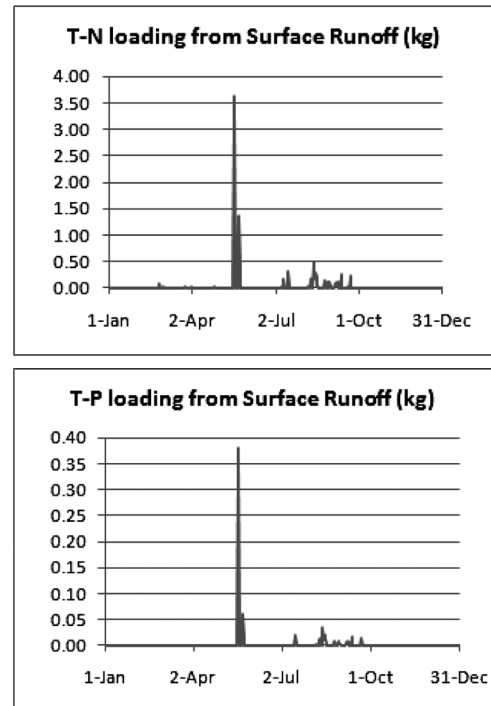


Fig. 10 Simulation results of T-N and T-P loading from paddy rice field by PADDIMOD2

Table 4 Nutrient loading from paddy rice field (kg/km²/day)

	This study			Document
	Growing season	Non-growing season	Annual load	Annual load
T-N	6.4	0.3	6.7	6.56
T-P	0.5	0.0	0.5	0.61

위해서는 PADDIMOD2 모델 보다 상세히 모의할 수 있는 모델 적용이 필요하지만 논에서의 BMPs별 상대적인 평가나 우선순위 결정에 PADDIMOD2의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 엑셀을 기반으로 개발된 모델이기 때문에 지자체 공무원이나 영농지도자 등과 같이 보다 실무에 가까운 분들에게 간단한 교육을 통해 사용이 가능한 모델이다. 따라서, 실무자들을 통해 해당 지역의 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 최적관리기법 개발에 적용 가능할 것으로 판단된다. 다만, PADDIMOD2는 입력자료가 최소화 되어 있기 때문에 적용대상지역에 대하여 검토정 과정을 거치지 않고 적용할시 모델결과에 불확실성을 포함할 수 있다는 한계점을 가지고 있으며, 다양한 조건에서의 PADDIMOD2 적용을 통한 보정자료의 일반화 혹은 몬테카를로시뮬레이션을 통한 확률적인 접근방법은 PADDIMOD2의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 판단되며 추후 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

제2단계 수질오염총량제 적용부터 T-P가 BOD와 더불어 수

질관리항목으로 추가되었다. 단일 항목으로 산림 다음으로 가장 많은 면적을 차지하는 논에서의 비점오염부하에 대한 관심이 점차 증가될 것으로 예상된다. 현재 수질오염총량제 논에서의 부하량은 Table 4에서 제시된 값을 사용한다. 그러나, 앞에서도 언급하였듯이 논은 담수상태이며 영농초기에 고농도의 영양물질 농도를 나타내지만 큰 강우가 발생하는 7월 이후에는 바닥농도에 다다르며 강우시 유출이 발생한다하더라도 다른 토지이용과 달리 논둑을 제외한 논자체에서의 토양유실은 발생하지 않는다. 따라서 논에서의 부하량은 시비량 감소, 영농초기 논둑 혹은 물관리와 같은 영농활동에 크게 영향을 받기 때문에 영농활동과 같은 비구조적 BMPs가 논에서의 비점오염부하량을 효율적으로 저감시킬 수 있으나 우리나라의 수질오염총량제에 있어서 이에 대한 삭감부하량산정에 대한 어떠한 가이드라인조차 제시하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 논 특성을 고려할 때 PADDIMOD2는 다양한 강우특성 뿐만 아니라 지역별 영농활동 특성을 반영할 수 있는 원단위 뿐만 아니라 비구조적 BMPs 적용에 따른 삭감부하량 산정에 유용한 틀로써 적용가능 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 논에서의 비점오염부하 산정 모델인 PADDIMOD2를 개발한 후, 경상북도 안동시에 위치한 논에 적용함으로써 PADDIMOD2 모델의 적용성을 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존의 PADDIMOD에 비해 PADDIMOD2은 영농기 뿐만 아니라 비영농기에서의 수문 및 수질을 모의할 수 있도록 수정함으로써 연간 논에서의 부하량을 산정할 수 있도록 개선하였다.
2. 영농기의 경우 논을 하나의 1단 탱크로 가정하여 물수지를 계산하였으며 논표면수의 수질농도를 예측함으로써 논에서의 부하량을 계산하며 논표면수의 수질농도는 Dirac delta 함수와 continuous source 함수에 의해 예측된다. 비영농기의 경우 논에서의 지표유출량은 SCS-CN 기법에 의해 예측되며, 논에서의 유출수 농도는 강우평균농도 (Event Mean Concentrations; EMCs)에 의해 비점오염부하량이 예측된다.
3. 기존의 도스프로그램 기반의 PADDIMOD를 엑셀기반의 PADDIMOD2로 개발함으로써 모델을 접하지 않은 비전문가라도 엑셀을 사용할 수 있으면 누구나도 적용가능할 수 있도록 사용자편의 시스템에 중점을 두어 모델을 개발하였다. 모델은 3개의 카테고리(Input data, parameter data, output data)로 구분되며 총 8개의 엑셀시트로 구성되어 있으며 엑셀의 강력한 도구인 그래프를 다양하게 제공함으로써 보정과정이 쉬워졌고 모의 결과 분석이 용이하다는 장점을 가지고 있었다.
4. 경상북도 안동시에 위치한 논에 담수심을 50 mm 유지한

다는 가정하에 2010년을 대상으로 모의한 결과, 총강우량과 관개량이 각각 1,051.7 mm, 439.2 mm였으며, 지표유출량과 손실량 (침투량 + 증발산량)이 각각 463.0 mm, 947.9 mm로 나타났다. 연간 T-N, T-P 부하량은 각각 6.7 kg/km²/day, 0.5 kg/km²/day인 것으로 나타났으며 대부분의 부하량이 영농기에 발생하는 것으로 나타났다.

5. PADDIMOD2 모델은 입력자료를 최소화하고 사용편의성을 최대화 한 비교적 간단한 모델로 논에서의 다양한 비구조적 BMPs 평가에 적합한 모델이며 수질오염총량제의 강우특성과 영농특성을 반영한 논에서의 원단위 산정과 비구조적 BMPs에 대한 삭감부하량 산정에 적용가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원 연구비지원 (농촌비점오염 저감을 위한 주민참여 및 자율역량 강화방안)에 의해 진행되었습니다.

REFERENCES

1. Chapra, S.C., 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill, New York, USA.
2. Choi, J.K., J.W. Koo, J.G. Son, K.S. Yoon, and J.Y. Cho, 2001. Nutrient balance and runoff loading during cropping period from a paddy plot in Maryeong irrigation district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(5): 153-162.
3. Jeon, J.-H., C.G. Yoon, J.-H. Ham, and K.-W. Jung, 2004. Model development for surface drainage loading estimates from paddy rice fields. *Paddy and Water Environment* 3(2): 93-101.
4. Jeon, J.-H., C.G. Yoon, H.S. Hwang, and K.W. Jung, 2006. Water quality modeling to evaluate BMPs in rice paddies. *Water Science and Technology* 53(2): 253-261.
5. Jeon, J.-H., C.G. Yoon, A.S. Donigian, K.-W. Jung, 2007. Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions. *Agricultural Water Management* 90: 75-86.
6. Jeon, J.-H., 2010. Event mean concentrations (EMCs) of paddy rice fields during non-growing season. *Bulletin of Engineering Technology Research Institute* 15: 131-136.
7. Kim, Y.M., 1998. Development of Creams-Paddy for estimating nonpoint source pollution from paddy rice

- fields. Master thesis, Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
8. Kwun, S.K., and D.S. Shin, 1990. The concentration and input/output of nitrogen and phosphorus in paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 9(2): 133-141 (in Korean).
 9. Ministry of Environment, 2006. Developing water quality conservation strategy for the main 4 river basins in Korea. Ministry of Environment (in Korean).
 10. NRCS, 1985. Urban Hydrology for Small Watersheds, 2-1. Technical Release 55. Conservation Engineering Division, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, USA.
 11. Rho, K.A., and H.S. Ha, 1999. Nutrient balance during rice cultivation in sandy soil affected by the fertilizer management. *Journal of Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 32(2): 155-163.
 12. Yoon, C.G., H. Hwang, J.-H. Jeon, and J.-H. Ham, 2003. Analysis of nutrients balance during paddy rice cultivation. *Korean Journal of Limnology* 36(1): 66-73.