

논에서의 비점오염부하량 예측을 위한 LIDMOD2 모델



전 지 흥
안동대학교 환경공학과 조교수
jhjeon@andong.ac.kr

1. 서론

오염물질은 유출경로에 따라 점오염원과 비점오염원으로 대별된다. 점오염원은 특정한 한 지점에서 유출되는 오염원을 말하며 시간에 따라 그 변화량이 상대적으로 적기 때문에 정량화 하기가 쉽고 수질관리에 유리하다. 반면에 비점오염원은 불특정 지점에서 광역적으로 유출되는 오염물질을 말하며, 강우시 토지표면에서 유출되는 경우가 대부분이기 때문에 시간에 따라 변화량이 크고 정량화하기가 어려우며 상대적으로 수질관리가 어렵다. 전체부하량에서 비점오염원이 차지하는 비중이 점점 증가하여 2015년에 이르러서는 BOD기준으로 4대강에 걸쳐 약 70% 내외인 것으로 보고되고 있으며 수질 오염총량제가 도입되고 난 후 비점오염원에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 정부에서는 비점오염원을 효율적으로 관리하기 위한 다양한 수질정책들을 제시하고 있다. 비점오염원은 강우시 토지로부터 유출되기 때

문에 강우특성과 토양특성뿐만 아니라 토지이용특성에 크게 영향을 받는다. 특히, 우리나라의 경우 토지이용 중 자연상태인 산림을 제외하고, 단일 지목 중 논이 차지하는 비율이 15%로 가장 높은 비중임을 감안할 때, 효율적인 비점오염원 관리를 위해서는 논에서의 비점오염물질 유출특성을 파악하는 것이 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

시공간적으로 변화하는 오염물질부하량과 다양한 오염물질저감대책 평가를 위해서는 오염물질의 발생 및 거동을 파악하는 것이 중요한 과정이며 이를 위해서 유역 혹은 수질모델 적용이 널리 이용되고 있다. 특히 유역에서의 오염물질 발생과 유출을 모의할 수 있는 유역모델의 경우 우리나라에서 주로 이용되는 모델의 대부분이 미국에서 개발이 되었기 때문에 논에서의 오염물질 기작을 모의하는데 한계를 가진다. 논은 논둑에 의해 담수를 하기 때문에 강우시 비점오염유출이 발생하지 않을 수 있으며, 영농활동에 의한 중간낙수에 의해 비강

우시 비점오염원이 발생할 수도 있다. 또한 담수상태에서 시비가 이루어지기 때문에 다른 농경지와는 달리 비료의 성분은 수환경에서 변화한다. 논에서의 기작을 모의할 수 있도록 기존의 모델을 수정하거나 새로운 모델을 개발하는 연구가 몇몇 연구자에 의해 국내에서도 수행이 되었다. 진영민(1998)은 Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System (CREAMS)모델을 논을 모의할 수 있도록 수정한 CREAMS-PADDY를 개발하였으며, 진영민 등(2002)이 경기도 수원시에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 시험포를 대상으로, 한국현 (2008)은 전라북도 진안군 마령면 평지리에 위치한 시험포장을 대상으로 CREAMS-PADDY를 적용한 바 있다. Jeon et al. (2005)은 Dirac delta 함수를 이용하여 논에서의 영양물질농도를 모의할 수 있는 PADDIMOD를 개발한 바 있으며, 경기도 여주시에 위치한 지하수를 관개하는 건국대학교 실험포와 지표수를 관개하는 전라북도 진안군 마령면에 위치한 시험포장을 대상으로 PADDIMOD의 적용성을 평가한 바 있다. 그러나 초기 PADDIMOD는 도스 기반의 모델로 입력파일이 텍스트 형태로 되어 있기 비전문가가 사용하기에는 한계점을 가지며, 또한 영농기간 동안 논에서의 유출량 및 부하량을 예측하기 때문에 비영농기간을 포함한 연간 유출량과 부하량을 계산하지는 못한다. 이후, 전지홍(2011)에 의해서 비영농기에도 논에서의 오염물질 부하량을 모의할 수 있도록 엑셀기반의 PADDIMOD2가 개발되었으며, 농업용저수지를 관개수로하는 경상북도 안동시에 위치한 시험포장을 대상으로 PADDIMOD2가 적용된바 있다.

PADDIMOD2는 논에서의 영양물질을 모의하는데 필요한 모델입력자료가 간단하고, 모델예측치가 비교적

실측치와 잘 맞을 뿐만 아니라 엑셀기반의 모델이기 때문에 사용이 간단하기 때문에 앞으로 논에서의 수질에 측뿐만 아니라 다양한 비점오염유출 저감기법 평가에 적용성이 높을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 PADDIMOD2의 기본원리와 모델 구성, 사용방법에 대해서 소개하고자 한다.

2. 모델의 기본이론

가. 수문도의

영농기간동안의 논은 물꼬에 의해 담수심을 유지하고 있으며, PADDIMOD2에서는 논을 그림 1과 같이 하나의 개념화된 1단 탱크로 가정하여 물수지에 의해 수문을 모의한다. 논에서의 담수심은 식(1)에 의해 계산되며 침투량과 지표유출량은 탱크모델의 기본이론에 따라 담수심에 비례하여 계수를 곱하여 산정하며 식(2)와 식(3)과 같다(전지홍 2011).

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

$$DR = (W - D) \times a_1 \dots \dots \dots \text{식(2)}$$

$$INF = W \times a_2 \dots \dots \dots \text{식(3)}$$

여기서, W_j 는 담수심, W_{j-1} 은 전날 담수심, IR_{1j} 는 관개량, IR_{2j} 는 빗눈 유입량, PR_j 는 강우량, DR_j 는 지표유

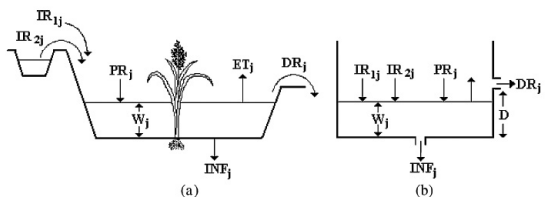


그림 1. 영농기간동안의 물수지 개념도 (전지홍 2011)

출량, ET_j 는 증발산량, INF_j 를 침투량, W 는 담수심, D 는 물꼬높이를 의미하며, a_1 과 a_2 는 지표유출량과 침투량에 대한 계수이다.

논에서의 영농기와 비영농기의 가장 뚜렷한 차이점은 담수심의 유무이다. 영농기간동안에는 물꼬에 의해 담수심을 유지시키기 때문에 다른 토지이용상태와 비교하여 수문학적·수질학적으로 뚜렷한 차이점을 가지고 있으나 비영농기에는 추가적인 시비가 이루어지지 않고 담수상태가 유지되지 않기 때문에 다른 토지이용상태와 수문학적·수질학적으로 유사한 특징을 가진다. 따라서, 비영농기간의 논에서의 유량 및 오염물질 부하 특성은 기존의 개발된 유역모델에서 개발된 공식을 그대로 사용할 수 있다. PADDIMOD2의 가장 큰 장점은 다른 논모델과 비교해서 입력자료를 최소로 하여 비교적 사용하기 쉽다는 것이다. 이를 고려할 경우 강우량만으로 유출량 모의가 가능하고 세계적으로 널리 이용되고 있는 SCS-CN기법에 의해 지표유출량을 모의한다(전지홍 2011). SCS-CN기법에 의한 유출량 모의는 식(4)~(5)과 같다(USDA NRCS, 1985).

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \times 24.5 \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

여기서, Q 는 지표유출량(mm), P 는 강수량(mm), S 는 잠재최대저류량(mm), CN 은 유출곡선이다.

나. 비점오염물질 배출부하량모의

영농기간동안 논에서의 배출부하량 모의는 담수심의 수질변화를 모의한 후 유출수 농도와 담수심의 수질농

도를 곱하여 배출부하량을 산정한다. 영농기간동안 PADDIMOD2에 의한 수질예측을 위해서는 다음과 같은 가정을 필요로 한다(Jeon et al., 2004).

- 논은 완전혼합반응조 (continuously stirred tank reactor; CSTR)이다.
- 시비된 영양물질의 일부분은 논 바닥에 흡착되며 나머지는 담수된 물에 용해된다.
- 시비에 의한 영양물질 농도변화는 Dirac delta 함수를 따른다.
- 바닥에서의 용출은 continuous source 함수를 따른다.

Dirac delta function은 수계에 순간적인 오염물질이 유입되었을 때의 수질변화를 모의하는데 사용되는데 논에서의 비료시비는 일시적으로 한꺼번에 이루어지기 때문에 이런 형태로 가정할 수 있다. 수학적으로는 오염물질 부하량은 $t=0$ 에서 부하량은 무한히 길고 얇은 선의 형태를 가지며 면적은 1이 되며 그 개념도는 그림 2와 같다(Jeon et al., 2004).

Dirac delta function은 식(6)에 의해 표현되는데, 이 해는 순간유입이 시스템전체에 순간적으로 혼합되어 초기농도가 m/V 되며 지수함수 형태로서 계수 α 에 의해

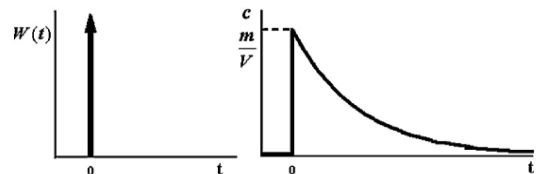


그림 2. 시비에 의한 영양물질농도모의 개념도

감소한다.

$$c = \frac{m}{V} e^{-\alpha t} \dots\dots\dots\text{식(6)}$$

여기서, c는 논에서의 담수시 영양물질 농도(mg/L), m은 시비 투여량(g), V는 논역의 담수체적(m³), α는 계수, t는 비료시비 후 경과일수(day)이다.

논바닥에서의 용출은 계단형 부하(continuous source function)에 의해 표현되는데, 계단형 부하는 수학적으로 t=0에서 시스템의 오염부하가 일정수준의 상태로 유지될때의 수질변화를 모의하며 그 개념도와 공식은 각각 그림 3과 식(7)과 같다.

$$c = \frac{W}{\beta V} \dots\dots\dots\text{식(7)}$$

비영농기간 동안의 논에서의 유출수 농도는 일정하다고 가정하는 유량가중평균농도(Event Mean Concentrations; EMCs)기법을 이용하였으며, 지표유출에 의한 영양물질 부하량은 유량가중평균농도에 유출량과 곱하여 계산한다.

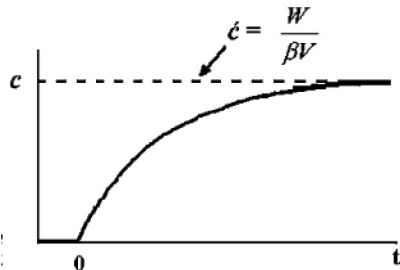


그림 3. PADDIMOD2의 용출영향모의 개념도

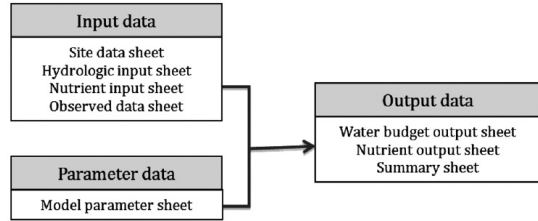


그림 4. PADDIMOD2 구성(전지홍, 2011)

3. 모델의 구성

PADDIMOD2는 입력데이터(Input data), 보정데이터(parameter data), 출력데이터(output data)의 3개의 데이터 카테고리라와 8개의 엑셀시트로 구성되어 있다(그림 4).

가. 입력데이터

입력데이터에는 주로 모델구동에 필요한 모니터링 자료를 입력하는 곳이다.

1) Site data sheet

Site data sheet에는 적용지역의 개요와 면적, 토양 배수상태(Hydrologic soil group)에 대한 정보를 입력한다. 토양배수상태는 토양의 침투특성에 따라 A, B, C, D 등급으로 구분되며, 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도에서 토양종류별 토양배수상태에 대한 정보를 얻을 수 있다.

2) Hydrologic input sheet

수문입력자료와 관련된 강우량, 관개량, 빗눈유입량, 물꼬높이, 증발산량 등에 대한 값을 입별로 입력하는 곳이다. 이곳에서 입력된 수문관련 모니터링 자료는 논에

서의 담수심변화와 논둑으로 유출되는 유출량을 계산하는데 사용된다.

3) Nutrient input sheet

관개수와 강우, 잇는 유입수의 수질과 같은 수질모니터링자료와 시비일과 시비량과 같은 영농활동과 관련된 정보를 입력하는 시트이다. 입력된 영농활동 정보와 수질관련 모니터링 자료는 논에서의 담수심 수질변화를 예측하는데 이용된다.

General Site Information

Project Information	
Company/Org:	
Project:	경기도 여주시
Jurisdiction:	
Scenario:	

Site Information	
Area (m2)	25200

Soil Hydrologic Groups (% of Site Area)	
Group A	0.00%
Group B	0.00%
Group C	100.00%
Group D	0.00%

Totals OK

(1) Site data sheet

PADDIMOD V2.0 Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field Hydrologic Input Data					
Date	Rainfall (mm)	Irrigation (mm)	Input from upper field (mm)	Dike Height (mm)	Evapotranspiration (mm)
9-Jun	0	0.0	0.0	200	5.88
10-Jun	31.8	0.0	0.0	200	5.68
11-Jun	0	2.8	0.0	200	6.11
12-Jun	15	30.3	0.0	200	5.12
13-Jun	0	0.3	0.0	200	5.34
14-Jun	0	0.0	0.0	200	5.21
15-Jun	0	0.0	0.0	200	4.59
16-Jun	0	0.0	0.0	200	1.92
17-Jun	0	0.0	0.0	200	3.17
18-Jun	0	0.0	0.0	200	4.92
19-Jun	0	0.0	0.0	200	4.82
20-Jun	5.2	0.1	0.0	200	4.10
21-Jun	0	0.2	0.0	200	4.73
22-Jun	0	0.0	0.0	200	6.02
23-Jun	2.8	0.0	0.0	200	1.42
24-Jun	6.4	0.0	0.0	200	4.16
25-Jun	0	0.0	0.0	200	5.14
26-Jun	0	0.0	0.0	200	4.34
27-Jun	0	0.0	0.0	200	5.21
28-Jun	0	0.0	0.0	200	4.51

(2) Hydrologic Input Sheet

PADDIMOD V2.0 Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field Agricultural Activity & Water Quality								
Date	Fertilization (kg/ha)		Irrigation Water Con'c (mg/L)		Upper Input Con'c (mg/L)		Rainfall Con'c (mg/L)	
	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus
16-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
17-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
18-May	55	19.64	0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
19-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
20-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
21-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
22-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
23-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
24-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
25-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
26-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
27-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
28-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
29-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
30-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
31-May			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
1-Jun			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
2-Jun			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
3-Jun			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
4-Jun			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18
5-Jun			0.01	0.001	0	0	2.2	0.18

(3) Nutrient Input Sheet

PADDIMOD V2.0 Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field Observed Data				
Date	Retained Water Depth (mm)	Runoff Depth (mm)	Nitrogen (mg/L)	Phosphorus (mg/L)
26-Jun	95.00	0.00		
27-Jun	95.00	0.00	4.70	0.07
28-Jun	95.00	0.00		
29-Jun	95.00	0.00		
30-Jun	95.00	0.00		
1-Jul	95.00	0.00		
2-Jul	95.00	0.00		
3-Jul	91.00	0.00	4.98	0.18
4-Jul	87.50	0.00		
5-Jul	125.00	0.00		
6-Jul	155.00	0.00		
7-Jul	163.00	0.00	1.14	0.18
8-Jul	155.00	0.00		
9-Jul	47.00	164.64		
10-Jul	37.00	188.05	4.82	0.12

(4) Observed data sheet

그림 5. LIDMOD2의 입력데이터 시트

나. 보정인자데이터

모델의 보정인자를 입력하는 곳이다. 크게 지표유출(Surface runoff)과 질소(Nitrogen), 인(Phosphorus)의 입력인자로 대별되는데, 질소와 인의 보정인자 데이터의 종류는 동일하다. 지표유출 보정인자 중 Infiltration coefficient와 runoff rate는 각각 식(3)의 a_2 와 (2)의 a_1 을 의미한다. 질소와 인의 soluble rate for basal, tillering, panicle fertilization은 각각 기비, 분얼비, 이삭비에서 담수심에 용해되는 비율을 의미 한다. α for basal, tillering, panicle fertilization은 각각 기비, 분얼비, 이삭비의 식(6)의 α 를 의미한다. upper limit of concentration from sediment release와 coefficient for sediment release는 식 (7)의 $\frac{W}{V}$ 와 β 를 각각의미한다.

Parameter	Value
Area	2.52
Surface Runoff	
Infiltration Coefficient	0.001
Runoff Rate	0.900
Nitrogen	
Soluble rate for basal fertilization	0.70
Soluble rate for tillering fertilization	0.65
Soluble rate for panicle fertilization	0.65
α for Basal Fertilization	0.005
α for Tillering Fertilization	0.005
α for Panicle Fertilization	0.05
Upper limit of concentration from Sediment release	2
Coefficient for sediment release	0.3
Phosphorus	
Soluble rate for basal fertilization	0.23
Soluble rate for tillering fertilization	1.00
Soluble rate for panicle fertilization	1.00
α for Basal Fertilization	0.1
α for Tillering Fertilization	0.03
α for Panicle Fertilization	0.17
Upper limit of concentration from Sediment release	0.15
Coefficient for sediment release	0.13
Parameters for non-growing season	
CN for Hydrologic Soil A Group	69.1
CN for Hydrologic Soil B Group	78.5
CN for Hydrologic Soil C Group	85.8
CN for Hydrologic Soil D Group	88.9
Event Mean T-N Concentration	3.93
Event Mean T-P Concentration	0.26

그림 6. LIDMOD2의 보정인자 데이터 시트

다. 출력데이터

1) Water budget sheet

모델에 의해 모의된 일별 담수심, 일별 지표유출량, 일별 침투량을 출력하는 시트이다.

2) Nutrient sheet

모델에 의해 모의된 일별 담수심의 질소 및 인농도, 논에서 유출된 질소와 인의 지표유출부하량을 출력하는 시트이다.

3) Summary sheet

연간 논에서의 수문모의결과와 비점오염부하량 모의 결과를 영농기와 비영농기로 구분해서 총괄적으로 요약 하는 시트이다. 수문모의결과에서는 지표유출량과 침투량, 증발산량을 출력하며 모의된 결과를 그래프로 나타 내어준다. 연간비점오염물질 배출부하량 모의결과에서는 연간부하량과 PADDIMOD2에서 모의된 결과를 원 단위로 환산해 출력하기 때문에 수질오염총량제에서 쉽게 연계하여 사용할 수 있다. 또한 논표면수의 수질농도 변화와 배출부하량을 엑셀 그래프로 제공하기 때문에 보고서 작성시 그래프를 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

3. 결론

이상으로 PADDIMOD2의 기본이론과 구조, 입출력 자료에 대해서 자세히 소개하였다. 모델은 가용자료와 사용목적에 따라 단순모델, 중간모델, 상세모델로 구분 된다. PADDIMOD2는 경험식을 사용하기 때문에 입력 자료가 단순하고 엑셀기반의 모델이기 때문에 모델에 있어 비전문가라도 손쉽게 사용할 수 있다는 장점을 가

지고 있다. 그러나, 경험식을 사용하기 때문에 검보정이 되지 않은 지역에 사용하기에는 모델의 한계점이 따른다. 따라서, PADDIMOD2를 보다 광범위하게 사용하기

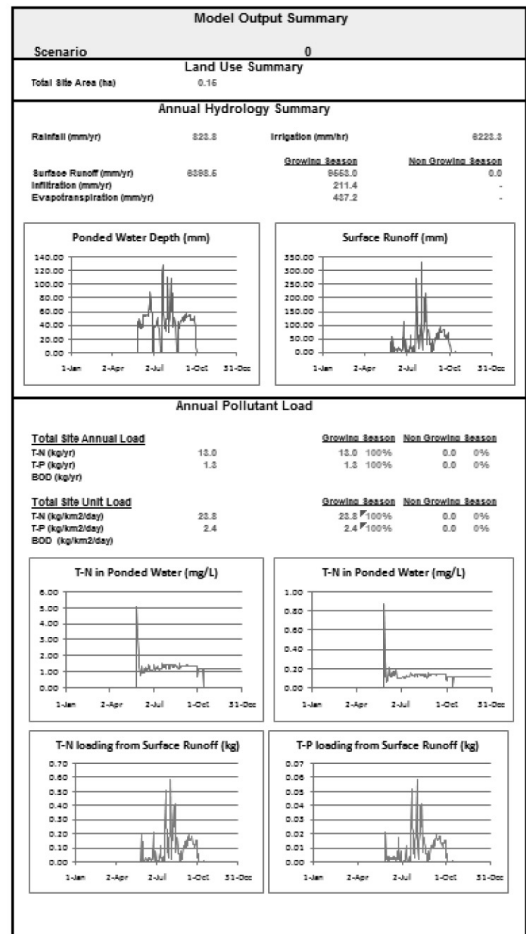
위해서는 다양한 조건에서의 모델 검보정을 통한 모델 보정인자의 데이터베이스화가 이루어져야 할 것이다.

PADDIMOD V2.0			
Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field			
Simulation Results: Water Budget			
Average CN Value		85.8	
Date	Retained Water Depth (mm)	Runoff Depth (mm)	Infiltration (mm)
6-Jul	114.83	0.00	0.04
7-Jul	122.92	0.00	0.01
8-Jul	118.56	0.00	0.00
9-Jul	38.37	345.32	0.27
10-Jul	3.53	31.75	0.00
11-Jul	0.00	0.00	0.00
12-Jul	0.00	0.00	0.00
13-Jul	0.00	0.00	0.00
14-Jul	6.03	54.24	0.07
15-Jul	0.59	5.33	0.00
16-Jul	0.00	0.00	0.00
17-Jul	0.00	0.00	0.00
18-Jul	0.00	0.00	0.00
19-Jul	49.02	0.00	0.05

(1) Water budget output sheet

PADDIMOD V2.0				
Nutrient Loading Model for Paddy Rice Field				
Simulation Results: Water Budget				
Date	Retained Water (mg/l)		Runoff Loading (kg)	
	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus
19.May	48.23	4.26	0.00	0.00
20.May	39.20	2.60	0.00	0.00
21.May	34.58	1.57	0.00	0.00
22.May	26.59	0.75	0.00	0.00
23.May	24.32	0.39	0.00	0.00
24.May	22.67	0.19	0.00	0.00
25.May	20.93	0.09	0.00	0.00
26.May	19.13	0.10	0.00	0.00
27.May	17.31	0.10	0.00	0.00
28.May	12.71	0.03	0.00	0.00
29.May	10.48	0.10	0.00	0.00
30.May	9.82	0.12	0.00	0.00
31.May	9.16	0.13	0.00	0.00
1-Jun	8.49	0.13	0.00	0.00
2-Jun	7.83	0.13	0.00	0.00
3-Jun	7.19	0.13	0.00	0.00
4-Jun	6.58	0.14	0.00	0.00
5-Jun	5.98	0.14	0.00	0.00
6-Jun	5.41	0.14	0.00	0.00
7-Jun	32.47	0.14	0.00	0.00
8-Jun	32.15	0.14	0.00	0.00

(2) Nutrient output sheet



(3) Output summary sheet

그림 7. LIDMOD2의 모의결과 데이터 시트

사 사

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

참고문헌

1. 전지홍. 2011. 논에서의 비점오염부하 예측을 위한 엑셀기반의 PADDIMOD2 개발. 한국농공학회 논문집 53(4): 11-19.
2. 진영민. 1998. 논외 비점오염물질 배출량 추정을 위한 Creams-Paddy 모형의 개발. 서울대학교 농업토목 석사 학위 논문.
3. 진영민, 박승우, 김상민, 강문성, 강민구. 2002. CREAMS-PADDY 모형을 이용한 논에서의 영양물질 부하 추정. 농촌계획 8(1): 60-68.
- 한국헌. 2008. 비점원오염모형을 이용한 논외 영농방법별 오염부하량 예측. 한국환경농학회지 27(1): 10-17.
4. Jeon, J.H., C.G. Yoon, J.H. Ham, and K.W. Jung. 2005. Model development for surface drainage loading estimates from paddy rice fields. Paddy and Water Environment 3(2): 93-101.

기획: 강문성 mskang@snu.ac.kr