



비중에 따른 논에서의 배출부하량 영향평가

Effects of Fertilizer Types on Pollutant Loadings from Rice Paddy Fields

장승우* · 강문성**† · 송인홍***†† · 장정렬**** · 이은정***** · 박승우*****

Chang, Seungwoo · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Jang, Jeong Ryeol · Lee, Eun Jeong · Park, Seung Woo

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the effects of control-release fertilizer (CRF) on pollutant loadings from a small watershed. The Baran watershed, 386 ha in size, was selected as the study site, and the AGNPS (Agricultural Non-point Source Pollution) model was used to evaluate the effects of fertilizer types. Digital maps of digital elevation (DEM), slope distribution, channel, flow direction, landuse, soil, and curve number were extracted from the study watershed. Model parameters related to hydrology and water quality were calibrated and validated by comparing model predictions with the observed data collected for 2 years (1999 to 2000). Calibration and validation resulted in R^2 values of 0.75-0.91 for all the water quality parameters. All the paddy fields (21.2 %) of the study watershed were sprayed by either CRF or NPK (standard fertilizer). In CRF application, total nitrogen (TN) load was 4.9% less than NPK application, however total phosphorus (TP) load was 0.7 % more than NPK application. In CRF application, considering only paddy fields in the study area, TN load was 38.7 % less than NPK application. Using CRF in paddy fields could be one of the ways to reduce pollutant loadings from agricultural watersheds, however, in order to confirm it, more researches about effects of using CRF are necessary.

Keywords: AGNPS; fertilizer type; Control-Release Fertilizer (CRF); pollutant loadings

1. 서 론

기존의 수질오염 관리는 주로 점오염원 위주로 관리되어 왔으며, 2006년 기준 하수도 보급률이 85.5 %에 이르러 점오염원 관리에 의한 수질 개선 효과가 한계에 도달하고 있고, 따라서 추가적인 하천, 호소 등의 수질 향상을 위해서는 비점오염원의 배출 저감이 요구되고 있다 (MOE, 2008). 이에 효과적인 비점오염원 관리를 위해서는 비점오염원 배출의 과학적인 정량화가 시급하고, 그 배출 특성에 따른 적절한 비점오염 관리방안 수

립이 요구된다.

우리나라 토지이용상태를 살펴보면 전체 면적의 64 %가 임야로써 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 그 다음이 논으로써 전체면적의 12 %로 인간 활동에 의한 토지이용으로써는 가장 많은 면적을 차지하고 있다 (Jeon et al., 2003). 주요 비점오염원 중 광범위하게 분포하는 토지에서 발생하는 농업 유래의 주요 비점오염인자인 질소와 인은 상대적으로 낮은 농도로 넓게 분포함으로써 강우 영향이 크고, 강우 유출과 함께 거동하여 농촌유역의 오염 부하에 큰 비중을 차지하고 있다 (Yoon et al., 2002). 따라서 하천이나 호소 등의 수질관리를 위해서는 농업 비점오염원의 효율적인 관리체계 구축이 필요하다.

우리나라의 경우, 논에서 발생하는 비점오염부하가 많은 양을 차지하고 있는 것으로 간주하고 있으나 일부 연구자는 오히려 논이 정화기능을 가지고 있어 물 환경에 긍정적인 영향을 미친다는 연구결과를 발표함으로써 서로 상반된 의견이 나오고 있다 (Eom, 2001; Kwon, 2002; Zhou et al., 2003). 농업비점오염 저감과 관련하여 주로 언급되는 것이 시비량 조절과 물꼬 조절 등의 물관리로 크게 나눌 수 있다. 물관리의 경우, 이상적인 유출 억제 방법이지만 노동력의 과다 소모 및 잡초 발생 등에 대한 검토 부족 등으로 현장에서 바로 적용하기는 쉽지 않은 어려움이 있다 (Kang, 2010).

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경-지역시스템공학부
 ** 서울대학교 농업생명과학대학 조경-지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸무연구원
 *** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수
 **** 농어촌공사 농어촌연구원 새만금연구부 책임연구원
 ***** 국립환경과학원 전문위원
 † 서울대학교 농업생명과학대학 조경-지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸무연구원
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582
 E-mail: mskang@snu.ac.kr
 †† Corresponding author Tel.: +82-2-877-4598
 E-mail: inhongs@snu.ac.kr

2011년 10월 14일 투고
 2011년 11월 4일 심사완료
 2011년 11월 7일 게재확정

최근 작물의 비료 이용율을 높이기 위해 완효성비료를 개발하고 완효성비료의 효과에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. Kim et al. (1995)과 Lee et al. (1992) 등은 완효성비료 시비가 속효성비료 시비보다 질소 이용율이 높아 작물 생산량이 증가되었다고 보고하였다. Lee (1996)은 완효성비료가 기비로 1회만 사용하기 때문에 노동력을 절감시키고 질소의 유실이 적어 수질오염 등을 경감시킬 수 있다고 보고한 바 있다. 또한, 완효성 질소비료의 효과가 건답직파재배에서 다른 재배방식보다 큰 것으로 나타났다 (Lee, 1996). 그러나, 유역 내에서 완효성비료의 시비가 농업비점오염에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 효과적인 농업비점오염 저감을 위해서는 물관리와 더불어 시비량 조절 및 시비 방법에 관한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 논을 대상으로 비중에 따른 농업소유역의 오염 배출부하량의 영향을 평가하기 위하여, AGNPS (Agricultural Non-point Source Pollution) 모형을 이용하여 소유역 내의 논에서 일반 비료를 시비할 때와 완효성비료를 시비할 때의 오염 배출부하량의 영향을 비교하고, 평가하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 시험유역

본 연구의 시험유역은 발안저수지 유역으로 경기도 화성시 봉담읍에 위치하고 있으며, 1996년부터 서울대학교 지역시스템공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다. 유역면적 29.79 km²의 발안저수지 유역은 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지이용상태를 보이고 있으며, 경지정리지구 및 개발보전지를 포함하고 있고, 주거지의 발달 등 도시화의 진행으로 수질 오염 수준이 다양한 특징을 보이고 있다.

발안저수지 유역은 7개의 소유역으로 구분되며 (Fig. 1), 본 연구에서는 HP#6 소유역을 선정하여 AGNPS 모형에 적용하였다 (Kang, 2002).

2. AGNPS 모형

AGNPS 모형은 미국 농무성과 미네소타지역 수질관리연구소에서 개발한 모형으로 농업유역으로부터의 폭우사상에 의한 유출, 유사, 총인, 총질소 및 COD (Chemical Oxygen Demand) 성분 등의 추정을 위해 개발된 분포형 매개변수 모형으로서 적용유역의 크기가 다양하다. AGNPS 모형은 크게 수문부분, 유사 운송 및 수질부분으로 구성되어 있으며, 유역을 수문특성이 균일한 정방형 격자 (cell)로 구분하여 이들 셀에 대해 각각의 폭우사상에 따른 유출과 침투유량, 토양유실 및 운송, 총인, 총질

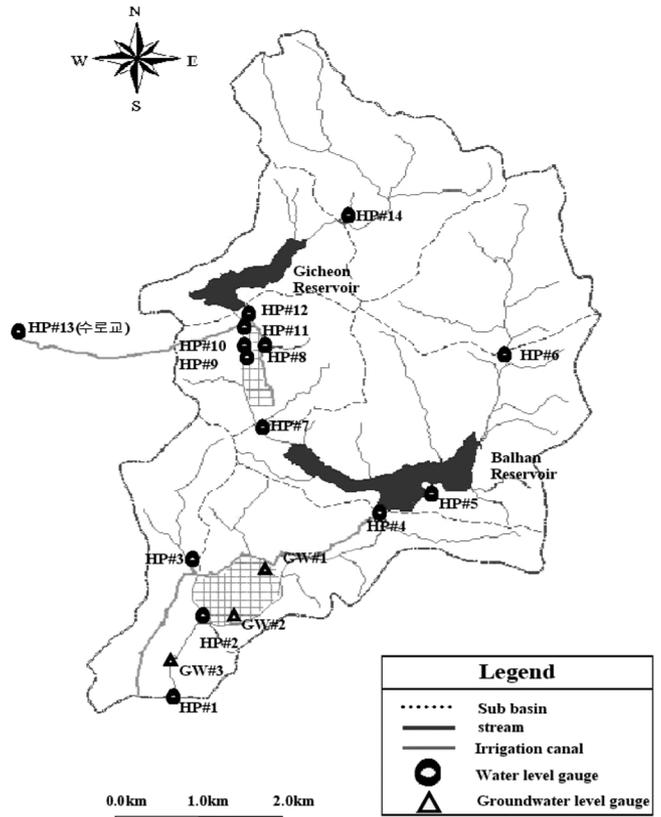


Fig. 1 Site map of Baran watershed (Kang, 2002)

소, 화학적 산소요구량 등을 구하도록 구성되어 있다. 유출량은 NRCS (Natural Resources Conservation Service)의 유출곡선지수법 (USDA, 1986)에 의하여 추정되며, 침투유량은 수로를 삼각형 수로로 가정하여 계산하는 TR-55 방법 (USDA, 1986) 등이 있다. 본 연구에서는 Smith와 Williams가 제안한 방법을 사용하였다. 토양유실량 추정은 단일 강우사상에 적용할 수 있도록 수정된 USLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 공식 (Wischmeier and Smith, 1978)을 사용한다. AGNPS 모형의 구조는 Cho (1998), Kang (2002), Lee (2007)에 자세히 서술되어 있다.

3. 모형입력자료

AGNPS 모형은 단일폭우사상에 대한 폭우사상 모형으로서, 입력자료는 기상, 지형, 토지이용, 토양도 등으로 구성된다.

가. 기상

본 연구의 기상자료는 시험유역으로부터 약 10 km 떨어진 수원기상관측소의 일별 기상자료를 이용하였으며, 1999년부터 2000년까지 총 2개년 동안의 일별 기상자료를 수집하였다. 강우침식

인자는 일별 강우량이 10 mm를 초과하는 강우에 대해 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$EI_T = \frac{A \cdot \exp(2.119 \cdot \log(R)) \cdot \exp(0.0086 \cdot \log(D))}{\exp(B \cdot \log(D))} \quad (1)$$

여기서, EI_T 는 강우침식인자 (ft·tons/acre-in), R 은 강우량 (inch), D 는 강우지속시간 (hr), 그리고 A 와 B 는 강우형태별 강우침식인자의 계산에 사용되는 계수이다 (Trey, 1997).

나. 지형

본 연구의 지형자료는 1/5000 수치지도를 이용하였다. 주제도는 기본도로부터 소유역 경계도, 수계망도, 경사방향도, 경사도 등을 구축하였다. 지형자료는 분포형 수질모형의 구동을 위해 그리드 (grid) 자료의 형태로 변환하였다. 격자의 크기는 선행연구의 연구결과를 바탕으로 제시된 100 m×100 m로 구성하였다 (Cho, 1998).

다. 토지이용

토지이용 분류는 환경지리정보서비스에서 제공하는 2000년 토지피복지도를 이용하였다. HP#6 소유역은 전체 유역 면적의

45.3 %가 산림으로 이루어져 있으며, 시가지 22.5 %, 논 21.2 %, 밭 7.5 %, 초지 1.8 %, 나지 1.6 %인 것으로 분석되었다. 특히 대상지역 내 논의 비율이 21.2 %로서 논에서의 유출에 의한 오염부하량이 소유역 전체에 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig. 2는 HP#6 소유역의 토지이용도를 보여주고 있다.

라. 토양도

토양도는 국립농업과학원의 정밀토양도 (1/25000)를 이용하여 구축하였다. HP#6 소유역은 오산통 (OnD2, OnE2, OnE3), 송산통 (SNC2, SND2, SNE2, SNE3), 지산통 (JiB, JiC), 청산통 (CaE2, CaE3, CaF3) 등의 토양통이 넓게 분포하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 3은 HP#6 소유역의 토양도를 보여주고 있다.

마. 토양유실인자

토양침식인자 (K)는 정밀토양도를 통해 얻은 토양특성을 이용하여 Wischmeier and Smith 방법 (1965)을 사용하여 결정하였다. 작물경작인자 (C), 지형인자 (LS)를 결정하는 경사장과 침식조절관행인자 (P)는 Wischmeier et al (1978), Park (1998), Cho (1998), Kang (2002), Lee (2007) 등의 연구결과를 바탕으로 구축하였으며, Table 1과 Table 2에서와 같다.

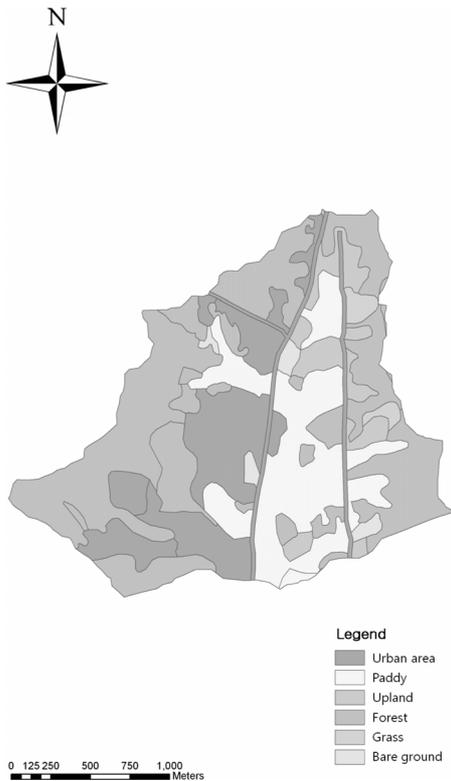


Fig. 2 Landuse map of HP#6

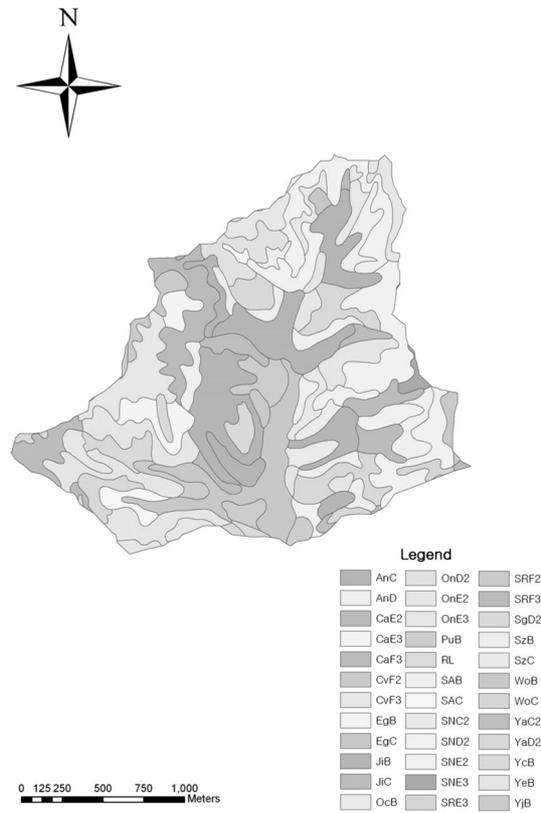


Fig. 3 Detailed soil map of HP#6

Table 1 Crop and slope length factors of USLE for soil-cover complex (Kang, 2002; Lee, 2007)

Landuse	Paddy	Upland	Forest	Urban	Water
C factor	0.001	0.03	0.001	0.01	0.00
slope length (m)	70	50	10	70~100	0

Table 2 Management factors (P) of USLE for slope (Park, 1998)

Slope (%)	Cropland practices	P factor	Slope (%)	Cropland practices	P factor
< 3	Terracing	0.12	13~17	Terracing	0.14
	Contouring	0.60		Contouring	0.70
3~9	Terracing	0.10	17~21	Terracing	0.16
	Contouring	0.50		Contouring	0.80
9~13	Terracing	0.12	21<	Terracing	0.18
	Contouring	0.60		Contouring	0.90

바. 비료시비

본 연구에서 비료시비량은 농가관행시비량 및 표준관행시비량을 고려하여 질소 180 kg/ha, 인산 60 kg/ha를 적용하였다. (Choi et al., 2002; Lee et al., 2005; Uhm et al., 2004; Hwang et

al., 2001). 논에서의 오염부하 모의를 위한 식은 다음과 같다.

$$c = \frac{m}{V} e^{-\lambda t} \quad (2)$$

여기서 c 는 시간에 따른 농도이고, m 은 초기 비료시비량을 나타낸다. m/V 은 순간적으로 유입된 오염물질 (비료)이 수계의 전체에 혼합되어 초기농도가 되는 것을 의미한다 (Jeon et al., 2003; Jeon et al., 2005).

완효성비료 처리구에서의 총질소 농도는 이양 후 7~15일 사이에는 일반 시비 처리구에 비해 현저히 낮은 것으로 나타나며, 30일 이후 무처리구보다 총질소 농도가 증가하는 것으로 보고되고 있다 (Ji et al., 2007). Lee et al. (2005)에 의하면 이양 25일 이후 완효성비료 시용구의 암모니아태 질소의 함량이 증가하는 것으로 나타났으며, 이양 20일 이후 완효성비료 시용구의 질산태 질소의 함량이 무처리구보다 높아지며, 40일 이후 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

AGNPS 모형은 격자내의 비료의 종류 및 비료 시비 방법을 구분하여 모의할 수 있는 기능이 없다. 따라서 본 연구에서는 완효성비료와 일반비료 시비에 따른 영향을 확인할 수 있도

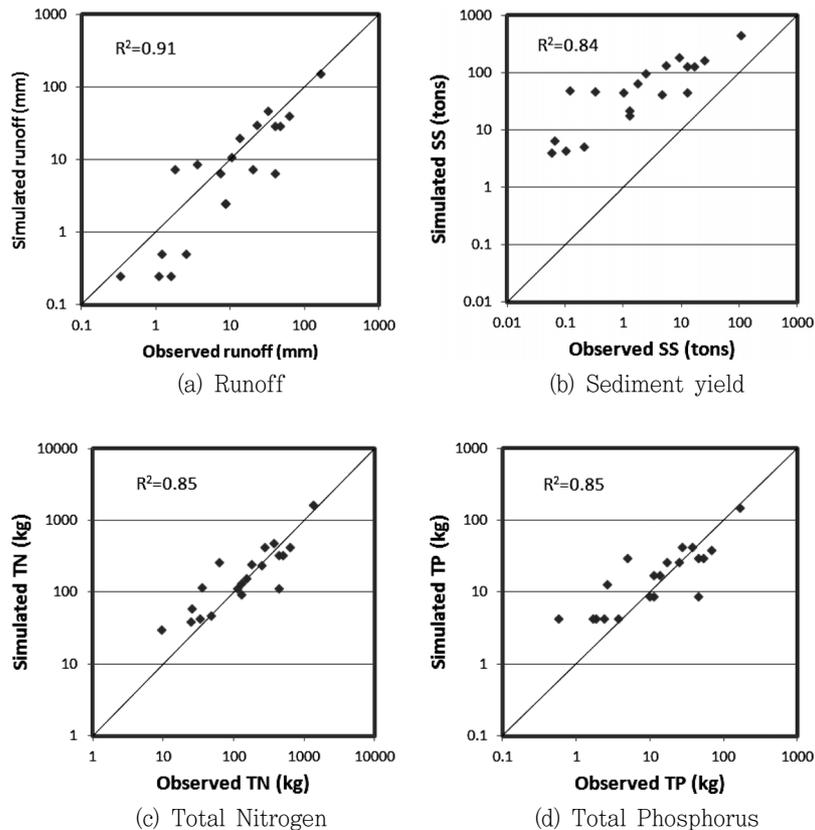


Fig. 4 Scatter plots of daily runoff, sediment yield, TN, and TP at HP#6 watershed for the calibration period (2000)

록 식 (2)와 선행연구의 결과를 이용하여 AGNPS 모형에 입력할 비료 시비량을 산정하였다. 일반비료의 경우, 시비 후부터 비료량이 일정하게 감소하며, 완효성비료의 경우에는 이양 초기의 시비량은 표준시비량의 1/4로 적용하였고, 이후 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정

AGNPS 모형의 보정을 위해 HP#6 소유역의 2000년 강우 중 단일 강우사상이 10 mm 이상인 20개의 폭우사상을 이용하여 모형을 보정하였다. 매개변수 보정방법에는 크게 시행착오법, 최적

화 기법에 의한 자동보정법, 그리고 이 두가지를 병행하는 방법이 있지만, 보정해야 할 매개변수가 많고 복잡한 모형에서는 여전히 시행착오법이 유용하게 적용되고 있다 (Feyen et al., 2000). 따라서 본 연구에서는 시행착오법을 이용하여 모형을 보정하였으며, 보정에 대한 평가를 위해 결정계수 (R^2)과 RMAE, RMSE, Nash-Sutcliffe의 효율지수 등을 이용하였다.

Fig. 4는 보정기간 (2000년) 동안의 유출, 유사량, 총질소 부하량 그리고 총인 부하량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. AGNPS 모형에서 유출, 유사량, 총질소 부하량, 총인 부하량 모두 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났으나, 유사량의 경우 실측치에 비해 과대평가되는 것으로 나타났다. Table 3은 실측치와 모의치의 통계적인 변량을 이용하여 모형을 평가한 결과를 나타내고 있다.

Table 3 Summary of calibration results at HP#6 watershed

Item	R^2	RMSE	RMAE	EI
Runoff (mm)	0.91	11.63	0.33	0.90
Sediment yields (tons)	0.84	107.69	7.09	-20.03
Total nitrogen (kg)	0.95	132.49	0.35	0.82
Total phosphorus (kg)	0.85	14.97	0.39	0.84

2. 모형의 검정

AGNPS 모형의 검정은 HP#6 소유역의 1999년 강우 중 강우사상이 10 mm 이상인 23개의 폭우사상을 이용하여 수행하였다.

Fig. 5는 검정기간 (1999년) 동안의 유출, 유사량, 총질소 부

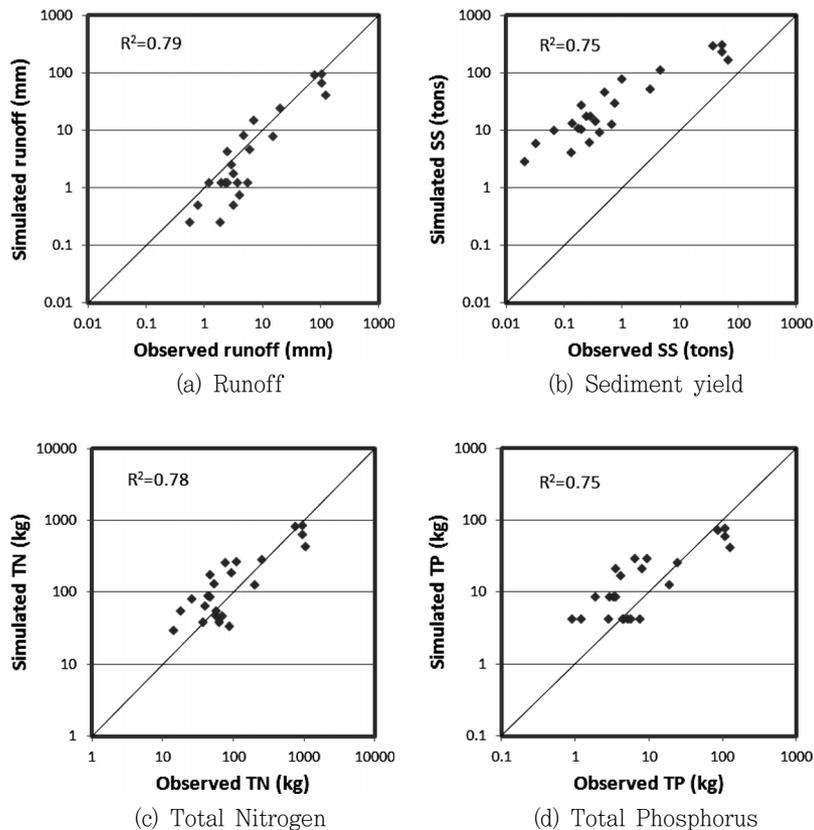


Fig. 5 Scatter plots of daily runoff, sediment yield, TN, and TP at HP#6 watershed for the validation period (1999)

Table 4 Summary of validation results at HP#6 watershed

Item	R ²	RMSE	RMAE	EI
Runoff (mm)	0.79	17.72	0.41	0.77
Sediment yields (tons)	0.75	95.86	6.81	-22.32
Total nitrogen (kg)	0.78	156.04	0.49	0.77
Total phosphorus (kg)	0.75	22.45	0.64	0.66

하량 그리고 총인 부하량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 검정 결과도 보정 결과와 마찬가지로 AGNPS 모형에서 유출, 유사량, 총질소 부하량, 총인 부하량 모두 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났으나, 유사량의 경우 실측치에 비해 과대평가되는 것으로 나타났다. Table 4는 실측치와 모의치의 통계적인 변량을 이용하여 모형을 평가한 결과를 나타내고 있다.

3. 비중에 따른 오염부하량 평가

일반비료의 표준 시비 시 질소 및 인은 시간에 따라 감소하게 되며 이에 따라 비료 시비 후 시간이 지나면서 유출에 의한 질소나 인의 오염부하량은 감소하게 된다. 완효성 비료를 시비할 경우 질소 및 인은 일반비료 시비 시와는 다른 기작으로 오염부하가 발생하게 된다.

본 연구에서는 유역 내 논 (21.2 %)에 일반비료 (NPK) 시비 후와 완효성비료 (CRF) 시비 후 전체 유역에서의 오염부하를 AGNPS 모형을 통해 추정하였다. 일반비료 및 완효성비료는 표준시비량을 적용하였으며, 보정에 사용한 2000년 강우자료 (Table 5)를 이용하여 5월 10일부터 50일 간격으로 시비를 한 것으로 가정하였고, 각각의 시비량은 5:3:2의 비율로 하였다. 총질소의 경우 일반비료 시비 시보다 완효성비료의 시비 시 약 3.4~8.4 % 정도 오염부하량이 감소하는 것으로 나타났으며, 영농기간 동안 유역의 총질소 오염부하량은 약 4.9 % 감소하는 것으로 나타났다. 이는 일반 비료와는 달리 완효성비료의 경우는 시비 후 갑작스런 질소의 용출을 방지하고, 영농기간 동안 조금씩 질소가 용출되는 특징이 반영되었기 때문인 것으로 보인다.

총인 오염부하량은 시비 초기에 완효성비료가 일반비료 시비 시보다 약 3.5~4.8 % 정도 감소하는 것으로 나타났으나, 전체 영농기간동안 완효성비료 시비 시 약 0.7 % 정도 증가하는 것으로 나타났다. 완효성비료를 시비한 경우 영농기간 전체에 걸쳐 논물에서 일정한 인 농도를 유지하는 반면, 일반비료 시비 시에는 초기 인 농도가 완효성비료 시비 시보다 높다가 식 (3)과 같이 농도가 줄어든다.

전체 영농기간 동안 일반비료와 완효성비료 시비에 따른 인 오염부하량은 질소 배출부하량과는 달리 비슷한 정도를 나타내었

Table 5 Rainfall data for AGNPS model application

Date	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	TN (kg)		TP (kg)	
			NPK	CRF	NPK	CRF
2000/04/21	12.2	0.3	44.36	44.36	5.01	5.01
2000/05/10	21.0	0.5	54.14	49.90	5.65	5.14
2000/05/27	16.6	0.3	34.55	34.33	3.57	3.58
2000/06/10	63.6	8.6	259.01	241.68	22.33	23.00
2000/06/26	15.8	0.3	36.08	36.07	3.76	3.76
2000/06/27	28.8	2.5	90.20	89.42	8.43	8.53
2000/06/29	51.8	19.8	275.31	230.95	22.18	18.35
2000/07/11	18	0.5	62.59	61.75	6.41	6.41
2000/07/22	303.6	155.2	1635.40	1593.47	125.80	131.79
2000/08/04	58.8	7.4	228.88	222.34	20.47	21.32
2000/08/09	30.8	7.4	116.01	114.87	9.38	9.67
2000/08/20	87.8	30.2	450.36	401.35	36.17	33.83
2000/08/24	37.4	10.9	161.89	150.51	12.65	12.65
2000/08/25	65.2	29.5	340.06	312.76	25.02	25.02
2000/08/26	79.8	40.6	432.96	401.59	31.37	31.37
2000/08/27	29.4	6.6	111.14	106.04	8.92	8.92
2000/08/31	29.4	6.6	110.12	106.04	8.92	8.92
2000/09/14	37.8	2.5	124.42	121.77	11.77	12.16
2000/09/15	88.2	47.5	463.86	454.69	34.84	34.84
2000/09/16	64.4	29.0	314.07	308.49	23.47	24.59
Sum	1,140.4	406.2	5,345.41	5,082.38	426.12	428.86

다. 이는 일반 비료 시비 후 인 농도가 지속적으로 감소하여 완효성비료 시비 시보다 포장내의 인 농도가 낮아지는 시점에서 큰 폭우사상이 발생하여 상대적으로 유출량이 많았기 때문에 사료된다.

일반비료 시비 후와 완효성비료 시비 후의 논에서 배출된 오염부하량을 AGNPS 모형을 이용하여 비교하였다. 일반비료를 시비하였을 때의 총질소 오염부하량인 759.05 kg/ha에 비해, 완효성비료를 시비하였을 때의 총질소 오염부하는 465.05 kg/ha로 약 38.7 % 감소한 것으로 나타났다. 총인 오염부하는 일반비료와 완효성비료를 시비하였을 때 모두 27.26 kg/ha로 나타났으나, 시비 직후인 5월 10일, 6월 29일, 8월 20일은 완효성비료 시비 시 약 52.9~100.0 % 정도 감소하는 것으로 나타났다. 하지만, 시비 후 시간이 지날수록 총인의 양이 증가하여 모의기간 동안의 총 합은 같은 것으로 나타났다. AGNPS 모형의 특성상 각각의 격자 (cell)에서의 영양물질의 배출부하량을 산정할 수는 있었으나, 이 결과는 단순히 격자에서 발생하여 배출되는 영양물질의 양을 산정한 것으로 유역의 하도구간을 지나면서 유출구까지 운반되는 총량과는 차이가 있다. Table 6은 일반비료와 완효성비료 시비 시 강우에 의한 논에서의 배출부하량

Table 6 Pollutant loads from Paddy fields

Date	TN (kg/ha)		TP (kg/ha)	
	NPK	CRF	NPK	CRF
2000/04/21	0.08	0.08	0.00	0.00
2000/05/10	6.87	1.09	0.92	0.00
2000/05/27	0.38	0.11	0.00	0.00
2000/06/10	45.15	26.12	0.94	1.86
2000/06/26	0.11	0.11	0.00	0.00
2000/06/27	5.20	4.28	0.00	0.00
2000/06/29	68.05	18.03	6.18	0.93
2000/07/11	1.03	0.11	0.00	0.00
2000/07/22	230.92	183.00	5.82	8.96
2000/08/04	29.75	22.39	0.94	1.86
2000/08/09	6.80	5.88	0.00	0.00
2000/08/20	96.26	42.34	5.93	2.79
2000/08/24	21.61	8.74	0.92	0.92
2000/08/25	57.50	27.06	1.86	1.86
2000/08/26	72.45	37.03	1.86	2.51
2000/08/27	10.46	4.94	0.00	0.00
2000/08/31	9.54	4.94	0.00	0.00
2000/09/14	12.42	9.66	0.00	0.92
2000/09/15	52.19	42.34	0.95	2.79
2000/09/16	32.29	26.78	0.94	1.86
Sum	759.06	465.03	27.26	27.26

을 나타내고 있다.

본 연구에서 모의된 논에서의 배출부하량을 비교하기 위해 다른 선행 연구들을 참고하였다. 완효성비료 시용 포장 논에서의 질소행동에 관한 연구 (Lee et al., 2005)에 따르면, 일반비료 처리구는 벼 이앙초기 포장 논에서의 유출수의 NH₄-N의 농도가 2.07 mg/L이었으나 그 이후 감소하다가 수비시용과 더불어 NH₄-N 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 완효성비료 처리구는 이앙초기 NH₄-N의 농도가 1.99 mg/L이었으며 벼 이앙 18일 이후부터 일반비료 처리구보다 높게 나타난 것으로 보고하였다. NO₃-N 농도의 경우 일반비료 처리구에서 벼 이앙 10일경에 약 3.97 mg/L으로 가장 높았으며, 그 이후 감소하는 경향을 보였고, 완효성비료 처리구의 경우 벼 이앙 후 30일까지 3~5 mg/L 범위를 보이다가 그 이후 감소하는 경향을 보인 것으로 나타났다. Ji et al. (2007)에 의하면 포장 논 중 완효성비료 처리구에서 총질소는 일반비료 처리구보다 비료 시비 후 7~15일 동안 92.9~94.6 % 감소하는 것으로 나타났다. 특히 비료 시비 후 최초 강우 발생 시 (1st runoff event) 포장 논에서의 유출수는 완효성비료 처리구에서는 총질소 배출부하량이 6.25 kg/ha, 5.34 kg/ha로 일반비료 처리구에서의 총질소 배출부하량인 8.56 kg/ha, 6.84 kg/ha에 비해 약 21.9~27.0% 감소하는 것으로 나타났다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 경기도 화성시 봉담읍에 위치한 발안저수지 유역 중 HP#6 소유역의 강우-유출 자료 및 수질자료를 이용하여 AGNPS 모형을 보정 및 검증하고, 대상 소유역 내의 논에 일반비료와 완효성비료를 시비하였을 때의 오염부하량의 변화를 비교하고 그 결과를 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 경기도 화성시 봉담읍에 위치한 HP#6 소유역의 2000년 강우-유출 자료 및 수질자료를 이용하여 AGNPS 모형을 보정하였으며, 유출, 유사량, 총질소, 총인의 결정계수 (R²)는 각각 0.91, 0.84, 0.85, 0.85로 나타났다.

2. 1999년 강우-유출 자료 및 수질자료를 이용하여 AGNPS 모형을 검증하였으며, 유출, 유사량, 총질소, 총인의 결정계수 (R²)는 각각 0.79, 0.75, 0.78, 0.75로 나타났다.

3. HP#6 소유역 내의 논 (21.2 %)에 일반비료와 완효성비료를 시비하였을 때의 오염부하량을 모의하였으며, 완효성비료를 시비하였을 때 오염부하량이 총질소의 경우 약 4.9 % 감소하였으나, 총인의 경우 약 0.7 % 증가하는 것으로 나타났다.

4. 논에서 오염부하량의 배출은 총질소가 완효성비료 시비 시 약 38.7 % 감소하였으나 총인은 동일한 것으로 모의되었다.

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

REFERENCES

1. Cho, J. P., 1998. Application of AGNPS model with rural watersheds having complex land use characteristics, Master degree. Dissertation, Seoul, Korea: Seoul National University (in Korean).
2. Cho, J. P., S. W. Park, and S. J. Im, 2008. Evaluation of agricultural nonpoint source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation, *Agricultural Water Management* 95: 400-408.
3. Cho, J. Y., K. W. Han, and C. H. Choi, 1999. Runoff loading of nitrogen and phosphorus with rainfall intensity from a paddy field, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 18(2): 140-147 (in Korean).
4. Choi, J. Y., 2007. Nonpoint BMPs Application and lag

- time in water quality response, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 29(11): 1179-1184 (in Korean).
5. Choi, W. Y., M. G. Choi, S. S. Kim, J. K. Lee, and M. H. Lee, 2002. Effect of latex coated urea on growth and yield in ridge direct dry seeding for water-saving rice culture, *Korean Journal of Crop Science* 47(3): 221-225 (in Korean).
 6. Eom, K. C., 2001. Environmentally beneficial function of rice culture and paddy soil, 28-35. Rice culture in Asia, International Commission on Irrigation and Drainage, and Korean National Committee on Irrigation and Drainage, Korea.
 7. Fernández-Escobar, R., M. Benloch, E. Herrera, and J. M. García-Novelo, 2004. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching, *Scientia Horticulturae* 101: 39-49.
 8. Feyen, L., R. Vázquez, K. Christiaens, O. Sels and J. Feyen, 2000. Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment, *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(1): 47-63.
 9. Han, K. H., J. H. Kim, J. S. Lee, J. T. Lee, J. Y. Cho, and K. S. Yoon, 2005. Effect of sampling frequency during storm period on estimation of pollutant load from paddy field, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 24(1): 17-23 (in Korean).
 10. Heo, J., 2004. Study on load change according to grid scale and landuse change in AnnAGNPS model, Ph.D. Dissertation, Cheongju, Korea: Cheongju University (in Korean).
 11. Jeon, J. A., 2001. Pollutant loads estimation by direct runoff at a small watershed with GIS-AGNPS linked model, Master's degree dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
 12. Jeon, J. H., C. G. Yoon, J. H. Ham, and K. W. Jung, 2005. Model development for surface drainage loadings estimates from paddy rice fields, *Paddy Water Environ* 3:93-101.
 13. Jeon, J. H., C. G. Yoon, H. S. Hwang, and K. S. Yoon, 2003. Water Quality Model Development for loading Estimates from Paddy Field, *Korean J. Limnol* 36(3): 344-355 (in Korean).
 14. Ji, X., S. Zheng, Y. Lu, Y. Liao, 2007. Study of dynamics of floodwater nitrogen and regulation of its runoff loss in paddy field-based two-cropping rice with urea and controlled release nitrogen fertilizer application, *Agricultural Sciences in China* 6(2): 189-199.
 15. Jung, K. H., W. T. Kim, S. O. Hur, S. K. Ha, P. K. Jung, and Y. S. Jung, 2004. USLE/RUSLE Factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 37(4): 199-206.
 16. Kang, B. H., B. Y. Ha, K. D. Park, M. S. Park, B. K. Sohn, Y. K. Jung, J. S. Heo, and J. S. Cho, 2002. Nitrogen release and polymer degradation properties of polymer-coated urea fertilizer in soil, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 35(5): 264-271 (in Korean).
 17. Kang, M. S., 2002. Development of Total Maximum Daily Loads Simulation System using Artificial Neural Networks for Satellite Data Analysis and Nonpoint Source Pollution Models, Ph.D. Dissertation, Seoul, Korea: Seoul National University (in Korean).
 18. Kang, M. S., 2010. Development of improved farming methods to reduce agricultural non-point source pollution, 121-177. Korea Rural Community Corporation Rural Research Institute (in Korean).
 19. Kim, H. K., 2009. Modeling hydrologic and water quality effects of impervious surfaces in farm and urban watersheds, Ph D. Dissertation, Seoul, Korea: Seoul National University (in Korean).
 20. Kwon, S. K., 2002. Multi-functional roles in paddy-fields and on-farm irrigation, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(3): 19-26 (in Korean).
 21. Lee, E. J., 2007. Assessing impact of non-point source pollution by management alternatives on arable land using AGNPS model, Master Degree Dissertation, Seoul, Korea: Seoul National University (in Korean).
 22. Lee, E. J., 2011. Unconstrained optimization of watershed nonpoint source pollution control and management practices using SWAT, Ph.D. Dissertation, Seoul, Korea: Seoul National University (in Korean).
 23. Lee, K. B., C. W. Park, K. L. Park, J. G. Kim, D. B.

- Lee, and J. D. Kim, 2005. Nitrogen balance in paddy soil of control-release fertilizer application, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 157-163 (in Korean).
24. Lee, M. S., G. A. Park, M. J. Park, J. Y. Park, J. W. Lee, and S. J. Kim, 2010. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery, *Journal of Environmental Sciences* 22(6): 826-833
25. Park, M. J., 1998. Study on the sediment yield estimation due to land development(I), 218-226, National Institute for Disaster Prevention (in Korean).
26. Shamshad, A., C. S. Leow, A. Ramlah, W. M. A. Wan Hussin, and S. A. Mohd. Sanusi, 2008. Application of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10: 239-252.
27. Siriwardena, L., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet river, central Queensland, Australia, *Journal of Hydrology* 326: 199-214.
28. Uhm, M. J., H. C. Park, K. C. Kim, J. Ryu, and J. S. Choi, 2004. Effect of fertilizer application level considering irrigation water quality on rice (*Oryza sativa* L.) productivity and agricultural environment, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 23(1): 7-14 (in Korean).
29. USDA (United States Department of Agriculture), 1986. Urban hydrology for small watersheds, TR-55 (technical release 55): Conservation engineering division, Natural resources conservation service.
30. Wischmeier W. H., and D. D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning, USDA agriculture handbook No. 537, United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service, Washington.
31. Zhang, X., and M. Zhang, 2011. Modeling effectiveness of agricultural BMPs to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff, *Science of the Total Environment* 409: 1949-1958.
32. Zhou, Q., Y. Zhu, 2003. Potential pollution and recommended critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern lake Tai area, China, *Geoderma* 115: 45-54.