



물꼬관리 및 완효성 비료 시비가 포장단위 논에서의 영양물질 배출부하량에 미치는 영향

Effects of Controlled Drainage and Slow-release Fertilizer on Nutrient Pollutant Loads from Paddy Fields

김계웅* · 강문성**,[†] · 송인홍*** · 송정현* · 박지훈* · 전상민* · 장정렬**** · 김진수*****

Kim, Kyeung · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Song, Jung-Hun · Park, Jihoon · Jun, Sang Min · Jang, Jeong Ryeol · Kim, Jin Soo

Abstract

The objective of this study was to investigate the effects of farming methods on mass balance from paddy rice. The experiment fields were established at Chunpo-myeon, Iksan-si in the Saemangeum watershed. Experiment was performed during the growing season to assess water and mass balances of the study field in 2013. The three different farming practices were applied: conventional (TR-A), drainage outlet heighten (TR-B) and slow release fertilizer use (TR-C). Drainage amount from TR-B was reduced by 28.5 % compared to the TR-A, while the amount from TR-C was similar to that of TR-A. Overall, nutrient concentration of paddy water were similar among the treatments except for T-P. Mean T-P concentration from TR-C was lower than that from TR-A (p-value<0.05). As the results of mass balance, TR-B appeared to reduce nutrient surface loss, substantially by 30.9 % and 40.8 % for T-N and T-P an compared to TR-A. TR-C treatment also demonstrated nutrient load reduction by 38.2 % and 40.1 % for T-N and T-P. The study results showed that water and fertilizer treatments are effective in surface load reduction respectively from paddy fields, and, long-term monitoring and evaluation is needed to confirm the reduction.

Keywords: Paddy field; drainage outlet heighten; water balance; mass balance

1. 서 론

점오염원 관리로 인한 수질개선효과가 한계에 도달함에 따라 비점오염원에 의한 수계별 오염부하율이 증가추세에 있으며, 2020년에는 T-P 기준으로 약 68.6 %에 달할 것으로 보고되고 있다 (Relevant Ministerial Consortium, 2012). 비점오염원 배출부하량은 토지계, 축산계에 의한 오염원 발생이 90 % 이상의 비중을 차지하고 있으며, 그 중 토지계에 의한 배

출부하량은 전체 T-P 오염부하의 57.5 %로 큰 비중을 차지하고 있어 대지, 도로, 농지 등 토지계의 오염원을 관리하는 것이 중요하다 (Relevant Ministerial Consortium, 2012).

그 중 새만금 유역은 농경지의 비율이 약 37 %로 전국 평균 19.9 %에 비해 1.5배 이상이며, 농경지에서의 배출부하량이 전체 오염물질 배출량의 40 ~ 60 %에 달하고 있어, 농경지로부터의 오염원 관리가 시급하다. 특히 새만금 유역의 논 비율은 유역면적의 약 30 %로 전국 평균 논 면적 11.6 %에 비해 2.5배 이상 높은 비율을 가짐에 따라, 논에서 발생하는 오염부하량 관리의 필요성이 요구되고 있다 (Jang et al., 2012; MOLIT, 2013). 그러나 논은 작부체계, 관개, 시비, 물관리 등의 영농방법과 지역, 토양, 강우특성, 오염원 종류 등에 따라 배출양상이 다양하며, 광범위한 지역을 통해 배출되기 때문에 오염물질의 수집 및 처리가 어렵다. 따라서 오염물질의 관리의 배출이 이루어진 이후에는 어려우며, 농경지내 발생원을 관리하는 것이 배출부하량 저감에 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다 (Kang, 2010; Song et al., 2012).

국내에서는 논에서의 오염부하량과 관련하여 1994년 국립환경연구원에서 비점원오염 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구와 조사지침을 문서화한 이래로 활발히 진행되어 왔으며, 관개방법 (Yoon et al., 2003a; Jeon et al., 2005; Kim et

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University
 ** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
 *** Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
 **** Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation
 ***** Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University
[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087
 E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: July 15, 2015
 Revised: August 27, 2015
 Accepted: December 31, 2015

al., 2005; Yoon et al., 2006; Jang et al., 2012; Song et al., 2013; Lee et al., 2014), 시비방법 (Yoon et al., 2003b; Choi et al., 2012), 유역 및 토양특성 (Choi et al., 2004; Cho et al., 2008; Han et al., 2011) 등을 고려하여 연구가 진행되고 있다. 이 중, 논에서의 오염부하량 저감 방법으로 주로 언급되는 것은 물꼬 조절 등의 물관리 방법과 시비량 조절 방법이다. Yoon et al. (2003a)과 Yoon et al. (2006)은 물꼬 조절이 배출부하량에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였으며, 물꼬 높이의 상승은 논물의 저류기능을 증가시키고, 영농초기 및 강우시의 배수량을 억제하여 고농도의 영양물질이 유출되는 것을 막아 배출부하량 저감에 효과적 방법이라고 보고하였다.

한편, 시비량 조절과 관련된 연구로, Yoon et al. (2003b)은 포장별로 화학비료의 시비량을 조절하고, 오염부하량을 비교한 결과, 시비량 감소는 배출부하량 저감에 큰 영향을 미치지 않으며, 수확량은 감소한다고 보고한 바 있어, 최근에는 완효성 비료의 사용으로 수확량을 유지하고, 시비량을 저감하려는 연구가 진행되고 있다. Lee et al. (2005)는 완효성 비료의 시비는 질소 이용률을 약 20% 향상시켜, 시비량을 약 30% 저감하여도 수확량에 영향을 미치지 않을 수 있다고 보고한 바 있으며, Jang et al. (2011)은 모델링을 통해 논에서 완효성 비료를 시비할 경우, 화학비료를 시비하는 경우에 비해, 유역 출구에서 T-N 오염부하를 38.7% 저감할 수 있으며, T-P는 동일하다고 보고한 바 있다. 하지만, 유역모델을 이용하여 모의되어 포장단위의 배출부하는 추정하기 어려우며, 완효성 비료가 사용된 논에서의 실측자료 또한 미비하여, 완효성 비료의 효과를 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 영농방법에 따른 배출부하량을 비교 평가하기 위하여, 새만금 유역 내 익산천 유역 하류에 위치한 논

포장을 대상으로 물꼬관리와 완효성 비료 시비 등의 영농기법을 고려하여 시험구를 배치하고, 수문·수질 계측망을 구축하여 논에서의 수문 및 수질 기작을 현장 모니터링 함으로써, 시험구별 물수지 및 물질수지를 산정하여 영농기법의 효과를 정량적으로 비교하고 평가하는데 있다.

II. 연구방법

1. 시험포장 구축 및 계측망 구성

가. 시험포장 구축 및 처리구 조성

본 연구에서는 새만금 유역 내 전라북도 익산시 춘포면 용연리 일대의 논 포장을 선정하였으며, 110 m × 35 m 크기의 논 포장 6개를 각 시험구별로 2반복하여 구축하였다. Fig. 1은 시험포장의 위치를 나타내고 있다. 시험포장은 대조구로 새만금 관행 영농방법을 적용하는 관행구 (TR-A)를, 실험구로 물꼬 높이 조절구 (TR-B)와 완효성 비료 시비구 (TR-C)를 구축하였다. Table 1은 시험구별 처리방법을 나타내고 있다. 관행구는 새만금 관행 영농방법으로 물꼬 높이를 7 cm로 유지하였으며, 포장의 토양검정 결과에 따라 맞춤형 비료 16호를 시비하였다. 물꼬 높이 조절구는 중간낙수 이전에는 물꼬 높이를 7 cm로 유지하고, 중간낙수 이후에는 물꼬 높이를 12 cm로 높이는 물관리 방법과 맞춤형 비료 16호를 시비하는 영농방법을 적용하였다. 물꼬 높이 12 cm는 국내의 선행연구 조사결과에 따라 작물의 생육 및 수확량에 영향을 미치지 않으며, 국내에서도 관측되는 수치로 선정하였다 (Mishra et al., 1998; Anbumozhi et al., 1998; Kang et al., 2006; Jang et al.,

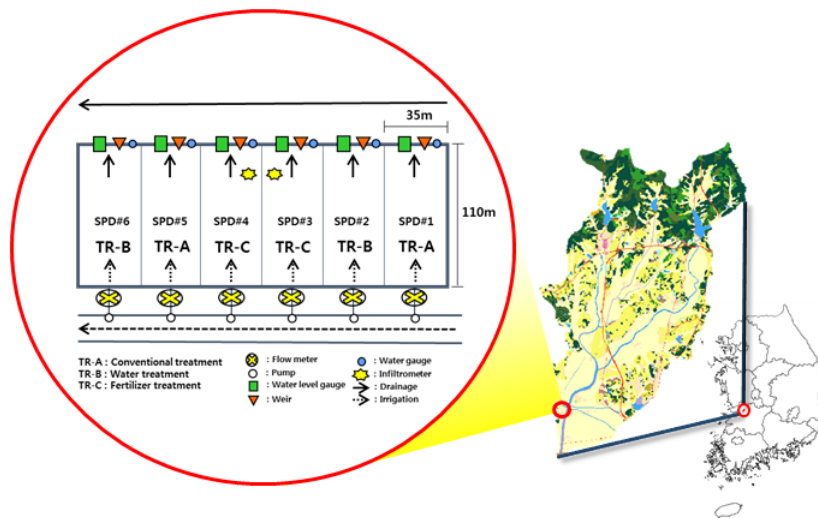


Fig. 1 Location and schematics of the paddy field experiment site in the Saemangeum area

Table 1 Drainage outlet heights and fertilization rates for the different paddy treatments

Item	Water depth management (cm)	Fertilization rate (kg/ha)		Fertilizer type
		T-N	T-P	
TR-A	7 cm	121.1	19.3	Customized fertilizer
TR-B	12 cm	108.6	21.6	Customized fertilizer
TR-C	7 cm	93.5	18.4	Slow-released fertilizer

TR-A: Conventional treatment

TR-B: Drainage outlet heighten treatment

TR-C: Slow release fertilizer use treatment

2010). 완효성 비료 시비구는 물꼬 높이를 7 cm로 유지하고 완효성 비료를 시비하는 영농방법을 적용하였다. 완효성비료는 비료성분의 공급이 완만하게 일어나 영농기동안 지속적으로 효과가 나타나는 비료로 화학비료에 비해 시비량 절감의 효과를 보인다.

나. 수문·수질 계측망 구성

물 및 물질수지 분석을 위해 Fig. 1과 같이 포장별로 수문·수질 계측망을 구성하였다. 대상지구 강우량 분석을 위해 용연리에 위치한 농가 옥상에 강우계를 설치하여 조사를 실시하였으며, 증발산량 분석을 위한 기상인자는 시험 포장에 가장 인접한 기상관측소인 전주관측소의 자료를 이용하였다. 관개량 측정에는 수중펌프와 유량계를 설치하여 포장별로 측정하였으며, 침투량은 원형 침투량계를 설치하여 관측기간 동안 감소한 수두 차를 통해 해당기간의 평균 침투량을 산정하였다. 논 담수심 측정을 위해 초음파 수위계를 설치하여 10분 간격으로 수위 관측을 실시하였으며, 배수량 측정은 위어와 부자식 수위계를 이용하여 10분 간격으로 측정된 수위와 수위-유량 관계식을 이용하여 배수량을 계산하였다.

물질수지 분석을 위해 관개수, 논 담수에 대해 수질 모니터링을 실시하였다. 2주에 1회씩 정기모니터링을 실시하였으며, 집중조사를 위해 이앙기에는 3~4일 간격으로, 강우시에는 20분~2시간 간격으로 모니터링을 실시하였다.

2. 물 및 물질수지 분석방법

포장단위 논 물수지는 담수심, 강우량, 관개량, 증발산량, 침투량, 담수심, 배수량으로 구성되며 식 (1)과 같이 구성된다.

$$WD_t = WD_{t-1} + R_t + IR_t - IN_t - ET_t - DR_t \quad (1)$$

여기서, WD_t 는 t일의 논 담수심 (mm), R_t 는 t일의 강우량 (mm), IR_t 는 t일의 관개량, IN_t 는 t일의 침투량 (mm), ET_t 는 t

일의 증발산량 (mm), DR_t 는 t일의 배수량 (mm)을 의미한다. 물질수지 분석을 위한 식은 식 (2)와 같이 구성된다.

$$\Delta S = PR_t + IR_t + F_t - IN_t - PU_t - DR_t \quad (2)$$

여기서, ΔS 는 토양 내 잔존량을, PR_t 는 t일의 강우에 의한 부하량 (kg/ha), IR_t 는 t일의 관개에 의한 부하량 (kg/ha), F_t 는 t일의 시비에 의한 부하량 (kg/ha), IN_t 는 t일의 침투에 의한 손실량 (kg/ha), PU_t 는 t일의 작물흡수에 의한 부하량 (kg/ha), DR_t 는 t일의 배수량에 의한 부하량 (kg/ha)을 의미한다.

3. 수질 및 식물체 분석방법

수질 시료 및 식물체의 분석은 서울대학교 농업과학공동기기원 (National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에 의뢰하여 분석을 실시하였다. T-N 및 T-P 항목에 대해 분석하였으며, 수질 시료는 수질오염공정시험기준 (환경부고시 제2012-99호)에 따라 분석하였으며, 식물체는 수확 후 현미와 벼에 대한 이화학적 특성을 분석하였다.

수질 농도 분석결과와 처리구간 유의성 분석을 위해, IBSS SPSS Statistics 21 (SPSS, Inc., 2012)를 이용하여, 독립표본 t-검정을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 물수지 분석

가. 논 담수심 모니터링 결과

Fig. 2는 논 담수심 모니터링 결과를 나타내고 있다. 논 담수심은 강우에 의해 증가하는 것으로 나타났으며, 비강우시에는 담수심이 일정 높이 이하로 내려가게 될 경우 농민이 관개를 함으로써 담수심이 증가하는 것으로 나타났다. 관개나 강우가 없는 날에는 침투와 증발산에 의해 담수심이 감소하

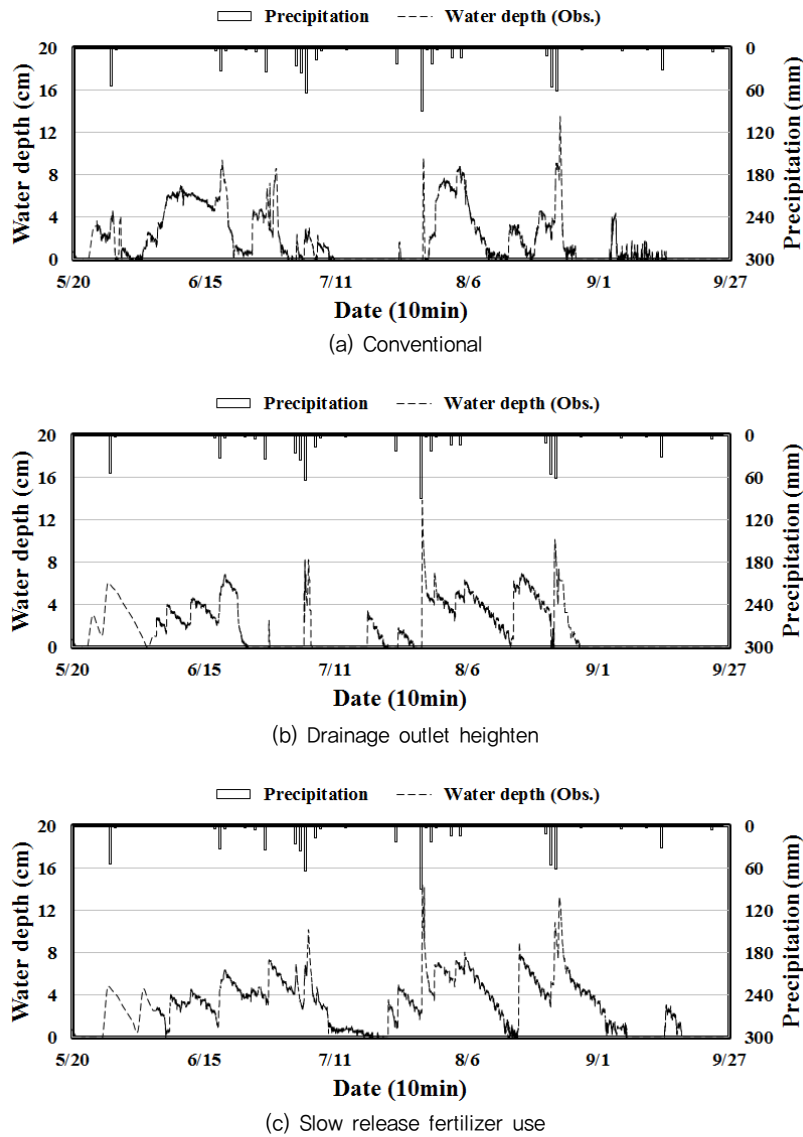


Fig. 2 Water depth comparison of among paddy treatments during the farming season

였으며, 중간낙수가 이루어지는 7월 중순경에는 담수심이 낮게 나타났다. 영농기간 TR-A의 평균 담수심은 2.61 cm로, TR-B의 평균 담수심은 2.94 cm로, TR-C의 평균 담수심은 2.24 cm로 나타났다. TR-A에 비해 TR-B의 평균 담수심이 0.33 ~ 1.26 cm 높게 나타나, 물꼬 높이가 상승을 통해 저류능을 높일 수 있는 것으로 나타났다. Mishra et al. (1998)은 물꼬 높이를 6 cm에서 30 cm까지 높일 경우 강우량의 56.75 %부터 99.5 %까지 저장할 수 있다고 보고한 바 있다. 또한 TR-B의 담수심은 강우량이 많은 경우 최대 15 cm까지 순간적으로 올라가는 것으로 나타났다. Jang et al. (2010)은 모니터링을 통해 영농 초기와 8월 하순에 최대 담수심이 12 cm 이상 올라갈 수 있음을 보고한 바 있다.

나. 물수지 분석결과

Table 2는 2013년 영농기간(5월 ~ 9월) 동안 물수지 분석 결과를 나타내고 있다. 모니터링 결과 영농기간 강우량은 695.2 mm로 나타나 전주기상청의 최근 30년 평균 강우량 997.4 mm에 비해 적게 나타났다. 특히 6월, 8월, 9월의 강우량이 최근 30년 평균에 비해 50 % 가량 적게 나타났다. 관개량은 TR-A 561.5 mm, TR-B 515.2 mm, TR-C 563.7 mm로 나타나 TR-B에서 TR-A에 비해 약 8 % 적게 관개 되는 것으로 나타났다. 이는 TR-B의 물꼬 높이가 상승에 따라 강우에 의한 유효수량이 증가하였기 때문으로 사료된다. 한편, 선행연구에 따르면 관개량은 영농초기에 집중되는 것으로 보고되는데 비해, 본 연구에서는 8월의 관개량 또한 28 ~ 35 %로 상대

Table 2 Water balance of the treatment paddy fields during the farming season

Item	Date	Inflow (mm)			Outflow (mm)				b/a (%)
		Rainfall	Irrigation	Sum (a)	Infiltration	Evapotranspiration	Surface Drainage (b)	Sum	
TR-A	May	106.0	60.0	166.0	67.5	39.3	30.5	137.2	18.4
	Jun	88.4	173.4	261.8	85.4	109.7	64.8	259.9	24.8
	Jul	294.8	81.9	376.7	59.2	100.0	190.0	349.0	50.4
	Aug	163.4	179.6	343.0	80.3	212.3	106.5	399.1	31.0
	Sep	42.6	66.7	109.3	36.7	66.1	8.9	111.6	8.1
	Sum	695.2	561.5	1,256.7	328.9	527.4	400.5	1,256.7	31.9
TR-B	May	106.0	60.0	166.0	54.1	29.2	36.4	119.7	21.9
	Jun	88.4	183.0	271.4	97.0	111.7	62.2	270.9	22.9
	Jul	294.8	69.9	364.7	67.9	122.3	141.7	331.9	38.9
	Aug	163.4	169.3	332.7	81.8	216.5	99.5	397.8	29.9
	Sep	42.6	33.1	75.7	32.4	57.7	0.0	90.1	0.0
	Sum	695.2	515.2	1,210.4	333.2	537.4	339.8	1,210.4	28.1
TR-C	May	106.0	120.0	226.0	75.1	45.1	70.8	191.0	31.3
	Jun	88.4	191.5	279.9	97.0	127.2	45.6	269.8	16.3
	Jul	294.8	1.8	296.6	45.4	74.0	187.8	307.3	63.3
	Aug	163.4	185.9	349.3	81.2	211.5	79.7	372.4	22.8
	Sep	42.6	64.5	107.1	45.8	72.6	0.0	118.4	0.0
	Sum	695.2	563.7	1,258.9	344.5	530.5	383.9	1,258.9	30.5

TR-A: Conventional treatment

TR-B: Drainage outlet heighten treatment

TR-C: Slow release fertilizer use treatment

적으로 크게 나타났다. 이는 대상지구의 8월 강우량이 163.4 mm로 최근 30년 평균 강우량 283.6 mm에 비해 적게 나타나 관개를 더 많이 하는 영농활동이 이루어진 것으로 사료된다. Song et al. (2012)은 모델링을 통해 물꼬높이가 50 mm 상승할 경우 유효수량 증가에 따라 관개량이 평균 86.6 mm 감소한다고 보고한 바 있다.

지표배수량은 TR-A 400.5 mm, TR-B 339.8 mm, TR-C 384.0 mm로 나타나 관행대비 TR-B에서 약 15%, TR-C에서 약 4% 적게 배수되는 것으로 나타났다. 유입량 대비 지표배수량은 TR-A 31.9%, TR-B 28.1%, TR-C 30.5%로 관행대비 TR-B에서 3.8%, TR-C에서 낮은 배수율을 보였다. TR-B의 배수량이 TR-A 및 TR-C 대비 적게 배수된 것은 물꼬높이가 높아 강우 저류능이 높고, 관개가 적게 된 점이 복합적으로 작용했기 때문으로 사료된다. 한편, 본 연구의 물수지는 단혀 있는데 이는 물수지 분석을 통해 배수량의 수위-유량 관계식을 보정하였기 때문이다.

논 물수지와 관련된 선행연구사례에 따르면 Jeon et al. (2005)은 지표수 관개 논과 지하수 관개 논을 대상으로 물수지

분석을 실시하여 지표수 관개 논은 평균 1,611.2 mm 유입되어 701.2 mm가 배수된다고 하였으며, 지하수 관개 논은 윗 논으로부터 유입량을 제외하고 평균 906.1 mm 유입되어 265.9 mm 배수된다고 보고한 바 있다. Jang et al. (2012) 2006년부터 2008년까지 관개 방법에 따른 물수지 분석을 실시하여 지하수 관개 논에서 평균 1,815.8 mm 유입되어 214.7 mm 배수, 하수 미처리 관개 논에서 1,877.4 mm 유입되어 236.3 mm 배수, 하수 자외선처리 관개 논에서 1,834.0 mm 유입되어 229.5 mm 배수된다고 보고한 바 있다. Choi et al. (2012)은 2011년 가축분 퇴비를 시비한 논의 물수지를 분석하였으며, 1,548.3 mm 유입되어 400.0 mm 배수된다고 보고한 바 있다. 이와 같이 물수지 연구결과가 차이가 나는 것은 연도별, 지역별 기상 조건의 차이와 영농방법의 차이가 원인이라고 보고되고 있다. (Kim et al., 2005; Song et al., 2012; Choi et al., 2012)

2. 물질수지

가. 수질분석결과

Table 3과 Fig. 3은 영농기간 동안 강우시와 비강우시 관개

수 및 논 담수의 수질 모니터링 결과를 나타내고 있다. 관개수 수질분석결과 T-N 농도는 평균 2.88 mg/L로, T-P 농도는 평균 0.03 mg/L로 담수 수질농도보다는 낮은 농도를 갖는 것으로 나타났으며, 경향성은 영농초기에 높은 농도를 나타내다 점차 낮은 농도로 떨어지는 것으로 나타났다.

논 담수 수질분석결과 비강우시 평균 T-N 농도는 TR-B에서 6.73 mg/L, TR-C에서 4.58 mg/L로 나타나, TR-A가 10.10

mg/L인 것에 비해 낮게 나타났으나, 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$). T-P 농도는 TR-A 0.58 mg/L, TR-B 0.58 mg/L, TR-C 0.33 mg/L로 TR-A와 TR-B는 유사한 농도로 나타났으며, TR-C에서는 농도가 낮게 나타났다. 통계적으로 TR-A는 TR-B와 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으며 ($p>0.05$), TR-C와 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p<0.05$). TR-C에서 TR-A에 비해 수질 농도가 낮

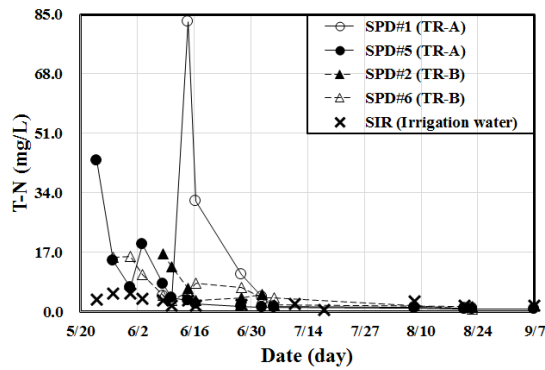
Table 3 Water quality characteristics of water samples for the different paddy treatments

		T-N			T-P		
		No. of samples	Mean (mg/L)	Range (mg/L)	No. of samples	Mean (mg/L)	Range (mg/L)
Irrigation water	SIR	14	2.88	0.71–5.39	13	0.03	0.01–0.05
Ponded water (non-rainy days)	TR-A	25	10.10	0.73–82.97	24	0.58	0.06–4.07
	TR-B	20	6.73	0.85–16.74	20	0.58	0.12–2.92
	TR-C	26	4.58	0.57–24.27	25	0.33	0.06–2.96
Ponded water (rainy days)	TR-A	14	1.00	0.44–2.13	41	0.29	0.04–0.78
	TR-B	14	1.27	0.55–3.01	42	0.52	0.08–2.27
	TR-C	41	1.98	0.47–9.30	41	0.24	0.02–0.79

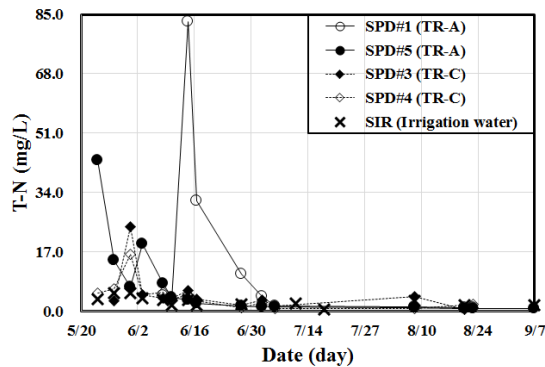
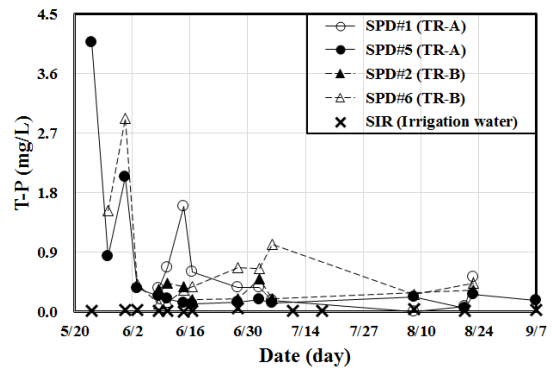
TR-A: Conventional treatment

TR-B: Drainage outlet heighten treatment

TR-C: Slow release fertilizer use treatment



(a) TR-A and TR-B



(b) TR-A and TR-C

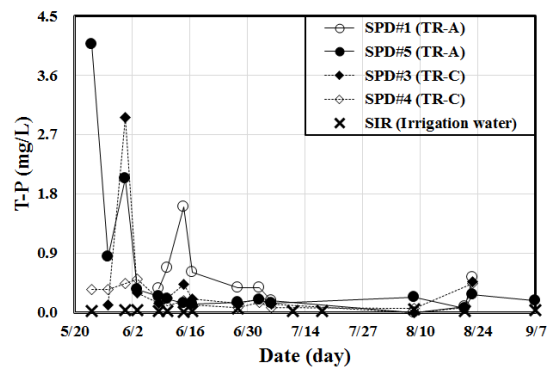


Fig. 3 Water quality of the different paddy treatments during the farming season

게 나타난 것은 TR-C에서 총 시비량이 적었던 것이 원인이 되었을 것으로 사료된다. 또한 완효성 비료는 입자의 표면이 특수한 물질로 코팅되어 비료의 효과가 빠르게 나타나는 화학비료에 비해 물속에서 서서히 용출되는 특성을 가지고 있으며, 이로 인해 일반적으로 시비 초기에 수질 농도가 낮게 나타나는 경향이 있다. 본 연구에서는 영농초기 집중적으로 수질 모니터링이 수행되었는데 영농 초기 수질 농도가 낮게 나타나는 완효성 비료의 특징이 TR-C의 평균 수질 농도가 낮게 나타나는 것에 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. Lee et al. (2005)는 완효성 비료 시비와 화학비료 시비의 담수 질소 농도를 비교하여, 영농초기에는 화학비료 시비의 담수 농도가 높게 나타났고, 벼 이앙 18일 이후부터는 완효성 비료 시비의 농도가 높게 나타났다고 보고한 바 있다.

경향성은 T-N, T-P 둘 다 모든 처리구에서 영농초기에 높은 농도를 나타내다 점차 감소하는 경향을 보였다. 처리구별로 수질의 최대, 최소, 평균 등이 다르게 나타나는 이유는 5월 하순에서 6월 중순까지의 이앙기 집중 조사를 실시하였으나

쓰레질 및 시비시기 등이 포장별로 달랐기 때문에 사료된다. 또한 T-N, T-P 농도는 처리구와 관계없이 영농초기에 높게 나타내며 서서히 감소하는 경향을 보이는데, 이는 영농초기 경운과 쓰레질에 의한 토양의 교란 및 시비활동으로 인한 영향으로 사료된다 (Yoon et al., 2003a; Kim et al., 2005; Song et al., 2013; Song et al., 2014)

강우시 담수 수질농도는 비강우시 평균 농도에 비해 낮은 것으로 나타났는데, 이는 강우가 비료성분이 대부분 희석되어 담수수질 농도가 낮게 측정되는 7~8월에 집중된 것이 원인이 되었을 것으로 사료된다. TR-C의 경우 다른 처리구에 비해 수질농도의 감소폭이 작게 나타내는데 이는 완효성 비료의 특성상 비료 성분이 지속적으로 나타나는 것이 원인이 되었을 것으로 사료된다. Lee et al. (2005)은 완효성 비료는 비효가 100일까지 지속될 수 있다고 보고한 바 있다.

나. T-N 물질수지 분석

Table 4는 T-N 물질수지 분석결과를 나타내고 있다. TR-A

Table 4 Nitrogen mass balance for the different paddy treatments during the farming season

T-N (kg/ha)										
Item	Date	Inflow				Outflow				b/a (%)
		Rainfall	Irrigation	Fertilizer	Subtotal (a)	Infiltration	Surface Drainage (b)	Plant Uptake	Sum	
TR-A	May	1.0	2.2	-	3.2	3.3	5.7	-	9.0	-
	Jun	0.8	5.0	121.1	126.9	4.0	5.3	-	9.3	-
	Jul	2.7	1.3	-	4.0	0.8	3.4	-	4.2	-
	Aug	1.5	2.9	-	4.4	0.8	1.1	-	1.9	-
	Sep	0.4	1.3	-	1.7	0.3	0.1	-	139.5	-
	Sum	6.4	12.6	121.1	140.0	9.1	15.5	139.1	163.6	11.1
TR-B	May	1.0	2.3	51.5	54.7	0.7	1.7	-	2.3	-
	Jun	0.8	5.8	57.2	63.8	2.6	4.2	-	6.8	-
	Jul	2.7	0.8	-	3.6	1.5	4.6	-	6.1	-
	Aug	1.5	2.8	-	4.3	1.2	1.4	-	2.5	-
	Sep	0.4	0.7	-	1.1	0.4	0.0	-	131.2	-
	Sum	6.4	12.3	108.6	127.3	6.3	11.7	130.9	148.9	9.2
TR-C	May	1.0	4.4	93.5	98.9	1.5	3.1	-	4.6	-
	Jun	0.8	5.7	-	6.5	1.9	1.0	-	2.8	-
	Jul	2.7	0.0	-	2.7	0.7	3.4	-	4.0	-
	Aug	1.5	2.9	-	4.4	1.4	1.1	-	2.5	-
	Sep	0.4	1.2	-	1.6	0.6	0.0	155.0	155.5	-
	Sum	6.4	14.2	93.5	114.1	5.9	8.5	155.0	169.3	7.4

TR-A: Conventional treatment

TR-B: Drainage outlet heighten treatment

TR-C: Slow release fertilizer use treatment

의 T-N 유입부하는 140.0 kg/ha로 TR-B의 유입부하가 127.3 kg/ha, TR-C의 유입부하가 114.1 kg/ha인 것에 비해 많은 T-N이 유입된 것으로 나타났다. 시비에 의한 유입부하량 차이는 -27.6 ~ -12.5 kg/ha로, 관개에 의한 유입부하량 차이가 -0.3 ~ +1.6 kg/ha인 것에 비해 크게 발생하였다. 이는, TR-B의 경우 TR-A와 동일한 시비를 하지 못하고 적게 시비한 것이 원인이 되었으며, TR-C는 완효성 비료의 시비량이 맞춤형 비료에 비해 적었던 것이 원인이 되었을 것으로 사료된다. T-N의 침투에 의한 손실량은 TR-A 9.1 kg/ha, TR-B 6.3 kg/ha, TR-C 5.9 kg/ha로 나타나, TR-A에 비해 TR-B와 TR-C의 침투량이 높게 나타난 것에 비해 침투손실량은 낮게 나타났다. 이는 처리구간 침투량 차이에 비해 담수 수질농도의 차이가 크게 나타났던 것이 침투손실량에 비교적 큰 영향을 나타낸 것으로 사료된다. T-N의 지표배수 부하량은 TR-A 15.5 kg/ha, TR-B 11.7 kg/ha, TR-C 8.5 kg/ha로 나타나, 물꼬 관리와 완효성 비료 시비를 통해 각각 관행대비 25 %, 45 %의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. TR-B는 물꼬 관리를 통해 배수량을 15 % 저감한 것이 영향을 미쳤을 것으로 사료되며,

TR-C는 총 시비량이 적었던 점과 완효성 비료를 시비함으로써 영농초기 유출이 많을 시에 담수 수질 농도가 낮았던 것이 원인이 되었을 것으로 사료된다. Evans et al. (1995)은 물꼬 관리를 통해 N과 P의 지표배출 부하량을 30 ~ 50 %까지 줄일 수 있다고 보고한 바 있으며, Yoon et al. (2006)은 T-N의 경우 지표유출과 침투를 통해 많은 양이 손실되기 때문에 배출 부하량의 저감을 위해서는 영농기간 동안 시비관리와 물관리가 필요하다고 보고한 바 있다. 또한, Chang et al. (2011)은 모델링을 통해 소유역 내의 논 (21.2 %)에 완효성 비료를 시비할 경우 T-N 배출을 약 4.9 % 저감할 수 있다고 보고한 바 있다. 한편 T-N의 유입부하량 대비 지표배수 부하량은 TR-A에서 11.1 %, TR-B에서 9.2 %, TR-C에서 7.4 %로 나타나 유입 부하량 대비 지표배수 부하량 또한 물관리와 시비관리를 통해 각각 1.9 %, 3.6 %의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

다. T-P 물질수지 분석

Table 5는 T-P 물질수지 분석결과를 나타내고 있다. T-P 유입부하는 TR-A에서 19.57 kg/ha, TR-B에서 21.83 kg/ha,

Table 5 Phosphorus mass balance of the different paddy treatments during the farming season

T-P (kg/ha)										
Item	Date	Inflow				Outflow				b/a (%)
		Rainfall	Irrigation	Fertilizer	Subtotal (a)	Infiltration	Surface Drainage (b)	Plant Uptake	Sum	
TR-A	May	0.02	0.02	-	0.04	0.29	0.54	-	0.82	-
	Jun	0.02	0.04	19.29	19.35	0.14	0.21	-	0.35	-
	Jul	0.07	0.02	-	0.09	0.08	0.34	-	0.42	-
	Aug	0.04	0.04	-	0.08	0.13	0.28	-	0.40	-
	Sep	0.01	0.02	-	0.03	0.09	0.03	-	28.24	-
	Sum	0.15	0.13	19.29	19.57	0.72	1.38	28.13	30.23	7.1
TR-B	May	0.02	0.02	10.23	10.27	0.03	0.13	-	0.16	-
	Jun	0.02	0.04	11.34	11.40	0.19	0.13	-	0.32	-
	Jul	0.07	0.02	-	0.09	0.16	0.45	-	0.61	-
	Aug	0.04	0.04	-	0.08	0.22	0.30	-	0.52	-
	Sep	0.01	0.01	-	0.02	0.09	0.00	-	27.95	-
	Sum	0.15	0.11	21.57	21.83	0.68	1.02	27.87	29.56	4.7
TR-C	May	0.02	0.03	18.40	18.45	0.09	0.18	-	0.27	-
	Jun	0.02	0.04	-	0.06	0.13	0.06	-	0.19	-
	Jul	0.07	0.00	-	0.07	0.04	0.19	-	0.23	-
	Aug	0.04	0.04	-	0.08	0.15	0.27	-	0.42	-
	Sep	0.01	0.01	-	0.02	0.14	0.00	30.32	30.46	-
	Sum	0.15	0.12	18.40	18.68	0.54	0.69	30.32	31.55	3.7

TR-A: Conventional treatment
 TR-B: Drainage outlet heighten treatment
 TR-C: Slow release fertilizer use treatment

TR-C에서 18.68 kg/ha가 발생하였다. T-N과 마찬가지로 관개에 의한 차이가 -0.02 ~ -0.01 kg/ha인 것에 비해 시비에 의한 차이가 -2.28 ~ 0.89 kg/ha로 크게 나타났다. 다만 TR-B의 T-P 유입부하는 T-N과 달리 TR-A에 비해 크게 나타났는데 이는 SPD#1에서 분얼비시 인을 시비하지 않았기 때문으로 사료된다. T-P의 침투에 의한 손실량은 TR-A 0.72 kg/ha, TR-B 0.68 kg/ha, TR-C 0.54 kg/ha로 나타나, T-N과 마찬가지로 TR-A에 비해 TR-B와 TR-C의 침투손실량이 낮게 나타났다. 이는 TR-A의 담수수질농도가 다른 처리구에 비해 높았던 것이 원인이 되었을 것으로 사료된다. T-P의 지표배수 부하량은 TR-A 1.39 kg/ha, TR-B 1.02 kg/ha, TR-C 0.69 kg/ha로, 물꼬 관리와 완효성 비료 시비를 통해 각각 26 %, 50 %의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. TR-B는 TR-A에 비해 유입부하가 적었음에도 불구하고 높은 저감효과를 나타냈는데, 이는 T-N과 마찬가지로 배수량 저감에 따른 효과로 사료된다. Yoon et al. (2003a)에 따르면 영농초기는 시비에 의해 인의 농도가 높은 시기로, 영농초기의 물꼬관리를 통해 초기 배출부하량을 줄일 수 있다고 보고한 바 있다. 한편, Jang et al. (2011)은 모델링을 통해 유역 내 눈에 완효성 비료를 시비할 때 T-P의 농도변화는 화학비료를 시비할 때와 배출부하량 차이가 미비한 것으로 보고하고 있는 것에 비해, 본 연구의 TR-C는 높은 저감효과를 나타내는데, 이는 T-N과 마찬가지로 완효성 비료를 시비함에 따라 영농초기 지표배수량이 많을 때 담수농도가 적었던 것이 배출부하 저감에 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. 한편 T-P의 유입부하량 대비 지표배수량은 TR-A에서 7.1 %, TR-B에서 4.7 %, TR-C에서 3.7 %로 유입부하량 대비 지표배수 부하량 또한 물관리와 시비관리를 통해 각각 2.4 %, 3.4 %의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 새만금 유역 익산천 하류에 위치한 논 포장에 대상으로 물꼬 관리 및 완효성 비료 시비 영농방법을 적용하여, 수문·수질 모니터링을 실시하고 영양물질 수지 분석을 통해 영농방법에 따른 배출부하량 저감효과를 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 논 평균 담수심은 관행 2.61 cm, 물관리 2.94 cm, 시비관리 2.24 cm로 관행대비 물관리의 평균 담수심이 0.33 cm 높게 나타나는 것으로 나타나 물꼬 높이를 상승을 통해 담수 저류능을 높일 수 있는 것으로 나타났다.
2. 물수지 분석결과 관행구 대비 물꼬 조절 관리구에서 약 8 % 적게 관개하는 것으로 나타났으며, 완효성 비료 시비구의

관개량은 관행구와 큰 차이를 나타내지 않았다. 지표배수량은 물꼬 조절 관리구에서 관행대비 약 15 % 저감되는 것으로 나타났으며, 완효성 비료 시비구는 큰 차이를 나타내지 않았다. 본 연구의 결과, 물꼬 높이를 상승하면 강우 저류능을 높일 수 있으며, 관개량 및 배수량의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

3. 물질수지 분석결과 T-N 부하량은 관행구 15.5 kg/ha, 물관리구 11.7 kg/ha, 시비관리구 8.5 kg/ha로 나타나 관행대비 물관리구와 시비관리구에서 25 %, 45 %의 배출부하 저감효과를 갖는 것으로 나타났다. T-P 부하량은 관행구 1.38 kg/ha, 물관리구 1.02 kg/ha, 시비관리구 0.69 kg/ha로 나타나 관행대비 물관리구와 시비관리구에서 26 %, 50 %의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과 물꼬 높이를 조절 및 완효성 비료 시비를 통해 논에서의 영양물질 배출부하를 줄일 수 있는 것으로 나타나 비점오염 저감을 위한 영농활동으로 물꼬 관리와 완효성 비료 시비 방법을 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 다양한 기상조건에 영향을 받는 농업비점오염의 특성상 장기적 연구를 통해 효과를 검증하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원되는 “농업비점오염 저감을 위한 영농방법 개선 기법 개발”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Anbumozhi, V., E. Yamaji, and T. Tabuchi, 1998. Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level. *Agricultural Water Management* 37: 241-253.
2. Chang, S. W., M. S. Kang, I. H. Song, J. R. Jang, E. J. Lee, and S. W. Park, 2011. Effects of Fertilizer Types on Pollutant Loadings from Rice Paddy Fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 53(6): 111-119 (in Korean).
3. Cho, J. Y., J. G. Son, J. K. Choi, C. H. Song, and B. Y. Chung, 2008. Surface and subsurface losses of N and P from salt-affected rice paddy fields of Saemangeum reclaimed land in South Korea. *Paddy Water Environment* 6: 211-219.
4. Choi, J. D., S. K. Kwun, and G. S. Kwon, 2004. Evaluation of

- NPS Pollutant Loads from Clayey Loam Fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 46(2): 107-114 (in Korean).
5. Choi, J. K., J. G. Son, K. S. Yoon, H. J. Lee, and Y. J. Kim, 2012. Runoff Characteristics in Paddy Field using Cow Manure Compost Fertilizer. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 54(3): 29-36 (in Korean).
 6. Evans, R. O., R. W. Skaggs, and J. W. Gilliam, 1995. Controlled versus conventional drainage effects on water quality. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(4): 271-276.
 7. Han, K. H., 2011. Characteristics of Non-Point Sources Pollutant Loads at Paddy Plot Located at the Valley Watershed during Irrigation Periods. *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 18(1): 94-102 (in Korean).
 8. IBM SPSS Statistics ver. 21.
 9. Jang, N. J., B. G. Kim, S. H. Im, and T. K. Kim, 2012. A Study on Evaluation of Target Region for the Agricultural Non-Point Sources Management. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 34(1): 23-31 (in Korean).
 10. Jang, T. I., H. K. Kim, S. J. Im, and S. W. Park, 2010. Simulations of storm hydrographs in a mixed-landuse watershed using a modified TR-20 model. *Agricultural Water Management* 97: 201-207.
 11. Jang, T. I., H. K. Kim, C. H. Seong, E. J. Lee, and S. W. Park, 2012. Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture. *Agriculture Water Management* 104: 235-243.
 12. Jeon, J. H., C. G. Yoon, J. K. Choi, and K. S. Yoon, 2005. The comparison of water budget and nutrient loading from paddy field according to the irrigation methods. *Korean Journal of Limnology* 38(1): 118-127 (in Korean).
 13. Kang, M. S., S. W. Park, J. J. Lee, and K. H. Yoo, 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management* 79(1): 72-92.
 14. Kang, M. S., 2010. Development of improved farming methods to reduce agricultural non-point source pollution. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(4): 40-50 (in Korean).
 15. Kim, M. K., K. A. Roh, N. J. Lee, M. C. Seo, and M. H. Koh, 2005. Nutrient load balance in large-scale paddy fields during rice cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 164-171 (in Korean).
 16. Lee, J. B., J. Y. Lee, S. H. Li, J. R. Jang, I. G. Jang, and J. S. Kim, 2014. Nutrient Balance in the Paddy Fields Watershed with a Source of River Water. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 56(5): 11-19 (in Korean).
 17. 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).
 18. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2013. Cadastral Statistics yearbook, Sejong Metropolitan Autonomous City, Korea (in Korean).
 19. Mishra, A., A. K. Ghorai, and S. R. Singh, 1998. Rainwater, soil and nutrient conservation in rainfed rice lands in Eastern India. *Agriculture Water Management* 38(1): 45-57.
 20. Relevant Ministerial Consortium, 2012. Second Nonpoint Source Management Comprehensive Plan. 11-1480000-001222-01. Sejong Metropolitan Autonomous City: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
 21. Yoon, C. G., H. S. Hwang, K. W. Jung, and J. H. Jeon, 2003a. Effects of ponded-water depth and reclaimed wastewater irrigation on paddy rice culture. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 45(4): 55-65 (in Korean).
 22. Yoon, C. G., J. H. Ham, and J. H. Jeon, 2003b. Mass balance analysis in Korean paddy rice culture. *Paddy and Water Environment* 1(2): 99-106.
 23. Yoon, G. S., J. Y. Cho, J. K. Choi and J. G. Son, 2006. Water Management and N, P Losses From Paddy Fields In Southern Korea. *Journal of the American Water Resource Association* 42(5): 1205-1216.
 24. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, and J. R. Jang, 2012. Comparing Farming Methods in Pollutant runoff loads from Paddy Fields using the CREAMS-PADDY Model. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31(4): 318-327 (in Korean).
 25. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, J. H. Park, S. M. Jun, K. U. Kim, and J. R. Jang, 2013. Analysis of Nutrient Load Balance in the Reservoir Irrigated Paddy Block. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 167-175 (in Korean).
 26. Song, J. H., H. S. Jeong, J. H. Park, I. H. Song, M. S. Kang, and S. W. Park, 2014. Analysis of Water Quality and Soil Environment in Paddy Fields Partially Irrigated with Untreated Wastewater. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 19-29 (in Korean).