

Characteristics of TN and TP in Runoff from Reclaimed Paddy Field of Fine Sandy Loam

Kyung-Do Lee*, Suk-Young Hong, Yi-Hyun Kim, Sang-il Na, and Kyeong-Bo Lee¹

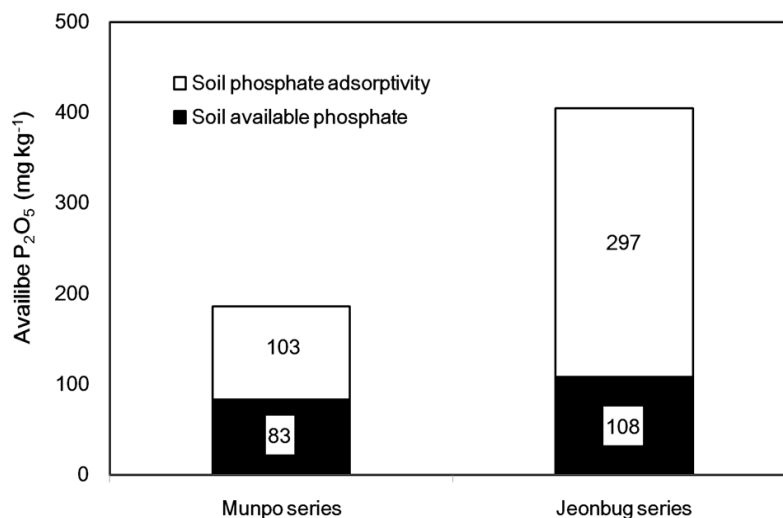
Soil and Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, RDA. Swon 441-707, Korea

¹Reclaimed Land Agriculture Research Division, National Institute of Crop Science, RDA. Iksan 570-080, Korea

(Received: November 1 2013, Accepted: November 13 2013)

This study investigated the runoff from rice paddy located on reclaimed fine sandy loam soil to provide data for the development of policies to protect water quality of estuaries. Total N (TN), Total P (TP) concentrations and runoff loads at outlet were monitored from 2006 to 2008. Soil phosphate adsorptivity was measured and compared with typical paddy soil in watersheds. TP concentration of the paddy water and TP runoff loads were much greater than those of typical paddy field in watershed because phosphate adsorptivity in reclaimed paddy field of fine sandy loam appeared to be a third of those of typical paddy soils by relatively low soil OM and high sand content of the reclaimed soil. Thus, nutrient runoff, particularly phosphate from the reclaimed paddy field needs to be managed more thoroughly to protect estuarine water quality.

Key words: TN, TP, Reclaimed land paddy, Runoff



Comparison of phosphate adsorptivity between Munpo series and Jeonbug series

*Corresponding author : Phone: +82312900346, Fax: +82312900208, E-mail: kdlee11@korea.kr

§Acknowledgement: This study was conducted by support of NAAS research and development project(project number: PJ009367).

Introduction

한국에서 간척농지는 안정적 주곡 생산을 위해 지난 1960년대 이래로 지속적으로 추진되어 왔다. 2009년 기준으로 완공된 간척지가 91,000 ha 준공 중인 간척지가 44,000 ha 인데, 이는 전체 논 면적의 약 10%를 차지하는 큰 면적이다. 그러나 간척지 담수호의 수질 악화 문제로 인해 신규 간척지의 개발은 한계에 봉착해 있다. 하천의 경우 수질이 악화된 일부 구간이 있을 수 있으나 하류로 내려가면서 오염물질이 정화되고 결국 바다로 흘러들어가 희석되지만, 간척지 방조제 조성 공사로 하구를 막은 경우 상류에서 내려온 오염물질이 담수호에 정체되어 수질이 악화되면서 조류가 번성하는 등 수생태계에 부정적 영향을 줄 수 있어 이에 대한 대책 마련이 필요한 실정이다 (Shin and Kwun, 1990; Yoon et al., 2001).

정체수역에서의 수질개선을 위해서는 산업폐수, 생활하수 등과 같이 발생원이 분명한 점오염원 뿐 아니라 농경지 처럼 오염물질의 발생원이 불분명한 비점오염원 또한 관리가 필요하다 (Kwun, 1998; Seo et al., 2002; Chun et al., 2005). 작물 생육을 위해 농경지에 비료로 사용되는 질소, 인 성분의 경우 강우, 농지배수 등에 의해 유출되면 하류 수생태계에서 조류의 양분으로 이용될 수 있기 때문이다 (Shin and Kwun, 1990; Yoon et al., 2003).

대부분의 간척지 조성지역은 논으로 이용되고 있기 때문에 논 배수는 담수호에 직접적으로 유입되고 있으므로 담수호 수질보전 대책 수립을 위해서는 담수호 상류유역의 오염부하 유입 뿐 아니라 담수호에 인접한 논에서의 비점오염부하도 평가 되어야 한다 (Yoon et al., 2001). 논에서의 비점오염부하 유출은 1990년대 초부터 연구가 수행되어 (Shin and Kwun, 1990), 논 담수에서의 오염물질 농도 변화 특성 (Cho et al., 2006; Kim et al., 2010), 필지 논에서의 영양물질수지 (Yoon et al., 2003), 광역 논에서 영양물질 수지

및 비점오염 부하 유출 특성 (Oh et al., 2002; Kim et al., 2005; Yoon et al., 2002) 등에 대해 연구가 이루어 졌으며, Yoon et al. (2001)은 CREAMS-PADDY 모델을 이용하여 고흥 간척지 담수호의 유입 오염부하량을 추정하였으나 기존 문헌 자료를 이용한 모의 결과로 실제 간척 논에서의 비점오염부하 유출 특성에 대한 모니터링 연구는 부족한 실정이다. 또한, 간척 논의 경우 일반 논과 다른 토양 이화학성과 영농방법을 가지고 있기 때문에 이를 고려한 연구가 필요하다. 기존 연구의 경우 논에서의 수문과 수질 변화에 초점을 맞추어 물수지 및 양분 분석 결과만을 제시하고 있어 토양 이화학성을 고려한 양분유출 특성 해석은 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 담수호와 인접한 세사양토 간척 논에서 총질소 (이하 TN), 총인 (이하 TP) 유출 특성, 논물 중 TN, TP 농도 변화 및 토양 인산 흡착능을 조사하여 간척 논에서 비점오염부하 발생 특성을 구명하기 위하여 수행되었다.

Materials and Methods

조사지역 본 연구는 전북 부안군 계화면에 위치한 국립식량과학원 벼맥류부 계화시험지 (35°46'29"N, 126°40'4"E) 간척 논에서 2006년부터 2008년까지 3년 동안 6월에서 9월까지 영농기에 수행되었다. 계화 간척지구는 1968년 방조제 공사가 완료되어 농경지 3,800 ha와 농지 배수를 바다로 배제하기 전 저류하기 위해 조성한 담수호인 조류지 230 ha를 조성하였으며, 조성된 간척농지의 대부분이 논으로 활용되고 있다 (Yoo et al., 2007).

계화지구 간척농지의 토양통은 상류 만경, 동진강 유역의 주요한 토양통 분포가 전북통, 만경통인 것과 달리 문포통이 주를 이루고 있다 (Hang et al. 2012). 문포통의 토성은 세사양토로서 미사질양토인 전북통, 만경통에 비해 모래 함량이 큰 특징을 가지고 있다.

2006년 3월 9일 계화시험지 벼연구 포장에서 전자기장으

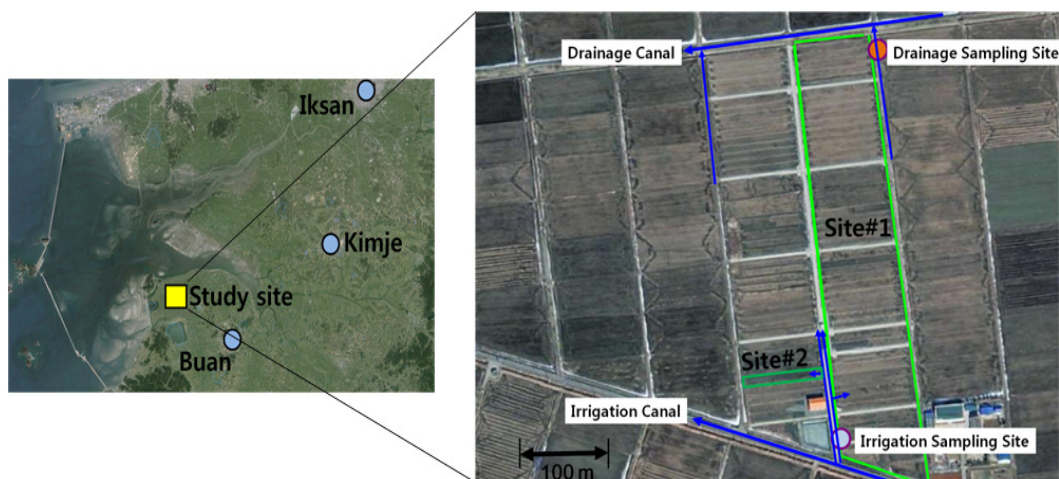


Fig. 1. Layout of the study area and the locations of the sampling sites.

로 토양 염농도를 추정할 수 있는 EM38기기 (Jung et al., 2003)를 활용하여 연구포장의 염농도 분포를 분석하여 지도를 작성한 결과 Site#2 인근 일부 지점에서는 여전히 비재배한계 농도인 토양 염농도 0.3% (4.7 dS m⁻¹) 이상의 높은 염농도 값을 보이고 있었다 (Fig. 2).

관개용수는 인근 청호저수지에서 영농기 동안 주기적으로 공급되었으며, 계화시험지의 경우 중앙 농로를 중심으로 좌우의 수로를 통해 관개수가 논으로 유입되었다. 논으로 유입된 관개용수는 논 말단의 물꼬를 통하여 배수로로 유출되게 되어 있어 시험지의 논은 크게 두 단지로 나눌 수 있었다.

간척 논에서 TN, TP 유출 특성 평가는 이들 두 단지 중에서 Site#1 5.0 ha에서 수행되었다. Site#1의 경우 Site#2가 포함된 단지에 비해 토양 염농도가 0.3% 이하로 염농도가 높지 않았고 내염성 벼 중간모본 육종 및 종자 증식 포장으로 활용되고 있었다. 이양은 5월말부터 6월초까지 이루어졌으며 시비량의 경우에도 N-P₂O₅-K₂O가 각각 11-5.1-5.7 kg 10a⁻¹로 일반 논 추천시비량보다 약간 높은 수준이었다.

논물 중의 TN, TP 농도 변화 시험은 2006년 Site#2에서 수행되었다. Site#2의 면적은 700 m²였으며 국립식량과학원 벼핵류부 벼육종재배과에서 염해경감을 위해 환수간격 실험을 수행하였는데, 논 유입부에 수도유량계를 설치하고 비강우시 3일 마다 배수 후 20~30 mm의 관개수를 공급하였다. 계화도시험지에서 육종된 청호벼를 5월 31일 이양하였으며, 비료량은 질소, 인산, 칼륨 비료를 각각 20 kg 10a⁻¹, 5.1 kg 10a⁻¹, 5.7 kg 10a⁻¹를 사용하였으며, 분시는 질소의 경우 기비:분얼비:수비를 5:2:3의 비율로, 인산은 전량 기비로 사용하였고, 칼륨은 기비:수비 7:3으로 사용하였다.

조사내용 및 방법 간척 논에서 TN, TP 유출 특성을 조사하기 위해 Site#1 단지 유출부에 유량계 (Unidata Starflow, Australia)를 설치하여 10분 간격으로 유량을 측정하였다. 비강우시에는 3일에서 6일 간격으로 유입부와 유출부에서 수질 시료를 채취하였다. 강우량은 계화도 시험지에 설치된

AWS 측정 자료를 활용하였으며, 강우 시 유출부에서의 수질 시료는 강우 전에 자동수질시료채취기 (Iscro 6712, USA)를 유출부에 설치하여 2시간 간격으로 수질시료를 채취하였다. 간척 논에서 유출되는 TN, TP 부하량은 Eq. 1, Eq. 2와 같이 비강우시 단지 유출부에서의 유량과 수질을 곱하여 산정하고, 강우 시에는 모든 강우사상에 대하여 수질시료를 채취하여 분석할 수 없으므로 강우사상 발생시 2시간 간격으로 채취한 수질 시료와 유량을 곱하여 유출부하를 산정하고 이를 유량과의 관계식으로 환산하여 부하량-유량 (L-Q) 식을 만들어 전체 강우사상의 유출부하 산정에 활용하였다 (Oh et al., 2002). 논에서의 비점오염 지표유출은 주로 강우 시에 크게 일어나는데, 유역의 대부분이 논으로 활용되고 있어 비료 사용에 따라 유출수 중의 TN, TP 농도가 영향을 받음으로 L-Q 식 작성 시에는 비료 사용에 따라 수질의 영향이 큰 시비기와 그렇지 않은 비시기를 나누어 작성하였다 (Oh et al., 2002).

$$\text{지표유출 부하량} = \sum \{ (3\sim 7\text{일별 농도}) \times \text{일 유출량} \} + \sum \{ \text{강우시 유출부하량} \} \quad (1)$$

$$\text{강우시 유출부하량} = \text{강우시 수질 및 유량 측정을 통한 L-Q식 산정} \quad (2)$$

필지 논에서 논물 중 TN, TP 농도 변화를 분석하기 위한 수질시료 채취는 Site#2 논에서 3일에서 6일 간격으로 환수 전에 관개수 유입부, 논 중간부, 배수 유출부에서 각기 500 mL씩 혼합하여 수행하였다. 수도유량계를 통해 공급량을 조절함으로써 수질 시료 채취 시 수위 변동이 크지 않아 수위에 따른 수질 영향을 최소화 할 수 있었다.

단지 유출입부와 단위 논에서 채취한 수질 시료의 TN, TP 농도는 수질오염공정시험법에 따라 각각 자외선흡광도법과 아스코르빈산 환원법을 이용하여 분석하였다.

간척지 논토양의 인산흡착능을 분석하기 위해 site#2의

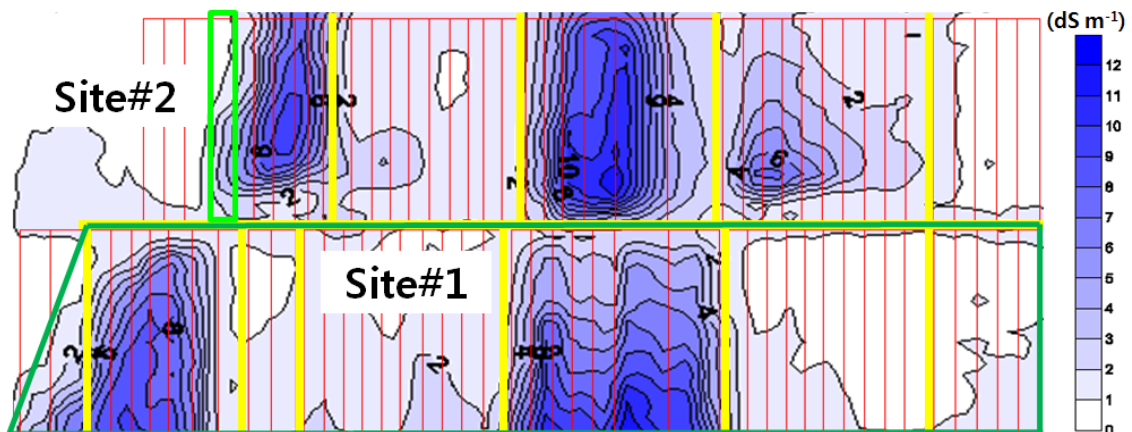


Fig. 2. Soil salinity distribution in study sites.

문포통 농토양과 함께 비교대상으로 유역에 많이 분포하고 있는 전북통 농토양을 전북 익산시 비백류부 간척지농업과 비연구 포장에서 각각 2006년 10월 비 수확 후 채취하여 풍건 후 실내에서 분석하였다. 토양의 인산흡착능은 25 mg L⁻¹의 인산 용액과 토양 1 g을 24 hr 동안 혼합한 후 0.45 μm 필터로 여과한 여과액의 농도와 시험 전 농도와의 차이로 계산하였으며 (Pierynski, 2000), 토양 유효인산과 비교하기 위해 환산계수 2.29를 곱하였다. 실험에 사용된 전북통 농 토양은 문포통 농토양에 비해 pH는 비슷하였으나 EC 함량이 낮고 토양유기물 함량과 유효인산 함량이 높았으며,

점토와 미사 함량이 많은 대신 모래 함량은 적은 것으로 분석되었다 (Table 1).

Results and Discussion

단지 유출부에서 TN, TN 유출 특성 연구지역에서 2006년부터 2008년까지 6월부터 9월까지의 연 강우량은 각각 734.4, 1,259.6, 486.3 mm로서 연차 간 차이가 컸는데, 2007년이 다른 해에 비해 1.7~2.6배 많은 값을 보였다 (Table 2). 월별로는 7월과 8월의 강우량이 많은 경향을 보였으나 2007

Table 1. Soil physicochemical properties in Munpo and Jeonbug series.

Soils series	pH	EC _{1:5} (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ca	K (cmol _c kg ⁻¹)	Mg	Soil texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
Munpo	7.7	2.8	10.1	83	1.6	0.8	2.8	SL	9	32	59
Jeonbug	7.2	0.9	29.0	108	6.0	0.3	2.3	SiL	22	70	8

Table 2. Rainfall in study area and runoff in outlet (Unit : mm).

Month	2006		2007		2008	
	Rainfall	Runoff	Rainfall	Runoff	Rainfall	Runoff
June	125.4	152.2	120.3	270.8	257.5	205.6
July	477.9	423.5	201.2	382.8	95.1	101.4
August	107.7	223.6	439.9	430.5	129.8	91.9
September	23.4	65.3	498.2	457.4	3.9	55.8
Sumation	734.4	864.5	1,259.6	1,541	486.3	454.7

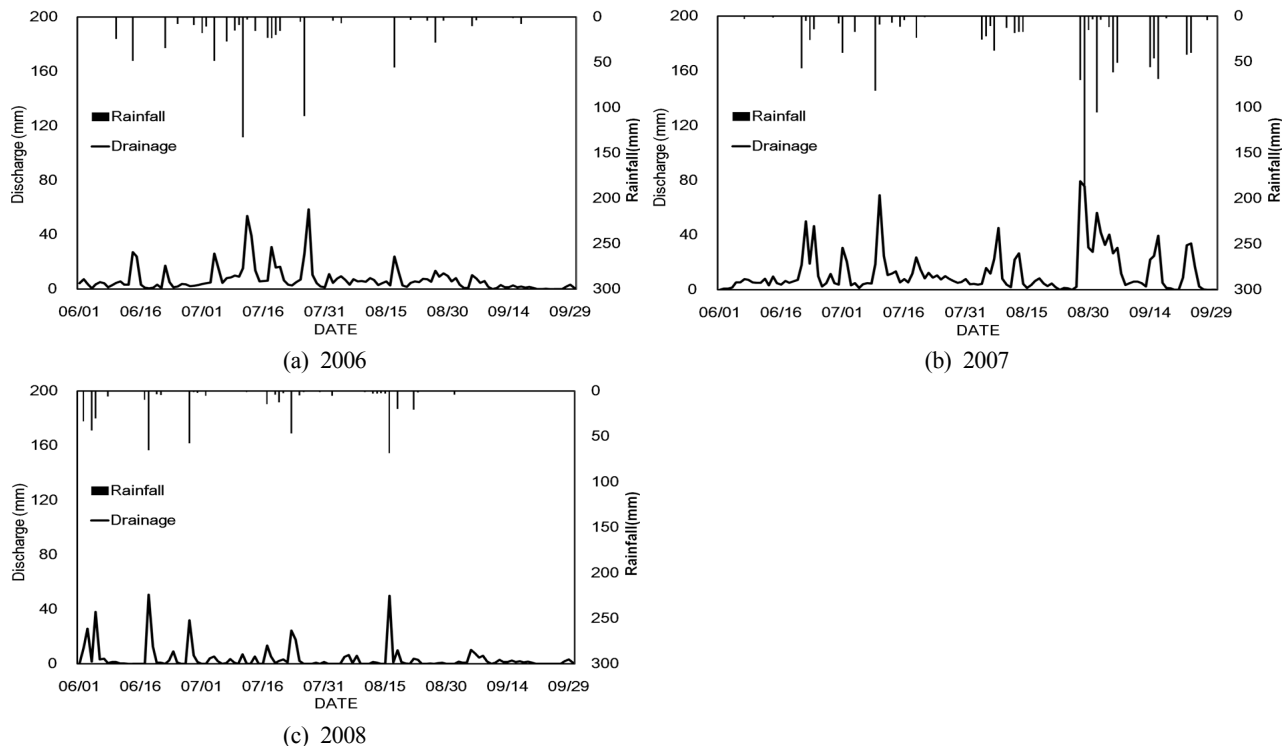


Fig. 3. Changes in discharge of drainage and rainfall in outlet ('06~'08).

년 9월의 경우 월별 강우량으로는 가장 많은 498.2 mm의 값을 기록하여 다른 해와 차이를 보였다. 단지 유출부에서의 유출량은 3년 동안 각각 864.5, 1,541, 454.7 mm의 값을 보여 연도별 강우량과 유사한 경향을 나타냈다. 유출부에서 시간별 유량 변화는 Fig. 3과 같았다. 2006년과 2007년의 경우 강우 시 뿐 아니라 생육초기부터 비강우시에도 지속적으로 유출이 발생했는데 이는 간척논의 경우 염해경감을 위해 흘러대기를 실시하던 관행에 따른 것으로 청호저수지에서 주기적으로 방류한 관개수가 생육 필요수량 이상으로 계속 논에 유입되면서 논물꼬를 넘어 유출되었기 때문이다. 2007년 9월의 경우에는 집중호우와 잦은 강우 사상으로 인해 유출부 유량이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 2008년의 경우 강우량이 2006년 강우량의 66%, 2007년 강우량의 39% 수준으로 급격히 줄면서 유출량도 크게 줄어들었다. 단지 유출부에서의 유출은 주로 강우에 의해 발생하였으며, 일부 간선수로에 관개용수가 공급되어 지선수로로 유입된 용수가 논을 통해 유출되기도 하였으나 지속적인 유출은 크게 발생하지 않았다.

비강우시 간척논의 유출입수 중의 TN, TP 농도는 '06~'08

년 영농기 동안 총 53회 측정되었다. 유입수 TN 농도는 0.47~2.94 mg L⁻¹의 범위에 평균 1.51 mg L⁻¹의 값을 보였으나, 유출수 농도는 0.64~7.44 mg L⁻¹의 범위에서 평균 2.81 mg L⁻¹의 값을 보였다. 연차 간 유출입수의 평균농도는 0.2 mg L⁻¹ 이내로 큰 차이를 보이지 않았다 (Table 3). 유입수 TP 농도는 0.02~0.15 mg L⁻¹의 범위였으며 평균 0.07 mg L⁻¹의 값을 보였으나, 유출수의 경우 0.10~0.99 mg L⁻¹의 범위에서 평균 0.41 mg L⁻¹의 값을 보여 유입수와 유출수의 평균 농도 차이가 약 6배 정도 되는 것으로 나타났다. 연차간 TP 평균농도 차이는 유입수 간에는 0.05 mg L⁻¹ 이내였으며, 유출수 간에는 0.1 mg L⁻¹ 이내를 유지하여 유입수와 유출수가 지속적으로 0.3 mg L⁻¹의 차이를 보였다. 시기별 유출입수 중의 TN 농도(Fig. 4)는 영농초기 유출수의 TN농도가 높은 경향을 보이다 후기로 갈수록 유입수와 유출수의 농도 차이가 줄어드는 경향을 보였는데, 이는 영농초기 비료 사용에 따라 유출수의 TN 농도가 상승하였다가 6월 중순 이후 장마기를 거치면서 유출수의 농도가 급격히 낮아졌기 때문이다. TP의 경우 2006년에 다소 수질 변동 폭이 큰 경향을 보였으나 전반적으로 시비 직후에는 높지 않다가 6월 중

Table 3. Concentrations of TN and TP in irrigation and drainage water.

Years	TN in Irrigation (mg L ⁻¹)				TN in Drainage (mg L ⁻¹)			
	Average	STDEV*	Max	Min	Average	STDEV*	Max	Min
2006 (n=21)	1.63	0.27	2.12	1.14	3.01	1.12	6.36	1.57
2007 (n=20)	1.41	0.43	2.27	0.73	2.63	1.77	7.44	0.64
2008 (n=12)	1.46	0.73	2.94	0.47	2.87	1.60	6.14	1.10
Total (n=53)	1.51	0.47	2.94	0.47	2.81	1.48	7.44	0.64

Years	TP in Irrigation (mg L ⁻¹)				TP in Drainage (mg L ⁻¹)			
	Average	STDEV*	Max	Min	Average	STDEV*	Max	Min
2006 (n=21)	0.10	0.04	0.15	0.02	0.49	0.26	0.99	0.10
2007 (n=20)	0.06	0.03	0.15	0.02	0.36	0.16	0.86	0.18
2008 (n=12)	0.05	0.01	0.07	0.03	0.35	0.15	0.67	0.15
Total (n=53)	0.07	0.04	0.15	0.02	0.41	0.21	0.99	0.10

* STDEV : Standard deviation

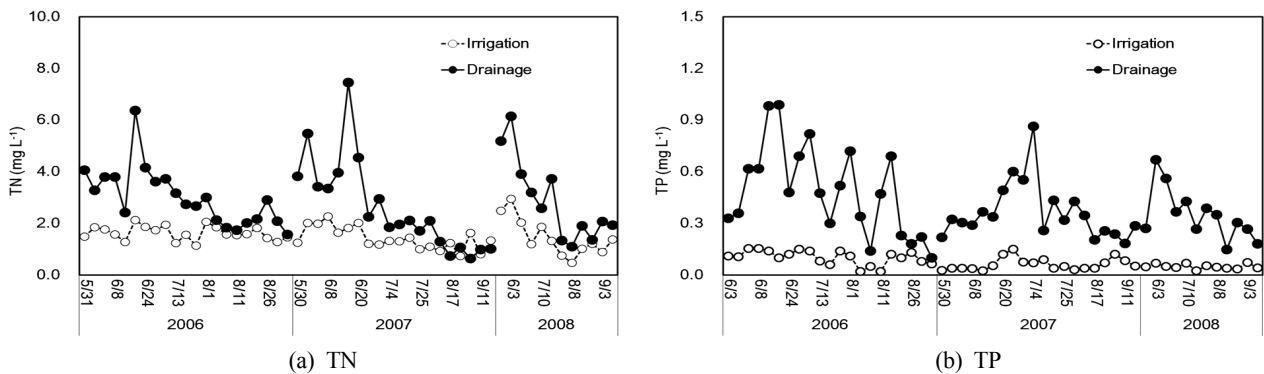


Fig. 4. Change of TN and TP concentration in irrigation and drainage.

순경에 높아지고, 이후 장마기를 거치면서 감소하는 경향은 유사하였다. 그러나 영농기 전반에 걸쳐서 유입수 TP 농도에 비해서 유출수의 TP 농도가 지속적으로 높은 경향을 보였다. Nam et al. (2010)은 계화도 조류지로 유입되는 배수로의 수질 TP 농도를 분석한 결과 관개용수보다 농경배수에서 2.8~5.1배 높게 나타났다고 보고하여 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

강우 시 단지 유출부에서 유출량, 수질 및 부하 변동을 분석하기 위해 2007년 7월 9일 16:00시부터 7월 10일 10:00시까지 내린 112.5 mm 강우에 대하여 2007년 7월 9일 14:00시부터 7월 11일 10:00시까지 2시간 간격으로 수질시료를 채취 후 분석한 결과를 Fig. 5와 같이 도시하였다. 유출량은 강우 직후 급격히 증가하다 7월 10일 0:00시 최고점을 기록하고 이후 감소하였으나 7월 11일 오전 농약 살포를 위해 논물꼬를 개방하면서 다시 포물선을 그리면서 완만하게 증감하는 경향을 보여 주고 있다. 유출수의 pH 경우 강우 초기 약간 증가하다 강우가 지속되면서 다시 감소하면서 이후 값의 큰 변동 없이 일정한 경향을 보였다. 유출수의 EC 경우에도 강우 초기 3~7 dS m^{-1} 의 값을 보이며 상승하였으나 이후 1 dS m^{-1} 이하로 급격히 감소하는 경향을 보였다. TN, TP의 경우도 강우 발생 초기에는 유사한 경향을 보였으나 강우가 종료되고 농작업을 위해 배수가 실시되면서는 TP의 경우 조금씩 증가하는 경향을 보였으며, 농지배수가 완료되어 유출량이 줄어드는 시점에서는 TN의 경우에도 약간 증

가하는 경향을 보였다. 이처럼 강우 시 단지 유출부의 수질은 강우 초기 증가하는 경향을 보였으나 이후 강우가 지속되면서 대체적으로 감소하여 일정하게 유지되다가 일부 성분의 경우 유량 변동에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으나, 대체적으로 유량 변동과 수질과의 상관은 찾을 수 없었으며 이러한 경향은 Han et al. (2005)의 연구 결과와 유사하였다. 결국 강우 시 단지 유출부에서의 유출되는 TN, TP 절대량인 부하의 경우 수질과 유량의 곱으로 계산됨으로 수질 변동에 비해 유량 변동이 큰 특성상 유량 변화와 유사한 증감 경향을 보였다.

단지 유출부에서의 TN, TP 유출부하는 수질 농도와 유량의 곱으로써 유출되는 TN, TP의 총량을 의미한다. 강우 시 유출 부하량 산정을 위해 2006~2008년까지 5회 강우사상에 대하여 2시간 간격으로 수질시료를 채취하였는데, TN의 경우 비료 시용시기를 고려하여 6월 초순과 중순, 7월 중순을 시비기로 하고, TP의 경우 6월 논물과 유출수의 수질 농도가 높아 이 기간을 시비기로 정하여 L-Q 식을 산정하였다(Fig. 6, Table 4). 비강우시와 강우 시 산정된 TN, TP 부하량의 합은 Table 5와 같았다. 논 단지의 TN, TP 유출부하는 영농방법, 강우특성, 관개방법, 관개수 수질 및 유역 토지이용 현황 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다 (Shin and Kwun, 1990; Cheon et al., 2005; Han et al., 2005; Kim et al. 2005; Yoon et al., 2003). 따라서, 본 연구의 결과를 다른 연구의 결과와 직접적으로 항목 간 비교하는 것은 어

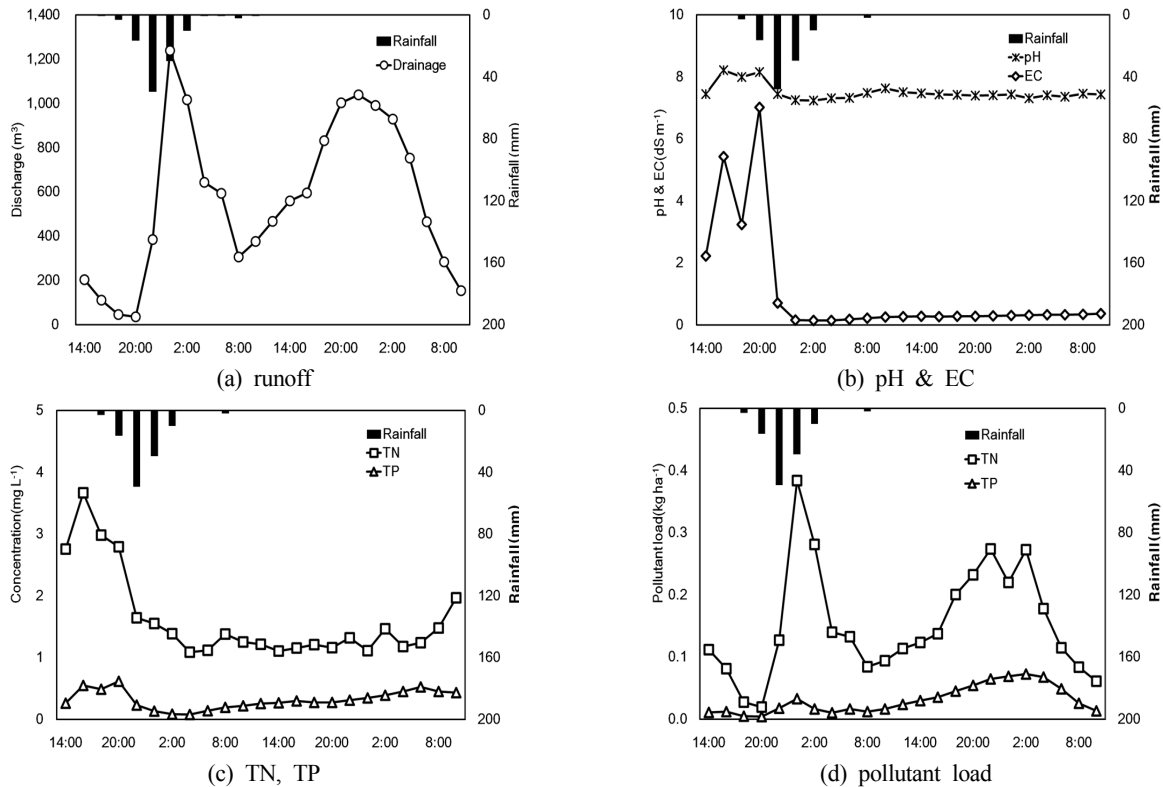


Fig. 5. Change of runoff, water quality(pH, EC, TN, TP) and pollutant load in storm event.

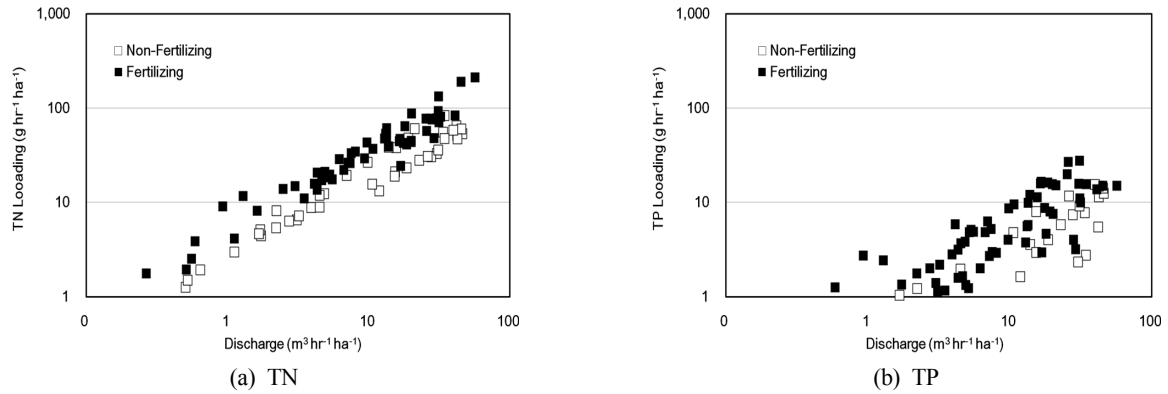


Fig. 6. Relationship between discharge and load in the storm events.

Table 4. Coefficients of the $L=aQ^b$ (Unit : $L : g \text{ hr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, $Q : m^3 \text{ hr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$).

Periods		Fertilizing	Non-Fertilizing
TN	No. of strom events	3	2
	No. of samples	54	42
	a	5.31	2.91
	b	0.81	0.81
	r^2	0.93	0.94
TP	No. of strom events	4	1
	No. of samples	70	23
	a	0.74	0.61
	b	0.84	0.72
	r^2	0.78	0.71

Table 5. Comparison of TN and TP effluent loads in paddy fields.

Study	Area (ha)	Year	Fertilizer (N-P ₂ O ₅ , kg 10a ⁻¹)	TN load (kg ha ⁻¹)	TP load (kg ha ⁻¹)	TN load / TP load
Yoon et al. (2002)	95	1999	13.4-2.9	57.8	2.33	24.8
		2000	14.0-3.1	54.7	1.96	27.9
Oh et al. (2002)	41.9	1998	16.4-2.1	99.3	3.50	28.4
		2000	18.0-2.4	107.4	2.98	36.0
This study	5.0	2006	11.0-5.1	23.32	5.43	4.3
		2007	11.0-5.1	42.09	8.33	5.1
		2008	11.0-5.1	13.90	1.74	8.0

려움이 있다. 그러나 논 단지 유출부에서 동일한 조건으로 측정되는 TN, TP 부하의 경우 그 비율을 상대적으로 비교해 볼 수 있다. 계화도 간척 논인 경우 질소 비료 사용이 타 연구에 비해 1.2~1.6배 적고, 인산 비료가 1.6~2.4배 많아 인산 비료에 대한 질소 비료의 비율이 타 연구에 비해 2.1~3.6 배 낮았으나, TP 부하에 대한 TN 부하의 비율이 4.3~8.0으로 타 연구에 비해 4.3~6.2배 더 크게 낮은 것으로 나타나 상대적으로 TP의 유출이 컸던 것으로 판단된다.

논 담수 중 TN, TP 농도 변화 논 담수 중 TN, TP 농도는 2006년 5월 31일 이양 직후부터 9월 22일까지 총 32회

측정되었다. TN 농도는 0.93 mg L⁻¹에서 58.6 mg L⁻¹의 범위에서 평균 5.53 mg L⁻¹의 값을 보였는데, 기비, 분얼비, 수비 사용 직후 급격한 증가를 보였으나 이후 환수 및 강우 등에 의해 급격히 감소하는 경향을 보였다(Fig. 7). TP의 경우 0.07 mg L⁻¹에서 1.39 mg L⁻¹의 범위에서 평균 0.52 mg L⁻¹의 값을 보였는데, 이양 직후 1.01 mg L⁻¹에서 이후 약간 감소하다 다시 증가하여 6월 14일 측정치를 제외하고 1.0 mg L⁻¹ 이상의 값을 보인 횟수가 8회나 되었다. 7월 이후에는 강우량이 증가하면서 TP의 농도가 급격히 감소하는 경향을 보여 상당량의 인 성분이 단지 외부로 유출되었을 것으로 판단된다. 논물에서 TN 농도가 비료 사용 직후 급격히

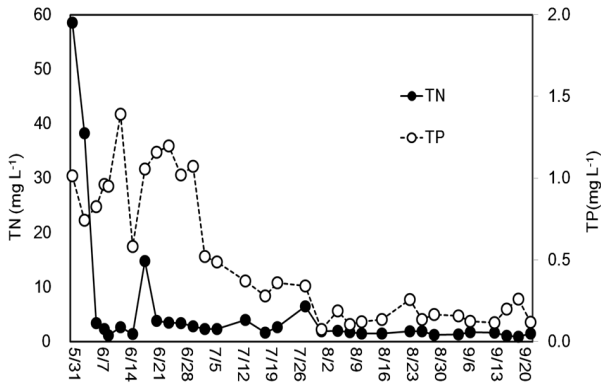


Fig. 7. Changes in TN and TP concentrations in water on reclaimed paddy fields.

증가하다 이후 급격히 감소하는 경향은 기존 연구(Seo et al., 2002; Jeon et al., 2005; Cho et al., 2006)와 유사하였으나, TP의 경우에는 상의한 결과를 보였는데, Seo et al.(2002), Jeon et al.(2005)의 연구에서는 논물 중 TP 농도가 시비 직후 가장 높고 이후 급격히 감소한다고 하였으나, Cho et al.(2006)는 기비 이후 약간 감소하던 TP 농도가 분얼비 시용 시기를 전후하여 다시 상승했다는 결과를 보고하였으며, Kim et al.(2010)은 필지 논에서 산화환원전위(Eh)와 논물 중 TP 농도 변화를 분석한 결과 혐기성 상태 일수록 인의 용출률이 높아졌다고 하였다. 기비 시용 시 인 성분은 논토양 내의 철성분에 의해 많은 양이 Fe(II)-P의 형태로 흡착이나 침전되었다가 (Kirk et al., 1990), 이후 담수 조건하에서 토양의 Eh가 낮아질수록, 토양의 pH가 높을수록 철 이온과 결합되어 있던 인이 분리되어 용해된다고 알려져 있다 (Vepraskas and Faulkner, 2001). 그러나 기존 문헌의 경우 같은 담수 조건임에도 불구하고 논 담수 중의 TP 용해 정도의 차이가 발생하는 원인에 대한 해석은 부족하였다.

세사양토 간척지 논토양의 인산흡착능 평가 계화 간척지 문포동 논토양의 인산 흡착능을 분석한 결과는 Fig. 8과 같았다. 시험 전 문포동 논과 전북동 논의 토양 유효인산 함량은 각각 83 mg kg^{-1} , 108 mg kg^{-1} 으로 25 mg kg^{-1} 의 차이가 났으나, 인산흡착능은 각각 103 mg kg^{-1} , 297 mg kg^{-1} 으로 3배 이상의 차이가 났다. Lee et al. (2011)은 간척지 토양과 논 토양 31점을 대상으로 토양 이화학성분 및 인산흡착능을 분석하고 항목 간 상관관계 및 다중회귀 분석을 수행한 결과, 인산흡착능에 영향을 미치는 토양 이화학성분으로는 점토 함량 ($r=0.80$), 치환성 칼슘 함량 ($r=0.79$), 토양 유기물 함량 ($r=0.78$), 가용성 철 함량 ($r=0.73$) 등이었으며, 각 성분들이 인산흡착능에 미치는 영향력을 상대적으로 비교한 결과 토양 이화학성분들이 인산흡착능에 미치는 영향력의 크기가 점토 함량, 가용성 철 함량, 토양 유기물 함

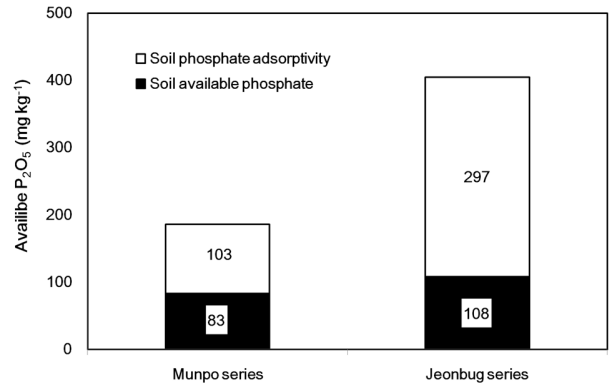


Fig. 8. Comparison of phosphate adsorptivity between Munpo series and Jeonbug series.

량, 치환성 칼슘 함량 순이라고 하였다. 계화 간척지 논토양도 토성이 세사양토로 미사질양토인 전북동 논에 비해 모래의 함량이 많은 반면 점토의 함량이 적고, 토양의 유기물 함량이 적어 인 흡착력이 낮기에 논 담수 중에 인 성분이 쉽게 용출 될 수 있었을 것으로 추정된다. 논물 중의 TP 농도가 분얼기에 다시 증가하는 경향을 보인 Cho et al. (2006)과 Kim et al. (2010)의 연구는 동일한 논에서 수행되었는데 논 토양의 모래 함량이 79.4%, 점토함량이 6.5%인 사질양토이면서 토양 유기물 함량이 0.68~0.82%로 일반 농경지가 2.0% 내외인 것에 비해 크게 낮았기에 토양에 흡착되어 있던 인의 용출이 용이했을 것으로 판단된다.

계화도 간척농지의 경우 간척 후 40년이 경과하여 상당 지역이 숙답화 되었기에 염피해가 없음에도 제염을 위한 흘러대기 관행이 지속되고 있고, 모래가 많은 간척지 토양의 특성으로 인한 양분 유실 우려로 과비하고 있다 (Yoo et al., 2000). 특히, TP의 경우 호소 부영양화의 제한인자로 작용하고 있어 (Kim et al., 2010), 부영양화를 막기 위해서는 인의 유출 저감을 위한 대책이 필요할 것으로 판단된다. 2008년의 경우 강우량이 적어 논에서의 유출량이 줄어들면서 TN, TP의 유출부하도 크게 저감된 것을 확인할 수 있었는데, 제염이 진행된 숙답의 경우 흘러대기가 필요치 않음으로 단지의 수문 및 필지 논물꼬 관리를 통하여 유출을 저감시키기 위한 노력이 있어야 할 것으로 판단된다. 또한, 토양의 염분 및 양분상태를 종합적으로 판단하여 검정시비를 통해 합리적으로 시비량을 줄여나가는 것이 농자재의 효율적 활용 및 하류의 조류지 수질 보전과 개선을 위해서도 필요할 것으로 생각된다.

Conclusion

간척 논에서 비점오염부하 발생 특성을 구명하기 위해 담수호와 인접한 세사양토 간척 논에서 TN, TP 유출 특성, 논물 중 TN, TP 농도 변화 및 토양 인산흡착능을 분석하였다.

그 결과 세사양토 간척 논의 경우 모래 함량이 많고 유기물 함량이 적어 토양의 인산흡착능이 낮기 때문에 논물 중의 TP농도, 단지 유출수 중의 TP 농도 및 부하가 높은 것으로 나타났다. 따라서, 간척농지 하류의 담수호 수질 개선을 위해서는 논토양 특성을 고려한 유출수 저감 및 합리적 시비를 위한 검정시비 정착 등의 노력이 필요할 것으로 판단된다.

References

- 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 J. Environ. Agric.* 18(2):140-147.
- Cho, J.W., J.S. Kim, K.Y. Oh, and S.Y. Oh. 2006. Pollutant concentrations at experimental paddy plots during irrigation season. *J. KSAE.* 48(3):97-106.
- 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 J. Environ. Agric.* 24(1):17-23.
- Hang, S.W., J.G. Kang, K.D. Lee, K.B. Lee, K.H. Park and D.Y. Chung. 2012. Division of soil properties in reclaimed land of the Mangyeong and Dongjin river basin and their agricultural engineering management. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(3): 444-450.
- 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 J. Limnol.* 38(1):118-127.
- Jung, Y.S., J.E. Yang, C.S. Park, Y.G. Kwon, and Y.K. Joo. 1998. Changes of stream water quality and loads of N and P from the agricultural watershed of the Yulmunchon tributary of the Buk-Han river basin. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 31(2):170-176.
- Jung, Y.S., W.H. Lee, J.H. Joo, I.H. Ryu, W.S. Shin, Y. Ahn, S.H. Ryu. 2003. Use of electromagnetic inductance for salinity measurement in reclaimed saline land. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 36(2):57-65.
- Kim, S.S., J.S. Kim, K.Y. Bang, E.M. Gwon, W.J. Chung. 2002. The estimation of the unit load and characteristics of non-point source discharge according to rainfall in Kyongan watershed. *J. KSEE.* 24(11):2019-2027.
- Kim, J.H., J.S. Lee, J.S. Ryu, K.D. Lee, G.B. Jung, W.I. Kim, J.T. Lee, and S.K. Kwun. 2005. Characteristics of Non-point Pollutants Discharge in a Small Agricultural Watershed during Farming Season. *Korean J. Environ. Agric.* 24(2):77-82.
- 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 J. Soil Sci. Fert.* 38(3):164-171.
- Kim, Y.H., J.S. Kim, and H. Jang. 2010. Variation of phosphorus concentration and redox potential in a paddy field plot during growing season. *J. KSAE.* 52(5):47-52.
- Kirk, G.J.D., T.R. Yu and F.A. Choudhury. 1990. Phosphorus chemistry in relation to water regime. In: *Phosphorus Requirements for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania*. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. 211-223.
- Kwun, S.K. 1998. Management improvement and perspective on nonpoint sources of water pollution in Korea. *J. KSEE.* 20(11):1497-1510.
- Lee, H.D., J.H. Ahn, C.H. Bae, and W.J. Kim. 2001. Estimation of the unit loading and total loading of nonpoint source in Paldang watershed by runoff loading during the rainfall. *J. KSWQ.* 17(3):313-326.
- Lee, K.D. J.G. Kang, J.H. Jung, J.H. Ryu, H.S. Ko, S.H. Im, S.W. Hwang and K.B. Lee. 2011. Analysis of multiple regression on soil physicochemical properties and P sorption in reclaimed land. *KSSSF autumn conference (Abstract)*.
- Nam, G.S., S.K. Hwang, D.B. Hong. 2010. Water quality property and measure of improvement for Gyeheha reservoir neighboring in the Saemangeum. *KCID J.* 17(1):4-15.
- Oh, S.Y., J.S. Kim, K.S. Kim, S.J. Kim, and C.G. Yoon. 2002. Unit loads of pollutants in a paddy fields area with large-scaled plots during irrigation seasons. *J. KSAE.* 44(2):136-147.
- Pierynski, G.M. 2000. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. *Southern Cooperative Series Bulletin No. #396*, North Carolina State University, USA.
- Seo, C.S., S.W. Park, S.J. Im, K.S. Yoon, S.M. Kim, and M.S. Kang. 2002. Development of CREAMS-PADDY model for simulating pollutants from irrigated paddies. *J. KSAE.* 44(3): 146-156.
- Shin, D.S. and S.K. Kwun. 1990. The concentration and input/output of nitrogen and phosphorus in paddy fields. *Korean J. Environ. Agric.* 9(2):133-141.
- Shin, E.S., J.Y. Choi, and D.H. Lee. 2001. Estimation of non-point source pollutant unit-loads in surface runoff considering land-use and basin characteristics. *J. KSWQ.* 17(2):137-146.
- Vepraskas, M.J. and S.P. Faulkner. 2001. Redox chemistry of hydric soils, ed. *Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification*, CRC Press LLC. 85-105.
- Yoo, C.H., C.H. Yang, T.K. Kim, J.H. Ryu, J.H. Jung, S.W. Kang, J.D. Kim and K.Y. Jung. 2007. Physico-chemical properties of paddy soil and actual farming conditions in Gyeheha reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(2):109-113.
- Yoon, K.S., S.M. Choi, H.M. Yang, K.H. Han, and K.S. Han. 2001. Prediction of the pollutant loading into estuary lake according to non-cultivation and cultivation conditions of reclaimed tidal land. *J. Kor. Soc. Rural Plan.* 7(1):22-36.
- Yoon, K.S., K.H. Han, J.Y. Cho, C.H. Choi, J.G. Son, and J.K. Choi. 2002. Water and nutrient balance of paddy field irrigated from a pumping station during cropping period. *J. Kor. Soc. Rural Plan.* 8(1):3-14.
- Yoon, C.G., H.S. Hwang, J.H. Jeon, and J.H. Ham. 2003. Analysis of nutrients balance during paddy rice cultivation. *Korean J. Limnol.* 36(1):66-73.