

Research Article

Open Access

영농방법에 따른 논에서의 배출부하량 모의

송정현,¹ 강문성,^{2*} 송인홍,³ 장정렬⁴

¹서울대학교 생태조경·지역시스템공학부, ²서울대학교 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원,
³서울대학교 농업생명과학연구원, ⁴한국농어촌공사 농어촌연구원

Comparing Farming Methods in Pollutant runoff loads from Paddy Fields using the CREAMS-PADDY Model

Jung-Hun Song,¹ Moon-Seong Kang,^{2*} In-Hong Song,³ and Jeong-Ryeol Jang⁴ (¹Department of Landscape Architecture and Rural systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea, ²Department of Landscape Architecture and Rural systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea, ³Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea, ⁴Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan, Gyeonggi 426-908, Korea)

Received: 16 October 2012 / Revised: 24 October 2012 / Accepted: 17 November 2012

© 2012 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: For Non-Point Source(NPS) loads reduction, pollutant loads need to be quantified for major farming methods. The objective of this study was to evaluate impacts of farming methods on NPS pollutant loads from a paddy rice field during the growing season.

METHODS AND RESULTS: The height of drainage outlet, amount of fertilizer, irrigation water quality were considered as farming factors for scenarios development. The control was derived from conventional farming methods and four different scenarios were developed based combination of farming factors. A field scale model, CREAMS-PADDY(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems for PADDY), was used to calculate pollutant nutrient loads. The data collected from an experimental plot located downstream of the Idong

reservoir were used for model calibration and validation. The simulation results agreed well with observed values during the calibration and validation periods. The calibrated model was used to evaluate farming scenarios in terms of NPS loads. Pollutant loads for T-N, T-P were reduced by 5 ~ 62%, 8 ~ 37% with increasing the height of drainage outlet from 100 mm of 100 mm, respectively. When amount of fertilizer was changed from standard to conventional, T-N, T-P pollutant loads were reduced by 0 ~ 22%, 0 ~ 24%. Irrigation water quality below water criteria IV of reservoir increased T-N of 9 ~ 65%, T-P of 9 ~ 47% in comparison with conventional.

CONCLUSION(S): The results indicated that applying increased the height of drainage after midsummer drainage, standard fertilization level during non-rainy seasons, irrigation water quality below water criteria IV of reservoir were effective farming methods to reduce NPS pollutant loads from paddy in Korea.

Key Words: CREAMS-PADDY, Farming method, Paddy, Pollutant loads, Water quality

*교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-2-880-4582; Fax: +82-2-873-2087;
E-mail: mskang@snu.ac.kr

서 론

2006년 기준 하수도 보급률이 85.5%에 이르러 기존의 점오염원 관리로 인한 수질 개선 효과가 한계에 도달함에 따라 (환경부 연구보고서, 2008), 하천, 호소 등의 수질 개선을 위해서는 비점오염원의 과학적 정량화와 그에 따른 관리방안 수립이 시급하다(Kang, 2010).

비점오염원의 주요 요인은 도로, 대지, 농촌의 토지계 등 주로 토지이용에 기반하는 오염원이 대부분을 차지하며, 이들은 전체 수체 유입 오염부하의 약 30%에 해당하고 그 기여율 또한 지속적인 증가 추세에 있다. 특히, 논은 농업용수의 80% 이상이 사용되는 만큼 수계에 직접적으로 미칠 수 있는 영향이 크다.

논은 지역이나 토양, 기후 특성, 오염원 종류, 관개 및 시비 등의 경작방법에 따라 배출 양상이 다양하며, 비점오염원 관리를 위해서는 농경지내 발생원 관리가 가장 효과적으로 알려져 있으며, 특히, 시비 효율 향상, 효율적인 물관리 등 다양한 영농방법 개선을 통한 비점오염원 발생 저감 방안 개발이 요구되고 있다(Kang, 2010).

비점오염의 주원인은 강수에 의한 유출이기 때문에 배출부하량은 강우량에 따라 변동이 크다. 따라서 영농방법에 따른 배출부하량 저감효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 강우량의 변동에 따른 영향을 장기적으로 고려해야 한다. 특히 담수논의 경우 강우량에 따른 관개량의 변화에 민감하므로 이를 고려해야 한다.

한편, 논에서의 영농방법 개선에 관한 연구는 쌀의 품질을 향상시키기 위하여 비료 중 가장 많은 성분을 차지하는 질소의 시비 조건에 따른 수확량 변화에 관한 연구(Mills and Benton, 1979; Kang *et al.*, 1997; Kang *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2009), 물관리에 따른 벼의 생육 및 수문, 수질에 미치는 영향에 관한 연구(Mishra *et al.*, 1998; Yoon *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2004) 등이 이루어지고 있지만 영농인자를 종합적으로 고려하여 배출부하량 저감효과를 평가한 연구는 미흡한 실정이다.

배출부하량을 정량적으로 산정하기 위해서는 장기적인 모니터링이 가장 정확하다. 하지만 영농방법 개선에 따른 논에서의 배출부하량 저감 효과를 평가하기 위해서는 시험포장을 운영하여 장기간의 실측자료가 뒷받침되어야 한다는 어려움이 있다. 따라서 국내외에서 모니터링 방법의 시간적, 경제적 한계를 극복하기 위하여 비점오염모형을 이용한 배출부하량 해석을 시도하고 있다.

국외의 경우 물질순환 기작을 모형화한 CREAMS(Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management Systems), GLEAMS(Groundwater Loadings Effects of Agricultural Management Systems)와 같은 포장단위모형(Field scale model)을 개발하여 배출부하량을 추정하였다. 하지만, 국외의 포장단위모형은 밭을 대상으로 개발되었기 때

문에 논에 대한 담수상태를 고려한 유출 및 영양물질의 거동을 모의하기에는 한계가 있다.

담수 논에서의 배출부하량을 모의할 수 있는 비점오염모형은 국내를 중심으로 개발되기 시작하였다. Jeon 등(2004)은 논에서의 시비와 바닥에서의 용출을 Dirac delta function과 Continuous source function을 이용하여 배출부하량을 모의하는 PADDIMOD모형을 개발하여 지하수관개논과 지표수관개논에 대하여 적용성을 평가하였다. Chin 등(2002)과 Seo 등(2002)은 CREAMS 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화에 대처할 수 있도록 개선하여, 또한 담수 환원 조건에 맞는 영양물질 반응식을 개선하여 CREAMS-PADDY (Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management Systems for Paddy) 모형을 개발하여 지표수관개논에 대하여 적용성을 평가하였고, Seong 등(2011)은 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논에서의 수질 변화를 모의하여 배출부하량 저감 효과를 평가한 바 있다.

본 연구는 담수논을 대상으로 영농방법에 따른 배출부하량 영향을 평가하기 위하여, 배출부하량 저감을 위한 영농관리 시나리오를 구성하였고, 과거 배출부하량 모의가 가능하도록 CREAMS-PADDY 모형과 HOMWRS 모형을 연계 모의하여 시나리오별 비점부하를 비교하고 평가하였다.

재료 및 방법

영농관리 시나리오 구성

본 연구에서는 논에서의 영농방법에 따른 배출부하량 저감효과를 평가하기 위하여 물관리 인자로 물꼬 높이, 논물의 농도와 관련된 인자로 시비량과 관개수의 수질의 변화에 따라 시나리오를 구성하였다. Table 1은 본 연구에서 설정한 영농관리 시나리오를 나타내고 있다.

대조군

시나리오에 따른 배출부하량의 변화를 비교하기 위하여 대조군을 구성하였다. 대조군은 시험포장의 실측치 및 영농기작을 반영하여 물꼬높이를 100 mm로 선정하였고, 시비량은 T-N 181 kg/ha, T-P 56 kg/ha를 시비하는 것으로 구성하였다. 대조군의 관개수의 수질은 실측치의 평균인 T-N 1.0 mg/L, T-P 0.04 mg/L로 관개하는 것으로 구성하였다. 이는 호소수 수질환경기준인 4등급 농업용수의 기준인 T-N 1.0 mg/L, T-P 0.1 mg/L 이하를 만족하는 수준이다.

대조군과 모든 시나리오에 대해 관개량은 담수심이 40 mm로 내려가는 경우 관개가 시작되어 담수심 40 mm까지 관개되는 것으로 구성하였으며, 6월 5일에 중간낙수가 이루어지고 6월 8일에 재관개가 되도록 하였다. 시비시기는 시험포장의 관행농업을 반영하여 기비는 5월 20일에, 추비는 7월 31일, 분얼비는 생략되어 시비되는 것으로 구성하였다.

Table 1. Farming methods Scenarios in this study

Item	The height of drainage outlet	Amount of fertilizer	Irrigation Water Quality
Control	Before MD* : 100 mm After M.D : 100 mm	T-N : 181 kg/ha T-P : 56 kg/ha	T-N : 1.0 mg/L T-P : 0.04 mg/L
Scenario I	Before MD : 100 mm After MD : 150 mm	T-N : 181 kg/ha T-P : 56 kg/ha	T-N : 1.0 mg/L T-P : 0.04 mg/L
Scenario II	Before MD : 100 mm After MD : 200 mm	T-N : 181 kg/ha T-P : 56 kg/ha	T-N : 1.0 mg/L T-P : 0.04 mg/L
Scenario III	Before MD : 100 mm After M.D : 100 mm	T-N : 90 kg/ha T-P : 45 kg/ha	T-N : 1.0 mg/L T-P : 0.04 mg/L
Scenario IV	Before MD : 100 mm After MD : 100 mm	T-N : 181 kg/ha T-P : 56 kg/ha	T-N : 4.7 mg/L T-P : 0.12 mg/L

* M.D stands for Midsummer Drainage

물꼬높이 시나리오

Mishra 등(1998)에 따르면 물꼬 높이를 300 mm까지 높여도 벼의 수확량 및 품질이 저하되지 않는 것으로 보고하고 있으며, 물꼬높이 증가에 따라 최대 99.5%의 강우를 저류할 수 있는 것으로 나타내고 있다. 본 연구에서는 물꼬높이 증가에 따라 강우 저류에 따른 배출부하량 저감 효과를 비교하고자 하였다. 중간낙수 이전에는 관행 물꼬 높이인 100 mm를 유지하여 중간낙수(Midsummer drainage)시 강제배수량이 크지 않도록 하였고, 중간낙수 이후 150 mm로 유지하여 관리하는 경우(Scenario I), 중간낙수 이후 200 mm로 유지하여 관리하는 경우(Scenario II)로 구분하였다.

시비량 시나리오

정부에서는 고품질 쌀 생산을 위해 표준시비량을 질소 기준 110 kg/ha에서 90 kg/ha로 감축하는 안을 채택한 바 있으나(농촌진흥청 연구보고서, 2001), 아직도 일부 농민들은 소출을 많이 내기 위하여 200 kg/ha 대의 질소질 비료를 주고 있다(Kim *et al.*, 2009). 본 연구에서는 시비량 감소에 따른 배출부하량의 변화를 고찰하기 위하여 감소된 표준시비량인 T-N 90 kg/ha, T-P 45 kg/ha를 시비하는 경우(Scenario III)를 구성하여 모의하였고 그 결과를 대조군과 비교하였다.

관개수 수질 시나리오

관개수 수질에 따른 배출부하량의 변화를 고찰하기 위하여, 시험포장의 상류에 위치한 이동저수지의 영농기 수질을 환경부 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 수집하였으며, 최근 10년간 수질 평균에서 표준편차만큼 높은 수준인 T-N 4.7 mg/L, T-P 0.12 mg/L으로 관개되는 경우(Scenario IV)를 구성하였다. Scenario IV의 관개수 수질은 호소수 수질환경기준인 4등급을 초과하는 수준이다. Jung 등(2011)에 의하면 영양물질 농도가 높은 하수처리수(T-N 7.2 ~ 23.9 mg/L, T-P 0.50 ~ 1.83 mg/L)를 관개하더라도 쌀

의 품질에 문제가 되지 않는 것으로 보고하고 있다.

CREAMS-PADDY 모형과 HOMWRS 모형의 연계 모의

본 연구에서는 논에서의 배출부하량을 추정할 수 있는 모형인 CREAMS-PADDY를 비점오염원 모형으로 선정하였으며, 영농방법별 배출부하량 저감양상이 강우량의 변화에 따라 달라질 것이라 판단하여 1981~2010년의 영농기(5월 1일~9월 20일)에 대해 모의를 하였다. Fig. 1은 본 연구의 흐름을 보여주고 있다. 모의기간의 기상자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 모의기간의 관개량은 HOMWRS(Hydrological Operation Model for Water Resources System)모형의 필요수량 추정치를 CREAMS-PADDY 모형의 입력자료로 이용하도록 구성하였다.

CREAMS-PADDY 모형은 포장단위 농업비점오염 모형으로 CREAMS 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화에 대처할 수 있도록 개선하고 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식을 개선하여 개발한 모형으로 CREAMS 모형의 입력력 형태를 유지하도록 구성되어 있다(Seong *et al.*, 2011). CREAMS-PADDY 모형은 크게 수문부분, 유사운송부분, 영양물질부분으로 구성되어 있으며 지표유출량, 유사량, 총질소(T-N) 및 총인(T-P)의 농도 및 부하량을 구하도록 구성되어 있다. 지표유출량은 강우량, 관개량, 침투량, 물꼬 높이를 입력받아 물수지식에 의하여 추정되고, 유사량은 수정된 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)공식(Wischmeier and Smith, 1978)으로 산정하며, 논물의 농도는 시비량, 강우의 농도, 관개수의 농도, 토양의 초기 영양물질량을 입력받아 영양물질의 이동을 이류-확산 반응식을 변형한 물질수지 식으로 추정하도록 구성되어 있다. 배출부하량은 추정된 지표유출량과 영양물질의 농도를 곱하여 산정하게 된다. CREAMS-PADDY 모형의 세부적인 기작은 Seo 등(2002)의 논문에 자세히 서술되어 있다.

HOMWRS 모형은 한국농어촌공사에서 개발한 모형으로 강우에 의한 유효우량 및 생육기별 재배관리수량을 고려하여 영농방식에 따른 논에서의 필요수량을 산정할 수 있다(Lee, 2011). HOMWRS 모형의 입력변수로 이앙기간 및 시기는 선행연구(한국농어촌공사 연구보고서, 2005)를 참고하여 묘대기는 4월 17일~5월 20일, 이앙기는 5월 15일~5월 24일, 본답기는 5월 25일~9월 11일로 설정하였고, 침투량은 시험포장 실측치의 평균인 1.3 mm/day, 순별 작물계수는 Yoo 등(2006)이 수원지방에 대해 산정한 값을 입력자료로 이용하였다.

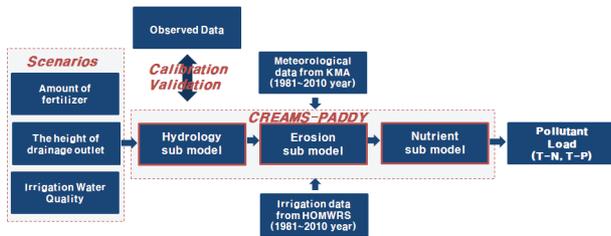


Fig. 1. Conceptual diagram of pollutant load estimation procedure.

포장단위 모니터링

시험포장 및 계측망 구성

본 연구에서는 경기도 평택시 서탄면 진목리에 위치한 이동저수지 관개 논을 연구 대상지로 선정하였다. 시험포장은 용남용수구역 중 토지이용이 논이 우점하고 있는 지역의 논으로, 크기는 30 m 100 m, 토양층은 신흥토(Sh)이다. 본 시험포장은 서울대학교 지역시스템공학과에서 정량적인 물수지 및 물질수지 산정을 위하여 수문 및 수질 모니터링을 시행하고 있으며 관개량, 지표유출량, 담수심 측정을 위한 초음파 수위계(SONDAR Ultrasonic level meter, ISTECHNOLOGIES, Korea) 및 부자식 수위계(Thalimedes, OTT Hydrometrie, Germany), 수질 시료 채취를 위한 자동 채수기(ISCO 6712 Portable Sampler, Telydyne Isco, Inc., USA)가 시험포장에 설치되어 있다. 기상인자 및 강우량 측정을 위한 강우계(HOBO Data Logging Rain Gauge, Dalotech, USA)와 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS)는 포장에서 동쪽으로 약 2 km 떨어진 곳에 설치되어 있다. Fig. 2는 시험포장의 위치 및 설계 모식도를 보여주고 있다.

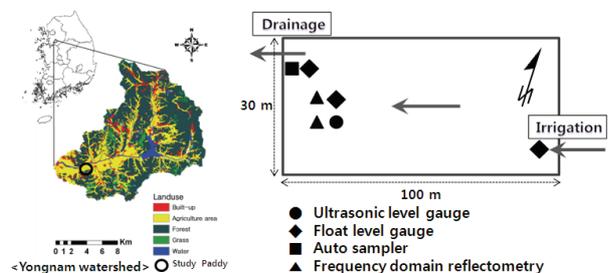


Fig. 2. Location of study area and schematic map of experimental plots including monitoring system.

물수지 분석

CREAMS-PADDY 모형의 지표유출량 입력자료 구축과 보정 및 검증을 위하여 시험포장의 2011~2012년도 영농기(5월 1일~9월 20일)의 물수지를 분석하였다. 물수지 식은 다음 식(1)과 같다.

$$W_t = W_{t-1} + IR_t + PR_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (1)$$

여기서, W_t 는 담수심, W_{t-1} 는 전날 담수심, IR_t 는 관개량, PR_t 는 강우량, INF_t 는 침투량, ET_t 는 증발산량, DR_t 는 지표유출량이다.

물수지 분석을 위하여 관개량, 강우량, 담수심은 10분단위로 측정된 실측치를 이용하였고, 증발산량은 AWS에서 수집한 평균온도, 상대습도, 평균풍속, 일사량과 수원지방의 순별 작물계수(Yoo *et al.*, 2006)를 이용하여 Penmann-Monteith 공식으로 산정하였다. 침투량은 시험포장 실측치와 결측기간에 대해 선행 연구(Hwang *et al.*, 2002; 한국농어촌공사 보고서, 2011)를 참고하여 이용하였다. 지표유출량은 10분단위로 측정된 실측치를 기본으로 이용하고, 결측기간에 대해 물수지 분석결과를 이용하였다.

물질수지 분석

CREAMS-PADDY 모형의 영양물질모형의 입력자료 구축과 모형의 보정 및 검증을 위하여 2011~2012년도 영농기(5월 1일~9월 20일)의 물질수지를 분석하였다. 물질수지 식은 다음 식(2)와 같다.

$$\Delta S = IR_m + PR_m + FER_m - INF_m - PU_m - DR_m \quad (2)$$

여기서, IR_m 는 관개에 의한 부하량, PR_m 는 강우에 의한 부하량, FER_m 는 시비에 의한 부하량, INF_m 은 침투에 의한 부하량, PU_m 은 식물흡수에 의한 부하량, DR_m 은 지표유출에 의한 부하량이다.

물질수지 분석을 위하여 관개수 및 논물의 시료를 2주 1회 단위로 정기 채취하였고, 시비 후 논물 농도 변화를 파악하기 위해 기비 시비 후 논물을 12시간 간격으로 24회 집중 채취하였다. 또한, 강우 시 집중조사를 위하여 자동채수기를 강우계와 연계하여, 15분에 2.54 mm(0.1 inch)이상의 강우 발생시 유출수를 채취하였다. 수질 시료의 분석은 서울대학교 농업과학공동기기센터(National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에 의뢰하였으며 T-N의 분석 방법은 Kjeldahl method, T-P의 분석방법은 ICP-Atomic Emission Spectroscopy이다.

결과 및 고찰

포장단위 모니터링 분석 결과

시험포장의 2011~2012년도 영농기 물수지 분석결과를 나타내면 Table 2와 같고, 물질수지 분석결과를 나타내면

Table 3, Table 4와 같다. 물수지 분석 결과 강우량은 7, 8월에(2011년 951.2 mm, 2012년 998.5 mm)로 집중되어 나타났다. 관개량은 영농초기인 5월(2011년 216.0 mm, 2012년 242.3 mm), 6월(2011년 148.0 mm, 2012년 220.8 mm)에 집중되어 나타났다. 지표유출량은 관개가 영농초기에 과다하게 이루어져 5월에 2011년 207.3 mm, 2012년 220.7 mm로 나타났고, 집중강우 기간인 7월에 2011년 391.0 mm, 2012년 358.4 mm, 8월에 2011년 323.6 mm, 2012년 391.8 mm로 나타났다. 증발산량은 2011년 598.9 mm, 2012년 662.7 mm, 침투량은 2011년 111.5 mm, 2012년 128.4 mm로 나타났다.

수질 분석 결과 관개수는 T-N 0.3~2.0 mg/L, T-P 0.01~0.04 mg/L로 나타났고, 강우는 T-N 0.9 mg/L, T-P 0.04 mg/L, 유출수는 T-N 0.5~20.3 mg/L, T-P 0.03~0.70 mg/L로 나타났다.

물질수지 분석 결과 시험포장으로 유입되는 부하량은 강우에 의해 T-N은 2011년 13.24 kg/ha, 2012년 12.9 kg/ha, T-P는 2011년 0.50 kg/ha, 2012년 0.54 kg/ha, 관개에 의해 T-N은 2011년 7.53 kg/ha, 2012년 9.03 kg/ha, T-P는 2011년 0.38 kg/ha, 2012년 0.69 kg/ha, 시비에 의해 T-N 2011년 181.00 kg/ha, 2012년 153.0 kg/ha, T-P는 2011년 56.00 kg/ha, 2012년 87.00 kg/ha로 나타났다. 시험포장에서 지표유출로 배출되는 부하량은 T-N은 2011년 30.77 kg/ha, 2012년 27.98 kg/ha, T-P의 경우 2011년 1.67 kg/ha 2012년 1.89 kg/ha로 나타났다. 2012년이 2011년에 비해 T-N 배출부하량이 감소하고 T-P 배출부하량이 증가한 것은 2012년에 T-N은 시비량이 감소하였고, T-P는 시비량이 증가하였기 때문으로 사료된다.

Table 2. Water balance of the study paddy field

Item	Month	Rain. (mm)	Irri. (mm)	Runoff (mm)	Evapo. (mm)	Infilt. (mm)
2011	May.	108.8	216.0	207.3	52.8	50.1
	Jun.	291.8	148.0	294.2	145.4	32.7
	Jul.	644.2	12.0	391.0	146.8	17.6
	Aug.	307.0	139.0	323.6	168.6	8.9
	Sep.	39.4	23.0	15.9	85.4	2.1
	Sum	1391.2	538.0	1232.1	598.9	111.5
2012	May.	16.5	242.3	220.7	26.2	50.1
	Jun.	100.8	220.8	278.4	182.2	32.7
	Jul.	572.3	65.5	358.4	168.4	22.5
	Aug.	426.2	159.0	391.8	212.6	15.1
	Sep.	239.0	7.0	102.5	73.3	8.0
	Sum	1354.8	694.7	1351.9	662.7	128.4

Table 3. Mass balance of the study paddy field(T-N)

Item	Month	Rain. (kg/ha)	Irri. (kg/ha)	Ferti. (kg/ha)	Runoff (kg/ha)	Infilt. (kg/ha)
2011	May.	1.04	0.90	168.00	13.37	3.41
	Jun.	2.78	3.31	0.00	8.55	1.42
	Jul.	6.13	0.27	0.00	5.83	0.26
	Aug.	2.92	2.60	13.00	2.70	0.09
	Sep.	0.38	0.46	0.00	0.32	0.03
	Sum	13.24	7.53	181.00	30.77	5.21
2012	May.	0.16	3.15	140.00	14.63	3.67
	Jun.	0.96	2.87		7.93	0.21
	Jul.	5.45	0.85		0.41	0.05
	Aug.	4.06	2.07	13.00	4.32	0.21
	Sep.	2.28	0.09		0.68	0.05
	Sum	12.90	9.03	153.00	27.98	4.19

Table 4. Mass balance of the study paddy field(T-P)

Item	Month	Rain. (kg/ha)	Irri. (kg/ha)	Ferti. (kg/ha)	Runoff (kg/ha)	Infilt. (kg/ha)
2011	May.	0.04	0.08	56.00	0.66	0.16
	Jun.	0.11	0.17		0.45	0.10
	Jul.	0.23	0.02		0.40	0.02
	Aug.	0.11	0.10		0.12	0.00
	Sep.	0.01	0.01		0.04	0.00
	Sum	0.50	0.38	56.00	1.67	0.28
2012	May.	0.01	0.24	87.00	0.83	0.21
	Jun.	0.04	0.22		0.47	0.02
	Jul.	0.23	0.07		0.43	0.03
	Aug.	0.17	0.16		0.11	0.01
	Sep.	0.10	0.01		0.06	0.00
	Sum	0.54	0.69	87.00	1.89	0.27

한편, 논에서의 배출부하량 선행연구를 살펴보면 Jeon 등 (2003)은 지하수 관개논에 대해 유출량 593.2 mm일 때 T-N 27.45 kg/ha, T-P 1.19 kg/ha, 유출량 1036.2 mm일 때 T-N 33.21 kg/ha, T-P 1.25 kg/ha, 진안군의 지표수 관개 포장논에 대해 유출량 602.0 mm인 경우 T-N 39.7 kg/ha, T-P 0.84 kg/ha, 유출량 701.3 mm인 경우 T-N 19.84 kg/ha, T-P 0.67 kg/ha으로 보고하였으며, Han (2011)은 곡간지 유역의 단일 필지 논에서 유출량 883.5 mm인 경우 T-N 34.4 kg/ha, T-P 1.0 kg/ha이 발생한다고 하였으며, Choi 등(2012)은 우분 퇴비를 시용한 논에 대해 유출량 400.0 mm인 경우 T-N 15.7 kg/ha, T-P 0.4 kg/ha로 화학비료를 사용하지 않아 배출부하량이 작게 발생하였다고 보고하는 등 지역적인 특성과 영농기작의 차이로 배출부하량이 다르게 발생하는 것으로 보고되고 있다.

CREAMS-PADDY 모형의 보정 및 검정

CREAMS-PADDY 모형의 보정 및 검정을 위해 시험지구의 2011~2012년 물수지 분석 및 물질수지 분석 결과 자료를 이용하여 지표유출량과 논물의 T-N, T-P를 단순시행착오법을 이용하여 보정하였다. 보정 및 검정에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상대평균절대오차(Relative Mean Absolute Error, RMAE), Nash-Sutcliffe 효율지수(Efficiency Index, EI)(Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수(R^2) 등의 통계적인 변량을 사용하였다(David and Gregory, 1999).

Fig. 3은 자료 보정(2011) 및 검정(2012)기간에 대한 지표 유출량의 모의결과를 실측치와 비교하여 보여주고 있다. 물꼬 높이는 100 mm를 유지하다가 중간낙수 시기에 물꼬 높이를 0 mm로 하여 강제배수가 이루어지도록 구성하였으며, 재관개가 이루어지면서 물꼬 높이를 100 mm로 유지하도록 하였다. 모형의 지표유출량 보정 결과 RMSE는 6.48 mm, RMAE는 0.18 mm/day, EI는 0.81, R^2 는 0.97로 나타났으며, 검정

결과 RMSE는 11.12 mm, RMAE는 0.33 mm/day, EI는 0.65, R^2 는 0.95로 나타났다.

Fig. 4, Fig 5는 각각 논물의 T-N, T-P의 자료 보정(2011) 및 검정(2012)기간에 대한 모의결과를 실측치와 비교하여 보여주고 있으며, Table 5는 보정 및 검정에 사용된 매개변수를 보여주고 있다. 논물의 T-N, T-P 실측치는 시비 후 농도가 급속히 감소하는 것으로 나타나는데, 이를 반영하여 모형의 매개변수를 조정하였다. 논물의 T-N 보정 결과 RMSE는 1.19 mg/L, RMAE는 0.26 mg/L, EI는 0.95, R^2 는 0.95의 값을 보였으며, 검정 결과 RMSE는 1.99 mg/L, RMAE는 0.37 mg/L, EI는 0.91, R^2 는 0.97의 값으로 나타났다. T-P 보정 결과 RMSE는 0.10 mg/L, RMAE는 0.33 mg/L, EI는 0.73, R^2 는 0.84로 나타났으며, 검정 결과 RMSE는 0.10 mg/L, RMAE는 0.30 mg/L, EI는 0.84, R^2 는 0.85로 나타났다.

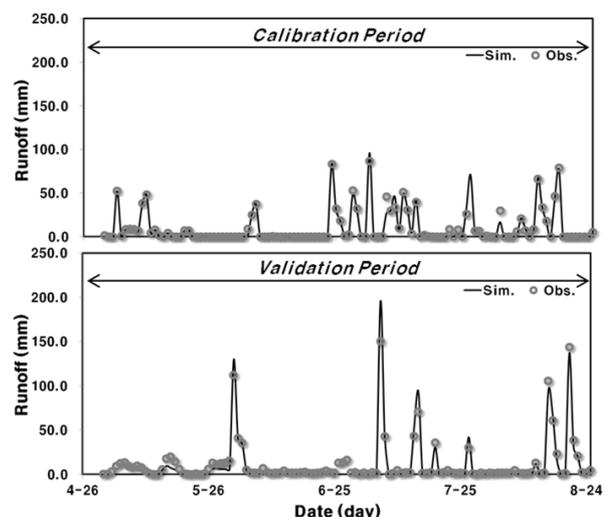


Fig. 3. Observed and simulated daily runoff for the calibration and validation periods(2011~2012).

Table 5. Calibrated used Parameter values used for the CREAMS-PADDY simulation

Parameters	CKND	CKNDP	CKAD	CKR	GAMMA
Value	0.055	0.01	0.00128	90000	0.08

* CKND means nitrogen immobilization coefficient
 CKNDP means phosphorus immobilization coefficient
 CKAD means adsorption equilibrium coefficient
 CKR means plant uptake coefficient
 GAMMA means correction for temperature coefficient

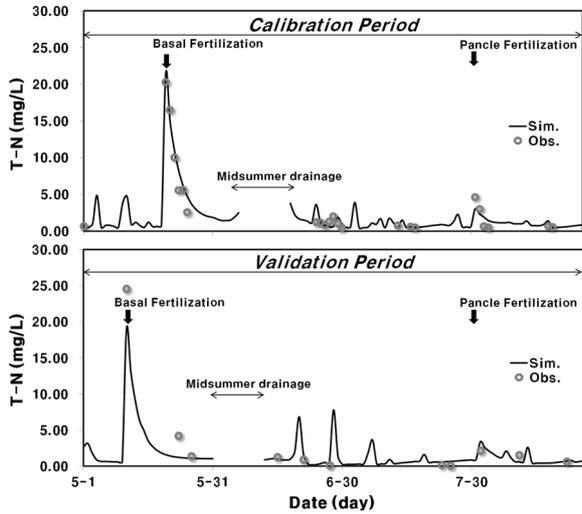


Fig. 4. Observed and simulated daily T-N concentration for the calibration and validation periods(2011~2012).

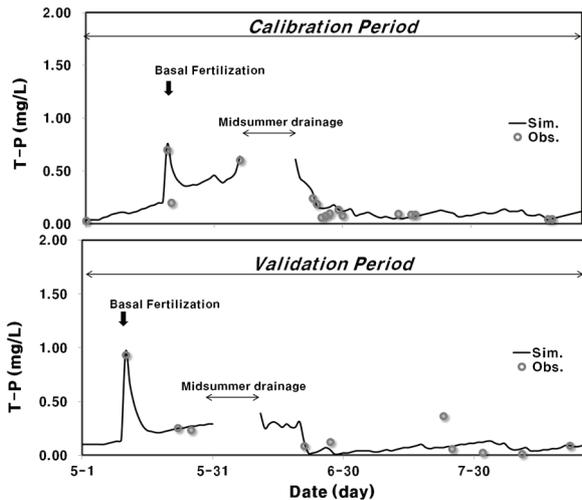


Fig. 5. Observed and simulated daily T-P concentration for the calibration and validation periods(2011~2012).

영농방법에 따른 배출부하량 저감효과 분석

본 연구에서는 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 물꼬 높이, 시비량, 관개수 수질에 따른 배출부하량 영향을 1981~2010년의 영농기에 대해 추정하였고 정량적으로 비교하였다. Fig. 6과 7은 T-N 및 T-P의 모의 결과를 통계적으로 도시하

여 보여주고 있다. 관행농업을 반영한 대조군의 경우 배출부하량이 최대 T-N 41.31 kg/ha, T-P 1.58 kg/ha, 최소 T-N 4.42 kg/ha, T-P 0.60 kg/ha, 평균 T-N 17.62 kg/ha, T-P 0.91 kg/ha로 강우량의 변화에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다.

물꼬 높이를 중간낙수 이전에 100 mm를 유지하다 중간낙수 이후 150 mm로 유지하는 경우(Scenario I) 30년 평균 배출부하량은 T-N 16.19 kg/ha, T-P 0.80 kg/ha로 나타났으며 대조군과 연도별 배출부하량을 비교하면 T-N 1~34%, T-P 5~21% 감소하는 것으로 나타났다. 중간낙수 이후 물꼬 높이를 200 mm로 유지하는 경우(Scenario II) 30년 평균 배출부하량은 T-N 14.73 kg/ha, T-P 0.70 kg/ha로 나타났으며 대조군과 연도별 배출부하량을 비교하면 T-N 5~62%, T-P 8~37% 감소하는 것으로 나타났다. 배출부하량의 저감 원인은 지표유출량과 논물 농도의 감소 때문인 것으로 사료된다. 물꼬 높이가 50.0 mm 상승할 경우 지표유출량은 평균 50.0 mm 감소하였으며, 유효유량 증가에 따라 관개량이 평균 86.6 mm 감소하는 것으로 나타났으며, 물꼬 높이 100 mm 상승 시 지표유출량이 평균 100.0 mm 감소하였으며, 관개량이 평균 130.4 mm 감소하는 것으로 나타났다. 이와 더불어 강우 농도는 논물 농도에 비해 비교적 낮기 때문에 유효유량이 증가하면 논물의 희석효과가 증가하여 중간낙수 이후의 물꼬 높이 50 mm 증가시 논물 농도가 평균 T-N 5.1%, T-P 4.7% 감소하였으며, 100 mm 증가시 평균 T-N 12.6%, T-P 11.7% 감소하는 것으로 나타났다. 한편, Sohn과 Chung(2002)에 의하면 담수심 20 mm, 40 mm 및 100 mm에서 벼 수확량에는 큰 차이가 없는 것으로 보고 하고 있으며, Won 등(1997)에 의하면 관행관개, 절수관개, 최대담수심을 200 mm로 구성한 심수관개의 수확량을 비교한 결과 심수관개에서 수확량이 가장 높은 것으로 보고하고 있으며, Auburnozhi 등(1998)에 의하면 담수심 9 cm에서 벼의 초장 및 수확량이 최대이며 심수관개보다 절수관개가 벼의 생존에 있어 더 유리한 것으로 보고하는 등 연구자들에 따라 최대담수심의 높이가 벼의 생육에 미치는 영향에 관한 연구 결과는 상이하다. 따라서 현장 적용 이전 물꼬 높이가 상승함에 따라 최대담수심이 벼의 생육과 병충해 발생 등에 미치는 영향에 관하여 고려되어야 할 것으로 사료된다.

표준시비량으로 시비량을 삭감하여 시비한 경우(Scenario III) 30년 평균 배출부하량은 T-N 17.45 kg/ha, T-P 0.89 kg/ha로 나타났으며 대조군과 연도별 배출부하량을 비교하면 T-N 0~16%, T-P는 0~9% 저감되는 것으로 나타났다. 시비량의 배출부하량 저감양상은 시비 직후의 강우의 발생유무에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 시비 직후 논물 농도가 상대적으로 높은 시점에 강우가 발생할 경우 시비량 삭감에 따라 배출부하량이 감소되어 나타났으나(30년 중 7회), 일정 농도로 평형을 이룬 시점에 강우가 발생할 경우 배출부하량 저감효과는 미비한 것으로 나타났다(30년 중 23회). 따라서 강우가 발생하는 시기를 피해 비료를 시비하면 배출부하량 저감에 효과적이라고 사료된다. 한편, 우리나라는

2013년까지 2003년 대비 화학비료와 농약 사용량을 40% 줄인다는 계획 하에 친환경농업 육성시책을 펴고 있으며(농촌진흥청 연구보고서, 2004), 농경지 양분관리는 생산성 향상을 위한 비옥도관리에서 양분불균형 해소와 집적된 양분관리 및 2차 오염을 예방에 초점을 맞추는 추세로 변하고 있다(Cho *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2012). 따라서 시비량 감소는 하천으로 유출되는 배출부하량 저감 측면에서 미비하더라도 토양 환경적 측면에서 중요한 것으로 사료된다.

관개수 수질을 호소수 수질환경기준인 4등급을 초과하는 수준인 T-N 4.7 mg/L, T-P 0.12 mg/L로 관개하는 경우 (Scenario IV) 30년 평균 배출부하량은 T-N 20.92 kg/ha, T-P 1.06 kg/ha로 나타났으며 대조군과 연도별 배출부하량을 비교하면 T-N 9~65%, T-P는 9~47% 증가하는 것으로 나타났다. 관개로 유입되는 부하량이 지표유출로 배출되는 부하량의 차를 비교하면, 대조군의 경우 관개로 인한 유입부하량이 지표유출 부하량에 비해 11.85 kg/ha, T-P 0.63 kg/ha 작게 나타났으며, Scenario IV는 관개로 인한 유입부하량이 지표유출 부하량에 비해 T-N 6.20 kg/ha 크게 나타났고, T-P 0.33 kg/ha 작게 나타났다. 이는 영양물질의 농도가 높은 관개수가 유입될 경우 논이 수질을 정화하는 경향을 보이기 때문이다. 다른 연구결과에 따르면 영양물질 농도가 높은 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우, 영양물질 성분을 작물의 생장에 이용할 수 있어 시비량을 줄일 수 있고, 수질이 개선된 물이 수역으로 들어가 결과적으로 하천수질을 개선시키는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Yoon *et al.*, 2003; Jang *et al.*, 2010).

Scenario I, II, III, IV를 종합하여 최적의 시나리오를 구성 하려면, 영농초기의 물꼬높이를 낮게 유지하여 중간낙수 시기의 고농도 논물이 강제 배수되는 것을 줄이고, 중간낙수 이후 물꼬를 높게 유지하여 지표유출량과 논물 농도를 줄이며, 비료는 강우가 발생하지 않는 시기에 표준시비량으로 시비하고, 호소수 수질환경기준인 4등급을 만족하는 관개수를 이용하였을 경우 논에서의 비점오염 관리에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 하지만 고농도의 관개수를 농업용수로 이용하더라도

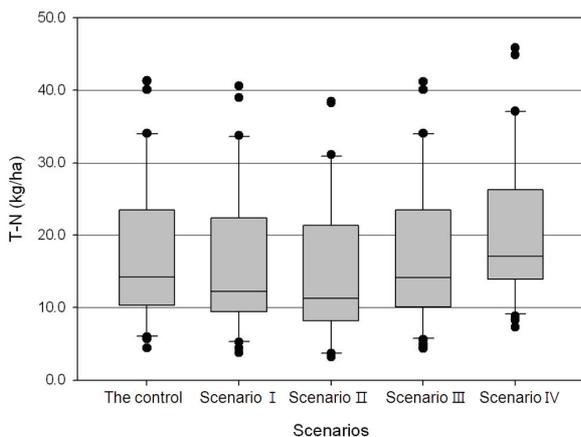


Fig. 6. Pollutant loads of T-N from a rice paddy fields according to each scenarios(1981~2010).

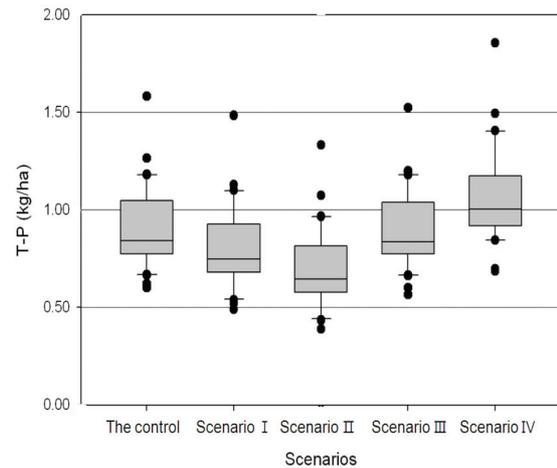


Fig. 7. Pollutant loads of T-P from a rice paddy fields according to each scenarios(1981~2010).

수계 전체의 배출부하량 저감에 있어서 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 모의 발생에 의해 이루어진 것으로 비점오염 저감을 위한 현장 실험 이전의 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

논은 지역이나 토양, 기후 특성, 오염원 종류, 관개 및 시비 등의 경작방법에 따라 배출 양상이 다양하다. 특히, 시비 방법 개선, 효율적인 물관리 등 영농방법 개선을 통한 비점부하 저감이 중요하다. 본 연구에서는 담수논을 대상으로 물꼬 높이, 시비량, 관개수 수질에 따른 배출부하량 저감효과를 평가하기 위해, 시험포장의 물수지 및 물질수지 분석자료를 이용하여 CREAMS-PADDY 모형을 보정과 검정을 하고, 영농관리 시나리오를 적용하여 그 결과를 평가하였다. 영농관리 시나리오는 선행연구를 조사하여 배출부하량 저감을 만족하는 동시에 벼의 수확량 저하를 초래하지 않도록 4개의 시나리오로 개발하였고, 대조군은 관행농업을 반영하여 구성하였다. CREAMS-PADDY 모형과 HOMWRS 모형을 연계하고, 과거 기상자료를 이용하여 1981~2010년 영농기의 배출부하량 모의가 가능하도록 모형을 구축하였다. 모형의 보정 및 검정을 위하여 서울대학교 이동저수지 관개는 시험포장의 물수지 및 물질수지 분석 자료를 이용하였고, 보정 결과 논물 총질소 및 총인의 결정계수는 0.95, 0.84, 모형의 효율지수는 0.95, 0.73으로, 검정 결과 논물 총질소 및 총인의 결정계수는 0.97, 0.85, 모형의 효율지수는 0.91, 0.84로 비교적 높게 나타났다. 영농관리 시나리오 적용 결과 중간낙수 이후 물꼬를 50 mm 증가시켰을 때 배출부하량은 대조군 대비 T-N 1~34%, T-P 5~21% 저감되는 것으로 나타났고, 100 mm 증가시켰을 때 대조군 대비 T-N 5~62%, T-P 8~37% 저감되는 것으로 나타났다. 관행시비량에서 표준시비량으로 시비량을 삭감시 배출부하량은 대조군 대비 T-N 0~16%, T-P 0~9% 저감되는 것으로 나타났으며, 배출부하량 저감양

상은 시비직후 강우의 발생유무에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 관개수 수질을 호소수 수질환경기준인 4등급을 초과하는 수준으로 관개하는 경우 배출부하량은 대조군 대비 T-N 9~65%, T-P는 9~47% 증가하는 것으로 나타났다. 영양물질의 농도가 높은 관개수가 유입될 경우 논은 수질을 정화하는 경향을 보였다. 시나리오를 종합하면 영농초기의 물꼬 높이를 낮게 유지하고, 중간낙수 이후 물꼬를 높게 유지하며, 비료는 강우가 발생하지 않는 시기에 표준시비량으로 시비하고, 호소수 수질환경기준인 4등급을 만족하는 관개수를 이용하였을 경우 논에서의 비점오염 관리에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 하지만 고농도의 영양물질이 함유된 관개수를 농업용수로 이용할 경우 수계 전체의 배출부하량에 저감에 있어 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구는 현장 실험 이전의 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

This study was supported by funds provided to the Rural Research Institute of the Korea Rural Community Corporation by the Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries as part of the Project of "Development of Agricultural Non Point Source Pollution Reduction Measures in the Saemangeum Watershed".

참고문헌

- Anbumozhi, V., Yamaji, E., Tabuchi, T., 1998. Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level, *Agri. Water Manage.* 37, 241-253.
- Chin, Y. M., Park, S. W., Kim, S. M., Kang, M. S., Kang, M. G., 2002. Nutrient loads estimation at paddy field using CREAMS-PADDY model, *J. Korean Society. Rural Plan.* 8(1), 60-68.
- Cho, J. Y., Han, K. W., Choi, J. K., Kim, Y. J., Yoon, K. S., 2002. N and P losses from a paddy field plot in central Korea, *Soil Sci. Plant Nutr.* 48, 301-306.
- Choi, J. K., Son, J. G., Yoon, K. S., Lee, H. J., Kim, Y. J., 2012. Runoff characteristics in paddy fields using cow manure compost fertilizer, *J. Korean Society. Agri. Eng.* 54(3), 29-36.
- Choi, J. S., Won, J. G., Ahn, D. J., Park, S. G., Lee, S. P., 2004. Growth and Yield of Rice by Field Water Management for Water-Saving Irrigation, *Korean J. Crop Sci.* 49(6), 441-446.
- David, R. L., Gregory, M. J., 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimate model validation, *Water Resour. Res.* 35(1), 233-241.
- Han, K. H., 2011. Characteristics of non-point Sources pollutant loads at paddy plot located at the valley watershed during irrigation periods, *Koran National Commi. Irri. and Drain.* 18(1), 94-102.
- Hwang, H. S., Yoon, C. G., Jeon, J. H., Kim, B. H., 2002. Water and nutrient mass balance in paddy field with groundwater irrigation in low-rainfall year, *J. Korean Society. Agri.* 44(4), 39-50.
- Jang, T. I., Lee, S. B., Seong, C. H., Lee H. P., Park, S. W., 2010. Safe application of reclaimed water reuse for agriculture in Korea, *Paddy Water Environ.* 2010(8), 227-233.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H., Jung, K. W., 2004. Model development for surface drainage loadings estimates from paddy rice fields, *Paddy Water Environ.* 3(2), 93-101.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Hwang, H. S., Yoon, K. S., 2003. Water quality model development for loadings estimates from paddy fields, *Korean J. Limnol.* 36(3), 344-355.
- Jung, K. W., Kim, H. K., Jang, T. I., Kim, S. M., Park, S. W., 2011. Assessing grain quality properties of reclaimed wastewater irrigation, *J. Agri. Life. Sci.* 44(6), 183-189.
- Kang, J. R., Kim, J. T., Beg, L. Y., Kim, J. I., 2005. Effect of Nitrogen Fertilizer Rates on Rice Quality in Mid-mountainous Area, *Korean J. Crop Sci.* 50(S), 37-40.
- Kang, M. S., 2010. Development of improved farming methods to reduce agricultural non-point source pollution, *M. Korean Society. Agri. Eng.* 52(4), 40-50.
- Kang, Y. S., Lee, J. H., Kim, J. I., Lee, J. S., 1997. Influence of Silicate Application on Rice Grain Quality, *Korean J. Crop Sci.* 42(2), 800-804.
- Kim, J. I., Choi, H. C., Kim K. H., Ahn, Jong. Kuk., Park, N. B., Park, D. S., Kim, C. S., Lee, J. Y., Kim, J. K., 2009. Varietal response to grain quality and palatability of cooked rice Influenced by different nitrogen applications, *Korean J. Crop Sci.* 54(1), 13-23.
- Lee, T. H., 2011. Introduction of HOMWRS : Hydrological Operation Model for Water Resources System, *M. Korea Water Res. Assoc.* 44(7), 88-91.
- Lee, Y. H., Sonn, Y. K., Lee, S. T., Heo, J. Y., Kim, M.K., Kim, E. S., Song, W.D., Zhang, Y. S., Jeon, W. T., Oh, Y. S., 2012. Topographical chemical properties of paddy soils in Gyeongnam province, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(2), 143-148.
- Mills, H. J., Benton, J., 1979. Nutrient deficiencies and

- toxicities in plants: Nitrogen, *J. of plant nutri.* 1(2), 101-122.
- Mishra, A., Ghorai, A. K., Singh, S. R., 1998. Rainwater, soil and nutrient conservation in rainfed rice lands in Eastern India, *Agri. Water Manage.* 38(1), 45-57.
- Nash J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles, *J. Hydrology* 10, 282-290.
- Seo, C. S., Park, S. W., Im, S. J., Yoon, K. S., Kim, S. M., Kang, M. S., 2002. Development of CREAMS- PADDY Model for Simulating Pollutants from Irrigated Paddies, *J. Korean Society. Agri. Eng.* 44(3), 146-156.
- Seong, C. H., Kim, S. J., Kim, S. M., Kim, S. M., 2011. Analysis of Wastewater Reuse Effect on Field-Scale Water Quality, *J. Korean Society. Agri.* 53(4), 59-65.
- Sohn, S. H., Chung, S. O., 2002. Effects of ponding depth treatment on water balance in paddy fields, *J. Korean Society. Agri. Eng.* 44(2), 67-74.
- Wischmeier W. H., Smith, D. D., 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.
- Yoo, S. H., Choi, J. Y., Jang, M. W., 2006. Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for FAO Penmann-Monteith and Modified Penmann Method, *J. Korean Society. Agri.* 48(1), 13-23.
- Yoon, C. G., Hwang, H. S., Jung, K. W., Jeon, J. H., 2003. Effects of Poned-Water Depth and Reclaimed Wastewater Irrigation on Paddy Rice Culture, *J. Korean Society. Agri.* 45(4), 55-65.
- Won, J. G., Choi, C. D., Lee, W. H., Kim, C. R., Lee, S. C., 1997. Influence of deep flooding on rice growth and yield in dry-seeded paddy field, *Korean J. Crop Sci.* 42(2), 166-172.
-