

새만금 유역에서 논 최적관리기법의 수질개선 효과와 정책고려사항

김종건·이수인*·신재영·임정하**·나영광·주소희·신민환**·최중대†

강원대학교 지역건설공학과
*국립환경과학원 유역총량연구과
** (주)수질환경분석센터

Effect of Paddy BMPs on Water Quality and Policy Consideration in Saemangeum Watershed

Jonggun Kim·Suin Lee*·Jae-young Shin·Jung-ha Lim**·Young-kwang Na·Sohee Joo·Minhwan Shin**·Joongdae Choi†

Department of Regional Infrastructure Eng., Kangwon National University

*Watershed and Total Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research

**Water Environment Analysis Center, Environment-friendly Agricultural Research Center

(Received : 07 August 2018, Revised: 19 September 2018, Accepted: 19 September 2018)

요약

새만금 간척지의 농지 간척 사업은 대부분 2020년까지 완공 될 예정이며, 그 시기 토지의 관개용수 활용에 대한 대비가 필요한 실정이다. 그러나 관개수의 수질은 드물게 목표 농도를 충족하고 있다. 이에 본 연구에서는 논에서의 최적관리기법(BMPs)인 토양검정시비(SO#1), SO#1과 SO#3의 복합처리(SO#2), 배수물꼬(SO#3), 완효성 비료시비 (SO#4) 방법을 관행재배(CT: Control)와 비교하여 논 비점오염원 저감효과 및 정책개발 시의 고려사항을 기술하였다. 논에서의 유출 저감은 SO#3(25%)와 SO#1(27%)에서 관행재배와 비교하였을 때 상대적으로 높았으나, SO#4 (9%)와 SO#2(7%)에서 낮게 나타났다. 논 유출량의 NPS 오염물질 농도와 부하는 변화의 폭이 높게 나타났으며 BMPs 중에 유의한 차이는 나타나지 않았다. 또한 농민들의 인식조사 결과, 농민들은 실제 BMP 구현의 한계로 기존 관행적인 영농활동을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 NPS 오염물질 관리와 관개수 절약을 위해서 농민 교육 및 지원과 함께 관개물꼬 및 논의 담수심을 자동 조절할 수 있는 관리방안이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 논, 최적관리기법, 비점오염원, 오염부하량, 저감효율

Abstract

Agricultural land reclamation in Saemangeum tidal land project is mostly planned to be completed by 2020. Irrigation water for the land is required to be prepared by that time. However, water quality for the irrigation sources is barely meet the target concentration. This paper described the reduction effect of and policy consideration for best management practices (BMPs) which were fertilizer prescription by soil test (SO#1), mixed application of SO#1 and 3 (SO#2), drainage gate control (SO#3), time-release fertilizer application (SO#4), and control (CT). Reduction of paddy runoff was relatively higher in SO#3 (25%) and SO#1 (27%) while lower in SO#4 (9%) and SO#2 (7%) than that in CT. In addition, farmers promised to follow the BMP guidelines but they didn't because of the several problems caused for the BMPs implementation. Thus, it recommended developing an automated control of irrigation gate and paddy water depth and supporting farmers for NPS pollution control and irrigation water reduction.

Key words : Paddy, BMPs, NPS pollution, Pollution load, Reduction

1. 서 론

수질오염부하총량 대비 비점오염원의 비중은 BOD를 기준으로 1998년의 약 27%에서 2003년에는 52.6%, 2010년

에는 68.3%, 그리고 2020년에는 72.1%까지 급속하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 점오염원은 하수처리장 등의 처리로 오염부하가 감소하는 반면, 비점오염원은 수거, 처리 및 관리가 어렵거나 또는 처리효율이 낮아 오염부하를 줄이지 못하고 있기 때문에 수질오염총량 대비 상대적 비중이 급격히 증가하기 때문이다(MOE, 2012, Kal et al., 2017, Jeon et al., 2018). 전북연구원은 새만금 유역의 농촌 비점오염원 배출비중은 총오염원 대비 BOD기준 75.5

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Regional Infrastructure Eng., Kangwon National University
E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

% (토지계 62.5 %, 축산계 33.4 %)이며, 향후 지속적인 증가추세를 나타낼 것이므로, 새만금 담수호의 수질개선을 위해서는 비점오염저감대책이 시급하다고 보고 있다 (NIER, 2014). 최근의 자료에서는 새만금의 동진강과 만경강 유역의 비점오염원 비중은 65.5%에서 85.5%까지 매우 높아 비점오염원에 대한 별도의 관리대책이 필요한 것으로 조사되었다(MOE et al., 2018). 환경부는 2004년 3월 비점오염원 관리대책을 시작으로 가축분뇨 관리 및 이용 대책, 수질환경보전법의 개정, 수질오염총량관리제도, 도시공원 및 녹지 등에 관한 법률 시행규칙을 개정, 제2차 비점오염원 종합대책 (MOE, 2006, 2012, 2014) 등 다양한 제도를 통하여 비점오염원을 제어하기 위해 노력하고 있다. 또한 환경부는 2013년에 새만금 유역의 전주사와 익산시 등 7개 시·군 815.8 km²를 새만금 유역 비점오염원관리 지역으로 지정 고시하고 비점오염원을 관리하고 있다 (MOE, 2014).

새만금개발사업 중 9,430ha에 달하는 농생명용지의 개발은 상당히 진척되어 있다. 농생명용지 5공구 1,513 ha는 이미 2017년 말에 준공되었고, 5,881 ha는 2020년까지 준공할 예정이다. 이들 신규 간척용지에 용수를 공급하기 위하여 2020년까지 새만금호의 담수화가 필요하고, 담수화에는 최소 2년 6개월 이상이 소요되므로 2018년 하반기부터는 담수화를 착수할 필요가 있다(MAFRA, 2018). 새만금호의 담수화를 위해서는 새만금 유역의 점오염원과 비점오염원의 유입을 제어할 필요가 있다. 특히 새만금 유역은 농지 중 논 면적이 상대적으로 높기 때문에 논에서 발생하는 비점오염원의 제어가 새만금호의 담수화에 매우 중요할 것으로 판단된다. 논 비점오염원의 제어를 위해서 농식품부에서 지원한 본 논문의 과제 외에 환경부는 경기도 이천시 설성천 유역 등에서 논 배수물꼬 관리를 통한 비점오염원 제어과제를 수행하고 있다(MOE, 2017). 그러나 기존의 연구과제 수준의 소규모 사업으로는 새만금 유역의 비점오염원 관리를 위한 농업최적관리방법(BMPs)의 도입, 평가 및 정책개발에는 부족할 수 있으므로 규모가 큰 현장 실증사업 등을 통한 정책자료의 습득과 활용이 시급히 요청되고 있다.

농업비점오염원은 현장특이성(Site-specific)이 매우 강하고 또한 평시와 강우시의 관개와 배수 등 유출수 관리에 절대적인 영향을 받는 물관리 의존성이 매우 강하다(Park et al., 2013). 따라서 농업, 특히 논 비점오염원을 제어하기 위해서는 인위적인 관개와 배수 시기뿐만 아니라 강우시 유출수를 효과적으로 감축할 수 있는 BMPs와 배수관리기술을 활용하여 비점오염원을 제어할 수 있는 시범연구가 필요하고, 이를 바탕으로 BMPs의 효과와 정책적 고려사항을 제안할 필요가 있다. 본 논문의 목적은 새만금 유역에서 수행된 논 BMPs의 수질개선효과와 BMPs를 보급하고 이행하는 과정에서 체험적으로 습득한 정책개발시의 고려사항을 기술하는데 있다. 본 논문은 새만금 유역에서 발생하는 논 비점오염원을 효과적으로 제어하고 감축하는 기술의 보급과 정책의 개발 및 이

행에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

새만금 유역의 논은 농경지 면적(과수원 제외)의 85.9%인 1,267.71 km²로 농경지의 거의 대부분을 차지한다. 새만금 유역의 토성은 양토 49 %, 식질양토 24 %, 사질양토 19 % 그리고 미사질양토 8%로 구성되어 있다(농촌진흥청 흙토람). 연구지역에서 멀지않은 군산시의 30년 연평균강수량은 1,270.8 mm이다. 농업비점오염원에 많은 영향을 줄 수 있는 100 mm/일 이상 강우는 연평균 1.2회, 그리고 영향이 크지 않을 수 있는 40 mm/일 이하의 강수량은 연간 107.3회(연강수량의 55.6 %)으로 나타났다 (Table 1). 시험포가 위치한 부안군의 강수량은 2015년 850 mm 그리고 2014년 1,011.1 mm로 군산시의 연평균강수량보다 적었다. 특히 시험포가 있는 부안군 백산면 지역의 2016년 8월 강수량은 30.2 mm로 매우 적었다.

본 조사연구는 농업인의 인식 조사부분과 논 유출수 모니터링부분으로 구성하였다. 인식 조사부분은 2년(2015~16년) 동안 조사하고 관찰한 자료를 활용하였다. 유출수 모니터링부분도 동일한 기간 동안 조사하였으나 조사시기별 유출과 비점오염원 농도의 구분이 가능한 2016년의 자료를 중심으로 사용하였고, 2015년도의 자료는 참고하였다. 농업인의 인식 조사는 연구지역인 전라북도 부안군 백산면 용계리(용계지구)와 김제시 공덕면 처산리(공덕지구) 지역의 농업인을 대상으로 수행하였다. 농민의 BMPs와 비점오염원에 관한 인식을 조사하기 위한 설문은 2015년에 23농가(용계지구)에서 2회에 걸쳐 37매의 설문조사를 했다. 그리고 2016년에는 78농가(용계+공덕지구)에서 2회에 걸쳐 156매의 설문조사를 했다. 설문의 주요내용은 농업비점오염원, BMPs, 환경개선사업 등에 관한 인식, 효과, 자발적 참여의지 등이었다.

논 유출수 모니터링 조사는 용계지구에서 수행하였다. 논 시험지구는 관개용수로와 배수로가 분리되어 있는 관개구획 중 5개의 관개블록(irrigation block)을 선정하였다. 관개블록의 면적은 3.19~8.35 ha이며, 각 블록에는 13~25개의 필지(field)가 있다. 실험처리는 대조구로 관행재배(CT: Control), 실험처리구로 토양검정시비(SO#1: Prescribed fertilizer application by soil test), 복합처리(SO#2: Mixed application of SO#1, SO#3 and non-participation), 배수물꼬(SO#3: Drainage gate control), 완효성 비료시비(SO#4: Time-release fertilizer application) 등 5개이다. 이들 실험처리는 배수물꼬 설치여부에 따라 관행물꼬관리(CT, SO#1, SO#4)와 배수물꼬관리(SO#2, SO#3) 등 2개의 처리로 구분할 수 있다. 각각의 실험처리는 무작위로 관개블록에 적용하였다. 실험오차를 줄이기 위해서 2 반복 이상의 실험이 필요하나 본 연구에서는 각 관개블록의 규모가 크기 때문에 블록단위의 2반복 이상의 실험은 하지 못했다. 각 관개블록의 유출부에 모니터링지점을 선정하고,

Table 1. 30-year daily rainfall analysis in Gunsan city during 1985-2015

Rainfall class (mm)	Annual average frequency	Total class rainfall (mm)	Rainfall per event (mm)	Cumulative share
0-20	96.7	397.1	4.1	31.7
20-40	10.6	300.2	28.4	55.6
40-60	4.2	207.9	49.5	72.1
60-80	1.8	119.3	66.6	81.6
80-100	0.8	70.3	87.9	87.3
100-120	0.6	66.6	111.0	92.6
120-140	0.2	21.4	125.8	94.3
140-160	0.1	9.7	138.8	95.0
160-180	0.0	5.4	178.4	95.5
180-200	0.1	12.5	179.1	96.5
200-220	0.0	0.0	0.0	96.5
220-240	0.1	15.3	218.6	97.7
240-260	0.0	8.4	279.8	98.4
300-320	0.1	20.6	294.5	100.0
Sum	115.2	1,254.7	-	-

2016년 5월부터 9월 사이의 영농기에 유량을 측정하고 또한 수질시료를 채취하였다. 유량측정을 위하여 수위-유량 곡선(Eq. 1~5)을 도출하였고, 자동수위계에서 측정된 수위를 유량으로 환산하였다(Fig. 1). 따라서 유량의 측정은 강우기와 비강우기를 포함하여 5분 간격으로 연속적으로 측정하였다.

$$SO\#1, y = 0.1463x + 0.002 \quad (R^2 = 0.9684) \quad (Eq. 1)$$

$$SO\#2, y = 0.0709x^2 + 0.0619x - 0.0024 \quad (R^2 = 0.9902) \quad (Eq. 2)$$

$$SO\#3, y = 0.299x^2 + 0.031x + 0.0023 \quad (R^2 = 0.9676) \quad (Eq. 3)$$

$$SO\#4, y = 1.7827x^2 - 0.1528x + 0.0095 \quad (R^2 = 0.8643) \quad (Eq. 4)$$

$$CT, y = 0.4669x^2 - 0.175x + 0.0198 \quad (R^2 = 0.9834) \quad (Eq. 5)$$

여기서, y는 유량(m³/sec)이고 x는 수위(m)이다.



Fig. 1. Automatic water meter installed at the outlet of control(CT) block (Thalimedes, OTT, the Netherlands)

수질시료는 강우시와 비강우시(평시)로 구분하여 수동으로 채수하였다. 논 지역에서는 도시지역과 달리 초기강우의 영향이 크지 않기 때문에 초기강우를 고려한 수질채취는 하지 않았다. 강우시는 2개의 강우사상 그리고 평시는 월 2회 이상 채수하여 5개의 관개블록에서 함께 70점의 시료를 채수하였다. 그리고 썩레질과 모내기, 중간낙수, 최종낙수 시기에는 2~3일에 1회씩 함께 120점의 수질시료를 채수하였다. 채취한 수질시료는 환경부의 수질오염공정시험방법 (MOE, 2004)에 따라 BOD₅, COD_{Mn}, SS, TN, TP 등을 분석하였다. 비점오염원의 평균농도는 평시는 유량가중 평균농도 (FWMC), 강우시는 강우사상평균농도 (EMC)를 구했으며, 비점오염원 부하는 유량과 농도를 곱하여 구하였다. 관개블록과 모니터링 지점과 관개블록의 실험처리, 면적과 필지숫자는 Fig. 2과 Table 2에 나타났다.



Fig. 2. Plane view of treated irrigation block, irrigation and drainage ditch, and block monitoring site of the study area located in Yongke-ri, Baeksan-myon, Buan-gun, Jeonbuk Province in Saemanguem watershed.

Table 2. Experimental treatment, area and number of fields of the 5 irrigation block monitored in this study

Experimental treatment	Gate type	Area (ha)	No. of field
CT (Control)	Conventional	4.17	15
SO#1 (prescribed fertilizer application by soil test)	Conventional	4.79	15
SO#2 (Mixed application of SO#1, SO#3 and non-participation)	Drainage gate	8.35	25
SO#3 (drainage gate control)	Drainage gate	3.19	13
SO#4 (time-release fertilizer application)	Conventional	5.59	17
Sum.		26.10	85

$$EMC = \frac{M_t}{V_t} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서, EMC는 강우사상평균농도(mg/L), M_t 는 강우사상동안의 총오염물질량(mg 또는 kg), V_t 는 강우사상기간동안의 총유출량(L 또는 m^3)이다. Q_i 는 i 시각의 유출량이고, C_i 는 Q_i 의 농도이다. 강우사상 외의 특정한 영농활동시기 등 일정한 시간동안의 FWMC도 동일한 공식을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유출량

각 관개블록의 유출량은 실험처리별 강우, 비강우(평시), 썩레질과 모내기, 중간낙수 및 최종낙수 시기 등 5개의 영농활동시기로 구분하여 분석하였다. Table 3은 영농활동시기별 및 실험처리별 유출량을 측정한 자료이다. 논에서의 유출량은 실험처리에 관계없이 모든 처리에서 평시에 가장 많이 나타났다. 비가 오지 않는 평시의 논 유출은 강하침투, 횡침투, 그리고 초과관개에 의한 무효방류로 발생한다. 본 연구의 각 관개블록은 필지가 많고 또한 농업인도 많아 물관리가 일정하게 이루어지지 못하고 일부의 논에서는 항상 무효방류가 나타나며 유출량이 많아졌고 또한 무강우(평시)일수가 길어서 평시의 유출량이 상대적으로 많아진 것으로 판단된다. 비가 많이 오면 강우유출이 많아지나 2016년에는 모니터링 기간 동안 강우량이 많지 않아 강우시 유출이 상대적으로 작게 나타났다. 썩레질과 모내기 기

간과 중간낙수 기간은 비슷한 양의 유출을 보였다. 그리고 수확 전 최종낙수 시기에는 다소 낮은 유출을 보였다.

BMPs로 처리한 관개블록은 관개농법에 비하여 7~27%의 유출량이 감소되었다. 배수물꼬(SO#3) 관개블록과 토양검정시비(SO#1) 관개블록에서 비교적 높은 유출량 저감율이 나타난 반면 완효성비료(SO#4)와 복합처리(SO#2) 관개블록에서는 상대적으로 낮은 유출량 저감율이 측정되었다. 유출량 저감율은 배수물꼬 설치유무와 함께 농업인의 관개관리 방법에도 매우 많은 영향을 받는다고 판단되었다. 이는 복합처리(SO#2)의 경우 배수물꼬가 많이 설치되었어도 유출량은 크게 줄지 않은 반면에 배수물꼬가 설치되지 않는 토양검정시비(SO#1)에서 유출량이 많이 줄었기 때문이다. 또한 실험처리의 종류에 관계없이 치리지역의 유출량이 감소했다는 것은 본 연구에 참여하는 농업인들이 관개와 유출(배수)관리에 대한 인식이 높아져 무효방류량이 줄었다는 의미가 될 수 있다. 즉, 본 BMPs의 보급과 이행 연구사업에 참여한 농민들은 연구가 진행되는 2년 사이 관개관리와 환경농업에 관한 인식이 그 만큼 높아졌고, 평소보다 더 신경을 써서 유출(배수)관리를 해왔다는 것을 의미한다. 또한 이와 같은 시범연구기간이 길면 갈수록 농업인들은 훨씬 더 많은 유출량을 감축하여 관개용수량과 비점오염 배출을 줄일 수 있다는 것을 의미할 수 있다.

배수물꼬 관리방법은 벼의 생육과 생산성에 영향을 주지 않고, 논외 유출을 제어하여 무효방류(유출)를 억제하고, 관개용수와 논 비점오염부하를 줄일 수 있는 BMPs의 하나이다. Mishra et al. (1998)은 배수물꼬를 30 cm 높이로 관리했을 때, 연구기간 동안 최대 99.5 %의 강우를 저류하며 유출량을 많이 줄일 수 있었다. 본 연구에서는 배수물꼬를 최대 12 cm 담수심으로 관리하였고, 25 %의 유출량을 줄일 수 있었다. 반면에 최대담수심을 2~3 cm로 설정하고, 간간이 논외 표면

Table 3. Comparison of runoff depth (mm) with respect to measurement period and runoff reduction ratio (%) of respective treatment with respect to control(CT)

Measurement period	SO#1	SO#2	SO#3	SO#4	CT
Normal days	884	1,192	948	1,071	1,283
Puddling, leveling and transplanting period	231	218	184	237	205
Forced mid-season drainage	204	312	212	191	351
Rainy days	386	438	395	543	444
Final drainage	105	156	115	220	202
Total	1,810	2,316	1,855	2,262	2,484
Reduction(%) CT : treatment	27%	7%	25%	9%	-

에 작은 틈(small cracks)이 벌어질 정도까지 토양을 말렸다 관개를 재개하는 간단관개방법, 즉 SRI (system of rice intensification) 또는 AWD (alternate wet and dry) 물관리 방법도 관개용수량과 배수량을 줄일 수 있는 방법으로 많이 알려지고 있다 (Seo et al., 2018; Choi et al., 2014; Norman, 2004; Siopongco et al., 2013). SRI와 AWD는 관개용수의 저장 뿐만 아니라 논에서 발생하는 메탄가스를 줄여 GWP(Global warming potential)를 29 % (Xu et al., 2015)에서 90 % (Linguist et al., 2014)까지 줄일 수 있다고 발표하였다. 그리고 Malyan et al. (2016)은 논에서 GWP를 삭감할 수 있는 가장 좋은 방법은 간단관개라고 보고하였다. 이상에서 보듯이 많은 연구자들이 논 의 유출량을 줄일 수 있는 SRI와 AWD와 같은 절수관개농법은 유량의 감소뿐만 아니라 온실가스의 저장에도 많은 기여를 할 수 있다고 보고하고 있으므로 새만금 유역의 논에서도 본 연구에서 채택한 배수물꼬 BMP 뿐만 아니라 간단관개 방법인 SRI와 AWD와 같은 BMPs도 적극적으로 도입할 필요가 있다.

3.2 논 비점오염원의 농도

실험처리별 및 영농활동기별 비점오염원의 개별 실측농도와 평균농도의 범위는 매우 커서 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 4). 즉, 본 연구에서 BMPs 처리는 유출수의 비점오염원 농도에 큰 영향을 미치지 않았다. 이와 같은 이유는 모니터링 시점이 1회로 충분히 길지 못했고, 농업인들의 영농활동에 의한 영향과 자연적인 변수의 영향이 컸기 때문으로 판단된다. 관개블록이 넓고 필지가 많아 각 블록의 영농활동이 일률적으로 이루어지지 못하고 개별적으로 이루어졌다. 그리고 수질시료 채취시의 각 블록의 수질은 개별적인 영농활동에 많은 영향을 받을 수밖에 없었다. 따라서 향후 넓은 관개블록의 수질을 모니터링 하는 연구는 블록 내 농업인들의 영농습관을 BMPs 실험설계부터 반영하여 실험처리와 모니터링 계획을 세울 필요가 있다.

Table 5는 실험처리에 관계없이 영농활동기별로 수질을 산술평균한 값이다. 논 유출수의 평균비점오염원 농도는 실

Table 4. Average concentration of paddy non-point source pollutants with respect to treatment and measurement period (Unit: mg/L)

Item		SS	BOD ₅	TOC	COD _{Mn}	TN	TP
SO#1	Normal day	18.4	2.4	10.6	20.8	4.103	0.123
	PLTP*	100.3	3.7	13.7	26.6	11.105	0.196
	FMD**	17.0	1.5	6.4	8.0	4.302	0.200
	Rainy day	25.7	2.9	11.6	22.1	4.623	0.140
	Final drainage	9.9	2.2	4.8	9.3	6.065	0.095
	Average	34.3	2.5	9.4	17.3	6.039	0.151
SO#2	Normal day	11.3	1.7	5.9	10.1	4.088	0.035
	PLTP	308.5	3.8	15.3	30.2	11.772	0.270
	FMD	17.6	1.4	4.9	7.4	4.543	0.192
	Rainy day	14.0	2.0	7.7	10.9	4.463	0.036
	Final drainage	5.0	2.5	8.2	14.3	4.701	0.053
	Average	71.3	2.3	8.4	14.6	5.913	0.117
SO#3	Normal day	22.2	1.9	6.0	9.9	5.036	0.046
	PLTP	276.2	3.5	14.3	25.2	8.813	0.133
	FMD	21.0	1.1	6.0	8.0	3.367	0.194
	Rainy day	18.3	2.2	7.8	12.7	7.891	0.040
	Final drainage	15.0	1.9	5.9	14.9	3.783	0.042
	Average	70.5	2.1	8.0	14.2	5.778	0.091
SO#4	Normal day	29.2	2.1	5.9	9.5	5.330	0.042
	PLTP	140.2	3.4	13.9	25.0	8.267	0.090
	FMD	22.4	1.9	7.0	10.9	5.159	0.204
	Rainy day	25.0	1.8	6.5	10.3	5.981	0.038
	Final drainage	30.4	2.1	5.9	13.8	5.197	0.040
	Average	49.5	2.3	7.8	13.9	5.987	0.083
CT	Normal day	23.0	2.4	8.3	12.6	6.091	0.069
	PLTP	212.7	3.7	14.7	26.5	13.003	0.324
	FMD	20.5	1.5	6.2	13.6	4.937	0.199
	Rainy day	22.0	1.6	10.9	17.7	7.218	0.064
	Final drainage	28.0	2.1	11.4	16.1	7.274	0.079
	Average	61.2	2.3	10.3	17.3	7.705	0.147

*PLTP: puddling, leveling and transplanting period

**FMD: Forced mid-season drainage period

Table 5. Arithmetic average of all measured concentration data with respect to measurement period (Unit: mg/L)

Measurement period	TP	BOD ₅	TN	TOC	SS	COD _{Mn}
Normal day	0.0630	2.10	4.930	7.34	20.8	12.58
PLTP*	0.2026	3.62	10.592	14.38	207.6	26.70
FMD**	0.1978	1.48	4.462	6.10	19.7	9.58
Rainy day	0.0636	2.10	6.035	8.90	21.0	14.74
Final drainage	0.0618	2.16	5.404	7.24	17.7	13.68

*PLTP: puddling, leveling and transplanting period

**FMD: Forced mid-season drainage period

험처리에 관계없이 썩레질과 이양기에 가장 높았다. 특히, 썩레질과 이양기의 SS 농도는 다른 영농활동기보다 거의 10배 정도 높게 나타났다. 강우유출수의 농도도 일반적으로 높게 나타났으나 썩레질과 모내기철만큼 높게 나타나는 않았다. 본 연구에서 측정된 영농활동기별 비점오염원의 산출평균농도는 SS 17.7~207.6 mg/L, BOD 1.48~3.62 mg/L, TN 4.462~10.592 mg/L, 그리고 TP 0.062~0.203 mg/L의 범위로 나타났다. 탁수유발물질인 SS 뿐만 아니라 다른 측정항목에서도 썩레질과 모내기철에 농도가 높아, 이 시기의 탁수유출관리가 만경강, 동진강의 수질은 물론 새만금호의 수질에도 매우 중요함을 보여주었다. 따라서 비점오염원의 농도면에서 평가할 때, 2016년도의 강우조건과 영농조건하에서 새만금호의 수질에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 영농활동기는 썩레질/모내기철이고, 강우시도 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 농업인들에게 썩레질과 모내기철, 특히 썩레질 후 바로 고농도의 탁수(흙탕물)를 즉시 배수하는 대신 탁수입자가 침전될 때까지 일정한 시간 이상을 기다린 후 배수하고 모내기하도록 설득할 필요가 있다. 또는 썩레질 후 탁수가 있는 상태에서 모가 뜨지 않고 모내기할 수 있도록 이양기를 개량하여 보급할 필요가 있다.

3.3 논 비점오염원 부하

실험처리구인 관개블록에서 측정된 유출량과 농도의 범위가 넓었기 때문에 비점오염부하도 변동범위가 크게 나타났다. 실험처리별 영농활동기로 구분하여 산정한 비점오염부하는 Table 6에 나타났다. 그리고 Table 7은 관행 대비 BMPs 처리블록의 비점오염부하 저감율이다. 배수물꼬 (SO#3)를 설치한 관개블록에서 비점오염원의 감소폭이 높게 나타났다. 다만, 탁수는 토양검정시비 (SO#1) 관개블록에서 가장 크게 감소하였다. 토양검정시비 (SO#1), 복합처리 (SO#2), 완효성비료 (SO#4) 관개블록은 관행에 비하여 오염부하가 감소되었으나 특정한 경향을 보이지는 않았다. 그리고 토양검정시비 (SO#1) 관개블록의 TP 부하가 관행보다 높게 나타나는 특이점도 보였다. 대조구(관행)와 실험처리구 사이의 유의성있는 유출량과 농도의 감소는 나타나지 않았으나 실험처리 블록의 유출량과 농도는 대조구에 비해 다소 감소하는 경향은 나타났다. 따라서 실험처리구의 오염부하는 대조구에 비해 낮게 나타났다. 그러나 실험처리 사이의 오염부하 저감율은 어떤 일정한 경향이나 유의적인

차이는 보여주지 못했다.

BMPs 처리에 관계없이 본 실험에서 측정된 수질인자별 관측기간 동안의 비점오염부하의 범위는 SS 55.9~97.8 kg/ha, BOD₅ 3.8~5.6 kg/ha, TOC 13.0~23.0 kg/ha, COD_{Mn} 9.6~37.2 kg/ha, TN 9.46~17.11 kg/ha, 그리고 TP 0.13~0.26 kg/ha으로 나타났다. 그리고 관행(CT) 대비 BMPs 처리블록의 비점오염부하 저감율은 SS 0~42.8%, BOD₅ 12.5~16.1%, TOC 17.8~43.5 %, TN 23.9~44.7 %, 그리고 TP -7.7~50 %의 범위를 보였다.

BMPs 처리의 효과가 잘 측정되지 못한 이유는 BMPs 처리의 영향뿐만 아니라 농업인의 환경농업 참여도와 영농습관, 강우와 같은 자연인자, 그리고 배수로의 관리(수초제거, 퇴적물 제거 등) 영향이 복합적으로 나타났기 때문으로 판단된다. 강우와 같은 자연현상은 인위적인 제어가 불가능하나 농업인의 영농습관은 지속적이며 장기적인 시범사업의 참여, 교육, 홍보, 기술이전, 보조금의 지급 등으로 친환경적으로 바뀌게 할 수 있다. 따라서 농지의 비점오염원을 지속적이며 안정적으로 제어하기 위해서는 효율적인 BMPs 기술개발과 함께 장기적인 시범사업과 지원정책으로 농업인들의 영농방법을 친환경적으로 변화시키며, 자발적으로 BMPs를 채택하고 이행할 수 있게 해야 한다.

Table 7은 평시 유출수의 유출심 1 mm 당 오염부하를 1로 했을 때, 여타 영농활동기의 오염부하이다. 관개블록의 비점오염부하는 썩레질과 모내기철 (PLTP)에 일반적으로 가장 높게 나타났다. 특히, 이 시기의 SS 부하는 평시에 비해 최소 4.9배에서 최대 27.5배까지 매우 높게 나타났다. 또한 평시에 비해 썩레질과 모내기철에는 BOD₅는 1.37~2.08배, TOC는 1.75~2.47배, TN은 1.58~2.95배, 그리고 TP는 1.28~8.20배까지 높게 나타났다. 즉, 탁수뿐만 아니라 유기물 (BOD₅, TOC)과 영양물질 (TN, TP)도 썩레질과 모내기철에 매우 높게 나타나므로 이 시기의 배수관리가 새만금 유역의 수질관리에 매우 중요함을 알 수 있다. 그리고 강우 유출시에도 상대적으로 높은 오염부하를 보였다. 총오염부하 대비 썩레질과 모내기 그리고 강우시의 오염부하 기여율은 수질측정항목에 따라 다르나 SO#1에서 35.7~60.3 %, SO#2에서 37.0~78.9 %, SO#3에서 30.8~67.2 %, SO#4에서 30.8~53.1 %, 그리고 CT에서 25.0~56.0 %이었다. 따라서 논 비점오염부하는 썩레질과 모내기철, 그리고 장마철 비가 올 때 중점적으로 제어할 수 있도록 BMPs와 정책을

Table 6. Average load of paddy non-point source pollutant with respect to treatment and measurement period (Unit: kg/ha)

Treatment	Measured period	SS	BOD5	TOC	CODMn	TN	TP
SO#1	Normal day	17.5	2.2	9.3	18.9	3.66	0.12
	PLTP*	23.7	0.8	3.1	6.1	2.52	0.04
	FMD**	3.5	0.3	1.3	1.6	0.87	0.04
	Rainy day	10.0	1.1	4.5	8.6	1.80	0.06
	Final drainage	1.3	0.2	0.6	1.3	0.61	0.01
	Sum	55.9	4.7	18.9	36.7	9.46	0.28
SO#2	Normal day	14.1	2.1	7.3	12.5	4.84	0.04
	PLTP	71.0	0.8	3.3	6.7	2.61	0.06
	FMD	5.4	0.4	1.6	2.3	1.36	0.06
	Rainy day	6.2	0.9	3.4	5.3	1.94	0.02
	Final drainage	1.1	0.4	1.2	2.3	0.73	0.01
	Sum	97.8	4.6	16.9	29.1	11.47	0.19
SO#3	Normal day	21.6	1.9	5.6	9.6	4.79	0.04
	PLTP	49.6	0.6	2.6	4.5	1.59	0.02
	FMD	4.4	0.2	1.3	1.7	0.69	0.04
	Rainy day	7.6	0.9	2.9	4.8	2.96	0.02
	Final drainage	1.9	0.2	0.6	1.6	0.46	0.01
	Sum	85.1	3.8	13.0	22.2	10.49	0.13
SO#4	Normal day	31.7	2.3	6.5	10.8	5.70	0.04
	PLTP	34.2	0.8	3.3	6.0	1.99	0.02
	FMD	4.3	0.4	1.3	2.1	0.98	0.04
	Rainy day	14.2	1.0	3.6	5.9	3.21	0.02
	Final drainage	6.7	0.5	1.3	3.0	1.14	0.01
	Sum	91.2	4.9	16.1	27.9	13.02	0.13
CT	Normal day	30.1	3.2	10.7	16.2	7.98	0.09
	PLTP	44.0	0.7	3.0	5.4	2.65	0.07
	FMD	7.2	0.5	2.2	4.7	1.73	0.06
	Rainy day	10.8	0.7	4.8	7.7	3.27	0.03
	Final drainage	5.7	0.4	2.3	3.2	1.48	0.02
	Sum	97.8	5.6	23.0	37.2	17.11	0.26

*PLTP: puddling, leveling and transplanting period

**FMD: Forced mid-season drainage period

Table 7. Reduction rate of selected paddy non-point source pollutant from treated block over conventional block (Unit: %)

Pollutant	SS	BOD5	TOC	CODMn	TN	TP
SO#1	42.8	16.1	17.8	1.3	44.7	-7.7
SO#2	0.0	17.9	26.5	21.8	33.0	26.9
SO#3	13.0	32.1	43.5	40.3	38.7	50.0
SO#4	6.7	12.5	30.0	25.0	23.9	50.0

융합하여 시행할 필요가 있다. 총오염부하 대비 중간낙수와 최종낙수 시기의 오염부하 기여율은 SO#1에서 7.9~17.9 %, SO#2에서 6.6~36.8 %, SO#3에서 7.4~38.5 %, SO#4에서 12.1~38.5 %, 그리고 CT에서 13.2~30.8 %로 측정되었다. 특히, 중간낙수시 TP의 배출량이 특이하게 높게 나타나서 오염부하 기여율의 최대값이 높았다. TP를 제외하면 중간낙수와 최종낙수 시기의 오염부하 기여율은 SO#1에서 7.9~15.6 %, SO#2에서 6.6~18.2 %, SO#3에서 7.4~14.9 %, SO#4

에서 12.1~18.4 %, 그리고 CT에서 13.2~21.2 %이었다. 중간낙수와 최종낙수는 인위적인 강제배수를 하지 않더라도 침투와 증발산 등 자연감소를 유도하여 논 비점오염부하를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이는 간단관개방법이 활용되는 SRI와 AWD는 상시적으로 자연감소를 시행하며 배수량을 최소화하고 있으나 벼의 생산성에는 부정적인 영향이 없는 것으로 입증되었기 때문이다 (Thakur et al., 2016; SRI-Rice, 2016; Siopongco et al., 2013).

Table 8. Non-point source pollution load per mm of drainage (g/mm/ha)

Treatment	Measured period	SS	BOD5	TOC	CODMn	TN	TP
SO#1	Normal day	19.8	2.49	10.52	21.38	4.14	0.14
	PLTP*	102.6	3.46	13.42	26.41	10.91	0.17
	FMD**	17.2	1.47	6.37	7.84	4.26	0.20
	Rainy day	22.8	2.51	10.27	19.63	4.11	0.14
	Final drainage	12.4	1.90	5.71	12.38	5.81	0.10
	Sum	174.8	11.84	46.30	87.65	29.23	0.74
SO#2	Normal day	11.8	1.76	6.12	10.49	4.06	0.03
	PLTP	325.7	3.67	15.14	30.73	11.97	0.28
	FMD	17.3	1.28	5.13	7.37	4.36	0.19
	Rainy day	14.2	2.05	7.76	12.10	4.43	0.05
	Final drainage	7.1	2.56	7.69	14.74	4.68	0.06
	Sum	376.0	11.33	41.84	75.44	29.50	0.61
SO#3	Normal day	22.8	2.00	5.91	10.13	5.05	0.04
	PLTP	269.6	3.26	14.13	24.46	8.64	0.11
	FMD	20.8	0.94	6.13	8.02	3.25	0.19
	Rainy day	19.2	2.28	7.34	12.15	7.49	0.05
	Final drainage	16.5	1.74	5.22	13.91	4.00	0.09
	Sum	348.9	10.23	38.73	68.67	28.44	0.48
SO#4	Normal day	29.6	2.15	6.07	10.08	5.32	0.04
	PLTP	144.3	3.38	13.92	25.32	8.40	0.08
	FMD	22.5	2.09	6.81	10.99	5.13	0.21
	Rainy day	26.2	1.84	6.63	10.87	5.91	0.04
	Final drainage	30.5	2.27	5.91	13.64	5.18	0.05
	Sum	253.0	11.73	39.34	70.90	29.94	0.41
CT	Normal day	23.5	2.49	8.34	12.63	6.22	0.07
	PLTP	214.6	3.41	14.63	26.34	12.93	0.34
	FMD	20.5	1.42	6.27	13.39	4.93	0.17
	Rainy day	24.3	1.58	10.81	17.34	7.36	0.07
	Final drainage	28.2	1.98	11.39	15.84	7.33	0.10
	Sum	311.1	10.89	51.44	85.54	38.77	0.75

*PLTP: puddling, leveling and transplanting period

**FMD: Forced mid-season drainage period

3.4 농업인의 인식조사와 BMPs 도입시의 정책 고려사항

연구지역 농업인의 비점오염원에 대한 인식은 2년 동안 연구가 진행되며 크게 향상되었다(RRI and KNU, 2015; 2016). 비점오염원의 인지도는 2015년의 33.3%에서 2016년에는 76.5%로 향상되었다. 비점오염원 저감사업에 2015년에는 52.6%가 참여의사를 밝혔으나 2016년에는 100%가 참여의사를 밝혔다. 연구지역 농업인들은 탁수(흙탕물)의 환경위해성을 잘 인식하고 있었고, 논(53%)과 밭(37%)에서 주로 발생한다고 설문에 응답하였다. 그리고 비점오염원 저감사업에 참여하기 위해서는 보조금의 지급이 가장 중요하다는 의견을 피력하였다. 본 연구에서 조사된 관행대조구(CT) 대비 BMPs의 비점오염부하 최대 저감효과인 SS 42.8 %, BOD₅ 16.1 %, TOC 43.5 %, TN 44.7 %, 그리고 TP 50 %는 BMPs 기술과 함께 시범사업에 참여한 일부 농업인의 친환경영농의지가 매우 크게 작용하였다고 판

단하고 있다. 반면에 일부의 농업인들은 BMPs의 도입과 이행에 여전히 부정적인 인식을 가지고 있음도 관측되었다. 또한 일부 농업인은 설문조사와는 다른 관행적인 영농활동을 하는 것으로 관측되었다.

토양검정시비(SO#1)는 기존 비료사용량의 약 40%를 감축하여 시비하도록 처방되었는데 이를 따르는 농업인들은 거의 없었다. 배수물꼬(SO#3)를 수령한 농업인의 25% 정도는 배수물꼬를 설치하지 않았다. 완효성비료(SO#4)를 처방받은 농업인들도 추가적으로 비료를 시비하여 관행시비량 정도의 비료를 사용하고 있었다. 비료의 사용량이 줄어들면 벼 생산량이 줄어들 것이라는 우려 때문에 대부분의 농업인들은 토양검정시비와 완효성 비료의 권장사용량보다 많은 관행시비량을 시비하였다. 배수물꼬 설치를 위한 노동력과 시간투자 그리고 설치 후 주기적인 점검 등의 번거로움 때문에 배수물꼬를 설치하지 않았다고 했다. 배수물꼬의 설치와 관리로 물 절약은

되지만, 물값이 무료인 농민에게는 물 절약으로 인한 혜택은 없고 노동력만 추가로 필요하기 때문이다. 이는 본 연구에서 BMPs 실험처리의 효과가 잘 관측되지 못한 중요한 이유 중의 하나로 판단되었다. 소규모 필지단위의 실험에서는 영향인자의 관리가 용이하기 때문에 SO#1, 3 그리고 4의 효과는 잘 나타난다. 그러나 시범사업과 같이 규모가 큰 유역단위의 조사 연구일 때는 많은 농업인들을 포함하여 다양한 인위적 및 자연적인 인자들이 작용하기 때문에 단시간 내에 BMPs 처리의 효과를 측정하기 어렵다는 생각이다.

본 연구를 수행하면서 환경보전 의식이 강한 소수의 농업인들은 기존의 관행적인 영농활동보다 상당히 많은 시간을 할애 하면서 BMPs에 참여하는 모습을 보였다. 그러나 대부분의 농업인들은 BMPs를 위해 소규모의 보조금 정도로는 추가적인 시간이나 노동력을 투자하려 하지 않았다. 이상의 자료와 관측 경험 등에서 농업비점오염원을 줄이기 위한 BMPs는 농업인의 시간과 노동력이 최소화될 수 있는 기술이라야 성공률이 높다는 판단을 하게 되었다. 논 농업에서 농업인들의 참여가 가장 작을 수 있는 BMPs는 관개물꼬의 자동화이다. 용수로의 관개물꼬와 논의 담수심을 근거리 무선통신으로 연동시키고, 일정한 담수심마다 관개물꼬의 개폐를 자동적으로 제어할 수 있다면 논 비점오염원뿐만 아니라 관개용수와 배수(무효방류)량을 획기적으로 감축하여, 새만금 유역의 수질개선과 기후변화로 인한 물 부족 대응에 매우 효과적으로 대응할 수 있다. 많은 논마다 관개물꼬 자동화장치의 설치는 상당한 예산을 수반할 수 있다. 그러나 이와 같은 예산은 농업인을 교육하며, 홍보하고, 지원하면서 영농습관을 바꾸는 오랜 시간과 비용에 비하면 오히려 경제적인 수 있다는 판단이다. 관개물꼬의 자동화는 본 연구에서 활용한 배수물꼬의 확대뿐만 아니라 SRI와 AWD와 같은 물관리의 고도화가 필요한 농업기술의 채택이 매우 쉬워진다. SRI와 AWD의 채택은 단순히 비점오염원의 감축뿐만 아니라 관개용수와 온실가스 또한 크게 감축할 수 있어 향후 물 부족과 기후변화 대응에 기여할 수 있다. Choi et al. (2014)는 SRI를 통해 논 비점오염원을 BOD 44%, SS 43%, TN 23%, 그리고 TP 36% 저감하였다고 보고하였다. 또한 최근의 연구에 따르면 아시아 지역에서 관행의 담수재배로 생산한 쌀에는 독성이 매우 강한 비소의 함량이 높는데, 간단관개를 기본으로 하는 AWD를 활용하면 쌀의 비소함량을 관행의 담수재배보다 59~65%까지 낮출 수 있다고 보고했다(LaHue et al., 2016; Linquist et al., 2014). 이와 같이 관개물꼬의 자동화 시설의 도입은 새만금 유역의 농업비점오염원에 의한 수질의 악화를 개선하며, 관개용수를 획기적으로 감축하여 농업수자원의 이용효율을 높이며, 기후변화로 인한 물 부족에 효율적으로 대응할 수 있다.

4. 결 론

BMPs 처리에 의한 유출량 저감율은 배수물꼬(SO#3, 25%)와 토양검정시비(SO#1, 27%)에서 비교적 높았고, 완효성비료(SO#4, 9%)와 복합처리(SO#2, 7%)에서 상대적

으로 낮았다. 평시 유출, 강우시 유출, 썩레질/모내기 유출, 중간낙수 그리고 최종낙수 등 영농활동기별로 유출량을 측정하였을 때, 평시 유출은 총유출량 대비 47.3~51.7%로 가장 많았다. 논외 무효방류를 최소화하여 평시 유출을 가능한 줄이면서 농업용수의 이용효율을 높일 필요가 있다.

BMPs 처리별 논 유출수의 비점오염원 농도는 변화의 폭이 매우 높았고 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 그러나 썩레질/모내기철의 SS 농도는 다른 영농활동기보다 10배 정도 높았고 다른 수질측정항목도 높게 나타나서 이 시기의 유출수 관리가 유역의 수질관리에 매우 중요하다고 판단되었다.

BMPs 처리에 관계없이 수질인자별 관측기간의 비점오염부하는 변동폭이 컸다. 그러나 관행(CT) 대비 BMPs 처리의 비점오염부하 저감율은 SS 0~42.8%, BOD5 12.5~16.1%, TOC 17.8~43.5%, TN 23.9~44.7%, 그리고 TP -7.7~50%의 범위로 나타나 BMPs 처리는 논외 비점오염원을 줄이는데 기여하는 경향을 보였다.

평시 유출수의 유출심 1 mm 당 오염부하를 1로 했을 때, 썩레질과 모내기철의 SS 부하는 최소 4.9배에서 최대 27.5배로 가장 높게 나타났다. 평시에 비해 썩레질/모내기철과 강우시의 오염부하 기여율이 상대적으로 높게 나타났으므로 논외 비점오염부하는 썩레질과 모내기철, 그리고 장마철 비가 올 때 중점적으로 제어할 필요가 있다.

논외 유출량, 비점오염원 농도와 부하는 BMPs 실험처리와 밀접한 관계를 보이지 않았다. 이는 농업인들이 BMPs 도입에는 찬성하였으나, 시범사업에 참여를 하면서 BMPs의 원칙(토양검정시비와 완효성 시비의 권장사용량 준수, 그리고 배수물꼬의 철치와 관리)을 충분히 준수하지 않았기 때문으로 판단된다. 다만, 시범사업에 참여한 농업인들은 2년의 시간이 지나며 비점오염원의 중요성과 BMPs의 채택에 긍정적으로 공감하는 경향은 보였다.

새만금 유역에서 논외 비점오염부하를 줄이기 위한 최선의 정책적 대안은 농민의 노동력과 시간투자가 가장 작을 수 있는 물관리의 자동화로 판단되었다. 용수로의 관개물꼬와 논외 담수심을 근거리 무선통신으로 연동시켜 일정한 담수심마다 관개물꼬를 개폐시켜 논외 담수심은 유지하면서도 무효방류를 최소화하면 비점오염부하의 최소화뿐만 아니라 관개용수를 획기적으로 감축할 수 있다. 또한 본 연구에서 활용한 배수물꼬 BMP뿐만 아니라 고도의 물관리가 요구되는 SRI와 AWD 농법의 도입도 물관리 자동화가 도입되면 매우 용이할 수 있다. 따라서 수질오염총량제, 비점오염관리 등 정책적으로 논 BMPs를 도입할 때는 이와 같은 고려사항을 충분히 반영해야 할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사 한국농어촌연구원(계약번호: 20160472433-00)과 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구구성비(관리번호-520150128)로 연구하였으며, 저자들을 위 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Choi, J. D., G. Y. Kim, W. J. Park, M. H. Shin, Y. H. Choi, S. I. Lee, and D. K. Yun, (2014). Effect of SRI water management on water quality and greenhouse gas emission in Korea. *Irrigation and Drainage* 63(2):263-270. doi: 10.1002/ird.1843
- Jeon, J., J. Jung, Y. Kim, L. Kim, (2018). A review of research trend related to NPS and suggestion for research direction in the future. *J. of Wetlands Research*, 20(1):80-93. [Korean Literature]
- Kal, B., J. Park, H. Kwon, T. Im, J. Lee, (2017). A study on the management of non-point source using peak water quality concentration. *J. of Wetlands Research*, 19(3):287-295. [Korean Literature]
- LaHue, G.T., R. L. Chaney, M. A. Adviento-Borbe, A. Bruce, and B. A. Linquist, (2016). Alternate wetting and drying in high yielding direct-seeded rice systems accomplishes multiple environmental and agronomic objectives. *Agric. Ecosyst. Environ.* 229(1): 30-39. doi:10.1016/j.agee.2016.05.020
- Linquist, B. A., M. Anders, M. A. Adviento-Borbe, R. L. Chaney, L. L. Nalley, E. F. F da Rosa, C. van Kessel, (2014). Reducing greenhouse gas emissions, water use and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biol.* doi:10.1111/gcb.12701.
- Malyan, S. K., A. Bhatia, A. Kumar, D. K. Gupta, R. Singh, S. S. Kumar, R. Tomer, O. Kumar, N. Jain, (2016). Methane production, oxidation and mitigation: A mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors. *Science of the Total Environment* 572(2016): 874-896. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.182
- Ministry of Agriculture, Forest and Rural Affairs (MAFRA), (2018). *Current Status of Saemanguem Project*. Reported to Environment Sub-committee, Saemanguem Council. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), (2004). *Standard Methods for Water Quality Analysis*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), (2006). *Water Environment Management Basic Plan - The 4 Major River Basin Water Quality Conservation Basic Plan (2006-2015)*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), (2012). *2nd Stage Non-point Source Pollution Management Comprehensive Measures (2012-2020)*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), (2014). *Introduction to non-point source management in Korea*. A presentation in International Symposium for 22nd Anniversary of World Water Day 2014. March 26, 2014.
- Ministry of Environment (MOE), (2017). Forum for sharing agricultural BMP examples considering the environment of Icheon city, Korea. Conducted as a part of demonstration project for expanding application and implementation of agricultural BMPs for NPS pollution management. Nov. 22, 2017. Icheon city, Korea. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), Jeollabuk-do (Jeonbuk), (2018). *Current status of non-point source pollution reduction measures in Saemanguem watershed. Reported to Environment Sub-committee*, Saemanguem Council. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER), (2014). *Proposed Non-point Source Pollution Management Measures of Saemanguem Watershed*. NIER-SP2014-324. Publication No.: 11-1480523-002215-01. [Korean Literature]
- Norman, U., (2004). System of rice intensification responds to 21st century need. *Rice Today*. 3(3): 42
- Park, K., S. Niu, Y. Kim, (2013). Reduction efficiency of the stormwater wetland from animal Feeding-Lot. *J. of Wetlands Research*, 15(1):79-90. [Korean Literature]
- Rural Research Institute (RRI), Kangwon National University (KNU), (2015). *Monitoring of BMP Implementation and Dissemination to control Agricultural NPS Pollution*. A Research Report. [Korean Literature]
- Rural Research Institute (RRI), Kangwon National University (KNU), (2016). *Monitoring of BMP Implementation and Dissemination to control Agricultural NPS Pollution*. A Research Report. [Korean Literature]
- Seo, J. Y., B. K. Park, W. J. Park, S. I. Lee, Y. H. Choi, M. H. Shin, J. D. Choi, (2018). Effect of SRI water management on the reduction of greenhouse gas emissions and irrigation water supply in paddy. *J. Korean So. of Agri. Eng.* 60(1): 79~87. doi: 10.5389/KSAE.2018.60.1.079 [Korean Literature]
- Siopongco J. D. L. C, R. Wassmann, B. O. Sander, (2013). Alternate wetting and drying in Philippine rice production: Feasibility study for a clean development mechanism. *IRRI Technical Bulletin* No. 17. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- SRI-Rice. (2016) SRI methodologies. Available from: <http://sri.cals.cornell.edu/aboutsri/methods/index.html>
- Thakur A. K., N. Uphoff, W. Stoop, (2016). Scientific underpinnings of the System of Rice Intensification (SRI): What is known so far. *Advances in Agronomy* 135: 147-179.
- Xu Y., J. Ge, S. Tian, S. Li, A. L. Nguy-Robertson, M. Zhan, C. Cao, (2015). Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China. *Science Total Environ.* 505: 1043-1052.