

논에서의 양분유출실태조사와 기후변화시나리오에 따른 양분유출 영향평가



최 동 호
농업과학원/박사후연구원
cdho8245@korea.kr



최 순 군
농업과학원/농업연구관
soonkun@korea.kr



허 승 오
농업과학원/농업연구관
soilssohur@korea.kr



조 재 필
APEC 기후센터/
응용사업팀장
jpcho89@gmail.com

1. 기후변화 시나리오와 농업

기후변화에 관한 정부 간 기후변화협의체(Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC)는 2013년 제 5차 평가 보고서(Fifth Assessment Report, AR5)를 채택하고, 대표농도경로인 RCP(Representative Concentration Pathway)를 기반으로 미래 기후변화 자료의 구축을 제시하고 있다(IPCC, 2013a; IPCC, 2013b, Yoo et al., 2015). 기후변화 시나리오는 온실가스, 에어로졸의 변화 등 인위적인 원인에 따른 기후변화를 전망하기 위해 미래온실가스 농도와 기후변화 수치모델을 이용하여 계산한 미래기후 전망정보이다(KMA, 2013). 기후모델은 몇 개의 지배방정식과 모수화를 통해 실제 기후시스템을 단순화시킨 프로그램으로, 생산된 기후변화 자료는 필연적으로 불확실성을 내포하고 있지만(NIMR, 2009), 현실점에서는 그것을 기본으로 하고 홍수, 가뭄, 수질 등 어떠한 변화나 문제가 생기는지 파악하여 향후 발생할 수 있는 부정적 영향을 최소화하는 대책을 강구해야 한다(Noh, 2009). 특히, 기후변화 시나리오는 동일지역, 시기일지라도 GCM의 종류에 따라 다양한 미래 모의 결과가 발생할 수 있으며 해당 GCM의 강수량 및 기온 등의 증감 경향에 의존되는 결과가 도출될 수 있다. 따라서, 기후변화 시나리오 적용 전에 다양한 GCM들의 기상자료의 경향성을 사전에 분석하고, 이를 바탕으로 GCM을 선정한다면 보다 합리적인 기후변화 관련 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다(Yoo et al., 2015).

국내의 경우 기상청에서 HadGEM3-RA 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)을 활용한 한반도 고해상도 기후변화 자료 및 미래 기후변화 전망을 제시하고 있고, 다양한 연구에서 기상청의 미래 기후변화 자료를 활용하고 있다(Park et al., 2014; Yoo et al., 2015). 특히, 기후변화에 따른 강수 및 기온 등의 기후특성의 변화가 농업 수환경 관점에서 오염물질의 유출에 미치는 영향을 평가하고 저감 방안 도출을 위한 연구의 중요성이 증대되고 있다

(Hwang et al., 2006).

2. 기후인자와 논 양분유출

Hwang et al.(2006)은 농촌 소유역을 대상으로 1964년부터 2004년까지의 강우자료를 ① 일강우량이 3일 연속이면 강우 첫날의 강수량과 마지막 날의 강우를 그 사이 일 강수량에 더하여 전체 강수량 변화 없이 강우사상별 일 최대 강수량 증가, ② 50mm 이상의 일강우량에 10% 증가, ③ 50mm 이상의 일 강우량에 20% 증가, ④ 전체 일 강우량을 20% 증가 등 4개의 강우변화 조건으로 GWFL 모형을 적용하여 유출량, T-N 부하량, T-P 부하량, 유사량 변화를 분석한 결과 ①의 경우 유출량보다는 유사량이 민감하였으며, ②와 ③은 유출량이 유사량보다 민감하게 반응하였고, ④의 경우 다른 시나리오에 비해 유출량, 유사량, T-N 부하량, T-P 부하량이 크게 나타났으며, 증가량은 각각 64.5%, 76.1%, 32.5%, 60.4% 였다. 또한, 기후변화 시나리오를 적용한 결과 연 강수량 변화가 큰 시나리오에서 유출량, 유사량, T-N, T-P 부하량은 각각 24.6%, 60.1%, 14.4%, 27.7%가 증가하였지만, 연 강수량 변화가 가장 작았던 시나리오에서는 유출량은 -0.4% 감소, 유사량, T-N, T-P의 부하량은 14.6%, 3.0% 7.2%가 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 연 강우일수가 20일 감소하는 경우에 연 강우일수가 10일 감소 경우보다 유출량과 유사량, T-N, T-P 부하량은 4~6%, 20~25%, 4~5%, 9~12%가 증가하는 것으로 나타났다.

기온의 상승은 식물의 성장의 둔화, 토지 피복의 불량, 토양의 유기물 함량 증가 등 농업환

경에 다양하게 영향을 미치며, 이는 유출량과 유사량의 변화, 질소와 인의 형태 변화를 야기한다. Li et al.(2011)은 SWAT 모델을 이용하여 온도변화를 -2°C에서 3°C까지 0.5°C씩 변화를 주면서 유출량과 유사량, 질소와 인의 변화를 분석하였다. 기온 변화에 따른 유출량 변화는 -0.81%에서 0.13% 로 큰 변화를 보이지 않았지만 유사량의 경우 3°C에서 13.58%가 증가하는 것으로 나타나 토양의 손실을 가속화 시킬 것으로 분석되었다. 무기 질소는 40.17% 증가, 무기 인은 5.86% 증가하는 것으로 나타났다. 온도상승에 따른 질소와 인의 무기화는 인에 비해 질소가 민감한 것으로 나타났다. 또한, 토양에 흡착되어 있는 질소와 인은 유사량과 함께 수계로 유입되어 하천의 부영양화를 유발 할 것으로 판단하였다.

3. 논 양분유출과 농경지 최적관리방안

우리나라의 경우 몬순기후지역으로 여름철에 강우가 집중되며, 특히 기후변화로 인한 강우일수 감소, 강우량과 강우강도의 증가에 따른 비점오염원의 유출특성 변화는 오염원 관리의 어려움이 증대되고 있다(Relevant Ministerial Consortium, 2012). 특히, 다양한 오염원 중 토지계(도시, 논, 밭, 산림, 기타)에서 63.5%로 가장 크게 기여하는 것으로 보고되고 있으며, 특히, 논 및 밭의 농경지에서 하천 및 호소로 유입되는 오염물질 중 30% 이상이 농업활동으로 유입된다(Yoon, 2010). 농경지로부터의 비점오염 물질은 재배작물, 재배지역, 영농방법, 강우특성, 토양특성, 수원공의 종류 등 다양한 원인에 의해 배출특성이 다르게 나타나고, 넓은 지역에서 발생되

기 때문에 배출 후에는 오염물질의 처리가 어렵다 (Kim et al., 2016). 따라서, 다양한 수문 및 영농조건의 장기적인 변화를 반영하여 축적된 자료를 활용한 오염물질의 유출 경로의 파악과 이를 기반으로 한 발생원에서의 관리가 중요하다.

논에서의 현장 모니터링을 통한 오염물질 정량화 연구사례를 살펴보면, Choi et al.(2015)은 저수지공급논의 T-N, T-P 유출부하량은 각각 6.2~11.3(평균: 9.6)kg ha⁻¹, 0.5~2.5(평균: 1.6)kg ha⁻¹이었으며, 지표수 공급논의 경우 각각 8.9~21.2(평균: 14.6)kg ha⁻¹, 2.0~3.2(평균: 2.5)kg ha⁻¹로 나타났다. Hwang et al.(2004)은 지표수와 지하수를 관개용수를 사용하는 논에서 T-N과 T-P 유출 특성을 분석하였는데, 지표수 관개 논에서의 T-N과 T-P 유출 부하량은 50.78kg ha⁻¹, 2.31kg ha⁻¹로 지하수 관개 논의 T-N과 T-P 유출 부하량인 8.26kg ha⁻¹와 0.42kg ha⁻¹보다 큰 것으로 보고 하였다. Kim et al.(2005)은 지표수 관개논에서 유출되는 T-N, T-P 부하량은 각각 17.3~22.1(평균: 19.7)kg ha⁻¹, 3.6~5.0(평균: 4.3)kg ha⁻¹로 보고하였다. 연구자별 제시하고 있는 부하량의 차이는 연도별, 지역별 기상 조건과 영농방법의 차이가 원인인 것으로 보고되고 있다 (Kim et al., 2005; Song et al., 2012; Choi et al., 2012).

이에 논에서의 유출특성 분석과 오염물질 저감방안 적용, 그리고 저감효과 분석을 위한 연구가 수행되고 있다. 논 유출 오염물질 저감방안으로 물꼬관리, 완효성 비료 사용, 저류지 등이 고려되고 있다(Kim et al., 2016; Lee et al., 2005; Yoon et al., 2003). 물꼬의 높이에 따라 저감량이 다르게 나타나며 물꼬높이를 중간

낙수 전 7cm, 중간낙수 후 12cm로 관리할 경우 관행적으로 물관리가 이루어지는 경우보다 유출량은 15%, T-N 부하량은 25%, T-P 부하량은 26%가 저감되는 것으로 나타났다. 또한, 논은 작물의 재배기간동안 강우와 관개로 공급된 양이 담수상태로 존재하기 때문에 강우시의 유출 외에도 비강우시 유출이 발생하기 때문에, 물꼬관리를 하는 경우 비강우시에도 15%의 유출량이 저감된다. 완효성 비료 사용시 유출되는 T-N은 관행적인 방법과 비교하여 45%, T-P의 경우 50%가 감소하는 것으로 나타났다(Kim et al., 2016). Kim et al.(2014)은 돈분퇴비 사용 후 저류지를 통하여 유출되는 T-N은 73.6%(9.52→2.52kg ha⁻¹), T-P 74.9%(3.16→0.80kg ha⁻¹)의 저감효율이 있는 것으로 보고하였다.

4. 현장 모니터링과 양분유출 산정 방법

4.1 연구의 목적

본 연구에서는 관행적으로 이루어지는 논에서의 양분유출 관련 실태조사와 더불어 이를 저감하기 위한 물꼬관리, 토양검정시비, 완효성비료 처리, 및 복합처리(물꼬관리+토양검정시비)를 통한 양분유출 저감효과를 분석하고자 한다. 또한, 기후변화 시나리오를 활용하여 기후특성의 변화를 전망하고 논에서의 양분유출량을 산정하기 위한 모형에 활용하여 향후 미래의 양분손실의 유출특성을 파악하고자 한다.

4.2 현장모니터링 대상지구

본 연구의 시험지구는 동진강 수계에 위치한 전



그림 1. 논 모니터링 위치 및 계측기기 현황



(a) 시판되는 배수물꼬



(b) 배수물꼬 설치 전경

그림 2. 논에서의 배수물꼬 장치 및 설치 예
(source : The Farmers Newspaper (2015))

라북도 부안군 백산면 용계리에 위치하고 있으며, 총 5개[대조구, 물꼬관리, 안효성비료, 토양검정 시비, 복합처리의 시험지구를 구성하였다. 처리구별 면적은 각각 대조구 5.2ha, 물꼬관리 4.2ha, 안효성비료 5.6ha, 토양검정시비 37.5ha, 복합처리 12.5ha이다. 관개용수는 한국농어촌공사 부안지사에서 관리하는 팔왕양수장(최대 양수량 $0.833\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$, 관개면적 385.2ha)에서 공급 받는다(그림 1).

4.3 논 양분유출 저감을 위한 최적관리방안 적용

논에서의 양분유출 저감을 위한 최적관리 방법으로 물꼬관리, 안효성 비료시비, 토양검정시비, 복합처리(물꼬관리, 토양검정시비)를 선정하여 적용하였다. 먼저 물꼬관리는 일정높이로 담수심을 조정하여 강우량과 관개량의 일부를 저류함으로써 배수로로 유입되는 물의 양을 저감하는 방법이며(그림 2), 안효성 비료는 질소 비료 기준으로 3번 사용하는 관행과 달리 영농



(a) 완효성 비료



(b) 완효성 비료 사용

그림 3. 논에서의 물꼬관리 적용

<source : (a) Rural women's newspaper (2010), (b) Yeongwang 21 newspaper (2015)>



(a) 비료 시비 전 토양 샘플



(b) 농촌진흥청 비료사용처방서

그림 4. 토양 검정을 통한 비료사용 처방서 발급

초기에 1회 시비가 이루어지며, 비료의 성분 시간의 경과에 따라 효과가 일정하게 나타난다(그림 3). 토양검정 시비의 경우 적용대상 시험 지구의 토양을 영농 전에 채취하였으며, 실험실로 운반 후 pH, 유기물, 유효인산, 유효규산, 치환성 양이온(칼륨, 칼슘, 마그네슘)을 분석하였다. 분석된 자료를 바탕으로 농촌진흥청 흙도량

시스템을 이용하여 비료시비처방서를 논 필지별로 발급받아 시비하였다(그림 4).

4.4 수질 및 수문 모니터링

강우시와 비강우시의 물수지와 수질특성 파악을 위해 배수로 말단에서 비강우시에 주 1회 모

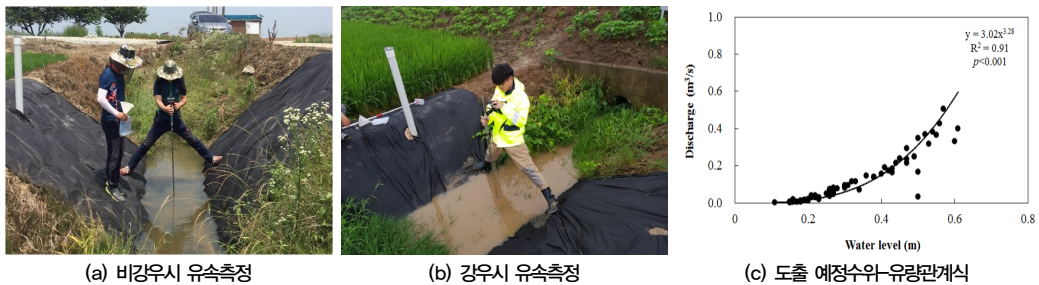


(a) 비강우 시료채취

(b) 강우시 시료채취

(c) 수질분석

그림 5. 논 배수로의 시료 채취 및 분석



(a) 비강우시 유속측정

(b) 강우시 유속측정

(c) 도출 예정수위-유량관계식

그림 6. 논 배수로의 유속 측정 및 수위-유량관계식 도출
(source : (c). Lee et al.(2014))

니터링을 수행하고 있으며, 강우시에는 향후 자동수질채취기를 이용할 예정이다(그림 5). 처리구별 유출량을 산정하기 위해 각 배수로 말단에 압력식 수위계(Orphimedes, OTT Hydromet, Germany)를 설치하여 수위를 관측하고 있다. 관측된 수위는 수위와 유량과의 관계로부터 도출된 회귀식을 이용하여 유량 산정에 활용할 예정이다(그림 6). 또한, 담수심 측정기와 침투량계를 설치하였다(그림 6). 수질 분석 항목은 T-N과 T-P 이며, 국립농업과학원의 수질분석 실무 매뉴얼에 따라 분석하고 있다(National Institute of Agricultural Sciences, 2016).

4.5 논 유출부하량 산정 방법

각 처리구별로 관측된 유량과 수질 자료를 식

(1)에 대입하여 부하량을 산정할 예정이다. 미세측 날짜의 농도는 관측값을 이용하여 각 계측점 사이의 농도를 선형 보간을 하고, 일 부하량(Daily load)은 유량과 농도의 곱으로 산정한 다. 추후 각 처리구별 면적으로 나누어 단위면적당 일 부하량을 계산을 하고, 그 값들을 더하여 영농기간동안 유출되는 부하량을 산정할 예정이다.

$$Load = \sum_{i=1}^N (Q_i \times C_i \times \Delta t) / A \quad \text{식 (1)}$$

여기서, Load는 관측 부하량(kg ha⁻¹)이며, Qi: 유출량(m³ s⁻¹), Ci : 관측농도(mg L⁻¹), Δt: 유출지속시간 간격, A는 시험구역의 면적(ha)이다.

5. 논 모델의 미래 기후정보 적용과 논에서의 양분유출 특성분석

5.1 기후변화 시나리오에 따른 상세화 자료 작성

최근의 기후변화로 인해 가뭄, 국지성 이상호우가 빈번하게 발생하고 있어 이상기후 관점의 기후변화에 대한 영향 평가가 요구된다. 하지만 선택된 GCM의 특성과 상세화 기법에 따라 미래 기간에 대한 기후특성이 다르게 전망될 수 있기 때문에 논으로부터의 양분유출에 민감한 기후특성을 도출하고 과거 기간의 관측자료와의 비교를 통한 재현성 평가 결과를 이용하여 적합한 GCM 및 상세화 방법을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 APEC 기후센터와 공동연구를 통해 국내외의 다양한 GCM 자료를 수집하고 다음과 같은 절차를 통해 본 연구의 목적에 부합하는 GCM을 제공하고자 한다. ① 상세화 이전 GCM의 관측자료 기반의 시공간적 재현성 분석을 통한 부적합 GCMs 배제, ② 다중의 통계적 상세화 기법을 이용한 관측지점별 미래 기후변화 전망 자료 생산, ③ 양분유출에 중요한 기후특성의 재현성 분석을 통한 GCM별 가중치 결정, ④ 미래기간의 변동성을 기반으로 하는 GCM의 우선순위 결정.

5.2 처리구별 논외 양분유출 모의를 위한 모형 선정

모형에서 논에서의 오염원의 유출특성과 오염원 저감을 위한 최적관리기법의 적용에 따른 오염원의 변화를 반영하기 위해서는 대상 모형이 논에서의 재배환경 및 다양한 영농기법을 반

영할 수 있어야 한다(Choi et al., 2016). 현재 비점오염 유출부하량의 모의가 가능한 모형 중 농업구역의 농경지 관리에 따른 효과분석이 가능한 모형으로 APEX 모형이 활용되고 있다. 하지만 논에서의 담수, 이앙 등을 반영하지 못해 논으로 구성된 지역에서의 적용에는 한계가 있다(Choi et al., 2016). 이에 Texas A&M과 농촌진흥청은 국제공동연구를 통해 논에서의 물수지 및 수질기작을 고려할 수 있도록 APEX 모형 내 모듈을 수정하여 APEX-Paddy 로 명명하였다(RDA, 2015). 따라서, 각 처리구별 관측자료를 이용하여 모형 내 매개변수를 보검정하고 미래 기후정보를 적용하여, 가까운 미래의 논에서의 양분유출 특성을 추정하고 저장하기 위한 관리방안을 모색할 예정이다.

6. 결론

논으로 투입되는 영양물질은 벼의 생육과 생산량 등 농업환경에 중요한 요인이다. 하지만, 벼의 생육과정에 이용되지 못하고 인근 수계로 유출되는 영양물질은 부영양화 등 부정적 영향을 초래한다. 특히, 기후변화에 따른 장기간의 무강우일수와 국지성 호우는 논에서의 효율적인 양분의 활용을 더욱 어렵게 만든다. 따라서, 본 연구를 추진함으로써 실제 논에서의 양분유출 실태를 조사하고, 이를 저장하기 위한 방안을 적용하고, 각 저장방법 별 효과를 검증하고자 하였다. 또한, 미래 기후자료와 영농방법, 최적관리를 통한 저장방안 등이 고려되는 APEX-Paddy 모형을 이용하여 가까운 미래의 기후변화에 따른 양분유출을 예측하고 선제적 대응을 위한 방안 제시가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Burger, M. and Jackson, I. A. 2003. Microbial Immobilization of Ammonium and Nitrate in Relation to Ammonification and Nitrification Rates in Organic and Conventional Cropping Systems, *Soil Biology and Biochemistry*, 35(1), pp. 29-36.
2. Choi, D. H., Jung, J. W., Yoon, K. S., Choi, W. J., Cho, S. H., Beam, J. A. and Yoo, S. H. 2015. Comparison of Unit Load from Paddy Field by Various Estimation Methods. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 24(5), pp. 407-419.
3. Choi, S. K., Kim, M. K., So, K. H. and Jang, T. I. 2016. Application of APEX-PADDY Model Considering the Growth Environment of Paddy Rice. *Rural resource: magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 58(2), pp. 23-27.
4. Eo, J. N., Hong, S. C., Kim, M. H., Choi, S. K., Kim, M. K., Jung, G. B. and So, K. H. 2016. Responses of Soil Chemical Properties and Microbiota to Elevated Temperature under Flooded Conditions, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 35(1), pp. 32-38.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013a. Summary for Policy makers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013b. Technical Report, In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
7. Kim, M. K., Kim, M. H., Choi, S. K., Choi, K. J., Hong, S. C., Jung, G. B. and So, K. H. 2014. Reduction of Pollutant Load by Small Pond in a Rice Paddy Applied with Pig Manure Compost. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 22(4), pp. 21-27.
8. Kim, K. U., Kang, M. S., Song, I. H., Song, J. H., Park, J. H., Jun, S. M., Jang, J. R. and Kim, J. S. 2016. Effects of Controlled Drainage and Slow-release Fertilizer on Nutrient Pollutant Loads from Paddy Fields, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 58(1), pp. 1-10.
9. Kim, M. K., Roh, K. A., Lee, N. J., Seo, M. C. and Koh, M. H. 2014. Nutrient Load Balance in Large-Scale Paddy Fields during Rice Cultivation, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 38(3), pp. 164-171.
10. Korea Meteorological Administration (KMA), 2013. *Climate Change Scenario: Use of Local Government and Policy Support*, 11-1360000-000949-01.
11. Lee, K. B., Park, C. W., Park, K. L., Kim, J. G., Lee, D. B. and Kim, J. D. 2005. Nitrogen Balance in Paddy Soil of Control-Release Fertilizer Application, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 157-163.
12. Lee, J. B., Lee, J. Y., Li, S. H., Jang, J. R., Jang, I. G. and Kim, J. S. 2014. Nutrient Balance in the Paddy Fields Watershed with a Source of River Water, *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(5), pp. 11-19.

13. Li, Y., Chen, B. M., Wang, Z. G. and Peng, S. L., 2011. Effects of Temperature Change on Water Discharge, and Sediment and Nutrient Loading in the Lower Pearl River Basin base on SWAT Modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1), pp. 68-83.
14. National Institute of Agricultural Sciences, 2016. *Agricultural Water Quality Analysis Practical Affairs Manual*(Revised edition). National Institute of Agricultural Sciences.
15. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2009. *Understanding of Climate Change (II) -Climate change in the Korean Peninsula: Present and future.*
16. Noh, J. H. 2009. Water Management Policy Direction for Climate Change. *Meteorological Technology & Policy*, 2(2), pp. 16-27.
17. Park, J. Y., Jung, H., Jang, C. H. and Kim, S. J., 2014. Assessing Climate Change Impact on Hydrological Components of Yongdam Dam Watershed Using RCP Emission Scenarios and SWAT Model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 56(3), pp. 19-29.
18. Relevant Ministerial Consortium, 2012. *The 2nd Comprehensive Plan on Nonpoint Source Management*, 11-1480000-001222-01. Office for Government Policy Coordination Prime Minister's Secretariat, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
19. Rural Development Administration (RDA), 2015. *APEX model user manual*. Rural Development Administration (RDA).
20. *Rural women's newspaper* (2010)
21. Shim, K. M., Roh, K. A., So, K. H., Kim, G. Y., Jeong, H. C. and Lee, D. B. 2010. Assessing Impacts of Global Warming on Rice Growth and Production in Korea, *Climate Change Research*, 1(2), pp. 121-131.
22. *The Farmers Newspaper*, 2015.
23. *Yeongwang 21 newspaper*, 2015.
24. Yoo, S. H., Kim, T. G., Lee, S. H. and Choi, J. Y. 2015. Trend Analysis of Projected Climate Data based on CMIP5 GCMs for Climate Change Impact Assessment on Agricultural Water Resources, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(5), pp. 69-80.
25. Yoon, C. G., 2010. Development of Nonpoint Pollution Abatement and Best Management Practice. *Rural resource: magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 25(4), pp. 15-28.
26. Yoon, C. G., Ham, J. H. and Jeon, J. H. 2003. Mass Balance Analysis in Korean Paddy Rice Culture. *Paddy and Water Environment*, 1(2): 99-106.