

APEX 모델을 이용한 옥수수-가을배추 재배지의 시비 수준별 비점오염 부하량 평가

Evaluation of Non-Point Pollution Loads in Corn-Autumn Kimchi Cabbage Cultivation Areas by
Fertilizer Application Levels Using the APEX Model

이종문^a · 엽소진^b · 전상민^c · 이병모^d · 양예린^{e,f} · 최순군^{g,†}

Lee, Jong-Mun · Yeob, So-Jin · Jun, Sang-Min · Lee, Byungmo · Yang, Yerin · Choi, Soon-Kun

ABSTRACT

Agriculture is recognized as an important anthropogenic cause of non-point source loads. Improved understanding of non-point source loads according to fertilization practices can promote climate change and eutrophication mitigation. Thus, this study evaluated the impact of conventional and standard fertilization practices on non-point pollution (NPP) loads in a dual-cropping system, utilizing the Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model. Our research objectives were twofold: firstly, to calibrate and validate the APEX model with observed data through experiments from 2018 to 2023; and secondly, to compare the NPP loads under conventional and standard fertilization practices. The model calibration and validation showed satisfactory performance in simulating nitrogen (N) and phosphorus (P) loads, illustrating the model's applicability in a Korean agricultural setting. The simulation results under conventional fertilization practices revealed significantly higher NPP loads compared to the standard fertilization, with P loads under conventional practices being notably higher. Our findings emphasize the crucial role of recommended fertilization practices in reducing non-point source pollution. By providing a quantitative assessment of NPP loads under different fertilization practices, this study contributes valuable information to sustainable nutrient management in agricultural systems facing the dual challenges of climate change and environmental conservation.

Keywords: APEX model; fertilization practices; non-point pollution; sustainable agriculture; water quality

1. 서론

기후변화에 따른 기온 상승 및 이상기상으로 집중 호우와
강우 패턴 변화가 발생하고, 이는 농업환경 전반에 영향을 미
치고 있다 (Murdoch et al., 2000; Koo et al., 2017). 농경지에
과도하게 투입한 양분과 집중 호우는 농업지역에서 발생하는

비점오염에 의한 수질오염 기여도를 증가시킬 것으로 예상되
며, 기후변화에 따른 비점오염원 관리의 필요성이 더욱 중요
시 되고 있다 (Kim et al., 2013; Lee and Yoon, 2019). 국내
농업 분야의 질소 (nitrogen, N) 수치는 230 kgN/ha이며, 인
(phosphorus, P) 수치는 46 kgP/ha로 OECD 국가 중 가장 높은
것으로 보고되고 있다 (OECD, 2024). 양분수지는 농경지에
추가된 양분 (비료, 가축분뇨, 유기물, 대기 침적 등)과 제거되
거나 손실된 양 (수확된 작물, 질소의 휘발, 용탈, 침식 등)을
비교한 것으로 농업에서 작물 생산량을 향상시키기 위해 비
료 사용은 불가피한 것이 사실이다. 다만, 과도한 비료 사용은
강우 및 관개로 인해 주변 수역으로 유출되어 수질 오염으로
이어질 수 있어 적절한 관리가 필요하다 (Nam et al., 2011;
Alori et al., 2017; Cui et al., 2020). 기후변화는 이상기상을
야기하고, 결과적으로 국내 농경지에서 배출되는 비점오염
배출 비중을 더욱 높일 것으로 예상된다 (Murdoch et al.,
2000).

정부에서는 농경지의 적절한 시비를 위해 작물별 비료 사
용처방 기준을 제시하고 있다 (NAS, 2019). 그러나 대부분의
농가에서 경험에 의존하고 있으며, 실제 사용한 비료 투입량
은 질소 기준으로 추천량보다 28~140 kgN/ha 이상 더 많은
것으로 조사되었다 (NAS, 2020). 이는 농경지 양분 집적과

^a Post Doctoral Researcher, Climate Change Assessment Division,
National Institute of Agricultural Sciences

^b Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute
of Agricultural Sciences

^c Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute
of Agricultural Sciences

^d Senior Researcher, Climate Change Assessment Division, National
Institute of Agricultural Sciences

^e Collaborative Researcher, Climate Change Assessment Division,
National Institute of Agricultural Sciences

^f Master Course, Department of Agronomy, Jeonbuk National University

^g Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute
of Agricultural Sciences

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-238-2504, Fax: +82-63-238-3823

E-mail: soonkun@korea.kr

Received: April 15, 2024

Revised: June 26, 2024

Accepted: July 16, 2024

비점오염 발생이라는 악순환의 원인이 될 수 있기 때문에 적절한 비료 사용을 위한 대책 마련이 필요하다. 이를 위해 정부는 농경지의 양분 과잉 투입으로 인한 환경 문제를 해결하기 위해 지역단위의 농경지 양분 부하 현황을 산출하고, 양분 수준을 관리하는 양분관리 제도의 단계적인 도입을 계획하고 있다 (ME, 2015). 또한, 양분관리 제도의 실행을 위해 농식품부에서는 2020년 공익형 직불제 개편을 통해 비료 사용량 준수, 부속 퇴비 사용 등의 의무준수 사항에 관한 기본형 공익직불제를 도입하여 인센티브를 지급하는 정책으로 농업환경 개선에 노력하고 있다 (Kim et al., 2021).

인센티브 정책을 효과적으로 수행하기 위해서는 농업인에게 최적관리프로그램 (Best Management Program, BMP)을 수행하도록 유도하고, 그 효과에 관한 정량적인 데이터 구축 및 평가가 필요하다. 농업에서의 BMP는 관개, 배수, 제방, 완충대, 단구, 수로, 비료, 가축분뇨 관리, 저류지, 저수지, 윤작 및 작물 선택, 농약 살포, 방목 및 경운 등을 포함한다 (Williams and Izaurralde, 2010; Mudgal et al., 2012; Koo et al., 2017). Hong et al. (2016)은 국내 고추 재배 시 화학비료를 사용했을 때, 총 질소가 10.1~11.5 kgN/ha, 총 인이 3.9~6.0 kgP/ha 유출된다고 보고하였으며, 우분 퇴비 투입 시 질소 9.9~12.0 kgN/ha, 인 4.5~6.6 kgP/ha, 돈분 퇴비 투입 시 질소 9.2~9.5 kgN/ha, 인 3.8~4.0 kgP/ha가 유출된다고 보고하였다. 여러 가지 BMP 전략 중 윤작은 농경지의 유출량을 58%, 인 유출을 85% 감소시키는 것으로 보고된 바 있다 (Jiao et al., 2011). Hunt et al. (2019)은 2모작 이상으로 다양한 작물을 포함하여 재배할 때, 수확량과 수익성을 유지 혹은 향상시키면서 양분 유출과 토양 침식 또한 상당히 낮추는 것으로 보고하였다. 다양한 작물을 재배할 때 2모작과 비교하여 총 질소 부하량 39%, 총 인 부하량을 30%까지 감소시킬 수 있다고 보고하였다. 양분관리 제도의 신속한 도입을 위해서는 윤작의 비점오염원 유출 패턴을 모니터링하고, 시비 수준에 따른 정량적인 비점오염원 유출량 평가가 필요하다.

최근에는 관측을 통한 농업부문 비점오염 평가의 한계를 극복하기 위해 다양한 유역 수문학적 분석 모형들이 개발되고 있으며, 다양한 환경조건 및 관리 조건을 고려한 비점오염 부하량 모의에 활용되고 있다 (Tuppad et al., 2010). 그러나 기존의 과정 기반 모델의 대부분은 중·대규모 유역 모델로 BMP의 결과를 효과적으로 분석하지 못하였으며 (Liu et al., 2017; Xingpo et al., 2021; Salaudeen et al., 2023), 복잡하고 불규칙적인 농경지 관리에 대한 분석이 어려웠다 (Tuppad et al., 2010; Ding et al., 2023). 반면, Agricultural Policy/ Environmental eXtender (APEX) 모델은 USDA와 텍사스 A&M 농업생명연구소에서 개발한 모델로 전 농장/소

규모 유역 관리에 활용하기 위해 개발되었다 (Williams et al., 2012; Mudgal et al., 2012). 이 모델은 바람과 물에 의한 침식, 지속가능성과 경제성, 관개와 수질, 토질, 작물 경합, 날씨와 해충 등의 요소를 고려하여 다양한 BMP를 평가하기 위해 구성되었다 (Williams et al., 2006; Williams et al., 2012).

Ramirez-Avila et al. (2017)은 APEX 모델을 활용하여 밭에서의 가축분뇨 투입에 따른 유출량과 인 부하량을 평가하였으며, Wang et al. (2008)은 옥수수 재배지에서 경운 방식에 따른 유출량과 퇴적량에 대해 평가한 바 있다. Baffaut et al. (2019)은 옥수수-콩-밀 재배지에서 무경운과 피복작물에 따른 유출량과 비점오염 부하량을 평가한 결과 APEX 모델은 유출과 관련한 예측 능력이 매우 우수했으며, 유출되는 비점오염원에 대해서도 대부분 만족할 만한 수준이라고 평가하였다. 그밖에도 APEX 모델은 집중적인 방목 회전, 식생수로, 분뇨 관리 등 다양한 농경지 관리에 활용되어 경관과 유역에 걸쳐 다양한 농업 시나리오를 모델링할 수 있는 유연성과 능력을 보여주었다 (Gassman et al., 2009).

그러나, APEX 모델은 미국의 지형과 재배환경을 바탕으로 개발되었기 때문에 자연환경 및 재배방식이 다른 국내 농경지에 바로 적용하는 것은 한계가 있다 (Koo et al., 2017). 국내의 경우, Choi et al. (2017)은 한국의 논벼 재배지에 대한 평가를 위해 논벼 재배 특성을 반영한 APEX 모델을 기반으로 APEX-paddy 모델을 개발하였다. 이후 Kamruzzaman et al. (2020)은 익산의 논을 대상으로 APEX-paddy 모델의 적용성을 검토하였고, Choi et al. (2021)은 SSPs 시나리오에 따른 논 필요수량 변동 평가를 수행한 바 있다. 또한, Bazrkar et al. (2023)은 작물 생산량 및 질소 부하량 변동을 평가하였다. 국내 밭의 경우, Koo et al. (2017)이 강원도 고령지 밭에서의 유출량과 인 부하량 평가를 통해 APEX 모델의 국내 적용성을 검토한 바 있다. 국내 논에서 APEX-paddy 모델을 활용하여 비점오염 부하량을 평가한 연구는 모델 개발 및 적용성 평가 등 활발하게 진행되고 있지만, APEX 모델을 활용하여 밭에서 비점오염원 부하량을 평가한 연구는 매우 부족하다.

따라서 본 연구에서는 APEX 모델을 활용하여 표준시비와 관행시비에 따른 옥수수 - 배추 2모작에서의 비점오염 부하량을 평가하고자 하였다. 이를 위해 옥수수 - 배추 재배 시 질소, 인의 부하량 평가를 위해 APEX 모델 입력 자료를 구축하였고, 시험포장 관측 자료를 활용하여 APEX 모델을 보·검정 하였다. 최종적으로 평년 기후에 대한 국내 표준시비와 관행시비의 비점오염 부하량을 모의하고 비교·평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상 지역

APEX 모델의 보 · 검정을 위해 전라북도 완주군 국립농업과학원 내 경사라이시미터 시험포장 (35°49'28"N, 127°02'50"E)을 조성하여 2018년~2023년 6년간 강우 유출수를 수집 및 분석하였다. 시험구는 너비 2 m, 길이 24 m로 조성하였으며 2반복으로 구성하였다. 시험구의 경사도는 13%이며, 상층부 토양 (0~20 cm) 특성은 모래 61.5%, 미사 28.1%, 점토 10.4%로 사양토 (sandy loam)였다. 연구 기간 중 연평균 강수량은 1394.7 mm이고, 연평균 기온은 14.2°C였다 (KMA, 2023). 연구 대상지는 문순기후로 대부분의 강수량은 7월과 8월 동안 집중되어 발생하였다.

2. 시험포장 운영 및 자료수집

시험포장에서 2018년~2019년은 옥수수 (대학찰) - 가을배추 (천고마비) 2모작을, 2020년~2023년은 옥수수 단작 재배를 하였다. 표준시비 및 영농일정 관리를 위하여 국립농업과학원의 작물별 비료 사용처방 (NAS, 2019)과 농업정보포털 농사로의 품목별 관리매뉴얼 (RDA, 2022)을 참고하여 수행하였다.

부하량 및 수질 샘플 수집을 위해 유출수 분취기 (공개특허 10-2013-0050011)를 설치하였다. 유출수 분취기는 유출수의 흐름 동력을 이용하여 샘플링 디스크를 회전시켜 유출수 일부 (1/100)를 채수하는 도구로 유출수 수량, 수질에 관한 준전수조사가 가능하게 한다. 수질 시료는 강우이벤트 종료 후

채수통의 물을 진탕한 후 상등액을 취하여 무균 채수병에 담아 분석실로 운반하여 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다. 시험포장 기상자료는 국립농업과학원 내 농업기상관측소 자료를 수집하여 사용하였고, 토양자료의 경우 농촌진흥청 토양환경정보시스템 “흙토람”에서 제공하는 자료를 활용하여 구축하였다 (NAS, 2023).

3. 발 비점오염 부하량 평가 모델

본 연구에서는 발의 비점오염 부하량을 평가하기 위해 APEX (version 1501) 모델을 사용하였다. APEX 모델은 농장 및 소유역 규모의 농업지역에 대하여 농업활동이 토양 및 물 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 개발되었다 (Williams et al., 2012; Mudgal et al., 2012; Bhandari et al., 2017). APEX 모형은 지형 및 토양특성, 기후, 관개방법, 작물 생육 및 작물 간 경합 등의 요소를 고려하여 경운, 시비, 관개, 작물 선택 및 윤작, 농약 살포 등 농장의 관리전략을 수립하고, 환경영향을 평가할 수 있다 (Williams et al., 2012; Kim et al., 2021). 이외에도 APEX 모형은 대기 중 이산화탄소 (carbon dioxide, CO₂) 농도와 기후변화를 고려하여 작물의 생장 및 생산량 변화를 모의할 수 있다 (Koo et al., 2017; Baffaut et al., 2019). APEX 모형은 일 단위로 모의되는 과정 기반 모형 (process based model)이며, 일부 과정은 시간 단위 또는 그보다 더 짧은 시간 단위에 대한 모의 구동이 가능하다 (Williams et al., 2012; Baffaut et al., 2019).

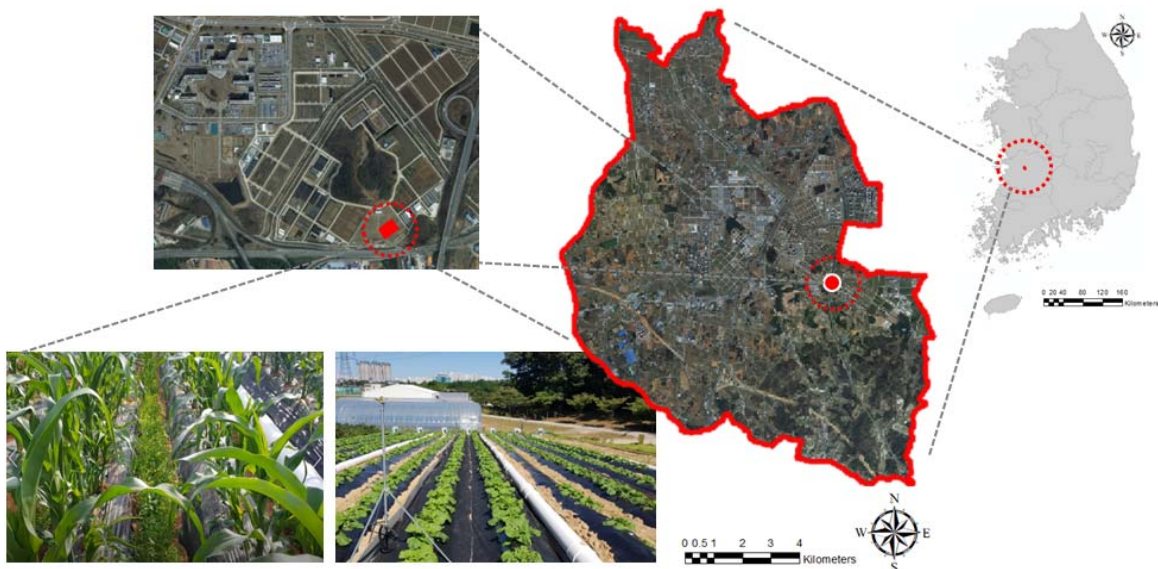


Fig. 1 The location of study area

4. 모델의 보·검정

밭 토양의 질소 및 인 부하량 평가를 위해 관련 있는 주요 요인에 대해 보정하였다. 매개 변수 보정은 하위 영역 파일 (.SUB), 매개 변수 파일 (.PARAM) 및 제어 파일 (.CONT)을 포함한 여러 파일에서 수행된다 (Kamruzzaman et al., 2020). 본 연구에서는 문헌 고찰을 통해 질소 및 인의 부하량 영향을 미치는 유출수, 토양유실 및 침식, 질소 및 인과 관련한 매개 변수를 확인하였다 (Wang et al., 2012). 모델의 보정은 R^2 (coefficient of determination)를 목적함수로 사용하였고, 질소 및 인 부하량과 관련한 민감 변수를 APEX 모형이 추천하는 범위 내에서 수동으로 보정하였다 (Table 1). 보정을 위한 자료는 2018년~2021년의 4년간 관측자료를 사용하였고, 2022년~2023년의 2년간 관측 자료는 검정자료로 활용하였다.

질소 및 인 부하량의 검정은 Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970), percentage bias (PBIAS) (Gupta et al., 1999), R^2 를 이용하였다. R^2 는 실측값과 모의 값의 선형 관계를 평가하는 지표로서 0~1 범위의 값을 가지며, 실측값과 모의 값이 선형 관계일수록 1에 가까운 값을 나타낸다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, O_i 와 P_i 는 각각 관측시간 i 에 대한 관측 값과 모의 값이며 \bar{O} 는 관측 값의 산술평균값이다. 그리고 n 은 전체 관측이다 (Moriassi et al., 2007).

NSE는 모의결과가 실측값과 얼마나 유사한가를 평가하는 지표로서 $-\infty \sim 1$ 범위의 값을 가지며 1에 가까울수록 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 평가할 수 있다. 만약 0 이하의 값을 나타낸다면 모의결과를 이용하는 것 보다 실측

값의 평균을 이용하는 것이 더 좋음을 의미한다 (Moriassi et al., 2007; Song et al., 2015).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

PBIAS는 모의 값과 실측값 총합의 대소를 비교하는 지표이다. PBIAS의 최적값은 0.0으로서 PBIAS의 절댓값이 낮을수록 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 판단할 수 있다 (Moriassi et al., 2007). 양의 값은 모형이 과소 추정을, 음의 값은 모형이 과대 추정하는 것을 의미한다. PBIAS는 다음과 같이 산정된다.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (3)$$

5. 시비 수준에 따른 비점오염 부하량 모의

본 연구에서는 시비 수준에 따른 비점오염 부하량의 장기적인 영향을 평가하기 위해 1991년부터 2020년까지 30년을 설정하고 일 단위로 비점오염 부하량을 모의하였다. 일별 부하량을 평균화하여 월 단위 및 연간 비점오염 부하량을 계산하였다. 농경지의 시비 수준에 따른 비점오염 부하량을 평가하기 위해 작물별 비료 사용처방 (NAS, 2019)에 제시된 표준 시비량 (standard fertilizer, SF)과 농업환경자원변동평가 (NAS, 2020)에 제시된 실제 농가에서 투입한 시비량 (convention fertilizer, CF)을 구분하여 평가하였다. 퇴비는 우분 퇴비로 동일하게 20 ton/ha로 투입하였고, 영농 일정 및 옥수수 - 배추 파종량 또한 동일한 조건에서 시비량만 표준 및 관행으로 달리하여 모의하였다 (Table 2).

Table 1 Criteria for evaluating the fitness of hydrological model (Moriassi et al., 2015a)

| Measure | Output response | Model performance evaluation criteria | | | |
|---------|-----------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| | | Very good | Good | Satisfactory | Not satisfactory |
| R^2 | discharge* | $R^2 > 0.85$ | $0.75 < R^2 \leq 0.85$ | $0.60 < R^2 \leq 0.75$ | $R^2 \leq 0.60$ |
| | P | $R^2 > 0.80$ | $0.65 < R^2 \leq 0.80$ | $0.30 < R^2 \leq 0.65$ | $R^2 \leq 0.40$ |
| | N | $R^2 > 0.70$ | $0.60 < R^2 \leq 0.70$ | $0.30 < R^2 \leq 0.60$ | $R^2 \leq 0.30$ |
| NSE | discharge | $NSE > 0.80$ | $0.70 < NSE \leq 0.80$ | $0.50 < NSE \leq 0.70$ | $NSE \leq 0.50$ |
| | N/P | $NSE > 0.65$ | $0.50 < NSE \leq 0.65$ | $0.35 < NSE \leq 0.50$ | $NSE \leq 0.35$ |
| PBIAS | discharge | $PBIAS \leq \pm 5$ | $\pm 5 < PBIAS \leq \pm 10$ | $\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$ | $PBIAS \geq \pm 15$ |
| | N/P | $PBIAS \leq \pm 10$ | $\pm 10 < PBIAS \leq \pm 20$ | $\pm 20 < PBIAS \leq \pm 30$ | $PBIAS \geq \pm 30$ |

*Includes all agricultural land runoff, river discharge, and baseflow from the land parcel and watershed models.

Table 2 Cultivation management schedule by fertilizer input level

| Date | Crop | Operation | Amount | |
|---------|----------------|---|-------------------------|---------------------------|
| | | | Standard fertilization | Continental fertilization |
| Apr. 1 | Corn | Cattle compost | 20 ton/ha | 20 ton/ha |
| Apr. 25 | | Fertilization and Ploughing (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) | 79-30-63 kg/ha | 118-108-101 kg/ha |
| Apr. 30 | | Corn sowing | 5 plants/m ² | 5 plants/m ² |
| May 18 | | Fertilization | 79-0-0 kg/ha | 118-0-0 kg/ha |
| Aug. 10 | Kimchi cabbage | Fertilization and Ploughing | 110-78-110 kg/ha | 110-103-100 kg/ha |
| Aug. 20 | | Kimchi cabbage sowing | 3 plants/m ² | 3 plants/m ² |
| Sep. 14 | | Fertilization | 105-0-44 kg/ha | 110-0-32 kg/ha |
| Oct. 4 | | Fertilization | 105-0-44 kg/ha | 100-0-32 kg/ha |

III. 결과 및 고찰

1. APEX 모델 보 · 검증

모델의 보정 단계에서는 다양한 환경 요인과 농업 활동이 유출수의 질과 양에 미치는 영향을 정확히 반영하기 위해, 총 14개의 주요 매개변수를 선정하여 조정하였다. 매개변수들은 유출수와 관련된 변수 5개, 총 질소 (T-N) 관련 변수 3개, 총 인 (T-P) 관련 변수 2개, 지표수 관련 변수 2개, 그리고 질소와 인의 복합적 영향을 반영하는 변수 2개로 구성되었다. 각 매개변수의 보정은 관련 연구와 비교 분석을 통해 이루어졌으며, 이 과정을 통해 APEX 모델이 한국의 농업 환경에 잘 맞도록 조정하였다 (Koo et al., 2017; Kamruzzaman et al., 2020; Choi et al., 2021). 각각의 매개변수에 대해서는 APEX 모형의 추천 범위 내에서 수동으로 보정하였다 (Table 3).

밭에서 옥수수 - 가을배추 2모작 재배에 따른 질소 부하량

보정 결과 R^2 는 0.65, NSE 0.3, PBIAS 21.1%로 나타났다. 검정 기간 R^2 는 0.64, NSE는 0.42, PBIAS는 -20.8%로 나타났다 (Fig. 2, Fig 3). 밭에서의 질소 부하량 모의 결과 R^2 는 보정기간과 검정 기간 모두 만족 수준인 것으로 평가되었다. NSE는 보정기간은 불만족으로 나타났지만, 검정 기간은 만족 수준인 것으로 평가되었다. PBIAS는 보정기간과 검정 기간 모두 만족 수준으로 평가되었다 (Table 4).

인 부하량 보정의 경우 R^2 는 0.76, NSE 0.72, PBIAS -22.1%로 나타났으며, 검정 기간의 R^2 는 0.69, NSE 0.33, PBIAS 5.1%로 나타났다 (Fig. 2, Fig 3). 인 부하량 모의 결과 NSE는 보정기간에 매우만족 수준으로 평가되었으나, 검정 기간에 불만족 수준으로 평가되었다. PBIAS는 보정기간에 매우만족 수준으로 평가되었고, 검정 기간은 만족 수준으로 평가되었다 (Table 4).

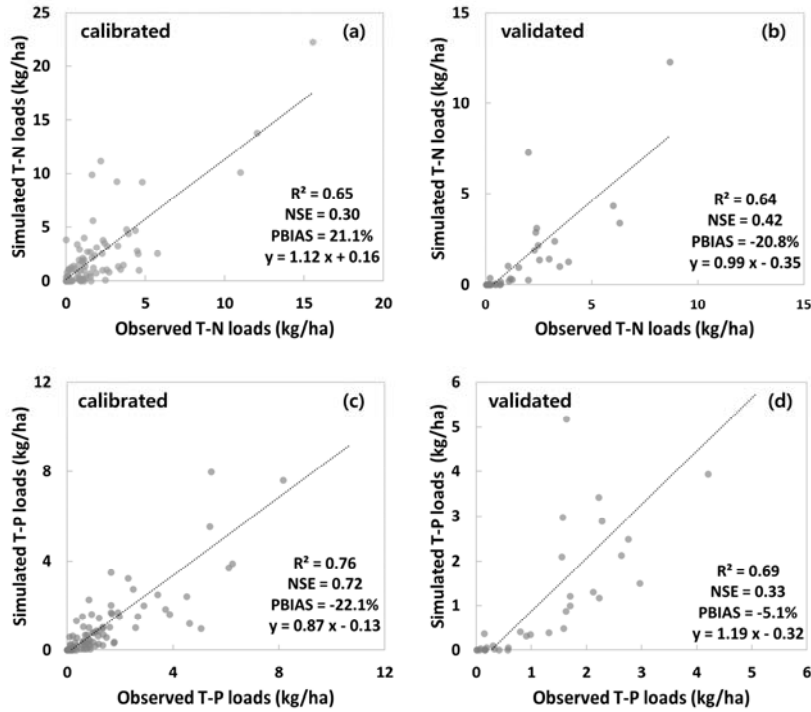
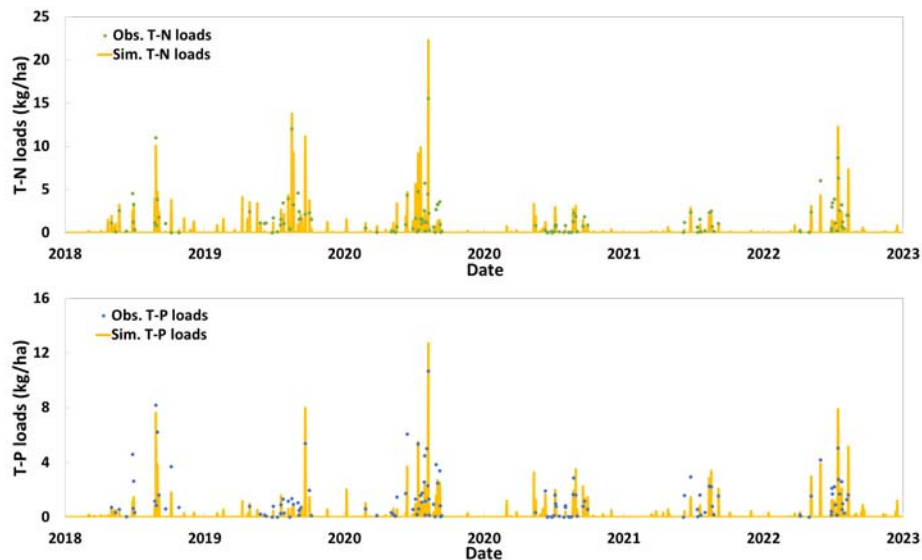
Table 3 APEX model parameters optimization results

| Impact | Parameters | Description | Range | Default value | Calibration value |
|----------------|------------|---|----------|---------------|-------------------|
| Discharge | PARM92 | Runoff volume adjustment for direct link (while NVCN=0) | 0.1-2.0 | 0.4 | 0.25 |
| | PARM20 | Runoff curve number initial abstraction | 0.05-0.4 | 0.2 | 0.4 |
| | APM | Peak runoff rate - rainfall energy adjustment factor | 0-1 | 1 | 0.9 |
| | PARM12 | Soil evaporation coefficient | 1.5-2.5 | 1.5 | 2 |
| | PARM17 | Evaporation plant cover factor | 0.0-0.5 | 0.1 | 0.3 |
| T-N | RFNX | Average concentration of Nitrogen in rainfall (ppm) | 0.5-1.5 | 0.8 | 1.47 |
| | PARM72 | Volatilization/nitrification partitioning coefficient | 0.05-0.5 | 0.15 | 0.05 |
| | PARM7 | N fixation | 0-1 | 0.5 | 0.6 |
| T-P | PARM59 | P upward movement by evaporation coefficient | 1-20 | 10 | 20 |
| | PARM8 | Soluble phosphorus runoff coefficient. | 10-20 | 15 | 10 |
| Surface runoff | DRV | Equation for water erosion | 0-7 | 4 | 6 |
| | PARM49 | Maximum rainfall interception by plant canopy (mm) | 0-15 | 7 | 5 |
| T-N and T-P | PARM29 | Biological mixing efficiency | 0.1-0.5 | 0.1 | 0.2 |
| | PARM62 | Manure erosion equation coefficient | 0.1-0.5 | 0.25 | 0.5 |

Table 4 Final performance indicator values on calibration and validation of APEX simulated total nitrogen and total phosphorus

| Division | Calibration | | | Validation | | |
|----------|----------------|--------------|-------|----------------|-------------|-------|
| | R ² | NSE | PBIAS | R ² | NSE | PBIAS |
| T-N | 0.65 | <i>0.30*</i> | 21.1 | 0.64 | 0.42 | -20.8 |
| T-P | 0.76 | 0.72 | -22.1 | 0.69 | <i>0.33</i> | -5.1 |

* Underlined values in italics indicate that the performance criterion was not satisfactory.


Fig. 2 APEX model calibration (2018–2021) and validation (2022–2023) result for total nitrogen loads (a, b), total phosphorus loads (c, d)

Fig. 3 Comparison of observed and simulated data results during the study period

2. 시비 수준에 따른 비점오염 부하량 평가

APEX 모델을 활용하여 관행시비와 표준시비에 따른 밭 토양의 질소와 인 부하량 모의하였다. 관행시비의 경우 연간 질소가 568 kg/ha 투입되었고, 표준시비의 경우 490 kg/ha가 투입되었으며, 인의 경우 관행시비는 318 kg/ha, 표준시비는 53.1 kg/ha가 투입되었다. 농가에서는 표준 시비량에 비해 질소를 15.9% 추가하여 시비하였고, 인의 경우 498.9%로 약 500%가량 추가 시비하는 것으로 나타났다 (Table 5).

관행시비를 할 때, 질소는 연평균 39.1 kg/ha/yr 유출되었고, 인은 59.6 kg/ha/yr 유출되었다. 표준시비의 경우, 질소는 37.3 kg/ha/yr, 인은 18.0 kg/ha/yr 유출되는 것으로 분석되었다 (Table 5). 농가에서 관행시비로 옥수수 - 가을배추 2모작 재배

시 표준시비 할 때보다 질소 부하량은 4.8%, 인 부하량은 231.1% 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 4).

30년 동안의 월별 평균값으로 분석한 결과 질소와 인의 부하량은 12월~2월에 가장 낮았고, 7월~9월에 가장 높은 것으로 나타났으며, 8월이 절정인 것으로 분석되었다. 관행시비의 경우 질소 부하량은 0.4~1.3 kg/ha/day, 인 부하량은 0.5~2.3 kg/ha/day이었다. 표준시비는 질소 부하량이 0.4~1.3 kg/ha/day, 인 부하량이 0.3~0.5 kg/ha/day로 나타났다. 관행시비는 표준시비보다 질소는 0.8%~5.4% 증가하는 것으로 나타났으며, 인의 경우 최소 27.0%에서 최대 375.5%까지 증가하였다 (Fig. 5).

Table 5 Results of annual fertilizer input and annual average non-point pollution loads according to fertilization practices

| Division | | CF (kg/ha) | SF (kg/ha) |
|---------------------------|---|------------|------------|
| Fertilizer input | N | 568.0 | 490.0 |
| | P | 318.0 | 53.1 |
| Non-point pollution loads | N | 39.1 | 37.3 |
| | P | 59.6 | 18.0 |

note: CF, convention fertilization; SF, standard fertilization

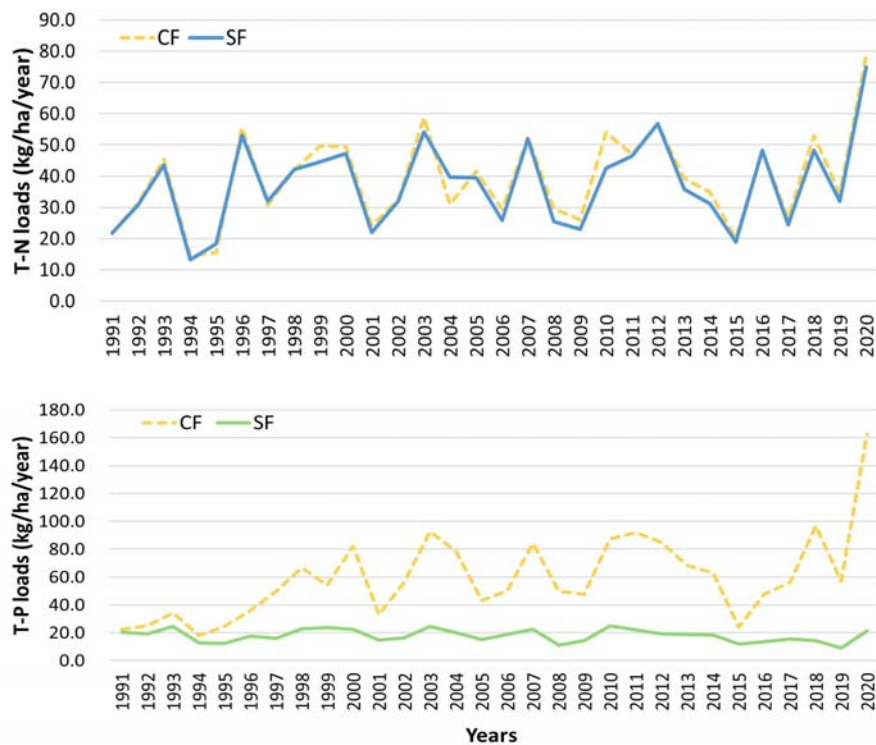


Fig. 4 Estimated annual total nitrogen and phosphorus loads over 30 years according to the convention fertilization (CF) and standard fertilization (SF)

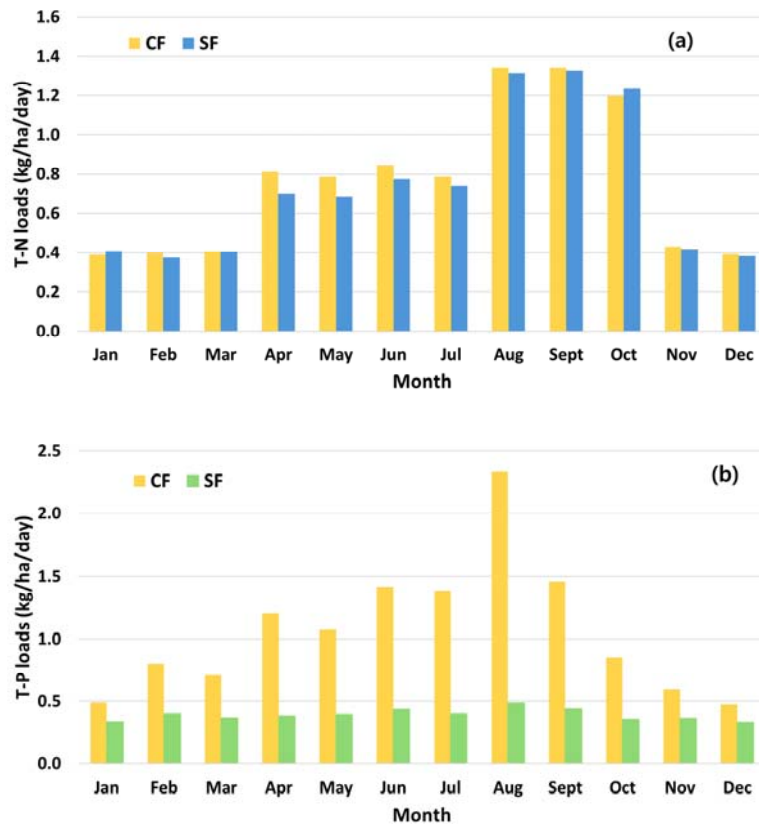


Fig. 5 Estimated average monthly total nitrogen (a) and total phosphorus (b) loads during 30 years

3. 고 찰

본 연구의 APEX 모델은 보정기간 질소 부하량과 검정 기간인 부하량의 NSE 평가 지표에 대해 각각 0.30, 0.33으로 불만족 수준이었다 (Table 4). 농경지에서 양분 부하량을 모델링하는 것은 토양 유형, 관리 관행, 기상 패턴, 지형 위치 등 영향을 미치는 다양한 요인으로 인해 복잡할 수 있다 (Nelson et al., 2017). APEX와 같은 과정 기반 모델은 이러한 동태를 장기간 모의하여 양분 부하를 평가하는 데 사용될 수 있다 (Nelson et al., 2017). NSE는 수문 모델의 예측력을 평가하는 데 있어 중요한 지표이며, 높은 NSE 값은 모델의 더 나은 예측력을 의미한다 (Nash and Sutcliffe, 1970). 그러나 NSE의 수용 기준은 모델링 시스템의 복잡성과 맥락에 따라 달라질 수 있다 (Ward et al., 2018; Moriasi et al., 2015b). 값이 1에 가까울수록 선호되지만, 모델링이 특히 어려운 상황에서는 낮은 NSE 값도 어느 정도 수용될 수 있다 (Moriasi et al., 2007; Moriasi et al., 2015a). Wang et al. (2012) 연구에서 양분 부하와 관련한 모델 평가 기준은 $NSE \geq 0.50$, PBIAS 50% 이내로 제시하였다. 이러한 이유로 Kumar et al. (2021)은 NSE가 0.45보다 크고 R^2 가 0.50보다 큰 경우를 보정 및 검증을 위한 평가

기준으로 만족한다고 보고하였다.

반면, Moriasi et al. (2015a)은 $NSE \leq 0.35$ 는 만족할 수준은 아니지만, 허용 불가 수준 ($NSE < 0.0$)은 아니라고 보고하였다. Ramirez-Avila et al. (2017)은 $NSE = 0.33$, PBIAS = 44%에도 불구하고 모델 성능 기준에 충족한다고 보고하였고, 이를 활용하여 농경지 유출수를 모의하였다. 복잡한 농업 시스템에서 양분 유출 모델링을 위해 높은 NSE 값을 달성하는 것은 어려울 수 있다 (McCuen et al. 2006; Jain and Sudheer, 2008). 또한 $NSE \leq 0.35$ 의 수용 여부는 특정 목표, 데이터 가용성, 연구의 공간적 및 시간적 규모, 그리고 모델 결과가 모델에 의해 정보화되는 관리나 정책 결정에 민감한지 여부에 따라 달라질 수 있다 (Moriasi et al., 2015a; Nelson et al., 2017; Ward et al., 2018). 일반적으로 모델 관련 연구자들은 높은 NSE 값을 목표로 하지만, 모델 개발의 초기 단계나 특히 복잡한 시스템에서는 낮은 값임에도 불구하고 유용한 정보를 제공할 수 있다 (McCuen et al., 2006; Jain and Sudheer, 2008; Moriasi et al., 2015a).

본 연구에서 보정 단계의 T-N, 검정 단계의 T-P에 관한 NSE 값 0.33과 0.30의 경우, 일별 강우량 100 mm 이상 발생한

불 특정일에 질소와 인 유출량이 과대평가되어 나타난 결과로 판단된다. T-N의 경우 모의한 1460일 중 과대평가된 4일을 보정했을 때, NSE 수치는 0.65로 만족 수준 이상의 좋음 수준이며, T-P의 경우 730일 중 과대평가된 1일을 보정할 시 NSE 수치가 0.57로 만족 수준 이상으로 나타났다. 따라서 일부 $NSE \leq 0.35$ 항목은 정확한 모델 성능을 나타내지는 않지만, 복잡한 시나리오에서는 수용될 수 있음에 따라, 복잡한 환경 시스템 모델링에 내재된 한계와 불확실성을 인식하면서 모델의 예측 능력을 향상시키려는 노력을 계속되어야 할 것이라고 생각한다 (McCuen et al., 2006).

본 연구에서 기존 농가는 표준 시비량에 비해 질소를 15.9% 추가하여 시비하였고, 인은 498.9% 추가 시비하는 것으로 나타났다. 이러한 농경지의 과다한 비료 투입은 환경적 측면에서 지표 및 지하수 오염, 수역의 부영양화 등 여러 가지 부정적 영향을 끼칠 수 있다 (Alori et al., 2017; Sharpley and Beegle, 2017; Xia et al., 2020). 질소와 인이 과다하게 수역에 유입되면, 물속 식물성 플랑크톤의 과도한 증식을 유발할 수 있으며, 이는 수중 산소를 소비하고, 수질을 저하시켜 수생 동·식물의 생존을 어렵게 만든다 (Carpenter et al., 1998; Smith, 2003; Xia et al., 2020). 미국의 경우 수질 저하된 호수 지역의 약 50%와 하천 유역의 약 60%에서 양분과잉 농축 문제가 관찰된 바 있다 (Smith, 2003). 또한 중국에서 주요 호수의 절반 이상이 부영양화 된 반면 거의 75%가 지속적으로 악화되고 있는 것으로 나타났다 (Sun et al., 2012). 하천 부영양화에 농업 비점오염원이 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 과다한 비료 사용은 지양해야 할 것으로 판단된다.

국제적으로 식량안보에 따른 농업의 비료 사용은 불가피한 것이 사실이다. 하지만, 적정량 이상의 비료 투입은 작물 생산량 측면에서 장점만 있는 것은 아니다. 최적의 비료 사용은 물 환경 부하를 완화시키면서 최대 생산량을 이끌 수 있다 (Kang et al., 2018; Guo et al., 2022). Kang et al. (2018) 연구에 따르면 최적 시비는 관행시비보다 질소 및 인 투입량을 각각 50%, 53% 감소시켰지만, 수확량에는 영향을 미치지 않았으며, 질소 및 인 과잉을 60%, 59% 유의하게 감소시켰다고 보고하였다. Guo et al. (2022)의 글로벌 메타분석 연구에서도 질소 비료 투입 이후에 작물 생산량이 증가하였지만, 적정 범위 이후부터 작물 생산량이 감소한다고 보고한 바 있다. 이는 최적의 비료 사용의 필요성을 시사하며, 검정시비의 중요성을 시사한다. 다만, 사전 토양에 따른 질소 및 인에 대한 개별적인 시비처방과 농가에서 쉽게 활용할 수 있는 시스템 구축 및 개선안이 필요할 것이라고 판단된다.

본 연구에서 시비수준에 따른 월별 인 부하량을 모의한 결과 관행시비는 표준시비보다 최대 375.5%까지 높아지는 것으

로 분석되었다 (Fig. 5). 이는 해당 농가 토양의 이화학적성을 고려하지 않고, 시판 비료에 제시된 사용량을 기준으로 투입하기 때문으로 판단된다. NAS (2020) 연구에서 사전 토양 분석을 통한 검정시비량과 실제 투입한 시비량을 비교한 결과 실제 투입한 비료의 양이 질소, 인산, 칼리 기준으로 옥수수가 0.4, 0.7, 5.2 kg/10 a, 배추가 4.6, 0.9, 5.7 kg/10 a 가량 추가로 투입되는 것으로 조사되었다. 벼 및 식량작물 재배 농가를 대상으로 화학비료의 종류 및 사용량을 조사한 결과, 비료의 종류로는 복합비료를 가장 많이 사용하였고, 옥수수의 경우 단위 면적당 투입량이 다른 작물보다 많았다 (NAS, 2020). 대부분의 농가에서 이미 유효인산의 함량이 적정 수준임에도 불구하고, 질소를 기준으로 복합비료를 투입함에 따라 토양의 인 함량이 매우 증가하여 인 유출로 이어졌다고 판단된다. 인은 작물의 필수 영양소 중 하나이지만, 과다한 인은 칼륨, 마그네슘, 칼슘과 같은 다른 영양소의 흡수를 방해하여 식물의 전반적인 영양 불균형과 토양 비옥도 고갈 및 독성으로 잎의 변색, 성장 정체 등을 초래할 수 있다 (Alori et al., 2017).

농경지에 투입된 인의 경우 2~4주 안에 토양에 90%까지 고정되며, 이러한 인 손실을 최소화하기 위해서는 토양 검정에 따른 적정량의 시비와 함께 토양 침식 조절이 가장 중요하다 (Sharpley and Beegle, 2017). 농경지에서 작물 피복은 토양 침식을 줄이고, 토양 수분을 향상시키며, 양분 유출을 감소시킬 수 있기 때문에 이러한 관리 전략을 최대한 활용할 필요가 있다 (Durán Zuazo and Pleguezuelo, 2008). 또한, 최소경운과 같은 보존 농법, 윤작, 유기물 추가, 완충 식생대와 같은 다양한 토양 관리 전략을 개선하여 토양 구조 및 토양침식을 지속적으로 감소시킬 필요가 있다 (Xia et al., 2020; Singh et al., 2023). Jiao et al. (2011)은 밀-대두 윤작 재배 시 밀-휴경에 비해 유출량을 58%, 인 유출을 85% 감소시켰다고 보고하였다. Korucu et al. (2018)은 옥수수-대두 재배 시 호밀 피복은 지표수 유출량을 65% 감소시켰으며, 암모니아태 질소 (NH_4-N)와 T-P 부하량을 86%, 83% 감소시켰다고 보고하였다. Hunt et al. (2019) 연구에서도 클로버와 알팔파 피복을 통해 지표 유출수 60%를 감소시켰고, 질소 및 인 유출량은 최대 39% 감소시켰다고 보고한 바 있다. 옥수수-대두 윤작재배 2년차에 질소 및 인의 부하량은 10 kgN/ha, 2.8 kgP/ha로서, 비료 투입량 (89 kgN/ha, 15 kgP/ha) 대비 11.2%, 18.6% 나타났다. 본 연구의 표준시비에 따른 질소 및 인의 부하량 7.6%, 33.8%와 비교할 때, 질소 부하량은 더 낮았지만 인 부하량은 상대적으로 높은 것으로 나타남에 따라 인에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 APEX 모델을 이용하여 옥수수와 가을배추의 2모작 재배지에서 표준시비와 관행시비를 적용했을 때의 비점오염 부하량을 평가하였다. 질소 부하량 보정 결과 R^2 는 0.65, NSE 0.30, PBIAS 21.1%로 나타났고, 검정 기간 R^2 는 0.64, NSE는 0.42, PBIAS는 -20.8%였다. 인 부하량 보정의 경우 R^2 는 0.76, NSE 0.72, PBIAS -22.1%로 나타났으며, 검정 기간의 R^2 는 0.69, NSE 0.33, PBIAS 5.1%로 옥수수-가을배추의 비점오염 부하량 모의가 만족할만한 수준으로 나타났다. 표준시비를 적용할 경우 질소 및 인의 부하량이 4.6%, 69.8% 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 표준시비를 통한 양분관리가 비점오염 저감에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 다만, 본 연구에서 표준시비와 관행시비에 따른 작물 생산량을 정량적으로 비교하지 못한 것에 한계가 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구의 결과는 농업 현장에서 표준시비를 촉진하고, 관행시비를 점진적으로 줄여나가는 정책 마련에 있어 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 수질 보호와 농업 지속 가능성을 향상시키기 위한 관리 전략의 개발에 기여할 것으로 기대된다. 본 연구는 비점오염 부하량을 평가하기 위해 APEX 모델을 국내 농업 시스템에 적용한 결과로써, 향후 연구에서는 다양한 작물 및 지역에 대한 확대 적용을 통해 모델의 범용성과 정확성을 더욱 향상시킬 필요가 있다. 아울러, 토양 관리, 작물 관리, 물 관리 등 재배관리 측면에서의 비점오염 관리 전략에 관한 평가가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

This work was carried out with the support of the “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2020-RD009348)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

REFERENCES

- Alori, E. T., B. R. Glick, and O. O. Babalola, 2017. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology* 8: 1-8. doi: 10.3389/fmicb.2017.00971.
- Baffaut, C., F. Ghidry, R. N. Lerch, N. R. Kitchen, K. A. Sudduth, and E. J. Sadler, 2019. Long-term simulated runoff and water quality from grain cropping systems on restrictive layer soils. *Agricultural Water Management* 213: 36-48. doi: 10.1016/j.agwat.2018.09.032.
- Bazrkar, M. H., E. O. Danquah, S. K. Choi, M. K. Kim, J. Jeong, and J. Cho, 2023. Projected unseasonable and shorter actual growth period for paddy rice and more pollutant loads into water bodies in a changing climate. *Agricultural Water Management* 279: 108211. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108211.
- Bhandari, A. B., N. O. Nelson, D. W. Sweeney, C. Baffaut, J. A. Lory, A. Senaviratne, G. M. Pierzynski, K. A. Janssen, and P. L. Barnes, 2017. Calibration of the APEX model to simulate management practice effects on runoff, sediment, and phosphorus loss. *Journal of Environmental Quality* 46(6): 1332-1340. doi: 10.2134/jeq2016.07.0272.
- Carpenter, S. R., N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Sharpley, and V. H. Smith, 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8(3): 559-568. doi: 10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2.
- Choi, S. K., M. K. Kim, J. Jeong, D. Choi, and S. O. Hur, 2017. Estimation of crop yield and evapotranspiration in paddy rice with climate change using APEX-Paddy model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(4): 27-42. doi: 10.5389/KSAE.2017.59.4.027. (in Korean).
- Choi, S. K., J. Cho, J. Jeong, M. K. Kim, S. J. Yeob, S. Jo, O. D. Eric, and J. H. Bang, 2021. Assessing future water demand for irrigating paddy rice under shared socioeconomic pathways (SSPs) scenario using the APEX-Paddy model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(6): 1-16. doi: 10.5389/KSAE.2021.63.6.001. (in Korean).
- Cui, N., M. Cai, X. Zhang, A. A. Abdelhafez, L. Zhou, H. Sun, G. Chen, G. Zou, and S. Zhou, 2020. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications. *Global Ecology and Conservation* 22: e01011. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01011.
- Ding, W., J. Xia, D. She, X. Zhang, T. Chen, S. Huang, and H. Zheng, 2023. Assessing multivariate effect of best management practices on non-point source pollution management using the coupled Copula-SWAT model. *Ecological Indicators* 153: 110393. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110393.
- Durán Zuazo, V. H., and C. R. R. Pleguezuelo, 2008.

- Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 65-86.
11. Gassman, P. W., J. R. Williams, X. Wang, A. Saleh, E. Osei, L. M. Hauck, R. C. Izaurralde, and J. D. Flowers, 2009. The agricultural policy/environmental eXtender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. *Transactions of the ASABE* 53(3): 711-740.
 12. Guo, C., X. Liu, and X. He, 2022. A global meta-analysis of crop yield and agricultural greenhouse gas emissions under nitrogen fertilizer application. *Science of the Total Environment* 831: 154982. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154982.
 13. Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo, 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* 4(2): 135-143. doi: 10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135).
 14. Hong, S. C., M. K. Kim, G. B. Jung, and K. H. So, 2016. Furrow covering effects with rice straw on nutrient discharge from upland soil used for red pepper cultivation. *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association* 24(1): 11-19. doi: 10.17137/korrae.2016.24.1.11. (in Korean).
 15. Hunt, N. D., J. D. Hill, and M. Liebman, 2019. Cropping system diversity effects on nutrient discharge, soil erosion, and agronomic performance. *Environmental Science and Technology* 53(3): 1344-1352. doi: 10.1021/acs.est.8b02193.
 16. Jain, S. K., and K. P. Sudheer, 2008. Fitting of hydrologic models: A close look at the Nash-Sutcliffe Index. *Journal of Hydrologic Engineering* 13(10): 981-986. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:10(981).
 17. Jiao, P., D. Xu, S. Wang, and T. Zhang, 2011. Phosphorus loss by surface runoff from agricultural field plots with different cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 90(1): 23-32. doi: 10.1007/s10705-010-9409-x.
 18. Kamruzzaman, M., J. Cho, S. K. Choi, J. H. Song, I. Song, and S. Hwang, 2020. Evaluating the performance of APEX-PADDY model using the monitoring data of paddy fields in South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(1): 1-16. doi: 10.5389/KSAE.2020.62.1.001. (in Korean).
 19. Kang, L., B. Fan, S. Chen, and Q. Chen, 2018. Fertigation combined with catch crop maximize vegetable yield and minimize N and P surplus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 112(1): 87-99. doi: 10.1007/s10705-018-9932-8.
 20. Kim, M. K., S. I. Kwon, G. B. Jung, S. C. Hong, M. J. Chae, S. G. Yun, and K. H. So, 2013. Small-scale pond effects on reducing pollutants load from a paddy field. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32(4): 359-358. doi: 10.5338/KJEA.2013.32.4.355. (in Korean).
 21. Kim, M. H., S. K. Choi, J. P. Cho, M. K. Kim, J. U. Eo, J. H. Bang, and J. M. Seong, 2021. Report on the climate change impact and vulnerability assessment on agricultural environment and ecology. Phase I (2016-2020). National Institute of Agricultural Science, Wanju, 305 pp. (in Korean).
 22. Koo, J. Y., J. Kim, S. K. Choi, M. K. Kim, J. Jeong, and K. J. Lim, 2017. Construction of database for application of APEX model in Korea and evaluation of applicability to highland field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(6): 89-100. doi: 10.5389/KSAE.2017.59.6.089. (in Korean).
 23. Korucu, T., M. J. Shipitalo, and T. C. Kaspar, 2018. Rye cover crop increases earthworm populations and reduces losses of broadcast, fall-applied, fertilizers in surface runoff. *Soil and Tillage Research* 180(March): 99-106. doi: 10.1016/j.still.2018.03.004.
 24. Kumar, S., R. P. Singh, and J. G. Kalambukattu, 2021. Modeling daily surface runoff, sediment and nutrient loss at watershed scale employing Arc-APEX model interfaced with GIS: A case study in Lesser Himalayan landscape. *Environmental Earth Sciences* 80(15): 1-17. doi: 10.1007/s12665-021-09791-4.
 25. Lee, J. H., and Y. M. Yoon, 2019. Comparison of nutrient balance and nutrient loading index for cultivated land nutrient management. *Korean Journal of Environmental Biology* 37(4): 217-227. doi: 10.11109/JAES.2021.23.2.085. (in Korean).
 26. Liu, Y., B. A. Engel, D. C. Flanagan, M. W. Gitau, S. K. McMillan, and I. Chaubey, 2017. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities. *Science of the Total Environment* 601-602: 580-593. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.212.
 27. McCuen, R. H., Z. Knight, and A. G. Cutter, 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index. *Journal*

- of Hydrologic Engineering* 11(6): 597-602. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).
28. ME, 2015. The 2nd basic plan for the management of water environment. Ministry of Environment, Sejong, Korea. (in Korean).
29. Moriasi, D. N., R. W. Zeckoski, J. G. Arnold, C. B. Baffaut, R. W. Malone, P. Daggupati, J. A. Guzman, D. Saraswat, Y. Yuan, B. W. Wilson, A. Shirmohammadi, and K. R. Douglas-Mankin, 2015a. Hydrologic and water quality models: Key calibration and validation topics. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1609-1618. doi: 10.13031/trans.58.11075.
30. Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati, 2015b. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763-1785. doi: 10.13031/trans.58.10715.
31. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900. doi: 10.13031/2013.23153.
32. Mudgal, A., C. Baffaut, S. H. Anderson, E. J. Sadler, N. R. Kitchen, K. A. Sudduth, and R. N. Lerch, 2012. Using the Agricultural Policy/Environmental eXtender to develop and validate physically based indices for the delineation of critical management areas. *Journal of Soil and Water Conservation* 67(4): 284-299. doi: 10.2489/jswc.67.4.284.
33. Murdoch, P. S., J. S. Baron, and T. L. Miller, 2000. Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. *Journal of the American Water Resources Association* 36(2): 347-366. doi: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb04273.x.
34. Nam, Y. H., S. W. An, and J. W. Park, 2011. Nitrogen budget of South Korea in 2008: Evaluation of non-point source pollution and N₂O emission. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 33(2): 103-112. doi: 10.4491/ksee.2011.33.2.103. (in Korean).
35. NAS, 2019. *Standards for fertilization by crops*. National Institute of Agricultural Science, Wanju, Korea. (in Korean).
36. NAS, 2020. *Monitoring project on agri-environmental quality in Korea*. National Institute of Agricultural Science, Wanju, Korea. (in Korean).
37. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
38. Nelson, N. O., C. Baffaut, J. A. Lory, G. M. M. M. Anomaa Senaviratne, A. B. Bhandari, R. P. Udawatta, D. W. Sweeney, M. J. Helmers, M. W. Van Liew, A. P. Mallarino, and C. S. Wortmann, 2017. Multisite evaluation of APEX for water quality: II. Regional parameterization. *Journal of Environmental Quality* 46(6): 1349-1356. doi: 10.2134/jeq2016.07.0254.
39. Ramirez-Avila, J. J., D. E. Radcliffe, D. Osmond, C. Bolster, A. Sharpley, S. L. Ortega-Achury, A. Forsberg, and J. L. Oldham, 2017. Evaluation of the APEX model to simulate runoff quality from agricultural fields in the southern region of the United States. *Journal of Environmental Quality* 46(6): 1357-1364. doi: 10.2134/jeq2017.07.0258.
40. Salaudeen, A. R., S. Shahid, A. Ismail, B. K. Adeogun, M. A. Ajibike, A. A. D. Bello, and O. B. E. Salau, 2023. Adaptation measures under the impacts of climate and land-use/land-cover changes using HSPF model simulation: Application to Gongola river basin, Nigeria. *Science of the Total Environment* 858(October 2022): 159874. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159874.
41. Sharpley, A., and D. Beegle, 2017. Managing phosphorus for agriculture and the environment. PA 16802, USA, 1-15 pp.
42. Singh, S. K., D. K. Vishwakarma, S. Ali Abed, N. Al-Ansari, P. S. Kashyap, A. Kumar, P. Kumar, R. Kumar, R. Jat, A. Saraswat, A. Kuriqi, A. Elbeltagi, S. Heddam, and S. Kim, 2023. Soil erosion control from trash residues at varying land slopes under simulated rainfall conditions. *Mathematical Biosciences and Engineering* 20(6): 11403-11428. doi: 10.3934/mbe.2023506.
43. Smith, V. H., 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. *Environmental Science and Pollution Research* 10(2): 126-139. doi: 10.1065/espr2002.12.142.
44. Song, J. H., I. Song, J. T. Kim, and M. S. Kang, 2015. Simulation of agricultural water supply considering yearly variation of irrigation efficiency. *Journal of the Korea Water Resources Association* 48(6): 425-438. doi: 10.3741/JKWRA.2015.48.6.425. (in Korean).

45. Sun, B., L. Zhang, L. Yang, F. Zhang, D. Norse, and Z. Zhu, 2012. Agricultural non-point source pollution in China: Causes and mitigation measures. *Ambio* 41(4): 370-379. doi: 10.1007/s13280-012-0249-6.
46. Tuppad, P., C. Santhi, X. Wang, J. R. Williams, R. Srinivasan, and P. H. Gowda, 2010. Simulation of conservation practices using the APEX model. *Applied Engineering in Agriculture* 26(5): 779-794. doi: 10.13031/2013.34947.
47. Wang, X., P. W. Gassman, J. R. Williams, S. Potter, and A. R. Kemanian, 2008. Modeling the impacts of soil management practices on runoff, sediment yield, maize productivity, and soil organic carbon using APEX. *Soil and Tillage Research* 101(1-2): 78-88. doi: 10.1016/j.still.2008.07.014.
48. Wang, X., J. R. Williams, P. W. Gassman, C. Baffaut, R. C. Izaurralde, J. Jeong, and J. R. Kiniry, 2012. EPIC and APEX: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1447-1462. doi: 10.13031/2013.42253.
49. Ward, N. K., F. Maureira, C. O. Stöckle, E. S. Brooks, K. M. Painter, M. A. Yourek, and C. K. Gasch, 2018. Simulating field-scale variability and precision management with a 3D hydrologic cropping systems model. *Precision Agriculture* 19(2): 293-313. doi: 10.1007/s11119-017-9517-6.
50. Williams, J. R., R. C. Izaurralde, V. P. Singh, and D. K. Frevert, 2006. The APEX model. In Singh, V. P., and D. K. Frevert (Eds.), pp.437-482. CRC Press.
51. Williams, J. R., and R. C. Izaurralde, 2010. The APEX model. In Singh, V. P., and D. K. Frevert (Eds.), (1st ed., pp.461-506). CRC Press, Florida, USA.
52. Williams, J. R., R. C. Izaurralde, and E. M. Stegliche, 2012. Agricultural policy/environmental extender model theoretical documentation version 0806. Texas A&M Blackland Research Center, Temple, TX.
53. Xia, Y., M. Zhang, D. C. W. Tsang, N. Geng, D. Lu, L. Zhu, A. Deshani Igalavithana, P. D. Dissanayake, J. Rinklebe, X. Yang, and Y. S. Ok, 2020. Recent advances in control technologies for non-point source pollution with nitrogen and phosphorus from agricultural runoff: Current practices and future prospects. *Applied Biological Chemistry* 63(8): 1-13. doi: 10.1186/s13765-020-0493-6.
54. Xingpo, L., L. Muzi, C. Yaozhi, T. Jue, and G. Jinyan, 2021. A comprehensive framework for HSPF hydrological parameter sensitivity, optimization and uncertainty evaluation based on SVM surrogate model - A case study in Qinglong River watershed, China. *Environmental Modelling and Software* 143: 105126. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105126.
55. KMA, 2023. <https://data.kma.go.kr/climate/average30Years/selectAverage30YearsKoreaList.do?pgmNo=188>.
56. NAS, 2023. <http://soil.rda.go.kr/soilseriesKor/J/JIGOGK.htm>.
57. OECD, 2024. <https://data.oecd.org/agrland/nutrient-balance.htm#indicator-chart>.
58. RDA, 2022. <https://www.nongsaro.go.kr/portal/portalMain.ps?menuId=PS00001>.