



논 물꼬관리 기법 적용에 따른 원단위 삭감부하량 산정식 평가

Assessing the Unit Load Reduction Equation of Drainage Outlet Raising Management in Paddy Fields

김동현^a · 오흥근^b · 장태일^{c†} · 함종화^d

Kim, Dong-Hyeon · Oh, Heung-Keun · Jang, Taeil · Ham, Jong-Hwa

ABSTRACT

The DOR (Drainage outlet raising) in the paddy field has been suggested as one of the most important best management practices for the TMDL (Total maximum daily load) management in the technical guidelines by the NIER (National institute of environmental research). However, this method is underestimated and is not well adopted by local governments for the TMDL. The purpose of this study is to evaluate the unit load reduction equation according to the application of DOR in order to expand this equation. The original equation in the guideline was derived using the HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) model for 1 year in Changnyeong. We analyzed the reduction effect of the original equation application by collecting additional long-term monitoring data from the Buan, Icheon, Iksan, and Jeonju. When comparing the reduction loads between the original equation and monitoring results, the evaluation results of the original equation were 11% of the monitoring analysis results, which was underestimated. This means that the original equation needs to be improved. For assessing the equation, the HSPF Paddy-RCH model was established according to the NIER guideline and evaluated for applicability. The performance results of the model showed a reasonable range by the statistical criteria. Modified equations 1 and 2 were proposed based on the monitoring and modeling results. Modified equation 1 was the method of modifying the original equation's main factors, and modified equation 2 was the method of applying the non-point pollution reduction efficiency according to the rainfall class using the long-term modeling results. At the level of 58.6~64.6% of monitoring data, the difference between them could be further reduced compared to the original equation. The suggested approach will be more reasonable and practicable for decision-makers and will contribute to the TMDL management plans.

Keywords: Unit load; BMP; paddy; drainage outlet raising; HSPF-Paddy RCH

1. 서론

국립환경과학원은 2019년에 오염총량관리기술지침을 개정 및 발표하였으며, 오염총량관리 시행계획의 수립 및 적용 등에 필요한 해당지역의 유역환경조사, 오염원조사, 오·폐수량 및 오염부하량 산정방법, 오염부하량 할당방법 및 수질 모델링 방법 등 기술적인 사항에 대하여 이 지침을 적용하고 있다 (NIER, 2019). 개정된 지침에는 토지계 (농경지, 논)에 대한 내용이 추가되었으며, 논 물꼬관리에 따른 삭감부하량

을 산정할 수 있는 산정식이 정책적으로 제시되었다. 이러한 내용을 기반으로 오염총량관리 기본계획 승인 신청시에 계획의 타당성을 평가하기 위한 기초자료를 작성하며, 단위유역 또는 지자체의 오염배출부하량을 산정하고 오염원을 관리하기 위해 삭감할 수 있는 시설 선정 및 삭감부하량을 산정하여 오염총량관리계획에 활용할 수 있다.

삭감부하량은 오염총량관리계획에 따라 개별 시설 (저류형, 침투형, 여과형, 생태저류형 등)을 통해 오염원이 삭감되는 양을 의미한다. 농경지에서 발생하는 농업비점오염물질은 물꼬관리, 시비관리를 통해 삭감계획을 수립할 수 있다. 하지만 지침에서 제시하고 있는 삭감부하량 산정식은 절차가 복잡하고 과소평가되는 문제점을 내포하고 있어 농업비점오염 삭감 계획에 반영을 하지 못하는 실정이다 (Yeon et al., 2015; Kim et al., 2010). 따라서 삭감부하량 산정식에 대한 개선이 필요할 것으로 판단되며, 다양한 지역의 농경지(논)에서의 모니터링 자료를 반영할 필요가 있다.

국내 논 비점오염 관리를 위한 대표적인 모니터링 연구사례는 다음과 같다. Choi et al. (2015)은 경기도 평택시를 대상으로 자동취수와 여과 배수물꼬를 적용하여 T-N 4.5%, T-P 26%의 저감효과를 제시하였다. Kim et al. (2016)은 새만금

^a Postdoctoral researcher, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University

^b Director, River Restoration Development Agency of Jeollabukdo

^c Professor, Department of Rural Construction Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Jeonbuk National University

^d Principal Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

† Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2518,

E-mail: tjang@jbnu.ac.kr

Received: December 08, 2022

Revised: January 12, 2023

Accepted: January 20, 2023

유역에서 논 물꼬관리, 시비관리 최적관리기법을 적용하여 모니터링을 수행하였으며, 물꼬관리는 T-N 27.1% T-P 38.0%, 시비관리는 T-N 29.0%, T-P 26.2% 그리고 복합관리는 T-N 41.0%, T-P 54.9% 저감효과를 제시하였다. KECO (2019)은 경기도 이천시, 전북 부안군, 강원도 홍천군을 대상으로 농촌 비점오염 모니터링을 수행하였으며, 모니터링 결과를 종합한 결과, 시비관리 T-N 10.0%, T-P 30.0%, 물꼬관리 T-N 15.0%, T-P 30.0%, 복합관리 T-N 25.0%, T-P 35.0%의 저감효율을 제시하였다. 선행연구에 따르면 논에서의 배출부하량 및 삭감부하량은 관개, 영농방법, 지역적 토양 및 강우 특성에 따라 상이한 결과를 나타낸다. 이는 오염총량관리 계획시 논 오염부하량 배출 모니터링 자료를 정량적으로 분석해서 삭감부하량을 도출하는 것이 명확한 방법이지만 각 지자체의 인력, 경제적, 시간적 한계가 있어 환경부 지침의 삭감부하량 산정식, 원단위를 통해 삭감부하량에 의존해야 하는 실정이다.

한편, 국내에서는 수계 상수원 수질개선 및 물관리를 위해 수질오염총량관리, 수질개선대책, 비점오염원관리 등 다양한 정책 및 사업을 통해 관리되고 있다. 특히, 삭감부하량에 따라 저감시설의 유지관리 비용 일부를 인센티브 형식으로 지원하는 방안으로 지자체의 적극적인 참여 유도를 고려하고 있다 (Park et al., 2019). 이에 따라 삭감부하량 산정식을 통한 삭감부하량 결과는 오염총량관리 계획 및 실행에 중요한 비중을 차지할 것으로 판단된다. 따라서 앞서 언급한 현행 삭감부하량 산정식의 한계를 보완할 수 있는 삭감부하량 산정식의 재평가 및 정책적인 접근이 필요하다. Kim et al. (2010)은 수질오염총량관리제에서 제시하는 안전율의 불확실성을 고려하기 위해 표준오차 및 변동성을 고려한 방법을 통해 합리적인 안전율 산정 방법을 제시한 바 있다. Yeon et al. (2015)은 생체

저류지를 대상으로 위어 및 오리피스가 고려된 현행 삭감대상부하비가 과소평가되고 있는 것을 분석하고 주요인자인 삭감대상부하비의 매개변수를 새롭게 추정하여 제시하였다. Lee et al. (2017)은 도로청소에 의한 비점오염 저감효과를 분석하고 수질오염총량관리제에 적용할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 선행연구 결과를 종합해보면, 현행 지침의 산정식을 이용하여 계산한 삭감부하량은 과소평가되고 있으며, 산정식의 안전율 또는 매개변수와 같이 삭감부하량 결과에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 수정 및 개선방안 연구가 필요하다.

본 연구에서는 환경부 오염총량관리기술지침의 논 물꼬관리 기법 적용에 따른 삭감부하량 산정식을 평가하고자 한다. 1) 선행연구를 통해 기 수집된 논 수문·수질 모니터링 자료 (KRCC RRI, 2016; KECC, 2019; Kim, 2022)를 활용하여 논 물꼬관리에 따른 오염부하량 배출 및 삭감부하량 분석, 2) 국립환경과학원의 삭감부하량 실증 연구결과 (Moon, 2019; NIER, 2019)와 동일하게 HSPF-Paddy RCH 모델링을 이용하여 삭감부하량 산정식의 주요인자를 분석, 3) 환경부 지침의 논 삭감부하량 산정식에 대한 정책적인 접근 범위 내에서 현행 삭감부하량 산정식을 개선할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지역 및 자료구축

본 연구의 대상지역은 논 모니터링 자료의 구득이 가능한 곳으로 경기도 이천시 장호원을 선음리, 전라북도 익산시 춘포면 용연리, 부안군 동진면 안성리, 전주시 덕진구 등 4곳의

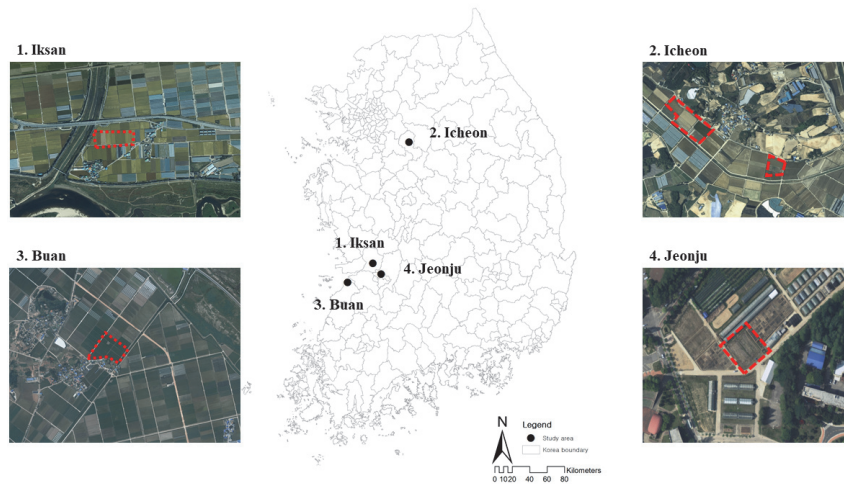


Fig. 1 Study sites and field experiments

시험포장에 위치한다. 모니터링 기간은 이천 및 부안은 2019년, 익산은 2013~2015년, 전주는 2015~2018년의 선행연구 자료를 활용하였다 (KRCC RRI, 2016; KECC, 2019; Kim, 2022). 각 지역별로 토지이용도, 유역도, DEM 등 자료를 수집하여 HSPF Paddy-RCH 모형 (Jung et al., 2019)의 입력자료를 구축하였으며, 기상자료는 현장에서 관측한 강우량 및 인근 기상관측소 자료를 활용하였다.

Fig. 2는 대상지역별 논 대조구 (CM, Conventional outlet management)와 물꼬관리 (DOR, Drainage outlet raising) 처리구의 모니터링 결과로서 영농기간 동안의 총 유출량 및 부하량이다. 논 수문 및 수질 모니터링은 배수구에 유량을 측정하고 배출수를 채취하여 수질 분석을 통해 오염부하량을 평가하였다. 대조구는 관행 물꼬높이 7 cm로 관리하며, 물꼬관리 처리구는 물꼬높이 12 cm로 관리되었다. 오염총량관리기술지침

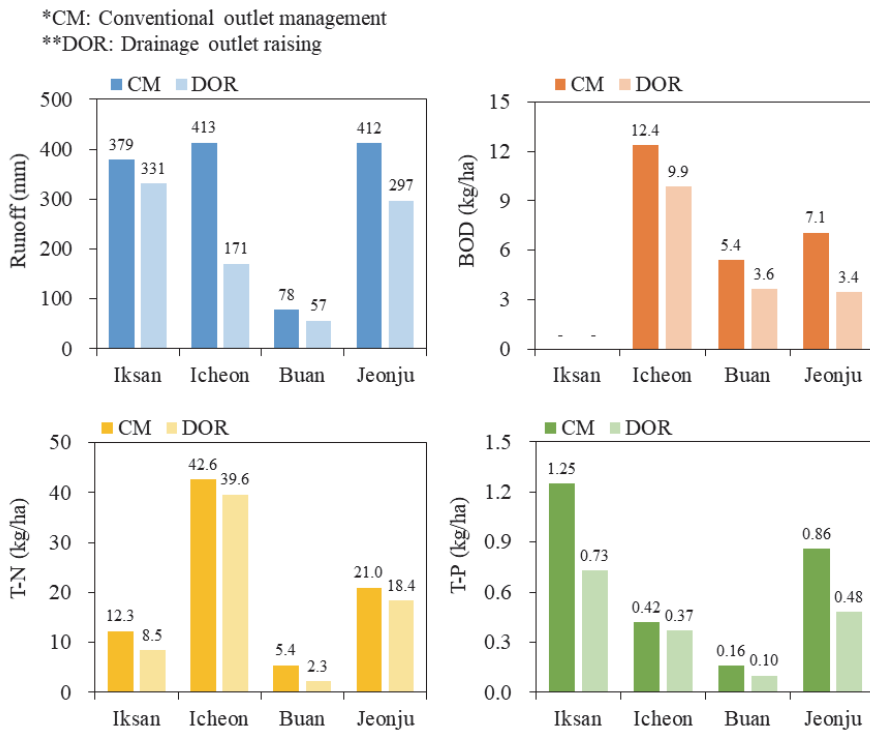


Fig. 2 Comparisons between CM (Conventional outlet management) and DOR (Drainage outlet raising) for runoff, BOD, T-N, and T-P in each paddy field

Table 1 Comparisons between monitoring data and calculated pollutant loads by reduction load equation

Region (Reference)	Monitoring (kg/km ² /day)			Equation (kg/km ² /day)		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Changnyeong (Moon, 2019)	1.84	1.50	0.73	0.34 (18.7%)*	0.17 (11.2%)	0.11 (15.4%)
Iksan (KRCC RRI, 2016)	-	3.83	0.52	0.27 (-)	0.13 (3.5%)	0.09 (17.1%)
Icheon (KECO, 2019)	2.53	2.97	0.05	0.36 (14.4%)	0.18 (6.0%)	0.12 (239%)
Buan (KECO, 2019)	1.77	3.13	0.06	0.32 (17.8%)	0.15 (4.9%)	0.10 (172%)
Jeonju (Kim, 2022)	3.62	2.57	0.38	0.35 (9.8%)	0.17 (6.8%)	0.12 (30.6%)

* Equation value / monitoring value × 100

의 오염원 항목과 같이 BOD, T-N, T-P 자료를 수집하였으며, 익산은 T-N 및 T-P만 모니터링 하였으며, BOD는 제외되었다. 이는 각 지역에 대한 연구 목적 및 모니터링 방법이 다르기 때문에 일부 방법에 차이가 있다. 모니터링 자료는 삭감부하량 산정 (Table 1)과 HSPF Paddy-RCH 모형 구축에 사용되었다.

2. 삭감부하량 산정식

논 물꼬관리기법에 대한 삭감부하량 산정식은 환경부 오염총량관리기술지침에 수록되어 있으며, 논 배수에 따른 농업비점오염원 관리를 위해 2019년 개정된 지침에 포함되었다. 다음 식 (1)은 오염총량관리기술지침에 기술된 논에서의 물꼬관리에 따른 삭감부하량 산정식이다.

$$\begin{aligned}
 RL &= \sum RL_m \times 0.8 \\
 RL_m &= MRL \times RR \\
 RR &= a \times \ln(x) + b \\
 MRL &= UL \times OR \times PR \\
 PR &= 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{Period \times MPR}{NM} \right) \\
 MPR &= \frac{P10}{TP10}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, RL은 삭감부하량 (kg/km²/day), 0.8은 안전율 20%, RL_m은 월별삭감부하량 (kg/km²/day), MRL은 월삭감대상부하량 (kg/km²/day), RR은 저감비, x는 물꼬 증가 높이, UL은 원단위 (kg/km²/day), OR은 물꼬배출비, PR은 강우배출비, Period는 영농 및 비영농기간 일 수, NM은 월간일 수 (28, 29, 30, 31), MPR은 월유효강우량비, P10은 10mm/day 이상 월강우량 합계, TP10은 영농 및 비영농기간 동안의 10 mm/day 이상 강우량의 총합계이다.

안전율은 발생부하량과 물꼬배출비 및 저감비의 불확실성을 고려하고 있다. 저감비는 논 물꼬 높이를 관행 (7cm)보다 높게 관리 (1~5cm)하였을 때 감소되는 배출량의 비율을 말하며 실측이 없는 경우 저감비로 산정된다. 저감비의 매개변수는 영농기간 (4~9월)과 비영농기간으로 구분되며, 영농기간의 a, b는 각각 0.078, 0.0221, 비영농기간에는 0.3183, 0.0396으로 정의하고 있다 (NIER, 2019). 발생부하량은 논에서 발생하는 오염부하량 (BOD, T-N, T-P)을 의미하며, 모니터링 자료 또는 원단위를 통해 산정할 수 있다. 지침에서는 답(논)의 발생원단위를 BOD 4.24, T-N 2.92, T-P 1.4 kg/km²/day

로 제시하고 있다 (NIER, 2019). 물꼬배출비는 발생부하량이 물꼬를 통해 배출되는 월부하량의 비로서 시비활동 및 작물 생육이 주로 이루어지는 영농기간과 비영농기간으로 구분하여 적용한다. 해당 지역의 실측이 없는 경우, 영농기간은 BOD, T-N, T-P 항목별 각각 0.132, 0.094, 0.131을 적용하며, 비영농기간은 BOD, T-N, T-P 항목별 각각 0.034, 0.073, 0.035를 적용한다 (NIER, 2019).

3. HSPF Paddy-RCH 모형

HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형은 미국 환경청 (US EPA)에서 개발한 준분포형 장기 수문 모형으로 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 증발산, 수질, 토양유식 및 영양물질 등을 모의할 수 있다 (Bicknell et al., 1997). 논에서의 수문 및 수질을 모의하기 위해 HSPF 모형의 PERLIND 및 REACH 모듈에서 대상 논 필지와 동일한 면적의 체적을 구축하여 비교적 단순한 형태인 논으로 표현 가능하다 (즉, HSPF Paddy-RCH model). 농경지를 모의하는 PERLIND 모듈에서 논 면적을 제거하고 대상 논과 동일한 면적의 RCHRES를 구성하고 HSPF의 F-Table을 기반으로 하는 FUNCT 옵션을 활용하여 배수물꼬 관리기법을 재현할 수 있다 (Moon, 2019; Jung et al., 2019). 논 모델링을 위한 HSPF Paddy-RCH 모형 구축은 Moon (2019)과 Jung et al. (2019)의 연구결과에 자세하게 설명되어 있다.

논 물꼬관리기법에 대한 삭감부하량 산정식은 2018년 경상남도 창원군에서 논 모니터링 및 HSPF-Paddy RCH 모형을 이용하여 도출되었으며, 삭감부하량 산정식 주요 인자인 저감비는 모델링을 활용하여 물꼬높이 증가를 구현하고 물꼬높이 시나리오에 따른 유출 저감 관계식으로 도출되었다 (Moon, 2019). 본 연구에서도 지침과 동일하게 HSPF Paddy-RCH 모형을 구축하여 각 지역별 모니터링 결과를 활용하여 모형을 보정하였으며, 삭감부하량 산정식의 주요인자를 분석하였다. 2010~2019년까지 장기모델링을 수행하여 다양한 기상조건에 따른 오염원 배출특성, 저감효과, 물꼬높이 증가에 따른 저감율, 그리고 삭감부하량 산정식의 주요인자를 평가하고, NIER (2012)가 제안했던 강우계급에 따른 오염부하량 배출 및 저감율을 분석하고자 한다.

III. 결과 및 고찰

1. 현행 삭감부하량 산정식 평가

대조구와 물꼬관리 처리구 모니터링 자료를 이용하여 현행 삭감부하량 산정식을 평가하고자 하였다. 모니터링 자료 (실

측자료)에 따른 삭감부하량과 현행 삭감부하량 산정식에 따른 삭감부하량 비교 결과는 Table 1과 같다. Moon (2019)은 지침에서 도출한 삭감부하량 산정식에 기반이 되는 결과이며, 모니터링 결과와 비교하여 평균 15.1% 수준으로 과소한 값으로 나타났다. 다른 지역에서도 삭감부하량 산정식의 결과가 평균 15.2%, 6.5%, 21.0% 수준을 보여주고 있으며, 이천과 부안의 T-P 모니터링 결과는 매우 낮아 삭감부하량 산정 결과가 더 높은 결과를 보여주었다. 이는 관계기간 (4월~9월) 결과이며, 비관개기간까지 포함하여 1년 동안의 전체 삭감부하량을 산정하였을 때, 5개 대상지역 모두 같은 결과 (BOD 0.78, T-N 0.76, T-P 0.26 kg/km²/day)로 나타났다. 이는 현행 삭감부하량 산정식의 주요인자를 적용하는 과정에서 강우배출비, 물꼬배출비, 저감비, 안전율이 곱하여져 과소화되는 문제점과 동일한 원단위를 사용하고 있어 지역의 유출 특성을 고려할 수 없는 한계점을 보여준다 (Kim et al., 2010).

현행 삭감부하량 산정식의 결과는 Moon (2019)에서도 산정식을 통한 삭감부하량은 안전율, 저감비, 물꼬배출비 등이 고려되어 일정 범위 내에서 삭감부하량이 산정되는 한계점이 있는 것으로 보고하였다. 한편, NIER (2012)는 농업비점오염원이 강우량 및 강우강도 등 강우특성에 따라 배출특성도 달라질 수 있으므로 강우계급을 구분하여 원단위 산정법을 제안한 바 있다. 삭감부하량 산정식의 강우배출비는 영농기간의 총 강우량에 대한 해당 월강우량의 비로서 강우특성 (강우강도, 지속기간, 강우사상 등)을 반영하지 못하는 한계가 있다. 특히, 배출부하량은 강우특성과 상관관계가 높기 때문에 산정식에 반영하는 것이 중요할 것으로 판단된다 (Kim et al., 2020).

2. HSPF Paddy-RCH 모형의 적용성 평가

대상지역별 논 필지 (대조구, 물꼬관리 처리구)에 대한 HSPF Paddy-RCH 모형을 구축하였으며, Table 2와 같이 수문 및 수질과 관련된 매개변수를 적용하여 보정을 수행하였다. 익산지역의 모형 보정기간은 2013~2014년이며, 검정기간은 2015년이다. 이천 및 부안 지역은 모형의 보정만 진행하였으며, 2019년 1년 기간동안 모델링이 수행되었다. 전주 지역의 모형 보정기간은 2015~2016년이며, 검정기간은 2017~2018년이다. 모형의 적용성 평가 지표는 필지단위 모형에 대표적으로 많이 사용되고 있는 결정계수 (Determination coefficient, R²)를 선정하였으며, 모형의 성능 평가 기준은 Moriasi et al. (2015)를 참고하였다. NSE는 유역단위 평가 기준으로 모형 구축에 참고만 하였다. 대상지역별 논 대조구 (CM)에 대한 모형 성능 평가 결과는 익산지역 논이 0.7 이상으로 “Satisfactory”, 이천, 부안, 전주 지역의 논은 0.75 이상으로 “Good”로 나타났다 (Fig. 3). 물꼬관리 처리구 (DOR)의 모형 성능 평가 결과는 대조구와 비교하여 상대적으로 낮은 지수를 나타냈으며, 이는 보정 및 검정기간이 짧고 장기간 자료가 아니라는 점에서 한계가 있는 것으로 판단된다. 다만, 물꼬조절 적용에 따라 대조구와 비교하여 유출량이 감소하였으며, HSPF-Paddy RCH 모형이 물꼬조절 관리와 유사한 재현성을 보였다라는 점에서 논 모델링 적용 가능성을 확인하였고 추후 모니터링 자료 확보에 따른 보완이 필요할 것으로 판단된다.

한편, Seong et al. (2018)은 HSPF 모형의 12.4 버전에서 습지에 지표유출수가 저류되는 현상을 구현하기 위한 Surface-Ftable을 이용하여 국내 논 유출특성을 모의할 수 있는지 검토한 바 있다. Moon (2019)과 Jung et al. (2019)은 위 내용과 같이 RCHRES를 구성하는 F-Table은 논이 “깊이-면적-부피-

Table 2 Representative calibrated values for runoff and water quality parameters for HSPF Paddy-RCH model

Parameter		Description	Iksan	Icheon	Buan	Jeonju
Runoff	LZSN	Lower zone nominal storage	10	4	11	13
	UZSN	Upper zone nominal soil moisture storage	1.5	0.1	0.13	0.13
	INFILT	Index to infiltration capacity	0.02	0.004	0.025	0.05
	AGWRC	Base groundwater recession	0.86	0.98	0.86	0.85
	DEEPPFR	Fraction of GW inflow to deep recharge	0.001	0.001	0.06	0.2
	INTERCEP	Monthly interception storage capacity	0.1-0.3	0.01-0.3	0.1-0.3	0.1-0.6
Water Quality	KBOD20	Unit BOD decay rate at 20°C	0.01	0.0004	0.03	0.05
	KODSET	BOD settling rate	0.05	0.015	0.06	0.001
	KTAM20	Nitrification rates of ammonia at 20°C	0.002	0.0033	0.02	0.005
	KNO320	Denitrification rates at 20°C	0.002	0.025	0.002	0.002
	PHYSET	Dead refractory organic constituents	0.2	0.3	0.3	0.25

Table 3 Statistics result of model calibration for runoff and pollutant loads

Items	Regions	CM (Conventional outlet management)				DOR (Drainage outlet raising)			
		Obs	Sim	R ²	NSE	Obs	Sim	R ²	NSE
Runoff (mm)	Iksan	378.5	321.9	0.71	0.69	331.3	285.8	0.83	0.91
	Icheon	413.4	326.1	0.84	0.79	170.6	304.3	0.71	0.44
	Buan	78.1	66.4	0.86	0.78	56.7	59.3	0.70	0.43
	Jeonju	412.3	266.9	0.75	0.73	297.4	233.3	0.71	0.80
BOD (kg/ha)	Icheon	12.4	13.5	0.67	0.61	9.9	13.4	0.64	0.65
	Buan	5.4	5.4	0.95	0.85	3.6	2.5	0.98	0.97
	Jeonju	7.1	12.8	0.58	0.43	3.4	11.4	0.54	0.43
T-N (kg/ha)	Iksan	12.3	16.2	0.57	0.52	8.5	16.2	0.57	0.50
	Icheon	42.6	15.1	0.67	0.57	39.6	14.9	0.65	0.56
	Buan	5.4	6.5	0.65	0.56	2.3	4.5	0.64	0.62
	Jeonju	21.0	6.2	0.75	0.72	18.4	5.2	0.70	0.70
T-P (kg/ha)	Iksan	1.25	0.47	0.46	0.61	0.73	0.42	0.48	0.54
	Icheon	0.42	0.22	0.57	0.41	0.37	0.20	0.68	0.40
	Buan	0.16	0.20	0.84	0.72	0.10	0.16	0.53	0.26
	Jeonju	0.86	1.90	0.54	0.4	0.48	1.61	0.53	0.63

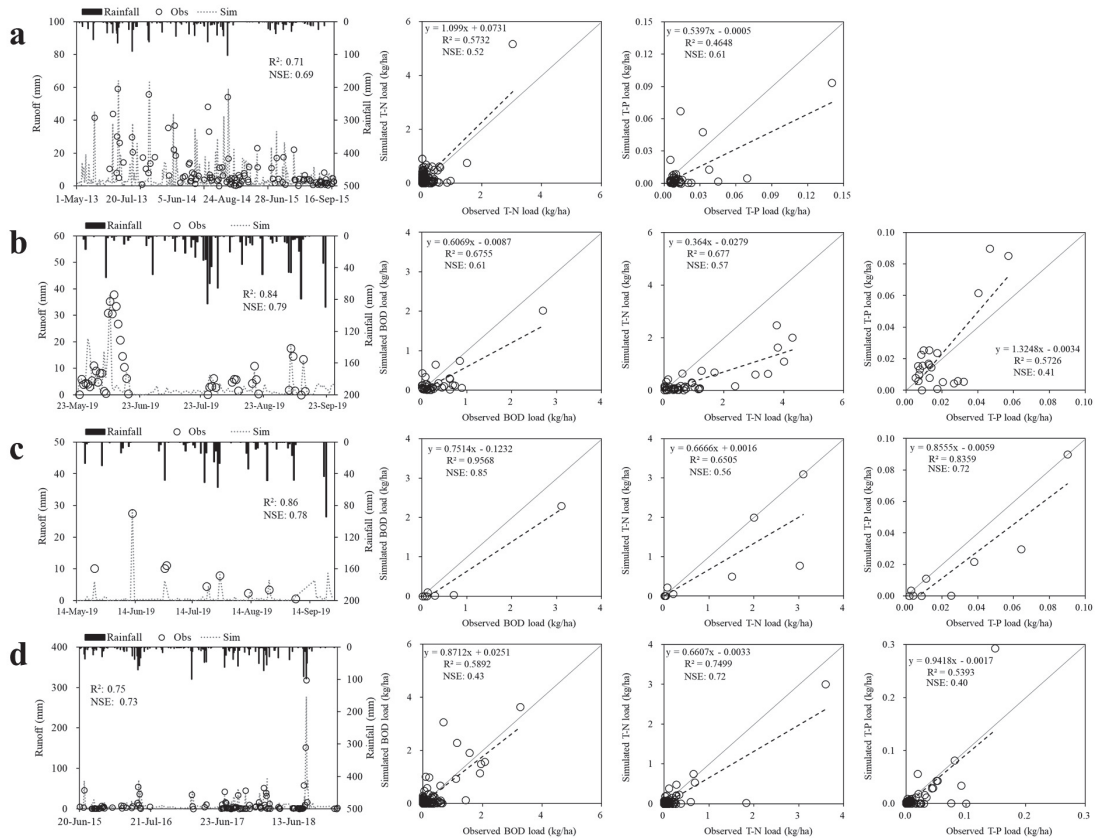


Fig. 3 Comparisons between observed and simulated runoff, BOD, T-N, and T-P in the (a) Iksan, (b) Icheon, (c) Buan, and (d) Jeonju paddy fields (CM, conventional outlet management)

유량”에 대해 고려했다면, Seong et al. (2018)은 PERLND의 Surface-Ftable은 논의 지표저류높이에 따른 유출비율을 계산하기 위해 “깊이-유출량비율”을 고려한 것으로 두 방법은 수체 (RCHRES)와 지표투수면 (PERLND)을 기준으로 논 유출 특성을 정의한 차이가 있다. 본 연구에서는 지침과 동일한 방법을 적용하고자 Moon (2019)과 Jung et al. (2019)의 방법을 인용하였으나, 향후 Seong et al. (2018)의 논 모델링 방법도 적용하여 각 방법의 장·단점을 분석하고 삭감부하량 산정식 주요인자 분석에 유리한 방법을 검토할 필요가 있다.

3. 장기모델링을 활용한 물꼬관리에 따른 논 오염부하량 비교

Fig. 4는 다양한 강우특성을 반영하고 강우계급에 따른 오염원 저감효과를 분석하기 위해 2010년부터 2019년까지 각 지역별 장기 모의 결과를 나타내고 있다. 지역별 논 물꼬관리 기준은 5 cm 증가로서 대조구 물꼬높이는 7 cm, 물꼬조절 처리구는 12 cm이며, 물꼬관리에 따른 배출량 저감효과는 다음과 같다. 익산지역의 저감효과는 유출량 4.3%, BOD 21.8%, T-N 35.0%, T-P 34.6%로 나타났다. 이천지역은 유출량 16.8%, BOD 35.5%, T-N 32.1%, T-P 33.9%로 나타났다. 부안지

역은 유출량 4.5%, BOD 23.6%, T-N 39.0, T-P 20.2%로 나타났다. 전주지역은 유출량 4.9%, BOD 7.7%, T-N 7.2%, T-P 6.0%로 나타났다. 장기모델링 결과는 지역별로 다양한 기상특성에 따른 배출량을 나타내고 있으며, 물꼬관리에 따른 저감효과를 보여주고 있다. 이는 강우특성의 변화와 비점오염원 배출은 밀접한 상관성이 있기 때문이며 (Choi et al., 2019), 이러한 이유로 Yeon et al. (2015)은 다양한 지역별 강우특성을 반영하여 삭감대상부하비를 고려한 바 있다. 따라서 삭감부하량 산정식은 다양한 지역 및 강우 특성 반영이 필요할 것으로 판단된다.

4. 삭감부하량 산정식 고찰

삭감부하량 산정식 (1)에서 원단위로부터 직접적인 저감효율 및 삭감량에 큰 영향을 미치는 주요 인자는 저감비, 물꼬배출비 그리고 안전율이다. 저감비는 물꼬 높이 입력에 따른 유출저감율이며, 물꼬배출비는 관행보다 높은 물꼬높이 (7 cm에서 12 cm로 증가)에 따른 수질항목별 저감율을 나타내고 있다. 안전율은 삭감부하량 결과의 불확실성을 보완하기 위한 인자이다. 세 가지의 주요 인자는 동일한 성격을 가지며, 원단위에 중복으로 곱하여 적용되면서 삭감부하량이 과소평

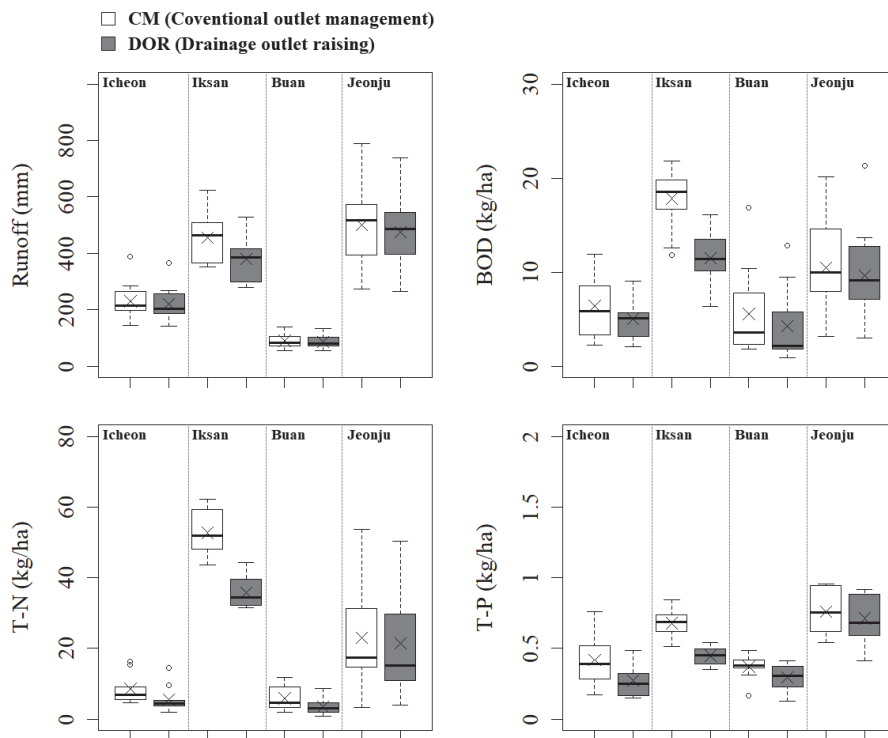


Fig. 4 Boxplot comparisons between CM (Conventional outlet management) and DOR (Drainage outlet raising) management for simulated runoff, BOD, T-N, and T-P in each study sites

Table 4 Outlet discharge rate (OR) of BOD, T-N, and T-P loads for irrigation and non-irrigation periods in each region

Region	Period	Outlet discharge rate (OR)		
		BOD	T-N	T-P
Changnyeong	Irrigation	0.132	0.094	0.131
	Non-irrigation	0.034	0.073	0.035
Iksan	Irrigation	0.561	0.172	0.513
	Non-irrigation	0.564	0.232	0.186
Icheon	Irrigation	0.577	0.409	0.232
	Non-irrigation	0.178	0.179	0.234
Buan	Irrigation	0.454	0.194	0.475
	Non-irrigation	0.572	0.108	0.086
Jeonju	Irrigation	0.604	0.249	0.488
	Non-irrigation	0.465	0.201	0.179
Mean	Irrigation	0.466	0.224	0.368
	Non-irrigation	0.363	0.159	0.144

가되는 결과로 이어진다. 본 연구에서는 물꼬배출비만 적용하여 중복적용에 따른 과소평가를 방지하고자 하였으며, Table 4와 같이 각 지역별 물꼬배출비 (OR)를 도출하고 범용적으로 적용할 수 있도록 평균값을 산정하여 물꼬관리 적용에 따른 수질항목별 저감율을 제시하였다. 저감비는 물꼬높이 반영을 위해 주기적인 모니터링 자료가 필요하지만 인적, 경제적, 시간적인 한계가 있기 때문에 실질적인 반영이 어려운 것으로 판단되어 제외하였다. 안전율은 과대평가라는 불확실성을 내포하는 경우 적용 가능할 것으로 사료되며, 삭감부하량 결과가 과소평가될 경우 제외하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 현행 식을 개선하여 다음 식 (2)와 같이 “삭감부하량 산정 개선식1”을 제안하고자 한다.

$$\begin{aligned}
 RL &= \sum MRL \\
 MRL &= UL \times OR \times PR \\
 PR &= 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{Period \times MPR}{NM} \right) \\
 MPR &= \frac{P10}{TP10}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, RL은 삭감부하량 (kg/km²/day), MRL은 월삭감부하량 (kg/km²/day), UL은 원단위 (kg/km²/day), OR은 물꼬배출비, PR은 강우배출비, Period는 영농 및 비영농기간 일 수, NM은 월간일 수 (28, 29, 30, 31), MPR은 월유효강우량비, P10은 10mm/day 이상 월 강우량 합계, TP10은 영농 및 비영농기간 동안의 10 mm/day 이상 강우량의 총합계이다.

한편, 토지계 부문의 비점오염저감시설 (저류형, 침투형, 여과형 등)에 따른 삭감부하량 산정식의 주요인자는 원단위

에 삭감대상부하비 (강우처리비에 따른 삭감대상부하량의 비)와 저감효율만 곱하는 것으로 간편하게 삭감부하량을 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 안전율 및 저감비 등 주요 인자를 제거하여 삭감부하량이 과소 산정되는 것을 방지하고 강우배출비는 강우계급별 강우사상, 강우량으로 대체, 물꼬배출비는 강우계급별 평균 저감효율 등으로 대체 적용하여 간편하고 범용적으로 적용할 수 있는 삭감부하량 산정 개선식을 추가로 제안하고자 하였다.

삭감부하량 산정식의 주요 인자를 개선하기 Fig. 5와 같이 HSPF Paddy-RCH 모형의 장기 모의 결과자료를 활용한 강우계급에 따른 오염원 저감효과를 평가하였다. 모니터링 결과는 자료 표본의 한계로 인하여 분석에 한계가 있었으며, 모델링을 이용하여 결과를 보완하였다. 강우계급은 총 4개 계급이며 (NIER, 2012), BOD 저감효과는 강우계급0(0~10 mm)에서 39.9%, 강우계급1(10~30 mm)에서 39.8%, 강우계급2(30~50 mm)에서 31.4%, 강우계급3(50 mm ≤)에서 27.4%, T-N 저감효과는 각각 26.1%, 25.9%, 22.2%, 16.1%로 나타났다. T-P 저감효과는 각각 19.2%, 20.2%, 17.3%, 15.3%로 나타났다. 강우계급이 높아질수록 저감효과는 낮아지는 것으로 나타나며, 이는 강우강도 및 강우량이 높은 날이 많을수록 비점오염원 및 삭감부하량에 반영되어 높게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

장기간의 모의결과를 활용하여 강우계급에 따른 저감효율, 강우계급별 강우사상, 평년강수량 대비 해당 연도의 강수량 인자를 기반으로 “삭감부하량 산정 개선식 2”를 제안하였다. 이에 따라 현행 식의 주요 인자인 저감비, 물꼬배출비가 수질항목별 저감효율로 통합되며, 강우배출비는 강우계급별 강우사상 및 강우량으로 대체하여 삭감부하량 산정식을 다른 토

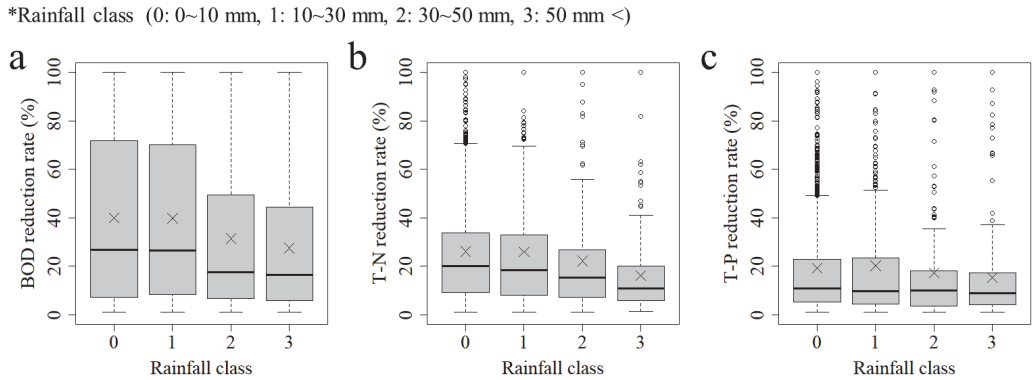


Fig. 5 Boxplot comparisons of simulated (a) BOD, (b) T-N, and (c) T-P reduction rate according to rainfall classes

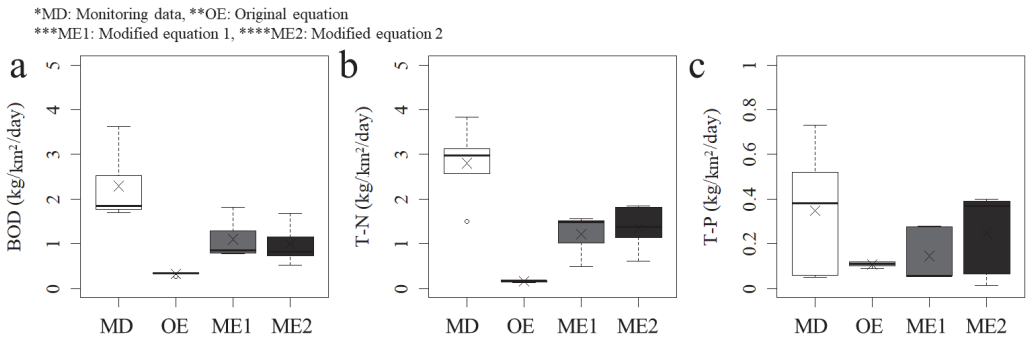


Fig. 6 Boxplot comparisons of reduction (a) BOD, (b) T-N, and (c) T-P loads according to monitoring data, original equation, modified equation 1, and 2

지계 부문의 삭감부하량 산정식과 같이 간소화하였다. 개선식 2는 다음 식 (3)과 같이 제안하고자 한다.

$$RL = \frac{\sum_{i=1}^j R_i \times UL \times RR_i}{RE_i} \times \frac{AP}{NP} \quad (3)$$

여기서, RL은 삭감부하량 (kg/km²/day), i는 강우계급 (0~3), R_i는 강우계급별 강우사상의 강우량 (mm), UL은 BOD, T-N, T-P의 원단위 (kg/km²/day), RR_i는 강우계급별 BOD, T-N, T-P의 저감율 (%), RE_i는 강우계급별 강우사상 횟수, AP는 해당연도의 연강수량, NP는 평년강수량이다. 강우사상의 수를 가중치로 하였으며, 평년강수량보다 해당연도의 연강수량이 높을 경우, 배출되는 부하량이 많아지도록 반영하였다.

Fig. 6은 각 지역별 관개기간의 삭감부하량 (BOD, T-N, T-P)에 대한 모니터링 결과와 지역별 강수량 자료를 현행 삭감부하량 산정식, 그리고 본 연구에서 제안한 삭감부하량 산정 개선식 1, 2에 적용하여 산정한 삭감부하량을 비교한 결과이다. 개선식 1에서는 지역별로 도출한 물꼬배출비를 활용하

여 산정하였다. 또한, 비관개기간의 논 모니터링 자료를 확보하지 못했기 때문에 관개기간 동안의 결과를 비교하였다. 모니터링 결과와 비교하여 현행 삭감부하량 산정식은 평균 17.0%, 삭감부하량 산정 개선식1, 2는 각각 평균 44.4%, 54.2% 수준으로 나타났다. 결과적으로, 개선식1, 2는 현행의 삭감부하량 산정식을 개선한 것으로 나타났으며, 현행 식과 비교하여 삭감부하량 산정 활용도 및 범용성이 높을 것으로 판단된다.

5. 전국 강우배출비 공간분포

삭감부하량 산정식의 주요인자 중 하나인 강우배출비는 기상자료가 있다면 전국적으로 공간분포 특성을 분석할 수 있으며, 강우배출비를 기준으로 국내 논 모니터링 대표지역을 선정할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다. 기상청에서 제공하는 90개 종관기상관측소의 최근 10년 (2012~2021년) 강우량 자료를 수집하여 강우배출비 (PR)를 산정하였다. 강우배출비는 ArcGIS를 이용하여 IDW (Inverse distance weight) 방법에 의해 공간 보간하여 전국 공간분포를 분석하였다. 연평균

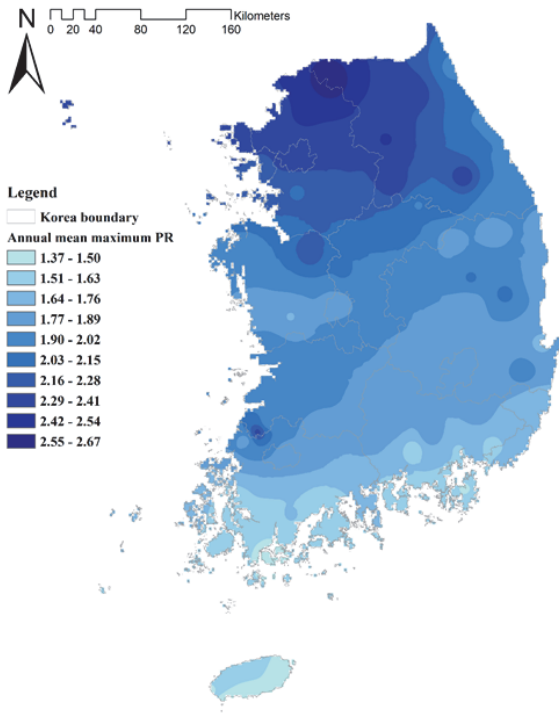


Fig. 7 Spatial distribution of PR (precipitation rate) in Korea using 90 ASOS (Automated Synoptic Observing System) stations data

최대강우배출비는 전국적으로 1.37~2.67로 나타났으며, 10개의 같은 간격 (0.145)으로 구분하여 각 구간의 강우배출비 값을 참고한 강우특성을 고려할 수 있는 지역을 선정하였다. 강우배출비가 낮은 순서로 제주 성산, 전남 완도, 경남 거제, 창원, 경북 구미, 대전광역시, 전북 전주, 고창, 강원 영월, 경기 이천, 충북 천안, 경기 파주, 동두천, 강원 철원으로 나타났다. 각 구간의 근접한 값을 포함하여 총 14개 지역을 강우배출비가 상이한 지역으로 선정하였다. 해당 지역을 고려한다면 범용적인 적용에 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 본 연구의 강우배출비 공간분포는 대표지역을 선정하기 위한 시범 결과로서, 향후 강우특성 (강우강도, 강우량, 지속기간, 강우침식인자 등), 공간분포 분석기법 (Kriging, spline 등), 논 면적 분포, 그리고 통계분석 등 면밀한 평가에 따라 개선될 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 오염총량관리기술지침의 논에서의 물꼬관리에 따른 삭감부하량 산정식을 검토하였다. 삭감부하량 산정식은 오염총량관리계획을 위해 실무자들이 사용하기에는

복잡한 식으로 구성되어 있으며, 모니터링 결과와 비교하여 과소한 값으로 산정되었기 때문에 실질적으로 유역의 오염총량관리계획으로 활용되기에는 한계가 있다. 따라서, 삭감부하량 산정식을 검토하였으며, 개선안을 제안하고자 다양한 지역 (경기도 이천, 전라북도 익산, 부안, 전주)의 모니터링 결과 및 HSPF 모형을 구축하여 장기간의 모델링 결과를 활용하였다. 모의 자료를 기반으로 현행 삭감부하량 산정식을 개선할 수 있는 1안과 강우계급별 저감효율을 분석하여 강우계급에 따른 삭감부하량 개선식을 2안으로 제안하였다. 개선된 삭감부하량 산정식의 결과는 모니터링 결과의 58.6~64.6% 수준으로 평가되었으며, 이는 현행 산정식 대비 편차가 상대적으로 줄어든 것으로 나타났다.

본 연구의 한계점은 삭감부하량 산정식을 개선했음에도 불구하고 현장 모니터링 결과와 비교하여 과소평가된 결과를 나타낸다. 이는 범용적인 적용을 위한 원단위 및 삭감부하량 산정식의 주요인자 등이 원인이 된다. 이를 개선할 수 있는 방안은 Choi et al. (2019)과 같이 국내 대표적인 기상 특성 또는 최근 강우 경향성을 반영할 수 있는 지역을 선정하여, 논 비점오염원 배출 특성에 따른 삭감부하량 산정식 주요인자들을 도출하고 통합한다면 합리적인 범용 산정식으로 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원 연구용역 (과제명: 새만금유역 농업비점오염 관리를 위한 교육지원 및 이행관리 방안)의 지원으로 이루어진 것임.

REFERENCES

- Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, A. S. Donigian, and R. C. Johanson, 1997. Hydrological simulation program-fortran user's manual for version 11. PB97-193114. U.S. Environmental Protection Agency.
- Choi, D. H., S. K. Choi, M. K. Kim, S. O. Hur, S. C. Hong, S. J. Yeob, and K. Yoon, 2019. A study on the estimation methods of nonpoint pollutant unit load: Focus on nonpoint pollutant unit load in paddy field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(3): 15-22. doi:10.5389/KSAE.2019.61.3.015.
- Choi, Y., Y. Kim, S. Kim, and M. Kim, 2015. Management of ponding depth and discharge filtration from paddy fields for controlling non-point source pollution. *Journal of the*

- Korean Society of Agricultural Engineers* 57(6): 125-130. doi:10.5389/KSAE.2015.57.6.125.
4. Jung, S. H., H. P. Rhee, H. S. Hwang, and C. G. Yoon, 2019. Study on development of paddy-rch method to consider discharge characteristics of paddy field in watershed model HSPF. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers* 41(6): 311-320. doi:10.4491/KSEE.2019.41.6.311.
 5. KECO, 2019. Application and diffusion of best management practices for non-point source pollution management in rural areas. Korea Environment Corporation.
 6. Kim, D. H., 2022. Evaluating the effects of BMPs for paddy and prioritizing management area under future climate linking SWAT and APEX-Paddy models. Ph.D. diss., Jeonbuk National University.
 7. Kim, D. H., T. Jang, and S. Hwang, 2020. Evaluating impacts of climate change on hydrology and total nitrogen loads using coupled APEX-paddy and SWAT models. *Paddy and Water Environment* 18, 515-529. doi.org/10.1007/s10333-020-00798-4.
 8. Kim, K., M. S. Kang, I. Song, J. H. Song, J. Park, S. M. Jun, J. R. Jang, and J. S. Kim, 2016. Effects of controlled drainage and slow-release fertilizer on nutrient pollutant loads from paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(1): 1-10. doi:10.5389/KSAE.2016.58.1.001.
 9. Kim, K. T., E. S. Chung, S. U. Kim, and K. S. Lee, 2010. Improvement and application of total maximum daily load management system of Korea: 2. Determine of margin of safety and allocation of pollutant loads. *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(1): 168-176.
 10. KRCC RRI, 2016. Development of agricultural non-point source pollution reduction measures on the Saemanguem watershed. Korea Rural Community Cooperation Rural Research Institute.
 11. Lee, T., H. L. Cho, E. Jeong, B. K. Koo, B. Park, and Y. Kim, 2017. A study on estimating diffuse pollution loads removal by road vacuum cleaning. *Journal of Korean Society on Water Environment* 33(2): 123-129. doi:10.15681/KSWE.2017.33.2.123.
 12. Moon, S. Y., 2019. The empirical study on agricultural non-point source pollution reduction for TMDL (Total maximum daily load). National Institute of Environmental Research.
 13. Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati, 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 58(6): 1763-1785. doi:10.13031/trans.58.10715.
 14. NIER, 2012. Rainfall-runoff survey method. National Institute of Environmental Research.
 15. NIER, 2019. Technical guidelines for total pollution management. NIER-GP2019-010. National Institute of Environmental Research.
 16. Park, J. H., J. Ryu, D. S. Shin, and J. K., Lee, 2019. The effective approach for non-point source management. *Journal of Wetlands Research* 21(2): 140-146. doi:10.17663/JWR.2019.21.2.140.
 17. Seong, C., C. Oh, and S. Hwang, 2018. Watershed-scale hydrologic modeling considering a detention effect of rice paddy fields using HSPF surface-ftable. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(5): 41-54. doi:10.5389/KSAE.2018.60.5.41.
 18. Yeon, J. S., K. B. Sim, O. Lee, S. Kim, and E. S. Kim, 2015. The improvement on the empirical formula of reduced target loading ratio for bio-retention non-point source control facilities. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 15(6): 443-450. doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.6.443.