

HSPF모형에서 논 모의 기능개선을 위한 Paddy-RCH 개발

Study on Development of Paddy-RCH Method to Consider Discharge Characteristics of Paddy Field in Watershed Model HSPF

정신혜¹ · 이한필¹ · 황하선² · 윤춘경^{1,*}

Shin Hye Jung¹ · Han-Pil Rhee¹ · Ha Sun Hwang² · Chun Gyeong Yoon^{1,*}

¹건국대학교 환경보건과학과 · ²국립환경과학원 물환경연구부

¹Department of Environmental Health Science, Konkuk University

²Water Environmental Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received January 23, 2019; Revised March 12, 2019; Accepted March 12, 2019)

Abstract : In the implementation of the Total Pollution Load Control (TPLC), in order to reasonably consider the reduction-plan for agricultural non-point sources (agNPS), be properly predictable. In Korea, agNPS caused by paddy fields occupies a large proportion, but general watershed models have limitations in simulating the water-balance and water quality mechanisms from paddy fields. In this study, the HSPF Paddy-RCH method that can simulate mechanisms of paddy in the watershed model was developed by connecting the PERLND module and the RCHRES module, and reconstructing the mass transfer path between modules. And the applicability of Paddy-RCH methods was evaluated by simulation on test paddies. As a result of calibration and verification, water-depth (ΔS) was evaluated as Very-Good, and runoff was Good (-13.97%) ~ Fair (-22.68%). In the water-quality prediction, BOD and T-N were evaluated as Very-Good, and T-P was Very-Good (2.62%) ~ Good (17.95%). It was evaluated that simulated results can represent the tendency of the measured value relatively well. The paddy-RCH method can be advantageous in that it can simultaneously grasp the influence of paddy fields and watershed size according to farming methods, can link with existing prediction methods by using a model that can be provided to everyone.

Key Words : TPLC, Agricultural Non-point Sources, Watershed model, HSPF, Paddy

요약 : 수질오염총량관리를 비롯한 유역관리제도의 시행에 있어서, 농업비점오염에 대한 삭감계획을 합리적으로 반영하기 위해서는 농업지역의 유출특성과 삭감행위로 인한 변화, 특히 유역 규모에서의 영향을 적절히 예측할 수 있어야 한다. 특히 우리나라는 수도작으로 인해 논이 비점오염 기여율이 높는데, 외국에서 개발된 유역모델은 일반적으로 논을 반영하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 유역모델 기법의 논에 대한 표현의 한계를 개선하기 위해, HSPF의 토지이용별 모듈(PERLND)과 하천 모듈(RCHRES), 그리고 모듈 간 물질 전달 경로를 정의하는 네트워크를 적절히 재구성하여 논을 영농특성을 반영할 수 있는 Paddy-RCH기법을 개발하고, 실험논에 적용하여 보정 및 검증과정을 통해 적용성을 평가하였다. 물수지 관련, 담수심의 경우 3개의 실험논에서 %Diff. (%상대오차)가 -2.38 ~ -5.31% (Very Good), R^2 는 0.654 (Fair) ~ 0.892 (Very Good) 수준으로 평가되었고, 유출량의 경우 %Diff.가 -13.97 (Good) ~ -22.68% (Fair), R^2 는 0.778 (Good) ~ 0.837 (Very Good)으로 평가되었다. 한편, 수질예측에 있어서 %Diff.는 BOD가 -5.54 ~ 8.37% (Very Good), T-N은 -9.74 ~ 14.73% (Very Good), T-P는 2.62 (Very Good) ~ 17.95% (Good)으로 평가되었다. 이에 따라, 비록 한정된 기간 및 지역에서의 적용이지만, 각 논을 영농 상황을 반영하여 모의된 결과가 비교적 양호하게 실측치의 경향성을 표현할 수 있는 것으로 평가되었다. 이러한 방법은 누구나 제공받을 수 있는 모델을 활용하여, 영농방법에 따른 필지 및 유역규모의 영향을 동시에 파악할 수 있고, 기존 예측기법과 연계할 수 있다는 점에서 이점을 가질 수 있으며, 향후 논에서의 삭감효과와 유역에서의 수질개선 효과를 정량화하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 수질오염총량관리, 농업비점오염, 유역모델, HSPF, 논

1. 서론

우리나라는 유역으로부터 배출할 수 있는 오염물질의 총량을 할당하여 관리함으로써, 수계 특정지점의 목표수질을 달성 및 유지할 수 있는 수질오염총량관리제도를 시행하고 있다. 이에 따라, 단계적으로 유역 내 환경기초시설을 비롯한 각종 배출시설의 방류수질 강화 등 점오염 삭감을 위한 노력이 경주되어 가시적 성과를 거두고 있다. 그러나 주로 강우유출수 거동에 따라 배출되는 비점오염의 경우, 지속

적인 개발과 극한기후 현상 등으로 인해 그 비중이 증가되고 있음에도, 점오염에 비해 상대적으로 삭감효과를 정량화하기 어려워, 명확하고 적극적인 삭감계획을 수립하기에 한계가 있는 실정이다.

한편, 우리나라는 농경지에서 기인하는 농업 비점오염물질이 수계 오염물질 중 많은 비중을 차지하고 있으며, 벼를 주식으로 하는 먹거리 특성상 수도작(논)에 의한 기여율이 높는데, 논은 그 영농특성으로 인해, 담수상태와 비담수상태가 공존하는 토지이용의 형태를 지니고 있다.¹⁾

* Corresponding author E-mail: chunyoonev@gmail.com Tel: 02-450-3747 Fax: 02-446-2543

특히 연중 이모작이 이루어지는 지역의 경우, 동일 토지 내에서 벼의 수확 후에는 밭으로서의 영농활동도 이루어짐에 따라, 연중 다각적인 유출 기작과 특성을 고려할 필요가 있다.

현재 수질오염총량관리를 비롯한 유역관리제도의 안정적 시행을 위해, 농업비점오염 관리를 목적으로 한 물꼬관리, 시비량 저감 등의 영농방법 개선 및 다양한 비구조적 삭감 행위를 유도하고 있는 정책적 현실에 비추어볼 때, 논 토지의 농업적 이용 및 유출 기작을 적절히 반영하여 해당 삭감행위에 따른 오염물질 유출의 저감 효과를 예측하는 것은 매우 중요할 것으로 판단할 수 있다.

최근 유역 내 다양한 토지이용으로부터 비점오염의 유출 해석 및 저감효과 예측 등을 위해 유역모델 기법이 다양하게 활용되고 있는데, 이 중 Stanford Watershed Model에 기반을 둔 HSPF (Hydrological Simulation Program-FOTRAN, US EPA)는 토지이용에 따른 비점오염원 유출특성을 반영하여 모의 할 수 있는 모델로서, 비교적 사용자의 자유도가 높아 국내외 가장 널리 활용되고 있는 모델 중 하나이다. 특히 미국의 총량제인 TMDLs 계획수립을 위해 다양한 유역에서 적용되고 있으며, 최근 환경부는 HSPF를 이용하여 수질오염총량제도에 유역모델을 직접 활용할 수 있는 방안과 대상물질의 배출특성 모의개선 방안에 대해 연구가 수행된 바 있다.^{2,3)}

그러나 농업지역에 초점을 맞추어볼 때, 밭이 농업지역의 주를 이루고 있는 외국에서 개발된 모형, 특히 HSPF 모형은 PERLND 모듈에서 농경지를 논/밭 혹은 담수/비담수 상태를 구분하지 않고 동일한 Agricultural Land로 모의하고 있어, 국내 논 연중 다양한 유출특성과 수질기작을 표현하는데 한계가 있다. 이에 따라, 앞선 연구자들이 논 특성을 고려할 수 있는 CREAMS-PADDY, PADDIMOD 등 필지단위 수질모형을 개발한 바 있고, 유역단위의 예측 및 평가를 위하여 HSPF를 수정하거나, SWMM에 컨셉을 둔 별도의 모형이 개발된 바 있다.⁴⁾ 다만, 이러한 모형은 일부 연구자들에 의해 개발 및 적용되었다는 점(접근의 한계), 유지관리에 한계가 있다는 점(안정성의 한계)에서 지속적인 활용에 어려움이 있었고, 논 담수의 모의에 있어서 직접적으로 물량을 다루기보다는 특정 변수들을 대체하여 간접적으로 모의하거나, 지표하와 연계된 수문현상을 모의하는데 한계가 있었다.

이에, 본 연구에서는 유역모형 HSPF가 토지이용별 각각의 독립된 반응계산 모듈(Operation)을 네트워크(Schematic, Mass-Link)로 연결하고 있는 구조적 특성에 착안하여, 논 작물재배 특성에 따른 담수 및 비담수 상태에서 물과 오염물질 거동을 재현할 수 있도록, HSPF의 기본 모듈과 그 전달경로의 재구성을 포함한 Paddy-RCH 기법을 개발하고, 시범지역에 적용하여 재현성을 검토함으로써, 향후 농업지역의 비점오염원 등 유역관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 유역모형 HSPF 및 논모의

준분포형 유역모형인 HSPF는, 소유역 단위의 토지이용 형태를 바탕으로 투수지역을 모의하는 PERLND 모듈과 불투수지역을 모의하는 IMPLND 모듈, 그리고 하천 수계를 모의하는 RCHRES 모듈로 구성되어 있다. 이 중 강우-유출 현상과 토지표면에 축적된 오염물질의 거동은 PERLND 및 IMPLND 모듈에서 모의하는데, IMPLND 모듈은 지표(표면)유출만을 모의하는 반면, PERLND 모듈은 지표유출과 함께 중간유출과 기저유출 등 지표 아래에서의 수문현상과 경로별 유출에 대해 종합적으로 모의한다. 이러한 지표면에서의 모의 결과는 RCHRES 모듈로 전달되며, RCHRES 모듈은 하천 내에서의 수리적 현상과 오염물질의 거동을 담당하게 된다.

HSPF의 모의 과정에서, 농업지역에 대한 모의는 토양수분과 그 밖의 인위적, 자연적 오염물질 기작에 대해 지원되는 PERLND 모듈에서 모의 되는데, 해당 모듈은 그 목적상 RCHRES 모듈과 달리 담수 환경을 구성할 수는 없다. 한편, 논은 논둑이 있어 기본적으로 저류 상태를 유지할 수 있으며, 배수물꼬 높이를 조절하여 영농특성에 따른 담수심을 조절하므로, 이를 모의하기 위해서는 담수 상태의 모의 기능과 함께 댐과 같은 수문 조절 기능을 필요로 한다. 이런 이유로 논 필지에서의 물질수지와 비점오염 유출을 모의하기 위해 과거 개발된 PADDIMOD, GLEAMS-PADDY 등은 논을 하나의 탱크조로 구성하여 담수상태와 관련 환경요소를 표현하고 물수지 및 물질기작을 모의한 바 있다.^{5,6)} 이러한 개념을 참고할 때, HSPF에서 수계를 담당하는 RCHRES 모듈의 기능을 논 지역 모의에 차용하면, 논 필지를 하나의 탱크조로 구성하여 비교적 단순한 형태로 논을 표현할 수 있다(Fig. 1).

농경지를 모의하는 PERLND 모듈에서 논 면적을 제거하고 대상 논과 동일한 면적의 RCHRES로 구성(대체)한 뒤, HSPF의 F-Table을 기반으로 하는 FUNCT 옵션을 활용하면 담수상태 유지 및 배수물꼬 조절, 침투 기능 등을 재현할 수 있다. 논 의 형상과 수리적 특성을 정의하는 F-Table을 구성하는 데 있어서, 논 의 담수심과 배수물꼬 높이에 따른 통수능(Outflow demand)은 BMP Reach Toolkit 모듈의 기능 중 하나인 흐름조절장치(flow control device)를 적용

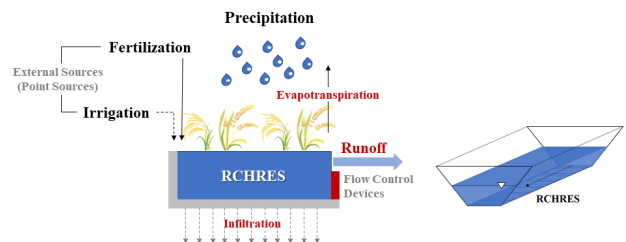


Fig. 1. The simple simulation structure of paddy field using Green tool.

하여 표현할 수 있는데, 배수물꼬의 폭과 조건별 높이를 입력하면 배수물꼬 높이에 따른 통수능을 차등 생성할 수 있다. 또한, 논 토양 특성에 따라 Green tool (Maryland Method 또는 Green-Ampt Method)을 이용하여 침투능을 생성할 수 있다.^{7,8)}

그러나 이러한 단순한 구조의 논 모의에 있어서 단점은 유역모형의 특성인 수문순환, 특히 다양한 유출경로(표면 유출, 중간유출, 기저유출)에 대해 충분히 표현할 수 없다는 데 있다. 즉 이러한 모의 구조에서는 침투된 유량이 PERLND의 지하수 충전 및 기저유출에 관여하지 않고, 사용자의 조작에 따라 사라지게 하거나, 일정 비율로 하천에 유출시키는 방법 중 택일하여 적용할 수밖에 없기 때문에 수문순환의 표현에 한계가 있다. 또한, 이모작을 하는 지역의 경우 겨울철 논이 밭으로 활용되는 영농특성을 반영하는 데 어려움이 있으므로, 연중 비담수와 담수상태를 반복하는 논의 환경특성을 적절히 반영하기 위해서는 PERLND 모듈과 RCHRES 모듈의 기능을 모두 필요로 한다.

2.2. Paddy-RCH기법 개발

앞에서 언급한 문제점을 개선하고, 논 담수/비담수 상태에서의 물수지 및 물질수지를 재현하기 위해 HSPF의 PERLND 모듈과 RCHRES 모듈의 기능을 조합하여 Paddy-

RCHRES 모의체계(이하 Paddy-RCH)를 개발하였다. Paddy-RCH는 논에 해당하는 PERLND (Agricultural Land)와 RCHRES 모듈이 서로 연계되어 하나의 논(혹은 논 지역)을 표현하는 방법으로, 비담수시기에는 PERLND에서 영농활동과 수문현상을 모의하고, 담수시기에는 RCHRES에서 논 특성에 적합하게 모의하여 상호 보완적 관계를 이루도록 하였다. 즉, 논을 담수상태로 유지시켜 작물을 재배하는 수도작의 경우, 시비를 비롯한 다양한 영농활동이 RCHRES 모듈을 중심으로 표현되며, 논을 비담수상태로 유지하거나, 혹은 밭의 형태로 작물을 재배(이모작)하는 경우는 PERLND에서 수문현상과 영농활동 등이 표현된다.

2.2.1. Paddy-RCH의 구조

Paddy-RCH는 동일한 면적을 갖되 서로 중복되지 않은 별도의 역할을 상호 보완적으로 수행하는 3개의 모듈로 구성되는데, 논 비담수상태를 모의하는 완전하게 동일한 두 개의 중복된 PERLND 모듈(Paddy-PERLND Couple : Paddy-PERLND와 Paddy-PERLND'), 그리고 논 담수상태를 모의하는 RCHRES 모듈(Paddy-RCHRES)로 구성하였다(Fig. 2).

Paddy-PERLND Couple은 전달경로(SCHEMATIC) 및 물질전달 방식(MASS-LINK)을 일부 수정한 뒤, 기존 PERLND

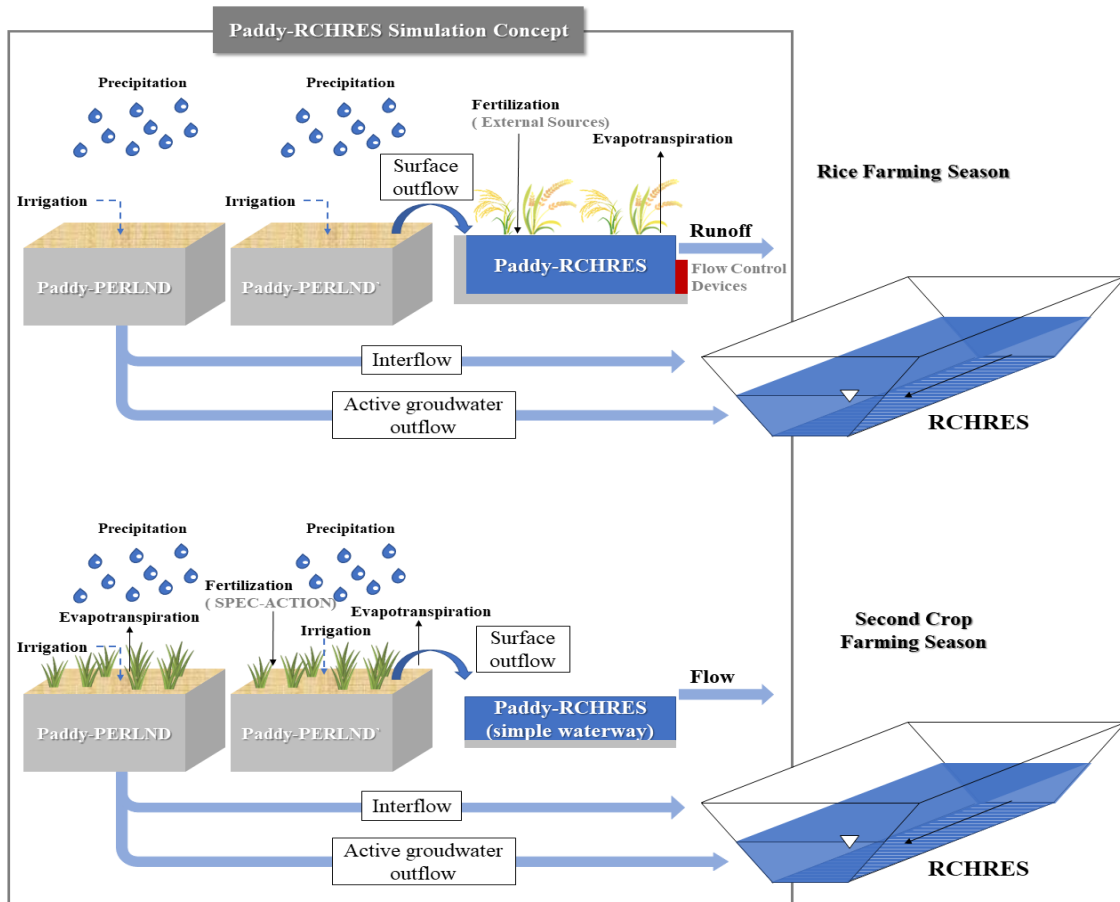


Fig. 2. The simulation concept and structure of Paddy-RCHRES.

모듈의 기능에 따라 동일한 매개변수 조건 아래 각각 모의 하는데, Paddy-PERLND는 모의된 결과 중 지표유출을 제외한 중간유출 및 기저유출 만을 소유역 하천(RCHERS)으로 전달하고 Paddy-PERLND'는 모의된 결과 중 지표유출만을 Paddy-RCHRES로 전달하도록 구성하였다.

이때 흐름조절장치는 HSPF에서 제공하는 BMPs Reach Toolkit을 이용하여 생성하며 작물의 생육특성 등에 따라 높이가 변경되는 배수물꼬 기능을 재현하게 된다. Paddy-PERLND'로부터 전달된 지표유출은 Paddy-RCHRES에서 증발산 되며, 저류된 담수심이 물꼬 높이를 초과할 경우 흐름 조절장치를 통해 소유역 하천으로 유출된다.

2.2.2. Paddy-RCH 배수물꼬 구현

HSPF의 RCHRES 모듈에 FUNCT 옵션을 적용하면, F-Table(해당 하천 구간의 형상학적, 수리학적 특성을 정의)에 입력되어 있는 계산된 통수능 F(vol)과 사용자가 제공한 특정 시간별 통수요구량 G(t)를 조합하여 시간적으로 다양한 통수 조건을 표현할 수 있다. 이러한 RCHRES 모듈은 하류 RCHRES로 전달하는 통수경로(Gate; OFLO)를 최대 5개까지 구성할 수 있다는 점에서 각각의 F(vol)과 G(t)

를 조합하면 더욱 다양한 조건의 활용이 가능하다(Fig. 3).

FUNCT 옵션은 외부 입력된 통수요구량 G(t)와 계산된 F(vol)을 한 시간 단위로 비교하여 둘 중 작은 값(1) 또는 큰 값(2) 그리고 둘의 합(3) 중 하나의 방법으로 통수시킬 수 있으므로 이를 적절히 조합하면 물꼬높이를 표현할 수 있다. 예를 들어 물꼬 높이가 0인 경우는 Fig. 4의 Gate1 (Natl. : 자연유출)만을 통해 통수시키면 되는데, 우선 Gate2~4에는 G(t)를 0으로 입력하고 G(t)와 F(vol) 중 작은 값을 선택하도록 설정하면 Gate1을 제외한 Gate2~4의 통수능은 0이 되므로 실질적으로 식 (1)과 같이 전달경로를 차단하는 효과가 나타난다. 한편, Gate1의 G(t)는 현실적으로 발생할 수 없는 극한값을 입력하고, G(t)와 F(vol) 중 작은 값을 선택하도록 하면 G(t)는 항상 F(vol)보다 크기 때문에 식 (2)와 같이 F(vol)이 통수되어 하류로 전달되므로 5개의 Gate 중 Gate1만이 통수 가능하다.

$$\text{IF } G(t) < F(\text{vol}), \text{ then } G(t) \quad (1)$$

$$\text{IF } G(t) > F(\text{vol}), \text{ then } F(\text{vol}) \quad (2)$$

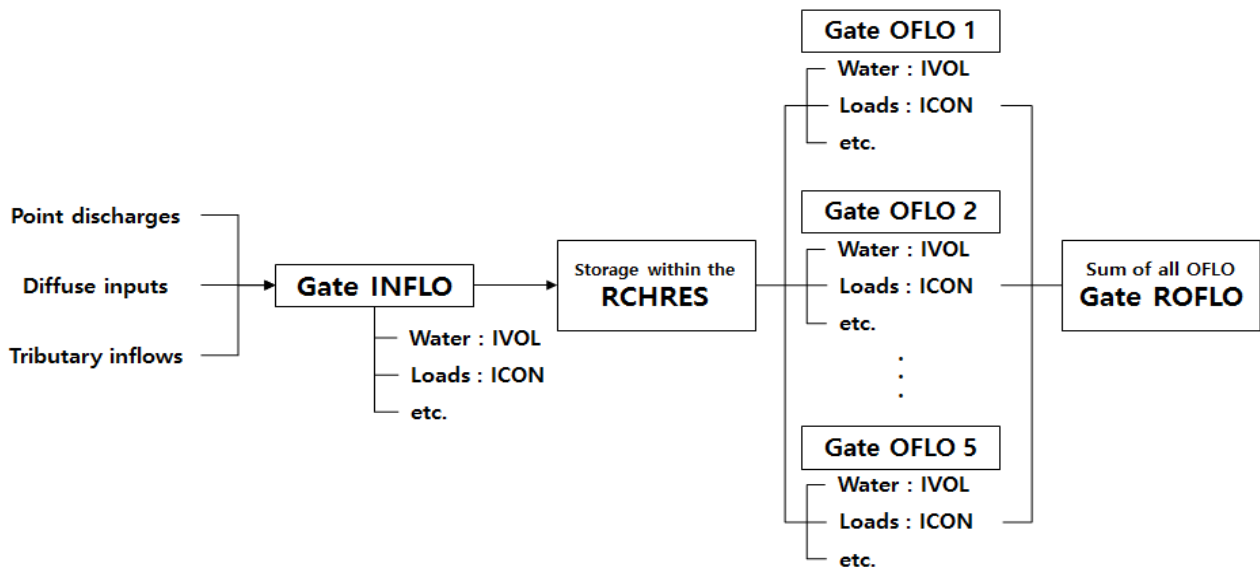


Fig. 3. Flow diagram for the HYDR section of the RCHRES application module.

FTABLE 1			***				
rows	cols		Gate 1	Gate 2	Gate 3	Gate 4	Gate 5
8	8		Ntrl.	FCD-03cm	FCD-05cm	FCD-07cm	FCD-12cm ***
depth	area	volume					
0.	4.94	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.10	4.94	0.49	0.98	0.	0.	0.	0.
0.16	4.94	0.81	1.48	1.34	0.	0.	0.
0.23	4.94	1.13	1.98	1.79	1.79	0.	0.
0.39	4.94	1.94	4.27	3.89	3.89	3.89	0.
0.49	4.94	2.43	5.25	4.79	4.79	4.79	4.79
0.66	4.94	3.24	7.54	6.92	6.92	6.92	6.92
0.99	4.94	4.86	14.8	13.73	13.73	13.73	13.73

Fig. 4. Example of F-Table setting for application of paddy sluice gate.

이러한 방법을 통해, RCHRES 모듈의 5개 Gate를 시기별로 선택하여 사용할 수 있는데, 각 Gate별 통수특성은 BMP Reach Toolkit의 기능을 이용하여 미리 배수물꼬 높이별 통수능(F(vol))을 생성하고 Paddy-RCHRES의 F-Table에 지정한 뒤, 외부 입력된 G(t)를 불러오면 논에서의 작물 생육 특성에 따른 물꼬높이를 5개까지 표현할 수 있다 (Fig. 4). 이때 각 Gate (OFLO)의 수심별 통수능인 F(vol)은 BMP Reach Toolkit의 흐름조절장치(Flow Control Device) 기능을 이용하여 배수물꼬의 폭과 계획 물꼬 높이를 입력하여 배수물꼬 높이별 통수능을 생성하여 적용한다.

2.2.3. Paddy-RCH 물수지 및 물질수지 구현

논의 담수 환경에서 물수지는 관개 및 강우로 인한 유입, 침투와 증발산, 월류(지표유출)를 통한 유출로 표현할 수 있으며, 이에 대한 물수지는 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$W_t = W_{t-1} + IR_t + PR_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (3)$$

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

이때, 오염물질의 유입은 관개수, 토양으로부터의 용출 또는 대기로 부터의 고정, 그리고 시비로 단순화하여 표현할 수 있으며, 유입된 오염물질은 배수물꼬를 통하여 배출되거나, 침전 등의 기능으로 논토양에 축적 또는 저장되고, 작물의 생육에 이용된다. 이에 따른 논에서의 물질수지는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta S = L_{IR} + L_{PR} + L_{FER} - L_{INF} - L_{PU} - L_{DR} \quad (4)$$

여기서, L_{IR} 은 관개에 의한 부하량, L_{PR} 은 강우에 의한 부하량, L_{FER} 은 시비에 의한 부하량, L_{INF} 은 침투에 의한 부하량, L_{PU} 은 식물흡수에 의한 부하량, L_{DR} 은 지표유출에 의한 부하량을 나타낸다.

논에서의 물수지 및 물질수지 구성 중 강우, 관개, 증발 그리고 시비 등은 실측 또는 계산된 자료를 WDM파일(입출력 데이터베이스)에 저장하여 입력 가능한데, 강우와 관개의 경우 Paddy-PERLND Couple에 연결되어 build-up and wash-off 기작에 따라 논의 비담수 상태를 모의하고, 시비와 증발산은 Paddy-RCHRES에 연결되어 RCHRES 모듈의 하천 수체모의 기작으로 논의 담수상태를 모의 한다.

작물의 생육에 이용되는 오염물질 거동은 F-Table 통수능

(Fig. 4) 중 Gate5를 작물에 의한 영양물질 흡수 공간으로 할당하고 물질전달 방식(MASS-LINK)에서 작물생육에 따른 흡수비를 적용하여 재현할 수 있다. 이때 오염물질의 농도만 가상의 RCHRES로 전달시켜 Paddy-RCHRES 내 오염물질은 감소하지만 담수량은 줄어들지 않아 결과적으로 논 담수 수질은 작물의 생육에 따라 점차 저감되도록 모의된다.

유사한 방법으로, 소하천에서 오염물질이 유달되는 과정에서 저감되는 현상을 BMP Reach Toolkit의 침투기능 (Maryland/Green-Ampt Method)을 활용해 유량은 다음 하천 구간으로 도달하지만 오염물질의 부하는 전달하지 않는 방법을 통해 재현된 바 있으며 이러한 방법을 유달 RCHRES 라 소개된 바 있다.^{9,10)}

한편, 이모작으로 동절기 작물을 재배하는 경우는 주로 비담수 상태에서 오염물질이 거동되므로 Paddy-PERLND Couple에서 주된 모의가 이루어진다. 그러나 Wet/Dry deposition 형태로만 QUALOF 모듈에 반영되는 PERLND의 특성상, Paddy-RCHRES와 같이 비료사용량을 직접 입력할 수 없으므로, 동절기 작물 재배를 모의하기 위해서는 SPEC-ACTION 모듈을 이용하여 시비활동을 적용할 필요가 있다.

2.3. Paddy-RCH의 적용 및 보정

Paddy-RCH기법의 적용성을 검토하기 위하여, 경상남도 창원군 계성천 유역에 위치한 3개 실험논(Test paddy)의 제원에 따라 모형을 구축하였다. 실험논의 면적은 0.18 ha (Paddy 1), 0.16 ha (Paddy 2, 3)로 유사한 수준이며, 지리적으로 인접하여 운영 특성에 큰 차이를 보이지는 않으나, Paddy 3만이 관행(Paddy 1, 2) 대비 물꼬높이가 비교적 높게 유지되었다(Table 1). 보정 및 검증 절차에 있어서는 Paddy 1의 보정을 통해 매개변수를 도출한 뒤, 유사 조건 (Paddy 2) 혹은 다른 조건(Paddy 3)의 논에 공통 적용함으로써 검증하는 일종의 확대검증 과정을 갖도록 하였다.

담수심에 대한 보정 및 검증은 2018년 6월로부터 8월 중 2일 간격으로 관측된 수위자료를 통해 이루어졌으며, 유출량과 유출수질(BOD, T-N, T-P)에 대한 보정 및 검증은 담수기간 중 발생한 5회 강우사상(6월 말 ~ 7월 초)의 강우-유출수 모니터링 자료를 활용하였다.

매개변수의 보정은 시행착오법에 의해 이루어졌으며, 이는 모형의 다양한 변수를 변화시켜 상관계수 및 결정계수 등의 최적점을 찾는 방법으로 반복횟수가 충분할 경우 전체 근사 최적점에 도달 가능한 방법이나, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.¹¹⁾ 모형효율 평가를 위한 결정계수는

Table 1. Characteristics of test paddies

	Test paddy	Gate (Sluice) Operation	Area (ha)	Agricultural Activity
Calibration	Paddy 1	7 cm	0.18	Conventional
	Paddy 2	7 cm	0.16	Conventional
Validation	Paddy 3	12 cm	0.16	Conventional

Table 2. General calibration/validation targets or tolerances for HSPF application^{11,12)}

Constituent	Very good	Good	Fair
Hydrology / Flow	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25
Water temperature	< 7	8 ~ 12	13 ~ 18
Sediment (SS)	< 20	20 ~ 30	30 ~ 45
Water Quality / Nutrients	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35
Pesticides / Toxics	< 20	20 ~ 30	30 ~ 40

Table 3. R² value ranges for model performance^{11,12)}

Criteria	Range			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Daily Flows	Poor	Fair	Good	Very Good →
Monthly Flows	Poor	Fair	Good	Very Good

Table 4. Hydrologic calibration parameters and possible ranges

Parameter	Description	Unit	Ranges			
			Typical	Possible	Application	
PARM2	INFILT	Infiltration capacity of the soil	in/hr	0.01 ~ 0.25	0.001 ~ 0.5	0.005
PARM3	BASETP	Fraction of remaining ET from baseflow	none	0 ~ 0.05	0 ~ 0.20	0.01
	DEEPPFR	Fraction of Groundwater inflow to deep recharge	none	0 ~ 0.2	0 ~ 0.5	0.001

상대오차(% Difference) 방법을 이용하였는데, HSPF모형의 적용사례 및 연구 자료를 바탕으로 일반적인 모형효율의 범위와 신뢰구간이 Table 2와 같이 제시된 바 있다.¹²⁾ 상대오차 산정방법은 식 (5)와 같으며, 이 때 O는 관측 값을, P는 모의 값을 의미한다.

$$\%Diff. = \left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \times 100 \quad (5)$$

한편, 유역 수문(유출)의 보정 및 검증에 있어서 R²를 활용하여 평가할 때 그 기준이 함께 제시되었는데¹³⁾, 일평균 유량을 활용하는 경우와 월평균유량을 활용하는 경우로 평가기준을 구분하고 있다(Table 3). 본 연구에서는 강우-유출 모니터링 자료를 활용하기 때문에, 모의 결과를 한 시간 단위로 출력하여 관측 자료와 비교할 필요가 있다. 다만 제시된 평가기준에 따르면, 모의치와 실측치의 비교에 있어서 시계열 단위가 더 세밀할수록 기준이 완화된다는 점에서, 시간단위 유량은 일평균유량 기준으로 평가함에 무리가 없을 것으로 판단하여, 이를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 담수심 및 유출량의 보정

Paddy-RCH기법을 통해 구축된 모형의 수리 및 수문현상에 대한 보정에 앞서, Paddy-RCH의 구성요소 중 Paddy-PERLND Couple은 비담수 시기(PERLND 영농시기)에 국한하여 증발산 관련 기후자료(PEVT)를 입력받고, Paddy-

RCHRES는 증발산(PEVT)이 증발(EVAP)을 대체하되, 담수 시기(RCHRES 영농시기)에만 입력받을 수 있도록 사전에 WDMUtil 및 기본설정을 수정하였다. 보정을 위해 사용된 Paddy-PERLND Couple의 매개변수는 PWAT-PARM2 block의 Infiltration과 PWAT-PARM3 block의 DEEPPFR, BASETP를 활용하였으며, 각 매개변수의 특징과 적용값은 Table 4에 나타낸 바와 같다.

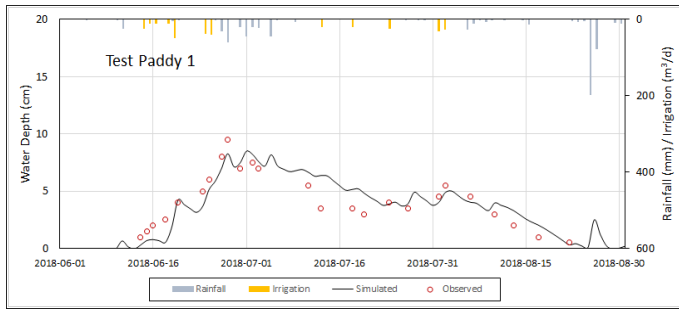
담수심(Water depth)과 강우-유출에 의한 월류량(Outflows)에 대해 보정 및 검증 결과를 평가하였다. 담수심은 상대오차(%Difference) 기준을 따를 때, 보정 및 검증 3개 실험실에서 Very Good으로 평가되었고, R²를 통한 평가에서는 확대검증에 해당하는 2번 실험실(Paddy 2, Fair)을 제외하고 Good ~ Very Good의 결과를 보였다. R²를 통한 평가가 상대오차 방법에 비해 상대적으로 낮게 평가되었는데, 이는 높은 수치에 의존적인 경향을 보이는 R²의 특성 상, 담수심의 수치가 영농기간 내 큰 편차를 보이지 않음에 기인한 것으로 판단된다(Table 5, Fig. 5).

한편, 강우-유출에 의한 월류량(유출량)역시 그래프를 통한 사전분석에서 모의치가 관측치의 경향을 비교적 양호하게 재현하는 것으로 판단되었으며(Fig. 6), 상대오차를 통한 기준에 따르면, 확대검증에 해당하는 3번 실험실(Paddy3, Fair)을 제외하고 2개의 보정 및 검증 실험실에서 Good으로 평가되었다. 또한, R²를 통한 평가에서는 보정 및 검증 실험실에서 모두 Good ~ Very Good으로 평가되어, 적어도 하나 이상의 평가지표는 Good 등급 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

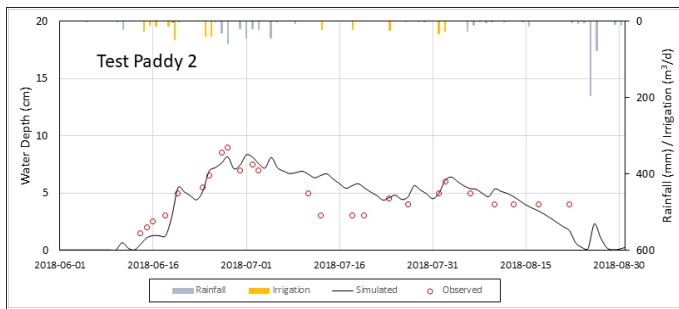
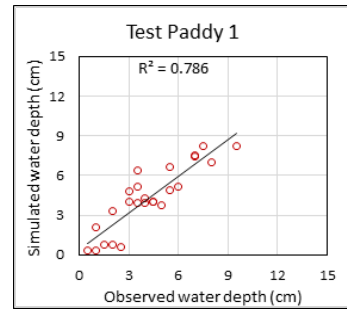
Table 5. Evaluation of calibration/validation for simulated water-depth and outflows

		Water depth				Outflows			
		%Diff.	Eval.	R ²	Eval.	%Diff.	Eval.	R ²	Eval.
Cal.	Paddy1	-2.38	Very G.	0.786	Good	-13.97	Good	0.837	Very G.
	Paddy2	-4.79	Very G.	0.654	Fair	-14.45	Good	0.831	Very G.
Val.	Paddy3	-5.31	Very G.	0.892	Very G.	-22.68	Fair	0.778	Good

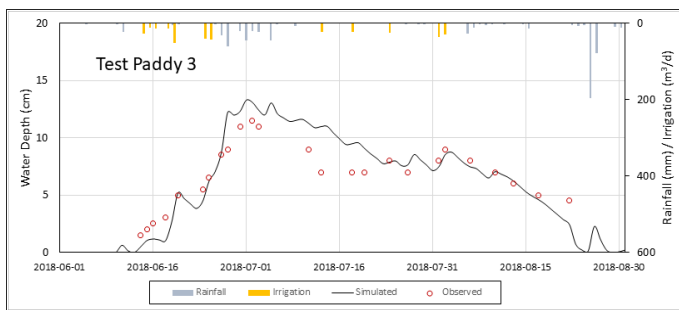
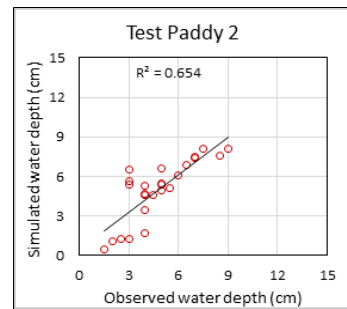
*) %Diff.; %Difference, Eval.; Evaluation, Very G.; Very Good



(a) Test paddy 1



(b) Test paddy 2



(c) Test paddy 3

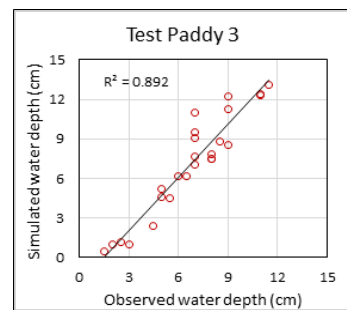


Fig. 5. Calibration/validation of HSPF Paddy-RCH for water-depth of test paddy-fields.

3.2. 유출수질의 보정

강우-유출에 의한 월류수의 실측수질(BOD, T-N, T-P) 자료를 활용하여, 모의된 월류수의 수질 보정을 수행하였다. 가용자료의 한계(실측 횟수 13회)로 인하여, 보정결과에 대해 충분한 수준의 통계적 평가를 적용하기에는 무리가 있으나, HSPF를 통한 수질보정에 일반적으로 활용되는 상대 오차 기준을 적용하면 Table 6에 나타난 바와 같다. 각각 보정 및 검증 실험논에 대해 평가된 BOD, T-N, T-P 모두

Good ~ Very Good으로 평가되었으며, 일부 항목(T-P)에 대해서만 실험논2에서 Good으로 평가되었다. 전반적인 그래프 분석에서는 모의치가 실측치 경향을 비교적 잘 반영하는 것으로 판단되며, 그래프 상의 점선은 월류량(보조 y 축), 실선은 모의수질, 작은 원은 실측수질을 나타낸다(Fig. 7). 일정 시기 모의치가 0까지 감소하는 등 변동이 큰 시기는 강우-유출 종료시기로서, 월류량이 없기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

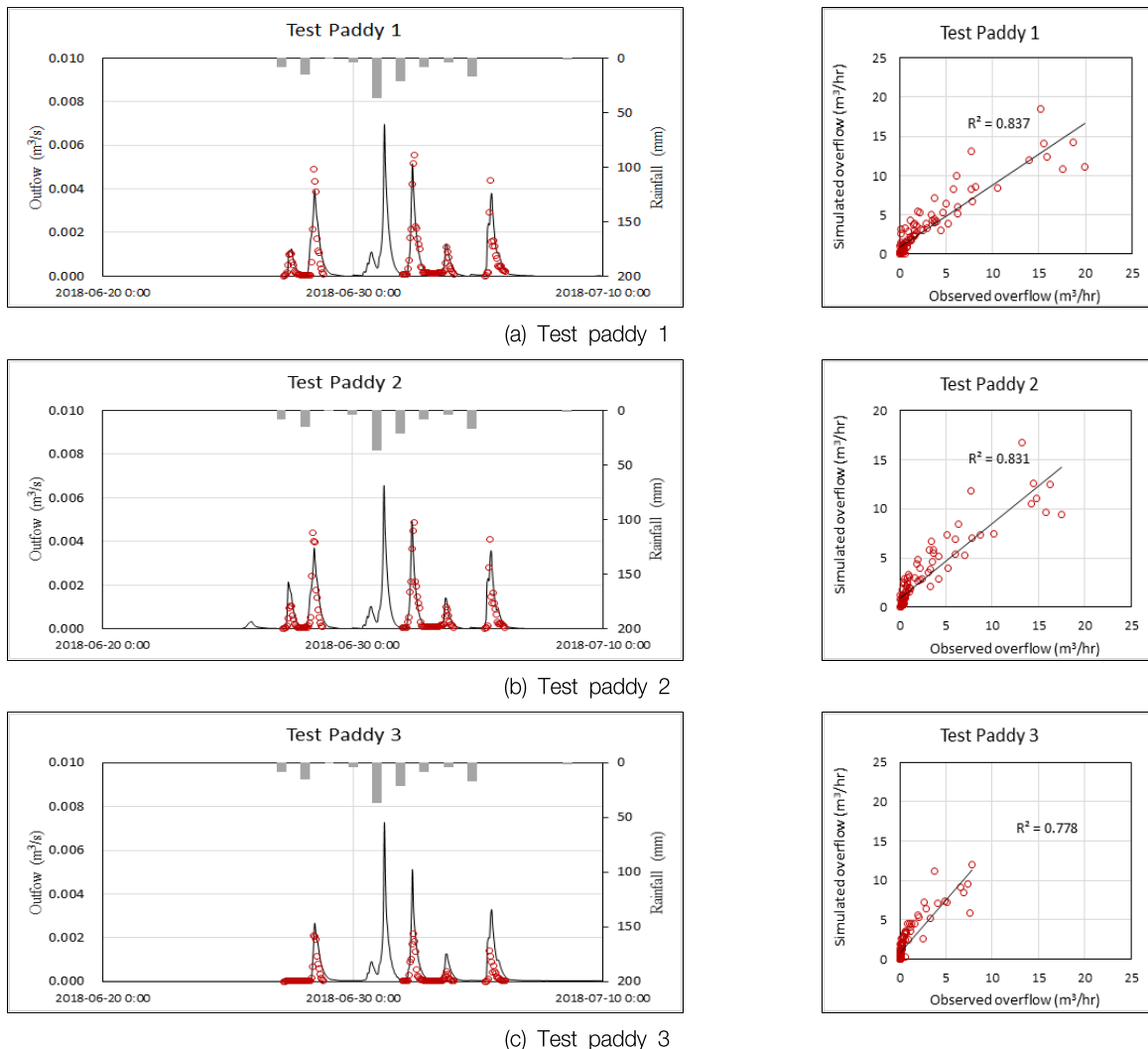


Fig. 6. Calibration/validation of HSPF Paddy-RCH for outflows (overflows).

3.3. 모형의 적용성 평가

Paddy-RCH 기법의 적용을 통해 구축된 논 의 모의결과는 결정계수의 평가를 바탕으로 판단할 때, 비교적 실측치를 유사하게 반영하고 있는 것으로 분석되었다. 비록 보정 기간이 수년에 달하는 장기 자료가 아니라는 점에서 다양한 기상조건에서의 분석과 평가가 이루어지는 데에는 어려움이 있으나, 인근에 위치한 다른 논(실험논2)에 동일 매개변수를 적용하였을 때에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다는 점, 물꼬높이를 증가시켜 담수심 조건이 다른 논(실험논3)에서 역시 유사한 재현성을 보였다는 점에서 논 의 기작을

표현하는데 Paddy-RCH 기법의 적용성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 물꼬높이 조절에 따른 유출특성 변화에 대해 모의 결과로부터 분석하였을 때, 관행 물꼬를 유지했던 실험논1, 2 간에는 큰 차이를 보이지 않았으나, 관행보다 증가된 물꼬높이를 유지했던 실험논3과 각각을 비교하면 추세선의 기울기가 상대적으로 낮고, 특히 실험논3에서 실험논1, 2 대비 유출이 발생하지 않는 시기가 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). 이러한 분석과정과 앞서 수행된 보정 및 검증 결과로부터 Paddy-RCH 기법이 모형 내 물꼬 조절을

Table 6. Evaluation of calibration and validation for simulated water-quality

		BOD		T-N		T-P	
		%Diff.	Eval.	%Diff.	Eval.	%Diff.	Eval.
Calibration	Paddy1	8,37	Very G.	-3,05	Very G.	12,30	Very G.
Validation	Paddy2	-5,54	Very G.	-9,74	Very G.	17,95	Good
	Paddy3	-0,70	Very G.	14,73	Very G.	2,62	Very G.

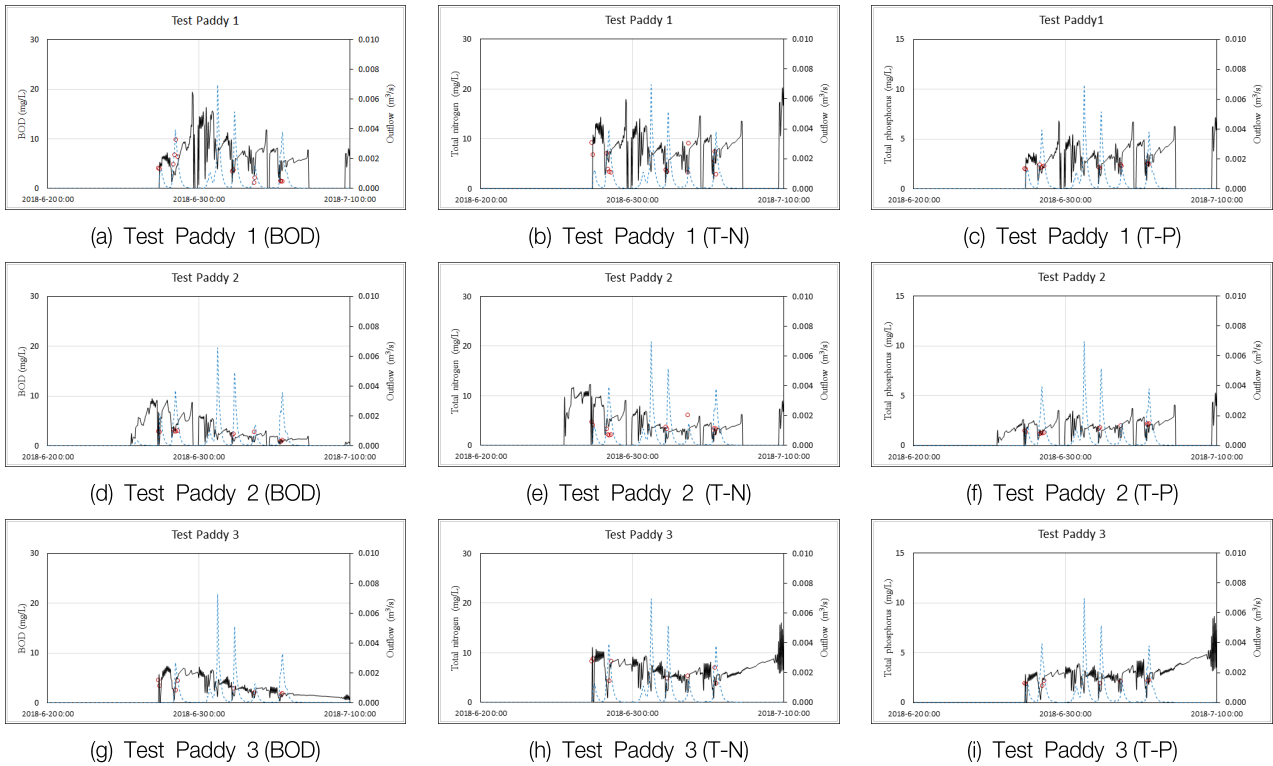


Fig. 7. Calibration and validation of HSPF Paddy-RCH for water-quality from outflows.

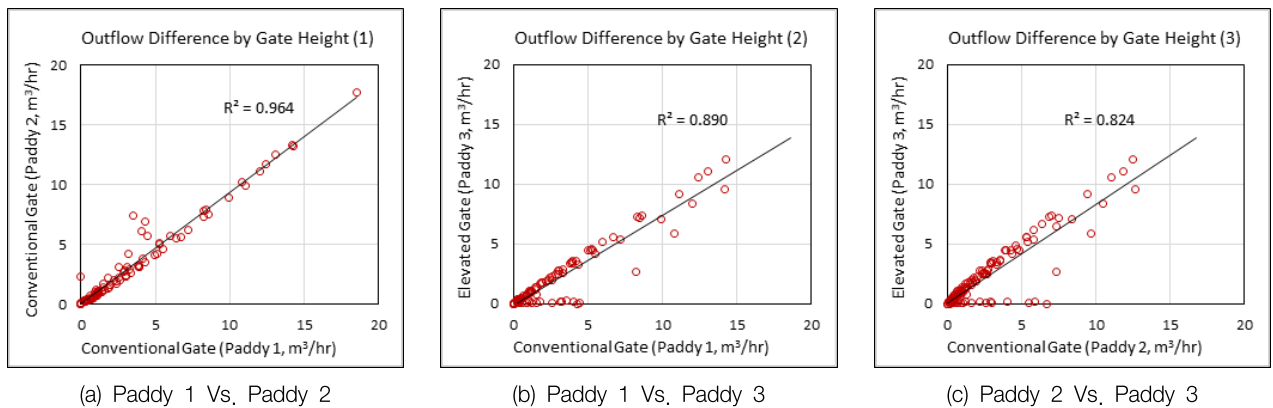


Fig. 8. Outflow differences by Gates (Sluices) operation of paddy.

반영하여 유출횟수 및 강도의 변화를 적절히 재현 가능할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 유역모형 HSPF의 투수지역의 토지이용별 모듈(PERLND)과 하천모듈(RCHRES)의 네트워크와 전달경로를 재구성하여 논 영농특성을 반영할 수 있는 Paddy-RCH 기법을 제시하고, 실험논에 적용하여 재현성을 평가하였다. 그 결과, 비록 한정된 기간 및 지역에 대한 적용이지만, 각 논 운영 상황을 반영하여 모의된 결과가 실측치와 비교할 때, 비교적 경향성을 양호하게 표현할 수 있는 것으로

평가되었다.

이러한 일련의 방법은 누구나 제공받을 수 있는 모델을 활용한다는 점(접근성), 영농방법 변화에 따른 농업지역(필지규모)과 유역규모의 영향을 동시에 파악할 수 있다는 점(확장성), 수질오염총량관리 등 유역관리를 위한 제도를 뒷받침하기 위해 연구되어 온 기존의 결과와 연계할 수 있다는 점(연계성)에서 이점을 가질 수 있다.

현재 적용된 Paddy-RCH 기법은 실험논의 담수환경을 RCHRES 모듈이 담당하여 탱크조 형태로 모의할 수 있도록 구성되었는데, 향후 다양한 지역의 담수/비담수 환경에서 장기간 자료에 대한 적용과 검증이 이루어진다면, 적정 매개변수를 특정화하고 그 범위를 도출할 수 있을 것으로

판단된다. 또한 이러한 일련의 방법은 필지 및 유역단위에서의 농업비점오염 관리로 인한 효과를 정량화 하고, 삭감량을 제시하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

KSEE

References

1. Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation (RRI), Development of improved farming methods for agricultural non-point source pollution reduction, RRI (2014).
2. National Institute of Environmental Research (NIER), Studies on Applicability and Methodology of Dynamic Water-Quality Model in Korean TMDL, NIER (2014).
3. National Institute of Environmental Research(NIER), A study on Simulation Method Considering Characteristics of Pollutant Discharge in TPLMS, NIER (2015).
4. Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation (RRI), Development of best management practice for reduce agricultural non-point source pollution in paddy field, RRI (2011).
5. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H. and Jung, K. W., "Model development for surface draiage loading estimates from paddy rice fields," *Paddy. Water Environ.*, **3**(2), 93~101(2005).
6. Chung, S. O., Kim, H. S. and Kim J. S., "Model development for nutrient loading from paddy rice fields," *Agric. Water Manag.*, **62**(1), 1~17(2003).
7. United States Environmental Protection Agency (US EPA), Technical Note 9; Web-based HSPF Toolkit to Support Low Impact Development (LID) and Other Urban Stormwater Modeling Applications, *EPA BASINS Technical Note*, Mohamoud, Y., Wolfe, K., and Parmar, R.(Eds.), US EPA, pp. 1~13(2007).
8. United States Environmental Protection Agency (US EPA), BASINS 4.1(Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) Modeling Framework, National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina, US EPA (2015).
9. Hwang, H. S., Rhee, H. P., Lee, S. J., Ahn, K. H., Park, J. H. and Kim, Y. S., "Study on representation of pollutants delivery process using Watershed Model," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **32**(6), 589~599(2016).
10. Ministry of Environment, Republic of Korea. Method for representation of pollutants discharge route using watershed model. Korea Patent (registration number) 1018464380000, filed Aug. 8th, 2017, Issued Apr. 2nd, (2018).
11. Lee, S. C. and Shin, D. C., "Performance comparison of genetic algorithm and trial-and-error method in the member size optimization," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **25**(10), 3~10(2009).
12. United States Environmental Protection Agency (US EPA), Watershed Model Calibration and Validation : Issues and Procedures, <https://www3.epa.gov/ceampubl/basins/training/b4lec15.pdf> (2011).
13. Donigian, A. S., Lecture #19, Calibraion and Verification Issures, HSPF Training Workshop Handbook and CD, Office of Science and Technology, US EPA, Washington, D. C., USA, pp. 19~22(2000).