



Original Article

유역모델 STREAM을 이용한 강우조건에 따른 금강하구 유입 오염부하량 산정

정의상 · 조홍래 · 구분경[†]
(주)하이드로코어 유역환경연구소

Estimation of Pollution Loads to the Geum-River Estuary for Precipitation Conditions Using a Semi-distributed Watershed Model STREAM

Euisang Jeong, Hong-Lae Cho, and Bhon Kyung Koo[†]

Hydrocore Ltd. Watershed Environmental Research Institute, Seoul 08501, Korea

요 약

금강하구유역은 한반도의 중부지방에 위치하며, 상류는 산림지역, 중하류는 농업지역이 주로 분포하는 논 중심 농업 유역이다. 본 연구는 유역모델 STREAM을 이용하여 강우조건에 따른 금강하구 유입부하량을 정량적으로 평가하였다. STREAM은 유역을 정방형 격자로 구분하고, 하천을 노드-링크 구조로 표현하며, 물리식을 기반으로 유역 내 수문학적, 생화학적 과정을 모의한다. 특히, 벼의 생장시기에 따라 입력된 논에 적정담수심과 물꼬높이를 통해 논에 관개용수 필요량과 지표유출량을 계산할 수 있어 논 중심 농업유역 모의에 적합하다. 금강하구유역에 대한 유역모델 구축을 위해 지형, 토지이용, 토성, 기상, 오염원, 하천수리시설 등 시공간 자료를 이용하였다. 유역은 100 m × 100 m 크기의 219,689개 정방형 격자와 197개 소유역으로 구성되었다. 모델 보정기간은 2014년이고, 검증기간은 2015-2016년이며, 유역 내 유량과 수질 관측지점 각 4개에 대하여 모델 보검정을 수행하였다. 강우조건 시나리오 분석을 위해 최근 20년의 강수량 자료를 이용하여 평수년(1997), 갈수년(2001), 홍수년(2003)을 선정하였다. 시나리오 모의결과, 하구 유입유량은 평수년 대비 갈수년의 경우 64.1% 감소하고, 평수년 대비 홍수년의 경우 33.3% 증가하였다. TOC, TN, TP의 평균 하구 유입부하량은 평수년 대비 갈수년의 경우 63.1% 감소하고, 평수년 대비 홍수년의 경우 18.6% 증가하는 것으로 나타났다. 논 중심 농업유역인 금강하구유역에서 평수년 대비 갈수년의 하구 유입유량과 유입부하량 감소폭이 강수량 감소폭에 비해 크게 나타나는 것은 가뭄 시기 관개용수 확보를 위해 하천유출량이 감소하였기 때문으로 판단된다.

Abstract – The Geum River Estuary Watershed is located in the central area of the Korean peninsula. The upper watershed is mainly covered with forest, whilst the lower watershed is mainly agricultural area. This study applies a semi-distributed watershed model to estimate pollution loads entering into the Geum-River Estuary under various precipitation conditions. The study applies watershed model STREAM (Spatio-Temporal River-basin Ecohydrology Analysis Model) that represents the watershed with square grid cells and rivers with links-and-nodes. The model simulates hydrological and biogeochemical processes mainly using physically-based equations. The model is highly applicable to agricultural watersheds where paddy fields are distributed along valleys, as it estimates irrigation abstractions and surface runoffs from paddy fields taking into account the optimal water depths and the openings of drainage gate in accordance to the growth curve of rice. The STREAM was set up for the Geum-River Estuary Watershed using national and local data sets of topography, land-use, soil texture, weather data, point-source pollution loads and river hydraulic structures. The watershed is represented with 219,689 grid cells of 100 m x 100 m, and 197 sub-catchments. The model was calibrated for one years (2014) and validated for the following two years (2015-2016) using streamflow and water quality data observed at four monitoring stations

[†]Corresponding author: bkkoo@hydrocore.co.kr

across the watershed. For precipitation scenario analysis, the normal year (1997), the flood year (2003) and the drought year (2001) were selected from the latest 25 year period. The simulation results show that: i) river flows increased by 33.3% and decreased by 64.1% in the flood year and drought year, respectively, compared to the normal year; ii) water pollution loads increased by 18.6% and decreased by 63.1% in the flood and drought year, respectively, compared to the normal year. This implies that irrigation abstractions can greatly affect the river flows and water quality of agricultural watersheds particularly in drought years making those agricultural watersheds more susceptible to droughts.

Keywords: Geum river(금강), estuary(하구), watershed model(유역모델), non-point source pollutant(비점오염원)

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 극한 강우의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이에 따른 육상기인 오염부하의 발생 및 하구 유입 부하의 특성에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 강우 패턴의 변화는 수체 내 유속, 체류시간, 수온, 용존산소 등 물리화학적 환경과 생물서식지 등 수생태계에 영향을 미친다(Caruso[2001]; Lake[2003]; Park *et al.*[2012]; Van Vliet and Zwolsman[2008]; Dewson *et al.*[2007]). 특히, 관개수요가 많은 논 중심 농업유역에서는 강수량의 변화가 용수공급 문제와 직결되어 작물생산량에 영향을 미친다.

금강하구는 금강호로 불리는 금강 본류의 말단과 군산·서천 일대의 연안지역을 포함하는 한반도 중부지방 서해안에 위치하며, 유역 면적이 약 10,000 km²에 이르는 금강 유역에서 유입되는 오염부하의 영향을 받는다. 금강하구에 직접적인 영향권인 금강하구유역은 논산평야로 대표되는 넓은 논농사 지역이 분포하고 있으며, 농업용수 공급을 위한 관개시스템이 발달되어 있다. 유역에서 하천이나 호수 등의 수체로 유입하는 오염부하는 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분된다. 점오염원은 하·폐수처리시설 방류수, 공장 폐수, 축산폐수 등 특정 지점에서 관거나 수로를 통해 수질오염물질을 배출하는 오염원이며, 비점오염원은 도시지역, 농업지역, 산림지역과 같이 불특정 지점에서 분산된 형태로 배출되는 오염원을 의미한다. 점오염원은 오염물질의 유출경로가 명확하여 자료수집 및 처리가 비교적 쉽고, 계절에 따른 영향이 적어 상대적으로 발생량 예측이 용이하다. 반면, 비점오염원은 강수량 등 기상조건에 따라 유출량이 직간접적으로 영향을 받아 배출경로와 배출량을 명확하게 파악하기 어려운 특징이 있다. 따라서 금강하구로 유입하는 오염부하량을 산정하기 위해서는 배출량 자료 수집이 용이한 점오염원 부하량과 함께 육상에서 강우유출을 통해 수체로 유입하는 비점오염 부하량에 대한 정량적인 평가가 필요하다.

비점오염 유출은 강우량, 강우강도, 무강우일수 등 강우 특성에 따른 시간적 변동 특성과 지형, 토성, 토지피복 등 비균질적인 육상 조건에 따른 공간적 변동 특성을 보인다. 이러한 시공간적인 변동 특성을 지닌 비점오염부하량을 산정하기 위해서는 비점오염 유출과정에서 나타나는 수문현상과 오염물질의 거동 양상을 분석할 수 있어야 한다. 육상기인 비점오염부하량을 산정하는 방법에는 원단위법과 유역모델링 기법이 있다. 원단위법은 다년간 관측을 통해 축적된 토지이용에 따른 비점유출 부하량 자료를 이용하여 원단위별

발생량을 만들고, 토지이용별 원단위를 이용하여 비점오염 유출량을 산정한다(Shin *et al.*[2001]). 원단위법은 사용이 간편하고, 기존의 자료를 쉽게 이용할 수 있지만, 오염부하의 시공간적 분포를 파악하기 어렵고, 다양한 시나리오 분석이 불가능하다. 이에 반해 유역모델링 기법은 유역 내 수문현상과 오염물질의 거동 양상을 수학적 기법을 통해 분석하는 과학적인 도구로서, 발생 오염부하의 시공간적 분포 특성을 이해하고, 시나리오 분석을 통해 다수의 조건에 따른 모의결과를 비교·분석할 수 있는 장점이 있다. 유역모델은 유역분할구조에 따라 크게 총괄형 모델(lumped model), 준분포형 모델(semi-distributed model), 분포형 모델(distributed model)로 구분된다(Cunderlik[2003]; Jajarmizadeh *et al.*[2012]; Paudel *et al.*[2011]). 대상유역을 단일한 공간단위로 가정하는 총괄형 모델은 유역모델 개발 초기에 많이 사용되었으나 컴퓨터 성능 향상 등으로 인해 최근에는 사용빈도가 줄어들고 있다. 준분포형 모델은 대상유역을 소유역이나 수문특성이 유사한 단위로 구분하는 구조를 가지고 있으며, 계산속도가 상대적으로 빠른 특징이 있다(Cunderlik [2003]; Jajarmizadeh *et al.*[2012]). 준분포형 모델은 비교적 큰 유역에서 전체적인 수문현상을 해석하는 데는 유리하지만 소유역이나 유사수문단위(HURs, hydrologic response units)의 크기와 모양이 균일하지 않기 때문에 인구밀집도가 높고, 토지이용이 집약적인 지역에서 유역관리 목적으로 이용하기에는 한계가 있다. 분포형 모델은 대상유역을 일정 크기의 정방형 격자로 구분하고 각 격자에서 수문현상과 물질이동을 모의한다. 분포형 모델은 유역 내부의 공간적 이질성을 표현할 수 있는 장점이 있으나 유역 면적이 커질수록 계산량이 기하급수적으로 증가하는 단점이 있다. 따라서 금강하구유역과 같은 중대규모 유역을 대상으로 한 유역모델 적용 시에는 분포형 모델이 갖는 공간적 이질성의 표현 능력과 준분포형 모델이 갖는 빠른 계산속도를 함께 고려할 수 있다면, 모델의 적용성에 큰 장점을 가질 것이다. 현재 국내에서 많이 사용되는 SWAT, HSPF, SWMM 등의 유역모델은 대부분 외국에서 개발된 준분포형 모델로 논 중심 농업유역이 다수 분포하며, 산지의 비율이 높고 토지이용이 집약적으로 이루어지는 국내 유역환경에 적용하기 위해서는 모델의 일부 기능을 개선하거나 새로운 기능을 추가해야 하는 한계가 있었다(Jeon *et al.*[2007]; Sakaguchi *et al.*[2014]). 따라서 본 연구에서는 분포형 모델의 느린 계산속도를 개선하고, 준분포형 모델의 공간적 연산단위의 크기와 모양의 불균일성을 보완한 복합형 유역 모델이자 국내 농업지역의 물순환 모의에 유리한 구조를 가진 유

역모델 STREAM을 적용하여 강우조건에 따라 금강하구로 유입하는 오염부하량에 대한 정량적인 평가를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상구역

연구대상구역은 우리나라 중부지방에 위치한 금강 유역 중 백제보 하류의 지류 유역과 군산과 서천 일대에 위치한 22개의 연안 유역으로 이루어진 금강하구유역이다. 백제보 상류유역은 4대강 사업으로 인해 건설된 다기능보로 인해 유량이 통제되고 있어 본 연구의 대상지역에서 제외하였다. 금강하구유역의 면적은 2,166.89 km²로 금강 전체 유역의 21.4%이며, 주요 하천으로 논산천, 강경천, 석성천, 금천, 지천, 길산천 등이 있다. 금강하구유역은 논산평야, 강경평야 등이 위치한 우리나라의 대표적인 곡창지대로 논(679.11 km²), 밭(243.47 km²) 등 농업지역의 면적이 전체 유역 면적의 44.5%를 차지한다(Table 1).

금강하구유역은 논 중심 농업유역으로 넓은 농경지에 농업용수를 공급하기 위한 관개시스템이 운용되고 있다. 유역 내에는 탐정, 동부, 반산 등 다수의 농업용저수지가 위치하고 있으며, 각 저수지는 관개구역도에 따라 지정된 논으로 관개수로를 통해 물을 공급한다. 또한, 하천에 보를 설치하여 물을 가두고, 양수시설을 이용하여 인근 논에 농업용수를 공급한다. 이와 같이 금강하구유역은 복잡한 관개시스템을 통해 유역 내 물순환이 인위적으로 조작되는 특징을 가지고 있으며, 강우조건이 논 중심 농업유역의 오염부하 유출량에 미치는 영향을 분석하기에 적합할 것으로 판단된다.

2.2 유역모델 STREAM

농경지의 비율이 높은 대표적인 농업유역인 금강하구유역을 대상으로 수문/수질 모의를 위해서는 관개시스템 구현 및 논 의 유출 기작 모의가 가능한 유역모델의 선정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 논 의 비율이 높은 국내 유역환경에 적합한 형태로 개발되고, 중대규모 유역에 적용할 수 있는 유역모델인 STREAM (Spatio-Temporal River-basin Eco-hydrology Analysis Model)을 사용하였다. STREAM은 대상유역을 정방형 격자로 구분하여 분포형 모델의 장점인 공간적 이질성의 표현력을 높이고, 준분포형 모델의 장

점인 빠른 계산속도를 적용할 수 있도록 개발되었다(Cho *et al.*[2015]). STREAM에서는 분포형 모델이 모든 격자를 순차적으로 계산함에 따라 발생하는 속도저하문제를 개선하기 위해 개별격자를 공간적 속성(토지이용, 토성, 경사도, 강우, 기상, 관망 특성)에 따라 유사한 그룹으로 구분하여, 그룹별 1회 연산 후 동일한 값을 그룹 내 개별격자에 부여한다. 대상유역을 Cell이라고 정의된 정방형 격자 기동으로 분할하고, 격자가 모여 구성된 다수의 소유역(sub-catchment)의 상하류 위계관계는 노드(node)-링크(link) 형태로 표현된다(Fig. 1). 격자 수준의 수문과정은 강우, 강우차단, 증발산, 토양침투, 지표면유출, 중간유출, 지하수충전, 지하수유출 등으로 구성된다. 소유역 수준의 수문과정은 지표수, 중간류, 지하수의 3개 저장소로 표현되며, 각 저장소에는 해당 소유역 내 격자에서 계산된 각 유출량을 저장한다. 노드-링크 수준의 수문과정에서 하천 흐름은 Muskingum-Cunge 방식으로 해석하며, 하천의 수리시설에 의한 물질이동을 모의할 수 있다.

유역모델 STREAM은 외국에서 개발된 대부분의 유역모델이 논에서의 수문 및 물질이동을 모의할 수 없는 한계점을 개선하였다. 논에서는 강우와 관개에 의해 유입된 유량이 증발산과 침투를 통해 손실된 후, 남은 물의 높이가 물꼬높이보다 높으면 유출이 발생하며, 영양물질의 변환과 이동 등의 물질수지에도 영향을 미치며 물수지와 물질수지 모식도는 Fig. 2와 같다.

국내의 농업유역은 하천, 저수지, 지하수 등에서 농업용수를 공급하는 관개시스템에 의해 유역 내 물순환이 인위적으로 변경된다. 유역모델 STREAM은 농업지역의 관개시스템을 반영하기 위해 작물성장 시기에 따라 필요한 논의 권장담수심과 밭의 토양수분함량의 최대값과 최소값을 설정하고, 입력된 최소값보다 낮으면 관개가 시작하고, 최대값보다 높으면 관개가 멈추는 과정을 통해 자동적으로 관개량을 산정하며, 관개용수 공급원은 하천, 저수지, 지하수 중에서 선정할 수 있다. 또한, 논 의 배수량은 작물성장 시기에 따라 입력된 논 의 물꼬높이보다 논 의 담수심이 높으면 유출이 발생하는 것으로 계산된다. 관개와 배수에 관련된 매개변수는 격자별 또는 토지피복별 시계열 형식으로 입력할 수 있으며, 보·배수문·저수지 등 농업용수리시설의 속성값은 해당 제원정보를 통해 입력할 수 있다. 그리고 물질수지 과정에서 중요한 입력인자인 퇴비와 비료의 투입은 토지피복별로 구분하여 작물성장 시기마다 적용할 수 있다. 논과

Table 1. Area ratios for catchment and land use

Catchment	Area ratio (%)	Area ratios for land use (%)				
		urban	paddy field	dry field	forest	etc.
Nonsancheon	24.9	6.6	24.6	13.8	49.7	5.4
Jicheon	11.6	3.3	18.3	8.1	65.1	5.3
Geumcheon	7.5	5.0	34.9	10.0	44.9	5.2
Seoksungcheon	6.8	6.6	37.9	16.7	33.0	5.8
Ganggyongcheon	5.7	10.0	43.1	13.6	28.5	4.8
etc	32.7	6.5	38.5	9.3	35.6	10.1
Coast catchment	10.8	17.1	26.5	10.7	32.4	13.4
Total	100.0	7.4	31.3	11.2	42.3	7.7

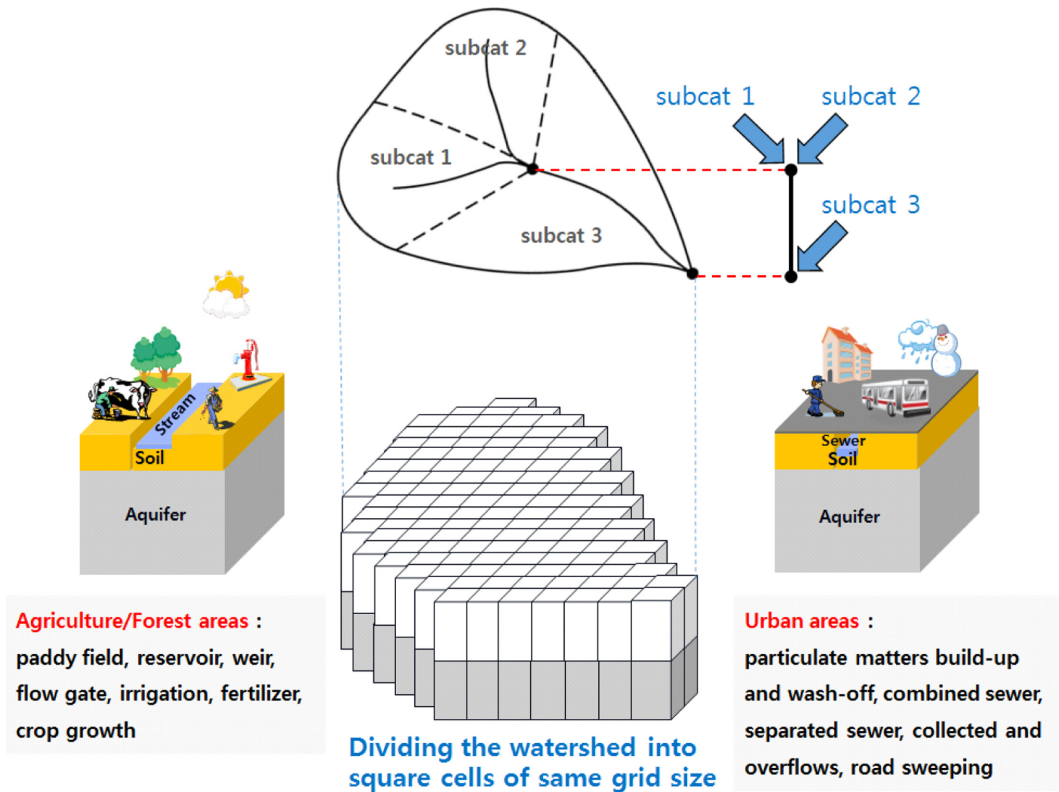


Fig. 2. Representation of a watershed using square grid cells and node-link structure in STREAM.

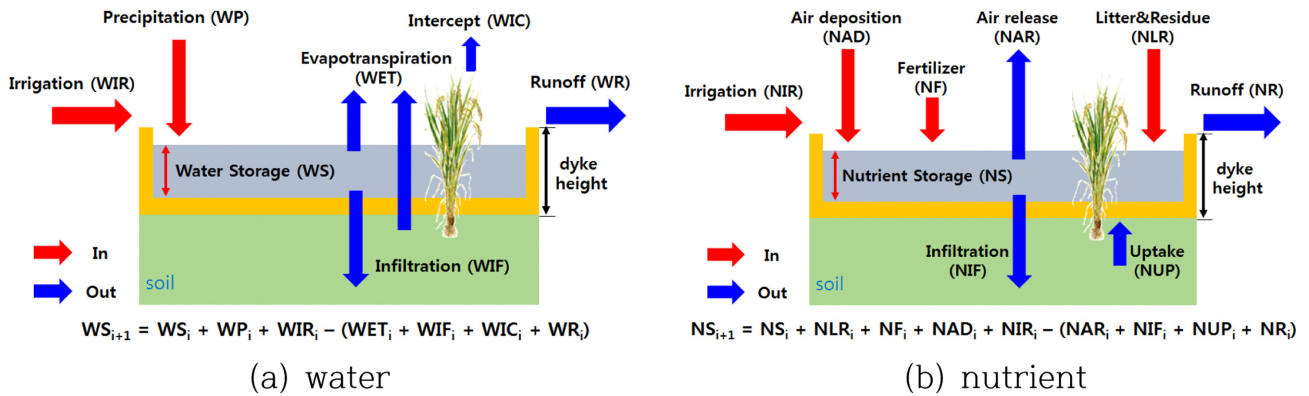


Fig. 2. Water and nutrients mass balance in the paddy fields.

밭에 시비할 경우 비료는 투입 즉시 작물이 흡수할 수 있는 성분으로 변환되지 않고 시간에 따라 용출되며, 이 때 용출속도는 지수적으로 감소하는 것으로 정의하였다. 또한 담수된 논에서는 지표면으로부터 용존성, 입자성 물질이 수체로 공급된다. 용존성 물질은 지표면과 수체가 저장소를 공유하며, 지표면의 저장량을 담수량으로 나눠 담수의 수질농도를 산정한다. 입자성 물질은 강우, 관개, 유출 등의 교란에 의해 부유하고 침강에 따라 농도가 안정화되도록 설계하였다. 교란에 의해 부유하는 양은 교란의 원인인자인 강우, 관개, 유출 수량에 의해 로지스틱함수로 계산되며, 침강량은 논을 완전혼합반응조로 가정하고 단위 연산시간 동안 담수심 대비 입자의 침강길이 비율로 계산된다.

2.3 모델 구축

유역모델 STREAM의 입력자료는 지형, 토지피복, 토성 등의 공간자료, 기상자료, 점오염원자료 등의 시계열자료, 관개시스템, 논, 적정담수심, 퇴비 및 비료 투입량 등의 농업활동자료로 구성된다.

공간자료 중 지형자료는 지표면의 고도, 경사도, 유향(flow direction) 및 누적유향(flow accumulation)이 필요하며 국토지리정보원의 10 m 수치고도모형(DEM)을 이용하여 구축하였다. 토지피복자료는 환경부의 중분류 토지피복도를 이용하였으며, 토성자료는 국립농업과학원의 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다.

시계열 자료 중 기상자료는 강우관측소와 기상관측소의 강수량, 기온, 상대습도, 현지기압, 풍속, 일사량 자료가 필요하며, 기상청에서 제

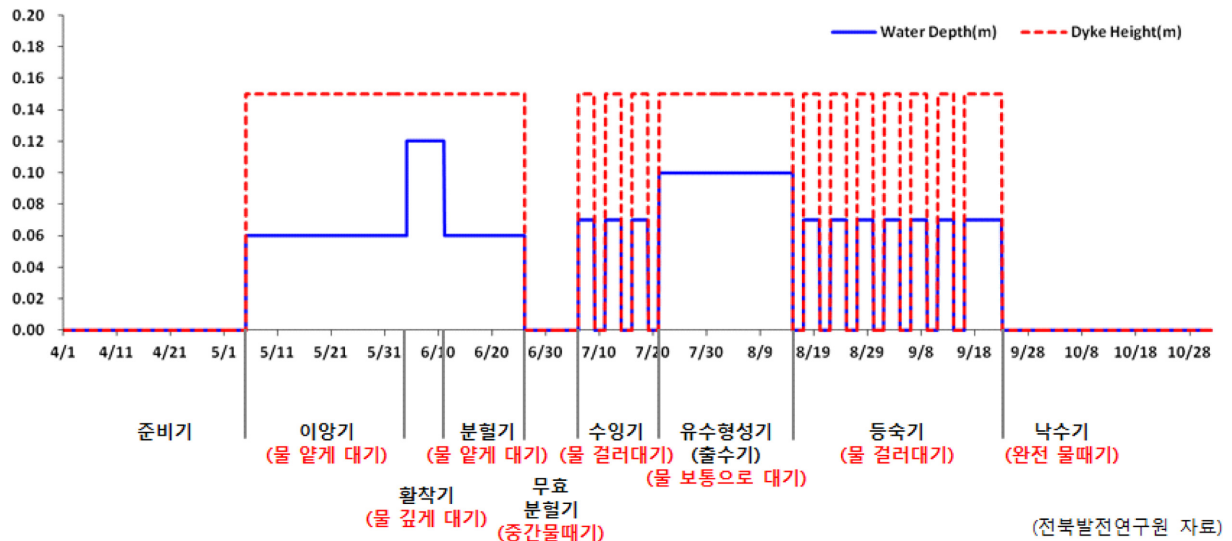


Fig. 3. Optimal water depth and dyke height for paddy fields.

공하는 1시간 단위 관측자료를 이용하였다. 강수량 자료는 2곳의 기상대(군산, 부여)와 7곳의 자동기상관측장비(AWS)에서 제공하는 자료를 사용하였으며, 기타 기상자료는 2곳의 기상대에서 제공하는 자료를 사용하였다. 점오염원 자료로는 처리 및 미처리 점오염원에 대한 구별된 자료가 요구되며, 환경부 전국오염원조사자료로서 제공되는 환경기초시설 배출량과 동리별 배출부하량 자료를 이용하였다.

농업활동자료 중 관개시스템 자료는 저수지, 보 등 농업용수리 시설의 위치정보와 각 시설의 속성값 그리고 관개용수 공급원별 관개용수 구역도를 반영하였다. 관개용수량을 산정하기 위해 필요한 논·밭의 적정담수심은 이앙기, 활착기, 분얼기 등 벼의 생육시기에 따라 입력하였다(Fig. 3).

논과 밭의 퇴비/비료 투입량은 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 작물별 표준시비량 자료를 이용하였다(Table 2).

금강하구유역을 대상으로 구축된 유역모델은 100 m × 100 m 크기의 정방형 격자 219,689개와 197개 소유역으로 구성되었다. 모의 시간간격은 15분이며, 입출력 시간간격은 1시간이다. 금강하구유역의 경계지점은 백제보와 금강하구둑 사이의 금강 본류구간 55개 지점과 서천과 군산 일대에서 서해로 직유입하는 연안구간 22개 지점으로 구분되며, 총 77개의 유역 경계지점에서 하구·하천으로 유입하는 유량과 오염부하량을 산정하였다.

2.4 강우조건에 따른 시나리오 모델 구축

강우조건에 따른 시나리오 모델 구축을 위해 부여 및 군산 기상대의 최근 20년간(1997~2016)에 대한 1시간 단위 강수량 자료를

분석한 결과를 토대로 평수년, 갈수년, 홍수년을 선정하였다. 평수년(normal year)은 연강수량 1,369.1 mm/yr인 1997년으로, 관개기인 4~9월의 강수비율이 73.8%로 나타났다. 갈수년(drought year)은 연강수량 732.2 mm/yr인 2001년으로, 관개기의 강수비율이 64.6%로 나타났다. 홍수년(flood year)은 연강수량 1,743.6 mm/yr인 2003년으로, 관개기의 강수비율이 89.7%로 나타났다. 보검정이 완료된 금강하구유역에서의 모델을 이용하여 강우조건에 따라 평수년(1997년), 갈수년(2001년), 홍수년(2003년)에 해당되는 시나리오 모의를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 보정 및 검정

유역모델의 매개변수를 모의대상유역의 특성에 맞게 조정하여 모의값의 재현성을 개선하고 확인하는 모델 보정(calibration)과 검정(validation)을 수행하였다. 보정기간은 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지이며, 검정 기간은 2015년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지이다. 모델 보·검정 지점은 유역 내 주요 하천인 지천, 금천, 석성천, 논산천 말단에 위치한 유량 관측지점 4곳(구룡, 석동, 우곤, 논산)과 수질 관측지점 4곳(지천-1, 금천, 석성천2, 논산천4)이다(Fig. 4). 유량 관측값은 한국수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 수위자료를 수문조사연보의 수위-유량곡선관계식을 이용하여 산정한 1시간 단위 자료를 이용하였다. 수질 관측값은 물환경정보시스템에서 제공하는 8일 간격 총량측정망 자료를 이용하였다.

보·검정 과정의 모델 정확도 평가는 PBIAS (Percent Bias), RSR (RMSE-observation standard deviation ratio), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency index), R² (coefficient of determination) 등의 통계지표를 사용하였다. 모델 결과의 평가는 매우 좋음(very good), 좋음(good), 만족(satisfactory), 불만족(unsatisfactory)의 단계로 구분되며,

Table 2. Manure and fertilizer for paddy fields and dry fields

Items	Manure (kg/ha)	Fertilizer	
		N (kg/ha)	P (kg/ha)
Paddy fields	12,000	90	30
Dry fields	15,000	52	51

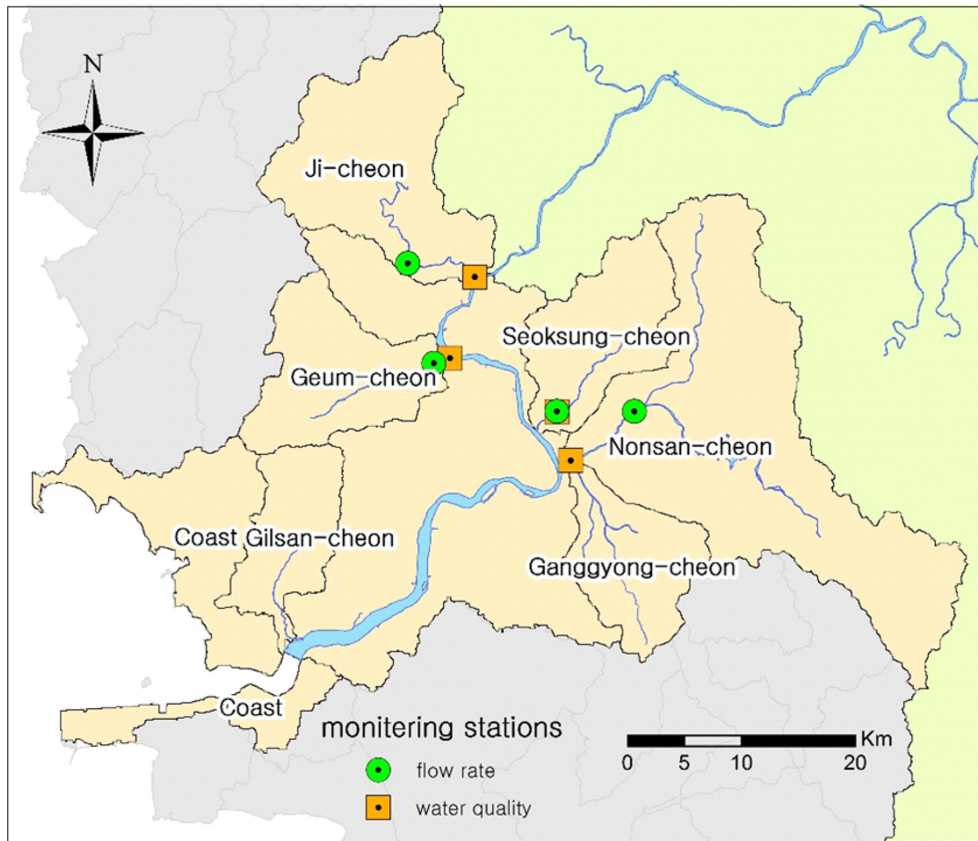


Fig. 4. Monitoring stations for flow rate and water quality.

Table 3. General performance ratings for recommended statistics for a monthly time step (Moriassi et al. 2007)

Index	Very Good	Good	Satisfactory	Unsatisfactory
PBIAS	$PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 25 \leq PBIAS$
RSR	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.70 < RSR$
NSE	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$NSE \leq 0.50$
R ²		$0.50 < R^2$		$R^2 \leq 0.50$

Moriassi et al.[2007]에서 제시하는 각 평가단계별 월단위 적정 범위를 참고하여 일단위와 월단위 모의결과에 대한 보검정의 정확도를 평가하였다(Table 3).

유량 보정 및 검정은 4개의 유량 관측지점(구룡, 석동, 우근, 논산)의 관측값과 모의값을 비교하였다(Fig. 5). 전체적으로 유량 모의값은 관측값과 유사한 경향성을 보이고 있으나 침두유량에서 시기에 따라 과소평가되는 것으로 나타났다. 모델 보검정 평가지표의 일단위 평균값을 보면, PBIAS는 보정과 검정 기간에 모두 매우 좋음 수준의 결과를, RSR은 보정과 검정 기간에 각각 좋음과 만족 수준의 결과를 보였다. NSE 및 R²는 보정과 검정 기간 모두 만족 수준으로 나타났다. 월단위 평가에서는 모두 매우 만족 수준의 결과를 보였다(Table 3). 세부 지점별로 보면, 보정 기간 구룡 지점에서의 RSR, NSE, R² 평가지표를 제외한 모든 경우에 만족 수준 이상의 재현성을 보여주므로, 유량 모의값이 관측값과 유사한 경향성을 보이는 것으로 판단된다.

수질 보정 및 검정은 4개의 수질 관측지점(지천-1, 금천, 석성천 2, 논산천4)에서 SS, TOC, TN, TP 등 4개 항목에 대한 관측값과 모의값을 비교하였다(Fig. 3). 사용된 수질 관측값은 주로 비강우 시 8일 간격으로 관측된 값으로서 강우 시 관측이 고려되지 않아 모의값의 기저농도에 대한 평가에 제한적으로 사용될 수 밖에 없는 한계를 포함하고 있어, 모델 보검정 평가 지표 중 PBIAS만을 이용하여 기저농도의 경향성을 평가하였다. 보정과 검정 기간의 수질항목별 일단위 모의결과에 대한 PBIAS를 보면, SS는 27.9%와 22.7%, TOC는 22.2%와 18.1%, TN은 16.8%와 17.0%, TP는 38.7%와 37.3%로 각각 나타났다. 반면 월단위 모의결과에 대한 PBIAS를 보면, SS는 36.8%와 25.5%, TOC는 21.6%와 18.8%, TN은 16.0%와 16.3%, TP는 39.5%와 32.4%의 결과를 보였다(Table 5). 일부 지점에서 관측값보다 모의값이 과대 또는 과소 추정되는 것으로 나타났으나 전체적으로 관측값의 경향성을 재현하는 것으로 판단된다.

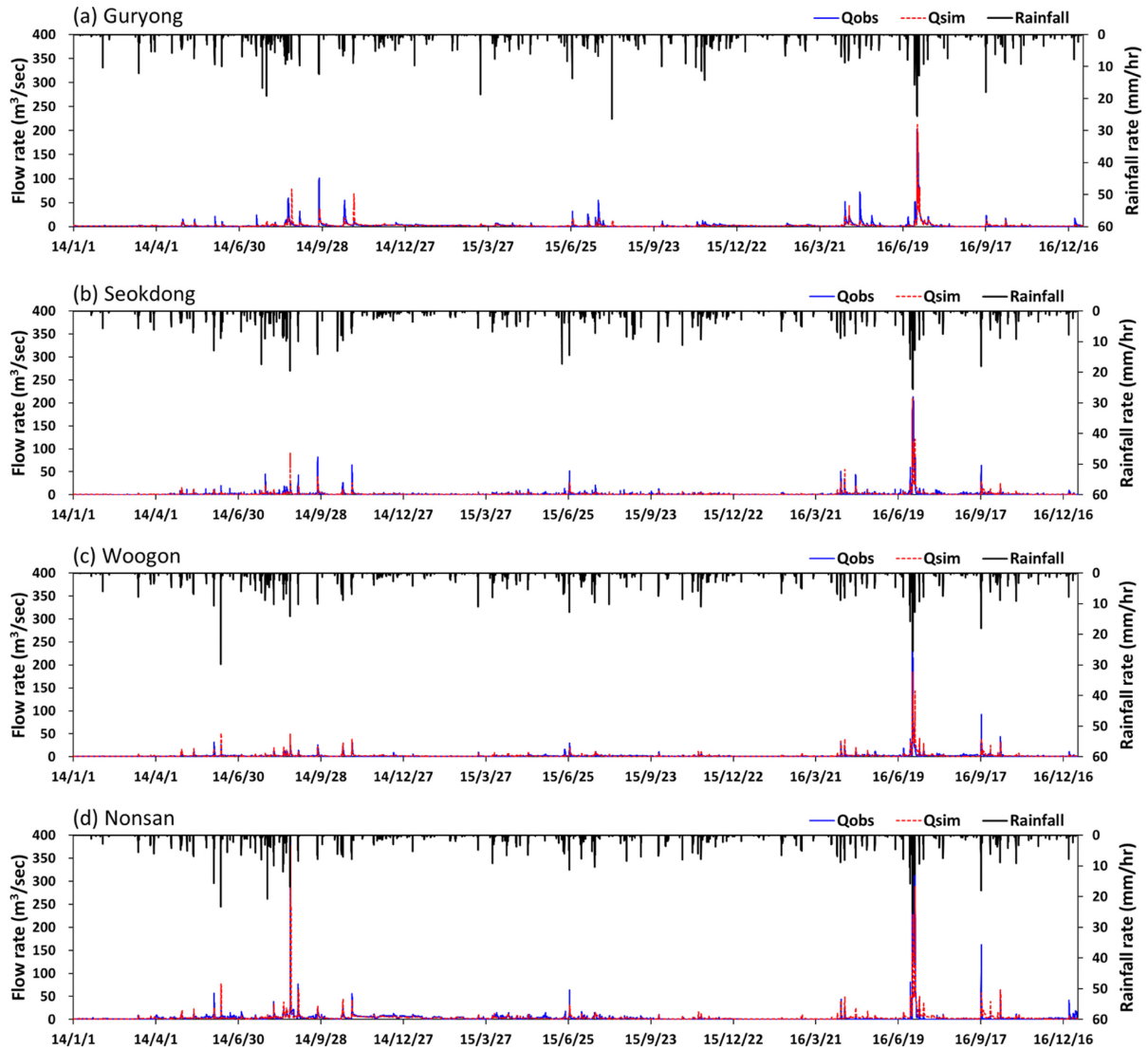


Fig. 5. Observed and simulated river flows for the calibration (2014) and validation (2015-2016) periods at the 4 monitoring station.

Table 4. Daily and Monthly performance indexes evaluated for river flows at the flow-rate monitoring stations

Index			Guryong	Seokdong	Woogon	Nonsan	Average
R ²	Cal.	Daily	0.362	0.659	0.724	0.861	0.652
		Monthly	0.790	0.941	0.784	0.967	0.870
	Val.	Daily	0.648	0.677	0.577	0.667	0.642
		Monthly	0.904	0.954	0.951	0.932	0.935
NSE	Cal.	Daily	0.342	0.624	0.722	0.833	0.630
		Monthly	0.788	0.885	0.778	0.954	0.851
	Val.	Daily	0.602	0.592	0.533	0.518	0.561
		Monthly	0.878	0.829	0.944	0.671	0.831
RSR	Cal.	Daily	0.811	0.613	0.528	0.409	0.590
		Monthly	0.460	0.339	0.471	0.214	0.371
	Val.	Daily	0.612	0.639	0.676	0.694	0.655
		Monthly	0.349	0.414	0.236	0.573	0.393
PBIAS	Cal.	Daily	3.107	2.909	3.822	9.023	4.715
		Monthly	3.011	2.402	3.899	9.111	4.606
	Val.	Daily	13.190	8.341	4.722	7.184	8.359
		Monthly	11.338	11.116	6.361	6.804	8.905

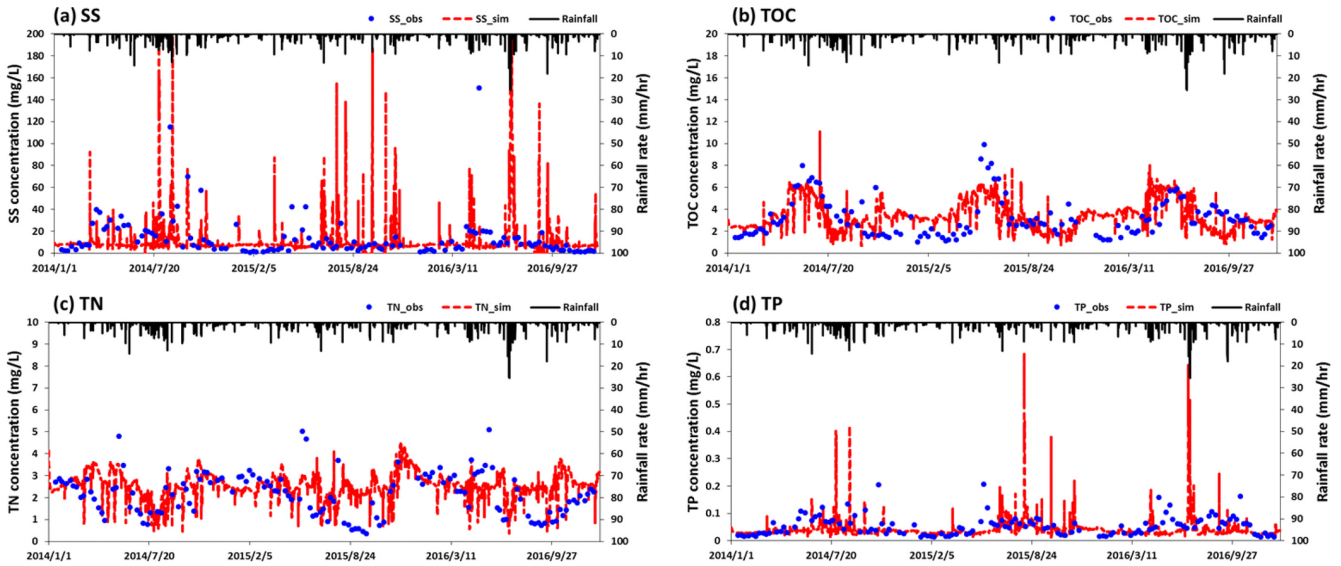


Fig. 6. Observed and simulated SS, TOC, TN, TP concentration graphs for the calibration (2014) and validation (2015-2016) periods at Jicheon-1 station.

Table 5. Performance indexes evaluated for river flows at the river stations

Index		Jicheon-1	Geumcheon	Seoksung cheon2	Nonsan cheon4	Average	
SS	Cal.	Daily	55.8	11.8	29.1	15.0	27.9
		Monthly	55.6	15.4	45.1	31.0	36.8
	Val.	Daily	14.2	19.4	32.8	24.2	22.7
		Monthly	24.5	39.2	20.4	17.9	25.5
TOC	Cal.	Daily	0.9	7.9	45.5	34.4	22.2
		Monthly	1.5	7.6	43.6	33.5	21.6
	Val.	Daily	11.4	3.2	28.9	28.9	18.1
		Monthly	10.7	5.2	29.7	29.6	18.8
TN	Cal.	Daily	12.9	1.7	30.5	22.1	16.8
		Monthly	10.2	1.0	31.6	21.1	16.0
	Val.	Daily	19.9	12.7	20.1	15.4	17.0
		Monthly	16.5	10.5	21.0	17.0	16.3
TP	Cal.	Daily	32.1	47.8	37.1	37.5	38.7
		Monthly	29.9	51.4	36.4	40.5	39.5
	Val.	Daily	24.4	44.4	48.4	32.2	37.3
		Monthly	19.4	39.9	40.4	30.0	32.4

모델 보검정 과정에서 사용된 유량과 수질 관련 주요 매개변수의 값은 Table 6과 같다.

3.2 시나리오 모의 및 분석

시나리오 모의결과에서 물수지와 물질수지 분석을 토대로 강우조건에 따른 금강하구로 유입되는 유량과 오염부하량의 변동성을 평가하였다.

강우조건 시나리오별 금강하구유역에서 하구로 유입하는 유량은 평수년, 갈수년, 홍수년에 각각 1.95×10^9 m³/yr, 0.70×10^9 m³/yr, 2.60×10^9 m³/yr의 값을 보여, 평수년 대비 갈수년에는 64.1% 감소하고, 홍수년에는 33.3% 증가하는 것으로 나타났다(Table 6). 평수년 대비 갈수년의 유입유량 감소폭이 강수량의 감소폭인 47.5%

보다 크게 나타났으며, 이는 농업지역에서 강수량 감소에 따른 농업수 부족분을 보충하기 위해 관개량이 97.7% 증가하고, 비강우 시기의 증가로 인해 증발산량이 21.5% 증가하였기 때문으로 판단된다(Table 7). 또한, 강수량과 관개량의 합으로 계산된 유역유입량 대비 하천유출량의 비율을 보면, 평수년과 홍수년은 각각 60.8%, 69.1%인 반면, 갈수년은 36.3%로 감소하는 것으로 나타났다(Table 7). 이는 논 중심의 농업유역에서 갈수년의 하천유출량이 강수량에 민감하게 반응하는 것을 보여 준다.

강우조건 시나리오별 금강하구유역에서 하구로 유입하는 유사량은 평수년 2.24×10^8 kg/yr, 갈수년 0.18×10^8 kg/yr, 홍수년 3.70×10^8 kg/yr로, 평수년 대비 갈수년은 92.1% 감소하고, 홍수년은 65.2% 증가하는 것으로 나타났다(Table 9). 평수년 대비 갈수년의

Table 6. Selected model parameters and values for the calibration of stream flow and water quality

Parameter	Unit	Description	Calibrated Value	Class
linkWFactor1	-	Muskingum-Cunge weighting factor1 for K when bank is full	0.95	Water
linkWFactor2	-	Muskingum-Cunge weighting factor2 for K when bank is 10% bankfull	0.05	Water
linkWFactorX	-	Muskingum-Cunge weighting factor X	0.25	Water
IntfRC	day ⁻¹	Interflow recession parameter	0.3	Water
Kgwr	day ⁻¹	Ground water recession parameter	0.01	Water
TstarC1	-	Dimensionless critical shear stress for clay	0.4750	Sediment
TstarC2	-	Dimensionless critical shear stress for silt	0.1240	Sediment
TstarC3	-	Dimensionless critical shear stress for fine sand	0.0332	Sediment
TstarC4	-	Dimensionless critical shear stress for coarse sand	0.0156	Sediment
Fbiosyn	-	Fraction of biosynthesis for organic matter decomposition	0.05	CNP
Fref	-	Fraction of refractory matter for organic matter decomposition	0.05	CNP
Fco2	-	Fraction of CO ₂ release for organic carbon decomposition	0.94	CNP
Fnh4	-	Fraction of NH ₄ generation for organic nitrogen decomposition	0.80	CNP
Fpo4	-	Fraction of PO ₄ generation for organic nitrogen decomposition	0.80	CNP
KLPOM	day ⁻¹	Labile Particulate Organic Matter decomposition rate coefficient	0.050	CNP
KRPOM	day ⁻¹	Refractory Particulate Organic Matter decomposition rate coefficient	0.001	CNP
KLDOM	day ⁻¹	Labile Dissolved Organic Matter decomposition rate coefficient	0.150	CNP
KRDOM	day ⁻¹	Refractory Dissolved Organic Matter decomposition rate coefficient	0.010	CNP
Knitr	day ⁻¹	Nitrification coefficient	0.500	CNP
Kdnit	day ⁻¹	Denitrification coefficient	0.050	CNP

Table 7. Inflows to the estuary from watershed at 77 border points

Items		Scenario		
		Normal year (1997)	Drought year (2001)	Flood year (2003)
Flow rate	(10 ⁹ m ³ /yr)	1.950	0.700	2.600
SS	(10 ⁸ kg/yr)	2.240	0.176	3.701
TOC	(10 ⁶ kg/yr)	5.977	1.891	7.737
TN	(10 ⁶ kg/yr)	2.962	1.347	3.182
TP	(10 ⁵ kg/yr)	1.363	0.458	1.621

Table 8. Water balance results for grid cell unit under precipitation scenarios

Scenario		Normal year (1997)		Drought year (2001)		Flood year (2003)	
		mm/yr	%	mm/yr	%	mm/yr	%
In	Rainfall	1,405.5	95.0	738.2	83.5	1,693.7	97.6
	Irrigation	74.0	5.0	146.4	16.5	41.5	2.4
	Sum	1,479.5	100.0	884.6	100.0	1,735.2	100.0
Out	ET	551.9	37.3	670.3	75.8	569.1	32.8
	Discharge	899.2	60.8	321.4	36.3	1,199.0	69.1
	Sum	1,451.1	98.1	991.7	112.1	1,768.1	101.9
Storage Change		28.4	1.9	-107.1	-12.1	-33.0	-1.9

유입 유수량 감소폭이 유입 유량의 감소폭보다 큰 것은 강수량의 감소로 인해 평수년 대비 갈수년의 토양침식량이 77.1% 감소하고, 유역 내 농경지의 담수 확보로 인한 지표유출 감소로 유사의 하천유출량이 92.1% 감소하였기 때문으로 판단된다.

강우조건 시나리오별 금강하구유역에서 하구로 유입하는 TOC 부하량은 평수년 5.98×10^6 kg/yr, 갈수년 1.89×10^6 kg/yr, 홍수년 7.74×10^6 kg/yr로 나타났으며, TN 부하량은 평수년 2.96×10^6 kg/yr, 갈수년 1.35×10^6 kg/yr, 홍수년 3.18×10^6 kg/yr로 나타났으며,

TP 부하량은 평수년 1.36×10^5 kg/yr, 갈수년 0.46×10^5 kg/yr, 홍수년 1.62×10^5 kg/yr로 나타났다(Table 10). 평수년 대비 갈수년의 TOC, TN, TP 하구 유입부하량은 평균 63.1% 감소하고, 평수년 대비 홍수년의 하구 유입부하량은 평균 18.6% 증가하는 것으로 나타났다. TOC, TN, TP의 연간 하구 유입부하량은 유입 유량의 경향성과 유사한 것으로 평가되었다. TOC, TN, TP 물질수지 분석에서 강우조건 시나리오별 유입량은 TOC 1,326~1,329.3 kg/ha/yr, TN 37.5~38.7 kg/ha/yr, TP 8.3~8.5 kg/ha/yr로 큰 차이가 나지 않지만 유출량은 TOC 8.7~35.7

Table 9. Sediment mass balance for grid cell unit under precipitation scenarios

Scenario	Normal year (1997)		Drought year (2001)		Flood year (2003)		
	kg/ha/yr	%	kg/ha/yr	%	kg/ha/yr	%	
In	Soil erosion	3,468.1	99.5	793.0	97.9	3,530.3	99.8
	Irrigation	17.4	0.5	16.9	2.1	7.4	0.2
	Sum	3,485.5	100.0	809.9	100.0	3,537.7	100.0
Out	Settling	2,451.7	70.3	728.7	90.0	1,829.5	51.7
	Discharge	1,033.8	29.7	81.2	10.0	1,708.2	48.3
	Sum	3,485.5	100.0	809.9	100.0	3,537.7	100.0

Table 10. Carbon, nitrogen, phosphorus mass balance for grid cell unit under precipitation scenarios

Scenario		Normal year (1997)		Drought year (2001)		Flood year (2003)		
		kg/ha/yr	%	kg/ha/yr	%	kg/ha/yr	%	
Litter residue	C	776.8	58.4	776.8	58.6	776.8	58.5	
	N	11.6	30.0	11.6	30.9	11.6	30.0	
	P	1.2	13.6	1.2	14.0	1.2	13.7	
Manure fertilizer	C	551.4	41.5	546.8	41.2	551.3	41.5	
	N	19.5	50.5	18.5	49.3	19.4	50.3	
	P	7.3	86.1	7.1	85.4	7.3	86.2	
In	Air deposition	C	-	-	-	-	-	
	N	6.6	17.0	5.4	14.4	7.1	18.3	
	P	-	-	-	-	-	-	
Irrigation	C	1.2	0.1	2.4	0.2	0.7	0.1	
	N	1.0	2.5	2.0	5.4	0.5	1.4	
	P	0.0	0.2	0.1	0.6	0.0	0.1	
Sum	C	1,329.3	100.0	1,326.0	100.0	1,328.7	100.0	
	N	38.7	100.0	37.5	100.0	38.6	100.0	
	P	8.5	100.0	8.3	100.0	8.5	100.0	
Air emission	C	1,199.1	90.2	1,317.6	99.4	1,157.5	87.1	
	N	4.1	10.7	7.2	19.1	3.2	8.2	
	P	-	-	-	-	-	-	
Plant uptake	C	-	-	-	-	-	-	
	N	22.6	58.5	23.5	62.6	22.7	58.9	
	P	8.6	100.5	8.3	100.5	8.8	103.0	
Out	Discharge	C	27.6	2.1	8.7	0.7	35.7	2.7
	N	13.7	35.4	6.2	16.6	14.7	38.0	
	P	0.6	7.4	0.2	2.5	0.8	8.8	
Sum	C	1,226.7	92.3	1,326.3	100.0	1,193.2	89.8	
	N	40.4	104.6	36.9	98.3	40.6	105.1	
	P	9.2	107.9	8.6	103.1	9.5	111.8	
Storage Change	C	102.7	7.7	-0.3	0.0	135.5	10.2	
	N	-1.8	-4.6	0.6	1.7	-2.0	-5.1	
	P	-0.7	-7.9	-0.3	-3.1	-1.0	-11.8	

kg/ha/yr, TN 6.2~14.7 kg/ha/yr, TP 0.2~0.7 kg/ha/yr으로 갈수년에 감소하고, 홍수년에 증가하는 것으로 나타났다(Table 9). 평수년 대비 갈수년의 TOC, TN, TP 유출량 감소는 하천유출유량 감소로 인한 영향과 함께 평수년 대비 갈수년의 토양온도가 0.05 °C 상승함에 따라서 통양 중 유기물 분해(decomposition), 무기화(mineralization) 등 미생물의 활동이 증가하였기 때문으로 판단된다. 강우조건이 하천수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 평수년(normal year), 갈수년(drought year), 홍수년(flood year) 하천유출

수의 SS, TOC, TN, TP 평균 농도를 비교하였다. 강우조건 시나리오별 하천유출수의 연평균 SS 농도는 홍수년에서 46.3 mg/L로 가장 높은 농도를 보였으며, TOC, TN, TP 농도는 각각 3.7 mg/L, 3.28 mg/L, 0.145 mg/L로 갈수년에 가장 높은 농도를 보였다(Table 11). SS 월평균 농도는 강수량이 588.3 mm/mon로 가장 많은 홍수년 7월에 261.8 mg/L로 가장 높은 값을 보였으며, 이는 강우에 의해 유출량이 증가하는 유사의 이동특성을 잘 나타내는 것으로 판단된다(Fig. 7). TOC 월평균 농도가 갈수년 5월에 가장 높고, TN,

Table 11. Yearly average concentrations of SS, TOC, TN, TP under precipitation scenarios

Scenario	SS (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Normal year (1997)	45.7	2.8	2.03	0.064
Drought year (2001)	11.9	3.7	3.28	0.145
Flood year (2003)	46.3	3.3	2.54	0.108

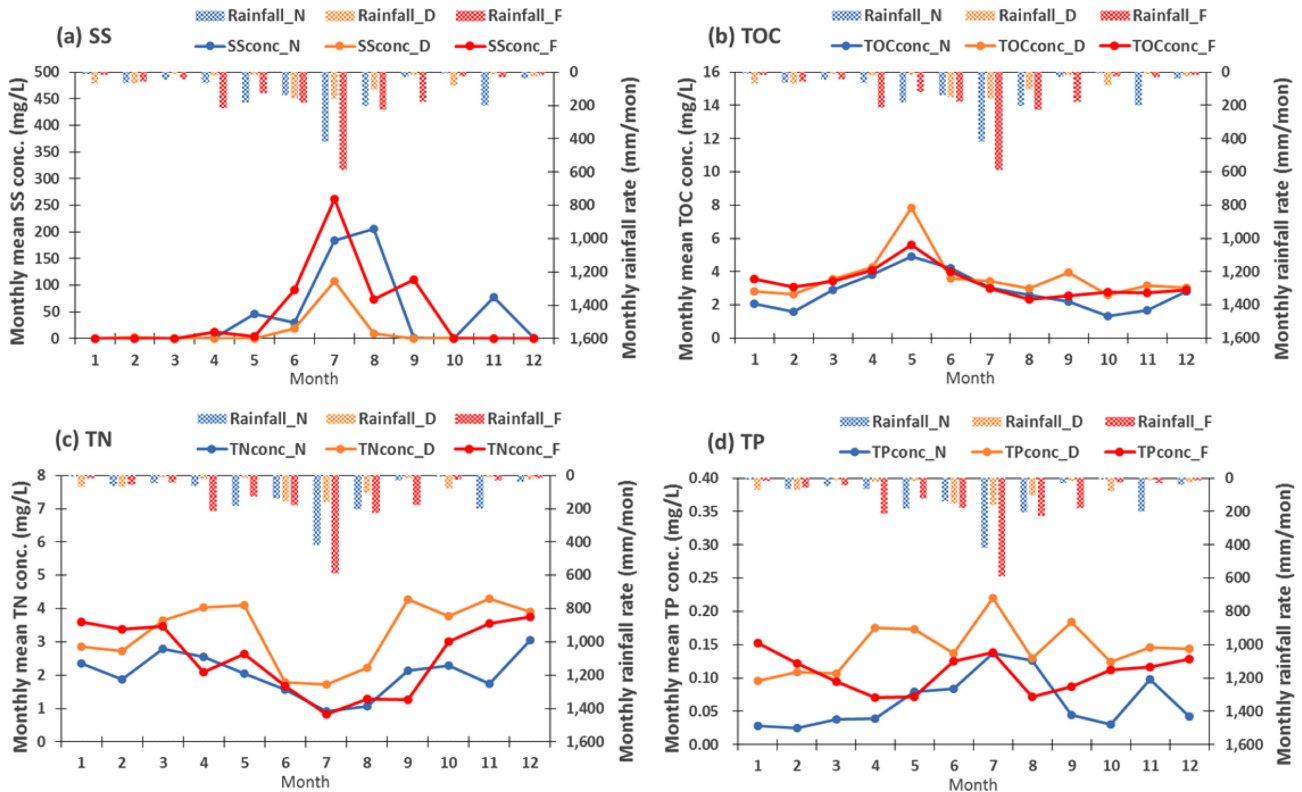


Fig. 7. Monthly average concentrations of SS, C, N, P of river discharge under precipitation scenarios (N: normal year, D: drought year, F: flood year).

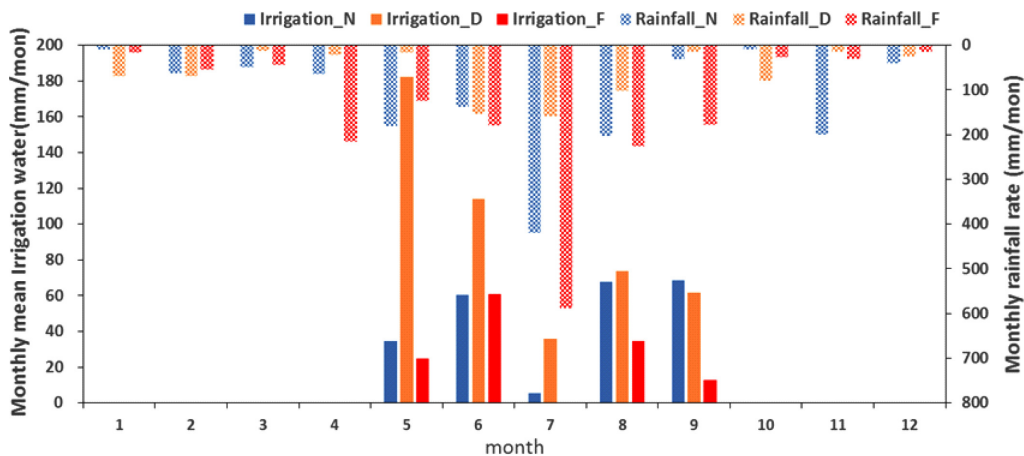


Fig. 8. Monthly rainfall and irrigation of paddy fields under precipitation scenarios (N: normal year, D: drought year, F: flood year).

TP 월평균 농도 또한 갈수년 4~5월에 가장 높은 것으로 나타났는데, 이는 농업활동 시기 중 퇴비와 비료를 투입하는 봄철에 토양에 투입되는 탄소, 질소, 인의 양은 동일하지만, 강수량 감소에 따른 유출유량 감소로 농도가 증가하기 때문으로 판단된다.

금강하구유역은 논이 비중이 높은 농업유역이므로 논이 수문특성을 이해하기 위해 강우조건 시나리오별로 논 지역의 강수량과 관개량을 비교하였다(Fig. 8). 논이 용수공급량은 강수량과 관개량의 합으로 계산되며, 강수량이 부족한 경우 관개량을 통해 부족분을

채우게 된다. 평수년(N), 갈수년(D), 홍수년(F)의 관개시기(5~9월)의 평균 용수공급량은 1,183 mm로 나타났다. 갈수년의 관개시기 강수량은 446.8 mm로 평수년의 46.0% 수준으로, 이를 보충하기 위해 관개량이 467.7 mm이 공급되었다. 특히, 이앙기 시기인 5월의 경우 강수량이 16.3 mm일 때 관개량이 182.3 mm가 공급되어 관개량이 강수량을 보완하는 역할을 잘 보여준다. 이와 같이 강수량이 감소하면 이를 보충하기 위해 하천 또는 저수지에서 관개용수를 공급하게 되고, 이로 인해 하천유지용수가 감소함에 따라 하천수질농도가 증가하는 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결 론

금강하구는 금강유역에서 유입하는 오염부하량이 서해로 유입되는 전이지대이며, 유역에서 유출된 오염부하량은 강우 패턴의 영향을 받는다. 본 연구에서는 유역모델링 기법을 이용하여 강우조건에 따라 유역에서 하구로 유입하는 오염부하량을 정량적으로 평가하였다. 강우조건은 최근 20년 관측값을 이용하여 평수년, 갈수년, 홍수년으로 1997년, 2001년, 2003년을 각각 선정하였다. 강우조건에 따른 하구 유입유량은 평수년 대비 갈수년의 경우 64.1% 감소하였고, 평수년 대비 홍수년의 경우 33.3% 증가하였다. 유입량 대비 하천유출량의 비율을 보면, 평수년과 홍수년은 각각 60.8%와 69.1%인 반면, 갈수년은 36.3%로 나타났는데, 이는 강수량 감소로 인해 관개량이 증가하고, 일조시간 증가로 인해 증발산량이 증가하였기 때문이다. 강우조건에 따른 유사의 하구 유입부하량은 평수년 대비 갈수년의 경우 92.1% 감소하였고, 평수년 대비 홍수년의 경우 65.2% 증가한 것으로 나타났는데, 이는 유역 내 농경지의 담수로 인해 지표유출이 감소하였기 때문이다. 강우조건에 따른 TOC, TN, TP의 하구 유입부하량은 평수년 대비 갈수년의 경우 평균 63.1% 감소하였고, 평수년 대비 홍수년의 경우 18.6% 증가하는 것으로 나타났다. TOC, TN, TP는 갈수년에서 수질농도가 증가하였는데, 이는 퇴비와 비료는 동일하게 투입되지만 유량이 감소하기 때문으로 판단된다.

금강하구유역과 같은 논 중심 농업유역은 강수량이 감소할 경우 농업용수 수요량이 증가하기 때문에 저수지 등 농업용수리시설에서 가뭄을 대비한 농업용수 확보가 필수적이다. 강수량이 감소할 때 하천의 수질농도가 증가하는 것을 방지하기 위해서는 퇴비와 비료 투입량 조절을 통해 하천으로 유출되는 부하량을 감소시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(하구역 종합관리시스템 개발 연구).

References

[1] Caruso, B.C., 2001, Regional river flow, water quality, aquatic

ecological impacts and recovery from drought, *Hydrolog. Sci. J.*, 46(5), 677-699.

[2] Cunderlic, J., 2003, Hydrologic Model Selection for the CFCAS Project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climate Conditions, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, Canada.

[3] Cho, H.L., Jeong, E., and Koo, B.K., 2015, Development of a hybrid watershed model STREAM: model structures and theories, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 31(5), 491-506.

[4] Dewson, Z.S., James, A.B.W. and Death, R.G., 2007, A review of the consequences of decreased flow for instream habit and macroinvertebrates. *The North American Benthological Society*. 26(3), 401-415.

[5] Jajarmizadeh, M., Harun, S. and Salarpour, M., 2012, A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology, *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 249-261.

[6] Jeon, J.H., Yoon, C.G., Donigian, A.S. and Jung, K.W., 2007, Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions. *Agric. Water Manag.* 90, 75-86.

[7] Lake, P.S., 2003, Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biol.*, 48, 1161-1172.

[8] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith T.L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*, 50(3), 885-900.

[9] Park, H.J., Kim, B.H., Gong, D. and Hwang, S.J., 2012, The effect of drought simulated by discharge control on water quality and benthic diatom community in the indoor experimental channel, *The Korean Society of Limnology*, 45(1), 129-138.

[10] Paudel, M., Nelson, E., Downer, C. and Hotchkiss, R., 2011, Comparing the capability of distributed and lumped hydrologic models for analyzing the effects of land use change, *Journal of hydroinformatics*, 13(3), 461-473.

[11] Sakaguchi, A., Eguchi, S., Kato, T., Kasuya, M., Ono, K., Miyata, A. and Tase, N., 2014, Development and evaluation of paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agric. Water Manag.*, 137, 116-122.

[12] Shin, E.S., Choi, J.Y. and Lee, D.H., 2001, Characteristics of non-point source pollutants in surface runoff from rural area, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 17(3), 299-311.

[13] Van Vliet, M.T.H. and Zwolsman, J.J.G., 2008, Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river, *J. Hydrol.*, 353, 1-17.

Received 25 June 2018

Revised 13 August 2018

Accepted 16 August 2018