



Original Article

가뭄이 농업유역의 하천 유량에 미치는 영향 분석: 준분포형 유역모델 STREAM의 논산천 유역 적용 사례

정의상^{1,†} · 조홍래² · 구본경³
¹주하이드로코어 유역환경연구소 수석연구원
²주하이드로코어 유역환경연구소 대표이사
³주하이드로코어 유역환경연구소 이사

Analysis of the Impact of Droughts on River Flows in an Agricultural Watershed Using a Semi-distributed Watershed Model STREAM

Euisang Jeong^{1,†}, Hong-Lae Cho², and Bhon Kyung Koo³

¹Senior Research Scientist, Hydrocore Ltd. Watershed Environmental Research Institute, Seoul 08501, Korea

²CEO, Hydrocore Ltd. Watershed Environmental Research Institute, Seoul 08501, Korea

³Director, Hydrocore Ltd. Watershed Environmental Research Institute, Seoul 08501, Korea

요 약

금강하구유역은 한반도의 중부지방에 위치하며, 상류는 산림지역, 중하류는 농업지 하천의 유량은 하천 수질과 수생태계 건강성에 영향을 미치는 주요 요소이기 때문에 가뭄이나 과도한 관개로 인한 하천 유량의 감소는 매우 심각한 수생태계 위해요인으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 준분포형 유역모델 STREAM을 이용하여 논산천 유역을 대상으로 가뭄 시기의 하천유량 변화 경향과 그 원인을 분석, 평가하였다. 논산천 유역은 유역면적의 약 44.5%가 농업지역으로 2015년에 심각한 가뭄의 영향을 받았다. 논산천 유역에서 2015년의 강우량과 하천유량은 2011년과 비교하여 각각 42.5%, 17.5% 수준으로 감소하였다. 한편, 2011년과 비교하여, 2015년 하천에서 취수된 관개용수는 43.4% 증가하였다. 즉, 2011년과 비교하여 2015년 강우량의 감소폭보다 하천유량의 감소폭이 25.0% 더 큰 것은 하천의 관개용수 취수량이 증가하고, 논의 유출량이 감소하였기 때문인 것으로 분석되었다.

Abstract – River flow rate is one of the critical factors that affect water quality and healthiness of the freshwater aquatic ecosystem. The decrease in river flows in a watershed due to drought and/or too much of irrigation water abstraction may cause serious problems in the fresh aquatic ecosystem. In this study, the trends and the causes of the change in river flows in drought year were analyzed and estimated for the Nonsan-cheon Watershed using a semi-distributed watershed model STREAM. About 44.5% of the Nonsan-cheon Watershed is covered with agricultural area and the study area was struck by a serious drought spell in 2015. Compared to those of 2011, rainfall and river flows have significantly fallen in 2015: decreased to 42.5% and 17.5%, respectively. On the other hand, compared to those of 2011, the amount of irrigation water taken from the rivers increased by 43.4% in 2015. It was analyzed that the decrease in river flows was 25.0% larger than the decrease in rainfall in 2015 because the irrigation water intake from the river increased.

Keywords: Geum river(금강), estuary(하구), Nonsan-cheon watershed(논산천유역), irrigation(관개), watershed model(유역모델)

1. 서 론

최근 지구온난화의 영향으로 기후변화가 빠르게 진행됨에 따라 전지구적으로 이상기후 현상이 증가하고 있다(IPCC[2014]). 국내

에서도 이상기후 현상이 증가하고 있으며, 특히, 평년 대비 강수량이 30% 이상 감소하는 가뭄의 발생빈도가 증가하고 있다(Joint Ministry[2018]). 가뭄에 따른 강우량 감소는 토양수분함량 및 지하수위의 저하를 유발하고, 이로 인해 지표유출, 중간류유출, 지하수 유출 등을 통해 유역에서 하천으로 유입하는 유량을 감소시킨다.

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

토양수분함량의 감소는 육상 식생의 수분 스트레스 증가로 인해 서식환경이 악화되고, 토양 내 물질의 분해와 이동이 감소해 토양 내 유기물, 영양물질, 중금속의 축적량이 증가한다(Lake [2011]). 한편, 하천의 유입유량 감소는 수생태계 내 유기체의 서식지 파괴와 먹이자원 고갈의 원인이 되며, 이로 인해 생태계 연결성을 손상시킨다(Lake[2003]). 하천의 유량이 감소하면 수온 상승과 유속 감소로 인해 산소의 용해성을 감소시키고 유기물의 분해속도를 활성화시키며, 이로 인해 수중 용존산소가 감소하게 된다(Carusio[2001]; Lake[2011]). 용존산소 감소는 수생태계 내 생물체에 심한 스트레스를 주고 다량의 물고기가 폐사할 수 있으며(Carusio[2001]; Van Vliet and Zwolsman[2008]; Lake[2011]), 서식지 파괴와 먹이자원의 변화로 인해 환경변화에 민감하게 반응하는 대형무척추동물이 급격히 감소하는 것으로 조사되었다(Dewson *et al.*[2007]). 또한, 가뭄은 하천생태계 뿐만 아니라 하구생태계에도 영향을 미친다. 가뭄에 따른 하천유량의 하구유입량이 감소하면 용존성무기질소와 같은 영양물질이 함께 감소함에 따라 하구생태계의 먹이자원인 식물플랑크톤의 증식량이 감소한다(Wetz *et al.*[2011]. Palmer and Montagnana[2015]). 식물플랑크톤 증식량의 감소는 수온 상승과 저층용존산소 감소와 함께 하구생태계의 서식환경과 먹이조건을 변경시켜 어류 폐사의 원인이 된다(Attrill and Power[2000]; Wetz *et al.*[2011]. Palmer and Montagnana[2015]). 특히, 하절기 가뭄으로 인한 염분 농도 상승은 굴의 질병으로 인한 폐사율 증가의 원인으로 나타났다(Petes *et al.*[2012]).

금강하구는 유역면적이 약 10,000 km²에 이르는 금강유역에서 유출된 유량이 군산·서천 일대의 서해와 만나 형성된 기수역으로, 금강의 말단과 서해 사이에는 1990년에 조성된 금강하굿둑에 의해 형성된 금강호가 위치하고 있으며, 전라북도와 충청남도 일원에 연간 3억 6천만 톤의 농업용수와 공업용수를 공급하는 역할을 한다(GRBEA[2003]). 금강하구에 직접적인 영향권인 금강하구유역은 논산평야로 대표되는 넓은 논농사 지역이 분포하고 있으며, 농업용수 공급을 위한 관개시스템이 발달되어 있다. 농업유역의 하천은 하천유지용수와 같이 수생태계 보호 목적뿐만 아니라 주로 농업용수 공급을 목적으로 이용되기 때문에 가뭄에 따른 하천유량의 감소는 가뭄으로 인한 농업용수 취수량이 증가함에 따라 더욱 심해질 수 있다. 하천유량 실태조사에 따르면, 농촌지역 소하천의 83%가 건천화되어 제기능을 발휘할 수 없는 하천인 것으로 분석하였는데(Park *et al.*[2006]), 가뭄 시기에는 이러한 현상이 더욱 악화될 개연성이 높다. 따라서 가뭄에 따른 금강하구로 유입하는 유량에 대한 평가를 위해서는 강수량 감소에 따른 농업유역의 수문흐름 특성을 이해하는 것이 요구된다.

우리나라 2015년 연강수량은 평년(1,245.3 mm) 대비 73%로 기상관측이 시작된 이래로 역대 최저 2위를 기록하였으며, 벼농사 등 농업활동이 이루어지는 5~9월의 강수량은 평년(1,019.7 mm) 대비 53.8%로 매우 적었다(Joint ministry[2016]; Kim *et al.*[2016]). 기후변화로 인해 가뭄의 강도와 빈도가 증가함에 따라 농업유역의 하천유량이 어느 정도나 감소하는지, 또 그에 따른 수생태계의 영향은

어느 정도일지에 대한 과학적 분석을 통해 체계적인 대책 수립이 필요한 시점이다.

일부 연구에서는 가뭄이 수문, 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 과거 자료를 수집하여 통계적인 분석을 수행하였으나(Brown *et al.*[2011]; Nosrati[2011]). 유역 내 수문흐름에 대한 정량적인 분석을 위해서는 유역모델링 기법이 적합하다. 유역모델링은 증발산, 침투, 하천유출 등 유역 내 수문현상을 수학적 기법을 통해 분석하는 과학적인 도구로서, 각 수문현상의 시공간적 분포를 이해하고, 시나리오 분석을 통해 다수의 조건에 따른 모의결과를 비교·분석할 수 있는 장점이 있다. 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]). 본 연구에서는 국내 논 중심 농업유역이 집중적으로 분포하는 유역환경의 물순환 모의에 유리한 구조를 가진 유역모델인 STREAM을 적용하여 가뭄이 금강호로 유입하는 농업유역의 하천유량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 이를 통해 농업유역의 하천유량 감소 관련 대책 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상유역

연구대상유역은 우리나라 중부지방에 위치한 금강 유역 중 금강호로 유입하는 지류 중의 하나인 논산천 유역이며, 행정구역 상 논산시, 완주군, 공주시에 포함되어 있다(Fig. 1). 논산천 유역의 면적은

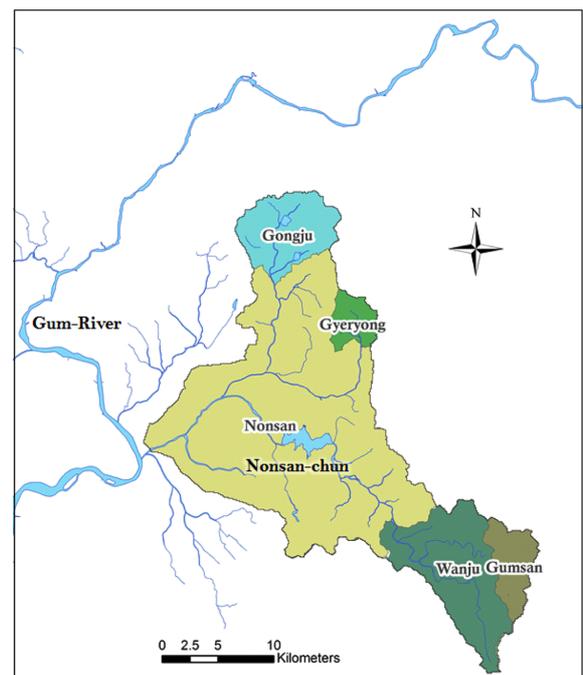


Fig. 1. Study Area : the Nonsan-cheon Watershed.

53,514 ha이며, 금강하구의 직접영향권인 백제보 하류의 유역 중 24.9%이다. 논산천 유역은 논산평야, 강경평야 등이 포함되어 있는 우리나라 대표적인 곡창지대로, 논(16,023 ha), 밭(6,120 ha) 등 유역의 중하류 지역의 농업지역의 면적이 전체 유역 면적의 41.4%를 차지하며, 상류 지역에 주로 분포하는 산림 지역은 전체 유역 면적의 50.0%를 차지한다.

논 중심 농업유역인 논산천 유역은 넓은 농경지에 농업용수를 공급하기 위해 관개시스템이 구축되어 운영되고 있다. 유역 내에는 탐정, 경천, 계룡 등 농업용 저수지가 다수 분포하고 있으며, 각 저수지는 관개용수 구역도에 따라 지정된 농경지로 관개수로를 통해 물을 공급한다. 또한, 하천에는 보가 설치되어 하천수를 저류하고, 취수장을 통해 인근의 농경지에 농업용수를 공급한다. 논산천 유역은 유역 내 분포하는 농경지에 농업용수를 공급하기 위한 관개시스템을 갖춘 대표적인 논 중심 농업유역으로, 유역 내 물순환의 경우 자연적인 수문흐름과 함께 인위적인 흐름변경이 이루어지는 특징을 갖고 있어 가뭄에 따른 농업유역에서의 유출량 분석에 적합한 대상 지역으로 판단된다.

2.2 유역모델 STREAM

농경지의 비율이 높은 논 중심 농업유역인 논산천 유역을 대상으로 강우, 유출 등의 수문현상을 모의하기 위해서는 농업지역의 관개시스템을 구현하고 논의 유출기작을 모의할 수 있는 유역모델을 선정해야 한다. 본 연구에서는 논 중심 농업유역이 다수 분포하는 국내 유역환경에 적합한 모의구조를 가지고 있으며, 중대규모 유역을 모의할 수 있는 유역모델인 STREAM (Spatio-Temporal River-basin Eco-hydrology Analysis Model)을 적용하였다. STREAM은 정방

형 격자 기반의 복합형 유역모델로서 분포형 모델이 갖는 공간적 이질성의 표현능력과 준분포형 모델이 갖는 빠른 계산속도를 함께 적용할 수 있는 특징을 지닌다(Cho *et al.*[2015]). STREAM은 분포형 모델의 개별격자 연산에 따른 속도저하문제를 개선하기 위해 개별격자를 공간적 속성(토지이용, 토성, 경사도, 강우, 기상, 관망 특성)에 따라 유사한 그룹으로 구분하여, 그룹별 1회 연산 후 동일한 값을 부여한다. 모의대상유역을 Cell이라고 정의된 정방형 격자 기동으로 분할하고, 격자가 모여 구성된 다수의 소유역(sub-catchment)은 상하류 위계관계가 형성되며, 노드(node)와 링크(link)의 형태로 표현된다(Fig. 2). 격자 수준의 수문과정은 강우, 강우차단, 증발산, 토양침투, 지표면유출, 중간류유출, 지하수충전, 지하수유출 등으로 구성되며 각 과정은 물리식을 기반으로 계산된다. 소유역 수준의 수문과정은 지표수, 중간류, 지하수의 3개 저장소로 표현되며, 각 저장소에는 해당 소유역 내 격자에서 계산된 유출량을 저장한다. 노드-링크 수준의 수문과정에서 하천흐름은 Muskingum-Cunge 방식으로 해석되며, 저수지·보·배수문 등의 하천의 수리시설에 의한 물질 이동을 모의한다.

국내 농업지역은 하천, 저수지, 지하수 등에서 용수를 공급하는 관개시스템에 의해 유역 내 물순환이 인위적으로 변경된다. STREAM은 농업용수리시설을 통한 물질이동을 모의하고 영농시기별 농업활동을 반영할 수 있기 때문에 논 중심 농업유역의 수문 모의에 적합한 구조를 가지고 있다. 관개 및 배수 등 영농활동과 관련된 매개변수는 격자별 또는 토지피복별로 입력할 수 있어 관개용수 구역도와 같은 지역 특이성을 반영할 수 있다. 농업유역의 수문과정에서 중요한 기작인 관개는 영농시기별 논의 권장담수심과 밭의 적정도양수분함량을 사용자가 입력하여 논의 담수심과 밭의

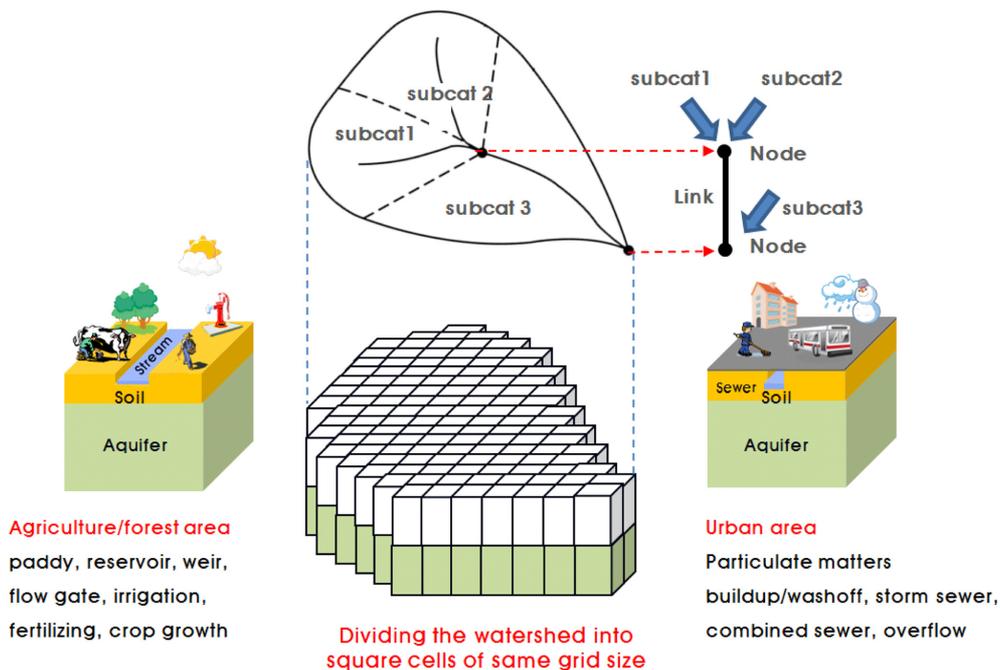


Fig. 2. Representation of a watershed using square grid cells and link-node structures in STREAM (Cho *et al.* 2015).

토양수분함량이 권장담수심과 적정토양수분함량보다 낮으면 자동적으로 이루어지며, 이를 통해 해당 지역의 관개용수 공급량을 계산한다. 관개용수 공급원은 하천, 저수지, 지하수, 관개수로 중 사용자가 지정할 수 있으며, 공급원이 불명확할 경우 인근은 하천에서 공급받는 것으로 설정할 수 있다. 또한, 둑(dyke)이 있는 논과 같은 농경지의 배수량은 영농시기별로 사용자가 입력한 물꼬높이보다 담수심의 높이가 높으면 유출이 발생하는 것으로 계산된다. 둑의 높이, 너비 등 농경지의 속성값과 관개와 배수에 관련된 매개변수는 격자별 또는 토지피복별 시계열 형식으로 입력되며, 보·배수문·저수지 등 농업용수리시설의 제원정보와 조작 프로세스는 사용자가 입력할 수 있다. 저수지의 저수율은 상류하천의 유입량과 관개량, 증발량, 저수지방류량과 같은 유출량으로 계산된 저수량을 저수지의 총저수용량으로 나눈 값으로 계산한다.

2.3 모델 입력자료 구축

STREAM의 모델 입력자료는 지형·토지피복·토성 등의 공간자료, 기상·점오염원 등의 시계열자료, 농업용수리시설, 관개용수구역도 등의 유역환경자료로 구성된다.

공간자료 중 지형자료에는 지표면의 고도, 경사도, 유향(flow direction) 및 누적흐름(flow accumulation) 등이 있으며, 국토지리정보원의 10 m 수치고도모델(DEM)을 이용하여 구축하였다. 토지피복자료는 2012년 기준 환경부의 중분류 토지피복도를 이용하여 논, 밭, 산림 등 총 12개의 분류군으로 구분하였다(Table 1). 토성자료는 국립농업과학원의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 Loam, Sandy

Table 1. Land use within the study area

Land use	Area (ha)	Ratio (%)	
Urban	2,443	4.6	
Agriculture	Paddy area	16,023	29.9
	Upland area	4,702	8.8
	Etc	1,418	2.6
	Forest	26,757	50.0
Grassland	593	1.1	
Wetland	292	0.5	
Bare soil	360	0.7	
Water	926	1.7	
Total	53,514	100.0	

Table 2. The recommended water depth for paddy fields.

Rice growth stage	Periods	Water management	Water depth (cm)
묘대기	04.15 - 05.20	물 얇게 대기	2 - 3
이앙기	05.20 - 06.05	물 얇게 대기	2 - 3
활착기	06.05 - 06.10	물 깊게 대기	5 - 7
분얼성기	06.11 - 06.25	물 얇게 대기	2 - 3
무효분얼기	06.26 - 07.15	중간물떼기	0
수잉기	07.16 - 08.15	물 걸러 대기	2 - 3
출수기	08.15 - 08.23	물 얇게 대기	3 - 4
등숙기	08.23 - 09.23	물 걸러대기	2 - 3
낙수기	09.24 - 09.30	완전물떼기	0

oam 등 총 8개의 분류군으로 구분하였다.

시계열 자료 중 기상자료는 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 현지 기압, 일사량 자료로 구성되며, 기상청에서 제공하는 1시간 단위 관측자료를 이용하였다. 강수량은 부여 기상대와 연무·논산 자동기상관측장비(AWS)에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 강수량 외 기상자료는 부여 기상대에서 제공하는 자료를 이용하였다. 점오염원 자료는 처리 점오염원인 환경기초시설배출량과 미처리 점오염원인 동리별배출량으로 구성되며, 환경부의 전국오염원조사자료에서 제공하는 자료를 이용하였다.

유역환경자료 중 농업용수리시설은 한국수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 유역 내 위치한 저수지와 보의 위치 정보와 각 시설의 속성값을 모델 입력자료로 이영하였다. 저수지 자료는 총저수용량이 50만 m³이상인 시설을 선정하였으며, 탐정, 경천, 계룡 등 4개의 저수지를 모델에 반영하였다. 보는 설치된 지점의 상류 유역면적이 500 ha 이상인 시설을 선정하였으며, 지경, 한전, 까치, 숙진 등 총 16개의 보를 모델에 반영하였다. 관개용수 구역도는 한국농어촌공사에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 유역 내 농경지는 각 구역별 관개용수 공급원을 지정하고 구역도에 표현되지 않은 농경지는 인근 하천에서 관개용수를 공급받는 것으로 가정하였다. 관개용수 공급량을 산정하기 위해 필요한 논·의 적정담수심은 농어촌연구원에서 제공하는 영농시기별 물관리방법 자료를 이용하여 이앙재배 기준으로 이앙기, 활착기, 분얼성기 등 벼의 생육시기별 적정담수심을 입력하였다(Table 2).

논산천 유역의 소유역은 지형자료를 기반으로 하천도와 관개용수구역도를 반영하였으며, 100 m × 100 m 크기의 정방형 격자 53,514개로 구성된 소유역 72개로 구분되었다. 모형의 모의 시간간격은 15분이며, 입출력 시간간격은 1시간이다. 총 모의기간은 2010년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 선정하였다. 논산천 인근에 위치한 부여기상대의 최근 40년(1978-2017년) 강수량 자료를 분석한 결과, 연평균 강수량은 1,342.2 mm/yr이며, 최소·최대 강수량은 각각 752.6 mm/yr, 2,137.5 mm/yr로 나타났다(Fig. 3). 모의기간 중 2010년 강수량은 1,378.3 mm/yr로 평년과 유사한 경향을 보였으며, 2011년 강수량은 2,014.7 mm/yr로 40년간 강수량 자료 중 2번째로 많은 강우를 보였다. 또한, 2013년 이후 5년간 평년보다 낮은 강우량이 지속되었으며, 2015년은 3번째로 낮은 강우량을 보여 가뭄에 의한 영향분석에 적합할 것으로 판단된다.

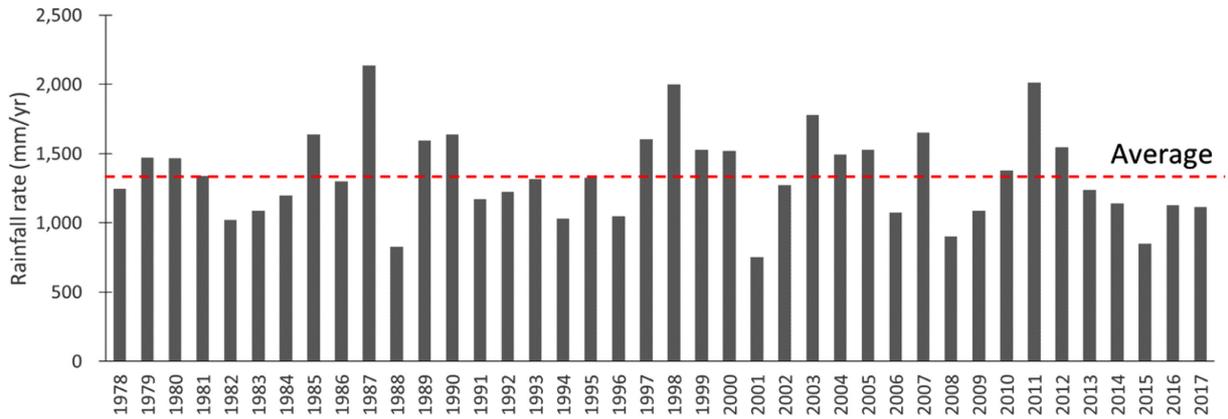


Fig. 3. Annual rainfall at Buyuo station for 1978-2017.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 보정 및 검증

모델 보정(calibration) 및 검증(validation)은 특정 시간과 장소에서 관측된 결과와 모델링을 통해 도출된 결과를 비교하여 모델의 재현성을 평가하고, 모델의 매개변수를 조정하여 모의값을 실측값에 일치시키는 일련의 과정이다. 논산천 유역에 대한 모델 보검정 과정에서 보정기간은 2010년 1월 1일부터 2013년 12월 31일, 검정기간은 2014년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지이며 각 4년간이다. 모델 보검정 지점은 논산천 유역 내 2개의 유량 관측지점(양촌, 논산)과 3개의 저수지 저수율 관측지점(탑정, 경천, 계룡)이다(Fig. 4). 유량 관측지점 중 양촌 지점은 유역 중상류에 위치하여

관개와 배수와 같은 인위적인 수문조작의 영향이 비교적 적은 지점이며, 논산 지점은 유역 말단부에 위치하여 최종유출유량의 정확도를 평가할 수 있는 지점이다. 3개의 저수지 저수율 관측지점은 농업유역의 주요 내부 프로세스인 관개량 산정의 정확도를 평가할 수 있는 지점이다. 유역모델의 수문모의를 위한 보검정 시 유역 출구지점에서 관측된 하천유량 자료만을 이용하는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 하천 상하류 관측지점과 주요 농업용수리시설의 관측지점에 대한 모델 보검정을 수행함으로써 농업유역의 수문흐름에 대한 모의 정확도를 높이고자 하였다. 유량 관측값은 한국수자원관리종합정보시스템(WAMIS), 저수지 저수량 자료는 농촌용수종합정보시스템(RAWRIS)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

모델 보검정 과정에서 모델의 재현성을 평가하는 통계적 방법으로 PBIAS (Percent Bias), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency index), RSR (RMSE-observation standard deviation ratio), R^2 (coefficient of determination) 등의 지표를 사용하였다. PBIAS는 관측값과 모의값의 총량을 비교하는 기초적인 통계지표이다. NSE는 관측값 간의 차이에 대비하여 관측값과 모의값의 차이를 비교하여 정규화한 통계지표이며, $-\infty \sim 1$ 사이의 값을 가진다. RSR은 지점간 오차를 비교하기 위하여 관측값의 표준편차를 이용하여 RMSE(Root Mean Square Error)를 표준화한 통계지표이다. R^2 는 관측값과 모의값의 상관관계를 나타내는 통계지표로서 0~1 사이의 값을 갖는다. 각 지표의 모의결과 평가는 매우 좋음(very good), 좋음(good), 만족(satisfactory), 불만족(unsatisfactory)으로 구분되며, 평가지표의 적정범위는(Moriasi *et al.*[2007])에서 제시한 값을 참고하였다(Table 3).

먼저, 모델 보정과 검정 기간에 대한 유량 모의값의 관측값과 비교를 통한 재현성을 평가하였다. 논산천 상류에 위치한 양촌 지점의 유량 관측값과 모의값을 비교한 결과, 전체적으로 유사한 경향성을 보이고 있으나, 시기에 따라 침투유량에서 과소 평가되는 것으로 나타났다(Fig. 5). 모델 재현성 평가 지수는 전 항목에서 보정 기간과 검정 기간 모두 적정범위 내에 있는 것으로 평가되었다(Table 4). 관측값과 모의값 비교 시 2013년 10~12월 기간에 모의값이 관측값보다 평균 $0.795 \text{ m}^3/\text{sec}$ 높은 값을 보이는데, 이는 이 기간의 유량 관측값의 평균값이 모의기간인 10~12월의 관측 유량과 비교하

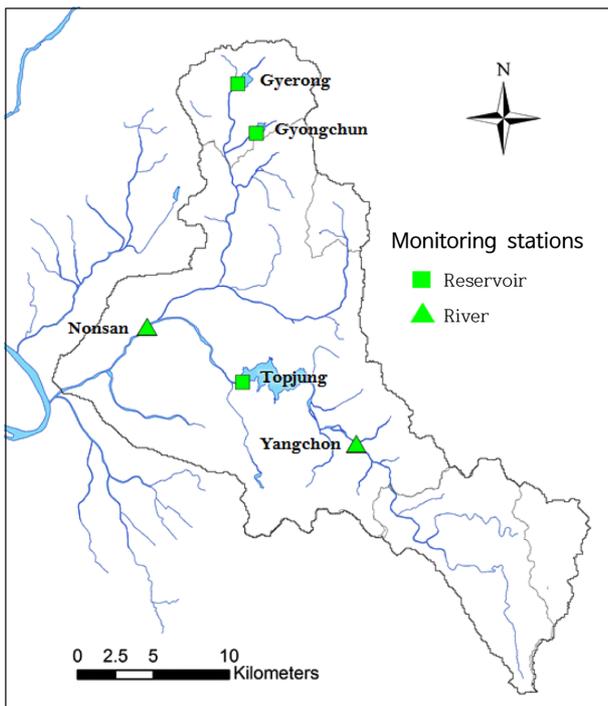


Fig. 4. Monitoring stations for river/reservoir stage.

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

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

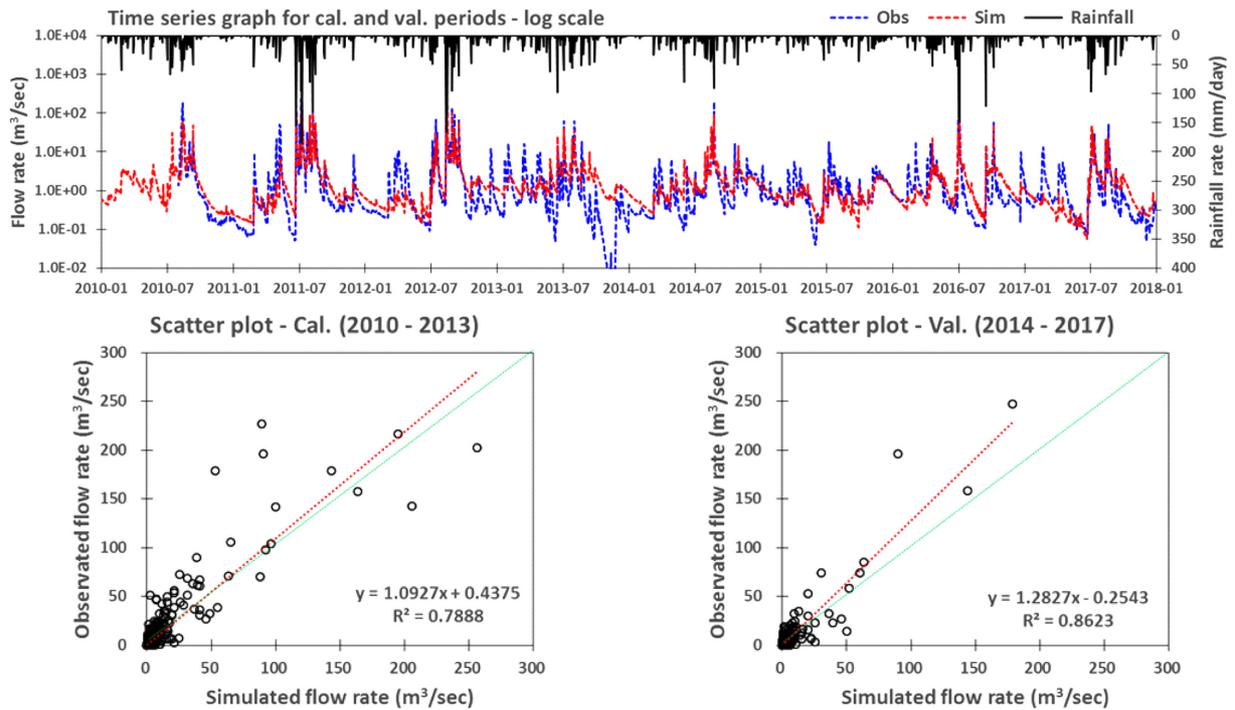


Fig. 5. Hydrographs and scatter plots of the observed and the simulated daily flow rates at the Yangchon Station.

Table 4. Model performance indexes evaluated for daily river flows at the monitoring stations for calibration and validation periods

Station	Cal. / Val. Periods	Index			
		PBIAS	NSE	RSR	R ²
Yangchon	Cal. (2010-2013)	19.822	0.792	0.456	0.789
	Val. (2014-2017)	13.226	0.820	0.425	0.862
Nonsan	Cal. (2010-2013)	15.097	0.819	0.426	0.832
	Val. (2014-2017)	6.317	0.788	0.461	0.820

여 평균의 22.2% 수준으로 낮은 것으로 나타나 관개 이외의 미확 인 취수, 관측값 오류 등 모델에서 재현할 수 없는 수문현상이 나타 난 것으로 판단된다. 논산천 하류에 위치한 논산 지점의 유량 관 측값과 모의값을 비교한 결과, 전체적으로 유사한 경향성을 보이고 있는 것으로 나타났다(Fig. 6). 모델 재현성 지수도 전 항목에서 보 정 기간과 검정 기간 모두 적정 범위 내에 있는 것으로 평가되었다 (Table 4). 관측값과 모의값 비교 시 2015년 12~2016년 2월 기간에 모 의값이 관측값보다 평균 0.664 m³/sec 높은 값을 보이는데, 이는 이 기간의 유량 관측값의 평균값이 전 모의기간 12~2월의 유량 관측 값의 평균의 16.1% 수준으로 낮은 것으로 나타나 양촌 지점과 동 일일하게 관개 이외의 미확인 취수, 관측값 오류 등 모델에서 재현

할 수 없는 수문현상이 나타난 것으로 판단된다.

논산천 중류에 위치한 탐정저수지와 노성천 상류에 위치한 경천 저수지와 계룡저수지의 저수율 관측값과 모의값을 비교한 결과, 모 의값이 전체적으로 관측값과 유사한 경향성을 보였다(Fig. 7-Fig. 9). 모델 재현성 지수는 3지점 모두 전항목에서 매우 좋음 수준을 보 이는 것으로 평가되었다(Table 5). 저수지의 수문 프로세스는 유입, 증 발, 관개, 유출로 구성되는데, 이 중 관개는 각 저수지의 해당 용수 구역 내 논의 담수심의 높이와 사용자가 입력한 권장담수심의 차 이인 관개필요수량만큼 저수지에서 자동적으로 관개가 일어나도록 구현되어 있다. 경천저수지의 2010년과 2016년 모의기간의 저수지 저수율에서 과대 또는 과소 평가된 것을 제외하고 전체적으로 유

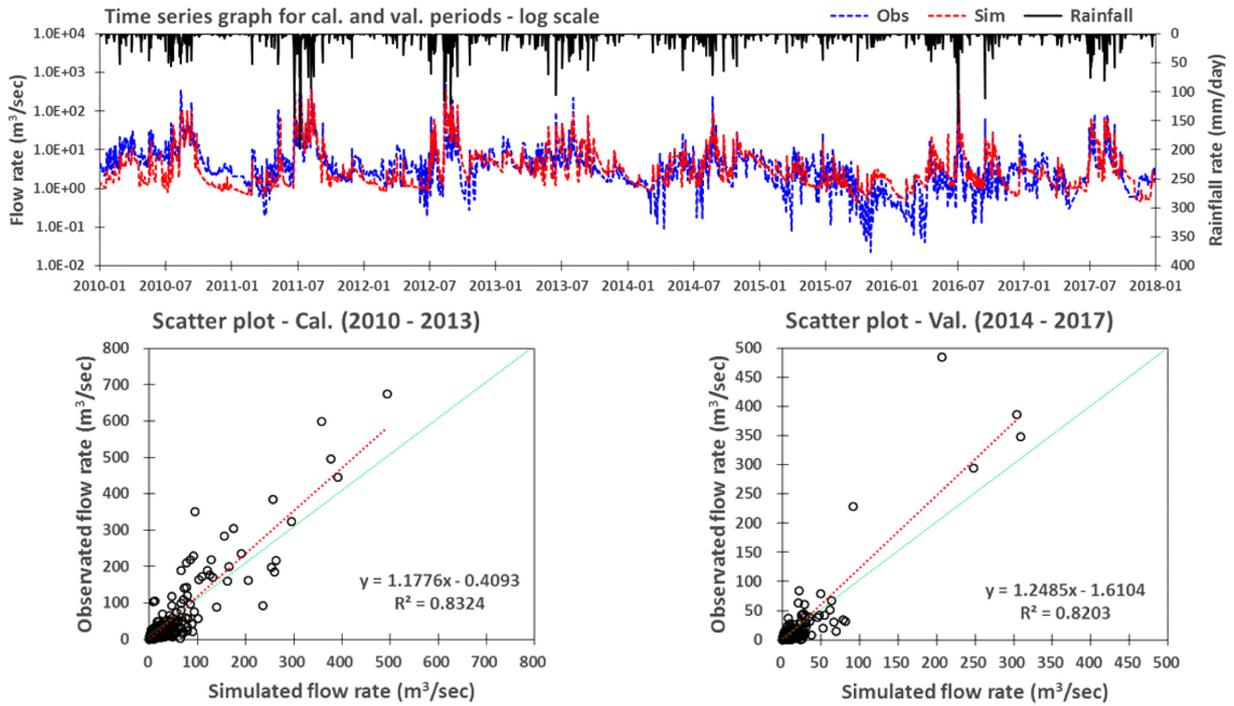


Fig. 6. Hydrographs and scatter plots of the observed and the simulated daily flow rates at the Nonsan Station.

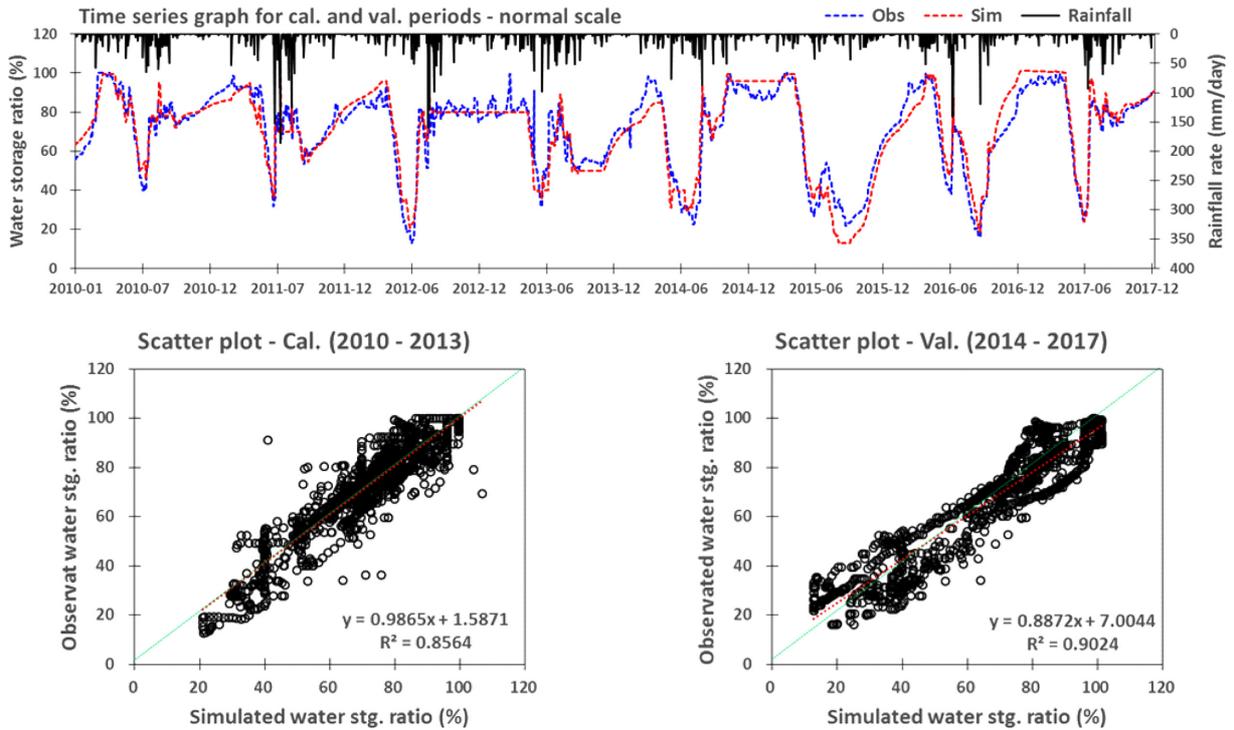


Fig. 7. Reservoir storage ratio time-series graph and scatter plots of the observed and simulated daily water storages at the Topjung Reservoir Station.

사한 경향을 보이는 바, 농업유역의 관개량에 대한 정량적인 평가에 적합한 매개변수 보정이 이루어진 것으로 판단된다.

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

3.2 연강우량 감소가 하천유량에 미치는 영향

논산천 유역에 대한 물수지 모의결과를 이용하여 연강우량 감소가 하천유량에 미치는 영향을 분석하였다(Table 7). 논산천 유역의 모의기간 중 연도별 평균 총강우량은 1,239.6 mm/yr이며, 이 중

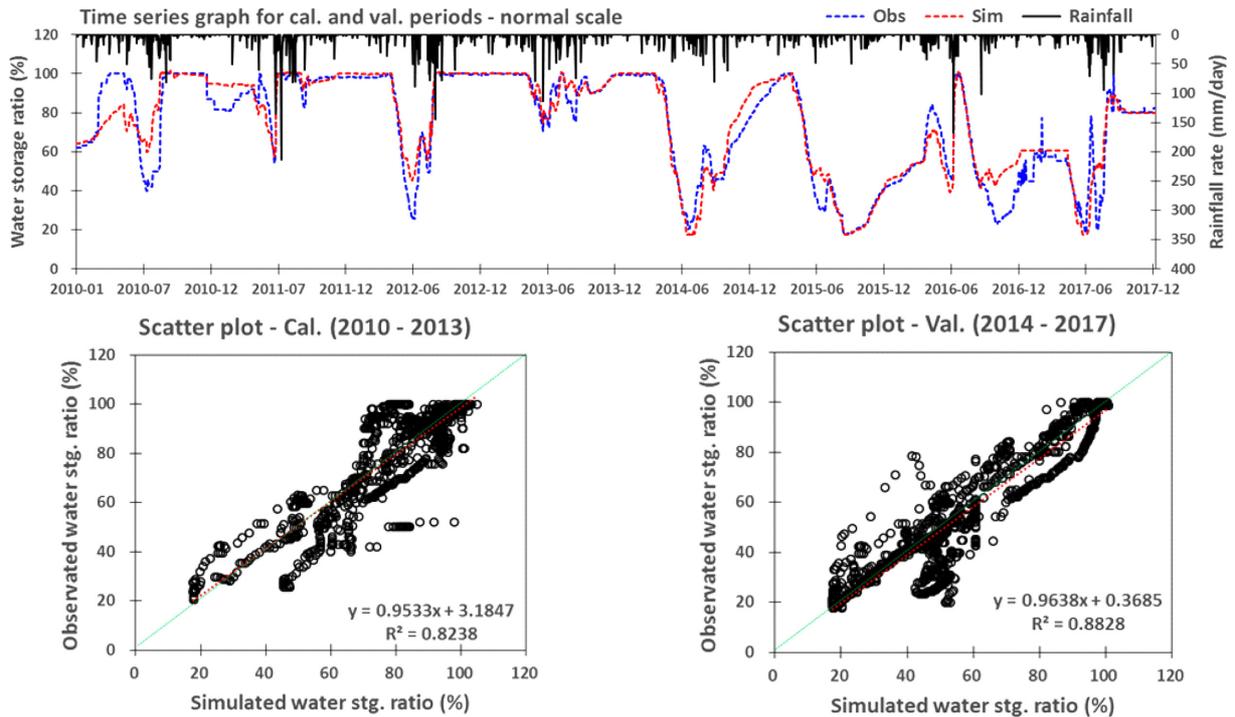


Fig. 8. Reservoir storage ratio time-series graph and scatter plots of the observed and simulated daily water storages a the Gyongcheon Reservoir Station.

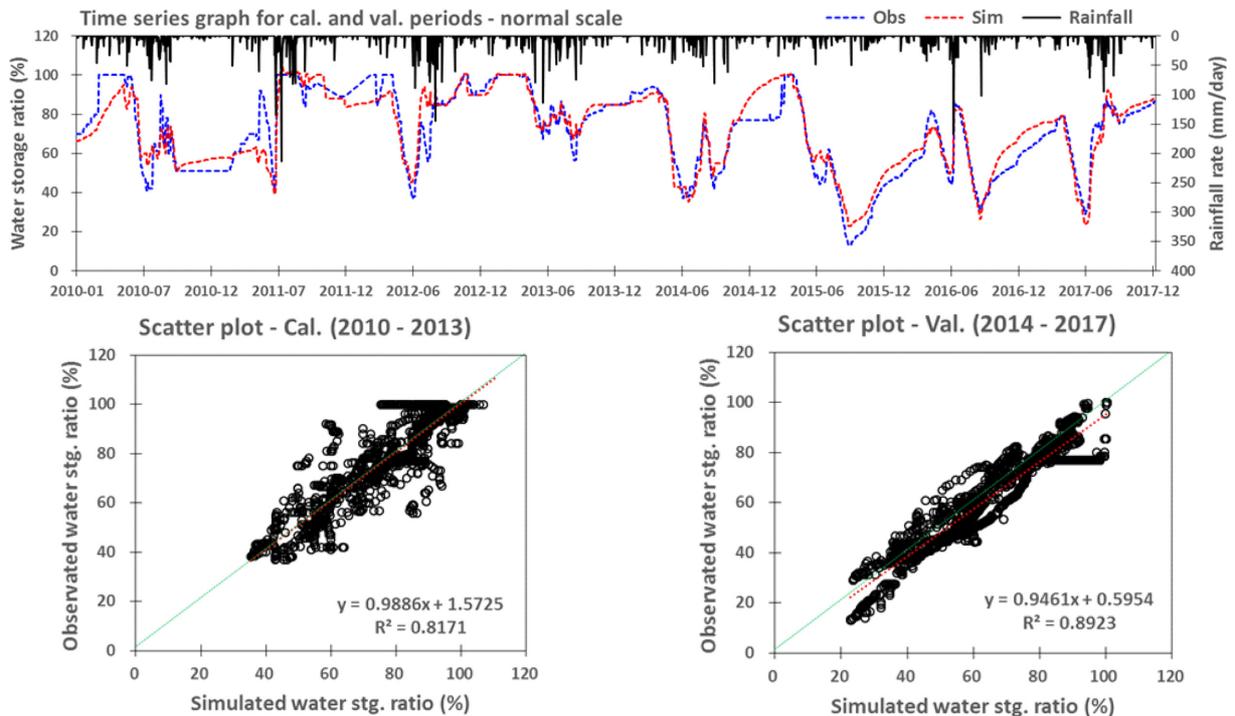


Fig. 9. Reservoir storage ratio time-series graph and scatter plots of the observed and simulated daily water storages a the Gyoryong Reservoir Station.

45.3%인 590.1 mm/yr의 유량이 유역 말단에서 금강호로 유입하는 것으로 나타났다. 최대강우량(1,822.5 mm/yr)이 발생한 2011년의 강우량은 최소강우량(775.3 mm/yr)이 발생한 2015년보다 2.4배 높

은 것으로 나타났다. 유역말단의 유출유량은 최대강우 해인 2011년은 1,154.9 mm/yr, 최소강우 해인 2015년은 202.5 mm/yr로, 2015년 대비 2011년의 하천유출량은 5.7배 높은 것으로 나타났다.

Table 5. Model performance indexes evaluated for daily reservoir water storage ratio at the reservoir monitoring stations

Station	Cal. / Val. Periods	Index			
		PBIAS	NSE	RSR	R ²
Topjung	Cal. (2010-2013)	0.766	0.843	0.396	0.856
	Val. (2014-2017)	1.346	0.886	0.337	0.902
Gyeongcheon	Cal. (2010-2013)	1.210	0.708	0.541	0.824
	Val. (2014-2017)	6.218	0.756	0.494	0.883
Gyeryong	Cal. (2010-2013)	1.043	0.776	0.473	0.817
	Val. (2014-2017)	4.699	0.868	0.364	0.892

Table 6. Selected model parameters and their calibrated values for stream flow

Parameter	Unit	Description	Calibrated Value
linkWFactor1	-	Muskingum-Cunge weighting factor1 for K when bank is full	0.75
linkWFactor2	-	Muskingum-Cunge weighting factor2 for K when bank is 10% bankfull	0.25
linkWFactorX	-	Muskingum-Cunge weighting factor X	0.25
Kgwr	day ⁻¹	Ground water recession parameter	0.2

Table 7. Water balance of the Nonsan-cheon Watershed for 2010-2017

Items		year				Avg.
		2010	2011	2012	2013	
In	Rainfall	1,249.9	1,822.5	1,468.5	1,232.1	
	Point source	35.5	35.5	35.6	35.5	
Internal Process	Runoff at stream inlets	704.3	1,267.3	933.5	670.9	
	Irrigation intake	169.9	179.1	217.8	159.0	
Out	Evapotranspiration	703.8	677.8	686.2	701.4	
	Discharge to watershed outlet	586.0	1,154.9	798.5	586.6	
Water storage change		-4.4	25.4	19.4	-20.4	
Items		year				Avg.
In	Rainfall	1,085.5	775.3	1,259.2	1,023.8	1,239.6
	Point source	35.5	35.5	35.6	35.5	35.5
Internal Process	Runoff at stream inlets	590.3	329.0	730.4	555.7	722.7
	Irrigation intake	189.6	256.9	275.3	231.3	141.6
Out	Evapotranspiration	636.6	647.8	729.5	674.6	682.2
	Discharge to watershed outlet	455.6	202.5	522.8	413.7	590.1
Water storage change		28.8	-39.6	42.5	-28.9	2.8

(unit : mm/yr)

이는 연간 증발산량이 평균값의 7% 이내로 강우량과 상관없이 일정 범위 내에서 유지되는 것으로 볼 때 강우량 감소에 따른 농업용수 부족량을 관개를 통해 공급받으며, 이로 인해 강우량의 증감이 하천유출량에 반영되는 것으로 판단된다. 최대강우 해인 2011년의 강우량 대비 하천유입유량(discharge to stream)의 비율은 69.5%이고, 강우량 대비 유역말단 유출유량(discharge to outlet)의 비율은 63.4%로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 최소강우 해인 2015년의 강우량 대비 하천유입유량의 비율은 42.4%인 반면, 강우량 대비 유역말단 유출유량의 비율은 26.1%로 감소하여 하천에서의 감소폭이 증가하였다(Fig. 10). 유역 내 하천 유입유량과 유역말단 유출유량의 차이는 유역 내 하천에서 손실되는 양인 하천증발량과 관개용수 취수량으로 구성된다. 유역 내 하천유입유량과 유역말단 유

출유량 사이의 차이는 유역 내 하천에서 손실되는 양으로서 이는 하천증발량과 관개용수 취수량으로 구성된다. 농업지역 면적으로 환산한 관개용수 취수량은 2011년 432.9 mm/yr, 2015년 620.8 mm/yr로, 2011년 대비 2015년의 관개용수 취수량이 43.4% 증가하였다. 이는 강우량 감소로 인해 농경지의 관개용수 필요수량이 증가하여 하천유량의 감소폭이 증가한 것으로 판단된다. 그리고 연도별 관개용수 취수량을 분석해 보면, 2015년 가뭄 이후 2016년도의 강우량이 1,259.2 mm/yr로 2010년과 유사한 평년 수준으로 증가하였음에도 불구하고 관개용수 취수량이 169.6 mm/yr에서 191.0 mm/yr로 증가하였으며(Fig. 11), 이로 인해 유역말단의 유출유량이 2010년에 비해 10.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 농업지역의 용수관리 특수성에 의한 것으로, 영농기 농업용수 확보를 위해 저

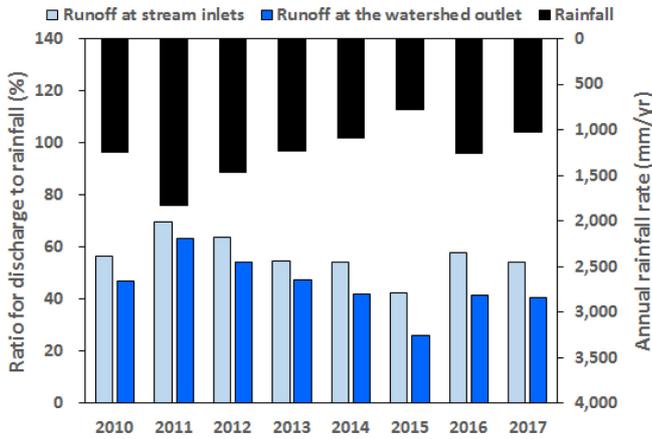


Fig. 10. Annual runoff ratios at stream inlets with the watershed and at the watershed outlet (2010-2017).

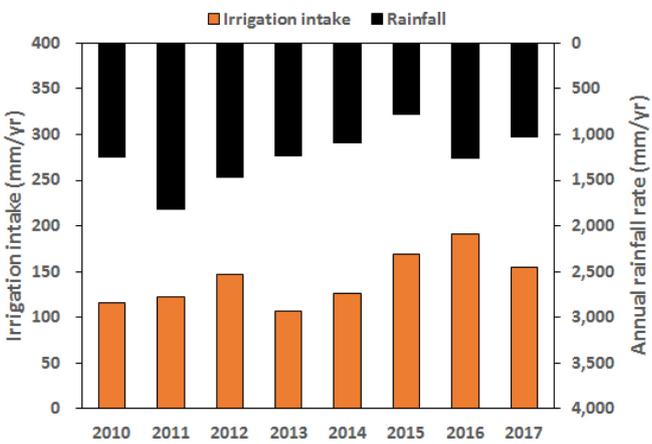


Fig. 11. Annual irrigation intake and annual rainfall (2010-2017).

수지 또는 관개수로에 비영농기에 저류를 하는데, 2015년 가뭄에 의해 저류량을 부족하여 2016년의 관개용수 취수량이 증가한 것으로 판단된다.

3.3 연강수량 감소가 하천의 관개용수 취수량에 미치는 영향

농업유역의 하천에는 관개용수를 취수하기 위한 목적으로 다수의 농업용수리시설이 위치하고 있으며, 하천유량의 변화에 중요한 인자로 작용한다. 보와 저수지와 같은 농업용수리시설 내 수문 흐름은 상류에서 들어온 유입수 중 일부는 수문증발로 대기 중으로 이동하고, 일부는 양수시설을 통해 관개용수로 취수되며, 나머지 저류량은 수위 상승에 따른 월류 또는 수문개방에 따른 방류를 통해 하류로 유출된다. 일반 하천과 달리 농업용수리시설이 위치한 하천에서는 관개용수 취수량이 유출량을 결정하는데 중요한 인자로 작용한다.

논산천 유역에는 농업용수 확보를 위한 다수의 보와 저수지가 분포하고 있으며, 본 연구에서는 16개의 보와 4개의 저수지를 반영하였다. 논산천 유역의 하천에서 취수되는 관개용수는 2010~2017년 평균 $75.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 이며, 강우량의 11.4% 수준인 것으로 분

석되었다. 또한, 최대강우 해인 2011년 대비 최소강우 해인 2015년의 관개용수 취수량은 1.4배인 것으로 나타났으며, 강우량 대비 관개용수 취수량의 비율이 2011년은 6.7%인데 반해 2015년은 21.9%까지 증가하는 것으로 분석되었다.

연강수량 감소가 하천의 관개용수 취수량에 미치는 영향을 분석하기 위해 모델 구축 시 반영한 농업용수리시설 중 6개의 주요 시설(무테보, 지경보, 한전보, 탐정저수지, 경천저수지, 계룡저수지)에 대한 유입량, 유출량, 증발량, 관개용수 취수량, 유입량 대비 관개용수 취수량의 비율 등 연도별 수문흐름을 분석하였다(Fig. 12). 전체적인 경향을 보면, 강우량이 감소함에 따라 유입량이 감소한 반면, 관개량은 증가하는 추세를 보여, 최소강우 해인 2015년의 경우 유입량 대비 관개량의 비율이 70% 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 무테보의 연평균 관개용수 취수량은 $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 유역 총취수량의 3.2%이며, 최소강우 해인 2015년의 유입량 대비 관개용수 취수량의 비율이 69.9%로 증가하였으나, 취수량은 오히려 38.0% 감소한 것으로 나타났다. 이는 노성천의 지류인 월암천에 위치한 무테보는 보 상류에 계룡저수지가 위치하고 있어 유입량 평균 대비 78.0% 감소하였기 때문으로 판단되며, 이로 인해 유출량은 $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 91.3% 감소한 것으로 분석되었다. 노성천의 지류인 주천과 연산천에 위치한 지경보와 한전보의 연평균 관개용수 취수량은 각각 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$, $8.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 유역 총취수량의 각각 7.8%, 11.8%이며, 2015년의 유입량 대비 관개용수 취수량의 비율이 각각 73.7%, 73.3% 증가하고 이로 인해 유출량은 각각 82.4%, 82.9% 감소한 것으로 분석되었다. 논산천 본류의 증류에 위치한 탐정저수지의 연평균 관개용수 취수량은 $34.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 유역 총취수량의 45.4%이며, 2015년 유입량 대비 관개용수 취수량의 비율이 85.5% 증가하고 이로 인해 유출량은 87.0% 감소한 것으로 분석되었다. 노성천 상류에 위치한 경천저수지와 계룡저수지의 연평균 관개용수 취수량은 각각 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$, $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 유역 총취수량의 각각 1.8%, 4.1%이며, 2015년의 유입량 대비 관개용수 취수량의 비율이 각각 132.5%, 108.8% 증가하고 이로 인해 유출량은 각각 93.2%, 89.9% 감소한 것으로 분석되었다. 논산천 유역의 관개용수 취수량은 탐정저수지, 지경보, 한전보와 같은 주요 농업용수리시설이 총취수량의 65.0%를 차지하고 있어 가뭄 예상 시 이 시설에 대한 용수확보 등의 사전관리가 필요할 것으로 판단된다.

2015년과 같은 가뭄 시기에 관개용수 취수량이 증가한 것은 강우량 감소로 인해 관개용수 필요수량이 증가하였기 때문이다. 영농시기인 4월부터 9월까지 농경지 개별 필지단위의 월별 강수량과 관개량을 산정결과를 통해 관개용수 필요수량을 분석하였다. 논산천 유역 내 논의 영농시기의 평균 강우량과 관개량은 각각 970.4 mm, 458.4 mm이며, 총유입량 1,428.8 mm 중 관개량의 비율이 32.1%로 나타났다(Fig. 13). 논의 영농시기 월별 총유입량을 보면, 7월과 8월이 328.7 mm와 341.6 mm로 가장 높고, 그 다음으로 5월이 254.5 mm를 차지하였으나, 총유입량 중 관개량이 차지하는 비율은 5월과 6월이 각각 67.8%, 43.6%로 가장 높았다. 이는 이양

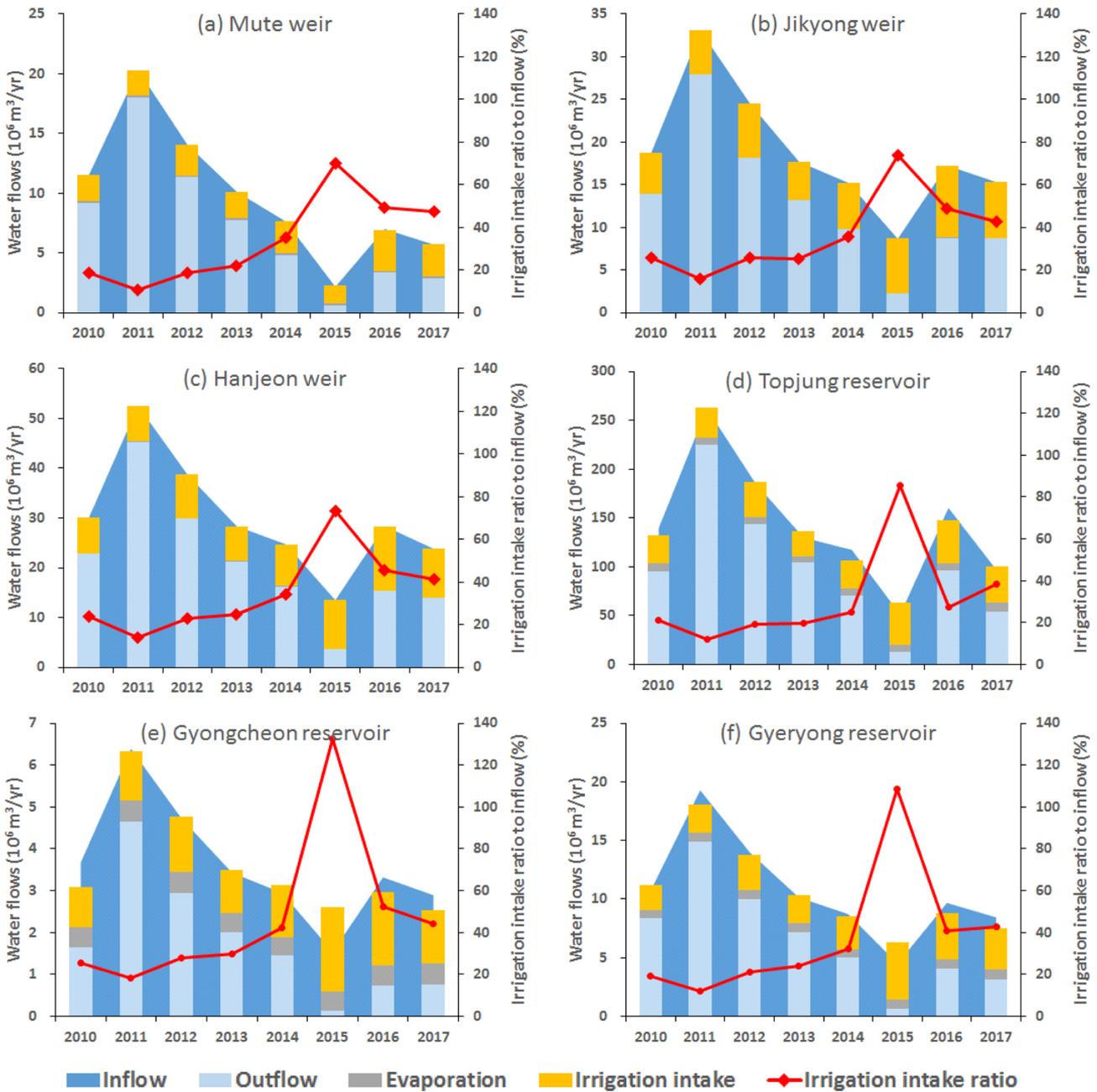


Fig. 12. Estimated inflow, outflow, evaporation, irrigation intake and irrigation intake ratio to inflow at 3 weirs and 3 reservoirs.

기, 활착기와 같은 영농시기에 농업용수의 수요가 높음에도 강우량이 부족하여 관개를 통해 이를 보완하는 우리나라의 농업환경을 반영하는 것으로 판단된다.

3.4 연강우량 감소가 논의 유출유량에 미치는 영향

영농시기 논의 유입수는 강우와 관개로 구성된다. 논의의 필요수량은 일차적으로 강우에 의해 이루어지며, 부족한 수량을 농업용수리시설을 이용한 인위적인 수단을 통해 채워진다. 이렇게 공급된 논의 유입수는 수면증발, 토양침투 후 증산 등 증발산 과정을 거친

후 지표유출, 중간류유출, 지하수유출을 통해 다시 하천으로 회귀한다. 모의기간 중 영농시기의 평균 유입수 중 50.0%인 713.9 mm가 증발산을 통해 대기 중으로 이동하고, 49.1%인 701 mm가 하천으로 이동하는 것으로 분석되었다(Table 8). 최소강우 해인 2015년의 경우 유입수가 평년 대비 29.0% 감소하였고, 하천유출량은 52.3% 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 하천유출량의 구성성분 중 지표유출이 444.2 mm에서 91.5 mm로 79.4%가 감소하였는데 이는 논의의 답수심이 물꼬높이 이상으로 올라가는 경우가 감소하였기 때문이며, 증발산이 평년 대비 3.1% 감소하여 큰 변화가 없음으로

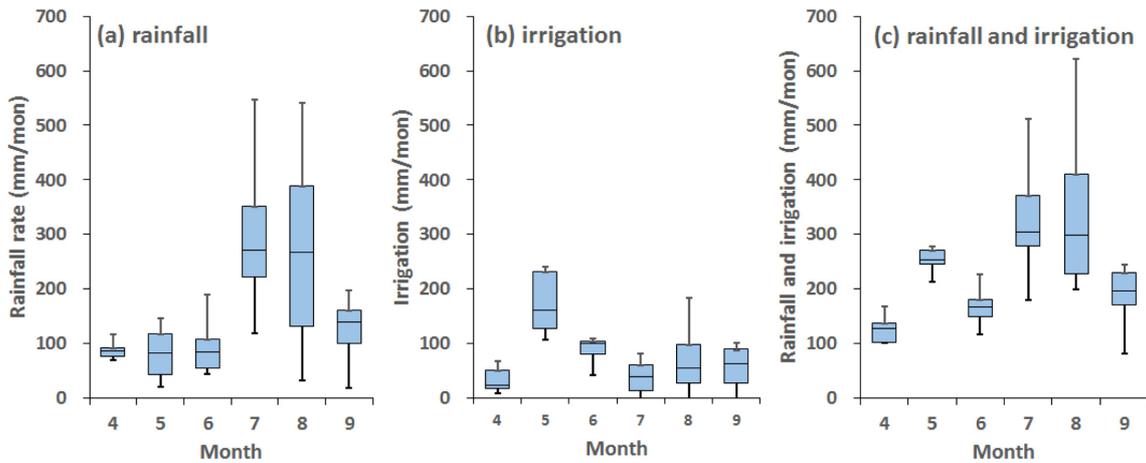


Fig. 13. Monthly rainfall, irrigation, and their sum at paddy fields in the Nonsan-cheon Watershed.

Table 8. Annual water balance for the paddy fields of the drought year 2015 compared with that of the 8-year average (2010-2017)

Items	Average		2015		
	mm/yr	%	mm/yr	%	
In					
Rainfall	970.4	67.9	421.3	41.5	
Irrigation	458.4	32.1	593.7	58.5	
sum	1,428.8	100.0	1,015.0	100.0	
Out					
ET	713.9	50.0	691.8	68.2	
Discharge	surface runoff	444.2	31.1	91.5	9.0
	interflow	119.1	8.3	109.9	10.8
	aquifer discharge	137.7	9.6	133.0	13.1
	sum	701.0	49.1	334.4	32.9
water storage change	13.9	1.0	-11.2	-1.1	

논의 담수심이 수표면의 증발과 토양층의 식생증산으로 인해 낮아지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

금강하구는 우리나라 중부지방에 위치한 금강유역에서 유입된 유량이 서해와 만나는 기수역으로, 농업용수와 공업용수 확보를 위해 1990년에 조성된 금강하구둑으로 인해 금강호가 위치하고 있다. 금강호의 직접영향권인 금강하구유역은 유역면적의 44.5%가 농업지역인 농업유역이다. 최근 기후변화에 따른 이상기후현상으로 가뭄의 발생빈도가 증가함에 따라 본 연구에서는 금강하구의 대표적인 농업유역인 논산천 유역을 대상으로 유역모델링 기법을 이용하여 가뭄이 농업유역의 하천유량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 농업지역의 관개시스템을 구현하고 논의 유출기작을 모의할 수 있는 유역모델 STREAM을 적용하여 논산천 유역을 대상으로 100 m × 100 m 격자 크기로 공간자료·시계열자료·유역환경자료 등의 모델 입력자료를 구축하였으며, 2010년부터 2014년까지 2개의 하천유량 관측지점과 3개의 저수지 저수율 관측지점에서 모델 보검정을 수행하였다.

논산천 유역의 총모의기간 평균 연강우량은 1,239.6 mm/yr이며,

이 중 45.3%인 590.1 mm/yr의 유량이 금강호로 유입되는 것으로 나타났다. 최소강우 해인 2015년 강우량이 최대강우 해인 2011년 강우량의 42.5%인데 반해, 2011년 대비 2015년의 금강호 유입유량은 17.5%인 것으로 나타났다. 이는 강우량 감소에 따라 농경지의 관개필요수량이 증가하여 저수지와 하천에서 관개용수 취수량이 2011년 대비 2015년에 43.4% 증가하였기 때문이다. 그리고 최소강우 해인 2015년 이후 2016년의 강우량이 평년 수준으로 증가하였음에도 관개용수 취수량이 2015년 대비 2016년에 12.6% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 당해년도 가뭄으로 인해 비영농기 농업용수 확보하지 못할 경우 차년도 농업용수 취수량이 증가하는 것을 보여주며, 장기간 가뭄이 지속될 경우 하천유량에 미치는 영향이 증가할 것임을 나타낸다.

논산천 유역 내 농업용수리시설 중 모델에 반영된 20개 시설에 대한 물수지를 분석한 결과, 연평균 관개용수 취수량은 75.8 × 10⁶ m³/yr이며, 강우량의 11.4%로 나타났다. 그리고 논산천 유역의 관개용수 취수량은 탐정저수지, 지경보, 한천보와 같은 주요 농업용수리시설이 총취수량의 65.0%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 이는 가뭄 예상 시 농업용수 확보를 위해 주요 시설을 집중관리 대상시설을 선정하면 효과적일 것으로 판단된다.

가뭄으로 인한 하천유량의 감소와 이에 따른 하구유입유량의 감

소는 수질 악화와 수생동식물 서식처 제한 등 수생태계에 매우 심각한 위협요인으로 작용할 수 있으며, 특히 대량의 관개용수를 취수하는 농업유역에서 하천유량이 가뭄에 취약한 것은 구조적인 한계점이다. 따라서 농업유역의 비율이 높은 금강하구유역에서 이에 대한 대책으로서, 논 경작지의 주요 수문과정인 강우유출, 증발산, 관개를 모의할 수 있는 유역모델링시스템을 바탕으로 관개용수 취수량의 시공간적 적정 수준을 산정함으로써, 농업생산성과 하구/하천의 수생태계 건강성을 통합하여 관리할 수 있는 의사결정 지원 체계를 구축하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

후 기

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

References

- [1] Attrill, M.J. and Power M., 2000, Modelling the effect of drought on estuarine water quality, *Water Research*, 34(5), 1584-1594.
- [2] Brown, I.M., Poggio, L. and Gimona, A., 2011, Climate change, drought risk and land capability for agriculture: implications for land use in Scotland, *Reg. Environ. Change*, 11(3), 503-518.
- [3] Caruso, B.C., 2001, Regional river flow, water quality, aquatic ecological impacts and recovery from drought, *Hydrolog. Sci. J.*, 46(5), 677-699.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] GRBEA, 2003, A Study on the Water Quality Changes of Daecheong Lake and Geum Estuary, Geum River Basin Environment Agency, 1-340.
- [7] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 1-151.
- [8] 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.
- [9] Joint Ministry, 2016, Climate report over 2015, 1-73.
- [10] Joint Ministry, 2018, Climate report over 2017, 1-218.
- [11] Kim H.S., Kim, H.S., Jeon, G.I, and Gang S.W., 2016, Analysis for drought of 2014-2015, *Water and Future*, 49(6), 61-75.
- [12] Lake, P.S., 2003, Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biol.*, 48, 1161-1172.
- [13] Lake, P.S., 2011, Drought and aquatic ecosystem: effects and responses. Wiley-Blackwell, 1-402.
- [14] 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.
- [15] Nosrati, K., 2011, The effects of hydrological drought on water quality, *IAHS-AISH Publication*. 348, 51-56.
- [16] Palmer T.A. and Montagna, P.A., 2015, Impacts of droughts and low flows on estuarine water quality and benthic fauna, *Hydrobiologia*, 753(1), 111-129.
- [17] Park, K.W., Kim, J.T., Ju, W.J., Park, J.H. and Oh, S.T., 2006, A study on causative factors of drying streams in rural area. Rural Research Institute.
- [18] Petes, L.E., Brown, A.J. and Knight C.R., 2012, Impacts of upstream drought and water withdrawals on the health and survival of downstream estuarine oyster populations, *Ecol Evol.*, 2(7), 1712-1724.
- [19] 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.
- [20] Van Vliet, M.T.H., Zwolsman, J.J.G., 2008, Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river, *J. Hydrol.*, 353, 1-17.
- [21] Wetz, M.S., Hutchinson, E.A., Lunetta, R.S., Paerl, H.W. and Taylor, C.J., 2011, Severe droughts reduce estuarine primary productivity with cascading effects on higher trophic levels, *American Society of Limnology and Oceanography*, 56(2), 627-638.

Received 10 October 2018

Revised 13 November 2018

Accepted 15 November 2018