

분포형 모형과 클라우드 서비스를 이용한 낙동강 실시간 유출해석시스템 개발 및 성능평가*

김길호¹ · 최윤석^{1*} · 원영진² · 김경탁¹

Development and Performance Assessment of the Nakdong River Real-Time Runoff Analysis System Using Distributed Model and Cloud Service*

Gil-Ho KIM¹ · Yun-Seok CHOI^{1*} · Young-Jin WON² · Kyung-Tak KIM¹

요 약

본 연구의 목적은 물리적 분포형 강우-유출 모형인 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model) 과 마이크로소프트 Azure(Microsoft cloud computing service)를 이용하여 낙동강 유역의 유출 해석시스템을 개발하고, Azure의 가상머신(VM, Virtual Machine) 설정에 따른 시스템 실행시간을 평가하는 것이다. 이를 위해서 낙동강 유역을 20개의 소유역으로 구분하고, 각 소유역에 대해서 GRM 모형을 구축하였다. 각 유역의 유출해석은 상하류 위상관계를 유지하면서 독립된 프로세스로 실행된다. 실시간 유출해석을 위해 국토교통부의 실시간 강우레이더 자료와 댐방류량 자료를 이용한다. 유출해석시스템은 Azure에서 실행되며, 유출해석 결과는 웹을 통해서 가시화 된다. 연구결과 실시간 수문자료 수신서버와 유출해석 계산서버(Azure) 및 사용자 PC가 연계된 낙동강 실시간 유출해석시스템을 개발할 수 있었다. 유출해석을 위한 전산장비는 하드디스크와 메모리 보다는 CPU의 성능에 크게 의존하는 것으로 평가되었다. 유출해석시의 디스크 입출력(I/O)과 계산 프로세스를 분산함으로써 입출력과 계산 병목을 각각 감소시킬 수 있었고, 실행시간을 단축시킬 수 있었다. 본 연구의 결과는 고해상도의 공간 및 수문 자료를 활용하는 분포형 모형을 이용한 대 유역 유출해석시스템을 구축하기 위한 기술로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 분포형 모형, 클라우드 서비스, 실시간 유출해석시스템, 홍수, GRM, Azure

2017년 6월 2일 접수 Received on June 2, 2017 / 2017년 7월 4일 수정 Revised on July 4, 2017 / 2017년 7월 6일 심사완료 Accepted on July 6, 2017

* 본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수·폭설재해 예측 및 경보 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

1 한국건설기술연구원 수자원연구실 Department of Hydro Science and Engineering Research, KICT
2 ㈜헤르메시스 기업부설연구소 Research Institute of HermeSys Co. Ltd.

* Corresponding Author E-mail : yschoi51@kict.re.kr

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a runoff analysis system of the Nakdong River watershed using the GRM (Grid-based Rainfall-runoff Model), a physically-based distributed rainfall-runoff model, and to assess the system run time performance according to Microsoft Azure VM (Virtual Machine) settings. Nakdong River watershed was divided into 20 sub-watersheds, and GRM model was constructed for each subwatershed. Runoff analysis of each watershed was calculated in separated CPU process that maintained the upstream and downstream topology. MoLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) real-time radar rainfall and dam discharge data were applied to the analysis. Runoff analysis system was run in Azure environment, and simulation results were displayed through web page. Based on this study, the Nakdong River real-time runoff analysis system, which consisted of a real-time data server, calculation node (Azure), and user PC, could be developed. The system performance was more dependent on the CPU than RAM. Disk I/O and calculation bottlenecks could be resolved by distributing disk I/O and calculation processes, respectively, and simulation runtime could thereby be decreased. The study results could be referenced to construct a large watershed runoff analysis system using a distributed model with high resolution spatial and hydrological data.

KEYWORDS : *Distributed Model, Cloud Service, Real Time Runoff Analysis System, Flood, GRM(Grid based Rainfall-runoff Model), Azure*

서 론

호수에 의한 유역 유출의 해석을 위해서 과거에는 주로 집중형 모형이 이용되었다. 홍수유출 해석시 집중형 모형이 이용된 이유는 우선 강우관측소에서 관측된 지점 강우자료를 유역 평균강우량으로 환산하여 유출해석에 적용함으로써 유출해석시 가장 중요한 요소인 강우에서 공간분포를 고려하지 못했기 때문이라고 할 수 있다. 또한 분포형 모형에 적용하기 위한 고해상도 수문학적 지형공간자료가 부족하고, 분포형 모형을 실행하기 위한 고성능의 전산장비가 일반화되지 못한 것도 중요한 이유 중 하나라고 할 수 있다.

최근 들어 레이더 강우자료의 사용이 보편화되고 있고, GIS 기술의 발달과 함께 고해상도의 공간자료를 획득할 수 있게 되었다. 이로 인해 과거에 비해 신뢰성 높은 자료를 이용해서 분포

형 모형의 입력자료를 구축할 수 있게 되었다 (Hong *et al.*, 2010; Jeon *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2014). 컴퓨터 기술의 지속적인 발달로 인해서 개인용 컴퓨터의 성능이 비약적으로 향상되었으며, 최근에는 다양한 클라우드 서비스를 통하여 HPC(High Performance Computer) 수준의 고성능 전산자원을 손쉽게 이용할 수 있게 되었다(Kang and Park, 2012; Demir *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015). 이와 같은 여건의 변화로 인해 분포형 모형을 이용한 홍수모의에 대한 연구와 함께 대유역에 대한 실시간 유출해석시스템 구축에 대한 연구가 확대되고 있다(Glenis *et al.*, 2013; Quiroga *et al.*, 2013; Kosukhin *et al.*, 2015; Brettschneider *et al.*, 2015; Siuta *et al.*, 2016).

분포형 모형의 실행시간은 유출해석 영역을 세분화한 해상도와 밀접한 관계가 있다. 해상도가 낮아질 경우에는 대유역에 대해서도 신속한 유출해석이 가능하지만, 해상도가 높아질 경우

에는 작은 유역에서도 격자의 개수가 많아지므로 유출해석 시간은 길어진다. 대유역을 하나의 도메인으로 설정하고 분포형 모형을 이용하여 고해상도 유출해석을 수행할 경우에는 실행시간이 길어지게 된다. 유출해석 실행시간을 줄이기 위해서는 일반적으로 저해상도의 자료를 적용하거나(Kim *et al.*, 2011; Choi *et al.*, 2012; Glenis *et al.*, 2013; Noh *et al.*, 2014) 병렬 계산을 하게 된다(Chung *et al.*, 2010; Park, 2014; Jung *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017). 그러나 저해상도의 자료를 적용할 경우 강우레이더와 같은 고해상도 수문자료의 공간분포 특성이 적절하게 반영될 수 없을 뿐 아니라, 고해상도의 원시 공간자료의 불확실성이 커지게 됨으로써 분포형 모형으로부터 얻을 수 있는 장점이 줄어들게 된다(Blöschl and Sivapalan, 1995; Young, 2006; Muleta *et al.*, 2007; Vivoni *et al.*, 2007). 반면 대유역을 다수의 소유역으로 분할하고 각 소유역을 독립된 프로세스로 유출해석을 수행할 경우에는 대유역을 하나의 도메인으로 해석하는 경우에 비해서 고성능의 전산자원이 필요하지만, 계산 시간을 줄이면서 고해상도 유출해석이 가능할 뿐만 아니라 소유역별로 모형을 보정할 수 있으므로 유출해석 결과를 향상시킬 수 있다(Andersen *et al.*, 2001; Ajami *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2015).

고성능의 전산장비를 이용한 유출해석시스템 구축을 위해서는 시스템 성능에 상대적으로 큰 영향을 미치는 CPU, 디스크, RAM 등의 구성과 이를 효과적으로 이용할 수 있는 소프트웨어의 개발이 필요하다. 그러므로 유출해석시스템을 구축하기 전에 시스템 구성 시나리오별로 다양한 평가가 필요하며, 이를 기반으로 최적화된 성능을 얻을 수 있는 시스템 구축 전략을 수립해야 한다. 클라우드 서비스에서는 다양한 전산자원을 손쉽게 선택하여 사용할 수 있는 환경을 제공하고 있으며, 이러한 측면에서 시스템 구축 전략을 시나리오별로 평가하기에 적합하다고 할 수 있다. 외국의 경우 PaaS(Platform as a Service),

IaaS(Infrastructure as a Service) 등과 같은 다양한 클라우드 서비스를 수자원분야에 활용하기 위한 연구가 진행 중이다(Demir *et al.*, 2014; Siuta *et al.*, 2016). 우리나라의 경우 홍수해석 등과 같이 많은 계산을 필요로 하는 요소 기술에 대해서는 주로 상용 클라우드 서비스 보다는 클러스터 컴퓨터 혹은 슈퍼컴퓨터와 같은 HPC를 이용하는 연구가 진행되었다(Chung *et al.*, 2010; Park 2014). 최근에는 IaaS를 중심으로 수자원 통합관리분야에서 클라우드 서비스를 이용하기 위한 연구가 진행되고 있으나(Kim *et al.*, 2015; Jung *et al.*, 2016), 분포형 모형의 적용과 같이 대용량 계산을 포함하는 홍수예측시스템 등에서의 클라우드 컴퓨팅의 적용에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 대유역에서 시공간적으로 고해상도 자료를 이용하는 분포형 모형을 이용한 유출해석을 수행하기 위한 클라우드 컴퓨팅의 적용에 대한 연구를 수행하였다. 실시간 자료 서버와 웹 프론트 엔드 및 Azure를 네트워크로 연결하여 실시간 유출해석시스템을 개발하였다. 이때 많은 계산을 필요로 하는 분포형 강우-유출 모형을 이용한 유출해석 부분을 Azure를 이용하여 수행할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 본 연구에서는 이와 같은 실시간 유출해석시스템의 개발 방법론을 제시하고, 시스템의 성능을 평가하고자 한다.

연구방법

1. 유출모형

본 연구에서는 물리적 분포형 강우-유출 모형인 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model) 모형을 적용하였다. GRM 모형은 실시간 유출해석시스템 구축을 위한 라이브러리인 GRM RT(cRTStarter 클래스)를 제공하고 있으며(Choi and Kim, 2017), 본 연구에서는 이를 이용하여 낙동강 유출해석시스템을 개발하였다. GRM RT에서는 실시간으로 제공되는 강우자료와 저수지 방류량 자료를 이용하여 실시간 유출해석

을 수행한다. 또한 GRM RT는 상하류로 연결된 다수의 소유역에 대해서 개별적으로 유출모형을 구축하고, 각 소유역의 유출해석 결과를 동적으로 연동시켜서 전체 유역의 유출해석을 수행할 수 있는 기법(소유역 연계 다지점 보정기법)을 제공한다(Choi and Kim, 2017).

‘소유역 연계 다지점 보정기법’을 적용할 경우에는 소유역별로 각기 다른 자료와 공간 해상도를 적용할 수 있다. 또한 각 소유역에 대해 개별적으로 모형을 보정할 수 있기 때문에 유역 전체를 하나의 모형으로 구축하는 것에 비하여 소유역의 수문학적 특성을 잘 반영할 수 있는 장점이 있다. 그리고 각 유역의 유출해석은 독립적인 프로세스로 병렬로 계산되므로 대유역에서 고해상도 유출해석을 할 경우에도 실행시간을 단축시킬 수 있다(Choi *et al.*, 2012).

2. Azure

클라우드 서비스를 이용하여 대용량의 계산이 필요한 S/W 시스템을 평가할 경우 고가의 장비 구입 전에 다양한 사양의 전산자원을 이용해서 목표 시스템을 시범 적용할 수 있으며, 이 과정에서 시스템의 병목요인을 평가하고 개선할 수 있다. Azure는 마이크로소프트에서 제공하는 클라우드 서비스로 SaaS(Software as a Service), PaaS, IaaS 등의 서비스를 제공한다. Azure에서는 전산자원 요소(CPU, 디스크, RAM 등)를 조합하여 다양한 성능의 전산자원 서비스를 사용할 수 있다. 본 연구에서는 Azure에서 제공하고 있는 3개의 가상머신(VM, Virtual Machine) 인스턴스(표 1)를 이용해서 유출해석시스템의 성능을 평가하였다. 유출해석 모형의 실행속도와 이에 직접적으로 영향을 미치는 3가지 항목(디스크 I/O 사용률, RAM 사용량, CPU 사용률)을 평가하였다.

3. 대상 유역

낙동강 유역의 면적은 약 23,384km²이고 유로 연장은 약 510km로 우리나라에서 가장 긴 유로 연장과 두 번째로 큰 유역면적을 가지고 있다. 낙동강은 강원도 태백시에서 발원하여 부산을 거쳐 남해안으로 유입된다. 낙동강으로 유입되는 주요 지류로는 반변천, 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강, 양산천 등이 있으며, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 영주댐 등을 포함하고 있다.

낙동강 분류의 경우 보와 하구언에 의해서 통제되고 있으므로 분포형 강우-유출 모형인 GRM을 이용해서 홍수량을 예측하기 어려운 문제가 있다. 또한 낙동강 분류구간은 홍수통제소 홍수 예보시스템에서 수리학적 모형이 구축된 구간이다. 그러므로 본 연구의 유출해석은 지류의 홍수량을 계산하는 것을 주요 대상으로 하였다.

그림 1과 표 2는 본 연구에서 적용한 유역 분할과 각 유역에서의 모형보정을 위한 수위관측소 지점을 나타낸 것이다. 낙동강의 주요 지류 13개(분류 중 구담 수위관측소 상류, 감천, 금호강, 남강, 내성천, 밀양강, 병성천, 양산천, 영강, 위천, 청도천, 황강, 회천)와 주요 댐 4개(남강댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐) 및 분류 구간을 3개로 나누어 총 20개의 소유역을 분할하였다. 이때 분류 구간의 3개의 유역(구미 유역, 이방 유역, 낙동강 하류 유역)은 상하류가 연결된 소유역간 연계를 위해 사용되었으며, 모형 보정 대상에서는 제외되었다.

모형의 보정을 위한 수위관측소는 1) 유량측정 및 관측자료의 품질관리가 지속적으로 이루어지는 지점, 2) 분류 하천 및 조위에 의한 배수영향이 없는 지점 혹은 배수의 영향이 있으나 자동유량 측정이 이루어지는 지점, 3) 상기 조건을 만족하는 관측소 중 가장 하류부에 있는

TABLE 1. Azure VM instances used in this study

Instance	OS	CPU	Core number	RAM (GB)	Disk (GB)
F8S	Windows 10 Enterprise KN 64bit	2.4 GHz Intel Xeon	8	16	SSD 16
F16S	Windows Server 2012 R2	E5-2673 v3 (Haswell)	16	32	SSD 32
DS15 v2	Windows Server 2012 R2		20	140	SSD 40

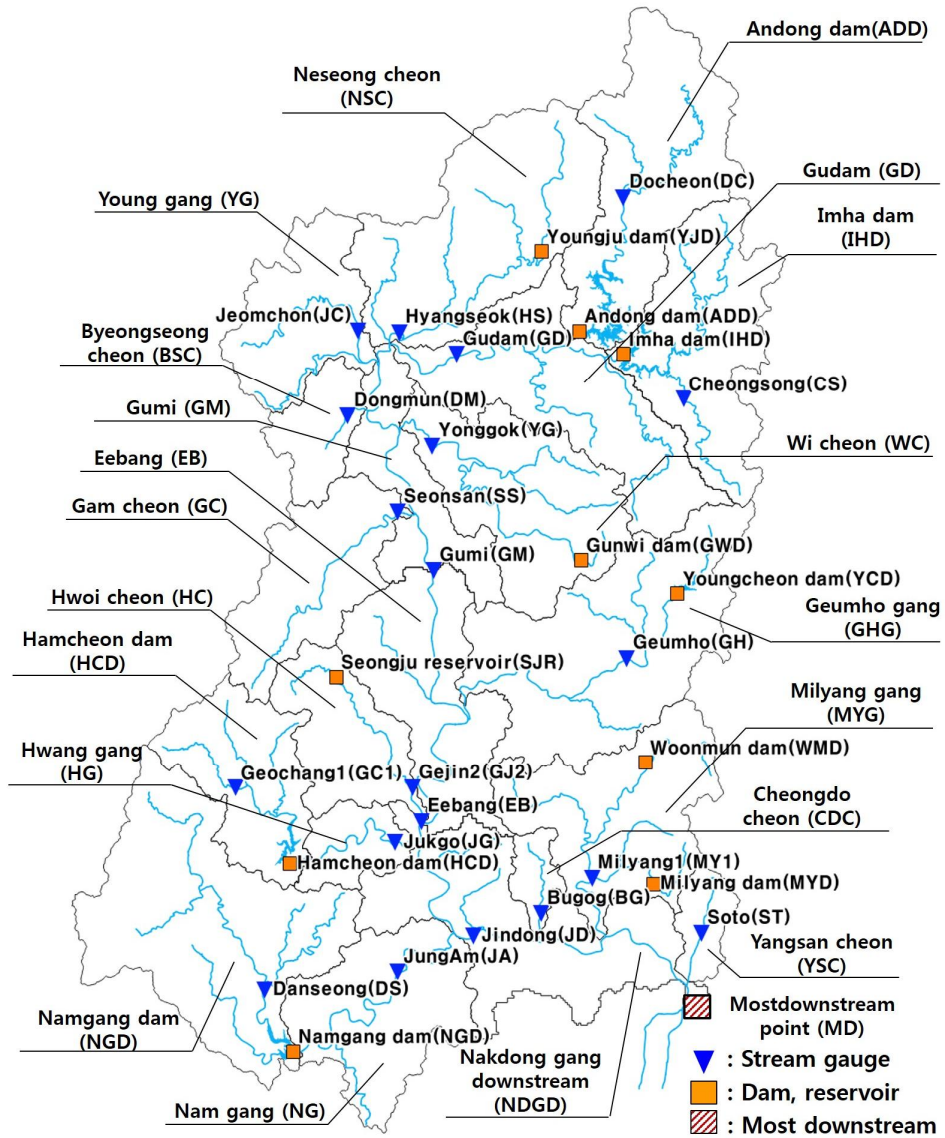


FIGURE 1. Watersheds and stream gauges for model calibrations

지점을 기준으로 선정하였다(KICT, 2015). 표 2에서 ‘청송’과 ‘거창1’을 제외한 모든 모형 보정 지점은 유량조사사업단에서 지속적으로 유량측정과 품질관리가 이루어지는 수위관측소이다. 또한 ‘청송’과 ‘거창1’ 수위관측소는 한국수자원공사에서 운영하고 있으며 임하댐 유역과 합천댐 유역내 배수영향이 없으면서 가장 큰 유

역면적을 가지는 수위관측소이다. 구담, 황강, 남강댐, 내성천, 회천, 위천, 금호강, 밀양강 유역은 상류에 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 영주댐, 성주저수지, 군위댐, 영천댐, 밀양댐, 운문댐이 있으며, 댐의 직하류 유량은 댐방류량에 의해 조절된다.

TABLE 2. Summary of watersheds and stream gauges for model calibrations

Watershed name		Calibration stream gauge name		Upstream flow control	Stream classification
Abbrev.	Full name	Abbrev.	Full name		
ADD	Andong dam	DC	Docheon	-	Upstream of dam
BSC	Byeongseong cheon	DM	Dongmun	-	Tributary
CDC	Cheongdo cheon	BG	Bugog	-	Tributary
GC	Gam cheon	SS	Seonsan	-	Tributary
GD	Gudam	GD	Gudam	ADD, IHD	Tributary
GHG	Geumho gang	GH	Geumho	YCD(Youngcheon dam)	Tributary
HC	Hwoi cheon	GJ2	Gejin2	SJR(Seongju reservoir)	Tributary
HCD	Hamcheon dam	GC1	Geochang1	-	Upstream of dam
HG	Hwang gang	JG	Jukgo	HCD	Tributary
IHD	Imha dam	CS	Cheongsong	-	Upstream of dam
MYG	Milyang gang	MY1	Milyang1	MYD(Milyang dam) WMD(Woonmun dam)	Tributary
NG	Nam gang	JA	JungAm	NGD	Tributary
NGD	Namgang dam	DS	Danseong	-	Upstream of dam
NSC	Neseong cheon	HS	Hyangseok	YJD(Youngju dam)	Tributary
WC	Wi cheon	YG	Yonggok	GWD(Gunwi dam)	Tributary
YG	Young gang	JC	Jeomchon	-	Tributary
YSC	Yangsang cheon	ST	Soto	-	Tributary
GM	Gumi	GM	Gumi	-	Main stream
EB	Eebang	EB	Eebang	-	Main stream
NDGD	Nakdong gang downstream	JD	Jindong	-	Main stream

4. 적용자료

낙동강 유출해석시스템 구축을 위해서는 GRM 입력자료 구축을 위한 공간자료와 실시간 강우자료 및 유량자료가 필요하며, 표 3과 같다. 본 연구에서는 HyGIS를 이용하여 DEM으로부터 유역 영역, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망, 경사 자료를 생성하였으며, 환경부 대분류 토지피

복도, 정밀토양도를 이용하여 GRM 입력자료를 구축하였다. 유출해석을 위한 강우자료는 한강 홍수통제소로부터 WINS를 통해서 실시간으로 수신되는 강우레이더자료로 전국 합성의 보정된 10분 간격의 RKDP 자료(HSR-RKDP)를 이용하였다. 하천 유량 자료는 모형을 보정하는데 사용되며, 댐방류량 자료는 댐 하류부분의 유출 해석을 위한 상류단 경계조건으로 적용된다.

TABLE 3. Geographic and hydrologic data summary of this study

Classification	Data	Data type	Remark
Geographic data	Land cover map	Raster	Classified into 7 GRM input data(land cover data)
	Detailed soil map	Polygon	GRM input data(soil texture and soil depth data)
	DEM	Raster	Used in drainage analysis and making GRM input raster data(watershed, flow direction, flow accumulation, stream, slope)
Hydrologic data	Rainfall radar data	Raster	GRM input rainfall data HSR-RKDP(composite and calibrated 10 min. data)
	Discharge data	text	Used in model calibration and boundary condition Stream discharge and dam outflow

실시간 유출해석시스템 개발

1. 모형 구축

본 연구에서는 낙동강 유출해석시스템 구축을 위해 낙동강 유역을 20개의 유역으로 분할하고 각 유역에서 GRM 모형을 구축하였으며(표 4), 각 유역 간의 연계 체계는 그림 2와 같다(KICT, 2016). 20개 유역은 각기 다른 해상도를 적용할 수 있으며, 각 유역의 격자 개수는 본 연구에서의 시스템 성능 평가 시 함께 논의될 것이다. 모형보정 지점은 각 유역의 최하류 격자보다 상류에 위치하며, 모형보정 지점에서의 계산결과와 관측 유량을 이용하여 모형을 보정한다. 각 유역 최하류 격자에서의 계산결과는 해당 유역의 하류에 연결된 유역에서의 상류단 경계조건으로 사용된다.

본 연구에서는 영주댐을 제외한 9개 댐의 방류량을 하류 유역의 Inlet에 적용하였으며, 각 댐의 방류량이 하류 유역에서의 상류단 경계조

건으로 적용된다. 영주댐의 경우 향후 추가 연구에서 반영할 예정이다. 8개 댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 군위댐, 영천댐, 밀양댐, 운문댐)은 관측 방류량을, 성주저수지는 Auto ROM(Reservoir Operation Rule)을 이용하여 계산된 유량을 하류 유역의 inlet으로 적용하였다. 9개의 댐 유역 중 비교적 유역면적이 큰 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐의 4개 유역은 별도의 모형을 구축하여 유출해석을 수행하지만, 계산된 유량이 하류로 전달되지는 않는다. 상기 4개의 댐 유역을 제외한 5개의 댐(군위댐, 영천댐, 밀양댐, 운문댐, 성주저수지) 유역은 별도의 모형을 구축하지 않았으며, 유출해석 영역에서 제외된다.

2. 유출해석시스템 개발

본 연구에서 개발한 낙동강 실시간 유출해석시스템의 구성은 그림 3과 같다. 실시간 유출해석시스템은 실시간 자료 수신 부(KICT 서버), 유

TABLE 4. Summary of GRM model settings

Watershed name	Resolution(m)	Grid number to be simulated	Upstream flow control name(type)	Connected downstream watershed
ADD	500	6,398	-	Not connected
BSC	300	4,903	-	GM
CDC	300	2,012	-	NDGD
GC	300	11,293	-	GM
GD	500	6,020	ADD, IHD (Inlet)	GM
GHG	500	7,412	YCD (Inlet)	EB
HC	300	8,648	SJR (Auto ROM)	EB
HCD	300	10,640	-	Not connected
HG	300	4,012	HCD (Inlet)	NDGD
IHD	500	5,348	-	Not connected
MYG	300	11,391	MYD, WMD (Inlet)	NDGD
NG	500	4,725	NGD (Inlet)	NDGD
NGD	500	9,056	-	Not connected
NSC	500	7,286	- (YJD was not applied)	GM
WC	500	5,358	GWD (Inlet)	GM
YG	300	10,220	-	GM
YSC	300	2,748	-	NDGD
GM	500	13,014	GD, BSC, GC, NSC, WC, YG (inlet)	EB
EB	500	5,070	GM, GHG, HC (inlet)	NDGD
NDGD	500	6,415	EB, CDC, HG, MYG, NG, YSC (inlet)	-

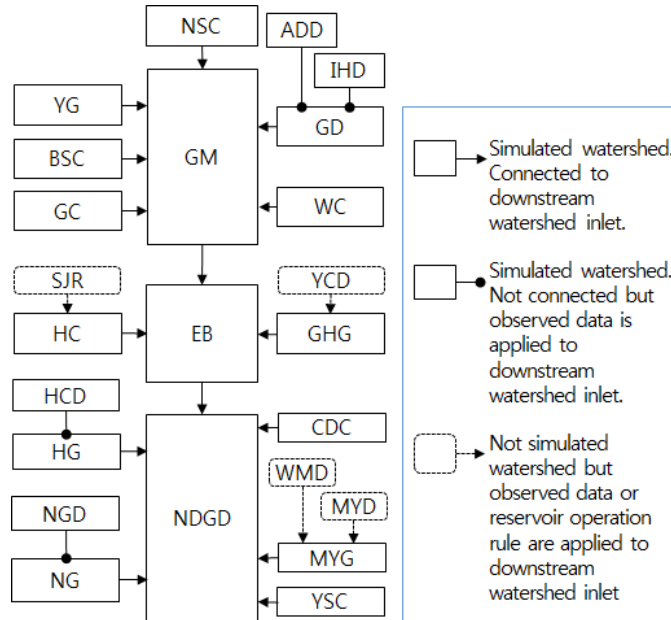


FIGURE 2. Watersheds connection system

출계산 부(Azure) 및 웹 프론트 엔드로 구성된다. 실시간 유출해석을 위해 사용되는 수문자료는 물관리정보유통시스템(Water Management Information System, WINS)으로부터 실시간으로 자료를 수신하고 있는 한국건설기술연구원(KICT)의 서버를 이용하였다(KICT, 2016).

WINS로부터 수신된 자료 중 강우레이더 자료와 하천 및 댐 유량 자료를 FTP를 이용해서 Azure로 전송한다. 강우레이더 자료는 Azure에서 본 연구의 20개 소유역 영역에 맞게 클리핑과 리샘플링 과정을 거친 후 각 유역의 데이터 폴더에 저장되며, 유출해석에 이용된다. 댐방류량 자료와 하천 유량 자료는 Azure의 데이터베이스에 저장된다. 이 중 댐방류량 자료는 유출해석시 이용되고, 하천 유량은 웹 프론트 엔드에서 유출해석 결과와 함께 그래프로 표시된다.

본 연구에서 구축한 낙동강 유역 유출해석 모형은 Azure에 설치하였다. 20개 유역을 연계하여 실시간으로 유출해석을 수행하기 위해서 GRM 모형의 실시간 유출해석 라이브러리인 GRM RT를 이용하여 실시간 유출해석시스템을 개발하였

다. GRM RT는 cRTStarter, cRealTime 등과 같이 실시간 유출해석을 위한 클래스로 구성된다. cRTStarter에서는 실시간 유출해석시스템 개발을 위한 API(Application Programming Interface)를 제공하며, 표 5와 같다(Choi and Kim, 2017). GRM 모형의 실시간 유출해석을 위해서는 REF(Real time simulation Environment File)이 필요하다. REF 파일에는 대상 유역의 GRM 유출해석 프로젝트 파일(.gmp), 상하류 유역의 연결정보, 자료의 시간간격, 초기유량 등을 명시하고 있다. 본 연구의 낙동강 유출해석시스템은 20개 유역의 REF 파일을 이용해서 각 유역을 연계한 유출해석 정보를 설정하고 유출모의를 수행한다(그림 3의 Azure 부분). Azure에서는 실시간 수문자료를 이용해서 유출해석을 수행하고, 계산 결과를 Azure의 자료 데이터베이스에 저장한다. 그러므로 표 1에서 제시된 Azure의 VM 인스턴스에 따라서 유출계산에 사용되는 전산자원의 구성이 달라지며, 본 연구에서는 이에 대한 유출해석시스템의 성능을 평가하였다.

웹 프론트 엔드에서는 사용자 PC에서 웹페이

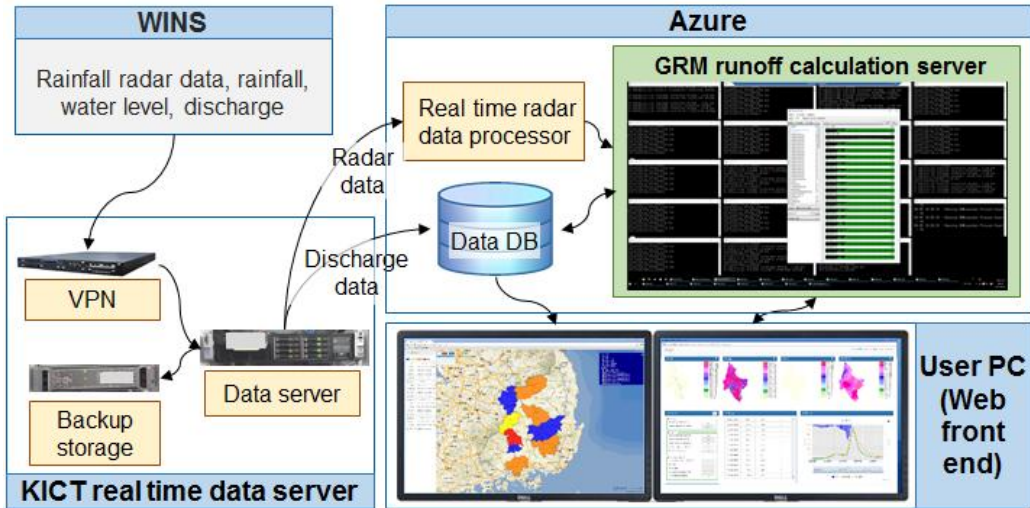


FIGURE 3. Real time runoff analysis system schematic diagram

TABLE 5. APIs provided by cRTStarter

Name	Usage
New(fpn_REF As String)	Create new object - fpn_REF : REF file path and name
SetUpAndStartGRMRT()	Start real time simulation
StopRTsimulation()	Stop real time simulation
UpdateWSPars(wsid As Integer, iniSat As Single, minSlopeChannel As Single, roughnessChannel As Single, soilHydraulicCond As Single, applyIniFlow As Boolean, Optional iniFlow As Single = 0)	GRM parameters update in memory - wsid : sub-watershed ID - iniSat : initial soil saturation - minSlopeChannel : minimum slope of channel bed - roughnessChannel : channel roughness coefficient - soilHydraulicCond : soil hydraulic conductivity - applyIniFlow : apply initial stream flow or not - iniFlow : initial stream flow value
SaveParsToProjectFile()	Save GRM parameters to GRM project file

지를 통하여 Azure 서버에 있는 유출해석 모형을 제어할 수 있으며, 지도와 함께 유출해석 결과를 확인할 수 있다. 유출해석 모형에 대해서는 표 5에서 제시된 유출해석의 시작, 종료, 매개변수 수정 및 저장 등을 실행시킬 수 있다. 웹 프론트 엔드는 공간정보 오픈플랫폼(브이월드, map.vworld.kr)과 OGC(Open Geospatial Consortium) 웹 GIS 표준을 이용하여 바탕 지도를 구현하였으며(Yoon and Lee, 2016), 20개 유역의 폴리곤, 관측소 등의 수문학적 정보

를 중첩하였다. 공간정보 오픈플랫폼을 이용하여 지도를 구성함으로써 지도의 확대 축소 및 주제도 설정에 따라서 다양한 유역 정보의 가시화가 가능하였다. 또한 이를 통해서 대상 유역의 지형, 시설물, 도시화 여부 등과 같은 다양한 지도 정보와 관측소 및 유출해석 결과를 함께 제시할 수 있었다. 유역 폴리곤을 선택하면 유량, 토양포화도, 강우의 분포 및 수문곡선과 같은 유역별 상세 유출해석 결과를 조회할 수 있다(그림 3의 User PC 부분).

유출해석시스템 성능평가

본 연구에서는 표 4에서와 같이 구성된 유역을 이용해서, 표 1에서 제시된 Azure VM 인스턴스별 유출해석시스템의 성능을 평가하였다. 이때 사용된 GRM 모형의 버전은 'v.GRM2017'이다. 표 4에서 제시된 20개 유역은 모두 독립된 GRM 모형으로 구축되었으며, 이에 따라 독립된 프로세스로 동시에 실행된다. 하나의 유역(하나의 모형)에서의 병렬계산은 적용하지 않았다('IsParallel=false' 옵션 적용). 강우자료는 2012년 9월 17일 경에 발생된 사상으로, 강우레이더 자료를 각 유역별 영역과 해상도에 맞게 클리핑과 리샘플링해서 저장된 자료를 적용하였다. 그러므로 본 성능평가에서는 강우자료 전처리에 소요되는 전산자원 평가는 제외되었으며, 단지 유출해석에 소요되는 전산자원만 평가하였다. GRM 모형의 계산시간 간격(dt)은 모든 유역에서 5분으로 고정된 값을 적용('IsFixedTimeStep=true' 옵션 적용)하였으며, 모의 기간은 24시간(2012년 9월 17일 00시 00분~9월 17일 23시 50분)으로 하였다. 표 1에서 제시된 Azure VM 인스턴스별 사용된 전산자원에 대한 평가와 유역별 유출해석에 소요된 시간의 근사값은 표 6과 같다.

1. 전산자원 평가

표 6에서 20개 유역 유출해석 프로세스는 DS15 v2 인스턴스(CPU 코어 20개)를 적용하였을 때 CPU 점유율이 90% 이하로 작아졌다. 그러므로 단일 유역에서의 병렬계산을 적용하지 않을 경우, CPU 코어에서의 병목을 해소하기 위해서는 하나의 유출해석 프로세스에 하나 이상의 CPU 코어를 적용하는 것이 안정적인 것으로 나타났다. 또한 CPU 코어 수가 늘어날 경우, RAM 사용량도 일부 증가하였으나 큰 변화가 있지는 않았다. 이는 CPU 코어 수가 증가함에 따라 동시에 계산되는 양이 늘어나고, 이에 따라 메모리 사용량도 함께 증가할 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

유출해석 프로세스의 실행 시에는 유출해석에 필요한 자료를 디스크로부터 읽고, 계산결과를 디스크에 기록하는 디스크 입출력(Disk I/O)이 발생한다. 본 연구에서는 입력(유역 자료, 강우자료, 유량자료 DB)과 출력(모형 계산결과와 텍스트 파일, 래스터 그림 파일, DB 기록)을 C: 드라이브 디스크 하나만을 이용하였을 경우와 출력 중 텍스트 파일과 래스터 그림 파일 쓰기를 D:를 이용하였을 경우로 구분하여 평가하였다. 두 경우 모두 디스크 입출력 점유율은 100% 미만의 값을 나타내었으나, C:와 D:로 분산했을 경우가 실행시간을 단축시킬 수 있었다. 그러므로 유출해석시스템의 디스크 입출력 병목을 줄이기 위해서는 적절한 입출력 배분이 필요한 것으로 평가되었다.

2. 실행시간 평가

표 6에서 Azure VM 인스턴스별 실행시간 평가에서는 코어의 개수가 가장 많은 DS15 v2에서 가장 적은 시간이 소요되었다. 즉 디스크 입출력을 분할했을 경우, 20개 유역 전체를 모의하는데 F8S, F16S, DS15 v2에서 각각 2.13분, 1.60분, 1.50분이 소요되었다. 본류 구간은 상류 유역이 계산시간 간격(dt)마다 계산된 이후에 그 결과를 이용해서 유출모의가 수행되며, 상류 유역의 계산 소요시간에 종속적이다. 그러므로 유역별 실행시간 평가에서는 본류 구간 3개 유역(GM, EB, NDGD)을 제외한 17개 유역에 대해서 평가하였다. 17개 유역의 평균 실행시간은 F8S, F16S, DS15 v2에서 디스크 입출력을 분할했을 때 각각 1.58분, 0.93분, 0.85분이 소요되었다.

DS15 v2에서는 CPU, RAM, 디스크 입출력 점유율이 모두 90% 이하이므로, 17개 유역에서 각기 다른 실행시간이 소요되는 것은 유역별 격자 개수와 유역 시스템 구성의 영향이 지배적이라고 할 수 있다. 그림 4는 디스크 입출력을 분할한 경우에 17개 유역에 대한 격자 개수와 DS15 v2를 이용한 실행시간을 나타낸 것이며, 격자의 개수가 많아질수록 실행시간은 점차적으

TABLE 6. Assessment of CPU, memory(RAM), and disk I/O occupations approximations and time spent during 24 hours simulation using each Azure VM instance

Classification	Instance name	F8S		F16S		DS15 v2		
	Disk I/O	C:	C:, D:	C:	C:, D:	C:	C:, D:	
CPU, RAM, disk I/O occup.	RAM (GB)	6.2	5.5	3.8	4.0	5.9	5.9	
	CPU (%)	90	100	75	97	70	85	
	Disk I/O(%)	C:	45	20	70	30	70	75
		D:	0	1	0	1	0	2
Time spent for each wat. (min)	Tributary watershed	ADD	1.68	1.45	1.30	0.93	1.20	0.83
		BSC	1.45	1.13	1.07	0.60	0.93	0.58
		CDC	1.17	1.08	0.82	0.45	0.65	0.40
		GC	2.03	1.73	1.72	1.27	1.58	1.22
		GD	1.02	1.08	0.87	0.50	0.65	0.42
		GHG	2.03	1.73	1.37	0.95	1.18	0.80
		HC	2.10	1.88	1.63	1.22	1.48	1.13
		HCD	2.22	1.98	1.72	1.28	1.57	1.22
		HG	1.75	1.57	1.10	0.70	0.98	0.62
		IHD	1.82	1.33	1.22	0.85	1.12	0.75
		MYG	2.40	2.12	1.95	1.57	1.82	1.48
		NG	1.48	1.37	1.15	0.70	1.02	0.63
		NGD	2.10	1.85	1.53	1.13	1.42	1.07
		NSC	1.78	1.72	1.32	0.92	1.22	0.83
	WC	1.92	1.70	1.32	0.90	1.15	0.78	
	YG	2.25	2.02	1.78	1.38	1.63	1.32	
	YSC	1.02	1.07	0.83	0.47	0.70	0.42	
	Ave.	1.78	1.58	1.33	0.93	1.19	0.85	
	Mainstream watershed	GM	2.27	2.02	1.80	1.38	1.65	1.33
		EB	2.28	2.03	1.83	1.40	1.67	1.35
NDGD		2.42	2.13	1.98	1.60	1.85	1.50	

로 증가되는 것을 알 수 있다. DS15 v2에서 가장 긴 실행시간을 나타내는 밀양강 유역 (MYG, 1.48분)의 격자 개수는 11,391개이며, 1만개 이상의 격자 개수를 가지는 감천 유역은 11,293개(GC, 1.22분), 합천댐 유역은 10,640개(HCD, 1.22분), 영강 유역은 10,220개(YG, 1.32분)을 나타내어 각각 상대적으로 긴 실행시간을 나타내었다. 또한 두 개의 inlet을 포함하기 때문에 유량 DB로부터 자료를 읽어오는 횟수가 많은 구담 유역(GD, 0.42분)과 밀양강 유역(지류 17개 유역 중 다른 유역은 inlet을 1개 이하로 포함함) 중 구담 유역은 다른 유역에 비해 짧은 실행시간을 가지고 있다. 그러므로 DB로

부터의 자료 입력에 소요되는 시간은 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

본류 구간 유역인 구미(GM), 이방(EB), 낙동강하류(NDGD) 유역은 연결된 상류 유역의 실행시간에 영향을 받는다. 구미 유역은 영강 유역(YG, 1.32분), 이방 유역은 구미 유역(1.33분), 낙동강하류 유역은 밀양강 유역(1.48분)에 의존하여 실행시간이 각각 1.33분, 1.35분, 1.50분이 소요되었다. 그러므로 전체 유역의 실행시간은 영강과 밀양강 유역의 실행시간에 의해 결정되었으며, 향후 추가적인 실행속도 향상을 위해서는 이 두 유역에서 우선적으로 성능개선을 해야 함을 알 수 있다.

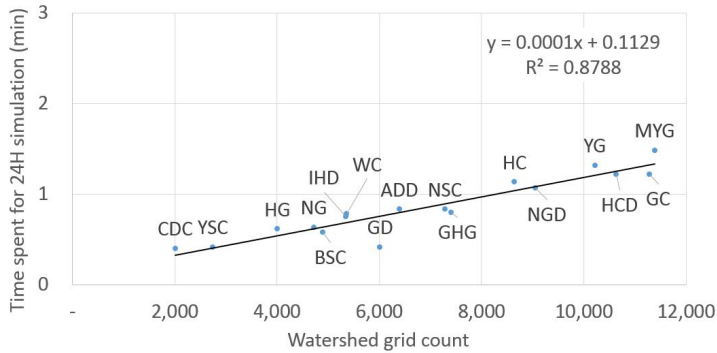


FIGURE 4. Grid numbers of 17 watersheds and time spent for 24 hours simulations using DS15 v2

결론

본 연구는 고해상도의 시공간 자료를 활용하는 분포형 모형을 이용한 대유역 유출해석시스템 구축을 위한 시스템 구성 및 실행속도 위주의 성능 평가에 대해서 수행되었다. 대유역에 대해서 고해상도 분포형 모형을 이용하여 유출해석을 수행할 때는 대용량의 계산이 필요하다. 본 연구에서는 대용량 계산에 필요한 전산자원의 유연한 평가를 위해서 마이크로소프트의 클라우드 서비스인 Azure를 이용하였다. 연구결과 전산자원의 적절한 확보와 이를 효과적으로 활용하기 위한 소프트웨어적 방안이 마련될 경우, 분포형 모형을 이용한 유출해석시스템의 실행시간을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

연구결과 실시간 자료 수신서버 노드와 Azure를 이용한 계산 노드, 사용자 노드(PC 웹 프론트 엔드)가 연계된 실시간 유출해석시스템을 구축할 수 있었다. PC에서 웹 페이지를 통해서 실행되는 웹 프론트 엔드는 공간정보 오픈플랫폼을 이용하였다. 이를 통하여 유출해석시스템의 결과와 함께 다양한 지도정보를 함께 제공함으로써 유역의 상황을 직관적으로 제시할 수 있었다. 또한 웹 프론트 엔드는 유출해석시스템의 제어와 결과 조회를 위해서 계산 노드와 네트워크로 연결되므로, 저성능의 PC에서도 어디에서나 손쉽게 유출해석시스템에 접근할 수 있었다. 고성능 전산장비의 사전 평가를 위해서 전

산장비의 사양을 손쉽게 변경할 수 있는 Azure를 이용하였다. 이를 통해서 실제 장비의 구축 없이도 대용량 계산에 필요한 전산자원의 다양한 평가가 가능하였다.

분포형 모형을 이용한 유출해석시스템 구축 시 시스템 실행에 소요되는 시간을 줄이기 위해서는 유역시스템 구성과 이를 이용한 유출해석 소프트웨어 시스템에서 병목이 발생하지 않도록 전산장비(하드웨어)를 구축해야 한다. 또한 하드웨어 측면에서 더 이상 실행시간을 단축하기 어려운 경우에는 다시 유역시스템 구성과 병렬 계산 등과 같은 소프트웨어 부분에서의 개선이 이루어져야 한다. 우선 본 연구에서 제시된 유역체계를 이용하여 낙동강 유출해석시스템을 구축할 경우의 전산자원 평가에서는 디스크 입출력과 CPU를 분산함으로써 이에 따른 병목을 해소할 수 있었다. 즉, CPU의 코어 개수가 많아지고, 디스크 입출력을 분산할 경우 실행시간은 감소하였다. Azure에서는 전산자원 서비스를 지속적으로 확대하고 있으므로, 향후에는 좀 더 다양한 전산자원을 이용한 시스템 평가가 가능할 것으로 사료된다.


실행시간을 단축시키기 위한 소프트웨어적 방안으로는 먼저 유역의 해상도를 낮추어서 유출 모형에서 계산되는 격자의 개수를 감소시킴으로써 실행시간을 단축시킬 수 있다. 본 연구에서는 합천댐, 감천, 밀양강, 영강 유역에 대해서 우선 적용할 수 있을 것이다. 또한 추가적인 CPU를 사용할 수

있을 경우에는 유역을 추가로 분할하거나, 하나의 유역 내에서도 병렬계산을 적용하여 유출해석을 함으로써 실행시간을 단축할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 유출해석 모형 개선, 유역 구성, 유출해석시스템 구축 및 성능 평가를 통한 시스템 최적화 등의 과정을 반복적으로 수행하였다. 이러한 연구과정에서 파일 기반의 수문자료 활용시스템 보다는 DB 기반의 시스템이 안정적인 것으로 평가되었다. 또한 유출해석시스템의 성능을 다각도로 평가함으로써 병목요인의 분석과 이의 해소를 위한 노력이 지속적으로 필요한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 시스템의 실행속도를 중심으로 성능을 평가하였으며, 유출해석시스템의 모형 보정 및 정확성 평가에 대해서는 영주댐 유역의 구축, 강우레이더 자료의 적용성 평가 등 추가적인 연구가 진행 중이다. 본 연구에서 제시된 시스템 성능은 계산결과와 출력 옵션, 전산자원 요소별 사양 등에 따라서 가변적일 수 있다. 본 연구의 결과는 고해상도의 시공간 자료를 사용하는 분포형 모형을 이용하여 대유역의 실시간 유출해석시스템을 구축할 때 시스템 구성 및 전산자원의 평가에 참고할 수 있을 것이다. 또한 다양한 GIS 기술을 이용해서 구축되는 고해상도의 시공간 자료의 유출해석 분야에 대한 활용성을 제고하는데 기여 할 수 있을 것이다.

감사의 글

WINS 구축에 도움을 주신 한강홍수통제소와 (주)토코넷, 낙동강 유출해석시스템 구축에 도움을 주신 (주)헤르메시스 안주영 책임연구원님과 유량 조사사업단에 감사드립니다. 

REFERENCES

- Ajami, N.K., H. Gupta, T. Wagener, and S. Sorooshian. 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for stream-flow estimation along a river system. *Journal of Hydrology* 298(1-4):112-135.
- Andersen, J., J.C. Refsgaard, and H.J. Jensen. 2001. Distributed hydrological modeling of the Senegal river basin—model construction and validation. *Journal of Hydrology* 247(3-4):200-214.
- Blöschl, G and M. Sivapalan. 1995. Scale issues in hydrological modeling: a review. *Hydrological Processes* 9(3-4):251-290.
- Brettschneider, M., B. Pfützner, and F. Fuchs-Kittowski. 2015. Cloud computing applied to calibration of flood simulation models. *Simulation Notes Europe: Technical Note* 25(3-4):171-177.
- Chen, Y., J. Li, H. Wang, J. Qin, and L. Dong. 2017. Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 21:735-749.
- Choi, Y.S., C.K. Choi, and K.T. Kim. 2012. Development of a multi-site calibration module of distributed model—the case of GRM. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(3):103-118 (최윤석, 최천규, 김경탁. 2012. 분포형 모형의 다지점 보정 모듈 개발—GRM 모형을 중심으로. *한국지리정보학회지* 15(3):103-118).
- Choi, Y.S., C.K. Choi, H.S. Kim, K.T. Kim, and S.J. Kim. 2015. Multi-site calibration using a grid-based event rainfall-runoff model: a case study of the upstream areas of the Nakdong River basin in Korea. *Hydrological Processes* 29(9):2089-2099.
- Choi, Y.S. and K.T. Kim. 2017. Grid based rainfall-runoff model user's manual for MapWindow GIS. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. pp.70-71 (최윤석, 김경탁. 2017. Grid based rainfall-runoff model user's manual for MapWindow GIS. 한국건설기술연구원. 70-

- 71쪽).
- Choi, Y.S., K.T. Kim, and J.H. Kim. 2012. Development and evaluation of a real time runoff modelling system using weather radar and distributed model. *Journal of Korean Wetlands Society* 14 (3):385-397 (최윤석, 김경탁, 김주훈. 2012. 기상레이더와 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석 시스템 개발 및 평가. *한국습지학회지* 14(3):385-397).
- Chung, S.Y., J.H. Park, Y.T. Hur, and K.S. Jung. 2010. Application of MPI technique for distributed rainfall-runoff model. *Journal of Korea Water Resources Association* 43(8):747-755 (정성영, 박진혁, 허영택, 정관수. 2010. 분포형 강우유출모형 병렬화 처리기법 적용. *한국수자원학회논문집* 43(8):747-755).
- Demir, I., S. Small, R. Goska, K. Keahey, P. Armstrong, P. Riteau, B. Seo, and R. Mantilla. 2014. Hydroinformatics on the cloud: data integration, modeling and information communication for flood risk management. *Proceedings of 11th International Conference on Hydroinformatics*, New York City, USA. Available at: http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/330/ (Accessed May 16, 2017).
- Hong, W.Y., G.A. Park, I.K. Jung, and S.J. Kim. 2010. Development of a grid-based daily watershed runoff model and the evaluation of its applicability. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 30(5B):459-469 (홍우용, 박근애, 정인균, 김성준. 2010. 분포형 유역 일유출 모형의 개발 및 적용성 검토. *대한토목학회논문집* 30(5B):459-469).
- Glenis, V., A.S. McGough, V. Kutija, C. Kilsby, and S. Woodman. 2013. Flood modelling for cities using cloud computing. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications* 2013 2:7.
- Jeon, B.K., C.K. Lee, and Y.S. Kim. 2012. Evaluation of rainfall measurement capability of dual polarization radar. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2):215-224 (전병국, 이충기, 김양수. 2012. 이중편파 레이더의 강우관측 능력 평가. *한국방재학회논문집* 12(2):215-224).
- Jung, D.H., J.H. Choi, and J.H. Kim. 2016. Application of parallel computation to water resources engineering. *Water for Future, Korea Water Resources Association* 49(3):75-83 (정동휘, 최지호, 김중훈. 2016. 병렬계산의 수자원공학에 적용. *한국수자원학회지: 물과미래* 49(3):75-83).
- Kang, M.G. and S.J. Park. 2012. Methodologies for incorporating smart water grid into water resources management considering the outlook for future water resources. *Proceedings of 2012 Conference for Korea Water Resources Association*. pp.785-789 (강민구, 박성제. 2012. 미래 수자원 전망을 고려한 스마트 워터 그리드 도입 방안. 2012 한국수자원학회 학술발표회 논문집 785-789쪽).
- KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). 2015. Development of flood/snowstorm disaster forecasting and warning platform based on hydrological radars. 3rd year research report. pp.205-220 (한국건설기술연구원. 2015. 수문레이더 기반 고해상도 홍수해석 기술 개발. 3차년도 연구보고서. 205-220쪽).
- KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). 2016. Development of flood/snowstorm disaster forecasting and warning platform based on hydrological radars. 4th year research report. pp.11-19 (한국건설기술연구원. 20

16. 수문레이더 기반 고해상도 홍수해석 기술 개발. 4차년도 연구보고서. 11-19쪽.
- Kim, Y.S., K.H. Chang, B.S. Kim, and H.S. Kim. 2011. Decision of GIS optimum grid on applying distributed rainfall-runoff model with radar resolution. *Journal of Korean Wetlands Society* 13(1):105-116 (김연수, 장권희, 김병식, 김형수. 2011. 레이더 자료의 해상도를 고려한 분포형 강우-유출 모형의 GIS 자료 최적 격자의 결정. *한국습지학회지* 13(1):105-116).
- Kim, D.Y., J.J. Lee, H.S. Chae, and E.H. Hwang. 2015. A study on the application of standard technology for integrated management of water hazard information platform. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(4):119-130 (김동영, 이정주, 채효석, 황의호. 2015. 수재해 정보 플랫폼 통합관리를 위한 표준기술 적용방안. *한국지리정보학회지* 18(4):119-130).
- Kosukhin, S.S., S.V. Kovalchuk, and A.V. Boukhanovsky. 2015. Cloud technology for forecasting accuracy evaluation of extreme metocean Events. *Procedia Computer Science* 51:2933-2937.
- Muleta, M.K., J.W. Nicklow, and E.G. Bekele. 2007. Sensitivity of a distributed watershed simulation model to spatial scale. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(2):163-172.
- Noh, S.J., S.W. Choi, Y.S. Choi, and K.T. Kim. 2014. Impact assessment of spatial resolution of radar rainfall and a distributed hydrologic model on parameter estimation. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34(5):1443-1454 (노성진, 최신우, 최윤석, 김경탁. 2014. 레이더 강우 및 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향 평가. *대한토목학회 논문집* 34(5):1443-1454).
- Park, J.H. 2014. Parallel flood inundation analysis using MPI technique. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(11):1051-1060 (박재홍. 2014. MPI 기법을 이용한 병렬 홍수침수해석. *한국수자원학회논문집* 47(11):1051-1060).
- Quiroga, V.M., I. Popescu, D.P. Solomatine, and L. Bociort. 2013. Cloud and cluster computing in uncertainty analysis of integrated flood models. *Journal of Hydroinformatics* 15(1):55-70.
- Siuta, D., G. West, H. Modzelewski, R. Schigas, and R. Stull. 2016. Viability of cloud computing for real-time numerical weather prediction. *American Meteorological Society* 31:1985-1996.
- Vivoni, E.R., D. Entekhabi, R.L. Bras, and V.Y. Ivanov. 2007. Controls on runoff generation and scale-dependence in a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences* 11:1683-1701.
- Yoon, G.S. and K.W. Lee. 2016. Application of OGC WPS 2.0 to Geo-Spatial Web Services. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(3):16-28 (윤구선, 이기원. 2016. 공간정보 웹 서비스에서 OGC WPS 2.0 적용. *한국지리정보학회지* 19(3):16-28).
- Young, A. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 320(1-2):155-172.
- Zhang X., R. Srinivasan, and M. Van Liew. 2008. Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE* 51(6):2039-2049.