

위성강우와 글로벌 지형 자료를 이용한 미계측 지역 홍수터 침수모의 : 두만강 도문/남양 지역을 중심으로*

최윤석¹ · 김주훈^{1*} · 김지성¹

Inundation Analysis on the Flood Plain in Ungauged Area Using Satellite Rainfall and Global Geographic Data: In the case of Tumen/Namyang Area in Duman-gang(Riv.)*

Yun-Seok CHOI¹ · Joo-Hun KIM^{1*} · Ji-Sung KIM¹

요 약

본 연구의 목적은 위성강우와 글로벌 지형자료를 이용하여 미계측 지역에 있는 홍수터에서의 홍수를 정량적으로 분석하기 위한 방법을 제시하는 것이다. 이를 위해서 두만강의 도문/남양 지역 홍수터에 대한 범람을 모의하고 대상 지역의 침수 상황을 정량적으로 분석하였다. 강우는 위성영상으로부터 유도된 강우 자료인 IMERG 자료를 이용하였다. 유출모의는 GRM 모델을 적용하였으며, 도문/남양 지역의 범람해석은 G2D 모델을 이용하였다. 홍수사상은 2016년 8월 태풍 라이언 폭으로 인해 발생한 홍수를 대상으로 하였다. 유출모의 결과의 검증은 도문/남양 지역의 침투유량 기록을 사용하였으며, 범람해석 결과의 검증은 현지답사를 통해 수집된 홍수상황과 홍수 전후의 위성영상 자료를 이용하였다. 연구결과 유출모의 침투유량은 7,639m³/s로 기록된 침투유량 7,630 m³/s와 약 0.1%의 상대오차를 나타내었다. 범람모의에서는 홍수발생 당시에 대한 상황 조사 자료 및 위성영상에서 확인된 침수 범위와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 도문/남양 지역의 홍수터에서 침수심의 변화와 침수시간을 평가할 수 있었다. 본 연구에서 적용한 방법과 연구결과는 향후 미계측 지역에서의 홍수를 정량적으로 평가할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 위성강우, 글로벌 지형 자료, 홍수, 두만강

2020년 02월 24일 접수 Received on February 24, 2020 / 2020년 03월 23일 수정 Revised on March 23, 2020 / 2020년 03월 24일 심사완료 Accepted on March 24, 2020

* 본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “위성자료를 이용한 북한 홍수범람 분석 기술 개발” 과제의 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 본 연구를 위해서 홍수 전후의 위성영상 데이터를 처리해주신 (주) ERI의 신형섭 대표이사님께 감사드립니다.

1 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원 Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

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

ABSTRACT

The purpose of this study is to present a method for quantitative analysis of flooding at the flood plain in an ungauged area using satellite rainfall and global geographic data. For this, flooding of the Tumen/Namyang area in the Duman-gang(Riv.) was simulated and the flood conditions were quantitatively analyzed. The IMERG data, a rainfall data derived from satellite images, was used as rainfall data. The GRM model was applied to the watershed runoff simulation, and the G2D model was applied to the flooding simulation of the Tumen/Namyang area. Flood event caused by Typhoon Lionrock in August 2016 was applied. Recorded peak discharge of the Tumen/Namyang region was used to verify the runoff simulation results. To verify the result of the inundation simulation, the flood situation collected through field survey and satellite image data before and after the flood were used. The peak flow rates by the runoff simulation and flood record were $7,639\text{m}^3/\text{s}$ and $7,630\text{m}^3/\text{s}$, respectively, with a relative error of about 0.1%. In the flood simulation, the results were similar to the flooding ranges identified in the survey data and satellite images. And the changes of flooding depth and flooding time in the flood plain in Tumen/Namyang area could also be assessed. The methods and results of this study will be useful for the quantitative assessment of floods in the ungauged areas.

KEYWORDS : *Satellite Rainfall, Global Geographic Data, Flood, Duman-gang(Riv.)*

서론

북한과 중국의 경계를 따라 흐르는 두만강 유역은 북한, 중국, 러시아 지역의 일부에 속해 있으며, 대부분의 지역이 미계측 지역이다. 이 지역의 홍수해석을 위해서는 강우 자료가 필요하나, 중국은 계측된 수문자료를 대외에 공개하지 않고 있으며, 북한 또한 일부 강우 자료를 WMO(World Meteorological Organization)를 통해서 제공하고 있으나 관측소의 밀도와 자료의 품질이 낮아 사용에 어려움이 있다. 그러므로 두만강 유역의 홍수량을 계산하기 위해서는 지상에서 계측된 강우 자료를 적용하는 것에 한계가 있으며, 본 연구에서는 이에 대한 대안으로 위성영상으로부터 유도된 강우 자료를 적용하고자 한다.

지상에 있는 강우관측소에서 관측된 강우는 본질적으로 강우의 공간적 불균일성을 반영하기 어려우며, 관측 주기가 하루 이상으로 긴 경우

에는 홍수 연구에 적용하는데 한계가 있다. 또한, 지상계측 방법은 해양, 극지방 및 산악지역의 강수량을 관찰하는데 어려움이 있다. 이에 반하여 원격탐사 기술은 지구 강수를 관찰하는데 많은 도움을 주는 기술로 인식되고 있다. 위성 자료를 이용한 강우 추정에는 지상 강우관측소 및 기상레이더와 비교하여 광역적 공간범위를 대상으로 하며, 지속적이고 균일한 강우를 생산한다는 장점을 갖고 있다(Hong *et al.*, 2016). 위성에 의한 강우관측 기술은 1997년 TRMM 위성이 발사된 이래로 TMPA(Multi-satellite Precipitation Analysis), 미국 NOAA의 기후예측 센터의 CMORPH, 일본 JAXA의 GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation) 등 다수의 다중위성강우 자료가 생산되고 있다(Kim *et al.*, 2015). 위성 자료를 이용한 강우 자료는 2014년 GPM Core 위성 발사로 시·공간 해상도 및 정확도가 크게 향상되었으며, GPM 미션의 최신 IMERG 위성강우는 위도 60N-S의 공간 범위에 대하여 시간해상도 30

분, 공간해상도 0.1도의 위성강우 자료가 생산되고 있다.

위성강우 자료는 전지구 강수량에 대한 이해 증진과 생태-수문학적 모델의 개발을 촉진하고 있으며, 광역적 혹은 지역적 홍수를 평가 및 예측하기 위한 연구에 다양하게 적용되고 있다 (Hong *et al.* 2019). 특히, 북한을 포함한 동아시아, 동남아시아, 아프리카 등지에는 수문학적 미계측 지역이 많기 때문에 위성강우 자료를 이용한 강수량 평가에 대한 연구가 다수 진행되고 있으며 (Hoscilo *et al.*, 2015; Dembélé and Zwart., 2016; Dandridge *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2019), 광역 홍수 해석 및 미계측/비접근 지역을 중심으로 위성강우를 홍수모의에 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다 (Harris *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011; Bajracharya *et al.*, 2014; Pakoksung and Takagi, 2016; Shuhei and Giriraj, 2017; Maggioni and Massari, 2018; Tam *et al.*, 2019). 이 연구들에서는 미계측 지역인 넓은 지역의 홍수해석에 위성강우 자료를 적용하고 있으며, 이때 위성강우 자료의 보정을 위해서는 지상에서 계측된 강우 자료를 이용하고 있다. 국내에서는 Kim *et al.*(2015)은 다양한 위성강우 자료와 각 자료를 이용한 유출 특성을 국내의 계측지역 자료와 비교 평가한 후 이를 이용하여 북한 청천강 유역의 홍수량을 추정함 바 있고, Kim *et al.*(2017)은 위성강우와 글로벌 지형자료를 이용해서 모로코 지역에서의 홍수를 분석함으로써 각 자료의 적용성을 평가하였다.

본 연구의 목적은 위성강우와 글로벌 지형자료를 이용해서 미계측 지역인 도문/남양 지역의 하도 홍수터에 대해서 홍수에 의한 침수양상을 평가하는 것이다. 본 논문의 구성은 2절에서는 연구대상 지역과 홍수사상 및 연구방법을 설명하였다. 3절에서는 위성강우 자료를 설명하였으며, 4절에서는 도문/남양 유역의 유출해석에 대해서 기술하였다. 5절에서는 도문/남양 지역의 침수모의와 홍수터에서의 침수 양상을 분석하였다. 6절에서는 연구결과와 시사점에 대해서 고

찰하였다.

대상 지역과 홍수사상 및 연구방법

1. 연구대상 지역 및 홍수사상

본 연구에서는 위성강우와 글로벌 지형자료를 이용하여 미계측 지역의 홍수해석 기법을 제시하고 평가하고자 한다. 이를 위해서 국외의 미계측 지역 중 북한, 중국, 러시아가 인접한 접경 지로서 수문자료와 공간자료가 계측되지 않아, 글로벌 공간자료와 위성강우의 활용이 필요한 두만강 인근 지역을 대상으로 연구를 수행하였으며, 2016년 태풍 라이언룩으로 인해 홍수피해가 발생한 도문/남양 지역을 중심으로 홍수를 분석하였다. 도문/남양 지역의 유역 면적은 약 24,622km²로 두만강 유역 전체 면적(약 32,994 km²)의 약 75%를 차지한다. 도문/남양 지역은 두만강 본류와 두만강의 가장 큰 지류인 가야강이 합류하는 지역으로서 호우시에 홍수위험이 높다. 그림 1은 본 연구에서의 홍수해석 영역을 나타낸 것이다. 그림 1(a)은 GRM 모델을 이용한 유출해석 영역을 나타낸 것으로 DMG는 두만강, ARG는 압록강, CCG는 청천강, DDG는 대동강, YSG는 예성강, IJG는 임진강, BHG는 북한강을 의미한다. 그림 1(b)는 본 연구의 범람해석 영역인 도문/남양 지역을 나타낸 것으로, 가야강과 두만강 본류의 합류점 직상류에 중국 도문시가 위치하고 있으며, 두만강 우측은 북한 온성군 남양노동자구이다. 그림 1(b)에서 “A” 지역은 남양에 포함된 지역으로 하도 내에서 넓은 홍수터를 형성하고 있다.

본 연구에서는 2016년 8월 31일에 두만강 인근에 상륙하여 큰 피해를 발생시킨 태풍 라이언룩에 의한 홍수를 분석하고자 한다. 태풍 라이언룩이 동반한 폭우로 인해 이재민이 14만 명 발생하고, 138명이 숨진 것으로 보도되었다 (VOA, 2016; NPR, 2016). 강우 자료의 기간은 2016년 8월 25일 01시~9월 6일 00시로 1시간 간격의 강우 자료 288개를 적용하였으며, 홍수 모의는 2016년 8월 25일 01시부터 480

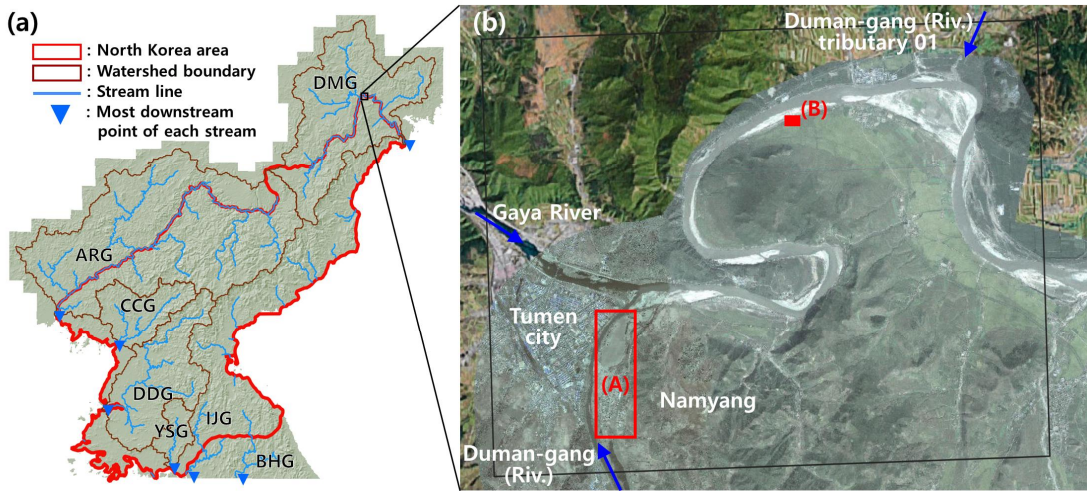


FIGURE 1. Study area. (a) and (b) are runoff and inundation simulation areas respectively.

In (a), DMG, ARG, CCG, DDG, YSG, IJG, and BHG means Duman-gang(Riv.), Aprop-gang(Riv.), Cheongcheon-gang(Riv.), Daedong-gang(Riv.), Yeseong-gang(Riv.), Imjin-gang(Riv.), and Bukhan-gang(Riv.) respectively. In (b), “A” is the flooded area and “B” is a building not flooded.

시간 동안 수행하였다. 중국 도문시의 현장 조사에 따르면 두만강 변에 건립되어 있는 홍수방어기념비(“홍수투쟁승리기념비”)문에 이때의 침투홍수량은 약 $9,630\text{m}^3/\text{s}$ 였다고 기록되어 있다. 또한 그림 1(b)의 “A” 에서 건물이 분포한 지역에서는 약 1 층 높이의 침수가 발생하였으며, 일부 건물은 완전히 파괴되었다. “B” 지역은 하천변에 위치한 가옥으로, 2016년 홍수 때 침수되지 않은 것으로 조사되었다.

2. 연구방법

본 연구에서는 범람분석 대상 지역인 도문/남양 지역의 홍수량을 계산하고, 계산된 홍수량을 이용해서 도문/남양 지역의 범람모의를 하였으며, 연구의 흐름도는 그림 2와 같다. 넓은 미계측 지역내에 있는 임의 지역에서 발생할 수 있는 침수 평가가 가능하기 위해서는 미계측 지역내 임의 지점에서 유역 홍수량 산정이 가능해야 한다. 이를 위해서는 분포형 모형의 활용이 적합하며, 본 연구에서는 국내외에서 적용성이 충분히 검증되고, 기술이 공개된 GRM(Grid based

Rainfall-runoff Model)(Choi and Kim, 2020) 모형을 적용하였다. 강우 자료는 위성영상으로부터 유도된 강우를 GRM 모형의 입력자료로 적용하였다. GRM 모형은 북한과 접경지에 포함된 유역 전체에 대해서 구축하였다. 도문/남양의 홍수량 계산을 위해서 홍수방어기념비에 기록된 침투홍수량을 이용하여 GRM 모형을 보정하였고, 홍수량 시계열 자료를 산출하였다.

본 연구의 대상 지역은 하도 단면 측량 자료가 없고, 건물과 제방 등이 반영된 정밀한 지형 자료가 없는 미계측 지역이다. 그러므로 침수해석은 DEM(Digital Elevation Model)을 이용해서 하도내 홍수터와 그 인근의 종단 및 횡단의 침수양상을 평가할 수 있는 2차원 침수해석 모형을 적용하는 것이 바람직 할 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 홍수터 침수모의 모형으로 검증되었고, 기술이 공개되어 있는 G2D(Grid based 2-Dimensional land surface flood model)(Choi and Kim, 2019) 모형을 적용하였다. 상류단 경계조건으로는 GRM에서 계산된 홍수량을 이용하였다. 범람모의 결과의 검증은

도문/남양 지역에서 현지 조사된 침수 상황과 홍수발생 전후의 위성영상 자료를 이용하였다.

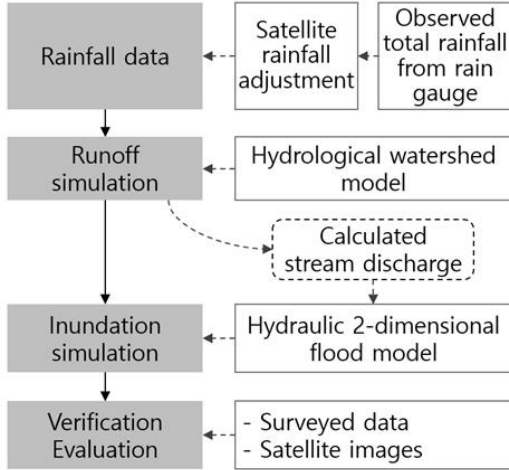


FIGURE 2. Study Process

위성강우 자료

태풍 라이언록은 2016년 8월 말경에 동해북부해상에서 중위도 저기압과 합쳐지면서 중심기압 980hpa의 비교적 강한 온대저기압으로 변질되었고, 북한 북부로 이동하면서 많은 비를 내렸다(Korea Meteorological Administration, 2017). 태풍 라이언록의 이동 경로에 있는 북

한의 강우관측소 자료는 결측이 많아서, 강우량을 추정하기 어려웠다. 그러므로 본 연구에서는 언론을 통해서 보도된 강우량 자료를 이용하였다. Namuwiki(2019)에서는 2016년 8월 31일에 조선중앙통신의 보도자료를 인용하여 경흥군 292mm, 부령군 275mm, 나선시 241mm, 경성군 187mm를 비롯해 함경북도 지방과 양강도의 일부 지역에서 많은 강우가 내렸다고 제시하고 있다. 본 연구에서는 이 4개 지역의 강우 자료를 이용해서 위성강우를 보정하였다.

그림 3(a)는 조선중앙통신에서 보도된 지상관측 강우를 IDW(Inverse Distance Weighting) 방법으로 보간한 공간분포도이고, 그림 3(b)는 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 위성강우인 IMERG(The Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) Late 자료이다. 그림 3에서 2가지 자료는 강우의 공간분포가 매우 유사한 특성을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 IMERG 위성강우 자료와 북한의 조선중앙통신에서 보도된 지상계측 강우 자료를 분석한 결과 지상계측 강우량보다 위성으로부터 유도된 강우량이 과소 추정되는 것으로 나타났다(표 1). 이는 Xie *et al.*(2011)과 Sohn *et al.*(2010) 등에서 제시된 바와 같이, 위성강우는 지상계측 강우량 자료와 타당한 상관관계를 갖고 있으나 지상계측 강우

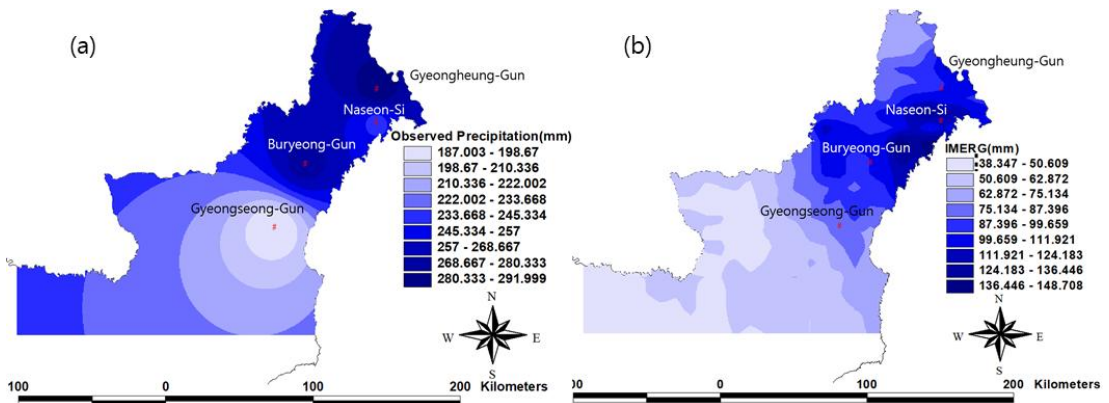


FIGURE 3. Rainfall distribution of Typhoon Lionrock.
(a) is rainfall distribution using ground gauge data, and (b) is IMERG data

TABLE 1. Comparison of cumulative rainfall and adjustment coefficient

Ground rainfall gauge name	Cumulative rainfall		Adjustment coeff.
	Ground gauge	IMERG	
Gyeongheung-Gun	292	88.8	3.29
Naseon-Si	241	95.3	2.53
Buryeong-Gun	275	91.1	3.02
Gyeongseong-Gun	187	73.2	2.55
Average	-	-	2.85

에 비해서 상당히 과소평가 되는 특징을 갖고 있기 때문이다. 위성강우가 과소 추정되는 것을 보완하는 방법으로 Harris *et al.*(2007)은 지상 계측 강우와 위성강우를 비교하여 보정계수를 계산한 후, 이를 위성강우에 곱해서 바이어스를 보정하였다.

본 연구에서는 IMERG 위성강우 자료를 보정하여 홍수모의에 적용하였다. IMERG 위성강우의 보정은 Harris *et al.*(2007)이 제시한 방법을 이용하였고, 이를 통해서 도출된 보정계수는 표 1과 같다. 4개의 지역에서 관측된 강우 집중

기간(2016년 8월 28일 19:00 UTC - 8월 31일 12:00 UTC)에서의 누적 강우와 각 관측소 위치에서의 IMERG 위성강우의 누적 값을 식 1과 식 2에 적용하여 보정계수를 계산하였다. 홍수해석에 사용되는 시계열 강우 자료는 식 3을 이용하여 계산하였다. 그림 4는 각 강우관측소에 대하여 보정계수 적용 전후의 누적강우량을 나타낸 것이며, 과소 추정된 위성강우가 보정에 의해서 지상 관측 강우량만큼 크게 수정되었다. 본 연구에서는 각 관측소 자료의 보정계수의 평균 값(c_{ave})인 2.85(표 1)를 전체 기간의 IMERG 위

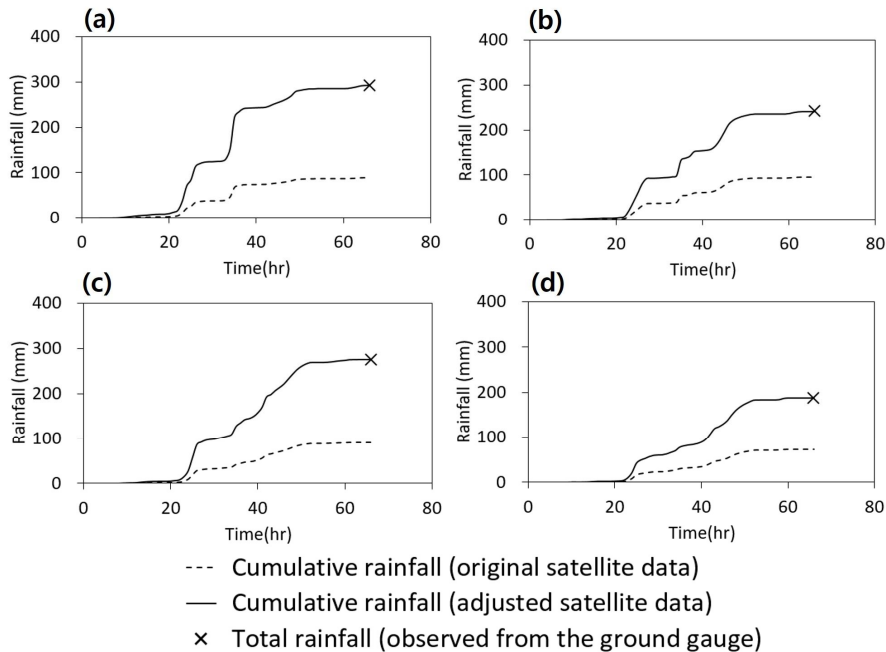


FIGURE 4. Cumulative satellite rainfall hyetographs before and after applying bias adjustment coefficient. (a) is Gyeonghung-Gun, (b) is Nasun-Si, (c) is Buryeong-Gun, and (d) is Gyeongseong-Gun.

성강우의 보정계수로 사용하였다.

$$c_i = \frac{RTO_i}{RTS_i} \quad (1)$$

$$c_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (2)$$

$$R_{app} = c_{ave}R \quad (3)$$

여기서, RTO_i 는 강우관측소 i 로부터 관측된 총 강우량, RTS_i 는 강우관측소 i 위치에 있는 위성강우 자료 격자에서의 총 강우량, c_i 는 강우 관측소 i 에 대한 강우 보정계수, n 은 강우관측소의 개수, c_{ave} 강우 보정계수의 평균 값, R 은 위성강우 자료, R_{app} 는 유출모의에 사용할 강우량을 나타낸다.

유출모의

1. 분포형 수문 모델 구축

본 연구의 대상 지역인 도문/남양 지역은 유역면적이 넓기 때문에 유역내 강우의 공간분포를 고려한 유출모의가 필요하다. 이를 위해서 격자로 분포된 위성강우 자료와 분포형 강우-유출 모형인 GRM을 이용해서 북한 전역과 두

만강, 압록강 유역에 포함되는 중국과 러시아 일부지역 및 임진강과 북한강 일부에 속해 있는 남한 지역을 포함하도록 모델을 구축하였다. GRM은 DEM으로부터 구축된 유역 지형자료와 토지피복도, 토양도를 이용해서 유역 모델을 구축할 수 있으며, GRM 모델에 대한 상세 사항은 Choi and Kim(2020)을 참고할 수 있다.

GRM 모델 구축에서 사용된 자료는 표 2 및 그림 5와 같다. 북한과 남한 지역은 국토지리정보원의 DEM을 적용하였고, 중국과 러시아 지역은 전지구 지형 자료인 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)(Jarvis *et al.*, 2008) DEM을 적용하였으며, 두 DEM을 병합하여 전체 DEM을 구축하였다. 이 DEM은 모델 구축 영역의 수문학적 지형 정보인 흐름방향, 흐름누적수, 하천망, 경사 래스터 파일을 만드는데 사용되었다. 토지피복도는 남한과 북한 지역은 환경부의 대분류 토지피복도를 적용하였고, 중국과 러시아 지역은 전지구 토지피복 자료인 GLCNMO(The Global Land Cover by National Mapping Organizations)의 토지피복도(Tateishi *et al.*, 2014)를 적용하였으며, 두 자료를 병합하여 전체 영역의 토지피복도를 구축하였다. 토양도는 남한과 북한 지역은 국립농업과학원의 정밀토양도와 한국농업기본도를 각각 적용하였고, 중국과 러시아 지역은 전지구 토양 자료인 HWSO(Harmonized World Soil

TABLE 2. Geographic data and the spatial resolution applied to the runoff model

Classification	Data source			Final data applied to the GRM
	South Korea region	North Korea region	China and Russia region	
DEM	- DEM by National Geographic Information Institute (Korea) - 10m×10m		- SRTM DEM - 90m×90m	- Merge the DEMs - Make flow direction, flow accumulation, stream, and slope maps - 500m×500m
Land cover map	- Classified into 7 attributes by Ministry of Environment(Korea) - 30m×30m		- GLCNMO land cover map version 3 - 15 arc-seconds	- Merge the maps - 500m×500m
Soil map	- Detailed soil map - Vector polygon	- Korea agricultural basic map - Vector polygon	- HWSO map - 30 arc-second	- Merge the maps - Make soil texture and soil depth maps - 500m×500m

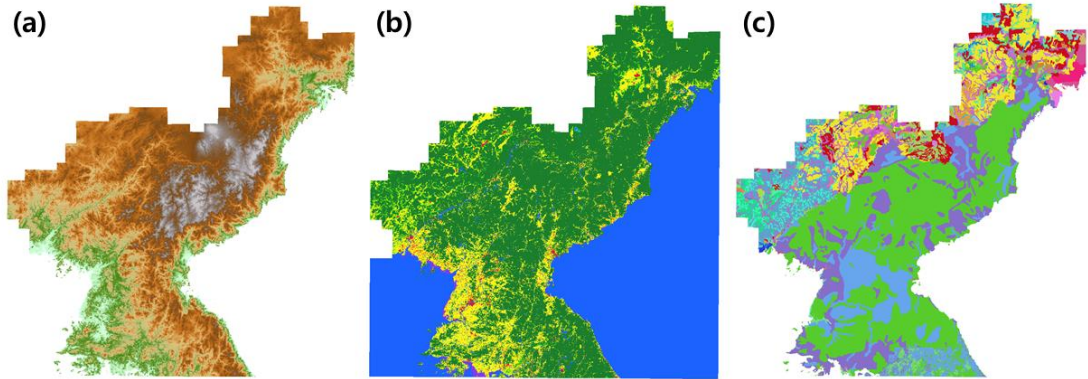


FIGURE 5. Merged geographic data with spatial resolution 500m×500m.
(a) is DEM, (b) is land cover map, and (c) is soil map

Database)(FAO *et al.*, 2012) 자료를 적용하였으며, 3가지 자료를 병합하여 모델 구축 영역에 대한 토성도와 토양심도를 구축하였다. 이 자료를 이용하여 500m×500m 해상도로 모델을 구축하였으며, 이때 전체 격자의 개수는 1,878,85개, 수문학적 계산이 이루어지는 유효 격자의 개수는 796,920개 이다.

2. 유출모의

중국 도문시에 있는 홍수방어기념비문에 기록된 침투홍수량인 7,630m³/s를 이용하여, 북한 전역에 대해서 구축된 GRM 모델에서 도문/남양 유역을 보정하였다. 모델 보정 전후의 매개변수와 모의 결과는 표 3 및 그림 6과 같다. 그림 6(a)는 GRM 모델을 보정하지 않고 기본 매개변수를 이용해서 모의한 결과이다. 그림 6(b)는 초기포화도를 시행착오법으로 0.48로 수정하고, 이를 제외한 다른 매개변수는 모두 기본 매

개변수를 적용하여 모의한 결과이다. 표 3에서와 같이 보정된 모의 결과 침투홍수량은 모의 시작 후 약 131.5 시간(2016년 8월 30일 12시 30분)에 약 7,639m³/s (그림 6(b)의 ④ 수문곡선)로 계산되었다. 이 값은 관측 값과 약 0.1 %의 상대오차를 나타내었으므로 모형이 잘 보정된 것으로 판단하였다. 그러므로 그림 6(b)의 계산된 수문곡선(그림 6(b)의 ①, ②, ③ 수문곡선)을 범람모의에서 상류단 경계조건으로 적용하였다.

범람모의

1. 2차원 범람해석 모델 구축

침수범위, 침수심, 침수시간을 함께 고려하여 홍수터의 중단 및 횡단에 대한 침수 양상을 평가하기 위해서는 일반적으로 2차원 침수해석 모델을 적용한다. 본 연구에서는 정형 사각 격자

TABLE 3. Model parameters and simulation results

Classification		Before calibration	After calibration
Model parameter	Ini. saturation ratio	0.8	0.48
	Minimum slope of channel bed(m/m)	0.0001	0.0001
	Roughness coeff. of channel	0.045	0.045
Peak discharge	Simulated(m ³ /s)①	9,653	7,639
	Observed(m ³ /s)②	7,630	
	Relative error(%)*	26.5	0.1

* $|\text{②}-\text{①}| / \text{②} \times 100$

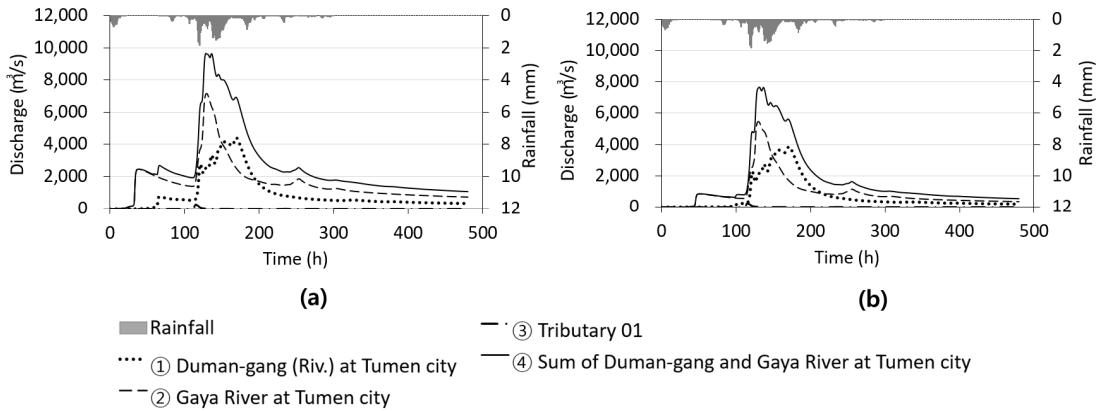


FIGURE 6. Runoff simulation hydrographs. Line number ④ is the sum of Gaya River and Duman-gang (Riv.), which is used for model calibration.

기반의 2차원 침수해석 모델인 G2D를 이용하여 도문/남양 지역에 있는 홍수터에서의 침수를 모의하였다. G2D 모델은 DEM을 이용해서 모의 도매인을 구축하고, 유량, 수위, 혹은 수심을 경계조건으로 적용할 수 있다. 또한 강우와 유량을 생성형으로 적용할 수 있다. G2D 모델의 이용 방법과 이론적 상세 사항은 Choi and Kim(2019)을 참고할 수 있다.

도문/남양 지역의 범람해석 도매인 구축을 위해서 국토지리정보원에서 제공하는 10m×10m 해상도의 DEM을 적용하였다. 이때 범람해석 도매인에 포함된 격자의 개수는 1,187,144개이다. 이 DEM에서는 하도내 지형이 평지로 나타나 있으며, 주수로와 고수부지가 구분되어 있지 않았다. 또한 제방도 표현되어 있지 않았다. 그러나 도문/남양 지역의 현장 조사 결과에 따르면 모의 영역에서 중국 지역에 포함된 하천에 대해서는 모두 약 5m 정도의 제방이 건설되어 있었고, 북한에 포함된 하천은 모두 인공 제방이 없는 자연적인 형태를 나타내고 있었다. 또한 홍수방어비문에는 2016년 태풍 라이언록 당시에 중국 도문시에서는 두만강 범람을 막기 위해서 제방위에 긴급 방어벽 작업을 하여 성공적으로 범람을 방어한 것으로 기록되었다. 그러므로 태풍 라이언록 홍수에서 도문시 측으로는 홍수가 범람되지 않은 것을 알 수 있다. 이러한

상황을 반영하기 위해서 본 연구에서는 중국에 포함된 가야강 좌우측과 두만강 좌측에는 제방 위치에 있는 DEM의 고도를 5m 가량 높여 범람이 발생하지 않도록 하였다. 또한 현장 조사 결과 하도내 고수부지와 주수로는 약 3m 정도의 고도차가 있음을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 하도내 DEM에서 주수로 부분을 약 3m 가량 낮게 고도를 수정하여 범람모의 도매인을 구축하였다.

범람모의에는 3개의 상류단 경계조건을 적용하였으며, 그림 1(b)에서 파란색 화살표로 표시한 것이다. 첫 번째는 두만강 본류에서 도문/남양 지역으로 유입되는 것이고, 두 번째는 가야강에서 도문/남양 지역으로 유입되는 것이다. 세 번째는 도문/남양 지역 하류에 있는 지류에서 두만강 본류로 유입되는 것이다. 각 지점에 대한 경계조건 유량으로는 그림 6(b)의 ①, ②, ③ 수문곡선을 각각 적용하였다. 모의 도매인 하류에서는 자유수면 유출 조건을 적용하였다. 조도계수는 지형과 유량에 비해서 민감도가 낮으나, 2차원 수리학적 모형에서 중요한 매개변수이다(Pappenberger *et al.*, 2005; Ghanbarpour *et al.*, 2011; Jung and Merwade, 2012). 본 연구에서는 시행착오법으로 범람모의를 하였으며, 자갈 하상과 작은 초목이 분포된 제방 및 홍수터를 고려하여, 조도계수를 0.045로 설정하

였다(Chow, 1959).

2. 범람모의 검증 및 평가

범람모의 결과를 검증하기 위해서 두 가지 방법을 적용하였다. 첫 번째 방법은 도문/남양 지역의 현장 조사로부터 확인된 홍수 발생 당시의 상황이다. 현장에서 조사된 자료에 따르면, 그림 7(b)의 “A” 지역에서 건물이 있는 지역을 포함한 넓은 범위에서 침수가 발생하였으며, “A” 영역 좌측 부분에 있는 건물의 침수심은 약 1층 정도로 추정되었다. 또한 두만강 본류와 가야강의 합류점 하류의 하천변에 위치한 가옥(그림 7(b)의 “B”)은 침수되지 않았다. 두 번째 방법은 홍수발생 전후의 위성영상자료를 이용하여 침수범위를 식별한 후 본 연구의 범람모의 결과와 비교하였다. 홍수발생 전의 영상은 Pleiades 위성(Gleyzes *et al.*, 2012)으로부터 촬영된 2015년 10월 16일의 영상이다. 홍수발생 후의 영상은 Worldview-2 위성(Pasquale *et al.*, 2013)으로부터 촬영된 2016년 9월 17일 영상이다. 이 영상은 홍수발생 직후의 영상으로 침수범위를 판별하기 적절할 것으로 판단되었다.

범람모의 결과는 그림 7(b) 및 (c)와 같다.

우선 첫 번째 방법에 의한 모의 결과의 검증은 그림 7(b)와 같다. 그림 7(b)의 “A” 영역에서는 좌측 부분에 위치한 건물 부분에서 최대 0.6m~3.4m의 침수심 분포를 나타내었으며, 하천변에 위치한 가옥(그림 7(b)의 “B”)은 침수되지 않는 것으로 모의되었다. 이러한 모의 결과는 현장에서 조사된 내용과 잘 일치 하였다. 두 번째 방법에 의한 모의 결과의 검증은 그림 7(c)와 같다. 그림 7(c)에서, 모의된 침수 범위는 위성영상으로부터 추출된 범람범위와 비교하였을 때, 건물 분포지역 일부와 완만한 경사를 이루는 하천변 농경지에서 차이를 보였으나, 전체적으로 두 자료는 아주 유사한 침수범위를 나타내었다. 그러므로 본 연구의 홍수모의 결과는 태풍 라인언록에 의한 도문/남양 지역의 홍수를 잘 재현한 것으로 판단되었다.

범람모의 결과를 침수범위, 침수심, 침수시간에 대해서 분석하면 그림 8과 같다. 전체 도매인에서 최대 침수심은 모의시작 후 133시간에서 8.9m, 최대 침수면적은 139시간에서 15.9 km²를 나타내었다. 본 연구의 주요 분석 대상은 하도내 홍수터이다. 하도내 홍수터는 그림 7(a)와 (c)에서 빨간색 영역으로 약 1.81km²의 면적을 가지며, 초록색 선으로 표시된 건축물 분포

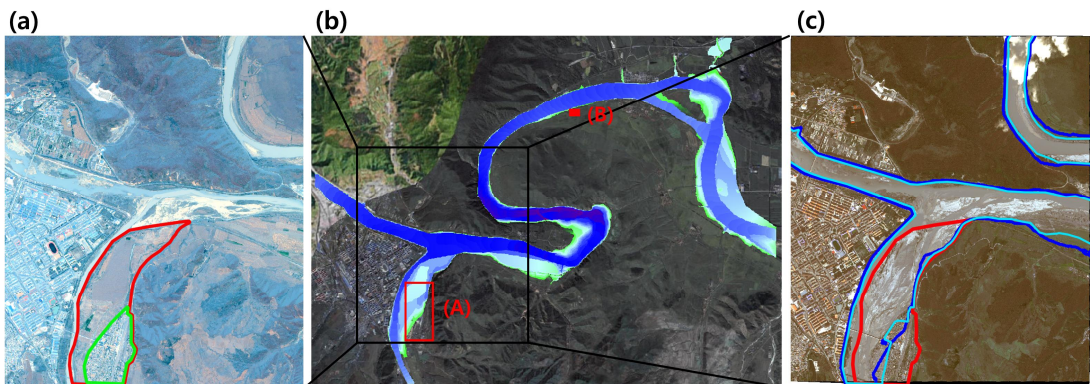


FIGURE 7. The results of inundation simulation. (a) and (c) are satellite images before and after flood, respectively. (b) Maximum flooded area simulated by this study. In (a) and (c), red line is the flood plain of this study area, blue line is the simulated flooding area, light blue line is the flooding area extracted from satellite image, and green line is the building area in the flood plain. In (b), “A” and “B” are same as FIGURE 1.

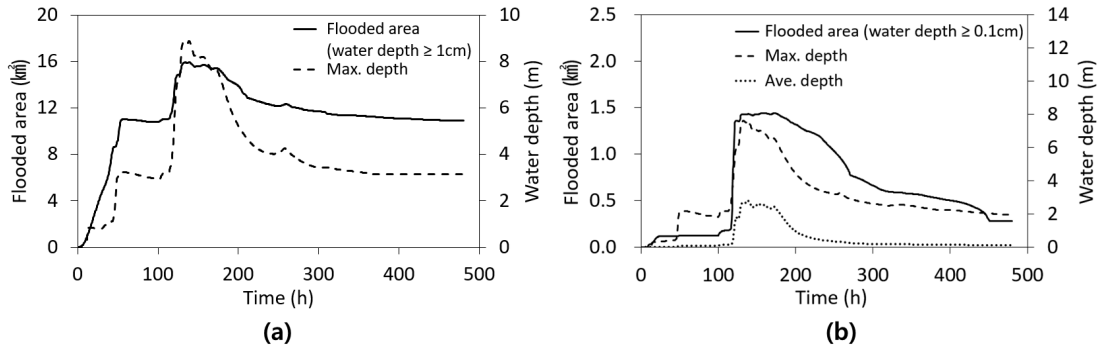


FIGURE 8. Flooded area and depth. (a) is simulation result for entire domain area, and (b) is the result for the flood plain of red line area of FIGURE 5(a) and (c)

지역의 면적은 약 0.50km²이다. 하도내 홍수터인 빨간색 영역은 모의 시작 후 8.5시간부터 침수되기 시작하였다. 최대 침수면적은 모의 시작 후 158.5시간에 1.44km²로 전체 홍수터의 약 80%가 침수되는 것으로 모의 되었으며, 홍수터에서 건물 분포 지역의 일부를 제외한 대부분의 지역이 침수되었다. 평균 침수심은 모의 시작 후 117.5시간부터 288.5시간까지 약 171시간 동안 20cm 이상의 값을 나타내었으며, 모의 종료시의 평균 침수심은 약 11cm를 나타내었다. 최대 침수심은 모의 시작 후 138시간에 홍수터와 인접한 하천 격자에서 약 7.6m를 나타내었다.

토의 및 결론

본 연구에서는 미계측 지역에 있는 홍수터에서, 홍수로 인한 침수양상을 평가하기 위해, 위성강우 자료와 글로벌 지형자료를 이용하여 홍수를 모의하고, 현장 조사 자료와 홍수 전후의 위성영상 자료를 이용하여 모의 결과를 평가하였다. 미계측 지역인 중국과 북한의 접경지인 도문/남양 지역을 대상으로 하였으며, 2016년 태풍 라인연륙에 의한 홍수를 모의하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 두만강 상류 지역의 유출해석을 위한 강우 자료는 IMERG 위성강우 자료를 사용하였다. 위성강우는 중위도 이상 지역에서의 일반적인 특징을 나타내어, 보도된 강우량에 비해 과

소추정되는 것으로 분석되었다. 이를 보정하기 위하여 집중 호우 지역의 보도된 총강우량과 위성강우 자료의 누가강우량을 무차원화하여 보정계수를 계산하였고, 이 보정계수를 이용하여 보정된 위성강우를 생성하였다.

둘째, 도문/남양 지역의 유출해석을 위해서 중국과 러시아 지역은 글로벌 지형자료인 SRTM DEM, GLCNMO 토지피복도, HWSO 토양도를 적용하였고, 북한 지역은 국내에서 만들어진 DEM과 토지피복도 및 토양도를 적용하였으며, 각 자료를 병합하여 GRM 모델의 입력자료로 사용하였다. 도문/남양 지역의 유출모의 과정에서 본 연구에서 적용한 글로벌 지형 자료는 입력자료 구축 및 매개변수 설정, 모형 보정 등에서 충분히 적용성이 있는 것으로 나타났다.

셋째, 홍수해석을 위해 두만강 유역의 유출모의와 도문/남양 지역의 범람모의를 수행하였다. 모의 결과는 도문/남양 지역의 현지 조사 자료와 홍수 전후의 위성영상 자료를 이용하여 검증하였다. 홍수모의의 평가 결과 유역 유출모형을 잘 보정할 수 있었다. 계산된 유량을 경계조건으로 하여 범람모의 한 결과는 현지 조사 자료 및 위성영상으로부터 추출된 범람범위를 잘 재현 할 수 있었다.

넷째, 도문/남양 지역의 하도 홍수터에서의 침수모의 결과 약 171시간 동안 20cm 이상의 평균 침수심을 나타내었다. 최대 침수심은 약 7.6m로 홍수터에 인접한 하천 격자에서 발생하

였으며, 480 시간 동안의 모의 종료시에는 약 11 cm의 평균 침수심을 나타내었다. 최대 침수 면적은 1.44 km²로 전체 홍수터의 약 80%가 침수되는 것으로 모의 되었다.

다섯째, 본 연구에서는 미계측 지역에서의 홍수모의를 위해, 위성강우와 글로벌 지형자료 및 모의 결과 검증에 위한 홍수 전후의 위성영상 자료를 사용하는 일련의 절차와 방법을 제시하였다. 이러한 기법은 향후 다양한 미계측 지역의 홍수분석에 활용될 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 제시된 것과 같이 미계측 지역이라고 할지라도 적용하는 자료와 모의 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 연구대상 현장에 대해 가능한 많은 자료를 수집하여 홍수모의에 적용하는 것이 바람직하다. **KAGIS**

REFERENCES

- Bajracharya, S.R., M.S. Shrestha, and A.B. Shrestha. 2014. Assessment of High-resolution Satellite Rainfall Estimation Products in a Streamflow Model for Flood Prediction in the Bagmati basin, Nepal. *Journal of Flood Risk Management*. 10(1).
- Choi, Y.S. and K.T. Kim. 2019. Grid based 2-dimensional Land Surface Flood Model User's Manual. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. p.1-9.
- Choi, Y.S. and K.T. Kim. 2020. Grid based Rainfall-runoff Model User's Manual. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. p.1-28.
- Chow, V.T. 1959. *Open-channel Hydraulics*. International student edition, McGraw-Hill, Kogakusha. p.101-123.
- Dandridge, C., V. Lakshmi, J. Bolten and R. Srinivasan. 2019. Evaluation of Satellite-based Rainfall Estimates in the Lower Mekong River Basin(Southeast Asia). *Remote Sensing*. 11:2709.
- Dembélé, M. and S.J. Zwart. 2016. Evaluation and Comparison of Satellite-based Rainfall Products in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing*. 37(17):3995-4014.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS and JRC. 2012. *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. p.1-6.
- Ghanbarpour, M.R. S. Salimi, M.M. Saravi and M. Zarei. 2011. Calibration of River Hydraulic Model Combined with GIS Analysis using Ground-based Observation Data. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 3(5):456-463.
- Gleyzes, M.A. L. Perret and P. Kubik. 2012. PLEIADES System Architecture and Main Performances. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX(B1), XXII ISPRS Congress, 25 August, Melbourne, Australia. p.537-542.
- Harris, A., S. Rahman, F. Hossain, L. Yarborough, A.C. Bagtzoglou and G. Easson. 2007. Satellite-based Flood Modeling Using TRMM-based Rainfall Products. *Sensors*. 7:3416-3427.
- Hong Y., Y. Zhang and S. Khan. 2016. *Hydrologic Remote Sensing: Capacity Building for Sustainability and Resilience*. CRC Press.
- Hong Y, G. Tang, Y. Ma, Q. Huang, Z. Han, Z. Zeng, Y. Yang, C. Wang and X. Guo. 2019. *Remote Sensing Precipitation:*

- Sensors, Retrievals, Validations, and Applications. In: Li X., Vereecken H. (eds) Observation and Measurement of Ecohydrological Processes. Ecohydrology, vol.2. Springer, Berlin, Heidelberg. p.107-128.
- Hoscilo, A., H. Balzter, E. Bartholomé, M. Boschetti, P.A. Brivio, A. Brink, M. Clericic and J.F. Pekelc., 2015. A Conceptual Model for Assessing Rainfall and Vegetation Trends in Sub-Saharan Africa from Satellite Data. *International Journal of Climatology*. 35:3582-3592.
- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson and E. Guevara. 2008. Hole-filled Seamless SRTM Data V4. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). <http://srtm.csi.cgiar.org>. (Accessed 04 February 2020).
- Jung, Y. and V. Merwade. 2012. Uncertainty Quantification in Flood Inundation Mapping using Generalized Likelihood Uncertainty Estimate and Sensitivity Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*. 17(4):507-520.
- Kim, J.H., Y.S. Choi and K.T. Kim. 2015. Flow Estimation Using Rainfalls Derived from Multiple Satellite Images in North Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 18(4):31-42 (김주훈, 최윤석, 김경탁. 2015. 위성 강우자료를 이용한 북한지역 홍수량 추정. *한국지리정보학회지*. 18(4):31-42).
- Kim, J.H., K.T. Kim and Y.S. Choi. 2017. FRunoff Estimation Using Rainfalls Derived from Multi-Satellite Images. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 17(1):107-118 (김주훈, 김경탁, 최윤석. 2017. 다중 위성 강우 자료를 이용한 유출 평가. *한국지리정보학회지*. 17(1):107-118).
- Kim, I.W., J. Oh, S. Woo and R.H. Kripalani. 2019. Evaluation of Precipitation Extremes over the Asian Domain: observation and modelling studies. *Climate Dynamics*. 52: 1317-1342.
- Korea Meteorological Administration, 2017. Typhoon Analysis Report 2016. p.198 (기상청. 2017. 2016년 태풍 분석보고서).
- Maggioni, V. and C. Massari. 2018. On the Performance of Satellite Precipitation Products in Riverine Flood Modeling: A Review. *Journal of Hydrology*. 558:214-224.
- NPR. 2016. <https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2016/09/14/493912206/devastating-typhoon-leaves-some-140-000-north-koreans-in-need-of-aid> (Accessed 13 December 2019).
- Namuwiki. 2019. <https://namu.wiki/w/2016%EB%85%84%20%EB%91%90%EB%A7%8C%EA%B0%95%20%EC%9C%A0%EC%97%AD%20%EB%8C%80%ED%99%8D%EC%88%98?from=%EB%B6%81%ED%95%9C%20%ED%99%8D%EC%88%98> (Accessed 30 January 2020).
- Pakoksung, K. and M. Takagi. 2016. Effect of Satellite based Rainfall Products on River Basin Responses of Runoff Simulation on Flood Event. *Modelling Earth System Environment*. 2:143.
- Pappenberger, F., K. Beven, M. Horritt and S. Blazkova. 2005. Uncertainty in the Calibration of Effective Roughness Parameters in HEC-RAS using Inundation and Downstream Level Observations. *Journal of Hydrology* 302(1-4):46-69.
- Pasquale M., P. Claudio and V. Andrea.

2013. Using WORLDVIEW-2 Satellite Imagery to Support Geoscience Studies on Phlegraean Area. *American Journal of Geosciences*. 3(1):1-12.
- Shuhei, Y. and A. Giriraj. 2017. Applications of Satellite-based Rainfall Estimates in Flood Inundation Modeling: a Case Study in Mundeni Aru River Basin, Sri Lanka. *Remote Sensing* 9(10):1-16.
- Sohn, B.J., H.J. Han and E.K. Seo. 2010. Validation of Satellite-based High-resolution Rainfall Products over the Korean Peninsula using Data from a Dense Rain Gauge Network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 49(4):701-714.
- Tam, T.H., M.Z.A. Rahman, S. Harun, M.N. Hanapi and I.U. Kaoje. 2019. Application of Satellite Rainfall Products for Flood Inundation Modelling in Kelantan River Basin, Malaysia. *Hydrology*. 6:95.
- Tateishi, R., N.T. Hoan, T. Kobayashi, B. Alsaaidh, G. Tana1 and D.X. Phong. 2014. Production of Global Land Cover Data-GLCNMO2008. *Journal of Geography and Geology*. 6(3):99-122.
- VOA. 2016. <https://www.voanews.com/east-asia/133-killed-north-korea-flooding> (Accessed 10 January 2020).
- Wang, J., H. Yang, L. Li, J.J. Gourley, I.K. Sadiq, K.K. Yilmaz, R.F. Adler, F.S. Policelli, S. Habib, D. Irwn, A.S. Limaye, T. Korme and L. Okello. 2011. The Coupled Routing and Excess Storage (CREST) Distributed Hydrological Model. *Hydrological Science Journal*. 56(1):84-98.
- Xie, P., S.H. Yoo, R. Joyce and Y. Yarosh. 2011. Bias-corrected CMORPH: a 13-year Analysis of High-resolution Global Precipitation. NOAA's Climate Prediction Center(presentation). Available at: http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/REF/EGU_1104_Xie_bias-CMORPH.pdf. (Accessed 03 May 2016).
- Yoshimoto, S. and G. Giriraj. 2017. Applications of Satellite-based Rainfall Estimates in Flood Inundation Modeling: a Case Study in Mundeni Aru River Basin, Sri Lanka. *Remote Sensing*. 9(10):1-16.
- Yuan, F., L. Zhang, K. Soe and Y. Liu. 2019. Applications of TRMM- and GPM-Era Multiple-satellite Precipitation Products for Flood Simulations at Sub-daily Scales in a Sparsely Gauged Watershed in Myanmar. *Remote Sensing*. 11(2):140. **KAGIS**