



## Development and application of the estimation method of flood damage in the ungauged basin using satellite data

Yeom, Woong-Sun<sup>a</sup> · Park, Dong-Hyeok<sup>b</sup> · Ahn, Jaehyun<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Graduated Student, Department of Urban Infrastructure and Disaster Prevention Engineering, Seokyeong University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Director of Research Institute, RAON T&C, Anyang, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Seokyeong University, Seoul, Korea

Paper number: 20-110

Received: 10 November 2020; Revised: 17 November 2020; Accepted: 17 November 2020

### Abstract

Economic analysis is a basic step in establishing disaster mitigation measures, but it is difficult to verify the results due to uncertainty. Therefore, the scope of investigation and analysis is wide. However, it is difficult to predict the amount of damage caused by flooding because the collection of relevant data is limited in the ungauged basin. In this study, distributed runoff analysis and flooding analysis were performed, and a method of estimating the amount of flood damage in the ungauged basin was proposed using collectible social and economic indicators and flood analysis results. For distributed runoff analysis and flooding analysis, GRM (Grid based Rainfall-runoff Model) and G2D (Grid based 2-Dimensional land surface flood model) developed by Korea Institute of Civil engineering and Building Technology were used. The method of substituting collectible social and economic indicators into the simple method and improvement method was used to estimate the amount of flood damage. As a result of the study, it was possible to estimate the amount of flood damage using satellite data and social and economic indicators in the ungauged basin.

**Keywords:** Flood damage, Ungauged basin, Satellite data, GRM, G2D

## 위성자료를 활용한 미계측유역의 홍수피해액 추산기법 개발 및 적용

염웅선<sup>a</sup> · 박동혁<sup>b</sup> · 안재현<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>서경대학교 대학원 도시기반방재안전공학과 석사과정, <sup>b</sup>(주)라온티앤씨 R&D센터 연구소장, <sup>c</sup>서경대학교 이공대학 토목건축공학과 교수

### 요 지

치수 관련 사업이나 재해대책 수립의 기초 단계인 경제성 평가는 미래에 발생할 가능성이 있는 홍수로 인한 피해액을 예측하는 중요한 과정이지만, 결과를 검증하는데 어려움이 있다. 따라서 정확한 피해액을 예측하기 위해서는 공학적 측면과 경제적 측면을 모두 고려하여야 하므로, 조사·분석의 범위가 매우 넓다. 그러나 미계측유역은 관련 자료의 수집에 제한이 있어 홍수로 인한 경제적 손실규모를 예측하는 데 어려움이 있으며, 관련 연구 또한 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 위성자료 기반의 분포형 유출 및 침수해석 모형을 활용하여 미계측유역인 대동강유역 내 평양시에 대한 침수해석을 수행하였으며, 수집 가능한 사회·경제지표와 침수해석 결과를 종합하여 홍수피해액을 추산하는 방법론을 제시하였다. 분포형 유출해석과 침수해석 모형은 한국건설기술연구원에서 개발한 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model)과 G2D (Grid based 2-Dimensional land surface flood model)를 활용하였으며, 홍수피해액은 간편법과 개선법의 방법론에 수집 가능한 사회·경제지표를 대입하는 형식으로 추산하였다. 연구 결과 미계측유역의 위성자료와 사회·경제지표를 기존의 방법론에 대입한 홍수피해액 추산이 가능하였으며, 추후 자료 수집 기술의 발달로 사용 가능한 자료의 종류와 범위가 넓어지면 자료의 구득이 어려운 타 지역에도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 홍수피해액, 미계측유역, 위성자료, GRM, G2D

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-940-7770  
E-mail: wrr21@naver.com (J. Ahn)

## 1. 서론

최근 기후변화로 인한 수문현상의 규모와 빈도가 증가하고 있으며, 또한, 해수면 온도가 상승하여 전에 없던 규모의 태풍 발생빈도가 증가하고 있다. 대표적인 예로, 2002년 루사, 2003년 매미, 2007년 나리 등의 태풍으로 인해 집중호우로 인한 홍수로 많은 피해가 있었다(Kang *et al.*, 2018). 이와 같이 매년 반복되는 홍수 재해로부터 국민의 생명과 재산을 보호하고 재해의 효과적인 관리를 위해서 사전예측을 위한 분석시스템 구축이 필요하나 대부분의 재해에는 많은 변수와 불확실성이 존재하여 현재의 정보체계에서는 한계가 있다(Yun *et al.*, 2010).

수자원 부문 사업에서 재해의 효과적 관리를 위한 치수사업을 실시할 때 사업의 경제성을 평가하는 예비타당성조사를 수행하게 된다. 경제성 평가는 치수사업의 우선순위 결정 측면에서 사업의 타당성과 재해방지를 통한 편익을 합리적으로 분석해 주기 때문에 치수 수립 단계에서 반드시 고려되어야 하는 중요한 요소이다(Joo *et al.*, 2018). 따라서 이와 관련한 방법론의 개발과 보완이 지속적으로 추진되어 왔다. 국내의 홍수피해 추정 방법론은 1985년 간편법을 시작으로, 2002년부터 개선법을 적용하였으며, 2004년부터 현재까지 다차원 홍수피해산정법을 적용하고 있다(KDI, 2019).

국내 계측유역에 대한 침수피해액 산정과 관련해서는 다차원 홍수피해산정법을 활용한 연구가 여러 차례 수행된 바 있다. Yi *et al.* (2006)은 GIS 기반의 분포형 분석기법을 기반으로 홍수피해액을 산정하는 방법론을 제시하였으며, Lee *et al.* (2006)은 다차원 홍수피해산정법을 도시지역에 적용 가능하도록 개선하는 연구를 수행하였다. Shin (2013)은 다차원 홍수피해산정법을 활용하여 항만 재난방재시설의 경제성 분석 방법을 제시하였으며, Kang *et al.* (2018)은 다차원 홍수피해산정법 중 건물 피해액 산정 시 건물군 인벤토리를 활용하는 방법론을 제시하였다. 그러나 이와 같은 분석은 지역에 대한 정밀 자료를 필요로 하여 자료의 종류가 부족한 미계측유역에 적용하기 어렵다는 한계점이 있다.

치수사업의 경제성 분석은 사업 전은 물론 사업 후에도 편익의 실체가 완벽히 검증되기 쉽지 않으므로 홍수피해에 대한 예측은 사업의 추진에 있어 중요한 부분이고 매우 민감한 사안이다(Kang *et al.*, 2018). 따라서 분석을 수행하는데 필요한 자료의 종류와 조사 대상의 범위가 매우 다양하다. 그러나 미계측유역의 경우 경제성 평가의 기초가 되는 유역의 수리·수문학적인 분석이 어렵고 경제적 자산에 관련한 자료 수집에 제한이 있어 기존의 계측 가능유역에 적용하는 자료나 방법론을 사용할 수 없다.

미계측유역의 홍수재해 평가와 관련해서는 주로 위성자료

또는 프로그램을 통한 모의 결과를 활용한 유출량 산정 및 평가, 침수해석을 통한 침수면적 산정에 관한 연구가 진행되었다. Kim *et al.* (2010)은 강우자료를 HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)에 입력하여 유출수문곡선을 모의하고 이를 통해 미계측 소유역의 돌발홍수 정도를 정량화하였다. Kwak *et al.* (2015)은 돌발홍수지수를 이용하여 상류가 미계측유역인 임진강유역에 대한 홍수위험도를 평가하였으며, Kim *et al.* (2015)은 북한 청천강 상류 지역에 대하여 위성강우와 지형자료를 활용한 홍수량 추정 관련 연구를 수행하였다. 또한 Son and Kim (2019)은 공간정보를 활용하여 미계측유역의 홍수 피해면적을 예측하였으며, Park *et al.* (2019)은 XP-SWMM 모델을 활용하여 미계측유역에 대한 침수해석을 수행하여 침수방지대책을 위한 적정 강우 빈도를 분석하였다. 그러나 현재까지 미계측유역의 침수피해로 인한 경제적 손실규모를 추정하는 연구는 진행된 바 없다.

그러나 북한이나 동남아 국가 등 수자원 관련 기술 발달이 상대적으로 부족하여 계측된 자료가 적은 국가의 수자원 개발 사업을 추진하거나 재해대책을 마련할 때 홍수재해 분석은 필수적이다. 특히 북한의 경우 대부분이 미계측 지역이거나 폐쇄적인 정책으로 수문기상정보의 획득이 어려워 풍수해로 인한 피해규모를 추정하는데 한계가 있으며(Son and Kim, 2019), 적절한 대책 수립 없이 주요 시설이 밀집되어 있는 지역에 큰 규모의 재난이 발생할 경우 한반도 안보 위기가 발생할 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 태풍 루사 당시의 강우가 미계측유역인 북한 대동강유역에 발생했을 경우를 재현하여 유출해석을 수행하고, 북한의 수도인 평양시를 대상으로 범람해석을 실시하였다. 또한 범람해석의 결과물로 도출된 평양시 침수 예상면적 및 침수심과 수집 가능한 평양시의 사회·경제지표를 기존의 홍수피해 추정기법인 간편법과 개선법에 대입하여 침수피해로 인한 피해액을 추산하는 방법론을 제시하였다. 유출해석에는 한국건설기술연구원에서 개발한 분포형 유출해석모형인 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model)을 활용하였으며, 범람해석에는 한국건설기술연구원에서 개발한 2차원 광역범람해석 모형인 G2D (Grid based 2-Dimensional land surface flood model)를 사용하였다.

## 2. 연구방법

본 연구의 대상지점인 북한 대동강유역과 평양시는 북한의 폐쇄적 정책으로 인해 기존 집중형 모형에 사용되는 수문 매개변수 자료의 구축에 한계를 갖고 있다. 따라서 본 연구에

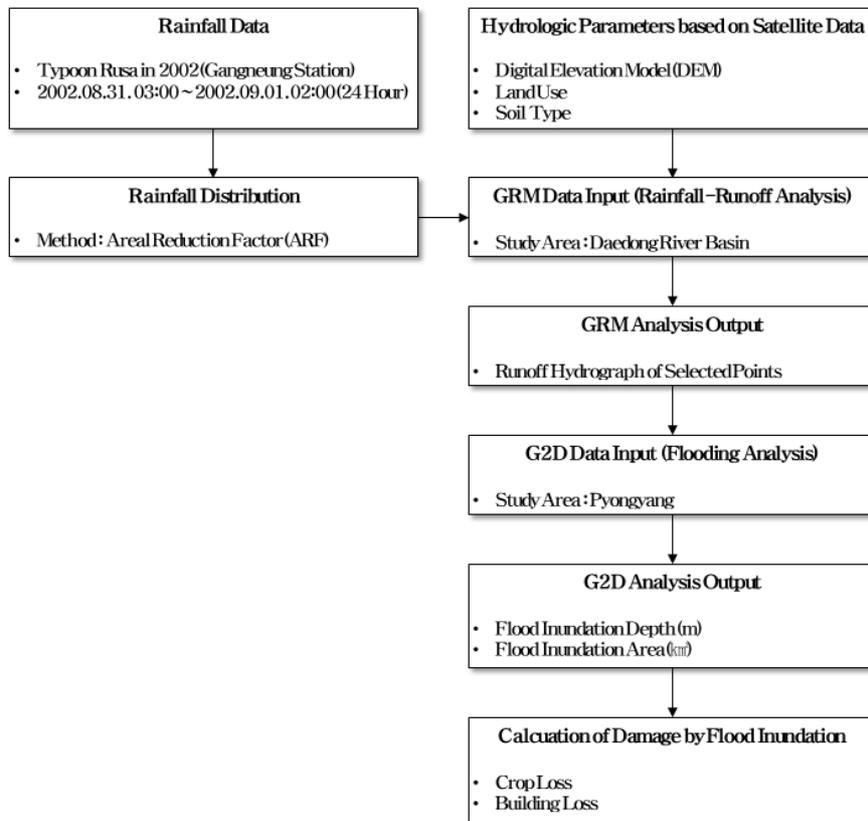
서는 위성영상으로부터 추출된 격자형 수문매개변수를 사용하여 미계측유역에도 적용이 가능한 분포형 유출해석모형 (GRM) 및 2차원 범람해석모형(G2D)을 활용하였다.

분포형 유출해석모형에 사용되는 강우량 자료는 2002년 태풍 루사 당시 강릉 기상관측소의 지속기간 24시간 강우자료를 공간적으로 분포시켜 사용하였다. 유역특성을 반영하기 위한 매개변수인 수치표고모델(Digital Elevation Map, DEM)은 국토지리정보원의 자료를 사용하였고, 토지피복도는 기후변화 대비 수자원 적응기술 개발 연구단(Climate

Change Adaption for Water Resources, CCAW)에서, 토양도는 UN 식량농업기구의 자료를 분석에 사용하였다. 분석에 사용된 자료 목록 및 내용은 아래 Table 1에 제시하였다. 침수해석 시에는 유출해석의 결과로 도출된 대동강유역 주요 지점별 유출수문곡선을 평양시로 유입되는 유량 경계조건으로 설정하여 분석을 수행하였다. 또한 간편법과 개선법의 농작물 피해액, 가옥 피해액 산정 방법론과 수집 가능한 평양시의 사회경제지표를 조합하여 침수로 인한 피해액을 추산하였으며, 본 연구의 연구 흐름도는 Fig. 1과 같다.

**Table 1.** List and explanation of the data used in the analysis

Data List	Explanation of Data	Source	Web site
Typhoon “Rusa” Rainfall Simulation Data	Rainfall Data per Hour of Gangneung Rainfall Observation Station (24Hour, 2002.08.31. 03:00~2002.09.01. 02:00)	Korea Meteorological Administration	<a href="https://data.kma.go.kr/">https://data.kma.go.kr/</a>
Topography and Soil Data	Digital Elevation Model (Resolution of 90 × 90 (m))	National Geographic Information Institute	<a href="https://www.ngii.go.kr/">https://www.ngii.go.kr/</a>
	Land Cover Map (Resolution of 500 × 500 (m))	Climate Change Adaption for Water Resources (CCA W)	<a href="http://gwb-ccaw.re.kr/">http://gwb-ccaw.re.kr/</a>
	Soil Map (Resolution of 500 × 500 (m))	Food and Agriculture Organization of the United Nations (UN FAO)	<a href="http://www.fao.org/">http://www.fao.org/</a>



**Fig. 1.** Research flowchart of this study

### 2.1 대상지점

본 연구에서는 유출해석 결과인 대동강유역 주요 지점별 유출수문곡선을 침수해석 시 평양시로 흘러드는 유량 경계 조건으로 설정하기 위해 유출해석 대상지점과 침수해석 및 홍수피해액 분석 대상지점을 각각 대동강유역과 평양시로 분리하였다(Fig. 2).

유출해석 대상지점인 대동강유역은 전체 유역면적 20,247 km<sup>2</sup>, 대동강의 유로연장은 450.3 km이다. 대동강은 서해안구의 대표적인 하천으로 평안남도 대홍군의 낭림산 한대령에

서 발원하여 황해남도 은천군과 은률군 사이에서 서해로 흐르는 하천이며, 북한의 가장 유용한 강으로써 종류는 평양시의 중요 하천이며, 인근 지역의 식수원으로 사용되고 있다.

침수해석 및 홍수피해액 분석 대상지점인 평양시는 북한의 수도이자 최대 도시로, 도시의 중심에 대동강이 흐르며 넓은 총적 평야가 발달해 있다. 평양시의 면적은 2,714.6 km<sup>2</sup>로, 이는 북한 전체 면적의 약 2.2%에 해당한다. 인구는 2019년 기준 약 300만 명으로 북한 총 인구 대비 11.2%가 거주하고 있다.

### 2.2 강우자료 수집 및 공간분포

2002년의 초대형 태풍 루사는 우리나라 강우관측 사상 일 최대 강우량을 기록하였고, 강릉지역의 경우, 다른 영동지역에 비하여 최대강우량과 강우강도가 훨씬 크게 발생되었다 (Kim, 2005). 본 연구에서는 태풍 루사와 같은 초대형 태풍이 내습했을 경우의 예상 침수구역과 침수피해액을 추산하기 위해 북한 대동강유역에 태풍 루사 내습 당시 강우를 모의하였다. 자료 수집 대상 관측소는 당시 최대 강우량을 기록한 강릉 강우관측소로 선정하였으며, 지속기간 24시간(2002년 8월 31일 오전 3시~2002년 9월 1일 오전 2시)의 1시간 단위 강우 자료를 활용하였다. 다음 Fig. 3은 본 연구에서 사용한 강우자료의 우량주상도를 나타낸 것이다. 수집된 강우자료의 지속기간 24시간 총 강수량은 879 mm, 1시간 최대 강우강도는 98 mm/hr이다.

수집된 자료를 분포형 유출해석 모형에 입력하기 위해 격자형으로 공간분포하였다. 공간분포 시에는 강우의 중심으로부터의 거리에 따른 강우량의 감소 조건을 모의하기 위하여 한국확률강우량도의 작성(MOCT, 2000) 보고서에서 제시한 면적감소계수(Area Reduction Factor) 산정공식을 적용하였다. 면적감소계수 산정공식은 Eq. (1)에 제시하였다.



Fig. 2. Study area in this study (Daedong river basin and Pyongyang)

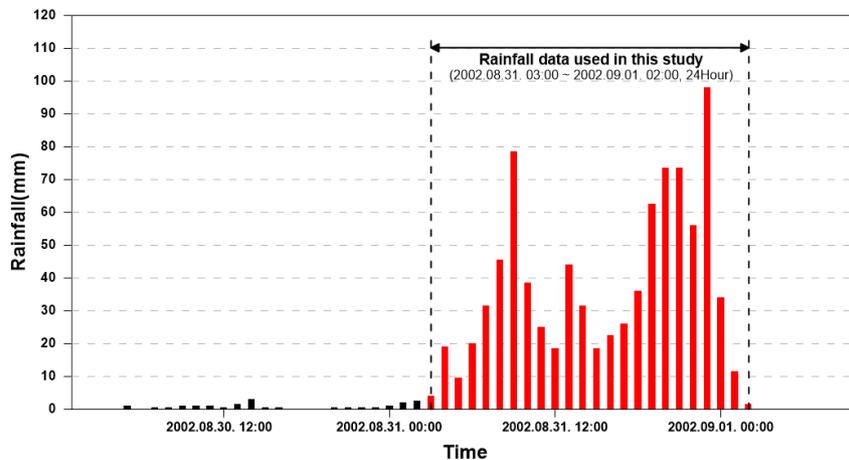


Fig. 3. Rainfall hyetograph (2002.08.30. 00:00~2002.09.01. 09:00)

$$ARF(A) = 1 - M \exp[-(aA^b)^{-1}] \quad (1)$$

여기서,  $ARF(A)$ 는 면적에 따른 면적감소계수,  $A$ 는 유역면적( $\text{km}^2$ )이며,  $M, a, b$ 는 재현기간 및 강우지속기간에 관계되는 회귀상수이다.  $M, a, b$ 의 경우 설계강우의 지속기간과 재

**Table 2.** Area reduction factor by distance from the center of rainfall

Regression constant			Distance (km)	Area ( $\text{km}^2$ )	Area Reduction Factor
$M$	$a$	$b$			
2.5280	0.1661	0.0994	10	314	0.92
			20	1,256	0.87
			30	2,826	0.84
			40	5,024	0.81
			50	7,850	0.79
			60	11,304	0.77
			70	15,386	0.75
			80	20,096	0.73
			90	25,434	0.72
			100	31,400	0.71
			110	37,994	0.69
			120	45,216	0.68
			130	53,066	0.67
			140	61,544	0.66
			150	70,650	0.65
			160	80,384	0.64
			170	90,746	0.63

현기간별로 한국확률강우량의 작성(MOCT, 2000) 보고서에 제시된 값을 사용하여야 하지만, 본 연구에서 활용하는 강우사상에 해당하는 값이 제시되어 있지 않아 가장 큰 재현기간인 200년 빈도에 해당하는 값으로 대체하여 사용하였다. 본 연구에서 활용한 회귀상수 및 계산 과정은 Table 2에 제시하였다.

다음으로, 공간분포된 격자형 강우자료를 유출해석 대상 지점인 대동강유역으로 강우 중심이동을 수행하였다(Fig. 4).

### 2.3 유출 및 침수해석 모델 구축

분포형 유출 및 침수해석 모델 구축을 위해 격자형으로 공간분포된 강우자료, 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM), 토지피복도, 토양도 자료를 모두  $250 \times 250(\text{m})$  크기로 리샘플(resample)하였다(Fig. 5).

분포형 유출해석모형은 유역을 작은 격자로 구분하여 격자 단위로 강우-유출 관계를 분석한다. 유출해석 수행 결과는 격자별 유출수문곡선으로 도출되며, 그 결과는 침수해석 시 하도에 흐르는 유량을 모의하는 입력 자료인 경계조건으로 활용된다. 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 대동강유역 상류로부터 평양시로 유입되는 7개 주요 지점을 대상으로 유출해석을 수행하였으며, 그 결과를 침수해석 모형에 경계조건으로 입력하여 침수해석을 수행하였다.

### 2.4 홍수피해액 추산

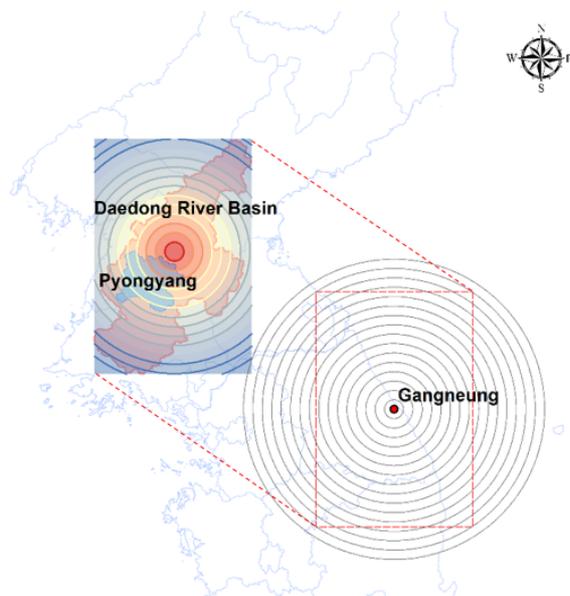
본 연구에서는 침수로 인한 경제적 손실규모를 추산하기 위해 본 연구의 결과인 침수피해 예상면적을 활용하여 직접적으로 계산이 가능한 농작물과 가옥 피해액 항목을 선정하였다. 또한 자료의 구득이 제한적인 미계측유역의 특성으로 인해 수집 가능한 범위의 사회·경제지표를 적용하여 계산할 수 있는 간편법과 개선법의 방법론을 활용하였다.

#### 2.4.1 농작물 피해액

침수피해로 인한 농작물 피해액 추산에는 개선법의 농작물 피해액 산정방법을 활용하였다. 개선법에서 농작물 피해액은 Eq. (2)와 같이 농작물 피해가 발생한 경지면적(단보)과 지역의 단보 당 수확량(kg), 농작물의 단가(원/kg)를 피해율로 곱하여 산정하게 된다.

$$H = \sum A_{ij} \times Q_j \times P_i \times d_i \quad (2)$$

여기서,  $H$ 는 농작물 피해액,  $\sum A_{ij}$ 는 농작물의 피해율이  $j$ 인 경지면적(단보),  $Q_j$ 는 농작물의 단보 당 수확량(kg),  $P_i$ 는 농



**Fig. 4.** Conceptual diagram of rainfall distribution

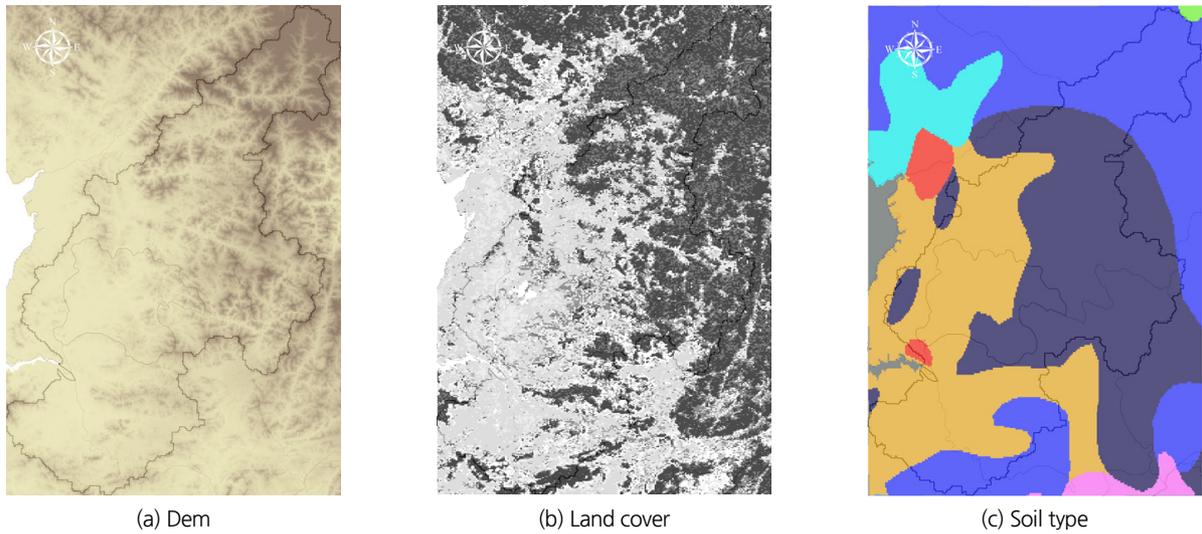


Fig. 5. Data used for grid based rainfall-runoff model

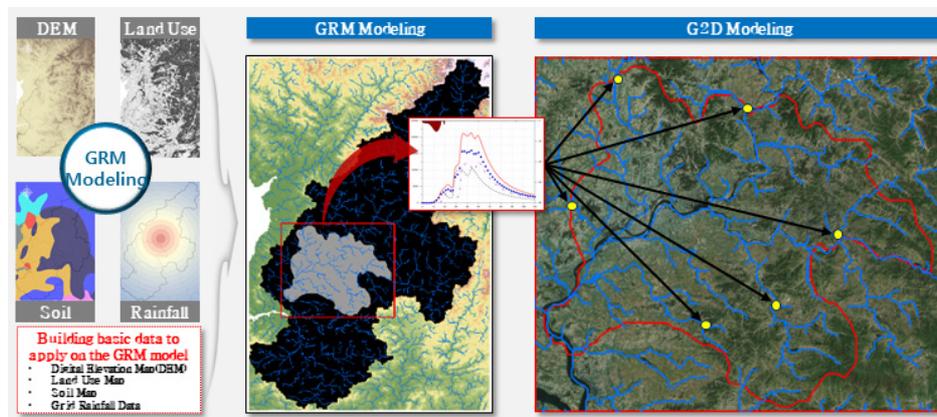


Fig. 6. Conceptual diagram of runoff and flooding analysis

작물의 단가(원/동),  $d_i$ 는 농작물의 피해율,  $i$ 는 농작물의 품종 구분,  $j$ 는 농작물의 피해율이다.

2.4.2 가옥 피해액

침수피해로 인한 가옥 피해액 추산에는 간편법의 가옥 피해액 산정방법을 활용하였다. 간편법에서 가옥 피해액은 Eq. (3)과 같이 최대 규모 홍수 발생 시의 침수면적내 가옥수, 가옥 피해율, 피해지역의 동당 가격(원)을 곱하여 산정한다.

$$D = \sum N \times P_i \times d_i \quad (3)$$

여기서,  $D$ 는 가옥 피해액,  $\sum N$ 은 침수면적 내 가옥수,  $P_i$ 는 가옥 동당 단가(원/동),  $d_i$ 는 가옥의 피해율,  $i$ 는 가옥의 종류별 구분이다.

3. 결 과

3.1 침수해석 결과

본 연구에서는 대동강유역에 2002년 태풍 루사 당시의 강우를 재현하여 분포형 유출해석을 수행하였으며, 그 결과를 활용하여 평양시에 대한 침수해석을 수행하였다. 평양시 침수해석 결과 강우 시작으로부터 30시간 경과 후 최대 침수면적을 기록할 것으로 분석되었으며, 평균 침수심도는 4.4 m로 산정되었다. 평양시 예상 최대 침수면적은 327.9 km<sup>2</sup>로 산정되었으며, 침수용적은 16억 m<sup>3</sup>으로, 평양시 전체 면적의 약 12.1%가 침수피해를 입을 것으로 분석되었다. 다음 Fig. 7은 강우 시작 30시간 이후 최대 침수면적을 기록하였을 때의 예상 침수구역도를 도시한 것이며 침수심도별 면적 및 비율은 Table 3에 제시하였다.

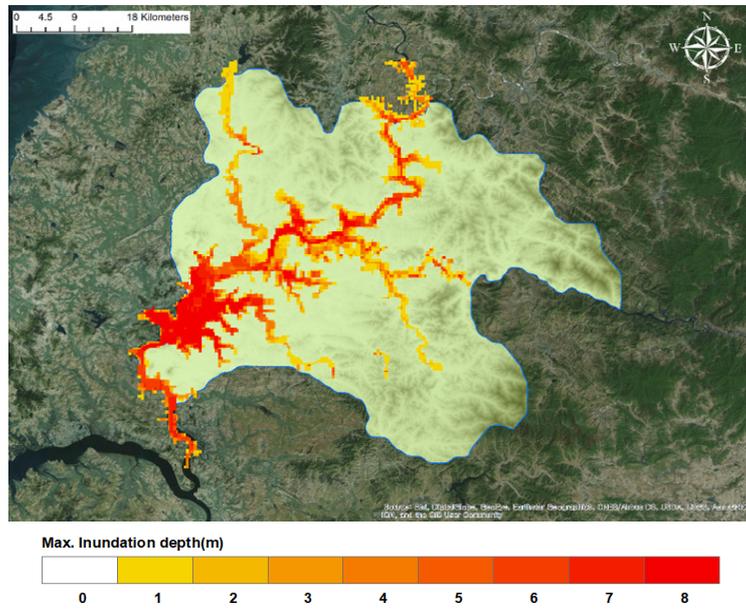


Fig. 7. Expected flood inundation area in Pyongyang

Table 3. Area and ratio by depth of flood inundation

Inundation Depth (m)	1	2	3	4	5	6	7	8
Inundation Area (km <sup>2</sup> )	46.4	44.1	37.2	34.9	51.0	39.3	46.2	28.9
Rate of Inundation Depth (%)	14.2	13.4	11.3	10.6	15.6	12.0	14.1	8.8

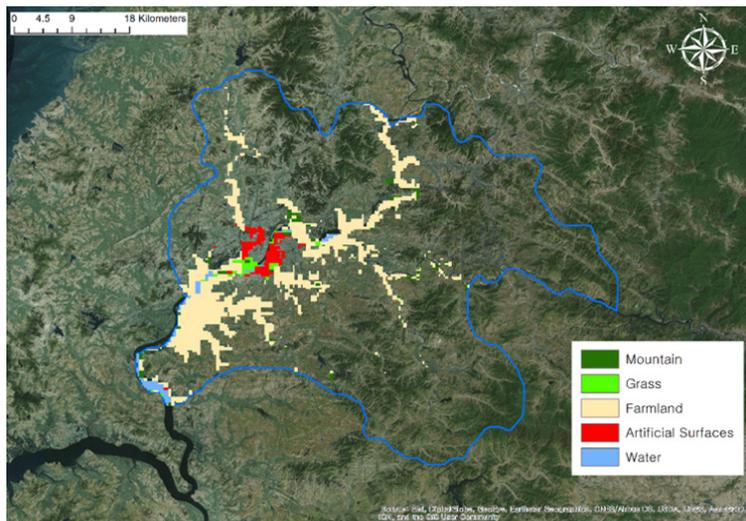


Fig. 8. Expected flood inundation area by land cover type

Fig. 8은 위성자료 기반의 토지피복도와 본 연구의 침수해석 결과를 중첩하여 추출한 토지이용 종류별 침수피해 면적을 나타낸 것이며, 산지, 농지, 도시지역의 총 면적 및 침수면적, 침수면적의 비율 등을 정리하여 Table 4에 제시하였다. 전체 침수면적인 327.9 km<sup>2</sup> 중 농지 침수면적은 255.6 km<sup>2</sup>로 전체

침수 예상면적 대비 77.9%에 해당할 것으로 분석되었다. 또한 도시지역 예상 침수면적은 25.1 km<sup>2</sup>로, 전체 침수 예상면적 대비 7.6%로 분석되었다.

농지의 경우 평양시 전체 농지면적인 1,814.4 km<sup>2</sup> 중 14.1%에 해당하는 범위가 침수피해를 입을 것으로 보이며, 도시지

**Table 4.** Ratio of flood inundation area by land cover type

Type of Land Cover	Area by Type of Land Cover (km <sup>2</sup> )	Flood Inundation Area by Type of Land Cover (km <sup>2</sup> )	The Ratio of Inundation to Total Area by Land Cover (%)
Mountain	798.0	17.0	2.1
Farmland	1814.4	255.6	14.1
Artificial Surfaces	67.1	25.1	37.4

**Table 5.** Calculation of flood damage area of farmland

Farmland Area in Pyongyang (991.7 m <sup>2</sup> )	The Ratio of Inundation to Total Farmland Area (%)	Flood Damage Area of Farmland (991.7 m <sup>2</sup> )
1,829,511.8	14.1	257,961.2

**Table 6.** Calculation of crop yield per unit area (991.7 m<sup>2</sup>)

Annual Crop Production in Pyongyang (1,000 ton)	Farmland Area in Pyongyang (991.7 m <sup>2</sup> )	Crop Yield Per Unit Area (kg/991.7 m <sup>2</sup> )
124.8	1,829,511.8	68

**Table 7.** Calculation of the amount of crop damage by flood inundation

Flood Damage Area of Farmland (991.7 m <sup>2</sup> )	Crop Yield Per Unit Area (kg/991.7 m <sup>2</sup> )	Exchange Rate of Korean Won-U.S. Dollor (Korean Won)	Amount of Crop Damage Caused by Flood Inundation (Billion Korean Won)
124.8	68	1,136.6	11.7

역의 경우 전체 도시면적 67.1 km<sup>2</sup> 중 37.4%가 침수될 것으로 분석되었다. 농지와 도시지역은 과거부터 대동강과 주요 지류 인근에 분포하고 있으며, 대부분 평지에 위치하고 있기 때문에 큰 피해를 입을 것으로 예상된다.

## 3.2 홍수피해액 추산 결과

### 3.2.1 농작물 피해액

위성자료 기반의 토지피복도와 침수해석 결과와 각종 평양시 농작물 관련 사회·경제지표를 개선법의 농작물 피해액 산정절차에 대입하여 예상 피해액을 산출하였다. 먼저, 침수로 인한 농작물의 피해율은 계산의 편의를 위해 모두 유실 및 매몰되었을 경우(100%)로 가정하였다. 또한 위성자료를 활용하여 농작물과 밭작물의 재배 면적을 구분하는 것에 어려움이 있어 평양시 경지면적을 모두 논작물(벼)로 가정하였다.

농작물 피해액 산정을 위해서는 먼저 침수피해 경지면적(단보) 산정이 필요하다. 면적단위인 단보는 농경지 면적을 측정할 때 사용하는 단위로, 1단보는 991.7 m<sup>2</sup>에 해당한다. 본 연구에서는 위성자료 기반의 토지피복도를 통해 산정된 논지 침수면적을 단보 단위로 환산하여 침수피해 경지면적을 계산하였다. 단보 단위로 환산된 침수피해 경지면적은 257,961.2

단보로 산정되었다(Table 5).

다음으로 북한농업동향(KREI, 2016) 보고서에서 제시된 북한 지역별 작물 생산량(kg)을 평양시 경지면적(단보)으로 나누어 농작물의 단보 당 수확량(kg/단보)을 계산하였다. 평양시 경지면적 전체를 논작물(벼) 생산면적으로 가정하였기 때문에 생산량 또한 평양에서 생산된 모든 작물을 논작물(벼)로 가정하여 계산에 활용하였다. 이와 같은 과정에 의해 계산된 평양시 연간 농작물 생산량은 약 124,800천 kg이며, 농작물의 단보 당 수확량은 68 kg로 산정되었다(Table 6).

마지막으로 농작물의 단가는 북한농업동향(KREI, 2020) 보고서에서 제시된 곡물류의 품목별 시장가격을 참조하여 2019년 분기별 농작물(쌀)의 단위 킬로그램 당 단가를 평균한 0.6달러/kg을 대한민국 원단위로 환산하여 적용하였다. 달러화 환산에 적용된 1달러 당 환율은 2020년 11월 1일 기준인 1,136.61원을 적용하였다.

앞서 계산된 침수피해 경지면적, 평양시 농작물 수확량, 농작물의 단가를 활용하여 농작물 피해액을 계산한 결과 약 117억 원의 경제적 손실이 있을 것으로 분석되었으며, 계산 과정은 Table 7에 나타내었다.

**Table 8.** Calculation of the number of buildings in the flooded area

Type of Building	Number of Buildings	The Ratio of Inundation to Total Artificial Surfaces (%)	Number of Buildings in the Flooded Area
Detached House	45,267	37.4	16,930
Row House	218,180		81,599
Apartment	434,230		162,402

**Table 9.** Calculation of the amount of building damage by flood inundation

Type of Building	Value of Building Assets (Korean Won)	Building Average Number of Floors	Number of Buildings in the Flooded Area	The Ratio of Damage (%)	Amount of Building Damage Caused by Flood Inundation (Billion Korean Won)
Detached House	5,683,050	1	16,930	100	96.2
Row House	11,366,100	5	81,599	40	371.0
Apartment	130,710,150	15	162,402	5.5	1,167.5

### 3.2.2 가옥 피해액

간편법에 의해 침수구역 내 가옥 피해액 산정을 위해서는 침수면적 내 가옥 수, 가옥 동당 단가, 가옥 피해율 산정이 필요하다. 본 연구에서는 수집 가능한 평양시의 주거 형태 및 주택 현황 자료를 조합하여 침수피해로 인한 가옥 피해액을 산정하였다.

침수구역 내 가옥 수는 Tak (2017)이 제시한 평양시 도시지역 내 유형별 주택수에 본 연구의 결과인 도시지역 침수면적 비율을 곱하여 추산하였다. 평양시 도시지역의 주택은 단독주택(1층 규모), 연립주택(5층 규모), 공동주택(15층 규모)의 3가지 유형으로 구성되어 있으며, 2017년 기준 유형별 주택수는 각각 45,267호, 218,180호, 434,230호로 조사되었다. 조사된 유형별 주택수에 침수해석 결과인 도시지역 침수편입률(37.4%)를 적용한 침수구역 내 주택수는 단독주택 약 16,930호, 연립주택 약 81,599호, 공동주택 약 162,402호로 산정되었다(Table 8).

북한에는 건물 자산의 개념이 없으나, 과거 불법이었던 부동산 거래가 최근에는 ‘주민들 속에 사장되어 있는 돈을 동원해 집을 지어줘라.’, ‘돈의 출처를 묻지 말라’는 등 부동산거래를 묵인에서 승인, 나아가 합법화하고자 하는 법적·제도적 변화가 김정은 시대 들어 부각되고 있다(Joung, 2018). 따라서 본 연구에서는 북한 이탈 주민 대상으로 형태별 주택가격을 조사하여 제시한 Joung (2018)의 연구 결과를 활용하여 평양 도시지역의 주택유형별 단가를 추산하였다. 마지막으로 가옥 피해율은 주택 유형별로 규모가 다르다는 점을 반영하기 위해 침수심별 피해 정도를 소파, 반파, 전파, 유실로 구분하여 피해율을 계산하는 간편법의 방법을 적용하여 가옥 규모별 피해율을 산정하였다.

위와 같은 과정에 의해 계산된 가옥 피해액은 단독주택 약 962억 원, 연립주택 약 3,710억 원, 공동주택 약 1조 1,675억 원으로 계산되었으며(Table 9), 총 가옥 피해액은 약 1조 6,000억 원으로 추산되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 태풍 루사 당시의 강우사상 모의를 통해 북한 대동강유역 및 평양시를 대상으로 유출 및 침수해석을 수행하였으며, 침수해석 결과를 토대로 홍수피해액을 추산하였다. 유출 및 침수해석에는 위성영상을 활용하여 미계측유역의 수문매개변수 구축이 가능한 분포형 유출해석모형 GRM 및 2차원 범람해석모형 G2D를 활용하였다. 침수해석 결과를 토지피복도와 결합하여 토지이용별 침수면적 및 침수심을 분석하였으며, 그 결과를 토대로 농작물 피해액과 가옥 피해액을 추산하였다.

침수해석 결과를 살펴보면, 대동강유역에 태풍 루사 당시 규모인 지속시간 24시간에 879 mm의 강우가 발생할 경우 평양시는 강우 시작으로부터 30시간 경과 후에 최대 침수면적인 327.9 km<sup>2</sup>를 기록할 것으로 분석되었으며, 평균 침수심도는 4.4 m로 계산되었다. 침수되는 수량의 총 용적은 16억 m<sup>3</sup>이며, 평양시 전체 면적의 약 12.1%가 침수피해를 입을 것으로 분석되었다.

홍수피해액 추산 결과를 살펴보면, 먼저 농작물 피해액의 경우 전체 농지면적의 14.1%에 해당하는 225.6 km<sup>2</sup>가 침수피해를 입을 것으로 분석되었으며, 이로 인해 약 117억 원의

농작물 피해액이 발생할 것으로 전망되었다. 가옥 피해액의 경우 평양시 도시지역 전체 면적의 37.4%에 해당하는 25.1 km<sup>2</sup>가 영향을 받을 것으로 분석되었으며, 이로 인한 가옥 피해액은 단독주택 약 962억 원, 연립주택 약 3,710억 원, 공동주택 약 1조 1,675억 원으로 총 피해액은 약 1조 6,000억 원에 달할 것으로 보인다. 이는 북한의 물가나 경제규모를 고려했을 때 비교적 큰 금액이라 할 수 있으며, 북한의 2018년 기준 국내총생산 35조 6,705억 원의 약 4%에 해당한다.

본 연구에서는 위성자료 기반의 분포형 유출 및 침수해석 결과와 각종 사회·경제지표를 간편법 및 개선법의 방법론에 입력하여 미계측유역에 적용 가능한 홍수피해액 추산법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 방법론은 기상·수문자료와 자산가치 등의 자료가 부족한 북한 지역이나 동남아 국가로 수자원 사업 진출 시 기초조사 단계에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

침수로 인한 피해액 추산 결과는 과거 실제로 발생했던 피해이력 등 경험적 자료를 통해 검증하는 과정이 필요하지만 미계측유역의 특성상 관련 자료의 구득이 어려운 실정이다. 또한 지적도나 침수구역 내 구조물의 자산 가치 등 침수피해 지역에 대한 각종 자료의 부족으로 분석 결과의 정확도를 높일 수 있는 방안이 부족하다는 한계점이 있다. 따라서 더욱 발달된 원격 탐사기술로 정밀한 자료의 구득이 가능해진다면 본 연구에서 제시한 결과의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 방법론과 결과는 과거 사상 및 필요 자료의 부족으로 객관화되지 않았다는 한계점이 있다. 따라서 미계측유역의 침수피해규모 분석 및 피해액 추산의 과정 및 결과를 검·보정할 수 있는 방안을 제시하는 연구가 후속될 필요성이 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전취약핵심역량 도약기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2019-MOIS33-006).

## References

- Joo, H., Lee, T., Kim, J., Kim, D., and Kim, S. (2018). "Study on optimum priority of flood control projects using the maximized economic curve." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 18, No. 7, pp. 403-415.
- Joung, E.I. (2018). "The analysis on change of property and development in North Korea." *The Journal of Northeast Asian Economic Studies*, NEAK, Vol. 30, No. 4, pp. 1-30.
- Kang, D.H., Lee, S.H., Kim, G.H., and Kim, B.S. (2018). "Estimation of flood damage using building group inventory and multi-dimensional flood damage analysis." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 18, No. 7, pp. 119-127.
- Kim, E.S., Choi, H.I., and Jee, H.K. (2010). "Estimation of the flash flood index by the probable rainfall data for ungauged catchments." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 10, No. 4, pp. 81-88.
- Kim, G.S. (2005). *A study on precipitation and runoff analysis of Gangneung area of Korea by the typhoon Lusa in 2002*. Masters Thesis, University of Seoul, p. 1.
- Kim, J.H., Choi, Y.S., and Kim, K.T. (2015). "Flow estimation using rainfalls derived from multiple satellite images in North Korea." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, KAGIS, Vol. 18, No. 4, pp. 31-42.
- Korea Development Institute (KDI) (2019). *A study on the application criteria of multi-dimensional method for the reduction of flood damage*. 2019 Policy Research Report, p. 29.
- Korean Rural Economic Institute (KREI) (2016). *Quarterly agricultural trends in North Korea*. Publication No. 02-2016-01, p. 13.
- Korean Rural Economic Institute (KREI) (2020). *Quarterly agricultural trends in North Korea*. Publication No. 02-2020-01, p. 119.
- Kwak, C.J., Choi, W.J., and Cho, J.W. (2015). "An assessment of flooding risk using flash flood index in North Korea-focus on Imjin basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 48, No. 12, pp. 1037-1049.
- Lee, K.H., Choi, S.A., Kim, H.S., and Shim, M.P. (2006). "Application of multi-dimensional flood damage analysis for urban flood damage." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 4B, pp. 363-369.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (2000). *Probability rainfall in South Korea*.
- Park, J., Yoon, Y., and Rhee, K. (2019). "Prevention of flood inundation in ungauged watershed using XP-SWMM." *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, KOSET, Vol. 20, No. 6, pp. 457-470.
- Shin, S.S. (2013). "Economic feasibility study of port disaster prevention facility from climate change storm surge using MD-FDA." *Ocean Policy Research*, KMI, Vol. 27, No. 2, pp. 133-176.
- Son, A., and Kim, J. (2019). "The analysis of flood in an ungauged watershed using remotely sensed and geospatial datasets." *Korean Journal of Remote Sensing*, KSRS, Vol.35, No.5-2, pp. 797-808.
- Tak, Y.D. (2017). "Housing policy and marketization in North Korea." *Monthly Housing Finance Report*, HF, Vol. 153, pp. 28-43.
- Yi, C.H., Choi, S.A., Shim, M.P., and Kim, H.S. (2006). "GIS based distributed flood damage assessment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 3B, pp. 301-310.
- Yun, H.C., Min, K.S., and Kim, M.K. (2010). "Construction of multi-purpose hazard information map based on digital image using geospatial information." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, KAGIS, Vol. 13, No. 3, pp. 91-101.