KIEAE Journal, Vol. 23, No. 3, Jun. 2023, pp.51-56.

KIEAE Journal
Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

121

청주시 도시 홍수 완화 계획 의사결정 지원을 위한 생태계서비스 요인

Ecological System Service Factors for Decision-making Support for Urban Flood Migration Planning in Cheong-ju

정상규* · 반영운** · 이태호***
Sang-Kyu Jeong* · Yong-Un Ban** · Tae-Ho Lee***

** First author, Professor, Dept. of Smart Eco-Industrial Convergence, Chungbuk National Univ., South Korea (neoshaky@chungbuk.ac.kr)*
*** Coauthor, Professor, Dept. of Urban Engineering, Chungbuk National Univ., South Korea (byubyu@chungbuk.ac.kr)*
**** Corresponding author, Associate Researcher, Division of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, South Korea (utome@nie.re.kr)*

A B S T R A C T

Purpose: This study aims to identify the factors of ecosystem service for decision-making support in the process of urban and regional development, maintenance, and regeneration planning to mitigate flood risk in the city due to climate change, targeting Cheongju in Korea. **Method:** In this study, using the urban flood risk mitigation model, spatial simulation analysis was performed for the city with land use/land cover map, watershed map, hydrologic soil group map, design precipitation, and biophysical data. **Result:** Rivers and streams in the farmland areas occupying a large area of the city and soil characteristics with poor permeability were found to act as factors that could cause farmland damage due to floods. Therefore, it is necessary to expand the distribution of urban forests by introducing vegetation such as trees to prevent flood damage. In addition, it was predicted that there is a risk of excessive runoff in areas with high development density, centered on industrial complexes in Cheongju. Therefore, it is necessary to develop an eco-industrial park that can prevent disaster and support citizen's recreation by creating green spaces and infrastructures to store runoff water. In this way, in the decision-making process for establishing a flood risk mitigation plan and promoting related policies, ecosystem service factors that can provide benefits such as disaster prevention as well as improvement of quality, carbon capture, and air purification should be considered.

ⓒ 2023. KIEAE all rights reserved.

K E Y W O R D

기후 변화
도시 홍수 완화
의사결정 지원
생태계서비스

Climate Change
Urban Flood Migration
Decision-making Support
Ecosystem Service

A C C E P T A N C E I N F O

Received Apr. 13, 2023
Final revision received Jun. 10, 2023
Accepted Jun. 15, 2023

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

21세기의 심각한 기후 변화는 예전에 비해 더욱 빈번한 폭우를 야기하여 사람과 건물에게 홍수 피해를 입혔고 전세계적으로 도시에 영향을 미쳐 지표 유출수(runoff)와 범람 등과 같은 도시의 우수 관리 문제를 야기하였다[1]. 우수가 토양에서 흡수되는 최대 침투성능보다 강수량이 초과되면 유출수가 발생한다. 지속적인 도시화로 야기된 인구 밀집과 토지 이용 변화에 따른 불투수성 지표면의 확장은 도시의 홍수 저감 능력을 감소시켰다[2]. 이러한 지표의 불투수성은 지하수 재생성을 제한하고 유출수의 유속을 높이는 요인이 된다[3]. 도시의 토지 이용, 식생, 토양군에 따라 토양의 공극과 수문학적(hydrological) 과정이 달라지는데 이는 우수의 토양 침투에 영향을 준다[4]. 홍수 피해를 예방하기 위해 홍수 제어 기반시설이 널리 사용되고 있으나 이는 도시 생태계에 부정적인 영향을 줄 수 있으므로 자연 생태계를 기반으로 홍수를 예방할 수 있는 해법의 마련이 필요하다. 따라서 도시 홍수 완화를 위해 "회색 기반구조(gray infrastructure)"와 더불어 생태계서비스 혜택을 제공할 수 있는 "녹색 기반구조(green infrastructure)"를 병행하여 활용하면 홍수 위기 완화 효과를 향상시킬 수 있다[5]. 이와 같이 도시 홍수 완화를 위해 기존 회색 기반시설을 녹색 기반시설로 지속적으로 전환하는 일은 기후 변화 적응을 위한 전략적 대안이 될 수 있다[6]. 홍수에 대한 회복력 증진을 위해서는 도시 생태 공간의 보존, 복원, 조성을 통한 투수성이 우수한 도시 계획 추진이 필요하다[7]. 생태계의 디지털 모델링은 기후 변화에 따른 도시의 국지적인 홍수 취약성 완화를 위한 전략 수립을 위한 도시 계획 의사결정을 지원할 수 있다[8]. 홍수를 예방하거나 완화하기 위한 도시계획 의사결정 과정에서 지리정보시스템(Geographic Information System, 이하 GIS) 도구를 활용하여 도시 녹지 공간 등의 생태계서비스의 공평한 분배와 탄력적 공급을 고려하여 당해 서비스 공간의 우선순위를 결정할 수 있다[9]. 기후변화에 따른 극단적인 폭우 발생에 따른 위기 대응을 위해서는 효과적인 우수 관리 체계 구축과 정책 수립을 위한 의사결정 지원시스템의 개발이 필요하다[1]. 이에 이 연구에서는 2017년 전국 최대의 강우로 큰 피해를 입었던 청주시를 대상으로 토양군과 토지이용 정보를 바탕으로 시뮬레이션을 실행하고 공간별로 홍수에 취약한 잠재적 지점을 파악하여 이에 대응할 수 있는 자연 생태계 기반의 방안을 도출하기 위해 도시 홍수 완화 계획 의사결정을 위한 생태계서비스 요인을 규명하고자 했다.

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
https://doi.org/10.12813/kieae.2023.23.3.051

1.2. 연구의 범위 및 내용

이 연구를 위해 2014년 이후 청원군과 통합된 이후로 흥덕구, 청원구, 서원구, 상당구의 4개 지역구로 구성된 청주시 전역을 대상으로 하계 집중 호우 기간에 발생 가능한 설계 강우량을 강우 1시간과 3시간 이후의 누적량을 토대로 시뮬레이션을 실행하여 그 공간별 유출수량과 저류량 산출결과를 GIS에서 가시화하였다. 이를 통해 도시 공간의 생태계 및 토지이용 특성에 따른 홍수 거동을 파악하고 홍수 완화에 기여하는 요인들을 검토하여 도시 홍수 완화 계획을 위한 의사결정 시 고려해야 할 생태계서비스 요인들을 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 청주시의 홍수 피해

2017년 7월 14~16일 집중호우로 충청지역에는 커다란 홍수피해가 발생하였다. 특히 기후변화에 따른 단기간의 강우 집중으로 청주시에는 미호천과 무심천을 비롯하여 영운천, 율량천, 석남천, 한계천 등의 중소하천 홍수량의 급증으로 범람, 침식, 호안 유실, 건물 및 기반시설 등 및 인명 피해가 발생하였다[10, 11].

2017년 7월 북태평양고기압이 평년보다 강하게 북서쪽의 한반도로 확장하여 중부지방의 강수량이 평년보다 많았다. 특히 7월 16일에는 중국 북부에 위치한 고기압과 북태평양고기압 사이로 다량의 수증기가 통과하면서 많은 비가 내렸다. 이때 청주시의 일 강수량은 290.2㎜로서 전국 최다 1위를 기록하였고 최대 시우량 91.8㎜으로 200년 빈도 확률강우량(91㎜)을 초과하였다. 특히 지류 지방하천인 석남천의 범람과 유실로 인해 청주시 복대동과 가경동 일원과 청주산업단지 폐수처리장 등이 침수 피해를 입었고 낭성면과 미원면에서는 지반 표층이 급경사인 산지지형을 중심으로 산사태 피해가 발생하였다. 이러한 홍수 피해로 2017년 7월 27일에 청주시가 특별재난지역으로 지정되었다[11].

2.2. 생태계서비스

생태계서비스의 초기 개념은 19세기에 자원의 유한함을 자각하고 폐기물의 처리 과정을 자연 생태계의 유기물 분해 과정과 유사한 서비스로 간주하려는 시도로부터 정립되었다[12]. 20세기에는 자연의 자산가치에 대한 연구가 수행되면서 생태계로부터 사람들이 직·간접적으로 얻을 수 있는 재화와 조절 서비스, 지지 서비스, 문화 서비스들을 모두 포함하는 혜택으로 인간 생활을 지원하는 생태계와 생물들의 서비스로 생태계서비스의 개념이 구체화되었다[12, 13]. 21세기에 들어서면서 UN이 세계 각국의 과학자들과 함께 2005년까지 새천년생태계평가(Millenium ecosystem assessment)를 추진하면서 생물다양성의 산물과 서비스를 설명하기 위해 생태계서비스의 개념을 도입하였다[14]. Boyd와 Banzhaf(2005)은 이러한 생태계서비스를 생물학적, 화학적, 물리적 속성들과 같은 생태계 기능과 구분하여 생태계를 구성하는 요소들을 소비하여 인간의 복지를 구현하는 것으로 정의하였다[15].

2.3. 수문학적 토양군

수문학적 토양군(Hydrologic Soil Groups)은 미국 농무부(United States Department of Agriculture, 이하 USDA)의 Natural Resources Conservation Service (NRCS)에서 토양의 수리 전도도(hydraulic conductivity)와 토양 깊이에 따라 A, B, C, D의 4가지 집단으로 토양 특성을 유형화한 것이다. 토심(土深) 50~100㎝ 사이에 투수층이 존재한다면 침투속도가 40㎛/s를 초과할 경우에는 A군, 10~40㎛/s일 경우에는 B군, 1~10㎛/s일 경우에는 C군, 1㎛/s 미만일 경우에는 D군으로 분류한다. 1m를 초과하는 토심에 투수층이 존재한다면 침투속도가 10㎛/s를 초과할 경우에는 A군, 4~10㎛/s일 경우에는 B군, 0.4~4㎛/s일 경우에는 C군, 0.4㎛/s 미만일 경우에는 D군으로 분류한다[16].

2.4. 도시 홍수 완화 모델

스탠포드 대학, 미네소타 대학, The Nature Conservancy, World World Wildlife Fund사가 연합하여 설립한 "Natural Capital Project"에서 개발된 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)는 생태계 변화에 따른 인간에게 전달되는 혜택의 변화 과정을 탐색하기 위한 오픈 소스 소프트웨어다[17]. 홍수는 하천 범람, 연안 범람, 폭우 등의 다양한 원인 요소로부터 발생하는데 생태계 구성요소는 강우의 유출수량과 지표면에서의 유속을 낮춰주는 역할을 한다. InVEST가 제공하는 여러 모델들 중에서 도시 홍수 위기 완화(urban flood risk migration, 이하 UFRM) 모델은 유출 감소량, 즉 강우량에 대한 픽셀당 저류(貯溜)량을 산출할 수 있고 홍수 범위와 기반시설에 대한 정보를 토대로 잠재적인 피해액 산출도 가능하다. 이러한 UFRM 모델은 조사 대상지의 예측 강수량을 입력하면 조사 대상지의 지도, 토지이용/피복(land use/ land cover, 이하 LULC) 지도, 수문학적 토양군 지도를 토대로 생태계서비스의 효과와 가치를 시뮬레이션을 통해 산출할 수 있다. 이 과정에서 곡선 지수법(Curve Number method)을 활용하여 토지이용 및 토양특성에 따라 유출수량과 저류량을 산출하고 그 결과를 GIS을 통해 가시화할 수 있다.

3. 연구 방법

3.1. 미래 강수량 설정

Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model (이하 HadGEM3-RA)는 IPCC의 5차 기후변화 보고서(AR5)에서 제시된 2종의 대표농도경로인 RCP4.5와 RCP8.5의 시나리오로 구성된 지역기후모델(Region Climate Model, RCM)이다. RCP4.5 시나리오는 높은 에너지 효율성과 기후 변화 저감을 중시하는 사회과 경제 발전 방향을 따르는 것을 전제로 2100년 이전에 세계 평균 온도가 2.6도 증가할 것으로 예상한 시나리오이고 RCP8.5는 온실가스 저감을 위한 기후 변화 대책이 거의 없는 상태로 전개된 미래 시나리오로 2100년 전에 세계 평균 온도가 4.3도 증가할 것으로 가정한다. 이 연구에서는 2021년 기후 위기 완화를 위해 한국 정부가 탄소중립 노선을 따르기로 한 현실을 감안하여 RCP4.5 시나리오를 선택하였다. 따라서 RCP4.5 시나리오로 구성

된 HadGEM3-RA를 기초로 영구구조물에 적용할 수 있는 50년 빈도의 시간당 설계 강수량을 UFRM에 적용하였다.

3.2. 입력용 자료 구축

전술한 미래 설계 강수량에 해당하는 수치를 InVEST 모델에 입력하여 도시의 홍수 거동을 분석하기 위해 분석영역을 벡터 형식의 지도로 입력할 필요가 있다. 그리고 해당 분석영역의 토지이용, LULC 상황 및 토양 특성을 파악할 수 있는 래스터 형식의 지도 입력이 필요하다. 이러한 지도를 구축하기 위해 청주시의 행정구역 경계 내의 유역(watershed) 지도, 환경부에서 제공하는 토지피복지도[18]와 농촌진흥청 국립농원과학원에서 제공하는 정밀토양도[19]를 활용하였다. LULC 지도는 세분류된 정보를 InVEST 모델 분석을 위한 토지이용 및 토지피복 유형 코드에 따라 분류하여 재작성하였다. 정밀토양도의 경우에도 토성, 토양 깊이, 토양 배수등급을 참고하여 USDA에서 제시한 분류 기준에 따라 강우 유출 가능성이 높은 순서대로 A, B, C, D로 구분하여 수문학적 토양군 지도를 구축하였다. 이러한 두 개의 지도에 할당된 값에 대응하는 유출곡선지수(Curve Number, 이하 CN)를 분석을 위해 입력하였다. 이때 CN은 USDA에서 제시한 지침[16]에 따라 LULC 유형 및 수문학적 토양군의 특성에 따라 산정된 생물리학(biophysical) 표를 입력 자료로 활용하였다.

Table 1. Input data for the analysis through UFRM

Input data	Format	Reference
Rainfall depth (㎜)	Float number	Water Resources Management Information System [20]
LULC map	Raster (10m×10m)	Ministry of Environment [18]
Soil hydrologic group	Raster (10m×10m)	National Institute of Agricultural Sciences [19]
Watershed	Vector	National Spatial Data Infrastructure Portal [21]
Biophysical table	comma-separated values (CSV)	USDA [16]

Table 2. CNs according to LULC and soil groups

Decscrpition	CNs for hydrologic soil group			
	A	B	C	D
High intensity developed	89	92	94	95
Medium intensity developed	61	75	83	87
Low intensity developed	51	68	79	84
Open space developed	49	69	79	84
Cultivated land	49	69	79	84
Pasture/Hay	49	69	79	84
Glass land	49	69	79	84
Deciduous forest	36	60	73	79
Evergreen forest	36	60	73	79
Mixed forest	36	60	73	79
Wetland	1	1	1	1
Bareland	77	86	91	94
Water	1	1	1	1

3.3. 시뮬레이션

이 연구에서는 전술한 미래 설계 강수량, 유역지도, LULC 지도, 수문학적 토양군 지도, 생물리학 표를 InVEST 소프트웨어에 입력하여 UFRM을 구축하여 시뮬레이션을 실행하였다. UFRM 에서는 유역의 미래 강수량을 입력하면 당해 유역에서 발생할 수 있는 강우 유출량(Eq. 2)과 저류량(Eq. 3)을 추정할 수 있다.

$$S_i = \frac{25400}{CN_i} - 254 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

여기서, S_i는 픽셀 $_i$의 잠재적 저류량(mm), CN_i는 픽셀 $_i$의 토지이용과 토양특성에 따른 CN값,

$$Q_i = \frac{(P - \lambda \times S_i)^2}{P + (1-\lambda) S_i} \times A \times 10^{-3} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

여기서, Q_i는 픽셀 i의 강우 유출량(㎥), P는 설계 강수량(㎜), S_i는 픽셀 i 의 잠재적 저류량(㎜), $\lambda \cdot S_i$는 유출이 시작되는데 필요한 강수량(간이 산정의 경우에 λ=0.2 적용), A는 픽셀의 면적(㎡)

(만약에 P가 $\lambda \cdot S_i$ 이하이면 위 식을 적용하지 않고 Q_i를 0㎥으로 산정)

$$RV_i = R_i \cdot P \cdot A \cdot 10^{-3} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

여기서, RV_i는 픽셀 i의 저류량(㎥), R_i는 픽셀 i 의 저류율(0~1), P는 설계 강수량(㎜), A는 픽셀의 면적(㎡)

InVEST의 UFRM은 위의 공식들을 기반으로 토지이용 및 토양 특성에 따라 강우 발생시 유출수량 및 물 저류량을 산출할 수 있다. 이러한 산출 결과를 GIS를 통해 지도 상에 공간적으로 표현할 수 있다. 이 연구에서는 오픈소스 GIS 응용프로그램인 “QGIS”를 활용하여 UFRM을 통해 산출된 결과를 가시화하여 청주시의 홍수 피해 취약 지점을 표현하였다.

4. 도시 홍수 위기 완화 수준 시뮬레이션

4.1. 침수피해 지역

행정안전부가 침수피해 발생 지역의 침수 흔적조사를 통해 2020년에 작성한 재해지도[22]에서 청주시의 침수흔적도(Fig. 1.)를 살펴보면 하천 인근으로는 청주시의 북서방향으로 흐르는 미호강 유역과 북남방향으로 흐르는 무심천 주변 지역에 침수피해가 집중되고 외곽 지역으로는 북동부 지역에 침수피해가 집중된 것으로 나타났다. 또한 상당구 낭성면의 감천, 미원면의 미원천과 달천 유역 일대가 침수피해 지역으로 조사되었다. 이러한 하천 유역 이외에도 상당구 금천동, 청원구 북이면, 흥덕구 남이면의 일부 지역이 침수피해 지역으로 조사되었다.

4.2. 토지이용 및 토양군 분석

LULC 지도(Fig. 2.)를 분석한 결과에 따르면 청주시 전역(904.7

ⓒ2023. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

Fig. 1. Inundation trace map in Cheongju
(Source: Ministry of the Interior and Safety, 2020)

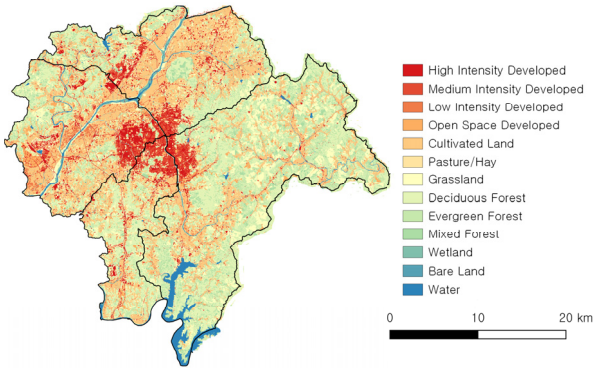


Fig. 2. LULC map in Cheongju

㎢)에서 건물 및 기반시설 등의 건설로 시가화 개발이 이루어진 지역은 129.234㎢(13.74%)로 그 중에 59.247㎢달하는 지역은 고밀도의 개발이 이루어져 있는 것으로 조사되었다. 삼림지역은 383.319㎢(40.75%)로서 가장 넓은 면적을 차지하는 것으로 나타났고 그 다음으로 농경지와 목장이 250.386㎢(26.62%)의 넓은 면적을 갖고 있는 것으로 분석되었다. 그 외에도 초지 135.064㎢(14.36%), 나지 1.31㎢(0.14%), 습지 16.857㎢(1.79%), 수역 24.537㎢(2.61%)의 분포를 보였다.

청주시의 4개 지역구들(서원구, 흥덕구, 청원구, 상당구)이 접하고 있는 일대는 2014년 청원군과 통합되기 이전부터 개발된 도심 지역으로 2000년대 이후 개발이 이루어진 오창 지역과 오송 지역 일대와 함께 고밀도 개발이 이루어졌다. 이 지역을 제외하고는 주로 대부분 농경지와 산림이 차지하는 비중이 높았다. 특히, 농경지는 청주시의 서북부 지역인 흥덕구와 청원구에 집중되었고 산림은 청주시 동부 지역인 상당구의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

수문학적 토양군(Fig. 3.)의 경우에는 A군이 293.333㎢(31.18%), B군이 452.237㎢(48.07%), C군이 111.330㎢(11.83%), D군이 83.312㎢(8.86%)의 면적을 차지하는 것으로 나타났다. 수문학적 토양군은 산림이 집중된 지역에서 A군과 B군이 집중되었고 수계 인근 토양은 주로 C군과 D군이 많았는데 특히 미호강 유역의 토양에 많이 분포하는 것으로 나타났다.

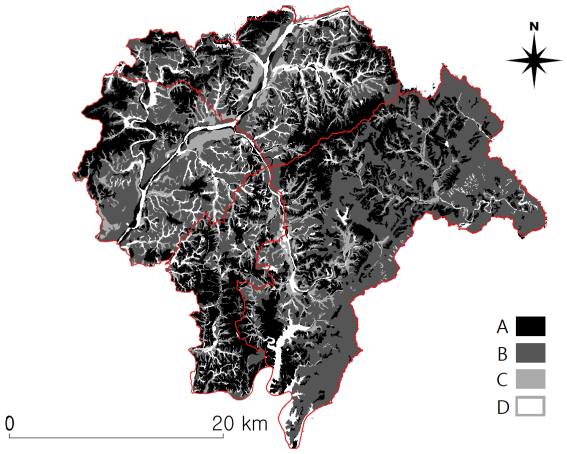
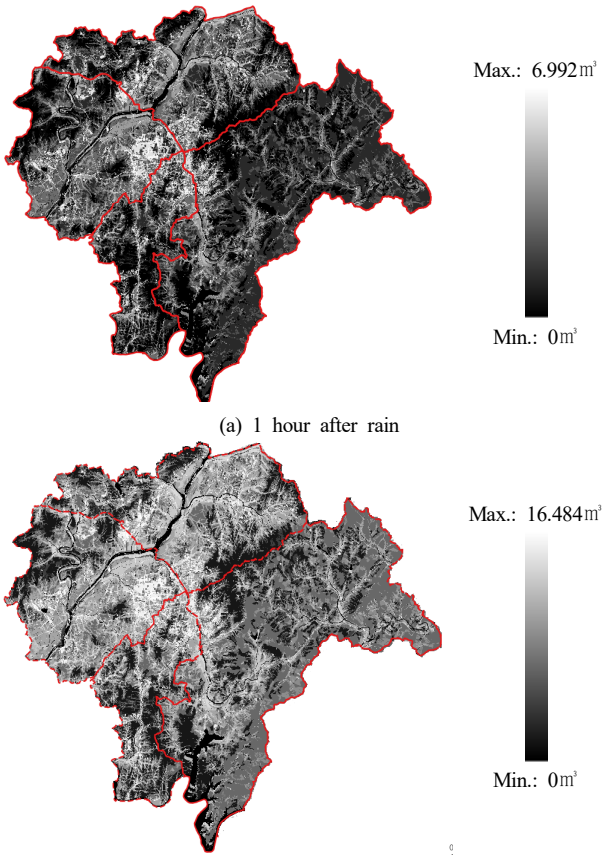


Fig. 3. Hydorologic soil groups in Cheongju

4.3. 강우 유출 및 저류 시뮬레이션

RCP 4.5 시나리오의 50년 빈도에 해당하는 청주시의 설계 강수량은 강우 발생 1시간 후의 경우에는 84.08㎜, 3시간 후의 경우에는 누적 강수량은 179.95㎜이다. 이에 InVEST 소프트웨어를 이용하여 UFRM에 전술한 강우 1시간과 3시간 후의 강수량 데이터를 입력하여 시뮬레이션을 수행하여 강우 유출량과 저류량을 산출하였다. 분석 결과에 따르면 강우 유출량(Fig. 4.)은 강우 1시간 후에 단위면적(10m × 10m, 100㎡), 즉 픽셀 당 평균 2.041㎥로 940.71㎢에 달하는 청주시 전역에 19,200,007㎥, 강우 3시간 후에는 픽셀 당 평균 7.796㎥로 청주시 전역에서는 73,338,196㎥의 유출수가 발생될 수 있을 것으로 예측되었다. 저류량(Fig. 5.)은 강우 1시간 후에 픽셀 당 평균 6.363㎥로 청주시 전역에 59,857,739㎥, 강우 3시간 후에는 픽셀 당 평균 10.199㎥로 청주시 전역에 95,943,593㎥의 유출수를 저류할 수 있는 것으로 분석되었다. 예측된 강우 유출량은 시내를 관통하는 미호강과 그 지류인 무심천과 인접한 유역 일대를 중심으로 비교적 높게 나타났다. 상대적으로 고밀도 개발이 이루어져 있는 청주시 4개 지역구들이 접하고 있는 구역에서 매우 높게 산출되었다. 이 곳은 시 · 군 통합 이전부터 도심부에 해당하는 공간으로 지역 하천인 무심천이 이 구역의 남북방향을 관통하여 흐른다. 특히 이 구역에서는 청주시의 서쪽권역인 흥덕구의 동부 지역에 높은 강우 유출량 발생 우려 지점들이 집중적으로 분포하는 것으로 분석되었다. 이 곳은 비하동과 청주산업단지가 위치한 지역으로 2017년 홍수 당시에 실제로 이 곳의 주거지와 산업단지에서 큰 피해가 발생하였다. 반면에 이 지역과 근접한 부모산을 중심으로 하는 삼림지대는 저류량이 매우 높게 산출되어 유출량이 적은 것으로 나타났다. 시 · 군 통합 이전에 청원군에 속했던 외곽지역의 경우에는 2000년대 이후에 급속 개발이 이루어진 오창과 오송의 고밀 개발 지역에서 강우 유출량이 높게 산출되었다. 특히 흥덕구 내 오창과학산업단지와 이 산업단지와 인접한 옥산산업단지 일원에서 강우 유출량이 높게 산출되었다. 이와 같이 공장들이 밀집한 산업단지 지역은 개발 밀도가 높아 유출수의 과다 발생으로 범람과 침수의 우려가 높은 것으로 조사되었다. 같은 지역구 내의 오송산업단지의 경우에도 유출량이 높게 산출되었으나 그 지점들이 집중되지 않고 흩어져 있는 양상을 보였다. 반면에 청주산업단지의 경우에는 높은 강우 유출량 발생 지점들이 집중적으



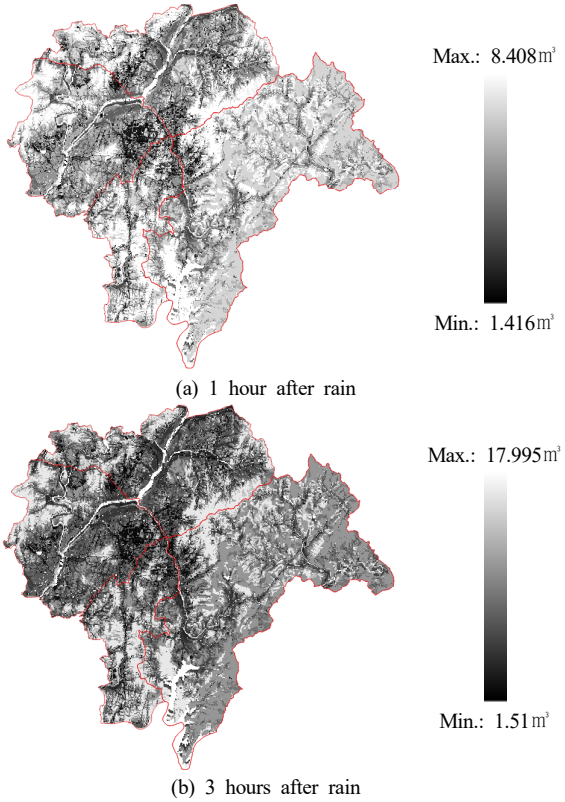
(a) 1 hour after rain

(b) 3 hours afrer rain

Fig. 4. Runoff volume in Cheongju

로 모여있는 양상으로 나타나 전자에 비해 더 큰 피해가 우려되었다. 따라서 이러한 산업단지에는 유출수를 저장할 수 있는 기반시설 이외에도 여유 공간에 최대한 많은 식생을 투입하여 저류량을 높일 수 있도록 공간을 계획할 필요가 있다. 이로써 기존 산업단지 내 개방 공간(open space)에 식생 투입을 통한 녹지 조성으로 방재 및 시민 레크레이션 지원 공간으로 활용하여 생태산업단지(eco-industrial park, EIP)로의 전환을 모색해야 할 것이다.

충북 진천군을 기점, 세종시를 종점으로 청주시 북동부를 가로질러 흐르는, 금강의 제1지류인 미호강 일대에는 넓은 농경지들이 있다. 이러한 미호강 유역 인근에서는 높은 강우 유출량이 산출된 지역들이 광범위하게 분포하고 있는 것으로 분석되었다. 이 일대는 주로 농경지로 수문학적 토양군도 투수성이 좋지 않아 저류효과가 낮은 C와 D군이 많이 분포하고 있어 홍수로 인한 농경지의 피해 가능성이 집중적으로 예측되었다. 실제로 이 일대는 홍수로 인한 침수피해가 청주시에서 가장 광범위하게 발생한 공간으로 조사되었다. 따라서 이 유역 일대의 개발, 정비, 복구 과정에서 수목 식재를 통해 도시숲 형태의 공간들을 농경지 사이에 분포시키거나 하천변을 따라 수목이 밀집된 회랑형 숲을 조성할 필요가 있다. 청주시에서 높은 저류량을 보이는 공간이 가장 많이 분포한 지역구는 산림이 많이 분포된 상당구로 나타났다. 수역과 습지를 제외하고 가장 높은 물 저류량을 갖는 생태계서비스 유형은 수목이 밀집된 산림으로 나타났다. 이는 저류 효과가 높은 토지 피복과 수문학적 토양군의 특성에 따른 결과로 볼 수 있다. 이상과 같은 시뮬레이션 결과는 홍수 위기 완화를 위한 생태계서비스의 중요성을 예증하여 관련 계획과 정책 추진을 위한 의사결정 지원 도구로서 UFRM의 유망한 역할과 홍수 위기 완화를 위한 생태계서비스 요인들의 활용 가능성을 보여주었다.



(a) 1 hour after rain

(b) 3 hours after rain

Fig. 5. Runoff retention volume in Cheongju

5. 결론

기후 변화에 따른 재해 위기 가능성이 높아진 상황에서 물관리에 대한 관심이 고조되었으나 여전히 인공 기반시설 중심의 물관리에 중점을 두어 생태계가 홍수 위기 완화에 기여할 수 있는 역할에 대한 고려가 부족했다. 이에 이 연구에서는 청주시를 대상으로 기후변화에 따른 도시의 홍수 위기 완화를 위한 도시 및 지역 개발, 정비, 재생계획 과정에서 의사결정 지원요소로서의 생태계서비스 요인들을 규명하고자 했다. 이 연구에서는 LULC 지도, 유역 지도, 토양군 지도, 미래 설계 강수량, 생물리학 데이터를 가지고 청주시에 대한 공간 시뮬레이션 분석을 수행하여 홍수 위기 완화를 위한 공간별 홍수 조절 수준과 생태계서비스 요인들을 파악할 수 있었다. 연구 결과에 따르면 청주시의 넓은 영역을 차지하고 있는 농경지 일대의 강이나 하천 그리고 투수성이 불량한 토양 특성은 농경지 피해를 야기할 수 있는 요인으로 작용하는 것으로 파악되었다. 이는 폭우 시 물을 흡수하고 저장할 수 있는 강, 하천, 습지 등과 이들을 보호하고 범람과 토양 침식을 막을 수 있는 주변의 식생들, 강우 유출수의 흡수 효과가 큰 토양, 초지, 나무, 숲 등은 도시의 홍수 완화 계획을 위한 녹색 기반구조(인프라)의 적소(適所) 배치와 이들의 생태학적 연결 등을 위한 의사결정에 활용 가능한 생태계서비스 요인들이 될 수 있음을 예증한다. 이에 홍수 피해 예방을 위해 수목 등의 식생 도입으로 도시 숲의

ⓒ2023. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

분포를 확장할 필요가 있다. 또한 청주시에 조성된 산업단지들을 중심으로 개발 밀도가 높은 지역에서 과다한 유출수 발생 우려가 있는 것으로 예측되어 유출수 저장을 위한 기반시설 구축 및 식생 투입으로 홍수 예방용 녹지 공간을 조성하여 방재 및 레크레이션 지원을 위한 생태산업단지를 개발할 필요가 있다. 이에 홍수 위기 완화 계획 수립 및 관련 정책 추진을 위한 의사결정 과정에서 생태계 구성요소들이 기후 변화에 따른 위기 상황에서 재해 방지뿐만 아니라 탄소 포집, 시민 삶의 질 개선 등의 혜택들도 제공할 수 있도록 생태계서비스 요인들이 고려되어야 할 것이다. 이 연구를 통해 생태계서비스 요인들을 고려하여 도시 홍수 위기 완화를 위한 생태도시 계획 의사결정 지원 적용 가능성을 제시했다는 점이 이 연구가 갖는 의의이다. 다만 이 연구에서 활용한 모델은 홍수 취약 지점을 판단하는 과정에서 지형적 특성, 물의 유속 및 방향 등과 같은 세부 변수들과 고밀도 개발 지역의 불투수성을 완화시킬 수 있는 배수로, 우수 관거 및 우수 저류시설 등과 같은 인공 시설물을 고려하지 못한 한계가 있었다. 향후 이러한 세부 사항들을 고려하여 보다 정교한 의사결정을 수행할 수 있도록 새로운 의사결정지원시스템의 개발 또는 기존 도구 및 데이터의 보완이 필요할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단(NRF-2019R1A2C1008612), 한국산업기술진흥원(P0008421) 및 국립생태원(NIE-고유연구-2023-03)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] B. Rosenzweig et al., Developing knowledge systems for urban resilience to cloudburst rain events, Environmental Science & Policy, 99, 2019, pp.150-159.
[2] D. H. Xu, Z. Y. Ouyang, T. Wu,, B.L. Han, Dynamic trends of urban flooding mitigation services in Shenzhen, China, Sustainability, 12(11), 2020, Article 4799.
[3] R. Berndtsson et al., Drivers of changing urban flood risk: A framework for action. Journal of Environmental Management, 240, 2019, pp.47-56.
[4] J. Huang, P. T. Wu, X.. N. Zhao, Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments, Catena, 104, 2013, pp.93-102.
[5] R. Pudar, J. Plavsic, A. Todorovic, Evaluation of green and grey flood mitigation measures in rural watersheds, Applied Sciences-Basel, 10(19), 25, 2020, Article 6913.
[6] S.K. Kim et al., Impacts of green infrastructure on flood risk perceptions in Hong Kong, Climatic Change, 162(4), 2020, pp.2277-2299.
[7] N. V. Long et al., From a hard to soft approach for flood management in the Vietnamese Mekong Delta: Integrating ecological engineering for urban sustainability in My Tho City, Water, 14(7), 2022, Article 1079.
[8] S. Salata, B. Arslan, Designing with ecosystem modelling: The sponge district application in Izmir, Turkey, Sustainability, 14(6), 2022, Article 3420.
[9] D. Afriyanie et al., Re-framing urban green spaces planning for flood protection through socio-ecological resilience in Bandung City, Indonesia, Cities, 101, 2020, 102710.
[10] 이신재, 김난수, 2017년 7월 집중호우에 따른 충청지역 홍수피해현황, 물과 미래: 한국수자원학회지, 제50권 제10호, 2017, pp.26-36. // (S.J. Lee, N.S. Kim, Current status of flood damage in Chungcheong area due to heavy rain in July 2017, Water for future, 50(10), 2017, pp.26-36.)
[11] 행정안전부, 2017 재해연보, 한국: 행정안정부, 2017. // (Ministry of the Interior and Safety (MOIS), Statistical Yearbook of Natural Diaster in 2017, Korea: MOIS, 2017.)
[12] G.C. Daily, Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems, Washington, D.C.: Island Press, 1997.
[13] S. Wunder, The efficiency of payments for environmental services in tropical conservation. Conservation Biology, 21, 2007, pp.48-58.
[14] Millennium Ecosystem Assessment (Program), Ecosystems and human wellbeing, Washington, D.C.: Island Press, 2005.
[15] J.W. Boyd, H.S. Banzhaf, Ecosystem services and government: The need for a new way of judging nature's value, Resources, 158, 2005, pp.16-19.
[16] Natural Resources Conservation Service - United States Department of Agriculture NRCS-USDA), Hydorology National Engnineering Handbook, Washington, D.C.: USDA, 2007.
[17] Natural Capital Project, InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs), https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest, 2023.03.04.
[18] 환경부 - 환경공간정보서비스, 토지피복도, https://egis.me.go.kr/, 2023.03.05. // (Ministry of Environment, Land cover map, https://egis.me.go.kr/, 2023.03.05.)
[19] 국립농업과학원 - 흑토람, 토양환경지도, http://soil.rda.go.kr/soil/soilmap/characteristic.jsp, 2023.04.05. // (National Institute of Agricultural Sciences, - Korean Soil Information System, Soil atlas, http://soil.rda.go.kr/soil/soilmap/characteristic.jsp, 2023.04.05.)
[20] 국가수자원관리종합정보시스템, 설계강수량, http://www.wamis.go.kr/wkc/wkc_flooddesign_lst.do, 2023. 03.05. // (WAter resources Management Information System (WAMIS), Design precipitation, http://www.wamis.go.kr/wkc/wkc_flooddesign_lst.do, 2023. 03.05.)
[21] 국가공간정보포털, 행정구역시군구_경계, http://data.nsdi.go.kr/dataset/15144, 2023.04.01. // (National Spatial Data Infrastructure Portal, Boundaries of administrative cites, counties and districts, http://data.nsdi.go.kr/dataset/15144, 2023.04.01.)
[22] 행정안전부, 침수흔적도(2020년), https://www.safemap.go.kr/dvct/data/selectDataAPIDetail.do?dataApiId=8, 2023.03.05. // (MOIS, Inundation trace map, https://www.safemap.go.kr/dvct/data/selectDataAPIDetail.do?dataApiId=8, 2023.03.05.)