

도시홍수 피해 저감을 위한 최적의 표면유출 네트워크 기반의 그린 인프라스트럭처 계획

한효주* · 송기환** · 이우균*** · 전진형****†

*고려대학교 일반대학원 환경생태공학과 석사과정, **고려대학교 일반대학원 환경생태공학과 박사과정,
***고려대학교 환경생태공학부 교수

Green Infrastructure Planning for Urban Flood Damage Reduction based on an Optimal Surface Runoff Network

Han, Hyojoo* · Song, Kihwan** · Lee, Woo-Kyun*** and Chon, Jinhyung****†

*Master Student, Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

***Professor, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Urban flooding is caused by an increase in surface area as a side effect of both urbanization and the natural limitations of drainage system capacity to cope with surface runoff. Appropriate measures are necessary to respond to urban flood damage. To respond to areas with surface runoff damage due to the prevalence of urban floods, this research provides green infrastructure planning by deriving optimal routes. This is accomplished by conducting analysis with respect to surface runoff networks as well as selecting target areas for green infrastructure applications. Our proposed green infrastructure planning process is presented by applying it to Daejeon Metropolitan City. A Least-Cost Paths analysis was utilized to derive the optimal surface runoff network, and a flood vulnerability analysis was performed by selecting target areas for green infrastructure planning. Finally, the types of green infrastructure were classified based on a literature review to suggest applicable types of green infrastructures within each target area. The main results of applying this method to Daejeon Metropolitan City are as follows. First, the optimal surface runoff network was derived from the starting point of the Gap Stream to the destination point of Se-dong basin area within Yuseong-gu. Second, seven cells with high flood vulnerability were derived where the green infrastructure would be applied as a priority. Finally, the green infrastructure considering its application in each cell was derived, including green alleys, detention ponds, bio-swales, and permeable pavement. This research was able to establish the proposed method by combining the optimal surface runoff network derivation with green infrastructure planning. This process is universally applicable to areas where urban flood damage occurs, including Daejeon Metropolitan City, where this case study was conducted.

Key words: Urban Flood, Surface Runoff, Impervious Area, Least-Cost Paths (LCP) Analysis, Green Infrastructure Planning

†Corresponding author : jchon@korea.ac.kr (02855, Room No. 502, West Bldg., College of Life Science, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea. Tel. +82-2-3290-3048)

ORCID 한효주 0000-0003-1076-8868
송기환 0000-0002-5608-195X

이우균 0000-0002-2188-359X
전진형 0000-0002-6367-4251

1. 서론

도시홍수는 도시지역에서 불투수면의 비율이 증가함에 따라 배수 시스템의 수용력을 넘어선 강우로 인해 발생하는 침수를 의미한다(National Academics of Sciences, Engineering, and Medicines, 2019). 한국에서의 도시홍수 피해는 과거 하천 및 지천들이 범람하거나 제방의 붕괴로 발생하는 외수침수가 주를 이루었으나, 2000년대 이후 점차 도시지역의 물이 외부로 원활하게 빠져나가지 못해 발생하는 내수침수의 형태가 주로 발생했다(Kim et al., 2002). 최근 기후변화로 인해 도시홍수의 발생빈도는 더욱 불규칙적일 뿐 아니라 규모 면에서도 증가하고 있다. 2009년부터 2018년까지 자연재해로 인한 피해액이 연평균 약 3.6조 원에 달하며, 이는 1998년부터 2009년까지의 연평균 피해액의 약 2배에 달한다(www.safekorea.go.kr). 그 중, 집중호우나 태풍으로 인한 풍수해 피해가 약 90% 이상을 차지하며 도시지역에 집중적으로 발생하고 있다(www.safekorea.go.kr). 국내에서는 서울(78.7%), 부산(64.8%), 대구(54.1%), 대전(49.9%) 등 대도시들이 임야를 제외한 불투수면적률이 높아 도시홍수의 피해가 크게 나타나고 있다(Moon et al., 2017).

도시홍수의 피해 규모는 불투수면에 따른 표면유출량과 배수 시스템의 수용력에 따라 결정된다(National Academics of Sciences, Engineering, and Medicines, 2019). 표면유출을 처리하기 위한 배수 시스템은 일반적으로 도시 지역에서 유출되는 우수를 수집하여 배출 통로와 저류지, 집수구역, 우수 배수 입구로 전달하는데 활용되는 인프라를 의미하며, 도로변의 도랑이나 중앙분리대수로, 우수통로, 습지대 등을 포함하고 있다(Akan and Houghtalen, 2003). 이는 도시홍수의 발생 시 침투유출량을 일부 분담하여 저류지 및 집수구역으로 우수를 배출시킴으로써 피해를 저감시키는 기능을 한다(Seo and Cho, 1998). 그러나 기존에 표면유출을 저감하기 위한 연구들은 대부분 유역 단위에서 댐과 제방 등을 통해 배수 시스템을 관리하고 계획하고자 했으며(Lee and Lee, 2015; Jeong et al., 2007), 이러한 유역 단위 연구에 비해 도시 단위에서의 표면유출 저감을 위한 연구는 미비하였다. 따라서 도시 전체의 공간계획에 도시홍수에 의한 표면유출 저감을 위한 계획이 반영될 수 있도록 광역 지자체 규모의 연구가 필요하다. 또한 기존 배수 시스템은 표면유출의 저감을 위해 배수구, 수로, 맨홀, 배출시설 등 주로 그레이 인프라스트럭처(Grey infrastructure) 측면에서 접근

하고 있으나, 그레이 인프라스트럭처는 수용력 확장 및 도시공간 활용 측면에서 한계가 있다(Koh and Lee, 2012). 그레이 인프라스트럭처의 설계 및 관리가 미흡할 경우 오히려 제방 붕괴 및 월류 등으로 인해 도시홍수 피해가 더욱 크게 나타날 위험이 있기 때문이다(Song et al., 2007). 따라서 표면유출을 고려한 배수 시스템을 계획함에 있어, 기존의 그레이 인프라스트럭처 중심의 접근을 보완할 수 있도록 그린 인프라스트럭처(Green infrastructure)를 도입하여 도시홍수를 대응해야 할 필요성이 있다.

그린 인프라스트럭처는 도시물 순환을 개선시킴으로써 홍수에 대응할 수 있도록 하는 시스템이나 기술, 혹은 시설을 의미한다(US Environmental Protection Agency, 2007). 그린 인프라스트럭처는 자연지반 토양, 식물 등 자연적 요소를 활용한 우수 차단·침투·저류를 통해 유출량을 감소시키는 기능을 할 수 있다(Park et al., 2007). 또한 그린 인프라스트럭처 확충을 통한 도시 내 불투수면적의 감소로 인해 침투유출량의 저감 및 지연효과 등이 나타난다(Hwang et al., 2017; Kim et al., 2011). 기존 연구들은 대부분 그린 인프라스트럭처가 갖는 유출 저감 효과 검증에 초점을 두고(Kim et al., 2011; Bin et al., 2008), 그린 인프라스트럭처를 모니터링 함으로써 그 효과를 분석하고자 하였다(Li et al., 2009; Davis, 2008). 그러나 도시홍수의 피해를 실질적으로 저감시키기 위해서는, 우수유출이 구체적으로 어떻게 나타나는지를 바탕으로 그린 인프라스트럭처를 적용하는 방향이 필요하다. 유출로 인한 피해를 완화하기 위해 표면유출수의 일부가 저류지로 집수될 수 있도록 하는 최적의 표면유출 네트워크를 도출하고, 도출된 네트워크의 도시홍수 대응 기능을 높일 수 있도록 하는 그린 인프라스트럭처 계획이 필요한 것이다. 본 연구에서 분석하고자 하는 표면유출 네트워크는 도시홍수로 인해 발생한 표면유출수가 배수 시스템을 통해 저류지로 흘러가는 경로를 의미하며, 최적의 표면유출 네트워크가 도출되기 위해서는 다음의 조건이 필요하다. 첫째, 경사도가 완만할 때 표면유출수가 저류지로 전달되는 과정에서 위험가능성이 낮으므로 최적의 경로가 도출된다. 둘째, 토지이용이 표면유출수의 배수 및 저장에 적합하고, 배수 시스템 확보를 위한 토지매입 및 토지변환 비용이 낮은 조건일 때 최적의 경로가 도출된다.

본 연구의 목적은 도시홍수 발생 시 유출로 인한 피해가 나타날 수 있는 지역에 효과적인 대응을 위해, 표면유출 네트워크 분석을 통한 최적의 경로를 도출하고 그린

인프라스트럭처 적지 선정 및 적용 계획을 제시하는 것이다. 이를 위해 첫째, 도시홍수 발생 시 표면유출수를 효과적으로 배수하고 저류지로 전달하기 위해 최적의 표면유출 네트워크를 도출한다. 이는 도시 배수시스템과 그린 인프라스트럭처를 연계하여 도시홍수에 의한 유출피해를 감소시키기 위한 그린 인프라스트럭처 적용 계획의 기반이 된다. 둘째, 최적의 표면유출 네트워크 상에서 그린 인프라스트럭처 계획을 효과적으로 적용하기 위해 적지를 선정한다. 셋째, 선정된 적지 내의 지역현황 및 토지이용유형을 반영하여 도시홍수 피해를 저감할 수 있는 구체적인 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 제안한다. 본 연구에서 정립한 최적의 표면유출 네트워크 기반의 그린 인프라스트럭처 계획 프로세스를 시범 적용하기 위해 2020년 도시홍수 피해가 있었던 대전광역시를 대상으로 사례연구를 진행했다.

본 연구는 배수 시스템을 중심으로 그레이 인프라스트럭처를 통해 표면유출 피해를 완화하고자 했던 기존 대책들이나 표면유출에 대한 네트워크 측면의 분석 없이 그린 인프라스트럭처의 기능 검증에 집중했던 선행연구들과 다르게, 배수 시스템 계획과 그린 인프라스트럭처 계획을 하나의 과정으로 통합하고 이를 바탕으로 구체적인 대상 지역의 계획을 이끌어냈다는 점에서 기존 연구들과 차별성을 갖는다. 본 연구가 갖는 중요성은 크게 세 가지로 제시할 수 있다. 첫째, 최적의 표면유출 네트워크를 도출하고 이를 바탕으로 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 제안하는 프로세스를 정립하여 제시한다. 둘째, 정립된 프로세스는 광역적 규모의 표면유출에 대한 네트워크 단위의 분석부터 지역적 규모의 구체적인 그린 인프라스트럭처 적용까지 유기적으로 연결된다. 셋째, 해당 프로세스는 특정 대상지에 한정된 것이 아니라, 도시홍수가 발생했거나 피해가 우려되는 지역에서 지자체 대책 및 계획을 수립할 경우 널리 활용될 수 있다.

2. 최적의 표면유출 네트워크 기반의 그린 인프라스트럭처 계획

본 연구에서 정립한 연구방법 프로세스는 Fig. 1과 같다. 1단계에서 먼저 최소비용경로(Least-Cost Paths; LCP) 분석을 활용하여 최적의 표면유출 네트워크를 도출한다. 도출된 최적의 표면유출 네트워크를 대상으로 2단계에서는 홍수취약성 평가를 실시하여 그린 인프라스트럭처 우

선 적용을 위한 적지를 선정한다. 1단계와 2단계의 LCP 분석과 홍수취약성 평가는 모두 지리정보시스템(Geographic information system; GIS) 프로그램 패키지인 ArcGIS를 활용할 수 있으며, 본 연구에서는 ArcMap 10.1이 활용되었다. 3단계에서는 위성지도 및 토지이용현황도를 활용하여 적지 내 토지이용유형과 지역현황을 조사하고, 이를 바탕으로 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 제안한다.

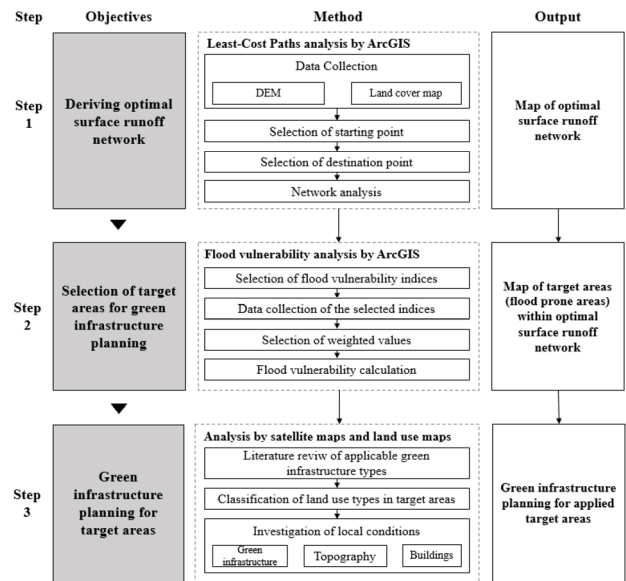


Fig. 1. Green infrastructure planning based on optimal surface runoff network process

2.1 최적의 표면유출 네트워크 도출

본 연구에서는 최적의 표면유출 네트워크를 도출하기 위해 LCP 분석을 활용했다. LCP 분석은 래스터자료를 기반으로 한 셀에서 인접한 8개의 셀로 이동하면서 누적되는 셀별 비용과 이동거리를 연산하여 시작점과도 착점을 최소 비용 누적값으로 연결하는 경로를 도출하는 네트워크 분석 방법이다(Etherington, 2016). 일반적인 LCP분석의 수행과정은 다음과 같다. 먼저, 시작점과 도착점을 설정한다. 다음으로, 시작점부터 도착점까지 네트워크를 분석한다. 이를 위해, 비용에 영향을 미치는 요인들을 선정한다. 각 요인별로 항목별 상대적 비용 및 가중치를 설정한 뒤, 래스터 형태의 공간자료를 구축한다. 이러한 각각의 공간자료를 비용표면(Cost surface)이라고 하며, 비용

표면을 증첩하여 셀별 비용의 누적값을 최소로 하는 이동 경로를 도출한다(Goncalves, 2010). LCP 분석은 선행연구에서 동물의 서식지 이동경로를 예측하거나(Song, 2011), 도시구역에서 하천의 경로를 예측하는 데 활용되기도 했다(Lim and Eom, 2008). 또한 Lee et al. (2014)은 야생 동물의 서식 조건 및 생태계서비스를 비용요인으로 적용하여 생태축 계획을 수립하기도 했다. 이처럼 LCP 분석은 다양한 요인 및 항목별 중요성을 반영한 최적의 경로를 도출할 수 있고, 잠재적 경로 예측 및 계획 수립에 활용될 수 있다는 점에서 유용하다. 따라서 본 연구에서는 경사도와 토지이용과 같은 다양한 요인별 비용 및 가중치를 고려하여 최적의 표면유출네트워크를 도출하기 위해 LCP 분석을 연구방법으로 채택했다.

본 연구에서 활용된 LCP 분석과정은 다음과 같다. 경사도 및 토지이용을 비용요인으로 선정하고, 토지 피복도와 수치 표고모델을 수집한다. 다음으로, 수집한 자료를 기반으로 ArcGIS의 공간분석도구를 통해 수문 및 지형, 토지이용 분석을 실시하여 시작점과 도착점을 선정한다. 먼저, 도시 홍수에 의한 표면유출 발생 가능성이 높은 지점을 의미하는 시작점을 선정하기 위해, 물흐름누적값과 고도가 높은 지점을 도출한다. 다음으로, 시작점의 표면유출수 일부가 전달될 수 있는 잠재적 저류지에 적합한 지점인 도착점을 선정하기 위해, 다음 세 가지 조건이 증첩되는 지역을 분석한다. 첫째, 저류에 적합한 토지이용분류(Table 1의 Tier 1~3)가 나타나야 한다. 둘째, 경사도가 5% 미만이어야 한다. 셋째, 인접한 셀에 비해 고도가 낮아 집수 가능성이 높게 나타나야 한다(Diaz-Nieto et al., 2016; Woods-Ballard et al., 2007). 마지막으로, 시작점과 도착점 사이의 네트워크에 대한 분석을 실시하여 최적의 경로를 도출한다. 최적의 경로는 경사도와 토지 이용의 조건에 따라 계산된다. 경사도가 완만할수록, 토지이용이 우수저류 및 전달에 적합하고 토지매입 및 토지변환비용이 낮을수록 셀별 비용이 낮게 계산된다. 이러한 과정을 통해 시작점에서 도착점까지 셀별 비용의 누적값을 최소로 연결할 수 있는 경로가 도출된다. 본 연구에서도 착점 선정 및 네트워크 분석을 위하여 대상지의 토지이용을 Tier 1~5로 재분류하는데 활용한 기준은 Table 1과 같다(Diaz-Nieto et al., 2016). Diaz-Nieto et al. (2016)이 LCP 분석의 근거로 활용한 항목과 항목별 상대적 비용 및 가중치를 참고하였다(Table 2).

Table 1. Basis on reclassification of land use for LCP analysis

Relative cost classification	Basis
Tier 1	Ideal locations for flood routes and surface-water storage. Water flowing or stored in these locations does not pose a risk. Low land acquisition and conversion costs.
Tier 2	Locations where flood routes or flood storage poses a low risk and minimal changes required.
Tier 3	Locations with a primary function that is sacrificed during surface-water events. Some change is required, but it is relatively easy to implement.
Tier 4	Locations where flood routes and flood storage pose a risk; therefore, some changes would be required to allow water to flow through or be stored.
Tier 5	Highly undesirable locations for flood routes or surface-water storage. Water flowing or stored in these areas would pose a very high risk. High land acquisition and conversion costs.

(Source: Diaz-Nieto et al., 2016)

Table 2. Relative cost of LCP analysis

Category	Class	Relative cost	Weighted value
Slope(%)	0-2	1	50%
	2-5	5	
	5-5.88	10	
	5.88-	25	
Land use	Tier 1	1	50%
	Tier 2	4	
	Tier 3	9	
	Tier 4	16	
	Tier 5	25	

(Source: Diaz-Nieto et al., 2016)

2.2 그린 인프라스트럭처 우선 적용을 위한 적지 선정

본 단계에서는 최적의 표면유출 네트워크로 도출된 경로상의 셀들을 대상으로 홍수 취약성을 평가하여 그린 인프라스트럭처가 우선적으로 도입되어야 하는 지역을 선정한다. 본 연구에서는 그린 인프라스트럭처를 통한 도시 홍수 피해저감을 목적으로 하기 때문에, 홍수취약성이 높은 지역에 그린 인프라스트럭처를 우선적으로 도입하고

자 했다(Li et al., 2020; Kang et al., 2014). 먼저, 홍수취약성 평가를 위해 선행 연구검토를 바탕으로 홍수취약성 지표를 선정한다. 다음으로, 대상지 특성 및 데이터 확보 가능성을 고려하여 선정된 지표들에 대한 데이터를 수집하고 공간자료를 구축한다. 이후 지표에 대한 가중치를 설정하고, ArcGIS의 공간분석도 구중가중치중첩(Weighted overlay)을 통해 셀별 홍수취약성 정도를 계산한다. 본 연구에서는 지표별 가중치를 적용하기 위하여 빈도비를 활용했다. 빈도비 모델은 조건부 확률 원리를 바탕으로 각 요인의 등급별 침수 발생 면적 비율을 의미하며(Chen et al., 2019; Kang et al., 2014; Kang and Lee, 2012), 이를 통해 각 요인의 등급에서 홍수 피해발생에 기여한 정도를 알 수 있다. 마지막으로, 홍수취약성 정도를 Natural Break 5개 등급(Class)으로 재분류한 뒤 홍수취약성이 가장 높은 Class 5에 해당하는 지역을 그린 인프라스트럭처 적용이 가능한 적지로 선정한다(Kang et al., 2014).

2.3 그린 인프라스트럭처 적용 계획

적지별 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 구축하기 위해 토지이용유형과 지역현황(그린 인프라스트럭처, 지형, 건물 현황)을 고려 요소로 선정한다. 먼저, 선행연구를 검토하여 도시홍수 대응에 적합한 그린 인프라스트럭처 유형을 토지이용별로 재분류한 뒤 이를 바탕으로 적지 내의 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 제안한다. 본 연구에서는 도시홍수에 적합한 그린 인프라스트럭처 유형을 분류하기 위해 Lee et al. (2018)이 제시한 분류를 참고했다. 본 연구에서 그린 인프라스트럭처를 도입하는 목적은 표면유출 네트워크에 그린 인프라스트럭처를 연계하여 유출피해를 저감하는 것이기 때문에, 이러한 목적에 적합하지 않은 대규모 스케일의 그린 인프라스트럭처와 건물의 옥상 및 지붕을 활용한 옥상정원, 집중호우 시 수위상승으로 범람할 수 있는 개천 및 호수는 제외했다. 앞서 분류한 내용에 대해 Park et al. (2007)이 제시한 토지이용유형에 따른 적합성을 기준으로 그린 인프라스트럭처 유형을 재분류했다. 본 연구에서는 토지이용유형을 주거 및 상업지역, 도로, 수역으로 구분했다. 토지피복도 중분류를 기준으로 주거 및 상업지역은 주거지역(110)과 상업지역(130), 도로는 교통지역(150), 수역은 내륙수(710)으로 각각 정의했다.

다음으로, 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 위해 위성 사진 및 토지피복도를 활용하여 지역현황 및 토지이용유

형을 분석한다. 지역현황으로 적지별 그린 인프라스트럭처, 지형, 건물 현황을 조사한다. 본 연구에서는 지형에 대한 경사도를 조사하여 평평한 지형, 오목한 지형, 경사가 가파른 지형으로 구분했다. 경사가 가파른 지형은 Ministry of Environment (2006)의 급경사지 기준에 따라 경사도 20° 이상으로 정의했으며, 경사가 가파른 지역에는 그린 인프라스트럭처 적용을 배제했다. 건물 현황은 주변의 건물 분포, 건물의 밀집 정도를 중심으로 조사했다.

3. 사례연구

3.1 대상지 선정

본 연구에서는 사례연구 대상지로 최근 도시홍수로 인한 표면유출 피해가 발생했던 대전광역시를 선정했다. 대전광역시에서는 최근 2020년 7, 8월 40여 일 동안 지속된 장마와 집중호우로 인해 3명의 인명피해 및 441명(208 가구)의 이재민이 발생했으며, 침수로 인한 시설의 피해액은 약 72억 600만 원 발생했다(Moon, 2020 Sept 02). 뿐만 아니라 과거 2012년에도 집중호우로 인해 중구 지역 내 약 21,85 m²에 해당하는 침수피해가 발생했다. 이러한 도시홍수 피해에 대응하고자 대전광역시는 2016년 6월 환경부로부터 ‘물순환선도도시’에 선정되어 둔산동과 월평동 일부 지역에 그린 인프라스트럭처 시설을 설치하고자 했다(Lee, 2020 Aug 03). 그러나 그 과정에서 도시 단위의 표면유출 분석 및 그린 인프라스트럭처 계획이 이루어지지 않고 개별 시설 도입에만 치중했기 때문에, 광범위한 도시 전체 차원에서의 도시홍수 피해 저감을 위한 그린 인프라스트럭처 계획의 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 과거 지속적으로 도시홍수 피해가 발생하였으며 기존 ‘물순환선도도시’ 사업이 진행되고 있는 대전광역시를 사례연구의 대상지로 선정했다.

대상지의 현황은 다음과 같다. 대전광역시는 2018년 12월을 기준으로 전체 면적이 539.5 km²이며, 2020년 8월 기준(외국인 제외) 1,469,431명의 인구가 거주하는 대도시이다(<https://www.daejeon.go.kr>). 대전광역시에는 금강 유역에 해당하는 3개의 국가하천, 26개의 지방하천, 87개의 소하천이 있다. 3개 국가하천인 갑천, 유등천, 대전천의 총 유로연장은 80.2 km, 유역면적은 1,076.46 km²이다(Lee, 2007). 2019년 환경부 토지피복도 대분류 분석 결과, 인공지반이 주를 이루는 시가지 건조지역은 면적의 약 23.5%, 녹지에 해당하는 산림지역 및 초지는 각각 48.8%, 7.9%

를 차지하였다(Fig. 2). 그의 토지이용은 농업지역(10.3%), 수역(4.7%), 나지(2.6%), 습지(2.0%) 순으로 비율이 나타났다.

3.2 자료수집

본 연구에서는 대전광역시를 대상으로 최적의 표면유출 네트워크를 도출하고 적지를 선정함으로써 그린 인프라스트럭처를 적용하는 계획을 제시하는 과정에서 필요한 자료를 수집했다. 첫째, 최적의 표면유출 네트워크 도출을 위하여 대전광역시의 환경부 2019년 토지피복도세분류(egis.me.go.kr)와 2014년 수치표고모델(www.nsd.go.kr)을 수집하였다. 둘째, 그린 인프라스트럭처 우선 적용을 위한 적지 선정 단계에서는 다음과 같이 홍수취약성 지표 및 지표별 가중치를 검토 및 수집하였다. 국내 홍수취약성 평가 관련 선행연구들을 검토하고 데이터 확보가능성을 고려한 결과, 홍수취약성 평가 지표로 고도, 지형곡률, 임상 종류, 토양배수능력, 유효토심, 경사도, 토지이용유형(불투수면 및 녹지 지역)을 선정하였다(Lee et al., 2016; Kang et al., 2014; Kim et al., 2013; Kang and Lee, 2012). 최종 표면유출 네트워크 도출 단계에서 선정된 시작점과 도착점이 모두 유성구 안에 있었기 때문에, 구 단위에 적

합하지 않은 강수량, 인구, 배수펌프량, 행정 및 의료 대응 능력 관련 지표는 제외했다. 토지이용유형은 2019년도 토지피복도세분류(egis.me.go.kr), 고도 및 경사도는 2014년 수치표고모델(www.nsd.go.kr), 임상 종류는 1:25,000 임상도(www.nsd.go.kr), 토양배수능력은 1:25,000 배수등급도(www.nsd.go.kr), 유효토심은 1:25,000 유효토심도(www.nsd.go.kr)를 공간자료로 수집했다. 본 연구에서는 지표별 가중치를 적용하기 위하여 Kang et al. (2014)이 활용한 홍수취약성 평가 지표별 빈도비를 수집했다(Table 3). 기존의 국내 홍수취약성 평가 연구들은 다양한 지표에 대해 가중치를 적용이 미비했으며, 일부 연구에서는 가중치를 임의로 동일하게 부여하거나 본 연구에서 제외한 범위의 지표들(배수펌프량, 행정, 의료대응능력 등)에 초점을 두고 있었다(Park and Song, 2014; Park et al., 2013). 따라서 데이터의 적용을 고려하여 본 연구에서는 Kang et al. (2014)이 제시한 지표들을 중심으로 선정했다. 마지막으로, 그린 인프라스트럭처 계획 단계에서 1:25,000 토지이용현황도(www.nsd.go.kr)와 2020년 네이버 위성지도(https://m.map.naver.com/)를 통해 적지별 지역현황에 대한 자료를 수집했다.

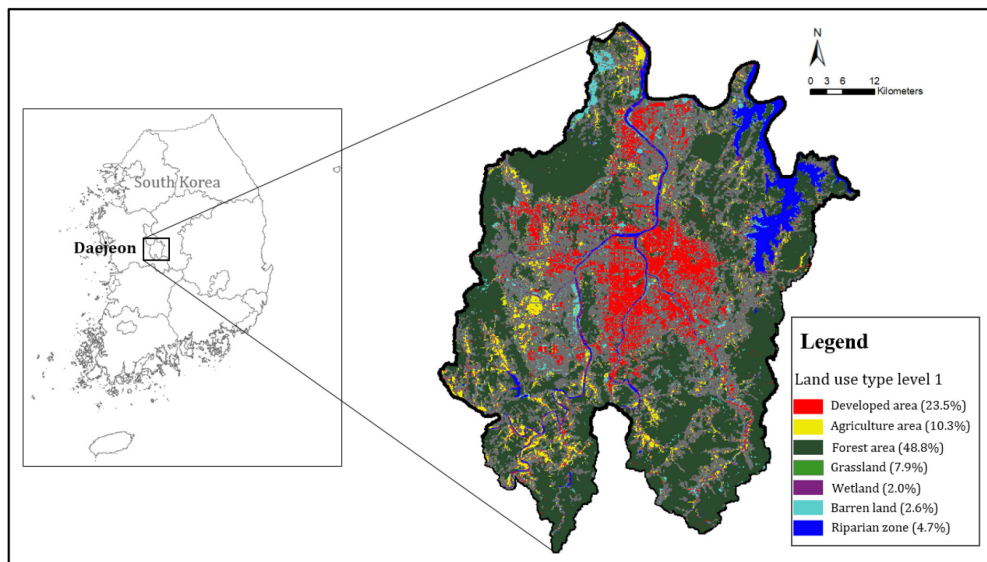


Fig. 2. Land use types of Daejeon Metropolitan City

Table 3. Ratio of each indicator calculated by Frequency Ratio Model

Indicators	Class	Ratio
Slope	0-5	1.13
	5-10	1.27
	10-15	1.74
	15-20	0.92
	20-25	0.83
	25-30	0.26
	30-35	0
	35-40	0
Curvature	40-90	0
	Concave	0.91
	Flat	1.11
DEM	Convex	0.89
	-20	1.13
	20-25	0.44
	25-30	1.77
	30-50	1.64
	50-100	1.16
	100-300	0.33
	300-	0
Impervious surface	Residential area	1.43
	Industrial area	0
	Commercial area	0
	Entertainment area	0
	Transportation area	3.01
	Public facilities area	0.87
Natural green space & other green space	Paddy	0
	Field	0
	Orchard	0
	Other plantations	0
	Natural grassland	0
	Artificial grassland	1.45
Timber type	Barren land	0.64
	Broad-leaf forest	0.51
	Mixed forest	0.10
Soil thickness	Needle-leaf forest	0.15
	0-20cm	0
	20-50	1.10
	50-100	0.97
Soil drainage	100-	1.06
	Poorly drained	1.49
	Somewhat poorly drained	0
	Moderately well drained	0
	Well drained	0.46
	Very well drained	0.28

(Source: Kang et al., 2014).

3.3 최적의 표면유출 네트워크 도출

수집한 자료를 바탕으로 최적의 표면유출 네트워크를 도출하기 위해 시작점과 도착점을 선정하고 네트워크를 분석하기 위해 대전광역시의 토지이용을 Tier 1 ~ 5을 분류한 내용은 다음과 같다(Table 4).

Table 4. Land use classification in study area

Relative cost classification	Land use in study area	Count of features
Tier 1	Natural grassland, Other grassland,	7,044
	Inland wetland, Riverside, River, Lake	
Tier 2	Schoolyard, Other barren land	1,176
Tier 3	Paddy, Field, Plantations, Orchard,	4,381
	Pasture	
Tier 4	Road	5,231
Tier 5	Others (Residential area, commercial area, etc.)	26,807

(Source: Diaz-Nieto et al., 2016)

본 연구에서 LCP 분석을 통해 선정한 시작점과 도착점은 다음 그림과 같다(Fig. 3(a), (b)). 시작점은 대전엑스포 광장 부근의 갑천 유역으로 행정구역상 유성구 도룡동에 위치하고, 물순환도시사업의 대상지인 서구 둔산동 북쪽에 위치하고 있다(Fig. 3(a)). 도착점은 유성구 세동으로 나타났다(Fig. 3(b)). 시작점과 도착점의 네트워크 분석을 통한 최적의 표면유출 네트워크 도출 결과는 Fig. 4와 같다.

시작점은 해발고도 35 ~ 40 m 정도의 고도로 다른 물흐름 네트워크의 분기점과 고도는 비슷하나 셀별물흐름누적값을 계산했을 때 33.92값으로 다른 분기점에 비해 높은 물흐름누적값을 나타내고 있다. 도착점은 유성구의 서쪽 아래에 위치하며 주변의 산이 있어 주변 지역보다 약 7 ~ 80 m 해발고도가 낮은 오목한 평지로 분지와 유사한 특성을 나타내고 있다. 최적의 표면유출 네트워크는 총 106 개의 셀을 지나게 된다. 해당 셀들은 모두 유성구 지역 내에 분포하고 있으며, 시작점인 유성구 도룡동으로부터 도착점인 세동까지 중앙 지역에서 서쪽 방향으로 진행되게 된다(Fig. 4). 경로상에는 유성구 도룡동, 유성구 봉명동 및 서구 월평동 일부, 유성구 상대동, 유성구 세동 등이 위치하고 있으며 해당 네트워크 내의 토지이용 분석 결과는 Table 5와 같다. 해당 네트워크에 해당하는 셀들의 총 면

적은 15.99 km²에 해당한다. 토지피복도 대분류 기준으로 분석 결과, 표면유출 피해를 증가시킬 수 있는 불투수면율이 높은 시가화 건조지역(100)의 면적은 도출된 네트워크 내에서 16.51%를 차지한다. 시가화 건조지역 내의 토지이용 구성을 파악하기 위해 토지피복도 중분류 기준으로 분석한 결과, 시가화 건조지역 내에서 교통지역이 차지하는 비중이 80%로 매우 높게 나타났으며, 그 뒤로 주거지역

(10%), 상업지역(5%) 순으로 나타났다. 전체적인 네트워크 내 토지이용 분포를 토지피복도 중분류를 바탕으로 분석 결과, 최적의 표면유출 네트워크 내에서 내륙수 지역(16.88%)이 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 그 다음으로 인공초지(15.10%), 교통지역(13.25%) 순으로 비중이 높게 나타났다.

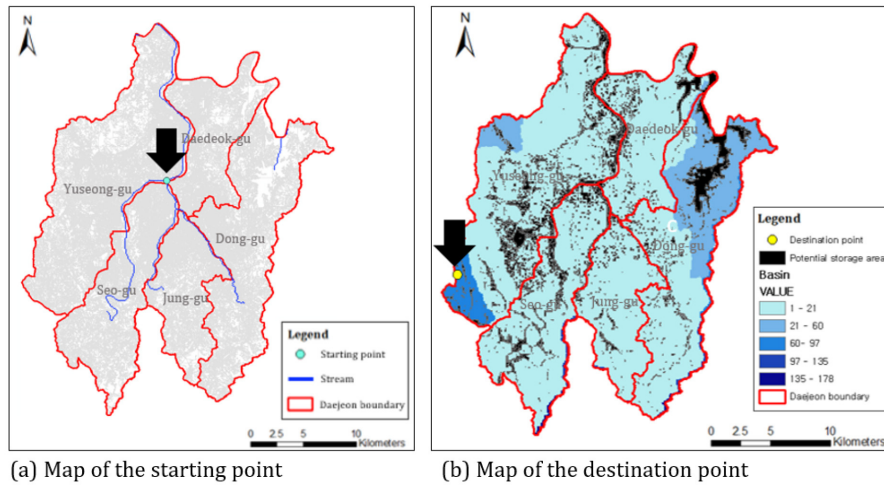


Fig. 3. The result of selecting the starting point and destination point

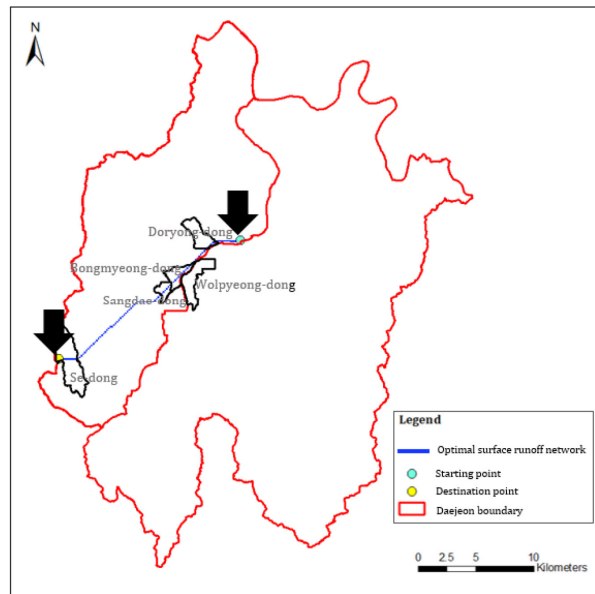


Fig. 4. The result of deriving optimal surface runoff network

Table 5. Land use included in optimal surface runoff network

Landusetypelevel I	Land use typelevelII	Area (km ²)	LevelIIpercentage (%)	Level I percentage (%)
Developedarea	Residential area (110)	0.26	1.63	16.51
	Industrial area (120)	0.02	0.15	
	Commercial area (130)	0.13	0.81	
	Entertainment area (140)	0.04	0.22	
	Transportation area (150)	2.12	13.25	
	Public facilities area (160)	0.07	0.44	
Agricultureland	Paddy (210)	1.42	8.88	20.06
	Field (220)	0.90	5.63	
	House plantations (230)	0.09	0.59	
	Orchard (240)	0.60	3.78	
	Other plantations (250)	0.19	1.18	
Forestarea	Broad-leaf forest (310)	1.25	7.85	22.21
	Needle-leaf forest (320)	1.50	9.40	
	Mixed forest (330)	0.79	4.96	
Grassland	Artificial grassland (420)	2.41	15.10	15.10
Wetland	Inland wetland (510)	1.15	7.18	7.18
Barrenland	Natural barren land (610)	0.04	0.22	2.07
	Artificial barren land (620)	0.30	1.85	
Riparianzone	Inland water (710)	2.70	16.88	16.88
Total		15.99	100	100

3.4 그린 인프라스트럭처 우선 적용을 위한 적지 선정

앞서 도출된 최적의 표면유출 네트워크 내에서 그린 인프라스트럭처를 우선적으로 적용할 적지를 선정했다. 적지를 선정하는 과정에서 실시한 홍수취약성 평가결과

다음과 같다(Fig. 5(a)). 홍수취약성 평가 등급이 높게 분석된 지역을 중심으로 그린 인프라스트럭처를 적용할 수 있는 적지를 선정했다(Fig. 5(b)). 선정된 지역은 갑천유역과 유성천 분기점 지역(1번), 만년교 부근 지역(2번), 대전 봉명초등·중학교 인근 지역(3번), 도안대로 및 봉명서로 교차

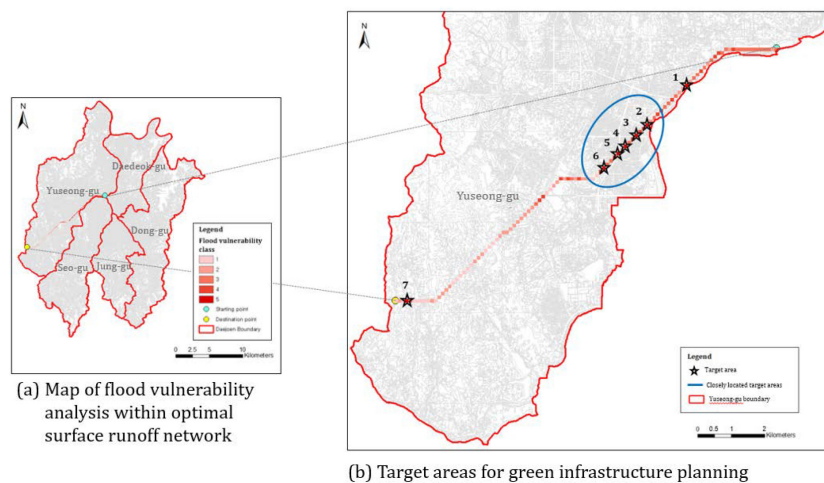


Fig. 5. The result of selecting target areas for green infrastructure planning

지역(4번), 도안대로 및 상대동로교차 지역(5번), 트리폴시티 9단지 아파트 단지 내 지역(6번), 까치산백운로(유성구 세동산64-8 부근)(7번)에 해당한다. 적지 선정 결과는 갑천과 진잡천이 흐르는 봉명동과 상대동의 하천 주변 및 주거 및 상업지역, 도로지역을 포함하는 시가화지역에 집중되었다.

3.5 그린 인프라스트럭처 적용 계획

적지 선정 결과 도출된 7개의 대상지에 대해 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 제안하기 위하여, 위성지도 및 토지이용현황도 분석을 통해 적지별 지역현황 (그린 인프라스트럭처, 지형, 건물 현황)에 대해 조사한 내용을 표에 나타냈다(Table 6). 1번에 해당하는 갑천과 유성천 분기점 부근 지역(유성구 도룡동)은 천변도시고속도로 완충녹지와 갑천수변녹지가 구성되어 있고, 경사가 평평하다(Fig. 6(a)). 2번에 해당하는 만년교 부근 지역(유성구 봉명동 및 서구 월평동)은 계룡로가 지나가고 계룡로 밑으로 저지대의 하천이 흐른다(Fig. 6(b)). 3번에 해당하는 봉명 초·중학교 부근 지역(유성구 봉명동)에는 아파트 단지와 학교가 위치하고, 아파트 단지조경 및 학교운동장 및 가로수가 구성되어 있으며, 평탄한 지형이다(Fig. 6(c)). 4번에 해당하는 도안대로 및 봉명서로 교차 지역(유성구 봉명동)은 평탄한 지형이며, 저층주거지 및 상가건물이 위치한다(Fig. 6(d)). 일부 상가 건물에 옥상녹화가 진행되어 있지만, 건물이 밀집되어 있고 아파트 단지에 비해 녹지가 부족한 실정이다. 5번에 해당하는 도안대로 및 상대동로교차 지역(유성구 상대동)은 상가건물들이 위치하고, 지형이 평탄하다 (Fig. 6(e)). 도안대로에는 완충녹지가 구성되어 있으며 일부 상가건물에는 옥상녹화가 되어 있으나, 상대적으로 상대동로 지역에는 그린 인프라스트럭처가 미흡하고 인공지반 비율이 타 대상지에 비해 높다. 6번에 해당하는 트리폴시티 9단지 아파트 단지 지역(유성구 상대동)은 단지내 고려시대 건물터가 있으며 녹지와 초지가 구성되어 있고 경사가 평탄하다(Fig. 6(f)). 마지막으로, 7번에 해당하는 까치산백운로 지역(유성구 세동)은 산지 내 4차선 도로로 주변지역이 대부분 산지로 구성되어 있다(Fig. 6(g)).

위의 분석을 바탕으로 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 다음과 같이 제시했다. 각 적지별 적용 가능한 그린 인

프라스트럭처 유형은 Table 6에 제시하였으며, 종합적인 적용 계획은 Fig. 7로 나타났다. 1번 지역의 경우, 갑천 주변의 수변녹지와 남쪽 방향으로 1 km 이내에 위치한 대전광역시 물순환 선도도시 시범사업 대상지를 연결하기 위해 약 135 m 길이의 녹도(Green alley)를 도입함으로써 도시내 생태적 네트워크를 높일 수 있다. 2번 지역 내의 하천은 산책로보다 낮은 비탈면과 오목한 지형이 있기 때문에, 이러한 지형을 활용하여 빗물을 저류하는 저류연못 (Detention pond)을 수역에 인접하여 설치할 수 있다. 또한, 현재 수변에 식재된 식생을 활용하여 수역에 인접한 선형의 식생수로(Bio-swale)를 조성할 수 있다. 식재된 식생과 지형을 활용할 경우 그린 인프라스트럭처 도입 시 공사 및 관리 과정에서 비용의 절감을 기대할 수 있다. 3번 지역은 대부분이 주거단지와 학교 등 공공시설로 이루어져 있어 사회적 교류가 활발하게 발생될 것으로 기대되기 때문에, 학교 및 아파트 단지 내의 유휴공간에 커뮤니티 정원과 같은 그린 인프라스트럭처를 도입할 수 있다. 또한 건물이 밀집해 있기 때문에 공간활용의 효율성을 위하여 주차장에 투수성포장, 레인가든과 같은 그린 인프라스트럭처를 도입하여 녹피율을 높이는 것이 효과적이다. 건물이 밀집된 4번 지역의 경우 상업지역 내의 공용주차장에 투수성포장을 도입하는 것이 지역현황에 적합할 것으로 판단된다. 그린 인프라스트럭처 조성이 미흡한 5번 지역에는 상대동로 주변에 약 300 m의 띠녹지를 보완하고, 공용주차장에 투수성 포장을 도입할 수 있다. 6번 지역은 유적지가 존재하기 때문에 그린 인프라스트럭처를 도입하기에 부적합하다고 판단하여 계획에서 제외했다. 7번 지역은 주변에 산지의 경사가 약 37~45°로 20° 이상의 가파른 경사에 해당하기 때문에 그린 인프라스트럭처 적용이 어려우며, 산지지형을 고려했을 때 그린 인프라스트럭처 도입보다도 시흥수로 인한 산사태를 예방하기 위한 사방 시설정비 및 관리가 필요하다. 도출된 대상지 중 2~5번 지역은 서로 밀집되어 있기 때문에 해당 지역에 특히 집중하여 약 1 km의 선형 그린 인프라스트럭처를 통해 연결성을 높일 수 있으며, 2~5번 지역에 집중하여 그린 인프라스트럭처를 설치하는 것이 도시홍수에 취약한 지역의 대응력을 높이는 데 효과적일 것으로 기대된다.



Fig. 6. The land use types of target areas

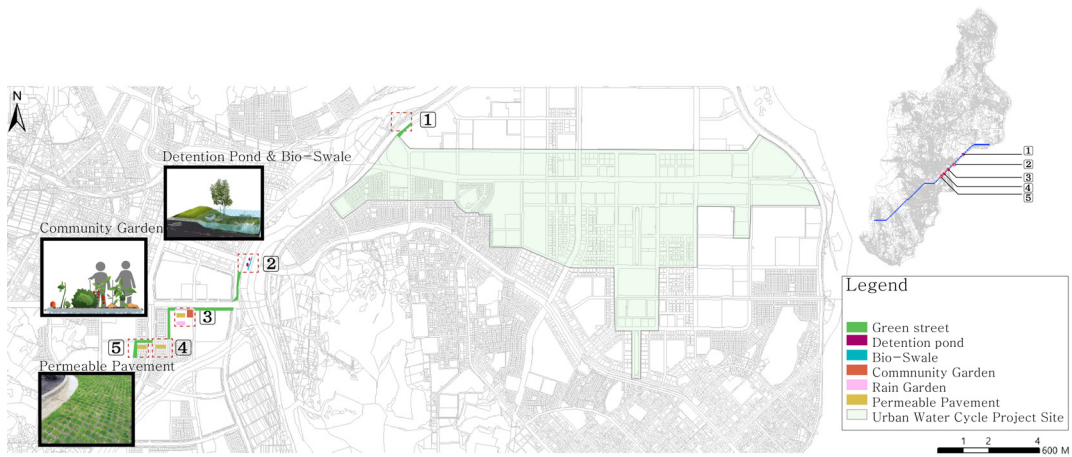


Fig. 7. Green infrastructure planning for applied target areas

Table 6. The applied types of green infrastructure in target areas

NO	Location	Local conditions	Green infrastructure types
1	Gap Stream and Yuseong Stream diversion area (Yuseong-gu Doryong-dong)	The Cheonbyeon City Expressway and the surrounding buffer green area are created. Waterfront green area around Gap Stream is created. Flatland.	Green street (alley)
2	Manyeongyo area (Yuseong-gu Bongmyeong-dong and Seo-gu Wolpyeong-dong)	The road and river exist. Gyeryong-ro has a linear strip green area. Concaved lowland.	Detention pond, Bio-swale
3	Bongmyeong elementary and middle school area (Yuseong-gu Bongmyeong-dong)	Worldcupdae-ro and Bongmyeongdae-ro exist. Apartments' green space, school fields and green space, playgrounds, and street trees exist. Flatland.	Permeable pavement, Rain garden, Garden (community/urban)
4	Doandae-ro and Bongmyeongseo-ro intersection area (Yuseong-gu Bongmyeong-dong)	Low-floor residential area and commercial area exist. Some commercial buildings have green roof. Green space is less than apartment area. Flatland.	Permeable pavement
5	Doandae-ro and Sangdaedong-ro intersection area (Yuseong-gu Sangdae-dong)	Commercial buildings exist. Some commercial buildings have green roof. Green street is near the road. Flatland.	Permeable pavement
6	Treeful City 9 th Apartment Complex area (Yuseong-gu Sangdae-dong)	Apartment complexes and historic heritage exist. Flatland.	-
7	Kkachi Mountain Baekwoon-ro (Yuseong-gu Se-dong)	Highway passes the mountain. Flat road in sloped mountain area.	-

4. 결론

본 연구는 도시홍수로 인한 표면 유출의 피해를 효과적으로 저감시키기 위해 표면유출의 네트워크를 분석하고 최적의 경로를 도출, 적지를 선정함으로써 그린 인프라스트럭처 적용 계획을 제시하고자 했다. 표면유출네트워크의 분석결과 대전 도룡동의 대전엑스포 광장 부근의 갑천 유역 지역(시작점)과 세동의 분지 지역(도착점)을 연결하는 최적의 네트워크가 도출되었다. 이를 대상으로 홍수취

약성 평가를 실시하여 가장 홍수취약성이 높은 7개의 셀이 우선적으로 그린 인프라스트럭처가 적용되어야 하는 적지로 선정되었다. 해당지역은 갑천과 유성천의 분기점 지역, 만년교 부근 지역, 대전봉명초등·중학교 인근 지역, 도안대로 및 봉명서로 교차 지역, 상도안대로 및 상대동로 교차 지역, 트리폴리티 9단지 아파트 단지 내 지역, 까치산백운로(유성구 세동 산64-8 부근) 지역이다. 선행 연구 고찰을 통해 토지이용별도 시홍수 대응에 적합한 그린 인프라스트럭처 유형을 분류하였고, 이를 참고하여 해당 대

상지의 지역 현황 및 토지이용유형을 고려한 도시홍수 피해 저감을 위한 그린 인프라스트럭처 계획을 제시하였다.

본 연구에서는 최적의 표면유출 네트워크도출을 위한 LCP 분석과정에서 토지이용과 경사도 두 요인만을 비용으로 고려하였다. 추후 연구에서는 지형적인 측면 외에도 환경적인 측면과 사회적인 측면들을 추가적으로 고려함으로써 표면유출 네트워크를 더욱 타당하게 도출할 필요가 있다. 또한 그린 인프라스트럭처 적용을 위한 적지를 선정하기 위해 홍수취약성 평가를 수행하는 과정에서 데이터 확보의 어려움 때문에 내수 배제시설물, 유역 및 하계망 분석 등 홍수취약성에 영향을 미치는 모든 요인들을 고려하지 못했다는 한계점이 있다. 마지막으로 그린 인프라스트럭처의 계획을 제시하는 과정에서 기존 그린 인프라스트럭처의 유형에 대해 문헌 고찰을 통해 수행했으나, 추후 연구에서는 공간시뮬레이션과 같은 과학적 기법을 추가하여 그린 인프라스트럭처의 계획을 보완하여 제시해야 할 것으로 판단된다.

그러나 본 연구는 먼저 최적의 표면 유출네트워크를 도출하기 위해 도시단위의 광역적 범위에서부터 네트워크 도출과 홍수취약성을 통해 선정된 적지 내에 그린 인프라스트럭처를 적용하는지 역적범위까지 다중 규모로써 연결했다는 점에서 의의가 있으며, 이는 향후 관련 연구와 정책에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다. 그 과정에서 최적의 표면유출 네트워크를 LCP분석을 통해 도출하고, 홍수취약성과 그린 인프라스트럭처 계획을 연계함으로써 프로세스로 정립하고자 했다는데 중요성이 높다. 추가적으로 본 연구에서는 정립한 연구방법 프로세스를 사례연구를 통해 대전광역시에 시범적으로 적용하여 구체적인 그린 인프라스트럭처 계획을 제시하였다. 사례연구 대상지로 선정된 대전광역시는 물순환 선도도시로 선정된 바 있고 도시홍수에 대한 대책을 수립하였으나, 기존 대책은 개별시설물단위로 그린 인프라스트럭처 계획을 수립하고, 도시전체의 표면 유출 흐름을 고려하지 않았다는 한계가 있었다. 그에 대해 본 연구에서는 대전광역시 규모에서 최적의 표면유출네트워크를 도출하였고, 이를 활용하여 그린 인프라스트럭처 계획을 연계하여 기존 대책의 공간적 규모를 확장하는 동시에 광역적 차원의 분석과 지역적 규모의 계획이 연결될 수 있도록 하였다. 이러한 연구방법 프로세스는 대전광역시뿐 아니라, 다른 도시 단위의 대상지에도 적용되어 그린 인프라스트럭처 계획의 과학적 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 2019년도 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 시행하는 한국연구재단 국제협력사업의 지원으로 수행된 연구결과임(과제번호: 2018K1A3A7A0308984212).

Reference

- Akan AO, Houghtalen RJ. 2003. Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Bin O, Kruse JB, Landry CE. 2008. Flood hazards, insurance rates, and amenities: Evidence from the coastal housing market. *J Risk Insur.* 75(1):63-82.
- Chen W, Hong H, Li S, Shahabi H, Wang Y, Wang X, Ahmad BB. 2019. Flood susceptibility modelling using novel hybrid approach of reduced-error pruning trees with bagging and random subspace ensembles. *J Hydrol.* 575(May):864-873.
- Daejeon Metropolitan City. 2020. Introduction of Daejeon; [accessed 2020 Sept 22]. <https://www.daejeon.go.kr>
- Davis AP. 2008. Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *J Hydrol Eng.* 13(2):90-95.
- Diaz-Nieto J, Lerner DN, Saul AJ. 2016. Least-cost path analysis to identify retrofit surface-water conveyance solutions. *J Hydrol Eng.* 21(3):1-14.
- Environmental Spatial Information Service. 2019. Land cover map; [accessed 2020 Sept 01]. egis.me.go.kr
- Etherington TR. 2016. Least-Cost Modelling and Landscape Ecology: Concepts, Applications, and Opportunities. *Curr Landsc Ecol Reports.* 1(1):40-53.
- Gonçalves AB. 2010. An extension of GIS-based least-cost path modelling to the location of wide paths. *Int J Geogr Inf Sci.* 24(7):983-996.
- Hwang JS, Seo YW, Kwon YJ. 2017. Effect of Green Infrastructure on Peak Flow Mitigation Focusing on the Connectivity of Impervious Areas. *J Korean Soc Civ Eng.*:1645-1646.
- Jeong ET, Seong YD, Ahn JS. 2007. Flood Control by Tailrace and Application Plan. *J Korean Soc Civ*

- Eng.:1361-1364.
- Kang JE, Lee MJ. 2012. Assessment of Flood Vulnerability to Climate Change Using Fuzzy Model and GIS in Seoul (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Geogr Inf Stud.* 15(3):119-136.
- Kang JE. 2014. Development and Application of Green Infrastructure Planning Framework for Improving Urban Water Cycle: Focused on Yeonje-Gu and Nam-Gu in Busan (in Korean with English abstract). *Korea. J. Environ. Policy* 13:43-73.
- Kim JJ, Kim TD, Choi DH, Jeon JH. 2011. Design of Structural BMPs for Low Impact Development (LID) Application and Modeling Its Effect on Reduction of Runoff and Nonpoint Source Pollution: Application of LIDMOD2 (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Water Qual.* 27(5):580-586.
- Kim JS, Sung HH, Choi GY. 2013. Spatial Patterns of Urban Flood Vulnerability in Seoul (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Reg Geogr.* 19(4):615-626.
- Kim YJ, Lee SM, Kim TH. 2002. A Study on the Establishment of the Management System for the Flood-Prone Areas. Seoul, Korea: Seoul Development Institute. .
- Koh TG, Lee WY. 2012. A Study on Urban Planning Techniques for Flood Reduction in the Lowlands - Focused on Seoul Metropolitan City in Korea - (in Korean with English abstract). *Seoul Studies.* 13(4):287-300.
- Lee GM, Choi JW, Jun KS. 2016. An Approach of Social Vulnerability Assessment to Urban Flood (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig.* 16(4):43-51.
- Lee HJ. 2020 Aug 03. Why is there urban flooding in 'Urban Water Cycle Leading City'. *Landscape Architecture Korea.*
- Lee HM, You SJ, Park S, Chon JH. 2018. A Study on Categories of Green Infrastructures to Enhance Urban Resilience (in Korean with English Abstract). *J Korea Plan Assoc.* 53(1):215-235.
- Lee JA, Chon JH, Ahn CW. 2014. Planning landscape corridors in ecological infrastructure using least-cost path methods based on the value of ecosystem services. *Sustain.* 6(11):7564-7585.
- Lee S, Lee YM. 2015. Designing a Decentralized Stormwater Management Corridor for a Flood-Prone Watershed using Surface Runoff Analysis (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Landsc Archit.* 43(3):13-26.
- Lee YS. 2007. A Field Survey of Gap Stream Origin. *River & Culture.* 3(1):46-52.
- Li H, Sharkey LJ, Hunt WF, Davis AP. 2009. Mitigation of impervious surface hydrology using bioretention in North Carolina and Maryland. *J Hydrol Eng.* 14(4):407-415.
- Li L, Uyttenhove P, Van Eetvelde V. 2020. Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk - A methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent. *Landsc. Urban Plan.* 194(2020 Feb):1-12.
- Lim YH, Eom JS. 2008. Development of Restoration Path Tracking Model for Urban Stream (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Geospatial Inf Sci.* 10(2):25-33.
- Ministry of Environment. 2006. Pre-Environmental Review Task Manual. Sejong, Korea; Ministry of Environment.
- Moon CM, Lee JG, Jeong HD, Lee EJ. 2017. Study of Feasibility for the Promotion of Water Cycle and the Introduction of Low Impact Development Technique. Daejeon, Korea; Daejeon Sejong Research Institute. Policy Report 2017-01.
- Moon SH. 2020 Sept 02. Daejeon City is preparing for urban flood measures. *Daejeon Ilbo.*
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Framing the challenge of urban flooding in the United States. Washington DC: National Academies Press
- National Disaster Safety Portal. 2018 Disaster Yearbook; [accessed 2020 Aug 27]. www.safekorea.go.kr
- National Spatial Data Infrastructure Portal. 2014. DEM;

- [accessed 2020 Sept 01]. www.nsd.go.kr
- National Spatial Data Infrastructure Portal. 2020. Forest Type Map; [accessed 2020 Sept 01]. www.nsd.go.kr
- National Spatial Data Infrastructure Portal. 2020. Land use map; [accessed 2020 Sept 01]. www.nsd.go.kr
- National Spatial Data Infrastructure Portal. 2020. Map of Soil Depth; [accessed 2020 Sept 01]. www.nsd.go.kr
- National Spatial Data Infrastructure Portal. 2020. Map of Soil Drainage Class; [accessed 2020 Sept 01]. www.nsd.go.kr
- Naver map. 2020. Satellite map; [accessed 2020 Sept 01]. <https://m.map.naver.com/>
- Park EJ, Kang GE, Lee HJ, Jwa SH. 2007. Improving the Function of Urban Green Space for Stormwater Management. *Gyeonggi Res Inst.*:3-9.
- Park HN, Song JM. 2014. Empirical Study on Environmental Justice through Correlation Analysis of the Flood Vulnerability Indicator and the Ratio of the Poor Population. *J Korea Plan Assoc.* 49(7):169-186.
- Park MJ, Song YS, Joo JG, Park MG. 2013. A Study on Urban Flood Vulnerability Assessment. *J Korean Soc Hazard Mitig.* 13(5):297-395.
- Seo GW, Cho WC. 1998. *Urban Hydrology*. Seoul: Engineers
- Song WG. 2011. *Habitat Network Modeling of Leopard Cat(Prionailurus bengalensis) Based on the Spatial Graph Theory* [dissertation]. Seoul National University
- Song YI, Lee BG, Jeong JC, Kim HS, Jeong SH, Shim JH. 2007. *Study on the Planning of Environmentally Friendly Flood Abandoned Measures*. Sejong, Korea; Korea Environmental Institute.
- US Environmental Protection Agency. 2007. *Reducing Sstormwater Ccosts through Llow Iimpact Ddevelopment (LID) Sstrategies and Ppractices*. Washington DC, United States; US Environmental Protection Agency.
- Woods-Ballard B, Kellagher R, Martin P, Jefferies C, Bray R, Shaffer P. 2007. *The SuDS manual (C697)*. London, United Kingdom; Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).