

IHP 제8단계(5~8차년도) : 일반과제
 지속가능한 도시 생태수문 시스템 구축을 통한
 도시물순환 전략 도출



서 용 원
 영남대학교 건설시스템공학과 부교수
 yseo@ynu.ac.kr



김 영 도
 인제대학교 지구환경시스템공학부 부교수
 ydkim@inje.ac.kr

1. 서론

2016년 10월 제18호 태풍 차바로 인해 제주, 전라남도, 경상남도, 부산광역시 등에 많은 피해가 발생하였다. 특히 울산에서는 태화, 우정시장 침수 등 큰 규모의 도시 침수 피해가 발생하였다. 특히 내항배수장의 미작동 및 갑문 폐쇄 지연으로 피해 또한 컸는데, 이러한 피해 발생 원인 분석 결과는 우리에게 기존의 도시홍수 저감을 위한 구조적 대안의 한계에 대한 명확한 인식이 필요하다는 것을 알려주고 있다. 기존 도시 홍수 저감을 위한 대표적인 대책인 배수 펌프장의 경우 잦은 오작동과 운영 실수, 단전 등의 이유로 설계빈도 홍수량을 초과한 이상 홍수 도래시 본래의 설계 빈도 홍수량 조차 처리하지 못하

는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 따라서 설계강우를 초과하는 이상 홍수 도래 시에도 별다른 문제 없이 원래 설계빈도의 홍수방어 기능을 그대로 유지할 수 있는 보다 지속가능한 도시홍수 저감 대안 및 관리대책에 대한 필요성이 제기되고 있는 실정이다.

불투수 면적비는 자연유역과 구별되는 도시유역의 가장 큰 특징 중의 하나이며 침투의 감소, 직접유출의 증가, 열섬효과, 증발산량의 감소 등 여러 가지 영향을 미치고 있다. 이러한 효과는 대부분 자연적인 수문학적 순환 과정에서 부정적으로 작용하여 도시환경의 여러 위협요인을 증가시키는 방향으로 작용하고 있다. 최근 도시의 불투수 면적을 보다 세분화하여 구분하는 방식이 제안되어 보다 정밀한 도시유역에서의 직접유출 산정에 이용되고 있다. 특히 최근 도시화의 부정적인 영향을 감소시킬 수 있는 그린 인프라 도입은 불투수면적의 직접적인 감소와 이로 인한 침투율 증가 뿐 아니라 불투수층의 연결성에도 영향을 줄 수 있다. 미국 환경청(USEPA, 2010; 2014)은 이미 토지이용에 따른 Sutherland 방정식(2010) 등 직접연결불투수면적(Directly Connected Impervious Areas, DCIA) 산정 경험공식을 제시하여 이용 중이다. 그러나 이러한 경험공식은 우리나라에 직접 적용하기는 적합하지 않으며, 우리나라의 토지분류 체계에 따른 직접연결불투수면적 산정 공식의 수립이 필요하다. 또한 직접연결 불투수면적과 폭함수에 기반한 수문반응 함수를



그림 1. 연구의 최종 목표 및 단계별 목표

정의, 개발하고 공간적인 그린 인프라 도입에 따른 홍수량 변동을 산정, 평가할 수 있는 모형 개발이 필요한 실정이다.

향후 기후변화로 인한 비정상적 정상성이 대두되고 있으며 RCP 8.5 시나리오의 경우 기상청 상세화 예측자료를 기초로 할 경우 부산지역의 2025년 기준 100년 빈도 확률강우량이 2배 증가하는 것으로 분석되고 있다(Seo et al., 2017). 이러한 상황에서 기존의 도시홍수 저감 대안의 한계를 극복하고 지속 가능한 도시 생태수문 시스템 구축을 위한 다양한 저감 대안을 제시할 필요가 있다. 또한 도시 물순환 회복률을 정의하고 이를 달성하기 위한 장기 로드맵의 제시 또한 필요할 실정이다. 이러한 장기 로드맵 작성에 있어 제시된 대안의 우선순위 결정에 있어 홍수저감 효과 및 경제성을 고려한 정량적 우선순위 및 사회경제적 평가를 통한 정성적 우선순위를 모두 고려하여 종합적인 우선순위를 결정할 필요가 있다.

2. 연구의 목표 및 연구 방법

본 연구 과제는 국제수문학프로그램(IHP) 8단계 사업(2014-2021)의 6개 주제 중 5번째 주제인 도시생태수문 분야(Focal Area 5.4)에 해당된다. 본 과제의 최종 목표는 앞서 서론에서 언급된 필요 연구 주제의 수행을 통해 건강 및 삶의 질 향상을 위한 도시 내 홍수저류시설 계획 및 도시 물순환 건전화 방안

을 제시하는데 있다. 세부 연구주제는 아래와 같다:

- 지속가능한 미래 도시개발을 위한 국내외 그린 인프라의 도입 현황 및 전망 제시
 - 그린 인프라로 인한 직접유출에의 영향평가 방안 개발
 - 지속가능한 도시 생태수문 시스템 구축을 통한 도시 물관리 전략 및 우선순위 도출
- 위 목적을 달성하기 위해 본 과제는 총 4차년(5차년도~8차년도)으로 계획되었으며 연차 별 연구내용은 아래와 같다.

5차년도(2018)는 국외의 지속가능한 홍수관리 방안에 대한 현황 조사와 국내의 기존 도시홍수저감 대안의 한계와 문제점을 분석한 후 지속가능한 홍수 관리 방안의 개념을 정의하고 국내여건에 적합한 지속가능한 도시 홍수 저감 대안을 유형별로 제시하는데 그 목적이 있다.

1단계에서는 기왕 도시 홍수 발생 지역을 대상으로 사례 조사, 분석하여 국내 도입되었던 기존 도시 홍수 저감 대안의 한계와 문제점을 파악하고자 한다. 특히 2010년, 2011년 연이어 발생한 서울 도심의 홍수와 2016년 태풍 차바로 인한 울산 태화시장 및 반구동 침수 원인 분석 조사를 통해 기존 도시 홍수 대처 방향의 문제점을 살펴보고자 한다. 이어 2단계에서는 국외의 지속가능한 홍수관리 방안 현황을 조사한다. 이미 1990년대 이후 제시되고, 2000년대 이후 구체적인 대안으로 발전되어온 네덜란드와 독

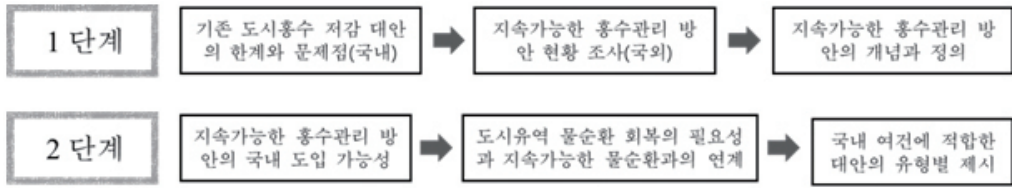


그림 2. 5차년도(2018) 연구계획

일의 ‘Room for the River’, 유럽·미국의 ‘Living with Floods’ 등 지속가능한 홍수관리를 위한 개념들과 정책 방안을 조사, 체계적으로 정리하고, 국내 적용이 가능하도록 지속가능한 홍수관리 방안을 정의하고자 한다. 특히 유럽을 중심으로 제안되었던 ‘생태적으로 지속가능한 홍수 관리 방안’과 저개발국을 중심으로 제시되었던 ‘경제적으로 지속가능한 홍수 관리 방안’ 등 관심분야와 관점에 따른 지속가능한 홍수 관리 방안에 대한 정의를 하고자 한다.

6차년도(2019)는 그린 인프라 도입으로 인한 직접 유출의 저감 영향 평가를 위하여 직접연결불투수면적의 개념의 중요성을 제시하고 이를 산정하기 위한 경험식 개발을 목표로 한다.

그린 인프라는 도시공간의 콘크리트로 만들어진 회색 인공구조물(grey infrastructure)에 대응되는 개념으로 기후변화에 대한 적응 대안(adaptation strategy)으로 부각되고 있으며, 도시의 왜곡된 물순환 구조를 자연에 가깝도록 개선함과 동시에 보다 지속가능한 환경을 만들기 위한 대안으로 부상하고 있다. 이에 따라 기후변화 대응을 위한 그린인프라 평가 기술의 일환으로서 그린 인프라의 도입으로 인한 도시 유역 수문곡선의 침투 홍수량 저감효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 앞서 언급한 바와

같이, 그린 인프라는 DCIA의 감소와 밀접한 연관이 있으며 도입되는 그린인프라의 유형에 따라 DCIA의 감소효과는 매우 상이하므로 이에 대한 상세한 평가가 반드시 필요하다. 또한 그린인프라의 도입에 따른 도시유출의 저감을 정량적으로 평가하기 위해서는 DCIA 개념의 도입과 국내에 맞는 DCIA 산정 경험식 개발이 필수불가결한 요소라 할 수 있다.

6차년도(2019) 1단계로는 직접연결불투수면적(DCIA) 혹은 유효불투수면적(EIA)의 개념을 조사 정리하여 제시하고 기존의 문헌조사 및 연구사례 조사를 통해 DCIA 개념의 중요성과 필요성에 대해 조사하여 제시할 예정이다. 또한 미 환경청에서 제시하고 있는 ‘disconnection ratio’ 등 그린 인프라의 유형별로 제시된 DCIA의 감소율에 관한 문헌을 조사 정리하여 도입되는 그린 인프라의 유형에 따른 DCIA의 감소율을 제시할 예정이다. 2단계로는 국내 토지피복도 세분류를 이용한 DCIA를 산정할 예정이다. 시범 도시 유역을 선정하여 선정된 도시 유역의 불투수면적의 연결성을 평가하여 토지피복세분류 별 총 불투수면적(Total Impervious Area)에 대한 DCIA의 면적비를 산정하여 이를 미국에서 제시되고 있는 DCIA 산정 경험식과 비교 검토하여(표 1 참조), 국내 여건에 맞고 국내 토지 피복도 분류에

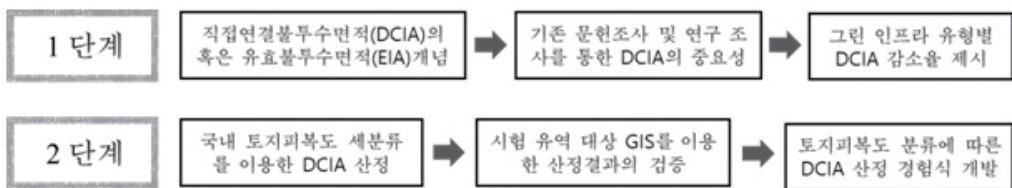


그림 3. 6차년도(2019) 연구계획

표 1. 미국에서 적용되고 있는 DCIA 산정 경험식 사례(USEPA, 2010)

Watershed Selection Criteria	Assumed Land Use	Equation
Average: Mostly storm sewerd with curb & gutter, no dry wells or infiltration, residential rooftops not directly connected	Commercial, Industrial, Institutional, Open land, and Med density residential	$DCIA=0.1(TIA)1.5$
Highly connected: Same as above, but residential rooftops are connected	High density residential	$DCIA=0.4(TIA)1.2$
Totally connected: 100% storm sewerd with all TIA connected	-	$DCIA=1.0(TIA)1.0$
Somewhat connected: 50% not storm sewerd, but open section roads, grassy swales, residential rooftops not connected some infiltration	Low density residential	$DCIA=0.04(TIA)1.7$
Mostly disconnected: Small percentage of urban area is storm sewerd, or 70% or more infiltrate/disconnected	Agricultural, Forested	$DCIA=0.01(TIA)2.5$

*DCIA: Directly Connected Impervious Area, TIA: Total Impervious Area



그림 4. 7차년도(2020) 연구계획

따른 DCIA 산정식을 제시할 예정이다.

7차년도(2020)에는 다양한 시공간 스케일을 고려할 수 있는 도시 동적생태수문 모형 구축 및 검증 방안을 제시하고자 한다. 또한, 2차년도에 산정한 DCIA를 이용, 배수망 구조를 이용한 직접유출 산정 및 그린 인프라 도시홍수저감효과 평가를 위한 모형을 구축하고, 이를 검증할 방안을 제시할 예정이다.

본 연구에서는 다양한 시공간 스케일에 적용할 수 있는 동적생태수문모형을 구축하고자 한다. 이를 위해 프로세스 기반 모형인 RHESSys (Regional Hydro Ecological Simulation System) 모형을 기초로 이를 보완 도시유역에 적용할 수 있는 방안을 제시할 예정이다. 또한 본 연구에서는 DCIA의 공간적 분포를 고려할 수 있는 준분포 도시수문모형을

개발하여 그린인프라의 공간적 적용에 따른 DCIA의 공간적 변화와 직접 유출에의 영향을 검토하고 이를 이용 직접유출 수문곡선을 산정하고 첨두 홍수량에 미치는 그린인프라의 영향을 정량적으로 평가할 방안을 제시할 예정이다. 본 연구에서는 도시유역 내의 각 지역을 직접 배수유역에 연결되는 불투수 지역(DCIA), 배수유역에 연결되지 않고 고립되어 있는 불투수지역(IIA), 침투가 일어나는 투수 지역(pervous area with infiltration, INPERV), 그리고 마지막으로 강우강도의 증가로 직접유출이 일어나는 투수지역(pervous area with excess rainfall, EXPERV) 등 네 가지 유형으로 구분하여 각 지역별 반응함수를 정의하고, 이를 이용하여 그린인프라의 도입이 유출 저감에 미치는 영향을 검토

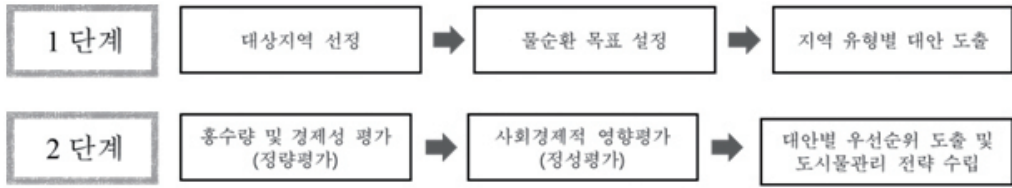


그림 5. 8차년도(2021) 연구계획

하고자 한다. 그린인프라를 평가하기 위한 기존의 방법론과 달리 이러한 방법론은 실제 유역에 그린 인프라를 도입하였을 경우 투수지역 혹은 불투수지역의 연결성(connectivity)을 총괄적으로 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다.

8차년도(2021)에는 대상 지역 선정 및 물순환 목표를 설정하고, 국내 여건에 맞는 다양한 대안을 통한 지속가능한 도시홍수 관리방안 제시하고자 한다. 이를 위해 홍수량 및 경제성 평가 등 정량 평가를 수행하고, 사회경제적 영향평가를 포함한 정성 효과를 추가로 고려한 대안 및 방안별 우선순위를 도출하고자 한다.

3. 연구의 추진체계

본 연구는 영남대학교와 인제대학교의 공동연구

로서, 영남대학교에서는 지속가능한 대안의 평가 모형개발 및 구축과 이를 이용한 대안 평가에 주안점을 두고 연구를 추진할 계획이다. 인제대학교에서는 현재 이용되고 물순환 지표 혹은 물순환 회복지표에 대한 검토 후 새로운 물순환 지표를 개발하고, 또한 이를 통해 도시 물관리 전략 수립에 중점을 두어 연구를 추진할 계획이다.

4. 연구의 기대효과 및 활용방안

최근 환경부로 국토부의 수자원 부문이 이동하며 수질, 수량을 총괄하는 본격적인 통합물관리 시대가 도래하고 있다. 이와 함께 물 관련 분야에서도 물순환 등 지속가능한 개발의 개념에 대한 적용이 여러 부문에서 검토되고 있다. 도시 물관리 부문에서는 그레이 인프라라고 칭해지는 기존의 전통적인 홍수



그림 6. 참여 연구진 구성 및 연구 추진 계획

저감 대안에 대하여 그린인프라 등 지속가능한 대안에 대한 연구의 필요성 또한 점차 높아지고 있는 상황이다. 이에 본 연구의 성과를 통해 그린 인프라의 공간적 계획에 대한 정량적인 평가 방안을 마련하는데 조금이나마 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 본 연구에서 제시하는 그린 인프라와 불투수면적의 연결성과의 상관성 정립은 도시공간에서의 그린 인프라 계획에 있어 중요한 요소로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 이를 이용하여 보다 정확한 침투홍수량에의 영향을 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

마지막으로 본 연구에서는 국외의 다양한 정책 사례와 철학을 검토 반영하여 국내 적용 가능한 다양한 지속가능 도시홍수 저감 대안을 제시할 예정이

다. 이러한 대안들을 임의의 시범유역을 대상으로 검토한 후, 정량평가(홍수피해 저감 편익 및 경제성 평가)와 정성평가(사회경제적 영향평가)를 거친 대안 별 우선순위를 도출할 예정이다. 이러한 결과들을 통해 지속가능한 도시의 관리와 발전을 위한 기준 물순환 목표를 재검토, 재설정하고, 보다 발전된 형태의 도시 물관리의 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 글은 환경부의 2018년 국제수문학프로그램(IHP) 연구지원 사업에 의한 것임.

참고문헌

- Seo, Y., Hwang, J., and Kim, B. (2017). "Extreme Precipitation Frequency Analysis Using a Minimum Density Power Divergence Estimator." *Water*, 9(2).
- Sutherland, R. C. (2000). "Methods for estimating the effective impervious area of urban watersheds." *The Practice of Watershed Protection*, 32, 193–195.
- USEPA (2010). "EPA's Methodology to Calculate Baseline Estimates of Impervious Area (IA) and Directly Connected Impervious Area (DCIA) for Massachusetts Communities."
- USEPA (2014). "Estimating Change in Impervious Area (IA) and Directly Connected Impervious Area for Massachusetts Small MS4 Permit." United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.