

폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소의 우수유출 저감효과 : 저류기능을 고려한 빗물이용시설을 중심으로

Effectiveness on Storm Water Management of Green City Planning Elements
: Focusing on Multipurpose Rainwater Utilization Facilities

윤재봉 동아대학교 대학원 도시계획·조경학과 석사(제1저자)
Yoon Jaebong M.S., Dept. of Urban Planning and Landscape,
Graduate School of Dong-A Univ.(Primary Author)
(spokesman@donga.ac.kr)

권태정 동아대학교 도시계획학과 조교수(교신저자)
Kwon Taejung Assistant Prof., Dept. of Urban Planning,
Dong-A Univ.(Corresponding Author)
(edankwon@dau.ac.kr)

목 차

- I. 서론
- II. 이론적 고찰
 - 1. 기존 방재대책 한계점 및 선행연구 검토
 - 2. 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소 도출: 저류기능을 고려한 빗물이용시설
 - 3. 관련 법률 및 사례 분석
- III. 대상지 선정 현황 분석
- IV. 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 우수유출 저감효과 분석
 - 1. 시나리오의 작성
 - 2. 분석모형 선정: 도시유출해석모형
 - 3. SWMM의 입력자료 구성
 - 4. 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 우수유출 저감효과 분석 결과
- V. 결론

※ 본 논문은 윤재봉, 2013, “폭우재해 완화를 위한 도시설계요소 효과분석 - 부산광역시 감전1 침수위험지구를 중심으로”, 동아대학교 석사학위 논문을 수정·보완하여 작성하였으며, 정부(국토교통부)가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 2011년도 첨단도시개발사업(11첨단도시G09) 지원을 받아 수행되었음.

I. 서론

최근 우리나라의 기후변화는 빠르게 진행되고 있으며, 기후변화 문제의 심각성을 인식한 국내 도시계획 관련 학계 및 정부는 지속가능개발 개념을 바탕으로 생태도시, 녹색도시 등 이상기후에 대처하기 위한 연구를 활발히 진행해왔다. 하지만 현재까지 진행된 도시계획 분야의 대처는 이상기후의 원인인 온실가스 배출을 감축하고 도시개발로 인해 교란된 생태계를 복원하는 데 중점을 두고 추진된 반면, 기후변화로 인해 이미 직면하고 있는 대형화된 자연재해에 대한 고려는 상대적으로 미미하였다.

최근 대형화된 자연재해의 일례로 2010년 9월에는 서울지역 집중 폭우로 인해 국가 상징거리인 세종로가 침수되었으며, 실종 2명을 포함하여 3명의 인명 피해와 약 5,700가구 1만 3,900명의 이재민이 발생하였다. 그리고 2011년 7월에는 수도권 지역의 기록적인 폭우로 인해 우면산 산사태가 발생하였으며, 이는 사망 16명과 580여 채 주택 침수로 이어지기도 하였다. 하지만 기후변화로 인한 최근의 대형화된 폭우 관련 자연재해 이후에도 국내의 방재대책은 방재시설의 개선·확충 등 과거 구조적 대책 중심으로 진행되었으며, 폭우를 대비한 도시공간구조 개편 및 생태·녹색도시 연구 결과의 연계·활용 등 도시계획 관련 비구조적 대책 마련은 미흡하였다. 대형화된 폭우에 대비한 하수관거 설계빈도 조정 등 구조적 대책의 중요성을 간과할 수 없으나 평상시에는 용량의 상당 부분이 활용되지 않는 등 경제적 비효율성이 대두될 수 있으며, 특정 하수관거 개선·확충 후에도 다른 관

련 수방시설 설계빈도¹⁾의 한계 또는 운영 미숙²⁾ 등으로 인하여 새롭게 개선·확충된 방재시설물의 제 기능을 기대할 수 없는 경우 또한 존재한다. 따라서 방재시설물 외에도 생태·녹색도시 연구와의 연계 속에서 도시의 모든 구성요소가 종합적으로 대응함으로써 방재시설의 부담을 완화하고 대형화된 폭우에 대응하기 위한 역할을 분담할 필요가 있다.

따라서 본 논문은 기후변화 대응 관련 도시계획 분야의 핵심 연구대상인 생태·녹색도시의 계획요소를 폭우 관련 도시 방재적 측면에서 평가하여 핵심계획요소를 도출하고, 폭우 시 해당 계획요소의 폭우 관련 방재시설 부담 완화 측면의 효과를 규명하고자 한다. 효과 규명을 위해 본 논문은 EPA-SWMM을 활용하여 부산광역시 낙동강변에 위치한 폭우관련 재해위험지구를 대상으로 도출된 녹색도시 계획요소의 방재 효과를 검증하였다. 본 논문에서의 폭우란 부산광역시 최대 하수관거 설계빈도에 해당하는 강우로 가정하였다. 본 논문은 향후 폭우재해로부터 안전한 도시조성을 위한 녹색도시 계획요소 도입가능성 검토를 넘어 비구조적 방재대책으로서의 녹색도시연구 연계방안에 대한 시사점을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

II. 이론적 고찰

1. 기존 방재대책 한계점 및 선행연구 검토

도시지역은 지역 내 도시화로 인한 불투수면의 증대, 토지피복의 변화로 인하여 침투유출량이 급격히

1) 국내 도시 대부분의 하수관거 설계빈도는 10년 빈도(75mm/h)를 기준으로 설치되어 있으며, 하수관거를 제외한 수방시설 역시 5~30년 빈도 설계기준으로 설치되어 있음(전병훈, 2012: 10).

2) 2012년 7월 1일, 부산광역시 해운대구 센텀시티에는 하루 231mm의 집중호우가 쏟아지면서 침수가 발생하였음. 부산시가 일대 저지대의 침수를 예방하기 위해 올림픽공원 지하에 설치한 우수저류조가 제 역할을 못하였는데, 낙엽 등 각종 이물질이 우수저류조의 입구를 막아 침수가 발생한 것으로 밝혀졌음(박주영, 2012).

증가할 뿐 아니라 침투유출량 도달시간이 단축되어 침수에 취약한 특성을 가지고 있다. 곽현구(2007: 1)에 의하면 도시지역의 침수는 토지이용으로 인한 토지피복의 변화와 더불어 강우 규모가 배수시스템의 용량을 초과하거나, 하천수위의 상승으로 관로 내에 역류가 발생함으로써 우수 배제를 제대로 수행하지 못할 경우에 발생한다.

일반적으로 폭우 관련 방재대책은 구조적 방법과 비구조적 방법으로 구분되며, 국내의 기존 방재대책은 주로 침수피해로부터 인간의 정주공간을 보호하는 구조적 방법에 크게 의존해왔다(권태정 외, 2012: 10). 기존의 구조적 방법은 특히, 하천변 제방시설과 같이 외수침수로부터 도시지역을 보호하기 위한 방재시설과 하수관거 확충 등 유출수의 신속한 배수를 통해 내수침수로부터 도시지역을 보호하기 위한 방재 단일목적의 구조물을 중심으로 이뤄졌다. 도시화로 인해 도시지역의 침투유출량과 침투유출량 도달 시간 관련 지표가 악화되었으나, 지표에서 우수를 침투·지연시키는 우수관리 시스템을 갖추는 데 상대적으로 소홀하였으며, 재해위험지역 또는 하천·해안변에 인접하여 주거지역이 밀집되어 조성되는 등 방재적 관점을 고려한 토지이용이 미흡한 점 등이 지적되고 있다(심우배 외, 2010: 16). 이에 따라 최근 들어 통합적 수자원 관리(Integrated Water Resources Management: IWRM)의 일환으로 통합적 홍수 관리(Integrated Flood Management: IFM)의 필요성이 대두되고 있으며, 이는 최근 이상기후로 인한 극한 홍수에 효과적으로 대비하기 위하여 토지이용 및 총괄적 수자원 관리와의 연계 등 비구조적 통합적 대응방안의 중요성을 강조하고 있다(World Meteorological

Organization, 2009).

한편, 도시지역의 침수 완화 관련 선행연구는 대부분 설계강우량을 초과하는 폭우에 대한 문제점을 인식하고 방재 단일목적 시설물의 위치 및 용량의 최적화에 대한 내용이 주류를 이루고 있다. 일부 연구에서 도시계획시설 측면에서의 방재방안 도입의 필요성을 제시하고는 있으나, 도입시설에 대한 효과 분석에 소홀한 한계점을 가지고 있다(표 1 참조). 또한 최근 토목 및 환경 분야에서는 도시의 물 순환 건전화와 비점오염원 관리를 동시에 달성할 수 있는 기법인 LID(Low Impact Development)에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. LID는 지표면 유출수를 저류·침투·증발 목적의 설계기법을 통해 개발 이전의 자연적인 수문학적 특성을 구현함과 동시에 지하수 함양 촉진을 목적으로 한다. LID는 주로 미국의 환경청(EPA)을 중심으로 사용되는 용어로 이와 유사한 기법으로는 영국의 지속가능배수시스템(Sustainable

표 1 _ 도시지역 침수 완화 관련 선행연구

연구자	연구 내용
진영길(2003)	도시지역의 홍수피해 원인 분석을 통하여 내수침수의 대책으로 배수계통 시설의 충분한 시설용량 확보를 제시함
박지현(2008)	저류지 위치별 홍수조절능력 평가에 의하여 하류에 비해 중류에 설치하는 것이 더욱 효과적임을 규명함
엄문섭(2008)	저류지 등의 기존 구조적 대책 외 우수유출저감시설과 더불어 도시계획시설 측면에서의 방재방안 도입의 필요성을 제시함
이상엽(2008)	SWMM을 활용하여 지하저류조의 용량과 최적의 위치를 선정함
최우정(2008)	SWMM을 활용하여 문산배수펌프장 배수구역의 우수관거 조정 및 재설계, 저류지 설치에 대한 효과를 분석함
박지은(2012)	MOUSE모형을 활용하여 관거의 증설과 저류공간 설치에 따른 침수개선 효과를 비교분석하여 관거의 증설만으로는 침수 저감에 한계가 있음을 주장함
이상은(2012)	저류시설 용량 산정과 더불어 녹지의 물순환 기능 개선, 침투설비의 설치 등 소규모 저감방안을 통하여 유출저감이 가능하며 공간계획상의 적용을 위한 규제 및 가이드라인 필요성을 제시함
채희창(2012)	XP-SWMM을 활용한 저류지의 위치변경에 따른 유출량 저감효과를 분석하여 위치에 따라 우수유출 저감효과의 차이가 큼을 분석함

표 2_LID기법의 유출량 저감효과 관련 선행연구

연구자	연구 내용
김현수(2002)	시범설치사업 및 SWMM을 활용한 시나리오 분석을 통하여 침투통, 침투측구, 침투트렌치, 투수성 포장의 효과를 증명함
장수철(2006)	옥상녹화 도입비율별(25%, 75%, 100%) 시나리오 분석을 통하여 옥상녹화의 우수유출저감효과를 증명함
배상원(2011)	침투도랑, 식생수로, 측구형 침투시설, 도심형 인공습지를 도입한 시나리오 분석을 통하여 침투유출량 및 총 유출량 저감효과를 증명함
송창준(2011)	XP-SWMM을 활용한 옥상녹화 시나리오 분석을 통하여 옥상녹화의 홍수량 감소 효과와 배수시스템 보완 측면의 대응책으로서 효과를 증명함
조은영(2012)	SWMM을 활용한 옥상녹화 및 투수성 포장의 시나리오 분석을 통하여 투수성 포장의 도입이 약 48% 더 효과적임을 증명함

Urban Drainage Systems: SUDS), 호주의 빗물관리 도시설계(Water Sensitive Urban Design: WSUD) 등을 들 수 있다(신상영 외, 2012: 68). LID 주요 요소로는 생태저류시설, 식생체류장지, 식생사면, 생태식생수로, 옥상녹화, 투수성 포장 등이 있다. LID 관련 선행연구에서는 각 계획요소에 대한 효과분석을 실시하고 있으나, 옥상녹화와 투수성 포장을 중심으로 연구가 진행되어 왔으며(〈표 2〉 참조), 투수성 포장의 경우 집중 강우 시 침투유출량 감소 및 침투유출량 도달시간 지연효과에 대한 의문과 한계가 지속적으로 제기되고 있다.³⁾

2. 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소 도출 : 저류기능을 고려한 빗물이용시설

최근 폭우재해 완화를 위한 연구가 방재 단일목적 시설물 중심에 초점이 맞추어져 진행됨에 따른 한계점을 인식하고 도시계획 차원의 접근 필요성을 바탕으로 연구가 진행 중에 있다. 본 논문은 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소를 도출하기 위하여 폭우

재해 완화를 위한 도시계획·설계요소 관련 연구에 대한 문헌고찰을 실시하였다. 대표적인 관련 연구로는 심우배 외(2010), 권태정 외(2012), 신상영 외(2012)가 있으며, 권태정 외(2012)의 연구에서 심우배 외(2010)의 연구를 선행연구로 포함함으로써 본 논문에서는 권태정 외(2012)와 신상영 외(2012)의 연구를 고찰함으로써 같음하였다. 신상영 외(2012)는 도시계획·설계에 대한 개념 및 이론검토를 바탕으로 폭우

재해 저감을 위한 현행 국내·외 제도 및 사례를 분석하여 최종 49개의 관련 요소를 도출하였고, 계획영역별(입지 및 토지이용, 기반시설, 단지조성, 건축물) 구분을 통하여 방재를 고려한 도시설계요소 인벤토리를 구축하였다. 권태정 외(2012)의 연구는 관련 법률 및 수립지침, 선행연구, 국내·외 사례분석을 통하여 관련 도시계획·설계요소 42개를 도출하였다. 권태정 외(2012)의 연구는 도출된 도시계획·설계요소를 공간적 위계별(광역, 도시, 지구·단지, 건축물<필지>) 및 재난위험함수의 변수로 구분하여 matrix를 구축하였다. 재난위험함수란 Exposure, Vulnerability, Hazard를 변수 Risk = function(Hazard × Exposure × Vulnerability)로 표현되며, 이는 자연재해로 인한 위험(Risk)은 자연재해의 빈도와 규모 등 자연재해 자체에 대한 요인(Hazard)과 재해에 대한 인명·재산의 노출(Exposure), 도시 사회 구성요소 각각이 지니는 취약성(Vulnerability)에 따라 결정됨을 의미한다. 본 논문은 공간위계별 구분을 통하여 대상지에 적용 가능한 계획요소의 도출이 관한 권태정 외(2012) 연구의 matrix를 바탕으로 신상영

3) 이재용 외(2001), 김병훈(2001)의 연구에서는 공극의 막힘으로 인한 투수성 포장의 효과감소를 예상하고 있으며, 이정민 외(2011)의 연구에서는 사용조사에 의하여 5년 경과 후 대부분의 침투능력이 폐쇄되고 있다고 지적함.

표 3_ 선형연구 고찰을 통해 도출된 폭우재해 완화 및 녹색도시 관련 계획요소

구분	광역	도시	지구·단지	건축물(필지)
Exposure	• 보존·관리용 지(지역) 설정	• 토지이용 관련 제도를 통한 취약 지역 관리 • 하천(유역) 및 해안 관리	• 지구/단지 내 기능·시설물 입지 관리 • 지반고 승고	• 입체적 용도·기능 관리
Vulnerability	• 하천 방재기능 강화	• 공공시설·용지 내 방재기능 부여 • 방재기능을 고려한 공원·녹지 확충 • 도시 해안·하천 방재기능 강화 • 빗물관리시스템 도입(지류·우수 이용) • 지하수위 및 지하 투수층 관리 • 방재 관련 제도 강화·도입 • 비상대응체계 확립 • 도로의 방재기능 강화	• 지구/단지 내 녹지율 제고 및 생태면적 확보 • 인공포장 불투수성 최소화 • 지구(단지) 내 우수 저류 기능 강화	• 옥상정원 도입 • 우수저류시설 도입 • 중수로 활용
Hazards	• 개발 영향 최소화 • 자연생태 건전성 제고	• 녹색·대중교통 중심 교통체계 확립 • 녹지 확보 및 네트워크화 • 생태계 복원 • 신재생에너지 활용 및 에너지 효율화 • 자원순환을 고려한 우수 관리·활용 • 자전거·보행자 중심 네트워크 구현 • 친환경 토지 이용	• 교통정온화 기법 도입 • 기존 지형을 고려한 단지개발 • 녹지율 제고 • 대중교통시설과 보행네트워크 연계 • 바람길, 열섬 등 미기후 적극 고려 • 보행친화적인 거리 조성 • 빗물 관리·활용 • 자연에너지 및 자원순환을 고려한 주택·시설계획 • 자연에너지 이용률 제고 • 폐기물 감량 및 재활용	• 빗물 저류·활용 시설 도입 • 신재생에너지를 고려한 건축 계획 • 에너지 저감형 주택 건축 계획 • 옥상정원·벽면녹화

외(2012)의 계획요소를 matrix에 추가하는 방법으로 계획요소를 종합하였다.

위와 같은 방법으로 종합된 matrix <표 3>을 바탕으로 부산시 자연재해위험지구의 공간적 위계인 지구·단지와 건축물(필지)에 해당하는 계획요소를 우선 선정하였다. 그 다음, 토지이용 등을 활용하여 재해에 대한 근본적인 노출을 줄이고자 하는 중요한 계획요소이나 특정 시설의 우수유출 저감효과를 증명하기 어려운 Exposure 측면의 계획요소를 제외하고 재해로부터 안전한 도시 건설을 위한 방재적 노력을 대표하는 Vulnerability 측면, 자연재해 빈도와 그 자체를 의미하는 생태·녹색도시 계획요소와 연계 가능한 Hazard 측면 간의 공통적인 계획요소를 본 논문은 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소로 정의하였다(그림 1) 참조. 그 결과로 분석 대상지에 적용 가능한 총 11개의 계획요소를 도출하였다(표 4)

참조).

도출된 11개의 계획요소를 포괄하는 대표적인 시설로는 빗물이용시설, 투수성 포장, 옥상녹화가 있으나 옥상녹화의 경우 선형연구를 통하여 그 효율성이 입증되었으며(장수철, 2006; 송창준, 2011; 조은영, 2012), 투수성 포장의 경우 앞서 언급된 바와 같이 한

그림 1_ 본 논문에서의 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소의 개념

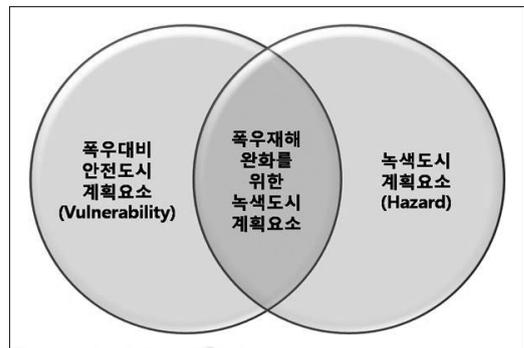


표 4_ 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소와 도입시설(대상지 공간적 위계를 바탕으로 도출)

구분	지구·단지	건축물(빌딩)
Vulnerability	<ul style="list-style-type: none"> 지구/단지 내 녹지율 제고 및 생태면적 확보 인공포장 불투수성 최소화 지구(단지) 내 우수저류 기능 강화 	<ul style="list-style-type: none"> 옥상정원 도입 우수저류시설 도입 중수로 활용
Hazard	<ul style="list-style-type: none"> 녹지율 제고 빗물 관리·활용 자연에너지 및 자원순환을 고려한 우수관리·활용 	<ul style="list-style-type: none"> 빗물 저류·활용 시설 도입 옥상정원·벽면녹화



대표적인 시설	계획요소
빗물이용시설	지구(단지) 내 우수저류기능 강화
	빗물 관리·활용
	우수저류시설 도입
	중수로 활용
투수성 포장	인공포장 불투수성 최소화
	자연에너지 및 자원순환을 고려한 우수관리·활용
옥상녹화	지구/단지내 녹지율 제고 및 생태면적 확보
	녹지율 제고
	옥상정원 도입
	옥상정원·벽면녹화

국형 폭우의 경우 실질적인 효과에 대한 의문과 한계가 제시되어오는 바 본 논문에서는 빗물이용시설을 중심으로 연구를 진행하고자 한다.

3. 관련 법률 및 사례 분석

빗물이용시설은 강우 발생 시 빗물을 하수관거로 유입시키지 않고 빗물저류조에 임시 저류시킴으로써 내수침수의 위험을 줄일 수 있다. 우리나라는 지붕면적 1,000㎡ 이상의 종합운동장, 실내체육관 및 공공청사를 신축(증축·개축·재축 포함)하는 경우 빗물이용시설을 설치 및 운영해야 하며, 빗물저류조의

용량은 지붕 빗물 집수면적에 0.05m를 곱한 규모 이상이 되어야 한다. 부산광역시에는 위의 시설물 외에도 시설물을 신축(증축·개축·재축 포함)하는 경우 빗물이용시설 설치를 권고할 수 있으며, 설치하는 자에게 1천만 원 이내에서 90%까지 예산의 범위에서 지원할 수 있다. 빗물이용시설은 크게 집수시설, 초기빗물처리시설, 저류시설, 수처리시설, 송수·배수시설로 구성된다(환경부, 2010: 14). 이러한 빗물이용시설의 선진사례로는 일본의 스미다구와 국내의 전주 월드컵경기장 등을 들 수 있다.

도시 대부분이 해수면보다 낮은 지역으로 이루어진 일본의 도쿄도 스미다구는 빗물이용의 대표적인 사례지로서 스미다구청은 일본에서 빗물이용을 하게 된 13번째 공공기관이다. 5천㎡의 집수면적과 저류용량 1천㎥의 지하저장 탱크를 가지고 있으며, 저류된 빗물은 주로 화장실 용수로 사용된다. 또한, 스미다구에는 빗물을 이용하기 위한 6개의 로지손이 있으며, 가정집의 지붕면을 통해 내려온 빗물을 집 근처 지하 탱크에 저장한 후 필요 시에 수동펌프를 이용해 손쉽게 빗물을 이용할 수 있다. 과거에는 소방용수로 사용하였으나, 최근에는 식물을 재배하기 위해 주로 사용된다. 로지손은 빗물이용시설을 소규모의 개별 건축물마다 설치하였다는 점에서 스미다구청과 같은 공공청사 및 종합운동장을 활용한 사례와 차별성을 가진다고 할 수 있다.

전주시 덕진구 반월동에 위치한 전주 월드컵경기장은 지붕면과 그라운드를 통해 집수한 빗물을 조경용수와 소방용수로 이용하고 있다. 지붕면 1만 3,650㎡, 그라운드 1만 912㎡를 통해 집수된 빗물은 저류, 처리, 급수 그리고 배수의 과정을 거쳐 이용된다. 빗물은 지하에 설치된 철근 콘크리트조에 2,090㎥의 용량으로 저류되며, 해당 사례지는 주경기장 및 보조경기장 잔디살수 용수로 연간 4천만 원 정도의 경제적 효과를 보고 있다(환경부, 2010: 157-

158; 과학기술부. 2004: 26).

빗물이용시설은 법률 및 사례검토에서 보듯이 저류시설에 빗물을 저류함으로써 침투유출량 저감 및 침투유출 도달시간의 지연에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 김갑수(2003: 7-11)에 의하면 빗물이용은 빗물을 지하로 침투시켜 지역물순환시스템의 재생, 지반침하 방지, 정원의 빗물 함양, 도시의 열섬화 방지대책 등에도 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

III. 대상지 선정 및 현황 분석

낙동강 인근에 위치한 부산광역시의 저지대 공업지역인 대상지는 '가'등급 침수위험지구로서 총면적 84만 m^2 다. 인근에 위치한 하천의 하상경사가 불규칙하고 완만함에 따라 홍수량 배제능력이 부족하여 배수펌프장을 가동하여도 상류 측의 수위저감 효과가 작은 특성을 가진다. 이로 인하여 간선하수도의 통수능력이 저하되고 집중호우 시 도로 및 공장지역의 침수가 빈번히 발생되어 2006년에 자연재해위험지구로 지정되었다.

대상지는 대부분(81.75%) 경사도 1° 미만의 지형적 특성을 가지고 있으며, 이러한 지형적 특성상 주변지역으로부터 흘러들어온 우수가 다른 지역으로 배수되지 못하고 대상지 내에 저류하는 시간이 증가함에 따라 침수가 발생할 우려가 상대적으로 높은 지역이다. 대상지 내 표고는 94.88%(7,994 m^2)가 0~5m 미만을 차지하고 있으며, 0m 미만 지역 또한 3.07%(2만 5,750 m^2)를 차지하고 있다.

대상지의 면적 중 76.01%(63만 8,505.10 m^2)는 전용공업지역으로 구성되어 있다. 준공업지역은 14만 7,022.62 m^2 (17.5%), 제2종 일반주거지역은 5만 4,472.28 m^2 (6.48%)로 대상지 면적 중 93.52%가 공업지역으로 구성되어 있다. 대상지의 가운데로 흐르는 하천의 일부 초지를 제외한 대부분은 시가화건

조지역으로 불투수 포장의 특성을 보이고 있다. 통계청의 SGIS의 센서지도도를 바탕으로 건축물의 용도를 분석한 결과 대상지의 총 1,445개 건축물 중 80.35%(1,161개)가 공업시설로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 단독주택이 10.8%(156개)로 구성되어 있다. 대상지는 200 m^2 미만 면적의 건축물이 891개(61.66%)로 가장 많으며 다음으로 300 m^2 이상 500 m^2 미만의 건축물 189개(13.08%)로 구성되어 있다.

IV. 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 우수유출 저감효과 분석

1. 시나리오의 작성

우수유출 저감효과 분석을 위한 시나리오의 작성을 위하여 빗물이용시설의 도입기준을 앞서 검토한 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」에 의거, 공공청사 등의 신축 등에 따른 설치기준인 1천 m^2 이상을 적용하였다. 분산형 빗물관리시스템은 연간 발생하는 강수에 대하여 상시 사용하기 때문에 연간이용일수가 매우 높으며, 제어가 간단한 특징을 가진다. 이와 더불어 분산형 빗물관리시스템은 집중형 빗물관리시스템에 비해 문제가 발생할 확률이 낮을 뿐만 아니라 문제 발생 시 다른 지역이나 도시에 미치는 영향이 매우 미미하여 위험관리에 안정적인 특징을 가진다(곽동근. 2010: 66). 따라서 본 논문은 위와 같은 특성에 기초하여 분산형 빗물이용시설과 집중형 빗물이용시설로 구분하여 시나리오를 작성하였다. 분산형 빗물이용시설은 조건에 부합하는 건축물을 대상으로 개별적인 빗물이용시설을 도입하는 것을 가정하여 시나리오를 작성하였다.

집중형 빗물이용시설은 분산형 빗물이용시설과 같은 용량으로 관거 본선 합류지점의 상·중·하류

그림 2_ 분산형 빗물이용시설 도입 건축물

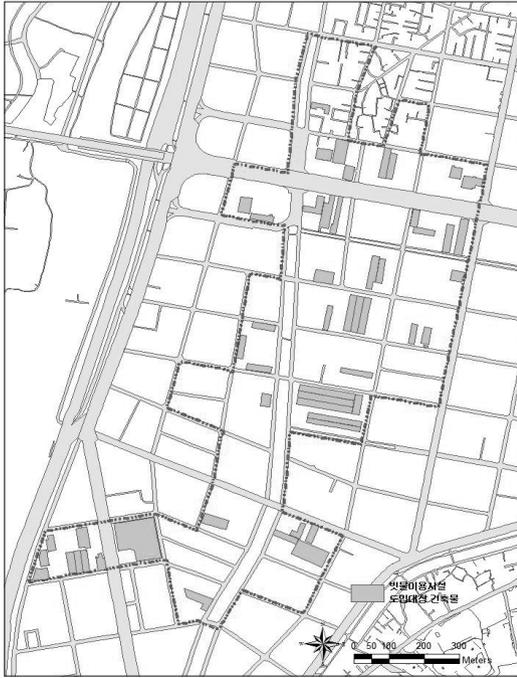
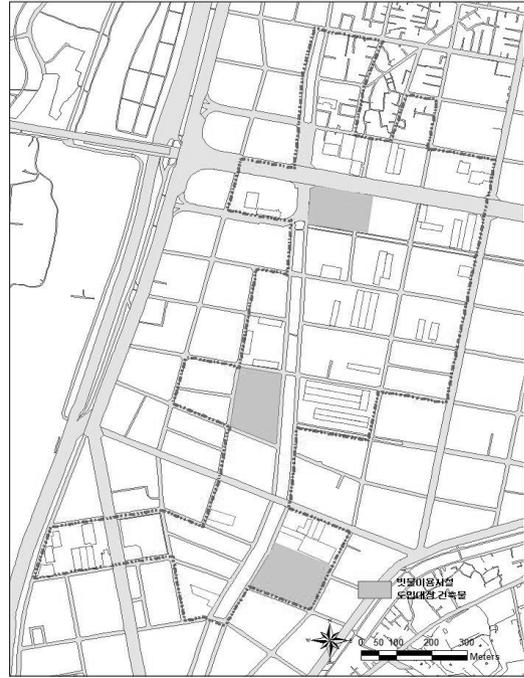


그림 3_ 집중형 빗물이용시설 도입 소유역



로 구분하여 각각의 지점에 총 3개의 중규모 빗물이용시설을 설치한 시나리오를 작성하였다.

ArcMap을 활용하여 도출한 결과, 건축물 면적 1천m² 이상의 건축물은 총 53개소이며, 시나리오별로 각각의 소유역에 적용한 빗물이용시설의 면적은 <표 5>와 같다.

2. 분석모형 선정: 도시유출해석모형

도시유역의 침수해석을 위해 필요한 해석기법에는 도시유출해석모형이 있다. 산지 및 농경지 유역에 대한 유출 해석의 기본개념과 달리 도시 지역의 유출 해석은 일반적으로 강우 손실률의 감소 및 강우 분배 경로의 변화, 유역 수문 시스템의 민감한 반응 등의 주요 특성을 갖는다. 도시유출해석모형은 이러한 특성을 고려하여 강우로부터 유출에 이르기까지 일련의 과정에 포함된 모든 물리적 현상을 정량화, 모

표 5_ 시나리오별 빗물이용시설 도입 면적

구분	소유역	도입 면적(m ²)
분산형 빗물이용시설	s2	1,006.88
	s3	11,679.37
	s7	2,740.61
	s9	5,812.55
	s10	6,692.94
	s11	16,741.88
	s13	4,991.55
	s14	17,324.00
	s17	2,183.03
	s18	8,271.56
	s20	2,242.72
	s21	12,834.17
	s22	10,585.92
합계	103,107.18	
집중형 빗물이용시설	s9	27,932.35
	s13	39,057.43
	s18	36,117.40
합계	103,107.18	

형화하려는 시도의 결과라고 할 수 있으며, 그동안 우리나라에 소개되어 비교적 그 적용성이 인정된 모형으로는 합리식, STORM, RRL, ILLUDAS, SWMM 등이 있다.

합리식 방법(Rational Method)은 도시유역이 갖는 수문특성을 고려하여 유역의 침투 홍수량을 결정하기 위한 방법으로 Mulvany(1850)에 의하여 처음 제안되었다. 그러나 합리식은 몇 가지 가정상의 문제점을 가지고 있으며, 침투 홍수량의 계산만을 목적으로 하므로 시간에 따른 유출량의 변화 성향 및 유출용적 등의 수문양을 계산하기에는 한계를 가진다(송창준, 2011: 33-34). STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model) 모형은 단일 또는 연속적인 강우로부터 나타나는 도시유역의 유출량과 수질분석이 가능하도록 미국공병단에서 1976년 개발한 모형이다. 도시 유역으로부터의 유출량과 오염물질은 합산되어 처리시설로 운반되거나 일시적인 저류시설로 유입되며, 범람하는 양은 유출량 및 처리/저류 시설 용량에 좌우된다는 기본개념을 바탕으로 한다. 하지만 STORM 모형은 계산 시간 간격이 1시간으로 고정됨에 따라 1시간 이상의 큰 도달시간을 갖는 대상 유역에 대한 사용은 제한되고 있다(김문모 · 이종태, 2005: 24).

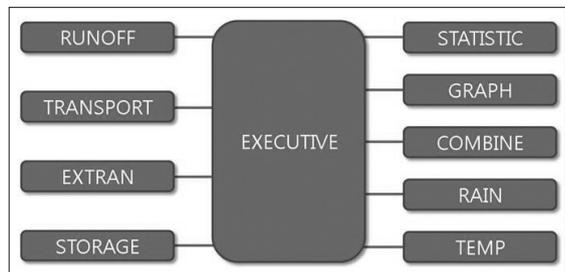
RRL 방법(Rord Research Laboratory Method)은 도시 배수망설계를 위하여 1962년 영국에서 고안된 방법으로 ILLUDAS모형 개발의 기초가 된 방법이다. 도시 지역의 불투수 지역만이 유출에 기여한다는 기본가정을 가지며, 대상유역에 대하여 등도달시간 - 집수면적 곡선을 작성하고 여기에 각 양의 강우 강도를 적용하여 각 소유역의 시간별 유출량을 합산함으로써 유입구에 대한 유입 수문곡선을 합성하는 비교적 간단한 방법이다. 그러나 전체 유역을 동일하게 취급함으로써 유역 내 불투수 지역의 분포현황은 유출량 산정에 포함되

지 않는다. 즉, RRL 방법은 유역 내 불투수 지역의 분포 현황 및 관로 내에서의 저류효과를 고려하지 못한다는 한계점이 있다(김문모 · 이종태, 2005: 24). ILLUDAS(Illinois Urban Drainage Area Similater) 모형은 RRL 모형을 개선하여 그 적용범위를 넓힌 모형이다. 이 방법은 RRL 모형에서 무시되었던 투수지역을 고려한다(곽현구, 2007: 11). ILLUDAS 모형은 우리나라에도 소개되어 1980년대 이후 두 차례 정도 개정된 모형이 실무에서 많이 사용되고 있다.

본 논문에 사용된 SWMM(Storm Water Management Model)은 1971년 미국EPA(Environmental Protection Agency)와 Metcalf&Eddy 회사가 Florida 대학 및 W.R.E(Water Resources Engineers)와의 공동연구로 개발하였다. 1988년 Huber와 Dicjinson에 의해 보완되어 도시유역 내에서 강우사상으로 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등의 모의가 가능한 종합적인 모형이다(송창준, 2011: 35). SWMM은 <그림 4>와 같은 블록의 형태로 구성되며, 126개의 보조 프로그램들로 구성된다.

개발 초기에는 Receiving Water 블록을 포함하여 5개의 실행블록이 있었으나, 1981년 이후 Receiving Water 블록은 SWMM모형에서 제외되었다. SWMM 모형은 전체적으로 4개의 실행블록과 5개의 보조블록, 하나의 Executive 블록으로 구성되어 있으며, 각

그림 4_ SWMM의 기본구조



각의 블록은 특정한 기능을 수행한다. 일반적으로 SWMM을 구동하는 과정에서는 Executive 블록과 하나 혹은 두 개 이상의 실행블록이 함께 실행된다.

SWMM은 유출 해석의 경우 비선형 저류 방정식에 의해 강우와 용설, 지표면 유출에 대한 고려가 가능하며, 침투량 산정에는 Horton식 또는 Green-Ampt 식을 사용한다. 초기연산이 수행되는 RUNOFF 블록에는 비선형 저류방정식이 적용되며, TRANSPORT 블록에서는 kinematic 방정식을 사용하여 하수 시스템의 유량과 오염물질 추적 및 침투 계산이 가능하다. EXTRAN 블록에서는 dynamic 방정식과 연속 방정식을 사용한다(김문모 · 이종태, 2005: 24-25). EPA-SWMM 5는 업데이트를 통해 LID 모듈을 추가함으로써, LID 관련 요소의 분석이 가능하게 되었다. 모의 가능한 기법은 크게 식생저류장치(Bio-Retention Cell), 침투트렌치(Infiltration Trench), 공극성 포장(Porous Pavement), 우수통(Rain Barrel), 식생도랑(Vegetative Swale)이 있다. 따라서 본 논문은 분석 대상지에 도입된 빗물이용시설의 평가에 적용이 용이한 EPA-SWMM 5를 분석모형으로 선정하였다.

3. SWMM의 입력자료 구성

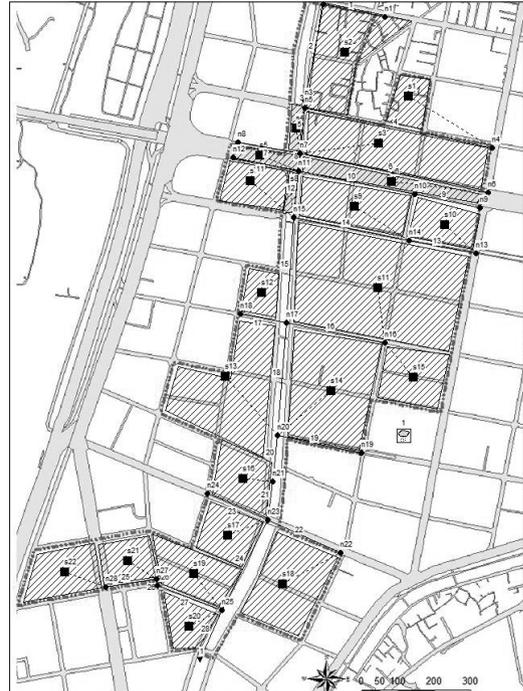
대상지의 관거 특성 관련 입력자료를 구축하기 위하여 하수관망도, 토지이용 등을 바탕으로 전체 배수유역을 22개의 소유역으로 분할하였고, 관망의 연결 및 흐름 방향을 고려하여 관망을 단순화하였다. 단순화된 관망도를 바탕으로 속성정보를 추출하여 소유역, 노드 그리고 링크와 관련된 입력자료를 구축하였다.

분할된 소유역에 대하여 대상지의 토지피복 현황을 바탕으로 불투수면적비를 적용하였으며, 지표면 조도계수의 경우, 불투수면에는 Ordinary concrete lining 값인 0.013, 투수면에는 Grass short 값인 0.15을 적용하였다. 지면저류량은 불투수면은 0.30, 투수

표 6_LID Control에 적용한 빗물이용시설 관련 변수

레이어	변수	단위	변수값
저류층	height	inch 또는 mm	50
	drain coefficient	계수	12.7
암거층	drain exponent	지수	0.5
	drain offset height	inch 또는 mm	800

그림 5_ 대상지의 SWMM 구축



면은 1.00을 적용하였다.

본 논문에서 도입하는 빗물이용시설에 따른 매개 변수 값들은 선행연구(조은영, 2012: 65-67; 주재승, 2012: 67-69) 검토를 통하여 도출된 값을 바탕으로 적용하였으며, 그 값에 대한 내용은 <표 6>과 같다. 위와 같은 입력자료를 바탕으로 구축된 하수관망도는 <그림 5>와 같다.

4. 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 우수유출 저감 효과 분석 결과

본 논문은 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 도입에 따른 대상지의 효과를 판단하기 위하여 3개의 시나리오를 작성하여 시나리오별 우수유출저감 효과를 분석하였다.

1) 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 미도입

저류기능을 고려한 빗물이용시설이 도입되지 않은 현재의 시가화 상태를 반영하는 첫 번째 시나리오의 경우 총 유출량은 15만 792.13m³(분석 대상지 내 총 강우량: 17만 1,957.05m³)이며, 유출률은 87.69%로 분석되었다.

2) 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 설치에 따른 우수유출 저감효과

저류기능을 고려한 빗물이용시설의 설치에 따른 우수유출 저감효과 분석 결과 분산형 빗물이용시설의 초기유출시점은 54분으로 빗물이용시설의 미도입(44분)과 집중형 빗물이용시설(44분)보다 10분의 지연효과가 있는 것으로 나타났다. 첨두유출시점의 경우 빗물이용시설 도입에 따라 미도입 시나리오(566분)에 비하여 136~139분의 지연효과가 나타났다. 첨두유출량의 경우 집중형 빗물이용시설은 23.02m³, 분산형 빗물이용시설은 100.05m³의 감소효과가 나타났다. 총 유출량은 미도입(15만 792.13m³)에 비하여 2만 2,254.16~7만 9,529.83m³가 감소되었으며, 분산형 빗물이용시설이 집중형 빗물이용시설보다 5만 7,275.71m³(유출률: 33.31%) 더 감소시키는 효과가 나타났다(표 7) 참조.

이와 같은 효과는 빗물이용시설 도입의 경우, 첨

그림 6_ 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소 미도입 시나리오의 유출곡선

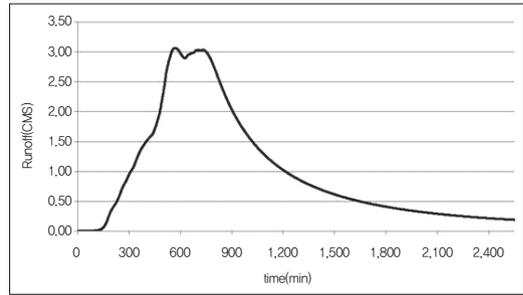


그림 7_ 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소 미도입 시나리오의 유출량 및 유출률

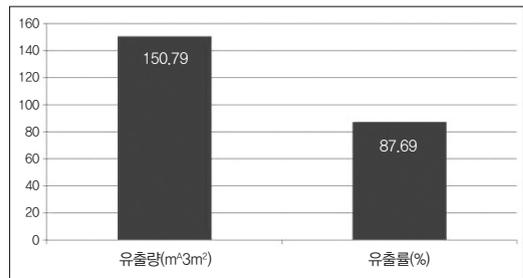


그림 8_ 빗물이용시설 도입에 따른 유출곡선의 변화

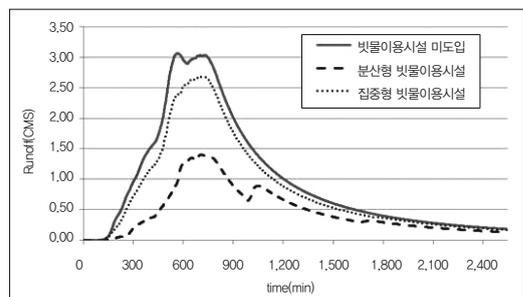


그림 9_ 빗물이용시설 도입에 따른 유출량 및 유출률의 변화

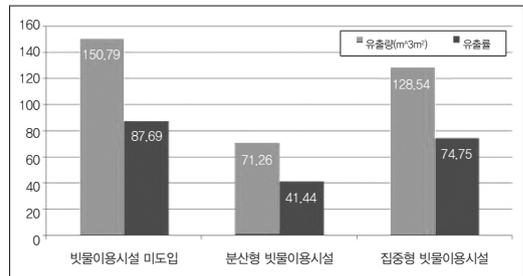


표 7_ 빗물이용시설 도입에 따른 우수유출 저감효과

구분	빗물이용시설 미도입	분산형 빗물이용시설	집중형 빗물이용시설
초기 유출시점(min)	44	54	44
첨두 유출시점 (min)	566	705	702
첨두 유출량 (m ³)	183.92	83.87	160.90
총 유출량(m ³)	150,792.13	71,262.30	128,538.01
유출률(%)	87.69	41.44	74.75

두유출량의 강도와 첨두유출량의 도달시간을 지연시켜 폭우재해로부터의 도시지역 안정성을 확보하는데 기여할 수 있음을 시사한다.

V. 결론

본 논문은 기후변화로 인한 자연재해의 증가로 기존 방재 단일목적 시설물 중심의 방재대책의 한계점을 인식하고 녹색도시 계획요소와의 연계 필요성을 강조하며, 설계빈도 이상의 강우와 관련된 재해의 완화 측면에서 녹색도시 계획요소의 하나인 빗물이용시설의 효과분석을 실시하였다. 빗물이용시설의 효과분석을 위하여 도시유출해석모형 중의 하나인 EPA-SWMM을 분석모형으로 선정하였다. EPA-SWMM을 활용하여 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 방재효과를 분석한 결과와 시사점은 다음과 같다.

첫째, 분산형 빗물이용시설이 집중형 빗물이용시설에 비하여 첨두유출량(77.03m³) 및 총유출량(5만 7,275.71m³), 유출률(33.31%) 등의 감소 효과가 큰 것으로 나타났다. 따라서 우수유출감소효과 측면만을 고려한다면, 향후 녹색도시의 조성을 위하여 개별건축물(공공청사, 종합운동장 등 포함)에 빗물이용시설 설치를 유도하는 경우 폭우를 고려한 저류용량까지를 산출하여 제시하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 이와 같은 접근방법은 대규모 빗물이용·저류시설(오프라인 저류지 등)의 역할을 효율적으로

대체할 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 녹색도시 계획요소 중 하나인 빗물이용시설의 폭우재해 관련 방재효과가 본 논문의 도시유출해석모형분석을 통하여 간접적으로 입증됨에 따라 기후변화 관련 방재적 측면의 안전도시 조성 노력과 녹색도시 조성 노력 간의 연계 기반을 조성하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

녹색도시 요소인 빗물이용시설이 첨두유출량 감소와 첨두유출 도달시간의 단축에 기여함과 동시에 설계빈도 이상의 강우 시 기존 방재대책의 부담을 덜어주고 배수시스템의 운영 미숙과 같은 만약의 사태 발생 시 그 피해규모를 줄이는 데도 일정 부분 기여할 수 있다고 판단된다. 따라서 녹색도시라는 현재 도시계획의 큰 축과 폭우재해로부터 안전한 도시 건설은 같은 축에 있는 것으로 볼 수 있으며, 향후 녹색도시 건설을 위한 빗물이용시설의 설치에 있어 우수유출 저감효과를 고려한 배치 및 용량을 설정함으로써 녹색도시와 폭우재해로부터 안전한 도시 건설 노력 간의 시너지효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 저류기능을 고려한 빗물이용시설의 폭우재해 관련 방재효과를 증명하였지만, 시나리오가 다양하지 못하고, 분석 대상 지역이 1개 지역으로 국한되어 빗물이용시설의 방재효과를 정량화하거나 일반화하기 어려운 한계점을 지닌다. 따라서 향후 연구에서는 빗물이용시설(특히, 분산형 빗물이용시설)의 방재효과를 다양한 시나리오와 지형 등 지역여건을 고려하여 검증해 봄으로써 최적의 배치기법 및 적정 저류용량 등을 제시할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌 •••••

과학기술부. 2004. 우수 저류 및 활용 기술 개발. 경기 : 과학기술부.

곽태근. 2010. “분산형 빗물관리시스템의 이·치수 효과 및 설계방법에 대한 연구 - 수원지역을 대상으로”. 서울대학교 석사학위 논문.

곽현구. 2007. “도시지역의 내배수시스템을 고려한 침수해석”. 충북대학교 박사학위 논문.

권태정 · 김희경 · 오세경 · 윤갑식 · 윤재봉. 2012. 폭우재해 관련 지속가능성 개념정립 및 토지이용 관련 기술 개발. 부산 : 동아대학교.

김갑수. 2003. 빗물이용을 통한 도시침수 저감 및 수돗물 절약방안. 서울 : 서울시정개발연구원.

김문모 · 이종태. 2005. “도시 유출 모형의 특성 및 활용방안”. 대한토목학회지 제53권 제9호, pp21-27.

김병훈. 2001. “투수성 포장의 우수유출 저감효과에 관한 실험적 연구”. 명지대학교 석사학위 논문.

김현수. 2002. “인천 침수피해지역의 우수유출저감시설 설치효과”. 인천대학교 석사학위 논문.

박주영. 2012. “[부산 · 울산 · 경남] 첨단도시 센텀시티 도로 침수를 막아라”. 조선일보. 7월 17일자.

박지은. 2012. “인천교 매립지 지역의 침수피해 저감을 위한 저류시설 활용방안”. 인천대학교 석사학위 논문.

박지현. 2008. “도시유역의 저류지에 의한 홍수조절능력에 관한 연구”. 경희대학교 석사학위 논문.

배상원. 2011. “SWMM5를 이용한 저영향개발의 홍수저감효과 분석: 장재천 유역을 대상으로”. 연세대학교 석사학위 논문.

송창준. 2011. “기후변화를 고려한 도시배수시스템 취약성 분석과 대응방안으로서 LID 기법 적용성 평가-굴포천 유역을 대상으로”. 인하대학교 석사학위 논문.

신상영 · 이석민 · 박창열 · 손은정. 2012. 폭우재해 저감 도시 설계기술 개발. 서울 : 서울연구원.

심우배 · 김걸 · 지승희 · 김학열. 2010. 기후변화에 안전한 재해통합대응 도시 구축방안연구(II). 경기 : 국토연구원.

엄문섭. 2008. “신도시 건설 시 도시방재 방안 연구”. 경원대학교 석사학위 논문.

윤재봉. 2013. “폭우재해 완화를 위한 도시설계요소 효과분석 - 부산광역시 감전1 침수위험지구를 중심으로”. 동아대학교 석사학위 논문.

이상엽. 2008. “도시지역 침수저감을 위한 지하저류조의 최적설계”. 경북대학교 석사학위 논문.

이상은. 2012. “상습침수지역 우수유출 저감계획 및 설계 - 강서구 화곡동 자연재해 위험지구를 대상으로”. 서울대학교 석사

학위 논문.

이재용 · 여운광 · 심재현 · 강태호. 2001. “투수성 포장재를 사용한 호우 시 우수유출 저감효과 분석”. 대한토목학회 논문집 제21권 제6-B호, pp645-654.

이정민 · 현경학 · 최종수 · 박용부 · 이운상 · 이유진 · 공영산. 2011. LID기술을 이용한 홍수저감 효과분석. 경기 : 한국토지주택공사.

장수철. 2006. “옥상녹화시스템의 우수유출효과분석”. 서울시립대학교 석사학위 논문.

전병훈. 2012. 5. 30. “기후변화에 따른 지역별 방재성능목표 설정 · 운영”. 소방방재청. 2012년 지방자치단체 자연재해 담당공무원 실무교육 - 우수저류시설 설치사업, 방재성능목표 설정 · 운영, 지구단위홍수방어기준 적용. 서울 : 코엑스.

조은영. 2012. “SWMM-LID 모형을 활용한 도시소유역 LID영향 분석”. 부산대학교 석사학위 논문.

주재승. 2012. “공업지역에서의 비점오염원 유출 특성분석 및 SWMM 활용 LID적용 효과 분석 연구”. 부산대학교 석사학위 논문.

진영길. 2003. “도시화로 인한 상습침수지역 원인분석 및 저감 대책에 관한 연구”. 서울산업대학교 석사학위 논문.

채희장. 2012. “XP-SWMM을 이용한 도시지역에서 우수저류지의 최적위치”. 한양대학교 석사학위 논문.

최우정. 2008. “도시저지대 침수방지를 위한 내배수체계 및 펌프운영 개선방안 연구”. 국민대학교 박사학위 논문.

환경부. 2010. 빗물이용시설 설치 · 관리 가이드북. 세종 : 환경부.

World Meteorological Organization. 2009. *Integrated Flood Management Concept Paper*. WMO-No.1047. Switzerland : World Meteorological Organization.

- 논문 접수일: 2013. 1. 21
- 심사 시작일: 2013. 2. 5
- 심사 완료일: 2013. 3. 12

Effectiveness on Storm Water Management of Green City Planning Elements : Focusing on Multipurpose Rainwater Utilization Facilities

Keywords: Climate Change, Natural Disaster, Stormwater Retention,
Rain Water Utilization Facilities

This study attempts (1) to find effective urban design elements in consideration of both heavy rainfall hazard mitigation and green city planning and (2) to evaluate their effectiveness in the field, a natural disaster-prone urban district in Busan, Korea. The analytical matrix considering previous green city planning research and ICPP's three factors of disaster risk suggests three main urban design elements that can be used against heavy-rainfall natural disaster, which elements include green roof, permeable urban surface, and rain water utilization facility. Rain water utilization facility is, however, introduced alone to the field analysis given that its effectiveness has not been fully tested in the previous studies. The field analysis using EPA-SWMM reveals the possible role of rain water utilization facilities in reducing the amount of the peak flow reduction as well as in expanding the runoff flow time. The analysis also suggests that a better result is expected when rain water utilization facilities with small-to-medium capacity are introduced in a dispersed way. The analytical results help guiding municipal governments' hazard mitigation efforts in consideration of green city planning and also promoting future studies to make connections between green city and hazard resilient city planning efforts.

폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소의 우수유출 저감효과 : 저류기능을 고려한 빗물이용시설을 중심으로

주제어: 기후변화, 자연재해, 빗물저류, 빗물이용시설

본 논문은 대형화된 폭우 관련 자연재해에 대한 대응 차원에서 현재 연구된 녹색도시 계획요소를 재난위험함수를 바탕으로 평가하여 투수성포장, 옥상녹화, 빗물이용시설 등 방재기능과 연계 가능한 계획요소를 도출하였다. 이후 선행연구 검토를 바탕으로 본 논문에서 그 효과를 중점적으로 검토할 빗물이용시설 계획요소를 선정하였다. 부산시 낙동강변 자연재해위험지구를 대상으로 EPA-SWMM을 활용하여 분석한 결과, 빗물저류기능을 고려한 빗물이용시설을 도입할 경우 침투우수 유출량 저감 및 침투우수유출 도달 시간 지연에 큰 효과가 있는 것으로 나타났으며, 특히 개별 건축물 중심의 분산형으로 도입·설치하는 경우는 유역별 집중적으로 도입·설치하는 것에 비해 그 효과 측면에서 월등히 우수한 것으로 나타났다. 본 논문의 연구 결과는 향후 녹색도시 조성은 물론, 폭우 관련 자연재해에 효율적으로 대응하기 위한 다목적 빗물이용시설 도입과 관련된 지방자치단체 정책방향 설정에 기여할 것으로 기대되며, 기후변화시대를 맞이하여 녹색도시와 안전방재도시연구 간의 연계를 위한 향후 연구방향 설정에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.