





# 레인시티 효과성 분석

Analyzing the Effects of Rain City

김은영

## 연구진

- 연구책임자 김은영 (수원시정연구원 연구위원)  
참여연구원 정경민 (수원시정연구원 위촉연구원)  
공동연구진 제상우 ((주)한국그린인프라연구소 부사장)  
강한민 ((주)한국그린인프라연구소 부장)  
송원경 (단국대학교 교수)  
김휘문 (단국대학교 박사과정)

## 연구 자문위원

- 권경호 ((주)한국먹는물안전연구원 센터장)  
이동근 (서울대학교 교수)  
송미영 (경기연구원 부원장)  
최종수 (LH토지주택연구원 연구위원)

© 2021 수원시정연구원

- 발행인** 김선희  
**발행처** 수원시정연구원  
경기도 수원시 권선구 수인로 126  
(우편번호) 16429  
전화 031-220-8001 팩스 031-220-8000  
<http://www.suwon.re.kr>  
**인쇄** 2021년 6월 30일  
**발행** 2021년 6월 30일  
**ISBN** 979-11-90343-63-3 (93300)

---

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.  
김은영. 2021. 「레인시티 효과성 분석」. 수원시정연구원.

---

비매품

# 국문요약

건강한 물순환 체계 확립을 위해 그린인프라의 확대 필요성이 점차 강조되고 있으며, 과거 전통적인 물관리방법에서 탈피하여 자연적인 물순환정책으로 생태계의 회복탄력성을 높일 수 있는 정책으로 변화되고 있다. 수원시는 물순환 체계 확립을 위해 2009년 1월 ‘수원시 통합 물관리 기본 조례’를 제정하고, 2009년 제8회 빗물모으기 국제워크숍 및 제3회 수원 물 포럼에서 세계 최초의 빗물도시 레인시티 조성을 선언한 바 있다.

본 연구에서는 수원의 대표적인 환경정책 브랜드인 레인시티사업의 효과를 검증하여 물순환정책의 지속가능성을 확보하고자 한다. 수원시 레인시티사업은 빗물저장시설과 빗물관리 시설로 크게 구분할 수 있으며, 이에 대한 선행연구 및 사례조사와 함께 실제 모니터링을 통해 효과를 분석하였다.

기존의 선행연구와 조성사례를 종합한 결과, 국내에서는 물순환선도도시를 중심으로 그린인프라사업이 추진되고 있으며 독일 함부르크, 호주 멜버른, 캐나다 벤쿠버 등을 조사한 결과 도시계획 및 설계측면에서부터 체계적으로 그린인프라를 도입하고 통합적인 물순환 정책을 추진하고 있다. 그린인프라는 대표적으로 비점오염물질 및 우수유출 저감 뿐만 아니라 수자원 확보, 도시열섬현상 완화, 도시경관 개선 효과 등이 있다.

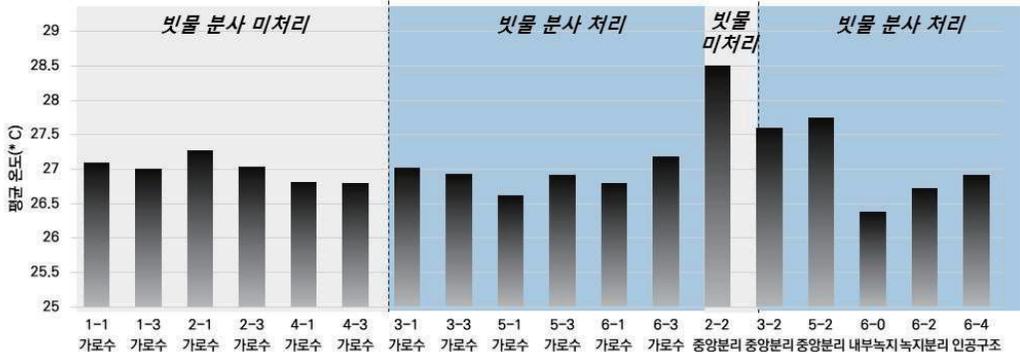
선행연구 및 사례를 통한 그린인프라의 주요 효과



빗물분사시설 효과를 확인하기 위해 여름철 온도저감 효과를 조사하였다. 고정형 온도계를 활용해 수원시 팔달구 월드컵로 일대에 설치된 빗물분사시설 가동에 따른 대기온도 변화를 모니터링한 결과, 중앙분리대의 경우 평균 2.11℃(최저 1.25℃, 최대 2.77℃)의 온도 차이가

있었으며, 가로수변은 평균 0.59℃(최저 0.46℃, 최대 0.68℃)의 온도 차이가 있는 것으로 조사되었다. 여름철 대기 온도는 일반적으로 14-15시에 최고점을 기록 후 물 분사 유무에 관계없이 감소하기 때문에 온도 저감 효과 극대화를 위해 14시 이전까지 빗물 분사를 수행하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단되었다.

빗물분사시설에 따른 평균온도 차이



수원시 레인시티 사업을 통해 조성된 빗물관리시설의 객관적인 효과분석을 위해 현장 모니터링 및 수문분석 모델(SWMM)을 통한 효과분석을 실시하였다. 현장 모니터링은 2개 타입의 식물재배화분을 대상으로 2회의 자연강우와 1회의 인공강우 실험을 통한 모니터링을 실시하였다. 자연강우 모니터링은 누적강우량이 낮아 유출량이 발생하지 않았으며, 인공강우 실험 결과 빗물유출저감율은 약 42.9%, 침투유량 저감율은 약 23%로 분석되었다. 현장 모니터링을 통해 수집된 자료를 바탕으로 수문분석 모델(SWMM)을 이용하여 연간 빗물 유출저감효과를 분석하였다. 식물재배화분 Type L5.0은 연간 총강우량의 약 76~86%를 Type L2.5는 약52%~62%의 빗물유출을 저감하는 것으로 분석되었다.

현장 모니터링 및 수문모델을 통한 분석 결과 현장에 설치된 식물재배화분의 기능은 효율적으로 작동하고 있음을 확인하였으며 확인된 빗물관리시설의 성능 자료는 향후 해당 지역의 적정 빗물관리시설 배치량을 결정하는데 유용한 자료가 될 것이다.

본 연구에서는 선행연구 및 현장 모니터링을 통해 효과를 검증하였으나 제한된 기간과 일부 시설을 대상으로 실시한 검증으로 유형별 모니터링과 정량적 분석이 필요하다. 향후 이를 토대로 물순환체계 확립 및 미래기후 대응을 위해 수원시 도시계획차원에서 그린인프라 도입에 대한 검토가 필요하다. 이를 위해서는 그린인프라시설별 효과에 대한 지속적인 모니터링이 필요하며, 수원시 전역을 대상으로 하는 빗물이용가능량 및 빗물유출 저감목표량을 산정

할 필요가 있다. 또한, 그린인프라시설 설치 가이드라인 및 사전협의제를 도입하여 가로수 및 도로 정비 시 체계적인 빗물관리 정책이 추진될 수 있도록 여건 마련이 필요하다. 특히, 구도심지역의 도시재생사업과 연계하여 도로, 주차장 및 노후건축물 정비 시 빗물관리시설의 도입을 함께 고려하여 구도심지역 뿐만 아니라 도시지역의 기후변화 취약성에 대한 회복탄력성을 높일 필요가 있다. 지속가능한 물순환정책 추진 및 모니터링 결과 공유를 통해 시민인식 증진이 필요하다.

그린인프라는 도시화로 인해 불투수면의 증가에 따른 도시열섬, 도시침수 등 도시환경문제를 해결하는 방식인 자연기반해법(Nature based Solution)의 일환이므로 이를 통해 기후변화 및 탄소중립에 대응할 필요가 있다. 물순환의 회복은 지속가능한 도시 발전의 핵심요소이자 도시 건설, 녹지공간, 시민의 삶 등과 밀접한 관련이 있기 때문에 ‘빗물 관리’라는 단편적인 차원에서 접근하는 것이 아니라 도시 전체를 아우르는 포괄적이고 장기적인 관점에서의 접근 필요하다.

주제어: 빗물저장시설, 빗물이용시설, 저영향개발, 온도저감효과, 빗물유출저감효과



---

## 차 례

---

<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
제1절 연구 배경 및 목적 .....	3
1. 연구 배경 .....	3
2. 연구 목적 .....	7
제2절 연구 범위 .....	8
1. 공간적 범위 .....	8
2. 내용적 범위 .....	9
제3절 연구 방법 .....	10
<b>제2장 레인시티의 이해</b> .....	<b>11</b>
제1절 레인시티 관련 개념 .....	13
1. 레인시티 .....	13
2. 그린인프라 .....	14
3. 저영향개발 .....	15
4. 그린빗물인프라 .....	15
5. 개념 간 관련성 .....	16
제2절 관련 계획 및 법규 검토 .....	17
1. 레인시티 관련 법규 .....	18
2. 레인시티 관련 조례 .....	20
3. 레인시티 관련 계획 .....	22
제3절 국내·외 사례 분석 .....	28
1. 청주시, 빗물유출제로화 시범사업 .....	29
2. 대전광역시, 물순환 선도도시 .....	33
3. 광주광역시, 물순환 선도도시 .....	36
4. 서울시, 건강한 물순환 도시 .....	39
5. 호주 멜버른, Total Watermark .....	42
6. 캐나다 밴쿠버, Water Sensitive Future .....	45

7. 독일 함부르크, Green Hamburg .....	49
제4절 수원시 레인시티 현황 .....	52
1. 수원시 레인시티 연혁 .....	52
2. 수원시 레인시티 관련 계획 .....	55
3. 수원시 레인시티 관련 조례 .....	63
4. 수원시 레인시티 사업 .....	66
제5절 시사점 .....	73
<b>제3장 레인시티 효과성 사례 종합 분석 .....</b>	<b>77</b>
제1절 분석의 개요 .....	79
제2절 그린인프라 기술요소별 효과 .....	81
1. 투수성 포장 .....	81
2. 침투도랑 .....	87
3. 식물재배화분 .....	93
4. 식생도랑 .....	100
5. 빗물정원 .....	106
6. 빗물저류시설 .....	113
제3절 효과 종합 .....	123
1. 기술요소별 효과 종합 .....	123
2. 그린인프라의 효과 .....	124
<b>제4장 빗물분사시설에 따른 온도저감 효과 .....</b>	<b>135</b>
제1절 모니터링 개요 및 방법 .....	137
1. 모니터링 개요 .....	137
2. 모니터링 방법 .....	138
제2절 모니터링 결과 .....	143
1. 가로 환경 특성에 따른 대기 온도 차이 .....	143
2. 빗물 분사에 따른 표면 온도 저감 효과 비교 .....	154
제3절 소결 .....	158
<b>제5장 저영향개발(LID)시설의 효과성 분석 .....</b>	<b>161</b>
제1절 모니터링 개요 .....	163

1. 모니터링의 목적 .....	163
2. 모니터링의 범위 .....	163
3. 모니터링의 방법 .....	165
제2절 모니터링 결과 .....	171
1. 자연강우 모니터링 1차 .....	171
2. 자연강우 모니터링 2차 .....	173
3. 자연강우 모니터링 결과종합 .....	176
4. 인공강우 실험 .....	176
제3절 수문분석 모델(SWMM) 분석 결과 .....	185
1. EPA SWMM .....	185
2. 2019년도 시강우량 모델링 결과 .....	188
3. 2020년도 시강우량 모델링 결과 .....	190
제4절 효과 종합 .....	192
1. 저영향개발 효과성 검증 .....	192
2. 저영향개발 설치면적율에 대한 제언 .....	192
<b>제6장 결론 .....</b>	<b>195</b>
제1절 연구의 의의 및 한계 .....	197
제2절 정책 제언 .....	200

## 표 차례

〈표 1-1〉 내용적 범위 .....	9
〈표 1-2〉 연구 방법 .....	10
〈표 2-1〉 레인시티 관련 계획 및 법규 검토 대상 .....	17
〈표 2-2〉 레인시티 관련 법규 .....	19
〈표 2-3〉 레인시티 관련 조례 .....	21
〈표 2-4〉 서울특별시 물순환 회복 실천계획(일부 발췌) .....	25
〈표 2-5〉 울산광역시 저영향개발 시설도입의 효과 분석(온실가스 배출저감) .....	27
〈표 2-6〉 울산광역시 저영향개발 시설도입의 효과 분석(열섬저감 효과) .....	27
〈표 2-7〉 국내·외 사례분석 대상 .....	28
〈표 2-8〉 시범사업 주요 연혁 .....	30
〈표 2-9〉 건강한 물순환 도시 조성계획의 주요 내용 .....	40
〈표 2-10〉 수원시 레인시티 정책 연혁 .....	52
〈표 2-11〉 물순환 관리 기본계획(2011) 기본 원칙 .....	56
〈표 2-12〉 수도정비 기본계획(변경)(2012)의 기본방향 .....	57
〈표 2-13〉 지하수 관리계획(2013)의 기본 방향 .....	58
〈표 2-14〉 물 재이용 관리계획(2014)의 수원시 물 재이용 총 목표량 .....	59
〈표 2-15〉 환경보전 기본계획(2016)의 물환경 분야 비전 및 목표 .....	60
〈표 2-16〉 통합 물 관리 종합계획(2019)의 전략과 중점과제 .....	61
〈표 2-17〉 수원시 물순환 관련 조례 .....	64
〈표 3-1〉 레인시티 효과성 분석을 위한 주요 선행연구 .....	79
〈표 3-2〉 레인시티 효과성 분석의 주요 대상 .....	80
〈표 3-3〉 투수성 포장 및 아스팔트 포장의 건설 및 유지비용 비교 .....	86
〈표 3-4〉 강우 디자인 .....	98
〈표 3-5〉 식물재배화분별 침투유출 저감 현황(WPCL) .....	98
〈표 3-6〉 월별 강우량 및 집수량 추정치 .....	117
〈표 3-7〉 빗물 수확 시스템 적용 시 현금 흐름 .....	119
〈표 3-8〉 빗물탱크(빗물 수확 시스템) 설치에 따른 연간 홍수량 감소율(2002~2008년) .....	122

〈표 3-9〉 그린인프라 기술요소별 효과 종합 .....	123
〈표 3-10〉 그린인프라의 효과 .....	124
〈표 3-11〉 기존 개발과 그린인프라 적용 비용 비교 .....	130
〈표 3-12〉 그린인프라 방식과 기존 방식의 비교 .....	131
〈표 4-1〉 빗물분사시설 모니터링 개요 .....	137
〈표 4-2〉 빗물분사시설 모니터링 방법 .....	138
〈표 4-3〉 빗물분사에 의한 가로 환경 대기 온도 저감 효과 모니터링을 위한 고정형 온도 계 설치 지점 .....	140
〈표 4-4〉 구간별 빗물 분사 가동 시간 .....	141
〈표 4-5〉 동일 가로 환경 유형에 따른 실험구/대조구 비교 분석 .....	142
〈표 4-6〉 가로 환경에 따른 모니터링 기간 유형별 평균 최고 온도 .....	145
〈표 4-7〉 9월 1일 10-13시 5-6구간 빗물 분사에 따른 대상지 전체의 표면 온도 변화 .....	154
〈표 4-8〉 9월 1일 13-16시 3구간 빗물 분사에 따른 대상지 전체의 표면 온도 변화 .....	156
〈표 4-9〉 빗물분사에 따른 대기온도 저감 효과 종합 .....	159
〈표 5-1〉 내용적 범위 .....	164
〈표 5-2〉 모니터링 장소 .....	167
〈표 5-3〉 식물재배화분의 상세 .....	168
〈표 5-4〉 식물재배화분 TYPE 5.0 1차 모니터링 결과 .....	171
〈표 5-5〉 식물재배화분 TYPE 2.5 1차 모니터링 결과 .....	172
〈표 5-6〉 식물재배화분 TYPE 5.0 2차 모니터링 결과 .....	174
〈표 5-7〉 식물재배화분 TYPE 2.5 2차 모니터링 결과 .....	175
〈표 5-8〉 식물재배화분 type별 집수유역 및 LID시설면적을 .....	176
〈표 5-9〉 식물재배화분 TYPE 5.0 인공강우실험 측정 결과 .....	178
〈표 5-10〉 식물재배화분 TYPE 2.5 인공강우실험 측정 결과 .....	179
〈표 5-11〉 식물재배화분 TYPE 5.0 인공강우 실험 결과 .....	181
〈표 5-12〉 식물재배화분 TYPE 2.5 인공강우실험 결과 .....	183
〈표 5-13〉 주요입력 데이터 .....	186
〈표 5-14〉 최근 10년 연간강우량 .....	187
〈표 5-15〉 2019년도 시설별 연간강우량 대비 유출량저감율, 증발량, 침투량 .....	190
〈표 5-16〉 2020년도 시설별 연간강우량 대비 유출량저감율, 증발량, 침투량 .....	191

---

## 그림 차례

---

<그림 1-1> 도시환경문제 및 물순환 왜곡 .....	3
<그림 1-2> 1973~2019년 전국·수원시 폭염일수 .....	5
<그림 1-3> 공간적 범위 .....	8
<그림 1-4> 문헌 검토 및 사례 연구 대상 .....	10
<그림 2-1> 레인시티 개념도 .....	13
<그림 2-2> 그린인프라와 유사 개념 .....	16
<그림 2-3> 환경부 제2차 물환경관리 기본계획의 체계 .....	22
<그림 2-4> 경기도 통합 물 관리 기본계획의 체계 .....	24
<그림 2-5> ‘빗물유출제로화 시범사업’ 대상지(오창과학산업단지) .....	30
<그림 2-6> 청주시 오창과학산업단지 저영향개발 기술요소 도입 현황 .....	31
<그림 2-7> ‘물순환선도도시 사업’ 주요 대상지(대전광역시) .....	34
<그림 2-8> 대전광역시 물순환 선도도시 조성사업 추진 현황 .....	35
<그림 2-9> 광주광역시 물순환 선도도시 조성사업 추진 현황 .....	38
<그림 2-10> 서울특별시 물순환 관련 정책 추진현황 .....	41
<그림 2-11> 뿔버튼 물순환 정책 운영 현황 .....	44
<그림 2-12> 밴쿠버 레인시티 전략의 목표 .....	46
<그림 2-13> 밴쿠버 물순환 정책 운영 현황 .....	47
<그림 2-14> 함부르크의 녹색 네트워크 개념도 .....	50
<그림 2-15> 함부르크 옥상녹화 현황 .....	51
<그림 2-16> 수원시 물순환 관련 주요 계획 .....	55
<그림 2-17> 수원시 주요 그린인프라 사업 .....	66
<그림 2-18> 수원시 주요 그린인프라 현황 .....	67
<그림 2-19> 종합운동장 그린인프라 현황 .....	68
<그림 2-20> 빗물저금통 현황 .....	69
<그림 2-21> 장안구청 그린인프라 현황 .....	70
<그림 2-22> 레인시티 시즌2 조성 현황 .....	71
<그림 2-23> 그린빗물인프라 조성사업(2017) 대상지 및 설치현황 .....	72

〈그림 3-1〉 투수성 포장 .....	81
〈그림 3-2〉 시카고 골목길 투수성 포장 적용 전후 .....	82
〈그림 3-3〉 프로빈스타운 주거단지 투수성 포장 적용 전후 .....	83
〈그림 3-4〉 투수성 포장의 비점오염물질 및 우수유출저감효과 .....	84
〈그림 3-5〉 투수성 포장 및 불투수성 포장의 표면온도 비교 .....	85
〈그림 3-6〉 침투도랑 .....	87
〈그림 3-7〉 네덜란드 즈볼러 실러호크의 침투도랑 .....	88
〈그림 3-8〉 용인시 처인구 침투도랑 .....	89
〈그림 3-9〉 침투도랑의 비점오염물질 및 우수유출저감효과 .....	90
〈그림 3-10〉 침투도랑 성능 평가 대상지 .....	91
〈그림 3-11〉 침투도랑 설치에 따른 관찰지점별 수위 변화 .....	92
〈그림 3-12〉 식물재배화분 .....	93
〈그림 3-13〉 미국 미시건주 식물재배화분 .....	94
〈그림 3-14〉 미국 필라델피아 식물재배화분 .....	95
〈그림 3-15〉 식물재배화분의 비점오염물질 및 우수유출저감효과 .....	96
〈그림 3-16〉 식물재배화분 모니터링 대상지 및 구조(WPCL) .....	97
〈그림 3-17〉 식물재배화분별 침투유출 저감 현황(WPCL) .....	99
〈그림 3-18〉 식생도랑 .....	100
〈그림 3-19〉 캐나다 토론토 에드워드 공원 주차장의 식생도랑 .....	101
〈그림 3-20〉 호주 티트리굴리 식생도랑 .....	102
〈그림 3-21〉 호주 티트리굴리 빗물저류시설(지하) .....	102
〈그림 3-22〉 영국 엔필드 식생도랑 .....	103
〈그림 3-23〉 식생도랑의 비점오염물질 및 우수유출저감효과 .....	104
〈그림 3-24〉 식생도랑과 일반 토양의 나무 성장 비교 .....	105
〈그림 3-25〉 빗물정원 .....	106
〈그림 3-26〉 스웨덴 예테보리 크비베리 공원의 빗물정원 .....	107
〈그림 3-27〉 노르웨이 브뤼겐 .....	108
〈그림 3-28〉 노르웨이 브뤼겐 빗물정원 .....	108
〈그림 3-29〉 빗물정원의 비점오염물질 및 우수유출저감효과 .....	109
〈그림 3-30〉 시안공대 캠퍼스 내 빗물정원과 구조 .....	110
〈그림 3-31〉 빗물정원의 관찰지점별 지하수 깊이 및 강우량 현황 .....	111

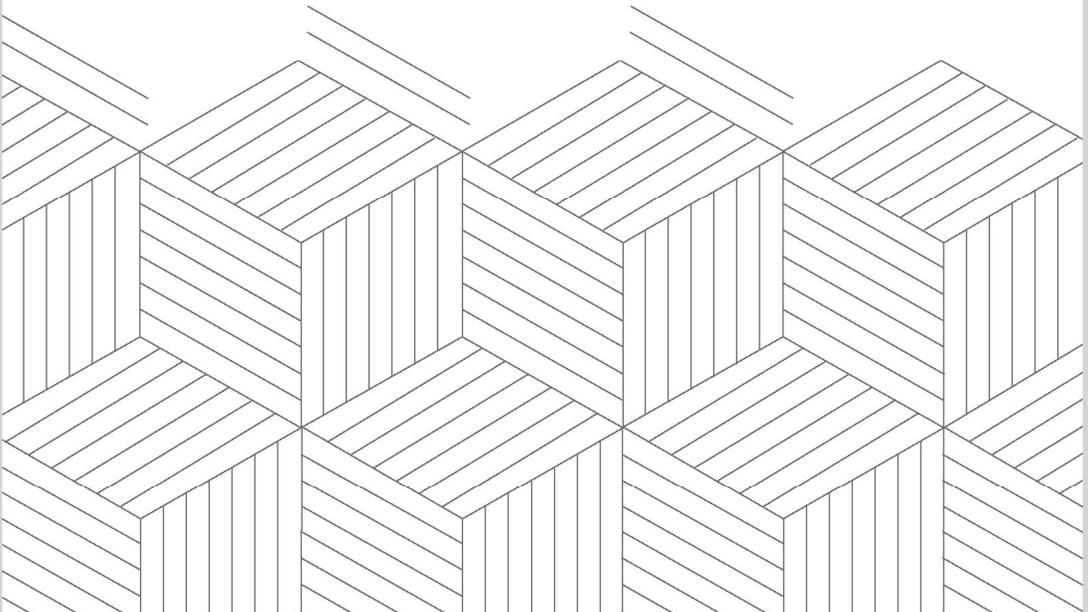
〈그림 3-32〉 젠킨타운 강 상류의 빗물정원 .....	112
〈그림 3-33〉 빗물저류시설 .....	113
〈그림 3-34〉 가나 쿠베마을의 빗물저류시설 건설현장 .....	114
〈그림 3-35〉 미국 씨게이트 미디어 리서치 센터의 빗물저류시설 및 필터 .....	115
〈그림 3-36〉 브라질 노테 프루미넨세 복합 화력발전소 전경 .....	116
〈그림 3-37〉 브라질 노테 프루미넨세 복합 화력발전소 빗물 수확시스템 .....	116
〈그림 3-38〉 빗물 수확 시스템 설계(빗물처리공정) .....	118
〈그림 3-39〉 시간경과에 따른 빗물저류시설 내 빗물의 변화 .....	120
〈그림 3-40〉 홍수저감 연구대상지 .....	121
〈그림 3-41〉 빗물탱크 유무에 따른 연간 홍수량 비교(2002~2008년) .....	122
〈그림 3-42〉 그린인프라의 주요 효과 .....	125
〈그림 3-43〉 그린인프라의 비점오염물질 저감효율 .....	126
〈그림 3-44〉 빗물이용시설 도입에 따른 유출곡선·유출량·유출률의 변화 .....	127
〈그림 3-45〉 그린인프라의 지하수 함양 효과 .....	128
〈그림 3-46〉 옥상녹화 적용에 따른 평균기온 분포 비교(15시 기준) .....	129
〈그림 3-47〉 옥상녹화 적용에 따른 냉·난방 에너지 절감 효과 .....	132
〈그림 3-48〉 그린인프라에 따른 도로변 대기오염물질 저감 .....	133
〈그림 4-1〉 빗물분사시설 설치 효과 분석 연구 대상지(1~6구간) .....	138
〈그림 4-2〉 빗물분사시설 분사 모습 및 고정형 온도계 설치 예시 .....	139
〈그림 4-3〉 대기온도 모니터링을 위해 설치된 고정형 온도계 .....	139
〈그림 4-4〉 표면 온도 지도 추출을 위한 열화상 무인카메라 비행경로 설정 및 분석 과정 ..	142
〈그림 4-5〉 가로 환경에 따른 모니터링 기간 평균 온도 차이 .....	144
〈그림 4-6〉 가로 환경에 따른 모니터링 기간 최고 온도 차이 .....	145
〈그림 4-7〉 8월 31일 오전 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화 .....	146
〈그림 4-8〉 8월 31일 오후 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화 .....	147
〈그림 4-9〉 9월 1일 오전 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화 .....	148
〈그림 4-10〉 9월 1일 오후 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화 .....	149
〈그림 4-11〉 8월 31일 오전 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화 .....	150
〈그림 4-12〉 8월 31일 오후 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화 .....	151
〈그림 4-13〉 9월 1일 오전 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화 .....	152
〈그림 4-14〉 9월 1일 오후 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화 .....	153

〈그림 4-15〉 2020년 9월 1일 10-13시 5-6구간 빗물 분사에 따른 표면 온도 변화	155
〈그림 4-16〉 2020년 9월 1일 13-16시 3구간 빗물 분사에 따른 표면 온도 변화	157
〈그림 5-1〉 LID시설 위치	163
〈그림 5-2〉 모니터링 분석의 흐름	165
〈그림 5-3〉 식물재배화분 표준 단면도	167
〈그림 5-4〉 식물재배화분의 빗물 유입 및 유출흐름도	168
〈그림 5-5〉 초음파식 이동형 유량계	169
〈그림 5-6〉 유량계 설치 위치 (유입부, 유출부)	170
〈그림 5-7〉 모니터링 센서 설치	171
〈그림 5-8〉 모니터링 센서 설치(2차)	173
〈그림 5-9〉 빗물관리용량산정식	177
〈그림 5-10〉 인공강우 실험	180
〈그림 5-11〉 SWMM 구축	185
〈그림 5-12〉 SWMM 데이터 입력 화면	186
〈그림 5-13〉 모델링 검보증	188
〈그림 5-14〉 2019년도 시강우량 모델링 결과	189
〈그림 5-15〉 2019년도 시강우량 모델링 결과	190



# 제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적  
제2절 연구 범위  
제3절 연구 방법





# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경 및 목적

### 1. 연구 배경

- 도시화·산업화로 빗물이 스며들지 못하는 콘크리트, 아스팔트 포장 등 불투수 포장면적이 증가하고 하천부지와 우수지 면적, 산림·녹지공간이 감소하는 등 도시화 및 기후 변화에 따른 자연적인 물순환 체계의 왜곡은 도시환경문제를 가중시킴

〈그림 1-1〉 도시환경문제 및 물순환 왜곡



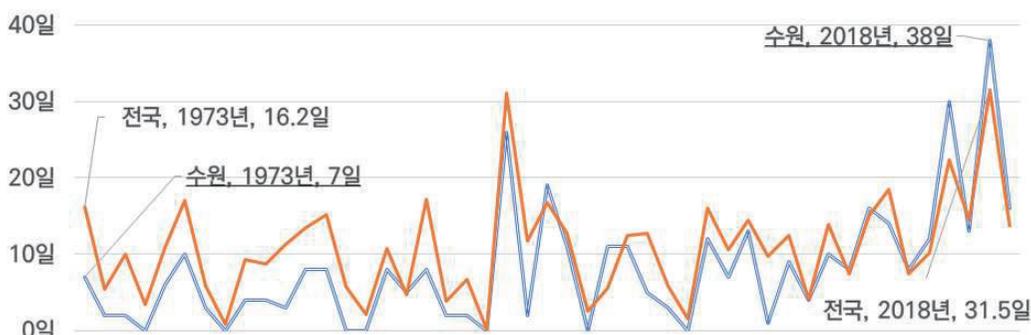
- 비점오염원의 불특정성으로 처리에 한계가 있어 강우유출수를 통한 관리 필요
  - 불투수 포장면적의 증가는 빗물이 토지로 침투하고 하천 및 바다로 흘러 들어간 후 일부는 햇빛에 의해 수증기가 되는 자연적인 물순환 과정 방해

- 물순환 왜곡은 비점오염원에 따른 수질악화, 도시홍수 급증, 수자원 부족 등 다양한 도시환경 문제를 야기하고 궁극적으로 도시민의 안전하고 깨끗한 주거환경 위협
  - 점오염원에 대해서는 하수처리장과 같은 환경기초시설을 확충하는 등 관리를 강화하여 오염 부하가 점차 개선되는 추세이지만 비점오염원의 오염 비중은 증가
  - 특히 산업화 및 도시화에 따라 불투수 면적 등이 증가하면서 비점오염원으로부터 발생한 수질오염 물질이 강우 시 빗물과 함께 하천으로 유입되어 수질 악화
  - 우수관 최종점에서 강우유출수를 정화하는 후처리방식의 비점오염 저감시설은 매우 비효율적이며 지속가능성도 명확하지 않아 강우유출수의 관리를 통해 비점오염물질을 저감하는 것이 중요
- 도심 개발에 따른 불투수면 확대에 따른 기존 빗물관리시스템의 한계 발생
    - 집중호우(일일 강수량 80mm 초과)가 발생하거나 도시화로 녹지가 콘크리트 포장으로 바뀌면서 하수관으로 유입되는 빗물의 양이 급증(독고석 외, 2003)
    - 하천 및 배수펌프장 등 빗물 처리시설의 설계빈도를 상회하는 초과유출량으로 인해 홍수범람 및 내배수 침수피해 가중(소방방재청, 2009)
    - 하수관거나 빗물펌프장은 수용가능 용량을 초과하면 소용이 없고 설치와 유지에 많은 비용이 소모되기 때문에 효과적인 치수방안이라고 보기 어려움(조혜정, 2011)
    - 특히 서울이나 수원과 같은 대도시 지역은 불투수면적 비율이 점차 증가하고 있어 한번의 돌발성 강우에도 막대한 피해 초래(조용모, 2006)
    - 기후변화로 집중호우(일일 강수량 80mm 초과)가 증가하는 등 강우 패턴이 변화하면서 기존 우수관로 시스템의 통수기능이 약화하고 도심지 침수 증가
  - 기후변화, 이상기후 등으로 매년 정례화 되는 가뭄으로 물관리 노력 필요
    - 도시화에 따른 불투수 면적 증가로 강우 시 빗물이 지표면 아래로 침투하지 못하고 하수관거를 통해 빠르게 하천으로 유출됨에 따라 지하수 고갈 및 그에 따른 지반 침하 현상, 하천의 건천화 등 문제 야기
    - 빗물이 땅 속으로 들어가 지하수가 되고, 이 지하수는 다시 강물이나 하천으로 순환하기 때문에 빗물을 버리면 지하수가 충분히 확보되지 못할 뿐 아니라 이미 사용하는 지하수를 보충할 수 없음(박현주, 2017)
  - 불투수 포장면적 증가로 도시열섬현상이 심화되어 폭염일수 증가
    - 국내 기상관측이 본격적으로 시작된 1973년 이래 전국의 연간 평균기온은 꾸준한 상

승세를 보였으며, 평균 최저기온 및 최고기온도 증가(〈그림 1-2〉 참고)

- 수원시 또한 평균기온 및 폭염일수가 꾸준한 상승세를 보였으며 2018년에는 폭염이 38일간 발생하는 등 역대 최고치 기록

〈그림 1-2〉 1973~2019년 전국·수원시 폭염일수



자료: 기상청 기상자료개방포털

- 전 세계적인 이상고온으로 폭염일수가 증가하는 등 기후변화 문제가 심화되는 중에 도시열섬현상 발생은 도시민의 삶의 질 문제에 지대한 영향을 미칠 수 있음
- 특히 수원시는 빠른 도시화로 도시 피복이 변화하고 도시 구조물이 증가하면서 열섬 현상, 공기순환 감소 등 도시특유의 기후문제가 발생하였고, 경기도 지역 중 온도상승 속도가 가장 빠른 것으로 나타남(공학양 외, 2015)
- 열섬현상으로 기온이 상승하면 여름철 에어컨 가동이 증가하는 등 전력소비량이 늘어나고 이는 다시 석탄화력발전소 등 발전시설 가동으로 이어져 온실가스 배출이나 미세먼지 배출량 증가를 야기(강찬수, 2018)
- 수원시에서는 자연적 물순환으로의 회복을 위해 레인시티 사업추진
  - 미국은 자연적 물순환 회복을 위해 선도적으로 그린인프라를 도입한 국가 중 하나이며, 1990년대 메릴랜드주에서 우수유출량 조절 및 비점오염 저감을 위해 생태저류지 개발을 추진한 것이 미국 내 그린인프라 활용의 시작으로 평가받고 있음
  - 국내에서도 해외의 사례를 참고하여 기존의 우수관리 시스템의 대안으로 자연적인 물순환 회복에 집중하고 있으며, 환경부는 홍수피해·비점오염원 증가 등 도시환경문제 완화를 위해 그린인프라를 중심으로 한 각종 시범사업 추진 중
  - 2013년부터 청주시·전주시를 대상으로 ‘빗물유출제로화 시범사업’을 실시했으며, 2014년부터 김해시·제천시 등에 ‘그린빗물인프라 조성사업’을 추진

- 서울시 또한 자연 물순환 기능을 회복하기 위해 2014년부터 각종 개발 사업에 그린 인프라를 도입하고 빗물마을을 조성하는 등 관련 사업 추진
  - 2020년에는 64억 원의 예산을 투입하여 ‘서울시 물순환 회복 기본계획’을 수립하고 물순환 시민 문화제, 물순환 스타트업 공모전 등 시민참여 행사 개최
  - 수원시도 2009년 도시의 건전한 물순환 회복을 위해 국내 최초로 ‘물순환을 전면으로 내세운’ ‘물순환 관리에 관한 조례’를 제정하고 2011년 ‘물순환 관리 기본계획’ 수립
  - 현재에는 ‘스마트 레인시티 수원’이라는 이름으로 각종 프로젝트를 수행하여 2018년 세계적 권위의 국제환경상인 ‘에너지 글로브 어워드 국가상’을 수상하는 등 국제적으로 성과를 인정받아 국내 그린인프라 활용의 선도도시로 평가받고 있음
- 가속화되는 기후변화로 인해 도시 내 물순환 정책 추진 강화 필요
    - 집중호우는 짧은 기간에 많은 비를 퍼붓기 때문에 비가 내리더라도 대부분 바다 등으로 흘러가 실생활에 사용하는데 한계가 있기 때문에 집중호우 때 내리는 빗물을 어디에, 어떤 방식으로 담아 두고 활용해야 할지 국가적 차원의 고민 필요(김태국, 2007)
  - 수원시는 물순환정책인 “레인시티 사업”을 추진하여 지속가능한 도시 실현을 위한 정책 추진의 발판 마련
    - 수원시는 ‘그린빗물인프라 조성공사’, ‘레인시티 시즌2 조성공사’ 등의 사업을 통해 수원종합운동장, 수원월드컵경기장, 수원시청, 장안구청 등에 빗물저류시설, 빗물정원, 투수성 포장 등 다양한 그린인프라를 설치·관리 중
    - 수원월드컵경기장, 수원종합운동장, 광고중학교 등에는 빗물저류시설과 함께 저류시설에 저장된 빗물을 활용할 수 있도록 빗물분사기, 빗물주유기를 함께 설치하여 폭염시 빗물분사기를 이용해 도로에 주기적으로 물을 뿌려 열섬현상 완화 가능
    - 그린인프라 선도도시로서 수원시의 관련 정책이 지속가능성을 확보하기 위해서는 기 운영 중인 인프라의 효과검증을 통해 객관적인 정책 결과를 산출하는 것이 필요
    - 레인시티의 효과를 확인할 경우, 정책에 대한 시민의 신뢰도를 높이고 사업에 대한 홍보 및 긍정적 이미지 형성이 가능할 것으로 기대

## 2. 연구 목적

- 본 연구에서는 수원시 “레인시티 사업”에 대한 효과성 분석을 통해 수원의 물순환 정책의 객관적인 효과를 검증하고 시민의 신뢰도를 제고하여 정책의 지속가능성을 확보하고자 함
- 레인시티 수원의 현황 및 추진성과 분석
  - 본 연구를 통해 국내 그린인프라 선도도시인 수원시의 추진성과 및 개선점을 확인하고 ‘스마트 레인시티 수원’ 정책 추진의 기초로 활용
  - 수원시 「물순환 관리에 관한 조례」, 「물순환 관리 기본계획」, 「그린인프라 조성사업」 등 그린인프라 관련 정책을 바탕으로 실현된 각종 성과 확인
  - 기존 사업의 추진 현황과 성과, 개선점을 파악하고 이를 바탕으로 레인시티 수원의 지속가능성을 위한 정책적 지향점 제시
- 수원시 그린인프라의 효과성 분석
  - 수원시 내에 설치·운영 중인 빗물분사장치, 식물재배화분 등 레인시티 사업의 효과를 분석하여 정책 추진의 성과를 객관적이고 과학적으로 입증
  - 수원시에서는 다년간의 레인시티 정책 추진으로 도시 곳곳에 그린인프라 시설을 운영 중이며, 수원시청과 장안구청에 설치된 그린인프라의 효과성 검증을 통해 정책 추진의 필요성을 입증한 바 있음
  - 본 연구를 통해 수원월드컵경기장 및 원천리천 유역에 위치한 그린인프라의 효과를 분석하여 정책의 필요성, 실효성을 증명하고자 함
- 분석결과를 바탕으로 수원시 물순환 정책 추진을 위한 정책 제안
  - 수원시 그린인프라의 정량적 효과 및 국내·외 그린인프라 사례, 수원시 정책 현황 등을 종합하여 ‘스마트 레인시티 수원’에 부합하는 정책제안
  - ‘레인시티’를 표방하는 수원시도 물순환 체계 구축이 정책 일부분에 머무는 것이 아니라 도시 관리 전면에서 우선될 수 있도록 적극적인 정책 추진 필요

## 제2절 연구 범위

### 1. 공간적 범위

- 수원시 그린인프라 시설을 대상으로 연구 추진
  - ‘레인시티 효과성 분석’을 위해 수원시의 그린인프라를 연구범위로 설정하되, 구체적인 분석대상으로 수원월드컵경기장 및 원천리천 지역의 그린인프라를 선정
  - 수원월드컵경기장에 설치된 빗물저류시설 및 노면분사시스템(빗물분사기)의 온도저감효과, 원천리천 지역에 위치한 식물재배화분, 식생도랑, 투수성 블록의 우수유출지연효과 분석

〈그림 1-3〉 공간적 범위



## 2. 시간적 범위

- 연구기간은 2020년 3월 ~ 2021년 X월이며, 연구 보고서는 2021년을 기준으로 작성
  - 2021년을 기준으로 연구 보고서를 작성하였으나 2021년 자료가 구축되지 않을 때는 최신의 공인된 자료를 기준으로 작성

## 3. 내용적 범위

- 레인시티에 대한 학술적 이해와 기능 분석, 현장 검증을 통해 효과성 확인

〈표 1-1〉 내용적 범위

구분	내용
서론	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ‘레인시티 효과성 분석’ 연구의 추진 배경 및 목적, 구체적인 연구 범위 설정</li> </ul>
레인시티의 이해	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도시환경문제의 대안으로서 레인시티의 개념과 목적을 살펴보고, 레인시티를 구축하기 위한 그린인프라 및 유사용어들에 대해 논의</li> <li>• 물순환, 빗물 등 레인시티와 관련된 법률 및 계획, 조례를 검토하여 레인시티의 추진 현황 및 정책적 바탕 등을 확인</li> <li>• 청주시, 대전광역시, 호주 멜버른, 독일 함부르크 등 그린인프라를 활용하고 있는 국내·외 사례를 검토하여 그린인프라의 중요성을 확인하고 수원시가 나아가야 할 방향을 검토</li> </ul>
레인시티 효과성 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주요 그린인프라 기술요소(투수성 포장, 침투도랑, 식물재배화분, 식생도랑, 빗물정원, 빗물저류시설)별 개념 및 특성을 확인하고 선행연구를 종합하여 각 요소의 효과를 확인</li> </ul>
수원시 레인시티 효과성 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수원시 레인시티 관련 조례 및 계획을 확인하고 관련 사업과 대내외 성과 검토</li> <li>• 빗물분사장치의 온도저감 효과 및 식물재배화분의 우수유출저감 효과 등을 검토하여 수원시 그린인프라의 효과를 객관적으로 제시</li> </ul>
결론	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연구의 의의 및 한계를 기술하고 수원시 레인시티 정책의 추진방향 제시</li> </ul>

### 제3절 연구 방법

- 수원시 레인시티 효과성을 객관적으로 증명하기 위해 다양한 연구방법 적용
  - 연구 수행을 위해 문헌 검토 및 사례 연구, 전문가 자문, 모니터링 등을 실시하였음.
  - 문헌 검토 및 사례 연구에 활용한 전 세계 국가 및 국내 지자체 현황은 <그림 1-4>와 같으며, 해외 13개국, 국내 8개 지자체(수원 제외)를 대상으로 함
  - 모니터링은 레인시티사업인 빗물분사시설에 따른 온도저감효과 모니터링과 저영향개발(LID)시설에 대한 빗물유출저감 효과 모니터링으로 구분하여 실시

<표 1-2> 연구 방법

구분	내용
문헌 검토	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 레인시티, 그린인프라, 저영향개발, 그린빗물인프라 등 각종 개념과 역할을 확인하기 위해 선행연구 및 각종 법률 및 계획 등 문헌 검토 실시</li> </ul>
사례 연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그린인프라 적용 현황 및 역할을 확인하기 위해 국내·외 그린인프라 사례 연구 실시</li> </ul>
전문가 자문	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 열섬효과, LID 효과 등에 대한 전문가 자문 실시</li> </ul>
모니터링	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수원시 그린인프라를 대상으로 효과 모니터링 실시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 빗물분사장치 온도저감 효과(대기온도 저감 및 표면온도 저감효과 분석)</li> <li>- 식물재배화분의 빗물유출 저감효과</li> </ul> </li> </ul>

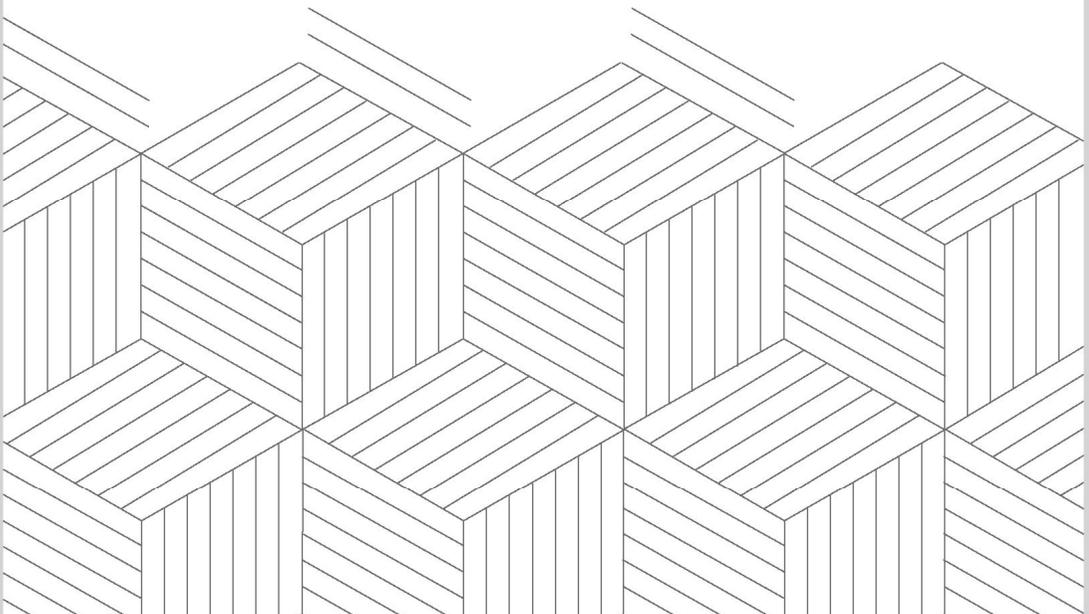
<그림 1-4> 문헌 검토 및 사례 연구 대상



# 제2장

## 레인시티의 이해

- 제1절 레인시티 관련 개념
- 제2절 관련 계획 및 법규 검토
- 제3절 국내·외 사례 분석
- 제4절 수원시 레인시티 현황
- 제5절 시사점





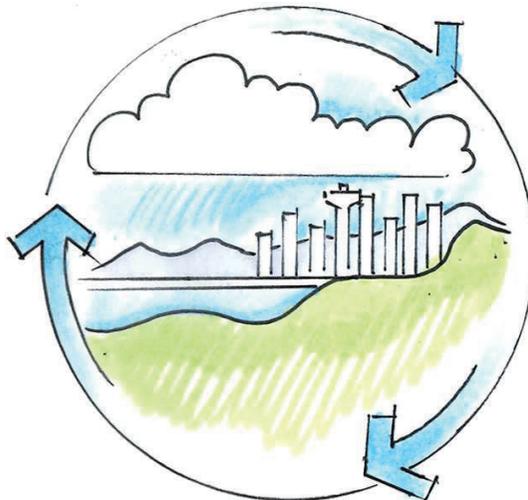
## 제2장 레인시티의 이해

### 제1절 레인시티 관련 개념

#### 1. 레인시티(Rain City)

- 레인시티는 그린인프라를 통해 자연적인 물순환 방식을 구축한 도시
  - 과거에는 산업화로 빗물이 오염되면서 피해야 하는 것으로 인식됐으나 현대의 빗물은 자연적인 물순환의 핵심이자 소중한 수자원으로 평가
  - 레인시티는 이러한 빗물의 중요성을 인식하여 전통적인 빗물관리방식에서 탈피해 자연적인 물순환 체계를 구축하여 빗물이 지역 곳곳에 머무르게 하는 도시를 의미
    - 빗물이 도시 내에서 자연스럽게 순환하면서 현대의 도시들이 경험하는 수질 악화, 홍수, 열섬현상 등 환경문제의 해결·완화 가능
  - 수원시를 비롯해 캐나다 밴쿠버, 호주 멜버른, 독일 함부르크 등 국내·외를 막론하고 다양한 도시들이 그린인프라를 통해 빗물을 다양하게 활용하는 ‘레인시티’ 정책 추진

〈그림 2-1〉 레인시티 개념도



자료: City of Vancouver(2019a), RAIN CITY STRATEGY

## 2. 그린인프라(Green Infrastructure)

- 그린인프라, 자연 생태계를 유지하기 위한 대기권역, 유역, 자연지역 등의 네트워크
  - 그린인프라는 기후변화 및 자원위기에 대한 대응방안 중 하나로 지속가능한 발전과 함께 활용되었으며, 1990년대 후반 북미에서부터 통용
  - 그린인프라는 다기능적 특성으로 인해 다양하게 정의되고 있으며, 광의적 측면에서 EU(2013)는 자연 및 준자연(semi-natural) 지역 및 기타 환경적 특성 간의 전략적으로 계획된 네트워크로 정의
    - Benedict and McMahon(2006)은 자연생태계의 가치와 기능을 보존하고, 깨끗한 공기와 물을 유지하며, 사람과 야생동물에게 다양한 혜택을 제공하는 자연 지역과 그 밖의 오픈스페이스의 상호연결 네트워크라고 설명
  - 2013년 EU가 발표한 ‘2020 생물다양성 전략’에 따르면 그린인프라는 전략 성공을 위한 핵심요소이며, 다수의 인구가 거주하는 도시환경에서 특히 중요
  
- 자연의 물 순환을 유지하고 회복하는 방안으로의 그린인프라
  - EU는 그린인프라를 자연의 다양한 요소를 아우르는 포괄적 개념으로 활용하고 있지만, 미국 환경보호청(U.S.EPA)은 물순환에 초점을 두고 ‘물 관리와 건강한 도시환경 구축을 위해 식생, 토양 그리고 자연적 과정을 활용하는 것’으로 정의(U.S.EPA, 2016)
    - 환경보호청에 따르면, 그레이인프라<sup>1)</sup>로 불리는 우수관로를 중심의 빗물처리 방식은 도심에서 빗물을 배제하도록 설계됐지만 그린인프라는 빗물을 발생지역에서 처리하며 환경적, 사회적, 경제적 측면에서 이점 제공
  - 물 순환의 측면에서 그린인프라는 빗물을 자연적인 방식으로 처리하는 것에 중점을 두며, 옥상녹화, 식생수로, 투수성포장, 빗물저류시설 등의 요소들로 구성
  - 단일 요소들도 강우유출수 및 비점오염물질을 효과적으로 저감시킬 수 있지만 각 요소가 상호 연결되었을 때 더욱 효과적으로 작동(김승현·조경진, 2015)
    - 그린인프라는 홍수 감소, 물공급 증가, 스모그 및 열섬현상 완화, 빗물관리 비용 저감, 녹지공간을 통한 삶의 질 개선 등의 이점 보유

1) 물관리 측면에서 그레이인프라(Gray Infrastructure)는 빗물배수구, 콘크리트 및 파이프와 같은 단단한 인프라를 활용하여 빗물을 모으고 수로로 전달하는 전통적인 수자원 관리 시스템을 의미. 그린인프라는 그레이인프라를 보완하거나 대체할 수 있음

### 3. 저영향개발(Low Impact Development)

- 저영향개발은 도시에서 빗물을 침투 및 저류시킴으로써 자연적인 물순환 체계로 회복하고자 하는 방안으로 개발에 따른 영향을 최소화하는 기법(환경부, 2016)
  - 1990년대 말 미국 메릴랜드 주에서 기존의 방안으로는 개발사업에 따른 강우유출수 처리에 한계가 발생하자 새로운 개발기법으로 저영향개발 모색
  - 저영향개발은 자연친화적 기법을 활용해 강우유출 발생원으로부터 유출량 및 비점오염을 저감하고 유출속도를 지연시켜 물순환 상태를 개발 이전에 가깝게 유지시키는 기법
    - 국내에서는 2000년대 이후에 저영향개발이 도입되기 시작했고, 2009년 환경부에서 비점오염물질 관리방안으로 저영향개발에 관한 연구 추진
  - 저영향개발의 주요 요소로 식물재배화분, 나무여과상자, 식생체류지, 옥상녹화 등이 있는데, 자연적인 방법으로 물순환을 회복시키는 것을 목표로 한다는 점, 그리고 구체적인 방법론에서 그린인프라와 유사성이 높음(우효섭 · 한승완, 2020)
    - 그린인프라는 토지개발 지역이나 기존 도시지역 모두에 대해 다양한 우수처리방안을 고려하는 반면, 저영향개발은 토지개발 지역에서 초점을 맞추는 기법
    - 자연 상태의 토지보전을 중심으로 자연적인 우수처리방안을 고려한다는 점에서 그린인프라와 저영향개발은 같은 개념이라고 할 수 있음(우효섭, 2020)

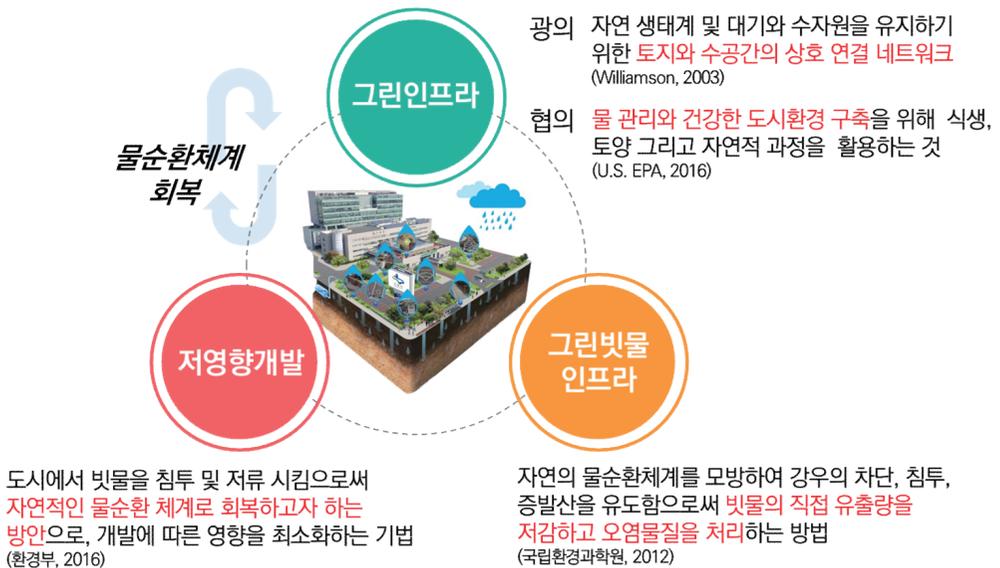
### 4. 그린빗물인프라(Green Stormwater Infrastructure)

- 그린빗물인프라는 자연의 물순환체계를 모방하여 강우의 차단, 침투, 증발산을 유도함으로써 빗물의 직접 유출량을 저감하고 오염물질을 처리하는 방법(국립환경과학원, 2012)
  - 주요 기술요소로는 옥상녹화, 빗물정원, 투수성 포장, 빗물이용시설 등이 있음
- 국립환경과학원(2012)에서는 녹색공간의 네트워크로 설명되는 광의의 그린인프라와 비교하여 자연의 물순환체계 회복을 위한 방안으로서 그린빗물인프라 정의
  - 미국 환경보호청에서는 그린인프라를 물순환에 초점을 맞추고 접근하고 있다는 점을 고려할 때 그린빗물인프라와 그린인프라는 동일한 개념으로 볼 수 있음
    - 미국 캘리포니아에 위치한 펠로앨토시의 '그린빗물인프라 계획'에서도 그린빗물인프라에 대해 설명하면서 그린인프라로 불리기도 한다고 서술하고 있음
    - 저영향개발은 그린빗물인프라의 하위개념이라고 설명하여 그린인프라, 그린빗물인프라, 저영향개발의 상호 관련성이 높다는 것을 증명

## 5. 개념 간 관련성

- 자연적인 물순환 회복을 지향하는 그린인프라, 저영향개발, 그린빗물인프라
  - 그린인프라, 저영향개발, 그린빗물인프라의 사전적 정의 및 관련 계획, 연구 등을 검토한 결과, 세 개의 개념은 자연적인 물순환 회복을 목표로 하고 동일한 기술요소를 공유한다는 점에서 상호관련성이 높음
  - 그린인프라가 그린빗물인프라를 포괄하거나, 그린빗물인프라가 저영향개발을 포괄했으며, 그린인프라가 저영향개발과 동일한 개념으로 활용되고 있음을 확인
    - 자연적인 방법으로 물순환을 회복시키는 것을 목표로 한다는 점, 그리고 구체적인 방법론에서 저영향개발은 그린인프라와 유사성이 높음
    - 자연상태의 토지보전을 중심으로 자연적인 우수처리방안을 고려한다는 점에서 그린인프라와 저영향개발은 같은 개념이라고 할 수 있음(우효섭, 2020)
    - 미국 캘리포니아에 위치한 팰로앨토시는 그린빗물인프라가 그린인프라로 불리기도 한다고 설명했으며, 저영향개발은 그린빗물인프라의 하위개념이라고 서술
- 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 수원시 그린인프라를 중심으로 연구를 추진하되 관련 법률 및 계획, 사례분석 등에서 그린빗물인프라와 저영향개발도 동일한 개념으로 판단하고 연구를 수행함

〈그림 2-2〉 그린인프라와 유사 개념



## 제2절 관련 계획 및 법규 검토

- 레인시티가 포괄하는 ‘물순환’, ‘빗물’ 등과 관련된 법률, 계획, 조례 검토
  - 국내에는 지속가능한 물순환 체계를 구축하고 국민의 삶의 질 향상을 위한 「물관리 기본법」을 비롯해 물 자원의 지속가능한 이용을 위한 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」(이하 물재법), 「물환경보전법」 등 건전한 물 관리를 위한 다수의 법률 제정
  - 정부에서는 법률에 근거해 물환경관리 기본계획을 수립하고 있으며, 서울, 울산, 제주 등 지자체 또한 물순환 관련 계획을 수립하여 물 관리를 위한 노력을 기울이고 있음
  - 국내 다수의 지자체는 조례를 통해 빗물이용시설을 설치한 시설물의 소유자 또는 관리자에게 수도요금 또는 하수도사용료를 경감할 수 있다고 명시
- 관련 계획 및 법규 검토를 통해 레인시티의 중요성, 필요성 확인
  - 자연재해와 환경문제에 효과적으로 대응하기 위해 물순환 회복이 필요하고, 지속가능한 물순환 체계를 구축하는 것은 국민의 삶의 질 향상에 관련되어 있어 국가 및 지방자치단체는 물 자원의 지속가능한 이용을 도모해야 함
  - 레인시티 관련 계획 및 법규 검토를 통해 수원시의 레인시티 정책이 수원시만의 일이 아니라 정부 및 각 지방자치단체가 국민을 위해 수행해야 할 의무이자 환경 및 개인의 삶과 밀접하게 관련되어 있다는 것을 확인할 수 있음

〈표 2-1〉 레인시티 관련 계획 및 법규 검토 대상

구분		대상
법규	국무조정실	• 「저탄소 녹색성장 기본법」
	환경부	• 「물관리기본법」 • 「물환경보전법」 • 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 • 「물관리기술 발전 및 물산업 진흥에 관한 법률」
	행정안전부	• 「자연재해대책법 시행령」
조례		• 「국내 자치단체 레인시티 관련 법률」(물순환, 빗물)
계획	환경부	• 제2차 물환경관리 기본계획(환경부)
	경기도	• 통합 물 관리 기본계획
	서울시	• 건강한 물순환 도시 조성 종합계획
	울산시	• 물순환 선도도시 기본계획 수립

## 1. 레인시티 관련 법규

- 법률을 통해 지속가능한 물순환 체계 구축의 필요성 강조
  - 「저탄소녹색성장기본법」에 따르면 정부는 기후변화로 인한 자연재해와 물 부족 및 수질악화, 수생태계 변화에 대응하기 위해 물순환 체계의 정비 및 수해의 예방 등을 포함하는 시책을 수립·시행해야 함
  - 「물관리기본법」은 법률 대상을 확대하여 국가 뿐 아니라 지방자치단체가 물관리 정책과 관련 계획 수립을 통해 지속가능한 물순환 체계를 구축할 수 있도록 해야 한다고 명시
  - 물순환 체계 구축을 위해서는 국가와 지자체뿐만 아니라 국민이라면 누구든지 물관리 시책에 협조해야 한다고 명시하여 물순환 체계의 중요성을 강조
    - 「물관리기본법」에서는 물순환을 강수가 지표수와 지하수로 되어 하천·호수·늪·바다 등으로 흐르거나 저장되었다가 증발하여 다시 강수로 되는 연속된 흐름이라고 정의하였으며 이는 레인시티가 추구하는 자연상태의 물순환과 같은 개념이라고 할 수 있음
    - 「물환경보전법」에서는 자연 상태의 물순환 회복에 기여할 수 있는 기법을 “저영향개발 기법”이라고 설명하면서 비점오염원이 배출될 수 있는 개발사업 시에 이를 고려한 비점오염저감계획서를 제출해야 된다고 명시
  - 물재법에서는 대통령령으로 정하는 공공청사, 공동주택, 대규모점포 등을 신축할 경우 빗물이용시설을 설치·운영해야한다고 명시함으로써 빗물이용의 필요성을 강조
  - 「물산업진흥법」은 물관리기술 개발 촉진, 물기술융합정보시스템의 구축 등 물관리기술의 체계적인 발전 기반 조성을 위해 제정되었으며, 국가와 지자체, 물산업 공공기관이 물순환 체계 구축을 위해 우수제품이나 기술의 발급 및 보급을 위해 노력해야 한다고 명시
- 건천화, 홍수, 폭염 등 자연문제 대응을 위한 빗물 활용의 필요성을 법률로 명시
  - 「자연재해대책법」은 자연재해의 예방·복구 및 그 밖의 대책에 관하여 필요한 사항을 규정한 법으로 해당법률의 시행령에 따르면 개발사업 등을 시행하거나 공공시설을 관리하는 자 등은 우수유출 저감대책을 수립해야 함
  - 「저탄소 녹색성장 기본법」에서도 기후변화로 인한 가뭄, 홍수, 폭염 등 자연재해와 물 부족 및 수질악화 등에 효과적으로 대응하기 위해 정부가 빗물관리 및 하수 재이용 등 물 순환 체계의 정비 등을 시행해야 한다고 명시
    - 정부는 빗물관리 외에도 안정적인 수자원 확보, 수생태계의 보전·관리와 수질개선, 수질오염 예방·처리를 위한 기술 개발 및 관련 서비스 제공 등 레인시티가 포괄하는 물순환 회복 관련 각종 사업을 실시해야 함

- 법률을 통해 기후변화와 도시화가 야기하는 각종 자연문제와 수생태계 변화에 대응하기 위해서는 빗물을 포함한 물 관리가 필요하다는 것을 확인 가능

〈표 2-2〉 레인시티 관련 법규

소관부처	관련 법률	관련내용
국무 조정실	「저탄소 녹색성장 기본법」	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정부는 기후변화로 인한 가뭄, 홍수, 폭염 등 자연재해와 물 부족 및 수질악화와 수생태계 변화에 효과적으로 대응하고 모든 국민이 물의 혜택을 고루 누릴 수 있도록 하기 위하여 '적극적인 빗물관리 및 하수 재이용 등 물 순환 체계의 정비 및 수해의 예방' 등을 포함하는 시책을 수립·시행해야 함</li> </ul>
환경부	「물관리기본법」	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 「물관리기본법」은 지속가능한 물순환 체계를 구축하고 국민의 삶의 질 향상에 이바지함을 목적으로 함</li> <li>• “물순환”이란 강수가 지표수와 지하수로 되어 하천·호수·늪·바다 등으로 흐르거나 저장되었다가 증발하여 다시 강수로 되는 연속된 흐름을 의미</li> <li>• 누구든지 지속가능한 물순환 체계를 구축하기 위하여 노력하고 국가와 지방자치단체의 물관리 시책에 협조하여야 함</li> <li>• 국가는 지속가능한 물관리 체계를 구축하고, 국민의 삶의 질을 향상시키는 데 필요한 종합적인 계획을 수립하여 시행할 책무가 있음</li> <li>• 지방자치단체는 국가의 물관리 정책과 관할 구역의 지역적 특성에 맞는 물관리 계획을 수립하여 시행할 책무가 있음</li> </ul>
	「물환경보전법」	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경영향평가 대상 사업자, 폐수배출시설 설치 사업자 등은 개발사업 시 불투수면에서 발생하는 강우유출수를 최소화하여 자연 상태의 물순환 회복에 기여할 수 있는 기법(이하 “저영향개발기법”이라 한다)등을 고려한 비점오염저감계획서를 제출해야 함</li> </ul>
	「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물재법은 물의 재이용을 촉진하여 물 자원을 효율적으로 활용하고 수질에 미치는 해로운 영향을 줄임으로써 물 자원의 지속 가능한 이용을 도모하고 국민의 삶의 질을 높이는 것을 목적으로 함</li> <li>• 대통령령으로 정하는 종합운동장, 실내체육관, 공공청사, 공동주택, 학교, 골프장 및 「유통산업발전법」 제2조제3호에 따른 대규모점포를 신축(대통령령으로 정하는 규모 이상으로 증축·개축 또는 재축하는 경우를 포함한다)하려는 자는 빗물이용시설을 설치·운영하여야 함</li> <li>• 지방자치단체는 빗물이용시설 또는 중수도를 설치한 시설물의 소유자 또는 관리자나 하·폐수처리수 재처리수를 공급받는 자에 대하여 조례로 정하는 바에 따라 수도요금 또는 하수도사용료를 경감할 수 있음</li> </ul>
행정 안전부	「물관리기술 발전 및 물산업 진흥에 관한 법률」	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 「물산업진흥법」은 물관리기술의 체계적인 발전 기반을 조성하여 물산업의 진흥에 기여함으로써 국민의 삶의 질 향상 및 지속가능한 물순환 체계 구축에 이바지하는 것을 목적으로 함</li> <li>• 국가, 지방자치단체 또는 물산업 공공기관은 지속가능한 물순환 체계 구축을 위하여 우수제품이나 기술의 발굴 및 보급을 위하여 노력하여야 함</li> </ul>
	「자연재해대책법 시행령」	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시장·군수·구청장은 상습가뭄재해지역에 대하여 빗물모으기시설 설치 등 가뭄 피해를 줄이기 위한 중장기대책을 수립·시행하여야 함</li> </ul>

자료: 법제처 홈페이지

## 2. 레인시티 관련 조례

- 국내 다수의 자치단체에서 레인시티 관련 조례를 제정하여 지속가능한 물순환 추진
  - 수원시 포함 서울특별시, 경기도, 인천광역시, 충청남도 등 전국 자치단체는 ‘물순환’, ‘빗물’ 을 주제로 한 레인시티 관련 조례 제정
  - 수원시는 물순환 체계를 구축하고 시민의 삶의 질 향상 및 지구 환경보전에 이바지하고자 국내 최초로 ‘물순환’ 이란 용어를 전면에 내세워 2009년 6월 19일 「수원시 물순환 관리에 관한 조례」를 제정(〈표 2-3〉 참고)
  - 경상남도는 ‘빗물’의 효율적인 이용을 도모하고 산업용수 공급, 재해예방 및 환경보전에 기여하기 위해 2009년 5월 14일 「경상남도 빗물 관리에 관한 조례」 제정
  - 경기도 또한 ‘물의 재이용’을 촉진하여 물 자원을 효율적으로 관리하기 위하여 체계적인 물 자원의 지속가능한 정책을 추진하는데 필요한 사항을 규정하기 위해 2012년 12월 28일 「경기도 물의 재이용 촉진 및 지원 조례」 제정
    - ‘물의 재이용’이란 빗물을 포함해 오수, 하수처리수, 폐수처리수 등을 물 재이용시설을 이용하여 처리하고, 처리된 물을 생활, 공업, 농업 등의 용도로 이용하는 것을 의미
  
- 빗물이용 및 관리 등 물순환을 포괄하는 조례들도 꾸준히 제정
  - 2005년 6월 3일 「군포시 빗물이용시설 설치조례」, ‘2009년 6월 19일 「수원시 물순환 관리에 관한 조례」 제정 이후 자원으로써 빗물에 대한 인식, 자연적인 물순환 회복의 중요성 등을 반영하여 전국 자치단체가 관련 조례 꾸준히 제정
  - 특히 서울시는 2005년 「서울특별시 빗물관리에 대한 조례」 제정 이후 2014년 이를 「서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본 조례」로 전부 개정하여 빗물관리에서 나아가 물순환 회복을 강조하고 이를 위한 저영향개발의 기본방향 제시
  - 광주광역시 또한 「물순환 기본 조례」를 통해 단순히 빗물을 모아서 활용하는 차원에서 벗어나 저영향개발을 통해 빗물의 유출을 최소화하고 개발로 인한 물순환과 물환경에 미치는 영향을 최소화하기 위한 종합적인 정책의 필요성을 강조
    - 대전광역시는 「물순환 개선 조례」 제21조에서 저영향개발기법 적용시설을 신규로 설치하려는 자에게 필요한 비용의 전부 또는 일부를 예산의 범위에서 보조할 수 있다고 명시하는 등 저영향개발기법이 확산될 수 있도록 적극 지원
    - 김해시, 안동시, 하남시 등에서도 ‘물순환’ 관련 조례에서 저영향개발기법 시설에 대한 재정지원을 명시하여 저영향개발을 통한 지역 내 물순환 회복 도모

〈표 2-3〉 레인시티 관련 조례

구분	연번	자치단체	조례명	제정일
물순환	1	수원시	「수원시 물순환 관리에 관한 조례」	2009. 6. 19.
	2	남양주시	「남양주시 물관리 및 물순환 기본 조례」	2009. 10. 21.
	3	서울특별시	「서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본 조례」	2014. 1. 19. 전부개정
	4	서울특별시 강동구	「서울특별시 강동구 물순환 회복에 관한 기본 조례」	2015. 12. 30.
	5	광주광역시	「광주광역시 물순환 기본 조례」	2017. 1. 1.
	6	대전광역시 서구	「대전광역시 서구 물순환 회복에 관한 기본 조례」	2017. 4. 10.
	7	울산광역시	「울산광역시 물 순환 회복 기본 조례」	2017. 12. 28.
	8	대전광역시	「대전광역시 물순환 개선 조례」	2017. 12. 29.
	9	안동시	「안동시 물순환 회복 조례」	2018. 4. 18.
	10	김해시	「김해시 물순환 개선 조례」	2018. 4. 27.
	11	하남시	「하남시 물관리 및 물순환 기본 조례」	2019. 9. 4.
	12	부산광역시 동래구	「부산광역시동래구 물순환 회복에 관한 기본 조례」	2019. 11. 13.
	13	천안시	「천안시 물순환 회복 기본 조례」	2020 6. 1.
빗물	1	군포시	「군포시 빗물이용시설 설치조례」	2005. 6. 3.
	2	과천시	「과천시 빗물이용시설 설치 조례」	2007. 6. 22.
	3	경상남도	「경상남도 빗물 관리에 관한 조례」	2009. 5. 14.
	4	전라남도	「전라남도 빗물이용에 관한 조례」	2009. 10. 5.
	5	전주시	「전주시 빗물관리에 관한 조례」	2009. 11. 4.
	6	나주시	「나주시 빗물관리에 관한 조례」	2010. 1. 20.
	7	창원시	「창원시 빗물관리에 관한 조례」	2010. 7. 1.
	8	광주광역시 광산구	「광주광역시 광산구 빗물관리에 관한 조례」	2011. 9. 27.
	9	인천광역시 동구	「인천광역시동구 빗물관리에 관한 조례」	2011. 10. 1.
	10	양산시	「양산시 빗물관리에 관한 조례」	2011. 11. 11.
	11	경산시	「경산시 빗물관리 조례」	2012. 11. 30.
	12	경기도	「경기도 빗물관리시설 설치에 관한 조례」	2012. 12. 28.
	13	영양군	「영양군 빗물관리에 관한 조례」	2013. 3. 8.
	14	의정부시	「의정부시 빗물관리 조례」	2013. 3. 19.
	15	화성시	「화성시 빗물관리에 관한 조례」	2013. 6. 13.
	16	고양시	「고양시 빗물관리시설 설치에 관한 조례」	2013. 10. 4.
	17	경상북도	「경상북도 빗물 관리에 관한 조례」	2013. 12. 30.
	18	포천시	「포천시 빗물관리에 관한 조례」	2014. 2. 27.
	19	광주광역시 남구	「광주광역시 남구 빗물관리에 관한 조례」	2015. 8. 10.
	20	인천광역시 미추홀구	「인천광역시 미추홀구 빗물관리에 관한 조례」	2016. 11. 14.
	21	인천광역시 부평구	「인천광역시부평구 빗물관리에 관한 조례」	2017. 9. 25.

자료: 법제처 홈페이지

### 3. 레인시티 관련 계획

#### 1) 제2차 물환경관리 기본계획(환경부)

- 수질, 수량관리 및 수생태계 보전을 위한 정부 물환경관리 정책의 최상위 계획
  - ‘제2차 물환경관리 기본계획’은 2016~2025년까지 10년 동안 하천·호소 연안 수계 등 우리나라 전 국토에서 펼쳐지는 물환경관리 정책의 목표와 방향을 담은 최상위 계획
  - ‘방방곡곡 건강한 물이 있어 모두가 행복한 세상’을 비전으로 삼고 ‘건강한 물순환 체계 확립’, ‘안전한 물환경 기반 조성’ 등의 핵심전략 수립(<그림 2-4> 참고)
- 하천의 발원지에서 하구 연안까지, 본류부터 지류·지천까지 물리·생물·화학적으로 맑고 깨끗한 물을 확보하여 자연과 상생하는 건강한 물순환을 달성하는 것이 기본전제
- 물환경이 제공하는 혜택과 풍요를 현세대의 인간과 생물은 물론 앞으로 태어날 미래세대까지 모두가 누릴 수 있도록 하여 행복한 세상을 실현하는 것을 지향

<그림 2-4> 환경부 제2차 물환경관리 기본계획의 체계



자료: 환경부(2016b), 제2차 물환경관리 기본계획

- 건강한 물순환 체계 확립을 위한 저영향개발의 확대 필요성 명시
  - 인간 활동에 의해 대규모의 건물과 도로 등이 건설된 도시는 빗물이 땅속으로 스며드는

- 자연스러운 물의 흐름을 바꾸고 오염부하량을 증가시켜 지표수에 부정적 영향 초래
- 건강한 물순환 체계를 확립하기 위해서는 전 국토의 물 저류·함양 기능 향상이 필요하며, 이를 위해서 도시지역에 저영향개발 및 그린인프라의 적용 확대 필요
  - 제2차 물환경관리 기본계획에서는 저영향개발기법 등의 적용 확대를 위해 현행 하수도 요금체계에 우수(빗물) 요금제를 도입하는 등 경제적 유인책 도입 검토
  - 신규도시 설계 및 계획 수립 시 저영향개발 기법을 적용하여 신도시 조성 모범사례를 창출하고자 하였으며, 저류 기능을 높이기 위해 도심 우수저류조 설치를 확대하고 녹지공간을 창출하여 생태학습 공간으로 활용하고자 함
    - 행복도시건설청과 환경부는 세종시 5·6 생활권에 저영향개발기법을 도입해 친환경 생태도시를 조성했으며, 관련 안내서(가이드라인)를 제작·배포(이지영, 2017)
    - 국토교통부와 환경부는 2019년 ‘친환경 공공택지 조성을 위한 관계기관 업무협약(MOU)’을 체결하고 남양 왕숙과 고양 창릉 등 3기 신도시 건설계획에 따른 신규 공공택지에 저영향개발기법을 적용해 친환경 도시공간 조성을 추진(봉승권, 2019)

## 2) 통합 물 관리 기본계획(경기도)

- 맑은 물의 확보와 공급, 생태계 유지 등 지속가능한 물 순환을 위한 기본계획
  - 경기도는 경기도민이 안전하고 건강한 물을 향유할 수 있도록 맑은 물의 확보와 공급, 생태계 유지 등 지속가능한 물 순환을 위한 기본계획 및 추진계획 수립
  - 계획의 비전을 ‘물 순환을 증시하고 기후변화에 강한 경기도’로 정하고 핵심가치로 ‘안심 물 공급’, ‘상생 물 관리’, ‘도약 물 산업’의 세 가지 선정(〈그림 2-5〉 참고)
  - 정책목표를 달성하기 위한 구체적 방안으로 우수율 제고, 중수도 외에 물재이용, 빗물 이용시설 등 그린인프라 관련 사업을 추진

〈그림 2-5〉 경기도 통합 물 관리 기본계획의 체계



자료: 경기도청(2015), 통합 물 관리 기본계획

- 경기도 통합 물 관리 사업 중 하나로 저영향개발 기법 적용을 통한 유역 물관리 제시
  - 가뭄으로 인한 물 부족 문제에 적절하게 대응하기 위해서는 빗물이용시설을 통한 수자원 확보가 필요하나, 경기도는 빗물이용시설 활용이 미비한 실정
    - 해당 계획에서는 연간 강수량의 다수가 일부 계절에 집중되어 있으며, 수돗물 요금이 낮기 때문에 빗물이용시설 활용이 저조하다고 지적
  - 경기도에서는 이러한 상황을 개선하고 저영향개발을 적용하기 위해 단기대책으로 기존 시설에 대한 이용실태 파악 및 모니터링 강화를 위한 연구용역을 추진하고자 함
  - 중장기대책으로는 정책추진을 위한 주민참여의 중요성을 고려하여, 주민 인식 개선을 위해 기술력 향상 및 교육 홍보 프로그램, NGO 연계 등 홍보 강화 예정
  - 효율이 검증된 저영향개발 기술개발과 함께 설계·시공 지침 및 매뉴얼 제작을 위한 연구용역을 추진하여 현장에서 적용될 수 있는 기반 마련
    - 택지개발 등 경기도 내 개발사업에 저영향개발 기법을 적용한 시범사업 추진

### 3) 건강한 물순환 도시 조성 종합계획(서울특별시)

- 도시환경문제를 회복하고 건강한 물순환 도시를 조성하기 위해 종합계획 수립
  - 서울특별시는 급격한 도시화로 불투수율이 크게 증감함에 따라 빗물의 표면유출이 급증하였고 이로 인해 열섬현상, 건천화, 지하수위 저하 등 도시문제 발생
    - 1962년 서울특별시 불투수율은 7.8%였으나 2010년 47.7%로 약 6배가 증가하였으며, 이로 인한 표면유출은 10.6%에서 51.9%로 약 5배 증가
  - 자연 물순환 복원, 버려지는 물의 재이용 활성화를 목표로 ‘도로 투수포장 확대’, ‘빗물 침투형 하수도 정비’ 등 5대 분야 42개 과제 수립(〈표 2-4〉 참고)

〈표 2-4〉 서울특별시 물순환 회복 실천계획(일부 발췌)

분야	과제	세부내용
공공에서 선도하는 물순환 회복	도로 투수포장 확대	노후보도 정비, 신규 포장시 투수포장 우수 적용
	그린 빗물 인프라 도입	식생수로, 여과시설, 침투화분, 인공습지 조성
	빗물 저류조 활용한 친수시설 확대	친수시설 조성시 빗물활용유도
재개발·재건축 등 각종 개발사업 적용 유도	물순환 회복 지구단위계획 수립대안 마련	물순환 회복 위한 ‘저영향개발 지구단위계획’ 신규 마련
	불투수 자재·공법 규제 강화	불투수 최소화 T/F 구성운영, 불투수 최소화 명문화
	청계천유역 환경치수 시범적용	시범사업 모니터링 및 시설도입 확대
민간보급 확대를 위한 지원방안 마련	소형 빗물이용시설 지원확대	민간 보조사업 수요 대응을 위해, 빗물이용시설 보급 확대
	상하수도 요금 개편 검토 및 추진	장기적으로, ‘빗물요금제’ 도입 등 발생원 관리대안 검토
	민간 소형 빗물이용시설 관리지원	보조금 지원 시설 사후 유지보수 지원
연구개발·제도정비를 튼튼한 정책초석 마련	물순환 시설 효과검증 및 편익비용 분석 연구	현장 모니터링 등 효과검증과 환경적 효과를 고려한 편익 검토
	자치구내 물순환 총괄업무 체계 유도	총괄부서 지정, ‘자치구 물순환 관리계획’ 수립 유도
시민과 함께 만드는 건강한 물순환 도시	빗물관리 시범마을 조성	마을만들기와 연계한 빗물마을 조성, 도봉동 새동네 등 연차별 확대
	물순환 백서 발간	물순환 회복 정책의 주요성과와 기록을 정리, 참고자료로 활용

자료: 서울특별시(2013), 건강한 물순환 도시 조성 종합계획

- 물순환 회복에 대한 종합적이고 체계적인 정책수행을 위해 연속된 계획 수립
  - 서울시는 2014년 「서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본조례」 제정 이후 물순환 회복 및 저영향개발에 대한 종합적이고 체계적인 정책수행을 위하여 2013년 ‘건강한 물순환도시 조성 종합계획’, 2013년 ‘서울특별시 빗물관리 기본계획’ 수립
  - 2018년 9월부터 2020년 8월까지 앞선 계획을 운영하는 과정에서 발견한 문제점을 보완하기 위해 ‘물순환회복 기본계획’ 수립 중
  - 서울시는 도시화와 기후변화로 발생하는 다양한 도시환경문제를 인식하고 이에 대응하기 위해 관련 조례를 재정했으며 이후 연속된 계획을 수립하는 등 물순환 회복을 위해 정책적 노력 실시

#### 4) 물순환 선도도시 기본계획 수립(울산광역시)

- 울산광역시, 환경부 물순환 선도도시 사업의 일환으로 ‘물순환 기본계획’ 수립
  - 환경부에서 물순환 개선 시범사업으로 실시한 ‘물순환 선도도시 사업’의 대상지인 울산광역시는 사업의 일환으로 ‘물순환 기본계획’ 수립
  - 울산광역시는 1970년대 산업단지 조성 이후 급격히 진행된 도시화 및 인구 고밀화로 불투수면적과 오염물질 배출부하량이 증가하고 있어 하천변 저지대의 침수피해와 하천과 지하수의 수질악화가 우려되는 실정
  - 울산시는 기본계획을 통해 1. 울산시의 물순환 환경 조사·분석, 2. 물순환 목표량 산정, 3. 구체적인 추진계획 수립을 실시하여 울산시 물환경 건전성을 회복하고자 함
- 울산시 저영향개발기법 도입 기대효과 분석을 통해 정책실현을 위한 실증적 근거 마련
  - 울산광역시에서는 ‘물순환 선도도시 기본계획’을 수립하는 과정에서 울산시 전체를 대상으로 한 저영향개발 시설도입의 기대효과 분석
  - 홍수조절효과, 강우유출량 저감효과, 열섬저감 효과 등 선행 연구에서 제시한 저영향 개발의 기능을 수치로 확인하여 정책의 효과, 필요성, 중요성을 증명할 근거 마련
    - 강우유출량, 비점오염물질 저감효과는 국내 연구에서 실제 사례 분석 및 모의실험을 통해 증명하였으나, 온실가스 배출저감 또는 열섬저감 효과를 산출한 사례는 많지 않음
    - 울산광역시에서는 국, 내외 연구사례 등의 결과를 이용하여 저영향개발 시설도입 시 나타날 수 있는 온실가스 배출저감량, 열섬저감 효과 등을 산출(〈표 2-6〉 참고)
  - 충청남도, 제주특별자치도, 대전광역시 등도 ‘물순환’, ‘빗물’, ‘저영향개발’ 관련 계획을 수립하는 등 범 레인시티 관련 정책에 대한 국내 자치단체의 관심이 높은 상황에서

울산의 연구는 타 지자체의 정책 노력을 지지할 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대

〈표 2-5〉 울산광역시 저영향개발 시설도입의 효과 분석(온실가스 배출저감)

구분	시나리오	식생형 LID 시설면적(㎡)	CO <sub>2</sub> 저감량(톤/년)
학산동	목표저감량달성안	8,147	9.67
	최적관리방안	3,002	3.57
온산읍	목표저감량달성안	320,679	381.10
	최적관리방안	12,830	15.24

자료: 울산발전연구원(2018), 울산 물순환 선도도시 기본계획 수립

〈표 2-6〉 울산광역시 저영향개발 시설도입의 효과 분석(열섬저감 효과)

구분	시나리오	식생형 LID 시설면적(㎡)	온도저감(℃)
학산동	목표저감량달성안	16,294	0.19
	최적관리방안	12,000	0.14
온산읍	목표저감량달성안	346,227	1.45
	최적관리방안	37,083	0.16

자료: 울산발전연구원(2018), 울산 물순환 선도도시 기본계획 수립

### 제3절 국내·외 사례 분석

- 도시의 물순환 개선을 위해 ‘그린인프라’, ‘저영향개발’ 등을 적용한 국내·외 사례 분석
  - 그린인프라를 중심으로 한 물순환 회복의 중요성, 정책 추진 배경 및 방안 등을 확인하기 위해 서울시, 대전광역시, 호주 멜버른 등 국내·외 적용 사례 분석
  - 국내에서는 환경부 정책으로 물순환 관련 사업을 추진한 지자체가 대부분이기 때문에 ‘빗물유출제로화 시범사업’, ‘물순환 선도도시’ 사업의 대상지를 중심으로 분석 실시
  - 국외 사례는 물순환을 도시 관리 및 개발의 기조로 삼아 관련 계획이나 정책을 적극적으로 추진 중인 도시들을 대상으로 제시
  
- 수원시 레인시티 정책의 현재와 향후의 추진 방향 점검
  - 국내·외 다수의 국가 및 지역에서 그린인프라를 활용 중에 있으며, 좁은 범위에서는 빗물관리 방안으로, 더 넓은 범위에서는 도시 전체를 아우르는 정책 기조로 활용
    - 우수관리 시스템의 문제를 인식하고 도시환경문제를 해결하기 위한 방안이자, 사회적, 경제적 측면까지 아울러 도시 전체를 이끌어나가는 주요 뼈대로서 활용하고 있음
  - 국내·외 사례를 통해 수원시 레인시티 정책의 현재를 점검하고, 미래지향적 관점에서 레인시티 정책을 어떻게 접근해야 하는지 방향성을 도출하고자 함

〈표 2-7〉 국내·외 사례분석 대상

구분		주제	내용
국내	청주시	• 빗물유출제로화 시범사업	• 대규모 지역을 대상으로 그린인프라의 비점오염물질 및 강우유출 저감 등 효과 확인
	대전광역시	• 물순환 선도도시	• 시민이 함께하는 물순환 도시 조성을 위해 그린인프라 조성사업 및 홍보 병행
	광주광역시	• 물순환 선도도시	• 시민사회, 행정가, 전문가가 합심하여 건전한 물순환 환경 조성을 추진
	서울특별시	• 건강한 물순환 도시	• 물순환 정책의 선도적인 추진을 통해 국내 모범사례로써 방향성 제시
국외	호주 멜버른	• Total Watermark	• 빗물관리뿐 아니라 자연을 아우르는 환경정책을 통해 도시환경의 건정성을 회복하고자 노력
	캐나다 밴쿠버	• Water Sensitive Future	• 미래지향적인 관점에서 빗물관리를 우선시하는 레인시티 계획 추진
	독일 함부르크	• Green Hamburg	• 도시 안에 거대한 녹색 네트워크를 구축하여 자연적인 물순환, 인간의 건강한 삶을 추구

## 1. 청주시, 빗물유출제로화 시범사업

### 1) 추진 배경

- 환경부에서는 비점오염원 관리를 위해 ‘비점오염원 설치 신고제도’ 등 정책 추진
  - 환경부는 유역환경변화로 인한 물환경 영향을 저감하기 위해 ‘수질오염총량관리제도’, ‘비점오염원 설치 신고제도’, ‘비점오염관리지역제도’ 등과 같은 다양한 제도 도입
  - 그러나 비점오염원 관리에 대한 법적 근거가 미약하여 효율적 관리의 어려움이 제기 되면서 2006년에 「물환경보전법」 제53조에 개발사업 및 사업장에 대한 비점오염원 관리를 명시하여 비점오염원 관리에 대한 법적 근거 마련
  
- 시범사업을 통해 저영향개발기법의 현실화 가능성 도출
  - 물환경 변화에 따른 관련 정책의 필요성이 대두되고, 정책 추진을 위한 법적 근거도 마련됐지만 검증되지 않은 비점오염저감시설의 무분별한 도입으로 시설의 효율 저하 및 유지관리의 어려움과 같은 문제 발생
  - 이에 따라 환경부는 ‘4대강 비점오염저감시설 설치 및 모니터링 시범사업(2005~2014)’을 실시하여 비점오염저감시설에 대한 매뉴얼을 마련하고 홍보 추진
  - 시범사업을 통해 효율적인 비점오염저감 및 강우유출저감 능력을 가진 저영향개발 기법의 적용 가능성을 도출하는 계기 마련
  
- 저영향개발의 적용 가능성을 검토하기 위해 시범사업 실시
  - 환경부는 도시지역의 저영향개발 확대를 위해 2014년부터 관공서 중심의 중규모 (1~4ha)지역을 대상으로 ‘그린빗물인프라 조성사업’ 추진
  - 대규모 도시지역 배수분구(38~40ha)의 저영향개발 적용 가능성을 검토하기 위해 2013년부터 ‘빗물유출제로화 시범사업’ 실시
  - 시범사업은 청주시 오창과학산업단지과 전주시 서곡지구를 대상으로 추진했으며, 도시 지역 물순환 구축과 비점오염저감 및 복합적 환경개선 효과 도출
    - 해당 사업의 성과는 대전광역시, 광주광역시, 울산광역시, 김해시, 안동시를 대상으로 2016년부터 추진한 ‘물순환선도도시 사업’에 반영
  - 본 연구에서는 빗물유출제로화 시범사업의 대상지 중 하나인 청주시 오창과학산업 단지를 대상으로 사례분석을 실시하여 저영향개발 적용 현황을 확인

## 2) 개요

- 청주시 오창읍 오창과학산업단지 대상으로 저영향개발의 효과 검증
  - 환경부는 2013~2014년 충청북도 청주시 오창읍 오창과학산업단지를 대상으로 빗물 유출제로화 시범사업을 실시했으며, 2015~2018년 사업 모니터링 실시
  - 식물재배화분, 나무여과상자, 식생체류지 등 저영향개발 요소를 적용했으며, 3개년 동안 효과평가를 실시하여 대규모 지역에 적용된 저영향개발의 효과를 검증
  - 사업을 통해 불투수면에서 발생하는 비점오염물질 및 강우 유출량 저감, 효과적인 유출수 관리를 통한 빗물관리 모범사례 제시, 저영향개발 기술요소가 실규모로 적용된 홍보 및 교육공간 확보, 도시경관 개선을 통한 도시가치 향상을 달성하고자 함

〈그림 2-6〉 ‘빗물유출제로화 시범사업’ 대상지(오창과학산업단지)



자료: 환경부(2019), 빗물유출제로화 시범사업 백서

〈표 2-8〉 시범사업 주요 연혁

구분	내용
2013. 03	• 빗물유출제로화 시범사업 대상지로 청주시 오창과학산업단지 선정
2013. 05 ~ 12	• 기본계획 및 기본설계 용역
2014. 03 ~ 05	• 실시설계 용역
2014. 08 ~ 12	• 시설공사
2015. 08	• 환경부 저영향개발 교육센터 개소
2015. 05 ~ 2016. 03	• 운영관리 및 효과평가 연구(1차년도)
2016. 06 ~ 2017. 03	• 운영관리 및 효과평가 연구(2차년도)
2017. 12 ~ 2018. 09	• 운영관리 및 효과평가 연구(3차년도)

자료: 환경부(2019), 빗물유출제로화 시범사업 백서

### 3) 추진 결과

- 식생체류지, 투수블록 등 기술요소 및 휴식공간, 저영향개발 홍보 시설물 설치
  - 비점오염 및 우수유출 저감 등을 위해 식생체류지, 식물재배화분, 나무여과상자, 침투도랑, 침투통, 침투형 빗물받이, 투수블록 등 7종류의 저영향개발 기술요소 설치<sup>2)</sup>
  - 저영향개발 기술요소에 적용된 수목과 함께 파고라 및 의자 등 휴게시설물을 설치하여 시민이 활용할 수 있는 친환경 휴식공간 조성
  - 정책의 지속가능성을 위해 저영향개발에 대한 시민의 인지도 제고가 중요하며, 이를 위해 홍보용 조형물 및 안내판, 홍보용 동판 등을 설치

〈그림 2-7〉 청주시 오창과학산업단지 저영향개발 기술요소 도입 현황

식물재배화분



나무여과상자



식생체류지



2) 각 기술요소는 일정량 이상의 효과를 보였으며, 청주시 오창읍에 대한 자세한 내용은 제3장 레인시티 효과성 분석에서 확인 가능

침투형 빗물받이



투수블록



침투도랑



침투통



자료: 환경부(2019), 빗물유출제거화 시범사업 백서

## 2. 대전광역시, 물순환 선도도시

### 1) 추진 배경

- 환경부에서 그린인프라 적용 모델 구축을 위해 대전광역시 등을 대상으로 사업 추진
  - 환경부의 비점오염물질 저감 및 그린인프라 설치 노력의 일환으로 대전광역시를 포함해 5개 지자체를 대상으로 2016년부터 ‘물순환 선도도시 사업’ 추진(환경부, 2016a)
    - 환경부에서는 국내 대도시의 도심지역이 높은 불투수면적율로 인해 홍수와 수질 악화, 물순환 왜곡문제가 제기되자 저영향개발기법 도입 모델 구축의 필요성 인식
    - 이를 위해 2016년 국내 인구 10만 명 이상의 대도시 74곳을 대상으로 물순환 선도도시 사업을 공모하였고, 대전광역시, 광주광역시, 울산광역시, 김해시, 안동시 선정
    - 물순환 선도도시로 선정된 지자체는 국비 및 기술검토를 지원받았으며, 관련 조례 및 기본계획 수립, 물순환 취약지역에 대한 시범사업을 추진
  
- 대전시는 물순환 체계 왜곡에 따른 환경문제의 해결방안으로 저영향개발 기법 주목
  - 도시화에 따른 불투수면 증가로 도시의 물순환 체계가 왜곡됨에 따라 대전광역시 내 수질·수생태계 악화, 하천의 건천화, 도시 유역 홍수 등 물환경 관련 문제 발생
  - 이에 따라 자연 상태의 물순환 회복 및 관리를 위해 물순환 선도도시 사업에 참여했으며, 사업의 일환으로 ‘대전광역시 물순환 개선 조례’를 수립하고 물순환 선도도시 운영에 따른 수환경 개선 효과를 연구(이재근 외, 2019)
    - 대전광역시는 2009년 ‘대전광역시 빗물관리에 관한 조례’를 제정하고 2010년 ‘대전광역시 빗물관리 기본계획’을 수립하는 등 도시의 건전한 물 환경과 물순환 체계가 회복될 수 있도록 정책적 노력을 기울여왔음

### 2) 개요

- 자연적인 물순환 회복에 이바지하기 위해 관련 조례 제정
  - 조례를 통해 10년 주기로 대전광역시 물순환 기본계획을 수립해야 함을 명시했으며, 비점오염원관리지역 및 자연재해위험개선지구, 풍수해 대비가 필요한 지역 등에는 저영향개발기법을 우선 적용해야 함을 강조
  - 물순환 시설에 관한 기술의 연구·개발 및 보급을 촉진하기 위해 저영향개발의 시범 적용, 효과분석 및 보급 촉진 사업, 물순환에 관한 교육·홍보자료의 발간·보급 등에 지자체에서 비용 또는 기술을 지원할 수 있음을 기술



### 3) 추진 결과

- 저영향개발 기법 적용 확산 사업의 일환으로 캠페인, 현장탐방교육 등 실시
  - 대전광역시 물순환 선도도시 조성을 위해 관련 조례 및 기본계획 수립 등을 완료했으며, <그림 2-9>과 같이 시민인식 개선을 위해 캠페인 및 현장탐방교육 실시
    - 2021년 말 준공 예정인 그린인프라 시범지구 사업으로 대전시 불투수면적률이 74.6%에서 66.1%로 축소되고 연간 빗물유출량도 23만톤 감소할 것으로 기대(문승현, 2020)
  - 캠페인은 시민으로 대상으로 진행됐으며, 비점오염저감 및 물순환 회복 사전협의 제도 안내, 저영향개발 기법 적용 확산 동참 서명운동 등으로 구성
  - 지역 내 초등학생이 저영향개발기법에 대해 이해하고 직접 관찰할 기회를 제공하기 위해 시청에 설치된 저영향개발시설을 대상으로 현장탐방교육 실시
    - 대전시청 뿐 아니라 대전시에 위치한 LH토지주택연구원 내 저영향개발 시범단지에서도 초등학생을 위한 이론교육 및 현장탐방교육 실시

<그림 2-9> 대전광역시 물순환 선도도시 조성사업 추진 현황

시민 대상 캠페인



초등학생을 위한 이론교육 및 현장탐방교육



자료: 한국소비자연맹 홈페이지

### 3. 광주광역시, 물순환 선도도시

#### 1) 추진 배경

- 도시화로 인해 불투수면이 증가하면서 광주광역시에 다양한 환경문제 발생
  - 국내·외 대도시들이 불투수면 증가로 여러 환경문제를 경험하는 것과 같이 광주광역시도 불투수면으로 인한 물순환 왜곡이 야기하는 침투유량 및 홍수량 증가, 유속 증가에 따른 하천변 토양 침식, 생물 서식지 파괴 등의 문제 발생
  - 광주광역시는 20세기 초까지 물의 도시로 광주 읍성 바깥은 대부분 논습지였으나 1970년대 급속한 도시화로 불투수면이 급증(광주광역시지속가능발전협의회, 2016)
  - 특히, 지역 전체가 수질오염총량관리지역으로 지정되었으며, 비점오염원 중 토지계 오염원 발생량이 90.4%를 차지하고 있어 수질 개선을 위한 관리 시급(광주광역시, 2018)
  
- 시민사회, 전문가, 행정의 의기투합하여 물순환 선도도시 추진
  - 광주광역시지속가능발전협의회는 1997년 1차 의제를 시작으로 5년마다 시민실천 의제를 작성하고, 시민·기업·행정 등 지역사회 주체들을 연계해 환경·경제·사회·교육 등 다양한 분야의 실천사업을 추진
  - 2011년 4번째 의제 선정을 위해 자연생태 환경 개선 및 생물다양성 확보에 대해 논의 하던 중 물순환이라는 개념이 처음 논의됐고, 물환경분과의 의제로 ‘빗물 이용으로 맑은 물이 흐르는 물순환 도시 만들기’를 설정(광주광역시지속가능발전협의회, 2016)
  - 2012년부터 수생태 모니터링, 빗물 저류조 확보, 빗물저금통 보급, 수자원 활용 시범 학교, 광주천 투수층 확대 등 물순환 도시 달성을 위해 연차별 사업 추진
  - 2016년에 지난 사업에 대한 평가를 진행하던 중 환경부 물순환 선도도시 추진계획을 접하고 시민사회, 전문가, 행정이 의기투합하여 공모사업 참여
  
- 물순환 선도도시 공모사업에서 광주광역시 1위 선정
  - 물순환 선도도시 공모사업 대상지 선정 중에 광주광역시가 협의회 참여단체, 기관, 기업 등과 함께 다양한 사업과 프로젝트를 진행했으며, 행정의 적극적인 협업 자세, 전문가의 지원을 높이 평가받아 1등으로 선정
  - 광주광역시는 공모사업을 계기로 도심 물순환 체계 개선에 선제적으로 대응하는 환경 생태도시로의 변화를 목표로 하고 있으며, 시범사업지구인 치평동 상무지구 일대의 미관 개선과 기반시설 정비 효과까지 거둘 수 있도록 사업을 추진할 예정

## 2) 개요

- 물순환 회복을 위한 정책의 종합적이고 체계적인 추진을 위해 조례 제정
  - 광주광역시의 객관적이고 체계적인 물순환 회복을 위해 「물순환 기본 조례」를 제정하고 물순환 건전화율, 물순환 분담량을 활용한 물순환 건전화율, 저영향개발 시설의 집수면적과 빗물관리 가능량으로 나타내는 물순환 분담량 등 물순환 목표기준을 설정
  - 광주광역시는 물환경의 오염을 예방하고 물순환을 촉진하기 위한 계획을 수립·시행해야하며, 시민들도 물순환 회복과 관련된 시책에 적극 협력해야 함을 명시
  - 물순환 회복을 위한 실질적 참여를 유도하기 위해 ‘제6장 물순환 회복을 위한 지원’을 통해 물순환 관리시설의 설치비용이나 수도요금 또는 하수도사용료와 같이 재정적 부분에 대한 지원 가능 여부를 명시
  
- 지역의 물순환 기초조사와 목표, 효과분석, 자원조달계획 등을 아우르는 기본계획 수립
  - 광주광역시에서의 물순환은 빗물을 중심으로 공원녹지, 바람길, 문화, 수변, 토양 등의 유기적 네트워크를 형성하는 것을 의미하며, 빗물에 큐레이터로의 역할을 부여
  - 목표를 선정함에 있어서 이상적·추상적 목표가 아니라 지역 현황과 특성을 고려하고 모델링을 통해서 구체적이고 현실적인 물순환 목표 수립
  - 모델링을 통해 물순환 개선효과, 비점오염 저감효과, 침투유출 저감효과를 확인했으며, 시설 유지·관리 및 모니터링 계획, 사업비 산출과 소요비용 산정을 아우르는 자원조달계획을 수립하여 물순환 선도도시 조성을 위한 가이드라인의 역할 수행

## 3) 추진 결과

- 친환경 빗물저금통 설치 사업, 물순환 선도도시 시민포럼 등 추진
  - 광주광역시는 물순환 선도도시 사업의 하나로 ‘2020년도 빗물저금통 설치 지원사업’을 추진하였으며, 빗물 재활용 활성화를 위해 지원사업을 확대할 예정
    - 어린이집, 단독주택, 근린생활시설 등 26곳을 대상으로 빗물저금통을 설치하여 총 33t의 빗물을 저장할 수 있으며, 농업용수, 조경, 청소, 교육용으로 활용 중
  - 시민들에게 ‘물순환 선도도시 조성사업’에 대해 설명하고, 사업에 대한 시민, 환경단체 전문가 등 각계의 의견을 수렴하기 광주시와 환경부 합동으로 포럼 개최
    - 광주광역시의 사업 추진상황을 공유하고 저영향개발 관련 사례를 학습하며, 참여자 전체가 참여하는 토론을 통해 성공적인 사업추진 방안에 대해 논의

〈그림 2-10〉 광주광역시 물순환 선도도시 조성사업 추진 현황

빗물저금통 설치 지원사업



물순환 선도도시 조성 관련 포럼

**2018 도시 물순환 광주포럼**

● **일 시** | 3월 11일(수) 15:30~16:30

● **장 소** | 광주시 김대중컨벤션센터 209호 회의실

● **주 최** | 광주광역시, 광주광역시의회

● **주 관** | 한국환경공단, 한국수자원공사, 광주광역시청

● **참 석 자** | 환경부, 지자체, 학계, 기업, 시민단체 등 100명

● **주요내용** | ① 도시 물순환 정책 추진사항 및 향후방향 (황주영) ② 광주광역시 물순환 기본계획 및 사업 추진 방향 (김민환) ③ 국내 도시환경에 적용가능한 생태적 LED 설계기법 (김주현)

**프로그램**

시 간	주 제	주 최
15:30~15:45	15분 10초 동안의 소개	한국수자원공사
15:45~15:50	인사말씀	광주광역시
15:50~15:55	2018 도시 물순환 정책 방향	한국환경공단
15:55~16:00	도시 물순환 정책 추진사항 및 향후방향	황주영
16:00~16:05	광주광역시 물순환 기본계획 및 사업 추진 방향	김민환
16:05~16:10	국내 도시환경에 적용가능한 생태적 LED 설계기법	김주현
16:10~16:15	질문과 답변 시간	광주광역시
16:15~16:20	마무리	한국수자원공사

천지일보

**물순환 선도도시 조성 시민포럼 (1차)**

물순환 선도도시 조성사업의 성공적인 추진을 위해 시민, 단체, 전문가 등과 민·관이 협력하는 소통의 장을 마련하고자 합니다. 시민 여러분의 많은 관심과 참여를 부탁드립니다.

2018. 3. 28(수) 오후 3시  
김대중컨벤션센터 209호

대상: 광주시민, 전문가, NGO단체 활동가, 관련 정책담당자 등

15:00 ~ 15:05	개회 및 참석자 소개
15:05 ~ 15:10	인사말씀
15:10 ~ 15:35	발제1. 시민이 함께하는 물순환도시 구현 김이형 광주대학교 교수
15:35 ~ 16:00	발제2. 물순환선도도시 시범사례 권익 한국환경공단 과장
16:00 ~ 16:30	발제3. 광주광역시 물순환관리기본계획 추진사항
16:30 ~ 17:00	질문토론(양중동훈) 좌장: 김민환 한국수자원공사 교수

주최: 광주광역시, 한국수자원공사, 한국환경공단, 광주광역시지속가능발전협의회

자료: 광주광역시, 광주광역시 지속가능발전협의회, 연합뉴스 자료사진, 천지일보 자료사진

## 4. 서울시, 건강한 물순환 도시

### 1) 추진 배경

- 지속적인 도시개발로 지역에 따라 최대 90% 이상의 불투수율을 보이는 서울특별시
  - 서울특별시는 인구의 폭발적 증가로 주거·상업용지의 수요가 증가하면서 토지 지목 중 대지면적의 비중이 커지고 상대적으로 산림·임야면적은 감소(김영란·진정규, 2018)
    - 대지면적은 1965년 62.6km<sup>2</sup>에서 2016년 207.9km<sup>2</sup>로 3.5배 증가했지만, 산림·임야면적은 230.49km<sup>2</sup>에서 140.5km<sup>2</sup>로 39%가 감소하여 대지면적이 임야면적보다 높은 비중 차지
    - 대지면적이 증가했다는 것은 지속적인 도시개발로 지표면의 상당수가 빗물이 스며들지 못하는 불투수면으로 변했다는 것을 의미하며, 불투수면은 1962년 서울시 면적의 7.8%였으나, 2015년에는 48.9%로 약 6.3배 증가
      - 특히, 시가지의 평균 불투수율은 86%이며, 90% 이상을 나타내는 지역도 상당수 존재
- 불투수면의 증가와 함께 찾아온 기후변화로 서울시 내 다양한 환경문제 발생
  - 서울시의 연평균강수량은 1970년대부터 꾸준히 증가했으며, 6~8월 여름철에 강수량이 집중되는 여름철 강수량 집중도도 시간이 갈수록 심화하는 것으로 나타남
    - 기온상승으로 폭염일수와 열대야 발생 빈도 및 지속기간이 증가하고 있고 최근 들어 이러한 경향이 더욱 심화하고 있는 실정
  - 서울연구원에서 서울시 물순환 상태 변화를 파악하기 위해 1960년대와 2000년대의 물순환 상태를 비교한 결과, 2000년대의 물순환이 과거에 비해 크게 악화하였으며, 침수피해 발생 위험 증가, 도시의 건조화, 지하수 함양 감소 등의 문제 발생
- 서울시의 물순환 회복을 위해 2000년대 초반부터 관련 정책 추진
  - 서울시는 물순환 회복을 위해 2004년 ‘물순환 기본계획’을 수립하였으며, 2007년 ‘서울시 빗물관리시설 설치 기본계획’, 2013년 ‘서울시 빗물관리 기본계획’, ‘건강한 물순환 도시 조성 종합계획’ 등을 기준으로 물순환 회복을 위한 각종 정책 추진
    - 2012년 「서울특별시 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 조례」를 제정하였으며, 2014년 「서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본조례」를 전부 개정하여 물순환 회복과 저영향개발 정책의 밑바탕 마련
    - 시민·전문가로 구성된 ‘물순환도시 시민거버넌스 민관 T/F’를 구성하고 ‘시민토론회’, ‘물순환 도시포럼’ 등을 개최하여 이해당사자 및 전문가로부터 의견 수렴

## 2) 개요

- ‘건강한 물순환 도시 조성 종합계획’을 중심으로 관련 정책 추진
  - 서울시 ‘건강한 물순환 도시 조성 종합계획’은 물순환회복 정책사업의 추진전략을 포괄적으로 담고 있는 사업계획으로, 물순환 정책의 기준이나 법정계획 성격인 ‘서울시 빗물관리 기본계획’과 상호보완적인 관계
  - 해당 계획은 ‘시민과 함께 만드는 건강한 물순환 도시’ 조성을 목표로 하며, 목표 달성을 위해 <표 2-9>와 같이 다섯 가지의 정책사업 수립

〈표 2-9〉 건강한 물순환 도시 조성계획의 주요 내용

정책구분	주요내용
공공선도형 물순환회복 정책사업	도로 투수포장 확대, 빗물침투형 하수도 정비, 기존 공공건물 물순환시설 확대, 그린 빗물 인프라 도입, 도로 물청소 시 재이용수 활용 확대, 빗물저류조를 활용한 친수시설 확대 등
민간 개발 시 물순환회복 유도 정책사업	재개발·재건축 등 개발 사업 시 빗물분담량 적용, 물순환회복 지구단위계획 수립대안 마련, 물순환 통합관리 시스템 구축, 불투수 자재·공법 규제 강화, 청계천 유역 환경치수 시범적용 등
빗물관리시설의 민간보급 확대 정책사업	소형 빗물이용시설 설치 지원확대 및 관리, 다양한 빗물관리시설 설치지원 보조, 상하수도 요금 개편 검토, 물순환 용자제 검토, 빗물이용 주치의 프로그램 운영, 민간 소형 빗물이용시설 관리지원 등
연구개발·제도정비를 통한 정책초석 마련 정책사업	전문기관 기술협력 MOU 추진, 서울형 물순환 모델 개발, 투수성능 지속성 확보, 물순환 업무 전문성 강화, 자치구내 물순환 총괄 업무체계 유도, 물순환 시설 효과검증 및 편익비용 분석 연구, 인재개발원 교육과정 신설 등
시민참여 확대 정책	빗물관리 시범마을 조성, 우수 성공사례 발굴 전파, 물순환 국제 심포지엄 및 시민토론회 개최 추진, 물순환 시민위원회 구성 및 운영, 물순환 백서 발간, 물순환 투어 프로그램 개발, 공모전 및 EXPO 개최 추진 등

## 3) 추진 결과

- 민·관·학이 함께하는 정책으로 서울시의 물순환 건전성 회복 노력
  - 서울시는 ‘건강한 물순환 도시 조성 종합계획’ 및 관련 조례 등을 바탕으로 지역의 물순환 회복을 위해 각종 노력을 다하고 있으며, 학계와 시민이 함께하는 정책 추진을 통해 기술의 발전 및 시민의 참여 유도
  - 물순환 도시 조성에 대한 시민의 공감대 확산을 위해 ‘2014년 서울 물순환 EXPO’를 개최하여 관련 사업과 기술발전을 직접 체험할 기회를 마련했으며, 2016년부터는 물순환과 빗물을 주제로 하는 ‘물순환 시민문화제’로 변경하여 여름철 대표 행사로 운영

- 서울시 조경과에서는 그린인프라 중 하나인 옥상녹화·텃밭 조성사업을 추진하고 있으며, 2019년까지 서울시 전역에 366개소의 옥상녹화·텃밭 조성
  - 2019년에는 마포구민체육센터, 상암중학교, 영등포소방서, 서울교통공사 등 15개소에 옥상녹화·텃밭을 조성했으며, 서울시에서 13억 7천만 원 지원
- 서울연구에서는 ‘빗물관리시설의 운영과 유지관리 방안’, ‘에너지 절감을 위한 옥상녹화의 활성화 방안과 모니터링’, ‘그린인프라의 미세먼지 저감효과 분석과 확대 방안’ 등의 연구를 통해 빗물 활용의 중요성을 강조하고 구체적인 적용 방안을 마련

〈그림 2-11〉 서울특별시 물순환 관련 정책 추진현황

서울시 물순환 시민문화제



2019년 옥상녹화·텃밭 조성사업 추진결과



자료: 서울 물순환 시민문화제 홈페이지

## 5. 호주 멜버른, Total Watermark

### 1) 추진 배경

- 멜버른은 장기간의 가뭄을 경험하면서 자연적인 물순환으로의 회복 필요성을 절감
  - 2000년대에 들어서 멜버른에 13년 동안 이어진 장기간의 가뭄을 경험했고, 물 안보의 심각한 위험은 도시 내의 수자원 활용방식의 근본적 변화를 유도
  - 정부 및 지자체, 시민과 기업들은 수자원의 효율적 관리가 필요하다는 것을 인식했으며, 각자의 영역에서 첨단 기술의 빗물 수집과 재활용 기법을 적용하기 시작
  - 다양한 노력들로 멜버른은 물 순환 측면에서 더욱 건강한 도시가 되었지만 기후 변화와 집중호우의 증가 등으로 인해 지속적인 물순환 관리가 필요한 실정
- 새로운 시대에 맞는 물순환 정책을 위해 ‘통합 물관리 계획’ 수립
  - 멜버른에서는 기후변화에 적응하고 생물다양성을 높이며, 물 공급 시스템의 지속가능성 향상에 기여하기 위해 WSUD를 포함해 물순환 회복을 위한 다양한 프로젝트 추진
    - Water Sensitive Urban Design(WSUD)은 물 순환이 자연스럽게 작동하는 도시 환경 조성을 목표로 물순환 관리를 도시 계획 및 설계에 통합하는 접근 방식이며, 호주에서 주로 사용되는 용어로 영국의 SUDS, 미국의 LID와 동일한 개념
  - ‘통합 물관리 계획’을 수립하여 물소비, 빗물, 폐수 및 지하수를 포함해 물순환의 모든 구성 요소에 대한 통합된 물 관리 방향 설정(City of Melbourne, 2014)
    - 멜버른의 통합 물관리 계획은 주기적으로 수립되고 있으며, 수립 당시의 상황과 여건에 따라 물순환 목표와 정책을 수립하여 실현가능성과 실효성을 높이고 있음

### 2) 개요

- 가뭄 극복을 위해 물 소비 저감에 초점을 맞춘 2009년 통합 물 관리 계획
  - 2009년 멜버른 통합 물 관리 계획은 10년 넘게 지속된 가뭄에 시달리는 동안 개발됐기 때문에 전반적인 물 소비량과 주 수도관에 대한 의존도 저감에 초점을 둬
  - 수자원과 직접 관련되어 있지 않은 기관에서도 물 보존에 초점을 맞춰 정책을 수행했으며, 공공건물에 빗물 재활용 설비를 설치하고 가정집에도 빗물탱크를 설치하거나 물 사용에 효율적인 가전제품을 사는 등 여러 방면에서 노력을 다함
  - 멜버른시는 미라롱 마르 공원, 알렉산드라 공원 등에 대규모 그린인프라를 설치하였으며, 도시 경관 조성에 WSUD를 적용

- 물 절약을 넘어 인간과 자연 모두를 통합적인 관점에서 바라보는 2014년 계획
  - 물 절약에 초점을 맞췄던 2009년 계획과 달리, 2014년 통합 물 관리 계획은 ‘기후 변화 적응’, ‘살기 좋은 도시’, ‘환경’, ‘물 사용’을 핵심 요소로 설정
  - ‘기후변화’는 극한 기후에 적응하는 복원력을 갖춘 안전한 도시 조성과의 관련이 있으며, 기후변화를 고려한 도시계획 수립, 기후변화와 홍수에 대한 인식 수준 향상 추구
  - ‘살기 좋은 도시’는 멜버른에서 거주하고, 일하고, 방문하고, 노는 모든 사람의 건강, 행복, 즐거움을 지원하는 물순환 조성을 목표로 하며, 이를 달성하기 위해 지역의 열린 공간 확충과 물과 관련된 공공 활동의 다양화를 지원
  - ‘환경’은 생물다양성, 건강하고 깨끗한 수로 등과 관련 있으며, 도시 숲의 조성, 물순환 시설의 관리를 통해 빗물유출 감소 및 오염물질저감, 침투량 증가 추구
  - ‘물 사용’은 용수 공급 시스템의 지속가능성 향상을 위한 요소로, 궁극적으로 멜버른 전체의 물 사용량 중 20%를 대체 수자원을 통해 공급받고자 함

### 3) 추진 결과

- 성공적인 정책 추진으로 멜버른내 물순환 건전성 향상
  - 통합 계획의 성공적인 수행으로 멜버른의 주거용 물 소비량은 2000년 이후 58% 감소했으며, 산업 영역에서 48%, 멜버른 시 자체적인 물 사용량은 26% 감소
    - 주민들은 물 사용에 효율적인 설비와 가전제품을 구입하고, 가뭄에 견디기 쉬운 식물을 심었으며 빗물 탱크를 설치하여 물 사용량을 줄임
    - 비라롱 마르 공원(Birrarung Marr)은 매년 약 4,500만ℓ의 관리용수를 소모했으나, 그린인프라 적용 후 70%를 저감했으며 인근 강에서 유입되는 질소, 인 등 오염물질 감소
  - 장기적이고 지속적인 물순환 정책 추진을 통해 <그림 2-12>와 같이 멜버른 전역에 빗물 수확 시스템을 구축하여 대체 수자원 확보
    - 멜버른 서쪽에 있는 250m의 주거용 거리인 이데스 플레이스(Eades Place)의 양쪽에 설치된 주차장 포장재를 투수성으로 변경한 결과, 매년 최대 79만ℓ의 빗물을 포집하고 있으며 빗물 오염도 및 침투유출량을 약 90% 저감
    - 2006년 완공된 의회 직원용 건물(Council House2)의 지붕 면적 전체를 빗물 포집 용으로 활용하고 있으며, 지하에는 빗물 보관용 저장 탱크 설치
    - 빗물 외에도 화장실과 샤워기, 세면기에서 사용된 물을 재활용할 수 있는 시스템을 마련하여 빗물과 함께 대체 수자원으로 활용

〈그림 2-12〉 멜버른 물순환 정책 운영 현황

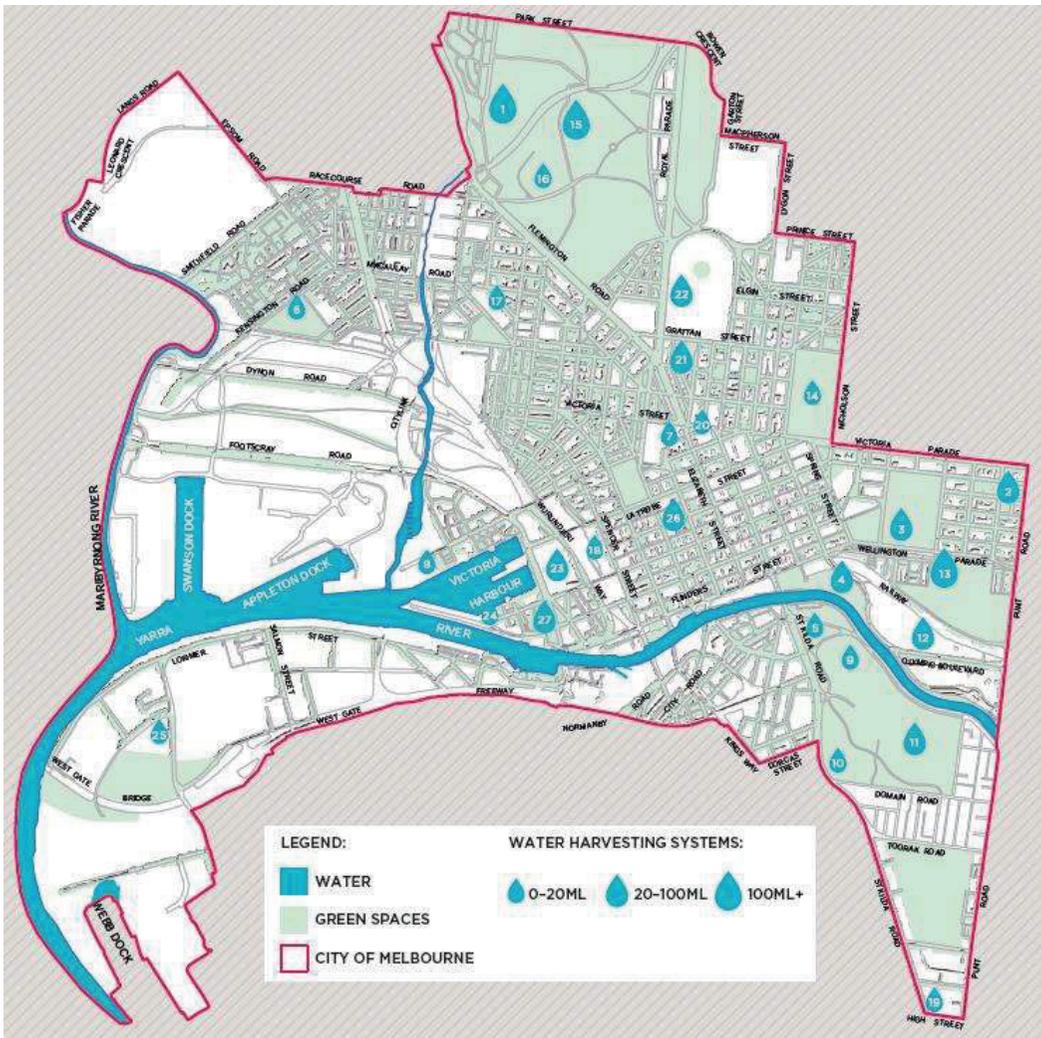
비라릉 마르 공원



이데스 플레이스



멜버른의 빗물 수확 시스템 현황



자료: City of Melbourne(2014), Total Watermark-City as a catchment

## 6. 캐나다 밴쿠버, Water Sensitive Future

### 1) 추진 배경

- 기후가 변화하고 도시가 성장하면서 전통적인 물 관리 방식의 개선 필요
  - 밴쿠버는 전통적인 물 관리 방식인 중앙집중식 시스템에 의해 물을 공급하고 공중 건강을 보호하며 범람의 위기를 완화해왔으나 기후의 변화, 건강한 생태계에 대한 지역 사회의 기대 상승 등 물 관리 환경이 변화하였음
  - 도시가 지속적으로 성장하면서 기존의 상하수도 인프라에 더 많은 압력이 가해지고, 시설의 상당수가 노후화되고 사용수명이 끝나가는 실정
  - 이에 따라 밴쿠버 내에서 빗물을 최대한 배제하는 전통적인 물 관리 방식에서 빗물을 모으고 활용하는 새로운 방식으로의 패러다임 변화 발생
  
- 밴쿠버 물 관리의 비전으로 물에 민감한 미래(Water Sensitive Future) 수립
  - 밴쿠버는 새로운 패러다임에 맞춰 도시 비전으로 ‘물에 민감한 미래’를 설정하였으며, 도시 전역에서 빗물을 모으고 재활용하며 녹지공간을 형성하여 인간과 자연이 공존할 수 있는 환경을 구축하고자 함
    - 공공 공간과 공원, 주택과 아파트의 옥상 등 도시 곳곳에서 빗물을 모으고 도시 하천망을 새롭게 조성하는 등 물이 도시 안에서 자연스럽게 순환할 수 있는 환경 조성
    - 도시화로 인해 사라진 열대우림과 수생태계의 회복을 통해 생물다양성을 확보하고, 자연적인 물 순환 구조 속에서 인간과 자연을 연결하고자 함
  
- 도시의 자연적인 물순환 회복을 위해 그린빗물인프라 도입 추진
  - ‘물에 민감한’ 도시 조성을 위한 필수 방안으로 그린빗물인프라를 주목했으며, 이를 통해 물순환을 회복할 뿐 아니라 녹지공간을 제공함으로써 시민의 웰빙과 신체건강 증진, 스트레스 감소, 사회 응집력 증대기회 제공
    - 밴쿠버는 그린빗물인프라를 통해 자연수계를 모방하여, 비가 내린 자리에서 빗물을 포획하고, 오염물질을 제거하여 지하수를 충전하거나 대기 중으로 증발하는 자연적인 물순환 과정을 형성하고자 했음
    - 그린빗물인프라가 물 관리 뿐 아니라 다양한 사회적 이익을 제공하므로 비용 측면에서 경제적이라고 강조했으며, 도시화가 자연생태계와 도시생태계에 미치는 부정적 영향을 절감하기 위해 시급한 적용이 필요하다고 설명

## 2) 개요

- 물에 민감한 미래 조성을 위해 2019년 밴쿠버 레인시티 전략 수립
  - 밴쿠버는 빗물 관리 방안의 패러다임을 그린인프라 중심의 자연적인 물순환 회복으로 전환하면서 다양한 프로젝트를 수행했으며, 그간의 노력을 종합하고 더 나은 미래를 계획하기 위해 2019년 밴쿠버 레인시티 전략 수립
  - 해당 계획은 빗물이 지역사회와 생태계를 위한 소중한 자원이라는 관점을 유지하면서, 수질(water quality), 회복력(resilience), 거주 적합성(livability)을 목표로 설정 - 측정 가능한 하위 목표로는 1. 물과 공기의 오염물질 제거, 2. 불투수면적에 대한 관리 강화, 3. 하수관로에 유입되는 빗물양 절감, 4. 빗물 수확 및 재사용, 5. 도시 열섬현상 완화, 6. 총 녹지면적 확대가 있음
  - 물순환을 도시의 한 영역으로 바라보는 것이 아니라, 도시의 기반시설 계획, 토지이용 계획 및 도시 설계를 물순환 관리 방안으로 통합하여 총체적인 관점에서 접근
  - 또한 공공영역에서뿐 아니라 교육, 역량강화, 파트너십에 투자하여 지역사회, 산업계, 학계, 비영리 부문 등에서도 적극적으로 참여할 기회 마련

〈그림 2-13〉 밴쿠버 레인시티 전략의 목표



자료: City of Vancouver(2019a), Rain City Strategy

### 3) 추진 결과

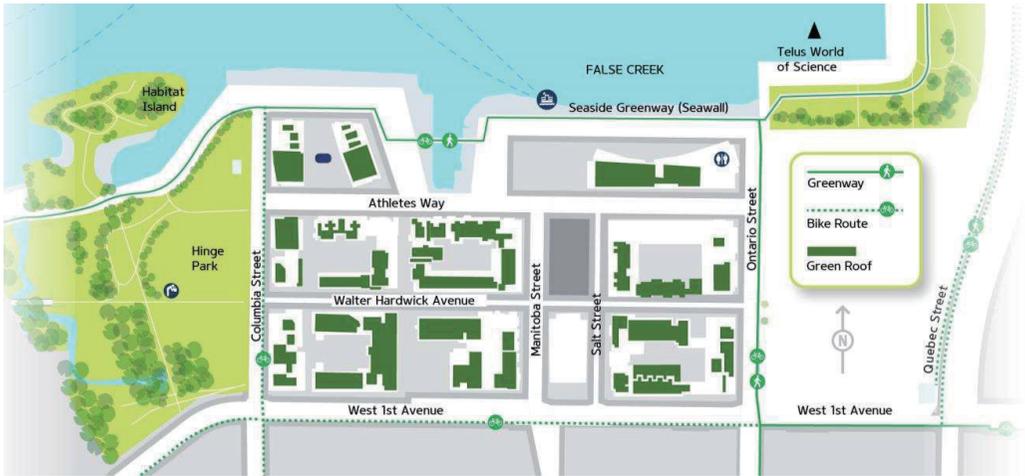
- 도시 곳곳에 그린인프라를 적용하여 물에 민감한 레인시티 구축
  - 밴쿠버시는 올림픽 선수촌, 63번가 유콘거리 등 도시 곳곳에 그린인프라를 적용하여 빗물유출을 방지하고 오염물질을 저감하며, 시민들을 위한 휴식공간 마련
  - 2010년 밴쿠버 동계 올림픽을 위해 선수촌을 조성하면서 선수촌 전역에 옥상녹화, 투수성 포장, 식생도랑 등 그린인프라와 에너지 효율화 시스템을 적용
    - 선수촌 내 크릭사이드(Creekside) 커뮤니티 센터는 운동, 회의, 레스토랑, 탁아소 등을 포함한 복합시설로 옥상녹화를 통해 빗물을 모아 화장실 및 관개용수로 활용하여 수돗물 소비를 30%까지 절감
    - 그 외에도 선수촌 내 다수의 건물에 옥상녹화를 적용하여 빗물의 수집·재활용, 건물 단열, 도시열섬효과 완화 등의 효과를 얻음
  - 밴쿠버 남쪽 마폴지역의 63번가 유콘거리 프로젝트는 마폴 공동체 계획 과정에서 처음 구체화되었는데, 오래된 마을의 개울을 회복시키고 자연적인 물순환이 일어날 수 있도록 102㎡ 규모의 그린인프라 적용
    - 이를 통해 연간 평균 강우량의 약 90%를 포집하고 오염물질을 저감하고 있으며, 벤치, 식수대 등 공동체를 위한 휴식공간 마련

〈그림 2-14〉 밴쿠버 물순환 정책 운영 현황

밴쿠버 올림픽 선수촌 그린인프라 적용



### 밴쿠버 올림픽 선수촌 옥상녹화 현황



### 63번가 유곤거리 프로젝트



자료: City of Vancouver(2019b), Rainwater Management in Olympic Village, City of Vancouver 홈페이지

## 7. 독일 함부르크, Green Hamburg

### 1) 추진배경

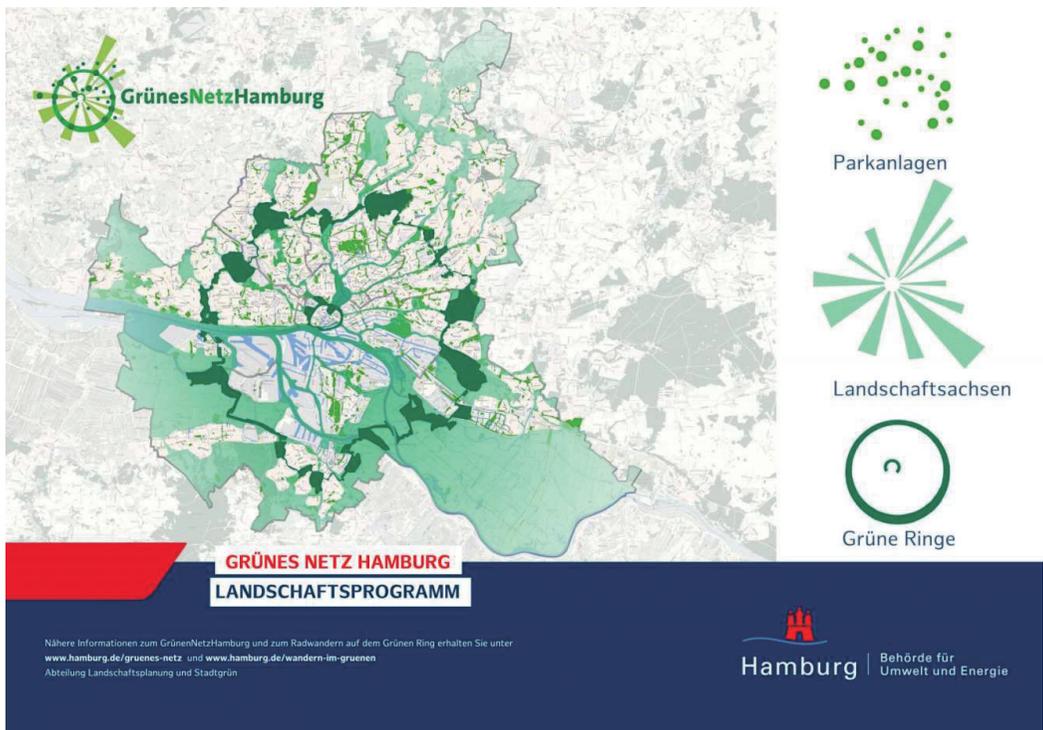
- 1980년대부터 물순환 회복을 위한 정책을 추진하고 있는 함부르크
  - 독일은 자연적인 물순환 회복을 통한 빗물 관리 분야의 선도적 국가이며, 함부르크에서는 1980년대부터 지역의 정책 결정 과정에서 빗물 관리를 우선시
  - 1990년대에 폐수 처리 및 물 보호를 위한 계획을 수립했으며, 배수로로 유출되는 빗물을 줄이기 위해 별도의 하수 시스템을 건설하고 빗물 유출 방지 및 유지를 위한 분산식 빗물관리 정책을 추진
  - 최근 기후 및 강우패턴의 변화로 홍수 위험이 증가하고 배수 시스템에 과부하가 발생하자 보다 과학적으로 빗물을 처리하고자 전문기관과 관련 연구를 추진하는 등 자연적인 물순환 달성을 위해 끊임없이 노력
- 적극적이고 효율적인 물 순환 정책 추진을 통해 환경 변화에 효과적으로 대처
  - 함부르크 도시개발환경부는 옥상녹화 지원 사업에 약 40억을 할당하는 등 적극적인 정책 추진으로 지역 내 옥상녹화 확장을 추진하고 있으며, 동시에 정책의 효율성을 높이기 위해 기존 공간과 그린인프라를 통합하고 있음
  - 그린인프라 요소 중 하나인 옥상녹화는 기존의 옥상공간을 그린인프라로 활용한 공간 통합의 사례라고 할 수 있는데, 함부르크는 기존의 놀이 및 여가 공간에 빗물 침투 및 저류기능을 추가하여 공간이 부족한 곳에서도 물순환을 가능케 함
    - 도시 광장이나 놀이터, 운동장을 일시적인 빗물 저장공간으로 활용하는 등 공간을 다기능화를 통해 정책의 효율성을 극대화
  - 이밖에도 그린 네트워크 조성, 21세기의 정원도시 전략 등 그린인프라와 관련된 수많은 정책을 추진하여 환경 변화에 효과적으로 대처하고 있음

### 2) 개요

- 도시 내 100만㎡의 옥상녹화 조성을 목표로 하는 '함부르크 옥상녹화 전략'
  - 함부르크시는 기후 변화가 야기하는 도전으로부터 지역을 보다 친환경적으로 조성하기 위해 독일에서 최초로 포괄적인 친환경 옥상녹화 전략을 추진
    - 녹지공간을 통한 도시공간의 질을 향상하고 시민을 위한 여가 공간을 마련하는 동시에 빗물을 저장하고 생물 다양성을 증대하기 위해 옥상 녹화에 주목

- 2014년 시작한 프로젝트 당시, 함부르크시 내에는 80만㎡ 규모의 옥상녹화가 완료된 상태였으며 향후 10년간 지역 내에 옥상녹화를 100㎡ 추가하는 것을 목표로 함
  - 목표 달성을 위해 공공건물의 옥상녹화, 건물 소유주에 대한 지원금 제공, 관련 세금 면제 등의 전략을 추진했으며, 2018년까지 118건에 대한 지원 실시
- 빗물을 흡수하고 홍수를 방지할 녹색 네트워크(green network) 조성
- 함부르크는 도시 전역의 공원과 숲, 강과 운하 등을 통합한 녹색 네트워크를 조성하여 빗물을 흡수하고 홍수를 방지하며, 기후변화에 대한 도시의 회복력을 향상시키고자 함
    - 2013년부터 추진 중인 해당 프로젝트는 독일 정부와 함부르크 지방 정부에서 확보한 56억 원의 예산이 책정되어 있으며, 녹지공간 뿐 아니라 황무지까지 포괄하여 도시의 생명력을 강화할 예정
  - 네트워크를 통해 보행자와 자전거 이용자가 보다 친환경적으로 살아갈 수 있는 환경을 조성하고, 자전거로의 통근을 촉진하여 자동차 사용을 감소시키고 동물의 안전한 이동을 보장하는 등 '녹색 대도시(green metropolis)'로의 변화를 추진

〈그림 2-15〉 함부르크의 녹색 네트워크 개념도



자료: Hamburg 홈페이지

### 3) 추진결과

- 옥상녹화를 통해 빗물 수집 뿐 아니라 여가, 휴식, 농업 공간 창조
  - 함부르크의 전략을 통해 확보한 옥상녹화 면적은 2018년 말까지 138만㎡에 달하며, 이중 40%는 거주용, 36%는 상업용 건물에 조성
  - 옥상녹화는 기초적인 기능은 빗물 수집 및 열섬현상 저감 등이지만, 함부르크에서는 태양열 발전기와 결합하거나 여가공간 및 놀이공간, 농업공간으로 확장

〈그림 2-16〉 함부르크 옥상녹화 현황



자료: City of Hamburg(2017)

## 제4절 수원시 레인시티 현황

### 1. 수원시 레인시티 연혁

- 국내·외에서 우수 정책으로 인정받은 ‘수원시 레인시티 정책’
  - 수원시는 2009년 1월 ‘수원시 통합 물관리 기본 조례’를 제정하여 지자체의 의무로써 물순환 체계 확립을 강조했으며, 2009년 제8회 빗물모으기 국제워크숍 및 제3회 수원 물 포럼에서 세계최초의 빗물도시 레인시티 조성 선언
  - 2009년 6월에는 ‘물순환 관리에 관한 조례’를 제정하여 수원시의 지속가능한 수자원 관리방안으로 자연에 가까운 물순환 회복을 지향할 것을 다시 한 번 공식화
  - 2010년에는 레인시티 사업을 본격적으로 실시하여 수원종합운동장에 빗물저류시설을 설치하였으며, ‘2014년 그린빗물인프라 조성공사’, ‘2017년 그린빗물인프라 조성사업’ 등을 꾸준히 실시하여 수원시 전역에 물순환 환경 구축
    - 물순환을 위한 조례와 계획뿐 아니라 조성사업을 꾸준히 실시하여, 정책이 활자로만 남지 않고 실현화될 수 있도록 노력했으며, 이를 통해 물난리 없는 도시환경, 열섬현상 완화, 수질 개선을 달성했다고 평가받고 있음(최모란·편광현, 2020)
  - 2012년부터는 시민을 대상으로 한 ‘빗물저금통 설치 지원’ 사업을 꾸준히 추진하여 물순환에 대한 시민의식 재고 및 민간 영역에서의 물순환 참여방안 마련
    - 빗물저금통 지원 사업 외에도 ‘생태·환경체험교육 프로그램 운영’, ‘통합 물 관리 위원회’ 등을 통해 시민들이 물순환 조성, 물관리에 참여할 수 환경을 구축하고자 함
  - 레인시티 조성을 위한 수원시의 지속가능한 노력, 정책의 참신성, 혁신성 등이 인정을 받아 ‘2017 지방정부 정책대상’, ‘그린월드 어워즈 2018’ 혁신부문 은상 등 국내·외 기관으로부터 다수의 상을 수여받았으며, 다수의 국가에서 벤치마킹을 위해 방문

〈표 2-10〉 수원시 레인시티 정책 연혁

구분	항목	내용
조례 제정	(2009. 1. 8) 수원시 통합 물관리 기본 조례	수원시민의 삶의 질 향상을 위해 지속적인 물순환 체계 확립을 목적으로 제정
업무 협약	(2009. 3) 서울대학교 빗물연구센터 업무협약(MOU)	수원시는 서울대학교 빗물연구센터와 업무협약을 체결하여 빗물 정책 추진을 본격화
행사	(2009. 4. 15 ~ 16) 제8회 빗물 모으기 국제워크숍 및 제3회 수원 물 포럼	수원시, 이클레이한국사무소, 서울대학교 빗물연구센터, 농촌진흥청 공동주최로 국제워크숍 및 수원 물 포럼을 개최. 행사는 ‘통합물관리를 이용한 빗물도시 레인시티 조성’을 주제로 하며, 수원시에서는 세계최초의 빗물도시 레인시티 조성을 선언

구분	항목	내용
조례 제정	(2009. 6. 19) 수원시 물순환 관리에 관한 조례	수원시의 물순환 체계를 구축하여 지속가능한 수자원 관리로 시민의 삶의 질 향상 및 지구 환경보전에 기여함을 목적으로 제정
행사	(2009. 6. 12 ~ 21) 이클레이(ICLEI)세계총회 참석	수원시는 동아시아를 대표하는 이클레이 집행위원 도시로, 이클레이 세계총회에 참석하여 '레인시티 수원' 프로젝트를 발표
조성 사업	(2010) 수원종합운동장 빗물저류시설 설치	2010년 말 수원종합운동장 지하에 건설된 빗물저류시설로, 수원시 레인시티의 본격적인 시작이라고 할 수 있음
수상	(2010. 12. 23) '지역 녹색성장 우수사례 발표대회' 우수상 수상	수원시는 녹색성장위원회와 행정안전부가 공동 주최한 '지역 녹색성장 우수사례 발표대회'에 경기도 대표로 참가해 '레인시티 프로젝트'에 대한 사례발표를 진행했으며, 도 부문에서 우수상 수상
계획 수립	(2011. 8) 물순환 관리 기본계획	수원시의 물순환 체계 복원과 '레인시티' 조성 및 물관리 시스템의 지속가능성 확보를 위해 물관리 지표 개발 및 물순환 대책 마련
조성 사업	(2012~2017, 2020) 빗물저금통 설치 지원	연속된 시민참여형 사업을 통해 물순환 도시의 기반 조성
발표	(2013) 레인시티 수원 선언	수원시는 2013년 '레인시티 수원 선언'을 발표한 뒤 시내 곳곳에 빗물이 용시설을 설치해 7만7천t을 저장할 수 있는 빗물시설을 구축
수상	(2013. 11. 28) '2013 SBS 물 환경대상' 정책·경영 부문 대상	SBS 물 환경대상은 물과 환경을 지키는 일에 탁월한 업적을 이룬 개인이나 기관 등에 수여하는 상으로, 수원시는 '레인시티 사업'의 성과를 인정받아 정책·경영 분야 대상 수상
계획 수립	(2014. 9) 물 재이용 관리계획	물재이용 활성화 및 지속가능한 친환경 수자원 확보를 위해 물재이용에 대한 종합적인 관리계획 수립
조성 사업	(2014. 12) 그린빗물인프라 조성공사	환경부와 함께 그린인프라 시범사업을 실시해 장안구청 청사에 투수성 포장, 침투도랑, 옥상녹화, 빗물정원 등 설치
조성 사업	(2015~2018) 레인시티 시즌2 조성공사	민선 6기 시민 약속사업 중 하나로 수원월드컵경기장, 수원시청, 수원시의회 일대 등에 그린인프라 적용
조성 사업	(2017~2020) 그린빗물인프라 조성사업	매탄동, 권선동, 영통동, 신동에 걸쳐있는 원천리천 유역에 식생도랑, 식물재배하분 등 그린인프라 적용
수상	(2017. 7. 13) '25회 조선일보 환경대상' 환경경영 부문 대상 수상	수원시는 '레인시티 사업'의 성과를 인정받아 환경부와 공동주관하는 '조선일보 환경대상' 시상식에서 환경경영 부문 대상 수상
수상	(2018. 2. 23) '2017 지방정부 정책대상' 대상 수상	(사)한국지방정부학회가 주관하는 '지방정부 정책대상'은 지자체의 독자적인 정책 가운데 지역 발전에 크게 기여했거나, 다른 지자체에 귀감이 될 만한 정책 사례를 발굴, 확산하기 위해 제정된 상으로 수원시는 '스마트 레인시티 수원' 정책으로 최고상인 대상 수상
벤치 마킹	(2018. 3. 29) 중남미 3개국에 환경정책 벤치마킹	국립환경인력개발원과 KET가 공동 주최하는 '2차년도 국제환경정책연구과정' 참가자인 콜롬비아, 파라과이, 볼리비아 환경정책 관계자 13명이 '스마트 레인시티 수원' 벤치마킹을 위해 수원시 방문
발표	(2018) '스마트 레인시티 수원' 정책 발표	2018년 10월 '수원형 스마트시티 정책모럼'에서 대표적인 스마트시티 사업 중 하나로 '스마트 레인시티 수원' 발표. 이는 기존의 레인시티 사업에 IoT, 빅데이터 등 최첨단 기술을 적용해 '스마트'한 사업으로의

구분	항목	내용
		개선을 목표로 함
수상	(2018. 9) '그린월드 어워즈 2018' 혁신부문 은상 수상	더 그린 오가니제이션이 주관하는 그린월드 어워즈는 세계 4대 국제환경상인 '그린애플 어워즈' 수상자 중 최고를 선정하는 국제대회로 세계적으로 권위 있는 환경상. 수원시는 '스마트 레인시티 수원'으로 혁신부문 은상 수상.
수상	(2018. 10) '2018 에너지 글로벌 어워드' 국가상 수상	오스트리아의 환경재단 에너지글로벌브가 제정한 '에너지 글로벌 어워드'는 매년 유네스코와 유엔환경계획의 협조를 받아 세계 곳곳에서 추진되는 지구환경의 지속가능한 발전에 기여한 프로젝트를 선정해 시상. 수원시는 '스마트 레인시티 수원' 정책으로 '에너지 글로벌 어워드 국가상'을 수상
수상	(2018) '경기환경대상' 환경우수기관부문 경기도지사상 수상	경기환경대상은 환경기술 발전과 환경보호 인식을 높이는 등 환경개선에 기여한 개인·단체·기업·기관 등에 수여하는 상 수원시의 자연친화적 물 순환도시 조성사업 '스마트 레인시티 수원'이 그 역할을 인정받아 수상자로 선정
벤치마킹	(2018. 9. 6) 미얀마 등 7개국 환경정책 벤치마킹	국립환경인력개발원이 주관하는 '기후변화 대응을 위한 지속 가능한 물관리 과정'에 참가한 미얀마, 인도네시아, 필리핀 등 7개국의 환경수자원 정책 공무원 14명이 '스마트 레인시티 수원' 벤치마킹을 위해 수원 방문
수상	(2018. 11. 15) '제23회 경기환경대상' 환경우수기관부문 경기도지사상 수상	경기환경대상은 환경기술 발전과 환경보호 인식을 높이는 등 환경개선에 기여한 개인, 단체, 기업, 기관 등에 수여하는 상으로 수원시는 '스마트 레인시티 수원' 정책의 효과를 인정받아 환경우수기관 부문 경기도지사상 수상
계획 수립	(2019. 11) 통합 물 관리 종합계획	수원시의 지속가능한 물관리의 완성과 민선7기 약속사업인 '통합 물 관리 체계 구축'의 일환으로 종합계획 수립
수상	(2020. 1. 21) '2019 올해의 환경인' 선정(염태영 시장)	정부의 미세먼지 정책 부응 및 지구온난화 방지 정책에 기여하고 환경수도 수원을 이룩한 공로로 염태영 수원시장이 한국환경전문기자협회로부터 '2019 올해의 환경인'으로 선정

## 2. 수원시 레인시티 관련 계획

- 자연적인 물순환 체계 구축을 위해 관련 계획 제정
  - 수원시에서는 2011년부터 물순환 및 관리에 대한 계획을 꾸준히 수립하여 지역 내 자연적인 물순환 체계구축 및 빗물자원의 효율적 활용, 통합적 정책수행의 기반 마련
  - ‘물순환 관리 기본계획’, ‘통합 물 관리 종합계획’은 자연적인 물순환 체계구축을 계획의 주요 목표로 삼고 있으며, 구체적인 실현방안으로 그린인프라 적용을 제시
  - ‘수도정비 기본계획’, ‘지하수 관리계획’은 기존의 물공급 인프라를 바탕으로 효과적인 수질관리 및 공급방안에 대한 계획으로 그린인프라와 직접적인 관련성은 부족
  - 그러나 자연적인 물순환 측면에서의 물관리는 단일 요소로만 달성할 수 없으며, 기존 방안과 새로운 방안의 조화, 그린인프라 요소들의 복합적인 적용 등을 필요
  - 따라서 본 연구에서는 그린인프라와 직접적 관련성이 떨어지는 계획이라도 통합적 관점에서 물순환에 영향을 미친다고 판단하여 함께 살펴보았음

〈그림 2-17〉 수원시 물순환 관련 주요 계획



### 1) 물순환 관리 기본계획(2011)

- ‘레인시티 수원’ 조성을 위해 구체적이고 방대한 기본계획 수립
  - 수원시는 빗물 순환의 왜곡으로 인한 도시환경문제를 해결하고자 자연적인 물순환 체계를 구축하고자 했으며, 이를 위해 물순환 기본계획 수립
  - 수원시의 물순환 현황부터 개선방안, 기술요소 적용 방안, 효과 분석 등 방대한 양의 내용을 구체적이고 상세하게 기술하여 계획의 실효성을 높이고자 하였음
  - 해당 계획은 침투받이, 투수성 포장 등 그린인프라의 구체적인 기능 및 설치 방법을 소개하고 모델링을 통한 효과분석을 통해 사업의 구체성, 실현 가능성을 극대화
  
- 중앙집중형 물관리에서 나아가 선진적인 물관리 방안 추진
  - ‘물순환 관리 기본계획’의 추진 목적을 충실히 달성하기 위해 ‘물관리의 지속가능성’, ‘기후변화 대비한 물관리’, ‘지하수 수위 유지’ 등 기본 원칙 설정
  - 각 원칙은 자연적인 물순환 체계를 통해 빗물유출을 최소화하고 수자원을 확보하며, 기후변화에 대비하고자 하는 그린인프라의 목표와 유사할 뿐 아니라, 그린인프라를 통해 물순환을 회복하고자 하는 국내 지자체들의 최근 계획과도 유사성이 높음
  - 즉, 수원시가 2010년대부터 전통적인 중앙집중형 물관리에서 한 단계 나아가 현대의 도시가 필요로 하는 선진적인 물관리를 시도했다는 것을 의미

〈표 2-11〉 물순환 관리 기본계획(2011) 기본 원칙

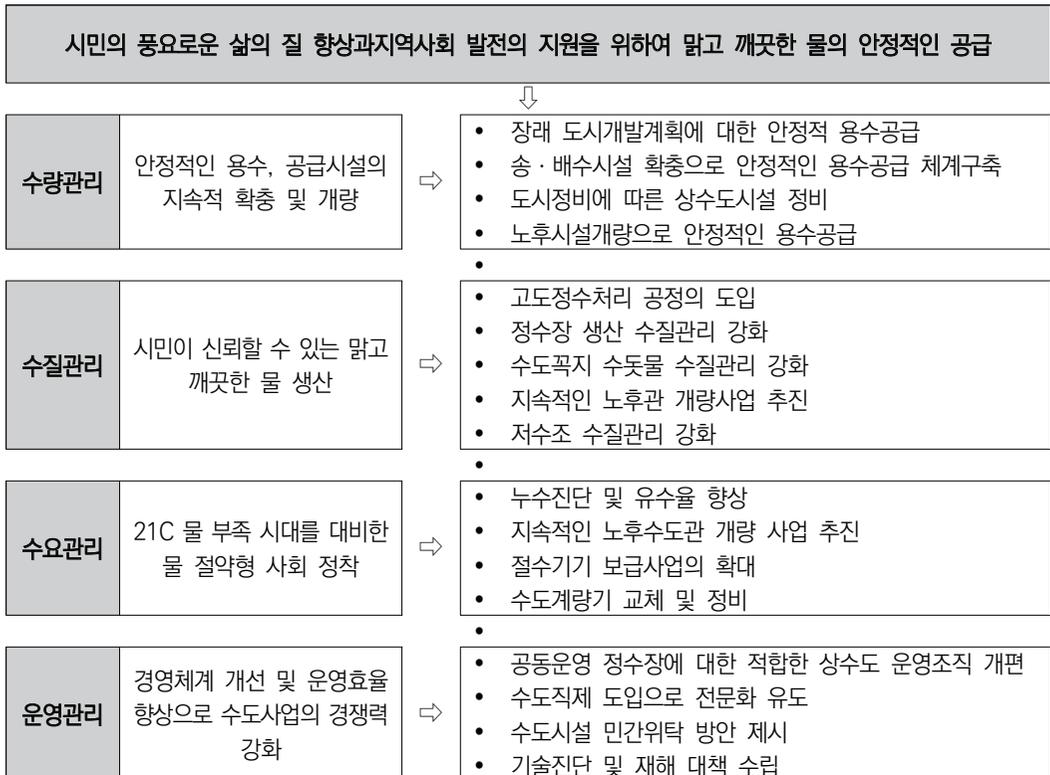
원칙	내용
‘洞’ 개념을 적용한 물관리: 개발 전·후 물상태 동일	‘洞’ 개념을 바탕으로 한 적극적인 빗물관리로 개발에 따른 저하를 방지함은 물론, 소규모 지역별 목표, 물자급률의 달성과 함께 에너지 소비를 줄이는 것을 원칙으로 함
물자급률 확보	수원시의 물자급률을 평가하고 이를 바탕으로 물 공급량을 늘리거나 사용량을 줄임으로써 수자원의 효율적 이용과 도시의 물순환 복원 달성
저탄소 녹색성장의 물관리	중앙집중형 물관리 시스템에 걸리는 부하를 줄여주기 위해 건설 및 유지관리 비용과 에너지 소모가 적은 분산형 빗물관리 시스템 이용
지하수 수위 유지를 통한 하천건천화 방지	‘불투수면의 증가 ⇨ 빗물침투량 감소 ⇨ 지하수위 감소 ⇨ 하천 건천화’의 과정을 해소하기 위해 빗물침투 확대를 원칙으로 설정
기후변화 대비한 물관리	집중형 물관리 시설은 홍수, 가뭄 등을 야기하는 기후변화에 유연하게 대처하기 어려우며 시설 확장 및 신축에 막대한 비용과 에너지가 소모되기 때문에 분산형 빗물관리 시스템을 통한 기후변화 대비가 필요
안전하고 지속가능한 물관리	급격하게 변화하는 도시환경에 따른 빗물 피해를 최소화하기 위해서는 도시지역에 내리는 빗물의 활용방안 마련 필요

자료: 한무영 외(2011), 물순환 관리 기본계획

## 2) 수도정비 기본계획(변경)(2012)

- 상수도시설의 적정하고 합리적 설치·관리를 위해 수도정비에 관한 종합계획 수립
  - 시민의 풍요로운 삶의 질 향상과 지역사회 발전을 위해서는 맑고 깨끗한 물의 안정적인 공급이 필수적이며, 수원시는 이를 달성하기 위해 「수도법」 제4조 및 동법의 시행령 제6조의 규정에 근거하여 수도정비에 관한 종합계획을 수립
  - 깨끗한 물을 안정적으로 공급하기 위해 수량, 수질, 수요, 운영 측면에서의 관리가 필요하며, 수원시는 4가지 요소를 중심으로 17가지의 세부사업 설정
  
- 기존 물관리 방안의 개선 및 관리를 통해 깨끗하고 효율적인 물 공급 추진
  - 수원시는 ‘수도정비 기본계획’을 통해 안정적인 용수공급과 수질관리를 도모했을 뿐 아니라 기존 시스템의 개선을 통해 물 절약형 사회를 정착시키고자 함
  - 그린인프라의 신규 적용뿐 아니라 수도정비 기본계획을 통한 기존 그레이인프라의 효율적인 관리와 개선이 더해진다면 보다 친환경적이고 효율적인 물환경 구축 가능

〈표 2-12〉 수도정비 기본계획(변경)(2012)의 기본방향



자료: 수원시(2018a), 수원시 수도정비 기본계획(변경)

### 3) 지하수 관리계획(2013)

- 수원시 지하수의 안전하고 깨끗한 보존과 체계적 관리를 위해 기본방향 설정
  - 수원시는 지하수의 전문적인 관리와 지속가능한 활용을 위해 ‘지하수 관리계획’을 수립했으며, 궁극적으로 ‘수원 시민의 삶의 질 향상’을 달성하고자 함
  - 해당 계획을 통해 지하수 관리방안의 문제점을 진단하고 지하수 관리 목표와 실행 계획 등을 마련하여 수원시 지하수 관리의 기본 지침으로 활용하고자 했음
  - 그러나 도시의 불투수면 증가가 지하수 수위에 큰 영향을 미친다는 사실을 고려할 때, 지하로의 빗물침투를 돕는 그린인프라의 적용이 병행되어야만 해당 계획이 목표로 하는 지하수의 지속 가능한 활용을 달성할 수 있을 것으로 예상

〈표 2-13〉 지하수 관리계획(2013)의 기본 방향

(비전) 지속가능한 지하수 활용으로 수원 시민의 삶의 질 향상	
기본방향	주요내용
지하수의 효율적 활용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기후변화(가뭄) 대응, 지하수 확보 및 자원체계 구축</li> <li>• 유출 지하수 활용 및 빗물침투(인공함양)를 통한 지속가능한 지하수 확보</li> <li>• 지하수 관련사업 지원(정화사업, 먹는샘물 사업 등)</li> </ul>
지하수의 미래가치 확보를 위한 보전·관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설관리 및 방치공 관리를 통한 체계적인 지하수 보전·관리</li> <li>• 지하수보전구역 및 인공함양지원보호 등 지속가능한 지하수 보전·관리</li> <li>• 수위고갈, 수질오염, 지반침하 등 지하수 장해현상 사전방지 위한 관리강화</li> </ul>
지하수의 지속적 조사·관측	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보조지하수 관측망의 적극 활용을 통해 하천거천화 방지 등 효율성 증대</li> <li>• 지하수 정보표준화 기반 구축</li> <li>• 지하수시설, 이용량 등 모니터링 체계 운영을 통한 지하수 자료 신뢰도 향상</li> </ul>
인프라 강화를 통한 지하수관리 효율화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 관리조직과 조례 제정 등 지하수관리 효율화</li> <li>• 신규사업 발굴 등을 통한 지하수 활용가치 증대</li> <li>• 교육 및 홍보강화를 통한 지하수 인식 제고</li> </ul>
인프라 강화를 통한 지하수관리 효율화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 관리조직과 조례 제정 등 지하수관리 효율화</li> <li>• 신규사업 발굴 등을 통한 지하수 활용가치 증대</li> <li>• 교육 및 홍보강화를 통한 지하수 인식 제고</li> </ul>
(목표1) 지속가능한 지하수의 효율적 활용	
(목표2) 공적 자원인 지하수의 적극적인 보전·관리	

자료: 수원시(2018a), 수원시 수도정비 기본계획(변경)

#### 4) 물 재이용 관리계획(2014)

- 물 재이용 활성화 및 지속가능한 친환경 수자원 확보를 위해 종합 관리계획 수립
  - 수원시는 물 재이용을 계획적·체계적으로 관리하기 위해 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 제6조제1항 및 동법 시행령 제4조의 규정에 의거하여 관련 계획 수립
  - 빗물이용시설, 중수도, 하수처리수재이용시설, 폐수처리수재이용시설, 발전소온배수 시설 및 기타 시설을 대상으로 구체적인 이용 현황을 조사하고 재이용 목표량을 설정
- 빗물이용시설의 효율적 운영·관리를 위한 개선방안 제시
  - 물 재이용 총 목표량에서 빗물이용시설의 비중이 비교적 크진 않지만, 빗물이용시설은 빗물이용뿐 아니라 물순환 체계구축과 홍수 방지, 수질 개선 등 다양한 역할 수행
  - 이에 따라 해당 연구에서는 빗물이용시설의 효율적 운영·관리를 위해 기존 현황을 점검하였으며, 그 결과 빗물사용량 파악의 한계, 한정적 사용용도 등의 문제 발견
  - 문제점 개선을 위해 빗물이용시설의 적정한 사용을 위한 지자체의 관리감독, 빗물 이용시설 설치 시 수도요금 감면, 빗물이용시설 설치지원 사업 등을 제시

〈표 2-14〉 물 재이용 관리계획(2014)의 수원시 물 재이용 총 목표량

(단위 : 천<sup>3</sup>/년)

구분	현재	1단계	2단계	3단계	4단계	
	2012년	2014년	2016년	2018년	2020년	
합 계	26,940.7	31,402.1	31,792.8	31,892.2	35,494.6	
빗 물	188.8	977.6	1,012.0	1,111.4	1,127.0	
중 수 도	699.0	235.4	587.7	587.7	587.7	
폐 수 처 리 수	-	-	-	-	-	
하 수 처 리 수	소 계	26,052.9	30,189.1	30,189.1	30,189.1	33,775.9
	장 내 용 수	24,163.3	24,163.3	24,163.3	24,163.3	26,718.3
	공 업 용 수	-	-	-	-	-
	농 업 용 수	-	-	-	-	-
	하천유지용 수	-	4,136.2	4,136.2	4,136.2	5,168.0
기 타	1,889.6	1,889.6	1,889.6	1,889.6	1,889.6	
기 타 용 수	-	-	4	4	4	

자료: 법안엔지니어링·한국종합기술(2014), 수원시 물 재이용 관리계획, 수원시

### 5) 환경보전 기본계획(2016)

- 환경적으로 건전하고 지속가능한 개발 달성을 위해 수원시의 환경목표와 비전 제시
  - 21세기에 들어 ‘지속가능한 발전’이라는 환경정책의 국제적 기준이 수립되면서 세계적인 선진도시들이 ‘환경적으로 건전하고 지속가능한 도시’를 목표로 관련 정책 추진
  - 수원시에서도 개발과 보전이 조화를 이루는 지속가능한 친환경적 도시 조성을 추진하고자 했으며, 이를 위해 중·장기 실천계획을 담은 ‘환경보전 기본계획’ 수립
    - 도시환경을 크게 자연환경, 대기환경, 수환경, 토양·지하수환경, 소음·진동관리, 폐기물 관리, 환경보건관리, 에너지 관리(기후변화)로 구분하여 분야별 계획 수립
  
- 수환경 분야의 비전으로 ‘지속가능하고 건강한 물의 도시 조성’ 추진
  - ‘환경보전 기본계획’ 내 수분야는 물 관리 패러다임의 변화와 비점오염원에 의한 수질 오염 비중 증가 등 사회·환경적 변화를 반영하여 ‘물관리 선진화’, ‘오염원 관리 전문화’, ‘안정적인 물공급 체계구축’, ‘물수요 관리 정착’을 목표로 설정
  - 세부사업으로는 ‘비점오염원 저감 및 관리 강화’, ‘스마트 레인시티 구축 지속 추진’ 등을 선정하여 ‘물순환 관리 기본계획’으로부터 이어져 왔던 물순환 회복 노력을 계승
  - 중소규모 하수처리장 신설, 고품질 상수도 공급 등 전통적인 물관리 사업과 시민이 참여할 수 있는 사업들을 통해 수원시의 물 관리 방안을 통합

〈표 2-15〉 환경보전 기본계획(2016)의 물환경 분야 비전 및 목표

(비전) 지속가능하고 건강한 물의 도시 조성	
추진 목표	세부 사업
물관리 선진화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물수요관리 선진도시 구축</li> <li>• 지속가능한 생태하천 복원 및 사후관리계획 수립</li> <li>• 시민 참여형 수질개선 교육 및 활동</li> </ul>
오염원 관리 전문화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 체계적인 점오염원 관리 및 하수도 시설 유지·보수</li> <li>• 비점오염원 저감 및 관리 강화</li> <li>• 중소규모 하수처리장 신설</li> </ul>
안정적인 물공급 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수질 관리 신기술 도입으로 고품질 상수도 공급</li> <li>• ICT 기술 기반 물 재난 관리체계 도입방안</li> <li>• 지속가능한 대체수자원 확보방안</li> </ul>
물수요 관리 정착	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물 재이용 활성화</li> <li>• 스마트 레인시티 구축 지속추진</li> </ul>

자료: 수원시(2018b), 환경보전 기본계획

## 6) 통합 물 관리 종합계획(2014/2019)

- 수원시의 변화된 물 환경을 반영하여 현재와 미래를 위한 통합 물관리 계획 수립
  - ‘2014 통합 물 관리 종합계획’을 바탕으로 수원시의 현황을 반영하여 현재와 미래를 대비한 ‘2019 통합 물 관리 비전, 목표, 전략 수립
    - 2014년 계획에서 제시됐던 사업들이 현재 관련 물 부서에서 시행되고 있는지 등 물관리 부서 현황 및 정책 진단을 통해 개선사항 도출
  - 수원시 내 물관리 정책의 통합이라는 목표를 계승하기 위해 행정과 물환경센터, 하천유역네트워크, 관련 전문가와의 민·관 물 거버넌스 구축
    - 폐기물 관리, 환경보건관리, 에너지 관리(기후변화)로 구분하여 분야별 계획 수립
  
- 도심 물 순환 능력 강화를 위해 분산형 빗물관리 방식 채택
  - 통합 물 관리 종합계획의 비전으로 ‘생태적으로 건강한 물 순환 도시 수원’을 선정하고 물 순환률 증가를 위한 구체적인 방안으로 그린인프라 적용을 제시
  - 2014년 계획에서도 빗물이용시설 및 레인가든 등 그린인프라 기술 적용을 제시했지만, 빗물이용의 측면에서 접근했다면, 2019년 계획은 도심 투수성 강화 및 지하수 관리를 통해 도시의 물 순환률 증가를 목표로 설정
    - 빗물을 이용의 대상으로 보는 것에서 나아가 도시의 건강한 수생태계 조성을 위해 총체적인 관점에서 빗물 순환을 논의했다는 것을 알 수 있음
  - 이 외에도 시민과 함께하는 물순환 관리를 위한 ‘하천유역관리위원회’ 구성 및 하천환경 유지관리를 통한 일자리 창출을 제시하여 시민참여의 구체성·실현 가능성 제고

〈표 2-16〉 통합 물 관리 종합계획(2019)의 전략과 중점과제

전략	목표	중점과제	주요 사업
통합 물 관리 정책 추진	통합 물 관리 위원회를 통한 이행평가 정례화	1. 통합 물 관리 제도 운영	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통합 물 관리 종합계획에 따른 이행계획 수립</li> <li>• 통합 물 관리 제도 이행 및 평가</li> <li>• 통합 물 관리 위원회 활성화</li> </ul>
		2. 열린 정보화 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물관리 정보 열린 공개 시스템 구축 및 운영</li> <li>• 환경오염배출시설 통합관리 시스템 구축·운영</li> </ul>
도심 물 순환 능력 강화	LID기법 활용 도심 물 순환률 증가	3. 도심 투수성 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도심투수면 및 물 순환 관리 목표 설정 및 운영</li> <li>• 그린 빗물 인프라 조성 및 운영</li> <li>• 비점오염저감시설 효율적 운영</li> <li>• 도심 생태환경 조성</li> </ul>

전략	목표	중점과제	주요 사업
		4. 지속가능한 지하수 관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>지하수 관리 기본계획 수립</li> <li>지하수 수질 및 수량 개선 대책 마련</li> </ul>
건강한 수생태 환경 조성	4대 하천 및 호소 수질 등급 1단계 향상	5. 하천·호소 수생태계 건강성 증진	<ul style="list-style-type: none"> <li>호소 수질 개선 대책 추진</li> <li>수원시 생물지표를 활용한 수생태계 관리</li> </ul>
		6. 지속가능한 하천·호소 환경정비	<ul style="list-style-type: none"> <li>시민이 만드는 수원형 하천·호소 관리매뉴얼</li> </ul>
건강하고 맑은 물 공급	수원시민 먹는 물 만족도 제고	7. 지역상수원 수질개선 및 수량 유지	<ul style="list-style-type: none"> <li>상수원보호구역 친환경 생태적 관리</li> <li>상수원 수질보호 대책 운영</li> <li>수도정비기본계획 수립</li> </ul>
시민참여 하천 유역관리	하천유역관리 네트워크 정례화	8. 하천유역관리 위원회 운영	<ul style="list-style-type: none"> <li>하천유역관리위원회 구성 및 운영</li> <li>하천환경 유지관리를 통한 시민일자리 창출</li> </ul>
온실가스를 낮추는 생활하수 관리	하수처리로 인한 온실가스 배출량 10% 감축	9. 하수처리 효율 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>하수처리수 재이용 증진</li> <li>하수처리장 온실가스 감축 사업</li> <li>불명수 유입 감축</li> </ul>

자료: 강은하·최서영·오미현(2019), 수원시 통합 물 관리 기본계획, 수원시정연구원

### 3. 수원시 레인시티 관련 조례

- 시민의 삶의 질 향상을 위한 수원시의 책무로써 물 순환 체계구축 명시
  - 「수원시 통합 물관리 기본조례」는 수원시민의 삶의 질 향상을 위해 지속적인 물순환 체계 확립을 목적으로 하며, 단순히 먹는 물을 넘어 경제 자원이자 문화적 자산, 궁극적으로는 모든 생명체를 지탱하는 생태학적 근본으로서 보호의 필요성을 강조
  - 시민은 깨끗한 물을 안정적으로 공급받을 뿐 아니라 홍수재해 등 위험으로부터 안전하게 보호받아야 할 권리가 있다고 명시하여 수원시가 먹는 물 관리를 포함해 도시의 물순환 체계 안정을 위해 정책적 노력을 기울일 것을 촉구
  - 수원시는 이후 「물순환 관리에 관한 조례」를 연이어 제정하여 건강한 도시환경을 위한 물순환 체계구축에 대한 정책적 의지를 드러냈으며, 이를 위한 계획 수립과 합리적인 시책 마련, 재정적·기술적 지원을 시의 책무로 명시
  - 각 조례는 시민을 위한 수원시의 책무를 강조했다 뿐 아니라 시민 또한 물환경 보전을 위해 물관리 시책에 적극적으로 참여할 것을 명시하여 물순환 체계가 수원시와 시민의 상호 협력을 통해 달성될 수 있음을 강조
  
- 시 차원의 재정적 지원을 통해 민간 영역에서의 그린인프라 확대 유도
  - 「물순환 관리에 관한 조례」에서는 그린인프라를 설치하는 자에 대해 수도요금 감감, 건축물 용적률 기준 완화, 설치비 지원 등 재정지원 가능성을 명시
  - 「수도급수 조례」도 빗물이용시설을 설치할 경우 수도요금 및 수수료를 감면할 수 있다고 설명하고 있으며, 「녹색건축물 지원조례」는 노후건축물 중 옥상(지붕)녹화나 빗물이용시설을 설치할 경우 녹색건축물 조성 지원금을 받을 수 있다고 설명
  - 수원시는 물순환 관련 계획을 통해 시민에 대한 물순환 관련 교육, 홍보, 참여 방안을 준비하는 동시에 여러 조례를 통해 재정지원의 길을 마련함으로써 민간 영역에서의 자발적인 그린인프라 설치확대를 유도
    - 물순환 체계구축을 위해서는 수원시가 직접 관리하는 건물이나 공원, 도로 등에 그린인프라를 적용하는 것도 중요하지만 수원시 건축물 중 국공유 건물이 3.1%<sup>4)</sup>에 불과한 것을 고려하면(국토교통부, 2019), 민간영역의 참여는 그린인프라 확대의 필수요소

4) 국토교통부(2019)의 건축물통계에 따르면 2019년 수원시 내 건축물은 61,970동으로 이 중 국공유 건물은 1,942.5동(3.1%), 개인 소유 44,464.1동(71.8%), 법인 소유 2,990.7동(4.8%), 기타는 12,572.7동(20.3%)로 나타나 개인소유 비율이 높은 것으로 나타났으며 국공유 건물과 유주가 불명확한 기타를 합해도 전체의 23.4%에 불과

〈표 2-17〉 수원시 물순환 관련 조례

조례	내용
<p>수원시 통합 물관리 기본 조례 (2009.01.08. 제정)</p>	<p>제1조(목적) 이 조례는 수원시민의 삶의 질 향상을 위하여 건강하고 맑은 물의 확보와 생태계의 유지 등 지속적인 물순환 체계를 확립하는 것을 목적으로 한다. (개정 2011.02.07.)</p> <p>제2조(통합 물관리의 기본이념) 물은 자연환경의 구성 요소이자 인간을 포함한 모든 생명체가 살아가는 데에 없어서는 안되는 자원으로서 다음 각 호를 기본이념으로 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 깨끗한 식수를 이용할 권리는 시민의 기본권리이다.</li> <li>2. 물은 공공의 재산으로 관리되어야 한다.</li> <li>3. 물은 생명을 지탱하는 생태학적 근본으로서 반드시 보호되어야 한다.</li> <li>4. 물은 제한된 경제 자원으로서 관리되어야 한다.</li> <li>5. 물은 공동의 문화적 자산으로서 보존되어야 한다.</li> </ol> <p>제4조(수원시의 임무) 수원시(이하 "시"라 한다)는 통합 물관리의 기본이념을 구현하고 물의 효율적인 개발·이용 및 보전과 재해방지에 필요한 종합적이고 지역적 특성에 부합하는 시책을 수립하여 시행하여야 하며, 전 지구적 물 보호운동에 참여한다. (개정 2011.02.07) (개정 2013.06.14) (개정 2018.04.02.)</p> <p>제5조(시민의 권리와 의무)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 모든 시민은 깨끗한 물을 안정적으로 공급받아 이용할 수 있고, 홍수재해 등의 위험으로부터 안전하게 보호받으며 건강하고 쾌적한 환경을 향유할 권리가 있다.(개정 2013.06.14)</li> <li>② 모든 시민은 물을 아껴 쓰고 물환경을 보전하기 위하여 시에서 추진하는 물관리 시책에 적극적으로 참여하고 노력하여야 한다.</li> </ol>
<p>수원시 물순환 관리에 관한 조례 (2009.06.19. 제정)</p>	<p>제1조(목적) 이 조례는「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」과 같은 법 시행령 및 같은 법 시행규칙에 따른 빗물이용시설 및 중수도의 설치를 촉진하고「지하수법」제2조에 의한 지하수 함양을 위하여 수원시의 물순환 체계를 구축하여 지속가능한 수자원 관리로 시민의 삶의 질 향상 및 지구 환경보전에 기여함을 목적으로 한다. (개정 2012.10.04)</p> <p>제3조(시 및 시민의 책무)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 수원시(이하"시"라 한다)는 수자원의 효율적 이용, 수질오염의 저감과 물 순환을 촉진하기 위한 계획을 수립하고 합리적인 시책을 마련하며, 이에 필요한 재정적·기술적 지원을 할 수 있다. (개정 2012.10.04)</li> <li>② 모든 시민은 시가 추진하는 물 순환을 위한 시책에 협력하여야 한다.</li> </ol> <p>제6조(물순환 관리 계획의 수립)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 시장은 효율적인 물순환 관리를 위하여 10년 마다 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」(이하 "법"이라 한다) 제6조의 물의 재이용관리계획을 포함하는 물순환 관리에 관한 종합적인 계획(이하 "관리계획"이라 한다)을 수립하여야 한다. (개정 2012.10.04.)</li> </ol>

조례	내용
수원시 물순환 관리에 관한 조례 (2009.06.19. 제정)	제15조(재정지원) ① 시장은 빗물관리시설, 중수도, 하수처리수 재이용시설을 설치하는 자에 대하여 예산의 범위에서 다음 각 호의 지원을 할 수 있다. 1. 수도요금 또는 하수도사용료의 경감 2. 건축물 용적률의 기준 완화 3. 빗물포인트 지급 ② 시장은 빗물관리시설을 설치하는 자가 다음 각 호에 해당하는 경우에는 예산의 범위에서 설치비를 지원할 수 있다. 1. 기존의 주택에 빗물이용시설을 설치하는 경우 2. 건축물 등에 빗물이용시설을 설치하여 용수의 자급률이 50퍼센트 이상인 경우 3. 빗물을 주제로 특색 있는 건축물을 조성하는 경우. 단, 이 경우 시에서 홍보용으로 활용할 수 있도록 동의하여야 한다. 4. 그 밖에 위원회에서 지원이 필요하다고 심의한 경우  제16조(연구개발·보급) 시장은 사업별 특성에 적합한 빗물관리 기법을 개발·보급하여야 한다. (개정 2012. 10. 04)
수원시 수도급수 조례 (1976.12.31. 제정)	제37조(요금 등의 감면 또는 지원) (개정 2014.03.25) ① 시장은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 수도요금 및 수수료는 원칙적으로 일반회계에서 감면 또는 지원할 수 있으며 특별한 사정이 있는 경우 특별회계에서 부담한다.(단, 중복 감면 또는 지원하지 않는다) (개정 2014.03.25) (개정 2018.09.28) 1. 중수도시설 및 빗물이용시설을 설치한 때 또는 공익상 필요하다고 인정한 때
수원시 녹색건축물 지원 조례 (2013.03.28. 제정)	제1조(목적) 이 조례는 「녹색건축물 조성 지원법」에 따라 조례로 위임된 사항과 그 시행에 필요한 사항을 규정함으로써, 노후주택의 생활환경, 에너지성능 등 주거환경 개선을 통해 시민의 삶의 질을 향상시키고 에너지 비용의 절감 등 녹색건축물을 활성화 하는데 그 목적이 있다. (개정 2019.11.08.)  제4조(적용대상) ① 대상 건축물은「건축법」제2조제1항제2호에 해당하는 건축물로서 사용승인을 받은 후 15년 이상의 단독주택, 다가구주택, 상가주택(연면적 660제곱미터 이하), 다세대주택 및 연립주택(150세대 이하)으로 다음 각 호 행위를 말한다.(개정 2015.11.13.)(개정 2019.11.08) 6. 지붕녹화(옥상조경을 의미하지 않으며 지붕의 단열을 위하여 초화류, 잔디, 야생초 등을 설치하는 것을 의미한다) 조성 7. 빗물이용시설 설치

자료: 법제처 홈페이지

#### 4. 수원시 레인시티 사업

- 수원시는 레인시티 조성사업을 통해 그린인프라 조성하여 도시의 물순환 체계구축
  - 수원시에서는 도시의 물순환 조성을 위해 관련 계획 및 조례를 마련하고 시민의 참여와 이해를 재고하기 위해 각종 행사 및 사업, 위원회 등을 구성
  - 이러한 노력이 현장에서 실현될 수 있도록 <그림 2-18>와 같이 그린인프라 적용 사업을 꾸준히 추진하여 빗물이 자연적인 방식을 따라 순환할 수 있는 여건을 조성
  - 해당 사업의 결과로 <그림 2-19>와 같이 종합운동장, 월드컵경기장, 수원시청, 장안구청 등에 빗물저류시설, 식물재배화분, 투수성 포장, 식생체류지 등 등 그린인프라 설치
  - 빗물저류시설 내 빗물의 활용 다각화를 위해 빗물주유기와 빗물분사시설을 마련하여 폭염, 황사, 미세먼지 등 대기환경 개선에 활용
    - 다산공원, 이의궁도장 등에 빗물주유기를 설치하여 필요한 사람은 누구나 빗물을 활용할 수 있게 했으며, 종합운동장과, 월드컵경기장, 광고중학교 주변에 빗물분사시설 설치
  - 수원시의 꾸준한 사업추진으로 국내 대표적인 ‘물 순환 도시’ 조성이 가능했으며, 2020년 8월 기준 지역 내 빗물저류시설은 317개로 올림픽 규격 수영장 40개를 가득 채울 수 있는 양의 빗물 저장 가능(수원시 보도자료, 2020)

<그림 2-18> 수원시 주요 그린인프라 사업



〈그림 2-19〉 수원시 주요 그린인프라 현황

빗물주유기 및 빗물분사시설



빗물정원, 투수성 포장 등 그린인프라



### 1) 수원종합운동장 빗물저류시설 설치(2009)

- 빗물저류시설의 수자원 절약 및 하천 건천화 방지, 침수피해 예방효과 입증
  - 수원시는 레인시티 프로젝트의 첫 사업으로 수원종합운동장에 빗물 1만 톤을 저장할 수 있는 저류시설 6곳과 빗물 4천 톤을 토양에 유입시킬 수 있는 침투시설 2곳을 설치
    - 2009년 11월 ‘빗물저류시설 실시설계 용역’ 최종보고회를 실시했으며, 2010년 말에 완공한 이후 1년 동안 저장용량 및 활용현황을 검토
    - 2019년에는 종합운동장 인근 도로에 자동 빗물분사시설을 설치해 빗물저류시설에 저장된 빗물을 운동장 용수뿐 아니라 도로의 온도 저감 및 청소 등에 활용
  - 종합운동장은 빗물은 모으는 집수구역과 빗물이 토양으로 스며들지 못하는 불투수 면적이 넓어 빗물이용시설 설치 최적지로 꼽혔으며, 설치 이후 1년 동안 약 1만 톤의 빗물을 모아 조경·청소·화장실 용수 및 인근 서호천의 유지용수로 활용
    - 건조기인 9월부터 서호천의 건천화 방지를 위해 6300여 톤의 물을 흘려보냄
  - 해당 시설은 100가구의 침수피해를 예방할 수 있도록 설계되었으며, 실제로 인근 송죽동 일원은 집중호우에 따른 침수피해가 감소한 것으로 나타남(이정하, 2011)

〈그림 2-20〉 종합운동장 그린인프라 현황

빗물저류시설 공사 현황



수원종합운동장 인근 빗물분사시설



자료: 수원시

## 2) 빗물저금통 설치 지원(2012~2017)

- 빗물 재활용이 민간영역에서 실현될 수 있도록 소규모 빗물저류시설 설치지원
  - 수원시는 2012년부터 시민을 대상으로 빗물저금통 설치 지원사업을 시행하여, 시민과 기관에서 빗물을 활용할 수 있는 여건 조성
  - 빗물저금통은 빗물을 저장할 수 있는 빗물저장탱크(빗물저류시설)을 의미하며, 수원시는 기존 건축물을 대상으로 신청을 받아 지붕상태, 흠통 등 현장실사를 포함하는 선정과정을 거쳐 총공사비의 90%, 최대 1천만 원까지 지원(2012년 기준)
  - 시민들은 빗물을 모아 도시농업과 정원수 등에 활용함으로써 수도물 사용을 절감할 수 있으며, 시 차원에서는 빗물의 재활용을 통해 물 부족을 해소하고 하수도 부하를 경감시켜 국지성 집중호우에 의한 도시홍수 등 환경재해 대책으로 활용 가능
- 사업을 통해 2012년 12개소, 2013년 23개소, 2014년 24개소 설치 완료

〈그림 2-21〉 빗물저금통 현황



주택 옥상에 설치된 빗물저금통



수요자의 취향을 반영한 빗물저금통



빗물저금통을 이용한 텃밭 경작



빗물저금통을 이용한 옥상텃밭 경작

자료: 수원시

### 3) 그린빗물인프라 조성공사(2014)

- 장안구청 청사에 그린인프라를 설치하여 물순환 체계구축에 일조
  - 수원시는 환경부와 함께 그린인프라 조성 시범사업을 펼쳐 장안구청에 청사에 투수성 포장, 침투도랑, 빗물저류시설, 옥상녹화, 빗물정원 등을 설치
    - 본 사업은 환경부가 추진한 지속가능한 물 순환체계 구축의 일환으로 추진됐으며 2014년 10월 1일부터 12월 19일까지 80일간 조성
  - 해당 사업을 통해 도시지역의 생태공간 조성 및 빗물이용 증가, 빗물유출 감소를 달성하고자 했으며 빗물관리 모범사례를 제시해 관련 기술의 홍보와 교육의 장으로 활용

〈그림 2-22〉 장안구청 그린인프라 현황

장안구청 그린인프라 시공 현장



장안구청 옥상녹화



자료: 수원시, 우수안 홈페이지

#### 4) 레인시티 시즌2 조성공사(2015~2018)

- 시민 약속사업으로 그린인프라 조성사업을 추진하여 물순환 도시 구축을 본격화
  - ‘레인시티 수원 시즌2’ 사업은 민선 6기(2014~2018년) 시민 약속사업 중 하나로 2015년부터 2018년까지 수원시 관내 불투수율이 높은 지역을 대상으로 추진
  - 2015년에는 수원월드컵경기장 부지 지하에 매설된 2만4천 톤 규모의 빗물저류시설에 노면청소차, 살수차 등이 접근해 탱크에 쉽게 빗물을 옮겨 담을 수 있도록 빗물주유소를 설치하고 월드컵경기장 앞쪽 왕복 8차선 600m 구간에 빗물분사시설 설치
    - 월드컵경기장 빗물저류시설 내 빗물은 접촉산화반응조, 자동제어 스크린, 빗물저류 등을 거쳐 깨끗한 물로 재탄생하며, 정화된 빗물로 하루 75톤 규모의 수돗물 절약 가능
  - 2016년에는 수원시청과 수원시의회 일대에서 2차 사업을 시행하였으며, 시청사 담장을 허물어 빗물정원을 설치하고 투수성 포장, 빗물침투도랑 등 적용

〈그림 2-23〉 레인시티 시즌2 조성 현황



자료: 수원시

### 5) 그린빗물인프라 조성사업(2017~2020)

- 대규모 조성사업을 통해 그린인프라의 효과 극대화 추구
  - 수원시는 2017년부터 매탄동, 권선동, 영통동, 신동에 걸쳐있는 원천리천 유역에 식물재배화분, 투수성 포장, 식생 도랑 등을 설치하는 ‘그린빗물인프라 조성사업’ 실시
    - 원천리천 유역은 수원시에 있는 4개의 하천유역(화구지천, 서호천, 수원천, 원천리천) 중 하나로 불투수율(41.6%)이 서호천 유역(43.2%) 다음으로 높고, BOD 배출부하량은 가장 높은 것으로 나타남
    - 원천리천 유역 중에 3개의 대상구역을 선정하였으며, 각각의 구역 내에 있는 남부경찰서, 인계예술공원, 효원공원, 매여울공원 등에 그린인프라 설치
    - 이전의 수원시 그린인프라 사업에 비해 규모면에서 월등하며 그린인프라가 다양한 요소의 결합으로 효과가 가증될 수 있음을 고려할 때, 비점오염물질 저감, 증발산을 통한 도시미기후 향상, 하천의 건천화 방지 등이 극대화될 것으로 기대

〈그림 2-24〉 그린빗물인프라 조성사업(2017) 대상지 및 설치현황



자료: 수성엔지니어링(2018), 수원시 그린빗물인프라 조성사업 기본 및 실시설계. 직접 촬영

## 제5절 시사점

- 자연적인 물순환 체계 구축과 빗물의 효율적인 관리는 국가 및 지자체의 의무
  - 물관리기본법, 물환경보전법 등 물과 관련한 다양한 법률은 지속가능한 물 관리 체계의 구축과 빗물의 효율적인 관리를 국가 및 지자체의 의무사항으로 명시
  - 국내 자치단체들도 해당 법률에 기초, ‘빗물 관리’ 및 ‘물순환’ 등에 대한 조례를 제정하여 물순환 체계의 회복을 위한 구체적인 방안과 지원 사항들을 명시
  - 기후변화로 가뭄, 홍수 등 자연재해와 물 부족 및 수질악화와 수생태계의 변화문제가 심화되고 있어, 국민의 안전 및 삶의 질을 지켜내기 위해서는 물순환 관리가 필수이며 법률에서도 이러한 중요성을 강조했다고 할 수 있음
  
- 국가 및 지자체 계획을 통해 물순환 체계 구축을 위한 그린인프라의 필요성 확인
  - 정부의 ‘제2차 물환경관리 기본계획’은 건강한 물순환 체계 확립을 위한 저영향개발의 확대 필요성을 강조했으며, 경기도 또한 통합 물 관리 계획을 통해 저영향개발 기법 적용을 통한 유역 물관리 방안을 제시
  - 서울시와 울산시에서도 도시화에 따른 불투수면 증가가 야기하는 다양한 환경 문제에 대응하기 위해서는 기존의 물관리 방안에서 탈피해야함을 인지하고 그린인프라를 통한 자연적인 물순환으로 회복하기 위해 관련 계획 수립
  
- 그린인프라를 활용한 자연적인 물순환 체계 확립은 시대적 흐름
  - 국내·외 사례에서 알 수 있듯 기후변화와 도시화로 인한 도시의 물환경 악화는 일부 지역만의 문제가 아니며, 전 세계가 고민하는 주요 이슈
  - 세계의 많은 도시들이 전통적인 물관리 방법에서 탈피하여 자연적인 물순환으로 회복하려고 노력한다는 점에서 그린인프라 적용은 더 나은 미래를 위해 선택해야만 하는 시대적 흐름이라는 것을 알 수 있음
  - 국내에서는 환경부의 지원 사업을 중심으로 청주, 광주, 울산 등에서 그린인프라 적용 사업이 추진되고 있으며, 독일, 밴쿠버, 호주의 도시들도 자연적인 물순환으로의 회복을 위해 물관리 계획을 수립하고 그린인프라 조성을 실시
  - 특히, 독일 함부르크는 1980년대부터 물순환 정책의 필요성을 인식하고 수십 년 동안 관련 정책을 이어왔으며, 현재에는 물순환에서 한 단계 나아가 도시 전역을 엮는 그린 네트워크를 구성하여 물과 자연, 그리고 인간이 어우러지는 도시공간 조성

- 도시 전체를 아우르는 포괄적 시각에서 그린인프라 적용 필요
  - 호주 멜버른에서는 도시계획 및 설계와 그린인프라를 통합한 Water Sensitive Urban Design을 적용해 총체적인 관점에서 도시의 물순환 회복 추진
  - 캐나다 밴쿠버에서도 ‘물에 민감한 미래’라는 비전하에 수생태계의 회복과 생물다양성 확보, 나아가서는 인간과 자연의 연결까지 고려하는 통합적인 물순환 정책 추진
  - 독일 함부르크 또한 개별 단위의 그린인프라 프로젝트를 추진하는 동시에 도시 전역의 숲, 공원, 강 등을 연결하는 녹색 네트워크 조성사업을 통해 함부르크를 거대한 녹색 공간으로 조성하여 자연과 인간의 조화, 물순환의 회복을 달성하고자 함
  - 물순환의 회복은 지속가능한 도시 발전의 핵심요소이자 도시 건설, 녹지공간, 시민의 삶 등과 밀접한 관련이 있기 때문에 ‘빗물 관리’라는 단편적인 차원에서 접근하는 것이 아니라 도시 전체를 아우르는 포괄적이고 장기적인 관점에서의 접근 필요
  
- 각종 조례와 계획을 수립하여 물순환 건전성 회복을 위한 정책 추진의 기초 마련
  - 수원시는 비점오염원 관리, 깨끗한 물 확보, 자연적인 물순환 체계 유지 등을 목표로 ‘물순환 관리 기본계획’, ‘통합 물 관리 종합계획’ 등 각종 계획 수립
  - 「물순환 관리에 관한 조례」, 「수원시 통합 물관리 기본 조례」 등 관련 조례를 제정하여 수원시와 시민의 의무로서 물순환 회복의 중요성 명시
    - 「수원시 물순환 관리에 관한 조례」는 물순환을 전면에 내세운 국내 최초의 조례이며, 이를 통해 물순환에 대한 수원시의 정책적 관심과 의지를 확인할 수 있음
  - 각종 계획과 조례를 지속해서 수립함으로써 건전한 물순환 환경 구축을 위한 정책 추진의 타당성 마련 및 방향 제시가 가능했으며, 민간영역에서의 참여 방안도 함께 고려하여 민과 관이 함께 하는 협동형 정책으로의 기초 마련
  
- 실효성 있는 사업을 통해 국내를 대표하는 레인시티의 자격 증명
  - 2009년 세계최초의 레인시티 조성을 공식화한 이후 이를 현실화하기 위해 지속해서 관련 사업을 추진하였고, 사업의 성과를 인정받아 벤치마킹 대상으로 각광
    - 콜롬비아, 파라과이, 필리핀 등 해외 국가는 물론, 서울시, 강원도국제도시훈련센터, 고려대 환경생태공학부, 제천지속발전가능협의회 등에서 방문(김경호, 2015)
  - 국제적 권위의 환경상인 ‘2018 에너지 글로브 어워드 국가상’을 비롯해 국내·외 다수 기관으로부터 레인시티 정책의 우수성을 인정받아 각종 환경상 수상
  - 그린인프라 정책으로 도시의 물순환 회복에 이바지했을 뿐 아니라 각종 벤치마킹과

수상 실적이 국내를 대표하는 그린인프라 조성 도시, 레인시티로서의 자격을 증명

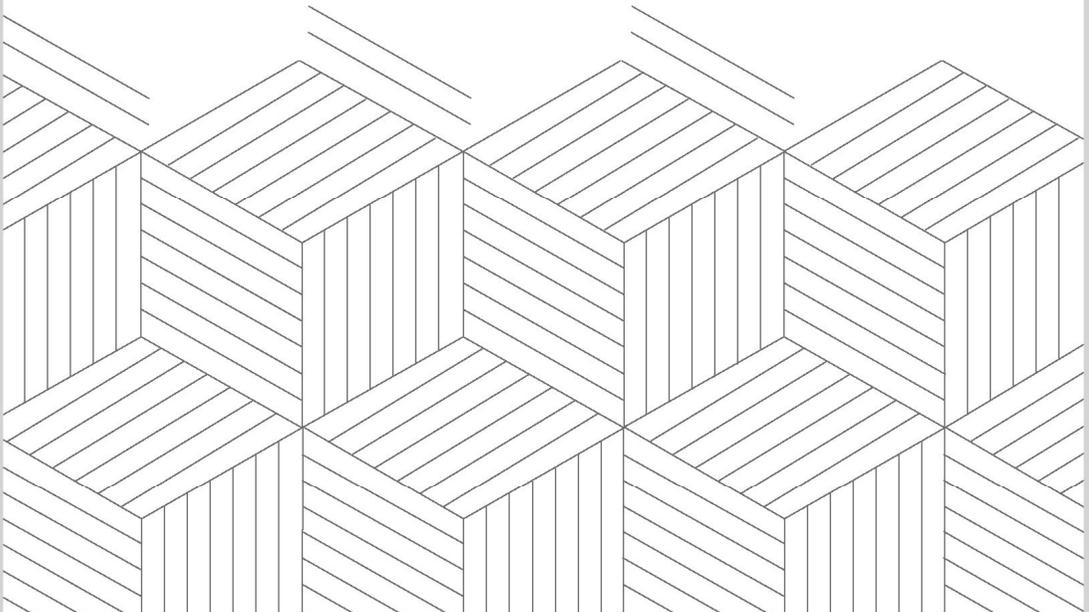
- 수원시의 대표 환경정책으로서 지속가능성을 확보할 수 있도록 기반 마련 필요
  - 2009년부터 시작된 수원시의 레인시티 추진 과정을 통해 해당 정책이 시민의 건강하고 안전한 주거환경을 구축 및 자연과 도시의 회복을 추구했을 뿐 아니라 수원시의 위상을 높이고 환경 도시로서 긍정적 이미지를 얻는 데 크게 이바지했음을 확인
  - 레인시티 정책의 대내외적 효과를 고려할 때, 수원시는 레인시티 정책이 지역의 대표 환경정책으로서의 위상과 역할을 지속할 수 있도록 기반을 마련해야 함
  - 물순환에 관한 관심이 떨어질 경우, 도시의 안정적인 체계가 다시 무너질 수 있으므로 기존의 정책을 유지하면서 동시에 새로운 사업의 끊임없는 발굴과 투자 필요



# 제3장

## 레인시티 효과성 사례 종합분석

제1절 분석의 개요  
제2절 그린인프라 기술요소별 효과  
제3절 효과 종합





## 제3장 레인시티 효과성 사례 종합분석

### 제1절 분석의 개요

- 정부 부처 및 지자체, 학계에서는 물순환 회복을 위한 방안으로 그린인프라 주목
  - 급격한 도시화에 따른 불투수 면적 증가, 빠른 배출을 추구하는 치수 방법 등으로 자연스러운 물순환이 왜곡되면서 수질 악화, 도시홍수 급증 등의 문제 발생
  - 국토교통부, 교육과학기술부, 환경부 등 정부 부처에서는 물순환 왜곡 문제를 해결할 대안으로 그린인프라의 필요성을 인식하고 관련 연구 추진
    - 미국, 영국, 호주 등 세계 각지에서도 빗물유출을 방지하여 자연 물순환과 물환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 전문기관 및 산하 연구원을 통해 연구 실행
    - 건축학, 토목학, 환경공학 등 학계에서도 도시의 물관리 방안으로써 그린인프라의 운영방안, 설치효과, 관리방안 등 다양한 주제로 연구 시행
- 본 연구에서는 선행연구와 국내·외 적용사례를 통해 물순환 왜곡으로 일어나는 다양한 환경문제를 완화하는 그린인프라의 효과를 확인하고자 함

〈표 3-1〉 레인시티 효과성 분석을 위한 주요 선행연구

대상지역	연구자	비고
충청북도 청주시 오창, 전라북도 전주	환경부(2019)	식물재배화분, 투수성 포장 등
미국 캘리포니아 데이비스 UCRPC 테스트 시설	Li, Harvey, Holland, & Kayhanian(2013)	투수성 포장의 온도저감효과 확인
중국 산시성 시안공대 캠퍼스 내 빗물정원	Li, Li, Li, Guo, & Dong(2019)	빗물정원의 지하수 함양효과 분석
멕시코 멕시코시티의 운송물류회사	Zavala, Prieto, & Rojas(2018)	빗물저류시설의 경제성 분석
창원시 내 빗물저류시설	한치복 · 이택순(2010)	빗물저류시설의 수질 개선효과 확인
이탈리아 팔레르노 내 주거지역	Freni & Liuzzo(2019)	빗물저류시설의 홍수 저감효과 확인

- 주요 그린인프라 시설인 투수성 포장, 식물재배화분, 빗물저류시설 등을 중심으로 연구
  - 미국 환경보호청(U.S.EPA 2015)은 그린인프라에 대한 안내문에서 대표적인 기술 요소로 옥상녹화, 투수성 포장, 레인가든, 빗물저류시설 등을 소개
    - 미국 뉴욕의 환경 비영리단체인 GrowNYC(2016)의 그린인프라 안내문에서도 대표적인 그린인프라 시설로 레인가든, 투수성 포장, 옥상녹화, 빗물저류시설 등을 소개
    - 캐나다 온타리오의 그린벨트 재단(2017) 또한 투수성 포장, 빗물저류시설, 옥상녹화 등을 포함해 총 17개의 그린인프라 시설에 대한 설명을 담은 가이드북 발간
  - 환경부(2013a)의 저영향개발 기술요소 가이드라인에서도 식물재배화분, 투수성 포장, 침투도랑, 식생도랑 등의 역할 및 적용대상지, 비점오염물질의 저감효율 제시
    - 이진희 외(2014)는 저영향개발 기법으로 투수성 포장, 침투도랑, 빗물정원, 옥상녹화 등 18개 기술요소를 소개하고 주요 기능으로 물순환 건전성 회복, 비점오염 저감, 홍수 저감, 빗물이용(물 재이용) 제시
    - 청주시 오창과학산업단지과 전주시 서곡지구를 대상으로 한 환경부 시범사업(2019)에서도 식물재배화분, 투수블록, 옥상녹화 등의 그린인프라 시설 적용
    - 평택 고덕신도시의 저영향개발기법 도입 방안에 대해 연구한 이정민 외(2016)는 빗물 정원, 침투도랑, 나무여과상자, 인공습지를 대상으로 실험 실시
- 본 연구에서는 선행연구를 종합하여 <표 3-2>와 같이 대표적인 그린인프라 기술을 중심으로 개념과 적용 사례, 경제적·환경적·사회적 측면의 효과를 확인하고자 함

<표 3-2> 레인시티 효과성 분석의 주요 대상

구분	특성	적용사례
투수성 포장	일반 아스팔트나 콘크리트와 달리 빗물을 토양으로 침투시키는 포장	미국 시카고, 미국 프로빈스타운
침투도랑	돌로 채워진 도랑이 내리는 빗물을 머금었다가 바닥과 측면을 천천히 침투시킴	네덜란드 즈볼러, 경기도 용인시 처인구
식물재배화분	컨테이너 또는 밀폐형 구조물로 시설 내 토양, 식물 등이 빗물을 수집·여과	미국 미시건주, 미국 필라델피아
식생도랑	풀이나 관목 등이 밀집된 얇은 선형 수로로 비점오염물질 감소 및 녹지 경관 제공 가능	캐나다 토론토, 호주 티트리굴리, 영국 엔필드
빗물정원	토종 관목과 다년생 식물 등으로 이루어진 정원으로 강우유출 저감 및 도시열섬 억제 가능	스웨덴 예테보리, 노르웨이 베르겐
빗물저류시설	빗물을 일시적으로 모아 두었다가 시간을 두고 방류하거나 저장하는 시설	가나 쿠베, 미국 프리몬트, 브라질 마카에

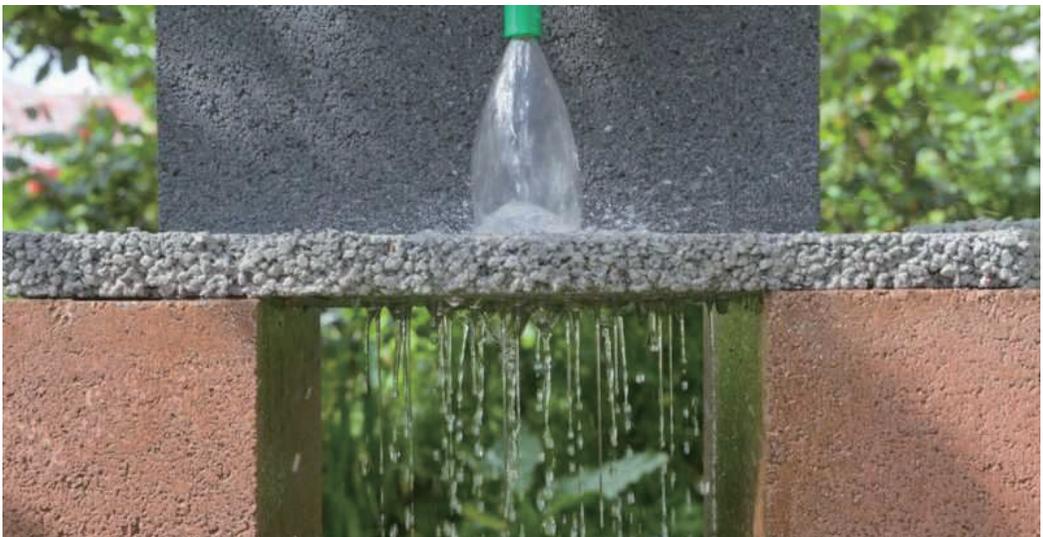
## 제2절 그린인프라 기술요소별 효과

### 1. 투수성 포장(Permeable Pavements)

#### 1) 개념

- 자연적인 물순환과 같이 빗물을 토양으로 침투시키는 투수성 포장
  - 일반 포장도로는 빗물과 오염물질을 밀어내는 불투수성으로 인해 빗물이 배수구로 직접 흘러 들어가게 하며, 수질오염 및 하수관 역류의 원인이 됨(GrowNYC, 2016)
  - 이처럼 빗물이 스미지 못하는 아스팔트나 콘크리트 포장과 달리 투수성 포장은 투수 블록 등 다공포장과 하부 쇄석의 공극을 통해 빗물을 토양에 침투시킴(환경부, 2019)
    - 투수성 포장은 크게 투수성 콘크리트, 투수성 아스팔트, 자갈강화포장으로 구분되며, 빗물을 토양으로 침투시키기 때문에 우수유출 및 비점오염물질 저감, 도시형 홍수 및 열섬현상 완화에 효과적
    - 빗물 침투로 지하수 충전을 촉진하고 주변 기반시설의 수명을 향상시키며, 일반적인 도로포장에 비해 유지관리가 용이(Greenbelt Foundation, 2017)
    - 불투수성 포장을 할 경우, 우수관로로 빠져나가지 못한 빗물이 도로 표면에 고여 차량이나 보행자의 이동을 방해하지만 투수성 포장은 빗물을 모두 투과하기 때문에 차량/보행자의 이동환경 개선 또한 가능(서울시, 2009)

〈그림 3-1〉 투수성 포장



자료: Land8 홈페이지

## 2) 적용사례

### (1) 미국 시카고

- 시카고 골목의 환경개선을 위해 투수성 포장을 활용한 The Green Alley Program
  - 시카고에서는 도시 내 많은 골목길이 하수도 및 빗물 관리시스템과 연결되어있지 않아 홍수문제가 종종 발생하는 것을 해결하기 위해 고비용의 하수도 시스템을 연결하는 것 대신 ‘The Green Alley Program’이란 이름으로 그린인프라 적용
  - 2001년부터 프로그램을 시작하여 2017년까지 투수성 포장을 중심으로 레인가든, 식물식재, 옥상녹화 등이 어우러진 300개 이상의 ‘그린 골목’ 구축
    - 프로그램을 주도한 시카고 교통국은 빗물을 침투시키는 투수성 포장을 적용하는 동시에 반사계수가 높은 포장재를 적극적으로 활용하였는데, 이로 인한 도시열섬현상 완화로 냉방비용이 절감되고, 식생의 성장 및 대기질 개선에 긍정적인 효과 발휘
    - 재활용 건설자재를 사용하여 매립지로 운반되는 폐기물을 줄이고 비용을 절감하는 등 그린인프라에 따른 물순환 개선뿐 아니라 과정의 친환경성도 중시

〈그림 3-2〉 시카고 골목길 투수성 포장 적용 전후



자료: CDOT(2010), The Chicago GreenAlley Handbook

### (2) 미국 프로빈스타운

- 투수성 포장을 적용해 미국 프로빈스타운 상업지역 및 해변의 환경개선
  - 프로빈스타운 항구는 해변을 보유하고 있어 어업 및 관광업이 가능하고 인근의 상업 중심지이자 주거단지가 밀집한 상업 거리(Commercial Street)와 인접
  - 그러나 밀도 높은 개발과 넓은 불투수면으로 인해 강우 시 상업 거리에서 오염물질과 함께 빗물이 해변으로 유출되고, 특히 여름철 폭풍이 발생한 이후에는 해수욕 기준을 초과하는 대장균이 검출되어 정기적으로 해변을 폐쇄하는 등 문제 발생

- 오염물질이 해변뿐 아니라 바다로 유출되면서 조개류에도 부정적 영향을 미치는 등 어업 및 관광업 모두에 피해 발생
- 매사추세츠 환경보호국은 이러한 문제를 해결하기 위해 상업거리를 중심으로 2012년부터 투수성 포장 건설 프로젝트를 시작
- 투수성 포장 및 기타 조치들이 더해지면서 빗물유출량이 감소하고 수질이 향상되는 효과를 얻었으며, 해변의 폐쇄 빈도도 크게 감소

〈그림 3-3〉 프로빈스타운 주거단지 투수성 포장 적용 전후



자료: U.S.EPA(2016), NONPOINT SOURCE SUCCESS STORY

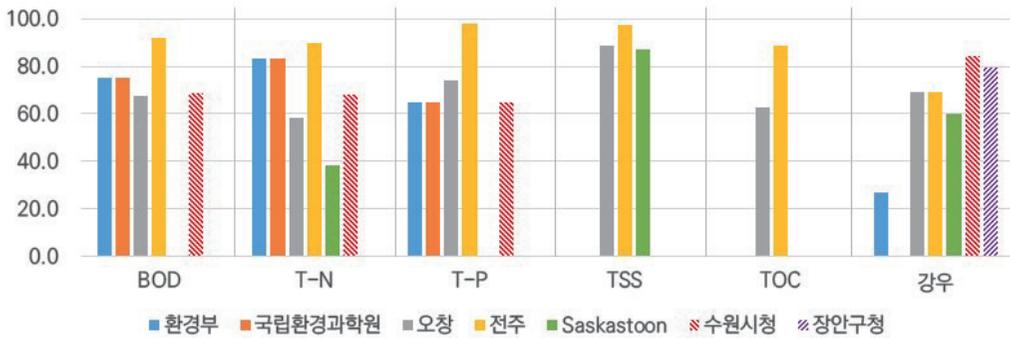
### 3) 효과

#### (1) 비점오염물질 및 우수유출 저감

- 비점오염물질별로 최소 38.5%에서 최대 97.2%의 저감효과 보유
  - 환경부(2013a)와 국립환경과학원(2018)은 선행연구 분석을 통해 그린인프라 시설별 비점오염물질 및 강우유출저감효율 기준을 제시했으며, 수원시(2016)에서는 수원시청 및 장안구청에 설치된 투수성 포장을 대상으로 모델링을 실시하여 저감효율 분석
  - 본 연구에서는 선행연구에서 제시한 비점오염물질 저감효율 및 강우유출저감효율을 종합하여 〈그림 3-4〉와 같이 투수성 포장의 성능을 확인
  - 연구마다 조건이 상이하기 때문에 절대적인 비교에 한계가 있을 수 있지만 투수성 포장의 일반적인 경향을 살펴본다는 측면에서 볼 때, 투수성 포장의 총부유물질(TSS) 저감효율은 평균 91.0%로 다른 오염물질에 비해 상대적으로 우수한 것으로 확인
- 환경부의 시범사업으로 진행된 청주시 오창과학산업단지에 적용된 투수성 포장은 BOD, T-N, T-P, TSS, TOC 저감효율이 평균 93.1%로 타 사례에 비해 높음

- 수원시청의 투수성 포장은 우수유출저감효율 84.2%로 장안구청(79.4%), 전주(69.4%) 등의 사례에 비해 가장 우수한 효율을 나타냄
- 투수성 포장 일반적으로 투수성의 표층과 모래 등으로 만들어진 필터층 등으로 구성되며 빗물이 표층과 필터층을 차례로 지나면서 오염물질이 여과되고 깨끗한 빗물이 하천 또는 지하수 등으로 흘러갈 수 있도록 유도함
- 이에 따라 앞선 사례에서 살펴본 바와 같이 도심의 자연적인 물순환을 개선하고 오염물질을 줄이는 방안으로 국내·외에서 활용 중

〈그림 3-4〉 투수성 포장의 비점오염물질 및 우수유출저감효과



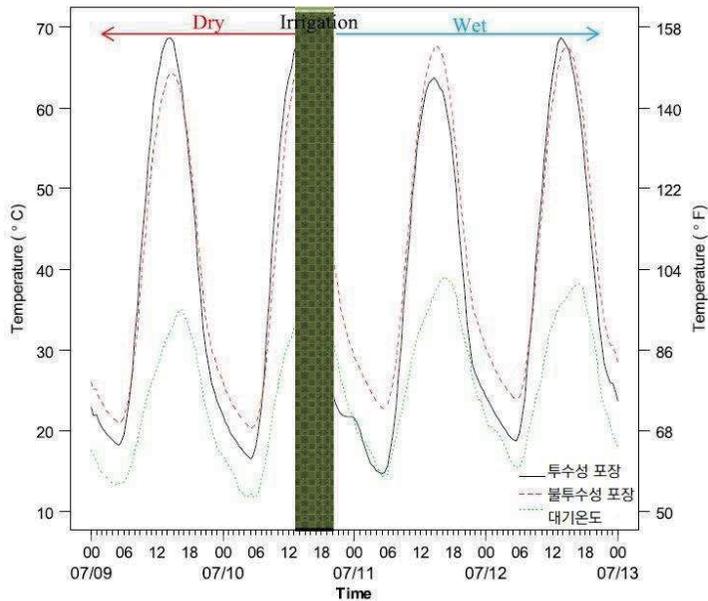
자료: 국립환경과학원(2018), 수원시(2016), 환경부(2013a, 2019), City of Saskatoon(2016)

## (2) 도심열섬현상 완화

- 투수성 포장은 습한 환경에서 탁월한 온도저감효과 보유
  - Li et al.(2013)은 열섬현상 완화 및 빗물 관리 방안으로 도로 포장에 관한 연구를 시행했으며, 투수성 포장 및 불투수성 포장, 차열성 포장 등 다양한 유형의 도로포장을 대상으로 온도변화 모니터링 실시
  - 투수성 포장의 고온저감 효과는 습한 조건에서 증대되는데, Li et al.(2013)은 이러한 특성을 고려하여 약 25℃의 물을 투수성 포장 및 불투수성 포장에 뿌리고 〈그림 3-5〉과 같이 물을 뿌리기 전과 후의 온도변화를 확인
    - 모니터링은 2012년 7월 9일 0시부터 7월 13일 0시까지 진행됐으며, 7월 10일 16시에 물을 뿌려 도로에 물을 주기 전과 후의 상황을 비교
    - 물을 뿌리기 전 건조한 상태의 낮 시간대에는 투수성 포장이 불투수성 포장에 표면 온도가 약 5℃ 높았으나 물을 뿌리기 시작한 직후에는 투수성 포장의 온도가 30℃ 이상 떨어졌으며 수분이 증발함에 따라 온도가 점차 상승

- Li et al.(2013)은 연구를 통해 불투수면 증가와 이상기후로 급증하는 열섬현상의 완화방안으로 투수성 포장의 가능성을 정량적인 방법으로 증명
- 수원시에서는 빗물저류시설을 활용해 빗물을 모은 후, 빗물분사기로 더운 여름 도로의 표면 온도를 낮추고 있으므로 이러한 방법이 투수성 포장과 결합한다면 온도를 더욱 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 예상

〈그림 3-5〉 투수성 포장 및 불투수성 포장의 표면온도 비교



자료: Li et al.(2013), The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management

### (3) 경제적 이점(일반 포장 대비)

- 투수성 포장은 초기 건설비용이 많이 들지만, 장기적 관점에서 경제적 이점 보유
  - Terhell et al.(2015)는 수문학적 관점에서 투수성 포장과 일반적인 아스팔트 포장을 비교한 Collins et al.(2008)의 연구를 바탕으로 투수성 포장의 경제적 효과 분석
  - 투수성 포장재는 일반적인 아스팔트 포장보다 돈과 인력 등 초기 건설비용이 더 많이 소요되지만, 건설 이후 유지보수비용은 아스팔트 포장보다 상대적으로 낮음
  - 투수성 포장은 하단에 빗물을 침투·여과할 골재를 비롯해 다양한 재료 층을 설치하고 땅을 더 깊이 뚫어야 해서 일반적인 아스팔트 포장보다 초기 건설비용이 많이 듭
  - 그러나 일반 아스팔트는 투수성 포장에 비해 풍화 및 온도, 지질의 응력에 영향을 많이 받기 때문에 표면이 쉽게 마모되고 균열 등이 발생하여 지속적인 유지·보수 필요

- <표 3-3>과 같이 약 2,000m<sup>2</sup> 규모의 주차장을 25년 이상 운영할 때 투수성 포장과 아스팔트 포장의 건설/유지비용을 비교한 결과, 투수성 포장의 전체 비용이 더 낮은 것으로 확인(Terhell et al., 2015)

<표 3-3> 투수성 포장 및 아스팔트 포장의 건설 및 유지비용 비교

(단위 : 회/\$, 주차장/25년 운영 기준)

구분	투수성 포장			일반 아스팔트 포장		
	빈도	단가	비용	빈도	단가	비용
초기 설치 (Installation)	1	165,350.00	165,350.00	1	109,000.00	109,000.00
빗물 유지시설 (Detention)	1	15,000.00	15,000.00	0	0.00	0.00
여과시설 (Vacuum Sweep)	25	400.00	10,000.00	0	0.00	0.00
투수성 재건 (Restore Permeability)	5	1,750.00	8,750.00	0	0.00	0.00
기초 재건 (Refresh Base)	1	8,100.00	8,100.00	0	0.00	0.00
균열 제거 (Crack Sealing)	0	0.00	0.00	25	250.00	6,250.00
아스팔트 덧입힘 (Seal Coat)	0	0.00	0.00	5	20,000.00	100,000.00
터 깎기 (Stripping)	0	0.00	0.00	1	3,125.00	3,125.00
부분 보수 (Patching)	0	0.00	0.00	5	100.00	500.00
표면 교체 (Replace Surface)	0	0.00	0.00	1	32,000.00	32,000.00
<b>합계</b>			<b>207,200.00</b>			<b>250,875.00</b>

자료: Terhell et al.(2015), Cost and benefit analysis of permeable pavements in water sustainability

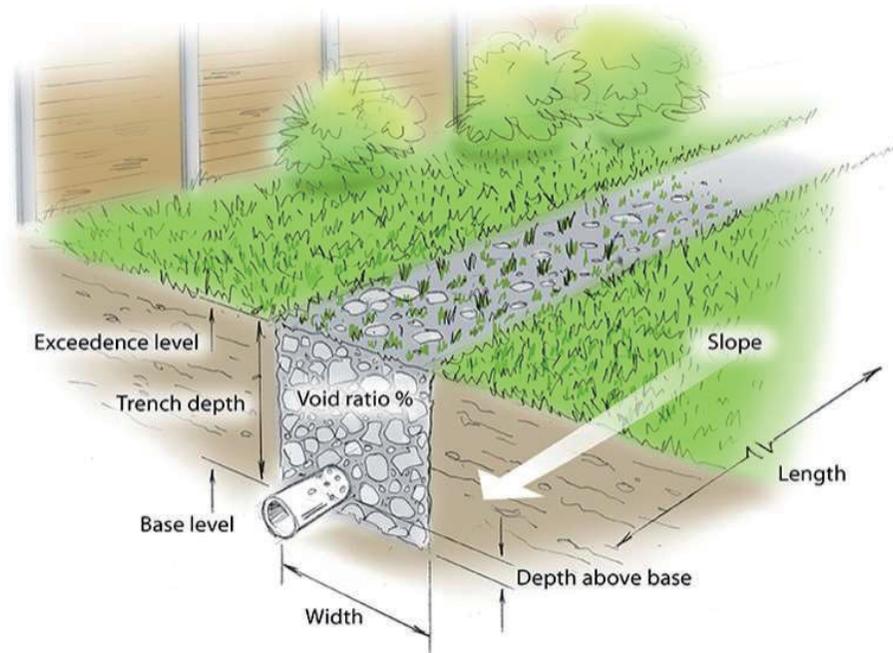
- 다만 Terhell et al.(2015)의 연구는 투수성 포장의 균열이나 부분 보수비용을 전혀 고려하지 않았는데, 서울시의 투수성 포장 시범시공 결과(2010)에 따르면 투수성 포장도 종류에 따라 표면이 파손되거나 벌어지는 등의 문제가 발생할 수 있음
- 그러나 투수성 포장의 유지보수비용을 추가한다 해도 빗물침투에 따른 지하수 함양, 오염물질 저감, 도심열섬현상 완화, 도심형 호수피해 방지 등의 효과를 경제적으로 환산한다면 이러한 비용을 초과하는 효과가 있을 것으로 예상

## 2. 침투도랑(Infiltration Trench)

### 1) 개념

- 빗물을 임시 저장해 우수유출을 완화하고 오염물질을 제거하는 침투도랑
  - 침투도랑은 돌로 채워진 길고 좁은 도랑으로 비가 내리면 돌 사이의 공간에 빗물을 머금었다가 도랑의 바닥과 측면을 통해 천천히 침투시킴(Dublin City Council, 2005)
  - 환경부(2019)는 이를 소규모 빗물저류시설이라고 표현했는데, 용어에서 알 수 있듯 빗물을 임시로 저장하기 때문에 우수유출의 양과 속도 조절이 가능하고 침투, 여과, 흡착, 생분해 등을 통한 오염물질 제거 또한 가능(City of Seattle, 2017)
  - 침투도랑은 다른 기술 대비 크기가 작아 소규모의 빈번한 강우 환경에 적합하며 건설비가 낮고 기존 우수관리 시스템의 크기를 줄이는 데 도움을 줄 수 있음(MAPC, 2017)
    - 식생체류지와 같이 조경적 측면에서의 효과는 크지 않지만 크기가 작아 도심 환경에 자연스럽게 어우러져 경관을 방해하지 않는다는 장점 또한 보유
    - 반면, 규모가 작아 집수량이 제한적이고, 침전물로 막히기 쉬워 적절한 기능을 보장하기 위해서는 필터 등을 활용한 전처리과정이 필요

〈그림 3-6〉 침투도랑



자료: Innovyze 홈페이지

## 2) 적용사례

### (1) 네덜란드 즈볼러

- 네덜란드 즈볼러, 우수유출 및 오염물질 저감을 위해 침투도랑 설치
  - 네덜란드 국토의 26%는 지면이 해수면보다 낮고, 29%는 하천이 범람할 가능성을 가지고 있어, 적절한 물관리는 국가의 생존전략이라고 할 수 있음(임성아, 2015)
  - 이에 따라 네덜란드는 선진적인 물 관리 기술과 간척 기술을 보유하고 있으며, 정부는 5년마다 '국가 물 관리 계획(National Water Plan)'을 수립
  - 다수의 전문가는 네덜란드의 물 관련 문제를 줄이려면 다양한 조치의 적절한 혼합이 필요하다고 강조했으며, 네덜란드 정부는 강우유출 및 오염유출 방지, 홍수 방지 등을 위해 빗물 저장 등을 포함한 빗물 관리 정책 수행(Beenen & Boogaard, 2007)
  - 이러한 노력의 일환으로 네덜란드 즈볼러의 쉘러호크(Schellerhoek)에 침투도랑이 설치되었으며, Beenen and Boogaard(2007)은 해당 시설에 대한 모니터링 실시 - 1994~1997년에 이루어진 1차 모니터링에 이어 2005~2006년에 2차 모니터링을 실시하여 침투도랑 내의 수위, 지하수 수준 등을 확인
  - 쉘러호크의 침투도랑은 비가 내린 후 24시간 이내에 도랑 내 빗물이 모두 주변으로 침투되는 것으로 나타나 강우유출저감효과가 100% 가깝다는 것을 입증
  - 침투도랑 주변 토양의 중금속 등 오염물질 농도가 과거 모니터링 결과값에 비해 크게 증가하지 않아 장기간에 걸쳐 오염물질 저감이 가능하다는 것을 증명

〈그림 3-7〉 네덜란드 즈볼러 쉘러호크의 침투도랑



자료: Beenen and Boogaard(2007), Lessons from ten years storm water infiltration in the Dutch Delta

## (2) 용인시 처인구

- 환경부에서는 경안천의 수질안정을 도모하고자 용인시 처인구에 침투도랑 설치
  - 경안천은 경기도 용인시에서 발원하여 광주시를 거쳐 팔당호로 유입되는 국가하천으로 용인시가 하천을 따라 자전거도로를 구축하는 등 용인시민들의 주요 휴식공간
  - 그러나 강우 시 도로에서 발생하는 비점오염물질이 하천으로 유입되어 수질이 오염됨에 따라 환경부에서는 처인구 전대리 일대에 침투도랑 설치
    - 전대리를 지나고 있는 45분 국도는 아스팔트로 포장되어 있어 불투수율이 100%에 달하며, 강우 시 빗물이 오염물질과 함께 도로를 타고 경안천으로 유출
  - 해당 시설은 강우유출수를 지하로 침투시켜 토양의 여과·흡착 작용에 의해 오염물질을 제거하는 것을 주요 목표로 하며 부지면적은 599㎡, 배수구역은 0.5ha에 이룸
    - 침투도랑에 의한 수질개선 효과를 분석한 결과, TSS의 평균 처리효율은 84.4%, BOD 77.4%, COD 78.5%, T-N 64.4%, T-P 67.9%로 나타남(비점오염저감시설 정보관리시스템)
  - 환경부에 따르면 수질 처리 뿐 아니라, 현장에서의 자연수 물수지를 도와 지하 수계의 지속적인 수량을 공급하여 기저유량을 유지하는데 도움을 주는 것으로 나타남
    - 경안천은 과거 공업용수로밖에 쓸 수 없을 정도로 수질이 안 좋았지만, 환경부를 비롯 경기도, 용인시 등의 정책이 더해지면서 수질이 많이 개선된 실정
    - 침투도랑만으로 경안천의 수질을 정상화하는데 한계가 있지만, 침투도랑을 포함해 다양한 그린인프라 기술 및 기타 정책이 병행된다면 추가적인 수질 개선 가능

〈그림 3-8〉 용인시 처인구 침투도랑(용인시 처인구 포곡면 전대리 117-9)



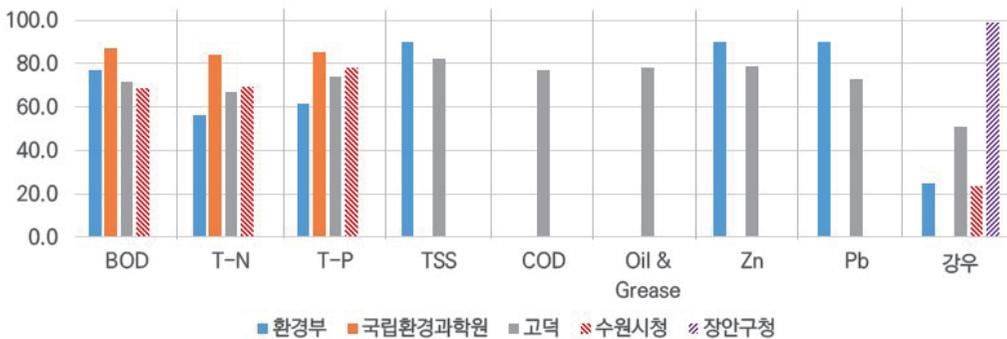
자료: 최지연(2010), 자연적 물순환 시스템을 가진 침투여과형 비점오염저감기술 개발

### 3) 효과

#### (1) 비점오염물질 및 우수유출 저감

- 선행연구를 통해 침투도랑의 다양한 비점오염물질 저감 효과 확인
  - 이정민 외(2016)의 모니터링 및 환경부(2013a)와 국립환경과학원(2018)의 가이드라인, 수원시(2016)의 모델링 결과를 종합하여 침투도랑의 효과 확인
    - 선행연구에서는 주로 BOD, T-N, T-P의 저감효율을 확인하였으나 이정민 외(2016)는 이 외에도 COD, Oil & Grease, Zn, Pb의 저감효율까지 확인
  - 우수유출저감효과의 경우, 장안구청 침투도랑의 모델링 값이 99.1%로 환경부(2013a) 가이드라인에서 제시한 25.0%, 이정민 외(2016)의 모니터링 결과인 50.9%, 수원시청의 23.6%에 비해 탁월하게 높은 수치 기록
  - 지역마다 환경이 다르므로 장안구청의 수치를 일반화하는 것은 어렵지만 침투도랑이 여건에 따라 높은 우수유출저감효과를 나타낼 수 있다는 것을 입증
  - 침투도랑의 비점오염물질별 저감효과를 비교해보면 BOD, T-N, T-P에 비해 TSS, Zn, Oil & Grease에 대한 저감효과가 높은 것으로 나타남
    - 오염물질 별 평균 저감효율은 TSS 86.0%, Zn 79.0%, Oil & Grease 78.4%, COD 77.2%, BOD 76.0%, T-P 74.6%, Pb 72.6%, T-N 69.1% 순
  - 우수유출저감효과와 같이 현장 여건에 따라 비점오염물질 저감효과도 달라질 수 있지만, 선행연구를 통해 침투도랑이 다양한 비점오염물질을 줄일 수 있음을 입증

〈그림 3-9〉 침투도랑의 비점오염물질 및 우수유출저감효과

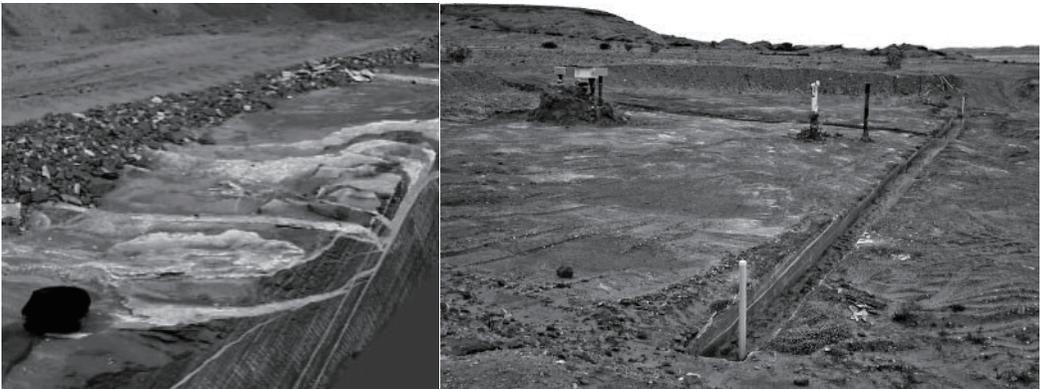


자료: 국립환경과학원(2018), 수원시(2016), 이정민 외(2016), 환경부(2013a, 2019)

## (2) 대수층 재충전(지하수 함양)

- 실험을 통해 대수층 재충전을 위한 경제적 방안으로써 침투도랑의 가능성 입증
  - 2000년대 초반 미국에서는 투수성 암반에서의 대수층 충전을 위해 주입정을 활용하는 경우가 일반적이었으나 전문가들은 성능증진과 비용 절감을 위해 대안 모색
    - 대수층은 물이 많이 저장되어 있을 뿐 아니라 잘 이동하기 때문에 지하수 개발에 적합한 암석층 또는 토양층을 의미(환경부, 2018)
  - Heilweil and Watt(2011)는 대안 중 하나로써 침투도랑의 성능을 평가하기 위해 미국 유타주 샌드 홀로(sand hollow) 주립공원에서 실험 추진
    - 실험은 2004년 10월 27일부터 12월 14일까지 48일간 주립공원 내에 있는 저수지(reservoir)에서 진행됐으며, 해당 저수지는 평소 지표수 저장과 대수층 재충전의 기능을 수행할 뿐 아니라 주립공원 내의 관광지로 잘 알려져 있음

〈그림 3-10〉 침투도랑 성능 평가 대상지

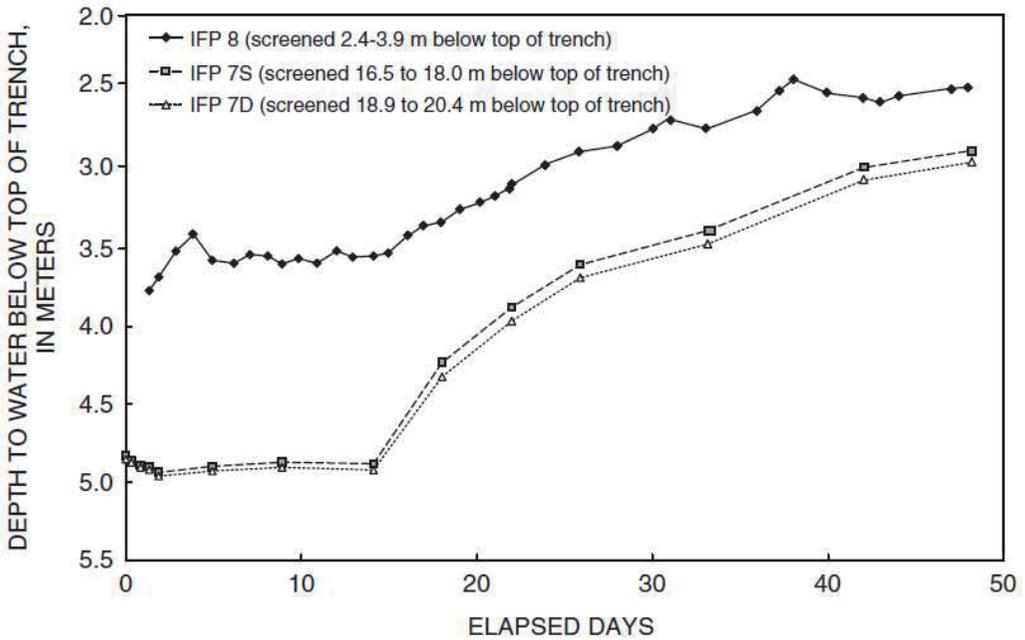


자료: Heilweil and Watt(2011), Trench infiltration for managed aquifer recharge to permeable bedrock

- Heilweil and Watt(2011)는 침투도랑 설치에 따른 대수층 수위변화를 살펴보기 위해 침투도랑에서 5m 떨어진 곳으로부터 시작되는 3개의 관찰지점 선정
  - 각각 2.4~3.9m(IFP 8), 16.5~18.0m(IFP 7S), 18.9~20.4m(IFP 7D) 깊이에서 선별
- 48일간의 실험 기간 2,000m<sup>3</sup> 규모의 대수층 재충전이 일어났으며, 수위는 약 2.5m 증가, 구체적으로는 〈그림 3-11〉과 같이 관찰지점별로 다른 결과가 나타남
  - 침투도랑과 가장 가까운 IFP8은 실험이 시작되기 전에 다소 건조한 상태였으나 실험 시작 1일 후에 포화상태로 변했고 실험이 끝날 때까지 지속해서 수위가 상승함
  - 대조적으로 IFP 7S와 IFP 7D의 수위는 실험 시작 18일 이후까지 4.9m 이하에 머물러 침투도랑 하단에 불포화대가 있다는 것을 확인할 수 있었음

- Heilweil and Watt(2011)는 연구결과를 통해 침투도랑이 미국 유타 남서부 지역의 사암 대수층 재충전을 위한 경제적 방안을 입증했다고 강조했다
- 해당 연구는 빗물이 아닌 저수지의 침투를 대상으로 실험을 했지만 침투도랑이 물의 침투를 도와 대수층 재충전에 긍정적인 역할을 했다는 점을 고려한다면 빗물의 침투 또한 수월하게 하여 지하수 함양에 도움이 될 것이라고 예상할 수 있음

〈그림 3-11〉 침투도랑 설치에 따른 관찰지점별 수위 변화



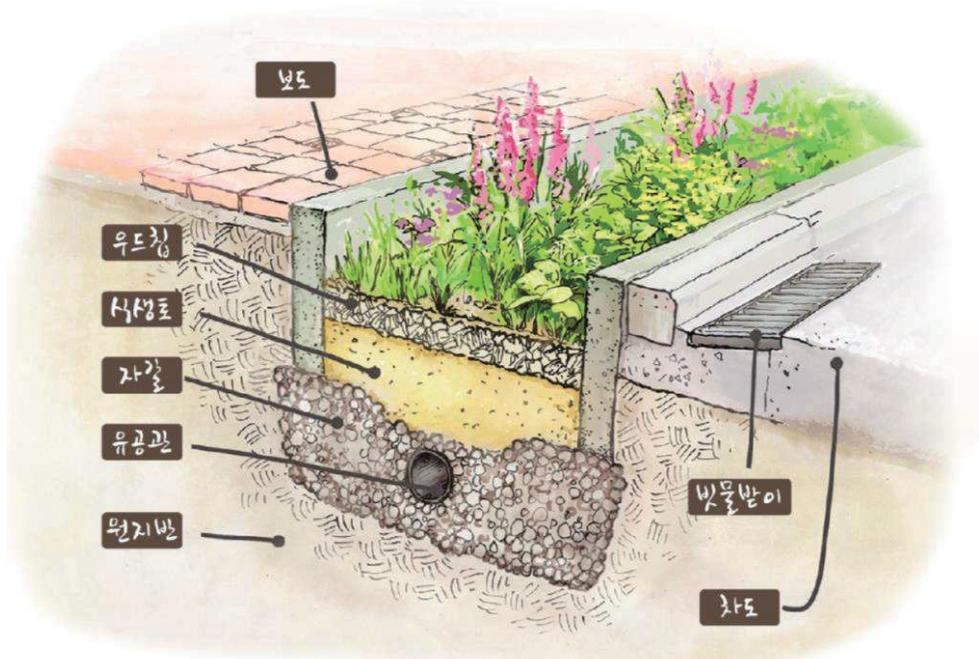
자료: Heilweil and Watt(2011), Trench infiltration for managed aquifer recharge to permeable bedrock

### 3. 식물재배화분(Planter Box)

#### 1) 개념

- 강우유출 및 수질오염 저감, 녹지공간 형성이 가능한 식물재배화분
  - 식물재배화분은 지상 또는 지하에 있는 밀폐형 구조물로 시설 내 토양, 식물 등이 빗물을 수집·여과하여 강우유출 및 수질 오염 저감(City of Lancaster, 2011)
    - 다만, 이러한 효과는 식물재배화분을 통한 토양으로의 빗물침투가 가능하도록 설계된 경우에 극대화되며 침투할 수 없는 경우 강우유출 및 수질 오염 저감 외에 침투유출량 감소 효과는 거의 없다고 볼 수 있음(SEMCOG, 2008)
  - 시설 내에 식물이 심겨 있으므로 도심 안에 녹지공간을 형성할 수 있고, 강우 시 빗물이 식물에 수분을 공급하고 수분이 다시 식물을 통해 대기 중으로 증발하는 선순환이 가능하지만 식생을 유지하기 위해서는 가뭄기에도 정기적인 수분 공급 필요
  - 공간이 한정적인 도시 지역이나 거리 등에 활용할 수 있을 뿐 아니라 개인 사유지에 설치할 경우 물웅덩이를 제거하거나 토양침식을 방지하고 조경을 꾸미는 데 효과적(City and County of Honolulu, 2012)

〈그림 3-12〉 식물재배화분



자료: 환경부(2019), 빗물유출제로화 시범사업 백서

## 2) 적용사례

### (1) 미국 미시건주

- 식물재배화분의 효과 및 모니터링의 필요성을 제시한 미국 미시건주
  - 미국 미시건 주정부는 랜싱(Lansing) 지역에 위치한 미시건 애비뉴(Michigan Avenue)의 환경 개선 프로젝트를 추진하면서 식물재배화분<sup>1)</sup> 등 그린인프라 설치
    - 미시건 애비뉴는 지역을 대표하는 경제·역사·문화의 중심지이자 미시간 주 전체의 관광 역할을 하는 곳으로 이스트 랜싱 다운타운과 주 수도 및 미시간 주립 대학교를 연결하는 교통 요충지
    - 1.5m 넓이의 식물재배화분 30개를 설치했으며, 이를 통해 도시환경에서의 빗물을 효과적으로 통제, 정화, 분사하는 수단으로 활용하고자 했음(SEMCOG, 2008)
      - 시설물을 통해 홍수위험을 완화하고자 했으며, 화분 내 식물을 통해 침전물, 영양소, 중금속 등의 오염물질을 제거하고 수온을 낮추며 강우유출수의 침투 및 증발을 촉진해 인근에 위치한 그랜드 리버(Grand river)에 미치는 영향을 줄이고자 했음
    - 2008년 건설이후 2014년 추가 연구를 통해 식물재배화분의 효과를 확인한 결과, 연간 강우유출량의 약 75%가 감소하는 등 소정의 성과 달성(Tetra Tech, 2014)

〈그림 3-13〉 미국 미시건주 식물재배화분



자료: SEMCOG(2008), A Design Guide for Implementers and Reviewers, Tetra Tech(2014). Green Infrastructure in the greater lansing area

1) Tetra Tech(2014)의 자료에서는 미시건 애비뉴에 설치된 식물재배화분을 식물재배화분형 식생체류지(planter box style bioretention)라고 표현했으나, 미국 환경보호청에서 이를 식물재배화분 사례로 소개했다는 점을 참고하여 본 연구에서도 식물재배화분 적용사례로 소개

## (2) 미국 필라델피아

- 미국 필라델피아, 녹색거리 구축을 위한 방안으로 식물재배화분 선택
  - 미국 필라델피아 수도국은 콜럼버스 스퀘어의 일부를 녹색 거리로 개조하고자 했으며 이를 위한 첫 번째 시도로 식물재배화분 설치(Philly Watersheds 홈페이지)
    - 수도국에서는 해당 프로젝트를 기초로 향후 대규모의 프로젝트를 수행하고자 함
  - 식물재배화분을 통한 침투와 증발, 또는 빗물의 역류 및 저속 유출로 강우유출수를 효과적으로 관리할 수 있으며, 과부화된 기존 하수도 시스템으로의 강우유출을 줄임으로써 주변의 개울과 강에 긍정적인 영향을 줌
  - 또한 추가적인 조경 및 그늘막을 설치하여 시각적인 아름다움을 증대하고 시민을 위한 편의시설을 제공하며 도심열섬현상을 완화

〈그림 3-14〉 미국 필라델피아 식물재배화분



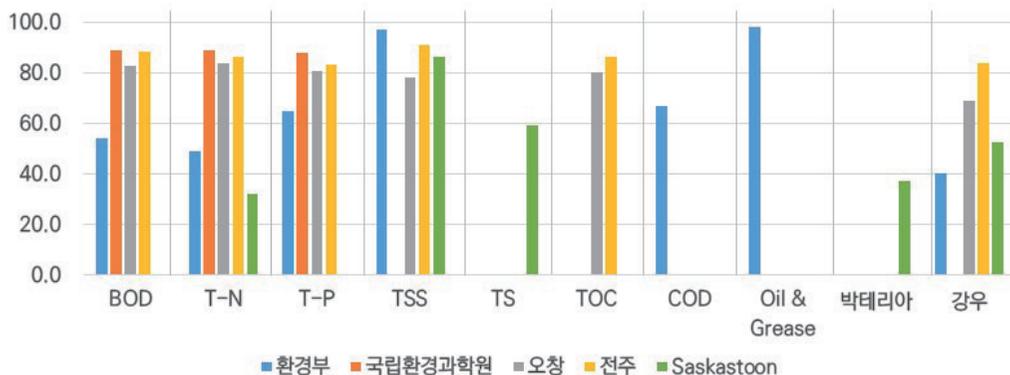
자료: Tetra Tech(2014), Green Infrastructure in the greater lansing area

### 3) 효과

#### (1) 비점오염물질 및 우수유출 저감

- 식물재배화분, 비점오염물질 중 TSS에 있어 상대적으로 우수한 저감효율 확인
  - 환경부(2013a)의 저영향개발 기술요소 가이드라인에 따르면 식물재배화분은 비점오염물질 중 특히 TSS 및 Oil & Grease에 대한 저감효율이 90.0% 이상인 것으로 나타남
    - 환경부에서는 비점오염물질 저감효율로 TSS 97.0%, Oil & Grease 98.0% 제시
  - 청주시와 전주시에서 시행된 환경부 시업 사업에서도 식물재배화분은 TSS에 대해 각각 78.2%, 90.9%의 저감효율을 나타냈고, 캐나다 새스커투스의 연구에서도 86.0%로 확인되어 다른 비점오염물질에 비해 비교적 높은 수치 기록
  - BOD나 T-N, T-P의 평균 저감효율 또한 68.0~79.3%로 나타났지만, 사례마다 저감효율의 최대값과 최소값의 차이가 23.0%p에서 57.0%p에 달하는 것에 비해 TSS의 저감효율 최대값과 최소값의 차이는 12.7%p로 비교적 고른 것으로 확인
  - 이를 통해 식물재배화분을 설치할 경우 비점오염물질 중 TSS는 안정적으로 제거 가능할 것으로 예상할 수 있으며, 이 밖에 COD나 Oil & Grease, 박테리아의 제거 또한 가능할 것으로 기대
  - 강우유출저감효율의 경우 전주시의 모니터링 결과값이 83.9%로 가장 우수한 수치를 기록했으며 환경부의 가이드라인이 40.0%로 가장 낮은 수치를 제시
  - 그러나 환경부에서 식생도랑의 강우유출저감효율을 10.0%, 침투도랑 25.0%, 투수포장 27.0%라고 제시한 것과 비교하면 40.0%는 비교적 양호한 수치라고 할 수 있음

〈그림 3-15〉 식물재배화분의 비점오염물질 및 우수유출저감효과



자료: 국립환경과학원(2018), 환경부(2013a, 2019), City of Saskatoon(2016)

(2) 침투유출 저감

- 강도 높은 뇌우 상황을 가정하여 식물재배화분의 침투유출 저감효과 입증
  - 미국 포틀랜드시에서는 지역 내에 운영하는 그린인프라에 대한 정보를 모으고 성능을 개선하고자 2005년부터 정기적인 모니터링 시행(City of Portland, 2013)
    - 모니터링 보고서는 2006, 2008, 2010, 2013년 발간됐으며, 지속적인 모니터링을 통해 각각의 그린인프라 시설이 지닌 장점을 정량화하여 유지보수비용을 낮추고 공공의 안전을 보장하며 전반적인 설계 및 기능을 개선하고자 했음
    - 도심 곳곳에 있는 식물재배화분에 대한 모니터링도 함께 추진됐으며, 수질오염방지 연구실(Water Pollution Control Lap)에 실험용으로 구축된 식물재배화분에 대한 연구는 2005년 8월부터 2009년 6월까지 4년 동안 진행
      - 실험을 위해 WPCL에 4개의 식물재배화분을 구축했으며, <그림 3-16>과 같이 각 화분에 상이한 충전재를 활용하여 성능을 비교하고자 했음
      - 시설별 모니터링은 다양한 강우 상황을 가정하여 추진됐으며, WPCL 모니터링은 25년 강우 디자인에 기반(<표 3-4> 참고)

<그림 3-16> 식물재배화분 모니터링 대상지 및 구조(WPCL)



<b>BAY 4</b> Soil 1; Filter Fabric; “limited space” geometry		
<b>BAY 1</b> Soil 1 Filter Fabric <i>[Reference]</i>	<b>BAY 2</b> Soil 2 Filter Fabric “Soil Comparison”	<b>BAY 3</b> Soil 1 Pea Gravel “No Fabric”

자료: City of Portland(2013), 2013 Stormwater Management Facility Monitoring Report  
 Soil1: 70% sandy loam + 30% digested paper fiber  
 Soil2: 55% sandy loam + 25% digested paper fiber + 20% coconut coir  
 Geometry: shorter/wider ratio = 2.6, narrower/ longer ratio = 1.2

〈표 3-4〉 강우 디자인

강우 디자인	강우량 (inch)	지속시간 (시간)	피크 강도 (inch/시간)	비고
25-Year (Basement Sewer Backup Protection Design Storm)	1.89	6	3.32	매우 강한 뇌우, 최초 15분 동안의 강우로 하수구를 압도하는 침투유출 발생
ASFO (CSO Control Design Storm)	1.41	24	0.92	여름철 강우, 3번의 여름마다 발생하는 1회의 홍수를 가정
Summer6 (CSO Control Storm series)	2.17	35	0.60	여름철 강우, 6년 동안 2번의 홍수를 가정
WQ (Water Quality Design Storm)	0.83	24	0.17	연간 강우유출량의 90%를 수집, 처리할 수 있는 수질 처리 기준, 연평균 2회 이상 발생하기 때문에 다른 디자인에 비해 강우량과 강도가 훨씬 낮음

자료: City of Portland(2013), 2013 Stormwater Management Facility Monitoring Report

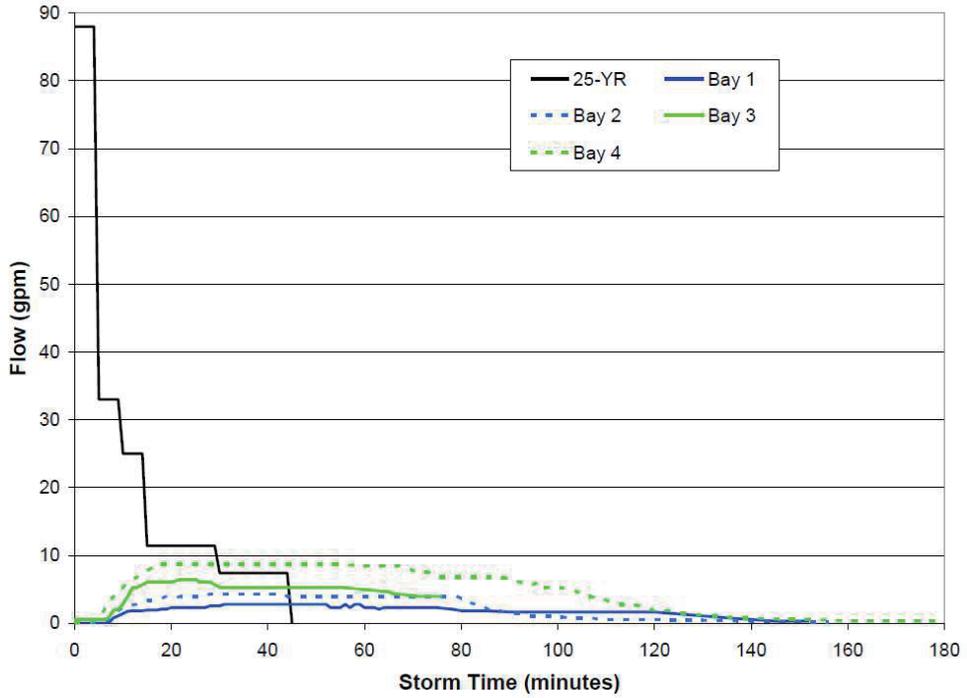
- 2005년 8월에 진행된 실험을 통해 식물재배화분별 침투유출저감효과를 확인한 결과, 〈그림 3-17〉, 〈표 3-5〉와 같이 91~96%의 높은 저감효과가 있는 것으로 나타남
- 다만 길고 좁은 모양인 Bay4에 비해 정사각형에 가까운 Bay1~3이 빗물 유지에 도움이 되었는데, 이는 식물재배화분의 벽을 따라 발생하는 누수 때문이라고 추정됨
- 토양과 배수용 돌 사이에 여과용 직물을 사용할 경우 빗물 유지능력이 향상할 수 있으며, 식물을 건강하게 유지하기 위해서는 더운 여름철에 수분을 공급하는 것이 중요

〈표 3-5〉 식물재배화분별 침투유출 저감 현황(WPCL)

구분	Bay1	Bay2	Bay3	Bay4
피크 유량(inch)	3.1	4.9	6.7	8.3
저감효과(%)	96%	94%	92%	91%

자료: City of Portland(2013), 2013 Stormwater Management Facility Monitoring Report

〈그림 3-17〉 식물재배화분별 침두유출 저감 현황(WPCL)



자료: City of Portland(2013), 2013 Stormwater Management Facility Monitoring Report

## 4. 식생도랑(Bioswales)

### 1) 개념

- 도로와 주차장의 오염물질을 저감하고 경관 개선에 효과적인 식생도랑
  - 식생도랑은 강우유출을 늦추고 오염물질을 걸러 내며, 빗물침투를 돕기 위해 풀이나 관목, 나무 등이 밀집된 얇은 선형 수로로(City of Alexandria, 2015), 식생수로, 침수식생 개수로 등 다양한 이름으로 불림(환경부, 2019)<sup>2)</sup>
  - 빗물의 보존과 여과시간을 늘리기 위해서는 선형의 면적이 유리하므로 식생도랑은 일반적으로 긴 도로와 평행하게 건설되는 경우가 많고, 물의 유속을 낮추기 위해 식생도랑 내에 사방땀을 만드는 경우도 있음(Bertule et al., 2017)
  - City of Saskatoon(2016)의 연구에서는 식생도랑이 선형이기 때문에 도로의 강우유출수를 처리하는 데 적합하다고 설명하기도 했는데, 선후 관계와 별개로 식생도랑은 도로나 주차장에 적용되는 경우가 많음
  - 토양의 여과·흡착 및 식물의 흡착작용으로 비점오염물질이 감소할 뿐 아니라 동·식물 서식공간을 제공하고 녹지 경관으로 기능한다는 장점이 있음(환경부, 2019)

〈그림 3-18〉 식생도랑



자료: City of Portland(2013), 2013 Stormwater Management Facility Monitoring Report

2) 본 연구에서는 식생도랑을 Bioswales라고 표기했지만, Bioswales는 Vegetated swales, dry swales, wet swales, grass channels, grass swales, biofiltration swales 등 다양한 이름으로 알려져 있기 때문에(City of Alexandria, 2015) 이를 포괄하여 연구 추진

## 2) 적용사례

### (1) 캐나다 토론토

- 노후화된 주차장으로 인해 발생하는 빗물 피해 예방을 위해 식생도랑 설치
  - 캐나다 토론토에 있는 에드워드 공원은 토론토 내의 공원 중 가장 큰 주차장을 보유하고 있는데, 시설 노후화로 강우 시 주변 지역으로 빗물이 유출되는 주요 원인이 되었으며 침식 및 홍수위험 증가, 수질 및 수생 서식지 저하에 영향을 미침
    - 인근 도심지역뿐 아니라 월캣 크릭 계곡에도 영향을 미쳐 교량과 산책로, 편의시설이 파괴되고 계곡 생태계에 악영향을 미침
  - 이에 따라 지자체에서는 보행자의 안전한 이동 및 물과 에너지 절약, 빗물 영향 완화 등을 목표로 개보수 프로젝트를 추진했으며, 식생도랑을 비롯해 식생체류지, 투수성 포장 등 그린인프라를 적용하여 강우유출수를 수집하고 유출속도를 저감하고자 함
  - 해당 프로젝트에서 식생도랑은 주차장에서 주변의 도심지로 배출되는 빗물을 제어하기 위해 건설됐으며, 가뭄에 강한 다양한 토종 식생을 활용
  - 새로운 그린인프라 주차장을 건설하기 위해 소요된 비용은 180만 달러로 이는 일반적인 아스팔트 주차장의 초기 건설비용보다 비싸지만, 침식 및 홍수피해에 드는 비용을 고려할 때 그린인프라 적용을 통한 예산 절감 가능
  - 식생도랑 등 그린인프라를 통해 기존의 주차대수를 유지하면서 노후된 주차장을 지속 가능한 시설로 변경했으며 강우유출량을 현저히 저감했고 식생을 통해 도시의 생물다양성을 증진시키고 휴식처가 될 그늘을 형성(Brankovic & Protic, 2019)

〈그림 3-19〉 캐나다 토론토 에드워드 공원 주차장의 식생도랑



자료: Schollenand 홈페이지

## (2) 호주 티트리굴리

- 빗물의 효과적 관리를 위해 육상경기장에 식생도랑 건설
  - 호주의 티트리굴리(Tea Tree Gully)시는 육상경기장인 벌카나 오벌(Bulkana Oval)을 대상으로 그린인프라 시범 프로젝트 추진
  - 강우유출수의 저장 및 재사용을 위해 식생도랑과 식생체류지를 건설했으며, 시설을 통해 여과된 빗물은 지하의 저류시설에 저장되었다가 경기장의 관개용수로 활용
  - 티트리굴리시는 식생도랑의 기본적인 기능인 빗물관리뿐 아니라 식생을 활용한 경관 개선, 시민을 위한 편의시설 운영 등이 결합할 때 그린인프라에 대한 지역 사회의 지지를 받을 수 있다고 강조(South Australia, 2010)

〈그림 3-20〉 호주 티트리굴리 식생도랑



자료: South Australia(2010), Bio-filter swale at Bulkana oval

〈그림 3-21〉 호주 티트리굴리 빗물저류시설(지하)



자료: South Australia(2010), Bio-filter swale at Bulkana oval

### (3) 영국 엔필드

- 강을 되살리기 위해 식생도랑을 포함한 그린인프라 적용
  - 영국 엔필드에 흐르는 살몬스 브룩(Salmons Brook)은 레아강의 작은 지류로 잘못 연결된 배관과 도로 등에서 흘러나온 폐수로 수질이 악화하자 환경청에서는 이를 개선하기 위해 식생도랑, 식생체류지 등 그린인프라 시설 설치
  - 식생도랑을 통해 빗물에 섞여 있는 오염물질을 여과함에 따라 수질이 개선됨은 물론 홍수위험이 감소하고 시민을 위한 여가공간의 기능 또한 수행
  - 이 외에도 살몬스 브룩 주변 부동산에 대한 주택보험 비용이 절감됐으며, 환경오염에 대한 대중의 인식 재고 및 습지에 대한 시민의 주인의식 향상(City of London, 2016)

〈그림 3-22〉 영국 엔필드 식생도랑



자료: City of London(2016), SuDS in London: A design guide.

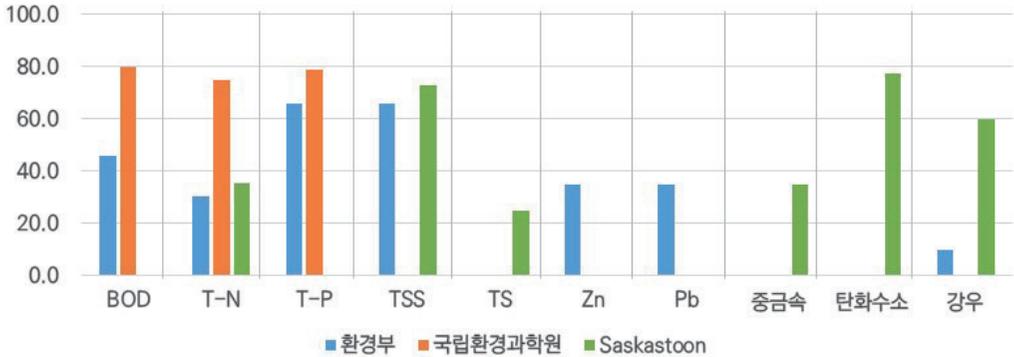
## 3) 효과

### (1) 비점오염물질 및 우수유출 저감

- 난분해성 물질 중 하나인 탄화수소 저감효과가 입증된 식생도랑
  - 식생도랑의 비점오염물질 저감효율에 대한 국립환경과학원(2018)과 환경부(2013a), City of Saskatoon(2016)의 연구에 따르면, 탄화수소와 T-P에의 저감효율이 각각 77.5%, 72.4%로 BOD(63.0%), T-N(47.0%) 등에 비해 상대적으로 높은 수치 기록 - 탄화수소는 석유화학 관련 산업에서 발생하는 오염물질로 독성을 가진 경우가 많고 BOD성 물질이나 영양염류와 달리 분해가 어려워 탄화수소가 섞인 폐수를 난분해성 폐수 중 하나로 분류하고 있음(박창호, 2001)

- 선행연구에서 식생도랑의 탄화수소 저감효과를 증명함에 따라 현대사회에 새로운 환경오염 물질에 대한 대응방안 중 하나로 식생도랑의 적용 가능성 확인
- 강우유출저감효과는 평균 35.0%로 식물재배화분이나 투수포장 등에 비해 비교적 낮지만, 환경부에서는 강우유출저감효과를 10.0%, City of Saskatoon시는 60.0%로 제시하는 등 연구마다 차이가 커 식생도랑의 저감효과가 낮다고 판단하기 어려움

〈그림 3-23〉 식생도랑의 비점오염물질 및 우수유출저감효과



자료: 국립환경과학원(2018), 환경부(2013a), City of Saskatoon(2016)

## (2) 식생의 성장 지원

- 강우유출 및 오염물질 저감 뿐 아니라 식생의 성장에 도움을 주는 식생도랑
  - Xiao and McPherson(2009)은 미국 산림청과 함께 식생도랑의 효과를 검증하기 위해 캘리포니아에 위치한 데이비스(Davis) 대학 주차장에 식생도랑을 설치하고 강우유출 및 오염물질 저감효과 및 나무 성장 추세를 확인
    - 식생도랑과 일반 토양을 대상으로 대조실험을 했으며, 2007년 2월부터 2008년 10월 까지의 실험 기간 비가 총 50회 내려 총 강수량은 563.8mm(총 50건)에 달함
    - 식생도랑 설치에 사용된 토양은 일반 토양과 화산암이 혼합된 것으로 해당 연구에서는 이를 데이비스 토양(Davis Soil)이라고 설명
  - 강우유출의 경우 실험구에서의 유출량은 대조구 대비 94.0% 적었으며, 오염물질의 경우 대조구와 실험구 사이에 통계적으로 유의한 차이는 없었지만 식생도랑의 저감 효과는 영양물질은 95.3%, 금속 86.7%, 유기탄소 95.5% 등 우수한 수치 기록
  - 식생도랑이 식생의 성장에 긍정적인 영향을 미치는지 확인하기 위해 실험구와 대조구에 각각 나무를 심었으며, 식생도랑에 식재된 나무가 일반 토양에 심어진 나무에 비해 더욱 잘 자란 것으로 나타남

- Xiao는 이러한 차이가 식생도랑 내 데이비스 토양에 존재하는 다량의 공극이 습기가 많은 계절에 일반 토양보다 더 나은 통기 및 배수를 제공함에 따라 발생했다고 서술했으며, 다만 건조한 여름에는 배수가 잘되기 때문에 물을 더욱 자주 줘야 한다고 설명
- 해당 연구는 식생도랑 설치에 화산암이 섞여 있는 데이비스 토양을 활용했기 때문에 어느 지역이나 적용하기는 어려울 수 있지만 식생도랑의 충전재에 대한 고민이 더해진다면 일반 토양보다 식생 성장에 도움이 된다는 것을 증명

〈그림 3-24〉 식생도랑과 일반 토양의 나무 성장 비교



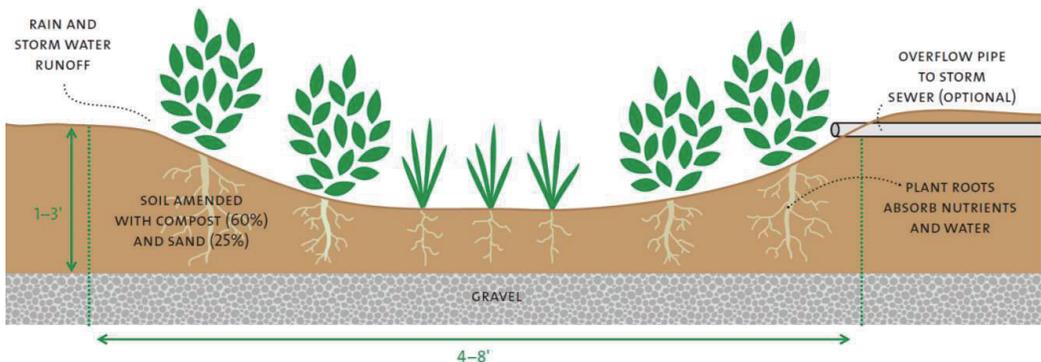
자료: Xiao and McPherson(2009), Testing a Bioswale to Treat and Reduce Parking Lot Runoff

## 5. 빗물정원(Rain Garden)

### 1) 개념

- 빗물관리 및 조경개선 효과로 공공뿐 아니라 민간 영역에서 애용되고 있는 빗물정원
  - 빗물정원은 토종 관목과 다년생 식물 등으로 이루어진 정원으로 일반적으로 자연 경사면의 낮은 지점에 건설(GrowNYC, 2016)
    - 내부는 식물 성장을 지원하는 토양 혼합물로 구성되며, 설치장소의 지형과 넓이에 맞게 크기를 조절할 수 있고 식생 종류도 지역 특성에 맞게 조절 가능(Hinman, 2013)
    - 식생체류지의 한 종류로 포괄되기도 하는데, 외국 사례에서도 빗물정원에 관해 설명 하면서 rain garden과 bioretention을 혼용(이정민 외, 2016)
  - 빗물에 섞여 있는 오염물질을 걸러 내는 동시에 풀과 꽃이 피는 식물들은 야생동물에게 음식과 피난처를 제공할 수 있어, 미국 연방환경청에서는 빗물정원을 강우유출을 줄이는 경제적 방법인 동시에 아름다운 방법이라고 설명
  - 빗물정원은 도시 열섬 억제에도 효과가 있으며(Bray et al., 2012), 조경 및 외관 개선 이 가능하고 빗물침투량을 늘려 지하수 충전에 도움을 줌(Hinman, 2013)
  - 미국과 영국 등에서는 개인이 사유지 내에 빗물정원을 직접 만들 수 있도록 관련 가이드북을 제작하는 등 접근이 쉬운 그린인프라 중 하나라고 할 수 있음
    - 영국 워킹(Woking)에서는 홍수피해가 빈번하자 이에 대한 대안 중 하나로 빗물정원을 주목하고 거주민을 위한 안내문 발간(Woking Borough Council, 2018)
    - 하와이의 환경 관련 비영리단체인 후이하와이(Hui o Ko'olaupoko)는 도시의 비점 오염물질 관리를 위해 빗물정원의 필요성을 인식하고, 빗물정원의 크기, 재료, 식물 선택 및 유지보수 등을 담은 설명서를 배포(Hui o Ko'olaupoko, 2013)

〈그림 3-25〉 빗물정원



자료: GrowNYC(2016), Green Infrastructure Techniques

## 2) 적용사례

### (1) 스웨덴 예테보리

- 대규모 주차장에서 유출되는 빗물관리를 위해 빗물정원 조성
  - 스웨덴 예테보리에 위치한 크비베리(Kvibergs) 공원은 우수한 자연환경과 스포츠 경기장 등 부대시설을 갖추고 있어 스포츠, 문화 및 교육활동을 즐길 수 있는 종합공간
  - 공원 내 멀티스포츠 경기장은 2015년 완공됐으며 주변에 500대를 수용할 수 있는 주차장이 마련되어있는데, 해당 주차장에서 흘러나오는 오염물질이 빗물에 섞여 주변 지역으로 흘러가기 때문에 예테보리시에서는 이를 방지하기 위해 빗물정원을 설치
    - 예테보리의 일부 지역에서는 홍수가 자주 발생했고, 강우 시 오염물질이 도시의 수도로 바로 흘러감에 따라 예테보리시는 효과적인 빗물 관리를 위해 그린인프라 적용을 고심해왔으며, 크비베리 공원 내 빗물정원 설치는 이러한 맥락에서 추진
    - 크비베리 공원의 빗물정원은 700㎡로 2015년 6월 완공됐으며, 주차장의 오염물질을 여과하고 강수량이 많을 때 홍수피해를 예방하는 것을 주요 목적으로 함
  - 예테보리시에서는 꾸준한 정기 모니터링을 통해 빗물정원을 관리하고 있으며, Hellberg(2016)는 연구를 통해 공원 내 빗물정원의 오염물질 제거 효율을 증명
    - 연구에 따르면 크비베리 공원의 레인가든은 침전, 여과, 흡착 등을 통해 오염물질을 제거했으며, 특히 인과 구리 제거에 탁월한 것으로 확인

〈그림 3-26〉 스웨덴 예테보리 크비베리 공원의 빗물정원



자료: Naturvation 홈페이지

## (2) 노르웨이 베르겐

- 세계문화유산 보존을 위해 빗물정원을 포함한 물관리 프로젝트 실시
  - 노르웨이 베르겐의 오래된 부두인 브뤼겐(Bryggen)은 중세 한자동맹 소속 상인들이 무역활동을 하던 무역 중심지로 1979년 세계문화유산으로 지정
    - 브뤼겐에는 <그림 3-27>과 같이 중세시대 상인과 점원들이 숙소 겸 사무실로 활용한 목조건물 수십 채가 바다를 향해 일렬로 늘어서 있음

<그림 3-27> 노르웨이 브뤼겐



자료: Visitbergen 홈페이지

- 현대에 들어 많은 양의 지하수가 누출되면서 브뤼겐의 생존을 위협함에 따라 노르웨이 정부와 지자체에서 빗물정원을 포함하는 물관리 프로젝트를 실시
- 프로젝트를 통해 지하수를 안정화하고 건물 아래의 고르지 않은 침하를 줄이고자 했으며, 이를 위해 물이 유출되는 대신 땅으로 침투할 수 있도록 150m<sup>2</sup> 규모의 빗물정원을 설치하고 지하수를 원래 높이로 복원하기 위한 파이프와 펌프 등 구축
- 다수의 연구에서 브뤼겐 프로젝트의 효과를 검증했으며, 현재에는 물환경 안정화로 문화유산 피해 우려를 잠재움(Erslund et al, 2015; Seither et al., 2016)

<그림 3-28> 노르웨이 브뤼겐 빗물정원(좌: 2014년 건설현장, 우: 2015년 운영현황)



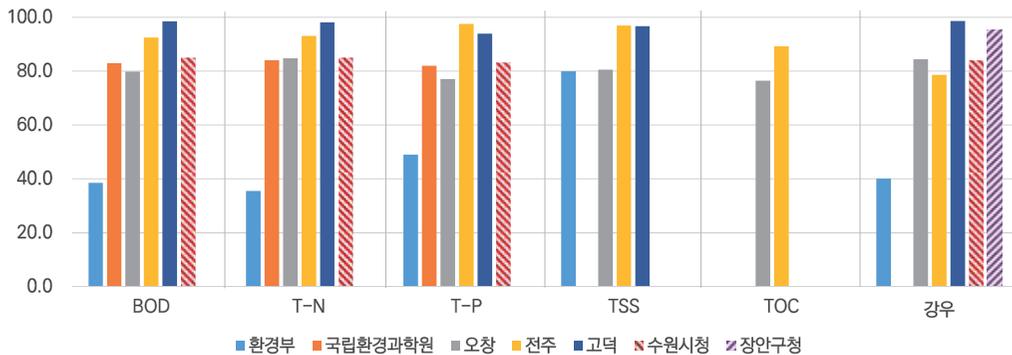
자료: Erslund et al.(2015), Seither et al.(2016)

### 3) 효과

#### (1) 비점오염물질 및 우수유출 저감

- 비점오염물질 및 강우유출 저감에 탁월한 효과 검증
  - 이정민 외(2016)는 평택 고덕신도시의 저영향개발기법 도입을 위해 테스트베드(test-bed)를 마련하고 빗물정원 등에 대한 모니터링을 실시했는데, 그 결과 빗물정원은 BOD, T-N 등의 오염물질을 90% 이상 줄인 것으로 확인
    - BOD 98.5%, T-N 98.1%, T-P 93.9%, TSS 96.7%, 강우유출 98.6% 저감
  - 전주시에서 실시한 환경부(2019)의 시범사업에서도 빗물정원이 오염물질을 평균 89% 이상 줄였으며, 강우유출은 78.6% 줄인 것으로 확인
  - 장안구청 내 빗물정원에 대한 모델링 결과에서도 강우유출을 95.3% 저감하는 것으로 나타나는 등 오염물질 및 강우유출 저감에 탁월한 효과 입증
  - 특히 각 연구의 평균 BOD, T-N, T-P 저감효과는 투수포장, 침투도랑, 식물재배 화분, 식생도랑에 대한 연구들의 평균 저감효과보다 우수한 것으로 확인
    - 각 그린인프라에 대한 연구 경향을 단순 비교했을 때 얻을 수 있는 결과로 연구마다 환경이 다르므로 빗물정원이 절대적으로 우수하다고 보기는 어려움

〈그림 3-29〉 빗물정원의 비점오염물질 및 우수유출저감효과



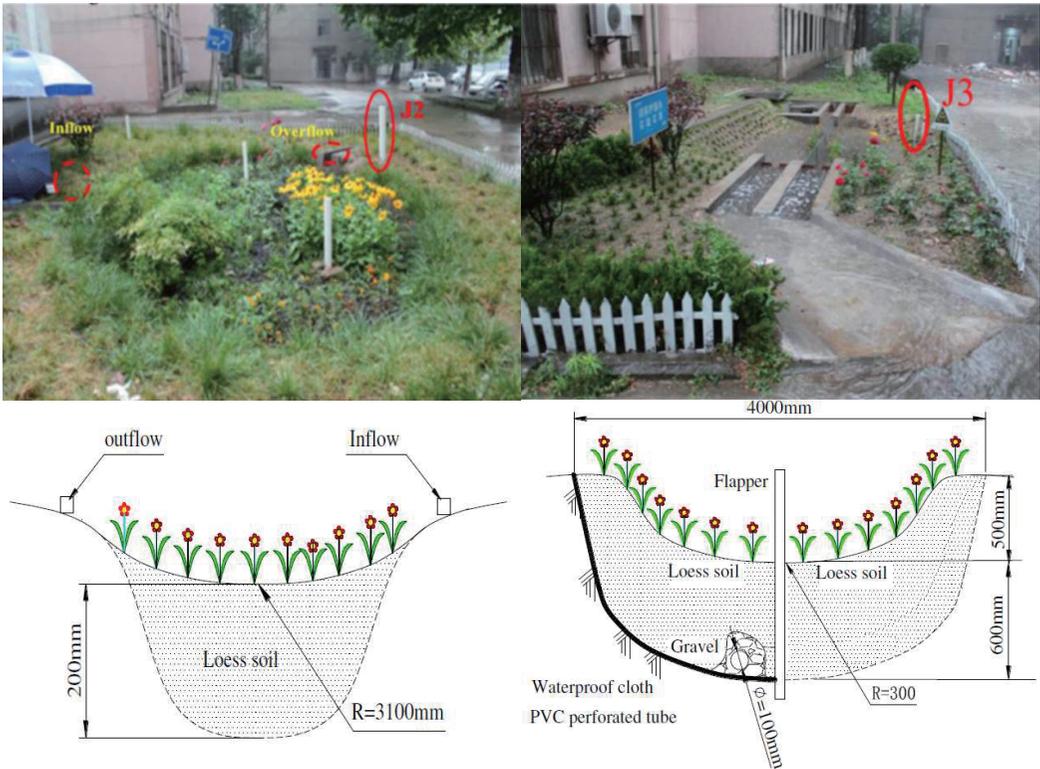
자료: 국립환경과학원(2018), 수원시(2016), 이정민 외(2016), 환경부(2013a, 2019)

#### (2) 지하수 함양

- 빗물의 침투를 도와 지하수 함양에 효과적인 빗물정원
  - 중국의 급속한 도시화로 수질 오염, 홍수 등의 문제가 증가하자 중국 정부는 해외의 그린인프라 사례를 참고하여 중국 특성에 맞는 스펀지 도시 조성 (Li et al., 2019)

- Li et al.(2019)은 그린인프라를 통해 빗물을 흡수, 저장, 침투, 저장하는 스펀지 도시의 효과를 확인하기 위해 빗물정원이 지하수 함양과 수질에 미치는 영향을 분석
  - 연구는 중국 산시성 시안의 시안공대 캠퍼스에 위치한 2개의 빗물정원을 대상으로 했으며, 2016년 5월부터 10월까지 5개월 간 진행
  - 연구기간 동안 비가 12번 내렸으며, 3개 지점(J1, J2, J3)에서 지하수 데이터를 수집 하였는데 J1과 J3은 2016년 5월부터, J2는 2016년 7월부터 실시
  - <그림 3-30>과 같이 J2와 J3은 2개의 빗물정원에 각각 위치하며, J1은 J2, J3와 비교하기 위한 대조구로 빗물정원에서 약 40m 떨어져 있으며, 외부의 영향을 받지 않음

<그림 3-30> 시안공대 캠퍼스 내 빗물정원과 구조

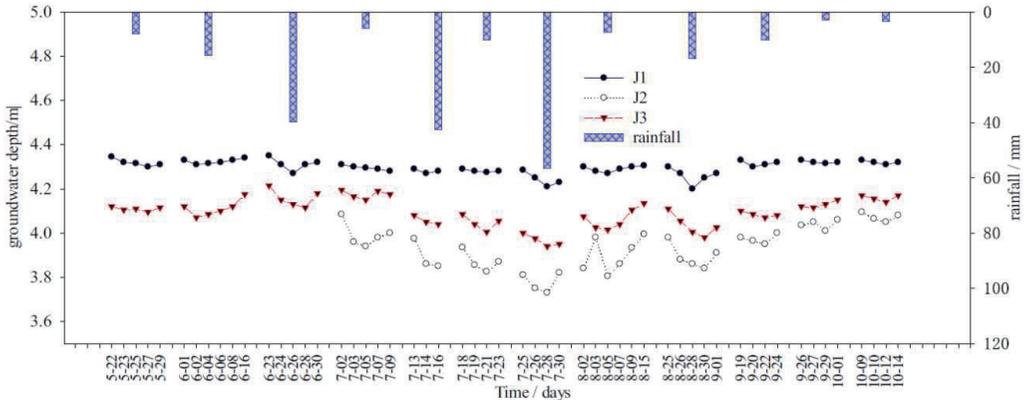


자료: Li et al.(2019), Analysis of rainfall infiltration and its influence on groundwater in rain gardens

- 모니터링 동안 J2와 J3의 지하수 깊이는 J1보다 낮았고, J1의 지하수 깊이는 비교적 안정적으로 유지된 반면 J2와 J3는 강우량에 따라 변화하는 모습을 보임
- 지하수 깊이(groundwater depth)는 지표면과 지하수 사이의 거리를 의미하며, 물의 높이를 의미하는 수위(level)와는 다른 의미

- 지하수 깊이가 낮았다는 것은 지표면에서 수위까지의 거리가 가까워 지하수량이 많은 것을 의미하며, 깊이가 높다는 것은 지하수량이 적다는 것을 의미
- 즉, 빗물정원의 침투 능력이 지하수 함양을 가능케 했다는 것을 증명한 결과로 특히 강우량이 많을 때는 침투량도 증가하여 지하수 증가로 이어지는 것을 확인

〈그림 3-31〉 빗물정원의 관찰지점별 지하수 깊이 및 강우량 현황



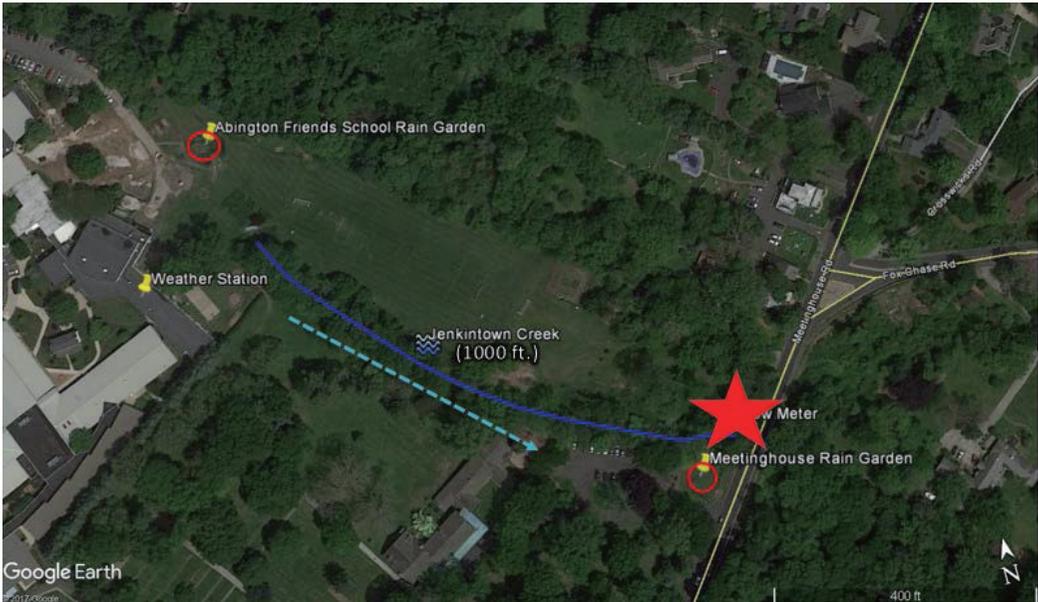
자료: Li et al.(2019), Analysis of rainfall infiltration and its influence on groundwater in rain gardens

### (3) 수온 저감

- 빗물정원이 빗물의 온도를 저감하여 수생태계 미치는 영향을 최소화
  - 빗물이 열을 머금은 도시의 불투수면을 지나면서 수온이 상승하게 되는데, 이것이 하천으로 흘러들어가 하천 생태계에 악영향을 미칠 수 있음
  - Sanchez(2018)는 이러한 열 영향(thermal effect)의 대응방안으로 빗물정원을 주목하여 미국 펜실베이니아의 젠킨타운 강(Jenkintown Creek) 상류에서 관련 연구 실시
    - 연구자는 도시의 강우유출수에서 발견되는 열 오염(thermal pollution)이 젠킨타운 강 상류의 브라운 송어와 같은 물고기들에게 심각한 영향을 받을 수 있다고 지적했는데, 이러한 생물들은 체온을 조절할 능력이 부족하기 때문에 온도 변화에 민감
    - 빗물정원의 효과를 확인하기 위해 〈그림 3-32〉와 같이 젠킨타운 강 상류에 빗물정원을 설치했으며, 효과비교를 위해 빗물정원을 설치하기 3개월 전부터 데이터 수집
      - 빗물정원은 애빙턴(Abington) 프렌즈 학교와 애빙턴 프렌즈 미팅(회의실) 인근에 각각 설치했으며, 연구는 2015년 8월부터 2017년 11월까지 2년 반 동안 진행
      - 분석에 따르면 비가 내릴 때마다 젠킨타운 강 상류의 수온이 상승했으며 강수량이 높을수록 수온이 더욱 상승했는데, 최대 3.3°C까지 증가한 것으로 나타남

- 빗물유출에 따른 수온상승은 계절을 가리지 않고 나타났지만 특히 더운 계절에 정도가 더욱 심했는데, 일조량이 많을수록 불투수성 면적의 온도가 높아지기 때문에 생겨난 결과라고 할 수 있음
- 강물에 직접 닿는 태양열로 인해 수온이 높아질 수도 있지만 젠킨타운 강 상류는 나무와 초목으로 그늘이 형성되어 있어서 수온 상승은 주로 빗물유출에 의해 발생
- 수온은 최대 23.3°C를 초과하지는 않았지만 젠킨타운 강 상류에 사는 송어와 연어 알 등이 생존하기에는 부적합
- 그러나 빗물정원의 설치 전후 수온 변화를 비교한 결과, 애빙턴 프렌즈 학교 인근빗물 정원의 수온 중앙값은 약 1°C 감소한 것으로 나타남
- 이러한 변화는 빗물이 빗물정원의 토양을 지나면서 열이 토양으로 흡수될 뿐 아니라 유출속도가 지연되기 때문에 발생했다고 할 수 있음
- Sanchez(2018)는 수치상으로는 미미한 변화일 수 있지만 젠킨타운 강에 살고 있는 브라운 송어 등 냉수성 어류에 지대한 영향을 미친다고 강조

〈그림 3-32〉 젠킨타운 강 상류의 빗물정원



자료: Sanchez(2018), Thermal Effects of Rain Gardens at the Headwaters of the Jenkintown Creek in Pennsylvania

## 6. 빗물저류시설(Rainwater Impound Facilities)

### 1) 개념

- 빗물의 수질·수량 조절 및 수자원 확보를 가능케 하는 빗물저류시설
  - 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」(이하 공원녹지법) 시행규칙 [별표 6]에 따르면 저류 시설은 빗물을 일시적으로 모아 두었다가 시간을 두고 방류하기 위해 설치하는 시설
  - 국토교통부의 한국 그린인프라 저영향개발 정보포털에서는 대표적인 저류시설로 저류지와 지하저류조를 소개했는데, 두 시설 모두 강우유출수의 수질과 수량 조절이 가능하고 특히 지하저류조는 저장된 빗물을 각종 용수로 활용할 수 있다는 장점 보유
    - 저류지는 연못형 저류지, 소규모 저류지 등이 있으며, 종류에 따라 물이 남아있거나 건기에 건조상태가 되는 등 다양한 형태로 구성(비점오염원 관리기술 연구단, 2015a)
    - 지하저류조는 빗물저류시설을 지하에 설치하여 지상부를 주차장 등 다른 용도로 이용할 수 있게 한 것으로 주로 홍수다발구역에 활용(비점오염원 관리기술 연구단, 2015b)
  - 서양에서는 빗물 저류를 포함하여 빗물 수확(Rainwater Harvesting)이란 표현을 사용하는데, 빗물저류시설의 수자원 확보 기능이 강조된 용어라고 할 수 있음
    - 빗물 수확은 지붕 등을 활용한 빗물 수집, 여과 및 이동, 빗물 저장 등을 총칭하는 말로, 빗물 저류는 빗물 수확의 한 부분이자 핵심 요소라고 할 수 있음
    - 저장된 빗물을 용수로 사용하기 위해서는 여과하고 이동시키는 과정이 필요하므로 수자원 확보측면에서 빗물저류시설은 전체 시스템의 한 부분으로 다뤄져야 함
  - 본 연구에서는 선행연구를 종합하여 단순히 빗물을 모아두는 것이 아니라 빗물을 저장하여 수질 관리 및 홍수 예방, 수자원 확보를 가능케 하는 시설로서 빗물저류시설에 대해 논의하고자 함

〈그림 3-33〉 빗물저류시설



자료: 비점오염원 관리기술 연구단(2015a), estormwater 홈페이지, indiamart 홈페이지

## 2) 적용사례

### (1) 가나 쿠베

- 빗물저류시설 설치로 아이들을 위한 양질의 수자원 확보
  - 미국의 아쿠아스케이프(Aquascape)재단은 아프리카에 있는 가나 쿠베(Kuve)마을의 수자원 확보를 위해 6.7×7.3×1.2m 규모의 빗물저류시설 설치(Atlantis, 2012)
    - 마을 학교의 금속재질 지붕은 빗물을 포획하는데 최적의 조건을 갖추고 있어 홈통과 파이프 등을 연결해 지붕에서 모인 빗물이 지하 저류시설로 흘러갈 수 있게 함
    - 또한 빗물 정화를 위해 미량의 구리 및 은이온을 활용한 정화시설과 물을 끌어올리기 위한 펌프, 각 설비에 전기를 공급하기 위한 태양광 패널 등을 설치
  - 쿠베마을의 빗물수확 시스템은 연간 약 3.8만ℓ의 빗물을 수집·정화하여 400명의 어린이를 위한 음용수를 제공할 수 있으며, 깨끗한 물을 바로 이용할 수 있으므로 학교에서는 식수를 활용해 아이들을 위한 따뜻한 요리를 제공할 수 있음

〈그림 3-34〉 가나 쿠베마을의 빗물저류시설 건설현장



자료: Atlantis(2012), Case Studies: Rainwater Harvesting Systems

### (2) 미국 프리몬트

- 사옥의 용수공급 및 빗물영향 감소를 위해 빗물저류시설 중심의 시스템 구축
  - 데이터 저장장치 전문업체인 씨게이트(Seagate)는 미국 프리몬트(Fremont)에 위치한 자사의 미디어 리서치 센터에 빗물저류시설을 중심으로 한 빗물 수확 시스템 구축 (Crawford, Smith, & Richey, 2019)
    - 센터에는 빗물을 모을 수 있는 62,000㎡ 규모의 지붕이 있었고, 씨게이트 측은 이를 활용해 수도물 사용을 줄이고 연구시설의 지속가능성 확보를 위해 관련 시스템 적용

- 저장된 빗물을 각종 용수로 활용하면서 수돗물 절약에 성공했지만, 강우량이 적은 달은 빗물 저류가 원활하지 않기 때문에 이를 대비한 백업 시스템 마련 필요
- 해당 연구는 이를 백업 통합(backup integration)이라고 설명했는데, 이는 빗물이 건물의 주요 급수로 사용되거나 1차 외부 급수 빗물이 사용되는 경우, 수요를 맞추지 못할 때를 대비해 자동으로 예비급수로 전환하도록 준비하는 것을 의미

〈그림 3-35〉 미국 씨게이트 미디어 리서치 센터의 빗물저류시설 및 필터



자료: Crawford et al.(2019), Rainwater Harvesting Case Study: Seagate Media Research Center

### (3) 브라질 마카에

- 화력발전소의 냉각수 공급처로 빗물저류시설 활용
  - 프랑스전력공사에서는 브라질 마카에(Macaé)에 2004년 12월부터 노테 플루미넨세(NORTE FLUMINENSE) 복합 화력발전소를 운영 중이며, 마카에가 자리한 리우데자네이루 주에서 필요로 하는 전력량의 약 22%를 생산(Poblador et al., 2017)
  - 발전소는 생산 과정에서 필요로 하는 냉각수를 마카에강으로부터 공급받았는데, 1960년 이후 인공적인 건설사업과 침식, 브라질 남동부 지역의 극심한 가뭄 등으로 마카에강에 상당한 변화가 일어났고 물 부족 문제가 본격화되기 전에 대책이 필요했음

〈그림 3-36〉 브라질 노테 플루미넨세 복합 화력발전소 전경



자료: Poblador et al.(2017), eDF Norte Fluminense 홈페이지

- 이에 따라 플루미넨세 화력발전소에서는 마카에강의 손실을 줄이기 위해 빗물 포획 및 저류를 위한 빗물 수확 시스템을 설치하여 빗물을 냉각수로 활용
  - 2012년 3월에 시작되어 약 17억이 투입된 해당 프로젝트는 화력발전소에서 정기적으로 실시하는 브레인스토밍 자리에서 직원들의 아이디어로부터 시작
- 빗물 활용 프로젝트를 진행하기 위해 지역 강우량에 관한 세밀한 연구를 시행하여 포집 가능한 빗물량을 계산하였고 화력발전 과정에 필요한 총 용수의 약 30%를 확보할 수 있는 것으로 나타남
  - 강물처리보다 빗물처리에 필요한 비용이 약 1억 7천만 원에서 2억 8천만 원 정도 저렴하여 비용적인 이점 또한 획득

〈그림 3-37〉 브라질 노테 플루미넨세 복합 화력발전소 빗물 수확시스템



자료: Poblador et al.(2017), Circular Water Management Case Study: Rainwater harvesting for water reduction

### 3) 효과

#### (1) 수자원 확보에 따른 경제적 이점(일반 수돗물 대비)

- 빗물을 상수도를 대신할 수자원으로 활용하여 경제성 획득
  - Zavala, Prieto, and Rojas(2018)는 전 세계적으로 물 부족 문제가 심화함에 따라 멕시코시티의 운송·물류회사를 대상으로 수자원으로서 빗물 활용의 경제성 확인
  - 사업지 내 집수 면적은 지붕, 마당(maneuvering yards), 관리동을 포함해 약 17,000㎡이며, 연간 포획 가능한 빗물량은 약 10,586.3㎥로 계산(〈표 3-6〉 참고)
    - 한국과 유사하게 멕시코시티도 강우량이 여름철에 집중되는데, 강우량이 가장 높은 8월과 가장 낮은 12월의 격차가 약 32배에 달하는 것으로 나타남

〈표 3-6〉 월별 강우량 및 집수량 추정치

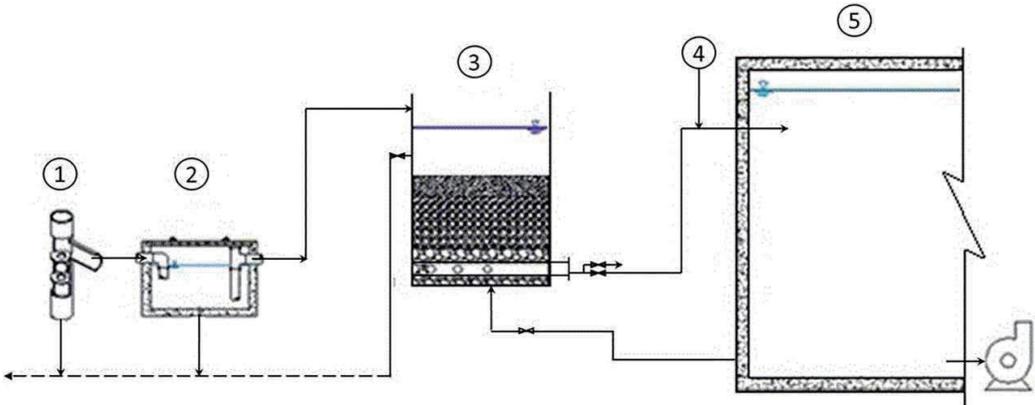
시기 (월)	강우량 (mm)	집수량			
		관리동 지붕	그 외 지붕	마당	합계
1	5.2	1.6	29.2	44.6	75.4
2	5.9	1.8	33.1	50.6	85.5
3	6.7	2.1	37.6	57.5	97.2
4	17.2	5.3	96.5	147.6	249.4
5	55.0	17.1	308.6	471.9	797.6
6	139.7	43.4	784.0	1,198.6	2,026
7	139.7	43.4	784.0	1,198.6	2,026
8	158.4	49.2	888.9	1,359.0	2,297.1
9	136.3	42.3	764.9	1,169.4	1,976.6
10	55.5	17.2	311.5	476.2	804.9
11	5.4	1.7	30.3	46.3	78.3
12	5.0	1.6	28.1	42.9	72.6
총합	730.0	226.5	4,096.6	6,263.2	<b>10,586.3</b>

\* 유의수준 5%에서 유의함, n=30년

자료: Zavala et al.(2018), Rainwater harvesting as an alternative for water supply in regions with high water stress

- 각 집수구역에서 수집된 빗물은 대장균, 유기물, 부유물질, 기름 및 그리스를 함유하고 있어 이용자의 안전을 위해 <그림 3-38>과 같이 빗물처리공정을 설계
- ①은 오염물질 유입 방지장치(first-flush diverters), ②는 기름 및 그리스 방지 트랩, ③은 무연탄-모래 필터, ④는 염소 소독 시스템, ⑤는 빗물저류시설

<그림 3-38> 빗물 수확 시스템 설계(빗물처리공정)



자료: Zavala et al.(2018), Rainwater harvesting as an alternative for water supply in regions with high water stress

- 빗물 수확 시스템 전문업체가 제시한 기준을 활용해 빗물처리공정 구축비용을 계산한 결과, 지붕과 마당의 빗물을 수집하는 경우 약 4,200만 원, 지붕에서만 빗물을 모을 때 약 5,000만 원의 비용이 소요되는 것으로 확인
- 총비용 중에 가장 많은 비중을 차지하는 것은 빗물저류시설로 경우에 따라 50~70%를 차지했으며, 연간 운영·유지비용은 약 100만 원에서 190만 원 소요
- 빗물처리공정의 구축 및 운영·유지비용과 상수도 이용요금을 비교하여 빗물 활용의 경제성을 평가한 결과, 5년 이내의 초기 비용이 상환되는 등 높은 경제성 확인
- 수돗물을 이용할 경우 소요되는 비용(연간 약 1,040만 원)과 빗물 수확 시스템의 건설 및 운영·유지비용을 비교하여 경제성을 평가했으며, 멕시코 은행 및 선행연구를 참고하여 MARR(최저요구수익률)을 8.76%로 설정
- 확인결과, <표 3-7>과 같이 5년 이내에 투자 금액 상환이 가능하고 10년 후에는 IRR(내부수익률)이 최저요구수익률(8.76%)의 2배를 웃도는 것으로 확인
- Zavala et al.(2018)은 빗물저류시설이 빗물처리공정 구축비용에 절반 이상을 차지하는 등 비용적 부담이 있지만, 높은 초기 비용에도 불구하고 빗물 저류 중심의 접근법이 수자원 확보와 경제적 이점을 동시에 달성하게 하는 방안이라고 강조

(단위 : \$)

연차	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
비용											
초기 투자	-35,302.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
운영 중 투자	-	-	-	-	-	-230.0	-	-	-	-	-230.0
운영 및 유지	-2,051.9	-2,225.0	-2,412.7	-2,616.5	-2,837.7	-3,077.8	-3,338.5	-3,621.4	-3,928.5	-4,261.8	-4,623.8
편익											
수돗물 절약	8,787.2	9,557.0	10,394.2	11,304.7	12,295.0	13,372.1	14,543.5	15,817.5	17,203.1	18,710.1	20,349.1
연간 현금 흐름	-28,566.8	7,332.0	7,981.5	8,668.2	9,457.3	10,064.2	11,205.0	12,196.1	13,274.4	14,448.2	15,495.3
NPV(순현재가치)	-28,566.8	-21,825.3	-15,077.8	-8,324.4	-1,565.3	5,048.3	11,818.4	18,593.9	25,374.5	32,160.1	38,851.4
IRR(%)(내부수익률)	-	-76.4%	-38.2%	-15.4%	-2.2%	5.7%	10.9%	14.4%	16.8%	18.5%	19.7%
B/(비용/편익 분석)	0.2	0.5	0.8	1.1	1.5	1.9	2.3	2.7	3.2	3.7	4.3
상환 기간(amortization year)	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

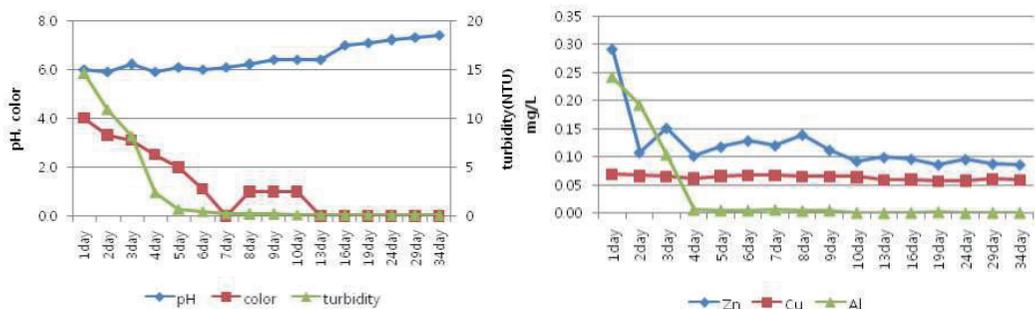
\* MARR(8.76%) = inflation(5.76%) + risk(3.0%)

Zavala et al.(2018). Rainwater harvesting as an alternative for water supply in regions with high water stress

## (2) 수질 개선

- 빗물저류시설은 별도의 여과 과정 없이 침전만으로 수질 개선 가능
  - 한치복·이택순(2010)은 창원시가 마주한 다양한 물순환 문제의 해결방안으로 빗물이용의 필요성을 제기했으며, 효율적인 이용을 위해 빗물 오염에 대한 연구를 추진
    - 빗물저류시설 내 빗물의 수질이 저류일수에 따라 어떻게 변화하는지 확인하고자 했으며, 이를 위해 2008년 10월 23일부터 34일간 pH, 색도, 탁도 중심의 수질분석 실시
    - 색도와 탁도는 먹는 물 기준항목 중에서 심미적 영향물질로 건강과 관련은 없지만 이용자 측면에서 중요한 항목으로 색도는 5도, 탁도는 0.5NTU<sup>3)</sup>를 이하를 기준으로 함
  - 저류시간 경과에 따른 저류조 빗물의 수질변화를 확인한 결과, 빗물의 초기 색도는 4.0도로 먹는 물 수질기준인 5.0도에 미치지 않았으나 분석 10일 후에 미 검출
  - 탁도의 초기 농도는 14.61NTU로 기준치를 초과하였으나 6일 경과 후, 0.5NTU 이하로 검출되었으며, 34일 후에는 0.12NTU로 검출
  - pH의 경우, 분석 초기에는 6.0으로 34일 경과 후에는 7.4로 증가하여 시간의 흐름과 함께 pH가 상승하는 것으로 나타났으며, 이는 곳 내리는 빗물은 산성이지만 저류조에 저장되어있는 동안 중성으로 변한다는 것을 의미
  - 이밖에도 아연(Zn)은 시간이 경과하면서 초기 농도에 비해 약 30% 수준으로 감소했고 알루미늄(Al) 농도는 0에 가까워져 침전에 의한 제거가 어느 정도 가능함을 증명
  - 한치복·이택순(2010)의 연구를 통해 빗물저류시설은 특별한 여과 과정 없이 침전만으로 일정 수준의 수질개선이 가능한 것을 증명했는데, 앞선 사례에서 알 수 있듯 여과장치가 추가된다면 보다 양질의 수자원 확보가 가능할 것으로 예상

〈그림 3-39〉 시간경과에 따른 빗물저류시설 내 빗물의 변화



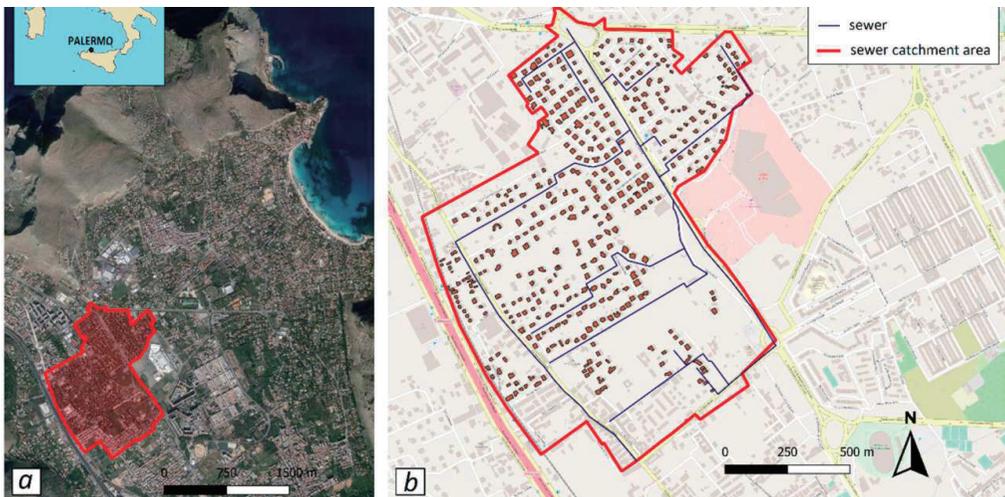
자료: 한치복·이택순(2010), 창원지역 빗물의 계절변화 및 저류시간에 따른 수질변화

3) NTU(Nephelometric Turbidity Unit) : 물의 탁도를 측정하는 단위

### (3) 홍수 저감

- 빗물저류시설이 빗물을 저장하여 홍수 발생횟수 저감 가능
  - Freni and Liuzzo(2019)는 가정용 빗물탱크의 광범위한 설치가 홍수 빈도 및 침투 홍수량 저감에 효과적이라는 선행연구 결과를 참고하여 이탈리아 팔레르모(Palermo) 주거지역을 대상으로 빗물탱크의 홍수 저감 효과를 확인
    - 연구대상지는 팔레르모에 있는 주거지역으로 408개의 단독주택으로 구성되어 있으며, 연구를 통해 빗물탱크가 홍수 저감에 미치는 효과를 정량화하고자 함
    - 효과 평가를 위해 각 단독 주택 옥상에 5m<sup>3</sup> 용량의 빗물탱크가 설치되어 있다고 가정했으며, 2002~2008년의 팔레르모 강우 데이터를 활용하여 효과를 계산
    - 해당 연구는 빗물 수확 시스템의 일부로서 빗물탱크를 연구했으며, 빗물 수확 시스템 탱크라고 기술(Rain Harvesting tanks, RWH tanks)

〈그림 3-40〉 홍수저감 연구대상지

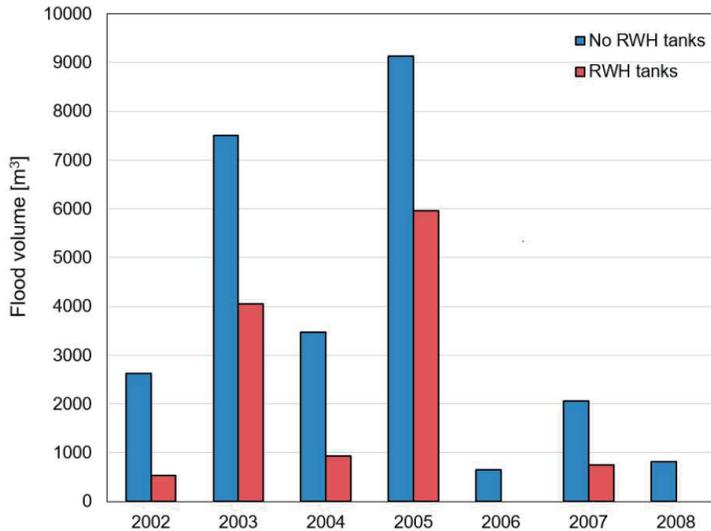


\* a : 연구대상지의 항공 영상, b : 연구대상지의 단독 주택 및 하수도 위치

자료: Freni & Liuzzo(2019), Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas

- 빗물탱크의 홍수량(flood volume) 감소효과를 평가하기 위해 탱크 유무에 따른 차이를 비교한 결과, 빗물탱크 설치 시에 〈그림 3-41〉, 〈표 3-8〉과 같이 홍수량 및 홍수빈도가 급격히 감소한 것으로 확인
  - 2002~2008년 총 24회의 홍수 피해가 발생했지만 빗물탱크를 설치할 경우, 12회로 감소하며, 연간 총 강우량이 낮았던 2006, 2008년에는 빗물탱크를 설치할 경우 홍수량이 100% 줄어드는 것으로 나타남

〈그림 3-41〉 빗물탱크(빗물 수확 시스템) 유무에 따른 연간 홍수량 비교(2002~2008년)



자료: Freni & Liuzzo(2019), Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas

〈표 3-8〉 빗물탱크 설치에 따른 연간 홍수량 감소율(2002~2008년)

연도	홍수 발생빈도		홍수량(m³)		홍수량 감소율 (%)
	탱크 미설치	탱크 설치	탱크 미설치	탱크 설치	
2002	3	2	2629.2	529.2	-80
2003	5	3	7506.1	4047.7	-46
2004	5	2	3472.8	931.3	-73
2005	4	4	9121.8	5960.4	-35
2006	2	0	654.4	0.0	-100
2007	3	1	2062.8	741.1	-64
2008	2	0	819.7	0.0	-100

자료: Freni & Liuzzo(2019), Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas

- Freni & Liuzzo(2019)는 빗물탱크가 홍수량 감소에 효과가 있다는 것을 증명했지만, 강우량이 빗물탱크의 용량을 초과하는 경우 홍수량 감소 효과가 낮아지므로 빗물탱크 또는 파이프의 용량을 키우는 것이 필요하다고 강조
- 본 연구는 대규모의 빗물저류시설 뿐 아니라 가정에 설치되는 소규모의 빗물저류시설도 각종 용수의 공급뿐 아니라 홍수 저감 효과가 있다는 것을 증명

## 제3절 효과 종합

### 1. 기술요소별 효과 종합

- 비점오염물질 저감, 수자원 확보 등을 통해 도시환경을 개선하는 그린인프라 기술
  - 선행연구를 통해 투수성 포장, 식물재배화분 등 주요 그린인프라 기술의 효과를 확인했으며, 세계의 많은 도시가 경험하고 있는 환경문제의 대안으로 그린인프라가 의미가 있을 뿐 아니라 실제 현장에서 적극적으로 활용되고 있다는 것을 증명
  - 그린인프라는 대표적으로 비점오염물질 및 우수유출 저감이 가능할 뿐 아니라 수자원 확보, 도시열섬현상 완화, 도시경관 개선 등이 가능
    - 그린인프라의 대부분이 식생을 활용하기 때문에 경관 개선이나 생물 다양성 증진이 가능한데, Sanches(2018)의 연구는 빗물이 빗물정원의 토양을 지나면서 온도가 하강하여 냉수성 어종 보호에 긍정적인 역할을 한다는 것을 증명
    - 이처럼 그린인프라는 특정 문제만을 해결하는 것이 아니라 전체의 자연적인 물순환 회복에 초점을 두고 있으므로 다양한 측면에서 도시기능 회복이 가능
  - 6개의 그린인프라 기술의 효과를 종합하면 <표 3-9>와 같은데, ‘△’ 표시는 효과가 없음을 의미하는 것이 아니라 아직 확인되지 않았음을 의미
    - 그린인프라의 경제적 이점은 그레이인프라의 건설·유지비용과의 비교나 비점오염물질 제거비용 등을 기준으로 판단하였는데, 식물재배화분은 관련 연구가 충분치 않기 때문에 아직 확인이 안 된 것이며, 없다고 확정할 수 없음
    - 빗물정원의 경제적 이점에 관해 본 연구에서 자세히 소개하진 않았지만 Xuan and Zhang(2013)은 물순환 문제를 해결하는 경제적 방안으로서 빗물정원을 설명

<표 3-9> 그린인프라 기술요소별 효과 종합

구분	비점오염물질 저감	우수유출 저감	수자원 확보	도시열섬현상 완화	생물다양성 증진	도시경관 개선	경제적 이점
투수성 포장	○	○	○	○	△	△	○
침투도랑	○	○	○	○	○	○	○
식물재배화분	○	○	○	○	○	○	△
식색도랑	○	○	○	○	○	○	○
빗물정원	○	○	○	○	○	○	○
빗물저류시설	○	○	○	△	△	△	○

\* △ 표시는 효과 검증 미확인

## 2. 그린인프라의 효과

- 현대의 도시가 안고 있는 다양한 환경문제의 대안으로 그린인프라의 효과 종합
  - 앞서 그린인프라의 각 기술요소가 지닌 효과를 개별적으로 확인했다면, 통합적인 관점에서 그린인프라가 지닌 효과는 <표 3-10>과 같음

<표 3-10> 그린인프라의 효과

구분		내용
환경적 측면	식생서식지와 생물다양성	• 녹색의 가로경관은 생물종에게 서식지를 제공함으로써 생물다양성을 강화
	수질	• 그린인프라는 불투수면으로부터 유출·운반되는 오염물질의 부하를 줄임으로 빗물의 수질을 향상(비점오염물질 저감)
	빗물 흐름관리	• 우수관로 시스템과 달리 그린인프라의 식생공간에 빗물이 머물면서 빗물 유출속도가 저하되고 토양침식 위험 감소 • 유속의 감소는 하류에 있는 수도에 미치는 부담을 경감
	자연수문학	• 지역의 토양이 적합한 경우, 빗물이 지하수에 스며들기 전에 빗물을 여과
	수동적 관개	• 그린인프라는 빗물이 식생에 물을 공급할 수 있도록 (관개)환경을 조성함에 따라 수작업으로 물을 공급할 필요가 줄어들고, 토양의 수분함양이 증가
사회적 측면	어메니티와 경관 디자인	• 그린인프라를 통한 경관 디자인은 도시의 성격과 정체성 형성에 기여 • 식생은 기존의 도시환경을 보완하여 단단해 보이는 그레이인프라의 표면을 부드럽게 하고, 시각적 경관을 제공
	온도 저감	• 대규모 식생은 그늘막과 증발 등을 통해 국지적인 온도 저감에 효율적 • 나무는 공원이나 녹지의 온도를 2~8℃까지 낮출 수 있으며, 폭염 시 불필요한 인명손실을 예방하는 것과도 관련이 있음
	야외활동 장려	• 그린인프라에 의한 녹지공간은 산책, 자전거 타기 및 기타 레크리에이션을 포함한 야외활동의 기회 제공
	대기 질	• 식생은 공기 질을 향상시키고 온실가스를 저감 • 나무는 대기에서 이산화탄소, 아산화질소, 일산화탄소 및 오존 등을 제거
경제적 측면	에너지 절약	• 그린인프라는 지역의 온도를 낮추고 건물표면에 그늘을 만들어주기 때문에 냉방 감소에 따른 에너지 사용 저감 가능
	인프라 수명 증대	• 그린인프라는 집수구 및 배수관과 같은 그레이인프라를 보완하기 때문에 인프라의 수명 연장 가능
	빗물관리 시스템	• 그린인프라를 적용할 경우 빗물의 유출속도를 낮추기 때문에 기존 우수관리시스템에 미치는 압력을 줄이고 유지보수비용 절감 가능
	재산가치와 시장성	• 나무와 그린인프라는 거리의 미적특성을 향상시키고 편의시설을 제공 • 또한 식생이 있는 거리의 가치는 없는 경우에 비해 최대 30% 이상 높음

자료: Global Designing Cities Initiative 홈페이지

- 선행연구에서는 모니터링 및 모델링 등을 통해 그린인프라의 비점오염물질 저감, 우수유출 저감 등의 효과를 정량적으로 확인했으며, 주요 내용은 <그림 3-42>와 같음
- 본 연구에서는 그린인프라의 주요 효과를 대상으로 각 효과가 어떤 과정을 통해서 나타나는지 확인하고 정량적인 수치를 제시하여 그린인프라의 효과를 객관화하고자 함

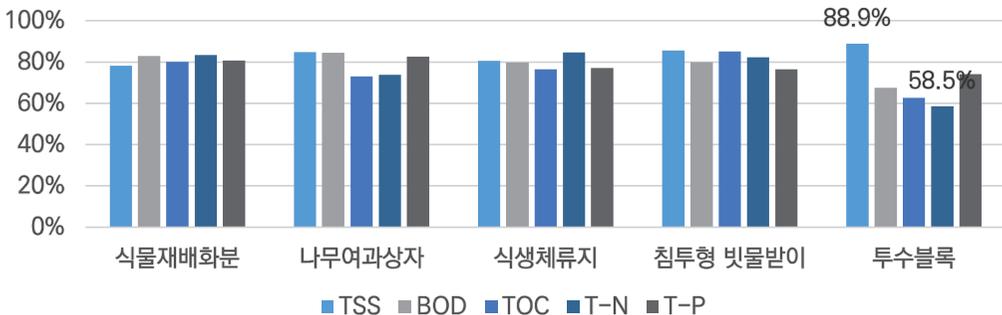
<그림 3-42> 그린인프라의 주요 효과



### 1) 비점오염물질 저감

- 비점오염물질 관리를 위한 최고의 대안인 그린인프라
  - 비점오염물질은 대부분 강우 시에 유출되며, 계절적, 지역적 편차가 크게 나타나 오염물질의 발생량과 부하량의 관리가 쉽지 않고 오염원이 광범위하게 산재하여 직접적인 관리보다는 그린인프라를 통한 관리 필요(낙동강물환경연구소, 2015)
  - 정부의 제2차 비점오염원관리 종합대책에 따르면 비점오염물질을 차집·처리하는 사후 처리적 형태에서 침투량 증대 등 사전예방적 관리로 패러다임의 혁신적 전환 시도
  - 강우유출수 농도저감 정책에서 실질적 비점오염원 저감을 위한 강우유출수 유출량 저감 방향으로 전환함에 따라 그린인프라의 적용 확대가 요구됨(관계부처합동, 2012)
  
- 그린인프라의 여과 및 흡착, 유기물 분해, 침전 등으로 비점오염물질 저감
  - 나무재배상자, 식물재배화분 등 그린인프라 내에 마련된 모래 등 여재(필터)의 여과 및 흡착, 식생의 유기물 분해 등으로 인해 오염물질 제거 가능
  - 그린인프라에 적용되는 각종 식물은 광합성을 통해 오염물질을 저감하며, 미생물은 호흡을 통해 유기물을 무기물화시켜 생물학적 오염물질을 저감
  - 빗물저류시설이 빗물이 장시간 보관하면서 빗물 내에 있던 각종 오염물질이 침전을 통해 감소하고 색도나 탁도가 개선되어 수자원으로써의 가치 증진
  - 그린인프라가 빗물을 보유·저장함에 따라 빗물의 오염물질 농도가 변하지 않더라도 하수관로에 유입되는 오염물질의 절대적인 양 감소(Gonzalez-Meler et al., 2013)
  - 환경부가 청주시에서 실시한 ‘빗물유출제로화 시범사업’ 실시 결과, 그린인프라가 오염물질에 따라 최대 88.9%의 저감효율이 있는 것으로 나타남(〈그림 3-43〉 참고)

〈그림 3-43〉 그린인프라의 비점오염물질 저감효율



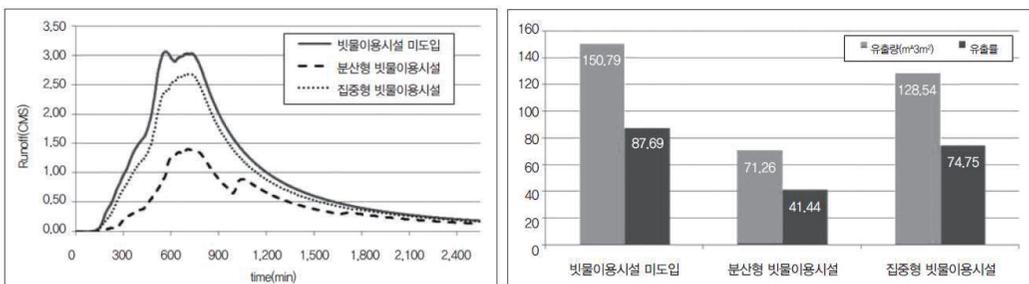
자료: 환경부(2019), 빗물유출제로화 시범사업 백서

주: 2015~2018년('15~'16년, '16년~'17년, '17~'18년) 1차년도별 저감효율의 평균

## 2) 우수유출 저감

- 그린인프라가 우수를 저장하고 유출시간을 지연시켜 홍수피해 최소화
  - 도시의 건물과 도로 등은 물이 스며들지 않는 불투수면이기 때문에 집중 호우 시 많은 양의 비가 지표면을 흐르다가 우수관을 통해 하천으로 보내지지만, 불어난 하천물이 다시 우수관이나 하수관을 통해 도시로 역류하면서 홍수 발생(한국수자원공사, 2011)
  - 전문가들은 홍수 예방을 위해 제방과 댐 등 인공 시설물 외에 빗물이 토양에 침투하고 자연스럽게 흐를 수 있게 하는 그린인프라의 필요성 강조(이동근·김호걸, 2014)
  - 빗물저류시설, 인공습지, 투수성 포장 등 그린인프라 시설은 빗물을 일시적 또는 장기적으로 보관하거나 하수관로로 흘러가는 것 대신 토양으로 침투할 수 있도록 해줌
  - 하천 및 배수펌프장 등도 빗물을 처리하고 보관할 수 있지만, 설계빈도를 상회하는 초과유출량이 발생할 때는 범람 등으로 인해 저지대의 침수피해가 발생할 수 있음
    - 2005년 미국 뉴올리언스에서 허리케인 카트리나가 발생했을 때 둑이 무너지면서 많은 양의 물이 마을로 흘러들어가면서 피해가 가중
  - 그린인프라는 기존 빗물관리시설의 초과유출량을 저장하기 때문에 우수의 직접 유출량을 저감하고 침투유출시간을 지연시켜 침수 및 홍수 피해 예방이 가능
    - Gonzalez-Meler et al.(2013)이 그린인프라의 우수유출저감효과에 대한 66개의 선행연구를 종합한 결과, 투수성 포장, 옥상 녹화, 식생침투(bio-infiltration)이 침투 유량 및 유출량을 52~85%로 감소시킨 것으로 나타남
    - 윤재봉·권태정(2013)이 빗물이용시설의 도입에 따른 폭우재해 완화 효과를 판단하기 위해 3가지 시나리오별 우수유출저감 효과를 분석한 결과, 분산형 빗물이용시설 도입 시 침투유출량 및 총유출량 등의 감소 효과가 큰 것으로 나타남

〈그림 3-44〉 빗물이용시설 도입에 따른 유출곡선·유출량·유출물의 변화

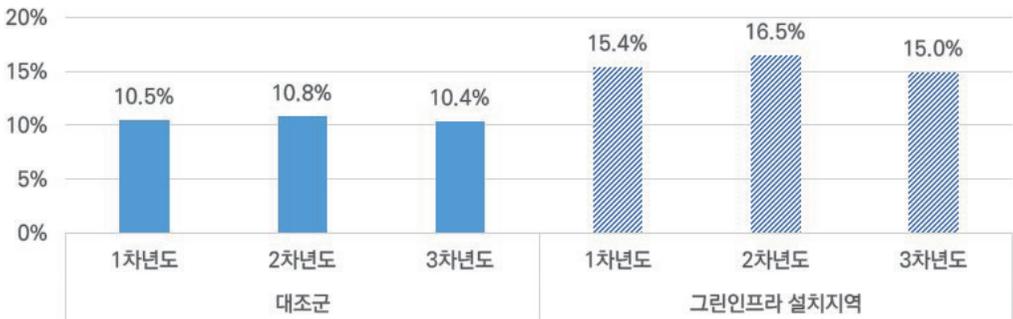


자료: 윤재봉·권태정(2013), 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소 우수유출 저감효과  
 주: 도시유출해석 모형 중 하나인 EPA-SWMM을 활용하여 빗물이용시설의 방재효과 분석

### 3) 수자원 확보

- 빗물저류시설에 보관한 빗물을 도시의 수자원으로 활용 가능
  - 미국, 독일 등에서는 빗물저류시설에 빗물을 보관해두었다가 생활잡용수, 소방용수, 재난 발생 시의 비상 음용수로 사용하는 등 빗물을 용수공급처로 활용(환경부, 2003).
  - 특히 수자원이 부족한 나라들에게 빗물은 주요한 수자원 공급처이며 국제기구 등의 도움으로 빗물 수확시스템을 구축하여 학교 및 가정 등에서 생활용수로 활용
  - 국내 지자체들도 도시의 물자급률 향상 및 수자원 절약을 위해 빗물저류시설에 빗물을 저장해두었다가 조경 및 청소용수 등으로 사용하고 있음
    - 제주도 서귀포 월드컵경기장은 빗물을 저장하여 잔디살수, 조경용수 및 화장실용수로 사용하고 있으며, 잡용수 이용 수량 대비 빗물이용량은 1년 평균 31.8%로 2003년 수돗물 절감량은 1일 778m<sup>3</sup>, 연간 18,985m<sup>3</sup>에 달함(이승복·김광목, 2005)
- 그린인프라 적용에 따른 빗물 침투 극대화로 지하수 함양
  - 도시의 불투수면 증가는 빗물의 침투를 방해하고 빗물의 표면유출량을 증가시키므로 하천 지하수 수위가 낮아지게 되고 이는 다시 하천 건천화, 지반 침하로 이어지게 됨
    - 비가 오지 않을 때 지하수에서 하천으로 물이 공급되어야 하는데, 지하수 수위가 낮아지면 이러한 작용이 일어나지 않기 때문에 건천화가 발생하게 됨
  - 그러나 그린인프라는 빗물이 토양으로 침투하는 자연적인 물순환 회복에 초점을 두고 있어서 지하수 함양 및 이로 인한 건천화 방지 등이 가능
    - 오창과학산업단지를 대상으로 한 ‘빗물유출제로화 시범사업’에서도 그린인프라 설치 지역이 대조군 대비 지하수 함양률이 약 5%p 높은 것으로 나타남(〈그림 3-45〉 참고)

〈그림 3-45〉 그린인프라의 지하수 함양 효과



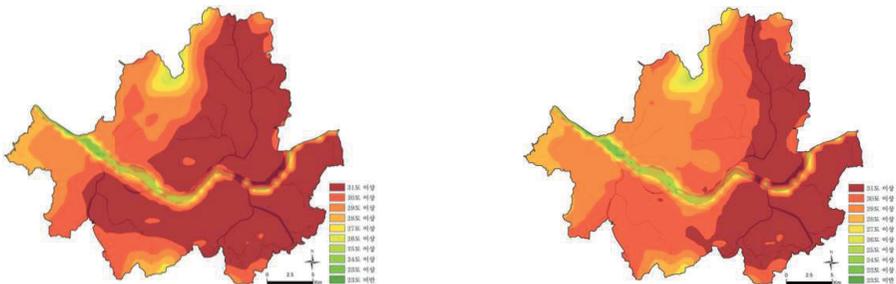
자료: 환경부(2019), 빗물유출제로화 시범사업 백서

주: 2015~2018년('15~'16년, '16년~'17년, '17~'18년) 1차년도별 효과의 평균)

#### 4) 도시열섬현상 완화

- 그린인프라의 수분 유지, 식생의 증발산 등으로 열섬현상 완화
  - 물은 높은 잠열<sup>4)</sup>을 가지고 있어 온도변화를 완충하지만 도시는 녹지 부족 및 건전화 등으로 습도가 상대적으로 낮아 온도변화에 쉽게 반응하여 도시열섬 현상 가중
  - 그린인프라는 빗물을 배출하는 기존 치수방법과 달리 최대한 빗물을 보관하고 배출을 늦춰 도시 내에 수분을 유지하기 때문에 열섬현상 완화에 긍정적 역할 수행
  - 특히 식물재배화분, 나무여과상자 등과 같은 그린인프라의 식생이 그늘을 만들어줄 뿐 아니라 앞에서 증발산이 이루어지면서 주변의 온도를 낮추는 효과가 있음
    - 식물과 토양의 증발작용 시 잠열 형태로 대기 중의 에너지를 사용하여 현열 증가를 억제해 주변 대기의 기온상승 저감 가능(김희주·오규식·이승재, 2018)
  - 특히 옥상녹화를 할 경우, 건물 표면에 그늘을 만들 뿐 아니라 토양이 태양빛이 건물 표면에 바로 닿는 것을 막아주어 표면 온도가 낮아지고 건물 내에 전달되는 열이 감소하여 대기 중으로 다시 방출되는 열도 감소하면서 건물 주변의 온도 역시 낮아짐
    - 일반 옥상이 태양복사에너지의 95%를 대기 중으로 방출하는 것과 달리 옥상녹화지는 58%를 감소시키고 건물 표면 온도를 최대 25℃ 저감(박은진·강규이·남미아, 2010)
    - 김희주 외(2018)에 따르면 서울시에 옥상녹화를 적용했을 때, 지역과 시간대에 따라 기온이 최소 0.13℃(강서구, 15시)에서 최대 2.68℃(동대문구, 21시) 감소
  - 식물재배화분이나 옥상녹화 등은 토양과 식생을 통해 온도를 낮추지만, 빗물을 저장하는 저류시설은 지붕 및 도로 등의 살수를 통해 간접적인 온도 저감 가능
    - 빗물을 지붕살수에 이용할 경우 0.7~1.0℃의 실온 상승 억제가 가능하며(최동호·이부용, 2006), 수돗물이나 지하수 대비 환경적 측면에서 유리(환경부, 2009)

〈그림 3-46〉 옥상녹화 적용에 따른 평균기온 분포 비교(15시 기준)



자료: 김희주 외(2018), 중규모 기상모델 (WRF-ARW) 을 활용한 서울시 옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과 분석  
 주: 중규모 기상모델 WRF를 활용하여 옥상녹화와 쿨루프 적용에 따른 기온저감 효과 분석

4) 물질의 상태가 기체와 액체, 또는 액체와 고체 사이에서 변화할 때 흡수 또는 방출하는 열

### 5) 경제적 이점

- 그린인프라 적용을 통해 개발비용 저감 가능
  - 그린인프라의 경제성은 주로 기존 방식과의 빗물관리 비용, 건설비 비교 등을 통해 확인했으며, 건설비는 기존 방식과 큰 차이가 없는 것으로 나타남(ECONorthwest, 2007)
  - 미국 연방 환경청의 사례연구에 따르면 <표 3-11>과 같이 기존의 빗물관리방식 대비 그린인프라의 건설비용이 대체로 낮은 것으로 확인(U.S.EPA, 2007)
    - 기존 방식은 일반적인 개발기법과 강우관리 기법을 적용했을 때 드는 비용이며, 그린인프라는 생태저류지, 투수성 포장 등의 기법을 적용했을 때 드는 비용을 의미
    - Kensington Estates는 고가의 포장재 사용, 우수관로 정비 등에 따른 전체 사업비 증가로 비용 절감을 하지 못했지만, 나머지는 14~79%의 비용 절감

<표 3-11> 기존 개발과 그린인프라 적용 비용 비교

구분	기존개발(\$)	그린인프라(\$)	절감비용(\$)	절감율(%)
2nd Avenue SEA street	868,803	651,548	217,255	25.0
Auburn Hills	2,360,385	1,598,989	761,396	32.3
Bellingham City Hall	27,600	5,600	22,000	79.7
bellingham Bloedel Donovan Park	52,800	12,800	40,000	75.8
Gap Creek	4,620,600	3,942,100	678,500	14.7
Garden Valley	324,400	260,700	63,700	19.6
Kensington Estates	765,700	1,502,900	737,200	-96.3
Laurel Springs	1,654,021	1,149,552	504,469	30.5
Mill Creek	12,510	9,099	3,411	27.3
Prairie Glen	1,004,848	599,536	405,312	40.3
Somerset	2,456,843	1,671,461	785,382	32.0
Tellabs Corporate Campus Tallabs	3,162,160	2,700,650	461,510	14.6

자료: U.S.EPA(2007), Reducing Stormwater Costs Through LID Strategies and Practices

- 그린인프라의 건설비가 많이 들더라도 효과 측면에서 경제적 이점 보유
  - Brewer and Fisher(2004)는 고밀도·중밀도 주거지, 초등학교, 상업지역 대상 사례 연구를 통해 건설비용을 확인하고, 모델링을 실시하여 빗물관리능력을 검증
  - 초등학교 및 상업지역은 기존의 빗물관리시설 건설비용 대비 그린인프라의 건설비가 더 많이 들었지만, 우수유출량 저장 능력 또한 높은 것으로 나타남
  - ECONorthwest(2007)는 이러한 우수유출 저장량 차이를 비용으로 환산했으며, <표 3-12>와 같이 대상지 모두에서 건설비용을 뛰어넘는 경제적 이익을 본 것으로 확인

〈표 3-12〉 그린인프라 방식과 기존 방식의 비교

대상지	우수유출 저장(acre-foot)		건설비용 차이 (기존 - 그린인프라)	우수유출 저장량 차이 (cubic-foot)	우수유출 저장량 차이를 비용으로 환산
	기존	그린인프라			
중밀도 거주지역	1.3	2.5	\$476,406	52,272	<b>\$104,544</b>
초등학교	0.6	1.6	\$(48,478)	43,560	<b>\$87,120</b>
고밀도 거주지역	0.25	0.45	\$25,094	8,712	<b>\$17,424</b>
상업지역	0.98	2.9	\$(9,772)	83,635	<b>\$167,270</b>

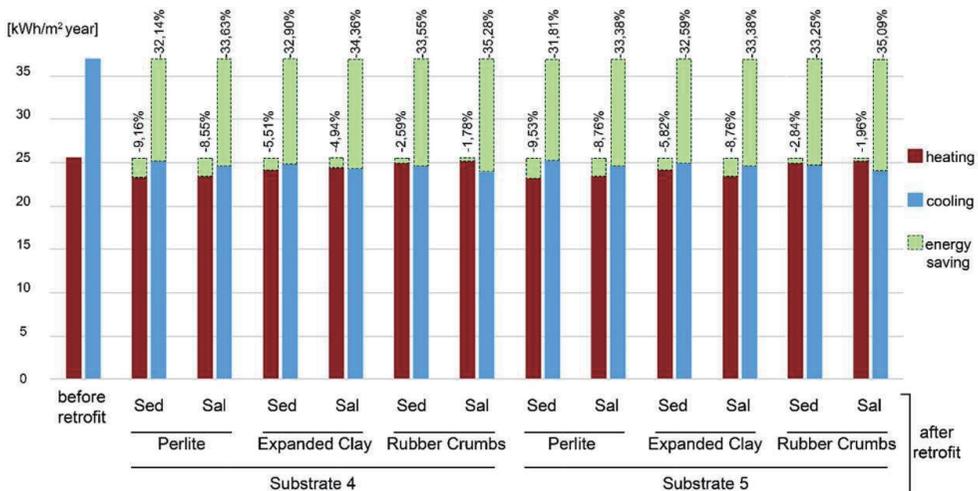
자료: Brewer & Fisher(2004), ECONorthwest(2007)

- 이처럼 그린인프라는 건설비 측면에서 기존 방식과 큰 차이가 없을 뿐 아니라 건설비가 더 소요되더라도 기능적 측면에서 우수한 경제성 보유
- 그린인프라는 우수유출 저감 능력뿐 아니라 수질 개선 및 지하수 함양, 녹지 조성 등의 다양한 효과를 지니고 있어서 이를 모두 고려할 경우 추가적인 경제성 획득 가능
  - 박은진 외(2010)는 그린인프라 중 하나인 옥상녹화가 쾌적한 환경을 조성함에 따라 건물의 경관 및 이미지가 상승하여 건물의 가치가 높아지게 되어 지가가 상승하고, 지자체에는 건물의 지가 상승으로 세입이 증대되는 효과가 있다 강조
  - 옥상녹화의 토양층이 산성비와 자외선으로부터 콘크리트의 노화를 방지하고 옥상녹화 밑의 콘크리트면은 여름철과 겨울철을 지나며 겪게 되는 극심한 온도변화를 줄이게 되어 내구성이 향상되고 유지관리 비용 절감
  - 청주와 전주에서 시행한 환경부(2019)의 시범사업에 따르면 수질 개선, 열섬현상 완화, 녹지면적 증가 등 그린인프라 적용에 따른 경제적 편익이 각각 233억, 213억 발생한 것으로 나타남(30년간, 최대 기준)

### 6) 에너지 절약

- 그린인프라가 외기온도를 차단하여 냉·난방 에너지 절약 가능
  - 이승원·김이호(2016)는 서울시에 있는 옥상 저류시설, 저류형 옥상녹화 시설, 침투형 저류시설, 투수성 포장 대상 냉·난방 에너지 저감 편익 등을 분석하였고, 옥상 저류시설과 저류형 옥상녹화 시설이 타 시설 대비 에너지 저감효과가 높다는 것을 확인
  - 이처럼 그린인프라 중에서도 옥상녹화형 시설들은 에너지 절약 효과가 탁월하며, 이를 증명한 연구들이 2000년대부터 꾸준히 이어져 오고 있음(Castleton et al., 2010)
  - 옥상녹화는 기존의 비녹화 지붕보다 열전도율이 낮아 외기온도를 차단하기 때문에 추위와 더위를 모두 막아 냉·난방에 필요한 에너지 절감이 가능하며(박은진 외, 2010), 유대중(2007)에 따르면 외기온도가 높을수록 에너지 소비 절감 효과가 증대
  - 와르소쿠수모·한무영(2018)도 건물 옥상에 그린인프라를 설치할 경우 연중 옥상 표면 온도가 비교적 안정을 이루고 난방과 냉방에 걸리는 시간이 감소해 건물의 에너지 효율을 향상할 수 있다는 사실을 밝혀냄
  - Cascone et al.(2018) 또한 <그림 3-47>과 같이 일반 옥상 대비 옥상녹화가 여름철의 냉방 소비량은 31~35%, 겨울철 난방 에너지 소비량은 1~9% 줄인다는 것을 확인 - 옥상녹화에 활용한 식물(세덤, 세이지)과 포장재(펄라이트, 팽창점토, 고무칩)의 조합을 달리하여 여러 가지 경우의 효과를 확인했으며, 정도의 차이는 있었지만 모두 에너지 절감 효과가 있었고 특히 세덤+펄라이트는 난방에, 세이지+고무칩이 냉방에 효과

<그림 3-47> 옥상녹화 적용에 따른 냉·난방 에너지 절감 효과

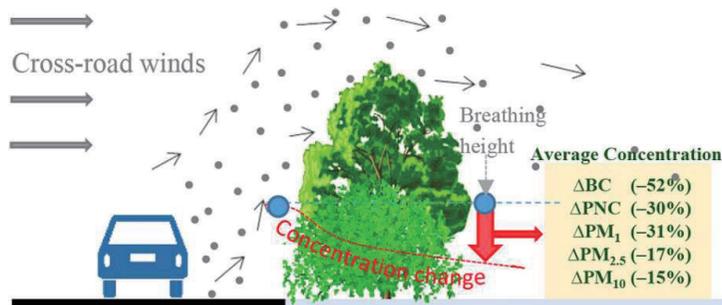


자료: Cascone et al.(2018), A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings

## 7) 대기질 개선

- 그린인프라가 흡수, 흡착, 차단, 침강의 과정을 통해 대기질 개선
  - 최근 5년 동안 미세먼지에 대한 국민 관심도는 급격하게 증가했으며 매일 미세먼지 정보를 확인하는 등 미세먼지로 인해 국민이 체감하는 불편도 증가
    - 전호철·안소은(2018)의 설문조사에 따르면 가장 시급하게 해결해야 할 환경문제로 ‘미세먼지 등 대기 질 개선’이라고 응답한 경우가 33.6%로 가장 많음
  - 독일이나 네덜란드 등에서는 미세먼지 저감 방안 중 하나로 그린인프라를 활용하고 있으며(성선용 외, 2019), 국내에서도 관련 연구가 활발히 진행(김원주, 2018)
  - 그린인프라는 크게 흡수, 흡착, 차단, 침강의 과정을 통해 대기질 개선이 가능한데, 나무에 흡수된 미세먼지는 체내에서 다른 물질로 변화되어 부피생장에 활용
    - 흡수란 나뭇잎의 기공으로 미세먼지를 대기오염물질을 흡수하는 것이며, 흡착은 잎, 줄기, 가지 등의 미세한 구조에 미세먼지가 부착되는 것을 의미
    - 차단은 숲에 미세먼지가 다다를 때, 이동면적 및 속도 감소로 통과하지 못하는 것이며, 침강은 숲에 내려앉거나 이동하던 미세먼지가 지표면으로 하강하는 것(김원주, 2018)
  - Abhijith and Kumar(2019)는 영국 길퍼드의 6개 도로변에서 모니터링을 시행하여, 도로에서 발생하는 대기오염물질에 대한 그린인프라의 저감 효과를 확인
    - 바람의 방향이나 그린인프라의 위치, 그린인프라 식생의 두께 등에 따라 저감효과에 차이가 있었지만, <그림 3-48>과 같이 도로에서 그린인프라 쪽으로 바람이 불어올 때 블랙카본이 최대 52%, 부유먼지 15%, 미세먼지 17%, 초미세먼지 31% 감소
  - 박효석·오규식·이상현(2014) 또한 연구를 통해 서울 전체에 그린인프라가 약 6.1% 증가했을 때, 이산화탄소 흡수량이 약 2.2% 증가한다는 것을 밝혀냈음

<그림 3-48> 그린인프라에 따른 도로변 대기오염물질 저감



자료: Abhijith & Kumar(2019), Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions

\* BC = black carbon, PNC = particle number concentrations

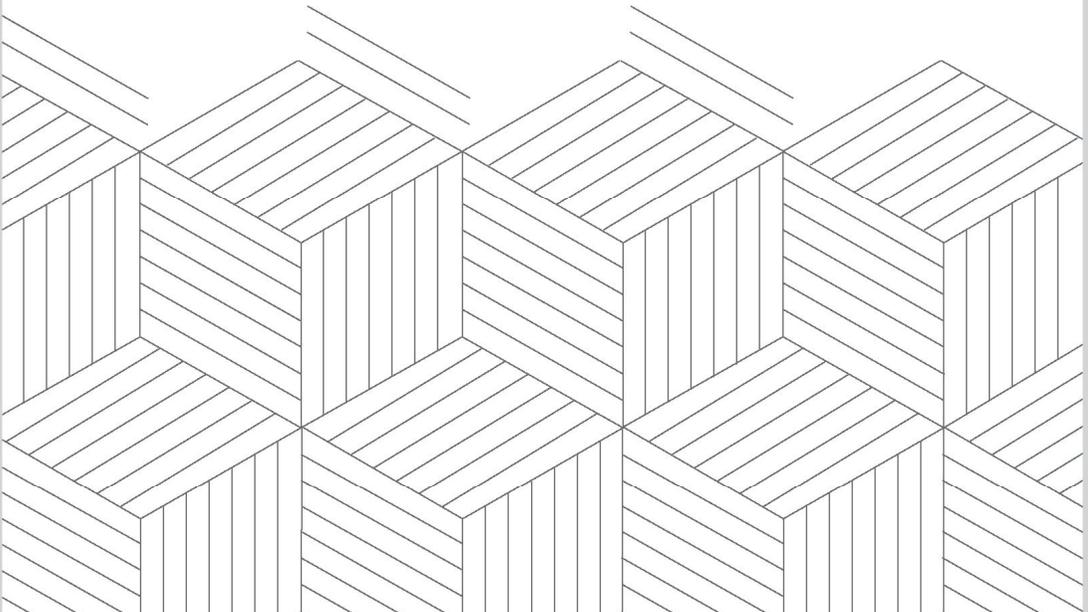


# 제4장 빗물분사시설에 따른 온도저감 효과

제1절 모니터링 개요 및 방법

제2절 모니터링 결과

제3절 소결





## 제4장 빗물분사시설에 따른 온도저감 효과

### 제1절 모니터링 개요 및 방법

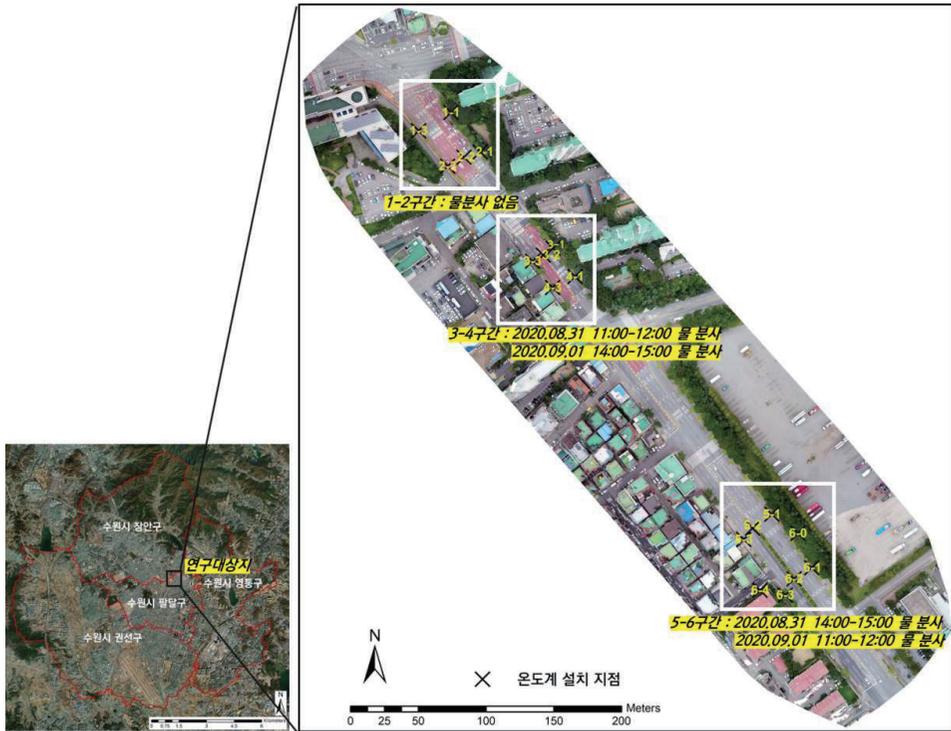
#### 1. 모니터링 개요

- 수원시 월드컵경기장 일대 빗물분사시설 가동에 따른 온도저감 효과 분석
  - 수원시 팔달구 월드컵로 일대에 시범적으로 설치된 빗물분사시설을 대상으로 시설 가동에 따른 온도저감 효과 분석(〈표 4-1〉, 〈그림 4-1〉 참조)

〈표 4-1〉 빗물분사시설 모니터링 개요

구분		내용
모니터링 대상		수원시 팔달구 월드컵로 310 일대에 설치된 빗물분사시설 (수원시평생학습관 ~ 수원월드컵경기장 조각공원 약 600m 차도)
모니터링 시기	빗물분사시설 가동	2020. 8. 31 ~ 9. 1 / 11:00 - 12:00, 14:00 - 15:00 (일일 2회, 총 4회 가동)
	대기 온도 모니터링	2020. 8. 30. 17:00 ~ 9. 1. 18:00 (49시간)
	표면 온도 모니터링	2020. 9. 1. 10:00 ~ 16:00 (6시간)

〈그림 4-1〉 빗물분사시설 설치 효과 분석 연구 대상지(1~6구간)



## 2. 모니터링 방법

- 빗물분사시설 일대의 대기온도 및 표면 온도 모니터링 실시
  - 모니터링 결과의 객관성을 더하기 위해 〈표 4-2〉와 같이 빗물 분사에 따른 대기 온도 및 표면 온도 변화를 각각 모니터링 하였으며 대기온도는 고정형 온도계, 표면 온도는 열화상 무인항공기를 통해 확인

〈표 4-2〉 빗물분사시설 모니터링 방법

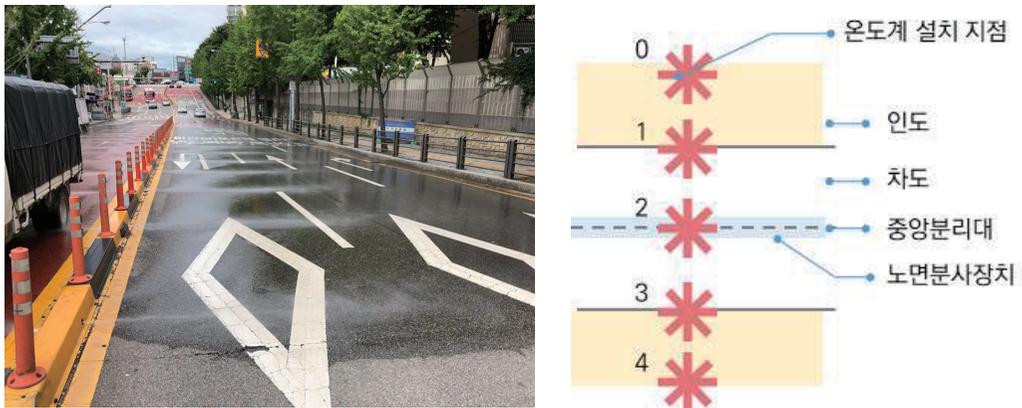
구분	대기 온도 모니터링	표면 온도 모니터링
모니터링 방법	고정형 온도계 (대상지 일대에 18개 설치)	열화상 무인항공기 (100m 고도에서 데이터 취득)
모니터링 대상	실험구(3, 4, 5, 6구간) : 빗물 분사 대조구(1, 2구간) : 빗물 미분사	고정형 온도계가 설치된 18개 지점을 기준으로 반경 5m 범위 내 평균 표면 온도 취득

## 1) 대기 온도 모니터링 및 분석

### (1) 고정형 온도계 설치

- 대기 온도 변화 측정을 위해 고정형 온도계 설치
  - 빗물 분사에 따른 도로 중앙, 가로수, 내부 녹지, 인공구조물의 대기 온도 변화를 측정하기 위해 <그림 4-2>, <4-3>과 같이 고정형 온도계(HOBO MX2301, USA) 설치
  - 모니터링에 활용한 온도계는 혹독한 외부 환경에서도 정확한 온도와 상대 습도를 측정할 수 있는 제품으로 여름철 야외에서 진행된 본 연구에 적합하다고 판단하여 활용

<그림 4-2> 빗물분사시설 분사 모습 및 고정형 온도계 설치 예시



<그림 4-3> 대기온도 모니터링을 위해 설치된 고정형 온도계



## (2) 실험구/대조구 구분

- 모니터링 대상지를 빗물분사 유무, 시간 등에 따라 실험구/대조구로 구분
  - 빗물분사 유무에 따른 온도저감 효과 비교를 위해 1, 2, 4구간은 분사가 전혀 되지 않는 대조구, 3, 5, 6구간은 빗물 분사가 진행되는 실험구로 설정
  - 각 구간의 가로수, 중앙분리대, 내부 녹지, 녹지분리대, 인공구조물에 고정형 온도계를 설치했으며, 구체적인 설치 현황은 <표 4-3>과 같음
    - 빗물분사장치가 설치되어 있는 도로 중앙을 기준으로 좌우 가로수에 대칭으로 고정형 온도계를 설치하였으며, 도로 중앙분리대(2, 3, 5구간) 또는 녹지분리대(6구간)가 설치되어 있는 구간은 추가적으로 도로 중앙부에 온도계 설치
    - 또한 가로 폭이 넓은 6구간은 도로로부터 가장 외각 지점인 녹지 내부, 인공구조물에 각각 1개씩을 추가로 온도계를 설치하여, 전체 1~6구간 내 18대의 온도계 설치
    - 고정형 온도계가 설치된 장소 유형별로는 가로수 12개, 중앙분리대 3개, 녹지분리대 1개소, 그리고 최외각 내부녹지와 인공구조물에 각각 1개씩 설치되어 있음

<표 4-3> 빗물분사에 의한 가로 환경 대기 온도 저감 효과 모니터링을 위한 고정형 온도계 설치 지점

		1구간 (대조구)	2구간 (대조구)	3구간 (실험구)	4구간 (실험구)	5구간 (실험구)	6구간 (실험구)
온도계 설치 지점	가로수	1-1 1-3	2-1 2-3	3-1 3-3	4-1 4-3	5-1 5-3	6-1 6-3
	중앙분리대	-	2-2	3-2	-	5-2	-
	내부 녹지	-	-	-	-	-	6-0
	녹지분리대	-	-	-	-	-	6-2
	인공구조물	-	-	-	-	-	6-4

## (3) 빗물 분사 유무에 따른 대기 온도 저감 효과 분석

- 빗물 분사 유무에 따라 대조구(1, 2구간)와 실험구(3, 4, 5, 6구간)의 온도 비교
  - 빗물 분사 유무에 따른 온도 저감 효과를 비교하기 위해 빗물 분사가 전혀 진행되지 않는 대조구(1, 2구간)와 물 분사가 진행된 실험구(3, 4, 5, 6구간)를 각각 측정
    - 빗물분사시설에 따른 온도 변화 모니터링을 위해 2020년 8월 30일 17시부터 9월 1일

18시까지 총 49시간동안 1분 단위로 도로 및 가로수 대기 온도 측정

- 또한 시간대에 따른 대기 온도 저감 효과를 비교하기 위해 구간별로 빗물 분사 시간에 차이를 두었으며, 상세한 일정은 <표 4-4>와 같음
- 실험구(3, 4, 5, 6 구간)를 대상으로 8월 31일부터 9월 1일까지 이틀에 걸쳐 1시간씩 빗물을 분사하였으며, 빗물 분사에 따른 온도 저감 효과를 모니터링

<표 4-4> 구간별 빗물 분사 가동 시간

날짜	시간	1구간 (대조구)	2구간 (대조구)	3구간 (실험구)	4구간 (실험구)	5구간 (실험구)	6구간 (실험구)
8. 31	11:00 ~ 12:00	×	×	○	○	×	×
	14:00 ~ 15:00	×	×	×	×	○	○
9. 1	11:00 ~ 12:00	×	×	×	×	○	○
	14:00 ~ 15:00	×	×	○	○	×	×

- 모니터링 기간 가로 조성 유형에 따른 평균, 최대 대기 온도 비교 분석 수행
  - 가로수, 중앙분리대, 녹지분리대, 내부녹지, 인공구조물들의 모니터링 기간 평균 간 온도 차이를 통계적(t.test 및 분산분석) 방법에 의거하여 비교 분석하여 가로 환경을 조성하는 유형의 전반적인 여름철 온도 차이를 규명
- 동일 가로 환경 유형(중앙분리대, 가로수)에 따른 대조구, 실험구 비교 분석 수행
  - 빗물 분사에 따른 대기 온도 저감 효과를 분석하기 위해 동일 가로 조성 유형에 대해 동일 시기 빗물 분사 유무 구간끼리 대기 온도 변화를 모니터링(<표 4-5> 참고)
    - 8월 31일 11-12시 및 9월 1일 14-15시에 빗물 분사가 처리된 실험구 3-4구간과 대조구(1-2구간)에 대해 분사 전, 중, 후 1시간 간격의 온도 변화를 모니터링
    - 8월 31일 14-15시 및 9월 1일 11-12시에 빗물 분사가 처리된 실험구 5-6구간과 대조구(1-2구간)에 대해 분사 전, 중, 후 온도 변화를 확인

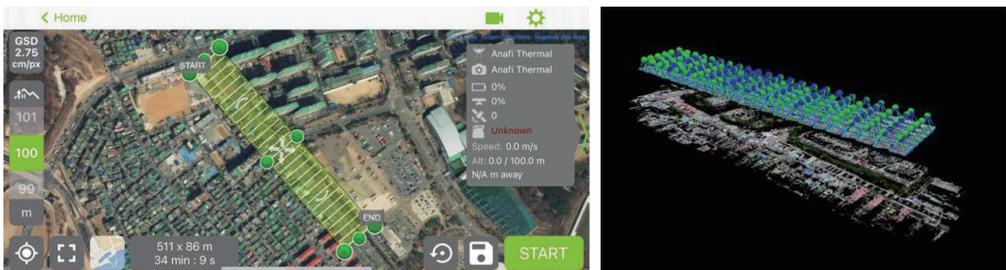
〈표 4-5〉 동일 가로 환경 유형에 따른 실험구/대조구 비교 분석

빗물분사 일시		실험구(빗물 분사 실시)	대조구(빗물 분사 미실시)	내용
8. 31	11:00 ~ 12:00	3-4구간	1-2구간	분사 전, 중, 후 온도 변화 모니터링(1시간 간격)
	14:00 ~ 15:00	5-6구간	1-2구간	
9. 1	11:00 ~ 12:00	5-6구간	1-2구간	
	14:00 ~ 15:00	3-4구간	1-2구간	

## 2) 표면 온도 모니터링 및 분석

- 열화상 UAV(Unmanned aerial vehicle; 무인항공기)를 통해 표면 온도 변화 분석
  - 2020년 9월 01일 10시부터 16시까지 1시간 간격으로 열화상 무인항공기를 활용하여 모니터링 대상지 일대의 표면 온도 데이터 확보
    - 열화상 UAV는 PARROT사(France)의 ANAFI Thermal을 이용하였으며, 해당 제품에는 4K HDR 21MP RGB 카메라와 함께 저이득 기준 -10℃ ~ 400℃ 사이의 표면 온도 측정이 가능한 열화상 카메라가 함께 부착되어 있음
  - ANAFI Thermal은 PIX4D Capture(Pix4D, Switzerland)를 통해 100m 고도에서 동일한 이동 경로를 설정하여 1시간 간격으로 총 6장을 취득하였으며, 보정 및 모자이크 프로세스는 PIX4D Mapper(Pix4D, Switzerland)를 활용(〈그림 4-4〉 참조)
  - 취득한 표면 온도 데이터를 비교 분석하기 위해 고정형 온도계가 설치된 18개 지점을 기준으로 반경 5m 범위 내 평균 표면 온도를 취득하여 각 가로 환경 유형에 대한 시기별 지표 온도 변화를 모니터링

〈그림 4-4〉 표면 온도 지도 추출을 위한 열화상 무인카메라 비행경로 설정 및 분석 과정

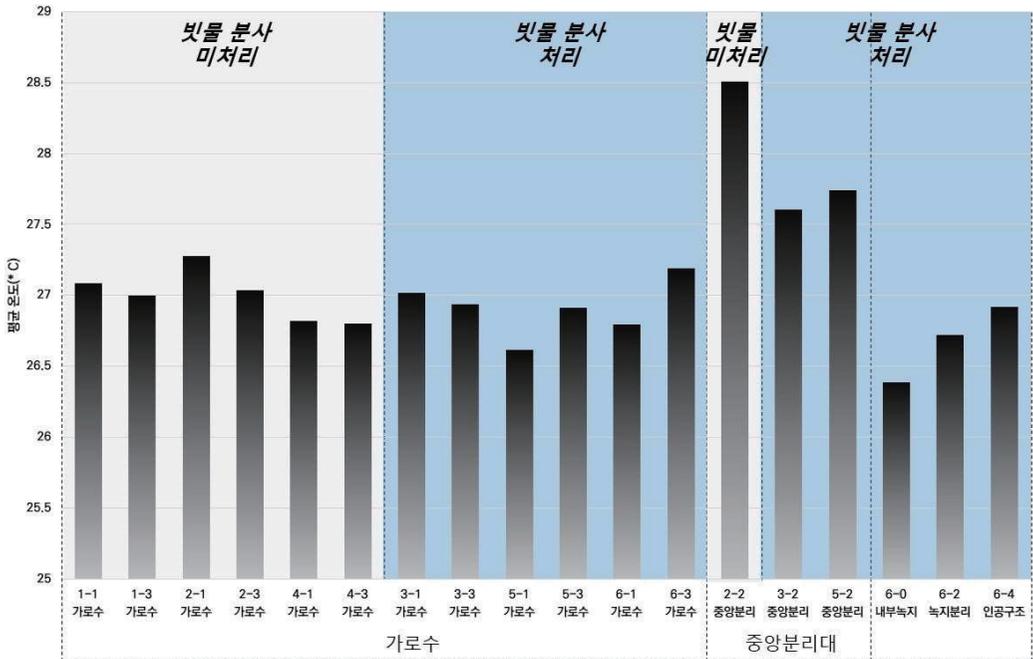


## 제2절 빗물 분사 처리에 따른 대기온도 모니터링 결과

### 1. 가로 환경 특성에 따른 대기 온도 차이

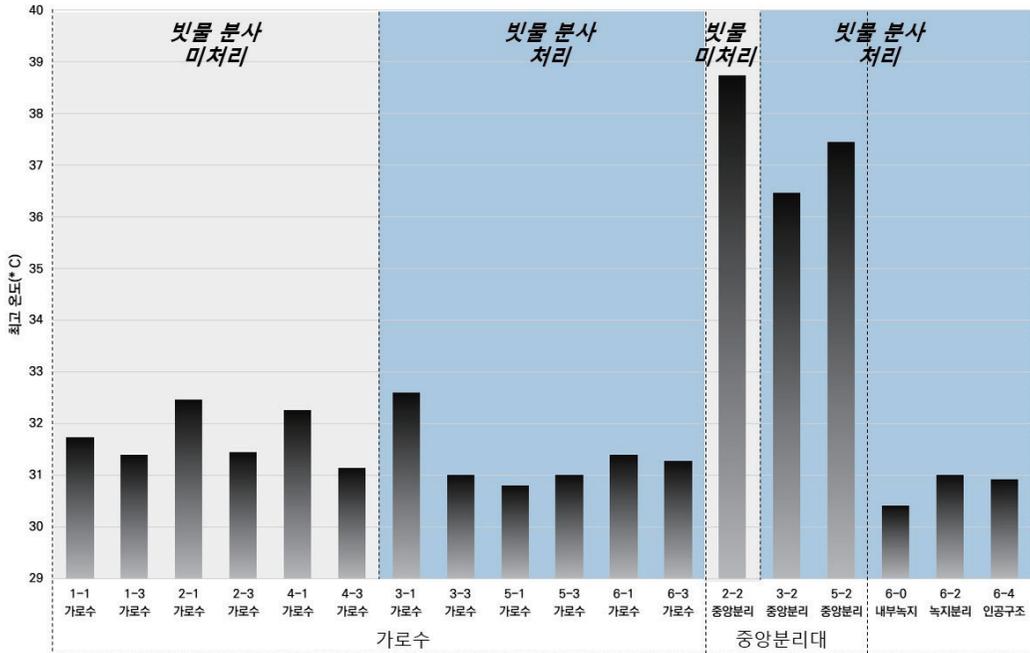
- 빗물 분사 뿐 아니라 식생 유무가 대기 온도 저감에 유의미한 영향을 미침
  - 18개 고정형 온도계를 통해 대상지 유형별 평균 대기 온도를 비교한 결과, 내부 녹지의 평균 대기 온도는 26.39℃, 녹지분리대 26.72℃, 외각 인공구조물 26.91℃, 가로수 26.97℃, 중앙분리대 27.95℃ 순으로 확인(〈그림 4-5〉 참조)
  - 가로수의 여름철 평균 대기 온도는 내부 녹지보다 높았으나( $t=11.41$ ,  $p<0.01$ ), 중앙 분리대 평균 대기 온도에 비해 1.56℃ 이상 낮은 것으로 나타남( $t=12.74$ ,  $p<0.01$ )
  - 반면, 6구간 녹지분리대의 평균 온도는 가로수에 비해 약 0.25℃ 낮은 것으로 나타났는데( $t=4.18$ ,  $p<0.01$ ), 이는 물 분사가 이루어진 지점과 가깝기 때문으로 해석됨
  - 그러나 녹지분리대와 동일하게 빗물이 처리된 중앙분리대와도 온도 차이가 확연하여 ( $t=8.95$ ,  $p<0.01$ ), 단순히 중앙분리대를 설치하는 것보다 녹지분리대를 조성하는 것이 여름철 온도 저감에 효과적인 것으로 해석됨
  - 특히 2구간 중앙분리대의 평균 온도는 28.51℃로 3, 5구간 중앙분리대의 평균 온도 27.60℃, 27.74℃과 비교하여 통계적으로 유의한 차이를 보였는데(ANOVA,  $F_{(2,2945)}=52.172$ ,  $p<0.01$ ), 이는 2구간에서 물 분사가 전무한 것에 비해 3, 5구간이 일 1회씩 빗물이 분사되어 중앙분리대 평균 온도에 영향을 미친 것으로 해석됨

〈그림 4-5〉 가로 환경에 따른 모니터링 기간 평균 온도 차이



- 분 단위 최고 온도는 빗물 분사가 없었던 2구간 중앙분리대가 가장 높은 것으로 확인
  - 최고 온도를 비교한 결과, 〈그림 4-6〉와 같이 중앙분리대 37.45℃, 가로수 31.25℃, 녹지분리대 31.01℃, 외각 인공구조물 30.93℃, 내부 녹지 30.41℃ 순으로 확인
  - 중앙분리대는 2구간 38.74℃(08/31 14:12), 5구간 37.45℃(08/31 13:55), 3구간 36.46℃(08/31 14:11-14:12) 순으로 확인되었으며, 세 구간 모두 8월 31일에 분 단위 최고 온도를 기록하였으나, 대조구로 빗물 분사가 없었던 2구간 최고 온도가 물 분사가 진행된 3, 5구간에 비해 최대 2.28℃ 가량 차이나는 것이 확인되었음
  - 가로수는 3-1구간 32.60℃(08/31 14:18), 2-1구간 32.47℃(08/31 14:19), 4-1구간 32.26℃(08/31 14:22), 1-1구간 31.74℃(08/30 17:00-17:01), 2-2구간 31.44℃(08/31 13:51-13:55), 1-3구간 31.40℃(08/30 13:55), 6-1구간 31.40℃(08/30 17:08), 6-3구간 31.27℃(08/30 17:08), 4-3구간 31.14℃(08/30 17:06), 5-3구간 31.01℃(08/30 17:08), 3-3구간 31.01℃(08/30 17:04-17:05), 5-1구간 30.80℃(08/30 17:03) 순으로 모니터링 기간 최대 온도가 확인되었음

〈그림 4-6〉 가로 환경에 따른 모니터링 기간 최고 온도 차이



- 가로수 및 증양분리대에서 빗물분사에 따른 0.29℃ ~ 1.89℃의 온도저감효과 확인
  - 〈표 4-6〉과 같이 가로수 빗물 분사 미처리 구간의 최고 평균 온도는 31.46℃, 빗물 분사 구간의 최고 평균 온도는 31.17℃로 약 0.29℃ 저감 효과 확인
  - 증양분리대 또한 빗물 분사 미처리 구간의 최고 평균 온도는 38.74℃인데 반해, 처리 구간은 36.85℃로 약 1.89℃의 저감 효과 증명
  - 빗물 분사 유무에 관계없이 가로수에 비해 증양분리대 최고 평균 온도가 약 7℃ 이상 높았으며, 빗물 분사에 따른 저감 온도 차이도 약 1.5℃ 이상 차이나는 것으로 나타남
  - 이를 통해 빗물분사시설 외에 도로변에 가로수를 설치하는 것이 여름철 도로의 평균 온도를 저감하고 열섬현상을 완화하는데 긍정적인 영향을 미칠 것이라 예상할 수 있음

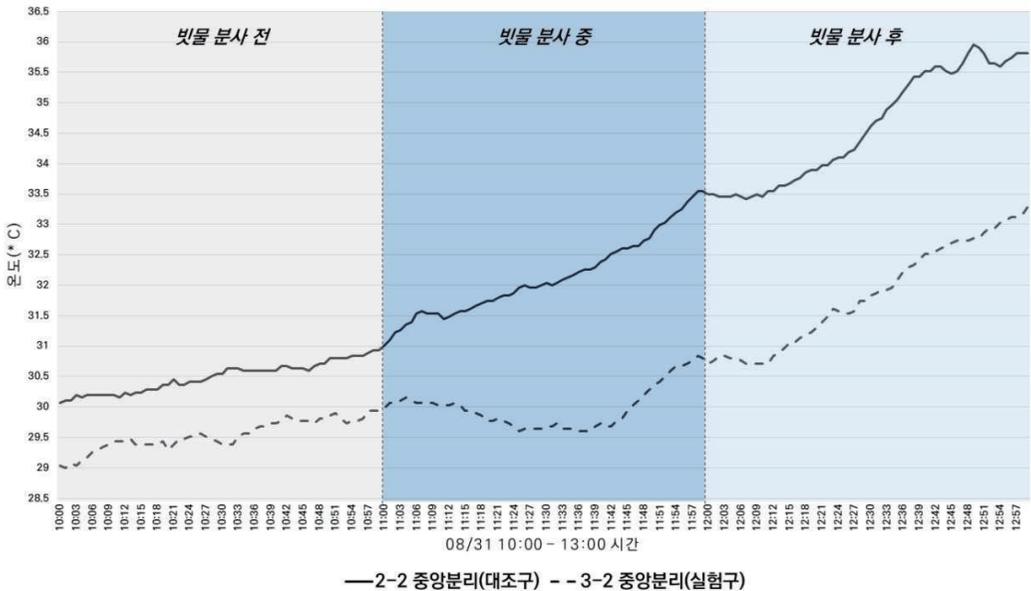
〈표 4-6〉 가로 환경에 따른 모니터링 기간 유형별 평균 최고 온도

온도	가로수			증양분리대		
	빗물 분사 미처리 구간(A)	빗물 분사 처리 구간(B)	온도 차이 (A-B)	빗물 분사 미처리 구간(A)	빗물 분사 처리 구간(B)	온도 차이 (A-B)
최고 평균 (°C)	31.46	31.17	0.29	38.74	36.85	1.89

### 1) 중앙분리대의 대기 온도 저감 효과 비교

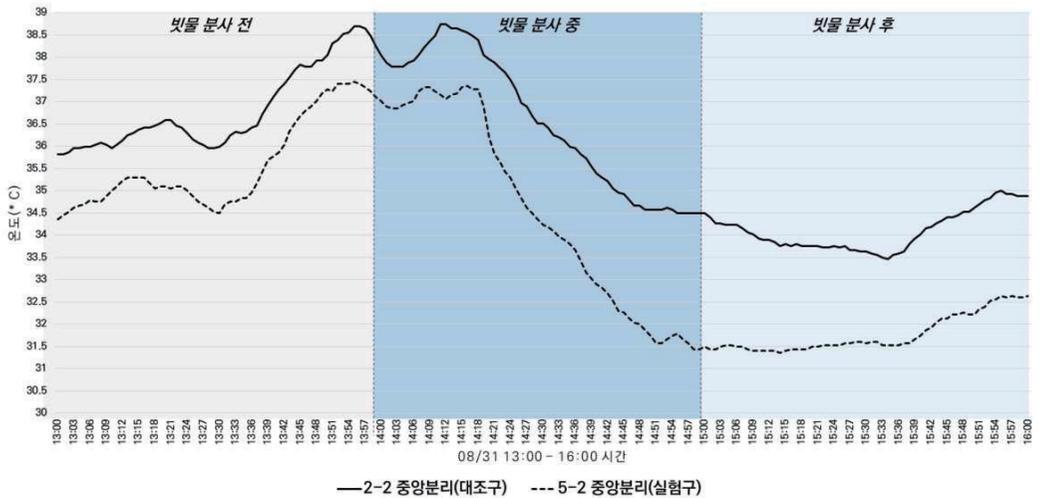
- 8월 31일 오전 모니터링을 통해 빗물분사의 대기온도 저감효과 증명
  - 2020년 8월 31일 오전(11-12시)에 빗물이 분사된 실험구(3구간)와 빗물이 분사되지 않은 대조구(2구간)의 중앙분리대 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-7〉 참조)
    - 빗물 분사 전 1시간(10-11시) 동안 대조구(2구간)의 평균 대기 온도는 실험구(3구간) 보다 약 0.95℃ 높은 것으로 확인
    - 빗물 분사(11-12시) 중 대조구의 평균 대기 온도는 실험구 보다 약 2.16℃ 높아, 빗물 분사 전에 비해 온도 차이가 증가(0.95℃ → 2.16℃)
    - 빗물 분사 후 1시간(12-13시) 동안 대조구의 평균 대기 온도는 실험구보다 약 2.77℃ 높아, 대조구와 실험구 간 대기 온도 차이가 지속적으로 증가함을 확인
  - 빗물 분사 전, 중, 후의 중앙분리대 대기 온도 변화를 비교한 결과, 빗물이 분사된 실험구가 대조구에 비해 지속적으로 낮은 온도를 유지했으며 시간 경과에 따른 온도 상승 폭도 상대적으로 낮은 것으로 확인
    - 대조구는 빗물 분사 전에 비해 분사 중 평균 대기 온도가 약 1.67℃ 증가하였으며, 빗물 분사 중에 비해 빗물 분사 후 약 2.45℃ 증가하여 증가 폭이 더욱 커졌음
    - 반면, 실험구는 대조구에 비해 증가 폭이 크지 않았는데 분사된 빗물이 중앙분리대 대기 온도 증가에 대한 저항 작용을 한 것으로 판단됨

〈그림 4-7〉 8월 31일 오전 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화



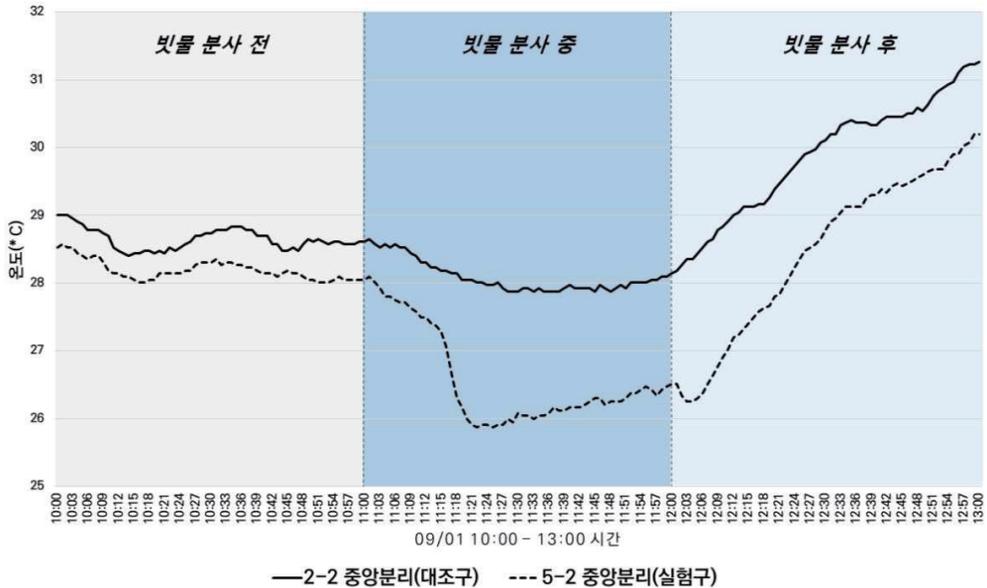
- 8월 31일 오후, 빗물이 분사된 중앙분리대의 대기 온도가 더욱 큰 폭으로 하락
  - 2020년 8월 31일 오후(14-15시)에 빗물이 분사된 실험구(5구간)와 빗물이 분사되지 않은 대조구(2구간)의 중앙분리대 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-8〉 참조)
    - 빗물 분사 전 1시간(13-14시) 동안 대조구(2구간)의 평균 대기 온도는 실험구(5구간)보다 약 1.25℃ 높았음
    - 빗물 분사(14-15시) 동안 대조구의 평균 대기 온도는 실험구 보다 약 2.04℃ 높아, 빗물 분사 전보다 온도 차이가 증가(1.25℃ → 2.04℃)
    - 빗물 분사 후 1시간(15-16시) 동안 대조구의 평균 대기 온도는 실험구보다 약 2.33℃ 높아, 대조구와 실험구 간 대기 온도 차이가 지속적으로 증가함
  - 오전과 달리 오후에는 빗물 분사 유무와 관계없이 실험구 및 대조구의 중앙분리대 대기 온도가 시간의 경과와 함께 모두 감소했으나, 빗물이 분사된 실험구가 대조구에 비해 더욱 큰 폭으로 감소한 것으로 확인

〈그림 4-8〉 8월 31일 오후 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화



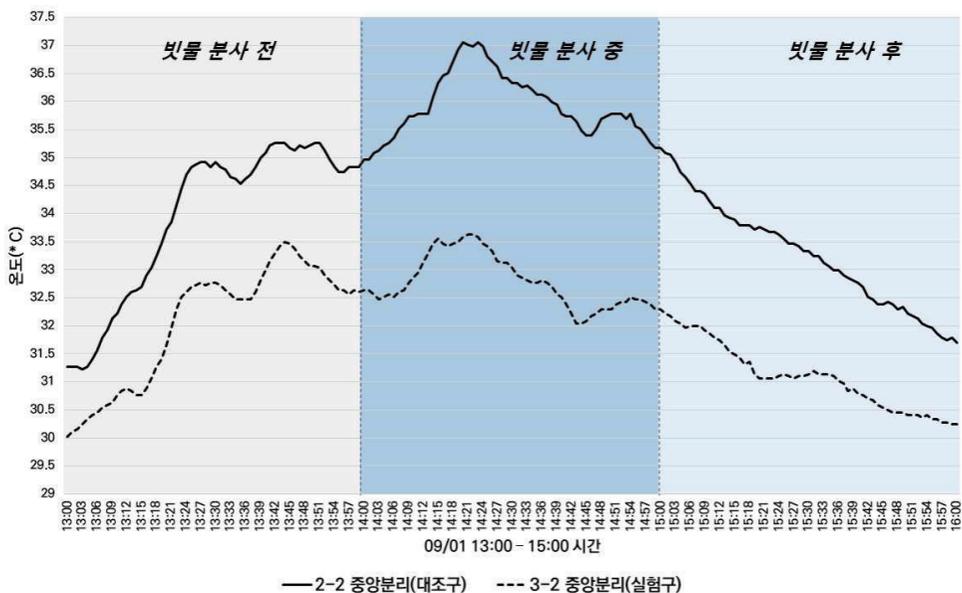
- 9월 1일 오전 모니터링에서도 빗물분사시설의 대기온도 저감효과 확인
  - 2020년 9월 1일 오전(11-12시)에 빗물이 분사된 실험구(5구간)와 빗물이 분사되지 않은 대조구(2구간)의 중앙분리대 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-9〉 참조)
    - 빗물 분사 전 1시간(10-11시) 동안 대조구(2구간) 평균 대기 온도는 실험구(5구간)보다 약 0.46℃ 높았음
    - 빗물 분사(11-12시) 동안 대조구의 평균 대기 온도는 실험구보다 약 1.51℃ 높았으며, 빗물 분사 이후(12-13시)에도 대조구가 실험구보다 약 1.43℃ 높았음
  - 8월 31일 오전 3구간을 대상으로 했던 모니터링 결과와 동일하게 실험구의 대기 온도가 대조구에 비해 지속적으로 낮아 빗물분사에 따른 온도저감효과 입증
  - 다만, 8월 31일 모니터링에서는 시간경과에 따른 실험구와 대조구 모두 대기 온도가 꾸준히 상승했지만 9월 1일에는 온도가 떨어지다가 다시 상승하는 모습을 보임
    - 8월 31일 오전 모니터링에서는 빗물 분사 전후로 평균 대기 온도가 계속 증가했으나 9월 1일에는 분사 전-중에 0.55℃ 감소 후, 분사 중-후에 1.76℃ 증가
  - 8월 31일에 비해 9월 1일 수원시 전체 평균 온도는 기상청 기준 약 1.3℃ 감소했으며, 고정형 온도계로 직접 실측한 자료에 따르면 약 4℃ 감소한 것으로 나타났는데, 이러한 대기 온도의 변화가 야기한 현상이라고 해석됨

〈그림 4-9〉 9월 1일 오전 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화



- 9월 1일 오후 모니터링 결과, 실험구가 대조구에 비해 최대 3.15℃ 낮은 것으로 확인
  - 2020년 9월 1일 오후(14-15시)에 빗물이 분사된 실험구(3구간)와 빗물이 분사되지 않은 대조구(2구간)의 중앙분리대 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-10〉 참조)
    - 빗물 분사 전 1시간(13-14시) 동안 대조구의 평균 대기 온도는 실험구보다 약 1.88℃ 높았으며, 빗물 분사(14-15시) 동안에는 약 3.15℃ 높아 대조구와 실험구의 대기 온도 차이가 더욱 커진 것으로 나타남
    - 반면, 빗물 분사 이후(15-16시)에는 대조구가 실험구보다 약 2.16℃ 높아 대조구와 실험구 간 온도 차이가 감소한 것으로 확인
    - 또한, 대조구는 분사 전-중 온도가 1.99℃ 증가하다가 분사 후 2.68℃ 감소하였으며, 실험구는 분사 전-중 온도가 0.72℃ 증가하다가 분사 후 1.69℃ 감소
  - 이전의 모니터링 결과와 동일하게 빗물이 분사된 실험구의 대기 온도가 대조구에 비해 낮았으며, 빗물 분사 중에는 최대 3.15℃ 낮은 것으로 확인
  - 그러나 빗물 분사 후에는 실험구와 대조구의 온도 차이가 감소한 것으로 나타났는데, 이는 빗물 분사 유무에 관계없이 이들 간 14시 30분-15시 사이를 기점으로 대기 온도가 감소하였기 때문에 나타난 결과라고 해석됨
  - 시간에 따른 온도 변화 특성을 고려하여 빗물 분사 시기를 설정하면 대기 온도 저감 효과를 극대화 할 수 있을 것으로 예상

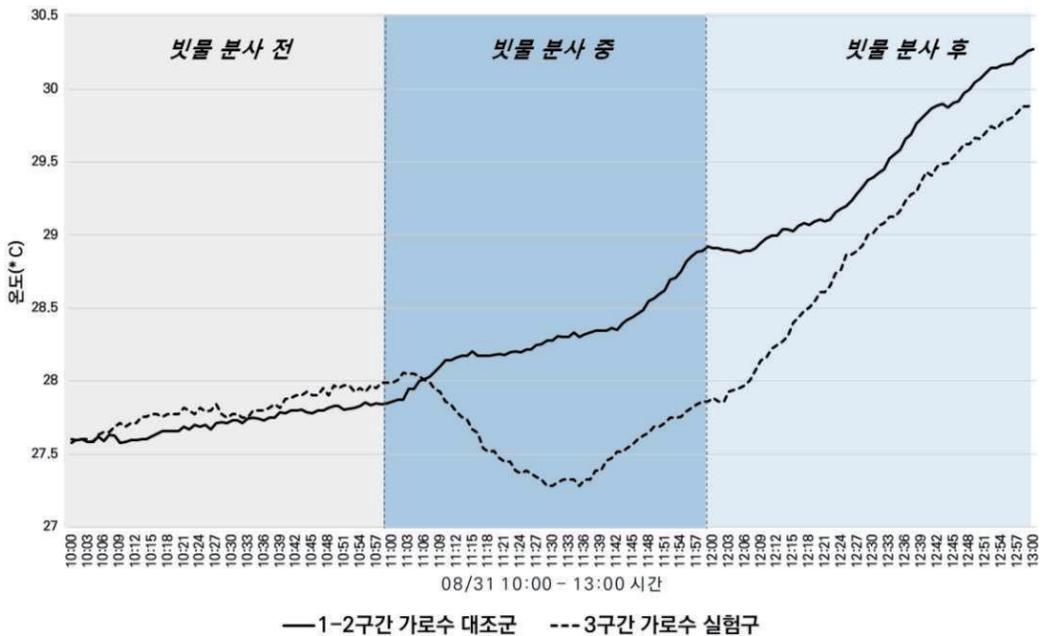
〈그림 4-10〉 9월 1일 오후 빗물 분사에 따른 중앙분리대 평균 대기 온도 변화



## 2) 가로수의 대기 온도 저감 효과 비교

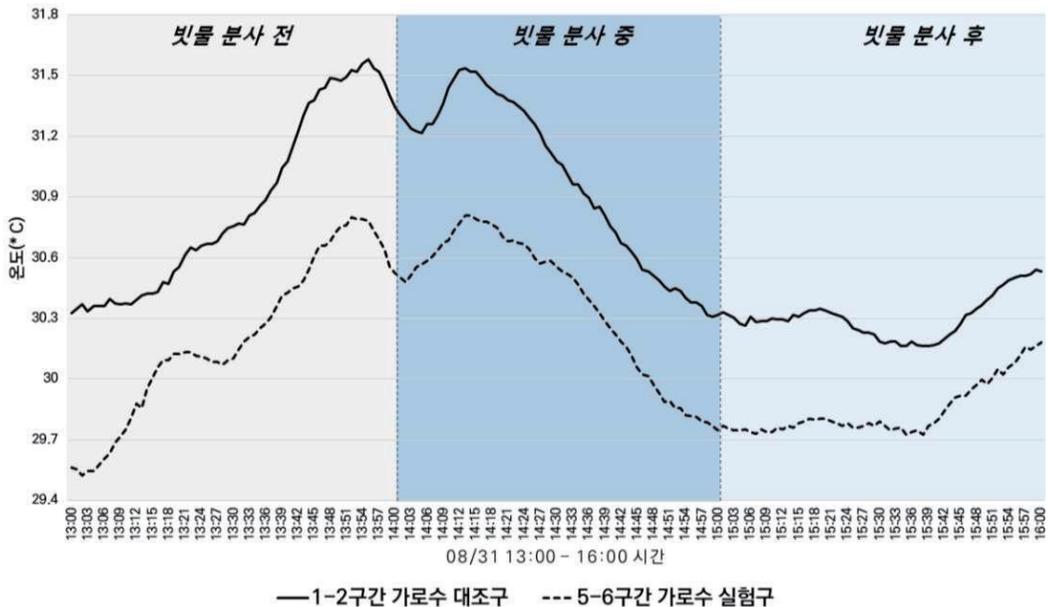
- 8월 31일 오전, 대기온도가 상승하면서 빗물 분사에 따른 가로수 온도 저감 효과 증명
  - 2020년 8월 31일 오전(11-12시)에 빗물을 분사한 실험구(3구간)와 빗물을 분사하지 않은 대조구(1-2구간)의 가로수 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-11〉 참조)
    - 가로수 대조구는 1-2구간에 설치된 온도계 4개의 평균 대기 온도이며, 실험구는 3구간 4개, 5-6구간에 설치된 온도계 4개의 평균 대기 온도를 의미
    - 중앙분리대와 다르게 가로수는 빗물 분사 전 1시간(10-11시) 동안 대조구(1-2구간)의 평균 대기 온도가 실험구(3구간) 보다 약 0.09℃ 낮은 것으로 확인
    - 그러나 빗물 분사(11-12시) 동안 대조구 평균 대기 온도가 실험구보다 약 0.68℃ 높아졌으며, 빗물 분사 이후에도 약 0.53℃ 정도 차이가 발생하여 빗물 분사로 인한 온도 저감 효과 확인
    - 빗물 분사 전에는 대조구의 대기 온도가 실험구보다 낮았지만 시간의 경과와 함께 대기 온도가 상승하면서 빗물 분사에 따른 온도 저감 효과가 나타남
      - 그러나 중앙분리대의 경우와 달리 실험구와 대조구 간 온도 차이가 상대적으로 작은 것으로 확인되었는데, 이는 식생의 유무에 따른 차이라고 예상됨

〈그림 4-11〉 8월 31일 오전 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화



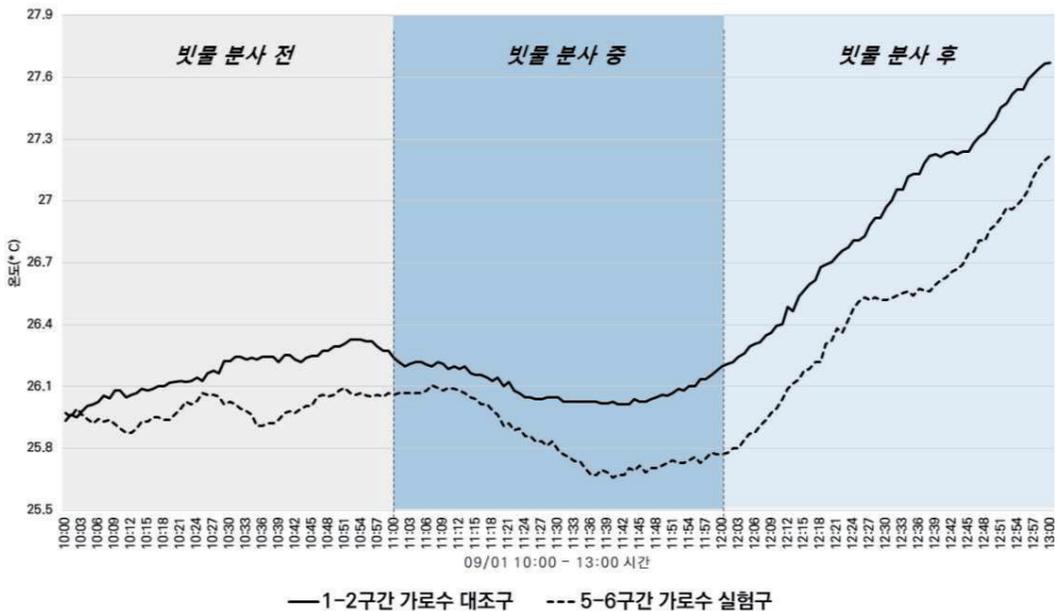
- 8월 31일 오후 시간에도 오전 시간과 유사한 수준의 온도 저감 효과 확인
  - 2020년 8월 31일 오후 시간(14-15시)에 빗물을 분산한 실험구(5-6구간)와 빗물을 분사하지 않은 대조구(1-2구간)의 가로수 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-12〉 참조)
    - 오후 빗물 분사 전 1시간(13-14시) 동안 대조구 평균 대기 온도는 실험구 보다 약 0.65℃ 높았으며, 빗물 분사(14-15시) 동안 약 0.61℃, 분사 후(15-16시)에는 약 0.46℃의 차이를 보여 온도 변화 폭이 거의 일정하게 유지된 것으로 확인
    - 빗물 분사 전, 중, 후에 따라 실험구와 대기구의 온도 차이는 0.46 ~ 0.65℃로 비교적 작은 것으로 나타났으며, 여름철 14-15시 가로수 평균 대기 온도는 도로 중앙 빗물 분사 유무에 크게 영향을 받지 않는다고 해석할 수 있음
    - 따라서 가로수를 대상으로 빗물 분사를 통한 최적의 온도 저감 효과를 달성하기 위해서는 빗물 분사 시간을 11-13시로 유지하는 것이 바람직하다고 보임

〈그림 4-12〉 8월 31일 오후 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화



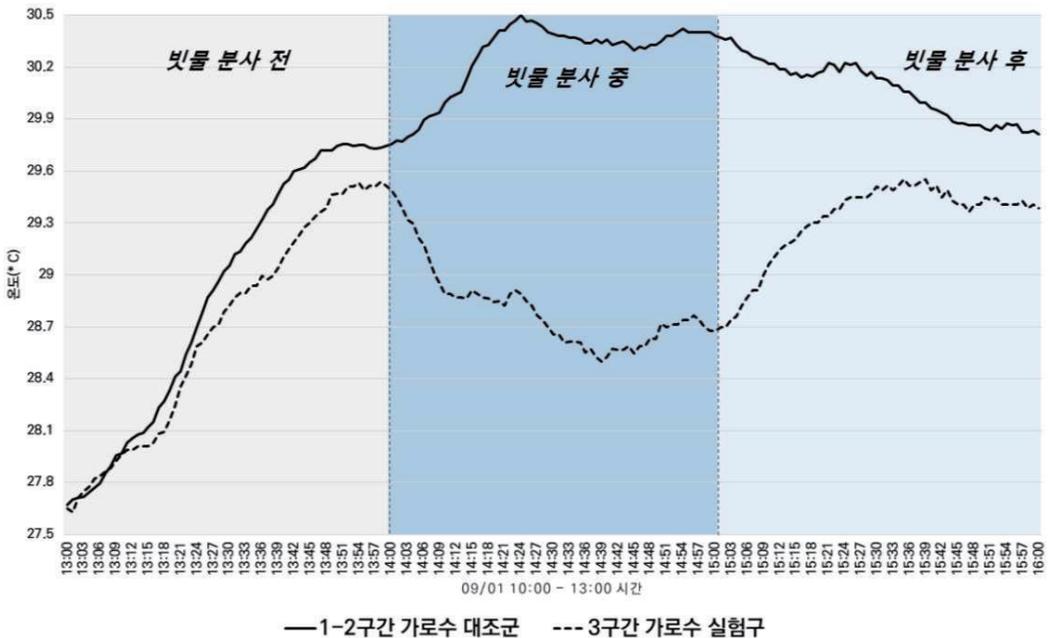
- 9월 1일 오전, 비교적 흐린 날씨에도 빗물 분사에 따른 온도 저감 효과 증명
  - 2020년 9월 1일 오전(11-12시)에 빗물을 분사한 실험구(5-6구간)와 빗물을 분사하지 않은 대조구(1-2구간)의 가로수 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-13〉 참조)
    - 빗물 분사 전(10-11시) 대조구 평균 대기 온도는 실험구보다 약 0.18℃ 정도 높았으며, 빗물 분사(11-12시) 동안 약 0.24℃, 분사 후(12-13시) 약 0.46℃의 차이를 보여 대조구 및 실험구 간 온도 변화 폭이 비교적 일정하게 유지된 것으로 나타남
    - 8월 31일 모니터링 결과에 비해 실험구와 대조구 간의 온도 차이가 크진 않지만 빗물을 분사한 경우 가로수의 온도 저감 효과가 있는 것으로 확인
    - 특히 9월 1일은 8월 31일에 비해 수원시 기온이 약 1-2℃ 감소했고 대기가 흐린 상태였음에도 불구하고 빗물 분사 장치의 온도 저감 효과를 증명
      - 8월 31일 오전 모니터링 당시 대조군 평균 온도는 시간의 경과와 함께 지속적으로 증가했으나 9월 1일에는 11-12시에 온도가 감소한 이후 12-13시에 증가
      - 이는 9월 1일 수원시 기온이 전날에 비해 다소 흐렸기 때문에 나타난 현상으로 예상되며, 온도가 낮아졌음에도 빗물을 분사한 실험군의 평균 온도가 대조군에 비해 낮았기 때문에 온도 저감 효과가 있다는 것을 확인 가능

〈그림 4-13〉 9월 1일 오전 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화



- 9월 1일 오후에는 실험구가 대조구의 온도 차이가 최대 1.40℃ 기록
  - 2020년 9월 1일 오후(14-15시)에 빗물을 분사한 실험구(3구간)와 빗물을 분사하지 않은 대조구(1-2구간)의 가로수 대기 온도 변화를 모니터링(〈그림 4-14〉 참조)
  - 빗물을 분사한 14-15시에 실험구와 대조구 간의 온도 차이가 점차 상승하면서 평균 1.40℃로 가로수 모니터링에서 가장 큰 온도 저감 효과를 나타냄
    - 빗물 분사 전(13-14시) 대조구의 평균 대기 온도는 실험구보다 약 0.19℃ 정도 높았으며, 빗물 분사(14-15시) 동안에는 약 1.4℃, 분사 후(15-16시)에는 0.79℃도 높은 것으로 확인
    - 빗물 분사로 인해 대조구와 실험구 간 평균 대기 온도 폭이 커짐을 확인하였으며, 분사 후에 실험구 가로수의 대기 온도가 일정 상승하다가 15시 30분을 기점으로 유지, 감소되는 경향을 보였음

〈그림 4-14〉 9월 1일 오후 빗물 분사에 따른 가로수 평균 대기 온도 변화



## 2. 빗물 분사에 따른 표면 온도 저감 효과 비교

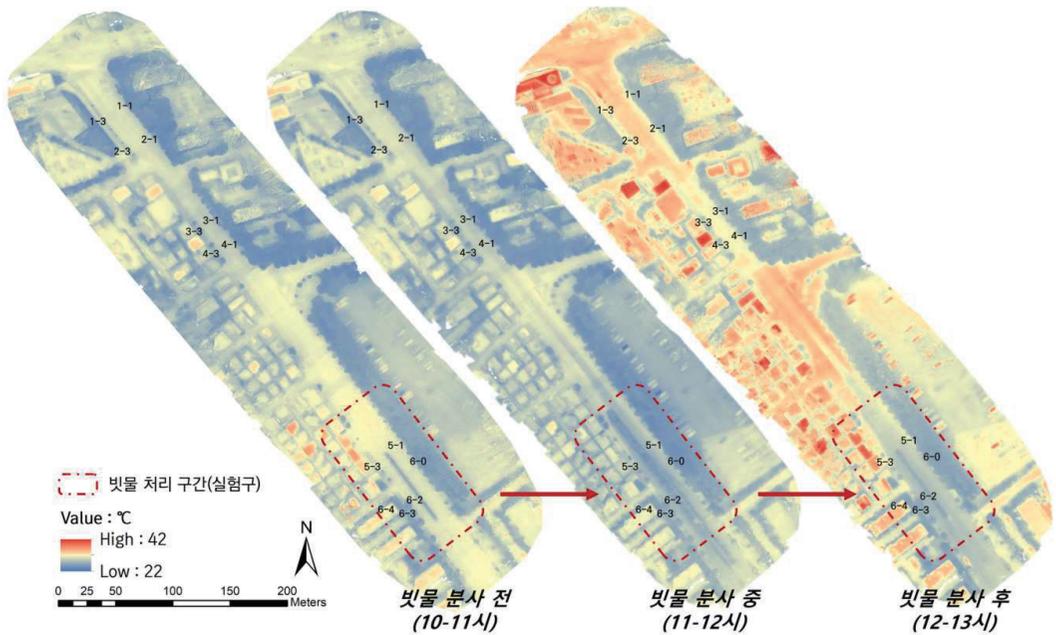
- 9월 1일 10-13시, 5-6구간 빗물 분사에 따른 대상지 전체의 표면 온도 저감 효과 확인
  - 5-6구간을 대상으로 빗물 분사에 따른 표면 온도 변화를 비교한 결과, 빗물 분사 전(10-11시)에 비해 빗물 분사 중(11-12시) 대상지 전체의 평균 온도가 약 0.002℃ 감소
  - 대상지 전체의 표면 온도 분포 현황을 살펴보면 빗물 분사 중 23.21-27.59℃로 빗물 분사 전(23.50-27.23℃)이나 후(25.27-30.35℃)에 비해 낮음
  - 낮 시간에는 표면 온도가 서서히 데워지기 때문에(제민희·정승현, 2018), 시간의 경과와 함께 오히려 온도가 떨어진 것은 빗물 분사의 영향인 것으로 예상
  - 가로수 및 중앙분리대를 별도로 확인했을 때도 일정 수준의 온도 저감 효과가 있는 것으로 나타났는데, 특히 중앙분리대의 온도 변화량 차이가 상대적으로 큰 것으로 확인
  - 이는 드론을 통한 표면 온도 측정 시 온도계 반경 5m 평균값을 산출하였기 때문에 수목의 경우 수관폭의 영향을 받아 변화량의 차이가 작지만, 수목이 없는 중앙분리대의 경우 주변 도로의 표면 온도의 영향으로 온도변화가 큰 것으로 보임
  - 빗물 분사 전에 비해 빗물 분사 중 가로수 평균 표면 온도는 약 0.19℃, 중앙분리대는 약 0.06℃ 감소했으며, 빗물 분사 중에 비해 빗물 분사 후 가로수 평균 표면 온도는 반대로 약 1.29℃, 중앙분리대는 3.15℃ 증가
  - 특히 빗물 분사 중에 5-6구간의 표면 온도가 확연하게 떨어졌을 뿐 아니라 실험구 주변 건물의 표면 온도 역시 감소한 것으로 나타남
  - 12-13시에는 대상지 전체의 표면온도가 상승했으나 가로수 녹지를 포함해 빗물을 분사한 5-6구간에서는 대조군에 비해 표면 온도가 낮은 것으로 확인

〈표 4-7〉 9월 1일 10-13시 5-6구간 빗물 분사에 따른 대상지 전체의 표면 온도 변화

(단위 : ℃)

구분	빗물 분사 전(10-11시)		빗물 분사 중(11-12시)		빗물 분사 후(12-13시)	
	표면 온도	대기 온도	표면 온도	대기 온도	표면 온도	대기 온도
온도 분포	23.50 ~ 27.23	-	23.21 ~ 27.59	-	25.27 ~ 30.35	-
평균 온도	24.55(±0.98)	-	24.55(±1.12)	-	26.73(±1.52)	-
가로수	24.52	25.99	24.33	25.87	25.62	26.46
중앙분리대	23.92	28.19	23.98	26.59	27.13	28.40

〈그림 4-15〉 2020년 9월 1일 10-13시 5-6구간 빗물 분사에 따른 표면 온도 변화



- 9월 1일 13-16시 3구간에서도 빗물 분사에 따른 표면 온도 저감 효과 증명
  - 9월 1일 10-13시 모니터링에 이어 13-16시에 모니터링을 실시한 결과, 3구간 빗물 분사 전(13-14시) 대상지 전체의 평균 표면 온도는 29.01(±1.57)℃로 1시간 전(12-13시)의 표면 온도(26.73℃)에 비해 급격한 상승세를 보임(2.27℃ 증가)
    - 빗물 분사 전(13-14시) 대상지 전체의 온도 분포는 최소 27.48℃에서 최대 34.18℃로 최소-최대 표면 온도 변화 폭이 매우 큰 것으로 확인
    - 빗물 처리가 없던 12-13시와 13-14시 사이 대기 및 표면 온도 변화량을 비교한 결과, 가로수 평균 대기 온도는 약 1.86℃, 중앙분리대는 약 3.17℃로 증가했으며 가로수 표면 온도도 약 1.91℃가 상승
    - 반면에 중앙분리대의 표면 온도는 오히려 약 0.20℃ 감소하였는데, 이는 주변 도로 표면 온도까지 포함하여 평균 표면 온도를 산출하였기 때문으로 해석됨
  - 3구간 빗물 분사가 시작된 14-15시 대상지 전체 온도 분포는 최소 26.78℃부터 최대 33.68℃로 확인되었으며, 평균 표면 온도는 약 28.76(±1.79)℃로 약 0.24℃ 감소
    - 특히, 가로수를 제외한 대부분의 표면 온도가 상대적으로 매우 높았으나 빗물 분사가 수행된 3구간 도로 표면 온도만 현저하게 감소하는 것으로 나타남
  - 마지막으로 3구간 빗물 분사가 종료된 시점인 15-16시에 대상지 전체 온도 분포를

확인한 결과, 최소 26.72℃부터 최대 29.95℃까지 확인되었으며 평균 온도는 약 28.46(±0.85)℃로 빗물분사 기간보다 약 0.31℃ 감소

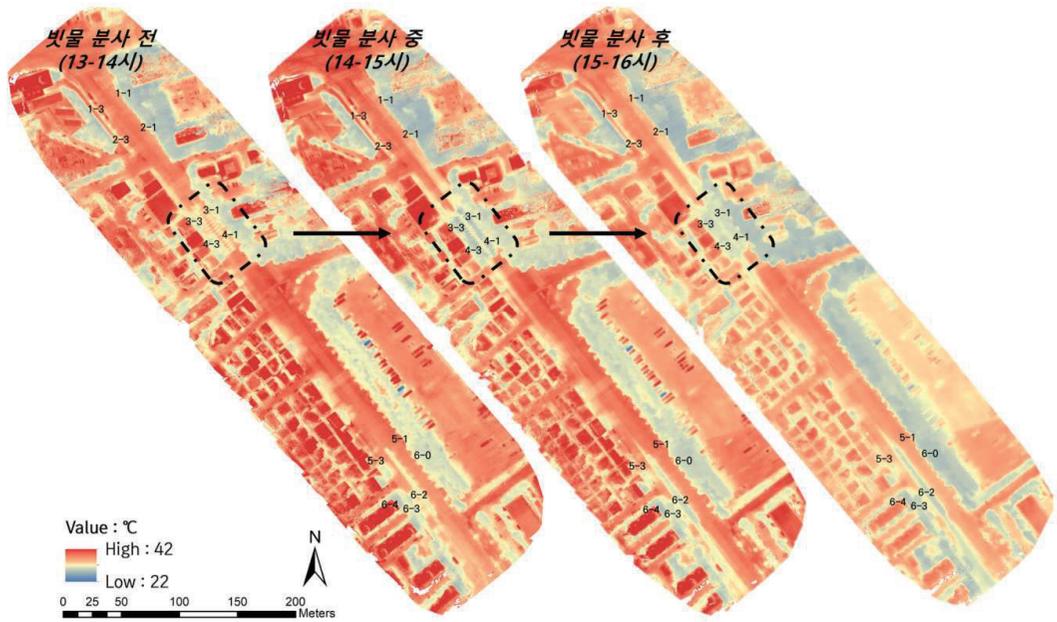
- 빗물 분사 시기보다 종료 시점인 15-16시에 전체 평균 표면 온도가 더 낮았는데, 중앙 분리대와 가로수의 대기 온도 또한 분사 종료 후에 감소
- 이는 빗물 분사 유무와 관계없이 수원시 평균 대기 온도가 15-16시를 기점으로 감소했기 때문으로 해석됨
  - 2020년 8월 31일 수원시 평균 대기온도는 14시, 16시, 9월 1일에는 오후 3시에 최고점을 기록한 후 서서히 감소
  - 온도 저감 효과를 극대화하기 위해 대기 온도가 상승한 14시 30분 이전까지 빗물 분사를 실시하는 것이 바람직한 것으로 판단됨

〈표 4-8〉 9월 1일 13-16시 3구간 빗물 분사에 따른 대상지 전체의 표면 온도 변화

(단위 : ℃)

구분	빗물 분사 전(13-14시)		빗물 분사 중(14-15시)		빗물 분사 후(15-16시)	
	표면 온도	대기 온도	표면 온도	대기 온도	표면 온도	대기 온도
온도 분포	27.48 ~ 34.18	-	26.78 ~ 33.68	-	26.72 ~ 29.95	-
평균 온도	29.01(±1.57)	-	28.76(±1.79)	-	28.46(±0.85)	-
가로수	28.47	28.54	27.42	28.53	28.37	28.65
중앙분리대	29.91	33.95	26.78	34.01	29.03	34.07

〈그림 4-16〉 2020년 9월 1일 13-16시 3구간 빗물 분사에 따른 표면 온도 변화



### 제3절 소결

- 모니터링을 통해 수원시 여름철 빗물 분사에 따른 온도 저감 효과 확인
  - 고정형 온도계를 활용해 수원시 팔달구 월드컵로 일대에 설치된 빗물분사시설 가동에 따른 대기온도 변화를 모니터링한 결과, <표 4-9>와 같이 온도 저감 효과 확인
    - 8월 31일 빗물이 분사된 실험구(3구간)와 분사되지 않은 대조구(2구간)의 중앙분리대 대기 온도 변화를 비교했으며 빗물 분사 중(11-12시) 실험구의 평균 대기 온도가 대조구에 비해 약 2.16℃ 낮았으며, 빗물 분사 이후에도(12-13시) 온도 차이가 증가
    - 8월 31일 실험구(5-6구간)와 대조구(1-2구간)의 가로수 대기 온도를 비교했을 때도 빗물을 분사하는 동안(11-12시) 실험구의 평균 대기 온도가 대조구에 비해 약 0.68℃ 낮은 것으로 나타남
  - 수원시의 전반적인 기온이 낮거나 식생이 포함된 가로 환경에서는 온도 저감 효과가 상대적으로 낮았지만, 정도의 차이가 있을 뿐 모든 경우의 모니터링에서 빗물 분사에 따른 대기 온도 저감 효과 확인
  - 열화상 무인항공기를 이용한 대상지 전체의 표면 온도 모니터링에서도 도로에 빗물을 분사한 실험구에서 유의미한 수준의 온도 저감 효과 확인
    - 9월 1일 11-12시에 실험구(5-6구간)에 빗물을 분사한 결과, 오전 시간에는 대기온도가 천천히 상승하는 것이 일반적임에도 불구하고 빗물 분사 전과 분사 중의 표면 온도가 동일한 것으로 확인(24.55℃ → 24.55℃ → 26.73℃)
    - 9월 1일 14-15시에 실험구(3구간)에 빗물을 분사한 결과, 빗물 분사 전(13-14시)에 비해 평균 표면 온도는 약 0.25℃ 감소(29.01℃ → 28.76℃)
  - 다만, 여름철 대기 온도는 일반적으로 3-4시에 최저점을 기록한 뒤, 꾸준히 상승하여 14-15시에 최고점을 기록한 후 다시 감소하는 경향을 보이기 때문에 온도 저감 효과 극대화를 위해서는 14시 이전에 빗물 분사를 수행하는 것이 바람직하다고 할 수 있음
- 식생을 통해 빗물분사시설의 온도저감 효과 극대화 가능
  - 모니터링 기간 중 가로수, 중앙분리대, 녹지분리대, 인공구조물, 내부 녹지의 평균 대기 온도를 비교한 결과, 중앙분리대가 가장 높았으며 특히 빗물 분사가 전혀 없었던 2구간 중앙분리대의 대기 온도가 가장 높은 것으로 확인
    - 중앙분리대의 평균 대기온도는 27.95℃, 가로수 26.97℃, 외각 인공구조물 27.91℃, 녹지분리대 26.72℃, 내부 녹지 26.39℃ 순

- 2구간 중앙분리대의 평균 온도는 38.51℃이며, 일 1회씩 빗물이 분사됐던 3, 5구간의 중앙분리대는 이에 비해 낮은 27.60℃, 27.74℃ 기록
- 반면, 중앙분리대와 동일한 기능을 하는 녹지분리대의 평균 대기온도는 중앙분리대에 비해 1.23℃ 낮아 도로 내 녹지 조성이 대기 온도 저감 효과가 있다는 것을 증명
- 또한 가로수를 대상으로 한 빗물분사장치의 온도저감 효과 모니터링에서도 중앙분리대에 비해 효과 정도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났는데, 이는 식생의 유무가 영향을 미친 것으로 해석됨
- 따라서 도로에 빗물분사장치를 설치하는 것 외에 녹지분리대나 가로수와 같이 식생을 식재하는 것이 여름철 대기온도 및 표면온도 저감에 효과적일 것으로 기대됨
- 식생을 중심으로 하는 그린인프라를 도로 주변에 설치한다면 대기질 개선, 우수유출 감소 등과 함께 온도 저감이 가능할 것으로 예상

〈표 4-9〉 빗물분사에 따른 대기온도 저감 효과 종합

(단위 : °C)

구분	시간	1-2구간 (대조구, A)	3-4구간 (실험구, B)	5-6구간 (실험구, C)	온도 차이 (A-B, A-C)	
8. 31	가로수	10:00 ~ 11:00	27.71	27.71	0.00	
		11:00 ~ 12:00	28.31	27.63	0.68	
		12:00 ~ 13:00	29.48	28.93	0.55	
		13:00 ~ 14:00	30.86		30.20	0.66
		14:00 ~ 15:00	31.00		30.39	0.61
		15:00 ~ 16:00	30.30		29.84	0.46
	중앙분리대	10:00 ~ 11:00	30.49	29.54		0.95
		11:00 ~ 12:00	32.14	29.99		2.16
		12:00 ~ 13:00	34.60	31.83		2.77
		13:00 ~ 14:00	36.83		35.58	1.25
		14:00 ~ 15:00	36.56		34.52	2.04
		15:00 ~ 16:00	34.11		31.78	2.33

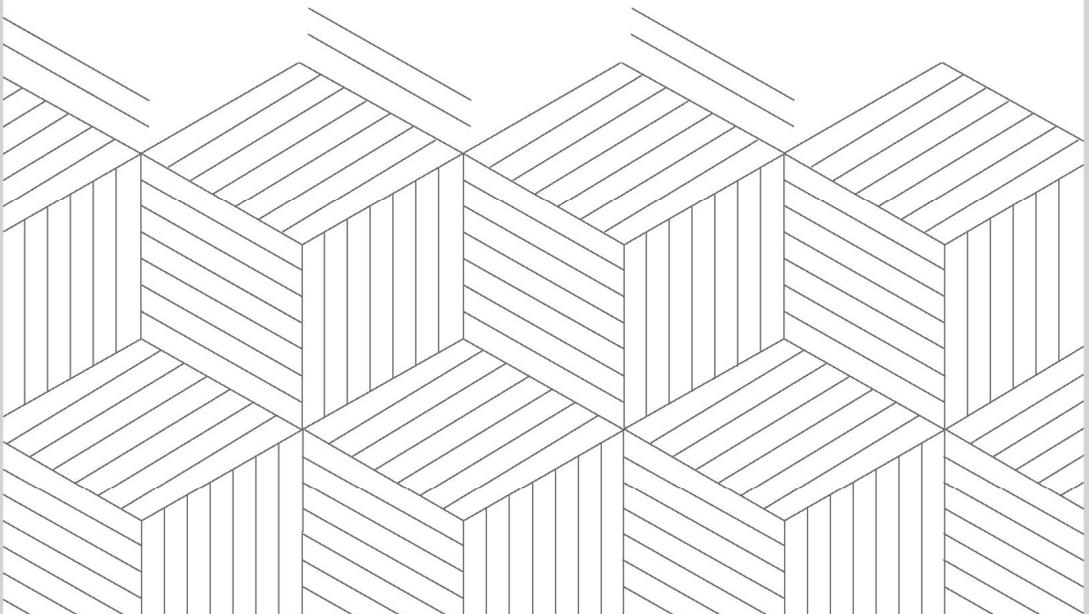
 표시는 빗물 분사를 의미



# 제5장

## 저영향개발(LID)시설의 효과성 분석

- 제1절 모니터링 개요
- 제2절 모니터링 결과
- 제3장 수문분석 모델(SWMM) 분석결과
- 제4절 효과 종합





# 제5장 저영향개발(LID)시설의 효과성 분석

## 제1절 모니터링 개요

### 1. 모니터링 목적

- 수원시 레인시티 사업으로 조성된 빗물관리시설의 객관적인 효과분석을 위한 모니터링

### 2. 모니터링 범위

#### 1) 공간적 범위

- 기 조성된 저영향개발(LID) 조성지역 중 원천리천유역의 식물재배화분, 식생도랑, 투수성블록을 대상으로 하되 모니터링이 가능한 시설을 검토하여 대상지 선정

〈그림 5-1〉 LID시설 위치



## 2) 시간적 범위

- 모니터링 기간은 2021년 3월~5월임
  - 자연강우가 발생한 날에 모니터링을 실시하는 것을 원칙으로 함
  - 다만, 모니터링 기간 동안 자연강우가 충분하게 발생하지 않은 경우 LID시설의 최대 능력을 볼 수 없고 이 경우 LID시설의 효과를 모사하기 위한 데이터가 부족할 수 있으므로 인공강우 실험을 진행할 수 있음

## 3) 내용적 범위

- LID시설의 현장 모니터링을 통해 단기 효과성 분석하고 여기서 분석된 기초 자료를 기반으로 장기 효과성을 분석함

〈표 5-1〉 내용적 범위

구분	내용
LID시설의 기초조사	현황 측량을 통한 집수면적 계산
원단위 예측	설치된 시설의 식생층, 자갈층의 깊이 및 구성비 확인
모니터링 항목	해당 시설의 집수면적(유역) 집수면적 대비 유입량 측정 (자연강우, 인공강우) 하부 배수구의 유출량 점검관 및 채수정의 배수현황 및 수위 체크
장기 효과분석	단기(자연강우, 인공강우)에서의 모니터링 결과 수문분석(모델링)을 활용한 LID시설별 효과분석 - 연간 총강우대량 대비 연간 토양 침투량, 유출량, 수분증발량 예측

### 3. 모니터링 방법

#### 1) 분석의 흐름

- '레인시티 효과성 분석'을 위해서 다음과 같은 절차를 통해서 진행함 <그림 5-2>
- 사전조사를 통해 모니터링을 진행할 수 있는 LID시설을 확인함
- 모니터링은 자연강우를 기반으로 하되 조사기간 동안 충분한 강우가 내리지 않을 경우 인공강우를 검토
- 시설의 담수심, 식생층 및 하부 기초 토양에 대한 포화투수계수, 배수관관저고 등의 시설의 세부 데이터를 구축
- 상기 모니터링으로부터 실측되거나 계산된 데이터를 활용하여 수문분석모델( SWMM)을 통해 장기효과 예측

<그림 5-2> 모니터링 분석의 흐름



## 2) 사전답사

- 일시 : 2021년 4월 1일
- 장소 : 영통구 효원로 407일대, 동탄원천로 915번길 일대, 영통로 290번지 일대
  - 위치1 : 영통구 효원로 407일대(영통구청앞) / 식물재배화분



- 영통구청 앞 왕복 12차선 도로로서 시설의 상태는 양호하나 대로변과 인접하여 모니터링 수행에 지장이 있을 것으로 판단됨

- 위치2 : 동탄원천로 915번길 일대(매탄주공 그린빌 인근) / 식물재배화분



- 매탄주공 아파트의 이면 도로로서 시설의 상태가 양호하고 차량의 통행도 적당함
- 식물재배화분 L2.5, L5.0 두 타입이 설치 되어있음
- 모니터링 장소로 적합하다고 판단됨

- 위치3 : 영통로 290번길 일대(벽적골 휴먼시아 인근) / 식생도랑



- 벽적골 휴먼시아 아파트 이면도로로서 식생 도랑이 설치되어 있음
- 식생도랑이 경사에 설치되어있어 유입량에 대한 계측이 어려움

### 3) 모니터링 대상지 및 시설

■ 모니터링 대상지

- 사전답사를 통해서 모니터링을 진행할 수 있는 장소를 선별함
- 빗물이 무리 없이 유입되고 계측이 가능하며 유출 계측도 동시에 진행할 수 있는 장소를 선택
- 동탄 원천로 915번길 일대(매탄주공 그린빌 인근)에서 진행이 가장 무난할 것으로 판단됨에 따라 본 장소로 선택

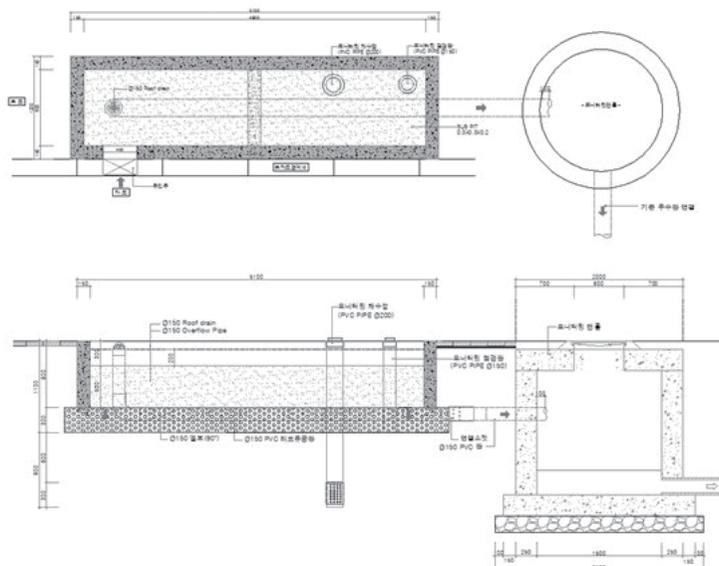
〈표 5-2〉 모니터링 장소

주소	- 동탄원천로 915번길 일대(매탄주공 그린빌 인근)
설치시설	- 식물재배화분 L2.5, L5.0 type

■ 모니터링 대상시설

- 모니터링 대상지역에 설치된 시설은 식물재배화분임 〈그림 5-3〉
- 식물재배화분은 화분의 폭에 따라서 L2.5 타입과 L5.0타입으로 구분되며 수원시 레인시티 프로젝트에 의해서 대상지 전역에 설치되어있음

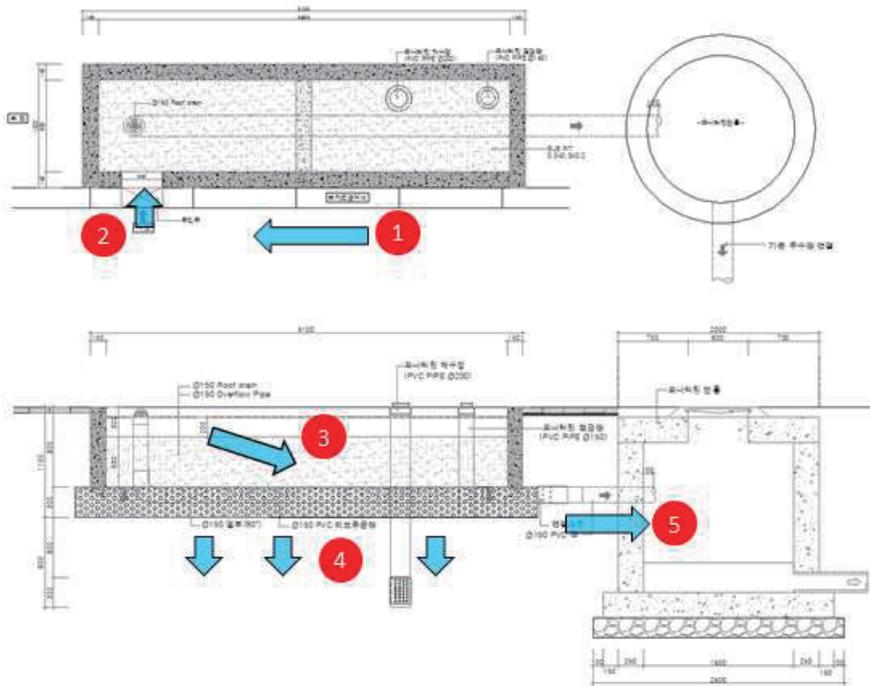
〈그림 5-3〉 식물재배화분 표준 단면도



〈표 5-3〉 식물재배화분의 상세

시설명	식물재배화분
크기	① 식물재배화분 L5.0type : L5,000 x W1,200 (시설면적 : 4.59㎡) ② 식물재배화분 L2.5type : L2,500 x W1,200 (시설면적 : 2.25㎡)
시설 기능	식물재배화분은 도로의 빗물을 도로와 인접한 녹지로 침투 시켜 유출 저감 및 도로에서 발생된 비점오염의 하수관거 유입을 줄여주는 기능을 기대할 수 있는 시설임  따라서 적절한 식생도와 원지반 및 주변 토양의 포화투수계수의 영향을 받을 수 있는 시설임

〈그림 5-4〉 식물재배화분의 빗물 유입 및 유출흐름도



번호	내용
①	도로의 경사를 통해서 시설로 빗물이 유도됨
②	유입구를 통해서 시설로 빗물이 유입됨 / 여과시설을 통해서 오염원 포집
③	유입된 빗물은 일차적으로 식생토로 침투됨
④	자갈층에서 빗물을 저류하고 원지반으로 침투됨
⑤	시설에서 침투되지 못한 빗물은 모니터링용 관을 통해서 유출됨

#### 4) 모니터링 기기 및 설치위치

##### ■ 모니터링 기기

- 식물재배화분은 도로에 떨어진 빗물을 주변 경사를 통해서 시설로 유입시키는 시설로서 강우사상에 따라서 매우 작은 유량부터 큰 유량이 유입될 수 있음
- 따라서 일반적인 만관식 유량계로는 유입량과 유출량을 측정하는 것이 어려울 것으로 예상되므로 매우 작은 유량도 측정할 수 있는 초음파식 이동형 유량계를 설치함

〈그림 5-5〉 초음파식 이동형 유량계

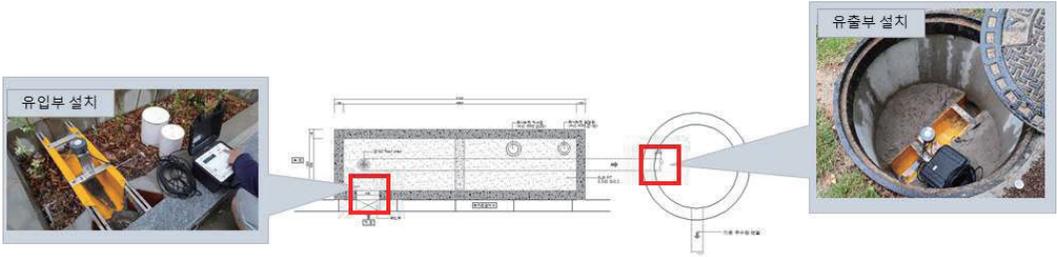


구분	내용
측정방식	초음파 센서를 통한 Tough Flume 측정위치의 수위데이터 측정 - Tough Flume의 수위데이터를 유량으로 연산
유량연산법	- 표준형 Tough Flume (PB-75F~PB-800F)표준 탑재
표시 및 기록	- 날짜, 시각, 수위, 순시유량, 적산유량, 누적유량
측정간격	- 매 10초 간격
측정 정밀도	F.S. ± 1%

##### ■ 모니터링 기기의 설치

- 모니터링시 정확한 데이터를 수집하기 위해서는 측정기기를 적절한 위치에 설치하는 것이 가장 중요한 요소임
- 유량계는 우수유출수 유입부와 식물재배화분의 하부 배수관의 유출구에 설치함

〈그림 5-6〉 유량계 설치 위치  
(유입부, 유출부)



## 제2절 모니터링 결과

- 현장 모니터링은 자연강우 2회 및 인공강우1회를 진행하였음

### 1. 자연강우 모니터링 1차

- 모니터링 개요
  - 날짜 : 4월 12일
  - 모니터링 시간 : 14:50~21:16 (약 6시간 30분)
  - 대상강우(모니터링 중) : 12.0mm

〈그림 5-7〉 모니터링 센서 설치

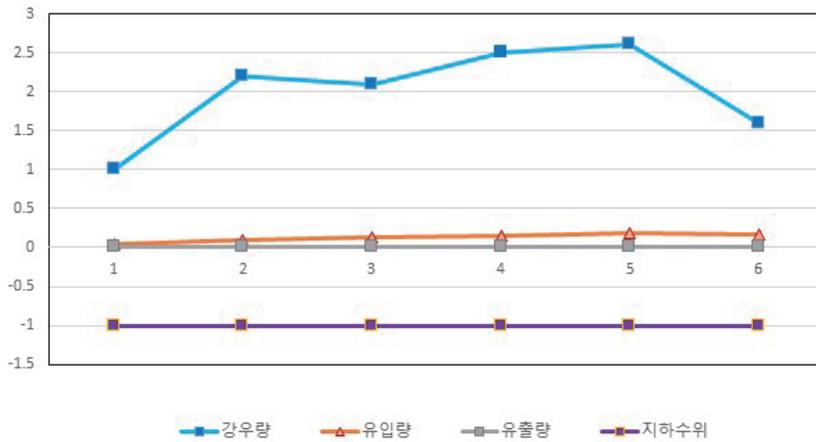


#### 1) 식물재배화분 TYPE 5.0

- 모니터링 시간동안 강수량은 12mm
- 식물재배화분으로 유입된 빗물은 0.756m<sup>3</sup>

〈표 5-4〉 식물재배화분 TYPE 5.0 1차 모니터링 결과

현지시간	누적시간 (H)	강수량 (mm)	유입량 (m3)	유출량 (m3)	지하수위
15:00	0	0	0	0	176.3
16:00	1	1	0.0363	0	176.3
17:00	2	2.2	0.1017	0	176.3
18:00	3	2.1	0.1240	0	176.3
19:00	4	2.5	0.1432	0	176.3
20:00	5	2.6	0.1873	0	176.3
21:00	6	1.6	0.1640	0	176.3
소계		12.0	0.756		



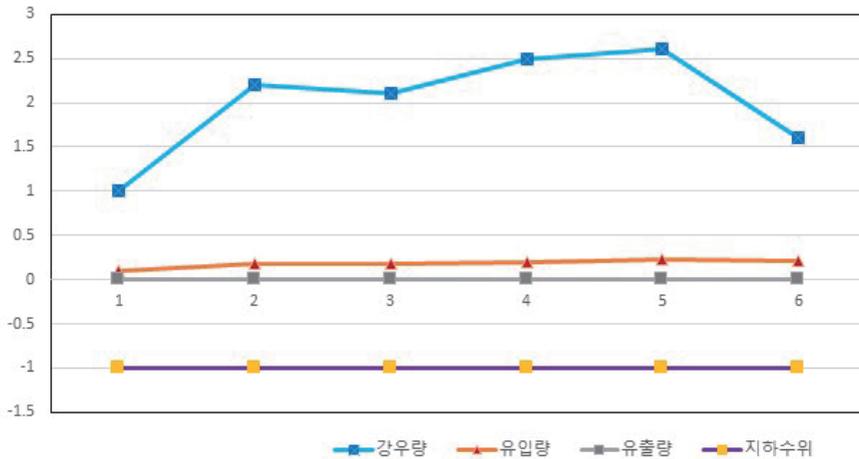
- 시설 외부로 유출량은 발생하지 않았으며 지하수위 또한 변화가 없었음
- 실험기간동안 식물재배화분으로 유입된 빗물은 모두 하부 토양으로 침투되었다 할 수 있음
- 지하수위의 변화가 없었으므로 식생토양, 지하토양의 포화투수계수를 측정할 수 없었음

## 2) 식물재배화분 TYPE 2.5

- 모니터링 시간동안 강수량은 약 12mm
- 시설로 유입된 빗물은 1.102m³

〈표 5-5〉 식물재배화분 TYPE 2.5 1차 모니터링 결과

현지시간	누적시간 (H)	강수량 (mm)	유입량 (m3)	유출량 (m3)	지하수위
15:00	0	0	0	0	
16:00	1	1	0.0993	0	
17:00	2	2.2	0.1750	0	
18:00	3	2.1	0.1858	0	
19:00	4	2.5	0.1925	0	
20:00	5	2.6	0.2357	0	
21:00	6	1.6	0.2135	0	
소계		12.0	1.102		



- 시설 외부로 유출량은 발생하지 않았으며 지하수위 또한 변화가 없었음
- 실험기간동안 식물재배화분으로 유입된 빗물은 모두 하부 토양으로 침투되었다 할 수 있음
- 지하수위의 변화가 없었으므로 식생토양, 지하토양의 포화투수계수를 측정할 수 없었음

## 2. 자연강우 모니터링 2차

- 모니터링 개요
  - 날짜 : 5월 4일
  - 모니터링 시간 : 16:30~24:00(약7시간 30분)
  - 강수량 : 17.7mm

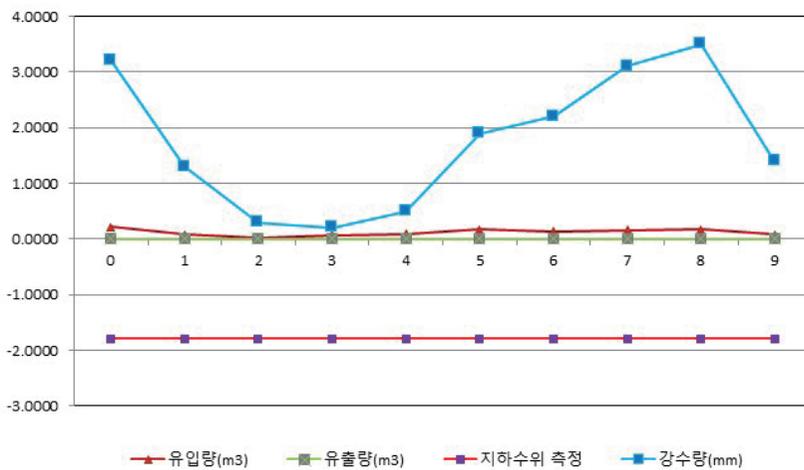
〈그림 5-8〉 모니터링 센서 설치(2차)



### 1) 식물재배화분 TYPE 5.0

〈표 5-6〉 식물재배화분 TYPE 5.0 2차 모니터링 결과

현지시간	누적시간 (H)	강수량 (mm)	유입량 (m3)	유출량 (m3)	지하수위	점검구 수위
14:00	0	0	0	0	-1.79	
15:00	1	3.2	0.2128	0		
16:00	2	1.3	0.0865	0		
17:00	3	0.3	0.0263	0		
18:00	4	0.2	0.0737	0		
19:00	5	0.5	0.0900	0		
20:00	6	1.9	0.1700	0	-1.79	109
21:00	7	2.2	0.1400	0		
22:00	8	3.1	0.1600	0		
23:00	9	3.5	0.1700	0	-1.79	109
0:00	10	1.4	0.0800	0		
		0.1		0		
소계		17.7	1.209			

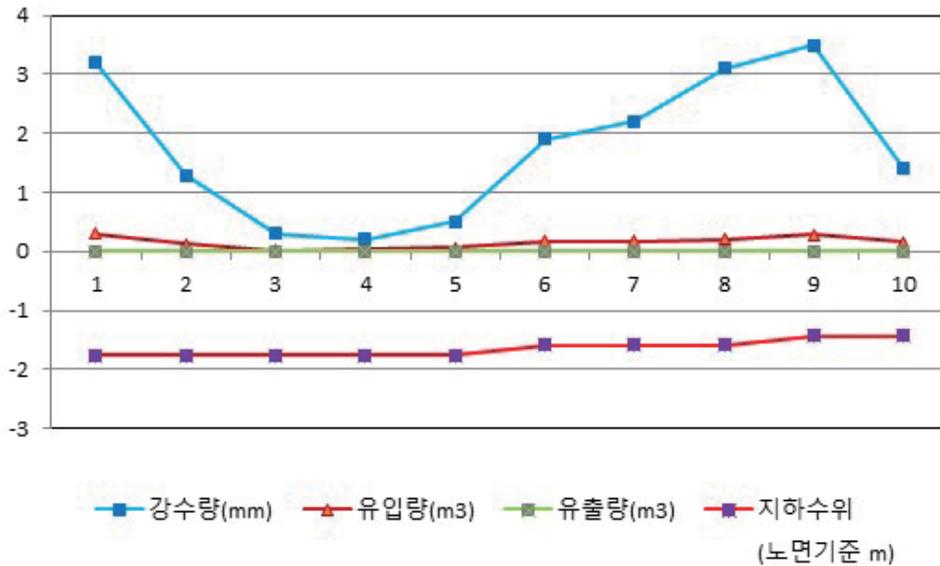


- 시설로의 빗물 유입량은 약1.209m<sup>3</sup>이며 유출량은 발생하지 않았음
- 모두 하부 토양으로 침투됨
- 지하수위의 변화가 없었으므로 식생토양, 지하토양의 포화투수계수를 측정할 수 없었음

## 2) 식물재배화분 TYPE 2.5

〈표 5-7〉 식물재배화분 TYPE 2.5 2차 모니터링 결과

현지시간	누적시간 (H)	강수량 (mm)	유입량 (m3)	유출량 (m3)	지하수위	점검구 수위
14:00	0	0	.	.	.	.
15:00	1	3.2	0.3040	0	-1.76	99
16:00	2	1.3	0.1235	0	.	.
17:00	3	0.3	0.0128	0	.	.
18:00	4	0.2	0.0405	0	.	.
19:00	5	0.5	0.0665	0	.	.
20:00	6	1.9	0.1810	0	-1.59	99
21:00	7	2.2	0.1742	0	.	.
22:00	8	3.1	0.2117	0	.	.
23:00	9	3.5	0.2880	0	-1.43	98
0:00	10	1.4	0.1530	0	.	.
.	.	0.1	.	0	.	.
소계	.	17.7	1.555	.	.	.



- 시설로의 빗물 유입량은 약1.209m<sup>3</sup>이며 유출량은 발생하지 않았음
- 모두 하부 토양으로 침투됨

- 지하수위의 변화가 발생함 : 유입량 0.728m<sup>3</sup> (모니터링 시작 5시간 후)
- 지하수위의 변화가 발생한 이유는 Type L2.5의 경우 LID시설의 면적율이 약2.25% (시설면적 2.25m<sup>2</sup>, 집수면적 약100m<sup>2</sup>)로서 집수면적이 상대적으로 크기 때문으로 예상됨
- 지하수위 변화폭이 크지 않아 지하토양의 포화투수계수를 측정할 수 없었음

### 3) 식물재배화분의 집수면적 및 LID시설 면적을 산정

- LID시설 면적율은 집수유역면적 대비 LID시설 설치면적의 비율을 말하며, 현장 모니터링을 통해 아래 표와 같이 산정되었음

〈표 5-8〉 식물재배화분 type별 집수유역 및 LID시설면적율

시설명	식물재배화분
식물재배화분 L5.0type	시설면적 : 4.59m <sup>2</sup> 집수면적 : 약 70m <sup>2</sup> LID 시설면적율 : 약 6.5%
식물재배화분 L2.5type	시설면적 : 2.25m <sup>2</sup> 집수면적 : 약 100m <sup>2</sup> LID 시설면적율 : 약 2.25%

### 3. 자연강우 모니터링 결과 종합

- 2번의 자연강우에 의한 모니터링의 결과 17.7mm이하의 강우에는 하부배수관 유출이 발생하지 않았음
- 실험기간 동안의 자연강우가 작아 LID시설의 성능치를 확인하기 어려움
- 이는 수문분석 모델링 자료를 구축하기 위한 식생토 및 하부토양의 포화투수계수와 같은 현장기초 자료를 수집할 수 없으므로 추가 실험이 필요함

### 4. 인공강우 실험

#### 1) 인공강우 실험 배경

- 4월12일 및 5월4일에 진행한 모니터링의 결과 17.7mm이하의 강우에는 L5.0type 및

L2.5type 모두 유출이 발생하지 않음

- 이러한 결과로는 식물재배화분의 최대 침투성능을 파악하기에는 무리가 있는 것으로 판단됨
- 향후 모델링을 활용한 장기모니터링에서 식물재배화분의 효과를 분석하기에는 데이터가 부족함
- 따라서 인공강우 실험을 통해 충분한 강우를 유입해 유출량과 유출시점, 하부토양의 포화투수계수등의 데이터를 확보 하여야 함

## 2) 인공강우 실험계획

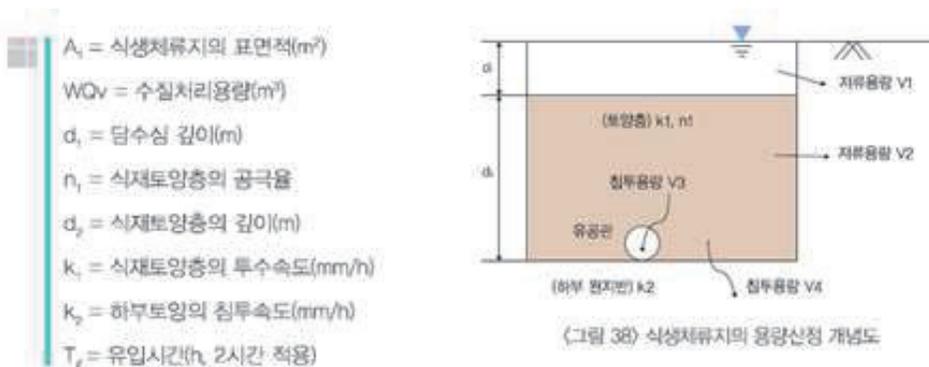
### ■ 주요 실험 목적

- 시설의 빗물 저장량 및 침투성능 확인(유입량 대비 유출량)
- 하부 자갈층 배수구에서 유출이 발생하는 시점(시설의 하부 및 측면 침투능 확인)
- 상부 담수부에서 오버플로우가 발생하는 시점(상부 식재토양의 침투능 확인)

### ■ 인공강우의 총량( $Q_v, m^3$ )과 강우시간(T)의 결정

- 인공강우총량은LID시설의빗물관리용량으로 설정함
- 식물재배화분 L5TYPE의 빗물관리용량 :  $4.183m^3$
- 식물재배화분 L2.5TYPE의 빗물관리용량 :  $2.253m^3$
- 강우시간은 빗물관리시설용량 산출 시 적용한 2시간으로 함

〈그림 5-9〉 빗물관리용량산정식



단, 유입시간에 대한 자료가 있는 경우 해당자료를 활용

### 3) 인공강우 패턴의 설정

- 유입강도는 식생토 및 하부기저 토양의 포화투수속도 보다 높게 설정
  - 수원시의 Huff모형 3분위적용
  - 최대 인공 강우강도는 약75mm/h
  - 식물재배화분 L5.0과 L2.5Type의 인공강우 실험계획서는 다음과 같음
  
- 식물재배화분 L5.0 type
  - 강우재연시간 : 120분
  - 강우재연패턴 : 수원지역 Huff 모형 3분위
  - 총 강우용량: 4.32m<sup>3</sup>

〈표 5-9〉 식물재배화분 TYPE 5.0 인공강우실험 측정 결과

Time(분)	누적 (%)	NET%	강수량 (mm)	10분당 유출용량 (V, m <sup>3</sup> )	누적 유출량 (V, m <sup>3</sup> )	유출량 (F, m <sup>3</sup> /h)
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	2.16	2.16	1.4	0.09	0.09	0.56
20	6.9	4.74	3.08	0.20	0.30	1.23
30	10.17	3.27	2.13	0.14	0.44	0.85
40	13.38	3.21	2.09	0.14	0.58	0.83
50	19.65	6.27	4.08	0.27	0.85	1.63
60	31.2	11.55	7.51	0.50	1.35	3.00
70	47.89	16.69	10.85	0.72	2.07	4.33
80	66.95	19.06	12.39	0.82	2.89	4.94
90	83.76	16.81	10.93	0.73	3.62	4.36
100	94.08	10.32	6.71	0.45	4.07	2.68
110	97.11	3.03	1.97	0.13	4.20	0.79
120	100	2.89	1.88	0.12	4.32	0.75
소계		100	65	4.32		

- 식물재배화분 L2.5 type
  - 강우재연시간 : 120분
  - 강우재연패턴 : 수원지역 Huff 모형 3분위
  - 총 강우용량: 2.33m<sup>3</sup>

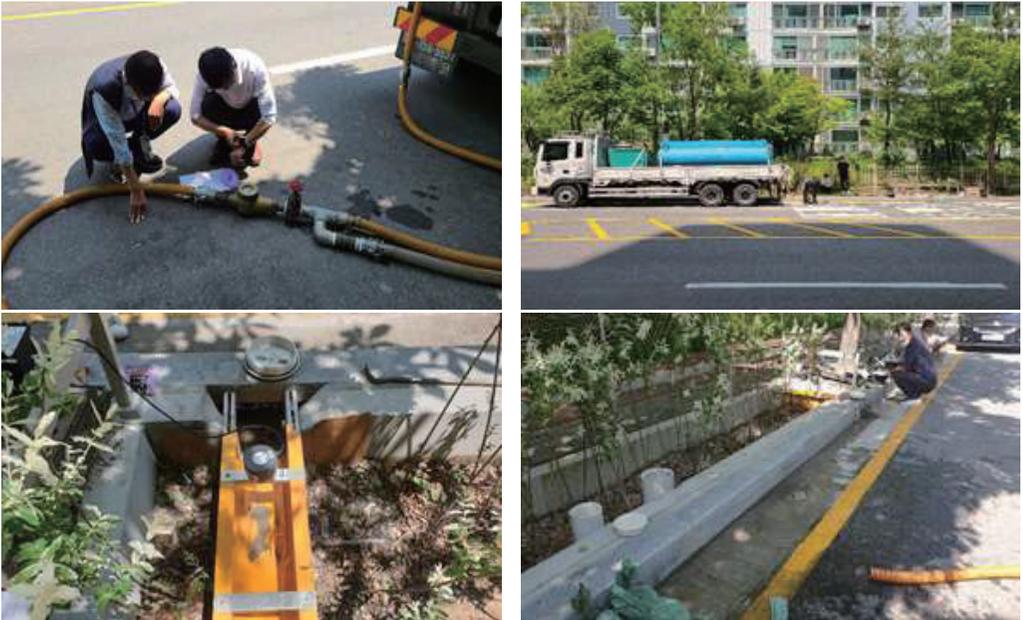
〈표 5-10〉 식물재배화분 TYPE 2.5 인공강우실험 측정 결과

Time(분)	누적 (%)	NET%	강수량 (mm)	10분당 유출용량 (V, m <sup>3</sup> )	누적 유출량 (V, m <sup>3</sup> )	유출량 (F, m <sup>3</sup> /h)
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	2.16	2.16	0.76	0.05	0.09	0.30
20	6.9	4.74	1.66	0.11	0.30	0.66
30	10.17	3.27	1.14	0.08	0.44	0.46
40	13.38	3.21	1.12	0.07	0.58	0.45
50	19.65	6.27	2.19	0.15	0.85	0.88
60	31.2	11.55	4.04	0.27	1.35	1.61
70	47.89	16.69	5.84	0.39	2.07	2.33
80	66.95	19.06	6.67	0.44	2.89	2.66
90	83.76	16.81	5.88	0.39	3.62	2.35
100	94.08	10.32	3.61	0.24	4.07	1.44
110	97.11	3.03	1.06	0.07	4.20	0.42
120	100	2.89	1.01	0.07	4.32	0.40
소계		100	35	2.33		

#### 4) 인공강우 시설 및 실험시기

- 유출량조절이 가능한 살수차를 활용하여 식물재배화분 유입구로 집수
  - 인공강우 설비
    - 2.5마력의 양수기를 통한 가압방식의 설비
    - 유출구 종단부에 벨브를 설치하여 유출량을 제어 할 수 있도록 함
    - 벨브 이전에 리턴벨브를 설치하여 일정 압력을 유지시켜 유출량 안정화
    - 만관식 유량계를 설치하여 인공강우 유출량을 측정함

〈그림 5-10〉 인공강우 실험



■ 인공강우 실험

- 시험일시 : 2021년 5월 13일
- 시간 : 10:00~15:40
- 인공강우를 도로의 빗물 측구를 통해서 직접 식물재배화분으로 유입되도록 유도
- 외부로 나가는 빗물이 없도록 모래주머니를 활용하여 빗물의 흐름을 통제함

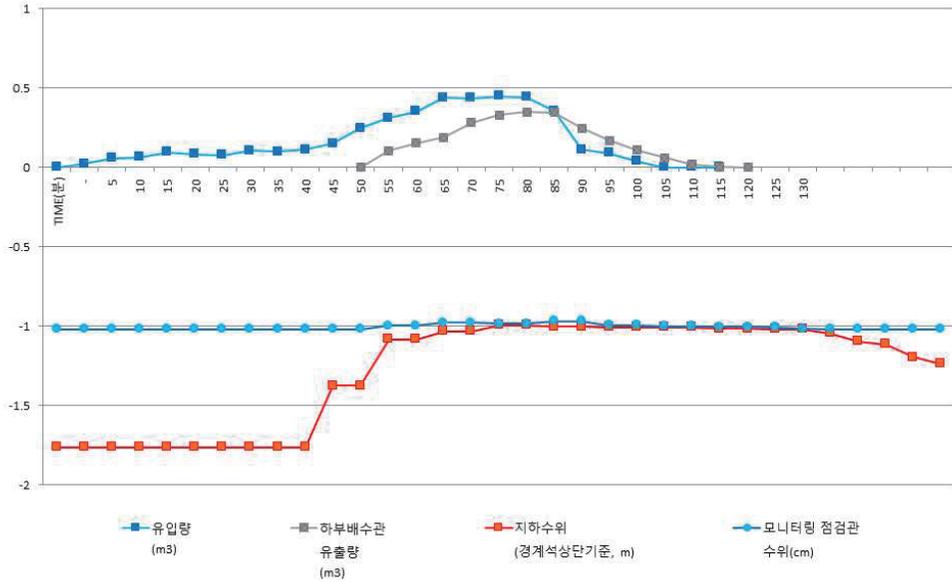
5) 인공강우 실험 결과

■ L5.0 인공강우실험 결과

- 총 유입량 $4.12\text{m}^3$ , 유출량 $2.357\text{m}^3$ , 토양으로 침투되는 양은 약 $1.77\text{m}^3$ 로 확인됨
- 빗물유출 저감율: 42.9%
- 침투유량 저감율: 약23%

〈표 5-11〉 식물재배화분 TYPE 5.0 인공강우 실험 결과

TIME(분)	유입량 (m3)	하부배수관 유출량 (m3)	지하수위	모니터링 점검관 수위(cm)	담수체 월류 발생시점
-	0	.	-1.763	-1.02	.
5	0.023	.	.	.	.
10	0.056	.	-1.763	-1.02	.
15	0.065	.	.	.	.
20	0.094	.	-1.763	-1.02	.
25	0.084	.	.	.	.
30	0.075	.	-1.763	-1.02	.
35	0.104	.	.	.	.
40	0.099	.	-1.763	-1.02	.
45	0.113	.	.	.	.
50	0.149	.	-1.375	-1.02	.
55	0.246	0.000	.	.	.
60	0.310	0.106	-1.083	-0.998	.
65	0.351	0.154	.	.	.
70	0.440	0.190	-1.033	-0.98	.
75	0.436	0.280	.	.	.
80	0.449	0.330	-0.993	-0.985	.
85	0.441	0.348	.	.	.
90	0.354	0.345	-1.003	-0.97	.
95	0.112	0.247	.	.	.
100	0.088	0.169	-1.008	-0.995	.
105	0.037	0.108	.	.	.
110	0.000	0.059	-1.008	-1	.
115	0	0.018	.	.	.
120	0	0.004	-1.018	-1.004	.
125	.	0.000	.	.	.
130	.	.	-1.02	-1.007	.
140	.	.	-1.02	-1.016	.
184	.	.	-1.046	-1.02	.
244	.	.	-1.096	-1.02	.
264	.	.	-1.116	-1.02	.
304	.	.	-1.198	-1.02	.
324	.	.	-1.237	-1.02	.
소계	4.128201	2.357	.	.	.



■ TYPE L5.0 인공강우 소결

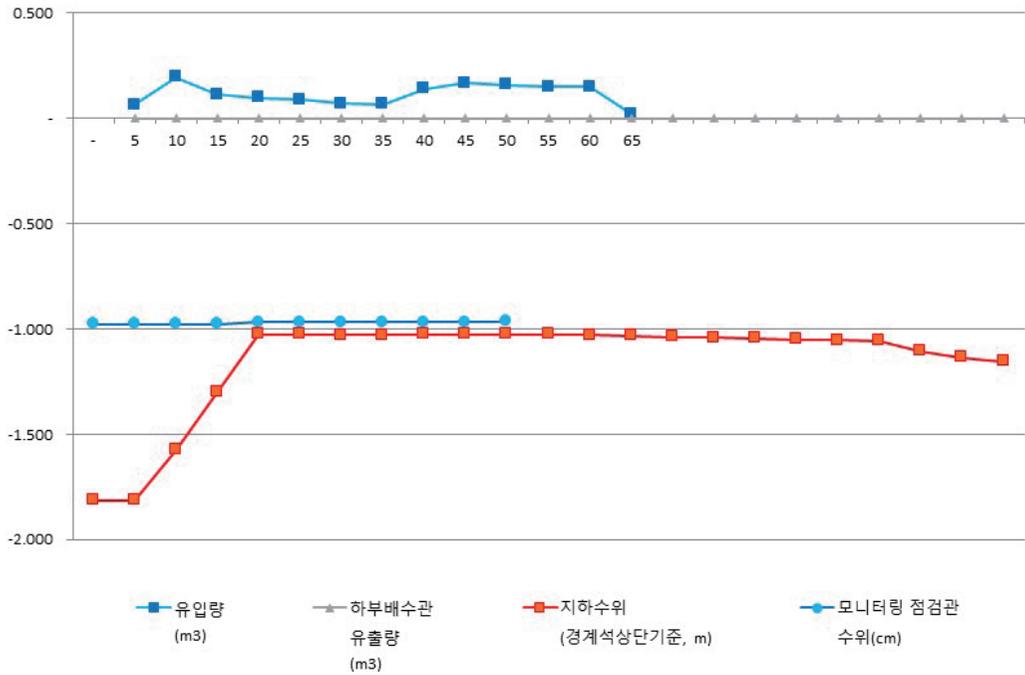
- 담수체의 월류 발생은 일어나지 않음, 식생토의 포화 투수계수가 높은 것으로 예측됨
- 하부배수관 유출 발생 시점은 인공강우 시작으로 부터 56분 경과된 시점이며 이때의 누적 강우량은 약 1.1m³임
- 약 1.5m³의 빗물이 유입 되었을 때 유출이 발생됨
- 인공강우 실험이 끝나고 약 3시간 동안 모니터링 채수정의 수위를 측정한 결과 하부 토양의 포화투수계수는 약 82mm/h로 조사됨

■ L2.5 인공강우실험 결과

- 하부 배수관이 점검맨홀이 아닌 인접 도로빗물받이로 연결되어있어 유출량을 측정할 수 없음

〈표 5-12〉 식물재배화분 TYPE 2.5 인공강우실험 결과

TIME(분)	유입량 (m3)	하부배수관 유출량 (m3)	지하수위	모니터링 점검관 수위(cm)	담수체 월류 발생시점	비고
-	.	.	-1.815	-0.976	.	.
5	0.065	-	.	.	.	.
10	0.196	-	-1.575	-0.976	월류발생	살수량 줄임
15	0.113	-	.	.	.	.
20	0.098	-	-1.025	-0.968	.	배수 발생 예상 시점
25	0.089	-	.	.	.	.
30	0.072	-	-1.030	-0.968	.	.
35	0.067	-	.	.	.	.
40	0.139	-	-1.027	-0.968	월류발생	.
45	0.169	-	.	.	.	.
50	0.158	-	-1.025	-0.965	.	월류관 막음
55	0.151	-	.	.	.	.
60	0.148	-	.	.	.	.
65	0.021	-	.	.	.	.
70	.	-	.	.	.	.
75	.	-	.	.	.	.
80	.	-	.	.	.	.
85	.	-	.	.	.	.
90	.	-	.	.	.	.
100	.	-	.	.	.	.
107	.	-	-1.105	.	.	.
117	.	-	-1.136	.	.	.
122	.	-	-1.154	.	.	.
소계	1.484	.	.	.	.	.



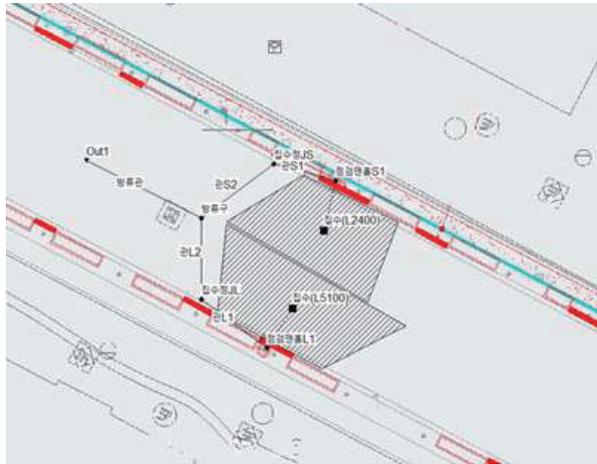
■ L2.5 인공강우실험 소결

- 담수체의 월류 발생은 강우강도 약 18mm/h로 지속되면 발생됨
- 식생토의 포화투수계수는 약 444.44mm/h 로 예측됨(월류관이 유공관으로 시공되어 과다하게 나온 것으로 판단됨)
- 지하수위의 변화를 통해서 인공강우 시작 후 22분 시점에서 하부배수발생이 이루어졌을 것으로 예측할 수 있음
- 하부 토양의 포화투수계수는 약 110mm/h로 조사됨

### 제3절 수문분석 모델(SWMM) 분석 결과

- 자연 및 인공강우 실험을 통해 수집된 기초데이터를 활용하여 모델을 구축하고 장기모니터링을 실시함

〈그림 5-11〉 SWMM 구축



#### 1. EPA SWMM

- EPA SWMM이란 ‘United States Environmental Protection Agency Storm Water Management Model’의 약자로서 미국 환경보호청에서 만든 강우, 유출, 지표면유출 시뮬레이션 모델임
  - 시가지/비시가지의 단일 호우 사상부터 연속적인 장기 호우 사상까지 수질, 수문 모델링이 가능함
  - 도로·초지·도랑·관로 등에 대한 강우, 유출, 증발, 침투, 지하수 흐름 모의 가능
  - SWMM의 수문 모델링은 투수/불 투수, 지면저류 유무에 따라 소유역의 유입, 유출, 침투량을 예측할 수 있음
- EPA SWMM은 퍼블릭도메인 소프트웨어로 무료로 배포되며 세계적으로 전문가 및 비전문가들이 SWMM을 기반으로 많은 프로젝트를 수행 중

##### 1) LID시설(식물재배화분) 데이터의 입력

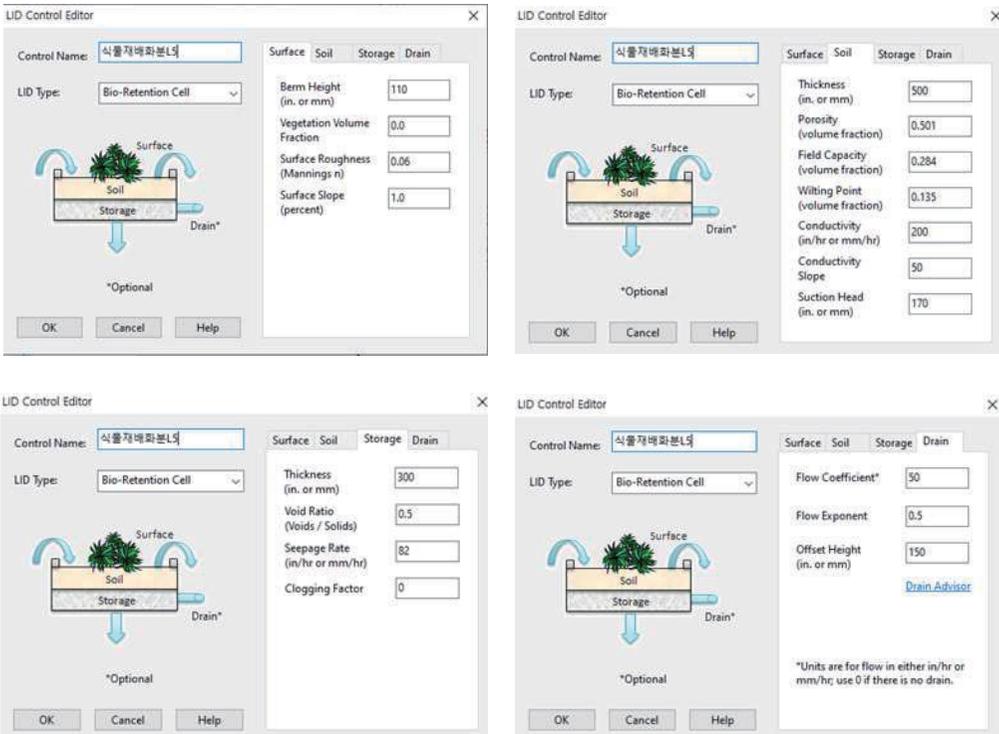
- 정확한 모델링을 구축하기 위해서는 LID 시설의 세부 데이터를 입력해야함

- 자연 및 인공강우 실험을 통해 추출된 각종 입력 값은 다음과 같음

〈표 5-13〉 주요입력 데이터

번호	주요 데이터	입력값
1	유역type L5.0 유역면적(식물재배화분 4.59m <sup>2</sup> )	70m <sup>2</sup>
2	유역type L2.5 유역면적(식물재배화분 2.25m <sup>2</sup> )	100m <sup>2</sup>
3	담수심 깊이	110mm
4	식생층의 포화투수계수	200mm/h
5	하부토양의 포화투수계수	82mm/h
6	배수관 관저고	150mm

〈그림 5-12〉 SWMM 데이터 입력 화면

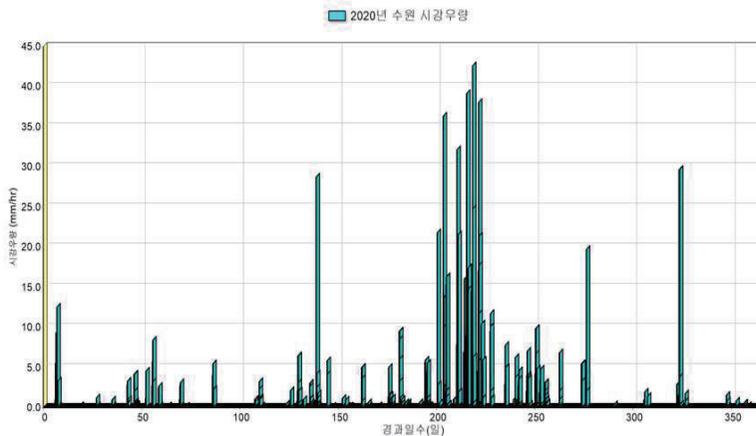


## 2) 강우입력자료

- 장기모니터링을 진행한 강우 입력자료는 기상청의 수원시 기상관측소(119지점)의 데이터를 활용하였음
- 장기모니터링 기간은 지난 5년 강우기록 중 비교적 연강강우량이 적은 2019년도(915.8mm)와 상대적으로 비교적 최근이고 연강강우량이 많은 2020년(1635.5mm)의 시강우량을 입력하였음
- 또한 증발산량 데이터는 2019년도와 2020년도의 월평균 증발량 데이터를 입력하였음

〈표 5-14〉 최근 10년 연강우량

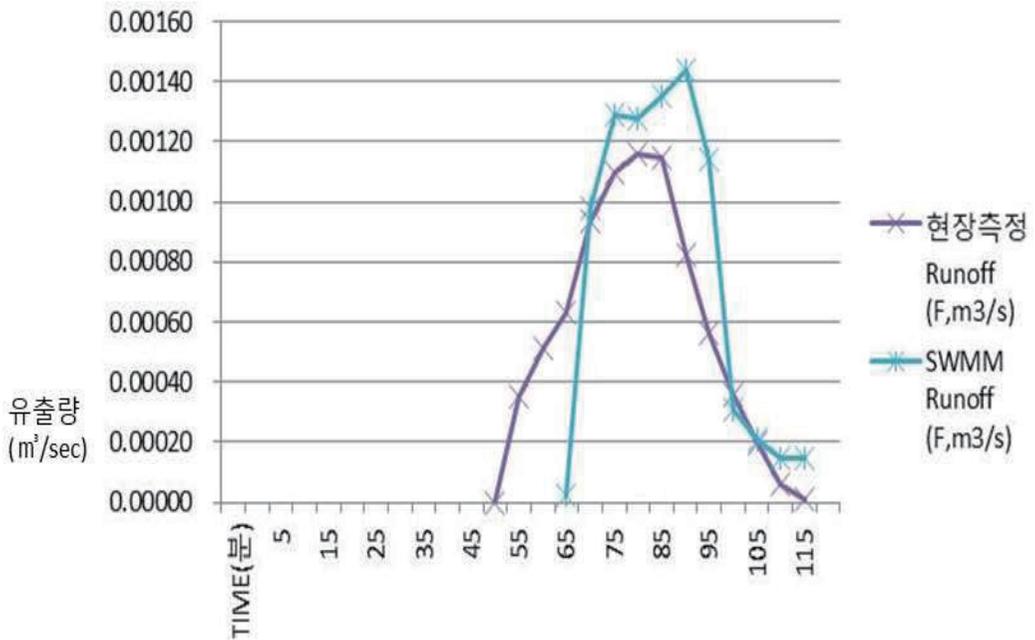
년도	합계강우량(mm)	일 최대 강우량(mm)
2011	1975.9	190
2012	1748.3	276.5
2013	1240.1	79
2014	1029.1	117.7
2015	751.1	64.7
2016	1023.4	104.2
2017	1328.6	130.8
2018	1293.1	124.8
2019	915.8	108
2020	1635.5	134.2



### 3) SWMM모델 검토증

- 사전 현장 모니터링을 통해 확인 data를 기반으로 검토증을 실시하였음(식물재배화분 TYPE5.0, 집수유역 70m<sup>2</sup> 대상)
- 모델링 예측 신뢰도는 83%로 비교적 높은 신뢰도를 기록하였음

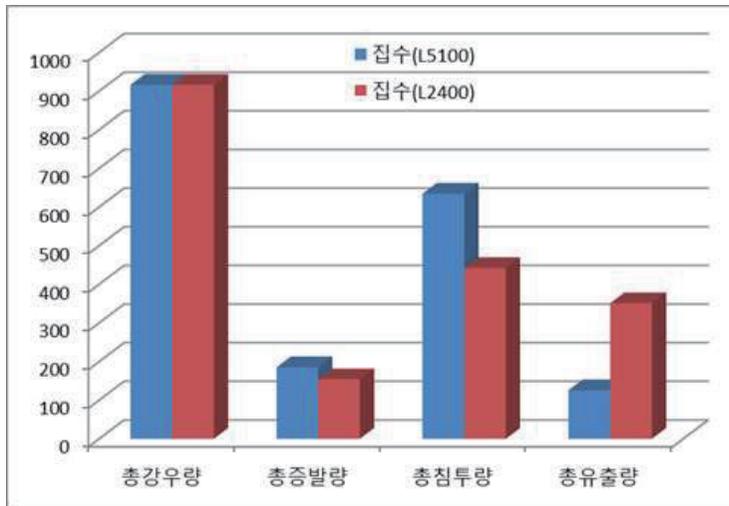
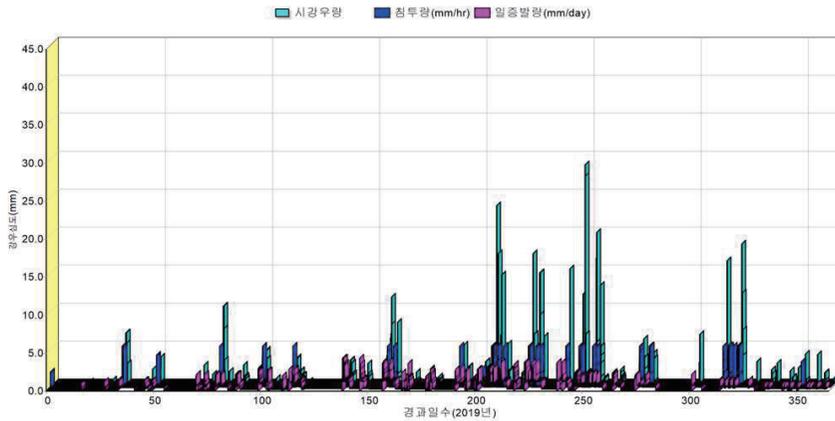
〈그림 5-13〉 모델링 검토증



## 2. 2019년도 시강우량 모델링 결과

- 연간강우량 : 915.9mm
- 연 최대 시강우량 : 28.7mm/h
- 최대 침투량 : 5.38mm/h
- 일 최대 증발량 : 2.47mm/day

〈그림 5-14〉 2019년도 시강우량 모델링 결과



Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> itr	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
집수(L5100)	915.90	0.00	184.78	634.22	125.66	0.01	0.00	0.137
집수(L2400)	915.90	0.00	153.92	442.03	350.79	0.04	0.00	0.383

■ 시물레이션 결과

○ 식물재배화분 Type L5.0

- 2019년도 총 강우량 915.90mm가 내렸으며 총 증발량은 184.78mm, 총 침투량은 634.22mm 였으며 유출량은 125.66mm로 분석되었음

- 연강우량 대비 유출저감율을 86.3%이며 증발량은 20.2%, 침투량은 69.2%임

○ 식물재배화분 Type L2.5

- 2019년도 총 강우량 915.90mm가 내렸으며 총 증발량은 153.92mm, 총 침투량은

442.03mm 였으며 유출량은 350.79mm로 분석되었음

- 연강우량 대비 유출저감율을 61.7%이며 증발량은 16.8%, 침투량은 48.2%임

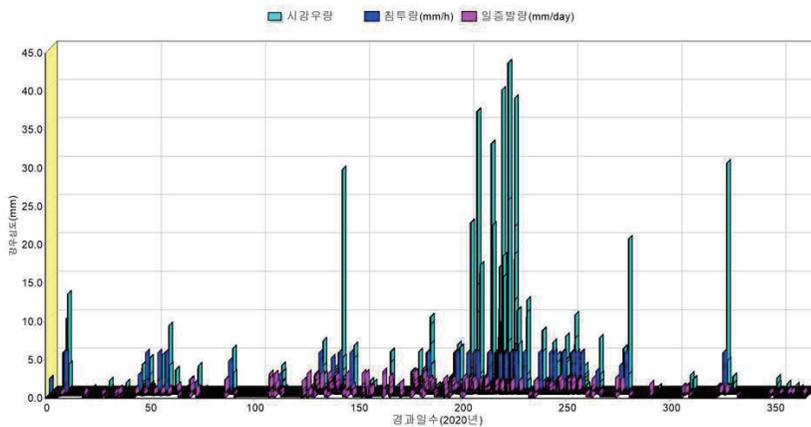
〈표 5-15〉 2019년도 시설별 연간강우량 대비 유출량저감율, 증발량, 침투량

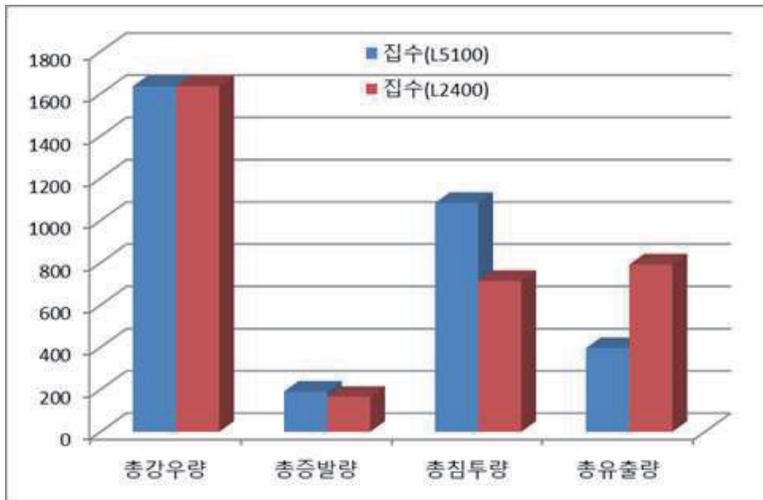
시설구분	유역면적	연강우량 대비 유출저감율	증발량	침투량
식물재배화분 Type L5.0	70m <sup>2</sup>	86.3%	20.2%	69.2%
식물재배화분 Type L2.5	100m <sup>2</sup>	61.7%	16.8%	48.2%

### 3. 2020년도 시강우량 모델링 결과

- 연간강우량 : 1,650mm
- 연 최대 시강우량 : 42.6mm/h
- 최대 침투량 : 5.38mm/h
- 일 최대 증발량 : 2.26mm/day

〈그림 5-15〉 2019년도 시강우량 모델링 결과





Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>^6</sup> ltr	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
TYPE L5.0	1635.50	0.00	190.41	1082.89	396.44	0.03	0.00	0.242
TYPE L2.5	1635.50	0.00	165.74	713.93	791.54	0.08	0.00	0.484

■ 시뮬레이션 결과

○ 식물재배화분 Type L2.5

- 2020년도 총 강우량 1,635.5mm가 내렸으며 총 증발량은 190.41mm, 총 침투량은 1082.89mm였으며 유출량은 396.44mm로 분석되었음
- 연강우량 대비 유출저감율을 75.5%이며 증발량은 11.6%, 침투량은 66.2%임

○ 식물재배화분 Type L5.0

- 2020년도 총 강우량 1,635.5mm가 내렸으며 총 증발량은 190.41mm, 총 침투량은 1082.89mm였으며 유출량은 396.44mm로 집계되었음
- 연강우량 대비 유출저감율을 75.5%이며 증발량은 11.6%, 침투량은 66.2% 임

〈표 5-16〉 2020년도 시설별 연간강우량 대비 유출량저감율, 증발량, 침투량

시설구분	유역면적	연강우량 대비 유출저감율	증발량	침투량
식물재배화분 Type L5.0	70m <sup>2</sup>	75.5%	11.6%	66.2%
식물재배화분 Type L2.5	100m <sup>2</sup>	51.6%	10.1%	43.6%

## 제4절 효과 종합

### 1. 저영향개발 효과성 검증

- 수원시 물순환정책의 지속가능성을 확보하기 위해서 설치된 LID시설의 객관적인 효과를 제시할 필요가 있기에 모니터링을 실시하였음
  - 2회의 자연강우(4월12일, 5월4일) 모니터링을 통해 17.7mm이하의 강우에서는 유출이 발생하지 않고 모두 자연지반으로 침투되는 것을 확인하였음
- LID시설의 최대 능력을 확인하기 위해 인공강우실험을 실시하였음
  - 인공강우는 수원시 Huff모형 3분위를 적용하고 최대인공강우강도는 약75mm/h로 설정했으며 2시간 동안 진행하였음
  - Type L5.0은 총유입량 4.12㎥, 총유출량 2.357㎥로 유출저감율 42.9%를 기록했으며 침투유출 저감율은 약 23%로 기록되었음
  - Type L2.5는 실험체관거의 설치 문제로 유출량은 측정 불가하였지만 담수체의 월류 발생은 강우강도가 약 18mm/h되면 발생하였으며, 하부배수 발생시점은 인공강우 시작 후 22분 시점에서 발생
- 자연강우 및 인공강우를 통해 추출된 각종분석 데이터를 기반으로 수문분석모델(SWMM)을 통해 LID시설의 장기모니터링을 실시함(모델링의 신뢰도는 83%)
  - 모델링은 최근 5년간 총강우량이 가장 작은 2019년도와 가장 높은 2020년도 강우량 데이터를 사용하였음
  - 2019년, 2020년 연간 빗물 유출저감 효과를 분석한 결과 식물재배화분 Type L5.0은 총강우량의 약 76~86%유출저감 능력이 있으며 Type L2.5는 약52%~62%의 유출저감 능력이 있는 것으로 분석 됨
- 자연강우, 인공강우 모니터링 및 모델링을 통해 현장에 설치된 식물재배화분의 기능은 매우 효율적으로 작동하고 있을 것을 확인하였음
  - 향후 보다 효율적으로 LID시설의 배치량을 결정하는 것은 빗물관리 목표량 및 해당 집수구역의 크기 및 식생도와 하부토양의 포화투수계수가 될 수 있음

### 2. 저영향개발 설치면적율에 대한 제언

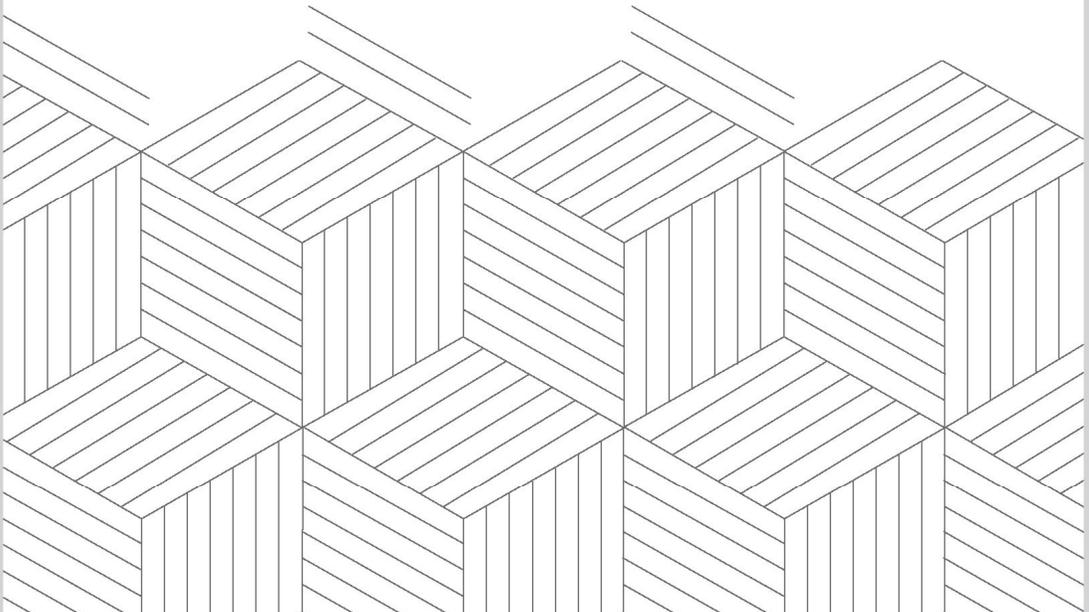
- 효율적인 LID시설의 배치는 수원시의 지속적인 물순환정책에 기술적인 시사점이 될 수 있음

- 효율적인 시설의 배치란 빗물유출저감 목표량을 설정하고 시설이 가지고 있는 기본적인 데이터를 기반으로 대응이 가능한 집수면적을 확정된 후 적정 위치에 배치하는 것이라 할 수 있음
- LID시설의 빗물관리용량을 결정하는 중요 데이터는 내부의 식생토 및 하부의 포화투수계수임
- LID시설의 적정 설치면적율에 대한 제언
  - 금번 모니터링 대상시설 식생토의 포화투수계수는 200mm/h이며 하부지반의 포화투수계수는 82mm/h로 빗물의 침투속도가 매우 빠른 편임
  - 현 시설의 연간 유출저감율은 51.6%~75.5%(2020년기준)로서 비슷한 저감율을 목표로 한다면 설치면적율은 2%내외로 설치하면 적절하다고 할 수 있음
  - 즉, 식물재배화분 L5.0의 경우는 약200㎡의 집수면적에 대응할 수 있으며 식물재배화분 L2.5의 경우 약100㎡의 집수면적에 대응할 수 있음(단, 대응 가능한 집수면적은 하부지반의 포화투수계수에 따라서 유동적임)
  - 아울러 적정집수면적과 이에 따른 설치지역을 결정할 때 기존 도로의 빗물받이의 위치를 변경하는 것도 고려 대상이어야 함



# 제6장 결론

제1절 연구의 의의 및 한계  
제2절 정책 제언





## 제6장 결론

### 제1절 연구의 의의 및 한계

- 본 연구에서는 수원의 대표적인 환경정책 중 레인시티사업의 효과를 검증하여 물순환 정책의 지속가능성을 확보하고자 함. 수원시 레인시티사업은 빗물저장시설과 그린인프라시설로 크게 구분할 수 있으며, 이에 대한 선행연구 및 사례조사와 함께 실제 모니터링을 통해 효과를 분석하였음
- 건강한 물순환 체계 확립을 위해 그린인프라의 확대 필요성은 국가 및 지자체 계획을 통해 필요성이 강조되어 왔음. 과거 전통적인 물관리 방법에서 탈피하여 자연적인 물순환정책으로 생태계의 회복탄력성을 높일 수 있는 정책으로 변화되고 있음
  - 그린인프라는 도시화로 인해 불투수면의 증가에 따른 도시열섬, 도시침수 등 도시환경문제를 해결하는 방식인 자연기반해법(Nature based Solution)과 연관성이 높음
- 기존의 선행연구와 조성사례를 종합한 결과, 국내에서는 물순환 선도도시를 중심으로 그린인프라사업이 추진되고 있으나 독일 함부르크, 호주 멜버른, 캐나다 밴쿠버 등을 조사한 결과 도시계획 및 설계측면에서 그린인프라를 도입하고 통합적인 물순환 정책을 추진하고 있음
  - 물순환의 회복은 지속가능한 도시 발전의 핵심요소이자 도시 건설, 녹지공간, 시민의 삶 등과 밀접한 관련이 있기 때문에 ‘빗물 관리’라는 단편적인 차원에서 접근하는 것이 아니라 도시 전체를 아우르는 포괄적이고 장기적인 관점에서의 접근 필요
- 그린인프라는 대표적으로 비점오염물질 및 우수유출 저감 뿐만 아니라 수자원 확보, 도시열섬현상 완화, 도시경관 개선 효과
  - 비점오염원 저감효과는 시설 및 오염물질에 따라 차이가 있으나 평균 70~80%정도로 조사되었으며, 투수블럭의 경우 TSS를 최대 88.9%를 저감한 바 있음(환경부, 2019)
  - 그린인프라는 우수를 저장하고 유출시간을 지연시켜 홍수를 최소화하고 있으며 침투 유량 및 유출량을 50~85% 감소시킨 바 있음(Gonzalez-Meler et al., 2013)
  - 빗물저류시설은 도시의 물자급률 향상 및 수자원 절약을 위해 빗물저류시설에 빗물을

저장해두었다가 조경 및 청소용수 등으로 활용 가능하며, 제주도 서귀포 월드컵경기장 관리 시 빗물을 이용하여 2003년 수돗물 절감량은 1일 778m<sup>3</sup>, 연간 18,985m<sup>3</sup>에 달함(이승복·김광목, 2005)

- 그린인프라는 빗물이 토양으로 침투하는 자연적인 물순환 회복에 초점을 두고 있어서 지하수 함양 및 이로 인한 건천화 방지 등이 가능하며 오창과학산업단지의 경우 지하수 함양률이 약 5% 증가한 것으로 나타남(환경부, 2019)
  - 식물재배화분이나 옥상녹화 등은 토양과 식생을 통해 온도를 낮추지만, 빗물을 저장하는 저류시설은 지붕 및 도로 등의 살수를 통해 간접적인 온도 저감 가능하며, 외기 온도를 차단하여 냉·난방 에너지 절약 가능함. 그린인프라로 대기오염물질의 흡수, 흡착, 차단, 침강의 과정을 통해 대기질 개선이 가능함
  - 그린인프라의 건설비가 비용이 다소 크더라도 효과 등 기능적 측면에서 경제적 이점을 보유함. 청주와 전주에서 시행한 환경부(2019)의 시범사업에 따르면 수질 개선, 열섬현상 완화, 녹지면적 증가 등 그린인프라 적용에 따른 경제적 편익이 각각 233억, 213억 발생한 것으로 나타남(30년간, 최대 기준)
- 빗물분사시설 효과를 확인하기 위해 여름철 빗물분사에 따른 온도저감 효과를 조사하였음. 고정형 온도계를 활용해 수원시 팔달구 월드컵로 일대에 설치된 빗물분사시설 가동에 따른 대기온도 변화를 모니터링한 결과, 중앙분리대의 경우 평균 2.11℃(최저 1.25℃, 최대 2.77℃)의 온도 차이가 있었으며, 가로수변은 평균 0.59℃(최저 0.46℃, 최대 0.68℃)의 온도 차이가 있었음.
  - 여름철 대기 온도는 일반적으로 14-15시에 최고점을 기록 후 물 분사 유무에 관계없이 감소하기 때문에 온도 저감 효과 극대화를 위해 14시 이전까지 빗물 분사를 수행하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단됨.
- 수원시 레인시티 사업을 통해 조성된 빗물관리시설의 객관적인 효과분석을 위해 현장 모니터링 및 수문분석 모델(SWMM)을 통한 효과분석을 실시하였음. 현장 모니터링은 2개 타입의 식물재배화분을 대상으로 2회의 자연강우와 1회의 인공강우 실험을 통한 모니터링을 실시하였음
    - 2회의 자연강우(4월12일, 5월4일) 모니터링 결과 각각의 누적 강우량이 12mm, 17.7mm로 배수구에서 유출량 발생하지 않음, 이것으로는 식물재배화분의 최대 성능치를 파악하기 어려워 별도의 인공강우 실험을 실시함

- 인공강우 실험은 해당시설의 빗물관리용량을 2시간 동안 살수하되 살수패턴은 Huff 모형을 적용하였음. 인공강우 실험결과 빗물유출저감율은 약 42.9%, 침투유량 저감율은 약 23%로 분석되었음
- 현장 모니터링을 통해 수집된 자료를 바탕으로 수문분석 모델(SWMM)을 이용하여 연간 빗물 유출저감효과를 분석하였음
  - 식물재배화분 Type L5.0은 연간 총강우량의 약 76~86%를 Type L2.5는 약 52%~62%의 빗물유출을 저감하는 것으로 분석 됨
  - Type별로 저감 효과의 차이는 식물재배화분의 설치 면적을 차이에서 기인함(Type L5.0 6.5%이며 Type L2.5는 2.25%)
  - 분석 강우량 자료는 수원시의 최근 5년간 총강우량이 가장 작은 2019년도와 가장 높은 2020년도 시강우량을 사용함
- 현장 모니터링 및 수문모델을 통한 분석 결과 현장에 설치된 식물재배화분의 기능은 효율적으로 작동하고 있음을 확인하였으며 확인된 빗물관리시설의 성능 자료는 향후 해당 지역의 적정 빗물관리시설 배치량을 결정하는데 유용한 자료가 될 것임
- 본 연구에서는 수원시의 대표적인 물순환정책인 레인시티사업에 대한 효과성을 검증하였음. 향후 이를 토대로 물순환체계 확립 및 미래기후 대응을 위해 수원시 도시계획차원에서 그린인프라 도입에 대한 검토가 필요함
- 본 연구에서는 선행연구 및 현장 모니터링을 통해 효과를 검증하였으나 제한된 기간과 일부 시설을 대상으로 실시한 검증으로 유형별 모니터링과 정량적 분석이 필요함
  - 향후 빗물저장시설을 활용한 빗물분사장치의 온도저감효과에 대한 정밀한 분석을 위해서는 온도 변화뿐만 아니라 습도 변화 등 불쾌지수와 연계하여 온도저감 효과를 종합적으로 검토할 필요가 있으며, 온도변화 모니터링 역시 물 분사 이후 일몰시까지의 온도변화를 검토할 필요가 있음
  - 저영향개발에 대한 효과 검증은 식물재배화분을 대상으로 빗물 유출저감효과만을 분석하였으나 향후 식생도랑, 투수블럭 등 다양한 유형에 대해 비점오염저감, 온도저감, 에너지 절약 등 보다 다양한 효과를 모니터링할 필요가 있음

## 제2절 정책 제언

- 레인시티는 수원의 대표적인 물순환 정책브랜드임. 빗물관리정책을 보다 체계적으로 추진하기 위해서는 빗물이용을 보다 활성화할 필요가 있음. 이를 위해서는 아래의 정책을 제안함

### *그린인프라시설별 효과 모니터링*

- 본 연구에서는 식물재배화분에 대한 빗물유출저감량을 모니터링 하였음. 향후 식생도량, 투수블럭 등 그린인프라시설별 빗물유출저감량 등 효과에 대한 모니터링을 실시하여 보다 정교한 효과 제시 필요
  - 저영향개발뿐만 아니라 빗물저장시설을 활용한 효과

### *도시차원에서의 빗물이용가능량 및 빗물유출 저감목표량 산정*

- 향후 수원시 도시전체를 대상으로 빗물이용가능량을 추정하고 이를 토대로 빗물이용가능량 확보를 위한 대상시설 확대 및 시설 설치를 위한 우선순위를 설정하여야 함
  - 저영향개발시설 배치량 결정은 빗물관리 목표량 및 집수구역의 크기를 고려하여 결정해야 함. 현재 모니터링 결과를 활용할 경우, 빗물유출 저감목표량을 연강수량의 50%로 설정 시 식물재배화분 설치 면적율을 약 2%로 늘려야 함

### *가이드라인 및 사전협의제 도입을 통한 일관성 있고 체계적인 빗물관리 정책 추진*

- 가로수 및 띠녹지 조성 시 저영향개발을 적용하여 도로에서 유출되는 빗물을 토양으로 흡수될 수 있도록 가이드라인을 제공 필요
  - 겨울철 제설제 살포와 식물의 성장둔화로 인한 급격한 토양 함수량 변화는 식물의 고사 등의 문제를 야기함(최혜선 외, 2016)
  - 모래나 염화나트륨 같은 제설제 피해를 최소화하기 위해서 시스템에 유입되어 막히는 걸 방지하기 위한 전처리 필요. 뉴욕시와 같은 저영향개발 설치 가이드라인을 제시하여 영향최소화 필요(New York City Department of Environmental Protection, 2012)
- 도로에서의 빗물관리가 중요하므로 수질환경과 등 물관리부서와의 사전협의제를 도입하여 부서간 소통체계를 마련하여 통합적인 물순환정책 추진 필요
  - 도로 비점오염원 저감시설 등 홍수관리에 특화된 LID, 비점오염물질 저감을 위한

## LID 등 도로에서의 빗물관리시스템 적용 가능

### *도시재생사업, 주택정비사업 등 주거정비사업과의 연계*

- 불투수포장비율이 높은 구도심지역은 폭염영향 및 도심침수 등 기후변화, 이상기후에 대한 영향이 높은 지역이므로 도시계획차원에서 근본적인 대책 마련 필요
  - 빗물침투시설의 경우 불투수율이 높은 고밀도지역에서 홍수 시 방재시설로 활용이 가능함(김영란·심주영, 2013)
- 도시재생사업, 주택정비사업 등 추진 시 도로 및 주차장, 노후건축물 재정비 시 투수성 포장 및 빗물 재이용할 수 있는 방안 연계 필요

### *자연기반해법(NbS)을 통한 기후변화, 탄소중립 대응*

- 도시지역은 불투수포장면 증가 등 도시화로 인한 영향과 폭염, 폭우 등 기후변화에 따른 영향이 가중되어 더 큰 도시환경문제를 야기함. 도시환경문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 자연기반해법 도입이 필수적임
- 이상기후에 대응하기 위한 도시문제해결을 위해서는 하수관거 용량 증설 등의 천문학적 비용이 수반되어 실현되는데 한계가 있음. 저영향개발, 그린인프라 등과 같이 도시생태계의 회복탄력성을 높일 수 있는 자연기반해법을 도입하여 기후변화 및 탄소중립시대에 대응하여야 함

### *물순환정책에 대한 교육 및 홍보를 통한 시민인식 증진*

- 레인시티사업 뿐만 아니라 저영향개발, 그린인프라 등 도시환경문제 해결의 방식 전환의 필요성에 대해 시민대상 교육 필요
- 레인시티 및 그린인프라 사업에 대한 효과 모니터링 결과를 시민들에게 제공하여 물순환정책에 대한 교육 및 홍보를 통해 시민인식 증진 필요

## | 참고문헌 |

### <국문 자료>

- 김은하, 최서영, 오미현. (2019). 「수원시 통합 물 관리 기본계획」. 수원시정연구원.
- 경기도청. (2015). 「통합 물 관리 기본계획」.
- 공학양, 김승현, 박성민, 박성애, 최광희, 신영규, 이종천, 길지현, 박종혁, 심규영, 김태규, 조형진. (2015). 「도시녹지의 도시환경질 개선 연구(II): 도시열섬현상을 중심으로」. 국립환경과학원.
- 관계부처합동. (2012). 「제2차 비점오염원관리 종합대책」.
- 광주광역시. (2018). 「광주광역시 물순환 관리 기본계획」.
- 광주광역시지속가능발전협의회. (2016). 지속 가능한 물순환도시 광주 만들기, 2016년 제18회 지속가능발전대상 공모전 우수사례집, pp. 14-21.
- 국립환경과학원. (2012). 「수질오염총량관리를 위한 비점오염원 최적관리지침」.
- \_\_\_\_\_. (2018). 「비점오염원 관리 및 물순환 개선을 위한 맞춤형 정책 지원 연구」.
- 국토교통부.(2016). 「수자원/세계 각국의 수자원 현황」.
- 김수봉, 김기호, 조진희. (2001). 도시열섬현상의 원인과 대책. 「환경과학논집」. 6. pp. 63-89.
- 김승현, 조경진. (2015). 도시 물순환 회복을 위한 그린인프라 계획 및 설계에 관한 연구: 조경계획 및 설계 해외사례 분석을 중심으로. 「한국도시설계학회지 도시설계」. 16(3). pp. 37-51.
- 김영란, 심주영. (2013). 주택정비사업에서의 빗물관리 적용 타당성 분석, 「서울도시연구」. 14(2). pp. 145-159.
- 김영란, 진정규. (2018). 「서울시 물순환정책 진단과 개선방안」, 서울연구원.
- 김원주. (2019). 「서울시 그린인프라의 미세먼지 저감 효과 평가(미세먼지 대응 그린인프라 토론회)」.
- 김희주, 오규식, 이승재. (2018). 중규모 기상모델 (WRF-ARW) 을 활용한 서울시 옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과 분석. 「서울도시연구」. 19(2). pp. 39-57.
- 낙동강물환경연구소. (2015). 「비점오염원 종합 모니터링 및 관리방안 연구」.
- 독고석, 한명실, 한무영. (2003). 빗물저장시설의 도시홍수 방지효과. 대한토목학회 학술대회. pp. 5563-5571.
- 박은진, 강규이, 남미아. (2010). 「도시열섬 완화를 위한 옥상녹화 활성화 방안」. 경기개발연구원.
- 박창호. (2002). 「생명공학기술」. 서울: 청문각.
- 박현주. (2017). 「빗물과 미래의 도시 물관리」. 환경부.
- 박효석, 오규식, 이상헌. (2014). 도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석: 서울시를 대상으로. 「도시행정학보」. 27(4). pp. 1-23.

- 범한엔지니어링, 한국종합기술. (2014). 「수원시 물 재이용 관리계획」. 수원시 비점오염원 관리기술 연구단. (2015a). 「저류지: 비점오염저감시설기술보고서」. \_\_\_\_\_ . (2015b). 「지하저류조: 비점오염저감시설기술보고서」. 서울특별시. (2013). 「건강한 물순환 도시 조성 종합계획」. \_\_\_\_\_ . (2019). 「지속가능한 친환경(투수성) 보도포장 기준(안) 마련」. 성선용, 박중순, 이상은, 김선희. (2019). 미세먼지 저감을 위한 도시 내 바람길 도입 방안. 「국토정책 Brief」. 709. pp. 1-6.
- 소방방재청. (2009). 「우수유출저감시설 설치 사업 설명자료」.
- 수성엔지니어링. (2018). 「수원시 그린빗물인프라 조성사업 기본 및 실시설계」. 수원시
- 수원시. (2016). 「레인시티 수원 시즌2 조성공사의 성능분석 및 효과분석 용역」. \_\_\_\_\_ . (2018a). 「수원시 수도정비 기본계획(변경)」. \_\_\_\_\_ . (2018b). 「환경보전 기본계획」
- 와르소쿠수모, 한무영. (2018). 도심형 옥상녹화를 설치한 대학 건물의 온도 저감 및 에너지 절약 효과. 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집. 18(1). pp. 50-51.
- 우효섭, 한승완. (2020). 물관리를 위한 자연기반해법과 유사개념들의 유형분류 및 체계. 「Ecology and Resilient Infrastructure」. 7(1). pp. 15-25.
- 울산발전연구원. (2018). 「울산 물순환 선도도시 기본계획 수립」. 울산광역시
- 유대중. (2007). 경량형 옥상녹화시스템의 냉난방부하절감효과에 관한 연구. 석사학위논문. 중앙대학교 대학원. 서울.
- 윤재봉, 권태정. (2013). 폭우재해 완화를 위한 녹색도시 계획요소의 우수유출 저감효과: 저류기능을 고려한 빗물이용시설을 중심으로. 「국토연구」. 77. pp. 3-16.
- 이동근, 김호걸. (2014). 그린 인프라를 통한 기후변화 문제 해결. 「Journal of Environmental Studies」. (54). pp. 27-36.
- 이승복, 김광목. (2005). 빗물관리의 효율성 제고 방안: 법령체계 및 제도 중심으로. 「국토연구」. 45. pp. 23-40.
- 이승원, 김이호. (2016). 서울시 저영향개발(LID) 시범 시설에 대한 편익 특성 연구. 「대한환경공학회지」. 38(6). pp. 299-308.
- 이재근, 이은재, 문충만. (2019). 「대전광역시 물순환선도도시 운영에 따른 수환경 개선효과」. 대전세종연구원.
- 이정민, 최종수, 진규남, 강명수, 정용길, 박인건, 서형중, 김세호, 이철규. (2016). 「평택 고덕신도시 저영향개발기법(LID) 도입 방안에 관한 연구(II)」. 토지주택연구원.
- 이진희, 최상기, 김태운, 주용준, 채은주. (2014). 「저영향개발(LID)기법의 환경영향평가 적용 방안」. 한국환경정책·평가연구원.

- 전주지방환경청. (2009). 「비점오염원 설치신고 사례집」.
- 전호철, 안소은. (2018). 「KEI 포커스 2018 국민환경의식조사」. 한국환경정책·평가연구원.
- 제민희, 정승현. (2018). 토지이용 유형별 도시열섬강도 분석. 「한국콘텐츠학회논문지」. 18(11). pp. 1-12.
- 조용모. (2006). 「서울시 빗물이용시설의 운영 및 유지관리 방안」. 서울시정개발연구원(現 서울연구원).
- 최동호, 이부용. (2006). 지붕살수에 의한 증발냉각작용이 최상층 실내온열환경에 미치는 영향 분석. 「대한건축학회 논문집」. 22(5). pp. 287-294.
- 최지연. (2010). 자연적 물순환 시스템을 가진 침투여과형 비점오염저감기술 개발. 박사학위 논문. 공주: 공주대학교 대학원.
- 최혜선, 홍정선, 이소영, 김이형. (2016). LID시설에 적용된 식물의 염분 저항성 및 효과 평가. Journal of Wetlands Research. 18(2). pp.201-207.
- 한국수자원공사. (2011). 소중한 물(교육자료).
- 한무영, 김상래, 박현주, 김미경, 김형준, 이주영, 김도형, 금소윤, 박기쁨, 박미라, 김보경, 오승혜, 홍혜림, 김기영. (2011). 「물순환 관리 기본계획」. 수원시.
- 한치복, 이택순. (2010). 창원지역 빗물의 계절변화 및 저류시간에 따른 수질변화. 「대한환경공학회지」. 32(5). pp. 461-468.
- 환경부. (2003). 「빗물이용시설 보급확대를 위한 정책방안 연구」.
- \_\_\_\_\_. (2009). 「기후변화 적응을 위한 한국형 그린인프라 구축방안 연구」.
- \_\_\_\_\_. (2013a). 「저영향개발(LID) 기술요소 가이드라인」.
- \_\_\_\_\_. (2013b). 「전국 불투수면적률 조사 및 개선방안 연구」.
- \_\_\_\_\_. (2016a). 광주광역시, 대전광역시 등 5개 도시, 수질오염·기후변화에 강한 도시로 탈바꿈. 보도자료.
- \_\_\_\_\_. (2016b). 「제2차 물환경관리 기본계획」.
- \_\_\_\_\_. (2018). 「지하수 상식(깨끗한 지하수)」.
- \_\_\_\_\_. (2019). 「빗물유출제로화 시범사업 백서」.

### 〈영문 자료〉

- Abhijith, K. V., and Kumar, P. (2019). Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions. 「Atmospheric Environment」. 201. p132-147.
- Atlantis. (2012). 「Case Studies: Rainwater Harvesitng Systems」.

- Beenen, A. S., and Boogaard, F. C. (2007). Lessons from ten years storm water infiltration in the Dutch Delta. 「NOVATECH」. 2007. p1139-1146.
- Benedict, M. A., McMahon, E. T. (2006). 「Green Infrastructure」. US: Island Press.
- Bertule, M., Appelquist, L. R., Spensley, J., Trærup, S. L. M., and Naswa, P. (2017). 「Climate Change Adaptation Technologies for Water」. Denmark: CTCN publications.
- Brankovic, M. D., and Protic, I. B. (2019). Bioswales as elements of green infrastructure. foreign practice and possibilities of use in the district of the City of Nis, Serbia. 「ICUP2018 2nd International Conference on Urban Planning」. Nis, Serbia.
- Bray, B., Gedge, D., Grant, G., and Leuthvilay, L. (2012). 「Rain Garden Guide」. UK: RESET Development.
- Brewer, K., and Fisher, H. (2004). Successfully Developing a Low-Impact Design Ordinance. 「Low Impact Development 2004 Conference」. Maryland.
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A., and Sciuto, G. (2018). A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. 「Building and Environment」. 136. p227-239.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., and Davison, J. B. (2010). Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. 「Energy and buildings」. 42(10). p1582-1591.
- CDOT. (2010). 「The Chicago Green Alley Handbook: An Action Guide to Create a Greener, Environmentally Sustainable Chicago」.
- City and County of Honolulu. (2012). 「Green Infrastructure for Homeowners」.
- City of Alexandria. (2015). 「Alternatives Evaluation: Green Infrastructure」.
- City of Hamburg. (2017). 「Hamburg's Green Roofs Economic Evaluation」.
- City of Lancaster. (2011). 「FACT SHEET: Stormwater Planter Box」.
- City of London. (2016). 「SuDS in London: A design guide」.
- City of Melbourne. (2014). 「Total Watermark- City as a catchment」.
- City of Portland. (2013). 「2013 Stormwater Management Facility Monitoring Report」.
- City of Saskatoon. (2016). 「Low Impact Development: Design Guide for Saskatoon」.
- City of Seattle. (2017). 「City of Seattle Stormwater Manual」.
- City of Vancouver. (2019a). 「Rain City Strategy」.
- City of Vancouver. (2019b). 「Rainwater Management in Olympic Village(brochure)」.
- Crawford, D., Smith, T. J., and Richey, C. (2019). 「Rainwater Harvesting Case Study:

- Seagate Media Research Center. US: ASPE Journal.
- Dublin City Council. (2015). 「INFILTRATION TRENCHES & SOAK-AWAYS」.
- ECONorthwest. (2007). 「The Economics of Low-Impact Development: A Literature Review」. US: ECONorthwest.
- Ersland, G. A., Matthiesen, H., Tuttle, K. J., and Hollesen, J. (2015). 「Monitoring Mitigation Management: The groundwater project - Safeguarding the world heritage site of Bryggen in Bergen」. Bergen: Riksantikvaren.
- EU. (2013). 「Building a green infrastructure for Europe(Catalog)」.
- Freni, G., and Liuzzo, L. (2019). Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas. 「Water」 11(7). 1389.
- Gonzalez-Meler, M. A., Cotner, L., Massey, D. A., Zellner, M. L., and Minor, E. S. (2013). The environmental and ecological benefits of green infrastructure for stormwater runoff in urban areas. 「JSM Environmental Science & Ecology」. 1(2). 1007.
- Greenbelt Foundation. (2017). 「A Green Infrastructure Guide for Small Cities, Towns and Rural Communities」. Toronto: Greenbelt Foundation.
- GrowNYC. (2016). 「Green Infrastructure Techniques」.
- Hanman, C. (2013). 「Rain Garden Handbook for Western Washington」. US: Washington State University.
- Heilweil, V. M., and Watt, D. E. (2011). Trench infiltration for managed aquifer recharge to permeable bedrock. 「Hydrological Processes」. 25(1). p141-151.
- Hellberg, M. (2016). Modeling Detention and Pollutant Fate in Bioretention Systems(Master's thesis), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Hui o Ko'olaupoko. (2013). 「Hawaii Residential Rain Garden Manual」. US: Hui o Ko'olaupoko.
- Li, H., Harvey, J. T., Holland, T. J., and Kayhanian, M. (2013). The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. 「Environmental Research Letters」. 8(1). 015023.
- Li, J., Li, F., Li, H., Guo, C. and Dong, W. (2019). Analysis of rainfall infiltration and its influence on groundwater in rain gardens. 「Environmental Science and Pollution Research」. 26(22). p22641-22655.
- MAPC. (2017). Massachusetts low impact development toolkit.
- New York City Department of Environmental Protection, (2012). Guidelines for the

- Design and Construction of Stormwater Management Systems.
- Poblador, A., Ferreira-Neto, c. P., and MARQUES DE SOUZA, M. (2017). 「Circular Water Management Case Study: Rainwater harvesting for water reduction」. Switzerland: wbcsl.
- Sanchez, S. C. (2018). Thermal Effects of Rain Gardens at the Headwaters of the Jenkintown Creek in Pennsylvania(Master's thesis), Villanova University, Pennsylvania, US.
- Seither, A., Ganerød, G. V., de Beer, H., Melle, T., and Eriksson, I. (2016). 「City case study of Bergen」. Bergen: COST.
- SEMCOG. (2008). 「A Design Guide for Implementers and Reviewers: Low Impact Development Manual for Michigan」.
- South Australia. (2010). 「Bio-filter swale at Bulkana oval」.
- Terhell, S. L., Cai, K., Chiu, D., and Murphy, J. (2015). 「Cost and benefit analysis of permeable pavements in water sustainability」. US: University of California.
- Tetra Tech. (2014). 「Green Infrastructure in the greater Lansing area」.
- U.S.EPA. (2007). 「Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices」.
- U.S.EPA. (2015). 「Green Infrastructure Opportunities that Arise During Municipal Operations」.
- U.S.EPA. (2016). 「NONPOINT SOURCE SUCCESS STORY: Massachusetts Porous Pavement Improves Provincetown Harbor Beaches」.
- Woking Borough Council. (2018). 「Rainwater Gardens: A Guide for Residents」.
- Xiao, Q., and McPherson, E. G. (2009). 「Testing a bioswale to treat and reduce parking lot runoff」. US: University of California.
- Xuan, X. Y., and Zhang, H. X. (2013). Application of rainwater garden in economical ecological urban landscape. 「Applied Mechanics and Materials」. 409-410. p800-805.
- Zavala, M. Á. L., Prieto, M. J. C., and Rojas, C. A. R. (2018). Rainwater harvesting as an alternative for water supply in regions with high water stress. 「Water Supply」. 18(6). p1946-1955.

## 〈인터넷 매체〉

국가법령정보센터[법제처]. (2020). <https://www.law.go.kr/LSW/main.html>

수원시 장안구청 빗물저류조 시공 사진[우수안]. (2014.11.04.). [https://blog.naver.com/hanko  
oksuan/220171191852](https://blog.naver.com/hankooksuan/220171191852)

용어사전[환경부 비점오염원]. <https://nonpoint.me.go.kr/dictionary/list.do>

저영향개발 처리효율[비점오염저감시설 정보관리시스템]. [http://npslid.hecsystem.com/user/1  
idInfo04.do](http://npslid.hecsystem.com/user/1idInfo04.do)

저영향개발(LID)기법 적용 확산 홍보 캠페인[한국소비자연맹]. (2019.10.16.). [http://cuk.or.kr/i  
ntroduce/04\\_view.asp?TnNo=1&no=1341&page=1&area=%EB%8C%80%EC%A0%  
84&keyword=%EB%AC%BC%EC%88%9C%ED%99%98&ord\\_mode=newest](http://cuk.or.kr/introduce/04_view.asp?TnNo=1&no=1341&page=1&area=%EB%8C%80%EC%A0%84&keyword=%EB%AC%BC%EC%88%9C%ED%99%98&ord_mode=newest)

폭염일수[기상청 기상자료개방포털]. (2019). [https://data.kma.go.kr/climate/heatWave/sele  
ctHeatWaveChart.do](https://data.kma.go.kr/climate/heatWave/selectHeatWaveChart.do)

행사 소개[서울 물순환 시민문화제]. (2020). [https://festival.seoul.go.kr/water/introduce/ye  
ar2020](https://festival.seoul.go.kr/water/introduce/year2020)

63rd Avenue and Yukon Street green rainwater infrastructure plaza[City of Vancouver]. (2020.02.07.). [https://vancouver.ca/home-property-development/63rd-avenue-  
and-yukon-street-boulevard-improvements.aspx](https://vancouver.ca/home-property-development/63rd-avenue-and-yukon-street-boulevard-improvements.aspx)

Benefits of Green Infrastructure[Global Designing Cities Initiative]. (2016). [https://glob  
aldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide/utilities-and-infras  
tructure/green-infrastructure-stormwater-management/benefits-green-infrastr  
ucture/](https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide/utilities-and-infrastructure/green-infrastructure-stormwater-management/benefits-green-infrastructure/)

Bryggen in Bergen[Visitbergen]. (2021). [https://en.visitbergen.com/things-to-do/bryg  
gen-in-bergen-p878553](https://en.visitbergen.com/things-to-do/bryggen-in-bergen-p878553)

CHICAGO ZOO GOES WILD FOR STORM WATER DETENTION[estormwater]. (2015.08.27). [https://www.estormwater.com/chicago-zoo-goes-wild-storm-water-detenti  
on](https://www.estormwater.com/chicago-zoo-goes-wild-storm-water-detention)

EDF Norte Fluminense[eDF Norte Fluminense]. [http://edfnortefluminense.com.br/noss  
os-negocios/edf-norte-fluminense/](http://edfnortefluminense.com.br/nossos-negocios/edf-norte-fluminense/)

EDWARDS GARDENS PARKING LOT[Schollenand]. (2014.09.23). [https://schollenandco  
mpany.com/projects/edwards-gardens-parking-lot/](https://schollenandcompany.com/projects/edwards-gardens-parking-lot/)

Grünes Netz Hamburg[Hamburg]. [https://www.hamburg.de/gruenes-netz/13046992/k  
arte-gruen-vernetzen/](https://www.hamburg.de/gruenes-netz/13046992/karte-gruen-vernetzen/)

Infiltration Trench[Innovyze]. <https://help.innovyze.com/display/infodrainage2020v2/>

## Infiltration+Trench

PermeableConcrete[Land8]. (2018.03.02.). [https://land8.com/wp-content/uploads/2014/04/1517-PP\\_JJHarrison\\_PermeableConcrete2-80x80.jpg](https://land8.com/wp-content/uploads/2014/04/1517-PP_JJHarrison_PermeableConcrete2-80x80.jpg)

Rain gardens in Kviberg[Naturvation]. (2017.08). <https://naturvation.eu/nbs/goteborg/rain-gardens-kviberg>

Rainwater Harvesting[indiamart]. <https://dir.indiamart.com/nagpur/rainwater-harvesting.html>

Stormwater Planter[Philly Watersheds]. [http://archive.phillywatersheds.org/what\\_were\\_doing/green\\_infrastructure/tools/stormwater-planter](http://archive.phillywatersheds.org/what_were_doing/green_infrastructure/tools/stormwater-planter)

## 〈신문기사〉

강찬수. (2018). 홍수에, 가뭄에 널뛰는 날씨 ...‘스핀지 도시’로 맞선다. 중앙일보. 2018.09.18.

김경호. (2018). [수원소식] 몽골 등 7개국 '스마트 레인시티 수원' 벤치마킹 등. 중앙일보. 2018.09.06.

김태국. (2007). [날씨 칼럼] 지구온난화 계속됐 물 부족현상 심각해져. 조선일보. 2007.10.06.

봉승권. (2019). 3기 신도시 저영향개발기법 적용...국토·환경부, MOU체결. 대한경제. 2019.06.16.

우효섭. (2020). [조경논단] 그린인프라와 저영향개발, 무엇이 비슷하고 다른지?. 라펜트. 2020.01.21.

이정하. (2011). '레인시티 수원' 빗물 재활용 성과. 뉴시스. 2011.12.05.

이지영. (2017). [세종] 친환경 생태도시 조성..행복도시에 저영향개발기법 도입. 도안뉴스. 2017.03.09.

임성아. (2015). 바다보다 낮은 땅, 네덜란드의 물 산업 현황. kotra 해외시장뉴스. 2015.11.20.

조혜정. (2011). 재앙이 되느냐, 자원이 되느냐. 한겨레. 2011.08.10.

최모란, 편광현. (2020). 주차장 바닥에 웬 원불? 광화문식 물난리 없는 수원의 비결. 중앙일보. 2020.08.14.

| 저자 약력 |

김은영

공학박사

수원시정연구원 연구기획실 연구기획팀장

E-mail : eykim@suwon.re.kr

주요 논문 및 보고서

「공간생태학적 특성을 고려한 수원시 그린인프라 구축기법 연구」 (2020, 수원시정연구원)

「수원시 가로수 건강성 평가: 증로 및 소로를 중심으로」 (2019, 수원시정연구원)

「수원시 연관 식물자원 스토리텔링 연구」 (2019, 수원시정연구원)

정경민

조경학석사

수원시정연구원 도시공간연구실 위촉연구원

E-mail : km3737@suwon.re.kr



