홍수 위험성 평가와 적응 시설을 활용한 경제적 개선 가치 산정 연구

서울대학교 그린인프라공학연구실
강준석 교수
junkang@snu.ac.kr

Contents

- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- 기후변화 리스크 평가
- 해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례
- 국내의 기후변화 리스크 평가 사례
- 의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가
- 결론

지능형 에코사이언스
재해저감 도시/인프라 설계
그린인프라 공학
생태모방공학

미국 및 한국에서 10년 이상의 교육
서울대학교 (2017 – 현재)
Georgia Southern Univ. (2011 – 2016)

40편이상의 SCI급 논문, 1편의 저서
한국 연구과제 20개 수행 (2017 – 현재)
미국 정부 R&D과제 8개 수행

SNU 지능형 에코사이언스 특성화대학원 사업책임자
(사)한국조경학회 기술이사 (2019 – 현재)
(사)한국기후학회 학술이사 (2019 – 현재)
건설산업비전포럼 기획위원 (2017 – 현재)
서울대학교농업생명과학대학 창업지원센터
연구지원 부장 (2019 – 현재)

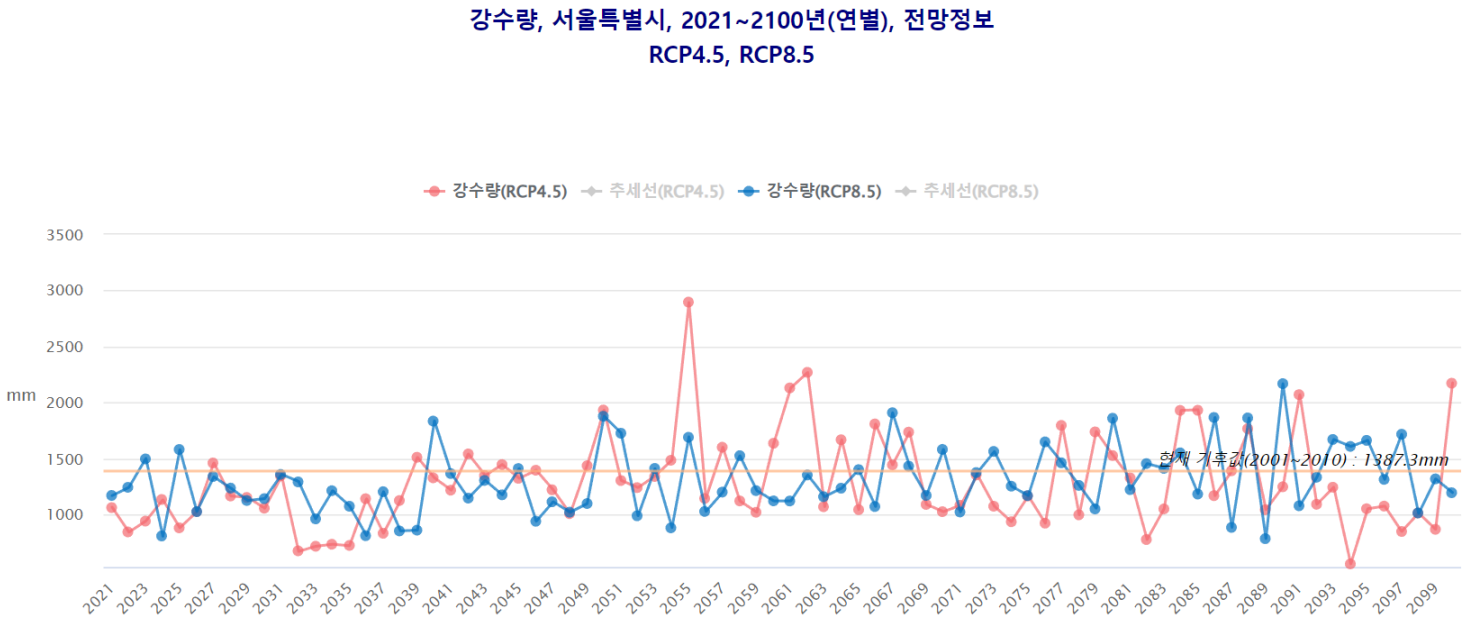
서울대학교 교수

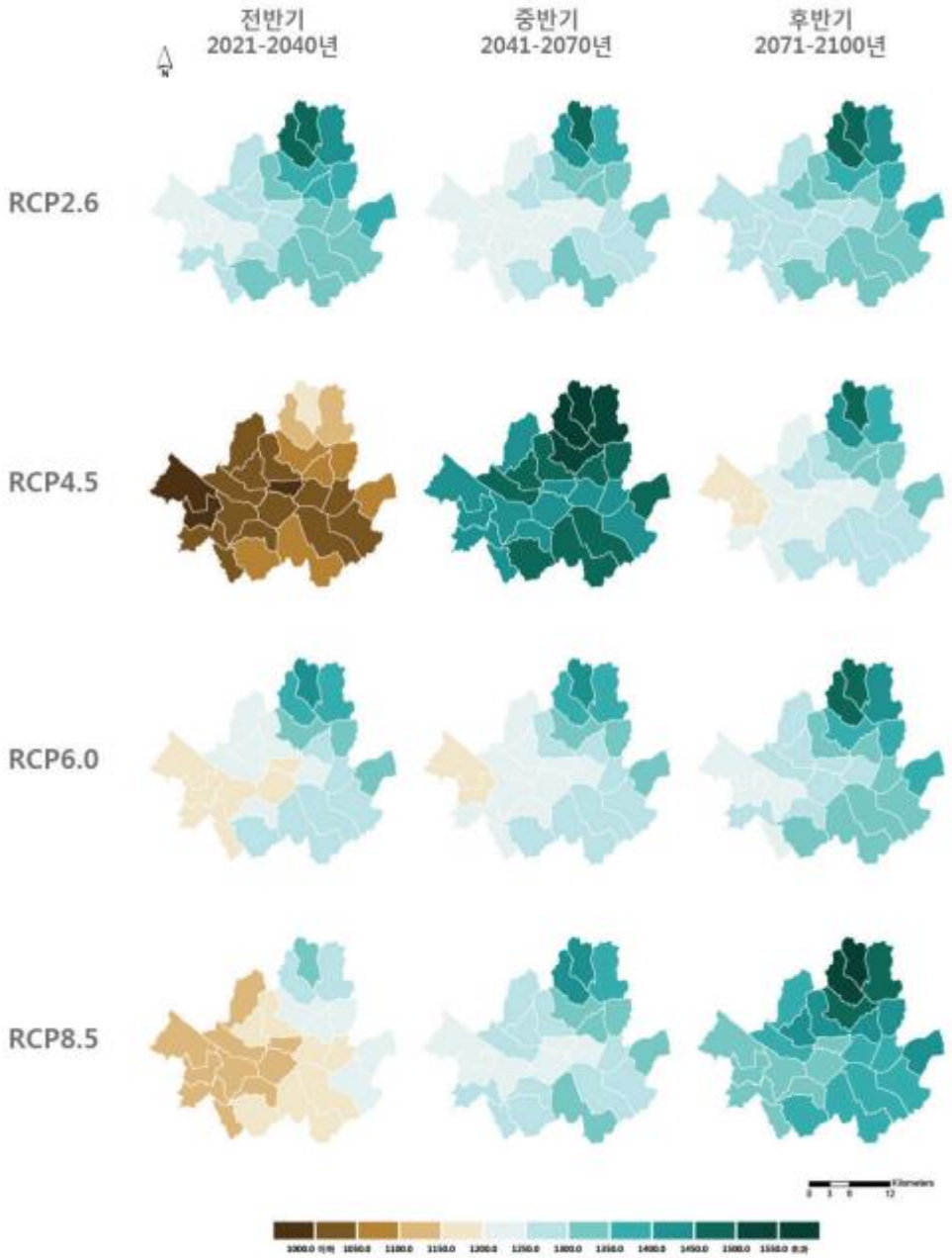
Junsuk Kang

영상 추가 예정

- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- 기후변화 리스크 평가
- 해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례
- 국내의 기후변화 리스크 평가 사례
- 의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가
- 결론

기후변화와 도시 홍수의 증가





- IPCC 5차 보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 규정하고, 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오를 개발
- 서울특별시의 강수량은 2021년부터 2100년까지 평균 약 1305.1mm 로 지역의 현재 기후값(1981-2010년)보다 약 53.4mm 줄어들 것으로 전망됨
- 하지만, 이는 단순히 연 평균 강수량이 줄어든 것으로 **극한 형태의 강우와 기존과는 다른 형태의 집중호우 형태의 강수가 빈번해질 것**으로 판단됨

기후변화와 도시 홍수의 증가

2022 중부권 폭우

연 도 : 2022

사 망 : 26명

부 상 : 155명, 이재민 : 2,280명

추정 피해액 : 1,300억 원

태풍 힌남노

연 도: 2022

사 망 : 3명. 실 종 : 8명, 부 상 : 1명

추정 피해액 : 1,683억 원 (시설물 추정)

2010 중부권 폭우

연 도 : 2010

사 망 : 5

피해액 : 221 억 원

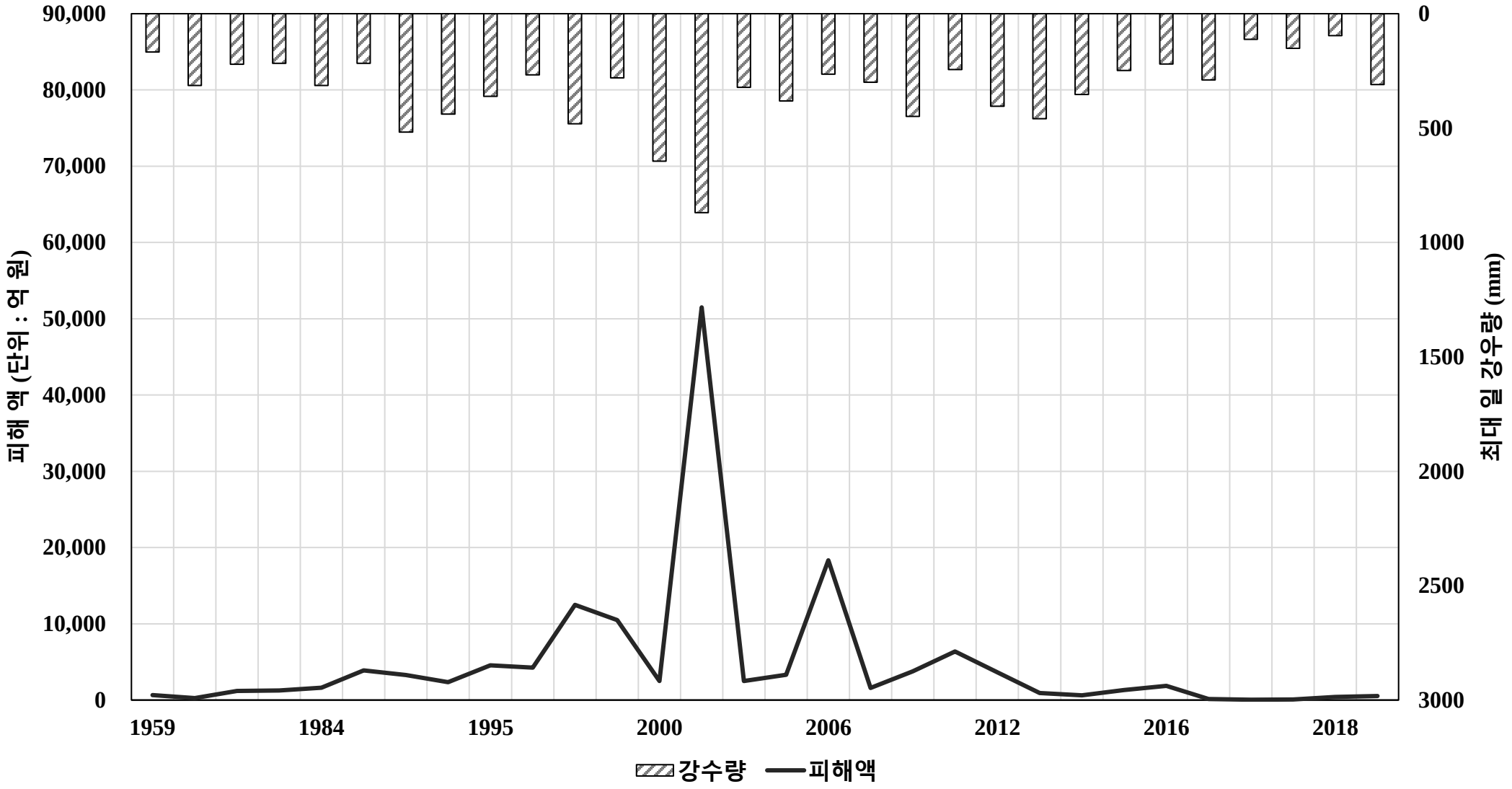
태풍 루사

연 도 : 2002

사 망 : 213명, 실 종 : 33명

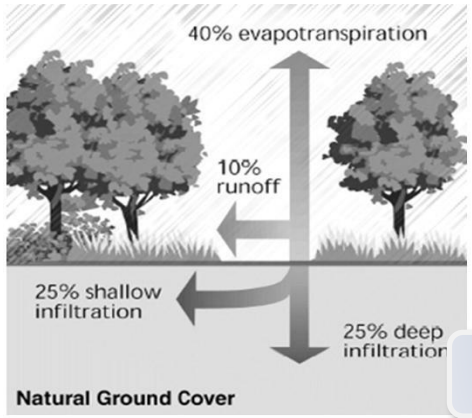
피해액 : 5조 1,479억 원

기후변화와 도시 홍수의 증가

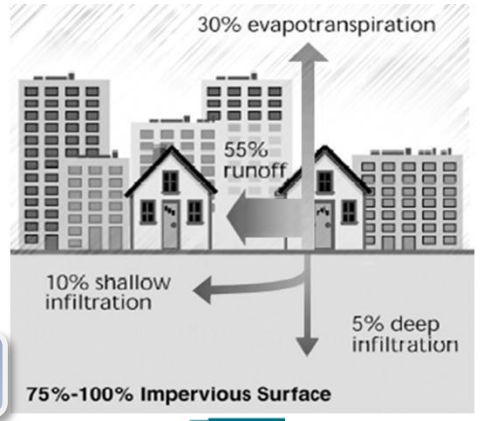


- 사회 인프라가 보강됨에도 불구하고, 1900년대 중반부터 홍수로 인한 피해액은 지속되고 있음
- 특히, 태풍을 동반한 형태의 도시 홍수의 피해의 추정액은 일반적인 홍수 피해액보다 훨씬 크게 나타남

물관리 쟁점 및 동향



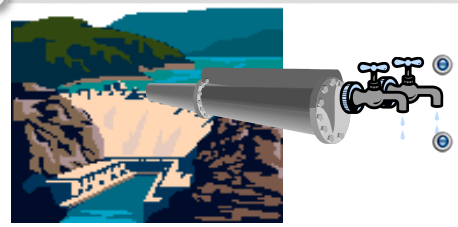
불투수층 증가



- 유출증가
- 기저유출감소↓
- 침투감소
- 증발감소

도시화

물수요 증가



- 수원 확보 어려움
- 물공급 에너지 증가

홍수 | 비점오염 | 지하수위 내려감 | 건천화 | 생태계 파괴 | 열섬 | 가뭄

+

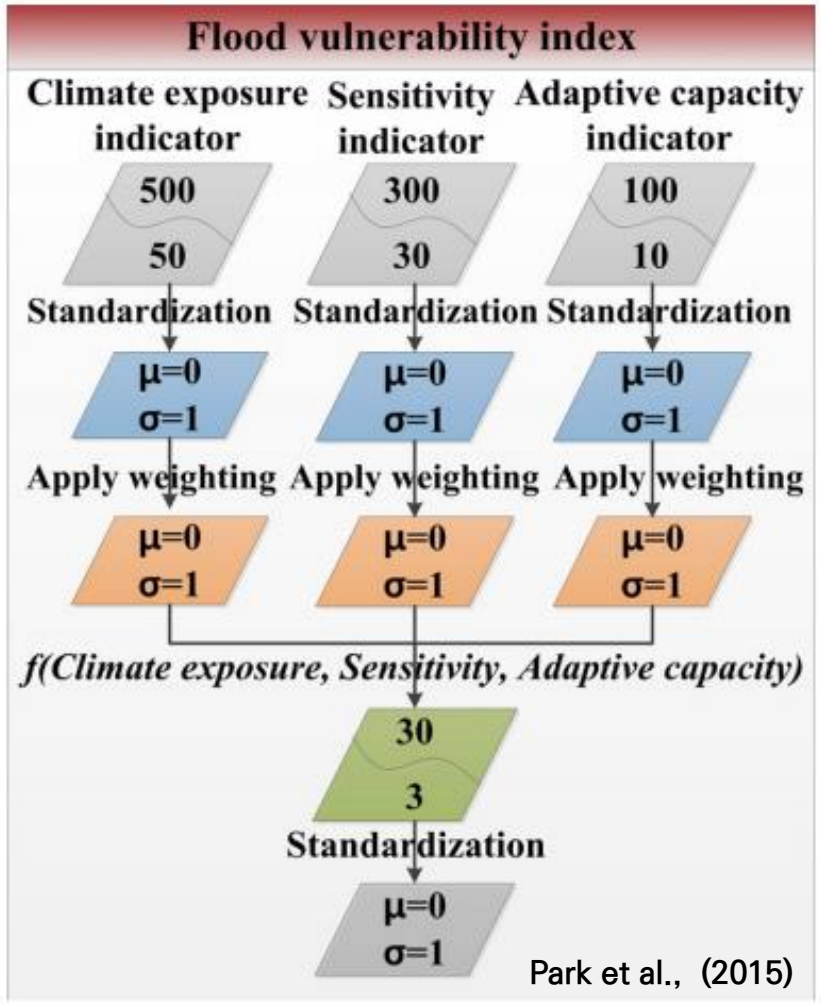
기후변화

물 문제 심화

미국	독일	호주	일본	한국
• 저영향 개발 (LID, Low Impact Development)	• 분산식 도시계획 (DUD, Decentralized Urban Design)	• 지속가능 도시계획 (WSUD, Water Sensitive Urban Design)	• 자연 순응형 개발 (SWCNP, Sound Water Cycle)	• 녹색도시 (SWC, Smart Watergy City, U-Eco City,)

- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- **기후변화 리스크 평가**
- 해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례
- 국내의 기후변화 리스크 평가 사례
- 의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가
- 결론

IPCC 기후변화 리스크 평가 요소



IPCC (2007)

$$\text{Flood vulnerability} = \alpha \times \text{Climate exposure} + \beta \times \text{Sensitivity} - \gamma \times \text{Adaptive capacity}$$

Proxy Variables for Climate Exposure, Sensitivity, and Adaptive Capacity (Park et al., 2015)

Index	Indicator	Unit	Description	Source
Climate exposure	CN80	Day	Number of days > 80 mm	Koh (2009)
	CX3h	mm	Maximum precipitation during three hours	
	CX24h	mm	Maximum precipitation during 24 h	ME (2012)
	CP24h200y	mm	Maximum probable precipitation (24 h duration, 200 year frequency)	
	C90th	mm/day	90th percentile of rainy day amounts	CRU (2005)
	CSDI	mm/day	Simple daily intensity	CRU (2005)
	CX5d	mm	Greatest five-day total rainfall	CRU (2005)
	CPL90th	%	% of total rainfall > long-term 90th percentile of rainy days	CRU (2005)
	CNL90th	Day	Number of days > long-term 90th percentile of rainy days	CRU (2005)
Sensitivity	SWF	m^3/day	Wastewater flow rate	ME (2012)
	SRL	km	Road length	ME (2012)
	SPD	Person/km^2	Population density	NDMI (2011)
Adaptive capacity	ARS	%	River improvement rate	ME (2012)
	AGRDP	One million won	Gross regional domestic product	ME (2012)

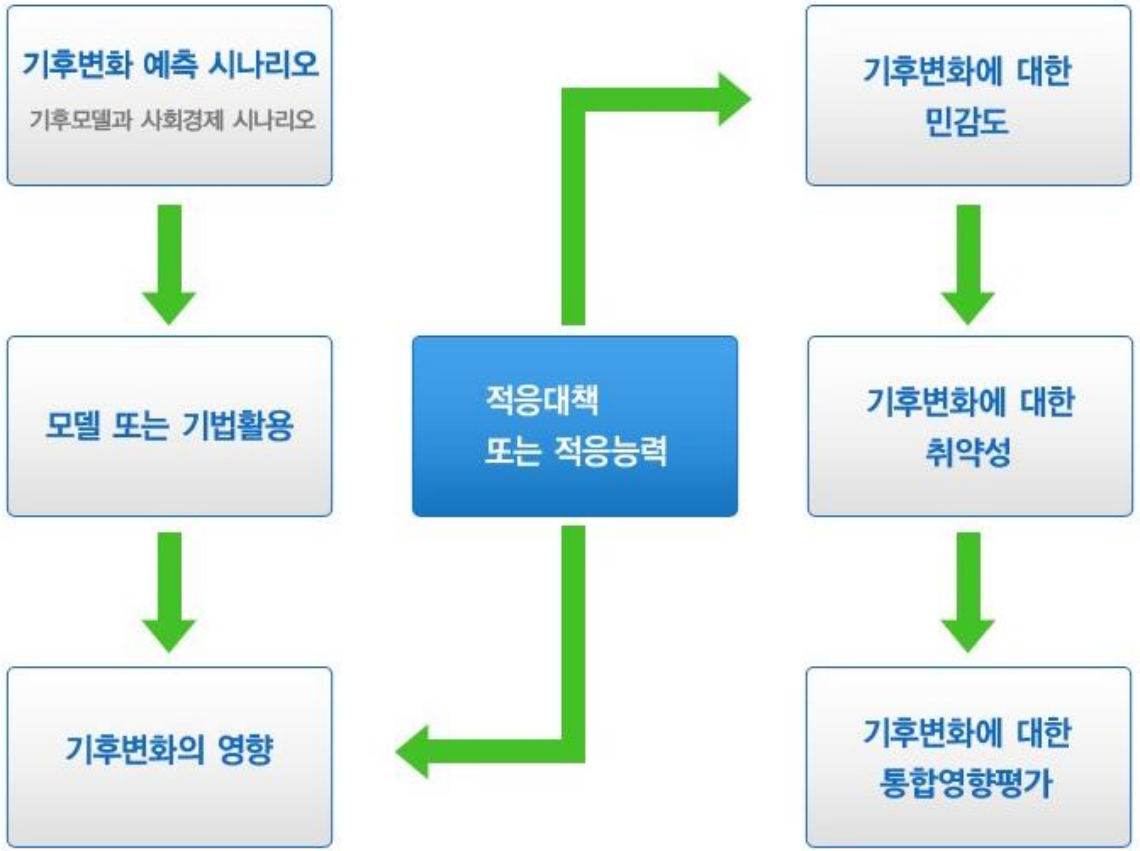
- IPCC AR5에 따르면, 기후 리스크는 재난재해의 양(Hazard), 노출 (Exposure), 취약성(Vulnerability)의 관계로 규명할 수 있음
- 노출을 줄이고, 취약성을 보완해야 기후변화 재난재해로 기인하는 리스크를 최소화 할 수 있음

기후평가 리스크를 줄이기 위한 수단? 완화(Mitigation)과 적응(Adaptation)

기후변화 적응이란

- 국제사회에서 기후변화로 인한 영향과 적응(Adaptation)에 대한 논의는 2001년 발간된 IPCC 제3차 보고서 이후 본격 시작
- 초창기 적응에 대한 논의는 상대적으로 기후 변화 영향에 취약한 개발 도상국을 중심으로 진행
- 하지만, 기후 변화의 재앙이 몰고 오는 영향이 개도국에 한정되지 않고 선진국을 포함하여 전 지구적으로 확대됨에 따라 적응에 대한 논의 또한 지구적으로 확대
- 최근에는 선진국들을 중심으로 홍수, 폭염 등 기후변화로 인한 재난 재해에 적극적으로 적응하는 노력들을 보임

→ 기후 위기, 선제적 기후변화 적응이 답이다



기후변화 적응의 과정

자료 출처 : 국가기후위기적응정보포털 / 보험, 기후위기를 묻다

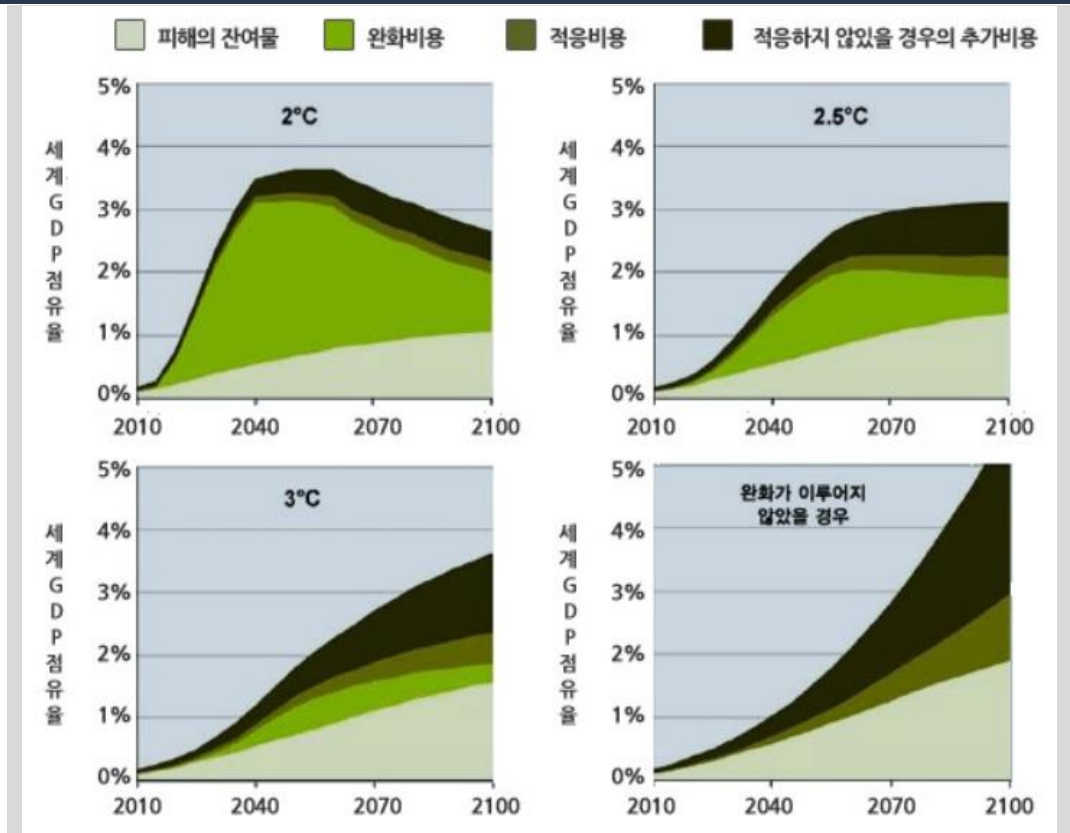
기후변화 리스크 평가

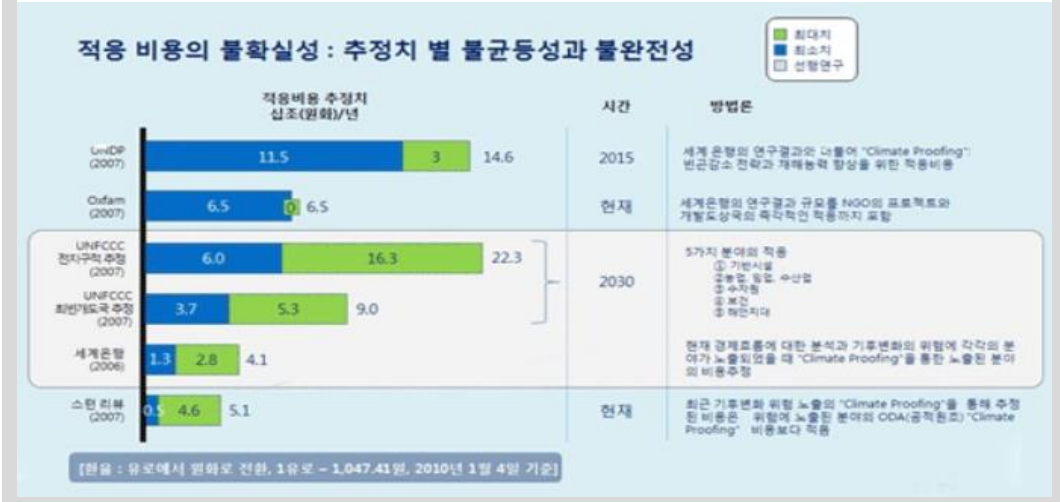
기후변화 적응의 비용과 편익

- 상대적으로 완화비용보다 적은 비용을 적응에 투자하였을 때 효과를 완화에 비해 빠른 시일 내에 효과적으로 얻을 수 있음
- 오른쪽의 그래프는 2050년까지의 온실가스 감축체제가 이루어졌을 때 완화비용, 적응비용, 피해의 잔여물, 적응하지 않았을 경우의 추가비용을 나타내고 있음
- 3℃에서 2℃로 온도상승폭을 줄일수록 완화비용은 증가하며 시간이 흘러갈수록 적응하지 않았을 경우의 추가비용이 증가함
- UNFCCC는 2030년에 기후변화적응을 위한 추가비용을 분야별로 산정하였으며, 특정 분야의 적응행동 들은 적은 비용으로 높은 편익을 얻을 수 있음

구분	전지구적 비용	선진국	개발도상국
농업	14	7	7
수자원	11	2	9
보건	5	추정하지 않음	5
해안지대	11	7	4
기반시설	8~130	6~88	2~41
종합	49~17	22~105	27~66

자료 출처 : 국가기후위기적응정보포털





기후변화 리스크 평가

리스크 관리(Risk Management)

리스크 식별
- 재난재해 리스크 감지
- 2022년 홍수 감지 등

리스크 분석
- 어느정도의 리스크가 예상되나?
- 침수심, 침수면적 등

리스크 저감
- 홍수를 막을 수 있도록 맨홀 등 정비
- 집앞 주차장 등 추가적인 Screen 설치

리스크 평가
- 얼마만큼 추가로 기술이 도입되어야 하는가?
- 불투수면적을 늘리고 하천을 정리하면 추가시설 필요 없음

리스크 수용
- 사회적으로 이를 받아들일 수 있는 공감대와 합의를 만드는 것

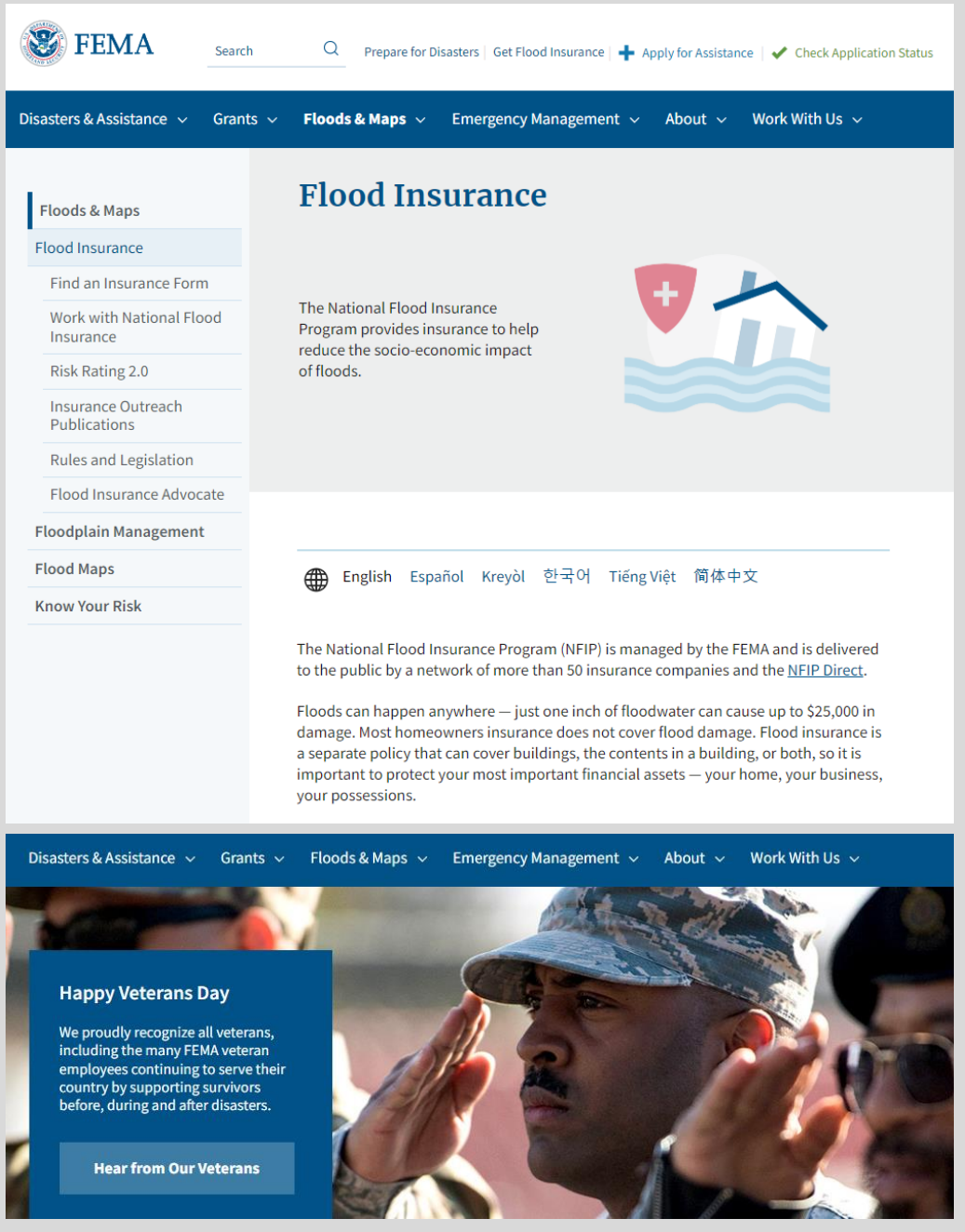
자료 출처 : FEMA / 보험, 기후위기를 묻다 p. 105

- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- 기후변화 리스크 평가
- **해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례**
- 국내의 기후변화 리스크 평가 사례
- 의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가
- 결론

해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례 - 미국

미국의 연방 홍수보험 프로그램

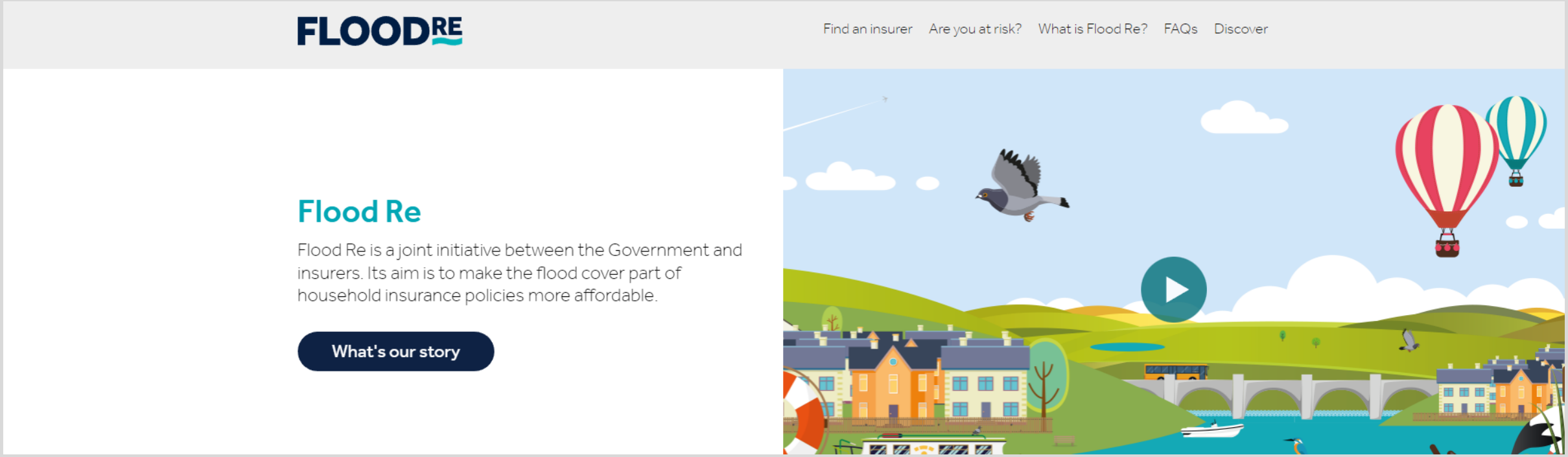
- 미국의 연방정부는 1950년부터 공적홍수보험제도의 운영 필요성을 제기함
- 1965년 플로리다 지역과 중부 걸프 연안의 홍수 이후에, 1968년부터 8년 연방 홍수보호법이 제정되었음
- 1969년에는 미국의 홍수리스크에 대한 공적보험제도인 연방홍수보호 프로그램(National Flood Insurance Program)이 만들어짐
- 대략 60여 개의 보험회사 네트워크가 연결되어 있음
- 연방 홍수보험 프로그램은 National Flood Insurance Program(NFIP) 산하의 Federal Emergency Management(FEMA)가 담당하고 있음
- 방재, 감재 정책을 실시하는 지방자치단체에 거주하는 주민은 임의로 가입할 수 있음. 하지만, 지방자치단체가 NFIP에 참석하지 않으면 연방 홍수 보험이 불가하다는 단점이 있음



자료 출처 : FEMA / 보험, 기후위기를 묻다

영국의 연방 홍수보험 프로그램

- 영국의 정부는 리스크가 큰 홍수에 대해 자국 국민들이 보험에 가입해 홍수 피해에 따른 손실 보상을 받을 수 있도록 하기 위해 민영 보험회사와 영국 정부가 공동으로 홍수재 보험(Flood Reinsurance)를 발족시켜 운영하고 있음
- 영국에서 주택보험을 제공하는 보험회사들이 공동출자를 하여 설립한 비영리 재보험회사로, 출자한 보험 회사들이 공동 운영하고 있음
- 2008년 이전에 건설된 주택물건에 대한 개인 보험계약임. 2009년 1월 1일 이후 신규 물건은 영국 정부가 리스크 큰 지역 내 주택을 건설할 때 인센티브를 주지 않는 것에서 비롯되었음
- 주택물건의 종류와 용도 등을 기준으로 8가지의 재보험 적용 조건을 정해두고, 이 조건을 충족해야만 재보험 대상에 해당함



- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- 기후변화 리스크 평가
- 해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례
- **국내의 기후변화 리스크 평가 사례**
- 의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가
- 결론

국내기후변화 리스크 평가 및 적응 사례

국내의 기후변화 리스크평가 시스템 (Climate change Risk Assessment System)

- 환경부와 한국환경연구원 국가기후위기적응센터가 민간기업의 기후변화로 인해 초개될 수 있는 피해를 추정하고 기업의 기후변화 적응 계획을 자발적으로 수립하여 경영계획과 전략에 반영할 수 있도록 '민간기업 기후변화 리스크평가 시스템(CRAS)'를 운영
- CRAS 시스템은 기업이 자발적으로 기후변화 리스크를 선제적으로 대응하고 이를 대비할 수 있도록 적응계획 수립을 지원하는 도구
- 기후변화로 발생할 수 있는 기업의 잠재리스크를 인식하고 분석, 평가과정을 통해 리스크 관리 수준 및 우선순위를 파악하여 기후변화의 영향을 사전적으로 진단할 수 있는 시스템
- CRAS시스템은 기업의 기후변화 위험요인을 인식하고 '기후변화 적응계획 수립보고서'를 자발적으로 작성할 수 있도록 전반적인 정보를 제공
- '기후변화 적응 리스크관리 실무교육과정'을 개설하고 CRAS 시스템을 활용해 총 60개의 기업 및 기관의 기후변화 적응계획 수립과 기후변화 적응 교육을 지원

국내기후변화 리스크 평가 및 적응 사례

풍수해보험

- 행정안전부가 관장하고 민영보험사가 운영하는 정책보험으로서 보험가입자가 부담하여야 하는 보험료의 일부를 국가 및 지자체에서 보조함으로써 국민은 저렴한 보험료로 예기치 못한 풍수해(태풍,홍수,호우,해일,강풍,풍랑,대설,지진)에 대해 스스로 대처할 수 있도록 하는 선진국형 재난관리제도
- 정부는 보험가입자의 부담을 최소화 하고 보험가입을 촉진 하고자 보험료의 일부를 지원
- 관장은 행정안전부에서 수행하고 운영은 민영보험사에서 수행함
- 주택, 온실가스, 소상공인의 상가나 공장을 지원하며, 국민의 자율적 재난관리 책임의식 고취를 위해서 정책 보험으로 개발됨
- ·「자연재난 복구비용 산정기준」에 따른 복구비의 주택 : 30% 온실 : 35% – 최대 5천만원까지 지원

- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- 기후변화 리스크 평가
- 해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례
- 국내의 기후변화 리스크 평가 사례
- **의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가**
- 결론

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

의사결정을 위한 정량적 적응정책 평가 방법론

- 정책을 평가하는 과정은 다차원적인(multi-dimensional) 성격을 갖고 있으며, 서로 상충될 가능성이 있는 평가 지표에 대한 중요도를 정성적인 평가 방법이나 정량적인 평가 방법을 동시에 사용함
- 정량적 평가 방법은 결과가 객관적이며 수치화될 수 있어 비교적 명확한 평가로 신뢰도는 높일 수 있음
- 최근에는 리스크 분석을 위한 모델의 형태가 달라지고 있음
- 통계 기반의 정량적 모델에서 진일보한 형태로 **물리식 기반의 모델들도 개발**되고 있음
- 물리식 기반 모델들은 디지털 트윈 시뮬레이션, 현실 세계를 가상세계 속에서 구현해낸 시뮬레이션과 연동하여 더욱 상세한 모델링을 할 수 있음
- 시간당 얼마만큼의 폭우가 발생하였을 때, 범람이 일어나고 이를 적응할 수 있는 방안의 효과는 얼마인지를 평가할 수 있음
- 이는 기후변화 리스크 및 대응 정책, 경제적 평가를 위해 활용 가능함

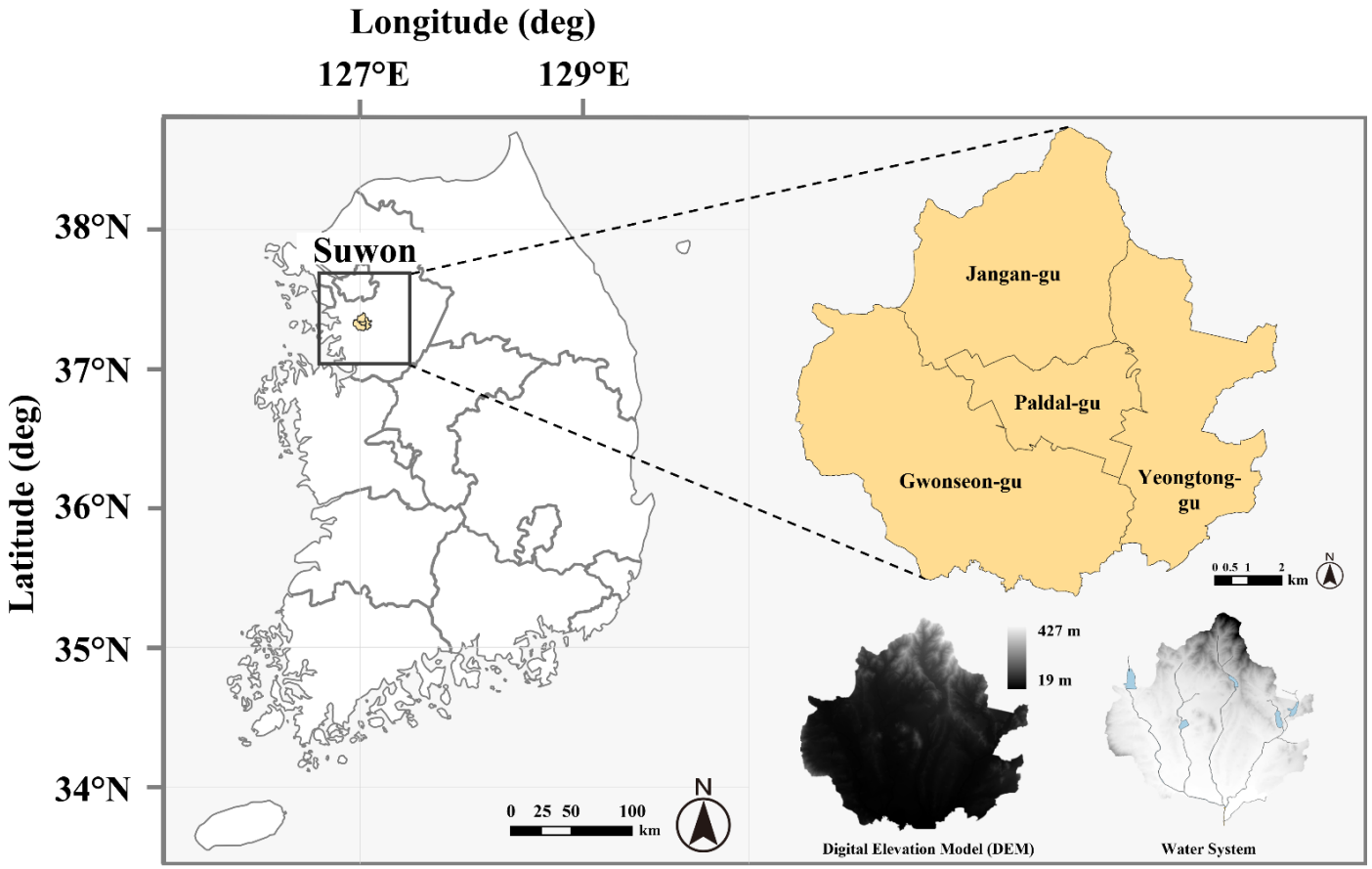
적응대책 평가 방법론의 구분

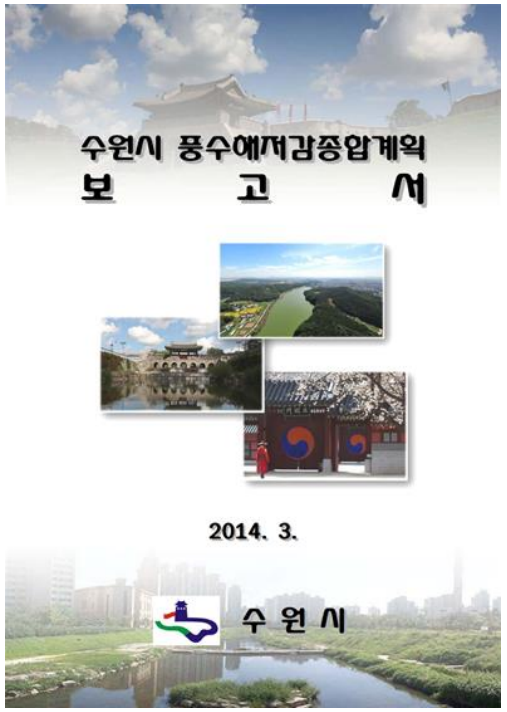
평가 방법 구분			장점	단점
정상적 평가 방법	다기준 의사 결정법	다기준 분석	환경 및 사회에 미치는 영향을 금전상으로 표시할 수 없는 경우 사용 가능	평가기준의 수가 많을 경우 우선순위 도출과정이 복잡해지고, 일관성 검증이 어려움
		AHP	상대적 중요도를 비율척도를 이용하여 정량화, 실증 분석과 엄밀한 수리적 검증	평가 대안의 수가 매우 많을 경우 과도한 이원비교를 수행해야 함
		MAUT	정량적, 정성적 가치 통합 가능, 조건에 따라 평가기준의 가중치 변화 및 평가대안의 추가 등 높은 유연성	효용함수 산출을 위해 평가기준에 대한 최대 ? 최소 구간을 설정해야 하는 번거로움
		FUZZY	실제 문제에서 발생하는 모호성과 불확실성을 효과적 처리	평가기준에 대한 의사와 전문가의 구체적 의견 반영 어려움
		FUZZY-AHP	명백한 하나의 특정 수치로 표현하기 어려운 AHP의 한계를 F판단구간을 적용해 극복	평가 대안의 수가 매우 많을 경우 과도한 이원비교 수행

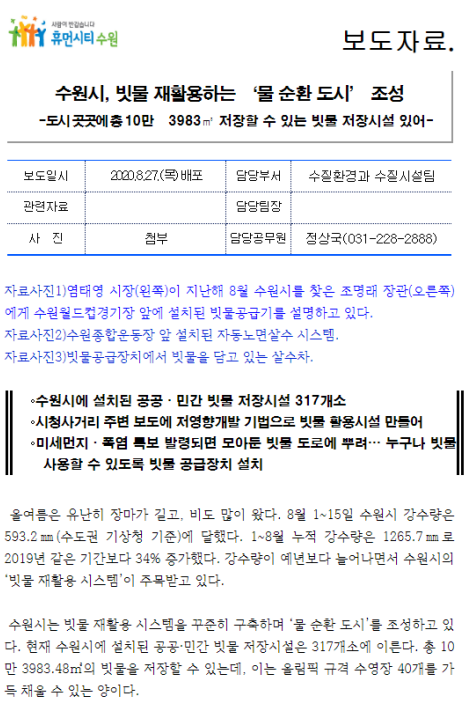
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시의 재난재해(폭우) 리스크 평가







휴먼시티수원

보도자료.

수원시, 빗물 재활용하는 '물 순환 도시' 조성

-도시 곳곳에 총 10만 3983㎥ 저장할 수 있는 빗물 저장시설 있어-

보도일시	2020.8.27.(목) 배포	담당부서	수질환경과 수질시설팀
관련자료		담당팀장	
사 진	첨부	담당공무원	정상국(031-228-2888)

자료사진1)염태영 시장(왼쪽)이 지난해 8월 수원시를 찾은 조명래 장관(오른쪽)에게 수원월드컵경기장 앞에 설치된 빗물공급기를 설명하고 있다.
자료사진2)수원종합운동장 앞 설치된 자동노면살수 시스템.
자료사진3)빗물공급장치에서 빗물을 담고 있는 살수차.

- ◦수원시에 설치된 공공 · 민간 빗물 저장시설 317개소
- ◦시청사거리 주변 보도에 저영향개발 기법으로 빗물 활용시설 만들어
- ◦미세먼지 · 폭염 특보 발령되면 모아둔 빗물 도로에 뿌려… 누구나 빗물 사용할 수 있도록 빗물 공급장치 설치

올여름은 유난히 장마가 길고, 비도 많이 왔다. 8월 1~15일 수원시 강수량은 593.2㎜(수도권 기상청 기준)에 달했다. 1~8월 누적 강수량은 1265.7㎜로 2019년 같은 기간보다 34% 증가했다. 강수량이 예년보다 늘어나면서 수원시의 '빗물 재활용 시스템'이 주목받고 있다.

수원시는 빗물 재활용 시스템을 꾸준히 구축하며 '물 순환 도시'를 조성하고 있다. 현재 수원시에 설치된 공공·민간 빗물 저장시설은 317개소에 이른다. 총 10만 3983.48㎥의 빗물을 저장할 수 있는데, 이는 올림픽 규격 수영장 40개를 가득 채울 수 있는 양이다.

수원시의 기후 리스크(폭우)를 줄이기 위한 노력들

→ 연구 대상지인 수원시는 적극적으로 기후 리스크(폭우)를 줄이기 위해 정책, 기술개발 등 노력을 기울이고 있음

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시의 재난재해(폭우) 리스크 평가

사람이 반갑습니다 휴먼시티수원

보도자료.

수원시 고색동, 대한민국 탄소중립 1번지로 변모한다!

탄소중립 그린도시 사업 5년간 400억 투입…마을 단위 기후위기 대응 모델

보도일시	2022.05.10.(화)	담당부서	기후에너지과 기후변화정책팀
관련자료	없음	담당팀장	김영희(031-228-2851)
사 진	첨부	담당공무원	이민진(031-228-2853)

사진1) 탄소중립 그린도시 수원 조성계획 마스터플랜.
사진2) 수원시청사 외벽에 탄소중립 그린도시 사업 선정을 알리는 대형 현수막이 게시돼 있다.
사진3) 수원시가 탄소중립 그린도시 사업으로 음폐수를 활용한 그린수소 생산모듈을 설치할 예정인 수원시 음식물자원화시설.
사진4) 지난 3월 말 기후변화체험교육관에서 열린 경기도 현장실사평가에서 수원시의 탄소중립 그린도시 사업 브리핑이 진행되고 있다.

행정타운 중심으로 에너지전환 집중…단독주택 등에도 확산하도록 연계
탄소숲 등 흡수원 확대, 신기술 적용해 기후변화에 적응하는 도시 모델
탄소중립 라이프 지원하는 앱 개발 등 시민 참여 확대해 30% 감축 목표

이산화탄소의 실질적인 발생량을 제로화하는 '탄소중립'은 더 이상 입으로만 외치는 구호가 아니다. 우리 삶의 터전을 지키기 위해 반드시 실천해야 할 생활 속 과제다. 온난화로 인한 지구 종말의 시계를 늦추기 위해 국가와 공공기관은 물론 기업과 개인이 필사적으로 지켜야 할 지향점이다.

수원시가 고색동 일대에서 마을 단위의 탄소중립 가능성을 모색한다. 최근 환경부의 '탄소중립 그린도시 사업' 대상으로 선정된 '그린경제로 성장하는 탄소중립 1번지 수원' 사업을 통해서다. 2026년까지 향후 5년간 국비 240억 원과 도비 48억원, 시비 112억 원 등 총 400억 원을 투입해 미래를 위한 새로운 가능성을 개척한다.

2026년 고색동에서는 수소버스를 타고 출근하고, 태양광으로 만든 전기를 사용하는 건물에서 업무를 하고, 에너지 관리 시스템을 활용해 친환경적인 상가에서 점심을 먹고, 공유전기차를 이용해 출장을 다녀오고, 에너지관리 시스템으로 모은 포인트를 사용하는 '탄소중립 라이프'가 실현될 전망이다.

◇고색동, 탄소중립 최신기술 집약

탄소중립 마을이 될 사업 대상지는 고색역을 중심으로 반경 2㎞ 내외 9㎢ 구역이다. 수원의 서부권에 위치한 고색동 일대는 1만9천여세대 4만여명이 거주하는 지역으로, 다양한 형태의 건축물들이 혼재한 곳이다. 즉 건축물별 적합한 에너지 사용과 절약의 방법을 찾아 적용해 볼 수 있는 최적지라는 의미다. 공공기관 청사가 모여 있는 행정타운과 업무시설과 상업시설이 밀집한 상업지구, 아파트 등 공동주택과 오래된 단독 및 다가구·연립주택 등에 각각 적용할 수 있는 인프라를 구축할 수 있다.

특히 기후 대응에 취약한 주민을 위한 에너지 정책이 필요한 곳이기도 하다. 기후변화에 대응하는 첨단 시스템 등이 갖춰지지 않은 노후 저층 주거단지가 많아 단열 성능이 미비한 30년 이상 구축이 기후변화에 대응할 수 있는 방안들이 추진된다. 특히 탄소중립 생활을 지원하는 앱 개발 등으로 시민들의 탄소중립 생활을 유도하는 것도 효과적이다.

수원시는 지역 내 탄소배출의 절반 이상이 건물 부문(2018년 기준 가정 23%, 상업 26%, 공공 4%)에서 이뤄지고 있는 만큼 다양한 건축물에 맞춤형 시스템이 갖춰지면 탄소중립 표준 모델을 제시할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또 이 사업으로 지역의 고질적인 주차난과 대중교통 여건을 개선해 도로수송에서 발생하는 온실가스도 감축한다는 계획이다. 여기에 황구지천과 서호천 등의 자연환경을 활용해 탄소흡수 및 생태복원 축을 만들고, 시민의 참여를 밑거름으로 그린도시의 거점을 만든다는 구상이다.

이에 따라 탄소중립 그린도시 사업은 고색동 일대 건물의 에너지를 50% 이상 저감하고, 그린수소 및 태양광 에너지를 생산하고, 대중교통 이용률을 높이고, 시민들의 탄소중립 라이프를 실천하는 노력으로 해당 지역에서 발생하는 온실가스의 29.5%를 감축하는 것을 목표로 한다.

◇행정타운 중심 에너지 자립 기반 마련

탄소중립 그린도시 사업의 핵심 전략은 행정타운을 중심으로 한 에너지 전환이다.

먼저 수원시는 권선구 행정타운 일대 공공건물에 에너지관리시스템을 도입해 최적의 에너지 관리 모델을 구축하고, 단열을 강화하는 등 에너지 효율을 높인다. 이른바 '플러스 에너지 행정타운'이다. 권선구청, 권선구보건소, 경찰서, 학교 등 15개 공공건물은 효율적인 에너지 관리를 넘어 태양광을 이용한 발전기지 역할도 하게 된다. 옥상과 옥외주차장 등에 태양광 발전시설을 설치해 총 2000㎾ 규모의 발전 능력을 갖춘 에너지 공급기지로 활용한다. 또 탄소중립 그린도시 관제센터를 만들어 사업대상지의 전체적인 탄소발생을 모니터링하고 관리한다.

행정타운의 탄소중립을 위한 인프라는 인근 주민 거주지역으로 확대된다. 5년간 500가구의 옥상과 베란다에 태양광 발전시설을 설치하고, 아파트와 연립주택 1300가구에 태양광 발전 설치를 지원한다. 연계사업으로 오래된 단독주택과 상가, 산업단지 건물에 에너지관리 시스템을 도입하고, 에너지 효율 개선사업이 병행돼 고색동은 '에너지 자립마을'로 거듭나게 된다.

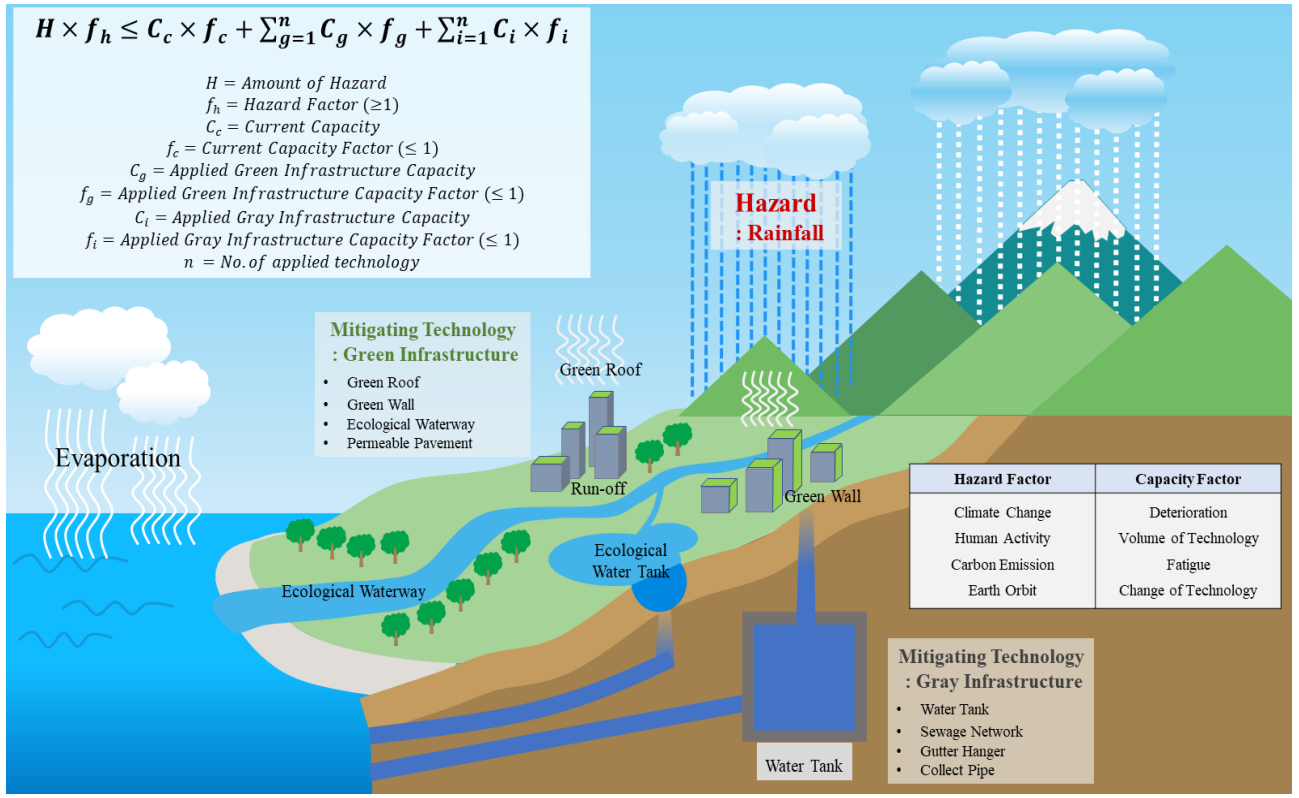
특히 이 지역은 그린수소를 중심으로 한 탄소중립 모빌리티의 시험대 역할도 하게 된다. 수원시 음식물자원화시설에서 발생하는 음폐수를 전기화학

→ 또한, 기후변화 리스크를 줄이기 위한 스마트시티와 탄소중립 실천 도시로 자리잡고 있음

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

재난재해 및 기후변화 리스크를 평가하기 위한 정량적 방법론? HCFD 모델



$$H \times f_h \le C_c \times f_c + \sum_{g=1}^{n} C_g \times f_g + \sum_{i=1}^{n} C_i \times f_i$$

$H = Amount\ of\ Hazard$
$f_h = Hazard\ Factor\ (\ge 1)$
$C_c = Current\ Capacity$
$f_c = Current\ Capacity\ Factor\ (\le 1)$
$C_g = Applied\ Green\ Infrastructure\ Capacity$
$f_g = Applied\ Green\ Infrastructure\ Capacity\ Factor\ (\le 1)$
$C_i = Applied\ Gray\ Infrastructure\ Capacity$
$f_i = Applied\ Gray\ Infrastructure\ Capacity\ Factor\ (\le 1)$
$n = No.of\ applied\ technology$

- 도시의 재난재해를 평가 및 저감하기 위한 종합적 진단모델
- 의사결정자가 사용할 수 있을 정도의 수준으로 개발되는 생태/근거 기반형 재난재해 적응 평가 방법론

도시의 용량 평가
- 강우 지속 시간에 따른 용량 산정
- 불투수면적, 파이프 등 도시의 인프라 종합적 고려
- 극한 강우에 대비하는 안전계수 개발

리스크 식별 및 분석

그레이 인프라 설계
- 전문가 설문 기반의 취약성 평가 및 그레이 인프라 배치 설계
- 그레이 인프라 단일 기술 설계
- 초기수위 등 용량 관련 안전계수 개발

리스크 저감 (1)

그린 인프라 설계
- 산업 개발형 그린인프라 개발
- 길 중심형 그린인프라 개발
- 주거 중심형 그린인프라 개발
- 포화도 등을 고려한 안전계수 개발

리스크 저감 (2)

인프라 상호작용 분석 & 의사결정형 모델 개발
- 두 가지 인프라의 상호작용 분석
- 의사결정자가 사용할 수 있는 진단 및 평가모델 제공

리스크 평가 및 수용

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

재난재해 및 기후변화 리스크를 평가하기 위한 정량적 방법론? HCFD 모델

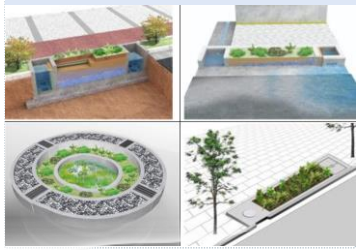
재난진단모델 정밀화 + 수문자료 분석

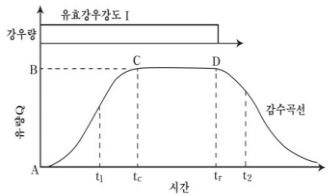
집중호우 취약지역 유형 분류

공간 특성 | 지형 특성 | 범람 해석

취약지역 특성별 유형 분류

취약지역 유형별 적용기술 도출





집중호우
재난진단 지수 추가

기존 모델
대응요소 정밀화

첨두 홍수량 및 유출수문곡선 산정

HCFD요소 정립 및 정밀화

유형별 도시침수 저감기술
적용표준 우선순위 제시

Test-bed
취약성 도출

도시침수 저감기술
입지선정기법 개발

세부내용

HCFD모델의 정량적 진단 검증

입지선정 기법 적용

HCFD모델 실증자료 적용

변수요인
추가 및 보정

수문자료 분석

입지선정기법 정밀화

도시 생태계 기반 집중호우 취약성 정량적 진단모델 (E-HCFD) 도출

E-HCFD 진단모델 정립

유형별 침수피해 저감기법 체계화

표준화된 집중호우 진단 모델 도출

지자체 적용 가능한 E-HCFD 공법 제시

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

HCFD 모델의 적용 가능범위? 기후변화로 기인하는 모든 재난재해의 적응

폭염 도시 열섬

산사태

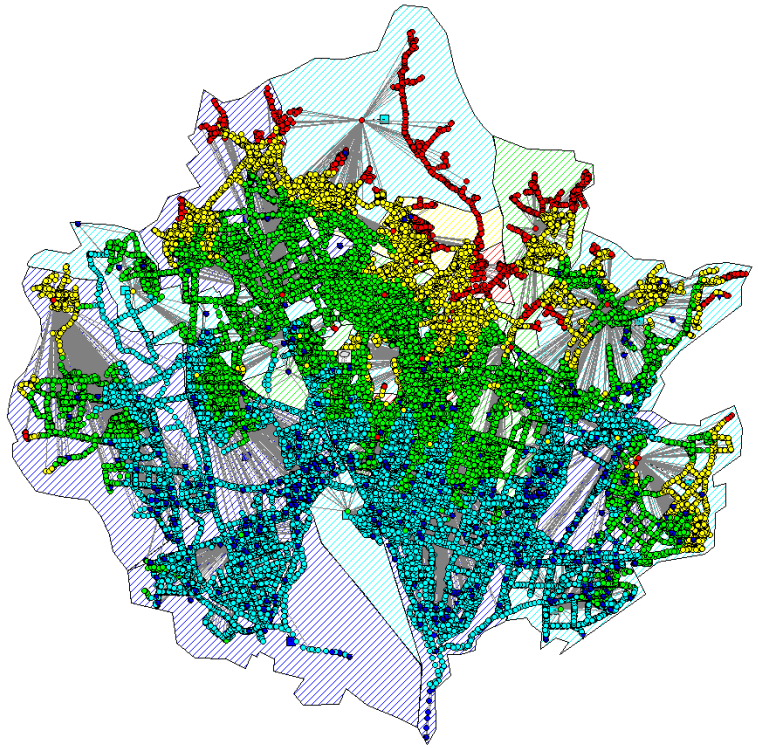
산불

도시 홍수

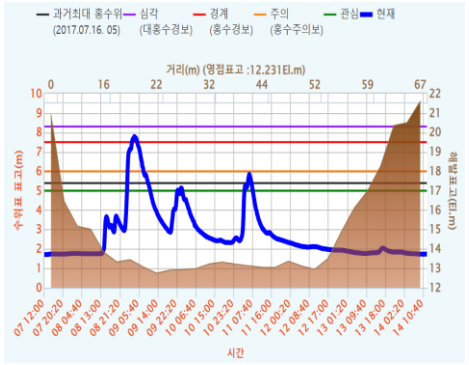
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

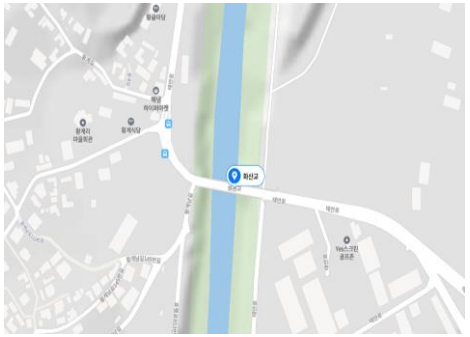
수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 평가



수원시 장안구 EPA SWMM 파일



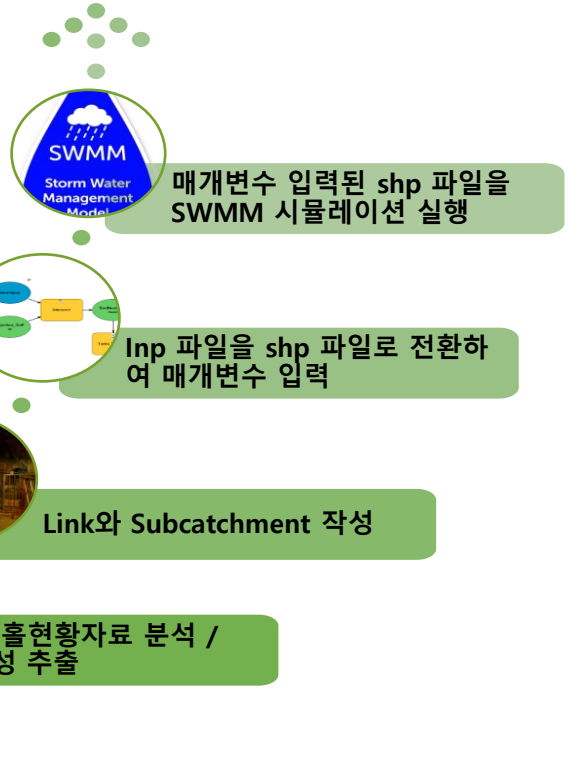
2022 화산교 홍수 및 수위 데이터



모델 검증 데이터 : 화산교 수위 데이터

Pipe Info				Outfall Info	Manhole	
no. of Pipe	length of Pipe	Type of Pipe	Diameter of Pipe	No. of Outfalls	No. of Manhole	Maximum Depth of Manhole
40,281	10,675 km	Circle or Rectangle	Various	336	39,197	Various

EPA SWMM 수원시 전역의 모델 제작

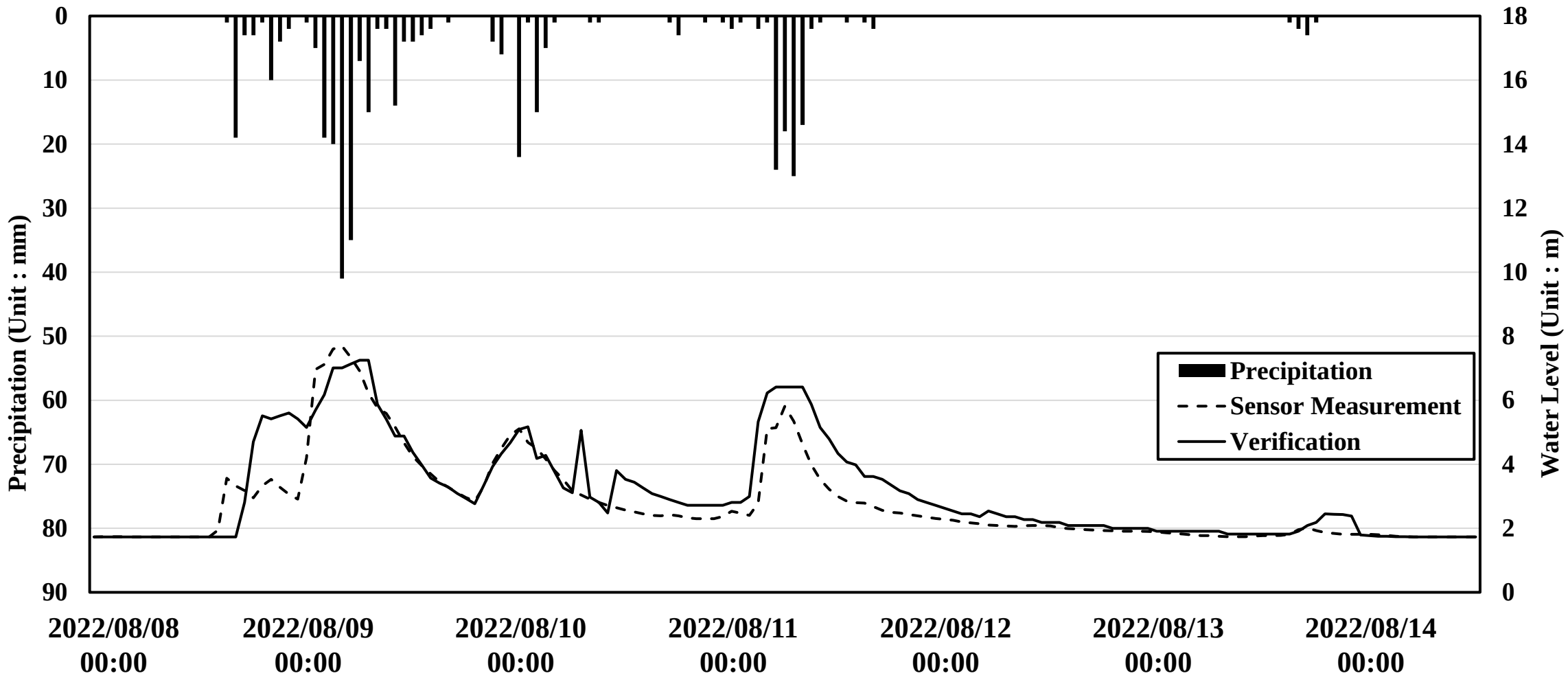


- 하수관망도, 유역의 크기, 경사도, 불투수면적 등을 고려하여 총 23개의 소유역을 구분
- 실제 물리적 모델을 제작하고 시뮬레이션하여 리스크를 최소화

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

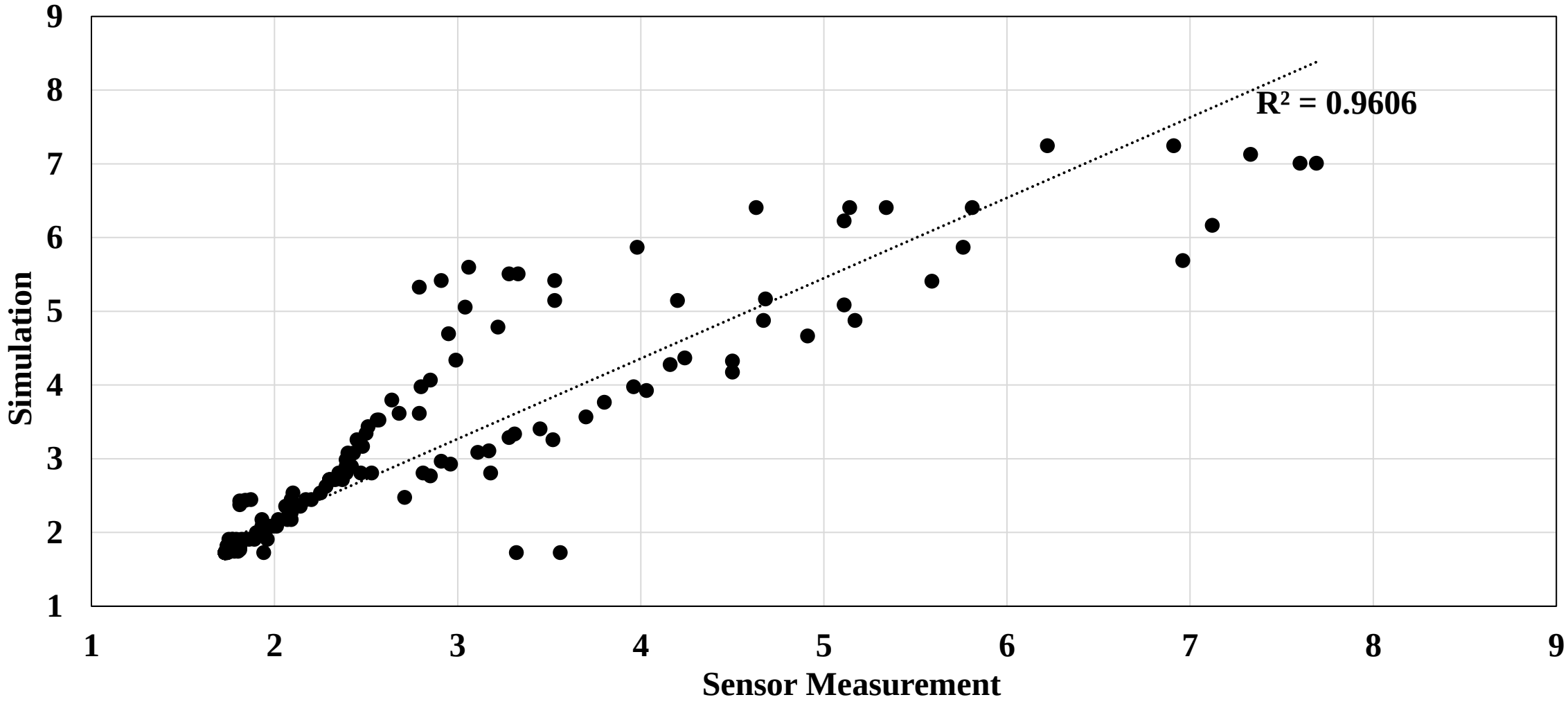
수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 평가



의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 평가



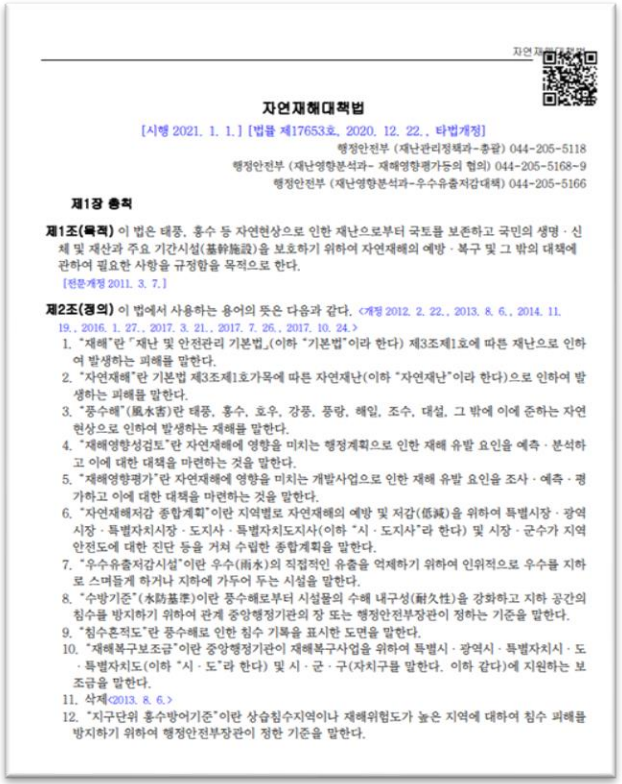
- 물리적 모델을 기후변화 리스크 의사결정에 사용하기 위해서는 보다 높은 수준의 정확도가 필요함

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 평가

- 자연대책법 (2020년 12월 22일 타법개정); 하수도정비 기본계획 보고서
- [하수도 설계 빈도는 10-30년 빈도, 법과 기본계획 보고서상 평가 지속시간은 3시간]
- 기후변화 시나리오 등 불확실성을 포함하는 대규모 강수에 대응할 수 있는 리스크를 평가함



자연재해대책법

[시행 2021. 1. 1.] [법률 제17653호, 2020. 12. 22., 타법개정]

행정안전부 (재난관리정책과-총괄) 044-205-5118
행정안전부 (재난영향분석과- 재해영향평가등의 협의) 044-205-5168~9
행정안전부 (재난영향분석과-우수유출저감대책) 044-205-5166

제1장 총칙

제1조(목적) 이 법은 태풍, 홍수 등 자연현상으로 인한 재난으로부터 국토를 보존하고 국민의 생명·신체 및 재산과 주요 기간시설(基幹施設)을 보호하기 위하여 자연재해의 예방·복구 및 그 밖의 대책에 관하여 필요한 사항을 규정함을 목적으로 한다.
[전문개정 2011. 3. 7.]

제2조(정의) 이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다. <개정 2012. 2. 22., 2013. 8. 6., 2014. 11. 19., 2016. 1. 27., 2017. 3. 21., 2017. 7. 26., 2017. 10. 24.>

1. "재해"란 "재난 및 안전관리 기본법」(이하 "기본법"이라 한다) 제3조제1호에 따른 재난으로 인하여 발생하는 피해를 말한다.
2. "자연재해"란 기본법 제3조제1호가목에 따른 자연재난(이하 "자연재난"이라 한다)으로 인하여 발생하는 피해를 말한다.
3. "풍수해"(風水害)란 태풍, 홍수, 호우, 강풍, 풍랑, 해일, 조수, 대설, 그 밖에 이에 준하는 자연현상으로 인하여 발생하는 재해를 말한다.
4. "재해영향성검토"란 자연재해에 영향을 미치는 행정계획으로 인한 재해 유발 요인을 예측·분석하고 이에 대한 대책을 마련하는 것을 말한다.
5. "재해영향평가"란 자연재해에 영향을 미치는 개발사업으로 인한 재해 유발 요인을 조사·예측·평가하고 이에 대한 대책을 마련하는 것을 말한다.
6. "자연재해저감 종합계획"이란 지역별로 자연재해의 예방 및 저감(低減)을 위하여 특별시장·광역시장·특별자치시장·도지사·특별자치도지사(이하 "시·도지사"라 한다) 및 시장·군수가 지역 안전도에 대한 진단 등을 거쳐 수립한 종합계획을 말한다.
7. "우수유출저감시설"이란 우수(雨水)의 직접적인 유출을 억제하기 위하여 인위적으로 우수를 지하로 스며들게 하거나 지하에 가두어 두는 시설을 말한다.
8. "수방기준"(水防基準)이란 풍수해로부터 시설물의 수해 내구성(耐久性)을 강화하고 지하 공간의 침수를 방지하기 위하여 관계 중앙행정기관의 장 또는 행정안전부장관이 정하는 기준을 말한다.
9. "침수흔적도"란 풍수해로 인한 침수 기록을 표시한 도면을 말한다.
10. "재해복구보조금"이란 중앙행정기관이 재해복구사업을 위하여 특별시·광역시·특별자치시·도·특별자치도(이하 "시·도"라 한다) 및 시·군·구(자치구를 말한다. 이하 같다)에 지원하는 보조금을 말한다.
11. 삭제<2013. 8. 6.>
12. "지구단위 홍수방어기준"이란 상습침수지역이나 재해위험도가 높은 지역에 대하여 침수 피해를 방지하기 위하여 행정안전부장관이 정한 기준을 말한다.

제 II 권

Hi Seoul
SOUL OF ASIA

서울특별시
하수도정비기본계획(변경)
보 고 서
2009. 6.

서울특별시

환경부 생활하수과 - 3890 ('11.11.24)호

하수도정비기본계획수립지침

2011. 11.

환 경 부
(http://www.me.go.kr)

ISBN 978-89-954715-8-6

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 과학적 근거 -

Korean Climate Change Assessment Report 2020

기상청
Korea Meteorological Administration

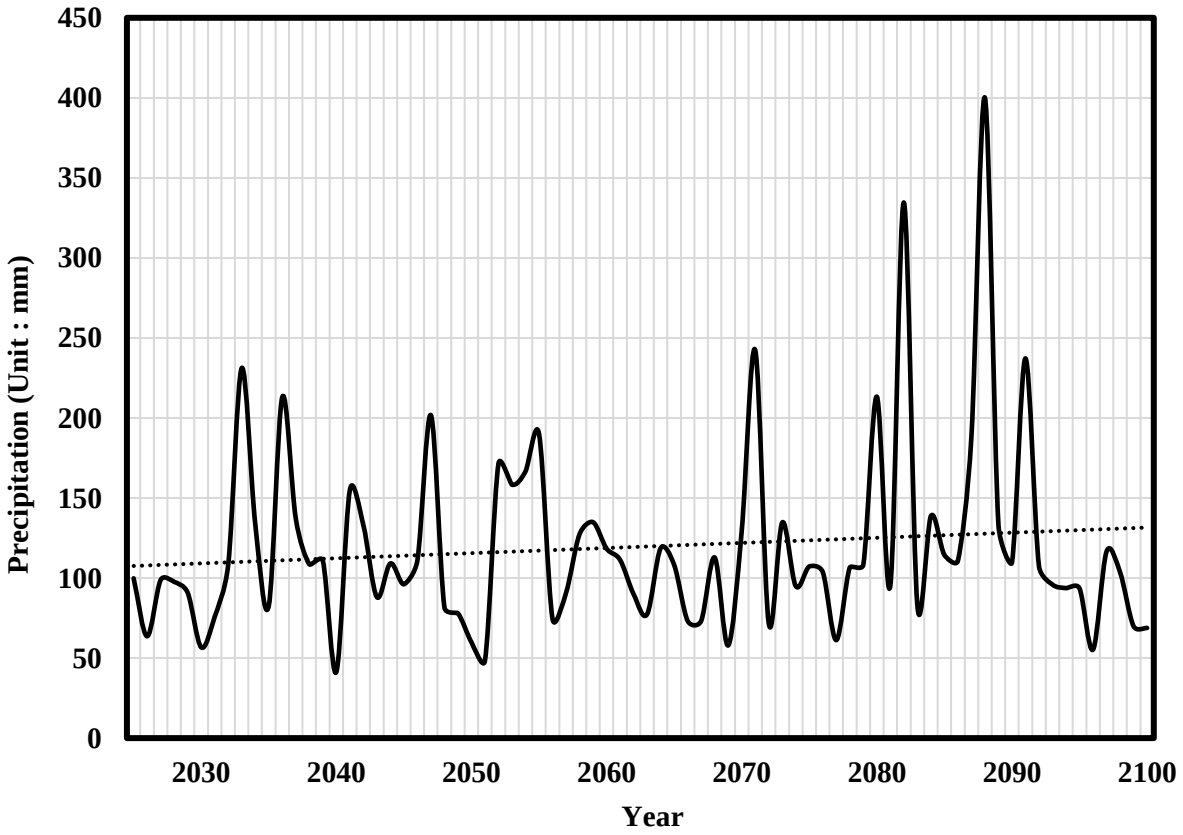
- 일 단위 최고 강수량은 법령 및 선행연구를 참고하여 강우 지속시간을 3시간(180 min)으로 설정하고 분석함

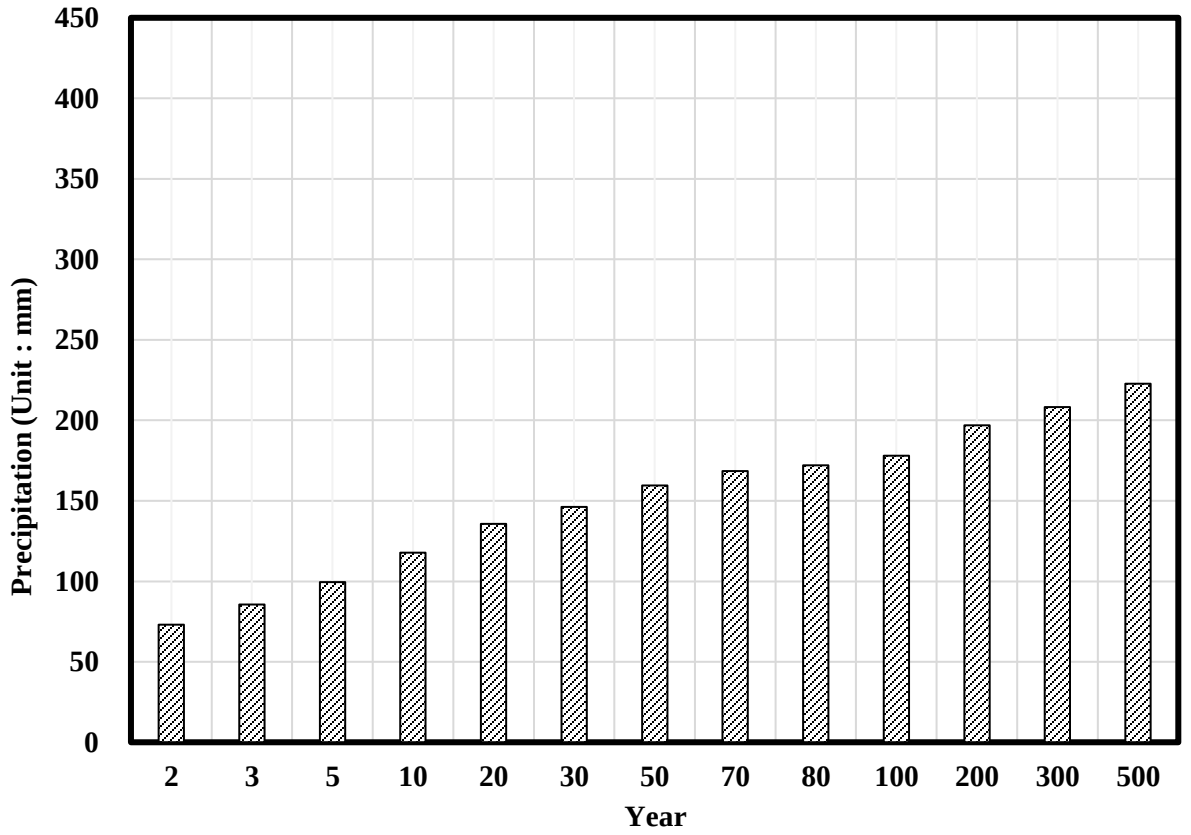
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 선정

- 기후의 리스크는 홍수의 강수량으로, 크게 확률 강우량과 기후변화 시나리오가 있음
- 본 연구에서는 기후변화시나리오 중 RCP 2.6을 채택하여 2100년까지의 일 강우량 중 최대 값을 사용함 (강우지속 시간 : 3시간)
- 확률 강우량은 500년 빈도에서도 220 mm 정도의 강수량이 올 것으로 예측하지만, 기후변화시나리오는 400 mm 임
- 강수량을 더 높게 두고 평가를 할 수록 리스크의 적응할 수 있는 시설을 적극 적용할 수 있음



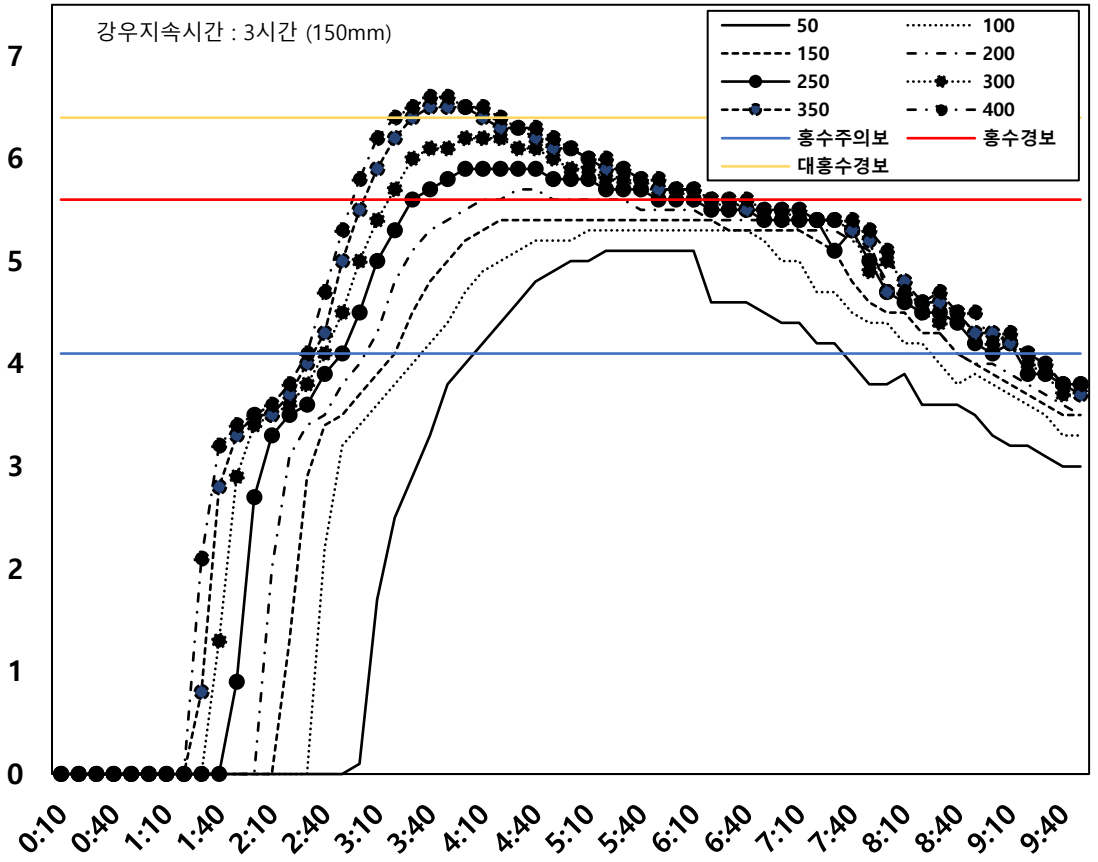


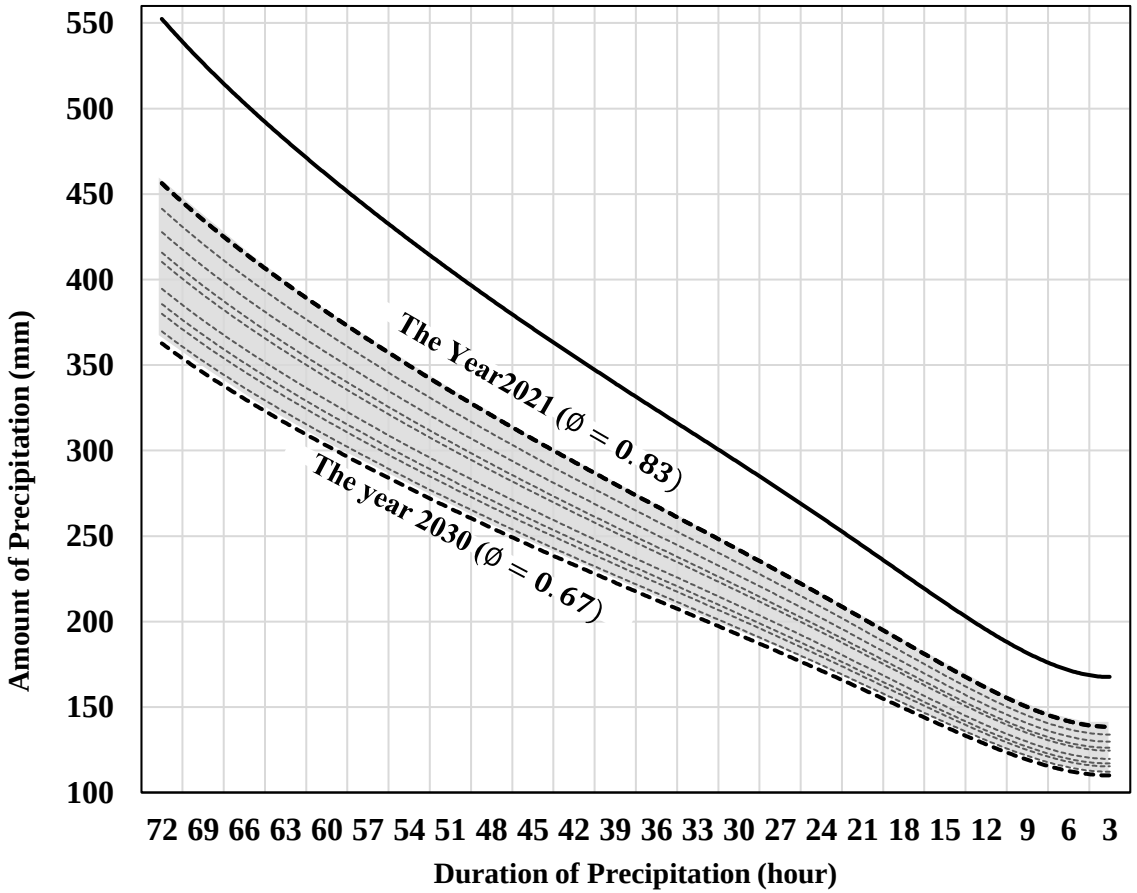
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 평가

- 수원시의 기후 리스크를 물리적 모델로 평가하기 위해서는 해당 도시의 시간당 강우량 (mm)의 용량을 파악해야 함





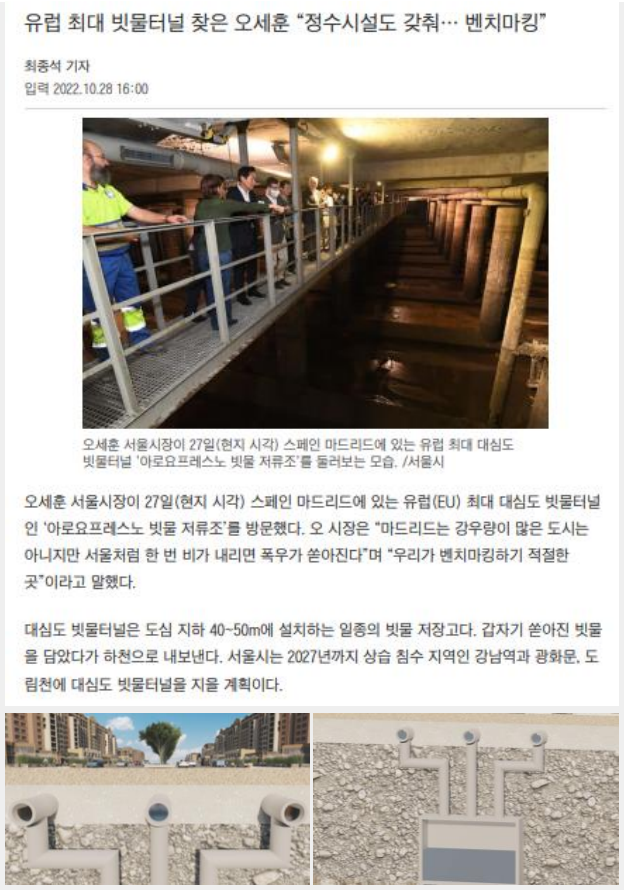
- 수원시 전역의 홍수 평가를 하였을 때 강우지속시간 3시간의 경우 150mm 이상이면 도시 홍수가 시작됨
- 더 보수적이고, 리스크에 대응할 수 있는 시설물들을 안전하게 설계하기 위해서 안전계수의 개념(0.67~0.83)을 둠. 약 137mm정도 강수 수용 가능

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계

- 리스크 적응을 위한 기술 선정 : 그레이 인프라와 그린 인프라
- 최근에는 맨홀, 하수도 등 기존의 관망 중심의 시설물이 아닌, 우수를 분산할 수 있는 그린 인프라가 주목 받고 있음



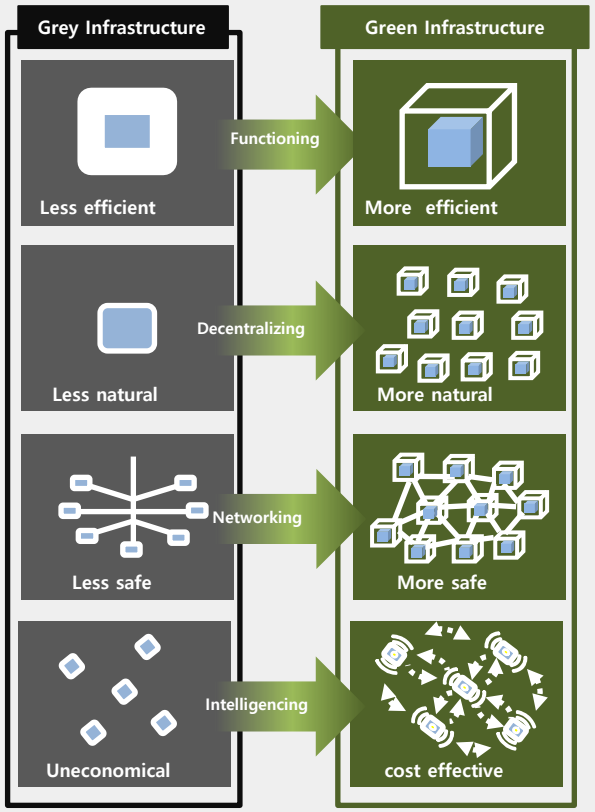
유럽 최대 빗물터널 찾은 오세훈 "정수시설도 갖춰… 벤치마킹"

최종석 기자
입력 2022.10.28 16:00

오세훈 서울시장이 27일(현지 시각) 스페인 마드리드에 있는 유럽 최대 대심도 빗물터널 '아로요프레스노 빗물 저류조'를 둘러보는 모습. /서울시

오세훈 서울시장이 27일(현지 시각) 스페인 마드리드에 있는 유럽(EU) 최대 대심도 빗물터널인 '아로요프레스노 빗물 저류조'를 방문했다. 오 시장은 "마드리드는 강우량이 많은 도시는 아니지만 서울처럼 한 번 비가 내리면 폭우가 쏟아진다"며 "우리가 벤치마킹하기 적절한 곳"이라고 말했다.

대심도 빗물터널은 도심 지하 40~50m에 설치하는 일종의 빗물 저장고다. 갑자기 쏟아진 빗물을 담았다가 하천으로 내보낸다. 서울시는 2027년까지 상습 침수 지역인 강남역과 광화문, 도림천에 대심도 빗물터널을 지을 계획이다.



'물고을' 수원시, '물 순환 도시' 본보기로 자리매김

다른 지자체·지방의회 빗물 재활용 시스템 등 벤치마킹 발길 이어져

권혁민 기자 | 2022.10.24. 15:31:45

경기 수원시는 빗물 재활용 시스템을 꾸준히 구축하며 '물순환 도시'를 조성중인 가운데 이를 벤치마킹하는 지자체·지방의회의 발길이 이어지고 있다고 24일 발표했다.

지난 7일 부산시 연제구의회 의원들이 광교 다산공원·광교물순환센터 등을 방문해 빗물저류조, 노면빗물분사시설, 빗물저금통, 물순환시스템 등을 둘러봤고, 11일에는 의왕시 공직자들이 방문해 빗물 재활용 시스템을 견학했다. 24일에는 청주시의회 환경위원회 소속 시의원들이 서호천 유역 비점오염저감시설을 찾았다.

▲청주시의회 환경위원회 소속 시의원들이 24일 수원시의 물순환시스템을 살펴보고 있는 모습. ⓒ수원시 제공

수원시는 2009년 '수원시 물순환 관리에 관한 조례'를 제정하며 '레인시티 수원'(물순환 체계 구축 사업)의 첫걸음을 뗐다. 레인시티 수원은 빗물과 같이 '흘러가는 물'을 재활용하는 시스템을 구축하는 것이다.

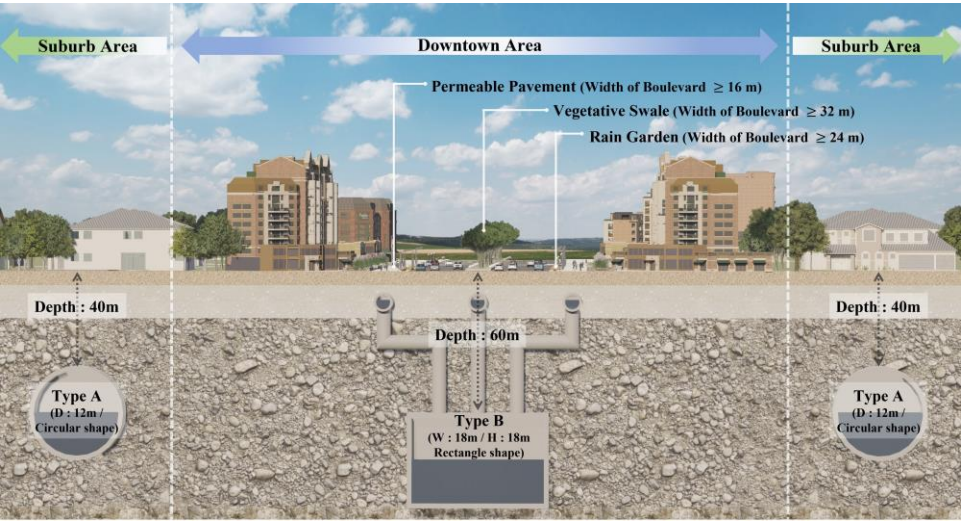
→ 미래의 기후 리스크를 적극적으로 줄이기 위해서는 그레이 인프라와 그린 인프라를 복합적으로 설계 해야 함

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계

- 어떤 공간에 어느 기술을 복합적으로 설계하는가에 따라서 폭우의 리스크를 효과적 또는 비효과적으로 줄일 수 있음

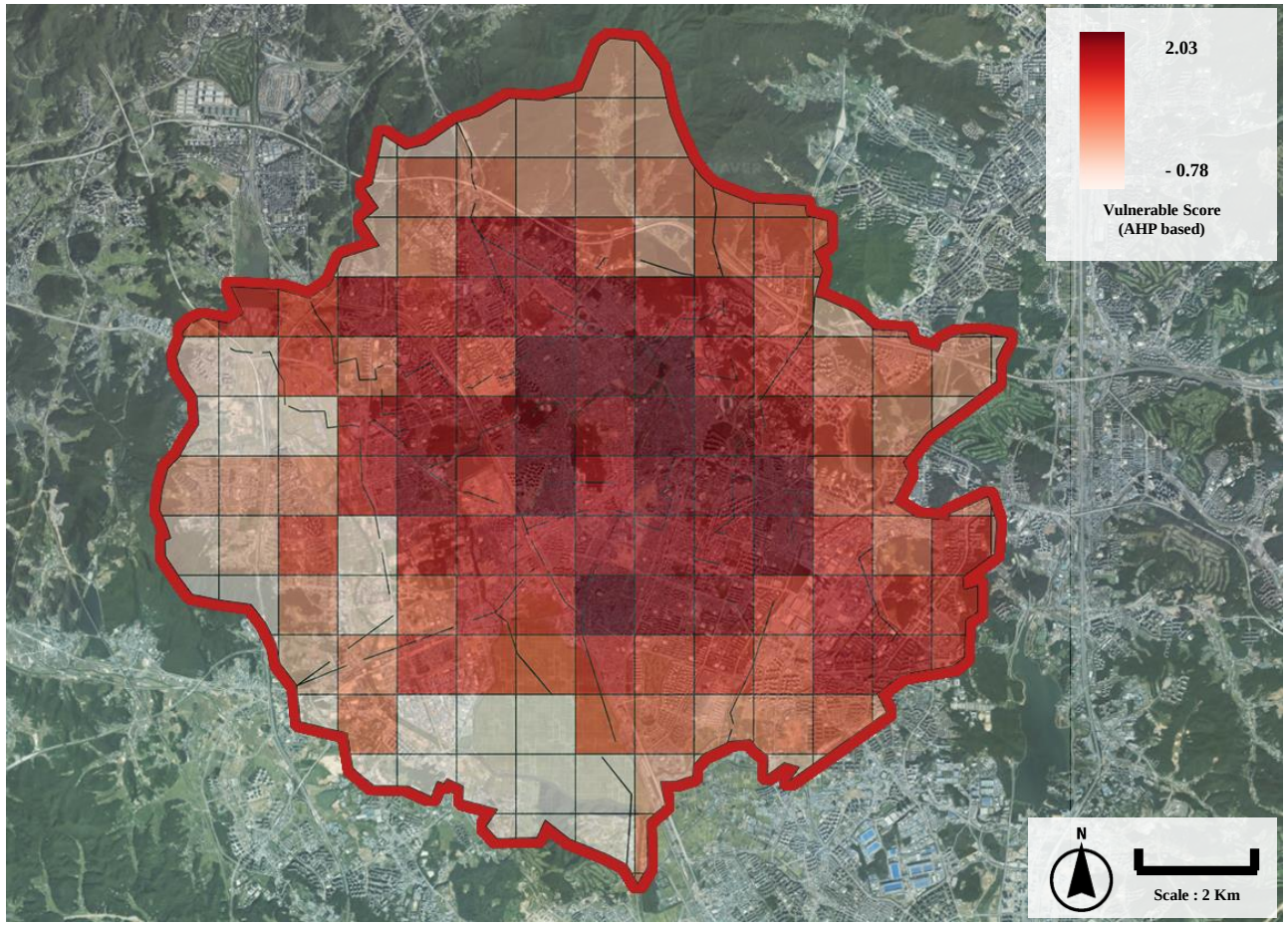


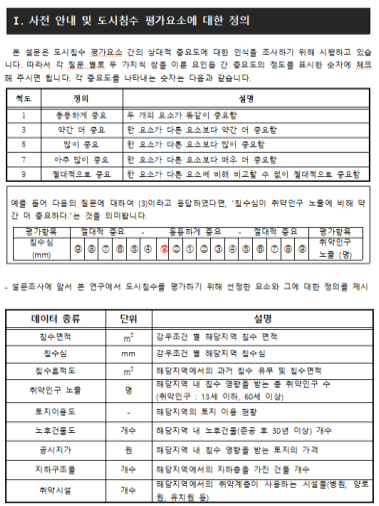
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그레이 인프라

- 그레이 인프라 설계에 앞서 정량적으로 어디가 더 취약한 곳인지를 평가할 필요가 있음
- AHP(Analytic Hierarchy Process)를 통해 최소의 비용으로 최대의 리스크 저감을 기대




Ⅰ. 사전 안내 및 도시침수 평가요소에 대한 정의

본 설문은 도시침수 평가요소 간의 상대적 중요도에 대한 인식을 조사하기 위해 시행하고 있습니다. 따라서 각 질문 별로 두 가지씩 쌍을 이룬 요인을 간 중요도의 정도를 표시한 숫자에 체크해 주시면 됩니다. 각 중요도를 나타내는 숫자는 다음과 같습니다.

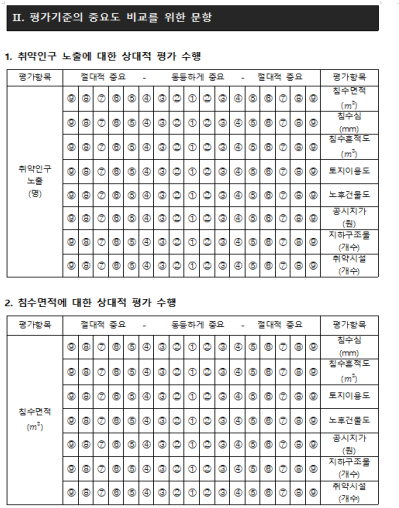
척도	정의	설명
1	동등하게 중요	두 개의 요소가 똑같이 중요함
3	약간 더 중요	한 요소가 다른 요소보다 약간 더 중요함
5	많이 중요	한 요소가 다른 요소보다 많이 중요함
7	아주 많이 중요	한 요소가 다른 요소보다 매우 더 중요함
9	절대적으로 중요	한 요소가 다른 요소에 비해 비교할 수 없이 절대적으로 중요함

예를 들어 다음의 질문에 대하여 (3)이라고 응답하였다면, '침수심이 취약인구 노출에 비해 약간 더 중요하다.'는 것을 의미합니다.

평가항목	절대적 중요	-	동등하게 중요	-	절대적 중요	평가항목
침수심 (mm)	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					취약인구 노출 (명)

- 설문조사에 앞서 본 연구에서 도시침수를 평가하기 위해 선정한 요소와 그에 대한 정의를 제시

데이터 종류	단위	설명
침수면적	m^2	강우조건 별 해당지역 침수 면적
침수심	mm	강우조건 별 해당지역 침수심
침수흔적도	m^2	해당지역에서의 과거 침수 유무 및 침수면적
취약인구 노출	명	해당지역 내 침수 영향을 받는 총 취약인구 수 (취약인구 : 13세 이하, 60세 이상)
토지이용도	-	해당지역의 토지 이용 현황
노후건물도	개수	해당지역 내 노후건물(준공 후 30년 이상) 개수
공시지가	원	해당지역 내 침수 영향을 받는 토지의 가격
지하구조물	개수	해당지역에서의 지하층을 가진 건물 개수
취약시설	개수	해당지역에서의 취약계층이 사용하는 시설물(병원, 양로원, 유치원 등)

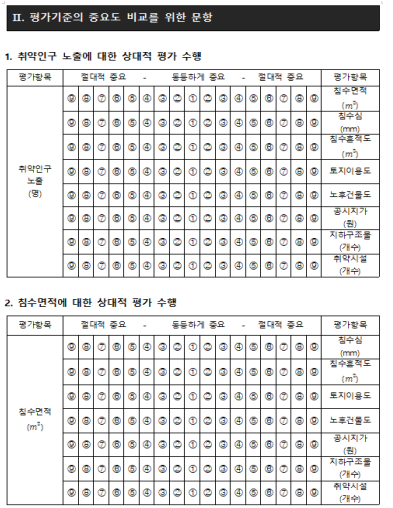

Ⅱ. 평가기준의 중요도 비교를 위한 문항

1. 취약인구 노출에 대한 상대적 평가 수행

평가항목	절대적 중요	-	동등하게 중요	-	절대적 중요	평가항목
취약인구 노출 (명)	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수면적 (m^2)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수심 (mm)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수흔적도 (m^2)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					토지이용도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					노후건물도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					공시지가 (원)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					지하구조물 (개수)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					취약시설 (개수)

2. 침수면적에 대한 상대적 평가 수행

평가항목	절대적 중요	-	동등하게 중요	-	절대적 중요	평가항목
침수면적 (m^2)	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수심 (mm)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수흔적도 (m^2)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					토지이용도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					노후건물도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					공시지가 (원)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					지하구조물 (개수)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					취약시설 (개수)


Ⅱ. 평가기준의 중요도 비교를 위한 문항

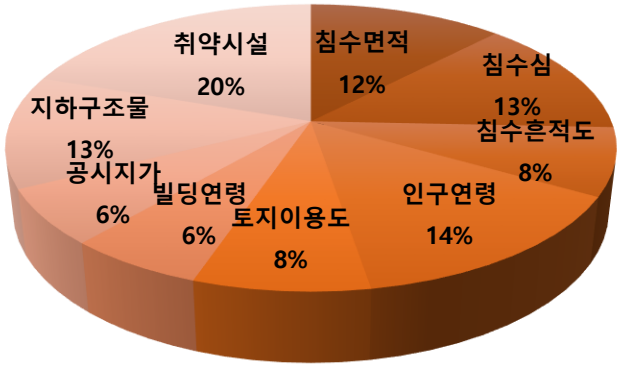
1. 취약인구 노출에 대한 상대적 평가 수행

평가항목	절대적 중요	-	동등하게 중요	-	절대적 중요	평가항목
취약인구 노출 (명)	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수면적 (m^2)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수심 (mm)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수흔적도 (m^2)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					토지이용도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					노후건물도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					공시지가 (원)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					지하구조물 (개수)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					취약시설 (개수)

2. 침수면적에 대한 상대적 평가 수행

평가항목	절대적 중요	-	동등하게 중요	-	절대적 중요	평가항목
침수면적 (m^2)	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수심 (mm)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					침수흔적도 (m^2)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					토지이용도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					노후건물도
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					공시지가 (원)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					지하구조물 (개수)
	⑨ ⑧ ⑦ ⑥ ⑤ ④ ③ ② ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨					취약시설 (개수)

- 침수면적
- 침수심
- 침수흔적도
- 인구연령
- 토지이용도
- 빌딩연령
- 공시지가
- 지하구조물
- 취약시설

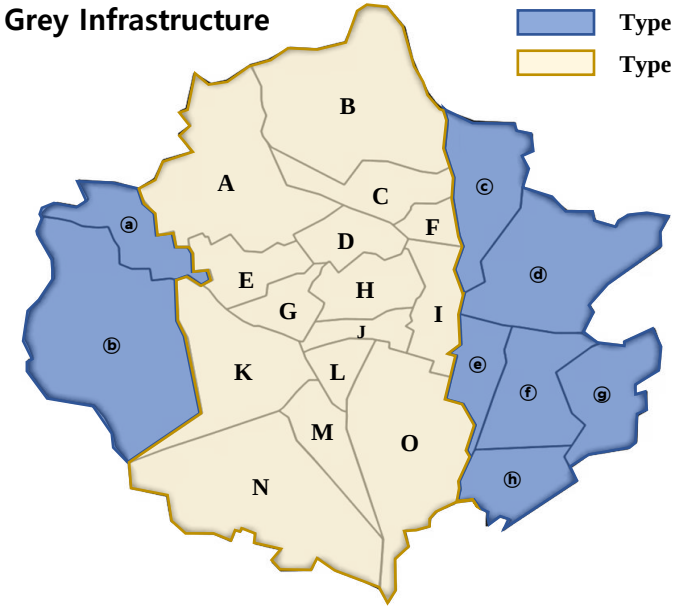


의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그레이 인프라

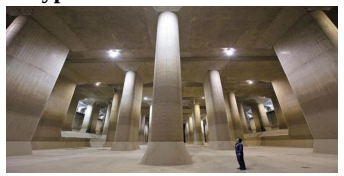
Plan of Grey Infrastructure



Type A

도쿄도 빗물 터널 (방수로)
상하폭 12 m, 원형 형태, 길이 4.5 km

Type B



도쿄 인근 사이타마현 빗물 터널 (방수로)
상하폭 18 m, 직사각형 형태, 길이 6.3 km

Safety Factor of Grey Infrastructure

Volume of Grey Infrastructure

Plan of Grey Infrastructure

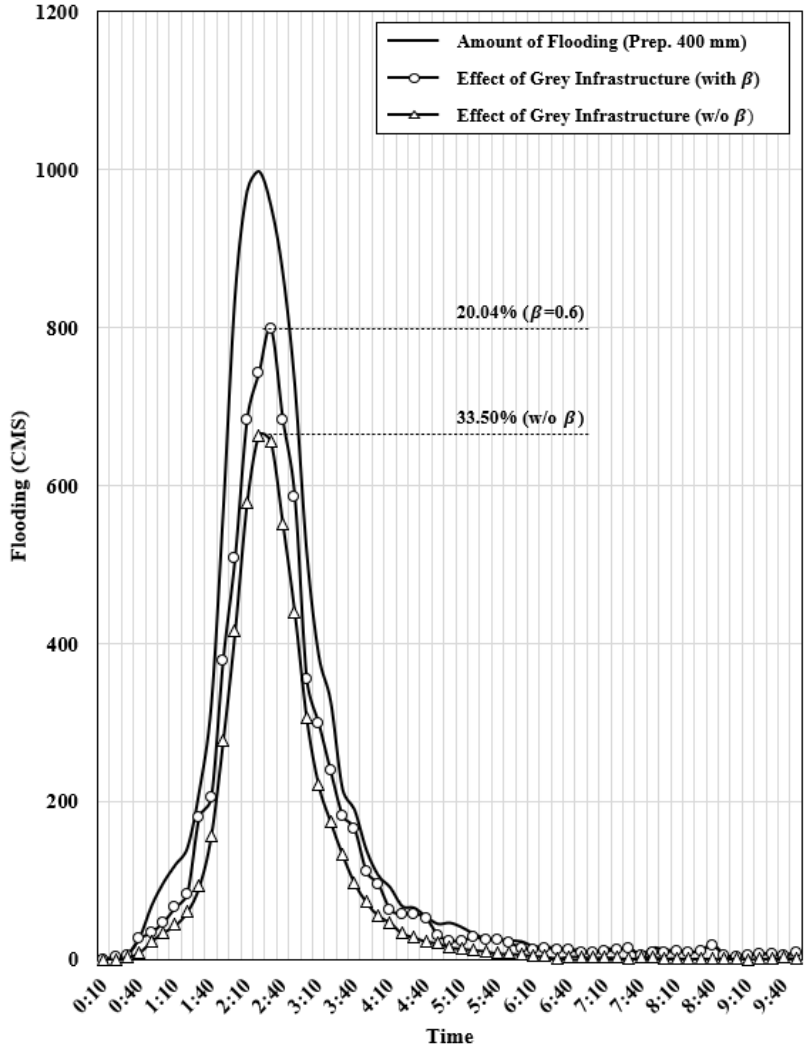
		Pipe Info					Manhole	
Type of Grey Infrastructure		no. of Pipe	length of Pipe	Type of Pipe	Diameter of Pipe	No. of Junction	No. of Manhole	Maximum Depth of Manhole
Type A	Sub a	6	2.80	Circle	12	1	6	40
	Sub b	17	6.69	Circle	12	1	16	40
	Sub c	10	4.26	Circle	12	1	9	40
	Sub d	9	3.85	Circle	12	1	8	40
	Sub e	9	2.87	Circle	12	1	8	40
	Sub f	9	3.41	Circle	12	1	8	40
	Sub g	8	4.45	Circle	12	1	7	40
	Sub h	7	3.11	Circle	12	1	6	40
Type B	Sub A	17	10.02	Rectangle	18	1	5	60
	Sub B	26	15.61	Rectangle	18	3	23	60
	Sub C	30	10.29	Rectangle	18	3	27	60
	Sub D	15	4.15	Rectangle	18	2	13	60
	Sub E	11	3.47	Rectangle	18	1	10	60
	Sub F	14	2.98	Rectangle	18	2	12	60
	Sub G	10	3.19	Rectangle	18	1	9	60
	Sub H	15	3.95	Rectangle	18	2	14	60
	Sub I	19	7.20	Rectangle	18	2	17	60
	Sub J	14	3.12	Rectangle	18	2	13	60
	Sub K	58	14.10	Rectangle	18	3	56	60
	Sub L	23	5.05	Rectangle	18	2	21	60
	Sub m	12	8.93	Rectangle	18	2	10	60
	Sub N	28	16.90	Rectangle	18	3	25	60
	Sub O	36	20.32	Rectangle	18	2	34	60

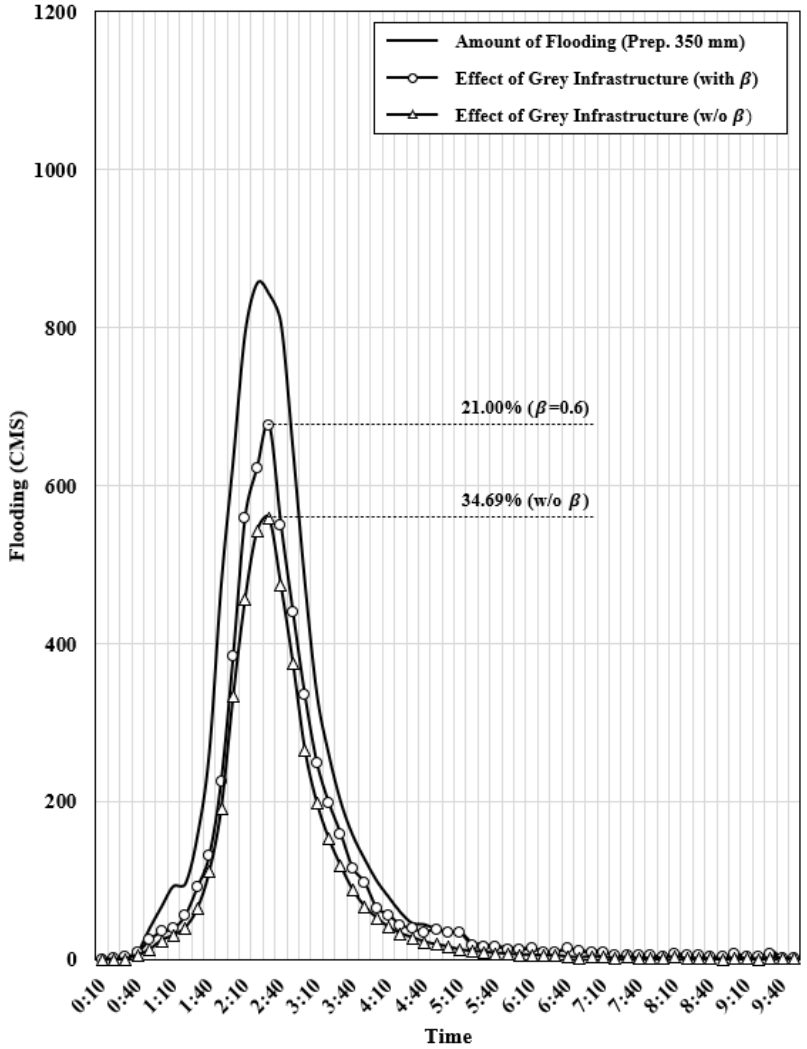
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그레이 인프라

- 2088년에는 강수가 최대 400 mm까지 내릴 것으로 판단되며, 이 때 그레이 인프라로 저감할 수 있는 홍수량은 20~33% 정도임



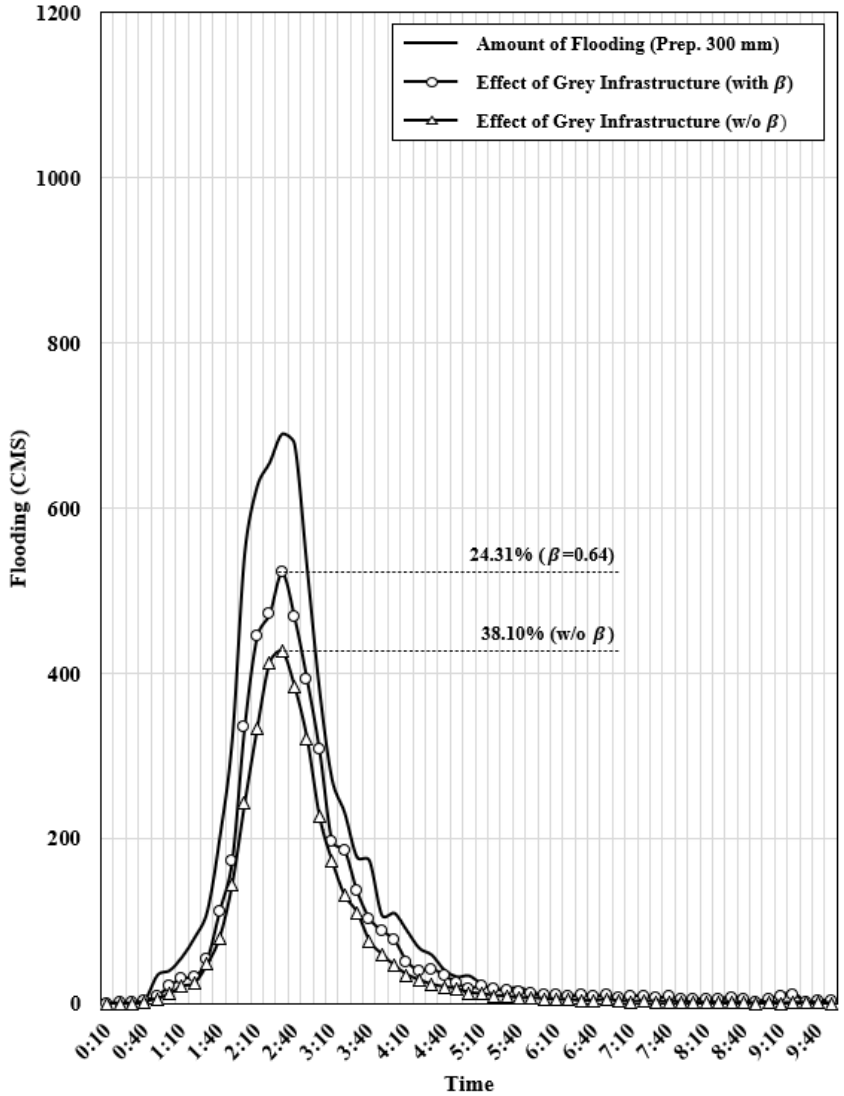


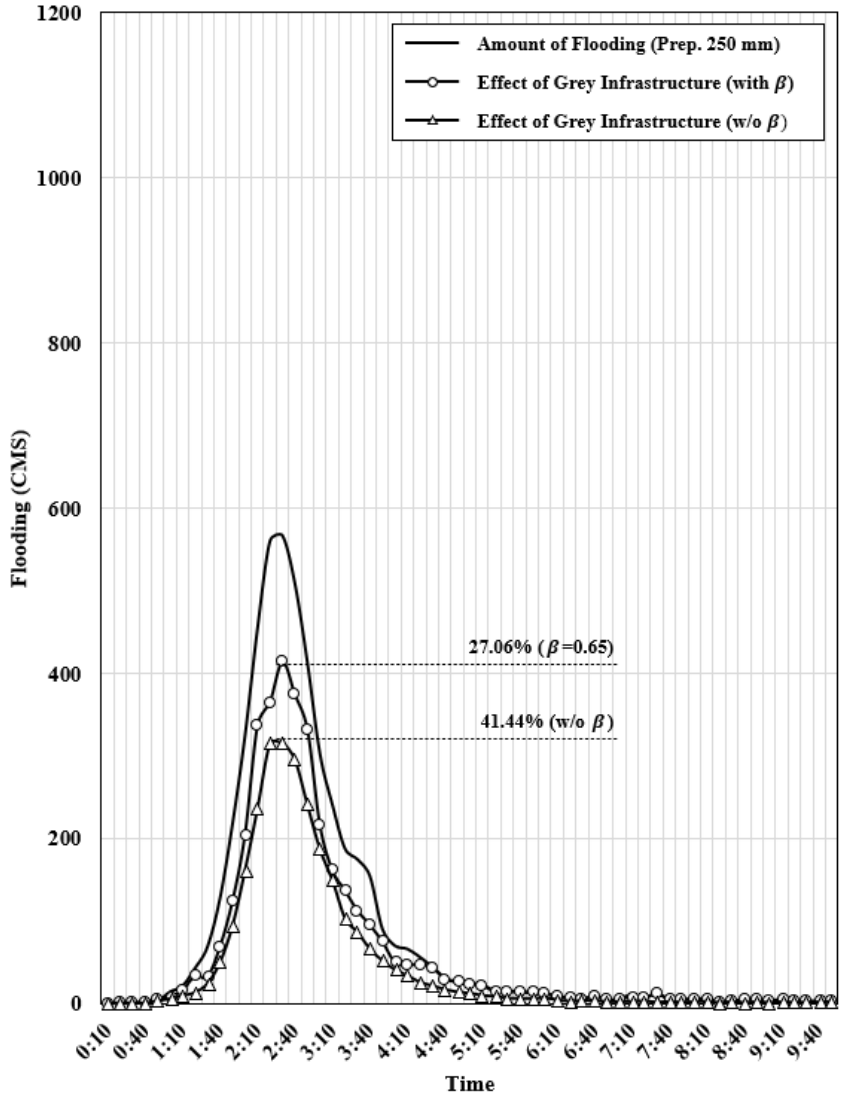
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그레이 인프라

β = Safety Factor of grey Infrastructure



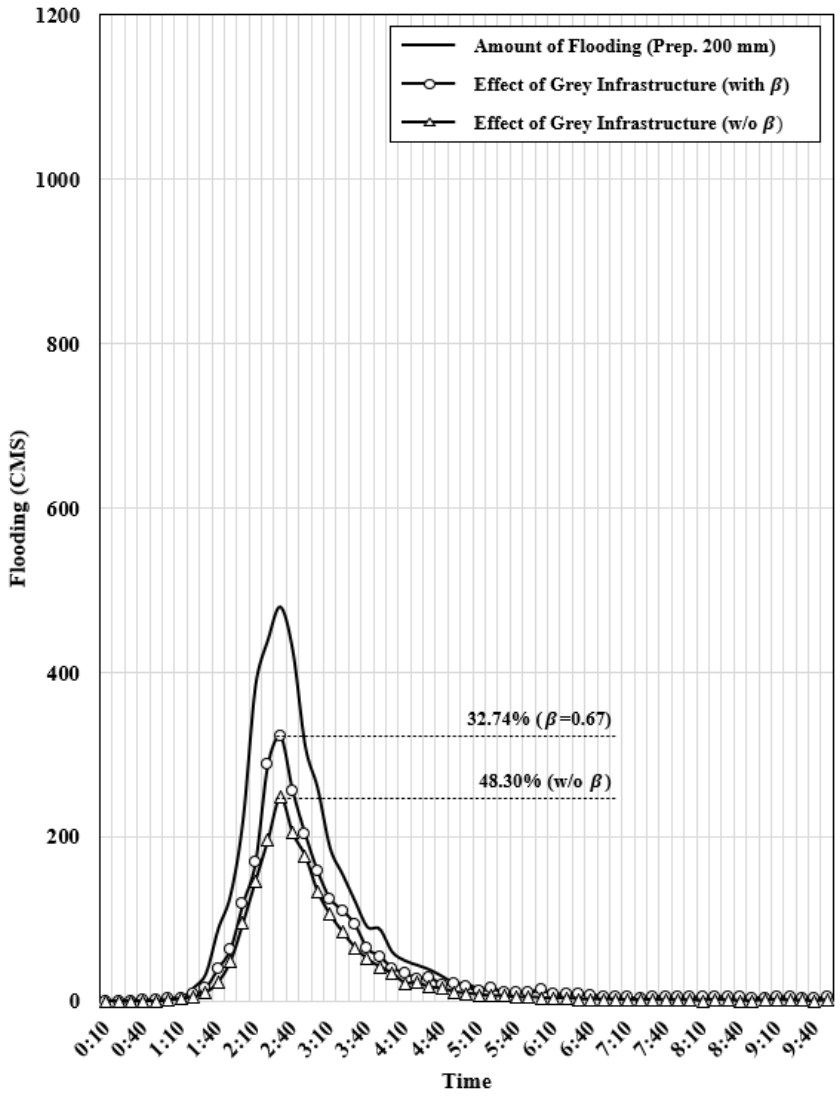


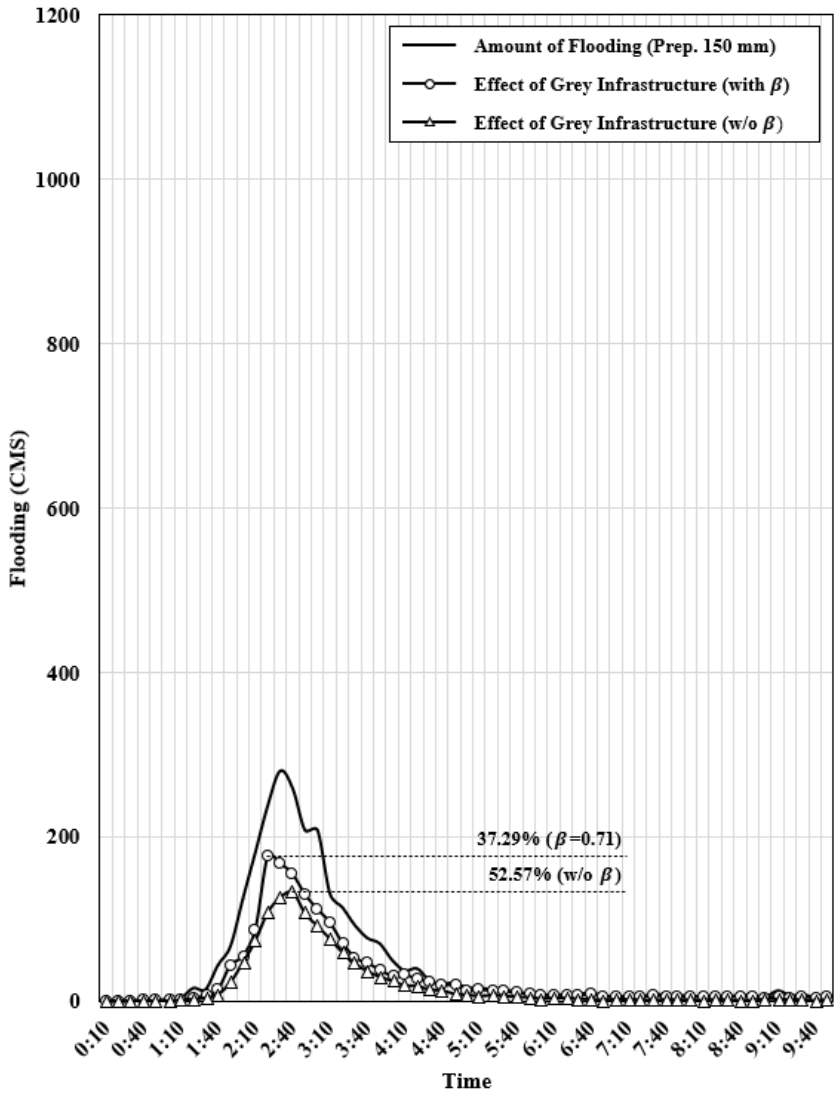
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그레이 인프라

β = *Safety Factor of grey Infrastructure*





의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

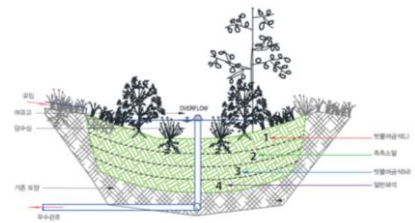
Plan of Green Infrastructure

Type of Green Infrastructure	Applied Location	Criteria	
Bio-retention Cell	Industrial Complex	Area of Industrial Complex x 0.1 (m²)	
Vegetative Swale	Median Vegetation	Length of Boulevard x 1 (m²)	Width of Boulevard >= 32 m
Rain Garden	Boulevard	Length of Boulevard x 0.5 (m²)	Width of Boulevard >= 24 m
Permeable Pavement	Sidewalk	Length of Boulevard x 1.5 (m²)	Width of Boulevard >= 16 m
Green Roof	Apartment	Area of Apartment x 0.1 (m²)	
Rain Barrel	House	Area of House x 0.05 (m²)	

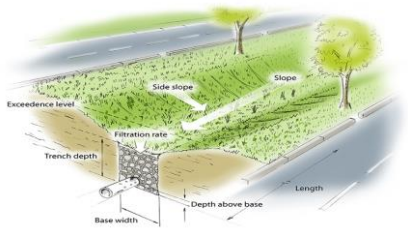
width of one lane : 4 m

Master Plan of Green Infrastructure

Bio-retention Cell

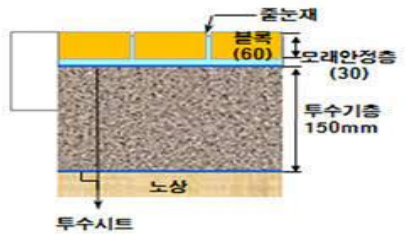


Vegetative Swale



Rain Garden

Permeable Pavement



Green Roof

Rain Barrel

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

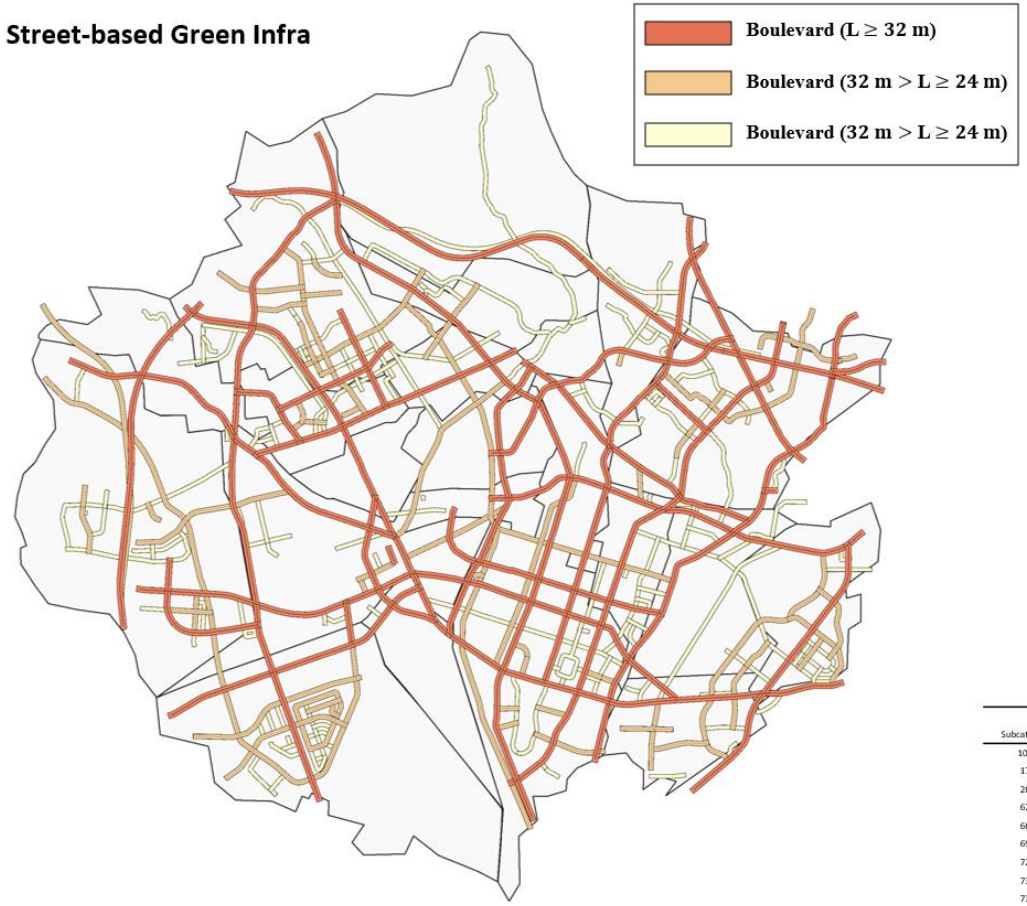
Area of Industrial Complex

Site	Area	Area of Green Infrastructure (Bio-retention Cell)	Subcatchment
ⓐ	120,000 m²	12,000 m²	Sub-8646
ⓑ	200,000 m²	20,000 m²	Sub-8646
ⓒ	1.4 km²	140,000 m²	Sub-6288
ⓓ	3.3 km²	330,000 m²	Sub-9844

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라



Street based Green Infrastructure			
Subcatchment	Area of PP	Area of Rain Garden	Area of Vegetative Swale
10603	101,691	28,644	41,430
1735	186,554	55,477	107,410
2628	213,624	65,049	97,884
6288	186,600	29,530	37,369
6669	76,545	23,662	47,324
6910	225,893	58,886	105,718
7295	230,961	72,966	53,441
7305	853,137	276,779	542,481
7354	427,454	135,394	270,569
7642	227,655	74,338	70,075
7949	99,788	29,922	57,882
8067	36,701	11,745	23,490
8646	541,433	169,525	317,709
8831	435,533	138,539	261,899
8923	164,678	54,398	92,560
8937	78,470	25,823	37,222
8954	179,210	58,837	111,289
8958	29,994	4,751	9,502
9140	83,840	26,227	39,474
9514	776,445	249,438	496,299
9678	184,262	55,141	101,347
9806	104,004	31,184	48,261
9844	195,029	54,727	99,996

	16m 이상 24m 미만		24m 이상 32m 미만			32m 이상			
Subcatchment	Road Length	Area of PP	Road Length	Area of PP	Area of Rain Garden	Road Length	Area of PP	Area of Rain Garden	Area of Vegetative Swale
10603	10,507	15,761	15,857	23,786	7,929	41,430	62,145	20,715	41,430
1735	13,416	20,123	3,544	5,316	1,772	107,410	161,115	53,705	107,410
2628	12,319	18,479	32,213	48,320	16,107	97,884	146,826	48,942	97,884
6288	65,339	98,009	21,692	32,538	10,846	37,369	56,053	18,684	37,369
6669	3,706	5,559	0	0	0	47,324	70,986	23,662	47,324
6910	32,823	49,235	12,055	18,083	6,028	105,718	158,576	52,859	105,718
7295	8,042	12,063	92,491	138,737	46,246	53,441	80,162	26,721	53,441
7305	15,200	22,801	11,076	16,615	5,538	542,481	813,721	271,240	542,481
7354	14,181	21,271	220	329	110	270,569	405,854	135,285	270,569
7642	3,095	4,643	78,600	117,900	39,300	70,075	105,113	35,038	70,075
7949	6,682	10,023	1,961	2,942	981	57,882	86,823	28,941	57,882
8067	977	1,466	0	0	0	23,490	35,235	11,745	23,490
8646	21,905	32,857	21,342	32,013	10,671	317,709	476,564	158,855	317,709
8831	13,278	19,917	15,178	22,767	7,589	261,899	392,849	130,950	261,899
8923	990	1,485	16,235	24,353	8,118	92,560	138,840	46,280	92,560
8937	667	1,001	14,424	21,636	7,212	37,222	55,833	18,611	37,222
8954	1,800	2,700	6,384	9,576	3,192	111,289	166,934	55,645	111,289
8958	10,494	15,741	0	0	0	9,502	14,253	4,751	9,502
9140	3,439	5,159	12,980	19,470	6,490	39,474	59,211	19,737	39,474
9514	18,755	28,133	2,576	3,864	1,288	496,299	744,449	248,150	496,299
9678	12,559	18,839	8,935	13,403	4,468	101,347	152,021	50,674	101,347
9806	6,968	10,452	14,107	21,160	7,053	48,261	72,392	24,131	48,261
9844	20,565	30,848	9,458	14,187	4,729	99,996	149,994	49,998	99,996

Vegetative Swale (식생분리대)

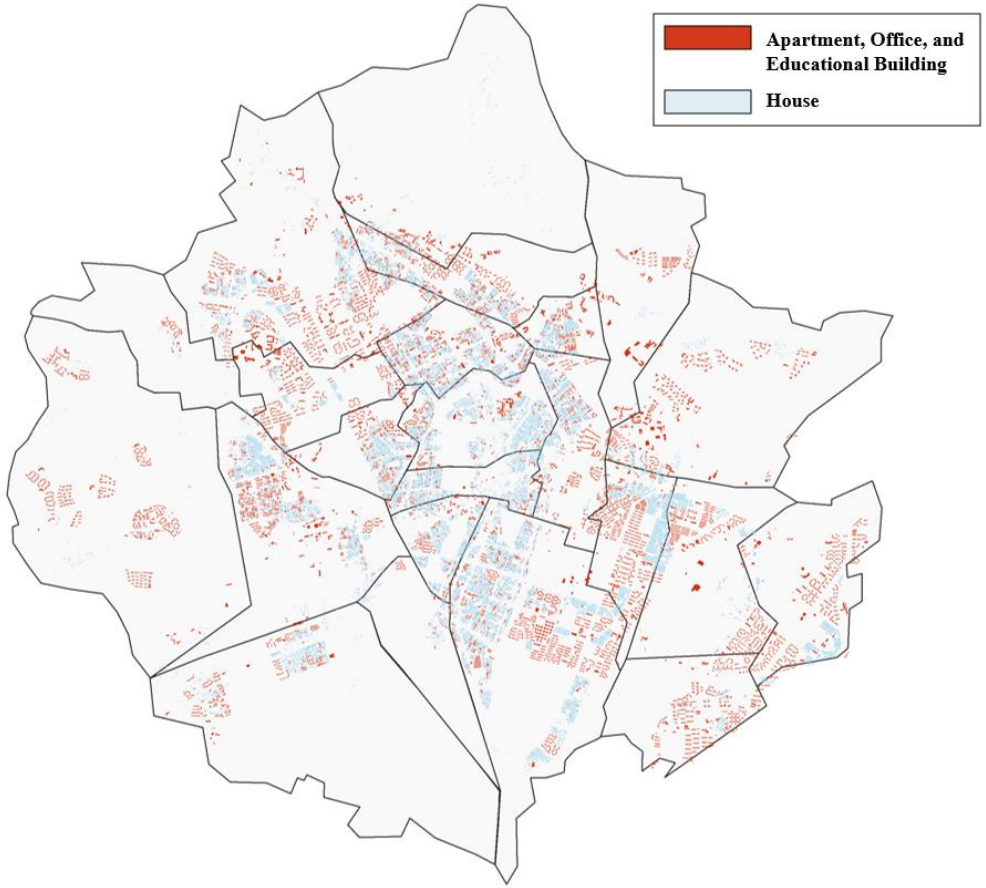
Rain Garden (식물재배화분)

Permeable Pavement (투수성포장)

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라



Plan of Green Roof – Apartment, Office, Educational Building

Subcatchment	Building Area	Area of Green Roof
10603	176,291	17,629
1735	201,257	20,126
2628	585,591	58,559
6288	108,186	10,819
6669	19,106	1,911
6910	257,190	25,719
7295	267,734	26,773
7305	231,206	23,121
7354	127,161	12,716
7642	29,228	2,923
7949	181,876	18,188
8067	107,587	10,759
8646	462,122	46,212
8831	177,774	17,777
8923	52,111	5,211
8937	109,137	10,914
8954	168,399	16,840
8958	77,937	7,794
9140	69,779	6,978
9514	77,503	7,750
9678	310,082	31,008
9806	184,009	18,401
9844	298,453	29,845

Plan of Rain Barrel - House

Subcatchment	Building Area
10,603	257,419
1,735	183,139
2,628	568,252
6,288	85,548
6,669	29,290
6,910	237,459
7,295	24,293
7,305	45,294
7,354	5,371
7,642	7,048
7,949	38,608
8,067	123,009
8,646	205,427
8,831	150,788
8,923	183,324
8,937	274,576
8,954	163,141
8,958	69,891
9,140	131,000
9,514	33,303
9,678	64,130
9,806	20,866
9,844	84,344

Green Roof (옥상녹화)

Rain Barrel (빗물통)

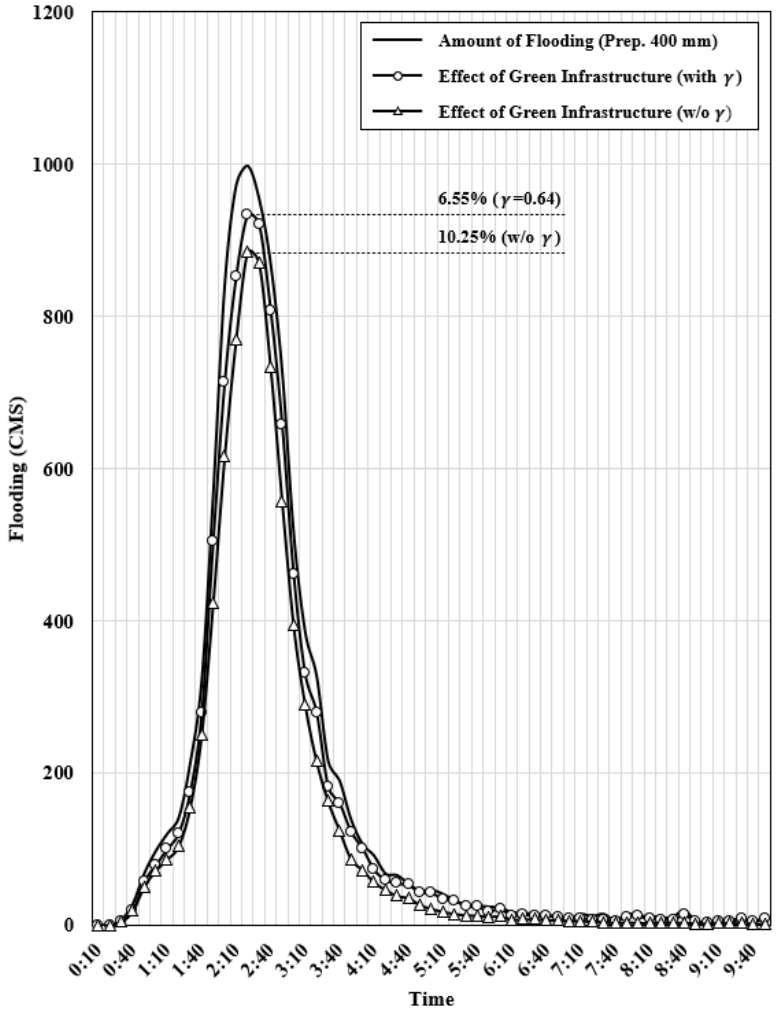
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

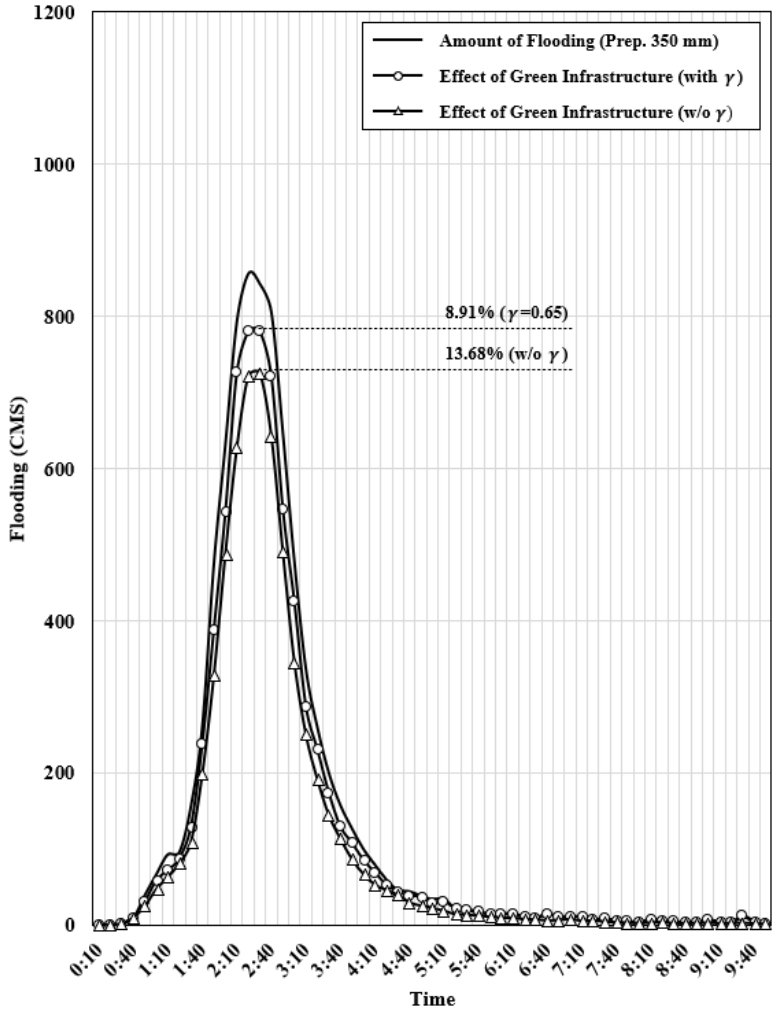
리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

- 2088년에는 강수가 최대 400 mm까지 내릴 것으로 판단되며, 이 때 그레이 인프라로 저감할 수 있는 홍수량은 6~10% 정도임

γ = Safety Factor of green Infrastructure



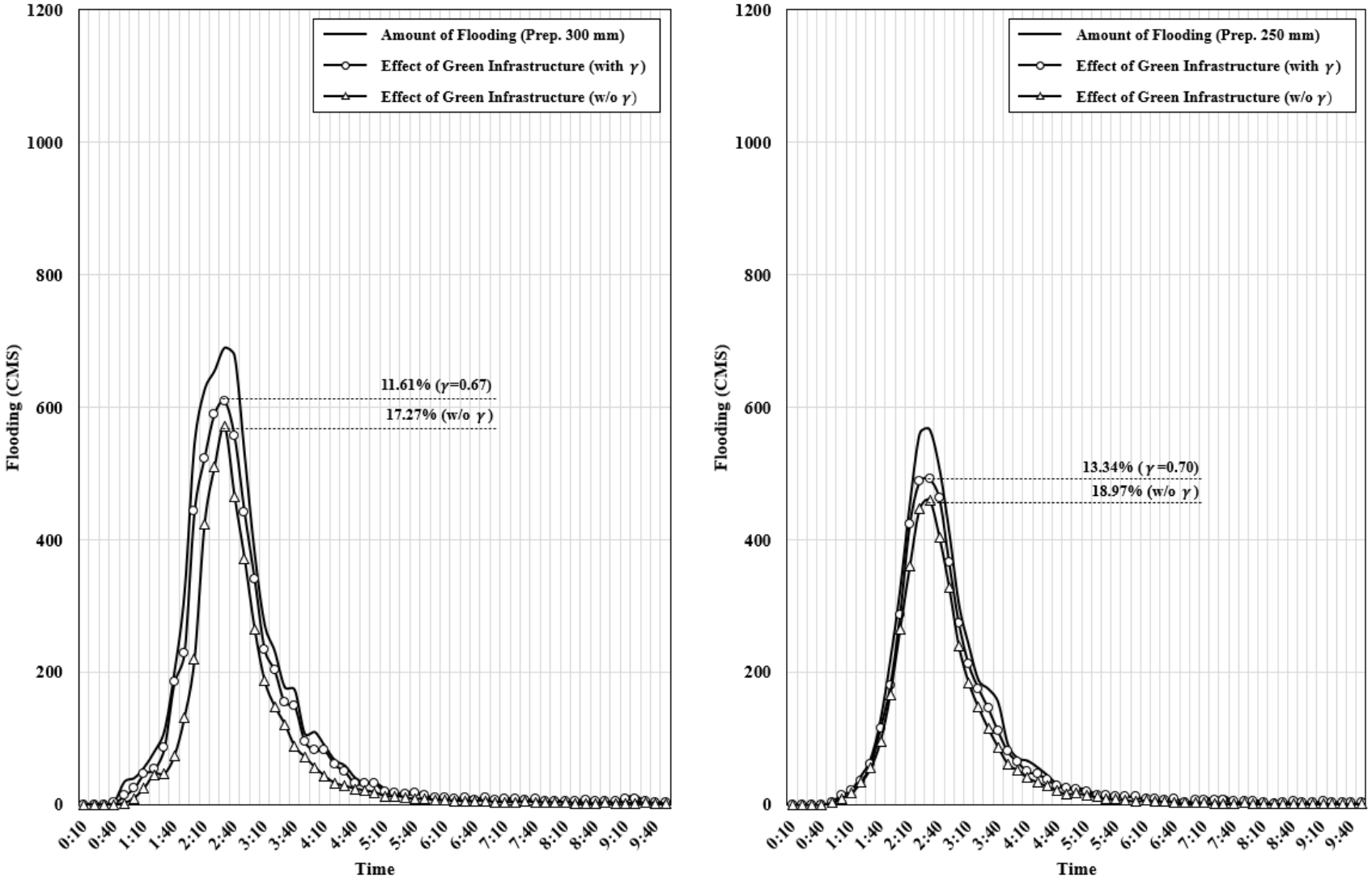


의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

γ = Safety Factor of green Infrastructure

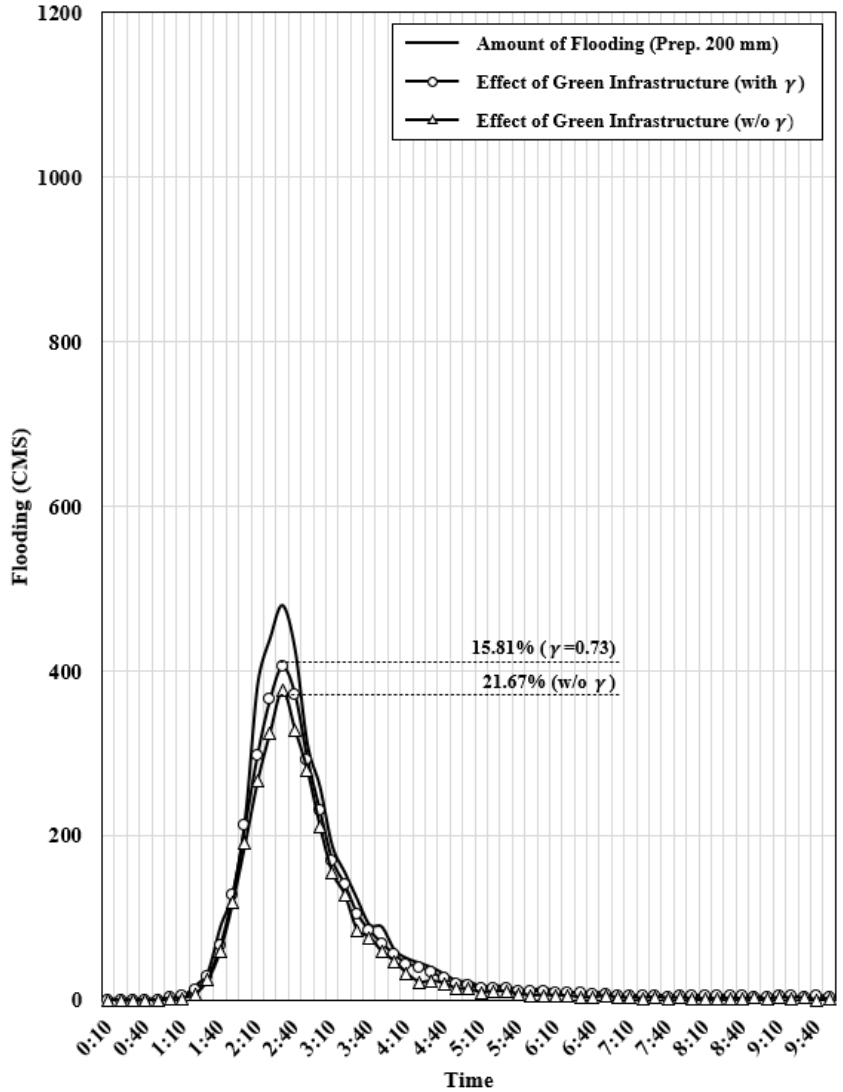


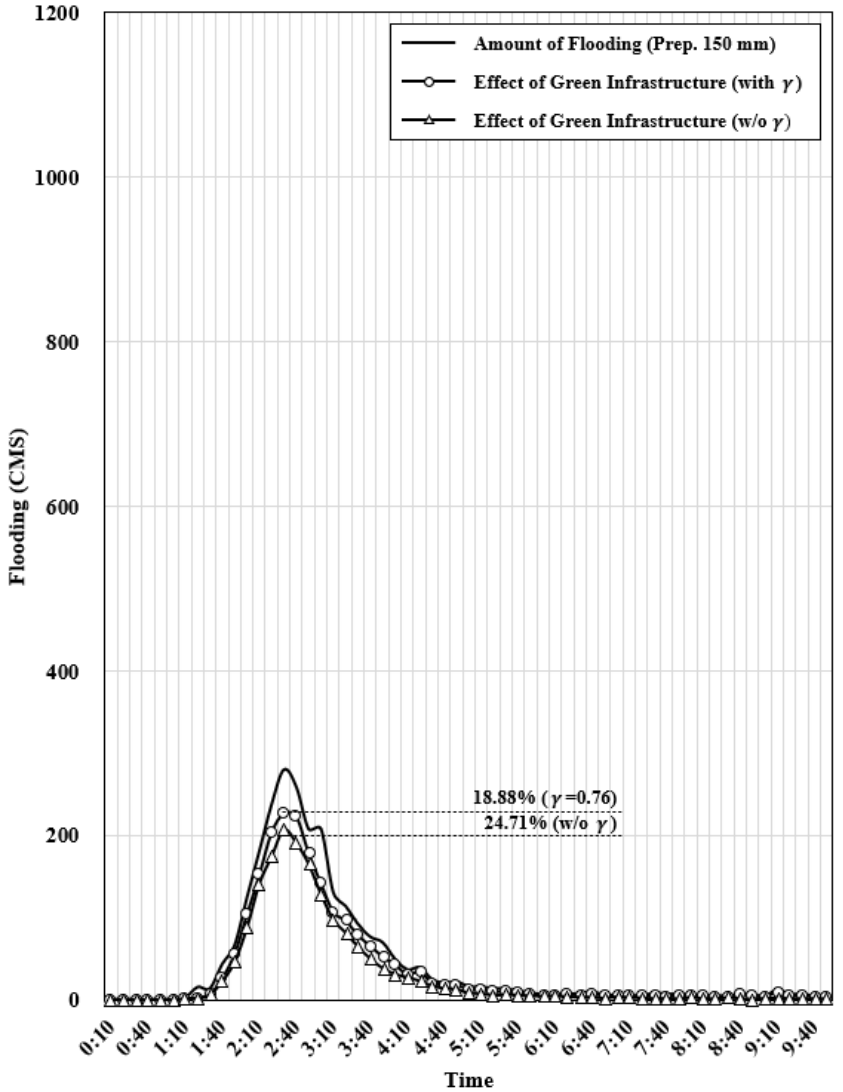
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

γ = Safety Factor of green Infrastructure





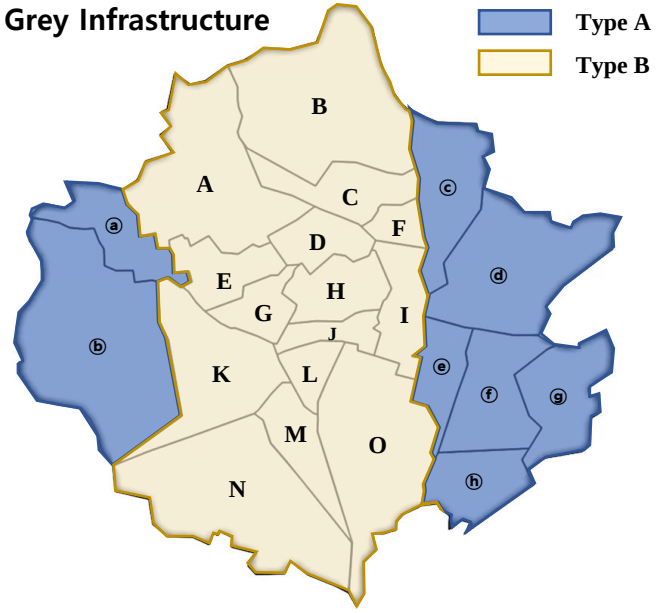
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

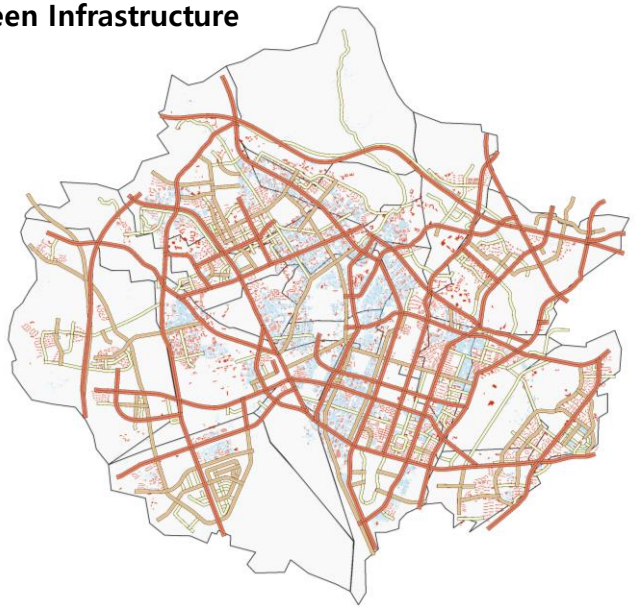
수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그레이 인프라와 그린 인프라의 복합 설계

- 그렇다면 왜 우리는 그레이 인프라와 그린인프라를 복합적으로 설계해야 할까?

Plan of Grey Infrastructure



Plan of Green Infrastructure



Type A

도쿄도 빗물 터널 (방수로)
상하폭 12 m, 원형 형태, 길이 4.5 km

Type B

도쿄 인근 사이타마현 빗물 터널 (방수로)
상하폭 18 m, 직사각형 형태, 길이 6.3 km

Type of Green Infrastructure	Applied Location	Criteria	-
Bio-retention Cell	Industrial Complex	Area of Industrial Complex x 0.1 (m²)	
Vegetative Swale	Median Vegetation	Length of Boulevard x 1 (m²)	Width of Boulevard >= 32 m
Rain Garden	Boulevard	Length of Boulevard x 0.5 (m²)	Width of Boulevard >= 24 m
Permeable Pavement	Sidewalk	Length of Boulevard x 1.5 (m²)	Width of Boulevard >= 16 m
Green Roof	Apartment	Area of Apartment x 0.1 (m²)	
Rain Barrel	House	Area of House x 0.05 (m²)	

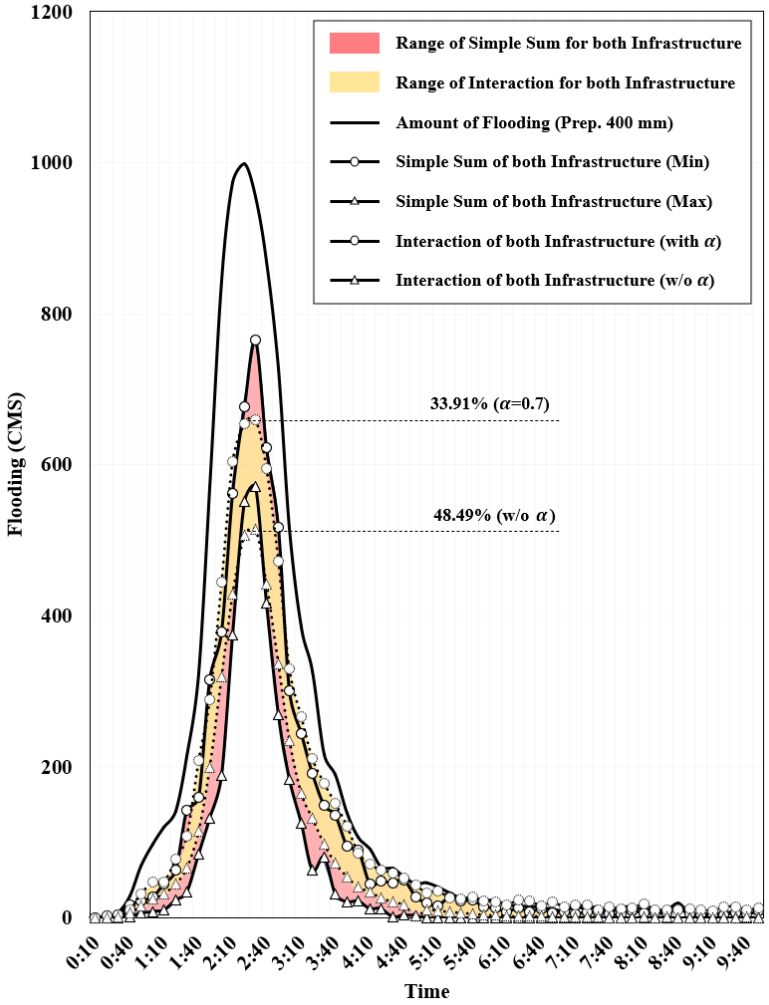
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

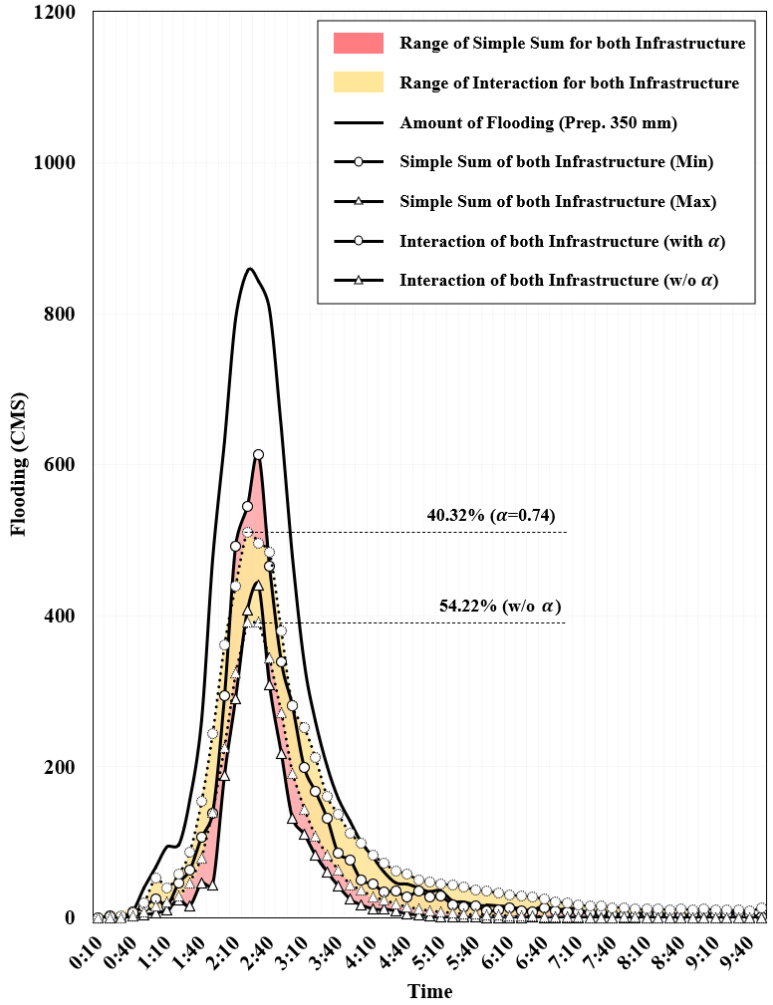
리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

- 그레이 인프라와 그린인프라의 복합 설계는 두 가지 기술을 단순히 합한 값보다 약 5%의 추가 효과를 얻을 수 있음

α = *Safety Factor of Interaction for both Infrastructure*



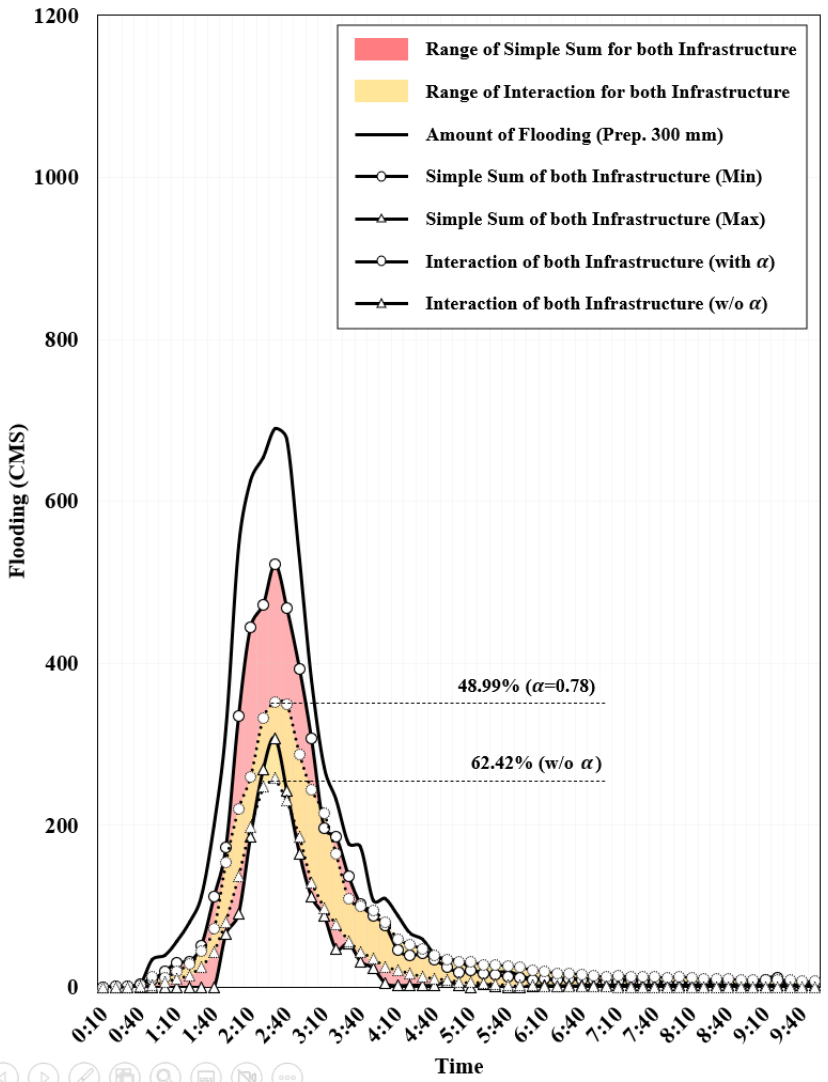


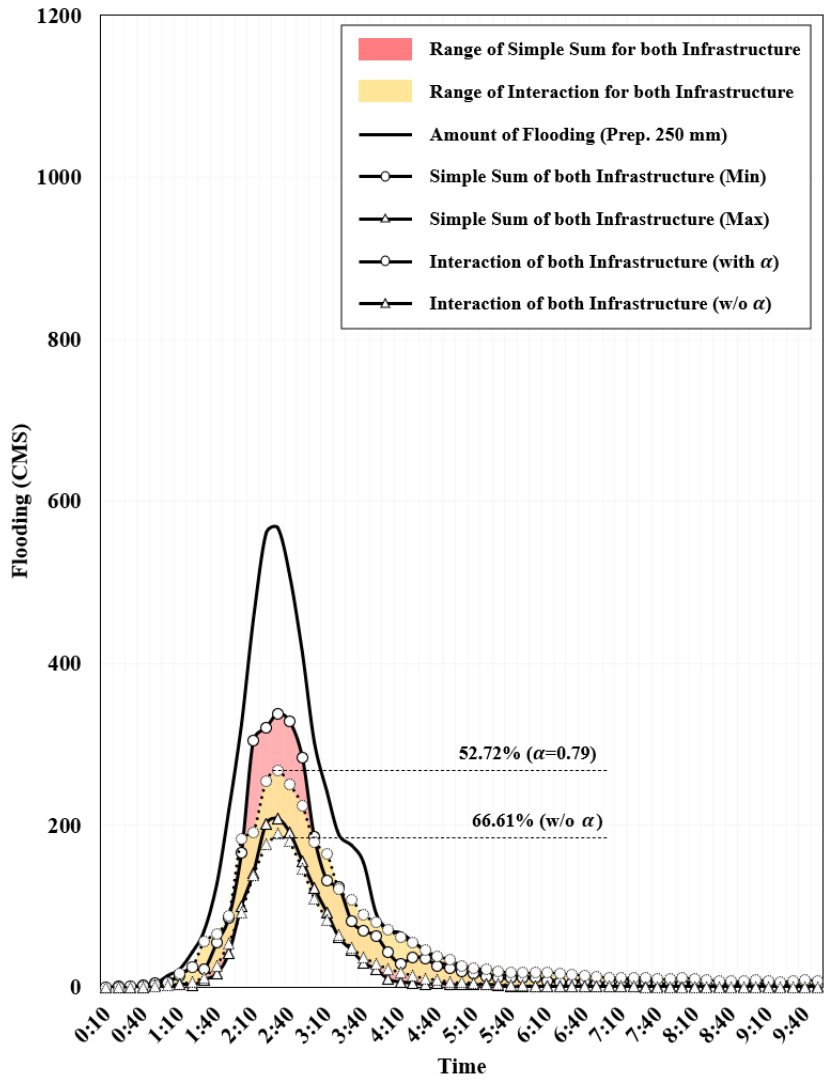
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

α = *Safety Factor of Interaction for both Infrastructure*





의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → **리스크 평가** → 리스크 수용

수원시 전역을 대상으로 홍수의 리스크 적응 설계 : 그린 인프라

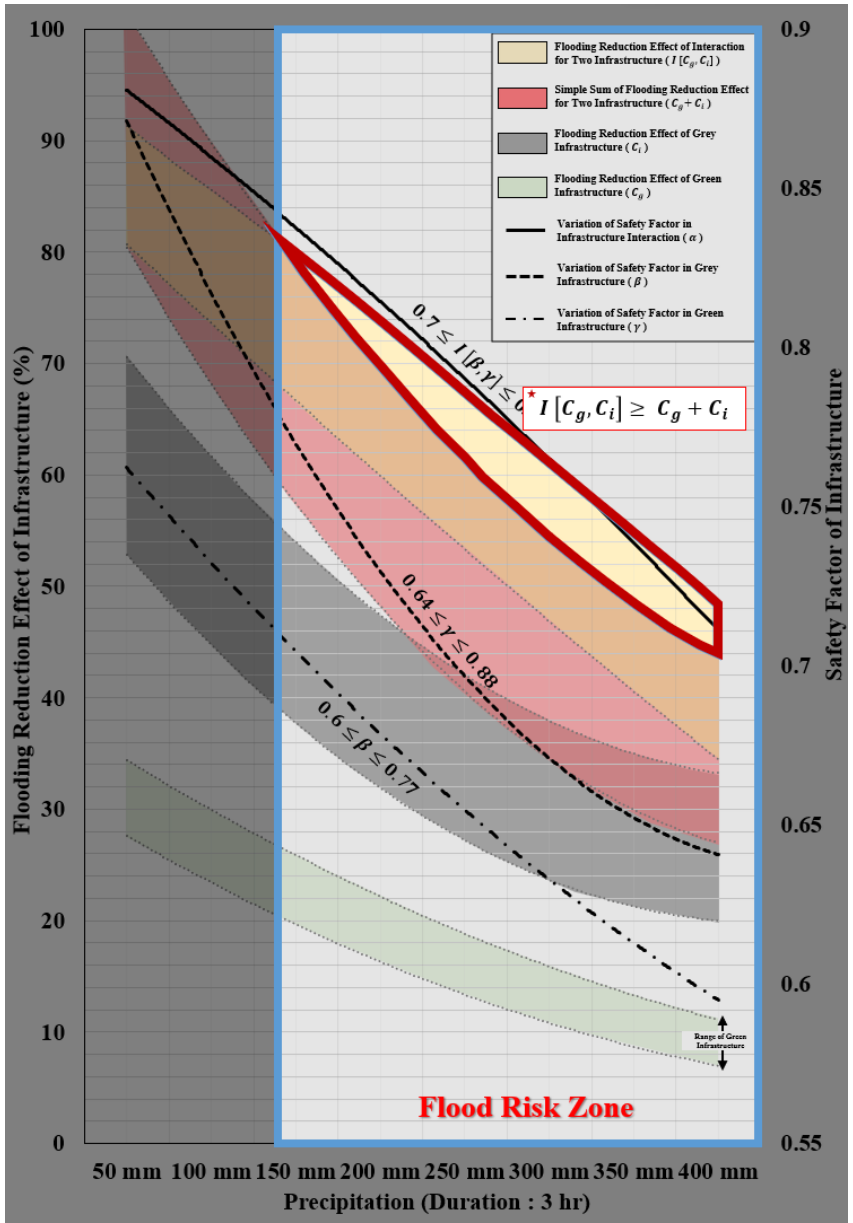
$$\star\ I\left[C_g, C_i\right] \geq C_g + C_i$$

요약

- 본 연구는 내수재해에 적극 대응하고 있는 수원시 전역의 그레이 인프라와 그린 인프라 기능에 대해서 그 유출저감 효과를 분석하였음
- 강우지속시간은 180분, 강수는 50 mm 간격으로 최대 400 mm까지 분석을 실시함
- 강수가 400 mm일 때, 그레이 인프라는 홍수를 30%, 그린 인프라는 10%정도 감당할 수 있음
- 그레이 인프라의 관망 상태 혹은 그린 인프라의 포화도에 따라 일정부분 안전계수를 두어야 함
- 그레이 인프라와 그린 인프라의 상호작용은 단순히 두 개의 합보다 약 5%정도 더 큰 홍수저감 효과를 가지고 있음

연구의 의의

- 최근 적극적으로 도입되고 있는 그레이인프라와 그린인프라 기술의 효과를 정량적으로 분석하고 대응할 수 있는 데이터를 지자체에 제공 가능함. 특히 서울시에서 홍수저감 기술로 고려되고 있는 대심도 터널을 그레이 인프라로 설계한 의의가 큼
- 그린 인프라와 그레이 인프라에 따른 홍수 저감효과를 Parametric Study로 분석하고, 결과값을 활용하여 Machine Learning 모델을 개발함
- 그린 인프라와 그레이 인프라가 동시에 도시에 설치되었을 때 기대되는 홍수저감효과를 정량적으로 분석하였다는데 의의가 있음

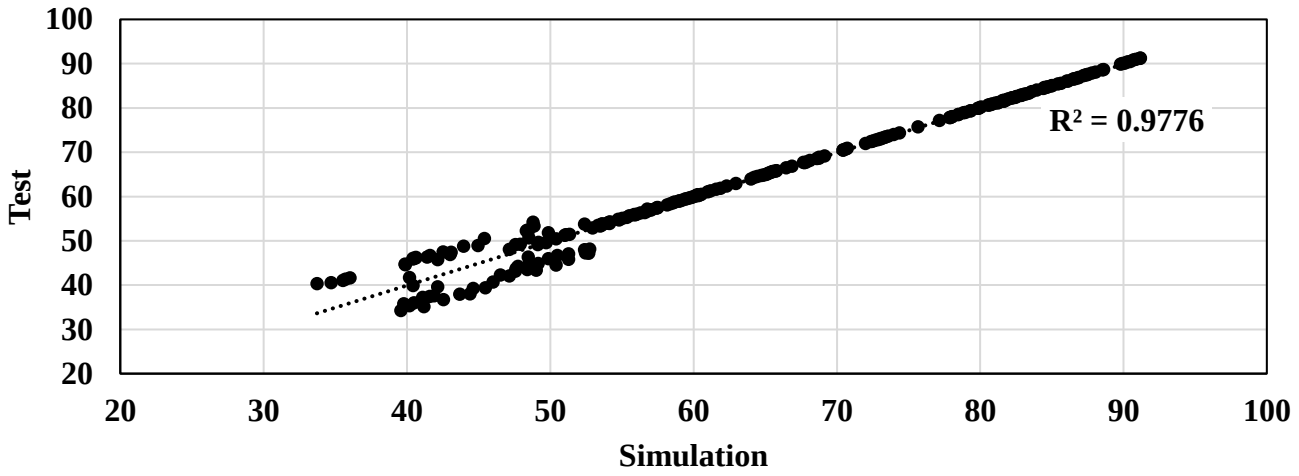


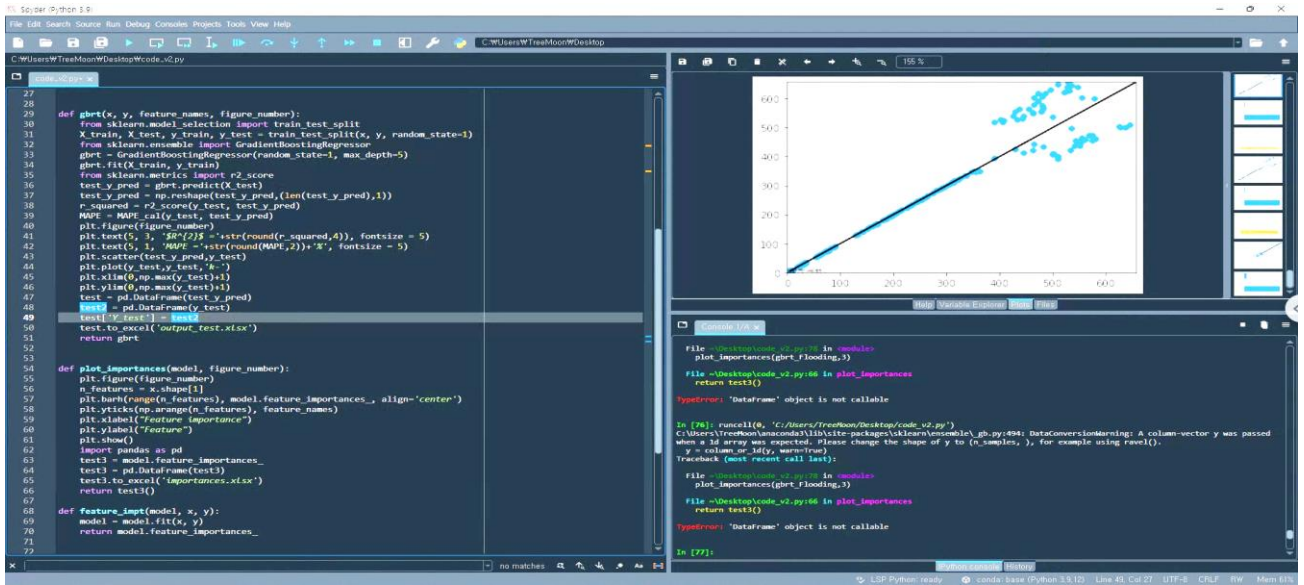
의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

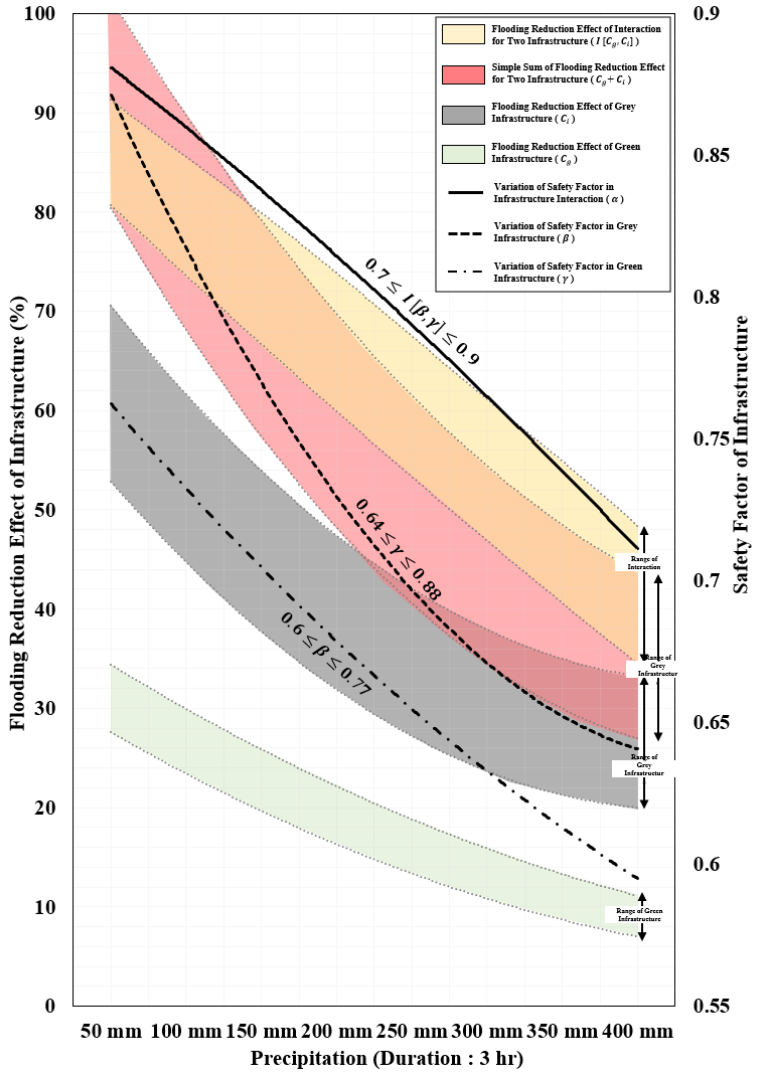
리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → **리스크 수용**

기후 리스크 적응 수단의 수용을 위한 데이터의 가공

- 단순히 연구가 연구만으로 끝나지 않고, 시민 혹은 의사결정자가 사용할 수 있는 형태로 가공되어야 함 → 인공지능 모델 혹은 Chart based Design







의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

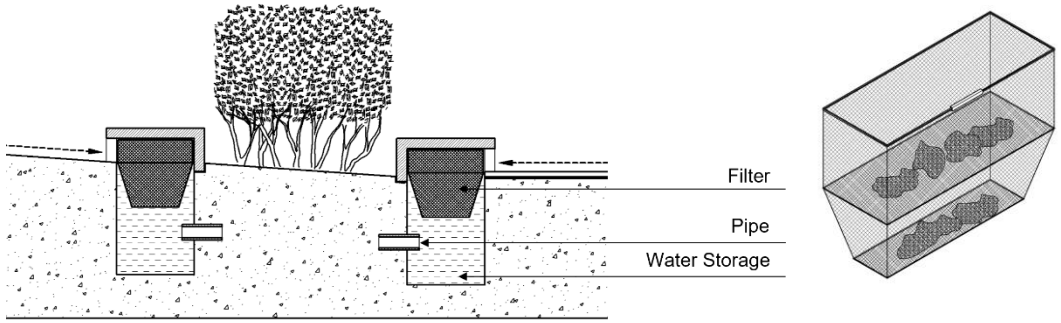
리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → **리스크 수용**

기후 리스크 적응 수단의 수용을 위한 신기술 개발

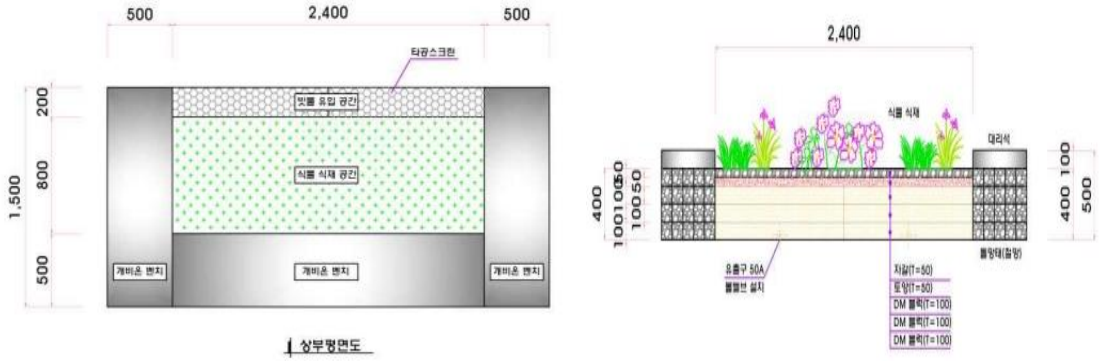
- 단순히 연구가 연구만으로 끝나지 않고, 시민 혹은 의사결정자가 사용할 수 있는 형태로 가공되어야 함 → 인공지능 모델 혹은 Chart based Design

도시침수 저감 최적 기술 개발

- 서울시 동작구 상도동에 최적화된 생태형 홍수저감 기술 설계
- 서울시 동작구 상도동 및 취약지역에 적용 가능한 홍수저감 기술 개발, 생태기법 적용



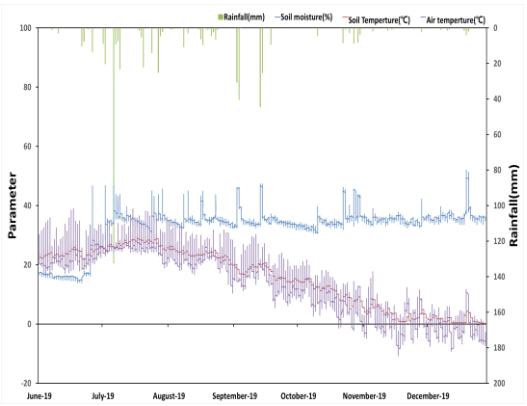
화단형 빗물저류시설



벤치를 구비한 LID 플랜터

도시침수 저감 최적 기술 시공 및 Living Lab

- 실제로 기술을 적용하고, 그 효과를 살펴봄
- 시민들에게 제공할 수 있는 형태의 Living Lab 프로그램을 기획하고 제공함



의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → 리스크 수용

기후 리스크 적응 수단의 수용을 위한 학술/사회적 노력

- 기후 리스크 적응 효과는 시민 뿐만 아니라 연구자 및 학계를 통해서도 지속적으로 노출되어야 함

관련 논문 발간

- 서울시 동작구 상도동에 최적화된 생태형 홍수저감 기술 설계
- 서울시 동작구 상도동 및 취약지역에 적용 가능한 홍수저감 기술 개발, 생태기법 적용

Kim and Kang, 2020

sustainability

Analysis of Flood Damage in the Seoul Metropolitan Government Using Climate Change Scenarios and Mitigation Technologies

Jaekyoung Kim and Junsuk Kang

리스크 식별 논문

Choi et al., 2020

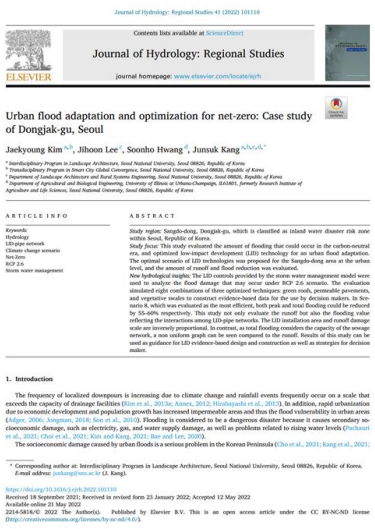
International Journal of Disaster Risk Reduction

Urban flood adaptation planning for local governments: Hydrology analysis and optimization

Younghun Choi, Junsuk Kang, Jaekyoung Kim

리스크 분석 및 저감

Kim et al., 2020


Journal of Hydrology: Regional Studies

Urban flood adaptation and optimization for net-zero: Case study of Dongjak-gu, Seoul

Jaekyoung Kim, Jihoon Lee, Soonho Hwang, Junsuk Kang

리스크 평가 및 수용

시민 공청회 및 Open 플랫폼을 활용한 교육

- 환경부, 국토교통부 등의 주관을 통한 시민 공청회 개최
- Open 플랫폼을 활용한 시민 교육 프로그램 제공

의사결정 지원을 위한 기후변화 리스크의 정량적 평가

리스크 식별 → 리스크 분석 → 리스크 저감 → 리스크 평가 → **리스크 수용**

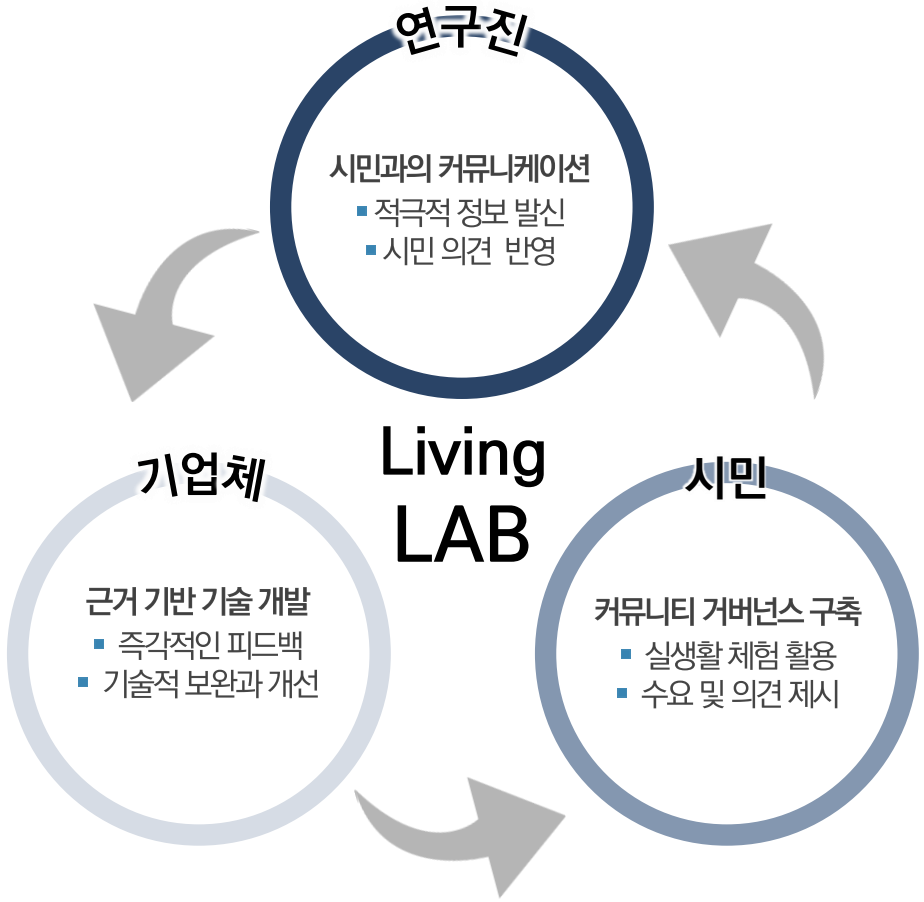
기후 리스크 적응 수단의 수용을 위한 산학연 협력 체계 구성

- 국제적 기후변화 리스크 이슈 및 국내외 적응 기술 개발을 위한 국/내외 협력 체계 구성

주관연구기관

서울대학교 Seoul National University

서울대학교 연구실 (6)	Ecological sensing AI Lab	LECCA	Green Infrastructure Engineering Lab	Landscape Architecture Planning & Design Lab	Water Quality & Environment Lab	서울대학교 농생명과학공동기기원
연계 기업 (18)	NARA SPACE TECHNOLOGY	UniAET	STORM WATER Co., Ltd.	ESCO RTS	UB	주식회사 이도
	(재)한국럭는물안전연구원	현우그린	eco geo		BLUE MARINE	SG드론(주)
	JH solution	DUKHEUNG	KCT	L&N	(주)한국종합공해시험연구소	DAEIL ENGINEERING
협력 대학 (8)	Berkeley		Stanford University			
	AGU	NIES	PURDUE	TRB		ACSP
학회/ 연구소 (10)	대한토목학회			한국방재학회		ASCE



- 기후변화와 도시 홍수의 피해 증가
- 기후변화 리스크 평가
- 해외의 기후변화 리스크 평가 및 적응 사례
- 국내의 기후변화 리스크 평가 사례
- 의사결정 지원을 위한 리스크의 정량적 평가
- **결론**

기후 리스크 적응을 위한 제언

- 기후 리스크 적응을 위해서 필요한 다섯 가지 제언

- 현재의 기후변화 리스크 보상 평가 기준으로 미래의 재난 재해를 보상하고자 할 때는 금액이 과도할 수 있음
- 적절한 규모의 적응 수단과 적극적인 정책, 취약성을 고려하여 리스크 보상의 체계를 다시 개편해야 함

- 미래의 기후 위기는 우리가 생각하는 것보다 더 큰 수준이 될 수 있음
- 현재 예측되는 재난재해에 대한 안전계수를 두고, 보다 안전한 형태의 접근을 하는 것이 중요함

- 기존의 통계 기반의 물리 모델과 물리식 기반의 모델을 복합적으로 적용해야 함
- 보다 구체적이고 상세한 분석 가능

- 물리적 모델에 기반한 평가와 이를 실현할 수 있는 기술 개발이 병행되어야 함
- 학교의 학생들은 이를 기반으로 전문인력 성장

- 연구자가 분석한 결과가 지속적으로 시민들에게 노출되어야 함
- Citizen-level의 리스크 적응 수단 개발 및 도입

질의 응답

경청해 주셔서 감사합니다