OPEN
출처표시 상업용금지 변경금지
공공누리 공공저작물 자유이용허락

기후위기 시대 자카르타-세마랑 해안도시벨트 복합재난 대응을 위한 리빙랩 기반의 솔루션 연구

2025. 02

KOICA 한국국제협력단
WORLD FRIENDS KOREA

기후위기 시대 자카르타-세마랑 해안도시벨트 복합재난 대응을 위한 리빙랩 기반의 솔루션 연구

2025.02

한국국제협력단

저자

책임연구원

김 태 형
- 서울대학교 환경대학원 교수

공동연구원

김 현 우
- 인천대학교 도시행정학과 부교수

박 윤 미
- 서울대학교 건설환경공학부 조교수

최 정 석
- 중부대학교 건축학과 교수

이 지 원
- 서울대학교 환경계획연구소 선임연구원

보조연구원

장 석 길
- 서울대학교 환경대학원 박사수료

Zhaowen Deng
- 서울대학교 환경대학원 박사과정

Tiara Agustin
- 서울대학교 환경대학원 석사과정

정 준 호
- 서울대학교 환경대학원 석사과정

정 민 주
- 인천대학교 도시계획·정책학과 박사과정

차 하 림
- 서울대학교 협동과정도시설계학 석사과정

외부집필진

이 주 현
- 시안교통리버풀대학교 도시계획학과 조교수

본 연구보고서의 내용은 한국국제협력단의 공식적인 입장과 일치하지 않을 수 있음을 밝힙니다.

본 연구보고서에는 제3자에게 권리(저작권)가 있는 저작물이 포함되어 있을 수 있습니다. 해당 내용 이용 허락은 사용자가 권리당사자에게 직접 확인해야 하며 그 사용에 관한 일체의 책임은 사용자에게 있습니다.

본 연구보고서의 내용은 출처와 집필자 명시 하에 인용이 가능하며, 아래와 같이 표기 바랍니다.

김태형, 김현우, 박윤미, 최정석, 이지원, 장석길, Zhaowen Deng, Tiara Agustin, 정준호, 정민주, 차하림, 이주현. 2025. **기후위기 시대 자카르타-세마랑 해안도시벨트 복합재난 대응을 위한 리빙랩 기반의 솔루션 연구.** 성남: 한국국제협력단.

※ 본 자료는 KOICA 도서관 홈페이지(https://lib.koica.go.kr)를 통해서도 볼 수 있습니다.

국문 요약

기후변화로 인해 질병, 열, 물 관리와 관련된 재난 발생이 급증하면서, 이들 재난이 상호작용하는 복합재난의 위험이 더욱 심화되고 있다. 기존의 단일 재난 중심 연구로는 이러한 복합적 위협에 효과적으로 대응하기 어려우며, 보다 통합적인 삼각측량 관점의 접근이 필요하다. 이에 본 연구는 기후변화의 직접적인 영향을 받으며 복합재난에 취약한 인도네시아 해안도시를 대상으로, 커뮤니티 수준에서의 복합재난 대응 전략을 체계적으로 탐색하였다.

본 연구는 자카르타-세마랑 해안도시 벨트를 대상으로 인공지능(AI) 기반 실증연구와 현지 커뮤니티의 참여관찰 연구를 결합한 통합적 연구방법을 적용하였다. 먼저, AI 기법을 활용하여 재난별 영향 요인과 핫스팟을 분석하고, 이를 바탕으로 복합재난 발생 지역을 규명하였다. 이후, 인도네시아 현지 전문가, 공공기관, 커뮤니티 관계자와 협력하여 AI 분석 결과를 검증하는 동시에, 리빙랩을 통해 지역사회가 직면한 구체적인 복합재난 문제를 파악하였다. 리빙랩 과정에서는 지역주민, 공공기관, 민간 기업, NGO, 연구 기관이 참여하여 복합재난 대응 전략을 모색하였으며, 이를 통해 실질적인 해결책을 개발하고 실증하였다.

실증연구 결과 및 리빙랩을 통해 도출된 재난 취약성을 반영하여, AI 기법을 활용한 재난 위험지수를 개발하였다. 이 지수를 기반으로 해안지역의 재난 발생 위험을 예측하고, 정책 수립의 우선순위를 정하는 데 기여할 수 있도록 하였다. 또한, 복합재난 영향을 완화할 수 있도록 맞춤형 완화계획 가이드라인을 수립하고, AI 기반 시뮬레이션을 통해 정책적 적용 가능성을 평가하였다. 이러한 접근을 통해 본 연구는 복합재난 대응 전략의 실효성을 높이고, 기후변화 대응을 위한 지속가능한 해안도시 모델을 제시하였다.

본 연구는 복합재난은 재난 간의 상호작용을 통해 발생하며 단일 재난 중심의 해결책으로는 효과적인 대응이 어렵다는 점을 확인하였다. 이에 대응하여 AI 기반의 과학적 접근을 통해 문제 해결이 필요한 재난 위험지역을 도출하고, 현지 파트너십 기반의 리빙랩을 통해 세부 문제를 파악하고 해결책을 도출하는 프로세스를 구축하였다. AI와 리빙랩을 결합한 복합적 접근법을 통해 해안도시의 구조적 취약성과 복합재난 발생 지역의 상호 연관성을 정밀 분석했다는 점에서 학문적·실용적 의의를 갖는다. 나아가, 이를 국제개발 협력 사업을 통해 유사한 문제를 경험하는 해안도시의 문제 해결에 활용할 수 있도록 가이드라인을 제시하여 기후변화 대응을 위한 해안도시 커뮤니티의 회복탄력성을 강화하는 데 기여하였으며, 복합재난 대응 전략 수립의 새로운 패러다임을 제시한다.

Executive Summary

Climate change has significantly increased disasters related to disease, heat, and water management, exacerbating the risk of complex disasters where these interact. Traditional studies focused on single disasters are insufficient to effectively address these multifaceted threats. Therefore, a more integrated, triangulated approach is needed. This study systematically examines community-level response strategies to complex disasters in Indonesian coastal cities that are directly affected by, and highly vulnerable to, climate change.

This study applied an integrated research methodology combining AI-based empirical research and participatory observational studies in local communities along the Jakarta-Semarang coastal belt. First, AI techniques were used to analyze disaster-related impact factors and identify hotspot areas prone to complex disasters. Then, to validate the AI-based findings while identifying specific complex disaster issues, Living Labs were conducted in collaboration with local experts, government agencies, and community stakeholders in Indonesia. The Living Lab process explored disaster response strategies, developed practical solutions, and tested them in real-world scenarios with the participation of local residents, government agencies, private companies, NGOs, and research organizations.

Based on the empirical research results and insights from the living labs, a disaster risk index was developed using AI techniques to predict the likelihood of disaster occurrence in coastal areas and support the prioritization of policy interventions. In addition, AI-driven simulations were conducted to assess the feasibility of policy applications, and a customized mitigation plan guideline was developed to reduce the impact of complex disasters. This approach enhances the effectiveness of complex disaster response strategies and proposes a sustainable coastal city model for climate change adaptation.

This study confirms that complex disasters are the result of interactions between different disaster factors, and that single-disaster solutions are insufficient for an effective response. To address this challenge, a scientific AI-based approach was used to identify high-risk disaster areas. A living lab framework based on local partnerships was used to diagnose specific problems and develop targeted solutions. By integrating AI-driven analysis and Living Lab methodologies, this study provides a comprehensive approach to analyzing structural vulnerabilities in coastal cities and the interrelationships of complex disaster-prone areas, providing both academic and practical contributions. In addition, by proposing a guideline for international development cooperation, this study contributes to strengthening the resilience of coastal urban communities in the face of climate change, while introducing a new paradigm for complex disaster response strategies.

목 차

Ⅰ장. 개요 ····· 1

제 1절. 연구 배경 및 목적 ····· 1
1. 연구 배경 ····· 1
2. 연구 목적 ····· 3

제 2절. 연구 범위 및 내용 ····· 4
1. 공간적 범위 ····· 4
2. 내용적 범위 ····· 5

제 3절. 연구 추진전략 ····· 7
1. 연구 수행 전략 ····· 7
2. 연구 추진 방법 ····· 8
3. 연구과제 수행 조직 및 업무 분장 ····· 10
4. 연구 추진 일정 ····· 11

Ⅱ장. [1단계] 기후변화에 따른 분야별 영향 요인 탐색 ····· 12

제 1절. 연구 목적 및 범위 ····· 12
1. 연구 목적 ····· 12
2. 연구 범위 ····· 13

제 2절. 기후변화에 따른 질병 영향 요인 도출 ····· 15
1. 세부 연구 배경 및 목적 ····· 15
2. 인도네시아의 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 현황 진단 ····· 16
3. 풍토병과 해안도시 구조간 상호작용 분석 및 기후변화로 인한 풍토병 확산 예측 ···· 22

제 3절. 기후변화에 따른 열 영향 요인 도출 ····· 43

1. 연구 배경 및 목적 ····· 43
2. 인도네시아 열섬포텐셜 결정요인 도출 ····· 44
3. 머신러닝 모델 기반 미래 열 위험 지역 예측 ····· 49
4. 시뮬레이션 기반 열 완화 가이드라인 제시 ····· 55

제 4절. 기후변화에 따른 물 영향 요인 도출 ····· 65
1. 연구 배경 ····· 65
2. 연구 목적 ····· 65
3. 연구 추진 방법 ····· 66

제 5절. 소결 ····· 82
1. 각 재난 별 주요 연구 결과 ····· 82
2. 해안도시와 복합재난 ····· 86

Ⅲ장. [2단계] 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입 개발 ····· 88

제 1절. 리빙랩 목표 및 내용 ····· 88
1. 리빙랩 목표 ····· 88
2. 리빙랩 세부절차 ····· 88
3. 기대효과 ····· 89

제 2절. 대상 지역 선정 ····· 90
1. 대상 도시 선정 ····· 90
2. 선정 지역 ····· 90

제 3절. 리빙랩 사전 설계 및 파트너십 구축 ····· 93
1. 파트너십 구축 ····· 93
2. 리빙랩 사전 설계 및 진행 프로세스 ····· 95

제 4절. 사전 워크샵 및 세미나 개최 ····· 96
1. 사전 워크샵 ····· 96
2. 서울대-코이카공동 세미나: 세마랑시장 초빙 도시재난대응 토론회 ····· 100

제 5절. 리빙랩 프로토타입 운영을 위한 현지조사 ····· 102

1. 리빙랩 프로토타입 운영 개요 ····· 102
2. 현지 조사 계획 및 준비 ····· 103
3. 현지 조사 주요 내용 ····· 105
4. 리빙랩 솔루션 아이디어 제안 및 검증 ····· 123

제 6절. 소결 ····· 141

Ⅳ장. [3단계] 기후변화 완화를 위한 완화계획 가이드라인 제안 ····· 144

제 1절. 기후변화 완화를 위한 C4V 인덱스 개발 ····· 144
1. 연구 목표 ····· 144
2. C4V 인덱스 개요 ····· 144

제 2절. 가이드라인 설정의 개요 ····· 146
1. 가이드라인의 개념 규정과 설정 방법 ····· 146

제 3절. 가이드라인 설정의 고려 사항 ····· 149
1. 한국의 유사 가이드라인 ····· 149
2. 인도네시아의 기후재난 관련 정책과 계획 사례 ····· 150
3. 현지 리빙랩 결과를 통한 가이드라인의 고려 요소 ····· 161

제 4절. 가이드라인의 구성 ····· 164
1. 기후변화 영향 완화계획 가이드라인의 구성 틀 ····· 164
2. 연구부문별 주요 고려사항 ····· 164
3. 적용영역별 주요 고려사항 ····· 168

제 5절. 가이드라인의 주요 내용 ····· 172
1. 총론 ····· 172
2. 질병 ····· 173
3. 열 ····· 175
4. 홍수 ····· 177
5. 복합재난의 통합관리 ····· 179

Ⅴ장. 결론 ····· 182

제 1절. 연구 요약 및 기대효과 ····· 182
1. 국제 협력 측면에서 본 연구의 기대효과 ····· 182
2. 향후 연구과제 방향 제안 ····· 186

참고 문헌 ····· 187

부록 ····· 194

〈부록 1〉 리빙랩 기반의 기후변화 완화계획 가이드라인(안) ····· 194

표 목차

〈표 1〉 연구 방법론 ····· 8
〈표 2〉 검토 대상 문헌 목록 ····· 17
〈표 3〉 거시환경분석(PESTEL) 결과 ····· 18
〈표 4〉 기후변화-도시구조-풍토병 변수 검토 ····· 20
〈표 5〉 자카르타 뎅기 핫스팟 분석 결과 ····· 24
〈표 6〉 자카르타 뎅기 핫스팟 유형 ····· 24
〈표 7〉 세마랑 뎅기 핫스팟 분석결과 ····· 25
〈표 8〉 세마랑 뎅기 핫스팟 유형 ····· 26
〈표 9〉 투입변수 ····· 28
〈표 10〉 ANOVA 분석 결과 ····· 29
〈표 11〉 모형 정확도 ····· 38
〈표 12〉 풍토병 발병 위험 지수 데이터셋 ····· 42
〈표 13〉 열 영향 지표 산출 식 ····· 45
〈표 14〉 인도네시아 자카르타 및 세마랑의 연간 열섬포텐셜 변화 (2015~2019년) ····· 46
〈표 15〉 인도네시아 자카르타 및 세마랑의 연간 열섬포텐셜 변화 (2020~2023년) ····· 48
〈표 16〉 머신러닝 예측을 위해 사용된 열 영향 변수 ····· 50
〈표 17〉 기상데이터 구축을 위한 자카르타의 기상관측소 위치 ····· 51
〈표 18〉 기상데이터 구축을 위한 세마랑의 기상관측소 위치 ····· 51
〈표 19〉 자카르타와 세마랑의 기상관측소 위치 이미지 ····· 51
〈표 20〉 자카르타와 세마랑의 열섬포텐셜 예측 이미지 ····· 52
〈표 21〉 자카르타 및 세마랑의 열섬포텐셜 예측 모델 결과 ····· 52
〈표 22〉 자카르타 열 영향 위험지역 분석 ····· 53
〈표 23〉 세마랑 열 영향 위험지역 분석 ····· 54
〈표 24〉 대상지 환경 조건 ····· 58
〈표 25〉 쿨 루프(Cool Roof) 재질 설정 ····· 59
〈표 26〉 Tambakrejo(탐박레조) 대상지 1 조건별 시뮬레이션 결과 ····· 60
〈표 27〉 Tambakrejo(탐박레조) 대상지 2 조건별 시뮬레이션 결과 ····· 61
〈표 28〉 Meteseh(메테세) 대상지 1 조건별 시뮬레이션 결과 ····· 62

〈표 29〉 Meteseh(메테세) 대상지 2 조건별 시뮬레이션 결과 ····· 63
〈표 30〉 대상지 환경 조건 ····· 64
〈표 31〉 위성 영상 이미지 기반 NDVI ····· 67
〈표 32〉 NDVI 분류 ····· 67
〈표 33〉 홍수 위험 지표 구축을 위한 물리적 요소 ····· 70
〈표 34〉 우도비 검정 결과 ····· 72
〈표 35〉 다항 로지스틱 분석 결과 ····· 74
〈표 36〉 사전 워크샵 참석 인도네시아 주요 관계자 ····· 96
〈표 37〉 현지조사 일정표 ····· 103
〈표 38〉 Meeting 1 진행 과정 ····· 108
〈표 39〉 Meeting 2 진행 과정 ····· 110
〈표 40〉 Meeting 3 진행 과정 ····· 113
〈표 41〉 Meeting 3 진행 과정 ····· 114
〈표 42〉 대상지의 주요 난제 ····· 123
〈표 43〉 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 추천 ····· 131
〈표 44〉 통합 쓰레기 관리 단계별 도입방안 ····· 137
〈표 45〉 C4V 인덱스 ····· 145
〈표 46〉 법률과 가이드라인의 성격 구분 ····· 147
〈표 47〉 한국의 위기관리 매뉴얼 구성 ····· 149
〈표 48〉 물, 열, 질병 관련 한국의 위기관리 매뉴얼 ····· 149
〈표 49〉 국가 기후변화 적응계획에 의한 국가행동계획(RAN API) ····· 151
〈표 50〉 기후변화 적응부문(꾸러미) ····· 151
〈표 51〉 해양·해안 부문 ····· 152
〈표 52〉 물 부문 ····· 153
〈표 53〉 농업 부문 ····· 153
〈표 54〉 건강 부문 ····· 155
〈표 55〉 자카르타 기후변화 완화 활동 ····· 158
〈표 56〉 자카르타 기후변화 적응 활동 ····· 159
〈표 57〉 자카르타 도시 회복 탄력성 전략 ····· 160
〈표 58〉 현지 리빙랩을 통한 문제 도출과 대안 모색 ····· 161
〈표 59〉 인도네시아의 기후복원을 위한 건강·의료 분야의 대응 활동 ····· 165
〈표 60〉 인도네시아의 기후복원을 위한 물 분야의 대응 활동 ····· 166

〈표 61〉 복합재난대응을 위한 토지이용계획의 구성 ····· 168
〈표 62〉 복합재난대응을 위한 기반시설의 구성 ····· 169
〈표 63〉 한국의 재난관리자원의 구분 ····· 171
〈표 64〉 리빙랩 솔루션 아이디어와 한국국제협력단 사업 사례 ····· 185

그림 목차

[그림 1] 기후변화 영향 ····· 2
[그림 2] 연구의 구성: 질병-열-물 관리 삼각측량(트라이앵글) ····· 3
[그림 3] 자카르타-세마랑 해안도시 벨트 ····· 4
[그림 4] 연구내용 ····· 6
[그림 5] 연구과제 수행 조직 및 업무 분장 ····· 10
[그림 6] 연구 추진 일정 ····· 11
[그림 7] 연구내용 ····· 12
[그림 8] 풍토병 연구 진행 체계 ····· 16
[그림 9] 거시환경분석(PESTEL)과 기후변화 5대 영역 ····· 19
[그림 10] 연구 대상지의 2020년 풍토병(뎅기) 발생 현황[단위: 건 수] ····· 27
[그림 11] 풍토병 발병 현황 및 지역별 분포 현황 ····· 30
[그림 12] 자카르타와 세마랑 지역의 군집 형태 ····· 31
[그림 13] 세마랑 지역의 군집분포 현황 ····· 31
[그림 14] 군집 별 물 공급 방식 ····· 32
[그림 15] 군집별 마을 수질오염 발생 현황 ····· 33
[그림 16] 군집 별 홍수 발생 비율 ····· 33
[그림 17] 군집 2의 의료시설까지의 거리(세마랑 지역 대상) ····· 34
[그림 18] 군집 별 슬럼 지역 현황 ····· 34
[그림 19] 자카르타 [군집 2]의 풍토병(뎅기열) 발생 현황 ····· 34
[그림 20] 자카르타 [군집 2] 지역의 물 공급 방식 ····· 35
[그림 21] 자카르타 [군집 2] 지역의 홍수 발생 현황 ····· 35
[그림 22] 자카르타 [군집 2] 슬럼 지역 내 주거용 건물 수 및 가구 현황 ····· 36
[그림 23] 세마랑 [군집 2]의 주요 특성 ····· 37
[그림 24] 의사결정나무모형 분석 결과: 풍토병 발병 지역 예측 ····· 38
[그림 25] 현지조사를 통하여 확인한 풍토병 관련 요인 ····· 39
[그림 26] 의사결정나무모형 분석 결과: 풍토병 발병 건수 ····· 40
[그림 27] 풍토병 위험 지수 도출 과정 ····· 41
[그림 28] 도시별 2022년 풍토병 위험 지역 ····· 42

[그림 29] 열 실증연구 연구디자인 프레임워크 ····· 43
[그림 30] 열섬포텐셜 지수 분석 체계 ····· 44
[그림 31] 미래 열섬포텐셜 예측 모델 분석 과정 ····· 49
[그림 32] 열 영향 완화 전략 시뮬레이션 과정 ····· 55
[그림 33] 열 영향 완화 전략 ····· 56
[그림 34] 녹지 현황 만족도 설문조사 결과 (좌: Tambakrejo, 우: Meteseh) ····· 57
[그림 35] 시뮬레이션 대상지 위치 ····· 58
[그림 36] Envi-met 시뮬레이션 예시 이미지 ····· 59
[그림 37] 그린인프라 네트워크 분석 체계 ····· 66
[그림 38] 도시별 MSPA 분석 결과 ····· 68
[그림 39] 도시별 녹지축 현황 파악 결과 ····· 69
[그림 40] 도시 홍수 위험 지수 제시 및 예측 체계 ····· 69
[그림 41] 도시별 2021년 홍수 위험 지역 ····· 71
[그림 42] 도시별 2021년 홍수 위험 지역 - Hotspot ····· 71
[그림 43] 도시별 중요 지표 ····· 76
[그림 44] 기후변화 시나리오 ····· 77
[그림 45] 기후변화 시나리오별 홍수 위험 지역 ····· 78
[그림 46] 홍수 저감형 녹지축 도출 체계 ····· 78
[그림 47] 식생지수 향상 시나리오별 홍수 위험 저감 지역 ····· 79
[그림 48] 식생지수 시나리오별 녹지축 제시 방안 ····· 80
[그림 49] LID 선호도 설문조사 결과 ····· 81
[그림 50] 홍수 위험지역 내 녹지축 조성을 위한 LID 적용 예시 ····· 81
[그림 51] 재난별 핫스팟 분석 결과 ····· 91
[그림 52] 리빙랩 대상지 핫스팟 도출과정 ····· 91
[그림 53] 세마랑 리빙랩 대상지 ····· 92
[그림 54] 리빙랩 구축을 위한 현지 다채널(4P) 파트너십 구축 ····· 93
[그림 55] 현지 다채널(4P) 파트너십 구축 프로세스 ····· 93
[그림 56] 이해관계자 맵핑 예시 ····· 94
[그림 57] 파트너십 1차 맵핑 ····· 94
[그림 58] 리빙랩 사전 설계 및 진행 프로세스 ····· 95
[그림 59] 사전 세미나 화면 ····· 99
[그림 60] 세미나 사진 ····· 101

[그림 61] 리빙랩 프로토타입 개발 절차 ····· 102
[그림 62] 현지 조사 준비회의 ····· 104
[그림 63] 현지 파트너 점검회의 ····· 104
[그림 64] 회의장소 점검 ····· 104
[그림 65] Meteseh 현장 답사 ····· 105
[그림 66] 홍수로 무너져 마을주민이 직접 복구한 제방 ····· 105
[그림 67] Tambakrejo 현장 답사 ····· 106
[그림 68] 배수로에 유입된 쓰레기 ····· 106
[그림 69] 상습적 침수가 발생하는 도로 ····· 106
[그림 70] 홍수로 인하여 문 높이를 상승한 주택 ····· 106
[그림 71] Meeting 1 그룹 활동(Meteseh) ····· 107
[그림 72] Meeting 1 결과물 예시(Tambakrejo) ····· 107
[그림 73] Meeting 2 ····· 111
[그림 74] Meeting 2 ····· 111
[그림 75] Meeting 3 라운드 1, 2 ····· 112
[그림 76] Meeting 3 라운드 1, 2 결과 ····· 112
[그림 77] Meeting 3 라운드 3(Meteseh) ····· 113
[그림 78] Meeting 3 라운드 4 ····· 113
[그림 79] 주요 기관 방문 및 면담(BPBD) ····· 120
[그림 80] 주요 기관 방문 및 면담(Distaru) ····· 120
[그림 81] 주요 기관 방문 및 면담(DPU) ····· 120
[그림 82] 주요 기관 방문 및 면담(Lasker Besti) ····· 120
[그림 83] 주요 기관 방문 및 면담(DLH) ····· 120
[그림 84] 주요 기관 방문 및 면담(DINKES) ····· 120
[그림 85] 워크숍 2: 결과 정리 및 논의 ····· 121
[그림 86] 워크숍 3: 리빙랩 솔루션 초안 작성 ····· 121
[그림 87] 워크숍 4: 솔루션 아이디어 구체화 ····· 121
[그림 88] 자카르타 대상지 답사(Muara Angke) ····· 122
[그림 89] 자카르타 대상지 답사(Muara Angke) ····· 122
[그림 90] 난제와 리빙랩 솔루션 아이디어 매칭 ····· 124
[그림 91] 마을에 설치된 EWS (Tambakrejo) ····· 124
[그림 92] 마을에 설치된 대피 표지판(Tambakrejo) ····· 124

[그림 93] 유사사례: 라인 재해(지진) 속보 알림 발송 서비스 ····· 125
[그림 94] 유사사례: Mpotsa ····· 126
[그림 95] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 구조 ····· 126
[그림 96] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 구축 타임라인(홍수) ····· 127
[그림 97] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 구축 타임라인(열섬, 질병) ····· 127
[그림 98] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 솔루션 맵핑(Meteseh) ····· 128
[그림 99] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 솔루션 맵핑(Tambakrejo) ····· 128
[그림 100] 쿨 루프 예시 ····· 130
[그림 101] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 타임라인 ····· 131
[그림 102] 다목적 옥상녹화 및 정수 시스템 체계도 ····· 134
[그림 103] 커뮤니티 그린루프 예시 ····· 135
[그림 104] 물 저장 및 정화 체계 예시 ····· 135
[그림 105] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 솔루션 맵핑(Meteseh) ····· 135
[그림 106] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 솔루션 맵핑(Tambakrejo) ····· 136
[그림 107] 유사사례: Wasteshark ····· 137
[그림 108] 유사사례: 서울 스마트 불편 신고 ····· 137
[그림 109] 통합 쓰레기 관리 도입 타임라인 ····· 138
[그림 110] 통합 쓰레기 관리 솔루션 맵핑(Tambakrejo) ····· 139
[그림 111] 솔루션 아이디어에 대한 전반적인 효과성 평가 결과 ····· 140
[그림 112] 현지조사 방법론 ····· 143
[그림 113] C4V 지수 정규화 과정 ····· 145
[그림 114] C4V 지수 정규화 과정 ····· 145
[그림 115] 복합재난 대응 가이드라인의 설정 방법과 절차 ····· 148
[그림 116] 복합재난 대응 가이드라인의 설정 방법과 절차 ····· 164

I장. 개요

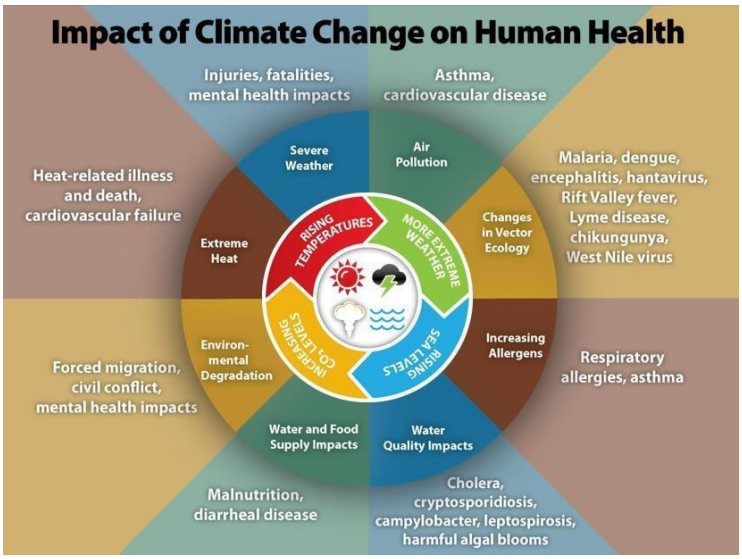
제 1절. 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

인도네시아는 열대성 기후의 도서 국가로 열 피해, 해수면 상승 및 복합재난(풍토병, 온열 질환, 홍수, 쓰나미) 모든 측면에서 기후변화의 직격탄을 맞고 있다. 특히, 인도네시아는 1만 7천여 개 이상의 섬으로 구성되어 있어 해안 도시를 중심으로 이상 기후와 강수 변동성으로 인한 도시 기반시설 피해 및 인간 건강에 미치는 피해가 급격히 증가하고 있다. 아시아 지역의 해양 온난화 속도는 지구 평균 지표면의 해양 온난화 속도의 3배 규모로 나타나, 기후변화로 인한 해안 지역의 피해는 더욱 커질 것으로 예상된다(IPCC, 2022). 인도네시아의 국가재난지방청에 따르면, 2022년에는 3,641건의 재난이 발생하였고 이로 인해 총 844명의 사망자가 발생하여 2018년 이후 최대치를 기록하였다. 또한, 2023년에는 뎅기열 확산으로 인해 143,000건의 감염 건수가 보고되었으며 1, 236명의 사망자가 발생하는 등 기후변화와 관련된 재해 피해가 보고되고 있다. 특히 인도네시아의 뎅기열 사망률은 0.72%로 동남아시아 국가 중 뎅기열 확진 건수가 많은 것으로 알려진 태국(0.07%)과 방글라데시(0.52%)보다 1.4배~10배가량 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 기후변화와 엘니뇨로 인한 기온 상승으로 인도네시아의 뎅기열, 열병, 물 재난이 급증하고 있음을 보여준다(World Health Organization(이하 WHO), 2023).

인도네시아는 기후적 여건과 지리적 특성으로 인하여 질병, 열, 물로 인한 복합재난의 발생 가능성이 크다. 특히, 기후변화로 인한 대기 불안정은 홍수와 쓰나미 등과 같은 수해를 발생시킬 가능성이 크며, 이는 열 피해와 질병(풍토병) 확산에도 영향을 미친다. 또한, 열로 인한 고온 건조한 환경은 상수도 보급률이 낮아 지하수 등을 통해 물을 공급받는 인도네시아 지역에서 (가뭄으로 인해) 물 관리에 영향을 미치며, 열로 인한 질병 발생 가능성을 높인다. 이처럼, 기후변화는 재난 간의 상호작용에 촉매 역할을 하며, 복합재난 발생 속도와 피해를 증가시킨다. 기후변화로 인한 연쇄적인 재난 발생은 지역 커뮤니티의 안전과 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 재난의 복잡한 상호작용을 이해해야 한다. 또한, 지역 커뮤니티 수준에서 기후변화의 영향을 완화(mitigation)함과 동시에 그 변화에 적응(adaptation)하는 맞춤식 조치가 필요하므로, 적절한 대응(완화·적응)전략을 마련하기 위한 삼각측량 관점에서의 접근이 요구된다. [그

림 1]은 미국 질병통제예방센터(Centers for Disease Control and Prevention, 이하 CDC), 국제 연합(United Nation, 이하 UN), 세계보건기구(WHO)이 인정하는 체계로서 기후변화가 인간 건강에 미치는 4대 원인 중 질병, 열, 물 관리를 핵심 요소로 보았다. 각 핵심 요소는 서로 연결되어 있으며, 재난 대비를 위한 정책의 실효성을 높이기 위해서는 커뮤니티 단위에서 적응 및 완화전략을 수립해야 함을 강조한다. 기후변화로 인한 복합재난 발생과 해안지역이 지닌 취약성에도 불구하고 해안지역을 대상으로 재난 취약성을 평가한 연구들은 해수면 상승(Rimda et al., 2018; Rahmadi et al., 2022), 해안 침식(Kalther and Itaya, 2020)에 초점을 두고 있어 통합적인 관점에서의 접근이 필요한 실정이다.



[그림 1] 기후변화 영향

(출처: National Research Council, 2020)

위와 같은 이유로 본 연구과제는 복합재난에 주목하였으며 해안지역의 커뮤니티 수준의 대응책을 마련하고자 하였다. 구체적으로는 인도네시아의 자카르타-세마랑 해안도시 벨트를 조망하는 실증연구(GIS, 머신러닝, AI 예측)를 바탕으로 기후변화 취약요인을 분석하고, 그 영향을 현지 커뮤니티에서 현미경 조사를 통해 기후변화 적응과 대응책을 도출하는 참여관찰연구(리빙랩)를 진행하였다. 본 연구는 복합재난으로서 질병, 열, 물 관리 문제를 고찰하고, 이에 대한 실천적 대안을 모색하기 위하여 대상국(인도네시아)의 지역 주민과 전문가와 함께 리빙랩 구축을 통해 Coastal City Climate Change Vulnerability(C4V) 지표를 도출하고 실용적인 해결 방안을 도출한다는 점에서 기존 연구과제 및 사업과 차별점을 지닌다. 특히, 기후변화에 따라 한국을

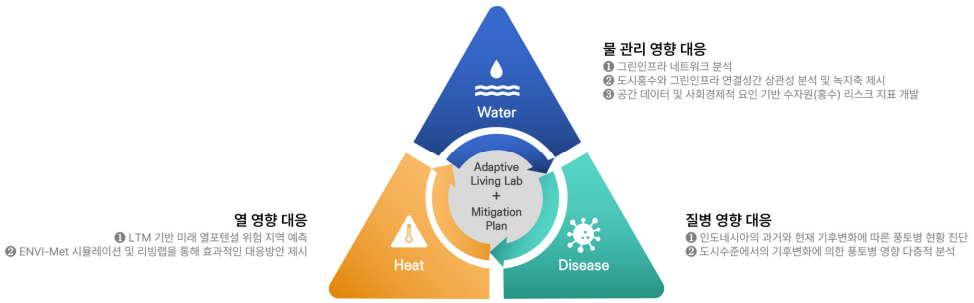
비롯한 온대 기후에 속하는 국가들이 기후변화로 인해 아열대성 기후로 변하고 있는 상황에서, 본 연구과제를 통해 인도네시아가 테스트베드로서 글로벌 네트워크 기반 및 성장의 자양분이 될 것으로 기대하는 바이다.

2. 연구 목적

본 연구과제는 질병, 열, 물 관리라는 기후변화에 기인한 복합재난의 핵심영역을 세부 주제로 설정하였다. 궁극적으로는 기후변화 대응을 위해 리빙랩을 통한 솔루션을 발굴하고자 리빙랩 프로토타입을 개발하고, 이를 통해 기후변화 완화전략을 제안하고자 하였다.

재난별 연구 목적은 다음과 같다. 첫째, 질병 영향은 인도네시아의 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 발생 현황과 인도네시아 정부 대응 정책을 정성적으로 진단하고, 머신러닝을 기반으로 도시 수준에서 기후변화에 의한 풍토병 발생과 도시의 기후·지리적·환경적·사회경제적 특성과의 관계를 규명하여 취약요인을 도출한다. 둘째, 열 영향은 딥러닝 모형인 LTM (Land Transformation Model)을 기반으로 미래 열 포텐셜 위험 지역(핫스팟)을 예측하고 열 포텐셜 영향 요인을 도출한다. 마지막으로 물 관리는 도시 홍수와 그린 인프라 네트워크의 관계를 분석한 후 홍수 영향을 줄이기 위한 녹지축을 제시하며, 환경적·사회경제적 요인을 기반으로 홍수 취약성 지표를 개발한다.

각 재난 별 원인과 영향을 확인하여 기후변화로 인하여 증가하는 재난 간 복합적 상호작용을 분석하고, 리빙랩 프로토타입을 개발하며, 이후 완화 가이드라인과 지표를 제안하여 통합적인 관점에서 접근이 필요한 복합재난의 효과적이고 실효성있는 대응을 도모한다.



[그림 2] 연구의 구성: 질병-열-물 관리 삼각측량(트라이앵글)

제 2절. 연구 범위 및 내용

1. 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 인도네시아의 자카르타(Jakarta)-세마랑(Semarang) 해안도시이다. 인도네시아의 해안 도시에서는 자연재해에 취약한 도서국의 해안에 위치하였다는 지리적 여건에 더해 기후변화로 인한 해수면 상승과 강우의 영향으로 홍수가 빈번하게 발생하고 있다. 급격한 도시화는 무분별한 지하수 사용과 이에 따른 지반침하로 홍수의 영향과 빈도를 배가하고 있으며, 기후변화로 인한 열 영향 또한 강화하고 있다. 한편, 기후변화로 뎅기열을 비롯한 풍토병의 매개체 서식에 유리한 환경이 조성되면서, 풍토병 또한 확산하고 있다. 다양한 재난이 동시다발적으로, 상호연계되어 발생하고 있는 이러한 인도네시아 해안도시의 특성은 복합재난 연구에 적합하다.

인도네시아 해안도시 중 자카르타와 세마랑은 자바섬의 주변 해안도시에 비해 급격한 도시화와 높은 인구 수로 인하여 재난 발생으로 인한 영향에 더 취약하다. 이를 해결하기 위해서 시 정부는 뎅기열 대응을 위한 볼바키아 모기사업, 홍수 대응을 위한 방벽 건설, 열 영향 완화를 위한 식재 운동 등 다양한 재난 대응 정책을 적극적으로 펼치고 있으며, 이를 지원하기 위한 국제협력도 활발히 진행되고 있으나 여전히 재난에 취약하다는 점에서 연구의 적합성을 가진다.



[그림 3] 자카르타-세마랑 해안도시 벨트

2. 내용적 범위

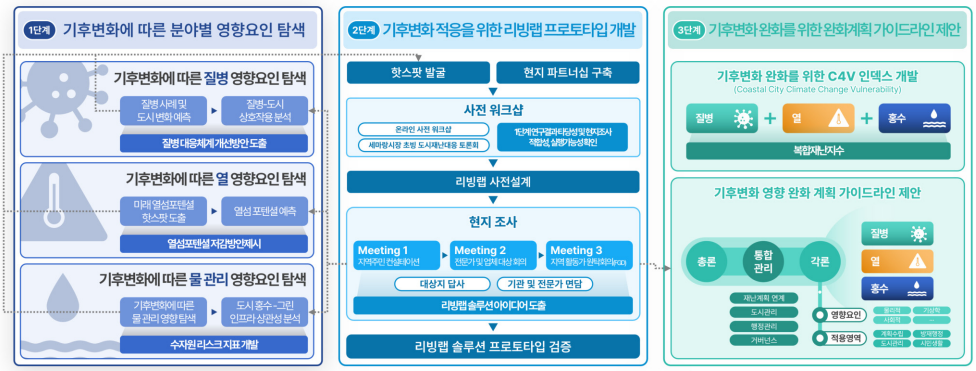
본 연구과제는 기후변화에 기인한 복합재난의 핵심 영역인 질병, 열, 물 관리를 세부 주제로 설정하였으며, 궁극적으로는 기후변화 적응을 위한 리빙랩 운영의 프로토타입을 개발하고 대상 국가의 기후변화 영향 완화를 위한 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 한다. 연구는 정성적·실증적 접근을 통해 재난 발생의 원인과 영향 요인을 도출하고, 이를 기반으로 현지 방문 조사와 리빙랩 운영을 통해 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입을 개발한 후, 기후변화 완화를 위한 C4V 지표와 가이드라인을 개발하는 3단계로 진행하였다.

1단계는 기후변화에 따른 재난별 원인과 영향 요인을 도출하는 데 초점을 두며, 현지조사 전 정성적·실증적 연구를 통해 재난별 발생 현황을 분석하고 주요 관심 지역(Hotspot)을 도출하고 영향 요인을 파악하는 과정과 현지조사 및 리빙랩 후 지역 내 문제점을 구체화하고 해결 방안을 제시하는 과정을 포함하여 각 단계와 유기적으로 연결되어 있다. 질병 부문에서는 기후변화에 따른 질병(뎅기열) 발생 원인과 영향 요인을 도출하기 위해서 질병의 과거와 현재 발생 현황을 분석하고 기후변화에 따른 질병 확산 가능성을 예측하였다. 이와 동시에 질병 확산에 영향을 미치는 취약 요인을 도출하였다. 리빙랩 이후 기후변화로 인한 질병 발병 원인과 영향 요인을 종합적으로 규명하고 커뮤니티 차원에서 질병 대응을 위한 솔루션을 발굴하고자 하였다. 열에서는 열섬(Urban Heat Island) 형성에 영향을 미치는 요인을 검토한 후, 열섬 포텐셜 핫스팟과 핫스팟 결정 요인을 도출하였다. 이후 시뮬레이션을 통해 열섬 포텐셜 저감 방안을 제시하였다. 물 관리 영향 요인은 연구 대상 지역 내 홍수 발생 가능성을 검토한 후, 기후변화로 인한 홍수 발생 가능성을 완화할 수 있는 녹지체계를 제안하였다.

2단계에서는 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입을 개발하고 운영하였으며, 연구 초기 과정부터 상대국의 주요 파트너기관인 인도네시아 디포네고로 국립대학교, 세마랑 시 정부 관련 부처 등과 함께 다수의 사전 회의 및 워크숍을 진행하여 리빙랩 프로토타입의 체계화와 전문성을 제고하였다. 또한 1단계 연구 수행 과정에서 도출한 질병·열섬·홍수 위험 지역이 중첩되어 기후변화로 인한 복합재난 발생에 가장 취약할 것으로 생각되는 커뮤니티를 대상으로 미시적인 접근을 통해 리빙랩 프로토타입을 개발하고, 향후 인도네시아의 기후변화 적응과 완화를 위한 정책적 기반을 제공하였다. 이를 위하여 현지조사 전 사전 워크샵과 현지조사에서의 대상지 답사를 통하여 1단계 연구 결과를 토대로 도출된 복합재난 취약지역의 정합성을 확인하고, 지역주민과 전문가를 대상으로 3단계에 걸친 리빙랩 프로토타입 개발 과정을 통하여 리빙랩 프로토타입을 개발하였다. 이 과정에서 세마랑 시 정부 관련 부처 면담을 통하여 시행중인 정책의 효과와

사각지대를 파악하여 프로토타입을 보완하였다.

3단계에서는 1·2단계 결과물을 종합하여 도출한 기후변화로 인한 복합재난 발생 영향을 완화하기 위한 C4V 인덱스와 완화 가이드라인을 제안하였다. 연구진은 기후변화로 인해 발생 가능한 복합재난을 커뮤니티 수준에서 대응할 수 있도록 C4V 인덱스를 개발하고 온라인 플랫폼을 통해 누구나 열람할 수 있도록 대시보드 형태로 결과물을 제공하였다. 이와 함께, 열(장기), 질병(단-중기), 물(단기) 재난의 영향력과 정책 수립을 고려하여 완화계획 가이드라인을 제공함으로써, 인도네시아 해안도시의 기후변화로 인한 복합재난 대응전략을 수립할 수 있도록 하였다. 가이드라인은 중부대학교 최정석 교수를 중심으로 인도네시아 디포네고로 대학의 연구파트너 2인, 이해관계자(한국-인도네시아 자문단, 주민), 국제협력 전문가(이주현 교수)가 함께 개발하였으며, 1·2단계 결과물을 바탕으로 가이드라인 설계, 시제품 도입, 모니터링 및 피드백 과정을 거쳐 개발하였다.



[그림 4] 연구내용

제 3절. 연구 추진전략

1. 연구 수행 전략

본 연구는 기후변화로 인한 복합재난(질병, 열섬, 홍수) 발생과 그로 인한 영향을 완화하기 위해서 지역 커뮤니티 기반의 적응과 완화 전략을 모색하는 데 초점을 두었다. 이에, 기후변화로 인해 커뮤니티 단위에서 가장 영향력이 클 것으로 예측되는 질병, 열(열섬), 물 관리(홍수)의 발생 영향 요인을 규명하고 기후변화 피해를 줄이거나 기회로 전환하는 완화 =전략을 제시하였다. 이와 함께 기후변화의 피해를 최소화하고 기회를 극대화하는 적응 전략을 동시에 수립하여 대상국인 인도네시아에 적응과 완화 전략을 모두 포괄하는 기후변화 대응방안을 모색하였다.

이와 함께 과업 기간 구축한 파트너십을 기반으로, 종료 이후에도 기후변화로 인한 복합재난 발생 영향 요인을 밝히고 정책을 수립하는 데 활용 가능한 리빙랩 프로토타입을 구축하고, 현지 조사와 리빙랩을 통해 도출된 주요 문제점과 솔루션을 기반으로 연구진인 제안하는 장기적 실천과 의제를 포함한 완화 가이드라인을 제공하고자 하였다. 이를 통해 본 연구는 대상국 주도의 자생적인 기후변화 대안을 제시하고 실행 기반을 마련한다는 점에서 차별성을 지닌다. 특히, 리빙랩이라는 대상국의 공공-민간-주민 파트너십 기반의 문제해결형 플랫폼을 기반으로 기후변화 대응을 위한 지속가능한 대안을 도출했으며, 향후 리빙랩을 통한 기후변화 대응이 가능하도록 프로토타입을 개발하였다. 따라서, 본 연구는 커뮤니티 단위에서 현지 적합성(fitness), 효과성(effectiveness), 실행가능성(feasibility)을 중심으로 한 기후변화 완화계획을 수립하기 위한 가이드라인을 제공한다는 점에서 실효성이 높은 정책과 함께 대상국의 기후변화로 인한 재난 발생에 장기적으로 대응할 수 있는 능력을 강화하는 데 기여하고자 한다.

이와 함께, 본 연구는 기후변화의 실증연구와 기후위기 커뮤니티에서의 참여관찰(리빙랩)을 결합하여 기후변화의 다양한 영향을 파악하고 이에 대한 대응 방안을 마련하고자 하였다. 기후변화는 지리적·행정적 경계를 초월한 광역적인 현상인 동시에, 그 영향력은 국지적 특성에 따라 상이하게 나타나는 현상이다. 또한, 그 영향은 정치, 경제, 인문사회, 문화, 환경 등의 분야에서 복합적으로 나타나고 있어, 파급효과 분석 시에는 다학문 융합적 접근을 통해 현상을 분석하고 대응책을 제시할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구는 문헌연구와 경험적 연구, 방문 연구 및 실지조사를 결합한 융복합 연구로서 동태적·복합적 특성을 지닌 기후변화 영향을 진단하기 위해 빅데이터 분석, AI, 시뮬레이션

GIS, 사례 추출 중심의 복합적 연구방법론을 활용하였다. 또한, 복합적 접근법인 혼합주사연구를 활용하여 기후변화의 광역적·국지적 측면을 함께 분석하였다. 이는 기후변화 영향이 심각한 3대 부문의 융복합 연구로서, 기후변화에 따른 영향 요인 분석과 대응 방안 제시를 위한 최적의 방법론을 도입하고 이를 결합 및 활용함으로써 향후 방법론적 개선에 기여할 것으로 판단된다. 국내 주관 연구 수행기관인 서울대학교와 인도네시아 연구 수행기관(디포네고로대학교) 간에는 지속적인 학술 및 연구 협력의 바탕이 되는 MOA(Memorandum of Agreement)를 체결한 바 있으며, 과제 진행 중에 연구 파트너십을 강화, 발전시키기 위하여 연구책임자가 운영 중인 서울대 융복합계획연구실과 디포네고로대학교 간의 연구협약을 체결하였다. 이를 통해 서울대학교-디포네고로대학교 간 추진된 정기교류와 공동연구를 발전적으로 계승하여 지속적인 호혜적 파트너십을 구축하였다.

〈표 1〉 연구 방법론

항목		질병 영향	열 영향	물 영향
1단계	기후변화에 따른 복합재난 영향 요인 도출	- PESTEL 분석 - K-Means Clustering - 시스템다이내믹스 - 의사결정 나무모형 - 구조방정식 모형	- LTM (Land Transformation Model) - ENVI-Met(Three-dimensional microscale Urban climate model) 시뮬레이션	- MSPA(Mophological Spatial Pattern Analysis) 모델링 - 구성요소 기반분석 (Component based analysis)
2단계	리빙랩 프로토타입 개발	- 리빙랩(사전설계, 현지 검토, 피드백, 프로토타입 확정)		
3단계	C4V 인덱스 개발 및 완화 가이드라인 제안	- 1단계와 2단계를 종합하여 C4V 인덱스 개발 - 완화 가이드라인 개발(정책 델파이 진행)		

2. 연구 추진 방법

국내 연구진과 인도네시아 연구진은 다음과 같이 역할을 분담하며 양국의 경험을 공유하고 상호 연구역량을 강화하며 과제수행 기간 동안 긴밀한 협력연구를 추진하였다. 먼저 한국 연구진은 기후변화에 따른 질병, 열, 물 관리 영향 요인 분석을 주도하며, 인도네시아 연구진은 인도네시아의 현황 및 기초자료 제공, 정책 검토 및 현지의 이해관계자(지역 정부, NGO, 국제기구, 커뮤니티 대표)를 섭외하고 긴밀한 커뮤니케이션 채널을 구축하여 파트너십을 추진하였다. 여기서 양국의 연구진은 모두 분석 결과의 타당성 평가와 해석, 양국의 기후변화 경험에 대한 비교 평가와 리빙랩 대상지역 선별 및 검증, 기후변화 완화를 위한 가이드라인 개발 과정에 참여하였다.

본 연구는 기후변화에 따른 질병, 열, 물 재난의 영향 요인 확인을 거쳐, 리빙랩을 통한 적응 방안을 모색하며, C4V 인덱스 개발 및 완화 가이드라인을 제안하는 것을 목표로 다음과 같이 3단계로 나누어 연구를 수행하였다.

1단계에서는 7개월간 문헌연구 및 경험적 연구를 통해 기후변화에 따른 질병, 열, 물 관리 영향을 분석하고 적응 및 완화를 위한 영향 요인을 도출하며 사례연구지역을 탐지하였다. 사례연구지역은 리빙랩 수행을 위한 대상지 선정 과정에 해당하며 질병, 열, 물 재난의 핫스팟 중첩지역에도 해당된다. 질병, 열, 물 관리의 분야별로 광역적 탐색을 거쳐 기후변화로 인한 영향으로부터 특히 취약한 지역을 진단하여 취약성이 높은 지역을 국지적 분석 수행에 관한 사례연구 대상지로 선정하였다. 이 과정에서는 인도네시아 연구진이 제공하여 공동 분석한 인도네시아 현황 및 기초자료를 토대로, 국내 3개 연구팀이 문헌연구와 경험연구를 거쳐 기후변화에 따른 질병, 열, 물 관리 분야의 영향 요인을 도출하였다. 이후 분석 결과의 타당성과 해석의 적절성을 확보하기 위해 인도네시아 연구 파트너와 함께 평가를 수행하였다.

2단계에서는 1단계 분석 결과를 토대로, 2주간 인도네시아 현지에 방문하여 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입을 개발하였다. 또한, 1단계의 기후변화 취약지역을 대상으로 한 리빙랩 프로토타입 사전설계안에 기반한 현지조사 이후 연구파트너 및 현지 전문가와 함께 논의하였다. 검증 피드백을 거쳐 인도네시아의 기후변화 적응 리빙랩 프로토타입을 개발 및 운영하였다. 이후, 운영 결과를 기반으로 추후 리빙랩 운영 및 적용을 위한 가이드라인을 개발하였다.

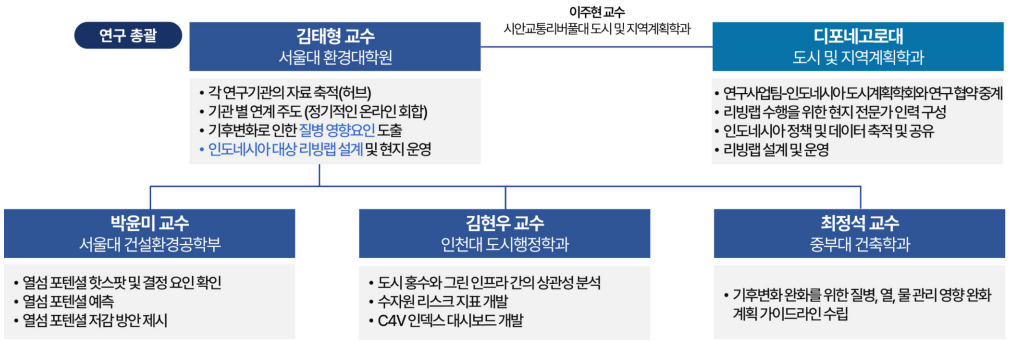
마지막으로 3개월간 진행되는 3단계 연구 과정에서는, 이전 단계 연구 결과를 바탕으로 기후변화에 따른 복합재난의 영향 완화를 위한 C4V 인덱스 및 완화 가이드라인을 개발하였다. 구체적으로는 질병, 열, 물 관리 분야의 영향 분석을 거쳐 도출한 장기적 질병 영향 완화전략과 리빙랩 협의 결과를 기초로 C4V 인덱스를 개발하고, 국내 연구진과 인도네시아 연구진의 상호 검증을 거쳐, 각종 건강 영향 요인의 억제, 조정과 도시 및 지역계획 방향, 지속적인 연구파트너십 확보 방안을 포함한 기후변화 완화 가이드라인을 제안하였다.

3. 연구과제 수행 조직 및 업무 분장

서울대학교 환경대학원은 국내 공동연구기관 코디네이터이며, 협력기관과 네트워킹을 매개하며 연구과제를 수행하였다. 상대국인 디포네고로대학교와 협력하여 현지 데이터를수집 및 자료를 축적하는 허브 역할을 수행하며, 정기적인 온라인 회합을 시행하여 기관 별 협력을 주도하였다.

세부 연구분야에서 서울대학교 환경대학원은 질병 관리, 서울대학교 공과대학은 열 관리, 인천대학교 도시과학대학은 물 관리에 관한 실증 연구를 진행하며, 중부대학교는 연구 결과를 종합하여 기후변화 완화를 위한 질병, 열, 물 관리 영향 완화 계획 가이드라인을 수립하였다. 인천대학교 도시과학대학은 C4V 인덱스 대시보드 개발을 주도하며 각 기관은 모두 인덱스 도출 과정에 참여하였다.

리빙랩의 경우 외부 전문가인 중국 시안교통리버풀대학교의 이주현 교수와 함께 수행하며, 현지 운영을 위해 상대국인 디포네고로대학교와 함께 진행하였다. 또한, 디포네고로대학교는 연구사업 및 서울대학교와의 연구협약을 중계하며 리빙랩 수행을 위한 현지 전문가 인력을 구성하였다. 이러한 업무 분장에 따라, 연구 수행을 위한 인도네시아 정책 및 데이터를 축적하여 공유하였다.



[그림 5] 연구과제 수행 조직 및 업무 분장

4. 연구 추진 일정

1단계에서는 질병/열/물 관리 영향 분석을 마무리하는 동시에 2단계 리빙랩 프로토타입을 통하여 확인한 주요 결과를 1단계 연구에 반영하였다. 2단계에서는 인도네시아 리빙랩 대상지에 방문하여 리빙랩을 수행하며, 검증 과정을 거쳐 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입을 도출하였다. 마지막 3단계에서는 1단계와 2단계 연구 결과를 종합하여 C4V 인덱스를 개발하고, 동시에 기후변화 완화 가이드라인을 개발하고 검증을 진행하였다.

분야	연구수행내용	연구추진일정												활동목표
		12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	
(1단계) 기후변화에 따른 복합재난(질병, 열, 물 관리) 영향요인 도출														
질병 영향	질병 사례 진단 및 도시 변화 예측	●	·····		●									기후변화에 따른 질병 영향 요인 규명
	질병-도시 상호작용 분석				●	·····		●						
열 영향	미래 열섬포텐셜 핫스팟 도출	●	·····		●									기후변화에 따른 열 영향 요인 규명
	핫스팟 결정요인 분석				●	·····		●						
	열섬 포텐셜 저감방안 제시								●	·····	●			
물 관리 영향	그린인프라(GI) 분석	●	·····		●									기후변화에 따른 물 관리 영향 요인 규명
	도시홍수 취약성 지수 제시 및 취약 예측 지역 도출				●	·····		●						
	홍수 위험(리스크) 지수 개발 및 녹지축 도출								●	·····	●			
(2단계) 기후변화 영향 적응을 위한 리빙랩 프로토타입 개발														
공통	리빙랩 프로토타입 개발							●	·····	●				기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입 개발
	리빙랩 프로토타입 검증								●	·····				
(3단계) C4V 인덱스 개발 및 기후변화 완화 가이드라인 제안														
공통	C4V 인덱스 개발								●	·····	●			C4V 인덱스 개발, 기후변화 완화 가이드라인 제안
	완화 가이드라인 개발									●	·····	●		
	완화 가이드라인 검증											●	·····	

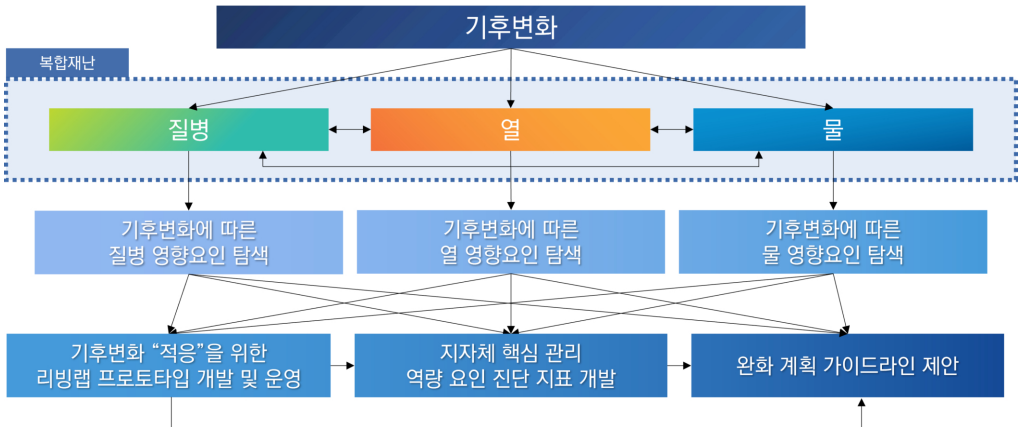
[그림 6] 연구 추진 일정

II장. [1단계] 기후변화에 따른 분야별 영향 요인 탐색

제 1절. 연구 목적 및 범위

1. 연구 목적

연구 수행 과정 중 1단계에 해당하는 '기후변화에 따른 분야별 영향 요인 탐색'은 인도네시아의 해안도시를 대상으로 질병(풍토병), 열(열섬), 물(홍수)에 대한 재난 발생 현황을 진단한 후, 재난 발생에 영향을 미치는 해안도시 지역의 특성을 분석하여 영향 요인을 도출한다. 이와 함께 지역에서 기후변화로 인한 재난 발생 가능성을 예측하고 관리할 수 있도록 재난별 위험 지수를 개발한다. 1단계 연구 과정에서 도출한 재난별 주요 발생지역 현황과 재난 발생 영향 요인을 바탕으로 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입을 개발하고 기후변화 완화 전략을 제안하는 데 활용하고자 한다.



[그림 7] 연구내용

2. 연구 범위

1단계는 재난별 현황 진단→주요 발생 지점 도출→영향 요인 탐색→현지 조사를 통한 재난 발생 영향 요인 도출 및 복합재난 발생 가능성 파악→위험지수 개발로 구성되며, 재난의 특성을 고려하여 재난별 연구 수행 방법을 달리 적용하였다. 예를 들어, 질병은 풍토병 발병 현황을 지역 보건소에서 수집·관리하고 있어, 행정구역 단위로 구축된 데이터를 분석에 활용하고 질병의 발병 특성을 고려하여 지역의 인구·사회경제·물리적 특성과 질병 발병 간의 관계를 분석하였다. 반면, 열은 열섬현상을 파악하는 데 사용되는 지표면 온도, 대기 온도 등을 위성 자료를 기반으로 추출한 후 사용하였다. 재난별 세부 연구 수행 범위는 다음과 같다.

① 기후변화에 따른 질병 영향 요인 탐색

- 현황 진단: 인도네시아의 과거와 현재 기후변화로 인한 풍토병 현황 진단(PESTEL 분석)
- 주요발생지점 도출: 연구 대상지인 자카르타와 세마랑을 대상으로 풍토병 주요발생지역 파악
- 영향 요인 탐색: 해안도시의 사회경제적 · 물리적 · 환경적 특성이 풍토병 발병에 미치는 영향을 분석하여 영향 요인 탐색
- 현지 조사: 현장조사와 리빙랩을 통해 풍토병 발병 영향 요인 도출, 기후변화로 인한 풍토병 확산 및 복합재난 발생 가능성 파악
- 위험지수 개발: 연구 결과를 종합하여 기후변화로 인한 풍토병 확산을 예측하는 위험지수 개발

② 기후변화에 따른 열 영향 요인 탐색

- 현황 진단: 인도네시아의 기후변화로 인한 열 영향 현황 파악
- 주요발생지점 도출: 연구 대상지인 자카르타와 세마랑을 대상으로 주요 열 위험 지역 파악
- 영향 요인 탐색: 해안도시의 사회경제적 · 물리적 · 환경적 특성이 열섬 현상에 미치는 영향을 분석
- 현지 조사: 현장조사와 리빙랩을 통해 열 영향 요인 도출, 기후변화로 인한 열 위험 증가 및 복합재난 발생 가능성 파악, 시뮬레이션을 통한 열섬포텐셜 대응방안 제시
- 위험지수 개발: 연구 결과를 종합하여 기후변화로 인한 열 영향 확산을 예측하는 위험지수 개발

③ 기후변화에 따른 물 관리 영향 요인 탐색

- 현황 진단: 인도네시아의 기후변화로 인한 물 관리 현황 파악
- 주요발생지점 도출: 연구 대상지인 자카르타와 세마랑을 대상으로 주요 홍수 취약 지역 파악
- 영향 요인 탐색: 해안도시의 사회경제적 · 물리적 · 환경적 특성이 홍수에 미치는 영향을 분석
- 현지 조사: 현장조사와 리빙랩을 통해 홍수 영향 요인 도출, 기후변화로 인한 홍수 위험 증가 및 복합재난 발생 가능성 파악, 그린인프라 네트워크 구축 시 영향력 완화 가능성 분석
- 위험지수 개발: 연구 결과를 종합하여 기후변화로 인한 홍수 발생을 예측하는 위험지수 개발

제 2절. 기후변화에 따른 질병 영향 요인 도출

1. 세부 연구 배경 및 목적

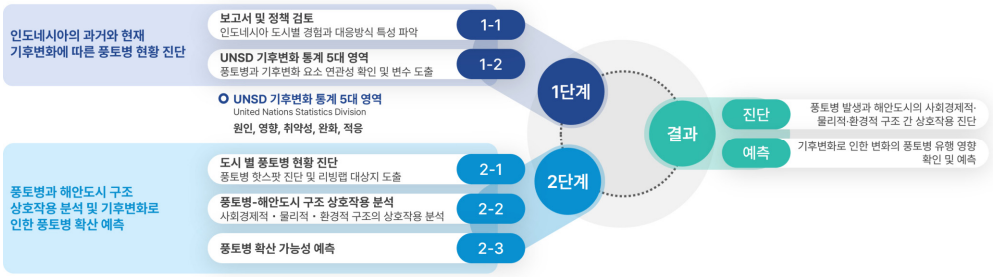
인도네시아는 기후변화로 인해 연중 평균 기온 상승, 해수면 상승 및 지반침하 심화 등의 문제를 겪고 있다. 2024년 4월 기온은 1991년~2020년 평균인 26.9도보다 0.89도 높은 27.7도를 기록하여 40년 만에 가장 더운 4월 기록을 경신하였고, 기상청의 2025년 기후전망 보고서(Climate Outlook 2025)에 따르면, 2025년 5월~7월까지 전국 평균기온이 0.3도~0.6도 상승할 예정이며 자바섬, 남부 수마트라, 동부·서부 누사텡가라 지역에서 기온 상승의 영향이 클 것으로 나타난 바 있다. 특히, 2024년에는 엘니뇨의 영향으로 고온 다습한 기온이 지속되면서 병원균을 전파하는 모기의 개체수와 활동 기간이 증가함에 따라 풍토병 발병률이 2023년 대비 2.5배 증가하였으며, 사망자 수 또한 약 3배 증가하였다.

기후변화로 인해 뎅기열 환자가 매년 증가하고 있음에도 불구하고 풍토병 대응을 위한 보건 인프라와 전문 인력이 부족하여 적절한 치료를 받지 못하는 상황이 발생하고 있다. 예를 들어, 자바섬 반둥(Bandung)지역에서는 뎅기열 환자들이 급증하였으나 이를 수용할 수 있는 병원 내 침상이 부족해 복도 간이 침상이나 휠체어에서 치료를 받기도 하였다[1]. 이와 함께 기후변화로 인한 식량 생산량 감소는 영양 부족의 원인이 되며, 이는 면역력 저하를 유발해 풍토병에 대한 취약성을 증가시킨다. 특히 적정량의 영양분 섭취와 보건 서비스에 대한 접근성이 낮은 저소득층에서 풍토병 발병률이 증가하고 있다(WHO, 2023)

이와 같은 배경에서 본 연구는 기후변화로 인한 풍토병 영향 요인을 도출하고 향후 기후변화로 인한 풍토병 확산 가능성을 예측하고자 하였다. 연구는 2단계로 구성되어 있으며([그림 8] 참고), 1단계에서는 인도네시아와 국제기구에서 발간한 풍토병 대응 보고서, 연구 문헌, 통계 자료를 기반으로 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 발병 현황을 진단하였다. 이후 2단계에서 해안도시의 풍토병 발병 실태를 핫스팟 분석을 통해 파악한 후 풍토병 발병에 영향을 미치는 해안도시의 사회경제적 · 물리적 · 환경적 특성을 규명하였다. 이를 통해 기후변화로 인한 풍토병 확산 가능성을 예측하고 대상국에서 진행될 리빙랩 소재를 도출하였다. 이후 현지 조사를 통해 풍토병 발병 영향 요인과 기후변화로 인한 풍토병 확산 및 복합재난 발생 가능성을 파악한 후, 연구 결과를 종합하여 풍토병 확산을 예측하는 위험지수를 개발하였다.

---

1) 연합뉴스(2024/04/05), "엘니뇨에 인니도 뎅기열 '비상'…사망자 작년대비 3배로 급증", https://www.yna.co.kr/view/AKR20240405055100104



[그림 8] 풍토병 연구 진행 체계

2. 인도네시아의 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 현황 진단

1) 연구 방법

본 연구과제는 인도네시아의 과거와 현재 풍토병에 대한 경험과 대응 방식을 파악하기 위하여 인도네시아 국가재난관리청, 인도네시아 보건복지부, 지방정부(자카르타·세마랑), WHO에서 2015년~2023년에 출판된 10권의 주요 보고서와 데이터를 중심으로 검토하였다(〈표 2〉 참고). 이후 검토 프레임워크를 구조화하여 문헌 분석을 진행하였으며, 2단계에서 진행되는 풍토병 발병에 영향을 미칠 수 있는 변수 후보군을 도출하였다.

풍토병 유형 및 발병 현황(발병률, 발병 시기 및 기간 등), 발병지역의 지리적·환경적·사회경제적 특성 등 전반적인 풍토병 발병 현황을 중심으로 진행하였다. 이후 거시환경분석(PESTEL)을 통해, 도시별 거시환경 6대 부문(PESTEL: 정치·정책(P), 경제·산업(E), 사회(S), 기술·정보(T), 환경(E), 법·규제(L))에서의 기후변화로 인한 풍토병 발생과 그 파급효과 및 대응의 변화를 분석하였다.

〈표 2〉 검토 대상 문헌 목록

제목	유형	언어	발행처	발행일
NatonalActon Plan for Acceleratonof Malaria Eliminaton2020-2024	보고서	영어	Ministry of Health of The Republic of Indonesia	2020
The Role of Village Malaria Cadres and Consultants in Controlling and Eliminating Malaria in Eastern Indonesia	보고서	영어	UNICEF	2022
Community-Based Surveillance: Indonesia Case Study — Community Epidemic & Pandemic Preparedness Programme (April 2021)	보고서	영어	The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC)	2021
Evidence-based Data and Information on the Impact of Climate Change in the Health Sector in Indonesia	보고서	영어	UNICEF, Ministry of Health, Indonesia	2021
Health Governance and Dengue in Southeast Asia	보고서	영어	S. Rajaratnam School of International Studies	2015
The Republic of Indonesia Health System Review	보고서	영어	WHO	2017
National Strategic Plan (NSP) for the Dengue Control Programme2021-2025	보고서	인니어	Ministry of Health of The Republic of Indonesia	2021
Dengue 2022 Annual Report	보고서	인니어	Ministry of Health of The Republic of Indonesia	2023
Semarang Health Profile 2022	보고서	인니어	Health Department of Semarang	2023
DKI Jakarta Province Health Profile 2022	보고서	인니어	Health Department of Jakarta	2023

2) 연구 주요 결과

① 인도네시아 풍토병 발병 현황

인도네시아에서는 주로 말라리아와 뎅기열(이하 뎅기로 표기)가 인도네시아 전역에서 유행하고 있으며 토착화된 상태로 파악되었다. 두 풍토병은 기후에 민감하며 모기를 매개체로 감염된다는 점에서 고온 다습한 환경에서 확산에 취약하다. 말라리아는 식생의 밀도가 높은 숲, 습지와 해안 지역에서 발병률이 높은 반면, 뎅기는 도시 지역에서 발병률이 높고 비교적 고도가 낮은 지역에서 전파된 사례가 많은 것으로 나타나 지리적 특성에 따라 유행하는 풍토병에 차이가 있음을 확인하였다.

② 거시환경분석(PESTEL)

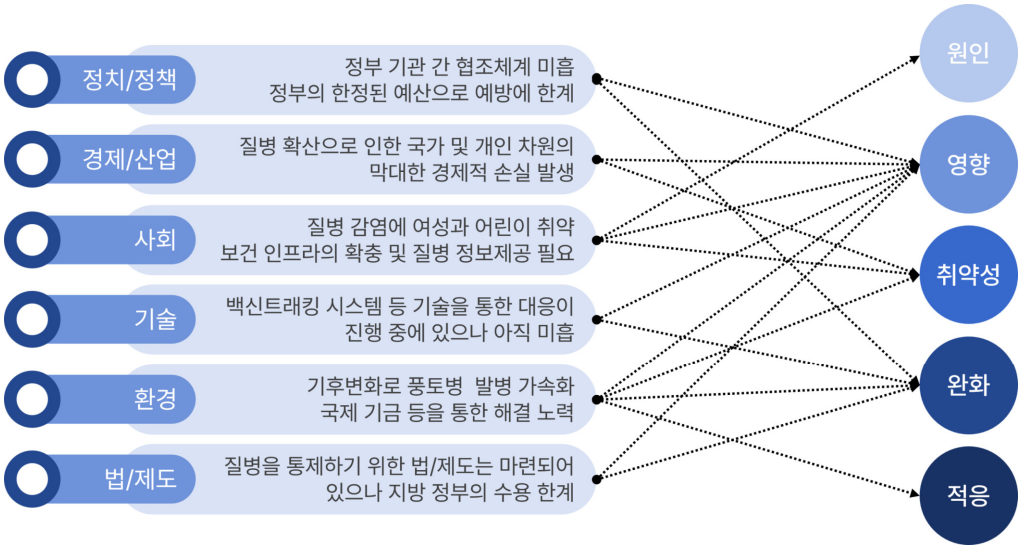
거시환경분석(PESTEL)을 수행한 결과, 정치·정책(P) 부문에서 정부부처간, 지방-중앙정부간

협조체계가 필요하며, 한정된 예산이 대응의 한계로 작용하고 있다는 것을 도출하였다. 경제·산업(E) 부문에서 풍토병의 발생은 생산성 저하, 의료비용 증가 등으로 국가 및 개인 차원의 막대한 경제적 손실을 초래한 것으로 확인되었다. 사회(S) 측면에서는 여성과 어린이가 풍토병에 특히 취약하며, 풍토병에 대응하기 위해 보건 인프라의 확충과 충분한 정보제공이 필요하다는 것을 도출하였다. 기술(T) 부문의 경우 인도네시아는 백신 트래킹 시스템, 감시 시스템, 역학조사 파일럿 등 풍토병 대응을 위한 다양한 기술적 노력을 기울이고 있으며, 환경(E)에서는 기후변화로 인해 기후에 민감한 풍토병의 발병이 가속화되고 있어 기후기금 등을 해결을 위해 사용하고 있다는 것을 파악할 수 있었다. 마지막으로 법·제도(L) 부문 분석 결과, 인도네시아에서의 풍토병 대응을 위한 법과 제도는 마련되어 있으나 부족한 대응 역량 등 수용 측면에서의 한계가 존재하고 있음을 확인하였다.

〈표 3〉 거시환경분석(PESTEL) 결과

구분	뎅기	말라리아
정치/정책(P)	- 커뮤니티 기반 대응 프로그램 여럿 시도됨(MoH, 적십자사) - 3M Plus 대응(모기의 서식 및 질병 전파 예방) - 인도네시아 기후변화 신탁기금을 통해 재정적 지원, 중앙정부에서 968억 루피아(약 81억 원)를 뎅기대응 프로그램에 배정	- 2030년까지 Malaria Free 선언하였으나 대응에 한계가 있음
경제/산업(E)	- 장애보전손실수명(DALY)로 측정하였을 때 뎅기가 국가에 미치는 손실이 큼 - 관광지역에 뎅기발생 우려(공항 등) - 뎅기발생 건당 피해액은 791~1250달러에 이르며, 인니 전체 기준으로 381억 달러 (2015)	- 말라리아 예방은 식량 생산, 수산업 및수출 산업의 생산성 향상, 이주 지역의 보호를 통해 국가 경제에 기여 - 중저소득일수록 말라리아 감염 확률이 높음
사회(S)	- 청년, 학생, 신앙, 여성 커뮤니티가 질병 대응을 위해 조직적으로 활동 - 뎅기연구와 대응에 민-관-학 협력이 이루어짐(연구주권 확보노력) - 도시확산으로 인한 보건 인프라, 보건인력 부족	- 가정주부와 농업인의 감염확률이 높음(조기기상/야외활동) - 보건시설 관련 정보 부족, 열악한 주거, 참여자 특성 등이 말라리아에 영향
기술(T)	- 벡터 추적, 맵핑, 역학조사 파일럿을 통해 조기경보시스템과 뎅기 예방 국가 가이드라인 제작 - 발병지 100m 반경에 대한 모기 추적·세마랑에서조기건강경보시스템 개발하여 활용	- 말라리아 감시 시스템(SISMAL) 개발 및 운영하여 마을, 민간 단위까지 확산 - 말라리아 백신 트래킹시스템 SMILE 개발 및 운영(WHO, MoH)
환경(E)	- 기후 취약성 질병 맵핑이 이루어졌으나 활용되지 않음 - 기후변화와 열섬현상으로 뎅기 가속화	- 기후변화가 말라리아 벡터 생태와 발병에 영향을 미침 - 기후변화로 인한 식량생산 감소는 영양부족의 원인이 되어 말라리아를 비롯한 전염병 증가의 원인이 됨

구분	뎅기	말라리아
법/제도(L)	- 뎅기열 비상사태 선포가법적으로 의무·모기 서식지 관리 미비 시 벌금 - 감시시스템이 수동적이고 평가체계가 없음	- 말라리아 박멸 프로그램 진행 - 민간의 보건시설이 국가 표준을 따라가지 못함 (대응역량 부족) - 중앙-지방정부 대응수준 차이 한계



[그림 9] 거시환경분석(PESTEL)과 기후변화 5대 영역

③ 변수 검토 및 후보군 도출

본 연구는 2단계 분석에서 활용할 주요 변수를 도출하기 위하여 인도네시아의 기후변화 및 지역 특성과 풍토병 발병 간의 관계를 다룬 연구 논문을 중심으로 검토하였다. 이후 United Nations Statistics Division(UNSD)의 기후변화 5대 영역인 원인, 영향, 취약성, 완화, 적응을 중심으로, 선행연구를 통해 검토한 변수와 UNSD 기후변화 지표의 연계성을 검토하였다.

주요 연구 문헌을 검토한 결과, 풍토병 확산에 기후, 확산 지역의 지리적·환경적·사회적 특성이 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 기후 환경 중 온도, 습도, 강수량은 풍토병 발병의 매개체인 모기의 서식에 주요한 영향을 미치며(Ashari Rasjid et al., 2019; Kesetyaningsih et al., 2018; Ishak and Kasman, 2018), 풍속은 모기의 이동 거리 및 사람과의 접촉에 영향을 미치는 것을 확인하였다(Ishak and Kasman, 2018). 지리적 여건 중 토지피복(land cover classification), 고도는 풍토병의 발생 정도, 즉 규모에 영향을 미치며(Kesetyaningsih et al., 2018), 계절에 따른 풍토병 발생 패턴은 식생지수(Normalized difference vegetation

index, NDVI)에 영향을 받는 것으로 나타났다(Astuti et al., 2019). 환경적 특성 중 도시 면적의 확대는 풍토병 확산을 촉진하는 것으로 나타났으며, 주택 밀도가 높은 지역일수록 풍토병 발병률이 증가하는 것을 확인하였다(Adnan, 2021). 마지막으로 지역의 사회적 특성 중 연령은 풍토병 전염에 대한 노출 정도에 영향을 미치며(Kesetyaningsih et al., 2018), 노동 인구는 비노동 인구에 비해 모기의 활동량이 많은 시간대에 외부에서 보내는 시간이 많아 풍토병 전염에 취약한 것으로 나타났다(Astuti et al., 2019).

연구 문헌 검토를 토대로 도출한 풍토병 발병에 영향을 미치는 주요 변수를 UNSD의 기후변화 영역을 적용한 결과, 기후 여건은 기후변화 영역 중 '영향' 부문에 해당하는 변수로 구성되어 있으며, 지리적 여건과 사회적 특성은 '취약성', '원인'에 해당하는 변수를 다수 포함한다는 특징을 보인다(〈표 4〉 참고).

〈표 4〉 기후변화-도시구조-풍토병 변수 검토

구분	변수	UNSD 기후변화 영역	UNSD 기후변화 지표	관련 연구 문헌
기후 여건	습도(Humidity)	영향 (Impacts)	• 상대습도(Relative humidity) • 기온(Air temperature)	Ashari Rasjid et al. (2019), Banu et al. (2011), Ishak and Kasman (2018), Kesetyaningsih et al. (2018)
	상대습도 (Relative humidity)	영향 (Impacts)	• 상대습도(Relative humidity) • 기온(Air temperature)	Banu et al. (2011), Halide and Ridd (2008)
	기온 (Air temperature)	영향 (Impacts)	• Cold nights, Warm days • 상대습도(Relative humidity) • 기온(Air temperature)	Ashari Rasjid et al. (2019), Ishak and Kasman (2018)
	평균 온도 (Average temperature)	영향 (Impacts)	• Cold nights, Warm days • 상대습도(Relative humidity) • 기온(Air temperature)	Banu et al. (2011), Tosepu et al. (2018)
	최고온도-최저온도 편차(Min-maximum temperature)	영향 (Impacts)	• Cold nights, Warm days • 상대습도(Relative humidity) • 기온(Air temperature)	Tosepu et al. (2018)
	강우량 (Rainfall)	영향 (Impacts)	• 강수량(Precipitation)	Ashari Rasjid et al. (2019), Ishak and Kasman (2018), Kesetyaningsih et al. (2018)
	강수일수 (Rainy day)	영향 (Impacts)	• 강수량(Precipitation)	Ashari Rasjid et al. (2019)
	일조시간 (Duration of sunlight)	-	-	Ashari Rasjid et al. (2019)

구분	변수	UNSD 기후변화 영역	UNSD 기후변화 지표	관련 연구 문헌
	풍속(Wind speed)	-	-	Ishak and Kasman (2018)
	강수량 (Precipitation)	영향 (Impacts)	• 강수량(Precipitation)	Banu et al. (2011), Makhapakron and Tripathi (2005), Wu et al. (2007)
지리적 여건	토지피복 (Land cover)	영향 (Impacts)	• 총 토지면적에서 황폐화된 토지의 비율(Proportion of land that is degraded over total land area)	Kesetyaningsih et al. (2018)
		취약성 (Vulnerability)	• 기후변화 영향에 취약한 수자원(Water bodies vulnerable to climate change impacts) • 지표면물감소(Reduction of surface water bodies)	Kesetyaningsih et al. (2018)
	고도(Altitude)	-	-	Astuti et al. (2019)
	식생지수(NDVI)	-	-	Adnan (2021), Brage et al. (2021)
사회적 요인	연령 (Older age)	원인 (Drivers)	• 인구(Population)	Adnan (2021)
	노동인구 (Working population)	-	-	Schmidt et al. (2011) Romeo-Aznar et al. (2022)
	도시 인구 (Urban population)	원인 (Drivers)	• 도시 거주 인구(Population)	Telle et al. (2021)
	소득 수준 (Income level: slum/wealthier area)	취약성 (Vulnerability)	• 국제 빈곤선 미만에 해당 하는 인구 비율(Proportion of the population living below the international poverty line by sex, age, employment status and geographic location) • 슬럼, 임시거주지, 비적정 주택에 거주하는 인구수 (Proportion of urban population living in slums, informal settlements or inadequate housing)	Adnan (2021)
환경적 요인	주택 밀도	-	-	Husnina et al. (2019)
	녹지 비율	완화 (Mitigation) 적응 (Adaptation)	• 총 산림 지역(Forest area) • 도시의 녹지 면적(Green urban area)	Gubler(2011) Akhtar et al.(2016)

구분	변수	UNSD 기후변화 영역	UNSD 기후변화 지표	관련 연구 문헌
	도시화	적응 (Adaptation)	• 총 도시 면적(Total area of cities)	Wolfe et al. (2023) Thakali et al.(2022)
	폐수 처리 비율	적응 (Adaptation)	• 총 폐수 발생량(Total wastewater generated) • 폐수처리(Total wastewater treated)	Bangs et al. (2006)
기타	ENSO (ElNiño Southern Oscillation) Houseindex	-	-	Arcari et al. (2007)
	SOI (Southern Oscillation Index)	-	-	

3. 풍토병과 해안도시 구조간 상호작용 분석 및 기후변화로 인한 풍토병 확산 예측

본 연구는 풍토병과 해안도시 구조 간의 상호작용을 복합적으로 분석하였다. 먼저 자카르타와 세마랑을 대상으로 풍토병(뎅기) 발병 현황(빈도, 규모, 패턴)을 파악하였다. 구체적으로는 시·자치구 단위 발생 현황을 파악하고, 도시특성(인구 등)에 따른 풍토병 발생현황을 확인하였다. 이후 핫스팟 분석을 통해 리빙랩 대상지를 도출하였다. 이와 함께 해안도시에서 발생하는 풍토병 양상을 전반적으로 고려하기 위하여 자바섬에 위치한 해안도시들을 대상으로 풍토병과 해안도시 구조간 상호작용을 분석하였다.

1) 도시별 풍토병 현황 진단 및 풍토병 핫스팟 도출

① 분석 방법

본 연구는 도시별 풍토병 현황을 진단하기 위하여 ① 시·자치구 단위로 풍토병 발병 현황을 파악하였으며, ② 마을 단위의 풍토병 데이터를 확보하여 도시특성(인구 등)에 따른 풍토병 발생 현황을 확인하였다. 이후 ③ 풍토병 핫스팟 분석을 통해 도시 내 풍토병 발생 패턴을 확인하고, 이를 기반으로 리빙랩 대상지를 도출하였다.

연구 수행 과정(문헌 분석, 전문가 인터뷰)에서 자카르타와 세마랑은 말라리아보다 뎅기가 주로

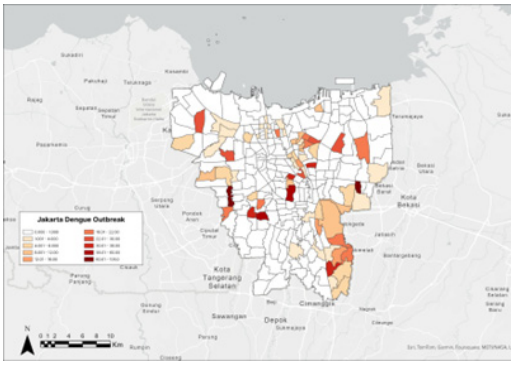
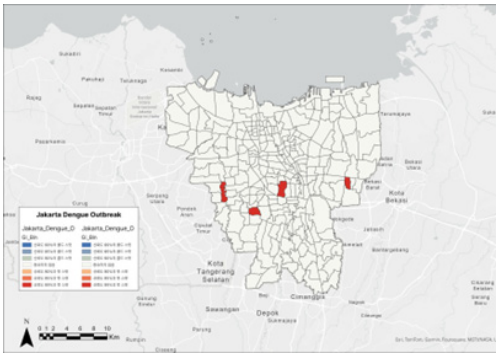
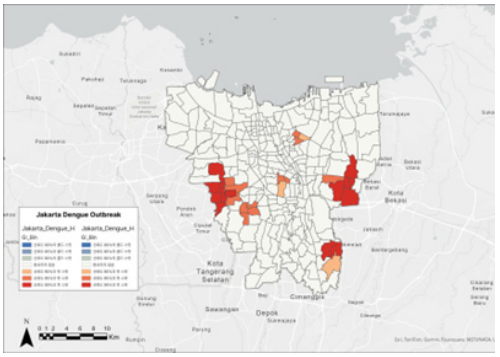
발생하고 있음을 확인하였다. 특히 말라리아는 자카르타에서 2021년~2022년에서 권역별 발생 건수가 최대 50건 이하로 나타난 반면, 뎅기는 2021년 대비 2022년에 발생 건수가 크게 증가하였음을 사전 현황 분석을 통해 확인하였다. 이를 기반으로 본 연구진은 대상지역의 풍토병을 뎅기로 한정하여 분석을 수행하였다. 연구에서 사용한 데이터는, 자카르타의 경우, 인도네시아 통계청(Badan Pusat Stlatistik, 이하 BPS)의 VIllage Potential Survey(PODES) 자료에서 2018년~2021년 동안 보고된 뎅기 발병 건수(Outbreak)를 사용하였다. 해당 뎅기 발병 건수는 인도네시아 정부의 공식 집계 기준에 따라 확인된 감염 건수에 해당된다. 세마랑은 세마랑시에서 운영 중인 뎅기 통합 데이터 포털(Tunggal Dara)에서 제공하는 2019년~2023년 간 발생한 월별 뎅기 발병 자료를 사용하였다. 분석에서는 마을 단위로 데이터를 구축하여 활용하였다.

구축된 자료를 기반으로 풍토병이 주로 발생한 지역을 파악하기 위해 핫스팟 분석을 수행하였다. 분석에는 핫스팟 분석(Getis-Ord Gi)과 Local Moran's I 분석을 활용하여 풍토병의 핫스팟 지역을 도출하였다. Getis-Ord Gi는 특정한 지역에 집단화된 사건을 분석하여 핫스팟 발생 양상을 파악하는 기법에 해당하며, Local Moran's I 분석은 주변 지역에 비해 높거나 낮은 값을 가진 지역들의 군집과 공간 이상값을 식별하여 핫스팟을 도출하는 기법이다. 이러한 분석 결과를 종합하여 풍토병 핫스팟 발생 양상을 종합적으로 파악하고 리빙랩 대상지역을 도출하였다.

② 분석 결과

핫스팟 분석 결과, 자카르타는 도시 중심부에 위치한 마을을 중심으로 뎅기가 집중적으로 발생하는 양상을 보인다. 특히, 2021년 대비 2022년 뎅기의 발병 건수가 크게 증가하였으며, 공간적으로는 Jakarta Timur, Jakarta Barat, Jakarta Selatan를 중심으로 뎅기가 발생하였다. 또한, 저층 주거지 밀집 지역이자 인구 밀도가 높은 Malaka Sari(105건, 서부 중앙에 위치)와 Ulujami(97건, 동부 중앙에 위치)에서 가장 많은 뎅기 발생 건수를 기록하였다. 자카르타의 뎅기 발병 건수와 뎅기 발병 건수를 인구로 통제한 결과에서 지역별 발병 현황은 모두 유사하게 나타났으며, 핫스팟 분석(Getis-Ord Gi) 결과에서도 도시 서부 중앙과 동부 중앙에 밀집된 형태로 나타났다(〈표 5〉 참고). 주로 저층 주거지역(단일 지역의 발생 건수가 높은 Malaka Sari와 Ulujami 지역)과 산업지역(Cakung Barat)을 중심으로 핫스팟이 형성되었음을 확인하였다.

〈표 5〉 자카르타 뎅기 핫스팟 분석 결과

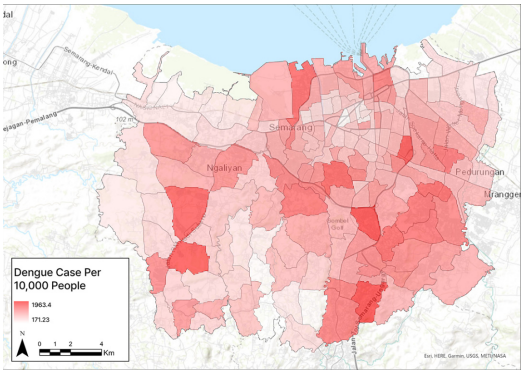
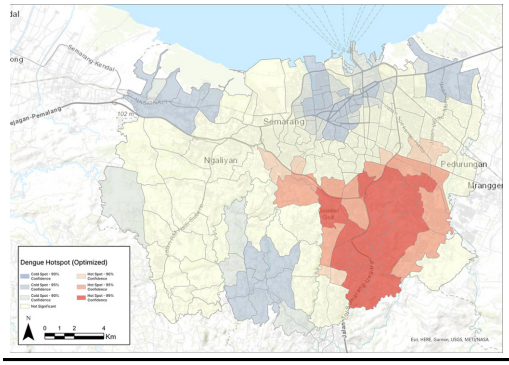
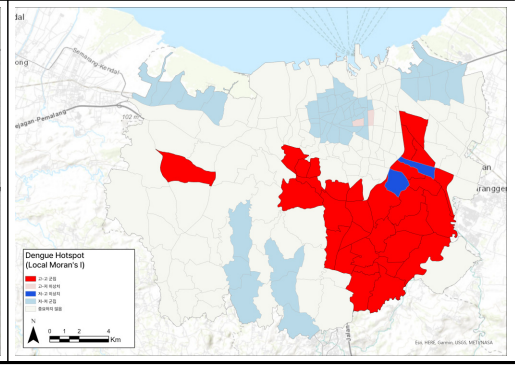
10,000명당 뎅기 발생 건수	
	
Getis-Ord Gi (Fixed Band)	Getis-Ord Gi (Contiguity Edge)
	

〈표 6〉 자카르타 뎅기 핫스팟 유형

	핫스팟 유형 1	핫스팟 유형 2
지역명	Malaka Sari, Ulujami	Cakung Barat
지역 성격	저층 주거지 밀집 지역	공장 및 창고
위성 지도		

세마랑은 도시 동남부 지역에서 뎅기가 집중적으로 발생하였다. 발생 연도에 따라 지역별 뎅기 발병 양상에 다소 차이가 있으나, 전반적으로 언덕 및 산림이 위치한 도시 동남부에 뎅기 발생이 집중되었으며, Sendang Mulyo(536건), Tlogosari Kulon(397건) 지역에서 주로 발생한 것을 확인하였다. 세마랑의 핫스팟 분석 결과는 10,000명당 뎅기 발생 건수 현황 결과와 유사하게 도출되었다. 주요 핫스팟 지역으로는 저층 주거지 밀집 지역(Meteseh, Sumurboto)과 산림과 녹지에 인접한 주거지역(Jabungan, Jangli, Mangunharjo)이 있다.

〈표 7〉 세마랑 뎅기 핫스팟 분석결과

10,000명당 뎅기 발생 건수	
	
Getis-Ord Gi (Fixed Band)	Local Moran's I
	

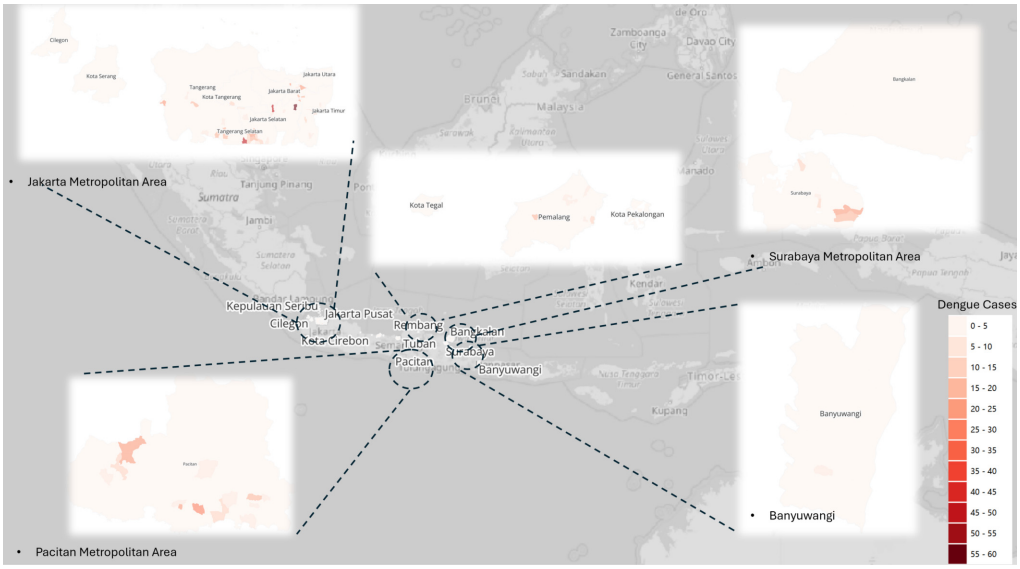
〈표 8〉 세마랑 멩기 핫스팟 유형

	핫스팟 유형 1	핫스팟 유형 2
지역명	Meteseh, Sumurboto	Jabungan, Jangli, Mangunharjo
지역 성격	저층 주거지 밀집 지역	산림 및 녹지와 인접한 주거지역
위성 지도		

2) 풍토병과 해안도시 구조 상호작용 분석

① 분석 범위

본 연구는 풍토병에 영향을 미치는 해안도시의 특성을 도출하기 위해서 자카르타와 세마랑이 위치한 자바섬의 해안도시를 대상으로 분석 대상지역을 확대하여 풍토병-해안지역의 도시 구조 간 상호작용을 분석하였다. 연구 분석 단위는 마을(village)이며 자카르타 및 세마랑과 지리적·기후적 환경이 유사한 파씨탄(Pacitan), 름방(Rembang), 수라바야(Surabaya), 반뉴왕이(Banyuwangi) 대도시권을 포함한다. 이를 통해 도출된 연구 결과는 자카르타와 세마랑과 유사한 환경을 지닌 인도네시아 자바섬의 해안도시 특성을 고려해 향후 연구 확장을 도모함과 동시에 해안 도시의 특성을 반영하여 대규모의 공중보건 및 도시계획 정책을 수립하고 이를 기반으로 한 국제협력 사업의 방향을 설정하는데 활용할 수 있다.



[그림 10] 연구 대상지의 2020년 풍토병(뎅기) 발생 현황[단위: 건 수]

② 분석 방법

본 연구는 풍토병 발생에 영향을 미치는 해안도시 구조를 도출하기 위하여 K-Means Clustering과 의사결정나무모형을 사용하였다. K-Means Clustering은 뎅기 발생에 영향을 미치는 주요 특성 간의 인과관계와 동태적 변화를 분석하는 데 활용하였으며, 이를 통해 해안도시내 지역 간 유사성과 뎅기 발병 현황을 살펴보고자 하였다. 이후 의사나무결정모형을 사용하여 자카르타와 세마랑의 뎅기 발생에 영향을 미치는 지역의 지리적·환경적·사회경제적 특성을 규명하고자 하였다. 의사결정나무모형은 데이터에서 관측된 패턴을 기반으로 트리 구조를 생성하여 질병 발병 가능성을 예측하는 데 특화된 분석 기법이다. 연구에서는 마을을 단위로 마을 내 뎅기 발병 유무, 발병 건수를 종속변수로 설정하여 해안도시(자카르타, 세마랑)에서 발생하는 풍토병의 영향 요인을 도출하고자 하였다. 이를 통해 풍토병과 해안도시 구조의 복합적인 상호작용을 분석하고 기후변화에 의한 영향을 확인하여 향후 도시의 풍토병 확산과 취약 요인을 도출하였다. 이후 현지 조사를 통해 새롭게 확인된 영향 요인과 복합 재난을 유발하는 취약 요소를 기반으로 지표체계를 구축한 후 풍토병 발병 위험 지수를 도출하였다.

③ 분석 자료

연구 수행 과정 중 “1단계: 문헌 검토 및 PESTEL 분석“에서 도출된 풍토병 확산 취약 요인을 비롯하여 자카르타-세마랑 해안지역의 특성, 전문가 자문 내용을 바탕으로 풍토병 발병 영향

요인을 도출하였다. 이후 자료 구득 가능성을 고려하여 아래 〈표 9〉와 같이 최종 투입 변수를 선정하였다.

자카르타와 세마랑과 같은 인도네시아의 해안지역은 홍수에 취약한 것으로 알려져 있다. 특히, 자카르타는 13개 강이 교차하는 늪지대 해안에 위치하고 있으며 도시의 일부 지역의 지반이 60cm 가량 가라앉은 상황이다(한국일보, 2021/08/19[2]). 세마랑 역시 해안지역을 중심으로 지반침하로 인해 상습적으로 홍수가 발생하고 있는 실정이다. 홍수를 촉진하는 지반침하는 지리적 특성(해안지역의 염수 유입)과 함께 낮은 상수도 보급률과 수처리 시설이 부족하여 지하수의 과도한 취수의 영향이 큰 것으로 보인다. 이와 같은 지속적인 홍수 발생은 모기가 번식하기 용이한 웅덩이를 만들어 뎅기 확산에 영향을 미치며, 출처가 불분명한 물 사용과 수처리 시설 부족은 마을과 가정에 오염된 물 유입을 증가시킬 수 있다는 점에서 뎅기 발생에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 1단계에서 도출한 영향 요인 중 폐수처리 시설을 물 공급과 수질 오염 차원에서 심화하여 세부 변수를 도출하였으며, 기후변화의 풍토병 발병 영향을 고려해 지역의 사회경제적 특성을 대변하는 변수를 선정하였다.

〈표 9〉 투입변수

구분(코드)	변수	설명
R605BK2	풍토병 발병 유무	풍토병 발병 유무 (0: 없음, 1: 있음)
R605BK3	풍토병 발병 건 수	마을 내 풍토병 발병 건 수
R507A	가정 음용수 주요 공급 방식	1: 판매용 생수, 2: 급수시설, 3: 계량기 설치 수도관, 4: 계량기 미설치수도관, 5: 펌프 우물(지하수), 6: 우물, 7: 약수터, 8: 강, 연못, 저수지, 댐, 9: 빗물, 10: 기타
R507B	비음용수 주요 공급 방식	1: 계량기 설치 수도관, 2: 계량기 미설치 수도관, 3: 펌프 우물(지하수), 4: 우물(지하수), 5: 약수터, 6: 강, 연못, 저수지, 댐, 7: 빗물, 8: 기타
R509B2K2	음용수(조리용) 공급 방식: 강	음식조리용 물 공급 방식이 강인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)
R509B2K4	음용수(조리용) 공급 방식: 저수지	음식제조용 물 공급 방식이 저수지인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)
R509B2K5	음용수(조리용) 공급 방식: 빗물	음식제조용 물 공급 방식이 빗물인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)
R509B3K2	음용수(식수) 공급 방식: 강	식수 공급 방식이 강인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)
R509B3K3	음용수(식수) 공급 방식: 운하	식수 공급 방식이 운하인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)
R509B3K4	음용수(식수) 공급 방식: 저수지	식수 공급 방식이 저수지인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)
R509B3K5	음용수(식수) 공급 방식: 빗물	식수 공급 방식이 빗물인 경우 해당(0: 미해당, 1:해당)

2) 한국일보(2021/08/19), "가장 빨리 가라앉는 이 도시 운명, "한국에 달렸다", https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2021081711020001405

구분(코드)	변수	설명
R511A	마을 내 자연수원(약수터 등) 공급지 유무	마을 내 약수터와 같은 자연수원 공급지 존재 여부
R512A	슬럼지역 존재 유무	마을 내 슬럼지역 존재 유무
R512B1	슬럼지역 수	마을 내 슬럼지역 수
R512B2	슬럼지역 내 주거용 건물 수	마을 내에 위치한 슬럼지역의 주거용 건물 수
R512B3	슬럼지역 내 거주민(가구) 수	마을 내 위치한 슬럼지역의 거주민(가구) 수
R513AK2	수질오염 발생	마을 내 수질오염 발생 여부
R510C1	강물오염 발생	마을 내 강물오염(원인:쓰레기)발생 여부
R513AK3	수질오염 원인	마을 내 수질오염 발생 원인(0:발생하지 않음,1:가정 내 사용,2:산업시설,3:기타)
R513AK4	수질오염 민원	마을 내 수질오염 민원 발생 건 수
R601BK3	연간 홍수 발생 건수	연간 홍수 발생 건 수
R601BK4	연간 홍수 피해자	연간 마을 내 홍수 피해를 겪은 주민 수
R704AK2	의료시설 수	마을 내 의료시설 수
R704AK3	가까운 의료시설까지의 거리	마을(중심지)에서 가장 가까운 의료시설까지의 거리
R710	영양실조 발생 건 수	마을 내 영양실조 발생 건 수
R711	저소득층 수	마을 내 저소득층 수

④ 해안도시의 풍토병 발생 유형화

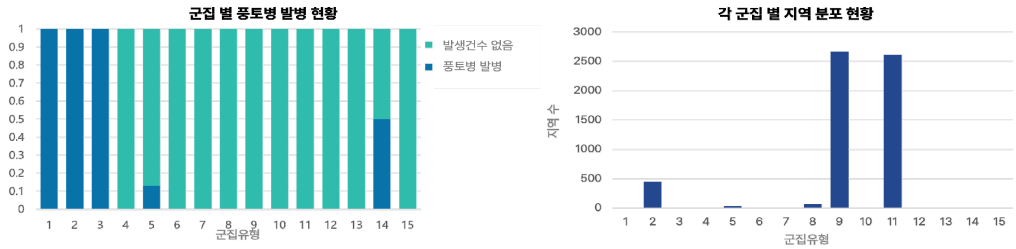
인도네시아 자바섬의 해안 도시에 대한 K-means clustering 분석 결과, 군집 형성은 물 공급원, 의료시설, 수질 오염 여부, 홍수 발생 현황, 슬럼가 및 저소득층 거주 비율과 관련된 것을 확인하였다.

〈표 10〉 ANOVA 분석 결과

변수	Cluster		Error		F	유의확률
	Mean Square	df	Mean Square	df		
가정 음용수 주요 공급 방식	1,099.32	14	1.77	9874	619.53	0.00
비음용수 주요 공급 방식	228.79	14	1.29	9874	177.64	0.00
음용수(요리) 공급 방식: 강	0.03	14	0.02	9874	1.66	0.06
음용수(요리) 공급 방식: 빗물	0.01	14	0.01	9874	1.64	0.06
음용수(요리) 공급 방식: 저수지	0.00	14	0.00	9874	0.42	0.97
음용수 공급 방식: 강	0.00	14	0.02	9874	0.51	0.93
음용수 공급 방식: 운하	0.00	14	0.00	9874	0.85	0.61
음용수 공급 방식: 빗물	0.01	14	0.01	9874	0.94	0.52
음용수 공급 방식: 저수지	0.00	14	0.00	9874	0.19	1.00
마을 내 자연수원 공급지 유무	12.82	14	0.55	9874	23.54	0.00
슬럼지역	7.43	14	0.14	9874	52.87	0.00

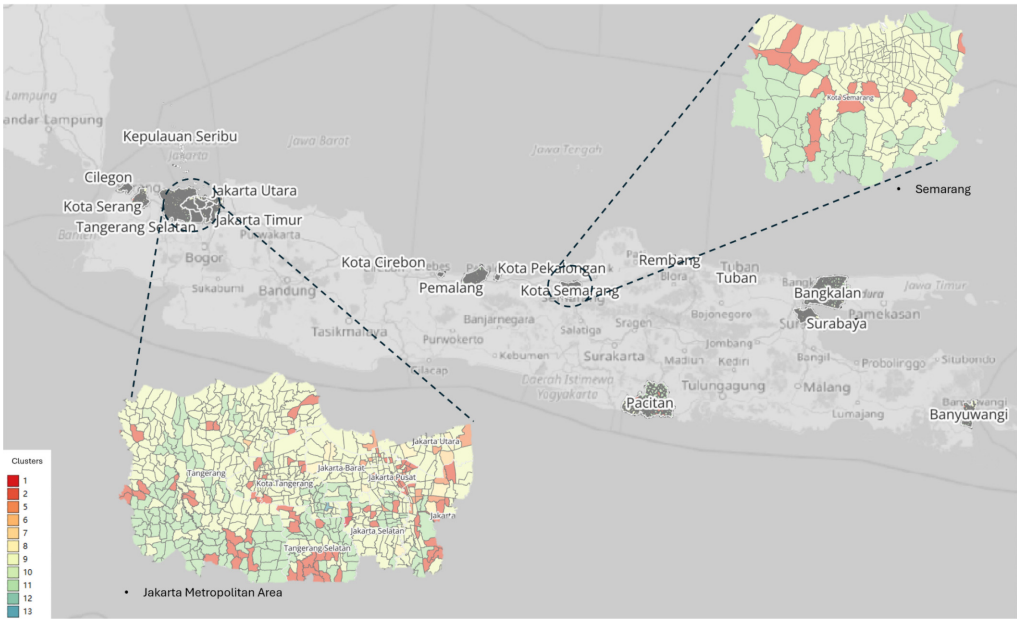
변수	Cluster		Error		F	유의확률
	Mean Square	df	Mean Square	df		
슬럼지역 수	466.55	14	0.34	9874	1,372.55	0.00
슬럼지역 내 주거용 빌딩 수	557.48	14	0.21	9874	2,642.33	0.00
슬럼지역 내 거주민 수	592.10	14	0.16	9874	3,657.16	0.00
수질오염 발생	3.11	14	0.17	9874	18.64	0.00
수질오염: 강에서 발생 건 수	4.11	14	0.18	9874	23.51	0.00
수질오염 원인	8.46	14	0.42	9874	20.05	0.00
수질오염 민원	9.05	14	0.52	9874	17.38	0.00
연간 홍수 발생 건수	3.42	14	0.80	9874	4.25	0.00
연간 홍수 피해자	72,491.92	14	0.00	9874	24,190,794.10	0.00
의료시설 수	4.82	14	0.19	9874	25.37	0.00
가까운 의료시설까지의 거리	39.24	14	0.95	9874	41.49	0.00
영양실조 발생 건 수	667.23	14	0.06	9874	120,48.68	0.00
저소득층 수	528.06	14	0.25	9874	2,089.66	0.00
뎅기열 발생	14,094.76	14	0.14	9874	100,899.592	0.00

K-means clustering 분석 결과, 대상지역의 특성에 따라 15개의 군집이 형성되며, 그 중 풍토병 발병 지역은 주로 [군집 2]에 집중되었다. 이는 풍토병 발병이 많은 지역으로 풍토병 고위험 지역임을 나타내는 반면, [군집 9], [군집 11]은 풍토병 발병 사례가 없는 지역이 집중되어 비교적 발병으로부터 안전한 지역에 해당한다.



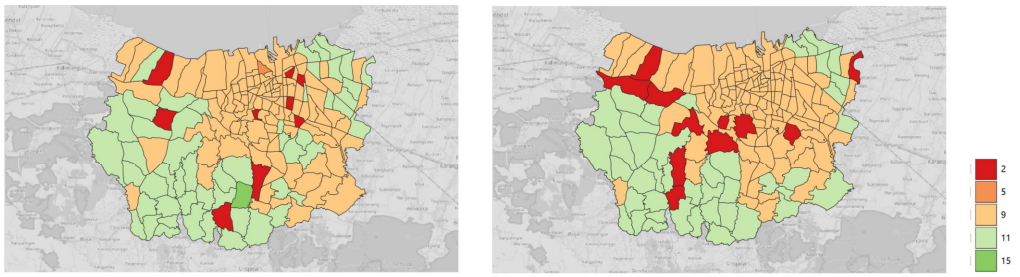
[그림 11] 풍토병 발병 현황 및 지역별 분포 현황

자카르타와 세마랑을 포함해 전체 대상지의 풍토병이 발생한 지역은 모두 [군집 2]로 분류된 반면, 풍토병이 발생하지 않은 지역은 주로 [군집 9]와 [군집 11]에 속해 군집별 특성이 상이함이 강조되었다. 여기서는 물 공급원(가정용수(음용), 비음용), 풍토별 발생 여부, 수질 오염 발생 여부(강물 오염) 등이 영향을 미치며, 슬럼가 존재 여부, 의료시설, 빈곤과 관련된 사회경제적 요인이 군집에 따라 다소 상이한 값을 보인다.



[그림 12] 자카르타와 세마랑 지역의 군집 형태

세마랑 지역의 군집 분포 현황을 살펴보면, 주로 [군집 2], [군집 9], [군집 11]에 해당하며 풍토병 발병 지역은 주로 [군집 2]에 속한다. 여기서 [군집 2]는 여러 지역에 걸쳐 다소 산발적으로 위치한 반면, [군집 9]는 도심지역에 주로 위치하며, [군집 11]은 주로 외곽지역을 포함하였는데, 이는 세마랑 외 대상지 전역에서도 나타난 특징을 보인다.



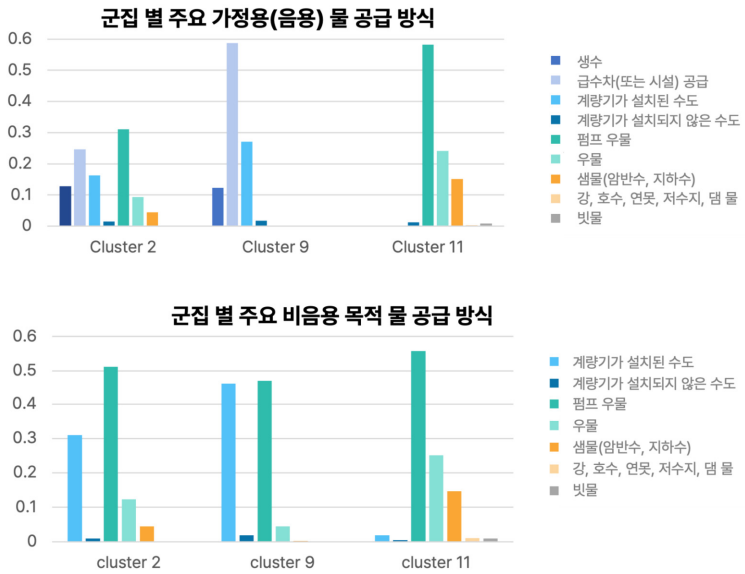
세마랑 – 2018년　　세마랑 – 2020년

[그림 13] 세마랑 지역의 군집분포 현황

본 연구는 세마랑과 자카르타 내 풍토병 발병 지역들이 속한 [군집 2]의 지역 특성을 분석하기 위해 각 영향 요인별 기초통계분석을 진행하였으며, 세마랑과 자카르타 내 지역이 대부분 포함된 [군집 2], [군집 9], [군집 11]의 특성을 비교 분석하여 지역 내 풍토병 취약 요소를 도출하였다.

[군집 2]는 가정용 음용수 공급 방식 중 '우물(지하수)', '수도관', '지하수' 순으로 공급 의존도가 높으며 비음용 목적 물 공급은 '수도관', '우물'을 통해 공급받는 것으로 나타났다(그림 14). 또한, [군집 2]는 아직 도시개발이 충분히 이루어지지 않은 외곽 지역을 함께 포함하고 있어 향후 수도 공급 체계 구축 및 개선의 필요성을 강조하고 있다. 비음용 목적 물 공급이 '수도관'과 '우물'에 대한 공급 의존도가 높은 것은 개량되지 않은 수도관에 대한 관리의 중요성을 강조하는 결과임을 시사한다. 이와 함께 다른 영향 요인(슬럼지역 현황, 저소득층 거주)과의 관계를 고려하였을 때, 거주민의 수도 사용 비용에 대한 부담과 수자원 공급에 대한 정부차원의 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

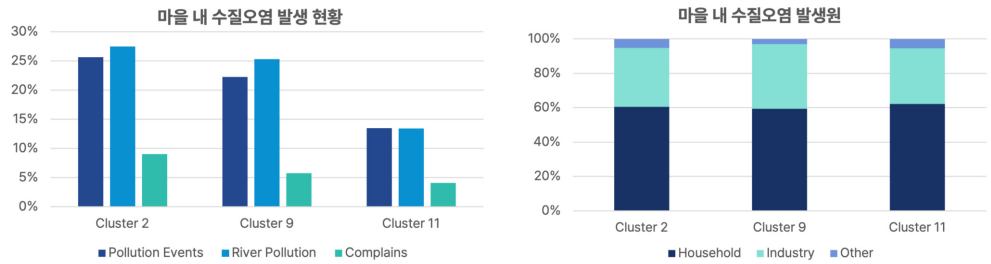
한편, 군집 별 주요 가정용수 및 비음용수 공급 방식을 분석한 결과 [군집 11]은 '우물(지하수)', '샘물'을 통해 가정용수와 비음용수를 공급받고 있어, 향후 정제되지 않은 물 사용으로 인한 풍토병 확산이 우려된다. 이에 따라, 풍토병 확산 예방을 위해 안전한 물 공급망 확보와 함께 안전성이 보장되지 않은 물 사용에 대한 주민 대상 교육의 필요성이 존재한다.



[그림 14] 군집 별 물 공급 방식

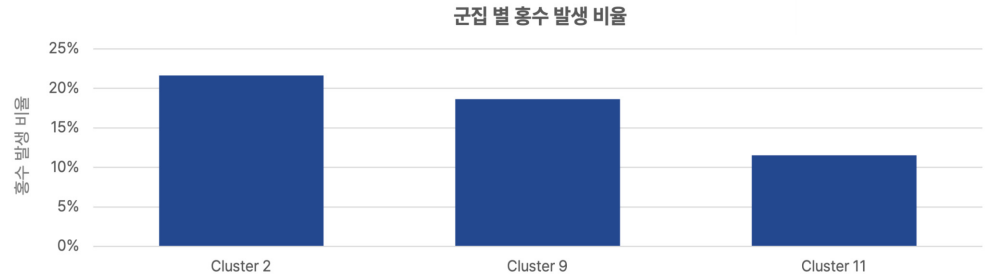
자연수원인 강에서 발생한 수질오염은 세마랑의 다른 마을들이 주로 속한 [군집 9], [군집 11]에 비해 [군집 2]가 높은 발생율을 보였으며, 가정에서 발생한 수질오염과 이에 대한 주민 민원은 자바섬 해안도시의 평균 수준에 해당되었다. 또한, [군집 2]에서는 수도관을 통한 물 공급 비율이 높게

나타났으나, 지하수와 우물을 통한 물 공급 비중이 높으며, [군집 11]은 자연수원을 통한 물 공급 비율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라, 주민 대상 경각심을 높이기 위한 정책과 함께, 공중보건 차원에서 자연수원에 대한 관리의 필요성이 제기된다.



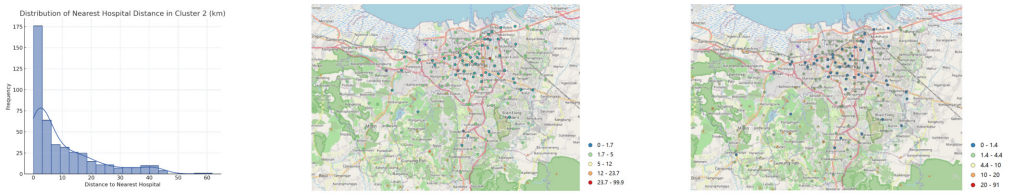
[그림 15] 군집별 마을 수질오염 발생 현황

군집 별 홍수 발생 비율의 경우, [군집 2]는 [군집 9], [군집 11]에 비해 홍수 발생율이 높게 나타나 풍토병의 발병이 물 공급, 홍수 발생과 같은 물 관리와 관련될 수 있음을 확인하였다.



[그림 16] 군집 별 홍수 발생 비율

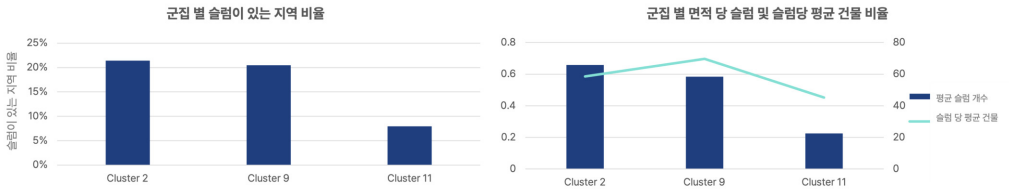
한편, 의료시설 측면에서 [군집 2]는 다른 군집에 비해 의료 시설 밀도가 마을 당 0.13개 수준으로 낮게 나타났으며, 풍토병 발병과 같은 응급 상황을 비롯해 일상적인 의료 접근에 한계가 발생할 수 있다는 문제점이 존재한다. 특히, 타 군집에 속한 마을과 비교했을 때 [군집 2]의 의료환경과 자원은 상대적으로 제한적이며, [군집 2]에서 가장 가까운 의료시설까지의 평균 거리는 10.4km이었다. 이는 의료시설이 위치해 있더라도 마을 내 모든 주민이 쉽게 접근하기 어려워 의료 격차가 발생할 수 있음을 의미한다.



의료시설까지 거리 의료시설까지의 거리(2018) 의료시설까지의 거리(2020)

[그림 17] 군집 2의 의료시설까지의 거리(세마랑 지역 대상)

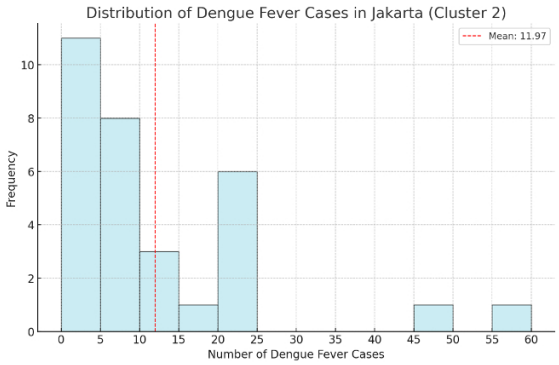
슬럼 지역에 관해 [군집 2]와 [군집 9]는 [군집 11]에 비해 마을 내 슬럼지역 비율이 높으며, [군집 2]의 평균 저소득층 비율은 [군집 9], [군집 11]에 비해 높아 풍토별 발병에 있어 사회경제적 요인의 취약성에 대한 고려가 필요하다.



[그림 18] 군집 별 슬럼 지역 현황

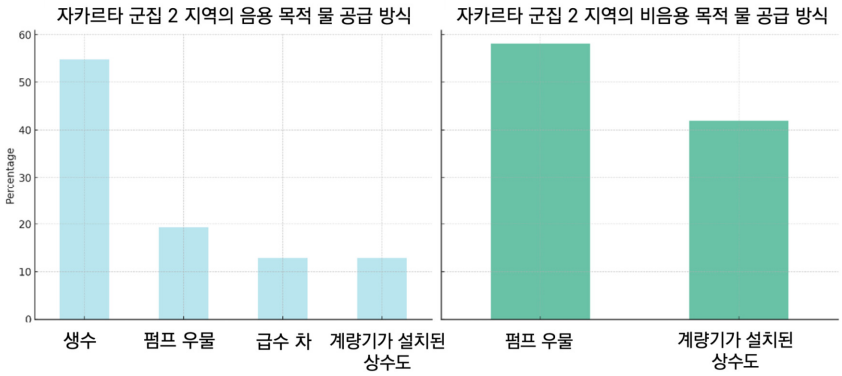
⑤ 자카르타의 풍토병 발생 지역(군집 2)의 특성

자카르타의 [군집 2]는 풍토병인 뎅기열이 발생하는 지역으로, 뎅기열 발생 건수, 물 공급 방식, 수질 오염, 홍수 발생, 슬럼 및 빈곤 수준(저소득층 거주), 의료 시설 등과 관련하여 명확한 특성을 보인다. 자카르타의 [군집 2]에서는 뎅기열 평균 발생 건수가 약 12건이며, 발생 건수는 최소 1건에서 최대 60건으로 다양하게 나타나 군집 간의 격차가 발생하고 있다



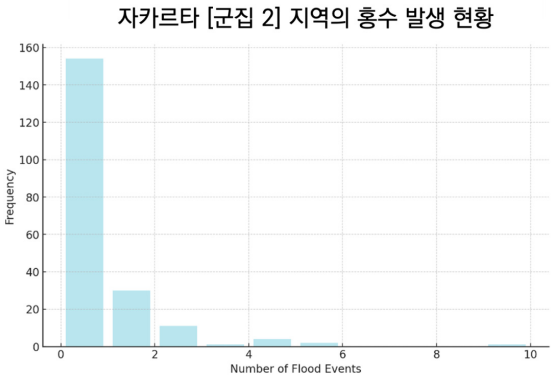
[그림 19] 자카르타 [군집 2]의 풍토병(뎅기열) 발생 현황

물 공급 방식의 경우, 자카르타 [군집 2]의 주요 음용수 공급원은 상업적으로 판매하는 생수로 나타났으며, 비음용 공급원은 상수도를 통해 공급받는 수돗물에 해당한다. 자카르타에서 풍토병이 발생한 지역에서는 강물, 운하, 저수지, 빗물을 통해 공급받은 물을 음용하지 않는 것으로 나타났으며, 물 자원 사용 목적에 따라 공급원이 명확히 구분됨을 확인하였다. 음용 목적의 경우, 질병과 품질에 대한 우려로 생수를 선호하며 비음용 목적은 편의성과 인프라 가용성 등을 이유로 상수도 의존도가 높은 것으로 추측할 수 있다.



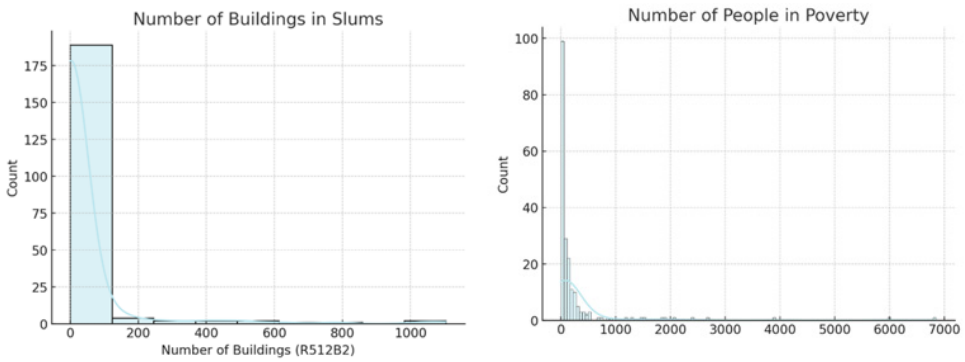
[그림 20] 자카르타 [군집 2] 지역의 물 공급 방식

또한, 자카르타의 [군집 2]의 약 24.1% 지역이 강물 오염을 경험했으며, 약 16.7% 지역에서는 수질 오염을 경험하였다. 수질 오염은 수인성 질병의 확산에 영향을 미쳐 주민들의 추가적인 건강 위험을 초래할 수 있어, 공중보건 차원의 대응이 필요하다. 자카르타 [군집 2]의 평균 홍수 발생 건수의 경우, [군집 2]의 평균보다 낮은 수준이나, 일부 [군집 2]에 해당하는 지역에서는 홍수가 집중적으로 발생하여 벡터 매개의 발생 가능성을 높이고 있다.



[그림 21] 자카르타 [군집 2] 지역의 홍수 발생 현황

슬럼 지역의 경우, [군집 2]에 속한 지역 중 21%가 슬럼 지역을 포함하며 지역 상당 부분을 차지하고 있다. 높은 건물 및 가구 밀도와 함께, 밀집도 또한 높은 슬럼가 지역에는 건물 1,104개가 존재하며 2,624세대가 거주하고 있다.



[그림 22] 자카르타 [군집 2] 슬럼 지역 내 주거용 건물 수 및 가구 현황

자카르타에서 풍토병이 발생한 지역 중 1/3은 마을 내 의료 시설이 없는 것으로 나타났다. 가까운 의료시설까지의 평균 거리는 약 1.6km으로 의료시설이 없는 마을 중 50%는 평균 3km 거리에 위치한 타 지역의 의료시설을 이용하고 있었다. 자카르타의 의료시설 접근성은 자바섬에 위치한 다른 해안도시의 풍토병 발생 지역에 비해 좋은 편에 속함에도 불구하고, 의료 시설이 위치하지 않은 지역들이 존재한다. 이에 따라 의료시설 접근성 보장을 위한 정책적 노력 또한 필요하다.

⑥ 세마랑의 풍토병 발생 지역(군집 2)의 특성

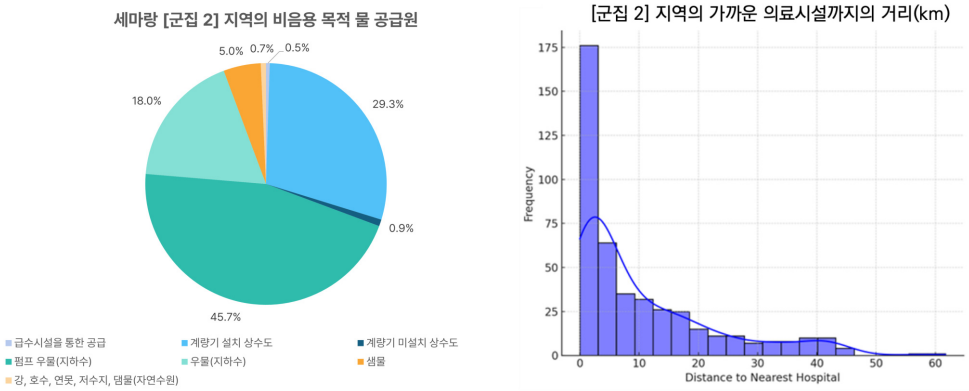
세마랑의 풍토병 발생 지역[군집 2]의 평균 뎅기열 발생 건수는 약 3.45건으로 다른 고위험 발생 지역에 비해 낮은 편에 해당한다. [군집 2]에 속한 세마랑 지역은 계량기가 설치되지 않은 상수도의 의존도가 물 공급의 29.5% 차지할 정도로 높으며, 이는 효과적인 모니터링에 어려움을 초래하는 요인이다. 요금 청구의 공정성과 물 사용에 대한 효과적인 모니터링 한계는 기후변화로 인한 풍토병 발생 예방에 걸림돌로 작용할 수 있다.

이와 함께 지역 내 비음용수는 주로 펌프 우물을 통해 공급되어 지하수의 사용이 주로 이뤄진다는 것을 보여주고 있다. 계량기가 설치된 수도(29.3%), 계량기가 설치되지 않은 수도(18%) 또한 펌프 우물 다음으로 높은 의존도를 보여, 풍토병 확산 방지를 위한 상수도 관리가 필요하다.

세마랑 [군집 2] 지역에서 발생한 수질 오염 사건의 경우 평균 이하 수준이었으며, 홍수 발생

위험으로부터 비교적 안전하다는 것을 확인하였다. 그러나, [군집 2]에 속한 많은 지역에서 수질 오염과 홍수 발생과 같은 위험에 노출되어 있음을 고려하였을 때, 기후변화로 인한 위험 발생에 대한 선제적 대응이 요구된다.

한편, 세마랑의 [군집 2] 지역의 빈곤수준은 자바섬 전체를 대상으로 진행한 [군집 2]의 슬럼 지역 및 저소득층 비중이 평균에 비해 낮은 수준에 해당하나, 일부 지역에 슬럼 지역 및 저소득층 비중이 집중된 형태를 보인다. 이와 함께, 의료 시설은 자카르타의 [군집 2] 지역과 마찬가지로 마을 당 평균 의료시설 수가 0.13개로 매우 적은 수준을 보이며, 가장 가까운 의료 시설까지의 거리는 10.4km에 달하고 있다. 이는 뎅기열과 같은 급성 질병에 대한 신속한 대응에 영향을 미치며, 제한된 의료시설의 가용성과 접근성은 효과적인 질병 관리 및 예방에 한계로 작용할 수 있다.



[그림 23] 세마랑 [군집 2]의 주요 특성

⑦ 의사결정나무모형을 통한 풍토병 발생 예측

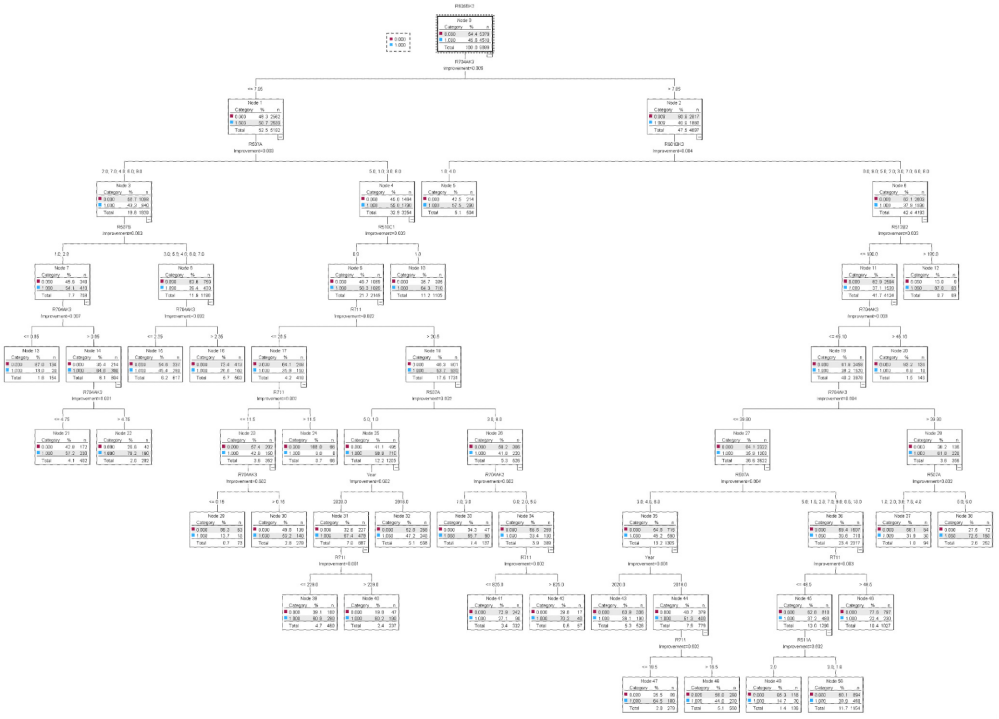
본 연구는 K-Means Clustering과 군집 별 기초통계분석을 통해 풍토병 집중 발생지역의 특성을 분석하였으며, 풍토병 발생에 취약한 도시 구조를 도출하고 예측하기 위하여 의사결정나무모형을 적용하였다. 풍토병 발병 여부를 종속변수로 설정한 모형의 정확도는 65.8%로 나타났으며, 풍토병이 발병하지 않을 지역의 특성을 해석하는 데 높은 예측력을 보였다.

〈표 11〉 모형 정확도

관측	풍토병 미발병 지역	풍토병 발병 지역	예측 정확도
풍토병 미발병 지역	3,946	1,433	73.4%
풍토병 발병 지역	1,950	2,560	56.8%
비율(평균)	59.6%	40.4%	65.8%

분석 결과[그림 25]에 따라 의료시설 접근성은 풍토병 발병 지역 예측에 가장 영향을 미치며, 풍토병 발병 예방 시 우선적으로 고려해야하는 요인으로 도출되었다. 또한, 저소득층 비율과 가정용 음용수의 주요 공급원도 풍토병 발병에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

가정용 음용수의 경우, 주요 공급원 유형에 따라 풍토병 발병에 미치는 영향력이 상이하였다. 이와 더불어 검증되지 않은 공급원을 통해 확보한 음용수는 뎅기열을 비롯해 수인성 질병 확산에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일례로, 우물(지하수)과 계량기가 설치되지 않은 상수도관을 통한 가정용 음용수 공급은 풍토병 발병 가능성을 증가시키는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 K-Means Clustering에서 전염병 발병 지역이 집중적으로 속한 [군집 2]의 특성에서 확인한 것과 유사하며, 풍토병 예방을 위해 의료시설, 마을 내 사회경제적 특성, 물 공급 방식이 중요함을 강조하고 있다.



[그림 24] 의사결정나무모형 분석 결과: 풍토병 발병 지역 예측

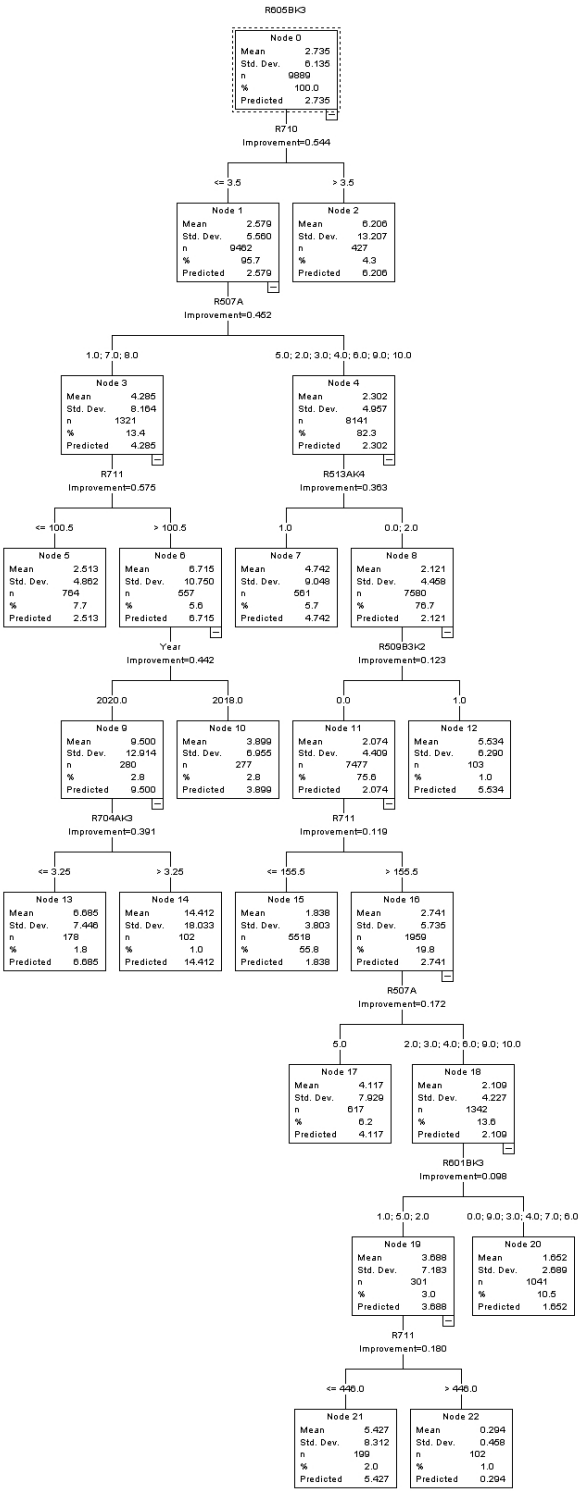
풍토병 발병 건수를 종속변수로 설정하여 풍토병 발병을 예측한 의사결정나무모형 분석 결과[그림 26]에서는 영양실조 발생 건수가 상위 노드로 도출되었으며, 저소득층 비율이 마을 내 풍토병 발병에 가장 중요한 영향 요인으로 도출되었다. 이는 사회경제적 특성과 풍토병 발병 취약성 간의 강한 상관성을 보여주고 있으며, 지역의 인구특성에 대한 중점적인 고려의 필요성을 강조하는 결과이다. 이와 함께 의료시설 접근성은 두 번째로 중요한 영향 요인으로 도출되었으며, 풍토병 발병 대응과 발병 확산, 질병의 심각성을 줄이는 데 영향을 미친다.

가정용 음용수의 주된 공급 유형과 수질 오염은 모두 풍토병 발병 지역 예측과 함께 주요 영향 요인으로 도출되었으며, 풍토병 확산과 발병 모두 물 공급과 관련 있음을 확인하였다. 이와 함께 홍수 발생 또한 풍토병 발생에 영향을 미치는 것으로 나타나 지역의 종합적인 물 관리 시스템의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

이러한 결과는 현조사를 통해서도 확인할 수 있었다. 연구의 대상지인 Meteseh와 Tambakrejo는 물 공급 인프라가 부족하여 지하수 사용률이 높았으며, 수공간에 대한 관리가 미흡하여 뎅기열과 같은 수인성 질병 확산 위험이 존재하였다. 아울러, Tambakrejo에서는 홍수와 침수로 인해 발생한 물웅덩이가 장시간 동안 유지되면서, 모기의 서식지도 함께 증가하여 뎅기열이 확산된 사례를 리빙랩을 통해 확인한 바 있다.



[그림 25] 현지조사를 통하여 확인한 풍토병 관련 요인

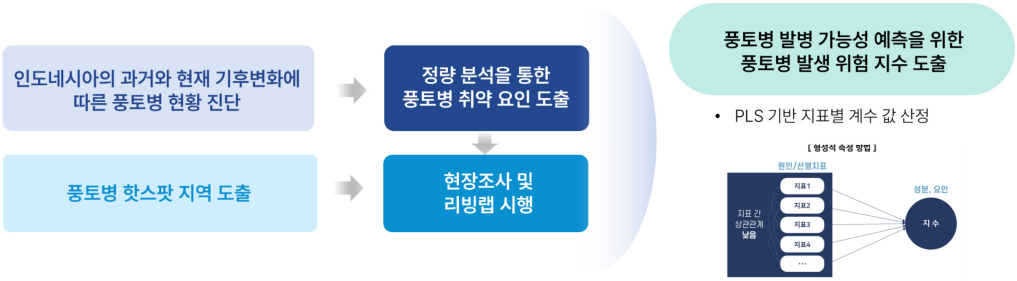


[그림 26] 의사결정나무모형 분석 결과: 풍토병 발병 건수

3) 풍토병 발병 가능성 예측

본 연구는 풍토병과 해안도시 구조 간의 관계를 분석하여 도출된 영향 요인과 현지조사(현장조사 및 리빙랩)를 통해 도출된 지역 내 풍토병 발병의 취약성을 종합하여 도시의 풍토병 발병을 예측할 수 있는 풍토병 발병 위험 지수를 제시하기 위해 [그림 27]과 같이 연구를 진행하였다.

구체적으로는 문헌 검토를 바탕으로 인도네시아의 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 현황을 진단하고, 해안도시 지역 중 자카르타와 세마랑을 대상으로 핫스팟 분석을 실시하였다. 이후, 머신러닝 기반의 예측 모형을 사용ㅎ여 풍토병 발생에 영향을 미치는 환경적·물리적·사회경제적 요인을 도출하였으며, 핫스팟 지역(Meteseh, Tambakrejo)을 대상으로 진행한 현장조사 및 리빙랩 결과를 종합하여 풍토병 발생에 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 이를 종합하여 풍토병 발병 위험을 예측할 수 있는 지수를 개발하고자 PLS 기반의 회귀모형을 사용하여 풍토병 발병에 대한 각 영향요인의 계수 값을 산정한 후 이를 가중치로 적용해 최종적인 풍토병 위험 지수를 도출하였다.



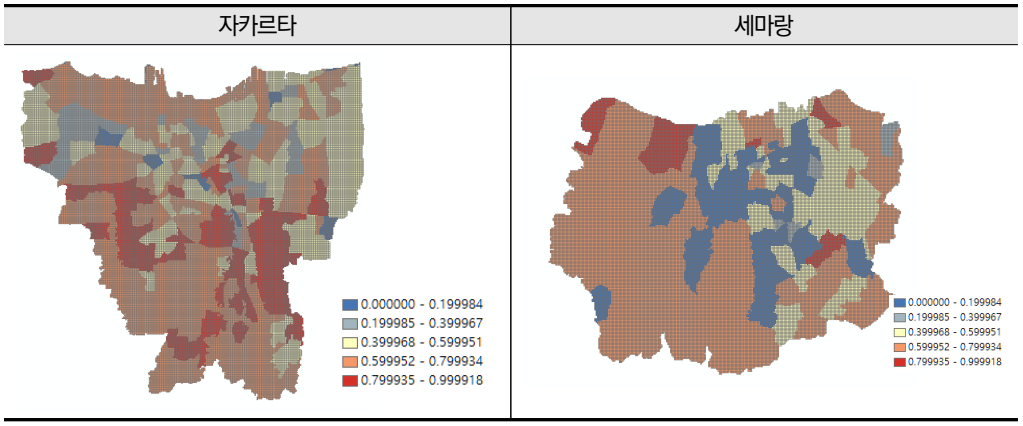
[그림 27] 풍토병 위험 지수 도출 과정

인도네시아 자카르타와 세마랑 지역을 대상으로 산출한 해안도시의 풍토병 위험 지수는 1단계 연구와 2단계 리빙랩을 통해 주요 취약 요인으로 나타난 홍수 발생과 같은 복합재난 요소와 수질 오염 여부, 사회경제적·물리적 요인인 인구 밀도, 음용수 출처, 병원 접근성 등을 활용하였다(〈표 12〉 참고). 또한, 풍토병(dengue)의 영향을 반영하기 위해 두 도시에서 구득한 풍토병 데이터를 활용하였으며, 마을 단위 통계 데이터인 PODES를 활용하여 풍토병 발병 위험 지수 데이터셋(데이터 기준 연도: 2022년)을 구축하였다.

공간 분석 단위는 풍토병 발병 대응을 위한 정책의 행정적 공간 단위를 고려하여 1단계 연구와 동일하게 마을 단위로 진행하였으며, 이후 100m×100m 그리드 단위를 적용하여 풍토병 위험 지수를 도출하였다.

〈표 12〉 풍토병 발병 위험 지수 데이터셋

분류		DataName	설명	비고
풍토병 발병 영향 요인	환경 요인	Flood event	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village별 홍수 발생 발생건수	
		Water pollution	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 수질 오염 여부(강, 호수, 저수지 대상)	
	사회적 물리적 요인	Population density	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village 별 거주민 밀도 (인구 (명)/면적)	
		Drinking water source	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village별 음용수 공급 방식	음용수 구입, 수로를 통해 공급, 지하수 사용으로 구분
		Household water source	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village별 가정용수 공급 방식	수로를 통해 공급, 지하수, 호수, 저수지 등을 통해 공급으로 구분
		Hospital Accessibility	병원 접근성(village 별 접근 가능한 병원 수/면적)	
		Slum	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village별 슬럼 내 거주비율	슬럼지역 내 위치한 주택 수 대비 거주민 수
		Low income	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village별 저소득층(지원대상) 비율	
		영양실조 비율	PODES(인도네시아 마을 통계)기반 village별 영양실조 발생 비율	
지수 가중치		Dengue	Village 별 뎅기발생 건 수/지역 면적	



[그림 28] 도시별 2022년 풍토병 위험 지역

제 3절. 기후변화에 따른 열 영향 요인 도출

1. 연구 배경 및 목적

인도네시아는 전국적으로 기후변화로 인한 인도네시아 내 폭염이 증가하고 있는 추세를 보이고 있다. 하지만 그 중, 주민들의 폭염취약성은 도시 및 해안 지역에서 높은 경향을 보이고 있으며, 자카르타와 세마랑은 대표적인 해안도시로 그 위험이 크다(Martiwiet al. 2023).

기후변화로 인하여 10월 중부 자바의 세마랑 지역은 섭씨 40도, 자카르타는 섭씨 37도까지 오르는 등 인도네시아의 여러 지역이 폭염 위험에 노출되고 있다. 이와 같이 기후변화로 인한 폭염 증가로 인하여 가뭄, 스모그, 전염병 확산 등 다양한 복합적인 사회문제가 발생하고 있다. 그 예로, 2023년 10월 중부 자바의 칠라캅(Cilacap, Central Java) 지역은 폭염으로 인하여 60일 이상 비가 내리지 않아 심각한 가뭄을 겪었다. 또한, 인도네시아의 수도 자카르타는 2023년 8월 기온상승에 따른 스모그로 다양한 피해사례가 속출하였으며, 이로 인해 자카르타시의 공무원들의 절반이 재택근무를 하는 등 대기오염을 완화하기 위해 정부 주도하의 다양한 정책을 시행하였다(BMKG, 2023). 이외에도 당해 기온상승으로 인한 뎅기열의 확산으로 143,000건의 감염 사례(1,236명 사망)가 발생하였다.

이에 본 연구는 열섬포텐셜(Heat Island Potential)을 주제로 열 위험지역을 예측하고 열 영향을 줄일 수 있는 방안을 제시하는 데 그 목적이 있다. 1단계로 열섬포텐셜 결정요인을 도출하고 2단계에서는 머신러닝 모델을 기반으로 열 영향 위험지역을 예측한다. 이 결과를 바탕으로 3단계에서 시뮬레이션 기반의 열섬포텐셜 대응 방안을 제시하고자 한다.



[그림 29] 열 실증연구 연구디자인 프레임워크

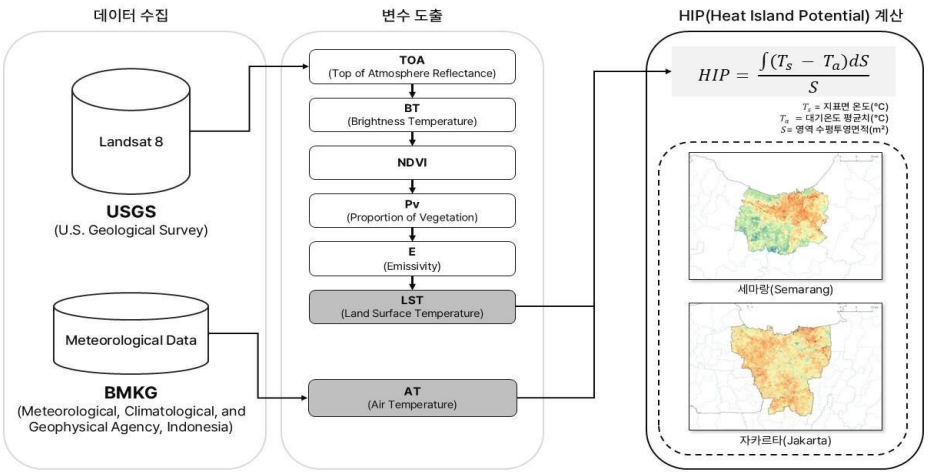
2. 인도네시아 열섬포텐셜 결정요인 도출

1) 연구 방법

1단계에서는 USGS(https://earthexplorer.usgs.gov/)에서 제공하는 Landsat 8 데이터에서 추출해낸 LST(Land Surface Temperature)와 BMKG(Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency, Indonesia)에서 제공하는 기상데이터 중 대기온도를 활용하여 HIP를 도출한다.

Landsat 8은 지구 표면 관찰을 위해 미국 항공우주국(NASA)과 미국 지질조사국(USGS)이 공동 개발한 인공위성으로, 2013년에 발사되어 16일마다 동일한 지역을 관측하며 데이터를 구득한다. BMKG(Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency, Indonesia)는 인도네시아의 기상, 기후, 지리학 연구 및 서비스를 담당하는 국가 기관으로, 다양한 기상 데이터를 제공한다.

Landsat 8 데이터를 활용하여 2015년부터 2023년까지의 연간 지표면 온도(LST)를 도출하였으며, BMKG에서 제공하는 대기 온도 데이터를 연간 평균 값으로 변환하였다. 이를 바탕으로 계산식을 적용하여 인도네시아 해안 도시인 자카르타와 세마랑의 연간 열섬 포텐셜 지수를 산출하였다. 이후 선행 연구 분석을 통해 열섬 포텐셜의 결정 요인을 도출하여 2단계 분석을 위한 사전 작업을 수행하였다.



[그림 30] 열섬포텐셜 지수 분석 체계

2) 연구 결과

① 열 영향지표

연구에서 사용되는 주요 열 영향지표에는 UHI(Urban Heat Island, 도시 열섬), LST(Land Surface Temperature, 지표면 온도), HIP(Heat Island Potential, 열섬포텐셜)이 있다.

UHI(Urban Heat Island, 도시 열섬)은 도시 기온이 주변의 교외 및 농촌보다 높아지는 현상이다. 아스팔트 포장 도로와 같은 지표면의 영향을 받으며, 많은 나라가 도시화로 인하여 UHI 영향을 받고 있다(Choi et al. 2014). 또한, UHI는 환경의 질을 낮추고 열로 인한 불쾌감을 생성하며 공공보건의 악화를 가속하는 원인이다. UHI의 원인은 도시의 녹지지대 감소, 도시를 구성하는 요소의 재료 및 구조, 인간의 활동으로 발생하는 열 그리고 날씨와 지리적 특성 등이 있다(US EPA, 2024).

LST(Land Surface Temperature, 지표면 온도)는 특정 지역의 표면 온도를 나타내며, 그 지역을 이루는 토양, 식물 등의 가중평균 값이다. 측정 위성에서 대기를 통해 땅으로 바라볼 때 보이는 모든 요소를 포함한다(Nasa, 2024). LST는 복사량(TOA)와 밝기온도(BT) 그리고 정규식생지수(NDVI)를 활용하여 계산되며, 대기 온도를 제한한 순수 지표면의 온도를 의미한다. HIP(Heat Island Potential, 열섬포텐셜)은 지표와 대기 간의 현열 교환량을 나타낸다.

이를 통해 열섬현상 발생 가능성을 추측할 수 있다(김태헌 등, 2018). **HIP(Heat Island Potential, 열섬포텐셜)**는 도시 열섬 발생 가능성을 정량적으로 평가하는 지표로, 위성 영상을 통해 값을 산출한다(Ino and Hoyano, 1996). 열섬 포텐셜은 지표면 온도(LST)와 달리 대기온도를 모두 고려하며, 이를 통해 열섬 위험이 큰 지역을 파악할 수 있다

〈표 13〉 열 영향 지표 산출 식

분류	산출 식	주석
LST (Land Surface Temperature)	$LST = \epsilon^{\frac{1}{4}} \times T$	LST = 지표면 온도 ϵ = 지표면 방사율 T = 밝기 온도
UHI (Urban Heat Island)	$UHI = \frac{LST - LST_m}{SD}$	LST = 지표면 온도 LST_m = LST 평균 SD = LST의 표준편차
HIP (Heat Island Potential)	$HIP = \frac{\int (T_s - T_a) dS}{S}$	T_s = 지표면 온도(°C) T_a = 대기온도 평균치(°C) S = 영역 수평투영면적

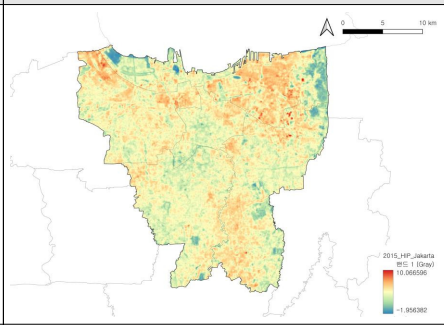
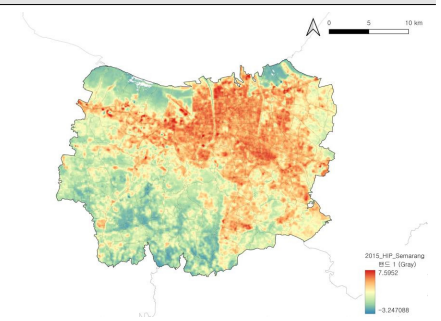
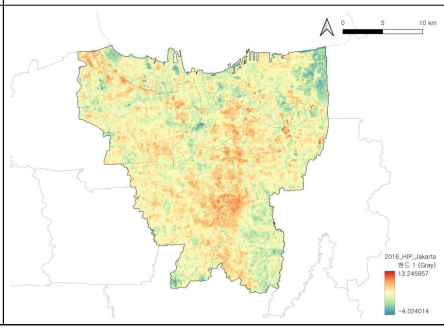
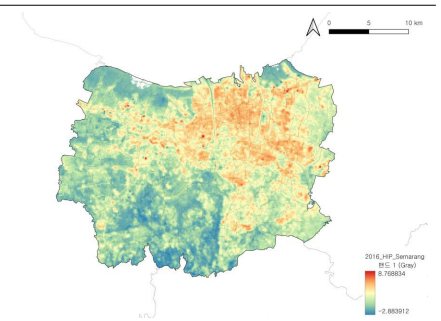
② 연간 열섬포텐셜 도출

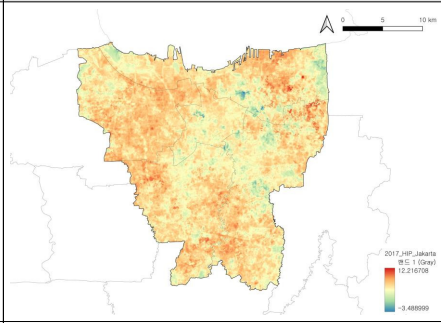
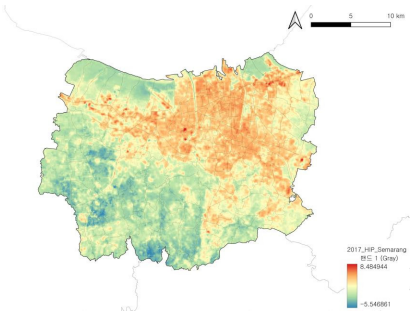
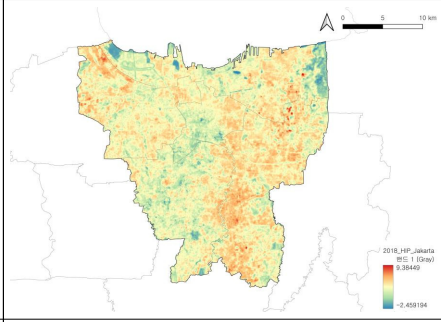
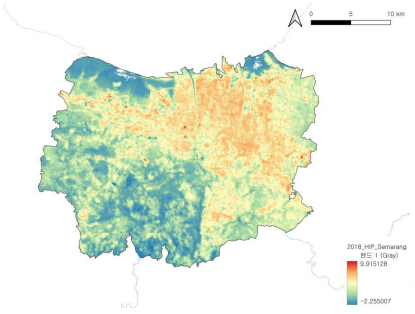
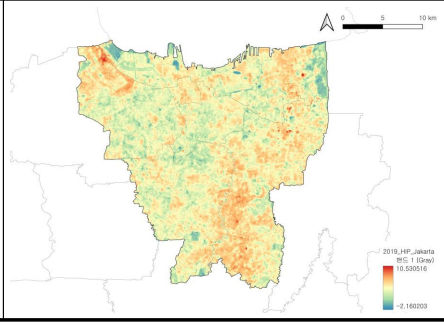
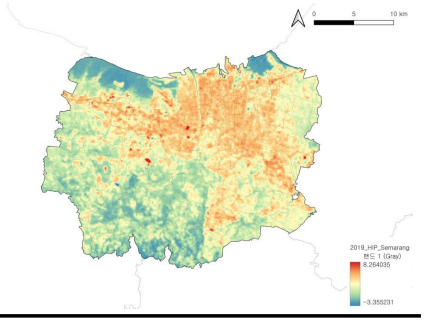
이를 통하여 열 영향 지표 HIP(Heat Island Potential)을 통한 열 위험지역을 도출하였다. 연간 자카르타와 세마랑의 열섬 포텐셜은 HIP(Heat Island Potential) 산출식을 활용하여, 연평균 지표면 온도와 대기 온도의 평균값을 바탕으로 도출되었다.

열섬포텐셜이 높다는 것은 해당 지역에서 열섬 효과가 강하게 나타날 가능성이 크다는 뜻이며, 낮다는 것은 열섬 효과가 상대적으로 적게 나타날 가능성을 의미한다. 열섬포텐셜의 차이는 도시의 환경과 인간 활동이 지역의 온도에 미치는 영향을 해석하고 관리하는 척도로 사용한다.

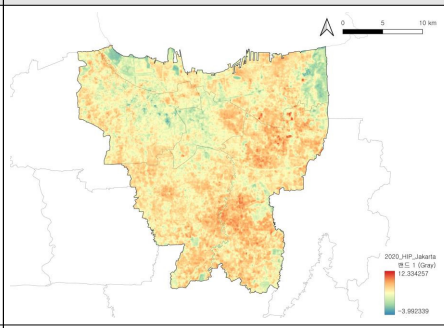
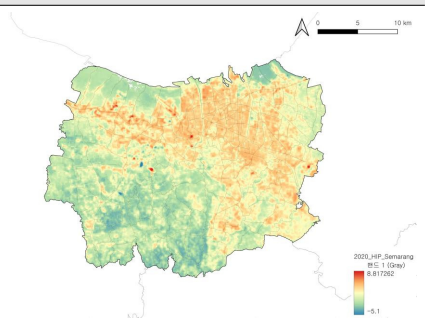
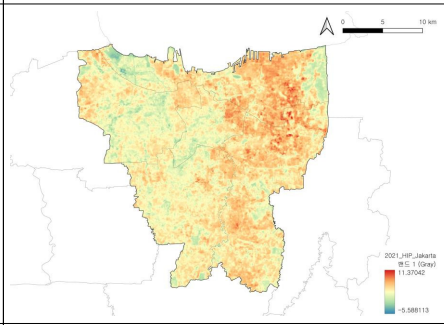
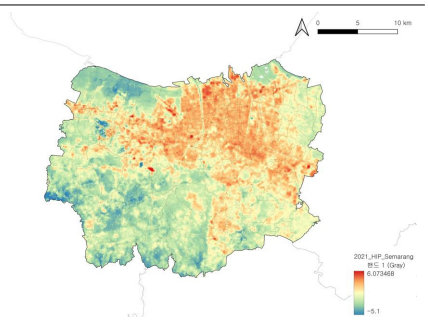
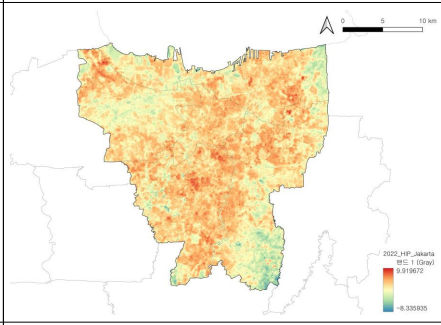
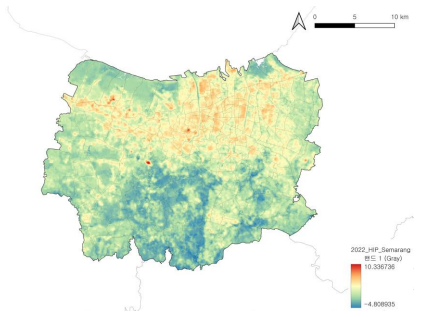
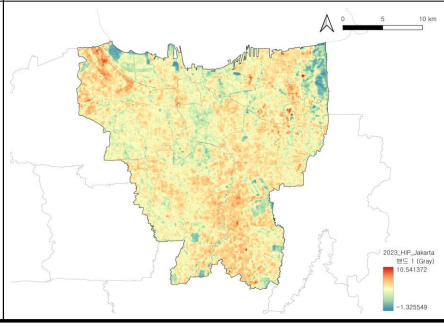
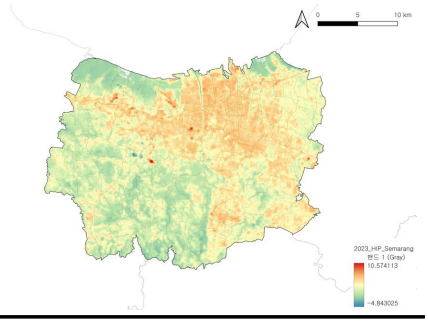
자카르타의 연간 열섬 포텐셜은 최소 -8에서 최대 +12 사이에 분포하며, North Jakarta, Jakarta Timur, West Jakarta의 북쪽 지역에서 열섬 포텐셜이 높은 경향을 보인다. 세마랑의 남서쪽은 고도가 높은 산지로 이루어져 있어 열섬 포텐셜이 낮으며, 세마랑의 연간 열섬 포텐셜은 최소 -5.5에서 최대 +10.3 사이에 분포하며, 도심에서는 대체로 +4 이상의 값을 나타내고, 도시 외곽으로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보인다.

〈표 14〉 인도네시아 자카르타 및 세마랑의 연간 열섬포텐셜 변화 (2015~2019년)

분석 연도	자카르타	세마랑
2015		
2016		

분석 연도	자카르타	세마랑
2017		
2018		
2019		

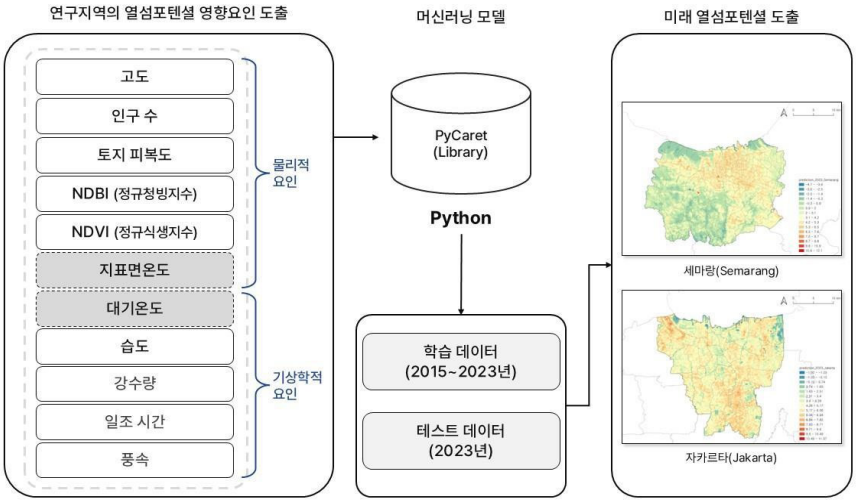
〈표 15〉 인도네시아 자카르타 및 세마랑의 연간 열섬포텐셜 변화 (2020~2023년)

분석 연도	자카르타	세마랑
2020		
2021		
2022		
2023		

3. 머신러닝 모델 기반 미래 열 위험 지역 예측

1) 연구 방법

미래의 열 위험 지역을 예측하기 위해 선행연구 분석을 통해 독립변수를 구축하였다. 이후, 머신러닝 자동화 오픈소스인 PyCaret 라이브러리를 사용한 Random Forest 모델을 통해 미래 열섬포텐셜을 예측하였다. 분석 결과를 통해 인도네시아 해안 도시인 자카르타와 세마랑에서 열에 취약한 지역을 도출하였으며, 해당 지역의 주요 특성을 심층적으로 분석하였다.



[그림 31] 미래 열섬포텐셜 예측 모델 분석 과정

2) 연구 결과

① 열섬 영향요인 도출

문헌 고찰을 통한 열섬 영향요인(driving factor, 열섬 상승 요소)을 파악하였다. 열섬의 원인은 물리적 요인(Physical Factors)과 기상학적 요인(Meteorological Factors)으로 구분할 수 있다.

열섬포텐셜의 원인은 주로 UHI(도시 열섬 현상)의 원인과 동일하며, 모터, 차량, 산업 공정의 난방 및 환기 시스템에서 발생하는 인위적인 에너지 방출, 표면 수분량의 차이, 도시 건축 자재의 열용량 차이를 포함한다(Miles and Esau, 2017; Mohajerani et al., 2017). 도시 지역의 토지 사용 및 토지 피복 변화는 지역 기후에 영향을 미치며, 이는 기온뿐만 아니라 구름, 강수량,

수질, 대기 질에도 영향을 준다(Arnfield, 2003; Wickham et al., 2013). 건물이 밀집된 지역은 주변보다 온도가 높아지며, 대기 온도를 상승시킨다(Lemonsu et al., 2015).

또한, 열섬포텐셜 및 UHI는 현지 기상 조건과 밀접하게 관련되어 있다. 예를 들어, 한국 서울특별시에서는 구름이 없을 때 UHI 강도가 약 +4.5로 높게 관측되었다(Jongtanom et al., 2011; Kim and Baik, 2002). 또한, UHI 강도에 영향을 미치는 주요 기상 변수 중 풍속이 가장 중요한 요인으로 꼽히며, 구름양이 그 뒤를 따르며, 바람의 흐름을 방해하지 않는 도시 구조는 열 영향을 효과적으로 줄일 수 있다(Oke, 1982; Yavuzturk et al., 2005). 대기의 다양한 요인은 열섬 강도에 직접적으로 기여하는데, 여기에는 수분 및 강우, 건물 배치 특성, 표면 및 건축 자재의 열용량, 도시에서 발생하는 열이 포함된다(Oke, 1982).

이와 같은 선행연구를 바탕으로, 본 연구에서는 고도, 인구 수, 토지 피복도, NDBI, NDVI, 강수량, 대기 온도, 습도, 지표면 온도, 주간 일조 시간, 풍속 등 총 11개의 변수를 독립변수로 선정하였다. 그러나 대기 온도와 지표면 온도는 열섬 포텐셜 도출 과정에서 이미 사용된 변수이므로 최종 분석에서는 제외하였다. 이후, 머신러닝 자동화 오픈소스인 PyCaret을 활용하여 Random Forest 모델을 구축하였으며, 이를 통해 미래 열섬 포텐셜을 예측하였다.

〈표 16〉 머신러닝 예측을 위해 사용된 열 영향 변수

변수 구분		변수 명	구득 기간	자료 출처
종속 변수		열섬포텐셜(HIP)	2015~2023	Landsat8 satellite data
독립 변수	물리적 요인	고도	2020	2024 Badan Informasi Geospasial
		인구 수	2023	GPWv411: Population Count (google earth engine)
		토지피복도	2023	Global Land Cover and Land Use Change, 2000-2020 (googleearth engine)
		NDBI(정규청빙지수)	2020	Landsat8 satellite data
		NDVI(정규식생지수)	2023	Landsat8 satellite data
	기상학적 요인	강수량	2015~2023	PUSAT DATABASE - BMKG
		대기온도	2015~2023	PUSAT DATABASE - BMKG
		습도(대기 중 수분량)	2015~2023	PUSAT DATABASE - BMKG
		지표면 온도	2015~2023	PUSAT DATABASE - BMKG
		주간 일조 시간	2015~2023	PUSAT DATABASE - BMKG
		풍속	2015~2023	PUSAT DATABASE - BMKG

이를 위해 인도네시아 자카르타의 6개 관측소와 세마랑의 3개 관측소에서 데이터를 수집하여,

분석에 필요한 기상 변수 데이터를 생성하였다. 생성된 데이터를 기반으로 QGIS를 활용하여 포인트 벡터 레이어의 역거리 가중 보간법(IDW; Inverse Distance Weighted)을 적용하여 변수 데이터를 래스터화하여 전처리하였다.

〈표 17〉 기상데이터 구축을 위한 자카르타의 기상관측소 위치

No	주	관할 구	명칭	X 좌표	Y 좌표	H(높이)
1	Jakarta	Kota Adm. Jakarta Utara	Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Priok	-6.10781	106.8805	3
2	Jakarta	Kota Adm. Jakarta Pusat	Stasiun Meteorologi Kemayoran	-6.15559	106.84	4
3	Banten	Kab. Tangerang	Stasiun Meteorologi Budiarto	-6.2867	106.5639	42
4	Banten	Kota Tangerang	StasiunMeteorologiSoekarno Hatta	-6.12	106.65	11
5	Banten	kotaTangerang Selata	Stasiun Klimatologi Banten	-6.26151	106.75084	27
6	Jawa Barat	Kab. Bogor	StasiunMeteorologiCiteko	-6.7	106.85	920

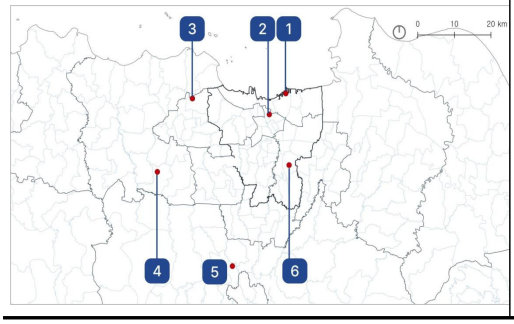
(출처: PUSAT DATABASE - BMKG, https://dataonline.bmkg.go.id/home)

〈표 18〉 기상데이터 구축을 위한 세마랑의 기상관측소 위치

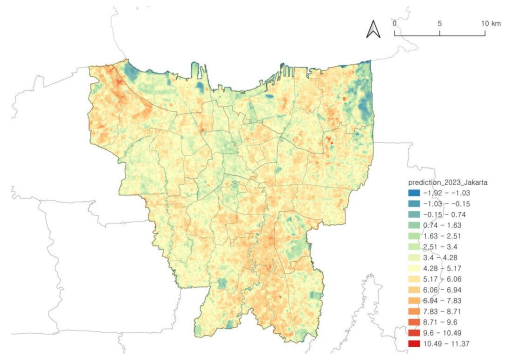
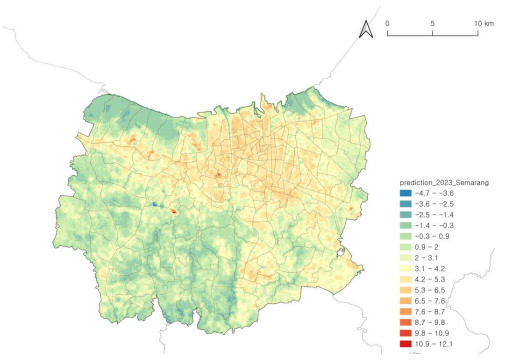
No	주	관할 구	명칭	X 좌표	Y 좌표	H(높이)
1	Jawa Tengah	Kota Semarang	Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Emas	-6.9486	110.4199	2
2	Jawa Tengah	Kota Semarang	StasiunMeteorologiAhmad Yani	-6.97683	110.3778	5
3	Jawa Tengah	Kota Semarang	Stasiun Klimatologi Jawa Tengah	-6.9847	110.3812	6

(출처: PUSAT DATABASE - BMKG, https://dataonline.bmkg.go.id/home)

〈표 19〉 자카르타와 세마랑의 기상관측소 위치 이미지

자카르타 (-1.92 ~ 11.37)	세마랑 (-4.7 ~ 12.1)
	

〈표 20〉 자카르타와 세마랑의 열섬포텐셜 예측 이미지

자카르타 (-1.92 ~ 11.37)	세마랑 (-4.7 ~ 12.1)
	

변수 중요도를 통해 자카르타와 세마랑의 열섬포텐셜에 영향을 미치는 주요 요인을 분석한 결과, 자카르타에서는 NDVI(정규식생지수), 고도(Elevation), 인구 수(Population)가, 세마랑에서는 인구 수(Population), NDVI(정규식생지수), 고도(Elevation)가 주요 변수로 도출되었다.

자카르타의 경우, 모델 평가 지표로 MAE는 0.4509, MSE는 0.4517, R^2은 0.8648로 나타나 높은 설명력을 보였으며, RMSE는 0.1291, MAPE는 0.2433으로 예측 정확도는 양호한 수준이다. 세마랑은 MAE 0.4152, MSE 0.3292, R^2 0.9146으로 자카르타보다 더 높은 설명력을 보였다. RMSE는 0.1957, MAPE는 0.8035로 나타나 예측 정확도는 자카르타에 비해 다소 낮은 것으로 분석되었다. 하지만, 자카르타와 세마랑 모두 높은 설명력을 보여 열섬포텐셜 예측 모델이 신뢰할 만한 결과를 제공하며, 자카르타는 예측 정확도가 높고, 세마랑은 더 높은 설명력을 지닌 모델로 해석된다.

〈표 21〉 자카르타 및 세마랑의 열섬포텐셜 예측 모델 결과

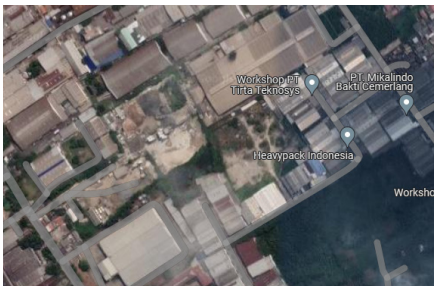
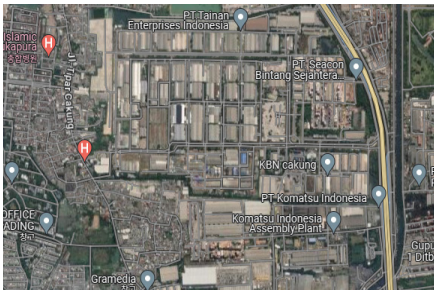
	자카르타	세마랑
MAE	0.4509	0.4152
MSE	0.4517	0.3292
RMSE	0.6717	0.5736
R^2	**0.8648**	**0.9146**
RMSLE	0.1291	0.1957
MAPE	0.2433	0.8035

② 열 영향 위험지역 분석

도출된 결과를 바탕으로 자카르타와 세마랑의 열 위험 지역을 분석하였으며, 각 도시의 세부 지역 명을 기재하고 위성사진과 지역의 주요한 공간적 특성을 정리하였다. 이를 통해 열에 취약한 지역의 공간적 분포와 특성을 파악할 수 있다.

자카르타의 열섬 포텐셜 분석 결과, 산업 단지가 밀집된 지역에서 열섬 포텐셜이 특히 높게 나타났으며, 이러한 영향은 인근 주거 지역으로 확장되는 경향을 보였다. Kalideres와 Kota Jakarta Barat 지역은 소규모 산업단지와 창고가 밀집해 열섬 포텐셜이 높게 나타났으며, 이로 인해 남서쪽 주거 지역까지 영향을 미쳤다. 또한, Cilincing, Jakarta는 중대형 산업단지가 밀집된 지역으로, 국소적으로 매우 높은 열섬 포텐셜 값이 도출되었다. 이는 산업 시설에서 방출되는 열이 주변 환경에 미치는 영향을 보여주는 결과로 해석된다.

〈표 22〉 자카르타 열 영향 위험지역 분석

지역	특성	위성 사진 (google map)
Kalideres, Kota Jakarta Barat	소규모 산업단지 및 부속 창고 위치	
Cilincing, Jakarta	중대형 산업단지 밀집	

세마랑의 열섬포텐셜 분석 결과, 주거 지역 인근에 위치한 공항과 공장이 열섬포텐셜을 높이는 주요 요인으로 확인되었다. Bongsari, Semarang Barat 지역은 밀집된 주거 지역 내 텍스타일 제조 공장이 위치해 국소적으로 높은 열섬포텐셜이 발생하였으며, 이러한 영향이 주변 주거 지역에도 확산되는 경향을 보였다. Tambakharjo, Semarang Barat 지역은 공항과 플라스틱

가공 공장 등 산업 시설과 주거지가 인접해 있어, 공항을 중심으로 높은 값이 도출되었으며, 이 영향이 인근 주거 지역까지 이어졌다.

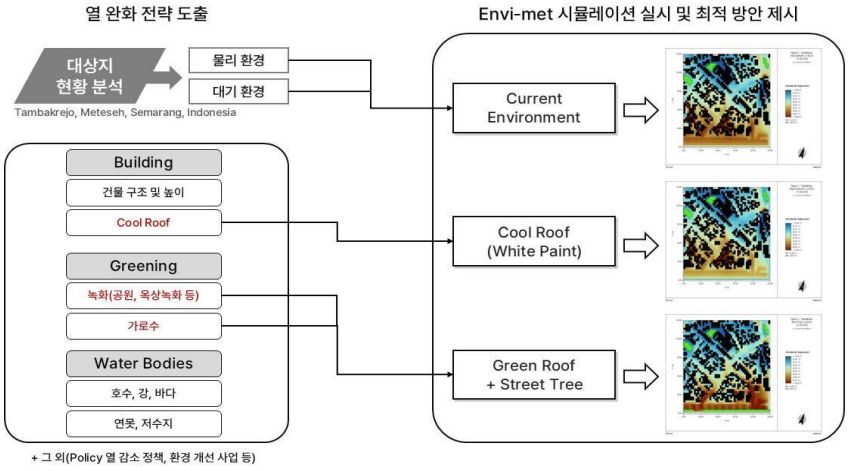
〈표 23〉 세마랑 열 영향 위험지역 분석

지역	특성	위성 사진 (google map)
Bongsari, Semarang Barat	주거지 내 텍스타일 제조 공장 위치	
Tambakharjo, Semarang Barat	공항, 플라스틱 가공업체 위치, 주거지 밀집	
PenggaronKidul, Pedurungan	쇼핑몰 및 생활시설 밀집	
Kedungpane, Mijen	세마랑 시 폐기물처리장 및 주거지 밀집	

4. 시뮬레이션 기반 열 완화 가이드라인 제시

1) 연구 방법

인도네시아 세마랑에서 현지 리빙랩을 통해 열 영향의 주요 원인과 대응 방안을 도출하였다. 질병, 열, 물 관리와 관련된 선행연구를 기반으로, 복합재난 발생 가능성이 높은 기후위기 관심 지역(hot spot) 커뮤니티를 선정하였다. 이후 선행연구 분석을 통해 열 영향 완화를 위한 정책 유형을 도출하고, 선정된 대상지에 적용가능한 방안을 구체화하였다. 이후, Envi-met 시뮬레이션 소프트웨어를 활용하여 열 완화 방안을 모의 실험한 결과, 공간적 특성에 따라 효과적인 열 완화 방안이 상이하게 나타남을 확인하였다. 이를 바탕으로 예측 결과와 분석된 열섬 요인을 종합하여, 각 지역의 특성에 맞춘 열섬 완화 가이드라인을 제안하였다.



[그림 32] 열 영향 완화 전략 시뮬레이션 과정

2) 연구 결과

① 열섬포텐셜 완화 전략

연구 대상지인 Tambakrejo(탐박레조)와 Meteseh(메테세)는 질병, 열, 홍수에 공통적으로 취약한 지역으로 선정되었으며, 현지 주민을 대상으로 참여 관찰 연구(리빙랩)를 진행하였으며, 이를 통해 복합재난에 대응하기 위한 기후변화 대응 리빙랩 프로토타입을 개발하였다. 열과 관련된 주요 대응 방안으로는 건물의 쿨 루프(Cool Roof) 도입, 옥상 녹화, 가로수 식재, 공원

녹지 확보 등이 포함되었다.

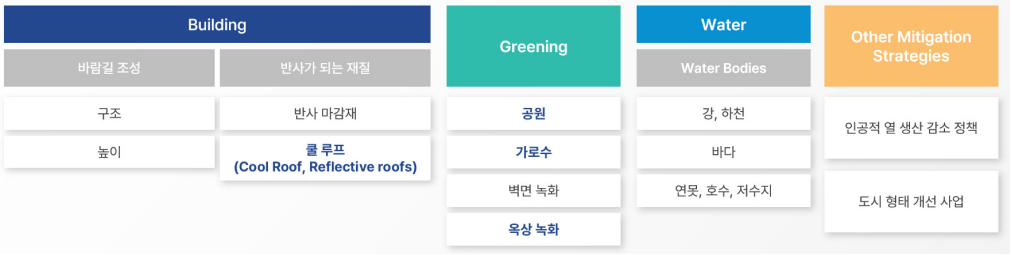
이후 선행연구 분석을 통해 열섬 포텐셜 완화 전략을 도출하였으며, 이는 리빙랩에서 제안된 방안과 맥락이 일치한다. 분석 결과, 건물 구성(Building), 녹지(Green), 수계(Water)가 도시 온도에 직접적인 영향을 미치는 주요 요인으로 확인되었다.

도시 내 지표면과 기온의 관계는 건물 및 도로 형상의 3차원적 특성에 의해 매개되며, 이러한 특성에는 지표면의 거칠기, 풍속, 풍향 등이 포함된다(Stathopoulou & Cartalis, 2007; Voogt & Oke, 2003; Weng, 2009; Weng & Quattrochi, 2006). 특히, 건물은 도시 기온에 중요한 영향을 미치며, 열섬현상(UHI)에 기여하는 주요 요소로는 건물 높이, 도로 폭, 건물의 개방성, 그리고 도로의 방향 등이 있다(Eliasson, 1996; Oke, 2004; Sakakibara, 1996).

녹지로 그늘진 지역은 직사광선을 받는 지역에 비해 기온이 낮게 유지되는 특성을 보인다(Kim et al., 2016; Oliveira et al., 2011). 식물은 증산작용과 차광 효과를 통해 기온을 낮추는 데 중요한 역할을 하며(Han et al., 2021), 미기후를 개선하는 데도 기여한다(Georgi & Dimitriou, 2010). 특히, 도시 녹지 공간(UGS)을 활용하는 것은 열섬현상(UHI)을 완화하는 가장 효과적인 방법 중 하나로 평가된다(Imran et al., 2019).

공원의 냉각 효과는 수공간의 비율이 높아질수록 증가하며, 수공간의 면적이 크고 모양이 규칙적일수록 도시 열 영향을 효과적으로 줄일 수 있다(Huang et al., 2022). 물의 높은 열용량과 증발 효과는 주변 환경에 냉각 효과를 제공하며, 대류와 복사를 통해 물과 공기 사이에서 열이 전달되기 때문에 수공간이 있는 지역은 인근 지표면보다 2~6°K 정도 온도가 낮게 유지된다(Aboulnaga et al., 2024).

이와 함께, 도시의 인공 열 생산을 감소시키는 정책 및 도시 구조 개선 사업을 시행함으로써 열섬현상을 추가적으로 완화할 수 있다. 이러한 통합적 접근은 도시 열 환경을 개선하는 데 중요한 역할을 한다.



[그림 33] 열 영향 완화 전략

(출처: Understanding Urban Heat Island Effect: Causes, Impacts, Factors, and Strategies for Better Livability and Climate Change Mitigation and Adaptation, 2024 및 선행 연구 분석을 기반으로 연구진 작성)

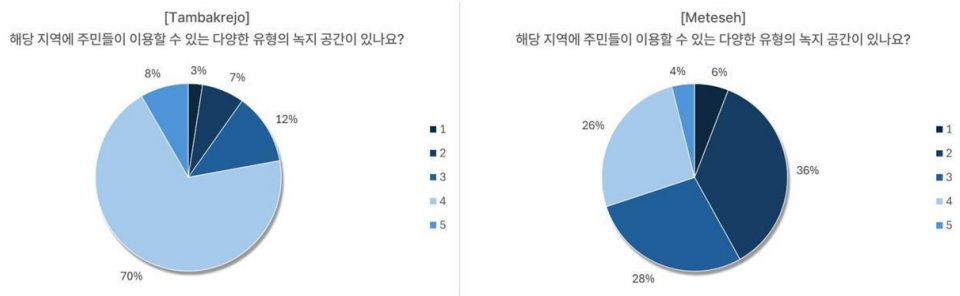
② 시뮬레이션 대상지 선정 및 분석

리빙랩 및 기존 연구를 통하여 도출한 열 영향 위험지역 및 완화 방안을 ENVI-Met 시뮬레이션을 활용하여 실험하였다. 이에 따라 대상지별 대략적인 물리적 환경 분석을 실시하였으며, 현장 답사와 설문결과를 통하여 이를 분석하였다.

Tambakrejo는 건물 밀집도가 높고, 도로의 아스팔트와 열용량이 큰 건물 재질이 결합되어 열 영향이 증가하고 있는 지역이다. Tambakrejo 지역 주민을 대상으로 한 설문조사 결과, 녹지 공간에 대한 인식은 다양한 의견을 보였다. 녹지 공간에 대한 주민들의 인식은 다양한 의견으로 나타났다. 조사에 참여한 203명 중 57명(28.1%)은 녹지가 약간 부족하다고 응답했으며, 43명(21.2%)은 적당하다고 평가했고, 63명(31.0%)은 보통이라고 답하였다.

극단적인 의견은 거의 나타나지 않았으나, 중립 응답 편향의 가능성이 존재한다. 하지만, 녹지 공간 부족을 언급한 주민들의 응답 비율이 높은 것으로 보아, 녹지와 수공간이 열 환경 개선에서 충분한 역할을 수행하지 못하고 있음을 의미한다.

반면, Meteseh의 경우 리빙랩 이후 실시한 설문조사에서 응답자의 158(78%)명이 해당 대상지의 녹지 분포가 충분하다고 답하였다. 그러나 건물 밀집도로 인해 바람길이 형성되기 어려워 열 환경이 악화되고 있는 상황이다. 이에 따라, 현지 건물 형태를 유지하면서 건물 재질과 녹지 조건을 조정하여 시뮬레이션을 진행하였다.



[그림 34] 녹지 현황 만족도 설문조사 결과 (좌: Tambakrejo, 우: Meteseh)

ENVI-met은 도시 환경에서 미기후 분석을 위한 3차원 시뮬레이션 소프트웨어로, 건물, 도로, 녹지 등 도시 구성 요소가 기온, 습도, 풍속 등 환경 변수에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 도구이다. 주로 UHI 평가와 도시 녹지 계획 등 열 환경 개선 방안을 마련하기 위해 활용되며, 공간 및 시간 단위의 정밀 분석을 통해 도시계획에 신뢰도 높은 과학적 근거를 제공한다.

본 연구에서는 기존 건물 형태를 유지하면서 옥상 녹화, 녹지 공간, 가로수 등 녹지 조건을 변형하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 녹지 환경 변화에 따른 열섬 포텐셜의 시간 및 공간의 열 분포 변화를 분석하였다. 열 영향 값이 높은 지역으로 나타난 곳 중, 리빙랩에서 주민들이 열 영향을 심각하게 언급한 Tambakrejo(탐박레조)와 Meteseh(메테세)에서 각각 한 지역을 선정하여 심층 분석을 진행하였다.



[그림 35] 시뮬레이션 대상지 위치

③ 시뮬레이션 조건 및 대기환경 설정

본 연구의 목표는 이러한 시나리오에 따른 열 환경 개선 효과를 비교 분석하고, 대상지의 구조적 특성에 따라 각 시나리오의 효과를 평가하는 것이다. 대상지의 환경 조건은 다음과 같으며, 시뮬레이션은 (1) 기존 상태, (2) 쿨 루프(Cool Roof) 도입, (3) 옥상 녹화(Green Roof) 및 가로수 도입과 같이 세 가지 시나리오로 설정하였다.

〈표 24〉 대상지 환경 조건

지역		도로	블록 구성	건물 배치	공원(녹지)	건물 외피	지붕 재질
탐박레조 (Tambakrejo)	1	4차선 도로 (12m)	비정형	분산형	있음	콘크리트, 벽돌	철, 콘크리트, 테라코타 마감재
	2	골목 (5m)	정형	밀집형	없음		
메테세 (Meteseh)	3	2차선 도로(6m)	비정형	분산형	없음		
	4	골목 (6m)	정형	밀집형	있음		



[그림 36] Envi-met 시뮬레이션 예시 이미지

시뮬레이션 대상지의 대기환경은 2023년을 기준으로 하였으며, 인도네시아의 건기 기간 중 6월 21일(하지)를 기준으로 하였다. 이에 따라 세마랑의 기상 조건은 BMKG(2023) 데이터를 바탕으로, 최저 기온 26°C, 최고 기온 35°C, 최저 상대습도 70%, 최고 상대습도 85%, 풍속 2m/s, 풍향 135도(남동풍)으로 적용하였다. 시뮬레이션 시 물리적 환경 조건을 달리하였으나, 기상 환경은 동일하게 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다.

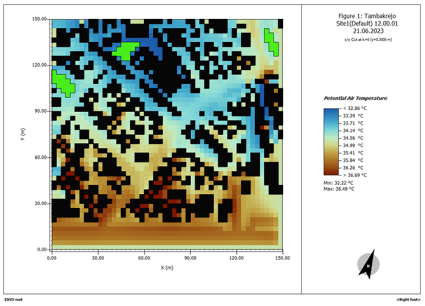
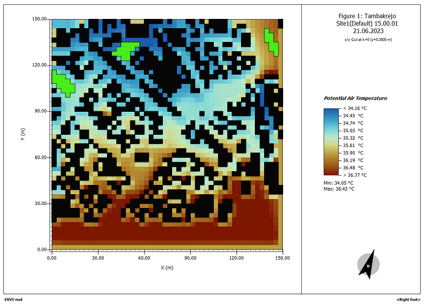
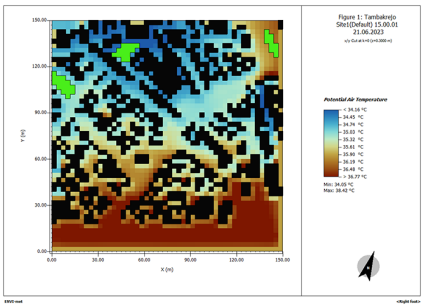
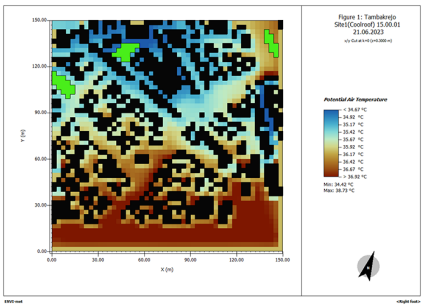
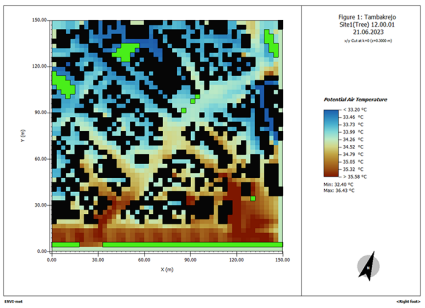
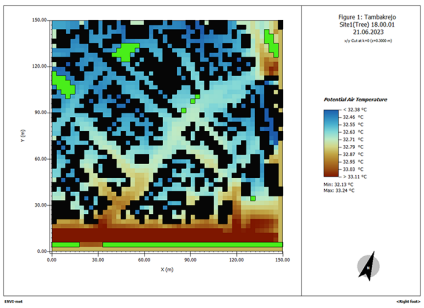
쿨 루프(Cool Roof, Reflective Roof)는 빛을 반사하는 특성으로 낮 시간 동안 지붕의 열 흡수를 최소화하여 건물 내부 온도를 낮춘다. 이러한 지붕은 주로 밝은 색상의 페인트 또는 반사율이 높은 재료로 구성되며, 열을 흡수하지 않고 반사하는 특성을 통해 냉방 에너지를 절감하고 도시 열섬 현상을 완화하는 데 기여한다. 본 연구에서는 쿨 루프 재질로 일반적인 백색 페인트의 반사율 값을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 쿨 루프 재질 설정 값은 아래 표와 같다.

〈표 25〉 쿨 루프(Cool Roof) 재질 설정

Property	Value
Absorption	0.1 ~ 0.3
Transmission	0
Reflection(Albedo)	0.7 ~ 0.9
Emissivity	0.9 ~ 0.95
Specific Heat(J/kgK)	1000 ~ 1500
Thermal Conductivity(W/mK)	0.15 ~ 0.3
Density(kg/m^3)	1200 ~ 1500

④ 시뮬레이션 결과

〈표 26〉 Tambakrejo(탐박레조) 대상지 1 조건별 시뮬레이션 결과

조건	12:00	15:00
기존		
쿨 루프		
옥상녹화 및 가로수		

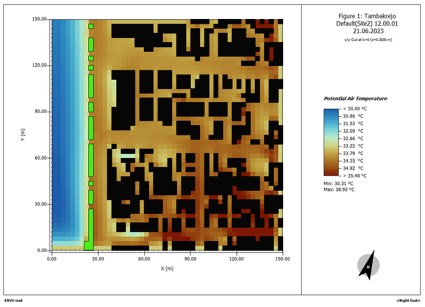
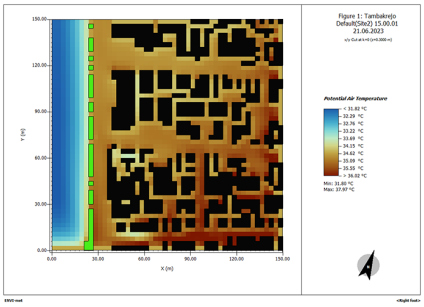
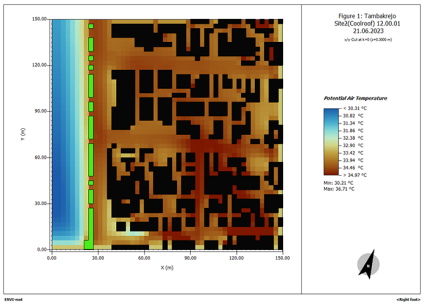
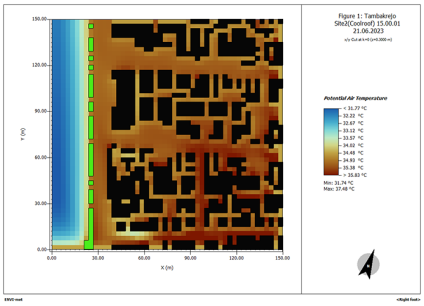
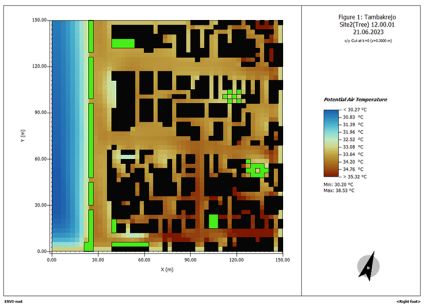
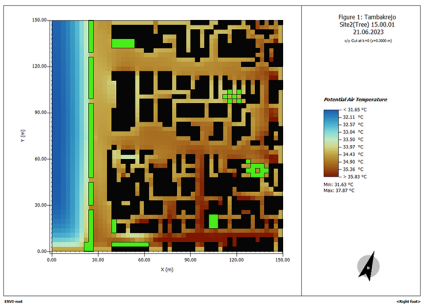
Tambakrejo(탐박레조) 대상지 1은 대로변 인근에 위치하며, 바람길 부재로 열이 정체되는 지역이다. 이 지역은 비정형 블록 구조와 곡선 형태의 골목이 특징이며, 대로변은 4차선(12m)에 접해 있다. 또한, 소규모 공원이 존재하나 녹지 공간이 충분히 조성되어 있지 않다.

시뮬레이션 결과, 건물 밀집 지역과 비정형 블록 구조를 가진 지역에서는 옥상 녹화가 가장 효과적인 열 완화 방안으로 나타났다. 쿨 루프는 전체적으로 열 환경을 개선하는 데 기여했으나, 건물 밀집도가 높은 지역에서는 효과가 제한적인 것으로 분석되었다. 옥상 녹화는 쿨 루프에

비해 약 2˚C의 추가적인 온도 완화 효과를 보였다.

결론적으로 대로변에는 가로수를 식재하여 열섬 효과를 완화하는 것이 권장되며, 건물 구조상 바람 길을 조성하기 어려운 경우 바람 흐름이 차단되는 지역에 녹지 공간을 조성하는 것이 열환경 개선을 위한 바람직한 대안으로 제시된다.

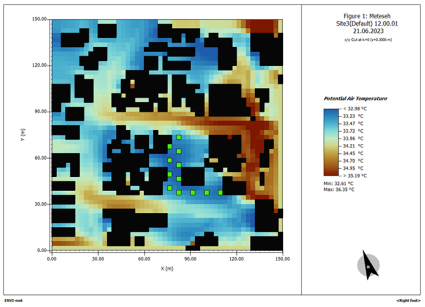
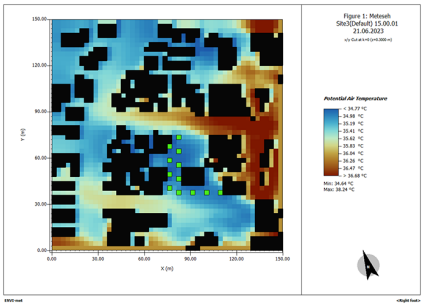
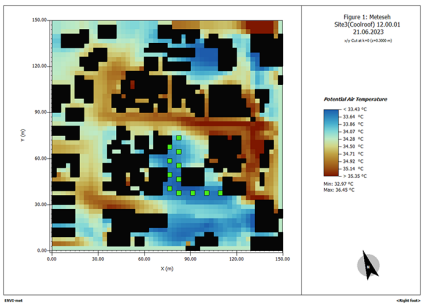
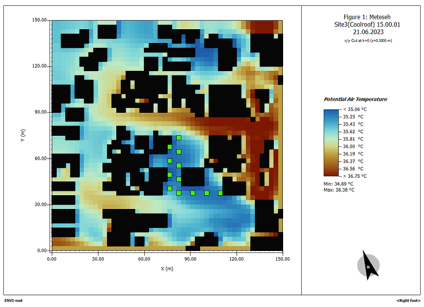
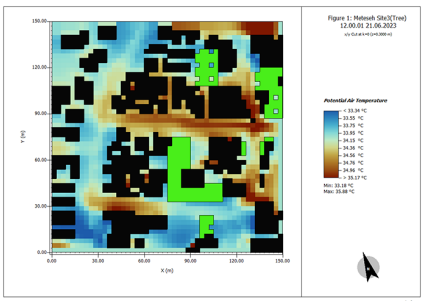
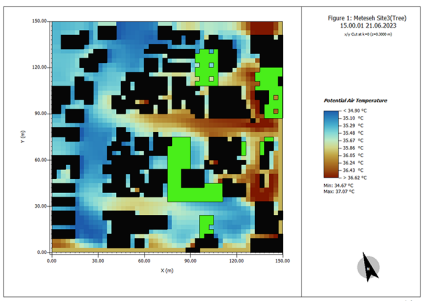
〈표 27〉 Tambakrejo(탐박레조) 대상지 2 조건별 시뮬레이션 결과

조건	12:00	15:00
기존		
쿨 루프		
옥상녹화 및 가로수		

Tambakrejo(탐박레조) 대상지 2는 녹지 공간이 부족한 주거 밀집 지역으로, 직사각형 블록과 좁은 골목으로 구성되어 있으며, Banjir Kanal Timur(동쪽 범람 운하)에 접해 있다. 이 지역은 공원이나 공터가 존재하지 않는 주거 밀집 지역이라는 점이 특징이다.

시뮬레이션 결과, 건물이 밀집된 정형 블록 구조에서는 쿨 루프 도입이 가장 효과적인 열 완화 방안으로 분석되었다. 쿨 루프는 현재 상태와 비교하여 약 1°C의 온도 완화 효과를 나타냈다. 반면, 옥상 녹화는 열 완화 효과에서 상대적으로 미미한 차이를 보였다.

〈표 28〉 Meteseh(메테세) 대상지 1 조건별 시뮬레이션 결과

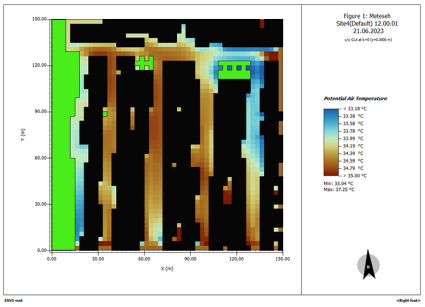
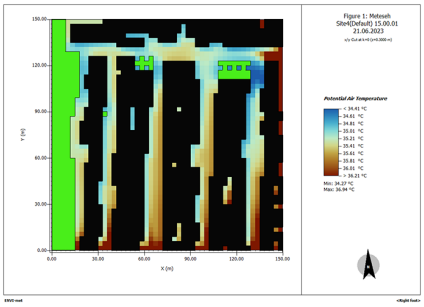
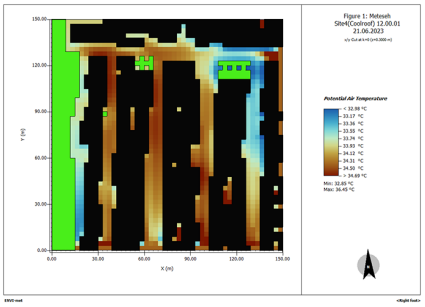
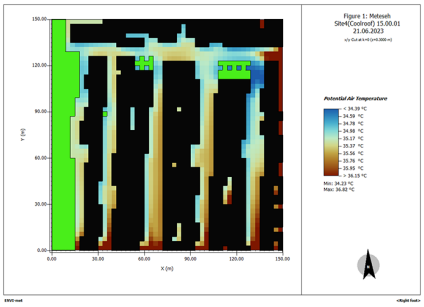
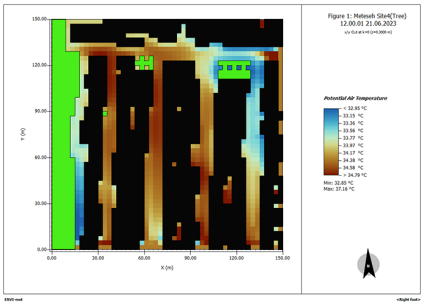
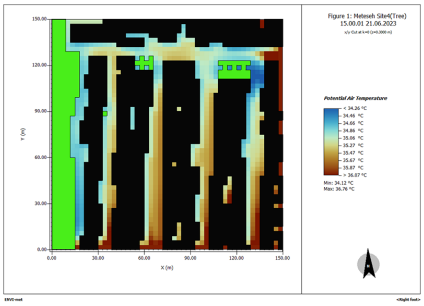
조건	12:00	15:00
기존		
쿨 루프		
옥상녹화 및 가로수		

Meteseh(메테세) 대상지 1은 비정형 블록으로 구성된 밀도가 높지 않은 분산형 주거 공간으로 넓은 아스팔트 도로와 블록으로 이루어진 보도가 특징이다. 이 지역은 녹지 공간이 부족하며, 주거 공간 내 공터가 위치한다.

시뮬레이션 결과, 비정형 블록과 건물이 분산된 주거 환경에서는 옥상 녹화와 외부 녹지 공간

조성이 열 환경 개선에 가장 효과적인 방안으로 나타났다. 특히 열이 집중되는 교차로나 노출된 공간에서는 그늘을 제공할 수 있는 식재가 열 완화에 중요한 역할을 하는 것으로 분석되었다. 반면, 쿨 루프는 현황과 비교했을 때 열 완화 효과가 미미한 수준으로 나타나, 해당 대상지에서는 녹지 공간의 확대를 통한 개선이 더욱 적합한 대안으로 평가되었다.

〈표 29〉 Meteseh(메테세) 대상지 2 조건별 시뮬레이션 결과

조건	12:00	15:00
기존		
쿨 루프		
옥상녹화 및 가로수		

Meteseh(메테세) 대상지 2는 건물 밀집으로 인해 열 정체 현상이 발생하는 지역으로, 직사각형의 블록과 좁은 골목으로 구성되어 있다. 주거 지역 인근에 녹지 공원이 조성되어 있지만, 블록 내부에 바람 길이 없어 열 정체 현상이 지속되고 있다.

주거 밀집 지역에서는 옥상 녹화와 외부 녹지 공간 조성이 열 환경 개선에 효과적인 것으로 나타났다. 시뮬레이션 결과, 현황 대비 녹지 공간을 추가로 조성할 경우 약 0.5°C의 온도 완화 효과가 있을 것으로 기대된다. 열 완화 효과는 현재 상태, 쿨 루프 도입, 녹지 조성 순으로 점진적으로 증가하며, 녹지 조성이 가장 큰 열 완화 정도를 보였다.

〈표 30〉 대상지 환경 조건

지역		블록 구성	건물 배치	공원(녹지)	주요 해결방안
탐박레조 (Tambakrejo)	1	비정형	분산형	있음	옥상녹화
	2	정형	밀집형	없음	쿨 루프
메테세 (Meteseh)	3	비정형	분산형	없음	옥상 녹화, 외부 녹지 조성
	4	정형	밀집형	있음	옥상 녹화, 외부 녹지 조성

⑤ 시뮬레이션 결론

본 연구는 선행연구를 바탕으로 쿨 루프, 옥상 녹화, 가로수 식재 등의 열 완화 방안을 시뮬레이션하여 열 환경 개선 가이드라인을 제시하고자 하였다. 시뮬레이션 대상 지역은 물리적 환경 조건이 상이한 지역으로, 특히 리빙랩에서 열 영향이 크다고 확인된 지역을 중심으로 진행되었다.

분석 결과, 물리적 환경 조건에 따라 열 완화 효과는 다음과 같이 차이를 보였다.

- 비정형 블록 주거 밀집 지역: 옥상 녹화가 가장 효과적인 열 완화 방안으로 나타났으며, 추가적으로 가로수 식재와 바람길 조성이 필요하다.
- 정형 블록의 녹지가 부족한 주거 밀집 지역: 쿨 루프가 가장 큰 열 완화 효과를 보였으며, 녹지 조성보다 건물 반사율 개선이 더 효과적인 것으로 분석되었다.
- 비정형 블록의 낮은 밀도의 분산형 주거 환경: 옥상 녹화와 외부 녹지 공간 조성이 가장 큰 열 완화 효과를 보였다. 특히 밀도 있는 녹지 조성이 열 환경 개선에 효과적인 것으로 확인되었다.
- 정형 블록 구조의 녹지가 존재하는 주거 밀집 지역: 블록 내 추가적인 옥상 녹화와 외부 녹지 조성으로 약 0.5℃의 열 완화 효과가 도출되었으나, 극적인 효과는 관찰되지 않았다.

결론적으로, 물리적 환경 조건에 따라 열 완화 방안의 효과가 달라지는 것을 확인할 수 있었으며, 각 지역의 특성을 고려한 맞춤형 열 환경 대응 방안을 적용하는 것이 바람직하다.

제 4절. 기후변화에 따른 물 영향 요인 도출

1. 연구 배경

1) 기후변화로 인한 인도네시아 내 홍수 발생 증가

[기후변화]

기후변화 및 해수면 상승으로 인해 해안지역의 홍수 발생 빈도가 증가하고 있으며, 특히 대표적인 해안 도시인 자카르타와 세마랑은 홍수의 범위 또한 광범위해지고 있다(Pramono, 2021).

- 기후변화로 인하여 2022년 인도네시아에서 발생한 홍수는 1,493건으로 가장 많이 발생한 자연재해로 발표되었으며, 특히 자카르타와 세마랑 등 해안지역에서의 홍수 피해가 증가하는 등 홍수 위험에 노출되고 있는 현황이다.

2) 홍수에 따른 사회문제 발생

[홍수 피해]

홍수 피해와 혼란으로 인한 일상생활의 중단과 복구 계획의 지연은 거주지 상실과 교육의 부재라는 사회문제를 야기하며 지역사회가 해체되거나 사회 소외 계층을 발생시킬 수 있다(Jakarta Globe, 2020.01.27.).

2. 연구 목적

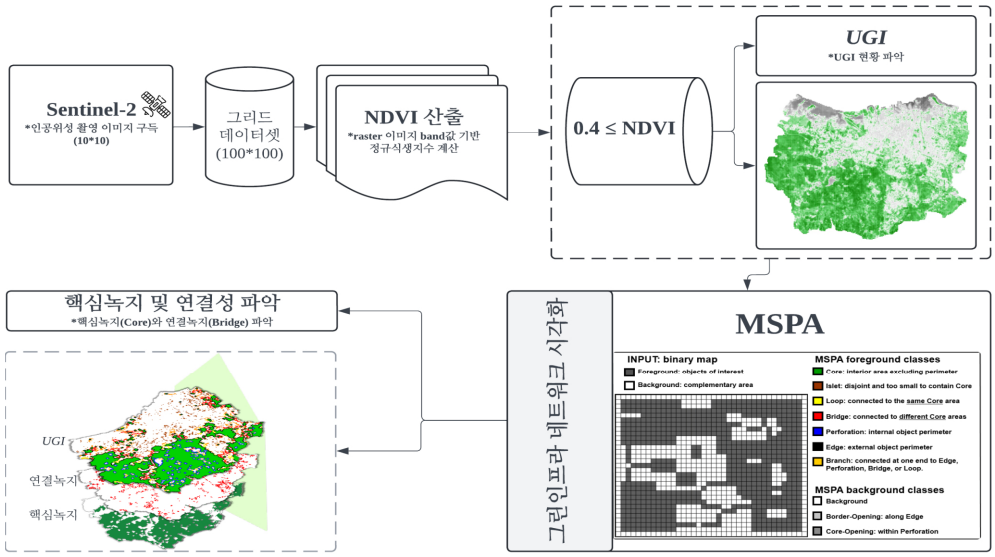
1) 세부연구 3: 기후변화에 따른 물 영향 요인 도출 및 홍수 위험 지수 개발을 통한 실증

본 연구는 기후변화에 따른 물 특히, 홍수에 영향을 줄 수 있는 요인을 도출한 후, 영향 요인을 바탕으로 홍수 위험 지수를 개발하는 데에 그 목적이 있다. 이를 위해 본 연구는 총 3단계로 구성되었으며, 먼저 1단계에서는 그린인프라 네트워크 분석을 통해 도시 내 자연적 인프라의 연결성을 평가하고자 하였다. 이를 바탕으로 2단계에서 도시 홍수 위험 지표를 제시하고 위험 지역을 예측하였으며, 3단계에서는 홍수 저감형 녹지축을 도출해 홍수 저감 및 관리 방안을 제시하고자 하였다.

3. 연구 추진 방법

① 1단계 : 그린인프라 네트워크 분석

[그린인프라 네트워크]



[그림 37] 그린인프라 네트워크 분석 체계

그린인프라 네트워크 분석을 위해 [그림 37]과 같이 1단계 내에 세부 단계를 나누어 진행하였으며 총 2단계로 구성하였다. 먼저, 1-1단계에서는 인도네시아의 주요 도시인 자카르타와 세마랑의 그린인프라 기초정보를 수집한 뒤, 녹지 현황을 분석하는 것을 목표로 하였으며 1-2단계에서는 UGI(Urban Green Infra) 기반의 도시지역 내 그린인프라 네트워크 현황을 분석하고 핵심녹지와 그 연결성을 파악하는 것을 목표로 하였다.

세계 최대 군도 국가인 인도네시아의 경우 집중 강우로 인한 하천의 범람, 하천 퇴적물로 인한 하천의 범람 등으로 인해 홍수가 발생하기 쉬워 기후 및 지질학적 요인으로 인한 홍수의 증가에 대한 민감도가 높은 지역 중 하나이다(Harwitasari and van Ast, 2011; Langlois, B. K. et al., 2023). 이에 인도네시아 주요 도시의 그린인프라 네트워크를 평가하기 위해 경관생태학, 생태네트워크, 공간 그래프에 대한 이론 검토 및 현황분석을 위한 MSPA 분석을 진행하였으며, 도시 홍수에 영향을 미치는 기후적(강수량, 해수면 높이, 기온 등)·지리적(토지이용·경사도 등) 요인에 대한 기초정보를 수집·검토를 수행하였다. 나아가 인도네시아의 산림을 비롯한 도시 내

녹지의 세부적인 반영을 위해 Sentinel-2 기반 10m*10m 단위로 촬영된 영상 이미지를 바탕으로 100m*100m 그리드 데이터셋을 구축한 후 정규식생지수인 NDVI를 활용하여 인도네시아 UGI 공간정보를 파악하였다.

〈표 31〉 위성 영상 이미지 기반 NDVI

자카르타 NDVI	세마랑 NDVI
	

지속적인 도시개발을 반영하여 가장 최신의 UGI 공간 데이터를 구축하기 위해 2015년~2021년까지 연구 대상지인 자카르타·세마랑(Jakarta·Semarang)의 식생 건강성과 밀도를 정량화한 지수인 정규식생지수(NDVI) 데이터를 구축하였다(〈표 31〉 참고). 위성사진을 기반으로 구득한 NDVI 레스터 파일을 가공한 뒤, 선행연구에서 정의된 식생 기준인 〈표 32〉를 활용하여 NDVI의 값이 0.4 이상인 지역을 건강한 녹지로 분류하여 UGI를 도출하였다(Aquino D. D. N. et al., 2018).

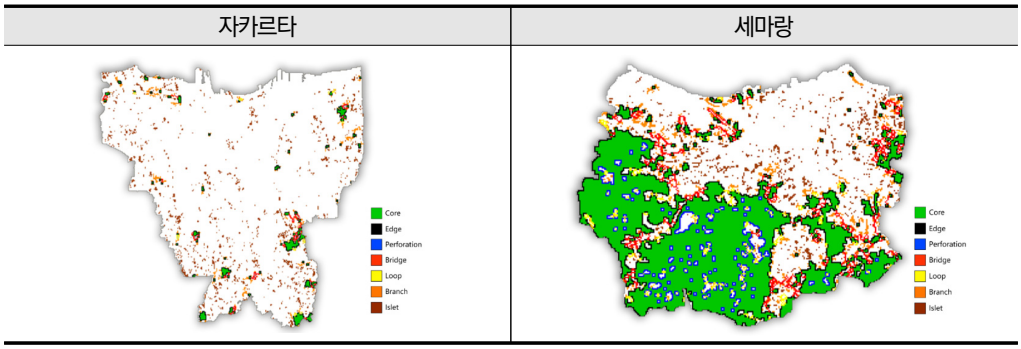
〈표 32〉 NDVI 분류

Class	Classification criterion
맨땅 또는 하천(또는 호수)	NDVI ≤ 0
매우 낮음	0 〈 NDVI ≤ 0.2
낮음	0 .2〈 NDVI ≤ 0.4
보통	0 .4〈 NDVI ≤ 0.6
높음	0 .6〈 NDVI ≤ 0.8
매우 높음	0 .8〈 NDVI ≤ 1

Aquino D. D. N. et al.(2018) 재구성

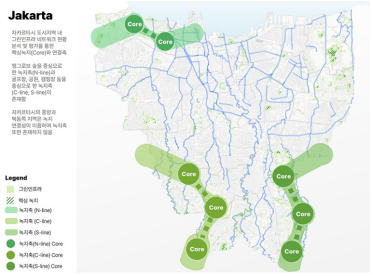
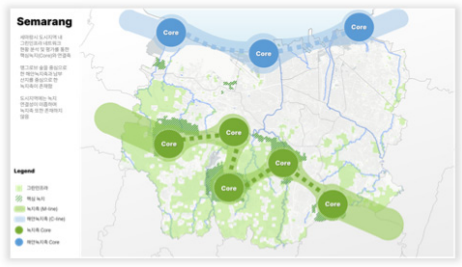
1-2단계에서는 1-1단계에서 도출된 NDVI를 활용하여 그린인프라 네트워크 및 연결 정도를 시각화하고자 MSPA를 활용하여 도시 내 핵심 녹지(Core)와 연결녹지(Bridge)를 도출하였다.

2021년을 기준으로 MSPA 분석 결과를 활용하여 주요 도시 내 녹지 네트워크 현황 분석 및 네트워크 연결성 평가를 진행하였다. 자카르타와 세마랑의 녹지 네트워크 현황 및 연결성을 파악한 결과는 [그림 38]과 같이 도출되었다. 자카르타의 핵심 녹지 대부분은 묘지공원과 골프장으로 나타났는데, 이는 도시개발과 건물 밀집으로 인해 도심부를 중심으로 한 도시 내부에는 핵심 녹지를 비롯한 UGI가 부족하기 때문이며, 동자카르타에 위치한 골프장을 제외한다면 녹지 간 연결성 또한 미흡한 현황이다. 반면 세마랑의 경우 서남부에 산지가 밀집하여 자카르타와 비교하였을 때 전반적으로는 UGI가 풍부하게 나타나 녹지 간 연결성이 우수해 보이지만, 도심 내에는 핵심 녹지가 존재하지 않는 등 자연 녹지 간 연결성을 제외한 녹지 간 연결성은 미흡하다.



[그림 38] 도시별 MSPA 분석 결과

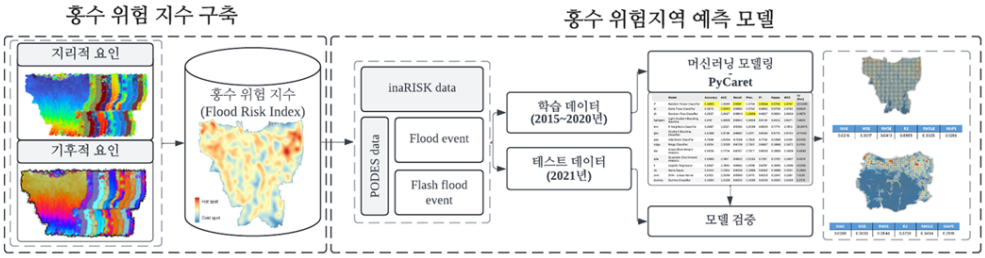
MSPA 기반의 녹지 현황 및 연결성 분석을 통해 도시별 핵심 녹지와 녹지축 현황을 파악한 뒤 이를 바탕으로 자카르타와 세마랑의 현재 녹지축을 도출하였으며 그 결과는 [그림 33]과 같다. 자카르타의 경우 UGI 네트워크 현황 분석 및 평가를 통해 도출된 녹지축은 총 3개로 맹그로브 숲을 중심으로 북자카르타에 위치한 N-Line(North-line) 녹지축, 골프장, 공원, 캠핑장 등을 중심으로 한 남자카르타의 C-line(Conservation-line) 녹지축, 동자카르타의 S-line (South-line) 녹지축이 존재하였다. 중앙 자카르타와 북동부 지역은 녹지 연결성이 미흡하여 녹지축이 존재하지 않았기에 이를 고려한 녹지축을 구축할 필요가 있음을 시사하는 결과이다. 세마랑에서 도출된 녹지축은 총 2개로 맹그로브 숲을 중심으로 한 C-line(Coastal-line) 해안 녹지축과 남부 산지를 중심으로 한 M-line(Mountain-line) 녹지축이 존재하였다. 세마랑은 도심지역의 녹지 연결성이 미흡하여 녹지축과 핵심 녹지가 존재하지 않는 등 해안과 산지를 잇는 녹지축이 부족한 현황이다.

자카르타	세마랑
	

[그림 39] 도시별 녹지축 현황 파악 결과

② 2단계 : 도시 홍수 위험 지수 제시 및 위험 예측 지역 도출

[도시 홍수 위험 지수]



[그림 40] 도시 홍수 위험 지수 제시 및 예측 체계

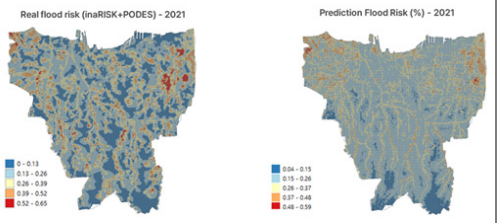
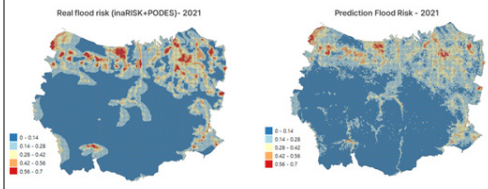
도시 홍수 위험 지수를 제시하기 위해 [그림 40]과 같이 총 3단계로 나누어 연구를 진행하였다. 2-1단계에서는 물리적(기후적·지리적) 요인을 기반으로 도시 홍수 위험 지수를 구축하였으며 홍수 발생 현황 데이터(inaRISK·PODES)를 활용하여 홍수 위험 지수가 높은 지역을 예측하였다. 2-2단계에서는 머신러닝을 활용하여 홍수 위험 지수에 활용된 요소의 중요도를 파악하였으며, 2-3단계에서는 기후변화 시나리오를 기반으로 홍수 위험 지역을 예측하였다. 단계별 내용은 아래와 같다.

〈표 33〉 홍수 위험 지표 구축을 위한 물리적 요소

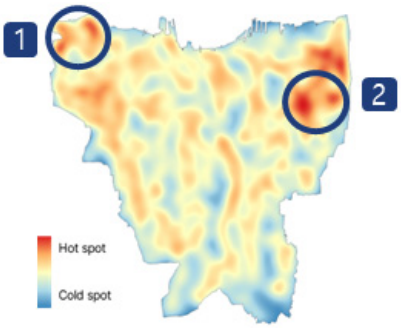
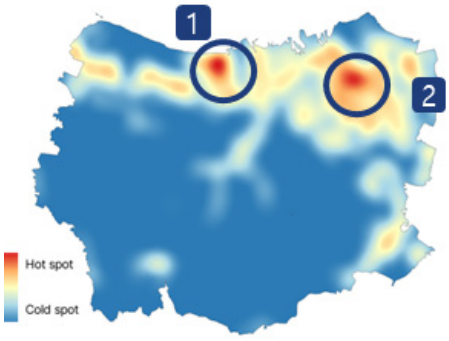
분류		DataName	설명
홍수 영향 요인	기후적 요인	ro	1차원 토양 수분 균형 모델을 사용하여 유도된 유출량
		vpd	포화수증기압
		aet	1차원 토양 수분 균형 모델을 사용하여 유도된 실제증발산량
		tmmn	평균온도
		def	1차원 토양 수분 균형 모델을 사용하여 유도된 기후 수분결핍
		soil	1차원 토양 수분 균형 모델을 사용하여 유도된 토양수분
		pr	누적강수량
		pdsi	Palmer 가뭄지수
		tmmx	최고온도
		twi	지형습윤지수
		flow-accumulation	누적유량
	지리적 요인	S2-NDBI	Sentinel-2 NDBI
		S2-NDWI	Sentinel-2 NDWI
		S2-NDVI	Sentinel-2 NDVI
		landcover	토지피복도
		flow-pointer	유량흐름
		slope	경사도
		aspect	최대기울기의 방향
		mean-curvature	평균곡률
		dtriver	가장 가까운 강까지의 거리
		Dtroad	가장 가까운 도로까지의 거리

인도네시아 자카르타와 세마랑의 홍수 위험 지수를 구축하기 위해 2015년~2021년 데이터인 기후적 요인(누적 강수량, 온도 등)·지리적 요인(DEM, NDBI, NDVI, Slope, CN 등)을 구득하여 홍수에 영향을 미칠 수 있는 물리적 요소로 활용하였다(〈표 33〉 참고). 또한 홍수 발생 건수를 반영하기 위해 인도네시아 재해 위험 지표인 inaRISK와 마을 단위 통계 데이터인 PODES(홍수 발생 건수·급류 홍수 발생 건수)를 활용하여 홍수 발생 현황 요소 데이터셋을 구축하였다. 나아가 인도네시아 홍수 발생 현황 데이터셋(2015년~2021년)을 활용하여 홍수 발생 현황과 홍수 영향 물리적 요소인 기후적 요인의 평균값과 지리적 요인을 100m*100m 그리드 단위로 생성하였다. 다음으로, 홍수 위험 지역 예측을 위해 머신러닝 모델인 Pycaret을 활용하여 머신러닝 방법론을 검토하였고 검토 결과 최적 모델이라 도출된 Random Forest를 통해 홍수 위험 지수 예측 모델을 구축하였으며 두 도시 모두 예측 모델 성능이 높게 나타났다(그림 41 참고). Random Forest를 통해 도출된 예측 결과를 100m*100m 그리드로 변환하여 물리적 요소를 기반으로 한 그리드별 홍수 위험 지수(Flood Risk Index; FRI)를 도출하였다. FRI를 바탕으로

Hot-spot 분석을 활용하여 2021년 홍수 위험 지역을 파악하였으며 그 결과는 [그림 42]와 같다. 자카르타의 경우 공원 및 인공낚시터가 밀집한 지역과(1번) 호수·타운하우스 밀집 지역(2번)과 같이 호소 주변이 홍수 위험 지역으로 나타났다. 세마랑의 경우 공항 및 인공 낚시터(1번)와 저층 주거지 밀집 지역(2번)과 같이 주로 녹지가 적고 주변이 개발된 시가지가 홍수 위험 지역으로 도출되었다.

자카르타						세마랑					
											
MAE	MSE	RMSE	R2	RMSLE	MAPE	MAE	MSE	RMSE	R2	RMSLE	MAPE
0.0216	0.0017	0.0413	**0.8885**	0.0325	0.1286	0.0299	0.0030	0.0544	**0.8720**	0.0434	0.2516

[그림 41] 도시별 2021년 홍수 위험 지역

자카르타		세마랑	
			
지역 특성	위성 사진 (google map)	지역 특성	위성 사진 (google map)
1. 공원 및 인공 낚시터		1. 공항 주변 및 인공 낚시터	
2. 호수 및 타운하우스 부지		2. 저층주거지 밀집 지역	

[그림 42] 도시별 2021년 홍수 위험 지역 - Hotspot

홍수 위험 지역을 바탕으로 인도네시아 세마랑 홍수 위험 지역에 해당하는 Tambakrejo와 Meteseh를 대상으로 사회경제적 수준에 따른 홍수 위험 인식 수준을 파악하기 위해 설문조사를 진행하였다. 설문조사 질문 문항은 '귀하 지역의 홍수 위협 수준을 어떻게 평가하시겠습니까?'로 구성하였으며, 리커트식 5점 척도로 평가하였다(매우 심각함, 심각함, 보통, 심각하지 않음, 매우 심각하지 않음). 독립변수의 효과를 종합적으로 검증하기 위해 〈표 34〉와 같이 우도비 검증을 실시하였으며 사회경제적 요인 중, 결혼 여부, 직업 상태, 주거지 유형, 교육 수준이 홍수 위험 인식에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

〈표 34〉 우도비 검정 결과

효과	모형 적합 기준	우도비 검정		
	축소모형의 -2 로그 우도	카이제곱	자유도	유의확률
평균 연간 가계소득	1051.536	5.21	4	0.27
성별	1050.246	3.92	4	0.42
결혼 여부	1072.623	26.30	12	0.01***
직업 상태	1080.700	34.37	20	0.02**
주거지 유형	1061.965	15.64	8	0.05**
주거 상태	1062.269	15.94	12	0.19
교육 수준	1089.207	42.88	28	0.04**
연령	1066.440	20.11	20	0.45

홍수 위험 인식 수준 별 영향 요인을 살펴보기 위해 다항 로지스틱 회귀모형을 사용하였으며 그 결과는 〈표 35〉와 같다. 분석결과 지역 내에서 홍수 위험이 매우 심각하지 않다(Not Serious At All)고 느끼는 계층에는 직업상태(풀타임), 주거지 유형(연립주택), 교육수준(중학교/동등)으로 도출되었다. 직업상태-풀타임의 추정값은 .839로 풀타임 근로자일 경우 다른 직업군 보다 홍수 위험을 심각하지 않다고 평가할 확률이 높다는 것을 의미한다.

주거지 유형 – 연립주택 또한 추정값이 16.430으로 나타났으며, 연립주택 거주자가 홍수 위험을 매우 심각하지 않다고 평가할 확률이 매우 높다는 결과가 도출되었다. 반면, 교육수준-중학교/동등에 해당할수록 다른 교육 수준 계층보다 지역 내 홍수 위험이 매우 심각하다고 분류될 확률이 높다(추정 값=-1.675). 홍수 위험이 심각하지 않다(Not Serious)는 인식을 가진 계층에서는 '매우 심각하지 않다'와 동일한 직업상태(풀타임), 주거지 유형(연립주택)이 유의한 변수로 도출되었으며, 직업상태(연금 수령자) 또한 유의한 변수로 나타났다.

심각하지 않다(Not Serious)의 직업상태-연금수령자의 추정값은 2.111으로 연금 수령자가 다

른 직업군에 비래 홍수 위험이 심각하지 않다고 평가할 확률이 높으며, 이에 대한 오즈는 Exp(2.111) = 8.258으로 나타나, “매우 심각함”에 비해 “심각하지 않다”를 선택할 가능성이 약 8.3배 높게 나타났다. 보통이다(Neither Serious nor Not Serious)를 선택한 계층에서는 결혼여부(결혼)만이 유의한 변수로 그 추정값은 -2.274로 나타나 기혼자는 홍수 위험이 보통이다 보다 매우 심각하다고 응답할 확률이 높다.

마지막으로 심각하다(Serious) 응답 계층의 경우 매우 심각하지 않다(Not Serious At All)와 심각하지 않다(Not Serious)응답 계층과 동일하게 직업상태(풀타임), 주거지 유형(연립주택)아 유의하다 도출되었으며 각가의 추정값은 0.804, 15.175로 다른 계층에 비해 홍수 위험 수준을 “매우 심각하다”가 아닌 “심각하다”로 응답할 확률이 높다고 나타났다.

이러한 설문조사 결과를 바탕으로 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다. 1) 풀타임 근로자와 연금 수령자 즉, 경제적 수준이 안정적인 계층일수록 홍수 위험 수준을 낮게 평가할 확률이 높으며, 이는 안정된 직업 수준이 홍수 위험 인식에 긍정적인 영향을 미침을 시사하는 결과이다. 2) 기혼자는 홍수 위험에 대해 높은 위험 의식을 가지고 있으며, 이는 가족 구성으로 인한 책임 인식이 위험 인식에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다.

〈표 35〉 다항 로지스틱 분석 결과

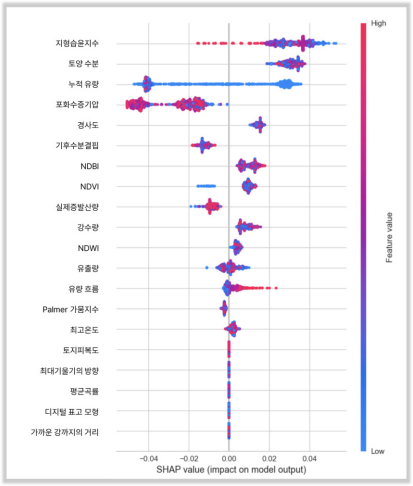
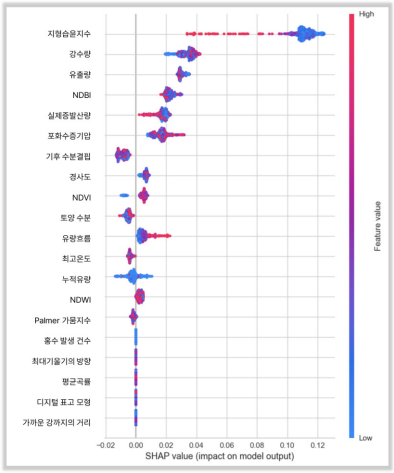
		Not Serious At All			Not Serious			Neither Serious nor Not Serious			Serious		
		B	Wald	Exp(B)	B	Wald	Exp(B)	B	Wald	Exp(B)	B	Wald	Exp(B)
평균 연간 가계소득		0.000	0.153	1.000	0.000	2.194	1.000	0.000	0.181	1.000	0.000	1.632	1.000
성별	여성	-0.013	0.002	0.987	-0.505	1.891	0.603	-0.155	0.105	0.856	0.216	0.444	1.241
	남성	0b			0b			0b			0b		
결혼 여부	사별	-0.482	0.118	0.617	1.189	0.750	3.285	1.116	0.631	3.052	2.406	3.208	11.094
	이혼	13.469	0.000	706799.815	1.278	0.000	3.589	23.920	0.000	24440997065.723	1.466	0.000	4.334
	결혼	-0.329	0.156	0.720	-0.771	0.741	0.463	-2.274***	6.303	0.103	0.631	0.454	1.879
	미혼	0b			0b			0b			0b		
직업 상태	풀타임	0.839*	2.662	2.315	1.655***	8.180	5.231	-0.042	0.002	0.959	0.804*	2.644	2.234
	파트타임	0.170	0.120	1.185	-0.060	0.007	0.942	-1.528	1.707	0.217	-0.246	0.231	0.782
	연금 수령자	-0.178	0.036	0.837	2.111**	5.829	8.258	0.084	0.004	1.087	-0.191	0.037	0.826
	자영업	0.223	0.364	1.250	0.754	2.521	2.126	0.361	0.459	1.435	-0.235	0.403	0.791
	기타	0.927	1.507	2.527	2.492***	10.096	12.089	1.196	1.560	3.307	0.354	0.186	1.425
	실업자	0b			0b			0b			0b		
주거지 유형	연립주택	16.430***	421.352	13655114.967	12.648***	175.111	311042.148	-8.716	0.001	0.000	15.175***	259.253	3895860.188
	단독주택	15.022		3341602.706	11.654		115163.323	3.499		33.085	15.562		5733136.678
	기타	0b			0b			0b			0b		
주거 상태	기타	12.351	0.000	231199.072	1.261	0.000	3.528	12.439	0.000	252582.210	13.420	0.000	673405.462
	무료 임대주택	13.384	0.000	649647.581	15.299	0.000	4406266.295	27.492	0.001	870178679762.286	0.048	0.000	1.049
	자가	-0.072	0.013	0.930	1.627	2.015	5.087	12.008	0.002	164139.113	-0.286	0.213	0.752
	유료 임대주택	0b			0b			0b			0b		

		Not Serious At All			Not Serious			Neither Serious nor Not Serious			Serious		
		B	Wald	Exp(B)	B	Wald	Exp(B)	B	Wald	Exp(B)	B	Wald	Exp(B)
교육 수준	초등학교 중퇴 이하	-1.794	2.483	0.166	12.227	0.002	204148.623	-12.872	0.002	0.000	12.379	0.001	237649.998
	초등학교 졸업 / 동등	-1.281	2.537	0.278	12.194	0.001	197556.727	0.509	0.118	1.663	12.627	0.002	304698.645
	중학교 / 동등	-1.675**	4.445	0.187	12.210	0.002	200781.827	0.375	0.065	1.456	12.611	0.002	299722.706
	고등학교 / 동등	-1.209	2.383	0.299	12.568	0.002	287342.693	-0.074	0.003	0.929	12.696	0.002	326508.739
	전문대학 I / II	-15.868	0.000	0.000	-0.967	0.000	0.380	-14.165	0.000	0.000	-2.184	0.000	0.113
	전문대학 III	-15.472	0.001	0.000	-1.438	0.000	0.237	2.172	1.379	8.778	12.681	0.002	321600.874
	전문대학 IV / 학사	-0.770	0.690	0.463	12.983	0.002	434925.989	-0.335	0.040	0.716	13.086	0.002	482102.992
	학교 미졸업	0b			0b			0b			0b		
연령	20세 이하	1.196	0.676	3.308	1.384	0.816	3.991	-13.480	0.000	0.000	-11.088	0.001	0.000
	20세 ~ 29세	0.113	0.025	1.119	0.372	0.187	1.450	-0.432	0.134	0.649	0.530	0.570	1.698
	30세 ~ 39세	0.363	0.453	1.437	0.120	0.032	1.127	0.834	1.088	2.302	0.465	0.705	1.592
	40세 ~ 49세	-0.189	0.146	0.828	0.194	0.103	1.214	0.478	0.379	1.613	-0.311	0.367	0.733
	50세 ~ 59세	-0.126	0.072	0.881	0.508	0.875	1.662	-0.328	0.194	0.720	0.092	0.037	1.096
	60세 이상	0b			0b			0b			0b		

*$p < .1$ **$p < .05$ ***$p < .01$

2-1단계에서 도출된 FRI를 기반으로 SHAP Value 중 Global SHAP을 활용하여 요소별 중요도를 도출하였으며 도시 홍수 위험에 영향을 미칠 수 있는 변수의 중요도를 파악하였다. 나아가 분석 결과를 기반으로 도시 홍수 저감 방안과 관련해 우선적으로 고려할 수 있는 물리적 지표를 제시하였다.

분석 결과, 자카르타의 경우 twi(지형습윤지수), soil(토양 수분), flow accumulation(누적유량)이 중요 변수로 도출되었으며, 세마랑에서는 twi(지형습윤지수), pr(누적강수량), ro(유출량)이 중요 변수로 도출되었다(그림 43 참고). SHAP를 통해 두 도시에서 공통적으로 지형습윤지수, 토양 수분, 누적 유량, 유출량이 모델 예측에 큰 영향을 미치는 주요 변수로 도출되었으며, 이는 강수량 및 기온과 밀접한 상관관계를 가지는 특성으로 나타났다. 이를 바탕으로 중요 변수를 대표할 수 있는 특성인 강수량과 기온(최고기온, 평균기온)을 고려하여 홍수 위험 지역을 파악할 필요가 있다고 파악하였으며, 이러한 결과는 기후변화에 따른 강수량과 기온(최고기온, 평균기온)의 변화를 기반으로 홍수 위험을 도출할 필요가 있음을 나타내는 결과이다. 즉, 두 도시 모두 지리적 요인보다는 상대적으로 기후적 요인이 중요하다 도출되었기에 홍수 저감 방안을 마련할 시 기후적 요인을 우선적으로 고려할 필요성을 시사하는 결과이다.

자카르타	세마랑
	

[그림 43] 도시별 중요 지표

마지막으로 2-3단계에서는 기후적 요인에 따른 홍수 위험 지역을 예측하기 위해 2-1단계에서 구축된 Random Forest 모델을 활용하여 기후변화 시나리오 기반 미래 홍수 위험 지수 및 위험 지역을 도출하였다. 기후변화 시나리오란 온실가스, 에어로졸 변화 등 인위적인 원인으로 발생

한 기후변화를 전망하기 위해 온실가스 농도, 기후변화 수치모델을 이용하여 산출한 미래기후 전망 정보이다(기상청 날씨누리). 주로 미래기후 전망 정보의 파악을 위해 SSP(Shared Socioeconomic Pathway, 공통사회경제경로)와 RCP(Representative Concentration Pathways, 대표농도경로)를 기후변화 시나리오로 활용하고 있다.

SSP의 경우 2100년 기준 복사강제력 강도(RCP)와 함께 미래 기후변화 대비 수준에 따라 인구, 경제, 에너지사용 등의 미래 사회경제 시스템의 변화를 적용한 시나리오로 IPCC 제6차 평가보고서 대응에서 활용된 가장 최신의 기후변화 시나리오이다. RCP의 경우 2100년 기준 복사강제력에 따른 온실가스 농도 시나리오로 IPCC 제5차 평가보고서 대응에서 활용된 시나리오이다. 두 기후변화 시나리오는 온실가스 농도를 중점으로 보았는지, 미래 사회경제 시스템의 변화를 중점적으로 보았는지에 따라 사용하는 목적이 상이한 모델이다.

본 연구의 2-3단계에서는 두 시나리오를 모두 고려할 필요가 있다고 판단되었기에, World Bank Climate Change Knowledge Portal에서 제공하는 SSP-RCP를 활용하였다. SSP-RCP는 [그림 44]와 같이 총 4종 표준 시나리오(SSP1-2.6(지속 가능 성장), SSP2-4.5(중도 성장), SSP3-7.0(불균형 성장-현 추세 유지), SSP5-8.5(고속 성장))로 구성되어 있으며 본 연구에서는 최대온도, 평균온도, 누적강수량의 변화량에 따른 시나리오를 기반으로 2030년 홍수 위험 지역을 예측하였다.

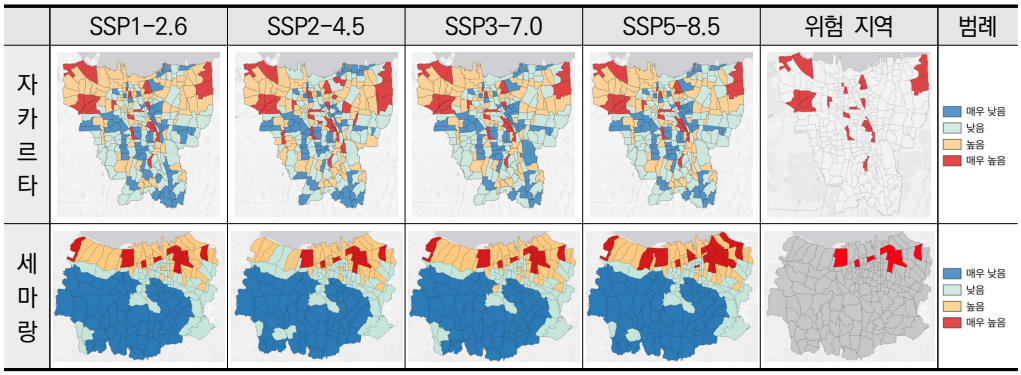
종류	의미	인도네시아 평균 기온(2030)	인도네시아 강수량(2030)
SSP1-2.6	✓ 사회 불균형 감소와 친환경 기술의 빠른 발달로 기후변화 완화 ✓ 적응능력이 좋은 지속성장가능 사회경제 구조의 저탄소 시나리오	+ 0.4°C	- 80.6 mm
SSP2-4.5	✓ 중도성장의 사회경제 시나리오로 기후변화 완화 ✓ 사회경제 발전 정도가 중간단계 가정	+ 0.38°C	-84.1 mm
SSP3-7.0	✓ 사회경제 발전의 불균형과 제도적 제한으로 인해 기후변화에 취약한 상태에 놓이는 사회경제 구조의 시나리오*(Baseline)*	+ 0.4°C	- 122.2 mm
SSP5-8.5	✓ 기후정책 부재, 화석연료 기반 성장과 높은 인적투자로 기후변화 적응능력은 좋지만, 완화능력이 낮은 사회경제 구조의 고탄소 시나리오	+ 0.52°C	- 39.1 mm

* 2014년 대비 2030년 변화량

[그림 44] 기후변화 시나리오

SSP-RCP 시나리오를 활용하여 인도네시아 마을 단위인 RW(village)별 기후변화 시나리오 예측을 진행하였다(자카르타 RW = 264, 세마랑 RW = 177). 또한, 미래 시나리오 예측에 있어 강수량이 50mm 이상인 날의 수, 평균 최대 1일 강수량을 반영하여 기후변화에 따른 국지성 호우 등 이상 기후 현상의 증가를 반영하였다. 앞서 구축된 모델을 활용하여 시나리오에 따라 FRI 예측값을 도출하였으며 이를 기반으로 k-means clustering을 활용하여 시나리오별 홍수 위험 지수를 군집화하여 홍수 위험 지수가 매우 높은 지역을 도출하였다. 예측 결과, 자카르타의 경우

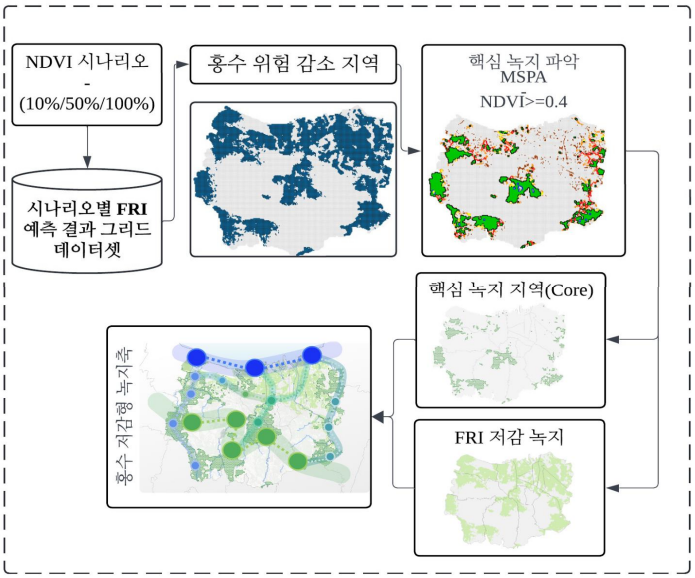
Danau Sunter Dll, Kampung Melayu, Bungur, Rawa Buaya 등이 홍수 위험 지수가 높은 지역으로 도출되었으며 네 지역 모두 현재 녹지 연결성이 미흡한 지역으로 이를 반영한 홍수 저감형 녹지축의 제시가 필요한 지역임을 확인하였다. 세마랑의 경우 Tambakrejo, Kemijen 등을 중심으로 한 해안지역이 홍수 위험 지역으로 예측되었으며 맹그로브 보존지를 제외하면 지역 내 그린인프라가 부족한 실정이기에 이를 반영한 녹지축이 필요하다(그림 45 참고).



[그림 45] 기후변화 시나리오별 홍수 위험 지역

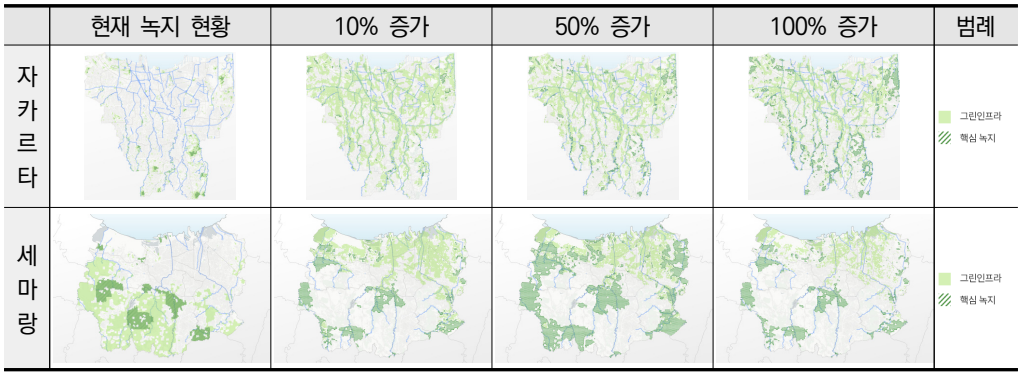
③ 3단계 : 홍수 저감형 녹지축 도출

[홍수 저감형 녹지축]



[그림 46] 홍수 저감형 녹지축 도출 체계

3단계에서는 NDVI 시나리오를 통한 장기적 측면의 홍수 저감형 녹지축을 도출하기 위해 3가지 세부 단계를 나누어 분석 결과를 도출하였다. 세부 연구 단계의 경우 1) 홍수 위험 지수를 고려한 대상지 내 녹지축을 도출하고자 NDVI 시나리오 분석(10%, 50%, 100% 증가)을 진행하였다. 2) 머신러닝 모델인 Random Forest를 활용하여 시나리오에 따라 NDVI가 높아질수록 FRI가 낮아지는 지역을 판별한 뒤, 녹지축에 반영해야 할 핵심 녹지 지역을 파악하였으며 그리드 데이터셋을 구축하였다. 3) FRI를 저감하기 위해 지역 특성을 반영하여 장기적인 녹지축을 제시하였다(그림 46 참고).

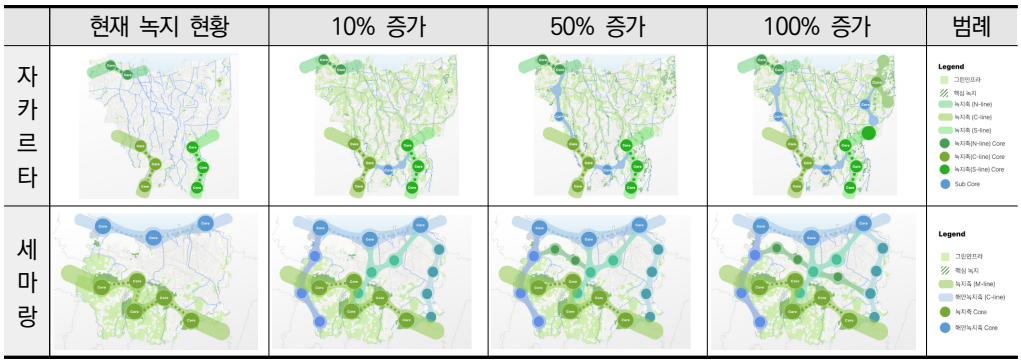


[그림 47] 식생지수 향상 시나리오별 홍수 위험 저감 지역

1단계에서 시나리오 분석을 진행한 뒤, 2단계 핵심 녹지 지역 및 FRI 저감 녹지를 파악한 결과는 [그림 47]과 같이 나타났다. FRI 저감 녹지는 NDVI 값이 증가하였을 때, FRI가 감소하는 지역으로 정의하였으며, 핵심 녹지 지역(Core)은 FRI 저감 녹지 중 NDVI 값이 0.4 이상인 지역으로 홍수 저감을 위한 녹지축 구축 시 우선적으로 고려되어야 하는 핵심 지역으로 정의하였다. 분석 결과, 자카르타의 경우 식생지수가 향상될수록 FRI가 감소되는 지역이 증가하였으며, 주로 동자카르타에 위치한 Suka Pura 지역을 중심으로 핵심 녹지 지역이 확장되었음을 확인하였다. 특히, 강변 공간을 중심으로 NDVI 향상에 따른 FRI 저감 지역이 증가하였으며 이는 강변 지역을 활용한 녹지축의 제시가 필요함을 의미하는 결과이다.

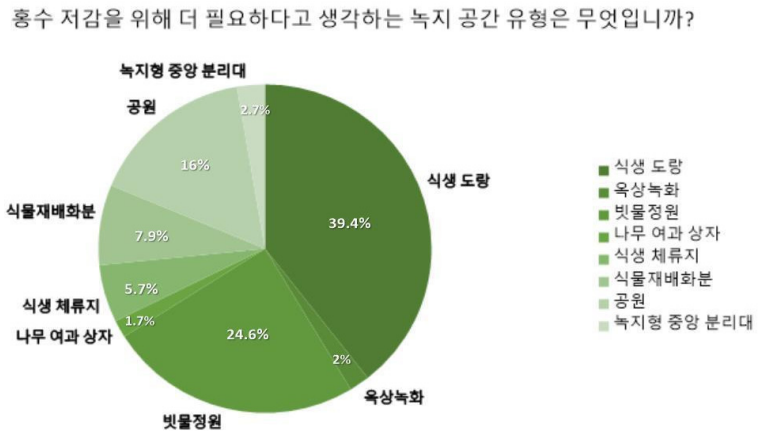
반면, 세마랑의 경우 NDVI가 50% 증가할 때 가장 많은 지역에서 FRI가 저감되었으며, 핵심 녹지 지역은 서남부에 위치한 산지 위주로 도출되었다. 이는 이미 서남부에 풍부한 녹지가 존재하는 세마랑에서는 무조건적인 녹지양의 증가보다는 기존 핵심 녹지를 보전하되, 도심부와의 녹지 연결성을 향상시키는 녹지축의 제시가 필요하다는 것을 의미한다. 분석 결과를 종합해 보면, 대부분의 지역이 개발되어 불투수층의 비율이 높은 자카르타의 경우 녹지 특히, 강변 공간을

중심으로 한 녹지가 증가할 때 FRI가 감소하며, 세마랑은 산지의 보전과 함께 도심부의 녹지축이 제시되었을 때 FRI가 저감되기에 지역 특성에 따른 녹지축의 제시가 필요하다는 것을 나타낸다. 이를 바탕으로 3단계에서 도시 내 녹지 공간을 유기적으로 연결하여 FRI를 저감할 수 있는 녹지축을 도출하였으며 그 결과는 다음 [그림 48]과 같이 나타났다. 자카르타의 경우 도시 외곽을 잇는 U자형 녹지축이 나타났으며 세마랑의 경우 보전산지-도심-해안 맹그로브 지역을 잇는 거미줄형 녹지축이 나타났다.

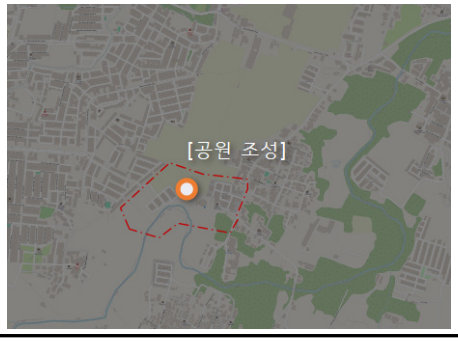


[그림 48] 식생지수 시나리오별 녹지축 제시 방안

홍수 저감을 위한 녹지축의 실질적인 제시를 위해 홍수 위험 지역 주민들의 저영향 개발(LID) 방식별 선호도를 조사하였으며, 이를 반영하여 해당 지역 내 녹지축 조성을 위한 녹지 도입 방안을 제시하고자 하였다. 세마랑의 Tambakrejo와 Meteseh를 대상으로 설문조사를 진행한 결과 식생도랑(39.4%), 빗물 정원(24.6%), 공원(16%)의 선호도가 높은 것으로 나타났다(그림 49 참고). 선호도가 높은 LID 유형의 경우 빗물을 저류시켜 홍수 위험을 저감시킬 뿐만 아니라, 지역 내 여가 시설로 활용되거나 지역 미관을 향상 시킬 수 있으며 배수로 쓰레기 문제를 해결할 수 있다는 특징이 존재하는 요소이다. 이에, 1) 타 지역보다 지대가 낮아 저류시설이 필요한 지역 2) 유휴부지 3) 배수로가 존재하는 지역에 해당 요소들을 도입하여 녹지축 연결을 위한 녹지를 조성한 결과는 [그림 50]과 같다.



[그림 49] LID 선호도 설문조사 결과

Tambakrejo	Meteseh
	

[그림 50] 홍수 위험지역 내 녹지축 조성을 위한 LID 적용 예시

제 5절. 소결

1. 각 재난 별 주요 연구 결과

본 장에서는 '기후변화에 따른 분야별 영향 요인 탐색'을 위하여 자카르타와 세마랑을 중심으로 한 인도네시아의 해안도시를 대상으로, 질병(풍토병), 열(열섬), 물(홍수)에 대한 재난 발생 현황을 진단한 후, 재난 발생에 영향을 미치는 해안도시 지역의 특성을 분석하여 영향 요인을 도출하였다. 영향 요인을 토대로 재난별 위험 지수를 개발하였으며, 현지 조사 결과를 기반으로 시나리오 분석을 진행하고 솔루션을 제안하였다.

1) 질병

질병 영향 부분에서는 2단계에 걸쳐서 해안도시구조와 기후변화 및 풍토병의 상호작용을 분석하였다. 첫 번째 단계에서는 보고서와 정책 검토를 통하여 인도네시아의 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 현황을 확인하였으며, UNSD 기후변화 통계 5대 영역을 기반으로 풍토병과 기후변화 요소의 연관성을 확인하고 연구 변수를 도출하였다. 이어서 두 번째 단계에서는 도시별 풍토병 현황을 진단하여 핫스팟을 도출하였으며, K-means 클러스터링과 의사결정나무모형을 이용하여 풍토병과 해안도시 구조의 상호작용을 확인하고 풍토병 확산 가능성을 확인하였다.

인도네시아 과거와 현재 기후변화에 따른 풍토병 현황 진단을 위하여 인도네시아 정부 보고서 및 국제기구 보고서를 검토하여 거시환경분석(PESTEL)을 시행한 결과, 전반적으로 뎅기를 비롯한 풍토병에 대한 취약성이 재확인 되었다. 특히, 풍토병의 체계적인 대응을 위하여 정부부처 및 지방-중앙정부 간 협조체계가 미비하여 이에 대한 개선 필요성이 확인되었다. 이와 함께, 풍토병 대응 관련 다양한 제도 및 정책이 마련되어 있으나 대응 역량의 한계로 적용 상의 문제가 있음도 도출되었다. 특히, 풍토병에 대한 여성, 어린이의 취약성 대비와 이를 위한 보건 인프라 확충 및 정보제공 시스템의 개선 필요성이 확인되었다.

이어서 학술지 논문과 연구보고서를 검토하여 인도네시아의 기후변화와 풍토병 간의 관계를 확인하였으며, 기후 여건에서는 온도, 습도, 강수량, 풍속, 지리적 여건에서는 토지피복, 고도, 식생지수, 사회적 요인에서는 도시의 인구밀도, 연령, 노동인구, 환경적 요인에서는 도시화, 폐수 처리 비율과 하수 시스템이 각각 변수로 도출되었다.

도시 별 풍토병 현황 진단 결과, 자카르타에서는 주거지가 밀집한 도시 중심부에 뎅기 핫스팟이

형성되었으며, 이들 지역은 특히 저밀 주거지와 산업 지역 등 인구밀도가 높은 지역적 특성을 보유하였다. 한편, 세마랑에서는 산지가 많은 도시 동남부에 주로 뎅기 핫스팟이 형성되었으며, 이는 모기 서식에 유리한 환경적 요인에서 기인하는 것으로 예상되었다.

풍토병과 해안도시 구조 상호작용 분석을 위하여 지리 및 기후적 특성이 유사한 자바섬의 11개 해안도시(대도시권)를 대상으로 표본을 구축하여 K-means 클러스터링을 진행하였다. 군집 간 특성 차이에 크게 기여하는 변수로는 물 공급 방식, 풍토병 발병, 수질오염, 홍수 발생 여부, 슬럼 지역 유무, 의료시설 접근성, 영양실조 발생 건 수, 저소득층 비율이 도출되었다. K-means 클러스터링 결과, 15개의 군집 중 풍토별 발병 지역은 주로 [군집 2]에 집중되었으며, 세마랑과 자카르타의 풍토병 발생도 해당 군집에 집중되었다. [군집 2] 주요 특성으로는 크게 4가지 특성이 도출되었다. 먼저, 우물과 샘물 같이 개관된 수돗물 외의 수단을 통한 물 공급 비율이 높아 물 관리에 대한 중요성이 강조되었다. 또한, 수질오염 발생 비율이 다른 군집에 비해 높게 나타나 공중보건 차원에서 물 관리에 대한 종합적인 관리 필요성이 대두되었다. 한편, [군집 2]는 홍수 발생에도 취약한 것으로 나타나 복합재난의 영향이 확인되었으며, 풍토병의 발병과 종합적인 물 관리 간의 연관성을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 마지막으로, [군집 2]는 상대적으로 높은 슬럼지역과 저소득층 비율을 보여 사회경제적 요인의 영향에 대한 고려가 필요하다.

해안도시 구조와 풍토병의 상호작용에 관한 의사결정나무 분석을 진행한 결과, 풍토병 발병 여부에는 의료시설 접근성과 저소득층 비율, 가정수 음용 공급방식이, 발병 건수에는 영양실조와 저소득층 비율이 가장 중요한 영향 요인으로 도출되었으며, 의료시설 접근성과 가정의 음용수 공급방식도 주요하게 도출되었다.

이러한 결과를 바탕으로 현장 조사를 진행한 결과, 실제 대상지 내 주요 풍토병 영향 지역에서 낮은 의료시설 접근성, 저소득층 밀집 거주, 열악한 물 공급 및 위생시설, 녹지 관리의 필요성이 제기되었으며, 현장 방문 과정에서 도출된 취약 요소를 종합하여 풍토병 발생 위험 지수를 도출하였다.

연구 결과, 풍토병과 해안도시 구조의 상관관계가 확인되었으며, 특히 수공간 및 수자원과 사회경제적 요인의 관리가 중요하게 나타났다. 이는 열 및 물 재난 및 그 영향과 궤를 같이하는 결과이며, 복합재난의 차원에서 풍토병 관리가 필요함을 시사한다.

2) 열

열 영향 부분에서는 열 영향 지표인 열섬포텐셜(Heat Island Potential)을 활용하여 과거와 현재의 열 위험이 높은 지역을 도출하고, 이를 기반으로 머신러닝 모델을 활용하여 미래의 열 위험 지역을 예측하였다. 이후, Envi-met 시뮬레이션 분석을 통해 대상지의 물리적 환경 조건에 따라 적합한 열 완화 전략을 도출하여 열 환경 개선 방안을 제시하였다.

자카르타와 세마랑의 열섬 포텐셜 분석 결과, 산업 단지와 같은 인공 열원이 열섬 포텐셜을 높이는 주요 요인으로 확인되었으며, 이러한 영향이 인근 주거 지역까지 확산되는 경향이 나타났다. 자카르타에서는 Kalideres와 Kota Jakarta Barat 지역이 소규모 산업단지와 창고 밀집으로 인해 높은 열섬 포텐셜을 보였고, 이로 인해 남서쪽 주거 지역까지 영향을 미쳤다. Cilincing 지역은 중대형 산업단지에서 방출된 열로 인해 국소적으로 매우 높은 열섬 포텐셜을 기록하였다. 세마랑에서는 공항과 공장이 열섬 포텐셜을 증가시키는 주요 원인으로 나타났다. 특히, Bongsari 지역은 텍스타일 제조 공장이 열섬을 유발했으며, Tambakharjo 지역은 공항과 플라스틱 가공 공장이 원인으로 작용하여 주변 주거 지역까지 영향을 미쳤다. 이는 산업 시설에서 방출되는 열이 열섬현상에 결정적인 영향을 미친다는 것을 보여준다. 연구 지역으로는 복합재난 지역을 고려하여 Tambakrejo와 Meteseh가 선정되었다. Tambakrejo는 산업단지가 인접하고 공장이 위치한 지역으로, 열섬 영향을 받는 지역이다. Meteseh는 분지 지형에 위치한 주거 밀집 지역으로, 열 위험이 높은 지역으로 나타났다.

선행연구와 리빙랩 결과를 바탕으로, 쿨 루프(Cool Roof), 옥상 녹화, 가로수 식재가 연구 대상지에 쉽게 적용 가능한 열 완화 방안으로 도출되었다. 동일한 환경 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 각 환경 조건에 가장 적합한 열 완화 방안을 분석하였으며, 이를 기반으로 효과적인 열 환경 개선을 위한 가이드라인을 제시하였다.

분석 결과, 물리적 환경 조건에 따라 열 완화 방안의 효과는 상이했다. 비정형 블록의 주거 밀집 지역에서는 옥상 녹화가 가장 효과적이었으며, 가로수 식재와 바람길 조성이 추가적으로 필요한 것으로 분석되었다. 반면, 녹지가 부족한 정형 블록의 주거 밀집 지역에서는 쿨 루프가 가장 큰 열 완화 효과를 보였으며, 건물 반사율 개선이 녹지 조성보다 더 효과적이었다. 낮은 밀도의 분산형 주거 환경에서는 옥상 녹화와 밀도 높은 외부 녹지 공간 조성이 열 환경 개선에 크게 기여하였다. 녹지가 존재하는 정형 블록 지역에서는 추가적인 옥상 녹화와 외부 녹지 조성을 통해 소폭의 온도 저감 효과가 확인되었다. 물리적 환경 조건에 따라 맞춤형 열 환경 대응 방안

을 설계하는 것이 중요하며, 이외에도 식생 및 녹지 면적 등의 요소를 종합적으로 고려한 열 완화 정책을 수립해야 한다.

3) 물

물 영향 부분에서는 홍수 영향 요인을 도출한 후, 이를 바탕으로 홍수 위험지수를 개발하고 홍수 위험 저감을 위한 녹지축을 제시하였다. 이를 위해 먼저 NDVI를 활용하여 대상지인 자카르타와 세마랑의 그린인프라 및 녹지축의 현황을 파악한 뒤, 기후적 및 지리적 요인과 홍수 정보를 사용하여 머신러닝 기반 대상지의 홍수 위험 평가를 위한 FRI를 구축하여 홍수 취약 지역을 도출하였다. 자카르타의 경우 Penjaringan(공원 및 인공 낚시터)와 Cakung Timur(호수 및 타운하우스 부지)이 홍수 위험 지역으로 도출되었으며, Penjaringan은 해안가에 위치한 지역으로 고도 등이 다른 지역에 비해 낮기 때문에 해수면 상승 및 지면 침하의 발생 등으로 인해 홍수 위험 지역으로 도출된 것으로 유추하였다. Cakung Timur는 강 특히, 우기 하천 범람이 빈번하게 발생하는 Cakung River까지의 거리가 가깝기에 하천 범람으로 인한 홍수가 발생할 것으로 판단되는 지역이다. 세마랑의 경우 Tambakharjo(공항 및 인공 낚시터)와 Tambakrejo(저층 주거지 밀집 지역)로 나타났는데, 두 지역 모두 해안가에 위치한 지역으로 다른 지역에 비해 고도가 낮은 지역이다. 즉, 타지역에 비해 고도가 낮고 녹지가 부족하여 우수 저류가 원활히 이루어지지 못하며, 지반침하로 인해 조수 홍수 또한 발생하여 홍수 위험 지역으로 분류되었다. 특히, Tambakrejo의 경우 물리적 요인과 더불어 쓰레기 투기 등으로 인해 지역 내 배수 시스템의 관리 미흡으로 인해 우수가 저류되지 않아 홍수가 발생한다는 특징이 존재하였다. 홍수 저감을 위해 기후변화 시나리오에 따른 홍수 위험 지역 또한 예측하였으며, 홍수 위험 지역으로 나타난 지역 내에 홍수 위험을 저감할 수 있는 녹지가 부족하다는 공통점이 존재하였으며 이는 홍수 저감을 위한 그린인프라의 필요성을 시사하는 결과이다.

앞서 도출된 결과를 기반으로 홍수 위험 저감을 위해 NDVI 증가 시나리오를 바탕으로 녹지축 조성에 고려되어야 하는 핵심 녹지 기반 지역 특성 맞춤형 녹지축을 제시하였으며 이를 도시계획 및 공원녹지기본계획 등에 고려할 필요가 있음을 도출하였다. 나아가 홍수 저감을 위한 녹지축의 구축을 위해 홍수 위험 홍수 저감을 위한 녹지 조성 방안을 제시하기 위해 LID 요소 선호도를 조사하였다. 그 결과, 지역 내 쓰레기 투기로 인한 배수 시스템의 문제와 홍수 발생을 해결할 수 있는 식생 도랑을 적용하는 것이 홍수 저감을 위한 녹지축 구축에 우선적으로 활용할 수 있음을 확인하였다. 나아가 주민참여 측면에서 식생 도랑과 더불어 홍수 저감을 위한 지역 환경 관리를 위해 주민 신고형 무단 투기 쓰레기 신고 체계의 적용 및 자동 쓰레기 수거 드론을

활용하는 등 효율적인 홍수 저감 체계의 확립을 통해 홍수 요인을 체계적으로 관리할 필요가 있다.

2. 해안도시와 복합재난

해안도시에서 발생하는 질병-열-물 재난은 복합재난으로서 그 원인과 영향요인이 상호작용하며, 각 재난의 결과 또는 피해가 다른 재난으로 이어지기도 한다.

복합재난 측면에서의 대표 사례인 홍수는 홍수 발생으로 인한 재산 피해 등 1차적 피해에만 국한되지 않기에 이를 복합적 차원에서 고려할 필요가 있다. 먼저, 하천의 범람과 배수 시스템 문제 등으로 인한 홍수의 발생은 거주지 침수·취수원을 오염시켜 식수 문제를 비롯하여 식수위생 측면에서의 물 문제를 야기하며 이로 인한 전염병 문제를 심화시킨다. 홍수 잔류수(Stagnant Floodwater)로 인한 오염수 유입과 더불어 모기 서식지 확대로 인한 말라리아 및 댕기 감염 원인인 모기 개체수의 증가 등으로 수인성 질병을 비롯한 전염병이 발생할 가능성을 증가시키기도 한다. 특히, 뎅기의 증상 중 하나인 피부 발진과 수인성 피부병의 혼동으로 인해 2차 피해가 발생하는 등 재난의 연쇄성과 동시성이 나타나고 있는 실정이다. 즉, 기후변화로 인한 자연재난은 사회적 재난의 시작점으로 변모하는 양상을 보이며 복합재난으로 발전하고 있다.

열섬 현상(Urban Heat Island)은 도심의 기온이 주변 농촌 지역보다 높은 현상으로, 이러한 현상은 홍수 발생에 직·간접적인 영향을 미친다. 열섬으로 인한 기온 상승은 대기 순환을 변화시켜 강수 패턴을 변경하고, 강수량 증가로 인한 홍수와 같은 이상기후를 초래할 수 있다. 특히 도심은 농촌 지역에 비해 극심한 강우 현상이 더 자주 발생하고 홍수 위험이 높다는 경향이 있으며(Lowry, 1998), 이는 자카르타와 세마랑이 폭염과 홍수로 인한 심각한 문제를 겪고 있는 상황과 연관 지을 수 있다. 이는 자카르타와 세마랑 도심의 열섬 지역에서 아스팔트와 콘크리트 같은 불투수층이 과도하게 분포한 결과로 해석할 수 있으며, 이러한 물리적 환경은 강우 시 배수 능력을 저하 시켜 도시 홍수 위험을 더욱 증가시키는 요인으로 작용한다.

또한, 열섬 현상은 모기 매개 질병인 뎅기열 발생과 밀접한 관련이 있다. 기온 상승은 모기의 생태적 특성, 특히 번식과 성장을 가속화하여 질병 전파 속도를 증가시킨다. 또한, 폭염으로 인하여 물 저장소와 물웅덩이의 온도를 상승 시켜 모기 유충의 서식 환경을 강화하며, 위생을 저하시킬 수 있다. 이는 시행한 설문 결과와 맥락을 같이하며, 뎅기열 사례는 낮은 사회경제적 지역, 높은 인구 밀도 지역 또는 빈민가와 같은 지역보다 지표 온도가 32°C 이상인 지역에 집중

되어 있다는 선행연구와 일치한다(Araujo et al., 2015).

따라서 열섬 현상(폭염), 홍수, 전염병은 개별적인 기후 재난으로 인식되기 쉽지만, 실제로는 상호작용하며 복합재난의 형태로 도시 환경에 영향을 미칠 수 있다. 폭염은 기온 상승을 통해 대기 순환과 강수 패턴을 변화시키며, 강수량 증가와 홍수 발생 위험을 높인다. 동시에, 홍수로 인해 형성된 정체된 물웅덩이는 모기의 서식지를 제공하여 전염병, 특히 뎅기열의 전파를 촉진한다. 동시에, 열대 도시의 폭염과 고습 환경은 위생 상태를 악화시키고, 사람들의 면역력을 약화시켜 질병에 대한 취약성을 높인다.

이러한 복합재난 특히, 자연재난으로 인해 발생하는 사회적 재난의 경우 그 책임소재가 불분명하기에 즉각적인 대응이 어려워 재해를 심화시킬 수 있는 가능성이 존재한다. 또한, 질병, 열, 물은 개별 문제가 아닌 상호의존성을 가지며, 따라서 이들 간의 상호작용을 통합적으로 이해하고 해결책을 마련하는 것으로 복합재난에 관한 위험성을 낮추고 회복력을 향상시킬 수 있으며, 본 장의 결과를 복합재난대응을 위한 기초적인 자료로 활용할 수 있을 것이라 판단한다.

III장. [2단계] 기후변화 적응을 위한 리빙랩 프로토타입 개발

제 1절. 리빙랩 목표 및 내용

1. 리빙랩 목표

본 연구팀은 기후변화에 따른 질병, 열, 물 관리 및 복합재난의 영향이 높을 것으로 예상되는 인도네시아 커뮤니티를 핫스팟 분석을 통해 탐지하였다. 이와 함께 기후변화로 인한 재난 및 복합재난 발생의 원인과 영향 요인 도출 결과를 바탕으로, 자카르타와 세마랑의 현지 커뮤니티를 대상으로 현미경식 참여 관찰 연구인 리빙랩을 진행하여 기후변화에 효과적으로 대응할 수 있는 리빙랩 프로토타입을 개발하고 운영하는 것을 목표로 한다.

2. 리빙랩 세부절차

1단계 연구 진행 과정에서 도출한 질병, 열, 물 관리 연구 결과를 바탕으로 복합재난 발생 가능성이 높은 기후위기 관심지역(핫스팟)을 선정하였다. 이와 함께 질병, 열, 물 관리의 취약성을 진단하고 이를 바탕으로 리빙랩의 사전 설계(안)을 구성하였다. 또한, 연구진은 리빙랩을 수행하기 위하여 설계 단계에서 현지 파트너십을 구축한 바 있다.

리빙랩 현지 파트너십은 리빙랩 프로토타입을 운영하고 가이드라인을 개발하기 위해서 구축하였으며, 다수의 공동 워크샵을 통해 선정 지역의 주요 기후변화 이슈를 정의하고 다양한 집단의 재난에 대한 인지 영향을 논의하는 과정을 거쳐, 기후변화 적응을 위한 고려사항과 해결 방향을 도출하였다. 상기 과정에는 참여자 대상 성과 검증 진행 및 프로토타입의 지속가능성을 평가하고, 리빙랩의 현지 지원 체계를 구축하는 것이 포함된다. 리빙랩 과정을 통해서 궁극적으로는 프로토타입 운영 결과를 기반으로 도출한 솔루션을 활용하여 향후 국제 협력 사업과 시 정부에서 정책 수립 과정에서 활용할 수 있는 가이드라인을 개발하여 이해관계자가 이를 사용하고 결과를 확장시킬 수 있도록 활용 가능성을 극대화하고자 한다.

3. 기대효과

본 연구는 커뮤니티 기반의 리빙랩을 통해 기후변화 적응을 위한 솔루션 체계를 구축하고 집중적인 참여관찰과 연구 수행과정에서 확보한 실증 데이터를 기반으로, 상대국인 인도네시아는 물론 우리나라의 효율적인 기후변화 적응 방안을 마련하는 장을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 리빙랩의 설계 및 운영 과정에서 인도네시아의 파트너 기관인 세마랑 디포네고로 국립대학교를 비롯해 세마랑 시 정부의 관련 부처, 민간 및 NGO 기관, 지역 주민 및 주민 주도의 커뮤니티가 주도적으로 참여하여 대상국이 자생적인 기후변화 대응 방안을 개발하는 능력을 갖추는 데 기여할 것으로 기대한다.

제 2절. 대상 지역 선정

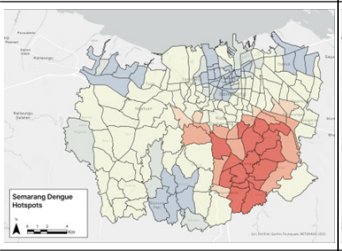
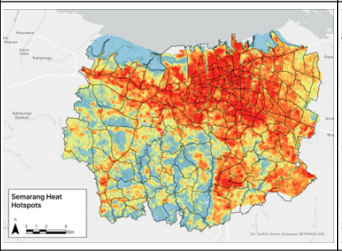
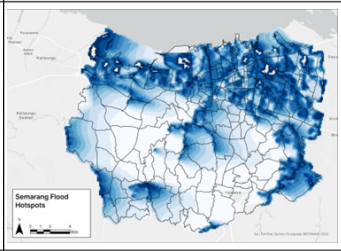
1. 대상 도시 선정

인도네시아 세마랑시는 중부 자바주의 주도이자 자바섬 북쪽 해안의 저지대에 위치한 인구 150만명의 대도시로, 뎅기열 등의 전염병과 열섬현상으로 인한 온열질환, 가뭄과 홍수, 지반침하와 같은 물 관련 재해 등 질병-열-물 관리에 취약한 도시이다. 따라서, 인도네시아 정부는 세마랑시의 질병-열-물 관리 대응을 위해 볼바키아 박테리아 감염 모기 방사를 통한 뎅기열 확산을 저지하고 홍수를 방지하기 위한 보호제방 건설 등의 노력을 기울이고 있다.

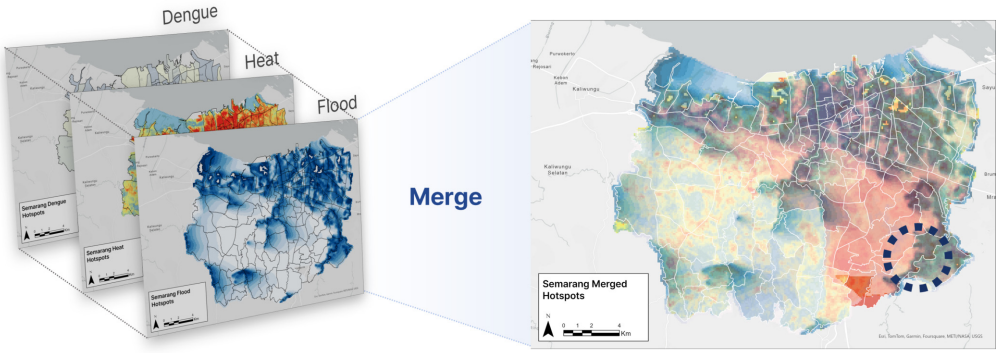
한편, 자카르타는 자바 해를 마주한 습지대 지형이자 13개의 강이 통과하는 지역으로, 기후변화로 인한 해수면 상승과 인프라 부족이 나타나고 있다. 이러한 상황에서 지하수 사용으로 인한 지반 침식이 나타나고 있으며, 특히 북부 자카르타는 매년 25cm씩 침하하여 2050년이 되면 95%가 가라앉을 것으로 예측되었다(BBC, 2018/08/15). 기후위기는 이러한 자카르타의 환경적 취약성을 심화시키고 있으며, 향후 질병-열-물 관리를 더욱 어렵게 하는 지표면 온도의 상승, 강수량 증가, 극심한 기상변화가 예상된다.

2. 선정 지역

본 연구는 기후변화로 인한 재난 영향을 고려하기 위해 자카르타-세마랑 해안도시 벨트 중 데이터 접근이 용이하고, 현지 파트너십 구축에 유리한 세마랑을 리빙랩 대상지로 선정하였다. 관련하여 1단계 실증연구 과정에서 질병, 열, 물(홍수) 관리가 집중적으로 요구되는 핫스팟을 도출하고 중첩하여 복합재난 핫스팟을 제시하였다. 분석 결과 질병, 열, 물 모두 공통적으로 세마랑 동남부 지역에 핫스팟이 도출되었으며, 재난별 핫스팟의 개별 특성은 다음과 같다.

질병	열	물
		
산림 인접 주거지역	시내 중심부 및 주거지역	수변(해안 및 강가)과 저지대

[그림 51] 재난별 핫스팟 분석 결과



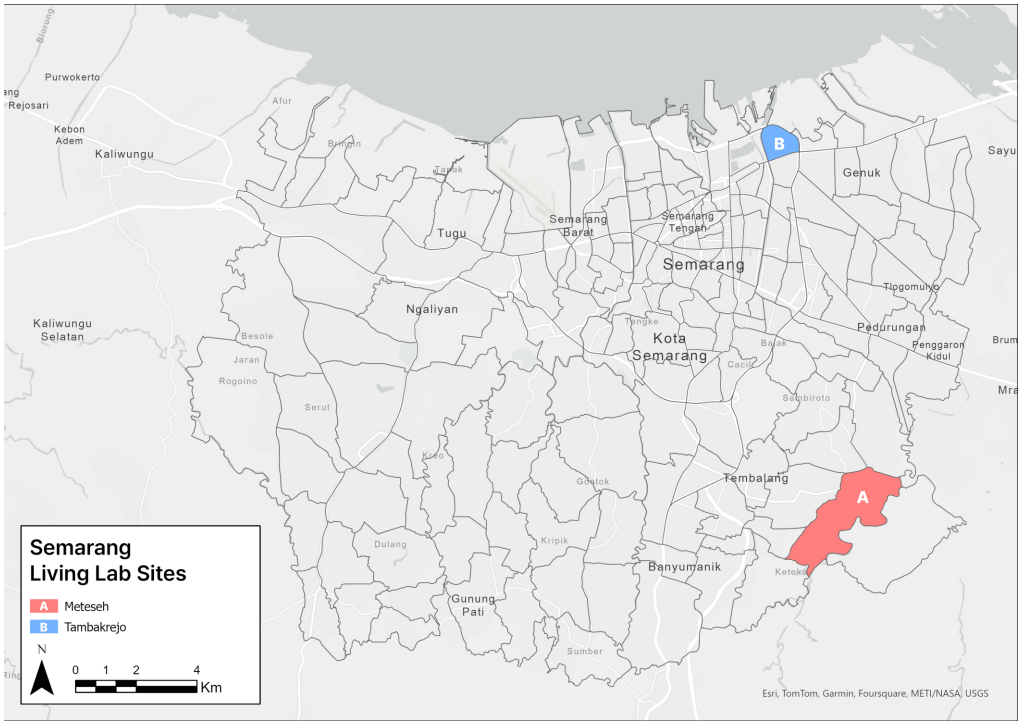
[그림 52] 리빙랩 대상지 핫스팟 도출과정

이러한 다양한 재난 핫스팟에 따라 종합적이고 다양한 유형의 리빙랩 프로토타입을 도출하고자, 하나의 대상지가 아닌 복수의 대상지에서 리빙랩을 시행하고자 한다. 이에, 세 재난이 중첩되어 나타나는 메테세(Meteseh)를 첫 번째 리빙랩 대상지로 선정하였다.

Meteseh는 세마랑 동남부에 위치한 Kelurahan(마을)으로, 산림에 인접한 저밀 주거지역이며, 강가에 접한 언덕이라는 지형적 특성을 가진다. 세마랑에서 가장 인구가 많은 지역 중 하나로, 2020년 기준 세마랑의 177개 마을 중 인구수 9위를 기록하였으며 2023년 기준 24,134명의 인구를 지니고 있다. 메테세는 현재 세마랑 내에서 빠르게 성장하고 있는 지역으로, 비교적 최근에 개발되었다.

또한, 메테세와 함께 열과 물의 공통 핫스팟으로 도출된 탐박레조(Tambakrejo)를 두 번째 리빙랩 대상지로 선정하였다. Tambakrejo는 세마랑 북동쪽 해안가에 위치한 Kelurahan으로 저지대에 위치한 용도혼합 지역이다. 주거지역뿐 아니라 공장도 위치하여 지역 내 지하수 사용

이 많아 지반침하가 우려되며, 인도네시아 재난관리청 데이터와 정량분석 결과를 통하여 홍수가 빈번한 지역임을 확인하였다. 여기서 특히, 저소득자 및 취약계층이 다수 거주하고 슬럼 주거지가 형성되어 있는 등, 재난에 취약한 특성은 리빙랩 대상지로써 적합하였다. 이와 같은 해당 대상지는 인도네시아 현지 파트너뿐 아니라 사전 워크샵을 통하여 세마랑의 주요 이해관계자에게 그 적합성을 검토받았다.

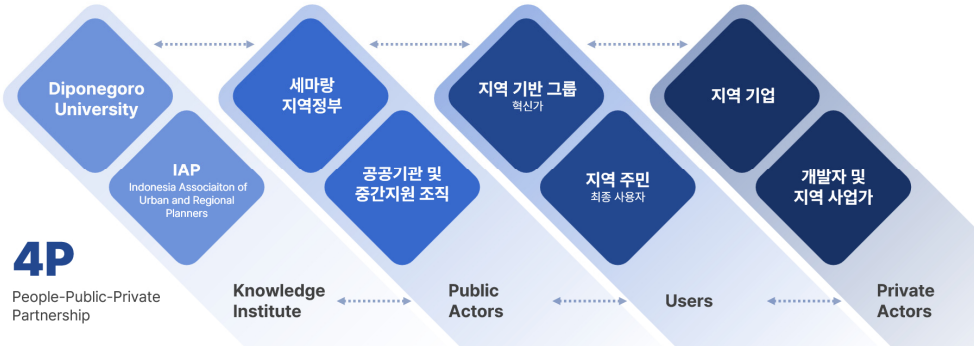


[그림 53] 세마랑 리빙랩 대상지

제 3절. 리빙랩 사전 설계 및 파트너십 구축

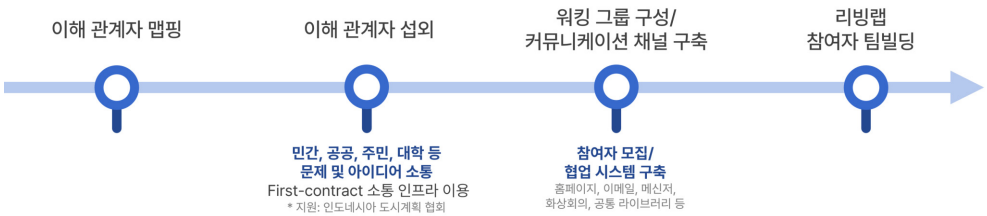
1. 파트너십 구축

공공 부문, 민간 부문, 학계·연구계, 이용자 그룹을 대상으로 리빙랩 구축을 위한 현지 다채널(4P) 파트너십 구축을 진행하였다. 다채널 파트너십의 주요 이해관계자로 세마랑(커뮤니티), 디포네고로대학교(학계), 세마랑 시청(공공), Environmental Resource Management(민간) 등이 존재한다.



[그림 54] 리빙랩 구축을 위한 현지 다채널(4P) 파트너십 구축

또한, 현지 다채널(4P) 파트너십 구축을 위해 이해관계자 맵핑, 이해관계자 섭외, 워킹 그룹 구성 및 커뮤니케이션 채널 구축, 리빙랩 참여자 팀빌딩을 수행하였다.

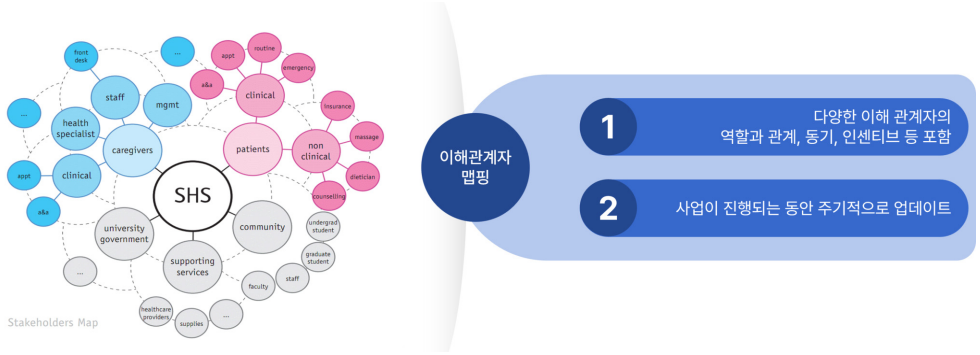


[그림 55] 현지 다채널(4P) 파트너십 구축 프로세스

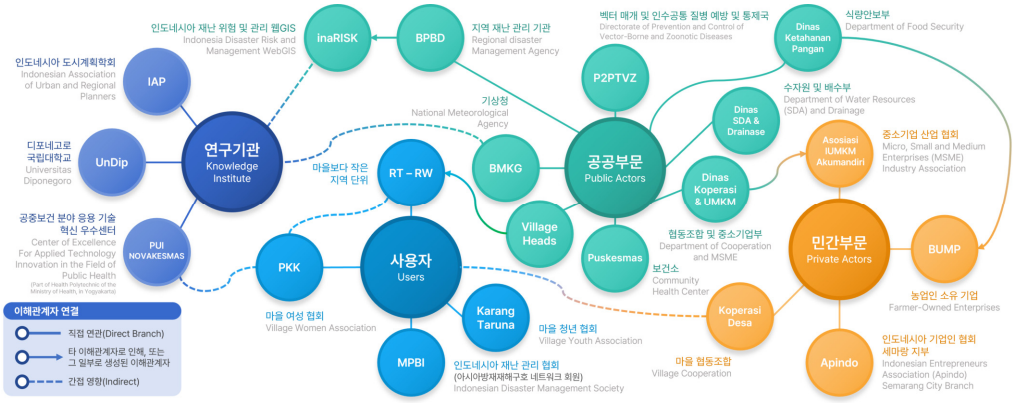
현지 파트너십을 중심으로 거주민 대상의 리빙랩 프로젝트 참여자를 모집하며, 연구진과 상대국 연구파트너인 Iwan Rudiarto 교수 및 Wiwandari Handayani 교수가 공동 퍼실리테이터로 참여하였다. 연구책임자의 지도 학생 1인은 인도네시아 국적의 관련 분야 경력자로, Environmental Resource Management 등 현지 기관과 협력하여 주요 이해관계자로 섭외하

였다.

이러한 현지 파트너십과의 자문회의를 통해, 리빙랩 사전 설계(안)을 검증하고 지역적 맥락에 맞도록 보완하는 과정을 거쳐 프로토타입을 공동 개발하였으며, 연구기관, 사용자, 공공 및 민간 부문의 현지 다채널 파트너십(4P) 구축을 위해 이해관계자 맵핑 또한 진행하였다.



[그림 56] 이해관계자 맵핑 예시



[그림 57] 파트너십 1차 맵핑

2. 리빙랩 사전 설계 및 진행 프로세스

리빙랩의 사전 설계와 진행 프로세스는 다음과 같은 과정을 거쳐 진행되었다.

먼저 지난 1월부터 4월까지 이해관계자의 맵핑 및 섭외를 거쳐 개방형 플랫폼을 구축하였으며, 한국팀과 인도네시아팀은 정기적으로 미팅을 진행하고 상호 피드백을 통해 단계별 파트너십을 구축하였다. 동시에, 3월에서 4월까지 기후위기에 따른 원인 영향 요인인 질병, 열, 물의 진단 결과를 바탕으로 핫스팟을 발굴하고, 이에 대한 현지조사를 준비하였다.

이후 6월 3일에는 한국 및 인도네시아팀, 인도네시아 주요 관계자가 참석한 온라인 사전 워크샵을 통해, 현지 파트너십과 거주민을 중심으로 대상 지역의 주요 기후 변화 이슈를 연구 내용에 기반하여 정의하고 거주민 집단별 인지 영향을 논의하였다. 또, 기후변화 적응을 위한 고려 사항과 해결방안을 논의하여, 최종적으로는 리빙랩 대상 지역 후보군을 설정하였다.

6월부터 진행한 리빙랩 사전 설계안 도출 과정에서는, 워크샵과 연구에 기반하여 분야별 영향 요인, 인지 영향에 따른 리빙랩 주제를 각 대상지 별로 1개씩 도출하였으며, 한국과 인도네시아팀이 1차 내부 평가를 진행하며 타당성과 정합성을 검토하였다. 이를 바탕으로 7월에 이해관계자 컨설테이션을 진행하여, 거주민, 연구계·학계·업계 전문가 및 공무원 등을 대상으로 포커스 그룹 인터뷰를 수행하여 리빙랩 사전 설계안을 개발하고 검토하는 과정을 거쳤다. 궁극적으로는 사전 설계안을 중심으로 현지 파트너십과 함께 프로토타입을 공동 개발하고, 실제 환경에서 반복적으로 테스트하며 피드백을 반영하고 운영하였다.



[그림 58] 리빙랩 사전 설계 및 진행 프로세스

제 4절. 사전 워크샵 및 세미나 개최

1. 사전 워크샵

1) 사전 워크샵 개요

1단계 연구 내용을 기반으로 연구 결과의 현지 정합성을 확인하고, 현지의 주요 기후변화 이슈와 함께 집단별 인지 영향을 논의하기 위한 사전 워크샵을 개최하였다. 이는 2024년 6월 3일 12:00부터 13:30까지 진행되었으며, 한국 및 인도네시아 연구진 15인, 인도네시아 주요 관계자 16인이 참석하였다. 특히, 인도네시아 주요 관계자는 공공, 민간, 학계 등 다양한 분야의 전문가를 포함하였으며, 그 목록은 〈표 36〉과 같다.

〈표 36〉 사전 워크샵 참석 인도네시아 주요 관계자

연번	성명	소속	직책
1	Ahmad Muhajirin	Regional Planning and Development Agency of Semarang City (Bappeda)	Representative
2	Nur Wachid	Public Works Department of Semarang City (DPU)	Representative
3	Fauziah RA	Public Works Department of Semarang City (DPU)	Representative
4	Arum N.A.	Public Works Department of Semarang City (DPU)	Representative
5	Abdul Hakam	Health Department of Semarang City (Dinkes)	Head of Dept.
6	Sidiq Disperkim	Housing and Settlement Areas Department of Semarang City	Representative
7	Fetri	Environmental Agency of Semarang City (DLH)	Representative
8	Safrinal Sofianidi	Environmental Agency of Semarang City (DLH)	Representative
9	Herlina Nia	Regional Research and Innovation Agency of Central Java Province (Brida Jateng)	Representative
10	Ardian Bakhtiar	Regional Research and Innovation Agency of Semarang City (Brida Semarang)	Chair
11	Dr. Muhammad Helmi S.Si. M.Si.	Center for Coastal Rehabilitation and Disaster Mitigation Studies (CoREM)	Chair
12	Arif Ganda Purnama S.T. M.T.	Association of Urban and Regional Planners of Central Java Province (IAP)	Chair
13	Mega Anggraeni S.T. M.Si.	Initiative Foundation for Climate Change (IKUPI)	Manager
14	Gregorius Jasson	Kota Kita	Director
15	Rizqa Hidayani	Kota Kita	Director
16	Silvania Utami	Kota Kita	Director
17	Raka Whisnu Suryandaru S.T. M.Sc.	PT Krida Karya Advisory	Director

2) 주요 토의 내용

사전 워크샵에서는 인도네시아 주요 관계자들을 대상으로 한 전반적인 연구 소개와 함께 각 연구팀에서 1단계 연구 결과를 제시하였다. 사전 세미나의 전반부에서는 각 팀의 결과를 바탕으로 연구의 현실성, 보완점 등에 관하여 토의하였다.

질병의 경우, 현재 세마랑에서 유행 중인 다른 풍토병인 렙토스피라증은 위생과 관련이 깊으며, 2023년 1월부터 3월까지 세마랑 북부에서 18건의 사망자 발생한 만큼 이에 대한 고려도 함께 검토하였다. 또한, 2016년부터 2023년까지의 세마랑 뎅기 출혈열 발병 패턴을 분석한 결과, 첫 우기인 3월~5월의 습도 증가가 뎅기 발생 건수 증가 패턴과 평행을 이루는 것을 확인하였으며, 이러한 결과는 기후위기와 질병의 관계를 조사하는 본 연구와의 접점이 있다고 할 수 있다.

열의 경우, 가장 열의 영향을 많이 받는 커뮤니티의 영향을 확인해볼 것을 제안하며, 리빙랩이 어떻게 영향을 최소화하는데 기여할 수 있는지에 대한 고민이 필요하다는 결론이 도출되었다. 물과 관련된 경우, 비영리 인도적 지원단체인 Mercy Corp가 아시아 도시 기후 변화 리질리언스 네트워크(Asian Cities Climate Change Resilience Network ; ACCCRN)를 통해 세마랑에서 증거를 구축하고 후속 프로그램을 진행하고 있으며, 세마랑을 비롯한 자바 북부 해안의 기후 회복력은 매우 지역적이며 구체적인 상황에 따라 다를 수 있음을 토의하였다. 또한, 그 중에서 세마랑의 홍수는 기후변화뿐 아니라 지반침하, 도시 역학, 인프라 등으로 인한 복합적이고 영구적인 침수에서 기인한다는 점에 주목할 수 있었다.

이와 함께, 사전 세미나의 후반부에서 리빙랩 후보지로 Meteseh, Rowosari (Meteseh와 인접한 유사한 환경의 마을), Tambakrejo를 제안하고 인도네시아 주요 관계자와 함께 해당 대상지의 적합성과 실현 가능성을 검토하였다. 그 결과, 대부분의 참가자는 리빙랩의 세 후보지를 모두 적합하다고 검토하였으며, 복수의 리빙랩 프로토타입을 운영하는 안에 대해서도 긍정적인 반응을 보였다. 특히, Mercy Corps에서는 세마랑 내 Babon과 Tuntang의 특정 지역에서 리빙랩을 진행할 예정이며, 향후 협업을 제안하기도 하였다.

3) 추가 서면 피드백

온라인으로 진행된 사전 세미나의 시간 및 물리적 한계를 극복하기 위하여 각 참석자에게 서면 피드백을 요청하였으며, 이를 통해 본인이 이해하고 있는 세마랑의 복합재난 관련 지식을 공유하고 연구 결과 및 리빙랩 대상지 선정의 지역 적합성 등을 검증하며 리빙랩 아이디어를 발굴하

였다.

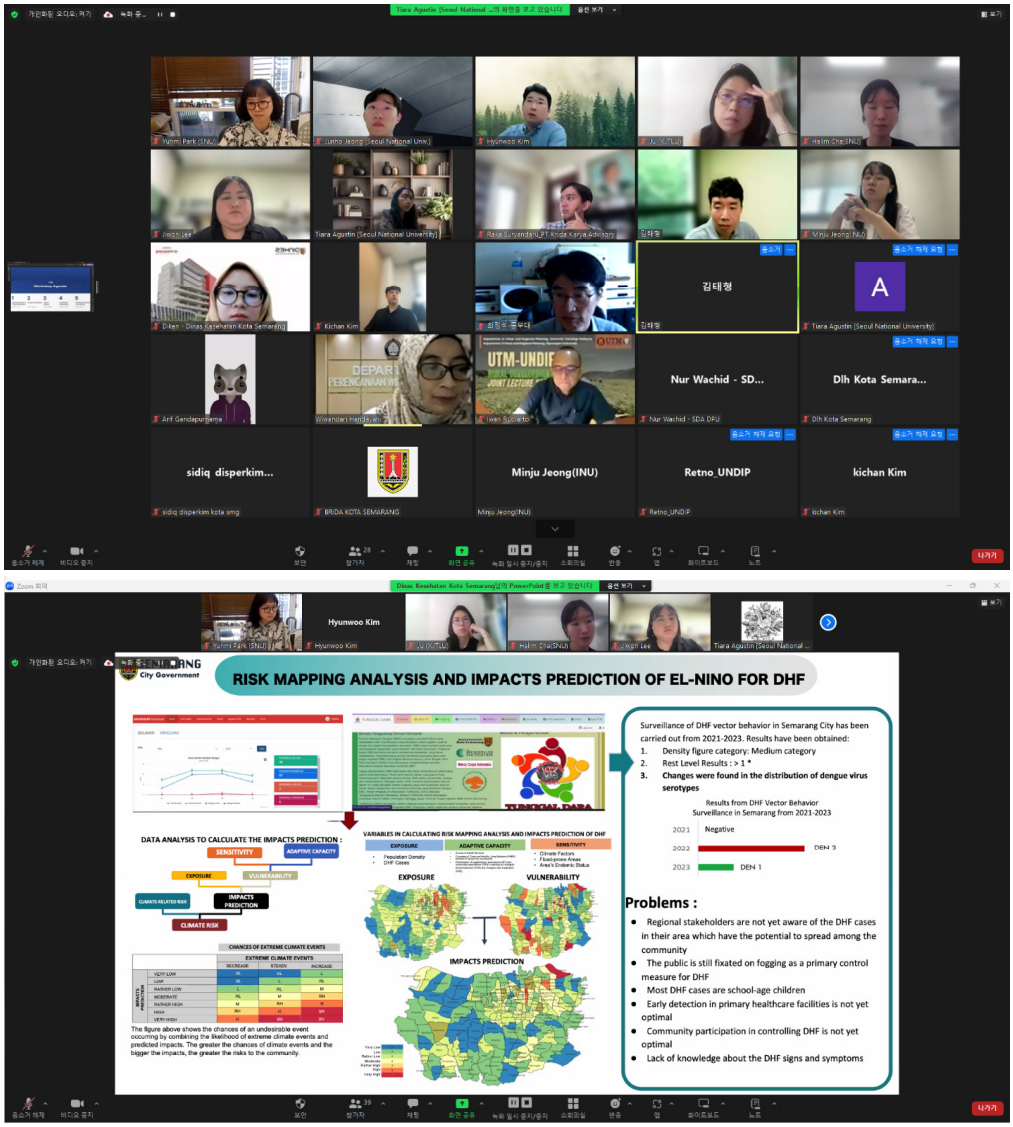
서면 피드백을 통해 연구 결과와 관련하여 모든 참가자가 연구 결과의 적합성을 재확인하였으며, 1단계 연구의 마무리 단계에 적용할 수 있는 사항을 제안할 수 있었다. 또한 모든 리빙랩 대상지 후보가 복합재난의 핫스팟임을 재확인하며 Meteseh와 Tambakrejo를 대상지로 추천하였다. 특히 Meteseh는 재해가 빈번함에도 불구하고 새로이 개발되어 기존에 연구되지 않은 대상지라는 점에서, 연구 의의의 존재를 확인할 수 있었다. 반면, 도시화가 진행 중이어서 새로 유입되는 인구가 많아 Tambakrejo보다 적은 지역 애착을 지녀 문제의 핵심에 대한 이해도 적을 것이라는 의견과 동시에, Meteseh가 포함된 Tembalang은 해안가보다는 홍수 위험이 낮다는 것이 지적되었다.

이외에도 리빙랩 대상지로 Pedurungan District와 Genuk District, Kaligawe 등을 제안함과 동시에, 다양한 리빙랩 아이디어가 제시되었다. 이들은 대부분 공동체 기반의 리빙랩으로써, 구성원들이 공동의 목표를 달성하기 위해 함께 협력하는 공동 협력인 Gotong Rojong 정신을 통해 기후위기에 대응하는 것이다. 구체적으로 배수관 설치 및 청소, 재활용에 기반한 폐기물 관리를 통해 기후 변화의 영향에 대처하고 탄소 배출을 줄일 수 있는 커뮤니티 수준의 대응 조치가 제안되었다. 이외에도, 구조적 솔루션과 동시에 비구조적 솔루션을 동시에 고려하고, 세마랑 도시계획 및 인프라와 연계하여 진행할 것이 제안되었다.

4) 성과 및 의의

먼저 사전 세미나를 통하여 1단계 연구의 현지 적합성을 검토할 수 있었으며, 1단계 연구를 통하여 도출된 개별 재난의 핫스팟이 실제 현황을 반영하고 있음을 확인하였다. 이를 통해 연구의 신뢰성을 확보하고, 남은 정량분석의 방향성을 구성하였다. 리빙랩 후보지의 적합성과 실현 가능성을 확인하였으며, 이를 토대로 대상지를 최종적으로 확정하였다. 대상지 선정과정에서 현지의 시각을 반영하여, 보다 현지밀착형의 실현 가능성이 높은 리빙랩 프로토타입 개발을 가능하게 하였다는 점에서 의의가 존재한다.

뿐만 아니라, 본 연구와 관련된 인도네시아 주요 이해관계자와의 관계를 형성하고 발전시킴으로써, 추후 리빙랩 프로토타입 개발과 후속 연구까지 이어질 수 있는 이해관계자와의 관계 형성의 초석을 다질 수 있었다. 정량분석 결과 보완과 함께, 리빙랩 프로토타입 개발에 필요하지만 온라인 상 구득의 한계가 있는 데이터의 제공을 요청 및 확보한 것은 큰 성과로 작용하였다.



[그림 59] 사전 세미나 화면

2. 서울대-코이카공동 세미나: 세마랑시장 초빙 도시재난대응 토론회 (SNU EPI & KOICA Invitational Seminar with Semarang City Mayor on Urban Disaster Responses)

1) 세미나 개요

사전 세미나 참석자 중 세마랑 보건국장(Abdul Hakam)과 공무원 일동이 국제행사 참석차 방한하여 추가적인 논의가 제안되었으며, 이에, 2024년 6월 25일 20:00-22:00에 서울대학교 환경대학원 글로컬홀 및 온라인 하이브리드로 방문 세미나를 개최하였다. 이를 통해 사전 워크샵과 관련된 후속 심층 논의를 진행하였다.

2) 주요 토의 내용

먼저 본 토의에서는 세마랑 보건부에서 진행하는 다양한 기후변화 관련 프로그램이 소개되었다. 그중 하나는 WHO 12개 항목에 기반하여 smartPLS를 활용한 취약성 지도를 개발하는 프로그램으로, 지난 2년간 15건의 기후 관련 질병 영향 위험 평가를 수행한 것이다. 이와 관련해 TBC 질병과 기후 변수의 연관성을 분석하여 각 마을별 취약성 및 노출 지도를 작성하고, 식품, 수질, 대기질 샘플링 및 검사를 위한 "Papandayan" 이니셔티브를 활용하여 마을 단위에서 설사 등 질병 원인에 대한 분석을 실시한 사례가 존재한다.

이와 함께 39개 보건소(Puskesmas)를 통한 정기적 데이터 수집과 함께, 매월 업데이트 및 검증 과정이 제시되었으며, 특히 뎅기열을 기후 영향 질병의 대표적 척도로 사용하는 것과 관련한 근거를 확보할 수 있었다. 지난 10년간의 데이터에 따라 기온 하강으로 뎅기열 발생이 증가하는 반면, 기온이 높아지면 2~3개월 지연된 영향을 미치는 것으로 나타났음이 확인되었다. 이는 즉, 뎅기열을 기후 영향 질병의 대표적 척도로 충분히 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 이외에도, 사회조사 데이터와 미시적 수준의 데이터는 부분적으로 이용 가능하며, 현재 위생 및 위생(PHBS 및 STBM)에 대한 데이터 범위는 30% 수준으로 구축되어 있어, 이를 지속하여 확대해 나가고자 하는 계획을 확인하였다.

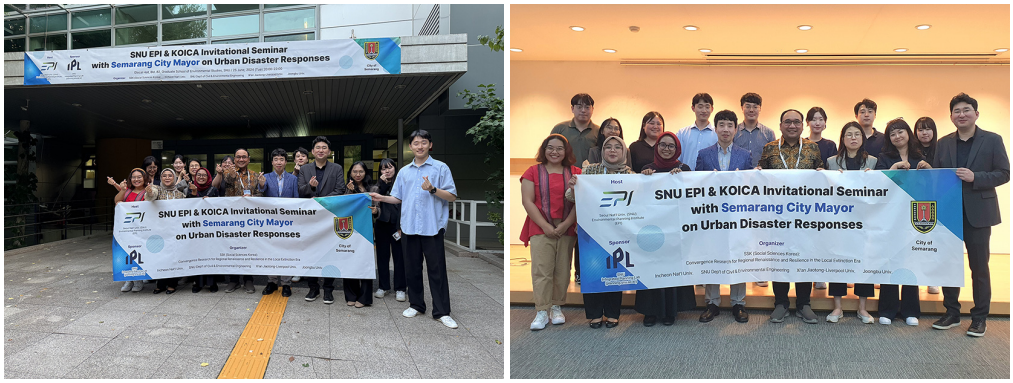
해당 토의에서는 세마랑의 지반 침하 문제와 미래 개발계획의 여부 및 방향에 관한 추가 논의 또한 진행되었다. 현재 세마랑의 지반 침하 속도는 연간 5~7cm로, 홍수 문제를 해결하기 위한 뱅거폴더 시스템, 제방 등의 혁신적인 프로그램을 시행 중이다. 개발계획의 경우 주민들의 경제

적 능력이 낮고 재해에 취약한 세마랑 북부 지역에 집중하여 이루어지고 있으며, 이는 적응력 향상을 위한 경제 활동과 사회적 개입을 강화하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 지역 북서쪽에는 맹그로브 보호 지역이 위치하고 있어, 이에 관한 논의도 진행하였다.

마지막으로 세마랑 리빙랩 대상지와 관련하여, 두 지역(Meteseh, Tambakrejo) 모두 홍수가 빈번하고, 도둑 문제가 많으며, 인구 밀도가 높고 위생이 취약하다는 추가 유의사항까지 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 지역의 위생을 개선하고 습관과 생활방식을 변화시키기 위한 광범위한 접근이 필요하다는 시사점이 제시되었다.

3) 성과 및 의의

해당 토의를 통해 세마랑의 기후위기, 도시개발 및 보건 관련 이슈의 심층 논의를 통하여 사전 세미나에서 미쳐 진행하지 못한 내용이 추가적으로 논의되었다. 세마랑 보건 및 건강과 관련하여 새로운 인사이트를 얻을 수 있었으며, 뎅기 및 렙토스피라와 관련한 구체적인 내용도 확인할 수 있었다. 또한, 세마랑의 도시개발 및 물 관리 정책도 확인하여 세마랑 및 리빙랩 대상지의 맥락을 파악하고, 데이터 제공과 리빙랩 프로토타입 개발 과정에서의 상호 협력이 강화될 수 있었다는 점에서 큰 성과를 얻을 수 있었다.



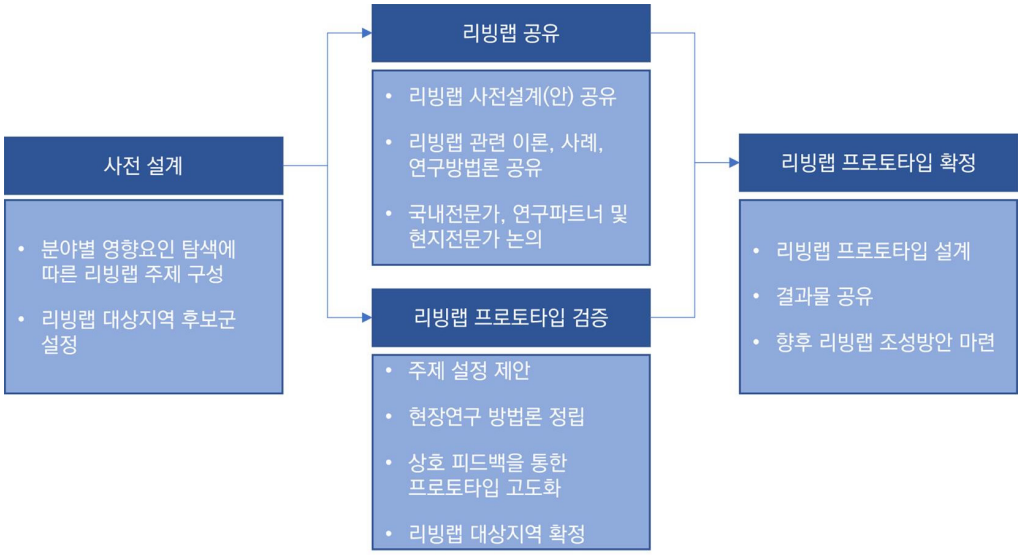
[그림 60] 세미나 사진

제 5절. 리빙랩 프로토타입 운영을 위한 현지조사

1. 리빙랩 프로토타입 운영 개요

리빙랩 프로토타입을 개발하기 위하여 현지 파트너십, 참여자들과 공동 워크샵을 진행하여 선정 지역의 주요 기후변화 이슈를 정의하였다. 다양한 집단별 인지 영향을 논의한 후, 적응을 위한 고려사항과 해결 방안을 도출하였으며, 특히 ICT 기반 기후변화로 인한 복합 재난 알림 시스템 구축 및 대피소 선정을 주요하게 다루었다. 이러한 과정으로 도출된 아이디어를 실제 환경에서 반복적으로 테스트하며, 다양한 사용자의 피드백을 바탕으로 개선하는 것이 리빙랩 프로토타입 개발의 주요 목적이다.

리빙랩 프로토타입은 연구 종료 이후 인도네시아 연구파트너, 또는 후속 연구를 통해 실제 리빙랩으로 확장 및 운영하며 커뮤니티 수준에서 기후변화 적응 방안을 마련하기 위한 다양한 정책-계획 실험 및 실증 데이터 확보에 활용하고자 한다.



[그림 61] 리빙랩 프로토타입 개발 절차

2. 현지 조사 계획 및 준비

1) 개요 및 주요 일정

리빙랩 프로토타입 개발을 위하여 2024년 7월 13일부터 7월 25일까지 연구진 6인과 외부 전문가 2인이 인도네시아 세마랑 및 자카르타에 방문하여 현지 조사를 시행하였다. 이를 위하여 세마랑에서는 주요 이해관계자 및 커뮤니티와 함께 3단계에 걸쳐 리빙랩 솔루션을 개발하고 검증하는 과정과 함께, 주요 기관과 내용을 공유하고 발전시키는 일정을 계획하였다.

자카르타에서는 리빙랩 솔루션을 발전시키고, 관련 대상지를 추가로 답사하여 인도네시아 해안 도시의 맥락에서의 복합재난 취약성과 솔루션을 확인하였다. 현지 조사를 통하여 현지에 최적화된 리빙랩 프로토타입을 개발하고 또 해당 성과를 공유하여 프로토타입을 보완 및 개선하였다.

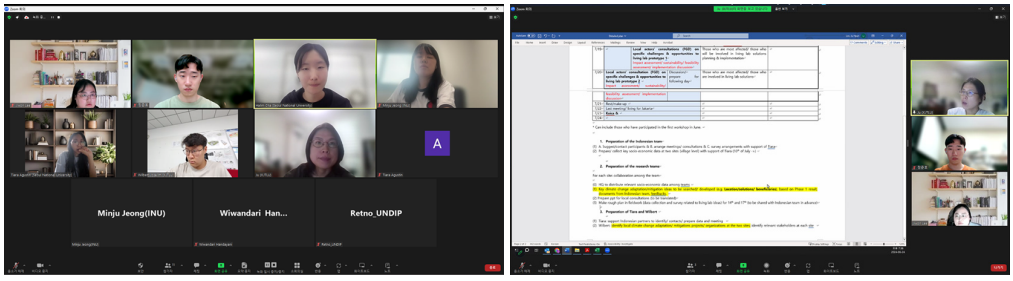
〈표 37〉 현지조사 일정표

일자	주요 활동	내용 및 비고
7/13(토)	이동(인천 → 자카르타 → 세마랑)	연구진 중 1인 조기 출국(10일~13일)
7/14(일)	리빙랩 대상지 답사 1(Meteseh) 리빙랩 준비 회의	
7/15(월)	Meeting 1: 지역주민 컨설테이션 1(Meteseh)	현지 파트너(디포네고로대), 지역 이해관계자 대표(마을 여성단체 등)와 리빙랩 아이디어 개발 및 발전을 위한 미팅 개최
7/16(화)	리빙랩 대상지 답사 2(Tambakrejo) Meeting 1: 지역주민 컨설테이션 2(Tambakrejo)	
7/17(수)	주요 기관 및 전문가 면담 워크숍 1: 난제 재정립 및 핫스팟 위치 조정, 아이디어 구체화	리빙랩 관련 주요기관 방문하여 연구성과 공유 및 Meeting 1에 도출된 문제 확인
7/18(목)	Meeting 2: 전문가 및 업체 대상 회의 (리빙랩 개발)	리빙랩 프로토타입의 공동 개발을 위한 논의
7/19(금)	Meeting 3: 지역 활동가 원탁회의(FGD) (리빙랩 적용)	영향을 가장 많이 받는 인원 및 리빙랩 솔루션 계획과 적용에 참여할 지역 행위자들을 대상으로 영향 평가, 지속가능성 및 실현 가능성 평가, 적용 관련 논의
7/20(토)	워크숍 2: 결과 정리 및 논의	
7/21(일)	워크숍 3: 리빙랩 솔루션 초안 작성	
7/22(월)	주요 기관(세마랑시 보건부, DINKES) 면담 이동(자카르타 → 세마랑)	
7/23(화)	워크숍 4: 리빙랩 솔루션 발전 및 대상지 답사	
7/24(수)	이동(자카르타 → 인천)	25일 도착

2) 사전 준비

① 상호 의견 공유를 통한 리빙랩 아이디어 및 섭외 대상 현지 이해관계자 발굴

사전 준비를 위하여 현지 조사 인원 및 현지 파트너와 수시 회의를 진행하여 구체적 리빙랩 대상 커뮤니티와 아이디어를 논의하였다. 특히, 각 팀의 연구결과가 통합적이고 유기적으로 반영될 수 있도록 공동의 리빙랩 아이디어를 도출하고 발전시키는 과정을 거쳤으며, 선행연구 및 사례를 검토하여 혁신적이고 지역의 특성에 맞는 리빙랩 아이디어 발굴하고자 하였다. 이어서, 각 팀의 연구 결과를 바탕으로 리빙랩 프로토타입 개발 과정에 참여할 현지 이해관계자 리스트를 공동으로 작성하고 섭외하는 과정을 거쳤다.



[그림 62] 현지 조사 준비회의

② 현지 사전점검 및 준비

원활한 현지조사를 위하여 연구진 1인이 조기 출국하여 사전점검 및 준비 작업을 진행하였다. 사전점검에서는 리빙랩 대상지 내 회의 장소를 확인하고 현지 파트너인 디포네고로대학교의 준비상황을 점검하였다. 또한, 리빙랩 대상지의 현지 주민과 전문가 등 참석자에게 실물 초청장을 발송하고, 현지 파트너와 리빙랩 진행 논의 및 퍼실리테이터 예비 교육을 진행하였다.



[그림 63] 현지 파트너 점검회의



[그림 64] 회의장소 점검

3. 현지 조사 주요 내용

1) 대상지 답사

1단계 정량연구를 통하여 도출되었던 대상지의 각 재난의 핫스팟 결과에 대한 정합성을 실제로 확인하고, 연구 대상지에 대한 이해를 높이기 위하여 현장 방문을 진행하였다. 핫스팟을 중심으로 진행된 현장 방문에는 현지 파트너 인원이 함께 동행하여 지역주민을 대상으로 대상지와 핫스팟에 대한 현장 인터뷰를 병행하였다.

① Meteseh (2024년 7월 14일)

Meteseh에서는 세 재난 모두 공통적으로 핫스팟으로 도출되었던 RT08/RW22[3] 지역, 질병 핫스팟으로 도출되었던 RT03/RW10 지역 등을 방문하여 정량연구 결과의 정합성을 확인하였으며, 실제로 도출한 핫스팟에서 빈번한 홍수와 뎅기에 취약한 환경이 포착되었다. 지역주민 현장 인터뷰 및 참여 관찰 결과, 지역의 방재 인프라가 부족하여 홍수 피해가 발생하였으나, 공공차원에서의 지원이 부족한 것을 확인하였다. 또한, 쓰레기 투기가 빈번한 점을 문제로 새로이 도출하였으며, 열섬 현상을 해결하기 위한 식재 활동이 우수하게 이루어지는 커뮤니티를 방문하여 사례로 활용하였으며, 지형적 요인으로 상하수도 사용이 어려운 것을 확인하였다.



[그림 65] Meteseh 현장 답사



[그림 66] 홍수로 무너져 마을주민이 직접 복구한 제방

3) RW (Rukun Warga), RT (Rukun Tetangga): 인도네시아의 집계구 단위로 실질적인 행정권한은 없으나 최소의 마을 단위. RT는 RW의 하위 단위.

② Tambakrejo (2024년 7월 16일)

Tambakrejo에서는 열섬 핫스팟으로 도출된 PT Javaprima Abadi(커피 제조공장), 홍수가 빈번한 Jl. Kali Tenggang, Jl. Purwosari 등을 방문하여 정량연구 결과의 정합성을 확인하였으며, 실제로 도출한 핫스팟에서 열섬요인이 확인되었다. 또한, 지역주민 현장 인터뷰 및 참여관찰을 통하여 지역의 주요 문제로 홍수와 쓰레기 문제를 파악하였다. 특히, 도로의 상습적인 침수와, 가격 접근성이 낮아 공공 수도를 사용하지 않고 지하수를 사용하는 가구가 많다는 사실을 확인하였다.



[그림 67] Tambakrejo 현장 답사



[그림 68] 배수로에 유입된 쓰레기



[그림 69] 상습적 침수가 발생하는 도로



[그림 70] 홍수로 인하여 문 높이를 상승한 주택

2) Meeting 1: 지역주민 컨설테이션

① 개요 및 진행 과정

Meeting 1에서는 마을 이장, 여성 단체(PKK) 회장, 청년 단체 회장 등 마을을 대표하는 주민들을 초청하여 기후위기로 인한 복합 재난의 원인과 영향을 파악하고, 주민들이 필요하다고 생각하는 리빙랩 솔루션 아이디어를 논의하였다. 퍼실리테이터의 주도하에 주민들은 지도를 활용하여 복합재난의 영향을 받은 지역과 솔루션 아이디어가 적용되었으면 하는 지역을 맵핑하였고, 해당 결과는 지역의 복합적 문제(Wicked Problem) 파악 및 솔루션 개발에 활용되었다.

회의는 각 지역별로 1시간 45분씩, 다음과 같은 과정으로 진행되었다. 먼저, 회의 목적과 프로젝트에 대한 간략한 소개 이후, 연구팀이 정량분석과 대상지 답사를 기반으로 도출한 마을의 복합재난 영향과 원인, 그리고 잠재적 리빙랩 아이디어를 제시하였다. 이어서, 임의의 두 그룹으로 참가자를 분리하고, 커뮤니티 맵핑을 기반으로 한 그룹 활동을 진행하였다.

그룹 활동에서, 참가자들은 복합재난의 영향, 경험, 그리고 리빙랩 아이디어에 관한 인식을 마을 지도에 맵핑하였다. 맵핑에는 각 재난을 상징하는 다른 색의 포스트잇(풍토병: 노란색, 열섬: 빨간색, 홍수: 초록색)을 사용하였다[그림 71, 72참고]. 먼저 영향과 관련하여, 참가자들은 홍수, 열섬, 질병으로 인하여 경제 활동 및 사회적 모임을 포함한 일상생활과 전반적인 삶의 질에 어떠한 변화가 있었는지 정성적으로 평가하고, 그 정도에 대하여 정량적으로 평가하였다. 경험과 현재 관행 차원에서는 지역사회가 복합재난에 적응한 다양한 방법이나 지역적 관행이 무엇인지(정성적), 또 무엇이 가장 효과적인지(정량적) 확인하였다. 마지막으로, 제시된 리빙랩 아이디어와 관련하여 얼마나 적합한지, 또 기존의 관행과 얼마나 연관될 수 있는지 평가하였다.



[그림 71] Meeting 1 그룹 활동(Meteseh)



[그림 72] Meeting 1 결과물 예시(Tambakrejo)

마지막으로, 각 그룹에서 논의된 내용을 전체에 공유하고 관련 내용에 관한 토론이 이루어졌다. 이러한 과정을 표로 나타내면 다음 〈표 38〉과 같다.

〈표 38〉 Meeting 1 진행 과정

일정	세부 일정	내용	시간
소개	-	- 회의 목적 및 참가자 소개 - 프로젝트에 대한 간략한 소개	10분
연구팀 발표	-	- 정량분석에 기반한 마을의 복합재난 영향과 원인 공유 - 대상지 답사를 기반으로 도출한 잠재적인 리빙랩 아이디어 제시	20분
"문제 해결 적합성" 논의	과정 설명	- 참가자를 두 그룹으로 분리 - 논의 과정 및 방법 설명	5분
	그룹 활동	참가자들이 리빙랩 아이디어에 대한 문제(복합재난), 영향, 경험, 인식을 지도(포스트잇)를 사용하여 맵핑 - (i) 영향: 홍수, 열섬, 질병으로 인한 일상 생활(경제 활동, 사회적 모임) 및 전반적인 삶의 질에 어떤 변화가 있었고(정성적), 그 정도는 얼마나 심각한지(정량적)? - (ii) 경험/현재 관행: 지역사회가 도전에 적응한 다양한 방법이나 지역 관행(정성적)은 무엇인지? 무엇이 가장 효과적인지(정량적)? - (iii) 리빙랩 아이디어에 관한 인식: 제시된 아이디어의 적합성 여부, 현재 관행과 얼마나 연관될 수 있는지?	40분
	공유 및 토론	- 각 그룹의 성과물을 전체에 공유하고 상호 교류	20분
	최종 제안 및 마무리	- 진행된 논의를 정리하고 마무리	10분

② Meteseh 주요 결과

[기후변화와 영향]

- Metetseh 주민들에 따르면, 1993년 이후 Meteseh 지역은 점차 더워졌으며 이는 주거 환경에 불편을 초래해왔다. 특히, 나무 심기를 통해 온도를 낮추고자 하는 시도가 있었으며, 이로 인하여 실제로 온도 감소 효과를 본 가구가 많은 것으로 확인되었다. 그러나, 지역 내에 여전히 기온 상승 문제가 존재하는 것 또한 확인되었다.

[수질]

- Meteseh에서는 과거에 주로 우물을 사용했으나, 적절한 배수시설이 없어 물이 고이면서 우물이 식수로 적합하지 않은 상태로 변하였으며, 이는 주로 Dinar 지역에서 발생하였다. 한편, Dinar 지역 뿐 아니라 대부분 지역의 주민들이 수질 악화를 경험하고 있으며, 이는 건강 문제로 이어질 가능성이 크다.

[홍수]

- Meteseh의 주민들은 홍수가 발생하면 활동의 제약과 함께 경제적 손실 또한 커진다고 평가하였다. 그러나, 2014년 이후로 홍수 문제 해결을 위한 조치가 취해지지 않고 있으며, 특히 배수 시스템이 개선되지 않는 점을 문제로 꼽았다.

[건강]

- 건강과 관련하여 Meteseh의 주민들은 열과 관련된 질병(열병, 독감)이 발생하고 있음에도 예방조치가 미흡하다고 평가하였다. 특히, 지역사회에서 질병 예방을 위한 건강 교육이 이루어지고는 있지만, 이의 효과적인 배포 및 실행이 부족한 점을 지적하였다.

③ Tambakrejo 주요 결과

[기후변화와 열]

- Tambakrejo 주민들은 기온 상승으로 인하여 탈수 증상의 증가와 야외 활동의 감소를 경험하였다고 답변하였다. 또한 무더위로 인한 전력 소비 증가와 기침, 감기를 비롯한 건강 문제의 발생 또한 체감하고 있었다. 이러한 문제의 원인이 되는 주거지의 열을 줄이기 위하여 도시 농업과 녹지 조성 시도가 있었으나, 해수의 영향으로 식물 생육이 어려워 성공적이지 못했다는 한계가 존재하였다.

[홍수]

- 홍수의 빈번한 발생으로, 홍수 발생시 신속한 대처가 가능한 상태이지만 여전히 홍수는 주민들에게 심각한 문제로 남아있었다. 특히, 홍수로 인하여 주거지 침수나 전력 및 식수 공급 중단이 빈번하게 발생하여 불편함을 체감하고 있었다. 그러나 주민들은 도로 높이기나 배수펌프 설치 등 정부 차원에서 다양한 노력이 이루어져 왔음에도 홍수 문제의 완벽한 해결은 이루어지지 않았다고 지적하였다.

[질병과 건강관리]

- Tambakrejo에서는 뎅기와 같은 질병이 여전히 문제로 남아있으며, 주민들은 모기 유충 감시와 건강검진을 통하여 예방을 시도하고 있었다. 다만, 연막 소독과 같은 방역 조치는 효과가 낮은 것으로 확인되었다.

[지역사회와 정부의 대처]

- 정부는 홍수와 열 문제를 해결하기 위하여 다양한 노력을 추진 중이나 지역사회는 여전히 더 많은 지원과 자원이 필요함을 주장하였다. 또 경제적 지원과 교육을 통한 지역사회의 역량 강화가 필요함을 제기하였다.

3) Meeting 2: 전문가 및 업체 대상 회의

① 개요 및 진행 과정

Meeting 2는 기후변화 적응 및 완화 솔루션에 관여하거나 관련 리빙랩 프로젝트를 진행하는 현지 기업이나 전문가, 엔지니어링 회사 또는 컨설팅 회사 등 산업 및 전문가 집단을 초청하여 리빙랩 솔루션 아이디어의 실현 가능성, 타당성, 혁신성 등을 점검하고 논의하고자 기획되었다. Meeting 2에는 비영리단체 중 관련 프로젝트 경험이 많은 Mercy Corps에서 2인, IKUPI에서 1인이 참석하였으며, Meeting 1의 결과를 토대로 발전시킨 리빙랩 솔루션 아이디어의 실현 가능성과 타당성을 논의하였다.

회의는 총 1시간 5분 동안 진행되었다. 먼저 회의 목적과 참가자, 프로젝트에 대한 간략한 소개 이후, 연구팀에서 대상지의 주요 문제, 최종 사용자(지역사회)의 현재 관행에 대한 '탐색' 결과를 공유하였다. 전문가 그룹은 과거 프로젝트 평가에 기반하여 기관의 경험을 공유하여 상호 학습하였다. 마지막으로, 리빙랩 솔루션 아이디어를 기능적 프로토타입으로 전환하는데 집중하여 프로세스 혁신, 주요 기능, 최적의 환경, 시장 구현 가능성을 검토하였다.

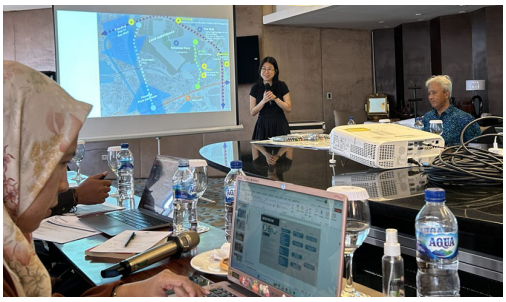
이러한 과정을 표로 나타내면 아래의 〈표 39〉와 같다.

〈표 39〉 Meeting 2 진행 과정

일정	내용	시간
소개	- 회의 목적 및 참가자 소개 - 프로젝트에 대한 간략한 소개	10분
리빙랩 아이디어 공유	- 대상지의 주요 문제, 최종 사용자(지역사회)의 현재 관행에 대한 '탐색' 결과 공유(연구팀) - 기관의 경험 공유(전문가 - 예: 과거 프로젝트 평가 기반)	15분
"문제 해결 적합성" 논의	* 컨셉을 기능적 프로토타입으로 전환하는 데 집중 - 프로세스 혁신, 주요 기능, 최적의 환경, 시장 구현 가능성	40분



[그림 73] Meeting 2



[그림 74] Meeting 2

② 주요 결과

[지역의 문제 및 복합재난 대응 관련]

- Tambakrejo와 관련하여, 두 단체는 모두 해당 지역이 정부 프로젝트가 집중된 지역이고, 홍수와 관련된 영양실조 및 발육부진(stunting) 문제가 심각함을 확인하였다. 특히 홍수가 발생하면 가정에서 지출해야 하는 비용이 늘어나며, 건강과 식량에 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 홍수로 인해 임산부와 어린이의 발육부진, 면역력 저하 등이 심화되며, 가정과 지역사회의 지속 가능한 개입이 필요한 상황이다.
- 한편, 홍수를 예방하기 위한 해안 방벽(seawall) 건설 이후 생태적, 사회적, 경제적 변화가 예상되며, 지역의 지형 변화에 따른 토지 손실(침수와 건조 지역의 변화) 문제도 중요하게 다뤄져야 함을 확인하였다.

[솔루션 관련]

- **해수 담수화:** Tambakrejo 지역의 염수 침투로 인해 토양의 염도가 높아졌고, 이를 해결하기 위한 해수 담수화(desalination) 기술을 연구팀에서 제안하였다. 전문가들은 담수화가 오염된 지역의 필터 역할을 할 수 있으며, Tambakrejo와 같은 산업 지역에 적합하다고 확인하였으나, 해당 기술을 지역사회가 이해하고 실질적으로 사용할 수 있을지에 대한 우려가 있으며, 특히 경제적인 지속 가능성이 중요한 문제로 제기되었다.
- **자동 쓰레기 수집 드론:** 전문가들은 드론이 쓰레기를 수거하는데 효과적이지만, 동시에 기술이 복잡하면 지역 사회가 이해하고 유지하기 어려울 우려가 존재함을 지적하였다.
- **소독 및 방역:** 저비용 소독 프로그램은 비용 효율적일 수 있지만, 지역 사회가 이 프로그램을 이해하고 지속적으로 관리할 능력이 있는지에 대한 의문을 제기하였다.
- **빗물 저장 시스템:** 주민들이 스스로 이해하고 제작할 수 있는 방법을 모색하여야 함을 강조하였다.

4) Meeting 3: 지역 활동가 원탁회의(FGD)

① 개요 및 진행 과정

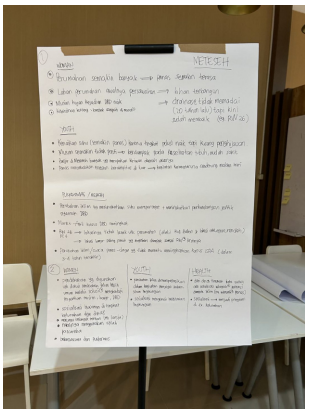
Meeting 3는 초점집단토의(Focus Group Discussion; FGD)를 통해 정량연구에서 도출되었던 핫스팟을 중심으로 집단이 인식하는 마을의 복합재난 영향을 심도있게 파악하고자 구성되었다. 이때, 지역 관점에서 리빙랩 솔루션 아이디어의 실현 가능성, 확장성, 유용성, 지속가능성 등을 점검하고 실행전략을 확인하고자 하였다.

Meeting 3는 이전의 Meeting 1, 2와 다르게, 같은 공간에서 두 대상지를 분리하여 진행하였으며, 퍼실리테이터의 주도하에 지도를 활용하여 영향을 받은 지역, 솔루션 아이디어 적용 지역 등을 맵핑하였다. Meteseh와 Tambakrejo에서 각각 여성단체 대표 3명, 지역 보건소(Puskesmas) 대표 3명, 청년단체 대표 3명, 총 18명이 참석하였으며, 4개의 라운드에 걸쳐 대상지 내 핫스팟의 복합재난 영향, 리빙랩 솔루션 아이디어에 관한 FGD를 진행하였다.

Meeting 3는 크게 라운드 1, 2와 라운드 3, 그리고 라운드 4로 나누어 진행되었다. 라운드 1과 2는 전체 토론으로 대상지 별로 그룹을 나누어 변화와 영향에 대한 인식을 확인하였다. 그중, 라운드 1에서는 복합재난 경험과 관련하여 지난 몇 년 동안 참가자 및 지역에서 경험한 홍수, 열섬, 질병의 변화를 평가하는 동시에 이러한 변화가 일상생활과 생계에 미친 영향을 확인하였으며, 라운드 2에서는 기후변화 인식과 관련하여 기후변화의 원인과 영향에 대한 참가자와 지역 내에서의 논의를 확인하였다.



[그림 75] Meeting 3 라운드 1, 2



[그림 76] Meeting 3 라운드 1, 2 결과

라운드 3과 4는 FGD로 이루어졌으며, 참가자들은 핫스팟에 관한 구체적인 인식과 리빙랩 대상지 및 솔루션 아이디어에 대한 의견을 공유하였다. 라운드 3에서, 참가자들은 대상지 별로 분리된 공간에서 각각 3개의 그룹(공공보건 종사자, 여성단체, 청년 단체)으로 나뉘었으며 지도를 제공받았다. 제공 받은 지도에, 각 그룹은 그룹별로 대상지 내에서 핫스팟이라고 생각하는 위치를 맵핑한 뒤, 커뮤니티가 홍수, 열섬, 질병에 어떻게 적응하였는지, 또 이러한 대처에 도움이 된 전통적인 관행이나 지식이 있는지 확인하고 맵핑하였다. 각 그룹의 맵핑 결과는 대상지의 다른 그룹과 공유하여 상호학습이 이루어졌다.

마지막 라운드 4에서는 다시 모든 참가자가 한 공간에 모여 리빙랩 대상지 및 솔루션 아이디어에 관한 논의를 진행하였다. 특히, 솔루션 적용 지역과 방향을 제안하고, 솔루션이 도입되었을 때 사용 희망 여부를 평가하였으며, 구체적인 구현에서의 과제를 확인하였다.

〈표 40〉 Meeting 3 진행 과정

일정	내용	시간
소개	- 회의 목적, 방법 및 참가자 소개	10분
라운드 1	**복합재난 경험** - 지난 몇 년 동안 참가자 및 지역에서 경험한 홍수, 열섬, 질병의 변화 - 이러한 변화가 일상생활과 생계에 미친 영향 확인	25분
라운드 2	**기후변화 인식** - 기후 변화의 원인과 영향에 대한 참가자 및 지역 내에서의 논의 확인	
라운드 3	**핫스팟 인식** [3-1] 핫스팟 위치 확인 [3-2] 커뮤니티의 홍수, 열섬, 질병 적응	20분
라운드 4	**리빙랩 대상지 및 솔루션 아이디어** - 솔루션의 적용 지역 및 방향 - 솔루션 사용 희망 여부 - 구체적인 구현 과제	20분



[그림 77] Meeting 3 라운드 3(Meteseh)



[그림 78] Meeting 3 라운드 4

5) 주요 기관 및 전문가 면담

① 개요 및 진행 과정

기후위기로 인한 다양한 복합재난의 원인, 관계, 영향, 정책 등을 파악하고 이해하기 위하여 관계된 주요 기관을 방문하여 인터뷰를 진행하였다. 해당 면담에서는 지역사회의 복합재난 예방과 기후변화로 인한 재난 취약성을 고려한 정부 정책 파악에 중점을 두었으며, 각 Meeting을 통해 도출되었던 결과를 바탕으로 정부 정책의 효과성 등 비교 확인하였다.

방문한 기관은 총 6개 기관으로, 구체적인 기관명과 일정은 〈표 41〉과 같다.

〈표 41〉 Meeting 3 진행 과정

일정	방문 기관
7월 17일 08:00	세마랑 재난관리국 (BPBD Kota Semarang, Badan Penanggulangan Bencana Daerah)
7월 17일 10:00	세마랑 공간계획부 (Distaru Kota Semarang, Dinas Penataan Ruang)
7월 17일 11:00	세마랑 공공사업부 (DPU Kota Semarang, Dinas Pekerjaan Umum)
7월 17일 13:30	Lasker Besti (지역 연구소)
7월 17일 14:30	세마랑 환경부 (DLH Kota Semarang, Dinas Lingkungan Hidup)
7월 22일 10:00	세마랑 보건부 (DINKES Kota Semarang, Dinas Kesehatan)

② 주요 결과

[세마랑 재난관리국]

- Tambakrejo 지역은 과거 연못(Tambak) 지역이었다는 지역적 맥락을 확인하였으며, 제방과 저수지는 지역 자연요소의 일부로서 지역 주민들은 본래 저수지였던 지역에 거주하고 있다는 사실을 인지하고 있어 홍수 발생에 익숙한 상태임을 확인하였다. 관련하여, Tambakrejo의 홍수 영향과 관련하여, 홍수가 가장 심한 시기에는 가슴 높이까지 물이 차올랐으며, 주민들은 주로 배(boat)를 이용하여 이동한 사례 또한 파악하였다.
- 물리적 인프라와 관련하여, SIPEL 방파제는 Tanjungmas 지역에서 해수 범람을 줄이기 위해 건설되었으며, Tambakrejo는 과거 Tanjungmas 지역의 일부였고, 이러한 SIPEL은 Tambaklorok의 방파제와 유사하게 Semarang-Demak 해안 방파제 국가 전략 프로젝

트의 일환으로 건설되었음을 확인하였다.

- 재난관리국에서는 세마랑 정부는 홍수 및 기타 질병에 대해 지역사회, 공무원 등 여러 이해관계자가 포함된 비상계획(Rencana kontigensi)을 보유하고 있으며, 이러한 비상계획은 보건부, 국가 재난관리국 등 모든 부서에게 관련 대응 계획에 대한 포괄적인 지침을 제공함을 확인하였다. 이러한 비상계획은 재난 관리국(BPBD)이 주도하며, 해당 비상계획이 활용된 재난 관리 사례로는 2023년 Meteseh 홍수와 Tambakrejo의 잦은 홍수 사례가 있음을 확인하여, 대상지에 실제로 홍수가 빈번함과, 정부차원의 계획이 작동하고 있음을 확인하였다.
- 한편, 2023년 Meteseh 홍수의 원인은 당시 Babon 수역에 강한 폭우가 발생해 정부는 더 큰 피해를 막기 위해 상류 댐을 개방하였으나, 하류의 유량이 범람하여 홍수가 발생한 것으로 확인하였다. 정부는 이에 따라 WMT를 상류로 보냈으나 이후 휴유증으로 주민들은 피부 발진 질병을 겪은 바 있음을 통해 복합재난의 사례를 확인할 수 있었다.

[세마랑 공간계획부]

- 세마랑은 저지대부터 고지대까지 다양한 지형을 보유하고 있으며, 400년 이상이 된 도시로 퇴적토가 지반 침하를 일으키는 원인이 된다는 자연지리적 원인을 확인하였다. 이러한 자연지리적 원인을 보완하기 위하여 Gunung Pati 와 주변지역은 kawasan penyangga (완충지대)로 지정되어 도시의 20% 면적이 녹지공간임을 발견하여 그린 인프라의 중요성을 인식하였다.
- 방조제가 포함된 200-250 ha 면적의 저류지는 유료 도로(toll road) 프로젝트의 일환으로 건설되고 있으나, 재난 관리 인프라 프로젝트에는 상당한 자금이 요구되고, 직접적인 수익은 거의 없다는 한계를 가지고 있다. 공간계획부에서는 이러한 재난 관련 프로젝트를 고속도로 통행료와 결합하면 경제적 수익을 제공하여 재난 방지 프로젝트에 대한 투자 유치 가능성이 높아질 것이라고 인식하고 있었다.
- 2031년까지 유효한 도시 계획 및 구역 규제 규정인 PERDA TATARUANG No5/2021. 의 위험지도에는 토양 수용능력 수준, 지형, 경사, 단층, 토양 유형 및 홍수 분석에 대한 데이터가 포함되며, Onemap Semarang이라는 WebGIS를 도시계획에 활용하고 있었다.
- 녹지공간과 환경 계획과 관련하여, 공간계획국에서는 기온 상승 방지를 위해 30%의 녹지 조성을 목표로 하고 있음을 확인하였다. 특히, 빗물을 저장하고 친환경 건축을 장려하는 정책을 펼치며 인프라 및 위생 개선을 위해 지역 공동체 교육이 필요함을 주장하였다.

[세마랑 공공사업부]

- 홍수 관리를 위하여 상류 유역에서는 숲 재조성, 식생 수 증가, 하류로 흐르는 유속을 늦추기 위한 수평 IPAL을 이용하는 등의 관리를 하고, 하류 유역은 펌프 설치, 저지대 지역 펌프 용량 증가 등의 물리적 인프라 개선이 이루어지고 있음을 확인하였다. 이때, 나무 심기는 DLH 및 BBWS와 협력하여 진행하며, 뿐만 아니라 매일 35개 수로를 청소하고 퇴적물 및 이물질을 제거하는 노력을 펼치고 있었다.
- 기후변화 적응과 관련하여, 공공사업부에서는 기후변화를 중요하게 고려하고 있으며, 8월 Kali Gara에서 DLH의 식생 지원을 받아 나무 심기 활동과 유역 관련 프로그램 시행 예정임을 확인하였다. 또한, 정기적인 하천 청소를 촉진하기 위해 관련 행사를 개최하고, 7월 27일 하천 회의 개최 예정이며, 8월 2일에는 수산부와 협력하여 해안 청소 운동을 개최하는 등 환경유지를 위한 공공 차원의 다양한 활동이 이루어지고 있음을 확인하였다.
- 지형적으로는, Kali Babon 강이 세마랑의 상류 지역과 하류 지역 두 지역을 통해 흐르며, 상류 지역은 여전히 자연 관리가 더 필요한 상황임을 확인하였다. 특히, 도시화로부터 녹지 공간을 보존하고 주거지를 보존하기 위해 Meteseh에 나무를 식재하는 것이 결정되었으며, 이는 식재를 리빙랩 솔루션으로 제안하고자 하는 연구팀의 계획과 동일한 맥락에서 제시된 것이라고 볼 수 있다.
- 비록 공공사업부의 역할은 재난 방지에 직접적 관련은 적으나, 도시 수로를 청소하는 것은 모기 객체 수 감소에 기여하며, 깨끗한 수로는 공중 보건에도 긍정적 영향을 미친다는 인식을 가지고 있었다. 특히, 현장 답사를 통해 Tambakrejo에서 홍수 발생 후 피부병과 발열이 집단 발병한 것을 확인함에 따라, 복합재난 영향의 완화를 위한 위와 같은 노력이 필요한 것으로 나타났다.
- 모든 홍수 사건은 시장에 의해 직접 관리되며, 이는 물리적 대응뿐만 아니라 사회적 대응도 포함되는데, Tambakrejo에는 경찰, 군대, 중앙정부가 포함된 공공 주방과 보건소(health posts)가 위치하여 우수한 재난 대응 인프라를 가지고 있음을 확인하였다.
- 주거지 개발에는 녹지 공간이 요구되며, 소규모 주택 허가에는 DPU와의 조정 단계가 포함되고, 이는 신규 개발이 기존의 수로에 영향을 미치지 않도록 하기 위함임을 확인하였다. 특히, DPU는 현재 홍수 문제를 해결하기 위해 주택 허가에 관여하고 있으며, 주거지 개발이 급격히 이루어진 Meteseh 지역과 Babon 유역 지역의 홍수 문제에 집중하고 있다는 점에서 공통된 문제인식을 확인하였다. 또한, 빗물 집수, 침투관 이용, 식재, 개방된 녹지공간 유지 등의 노력을 기울이고 있음을 확인하였다.

- 재난 영향 관리를 위해 도시개발 부서 간 협력하여 데이터를 공유하고, 중앙정부, 지방정부 등 타 부처와 정기적 협력을 진행하고 있었다. 그 중, DPU는 상류부터 하류유역까지 홍수 관리를 맡으며, 상류지역은 식생 재조림, 빗물 집수, 수평 침투관 등을 이용하고 하류지역은 특히 세마랑 동부 해안지역의 침수로 인해 폴더 시스템 개념을 중요하게 생각하고 있는 것으로 나타났다.
- DPU의 우선순위는 홍수이며, 많은 주의를 기울이고 있음을 확인하였다.

[Lasker Besti]

- 질병은 크게 뎅기열과 같은 매개 전염병과 비감염성 질병으로 분류되며, 매개성 전염병은 기후와 밀접한 관련이 있음을 연구에서 확인하였으며, 기온이 상승하면 모기의 수명주기가 길어져, 고지대에서도 모기의 생존력이 상승하게 되는 점 또한 확인하였다.
- 한편 세마랑에서는 기후 스마트 마을 프로젝트를 통하여 도시개발부, 환경청, 기상청 및 기타 부서가 이해관계자로 참여하며, 기상청과의 협업을 통해 수행되는 기후 관련 질병에 대한 분석과 조기 경보 시스템을 마을 단위로 확대하는 것에 협의하였음을 확인하였다.
- 시범 프로젝트로는 기후변화와 관련 질병에 취약한 것으로 알려진 Kemejen 마을의 뎅기열과 랩토스피라증에 집중하였는데, 렙토스피라증은 기후와 환경변화에 큰 영향을 받는 질병으로, 기후 관련 질병이라는 인식 제고와 주목이 더 필요한 상황이다.
- 기후위기 관련 재난 부문의 프로그램과 공동체의 역할에는 다음과 같은 사항들이 포함된다.
  - 1 House 1 Supervisor: 각 집에서 모기 유충을 모니터링
  - Laskar Besti : Sijentik program을 통해 학교, 시장, 모스크 등의 공공장소에서 모기 유충을 모니터링하고 보고
  - Sijentik program: 모기 유충을 식별하고 모기에 물리지 않도록 대중을 대상으로 예방 교육을 실시
  - Tunggaldara System : 웹사이트를 통해 실시간 보고 및 모니터링이 가능하며, 정부의 지역 보건 클리닉인 Puskesmas가 참여
- Meteseh지역은 질병 관리를 위해 보건소와 협력해왔으며, 이러한 노력을 위해서는 지역사회의 실천적 행동이 필요하고, 렙토스피라증 질병은 Meteseh와 더불어 Tambakrejo와 같은 저수지 지형에서 흔하게 발병함을 확인하였다.

[세마랑 환경부]

- 나무를 베려면 허가가 필요하며, 수수료(retribution fee)가 부과되는 정책이 있음을 확인하였으며, PERDA 8 No. 2018 조례에 의해 나무 한그루를 벨 경우, 반드시 다른 나무로 대체하여야 함을 소개하였다. 식생확대를 위해 나무를 무료로 배포하고 있는 환경부의 노력 또한 확인하였다.
- Meteseh는 주택단지와 지역에 따라 식수 및 녹지공간과 그에 대한 관심의 정도가 상이한데, 녹지 공간 조성을 위해서는 지역사회 노력이 필요하며, 특히 식생을 늘려 완화 행위에 해당하는 PROKLIM을 위해 나무가 추가적으로 더 필요한 상황이다. Meteseh는 가뭄과 물 부족 현상, 폐기물 소각, 화전, 화전에 대한 규제 불이행, 이로 인한 토지 건조화 등의 문제가 있음을 재확인하였다.
- 리빙랩 아이디어로 환경부는 신재생 에너지 활용 및 풍력 에너지와 태양광 에너지 사용, 전기에너지를 통한 펌프 기계 활용, 조기 경보 시스템(Early Warning Systems; EWS), 바이오가스 정화 탱크와 정화를 통한 기수의 식수화 등의 방법을 제안하였다.
- 환경부는 마지막으로 친환경 건축을 강조하며, 주택과 고층 건물의 식생 피복을 유지하며, 하수처리장에서 발생한 폐수를 식생에 활용하고 수직 정원을 도입하고자 장려하고 있다고 밝혔다.

[세마랑 보건부]

- 기후위기로 인하여 발생하는 질병을 비롯한 세마랑시 건강 문제의 원인, 관계, 영향, 정책 등을 파악하고 이해하기 위하여 관계된 주요 기관인 세마랑시 보건부를 방문하여 인터뷰를 진행하였다. 지역사회의 복합재난 예방과 기후변화로 인한 질병 취약성을 고려한 정책 파악에 중점을 두어 Meeting 1을 통해 도출되었던 결과를 바탕으로 정책의 효과성 등을 비교하고 확인하였으며, 지난 6월 보건부의 한국 방문 이후 진행된 연구 결과를 상호 교류하였다.
- 보건부에서 최근 병원(ICD 데이터)을 활용하여 2024년 3월부터 6월까지의 데이터를 분석한 결과, 해당 기간 동안 열파가 발생했으며, 초기 결과에 따르면 높은 온도가 폐렴 사례 증가에 영향을 미친 것으로 나타났다. 이는 기후변화가 건강에 미치는 영향을 보여주는 중요한 지표로서, 추가적인 연구와 대응이 필요함을 시사한다.
- Meteseh는 개발자 주택 지역의 증가와 식생 부족으로 인한 열섬 현상 등으로 건강 위험이

증가하고 있으며, Tambakrejo는 상류에서 오는 홍수와 폐수 처리의 어려움으로 인해 환경 및 건강 문제가 심각한 상황이다. 보건부는 이러한 문제를 해결하기 위해 예방 및 대응 조치를 취하고 있지만, 인력 부족과 주민들의 거부 등 여러 도전에 직면해 있는 상황이다.

- Tambakerjo의 주민들은 초기에는 탈수 증상을 자신들의 건강 문제로 인식하지 못했으나 보건소(Puskesmas)의 교육과 치료를 통해 이제는 어느 정도 인식이 개선되었다. 그러나 여전히 완전하지는 않으며, 이는 주민들의 건강 인식을 높이기 위한 지속적인 교육과 홍보가 필요함을 시사한다.
- 여러 거주민 중 특히 취약 계층인 노인, 임산부, 어린이, 장애인 등에 대한 직접적인 지원과 교육이 강조되었으며, 이들의 건강과 안전을 보장하기 위한 부서 간 협력과 지역 사회 참여의 중요성이 부각되었다. 또한 볼바키아 프로젝트와 같은 혁신적인 접근 방식을 통해 뎅기열과 같은 질병을 통제하려는 노력이 진행되고 있으나 허위 정보와 주민들의 거부로 인한 어려움이 존재하여, 주민 인식 개선을 위한 지속적인 교육과 홍보가 필요하다.
- 한편, 환경 개선을 위해서는 도시 녹지화 프로그램이 진행되고 있으며, 기술적 수정과 인공적인 개입을 통해 식생 부족 문제를 해결하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 그 중 Tenggang 강에 폐수 흡입을 위한 리빙랩 아이디어를 적용하는 등의 아이디어가 논의되었다.
- 향후 보건부는 데이터 공유와 추가 연구를 통해 대응을 강화하고, 학계와의 협력을 통해 연구 결과를 정책에 반영하고자 하고 있으며, 본 연구의 결과에 특히 주목하고 있음을 확인하였다.

③ 방문 사진



[그림 79] 주요 기관 방문 및 면담(BPBD)



[그림 80] 주요 기관 방문 및 면담(Distaru)



[그림 81] 주요 기관 방문 및 면담(DPU)



[그림 82] 주요 기관 방문 및 면담(Lasker Besti)



[그림 83] 주요 기관 방문 및 면담(DLH)



[그림 84] 주요 기관 방문 및 면담(DINKES)

6) 리빙랩 워크숍

① 개요 및 진행 과정

각 Meeting과 주요 기관 면담에서 도출된 결과를 바탕으로 연구팀에서 리빙랩 솔루션 아이디어를 도출하고 개발하는 워크숍을 진행하였다. 워크숍은 총 4차례 진행하였으며, 각각 1) 난제 재정립 및 핫스팟 위치 조정, 리빙랩 아이디어 구체화 2) 결과 정리 및 논의, 3) 리빙랩 솔루션 초안 작성, 4) 리빙랩 솔루션 발전의 단계로 진행하였다.

워크숍 1에서는 현장조사와 Meeting 1 컨설테이션 및 인터뷰 내용을 바탕으로 난제를 재정립하고, 대상지역 내 핫스팟 위치를 조정하였으며, 전문가 및 지역주민의 검토를 위한 리빙랩 아이디어를 구체화하였다.

워크숍 2에서는 Meeting 1~3에서 도출되었던 주요 결과물을 정리하고 이에 대한 논의를 진행하였다. 특히, 커뮤니티 맵을 전산화하고 번역하여 지역주민이 인식하는 복합재난의 영향과 대응, 솔루션 아이디어와 희망지역을 확인하였다.

워크숍 3에서는 워크숍 2의 결과를 참고하여 지역의 난제를 도출하고, 다양한 사례를 참고하여 리빙랩 솔루션 초안을 작성하였다. 지역의 난제가 복합적으로 나타나는 만큼, 솔루션 또한 다양한 난제에 통합적이고 유기적으로 대응할 수 있도록 브레인스토밍을 진행하였다.

마지막 워크숍 4에서는 워크숍 3에서 도출된 솔루션 아이디어를 구체화하였다. 솔루션 아이디어의 실현 가능성, 적합성, 효과성, 참신성을 검토하고, 아이디어의 구체성을 높이는 작업을 진행하였다. 이를 통해 총 3가지의 리빙랩 솔루션 아이디어 최종안을 구상하였다.



[그림 85] 워크숍 2: 결과 정리 및 논의



[그림 86] 워크숍 3: 리빙랩 솔루션 초안 작성



[그림 87] 워크숍 4: 솔루션 아이디어 구체화

7) 자카르타 대상지 답사

① 개요 및 주요 결과

복합재난의 위협을 받고 있는 자카르타의 대상지를 추가로 확인하여 세마랑과 상호 비교하고, 그린 인프라 사례지를 답사하여 도시계획에 그린 인프라가 미치는 영향을 확인하고자 자카르타 답사를 진행하였다.

답사에서는 먼저 해안지역에 위치하여 해수면 상승, 지반 침하의 위협을 받고 있으며 홍수 및 열 핫스팟으로 도출된 Muara Angke 지역을 방문하여, 생활 환경, 배수로 노출 등 위생 환경, 질병 취약성을 검토하였다. 답사 결과, Muara Angke는 세마랑과 유사한 어업항으로 열악한 배수, 투수가 어려운 도로포장, 쓰레기 문제를 공유하고 있었으며, 이를 토대로 솔루션 적용 확대의 가능성을 모색하였다.

이어서, 기후위기와 복합재난에 대응하는 방안인 그린 인프라 조성 사례지(Green Belt PIK2)를 방문하여 우수사례를 검토하였다. Green Belt PIK2는 신도시에 조성된 2km 길이의 선형 공원으로, 배수 운하를 중심으로 녹지축을 조성하고 주거, 상업, 업무 지역을 연계하였다. 해당 사례를 통해 그린 인프라 조성의 효과성과 적용 방향을 확인하였다.



[그림 88] 자카르타 대상지 답사(Muara Angke)



[그림 89] 자카르타 대상지 답사(Muara Angke)

4. 리빙랩 솔루션 아이디어 제안 및 검증

1) 지역의 난제 도출 및 솔루션 매칭

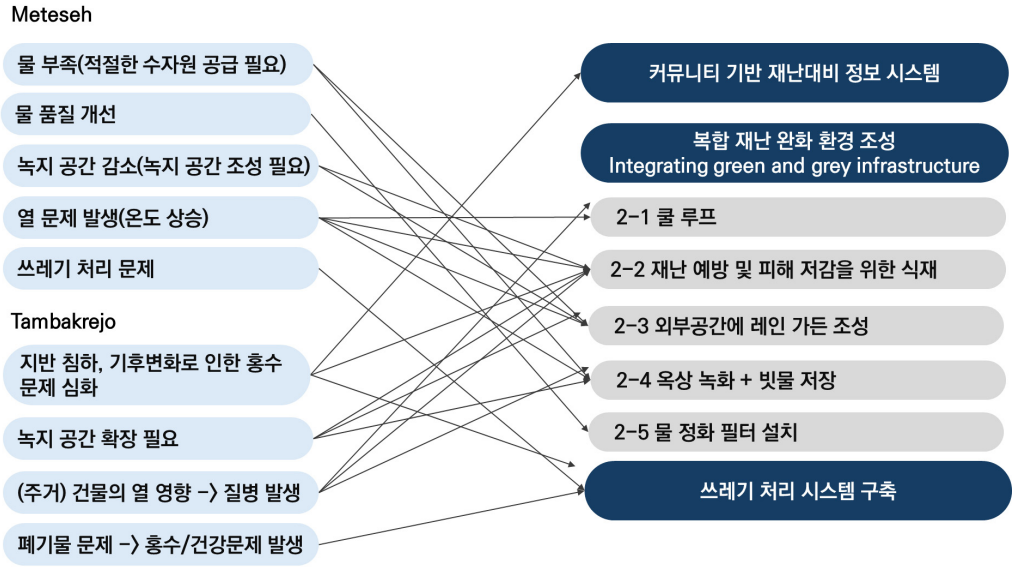
Meeting 1부터 3까지의 과정과 대상지 답사, 주요 기관 및 전문가 면담을 통하여 대상지의 여러 현안을 확인하였다. 이러한 현안 중 지속적으로 해결에 난항을 겪어왔고, 상호연계성이 짙어 단독으로 해결이 어려우며, 복합재난 영향 및 대응과 관계있는 난제(Wicked Problem)를 도출하였다.

Meteseh와 Tambakrejo에서 도출된 주요 난제는 다음과 같다.

〈표 42〉 대상지의 주요 난제

대상지	난제	내용
Meteseh	적절한 수자원(가정용수) 공급 불가능	- 물 정화 및 상하수도 인프라 부족으로 인한 품질 문제가 발생 - 물 부족 현상 발생
	무분별한 개발로 인한 녹지 공간 감소	- 빠르게 개발되고 있는 지역으로, 무분별하게 개발되어 녹지 공간이 감소 - 녹지 면적 감소로 홍수의 속도 증가
Tambakrejo	주거 건물의 열 영향 증가	- 열악한 소재, 단열 및 기후의 영향으로 주거 건물의 열 영향 증가
	저지대 및 지반침하로 인한 배수 문제	- 해안가에 위치하여 지대가 낮고, 과도한 지하수 사용으로 지반침하가 지속적으로 발생하여 상습적으로 침수 - 열악한 배수시설 및 투수율이 낮은 포장
Meteseh & Tambakrejo	홍수와 열 피해를 줄이기 위한 식재 부족	- 녹지 면적이 부족하고, 특히 주거지역에 나무 등 식생이 부족해 홍수와 열 피해에 더 극심하게 노출
	늦은 재난 경보 시스템 및 정보 부족	- 재난 경보 시스템이 존재하지만 미리 대피하기에는 알림이 늦음 - 재난 경보 시스템의 알림이 잘 전달되지 않음 - 정부 기관에서 재난 및 질병 관련 정보를 이미 제공하고 있으나 디지털 소외계층은 정보 접근에 한계가 있음
	쓰레기 처리 문제	- 분리수거가 잘 시행되지 않으며, 많은 쓰레기가 투기 또는 소각됨

도출된 지역의 난제를 기반으로 연구팀은 커뮤티티 단위에서 도입이 가능하고, 실현 가능성이 높은 1) 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템, 2) 복합재난 완화 환경 조성, 3) 통합 쓰레기 관리의 세가지 리빙랩 솔루션 아이디어를 개발하였으며, 이를 각각 다음 [그림 81]과 같이 매칭하여 솔루션의 정합성을 확인하였다.



[그림 90] 난제와 리빙랩 솔루션 아이디어 매칭

2) 솔루션 아이디어 1: 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템

① 해결 대상 주요 난제

기존 대상지에는 재난에 대응하기 위하여 조기 경보 체계(Early Warning System; EWS)가 설치되어 있으나, 정작 알림이 늦고 잘 전달되지 않아 재난 대응에 한계가 있는 것으로 나타났다. 또한, 재난정보와 관련하여 정부 기관에서 재난 및 질병 관련 정보를 이미 제공하고 있으나 디지털 소외계층은 정보 접근에 한계가 있음이 확인되었다.



[그림 91] 마을에 설치된 EWS (Tambakrejo)



[그림 92] 마을에 설치된 대피 표지판(Tambakrejo)

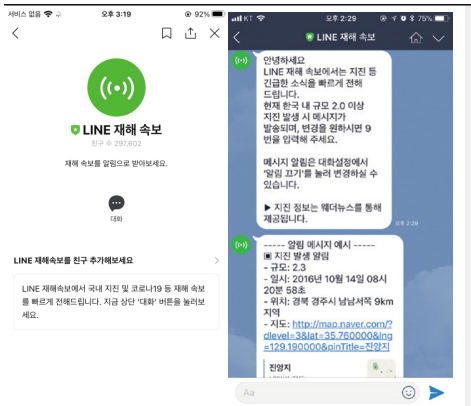
② 아이디어 개요

기존 EWS의 한계를 보완하고, 모든 계층에서의 재난 정보접근성을 향상하기 위하여 커뮤니티와 공공, 그리고 기술이 유기적으로 연계된 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템을 제안하며, 이는 크게 네 단계로 구분되어 설치, 운영된다.

첫 번째 단계로, 주민들이 필요하다고 맵핑한 장소를 중심으로, 태양광으로 작동하는 Solar EWS를 설치한다. 이때, 세마랑 관내 대학과 관련 기술 보유회사, 세마랑 재난관리청(BPBD)이 체계를 공동 개발하고 설치한다. Solar EWS의 관리는 마을의 청년 단체가 BPBD의 도움을 받아 주기적으로 진행한다.

이어서, 커뮤니티별 재난대응조직을 구축하고 재난 발생 시의 역할을 분담한다. 기존에 부상자 대응, 전염별 관리 등 마을 보건활동을 전담한 보건소(Puskesmas)와 재난 구조 및 복구 활동을 담당하는 소방서, 경찰서 등과 협력하여, 청년 단체는 마을 내 정보취약계층에 정보를 전파하고 취약계층 대피를 지원한다. 여성 단체는 홍수 시 비상식량 제작 및 배포, 열섬 현상과 질병 발생 시, 마을 내 정보 취약계층에 정보를 전파하고, 취약계층의 귀가와 대피를 지원한다. 재난대응조직 간에는 Whatsapp(또는 전용 앱) 기반 채팅으로 소통한다.

Solar EWS와 커뮤니티 재난대응조직이 갖춰지면, Solar EWS가 재난의 징후를 감지했을 때, 재난 대응조직과 주민들에게 자동으로 알림을 발송하는 체계를 구축한다. 이를 위하여 기존의 EWS를 업그레이드하고 새로 설치한 EWS를 통합하여 운영한다. 업그레이드 된 EWS는 기존처럼 사이렌으로 마을에 재난을 경보하는 동시에, 자동으로 Whatsapp을 통하여 재난 대응조직에 대응지시 메시지를 발신하고, 마을 주민에게는 대피 메시지를 전송한다. 재난 예측값이나 상황에 변동이 있을 때 Whatsapp을 통하여 실시간으로 업데이트한다.

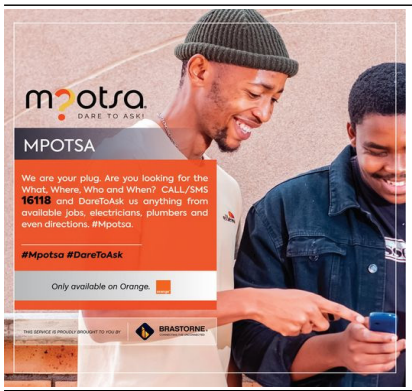


메신저 앱인 라인에서 재해 속보를 친구 추가하면 지진 등 재해 발생 시 알림 메시지 수신 가능

자료: 기상청 온라인 지진 과학관 (https://www.kma.go.kr/eqk_pub/bbs/board.do?tableType=online_news&wrId=181

[그림 93] 유사사례: 라인 재해(지진) 속보 알림 발송 서비스

마지막으로, 평시에 재난 대응 교육을 진행한다. 재난에 대비하여 주민들이 평소에 재난 대응 요령을 손쉽게 파악할 수 있도록 Whatsapp 챗봇을 개설하여 운영한다. Whatsapp 이용이 어려운 정보 취약계층을 위하여 ARS 방식의 Disaster Help Center를 운영하며, 평소에 재난 대응 요령에 대한 질문이 있을 때 답변하고, 비상시 구조 요청 및 재난 피해 신고를 할 수 있도록 한다([그림 93] 참고).

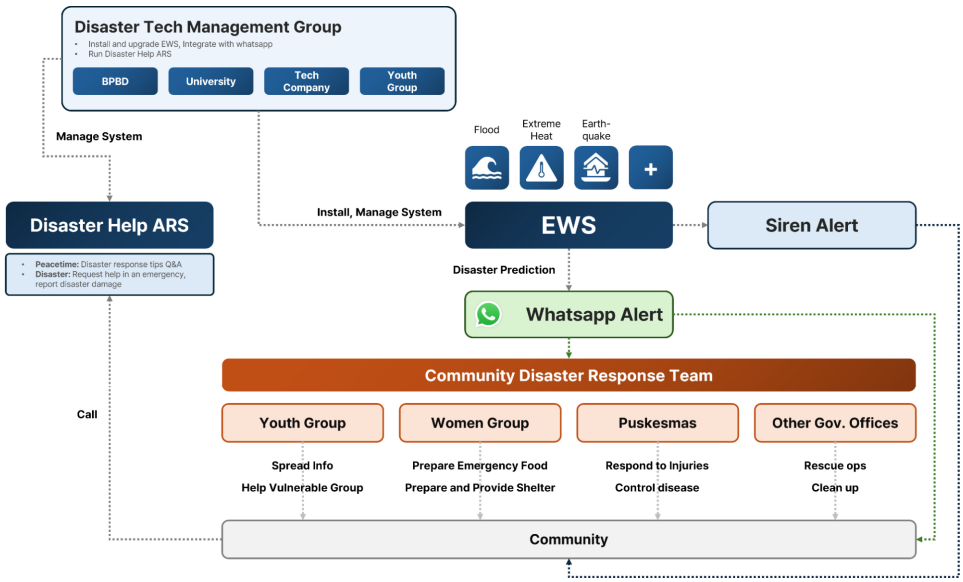


데이터 및 기술 접근에 어려움을 겪는 계층을 위하여 개발된 양방향 전화기반 질의응답 플랫폼으로, 거의 모든 정보를 제공. 특히, 건강관련 정보 제공에 용이함.

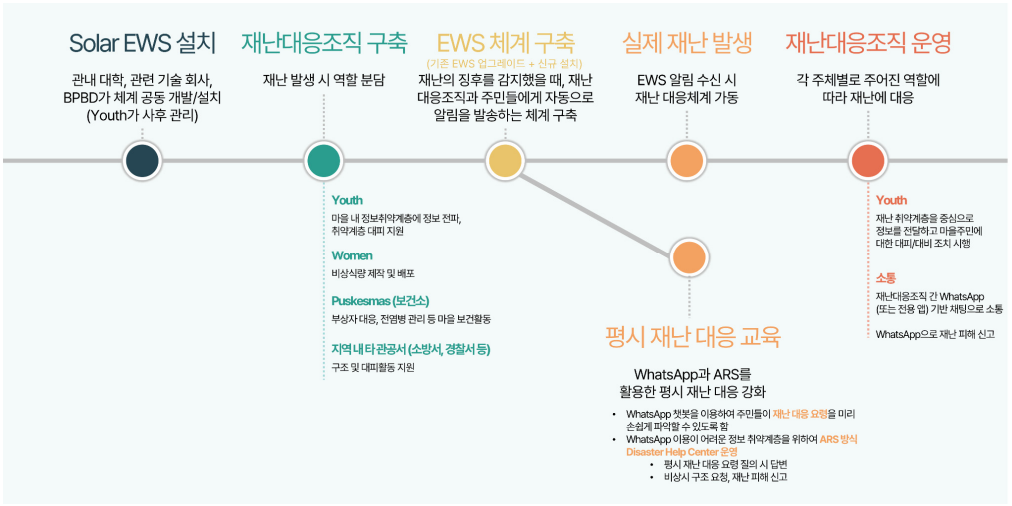
자료: Mpotsa (https://brastorne.com/wp-content/uploads/2024/03/Mpotsa-Brochure.pdf)

[그림 94] 유사사례: Mpotsa

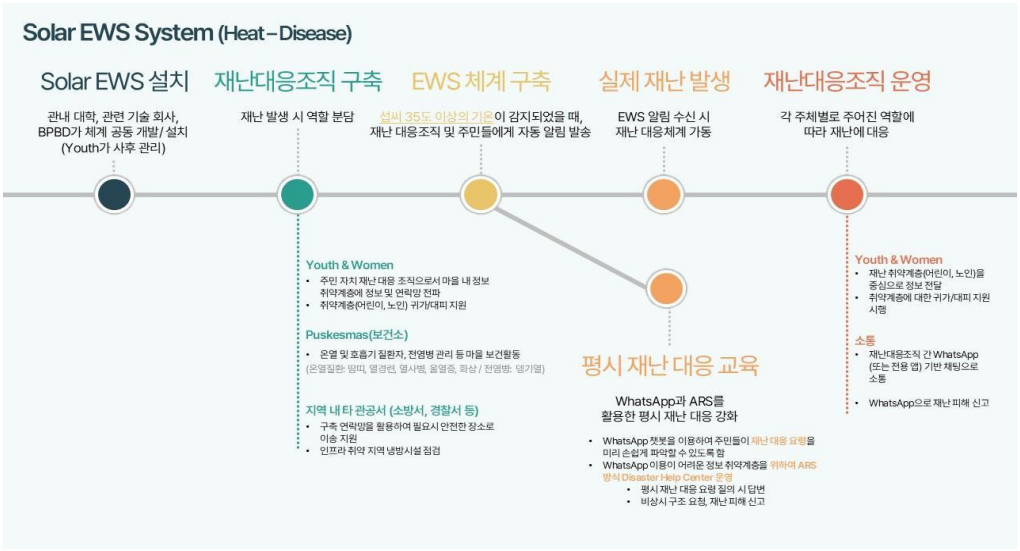
솔루션의 구조는 [그림 95]와 같으며, [그림 96], [그림 97]과 같은 타임라인으로 구축된다. 제안된 솔루션을 통하여 정보격차를 줄이고, 커뮤니티가 더 적극적으로 재난에 대응할 수 있도록 지원하며, 궁극적으로 커뮤니티의 재난대응능력이 향상될 것으로 기대한다.



[그림 95] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 구조



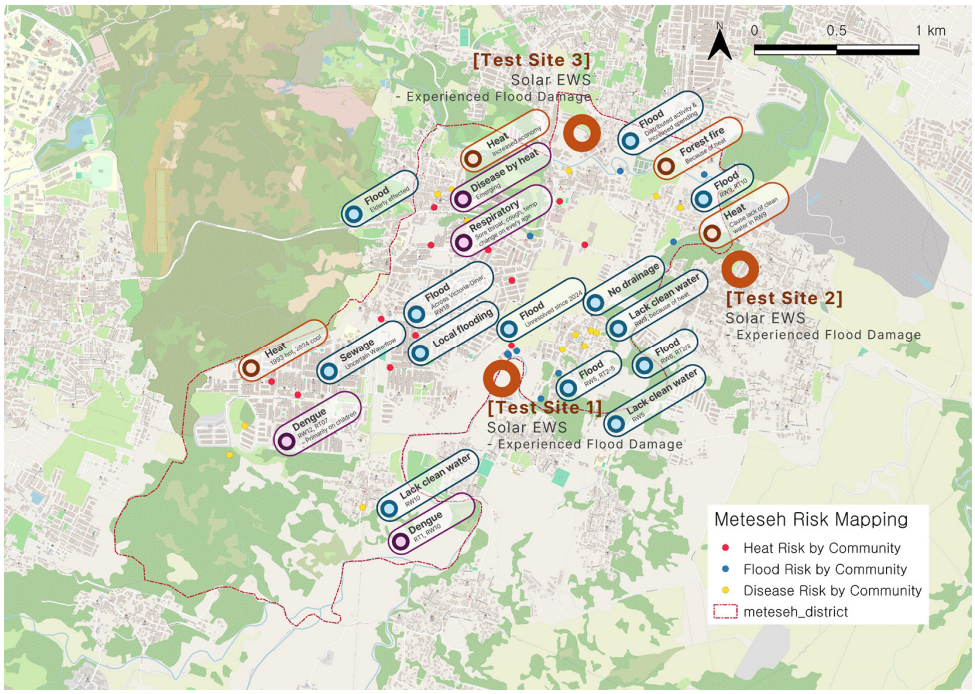
[그림 96] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 구축 타임라인(홍수)



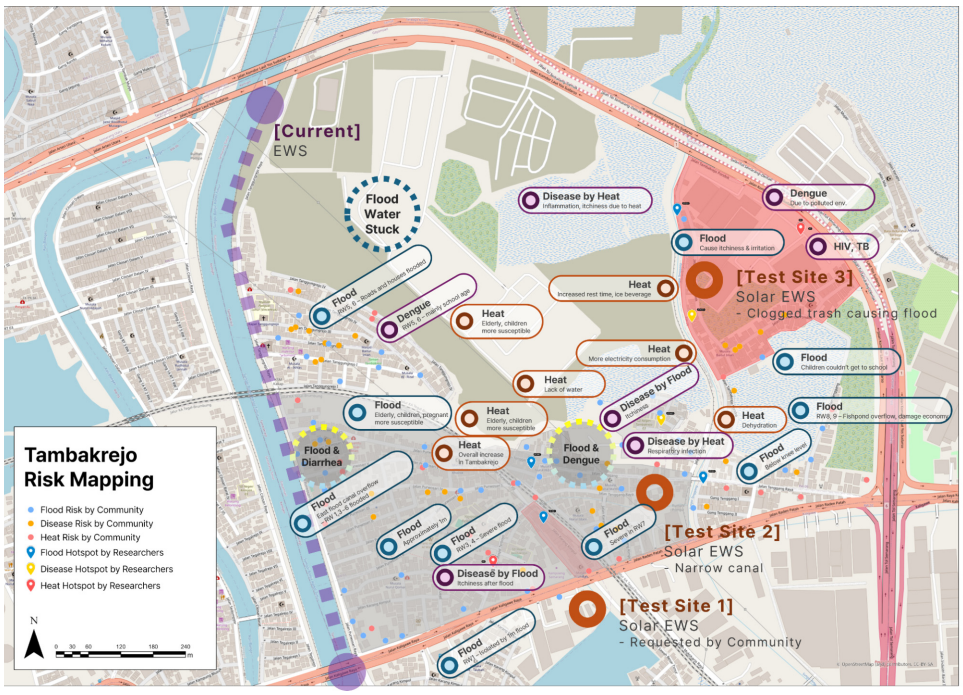
[그림 97] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 구축 타임라인(열섬, 질병)

③ 솔루션 대상지 맵핑

1단계 연구와 현지 조사를 토대로 도출, 보완된 핫스팟 및 주민들이 솔루션이 필요하다고 맵핑한 장소를 중심으로 대상지 내 솔루션을 우선적으로 도입할 포인트를 도출하였으며, [그림 98], [그림 99]와 같다.



[그림 98] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 솔루션 맵핑(Meteseh)



[그림 99] 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템 솔루션 맵핑(Tambakrejo)

3) 솔루션 아이디어 2: 복합재난 완화 환경 조성

① 해결 대상 주요 난제

대상지는 공통적으로 녹지공간의 부족으로, 열 영향과 홍수를 비롯한 재난 대응에 어려움을 겪고 있다. 특히, Tambakrejo에서는 주거 건물의 열 영향이 증가하고 있으며, Meteseh에서는 적절한 수자원(가정용수) 공급이 원활히 이루어지지 않고, 동시에 무분별한 개발로 인하여 녹지공간이 감소하고 있다.

② 아이디어 개요

복합재난 완화 환경조성은 식재와 지붕개선 솔루션을 통하여 물과 열을 통합적으로 관리하는 것에 그 목적이 있다. 솔루션은 크게 네가지 요소로 이루어져 있으며, 각 대상지에 맞춤형으로 적용하고자 한다. 종합적이고 지역에 맞춘 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 솔루션을 통하여 지역의 물 및 열 관리를 개선하고 복합재난에 효과적으로 대응하며, 궁극적으로 공동체 기능을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

[솔루션 2-1] 쿨 루프(Tambakrejo 적용)

Tambakrejo는 열악한 소재, 단열 및 기후의 영향으로 주거 건물의 열 영향 증가하고 있으며, 이로 인하여 주민들이 열 관련 질병을 경험하고 있으나, 확보할 수 있는 녹지공간이 부족하여 근원적인 개선은 어려운 상황이다. 이에, 백색 열가소성막 소재 페인트를 지붕에 칠하는 쿨 루프(Cool Roof)를 통하여 경제적인 방식으로 실내 온도 4℃ 절감 및 냉방에너지 평균 20% 절감 효과를 얻고자 한다.

쿨 루프 도입은 커뮤니티 단위의 지원 사업 시행, 쿨 루프 적용 교육, 지원사업 시행, 에너지 소외계층 파악 및 우선 지원의 단계로 이루어지며, 각 주체는 다름과 같은 활동을 진행한다. 먼저 개인은 Cool Roof 적용을 위한 교육을 수강하여, 쿨 루프의 필요성과 장점 등을 파악하고, 효과 증대를 위한 옥상 및 지붕 청소 등 관리방안에 대한 이해를 높인다. 이어, 각 가정의 지붕에 쿨 루프를 단계적으로 도입한다. 1단계로 적극적인 참여 집단이 열 영향을 많이 받아 실내 온도를 상승시키는 철제 슬리브와 같은 지붕 자재를 벽돌 등으로 교체하며, 2단계로 옥상과 지붕을 청소하며, 마지막 3단계에서 쿨 루프를 적용한다. 자재 교체에 어려움이 있는 소극적 참여 집단은 지붕 색만 하얀색으로 교체한다.

커뮤니티 차원에서는 청년, 여성 단체 및 보건소가 공공에서의 쿨 루프 지원 사업 시행 시 에너지 소외 계층이 우선적으로 적용받을 수 있게 지역 내 에너지 소외 계층 파악하는 작업을 한다. 이러한 에너지 소외계층에는 독거노인 등이 포함된다. 또한, 지역 내 페인트 시공 및 건축 시공과 관련된 직업군과 공공이 협력하여 보다 빠른 쿨 루프 시공을 진행하고, 청년 단체는 인터넷 소외계층이 쿨 루프 지원사업을 신청하는 것을 지원하여 개인과 공공사업간 연계를 도모한다.

마지막으로, 공공에서는 가구 단위 지원사업을 통해 쿨 루프 시공을 위한 지원금을 제공한다. 예를 들어 한국의 경우 단위 면적당 15,000원(최대 150만원)을 지원하는 사업이 있으며, 취약계층에 대한 우선 지원 혜택이 있다. 또한 가구 단위 외에도 커뮤니티 차원에서 주민들이 폭염을 피해 모일 수 있는 시설 및 집객시설(어린이집, 학교, 경로당 등)에 쿨 루프를 적용하여 폭염 쉼터를 마련한다.



[그림 100] 쿨 루프 예시

자료: https://www.jjilbo.com/news/articleView.html?idxno=235409

[솔루션 2-2] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재(Meteseh, Tambakrejo 적용)

Meteseh와 Tambakrejo 모두 열악한 식생과 부족한 녹지공간으로 인하여 열섬과 홍수 대응에 난항을 겪고 있다. 또한, 식재를 하더라도 재난을 견디지 못하는 경우가 많이 발생한다. 이에, 지역별로 물(가뭄, 홍수)에 강한 열대 식물 중, 장기간 이어지는 건기에 잘 버티고 홍수에 강한 초본류를 주로 식재하여 재난을 예방하고 피해를 저감하고자 한다. 식재는 (1) 옥상녹화 및 레인가든에 적용 가능하고, (2) 염분에 강하고 강 주변에 식재하여 물 흡수 및 방벽 역할을 할 수 있으며, (3) 동시에 건기가 길거나 물이 부족한 지역에서도 잘 버틸 수 있는 식물을 대상으로 한다.

주체별로는 다음과 같은 활동을 진행한다. 먼저, 개인은 지역 환경(해수+담수가 만나는 지점)의 이해도를 높이기 위한 교육을 수강하고, 동시에 홍수 저항성 식물, 염생식물에 관한 교육도 함께 수강한다. 커뮤니티에서는 공용공지/유휴부지의 녹지(과일밭, 레인 가든) 관리를 위한 단체를 결성하고 식재 활동을 진행한다. 마지막으로, 공공에서는 1차로 지방정부에서 주민들에게 식물 보급, 비료를 제공하는 등 초기 설치비용을 지원하며, 2차로 지속적인 관리를 위한 최소한의 매뉴얼을 제공하여 주민들이 자체적으로 녹지를 조성할 수 있도록 한다. 장기적으로는 녹지 모니터링을 통하여 제도가 정착하는지 관리한다.

재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 타임라인과 추천 열대 식물은 다음과 같다.



[그림 101] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 타임라인

〈표 43〉 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 추천

대상지	분류	이름	용도 및 특징	사진
Meteseh & Tambakrejo	초본류	Gamba Grass (Andropogon gayanus)	- 다양한 토양 적응 (모래-점토,알칼리-강산) - 일시적인 침수에 내성 - Var. gayanus는 계절성 습지에서 발생, 침수 토양에 잘 적응 - 강 주변에 식재(특히 Meteseh)	

대상지	분류	이름	용도 및 특징	사진
		Axonopus compressus (Broadleaf carpet grass)	- 습도가 높은 곳에서 잘 자람 - 토양 침식을 막아주는 지피식물 - 열대/아열대 지역에서 잔디밭용으로 사용 - 특히 Tambakrejo에 식재	
		Brachiaria decumbens	- 오염된 토양에 내성 - 옥상녹화 및 레인가든	
		Panicum maximum	- 불모지 개간할 때 사용하는 등 척박한 환경에 내성	
Tambakrejo		Paspalum vaginatum (seashore paspalum)	- 물가에서 생장 쉬움 - 뿌리 깊음	
	목본류	Mangrove	- 생태계 다양성을 보존하고, 홍수, 해수면 상승, 태풍예방에 효과적	
		Passion Fruit	- 패션후르츠 종류 중 Passiflora gibertii와 Passiflora edulis는 염분에 내성이 있음	

[솔루션 2-3] 외부공간 레인가든 적용(Meteseh 적용)

레인가든(Rain Garden)은 외부 지역에 빗물을 저장하여 물을 다시 사용하고, 지표면 온도를 낮추는 데 영향을 미친다. 이에, 솔루션 2-3은 주택 사이 자투리 공간을 활용하여 레인가든을 조성하여 커뮤니티 공간의 재난 회복탄력성을 강화하는데 그 목표가 있다.

주체별로는 다음과 같은 활동을 진행한다. 먼저, 개인은 교육 주택 사이 자투리 공간 활용을 위한 레인가든의 필요성, 적극적 참여 및 토지 이용을 위한 교육을 수강하고, 마을 또는 가정 내에서 자투리 공간으로 활용할 수 있는 부지 내에 레인가든을 설치한다. 이러한 레인가든은 도시농장으로 활용이 가능하며, 가정 내 마당 또는 정원 활용 시 가정에서 소비가 가능한 수준의 농작물을 재배할 수 있다. 레인가든 조성 이후에는 지속적인 관리를 통하여 환경을 유지한다. 특히, 쓰레기를 방치하지 않고 식물을 관리하여 빗물저장의 효율성을 높인다.

커뮤니티에서는 물이 자주 고이며 쓰레기 투기가 빈번한 커뮤니티 내 자투리 공간(유휴부지)을 파악하여 레인가든 설치 후보지를 도출한다. 마을 내 레인가든의 식재 및 쓰레기를 관리하며, 레인가든 아래 파이프를 통해 모인 빗물을 관리한다. 또한, 청년 및 여성 단체에서는 빗물저금통 등 탱크 내에 모인 빗물을 수거하여 정수과정을 거쳐 식수화하고 저장 및 보급한다. 모스크에서 손을 씻는 용도나 빨래 등에 사용할 수 있는 생활용수로도 활용하며, 종교 및 청년 단체에서 수질 오염 상태를 관리하고 보급한다. 여성 단체는 유휴부지 내에서 재배된 농작물을 공공 주방(재난 시)에서 활용하며, 평소에는 저소득층이 방문하는 무상급식소에서 활용한다.

마지막으로 공공에서는 레인가든 지원 사업을 시행하여 비용적인 부담을 완화할 수 있는 지원금을 배포하고 유휴부지 내 레인가든의 설치를 적극적으로 추진한다. 또한, 농작물 등 레인가든에 식재 가능한 식물 보급 및 파이프 등 관거 시설을 설치하며, 세마랑 공공사업부(DPU)가 활용하고 있는 웅덩이 데이터를 활용하여 빗물이 고이는 지점을 파악한다. 마지막으로 파이프 등 관거 시설을 DPU와 협력하여 관리한다.

[솔루션 2-4] 다목적 옥상녹화 및 정수 시스템(Meteseh 적용)

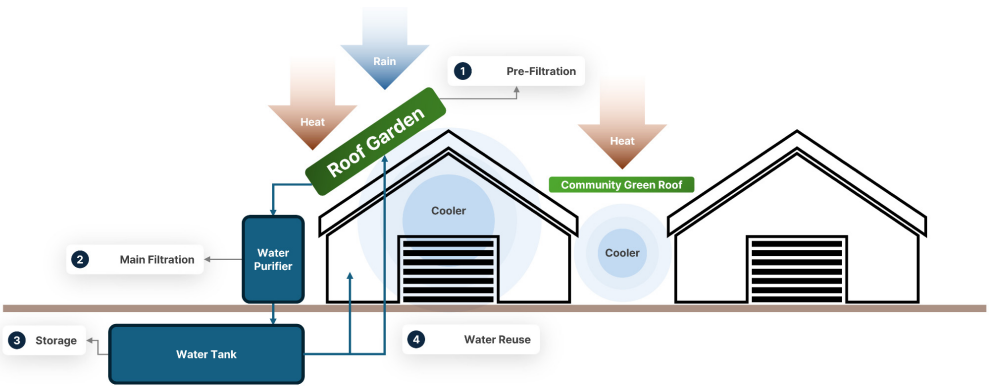
Meteseh는 고도가 높고 새로 개발되고 있는 지역으로, 상하수도 인프라가 부족하여 적절한 수자원(가정용수) 공급이 원활히 이루어지지 않고, 동시에 무분별한 개발로 인하여 녹지 공간이 감소하고 있다. 이에, 수자원 확보와 녹화를 동시에 진행할 수 있는 다목적 옥상녹화 및 정수 시스템을 도입하여 빗물 〉 옥상정원 〉 저장소 〉 정수기 〉 생활용수로 이어지는 물 순환체계를 구축한다. 특히, 단계적으로 분화하여 옥상녹화와 정수기를 도입하고, 이를 통합적으로 연계하여 한가지 솔루션을 통해 복합재난에 대응할 수 있도록 하며, 개인 및 커뮤니티 차원에서 모두 적용할 수 있도록 범용성 있는 솔루션을 제시하고자 한다.

먼저 단기적으로, 태양열, 미생물, 또는 바이오샌드를 활용한 커뮤니티 공용용수 정화 및 저장시설을 우선 도입하고 실증한다. 또한, 공용공간과 주택 사이, 거리 위 등에 가벼운 소재 및 넝쿨

식물을 이용하여 그린 루프를 조성하고, 이때 식량작물을 재배하면 마을주민이 공용으로 수확 또는 판매할 수 있도록 한다. 중장기적으로는 일부 가정에 소형화된 물 정화 및 저장시설을 설치하고 실증하며, 해당 가정에 옥상정원을 설치한다. 설치한 옥상정원은 가정용 물 정화 및 저장시설과 연결하고 실증하며, 이를 마을 단위로 확대한다.

이를 위해서는 개인 차원에서 각 가정마다 옥상 정원을 설치할 수 있도록 마을 차원에서 교육 및 지원이 이루어져야 한다. 특히 식재 방법, 설치 방법 등을 교육하고 설치 비용 또는 재료 및 식물을 지원해야 한다. 이때, 옥상정원은 병충해와 우수, 가뭄에 강하고, 현지에서 조달이 가능한 식물 위주로 식재하며, 가볍고 설치가 쉽게 하여 기존 주택에 하중 부담을 최소화해야 한다. 이를 위해서는 지역 내 대학과 협력하여 표준형 옥상정원 모델을 제작하고 검증하는 것이 필요하다. 개인은 우기에 옥상정원을 통해 1차로 빗물을 정화하고 저장해둘 수 있으며, 건기에는 저장해둔 빗물과 함께 지하수를 태양열, 미생물, 또는 바이오샌드를 이용하여 정화한 후 사용할 수 있도록 시설을 개선한다.

커뮤니티 차원에서는 주택 사이, 거리 위에 가벼운 소재 및 넝쿨 식물을 이용하여 그린 루프를 조성하고, 커뮤니티가 공동 관리하도록 한다. 정원 가꾸기 교육 등을 통해 옥상정원을 효과적으로 관리하는 방법을 이해하고 발전시켜 나갈 수 있도록 하며, 청년 및 여성 단체가 마을 내 정수시설을 공동으로 관리하고, 보건소가 주기적으로 점검할 수 있도록 한다.

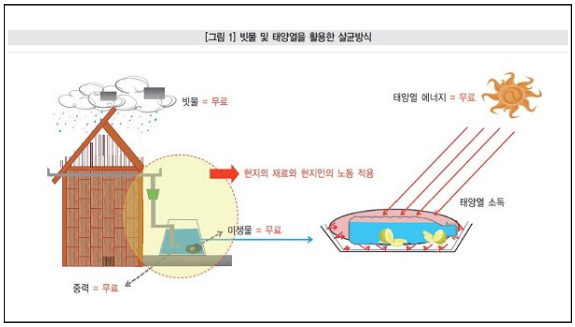


[그림 102] 다목적 옥상녹화 및 정수 시스템 체계도



[그림 103] 커뮤니티 그린루프 예시

자료: https://www.diakonia.se/en/where-we-work/asia/bangladesh/transforming-endless-poverty-in-balurmath-slum/

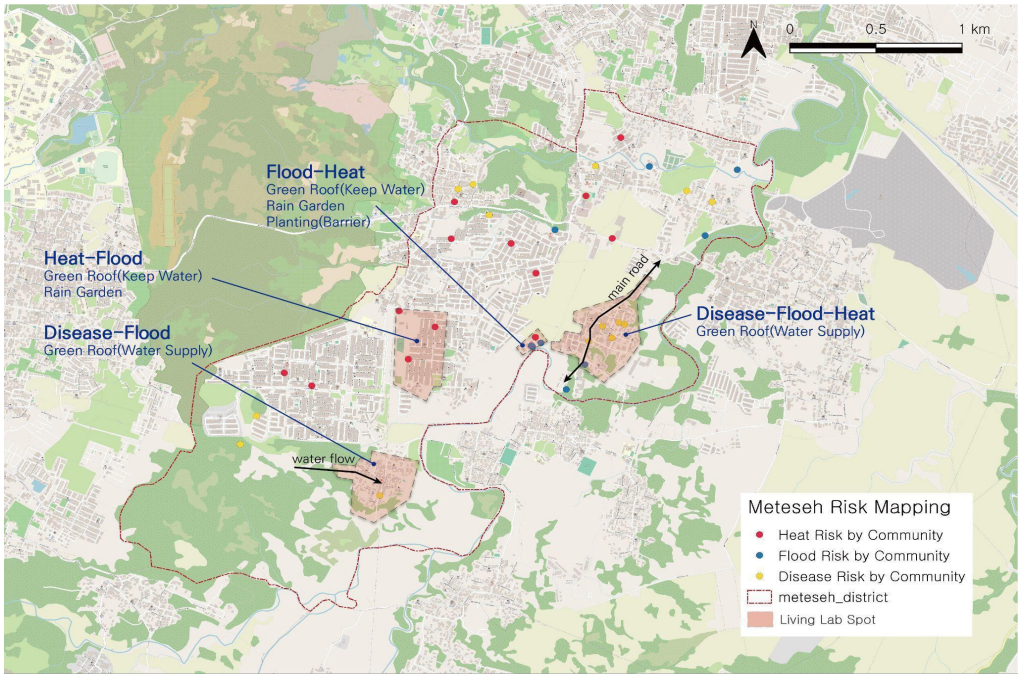


[그림 104] 물 저장 및 정화 체계 예시

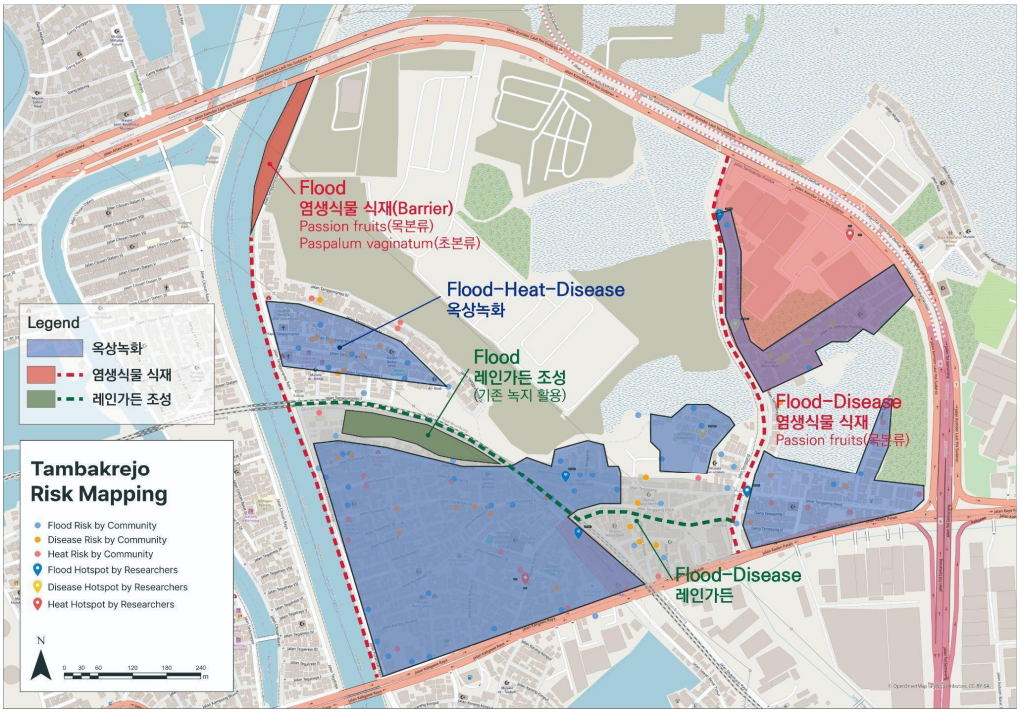
자료: https://www.jejunews.com/news/articleView.html?idxno=2206286

③ 솔루션 대상지 맵핑

1단계 연구와 현지 조사를 토대로 도출, 보완된 핫스팟 및 주민들이 솔루션이 필요하다고 맵핑한 장소를 중심으로 도출한 대상지 내 솔루션을 우선 도입 포인트는 각각 다음과 같다.



[그림 105] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 솔루션 맵핑(Meteseh)



[그림 106] 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 솔루션 맵핑(Tambakrejo)

4) 솔루션 아이디어 3: 통합 쓰레기 관리

① 해결 대상 주요 난제

대상지는 공통적으로 쓰레기를 투기하거나 소각하는 등 관리가 제대로 이루어지지 않으며, 이는 복합재난의 대응에 영향을 미치고 있다. 배수로 및 강에 쓰레기가 유입되어 배수가 원활하게 이루어지지 않고 있으며, 토양을 오염시키고, 투수 면적을 감소시키고 있다.

② 아이디어 개요

대상지 내에서 자동으로 쓰레기를 수거하고 커뮤니티가 함께 관리에 참여하는 체계를 구축하며, 다음과 같은 단계로 이루어진다.

〈표 44〉 통합 쓰레기 관리 단계별 도입방안

단계	내용	세부 단계
1단계	불법투기 신고 어플리케이션 및 쓰레기 수거 담당자 지정	1-1 : 쓰레기 수거 담당자 지정 및 쓰레기 수거 교육 1-2 : 불법투기 신고 어플리케이션 보급 1-3 : 쓰레기 신고 관련 메뉴얼 보급(청년 및 여성 단체 중심) 1-4 : 어플리케이션 타임라인 기반으로 쓰레기 수거 사업 진행
2단계	자동 쓰레기 수거 드론 보급	2-1 : 테스팅 지역 내 선제적으로 자동 쓰레기 수거 드론 보급 2-2 : 쓰레기 수거 담당자 및 공공의 유지 관리 2-3 : 불법투기 신고 어플리케이션으로 도출된 상습 불법투기 장소 특정 및 드론 운행 지역 선정
3단계	가정별 교육 및 관리	3-1 : 어플리케이션 운영 결과 및 드론 수거 결과 기반 쓰레기 배출에 대한 가정별 교육 3-2 : 1단계 및 2단계 과정에 대한 관리감독

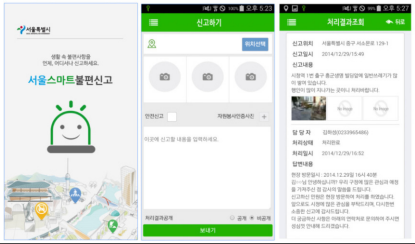
주체별 도입 방안 및 효과는 다음과 같다. 먼저 개인 차원에서는 불법투기 신고 어플리케이션을 활용하여 일반쓰레기 불법투기에 대한 경각심을 제고한다. 어플리케이션을 통해 즉각적인 쓰레기 무단투기 대응이 가능할 뿐 아니라, 주민 참여형 시스템 활용을 통한 쓰레기 배출 인식을 제고할 수 있다. 또한 지역 내 일반쓰레기 수거담당자 지정 및 폐기물 수거 체계 마련하는 과정에서 기초생활수급자를 수거 담당자로 지정한 후 폐기물 수거 비용을 지급하여 생활비 보조 수단으로 활용할 수 있다. Tambakrejo의 여성 단체에서 기시행하고 있는 쓰레기 수거 관련 활동과 연관하여 폐기물 순찰대 등 체계적인 수거 체계를 마련할 수 있다. 마지막으로, 가정별 일반쓰레기 배출(불법투기)에 대한 교육을 진행하여 쓰레기의 발생 자체가 감소할 수 있도록 한다.



- 전지 충전 방식으로 1회 충전으로 약 5km 주행 가능, 한 번 충전으로 하루 8~10시간 물 청소 작업을 통해 500kg 부피(플라스틱 물병 2만 1천 개)의 수중 잔여물을 수집
- 센서가 내장되어 있어 운행 중에는 관리자가 필요하지 않으며, 수질 감지가 가능한 센서가 포함된 모델도 존재

자료: https://dronesolutionservices.com/wasteshark

[그림 107] 유사사례: Wasteshark



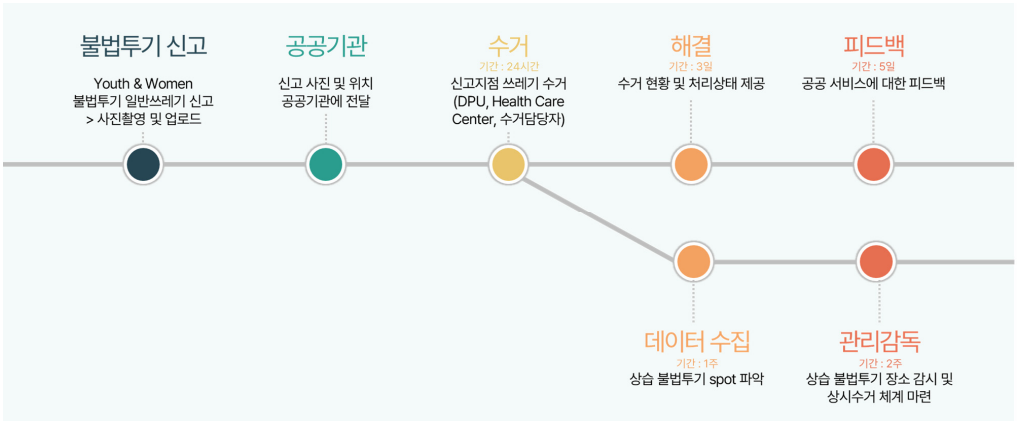
- 쓰레기 무단 투기를 간편하게 신고할 수 있는 어플리케이션을 운영하고 처리결과를 즉각적으로 확인 가능

자료: https://smartreport.seoul.go.kr/w100/index.do

[그림 108] 유사사례: 서울 스마트 불편 신고

커뮤니티 차원에서는 청년 단체와 여성 단체 등 어플리케이션과 스마트폰 사용에 익숙한 주민들이 주도적으로 불법투기를 신고할 수 있는 어플리케이션을 마을 주민에게 배포하고 적극적으로 신고한다. 또한, 자동 쓰레기 수거 드론(그림 107 참고)을 운영하며, 지역 내 일반쓰레기 수거담당자를 지정하고 폐기물 수거비용을 지급한다. 쓰레기 수거 담당자는 지정된 시간에 수집된 쓰레기를 수거 및 드론을 충전하며(Village Center에서 보관 및 충전), 활동 현황 파악 및 감시는 DPU와 여성 단체, Community Center가 함께 한다.

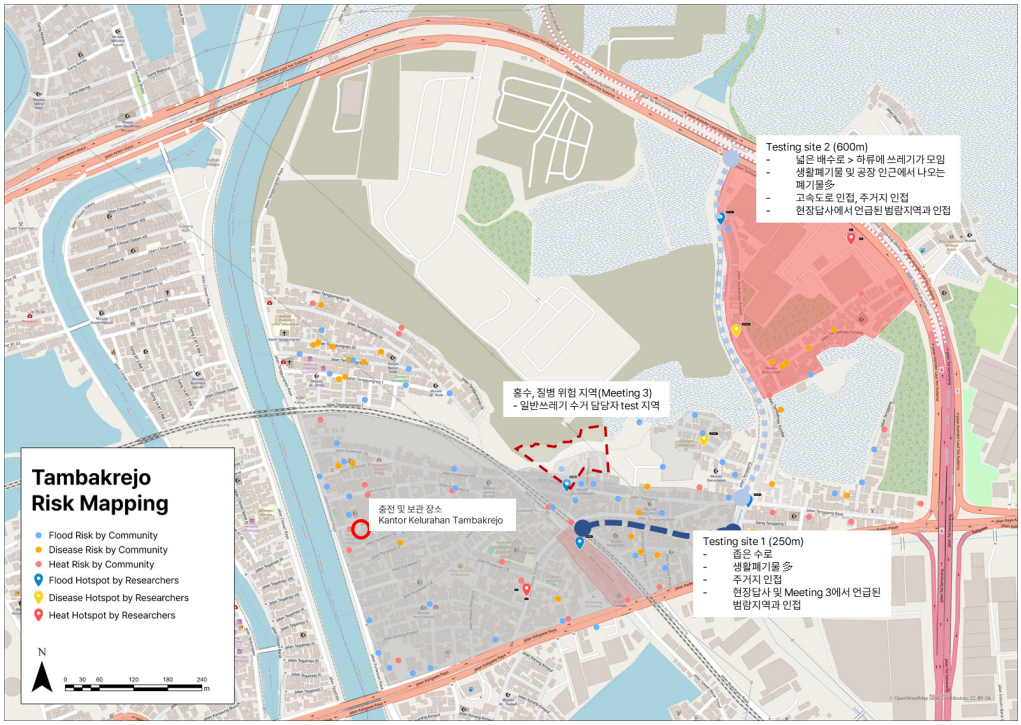
마지막으로 공공에서는 불법투기 신고 어플리케이션을 통한 불법투기 장소 파악 및 신고에 따른 즉각적인 피드백 대응체계를 마련하며, 자동 쓰레기 수거 드론의 충전 및 보관장소를 마련한다. 해당 내용을 타임라인으로 정리하면 다음과 같다.



[그림 109] 통합 쓰레기 관리 도입 타임라인

③ 솔루션 대상지 맵핑

1단계 연구와 현지 조사를 토대로 도출, 보완된 핫스팟 및 주민들이 솔루션이 필요하다고 맵핑한 장소를 중심으로 대상지 내 솔루션을 우선적으로 도입할 포인트를 Tambakrejo 내에서 도출하였으며, 아래 그림과 같다.

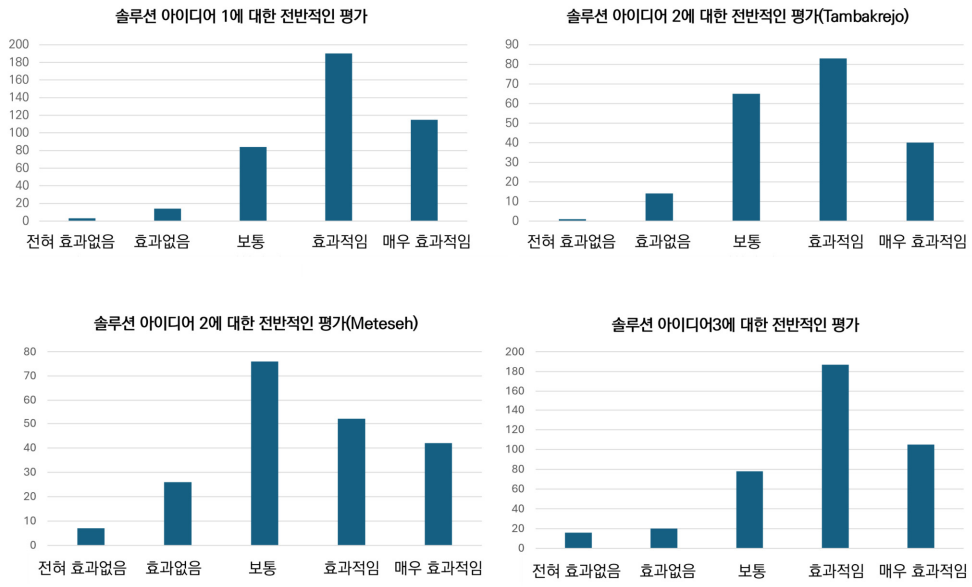


[그림 110] 통합 쓰레기 관리 솔루션 맵핑(Tambakrejo)

5) 솔루션 아이디어 검증 및 복합재난 인식 확인

리빙랩 수행 내용을 기반으로 도출한 솔루션의 실현 가능성과 효과성을 검토하고, 복합재난에 대한 인식을 확인하여 솔루션을 최종적으로 보완하기 위해 대상지 거주민을 대상으로 설문조사를 2024년 10월 한 달간 진행하였다. 설문 문항은 복합재난 경험과 인식, 재난 취약성 및 대응, 연구진이 제안한 솔루션 아이디어에 대한 평가로 구성하였다. 설문조사는 현지조사를 진행한 Meteseh와 Tambakrejo 지역을 대상으로 마을당 203명씩 총 406명을 대상으로 수행하였다.

설문조사에서는 솔루션 아이디어의 실현가능성과 효과를 조사했으며, 대체로 효과가 높을 것으로 평가되었다. 솔루션 아이디어 1은 '효과적임', '매우 효과적임'으로 응답한 거주민이 대부분으로 나타났으며, 솔루션 아이디어 2는 두 대상지역에서 모두 긍정적으로 평가되었으나, Meteseh 지역보다는 Tambakrejo에서 더욱 효과적으로 평가하는 것으로 나타났다. 이는 Tambakrejo의 불투수면적 비율이 높고 리빙랩 중 Meteseh보다 식재에 대한 필요성이 크게 나타난 것과 같은 맥락에서 해석할 수 있다. 솔루션 아이디어 3은 솔루션 아이디어 1과 2보다 효율성을 더욱 긍정적으로 평가하는 것을 확인하였다(그림 111 참고).



[그림 111] 솔루션 아이디어에 대한 전반적인 효과성 평가 결과

제 6절. 소결

본 연구는 인도네시아 자카르타와 세마랑 지역을 대상으로 기후변화에 따른 복합재난(질병, 열, 물 관리) 영향을 탐지하고, 지역사회가 기후변화에 효과적으로 적응할 수 있는 리빙랩 프로토타입을 설계, 운영, 개발하고자 하였다. 이를 위해 머신러닝·AI를 사용하여 재난 발생에 영향을 미치는 지역의 기후·지리적·환경적·사회경제적 요인을 파악하였으며, 복합재난 발생 가능성이 높은 핫스팟을 도출하였다. 이후 현지 파트너십과 협력체계를 구축하여 리빙랩 프로토타입을 설계하고 현지조사 기간 중 운영하여, 지역의 복합재난 취약성을 확인하고 주요 문제점을 발굴하였으며, 지역주민과 함께 지역의 문제점을 도출하고 해결책을 모색하였다.

리빙랩의 세부 절차는 1단계 기후위기 관심지역 핫스팟 선정, 2단계 리빙랩의 사전 설계 및 현지 파트너십 구축, 3단계 리빙랩 프로토타입 운영으로 구성된다. 연구진은 현지 파트너십을 통해 다양한 이해관계자(주민·공공·민간·학계)를 대상으로 사전 워크숍, 인터뷰, 참여관찰을 진행하였으며, 재난에 대한 인지와 영향, 적응 방안을 논의하고 해결 방향을 도출하였다.

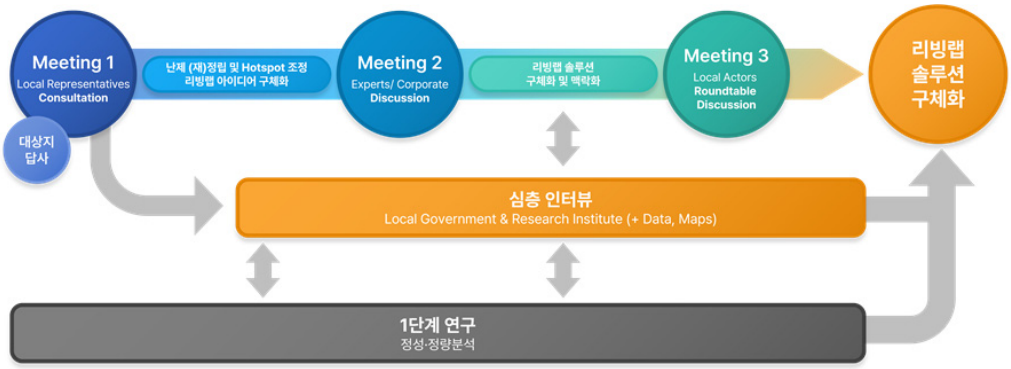
본 연구는 커뮤니티 기반의 리빙랩을 통해 기후변화 적응을 위한 솔루션 체계를 구축하고, 참여관찰을 통해 확보한 실증 데이터를 기반으로 인도네시아 해안도시의 효율적인 기후변화 적응 방안을 제시하는 데 기여할 수 있음을 시사한다. 특히, 세마랑 지역은 뎅기열, 열섬 현상, 홍수 등의 문제를 중심으로 복합재난의 핫스팟 지역을 도출한 후, 복합재난 발생 가능성이 큰 Meteseh와 Tambakrejo를 대상으로 현지조사와 리빙랩을 수행하였다. 리빙랩은 지역주민 대상 컨설테이션과 전문가 및 민간 기업 대상 회의, 지역 활동가 대상 원탁회의로 진행되었다. 또한, 이와 함께 기후위기로 인한 다양한 복합재난의 원인, 관계, 영향, 정책을 파악하기 위하여 주요 기관(세마랑 재난관리국, 공간계획부, 환경부, 보건부, 대학 내 지역연구소)을 방문하여 인터뷰를 수행하였다. 해당 면담에서는 지역사회의 복합 재난 예방과 기후변화로 인한 재난 취약성을 고려한 정부 정책을 파악하는 데 중점을 두었으며, 각 미팅을 통해 도출된 결과를 바탕으로 정부 정책의 효과성을 비교 확인하였다.

각 회의와 주요 기관 면담에서 도출된 결과를 바탕으로 연구진은 다수의 워크숍을 통해 결과를 정리하고 리빙랩 솔루션 초안을 작성하였으며, 이를 바탕으로 리빙랩 솔루션을 구체화하였다. 대상지역인 Meteseh와 Tambakrejo에서 나타난 주요 난제로 기후변화로 인한 가뭄 및 물 부족 심화, 이상기후현상으로 인한 홍수와 뎅기열, 온열질환이 발생하고 있는 것으로 나타나 기후변화의 영향과 복합재난 발생 가능성을 확인하였다. 이와 함께 Meteseh는 새롭게 개발되고

있는 주거지역으로 수자원 공급의 불안정성, 무분별한 개발로 인한 녹지 공간 감소 문제가 발생하고 있으며, 이로 인해 풍토병(뎅기열), 열(열섬 및 온열질환), 물 관리(수자원 공급 및 관리, 홍수) 문제가 복합적으로 나타나고 있었다. 한편, 해안지역에 위치한 Tambakrejo는 열(열섬), 저지대 및 지반침하로 인한 배수 문제, 쓰레기 처리 문제, 식재의 어려움 등과 같은 문제가 발생하고 있었다. 특히, Tambakrejo는 해안가가 위치한 마을로 홍수가 상습적으로 발생하고 있는 지역이자 높은 건축물 및 인구 밀도, 불투수면적 비율을 보이고 있으며, 무분별한 지하수 사용으로 인해 지반침하가 발생하여 지속적으로 침수가 발생하고 있다. 따라서, 대상지역에서 발생하고 있는 문제들을 해결하기 위한 시 정부와 국제기구 등의 노력에도 불구하고 해결에 난항을 겪어왔으며, 문제들 간의 상호연계성이 짙고 결과적으로 복합재난을 야기하여 단독으로 해결하기 어렵다는 점에서 난제로 볼 수 있다.

위와 같이 지역에서 발생하고 있는 주요 문제를 해결하기 위하여 연구진은 커뮤니티 단위에서 도입 가능하고 실현 가능성이 높은 1) 커뮤니티 기반의 재난대비 정보 시스템, 2) 복합재난 완화 환경 조성, 3) 통합 쓰레기 관리의 세가지 솔루션 아이디어를 제안하였다. 연구에서 제안한 솔루션은 재난 정보 접근성을 향상하고 지역 커뮤니티를 중심으로 재난에 대응할 수 있도록 지원하여 재난대응능력을 향상시킬 것으로 기대된다. 특히, 국제원조를 통해 지원 가능한 기술(Solar EWS, 쓰레기 수거를 위한 Wasteshark)을 제공한 후, 해당 기술을 커뮤니티에서 활용 및 유지보수하여 효과가 지속될 수 있도록 운영 체계를 구축하는 데 초점을 두었다는 점에서 의의를 갖는다. 또한, 연구진은 대상지역 거주민(총 406명)을 대상으로 솔루션의 도입 효과에 대한 실현가능성과 효과성을 검증하기 위해 설문조사를 진행하였으며, 전반적으로 솔루션의 실현 가능성과 효과성이 긍정적으로 평가된 것을 확인하였다.

아울러, 본 연구를 통해 리빙랩이 기후변화로 인한 복합재난 발생 상황에서 지역사회 주도로 해결책을 모색할 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 특히, 대상국의 다양한 이해관계자들이 협력하여 문제를 인식 및 해결하는 과정에서 기후변화 적응을 위한 자생적 역량이 향상되었으며, 향후 정책 수립에 있어 본 연구가 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.



[그림 112] 현지조사 방법론

IV장. [3단계] 기후변화 완화를 위한 완화계획 가이드라인 제안

제 1절. 기후변화 완화를 위한 C4V 인덱스 개발

1. 연구 목표

기후변화 완화를 위한 C4V 인덱스는 기후변화에 따른 커뮤니티 수준에서 질병, 열, 물 관리 영향을 완화하기 위한 취약성 지표를 제안하는 데에 그 목적이 있다.

- 본 연구에서는 1단계를 통해 도출한 질병, 열, 물 관리 영향 요인과 2단계를 통해 확인한 기후변화 적응 및 완화를 위한 지역 핵심 관리 역량 요인을 활용하여 기후변화 완화를 위한 역량 요인을 진단할 수 있는 지표를 발굴하였다. 기후변화로 인한 영향을 장기적으로 완화하여 효과를 극대화하기 위해 물 관리는 단기, 열은 단기~중기, 질병은 장기 계획을 제안하여 기후변화 완화를 위한 전략이 지속 가능한 효과와 발전을 보장하는 체계를 구축하도록 하였다.

2. C4V 인덱스 개요

앞서 진행한 1·2단계를 통해 열, 질병, 물 관리 관련 인구·사회·환경·정책 요소에 대한 다차원 자료를 구축한 뒤 이를 종합적으로 고려한 C4V (Coastal City Climate Change Vulnerability) 인덱스를 개발하였다.

- 본 연구에서는 최종적으로 웹사이트 개발을 통해 각 세부 연구 결과를 기반으로 3가지 부문의 취약성 지도를 시각화·수치화하여 구현하였으며, 이를 통해 그리드 단위에서 기후변화에 의한 취약성 평가를 위한 공간적 지표를 마련하였다. C4V는 질병, 열, 물 관리 3가지 부문의 리스크 지표와 종합적 취약성 지표에 대해 나타낼 수 있는 지표로 특정 부문의 가중치를 고정하는 것이 아닌 **웹사이트 이용자가 이용 목적에 따른 가중치를 적용하여 직접 C4V를 도출**할 수 있게 구성하였다. C4V 인덱스 도출에 앞서 지수의 통일성을 위해 1·2단계를 통해 도출된 지수들을 [그림 113]과 같이 **10점 척도로 정규화한 후** 웹사이트 이용자가 정하는 가중치를 적용하고자 하였다.



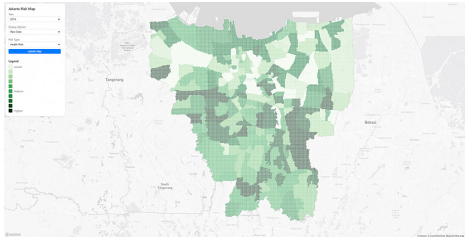
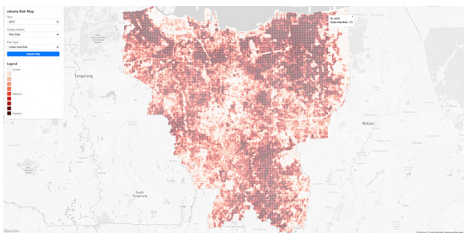
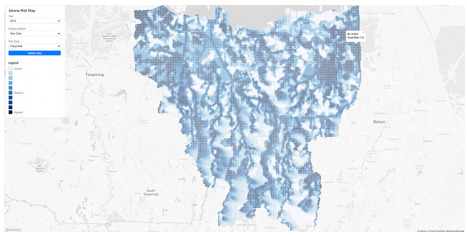
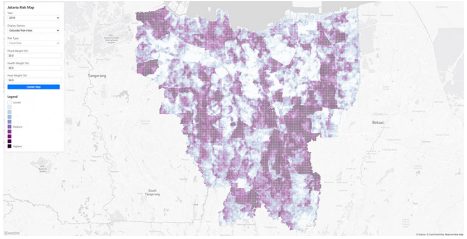
[그림 113] C4V 지수 정규화 과정

- 복합재난지수인 C4V의 경우 이용자가 재난 지수를 보다 쉽게 이해할 수 있도록 설계하였으며 이를 위해 세 부문의 지수를 합한 값인 총점 30점을 다시 10점 척도로 정규화하였다. 이용자가 정하는 가중치를 바탕으로 복합재난지수를 산출하는 공식은 아래 [그림 114]와 같다. 가중치는 **세 가중치의 합이 100을 넘지 않도록 설정**하였으며(그림 106 참조. 질병 가중치 + 홍수 가중치 + 열 가중치 = 100), C4V 인덱스를 공간 단위로 구축한 결과는 〈표 45〉와 같다.



[그림 114] C4V 지수 정규화 과정

〈표 45〉 C4V 인덱스

질병 리스크 지표	열섬현상 리스크 지표
	
홍수 리스크 지표	**종합 취약성 지표**
	

- C4V 인덱스 웹사이트 주소는 다음과 같다.(https://c4v.app)

제 2절. 가이드라인 설정의 개요

1. 가이드라인의 개념 규정과 설정 방법

1) 가이드라인의 개요

Cambridge Dictionary에 의하면, 가이드라인(guideline)은 “사람들에게 어떤 일을 어떻게 해야 하는지 또는 어떤 것이 되어야 하는지에 대해 조언하기 위한 정보(information intended to advise people on how something should be done or what something should be)”를 의미한다. 이는, 한국에서는 법률이 아니지만 법률적 효과를 가진 것으로 지침(guideline), 운영규정, 행정규칙이라는 용어로 사용되고 있으며, 가이드라인(guildeline)이라는 용어는 일반적으로는 비법정 용어로 사용되는 경향이 존재한다.

따라서 한국에서는 ‘guideline’이라는 동일한 영어 표기로 사용되지만, 법적 효과가 상이한 가이드라인과 지침을 구분할 필요가 있다. 본 연구에서 제안하는 가이드라인은 한국의 법률체계를 기준으로 할 때, 지침이라기보다는 법적 효과에서 자유로운 가이드라인의 성격으로 구성할 필요성이 존재한다.

법률과 가이드라인은 모두 본질적으로 규제의 메커니즘에 속한다. 그러나 이들은 그 위상과 성격, 집행성, 제정방법, 적용범위 등에서 큰 차이가 존재하며, 법률 효과를 가진 지침과 비법정 가이드라인의 차이는 아래 〈표 46〉과 같이 구분할 수 있다.

〈표 46〉 법률과 가이드라인의 성격 구분

구분	법률(Laws)	가이드라인(Guidelines)
위상(status)	법률은 특정 관할권 내의 개인과 조직에 대해 집행 가능하고 구속력이 있는 정부 또는 통치 기관이 제정한 공식적인 서면 규칙	가이드라인은 정부 기관, 전문 단체 또는 기관에서 특정 활동, 산업 또는 상황에 대한 조언, 모범 사례 또는 권장 사항을 제공하기 위해 종종 발행하는 권장 사항 또는 제안
집행성 (Enforceability)	법률을 위반하면 위반의 심각성에 따라 벌금, 과태료 또는 징역과 같은 법적 처벌을 받을 가능성	가이드라인은 법적 구속력이 없으며 일반적으로 법의 효력이 부재. 그러나 특정 법률이나 규정에서 채택되거나 참조 혹은 그 법률에 대한 보완적 역할
		가이드라인은 특정 목표나 표준을 달성하기 위한 방향, 기준 또는 제안을 제공하기 위한 것이지만, 법률이나 규정에 명시적으로 포함되지 않는 한 자율적으로 준수하는 경우가 일반적
제정 (Creation)	법률은 일반적으로 투표행위, 입법기관의 공식적인 입법 절차를 거쳐 제정	행정당국, 공공기관 외에도 민간에서 특정 목적이나 특정 사업 추진을 위해 자율적으로 제정
적용범위(Scope)	법률은 형사, 민사, 행정 및 규제 문제를 포함한 광범위한 사항에 대한 규제 중심	일반적으로 법적으로 강제되지 않기 때문에 법률에 비해 더 많은 유연성과 해석을 허용

2) 가이드라인의 성격 설정

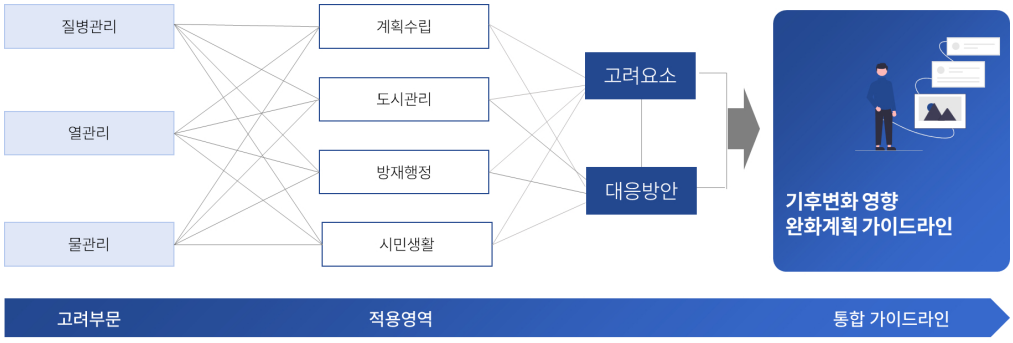
‘열(장기), 질병(단~중기), 물(단기)별 정책 적용과 영향 기간을 고려한 완화계획 가이드라인을 제공함으로써 인도네시아 커뮤니티의 맞춤형 기후변화 대응 전략을 수립한다. 가이드라인은 디포네고로대학교의 연구파트너 2인, 이해관계자(한국-인도네시아 자문단, 주민), 국제협력 전문가(이주현 교수)와 함께 개발하며 단계 결과물을 바탕으로 가이드라인을 설계한다.

본 연구를 통해 기후변화에 따른 커뮤니티 수준에서 질병, 열, 물관리 영향을 완화하기 위한 C4V (Coastal City Climate Change Vulnerability) Index를 도출한 후, 리빙랩(Living Lab)을 통해 도출한 솔루션에 입각하여 ‘기후변화 영향 완화계획 가이드라인’을 제안한다. 이는 인도네시아 중앙정부 혹은 지방정부가 사용하는 공식 가이드라인과는 달리 본 가이드라인은 특정 주제에 대한 연구를 토대로 하는 가이드라인(안)을 작성하는 것이며, 따라서 연구의 분석결과와 현지 리빙랩을 통해 도출한 솔루션에 입각한 가이드라인이다. 또한, 열-질병-홍수에 국한된 계획수립부문, 도시관리부분, 방재행정부문, 시민생활 등 거버넌스를 고려하는 포괄적 가이드라인을 지향하고자 한다.

본 연구에서 제안하는 계획 가이드라인의 성격은, 인도네시아 해안지역의 도시 수준에서 복합재

난(질병-열-물)의 영향을 감소 혹은 완화하기 위한 「기후변화 영향 완화계획 가이드라인(안)」이다. 이는 기후변화에 따른 질병, 열, 물 관리 분야의 건강 영향 요인 식별, 이들 요인의 완화를 위한 정책 및 계획 제언, 완화를 위한 다양한 주체별 실행계획 지속적인 완화 대안 모색을 위한 협력 확보 방안 등으로 구성되어 있다. 그리고 현지 연구 파트너십과의 지속적인 피드백을 거쳐 분야별 영향 완화를 위한 정책방향, 커뮤니티전략, 실행계획을 제시하여 향후 인도네시아에서 커뮤니티 기반의 기후변화 완화를 위한 가이드라인으로 활용하도록 제안하고자 한다. 최종적으로 본 연구의 가이드라인은 인도네시아 자카르타-세마랑 해안도시벨트가 열-질병-홍수의 복잡재난에 대응하기 위해 법령이나 정책과 제도에 따른 공식 매뉴얼(manual)이나 지침(guideline)을 작성할 때 활용할 수 있는 준거틀(frame of reference)을 제시하는 것에 그 목적이 있다.

3) 가이드라인 설정의 방법과 절차



[그림 115] 복합재난 대응 가이드라인의 설정 방법과 절차

※ C4V (Coastal City Climate Change Vulnerability)는 본 연구에서 개발된 지표이며, 질병 리스크 지표, 열섬 리스크 지표, 수자원 리스트 지표, 종합 취약성 지표로 구성

제 3절. 가이드라인 설정의 고려 사항

1. 한국의 유사 가이드라인

한국의「재난 및 안전관리 기본법」 제34조의5에 따라, 승인받은 위기관리 매뉴얼은 다음과 같이 구성되어 있다.

〈표 47〉 한국의 위기관리 매뉴얼 구성

구분	작성기관	승인기관
위기관리 표준매뉴얼	재난관리주관기관의 장	행정안전부장관
위기대응 실무매뉴얼	재난관리주관기관의 장 및 관계 기관의 장	재난관리 주관기관의 장
현장조치 행동매뉴얼	위기대응 실무매뉴얼 작성기관의 장이 지정한 기관의 장	재난관리 주관기관의 장 (※시장 · 군수 · 구청장이 작성한 현장조치 행동매뉴얼은 시 · 도지사가 승인)

자료: 행정안전부, 2024, 자연재난실 위기관리매뉴얼
https://www.mois.go.kr/frt/sub/a06/b11/crisisManual/screen.do

2022.12.31.일 기준, 한국의 재난유형별 위기관리 매뉴얼은 41개 표준매뉴얼로 구성되어 있으며, 그 중 물과 열 및 질병에 관련된 것은 다음과 같이 8개로 규정된다.

〈표 48〉 물, 열, 질병 관련 한국의 위기관리 매뉴얼

구분	주관기관	표준매뉴얼
물 관련	해양수산부	(4개) 적조, 녹조, 조수, 풍수해
	행정안전부	(1개) 가뭄
	국토부	(1개) 댐(환경부)
열 관련	행정안전부	(1개) 폭염
질병 관련	보건복지부	(1개) 감염병

자료: 행정안전부, 2024, 자연재난실 위기관리매뉴얼
https://www.mois.go.kr/frt/sub/a06/b11/crisisManual/screen.do

2. 인도네시아의 기후재난 관련 정책과 계획 사례

1) 인도네시아의 관련 주요 계획의 검토 및 가이드라인 고려 요소의 도출

① 국가 기후변화 적응계획(NAPs)(2019)

NAPs는 기후변화의 영향을 받게 될 4대 우선부문(해양·해안, 물, 농업, 건강)로 설정되었으나, 도시 그 자체는 주요 부문으로 고려되지 못한 상태이다. 이는 인도네시아가 타 국가에 비해 넓은 해안선, 높은 해안지역 인구 밀도와 함께, 농업 생산 및 천연자원에 대한 의존도가 높고 적응력이 상대적으로 낮으며, 기후적으로 취약한 열대성 국가라는 특성에서 기인한다.

NAPs의 4개 부문에서 고려할 기후위험요소(climate hazards)로는. 9가지(홍수, 물이용, 가뭄, 수산업 및 농업생산 감소, 해안경사지에 영향을 주는 해안홍수, 해양(항해)안전성, 퇴적물 변화, 소형 어업선박의 항해 거리 감소, 도시지역의 매개 질병(vector borne diseases)과 열 스트레스(heat stress)의 증가)가 세분화되어 있다.[4)]

② 국가 기후변화 적응계획에 의한「국가행동계획(RAN API)

「국가 기후변화 적응계획(NAPs)」을 통해 기후변화 적응을 위한 '개발계획상의 접근법(RAN API: Approach in Development Planning)'이 제시되었다. 여기서는 국가적으로 중요한 4대 우선부문의 기후변화 적응을 위해, 4개의 적응 전략부문(climate change adaptation clusters)을 제시하고 그에 대한 고려사항을 제안하였다(〈표 49〉 참고).

이러한 국가 차원에서의 RAN API는 관련 기관이나 지방정부에서 중앙정부의 방향성에 부합하여 기후변화 영향에 대응하기 위한 지방정부의 실천계획이나 전략을 수립하는데 참고자료로 활용될 수 있다.[5)]

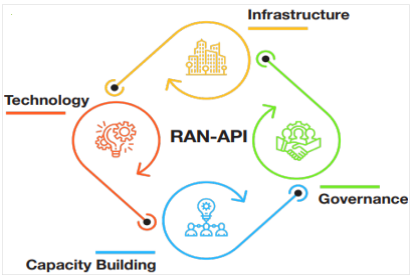
---

4) Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.7

5) Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.13

〈표 49〉 국가 기후변화 적응계획에 의한 국가행동계획(RAN API)

우선부문	전략부문	(공통)고려사항
해양·해안	기반시설(infrastructure), 기술(technology), 역량구축(capacity building), 거버넌스(governance)	성인지감수성, 취약집단, 생태기반, 경관기반, 공간기반, 금융혁신, (정보공유)
물		
농업		
건강		
국가행동계획의 정책방향 및 전력추진		



자료: Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, 12~13을 재정리

한편, 기후변화 적응부문의 주요 내용은 다음과 같다(〈표 50〉 참고).

〈표 50〉 기후변화 적응부문(꾸러미)

전략부문	주요 제시 내용
기반시설 (infrastructure)	- 기후영향에 대한 복원력, 생태계기반, 개선(개조) 가능 - 경관 및 자연과 조화를 이루거나 환경친화적이고 저렴한 기술을 사용하여 건설(green infrastructure) - 기후 변동성과 기후변화 영향을 고려하고 복합위험 감소를 지원 - 저소득층과 취약계층을 고려
기술 (technology)	- 인간과 환경에 미칠 수 있는 잠재 영향을 해결하기 위한 과학적 방법으로서의 기술 개발·적용함 적응기술은 기후변화의 잠재적 영향에 대응 가능 - 개발목표에 부합 - 비용 효율적 - 환경 친화적 - 문화적으로 양립 가능 - 사회적으로 수용 가능
역량구축 (capacity building)	- 이해관계자들이 기후변화를 줄이기 위한 다양한 행동을 설계 - 기후변화 영향, 적응, 손실과 피해를 극복하고 모니터링할 수 있는 신뢰할 수 있는 조치 마련 - 기후 관련 매개변수를 모니터링하고 새로운 기술 및 방법 제시 - 기후변화 인식 제고
거버넌스 (governance)	- 정부, 민간 부문, 지역사회 등 개발 주체의 적응 노력을 위한 규제제도 및 조정 - 거버넌스에는 정부, 민간 부문, 지역사회 등 개발 주체의 적응 노력을 위한 규제 제도 및 조정 - 포용성, 투명성, 정보에 대한 쉬운 접근성, 책임성의 원칙을 적용하여 개발 요소의 조정을 통해 구현

자료: Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.16을 재정리

③ 기후변화 적응을 위한 4대 우선부문의 추진전략의 이행방안

〈표 51〉 해양·해안 부문

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
기반시설 (infrastructure)	- 기후변화의 영향에 대한 취약성이 높은 지역에서 해안지형의 특성을 고려한 기반시설 - 생태계기반의 적응(EbA)과 지역사회 기반의 적응(CbA)방식의 접근법 결합 - 해안지역 침식위험의 감소	- 해변 벨트(지오텍스타일 백/KGM) 건설 - 단단한 구조물 건설: 해변 벨트, 하이브리드 구조물, 콘크리트 구조물 - 연성 구조물 건설: 맹그로브 식재 또는 해안식생), 그린벨트 - 복합수문: 홍수 수로의 수위 차이를 활용하여 도시의 홍수 수로에 배수용 자동수문 설치
기술 (technology)	- 해양조사기술을 적용하여 어족 자원을 감지하고 기후변화로 인한 어획량 감소를 방지	- 원격작동차량(ROV, Remotely Operated Vehicle)을 통한 해양조사기술
	- 선박사고를 줄이기 위해 극단 파도를 탐지하는 기술	- AIS(Automatic Identification System) 기술 적용 - VTS 기술적용: 선박 및 선박교통량 자동 추적
	- 기후변화의 영향으로 인한 해안선 변화에 대한 적응: 해수면 상승과 극단 기후을 고려한 공간계획이 필요한 지역에서 혁신적인 해안 모니터링시스템을 적용	- 식물모래톱 인공기술(phyto-sandbar artificial technology) 적용
	- 조업시간의 확실성을 높이고 어부들의 극한 파도로 인한 항해 위험 감소	- 적응력이 좋고 유리섬유로 제작된 혁신적 소형 어선
역량구축 (capacity building)	- 10GT 이상 어선 표준화로 어업 지원	- 유리섬유 원료를 사용한 ToT 어선 제조
	- 극심한 기후로 인해 바다에 나가지 못하는 영세 어민들에게 생계수단 지원	- 협동조합 및 어업단체의 역량 강화 - 어업보험 (Weather index insurance)
	- 해안지역의 재난대응 역량 강화	- 어민단체, 지역사회 및 지방정부에 대한 지원
	- 생태계기반의 적응 개념을 적용하기 위해 해안지역의 사회단체의 참여	- 공동체 기반의 해안생태계 관리
거버넌스 (governance)	- 소규모 어민들이 해양기후정보에 대한 역량 및 정보 집근성 증대	- 쉽게 접근 가능한 어업 정보의 제공 - 조기 경보시스템 - 교육, 카운셀링 및 대중인식
	- 높은 파도 위험, 어선 종류, 어선용량에 관련된 규제장치와 정보의 제공	- 해안지역과 작은 섬지역에서 재난 관련 규제를 위한 기후위험에 대한 기술 투입 - 해양과 해안 규제를 위해 기후위험에 관련된 기술 투입 - 해안지역의 재난위험지도 - 규제지역 혹은 해양보호지역에서 어업관리규제

자료: Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.24를 재정리

〈표 52〉 물 부문

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
기반시설 (infrastructure)	- 가뭄과 홍수의 위협을 받는 면적을 고려 - 영향을 받는 가구 수, 농경지 규모, 산업을 기준으로 수용 능력 계산 - 강우 강도 증가하는 지역의 수, 위치 고려	- 댐 건설 - 저류조 설치 - 상류 지역의 식생관리 - 대체 가능한 깨끗한 물 공급원을 마련하고, 빗물 저장을 위한 건설과 구조물 개선
	- 강우 예측에 따른 기술 역량 조정	- 도시의 배수구 조정
	- 해수면 상승의 위협을 고려하여 해안지역의 담수 관리를 조정	- 토양침투 시설 및 조절
기술 (technology)	- 생명공학 기술을 활용하여 기후에 강한 우수 품종의 개발	- 날씨 조절 기술 (강우감소)
	- 담수 수요 충족하기 위해 저수지에 물 저장	- 날씨 조절 기술 (강수감소)
	- 대수층으로 물 보충	- 물 주입 기술
	- 가뭄 지역에 실시간 물 배급	- 누수를 감지하고 물 소비량을 파악하는 기술
역량구축 (capacity building)	- 가뭄 기간에 물 자원을 이용하고 관리하기 위한 대중인식의 증가	- 대중인식의 증대 - 훈련, 홍보 등을 통한 지역사회 역량의 증가
거버넌스 (governance)	- 적응형 엔지니어링 설계, 기술표준, 기반시설의 개발 또는 개선	- 국가건물과 작동기준의 개정에 기술 투입
	- 유역 내 지하수보호구역(KLA)의 결정, 유역 내 산림 재조림 및 산림 이용 제한	- 지하수보호구역(KLA) 규제에 대한 정책에 기술 투입
	- 가정, 농업 및 산업의 물 수요를 충족하기 위한 물 이용성을 높이기 위한 수자원 관리	- 기후변화 적응형 식수 공급시스템을 위한 마스터플랜 개발 규범, 표준, 절차 및 기준 발간
	- 환경질을 향상하기 위한 물자원 관리	- 환경적으로 안전한 물 확보

자료: Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.21을 재정리

〈표 53〉 농업 부문

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
기반시설 (infrastructure)	- 가뭄과 작물 실패가 빈번한 농업 중심지 지역의 농업용수 요구량 충족	- 관개에 필요한 댐, 저수지, 저류지 건설 - 관개 네트워크의 건설 및 유지 관리 - 강, 댐 및 기타 저수지의 정상화 - 배관 및 얕은 우물, 점적 관개 및 스프링클러 관개 시스템
	- 물과 토양보존으로 건조하고 중요한 토지의 토양특성을 개선하여 물을 더 잘 보전	- 빗물 수확을 통한 가뭄 조건에서의 파종 시간 연장 (통합형 소형 저수시설) - 유기질 비료 사용을 늘리고 화학 비료 사용 줄이기 - 폐광 지역 및 중요 토지의 모판에 코코피트 사용

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
기술 (technology)	- 생명공학기술을 활용하여 가후에 강한 우수 품종을 개발	- 기후 스트레스와 병충해에 강한 우수한 품종의 식물 개발. - 홍수, 가뭄, 염분, 해충에 강한 쌀 품종 개발. - 특정 미생물을 사용하여 고염분 저항성 쌀 품종 개발. - 극한 기후에 견디는 고영양 덩이줄기
	- 기후영향과 식량안보를 고려한 농업혁신 및 기술강화	- 정밀 농업 및 스마트 농업을 위한 기술 활용. - 농경지의 수분 함량과 토양 화학을 파악할 수 있는 센서(비디메트리/드론/CCTV 등) 사용. - 토지의 물 균형과 식물 영양분을 모델링하고, 영양분과 물 부족 지점에 대한 지리정보시스템 개발 - 토지 특성에 따른 급수 및 비료 도구의 자동화
	- 식물성장을 파악하고 물과 영양 사용량을 기록하는 기술의 채택과 수정	- 모디스(Modis)와 센티넬(Sentinel)-2 이미지를 활용한 논의 모니터링
	- 가뭄을 피하기 위해 계절 예측에 따라 식재 시기를 조정	- 경작일정통합정보시스템(Integrated planting calendar information system) - 계절과 지역이 적절한 작물 상품에 적합한지 파악 - 농업을 위한 기후예측
	- 기후영향을 고려한 주요 상품(쌀) 외에도 식량생산을 늘리기 위한 농업 혁신 강화	- 높은 염분을 견디는 염수성 틸라피아(tilapia) 개발 - 기후 스트레스에 강한 영양가 높은 풀리 개발 - 더위 스트레스 극복을 위한 가축 사료의 품질 개선 - 더위 스트레스에 대응할 수 있는 가축 백신 개발 - 기후 스트레스에 강한 우량 가축 유전자 개발
	- 기술을 사용하여 건기에 농경지에 관개용수를 공급하여 쌀 생산량 증대	- 농업용 저수지를 보충하고 식량 생산 중심지의 가뭄예측을 위한 기상조정기술 - 태양열 워터펌프.
역량구축 (capacity building)	- 작물을 심는 시기와 농업 관행을 결정하는 데 유용한 기후정보에 대한 농부들의 이해 증진	- 기후현장학교
	- 농민들이 혁신 및 농업기술(기후에 강한 우수 품종, 정밀 농법, 재배 달력, 농업정보 시스템)을 활용할 수 있도록 교육	- 농업인 단체 등에 대한 지원 및 촉진
	- 기후 스마트 농업 전략과 관련된 농업 비즈니스에 대한 이해도	- 농업기업에 대한 지원 및 촉진
	- 기관의 역량과 농업 인적 자원을 향상	- 농업기후정보시스템, 데이터베이스 관리, 정밀 농법 구현과 관련된 농업기관(직업)의 임원 및 구성원 교육
거버넌스 (governance)	- 물과 비료(시비) 사용의 효과를 개선하여 작물 생산성, 비용 효율성을 높이고 온실가스 배출을 저감	- 전략적 농경지에 정밀 농법 적용 - 논에 간헐적 관개 적용 - 농업폐기물(가축분뇨)를 식물에 활용 - 한 농지에 여러 종류의 식물을 통합 재배.

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
	- 기후스마트 농업전략의 일환으로 통합 농업 데이터베이스를 개발	- 농지개발의 위치 및 특성의 지도화(기후변화의 부정적 및 긍정적 영향 모두) - 데이터 및 정보자원의 지도화 - 농업부문 기관 간의 협력 강화
	- 기후 실패 발생 시 농지에 대한 대체 금융을 제공	- 기후기반의 농업보험 - 농업 투자 상품의 금융 및 제조 활용 장려
	- 기후스마트 농업전략에 따라 유통 및 농업 시장 강화	- 농업 비즈니스 체인 관련 규제의 검토 및 강화 - 새로운 농업시장 창출(연구자와 기업, 기타 농업기업가 간의 농업혁신 기술거래). - 통신 사업자와의 협력. - 마을소유기업(BUMDes) 및 농업 분야의 중소기업 강화 - 기후와 환경을 고려한 운영표준(ISO)을 적용

자료: Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, 22~23을 재정리

〈표 54〉 건강 부문

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
기반시설 (infrastructure)	- DHF의 취약성이 높은 위치에 적절한 인프라를 구축	- 건물 보건기준을 준수하는 주택 및 건물
	- 보건시설의 수용 능력을 계산할 때 잠재적인 DHF 발생 위치를 고려	- 보건시설의 수용능력을 증대
	- 발병 지역의 특성에 따라 환경보건 강화	- 지역사회기반 위생(STBM) 구현 - 깨끗한 물과 최소한의 생계수단 제공 - 포깅(Fogging)(뎅기열 매개체 박멸) - 오픈스페이스(RTH) 추가 확보
기술 (technology)	- DHF 발생 정보 및 조기 경보 시스템의 가용성	- 발생 예방을 위한 DBD-Klim 조기 경보 및 정보 시스템 개발(일일 보고 시스템). - 데이터 및 정보 완성
	- 잠재적 매개체 매개 질병 발생 모델링(감염 건수 및 기간)	- 기후변화 질병의 건강 생체 모니터링
역량구축 (capacity building)	- 기후변화 질병에 대한 지역사회, 특히 취약 계층의 이해 증진	- 기후변화의 영향에 대한 조기 교육 - 초급교육과정(자연과학)에 공중보건 및 기후 커리큘럼 추가 - 건강 촉진자 및 주만틱(wiggler 감시)을 위한 기후위험 지식 향상 - 잠재적 발병 지역에서 예방 및 질병 통제에 대한 인식 확산 및 인식 제고

전략부문 (Cluster)	이행방안 (Delivery Strategy)	개입방안 (Indicative Intervention)
거버넌스 (governance)	- 예상되는 DHF 발생 징후에 따라 예방 및 전파 통제를 위한 법과 프로그램을 활성화	- 개정된 질병예방지침 - 질병 예방 프로그램 현장 점검 - 건강건물표준화(Healthy building standardization) 조정
	- DHF 발생 예방/대응에 있어 지역사회 기반 적응을 극대화	- 뎅기열 매개체 전파를 방지하고 깨끗한 물을 공급하기 위한 간단한 기술 사용(DBD캡)
	- 가정 기반 적응 (가정 규모의 취약성을 줄이기 위해 지역 사회의 적극적인 참여).	- 가구단위에서 건강부문의 기후변화 적응: - 가족복지에서 여성(가정 및 이웃) - 지역 청소년 커뮤니티 - 기타 마을 단위 커뮤니티

자료: Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.25를 재정리

2) 인도네시아의 재난관리 주무관청: 재난관리청[6)]

현재 인도네시아의 국가재난관리 기관은 Indonesian National Board for Disaster Management(BNPB; Badan Nasional Penanggulangan Bencana)이며, 2007년 인도네시아의 Number 24 법령에 따라 재해 발생 전, 재해 발생 시, 재해 발생 후의 3단계로 구분하여 그 역할과 책임을 명시하고 있다. 지방정부의 재난관리는 각 province와 regency의 재난관리청(BPBD; Badan Penanggulangan Bencana Daerah)에서 관리하며, BPBD는 BNPB의 하위기관으로써 BNPB와 동일한 역할과 책임을 지닌다. 이에 따라 인도네시아의 법률상 홍수 예·경보시스템은 재해 발생 전 재난 대비 대책의 하나로써 BNPB 및 BPBD와 밀접하게 연관되어 있으나, 홍수 예·경보시스템은 수자원에 대한 전문적 지식 및 유역개념의 통합관리가 이루어져야 하므로 BNPB에서 단독으로 수행하기에는 한계점이 존재한다.

이와 별개로 유역관리청(BBWS)은 유역·하천 모니터링, 홍수분석, 통합 유역관리 등의 업무를 담당함으로써 홍수 예·경보 시스템의 운영 측면에서 유역관리청과 BPBD 두 기관으로 이원화되어 있는 상황이다. 즉, 현재의 경우 홍수 예·경보를 위한 수문자료 수집, 홍수분석 및 예측업무는 유역관리청의 소관이며, 수집된 수문자료 및 분석결과를 주민에게 전달하는 경보발령 업무와 피해조사 및 복구 등 사후관리는 BPBD가 주관하고 있는 실정이다. 이는 기존 홍수 예·경보시스템 운영실적이 없는 인도네시아의 현실에서 비롯된 것에서 기인한다.

6) KOICA 인도네시아사무소(동남아 2실), 2019, 「인도네시아 찌따룸강 유역 홍수 예·경보 시스템 구축 2차 사업(2020~2023 기본계획」, p.34

3) 자카르타주 '저탄소개발계획' 수립 사례[7)]

① 계획수립의 개요

인도네시아에서는 자카르타주가 국가의 온실가스 감축목표 달성을 돕기 위해 기후변화 완화 활동과 적응 활동을 통합하는 지역 차원의 종합적 규제정책인 '지역 저탄소 개발계획'을 처음으로 수립하여 기후변화 의제를 지역개발과 연계하고 있다. 또, 인도네시아는 파리기후협정에 의거해 2030년까지 온실가스 최소 29% 감축하고, 국제사회 지원 시 최대 41% 감축하는 국가 온실가스 감축목표를 수립하였다.

그러나 중앙정부와 국제사회의 이러한 노력에도 불구하고, 지방정부 차원에서 다양한 이해관계자들을 포괄하고 참여시키는 절차를 마련하는 것이 그동안 난제로 작용하였다. 특히, 중앙정부와 지방정부 사이에 수직적으로 기후변화 관련 활동을 통합하고 동기화시키는 것이 국가 온실가스 감축목표 달성에서 제일 중요한 요소이다. 이에, 중앙정부는 지방정부에 자체적인 온실가스 감축목표를 포함한 저탄소개발계획을 자발적으로 수립할 것을 권고하고 있다.

자카르타주에서는, 「기후변화에 대응하는(회복탄력적인) 지역 저탄소 개발계획」(Climate Resilient Regional Low Carbon Development Plan)에 관한 주지사 행정령(2021년 90호)을 수립하고 상세 계획안을 포함하였다. 이는 자카르타의 기후변화 완화(mitigation)와 적응(adaptation) 활동을 통합하는 지역 차원의 종합적 규제정책이다. 아니스 바스웨단 자카르타 주지사에 따르면, 자카르타는 인도네시아에서 '2020~2024 국가중기개발계획'에 대응하는 저탄소 개발계획을 수립한 첫 번째 주이며, 이 계획을 통해 처음으로 기후변화에 대응하는 활동이 법적으로 규제되는 지역이다. 자카르타주의「지역 저탄소 개발계획」은 파리기후협정 및 인도네시아의 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여하고자 하는 자카르타의 적극적 정책이며, 특히 종종 덜 중요하게 여기는 기후변화 적응 활동을 강조하고, 기후변화와 연계되는 지역개발을 핵심 정책으로 편입시키는 것이 목표이다. 이는 기후변화로 야기되는 재난/재해 취약 지역을 줄여 지역사회의 적응력을 향상시키는 것을 핵심으로 한다.

② 계획의 주요 내용

자카르타주 정부는 자카르타를 기후변화에 대응하는(회복탄력적) 도시로 조성하고, 2030년까지 온실가스 최소 30% 최대 50% 감축, 2050년까지 온실가스 배출 제로(0)를 목표로 설정하였다. 에너지, 폐기물 관리, 농림수산업 등은 자카르타의 주요 온실가스의 직간접적 배출원으로, 2020년

7) 서울연구원, 2022, 세계도시동향, 제526호 (https://www.si.re.kr/node/66100)

연간 온실가스 배출량은 약 5,000만톤CO2eq에 달한다. 특히 에너지 부문 또는 전력 생산 시 화석연료 사용, 가정용·산업용 전력 사용, 교통 부문이 온실가스 배출의 큰 부분을 차지하고 있다.

여기서 기후변화 완화 활동은 에너지, 농림수산업, 폐기물 관리, 산업공정 등 4개 부문 총 11개 활동으로 구성하였으며, 그 내용은 〈표 55〉와 같다.

〈표 55〉 자카르타 기후변화 완화 활동

부문	활동	세부내용
에너지	에너지 효율성 제고	- 정부청사 및 민간 건물에 녹색건축 원칙 적용, 에너지 효율적 이용 및 보존 - 에너지 절약 가로등 설치 - 녹색건축 건물주에게 인센티브 제공 - 기존 정부청사를 녹색건축으로 전환 - 1년 3회 정부청사 조명 소등 행사 개최
	재생에너지 이용 확대	- 옥상 태양광 패널 설치 - 지역에너지 일반계획을 통한 재생에너지 이용 확대 로드맵 수립
	보다 친환경적인 연료로 교체	- 간선급행버스에 전기차 도입 - 정부 공용차량으로 전기차 이용 장려 - 전기차 지원 인프라 개발
	대중교통 이용 확대	- 대중교통 간 정거장 통합 최적화 - 지하철 및 경전철 건설 완료 - 대중교통 지향형 개발(TOD) 추진 - 도심 혼잡통행료 및 높은 주차요금 부과/시행을 위한 규제정책 수립
	보행 및 자전거 이용과 기존 대중교통수단의 통합	- 자전거 이용자를 위한 노선 및 시설 조성 - 보행로 최적화 및 보행자 지원시설 조성 - 저탄소구역 조성
농림 수산업	온실가스 흡수 확대	- 식재 보전 모니터링시스템 - 공원 및 녹지 오픈스페이스 조성 - 지역사회 옥상정원 조성 장려 - 공지를 녹지 오픈스페이스로 조성 - 도시농업 프로그램 개발 및 최적화
폐기물	발생원별 쓰레기 배출량 감소	- 쓰레기 재활용센터 설치 확대 - 3R(감소, 재사용, 재활용) 활동 최적화 - 주기적인 쓰레기 분리수거 및 운송 시행
	오폐수 처리 최적화	- 정화조 이용 최적화, 노상분뇨 근절 - 오폐수 처리시설 최적화
	쓰레기 처리 과정 향상	- 쓰레기 소각 발전소 건설 - 투자 재원 확보를 위한 데이터 수집
산업 공정	친환경적인 에너지 활용	- Euro 4 기준에 맞는 연료 및 가스로 교체
기타	기후변화 외교	- 인도네시아 타 도시들도 저탄소개발계획 수립에 동참하도록 장려 - 저탄소개발을 지원하는 개발프로젝트에 민간 참여 분위기 조성 - 기후변화 완화 및 적응 활동부서의 역할 최적화

기후변화 적응 활동의 경우, 기후변화로 인해 발생하는 재난·재해에 취약한 지역사회의 적응력을 향상하기 위해 보건, 수자원, 해안·도서지역, 에너지, 식량안보, 주거지역, 인프라 등 7개 부문 총 11개 활동으로 구성되어 있으며 아래 〈표 56〉과 같다.

〈표 56〉 자카르타 기후변화 적응 활동

부문	활동	세부내용
보건	보건서비스 시설 보급 및 개선	- 환자 대응을 위한 신속한 앰뷸런스 보급 - 재난관리 시 산소호흡기 제공 - 공중보건 위기 시 양질의 보건서비스 접근성 확대 - 지역사회의 보건서비스 범위 확대 및 역량 강화 - 신체장애가 있는 장애인을 위한 기구 지원
	보건서비스 관리	- 영유아의 기초 면역 100% 달성 - 영유아, 취학아동, 노인을 위한 표준보건서비스 관리 - 잠재적 특이 질환 및 특이사건 조사 관리 - 통합 긴급관리시스템을 통한 병원 이송 전 긴급서비스 관리
수자원	지역사회의 보건 프로그램 교육 및 인식 제고	- 건강한 지역사회 보건 활동 장려 - 고아, 노숙자, 독거노인, 장애인을 위한 사회적 지원
	생활하수 관리	- 생활하수 관리 시스템 조성 및 향상
해안 및 도서 지역	침투수 관리	- 빗물을 신속하게 땅으로 침투시키는 침투 우물 조성
	홍수 통제활동	- 저수지, 댐, 연결수로, 교량, 수문 등 조성 - 홍수통제 펌프 설치 - 하천 수자원 관리를 위한 토지 매입
	해안 및 도서지역 관리	- 맹그로브(mangrove) 나무 등 해변 수종 식재 - 기후변화에 적응하는 어업센터 및 마을 구축 - 해안/도서지역 관리를 위한 인센티브 및 역(逆) 인센티브에 관한 규제 수립
에너지	친환경적인 에너지 활용	- Euro 4 기준에 맞는 연료 및 가스로 교체
식량 안보	식량안보 제고	- 양식이 가능한 물고기 종자 보급 - 채소 경작에 수경재배 도입 - 수산 양식 시설 및 인프라 보급 - 어미 나무 및 나무 종자의 유지 관리
주거 지역	주거지역 유지 관리	- 아파트 건설 - 자가주택 구입이 불가능한 사람들을 위한 저렴 주택 접근성 향상 - 주거지역 인프라 개선 - 노후 아파트 재개발
인프라	기후변화에 회복탄력적인 인프라 조성	- 재난/재해 시 인프라 복구 및 재건 - 도로, 교량, 교차로, 보행로 등을 수시로 유지 관리 - 녹색건축 장려

4) 자카르타주 '100대 회복 탄력적 도시' 프로그램[8)]

다양한 도시문제를 장기적·지속적 관점에서 예방하고 대응 능력을 키우기 위해 록펠러재단의 '100대 회복 탄력적 도시' 프로그램에 참여한 인도네시아 자카르타주는 최근 '준비된, 건강한, 연결된'이라는 3가지 주요 개념과 그 세부전략으로 구성된 '자카르타 회복 탄력성 전략'을 발표하였다. 특히, 자카르타는 2016년 5월부터 '100대 회복 탄력적 도시' 프로그램에 참여하고 있는데, 이 록펠러재단 프로그램(2013년 ~ 2019년)[9)]은 도시 간 국제 네트워크이자 21세기 들어 점점 잦아지는 물리·사회·경제적 도전에 대응해 세계 여러 도시의 회복 탄력성 향상을 지원하는 프로그램이다.

자카르타의 도시 회복 탄력성 전략은 크게 세 가지 주요 개념으로 구성되어 있다. '준비된(Ready) 자카르타', '건강한(Healthy) 자카르타', 그리고 '연결된(Connected) 자카르타'이다.

〈표 57〉 자카르타 도시 회복 탄력성 전략

구분	세부 추진 내용
준비된 자카르타	- 기후변화 영향이나 재난재해 위험 등 각종 압력과 충격들을 완화(mitigate)하고 그에 적응(adapt)하는 능력을 갖춘 도시 - 2030년까지 자카르타 전역의 취약성 수준을 '낮음' 80%, '보통' 20% 수준으로 낮춤
건강한 자카르타	- 깨끗한 식수·오수와 지속가능한 폐기물관리 서비스로의 접근성을 보장하는 도시 - 2030년까지 깨끗한 식수 제공 100%, 2050년까지 오수 관리 100%, 2024년까지 노상 배변 근절, 2025년까지 환경 친화적인 쓰레기 배출 관리 100% 달성
연결된 자카르타	- 모든 시민이 이용할 수 있는 저렴한 대중교통과 서로 의사소통할 수 있는 네트워크를 제공하여 연결성과 이동성이 향상되는 도시 - 2030년까지 자카르타 대광역권 대중교통 이용률 60%, 2030년까지 시민의 공공정보체계 접근도 100% 달성

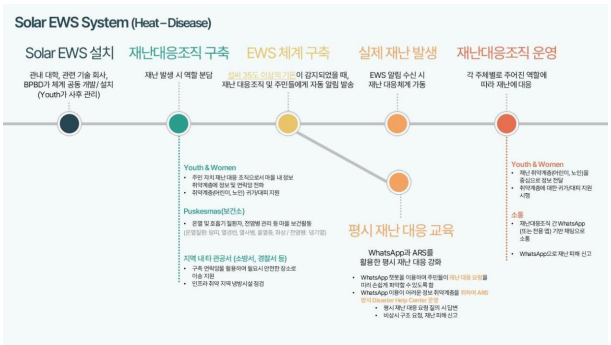
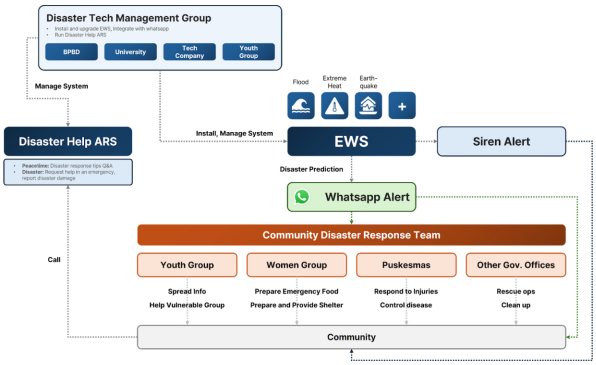
- 자카르타의 도시 회복 탄력성 전략은 3개 주요 개념 아래 총 12개 방향과 32개 전략을 구체적으로 수립해 장기적으로 추진되고 있으며, 회복 탄력성의 비전은 '공공서비스와 혁신으로 모든 시민에게 안전하고 건강하고 풍요롭고 행복하게 살 평등한 기회를 제공'으로 정의하고 있다. 또한, 네트워크 회원 도시의 '회복 탄력성 최고책임자(Chief Resilience Officer)'를 임명하고 회복 탄력성 전략 수립 개발, 네트워크 활동 등을 지원하고 있다.

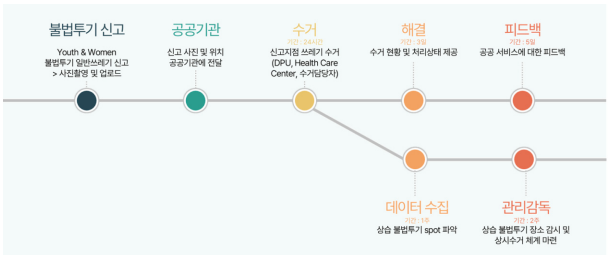
8) 서울연구원, 2019, 세계도시동향, 제465호 (https://www.si.re.kr/node/62524)
9) 이 프로그램에서는 회원 도시들의 지속적인 회복 탄력성 활동에 총 8백만 달러(97억 원)를 지원하기로 결정

3. 현지 리빙랩 결과를 통한 가이드라인의 고려 요소

인도네시아 현지의 두 곳(Meteseh, Tambakrejo)에서 리빙랩을 실시한 결과로, 복합재난에 대한 대응 측면에서 중요하게 고려할 문제점을 도출하고 그에 대한 대안을 다음과 같이 제시하였다(<표 58> 참고).

<표 58> 현지 리빙랩을 통한 문제 도출과 대안 모색

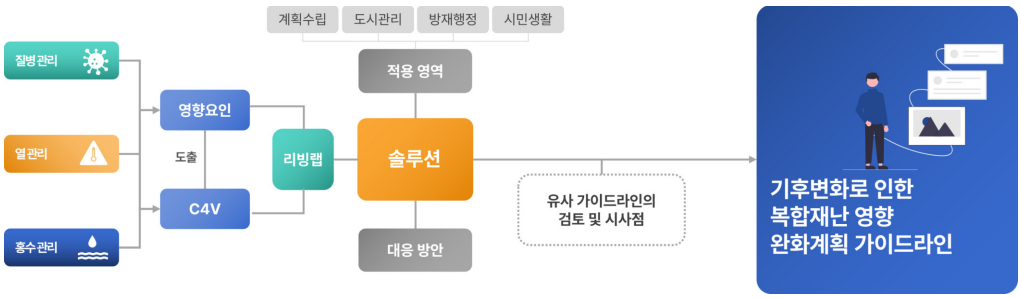
핵심문제	해결대안
(M) 적절한 수자원(가정용수) 공급 불가능 - 인프라 부족으로 인한 품질 문제, 물 부족 등	- 물 정화 필터 설치 - 옥상 녹화 및 물 정화 장치 설치 - 빗물 〉 Roof Garden 〉 저장소 〉 정화 필터 〉 생활용수로 사용
(M, T) 늦은 재난 경보 시스템 (M, T) 정보 부족(이미 정부기관에서는 재난/질병에 대한 정보를 제공하고 있으나 디지털 소외계층의 정보 접근 한계 문제)	- 재난 및 건강 관련 디지털 격차 해소 및 정보 접근 확대 필요 - 커뮤니티 기반 재난대비 정보시스템 구축 (1) 태양열을 활용한 Solar EWS 설치, (2) 재난대응을 위한 커뮤니티별 재난대응 조직 구축, (3) Solar EWS 감지 후 자동 알림 발송 체계 구축(사이렌으로 마을 내 경보, Whatsapp을 통해 재난대응조직에 메시지 및 마을 주민에 대피 메시지 전송), (4) 재난대응조직(마을 내 Youth 그룹중심) 교육 및 운영, 평시 재난대응 교육(Whatsapp 챗봇 제작) - 예시(열 재난)  - 시스템 알고리즘 

핵심문제	해결대안
(M, T) 쓰레기 투기 및 소각	- 쓰레기 처리를 위한 WASTE BANK는 재활용 수거를 대상으로 함 - 일반쓰레기에 대한 수거율이 낮다보니, 이에 대한 관리 필요 - 특히, 강/바다/저수지에 무단 투기한 쓰레기 처리가 필요하여 자동으로 쓰레기를 수집하는 Waste shark 등을 도입 - 지역 내 일반쓰레기 수거담당자(저소득층) 및 폐기물 수거비용지급하여 관리 - 불법투기 신고 어플리케이션을 개발하여 주민 주도의 불법투기 신고 (사례: 서울시 스마트 불편 신고)-- 지역 커뮤니티 활동과 연계 - ** 순서 (1) 불법투기 신고 어플리케이션 보급(메뉴얼 및 교육 병행) 및 쓰레기 수거 담당자 지정 (2) 자동 쓰레기 수거 드론 보급 (3) 가정별 교육 및 관리
(T) 저지대 및 지반 침하로 인한 배수문제	
(M) 무분별한 개발로 인한 녹지 공간 감소(홍수 속도 증가)	- 빗물정원(rain garden)은 외부 지역에 빗물을 저장하여 물을 다시 사용하고, 지표면 온도를 낮추는 데 영향 - 주택 사이 자투리 공간을 활용하여 빗물정원 조성 - 커뮤니티는 마을 내 자투리공간(물이 자주 고이고 쓰레기 투기가 빈번한 지역)을 파악하여 빗물 정원 설치 - 공공은 빗물 정원 지원 사업을 시행하고 DPU가 보유한 웅덩이 데이터를 활용하여 빗물이 고이는 지점을 파악하여 지역 주민들에게 정보 전달, 관거 시설 설치 및 유지관리
(M, T) 홍수와 열피해를 줄이기 위한 식재 부족	- 재난 예방 및 피해 저감을 위한 식재 - 주로 물(가뭄, 홍수)에 강한 열대 식물을 식재하여 장기간의 건기에 잘 버틸 수 있고 홍수에 강한 초본류를 식재 - 식재는 아래 기준을 기반으로 구분 (1) 옥상녹화 및 rain garden에 적용 가능 (2) 강 주변에 식재하여 물 흡수 및 배리어 역할을 할 수 있는 식재(+염분에 강한 식재) (3) 건기가 길거나 물이 부족한 지역에서도 잘 버틸 수 있는 식재 - 주민 대상 지역 식재를 위한 지역환경에 대한 이해도를 높이기 위한 교육 진행 - 커뮤니티 대상 공용공지와 유휴부지의 녹지(도시농업, 레인 가든) 관리를 위한 단체 결성 및 식재 활동 진행 - 공공: (1) 단기: 주민들에게 식물, 비료 제공하여 초기 설치 비용 지원, (2) 지속적인 관리를 위한 최소한의 매뉴얼을 제공하여 주민들이

핵심문제	해결대안
	자체적으로 녹지를 조성할 수 있도록 함, (3) (장기) 녹지 모니터링을 통하여 제도가 정착하는 지 관리  **레인가든/옥상녹화 식재 타임라인** 식재 역할: 배수, 토양 정화, 토양 침식 방지, 잡초 억제, 미관 적용 지역 / 식물 종류 / 유형 / 식재 시기 / 정착 기간 / 적용 방식 / 주요 역할 / 세부 역할 / 특징 Mitesoh — Brachiaria decumbens — 초본 — 11월 — 11월~2월 — 옥상녹화 — 홍수 저감, 열섬 완화 — 배수, 침식 방지, 잡초 억제, 토양 정화 — • 오염된 토양에 내성 • 심한 홍수에는 약함 Panicum maximum — 초본 — 11월 — 11월~2월 — 레인가든, 옥상녹화 — 홍수 방지, 열섬 완화 — 배수, 침식 방지 — • 척박한 환경에 적응 • 장기간의 건기에 내성 Paspalum vaginatum (seashore paspalum) — 초본 — 11월 — 11월~2월 — 레인가든 — 홍수 방지, 홍수 저감, 열섬 완화 — 배수, 침식 방지 — • 수변(염수 혜안)에서 생장 • Paspalum distichum는 당수에 안에서자라는 유사종 Tambakrejo — Axonopus compressus (Broadleaf carpet grass) — 초본 — 11월 — 11월~2월 — 옥상녹화 — 열섬 완화 — 토양 정화, 미관 — • 습도가 높은 곳에서 생장 • 그늘진 환경 선호 • 농장의 토양 덮개로 사용 • 염도 내성 낮음 Axonopus compressus (Broadleaf carpet grass) — 초본 — 11월 — 11월~2월 — 옥상녹화 — 홍수 저감, 열섬 완화 — 침식 방지, 미관 — • 습도가 높은 곳에서 생장 • 그늘진 환경 선호 • 농장의 토양 덮개로 사용 • 염도 내성 낮음 Both — Gamba Grass (Andropogon gayanus) — 초본 — 11월 — 11월~2월 — 레인가든, 옥상녹화 — 홍수 저감, 열섬 완화 — 침식 방지 — • 다양한 토양환경에 적응 • 계절성 습지에서 발생 • 침수토양에 잘 적응
(T) 주거 건물의 열 영향 증가	- White Cool Roof: 백색 열가소성막 소재 페인트를 지붕에 칠하는 방법으로 실내온도 4도 절감 효과, 냉방에너지 평균 20% 절감 - 커뮤니티 단위의 지원사업 시행 〉 Cool Roof 적응 교육 〉 지원사업 시행 〉 에너지 소외계층 파악 및 우선 지원(공공에서 지원 사업 시행 시, 에너지 소외 계층이 우선적으로 지원받을 수 있도록 지역 내 여성/청년 커뮤니티가 지원)

제 4절. 가이드라인의 구성

1. 기후변화 영향 완화계획 가이드라인의 구성 틀



[그림 116] 복합재난 대응 가이드라인의 설정 방법과 절차

1) 가이드라인의 목적

본 가이드라인은 지방정부 당국의 기후변화 영향 완화를 위한 정책적 우선순위 결정과 함께, 시민들을 재난으로부터 보호할 수 있도록 재난에 대응한 시민행동요령의 정립을 지원하는 것을 목적으로 한다. 이에, 연구분석에서 도출된 결과를 적용영역(계획, 관리, 행정, 생활)에 배분하고, 그에 따른 고려요소와 대응방안에 대한 가이드라인을 제시한다.

2. 연구부문별 주요 고려사항

1) 질병 부문

인도네시아에서 2045년까지 DHF(Dengue Hemorrhagic Fever, 뎅기출혈열) 질병 사례가 매우 높을 것으로 예상되는 도시는 Pekanbaru, Palembang, Banjarbaru, Banjarmasin, Samarinda, Tarakan, Kolaka, Ambon, Semarang, Bali and Kupang이며, 강우와 온도변화에 의해 말라리아와 폐렴의 가능성은 증가할 것으로 예견[10]되고 있다. 건강·의료 부문에서 기후복원(climate resilience)을 위해 아래와 같은 행위가 필요할 것으로 판단된다.

10) Kementerian PPN/ Bappenas, List of Priority Locations and Climate Resilence Actions, 2021, p.6

〈표 59〉 인도네시아의 기후복원을 위한 건강·의료 분야의 대응 활동

행위 그룹	행위 내용
건강·의료시설의 확대	- 병원, 지역보건센터, 공공의료시설의 수용력 확대 - 주거지역에서 소규모 건강서비스센터를 설치
지역의 환경적 건강성 증진	- 자연과 조화를 이루고 기후변화를 고려하는 통합된 거주지역을 형성 - 주거지역에서 위생시설과 기반시설의 건설 - 상수시설 및 기반시설의 건설 - 모기유충 방지를 위한 단순 기술의 적용

자료 : Kementerian PPN/ Bappenas, List of Priority Locations and Climate Resilence Actions, 2021, 64-65

2) 열 부문

인도네시아는 빠르게 도시화되는 과정에서 고밀도 인구, 열대기후, 해안도시의 특성을 가지고 있기 때문에, 열섬 현상에 대한 완화와 적응이 필수적이다. 그동안 열섬현상에 대응하여 고려된 방안은 도시녹지 확대 및 맹그로브 복원이 대표적으로 존재한다. 여기서 자카르타와 세마랑과 같은 해안도시는 맹그로브 복원의 혜택이 클 것으로 예상된다. 그 외에도 쿨루프 및 반사성 건축 자재의 사용, 블루(blue)-그린(green) 인프라의 결합 방식 활용, 빗물을 포집·저장한 후 녹지공간이나 도로 냉각에 사용하는 시스템 등 다양한 방법과 기술이 도입될 필요성이 존재한다.

3) 홍수 부문

인도네시아의 국가장기개발계획(RPJPN, 2005-2025)에 따른 제3차 국가중기개발계획(RPJMN, 2015-2019)에서 인도네시아의 물관리 중점 분야는 홍수관리, 물공급 및 활용 개선을 위한 정부 정책이행 역량강화, 통합물관리시스템 보급, 물관련 인프라 구축 지원 및 포용적 개발을 위한 소외지역 대상 수자원공급 및 배수체계 지원 등으로 구성[11]되어 있다. 인도네시아의 수재해 관련 문제 대응에는 중앙정부의 국가재난관리청(Indonesian National Board for Disaster Management(BNPB; Badan Nasional Penanggulangan))을 필두로 지방정부의 재난관리청(BPBD; Badan Penanggulangan Bencana Daerah)이 담당[12]하고 있다.

또한, KOICA의 사업을 통해, 찌따룸강 상류 유역(반둥 지역)을 대상으로 1차 사업(2014-2017

11) KOICA 인도네시아사무소(동남아 2실), 2019, 「인도네시아 찌따룸강 유역 홍수예경보 시스템 구축 2차 사업(2020~2023 기본계획」, p.7
12) KOICA 인도네시아사무소(동남아 2실), 2019, 「인도네시아 찌따룸강 유역 홍수예경보 시스템 구축 2차 사업(2020~2023 기본계획」, p.35

년(500만불), '인도네시아 찌따룸강 유역 홍수예경보시스템 개발'이 추진되었고, 1차 사업을 통해 인도네시아 최초로 "실시간" 홍수예경보시스템이 성공적으로 도입되었다. 2차사업으로는 인도네시아 국가 전역으로 확대할 수 있는 표준화된 랜드마크 시스템으로 확장사업이 추진[13]되고 있다.

이용 가능한 물의 감소를 대비해야 한다는 점 또한 고려해야 한다. 2024년에 이미 자바(Java)와 누사 텐가라(Nusa Tenggara)지역에서 이용 가능한 물의 감소할 것으로 예상(자바 439.21㎥/capita/year, 누사 텐가라 1,654.82㎥/capita/year 감소)[14]되었으며, 물 부문에서 기후복원(climate resilience)을 위해 다음과 같은 행위가 필요하다.

〈표 60〉 인도네시아의 기후복원을 위한 물 분야의 대응 활동

행위 그룹	행위 내용
물 저장시설의 공급	- 댐 건설 - 저수지 축조 - 가뭄 대응에 필요한 빗물 저장시설의 개발 및 조정 - 가뭄과 해수유입으로 담수에 영향을 받는 해안 및 도서지역에 물탱크와 저수지의 축조
집수구역의 재정비	- 습지생태계의 보호와 복원 - 숲과 토지를 식생을 활용한 복원 - 고품질의 생산적 산림식생의 공급
기술의 적용	- 가뭄을 예방하고 수계를 보충하기 위해 기후완화 기술의 적용 - 홍수로부터 물 주입(water injection) 기술의 적용 - 과도한 표면유출수에 대비하여 투수 및 흡수 아스팔트를 건설
물 재활용 및 매립기술의 적용	- 군도지역에서 역삼투 담수화(SWRO) 기술의 적용 - 폐수를 정화하는 물 재활용 기술의 적용
물 손실 방지	- 급·배수 관로의 건설, 유지 및 수리 - 관로 누출 탐지기술의 적용
홍수 완화	- 홍수재난 복원력에 필요한 수자원 인프라의 개발과 조정 - 기후변화 적응적 배수체계의 개발 - 하천제방 보호시설의 건설(콘크리트나 나무를 활용) - 저수지, 호수, 수로의 준설

자료 : Kementerian PPN/ Bappenas, List of Priority Locations and Climate Resilence Actions, 2021, 37-39

13) KOICA 인도네시아사무소(동남아 2실), 2019, 「인도네시아 찌따룸강 유역 홍수예경보 시스템 구축 2차 사업(2020~2023 기본계획」, p.44

14) Kementerian PPN/ Bappenas, List of Priority Locations and Climate Resilence Actions, 2021, p.6

4) 통합관리 부문

통합관리 측면에서 효과적인 재난대응을 위해 공공기관간의 협력체계의 구성[15]을 고려할 필요성이 존재한다. 구체적으로는, 재난대응 시 공공조직별 전담 연락관 제도의 신설과 재난대응 매뉴얼의 통합화·간소화 및 디지털화를 통한 현장 활용성 제고 및 재난대응 매뉴얼 상 구체적인 협업 방법에 관한 지침 보강이 필요하다. 유관기관 간 업무 범위와 역할에 대해 사전협의와 조율을 통해 명확성을 제고해야 하며, 재난관리자원공동활용시스템 운영 개선을 통한 공공조직 간 자원공유 내실화 또한 요구된다. 마지막으로 재난안전관리 전문인력의 확충 및 지역 내 재난대응 중추기관으로서의 지자체 재난부서의 위상 제고를 통한 공공조직 간 조정력 강화를 고려해야 한다.

더불어, 효과적인 재난대응을 위해 공공기관-민간조직간의 협력체계 구성도 통합관리 부문에서 고려해야 할 부분이다. 중앙 및 지역재난안전대책본부 구성 시 대표성을 지닌 민간전문 참여의 제도화가 있을 수 있으며, 통합자원봉사지원단 제도 운영방식의 실효성 제고를 통해 효과적인 자원봉사 인력과의 협업이 촉진될 수 있다. 또한 긴급구호 자원 배분 조정을 위해 중앙정부-지자체-민간조직 간 협의체를 운영하고, 중앙 및 지역단위의 재난관리위원회 등 조직에서 재난유형별 위원회의 구성을 통해 민관협력을 활성화할 수 있다. 이 외에도 포털사이트를 활용한 재난상황 및 정보공유 활성화, 자원봉사자에 대한 사전 재난대응 교육 및 훈련 프로그램의 내실화 및 신종 감염병 재난발생 시 병원 등 민간과의 협업체계 강화를 위한 지속가능한 협업 유인책 도입 등이 고려될 수 있으며, 궁극적으로는 지역사회 중심의 재난대응역량 강화를 위한 지역주민·취약계층의 교육 및 교류 활성화와 함께 공공기관-민간조직 간에 정보공유시스템 구축이 필요하다.

15) 한국행정연구원, 2022,「재난대응 과정에서의 협업체계 강화방안 연구」, p.xiv~xv

3. 적용영역별 주요 고려사항

1) 계획수립 영역

도시계획을 통한 도시의 재난대응 도시기반의 구축 측면에서는 용도규제의 교정과, 핵심 인프라의 보강과 함께 복합재난을 고려한 환경개발을 지원하는 도시계획 수단의 도입을 고려해야 한다. 먼저 홍수 범람원, 해안 지역 등과 같은 고위험 지역에서의 건축을 제한하고, 지속 가능한 도시성장을 유도하기 위해 용도규제를 변경할 필요성이 존재한다. 또한 전력망, 수도 시스템, 교통 등 필수 시스템을 강화하여 홍수, 폭염과 같은 극한 기상 조건을 견딜 수 있도록 보강해야 하며, 환경개발 측면에서 저영향개발계획, 기후생태기반시설 설치계획을 도입할 필요가 있다.

〈표 61〉 복합재난대응을 위한 토지이용계획의 구성

계획영역	계획내용	세부내용
토지이용	공간구조 및 용도배치	□ 자연적인 유출경로를 고려한 공간배치 □ 폭우취약성을 고려한 용도배치 □ 재해취약지역 보전계 용도지역 전환 또는 유지의 원칙 (예, 녹지지역 및 비도시시지역) □ (구역지정) 재해저감대책 수립을 위해 재해취약지역을 포함하여 구역지정 및 조정 □ (공동개발) 재해취약지역의 공동개발 지정 및 재해저감대책 수립 □ (특별계획구역) 특별계획구역 계획시 방재시설의 기부채납, 우수유출저감시설 검토 □ 토지매수 및 주민이주(공공 토지매수, 개발권 매입, 기성시가지내 소규모 취락지구 이전 검토, 대체토지 마련 등) □ 방재지구 지정 검토
	회피 및 이격	□ 주민거주가 적은 지역 내 폭우취약지역 신규개발 억제, 보전 □ 가급적 원형을 보전하고, 수체계와 연계한 오픈스페이스 계획 □ 하천변 저지대 수퍼제방 조성 □ 하천변·연안변·급경사지 등과 이격(set back) 및 완충지대 조성
	입지 및 시설에 대한 제한	□ 도로·지하도로·철도·공항 등 교통시설은 폭우취약지역 내 설치 제한 □ 학교·공공청사·종합의료시설은 폭우취약지역 내 설치 제한 □ 유원지의 야영장 및 숙박시설·반지하주택·대피시설은 폭우취약지역 내 설치 제한 □ 공원에 저류시설을 설치하는 경우, 가급적 보호하고자 하는 폭우취약지역 직상류에 설치 □ 화장시설·공동묘지·납골시설·자연장지는 지형상 배수가 잘되고 붕괴나 침수의 우려가 없는 장소에 설치 □ 투수성 및 침식성이 강한 토양의 개발 최소화 □ 전기공급설비·가스공급설비·유류저장 및 송유설비는 침수 및 산사태 등 재해발생 가능성이 적은 지역에 설치

〈표 62〉 복합재난대응을 위한 기반시설의 구성

계획영역	계획내용	세부내용
기반시설	공통	□ 방재시설 확충 (예, 방수설비 용량 강화, 지표면 저류, 지하저류조 설치 등) □ 공공시설의 방재활용 가능성 검토 □ 배수시설 개선(하천정비, 배수체계 개선, 배수능력 제고 등) □ 시설물 유지관리 계획 수립(시설 점검 · 정비 · 보수 · 보강, 유지관리계획 수립 등) □ 사면배수체계 강화(지표수 및 지하수 배수체계 개선) □ 수해상습지역에는 가급적 운동장 · 공원 등 공공용지 확보 □ 주차장 표면을 포장하는 경우, 투수성 재료, 잔디블록 사용
	도로	□ 산사태 방지시설 직하류 도로의 저류시설 설치 □ 광역도로변(4차선이상) 생태수로 설치 □ 가로변 화단으로 우수유입을 위한 경계턱 제거 □ 도로부 배수처리 강화 □ 인접 시가지 침수 방지를 위한 횡단배수로 및 지하저류조 설치 □ (보행 및 자전거도로) 빗물이 잘 스며드는 투수성 재료를 사용하고, 인접 시가지 침수 방지를 위한 횡단배수로 및 지하저류조 설치
	공공시설	□ (학교) 고지대 학교의 경우 하류 시가지 침수방지를 위한 교문 횡단배수로 및 지하저류조 설치, 재해발생 시 주민의 일시적 체류를 위한 시설 설치 □ (운동장) 폭우취약지역 내 실외운동장의 경우 주변지역의 우수 저류, 재해 발생 시 주민의 일시적 체류를 위한 시설 설치 □ (공공청사) 폭우취약지역 및 주변지역에 설치할 경우 저류시설 설치, 재해 발생 시 주민의 일시적 체류를 위한 시설 설치, 핵심 공공청사는 전체의 공간구조를 고려하여 재해로부터 안전한 지역에 단독형으로 설치
	주차장	□ 폭우취약지역 내 주차장 지하 저류시설 설치 □ 주차장 표면을 포장하는 경우에는 잔디블록 등 투수성 재료 사용 □ 폭우취약지역 내 주차장 주변 생태수로 설치
	공원	□ 공원 내 저류시설 설치 □ 공원 내 광장·운동시설공간 등의 지표면 저류

출처 : 국토연구원, 2019,「대형재해에 대비한 도시복합재난 관리방안 연구」, p.105~109를 수정

2) 도시관리 영역

도시관리 영역에서는 크게 세 가지-자연기반의 도시관리, 통합 재난관리 및 재난 후 복원능력 부분에서 각각 고려사항이 존재한다. 먼저 자연기반의 도시관리는 도시 내부와 주변의 자연환경을 연계하거나 생태계와 녹색인프라를 도시 지역에 통합하는 방식으로 도시를 계획-개발-관리하여 지역의 환경문제를 해결하고 주민들의 삶의 질을 개선하여 재난에 대한 복원력을 높이고 환경영향을 줄이며 주민들에게는 여러 사회적, 경제적, 생태학적 이점을 제공하는 것이 필요하다. 통합 재난관리는 정부, NGO, 민간 부문 간에 재난관리자원과 재난대응서비스를 신속히 시행할 수 있는 관리체계를 구축해야 한다. 재난 후 복원능력 측면에서는, 재난 피해를 입은

인프라를 더 높은 기후 회복력을 갖춘 상태로 업그레이드할 수 있도록 원칙의 설정을 고려해야 한다.

3) 행정관리 영역

행정관리 측면에서 재난에 대응하기 위해, 단계별 행정이행 사항의 규정이 고려되어야 한다. 재난은 단계적으로 구분되어 대응되기도 하는데, 한국은 1970년대 미국 주지사협의회(National Governors' Association; NGA)에서 "종합적 재난관리(comprehensive emergency management)의 일환으로 재난관리의 4단계, 완화(mitigation)-대비(preparation)-대응(response)-복구(recovery)"를 정립한 것을 표준 사례로 활용하여 재난안전관리의 과정으로서 예방-대비-대응-복구 사이클을 활용하고 있다. 이는 2004년 「재난 및 안전관리 기본법」 제정 이후 국가의 공식적인 재난관리 과정으로 규정된 상태[16]이다. 반면, 영국에서는 총 6단계의 과정으로서 통합재난관리(integrated emergency management; IEM)를 공식적으로 사용하고 있는데, 이는 예측(Anticipation), 평가(Assessment), 예방(Prevention), 준비(Preparation), 대응(Response), 복구(Recovery)로 구분된다.

이와 함께, 기후변화로 인한 복합재난에 대한 방재능력을 형성하기 위해 다음과 같은 행정 관리 체계를 구축할 필요가 있다. 먼저 위험평가 및 계획이 수립되어야 한다. 이를 통해 잠재적인 위험과 취약성을 식별하고 평가하며, 프로토콜, 절차 및 책임을 명시한 종합적인 비상 계획을 개발해야 한다. 또, 조기경보체계를 구축하여 기후 관련 위험을 예측하고 모니터링하는 기술을 구현하며, 조기 행동을 가능하게 하기 위해 커뮤니티와 당국에 적시에 경고를 전파하는 것이 이뤄질 수 있어야 한다.

더불어, 커뮤니티 참여 및 교육도 중요한 요소로써, 커뮤니티에 재난 대비 및 대응에 대한 교육과 훈련을 제공하고 준비 상태를 확인하기 위한 훈련과 시뮬레이션을 실시해야 한다. 재정지원 메커니즘에서는, 지역주민과 지역기업들이 재난에 따른 경제적 영향을 줄일 수 있도록 국가가 주도하고 지방정부가 참여하는 형태의 재난구호기금 및 기후보험프로그램을 마련할 수 있으며, 이와 함께 인프라 및 자원관리 행정체계를 구축해 재난 대응을 위한 인프라를 강화하고, 식량, 물, 의료용품 및 피난처와 같은 재난관리자원의 가용성과 효율적 공급체계를 제공할 필요성이 있다.

16) 한국행정연구원, 2016, 「국가 재난안전관리의 전략에 대한 연구」 p.132

〈표 63〉 한국의 재난관리자원의 구분

대분류	
자재	응급조치 및 복구에 동원 가능한 기본적인 재료
장비	응급조치 및 복구 등에 동원되는 장비
인력	전문적인 기술과 기능을 보유한 인적자원
중분류	
구조구급, 의료방역, 긴급생활안정지원, 에너지기능복구, 시설응급복구, 긴급통신지원, 재난현장환경정비, 교통대책, 사회질서유지, 자원봉사, 기타 기능	
소분류	
자재	방열복, 염화칼슘, 오일펜스, 응급구호세트 등 38종
장비	굴착기, 덤프트럭, 펌프, 고소작업차, 크레인 등 124종
인력	한국해양구조협회, 의용소방대, 자율방재단 등 19팀

자료: 행정안전부, 2017,「재난관리 공동활용시스템(DRSS) 가이드 북」, p.3

4) 시민생활 영역

시민생활 영역에서는 무엇보다 기후변화 및 기후재난에 대한 관심을 가지고 기후친화적 인식이 형성될 수 있도록 활성화하는 것을 고려해야 한다. 먼저 정치적 참여로는, 지역에 영향을 주는 정치인과 기업이 기후친화적인 정책과 비즈니스를 추진하도록 하여 활성화할 수 있다. 또한, 쓰레기 무단투기 금지, 물과 에너지 절약, 대중교통 이용 또는 자전거 타기 등 친환경적 생활방식이 채택될 수 있도록 기후친화적 인식을 형성해야 한다. 궁극적으로는 지역이 기후재난에 따른 대응전략을 수립하고 적절하게 시행할 수 있도록, 지역사회기반의 참여형 재난대응에 동참하고 대응행위를 실천하는 인식을 형성하는 것이 고려되어야 한다.

제 5절. 가이드라인의 주요 내용

1. 총론

1) 총칙

① 가이드라인의 개요

본 가이드라인은 인도네시아 자카르타와 세마랑 해안도시벨트의 복합재난에 대응하기 위한 계획 및 대응전략 수립을 목적으로 한다. 또한, 가이드라인의 내용은 인도네시아의 법률과 제도에 따른 것이 아닌 연구결과에 따른 제안사항으로서, 향후 당국의 법률 및 제도에 따라 수정 및 보완이 가능하도록 구성한다.

2) 가이드라인의 성격

① 가이드라인의 범위

본 가이드라인의 공간적 범위는 자카르타와 세마랑을 연결하는 해안도시벨트이며, 내용적 범위는 질병, 열, 홍수로 인한 복합재난 대응전략에 따른 관련 집단의 역할과 행위로 제한한다. 가이드라인은 총론, 각론, 통합관리로 구성되며 각론은 연구내용에 따라 질병, 열, 홍수로 구성된다. 통합관리 부문에서는 각론의 대응방안의 효율적 추진을 위한 통합계획과 관리행정 거버넌스의 구성방안을 제시한다.

② 가이드라인의 이행력 확보

인도네시아의 공공기관은 해안도시벨트의 복합재난 대응전략 수립 시, 본 가이드라인을 수정 혹은 추가 및 변경하여 사용할 수 있으며, 다만 복합재난의 불확실성을 고려해 모니터링 관리를 통하여 유연하게 적용하도록 한다.

2. 질병

1) 영향 요인의 관리 가이드라인

① 의료접근성

기후변화 관련 질환의 대응을 위해 공급자 측면에서는 적절한 공공서비스 제공을, 수요자 측면에서는 의료기관 접근성을 고려하여야 한다. 이 때, 의료 접근성은 경제적, 물리적 접근성으로 구분하여 관리한다. 이러한 의료 접근성 향상을 위해 기후 관련 공공의료시설을 확대하고, 취약계층의 비용 지원방안을 강구한다.

비도시지역의 공공 진료소를 확대하고 기후관련 질환의 전문 인력을 확충한다. 신규 의료기관 설치시에는 입지에 따른 재해영향을 평가하고, 기존 의료기관의 방재시설 또한 강화하도록 한다. 기후영향평가에는 의료·보건 평가를 포함하여 사전 대응체계를 구축하고, 지역 건강센터(health center)는 사회매체(social media)를 기반으로 하여 뎅기열 확산 방지를 위한 신속한 정보전달 체계를 구축하여야 한다.

② 저소득층 주거 및 생활용수 관리

저소득층 집중 거주지역에 대한 질병관리를 강화하고, 그 중에서도 수변 및 초지에 접한 지역은 환경개선 사업을 우선적으로 실시한다. 또한, 상수도 공급사업을 확대하여 지하수의 음용수 이용을 저감하도록 하고, 상수 공급이 불가능한 경우에는 수질정화필터를 공급하여 정수된 지하수를 보급한다.

2) 적용영역의 관리 가이드라인

① 계획수립 부문

지역별 환경여건을 고려한 기후·환경보건계획을 수립하고, 이를 재난대응 관련 도시계획 등과 상호 연계하여 반영하도록 한다. 기후·환경보건계획을 통해 복합재난 발생 시 고려해야 하는 건강 및 환경유해인자를 도출하고, 취약계층에 대한 비상 서비스 제공 방안을 제시한다.

② 도시관리 부문

질병 취약성이 높은 지역은 건물 보건기준을 준수하는 건축 및 개발을 유도한다. 또한 공공의료 시설 환자 수용력을 확대하고, 상급의료기관이 부족한 지역은 건강센터를 확대하도록 한다. 지역 단위 보건의료 시설 개선 정책을 우선 실시하고, 신속한 환자 대응을 위해 앰뷸런스의 보급을 확대한다.

의료 위기 시 보건 서비스 접근성 유지를 위해 시설·인력을 확보하고, 재난취약집단을 위한 기구 및 장비 구비를 지원한다. 보건위생 문제 방지를 위해 배수구 쓰레기, 모기, 악취 억제 시설을 개선하고, 질병 발생 초기 단계에서 조기 예·경보를 위한 정보 시스템을 구축한다.

③ 방재행정 부문

지역단위로 환경관리와 건강관리를 통합하여 고려하고, 지역 환경적 건강성 증진을 질병관리의 핵심 목표로 설정한다. 또한 전염성 질환에 대한 범부처 행정관리체계를 구축하여 관계자들을 대상으로 지속적인 교육을 실시한다.

질병 관리를 위한 상·하수도, 폐기물처리시설 설치를 확대하고, 모기 유충 등 전염매체 제어를 위해 저비용 방역기술 및 물자 보급을 확대한다. 또한 추가 감염의 차단을 위해 격리자 관리시설을 지정 및 신규 설치하고, 지방정부 차원의 일차 지원사항을 규정한다.

재난발생에 따른 관리체계를 구축하고 지역의 중대형 병원 단위로 재난발생시 보건환경관리, 환자관리 등에 대한 세부방안을 마련한다. 지역별 보건환경행정에는 청소(cleaning), 소독(disinfection), 살균(sterlization) 과정이 포함된다.

④ 시민생활 부문

기후위기에 따른 취약계층의 이해를 증진하고, 초급 교육과정부터 기후변화 관련 내용을 추가하여 조기 교육을 도모한다. 주민들은 재난발생시 관계기관에서 제시한 행동요령을 숙지하고 이에 따른 조치를 취하도록 한다.

질병 발생 잠재 지역은 민관 공동프로그램을 발굴 및 시행하여 예방과 통제의 인식을 제고한다. 또한 뎅기열 매개체의 전파 방지 및 깨끗한 물 공급을 위해 간편기술 보급을 확대한다. 쓰레기 투기 및 불법 소각 처리의 대안을 제시하고, 수인성 질병 예방을 위한 생활환경 개선을 추진한다.

3. 열

1) 영향 요인의 관리 가이드라인

① 열섬현상 분석

열섬현상에 대해 지역별로 물리적 요인과 기상학적 요인을 도출하여 재난관리에 적용한다. 이때, 물리적 측면에는 건축마감재, 정규식생지수, 토지피복 등을 검토하며, 기상학적 측면에서는 강수량, 일조량, 지표면온도 등을 검토한다.

2) 적용영역의 관리 가이드라인

① 계획수립 부문

기후변화로 인한 열 질환에 대응하기 위해 환경·건강보건계획 수립시 열 관련 질병 예방 및 관리방안을 포함하여 수립하도록 한다. 또한 도시 차원에서 기후변화 대응을 위한 계획을 수립하고, 건축 차원에서는 기후 회복력이 높은 건축을 장려한다.

도시 차원에서 친환경 에너지로의 전환을 도모하기 위해 대중교통중심개발(TOD), 대중교통간 정거장 통합 등의 계획을 추진한다. 뿐만 아니라, 1인 승용차 억제를 위해 혼잡통행료 등의 규제를 마련하고, 녹색교통과 대중교통 통합을 추진한다. 또한 재생에너지 이용 확대 로드맵을 수립하고 건물 사이 바람통로를 고려한 열섬 완화계획을 수립한다.

② 도시관리 부문

홍수, 폭염 등에 대해 보호막의 역할을 갖는 습지와 산림을 보호 및 복원하고, 녹지회랑, 도시숲 확대 등을 통해 자연적 도시열섬 완충작용을 활성화하도록 한다.

건축차원에서는 건물에 반사성이 높은 자재를 사용한 쿨 루프 설치를 장려하고, 도로, 주차장 등에 반사성 페인트 및 쿨 포장재를 사용하도록 하여 열 흡수를 저감한다. 또한 정부청사뿐만 아니라 인센티브 등을 통해 민간건물에 대해서도 녹색건축 적용 및 전환을 추진한다.

블루(blue)-그린(green) 인프라를 결합하여 열섬현상 완화와 수자원 관리를 통합적으로 운영하고, 친환경 자동차 이용 확대 등을 통해 도시 에너지 전환을 지원한다. 이를 위해 간선급행버스 및 공용차량 등에 대해 전기차 도입을 확대하고 전기차 관련 인프라 개발을 가속화한다. 더불어

자카르타의 MRT, BRT을 확대하여 화석연료를 저감하고 녹색교통 이용을 편리하게 한다.

도로 주변에는 완충녹지를 조성하여 주거지역으로의 열 이동을 완화하고, 통행 및 인구 밀집지역에 수경시설을 확대하여 냉각효과를 제공하도록 한다. 인구 밀집지역과 주요 보행로에는 차양막, 쿨링포크 등의 폭염회피시설을 설치한다. e-가로수벤치 등의 다기능시설을 설치하여 계절적 이용편차를 저감하고 시설관리의 경제성·효율성을 증진하도록 한다.

③ 방재행정 부문

열 관리 모니터링을 지속적으로 실시하고, 열 흡수를 줄이기 위한 건축규정 및 설계기준을 시행하여 토지이용규제를 재조정한다. 열 관련 질병 및 사망 사례를 지속적으로 모니터링하며, 열 관련 건강위험 발생 시 취약계층을 우선적으로 보호하기 위한 긴급 대응계획을 수립한다.

열파 기간 동안에는 전력수요 대응 프로그램을 실시하여 전력망 부하를 저감하고 정전을 최소화한다. 또한 물과 열섬을 동시에 고려한 연계행정체계를 형성하여 가뭄 발생시 물부족지역의 열섬효과를 방지한다.

④ 시민생활 부문

저소득층으로 하여금 열 노출을 최소화하는 에너지 효율적인 주택의 접근성을 제고시키는 주택정책을 추진하고, 단열을 고려한 주택개량을 실시한다. 또한 나무 심기, 냉방센터 관리, 녹색지붕 프로젝트 등의 열 완화 노력에 커뮤니티의 참여를 장려한다.

시민들은 폭염에 대비한 행동요령을 숙지하고, 포장도로 주변에서의 장기간 활동을 자제한다. 또한 폭염시에는 관계기관의 행동요령을 따르고 공공매체를 확인하여 안전조치를 취하여야 한다.

4. 홍수

1) 영향 요인의 관리 가이드라인

① 홍수 요인 분석

지역별 홍수 피해와 관련된 물리적 요인과 기상학적 요인을 도출하여 재난관리에 적용한다. 이때, 물리적 측면에서는 불투수면적, 유량흐름, 강-하천-도로까지의 거리 등을 검토하고, 기상학적 측면에서는 포화수증기압, 기후수분결핍, 지형습윤지수 등을 검토한다.

2) 적용영역의 관리 가이드라인

① 계획수립 부문

계획 수립시 현명한 물관리 도시(Water Wise City)를 지향하는 계획수단을 적용하도록 하고, 지역단위 물관리 종합계획을 수립하여 저영향개발(LID), 오폐수 재이용 확대 등의 프로그램을 추진한다. 물관리 계획은 공급관리, 이용관리, 주변관리를 통합하여 수자원을 지원할 수 있도록 통합계획으로 수립한다. 집중강우유출수(Stormwater runoff) 문제 완화를 위한 계획을 수립하고, 수계영향 지역에 설치하는 시설물에 대해 친수시설 규정을 마련한다. 또한 주요 수계에 특정 시설물을 설치할 경우 하천유역의 환경평가를 강화하도록 한다.

② 도시관리 부문

도시지역의 불투수 문제를 해소하기 위해 주거밀집지역 인근에 유수 및 저수공간을 마련하고, 저지대에는 배수를 저해하는 지반침하를 정책적 우선순위로 배정한다. 홍수취약지역을 판별하여 배수펌프장 용량을 확보하고, 배수 방해 방지를 위해 주기적으로 하천을 청소한다. 이러한 홍수취약지역 중심으로 홍수통제 펌프를 설치하고 효율적인 하천관리를 위해 토지매입을 확대한다. 또한 물 저장시설과 빗물 저장시설의 조정·공급을 확대하고 해안 및 도서지역에 물탱크를 설치하고 저수지를 축조한다.

건기의 물 부족과 우기의 물오염을 동시에 고려하기 위하여 가뭄과 홍수에 강한 토착식물을 식재하고, 지역단위 적응형 물관리 정책을 통해 완충지대 관리체계를 조성한다. 유역 단위로 토지이용, 하수도 관리 등 하천에 미치는 영향요소를 종합 고려하여 계획을 수립하고, 도시지역에 상·하수도 및 하천관리 기반시설을 확충하여 홍수와 가뭄에 대비한다.

소하천 범람을 대비하여 설계빈도를 상향하고, 관련 기반시설을 확충하여 홍수 방어능력을 제고한다. 댐-보-하굿둑을 연계하여 운영하며, 대규모뿐만 아니라 중·소규모 저수지 또한 치수능력을 보강하고, 해안-하천-도시를 포괄하는 통합물관리체계를 구축하기 위해 완충지대 조성 및 관리체계를 수립한다.

해안 및 인접지역에는 침투우물을 조성하여 빗물이 신속하게 땅으로 침투되도록 하고, 기후변화 취약지역은 우선적으로 물 관련 기반시설을 강화한다. 또한 생태기반과 지역사회기반 접근법을 결합하여 다양한 물관리 구조물을 설치하고, 가뭄 및 홍수 위협을 받는 면적과 가구 수 등을 대상으로 댐, 저류조, 식생관리를 실시한다.

대체가능한 수자원을 마련하고 빗물 저장을 위한 구조물을 개선하도록 한다. 또한 해안지역 담수관리를 조정하고, 저수지, 댐 등 시설 조성을 확대하여 지역단위 홍수 및 가뭄 통제를 강화한다. 나아가 홍수-가뭄 통합관리기술을 개발·적용하여 가뭄 예방 및 수계를 보충하고, 홍수로부터 물 주입 기술 도입과 기후완화 기술 적용 등을 확대한다.

집수구역을 재정비하여 습지생태계 보호 및 복원과 산림식생 공급을 강화한다. 역삼투 담수화기술 활용방안 마련 등 물 재활용 기술을 개발하고, 물 손실 방지를 위한 기술 개발·적용, 관로누출 탐지기술 적용 등을 확대한다.

③ 방재행정 부문

물관리 행정에 있어서 물 발자국(Water Footprint)을 고려하도록 하고, 가뭄 지역에 실시간으로 물의 배급이 가능한 행정체계를 구축한다. 또한 과거의 침수 및 가뭄자료 분석, 위험기준 설정 등을 포함한 예·경보 시나리오를 작성하여 도시홍수 및 가뭄 대응 시나리오로 활용한다.

④ 시민생활 부문

가뭄 기간에는 물 자원을 절약하고 교육과 훈련 등을 통해 쓰레기 무단투기로 인한 방재문제에 대한 시민의식을 형성한다. 또한 지역사회 단위에서 기초생활시설로도 활용가능한 방식의 도시농업을 도입하고 주민이 참여하도록 하여 물 문제 해소에 기여한다. 시민들은 홍수 발생시 홍수취약지역의 접근을 삼가고 차량 이용에 주의하여야 하며, 공공매체를 통해 기상상황을 확인하고 관계기관의 행동요령에 따른다.

5. 복합재난의 통합관리

1) 통합계획

① 재난계획의 연계 및 통합관리

환경-도시-재난의 연계계획이 가능하도록 도시계획의 대안을 발굴하고, 환경-도시-방재의 계획간 연계를 위해 법률 및 행정규정으로 이를 제도화한다. 나아가 재해취약성 분석, 복합재난 관리지도, 도시별 방재계획을 연계한 예방형 도시계획적 대책을 수립한다. 열-질병-홍수의 각 대응계획은 상호교차 검토를 실시하여 부정적 피드백을 최소화한다. 이러한 재난대응계획과 관련 법정계획의 이해 적절성 파악을 위한 피드백 매커니즘을 도입하고, 재난 관련 계획과 성과평과의 실시는 일선기관과 총괄기관으로 구분하여, 관련 기관의 역할과 책임을 분명히한다. 재난 모니터링에는 주민들의 직접 참여를 위한 개방형 모니터링 체계를 개발한다.

기반시설과 도시시설을 재편성하여 복합재난대응 기능을 활성화하고, 도시-환경-기후 전문가들은 복합재난 대응에 효과적인 도시시설을 발굴하도록 한다. 단기적으로는 그린인프라(green infra)와 그레이인프라(gray infra)를 적절히 혼합하고, 장기적으로는 그린인프라 중심으로 도시시설을 개편한다. 도시 녹지공간을 확충하고 공간적 특성을 고려한 대안녹지를 발굴한다.

② 도시관리

'지역사회기반의 재난대응정보시스템'을 구축하여 지역단위 현장에서 선제적 대응이 가능한 체계를 마련한다. 또한 AI를 활용한 홍수예보시스템 등을 개발·적용하여 복합재난의 조기 예보시간을 확대하고 예측주기의 단축을 도모한다.

지역맞춤형 재난관리 매뉴얼을 제작하고 그에 따라 역할 분담 및 조직 구성을 수행한다. 재난시 사용가능한 민간조직의 인력·기술·장비의 지속적 관리체계를 유지하고, '방재 및 재난관리 통합플랫폼'을 개발하여 복합재난 관리지도와 도시방재계획을 통합 운영한다. 이러한 개방형 플랫폼 구축을 통해 관련 민간기관이 통합플랫폼에 참여하고 실제 재난대응 수행이 가능하도록 한다.

복합재난은 예방-대비-대응-복구단계로 구분하여 단계별 관리를 실시한다.

- 예방단계에는 재난대응 조직의 구성 및 정비, 정비, 예측정보 구축, 교육 및 훈련 홍보,

특정관리대상지역 관련 조치 등이 포함되며, 이는 자연재해의 복합재난화 방지를 위한 필수서비스 공급시설 관리 강화 단계에 해당한다.

- 대비단계에는 긴급 통신수단 마련, 기능별 재난대응 할동계획 작성 및 활용 등이 포함되며, 해당 단계에서는 재난관리자원을 비축하고 효율적 자원투입을 위한 정기적 훈련을 시행한다.
- 대응단계는 대응단계, 응급조치, 긴급구조의 세 단계로 구분된다. 대응단계에서는 재난발생 1일 시간 내 긴급구조와 신속한 대응시설 마련이 요구된다. 응급조치 단계에는 재난경보의 발령, 피난권고 및 지시, 위험구역 설정, 지역 소재 공무원 비상소집, 급수수단 및 피난처 확보, 휴업명령 및 휴원·휴교 처분 요청 등이 포함된다. 마지막으로 긴급구조 단계는 소방청 또는 소방서 중심으로 이루어지며, 피해확산 저감 방지에 초점을 둔다.
- 복구단계는 1주일 이내의 단기복구와 장기복구 단계로 구분되며, 재난피해의 신고·조사·보고, 재난복구계획의 수립 및 시행 등을 실시한다. 단기복구 단계에서는 기본적인 의식주와 필수 서비스를 지원하며, 장기복구 단계에서는 경제·사회생활 정상 복귀를 위한 회복과 경제활동 관련 지역관리를 수행한다.

③ 행정관리

「위기관리 대응 매뉴얼」을 작성 및 최신화하여 복합재능 대응력을 강화하고, 이러한 대응 매뉴얼은 지방정부별로 실무매뉴얼과 행동매뉴얼로 구분하여 작성·운용한다. 또한 지방정부 차원에서 재난대응력의 핵심 요소인 재난 분야의 공무원을 확충하고, 교육 프로그램을 통해 공무원의 전문성 향상을 도모한다.

주요 취약시설과 지원시설 중요도를 도출하여 복합재난 관리지도를 작성하고, 재난대응에 필요한 필수 지원시설은 필수서비스 공급시설, 경제활동 기반시설, 교통 기반시설, 구호·대처시설로 구분하여 지방정부가 관리한다.

지역 공공기관을 중심으로 현장 중심 재난안전통신망을 마련하고, 인구 밀집지역은 정기적 재난대비 훈련을 실시하여 대응역량을 함양한다. 또한 행정영역, 지원영역, 주민영역별로 「재난대응 행동요령」을 제작하여 현장훈련을 진행하고, 공공-민간통합 재난관리자원 공동관리체계를 구축하여 재난발생시 즉각 동원하도록 한다.

④ 거버넌스

최다 주민참여, 효율적 협력구조, 지역자원 최대활용의 요소를 고려하여 재난대응 거버넌스를 구축하고, 재난취약계층의 디지털 격차를 최소화하여 재난 정보 접근을 최대화한다. 주민 재난대응 교육참여를 위한 동기를 부여하고, 시민들은 기후위기로부터 안전한 지역만들기에 적극 참여한다.

지방정부와 민간기관이 협력할 수 있는 재난대응 체계 및 상시 관리체계를 구축하고, 재난대응에 필요한 인력 및 시설을 갖춘 민간업체 등은 재난대응 지원기관으로 지정하여 지속적으로 관리한다. 나아가 공공-민간기관(기업)간 협력방안과 공공기관-지역주민간 협력방안을 구성하고 재난대응의 관행으로 정착시킨다.

재난대응 차원에서 쓰레기 처리를 위한 지역단위 순환자원 활용 프로그램을 발굴하고, 지역 내 조달 가능한 재난 대비 장비와 물품을 조사하여 그 목록을 관련 기관 및 주민에게 공유한다.

V장. 결론

제 1절. 연구 요약 및 기대효과

1. 국제 협력 측면에서 본 연구의 기대효과

기후변화로 인해 질병, 열, 물 관리와 관련된 재난의 발생이 급증하고 있다. 이러한 현상은 특히 인도네시아 해안 도시에서 심각하게 나타나고 있다. 기후변화가 초래하는 극단적인 기상 현상은 해수면 상승과 잦은 폭풍우 등을 통해 해안 지역의 취약성을 악화시키고, 홍수와 질병 발생의 이중 위험을 초래한다. 이와 함께 기후변화로 인한 기온 상승은 열섬 문제, 온열 질환과 같은 문제를 야기하며 가뭄을 초래해 지역 내 물 관리의 필요성을 강조한다. 이러한 상황에서 발생하는 복합재난은 지역사회 내 생계와 생존에 큰 위협요인으로 작용하며 지속가능한 발전을 저해한다.

기후변화로 인한 연쇄적인 재난 발생은 지역 커뮤니티의 안전과 생존에 막대한 영향을 미치기 때문에, 재난의 복잡한 상호작용에 대한 이해가 필요하다. 또한, 복합재난에 효과적으로 대응하기 위해서는 지역 커뮤니티 수준에서 기후변화의 영향을 완화함과 동시에 그 변화에 적응하는 맞춤식 조치가 필요하므로 적절한 대응 전략을 마련하기 위해서 국제 협력의 중요성이 강조된다. 비슷한 기후 특성 또는 재난 경험을 지닌 국가 또는 국제 기구들이 협력하여 기후변화에 대한 연구 데이터를 공유하고, 인도네시아 해안도시의 기후적응력을 향상시키기 위한 과학적 기반을 강화할 수 있다. 예를 들어, 본 연구에서 접근한 바와 같이, 최신 기후 모델링 기술과 재난 예측 시스템을 활용하여 위험 지역을 식별하고 이를 바탕으로 지역 주민 주도의 대응 전략을 수립하는 것이 필요하다.

아울러, 국제 협력 기반의 기술 이전과 재정적 지원은 상대국의 복합재난을 극복하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 한국국제협력단은 인도네시아를 포함한 동남아시아 지역에서 홍수 방지를 위한 인프라를 구축하고, 물 부족 문제를 해결하기 위한 효율적인 물 관리 시스템을 구축한 바 있다. 이와 같은 경험과 기술을 공유하고 필요한 자금을 지원함으로써 지역사회의 기후 회복력을 높이는 데 기여할 수 있다. 본 연구는 과학적 근거 기반의 접근을 통해 도출한 복합재난 발생 특성과 영향요인을 바탕으로 리빙랩을 진행하였으며, 이를 통해 기후변화로 인한 재난과

관련된 다양한 이해관계자와 교류하고 지역 주민 주도의 솔루션을 도출하고자 하였다.

이와 같은 경험을 지역 사회에 공유하고, 지역 주민과 상대국 기관이 함께 대응 능력을 키울 수 있도록 교육과 훈련 프로그램을 제공하는 것 또한 매우 중요하다. 따라서, 본 연구의 결과와 이를 종합하여 제안한 가이드라인을 활용하여 과학적 데이터 공유, 복합재난 적응 및 완화를 위한 기술 제공 및 재정적 지원, 그리고 역량 강화 프로그램을 통해 상대국과 협력한다면, 인도네시아 해안도시의 지속 가능한 발전과 재난 회복력 증진에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

본 연구는 인도네시아 해안도시 중 자바섬에 위치한 자카르타-세마랑 해안도시 벨트를 대상지역으로 설정하였다. 자카르타와 세마랑은 해안가에 위치한 도시로 해발고도가 해수면보다 낮아 상습적으로 홍수가 발생하고 있으며, 이상기후로 인한 열 문제와 뎅기열과 같은 풍토병 문제를 직면하고 있다. 본 연구는 실증연구(머신러닝, AI예측)를 바탕으로 과학적 근거 기반의 기후변화 취약 요인을 분석하고, 그 영향을 현지 커뮤니티에서 현미경식 접근을 통해 기후변화 적응과 완화를 위한 대응책을 도출하는 참여관찰연구(리빙랩)를 수행하였다. 본 연구는 복합재난으로서 질병, 열, 물 관리 문제를 분석하고, 이에 대한 실천적 대안을 도출하기 위하여 대상국의 지역 주민, 공공, 민간, 학계 전문가와 함께 리빙랩 프로토타입을 설계 및 운영하였다. 리빙랩을 통해서 연구진은 질병, 열, 물 관리간의 상호작용을 통해 복합재난이 발생하고 있으며, 이를 야기하는 지역 내 문제들은 단일 재난 관점에서 접근하여 해결하기 어렵다는 것을 확인하였다.

특히, 해안지역의 지리적 특성(해안가와 인접하며 지반침하 발생; 세마랑은 지면이 해수면보다 낮음)과 환경적 특성(불투수면 면적이 넓음, 물 관리 미흡으로 인해 배수 문제 발생)은 지역에서 홍수로 인한 피해를 악화시키는 것으로 나타났다. 또한, 홍수 발생 후 물 웅덩이 관리, 배수 · 하수처리 미흡과 같은 물 관리 문제는 질병 발생을 초래한다. 지역의 열악한 사회적 · 물리적 환경은 열로 인한 피해를 증가시키며, 이 또한 온열 질환, 가뭄과 같은 이중 피해를 발생시키기 때문에 복합재난 관점에서 재난 피해를 완화할 수 있는 정책의 필요성이 강조된다.

일반적으로 국제 협력이 사전 정보 취합, 사업 설계, 프레임워크 정립, 모델 적용 단계로 이루어진 것(International Organization for Migration United Kingdom, 2024)처럼, 본 연구도 대상국의 기후변화로 인한 재난 발생 현황과 재난의 영향을 다룬 정책을 조사하고 이와 관련된 이해관계자를 식별하는 절차를 포함하고 있다. 이와 함께 현지 파트너십을 구축하고 정부 기관과의 협력을 통해 지역 문제 인식과 정책 동향을 파악하였다. 이후 리빙랩 수행 결과를 바탕으로 지역의 현안을 해결하기 위한 솔루션의 세부범위 및 목적, 연구 대상 등을 구체화하였다. 이를

통해 연구는 국제개발협력을 통해 연구에서 제안한 솔루션을 사업화하는 데 있어 활용 가능성을 최대화하고자 하였다.

특히, 전염병, 열섬 현상(폭염), 홍수는 개별적인 기후 재난으로 인식되기 쉽지만, 실제로는 재난 간의 상호작용이 발생하며 복합재난의 형태로 도시에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 자연재해로 인해 발생하는 사회적 재난은 그 책임소재가 불분명하기 때문에 즉각적인 대응이 어려워 재해를 심화시킬 수 있는 가능성이 존재한다. 따라서 이들 간의 상호작용을 통합적으로이해하고 해결하는 것은 복합재난에 대응하기 위한 기초자료로 활용될 수 있음을 보여준다. 또한, 연구에서 도출한 C4V지표는 향후 인도네시아 해안도시를 대상으로 질병-열-물 관리 피해가 발생할 지역을 예측하고, 국제 협력 사업을 수행하기 위한 대상지역을 선정하는 데 활용할 수 있다.

인도네시아의 자카르타-세마랑 해안벨트의 기후변화 복합재난 발생 가능성을 완화하고 적응하기 위해 연구에서 제안한 '기후변화 복합재난 영향 완화계획 가이드라인(안)'은 연구 전반의 결과와 국내외 관련 지침 및 가이드라인을 기반으로 제안되었으며, 주로 리빙랩을 통해 도출한 솔루션을 계획수립, 도시관리, 방재행정, 시민생활 영역에 적용하는 데 활용할 수 있도록 고안되었다. 특히, 인도네시아는 복합재난 대응을 위한 직접적인 지침과 가이드라인이 부재하여 기후재난 관련 정책과 계획 사례를 검토해 가이드라인 설정 고려 요소와 대응방안을 도출해야 할 필요가 있다.

위와 같은 이유로 본 연구는 인도네시아 해안벨트 도시의 기후변화 복합재난 영향 완화계획 가이드라인(안)을 총칙, 부문 별(질병-열-홍수) 가이드라인, 통합관리 가이드라인으로 구성하였으며, 해당 사항에 대한 적용영역별 역할과 행위를 규정하고자 하였다. 특히, 가이드라인 총칙(제 1장)은 인도네시아 자카르타와 세마랑의 복합재난 대응을 위해 수립이 필요한 계획과 전략에 활용할 수 있는 제안 사항을 제시하고, 향후 인도네시아의 공공기관에서 법률과 제도에 따라 수정 및 보완이 가능하도록 유연하게 구성하고자 하였다. 부문별 가이드라인은 복합재난 관점에서 각 재난의 정책 방향을 제안하였다. 예를 들어, 열 부문(제 3장)은 온열 질환에 대응하기 위한 건강보건계획 수립(질병+열 관점)해야 함을 강조하였으며, 이와 함께 열섬완화와 수자원 관리를 통합 관리하기 위해 연계행정체제 형성이 요구됨을, 홍수 부문(제 4장)은 통합 물 관리 정책과 홍수-가뭄 통합관리기술 적용을 통한 통합 물 관리 체계 구축이 필요함을 제시하였다.

아울러, 리빙랩을 통해 발굴한 지역 난제와 솔루션과도 연계 가능하도록 연계 방향을 제시하였다. 이와 관련하여, 본 연구는 한국국제협력단의 국제협력 사례를 추가 검토하였으며, 이를 통해

한국국제협력단의 풍부한 경험과 전문 지식을 바탕으로 대상국의 해안도시 재난 적응 및 완화를 위해 기여할 수 있음을 확인하였다(〈표 64〉). 예를 들어, 한국국제협력단은 필리핀, 모잠비크 일대에 홍수 조기경보 시스템을 구축한 바 있다. 이 중 필리핀 마닐라 주요 강 유역을 대상으로 조기경보 시스템을 구축하고 방재기관 워크숍 및 주민 대피 훈련 등을 함께 진행하였다. 그 밖에 솔루션 아이디어 2처럼 자연환경을 기반으로 한 재난 방지 및 녹화 사업을 진행하거나 감염병 대응 역량 강화를 위해 지역의 커뮤니티 기반 대응 체계, 정기 교육 등을 지원한 사업, 해양 쓰레기 처리를 위한 모니터링 시스템 구축 사업 등을 진행한 것을 확인하였다. 이와 같이 본 연구 대상지의 문제점을 해결하기 위해 제시한 솔루션에 대한 한국국제협력단의 경험과 재정적 지원은 인도네시아 내 해안지역이 겪고 있는 기후변화로 인한 복합재난 문제에 대응하고 실효성 높은 사업을 통한 문제해결에 도움이 될 것으로 기대된다.

〈표 64〉 리빙랩 솔루션 아이디어와 한국국제협력단 사업 사례

솔루션 아이디어	한국국제협력단 사례		
	사업명	대상 지역	지원 내용
솔루션 아이디어1: 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템(홍수)	홍수 조기경보 및 모니터링 체계 구축사업	필리핀	마닐라 주요 강 유역에 대한 실시간 관측 및 조기경보 시스템 구축 방재기관 워크숍 및 주민 대피 훈련 실시
솔루션 아이디어1: 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템(홍수)	리쿵고(Licungo) 강 유역 홍수 예·경보 시스템 구축사업	모잠비크	홍수 예경보 시스템 구축 홍수예측 수리수문모형 개발 관계기관 및 지역주민이 참여하는 홍수대응훈련 진행
솔루션 아이디어1: 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템(열섬, 질병)	감염병 예방 및 대응체계 강화사업	캄보디아	공중보건관리역량 강화 프로그램 긴급대응체계 및 국가 공중보건 대응계획 수립
솔루션 아이디어1: 커뮤니티 기반 재난대비 정보 시스템(열섬, 질병)	전염병 질병 관리 역량강화 사업	우즈베키스탄	수인성 식품매개성 감염병 원인 규명 중장기 역학 조사자 교육 과정 마스터 플랜 수립 역량 강화를 위한 국내(한국) 초청 연수 실시
솔루션 아이디어2: 복합재난 완화 환경 조성	스마트 기술기반 산림·도시녹화 역량강화사업	우즈베키스탄	식재지 선정 및 식재 조림방법과 식재후 관리 방법 교육 도시녹화용 수목 공급
솔루션 아이디어3: 통합 쓰레기 관리	해양 쓰레기 관리 역량 강화 사업	필리핀	해양쓰레기 모니터링 사업(해양 쓰레기 발생 동향 파악, 수원국의 수거 처리 지원) 청항선 설계, 감리, 건조 및 배치

2. 향후 연구과제 방향 제안

본 연구는 과학적 근거를 기반으로 복합재난 발생 지역과 재난과 해안도시구조 간의 관계를 분석하고, 리빙랩을 통해 도출된 지역 현안을 해결하기 위한 솔루션의 세부적인 범위와 목적, 대상을 구체화하였다. 또한, 단계적 접근을 통해 지속가능한 문제 해결과 기후변화 영향 완화를 목표로 각 솔루션을 점진적으로 구현하였으며, 이를 향후 국제개발 협력을 통해 사업화하는 데 있어 활용 가능성을 극대화하기 위한 가이드라인을 제안하였다. 이후, 솔루션 사업화를 위해 한국국제협력단의 과거 및 현재 지원 사업 현황을 검토하여 유사 협력 사례를 파악하였다.

향후 연구에서는 기후변화로 인한 복합재난의 영향을 실질적으로 완화하기 위해 사업화에 집중할 필요가 있다. 본 연구에서 구축한 현지 파트너십을 바탕으로 국제협력사업으로 추진될 수 있도록 구체적인 실행 계획을 수립해야 하며, 연구 결과물의 확산을 위해 인도네시아 해안도시에서 나타난 복합재난의 전반적인 특성을 도출할 필요가 있다.

참고 문헌

논문 및 보고서

Aboulnaga, M., Trombadore, A., Mostafa, M., & Abouaiana, A. (2024). Urban green coverage as a strategy for mitigating high temperatures in cities. In Livable Cities. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51220-9_3

Adnan, R. A., Ramli, M. F., Othman, H. F., Asha'ri, Z. H., Ismail, S. S., & Samsudin, S. (2021). The Impact of Sociological and Environmental Factors for Dengue Infection in Kuala Lumpur, Malaysia. Acta tropica, 216, 105834.

Arcari, P., Tapper, N., & Pfueller, S. (2007). Regional variability in relationships between climate and dengue/DHF in Indonesia. Singapore Journal of Tropical Geography, 28(3), 251-272.

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 23(1), 1–26.

Akhtar, R., Gupta, P. T., & Srivastava, A. K. (2016). Urbanization, urban heat island effects and dengue outbreak in Delhi. Climate Change and Human Health Scenario in South and Southeast Asia, 99-111.

Aquino, D. D. N., Rocha, O. C. D., Moreira, M. A., Teixeira, A. D. S., & Andrade, E. M. D. (2018). Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. Revista Ciencia Agronomica, 49(3), 420-429.

Araujo, R. V., Albertini, M. R., Costa-da-Silva, A. L., Suesdek, L., Franceschi, N. C. S., Bastos, N. M., Katz, G., Cardoso, V. A., Castro, B. C., Capurro, M. L., & Allegro, V. L. A. (2015). Sao Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. Brazilian Journal of Infectious Diseases, 19(2), 146–155. https://doi.org/10.1016/j.bjid.2014.11.005

Astuti, E. P., Dhewantara, P. W., Prasetyowati, H., Ipa, M., Herawati, C., & Hendrayana, K. (2019). Paediatric dengue infection in Cirebon, Indonesia: a temporal and spatial analysis of notified dengue incidence to inform surveillance. Parasites & vectors, 12, 1-12.

Bangs, M. J., Larasati, R. P., Corwin, A. L., Wuryadi, S., & Jakarta, I. (2006). Climatic factors associated with epidemic dengue in Palembang, Indonesia: implications of short-term meteorological events on virus transmission. Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health, 37(6), 1103.

Banu, S., Hu, W., Hurst, C., & Tong, S. (2011). Dengue transmission in the Asia-Pacific region: impact of climate change and socio-environmental factors. Tropical Medicine & International Health, 16(5), 598-607.

Dalimunthe, S. A. (2020, January 27). Treating Disaster as a Social Problem. Jakarta Globe.

Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. Atmospheric Environment, 30(3), 379–392. https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00033-X

Farid, M., Sihombing, Y. I., Kuntoro, A. A., Adityawan, M. B., Syuhada, M. M., Januriyadi, N. F., ... & Nurhakim, A. (2023). Development of flood hazard index under climate change scenarios in Java Island. Progress in Disaster Science, 20, 100302.

Georgi, J. N., & Dimitriou, D. (2010). The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece. Building and Environment, 45, 1401–1414. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.12.003

Gubler, D. J. (2011). Dengue, urbanization and globalization: the unholy trinity of the 21st century. Tropical medicine and health, 39(4SUPPLEMENT), S3-S11.

Halide, H., & Ridd, P. (2008). A predictive model for dengue hemorrhagic fever epidemics. International journal of environmental health research, 18(4), 253-265.

Harwitasari, D., & van Ast, J. A. (2011). Climate change adaptation in practice: people's responses to tidal flooding in Semarang, Indonesia. Journal of flood risk management, 4(3), 216-233.

Health Department of Semarang. (2023). Semarang Health Profile 2022.

Health Department of Jakarta. (2023). DKI Jakarta Province Health Profile 2022.

Heo, S., Park, S., & Lee, D. K. (2023). Multi-hazard exposure mapping under climate crisis using random forest algorithm for the Kalimantan Islands, Indonesia. Scientific Reports, 13, 13472. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40106-8

Huang, R., Yang, M., Lin, G., Ma, X., Wang, X., Huang, Q., & Zhang, T. (2022). Cooling effect of green space and water on urban heat island and the perception of residents: A case study of Xi'an City. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(22), 14880. https://doi.org/10.3390/ijerph192214880

Husnina, Z., Clements, A. C., & Wangdi, K. (2019). Forest cover and climate as potential drivers for dengue fever in Sumatra and Kalimantan 2006–2016: a spatiotemporal analysis. Tropical Medicine & International Health, 24(7), 888-898.

Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2019). Effectiveness of vegetated patches as Green Infrastructure in mitigating Urban Heat Island effects during a heatwave event in the city of Melbourne. Weather and Climate Extremes, 25, 100217. https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100217

Ishak, N. I., & Kasman, K. (2018). The effect of climate factors for dengue hemorrhagic fever in Banjarmasin City, South Kalimantan Province, Indonesia, 2012-2016. Public Health of Indonesia, 4(3), 121-128.

Kesetyaningsih, T. W., Andarini, S., Sudarto, S., & Pramoedyo, H. (2018). Determination of environmental factors affecting dengue incidence in Sleman District, Yogyakarta, Indonesia. African journal of infectious diseases, 12(1S), 13-25.

Langlois, B. K., Beaulac, L., Berry, K., Anyanwu, O., Simpson, R. B., Ismanto, A., ... & Naumova, E. N. (2023). Household flood severity and migration extent in central Java: analysis of the Indonesian Family Life Survey. International journal of environmental research and public health, 20(9), 5706.

Lemonsu, A., Viguie, V., Daniel, M., & Masson, V. (2015). Vulnerability to heatwaves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). Urban Climate, 14, 586–605.

Lowry, W. P. (1998). Urban effects on precipitation amount. Progress in Physical Geography, 22(open in a new window), 477–520. doi:10.1191/030913398670090480

Martiwi Diah Setiawati, Marcin Pawel Jarzebski and Kensuke Fukushi. (2022). Extreme heat vulnerability assessment in Indonesia at the provincial level. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1095 012021

Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2016). Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: Study of Chandigarh city, India. Sustainable Cities and Society, 26, 264–277. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.018

Miles, V., & Esau, I. (2017). Seasonal and spatial characteristics of urban heat islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities. Remote Sensing, 9(989), 1–15. https://doi.org/10.3390/rs9100989

Ministry of Health of The Republic of Indonesia. (2020). Natonal Acton Plan for Acceleratonof Malaria Eliminaton 2020-2024.

Ministry of Health of the Republic of Indonesia. (2021). National Strategic Plan (NSP) for the Dengue Control Programme 2021-2025.

Ministry of Health of the Republic of Indonesia. (2023). Dengue 2022 Annual Report.

Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. Journal of Environmental Management, 197, 522–538. https://doi.org/ 10.1016/ j.jenvman.2017.04.014

NASA. (2024). https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M·NASA. (2019). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook

Oke, T. R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (Vol. 81, p. 51). Geneva: World Meteorological Organization.

Oliveira, S., Andrade, H., & Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. Building and Environment, 46(11), 2186–2194. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034

Pramono, I. B. (2021). Nature-based solutions for integrating flood and land subsidence: A case study in Jakarta and Semarang. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 874(1), 012001. https://doi.org/10.1088/1755-1315/874/1/012001

Rasjid, A., Yudhastuti, R., Notobroto, H. B., & Hartono, R. (2019). Climate Change: An overview of the prevalence of dengue hemorrhagic fever in South Sulawesi Province of Indonesia. Indian Journal of Public Health Research & Development, 10(8), 1982-1986.

Romeo-Aznar, V., Picinini Freitas, L., Gonçalves Cruz, O., King, A. A., & Pascual, M. (2022). Fine-scale heterogeneity in population density predicts wave dynamics in dengue epidemics. Nature communications, 13(1), 996.

Sakakibara, Y. (1996). A change of air temperature with reurbanization in Tsukuda. Tenki, 43, 25–31.

S. Rajaratnam School of International Studies. (2015). Health Governance and Dengue in Southeast Asia.

Schmidt, W. P., Suzuki, M., Dinh Thiem, V., White, R. G., Tsuzuki, A., Yoshida, L. M., ... & Ariyoshi, K. (2011). Population density, water supply, and the risk of dengue fever in Vietnam: cohort study and spatial analysis. PLoS medicine, 8(8), e1001082.

Sooyoung Lim, Eunhye Ha, & Gunhak Lee. (2023). A study on the prediction of rice yields of agricultural use in Saemangeum reclaimed land using satellite imagery and deep learning. Journal of the Korean Geographical Society, 58(6), 585–598. https://doi.org/10.22776/kgs.2023.58.6.585

Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2007). Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. Solar Energy, 81(3), 358–368. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.014

Telle, O., Nikolay, B., Kumar, V., Benkimoun, S., Pal, R., Nagpal, B. N., & Paul, R. E. (2021). Social and environmental risk factors for dengue in Delhi city: A retrospective study. PLoS neglected tropical diseases, 15(2), e0009024.

Thakali, O., Raya, S., Malla, B., Tandukar, S., Tiwari, A., Sherchan, S. P., ... & Haramoto, E. (2022). Pilot study on wastewater surveillance of dengue virus RNA: Lessons, challenges, and implications for future research. Environmental challenges, 9, 100614.

The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). (2021). Community-Based Surveillance: Indonesia Case Study — Community Epidemic & Pandemic Preparedness Programme.

Tosepu, R., Tantrakarnapa, K., Nakhapakorn, K., & Worakhunpiset, S. (2018). Climate variability and dengue hemorrhagic fever in Southeast Sulawesi Province, Indonesia. Environmental Science and Pollution Research, 25,

14944-14952.

Tumiar Katarina Manik, & Syarifah Syaukat. (2015). The impact of urban heat islands: Assessing vulnerability in Indonesia. Asian Cities Climate Resilience, Working Paper Series 13, 2015. http://pubs.iied.org/10721IIED.html

UNICEF. (2021). Evidence-based Data and Information on the Impact of Climate Change in the Health Sector in Indonesia.

UNICEF. (2022). The Role of Village Malaria Cadres and Consultants in Controlling and Eliminating Malaria in Eastern Indonesia.

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 86, 370–384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 335–344. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007

Weng, Q., & Quattrochi, D. A. (2006). Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue. Remote Sensing of Environment, 104, 119–112.

WHO. (2017). The Republic of Indonesia Health System Review.Nakhapakorn, K., & Tripathi, N. K. (2005). An information value based analysis of physical and climatic factors affecting dengue fever and dengue haemorrhagic fever incidence. International journal of health geographics, 4, 1-13.

Wolfe, M. K., Paulos, A. H., Zulli, A., Duong, D., Shelden, B., White, B. J., & Boehm, A. B. (2023). Wastewater detection of emerging arbovirus infections: Case study of Dengue in the United States. Environmental Science & Technology Letters.

김태헌, 이원희 , 한유경. (2018). Landsat-8 시계열 위성영상을 활용한 도심지 확장에 따른 열섬 포텐셜분석. 한국측량학회지, 36(4), 305-316.

웹페이지

Asia's climate-driven health crisis raises alarm ahead of COP28. (2023). https://asia.nikkei.com/Spotlight/The-Big-Story/Asia-s-climate-driven-health-crisis-raises-alarm-ahead-of-COP28 (검색일: 24.01.08.)

Indonesia's dry season to peak in October, extreme heat expected. (2023).

https://en.antaranews.com/news/295116/indonesias-dry-season-to-peak-in-October-extreme-heat-expected (검색일: 24.01.08.)

Syarifah Aini Dalimunthe, "Treating Disaster as a Social Problem", Jakarta Globe, 2020.01.27., https://jakartaglobe.id/opinion/treating-disaster-as-a-social-problem (검색일: 24.06.01.)

기상청 날씨누리, 세계기후자료 인도네시아 자카르타(96745) 월별 평균값, https://www.weather.go.kr/repositary/sfc/climate/world/w_96745.html (검색일 : 24.01.12.)

부록

〈부록 1〉 리빙랩 기반의 기후변화 완화계획 가이드라인(안)

제1장 총론

1.1 총칙

1.1.1 본 가이드라인은 인도네시아의 자카르타와 세마랑 해안도시벨트의 질병, 열, 홍수 및 관련 복합재난에 대응하기 위한 계획수립과 대응전략을 모색하는데 고려할 방향과 요소를 제시하는 것이 목적이다.

1.1.2 본 가이드라인은 인도네시아 중앙정부 및 지방정부(자카르타, 세마랑)의 법률과 제도에 따른 것이 아니라 연구결과에 따른 제안사항이기 때문에 해당 행정당국에서 관련 계획 및 정책 추진 시에 수정 및 보완을 통해 활용 가능하도록 구성한다.

1.2 가이드라인의 성격

1.2.1 본 가이드라인의 공간적 범위는 인도네시아의 자카르타와 세마랑을 연결하는 해안도시벨트로 한정한다.

1.2.2 본 가이드라인의 내용적 범위는 질병, 열, 홍수로 인한 복합재난의 대응전략에 따른 관련 집단의 역할과 행위를 제안한다.

1.2.3 본 가이드라인의 제안 사항은 인도네시아의 법률과 제도의 규정에 따른 것이 아니라 연구결과에 따른 실천적 시사점을 제안하는 것이다.

1.3 가이드라인의 구성

1.3.1 본 가이드라인은 총론, 각론, 통합관리로 구성된다.

1.3.2 각론은 연구내용에 따라 질병, 열, 홍수로 구성된다.

1.3.3. 통합관리 부문은 각론에서 제시한 대응방안을 효율적으로 추진할 수 있도록 통합계획, 관리행정 거버넌스를 구성하는 방안에 대한 가이드라인을 제시한다.

1.4 가이드라인의 이행력 확보

1.4.1 인도네시아의 공공기관이 해안도시벨트의 기후위기나 복합재난에 대응하기 위한 계획이나 지침을 수립할 때, 본 가이드라인의 내용을 수정·추가·변경하여 사용할 수 있다.

1.4.2 공공기관이 본 가이드라인을 적용하고자 할 때는 기후위기로 인한 복합재난의 불확실성을 고려하며,

모니터링과 이행실적 및 환류를 통해 본 가이드라인을 수정·보완하여 유연하게 적용하여 이행하도록 한다.

제2장 질병

2.1 영향 요인의 관리 가이드라인

2.1.1 의료 접근성

1) 기후변화 관련 질환 대응전략의 핵심은 공급자 측면에서는 기후질환에 대한 공공서비스를 적절하게 제공하는 것이고, 수요자 측면에서는 기후 질환자가 의료기관을 얼마나 손쉽게 이용할 수 있느냐를 고려해야 한다.
2) 의료 접근성은 의료 수요자의 경제적 접근성과 의료기관에 대한 의료 수요자들의 물리적 접근성으로 구분하여 관리한다.
3) 지역주민들의 의료비 지불능력의 격차를 고려하여 기후 관련 질병에 대한 공공의료시설을 확대하고 취약계층에 대한 비용 지원방안을 강구한다.
4) 도사농촌간 의료기관 접근성 차이를 완화할 수 있도록 비도시지역에 대해 공공 진료소 등을 확대한다.
5) 온열질환 등 기후 관련 질환 전문 의료인력을 확충한다.
6) 신규 의료기관을 설치할 때는 재난발생에 의해 영향을 받지 않도록 의료기관 입지에 따른 재해영향을 평가하고, 기존 의료기관에 대해서는 방재시설 등을 강화한다.
7) 기후영향평가를 실시할 때는 의료·보건에 대한 영향평가를 포함하도록 하여 기후질환에 대한 사전 대응체계를 구축한다.
9) 지역에 설치된 건강센터(health center)는 홍수 시 뎅기열 피해 확산을 막기 위해 사회매체(social media)를 기반으로 비상 연락망을 구축하여 신속한 의사소통과 정보전달 체계를 구축한다.

2.1.2 저소득층 거주지 관리

1) 저소득층 집단거주지역에서 뎅기열 발생이 증가하는 현상을 고려하여 저소득층 거주비율이 높은 지역에 대한 질병관리를 강화한다.
2) 저소득층 집단거주지역 중에서 수변이나 초지에 접하고 있는 지역에 대해서는 우선적으로 위생 및 환경개선 사업을 실시한다.

2.1.3 생활용수 관리

1) 지하수의 음용수 이용을 줄이기 위해 공공 상수도를 통해 생활용수를 공급받을 수 있도록 상수도 공급사업을 확대한다.
2) 상수 공급 없이 지하수를 사용해야 하는 경우에도 지하수를 그대로 사용하지 않고 필터를 통해 정수된 물을 사용할 수 있도록 수질정화필터를 공급한다.

2.2 적용영역의 관리 가이드라인

2.2.1 계획수립 부문

1) 지역별 기후변화 및 환경여건을 고려한 기후·환경보건계획을 수립하고, 그 내용을 재난대응 관련 계획, 도시계획, 환경계획과 상호 연계 반영한다.
2) 기후·환경보건계획을 통해 복합재난발생시에 고려해야 하는 건강 및 환경유해인자를 도출하고, 그에 대한 도시계획적, 재난대응적 해결 대안과 취약계층에 대한 비상 서비스 제공 방안을 제시한다.

2.2.2 도시관리 부문

1) 질병 관리를 위한 기반시설의 확충 차원에서 뎅기열 등 질병 취약성이 높은 지역에 대해서는 건물 보건기준을 준수하는 주택, 건물, 인프라 설치를 유도한다.
2) 보건의료시설의 서비스 확대를 위해 병원, 건강센터, 기타 공공의료시설의 환자 수용력을 확대한다.[17]
3) 병원 등 상급 의료기관이 부족한 지역에 대해 건강센터를 확대하여 의료·보건 기능을 강화한다
4) 지역 단위의 보건서비스 시설을 확대하고 보건의료 시설 개선을 위한 정책과 사업을 우선 실시한다.[18]
5) 재난발생 시에 환자 대응을 위한 신속하게 할 수 있도록 앰뷸런스의 보급을 확대한다.
6) 공중보건 문제나 의료위기 시에도 저소득층이나 취약지역에 대한 기본적인 보건서비스 접근성을 유지할 수 있도록 시설과 인력을 확보한다.
7) 신체장애 등 재난취약집단에 대한 비상시 사용할 수 있는 기구와 장비를 구비할 수 있도록 지원한다.
9) 뎅기열 등 질병 발생에 대한 초기 정보를 파악하고 조기예경보시스템을 가동할 수 있도록 정보시스템을 구축한다.
10) 외부 노출된 배수구에 쓰레기를 버려 배수를 막거나 모기 및 악취 발생 등 보건위생의 문제 발생을 억제할 수 있도록 시설을 개선한다.

2.2.3 방재행정 부문

1) 지역의 환경적 건강성 증진[19]을 질병관리 행정의 핵심 목표로 설정하고, 지역단위로 환경관리와 건강관리를 통합적으로 고려한다.
2) 주거밀집지역에서 질병관리에 필수적인 상수도, 하수도, 폐기물처리시설 등 공급·처리시설의 설치를 확대한다.
4) 모기 유충 등 전염매체를 제어할 수 있도록 저비용의 방역 기술과 물자의 보급을 확대한다.
5) 전염성 질환에 대한 범부처 행정관리체계를 구축하고 공무원들과 관계자들을 대상으로 교육과 훈련을

---

17) Kementerian PPN/ Bappenas, List of Priority Locations and Climate Resilence Actions, 2021, 64-65
18) 서울연구원, 2022, "자카르타주 '저탄소개발계획' 수립 사례" 「세계도시동향」, 제526호 (https://www.si.re.kr/node/66100)을 재정리
19) Kementerian PPN/ Bappenas, List of Priority Locations and Climate Resilence Actions, 2021, 64-65을 재정리

지속적으로 실시한다.

6) 감염자를 치료하고 추가 감염을 차단하기 위해 격리자 관리시설을 지정하거나 신규 설치하고, 지방정부의 일차 지원사항을 규정한 후 시민의 감염차단과 생활안전 방안을 설정한다.[20]

7) 재난발생에 따른 긴급 수술 등 의료 관리체계의 구축하고, 지역의 중대형 병원 단위로 재난발생 시에 보건환경관리, 긴급 수술 및 환자관리 등에 대한 세부방안을 마련한다.[21]

8) 지역별 보건환경행정에서는 쓰레기 처리를 포함한 청소(cleaning), 소독(disinfection), 살균(sterlization)을 포함한다.

2.2.4 시민생활 부문

1) 기후변화 및 기후위기에 따른 질병에 대한 지역사회, 특히 취약계층의 이해를 증진한다.[22]

2) 기후변화 영향에 대한 조기 교육을 위해 초급 교육과정부타 공중보건 및 기후 관련 내용을 추가한다.

3) 질병 발생의 잠재력이 높은 지역에서는 예방 및 질병 통제에 대한 인식 확산 및 인식 제고를 위해 다양한 민관 공동 프로그램을 발굴·시행한다.

4) 뎅기열 매개체 전파를 방지하고 깨끗한 물 공급을 위한 간편기술(ex. DBD캡)의 보급과 사용을 확대한다.

5) 주민들은 정부가 제공하는 질병 예방과 감염 방지 등에 필요한 행동요령을 숙지한다.

6) 재난발생 시에 주민들은 중앙정부 혹은 지방정부 등 관계기관에서 제시한 행동요령에 따라 생활상의 조치를 취한다.

7) 주민들은 뉴스 등 공공매체를 통해 질병 대응상황을 확인하면서 생활상의 건강관리 및 위생조치를 취한다.

8) 시민들의 쓰레기 투기 및 무단 소각에 대한 문제점을 교육하고 그에 대한 처리 대안을 발굴·제안한다.

9) 하천의 부유 및 적체 쓰레기로 인한 수인성 질병을 예방할 수 있도록 시민 중심으로 생활환경 개선 운동을 추진한다.

---

20) 국립재난안전연구원, 2020,「사회재난 수습·지원 가이드라인 개발」, p.124를 수정

21) WHO, 2008,「DISASTER MANAGEMENT GUIDELINES: EMERGENCY SURGICAL CARE IN DISASTER SITUATIONS」, pp. 4~6

22) Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.25를 재정리

제3장 열

3.1 영향 요인의 관리 가이드라인

3.1.1 지역마다 열섬현상과 열에 따른 피해 정도에 영향을 줄 수 있는 물리적 요인과 기상학적 요인을 과학적으로 도출하여 각 지역의 재난관리에 적용한다.

3.1.2 물리적 측면에서는 건축마감재, 건물밀도, 정규식생지수, 인구밀도, 식생, 토지피복, 고도 등을 포함하여 검토한다.

3.1.3 기상학적 측면에서는 강수량, 대기온도, 습도, 지표면온도, 일조량, 풍속 등을 포함하여 검토한다.

3.2 적용영역의 관리 가이드라인

3.2.1 계획수립 부문

1) 기후변화로 인한 열 질환의 계획적 관리체계 구축 차원에서 지역 환경보건계획이나 건강보건계획을 수립할 때 열 관련 질병에 대한 예방 및 관리방안을 포함한다.
2) 도시 차원에서는 기후변화에 대응하기 위한 계획을 수립·시행하고, 건축 자원에서는 '루마펑궁(rumah panggung)'같이 기후 회복력이 있는 건축을 장려한다.
3) 도시에서 친환경의 에너지로 전환을 지원하기 위한 계획적 고려를 확대한다.
4) 대중교통의 이용 확대를 위해 대중교통 간 정거장 통합을 최적화하고, 도시특성을 고려하여 지하철 및 경전철 건설을 포함한 대중교통중심개발(TOD)을 추진한다.[23]
5) 도시로의 1인 승용자 억제를 위해 도심의 혼잡통행료 및 높은 주차요금 부과 등을 시행하는 규제정책을 적극 활용한다.
6) 녹색교통(보행 및 자전거)과 대중교통의 통합을 위해 자전거를 위한 노선 및 시설의 조성, 보행로 최적화 및 보행자 지원시설 조성, 저탄소구역 조성 등을 추진한다.
7) 재생에너지 이용 확대를 위해 옥상 태양광 패널 설치 확대, 지역에너지계획을 통한 재생에너지 이용 확대 로드맵을 수립·추진한다.
8) 높은 건물밀도로 인한 열 지체 현상을 해소할 수 있도록 건물 사이의 공간에 바람통로를 고려한 열섬 완화계획을 수립한다.

3.2.2 도시관리 부문

1) 자연기반의 도시관리 차원에서 홍수, 폭풍, 해일, 폭염 등에 대한 자연적인 보호막 역할을 하는 습지, 맹그로브 숲과 산림을 보호하고 복원한다.

---

23) 서울연구원, 2022, "자카르타주 '저탄소개발계획' 수립 사례" 「세계도시동향」, 제526호 (https://www.si.re.kr/node/66100)을 재정리

2) 도시의 열섬효과를 완화하고 과도한 강우를 흡수할 수 있도록 다목적 공원, 녹지회랑, 도시 숲 등을 확대하여 자연적인 도시열섬 완충작용을 활성화한다.
3) 많은 일사량을 고려하여 주거 및 상업용 건물에 반사성이 높은 자재를 사용한 쿨루프 설치를 장려한다.
4) 도로, 인도, 주차장 등의 포장공간에 반사성 페인트 및 쿨 포장재를 적용하여 열 흡수를 저감하도록 한다.
5) 블루(blue)-그린(green) 인프라의 결합 방식을 적용하여 열섬현상 완화와 수자원 관리를 통합적으로 운영한다.
6) 도시의 에너지 전환을 지원할 수 있도록 에너지 효율성 제고, 재생에너지 이용 확대, 친환경 자동차 이용을 확대한다.
7) 에너지 이용의 효율 증대를 위해서 정부청사는 물론이고 주요 민간건물에 대해 녹색건축 원칙의 적용, 에너지 효율적 이용 및 보존 지침의 준수, 에너지 절약 가로등 설치, 녹색건축 건물주에게 인센티브 제공, 기존 공공청사의 녹색건축 전환 등을 추진한다.
8) 콘크리트, 아스팔트와 같은 건축물의 외피 재료는 열을 흡수하여 도시의 온도를 높이기 때문에 반사율이 높은 페인트, 쿨루프(Cool roof) 등을 통해 건물 표면이 열을 반사하도록 한다.
9) 친환경 자동차의 확대를 위해 간선급행버스에 전기차 도입 확대, 정부 및 공공기관의 공용차량에 대한 전기차 전환 확대, 전기차 이용 확산을 지원하기 위한 인프라의 개발 및 설치를 가속한다.
10) 주거지역으로의 열 확산을 완화하기 위해 도로 주변에 완충녹지를 조성하여 주거지역으로 열 이동을 완화한다.
11) 도시의 광장 등 통행밀집지역, 다중이용시설, 주거밀집지역에는 수경시설을 확대하여 열섬현상의 완화와 즉각적인 냉각효과를 제공한다.
12) 도시지역에서 열로 인한 건강 피해를 저감할 수 있도록 통행밀집지역, 대중교통정류장, 주요 보행로 등에 차양막, 열쉼터, 쿨링포크, 음수대 등 폭염회피시설을 설치한다.
13) 화석연료를 저감하기 위해 자카르타의 MRT, BRT을 확대하고 전기차 및 녹색교통(도보 및 자전거) 이용을 편리하게 한다.
14) 열 피해 완화를 위한 도시시설은 e-가로수벤치 같은 다기능시설로 설치하여 계절적 이용 편차가 최소화되도록 하여 시설관리의 경제성과 효율성을 확대한다.

3.2.3 방재행정 부문

1) 지속적으로 열섬현상과 열 관리를 위한 모니터링을 실시하고 그에 대응한 행동계획을 수립한다.
2) 열 흡수를 줄이기 위한 쿨루프, 반사성 포장재, 에너지 효율적 건축물을 요구하는 건축규정과 설계기준을 시행하고 토지이용규제를 재조정한다.
3) 열파 발생 등 열 관련 건강위험이 우려될 때는 우선적으로 취약계층을 보호하기 위한 긴급 대응계획을 수립하고 시행한다.
4) 열 관련 질병 및 사망 사례를 모니터링하여 건강에 미치는 영향을 추적하고 재난관리자원을 적재적소에 배분한다.

5) 열파 동안 전력수요를 관리하여 전력망의 부하를 줄이고 정전을 최소화하는 프로그램을 작동할 수 있도록 전력수요 대응 프로그램을 실시한다.
6) 가뭄 시에는 물이 부족한 지역에서 열섬효과가 악화될 수 있기 때문에 물와 열섬을 동시에 고려할 수 있도록 연계행정체계를 형성한다.

3.2.4 시민생활 부문

1) 사회경제적 취약계층이 열섬 피해에 더욱 취약하기 때문에 저소득층이 열 노출을 최소화할 수 있는 에너지 효율적인 주택에 접근할 수 있도록 주택정책을 추진한다.
2) 열 관련 건강문제를 인식하여 시민들은 폭염에 대비한 주민 행동요령을 숙지한다.
3) 도로 주변의 열 증가로 인한 건강피해를 입지 않도록 포장도로 주변에서의 장시간 활동을 자제한다.
4) 주택 재료 및 주거지의 구조가 열 영향에 취약한 경우 단열을 고려한 주택개량을 실시한다.
5) 폭염이 발생할 경우에는 정부 등 관계기관에서 제시한 행동요령에 따라 생활상의 필요한 조치를 취한다.
6) 뉴스 등 공공매체를 통해 기상상황을 확인하고 생활상의 안전조치를 취한다.
7) 나무 심기, 냉방센터 관리, 녹색지붕 프로젝트와 같은 열 완화 노력에 커뮤니티가 참여하도록 장려한다.

제4장 홍수

4.1 영향 요인의 관리 가이드라인

4.1.1 지역마다 홍수 발생에 따른 피해 정도에 영향을 줄 수 있는 물리적 요인과 기상학적 요인을 과학적으로 도출하여 각 지역의 재난관리에 적용한다.

4.1.2 물리적 측면에서는 불투수면적, 식생, 습윤, 토지피복, 유량흐름, 경사도 및 기울기, 강-하천-도로까지의 거리 등을 검토한다.

4.1.3 기상학적 측면에서는 강수량 중 하천으로 흐르는 양, 포화수증기압, 증발산량, 기후수분결핍, 토양수분, 누적강수량, 누적유량, 가뭄지수, 최고온도, 지형습윤지수 등을 검토한다.

4.2 적용영역의 관리 가이드라인

4.2.1 계획수립 부문

1) 현명한 물관리도시(Water Wise City)를 지향하는 계획수단을 적용한다.[24]
2) 지역단위의 물관리종합계획을 수립하여 저영향개발(LID), 기후·생태기반시설(녹색기반시설)의 설치, 물 절약, 오폐수 재이용 확대, 지하수 재충진 프로그램 등을 추진한다.[25]
3) 홍수관리를 위해 집중강우유출수(Stormwater runoff) 문제를 완화할 수 있도록 계획을 수립한다.
4) 홍수 영향을 고려하여 수계영향지역에 설치하는 시설물에 대한 친수시설규정을 마련하여 시행한다.[26]
5) 주요 수계에 일정 규모 이상의 특정 시설물을 설치할 때는 재해영향을 고려할 수 있도록 하천유역의 환경평가를 강화한다.
6) 물관리 계획은 물의 공급관리(치수), 물의 이용관리(이수), 주변 관리(수변)를 통합한 물관리를 지원할 수 있도록 통합계획으로 수립한다.

4.2.2 도시관리 부문

1) 도시지역의 불투수 문제에 대한 대안으로 주거밀집지역 인근에 레인가든, 다목적 호수 등 유수 및 저수공간을 마련한다.
2) 저지대의 배수 문제에 대응하기 위해 배수를 저해하는 지반침하를 정책적 우선순위에 배정한다.
3) 홍수취약지역을 판별하고 그에 따른 배수펌프장 용량을 확보한다.
4) 하천의 부유 및 적체 쓰레기로 인한 배수 방해를 최소화하기 위해 하천 청소를 주기적으로 실시한다.

---

24) 김이형, 2017, "통합물관리와 기후변화적응", 「기후변화와 통합물관리 세미나자료집」, 기후변화 대비 수자원적응기술 개발연구단, p.27
25) KOICA 인도네시아사무소, 2019, 「인도네시아 찌따룸강 유역 홍수예경보시스템 구축 2차사업 기본계획」, p.6을 수정
26) KEI, 2020, 「하천구역 내 친수시설물 입지 및 조성에 관한 환경영향평가 가이드라인 마련 연구」, pp.32~36을 수정

5) 건기의 물 부족과 우기의 물 오염을 동시에 고려하는 방안으로 가뭄과 홍수에 강한 토착식물을 선별하고 식재하여 재난예방과 피해저감을 도모한다.
6) 지역단위 적응형 물관리정책[27]을 통해 주요 수계의 주변에 재난에 대비한 완충지대를 조성하고 관리체계를 구축한다.
7) 유역단위로 토지이용, 점오염원·비점오염원 관리, 하수도 관리, 물순환, 주택·교통계획 등 하천에 영향을 미치는 요소들을 종합적으로 고려하여 계획을 수립·시행한다.
8) 도시지역에서 홍수 및 가뭄에 대비하여 상수도, 하수도 및 하천관리에 필요한 기반시설을 확충하고 관리를 강화한다.
9) 홍수 방어 능력을 높이기 위해 소하천 범람 대비 설계빈도를 상향하고 대심도 터널, 지하 방수로, 강변 저류지 등 관련 기반시설을 지속적으로 확충한다.
10) 가뭄 상황에 효과적으로 대응할 수 있도록 댐-보-하굿둑을 과학적으로 연계 운영하고 대규모 저수지(ex. 500만㎥)뿐만 아니라 중· 소규모 저수지(ex. 30만㎥)까지 치수능력을 보강한다.[28]
11) 해안-하천-도시를 포괄하는 통합물관리체계를 구축하기 위해 주요 수계주변에 대한 재난에 대비한 완충지대의 조성 및 관리체계를 구축한다.
12) 해안 및 인접지역에서는 침투수 관리를 위해 빗물을 신속하게 땅으로 침투시키는 침투우물을 조성한다.[29]
13) 기후변화 영향에 대한 취약성이 높은 지역에 대해 우선적으로 물 관련 기반시설을 강화한다.[30]
14) 생태기반과 지역사회기반 접근법 결합하여 연성구조물, 경성구조물, 복합구조물 등 다양한 물관리 구조물을 설치한다.
15) 가뭄과 홍수의 위협을 받는 면적과 가구 수, 농지 규모, 산업을 기준으로 댐, 저류조, 식생관리를 실시한다.
16) 대체할 수 있는 깨끗한 물 공급원을 마련하고 빗물 저장을 위한 건설과 구조물을 개선한다.
17) 해수면 상승의 위협을 고려하여 해안지역의 담수관리를 조정한다.
18) 지역단위 홍수 및 가뭄 통제를 위한 시설을 강화하기 위해 저수지, 댐, 연결수로, 교량, 수문 등 시설 조성을 확대한다.
19) 홍수취약지역을 중심으로 홍수통제 펌프 설치를 확대하고, 장기적으로 통합적 하천관리를 달성하기 위해 토지 매입을 확대한다.
20) 물 저장시설의 공급 확대를 위해 댐 건설, 저수지 축조, 가뭄 대응에 필요한 빗물 저장시설의 개발 및 조정, 가뭄과 해수유입으로 담수에 영향을 받는 해안 및 도서지역에 물탱크와 저수지의

---

27) 김영오, 2017, "기후변화와 적응형 물관리 전망", 「기후변화와 통합물관리 세미나자료집」, 기후변화 대비 수자원적응기술 개발연구단, pp.13~18
28) 환경부, 2023, 「제3차 국가 기후위기 적응 강화대책 수립」, 보도자료, p.2
29) 서울연구원, 2022, "자카르타주 '저탄소개발계획' 수립 사례" 「세계도시동향」, 제526호 (https://www.si.re.kr/node/66100)을 재정리
30) Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.24Kementerian PPB/Bappenas, 2019, NATIONAL ADAPTATION PLAN, EXECUTIVE SUMMARY, p.24

축조를 실시한다.

21) 집수구역의 재정비를 통해 습지생태계의 보호와 복원, 숲과 토지에 대한 식생을 활용한 복원, 고품질의 생산적 산림식생의 공급을 강화한다.

22) 물 재활용 기술의 개발·보급을 위해 역삼투 담수화기술의 활용 방안 개발 및 적용, 폐수를 정화하는 물 재활용 기술의 적용을 확대한다.

24) 물 손실 방지를 위한 기술개발·적용, 급·배수 관로의 건설, 유지 및 수리, 관로누출 탐지기술의 적용[31]을 확대한다.

25) 홍수-가뭄 통합관리기술의 개발·적용으로 가뭄을 예방하고 수계를 보충하기 위해 기후완화 기술의 적용, 홍수로부터 물 주입 기술의 적용, 과도한 표면유출수에 대응하여 투수 및 흡수 아스팔트의 활용을 확대한다.

4.2.3 방재행정 부문

1) 물 발자국(Water Footprint)을 고려하는 물관리행정으로 전환한다.

2) 도시홍수와 도시가뭄에 대한 예보 및 경보 시나리오를 작성하여 활용한다.

3) 예·경보 시나리오에서 과거의 침수 및 가뭄자료 분석, 침수 및 가뭄 위험기준 등을 설정하여 지방정부 단위의 도시홍수 및 도시가뭄에 대한 대응 시나리오로 활용한다.[32]

4) 재난발생시 가뭄지역에 실시간으로 물을 배급할 수 있는 행정체계를 구축한다.

4.2.4 시민생활 부문

1) 가뭄 기간에 물 자원을 절약하고 효율적으로 이용하고 관리할 수 있도록 교육, 훈련, 홍보 등을 통해 시민들의 인식 향상을 도모한다.

3) 무단 투기되어 하천에서 부유하거나 배수로에 적체된 쓰레기로 인해 발생하는 환경문제, 홍수시 방재문제에 대한 시민인식을 형성한다.

4) 물 문제에도 기여하고 주민들의 기초생활시설로도 활용하는 차원에서 주택, 건물, 지역사회 단위에서 다양한 규모와 방식의 도시농업을 도입하고 활동에 참여한다.

5) 홍수로 인한 재난발생에 대비한 주민 행동요령을 숙지하고, 홍수 예·경보 발생 등 침수 우려 시에 하천 및 해안의 저지대와 지하공간, 공사현장 등 홍수취약지역으로의 접근을 삼가고 차량 이용에 주의한다.[33]

6) 주민들은 뉴스 등 공공매체를 통해 기상상황을 확인하고 홍수 발생이 우려될 때는 정부 등 관계기관에서 제시한 홍수시 행동요령에 따라 생활상의 안전조치를 취한다.

---

31) 서울연구원, 2022, "자카르타주 '저탄소개발계획' 수립 사례" 「세계도시동향」, 제526호 (https://www.si.re.kr/node/66100)을 재정리

32) 국립재난안전연구원, 2014, 「지역별 주요 재난대응 시나리오 및 기준개발(1)-도시홍수 및 가뭄 중심으로」, pp.52~53

33) 행정안전부, (연도미상) '홍수 대비 국민행동요령', '태풍·호우 대비 국민행동요령'

제5장 복합재난의 통합관리

5.1 통합계획

5.1.1 환경-도시-재난의 연계계획이 가능하도록 복합재난을 고려한 재해 예방형, 지역 맞춤형의 도시계획 대안을 발굴·시행한다.

5.1.2 도시의 녹지공간의 감소에 대응하기 위해 계획적으로 녹지공간을 확충하고, 공간적 특성을 고려하여 생태면적율을 적용하거나 녹지빌딩, 선형녹지, 입체녹지 등의 대안녹지를 발굴하고 활용하는 방안도 강구한다.

5.1.3 재해취약성 분석, 복합재난 관리지도, 도시별 방재계획을 연계한 예방형 도시계획적 대책을 수립한다.

5.1.4 환경계획, 도시계획, 방재계획 간의 연계를 보장하기 위해 법률이나 행정규정으로 연계계획을 제도화한다.

5.1.5 복합재난대응이 가능한 도시기능을 활성화할 수 있도록 기반시설과 도시시설을 재편성한다.

5.1.6 지역사회의 도시-환경-기후 전문가들은 기후변화로 인한 복합재냔 대응에 효과적인 도시시설을 발굴하고 설치 방안을 제시한다.

5.1.7 단기적으로는 그린인프라(green infra)와 그레이인프라(gray infra)를 적절하게 혼합하여 복합재난에 대응하면서, 장기적으로는 그린인프라를 중심으로 도시시설을 개편한다.

5.1.8 열-질병-홍수 간에 부정적 피드백이나 부정적 시너지 최소화할 수 있도록 각 대응 계획 간에 상호 교차 검토를 적극 실시한다.

5.1.9 주민들이 생활과정 및 생업현장에서도 직접 재난 관련 모니터링에 참여할 수 있도록 스마트폰 앱 등을 활용한 개방형 모니터링 체계를 개발하여 활용한다.

5.1.10 재난대응계획과 환경계획, 도시계획 등 관련 법정계획의 이행 적절성을 파악할 수 있는 피드백 매커니즘을 도입하여 체계적인 계획 추진을 유도한다.

5.1.11 재난 관련 계획 및 사업추진에 따른 성과평가는 일선기관과 총괄기관으로 구분하여 실시하며[34], 재난 관련 기관의 역할과 책임을 분명하게 관리한다.

5.2 도시관리

5.2.1 '지역사회기반의 재난대응정보시스템'을 구축하여 중앙정부 이전에 지역단위의 현장에서 먼저 신속하게 기초적 대응을 할 수 있는 체계를 마련한다.

5.2.2 기후변화에 따른 복합재난의 조기예보 및 경보체계를 강화하기 위해 AI를 활용한 홍수예보시스템 등을 개발·적용하여 예보시간 확대와 예측주기 단축을 도모한다.[35]

---

34) 한국행정연구원, 2022, 「분야별 성과지표 개선방안 연구: 재난안전분야를 중심으로」 p.223
35) 환경부, 2023, 「제3차 국가 기후위기 적응 강화대책 수립」, 보도자료, p.2

5.2.3 복합재난은 예방-대비-대응-복구단계로 구분하여 단계별 관리를 실시한다.

1) 예방단계

① 재난대응 조직의 구성 및 정비, 재난예측 및 예측정보에 관한 체계 구축, 재난발생에 대비한 교육·훈련과 홍보, 안전관리체계의 구축과 규정 제정, 국가핵심기반의 관리, 특정관리대상지역에 관한 조치, 재난방지시설의 점검·관리, 재난관리자원의 비축과 장비·시설 및 인력 지정 등을 실시한다.

② 자연재해가 복합재난으로으로 악화되지 않도록 인구 및 시설물 밀집지역에 대한 필수서비스 공급시설을 관리를 강화한다.

2) 대비단계

① 긴급 통신수단의 마련, 기능별 재난대응 활동계획의 작성과 활용, 위기관리 매뉴얼의 작성과 운용, 재난대비 훈련 등을 시행한다.

② 재난관리자원을 비축하고 통합 재난관리체계를 구축하며, 효율적인 자원투입을 위한 훈련을 정기적으로 시행한다.

3) 대응단계

① 대응단계: 재난발생 1일 시간 내에서 응급조치 및 긴급구조를 시행 후에 재난의 확대 방지 및 피해 저감을 위해 구호 및 대응시설을 신속하게 마련한다.

② 응급조치 : 재난경보의 발령, 피난 권고와 지시, 인력과 장비 및 물자의 동원·위험구역의 설정·대피명령·응급지원 등 응급조치의 수행, 긴급 수송 및 구조 수단 확보, 지역 소재 행정기관 소속 공무원의 비상소집, 피해시설의 응급복구와 방역·방범·질서 유지, 급수수단·피난처·구호품 등의 확보, 현장 지휘통신 체계 확보, 지역에 대한 여행 등 이동자제 권고, 휴업명령 및 휴원·휴교 처분 요청, 그 밖에 재난예방에 필요한 조치를 취한다.

③ 긴급구조 : 긴급구조 활동은 소방청 또는 소방서를 중심으로 수행하는데, 긴급구조는 신속한 인명구조와 더불어 피해확산 저감에 중요하다.

4) 복구단계

① 복구단계는 단기복구(1주일 이내)와 장기복구 단계로 구분하여 시행하며,[36] 재난피해의 신고·조사·보고, 재난복구계획의 수립·시행, 자체 복구계획 또는 특별재난지역의 재난복구계획에 따라 시행되는 사업관리 등을 실시한다.

② 단기복구 단계에서는 피해 받은 주민들의 기본적인 의식주를 지원하는 것이 중요하며, 복합재난발생 후 복구단계에서도 필수 서비스 공급시설에 대한 지원을 지속한다.

③ 장기복구 단계에서는 주민들이 정상적인 경제·사회 생활을 할 수 있도록 회복 부분에 초점을 두고 관리요하며, 경제활동 기반시설의 중요도가 높기 때문에 일반적인 공공시설의 관리뿐만 아니라 경제활동에 관련된 민간시설 및 지역관리도 수행한다.

5.2.4 지역맞춤형의 재난관리 매뉴얼을 제작하고 그에 따라 지역별로 재난대응에 필요한 역할을 분담하고

36) 국토연구원, 2020,「국토정책 Brief」, No.754. p.4

담당 조직을 구성한다.

5.2.5 민간기업과 민간조직이 보유한 재난 시에 사용 가능한 인력·기술·장비 등에 대한 지속적인 관리체계를 유지한다.

5.2.6 물-열-질병의 복합재난 관리지도와 도시방재계획의 통합적 운영을 위해 '방재 및 재난관리 통합플랫폼'을 개발한다.

5.2.7 관련된 민간기관이 통합플랫폼에 참여하고 실제 재난대응 활동을 수행할 수 있도록 개방형의 통합플랫폼으로 구축한다.

5.3 행정관리

5.3.1 복합재난의 위기를 관리할 수 있도록 「위기관리 대응 매뉴얼」을 작성하여 운영하며 항상 최신화하여 대응력을 강화한다.

5.3.2 복합재난에 대한 위기관리 대응 매뉴얼은 국가 차원의 표준매뉴얼 외에도 지방정부별로 실무매뉴얼과 재난대응인력을 위한 행동매뉴얼로 구분하여 작성하고 운용한다.[37]

5.3.4 지방정부의 재난 관련 공무원들의 역할과 역량이 재난대응력 향상의 중요한 요소이기 때문에[38] 재난 관련 공무원을 확대 충원하고 전문성 향상을 위한 교육·훈련 프로그램을 강화한다.

5.3.4 공무원 외에도 재난에 관련된 공공부문과 민간업체의 담당자들을 대상으로 「재난대응 훈련 가이드북」 등을 작성하여 교육 및 훈련을 지속적 체계적으로 진행한다.

5.3.6 주요 취약시설과 지원시설의 중요도를 도출하여 복합재난 관리지도를 작성한다.

5.3.7 복합재난의 대응에 필수적인 지원시설은 필수 서비스 공급시설, 경제활동 기반시설, 교통 기반시설, 구호·대처시설로 구분하고 지방정부가 세분하여 관리한다.

5.3.8 지역의 관공서 및 학교 등 공공기관을 중심으로 현장 중심의 재난안전통신망을 마련한다.

5.3.9 주거밀집지역과 다중이용시설을 대상으로 재난대비 훈련을 정기적으로 실시하여 실천적 대응역량을 함양한다.

5.3.10 재난발생 시에 행정영역, 지원영역, 주민영역별로 따라야 하는 「재난대응 행동요령」을 제작하여 배포하고 그에 따른 현장훈련을 진행한다.[39]

5.3.11 재난관리에 필요한 자원을 일상적으로 관리하고 재난발생 시에 즉각 동원하여 사용할 수 있도록 공공-민간통합의 재난관리자원 공동관리체계를 구축한다.

5.4 거버넌스

5.4.1 시민들은 기후위기로부터 안전한 도시 및 지역만들기에 적극 참여한다.

5.4.2 재난대응에 필요한 거버넌스는 최다의 주민참여, 효율적 협력구조, 지역자원 최대활용을 고려하여

---

37) 충남연구원, 2019, 「재난관리 매뉴얼 현행화 및 초기 행동매뉴얼 작성」, pp.6~9
38) 한국행정연구원, 2021, 「재안안전관리 역량 제고 방안 연구」, p.301
39) 행정안전부, 2017, 「재난관리 공동활용시스템(DRSS) 가이드 북」, p.8, 11

구성한다.

5.4.3 재난취약계층의 디지털 격차를 최소화하여 모든 주민의 재난 관련 정보 접근을 최대화한다.

5.4.4 주민들에 대한 재난대응 교육을 확대하고 교육 참여를 활성화하기 위한 적절할 동기를 부여한다.

5.4.5 효율적 재난대응을 위해 지방정부와 지역기업 등 민간기관이 협력할 수 있는 체계의 구축과 상시 관리체계를 구축한다.[40]

5.4.6 재난대응에 필수적인 적정한 인력과 시설을 갖춘 민간업체 등을 지방정부에서 재난대응 지원기관으로 지정하고 관리한다.

5.4.7 재난대응에 필요한 공공기관간 협력구조를 근간으로 공공-민간기관(기업)간 협력방안, 공공기관-지역주민간 협력방안을 구성하고 재난대응을 위한 관행으로 정착시킨다.

5.4.8 쓰레기 처리를 재난대응과 자원관리 차원에서 다룰 수 있는 지역단위의 순환자원 활용 프로그램을 지속적으로 발굴한다.

5.4.9 재난에 대비하여 해당 지역에서 획득 및 조달 가능한 장비와 물품을 정기적으로 조사하고 그 목록을 관련 기관과 지역주민에게 공유한다.

---

40) 두산인프라코어는 2008년 중국 쓰촨성 대지진과 2010년 칭하이성 지진 때에 굴삭기 등의 중장비를 복구 작업에 투입하는 협력지원을 실시하였고, 삼성에스원 3119 구조단은 국가재난이나 대형사고가 발생했을 때 지역소방서와 협력하여 구조활동을 하는 한국 최초의 민간 구급구조기관으로 지정 (한국행정연구원, 2022, 「재난대응 과정에서의 협업체계 강화방안 연구」, p.53~54)

연구교육 2025-03-029

기후위기 시대 자카르타-세마랑 해안도시벨트 복합재난 대응을 위한 리빙랩 기반의 솔루션 연구

발 행 2025년 2월
발 행 인 장원삼
발 행 처 한국국제협력단
편 집 인 ODA연구교육원
주 소 경기도 성남시 수정구 대왕판교로 825(우: 13449)
전 화 1588-0434
팩 스 031)740-0260
홈페이지 http://www.koica.go.kr
인 쇄 경성문화사
I S B N 978-89-6469-626-2 93320

[본 보고서의 저작권은 한국국제협력단에 있으며,
한국국제협력단의 허락 없이 무단 전제와 복제를 금합니다.]

연구자료

연구교육 2025-03-029

978-89-6469-626-2 93320

기후위기 시대 자카르타-세마랑 해안도시벨트
복합재난 대응을 위한 리빙랩 기반의 솔루션 연구

13449 경기도 성남시 수정구 대왕판교로 825
Tel. 1588-0434 Fax. 031-740-0260
https://www.koica.go.kr

KOICA 한국국제협력단