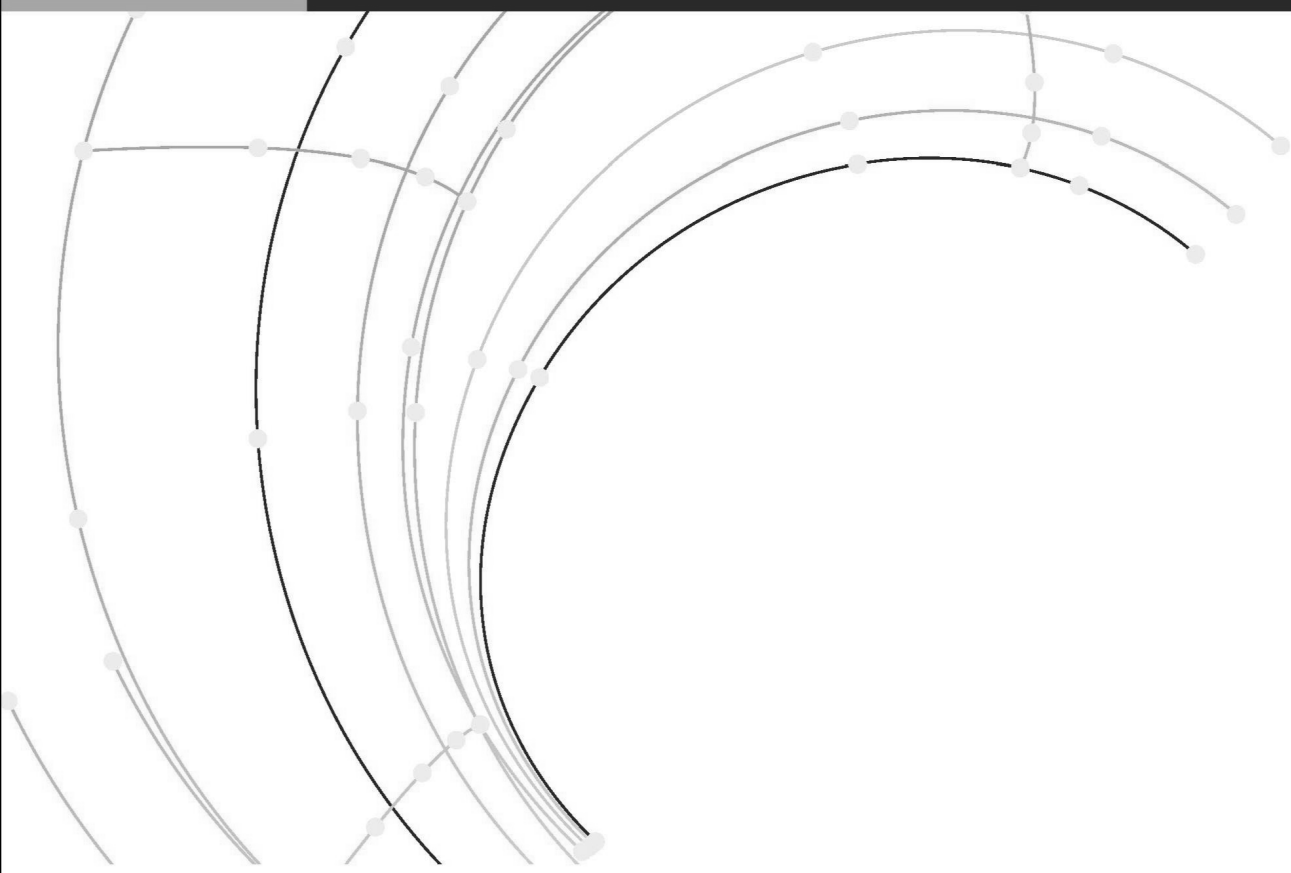
정책연구 2026-36

경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 모델 개발 연구

Development of an Integrated External and Internal Flood Risk Assessment Model for Gyeonggi Province

왕원준 외
makelest@gri.re.kr



www.gri.re.kr

GRI 경기연구원
Gyeonggi Research Institute



GRI 경기연구원
Gyeonggi Research Institute

정책연구 2026-36

경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 모델 개발 연구

Development of an Integrated External and Internal Flood Risk Assessment Model for Gyeonggi Province

연구책임 왕원준 (경기연구원 연구위원)
연구지원 윤영관 (경기연구원 선임연구원)

인쇄 2026년 6월
발행 2026년 6월
발행인 강성천
발행처 경기연구원
주소 (16207) 경기도 수원시 장안구 경수대로 1150
전화 031)250-3114 / 팩스 031)250-3111
홈페이지 www.gri.re.kr
등록번호 제99-3-6호

ⓒ 경기연구원, 2026

ISBN 979-11-6853-556-5 93530

※ 이 보고서의 내용은 연구자의 의견으로서
경기연구원의 공식 견해와 다를 수 있습니다.

POLICY
PROPOSAL

정책건의

❑ 기후변화로 집중·극한호우가 증가하고 경기도에서 2년 주기로 대규모 홍수피해가 반복되면서, 한정된 방재예산의 치수사업 투자우선순위를 뒷받침할 개선된 홍수위험도 평가체계가 요구됨

○ 극한호우(시간당 50mm 이상)의 누적 발생일수는 과거(1973~1997년) 대비 약 86.2% 증가

○ 경기도는 최근 2년 주기(2018, 2020, 2022, 2024년 등)로 집중호우 및 태풍에 따른 대규모 홍수피해가 반복됨

❑ 기존 경기기후플랫폼의 홍수위험도 평가는 하천발 외수 침수에 한정되고 극한강우사상에 대한 홍수위험지도를 일괄 적용하여, 도심지의 내수침수 미반영과 홍수위험에 대한 과대평가 등의 한계가 있었음

○ 도로와 같은 공공시설 세부지표가 일부 미반영됨

○ 강우 규모와 무관하게 극한 강우사상 침수지도를 일괄 적용하여 과대평가될 우려가 존재

❑ 본 연구는 외수(홍수위험지도)와 내수(도시침수지도)를 통합하고, 표준유역별 최대강우량 규모에 부합하는 빈도별 침수지도를 선택하여 2016~2024년 경기도 31개 시군·격자 단위 홍수위험도 지수를 산정함

○ 전국 69개 ASOS 관측소와 578개 ASOS+AWS 관측소 자료로 표준유역별 지속시간별 최대강우량을 산정하고, 재현기간 30년 빈도 미만은 적용에서 제외

○ 도로 면적·지하차도 면적(시군), 침수심·침수면적(격자) 등 신규 세부지표를 추가하여 공공시설 피해와 침수 강도를 반영

❑ 시군 단위는 유전 알고리즘(GA) 가중치를, 격자 단위는 엔트로피 가중치, 유클리드 거리를 적용해 홍수위험도 지수를 산정하고 재해연보 호우·태풍 피해액 순위로 정확도를 검증함

○ 시군 단위 지수는 재해연보 피해액 순위와의 절대오차·RMSE 기준으로 높은 일치도를 보임

○ 격자 단위 지수는 시군 내 침수 위험지역과 피해대상(건물·인구·농경지·도로)의 분포를 정밀하게 진단

❑ **산정 결과물을 경기기후플랫폼에 탑재하여 홍수피해 저감을 위한 의사결정지원 체계를 구축할 것을 제안함**

○ 2016~2024년 시군·격자 단위 홍수위험도 산정 결과를 경기기후플랫폼에 탑재

○ 시군 단위 지수는 지자체별 치수사업 방재예산의 투자우선순위 결정을 지원하는 참고자료로 활용

○ 연도별 강우 규모별 침수 위험지역을 100m×100m 격자 단위 통계지도로 시각화하여 사전 대피계획 수립, 자산유형별 피해 저감, 주민 안전인식 개선에 기여

키워드 극한호우, 홍수위험지도, 도시침수지도, 홍수위험도 지수

CONTENTS

차례

정책건의

제1장 | 서론 _ 1

1. 연구의 배경 및 목적 ····· 3
   1) 연구의 배경 ····· 3
   2) 연구의 목적 ····· 5
2. 홍수위험도 평가 관련 연구 동향 ····· 6
   1) 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD) ····· 7
   2) 홍수피해지표(Flood Damage Index, FDI) ····· 8
   3) 자연재해 안전도 ····· 8
   4) 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI) ····· 8
   5) 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수(Flood Risk Index, FRI) ····· 9
3. 선행 연구의 문제점 분석 및 연구방향 ····· 9

제2장 | 경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 방법론 구축 _ 13

1. 평가체계의 기본 개념: 침수·위험도·피해의 구분 ····· 15
2. 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 방법론 ····· 16
   1) 항목 및 세부지표 구성 ····· 16
   2) 외수·내수 통합 침수지도 활용 및 빈도별 침수지도 선택 ····· 18
   3) 침수지도와 중첩을 통한 피해대상 선별 ····· 20
   4) 세부지표별 지수화 ····· 21
   5) 유전 알고리즘 기반 가중치 산정 ····· 22
   6) 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 ····· 25
3. 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 방법론 ····· 26
   1) 항목 및 세부지표 구성 ····· 26
   2) 격자자료-침수지도 중첩 및 격자 선별 ····· 27
   3) 세부지표별 지수화 ····· 28
   4) 가중치 산정 및 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 ····· 29

제3장 | 경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 결과 _ 31

1. 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 결과 ····· 33
   1) 경기도 내 표준유역별 침수지도 적용 ····· 33
   2) Hazard 항목의 시군 단위 세부지표 지수 ····· 38
   3) Exposure 항목의 시군 단위 세부지표 지수 ····· 43
   4) Vulnerability 항목의 시군 단위 세부지표 지수 ····· 54
   5) Capacity 항목의 시군 단위 세부지표 지수 ····· 62
   6) 유전 알고리즘 기반 세부지표별 가중치 산정 결과 ····· 67
   7) 경기도 31개 시군별 홍수위험도 지수 산정 및 정확도 검증 ····· 68
2. 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 결과 ····· 71
   1) 격자 단위 산정 결과의 표출 방식 ····· 71
   2) Hazard 항목의 격자 단위 세부지표 지수 ····· 72
   3) Exposure 항목의 격자 단위 세부지표 지수 ····· 73
   4) Vulnerability 항목의 격자 단위 세부지표 지수 ····· 76
   5) 세부지표별 엔트로피 가중치 산정 결과 ····· 78
   6) 격자 단위 항목별 지수 산정 ····· 79
   7) 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 및 실제 피해 사례 비교 ····· 84
   8) 빈도별 침수지도를 적용한 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 ····· 89

제4장 | 결론 및 정책 제언 _ 93

1. 시군 단위 홍수위험도 지수의 결론 ····· 95
   1) 빈도별 침수지도 선택 적용을 통한 홍수위험도 과대평가 완화 ····· 95
   2) 13개 세부지표 기반 통합 평가체계의 구축 ····· 95
   3) 유전 알고리즘 가중치의 의의 및 정확도 검증 ····· 96
2. 격자 단위 홍수위험도 지수의 결론 ····· 96
   1) 침수 강도를 반영한 격자 단위 세부지표 구성 ····· 96
   2) 엔트로피 가중치 및 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 ····· 97
   3) 위험지역·피해대상의 공간 정밀 진단 ····· 97
3. 활용 방안 ····· 98
   1) 시군 및 격자 단위 홍수위험도 평가를 고려한 치수사업 의사결정 지원 ·· 98
   2) 항목별 진단을 통한 대응수단 차별화 ····· 98

3) 기존 법정계획 및 방재제도와의 연계 ····· 99
4) 시계열 진단을 통한 위험 변화 모니터링 ····· 99
4. 정책 제언 ····· 99
1) 경기기후플랫폼 기반 정례 평가체계의 안정적 운영 ····· 99
2) 치수사업 의사결정의 보조 참고자료로 활용 ····· 100
3) 위험정보 공개를 통한 주민 위험소통 강화 ····· 100
5. 평가체계의 한계 및 향후 과제 ····· 100

참고문헌 _ 101

Abstract _ 103

TABLES

표차례

[표 1-1] 과거(25년), 최근(25년)의 집중호우, 극한호우 누적 발생 일수 비교 ····· 4
[표 1-2] 선행 연구(경기연구원, 2025)와 본 연구의 홍수위험도 평가 방법 비교 10
[표 2-1] 침수·위험도·피해의 개념 구분 ····· 16
[표 2-2] 시군 단위 홍수위험도 지수의 4개 항목 및 13개 세부지표 ····· 17
[표 2-3] 침수지도 유형별 제공 빈도 ····· 18
[표 2-4] 경기도 내 표준유역별 최대강우량 규모에 따른 침수지도 적용 기준 ····· 19
[표 2-5] 침수지도 유형별 대표 지속시간 ····· 20
[표 2-6] 격자 단위 홍수위험도 지수의 3개 항목 및 11개 세부지표 ····· 27
[표 3-1] 연도별 침수지도 적용 대상 표준유역 목록 ····· 34
[표 3-2] 13개 세부지표별 유전 알고리즘 기반 가중치 산정 결과 ····· 67
[표 3-3] 연도별 시군 단위 호우·태풍 피해액 순위와 홍수위험도 지수 순위 간 절대오차 통계 70
[표 3-4] 경기도의 홍수위험지도 내 격자 단위 세부지표별 엔트로피 가중치 산정 결과 ··· 79

PICTURES

그림차례

[그림 1-1] 연도별 극한호우(시간당 50mm 이상) 발생 일수 ····· 3
[그림 1-2] 외수침수와 내수침수의 개념도 ····· 5
[그림 1-3] 표준유역별 최대강우량 규모에 따른 빈도별 침수지도 선택 적용 개념도 ·· 6
[그림 1-4] IBA 기반 홍수위험도 지수 개념도 ····· 7
[그림 2-1] 침수·위험도·피해의 관계 ····· 16
[그림 2-2] 격자 단위 건축물수와 침수지도를 활용한 침수된 건축물 선별 ····· 21
[그림 2-3] 시군별 건축물수의 min-max 정규화 지수(왼쪽)와 분위수 기반 구간별 점수(오른쪽) 22
[그림 2-4] 유전 알고리즘을 활용한 최적 가중치 산정 과정 ····· 24
[그림 2-5] 유전 알고리즘 기반 2016년, 2024년 경기도 31개 시군별 홍수위험도 지수 25
[그림 2-6] 시군 단위 홍수위험도 지수 산정에 대한 연구흐름도 ····· 26
[그림 2-7] 2022년 기준 30년 빈도 침수지도 사용 시 침수심 지수, 도로 면적 지수 ·· 28
[그림 2-8] 홍수위험지도 내 피해 대상이 존재하는 홍수위험도 지수 격자 선별 ·· 30
[그림 2-9] 격자 단위 홍수위험도 지수 산정에 대한 연구흐름도 ····· 30
[그림 3-1] 전국 69개 ASOS 관측소와 578개의 ASOS+AWS 강우관측소 분포 ·· 33
[그림 3-2] 2016~2024년 경기도 내 침수지도 적용 기준을 만족하는 표준유역 수 ·· 36
[그림 3-3] 2016~2024년 경기도의 연도별 호우·태풍 피해액 ····· 37
[그림 3-4] 지속시간별 30년 빈도 이상 강우 발생 횟수 및 최대 강우빈도 ····· 37
[그림 3-5] 경기도 31개 시군의 연도별 홍수위험지도+도시침수지도 분포 ····· 38
[그림 3-6] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 최대강우량(지속시간 2시간) 지수 ·· 39
[그림 3-7] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 최대강우량(지속시간 12시간) 지수 ··· 41
[그림 3-8] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 건축물수 지수 ····· 44
[그림 3-9] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 주민등록인구수 지수 ····· 46
[그림 3-10] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 공시지가 지수 ····· 48
[그림 3-11] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 농경지 면적 지수 ····· 50
[그림 3-12] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 도로 면적 지수 ····· 52
[그림 3-13] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 노후건축물수 지수 ····· 54
[그림 3-14] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 의존인구수 지수 ····· 56
[그림 3-15] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 밭·시설·인삼 재배면적 지수 ·· 58
[그림 3-16] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 지하차도 면적 지수 ····· 60

[그림 3-17] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 방재시설 밀도 지수 ····· 63
[그림 3-18] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 누적 방재예산액 비율 지수 ··· 65
[그림 3-19] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 홍수위험도 지수 ····· 68
[그림 3-20] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 침수심 지수 분포 ····· 72
[그림 3-21] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 침수면적 지수 분포 ····· 72
[그림 3-22] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 건축물수 지수 분포 ····· 73
[그림 3-23] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 주민등록인구수 지수 분포 ····· 74
[그림 3-24] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 공시지가 지수 분포 ····· 74
[그림 3-25] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 농경지 면적 지수 분포 ····· 75
[그림 3-26] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 도로 면적 지수 분포 ····· 75
[그림 3-27] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 노후건축물수 지수 분포 ····· 76
[그림 3-28] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 의존인구수 지수 분포 ····· 77
[그림 3-29] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 밭·사설·인삼 재배면적 지수 분포 ·· 77
[그림 3-30] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 지하차도 면적 지수 분포 ····· 78
[그림 3-31] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 Hazard 지수 분포 ····· 80
[그림 3-32] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 Exposure 지수 분포 ····· 80
[그림 3-33] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 Vulnerability 지수 분포 ····· 81
[그림 3-34] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 Hazard 지수 분포 ····· 81
[그림 3-35] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 Exposure 지수 분포 ····· 82
[그림 3-36] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 Vulnerability 지수 분포 ····· 82
[그림 3-37] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 Hazard 지수 분포 ····· 83
[그림 3-38] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 Exposure 지수 분포 ····· 83
[그림 3-39] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 Vulnerability 지수 분포 ····· 84
[그림 3-40] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 홍수위험도 지수 분포 ····· 85
[그림 3-41] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 홍수위험도 지수(선별) 분포 ··· 86
[그림 3-42] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 홍수위험도 지수 분포 ····· 86
[그림 3-43] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 홍수위험도 지수(선별) 분포 ··· 87
[그림 3-44] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 홍수위험도 지수 분포 ····· 87
[그림 3-45] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 홍수위험도 지수(선별) 분포 ··· 88
[그림 3-46] 2022.8.8.~9. 경기도 양평군의 침수 피해 발생 지점 분포 ····· 89
[그림 3-47] 2024년 기준 경기도의 빈도별(30~500년) 격자 단위 홍수위험도 지수 분포 ·· 90

1

서론

1. 연구의 배경 및 목적
2. 홍수위험도 평가 관련 연구 동향
3. 선행 연구의 문제점 분석 및 연구방향

Gyeonggi Research Institute

제1장 서론

1 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

❑ 기후변화로 한반도를 포함한 동아시아의 강우량과 집중·극한호우의 발생빈도·강도가 지속적으로 증가

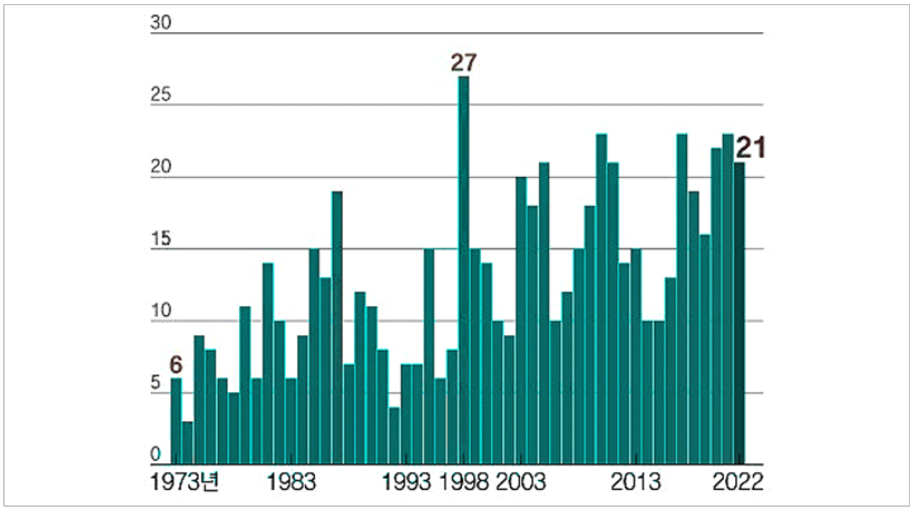
○ IPCC 제6차 평가보고서(AR6)에서는 동아시아 대부분 지역에서 여름철 몬순 기후의 영향으로 강우량이 장기적으로 증가할 것으로 평가함

○ 다수 관측소에서 일 최대강우량의 증가 경향이 발견되었으며, 향후 강우의 발생빈도와 강도가 지속적으로 증가할 가능성이 높은 것으로 평가됨

○ 국내에서도 시간당 30mm 이상(집중호우)과 50mm 이상(극한호우)의 발생빈도가 급격하게 증가

- 최근 25년(1998~2022) 집중호우, 극한호우 누적 발생일수는 각각 992일, 419일로 과거 25년(1973~1997) 대비 각각 34.4%, 86.2% 증가

[그림 1-1] 연도별 극한호우(시간당 50mm 이상) 발생 일수



자료: 중앙일보(2023). "https://www.joongang.co.kr/article/25178133".

[표 1-1] 과거(25년), 최근(25년)의 집중호우, 극한호우 누적 발생 일수 비교

항목	과거(1973~1997년)	현재(1998~2022년)	증가율
집중호우 (시간당 30mm 이상)	738	992	34.4%
극한호우 (시간당 50mm 이상)	225	419	86.2%

❑ 주거건물과 사회기반시설이 밀집된 경기도 도심지역에서 홍수 발생 시 인명 및 재산피해가 급격하게 증가

○ 경기도에서는 2년 주기(2018·2020·2022·2024년)로 집중호우·태풍에 따른 대규모 홍수피해가 반복적으로 발생

○ 정부는 홍수위험지역을 사전에 파악하고 재해예방사업 등 치수사업과 방재예산 편성을 통해 홍수피해를 저감

○ 치수사업은 대상 지역별 투자우선순위를 기준으로 의사결정이 이루어지기 때문에 정확한 홍수위험도 평가를 수행할 수 있는 의사결정 지원도구가 필요함

❑ 경기기후플랫폼에 탑재된 기존 홍수위험도 평가(2016~2023년)는 시군 내 침수위험지역과 피해대상 분포를 파악하는 데 유용함이 확인

○ 연도별 100m×100m 격자 통계지도와 홍수위험지도를 통해 침수 위험지역과 피해대상(건물·인구 등)의 분포가 직관적으로 파악됨

○ 다만 하천발 외수 침수 피해에 한정하여 평가가 이루어졌고, 도로 등 공공시설을 포함한 일부 세부지표가 미반영된 한계가 있음

❑ 경기도 내 홍수피해는 하천에서 발생하는 외수 침수 피해 외에 도심지에서 발생하는 내수 침수 피해로 피해유형이 다변화

○ 경기도 홍수피해는 하천이 넘치는 외수침수와 도심 배수가 막히는 내수침수로 구분됨

○ 평가 정확도 향상을 위해 도시침수(내수)까지 포함하여 홍수위험에 노출된 피해대상을 선별 및 진단하는 방향으로 확장이 요구됨

[그림 1-2] 외수침수와 내수침수의 개념도



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

2) 연구의 목적

❑ 격자 단위 공간분석자료와 홍수위험지도(외수)·도시침수지도(내수)를 기반으로 한 지표기반 접근법(Indicator Based Approach, IBA)으로 경기도의 개선된 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 프로세스를 제시

○ (외수·내수 통합) 하천발 홍수위험지도(외수)에 도시침수지도(내수)를 통합 적용하여 홍수위험도 평가의 정확성을 개선

○ (신규 세부지표 발굴) 침수 강도(침수심, 침수면적)와 공공시설물(도로·지하차도 등)이 평가에 반영되도록 신규 세부지표를 추가 발굴

○ (빈도별 침수지도 선택) 경기도 내 표준유역별 최대강우량 규모에 부합하는 빈도별 침수지도(외수·내수)를 선택 적용하여 홍수위험도가 과대평가되는 문제를 방지

- 경기기후플랫폼에 적용된 기존의 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수(Flood Risk Index, FRI)는 강우 규모에 상관없이 극한 강우사상에 대한 홍수위험지도(외수)를 일괄 적용했기 때문에 홍수위험에 노출된 피해대상(건물, 인구, 농경지 등)의 규모가 과대 평가됨

- 본 연구에서는 경기도 내 표준유역별로 집계되는 최대강우량의 규모에 부합하는 빈도별 침수지도(외수·내수)를 선택 적용하여 홍수위험도가 과대평가되는 문제를 방지

[그림 1-3] 표준유역별 최대강우량 규모에 따른 빈도별 침수지도 선택 적용 개념도



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (시군 단위) 경기도 31개 시군을 대상으로 2016~2024년 홍수위험도 지수를 산정하여, 위험도가 높은 시군을 파악하고 치수사업 투자우선순위 결정을 지원

❑ (격자 단위) 100m×100m 격자 단위로 홍수위험도 지수를 산정하여, 시군 내 위험지역과 피해대상(건물, 인구, 농경지, 도로 등)의 분포 및 밀집도를 정밀 진단

❑ 연구를 통해 도출된 산출물을 경기기후플랫폼에 탑재하여 경기도 31개 시군별 홍수피해 저감에 대한 의사결정지원체계를 구축

2 홍수위험도 평가 관련 연구 동향

❑ 위험도 평가 방법은 정량적 접근법(Quantitative approach)과 정성적 접근법(Qualitative approach)으로 구분

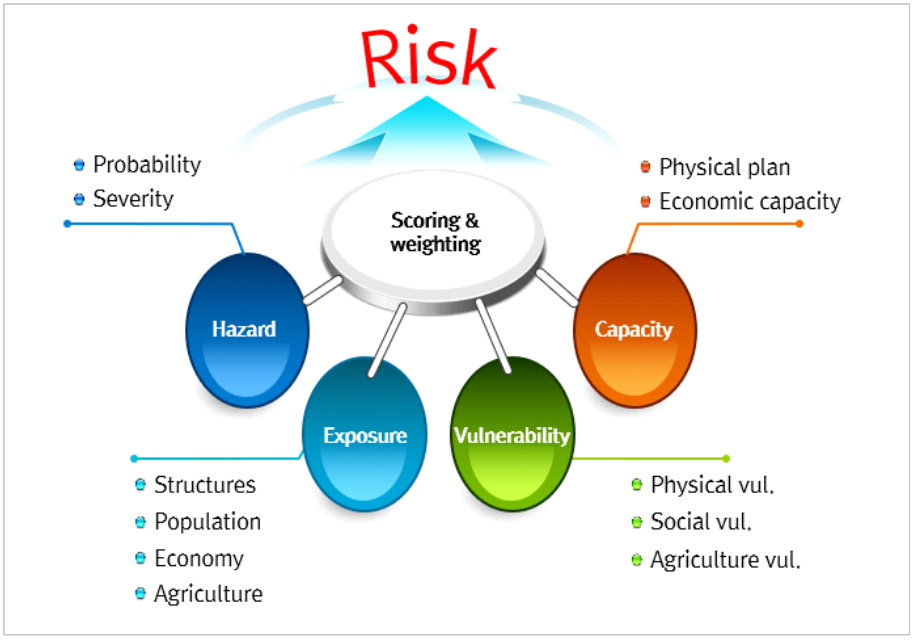
○ 정량적 접근법은 Quantitative Risk Assessment(QRA)와 Event Tree Analysis(ETA)로 구분

○ 정성적 접근법에는 Risk Matrix Approach(RMA)와 Indicator Based Approach(IBA) 등이 있음

❍ 본 연구에서는 격자 단위 공간분석자료와 침수지도를 활용하여 시군 및 격자 단위 상대위험도를 평가하므로, 정성적 평가 방법인 IBA가 가장 적절한 것으로 판단함

- IBA란 '위험'처럼 직접 측정하기 어려운 복합 개념을 Hazard(위해성), Exposure(노출성)·Vulnerability(취약성) 등을 대표하는 여러 측정 가능한 세부지표로 나눈 뒤, 이를 지수화, 가중치 적용 및 합성하여 하나의 종합지수로 산출하는 평가 방법임

[그림 1-4] IBA 기반 홍수위험도 지수 개념도



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ 국내에서 IBA를 활용한 홍수위험도 평가 사례로는 홍수피해잠재능(PFD), 홍수피해지표(FDI), 자연재해 안전도, 홍수취약성지수(FVI), 경기기후플랫폼의 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수 등이 있음

1) 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)

❑ 2개 항목(잠재성·위험성)과 9개 세부지표로 구성되어 치수단위 구역별 상대위험도를 평가(건설교통부, 2001)

○ 수자원장기종합계획 수립을 위해 도입된 국내 최초의 정성적 홍수위험도 평가방안

○ 도서지역·해안지역 등 지역적 여건을 고려하지 못하는 한계

2) 홍수피해지표(Flood Damage Index, FDI)

❑ 4개 요인(자연적·사회적·정책적·시설적)과 12개 지표로 구성되어 행정구역 단위의 위험도를 평가(국토연구원, 2005)

○ 행정구역 단위에서 상대위험도를 평가·비교할 수 있는 장점

○ 인명피해·간접피해 등에 대한 위험은 고려하지 못하는 한계

3) 자연재해 안전도

❑ 지자체별 풍수해 위험요인과 방재정책 추진상황을 점검·진단하기 위해 개발된 정성적 평가방안으로, 3개 부문(재해위험요인·방재대책추진·시설점검정비)으로 구성(행정안전부, 2022)

○ 2022년 기준 14개의 재해위험요인, 26개의 방재대책추진, 13개의 시설점검정비 지표로 구성됨

○ 부문별 지수에 유클리드 거리를 적용하여 산정하며, 1에 가까울수록 자연재해로부터 안전한 지자체를 의미

○ 자연재해저감종합계획 수립 시 현황자료로 활용되며, 상·하위 ±15%(A·E) 지자체에 피해복구비 국고추가지원율을 ±2% 가감하여 지원

4) 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI)

❑ 기후변화에 대비한 전라북도 홍수대책 선진화를 위해 개발된 방안으로, 4개 요인(기상학적·수문지형학적·사회경제적·홍수방어능력)과 15개 지표로 구성하여 14개 시군의 상대위험도를 평가(전북발전연구원, 2010)

○ 전라북도의 지역적 특징을 반영한 장점

○ 전라북도 14개 시·군에 한정하여 분석을 수행했다는 한계가 존재

5) 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수(Flood Risk Index, FRI)

❑ 경기도 내에서 연도별로 극한호우 및 태풍 발생 시 홍수피해 가능성이 높은 시군들의 홍수위험도를 파악하고, 위험 시군 내 침수지역과 피해대상(건물, 인구, 농경지 등)의 분포를 반영하여 격자 단위로 홍수위험도를 정밀하게 평가(경기연구원, 2025)

○ 세부지표별 격자 단위 공간분석자료와 국가·지방·소하천 홍수위험지도를 사용하여 홍수위험에 노출된 피해대상을 선별하여 평가에 반영

○ 시군 단위 홍수위험도 지수는 유전 알고리즘 기반 가중치 산정법을 적용하고, 격자 단위 홍수위험도 지수는 엔트로피 가중치와 유클리드 거리를 적용하여 산정함

○ 하천발 외수침수에 한정해서 피해대상을 선별했기 때문에 내수침수가 미반영되었고, 극한강우사상에 대한 홍수위험지도를 모든 시군에 일괄 적용하여 홍수위험도가 과대 평가될 수 있다는 한계가 존재

3 선행 연구의 문제점 분석 및 연구방향

❑ 선행 연구는 지자체별 통계자료나 공간분석자료에서 추출한 통계값으로 건축물수 등의 세부지표별 DB를 구축

○ 지자체별 통계자료는 자료 특성상 홍수위험에 직접 노출되는 대상만 선별하여 사용할 수 없음(왕원준 외, 2021)

○ 도로명주소 전자지도 등의 폴리곤 기반 공간분석자료는 피해자산을 선별·가공하는 데 요구되는 작업성능과 소요시간이 큰 단점

○ 경기기후플랫폼의 기존 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수(경기연구원, 2025)는 하천발(외수) 침수지도 활용이 주가 되어, 최근 증가하는 도시침수(내수) 피해를 반영하는 데 한계가 있음

○ 또한, 경기도 내에서 집계되는 강우 규모에 상관없이 극한 강우사상에 대한 홍수위험지도를 일괄 적용했기 때문에 홍수위험에 노출된 피해대상(건물, 인구, 농경지 등)의 규모가 과대 평가되는 문제가 존재

❑ 기존 연구와의 차별점

- ❍ (외수·내수 통합) 하천발 홍수위험지도 외에 도시침수지도를 함께 적용하여 경기도 내 홍수위험도 평가의 정확성을 개선
- ❍ (빈도별 침수지도 선택) 경기도 내 표준유역별 최대강우량 규모에 부합하는 빈도별 침수지도(외수·내수)를 선택 적용하여 홍수위험도가 과대평가되는 문제를 방지
- ❍ (침수지도 유형별 대표 지속시간 설정) 침수유형별 유역 반응시간을 고려해 대표 지속시간군을 차등 적용하고, 해당 지속시간군 내 최대 빈도를 선택
- ❍ (신규 세부지표 추가) 침수 강도와 도로·지하차도 등 공공시설물이 평가에 반영되도록 신규 세부지표를 추가

[표 1-2] 선행 연구(경기연구원, 2025)와 본 연구의 홍수위험도 평가 방법 비교

구분	선행 연구(경기연구원, 2025)	본 연구
분석 대상	경기도 31개 시군	경기도 31개 시군(동일)
분석 기간	2016~2023년	2016~2024년(1개년 확장)
침수 유형	외수(하천 범람) 중심	외수 + 내수(도시침수) 통합
침수지도 적용 방식	극한 강우사상에 대한 침수지도를 전 시군에 일괄 적용	경기도 내 표준유역별 최대강우량 규모에 부합하는 빈도별 침수지도 선택 적용(30년 빈도 미만 미적용)
사용 침수지도	국가·지방·소하천 홍수위험지도(외수)	좌동 + 도시침수지도(내수), 빈도별
침수지도 유형별 지속시간 적용 기준	지속시간 구분 없이 극한 강우사상 침수지도 일괄 적용	침수유형별 유역 반응시간을 고려해 대표 지속시간군을 차등 적용하고, 해당 지속시간군 내 최대 빈도를 선택 • 도시침수지도: 1·2·3시간 • 소하천: 1·2·3·6시간 • 지방하천: 6·12시간 • 국가하천: 6·12·24시간
Hazard 세부지표	• (시군) 확률강우량(100년·24h), 최대강우량(24h) • (격자) 시군과 동일	• (시군) 최대강우량(2h), 최대강우량(12h) — 단기·장기 분리 • (격자) 침수심, 침수면적

구분	선행 연구(경기연구원, 2025)	본 연구
Exposure 세부지표	건축물수, 주민등록인구수, 공시지가, 농경지 면적(4개)	좌동 + 도로 면적(5개)
Vulnerability 세부지표	노후건축물수, 의존인구수, 밭·시설·인삼 재배면적(3개)	좌동 + 지하차도 면적(4개)
Capacity 세부지표	방재시설 밀도, 누적 방재예산액 비율(2개)	좌동(2개)
세부지표 수	• (시군) 11개 • (격자) 9개	• (시군) 13개 • (격자) 11개
가중치 산정법	• (시군) 유전 알고리즘(GA) • (격자) 엔트로피 + 유클리드 거리	좌동
정확도 검증 기준	시군별 호우·태풍 피해액 순위와 홍수위험도 지수 순위 간 절대오차	좌동

❍ 본 연구에서 제시한 2016~2024년 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수는 기존 외수 중심 평가의 한계를 보완하여 정성적 홍수위험도 평가의 정확도와 신뢰성을 개선한 의사결정지원도구로 활용 가능

02

경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 방법론 구축

1. 평가체계의 기본 개념: 침수·위험도·피해의 구분
2. 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 방법론
3. 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 방법론

제2장 경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 방법론 구축

1 평가체계의 기본 개념: 침수·위험도·피해의 구분

❑ 본 연구의 '홍수위험도 지수'를 올바로 이해하려면 '침수', '위험도', '피해'를 구분해야 함. 세 가지는 비슷해 보이지만 뜻이 서로 다르므로, 방법론을 설명하기 전에 먼저 구분하여 정의함

○ 비가 내리면 물이 차고(침수), 그 자리에 건물, 사람, 농경지처럼 피해를 입을 대상이 많을수록 위험이 커지며(위험도), 그 결과 실제 손실(피해)이 발생함. 즉 '강우 → 침수 → 위험도 → 피해'의 순서로 이어지며, 각 단계는 의미가 서로 다름

○ (침수 ≠ 위험도) 물이 깊게 차더라도 그 자리에 건물이나 사람이 없으면 피해로 이어지지 않아 위험도는 낮게 산정됨. 예를 들어 빈 들판이 잠기는 경우와 도심 주거지가 잠기는 경우는, 물에 잠긴 정도는 같아도 위험도는 크게 다름

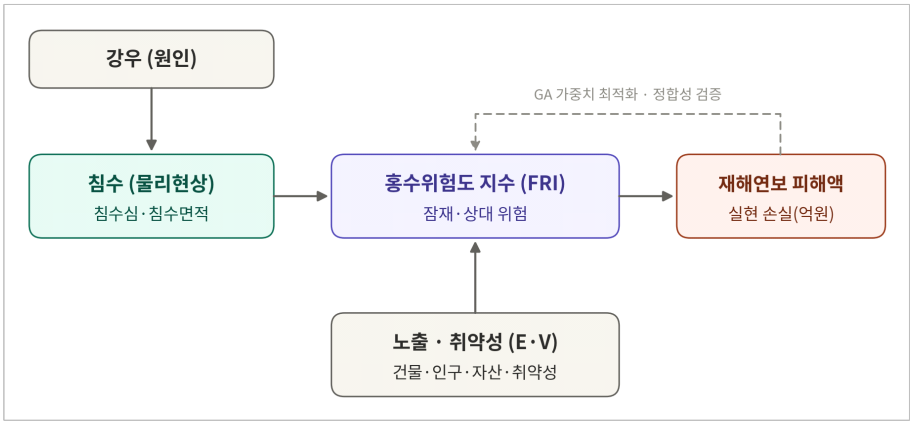
○ (위험도 ≠ 피해액) 홍수위험도 지수는 '어느 시군이 상대적으로 더 위험한가'를 비교하기 위한 값이며, 피해 금액을 직접 예측하지는 않음. 지수가 높다는 것은 피해가 발생할 가능성이 크다는 뜻이지, 특정 액수의 손실을 의미하지는 않음

○ (피해액의 역할) 본 연구에서 재해연보의 호우·태풍 피해액은 홍수위험도 지수를 만드는 과정에서 두 가지로 쓰임. ①실제 피해가 컸던 시군에서 홍수위험도 지수가 더 크게 산정되도록 세부지표별 가중치를 정하는 기준으로, ②완성된 지수가 실제 피해 순위와 얼마나 일치하는지 확인하는 검증 자료로 활용함 (행정안전부, 2025)

[표 2-1] 침수·위험도·피해의 개념 구분

개념	정의	본 연구에서의 위치	측정 방식
침수(강도)	침수심, 침수면적으로 표현되는 물리적 침수 특성	Hazard 항목의 세부지표(격자)	물의 깊이(m)와 잠긴 면적(m^2)
홍수위험도 지수(FRI)	H·E·V·C를 결합한 상대적·잠재적 위험량	본 연구의 최종 산출물	시군 간 비교를 위한 무차원 지수
호우·태풍 피해액	홍수로 실제 발생한 손실 금액	GA 가중치 최적화 목표 + 정합성 검증 기준	실제 피해 금액 (천 원)

[그림 2-1] 침수·위험도·피해의 관계



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

2 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 방법론

1) 항목 및 세부지표 구성

❑ 지표기반 접근법(IBA)을 적용한 시군 단위 홍수위험도 지수는 4개 항목(Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity)과 13개 세부지표로 구성

○ Hazard 항목은 홍수 위험과 관련된 세부지표(최대강우량 등)로 구성되어 있으며, 세부지표 지수가 크게 산정된 시군은 단기, 장기 강우사상의 규모가 크게 발생한 시군을 의미함

○ Exposure 항목은 홍수위험에 노출된 건물, 인구, 농경지, 도로 등으로 세부지표를 구성하였으며, Vulnerability 항목은 Exposure 항목의 세부지표가 가지고 있는 취약성을 나타내는 세부지표(노후건축물수, 의존인구수 등)로 구성됨

○ Capacity 항목은 대상 지역의 홍수위험을 저감하는 데 기여하는 세부지표로 구성되어 있으며, 연도별 개선되는 세부지표 지수의 변화를 통해 지자체에서 홍수피해를 줄이려는 조치 및 관심 여부를 확인할 수 있음

❑ 외수·내수 통합 평가체계 고도화를 위해 신규 세부지표를 추가

○ (Hazard) 단시간과 장기간 강우 특성을 모두 반영하기 위해 기존의 확률강우량(100년 빈도, 지속시간 24시간)과 최대강우량(지속시간 24시간)을 제외하고 최대강우량(지속시간 2시간)과 최대강우량(지속시간 12시간)을 추가

○ (Exposure) 홍수위험에 노출된 공공시설을 반영하기 위해 도로 면적을 추가

○ (Vulnerability) 침수에 취약한 도로를 반영하기 위해 지하차도 면적을 추가

[표 2-2] 시군 단위 홍수위험도 지수의 4개 항목 및 13개 세부지표

항목	세부지표	단위
Hazard	최대강우량(지속시간 2시간)	mm
	최대강우량(지속시간 12시간)	mm
Exposure	건축물수	동
	주민등록인구수	명
	공시지가	천 원
	농경지 면적	m^2
	도로 면적	m^2
Vulnerability	노후건축물수(20년 이상)	동
	의존인구수(유아+고령)	명
	밭·시설·인삼 재배면적	m^2
	지하차도 면적	m^2
Capacity	방재시설 밀도	개/km^2
	누적 방재예산액 비율	천 원/km^2

2) 외수·내수 통합 침수지도 활용 및 빈도별 침수지도 선택

❑ 하천발 홍수위험지도(외수)에 도시침수지도(내수)를 함께 적용하여 홍수위험도 평가의 정확성을 개선

○ 기후에너지환경부에서는 '홍수위험지도 정보제공포털'에서 전국 국가하천, 지방하천 홍수위험지도와 도시침수지도를 빈도별로 제공하고 있음

○ 행정안전부에서는 과거 R&D 과제를 통해 전국 빈도별 소하천 홍수위험지도를 결과물로 도출하였음

○ 선행 연구에서는 극한 강우사상에 대한 하천발 홍수위험지도(국가, 지방, 소하천)만을 일괄 적용했기 때문에 연도별로 강우관측소에서 집계되는 강우강도가 침수지도에 고려되지 못했고, 도심지에서 발생하는 내수침수도 홍수위험도 평가에 미반영됨

○ 따라서 본 연구에서는 경기도 내 126개 표준유역을 대상으로 집계되는 6개 지속시간(1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간)별 면적 단위 최대강우량을 확률강우량과 비교해서 빈도별 홍수위험지도와 도시침수지도를 적용함

[표 2-3] 침수지도 유형별 제공 빈도

침수지도 유형	제공 빈도	제공기관
국가하천 홍수위험지도	100년, 200년, 500년	기후에너지환경부
지방하천 홍수위험지도	50년, 80년, 100년, 200년, 500년	기후에너지환경부
소하천 홍수위험지도	30년, 50년, 80년, 100년	행정안전부
도시침수지도	30년, 50년, 80년, 100년, 500년	기후에너지환경부

자료: 홍수위험지도 정보시스템. "https://www.floodmap.go.kr/intro".

❑ 극한강우 침수지도를 일괄 적용하면 노출 피해대상과 위험도가 과대평가되므로, 표준유역별 강우규모에 부합하는 빈도별 침수지도를 선택하여 적용

○ (분석 흐름) 침수지도 수집(외수+내수) → 126개 표준유역 강우규모 산정 → 지속시간별 빈도 판정 → 적용 침수지도 선택 → 침수지도와 세부지표별 격자 중첩 및 격자 단위 통계량 갱신

❑ (강우빈도 판정) 경기도 내 표준유역별 연도별 최대강우량을 지속시간별 확률강우량과 비교하여 적용 빈도를 판정

○ 표준유역에서 집계된 지속시간별 최대강우량이 30년 빈도 미만인 경우 침수지도를 미적용하고, 30년 이상부터는 30·50·80·100·200·500년 빈도 순으로 대상 구간의 침수지도를 적용

○ 30년 빈도 미만은 '무침수'가 아니라 '지도 적용기준 미충족'으로 해석

○ 제공되지 않는 중간빈도는 상향 적용을 지양하고 낮은 빈도를 적용(40년 빈도 규모의 최대강우량은 30년 빈도 침수지도를 적용)

○ 집계된 지속시간별 최대강우량이 최대 빈도(500년 빈도)를 초과하는 경우 최대 빈도(500년 빈도) 침수지도를 적용

[표 2-4] 경기도 내 표준유역별 최대강우량 규모에 따른 침수지도 적용 기준

표준유역 내 최대강우량 규모	적용하는 침수지도
30년 빈도 미만	침수지도 미적용
30년 이상 50년 미만	30년 빈도 침수지도 적용
50년 이상 80년 미만	50년 빈도 침수지도 적용
80년 이상 100년 미만	80년 빈도 침수지도 적용
100년 이상 200년 미만	100년 빈도 침수지도 적용
200년 이상 500년 미만	200년 빈도 침수지도 적용
500년 이상	500년 빈도 침수지도 적용

○ 빈도별 침수지도를 적용할 때 가용 가능한 침수지도를 활용하는데, 예를 들어 30년 빈도 침수지도는 소하천 홍수위험지도와 도시침수지도만을 사용하고, 500년 빈도 침수지도의 경우 500년 빈도 홍수위험지도가 없는 소하천에서는 100년 빈도 침수지도를 대신 사용함

❑ (침수유형별 대표 지속시간군) 도시침수, 소하천, 지방하천, 국가하천은 임계 지속시간에 도달하는 유역 반응시간이 서로 다르므로, 침수유형별 대표 지속시간군 내 최대 빈도를 적용

○ 도시침수지도: 단시간(d1~d3) — 우수관로·저지대·지하차도 등 짧은 도달시간과 단시간 강우강도에 민감

○ 소하천 홍수위험지도: 단·중단기(d1~d6) — 유역면적이 작고 첨두 도달시간이 짧음

○ 지방하천 홍수위험지도: 중기(d6~d12) — 지류 유입과 중규모 유역의 첨두 홍수량 형성에 다소 긴 지속시간이 중요

○ 국가하천 홍수위험지도: 장기(d6~d24) — 본류 수위는 장시간 강우에 영향을 받음

[표 2-5] 침수지도 유형별 대표 지속시간

침수지도 유형	대표 지속시간
도시침수지도	지속시간 1시간(d1), 2시간(d2), 3시간(d3)
소하천 홍수위험지도	지속시간 1시간(d1), 2시간(d2), 3시간(d3), 6시간(d6)
지방하천 홍수위험지도	지속시간 6시간(d6), 12시간(d12)
국가하천 홍수위험지도	지속시간 6시간(d6), 12시간(d12), 24시간(d24)

❑ (30년 빈도 미만 강우 처리) 침수지도는 미적용하되 강우규모는 Hazard 항목의 최대강우량(d2, d12) 지수에 반영하여 강우위험은 반영되도록 함

3) 침수지도와 중첩을 통한 피해대상 선별

❑ 세부지표별 격자자료와 격자 단위 침수지도 간 중첩을 통한 선별

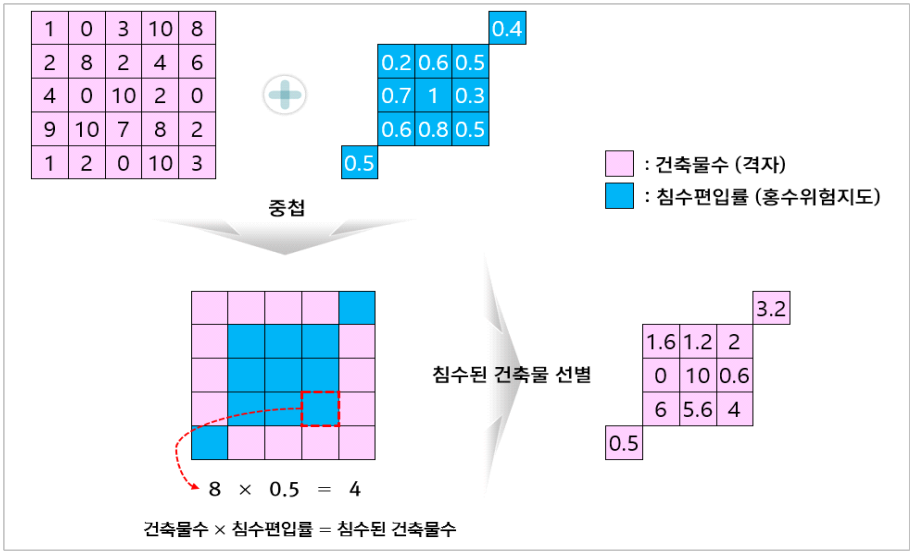
○ 국토정보플랫폼에서 제공하는 100m×100m 격자자료를 베이스로 4개 항목별 세부지표에 대한 래스터 기반 격자자료를 구축

○ 경기도 내 격자화한 국가하천·지방하천·소하천 홍수위험지도와 도시침수지도를 기준으로, Exposure, Vulnerability 세부지표 격자 중 침수 영향권에 포함되는 격자만 추출하여 분석에 활용

- 분석의 편의를 위해 홍수위험지도를 격자 단위 침수편입률을 속성값으로 갖는 래스터 기반 격자자료로 변환
- 선별된 세부지표별 격자에는 각 속성값에 홍수위험지도의 침수편입률을 가중하여 보정값을 산출

○ 선행 연구에서는 극한 강우사상에 대한 홍수위험지도만을 사용하여 피해대상을 선별하였으나, 본 연구에서는 연도별로 경기도 표준유역 단위로 집계된 최대 강우량 규모를 고려해서 취합된 침수지도(홍수위험지도+도시침수지도)를 격자화해서 선별에 사용함

[그림 2-2] 격자 단위 건축물수와 침수지도를 활용한 침수된 건축물 선별



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

4) 세부지표별 지수화

❑ 분위수를 활용한 구간별 점수화로 세부지표별 통계자료를 지수화

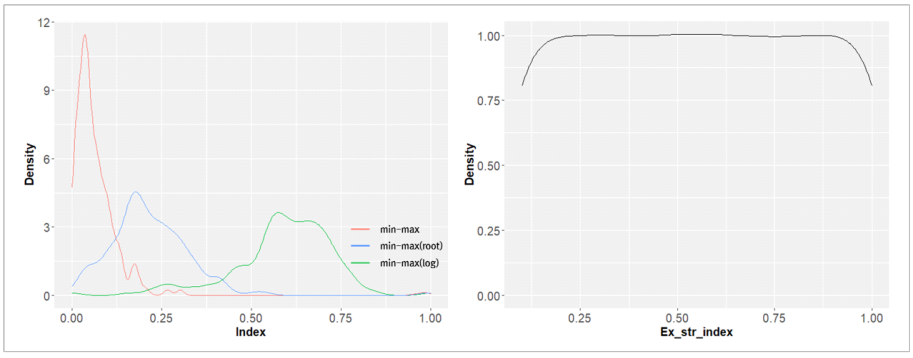
○ min-max 정규화, Z-score 등은 통계자료 분포에 편향이 있을 경우 지수가 왜곡되므로, 모든 구간에서 동일한 밀도를 갖는 분위수를 활용한 구간별 점수화 기법을 적용함

○ 해당 지수화 방법은 세부지표별 통계자료를 10분위수를 기준으로 10등분한 후 0.1~1의 범위에서 0.1 간격으로 각 구간마다 점수를 부여하는 방법임

○ 즉 동일한 밀도를 가진 구간별로 점수가 부여되는 방식이기 때문에 지수의 분포가 정규분포를 따르지는 않지만, min-max 정규화, Z-score 방법 등과는 달리 분포에 치우침 없이 지수화가 가능하다는 장점이 있음(왕원준, 2023)

○ 본 연구에서는 분위수를 활용한 구간별 점수화 기법을 적용하여 4가지 항목에 포함된 13개 세부지표별 통계자료를 지수화함

[그림 2-3] 시군별 건축물수의 min-max 정규화 지수(왼쪽)와 분위수 기반 구간별 점수(오른쪽)



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

○ Capacity 항목에 포함된 세부지표별 지수의 경우 다른 항목에 포함된 세부지표별 지수와 달리 지수의 크기가 의미하는 바가 정반대이므로 세부지표 지수에 반전화를 적용하여 시군 단위 홍수위험도 지수에 활용함

$$1.1 - Capacity \text{ 항목의 세부지표 지수}$$

5) 유전 알고리즘 기반 가중치 산정

❑ **세부지표별 지수에 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 기반 가중치를 적용·합산**

○ 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)은 생물의 유전·진화 과정을 모방한 전역 최적해 탐색 기법으로, 목적함수에 대한 수학적 제약이 적고 전역 최적해에 도달할 가능성이 큼

○ 엔트로피, AHP, TOPSIS 등 기존 가중치 산정법은 재해연보 피해액 순위와의 절대오차를 줄이는 데 한계가 있어, 본 연구에서는 GA 기반 가중치 산정법을 적용함

○ 세부지표 지수에 GA로 도출한 가중치를 부여한 뒤, 재해연보상 호우·태풍 피해액 순위와 시군 단위 홍수위험도 지수 순위 간 절대오차 합계가 최소가 되도록 최적의 홍수위험도 지수를 산정

○ 가중치 산정 절차는 ①입력자료 선별 → ②적합도 함수식 설정 → ③초기값 생성·보정 → ④적합도 산정·부모 염색체 선택 → ⑤교차·돌연변이 → ⑥가중치 보정·반복의 순서로 진행

○ (1단계) 입력자료 선별

- 연구기간(2016~2024년) 동안 호우·태풍 피해가 발생한 경기도 시군들을 중복 포함하여 선별
- 선별된 시군을 대상으로 분위수를 활용한 구간별 점수화로 산정한 세부지표별 지수와 시군별 호우·태풍 피해액 순위를 각각 정리

○ (2단계) 유전 알고리즘 기반 적합도 함수식 설정

- 연도별 시군 단위 홍수위험도 지수 순위와 호우·태풍 피해액 순위 간 편차의 합계가 최소가 되는 세부지표별 가중치(a, b, c, …)를 탐색하도록 적합도 함수식을 구성

$$\sum\Big(\Big|RANK(ax_{1_{2016}}+bx_{2_{2016}}+cx_{3_{2016}}+dx_{4_{2016}}+\cdots\cdots+mx_{13_{2016}})-RANK(Damage_{2016})\Big|+\Big|RANK(ax_{1_{2017}}+bx_{2_{2017}}+cx_{3_{2017}}+dx_{4_{2017}}+\cdots\cdots+mx_{13_{2017}})-RANK(Damage_{2017})\Big|+\Big|RANK(ax_{1_{2018}}+bx_{2_{2018}}+cx_{3_{2018}}+dx_{4_{2018}}+\cdots\cdots+mx_{13_{2018}})-RANK(Damage_{2018})\Big|+\vdots\Big|RANK(ax_{1_{2024}}+bx_{2_{2024}}+cx_{3_{2024}}+dx_{4_{2024}}+\cdots\cdots+mx_{13_{2024}})-RANK(Damage_{2024})\Big|\Big)$$

- 순위 편차에서 음수가 발생하지 않도록 절대값을 개별 적용하여 절대오차 합계를 산정하며, 적합도(절대오차 합계)가 작을수록 최적해에 근접

○ (3단계) 조건을 만족하는 초기값 생성 및 보정

- 세부지표별 가중치를 유전자로 갖는 염색체를 랜덤 샘플링하여 초기값 60개를 생성
- 교차 과정에서 10진수를 2진수로 변환하는 편의를 위해 가중치를 정수로 설정
- 염색체별 가중치의 합계가 1000이 되도록 보정(소수점 이하 내림, 마지막 가중치는 1000에서 나머지 합계를 차감하여 산정)

○ (4단계) 염색체별 적합도 산정 및 부모 염색체 선택

- 부모 염색체 선택에는 Rank 선택법(변형)과 Elitism Preserving 선택법을 함께 적용
- (Rank 선택법 변형) 적합도 순위가 상위인 염색체의 선택 확률이 더 크도록 적합도 비율 산정식을 변형하여, 최적해 탐색에 필요한 작업성능과 소요시간을 개선

$$Rank\,선택법(변형)의\,적합도\,비율 = \frac{\frac{1}{염색체별\,순위}}{\sum(\frac{1}{염색체별\,순위})}$$

- (Elitism Preserving) 가중치 개수가 많아 세대 전이 시 최적 가중치가 소멸할 수 있으므로, 직전 세대에서 적합도가 가장 좋은 염색체를 다음 세대에 그대로 전달
- 적합도(절대오차 합계)가 작은 염색체가 상위 순위를 갖도록 오름차순 정렬한 후 선택법을 적용

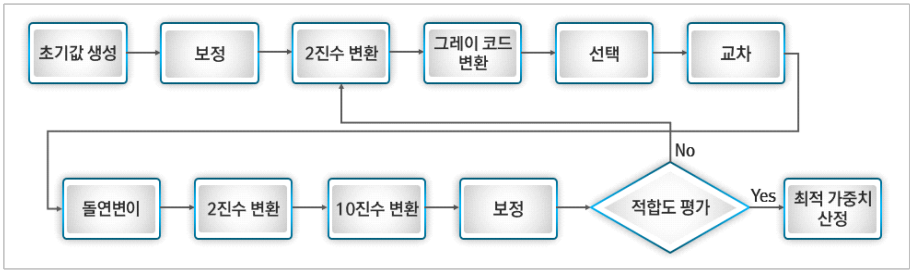
❍ (5단계) 염색체 간 교차 및 돌연변이

- 선택된 부모 염색체(중복 선택 허용)를 교차(Crossover)하여 자식 염색체를 생성
- 2진수를 그대로 교차하면 Hamming Cliff 문제가 발생하므로, 이웃한 수와의 Hamming 거리가 1인 그레이 코드(Gray Code)로 변환한 후 교차·돌연변이를 수행
- 각 가중치를 10비트 그레이 코드로 변환하므로, 그레이 코드의 총 자릿수는 세부지표 수에 10을 곱한 비트 수로 구성
- 가중치별 교차 지점은 랜덤으로 설정하고, 교차율 70%(부모 염색체 중 42개 랜덤 샘플링)와 돌연변이 발생확률 10%를 적용

❍ (6단계) 반복 수행을 통한 가중치 보정 및 최적 가중치 산정

- 그레이 코드를 10진수로 변환하면 가중치 범위가 0~1023이 되므로, 초기값에 적용한 보정을 다시 적용하여 범위를 0~1000으로 변경
- 여러 세대에 걸쳐 선택·교차·돌연변이를 반복하여 절대오차 합계가 최소가 되는 가중치를 탐색
- 최종 염색체의 가중치를 1000으로 나누어 세부지표별 최적 가중치(합계 1)를 산정

[그림 2-4] 유전 알고리즘을 활용한 최적 가중치 산정 과정



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

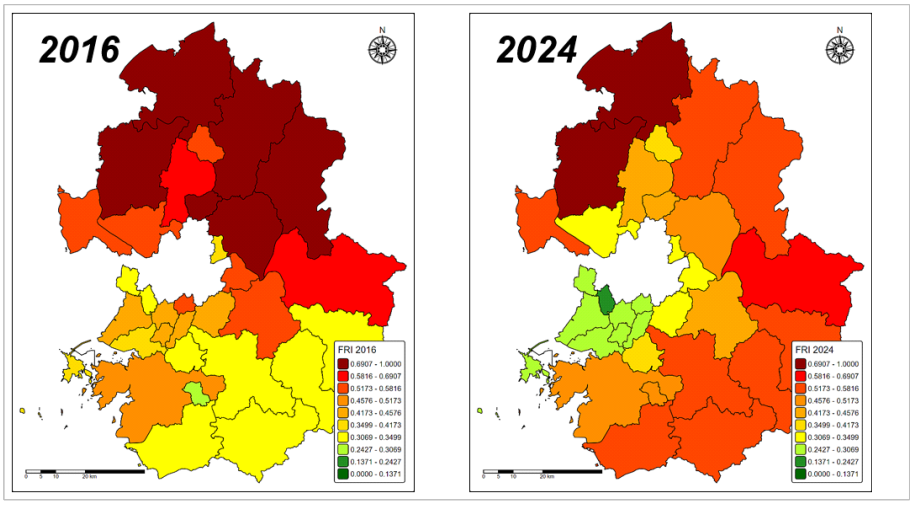
6) 시군 단위 홍수위험도 지수 산정

❑ 가중 합으로 산정된 지수에 min-max 정규화를 적용해 0~1의 범위를 갖는 지수로 변환

❑ 연도별 시군 단위 홍수위험도 지수를 산정하여 홍수위험도가 높은 시군들을 파악하고, 치수사업에 대한 의사결정지원도구로 활용

$$FRI = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + \cdots \cdots + mx_{13}$$

[그림 2-5] 유전 알고리즘 기반 2016년, 2024년 경기도 31개 시군별 홍수위험도 지수



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 2-6] 시군 단위 홍수위험도 지수 산정에 대한 연구흐름도



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

3 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 방법론

1) 항목 및 세부지표 구성

❑ 격자 단위 홍수위험도 지수는 3개 항목(Hazard·Exposure·Vulnerability)과 11개 세부지표로 구성

❍ Hazard 항목에는 최대강우량(지속시간 2시간), 최대강우량(지속시간 12시간) 대신 침수심, 침수면적이 신규 반영됨

- 격자 단위 침수심과 침수면적을 산정하기 위해 시군 단위 홍수위험도 지수에서 시군별 피해대상 선별에 사용한 연도별 표준유역 단위로 취합된 침수지도를 사용함
- 추가로 경기도 내 31개 시군에서 동일 강도의 강우가 발생했을 때 격자 단위 세부지표 지수, 항목별 지수, 홍수위험도 지수의 변화를 비교해 볼 수 있도록 30년, 50년, 80년, 100년, 200년, 500년 빈도 침수지도를 적용한 결과도 함께 도출함

❍ Exposure, Vulnerability 항목은 시군 단위에서 사용된 세부지표와 동일하게 도로 면적과 지하차도 면적이 반영됨

❍ Capacity 항목의 세부지표인 방재시설 밀도와 누적 방재예산액 비율은 시군 단위 통계자료로 구축되어, 격자화 시 동일 시군 내 격자가 모두 같은 값을 가져 격자 단위 위험도가 과대 혹은 과소평가될 수 있어 제외함

[표 2-6] 격자 단위 홍수위험도 지수의 3개 항목 및 11개 세부지표

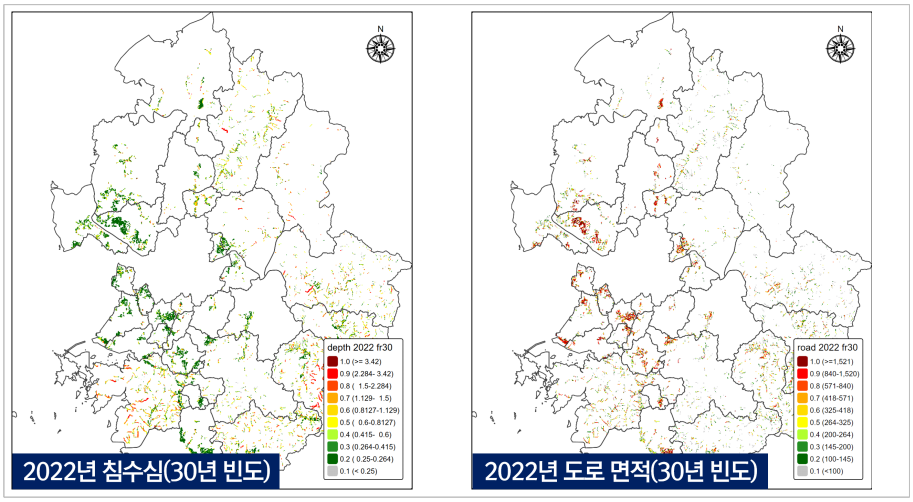
항목	세부지표	단위
Hazard	침수심	m
	침수면적	m^2
Exposure	건축물수	동
	주민등록인구수	명
	공시지가	천 원
	농경지 면적	m^2
	도로 면적	m^2
Vulnerability	노후건축물수(20년 이상)	동
	의존인구수(유아+고령)	명
	밭·시설·인삼 재배면적	m^2
	지하차도 면적	m^2

2) 격자자료-침수지도 중첩 및 격자 선별

❑ **세부지표별 100m×100m 격자자료와 침수지도(외수+내수)를 중첩하고 침수편입률을 적용하여 홍수위험에 직접 노출된 격자와 통계값을 선별**

○ 래스터 기반 격자자료는 행정경계의 제약을 받지 않아 분석에 필요한 격자만 선별하여 사용 가능

[그림 2-7] 2022년 기준 30년 빈도 침수지도 사용 시 침수심 지수, 도로 면적 지수



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

3) 세부지표별 지수화

❑ **분위수를 활용한 구간별 점수화를 개별 격자마다 적용하여 세부지표별 격자자료를 지수화**

❍ 속성값이 기준치 미만인 격자는 0.1로 일괄 변환한 뒤, 남은 격자를 9분위수로 9등분하여 0.2~1 범위에서 0.1 간격으로 점수를 부여

- (Hazard) 침수심 0.25m 미만, 침수면적 $100m^2$ 미만
- (Exposure) 건축물수 1동 미만, 주민등록인구수 1명 미만, 공시지가 0천 원, 농경지 면적 $100m^2$ 미만, 도로 면적 $100m^2$ 미만
- (Vulnerability) 노후건축물수 1동 미만, 의존인구수 1명 미만, 밭·시설·인삼 재배면적 $100m^2$ 미만, 지하차도 면적 $100m^2$ 미만

❍ 침수편입률 적용과 기준치(0.1) 미만의 격자 단위 통계값 처리는 세부지표 수준에서만 적용하며 항목 수준에는 적용하지 않음

❍ 또한, 세부지표별 지수화의 기준이 되는 분위수를 산정할 때는 경기도 내 모든 시군들의 침수 범위를 포함시키는 30년, 50년, 80년, 100년, 200년, 500년 빈도의 침수지도를 모두 반영한 상태에서 산정함

○ 빈도별 침수지도를 활용해 산정된 세부지표별 분위수 값을 그대로 연도별 침수지도를 적용한 세부지표별 격자자료에도 적용하여 지수화를 수행함

○ 이를 통해 동일한 분위수를 활용해 지수화를 수행했기 때문에 연도별 세부지표 지수 산정결과와 빈도별 침수지도를 적용한 지수화 결과를 비교할 수 있음

4) 가중치 산정 및 격자 단위 홍수위험도 지수 산정

❑ 세부지표별 엔트로피 가중치를 적용하여 항목별 지수를 산정

○ 엔트로피 가중치 산정법은 통계자료의 정량적 특성을 기반으로 산정되어 전문가의 주관이 개입되지 않는 객관적 가중치 산정법임

○ 11개 세부지표들을 항목별로 구분하여 엔트로피 가중치를 산정 후 가중 합을 적용해 연도별 Hazard, Exposure, Vulnerability 지수를 산정

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} \cdots x_{1n} \\ \vdots \quad \vdots \\ x_{m1} \cdots x_{mn} \end{bmatrix}$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \cdots, m;\ j = 1, 2, \cdots, n)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \log p_{ij} \quad (k = \frac{1}{\log m};\ j = 1, 2, \cdots, n)$$

$$d_j = 1 - E_j$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \quad (j = 1, 2, \cdots, n)$$

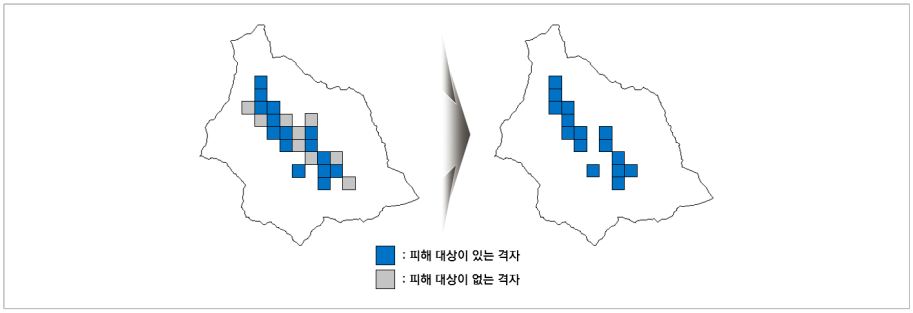
❑ 산정된 항목별 지수에 min-max 정규화를 적용한 뒤 Hazard, Exposure, Vulnerability 지수에 유클리드 거리를 적용하여 격자 단위 홍수위험도 지수를 산정

$$D = \sqrt{(Hazard)^2 + (Exposure)^2 + (Vulnerability)^2}$$

❑ 연도별 격자 단위 홍수위험도 지수를 산정하여 시군 내 침수 위험지역과 피해대상의 분포 및 밀집도를 정밀 진단하는 기반을 마련함

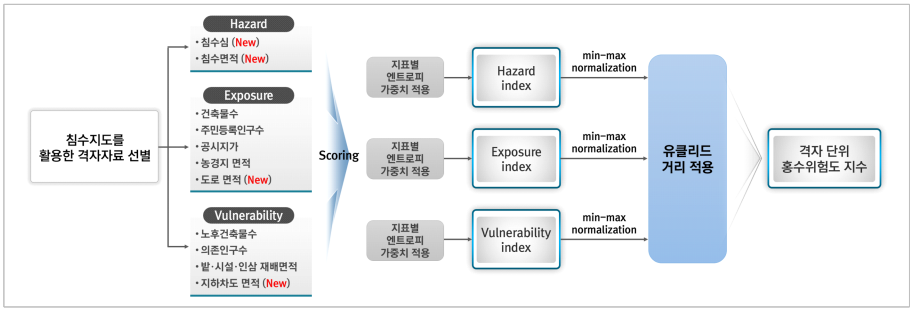
❑ 산정된 홍수위험도 지수 격자 중에서 피해대상(건물·인구 등)이 기준치 미만인 격자는 제거하면 시군별 침수 현황 파악에 대한 활용성을 개선할 수 있음

[그림 2-8] 홍수위험지도 내 피해 대상이 존재하는 홍수위험도 지수 격자 선별



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 2-9] 격자 단위 홍수위험도 지수 산정에 대한 연구흐름도



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

03

경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 결과

1. 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 결과
2. 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 결과

제3장 경기도 외수·내수 통합 홍수위험도 평가 결과

1 시군 단위 홍수위험도 지수 산정 결과

1) 경기도 내 표준유역별 침수지도 적용

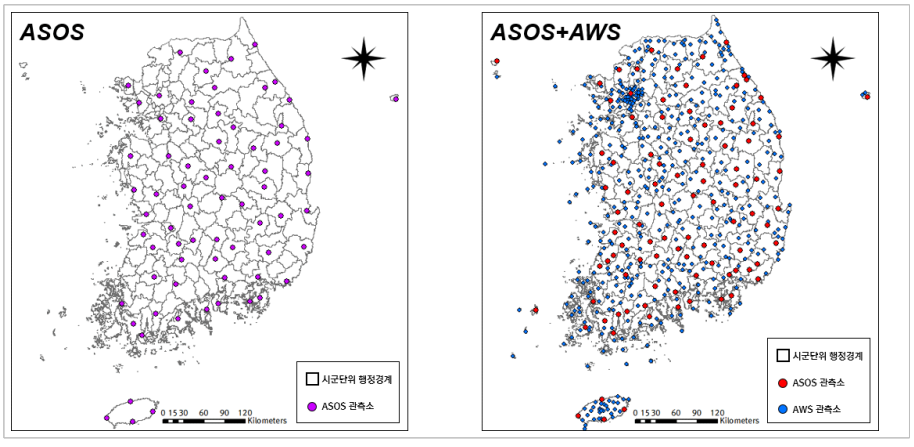
❑ 지속시간에 따른 표준유역별 최대강우량 산정을 위해 전국 69개 ASOS 관측소와 578개 ASOS+AWS 관측소 반영

○ 경기도 내 지속시간별 강우강도에 따른 표준유역별 침수지도 활용을 위해 티센 면적비로 면적 단위 확률강우량과 최대강우량을 산정함(국토해양부, 2011)

○ (확률강우량) 2016~2024년 동안 30년 이상인 강우자료를 보유하고 있는 69개의 전국 ASOS 관측소를 선정한 후 표준유역 단위의 연도별, 지속시간별 확률강우량을 산정함

○ (최대강우량) 2016~2021년에는 전국 578개 ASOS+AWS 관측소별 강우자료를 사용하고, 2022년은 575개, 2023년은 573개, 2024년은 571개의 관측소별 강우자료를 사용하여 표준유역 단위의 연도별, 지속시간별 최대강우량을 산정함

[그림 3-1] 전국 69개 ASOS 관측소와 578개의 ASOS+AWS 강우관측소 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ 경기도 내 침수지도 적용 기준을 만족하는 연도별 표준유역 선정

○ 연도별 표준유역 단위로 집계된 지속시간별 최대강우량의 강우강도를 기준으로 침수지도 유형별 지속시간 조건을 만족하는 30년 빈도 이상의 침수 규모 중에서 최대 빈도의 침수지도를 적용함

- 2018년 역곡천합류후 유역의 경우 국가, 지방, 소하천 홍수위험지도는 100년 빈도를 적용하고, 도시침수지도는 30년 빈도를 적용함

○ 검토 결과 2016~2024년(9년) 동안 2018년(8개), 2020년(8개), 2022년(12개), 2024년(6개)에 한정해서 침수지도를 적용할 기준을 충족하는 표준유역이 발생하였으며, 그중에서 강우강도가 가장 컸던 2022년에 최대 12개의 표준유역에 침수지도를 적용함

○ 2년 간격으로 집계된 표준유역의 수는 피해가 상대적으로 컸던 2018, 2020, 2022, 2024년에 집중되는 경향을 보임

○ 특히 지속시간별 30년 빈도 이상의 강우 발생 횟수를 살펴보면, 지속시간 2시간일 때 25번으로 최대 횟수가 집계되었으며, 강우 빈도도 500년 빈도로 최대 규모로 발생함

○ 그리고 지속시간 2시간을 기점으로 지속시간이 증가할수록 30년 빈도 이상의 강우 발생 횟수와 규모는 감소하는 추세를 보여줌

○ 침수지도가 미적용된 5년(2016년, 2017년, 2019년 등)의 경우 30년 빈도 미만의 저빈도 강우가 발생했음에도 ①노후배수로, ②통수단면 부족, ③시설관리 문제 등으로 인해 홍수피해가 집계됨

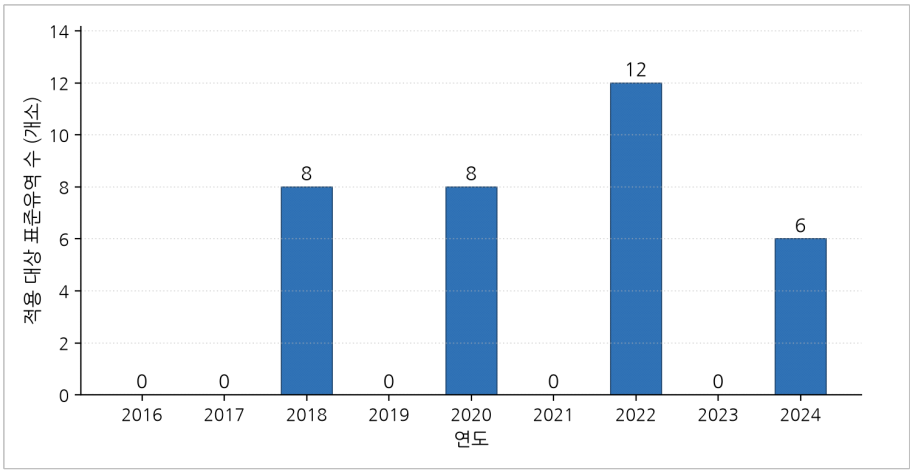
[표 3-1] 연도별 침수지도 적용 대상 표준유역 목록

연도	표준유역 코드	표준유역명	적용 빈도	지속시간별 판정 빈도
2018	102105	역곡천합류후	100년 빈도	30년 빈도(d2), 30년 빈도(d3), 100년 빈도(d6), 100년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2018	102107	역곡천	100년 빈도	50년 빈도(d2), 100년 빈도(d3), 50년 빈도(d6), 30년 빈도(d12)
2018	102108	군남 홍수조절지	80년 빈도	30년 빈도(d2), 80년 빈도(d6), 80년 빈도(d12), 50년 빈도(d24)

연도	표준유역코드	표준유역명	적용 빈도	지속시간별 판정 빈도
2018	102109	한탄강합류후	30년 빈도	30년 빈도(d6), 30년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2018	102203	대교천합류후	200년 빈도	50년 빈도(d1), 200년 빈도(d2), 200년 빈도(d3), 50년 빈도(d6), 30년 빈도(d12)
2018	102204	부소천합류후	50년 빈도	30년 빈도(d6), 50년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2018	102205	한탄강댐	500년 빈도	200년 빈도(d1), 500년 빈도(d2), 200년 빈도(d3), 100년 빈도(d6), 50년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2018	102214	차탄천	30년 빈도	30년 빈도(d2), 30년 빈도(d3)
2020	100705	청미수위표	100년 빈도	80년 빈도(d1), 100년 빈도(d2), 100년 빈도(d3), 100년 빈도(d6)
2020	101010	지촌천	30년 빈도	30년 빈도(d2)
2020	101304	가평수위표	30년 빈도	30년 빈도(d2)
2020	101307	청평댐상류	500년 빈도	200년 빈도(d1), 500년 빈도(d2), 200년 빈도(d3)
2020	101414	홍천강하류	30년 빈도	30년 빈도(d2)
2020	102107	역곡천	50년 빈도	50년 빈도(d2), 50년 빈도(d3), 30년 빈도(d6)
2020	102203	대교천합류후	50년 빈도	30년 빈도(d2), 50년 빈도(d3)
2020	102214	차탄천	30년 빈도	30년 빈도(d2), 30년 빈도(d3)
2022	100705	청미수위표	30년 빈도	30년 빈도(d3)
2022	100718	양평수위표	50년 빈도	30년 빈도(d1), 50년 빈도(d2), 50년 빈도(d3), 50년 빈도(d6), 50년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2022	100719	남한강하류	50년 빈도	50년 빈도(d2), 50년 빈도(d3), 30년 빈도(d6), 30년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2022	101603	경안수위표	100년 빈도	30년 빈도(d2), 100년 빈도(d3), 30년 빈도(d6), 30년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2022	101605	경안천하류	100년 빈도	50년 빈도(d2), 100년 빈도(d3), 50년 빈도(d6), 50년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2022	101701	팔당댐	100년 빈도	50년 빈도(d2), 100년 빈도(d3), 50년 빈도(d6), 50년 빈도(d12), 30년 빈도(d24)
2022	101814	안양천상류	30년 빈도	30년 빈도(d2)
2022	101815	안양천중류	50년 빈도	50년 빈도(d1), 50년 빈도(d2), 50년 빈도(d3), 30년 빈도(d12)
2022	101816	안양천하류	30년 빈도	30년 빈도(d1), 30년 빈도(d2)

연도	표준유역 코드	표준유역명	적용 빈도	지속시간별 판정 빈도
2022	102105	역곡천합류후	50년 빈도	50년 빈도(d2)
2022	102108	군남 홍수조절지	50년 빈도	50년 빈도(d2)
2022	120206	남양방조제	50년 빈도	30년 빈도(d1), 50년 빈도(d2), 50년 빈도(d3)
2024	100607	삼산천	50년 빈도	50년 빈도(d1)
2024	100608	간현수위표	30년 빈도	30년 빈도(d1)
2024	102302	사미천	30년 빈도	30년 빈도(d24)
2024	102304	문산천합류후	50년 빈도	30년 빈도(d1), 50년 빈도(d24)
2024	102306	문산천하류	30년 빈도	30년 빈도(d1)
2024	102308	사천	50년 빈도	50년 빈도(d24)

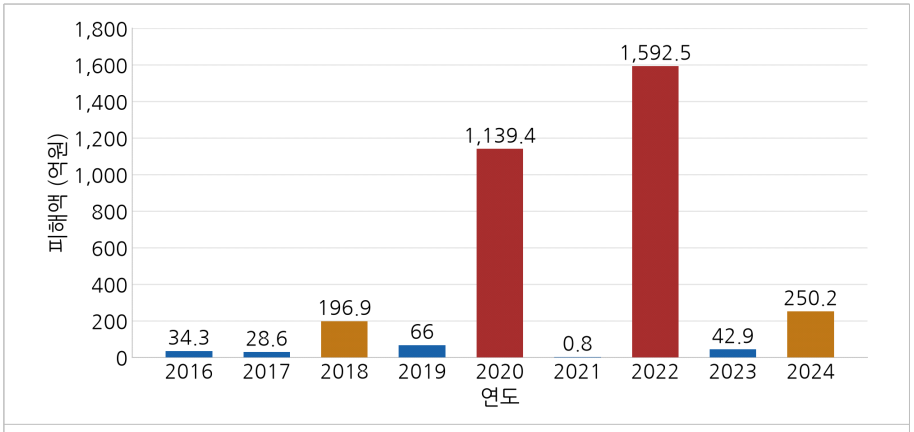
[그림 3-2] 2016~2024년 경기도 내 침수지도 적용 기준을 만족하는 표준유역 수



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

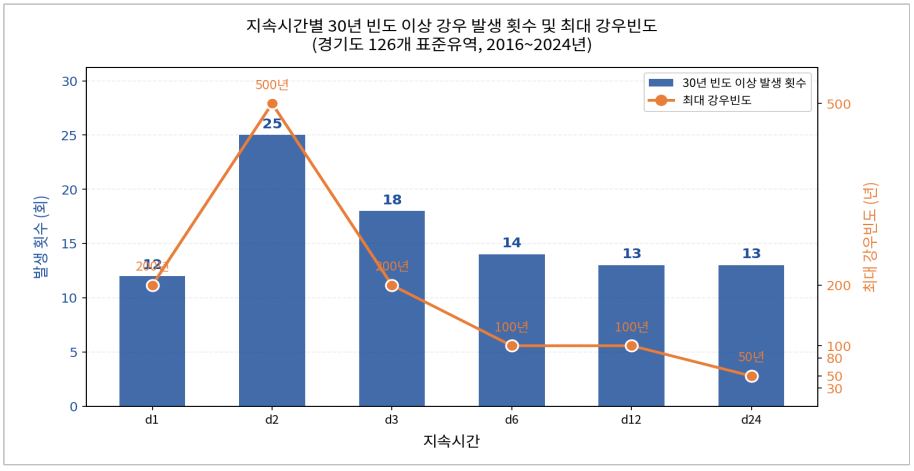
[그림 3-3] 2016~2024년 경기도의 연도별 호우·태풍 피해액

(단위: 억 원)



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-4] 지속시간별 30년 빈도 이상 강우 발생 횟수 및 최대 강우빈도

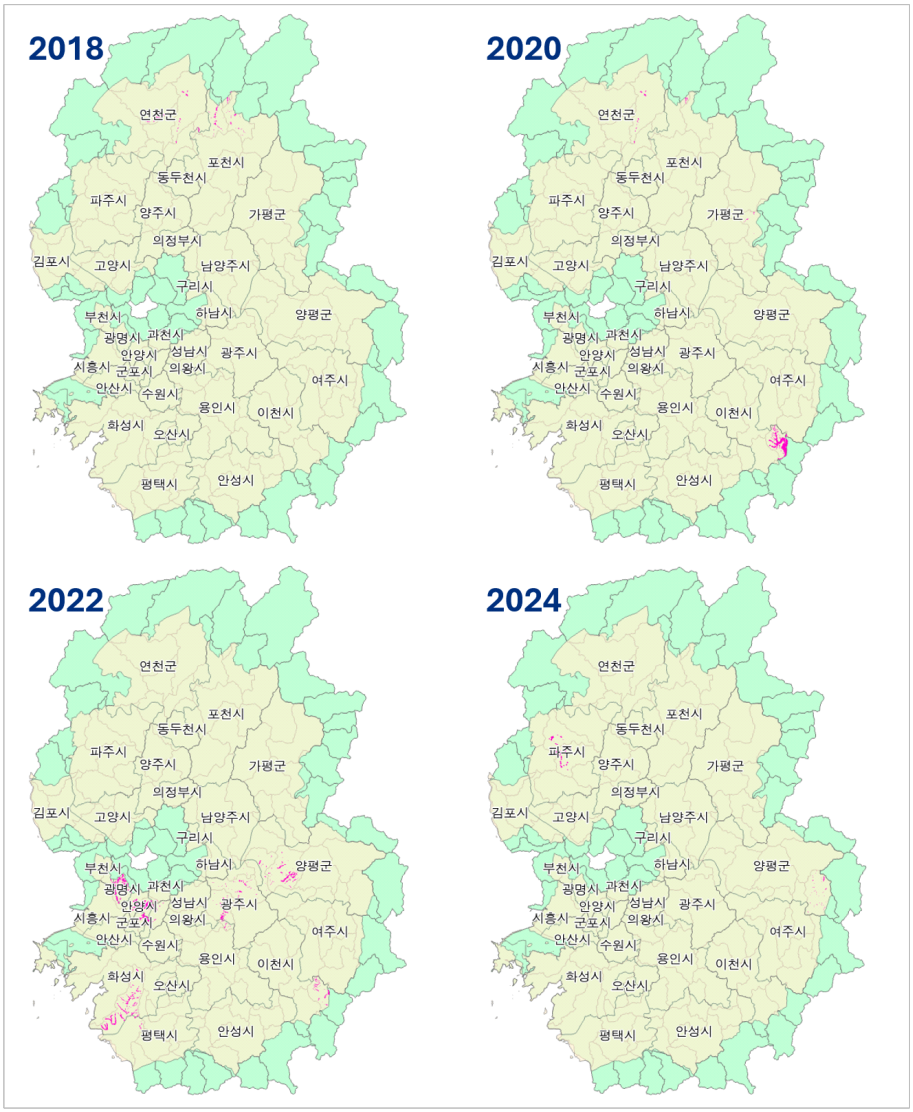


자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ 연도별 경기도 내 표준유역별 침수지도 적용 결과

○ 연도별로 지속시간별 30년 빈도 이상의 침수가 발생한 표준유역들을 경기도 시군별 행정경계와 중첩한 결과 2018년은 연천군, 포천시, 2020년은 연천군, 이천시, 2022년은 양평군, 이천시, 광주시, 안양시, 2024년은 파주시, 양평군 등의 시군에서 침수지도가 위치함을 확인함

[그림 3-5] 경기도 31개 시군의 연도별 홍수위험지도+도시침수지도 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

2) Hazard 항목의 시군 단위 세부지표 지수

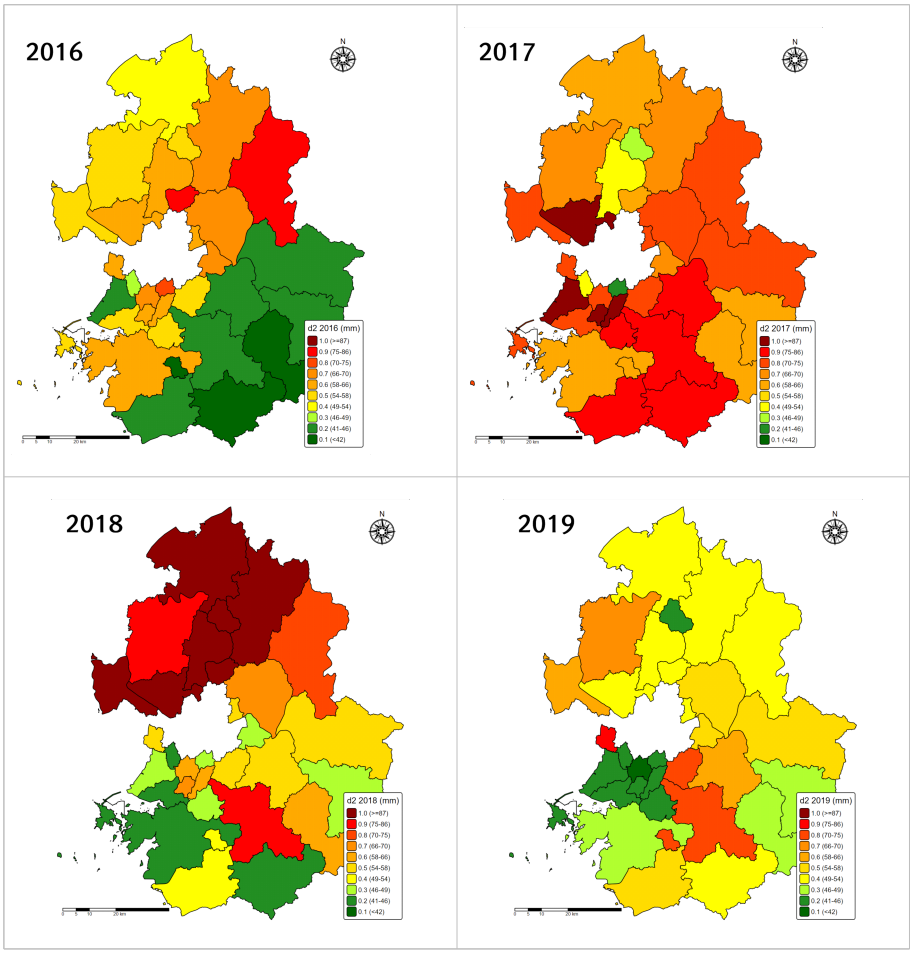
❑ 2016~2024년 동안 경기도 31개 시군별로 집계한 Hazard 항목의 지속시간별 최대강우량 통계를 활용해 지수화 수행

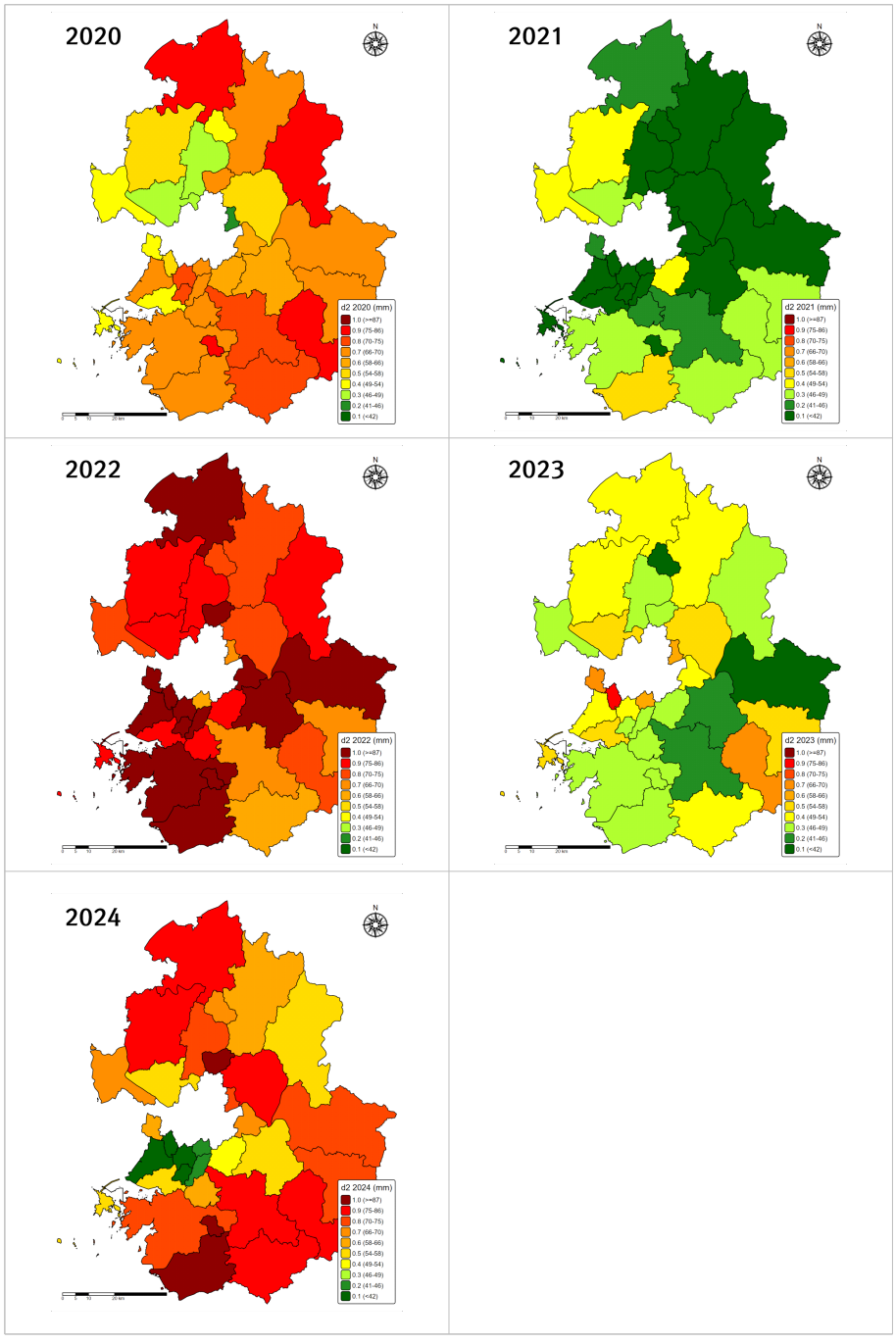
❍ 세부지표: 최대강우량(지속시간 2시간), 최대강우량(지속시간 12시간)

❍ 지속시간 2시간과 12시간의 최대강우량을 세부지표로 반영하여 단기간 강우와 장기간 강우 특성을 홍수위험도 지수에 모두 반영되도록 함

❍ 분위수를 활용한 구간별 점수화로 0.1~1 범위의 지수를 부여하고 연도별 통계지도로 제시

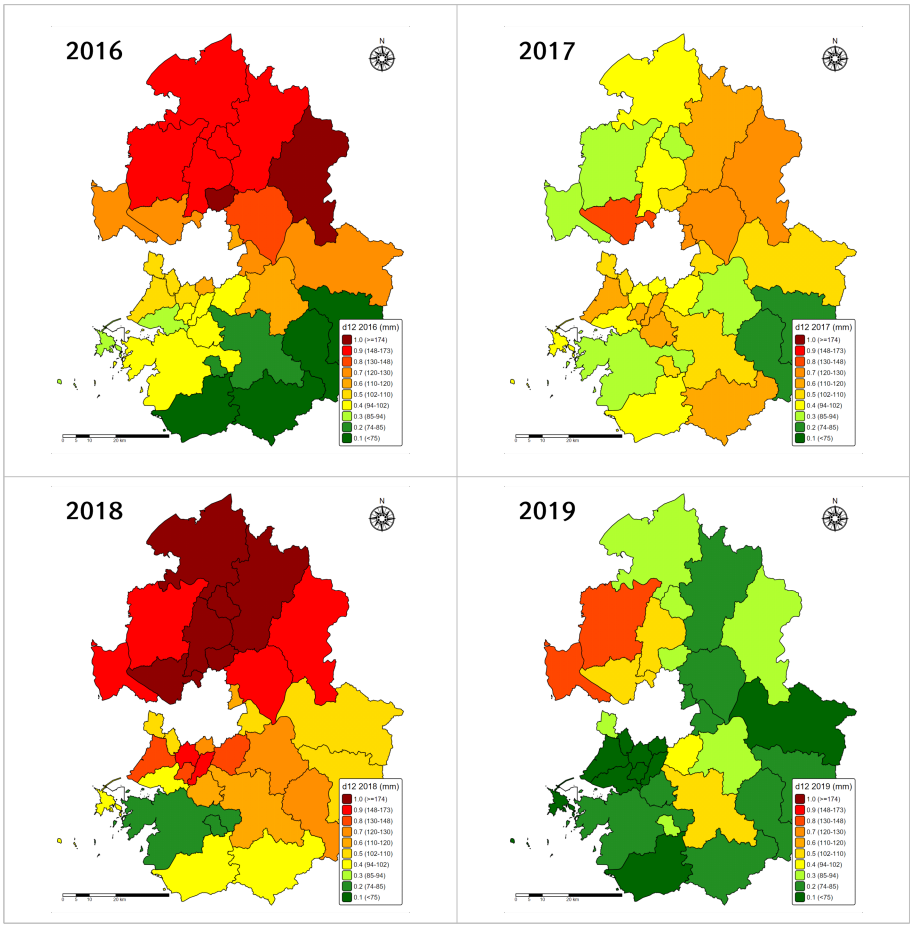
[그림 3-6] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 최대강우량(지속시간 2시간) 지수

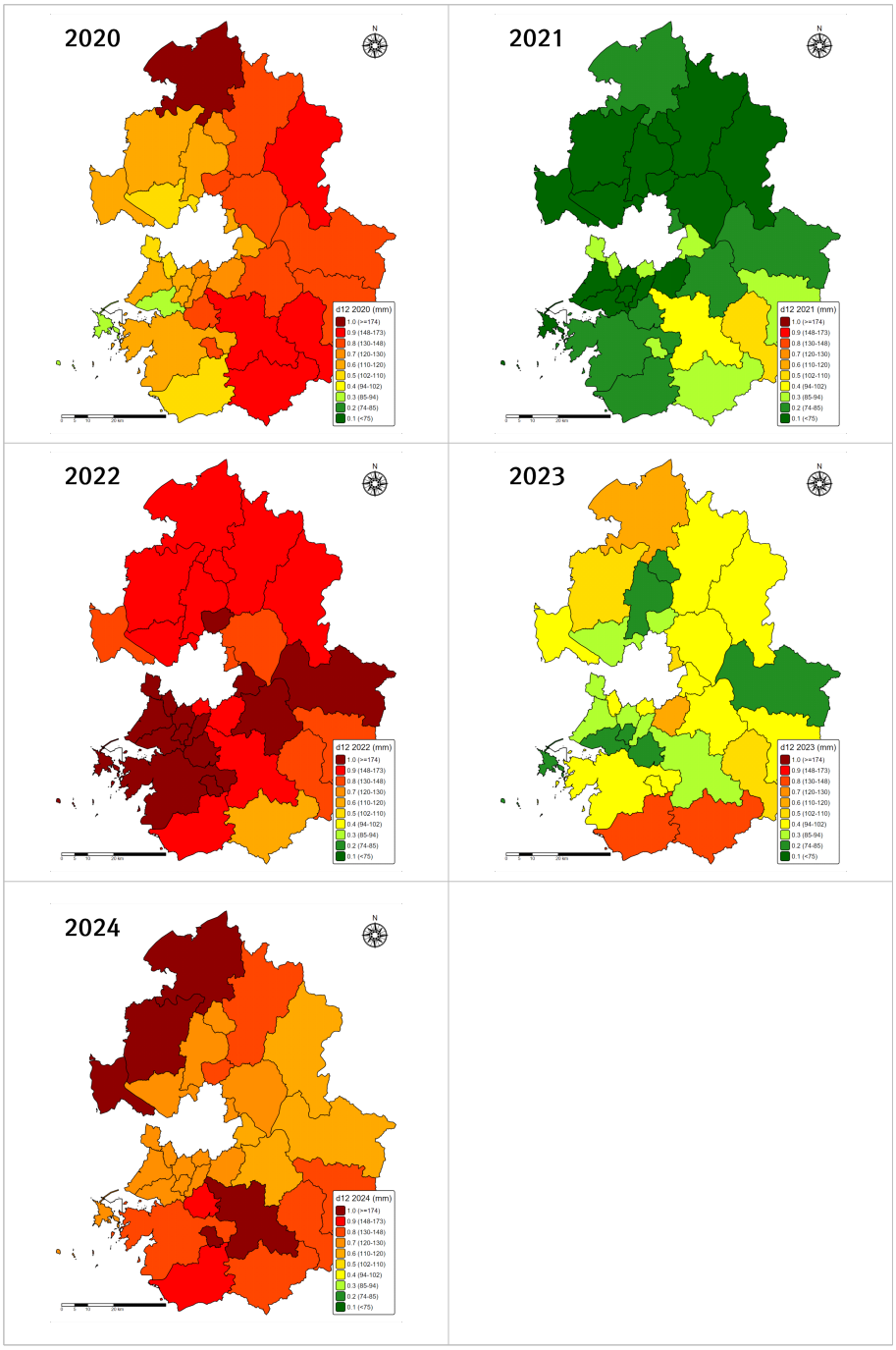




자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-7] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 최대강우량(지속시간 12시간) 지수





자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 2018년, 2020년, 2022년, 2024년에는 시군별 최대강우량 지수가 크게 산정되었으며, 해당 연도에는 단기 강우와 장기 강우 모두 크게 산정된 모습이 나타남

○ 특히 2020년과 2022년에는 경기도 전역에서 정체전선발 집중호우로 인해 큰 홍수피해가 발생함

○ 반면 2021년은 두 최대강우량의 지수가 모두 작게 산정되었으며, 호우·태풍 피해액도 0.8억 원으로 매우 작게 집계됨

3) Exposure 항목의 시군 단위 세부지표 지수

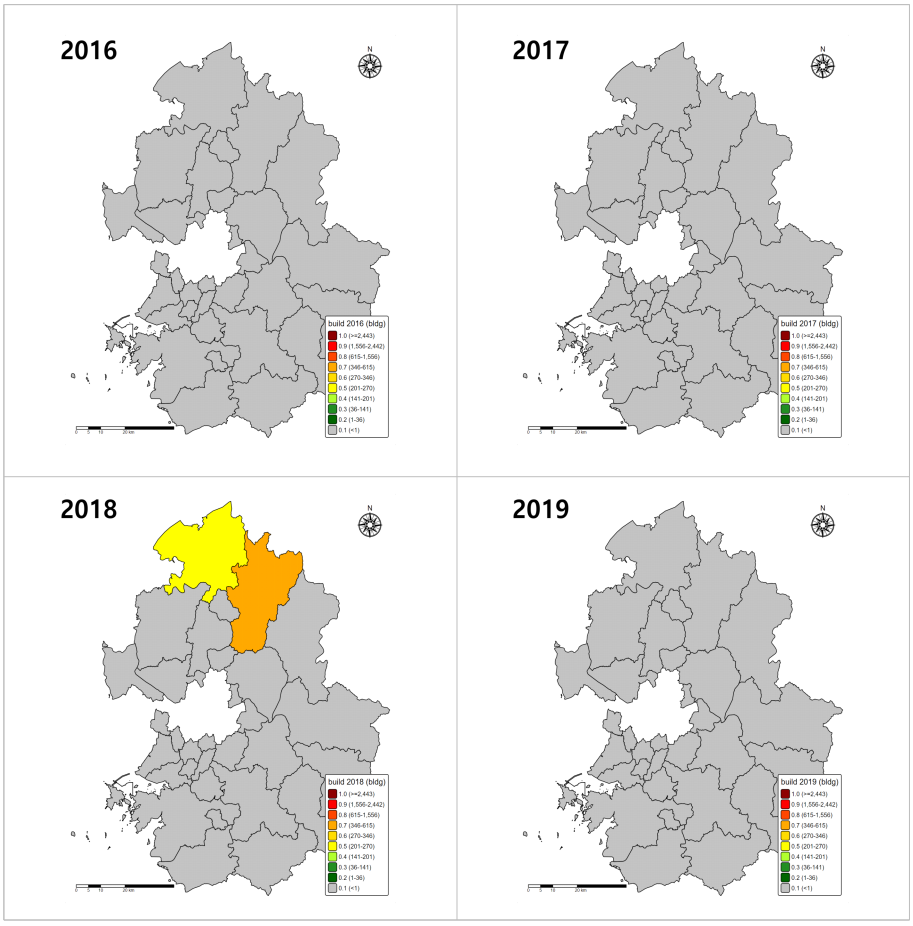
❑ 2016~2024년 동안 표준유역별로 반영된 빈도별 침수지도(외수+내수)를 사용하여 Exposure 항목의 세부지표별 통계를 선별 후 시군 단위 지수를 산정

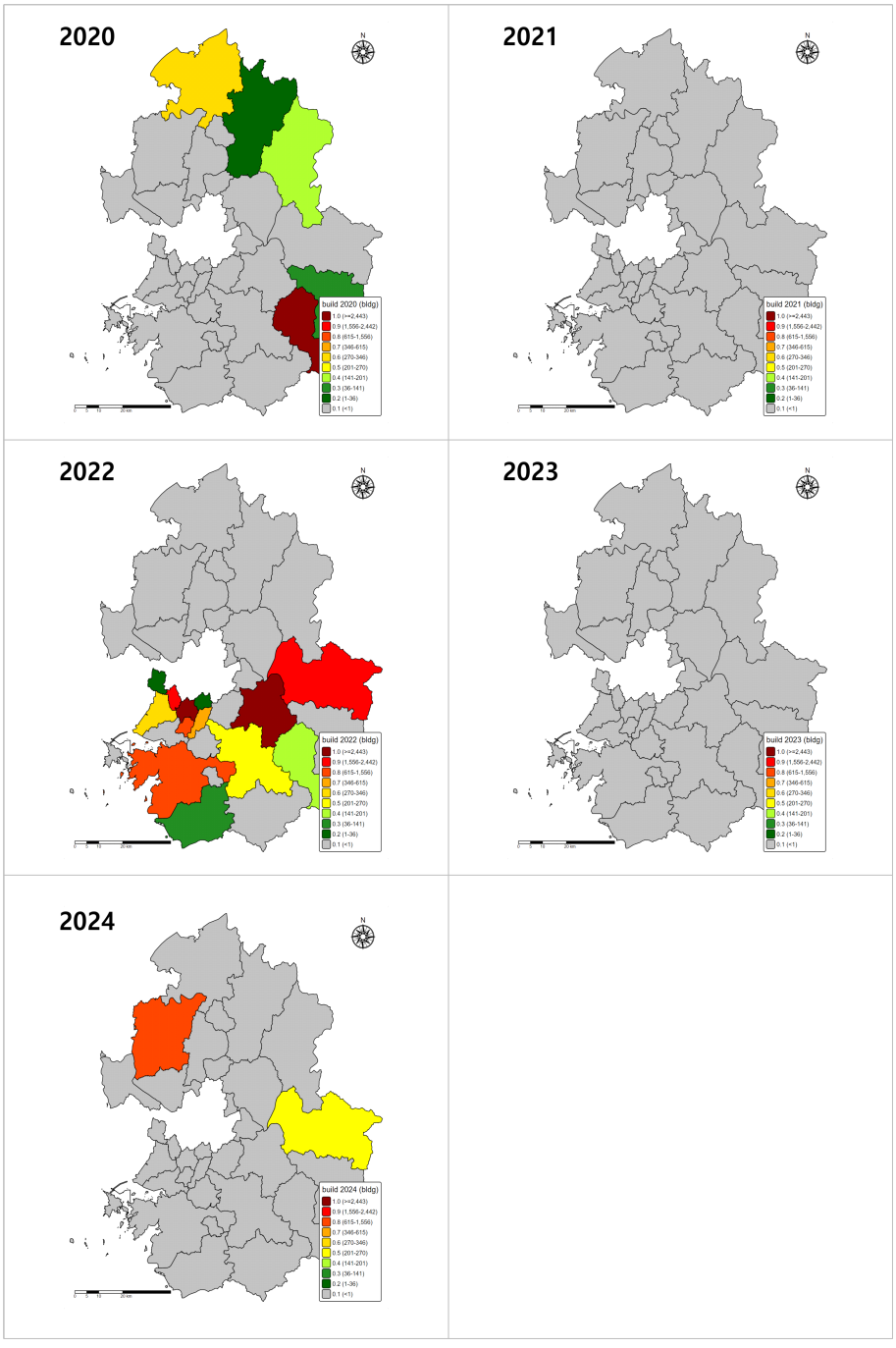
❑ 세부지표: 건축물수, 주민등록인구수, 공시지가, 농경지 면적, 도로 면적

❑ 세부지표별 100m×100m 격자자료를 침수지도(홍수위험지도, 도시침수지도)와 중첩하여 침수편입률을 적용해 선별 후 시군 단위로 합산하여 지수를 산정

○ 분위수를 활용한 구간별 점수화로 0.1~1 범위의 지수를 부여하는데, 연도별 침수지도가 미적용된 시군의 개수가 하위 10%를 초과하므로, 해당 시군들은 일괄적으로 0.1을 부여하고, 나머지 통계에는 9분위수를 적용해 지수화 수행

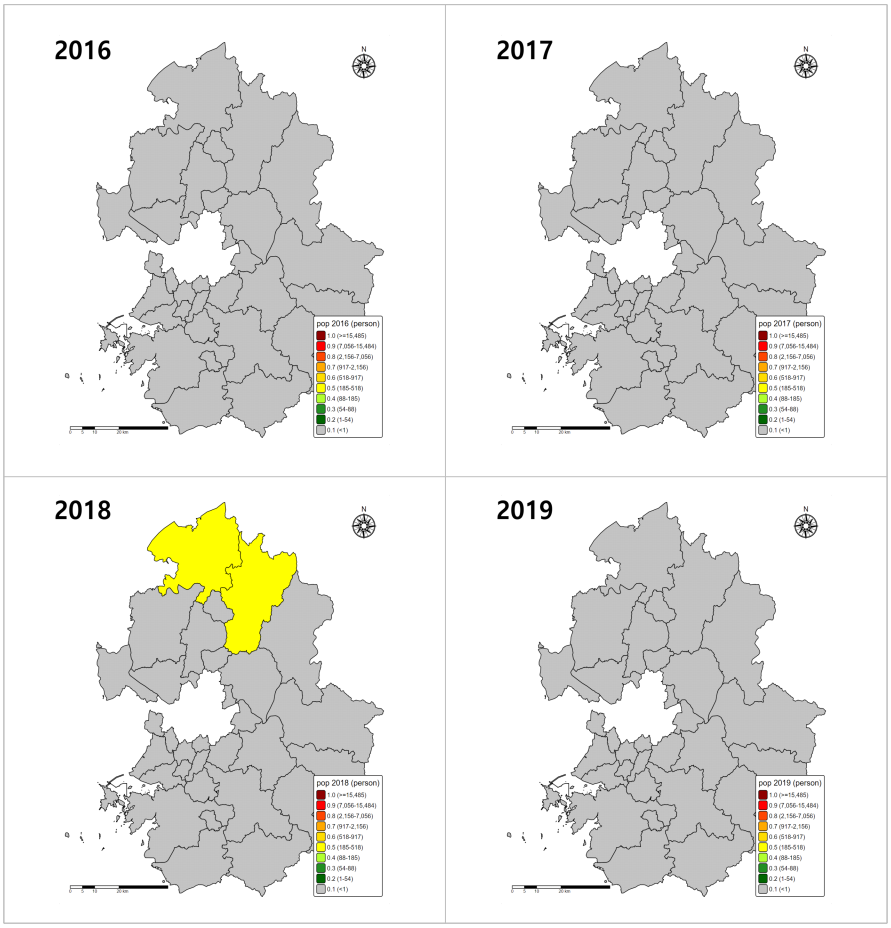
[그림 3-8] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 건축물수 지수

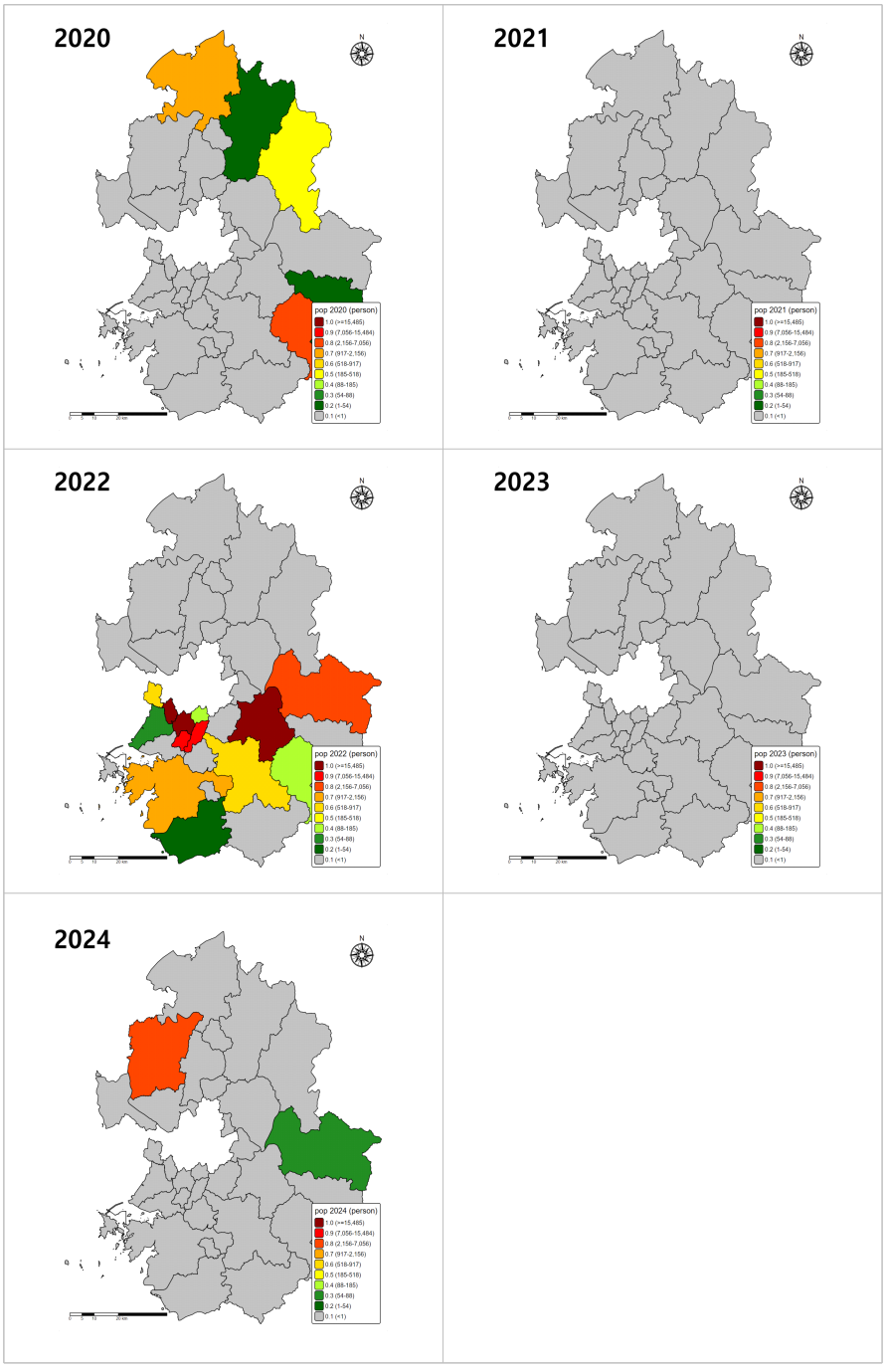




자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

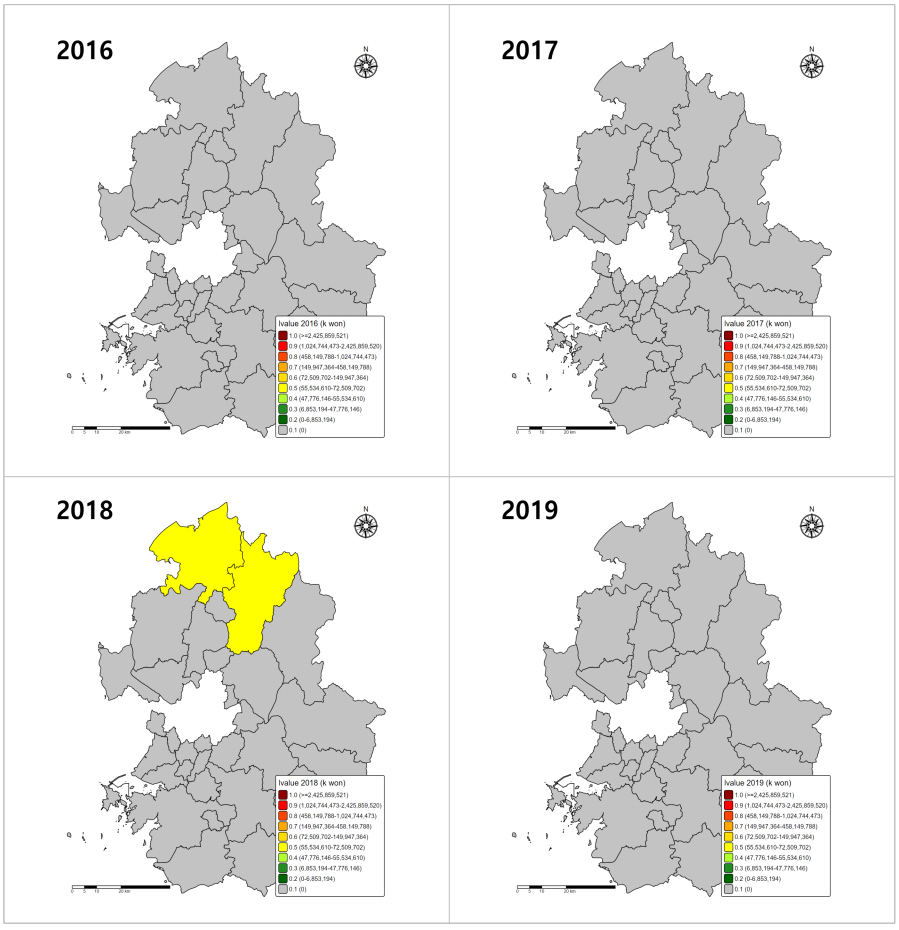
[그림 3-9] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 주민등록인구수 지수

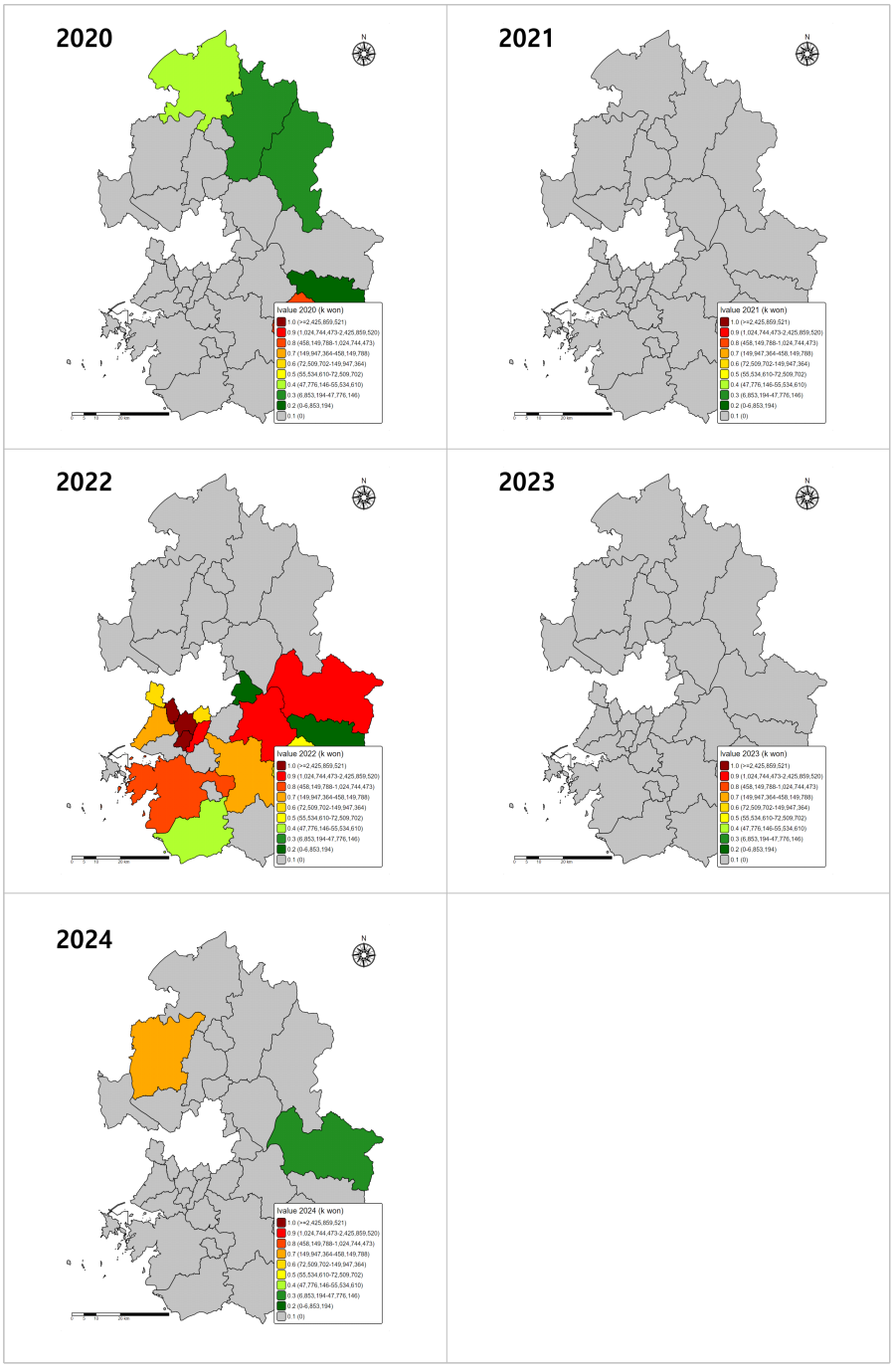




자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

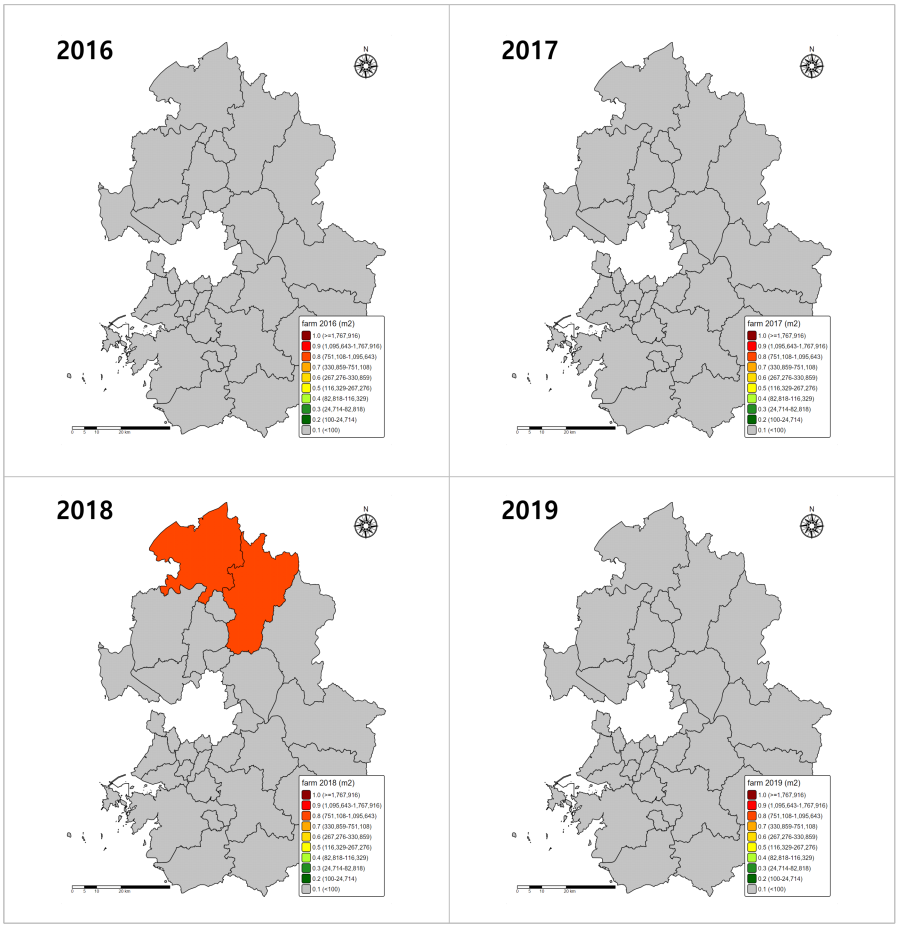
[그림 3-10] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 공시지가 지수

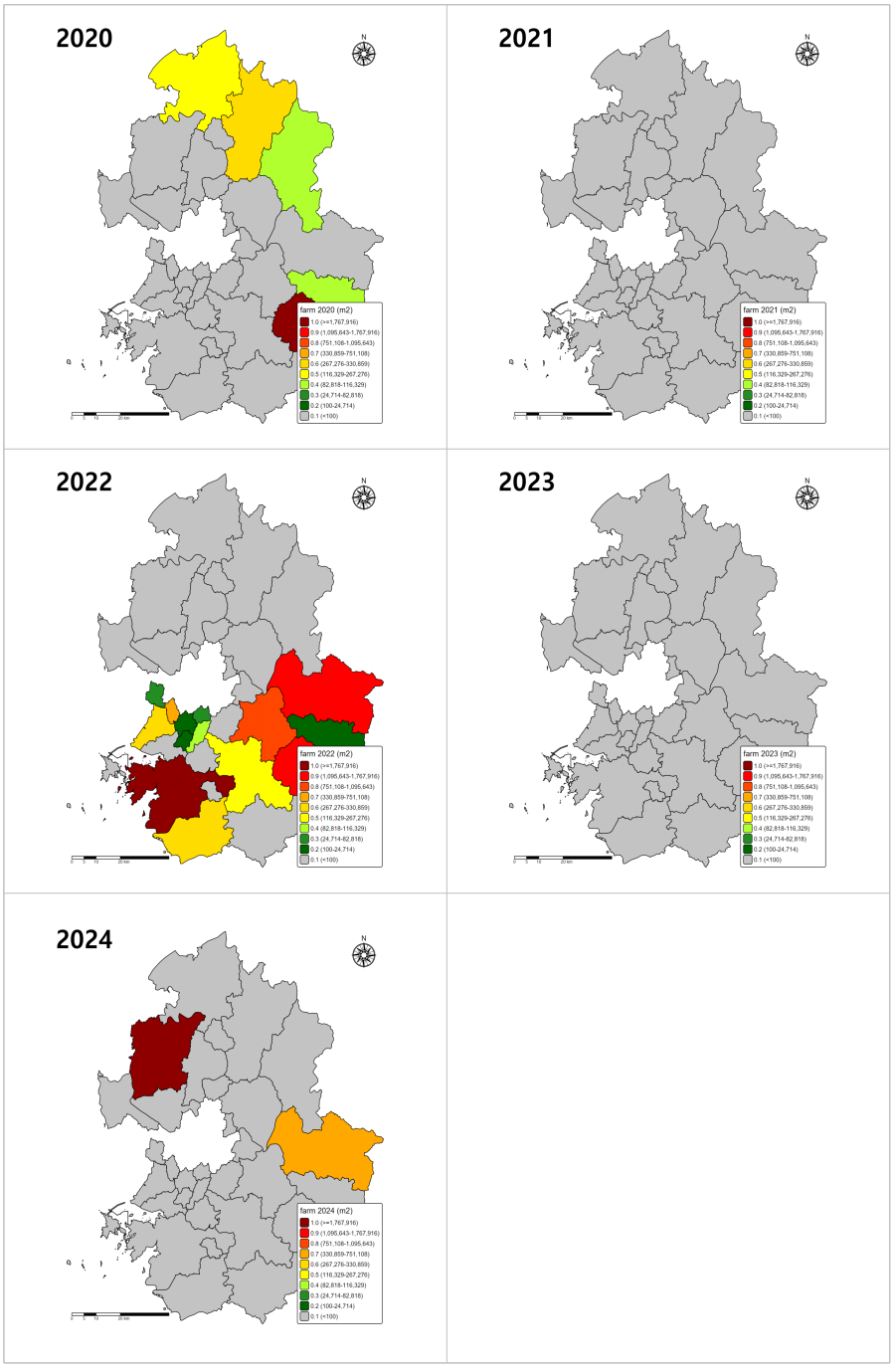




자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

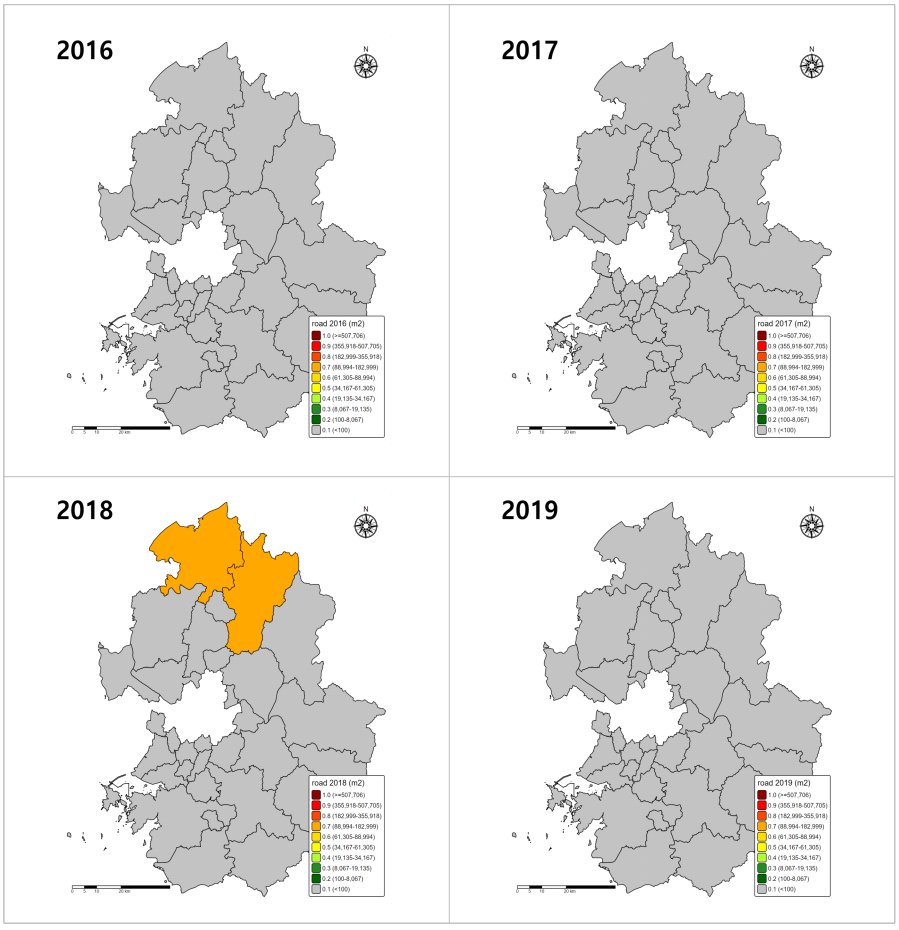
[그림 3-11] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 농경지 면적 지수

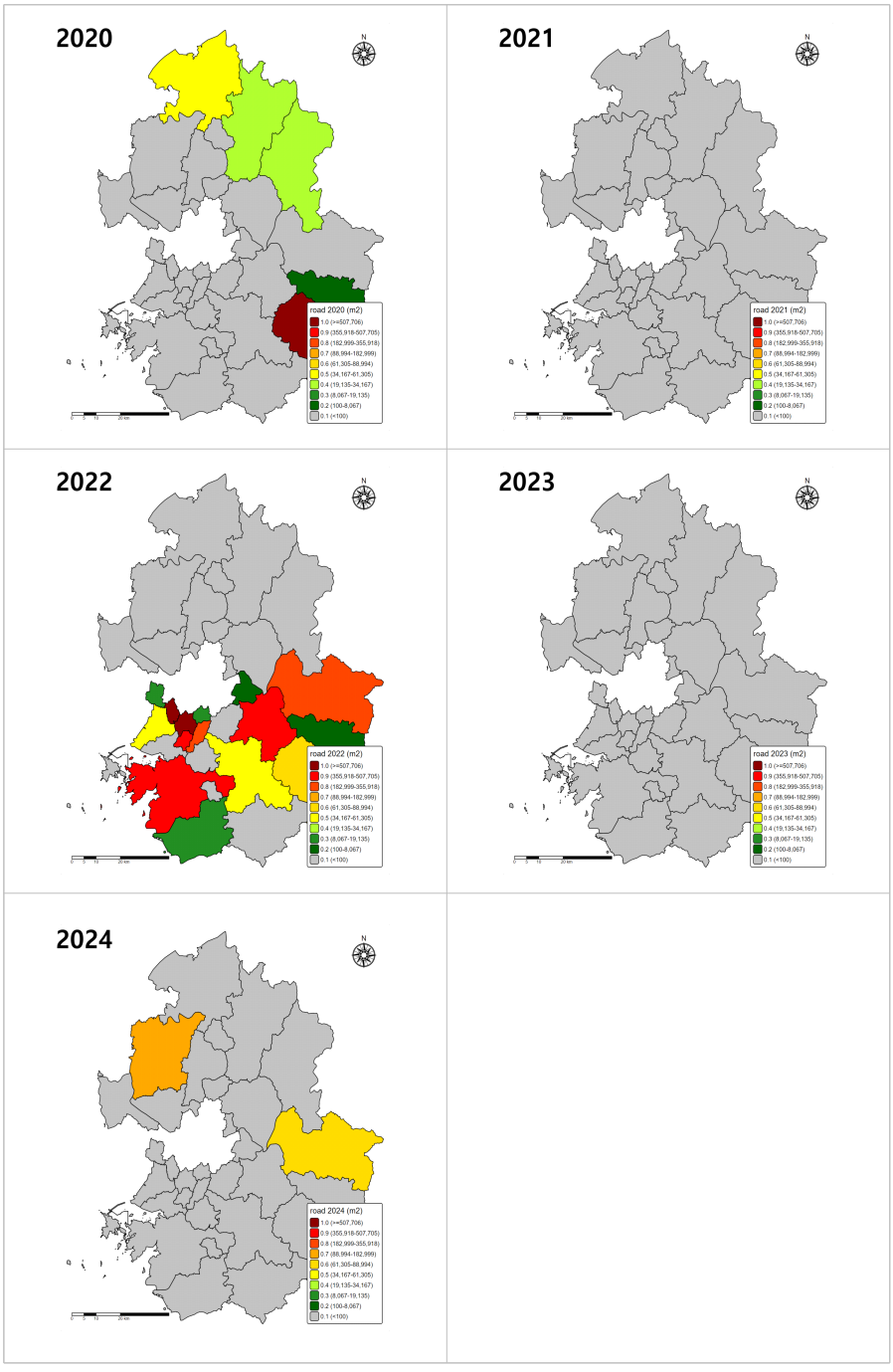




자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-12] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 도로 면적 지수





자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 침수지도가 적용된 4개 연도의 시군들에 한정해서 세부지표 지수가 산정되고 Exposure 항목의 세부지표별로 지수 분포 양상이 다르게 나타남

○ Exposure 항목의 세부지표가 홍수위험에 노출된 해는 2018, 2020, 2022, 2024년에만 존재하고, 나머지 5개 연도는 전부 0임

○ 특히 2022년은 정체전선으로 인한 수도권 집중호우 때문에 14개 시군에서 세부지표 지수가 집계됨

○ 주민등록인구수, 공시지가는 안양시와 같은 특정 시군에서 크게 집계된 반면, 건축물수, 도로 면적 등은 여러 시군에서 고르게 분포함

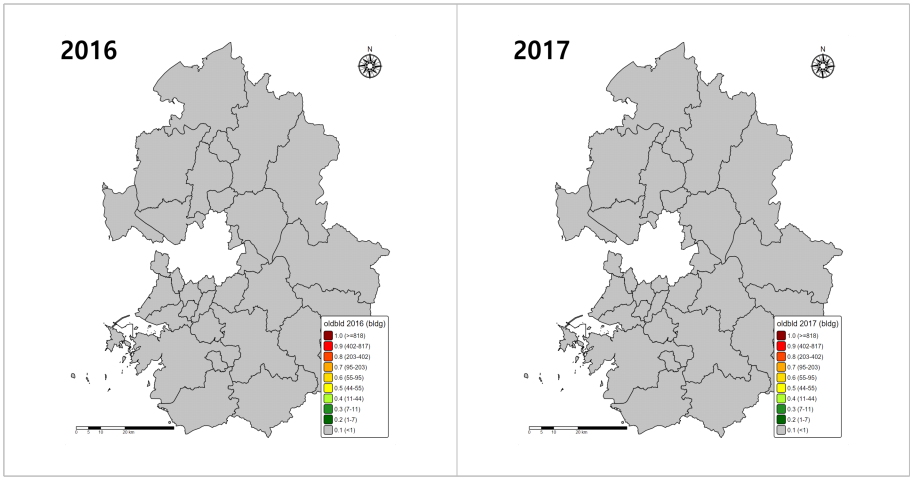
○ 특히 농경지 면적의 경우 이천시 등과 같이 농경지의 밀집도가 높은 시군에서 지수가 크게 산정되는 농촌형 침수 패턴이 나타남

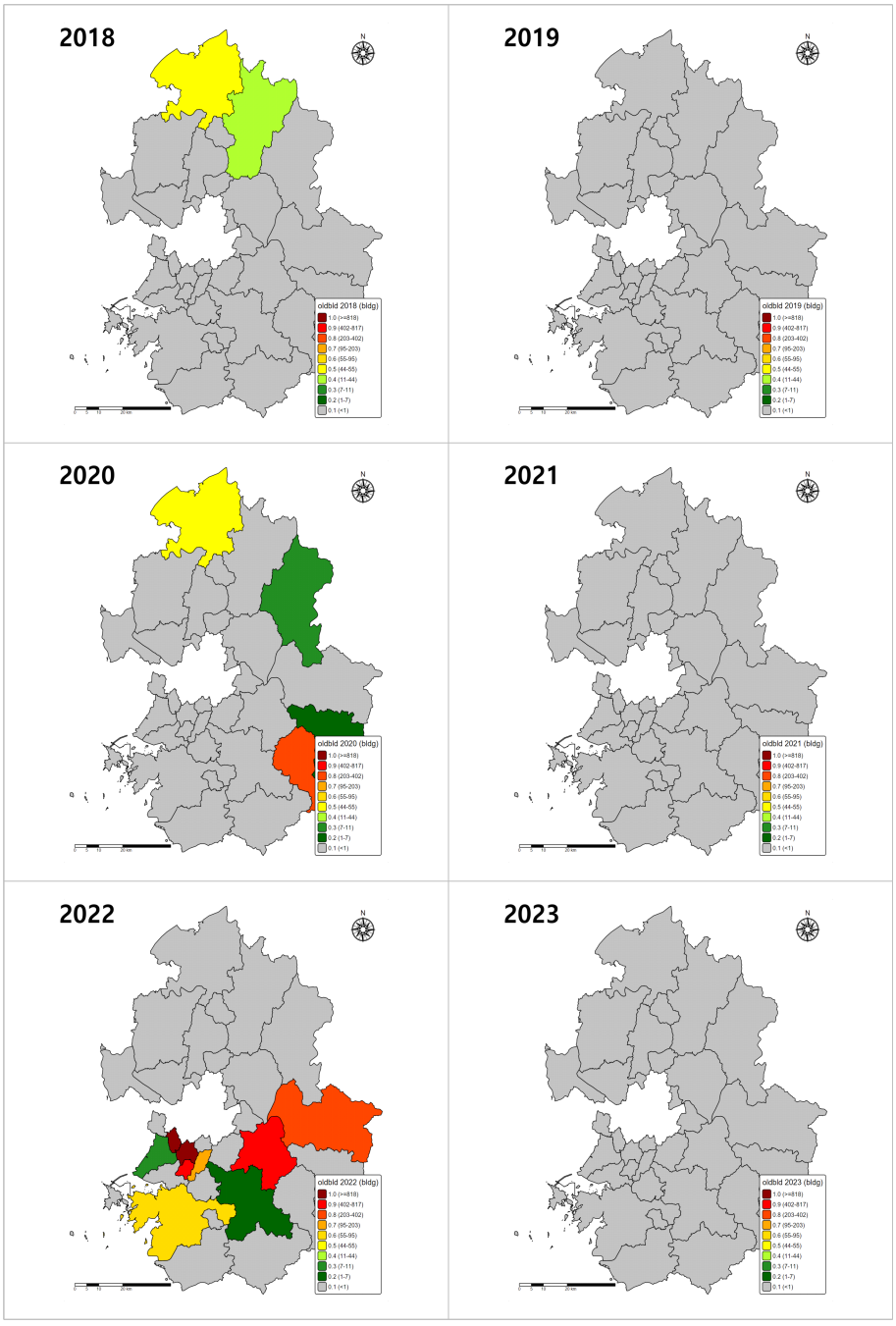
4) Vulnerability 항목의 시군 단위 세부지표 지수

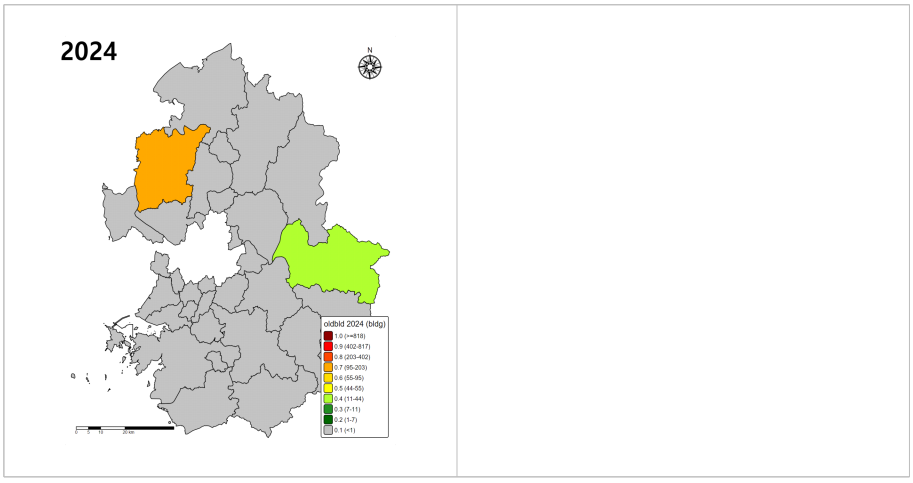
❑ 세부지표: 노후건축물수, 의존인구수, 밭·시설·인삼 재배면적, 지하차도 면적

❑ Exposure와 동일하게 침수지도와 중첩을 통해 침수편입률이 적용된 격자자료를 선별하고, 시군 단위로 집계한 후 분위수를 활용한 구간별 점수화로 지수화

[그림 3-13] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 노후건축물수 지수

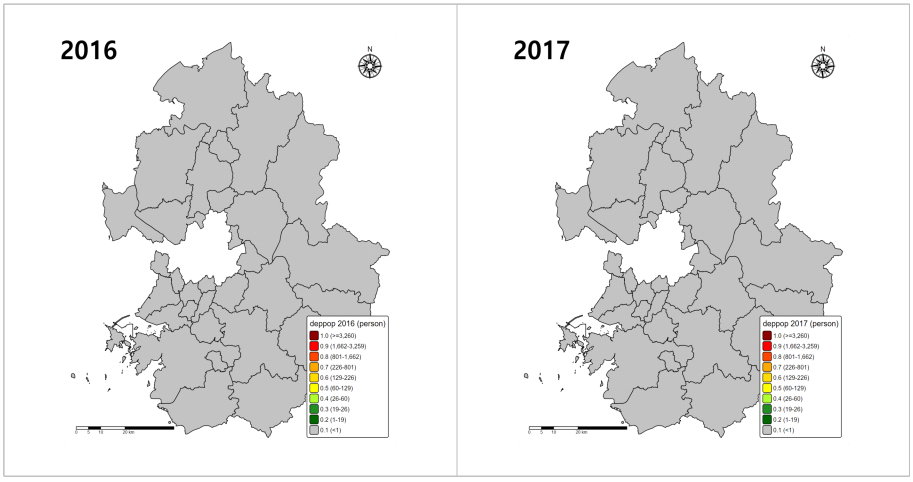


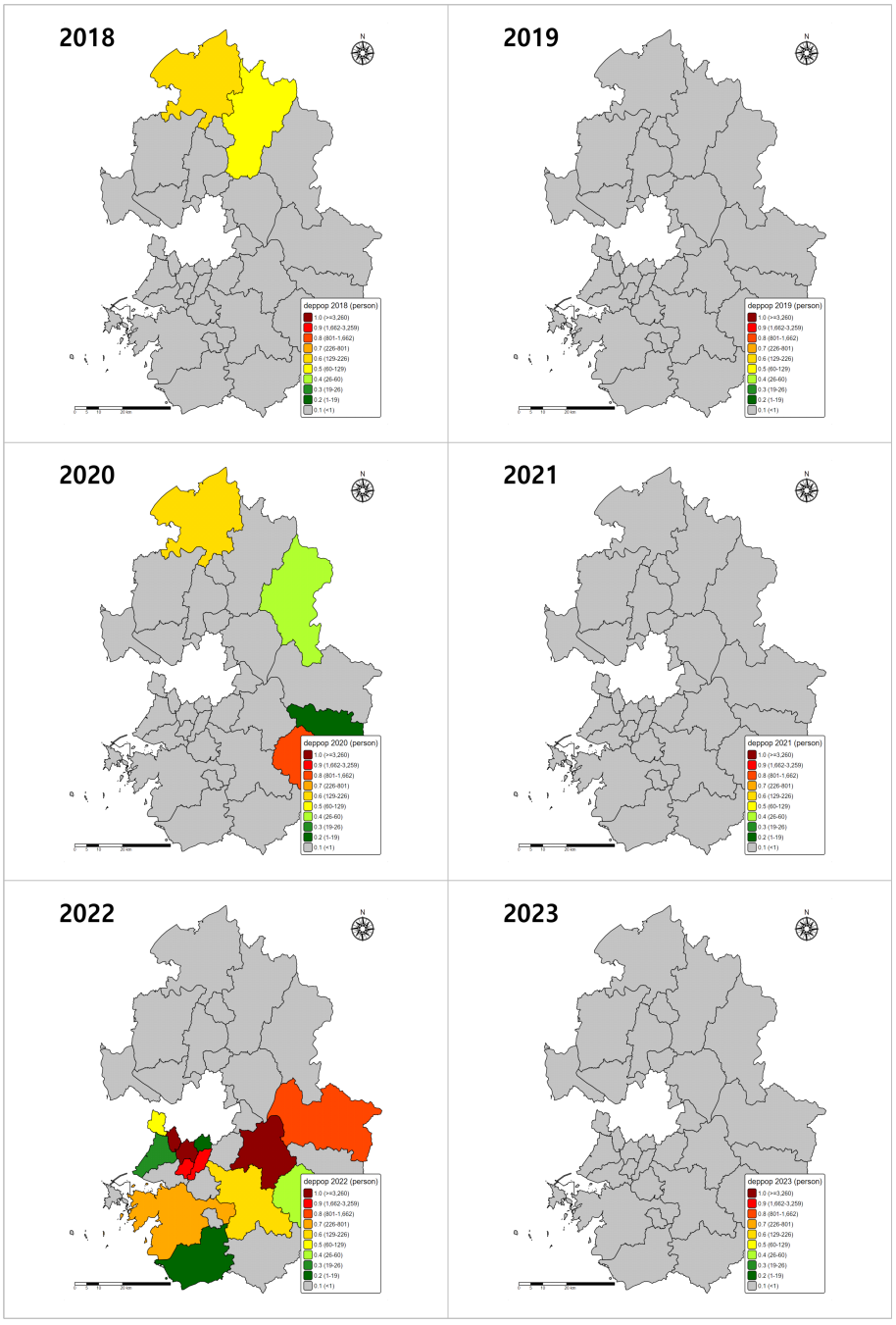

2018
oldbld 2018 (bldg)
1.0 (>=818)
0.9 (402-817)
0.8 (203-402)
0.7 (95-203)
0.6 (55-95)
0.5 (44-55)
0.4 (11-44)
0.3 (7-11)
0.2 (1-7)
0.1 (<1)
2019
oldbld 2019 (bldg)
2020
oldbld 2020 (bldg)
2021
oldbld 2021 (bldg)
2022
oldbld 2022 (bldg)
2023
oldbld 2023 (bldg)

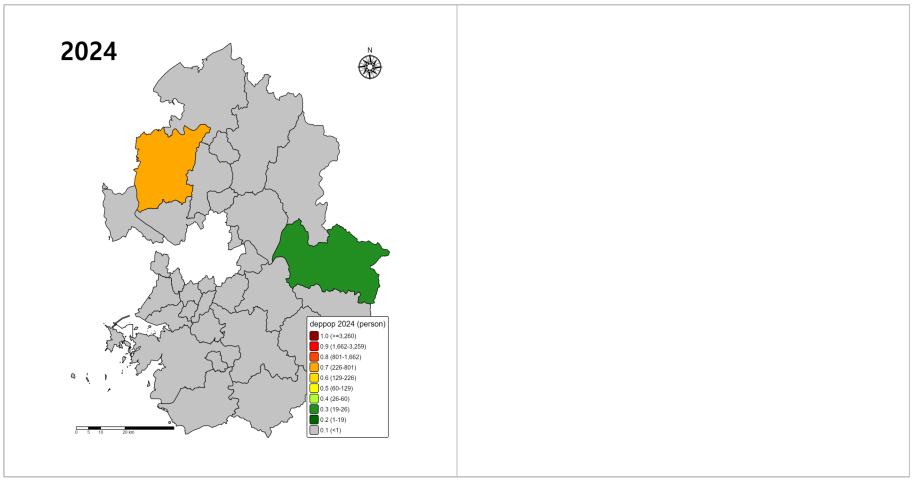


자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-14] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 의존인구수 지수

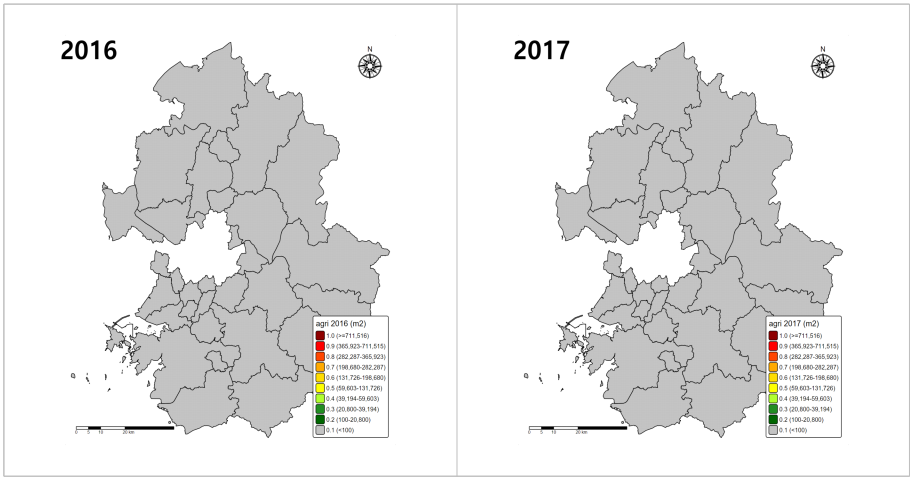


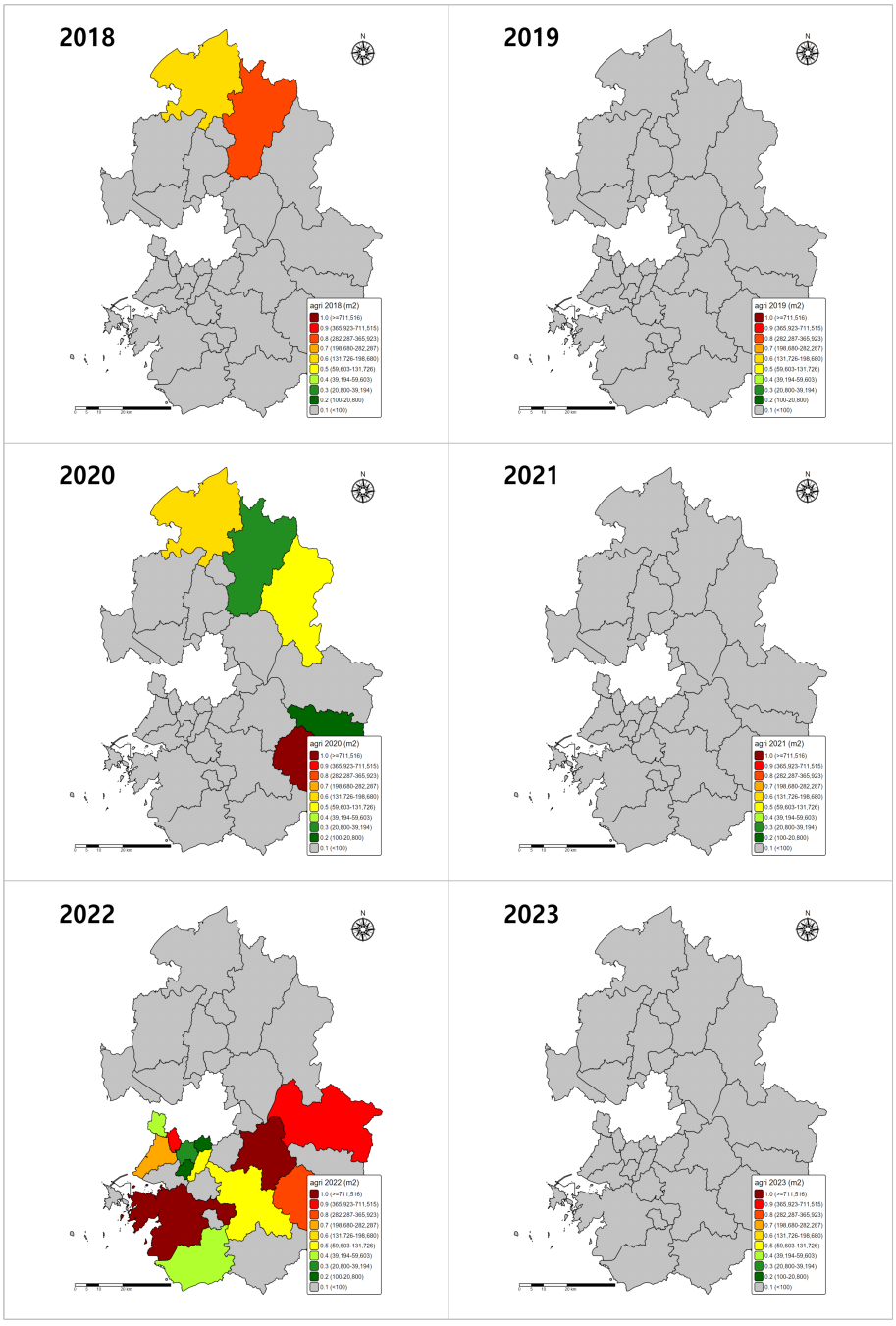

2018
deppop 2018 (person)
2019
deppop 2019 (person)
2020
deppop 2020 (person)
2021
deppop 2021 (person)
2022
deppop 2022 (person)
2023
deppop 2023 (person)

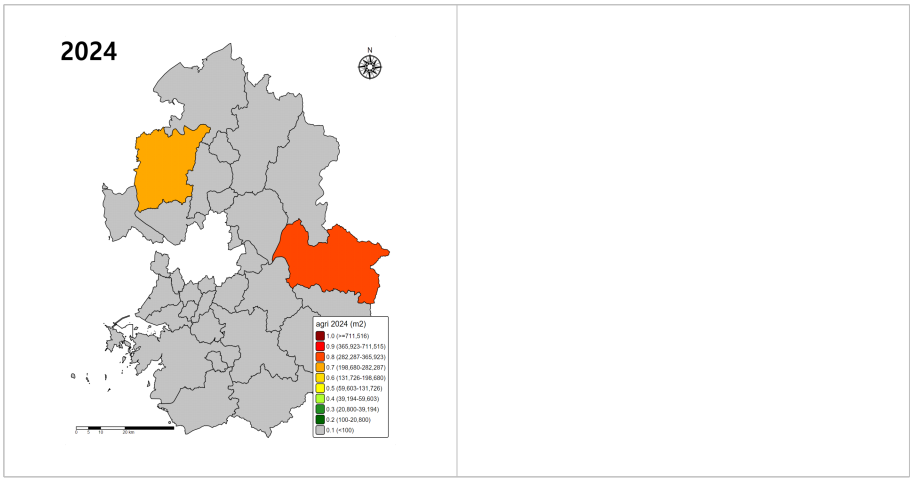


자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-15] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 밭·시설·인삼 재배면적 지수

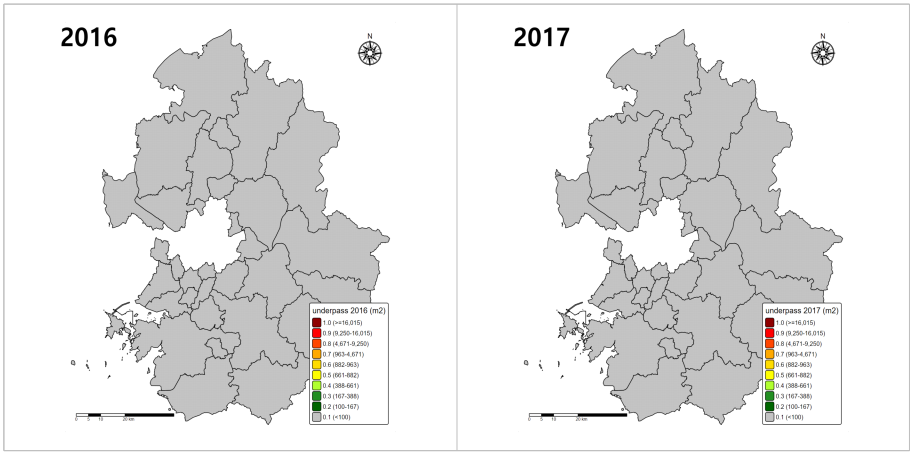


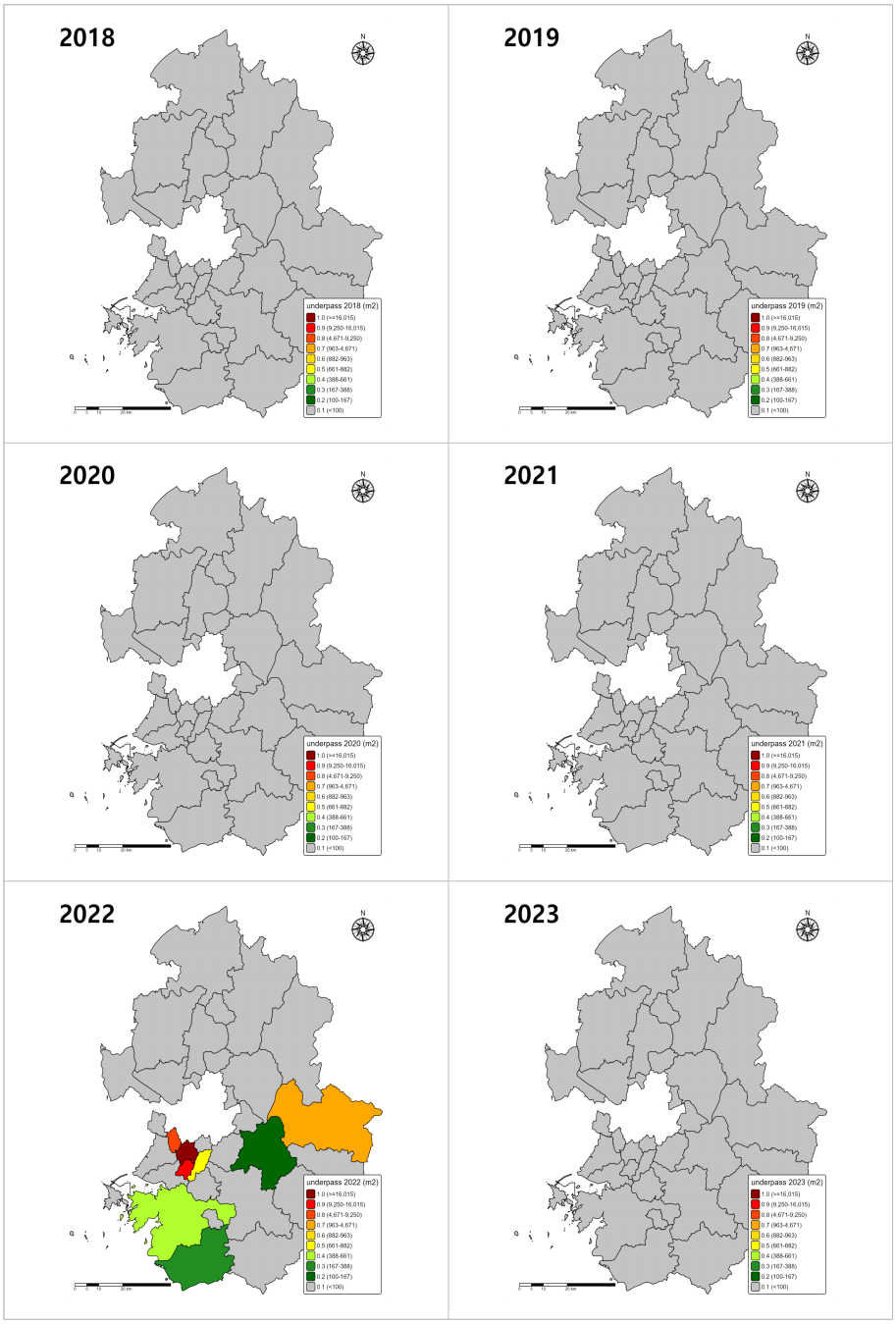

2018
agri 2018 (m2)
1.0 (>=711,516)
0.9 (365,923-711,515)
0.8 (282,287-365,923)
0.7 (198,680-282,287)
0.6 (131,726-198,680)
0.5 (59,603-131,726)
0.4 (39,194-59,603)
0.3 (20,800-39,194)
0.2 (100-20,800)
0.1 (<100)
2019
agri 2019 (m2)
2020
agri 2020 (m2)
2021
agri 2021 (m2)
2022
agri 2022 (m2)
2023
agri 2023 (m2)

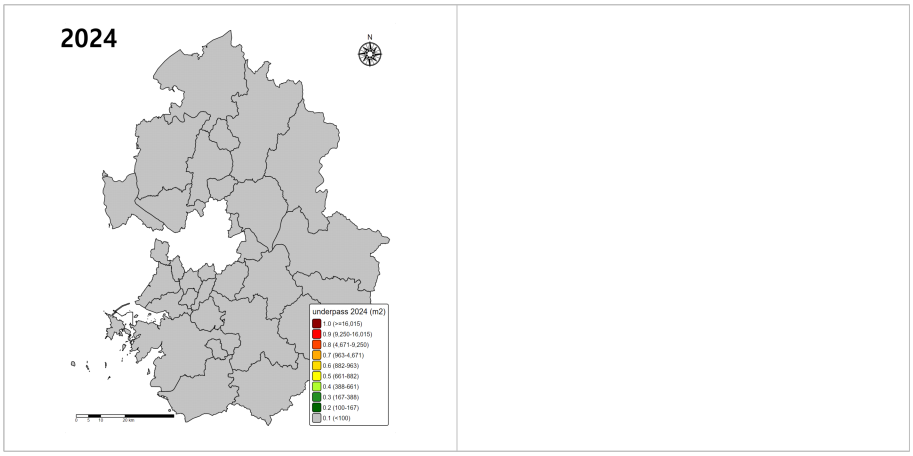


자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-16] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 지하차도 면적 지수




2018
underpass 2018 (m2)
1.0 (>=16,015)
0.9 (9,250-16,015)
0.8 (4,671-9,250)
0.7 (963-4,671)
0.6 (882-963)
0.5 (661-882)
0.4 (388-661)
0.3 (167-388)
0.2 (100-167)
0.1 (<100)
2019
underpass 2019 (m2)
2020
underpass 2020 (m2)
2021
underpass 2021 (m2)
2022
underpass 2022 (m2)
2023
underpass 2023 (m2)



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 노후건축물, 의존인구수, 밭·시설·인삼 재배면적 지수는 Exposure 항목의 세부지표와 유사한 분포를 보여주지만, 지하차도 면적은 다른 양상을 보임

○ 주민등록인구수, 건축물수 지수 등이 크게 산정된 안양시의 경우 의존인구수, 노후건축물수도 크게 산정됨

○ 밭·시설·인삼 재배면적 지수도 농경지가 밀집된 이천시 등의 시군에서 크게 산정되는 모습이 나타남

○ 다만, 지하차도 면적의 경우 다른 세부지표 대비 침수지역 내에 포함된 지하차도의 희소성 때문에 지수의 분포도 나머지 세부지표들과는 다른 모습을 보여줌

5) Capacity 항목의 시군 단위 세부지표 지수

❑ 세부지표: 방재시설 밀도, 누적 방재예산액 비율

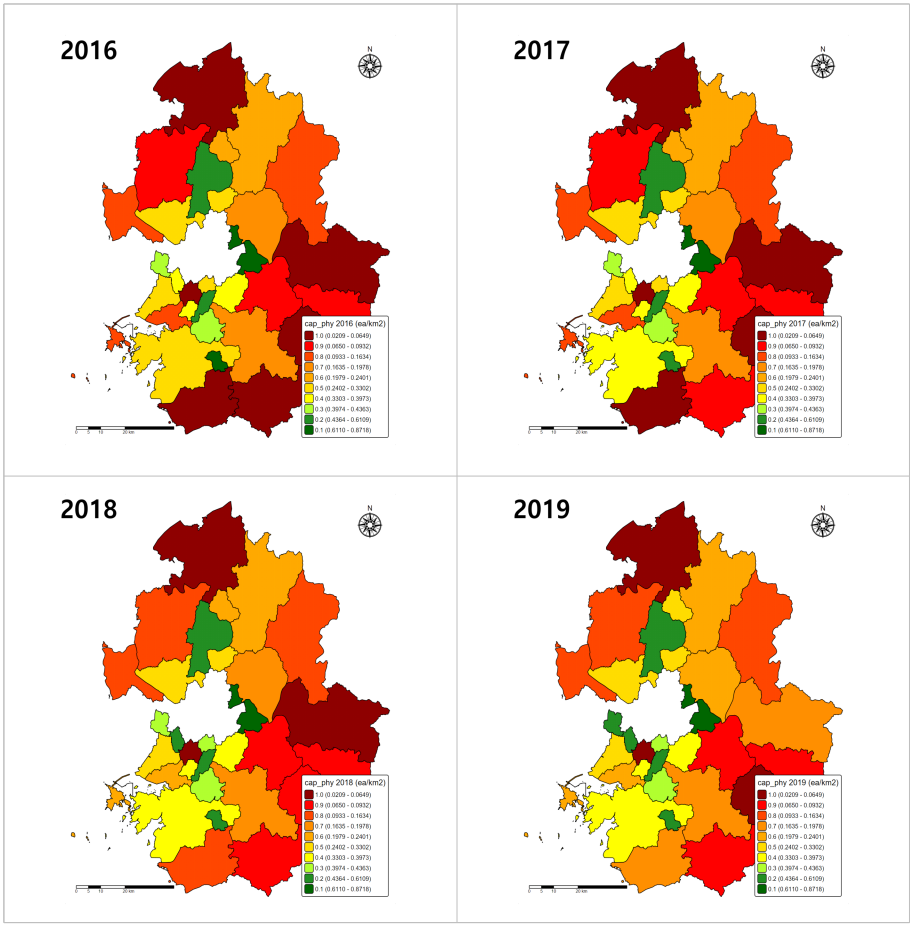
❑ 시군 단위 통계자료로 지수를 산정하되, 지수가 클수록 위험 저감(긍정적)을 의미하므로 다른 항목과 방향을 통일하기 위해 반전화를 적용

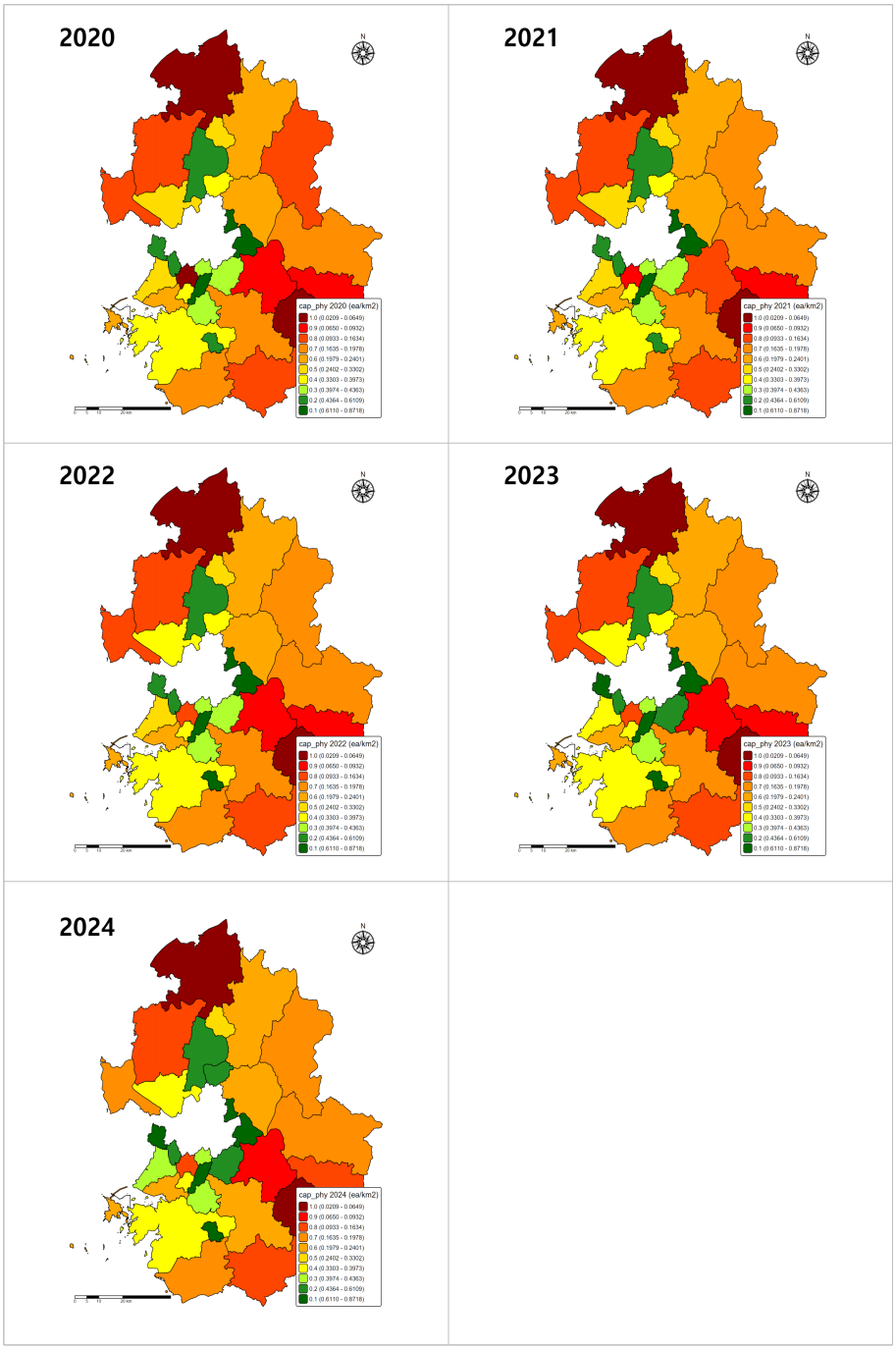
○ 분위수 점수화 범위가 0.1~1이므로 1.1에서 차감하여 반전(지수 0.1 → 1.0)

❑ 방재시설 밀도는 국가통계포털(KOSIS)의 도시계획현황 통계에 기재되어 있는 시군별 방재시설(하천, 유수지, 저수지, 방수설비, 사방설비, 방조설비)의 수를 지자체별 면적(km^2)으로 나누어 산정

❑ 누적 방재예산액 비율은 2012년부터 기준연도 – 1까지의 지자체별 재난방재민방위 예산과 수자원 예산의 누적 합에 지자체별 면적(km^2)을 나누어 산정

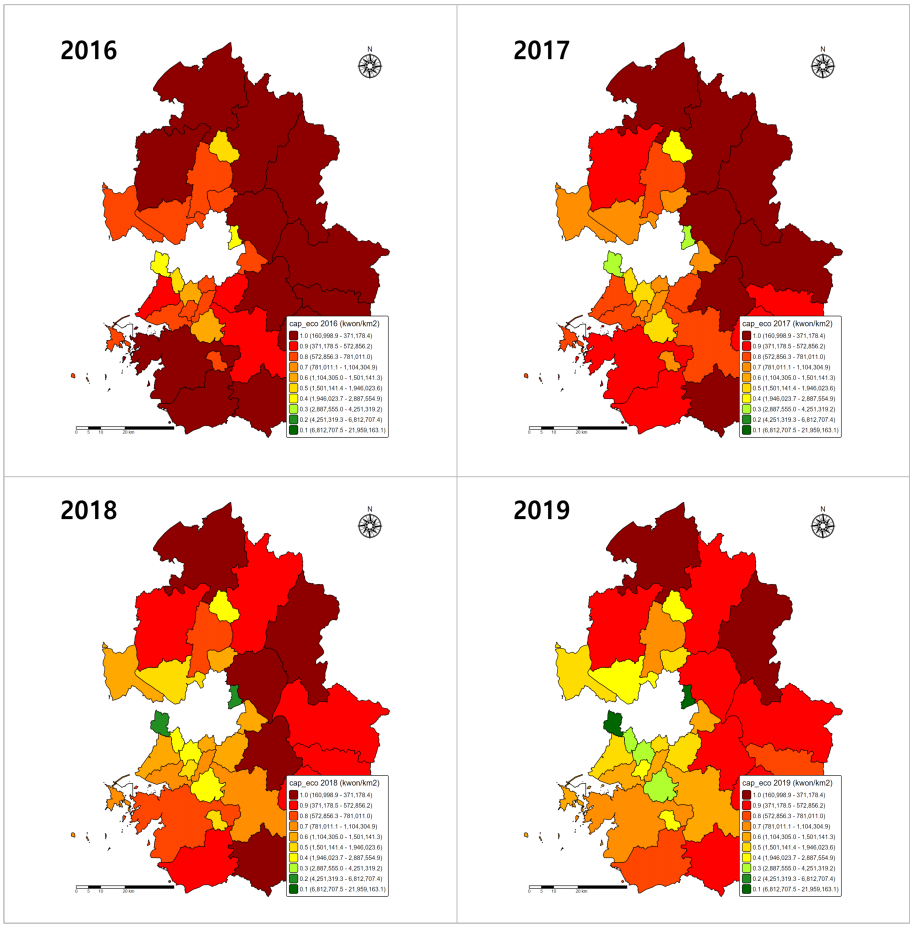
[그림 3-17] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 방재시설 밀도 지수

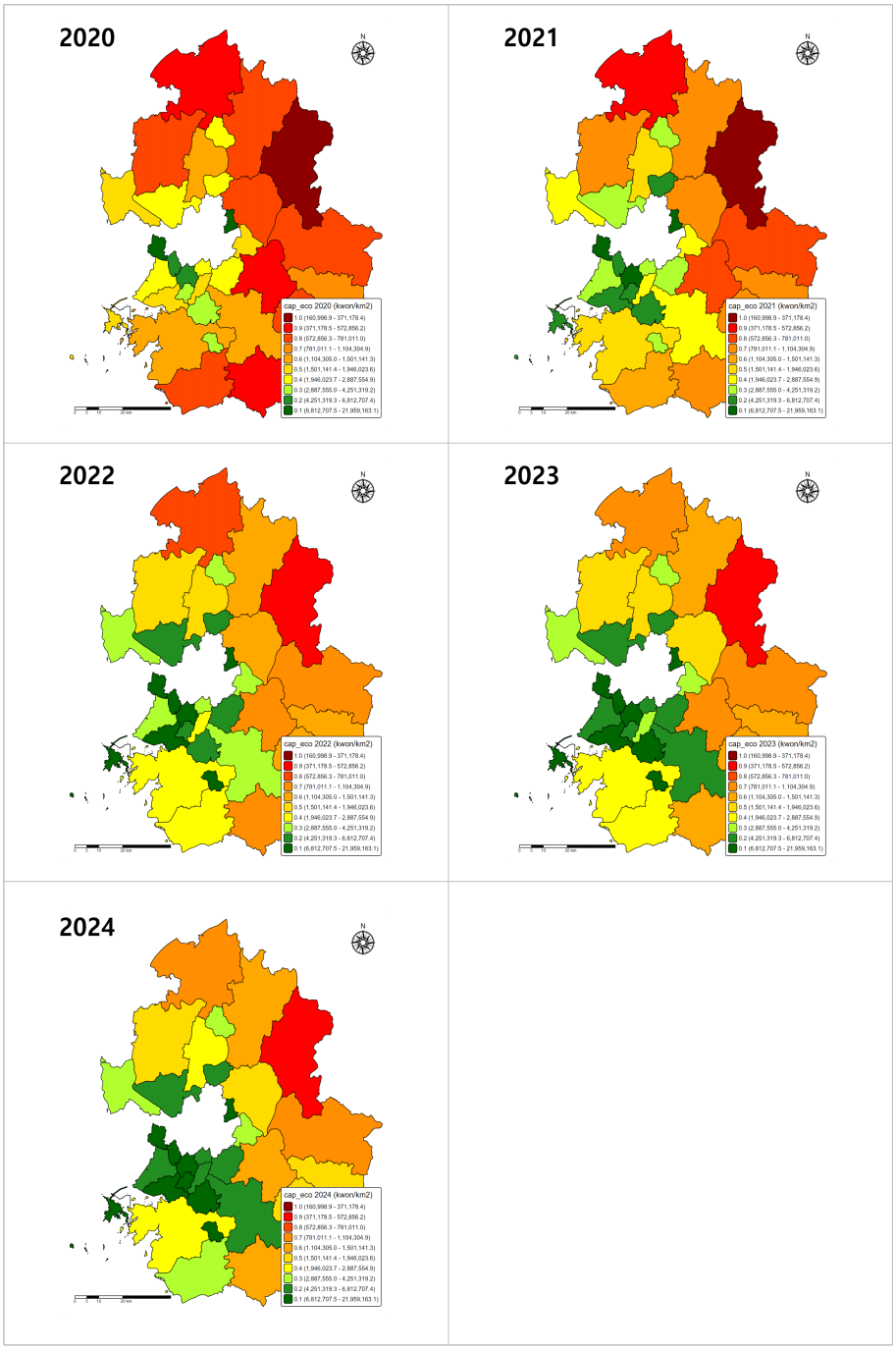




자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-18] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 누적 방재예산액 비율 지수





자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 2016년 대비 2024년의 세부지표 지수 변화에서 방재시설 밀도는 완만히 증가한 반면, 누적 방재예산액 비율은 특정 시군에서 급격하게 증가

○ 누적 방재예산액 비율 지수는 소수의 대도시들에 집중해서 크게 산정되었으며, 그중 2024년 기준 구리시는 가평군의 38배 격차를 보임

○ Capacity 항목의 세부지표 지수들은 분위수를 활용한 구간별 점수화로 지수화된 결과에 반전화를 적용했기 때문에 통계지도에서도 연차가 누적될수록 지수의 크기도 작아지는 양상이 나타남

6) 유전 알고리즘 기반 세부지표별 가중치 산정 결과

❑ (GA) 재해연보 호우·태풍 피해액 순위와의 절대오차 합계가 최소가 되도록 세부지표별 가중치를 산정하며, 전체 세부지표 가중치의 합계는 1

[표 3-2] 13개 세부지표별 유전 알고리즘 기반 가중치 산정 결과

항목	세부지표	세부지표 가중치	단위
Hazard	최대강우량(지속시간 2시간)	0.098	mm
	최대강우량(지속시간 12시간)	0.321	mm
Exposure	건축물수	0.021	동
	주민등록인구수	0.019	명
	공시지가	0.018	천 원
	농경지 면적	0.011	m^2
	도로 면적	0.119	m^2
Vulnerability	노후건축물수(20년 이상)	0.023	동
	의존인구수(유아+고령)	0	명
	밭·시설·인삼 재배면적	0.011	m^2
	지하차도 면적	0.083	m^2
Capacity	방재시설 밀도	0.020	개/km^2
	누적 방재예산액 비율	0.256	천 원/km^2

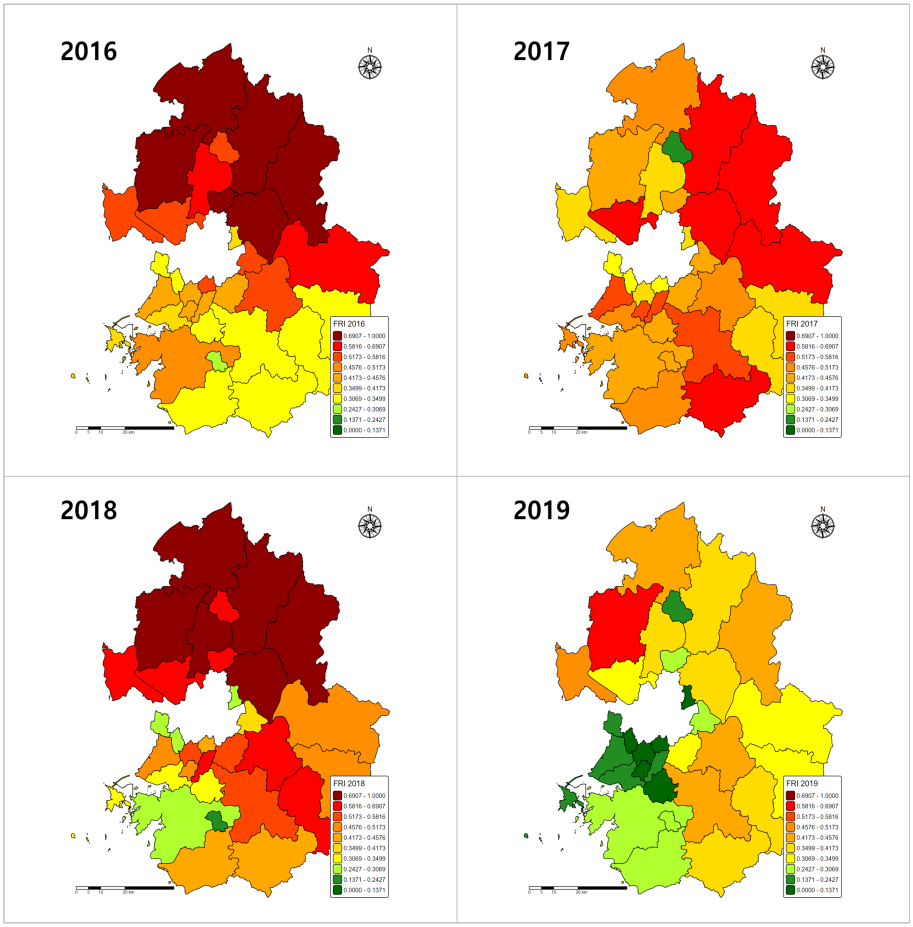
○ Hazard 항목에선 최대강우량(지속시간 12시간), Exposure는 도로 면적, Vulnerability는 지하차도 면적, Capacity는 누적 방재예산액 비율에 가중치가 크게 배분되는 특징이 나타남

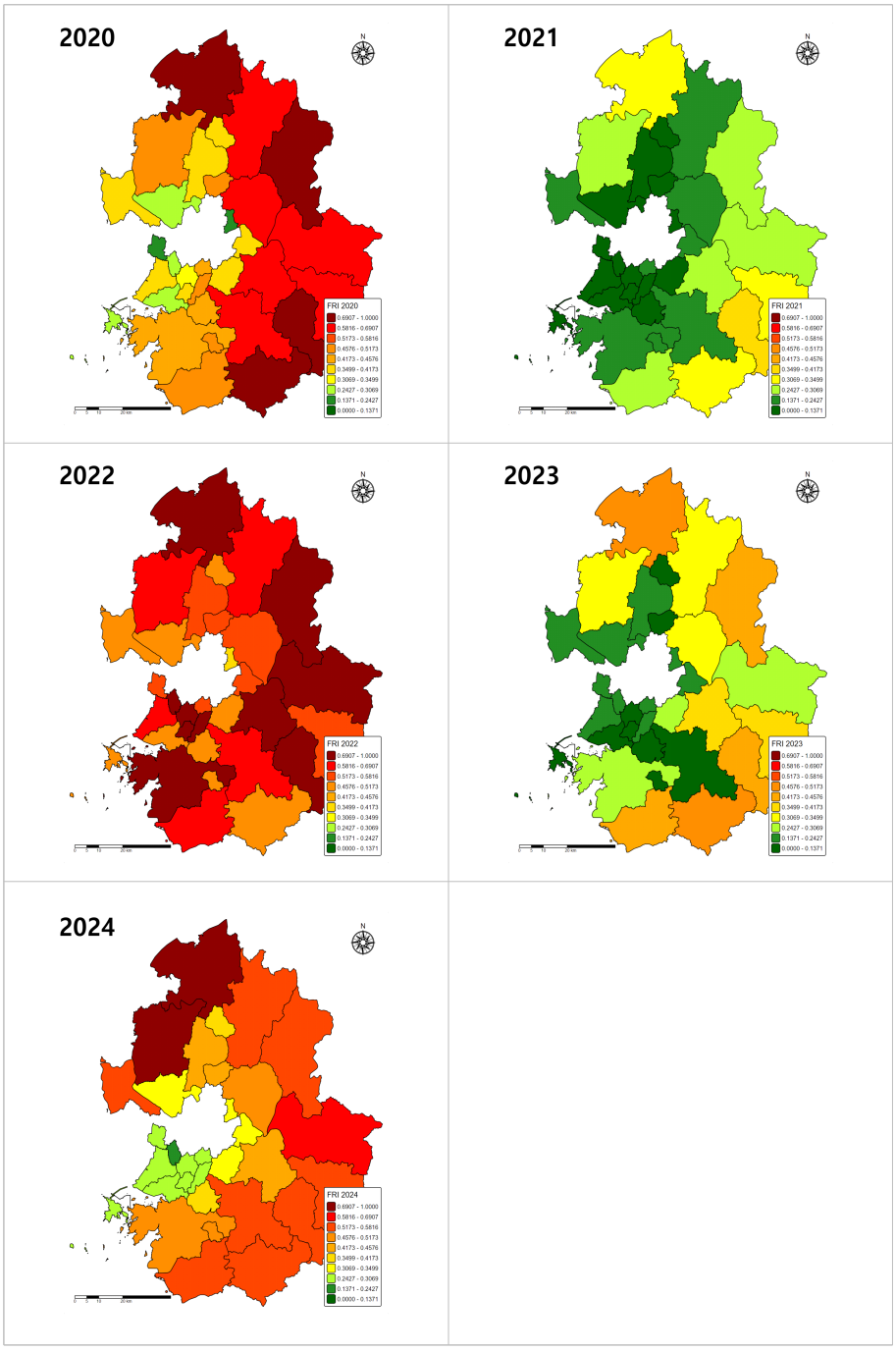
○ 전반적으로 의존인구수를 제외한 모든 세부지표에 가중치가 배분되었으며, 그중에서 Hazard 항목에서는 신규 세부지표로 추가된 지속시간별 최대강우량, Exposure 항목은 도로 면적, Vulnerability 항목은 지하차도 면적, 그리고 Capacity 항목에선 누적 방재예산액 비율의 가중치가 크게 배분되는 모습을 보임

7) 경기도 31개 시군별 홍수위험도 지수 산정 및 정확도 검증

❑ 세부지표 지수에 GA 가중치를 적용 및 합산한 뒤 min-max 정규화를 적용하여 연도별 시군 단위 홍수위험도 지수(0~1)를 산정

[그림 3-19] 2016~2024년 경기도 31개 시군별 홍수위험도 지수





자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[표 3-3] 연도별 시군 단위 호우·태풍 피해액 순위와 홍수위험도 지수 순위 간 절대오차 통계

연도	피해발생 시군 개수	절대오차 합계	절대오차 평균	RMSE
2016	26	236	9.08	11.07
2017	26	160	6.15	7.85
2018	31	124	4.00	5.24
2019	28	152	5.43	6.45
2020	27	106	3.93	5.58
2021	9	27	3.00	3.69
2022	31	210	6.77	8.99
2023	25	146	5.84	7.20
2024	26	114	4.38	6.38
합계	229	1,275	5.57	7.43

❑ 2016~2024년의 기간 동안 중복을 포함하여 총 229개 시군에서 호우·태풍 피해가 발생하였음

❑ (정확도 검증) 재해연보 호우·태풍 피해액 순위와 유전 알고리즘 기반 가중치를 적용한 시군 단위 홍수위험도 지수의 순위에 대해서 연도별 절대오차 합계, 절대오차 평균, RMSE를 산정하여 정확도를 평가함

○ 정확도 검증을 수행한 결과 절대오차 합계는 1,275, 평균은 5.57, RMSE는 7.43으로 산정됨

○ 선행 연구에서 2016~2023년 시군 단위 홍수위험도 지수에도 도출된 정확도 검증 결과(절대오차 평균: 5.52, RMSE: 7.65)와 비교했을 때 2024년이 추가되었음에도 불구하고, 절대오차 평균은 유사하게 도출되었으며, RMSE는 기존 대비 개선된 결과가 도출되었음

○ 또한, 연도별로 집계된 강우강도를 고려한 침수지도 적용과 내수침수 반영, 공공시설에 해당하는 도로 면적, 지하차도 면적 등의 신규 세부지표를 추가하여 시군 단위 세부지표 지수와 홍수위험도 지수의 설명력과 활용도가 개선됨

❑ (한계 검토) 30년 빈도 미만의 강우강도를 고려한 침수지도 미적용, 침수지도가 존재하지 않는 표준유역이 다수 존재하는 문제점 등이 시군 단위 홍수위험도 지수의 정확도 개선에서 한계점으로 작용함

2 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 결과

1) 격자 단위 산정 결과의 표출 방식

❑ 보고서에서 연도별 결과는 재해연보 기준 호우·태풍 피해액 1위 시군에 한정하여 격자 단위 통계지도를 표출

○ 침수지도 적용 표준유역이 국지적으로 분포하여 경기도 전역 지도로는 격자 단위 지수 분포의 판독이 어려움

○ 표출 대상은 2020년 연천군, 2022년 양평군, 2024년 파주시이며, 연도별 침수지도 위치 시군과도 일치함

- 2018년은 피해액 1위 시군이 2020년과 동일한 연천군으로 중복되어 표출 대상에서 제외함

❑ 연도별 피해규모가 가장 컸던 2022년 양평군은 세부지표 지수부터 항목별 지수, 홍수위험도 지수까지 전체 위계를 제시

○ 2022년은 강우강도와 침수지도 적용 표준유역 수(12개)가 최대였던 해로, 격자 단위 지수의 판독 과정을 대표적으로 보여주기에 적합함

○ 2020년 연천군과 2024년 파주시는 항목별 지수와 홍수위험도 지수를 제시하여 연도 간 비교에 활용함

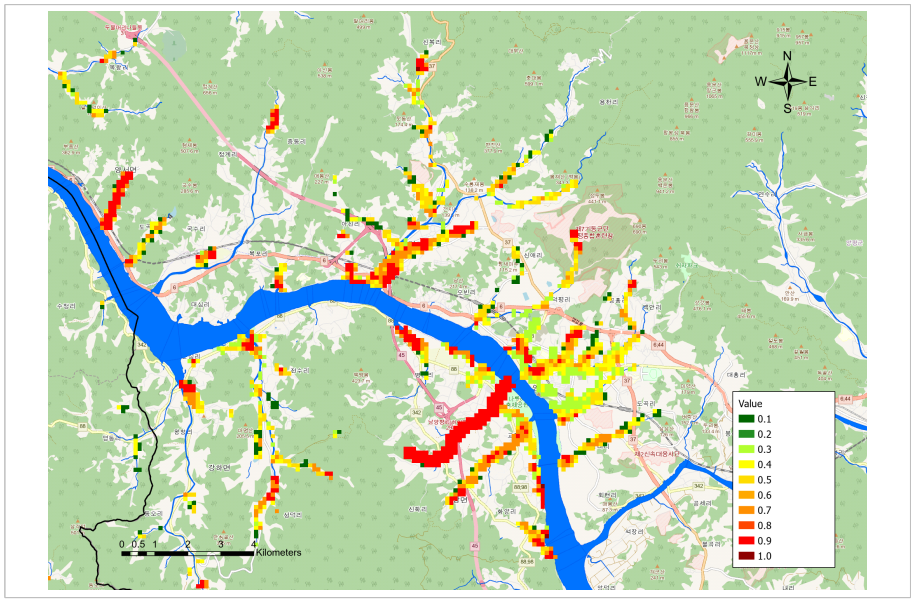
❑ 빈도별(30~500년) 침수지도를 적용한 결과는 경기도 전역 지도로 표출하되 홍수위험도 지수에 한정하여 제시

2) Hazard 항목의 격자 단위 세부지표 지수

❑ 세부지표: 침수심, 침수면적 — 선택된 빈도별 침수지도로부터 격자별로 산정

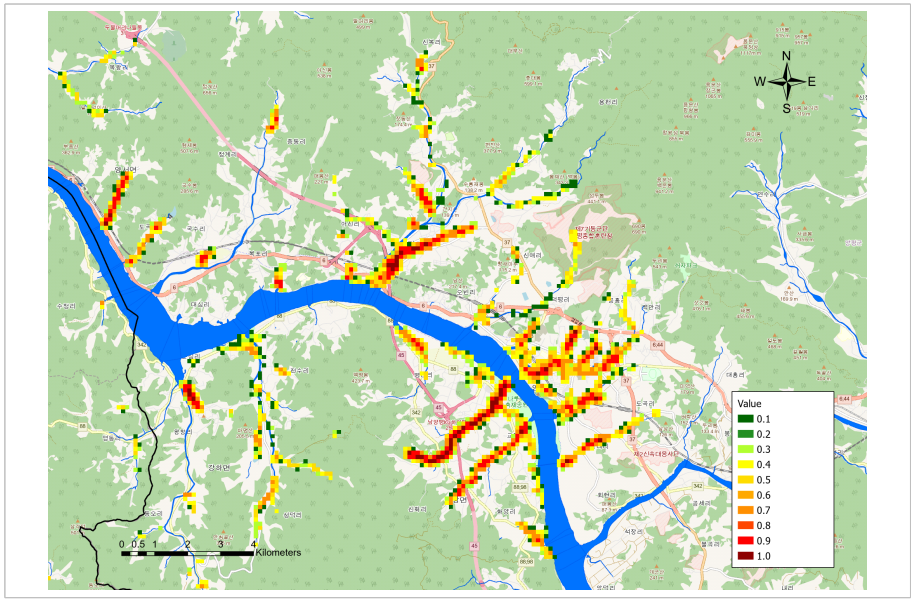
❑ 분위수를 활용한 구간별 점수화를 개별 격자마다 적용하여 지수화하고 해당 분위수 기준을 연도별 격자 단위 통계지도에도 적용

[그림 3-20] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 침수심 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-21] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 침수면적 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 하천 주변과 도심지 내 저지대에서 침수심과 침수면적이 크게 산정됨

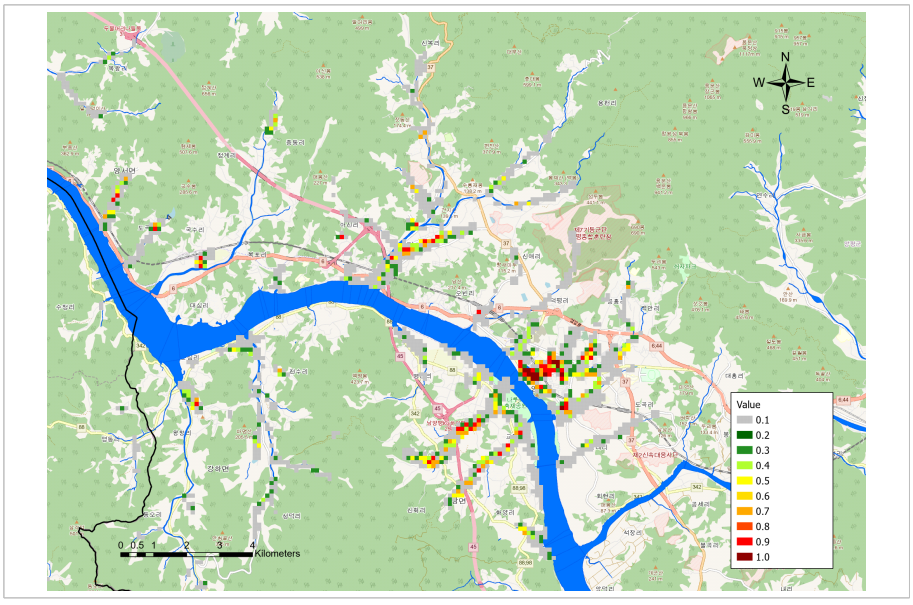
3) Exposure 항목의 격자 단위 세부지표 지수

❑ 세부지표: 건축물수, 주민등록인구수, 공시지가, 농경지 면적, 도로 면적

❑ 홍수위험지도·도시침수지도로 선별하고 침수편입률을 적용한 격자자료를 분위수를 활용한 구간별 점수화로 지수화

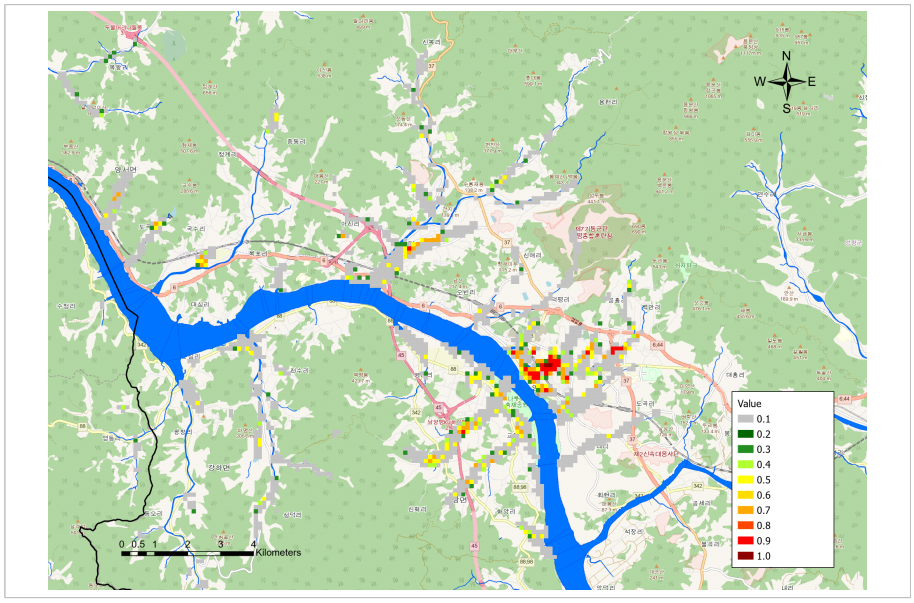
○ (기준치 처리) 속성값이 기준치 미만인 격자는 0.1로 일괄 변환한 뒤, 남은 격자를 9분위수로 9등분(0.2~1)

[그림 3-22] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 건축물수 지수 분포



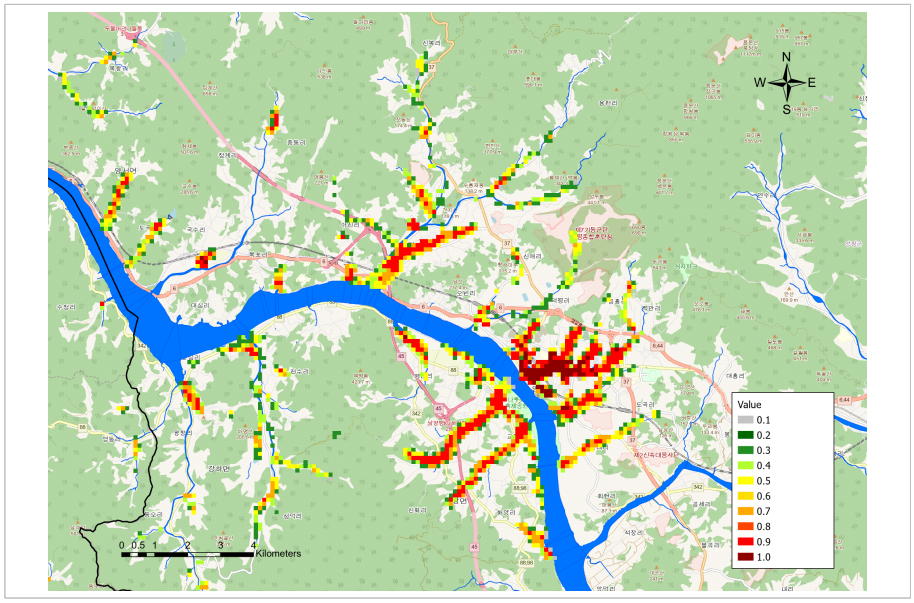
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-23] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 주민등록인구수 지수 분포



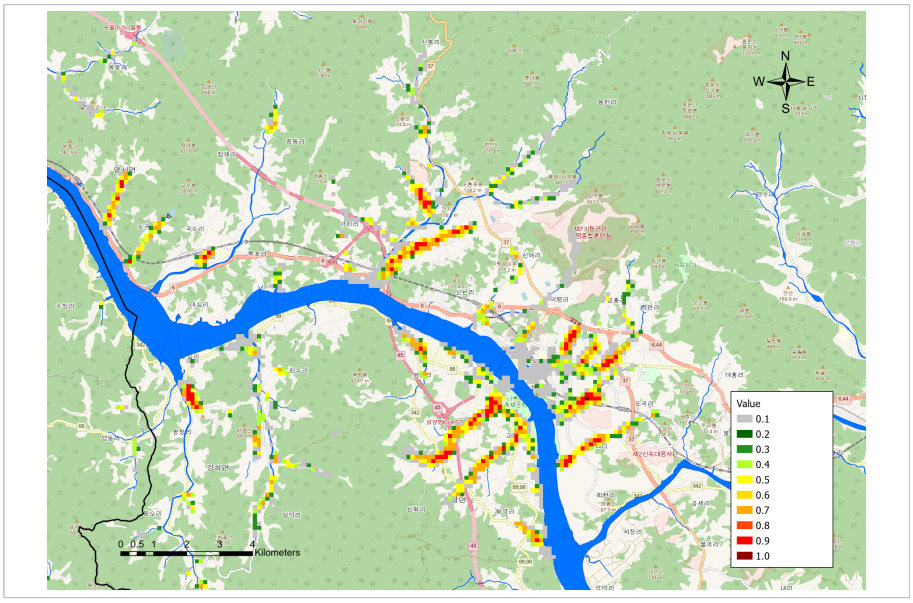
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-24] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 공시지가 지수 분포



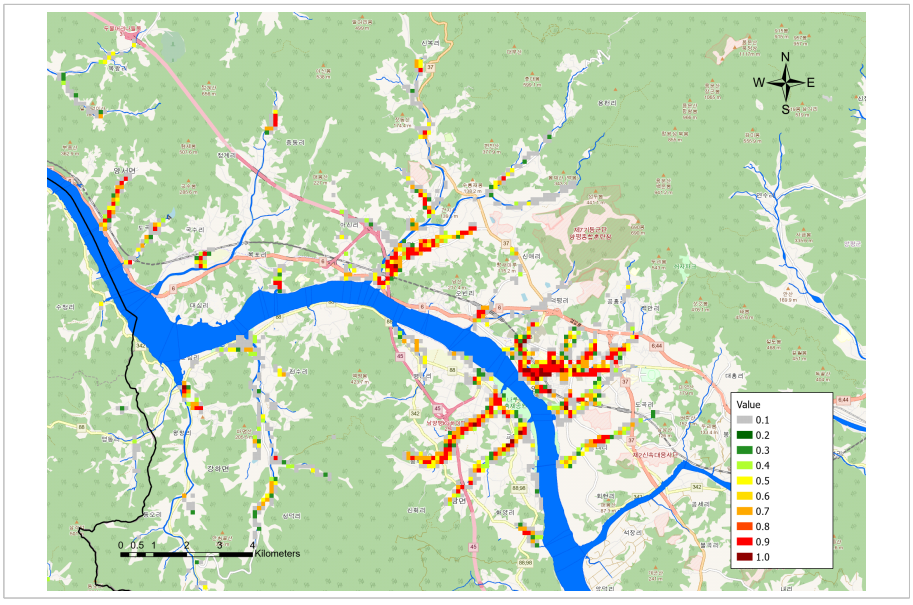
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-25] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 농경지 면적 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-26] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 도로 면적 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

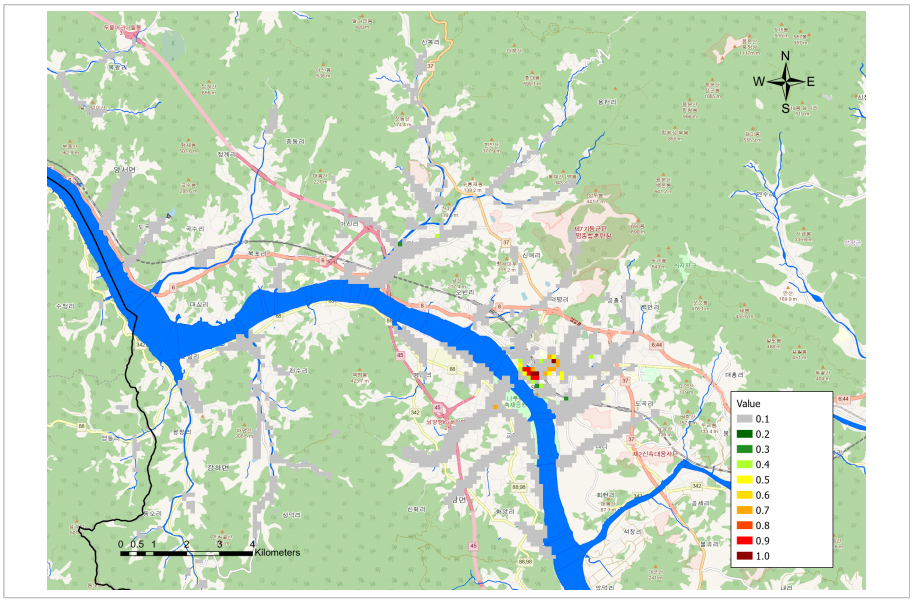
❑ (결과 해석) 건물·인구가 밀집한 도심지 주변의 격자에서 Exposure 항목에 포함된 주요 세부지표인 건축물수, 주민등록인구수, 공시지가 등이 크게 산정됨

4) Vulnerability 항목의 격자 단위 세부지표 지수

❑ 세부지표: 노후건축물수, 의존인구수, 밭·시설·인삼 재배면적, 지하차도 면적

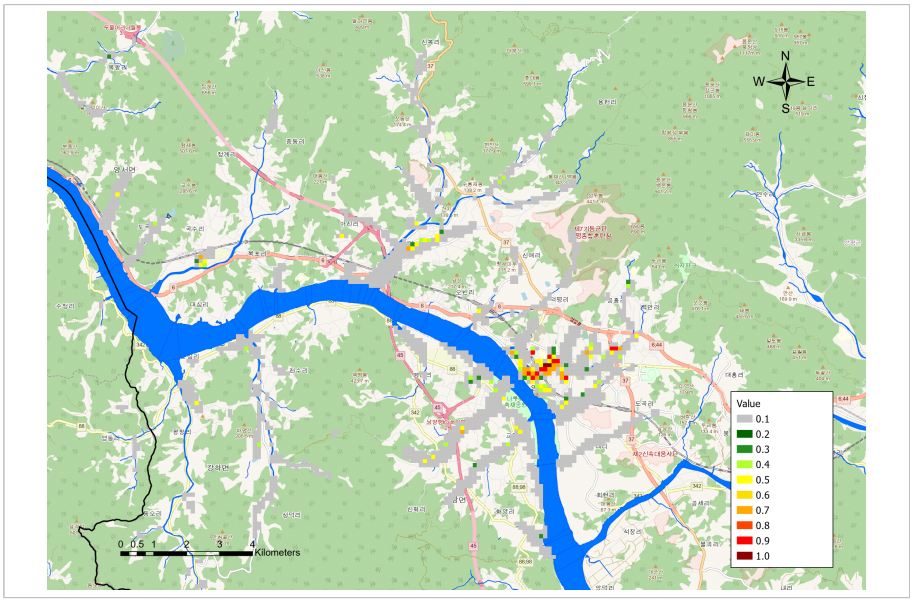
❑ Exposure 항목의 세부지표와 동일하게 침수지도와 Vulnerability 항목의 세부지표별 격자자료 간 침수편입률을 적용한 중첩 분석을 통해 격자를 선별한 후 지수화 수행

[그림 3-27] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 노후건축물수 지수 분포



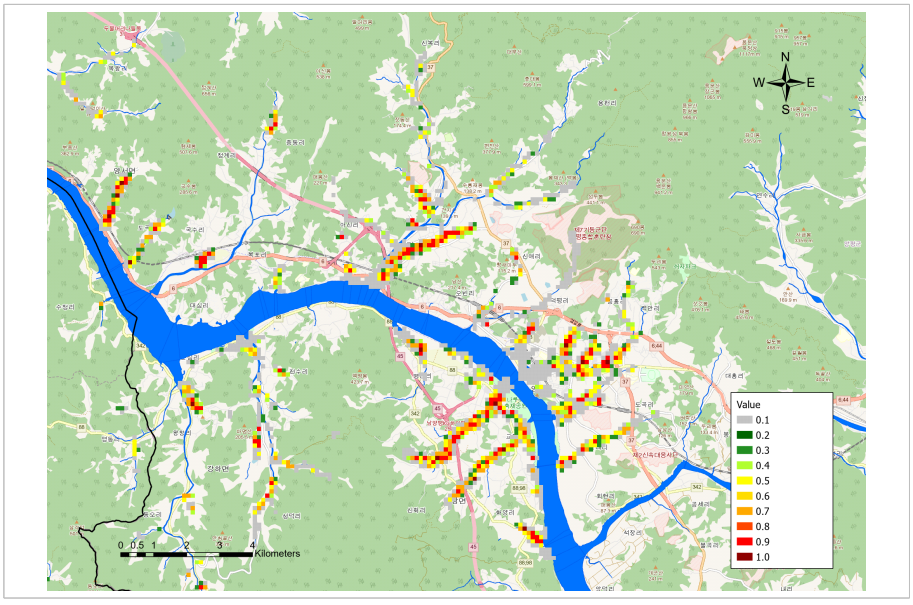
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-28] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 의존인구수 지수 분포



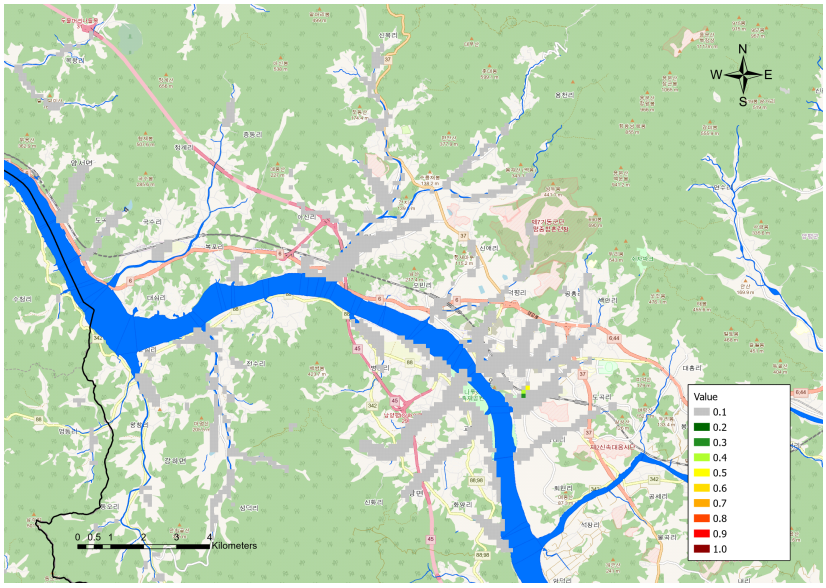
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-29] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 밭·시설·인삼 재배면적 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-30] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 지하차도 면적 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 건물, 인구가 밀집된 시군에선 노후건축물수와, 의존인구수 격자들도 다수 분포하고 있으며, 도심지를 제외한 하천 주변의 농경지의 밀도가 높은 지역에선 격자 단위 밭·시설·인삼 재배면적 지수도 크게 산정됨

5) 세부지표별 엔트로피 가중치 산정 결과

❑ 격자 단위 세부지표별 원데이터로 엔트로피 가중치 산정

[표 3-4] 경기도의 홍수위험지도 내 격자 단위 세부지표별 엔트로피 가중치 산정 결과

항목	세부지표	세부지표 가중치	단위
Hazard	침수심	0.505	m
	침수면적	0.495	m^2
Exposure	건축물수	0.190	동
	주민등록인구수	0.377	명
	공시지가	0.195	천 원
	농경지 면적	0.103	m^2
	도로 면적	0.135	m^2
Vulnerability	노후건축물수(20년 이상)	0.185	동
	의존인구수(유아+고령)	0.110	명
	밭·시설·인삼 재배면적	0.233	m^2
	지하차도 면적	0.472	m^2

○ (특징) 변동계수가 큰 세부지표에 가중치가 많이 배분되는데, Hazard 항목에선 두 세부지표의 변동계수가 유사하고, Exposure 항목은 주민등록인구수, Vulnerability는 지하차도 면적의 가중치가 크게 산정됨

○ (시군 대비) 시군 단위는 격자 통계량을 시군별로 합산한 후 유전 알고리즘을 적용해 최적 가중치를 산정하지만, 격자 단위는 개별 격자 단위 통계값을 엔트로피 가중치 산정법에 반영하므로 가중치 산정 결과가 달라짐

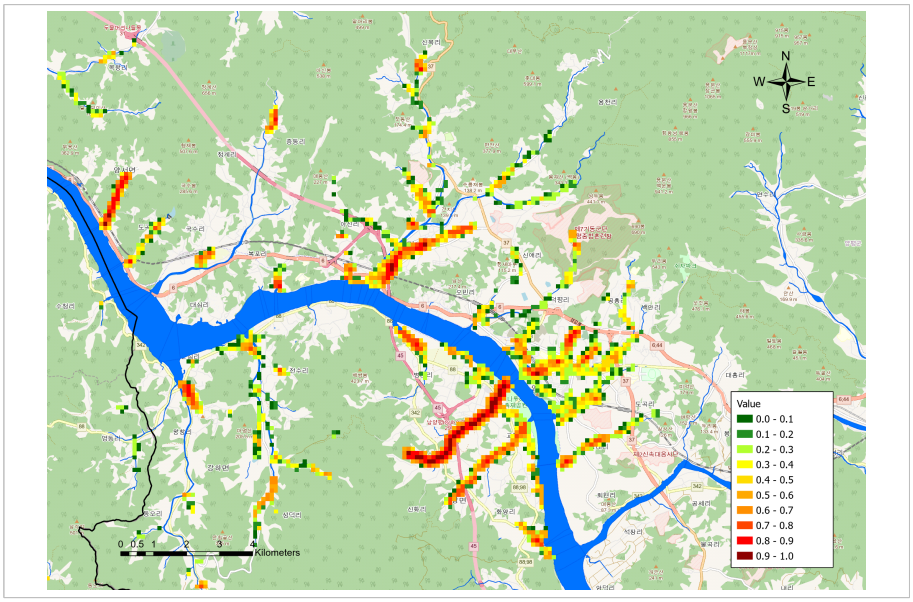
6) 격자 단위 항목별 지수 산정

❑ 항목별 세부지표 지수에 엔트로피 가중치를 적용해 가중 합하고, min-max 정규화로 0~1 범위의 항목별 지수를 산정

❑ 연도별 피해액 1위 시군을 대상으로 Hazard, Exposure, Vulnerability 지수의 통계지도를 제시

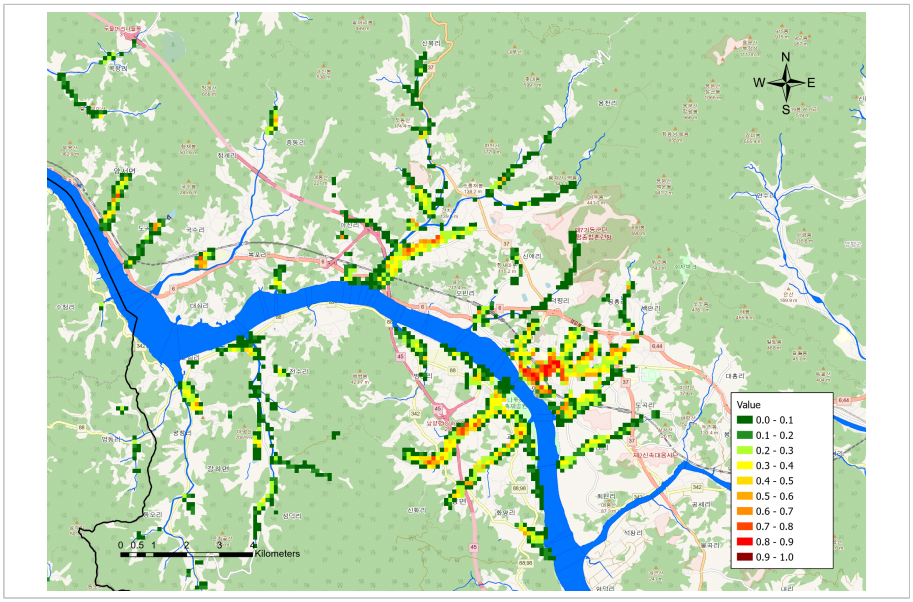
○ 세부지표 지수를 제시한 2022년 양평군을 먼저 배치하고, 2020년 연천군과 2024년 파주시를 이어서 제시해 연도 간 비교가 가능하도록 구성

[그림 3-31] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 Hazard 지수 분포



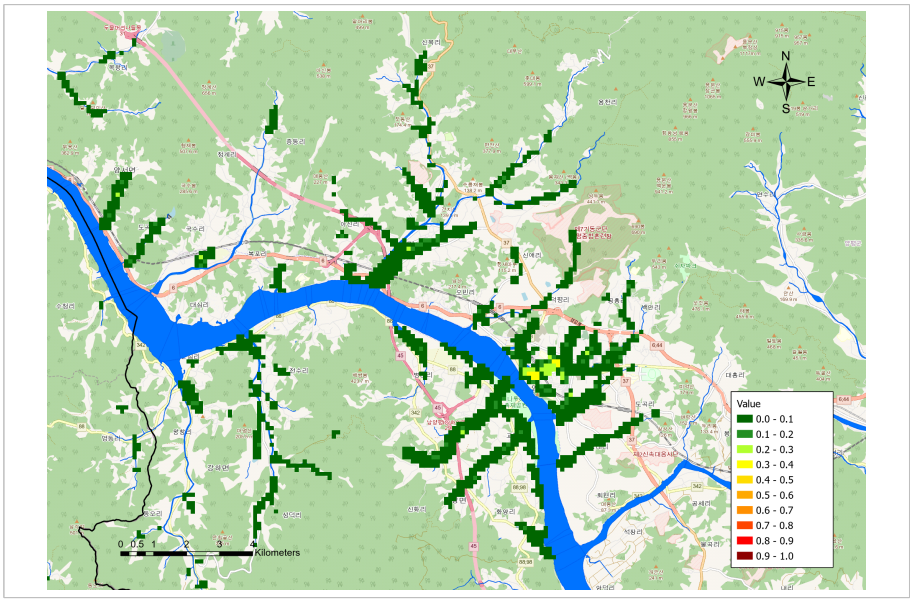
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-32] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 Exposure 지수 분포



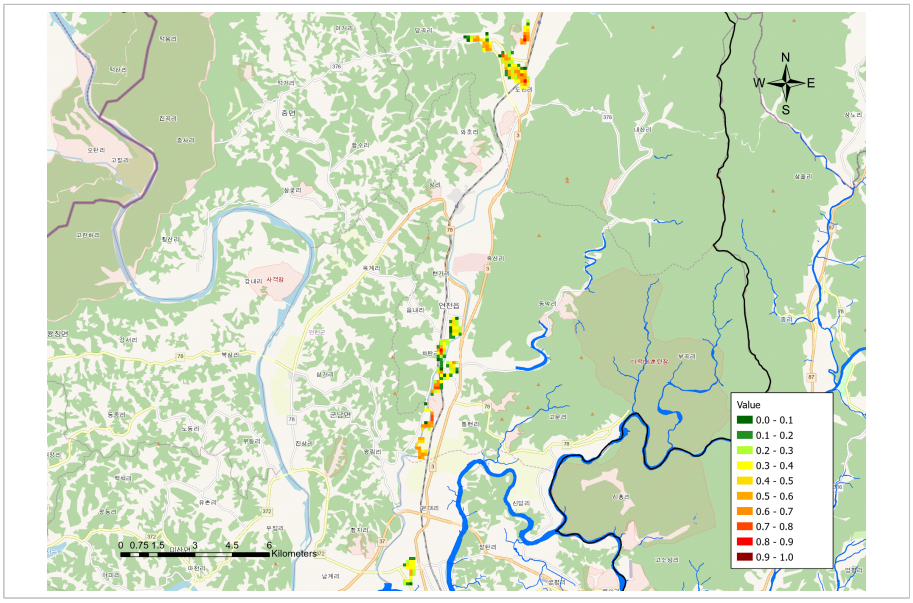
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-33] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 Vulnerability 지수 분포



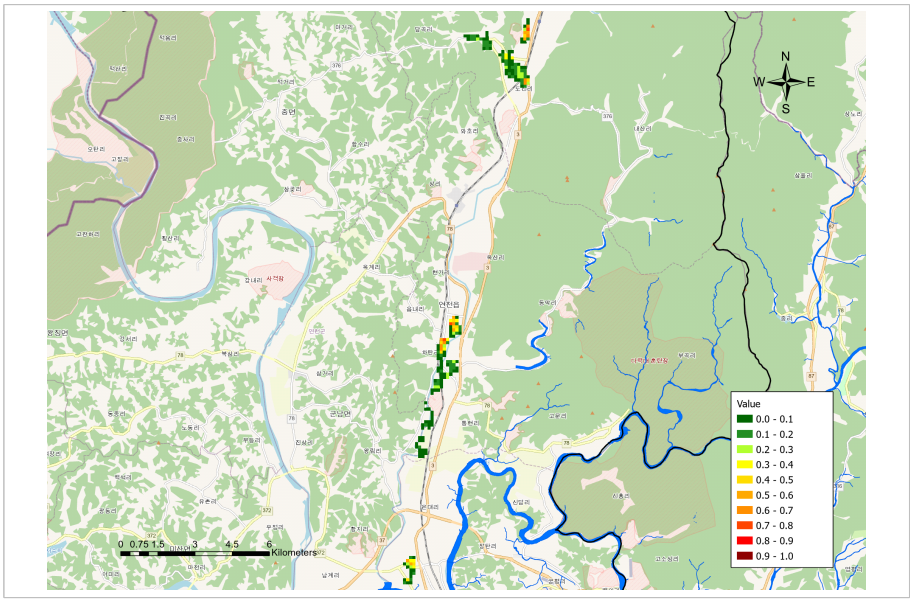
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-34] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 Hazard 지수 분포



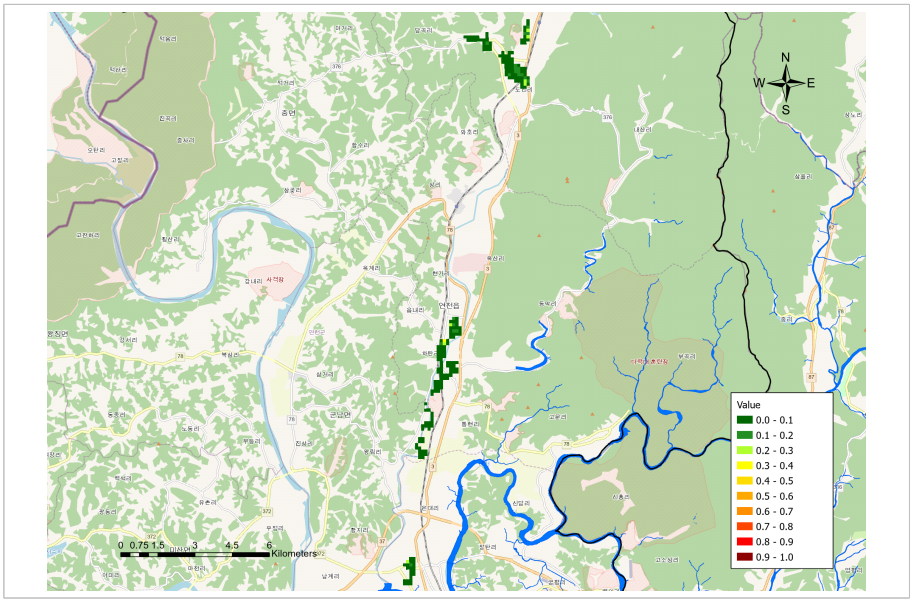
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-35] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 Exposure 지수 분포



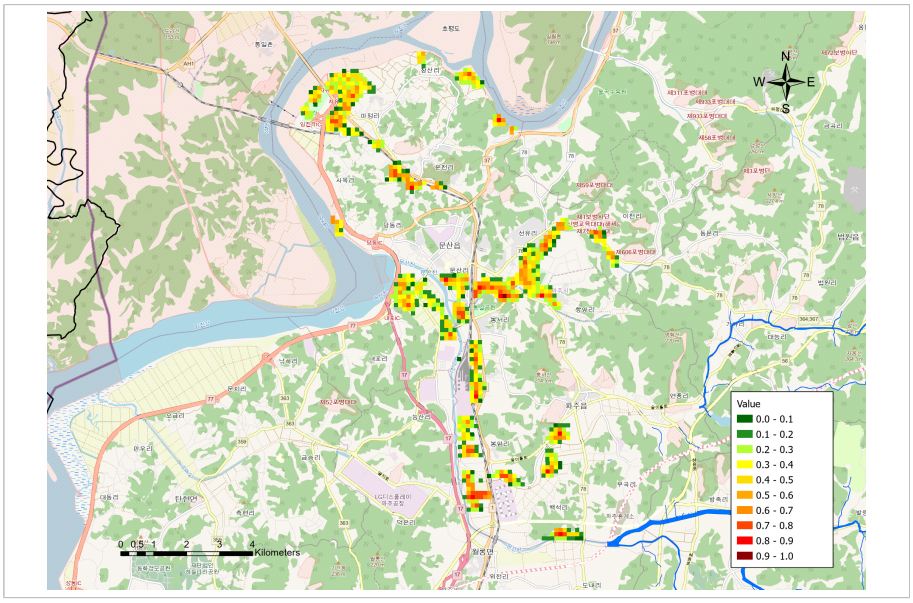
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-36] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 Vulnerability 지수 분포



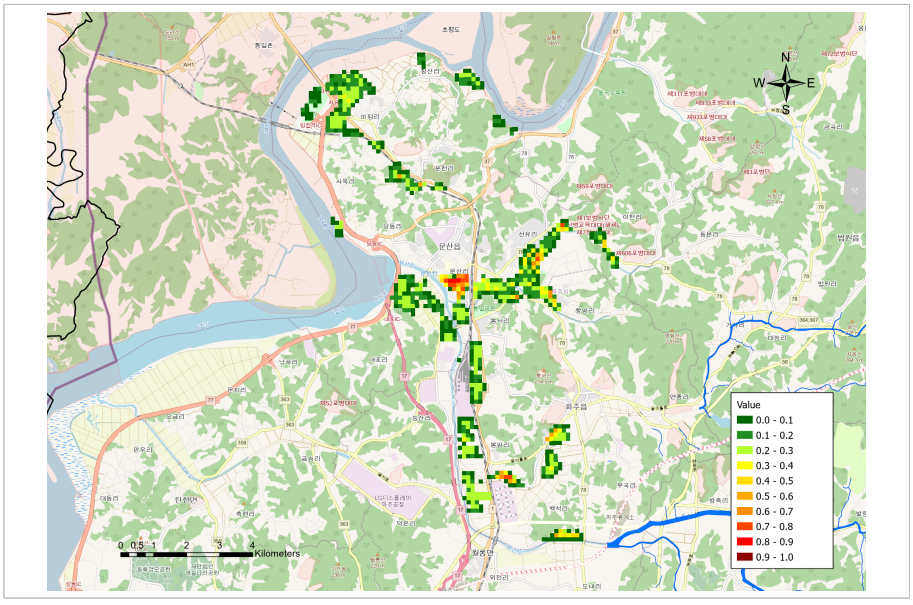
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-37] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 Hazard 지수 분포



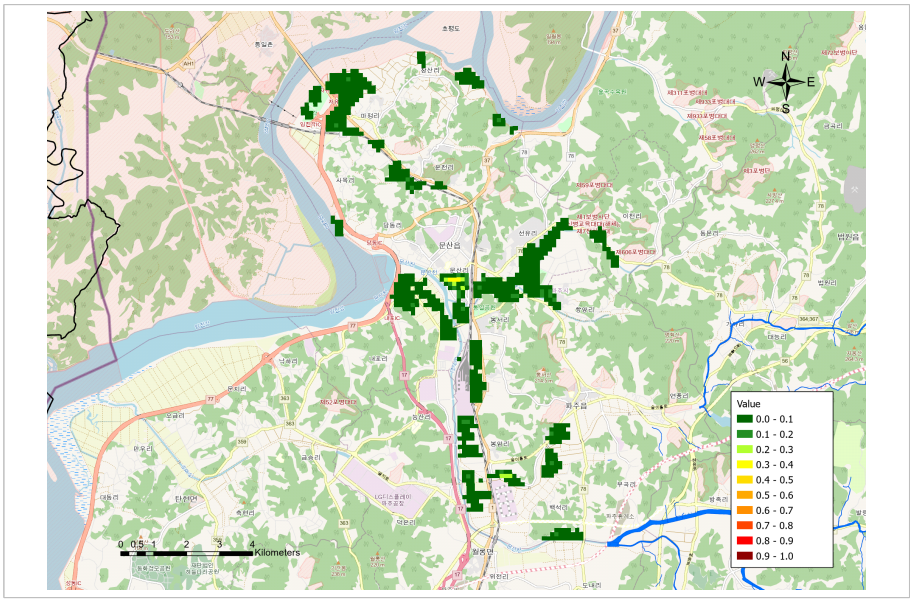
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-38] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 Exposure 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-39] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 Vulnerability 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 항목별 지수는 항목 내 가중치가 크게 배분된 세부지표의 격자 분포 특성을 크게 반영함

○ Exposure 지수는 주민등록인구수 지수, Vulnerability 지수는 지하차도 면적, 밭·시설·인삼 재배면적 지수의 분포와 유사한 양상이 나타남

○ 하천 주변을 따라 침수지도 격자가 분포하는 가운데, 읍·면 시가지와 중첩되는 구간에서 Exposure 지수가, 하천 주변의 밭·시설·인삼 재배지와 지하차도 구간에서 Vulnerability 지수가 크게 산정됨

7) 격자 단위 홍수위험도 지수 산정 및 실제 피해 사례 비교

❑ Hazard, Exposure, Vulnerability 지수에 유클리드 거리를 적용하여 0~√3 범위의 격자 단위 홍수위험도 지수를 산정

○ (통계지도) 격자 단위 홍수위험도 지수에 10분위수를 적용해 구간을 분할하여 색을 부여하되, 지수값 자체는 그대로 유지

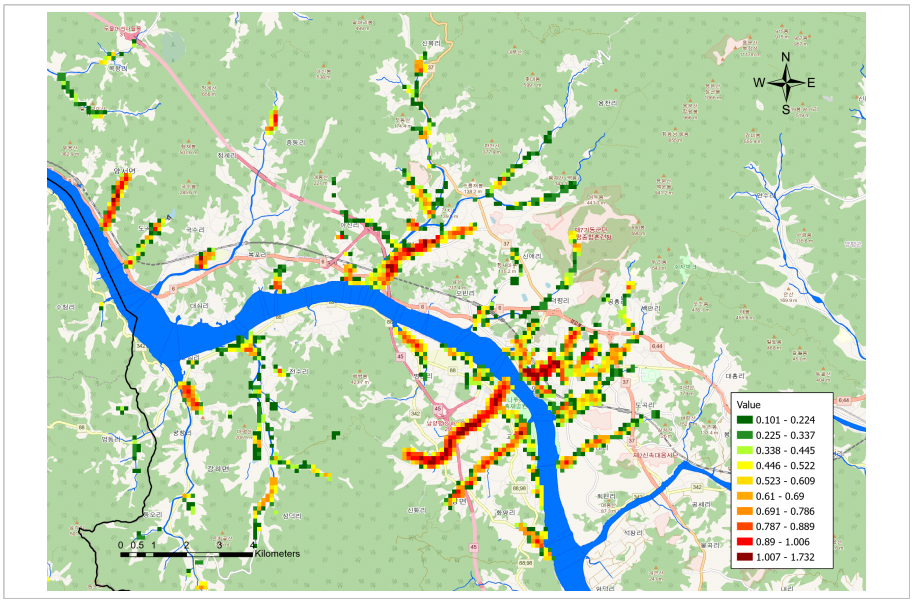
❑ 산정된 홍수위험도 지수 격자 중에서 피해대상이 존재하는 격자만 선별한 통계지도를 함께 제시

○ (선별 기준) 건축물수 1동 미만, 주민등록인구수 1명 미만, 농경지 면적 100㎡ 미만, 도로 면적 100㎡ 미만의 조건을 모두 만족하는 격자는 피해대상이 없는 것으로 간주하여 제외

○ (선별 목적) 선별 전 지도는 시군 내 전체 침수 범위를 보여주는 반면, 선별 후 지도는 홍수위험에 노출된 피해대상의 위치와 밀집도를 직관적으로 판독할 수 있음

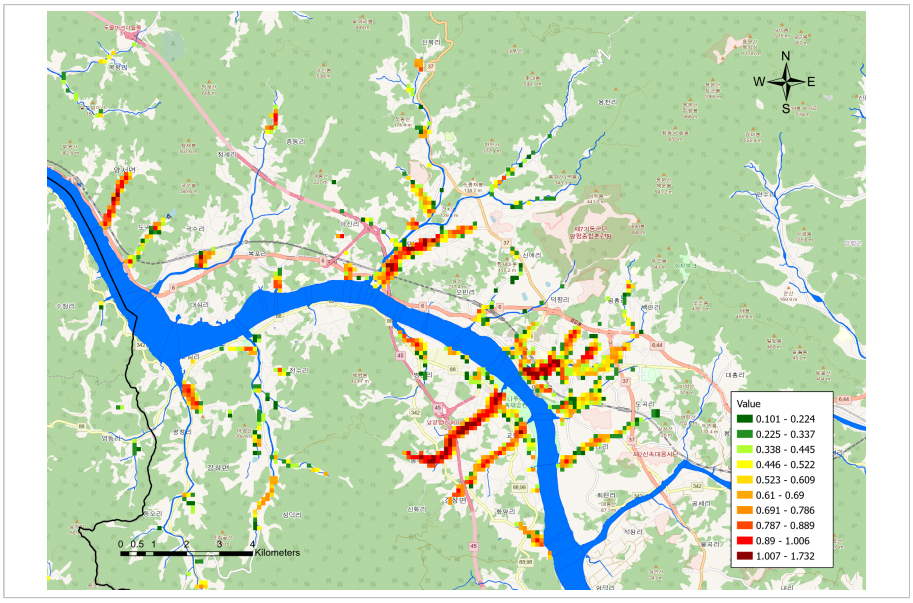
○ 두 지도의 비교를 통해 전체 침수 범위와 실제 피해대상 분포를 구분해서 확인할 수 있어 통계지도의 가시성과 활용성이 개선됨

[그림 3-40] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 홍수위험도 지수 분포



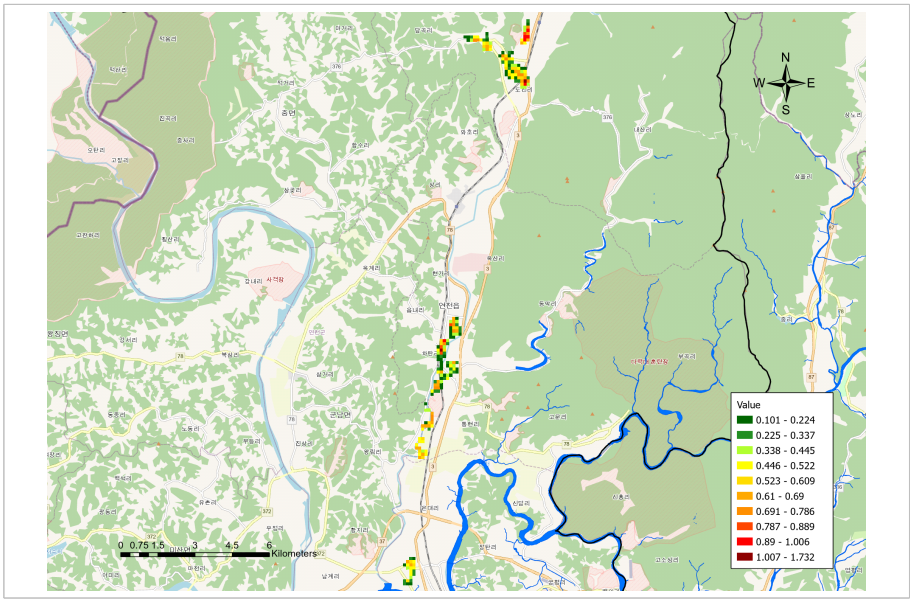
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-41] 2022년 경기도 양평군의 격자 단위 홍수위험도 지수(선별) 분포



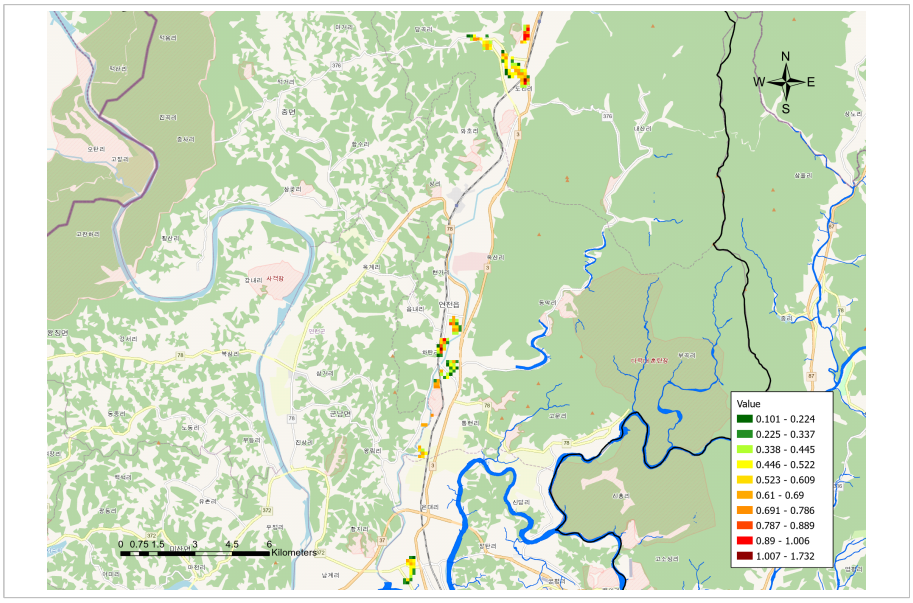
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-42] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 홍수위험도 지수 분포



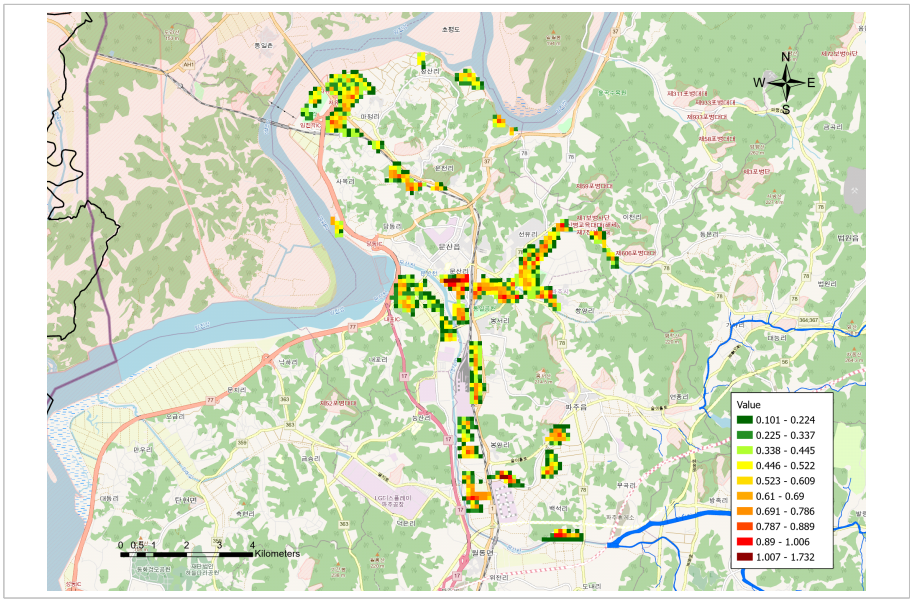
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-43] 2020년 경기도 연천군의 격자 단위 홍수위험도 지수(선별) 분포



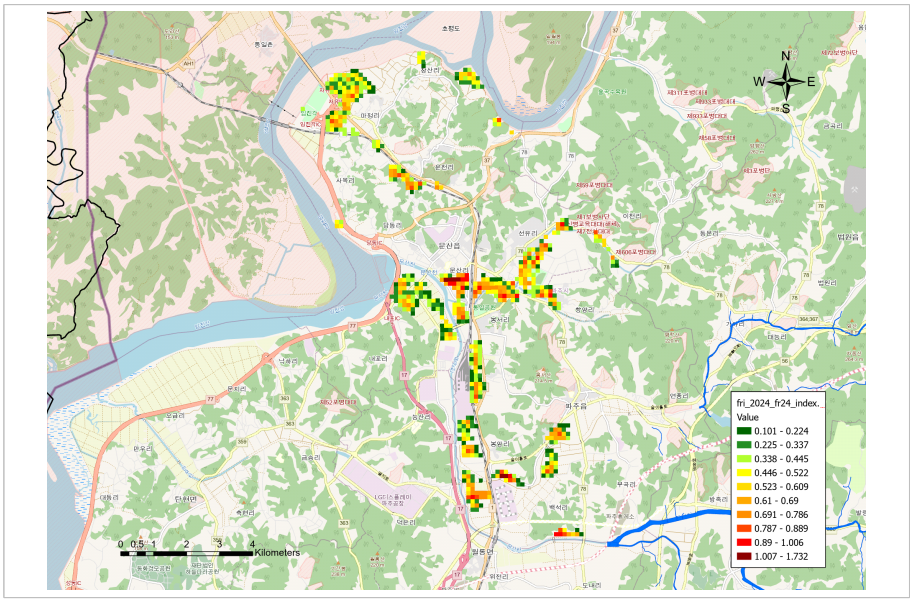
자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-44] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 홍수위험도 지수 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

[그림 3-45] 2024년 경기도 파주시의 격자 단위 홍수위험도 지수(선별) 분포



자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 유클리드 거리를 동일 가중 개념으로 적용했기 때문에 세 항목 지수의 특징이 홍수위험도 지수에 균등하게 반영됨

○ 침수심이 깊더라도 피해대상이 없는 격자는 지수가 작고, 시가지, 농경지와 중첩된 격자에서는 지수가 크게 산정되어 시군 내에서 홍수위험에 노출된 피해대상 밀집 지역의 식별이 가능함

○ 선별 후에는 하천 주변 및 도심지 외곽의 피해대상이 없는 격자들이 제거되어 건물, 인구, 농경지, 도로 등이 밀집된 격자가 통계지도에서 뚜렷하게 드러남

❑ (실제 피해 사례 비교) 격자 단위 홍수위험도 지수는 100m 격자 규격의 피해액 참값이 없어 시군 단위와 같은 정량적 정확도 검증이 어려우므로, 실제 침수 피해지점과의 위치 비교를 수행

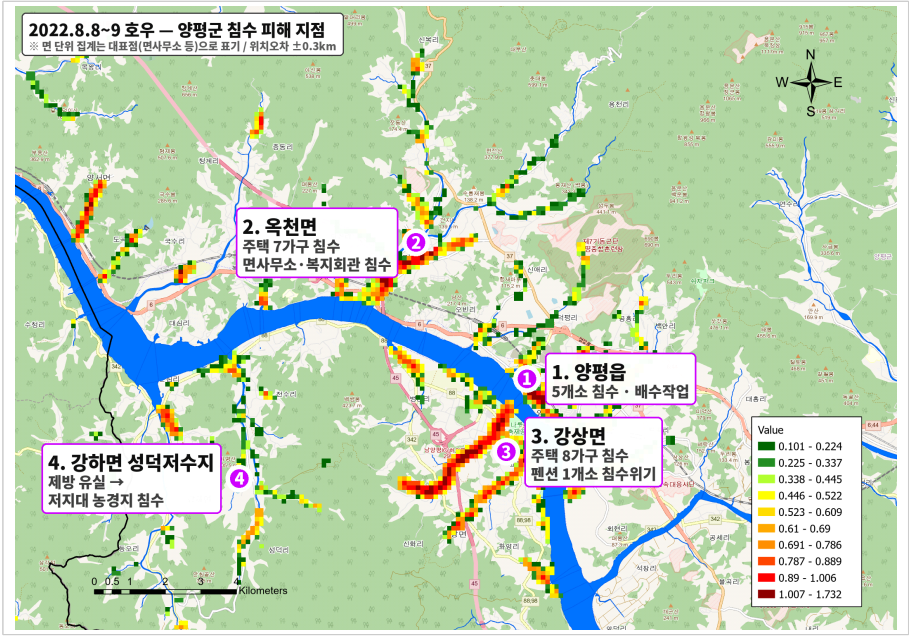
○ 검토 대상은 침수지도 적용 연도 중 피해규모가 가장 컸던 2022년 양평군으로, 재해연보 기준 호우·태풍 피해액이 490.7억 원으로 경기도 시군 중 최대임

- 지속시간 1~12시간 동안 최대 50년 빈도 규모의 강우가 집계되어([표 3-1] 참조), 집중호우에 따른 하천 및 배수 여건이 복합적으로 작용하여 침수피해가 발생함

❍ 급경사 산지의 빠른 유출 집중, 지방하천, 소하천 주변 저지대의 자산 밀집, 내수 배수 한계 등이 복합적으로 작용하는 양평군의 피해 특성이 격자 단위 지수의 공간 분포에 반영됨

❍ 흑천·남한강 합류부의 저지대와 지류 연안에서 홍수위험도 지수가 크게 산정되었으며, 실제 침수 피해가 확인된 양평읍, 옥천면, 강상면, 강하면 등과 공간적으로 중첩되는 것을 확인함

[그림 3-46] 2022.8.8.~9. 경기도 양평군의 침수 피해 발생 지점 분포



자료: 뉴시스(2022). “https://www.newsis.com/view/?id=NISX20220809_0001972532”.

8) 빈도별 침수지도를 적용한 격자 단위 홍수위험도 지수 산정

❑ 경기도 전역에 30, 50, 80, 100, 200, 500년 빈도 침수지도를 일괄 적용하여 빈도별 격자 단위 홍수위험도 지수를 산정

❍ (구축 목적) 대상 연도에 30년 빈도 미만의 강우가 발생한 시군이더라도, 30년 빈도 이상의 강우 발생 시 홍수위험 범위 내에서 세부지표별 피해대상이 어느 정도 포함되는지 확인하기 위함

❍ 연도별 피해액 1위 시군에 적용된 빈도와 동일한 빈도의 전역 지도를 참조하면, 해당 규모의 강우가 다른 시군에서 발생한 상황을 가정한 침수 피해 범위를 비교할 수 있음

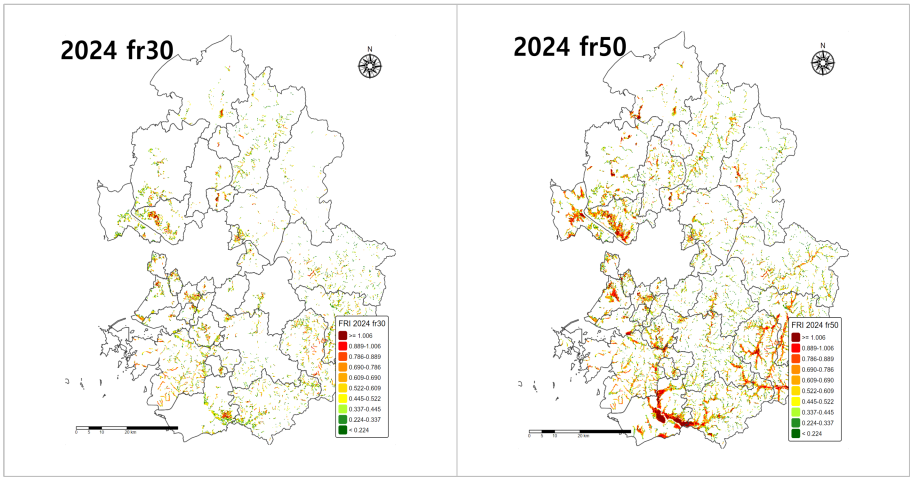
- 2022년 양평군 일대에는 최대 50년 빈도가 적용되었으므로, 50년 빈도 전역 지도는 동일 빈도의 강우가 경기도 전역에서 발생한 상황에 대응함

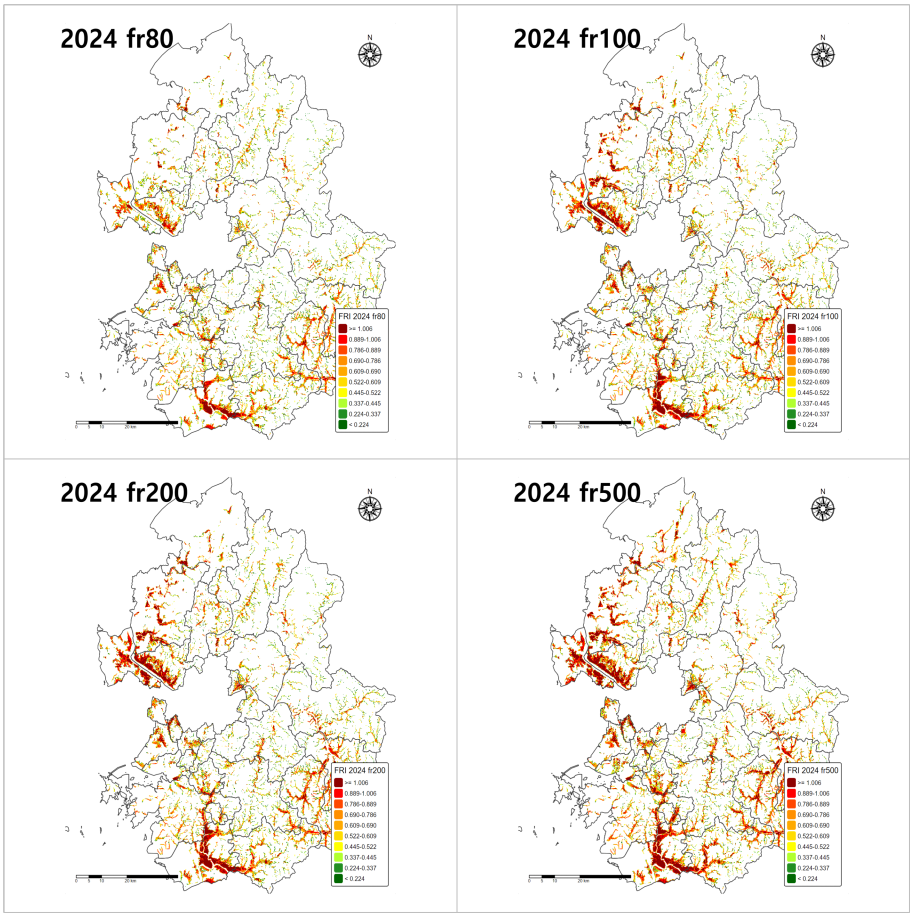
❍ 미침수 시군의 잠재적 위험지역과 피해대상 규모를 사전에 진단할 수 있어 방재사업 우선순위 결정 등 의사결정지원도구로 활용 가능

❑ **빈도별 홍수위험도 지수는 분석에 반영된 가장 최신 연도인 2024년을 기준으로 제시**

❍ Exposure, Vulnerability 항목의 세부지표 통계는 연도 간 변화가 크지 않아 최신 연도를 기준으로 한 격자 단위 홍수위험도 지수가 대표성을 가짐

[그림 3-47] 2024년 기준 경기도의 빈도별(30~500년) 격자 단위 홍수위험도 지수 분포





자료: 경기연구원(2026). 연구진 작성.

❑ (결과 해석) 빈도가 커질수록 침수 범위가 하천 연안에서 내륙 저지대로 확장되며, 홍수위험도 지수가 크게 산정되는 격자의 수와 분포도 함께 증가함

○ 저빈도(30, 50년)에서는 하천 연안과 도심지 내 저지대에서 위험 격자가 국한되지만, 고빈도(200, 500년)에서는 시가지 내부까지 위험 범위가 확대됨

○ 연도별 결과에서 침수지도가 적용되지 않았던 시군에서도 빈도별 결과에서는 위험 격자가 확인되어, 강우강도에 따른 잠재적 위험의 공간 분포를 진단할 수 있음

4

결론 및 정책 제언

1. 시군 단위 홍수위험도 지수의 결론
2. 격자 단위 홍수위험도 지수의 결론
3. 활용 방안
4. 정책 제언
5. 평가체계의 한계 및 향후 과제

Gyeonggi Reseearch Institute

제4장 결론 및 정책 제언

1 시군 단위 홍수위험도 지수의 결론

1) 빈도별 침수지도 선택 적용을 통한 홍수위험도 과대평가 완화

❑ 지속시간에 따른 표준유역별 최대강우량 산정을 위해 전국 69개 ASOS 관측소와 578개 ASOS+AWS 관측소 자료를 활용하고, 티센면적비를 적용하여 면적 단위 확률강우량 및 최대강우량을 산정함

❑ 표준유역별 최대강우량 규모에 부합하는 빈도별 침수지도(외수·내수)를 연도별로 선택 적용함으로써, 극한 강우사상 침수지도를 일괄 적용하던 기존 방식의 홍수위험도 과대평가 문제를 구조적으로 완화함

○ 그 결과 2016~2024년 중 침수지도 적용 기준을 충족한 표준유역은 2018년(8개), 2020년(8개), 2022년(12개), 2024년(6개)에 한정되어, 위험도가 일률적 최악 시나리오로 평탄화되지 않고 연도·유역별 실제 강우 규모에 따라 차등화됨

❑ 외수(홍수위험지도)와 내수(도시침수지도)를 단일 지수 체계에서 통합 적용하여, 하천발 외수 침수에 한정되던 기존 평가를 도시 내수침수까지 확장함

2) 13개 세부지표 기반 통합 평가체계의 구축

❑ 시군 단위 홍수위험도 지수는 지표기반 접근법(IBA)에 따라 Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity 4개 항목과 13개 세부지표로 구성됨

○ Hazard: 최대강우량(지속시간 2시간), 최대강우량(지속시간 12시간) — 단기·장기 강우사상의 규모를 함께 반영

○ Exposure: 건축물수, 주민등록인구수, 공시지가, 농경지 면적, 도로 면적

○ Vulnerability: 노후건축물수, 의존인구수, 밭·시설·인삼 재배면적, 지하차도 면적

○ Capacity: 방재시설 밀도, 누적 방재예산액 비율

❑ 분위수를 활용한 구간별 점수화로 세부지표 지수를 산정하고, Capacity는 값이 클수록 위험을 저감하므로 반전화하여 다른 항목과 방향을 통일함

❑ 도로 면적·지하차도 면적 등 신규 세부지표를 추가하여, 기존 평가에서 누락되던 공공시설 피해와 지하공간 침수 취약성을 위험도에 반영함

3) 유전 알고리즘 가중치의 의의 및 정확도 검증

❑ 재해연보의 호우·태풍 피해액 순위와 홍수위험도 지수 순위 간 절대오차 합계가 최소가 되도록 유전 알고리즘(GA)으로 13개 세부지표의 가중치를 산정하여, 홍수위험도 지수가 실제 피해 분포에 정합하도록 보정함

○ 산정된 가중치는 장기 강우사상을 대표하는 최대강우량(지속시간 12시간, 0.321)과 신규 세부지표인 도로 면적·지하차도 면적, Capacity의 누적 방재예산액 비율에 크게 배분되었으며, 신규 지표가 위험도 설명에 실질적으로 기여함을 확인함

❑ GA 가중치를 적용·합산하고 min-max 정규화하여 2016~2024년 연도별 31개 시군 홍수위험도 지수를 산정함

❑ 정확도 검증 결과 절대오차 합계 1,275, 평균 5.57, RMSE 7.43으로 산정되어, 2024년이 추가되었음에도 선행 연구(2016~2023년, 평균 5.52·RMSE 7.65) 대비 동등 이상의 정확도를 유지함

○ 이는 강우강도를 고려한 침수지도 적용, 내수침수 반영, 신규 세부지표 추가에도 홍수위험도 지수의 피해 설명력이 저하되지 않았음을 의미함

2 격자 단위 홍수위험도 지수의 결론

1) 침수 강도를 반영한 격자 단위 세부지표 구성

❑ 격자 단위 홍수위험도 지수는 Hazard, Exposure, Vulnerability 3개 항목, 11개 세부지표로 구성하고, 시군 내에서 균일하게 산정되는 Capacity는 제외함

○ Hazard: 침수심, 침수면적 — 선택된 빈도별 침수지도로부터 격자별로 산정

○ Exposure: 건축물수, 주민등록인구수, 공시지가, 농경지 면적, 도로 면적

○ Vulnerability: 노후건축물수, 의존인구수, 밭·시설·인삼 재배면적, 지하차도 면적

❑ 침수심·침수면적을 신규 세부지표로 반영하여, 시군 단위에서는 드러나지 않는 격자별 침수 강도를 가시적으로 표현함

2) 엔트로피 가중치 및 격자 단위 홍수위험도 지수 산정

❑ 세부지표 지수에는 엔트로피 가중치를, 항목별 지수 결합에는 유클리드 거리를 적용하여 0~√3 범위의 격자 단위 홍수위험도 지수를 산정함

○ Hazard 항목에서는 침수심(0.505)과 침수면적(0.495)에 균형 있게 가중치가 배분되었으며, 침수 깊이와 범위가 함께 위험도를 결정하도록 구성됨

❑ 엔트로피 가중치는 변동계수가 큰 세부지표일수록 가중치가 크게 배분되는 특성을 보임

3) 위험지역·피해대상의 공간 정밀 진단

❑ 격자 단위 홍수위험도 지수는 행정경계의 한계를 넘어, 시군 내에서 침수 위험 지역과 피해대상(건물·인구·농경지·도로)이 밀집한 고위험 구역을 정밀하게 식별함

❑ 피해대상이 존재하는 격자만 선별한 통계지도를 통해, 실질적으로 피해가 발생할 수 있는 지역을 우선 진단함으로써 시군 단위 지수와 상호 보완하는 체계를 형성함

○ 시군 단위 지수는 행정·예산 배분의 거시적 의사결정에, 격자 단위 지수는 현장 대응·시설 입지의 미시적 진단에 활용되어 정책 적용 층위에 따라 역할을 분담함

3 활용 방안

❑ 본 연구의 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수는 미래 침수를 예측하는 것이 아니라, 2016~2024년의 위험을 진단하여 치수사업 의사결정을 지원하는 도구이며, 진단 결과는 다음과 같이 활용됨

1) 시군 및 격자 단위 홍수위험도 평가를 고려한 치수사업 의사결정 지원

❑ 시군 단위 지수로 위험도가 높은 시군을 식별하여, 방재예산 배분과 치수사업 투자우선순위 결정의 객관적 근거로 활용

❑ 격자 단위 지수로 시군 내 침수 위험지역과 피해대상(건물·인구·농경지·도로)이 밀집한 고위험 격자를 식별하여, 치수사업 대상지 선정 및 방재시설(배수펌프장·저류지 등) 입지 검토에 활용

○ 방재예산 배분, 투자우선순위와 사업 대상지 선정, 방재시설 입지 검토 등의 의사결정이 하나의 평가체계에서 연속적으로 지원됨

2) 항목별 진단을 통한 대응수단 차별화

❑ 시군 단위는 13개 세부지표 지수가, 격자 단위는 항목별 지수(Hazard·Exposure·Vulnerability)가 함께 산정되므로, 위험의 원인에 따라 서로 다른 치수·방재 수단을 처방할 수 있음

○ Hazard가 높은 지역: 하천 정비·배수시설 확충 등 구조적 침수 저감

○ Exposure가 높은 지역: 토지이용 관리·자산 보호 및 침수 방지시설

○ Vulnerability가 높은 지역: 취약계층·노후시설·지하공간 등 대상별 안전대책 수립

○ Capacity가 낮은 지역(반전화 미적용): 방재예산·방재시설 등 대응역량 보강

- 단, 호우·태풍 피해가 잦아 방재투자가 누적된 시군은 Capacity가 높게 진단되어 후순위가 될 수 있으므로, 다른 세부지표 지수를 함께 검토하여 해석함

3) 기존 법정계획 및 방재제도와의 연계

❑ 진단 결과를 자연재해저감종합계획, 하천기본계획 수립과 재해예방사업 투자우선순위 평가의 참고자료로 연계하여 활용성을 제고

○ 행정안전부 자연재해 안전도 진단과 상호 보완적으로 활용하여 경기도 차원의 홍수위험 진단 근거를 보강

4) 시계열 진단을 통한 위험 변화 모니터링

❑ 연도별(2016~2024) 지수로 시군·지역별 홍수위험 진단 결과의 변화를 모니터링하여, 위험이 누적·심화되는 지역을 지속 관찰하는 근거로 활용

○ 단, 본 지수의 연도별 변화는 강우 규모(선택된 빈도 침수지도)와 노출·취약성 자료의 변동을 반영한 것으로, 개별 치수사업의 시행 효과가 외수·내수 침수지도에 직접 반영된 것은 아님

○ 경기기후플랫폼 탑재를 통해 의사결정자가 위험 변화와 고위험 구역을 상시 확인하도록 지원

4 정책 제언

❑ 본 연구를 통해 고도화된 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수는 경기기후플랫폼에 탑재되어 활용될 것이며, 이를 토대로 평가 결과가 경기도의 홍수 방재정책에 효과적으로 정착 및 확산되기 위한 방향을 제언함

1) 경기기후플랫폼 기반 정례 평가체계의 안정적 운영

❑ 본 연구의 외수·내수 통합 평가체계는 경기도와의 협업을 통해 경기기후플랫폼에서 연도별 갱신 및 고도화가 진행되고 있으며, 이를 안정적인 정례 평가체계로 정착시킬 것을 제언함

○ 침수지도(외수, 내수)는 기후에너지환경부에서 제작하는 외생 자료를 기반으로 하며, 갱신이 비정기적이므로, 정례 갱신은 매년 변동하는 홍수위험도 지수의

세부지표별 자료를 중심으로 하고 침수지도는 홍수위험도 지수가 갱신되는 시점에서 재확인하여 함께 반영하는 이원적 갱신 규칙을 마련할 필요가 있음

2) 치수사업 의사결정의 보조 참고자료로 활용

❑ 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수를 자연재해저감종합계획 수립 등에서 재해예방사업 투자우선순위 판단의 보조 참고자료로 활용할 것을 제언함

○ 분석을 통해 도출된 홍수위험도 평가 결과는 치수사업에 대한 의사결정 절차에서 위험 진단 결과에 대한 근거를 보태는 보완적 위치에서 활용될 수 있음

3) 위험정보 공개를 통한 주민 위험소통 강화

❑ 경기기후플랫폼을 통해 대중들에게 공개될 고도화된 시군 및 격자 단위 홍수위험도 지수는 주민들에게 홍수위험에 대한 사전 대비와 안전 인식 개선으로 연결할 것을 제언함

○ 100m×100m 격자 단위 통계지도와 연도별 강우강도에 따른 침수위험지역 정보를 주민이 이해하기 쉬운 형태로 제공하여, 거주지 위험 인지와 대피 동선 파악 등의 일상적 대비에 활용하도록 함

5 평가체계의 한계 및 향후 과제

❑ 본 연구는 강우 재현기간을 위험 지표로 삼는 강우 기반 평가로서, 배수 불량·하천 배수위 상승 등 비강우 요인에 의한 침수는 직접 반영하지 못하는 한계가 있음

❑ 빈도별 침수지도를 적용 가능한 연도에 평가가 한정되는 한계가 있음

○ 침수지도 미적용 연도에는 시군 단위 Exposure, Vulnerability 항목의 세부지표 지수가 최저값(0.1)으로 평탄화되고, 격자 단위 지수는 산정되지 않음

○ 30년 빈도보다 작은 강우에 의한 침수는 위험도 평가에 직접 반영되지 못함

○ 향후 저빈도 침수지도 확보 시 소규모 강우 사상을 홍수위험도 평가에 반영하여 평가 결과의 정밀도를 개선할 수 있음

REFERENCE

참고문헌

건설교통부(2001).『수자원장기종합계획』.

경기연구원(2025).『고정밀 공간정보 기반의 하천 홍수위험도 평가 모델 및 소하천 홍수위험 지도 제작』.

국가통계포털. “http://kosis.kr”.

국토연구원(2005).『홍수피해특성 분석 및 홍수피해지표 개발에 관한 연구』.

국토정보플랫폼. “http://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do”.

국토해양부(2011).『확률강우량도 개선 및 보완 연구』.

뉴시스(2022). “https://www.newsis.com/view/?id=NISX20220809_0001972532”.

왕원준·김동현·유영훈·이준형·김경탁·김형수(2021). “홍수위험도 평가를 활용한 인천광역시 복원탄력성 의사결정 지원”, 한국방재학회 논문집, 21(4), 197-210.

왕원준(2023). “격자 기반 홍수위험도 평가 방법론 개발 및 적용”, 박사학위논문, 인하대학교.

전북발전연구원(2010).『기후변화 대비 전라북도 홍수대책 선진화 방안』.

중앙일보(2023). “https://www.joongang.co.kr/article/25178133”.

지방재정365. “http://lofin.mois.go.kr”.

행정안전부(2022).『2022년 자연재해 안전도 진단 추진계획』.

행정안전부(2025).『2024 재해연보(자연재난)』.

홍수위험지도 정보시스템. “https://www.floodmap.go.kr/intro”.

Abstract

Climate change has increased localized and extreme rainfall, and Gyeonggi Province has suffered large-scale flood damage on a two-year cycle. However, the flood risk assessment of the existing Gyeonggi Climate Platform was limited to riverine(external) flooding and applied a single extreme-rainfall inundation map uniformly across all regions, overestimating flood risk.

This study integrated external flooding(flood risk maps) and internal flooding(urban inundation maps), and mitigated this overestimation by selectively applying frequency-based inundation maps matching the maximum rainfall scale of each standard watershed. Using an Indicator-Based Approach(IBA), flood risk indices for 2016–2024 were calculated at two scales: for the 31 cities and counties of Gyeonggi Province, and at a 100m×100m grid scale. At the city/county scale, genetic algorithm(GA) weights were applied to 13 indicators across 4 items; at the grid scale, entropy weights and Euclidean distance were applied to 11 indicators across 3 items. New indicators, including road and underpass area and inundation depth and area, were added.

Against the disaster-yearbook damage rankings, the city/county index yielded a total absolute error of 1,275, a mean of 5.57, and an RMSE of 7.43. Despite adding 2024, the mean absolute error was similar to the previous study(2016–2023) while the RMSE improved. The grid-scale index visualized inundation intensity and precisely diagnosed high-risk zones where damage targets are concentrated.

The resulting indices are uploaded to the Gyeonggi Climate Platform, updated annually, and can serve as time-series data for monitoring risk changes and as supplementary reference for prioritizing flood control investment.

Keyword Extreme Rainfall, Flood Risk Map, Urban Inundation Map, Flood Risk Index