기본과제 2025-01

세종시 홍수 취약성 평가 연구

2025

송양호 · 안용준

세종연구원

세종연구원
SEJONG RESEARCH INSTITUTE

기본연구 2025-01

세종시 홍수 취약성 평가 연구

송양호·안용준

세종연구원
SEJONG RESEARCH INSTITUTE

연구책임 송양호 | 세종연구실 책임연구위원
공동연구 안용준 | 세종연구실 책임연구위원
연구지원 이인희 | 세종연구실 전문연구원

기본연구 2025-01

세종시 홍수 취약성 평가 연구 : H-T-L 프레임워크 기반 미시적 취약성 분석

발행인 권 영 걸
발행일 2025년 11월
발행처 세종연구원
30147 세종시 한누리대로 1966 로이어즈타워 7층
전화: 044-550-3500 팩스: 044-555-3599
홈페이지 : http://www.sri.re.kr
인 쇄 ㈜경성문화사 TEL 044-868-3537 FAX 044-868-3565

이 보고서의 내용은 연구책임자의 견해로서 세종특별자치시의 정책적 입장과는 다를 수 있습니다.
출처를 밝히는 한 자유로이 인용할 수 있으나 무단 전재나 복제는 금합니다.

요약 및 정책 제언

■ 요약: 세종시 홍수 위험의 복합적 특성 및 평가 모델의 의의

□ 세종시 홍수 위험의 복합성과 연구의 당위성

❍ 본 연구는 세종특별자치시의 홍수 취약성을 단순한 기후 중심의 접근법이 아닌, 도시 개발과 행정 시스템 간의 구조적 모순에서 비롯된 복합적 재해 위험으로 진단하였음

- 세종시는 저영향 개발(LID)을 표방하며 조성되었으나, 급속한 개발 속도에 비해 도시 물순환을 관리하는 불투수 면적 관리 체계(법적·행정적)가 미비하여 취약성을 내재하게 되었음
- 이는 환경적 취약성이 자연적 원인보다 행정 및 제도적 실패와 물리적 환경의 결합으로 인해 증폭된 결과임을 명확히 시사함

❍ 세종시는 중앙 행정 기능이 집적된 국가의 핵심 지역으로서, 홍수 재해는 단순한 경제적 손실을 넘어 국가 기능 마비라는 복합적이고 중대한 위험을 초래할 수 있음

□ 읍면동 단위 미시적 분석 필요성

❍ 기존 홍수 취약성 평가는 광역적 행정구역 단위(시군구)에 집중되어, 실제 피해가 발생하는 하천변, 저지대, 반지하 밀집 지역 등 읍면동 단위의 미세한 국지적 특성을 반영하는 데 한계가 있었음

- 홍수 피해의 특성상 이러한 미세한 공간적 차이에 따라 결과가 크게 달라지므로, 본 연구는 광역 분석에서 가려지던 읍면동 단위의 취약성 차이를 규명하는 데 핵심적인 의의를 두고 있음
- 미시적 분석은 물리적 피해액은 물론, 고밀도 지역의 인명 피해 추정 및 사회경제적 취약계층에 집중되는 피해 양상을 정밀하게 파악할 수 있는 기반을 제공함

❍ 본 연구는 도농복합도시 세종시의 이질적 특성을 포괄적으로 진단하기 위해 취약성의 근원을 인적·관리(Human·Management), 유형·구조(Tangible·Structural), 입지·환경(Location·Environmental)의 세 차원으로 분할하는 H-T-L 모델을 제안하였음

- 지표의 상대적 중요도를 결정하는 가중치 산정에는 평가자의 주관적 편향을 배제하고 데이터의 변별력(정보량)에 기반한 엔트로피 가중치 기법을 적용하여 정량 분석의 객관성과 신뢰도를 확보하였음

■ 취약성의 공간적 양극화 진단: '도·농 이중구조'와 '신·구 취약성 공존'

❍ 읍면동 단위의 정밀 분석 결과, 세종시의 홍수 취약성은 특정 공간에 위험이 집중되는 '공간적 양극화' 양상을 보였으며, 이는 '도·농 간 노출 이중구조'와 '신·구 취약성 공존 상태'라는 두 가지 고유한 특성으로 요약할 수 있음

- 이러한 이질적 취약 구조는 획일적 재난관리 정책의 실효성에 한계가 있음을 시사하며, 각 지역의 특성에 부합하는 맞춤형 전략 수립이 필수적이라는 것을 가리킴

□ 도시와 농촌 간의 노출 이중구조

❍ 세종시의 홍수 위험 노출은 인구 및 자산 밀도에 따라 신도심(동)과 구도심 및 농촌(읍면) 간에 명확한 이중구조를 형성하며, 재난 시 피해 집중 유형이 구분될 것으로 판단됨

- (신도시 중심의 고밀도 노출 위험) 종촌동, 새롬동, 소담동 등 신도심은 인구 밀집도와 자산 가치가 상대적으로 높은 수준으로 이는 홍수 발생 시 인명 피해 규모와 경제적 손실 집중성이 극대화되는 도시형 고위험 지역임을 의미하며, 대규모 혼잡 발생 가능성으로 인해 재난 대응의 관리 난이도가 높게 평가됨
- (농촌 외곽 중심의 지리적 노출 위험) 전의면, 연서면, 금남면 등 외곽 지역은 인구 노출은 낮지만, 1차 산업 종사자 밀도와 하천 점유율이 높아

농경지 및 생계 기반 시설 손실에 국한된 지리적 노출 위험과 함께 1차 산업 자산 손실 및 토양 유실로 인해 장기적인 경제적 회복탄력성 저하가 우려됨

❍ 이러한 이중구조는 행정 자원의 불균형한 배분을 야기하여 취약 지역의 적응 능력을 저하시키고, 궁극적으로 안전 불평등을 심화시키는 구조적 원인으로 작용할 것으로 판단됨

□ 신·구 취약성 공존 상태

❍ 세종시 홍수 위험 민감성은 개발 시점과 유형에 따라 상이한 근본 원인을 갖는 두 가지 취약성 유형이 공존하고 있으며, 맞춤형 전략이 요구됨

- (구도심의 구조적 민감성) 조치원읍은 노후 건축물 밀도, 반지하 밀도, 재해취약인구 밀도가 가장 높은 지역으로 이는 자가 방재 능력이 미흡한 취약계층과 물리적 안정성이 낮은 시설이 중첩되어 있음
- (신도심의 환경적·설계적 민감성) 보람동, 종촌동, 어진동 등 신규 도심 지역은 불투수면적율이 높고 평균 해발고도와 경사도가 낮은 지형적 조건을 지니며, 이러한 조건의 중첩은 빗물 유출을 가속화하고 유출량 지연을 유발하여 도시 내수침수 문제에 노출되는 환경을 조성함

■ 홍수 위험을 결정하는 5대 핵심 요인 분석 및 FVI 진단

□ 홍수 취약성 지수(FVI) 결정 5대 핵심 요인

❍ 본 연구의 핵심 지표들을 상호 분석한 결과, 홍수 위험(Flood Vulnerability Index, FVI)을 결정하는 5대 요인이 도출되었으며, 이들 요인은 도시화와 제도적 대응 간의 경쟁 관계 속에서 유기적으로 연결되어 있다고 판단됨

[표-요약] 홍수 위험을 결정하는 5대 핵심 요인

요인	영향력 분석
인구밀도	• 인구 밀집은 잠재적인 인명 피해 규모를 확대하고, 재난 시 대피 활동을 복잡하게 만드는 근본적인 위험 • 신도시 '동' 지역의 높은 FVI는 이 지표의 영향력을 직접적으로 보여주고 있음
불투수면적율	• 도시화의 강도를 대변하며, 불투수 면적의 증가는 빗물의 지표면 유출량 및 속도를 급격히 증가시켜 도시 배수 체계에 과부하를 유발하고 침수 위험을 증대시킴
저지대 비율	• 지형에 따라 강우유출수는 어디로 흐르고 모이고 고일지를 결정하는 가장 기본적인 통제 변수임 • 최대 가중치는 지형적 특성이 홍수 위험의 기본값을 설정하는 지배적 요인임을 가리킴
공무원 밀도	• 두 지표 모두 높은 가중치를 부여받은 것은 지역 간 제도적·물리적 대비 태세의 편차가 커 이것이 곧 지역의 회복탄력성 격차를 결정지음을 시사함 • 도심 행정 중심지에 자원이 집중되고 농촌 지역은 심각한 결핍 상태에 있는 현실이 취약성 불균형의 주요 원인에 해당함
민방위 대피시설 밀도	

□ FVI 진단 기반의 읍면동 취약성 순위 및 특성 분석

❍ H-T-L 모델 기반으로 산출된 부문별 통합 홍수 취약성 지수(FVI)를 활용하여 세종시 23개 읍면동의 취약성 구조를 진단하였음

- 분석 결과 세종시의 재난관리 전략이 위험의 '규모'와 '심각성' 두 측면으로 이원화된 접근 전략이 필요하다고 판단됨

[표-요약] 세종시 주요 취약 지역 FVI 구성요소 분석 (H-T-L 모델 기반)

읍면동 (취약지역)	H-M FVI (인적·관리)	T-S FVI (유형·구조)	L-E FVI (입지·환경)	구조적 진단 및 정책적 시사점
종촌동	1.202	0.820	1.315	• 인구밀집과 불투수면 환경 민감성이 중첩 • 고밀도 도시 설계에 따른 사전 대응책 수립 필요
조치원읍	0.724	1.353	0.842	• 노후 건축물 및 반지하 밀도로 인한 인명피해 잠재력 • 물리적 구조 개선 및 사회적 지원 필요
보람동	0.690	0.654	1.306	• 세종시 가장 낮은 해발고도와 가장 높은 불투수면적율 중첩 • 저영향개발을 포함한 자연기반 해법 적용 필요
새롬동	0.892	0.750	1.189	• 높은 인구 및 자산 노출과 민감도 높음
농촌 외곽 지역	(낮음)	(낮음)	(낮음)	• 적응능력 공백 문제 • 연기면, 금남면 등은 공무원 밀도 및 대피시설 밀도가 낮아 재난 시 안전 공백 우려

■ 정책 제언: 맞춤형 취약성 저감 전략

❍ 분석 결과를 바탕으로, 세종시의 '도농 간 노출 이중구조' 및 '신구 취약성 공존 상태'를 해소하고 전반적인 홍수 취약성을 효과적으로 저감하기 위한 구체적이고 실행 가능한 정책 방향을 다음과 같이 제언함

□ 고밀도 도심 핵심지역 대상(인구밀도 및 불투수면적율 관리)

❍ 개발 주도형 위험을 효과적으로 완화하기 위해서는, 모든 신규 건설 및 재개발 프로젝트에 저영향개발(Low Impact Development, LID) 및 녹색기반시설(Green Infrastructure, GI) 설치를 의무화하는 조례를 신속히 시행하고 강력하게 집행할 필요가 있음

- 도시계획 및 조례 개정의 일환으로 '(가칭) 녹색 기반시설 의무화 조례'를 도입하는 것도 고려할 필요가 있으며, 해당 조례는 모든 신규 상업 및 대규모 주거 개발 사업에 투수성 포장, 옥상 녹화, 식생수로와 같은 저영향개발 기법 적용을 의무화하는 것을 담아야 함
- 나아가, 인구 및 자산 노출 위험을 사전에 통제하기 위해 과도한 밀집을 억제하는 방향으로 용적률 및 녹지 의무 비율 기준을 재검토하는 과정도 지속적으로 고려해야 함

□ 구조적으로 민감한 구도심 대상(예: 조치원읍)

❍ '기반시설 노후화 위험'을 관리·저감하기 위한 핵심 정책으로, 노후 건축물 및 반지하 주택에 침수 방지 시설(차수판, 역류 방지 밸브 등) 설치를 지원하는 맞춤형 보조금 프로그램을 마련해야 함

- 실행 방안으로는, 해당 지역의 노후화된 도시 배수관망 개선 사업을 최우선 과제로 지속 추진하는 것이 중요함
- 침수 위험 지역에 대한 대응 능력을 극대화하고자 표적화된 기반시설 성능 개선을 추진해야하며, 가장 위험도가 높은 배수분구를 선정하고 해당 지역의 노후 하수관로 및 배수 시스템을 개량하는 데 시의 자본개선예산을 집중 투입함으로써 정책의 효과를 높여야 함

□ **농촌 지역의 적응 능력 격차 해소**

❍ 재난관리 인력 및 방재 인프라 배분 공식을 재검토하여 상대적으로 취약한 농촌 '면' 지역에도 최소한의 기본 서비스가 보장되도록 해야 함

- 실행 방안으로 농촌 중심지에 공인된 민방위 대피소 기능을 겸할 수 있는 다목적 커뮤니티 센터를 건립하는 것을 제안하며, 재난 발생 시 소외 지역에 행정력을 신속히 투사하고 현장을 지휘할 수 있도록 이동식 현장 지휘차량 시스템을 도입하는 것도 고려해야 함

□ **지형적 고위험 지역 대상(저지대 관리)**

❍ 상습 침수 위험이 있는 저지대에 대해서는 재해위험구역으로 지정하고, 신규 주거시설 개발을 제한하거나 금지하는 강력한 토지이용규제를 시행해야 함

- 이러한 규제와 함께 취약한 하류 지역으로 유입되는 유출량을 근본적으로 줄이기 위해 상류 지역에 대한 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS) 투자를 확대해야 함
- 구체적으로, 기존 습지를 복원하고 홍수터를 확보하는 사업을 추진하여 유역 전체의 물 보유 능력을 증대시켜야 함

차 례

1장 서론 ····· 1

제1절 연구의 배경 및 목적 ····· 3

1. 연구의 배경 ····· 3
2. 연구 목적 ····· 5

제2절 연구방법 ····· 7

1. 연구의 범위 및 방법 ····· 7
2. 연구결과의 활용 및 기대효과 ····· 8

2장 홍수 취약성 이론적 고찰 ····· 9

제1절 이론적 배경 및 동향 분석 ····· 11

1. 개념적 정의 ····· 11
2. 국내·외 연구 동향 ····· 15

제2절 주요 평가 이론 ····· 23

1. 개념적 프레임워크 기반 평가기법 ····· 23
2. 정량적 분석 방법론 ····· 31

3장 홍수 취약성 분석 지표 선정 ····· 39

제1절 분석 지표 선정 및 가중치 부여 방안 ····· 41

1. 통합적 진단 프로세스 모델의 구조화 ····· 41
2. 엔트로피 가중치 기반 접근 ····· 54

제2절 연구 대상 지역 개요 ····· 58

1. 지역 일반 현황 ····· 58
2. 지리적 현황 ····· 70

4장 홍수 취약성 평가 결과 분석 ····· 75

제1절 읍면동 단위 홍수 취약성 지수 산정 ····· 77

1. 엔트로피 가중치 산정 결과 및 지수 산출식 정의 ····· 77
2. 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산정 ····· 86

제2절 취약 요인 진단 ····· 93

1. 노출 요인 분석 ····· 93
2. 민감도 요인 분석 ····· 95
3. 적응능력 요인 분석 ····· 97

5장 결론 ····· 99

제1절 종합 ····· 101

제2절 정책 제언 ····· 106

참고문헌 ····· 109

표 차례

[표 2-1] 주요 홍수 유형별 원인 및 특성 ····· 12
[표 2-2] 국내 홍수 취약성 연구 종합 분석 ····· 17
[표 2-3] 국외 홍수 취약성 연구 종합 분석 ····· 21
[표 2-4] SETS 프레임워크와 기존 모델과의 차별성 ····· 28
[표 2-5] 홍수 취약성 정량 평가 기법별 특성 비교 ····· 37
[표 3-1] 평가지표 범주 구성 및 기본 방향 ····· 42
[표 3-2] 인적·관리 취약성 분야 구성 지표 ····· 45
[표 3-3] 유형·구조 취약성 분야 구성 지표 ····· 48
[표 3-4] 입지·환경 취약성 분야 구성 지표 ····· 51
[표 3-5] 본 연구 평가지표의 구성 및 출처 ····· 52
[표 3-6] 홍수 취약성 세부 지표 및 측정 방향 ····· 53
[표 4-1] 인적·관리 부문 지표 정규화 결과 ····· 79
[표 4-2] 유형·구조 부문 지표 정규화 결과 ····· 80
[표 4-3] 입지·환경 부문 지표 정규화 결과 ····· 81
[표 4-4] 취약성 부문별 엔트로피 가중치 산정 결과 ····· 85
[표 4-5] 인적·관리 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과 ····· 87
[표 4-6] 유형·구조 부문 통합 홍수취약성 지수(FVI) 산출 결과 ····· 88
[표 4-7] 입지·환경 부문 통합 홍수취약성 지수(FVI) 산출 결과 ····· 89
[표 5-1] 홍수 위험을 결정하는 5대 핵심 요인 ····· 104
[표 5-2] 주요 취약 지역 FVI 구성요소 분석(H-T-L 모델 기반) ····· 105

그림 차례

[그림 1-1] 연구배경 및 필요성 ····· 6
[그림 2-1] IPCC AR5 취약성 개념 및 평가 프레임워크 ····· 24
[그림 2-2] PSR indicator framework ····· 25
[그림 2-3] DPSIR 프레임워크 ····· 26
[그림 2-4] DPSIR 프레임워크 ····· 28
[그림 2-5] 기후변화 시나리오와 공간정보 기반 홍 취약성 평가 예 ····· 30
[그림 2-6] AHP의 일반적인 적용 과정 ····· 32
[그림 2-7] 엔트로피의 가중치 산정 과정 ····· 33
[그림 2-8] 엔트로피의 가중치 산정 과정 ····· 34
[그림 3-1] 읍면동별 인구수 현황 ····· 58
[그림 3-2] 읍면동별 인구밀도 현황 ····· 59
[그림 3-3] 읍면동별 1인 가구 수 현황 ····· 60
[그림 3-4] 읍면동별 재해 취약 인구수 현황 ····· 61
[그림 3-5] 읍면동별 기초생활수급자 수 현황 ····· 62
[그림 3-6] 읍면동별 1차 산업 종사자 수 현황 ····· 63
[그림 3-7] 읍면동별 평균공시지가 현황 ····· 64
[그림 3-8] 읍면동별 민방위 대피시설 수 현황 ····· 65
[그림 3-9] 읍면동별 공무원수 현황 ····· 66
[그림 3-10] 읍면동별 건축물 수 현황 ····· 67
[그림 3-11] 읍면동별 반지하 주택 수 현황 ····· 68
[그림 3-12] 읍면동별 노후건축물 현황 ····· 69
[그림 3-13] 읍면동별 평균해발고도 현황 ····· 70
[그림 3-14] 읍면동별 평균 경사도 현황 ····· 71
[그림 3-15] 읍면동별 평지 면적 현황 ····· 71
[그림 3-16] 읍면동별 하천점유율 현황 ····· 72
[그림 3-17] 읍면동별 불투수면적율 현황 ····· 73
[그림 4-1] 인적·관리 부문 지표 정규화 결과 ····· 82

[그림 4-2] 유형·구조 부문 지표 정규화 결과 ····· 83
[그림 4-3] 입지·환경 부문 지표 정규화 결과 ····· 84
[그림 4-4] 인적·관리 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과 ····· 90
[그림 4-5] 유형·구조 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과 ····· 91
[그림 4-6] 입지·환경 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과 ····· 92

서론

1장

제1절 | 연구의 배경 및 목적
제2절 | 연구방법

SEJONG RESEARCH INSTITUTE

1장 | 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

□ **복합적 재해 위험 요인 내재**

❍ 세종특별자치시(이하 “세종시”)는 친환경 도시 및 저영향 개발(LID)을 표방하며 조성되었음에도 불구하고, 신속한 도시 개발 과정에서 환경 관리 체계가 그 속도를 따라가지 못하는 상황에 놓여져 있음

- 도시 물순환 체계의 건전성을 좌우하는 불투수 면적 관리에 대한 법적 및 행정적 체계가 미비하다는 사실은 세종시의 환경적 취약성이 단순히 자연 현상에 기인하는 것이 아니라, 관리 부실로 인해 내재화되고 있다는 것을 인식할 필요가 있음
- 세종시의 홍수 취약성 평가는 단순한 재해 노출 정도를 파악하는 것이 아닌, 행정 및 제도적인 미흡한 부분이 물리적 환경과 결합하여 그 위험을 어떻게 증폭시키는지를 진단해야 할 필요가 있음

❍ 세종시는 중앙 행정 기능이 집적된 도시 특성으로 인해 홍수 재해가 발생할 경우, 단순한 경제적 손실을 넘어 국가 기능 마비라는 복합적이고 중대한 위험을 초래할 수 있음

- 행정의 연속성 확보, 고밀도 건축물의 안정성, 그리고 신도시 개발 과정에서 발생할 수 있는 환경 관리 미비라는 세 가지 고유 특성을 중심으로 통합적이고 심층적인 분석을 수행할 필요가 있음

□ 읍면동 단위(미시적) 분석의 필요성

❍ 기존 홍수 취약성 평가 연구는 주로 시군구와 같은 광역적 행정구역 단위를 중심으로 수행되어 왔음

- 광역적 분석은 거시적인 정책 방향 설정에는 유용하나, 실제 홍수 피해가 발생하는 하천변, 저지대, 반지하 가구 밀집 지역과 같은 읍면동 단위의 국지적 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계점을 지님
- 홍수 피해는 이러한 미세한 공간적 특성에 따라 크게 달라지는 특징을 지님
- 광역적 분석에서 평준화되어 드러나지 않던 읍면동 단위의 미세한 취약성 차이를 규명하는 것이 본 연구에서 살펴보아야 할 내용임

❍ 서울시의 사례에서도 지수 산정 방식에 따라 특정 구의 홍수 취약성 순위가 최대 81등급까지 변동한다는 연구 결과는 미시적 접근이 얼마나 중요한 통찰을 제공할 수 있는지를 명확히 보여주고 있음(이종석과 최현일, 2018)

- 미시적인 세밀한 분석을 통해 물리적인 피해액뿐만 아니라 인구밀도가 높은 지역의 인명 피해 추정, 나아가 특정 사회경제적 취약계층(노인, 장애인, 저소득층)에 집중되는 피해의 양상을 보다 정확하게 파악이 가능하다는 장점을 지님(김강민 등, 2024)

❍ 결론적으로, 읍면동 단위의 정밀한 분석 연구는 재해위험도가 높은 특정 지역에 대한 토지이용 제한, 방재시설 확충의 우선순위 결정, 재해취약계층을 위한 맞춤형 지원 정책 수립 등 실질적이고 구체적인 재해예방형 도시계획 수립의 기초자료로 활용될 수 있음

2. 연구 목적

❍ 본 연구는 세종시의 홍수 취약성에 대한 구조적 진단과 과학적 근거에 기반한 정책 제언을 도출하는 것을 핵심 목적으로 함

- 기존 홍수 취약성 평가 방법론의 장단점을 진단하고 이를 바탕으로세종시 고유의 도시 특성을 반영하는 다차원적인 분석 체계를 구축하여 실효성 있는 방재 전략을 마련하는 데 주안점을 두고 있음
- 구체적인 연구 목적은 다음과 같음

❍ 첫째, 세종시 홍수 취약성의 종합적 진단 및 모델 구축

- 광역적 평가에서 간과되기 쉬운 세종시의 복합적 특성, 즉 도농복합도시의 이질성 및 행정도시로서의 고위험 특성을 반영하고자 함
- 취약성의 근원을 인적·관리(Human·Management), 유형·구조(Tangible·Structural), 입지·환경(Location·Environmental)의 세 차원으로 분할하여 진단하는 H-T-L 모델을 구축하고 적용하였음

❍ 둘째, 읍면동 단위 미시적 분석의 과학적 기반 확보

- 홍수 피해의 국지적 특성을 반영하고자 읍면동 단위의 미세한 취약성 차이를 정량적으로 분석하고, 객관성과 신뢰도 확보를 위해 데이터 자체의 변별력을 기반으로 가중치를 산정하는 엔트로피 가중치 기법을 적용하여 분석의 객관성을 높이고자 하였음

❍ 셋째, 과학적 근거에 기반한 정책 제언

- 도출된 정량적 취약성 진단 결과를 바탕으로 세종시의 '도농 간 노출 이중구조'와 '신구 취약성 공존 상태'를 해소하고, 고밀도 도심 지역, 구조적으로 취약한 구도심, 그리고 행정 인프라가 부족한 농촌 지역 등 지역 특성별 맞춤형 방재 및 도시 회복탄력성 확보 전략을 수립하기 위한 정책적 기초자료를 제공하고자 하였음



[그림 1-1] 연구배경 및 필요성

제2절 연구방법

1. 연구의 범위 및 방법

□ 연구의 범위

❍ 본 연구는 세종시의 홍수 취약성 평가를 위한 공간적·시간적·내용적 범위를 아래와 같이 설정하였음

- (공간적 범위) 세종시 전체(읍면동 단위)를 대상으로 하여, 기존 광역 분석에서 파악하기 어려웠던 미세한 국지적 취약성 차이를 규명하는 데 중점을 둠
- (시간적 범위) 최근 5년(2020~2024)간의 행정 및 통계 데이터를 기반으로 분석을 수행, 장기적인 정책 전략을 제안
- (내용적 범위) 홍수 취약성 지표 선정, 세종시 평가 모델 구축, 취약 지역에 대한 정량적 분석 및 정책 제언

□ 연구의 방법

❍ 본 연구는 홍수 취약성의 다차원적 특성을 객관적이고 과학적으로 진단하기 위해 문헌 연구와 정량적 분석 기법을 병행하였음

- (주요 연구 방법론) 문헌 연구, 통계 및 GIS 데이터 분석, 전문가 자문, 모델링 및 시뮬레이션 등의 방법론 활용
- (세종시 평가 모델 제안) 도농복합도시 세종시의 이질적인 특성을 포괄적으로 반영하기 위해 취약성의 근원을 인적·관리, 유형·구조, 입지·환경의 세 차원으로 분할하여 진단하는 H-T-L 모델 제안
- (객관적 가중치 산정 기법 적용) 평가지표의 상대적 중요도를 결정하는 과정에서는 평가자의 주관적 편향을 배제하고 데이터 자체의 변별력(정보량)을 기반으로 객관적 가중치를 산정하는 엔트로피 기법을 적용함으로써 정량 분석의 객관성과 신뢰도를 확보

2. 연구결과의 활용 및 기대효과

□ 세종시 도시 방재 정책 수립의 기초 자료 제공

❍ 본 연구는 읍면동 단위의 미시적 분석을 통해 광역적 평가에서 간과되었던 지역별 미세한 취약성 차이를 검토하고자 하였음

- 이는 세종시의 고유한 '도농 간 이중구조' 및 '신구 취약성 공존 상태' 등 이질적인 위험 특성에 기반한 토지이용 제한, 방재 시설물 확충 우선순위 결정, 그리고 재해취약계층을 위한 맞춤형 지원 정책 수립 등 실질적인 재해예방형 도시계획 수립을 위한 핵심 기초 자료로 활용될 수 있음

□ 유사한 신규 도시에 대한 적용 가능성 제시

❍ 세종시와 같이 급속한 개발을 겪었거나 도농복합적 특성을 지니는 유사한 신규 도시에 대한 홍수 취약성 평가 모델을 구축하고 분석하는 데 있어 참고할만한 방법론을 제안하고자 하였음

- 본 연구에서 제안한 H-T-L(인적·관리, 유형·구조, 입지·환경) 모델은 도시화와 행정 시스템의 복합적인 상호작용으로 인해 위험이 내재화되는 신도시의 구조적 취약점을 진단하는 데 효과적으로 적용될 수 있음

□ 취약성 평가 모델 개발에 대한 학술적 기여

❍ 취약성 평가 모델의 객관성 및 신뢰도 확보에 학술적으로 기여하고자 하였음

- 평가자의 주관적 판단을 배제하고 데이터 자체의 변별력(정보량)을 기반으로 객관적 가중치를 산정하는 엔트로피 가중치 기법을 적용함으로써, 정량 분석의 과학적 기반을 강화하고 향후 취약성 평가 모델 개발 연구의 방법론적 신뢰도 제고 과정에 활용될 것으로 기대됨

홍수 취약성 이론적 고찰

2장

제1절 | 이론적 배경 및 동향 분석
제2절 | 주요 평가 이론

SEJONG RESEARCH INSTITUTE

2장 | 홍수 취약성 이론적 고찰

제1절 이론적 배경 및 동향 분석

1. 개념적 정의

□ **홍수 취약성의 개념적 정의 및 원인**

❍ 홍수(Flood)는 사전적으로 큰 물 또는 하천의 물이 넘쳐흐르는 자연현상으로 보다 넓은 의미에서 모든 종류의 수해(水害)를 포괄하는 개념으로 사용되며[1], 발생 원인은 크게 자연적 원인과 사회구조적 원인으로 구분함

- 자연적 원인으로는 집중호우와 같은 과도한 강수량, 태풍 및 지진에 의한 해일 등이 대표적이며, 이 중 우리나라의 홍수는 주로 여름철 장마 기간의 집중호우와 태풍으로 인한 국지성호우 그리고 선상강수대의 영향에 의해 주로 발생함
- 과거에는 설계빈도를 초과하는 집중호우가 홍수 발생의 주요 원인으로 인식되었다며, 최근에는 도시화와 같은 사회구조적 원인이 홍수 피해를 가중시키는 주요 요인으로 포함됨
- 대표적으로 도시화에 따른 불투수 지역의 증가는 빗물의 자연스러운 배수를 방해하고, 이는 곧 첨두 홍수량의 증가와 홍수 도달 시간의 단축으로 이어져 도시 내수 침수 피해를 유발하고 있음
- 홍수라는 현상은 단순한 자연적 재난이 아니라, 인간의 사회경제적 활동과 복합적으로 얽혀 나타나는 결과로 이해해야 함

1) K-water 물정보포털(https://www.water.or.kr/)

□ 홍수 유형별 분류 및 특성

❍ 홍수는 호우의 강도(Intensity), 지속시간(Duration), 그리고 지역적 특성에 따라 다양한 유형으로 구분됨

- 본 연구에서 수행하고자 하는 읍면동 단위 분석에서는 단일 홍수 유형에 국한되지 않는 복합유형이라 할 수 있음
- 예를 들어, 하천변에 위치하고 동시에 도시화가 진행된 읍(邑) 지역의 경우 하천 범람으로 인한 피해와 도시 내수침수 피해를 모두 겪을 수 있음
- 반면, 경사가 급한 산악 지형이 많은 면(面) 지역은 집중호우 발생 시 산지 돌발홍수에 특히 취약할 수 있음
- 이처럼 해당 지역의 도시적·지형적 특성을 심층적으로 분석하는 것이 읍면동 단위 홍수 취약성 평가이며, 다양한 지표를 선정하고 반영하여 분석하는 것이 매우 중요하다고 판단됨

[표 2-1] 주요 홍수 유형별 원인 및 특성

유형	원인	특성
하천홍수 (River Flood)	태풍 또는 집중호우에 의한 하천의 범람	공간적으로 넓은 지역에 장기간 발생하며, 제방의 월류 및 붕괴에 의한 피해가 지배적
도시홍수 (Urban Flood)	도시의 불투수 지역 증가, 내수 배제 불량	첨두 홍수량 증가 및 도달 시간 단축으로 주택지·상가·공장 등의 침수 피해가 지배적
돌발홍수 (Flash Flood)	급경사 소유역(산악지역)에의 단시간 집중호우	공간적으로 좁은 지역에 짧은 기간(분 단위) 동안 발생하며, 산사태 및 상류 소형 댐 붕괴와 결부될 수 있음
해안홍수 (Coastal Flood)	태풍 및 호우 시 저기압에 의한 해수면 상승 및 높은 파랑	해안가 저지대에서 바닷물에 의한 침수 피해가 지배적이며, 하천 하류 지역의 역류 피해를 유발할 수 있음

출처: K-water 물정보포털(https://www.water.or.kr/)의 내용을 바탕으로 작성

❍ 취약성(Vulnerability)은 다양한 영역에서 조금씩 다른 의미로 사용되고 있으며, 자연재해 연구 분야에서 정의하는 취약성은 '잠재 피해 현상으로부터 생긴 손실의 정도'에 해당함

- 외부에서 가해지는 위해 요소와 이에 따른 부정적인 영향 측면에서 취약성을 보는 것으로, 피해를 일으키는 외부 자극에 대해 시스템이 얼마나 영향을 받는지와 외부 자극에 대해 시스템이 얼마나 민감하게 반응하는지에 주안점을 둠(정윤환 등, 2025)
- 반면, 사회학적 측면에서 보는 취약성의 개념은 주로 '사회적 취약성'으로 동일한 외부 스트레스가 온다고 하여도 이에 대처하는 능력이 각 가계나 커뮤니티에 따라 상이하다는 것임
- UN 등 국제기구에서는 위의 두 가지 관점을 종합하여 기후변화 취약성의 개념을 외부 스트레스에 대한 결과물로서의 취약성과 사회시스템의 내적 상태로서의 취약성으로 보고 있음(유가영과 김인애, 2008)

❍ 취약성은 단순히 물리적 위험에 국한된 것이 아니라, 피해에 대한 민감성이나 대응 및 적응 역량의 부족 등 다양한 개념과 요소를 아우르는 다차원적 개념에 해당함

- 취약성 관련 연구들의 경우 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 보고서(AR5, AR6)에서 제시하는 위험(Risk) 프레임워크를 이론적 기반으로 삼고 있음
- 해당 프레임워크는 재해 위험을 위해(Hazard), 노출(Exposure), 취약성(Vulnerability)의 세 가지 핵심 구성요소 간의 상호작용으로 설명하며 아래 관계식과 같은 개념적 관계로 구성됨

· 위험(Risk)=위해(Hazard)×노출(Exposure)×취약성(Vulnerability)

❍ 홍수 취약성(Flood Vulnerability)은 기후변화로 인해 증가하는 극한의 기상 현상 아래 도시 인구가 홍수에 노출될 때 발생 가능한 잠재적인 피해를 포괄적으로 평가하는 개념이라 할 수 있음

- 단순히 물리적인 위험을 넘어, 재해가 발생함으로 인해 부정적인 영향을

받는 사회·경제적인 여파와 같은 다양한 요소들의 복합적인 상호작용을 포함한다고 볼 수 있음

❍ IPCC 프레임워크에 따라 홍수 취약성은 크게 세 가지 차원으로 구성되며, 각기 독립적이지만 상호 연관된 구성함수로 정의됨

❍ 노출(Exposure)은 '홍수 발생'이라는 위해(Hazard) 요인에 직접적으로 노출된 상태 또는 대상을 가리킴(이종석과 최현일, 2018)

- 홍수가 발생했을 때 잠재적으로 피해를 입을 수 있는 사람, 재산, 사회 기반 시설 또는 경제적·사회적·문화적 자산 등을 포괄함
- 주로 기후변화로 인한 물리적 변수(기온, 강수량 등)와 연관됨

❍ 민감도(Sensitivity)는 홍수에 노출되었을 때 '피해를 입을 가능성'을 높이는 지역의 내재적 특성을 가리킴

- 민감도는 물리적 특성(불투수면적, 노후 시설 비율)뿐만 아니라 사회적 특성(취약계층 인구, 소득 수준)까지 포함함
- 예를 들어, 불투수면적 비율이 높은 지역이나 재해취약계층이 밀집된 지역은 동일 체적의 강수량이 발생하더라도 피해발생의 규모가 크게 달라질 수 있음

❍ 적응능력(Adaptive Capacity)은 홍수발생에 따른 피해를 줄이고, 복구하는데 기여하는 잠재력으로 지역 사회의 역량 등을 포함함

- 이는 시스템의 회복력(Resilience)을 측정하는 척도라 볼 수 있으며, 물리적 방재시설(빗물펌프장), 재정적 능력(재정자립도), 제도적 지원(재해예방계획, 풍수해보험) 등 다양한 요소로 구성됨(장경은 등, 2023)
- 통상 적응능력이 높을수록 홍수에 대한 취약성은 낮아지는 반비례 관계의 상관성을 지님

2. 국내·외 연구 동향

□ 국내 홍수 취약성 평가 연구 동향

❍ 2010년도부터 수행된 관련 연구들을 살펴보면 자연·지형적 내지 물리적 인프라를 고려하는 연구에서 사회적·경제적·환경적 요인을 모두 고려하는 다차원적인 취약성 평가 연구로 전개되었음

❍ 취약성 평가에 반영된 지표을 살펴보면 강수량, 유출량, 불투수면적, 경사, 하천정비율, 댐 등의 홍수 유발 인자를 위주로 고려했던 연구에서 다차원적인 연구로 전개되면서 재해취약계층, 저소득층, 반지하 가구 등 특정 주거 형태 또는 도시 기능 유지 관련 지표들로 확장됨

- 최근에는 상세 공간단위에 대한 취약성을 평가하기 위한 연구를 위해 인구밀도, 자산 밀집도, 재정자립도, 공무원 수, 교육 수준과 같은 사회·경제적 지표와 불투수면적률, 지하 공간, 반지하 주택 비율, 노후 건축물 수 등 도시 특성을 대변하는 지표들이 고려되고 있음
- 이외에도 저류 시설 개수나 체적, 빗물펌프장, 녹지 및 보호 지역, 대피시설 수, 행정안전부 지역안전지수 등 방재역량과 관련된 지표를 적응능력 지표로 반영하고 있음

❍ 평가 방법의 경우 지표들을 단순하게 산술평균 하거나 특정 지표에 가중치를 부여하여 통합된 지수를 산정하는 연구들이 주를 이루었음

- 다만 이러한 산정 과정의 경우 지표들을 통합하는 과정에서 수학적 근거가 부족하여 취약성 평가의 객관성이 부족하다는 의견이 제기된 바 있음(강정은와 이명진, 2012)
- 이러한 문제에 대해 최근 평가 방법론의 고도화 연구들이 제안되었으며, 퍼지(Fuzzy) 모형을 통한 지표 통합의 수학적 근거 개선, 다변량 통계 분석을 통한 취약성 유형 분류, 델파이(Delphi)·계층 분석(Analytic Hierarchy Process, AHP)과 같이 주관성의 한계점을 보완하기 위한 엔트로피(Entropy) 방법 등을 통해 분석 과정의 신뢰도를 높이기 위한 연구들이 제안되었음

❍ 분석 대상 및 범위를 살펴보면 대부분의 연구가 유역 단위나 광역자치단체(시·도)와 같이 거시적인 공간을 기준으로 하여 지역간 비교에 중점을 두고 연구를 수행하였음

- 최근에 연구들은 분석 단위를 상세화하여 특정 취약성이 나타나는 배경을 해석하기 위한 연구들이 제안되었음
- 기초자치단체(시·군·구)나 서울시 내지 한강 권역과 같은 고밀도 도시지역에 대한 접근과 같이 세밀한 공간 단위에서 취약성을 평가하려는 경향이 나타났음

❍ 살펴본 결과 지표의 구성을 다양하게 반영하기 위한 노력에도 불구하고 드러난 한계점은 자료의 가용성 문제 그리고 평가를 위한 가중치 선정과정의 신뢰도 문제를 꼽을 수 있음

- 사회·경제적 지표를 확장하는 추세임에도 불구하고 지역 간 내지 광역·기초 지자체 간의 통계자료의 편차가 크다는 점임
- 홍수 취약성에 적용하고자 하는 지표들의 경우 대부분 행정구역 단위이며, 유역과 같은 자연적 경계에 맞춘 분석이 어렵다는 점 역시 한계점으로 꼽을 수 있음
- 음정인과 김형규(2024)의 연구에서도 재정자립도, 복구비, 펌프장 용량 등 적응 역량 관련 지표는 행정동과 같은 세밀한 단위에서 구득하기 어려워 취약성을 구성하는 프레임 간의 균형 잡힌 평가가 제한될 수 있음을 주장하였음
- 자료의 편차 문제와 모호한 가중치 산정 및 반영은 결국 결과 해석에 차이가 발생할 수 있으며, 취약성과 위험도를 과소 추정할 우려가 있어 지속적인 보완이 필요하다고 판단됨

❍ 아래 표는 본 연구에서 살펴본 국내 홍수 취약성 평가와 관련된 연구들의 지표, 특징을 정리하였음

[표 2-2] 국내 홍수 취약성 연구 종합 분석

선행 연구	연구 대상	평가 방법론	적용 지표	특징
손민우 등 (2011)	북한강 유역 (중권역)	DPSIR, SDSM, HSPF	• 추진력: 인구증가율, 불투수면적 • 압력: 인구밀도, 자산가치 • 상태: 일최대강우량, 유출량 • 영향: 연평균 홍수피해액 • 반응: 제방안정도, 펌프장, 공무원수	• 미래 기후변화 시나리오 반영, 수문학적 모델링 결합, 인과관계 기반 지표 구성
강정은·이명진 (2012)	서울시 (자치구)	퍼지모형, GIS 기법	• 노출: 일 최대 강수량, 일강수량 80㎜ 이상인 날 수 • 민감도: 경사, 지질, 고도, 하천거리, 불투수면적 • 적응능력: 유수지, 자연녹지, 공원녹지	• 기존 평가기법을 퍼지모형으로 개선하여 방법론적 엄밀성 강화, 실제 침수 자료로 모델 검증
이규민 등 (2016)	서울 도림천 유역 (행정동)	델파이, 엔트로피 결합 가중치, TOPSIS	• 도시 구조물(지하 공간), 토지이용, 거주자(취약계층, 연령, 장애), 취약점(도로, 지하 구조물), 대응 역량(구조 인력)	• 인명 및 도시기능 관리에 중점, 주관적·객관적 가중치 결합, 지역별 내재된 취약 요인 사전 인식 가능
이병재 등 (2018)	전국 232개 지자체	기후노출 및 도시민감도 지표 분석	• 기후노출: 일강우량 80mm 이상인 날 수 • 도시민감도: 하천길이, 평균고도 이하 면적, 불투수면적, 65세 이상 노인 및 5세 이하 아동수, 단독·반지하주택비율등	• 2012년과 2017년 동일 기준 분석으로 취약성 변화 추이 모니터링 가능 • 기후노출과 도시민감도를 분리하여 요인별 취약성 분석
이종석·최현일 (2018)	전국 231개 시군구	평가지표를 종합한 지수 산정 및 비교	• 노출성(EI): 일 최대강우량, 강우강도, 80㎜ 이상 강우일수 • 민감도(SI):유역경사, 인구밀도, 도시화율 • 응능력(AI): 인구당 공무원 수, 배수펌프장 능력, 하천개수율	• IPCC의 두 가지 취약성 평가 체계(EI+SI+AI, PI+ AI)에 따른 결과 비교 및 영향 분석, 홍수저감계획 수립의 기초 정보 제공

선행 연구	연구 대상	평가 방법론	적용 지표	특징
주홍준 등 (2018)	한강 유역 일부 (표준유역)	홍수피해잠재능, 홍수위험도 지표 산정, AHP 및 엔트로피 가중치 적용 비교	• PFD: 인구밀도, 자산, 도시화율, 사회기반시설, 홍수피해액, 확률강우, 하천 개수율, 댐·저수지, 펌프장 • 홍수위험도: 과거피해, 기상학적 취약성, 수문지형학적 취약성, 사회경제적 취약성, 홍수방어 취약성	• PFD, 홍수위험도 지표를 통해 홍수 취약성 평가, AHP와 엔트로피를 활용한 객관적 가중치 산정 • 치수사업 시나리오 적용으로 사업의 기대 효과 분석
신희재 등 (2019)	한강권역 도시 (지자체)	주성분분석, K-평균 군집분석	• 기후노출: 일 최대강수량, 3시간 최대강수량 • 민감도: 불투수율,평균경사,인구밀도 • 적응도: 재정자립도,우수관거비율,저류조용량	• 홍수 취약성에 따른 도시 유형화, 지역별 맞춤형 대책 제시, 정책적 활용성 높음
황난희 등 (2019)	서울시 (자치구)	Fuzzy AHP 결합 가중치, PSR 구조	• 압력(PI): 인구밀도, 차량 수, 일 최대강수량, 80mm 이상 강수일수, 고령화 인구 비율 등 • 상태(SI): 인명피해자 수, 연홍수피해액, 홍수피해횟수, 공공시설 피해액 • 대책(RI): 공무원수, 재정자립도, 대피시설수, 빗물펌프장 수, 제방길이 등	• AHP와 Fuzzy AHP 방법을 결합하여 의사결정의 불확실성 반영, PSR 구조로 인과관계에 따른 평가 지표 구성 • 강남 지역의 취약성 감소를 정량적으로 분석
이선미 등 (2020)	서울시 (자치구)	엔트로피 가중치, 유클리드 거리 산정	• 기후노출: 강우 강도, 3시간 최대 강우량, 강우 발생일수 • 민감도: 불투수면적, 평균경사, 인구밀도, 노후주택, 지하층가옥 비율, 공시지가 • 적응도: 재정자립도, 우수관거, 맨홀비율, 예방대책 지수	• 엔트로피 가중치로 지표별 가중치 객관화, 유클리드 거리로 홍수취약도 산정하여 객관성 증대
김혜령·김윤정 (2021)	서울시 (행정동)	주성분분석, K-평균 군집분석	• 취약계층: 노인, 영유아, 장애인, 기초생활수급자 • 도시환경: 불투수면적,노후건축물 • 적응자원: 공무원수,병원,녹지,피난처	• 사회적 취약성 개념 심층 반영, 노인·저소득 노인의 민감성 규명, 정책 우선순위 제시

선행 연구	연구 대상	평가 방법론	적용 지표	특징
박성재 등 (2024)	농촌지역 (저수지 유역)	상관분석, 침수분석	• 기후노출: 확률강우량, 일 최대 강우량 • 민감도: 인구, 건축면적, 농경지면적 • 적응능력: 수리시설물(설계홍수량, 배수용량)	• 농촌 지역에 특화된 지표 적용, 홍수 피해 규모 예측에 초점, 도시 지역과 차별화
박해경·서승범 (2024)	전국 기초지자체	로지스틱 성장함수, 비선형 회귀	• 독립변수: 일 최대 강우량 • 종속변수: 홍수피해금액 • 파라미터: a(민감도), b(홍수임계치), c(최대피해액)	• 홍수 피해와 강우량 간 비선형 관계 모델링, 저감 정책 효과를 정량적 지표로 입증
음정인·김형규 (2024)	서울시 (행정동)	다차원 지수 평가, 스케일 재조정	• 사회: 반지하 가구, 노인 인구, 1인 가구, 공무원 수 • 경제: 저소득층, 교육수준, 공시지가 • 환경: 불투수면적, 공원녹지, 강수량	• 반지하 가구 지표 포함, 행정동 단위의 초미시적 분석, 다차원적 취약성 평가

□ **국외 홍수 및 기후변화 취약성 평가 사례**

❍ 국외 연구 역시 국내 연구들과 유사하게 IPCC의 취약성 개념 프레임워크(노출, 민감도, 적응 능력)를 기반으로 수행한 연구들이 주를 이루었으며, 국가적인 규모에서 지역적인 규모에서 평가가 이루어졌음

- 기후변화와 도시화에 따른 위험 증가에 대응하여 공간적 형평성을 정교하게 반영하고 이를 토대로 상세한 평가·고찰하는 방향으로 발전하고 있음(Islam and Meng., 2024)
- 아울러 인프라·인구·자산이 집중되어 있는 도심지 특성상 홍수가 발생할 경우 재난 규모가 증폭되는 것을 고려하여 지속가능성 및 회복력 강화를 목표로 하는 연구들이 제안되었음

❍ 도시의 복잡성을 단순히 다수의 지표로 대변할 수 없는 상황을 개선하고자 사회(Social)-생태(Ecology)-기술(Technology) 영역을 통합하는 SETS 시스템 프레임워크를 사용하여 홍수 취약성을 평가하는 접근 방식이 주목받고 있음(Chang et al., 2021)

- 유사 연구사례로는 사회(Social)-경제(Economic)-구조(Structural)-환경(Environmental) 영역을 다룬 SESE 시스템 프레임워크에 대한 연구가 있으며, 이들 연구의 경우 토지 이용 규제를 통한 홍수 위험 관리의 우선순위를 정하는 데 활용된 바 있음(Park and Choi, 2025)

❍ 국외 연구 역시 도시 내 수준(intra-city level)의 취약성 연구 사례가 증가하고 있는데, 도시 전체를 하나의 덩어리로 보는 것이 아닌 행정동, 구(區) 또는 더 작은 격자 단위와 같이 도시 내부의 구역별로 홍수 취약성을 평가해야 함을 강조하고 있음

- 다만 도시 내 수준(scale)을 좁게 해석하기 위해 접근하는 과정에서 발생하는 지표의 이질적인 문제들에 대해 살펴보는 과정, 그리고 취약계층과 관련된 지표를 반영하는 노력이 강조되고 있음
- 사회적 취약성 요인을 세밀하게 고려하여 홍수가 발생할 경우 피해를 가장 크게 입을 가능성이 높은 지역을 식별하고 맞춤형 방재 대책을 수립하기 위한 연구들이 제안되고 있음(Pakati et al., 2025)

[표 2-3] 국외 홍수 취약성 연구 종합 분석

선행 연구	연구 대상	평가 방법론	적용 지표	특징
Chang et al. (2021)	미국 6개 도시 (Atlanta, NYC, Phoenix 등)	SETS 프레임워크 (Social-Ecological-Technological Systems)	• 사회적(S): 인구(총수), 인구 밀도, 영어 숙련도, 65세 이상 비율, 중간 소득, 세입자 비율 • 생태적(E): 경사 표준 편차, TRI/Superfund 근접성, 형태 지수/패치 크기, 나지 비율, 습지 비율, 생산성 • 기술적(T): 건물 면적 비율, 핵심 인프라 수, 도로 밀도, 불투수성 표면 비율, 녹색 인프라 밀도, 비상 센터와의 거리	• 복잡계 도시 취약성에 대한 통합적 접근 • S-E-T 프레임워크 내 공간적 교차 분석 기반의 연구 수행 및 정책 제언
Duan et al. (2022)	전 지구 (Global), 2005~2020년	삼각 퍼지수 (Triangular Fuzzy Number) 기반 계층분석(AHP)	• 위해 (Hazard) (7종): 최대 5일 강수량, 토지 이용, 식생 지수, 하천 밀도, 토양 조직, 경사, 고도 • 취약성 (Vulnerability) (12종): 인구 밀도, 경제 밀도, 건물 밀도, 농지 밀도, 여성 인구 밀도, 아동 인구 밀도, 노인 인구 밀도, 불투수성 표면, 도로 밀도, 쉼터 밀도, 병원 밀도, 1인당 GDP	• 전 지구적 위험 증가 추세 파악을 위한 연구 수행 • 다중 규모 분석(Grid, Hotspot, National)의 중요성 강조(주관적/객관적 가중치 반영)
Rentschler et al. (2022)	전 지구 (Global), 188개국	고해상도 인구/홍수 데이터 중첩분석	• 홍수 노출: 100년 재현 기간 홍수 노출(침수심 0.15m 초과를 기준으로 함) • 빈곤 수준: 일 소비 $1.90 미만(극빈), 일 소비 $3.20 미만, 일 소비 $5.50 미만	• 홍수 노출과 빈곤의 직접적인 교차점 분석 • 정책 우선순위 설정을 위한 사회정의 지향적 데이터 수집 및 반영

선행 연구	연구 대상	평가 방법론	적용 지표	특징
Kaur et al. (2024)	캐나다 켈로나시 (Neighborhood Scale)	Fuzzy AHP + OWA(Ordered Weighted Average)	• 물리적: 범람원 지도, 해안가 커뮤니티, 비상조정 기구, 지난 10년간 홍수 경험 횟수, 쉼터 단위 수, 도로망, 병원/진료소 수, 도시 산림 피복 면적, 홍수 지역 근접성, 홍수 통제 인프라 가용성 • 사회적: 홍수 인식/교육 지식, 인구 밀도, 범람원 거주 인구. 경제적: 평균 가구 소득, 홍수 보험, 고용률. 환경적: 연간 강수량, 눈, 온도, 환경 보호 구역, 집중호우/적설 녹는 달 수, 홍수 시즌 수위, 지하수 수위, 지형	• 국지적 취약성 지수개발 • 다기준 의사결정 과정의 종합지표 작성을 통한 집계 과정의 유연성 확보
Ali et al. (2024)	파키스탄 페샤와르 (Urban Area)	Modified Fisher's Ideal Quantity Index, Patnaik+ Narayan Index	• 다중 구성 요소: 물리적, 경제적, 사회적, 태도적(Attitudinal) 취약성 • 평가 부문: 주거, 상업 및 제조, 핵심 시설 (각 부문별로 4가지 취약성 구성 요소를 평가)	• mFIQI를 활용하여 취약성 구성 요소의 정량화 및 통합 • 부문별/요소별 취약성 지수를 산정하고 지역에 대한 취약성 점수들을 통합 지표화 실시
Moragues et al. (2025)	스페인 팔마 도시 지역 (Dense Urban Area)	Fuzzy Logic(Membership/Gamma Function) + PCA	• 사회인구통계/경제: 여성 비율, 청년층 비율, 노년층 비율, 외국인 비율, 순 가구 소득 • 필수 서비스 근접성: 보건, 지원, 민방위, 교육 서비스. 기타 노출: 인구 밀도, 거주층 면적, 지하층 수 • 취약성 감소: 공공 공원 근접성	• 퍼지 논리를 통해 지도의 경계를 현실적으로 처리하기 위한 과정을 고찰 • 예측하기 어려운 재난 상황의 인구 이동 수요를 정밀하게 모델링하기 위한 방법론을 제시
Ramadan et al. (2025)	UAE 알-아인시 (Arid Region)	GIS Spatial Modeling, AHP 기반 MCDA	• 물리적: 토양, 지질, 강우량, 고도, 경사, 흐름 방향, 하천 차수, 토지 피복. 사회적: 인구 밀도, 총 인구	• 상대적으로 건조한 도시지역의 돌발홍수 특성 반영

제2절 주요 평가 이론

1. 개념적 프레임워크 기반 평가기법

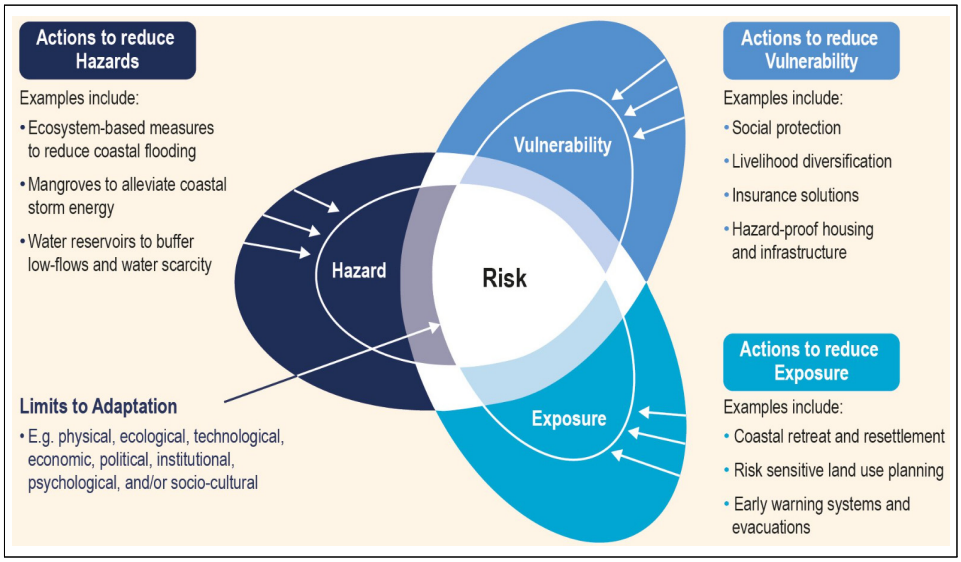
❍ 홍수 문제를 포함한 기후 관련 문제들이 복잡하고 불확실한 환경을 조성함에 따라, 효과적이고 적극적인 대응 전략 수립을 위해서는 취약성 평가 등 근거 기반의 정책 결정이 필수적임

- 취약성 평가 모델은 시스템의 내재적 특성과 외부적 충격 간의 복잡한 상호작용을 정량화하고 구조화하는 데 필수적인 도구에 해당함
- 본 절에서는 이러한 취약성 평가에 적용되고 있는 주요 평가 방법론을 살펴보았음

□ IPCC 기반 취약성 평가 모델

❍ 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)가 제시하는 취약성 프레임워크는 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 표준 모델임

- 취약성(Vulnerability)은 시스템이 기후변화의 악영향에 의해 부정적으로 영향을 받을 수 있는 정도로 정의되며, 이를 세 가지 핵심 구성 요소, 즉 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 그리고 적응 능력(Adaptive Capacity)의 함수로 정의됨
- 노출은 시스템이 강우량, 기온 변화, 홍수 빈도와 같은 물리적 기후 위험(Hazard)에 직면하는 정도를 의미하며, 기후라는 외설 변수에 의해 결정됨
- 민감도는 노출된 기후 위험에 시스템이 반응하여 영향을 받는 정도를 나타내며, 가뭄 발생에 따른 농업 생산성이 감소하는 문제와 같이 내부적인 관계성을 반영함
- 적응 능력은 시스템이 기후변화의 영향을 효과적으로 완화하거나 새로운 조건에 맞게 조정할 수 있는 능력이며, 사회경제적 자원, 제도적 구조, 기술적 역량 등 시스템의 내재적 회복력을 포괄함



[그림 2-1] IPCC AR5 취약성 개념 및 평가 프레임워크

자료: Oswald-Spring, D. Ú.(2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

□ PSR 모델

❍ PSR(Pressure-State-Response) 모델은 OECD(1993)[2]에서 개발하여 전 세계적으로 널리 활용되고 있으며, 국제기구나 다양한 나라들이 지표 설정에 활용하고 있음

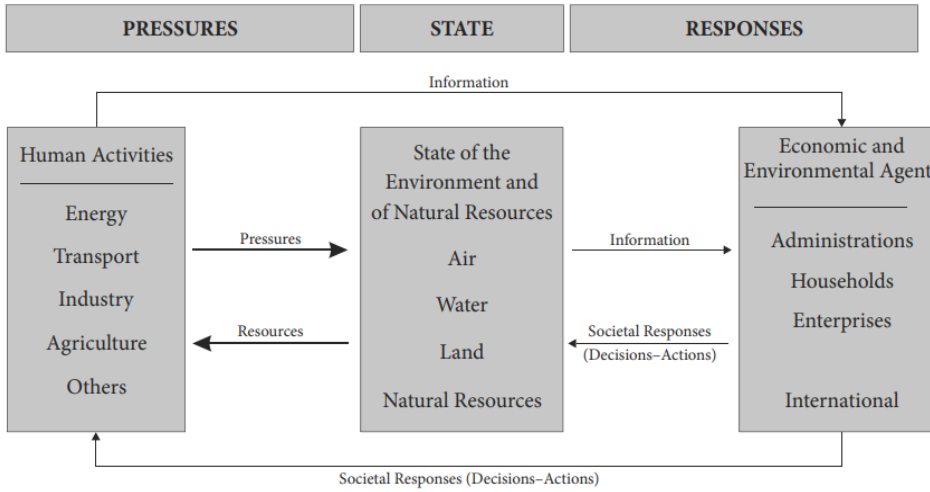
- 취약성 문제를 인과관계로 분석할 수 있고 쟁점 및 사회, 경제간의 상호 연관된 관점에서 파악이 가능하다는 장점을 지님(이근우 등, 2023)
- 따라서 특정 환경 문제의 압력 수준과 현재 상태를 집중적으로 모니터링 하고, 이에 대한 정책적 대응의 단기적 효용성을 평가하는 데 매우 효율적인 방법으로 활용되고 있음
- 해당 모델은 운전력과 영향 구성요소가 생략되어 있어 분석의 복잡성이 낮은 편으로, 인과 관계에 기반을 두고 있음(Ribeiro, 2020)

2) 지속가능한 개발(Environmentally Sound and Sustainable Development, ESSD)의 환경지표 개발 과정에서 PSR 모델을 핵심적인 방법론으로 채택

- 인과 관계의 불확실성이 다소 존재한다는 의견이 있으며, 지표에 대한 모호한 분류 내지 지표 자체에 대한 주관적인 판단으로 지표와 정책 간의 문제를 명확하게 연계하지 못하는 문제에 대한 주의가 필요함

❍ 아래 그림은 OECD에서 제안한 PSR 프레임워크의 관계도이며 주요 구성요소는 아래와 같음

- 압력(Pressures): 인간의 활동이 환경에 가하는 영향력
- 상태(State): 환경 및 천연자원의 '상태' (질과 양) 변화
- 대응(Responses): 사회가 정책이나 행동(Decisions Actions)을 통해 이러한 변화에 대처하는 방식



[그림 2-2] PSR indicator framework

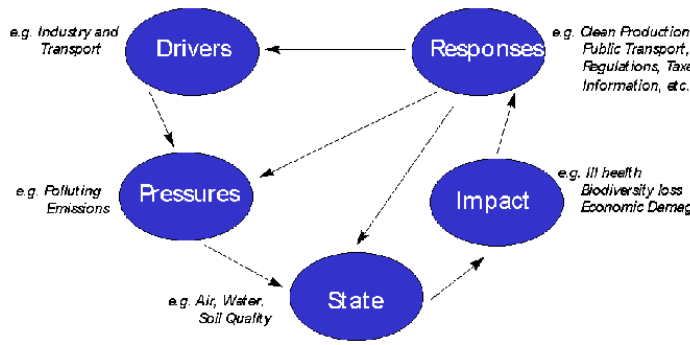
자료: OECD core set of indicators for environmental performances reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment, Environment Monographs No. 83. OECD, Paris, 1993.

❍ PSR 프레임워크 제안 이후 DSR(Driving force-State-Response), DPSIR(Driving force-Pressure-State-Impact-Response) 프레임워크 등으로 개념이 확장되었음

□ DPSIR 모델

❍ 유럽 환경청(European Environment Agency, EEA)이 개발한 DPSIR (DPSIR, Driving Force-Pressure-State-Impact-Response) 모델은 환경 문제의 원인-결과-대응 간의 관계를 중요시 하는 모델임

- 선형적 인과 관계를 중요시 하는 해당 방법론은 문제 발생과 미치는 영향, 그리고 사회적 반응을 체계적으로 분석하며 정책적 대안 제시 과정에 활용되고 있음
- 운전력·동인(Driving Force): 환경 변화를 유발하는 사회경제적 및 제도적 근본 동인이며, 인구 증가, GDP 성장, 산업화, 기술 혁신 등 사회적 변화를 포함함(Afedor et al., 2024)
- 압력(Pressure): 운전력에 의해 유발, 환경에 직접적인 스트레스나 부하를 가하는 행위·배출로, 환경오염 물질 배출량, 토지이용 변화, 에너지 소비 등을 포함함
- 상태(State): 압력의 결과로 나타나는 환경 문제로 대기 질, 수질 오염 농도, 산림 면적, 침수발생량 등을 포함함
- 영향(Impact): 환경 상태 변화가 인명 피해, 사회·경제적인 영향에 미치는 현상을 포함함
- 대응(Response): 문제를 해결하거나 영향을 완화하기 위한 사회의 정책적, 제도적, 기술적 조치를 가리킴



[그림 2-3] DPSIR 프레임워크

자료: The DPSIR-Framework displayed by the European Environment Agency

□ SETS 모델

❍ 기존의 취약성 평가 기법은 전통적으로 물리적 위험을 중심으로 분석되었으나, 최근에는 사회적 불평등, 생태계 복원력, 도시 형태 요소 등을 포괄하는 복합적 시스템 취약성 평가로 그 영역이 확대되었음

- 이러한 패러다임의 변화는 재난 위험을 다차원적 관점에서 이해하고 선제적으로 대응하기 위한 학술적, 정책적 요구사항을 반영함

❍ Chang et al. (2021)은 도시 시스템을 상호 연계된 사회(Social), 생태(Ecological), 기술(Technological)의 세 가지 관계로 정의하고, 각 요소별로 노출, 민감도, 적응 능력을 반영하는 평가 기법을 제시하였음

- 해당 기법의 주요 핵심은 사회-생태-기술 세 가지 요소가 중첩되는 '핫스팟(Hotspot)'을 식별함으로써, 다중 취약성이 공존하는 부문에 대한 근본적인 해결책을 마련하는 데 있음
- 특정 부문의 단일 위험이 아닌, 시스템적 상호작용으로 인해 증폭되는 취약점을 해소하는 데 초점을 둠
- 결론적으로, SETS(Social-Ecological-Technological System) 기반 홍수 취약성 평가는 요소 간 상호작용의 교차점을 명확하게 분석하기 위한 모델에 해당함
- 따라서 극한 홍수를 포함한 기후변화에 능동적으로 대응 가능한 도시 구축을 위한 정책 수립 및 자원 배분 결정에 필수적인 기초 정보를 제공하는 핵심 기법으로 활용이 가능함

[표 2-4] SETS 프레임워크와 기존 모델과의 차별성

구분	SETS 프레임워크 특징	기존 홍수 취약성 연구의 특징
정의	• 도시를 상호 연결된 사회, 생태, 기술 세 가지 프레임워크로 정의 • 세 구성 요소에 노출, 민감도, 적응 능력을 각각 평가 • 세 구성 요소의 공간적 교차점(핫스팟) 매핑에 중점 • 다중 취약성이 공존하는 영역에 대한 적극 정책 개입 강조	• 대부분의 연구가 사회경제적 측면에 주로 초점을 맞춤 • 홍수 전(pre-event)의 정적인(static) 데이터를 중심으로 다루면서 취약성의 동적 측면을 고려하지 못함
생태 요소 역할	• 홍수 취약성의 핵심 요소에 생태적 요소를 반영하고, 생태계가 홍수에 대처하는 능력을 정량화	• 생태적 요소에 대한 평가 미흡 • 시민의 대응 및 적응 능력과 관련된 지표에 대한 가중치 부족
기술 요소 역할	• 인프라의 노출 및 회복 능력을 정량화	• 물리적 취약성을 중심으로 평가, 사회적 측면을 다루지 않음 • 사회-물리적 요소만 부분 고려



[그림 2-4] DPSIR 프레임워크

자료: Chang et al., (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. Sustainable Cities and Society, 68, 102786.

□ **기후변화 시나리오 기반 홍수 취약성 평가**

❍ 장기적인 도시 탄력성 확보 전략을 수립하기 위해 기후변화 시나리오를 홍수 취약성 평가에 반영하는 연구가 활발하게 진행되고 있음

- 이는 미래 기후변화에 따른 시스템적 위험에 대비하고, 효과적인 기후 위기 적응 대책 수립을 위한 근거를 마련하는 것을 목표로 함

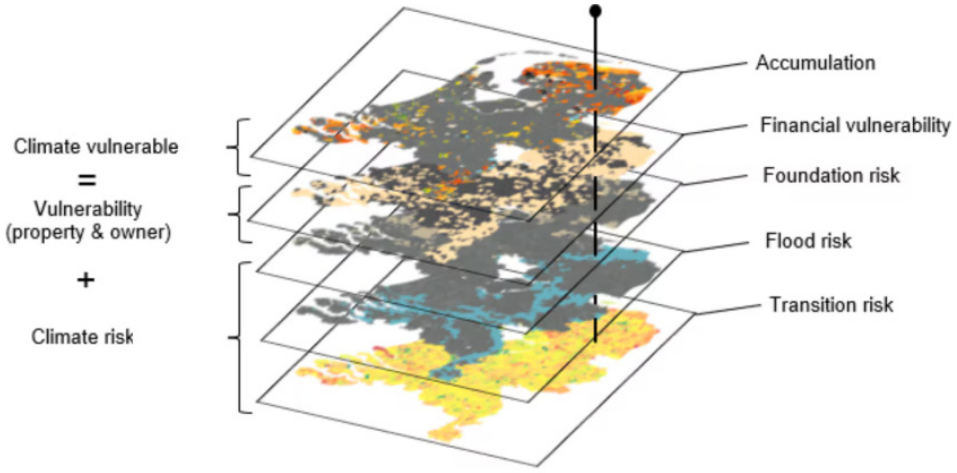
❍ 기후변화 시나리오(RCP, SSP) 기반 홍수 취약성 평가는 미래 기후 변화에 따른 극한 강우 현상 및 해수면 상승과 같은 위해 요소의 변화를 예측하여, 장기적인 관점에서 도시 및 지역 사회의 홍수 취약성과 위험도를 종합적으로 평가하는 방법론임

- 단순히 현재의 위험만을 분석하는 전통적 접근방식에서 벗어나, 미래 시스템적 위험에 선제적으로 대비하는 시사점을 제공하고 있음
- RCP(Representative Concentration Pathways)는 과거 IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체) 평가 보고서에서 활용된 시나리오로, 미래 온실가스 농도 변화에 따른 평균 복사 강제력의 경로를 나타냄
- SSP(Shared Socio-economic Pathways)는 IPCC 제6차 평가 보고서(AR6)에서 채택된 시나리오로, 미래의 사회·경제적 경로를 함께 고려하여 기후변화 예측의 불확실성을 통합적으로 분석함
- 사회·경제적 경로란 저탄소 기반 시나리오인 SSP1-2.6과 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5 등이 있으며, 이는 미래 사회 발전 방향에 따른 기후 위험을 다각도로 파악할 수 있게 함

❍ 기후변화 시나리오 기반 연구의 특징은 지자체 단위의 실질적인 기후적응을 위한 구체적인 대책을 마련하기 위해 격자 단위 물리적 홍수 모델링 결과, 점 단위 건축물, 격자 단위 인구 및 토지 피복도 등 고해상도 공간정보를 활용하여 위험 지역을 식별하는 데 있음

- 식별 과정에서 극한 강우나 빈도와 같은 위해 지표 뿐만 아니라 잠재적 침수 면적 및 침수심과 같은 취약 지표 그리고 인구밀도와 같은 노출 지표를 기후변화 시나리오와 결합하여 공간정보 표출하고 있음

❍ 이러한 분석은 미래 기후 위험의 공간적 분포와 심각도를 예측함으로써, 적응 대책의 우선순위를 설정하고 투자 효율성을 극대화하는 정책적 근거를 제공함



[그림 2-5] 기후변화 시나리오와 공간정보 기반 홍 취약성 평가 예

자료: World Economic Forum(2024), How we can identify climate-vulnerable neighbourhoods and protect inhabitants, https://www.weforum.org/

❍ 기존 연구 검토 결과, 홍수 취약성 평가 연구는 지표의 다차원화를 추구하며 평가 결과를 보다 정교하게 정량화하는 방향으로 발전해 왔음

- (관점의 확장) 초기에는 물리적 위험 요소를 중심으로 고려했으나, 최근에는 사회·경제적 불평등 및 도시 거버넌스 등 비물리적 요소까지 포함하는 방향으로 연구의 관점이 확장되고 있음
- (정책적 지향) 다차원적인 접근을 통해 도출된 평가 결과가 실질적인 정책적 실행력으로 연결될 수 있도록 하는 것을 주요 목표로 지향하고 있음
- (고해상도 공간정보 활용) 고해상도 공간정보를 함께 분석함으로써 기존의 광역적인 평가에서 보다 세밀한 공간적 위험 지도를 구축하고 있으며, 지자체가 처한 예산 분배, 방재 시설물 우선순위 결정, 대피 경로 지정 등 현실적이고 실행해야만 하는 기후 적응 대책 수립 과정에 근거자료로 활용

2. 정량적 분석 방법론

❍ 세종시는 도시와 농촌 기능이 혼재된 도시-농촌 복합도시로 홍수에 대한 취약성이 지역마다 상이하게 나타나기에 보다 과학적이고 정량적인 취약성 평가가 중요함

- 홍수 취약성을 위한 정량평가는 인구밀도, 지형, 토지이용, 방재시설 등 다양한 지표를 고려하여 각 지역의 홍수 피해 가능성을 수치화하는 과정이라 할 수 있음
- 다기준 의사결정(MCDM) 기법부터 통계분석, 머신러닝에 이르기까지 다양한 방법론이 홍수 취약성 평가에 활용되고 있음
- 본 절에서는 홍수 취약성 평가를 위한 정략적 분석의 대표적인 기법인 AHP, Entropy 기반 MCDM, Fuzzy TOPSIS, PCA에 대해 살펴보았음

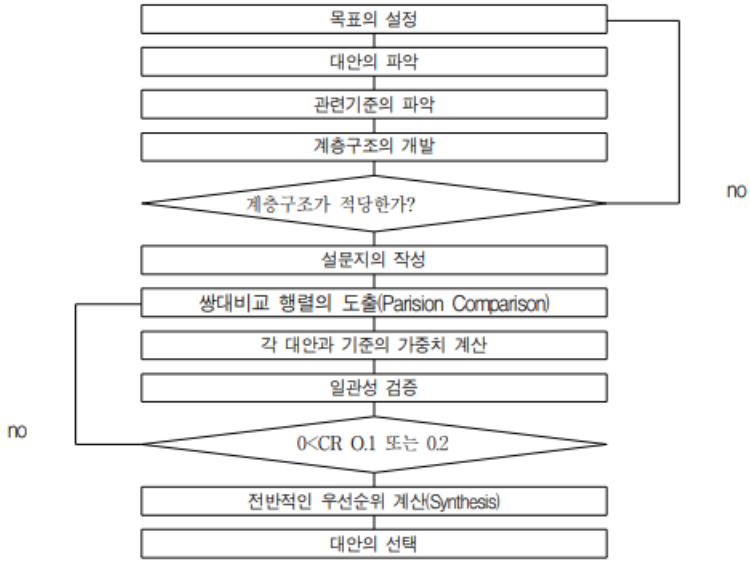
□ 계층적 의사결정 기법

❍ 분석적 계층화 기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)은 홍수 취약성 평가에서 전문가의 지식과 경험을 구조화하여 여러 평가기준의 중요도를 산정하는 다기준 의사결정 기법임(Abdrabo et al., 2023)

- 예를 들어 홍수 취약성에 영향을 미치는 강우량, 고도, 배수시설 밀도, 인구사회적 특성 등을 계층적으로 구조화한 후 쌍대비교를 통해 가중치를 도출함

❍ AHP는 개념이 직관적이고 전문가 의견을 직접 반영하므로, 지역 상황에 맞는 맞춤형 평가가 가능하다는 장점을 지님

- 평가과정과 가중치 산정이 투명하여 해석이 용이하고, 이해관계자들에게 결과를 설명하기 수월함
- 데이터가 부족한 경우에도 전문가 지식을 활용해 평가를 수행할 수 있어, 자료 빈약 지역의 홍수 취약성 평가에 특히 유용함
- GIS 연계가 용이하여 공간적 표현력이 뛰어나고, 결과를 지도 형태로 시각화하여 취약 지역을 직관적으로 파악할 수 있음(Mulu, et al., 2025)



[그림 2-6] AHP의 일반적인 적용 과정

자료: 안진성(2011), 델파이 기법(Delphi)과 계층적 의사결정방법(AHP)의 적용을 통한 전통정원의 보존상태 평가지표 개발, 성균관대학교 박사학위논문.

❍ 다만, AHP는 전문가 주관에 크게 의존하므로, 가중치에 주관성과 편향이 개입된다는 단점을 지님

- 여러 전문가의 의견을 종합하더라도 근본적으로 정량적 근거가 부족한 가중치 결정이므로, 객관성 문제로 이어질 수 있음
- 또한 비교 대상이 많아질수록 쌍대비교 행렬 일관성 확보가 어렵고, 복잡한 상호작용 효과를 반영하기 어렵다는 단점을 지님
- 즉, AHP는 각 요인을 독립적으로 가정하고 선형적으로 취합하기 때문에 실제 홍수 취약성 요인들 간의 상호작용을 과소평가하여 평가가 다소 단순화될 우려가 있음(Zhang et al., 2023)

❍ AHP 기반 홍수 취약성 평가는 전문가 합의에 기반한 명확한 우선순위를 제공한다는 장점을 바탕으로 정책 수립 시 우선 투자지역 선정에 직접 활용될 경우 효과적이라 판단됨

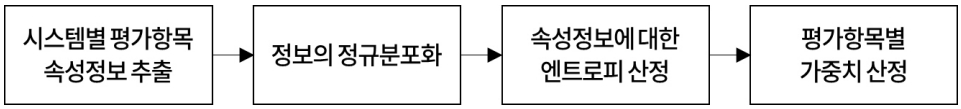
- AHP로 도출한 고위험 지역을 중심으로 치수 예산을 배분하거나 주민대피 계획을 수립할 수 있음

- AHP의 결과는 설득력이 높고 이해하기 쉬워, 지자체나 주민 설명회 등에서 정책의 정당성을 설명하는 자료로 쓰이기도 함
- 다만 주관적 판단에 의한 결과임을 감안하여, 필요시 다른 객관적 기법과 병행하여 검증하는 것이 권장됨

□ 엔트로피 기반 다기준 의사결정 기법

❍ 엔트로피(Entropy) 이론을 활용한 Entropy Weight Method(EWM) 기반의 다기준 의사결정 기법(Multi-Criteria Decision-Making, MCDM)은 평가기준들의 데이터 분포에 따라 객관적 가중치를 부여하는 방법임(Xiang and Lyu, 2023)

- 선정된 지표들의 값이 정보전달량을 계산하여 변동성이 큰 지표에 높은 가중치를 할당하고, 변동성이 적으면 낮은 가중치를 부여하는 특징을 지님
- 이렇게 도출된 엔트로피 기반 가중치를 활용하여 지표들을 선형 결합하거나, 다른 이론과 결합된 MCDM 기법에 적용해 취약성 순위를 산정하는 연구들이 진행되고 있음



[그림 2-7] 엔트로피의 가중치 산정 과정

자료: 송양호(2011), 다기준의사결정기법을 이용한 도시 내수침수 위험도 평가기법, 한밭대학교 석사학위논문.

❍ 엔트로피 기반 다기준 의사결정 기법은 데이터 자체 값을 기반으로 가중치를 결정하므로, 앞서 나열한 AHP와 달리 평가자의 주관적 편향을 배제할 수 있다는 장점을 지님(Xiang and Lyu, 2023)

- 각 지표의 정보량에 비례하여 중요도를 산정하기 때문에, 자료가 지니고 있는 내재적 특성을 토대로 보다 합리적인 가중치를 도출해 낼 수 있음
- 홍수 취약성 평가와 같이 다수의 복합지표를 다루는 연구에서 유용하게 활용되고 있으며, 지표 간 상관관계를 명시적으로 고려하지 않아도 적용

이 비교적 간단함

- 이러한 장점은 도시-농촌 복합지역의 취약성 평가에서도 적용 범용성이 높다고 볼 수 있으며, 산출한 취약성 지수를 지도화하여 객관적 취약성 분포도를 생성할 수 있다고 판단됨

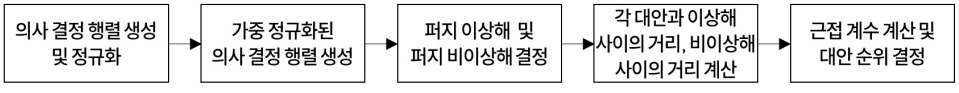
❍ 다만, 엔트로피 기법은 지표 값들의 상대적 변동성만 고려하므로, 지표 간의 인과관계와 같은 내재적인 특성을 반영하지 못할 수 있다는 단점을 지니며, 중요한 지표가 변별력이 낮을 경우 낮은 가중치를 받는 문제로 이어질 우려가 있음(Xie and Meng, 2023)

- 이러한 문제로 인해 엔트로피 이론을 바탕으로 가중치 산정 이후, 최종 취약성 평가에는 추가적인 다기준 의사결정 기법(예: 가중합, TOPSIS, PROMETHEE 등)을 결합이 필요함

□ Fuzzy TOPSIS 기법

❍ TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)는 여러 대안 중 가장 이상적인 해에 가까운 정도를 평가하여 순위를 매기는 MCDM 기법임

- Fuzzy TOPSIS는 퍼지 이론을 결합하여 지표값이나 가중치에 내재된 불확실성을 모형화한 기법임
- 홍수 취약성 평가에서 퍼지 TOPSIS를 활용하면, 각 평가기준을 퍼지 숫자(삼각형 퍼지수 등)로 표현하여 전문가 판단의 불명확성이나 데이터의 모호함을 반영할 수 있다는 장점을 지님(Lee et al., 2013)



[그림 2-8] 엔트로피의 가중치 산정 과정

자료: Ansari, M. T. J., Al-Zahrani, F. A., Pandey, D., & Agrawal, A. (2020). A fuzzy TOPSIS based analysis toward selection of effective security requirements engineering approach for trustworthy healthcare software development. BMC Medical Informatics and Decision Making, 20(1), 236.

❍ Fuzzy TOPSIS의 큰 장점은 불확실성의 정량화라고 할 수 있는데, 가중치 산정과정에 전문가마다 의견이 다르거나 데이터에 오차범위가 존재할 경우, 퍼지론을 통해 이를 수리적으로 처리하여 평가의 신뢰도를 높임(Lee et al., 2013)

- TOPSIS 자체의 장점으로서, 이상적인 안전 상태와 최악의 위험 상태를 가정하고 각 대안을 평가하므로 평가결과의 상대적 의미가 명확한 편임

❍ 다만, 비전문가 입장에서는 쉽게 이해하기 어려운 개념이기에 설명과 분석 과정에 대한 많은 노력이 필요하며, 퍼지 수 정의, 소속함수 설정 등 퍼지 이론 관련 매개변수에 대한 모니터링이 필요함

- TOPSIS 자체 단점인 가중치에 대한 민감도 문제를 고려할 때, 절대적인 예측이기보다는 상대적 평가의 도구로 활용하는 것이 바람직함
- 도시-농촌 복합지역처럼 데이터가 부분적으로 부족하거나 모호한 경우, 퍼지 기법은 제한된 정보에서 최선의 판단을 이끌어내어 정책의 사각지대를 해소하는 도구로 활용이 가능함

□ 주성분 분석

❍ 주성분 분석(Principal component analysis, PCA)은 다수의 관련 변수를 몇 개의 주성분(잠재 차원)으로 요약하여 복잡한 취약성 요인의 구조를 파악하는 통계 기법에 해당함

- 홍수 취약성 평가에서는 인구, 경제, 환경 등 여러 지표 간의 상관관계를 고려하여 PCA 분석을 수행함으로써, 중복 정보를 줄이고 핵심 취약성 인자들을 추출하는 데 활용하고 있음(Xie and Meng, 2023)
- 예를 들어 인구밀도, 재해취약인구, 소득수준 같은 사회·경제 관련 지표들을 PCA로 분석하면 '인구사회취약성'이라는 주성분과 '인프라 취약성'과 같은 또 다른 주성분을 분석해 낼 수 있음
- PCA는 데이터 내에 내제된 구조들을 파악하는 데 효과적이며, 다차원 데이터를 연구자가 설정한 대표 주성분 축으로 정리하여 취약성 요인을 파악할 경우 주요 변수들이 취약성을 주도하는지에 검토하는 과정이 중요함

- 이러한 분석 과정에서 상관관계가 높은 지표들은 동일한 주성분에 묶여 중복 문제가 제거되며, 서로 독립적인 요인이 드러나 취약성의 다차원적 특성을 이해할 수 있다는 특징을 지님
- 이와 함께 가중치 산정에 있어 주관 개입 없이 데이터 기반으로 이루어지므로, 객관성과 재현성이 높은 편임(Moreira et al., 2021)

❍ PCA 기법은 선형기법이며, 지표들 간 비선형 관계나 특정 임계치 이상의 효과 등을 반영하지 못한다는 단점을 지니고 있음

- 홍수 취약성에서는 지표 간의 관계나 중첩·복합적인 효과가 반영될 수 있는데 이러한 정보를 포착하기 어렵고 문제르 추론해 가는 과정에서 연구자 의견이 과도하게 개입될 우려가 있음
- 이러한 약점을 보완하기 위해 PCA 결과에 전문가 가중치(AHP)를 결합하는 연구를 통해 주성분 분석 결과에 대한 신뢰도를 높이는 절차를 반영하고 있음(Xie and Meng, 2023)

□ 기법별 비교 요약

❍ 앞서 살펴본 방법들에 대한 특징을 종합하면 개별 기법의 장단점이 뚜렷하기에 독립적으로 활용하기 보다는 두 가지 이상의 기법을 연계하여 상호보완적으로 활용될수록 신뢰도 높은 결과 도출이 가능하다는 점임

- 전통적인 AHP와 엔트로피 기법은 전문가 식견과 데이터 기반 객관성이라는 대비되는 이점을 지니고 있으며, Fuzzy TOPSIS는 불확실한 현실을 반영함으로써 평가의 신뢰도를 높여준다는 특징을 지님
- PCA의 경우 데이터 압축과 패턴 인식을 통해 취약성의 구조적 이해를 돕는데 유용하며, 정책 수립을 지원하는 과정에 잇어 이들 기법을 단독으로보다는 복합적으로 활용하는 것이 바람직함(Uddameri and Hernandez, 2025)
- 중요한 것은 각 도시-농촌 복합지역의 상황에 맞는 도구를 선택하고, 지속적인 데이터 축적과 전문역량 강화를 통해 기법들을 발전적으로 활용하는 것이라 판단됨

[표 2-5] 홍수 취약성 정량 평가 기법별 특성 비교

방법론	적용 가능성 및 범용성	해석 용이성 및 예측 정확성	데이터 요구 수준
AHP	• 전문가지식 활용으로 거의 모든 지역에 적용 가능	• 가중치와 계층구조가 직관적 • 결과 설명이 용이하여 정책 수용성이 높음 • 정량적 검증이 어렵고 주관성 개입으로 정확도 한계	• 전문가 판단으로 데이터 의존도 낮음 • 소규모 데이터 또는 정성적인 데이터로도 평가 가능
Entropy 기반 MCDM	• 다수지표 다루는 경우 효과적	• 가중치 산정 근거가 수리적이어서 이해가 어려움 • 데이터의 변동이 큰 지표를 중시하여 합리적인 편	• 평가를 위한 충분한 데이터 필요 • 자료의 충분한 확보·반영이 신뢰도 결과에 크게 영향
Fuzzy TOPSIS	• 불확실성높거나 전문가 다수 참여 상황에 적합	• 퍼지개념으로 다소 복잡, TOPSIS 자체는 직관적(0~1 척도) • 이상·비이상해를 퍼지값으로 정의, 근접도를 계산	• 정성·정량 데이터 모두 활용 • 다수 전문가 의견 취합시 데이터 양이 많은 편
PCA	• 사회경제지표 등 다차원 데이터 구조를 갖춘 경우 적합	• 주성분 의미가 추상적일 수 있어, 전문가 해석 필요 • 상관성 제거로 정밀한 패턴 도출	• 평가를 위한 충분한 데이터 필요 • 결측치 보완 및 표준화 등 전처리 과정이 반드시 필요

홍수 취약성 분석 지표 선정

3장

제1절 | 분석 지표 선정 및 가중치 부여 방안
제2절 | 연구 대상 지역 개요

3장 | 홍수 취약성 분석 지표 선정

제1절 분석 지표 선정 및 가중치 부여 방안

1. 통합적 진단 프로세스 모델의 구조화

□ H-T-L 모델 제안

❍ 본 연구는 도농복합도시라는 세종시의 고유 특성을 반영하는 홍수 취약성 평가 시스템 요소를 구체화하고자 하였음

- 이를 위해 기존의 취약성 범주를 기반으로 H-T-L(Human·Management-Tangible·Structural-Location·Environmental) 모델을 새롭게 제안함
- 이 모델은 홍수 취약성의 근본 원인을 서로 독립적이면서도 유기적으로 연계된 세 가지 차원으로 분할하여 분석하는 혁신적인 프레임워크에 해당함

❍ 본 연구는 도농복합도시라는 세종시의 고유한 특성을 평가에 실질적으로 반영하기 위해 홍수 취약성 평가 지표를 세 가지 핵심 범주로 구성하였음

- 이 구성은 취약성 요소가 발생하는 근원과 관리 특성에 기반하여 작성되었으며, 취약성 요소를 1) 인적·관리, 2) 유형·구조, 3) 입지·환경의 세 차원에서 종합적으로 진단하고 정책적 함의를 도출하기 위함임

❍ 본 연구는 도농복합도시라는 세종시의 고유한 특성을 반영하여 홍수 취약성 평가 지표를 세 가지 핵심 범주로 구성하였음

- 이는 취약성 요소를 인적·관리, 유형·구조, 입지·환경의 세 차원에서 종합적으로 진단하고 정책적 함의를 도출하기 위함임

- 세종시의 홍수 취약성 평가지표는 아래의 세 가지 대분류로 구성되며, 이는 취약성 요소가 발생하는 근원과 관리 특성에 기반하여 작성함

[표 3-1] 평가지표 범주 구성 및 기본 방향

분류	주요 특성 및 내용
인적·관리 취약성	• 재난 대응 역량, 비구조적 대책 및 정책적·사회적 관리 수준 등 인적 요인과 제도적 관리 측면의 취약성
유형·구조 취약성	• 인프라, 건물, 시설 등 물리적 시설물의 노후도 및 구조적 안전성 측면의 취약성
입지·환경 취약성	• 지형, 기후, 토지 이용 등 지역 고유의 지리적·환경적 조건으로 인한 취약성

□ 인적·관리 취약성(Human·Management) 지표 정의

❍ 인적·관리 취약성은 홍수 재난 상황에서 인명 보호사회 기능의 연속성유지를 저해하는 조직적·제도적·사회적 역량의 결핍 상태를 측정하는 범주에 해당함

- 구체적으로 이는 인적 자원의 교육 및 훈련 수준 미흡, 그리고 행정 및 제도적 관리 체계의 미비점에서 기인하는 취약성을 포괄적으로 진단하기 위한 목적을 지님
- 특히, 재난 발생 전후의 위기관리 및 대응 프로세스의 효율성과 투명성, 관련 주체 간의 협력 체계의 공고성, 그리고 정책 및 행정 절차상 책임 소재의 명확성등 관리적 측면의 미비가 적응 능력과 사회적 민감도에 미치는 영향을 중점적으로 분석하는 것을 목적으로 함

❍ 인구밀도는 행정동의 총면적 대비 거주하고 있는 인구의 수를 나타내며, 밀도가 높을수록 홍수 발생 시 인명 피해 및 사회적 혼란의 잠재적 규모가 커지므로 취약성이 높다고 평가됨

- 인구밀도가 높은 지역은 홍수 발생 시 대피 및 구호 활동이 복잡하고, 인명 피해가 집단적으로 발생할 위험이 높다고 판단하며, 취약성 지수에서는 인구밀도가 높을수록 취약한 것으로 간주함

$$\text{인구밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 거주인구 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (1)}$$

❍ 재해 취약 인구 밀도는 행정동의 총면적 대비 이러한 취약 계층의 수가 얼마나 밀집되어 있는지를 나타내며, 재난 발생 시 스스로 대피하거나 신속하게 대응하기 어려운 대상(65세 이상 고령 인구 수, 5세 이하 영유아 인구 수, 장애인 인구 수)을 포함함

- 취약인구 밀도가 높은 지역은 홍수 발생 시 인명 피해 위험이 가장 높고(대피·이동 어려움), 긴급 구호 및 의료 지원 수요가 집중되어 사회적 혼란이 가중될 우려가 있으며, 앞서 나열한 인구밀도보다 피해의 심각성을 더 잘 반영하는 지표라 할 수 있음

$$\text{재해취약인구 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 재해취약인구 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (2)}$$

❍ 1인 가구 밀도는 분석 대상 읍면동의 총면적 대비 혼자 거주하는 가구의 수가 얼마나 밀집되어 있는지를 나타냄

- 1인 가구는 재난 발생 시 공동체나 가족의 도움을 받기 어려워 대응능력이 낮다고 평가하며, 1인 가구 중에는 노인, 청년층 등 재해 취약 인구에 속하는 경우가 많아 취약성이 가중되는 특징을 지님

$$\text{1인 가구 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 1인 가구 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (3)}$$

❍ 기초생활수급자 밀도는 읍면동의 총면적 대비 기초생활수급자로 등록된 인구의 수가 얼마나 밀집되어 있는지를 나타내며, 재난 발생 시 자력 복구 능력이 가장 취약한 계층의 밀집도를 나타냄

- 이들 대상은 홍수 피해를 입을 경우, 자력으로 피해를 복구하거나 재난 물품을 구매할 경제적 자원이 극히 부족하여 피해가 장기화될 위험이 높으며, 노후되거나 저지대에 위치한 주택(반지하 등)에 거주하는 경우가 많아, 물리적 노출 위험까지 함께 커지는 경향이 있음

$$\text{기초생활수급자 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 기초생활수급자 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (4)}$$

❍ 1차산업 종사자 밀도는 읍면동의 총면적 대비 농업·임업·어업 등 1차 산업에 종사하는 인구의 수가 얼마나 밀집되어 있는지를 가리키며, 해당 지역의 토지 이용 특성과 피해 복구 용이성을 간접적으로 반영하는 지표에 해당함

- 농경지, 양식장과 같은 1차 산업 분야의 경우 홍수에 가장 직접적으로 취약한 자산으로, 홍수 발생 시 농작물과 가축의 손실 및 토양 유실 등 막대한 경제적 피해가 발생하므로, 밀도가 높을수록 경제적 피해 심각성이 높다고 해석함
- 1차 산업 지역은 일반적으로 불투수 면적이 낮고, 도심 지역에 비해 인명 피해 위험 및 사회적 혼란도가 낮다는 측면에서는 취약성이 낮을 수 있음

$$\text{1차 산업 종사자 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 1차 산업 종사자 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (5)}$$

❍ 공무원 밀도는 읍면동의 총면적 대비 해당 지역에서 근무하는 공무원수가 얼마나 밀집되어 있는지를 나타내며, 본 연구에서는 중앙 정부 기관을 제외한 세종시 공무원만 고려하였음

- 공무원 밀집 지역은 재난 발생 시 행정력이 빠르게 동원될 수 있는 잠재력을 지니고 있으며, 정보 전달·긴급 구호·현장 통제 등 초기 대응 능력을 보유하고 있다고 해석함
- 또한 주요 공공기관이 밀집된 지역일 가능성이 높아, 해당 지역은 재난 관리 인프라 및 자원이 집중되어 있다고 볼 수 있음

$$\text{공무원 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 공무원 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (6)}$$

[표 3-2] 인적·관리 취약성 분야 구성 지표

취약성 속성	세부 지표		지표별 선정 배경	상세 설명
노출	인구밀도		• 동일 규모의 홍수 범람원이라도 인명(사람 수)이 더 많이 겹쳐 인명피해 잠재치가 증가	• 인구밀도는 홍수위험 지역 내에 위치한 인구의 밀집 정도를 나타냄 • 잠재적인 인명피해 규모를 측정하는 핵심 노출지표임
민감도	재해 취약 인구 밀도	고령 인구 밀도	• 이동성·만성질환 등으로 경보 인지·대피·회복 과정에서 취약	• 노약자(65세 이상)는 신체적 기능 및 생계유지 문제로 인해 재난 대처 능력이 현저히 낮아 민감도가 매우 높음
		영유아 인구 밀도	• 보호자 의존, 체온조절·질병 취약성 등으로 응급상황 대응능력이 낮음	• 5세 이하 인구의 경우 재난 상황에서 보호자의 통제에 의존하고 신체적 취약성이 높아 민감도를 증가시키는 주요 요인에 해당
		장애인 인구 밀도	• 이동·의사소통·의료 접근성 제약으로 대피난이도·2차피해 위험이 큼	• 재난 취약 계층으로서 이동 및 의사소통 제약으로 인해 실시간 재난 정보에 접근하지 못하고 대처 능력이 부족하여 재난 위험에 상시 노출
	1인 가구 밀도		• 사회적 연결망 부재로 경보 공유·대피 지원·복구지원 접근성이 낮아 회복력 저하 우려	• 1인 가구는 다인 가구에 비해 재난 발생 후의 회복탄력성(Resilience)이 유의미하게 낮음 • 이들의 회복력은 사회적 지지체계의 유무에 의해 결정, 사회적 민감도를 나타내는 중요한 지표에 해당
	기초생활수급자 밀도		• 소득·저축·보험 접근성이 낮아 예방·대응·복구 비용 감당력이 떨어짐	• 재난 취약 계층으로, 삶의 여력이 부족하여 주거 시설 노후화 및 화재 등 2차 재난 위험 시설이 부족, 재난 피해 후 복구에 필요한 재정적 민감도가 높음

취약성 속성	세부 지표	지표별 선정 배경	상세 설명
민감도	1차산업 종사자 밀도	• 농업·어업 등은 토지·수문 조건에 직접 의존해 홍수 시 소득·생계 손실이 크고 회복이 지연됨	• 1차 산업(농·어업)은 토지 및 수문 환경에 대한 의존도가 높아, 홍수 재난 시 작물 및 시설물 손실을 통한 소득 및 생계 피해가 직접적으로 발생하여 경제적 회복에 장기간이 소요될 수 있음 • 지역 경제의 민감도를 높이는 지표로 해석
적응능력	공무원 밀도	• 재난 대응의 행정역량 (인력·민원대응·현장조정)의 대리지표 • 인구 대비 인력이 많을수록 조기 경보·현장 대응·취약계층 발굴이 원활	• 인구 대비 공무원 수는 재난 상황 발생 시 초기 대응, 취약계층 대피 안내, 민원 대응 및 현장 조정에 투입 가능한 행정 인력의 규모를 나타냄 • 지역사회의 재난 대응 시스템의 효율성과 현장 관리 역량을 측정하는 중요한 지표이며, 지역의 피해 저감 및 회복을 지원하는 '적응 능력'을 간접적으로 반영함

□ 유형·구조 취약성(Tangible·Structural) 지표 정의

❍ 유형·구조 취약성은 홍수 재난 발생 시 직접적인 피해로 이어질 수 있는 유형 자산의 물리적 상태와 건축물 및 주요 기반 시설의 구조적 안전도에 대한 결함을 포괄적으로 진단하는 범주에 해당함

- 시설물의 구조적 건전성, 내구 연한, 재해 대비 안전 기준 준수 여부, 그리고 물리적 방호 능력 등 유형적·구조적 측면의 미비로 인해 발생하는 위험 노출 정도를 중점적으로 평가함
- 본 범주는 재난 발생 시 피해 최소화 및 기능 유지에 필수적인 물리적 자산의 복원력(Resilience)확보 방안을 모색하는 데 중요한 기초자료를 제공함

❍ 평균 공시지가는 홍수 발생 시 잠재적 경제적 피해 규모를 측정하는 대리변수로, 공시지가가 높은 행정동일수록 홍수 피해 발생 시 경제적 손실이

클 것으로 예상되므로 취약성이 높다고 판단함

- 국토교통부에서 제공하는 표준공시지가 자료를 토대로 세종시 읍면동별 개별 공시지가를 토대로 관내 모든 필지의 공시지가를 합산하여 행정동별 평균 공시지가를 산출·반영하였음

❍ 건축물 밀도는 읍면동의 총면적 대비 해당 지역 내 건축물이 얼마나 밀집되어 있는지를 나타내며, 밀집도가 높을수록 홍수 발생 시 피해가 한곳에 집중될 가능성이 높아 피해 집중성을 반영하는 지표에 해당함

$$\text{건축물 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 건축물 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \qquad \text{식 (7)}$$

❍ 노후건축물 밀도는 읍면동의 총면적 대비 일정 기준 30년 이상을 초과한 노후 건축물의 수가 얼마나 밀집되어 있는지를 나타내며, 홍수 피해 발생 시 피해 규모의 심각성과 복구의 어려움을 동시에 반영하는 지표에 해당함

- 오래된 건축물은 상대적으로 내수성이 낮고 구조적 안정성이 취약하여, 침수나 수압에 의해 붕괴 및 파손될 위험이 높음
- 저소득층 거주 비율이 높을 수 있으며, 홍수 피해 시 복구 비용 부담 능력 및 정부 지원에 대한 의존도가 높아 사회적 취약성이 가중된다고 볼 수 있음

$$\text{노후 건축물 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}\,i\text{의 총 노후 건축물 수}}{\text{읍면동}\,i\text{의 총 면적}\,(km^2 \text{ or ha})} \qquad \text{식 (8)}$$

❍ 반지하 밀도는 읍면동의 총면적 대비 반지하 주택 및 가구가 얼마나 밀집되어 있는지를 나타내며, 침수 위험에 대한 사회적 취약성과 물리적 취약성을 모두 반영하는 핵심 지표에 해당함

- 반지하 주택은 지표면보다 낮아 침수에 가장 직접적으로 노출되며, 특히 단기 집중호우 발생시 침수 피해를 입을 가능성이 높음
- 반지하 거주 가구는 경제적 취약 계층일 확률이 높으며, 침수 피해 발생 시 탈출의 어려움 등으로 인한 인명 피해 위험과 동시에 복구 능력 및 자

가 복구 자원이 부족한 편임

$$\text{반지하 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}i\text{의 총 반지하 주택 수}}{\text{읍면동}i\text{의 총 면적}(km^2 \text{ or ha})} \quad \text{식 (9)}$$

❍ 민방위 대피시설 밀도는 읍면동별 대응 능력을 나타내는 지표로 밀도가 높을수록 주민들이 재난 발생 시 시설에 접근하기 용이하여 취약성이 낮다고 볼 수 있음

- 민방위 대피시설 밀도는 해당 행정동의 인구수 또는 총 면적 대비 민방위 대피시설의 수이며, 인구 1,000명당 시설 수를 고려함으로써 인구밀도 대비 시설의 충분성을 반영하고자 하였음

$$\text{민방위 대피시설 밀도}_{\text{읍면동}i} = \frac{\text{읍면동}i\text{의 총 민방위 대피시설 수}}{\text{읍면동}i\text{의 총 인구수}} \quad \text{식 (10)}$$

[표 3-3] 유형·구조 취약성 분야 구성 지표

취약성 속성	세부 지표	지표별 선정 배경	상세 설명
노출	평균 공시지가	• 단위면적당 자산가치가 커 잠재 경제적 손실이 확대됨 • “자산손실” 측면에서 노출로 정의, “사회적 취약성·형평성”측면에서 “고가”=“완충능력” 처리하는 방식도 있음	• 자산가치는 홍수 피해가 발생했을 때 사회경제적 영향을 반영하는 핵심 지표임 • 단위면적당 자산 밀집도를 통해 잠재적인 경제적 노출위험을 측정
	건축물 밀도	• 건물 자체가 홍수에 노출되는 자산의 절대 규모를 가리키며. 많을수록 잠재 피해 규모가 큼	• 인구 밀도와 함께 자산 밀도를 측정하는 노출지표, 홍수 위험 지역 내에 위치한 주택 등 자산의 절대 규모를 측정
민감도	노후건축물 밀도	• 내수침수·범람에 대한 구조적 저항성이 낮고, 설계강우적용 가능성이 커 피해 강도가 커짐	• 오래된 건축물은 최근의 강화된 내수침수 및 범람에 대한 구조적 설계 기준(설계강우)이 적용되지 않았을 가능성이 높아, 홍수 발생 시 구조적 저항성이 낮고 침수에 대한 물리적 피해 강도가 증가함 • 재산 피해의 규모를 확대하는 주요 민감도 지표에 해당

취약성 속성	세부 지표	지표별 선정 배경	상세 설명
민감도	반지하 밀도	• 지하·반지하는 월류·역류 시 침수 발생확률과 깊이가 모두 높아 인명·재산 피해가 커짐	• 지하 또는 반지하 공간은 집중호우 시 빗물의 월류 및 역류 현상으로 인해 침수 발생 확률과 침수 깊이가 다른 층에 비해 현저히 높아짐 • 인해 인명 피해 및 재산 피해가 급격히 증가할 위험이 크며, 도시 지역의 핵심적인 물리적 민감도 지표로 활용.
적응능력	민방위 대피시설 밀도	• 안전한 회피·대피 옵션의 수용력을 가리키며, 인구 1천명당 시설이 많을수록 피해 저감·회복력이 높음	• 재난, 전쟁 등의 위급 상황에 대비하여 지정된 시설 • 시민들이 안전하게 회피할 수 있는 공간 자원의 적응 능력을 측정하는 중요한 지표

□ 입지·환경 취약성(Location·Environmental) 지표 정의

❍ 입지·환경 취약성은 홍수 재난 위험에 대한 대상 지역의 지리적 입지 조건과 자연 환경적 특성으로부터 발생하는 노출 수준을 종합적으로 진단하는 범주에 해당함

- 지역의 지형 및 수문학적 특성에 따른 위험성, 그리고 기후 변화에 의해 증폭되는 지역 특유의 환경적 위험 요소에 대한 노출 정도를 중점적으로 평가함
- 본 범주는 인간 활동과는 독립적으로 존재하는 자연 환경 자체의 안정성 및 재해 발생 가능성을 핵심적으로 다루며, 이는 재난 피해의 잠재적 규모를 예측하는 데 필수적인 기초 분석 요소로 활용이 가능함

❍ 하천점유율은 읍면동 총 면적 대비 해당 지역 내의 하천 구역 면적이 차지하는 비율을 백분율로, 주로 토지 이용 분석이나 홍수 취약성 평가의 지표로 사용되는 개념에 해당함

- 하천점유율이 높다는 것은 해당 행정동의 상당 부분이 하천변에 인접해 있다는 것을 의미하며, 이는 홍수 발생 시 범람 위험 지역에 더 많이 노출되어 있다는 뜻이므로 홍수 취약성이 높다고 해석하였음

$$\text{하천점유율}_{\text{읍면동}i}(\%) = \left(\frac{\text{읍면동}i\text{내 하천 구역 면적}}{\text{읍면동}i\text{의 총 면적}}\right) \times 100 \qquad \text{식 (11)}$$

❍ 평균해발고도는 읍면동별 구역 내 모든 지점의 해발 고도를 평균한 값으로, 고도가 낮을수록 물이 정체되기 쉽고 배수가 어려워 침수 위험이 높으므로 지형적 취약성이 높다고 판단함

- GIS 프로그램에서 DEM 데이터를 활용하여 산출하였음

❍ 불투수면적율은 아스팔트, 콘크리트, 건물 지붕 등 빗물이 땅속으로 스며들지 못하고 표면 유출수로 직접 유출하게 기인하는 모든 인공 구조물로 덮인 면적을 가리키며, 읍면동의 총면적 대비 불투수면적이 차지하는 비율에 해당함

- 빗물이 땅으로 스며들지 못하고 빠르게 지표면을 따라 흐르면서 하수도와 하천에 급격하게 부하를 줘 도시 홍수의 위험을 높이는 지표에 해당함

$$\text{불투수면적율}_{\text{읍면동}i}(\%) = \left(\frac{\text{읍면동}i\text{내 불투수 면적}}{\text{읍면동}i\text{의 총 면적}}\right) \times 100 \qquad \text{식 (12)}$$

❍ 저지대 비율은 물이 정체되어 침수 피해가 심화될 수 있는 평탄한 위험 지역의 밀집도를 가리키며, 본 연구에서 저지대 기준은 읍면동의 총 면적 대비 경사도 5° 이하의 비교적 완경사 지역이 차지하는 면적을 고려하였음

- 저지대 비율이 높다는 것은 해당 읍면동이 홍수에 노출될 경우 침수 피해가 발생할 지리적 공간이 많다는 것을 가리키며, 배수가 지연될 경우 2차 피해로 이어질 우려에 대해 고려하였음

$$\text{저지대 비율}_{\text{읍면동}i}(\%) = \left(\frac{\text{읍면동}i\text{내 경사도} \leq 5^\circ\text{인 면적}}{\text{읍면동}i\text{의 총 면적}}\right) \times 100 \qquad \text{식 (13)}$$

[표 3-4] 입지·환경 취약성 분야 구성 지표

취약성 속성	세부 지표	지표별 선정 배경	상세 설명
노출	하천점유율	• 행정구역 내 하천·하폭 비중이 클수록 범람원과의 접촉면이 넓어지고, 제방 월류·파손 시 영향면적이 증가할 우려가 있음	• 중소규모 지방하천의 경우 지형의 높낮이와 모양 등이 중요 • 하천점유율은 범람원과 접촉하는 면적을 넓혀 홍수 위험 예측 모델에서 핵심 노출요소로 활용
	평균해발고도	• 저지대는 역류·집수가능성이 크고, 배수 불능 시 장기 침수에 취약함	• 유역 평균 표고는 유출 방향과 저지대의 침수 위험성을 평가하는 지형학적인 노출지표로 활용
민감도	불투수면적율	• 투수 부족은 유출계수 증가와 첨두유량·체류심·체류시간 악화로 이어져 같은 강우에도 피해가 커짐	• 도시화에 따라 불투수 면적이 증가하면 첨두유량이 증가하고 도달 시간은 단축되어 재해 유발 가능성이 커짐
적응능력	저지대 비율	• 완경사는 집수·체류를 유도해 면적침수 가능성이 증가함	• 경사는 물 빠짐 능력과 함께 도시 침수 및 홍수 위험을 예측하는 모델에서 고려되는 중요한 지표임 • 완만한 경사도는 배수를 지연시키고 물의 체류를 유도하여 노출위험 증가

□ 데이터 수집 및 전처리

❍ 본 연구에서는 IPCC에서 정의한 취약성 개념에 따라 평가지표를 노출, 민감도, 적응능력 속성별로 구분하고, 이를 다시 인적·관리, 유형·구조, 입지·환경의 세 가지 부문으로 분류하여 분석하였음

- 전체 평가지표는 총 15개의 세부지표로 구성되었으며, 각 지표의 출처 및 기준연도는 다음과 같음

[표 3-5] 본 연구 평가지표의 구성 및 출처

부문	속성	세부 지표		출처	기준연도
인적·관리	노출	인구밀도		세종시 주민등록인구통계	2024
	민감도	재해취약 인구밀도	고령 인구 밀도		2024
			영유아 인구 밀도		2024
			장애인 인구 밀도	세종시 장애인통계	2024
		1인 가구 밀도		KOSIS 국가통계포털 가구원수별 가구	2024
		기초생활수급자 밀도		세종시 행정동별 기초생활수급자 인원수	2022
		1차산업 종사자 밀도		세종시 사업체조사 보고서	2022
	적응능력	공무원 밀도		세종시 정원배정에 관한 훈령	2025
유형·구조	노출	평균 공시지가		국토교통부 표준공시지가	2023
		건축물 밀도		국토교통부 건축물 생애이력관리시스템	2024
	민감도	노후건축물 밀도			
		반지하 밀도		국토교통부 건축물대장	2025
	적응능력	민방위 대피시설 밀도		행정안전부 전국민방위대피시설표준데이터	2025
입지·환경	노출	하천점유율		국토교통부 브이월드(실폭하천)	2024
		평균해발고도		국토교통부 브이월드(등고선)	2024
	민감도	불투수면적율		환경부 환경공간정보서비스	2021
	적응능력	저지대 비율		국립농업과학원 토양경사도	2024

❍ 홍수 취약성 분석에 사용되는 여러 지표들을 통합 지수로 만들기 위해서는 모든 지표를 동일한 척도(스케일)로 변환하는 표준화(Normalization) 과정이 필수적임

- 가장 일반적인 표준화 방법인 Min-Max 정규화를 기반으로 지표의 방

향성에 따른 표준화 과정을 진행하였으며, 모든 지표는 최종적으로 '0'에서 '1' 사이의 값으로 변환하였음

- 표준화 과정 중 지표의 취약도 특성에 따라 정방향과 역방향 지표별로 정규과 과정을 진행하였음

❍ 정방향 지표는 지표 값이 높을수록 홍수 취약성이 높아지는 경우에 해당하며, 반대로 역방향 지표는 해당 지표 값이 높을수록 홍수 취약성이 낮아지는 경우에 해당함

- 통상적으로 정방향 지표의 경우 사회·경제적 노출에 따른 취약성이 큰 지표들이 주를 이루며, 역방향 지표의 경우 재난에 대한 대비·대응능력을 나타내는 지표들로 구성됨

$$정규화지수 = \frac{지표값 - 최소값}{최대값 - 최소값} \quad \text{식 (14)}$$

$$정규화지수 = 1 - \left(\frac{지표값 - 최소값}{최대값 - 최소값}\right) \quad \text{식 (15)}$$

[표 3-6] 홍수 취약성 세부 지표 및 측정 방향

취약성 부문	지표명	측정 의미	취약성 방향
인적·관리	인구밀도	인명 피해 및 혼란 규모	↑
	재해취약인구 밀도	사회적 대응 능력 부족	↑
	1인 가구 밀도	사회적 고립 취약성	↑
	기초생활수급자 밀도	경제적 복구 능력 취약성	↑
	1차산업 종사자 밀도	1차 산업 경제적 노출	↑
	공무원 밀도	행정적 대응 능력	↓
유형·구조	평균 공시지가	경제적 피해 규모	↑
	건축물 밀도	자산 밀집도 (피해 집중)	↑
	노후건축물 밀도	구조적·경제적 취약성	↑
	반지하 밀도	침수 및 인명 피해 위험	↑
	민방위 대피시설 밀도	사회적 대피 용이성	↓
입지·환경	하천점유율	환경적 노출도	↑
	평균해발고도	지형적 안전성	↓
	불투수면적율	물리적 유출 위험	↑
	저지대 비율	물 정체 및 침수 위험	↑

2. 엔트로피 가중치 기반 접근

❍ 홍수 취약성 평가는 다수의 복합 지표를 다루며, 이 지표들의 상대적 중요도를 결정하는 가중치 산정 과정이 평가의 객관성과 신뢰도를 좌우함

- AHP의 경우 전문가의 지식과 경험을 구조화하여 가중치를 도출하지만, 평가자의 주관적 편향이 개입될 수 있다는 근본적인 한계를 지님
- 세종시와 같이 도시(동)와 농촌(읍면) 기능이 혼재되어 인구밀도, 지가, 환경적 특성의 편차가 극심한 도농복합도시의 경우, 전문가 주관보다는 데이터 자체의 이질성을 객관적으로 반영하는 기법이 필수적이라 판단됨

❍ 이에 따라 본 연구는 평가 기준 데이터의 정보량에 기반하여 객관적 가중치를 산정하는 엔트로피 기법(Entropy Weight Method, EWM)을 T-L-H 통합 진단 모델의 정량기법을 제안하고자 함

- 엔트로피 기법은 앞서 설명한 바와 같이 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)에서 평가 기준(Criteria) 간의 상대적 중요도를 객관적으로 도출하는 데 유용성이 검증된 방법론임

□ 엔트로피의 개념적 배경

❍ 엔트로피 기법은 통신신호의 불확실성을 분석하는 정보이론(Information Theory)에 이론적 바탕을 두고 있음

- 일반적으로 엔트로피는 무질서도 또는 불확실성의 척도로 알려져 있으나, 정보이론에서는 특정 신호 또는 변수가 가지고 있는 정보의 양(정보용량)으로 정의됨

❍ 정보이론에 따르면 어떤 변수가 보여주는 데이터의 분산도(variability)가 클수록, 즉 데이터가 특정 값으로 집중되지 않고 넓게 퍼져 불확실성이 높을수록 해당 변수는 더 많은 정보를 내포한다고 해석함

- 따라서 엔트로피는 통계적 해석이 가능한 모든 무작위 변량에 대해 정량적으로 계산될 수 있으며, 정보의 객관적인 가치를 평가하는 기준으로 활용되고 있음

❍ 홍수 취약성 평가와 같은 다기준 의사결정 문제에서 엔트로피는 다음과 같은 논리로 가중치를 결정함

❍ (높은 엔트로피) 엔트로피 값이 클수록 곧 정보의 가치가 중요하다고 판단하며, 특정 평가 기준 항목의 엔트로피 값이 크다는 것은, 해당 항목의 데이터 값들 간 편차가 크고 불확실성이 높다는 것을 의미함

- 다시 말해, 해당 항목이 평가 대상들(예: 행정구역)을 구분하는 변별력이 높고 정보량이 풍부함을 시사함

❍ (객관적인 가중치 부여) 엔트로피 기법은 데이터의 분산 정도가 커서 정보량이 많은 항목일수록 높은 객관적 가중치를 부여함

- 따라서 변별력이 높은 기준이 최종 위험도 평가에 더 큰 영향을 미치는 구조에 속함

□ 한계 엔트로피의 정의

❍ 정보량을 정량화하기 위해 엔트로피 이론은 한계 엔트로피(Marginal Entropy), 결합 엔트로피(Joint Entropy), 조건부 엔트로피(Conditional Entropy) 등의 개념을 사용함

- 이 중 정보량 또는 불확실성을 측정하는 가장 기본적인 개념은 한계 엔트로피임

❍ Shannon(1948)이 제안한 이산 무작위 변량 X에 대한 한계 엔트로피 H(X)는 식 (14)과 같이 정의되며, 이산 변량의 발생 확률을 기반으로 정보량을 정량화함

- 식(1)에서 $P(x_n)$은 x_n의 발생확률이며, 한계엔트로피의 개념은 연속무작위변량에 대해서도 적용이 가능함

- 연속무작위변량 X가 확률밀도함수 $f(x)$를 따른다고 가정하면, X의 범위를 Δx의 간격으로 나눌 수 있으며, 이때 X의 한계 엔트로피는 식(15)와 같이 정의됨

- 두 무작위 변수 X, Y가 서로 독립인 경우 총 엔트로피는 각각의 엔트로피의 합 식 (16)과 같음

$$H(X) = \sum_{n=1}^{N} P(x_n) \ln P(x_n),\ n = 1,2,3,...,n \qquad \text{식 (14)}$$

$$H(X;\Delta x) \simeq -\int_{0}^{\infty} f(x) \ln f(x)\, dx \ - \ln \Delta x \qquad \text{식 (15)}$$

$$H(X,\ Y;\Delta x, \Delta y) = H(X;\Delta x) + H(Y;\Delta y) \qquad \text{식 (16)}$$

□ 엔트로피 기법의 다기준 의사결정 적용

❍ 엔트로피 기법은 AHP와 같이 설문조사 등을 통한 의사결정자의 주관적 판단에 의존하는 방법론과 달리, 오직 구성된 의사결정문제의 데이터에 의해서만 가중치를 계산할 수 있다는 장점을 지님

- 본 연구에서는 홍수 취약성 평가에 해당하는 각각의 항목별 가중치 산정에 있어, 정규분포 형태의 확률밀도 함수를 갖는 엔트로피 기법을 적용하였음

❍ 이 정규분포형 엔트로피 기법은 대안-속성 행렬로부터 가중치 벡터를 추정하는데, 이 행렬은 엔트로피 관점에서 기준들 간의 가중치 추정에 필요한 정보를 담고 있음

- 즉, 대안들 간의 차이가 큰 기준은 중요한 기준이고, 대안들 간의 차이가 적은 기준은 덜 중요한 기준으로 간주됨

❍ 의사결정 문제는 식 (17)과 같이 D라는 행렬로 나타낼 수 있으며, 모든 속성에 대해서 정규화 한 결과를 p_{ij}라고 하면, p_{ij}는 식 (18)과 같이 표시됨

- 또한 각 속성의 엔트로피를 E_{ij}라고 하면, 엔트로피는 식 (19)로 산정할 수 있음

$$D=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{식 (17)}$$

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \ (i=1,2,...,m; j=1,2,...,n) \quad \text{식 (18)}$$

$$E_j=-k\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\log p_{ij} \ (Here, k=\frac{1}{\log m}; j=1,2,...,n) \quad \text{식 (19)}$$

❍ 속성의 가중치를 구하기 위하여 다양성정도 d_j를 사용하는데, 다양성 정도는 $d_j=1-E_j$와 같이 계산되며, 이 값들은 각 속성에 대하여 정규화한 것이 식 (20)과 같이 그 속성의 가중치(w_j)가 됨

$$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} (j=1,2,...,n) \quad \text{식 (20)}$$

제2절 연구 대상 지역 개요

1. 지역 일반 현황

□ 인구 및 가구 특성

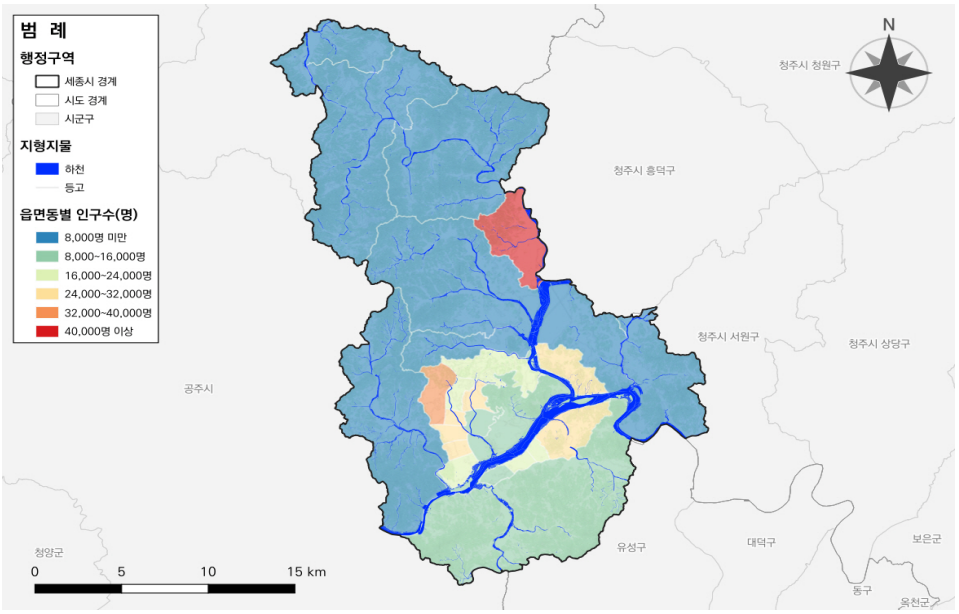
❍ 세종시 인구 구조는 행복도시(신도심)와 읍·면(구도심 및 농촌) 지역 간에 확연한 대비를 보이며, 각각 상이한 재해 위험 특성을 내포하고 있음

❍ 신도심(행복도시): 신도심의 중심 동(洞) 지역은 인구 40,000명 이상 및 가구 수 20,000가구 이상으로 인구가 고밀도로 집중되어 있음

- 이는 재난 발생 시 극단적인 '고밀도 노출' 위험을 내포하며, 대규모 인원의 동시다발적 피해 및 혼잡 발생 가능성이 높음

❍ 구도심 및 농촌 지역(읍·면): 이 지역은 노후 주택 및 저층 건물의 비율이 높고, 상대적으로 재해취약인구가 많이 거주하고 있음

- 세종시는 지역별 특성에 맞춘 이원화된 재난 대응전략 수립이 필요함

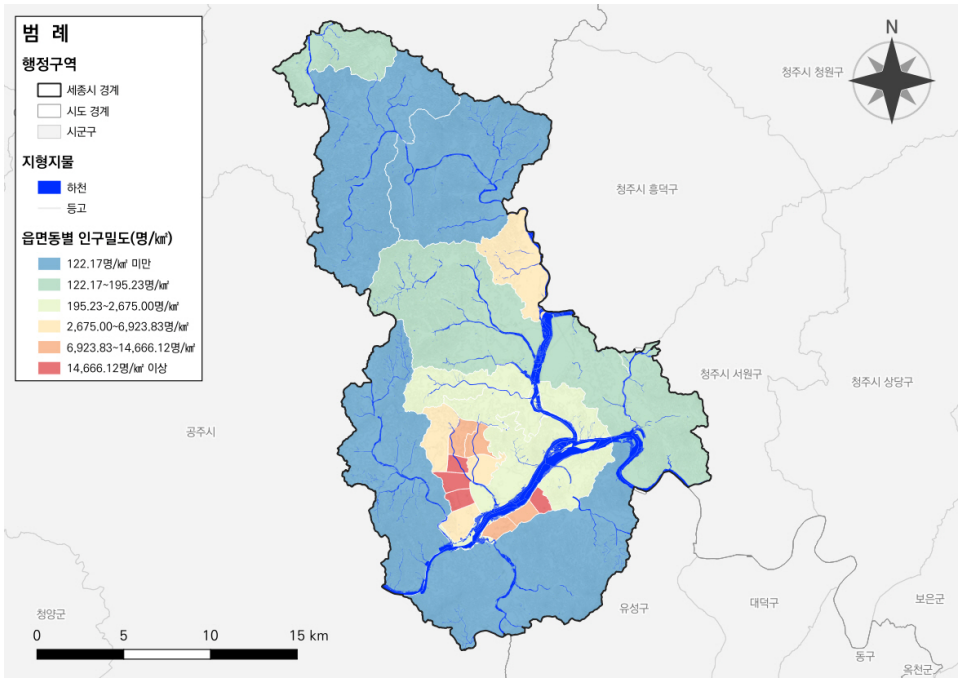


[그림 3-1] 읍면동별 인구수 현황

자료: 세종시(2024), 〈세종시 주민등록인구통계〉를 바탕으로 작성

❍ 인구밀도를 살펴보면 읍면동별 편차가 매우 크게 나타나고 있으며, 특히 신도심 지역의 높은 밀집도는 재난 대응 시 심각한 병목 현상을 유발할 가능성이 높음

- 인구밀도가 가장 높은 지역은 종촌동으로 제곱미터(㎡)당 24,296명으로 확인되었으며, 새롬동(17,530명/㎡)과 소담동(17,587명/㎡)과 함께 세종시 내에서 인명 피해 노출 가능성이 가장 높은 도시 밀집 지역으로 나타났음
- 이러한 고밀도 지역은 대부분 고층 아파트 단지로 구성되어 있어 침수 발생 시 수직 대피가 주를 이룸
- 반면, 전동면(53명/㎡)이나 전의면(81명/㎡) 등 농촌 지역은 인구 밀집으로 인한 대피 장애 위험은 극히 낮다고 판단됨

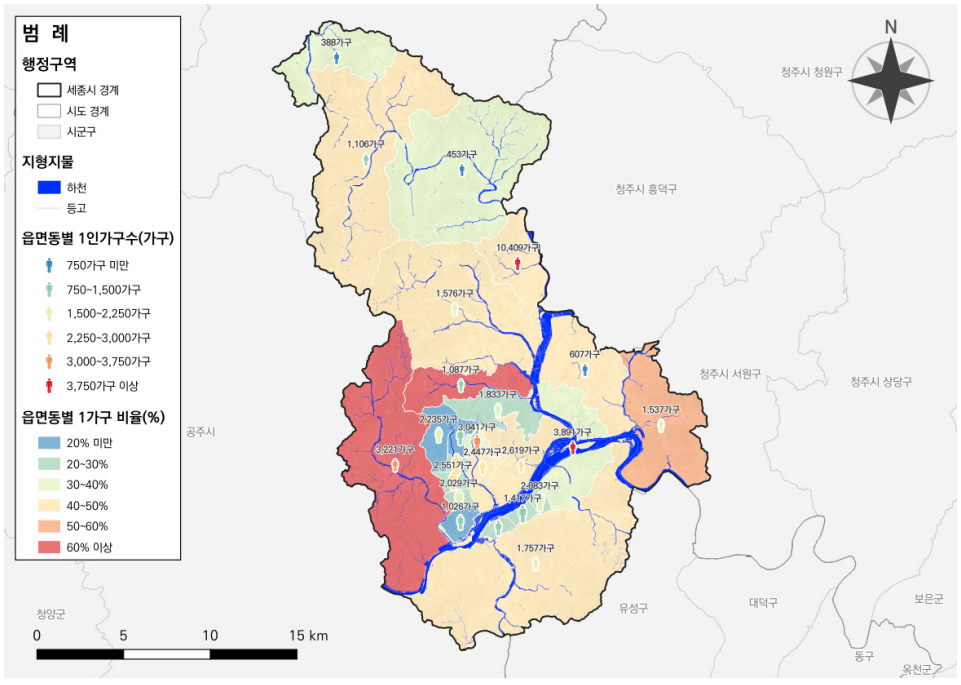


[그림 3-2] 읍면동별 인구밀도 현황

자료: 세종시(2024), 〈세종시 주민등록인구통계〉를 바탕으로 작성

❍ 1인 가구의 경우 재난 발생 시 자력 대피나 구조 요청에 어려움을 겪을 가능성이 큰 사회적 취약 계층으로 볼 수 있으며, 이들 중 고령자·장애인·독거 세대 등이 다수 포함되어 인명 피해 취약성을 가중시키는 지표에 해당함

- 조치원읍(10,409명)에 압도적으로 많아 세종시 전체 1인 가구의 약 20%를 차지하는 것으로 나타났으며, 동 지역에서는 반곡동(3,891명), 도담동(3,041명), 나성동(2,619명) 등 신도심에도 상당수 분포함
- 조치원읍은 1인 가구가 집중되어 있어, 홍수 발생 시 인명 피해의 집중 발생 및 초기 대응 취약성이 가장 높은 지역으로 평가됨
- 동 지역의 1인 가구는 아파트와 같은 공동주택에 거주하더라도 초기 대피에 어려움을 겪을 가능성이 있어 취약성을 지니고 있다고 판단됨



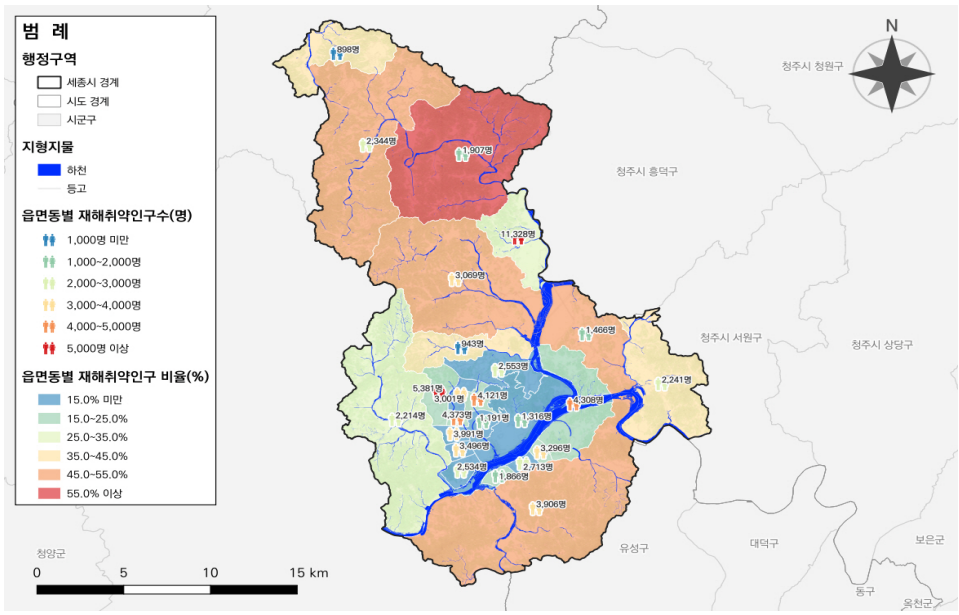
[그림 3-3] 읍면동별 1인 가구 수 현황

자료: KOSIS 국가통계포털(2024), 〈가구원수별 가구〉를 바탕으로 작성

□ 사회·경제적 취약 계층

❍ 재해 취약 인구는 5세 미만 아동, 65세 이상 고령자, 등록 장애인을 포함하며, 이들은 자가 방재 능력과 이동성이 낮아재난 발생 시 심각한 인명 피해 위험에 노출되는 대상임

- 검토 결과, 세종시의 재해 취약 인구는 신도심 대비 구도심인 읍·면 지역에 집중되어 있음을 확인하였음
- 조치원읍은 총 11,328명의 재해 취약 인구를 보유하여 세종시 읍면동 중 가장 많은 인구가 거주하는 것으로 확인, 이는 신도심에서 취약 인구가 가장 많은 고운동(5,381명) 대비 두 배가 넘는 수준임
- 특히, 조치원읍을 포함한 읍·면 지역은 고령 인구(65세 이상)가 취약 인구의 주류를 이루고 있음
- 읍·면 지역과 달리 신도심의 경우 유아 인구(5세 미만)의 비율이 상대적으로 높으며, 반곡동(2,275명)이 세종시 내에서 유아 인구가 가장 많으며, 고운동(1,604명), 해밀동(1,458명)순으로 나타났음

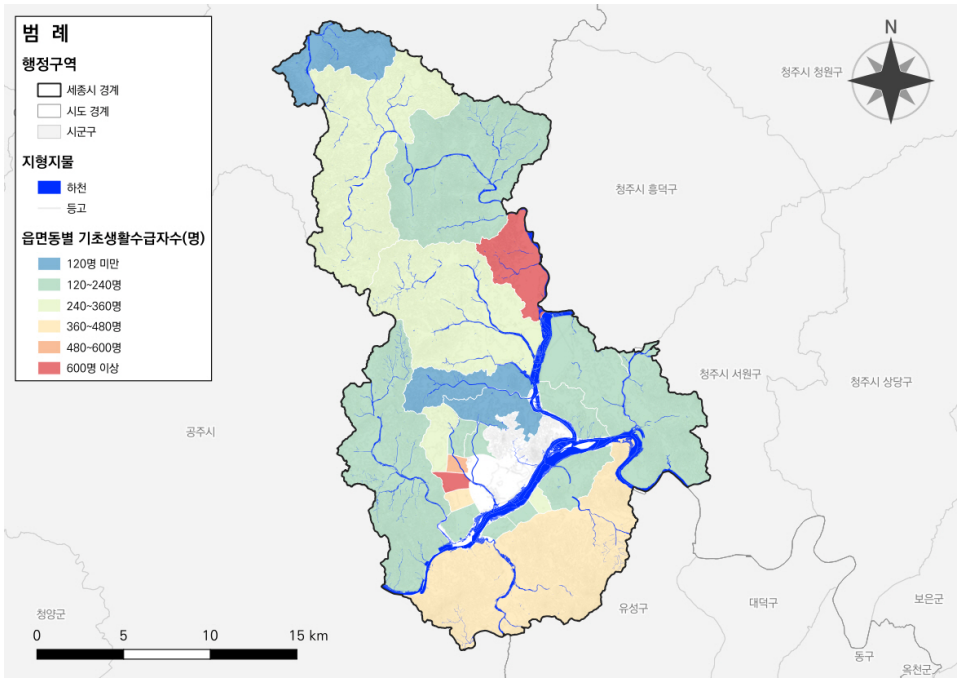


[그림 3-4] 읍면동별 재해 취약 인구수 현황

자료: 세종시(2024), 〈세종시 주민등록인구통계〉를 바탕으로 작성

❍ 기초생활수급자는 홍수 피해 발생 시 재산 및 생활 복구 능력이 상대적으로 취약한 계층에 해당함

- 이들은 재난으로 인해 장기적인 사회·경제적 피해를 입을 가능성이 높으며, 이는 재난으로 인한 빈곤층으로 이어질 우려가 있는 대상임
- 조치원읍(1,693명)에 가장 많이 거주하는 것으로 확인되었으며, 다정동(617명), 종촌동(526명) 등 일부 동 지역에도 많이 분포하고 있음
- 이외에도 금남면(367명), 전의면(310명) 등 읍·면 지역 중심으로 많이 분포하고 있는 것으로 확인됨
- 기초생활수급자가 많은 지역은 피해 복구 지원의 행정적 수요가 높고, 재난으로 인한 빈곤층 심화 위험이 큰 편임

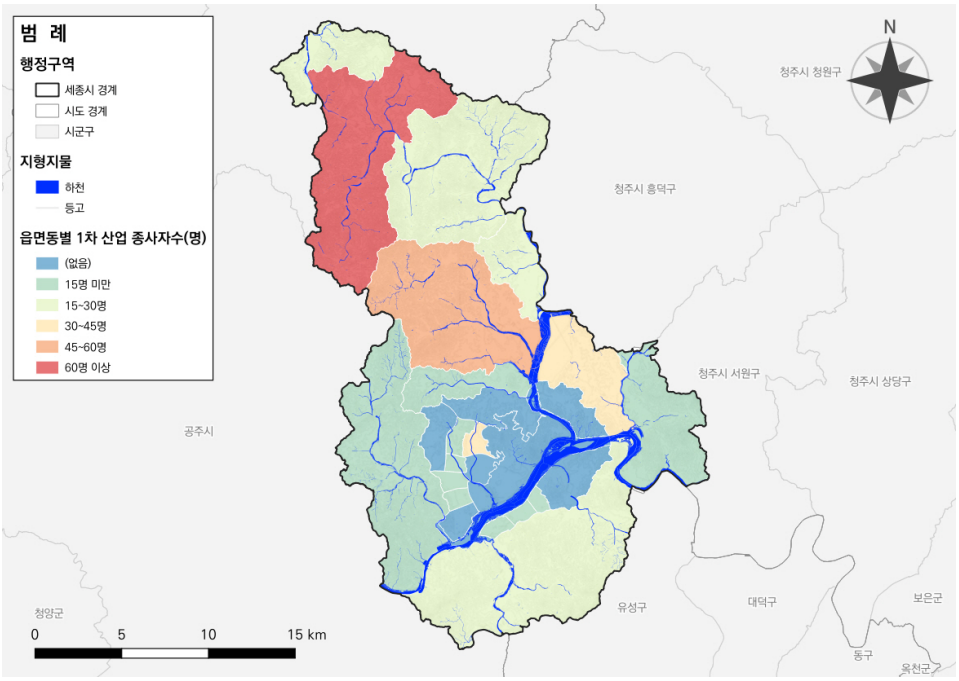


[그림 3-5] 읍면동별 기초생활수급자 수 현황

자료: 세종시(2022). 〈세종시 행정동별 기초생활수급자 인원수〉를 바탕으로 작성

❍ 1차 산업 종사자는 농·어업 등 하천 및 자연 환경에 직접 의존하는 산업에 종사하는 인구로, 홍수 발생 시 생계 기반에 직접적인 타격을 입는 대상에 속함

- 전의면(69명), 연서면(58명)등 면 단위 지역에 주로 분포하며, 도담동(38명)등 일부 동 지역에서도 확인되었음
- 1차 산업 종사자가 많은 면 단위 지역은 농경지 침수 등으로 인해 생계 기반의 피해가 커져 지역 경제의 장기적인 취약성이 높아질 우려가 있어 경제적 취약성을 판단하는 데도 활용하는 편임

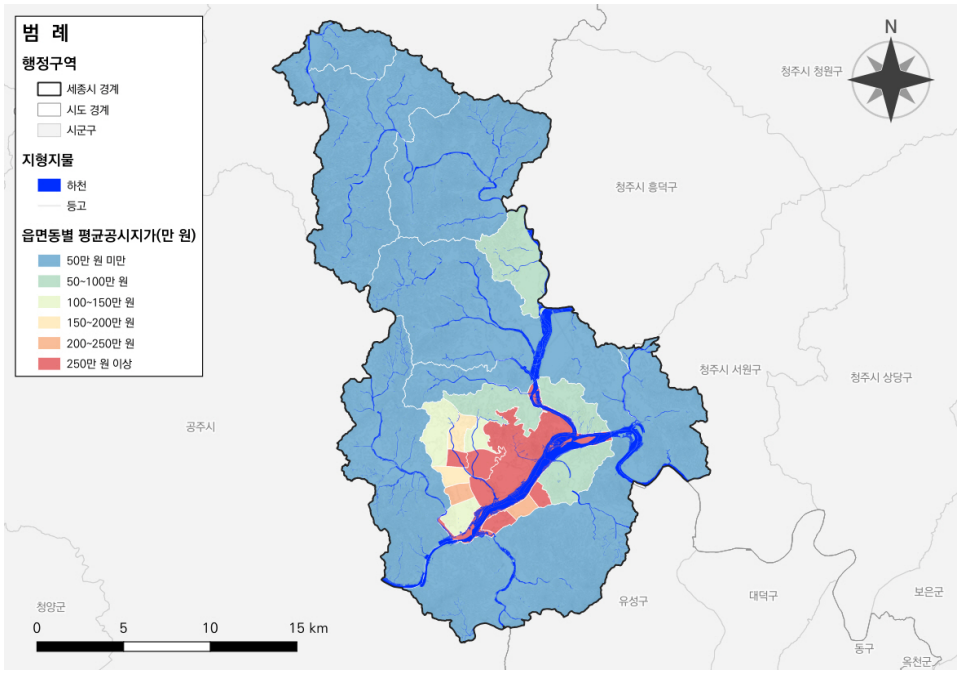


[그림 3-6] 읍면동별 1차 산업 종사자 수 현황

자료: 세종시(2022), 〈세종시 사업체조사 보고서〉를 바탕으로 작성

❍ 세종시의 경제적 자산 가치는 신도심 내 소수 동(洞) 지역에 극도로 집중되어 있으며, 이는 재해 발생 시 단위 면적당 최고 수준의 경제적 손실을 유발할 수 있음을 가리킴

- 평균 공시지가가 가장 높은 지역은 소담동 (2,993,500원/㎡)이며, 어진동(2,940,000원/㎡), 나성동(2,786,641원/㎡) 순으로 나타났음
- 이들 지역은 행정 기능 및 상업 시설이 밀집된 핵심 도시 인프라 지역이므로, 침수 피해 발생 시 단순 재산 손실을 넘어 광역적인 도시 기능 마비를 초래할 위험이 높음
- 반면, 전동면(74,976원/㎡)과 소정면(117,026원/㎡)은 경제적 노출도가 가장 낮게 나타났음
- 공시지가가 높은 지역은 재산 피해 규모는 클 수 있으나 방재 투자 수준 역시 높을 수 있으며, 공시지가가 낮은 지역은 노후 주거 및 임대 비중이 높아주민의 경제적 취약도가 높게 나타나는 편임



[그림 3-7] 읍면동별 평균공시지가 현황

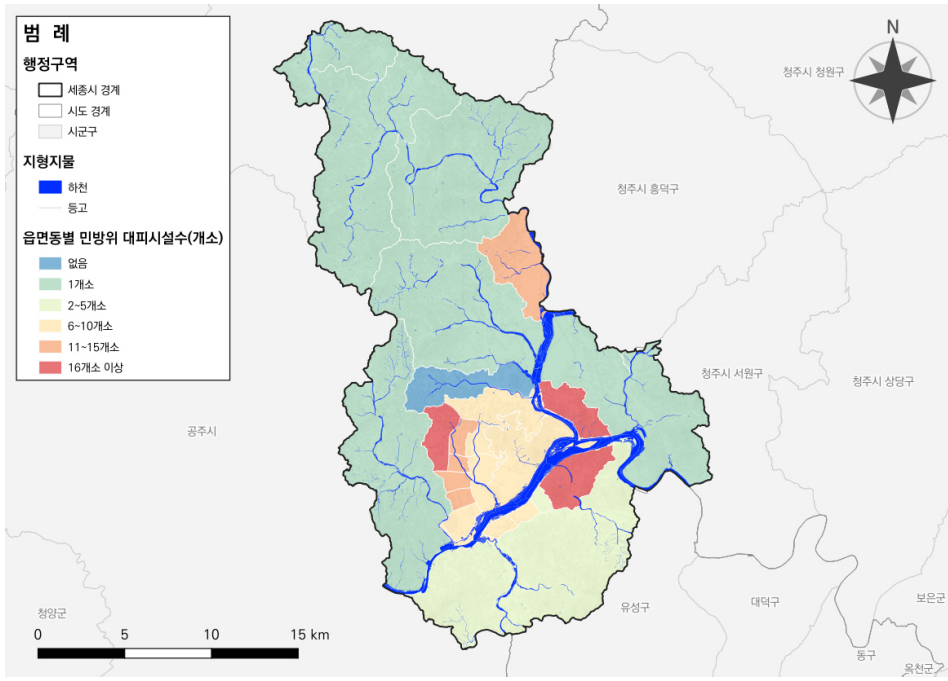
자료: 국토교통부(2023), 〈표준공시지가〉를 바탕으로 작성

□ 재난 대응 자원 및 건축물 특성

❍ 타 지표를 통해 물리적 및 사회적 취약성이 가장 높다고 판단되는 조치원읍의 경우 취약성 수준 대비 방재 인프라가 매우 부족한 것으로 나타났음

❍ 조치원읍의 민방위 대피시설 수는 11개에 불과하며, 이는 신도심 지역인 고운동(21개)이나 아름동(12개)과 비교했을 때, 높은 재난 취약성 대비 방재시설의 양적 부족함을 명확히 보여주고 있음

- 따라서 구도심 지역은 단순한 취약 시설 정비를 넘어, 재난 발생 시 즉시 활용 가능한 임시 대피 공간 확보와 기존 대피 시설의 접근성 강화가 시급한 과제로 판단됨

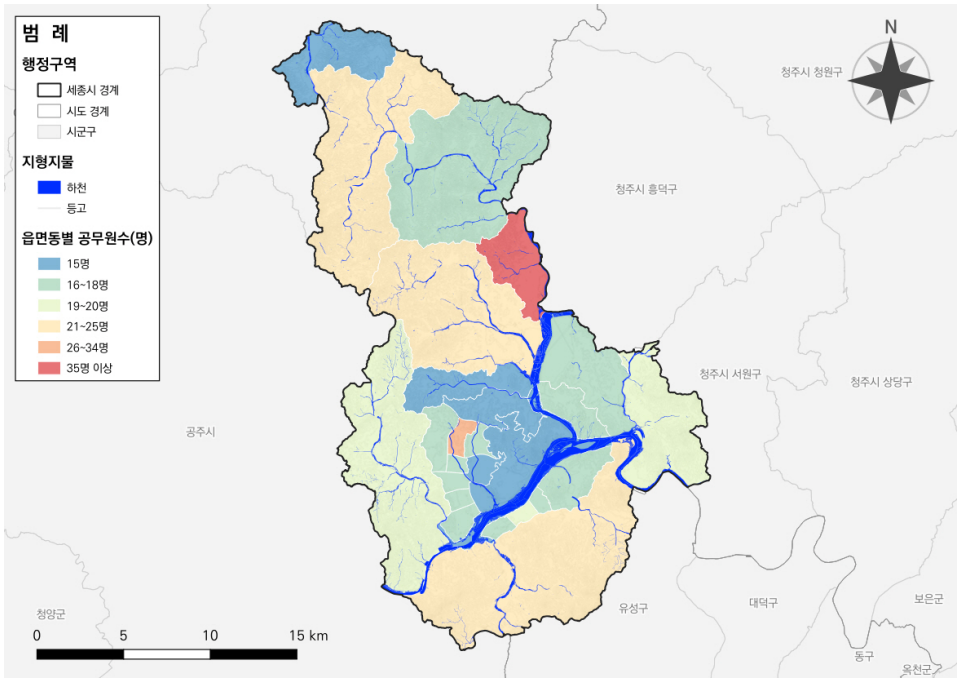


[그림 3-8] 읍면동별 민방위 대피시설 수 현황

자료: 행정안전부(2025), 〈전국민방위대피시설표준데이터〉를 바탕으로 작성

❍ 읍면동별 공무원 수는 홍수 등 재난 발생 시 현장에서 초기 대응, 이재민 구호, 행정 지원을 수행하는 지역 행정력의 밀도를 나타내는 지표에 해당하며, 공무원 수가 많다는 것은 초기 대응 행정력이 집중되어 있음을 가리킴

- 조치원읍(68명)이 압도적으로 많으며, 아름동(34명)등 일부 동 지역을 제외하고는 대부분의 동·면 지역은 15~22명 수준으로 비슷한 분포를 보이고 있음
- 조치원읍은 취약 인구 및 건축물 수가 가장 많기 때문에 이에 상응하는 대응 인력이 배치된 것으로 판단됨
- 다만, 면적이 넓고 취약 인구가 많은 다른 읍·면 지역은 공무원 수가 상대적으로 적어 단위 면적당/취약 인구당 대응력이 부족할 가능성이 있음



[그림 3-9] 읍면동별 공무원수 현황

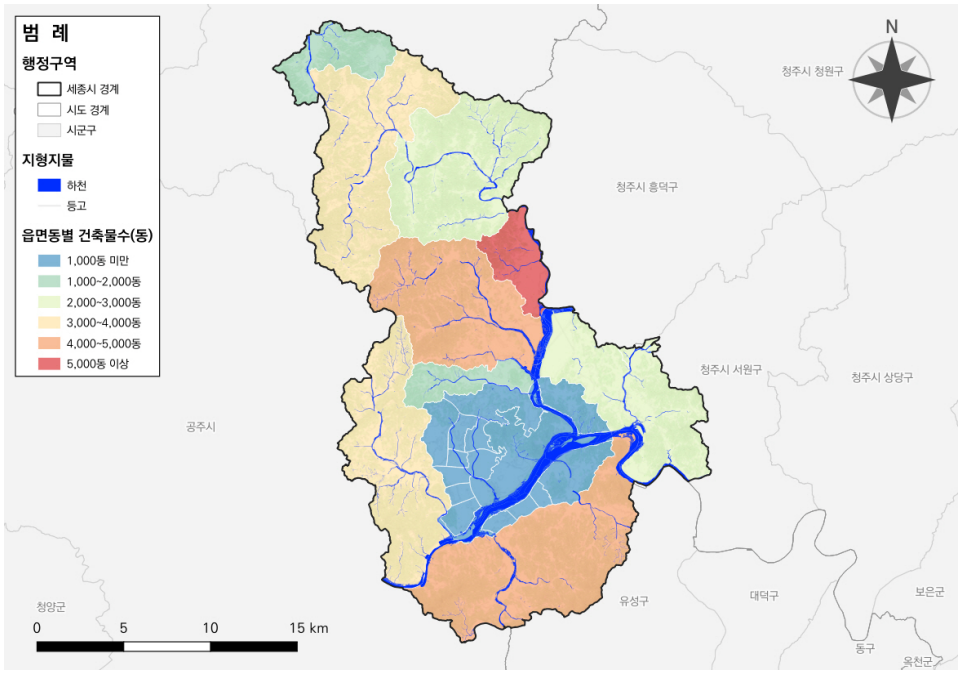
자료: 세종시(2025), 〈세종시 정원배정에 관한 훈령〉를 바탕으로 작성

❍ 건축물 수는 읍·면 지역에 집중되어 있는 것으로 나타났으며, 특히 조치원읍(5,594개)이 가장 많고 금남면(4,341개), 연서면(4,064개) 순으로 높은 수치를 보였음

- 반면, 신도시인 동 지역은 고층 아파트 위주의 개발 특성상 건축물 수 자체는 상대적으로 적게 나타났음

❍ 본 연구에서 파악한 건축물 자체의 수량 외에도, 침수 피해에 취약한 구조적·기능적 특성을 추가적으로 검토할 필요가 있다고 판단됨

- 특히, 읍·면 지역에 다수 존재하는 노후 주택이나 단독주택 등 저층 건물의 비율이 높을수록 홍수 발생 시 실질적인 침수 피해액은 크게 증가할 것으로 판단됨
- 저층 건물은 침수심이 낮더라도 직접적인 피해를 입기 쉬워 피해 밀도를 높이는 주요 요인이므로, 향후 연구에서는 이러한 취약 건축물의 특성 및 분포를 고려한 정밀한 분석이 요구됨

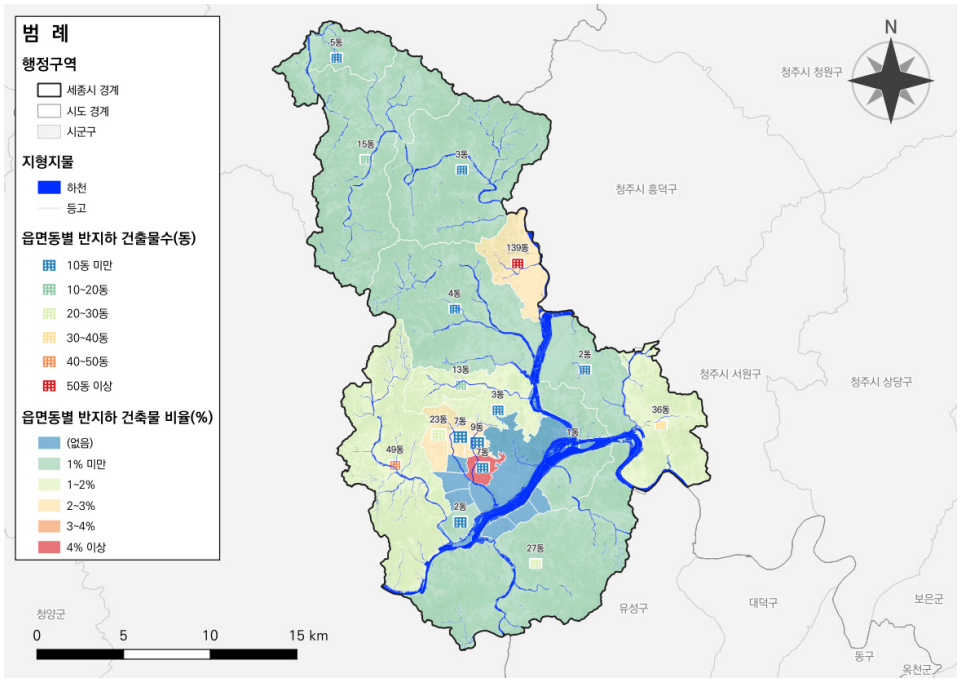


[그림 3-10] 읍면동별 건축물 수 현황

자료: 국토교통부(2024). 〈건축물생애이력관리시스템〉을 바탕으로 작성

❍ 반지하 주택의 경우에도 조치원읍에 가장 많은 수가 집중된 것으로 확인되었으며, 세종시 전체 반지하 주택(345개) 중 약 40%에 해당하는 139개가 조치원읍에 위치하고 있음

- 반지하 주택은 홍수 발생 시 급속한 침수로 인해 인명피해 위험이 가장 높은 시설로 알려져 있음
- 따라서, 반지하 주택이 밀집된 조치원읍의 특성상 이미 높은 수준의 재해 취약 인구와 위험 요소가 중첩될 경우 인명피해 위험도는 기하급수적으로 증가할 우려가 있음
- 이러한 특성을 고려할 때, 반지하 주택이 집중된 조치원읍은 풍수해 예보 단계에서부터 선제적인 강제 대피 조치를 최우선으로 고려하고 시행해야 함

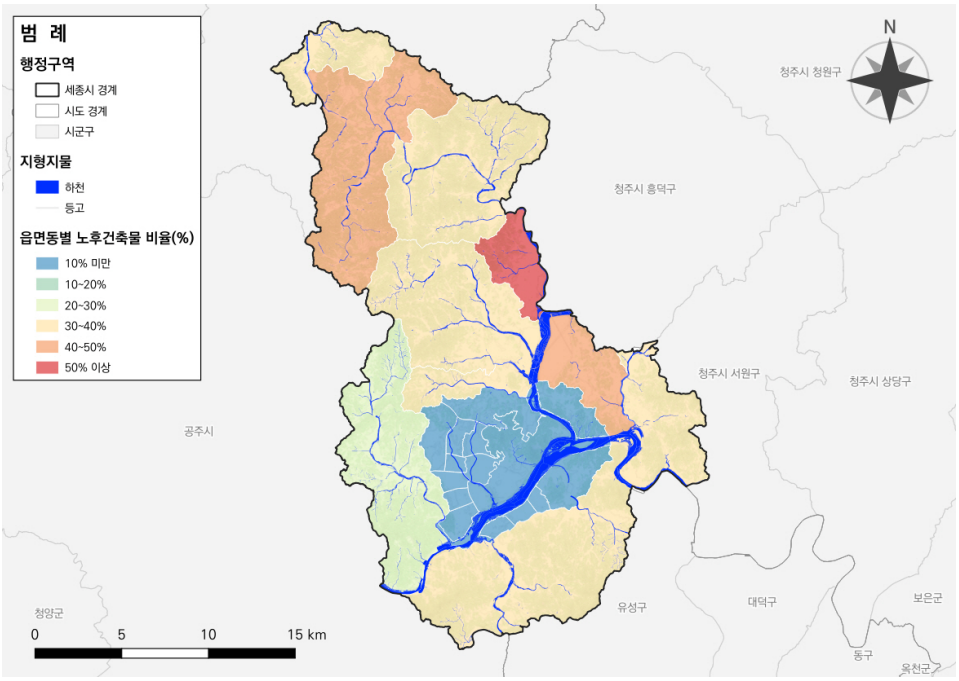


[그림 3-11] 읍면동별 반지하 주택 수 현황

자료: 국토교통부(2025), 〈건축물대장〉을 바탕으로 작성

❍ 노후 건축물 역시 구도심 지역, 특히 조치원읍에 절대적으로 집중되어 있는 것으로 확인되었음

- 조치원읍은 세종시 전체 노후 건축물(12,564개) 중 약 23%에 해당하는 2,911개가 노후 건축물에 속하는 것으로 나타났음
- 이는 앞서 언급된 반지하 주택, 재해 취약 인구 집중과 더불어 조치원읍의 물리적 재해 취약성을 가중시키는 주요 요인에 해당함



[그림 3-12] 읍면동별 노후건축물 현황

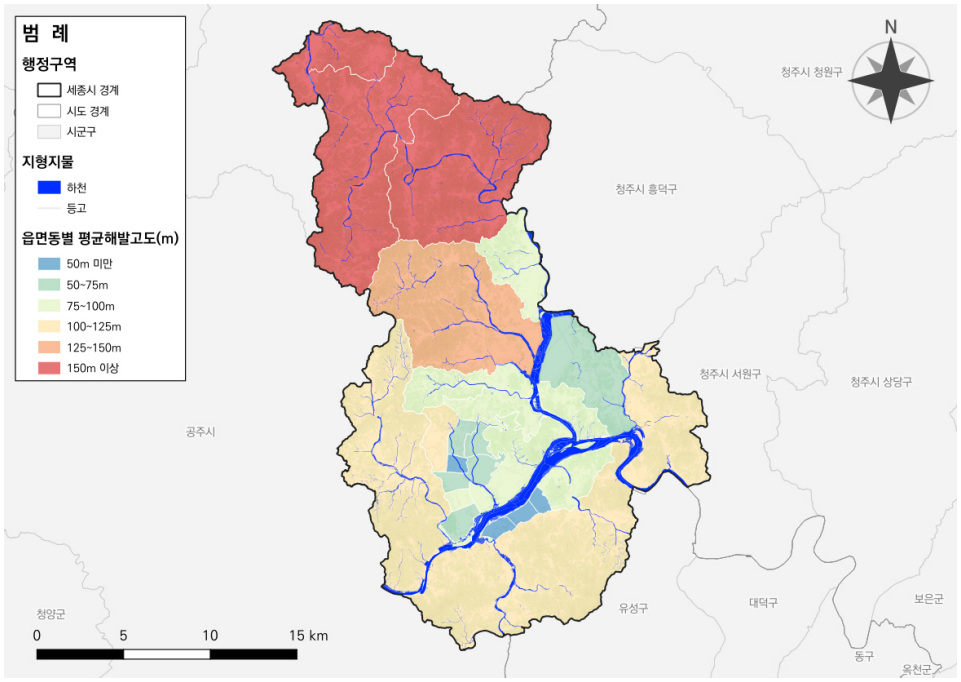
자료: 국토교통부(2024). 〈건축물생애이력관리시스템〉을 바탕으로 작성

2. 지리적 현황

□ 지형적 요인

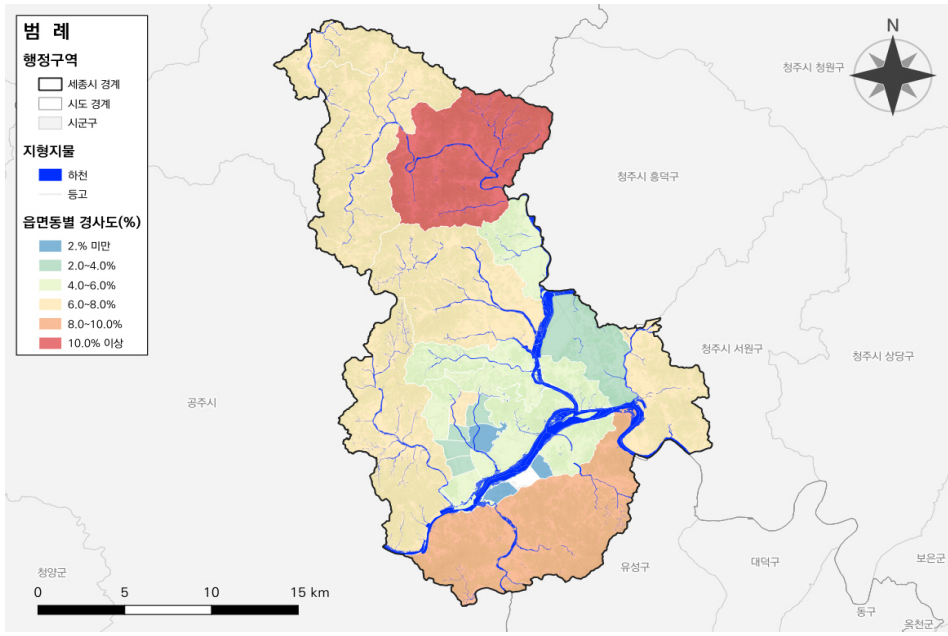
❍ 세종시 신도심 남부 지역은 해발고도가 극도로 낮고 평탄한 지형적 특성으로 인해 자연적인 배수가 다소 취약할 것으로 판단됨

- 해당 지역은 물이 쉽게 유입되지만, 동시에 정체되기 쉬운 조건을 지니고 있으며, 특히 보람동(평균 해발고도 27.5m)과 대평동(25.7m)은 세종시 내에서 평균 해발고도가 가장 낮은 편에 속함
- 평균 경사 역시 보람동 0.80°, 대평동 1.15°, 소담동 1.42° 순으로 낮게 나타나, 집중호우 발생 시 유출량의 정체가 발생할 우려가 큼
- 보람동은 경사도 7° 이하 면적 비율이 약 35%로 세종시 내에서 가장 높게 나타나, 지형적인 침수 취약성이 특히 두드러짐



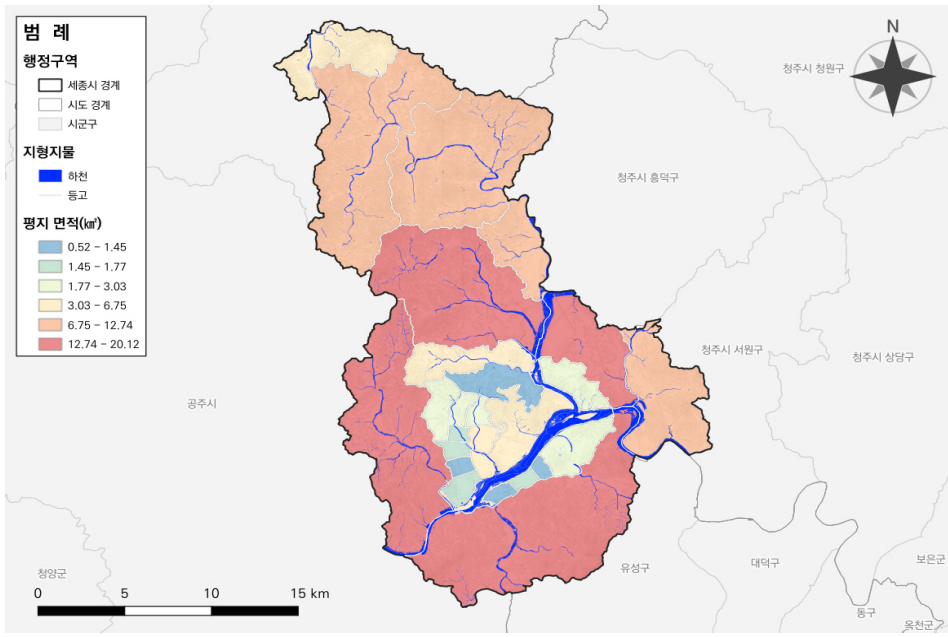
[그림 3-13] 읍면동별 평균해발고도 현황

자료: 국토교통부(2024). 〈브이월드(등고선)〉을 바탕으로 작성



[그림 3-14] 읍면동별 평균 경사도 현황

자료: 국립농업과학원(2024), 〈토양경사도〉를 바탕으로 작성



[그림 3-15] 읍면동별 평지 면적 현황

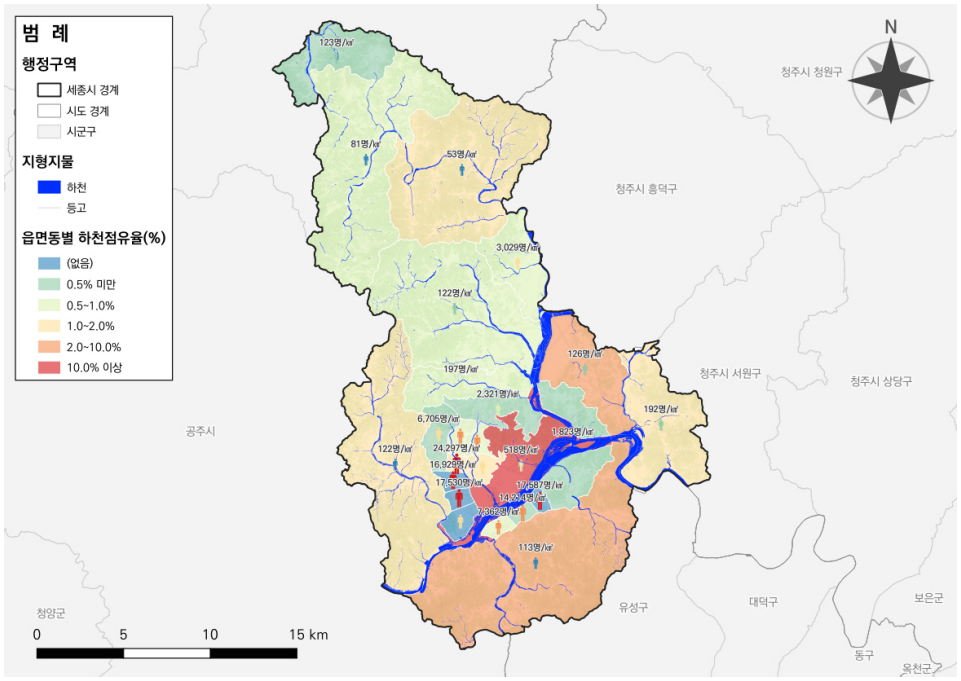
자료: 국립농업과학원(2024), 〈토양경사도〉를 바탕으로 작성

□ 물순환 및 하천 특성

❍ 하천 점유율은 해당 행정구역 면적 대비 하천이 차지하는 비율로, 하천 범람 위험에 대한 직접적인 노출 정도를 나타냄

❍ 나성동은 하천 점유율이 18.18%로 세종시 전체에서 가장 높게 나타났으며, 이는 나성동이 금강 홍수위 상승에 따른 구조적 범람 위험에 가장 민감한 지역이라 할 수 있음

- 나성동은 동시에 평균 공시지가가 세종시에서 가장 높은 수준이므로 하천 범람 위험에 대한 철저한 관리가 필요함
- 연동면(2.83%) 및 금남면(2.30%) 역시 하천 점유율이 타 지역 대비 높은 편으로, 지방·소하천 전반에 대한 하천 관리 및 제방 안전성 확보에 대한 점검이 필요함

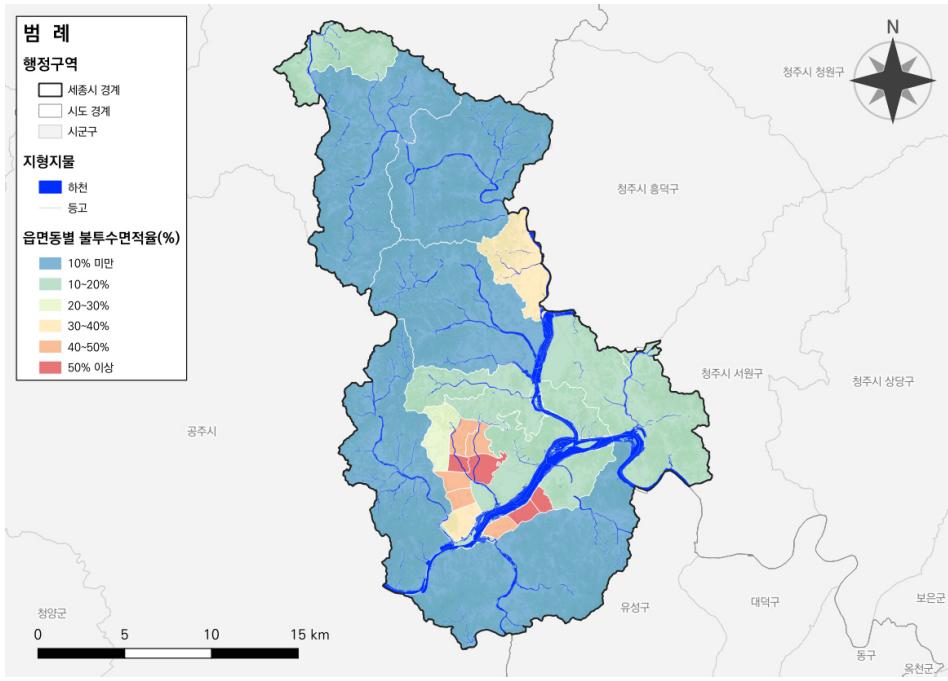


[그림 3-16] 읍면동별 하천점유율 현황

자료: 국토교통부(2024), 〈브이월드(등고선)〉을 바탕으로 작성

❍ 불투수면적율은 도시화 수준과 밀접한 관련이 있으며, 빗물의 침투를 막아 도시 침수를 급증시키는 주요 원인에 해당함

- 불투수면적율의 경우 보람동(63.31%), 어진동(58.20%), 종촌동(57.69%), 소담동(56.69%) 순으로 높게 나타났으며, 절반 이상의 면적이 포장되어 있다는 점은 집중호우 발생시 침수 위허성이 높다고 할 수 있음
- 보람동은 가장 낮은 해발고도와 경사도 그리고 가장 높은 불투수면적율이라는 세 가지 지형적 조건이 중첩된 행정구역으로, 이 지역에 대한 재해 저감 노력은 대규모 빗물 저류 및 침투 시설(LID) 확충에 초점을 맞춰야 함



[그림 3-17] 읍면동별 불투수면적율 현황

자료: 환경부(2021). 〈지역별 세분류 토지피복 면적 현황〉을 바탕으로 작성

□ 개별 지표 기반 홍수 취약성 중간 점검

❍ 세종시 홍수 취약성 분석에 앞서 개별 지표를 살펴본 결과, 구도심(읍·면)과 신도심(동) 간에 이질적인 취약성을 지니고 있다고 판단되며, 효과적인 예방대책 수립 및 관리를 위해 서로 다른 위험 유형에 대한 맞춤형 전략 수립이 필요하다고 판단됨

❍ 구도심(조치원읍 중심): 인명 피해 중심의 복합 취약성

- 구도심의 핵심인 조치원읍으로 다수의 지표 상으로도 취약도가 중첩되고 있음
- 세종시 내에서 가장 많은 재해 취약 인구를 보유하고 있으며, 가장 많은 노후 건축물(2,911개)과 반지하 주택(139개)이 집중되어 있음
- 이들 지역의 경우 자가 방재 능력이 낮은 취약 계층이 물리적 안정성이 낮은 시설에 거주하는 상황이 중첩되고 있음

❍ 신도심(보람동·어진동·종촌동 중심): 도시 기능 마비 및 경제적 손실

- 신도심은 도시 기능 마비 및 경제적 손실 중심의 위험 지역으로 정의되며, 고가치 자산이 최악의 수문학적 조건에 노출되어 있음
- 보람동, 대평동 등은 낮은 해발고도와 경사도, 높은 불투수면적율과 같은 수문학적 조건이 중첩되어 침수 위험에 민감한 지역에 해당함
- 어진동·소담동 등 핵심 동 지역에는 높은 수준의 공시지가와 자산이 밀집되어 있으며, 이러한 경제적 노출 역시 침수 위험에 민감하다고 볼 수 있음

홍수 취약성 평가 결과 분석

4장

제1절 | 읍면동 단위 홍수 취약성 지수 산정
제2절 | 취약 요인 진단

SEJONG RESEARCH INSTITUTE

4장 | 홍수 취약성 평가 결과 분석

제1절 읍면동 단위 홍수 취약성 지수 산정

1. 엔트로피 가중치 산정 결과 및 지수 산출식 정의

❍ 본 장에서는 H-T-L 프레임워크와 선정된 15개 세부 지표를 기반으로, 세종시 읍면동 단위의 홍수 취약성 지수(Flood Vulnerability Index, FVI)를 정량적으로 산출하고 그 공간적 분포를 분석하였음

- 도농복합도시라는 세종시의 고유한 이질성을 객관적으로 반영하여 평가의 신뢰도를 확보하기 위해 엔트로피 가중치 기법을 적용하였음

□ 지표 정규화 결과 고찰

❍ 정규화된 데이터를 종합적으로 분석한 결과, 세종시 홍수 취약성에 대한 가장 큰 우려점은 '취약성의 공간적 양극화'라고 판단됨

- 지표들을 살펴보면 읍면동 간의 재해 위험과 대응 능력이 균일하게 분포되어 있지 않는 것을 볼 수 있음
- 다만, '고밀도', '구조적 노후화' 등과 같이 뚜렷하게 구분되는 지역 유형으로 군집화된 결과를 보이고 있음
- 이러한 경과는 결국 하나의 도시라 하더라도 획일적인 재난관리 정책으로는 효과를 거두기 어려움
- 따라서 각 지역의 고유한 취약성 특성을 이해하는 과정을 통한 맞춤형 전략이 필요하다고 판단됨

❍ 신도시 지역은 '고밀·고압축' 형태의 사회적 취약성이 높다고 판단됨

- 종촌동, 새롬동, 소담동, 보람동 등의 경우 공통적으로 인구밀도, 재해취약인구 밀도, 1인 가구 밀도가 최고 수준에 달하며, 이는 재난 발생 시 관리해야 할 인구 자체가 많고, 그 안에 사회적 약자가 집중되어 있다고 볼 수 있음
- 동시에 불투수면적율 또한 높은 수준을 보이고 있으며, 집중호우 시 도시 내수침수에 매우 민감한 환경을 지니고 있다고 볼 수 있음
- 반면, 노후건축물이나 반지하 밀도는 거의 0에 가까워 구조적 위험은 낮고, 공무원 밀도나 민방위 대피시설과 같은 적응능력 자원은 비교적 양호하게 분포하는 것을 볼 수 있음

❍ 구도심 지역은 '물리적 구조물의 노후화' 취약성이 높다고 판단됨

- 조치원읍은 앞서 설명했던 신도심과는 반대의 취약성 특성을 보이고 있으며, 노후건축물 밀도와 반지하 밀도에서 압도적인 수치를 보이고 있음
- 물리적 구조물의 취약성이 높다는 것은 홍수뿐만 아니라 지진을 포함한 다른 유형의 자연재난에도 취약성을 지니고있다고 볼 수 있음
- 반면, 인구밀도는 신도시보다 낮고, 적응능력 지표인 민방위 대피시설 밀도는 상대적으로 낮아 위험 대비 방호 인프라가 부족한 편임

❍ 농촌 및 외곽 지역은 '행정·인프라 공백' 해소를 통한 기본적인 안전망 구축의 수준의 제고가 필요하다고 판단됨

- 연기면, 금남면, 전동면 등 농촌 및 외곽 지역은 대부분의 노출 및 민감도 지표에서 매우 낮은 값을 보이고 있음
- 인구밀도가 낮고 개발률이 높지 않다는 것은 표면적으로는 안전해 보일 수 있음
- 그러나 읍면동 공무원 밀도와 민방위 대피시설 등의 상대적인 밀도가 매우 낮은 수준이거나 '0'에 가깝게 나타나고 있으며, 이는 재난 발생 시 대응을 책임질 행정력과 대피할 기반시설이 절대적으로 부족한 '안전 공백' 상태로 인식하고 해당 지역의 주민들에 대한 최소한의 안전권을 보장하고 있는지에 대한 검토가 필요해 보임

[표 4-1] 인적·관리 부문 지표 정규화 결과

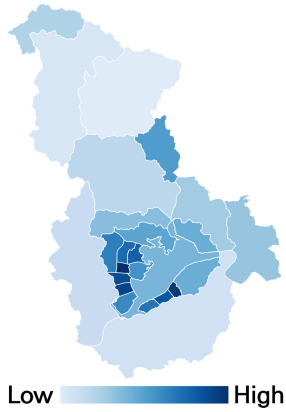
유역	노출	민감도				적응능력
	인구밀도	재해취약 인구 밀도	1인 가구 밀도	기초 생활수급자 밀도	1차산업 종사자 밀도	읍면동 공무원 밀도
조치원읍	0.123	0.209	0.316	0.268	0.074	0.314
연기면	0.006	0.012	0.035	0.017	0.018	0.063
연동면	0.003	0.009	0.009	0.013	0.080	0.033
부강면	0.006	0.013	0.020	0.018	0.010	0.026
금남면	0.002	0.005	0.007	0.011	0.018	0.000
장군면	0.003	0.002	0.022	0.009	0.008	0.003
연서면	0.003	0.006	0.009	0.011	0.057	0.005
전의면	0.001	0.001	0.004	0.011	0.059	0.002
전동면	0.000	0.000	0.000	0.006	0.015	0.001
소정면	0.003	0.006	0.007	0.012	0.080	0.040
한솔동	0.266	0.224	0.147	0.131	0.000	0.403
새롬동	0.721	0.607	0.567	0.550	0.250	0.746
나성동	0.019	0.005	0.040	0.000	0.000	0.020
도담동	0.442	0.526	0.627	0.185	1.000	0.577
어진동	0.163	0.109	0.384	0.000	0.000	0.360
해밀동	0.094	0.071	0.088	0.008	0.000	0.099
아름동	0.426	0.343	0.227	0.162	0.024	1.000
종촌동	1.000	1.000	1.000	1.000	0.047	0.983
고운동	0.274	0.258	0.173	0.145	0.000	0.208
소담동	0.723	0.734	0.746	0.563	0.137	0.902
반곡동	0.073	0.063	0.100	0.018	0.000	0.048
보람동	0.584	0.525	0.442	0.345	0.239	0.936
대평동	0.301	0.313	0.291	0.272	0.105	0.686
다정동	0.696	0.608	0.625	0.785	0.031	0.651

[표 4-2] 유형·구조 부문 지표 정규화 결과

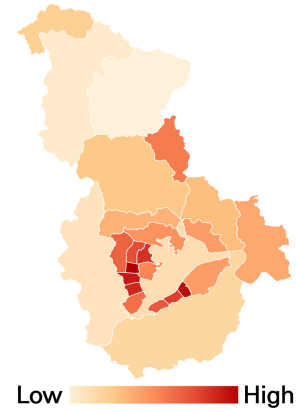
유역	노출		민감도		적응능력
	평균공시지가	건축물 밀도	노후건축물 밀도	반지하 밀도	민방위 대피시설 밀도
조치원읍	0.237	1.000	1.000	1.000	0.299
연기면	0.068	0.247	0.195	0.106	0.000
연동면	0.029	0.239	0.223	0.009	0.411
부강면	0.053	0.247	0.204	0.128	0.209
금남면	0.075	0.129	0.111	0.037	0.273
장군면	0.058	0.143	0.077	0.090	0.170
연서면	0.039	0.165	0.140	0.007	0.166
전의면	0.015	0.109	0.100	0.024	0.220
전동면	0.000	0.091	0.074	0.005	0.365
소정면	0.014	0.160	0.129	0.030	0.543
한솔동	0.391	0.184	0.000	0.069	0.495
새롬동	0.749	0.337	0.000	0.000	0.504
나성동	0.929	0.000	0.000	0.000	0.683
도담동	0.474	0.449	0.000	0.437	0.451
어진동	0.982	0.111	0.000	0.260	1.000
해밀동	0.296	0.051	0.002	0.035	0.396
아름동	0.517	0.359	0.000	0.307	0.573
종촌동	0.838	0.391	0.000	0.000	0.481
고운동	0.396	0.389	0.000	0.426	0.655
소담동	1.000	0.356	0.000	0.000	0.257
반곡동	0.297	0.045	0.007	0.006	0.776
보람동	0.662	0.328	0.000	0.000	0.592
대평동	0.834	0.201	0.000	0.000	0.690
다정동	0.567	0.377	0.000	0.000	0.472

[표 4-3] 입지·환경 부문 지표 정규화 결과

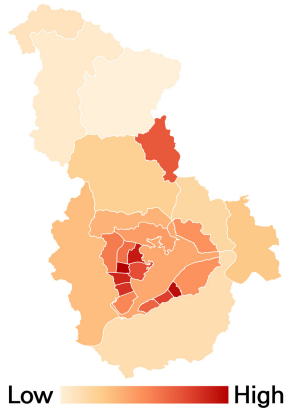
유역	노출		민감도	적응능력
	하천점유율	평균해발고도	불투수면적율	저지대 면적 비율
조치원읍	0.051	0.379	0.469	0.316
연기면	0.048	0.410	0.114	0.426
연동면	0.156	0.268	0.152	0.279
부강면	0.099	0.530	0.146	0.441
금남면	0.127	0.529	0.004	0.211
장군면	0.106	0.562	0.018	0.108
연서면	0.056	0.567	0.018	0.231
전의면	0.042	1.000	0.028	0.332
전동면	0.058	0.882	0.000	0.618
소정면	0.028	0.741	0.082	0.251
한솔동	0.000	0.172	0.507	0.439
새롬동	0.000	0.281	0.731	0.066
나성동	1.000	0.408	0.095	0.393
도담동	0.036	0.228	0.746	0.419
어진동	0.067	0.179	0.912	0.390
해밀동	0.025	0.343	0.122	0.779
아름동	0.044	0.264	0.611	0.277
종촌동	0.064	0.047	0.903	0.046
고운동	0.018	0.461	0.348	0.000
소담동	0.000	0.071	0.886	0.471
반곡동	0.019	0.338	0.110	0.675
보람동	0.006	0.010	1.000	0.161
대평동	0.032	0.000	0.761	1.000
다정동	0.000	0.204	0.767	0.486



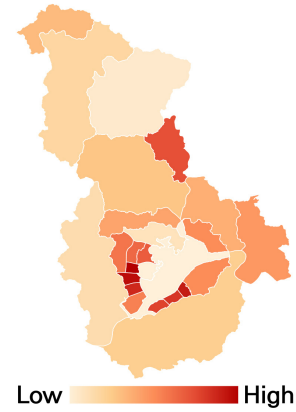
(a) 인구밀도



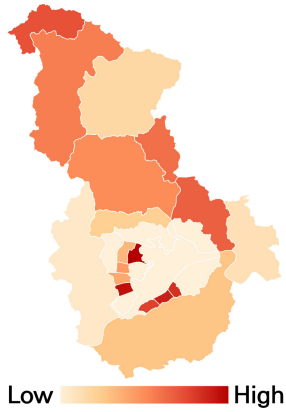
(b) 재해취약인구 밀도



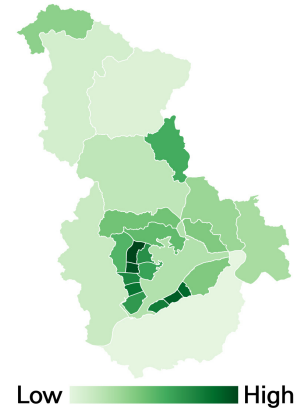
(c) 1인 가구 밀도



(d) 기초생활수급자 밀도

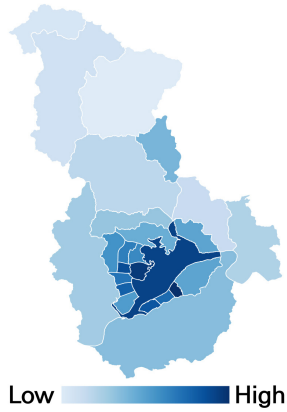


(e) 1차산업 종사자 밀도

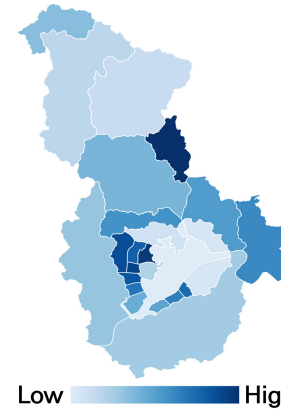


(f) 읍면동 공무원 밀도

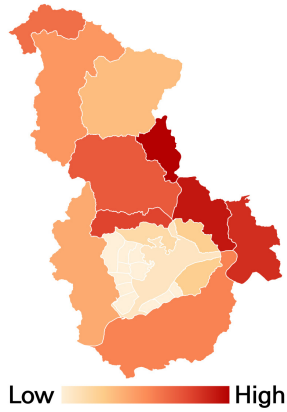
[그림 4-1] 인적·관리 부문 지표 정규화 결과



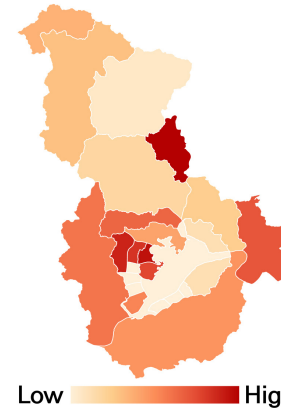
(a) 공시지가



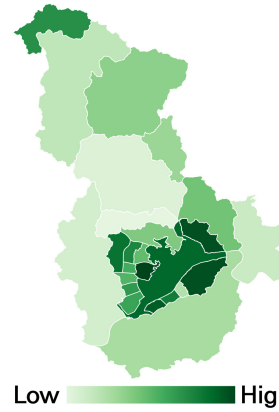
(b) 건축물 밀도



(c) 노후건축물 밀도

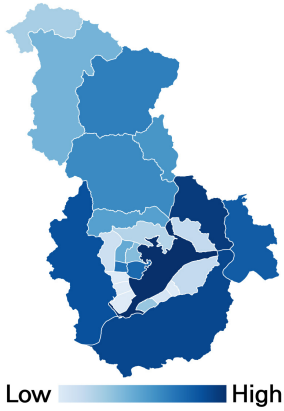


(d) 반지하 밀도

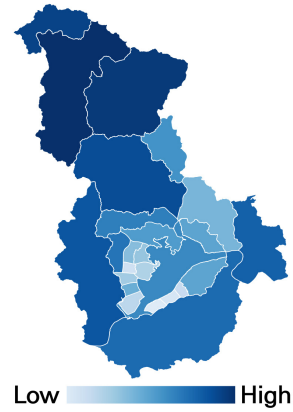


(e) 민방위대피시설 밀도

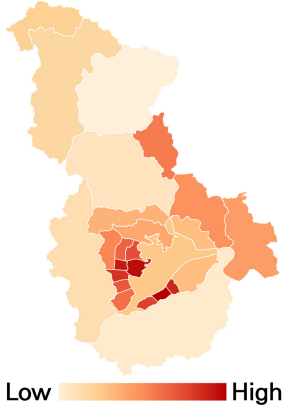
[그림 4-2] 유형·구조 부문 지표 정규화 결과



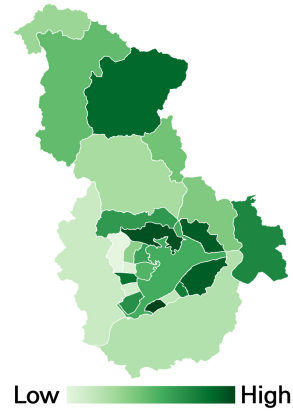
(a) 하천점유율



(b) 평균해발고도



(c) 불투수면적율



(d) 저지대 면적 비율

[그림 4-3] 입지·환경 부문 지표 정규화 결과

□ 세부 지표별 엔트로피 가중치 산정 결과

❍ 통상적으로 지표의 가중치가 높다는 것은, 해당 요인이 지역 간의 안전 격차를 만들어내는 가장 결정적인 변수임을 의미함

- 엔트로피 이론에 따라 속성이 가진 전체 중요도(가중치 총합 1.0)는 이 속성을 설명하기 위해 투입된 지표들에게 배분되어야 하는 것이 원칙임
- 다만, 연구에서 속성별로 하나의 지표만 반영한 배경에는 읍면동 단위 취약성 평가를 위한 과정에 경쟁할 다른 지표가 없었으며, 향후 지표의 적절성에 대한 지속적인 검토와 관리가 필요하다는 한계점을 지님
- 아래 표는 엔트로피 기법을 적용하여 총 15개 세부 지표의 최종 가중치가 산정결과를 나타냄

[표 4-4] 취약성 부문별 엔트로피 가중치 산정 결과

취약성 부문	속성	세부 지표	취약성 방향	엔트로피 가중치 (Wj)
인적·관리	노출	인구밀도	↑	1.0000
	민감도	재해취약인구 밀도	↑	0.1996
		1인 가구 밀도	↑	0.1886
		기초생활수급자 밀도	↑	0.2625
		1차산업 종사자 밀도	↑	0.3493
	적응능력	공무원 밀도	↓	1.0000
유형·구조	노출	평균 공시지가	↑	0.5476
		건축물 밀도	↑	0.4524
	민감도	노후건축물 밀도	↑	0.5140
		반지하 밀도	↑	0.4860
	적응능력	민방위 대피시설 밀도	↓	1.0000
입지·환경	노출	하천점유율	↑	0.7147
		평균해발고도	↓	0.2853
	민감도	불투수면적율	↑	1.0000
	적응능력	저지대 비율	↑	1.0000

2. 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산정

□ 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산정 과정

❍ 각 읍면동별로 15개 세부 지표의 정규화된 값(X_{ij})에 각각의 엔트로피 가중치(W_j)를 곱한 후, 이 값들을 모두 더하여 최종 지수를 산출하였음

$$FVI_i = \sum_{j=1}^{15} (W_j \times X_{ij}) \qquad \text{식 (20)}$$

- FVI_i는 i지역의 최종 통합 홍수 취약성 지수, W_j는 j번째 지표의 엔트로피 가중치, X_{ij}는 i지역의 j번째 지표의 정규화된 값을 가리킴
- 산출된 최종 FVI를 바탕으로 세종시 23개 읍면동별 취약성 순위가 결정되며, FVI가 높을수록 홍수 취약성이 높은 지역으로 해석하였음

❍ 가중치가 반영된 이후 최종적으로 통합 홍수 취약성 지수(FVI)를 산출하게 되며, 이때 취약성 구조 분석을 위해 유클리드 거리 기법을 활용하여 산정하게 됨

- 유클리드 거리기법을 바탕으로 홍수 취약성을 노출, 민감도, 적응능력세 가지 차원으로 구성된 3차원 공간으로 개념화하는 과정에 해당함
- 해당 공간에서 가장 이상적인 상태, 즉 '완벽하게 안전한 지역(Ideal Safe Area 또는 Ideal Points)'은 노출=0, 민감도=0, 적응능력=1인 원점(0,0,0)이라 할 수 있음
- 결국 개별 지역의 취약성은 해당 원점으로부터 해당 지역의 좌표까지의 거리로 측정되며, 거리가 멀수록 취약성이 크다는 것을 가리킴

❍ 부문별 통합 지수 산정을 위해서는 15개 지표를 노출(Exp), 민감도(Sen), 적응능력(Adap)의 세 가지 부문으로 분류하고, 각 부문에 속하는 지표들의 가중합산($W_j \times X_{ij}$)을 통해 각 지역의 부문별 대표 점수(Expi, Seni, Adapi)를 계산함

- 산출된 세 부문의 점수를 아래의 유클리드 거리 공식에 대입하여 최종 거리(d)를 산정하게 됨

- 아래 수식에서 적응능력(Adap)의 경우 값이 클수록 긍정적(취약성 낮음)이므로, 다른 두 지표와 방향을 맞추기 위해 1에서 빼주는 변환을 거쳤음
- 결국 적응능력이 높을수록(Adap=1) 이 축의 값은 0에 가까워져 '이상적으로 안전한 상태'에 부합하게 됨

$$d = \sqrt{((\mathrm{Exp})^2 + (Sen)^2 + (1 - Adap)^2)} \qquad \text{식 (20)}$$

[표 4-5] 인적·관리 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과

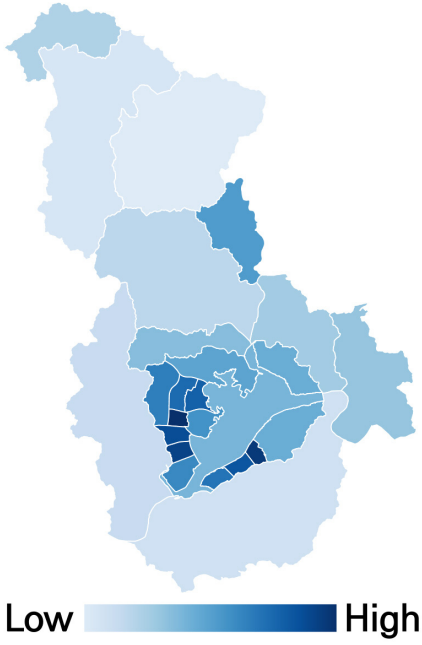
유역	노출	민감도	적응능력	통합 지수(FVI)
조치원읍	0.123	0.198	0.314	0.724
연기면	0.006	0.020	0.063	0.937
연동면	0.003	0.035	0.033	0.968
부강면	0.006	0.014	0.026	0.975
금남면	0.002	0.011	0.000	1.000
장군면	0.003	0.010	0.003	0.997
연서면	0.003	0.026	0.005	0.995
전의면	0.001	0.025	0.002	0.998
전동면	0.000	0.007	0.001	0.999
소정면	0.003	0.034	0.040	0.960
한솔동	0.266	0.107	0.403	0.662
새롬동	0.721	0.460	0.746	0.892
나성동	0.019	0.009	0.020	0.981
도담동	0.442	0.621	0.577	0.872
어진동	0.163	0.094	0.360	0.667
해밀동	0.094	0.033	0.099	0.906
아름동	0.426	0.162	1.000	0.456
종촌동	1.000	0.667	0.983	1.202
고운동	0.274	0.122	0.208	0.847
소담동	0.723	0.483	0.902	0.875
반곡동	0.073	0.036	0.048	0.956
보람동	0.584	0.362	0.936	0.690
대평동	0.301	0.225	0.686	0.490
다정동	0.696	0.456	0.651	0.902

[표 4-6] 유형·구조 부문 통합 홍수취약성 지수(FVI) 산출 결과

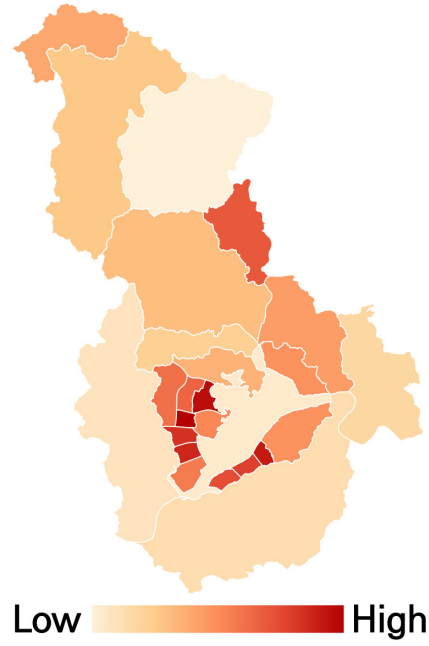
유역	노출	민감도	적응능력	통합 홍수 취약성 지수(FVI)
조치원읍	0.582	1.000	0.299	1.353
연기면	0.149	0.152	0.000	1.022
연동면	0.124	0.119	0.411	0.613
부강면	0.141	0.167	0.209	0.821
금남면	0.100	0.075	0.273	0.738
장군면	0.097	0.083	0.170	0.839
연서면	0.096	0.075	0.166	0.843
전의면	0.057	0.063	0.220	0.784
전동면	0.041	0.041	0.365	0.637
소정면	0.080	0.081	0.543	0.471
한솔동	0.297	0.033	0.495	0.587
새롬동	0.563	0.000	0.504	0.750
나성동	0.509	0.000	0.683	0.600
도담동	0.462	0.212	0.451	0.749
어진동	0.588	0.126	1.000	0.601
해밀동	0.185	0.018	0.396	0.632
아름동	0.446	0.149	0.573	0.635
종촌동	0.636	0.000	0.481	0.820
고운동	0.393	0.207	0.655	0.562
소담동	0.709	0.000	0.257	1.027
반곡동	0.183	0.007	0.776	0.289
보람동	0.511	0.000	0.592	0.654
대평동	0.548	0.000	0.690	0.629
다정동	0.481	0.000	0.472	0.714

[표 4-7] 입지·환경 부문 통합 홍수취약성 지수(FVI) 산출 결과

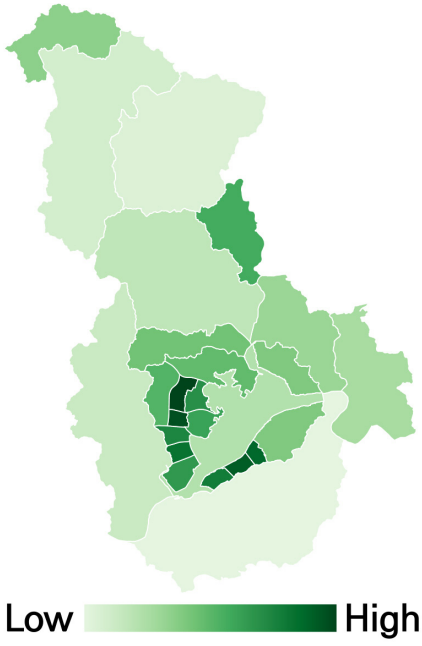
유역	노출	민감도	적응능력	통합 홍수 취약성 지수(FVI)
조치원읍	0.145	0.469	0.316	0.842
연기면	0.151	0.114	0.426	0.604
연동면	0.188	0.152	0.279	0.760
부강면	0.222	0.146	0.441	0.619
금남면	0.242	0.004	0.211	0.826
장군면	0.236	0.018	0.108	0.923
연서면	0.202	0.018	0.231	0.796
전의면	0.315	0.028	0.332	0.739
전동면	0.293	0.000	0.618	0.482
소정면	0.232	0.082	0.251	0.789
한솔동	0.049	0.507	0.439	0.758
새롬동	0.080	0.731	0.066	1.189
나성동	0.831	0.095	0.393	1.034
도담동	0.091	0.746	0.419	0.950
어진동	0.099	0.912	0.390	1.102
해밀동	0.116	0.122	0.779	0.278
아름동	0.106	0.611	0.277	0.953
종촌동	0.059	0.903	0.046	1.315
고운동	0.145	0.348	0.000	1.069
소담동	0.020	0.886	0.471	1.032
반곡동	0.110	0.110	0.675	0.360
보람동	0.007	1.000	0.161	1.306
대평동	0.023	0.761	1.000	0.762
다정동	0.058	0.767	0.486	0.926



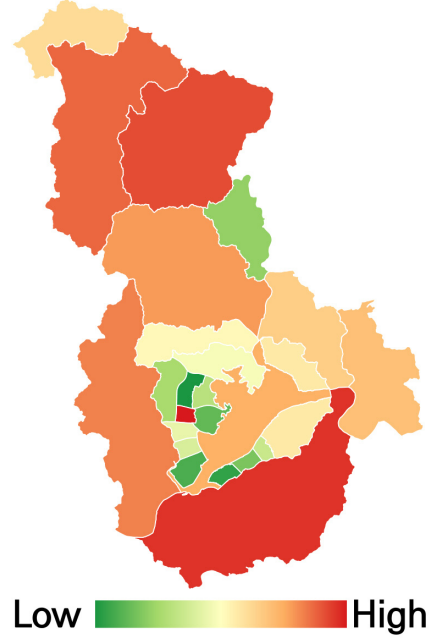
(a) 노출 부문 통합 지수



(b) 민감도 부문 통합

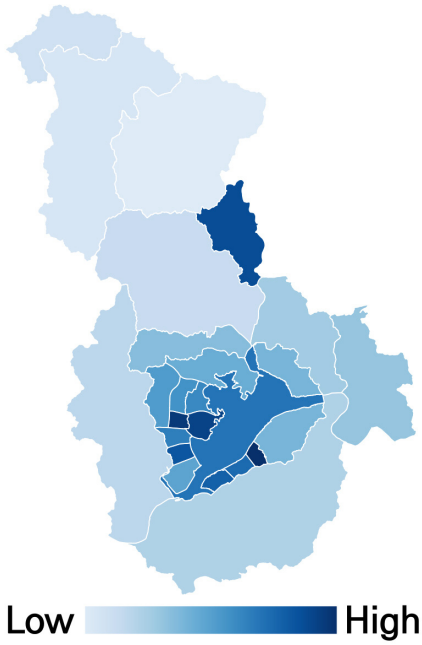


(c) 적응능력 부문 통합

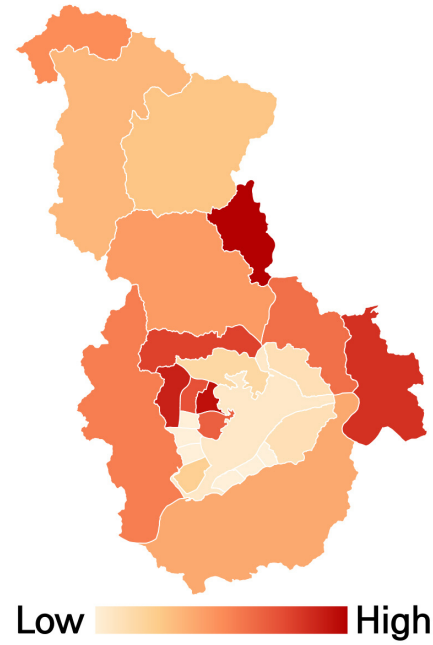


(d) 인적·관리 부문 통합 홍수 취약성 지수

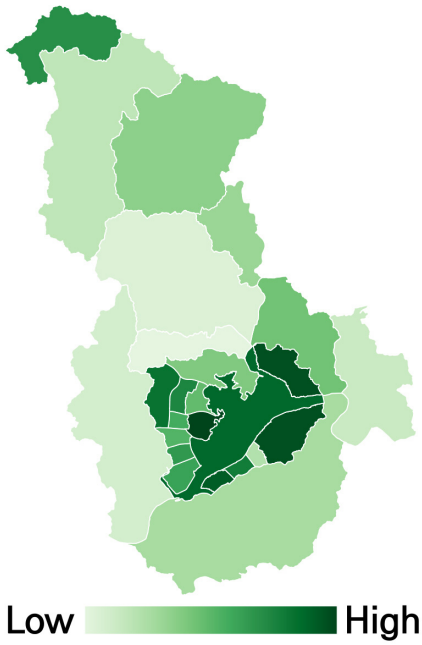
[그림 4-4] 인적·관리 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과



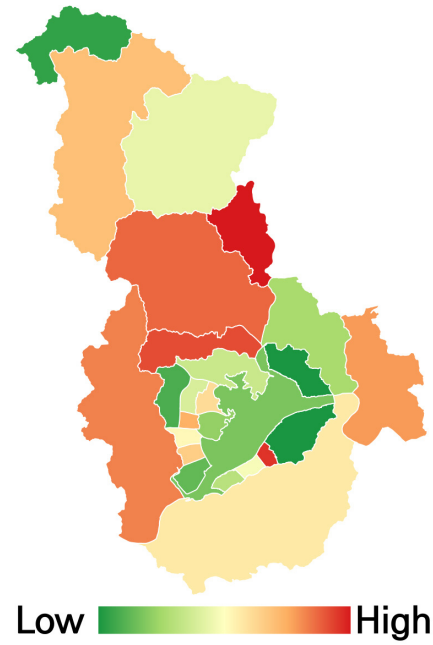
(a) 노출 부문 통합 지수



(b) 민감도 부문 통합

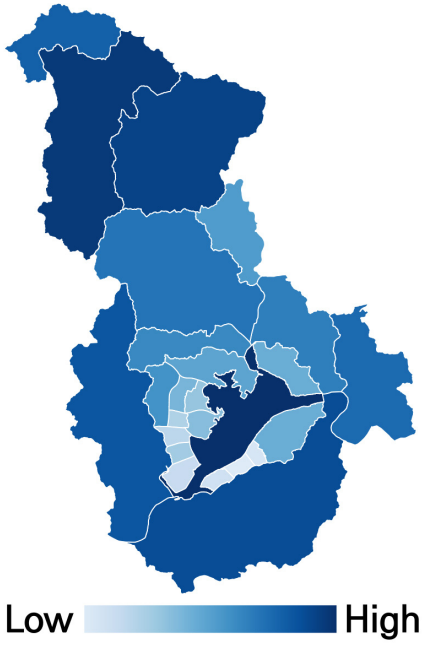


(c) 적응능력 부문 통합

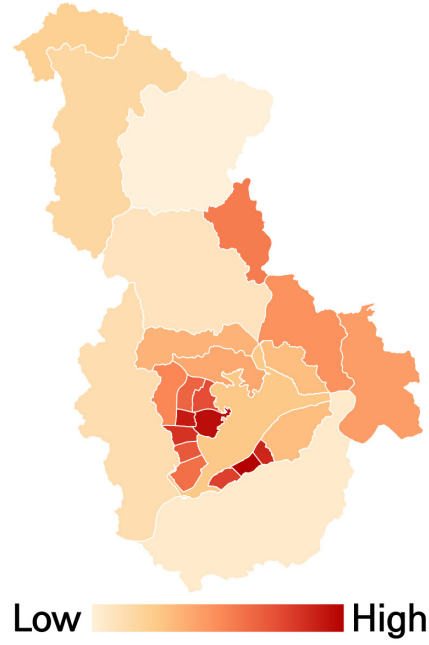


(d) 유형·구조 부문 통합 홍수 취약성 지수

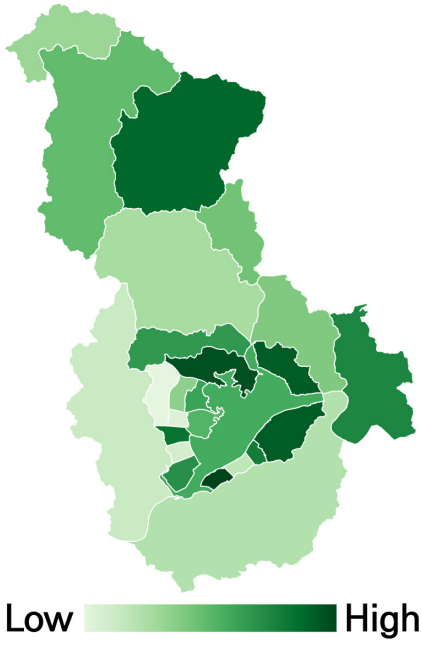
[그림 4-5] 유형·구조 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과



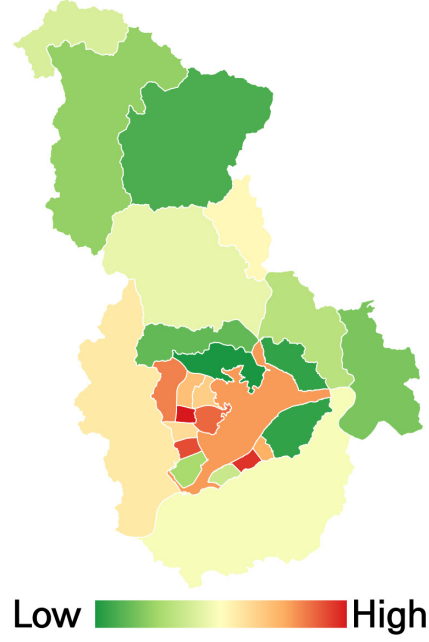
(a) 노출 부문 통합 지수



(b) 민감도 부문 통합



(c) 적응능력 부문 통합



(d) 입지·환경 부문 통합 홍수 취약성 지수

[그림 4-6] 입지·환경 부문 통합 홍수 취약성 지수(FVI) 산출 결과

제2절 취약 요인 진단

1. 노출 요인 분석

□ 노출 요인별 세부 분석 및 지표 해석

❍ 노출성 분석은 자연재해, 특히 홍수 발생 시 직접적인 피해를 입을 수 있는 인구 및 자산이 공간적으로 어디에 집중되어 있는지를 파악하고 정량화하는 핵심적인 과정에 속함

❍ 본 연구는 홍수 위험에 대한 노출 수준을 객관적으로 평가하기 위하여 포괄적인 접근 방식을 채택하였으며, 이를 위해 사용된 핵심 지표들은 해당 지역의 인구·경제·지리적 특성을 종합적으로 아우르도록 구성하였음

- 이러한 다차원적인 지표 체계는 홍수 피해 잠재력을 입체적으로 분석하는 데 기여할 것으로 판단됨
- 노출 요인 분석은 세부적인 부문으로 구분되어 진행되었으며, 각 부문별 핵심 지표의 적용 및 해석은 다음과 같음

❍ 인적·관리 부문에서는 인구밀도와 재해취약인구 밀도가 주요 지표로 고려되었음

- 이 중 특히 인구밀도가 높은 가중치를 부여받았는데, 이는 해당 지역의 인구 밀집도가 홍수 발생 시 인명 피해 위험을 결정하는 가장 지배적인 변수에 해당한다는 분석에 근거함
- 즉, 인구가 밀집된 지역일수록 잠재적인 인명 피해 규모가 커질 위험이 높다고 판단하였음

❍ 유형·구조 부문의 경우, 평균 공시지가가 핵심 지표로 활용되었음

- 평균 공시지가는 특정 지역에 집중된 경제적 자산의 가치를 대변하는 지표로서, 홍수 피해로 인한 유형 자산의 잠재적 손실 규모를 간접적으로 측정하는 데 이용되었음

❍ 마지막으로 입지·환경 부문에서는 하천점유율과 평균 해발고도가 적용되었음

- 이 두 지표는 홍수 범람과 직접적으로 관련된 지리적 위험도를 나타내는

변수로서, 해당 지역의 지형적 특성과 수계(水系) 접근성에 따른 노출 수준을 과학적으로 평가하는 데 중요한 근거를 제공함

□ 노출 요인 분석 결과: 지역별 노출성 집중 및 이중 구조

❍ 노출 요인 분석 결과, 신도심 지역에서 노출 요인의 집중 현상이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었음

- 특히 인적·관리 부문에서 종촌동과 새롬동은 극심한 노출성을 보였으며, 이는 높은 인구밀도에 기인하는 전형적인 도시형 위험에 속하는 것으로 해석됨
- 높은 인구 밀집도가 홍수 발생 시 인명 피해 위험을 결정하는 가장 지배적인 요인임을 방증하는 결과에 해당함

❍ 반면, 입지·환경 부문에서는 하천에 인접한 나성동이 가장 높은 노출 수치를 기록하였는데, 이는 해당 지역이 금강에 인접하여 하천점유율이 높기 때문인 것으로 판단됨

- 이는 지리적 특성에 따른 범람 위험이 노출성을 높이는 사례에 속함

❍ 농촌 외곽 지역인 연기면, 금남면, 전동면 등은 전반적으로 노출 요인이 작게 나타났음

- 특히 '면' 단위 지역들은 인적·관리 부문에서 노출성 지수가 0에 가까운 낮은 값을 보였는데, 이는 인구밀도가 낮아 인명 피해에 대한 잠재적 노출이 적음을 반영하는 결과로 판단됨

❍ 노출 부문에 대한 전반적인 분석 결과는 지역 간 '도농 간 노출 이중구조'를 명확히 보여주고 있음

- 신도시 중심의 '동' 지역: 높은 인구와 경제 자산이 밀집되어 있어 인구·경제적 노출 위험에 직면
- 농촌 외곽 '면' 지역: 인구 노출 수준은 낮으나, 하천 인근 농경지 등 특정 입지에 국한된 지리적 노출 위험을 안고 있음

❍ 분석된 도농 간 노출 이중구조를 고려할 때, 향후 홍수 위험 관리 전략 역시 이에 맞춰 이원화되어야 할 필요가 있음

- 도시지역: 고밀도 인구와 핵심 자산 보호에 중점을 둔 재난 대피 계획 및 시설 방호에 역량을 집중해야 함
- 농촌 지역: 범람원 토지이용 관리, 소규모 산재된 정주촌 보호, 그리고 하천 인근 농경지 방호에 초점을 맞춘 맞춤형 위험 저감 대책을 수립해야 할 것으로 판단됨

2. 민감도 요인 분석

□ 민감도 요인별 세부 분석 및 지표 해석

❍ 민감도 요인 분석은 동일한 홍수 위험에 노출되더라도 특정 지역의 사회적 및 구조적 특성으로 인해 더 큰 피해를 입을 수 있는 내재적 경향성을 파악하는 과정에 속함

- 본 연구에서 민감도를 평가하기 위해 사용된 핵심 지표들은 지역 사회의 사회적 약자 분포, 건축물의 물리적 상태, 그리고 도시화에 따른 환경적 변화를 포괄하고 있음

❍ 인적·관리 부문의 경우, 1인 가구 밀도와 기초생활수급자 밀도가 주요 지표로 고려되었음

- 이 지표들은 재난 발생 시 정보 접근 및 대피에 어려움을 겪을 수 있는 사회적 취약계층의 분포를 나타내며, 이들의 밀집도가 높을수록 사회적 민감도가 높아지는 것으로 해석되었음

❍ 유형·구조 부문에서는 건축물 밀도, 노후건축물 밀도, 그리고 반지하 밀도가 활용되었음

- 이 지표들은 건물의 물리적 상태와 구조적 특성이 홍수 피해에 얼마나 취약한지를 보여주는 직접적인 지표에 해당함
- 특히 노후화되거나 침수에 취약한 구조(반지하)가 밀집될수록 물리적 피해의 민감도가 급격히 증가하는 경향을 보임

❍ 마지막으로 입지·환경 부문에서는 불투수면적율이 이 범주에서 가장 결

정적인 지표로 사용되었음

- 불투수면적율은 지표면이 아스팔트나 콘크리트 등으로 덮여 빗물이 땅 속으로 스며들지 못하고 표면 유출을 가속화시키는 환경적 민감성을 대표하며, 도시화된 지역의 홍수 위험도를 높이는 핵심 요인으로 작용함

□ 노출 요인 분석 결과: 서로 다른 취약성의 공존

❍ 민감도 지수의 지역별 분포를 분석한 결과, 세종시 내부에는 서로 다른 유형의 취약성이 공존하고 있음이 명확하게 확인되었음

- 민감성은 특정 지역의 사회적·구조적 특성에 기인하여 동일한 홍수에도 더 큰 피해를 입을 수 있는 내재적 경향성을 나타냄

❍ 조치원읍의 경우 유형·구조 부문에서 민감도 지수가 높게 나타났음

- 이러한 결과는 결국 구도심이 가진 구조적 민감성이 높다는 점을 시사하며, 구도심의 특성상 노후 건축물이 밀집되어 있고, 전반적인 건축 밀도가 높기 때문인 것으로 판단됨
- 노후 건축물은 홍수와 같은 외부 충격에 취약하며, 고밀도의 건축물은 피해 확산 가능성을 높이는 요인으로 작용함

❍ 반면, 입지·환경 부문에서는 보람동, 종촌동, 어진동 등 신규 개발된 도시 지역에서 매우 높은 민감도가 나타났음

- 이는 고밀도 도시 개발에 따라 불투수면적율이 증가했다는 환경적인 민감성을 반영한 결과로 판단되며, 불투수면적의 증가는 빗물의 침투를 방해하고 표면 유출을 급격히 가속화하여, 도시 지역의 침수 위험을 높이는 핵심적인 원인으로 작용함

❍ 민감도 부문에서 나타난 결과들을 종합해보면, 개발 과정에서 겪을 수 밖에 없는 '신구(新舊) 취약성 공존 상태'로 정의할 수 있음

- 조치원읍과 같은 구도심의 취약성은 주로 기반 시설의 노후화와 과거의 건축 기준에 기인한 구조적 문제로 판단되며, 이는 노후 건축물 밀집과 낮은 방재 성능에서 비롯됨
- 반면, 보람동, 종촌동 등의 신도심 취약성은 고밀도 개발 과정에서 선택

된 토지이용 방식, 즉 높은 불투수면적율이 빗물 유출을 증가시킬 우려를 내포하는 환경적·설계적 문제로 규정할 수 있음

❍ 구도심과 신도심 사례에서 볼 수 있듯이, 민감도를 저감하기 위한 대책은 동일한 접근 방식을 적용할 수 없으며, 취약성의 근본 원인에 따라 전략이 이원화되어야 함

- 구도심 저감 대책: 기존 시설의 성능 개선에 초점을 맞추어, 건축물 개보수·재개발을 통한 물리적 성능 향상 및 내수배제 시설 강화에 집중
- 신도심 저감 대책: 미래지향적 도시설계 원칙을 적용하여 문제의 근원인 '설계'를 개선하는 방식이 필요하며, 저영향개발(LID) 기법 도입, 녹지공간 확보, 그리고 빗물 관리 시스템 구축 등을 통해 환경적 민감성을 낮추는 데 주력해야 함

3. 적응능력 요인 분석

□ 적응능력 요인별 세부 분석 및 지표 해석

❍ 적응능력은 지역사회가 재난에 효과적으로 대응하고 피해로부터 회복할 수 있는 내재적 역량을 의미하며, 이는 곧 전체적인 취약성을 경감시키는 결정적인 요인에 해당함

- 본 연구에서는 지역사회의 적응능력을 객관적으로 평가하기 위해 주로 제도적 역량과 물리적 인프라를 포괄하는 핵심 지표들을 포함하여 분석을 수행하였음

❍ 공무원 밀도는 재난 발생 시 대응 계획 수립, 현장 지휘, 복구 관리 등을 수행할 수 있는 행정적 역량의 수준을 대변하는 지표에 해당함

- 공무원 밀도가 높을수록 신속하고 체계적인 재난 대응이 가능하다고 판단됨

❍ 민방위 대피시설 밀도는 재난 발생 시 주민들이 안전하게 대피할 수 있는 공간 확보 수준을 가늠하는 지표임

- 충분한 대피시설은 인명 피해를 최소화하고 재난 시 지역사회의 안정성을 유지하는 데 필수적인 물리적 인프라에 해당함

□ **적응능력 요인 분석 결과:**

❍ 적응능력 분석 결과 '도농 간 적응능력의 양극화'를 확인할 수 있음

❍ 세종시의 신도심(아름동, 종촌동, 보람동 등)은 표면적으로는 최종 취약성 지수(FVI)가 낮게 나타났으나, 이는 높은 인구밀도와 불투수면적율이라는 내재된 취약성에도 불구하고 높은 적응 능력으로 위험을 상쇄하고 있는 결과로 이어졌음

- 이러한 점은 평상시에는 안정적이라 비춰질 수 있으나 대평동이나 보람동과 같이 낮은 저지대 면적 비율이 높은 지형적 여건을 지닌 고밀도 개발된 지역의 경우 리스크가 실제 발생할 경우 해당 위험이 순식간에 전개되어 복합재난으로 이어질 잠재적 위험을 지니고 있다고 볼수 있음

❍ 금남면, 전의면, 연기면 등의 면 지역은 인적·관리 및 유형·구조 적응능력 지수가 매우 낮게 산정되었는데 이들 지역은 낮은 인구밀도로 인해 노출 자체는 낮지만, 재난 발생 시 대피 및 구호 활동을 위한 최소한의 행정 인력과 안전한 대피 인프라가 절대적으로 부족한 상태임을 의미함

- 특히 조치원읍의 경우, 세종시 내에서 가장 많은 재해 취약 인구와 노후 건축물 및 반지하 밀도(높은 민감도)를 가지면서도 신도심 대비 낮은 적응력을 보여 높은 민감도와 낮은 회복력의 위험 중첩이 발생하고 있다고 볼 수 있음

❍ 적응능력 분석 결과를 종합해보면, 홍수 위험 관리가 단순히 치수 사업을 확대하는 기존의 방식을 고수해서는 안 된다는 것을 확인하였음

- 인적·제도적 자원의 공간적 형평성을 재고하여, 상대적으로 취약한 농촌 및 구도심 지역의 '최소 재난 안전 기준'을 제고해야 함을 가리킴

- 본 연구에서 접근한 미시적 분석은 기존의 광역적 분석에서는 간과되었던 읍면동 단위의 미세한 취약성 차이를 살펴보는 과정을 통해 향후 정책적 기초자료로 참고가 가능할 것으로 판단됨

결론

5장

제1절 | 종합
제2절 | 정책 제언

SEJONG RESEARCH INSTITUTE

5장 | 결론

제1절 종합

■ 세종시 홍수 위험의 복합적 특성 및 평가 모델의 의의

□ 세종시 홍수 위험의 복합성과 연구의 당위성

❍ 본 연구는 세종시의 홍수 취약성을 단순한 기후 중심의 접근법이 아닌, 도시 개발과 행정 시스템 간의 구조적 모순에서 비롯된 복합적 재해 위험으로 진단하였음

- 세종시는 저영향 개발(LID)을 표방하며 조성되었으나, 급속한 개발 속도에 비해 도시 물순환을 관리하는 불투수 면적 관리 체계(법적·행정적)가 미비하여 취약성을 내재하게 되었음
- 이는 환경적 취약성이 자연적 원인보다 행정 및 제도적 실패와 물리적 환경의 결합으로 인해 증폭된 결과임을 명확히 시사함

❍ 세종시는 중앙 행정 기능이 집적된 국가의 핵심 지역으로서, 홍수 재해는 단순한 경제적 손실을 넘어 국가 기능 마비라는 복합적이고 중대한 위험을 초래할 수 있음

□ 읍면동 단위 미시적 분석 필요성

❍ 기존 홍수 취약성 평가는 광역적 행정구역 단위(시군구)에 집중되어, 실제 피해가 발생하는 하천변, 저지대, 반지하 밀집 지역 등 읍면동 단위의 미세한 국지적 특성을 반영하는 데 한계가 있었음

- 홍수 피해의 특성상 이러한 미세한 공간적 차이에 따라 결과가 크게 달라지므로, 본 연구는 광역 분석에서 가려지던 읍면동 단위의 취약성 차

이를 규명하는 데 핵심적인 의의를 두고 있음

- 미시적 분석은 물리적 피해액은 물론, 고밀도 지역의 인명 피해 추정 및 사회경제적 취약계층에 집중되는 피해 양상을 정밀하게 파악할 수 있는 기반을 제공함

❍ 본 연구는 도농복합도시 세종시의 이질적 특성을 포괄적으로 진단하기 위해 취약성의 근원을 인적·관리(Human·Management), 유형·구조(Tangible·Structural), 입지·환경(Location·Environmental)의 세 차원으로 분할하는 H-T-L 모델을 제안하였음

- 지표의 상대적 중요도를 결정하는 가중치 산정에는 평가자의 주관적 편향을 배제하고 데이터의 변별력(정보량)에 기반한 엔트로피 가중치 기법을 적용하여 정량 분석의 객관성과 신뢰도를 확보하였음

■ 취약성의 공간적 양극화 진단: '도·농 이중구조'와 '신·구 취약성 공존'

❍ 읍면동 단위의 정밀 분석 결과, 세종시의 홍수 취약성은 특정 공간에 위험이 집중되는 '공간적 양극화' 양상을 보였으며, 이는 '도·농 간 노출 이중구조'와 '신·구 취약성 공존 상태'라는 두 가지 고유한 특성으로 요약 할 수 있음

- 이러한 이질적 취약 구조는 획일적 재난관리 정책의 실효성에 한계가 있음을 시사하며, 각 지역의 특성에 부합하는 맞춤형 전략 수립이 필수적이라는 것을 가리킴

□ 도시와 농촌 간의 노출 이중구조

❍ 세종시의 홍수 위험 노출은 인구 및 자산 밀도에 따라 신도심(동)과 구도심 및 농촌(읍면) 간에 명확한 이중구조를 형성하며, 재난 시 피해 집중 유형이 구분될 것으로 판단됨

- (신도시 중심의 고밀도 노출 위험) 종촌동, 새롬동, 소담동 등 신도심은 인구 밀집도와 자산 가치가 상대적으로 높은 수준으로 이는 홍수 발생 시 인명 피해 규모와 경제적 손실 집중성이 극대화되는 도시형 고위험

지역임을 의미하며, 대규모 혼잡 발생 가능성으로 인해 재난 대응의 관리 난이도가 높게 평가됨

- (농촌 외곽 중심의 지리적 노출 위험) 전의면, 연서면, 금남면 등 외곽 지역은 인구 노출은 낮지만, 1차 산업 종사자 밀도와 하천 점유율이 높아 농경지 및 생계 기반 시설 손실에 국한된 지리적 노출 위험과 함께 1차 산업 자산 손실 및 토양 유실로 인해 장기적인 경제적 회복탄력성 저하가 우려됨

❍ 이러한 이중구조는 행정 자원의 불균형한 배분을 야기하여 취약 지역의 적응 능력을 저하시키고, 궁극적으로 안전 불평등을 심화시키는 구조적 원인으로 작용할 것으로 판단됨

□ 신·구 취약성 공존 상태

❍ 세종시 홍2수 위험 민감성은 개발 시점과 유형에 따라 상이한 근본 원인을 갖는 두 가지 취약성 유형이 공존하고 있으며, 맞춤형 전략이 요구됨

- (구도심의 구조적 민감성) 조치원읍은 노후 건축물 밀도, 반지하 밀도, 재해취약인구 밀도가 가장 높은 지역으로 이는 자가 방재 능력이 미흡한 취약계층과 물리적 안정성이 낮은 시설이 중첩되어 있음
- (신도심의 환경적·설계적 민감성) 보람동, 종촌동, 어진동 등 신규 도심 지역은 불투수면적율이 높고 평균 해발고도와 경사도가 낮은 지형적 조건을 지니며, 이러한 조건의 중첩은 빗물 유출을 가속화하고 유출량 지연을 유발하여 도시 내수침수 문제에 노출되는 환경을 조성함

■ 홍수 위험을 결정하는 5대 핵심 요인 분석 및 FVI 진단

□ 홍수 취약성 지수(FVI) 결정 5대 핵심 요인

❍ 본 연구의 핵심 지표들을 상호 분석한 결과, 홍수 위험(Flood Vulnerability Index, FVI)을 결정하는 5대 요인이 도출되었으며, 이들 요인은 도시화와 제도적 대응 간의 경쟁 관계 속에서 유기적으로 연결되어 있다고 판단됨

[표 5-1] 홍수 위험을 결정하는 5대 핵심 요인

요인	영향력 분석
인구밀도	• 인구 밀집은 잠재적인 인명 피해 규모를 확대하고, 재난 시 대피 활동을 복잡하게 만드는 근본적인 위험 • 신도시 '동' 지역의 높은 FVI는 이 지표의 영향력을 직접적으로 보여주고 있음
불투수면적율	• 도시화의 강도를 대변하며, 불투수면의 증가는 빗물의 지표면 유출량 및 속도를 급격히 증가시켜 도시 배수 체계에 과부하를 유발하고 침수 위험을 증대시킴
저지대 비율	• 지형에 따라 강우유출수는 어디로 흐르고 모이고 고일지를 결정하는 가장 기본적인 통제 변수임 • 최대 가중치는 지형적 특성이 홍수 위험의 기본값을 설정하는 지배적 요인임을 가리킴
공무원 밀도	• 두 지표 모두 높은 가중치를 부여받은 것은 지역 간 제도적·물리적 대비 태세의 편차가 커 이것이 곧 지역의 회복탄력성 격차를 결정지음을 시사함 • 도심 행정 중심지에 자원이 집중되고 농촌 지역은 심각한 결핍 상태에 있는 현실이 취약성 불균형의 주요 원인에 해당함
민방위 대피시설 밀도	

□ FVI 진단 기반의 읍면동 취약성 순위 및 특성 분석

❍ H-T-L 모델 기반으로 산출된 부문별 통합 홍수 취약성 지수(FVI)를 활용하여 세종시 23개 읍면동의 취약성 구조를 진단하였음

- 분석 결과 세종시의 재난관리 전략이 위험의 '규모'와 '심각성' 두 측면으로 이원화된 접근 전략이 필요하다고 판단됨

[표 5-2] 주요 취약 지역 FVI 구성요소 분석(H-T-L 모델 기반)

읍면동 (취약지역)	H-M FVI (인적·관리)	T-S FVI (유형·구조)	L-E FVI (입지·환경)	구조적 진단 및 정책적 시사점
종촌동	1.202	0.820	1.315	• 인구밀집과 불투수면 환경 민감성이 중첩 • 고밀도 도시 설계에 따른 사전 대응책 수립 필요
조치원읍	0.724	1.353	0.842	• 노후 건축물 및 반지하 밀도로 인한 인명피해 잠재력 • 물리적 구조 개선 및 사회적 지원 필요
보람동	0.690	0.654	1.306	• 세종시 가장 낮은 해발고도와 가장 높은 불투수면적율 중첩 • 저영향개발을 포함한 자연기반 해법 적용 필요
새롬동	0.892	0.750	1.189	• 높은 인구 및 자산 노출과 민감도 높음
농촌 외곽 지역	(낮음)	(낮음)	(낮음)	• 적응능력 공백 문제 • 연기면, 금남면 등은 공무원 밀도 및 대피시설 밀도가 낮아 재난 시 안전 공백 우려

제2절 정책 제언

■ 맞춤형 취약성 저감 전략

❍ 분석 결과를 바탕으로, 세종시의 '도농 간 노출 이중구조' 및 '신구 취약성 공존 상태'를 해소하고 전반적인 홍수 취약성을 효과적으로 저감하기 위한 구체적이고 실행 가능한 정책 방향을 다음과 같이 제언함

□ 고밀도 도심 핵심지역 대상(인구밀도 및 불투수면적율 관리)

❍ 개발 주도형 위험을 효과적으로 완화하기 위해서는, 모든 신규 건설 및 재개발 프로젝트에 저영향개발(LID) 및 녹색 기반시설(GI) 설치를 의무화하는 조례를 신속히 시행하고 강력하게 집행할 필요가 있음

- 도시계획 및 조례 개정의 일환으로 '(가칭) 녹색 기반시설 의무화 조례'를 도입하는 것도 고려할 필요가 있으며, 해당 조례는 모든 신규 상업 및 대규모 주거 개발 사업에 투수성 포장, 옥상 녹화, 식생수로와 같은 저영향개발 기법 적용을 의무화하는 것을 담아야 함
- 나아가, 인구 및 자산 노출 위험을 사전에 통제하기 위해 과도한 밀집을 억제하는 방향으로 용적률 및 녹지 의무 비율 기준을 재검토하는 과정도 지속적으로 고려해야 함

□ 구조적으로 민감한 구도심 대상(예: 조치원읍)

❍ '기반시설 노후화 위험'을 관리 및 저감하기 위한 핵심 정책으로, 노후 건축물 및 반지하 주택에 침수 방지 시설(차수판, 역류 방지 밸브 등) 설치를 지원하는 맞춤형 보조금 프로그램을 마련해야 함

- 실행 방안으로는, 해당 지역의 노후화된 도시 배수관망 개선 사업을 최우선 과제로 지속 추진하는 것이 중요함

- 침수 위험 지역에 대한 대응 능력을 극대화하고자 표적화된 기반시설 성능 개선을 추진해야하며, 가장 위험도가 높은 배수분구를 선정하고 해당 지역의 노후 하수관로 및 배수 시스템을 개량하는 데 시의 자본개선예산을 집중 투입함으로써 정책의 효과를 높여야 함

□ 농촌 지역의 적응 능력 격차 해소

❍ 재난관리 인력 및 방재 인프라 배분 공식을 재검토하여 상대적으로 취약한 농촌 '면' 지역에도 최소한의 기본 서비스가 보장되도록 해야 함

- 실행 방안으로 농촌 중심지에 공인된 민방위 대피소 기능을 겸할 수 있는 다목적 커뮤니티 센터를 건립하는 것을 제안하며, 재난 발생 시 소외 지역에 행정력을 신속히 투사하고 현장을 지휘할 수 있도록 이동식 현장 지휘차량 시스템을 도입하는 것도 고려해야 함

□ 지형적 고위험 지역 대상(저지대 관리)

❍ 상습 침수 위험이 있는 저지대에 대해서는 재해위험구역으로 지정하고, 신규 주거시설 개발을 제한하거나 금지하는 강력한 토지이용규제를 시행해야 함

- 이러한 규제와 함께 취약한 하류 지역으로 유입되는 유출량을 근본적으로 줄이기 위해 상류 지역에 대한 자연기반해법(NbS)투자를 확대해야 함
- 구체적으로, 기존 습지를 복원하고 홍수터를 확보하는 사업을 추진하여 유역 전체의 물 보유 능력을 증대시켜야 함

참고문헌

단행본

OECD. (1993). OECD core set of indicators for environmental performances reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment, Environment Monographs No. 83. OECD, Paris.

Oswald-Spring, D. Ú. (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

유가영, 김인애 (2008). 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안. 한국환경연구원 기본연구보고서.

학위논문, 학술지 논문

Afedor, D., Amankwah, E., & Takase, M.(2024), Application of DPSIR model t o ascertain driving forces and their impacts on the Volta basin. Heliyon, 10(19).

Ansari, M. T. J., Al-Zahrani, F. A., Pandey, D., & Agrawal, A.(2020), A fuzzy T OPSIS based analysis toward selection of effective security requirements engineering approach for trustworthy healthcare software development. BMC Medical Informatics and Decision Making, 20(1), pp.236.

Chang, H., Pallathadka, A., Sauer, J., Grimm, N. B., Zimmerman, R., Cheng, C., ... & Herreros-Cantis, P.(2021), Assessment of urban flood vulnerabilit y using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. Sustainable Cities and Society, 68, 102786.

IAbdrabo, K. I., Kantoush, S. A., Esmaiel, A., Saber, M., Sumi, T., Almamari, M., ... & Ghoniem, S.(2023), An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-ma king tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. Urban Climate, 48, 101426.

Islam, M. T., & Meng, Q.(2024), Spatial analysis of socio-economic and dem ographic factors influencing urban flood vulnerability. Journal of Urban

Management, 13(3), pp.437-455.
Lee, G., Jun, K. S., & Chung, E. S.(2013), Integrated multi-criteria flood vulnerability approach using fuzzy TOPSIS and Delphi technique. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(5), pp.1293-1312.
Moreira, L. L., de Brito, M. M., & Kobiyama, M.(2021), A systematic review and future prospects of flood vulnerability indices. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2021, pp.1-23.
Mulu, A., Kassa, S. B., Wossene, M. L., Adefris, S., & Meshesha, T. M. (2025), Identification of flood vulnerability areas using analytical hierarchy process techniques in the Wuseta watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Scientific Reports, 15(1), 28680.
Pakati, S. S., Shoko, C., & Dube, T.(2025), Integrated flood modelling and risk assessment in urban areas: A review on applications, strengths, limitations and future research directions. Journal of Hydrology: Regional Studies, 61, 102583.
Park, K., & Choi, S. H.(2025), Analysis of urban flood risk for the implementation of sustainable land use measures. Climate Services, 38, 100568.
Ribeiro, D. (2020). Bela krajina: Sustainability in a Karst Landscape (Vol. 6). Založba ZRC.
Shannon, C. E.(1948), A mathematical theory of communication. The Bell system technical journal, 27(3), pp.379-423.
Uddameri, V., & Hernandez, E. A.(2025), Machine Learning for Flood Resiliency—Current Status and Unexplored Directions. Environments, 12(8), 259.
Xiang, H. T., & Lyu, H. M.(2023), Assessment of vulnerability to waterlogging in subway stations using integrated EWM-TOPSIS. Smart Construction and Sustainable Cities, 1(1), 17.
Xie, W., & Meng, Q.(2023), An integrated PCA–AHP method to assess urban social vulnerability to sea level rise risks in Tampa, Florida. Sustainability, 15(3), 2400.
Zhang, Z., Zhang, S., Hu, C., Zhang, X., Yang, S., Yan, H., & Zhang, Z.(2023), Hazard assessment model of ground subsidence coupling AHP, RS and GIS–A case study of Shanghai. Gondwana Research, 117, pp.344-362.
강정은, 이명진(2012), 퍼지모형과 GIS 를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가-서울시 사

례를 중심으로. 한국지리정보학회지, 15(3), pp.119-136.
강정은, 이명진(2012), 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 – 서울시 사례를 중심으로 –. 한국지리정보학회지, 15(3), pp.119-136.
김강민, 황태건, 이유빈, 황철수 (2024), 자연재해에 대한 사회적 취약성 평가. 대한지리학회지, 59(1), pp.73-90.
김혜령, 김윤정(2021), 사회적 취약성을 고려한 도시홍수 취약요인 연구: 서울시 행정동을 중심으로, 한국기후변화학회지, 12(2), pp.187-202.
박성재, 곽지혜, 김지혜, 김시내, 안재영, 오서주, 강문성(2024), 농촌지역 홍수 취약성 및 재해 규모 평가를 위한 세부지표 분석, 한국농공학회 학술대회초록집, pp.99.
박해경, 서승범(2024), 로지스틱 성장함수 기반 홍수 피해함수를 이용한 기초지자체 단위 홍수 취약성 평가, 한국방재학회논문집, 24(6), pp.367-376.
손민우, 성진영, 정은성, 전경수(2011), 기후변화를 고려한 홍수취약성지표의 개발, 한국수자원학회논문집, 44(3), pp.231-248.
송양호 (2011), 다기준의사결정기법을 이용한 도시 내수침수 위험도 평가기법. 한밭대학교 석사학위논문.
신희재, 최영제, 이재응(2019), 지역적 특성을 고려한 도시지역 홍수 취약성 평가: 한강권역을 대상으로. 한국방재학회논문집, 19(5), pp.293-303.
안진성 (2011), 델파이 기법(Delphi)과 계층적 의사결정방법(AHP)의 적용을 통한 전통정원의 보존상태 평가지표 개발. 성균관대학교 박사학위논문.
음정인, 김형규(2024), 서울특별시 반지하 가구를 고려한 홍수 취약성 평가, 한국기후변화학회지, 15(1), pp.35-46.
음정인, 김형규(2024), 서울특별시 반지하 가구를 고려한 홍수 취약성 평가. 한국기후변화학회지, 15(1). pp.35-46.
이규민, 최진원, 전경수(2016), 도시홍수에 대한 사회적 취약성 평가에 대한 연구, 한국방재학회논문집, 16(4), pp.43-51.
이규민, 최진원, 전경수(2020), 사회적 평가 지표를 반영한 도시 홍수취약성 평가, 토지주택연구, 11(1), pp.109-116.
이근우, 이형주, 정건희(2023), PSR과 DPSIR을 이용한 대한민국 대설 취약성 분석. 한국습지학회 논문집, 25(4), pp.345-352.
이병재, 김학열, 김소윤(2018), 기후변화 홍수에 대한 국토 취약성 변화 분석 연구, 한국방재학회논문집, 18(6), pp.27-33.
이상혁, 강정은(2018), 도시계획 적용을 위한 도시홍수 취약성 및 리스크 평가, 국토계획, 53(5), pp.185-206.
이선미, 최영제, 이재응(2020), 엔트로피 가중치 산정방법을 활용한 도시지역 홍수취약

성 평가, 한국방재학회논문집, 20(6), pp.389-397.
이종석, 최현일 (2018), 기후변화취약성 평가지표 분류체계에 따른 홍수취약성 평가결과의 비교. 한국방재학회논문집, 18(3), pp.221-229.
이종석, 최현일(2018), 기후변화취약성 평가지표 분류체계에 따른 홍수취약성 평가결과의 비교, 한국방재학회논문집, 18(3), pp. 221-229.
장경은, 손동욱, 박초롱, 이종호(2023), 기후변화 종합 취약성 분석을 통한 재해 관리 강화방안-서울시를 중심으로-. 한국생태환경건축학회 논문집, 23(3), pp.39-50.
정윤환, 황윤성, 홍승호(2025), 사회경제적 요소를 반영한 침수취약성 지수 개발: 서울특별시를 중심으로. 대한토목학회논문집, 45(2), pp.161-171.
주홍준, 김수전, 이명진, 김형수(2018), 홍수취약성을 고려한 치수 투자우선순위 결정방안, 한국방재학회논문집, 18(2), pp.417-429.
황난희, 박희성, 정건희(2019), 한국 도심지에서의 홍수취약성 분석, 한국수자원학회논문집, 52(10), pp.729-742.

웹페이지·기타

KOSIS 국가통계포털 (2024). 가구원수별 가구.
국립농업과학원 (2024). 토양경사도.
국토교통부 (2023). 표준공시지가.
국토교통부 (2024). 건축물생애이력관리시스템.
국토교통부 (2024). 브이월드 (등고선).
국토교통부 (2024). 브이월드 (실폭하천).
국토교통부 (2025). 건축물대장.
세종시 (2022). 세종시 사업체조사 보고서.
세종시 (2022). 세종시 행정동별 기초생활수급자 인원수.
세종시 (2024). 세종시 장애인통계.
세종시 (2024). 세종시 주민등록인구통계.
세종시 (2025). 세종시 정원배정에 관한 훈령.
행정안전부 (2025). 전국민방위대피시설표준데이터.
환경부 (2021). 지역별 세분류 토지피복 면적 현황
환경부 (2021). 환경공간정보서비스.

세종시
홍수 취약성 평가 연구

세종연구원
SEJONG RESEARCH INSTITUTE

세종특별자치시 한누리대로 1966 로이어즈타워 7층
Tel. 044-550-3500 Fax. 044-868-3565
www.sri.re.kr

비매품/무료
93350
9 791124 215043
ISBN 979-11-24215-04-3