

도시 지역 수문특성 및 사회인구적 특성을 반영한 지반 안전성 평가 연구

최한나^{1,2*} · 심소정¹ · 이예빈^{1,2} · 정재훈¹ · 하규철^{1,2}

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²과학기술연합대학원대학교 지질과학

Influence of Integrated Hydrological and Socio-Demographic Characteristics on Ground Stability in Urban Areas

Hanna Choi^{1,2*}, Sojeong Sim¹, Yebin Lee^{1,2}, Jaehoon Jung¹, and Kyoochul Ha^{1,2}

¹Geo-Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

²University of Science and Technology, Geological Science, Daejeon 34113, Korea

ABSTRACT

Urban land subsidence has been increasing in Korea due to both natural and human factors. This study investigates the main causes of subsidence and proposes strategies for long-term ground stability in Sejong and Daejeon, rapidly developing cities in central Korea. A spatial database was established by integrating meteorological, hydrogeological, and socio-demographic data within a GIS framework. The results show that areas with low drainage capacity and unconsolidated alluvial deposits are highly vulnerable to subsidence, especially where roads and buildings are densely concentrated. Areas with high-density subsurface facilities exhibit lower groundwater levels and higher frequencies of subsidence, particularly in urban centers. The expansion of impervious surfaces and the rise in groundwater outflow further increase the risk of ground stability weakening. Sejong has experienced a rapid increase in groundwater wells indicating the need for continuous groundwater level monitoring. In Daejeon, large volumes of groundwater discharge from subways and buildings and the deterioration of aging pipelines emphasize the need for improved drainage systems and scheduled maintenance. This study provides a spatially integrated framework for analyzing urban ground stability and supports sustainable urban development through systematic subsurface management.

Key words : Land subsidence, Urban area, Natural factors, Social factors, Ground stability

1. 서 론

최근 국내에서 보고되는 지반침하 사례는 자연적 요인과 인위적 요인이 복합적으로 작용한 결과로 나타나, 발생 양상의 예측이 어렵고 복구 과정에도 다양한 기술적 접근이

요구되고 있다(MOLIT, 2024). 지하안전정보시스템(Underground Safety Information System)의 통계자료는 지반침하가 주로 굴착공사와 노후 매설관의 관리 부실에서 기인함을 보여준다(JIS, 2025). 이에 더해, 극한호우 및 지하수 양수 등으로 인한 지반 응력의 변화와 토사 유실이 침하의 주요 인자로 작용할 수 있다는 것이 국내외 여러 연구자들에 의해 제시되고 있다(Jeong et al., 2018; Ihm et al., 2018; Wang et al., 2019; Sulapas et al., 2024).

기후변화에 의해 극한기상 발생 빈도가 증가함에 따라 한국의 기후평년값은 2000년대 이후 연평균 강수량이 약 40 mm 이상 상승한 것으로 보고된다(KMA, 2025). 2019년 이상기후 보고서(OPC and KMA, 2020)에 따르면, 한국의 연평균 기온은 2010년대 이후 꾸준히 상승함과 동시에 매년 폭염이 이어졌다. 또한, 2010년대 초반은 강한 한파가, 2010년대 후반은 가뭄이 장기간 이어지며 국내 기후에 영향을 미친 것으로 나타났다. 또한, 2010년대 이

주저자: 최한나, 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터 선임연구원, 과학기술연합대학원대학교 부교수

공저자: 심소정, 충남대학교 환경IT융합공학과 석사; 이예빈, 과학기술연합대학원대학교 지질과학 석사과정; 정재훈, 한국지질자원연구원 지하수자원연구센터 기술원; 하규철, 한국지질자원연구원 지하수자원연구센터 책임연구원, 과학기술연합대학원대학교 교수

*교신저자: 최한나, 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터 선임연구원, 과학기술연합대학원대학교 부교수

E-mail: pythagoras84@kigam.re.kr

Received : 2025. 11. 06 Reviewed : 2025. 11. 19

Accepted : 2025. 12. 24 Discussion until : 2026. 02. 27

후 근대 기상관측 이래 가장 많은 수의 태풍이 국내에 영향을 미쳐(OPC and KMA, 2020), 한반도에서 극한기상의 발생 빈도와 강도 모두가 증가한 것으로 판단된다. 강수일수 및 강우강도의 증가를 의미하는 장마나 폭우와 같은 극한호우 시 다량의 물이 투수층에 침투하면, 토양의 부력 증가로 지반의 응력이 약해진다. 이러한 과정은 토양공극의 수화에 따른 지반 약화와 토사유출을 촉진하여 지반침하의 발생을 높일 수 있다(Zoback, 2010; Choi et al., 2022; Lee et al., 2023). 반면, 오랜 기간 강수가 없는 경우에도 토양 공극에 지하수 대신 공기가 채워지며 지반이 압밀되어 도로 함몰 등 지반의 안정성과 밀접하게 관련된 2차 변형이 일어날 수 있다(Sin, 2021; Choi et al., 2024).

국가지하안전관리 기본계획 보고에 의하면, 2014년부터 2023년까지 국내에서 총 2,084건의 지반침하가 보고되었으며, 가장 많은 발생 건수를 기록한 행정구역은 경기도(429건), 강원도(270건), 서울시(216건) 순으로 나타났다(MOLIT, 2024). 강원도의 높은 발생 빈도는 광범위한 석회암 지반의 분포, 다양한 채굴방식이 적용되었던 폐광의 존재, 지속적인 지하수 개발과 국지적 도시화의 복합작용에서 기인한 결과로 보고된다(Choi et al., 2008; Cho and Kim, 2012; Lee, 2025). 강원도는 상대적으로 인구밀도가 낮고 행정구역이 넓어 지반침하에 따른 피해 규모가 제한적이었으나, 주요 기반시설이 밀집한 도심지의 지반침하는 인명피해 및 경제적 손실이 연속적으로 발생할 가능성이 높다. 따라서, 이 연구는 기상이변이 본격적으로 보고되기 시작한 2010년대를 기준으로, 세종시와 대전시의 수문기상 및 사회인구 자료를 침하유발 인자로 활용하여 잠재적 위험지역을 탐색하고 대응 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 수문기상 및 사회인구적 특성 등 다양한 공간 데이터를 GIS 기반으로 통합하여, 지반침하 위험에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자의 공간적 분포를 시각화하고, 인자들의 중첩에 따른 잠재적 위험지역을 탐색적으로 제시하려 한다. 이러한 접근은 주로 2 m 이내의 깊이에 설치되어 천부 침하의 원인으로 꼽히는 상·하수관, 통신 시설 등의 지하매설물에 중점을 둔 기존 침하인자 탐색과 달리, 굴착공사 및 지하수위 변동 등 대규모 침하를 유발할 수 있는 심부 요인까지 통합적으로 논의해 본다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다.

침하 인자별 가중치를 적용하여 위험도를 평가하는 것은 과학적 근거 하에 더욱 신중하고 보수적인 접근이 필요하다고 판단하여 이 연구에서는 다루지 않았다. 다만 상술한 바와 같이, 인자들의 공간적 분포를 시각적으로 제시하여

앞으로 도시 확장이 이뤄지는 동안 침하를 방지하기 위해 개발 시 주의해야 할 요소들을 제안하고자 한다. 또한, 이 연구는 신도시 개발 및 구도심 재개발이 병행되는 국내 도시 여건에 대응하여 장기적 도시계획 및 지반 안정성 평가에 적용할 수 있는 종합적 해석기반을 시범적으로 제시함으로써 향후 지반침하 예방 및 도시 안전관리 체계 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역

2012년 출범한 세종특별자치시는 ‘세종특별자치시 설치 등에 관한 특별법’이 제정(2010년)됨을 계기로 민간기관 이전과 본격적인 도시개발이 이뤄지기 시작하였으며, 현재까지 행정중심복합도시로의 건설이 지속되고 있다. 세종시와 남북방향으로 인접한 대전 지역은 1995년 광역시로 승격된 이후 대전광역시로서 지속적인 성장을 이어왔으며, 2024년 기준 인구밀도가 2,718명/km²로 전국에서 다섯 번째로 높다. 주민등록 인구통계 조사자료에 따르면(KOSIS, 2025), 2025년 전국적으로 인구가 감소하는 추세임에도 불구하고, 대전시와 세종시의 인구는 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라, 두 지역 모두 정주여건 개선을 위한 인프라 확충 및 지하시설물 구축이 활발히 진행될 것으로 여겨진다. 대전시는 노후화된 지하 매설물의 구조적 취약성이 지반침하에 영향을 미칠 가능성이 높으며, 세종시는 활발한 굴착공사 및 지하수 양수와 관련된 활동들이 지반 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 장기적 도시개발의 지속가능성을 확보하기 위해, 이들 복합 도시지역의 취약점을 판단하고 이를 통해 지반 안정성 유지를 위한 관리체계 구축이 필요하다.

2.2. 활용인자

지반침하는 지반의 갑작스러운 함몰 혹은 지반구성 물질의 재배열에 따른 안정화(하강)를 의미하며, 침하의 원인으로는 크게 외부적 원인에 의한 지하수위 하강과 상하수도관 파열에 의한 토사유출이 꼽히고 있다(Jo and Lee, 2014). 침하에 관여하는 것으로 추정되는 인자들은 국내외 여러 연구자들에 의해 다루어진 바 있으나, 이 연구에서는 Zhan et al.(2025)이 제안한 수문, 지형, 사회, 인구 등 지반 침하 영향인자 가운데, 공공데이터로써 획득 가능한 요소들을 중심으로 선정하였다. 특히, 지하수위 하강으로 인해 나타날 수 있는 침하에 대해서는 연구지역의 강수량, 배수 등급, 지하수 양수량·유출량, 지하수위 등의 정보를 사회

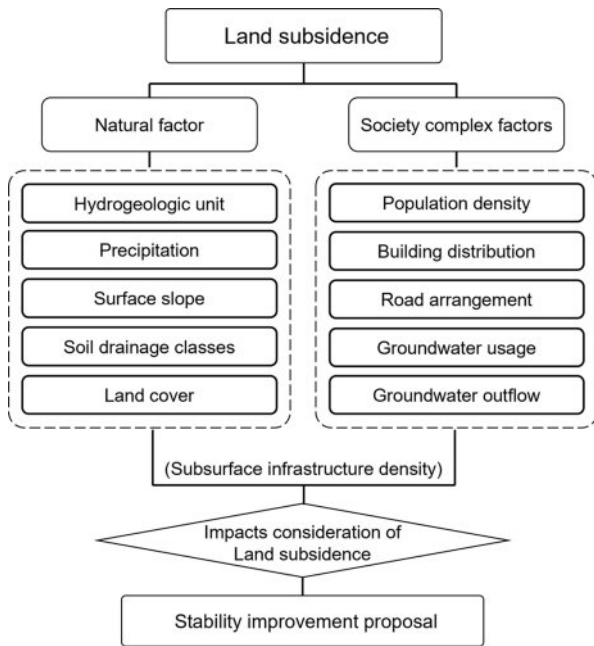


Fig. 1. Conceptual diagram of land subsidence factors and the overall research flow of this study.

인구적 정보와 함께 해석할 필요가 있다고 판단하였다. 세종시와 대전시의 잠재적 위험지역을 탐색하기 위해 사용한 자료는 자연적 영향인자로서 강수량, 토지피복, 수문지질, 배수등급, 지형경사를 고려하였으며, 인위적 영향인자로서 인구밀도, 건물 및 도로 분포, 용도별 지하수 사용량, 유출지하수량, 지하수 시설수를 포함하였다. 이러한 인자들을 종합하여 지역별 지반침하 발생건수를 종속변수로 고려하였으며, Fig. 1에 제시된 흐름에 따라 장기적 지반안정성 확보를 위해 고려할 주요 인자들의 관리방안을 제시하였다.

2.3. 자료수집 및 적용방법

연구자료 수집기간은 세종시의 출범과 공식적인 관측이 시작된 2012년부터 2024년으로 설정하였다. 강수량 자료는 기상청에서 운영 중인 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)의 오픈 API(Application Programming Interface)를 통해 공공데이터를 수집하였다(KMA, 2025). 토지피복, 수문지질, 배수등급, 지형경사 자료는 한국지질자원연구원에서 발간한 ‘금강권역 지하수 정보지도(Kim et al., 2021)’의 기본자료(환경부 환경공간정보서비스 <https://aid.mcee.go.kr>, 국립농업과학원의 흙도람 <https://soil.rda.go.kr> 등)를 참고하여 재가공 하였다(EGIS, 2025; KSIS, 2025). 지하수 시설 현황 및 용도별 사용량은 국가지하수정보센터(<https://www.gims.go.kr>)의 자료를 활용하였으며(GIMS, 2025), 해당 사이트에서

공개된 2023년까지의 지하수 정보를 기반으로 분석하였다. 또한 2023년의 유출지하수 발생원과 발생량 자료는 ‘2024 지하수조사연보(MOE and K-water, 2024)’를 참고하였으며, 보다 정확한 자료를 확보하기 위해 공공기관 정보공개청구 절차를 통해 추가 자료를 수집하였다. 지반침하 발생 현황은 국토교통부의 지하안전정보시스템의 오픈 API를 활용하여 데이터를 수집하였다(JIS, 2025).

위 인자들은 ArcGIS Pro 3.4.0 (Esri)을 활용하여 시각화하고, 중첩인자를 구별하기 위해 경사도, 배수등급, 인구밀도와 같은 공간자료를 통합 및 분석하였다. 경사도는 분위수 재분류 기법(reclassify quantile method)을 적용하여 평지와 산지의 분포를 5단계로 구분하였으며, 배수등급은 금강권역 지하수 정보지도를 참고해 동일한 구간을 가지는 ‘매우 불량’부터 ‘매우 양호’의 7단계로 구분하여 적용하였다. 배수등급은 토양 투수성에 따라 분류되며 불포화대 토양의 공극률, 입도분포, 침투능 등의 특성이 강수의 지하수 함양 및 지표 안정성에 미치는 영향이 클 것으로 판단되어 분석 인자로 활용하였다. 인구밀도, 건물 분포, 도로 분포 자료는 국토교통부 통계지리정보서비스(<https://sgis.mods.go.kr>)와 국토지리정보원(<https://www.ngii.go.kr>)의 공공데이터를 활용하였다(NGII, 2025; SGIS, 2025). 2024년 총인구수, 연속수치지형도의 건물 정보, 용도지역·지구의 도로 정보 셰이프파일(shp.)을 기반으로 격자 파일인 래스터(raster structure)로 변환하고, 분위수 기법을 적용하여 5단계로 재분류하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 자연 및 사회적 인자들의 분포 특성

연구지역은 한반도 남서부에 위치하며 세종시의 면적은 약 465 km², 대전시 면적은 약 540 km²으로 두 도시를 합한 면적은 충청도 전체 면적의 약 6%에 해당한다(Fig. 2a). 세종시는 도시의 동서방향으로 금강이, 남북방향으로 미호강이 흐르고 있으며, 주요 도시 지역은 남부에 위치하고, 산지는 서북부에 주로 분포한다. 대전시는 도심 중앙으로 갑천이 흘러나가며, 북쪽 경계에서 금강과 합류한다. 연구지역의 수문지질은 대부분 관입화성암으로 구성되어 있으며, 세종시 북부 및 대전시와 세종시의 경계 지역에는 결정질 편마암류가 분포한다(Fig. 2b). 대전시 남부와 중앙부에는 변성퇴적암류가 남동방향으로 협소하게 나타나며, 두 지역 모두 하천을 따라 미고결 쇄설성 퇴적층이 분포한다. 지형경사도(Fig. 2c)와 배수등급도(Fig. 2d)는 미고결 쇄설성 퇴적층 분포지역에서 상대적으로 낮은 값을 보인다. 토양

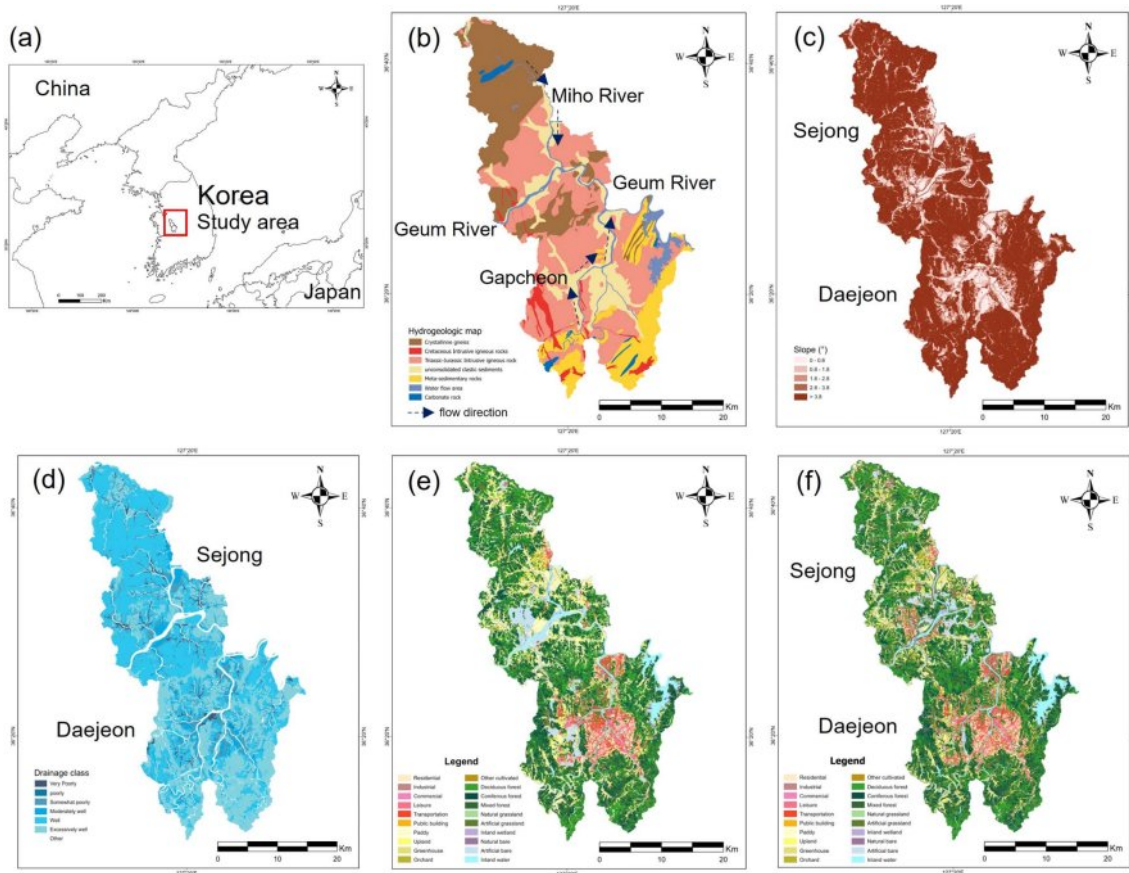


Fig. 2. Location of the study area (a); hydrogeologic unit (b); slope gradient (c); soil drainage classes (d); land cover classification in 2013 (e); and land cover classification in 2023 (f).

배수등급이 높을수록 하천 배수밀도는 낮아진다. 하천 배수밀도는 단위면적 당 존재하는 하천의 총 길이를 의미하는데, 지표투수율이 낮아질수록 강우의 침투가 감소하며, 하천 유로가 발달한다는 점에 기반하여 계산되기 때문에 토양 배수등급과 반비례한 관계를 보인다(Kim et al., 2021). 이는 하천 주변에 인프라가 집중되는 도시 특성과 토양 배수등급을 기반으로 한 지표 안정성 해석이 서로 유사한 관계 구조를 갖는 영향인자로 고려될 수 있음을 의미한다.

한편, Fig. 2e는 2013년, Fig. 2f는 2023년의 토지피복도를 나타내며 10년 간 연구지역의 토지이용 변화를 보여준다. 10년 동안 변화한 토지피복 인자별 변화율은 Appendix 1에 나타내었다. 2013년 대전시 서부의 갑천변과, 대전시 세종시 경계부, 금강 인근에 다수의 나대지(artificial bare)가 존재하였으나, 2023년에는 이 지역 대부분이 농업지대 및 교통시설(도로)로 전환된 것이 확인된다. 대전시의 일부 농지는 교통시설로 대체되었으며, 반대로 대전시-세종시 동쪽 경계부의 농지가 나대지로 변화한 것이 관찰된다. 이는 신규 인프라 구축을 위한 공간 확보로 여겨지며, 대전시와

세종시 전역에서 도로망 확충, 주거·상업지구 개발 등 활발한 도시 개발이 진행되고 있음을 시사한다. 한편, 세종시의 기존 도심이었던 조치원 지역은 세종시 남부의 행정복합 도시 개발에 비해 상대적으로 토지이용 변화가 적은 것으로 나타났다. 지난 10년간의 토지피복 변화는 대전시의 구도심 확장 및 신도시 연계 강화, 세종시의 계획도시 형성 가속화를 보여주는 것으로 판단된다.

2018년 지하안전법 시행 이후 지반침하 발생 신고가 의무화되면서, 지반침하의 주요 원인으로 매립물(상하수관 포함) 손상과 매설 및 굴착공사 부실이 보고되고 있다. 지하시설물 주변 토양유실은 강수 침투 혹은 지하수면의 상승 및 하강에 의해 토립자의 유출을 가속화하며, 이로 인해 공동이 형성되고 지반이 약화되어 침하가 발생할 수 있다(Kim, 2015; Lee et al., 2023). 폭우나 장마와 같은 장기적이며 집중적인 강우사건은 천부대수층 및 불포화대의 안정성을 저하시킬 수 있어, 연구지역의 강수량 분석 및 풍수기-갈수기 구분이 필요하다. Fig. 3은 2012년부터 2023년까지의 대전시와 세종시 강수량 자료를 나타내며, 연도별

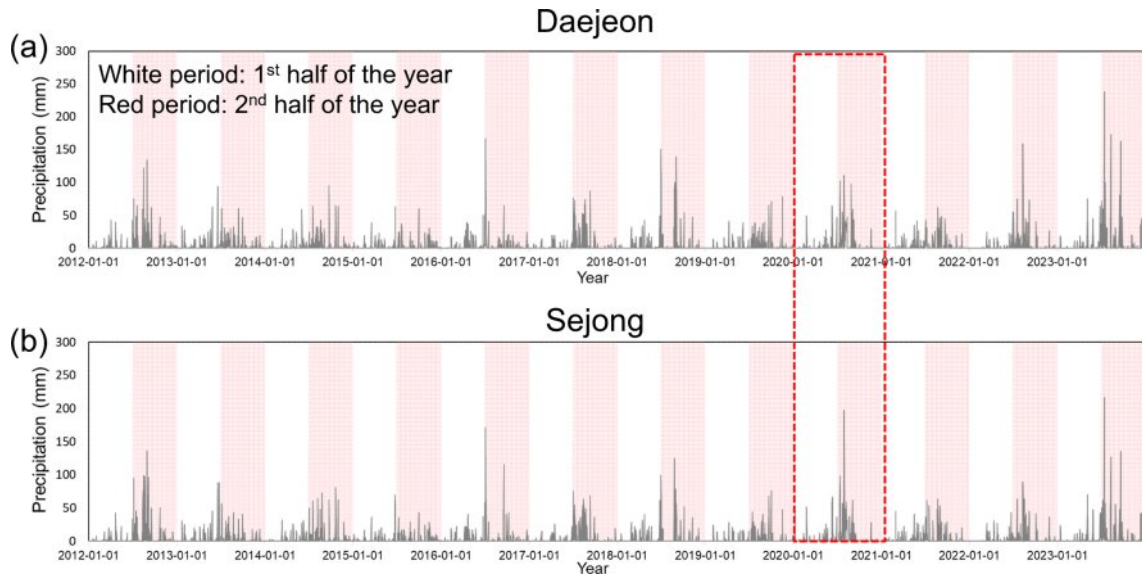


Fig. 3. Annual precipitation in Daejeon and Sejong from 2012 to 2023. Red box exhibits the highest precipitation and the longest duration of rainfall during the study period.

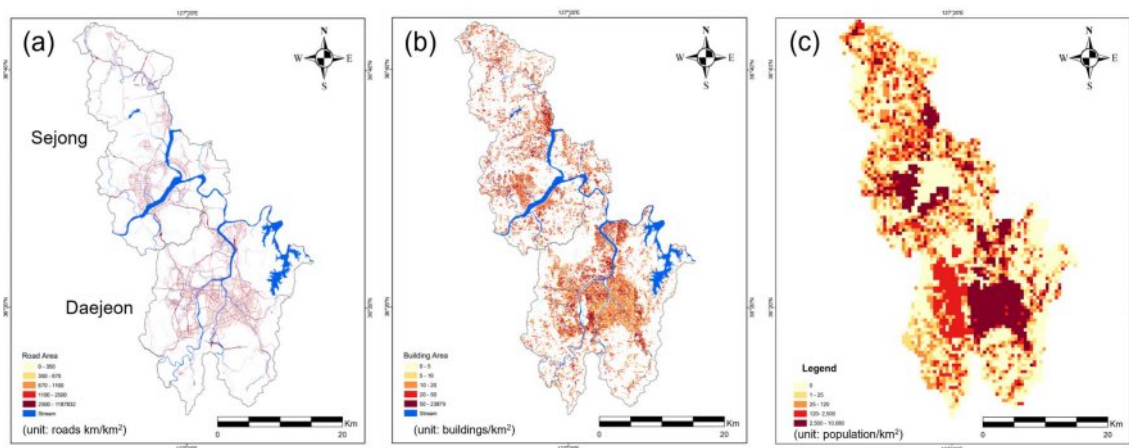


Fig. 4. Spatial distribution of (a) roads, (b) buildings, and (c) population density in Daejeon and Sejong for 2024.

강수량을 구별하기 용이하도록 상반기는 흰색 칼럼, 하반기는 분홍색 칼럼으로 나누어 표현하였다. 막대그래프의 높이는 강수량의 상대적 크기를 의미한다. 2020년은 극한 호우보다 장마로 인한 피해가 집중된 시기로, 기상청의 발표에 따르면 해당연도 7월은 평균기온이 낮고 정체전선이 한반도에 장기간 머무르며 많은 비가 내린 것으로 보고되었다(Fig. 3의 빨간 박스표시 부분). 강수사건이 장기간 이어지면 불투수층의 함수비가 증가하고, 모세관 흡수력 감소와 함께 지반 안전성 저하를 초래해, 표층파괴 및 토양 유실로 인한 침하로 이어질 수 있다(Kim, 2017). 또한, 강수로 인한 불포화대 공극 재배치 및 불량한 다짐 부위의 토사유출은 매설 관로의 수직수평 변위를 유발하고, 토압

하중의 불균형을 초래하여 관로의 파손을 일으킬 가능성이 있다(Zoback, 2010; Sin, 2021).

2024년 기준으로 지반 안정성에 영향을 미칠 수 있는 사회적 인자들의 공간 분포 특성을 시각적으로 제시하고자 도로와 건물의 배치, 인구밀도를 Fig. 4에 나타내었다. 세종시는 대전시 유성구와 대덕테크노밸리를 연결하는 두 개의 주요 도로축이 존재하며, 두 도시 모두 하천을 중심으로 도로망이 발달되어 있다(Fig. 4a). 이는 하천 주변 평지의 발달에 더하여 행정구역 경계를 따라 형성된 산지로 인해, 주거 밀집도 및 상업시설의 접근성과 편의성에 따라 도로가 계획·건설된 결과로 여겨진다. 연구지역 건물들은 도로 주변에 집중적으로 분포하고 있으며(Fig. 4b), 이들

정보는 공간을 대표하기보다는 국지적 혹은 선형의 정보로서, 건물·도로·인구분포는 공간밀집도가 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4c). 이는 앞서 제시한 토지피복도에서의 주거, 교통 및 상업지구 분포와도 일치하는 것으로 나타났다. Kim (2017)은 지하시설물의 밀집도가 높을수록 지반침하(지반함몰)의 발생빈도가 증가한다고 보고하였다. 이는 밀집 지역에서 반복적으로 수행되는 매설·복구 작업이 다짐 불량과 공동 형성을 초래하여 지반 안정성을 저하시킨 결과로 볼 수 있다.

3.2. 지하수 및 유출지하수 현황

3.2.1. 용도별 지하수 이용량과 관정의 분포

2023년 국내 지하수 이용량의 약 55%는 농업용수로, 약 40%는 생활용수로 사용되고 있다(Fig. 5a). 한국의 주요 대도시인 서울시와 부산시의 경우, 지하수 사용 용도 가운데 생활용수의 비율이 각각 약 83%, 73%로 매우 높게 나타난다(Fig. 5b, c). 서울특별시 물순환정보 공개시스템(<https://swo.seoul.go.kr/>)의 지하수시설 현황 자료에 따르면 농업용 지하수는 주로 공원관리, 원예·조경, 소규모 전담용으로 활용되고 있다(SWO, 2025). 서울시와 부산시는 고도로 개발된 도시이기 때문에 대규모 농업단지가 거의 존재하지 않으며, 이에 따라 농업용 지하수 수요가 매우 제한적이다. 또한 상수도 보급률이 높음에도 불구하고, 일부 주거

시설 및 상업시설에서는 식수 보조원, 냉·난방용수, 민방위 급수, 청소용수 등 다양한 생활 및 서비스 목적으로 지하수를 지속적으로 이용하고 있다. 이와 함께, 과거에 개발된 지하수 관정이 현재까지 운영되고 있어 생활용수로써 지하수 사용 비중이 전국 평균보다 현저히 높은 특성을 보인다.

대도시의 지하수 이용 양상과 달리, 세종시의 지하수는 농업용수 50%, 생활용수 36%로 전국의 지하수 활용 용도 평균치와 유사한 분포를 보인다(Fig. 5d). 이는 앞서 Fig. 2에서 논의한 바와 같이, 세종시는 현재 도시개발이 지속적으로 진행되는 한편, 전담과 과수원 등에서는 여전히 활발한 농업 활동이 이루어지고 있어 농업용수의 사용량이 높은 것이 반영된 것으로 판단된다. 또한, 다른 지역들에 비해 공업용수로 사용되는 지하수량이 상당히 많은 것이 보인다. 대전시는 농업용수 비율이 32%로 서울시와 부산시에 비해 높게 나타나지만, 생활용수 63%, 공업용수 4.7%로 대도시형 지하수 이용 형태를 보인다(Fig. 5e). 이는 대전시가 세종시에 비해 인구가 많고 농지가 상대적으로 적은 도시 환경을 가지고 있어 생활용수 중심의 지하수 이용이 이루어지는 것으로 해석된다.

대한민국 지하수법 제7조 및 제8조의 규정에 따르면(국가법령정보센터, <https://www.law.go.kr/>), 지하수 개발이용자는 동력장치 유무와 양수능력에 따라 허가 혹은 신고 절차를 거쳐야 한다(KLIC, 2025). 생활용수 및 공업용수의

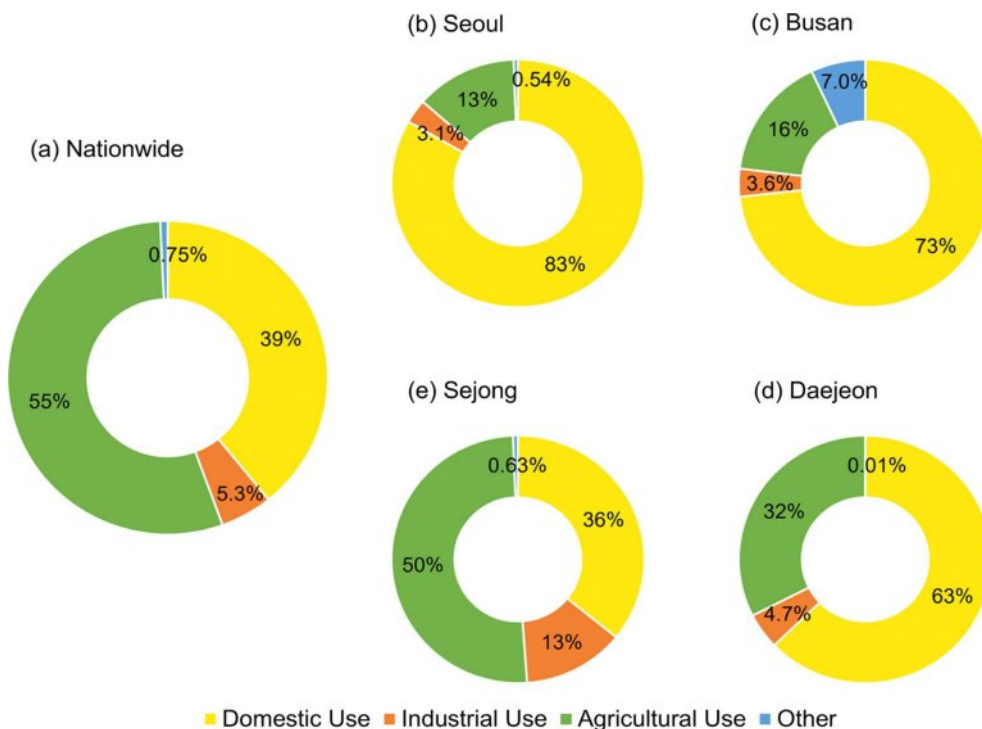


Fig. 5. Groundwater utilization rate by usage classification in Korea, Seoul, Busan, Sejong, and Daejeon in 2023.

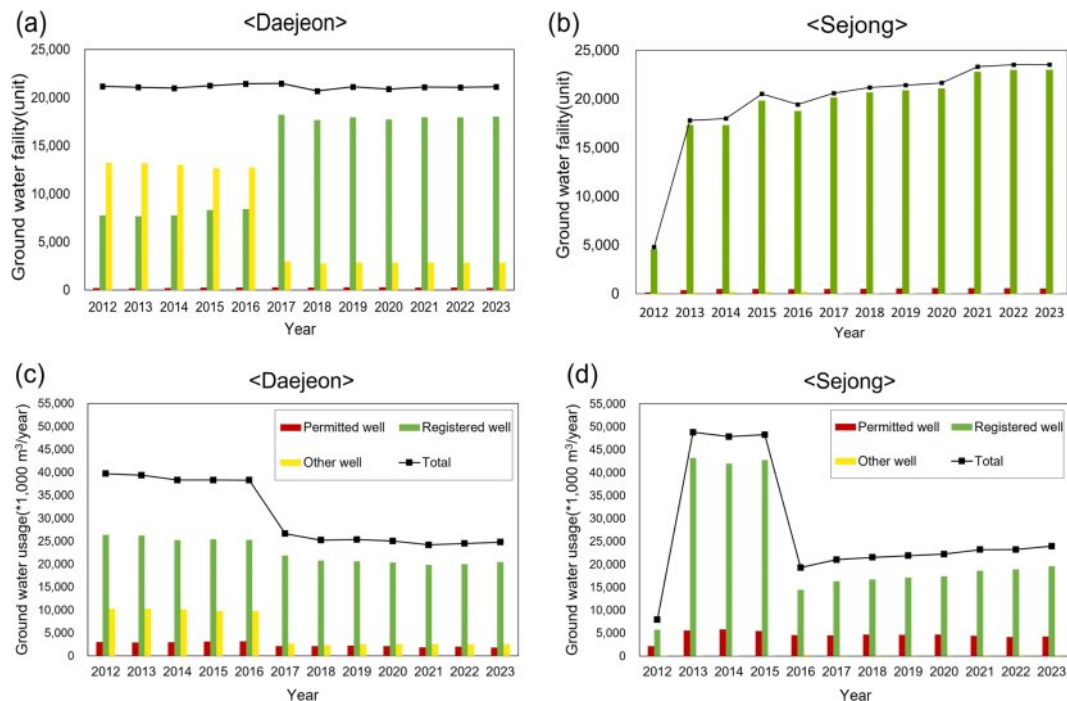


Fig. 6. Number of groundwater facilities in Daejeon (a), number of groundwater facilities in Sejong (b), groundwater usage by facility type in Daejeon (c), and groundwater usage by facility type in Sejong (d).

경우 1일 양수능력이 100톤(토출관 직경 40 mm)을 초과하는 경우 허가 관정에 해당하며, 그 이하의 경우 신고 관정으로 분류된다. 농·어업용수는 1일 양수능력 150톤(토출관직경 50 mm)을 초과하는 경우 허가 대상이며, 그 이하인 경우 신고 대상이다(KLIC, 2025). Fig. 6은 대전시와 세종시의 신고공, 허가공, 기타공의 시설수와 이용량 변화를 도시한 그래프이다. 대전시는 2017년 신고 관정 수가 급격히 증가하고 기타 관정 수는 크게 감소하였으나(Fig. 6a), 총 관정 수는 큰 변화가 없어 기존 기타 관정이 신고 및 등록된 것으로 해석된다. 세종시는 2013년에 전년 대비 약 3.7배의 관정이 보고되어, 도시 개발과 함께 활발한 지하수 양수 활동이 이루어진 것으로 보인다(Fig. 6b). 이후 세종시의 지하수 관정 수는 지속적으로 증가하여, 2023년 기준 약 23,500개로 대전시의 관정 수(약 21,000개)보다 약 10% 더 많이 존재하는 것으로 조사되었다.

한편, 두 지역 모두 지하수 사용량에서 뚜렷한 변화가 관찰된다. 국가지하수정보센터 통계에 따르면(GIMS, 2025), 대전시는 2017년 이후 신고공과 기타공의 지하수 사용량이 감소하였으며(Fig. 6c), 생활용수 및 농업용수 사용량 모두 감소하는 추세를 보였고, 이는 단위면적당 지하수 이용량($\text{m}^3/\text{년}/\text{km}^2$)통계에서도 동일하게 나타난다(GIMS, 2025). 반면 세종시는 개발 초기(2012~2013년) 지하수 사

용량이 급증하였으나, 2015~2016년 사이 전체의 약 60%가 감소하였고, 특히 신고공의 사용량 변동이 두드러졌다(Fig. 6d). 2016년 통계조사 결과에 따르면 세종시의 생활용 지하수 사용량은 전년 대비 약 71% 감소하였으며, 농업용 지하수는 약 55.4% 감소한 것으로 나타났다. 이는 세종시의 생활·농업용 지하수 관정이 주로 신고공 형태로 운영되었으나, 도시 확장 및 농업지대 축소로 상수도 이용이 증가함에 따라 지하수 사용량이 자연스럽게 감소한 것으로 해석된다. 그럼에도, 세종시의 지하수 총 사용량은 여전히 대전시와 유사한 수준을 유지하고 있어, 지반 안정성과 수자원 관리 측면에서 체계적인 관정 관리 및 장기적 이용 계획 수립이 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2. 유출지하수 발생량과 발생원

유출지하수는 지하철, 터널, 대형 건축물 등 지하시설물의 개발 및 유지 과정에서 인위적 활동에 의해 자연적으로 흘러나오는 지하수를 의미한다. 과거에는 이러한 지하수가 빗물·오수 집하관을 통해 하수처리장으로 배출되었으나, 지하수법 개정 이후 수질기준을 만족하는 경우 생활용수(소방, 조경, 청소, 냉·난방용수 등)로 활용할 수 있게 되었으며, 나아가 농·어업용수 및 공업용수로의 이용도 가능해졌다. 유출지하수 발생량이 많다는 것은 대수층으로

부터 배출되는 지하수의 양이 많음을 의미하며, 이는 도시개발 및 대형 공사 건수가 증가함에 따라 지하수위 저하, 토사유출, 지하공동 발생 가능성에 대한 우려로 이어진다(Kim and Jung, 2018). 2025년부터는 지하수법 제9조 제2항에 따라, 일정 규모 이상의 건축물(시설물)을 설치하거나 공공건축물 및 시설물이 준공된 이후, 기준용량 이상의 지하수가 유출되는 경우 관할 행정기관에 유출지하수 이용 및 사용 종료 신고를 의무적으로 해야 한다(KLIC, 2025). 기준이 되는 용량은 지하철·터널·전력 및 통신구의 경우 300톤/일, 연면적 10만 m² 이상 또는 21층 이상의 건축물의 경우 30톤/일이다.

국가지하수정보센터 지하수연보에 따르면(MOE and K-water, 2024), 유출지하수 발생량이 가장 많은 도시는 서울특별시로 나타났으며, 그 뒤를 이어 경기도, 대구광역시, 대전광역시, 부산광역시, 인천광역시 순으로 나타났다

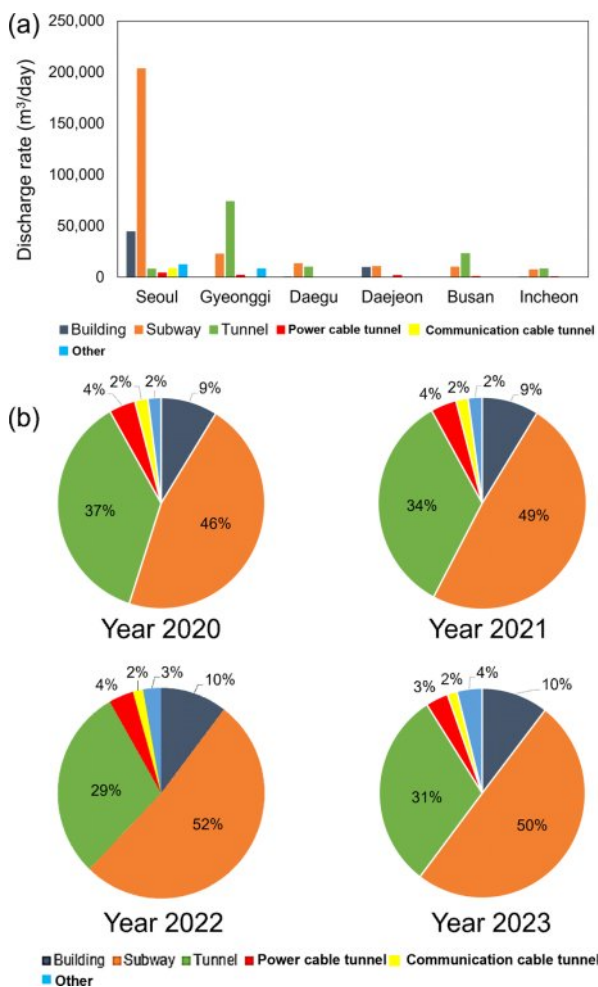


Fig. 7. Status of groundwater outflow occurrences by facility type per city in 2023 (a), and annual groundwater outflow occurrences by facility type from 2020 to 2023 (b).

(Fig. 7a). 서울시는 인구밀도가 가장 높고 다양한 도시 기반시설과 대형 건물이 밀집되어 있어 국내 전체 유출지하수량의 약 55.6%가 서울시에서 발생하는 것으로 보고되었다. 서울의 주요 유출지하수 발생원은 지하철 및 건축물이며, 그 다음으로 통신구·터널·전력구에서 배출되는 것으로 나타났다. 반면, 경기도는 터널, 대구시는 지하철역, 대전시는 지하철역과 건축물에서 거의 유사한 양의 지하수가 유출되는 것으로 조사되었다. 연도별 발생 추세를 살펴보면 유출지하수의 약 50%가 지하철로부터 발생하며, 그 뒤를 이어 터널에서 유출된 양이 약 35% 내외의 비율을 차지하는 것으로 조사되었으며, 두 발생원의 기여도는 전체의 80% 이상으로 다른 발생원에 비해 매우 큰 편이다(Fig. 7b). 2020년부터 2023년 사이 유출지하수의 전국적인 발생량과 연간 증감추세는 Appendix 2에 제시하였다. 유출지하수의 총 발생량은 꾸준히 증가하는 것으로 조사되었으며, 이 가운데 건축물과 기타시설물은 조사기간 동안 지속적으로 배출량이 증가하였다. 지하철 시설은 유출지하수가 발생하는 가장 주요한 원인으로 나타났지만, 2023년에는 전년도에 비해 발생량이 소폭 감소한 것으로 조사되었다. 기타 지하시설물에서의 지하수 배출량 증가가 지속되고 있어, 향후에는 유출지하수 발생원을 보다 세분화하여 관리할 필요가 있다.

3.2.3. 시도별 지반침하 보고 건수

대전시와 세종시의 장기적 도시개발 과정 동안 지반 안정성 유지 방향을 제시하기 위해, 이 연구에서는 지반 침하 발생 시기와 원인을 분석하였다. 이를 위해 국토교통부 지하안전정보시스템으로부터 2018년 1월부터 2024년까지의 지반침하 보고 건수를 수집하여 주요 시·군을 중심으로 Table 1에 제시하였다(JIS, 2025). 2018년 이전 자료는 지하안전법 시행 이전으로, 지반침하 신고가 통합 관리되지 않아 신뢰성과 정확한 발생 건수의 파악이 어려워 본 연구에서는 제외하였다. 연구 조사가 이루어진 2018년부터 2024년 사이 지역별로 발생한 지반침하 건수는 경기도가 22%로 가장 많았으며, 다음으로 광주시 11%, 부산시 9.6%, 서울시, 충청북도, 강원도의 순서로 약 8%씩 발생한 것으로 보고되었다(Table 1). 경기도는 서울시와의 접근성이 좋고 주택공급 및 인프라 건설사업이 활발한 지역으로, 국내에서 가장 많은 인구가 거주하고 있으며, 건설공사와 관련된 침하건수가 꾸준히 보고되고 있다. 그러나 연구기간 동안 세종시의 지반침하는 거의 보고되지 않았으며, 발생 원인도 수도관 손상 및 지하시설물과 관련되어 두루 나타나 특정 유발인자를 구별하기는 어려웠다.

Table 1. Reported cases of land subsidence by region in descending order of frequency from 2018 to 2024 (unit: cases)

Year	Gyeonggi	Gwangju	Busan	Seoul	Chungbuk	Gangwon	Jeonbuk	Gyeongbuk	Daejeon	Gyeongnam	Other region
2018	79	28	30	17	60	41	5	22	4	10	42
2019	53	20	15	13	6	5	6	1	20	32	22
2020	47	55	29	15	24	30	7	14	20	5	38
2021	35	13	17	11	2	5	14	12	8	5	20
2022	36	6	8	20	9	10	40	16	9	4	19
2023	26	28	16	22	10	18	3	8	9	9	12
2024	28	6	19	17	2	2	2	2	4	3	18
Total	304	156	134	115	113	111	77	75	74	68	171

Table 2. Reported causes of land subsidence in major cities in Korea (unit: cases)

Causes	Gyeonggi	Gwangju	Busan	Seoul	Chungbuk	Gangwon	Jeonbuk	Gyeongbuk	Daejeon	Gyeongnam	Other regions	Total
Water supply pipes damage	10	1	14	14	3	24	0	1	1	2	16	86
Sewer line damage	120	109	51	51	83	22	55	19	62	21	45	638
Other buried utilities damage	22	9	8	7	8	4	9	3	2	5	13	90
Poor excavation work	44	1	5	15	1	16	0	7	0	1	13	103
Poor backfill compaction	68	28	22	20	4	29	4	32	4	6	34	251
Poor construction of water and sewer pipelines	10	1	3	3	4	4	1	3	4	0	7	40
Poor construction of other buried utilities	13	1	4	1	3	2	0	1	0	2	1	28
Other causes	17	6	27	4	7	10	8	9	1	31	42	162

전국적으로는 지하안전법 시행 첫 해인 2018년에 338건의 지반침하가 보고되어 가장 많은 발생 빈도를 보였으며 (JIS, 2025), 이는 연간 거의 매일 침하가 발생한 수준이다. 그 다음으로 많은 횟수가 보고된 연도는 2020년으로, 연간 284건의 지반침하가 보고되었다. 기상청 통계분석에 의하면 2020년은 장마기간(기상청 기준 6월 하순~7월 하순) 중 전국 평균 강수량이 696 mm, 강수일수가 28.5일로 연구 기간 중 가장 높게 나타났다. 특히 장마기간 중 전국 평균 강수일수는 2000년대 들어 가장 높았던 것으로 보고되었다(KMA, 2025). 따라서, 장기간 지속된 강수에 따른 지반 안정성 저하가 이 시기 침하의 주요 원인으로 작용하여, 지반의 안정성이 낮아지며 침하 보고 건수가 증가한 것으로 판단된다.

지하안전정보시스템에 제시된 지반침하의 주요 원인은, 하수관 손상(약 46%), 다짐(되메우기) 불량(약 18%), 그 외 기타 요인 순으로 나타났다(Table 2). 대전시 또한 2019년과 2020년에 침하 보고 건수가 집중되었으며, 전체 발생의 약 84%가 하수관 손상에 기인한 것으로 조사되었다(JIS, 2025). 2024년 기준 전국 하수관로의 약 45%가 내구연한(20년)을 초과하였으며(하수도정보시스템, [https://](https://www.hasudoinfo.or.kr)

www.hasudoinfo.or.kr), 30년 이상 된 관로는 전체의 약 32%에 달한다(SIS, 2025). 이러한 문제를 해결하기 위해 노후 하수관로 정비 및 지반침하 안전점검 주기 단축, 그리고 1차(2020~2024), 2차(2025~2029) 국가지하안전관리 기본계획 등을 통해 체계적인 관리 및 정비 방안이 구축되고 있다. 한편, 현재 보고되는 침하의 대부분은 천부(깊이 2 m 이내)에서 발생하는 것으로 분류되며, 터널 등 굴착 공사와 관련된 심부(중규모 이상) 침하는 별도의 발생 메커니즘을 갖는다(Lee, 2025). 따라서 지반침하 원인을 심도 및 형태별로 세분화하여 관리할 필요가 있으며, 유출지하수 자료와 지하시설물 밀도 자료를 함께 비교할 수 있다면 침하 취약구간을 보다 정밀하게 도출하고, 체계적인 모니터링과 관리 전략을 수립할 수 있을 것이다.

Fig. 8a는 대전시와 세종시에서 발생한 지반침하 위치를 도로 및 건물 분포와 함께 도시한 결과로, 도로를 따라 건물이 밀집한 지역에서 침하가 집중적으로 발생한 것으로 나타났다. 연구지역 내 침하가 나타난 구역은 앞서 논의한 바와 같이 미고결 쇄설성 퇴적층이 하천 주변과 도심부에 분포하며, 토양 배수등급이 낮아 강수 시 배수가 원활하지 않을 것으로 예상된다. Jeong et al. (2016)은 느슨한 퇴적

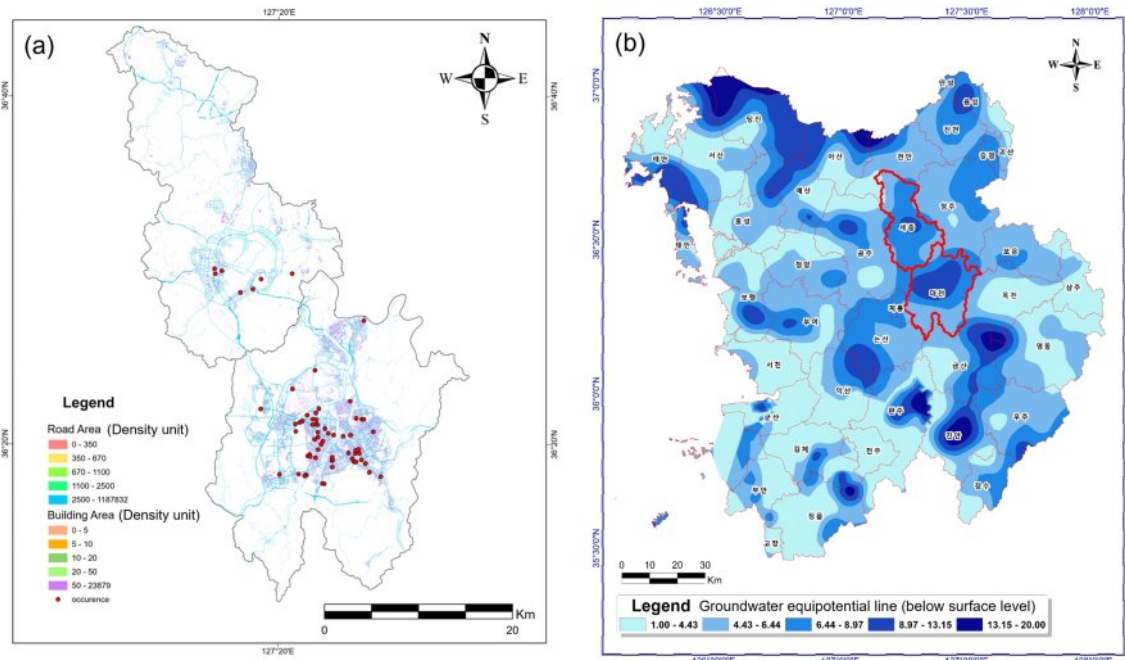


Fig. 8. Spatial distribution of roads, buildings, and reported land subsidence locations (a), and a contour map of groundwater levels in the Geum River Basin showing the study area in red (modified from Kim et al., 2021). Density units represent roads (km) and buildings (number) per square kilometer, respectively.

층에서 공동이 빠르게 형성되고 심부 침하가 발생할 수 있으며, 불포화대 대수층의 경우 지하수위가 지표에 가까울수록 침하의 발생 속도와 규모가 증가한다고 보고한 바 있다. 이러한 선행연구를 고려할 때, 대전시와 세종시의 침하지역 또한 강수 사건, 지하수 및 토양 특성과 같은 지역적 인자들이 지반침하에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 이와 함께, 지하시설물이 밀집된 도심지의 경우, 집중호우 시 침입수에 의한 공동 형성, 지하수위 변동에 따른 토사 유실, 그리고 상·하수 유출의 반복으로 인한 공동화가 침하로 이어질 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 지역에서는 지하매설물 시공 시 다짐 및 채움재 보강에 대한 엄격한 계획과 관리·감독이 필요할 것이다. Fig. 8b는 금강권역 지하수 정보지도(Kim et al., 2021)의 지하수 등수위선도를 재가공한 자료로서, 지표로부터 지하수면까지의 깊이를 나타낸다. 그림의 빨간색 실선으로 표시된 세종시와 대전시는 도로와 건물의 밀도가 높은 곳을 중심으로 지하수위가 더 깊게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 지하수 양수 혹은 유출지하수가 연구지역 지하수위에 미치는 영향이 크며, 장기적 개발이 진행되며 지하매설물이 많아질수록 지하수위는 더욱 하강할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 배수 시스템의 확충, 집중 개발 지역의 장기 모니터링, 지하 매설물 정보의 통합 관리 및 유출지하수를

포함한 지하수 정보공유 체계의 구축이 필요하다.

4. 결론 및 제언

집중호우나 장마 시 불포화대의 함수비가 증가하면 지반의 전반적 안정성이 저하될 수 있으나, 실제 침하 발생에는 지하수위 변동, 노후화된 지하시설물의 누수, 굴착공사로 인한 지반 교란 등 여러 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 세종시와 대전시는 하천 주변에 상대적으로 연약한 퇴적층이 분포하고, 도로 및 건물이 밀집하며 지형경사가 낮아 배수능력이 제한되는 특성을 가진다. 이러한 조건에서는 집중호우 시 지하시설물의 구조적 취약부를 통한 침입수에 의한 토사 유실, 공사구간의 연약화, 지하수위 급변 등에 의해 공동 및 침하가 발생할 가능성이 더욱 커질 수 있다. 따라서 침하 취약지역의 안정성 확보를 위해서는 단순한 배수시설 확충뿐만 아니라, 노후 관로의 누수 모니터링 및 교체, 굴착공사 시 지반교란 최소화, 지하시설물 주변의 적정 다짐관리, 지하수위 변동 감시 등 다각적인 예방·관리 전략이 함께 적용될 필요가 있다.

또한 유출지하수의 증가는 지하수위 하강, 토사 유실, 지하공동 형성 등 지반 안정성을 저해하는 다양한 문제를

야기할 수 있다. 특히 대전시는 지하철 및 대형 건축물에서 배출되는 유출지하수의 양이 많아, 이로 인한 지하수위 저하와 지반 약화가 우려된다. 본 연구 결과에서도 대형 건축물 등 지하시설물이 밀집된 지역에서 지하수위가 상대적으로 낮게 나타났으며, 인구가 집중된 도심지에서 지반침하 발생 빈도가 높은 것으로 확인되었다. 세종시의 경우 2013년 이후 관정 수가 급증하여 2023년 기준 대전보다 약 10% 많았고, 지하수 이용량 또한 높은 수준을 유지하고 있어 지속적인 관리가 요구된다. 따라서 지반 안정성 확보를 위해서는 정기적인 지하수위 모니터링과 더불어 지하수 이용 및 유출지하수 관리에 대한 체계적인 대응이 필수적이다.

세종시는 2012년 출범 이전부터 존재하던 다수의 농업용 및 생활용 지하수 관정에 대해서도 지반 안정성을 유지할 수 있도록 적정 취수량에 대한 기준 설정이 필요하다. 또한 세종시의 지하관로는 매설 연한이 비교적 짧아 구조적 노후화 우려는 크지 않지만, 장기적인 지반 안정성 확보를 위해서는 개발 밀집이 예상되는 지역을 중심으로 배수시설 확충, 매설 공정의 철저한 품질 관리, 매설물 밀집도 조절 등과 같은 선제적 관리 체계를 마련할 필요가 있다. 대전시는 장기간의 도시 개발 과정에서 노후 상·하수도관에 기인한 지반침하 사례가 다수 보고되어 왔으며, 이에 대응하기 위한 노후 관로 정비사업이 지속적으로 추진되고 있다. 상·하수관 매설이 인구 밀집지역에 집중되어 있다는 점을 고려하면, 지하 공동 발생을 억제하고 침하를 조기에 탐지하기 위한 모니터링 체계의 강화가 필수적이다. 특히 대전은 하천을 따라 도로와 기반 인프라가 밀집해 있고, 주거시설 또한 도심 내에 조밀하게 분포하고 있어 추가적인 안전시설 설치나 관로 교체가 현실적으로 제약을 받는다. 이러한 여건을 감안하면, 지하시설물 현황과 지하수 사용 및 유출지하수 발생량 등 관련 정보를 투명하게 공개하고, 매설물 밀집 지역이나 지하수위 변동이 반복적으로 크게 나타나는 구역을 대상으로 지표투과레이더(GPR) 및 물리검층 등과 같은 비파괴 조사기법을 활용한 상시 모니터링을 구축 운영하는 것이 필요하다. 이러한 접근은 지반 안정성 확보뿐 아니라 도시 안전관리 체계의 실질적 강화에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원에서 수행하고 있는 주요 사업 “지속가능한 지하수 최적 활용·보전관리 고도화 기술 개발(25-3411)”의 지원을 받아 수행하였습니다. 논문의 작

성에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 지하수환경센터와 지하수자원센터분들께 감사드립니다.

References

- Cho, M.J. and Kim, S.W., 2012, Analysis of Ground Subsidence Using ALOS PALSAR (2006–2010) in Taebaek, Kangwon. *Econ. Environ. Geol.*, **45**(5), 503-512.
- Choi, C.H., Kim, J.Y., Kang, J.M., Lee, S.Y., and Baek, W.J., 2022, Ground Subsidence Risk Analysis on Correlation Between Rainfall and Rainfall Intensity. *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **64**(3), 75-83.
- Choi, H., Han, J.G., and Han, S., 2024, Influences of Deicing Agent Usage on the Variation of Conservative Ion Concentrations in Groundwater According to Meteorological Characteristics: Suggestions for Public Data Availability. *J. Soil Groundwater Environ.*, **29**(4), 44-57.
- Choi, J.K., Kim, K.D., Song, K.Y., and Jo, M.J., 2008, A Study on the Correlation Between Coal Mining Subsidence and Underground Goaf. *Econ. Environ. Geol.*, **41**(4), 453-464.
- EGIS (Environmental Geographic Information Service), 2025, Environmental theme map. Available online: <https://aid.mcee.go.kr> [accessed 25.08.04]
- GIMS (Integrated Ground Water Information System), 2025, Groundwater Statistics. Available online: <https://www.gims.go.kr> [accessed 25.09.14]
- Ihm, M.H., Shin, S.S., Kim, W.S., and Kim, H.J., 2018, Ground Subsidence Risk Ratings for Pre-excavation. *The J. Eng. Geol.*, **28**(4), 553-563.
- Jeong, S., Tarek, K., Jeong, Y., and Kim, D., 2017, Experimental Study on Ground Subsidence and Underground Cavity Expansion Under Various Conditions. *The J. Eng. Geol.*, **27**(2), 143-152.
- Jeong, S.-W., Kim, S.-W., Yum, B.-W., Kuwano R., 2016, Experimental results on compaction and groundwater level dependent ground subsidence using a small-sized laboratory tank model. *J. Korean Soc. Hazard Mitag.*, **16**(6), 309-317.
- JIS (Underground Safety Information System), 2025, Land subsidence accident statistics. Available online: <https://www.jis.go.kr> [accessed 25.08.04]
- Jo, S.-H., and Lee, G.-S., 2014, Investigation into Ground Subsidence in Urban Areas: Causes, Case Studies, and International Countermeasures. *Disaster Prev. Rev.*, **16**(3), 16-23.
- Kim, J.Y., 2017, Correlation analysis of sewer integrity and ground subsidence, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **18**(6), 31-37.
- Kim, S., and Jung, K., 2018, Experimental Study on Influence of Ground Collapse due to ground water level lowering. *J.*

Korean Geo-Environ. Soc., **19**(11), 23-30.

Kim, Y., Ha, K., Moon, S.H., Kim, H., Koh, D.C., Ko, K.S., Cho, B., Lee, B., Yun, U., Choi, H., Lee, C.M., Jun, S.C., Kim, S., Lee, S.C., Lee, S.M., and Choi, Y.S., 2021, Groundwater Information Map of the Geumgang River Basin. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), DaeJeon, Korea. ISSN 979-11-90505-22-2 (93450).

Kim, Y.S., 2015, Environmental Impact Assessment and Prevention of urban "Sinkholes". Korea Environment Institute publisher, Sejong, Korea.

Kim, Y.S., Kim, J.H., Lee, J.K., and Kim, S.S., 2013, A Study on Soil Slope Stability Design Considering Seepage Analysis. *J. Korean Geotech. Soc.*, **29**(1), 135-147.

KLIC (Korean Law Information Center), 2025, Groundwater Act. Available online: <https://www.law.go.kr> [accessed 25.09.10]

KMA (Korea Meteorological Administration), 2025, KMA weather data service - Open MET data portal. Available online: <https://data.kma.go.kr> [accessed 25.09.10]

KOSIS (Korean Statistical Information Service), 2025, Resident registration population statistics. Available online: <https://kosis.kr> [accessed 25.08.08]

KSIS (Korea Soil Information System), 2025, Soil environmental map. Available online: <https://soil.rda.go.kr> [accessed 25.08.04]

Lee, J.-Y., 2025, Characteristics of Ground Subsidence in Korea Based on Data from the Underground Safety Information System: Implications for effective countermeasures. *J. Geol. Soc. Korea*, **61**(2), 171-180.

Lee, Y.Y., Lee, D., Bae, E.J., Lee, C.M., and Choi, H., 2023, Analysis of Land Subsidence Risk Factors Considering Hydrological Properties, Geomorphological Parameters, and Population Distribution. *J. Soil Groundwater Environ.*, **28**(6), 45-57.

MOE (Ministry of Environment) and K-water, 2024, 2024 groundwater annual report (in Korean), MOE and K-water, Sejong.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2024, The 1st and 2nd National Master Plan for Subsurface Safety Management (in Korean), MOLIT, Sejong.

NGII (National Geographic Information Institute), 2025, National land information map. Available online: <https://www.ngii.go.kr> [accessed 25.08.08]

OPC (Office for Government Policy Coordination) and KMA (Korea Meteorological Administration), 2020, 2019 Report on Extreme Climate: 10th Anniversary Special Edition (in Korean). KMA publisher, Sejong.

Sin, J.K., 2021, Study on the Application of Press in Steel Pipe Pile for Restoring Building of different settlement, Master thesis, Wonkwang University Press, Iksan, Korea.

SIS (Sewer Information System), 2025, Sewerage statistics. Available online: <https://www.hasudoinfo.or.kr> [accessed 25.09.10]

Sulapas, J.J.S., Ybañez, A.A.B., Marasigan, K.M.M., Grageda, J.M.B.M., and Lagmay, A.M.F.A., 2024, Ground Subsidence in Major Philippine Metropolitan Cities from 2014 to 2020. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, **133**, 104107.

Wang, Y.Q., Wang, Z.F., and Cheng, W.C., 2019, A Review on Land Subsidence Caused by Groundwater Withdrawal in Xi'an, China. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **78**(4), 2851-2863.

Zhan, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Xu, J., Chen, H., Liu, G., and Wan, Z., 2025, Risk Assessment of Land Subsidence in Shanghai Municipality Based on AHP and EWM. *Sci. Rep.*, **15**(1), 7339.

Zoback, M.D., 2010, Reservoir Geomechanics, Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom.

Appendix 1. Percentage changes in land cover in Sejong and Daejeon over 10 years.

Categories	Sejong		Daejeon	
	2013	2023	2013	2023
Public building	0.28%	0.46%	0.97%	1.33%
Industrial	0.89%	0.77%	0.91%	1.05%
Orchard	1.48%	2.92%	0.53%	1.15%
Transportation	1.96%	3.07%	6.52%	5.70%
Artificial bare	5.94%	0.91%	3.26%	0.43%
Other cultivated	0.63%	1.98%	0.21%	4.59%
Inland water	2.14%	1.85%	3.93%	1.37%
Inland wetland	1.93%	8.92%	1.53%	2.11%
Paddy	15.57%	0.19%	4.41%	0.46%
Leisure	0.03%	11.86%	0.23%	7.94%
Upland	11.65%	1.03%	8.09%	3.05%
Commercial	0.53%	0.78%	3.21%	0.78%
Greenhouse	0.41%	4.71%	0.61%	2.00%
Artificial grassland	2.06%	14.08%	5.31%	9.36%
Nature bare	0.14%	0.30%	0.32%	0.28%
Nature grassland	3.13%	0.01%	2.87%	0.02%
Residential	1.73%	2.41%	6.52%	7.39%
Coniferous forest	15.11%	12.66%	17.14%	17.16%
Mixed forest	6.00%	5.57%	8.84%	9.44%
Deciduous forest	28.42%	25.51%	24.59%	24.42%

Appendix 2. Nationwide groundwater outflow occurrences (m³/day) from 2020 to 2023 with year-to-year variation rates (in parentheses).

Year	Total	Building	Subway	Tunnel	Power duct	Communication duct	Other
2020	350,206	30,972	161,598	128,844	14,444	7,212	7,136
2021	459,950 (31.34%)	40,577 (31.01%)	224,968 (39.21%)	157,251 (22.05%)	18,463 (27.82%)	8,670 (20.22%)	10,021 (40.43%)
2022	522,971 (13.70%)	54,308 (33.84%)	271,022 (20.47%)	154,373 (-1.83%)	20,233 (9.59%)	8,347 (-3.73%)	14,688 (46.57%)
2023	541,362 (3.52%)	56,654 (4.32%)	269,924 (-0.41%)	165,893 (7.46%)	19,139 (-5.41%)	8,347 (0.00%)	21,405 (45.73%)