

수문 및 지형특성과 인구분포를 고려한 지반침하 발생 평가인자 분석

이예영¹ · 이다해² · 배은지³ · 이충모⁴ · 최한나^{5*}

¹경희대학교 지리학과

²한양대학교 자원환경공학과

³경북대학교 지구시스템과학부

⁴부산대학교 지질환경과학과

⁵한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부

Analysis of Land Subsidence Risk Factors Considering Hydrological Properties, Geomorphological Parameters, and Population Distribution

Ye-Yeong Lee¹ · Dahae Lee² · Eun-Ji Bae³ · Chung-Mo Lee⁴ · Hanna Choi^{5*}

¹Department of Geography, Kyung Hee University

²Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

³School of Earth System Science, Kyungpook National University

⁴Department of Geological Sciences, Pusan National University

⁵Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

To assess land subsidence estimation and preparedness in the Geum River basin, this study applied GIS techniques and identified six key areas. The Geum River basin has experienced an increase in heavy rainfall since late 2010, and four study areas have shown an increase in groundwater levels. Land subsidence primarily occurred from June to September, with higher rainfall years in 2020 and 2023. Approximately 83.6% of land subsidence in Chungcheongbuk-do province occurred in Cheongju-si, mainly attributed to aging sewage pipes. The regions experiencing population growth have likely led to the construction of underground infrastructures and sewer pipes. Thus, it is considered that various factors, including sewage pipe leaks, precipitation, slope gradient, low drainage density, and groundwater level fluctuations, have contributed to land subsidence. Improving land subsidence estimation involves incorporating additional natural factors and human activities.

Keywords: Land subsidence, Aging sewage pipes, Groundwater level, Precipitation event, Slope gradient, Drainage density, Population density

1. 서 론

전 지구적 기후변화가 지속되며 가뭄과 홍수 등 극한기후 현상의 빈도가 증가하고 있다(IPCC, 2021). 한국에서도 장마 및 태풍 발생기간 동안 이상기후현상이 증가하였다는 사례가 보고되고 있으며, 특히 시간적·공간적으로 호

우가 집중되는 경우 심각한 피해를 입기도 한다. 기상청의 자료에 의하면 2023년 장마기간(6월 25일~7월 16일) 동안 누적 강수량은 충청권 654.4 mm, 호남권 614.4 mm, 영남권 481 mm로 3개 권역 모두 평년(238.3 mm~251 mm)의 2배를 넘었으며, 강수일수도 15일~17일로 기상관측 이래 가장 많은 비가 내렸다. 강수는 대수층에 함양되어 지하수위의 상승 및 하강에 관여하고, 각 사건별 강수강도와 총 강수량은 자유면 대수층 상부 불포화대 토양 결합력에 영향을 미칠 수 있다(Yoo and, Kim, 2010; Fetter, 2018). 홍수와 태풍 등 강한 강수가 나타났을 때, 상부의 유수가 비탈면으로 유입되면 지표하부와 대수층 상부 사이에서 중간류(interflow)가 발생하고 천부 매립시설 주변

주저자: 이예영, 학부과정

공저자: 이다해, 석사과정; 배은지 학부과정; 이충모, 조교수

*교신저자: 최한나, 선임연구원

Email: pythagoras84@kigam.re.kr

Received : 2023. 10. 24 Reviewed : 2023. 11. 12

Accepted : 2023. 11. 27 Discussion until : 2024. 02. 29

의 토사유실이 발생할 가능성이 있다. 상하수도관의 누수나 지하시설 유지를 위한 지하수 양수 등 배출시설에 의해 토양층의 공극이 비면, 중력에 의한 다짐효과가 일어나고 침수방향으로 토립자가 쏠리며 지반이 약화되어 지반침하가 나타날 수 있다. 특히, 도심지역에서 지하 구조물 공사가 이뤄지며 지하수의 유동경로가 차단되면 지반의 압밀침하(consolidation settlement)가 발생하며 도로함몰 혹은 지반침하(지반함몰)가 나타날 수 있다(Sin, 2021). 대수층의 지하수는 지표에서 작용하는 응력에 대응하여 지반을 지지하는 역할을 하므로, 외부적 요인으로 인해 지하수의 이상거동이 발생하는 경우, 지하수가 더 이상 응력을 지지하지 못해 지반 약화가 일어날 수 있다(Zoback, 2010). 따라서 장기간에 걸쳐 대수층 수위변동 범위를 파악하고, 수위회복이 가능한 안정범위를 벗어났다고 판단되는 경우 자연적 요인과 인위적 요인을 각각 분리하여 지반침하 발생 기여요소를 파악하고, 대응방안을 제시하는 것이 중요하다.

지반침하 메커니즘의 분석을 위해 많이 활용되는 인자로는 강수의 시계열 자료, 토양수분, 식생분포와 인구밀도 등이 있는데 이러한 자연적·인위적 인자들의 영향이 복합적으로 반영되어 도로 및 건축물의 침하가 발생하는 것으로 보고되고 있다(Lee and Koo, 2007; Sin, 2021; Oh et al., 2022). 지반침하 연구는 과거에 구조물 건설 및 관리를 위한 시공설계의 관점에서 많은 연구가 이루어졌으나, 최근에는 자연재해와 개발밀도 상승 등 수문학적 관점을 함께 고려하여, 복합적 요인에 의한 지반침하를 다루는 연구가 증가하고 있다(Lee and Koo, 2007; Kim and Lee, 2018; Oh et al., 2022). Oh et al.(2023)는 금강유역을 14개의 중권역으로 세분하여 지하수량의 장기적 영향 인자를 연구하였으며, 연구지역 가운데 무주남대천, 대청댐 하류, 대청댐이 인간활동에 의해 더 많은 영향을 받고, 그 외의 중권역은 기후변화의 영향을 더 크게 받는 것으로 보고하였다. Oh et al.(2022)는 강수의 유입이 지하수위 상승에 기여하는 정도를 파악하고, 수위변동이 지반 변위에 얼마나 많은 영향을 주는지 확인하고자 서울시와 충청북도의 수문인자를 분석하였다. 강우발생 시 도심과 산지에서 공통적으로 지하수위가 상승하였으며, 산지는 표토의 토양포화도 증가에 따른 토사유출이 발생하고, 도심지는 지하수위 상승에 따라 일시적으로 지반의 유효응력(effective stress)이 감소하는 가역적 응기가 나타남을 보고하였다. 이와 같이 지반침하의 발생 가능성을 예측하여 선제적으로 대응하고, 사후대책을 수립하기 위해서는 수문학적 특성과 인간의 정주 여건을 복합적으로 고려하여

야 할 것이다.

2021년 한국의 지하수 이용량(2,980백만 $\text{m}^3/\text{년}$)은 대부분 농업용(1,600백만 $\text{m}^3/\text{년}$, 전체의 53.7%)과 생활용(1,191백만 $\text{m}^3/\text{년}$, 전체의 40%)으로 사용되고 있다(Molit and K-water, 2022). 이 시기 한국의 지하수 사용시설은 충청남도에서 29만 9천개소로 가장 많았으며, 단위면적당 지하수 일 이용량 역시 제주도와 인천시를 제외하고 세종시($136.7 \text{ m}^3/\text{일}/\text{km}^2$), 충청남도($125.8 \text{ m}^3/\text{일}/\text{km}^2$), 대전시($122.7 \text{ m}^3/\text{일}/\text{km}^2$)의 순으로 높게 나타난다. 이는 상수시설의 보급과는 별개로, 해당 지역들의 생활 및 농업시설 유지에 지하수의 의존률이 상당히 높음을 의미한다. 통계청에서 2022년 발표한 인구통계자료에 의하면(<https://kostat.go.kr/>), 2020년 가구 증가율은 세종시, 경기도, 충청북도 순으로 높고, 대전시는 2022년 한국에서 유일하게 인구가 증가한 지역으로 조사되었다(Statistics Korea, 2023). 이와 같이 도심과 비도심 특성이 고루 나타나는 금강권역은 자연적 요인과 인위적 요인에 의한 지반침하의 가능성을 두루 살펴볼 수 있다. 이 연구에서는 금강권역의 강수량, 지하수위, 댐과 하천의 위치 등 수문특성, 배수밀도, 경사도 등 지형특성과 인구밀도, 지역별 지반침하 등의 인간활동 요인을 지반침하 발생 요소로 종합적으로 고려하고, 예측 및 대비를 위한 평가인자를 제안하고자 한다. 이는 산사태 및 지반시설물 분야에서 주로 수행되어온 재난발생가능성에 대해 새로운 해석방향을 제안한다는 점에서 이전 연구와 구분되며, 도시계획 및 환경안정성을 평가하는 연구자들에게 자연적 요인 및 사회적 요인을 고려한 구조적 해석 방안을 제시한다는 점에서 의미 있는 기여를 할 것으로 판단한다.

2. 연구방법

금강권역은 한국 전체 면적의 약 10%에 달하는 거대한 유역으로, 약 $17,537 \text{ km}^2$ 에 달하는 면적을 가지며 4개 대권역, 21개 중권역, 27개 단위유역, 137개 표준유역으로 구성된다. 금강권역은 산악지형과 해안지형이 모두 존재하여 행정구역별 토지이용 특성 및 인구밀도에 큰 차이가 있다. 연구지역 식생의 다양성, 지형특성 및 수문학적 특성의 편차는 지하수 과다양수, 지하매설물 증가 등 외부적 요인에 의한 지반침하에 영향을 미칠 것으로 판단하여, 금강권역을 좀 더 세분화하여 각 시·군 별로 자료 수집을 진행하였다. 이 연구에서는 대수층과 기상정보를 통합한 지반침하 발생 위험성을 예비적으로 평가하고자, 지하수위 변동에 영향을 미치는 주요 수문인자와 지반침하 발생

보고 자료를 수집하였다. 국가지하수정보센터(<https://www.gims.go.kr>)의 오픈 API(Application Programming Interface)로부터 행정구역별 측정망 제원을 검토하고, 일 단위 지하수위 정보를 활용하였다(GIMS, 2023). 장마와 태풍이 집중적으로 발생하여 지반침하와 연관이 있을 것으로 판단되는 하계(6월~9월) 지하수위 자료를 2014년부터 2023년까지 10년에 걸쳐 수집하여 각 행정구역별 장기 지하수위 변동을 확인하였다. 충남 예산의 경우 예산1 관정이 2014년에 설치되었기 때문에, 2015년부터 9년간의 자료를 수집하였다. 지하수 관정은 10년 이상의 장기 관측 자료가 존재하며, 인구밀집 지역과는 떨어져 있으며, 행정구역별로 공간적 대표성을 가질 수 있도록 각 시·군 별로 3개씩 선정하였다. 조사 지역의 강수량 자료는 기상청의 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)의 오픈 API 자료를 활용하였으며 수집 시기는 지하수위 관측 시기와 동일하다. 충청남도 예산군은 기상관측지가 존재하지 않아 금강홍수통제소(<http://www.geumriver.go.kr>)의 공공데이터 가운데 덕산면사무소 지점의 자료를 활용하였다(GRFCO, 2023). 금강권역 지형매개변수를 활용하여 경사도 및 흐름 방향도를 얻어내고자, 국토지리정보원에서 제공하는 90 m DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여(<https://www.ngii.go.kr>), QGIS에서 각 주제도의 투영과 해상도를 동일하게 조정하여 경사 래스터와 음영기복도를 생성하였다(NGII, 2023). 경사도는 한국지질자원연구원의 지하수 기본현황도 중 금강권역 경사도의 범례를 참고하여, 평지와 산지의 구분 기준에 따라 7개 단계로 구분하여 색상으로 나누어 표현하였다(Kim et al., 2021). 유역 시스템의 유출특성을 파악하기 위해 배수구조를 구성하는 하천망(channel network)과 구릉 사면(hill slope)들의 정보를 결합하여 금강권역 유역별 강수대응 능력을 공간적으로 해석하고자 하였다(Kim and Lee, 2010). 배수밀도의 추출을 위해 금강권역 내 하천망 웨이브파일(shp.)을 이용하여 수로의 총 길이를 유역면적으로 나누어, 지면(landscape)의 절개정도를 파악하였다. 하천망의 자료는 본

류를 제외한 지류 중 1, 2, 3차 지류만을 이용하였는데, 이는 지류유역과 본류유역의 수문학적 특성이 다르게 나타나므로 시·군 단위의 연구지역 선정을 위한 단위로서 지류유역의 분포를 확인하는 것이 적합하기 때문이다(Choi et al., 2023). 각 지역별 지반침하 발생 현황은 국토교통부의 제1차 지하안전관리 기본계획 자료와 충북연구원(<https://www.cri.re.kr>)의 충북 지하안전 확보를 위한 관리 체계 구축 방향 자료를 활용하였다(MOLIT, 2019; CRI, 2023). 2018년 이후 자료는 국토교통부의 지하안전정보시스템(<https://www.jis.go.kr>) 자료를 활용하였다(JIS, 2023). 2018년 지하안전법 시행 이후 지반침하 발생 신고가 의무화되어 2018년 이후에는 지반침하 발생원인 등에 대한 세부 정보 취득이 가능해졌으며, 이 연구에서는 지반침하 발생 원인으로 크게 하수관 손상, 기타매설공사 부실, 기타 매설물 손상, 굴착공사 부실, 기타의 5종류로 구분하였다. 마지막으로 지역별 인구분포, 광역 및 지방 상수도 급수 인구, 하수처리시설의 면적은 통계청 국가통계포털에서 제공하는 지자체 기초통계조사 자료를 활용하여 연구지역의 인구밀도 확인 및 상수도 관거의 매립 정도를 추정할 수 있었다(KOSIS, 2023). 연구를 위해 수집한 공간정보 목록은 Table 1과 같다. 이들 정보를 종합하여 요인별 지반 약화에 미치는 영향과 수문기상특성을 고려하여 지반 침하 발생 가능성을 평가하고자 하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 지형 및 수문인자의 공간적 분포

수문인자에 의한 지반침하 발생 가능성을 고려하기 위해 금강권역의 지하수위와 하천분포도, 경사도, 배수밀도를 Fig. 1에 도시하였다. 금강은 전라북도 장수군에서 발원하여 서해로 흘러나가며 크게 덕유산, 계룡산, 속리산 등의 산으로 둘러싸여 있어, 유역 내에서 산지지형과 평야지형이 복합적으로 관찰된다. 특히, 금강발원지부터 대청호까지의 상류지역은 속리산과 덕유산에 맞닿아 있고,

Table 1. Collected spatial data parameters

Major category	Subcategory	Specific classification
Natural ecological environment	Topography	Slope gradient
		Drainage density
	Hydraulics and soil condition	River/stream distribution
		Groundwater level fluctuation
Living environment	Integrated water condition	Population density
Resilience	Climate	Amount of precipitation
	Vulnerability	Land subsidence frequency

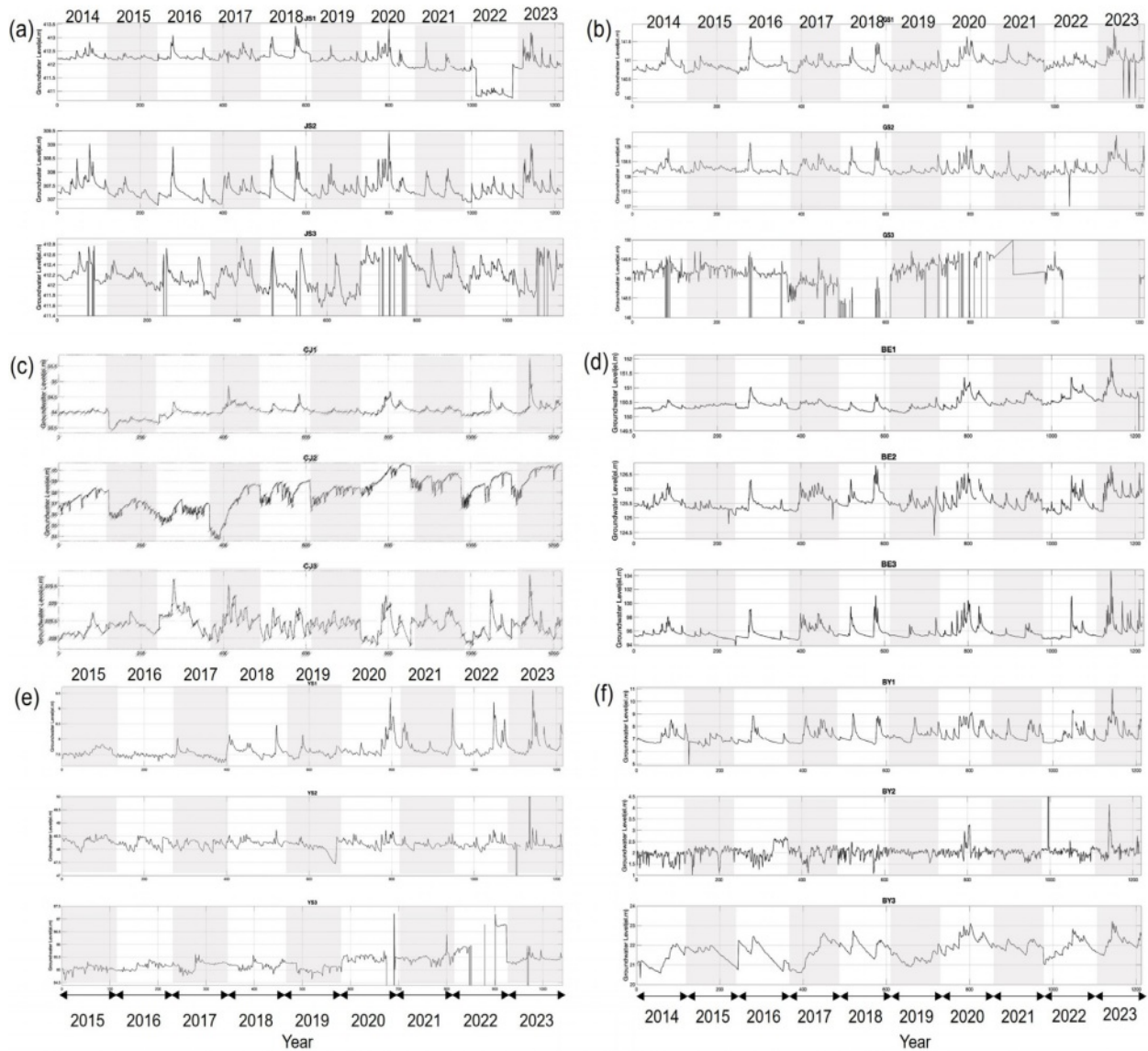


Fig. 2. Groundwater level variations from June to September in the study regions for 10 years.

향을 크게 받지 않았다고 판단되는 관정들을 중심으로 해석하면, 대체로 연구지역의 지하수위가 유지되고 있거나 (장수군 Fig. 2(a), 금산군 Fig. 2(b)) 꾸준히 상승하고 있는 것으로 여겨진다(청주시 Fig. 2(c), 보은군 Fig. 2(d), 예산군 Fig. 2(e), 부여군 Fig. 2(f)). 이는 기상청의 자료에 근거하여 2020년부터 우기의 강수가 증가하고 강수일수가 증가한 것과 상관성이 있다고 판단되며, 강우의 빈도와 강우사건별 총량의 증가는 지하수위에서도 동일하게 관찰된다. 연속적인 비강우 일수에 의한 지하수위 하강(minus peak)에 비해 강수에 의한 상승(plus peak)이 더 크게 관찰되기 때문에 금강권역 내 연구지역의 지하수위는 대체로 상승하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 지

하수위의 상승은 지표와 지하수면의 거리가 가까워짐을 의미하므로, 장마 혹은 폭우 등의 사건으로 강수의 침투량이 증가한다면 토사유출 및 토양공극의 수화로 지반이 약화되고 지반침하가 발생할 가능성이 높아질 수 있다. 현재 금강권역의 지형 및 수문인자 특성은 안정적인 대수층 환경이 유지되고 있는 것으로 여겨지나, 외부적 요인인 극한호우 혹은 과다양수에 따른 지하수위의 하강이 발생한다면 지반약화와 함께 지반침하가 나타날 수 있다고 여겨진다.

3.2. 지역별 지반침하 발생 건수와 강수의 연관성 도출

Table 2(a)는 2014년부터 2023년 9월까지 충청남도, 충

Table 2. The reported incidents number of land subsidence in the study area over the past 10 years (a), land subsidence in Cheongju-si between June and September over the past 10 years (b), and the causing factors of land subsidence in Cheongju-si (c)

(a)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Chungnam	1	2	3	8	3	1	5	4	0	4
Chungbuk	1	3	1	55	60	6	24	2	3	9
Cheongju (Chungbuk)	0	2	1	46	49	6	16	2	2	1
Jeonbuk	0	6	10	3	5	6	7	16	3	40

(b)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
June	0	0	0	1	16	2	2	2	0	1
July	0	2	1	36	0	0	2	0	0	0
Augustus	0	0	0	6	0	0	12	0	1	0
September	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0

(c)	2018		2019		2020		2021		2022		2023	
	Number	Ratio (%)	Number	Ratio (%)	Number	Ratio (%)	Number	Ratio (%)	Number	Ratio (%)	Number	Ratio (%)
Pipe Damage	44	78.6	5	83.3	20	87.0	2	100	0	0	1	100
Inadequate Landfill	4	7.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buried Material	2	3.57	0	0	2	8.70	0	0	0	0	0	0
Excavation Work	0	0	1	16.7	0	0	0	0	0	0	0	0
Other	6	10.7	0	0	1	4.30	0	0	2	100	0	0
Total	56	100	6	100	23	100	2	100	2	100	1	100

충북도, 전라북도에서 발생한 연도별 지반침하 건수이다. 2018년 지하안전법 시행 이후 기초지자체별 지반침하 발생 신고가 의무화되어 지하안전정보시스템 상에서 2018년 이후에 발생한 지반침하의 세부 위치와 시점에 대한 자료를 얻을 수 있었다. 지하안전법 시행 이전인 2014년부터 2017년 사이의 지반침하 세부정보 취득에는 한계가 있었으며, 국토교통부 제1차 지하안전관리 기본계획 자료와 기사자료를 참고하여 세부 발생 위치를 최대한 파악하고자 하였다. Table 2(b)는 2014년부터 2023년 6월부터 9월 사이 청주시에서 발생한 연간 지반침하 발생 건수를 보여준다. Table 2(c)는 2018년부터 2023년 9월까지 충청북도 청주시에서 발생한 연간 지반침하 발생 원인을 나타낸 자료이다.

조사기간 동안 발생한 90건의 지반침하 가운데 80%에 해당하는 72건이 하수관 손상으로 인해 발생하였으며, 기타매설공사 부설과 기타매설물 손상으로 인한 지반침하가 4건씩 발생하였다. 매립된 시설물의 누수 혹은 채움재 부설에 의해 토양의 유실이 일어난 경우, 강수사건에 의한 지하수위의 상승 및 하강은 시설물 주변 토양의 유실을 더욱 가속화하며 지하 공동의 확장과 지표의 함몰까지 발

생시킨다(Kim, 2015). 즉, 지반침하의 원인 파악과 대비를 위해서는 관의 파손과 관거 접속불량부위를 통해 유입되는 지하수의 침입(침입수, infiltration)과 우수관 혹은 우수관의 오점, 맨홀의 시공불량 등으로 유입되는 우수의 유입(유입수, inflow)이 모두 고려되어야 한다(Park et al., 2006). 이를 위해 본 연구에서는 2014년부터 2023년 사이 연구지역(충청남도 예산군·부여군·금산군, 충청북도 청주시·보은군, 전라북도 장수군)에서 측정된 연간 강수량(mm)과, 충청남도, 충청북도, 전라북도의 연간 지반침하 발생건수를 Fig. 3에 나타냈으며, 그림에서는 강수량이 많은 해에 지반침하가 많이 발생하는 추세가 보인다.

전라북도 장수군은 1,421.8 mm로 가장 높은 10년 평균 연간 강수량을 보였으며, 연구기간 동안 최대값 2,126 mm, 최소값 983 mm로 많은 강수량을 보였다. 충청남도 부여군에서는 2020년 10월에 지반침하가 1건, 충청북도 보은군에서는 2023년 7월 지반침하가 1건 발생하였으나 대상 지역 중 충청남도 예산군, 금산군과 전라북도 장수군의 경우 최근 10년간 지반침하가 발생하지 않았다. 이에 비해, 충청북도 청주시에서는 2017년 한 해에만 충청북도 전체 지반침하 보고량의 83.6%에 해당하는 46건의

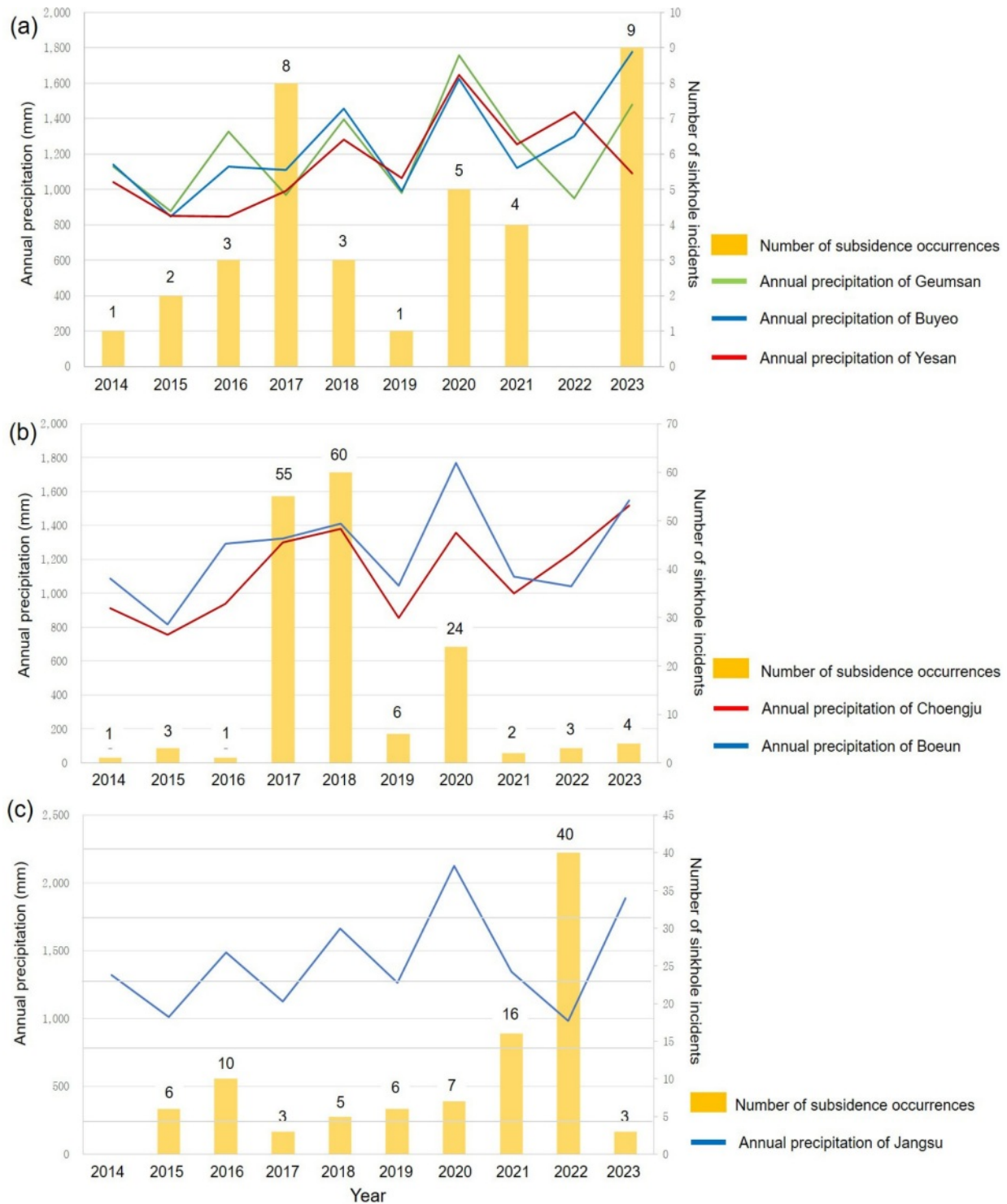


Fig. 3. The annual precipitation and the number of land subsidence occurrences in the (a) Chungcheongnam-do, (b) Chungcheongbuk-do, and (c) Jeollabuk-do.

지반침하가 발생하였다. 이런 이유로 Table 2(b)에서 다른 것처럼 2014년부터 2023년 9월까지 충청북도 청주에서 발생한 월별 지반침하 건수 가운데, 2018년과 2019년을

제외하고 이 지역의 연간 지반침하는 6월부터 9월사이의 시기에 집중적으로 발생하여 집중강우가 발생하는 시기와 일치하는 것으로 판단된다.

충청북도 청주시는 1,126.3 mm로 가장 낮은 10년 평균 값을 보였으며, 연구기간 동안 최대값 1,126.3 mm, 최소값 757 mm로 장수군의 최대값과 비교하였을 때 무려 600 mm 이상의 강수량 차이를 보였다. 한편, 최대강수량을 기록한 시기는 한국에서 홍수피해가 극심한 시기로 알려진 2020년과 2023년으로 구분되어 나타났다. 2020년은 충청남도 예산군·금산군, 충청북도 보은군, 전라북도 장수군의 4개 지역에서 최대강수량을 보였으며(1,647 mm~2,126 mm), 2023년은 충청남도 부여군, 충청북도 청주시의 2개 지역에서 최대강수량을 보였으며(1,517 mm~1,778 mm), 한국의 10년 평균 연간 강수량으로 알려진 1,263 mm과 비교하여 매우 높게 나타났음을 확인할 수 있다(KMA, 2023).

Fig. 3(a)는 충청남도 전역에서 발생한 것으로 보고된 지반침하 횟수와 금산군, 부여군, 예산군의 연간 강수량을 도시하였다. 연구기간 동안 충청남도에서는 연간 10회 미만의 지반침하가 발생하였으며, 대상 지역 외에는 보령시에서 5건, 천안시와 공주시에서 각 4건의 지반침하가 발생하였다. Fig. 3(b)는 충청북도 전역에서 발생한 것으로 보고된 지반침하 횟수와 청주시, 보은군의 연간 강수량을 도시하였다. 충청북도에서는 최근 10년간 총 164건의 지반침하가 발생하였으며, 이 가운데 76.2%인 125건이 청주에서 발생하였다. Table 2에 적시된 것처럼 연구기간 동안 지반침하의 주요 원인으로 하수도 손상으로 인한 지반침하가 72건(80%)으로 가장 우세하게 나타났다. 2018년 지하안전법이 시행된 이후 상하수관 점검 등을 통해 각 지자체의 지반침하 예방 노력이 이어지며 2019년부터 2023년 사이 연간 10회 미만의 지반침하가 발생하였으나, 앞서 다룬 것처럼 강우량이 많았던 2022년에는 다시 24건의 지반침하가 발생하였다. 이는 외부적 요인인 하수관의 누수 이외에도 자연적 요인인 강수량, 배수밀도, 평탄한 지형특성, 그리고 수문영향인자인 대청다목적댐으로 인한 수위상승 등이 복합적으로 지반침하 발생에 영향을 미치는 것으로 추정된다. Fig. 3(c)는 전라북도에서 전역에서 발생한 것으로 보고된 지반침하 횟수와 장수군의 연간 강수량으로, 2021-2022년을 제외하고는 전라북도 전역에서 연 10회 이하의 지반침하가 발생하였다. 그러나 2021년에는 16건의 지반침하 중 14건이 익산시에서 발생하였고, 2022년에는 총 40건의 지반침하 중 6건이 익산시, 32건이 전주시에서 발생하였다. 전라북도 전역에서 발생한 지반침하의 주된 원인은, 충청북도 사례와 마찬가지로 하수관 손상(58건, 전체의 75.32%)이었다. 이 자료를 통하여 지반약화에 따른 포트홀 등의 초기현상과, 더 나아

가 싱크홀과 지하공동 등의 지반침하는 특정 지역에서 집중적으로 발생하고 있으며, 도심지역 하수관 손상과 강우 강도가 주요 영향인자임을 추정할 수 있었다. 도시화가 진행되며 지하수의 양수, 토양 유실과 함께 전기/수도/통신 등 지하인프라의 구축 등 가속화하며 이는 지반침하의 인자로 작용할 수 있다. 앞선 정부 통계자료에서 다룬 것처럼, 부실한 매설공사와 하수관 손상은 지반의 약화를 유발하고 더 나아가 지반침하를 발생시키는 것이 선행 연구에 의해 보고되고 있다(Putri et al., 2017; Corbau et al., 2019, Aljammaz et al., 2021). 따라서 연구대상지역에서도 관로누수 및 채움재 불량 등으로 인해 지하매설물 주위 토양유실이 이미 진행되고 있는 경우 지하수위의 변동과 강수의 유입은 지반침하를 가속화 시킬 것으로 판단된다.

다음 단계로, 지반침하 시점과 강수시점과의 상관성을 상세히 파악하고자 지역별 6월부터 9월 사이의 월별 강수량과 시군별 지반침하 횟수를 Fig. 4에 도시하였다. 2018년부터 지하안전법이 시행 이전 시기는 월별 지반침하 정보를 얻기 어려워 자료 활용이 가능한 2018년부터 2023년 사이 6월부터 9월 사이 월별 지반침하 건수를 비교하였다.

풍수기 강수량은 연도별로 차이가 있으나, 해당연도 지역별로 비슷하게 나타났다. 강수량은 큰 차이가 보이지 않는 것에 비해 지역별 지반침하 발생량은 상당히 다른 양상을 보였으며 충청북도는 2018년과 2020년, 전라북도는 2022년에 특히 많은 지반침하 건수가 보고된 것을 확인할 수 있다. 그 가운데, Fig. 4(b)에서 2018년도 6월의 강수량은 8월에 비해 적은 편이었으나, 18건의 지반침하가 보고되었다. 이는 전년도인 2017년 7월에만 누적강수량(789.1 mm)과 지반침하(36건)가 발생하였다는 점에 착안하여 이유를 추정할 수 있다. 지반의 약화가 진행되는 가운데 2018년 6월 풍수기가 시작되며 다량의 우수가 하수관에 유입됨에 따라 노후하수관을 따라 토사유출이 가속되었기 때문으로 사료된다. 지반침하 건수는 지하안전법의 시행 및 지자체의 예방 노력에 따라 점차 줄어들고 있으나, 여전히 상당수의 지반침하가 6월부터 9월사이의 집중강우 시기에 발생하고 있으며 하수관 및 지하매설물로 인한 원인이 80% 이상을 차지하고 있다. 따라서 금강권역 도심지역 지반침하의 원인은 크게 도심지역 하수관 손상과 강우의 강도 및 지속성으로 고려할 수 있다고 판단되며, 지반침하가 나타나면 지속적으로 반복하여 발생하기 때문에 원인파악 및 적극적 해결책을 제시하는 것이 매우 중요하다고 판단된다. 이에 근거하여 배관시설 등의

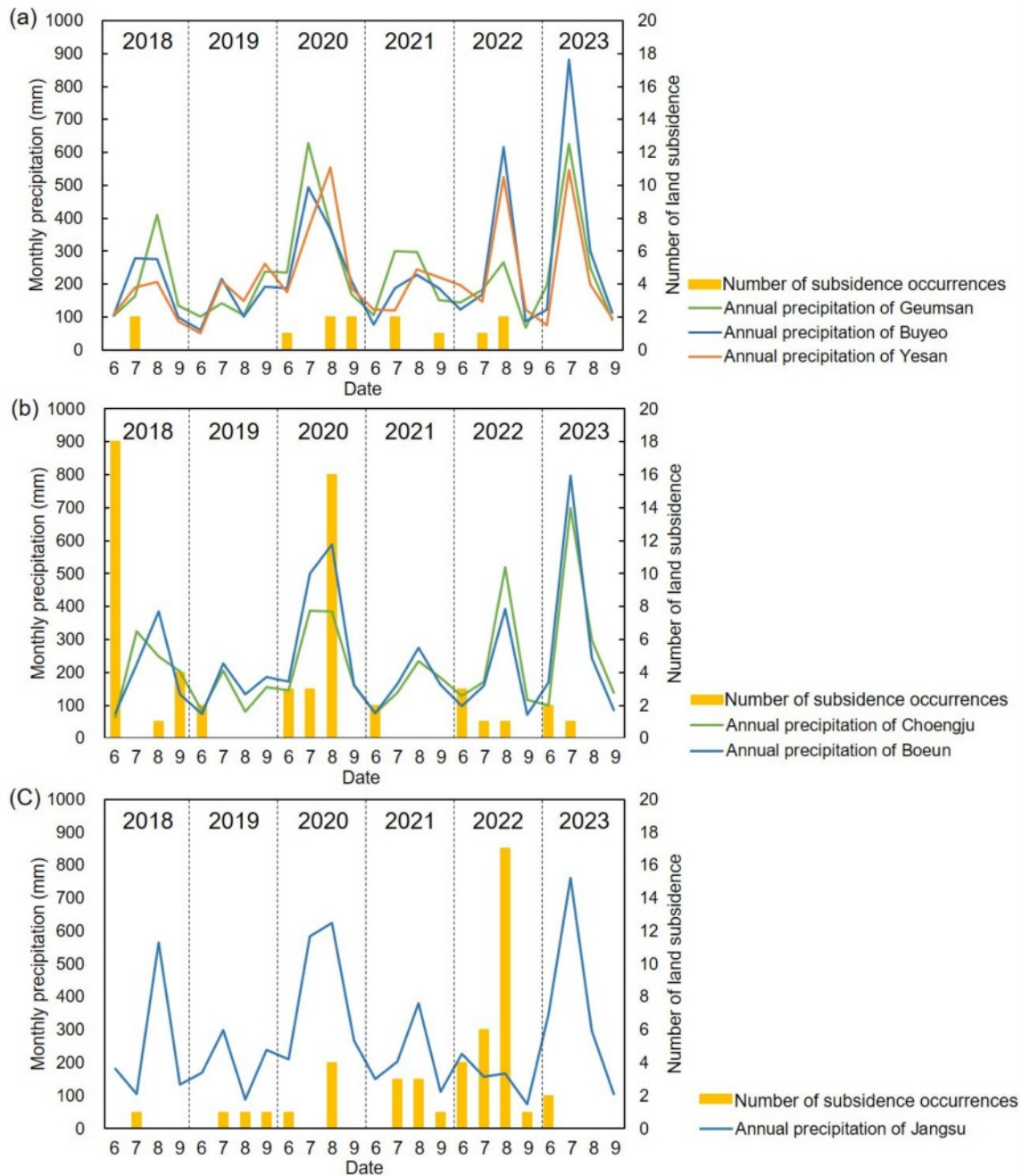


Fig. 4. The monthly precipitation during the wet period and the number of monthly land subsidence occurrences in the (a) Chungcheongnam-do, (b) Chungcheongbuk-do, and (c) Jeollabuk-do.

지하인프라 구축에 영향을 미치는 인구밀도와 지반침하 발생의 연관성을 다음 챕터에서 토의하고자 한다.

3.3. 인구밀도와 지반침하 발생 연관성 도출

인구밀도의 상승은 각 지역의 건축물 및 인프라 구축과 연계되어 지하시설물 매립 및 지하수 양수량 증가와 연계될 것으로 예측된다. 실제로, 도시화가 진행되며 개발면적

이 증가할수록 지반침하의 발생량이 증가하는 것이 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다(Putri et al., 2017; Corbau et al., 2019, Aljammaz et al., 2021; Oh et al., 2023). Fig. 5는 통계청의 지자체 기초통계조사 자료를 활용하여 2014년부터 2022년 사이 6개 연구대상지역의 인구밀도(명/km²) 변화량과 연간 총 지하수사용량(m³/년) 자료를 도시하였다(KOSIS, 2023). 그림에서 5개 지역(금산군, 부

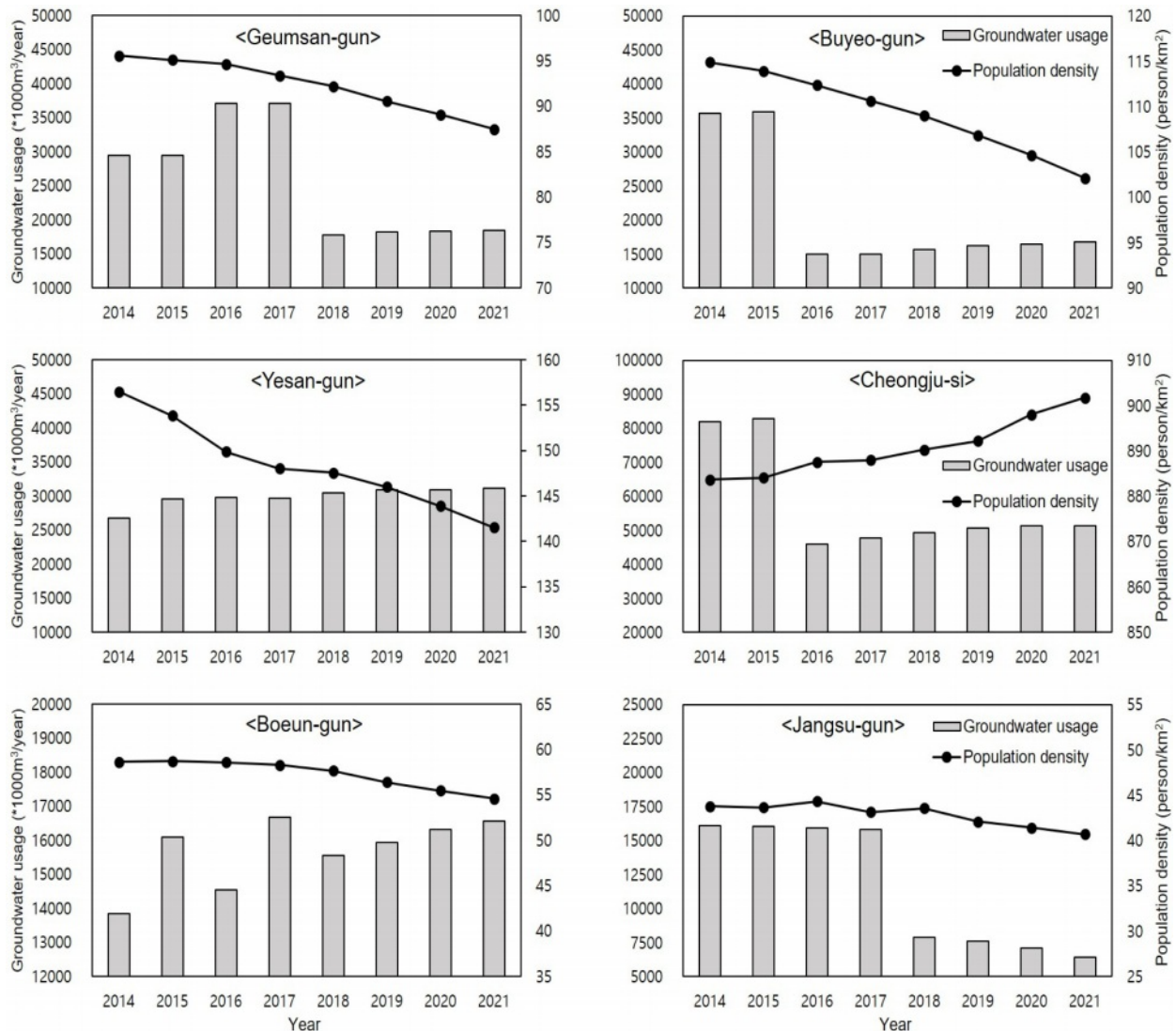


Fig. 5. Population density of the study regions.

여군, 예산군, 보은군, 장수군)은 인구밀도가 감소하고 있으나, 청주시만 유일하게 인구밀도가 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 청주시의 인구밀도는 연구지역 가운데 가장 높은 수준이며 2020년에 들어서며 인구밀도가 가파르게 상승한 것을 확인할 수 있다. 장수군은 연구지역 가운데 가장 낮은 인구밀도를 보이며, 2016년과 2018년 인구밀도가 증가하였으나 전체적으로는 꾸준히 감소하는 추세가 이어지고 있다. 인구밀도가 가장 크게 감소한 지역은 예산군으로 8년 사이 $14\text{명}/\text{km}^2$ 의 가파른 인구감소를 보인다. 한편, 지하수의 연간사용량은 2015년 후반부에 대체로 감소하는 추세가 보이며 금산군, 부여군, 장수군, 청주시에서 눈에 띄게 감소하는 것이 관찰되었는데 이는 국내 상수도의 보급률이 높아지며 생활 및 음용수로

활용되는 지하수의 비율이 감소한 것이 반영되었기 때문으로 추정된다. 또한 사용량이 집계되지 않은 소규모 시설의 지하수 활용도 고려한다면, 총지하수 사용량은 상당히 많을 것으로 추정된다. 이에 비해 예산군과 보은군의 지하수 사용량은 증가하는 것이 관찰되는데, 이들 두 지역은 농업축산분야의 성장에 집중하고 있는 특성화지역으로 과수, 원예, 특용작물의 재배가 활발히 이루어지고 있어 지하수 소비량이 증가하고 있는 것으로 판단된다.

금강권역의 지반침하 자료는 인구와 지하시설이 밀집한 도심지역으로 갈수록 지반침하 문제가 증가함을 보고하고 있으며, 특히 청주가 가장 유의미한 연관성을 보이고 있다. Fig. 5에 나타난 것처럼 청주시의 인구밀도 증가는 도시화 및 지하매립시설의 노후화와 연계되어 지반침하

Table 3. Population served by local and regional water supply system (a), and areas of Municipal Sewage Treatment Facilities (b) of the study regions

(a)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Geumsan-gun	41,429	42,887	43,963	43,877	43,914	43,728	43,071	43,920
Buyeo-gun	50,047	50,509	44,138	53,603	57,066	56,469	57,813	57,345
Yesan-gun	51,681	53,317	55,733	56,308	57,221	60,486	63,460	62,609
Cheongju-si	811,373	814,740	820,539	823,350	826,639	829,335	833,516	836,711
Boeun-gun	16,185	16,577	17,669	18,175	17,867	17,781	17,612	17,771
Jangsu-gun	16,684	18,085	20,390	20,381	20,369	19,690	20,187	19,855
(b)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Geumsan-gun	23,823	23,823	24,250	24,250	24,250	24,250	24,250	24,210
Buyeo-gun	35,316	40,518	40,518	40,518	40,518	40,518	40,518	40,518
Yesan-gun	150,425	150,425	150,425	150,425	150,425	150,425	130,607	130,607
Cheongju-si	679,585	689,966	515,542	515,542	515,542	515,542	515,542	515,542
Boeun-gun	31,302	31,302	31,302	31,302	31,302	31,302	31,302	31,302
Jangsu-gun	31,454	31,454	23,526	131,011	131,011	131,011	131,011	131,011

위험성을 높일 것으로 추정된다.

Table 3(a)는 연구지역별 광역 및 지방상수도 급수인구 자료이며, Table 3(b)는 하수처리시설 면적이다. 청주시는 도시의 행정경계 면적이 9,410 km²로, 다른 연구지역의 면적(금산 577.2 km², 부여 624.6 km², 예산 542.7 km², 보은 584.3 km², 장수 533.2 km²)에 비해 2배 이내의 크기를 가진다. 그러나 인구밀도는 다른 지역의 10배에 달해 지하기반시설 또한 다수 존재할 것으로 유추할 수 있다. 실제로 Table 3에 나타난 것처럼 청주시의 광역 및 지방상수도 급수인구는 타 지역과 비교해 약 10배 이상, 하수처리시설의 면적은 약 4배 이상으로 조사되었다. 이는 극한호우 혹은 관로의 누수로 인한 지반침하 발생가능성을 더욱 높일 것으로 추정되며, 인구의 상승과 개발이 진행될수록 지반침하 위험성은 더욱 증가할 것으로 사료된다. 한편, Table 3(b)의 자료에서 보은군은 2014년부터, 부여군은 2015년부터, 장수군은 2017년부터 하수처리시설 면적의 변화가 없는 것으로 나타나며, 해당 지역들은 추가적인 하수관의 매립이 매우 소극적으로 진행되고 있을 것으로 추정된다. 따라서 지하시설물의 매설 밀도가 낮더라도 장기적으로 노후관로의 보수 및 교체, 풍수기 우수의 유입에 의한 지반약화를 고려한 지반침하 대비가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

지하수는 암반 또는 충적층 공극 내 존재하며 지표에서 작용하는 응력에 대응하여 지지하는 역할을 수행하며, 유체의 배수 여부에 따라 암반의 강도 및 거동에 차이가

발생한다. 지하수가 유동하지 않고 공극 내에 갇혀있는 경우 지표에서 작용하는 응력에 대응하여 지지하는 역할을 수행한다. 반면 지하수의 유동이 발생하는 경우, 지하수가 더 이상 응력을 지지하지 못해 이로 인한 지반 약화가 일어날 수 있다. 따라서 지하수위의 장기적 혹은 급격한 하강이 발생하면 자유면 대수층 상부 불포화대 토양 결합력이 감소하고, 지하매립시설물의 구조적 안정성이 낮아져 지반침하를 촉진시키는 하나의 원인이 될 수 있다. 이때 지역별 지형 및 지질 특성, 지하수위의 변동 속도, 강수의 집중도뿐 아니라 지하수 사용량과 지하매립시설물의 상태 등 외부적 영향인자가 복합적으로 작용함에 따라 지반침하가 나타날 수 있다. 이 연구에서는 지표경사도, 장기지하수위, 배수밀도, 강수량 정보를 기반으로 금강권역 내 지반침하 주의지역 6곳(장수군, 금산군, 청주시, 보은군, 예산군, 부여군)을 선정하였다. 이들 지역에 대해 지반침하 보고건수와 인구밀도변화 등 영향인자 간의 관계를 종합적으로 분석하여 지반침하 발생 위험성에 대한 평가를 수행하였다. 연구수행 기간 동안 관찰된 금강권역 6개 대상지역의 지하수위는 안정적으로 유지되고 있음을 확인하였으나, 2010년대 후반부터 연강수량의 상승과 연계되어 일부 지역의 지하수위 상승이 관찰되었다. 인간 활동에 의한 발생요인으로 하수관 손상에 의한 토사유출 영향이 가장 높았으며, 폭우 시에도 관내순간유동량 급증과 유출수의 흐름으로 강수의 침투와 중간류의 흐름이 강하게 발생하여 지반약화와 지반침하가 발생하는 것으로 해석되었다. 인구증가에 따른 도시개발과 지반침하 발생빈도는 상당히 연관성이 있는 것으로 판단되며, 노후하수관 문제와 동시에 매립 지하시설물의 증가 등 인프라 구축으

로 인한 지하수계의 변화가 지반침하의 주요원인 중 하나로 작용한다고 평가된다. 따라서 지반침하의 발생과 연쇄적으로 나타날 수 있는 재해를 방지하기 위해서는 사질토양이 혼합된 연약지반에 대한 위험성 평가, 노후 하수관 점검과 대형건축물의 지하수 양수량 관리 등 제도적 대응 방안이 구축되어야 한다. 또한 기후변화에 따라 발생빈도가 증가하고 있는 이상강수에 대응하기 위한 우수관거 확충 및 통수용량 확보를 위한 행정적 관리를 적극적으로 실시하고, 사회적 안전 공감대를 형성하는 노력이 필요하다.

청주시는 2019년도 지반침하 방지 5대 중점관리계획을 수립하는 등 침하관리와 재해방지를 위한 노력을 펼치고 있으며 특히 상·하수도관을 포함한 지하공간 매립시설물의 관리에 중점을 두고 있다. 기후변화 및 인프라 구축과 관련한 지반침하 사례보고가 전국적으로 증가하고 있는 상황에서, 이 연구는 금강권역이라는 대권역을 아울러 수문, 지리, 기상 등 자연적 요소와, 인간활동 등 인위적 요소를 종합적으로 활용하여 지반침하 발생 영향인자를 판단하고자 하였다. 이 연구에서 함께 다루지 못한 세밀한 지하수 수위자료, 토양함용도, 지질특성 및 구조선의 분포 등의 다양한 요소들을 복합적으로 고려한다면 더욱 효과적인 지반침하 위험성 예측 및 대응이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원에서 수행하고 있는 주요 사업 “기후변화대응 대응량지하수 확보 및 최적활용 기술개발(23-3411)”과 2022년도 과학기술정보통신부 국가과학기술연구회 선행 융합연구사업(CPS22121-100)의 지원을 받아 수행하였습니다. 논문의 작성에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 황재홍, 변옥환, 한수연 박사님께 감사드립니다.

References

- Aljammaz, A., Sultan, M., Izadi, M., Abotalib, A.Z., Elhebiy, M.S., Emil, M.K., Abdelmohsen, K., Saleh, M., and Becker, R., 2021, Land subsidence induced by rapid urbanization in arid environments: A remote sensing-based investigation, *Remote Sens.*, **13**(6), 1109.
- Choi, H., Lee, C.-M., Jo, H.J., and Shim, B.O., 2023, Assessment of groundwater recharge and connectivity with surface water in a mountainous watershed using natural tracers in Daejeon, Korea, *Environ. Earth Sci.*, **82**(530).
- CRI (Chungbuk Research Institute), 2023, Available from <https://www.cri.re.kr>. [Accessed September 20, 2023]
- Corbau, C., Simeoni, U., Zoccarato, C., Mantovani, G., and Teatini, P., 2019, Coupling land use evolution and subsidence in the Po Delta, Italy: Revising the past occurrence and prospecting the future management challenges, *Sci. Total Environ.*, **654**, 1196-1208.
- Fetter, C.W., 2018, *Applied Hydrogeology* 4th ed., Waveland Press, Illinois, United States of America, ISBN 978-1-4786-3709-7.
- GIMS (National Groundwater Information Management & Service Center), 2023, Available from <https://www.gims.go.kr>. [Accessed October 10, 2023]
- GRFCO (Geum River Flood Control Office), 2023, Available from <http://www.geumriver.go.kr>. [Accessed September 25, 2023]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2021, Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate, In IPCC 6th Assessment Report, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/>. [Accessed October 5, 2023]
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2023, Available from <https://www.kma.go.kr>. [Accessed September 20, 2023]
- Kim, Y.S., 2015, Environmental impact assessment and prevention of urban “Sinkholes”, Sejong, Korea.
- 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, J.C. and Lee, S.J., 2010, Mapping the spatial distribution of drainage density based on GIS, *J. Korean Soc. Geo. Spat. Inf. Sci.*, **18**(1), 3-9.
- Kim, I. and Lee, J., 2018, Influencing factor analysis on groundwater level fluctuation near river, *Ecol. Resil. Infrastruct.*, **5**(2), 72-81.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service), 2023. Available from <https://kosis.kr>. [Accessed November 15, 2023]
- Lee, J.Y. and Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on ground-water environment, *J. Geol. Soc. Korea*, **43**(4), 517-528.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2019, 1st Subterranean Safety Management Basic Plan (2020~2024), Sejong, Korea.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) and K-water (Korea Water Resources Corporation), 2022, Groundwater Annual Report, Sejong, Korea.

- NGII (National Geographic Information Institute), 2023, Available from <https://www.ngii.go.kr>. [Accessed October 10, 2023]
- Oh, S., Kim, W., Kang, M., Yoon, H., Yang, J., and Choi, M., 2022, An analysis of land displacements in terms of hydrologic aspect: satellite-based precipitation and groundwater levels, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **55**(12), 1031-1039.
- Oh, M.J., Kim, D., Lee, J.-H., and Kim, T.-W., 2023, Quantitative impacts of climate change and human activities on the watershed runoff variation of the Geum River basin, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **56**(6), 381-392.
- Park, M.-G., Kim, D.-S., Ahn, W.-S., and Oh, J.-M. 2006. A quantitative/qualitative study of infiltration/inflow for order decision of sewer pipe maintenance, *J. Korea Water Wastewater*, **20**(1), 53-62.
- Putri, R.F., Wibirama, S., Sukamdi, and Giyarsih, S.R., 2018, Population condition analysis of Jakarta land deformation area, *IOP Conf. Ser.: Environ. Earth Sci.*, **148**, 012007.
- Statistics Korea, 2023, Population and Housing Census. Available from <https://kostat.go.kr>. [Accessed September 25, 2023]
- 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.
- JIS (Underground Safety Information System), 2023, Available from <https://www.jis.go.kr>. [Accessed September 20, 2023]
- Yoo, C.S. and Kim, K.W., 2010, Analysis on characteristics of sediment produce by landslide in a basin 2, rainfall event-based analysis, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **10**(3), 147-154.
- Zoback, M.D., 2010, Reservoir Geomechanics, Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom.