AI 기술을 활용한 지하공간 위험도 관리 기술

이성열 지반연구본부 박사후연구원

들어가며

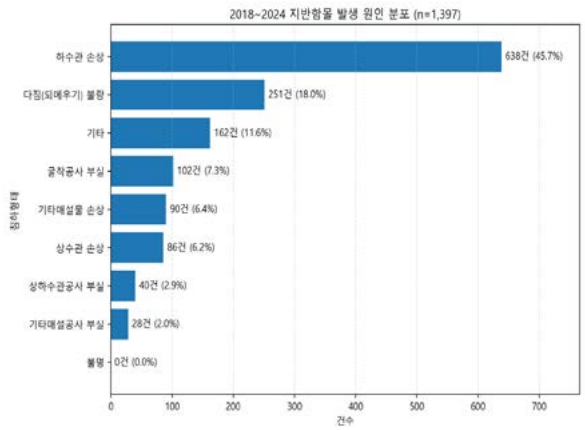
도심지 지하공간에는 지하철, 공동구, 각종 매설관 등과 같은 기반시설이 중첩되어 있어, 지상에서는 식별하기 어려운 사고 위험이 존재하고 있다. 최근 수년간 반복되는 지하공간 사고는 시민의 안전을 위협해 왔고, 교통 인프라의 마비 등 연쇄적인 피해로 이어지기도 했다. 최근 5년('20~'24)간 전국의 지반함몰 사고는 957건으로 매년 약 200건의 사고가 발생하고 있다. 그 중에서도 인명피해 발생 가능성이 큰 대형사고는 57건(6.6%)이 발생한 것으로 보고되었다.

지하공간 사고 유형에는 지반침하와 지반함몰, 지하매설관(열수송관)의 파열 등이 있으나, 본 글에서는 이 가운데 지반함몰 사고를 중심으로 다루고자 한다. '지반함몰'은 지반 상부가 붕괴되는 형태로 발생하여, 흔히 '싱크홀'로 불리지만, 지질학적 싱크홀과는 발생 기작이 다르다. 싱크홀은 지층에 위치한 석회암과 같은 용해성 암석이 지하수에 용식되어 지반내 공동이 발생하는 반면에, 지반함몰은 지하수위의 변동에 따른 토립자 유실로 공동이 발생하여 상부가 붕괴되는 메커니즘을 보이고 있다.

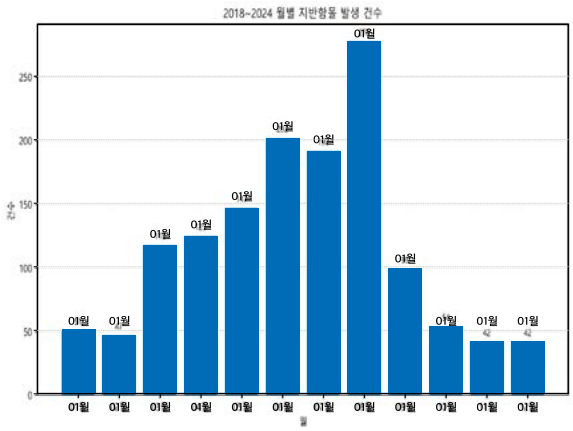
지반함몰의 사고사례로는 2024년 서울 연희동에서 발생한 폭 4m, 깊이 2.5m, 연장 6m 규모의 지반함몰 사고로 SUV 차량이 추락하여 탑승자 2명이 부상당한 사고가 있었고, 2025년에는 서울 명일동에서 발생한 지름 20m급 대형 지반함몰 사고로 인해 1명이 사망하고 1명의 부상자가 발생한 사례가 있었다. 이외에도 크고 작은 지반함몰 사고가 꾸준히 발생하고 있으며, 지반함몰 사고의 주요 발생 원인으로는 지하 매설관의 손상과 지하공간 공사에 따른 토사유실 및 지하수위 하강으로 조사되었다.

정부에서는 지반함몰 사고를 예방하고 대응하기 위해 「지하안전관리에 관한 특별법」과 「국가지하안전관리 기본계획('25~'29)」 등의 정책을 마련하여, 디지털 기반의 지하안전관리체계를 구축하기 위한 노력을 하고 있다. 이에 따라 디지털 지하정보를 활용한 지하공간 위험도 관리 기술에

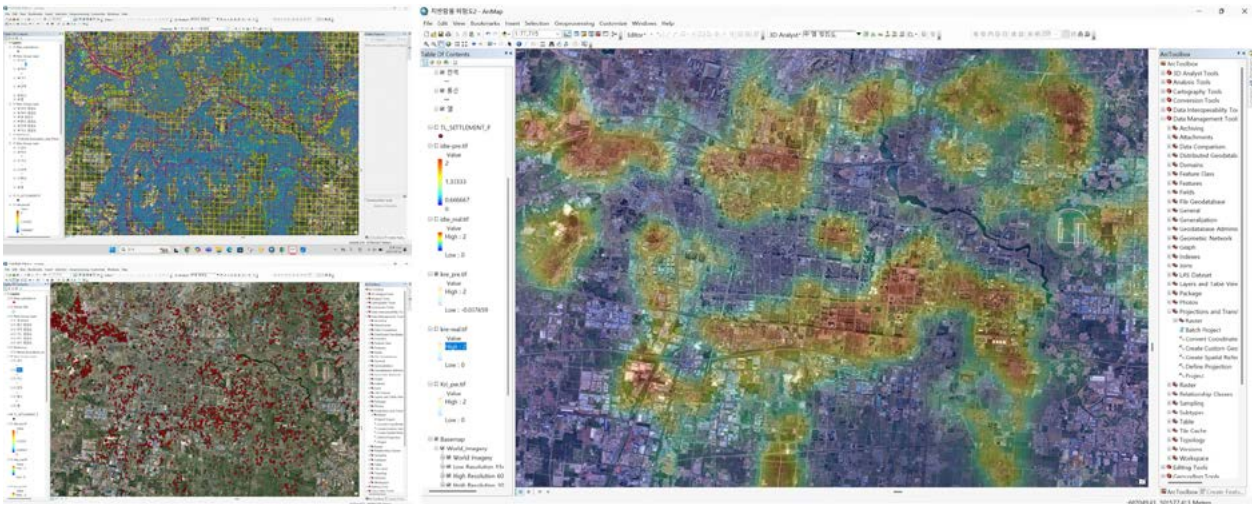
[그림 1] 지반함몰 주요 발생 원인



[그림 2] 월별 지반함몰 발생 현황



[그림 3] AI기반 지반함몰 위험지도 예시



대한 연구들이 수행되고 있으며, 본 글에서는 지반함몰에 대한 예방 및 대응을 위해, 디지털 지하정보 기반의 AI 기술을 활용한 지하공간 위험도 관리 기술개발 현황 및 미래 연구 방향을 간단히 소개하고자 한다.

지반함몰 사고발생 현황 및 원인

지반함몰은 침투수 유입과 지하수위의 변동 등의 원인으로 간극수압이 상승하고 유효응력이 감소함에 따라 토립자 유실이 발생하고, 이로인해 지반내 공동이 형성되어 점차 확대되다가 최종적으로 지반 상부가 붕괴되는 메커니즘을 갖고있다. 지하안전정보시스템 자료에 따르면 2018년~2024년 동안 발생한 1,397건의 지반함몰 주요원인으로는 하수관의 손상(47%), 다짐 불량(17%), 기타(11%), 굴착공사 부실(6%) 순으로 나타났다[그림 1]. 특히 우리나라 우기에 해당하는 6~9월에 지반함몰 사고가 55%로 집중되는 경향이 뚜렷하다[그림 2].

[표 1]은 2024~2025년에 발생한 주요 지반함몰 사고의 원인을 나타낸 것이다. 최근 보고된 인명피해를 동반한 대규모 지반함몰은 주로 굴착 및 지하철 공사 과정에서 발생한 토사 유실 등 굴착공사 요인에 기인한 것으로 지목된다. 이에 따라 지하매설물과 지하구조물의 상태와 굴착공사 정보, 기상정보, 지반정보, 지하수정보 등을 통합해 사전 예측과 예방적 대응 체계를 구축할 필요가 있다.

[표 1] 주요 지반함몰 사고 발생 원인('24~'25)

(한국건설기술연구원(2025), 땅꺼짐 예방·대응을 위한 KICT 정책 제안)

사고 위치	발생연월	주요 원인
서울 연희동 성산로	2024.08.	집중호우, 지하매설물, 주변공사 등 복합적 요인
부산 사상-하단선	2024.08 ~ 2025.04	집중호우, 차수벽 품질문제
서울 명일동	2025.03.	지하수위 하강 및 고속도로 터널 공사, 노후 하수관
광명 신안산선	2025.04.	연약지반, 지하수 배수 관리 미흡

AI 기반 지하공간 위험도 관리 기술

지하공간 사고를 예방하고 대응하기 위해 디지털 정보를 활용한 AI 기반 지하공간 위험 관리 기술들이 개발되고 있다. 대표적으로 지하매설물과 지반환경 정보를 활용한 AI 기반 지반함몰 위험도 예측 기술을 간단히 소개하고자 한다. 해당 기술을 개발하기 위해서 지반함몰의 주요 발생원인으로 지목된 6종 지하매설물(상수, 하수, 전기, 통신, 난방, 가스)의 속성정보와 지반환경 정보(투수계수, 지층두께, 고도), 지반함몰 이력정보를 수집하여, 공간분석을 통한 데이터 추

출을 통해 학습 데이터셋을 구축하였다. 구축한 학습데이터를 AI 알고리즘에 학습시켜 예측 모델을 개발하고, 개발된 모델에서 예측되는 지반함몰 사고 위험도를 위험지도 형태로 가시화할 수 있는 기술이다. 해당 기술은 데이터 전처리와 모델의 구조를 단순화하여, 광범위한 지역에서도 빠르게 학습과 예측을 수행할 수 있으며, 주기적인 데이터 갱신을 통해 위험지도를 최신 상태로 유지할 수 있다. 개발된 AI 기반 지반함몰 위험도 예측 모델은 대상지역의 사고 위험도를 3등급(위험, 주의, 안전)으로 구분할 수 있고, 모델의 정확도는 약 75% 수준으로 평가되었다. 모델 학습에 포함되지 않은 최근 5년간 발생한 지반함몰 사고를 위험지도에 대입하여 현장 적용성을 확인해본 결과, 70% 이상의 지반함몰 사고가 주의, 위험 구간에서 발생한 것으로 확인되었다. [그림 3]은 AI 모델 기반으로 제작된 지반함몰 위험지도의 예시를 나타낸 것이다.

AI기반 지반함몰 위험도 예측 모델을 통해서, 지반함몰 사고 발생 위험도가 높은 고위험구간을 중점관리구간으로 선정하여 관리한다면, 지하공간 사고의 위험관리가 충분히 가능할 것으로 사료된다. 하지만 현재 개발된 지반함몰 위험도 예측 모델은 지하매설물의 속성정보와 지반환경정보만을 활용하여 지반함몰 위험도를 예측하였기 때문에 모델의 신뢰도 향상에 한계가 존재한다. 전술한 바와 같이, 지반함몰 사고는 지하매설물 손상, 굴착공사, 다짐 불량 등 다양한 원인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서 공사이력과 기상정보, 지하수위의 변동 등 다양한 동적 데이터와의 통합분석을 통해 신뢰성 높은 지반함몰 위험도 예측 모델을 개발할 필요가 있다.

AI 기반 지하공간 위험도 관리 기술의 미래 방향

AI 기반 지하공간 위험도 관리 기술의 궁극적인 목표는 사고를 사전에 예측하여, 신속하고 효율적인 대응 체계를 구축함으로써 인명 및 사회적 피해를 최소화하는 것이다. 이를 위해 현재의 지반함몰 예측 모델을 고도화 할 필요가 있다. 대규모 굴착공사 이력정보와 지하수위의 변화 그리고 기상정보와 같은 지반함몰 사고를 직·간접적으로 유발할 수 있는 인자를 추가하여 현실적이고 신뢰성이 높은 예측이 가능하도록 하는 것이다. 이렇게 고도화된 모델을 통해 선별된 지반함몰 발생의 상대적 위험도가 높은 구간과 지하철 및 지하터널 공사 구간, 대규모 굴착구간 등을 우선중점관리구간으로 선정할 수 있다. 더 나아가 AI 에이전트 기반의 땅꺼짐 통합 관리 솔루션을 통해 현장 활용성이 높은 지하공간 위험도 관리 기술의 개발까지 가능할 것으로 예상된다. 땅꺼짐 통합 관리 솔루션을 통해 탐사장비와 인력을 효율적으로 배치하고, 사고 발생시 교통 통제 및 우회, 복구 절차를 지자체 담당자에게 제공함을써 빠른 사고 대응과 처리를 통해 사회적 피해를 최소화 할 수 있을 것이다. 이와 같이, 지하공간 위험도 관리를 위해 개발된 요소기술들을 실제 기술 활용자 중심으로 통합하여 국민의 안전을 확보함으로써 국민의 삶의 질을 향상시키고 건설산업의 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. **KICT**

참고자료

- 이성열, 강재모, 김진영(2023), Machine Learning-based Predictive Model of Ground Subsidence Risk using Attribute Information and Density of Underground Pipelines in Urban Areas. IEEE ACCESS, Vol.11, pp. 69326-69336.
- 박준환, 김지법, 이성열, 강재모, 문두환(2024), Hybrid MLP-CNN-based ground sink susceptibility prediction in urban area using underground pipe map. Applied chemistry for engineering, Reliability Engineering & System Safety, Vol.245, 110031, pp.1-15.