

# 지반함몰 위험성 예측 및 평가기술 개발

백용(지반연구소 연구위원)

지반함몰 분야가 사회이슈로 부각된 상황에서 정부에서는 정책적인 측면에서 지하공간 통합안전관리체계를 구축하는 '지반침하 예방대책'을 마련하고, 「지하관리에 관한 특별법」을 국회와 함께 제정해 시행을 앞두고 있다. 그리고 지하공간 통합지도 구축, 굴착공사 현장 주변의 안전관리 강화, 불안요소에 대한 선제적 모니터링 및 관리를 통한 공사 현장의 개선을 추진하고 있다.

따라서, 지반안전연구단의 핵심기술인 '지반함몰 위험성 예측 및 평가기술 개발'에서는 가장 시급한 주제를 선정해 현장에서 신속하게 적용할 수 있는 기술 실용화 및 정책 제안을 중심으로 가시적 성과를 도출하는 데 목표를 두고 있다. 특히, 「지하관리에 관한 특별법」을 구체화시킬 수 있는 정책 제안을 도출함과 동시에 동법의 시행령을 지원하는 기술 가이드라인을 제시해 도심지 지반굴착시 토류구조물의 시공상태 및 주변 지장물과의 관계를 파악해 실질적인 국민의 안전을 확보할 수 있도록 하고 있다. 그리고, 그동안 효율적으로 관리되지 못했던 지반 내 여러 상황을 고려하고 신뢰도 높은 연구성과 도출을 위한 실험과 해석을 통해 도심지 지반함몰 재해 예방을 위한 우리나라의 기초 기술력을 증대시키고자 한다.

## 기술개발의 비전과 연구 구성

본 연구에는 주관연구기관인 한국건설기술연구원 외에도 총 8개의 공동연구기관과 1개의 참여기업이 참가하고 있다. 지금까지 건설 산업에서 다소 간과해 왔던 굴착현장 지하수 처리 문제 및 안전에 대한 문제를 적극적으로 해결할 수 있도록 지반함몰을 모사하는 축소모형실험, 원심모형실험 실험 기법 까지 정립하고 장기간에 걸쳐 본 연구성과의 신뢰도를 평가해 관련업계(건설 및 교통관련 학교, 연구원등)에서 사용할 수 있도록 추진한다. 특히, 지반함몰을 유발하는 주요 원인인자를



[그림 1] 지반함몰 위험성 예측 평가 기술 개발의 비전

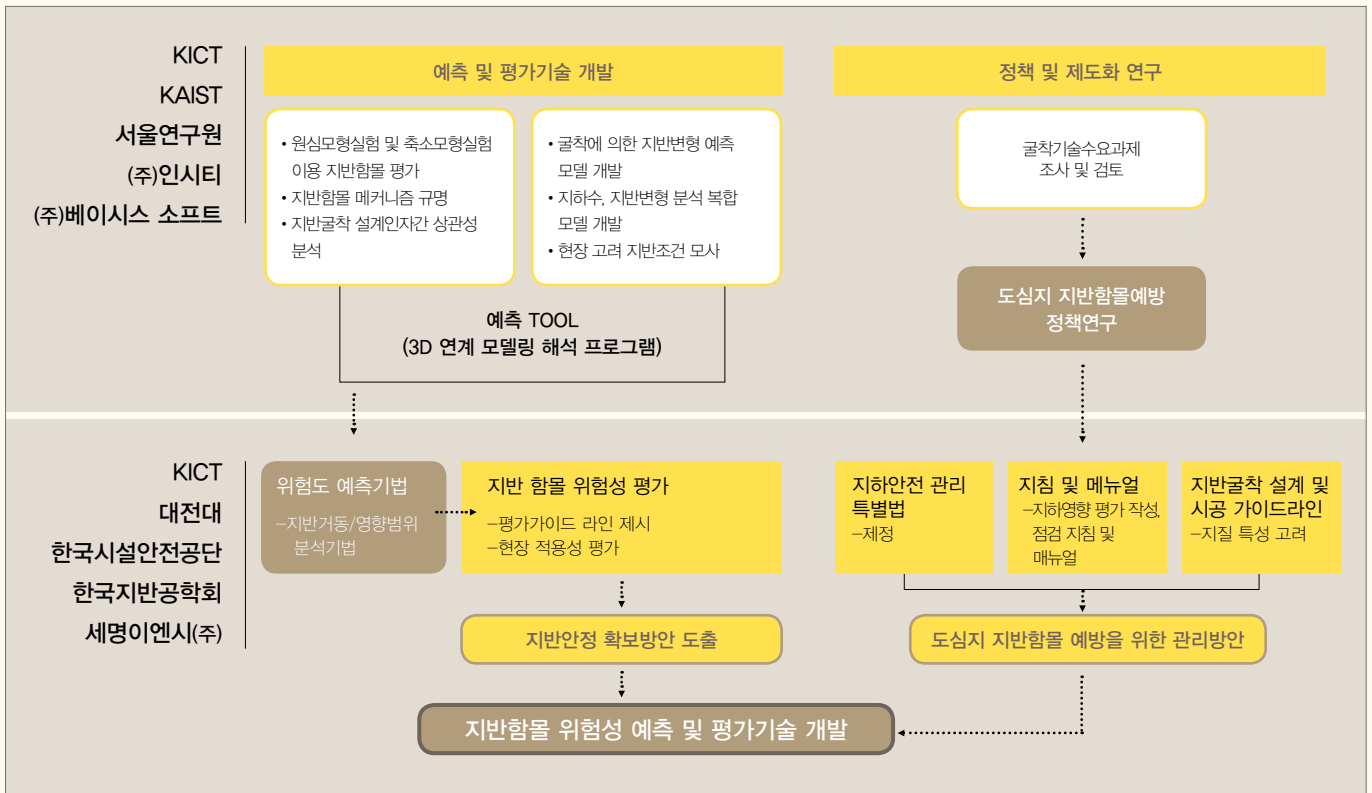
규명, 주요 설계인자로 제시해 지하 굴착공사 및 사회기반시설(상하수도 건설 등) 건설의 안전성을 높이는 데 기여할 계획이다. 전체적인 연구 내용은 다음과 같다.

- 지반함몰 발생 유형, 원인 분석 및 메커니즘 규명
- 지반굴착시 설계인자간 상관성 분석
- 지반굴착시 지반변형 영향범위 분석 및 도출
- 굴착 시공 중 단기 지하수 유출과 지반변형 분석 복합 모델
- 굴착 시공중 지하수 변화 미 지반변형 연계 해석이 가능한 토류구조물 설계 프로그램
- 심도별 지반특성을 고려한 지반거동 분석 기법
- 지질 특성별 대수층 변화 분석을 위한 3D 해석프로그램
- 지반·공사 특성별 지반함몰 위험성 예측 및 평가 가이드라인
- 지반함몰 방지 및 변형 최소화를 위한 굴착기술 수요과제
- 도심지 지반함몰 예방을 위한 지침 및 정책 개선(안)
- 지질특성별 지반굴착 설계 및 시공 가이드라인 개발
- 지반함몰 방지를 위한 굴착공사 현장 및 인접시설물 안전점검 매뉴얼
- 지반함몰 위험성 예측·평가 방법 및 기준(굴착공사 전·중·후)

### 기술개발 주요 연구내용

지반함몰 메커니즘을 규명하고 설계인자의 상관성 분석을 위해 한국과학기술원(연구책임자 김동수 교수)에서 축소모형실험과 원심모형실험을 통해 현장조건의 환경특성에 맞는 신뢰성 있는 지반함몰 모사를 수행하게 된다. 실험을 통해 획득된 여러 데이터들은 각 공동연구기관에 전달되어 안전한 지반굴착을 위한 지하수 변동 및 지반거동 정밀해석기술의 개선을 위한 지반함몰 위험성 예측 및 평가 기술 개발에 적극 활용될 것이다. 원심모형실험은 축소된 모형을 고속으로 회전시켜 실제 중력보다 매우 큰 중력 가속도를 인위적으로 발생시킴으로써 현장의 응력상태를 구현하고, 대형 지반 구조물의 설계와 시공 사이에 발생할 수 있는 지반 거동의 괴리를 해소함과 동시에 다양한 변수를 고려해 신뢰성 있게 현장을 재현하는 실험이다. 지반함몰은 지반-구조물-지하수 등의 상호인자들이 복합적으로 작용해 발생하는 현상이기 때문에 상사비를 고려한 축소 모형에 지하수 흐름까지 모사해 연구를 수행하고 있다.

지반함몰 예측 및 평가 기술 개발에는 한국건설기술연구원과 대전대(연구책임자 임명혁 교수), 세명이엔시(주)(연구책임자 정호영 이사)가 참여해 이론과 실제 현장의 데이터 등을 활용한 신뢰도 높은 예측 및 평가 기술을 개발할 예정이다. 지반함몰을 유발하는 위험요소 규명 및 분류,



[그림 2] 지반함몰 위험성 예측 및 평가 기술 개발(세부) 연구 구성

발생 가능한 위험경로 모델링, 위험경로별 경제적 손실에 대한 평가 등을 통해 굴착공사의 설계 및 시공 과정에서 발생 가능한 지반함몰을 예측 및 평가할 수 있는 기법을 도출하고자 한다. 이를 통해 위험요소를 고려한 설계반영, 시공시 위험경로의 집중관리, 위험등급에 따른 유지관리에 대한 준수사항 및 지반 안정화 대응 방안을 제시하고자 한다. 지반굴착 공사의 설계 및 시공 중 발생할 수 있는 위험요소와 위험경로를 분석해 계획 및 설계의 적정성과 신뢰성을 검토할 필요가 있으며, 지반함몰의 발생확률 및 그에 따른 경제적 손실 평가로부터 위험도를 평가해 평가결과로부터 지반함몰 위험을 배제할 수 있는 준수 및 권고사항을 제안하고, 지반 안정화 확보를 위한 다양한 방안의 제시하고자 한다.

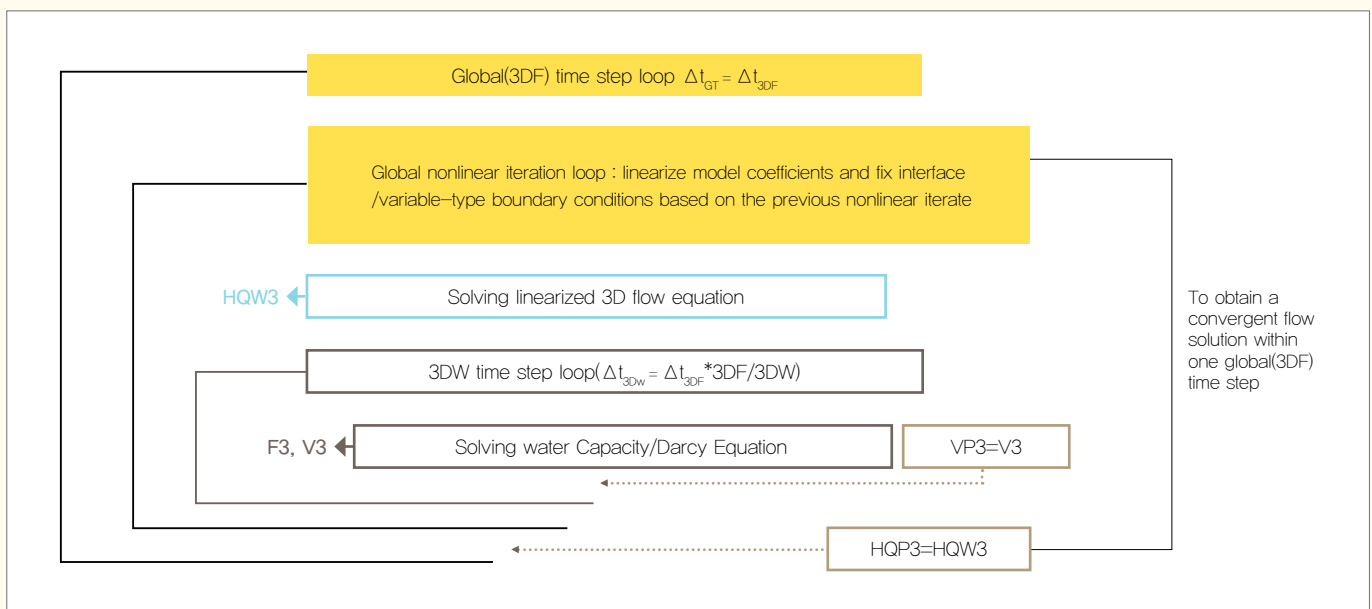
지반함몰 예측 및 평가를 위한 프로그램 개발을 위해 전문개발업체인 (주)인시티(연구책임자 이재영 연구소장)와 (주)베이스소프트(연구책임자 김병찬 연구소장)가 참여하고 있다. 도시 집중화로 인해 빌딩 등 시설물 건설에 있어 굴착규모와 굴착심도가 점차 증가하고 지하구조물 또한 대형화 추세로 인해 지하수위 변동에 의한 영향이 심화되고 있어 지하수 변동과 연계된 지반변형 예측기술의 확보가 시급한 실정이다. 특히 집중호우나 지반굴착에 의해 미고결 퇴적층(Unconsolidated soil, 또는 토양)이 포화-불포화 상태를 반복적으로 진행됨에 따라 토양의 공극 내 분포하는 체적함수비 변화가 발생되며 이에 따른 토양 내 지하수 거동에 따른 유효공극률 예측을 기반으로 지반침하 예측 기술개발이 필요하다. 또한, 지반굴착 시 지하수 변동에 대한 영향과 그에 따른 지반 변형을 복합적으로 예측하기 위해서는 포화/불포화 지반에서의 지하수 거동예측이 선행되어야 하며, 이를 통해 도출된 토양 내 함수비를



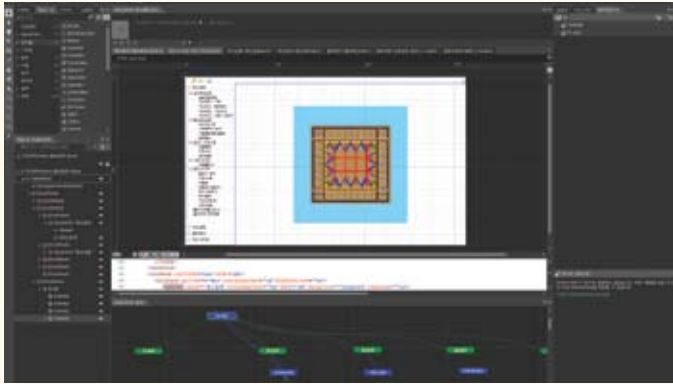
[그림 3] 원심모형시험기(KAIST)

동적으로 모의해 지반 체적 변화를 정량적으로 예측할 수 있는 모델링 기술 개발이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 지반굴착 시 지하수 흐름의 영향과 그에 따른 지반변형을 복합적으로 예측하기 위해서 포화-불포화 변동성 지반에서의 지하수 거동예측이 선행되어야 하며 이를 통해 도출된 토양 내 함수비 변화량을 동적으로 모의해 지반체적 변화를 정량적으로 예측할 수 있는 모델링 기법을 개발하고 있다.

기존의 토류구조물 설계를 위해서는 지하수의 영향을 상세하게 구현하기 어려운 부분이 있었다. 토압이론에 의한 구조물 설계에 중점을 두었기 때문에 실용적으로는 어려움이 없었으나, 빈번한 지하수위 변화에 대응하기 어려운 부분이 많았다. 이에 본 연구에서는 지하수위 변화와 함께 굴착지반 주변의 변형까지 동시에 추정 가능한 이론을 조사해 이론적으로 적합한 방향을 선정하고자 했으며, 토류벽 설계프로그램과



[그림 4] 포화-불포화 3차원 지하수 유동해석 알고리즘



[그림 5] 토류구조물 설계프로그램 개요

지하수에 의한 지반변형 3차원 프로그램의 기본이론을 상호 보완이 가능하도록 개발하고 있다.

또한, 정책 및 제도화 분야에서는 지난 2015년 12월 지하안전관리 특별법 제정과 발맞추어 정부 및 지자체의 지반함몰 정책 개선, 설계·시공 가이드라인 제시, 지하안전영향평가 지침 및 매뉴얼 제정 등의 성과 도출을 위해 한국시설안전공단(연구책임자 윤태국 실장), 서울연구원(연구책임자 이석민 연구위원), 한국지반공학회(연구책임자 한유식 연구실장)가 연구를 수행하고 있다. 지반함몰을 근본적으로 예방하기 위해서는 지하를 개발하고 이용하는 단계에서 그에 적합한 안전관리를 하도록 하는 예방적 규제와 이를 위한 체계적인 제도가 필요하다. 일본의 경우 지진발생도 많고 지반이 연약하기 때문에 각 지자체마다 지반침하대책에 대한 조례 및 규제법을 규정해 시행하고 있다. 그러나 현재 우리나라에는

굴착공사에 따른 지하안전영향을 예측·평가하고, 지반함몰 위험도를 평가하는 구체적인 방법 등이 없는 실정으로, 체계적인 지하안전관리와 제도 시행을 위해서 합리적이면서도 즉시 적용 가능한 평가방법 등을 시급히 마련할 필요가 있다. 즉, 지하개발 단계에서 일정 규모 이상의 지하 굴착공사를 수반하는 사업에 대해 사전에 지하안전에 대한 영향을 평가·조사해 위험을 예방하도록 해야 한다. 본 연구에서는 기존의 지반함몰 예방대책은 노후 하수관로 보강, 다짐도 측정, 되메우기 공법, 굴토심의 등 구조적, 기술적 위주의 정책을 보완하고, 지반함몰 관리 유관 기관 간 정보공유 및 관리체계의 필요성을 수렴해 이를 위한 정책 개선안을 제시하고자 한다.

### 맺음말

‘지반함몰’은 언론을 통해 사고 사례들이 먼저 보도되고, 도로 및 상하수도 관리 기관들이 효율적으로 대처하지 못하는 부분이 부각되어 있다. 갑작스레 도로가 붕괴하는 등의 현상에 대해 국민들은 불안감을 호소하고 있는 상황에서 본 연구의 추진으로 R&D의 성과물이 사회문제를 적극적으로 해결할 수 있는 사례가 될 수 있다고 생각한다. 국가 차원의 기술적, 정책적인 대비책을 연구 개발을 통해 「지하안전관리에 관한 특별법」 시행 이전에 제시함으로써 현장에서 발생할 수 있는 혼란을 방지하고, 다양한 도심지 지반 재해에 대해 효과적으로 대응함으로써 관련 예산의 절감과 함께 국가에 대한 국민의 신뢰도를 높일수 있는 계기가 될 것으로 생각된다.

현황	개선(안)	정책 방향
자료 수집, 구축 방법 및 지침 미흡	업무프로세스 개선	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 통계자료 및 관련 DB 구축프로세스 개선</li> <li>- 지자체 업무지침 수립</li> <li>- 정보시스템 연계 및 유지관리</li> </ul>
부처간 정보공유 체계 미흡	협력체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유관 부처 및 부서</li> <li>- 민간협력</li> <li>- 전문가 활용</li> </ul>
법제도 시행	「지하안전관리에 관한 특별법」 개선	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 「지하안전관리에 관한 특별법」 개정</li> <li>- 타법과의 연계성</li> </ul>
구조적, 기술적 위주의 정책	지반함몰 예방정책 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 노후 하수도 조사 및 정비</li> <li>- 공사장 유출지하수 관리</li> <li>- 전국단위 지반침하 관측망 운영</li> </ul>

[그림 6] 도심지 지반함몰 발생 대응 정책 개선 방향(안)