

사물인터넷,
 재난을 예방하라!

사물인터넷 융합기술을 활용한 지반함몰 관리기술

지반함몰(싱크홀)이란 지반침하의 한 형태로 지반 내 공동(cavity)이 발생하여 표층지반이 갑작스럽게 가라앉으면서 지반에 발생한 구멍이다. '싱크홀'이란 용어는 본래 자연적 원인에 의한 지반함몰을 대상으로 한 용어이므로 최근 국내에서 문제가 되고 있는 도심지 지반함몰과는 구분해서 정의할 필요가 있다. 하지만 이미 국내에서는 발생원인과 상관없이 대부분의 유사한 형태 지반함몰 현상에 대해서 '싱크홀'이란 용어를 사용하고 있다.

도시의 안전을 위협하는 지반함몰

자연적 원인에 의해 발생하는 싱크홀은 크게 용해형 싱크홀(dissolution sinkhole), 지표 침하형 싱크홀(cover-subsidence sinkhole), 지표 붕괴형 싱크홀(cover-collapse sinkhole)의 세 가지 유형으로 분류할 수 있다.

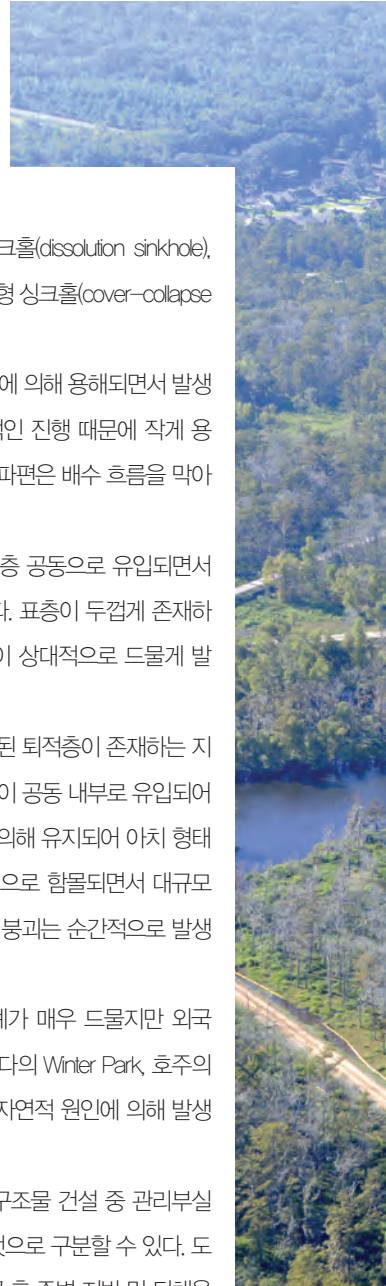
용해형 싱크홀은 지표면에 노출된 석회암이 지표수나 빗물에 의해 용해되면서 발생하는 유형으로 암반표면으로부터 용해가 진행되어 점진적인 진행 때문에 작게 용해된 부분이 커지는 현상이다. 또한, 싱크홀로 유입된 암석파편은 배수 흐름을 막아 물웅덩이나 습지가 형성될 수 있다.

지표 침하형 싱크홀은 주로 표층의 모래질 퇴적층이 암반층 공동으로 유입되면서 표층이 가라앉는 형태이며 점진적인 형태로 발생하게 된다. 표층이 두껍게 존재하거나 점토질 퇴적층인 지역에서는 이러한 유형의 싱크홀이 상대적으로 드물게 발생하며 오랫동안 발견되지 않을 수도 있다.

지표 붕괴형 싱크홀은 주로 지표에 점토질 흙이 많이 포함된 퇴적층이 존재하는 지역에서 발생한다. 암반 내부에 공동이 발생한 후 표층의 흙이 공동 내부로 유입되어 표층 두께가 얇아지게 되며 표층은 점토질 흙의 점착력에 의해 유지되어 아치 형태의 구조를 이루게 된다. 점진적으로 얇아진 표층이 순간적으로 함몰되면서 대규모 싱크홀이 발생하며 진행에는 오랜 시간이 걸릴 수 있지만, 붕괴는 순간적으로 발생하므로 큰 피해가 발생할 수 있다.

자연적 원인에 의해 발생한 싱크홀은 국내에서는 그 사례가 매우 드물지만 외국의 경우 다양한 발생 사례가 보고되고 있다. 1981년 플로리다의 Winter Park, 호주의 Umpherston(The Sunken Garden), 오만의 Bimmah 등은 자연적 원인에 의해 발생한 대규모 싱크홀 발생 사례이다.

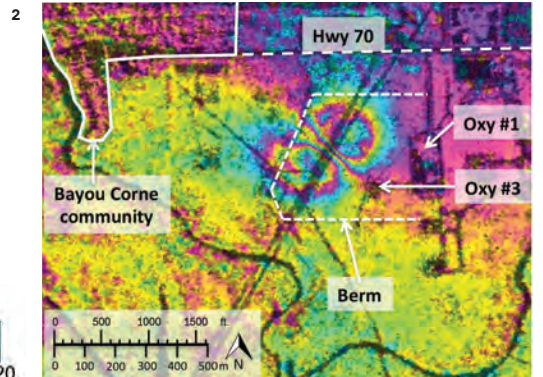
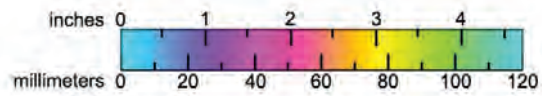
인위적 싱크홀의 발생 원인은 ①지하매설물 훼손 ②지하구조물 건설 중 관리부실 ③지하수 사용, 지하수 흐름 교란 등 지하수 변화에 의한 것으로 구분할 수 있다. 도심지 지하에 매설된 상하수도관, 전기·통신관로 등은 시공 후 주변 지반 및 뒤채움 흙의 다짐 등 시공이 부실하면 지반함몰이 발생할 수 있다. 특히 상하수도관이 넓거나 충격 때문에 파손될 경우 누수가 발생하여 상부의 흙이 유실되어 지표 붕괴형 싱크홀과 같이 갑작스러운 지반함몰이 발생할 수 있다. 터널 등 지하구조물 건설 시 굴진면 관리가 부실하게 되면 다량의 지하수가 유입될 수 있으며 이로 인해 발생한 지중의 공동이 점차 확대되어 지표면에 커다란 지반함몰(싱크홀)이 발생할 수 있다. 그리고 지하철 또는 지하도로 건설 시 공법의 변경이 발생하는 접합부에서 방수기법의 차이에 의한 누수 현상이 발생할 수 있으며 이로 인해 접합부 상부 지반으로 공동화가 진행되면 지반함몰이 발생할 수 있다. 또한, 지하수의 과다한 사용으로 인해 암반 내 공동이 생성될 수 있으며, 이렇게 생성된 공동은 지반함몰을 유발할 수 있다. 과다한 지하수 사용, 대형 신축 건물 터파기, 지하철 공사 등으로 지중의 지하수가





1

1. 지난 2012년 8월 미국 루이지애나주(州) 바이우 콘(Bayou Corne)에서 길이 약 229미터 · 넓이 약 10만 117제곱미터 규모의 초대형 싱크홀이 발생했다. 미국 정부는 과학적인 근거를 바탕으로 싱크홀 발생을 사전에 예측하고 주민들을 대피 시켜 아무도 피해를 입지 않았다. 2. 바이우 콘 싱크홀에 대한 NASA 분석자료



과다하게 배출될 경우, 주변 영역의 지하수위가 낮아질 수 있으며, 지하수위 하강은 지반 내 유효 응력이 증가하여 넓은 영역에 걸쳐 지반함몰이 발생할 수 있다. 이와 더불어 지역 간 수두차 발생으로 넓은 영역에 걸쳐 지하수 흐름이 발생하여 지하수 흐름 변화에 따른 토사유실 등으로 지반함몰이 발생할 수 있다.

지반함몰(싱크홀) 해결을 위한 다양한 기술

지반함몰(싱크홀)에 대응하기 위한 기술은 탐사기술과 예측 및 예방기술이 있다. 지중에 발생한 공동의 탐사방법은 크게 비파괴 물리탐사와 파괴 물리탐사로 구분할 수 있다. 비파괴 물리탐사의 대표적인 방법으로는 지표레이더 탐사(Ground Penetrating Radar, GPR), 다중채널 표면파 탐사(Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW), 전기비저항탐사(Resistivity Survey, RS), 충격반향기법(Impact-Echo, IE) 등이 있다. 파괴 물리탐사의 방법으로는 시추탐사(Boring), 시추공 영상촬영, 토모그래피(Tomograph) 등이 있다. 비파괴 물리탐사의 경우 지표면 특히 도심지 도로의 포장을 손상하지 않고 탐사할 수 있기 때문에 도심지에서 발생하는 싱크홀(지반함몰)이나 지하공동을 발견하는 데 유용한 방법이라고 할 수 있다. 하지만 탐사 심도가 얇고 지표면에 두꺼운 인공구조물이 존재할 경우 탐사결과의 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다.

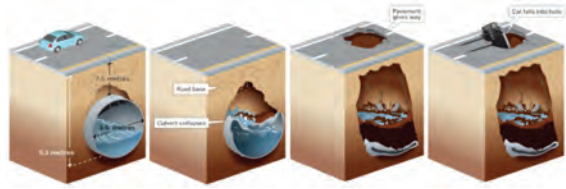
일본의 경우, 1980년대 후반부터 도심 지반함몰(싱크홀) 문제에 대해 관심을 두고, 현재까지 다양한 장비(도로 지하 공동 탐사차 등)를 개발하여 운용하고 있다. 미국의 경우, 1990년 후반부터 '3차원 지하 투시 이미지 레이더(Ground Penetrating Imaging Radar, GPR) 등을 개발하여 현장에서 상용화하고 있다.

자연적 원인에 의해 싱크홀이 자주 발생하는 미국 플로리다에서는 인공위성과 항공사진 등을 통해 중장기적인 측면에서 싱크홀 발생 현황을 감시하고 관련 자료 데이터베이스를 구축하고 있으며, 미국지질조사국(USGS)을 중심으로 싱크홀 지도 제작과 대응방안에 대한 연구를 수행하고 있다. 미국 항공우주국(NASA)은 항공기시스템과 인공위성에서 수집한 레이더 자료를 이용한 레이더간섭기법(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)을 통해 싱크홀을 예측하는 기술을 활용하고 있다. 2012년에는 미국 LA에서 발생한 대형 싱크홀인 바이우 콘(Bayou Come) 싱크홀의 발생을 한 달 전에 예측한 사례도 있다.

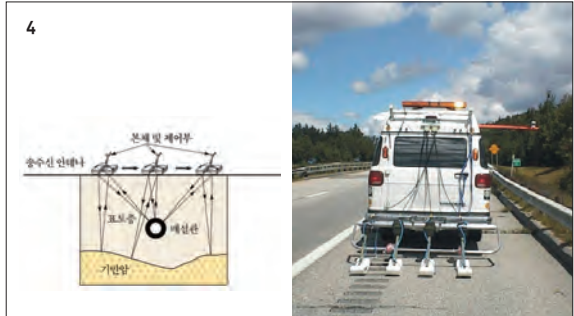
안전한 대한민국을 만들기 위해 뭉친 출연(연)

국가과학기술연구회 산하 4개의 정부출연연구기관(한국전자통신연구원, 한국건설기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국지질자원연구원)으로 구성된 UGS(Under Ground Safety) 융합연구단에서는 'IoT 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템' 기술을 개발하고 있다. 'IoT 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템'은 지하공간의 상하수도관로, 도시철도 구조물 및 주변 환경, 지하수 및 지질환경 변화 등의 복합감시(상시감시, 확인감시, 광역감시)를 통해 수집한 지하공간 빅 데이터를 분석하여 지하공간 상황을 조기에 감지, 예측, 대응하는 서비스를 제공한다.

3



4



도심지 지반함몰(싱크홀)을 예방하기 위한 예측 기술 구분

- ①지리정보체계(Geographic Information System, GIS)를 활용한 싱크홀 발생 위험도 예측 기술(지질도, 지하수 지도, 지하매설물도, 지하구조물 설계도 활용)
- ②인공위성 및 항공 사진 등 영상자료를 활용한 광역 싱크홀 위험지구 도출 기술
- ③지하시설물, 교통량, 지반정보, 지리정보체계 등 다양한 정보를 활용한 도심지 지반함몰(싱크홀) 위험지도 구축 기술



한국전자통신연구원의 'IoT 기반 재난재해 예측 및 대응 시스템 기술 개발' 연구는 지하공간의 변화를 추적하는 통합감시 및 예측모델 개발을 통해 주요 시설에 대한 개별적인 상태 변화뿐만 아니라, 지반함몰과 같은 복합 재난재해 사고를 조기에 감지하고, 사전에 선제적으로 대응할 수 있는 IoT 기반 대응 시스템을 개발하는 것이며, 도시 전역에 분포하고 있는 지하 매설물 및 도시 철도 지하구조물/주변 지반의 자원과 자산에 대한 센싱 및 계측 데이터 수집이 가능한 광역 저전력·고신뢰 무선 사설망(Wireless Personal Area Network, WPAN) 기술과 복합 재난재해 사고를 조기에 감지하고 사전 예방할 수 있는 의사결정 시스템 기술을 개발한다.

한국건설기술연구원의 '지하매설관 실시간 전역 위험 감시 기술 개발' 연구는 상하수도관로의 누수, 손상, 이상 거동 등으로 인해 발생할 수 있는 지반함몰 등의 사고를 예방하기 위해 상수도관로의 누수, 하수관로의 이상거동 및 배면 공동을 탐지할 수 있는 탐사 및 계측 시스템과 관로 주변 지반함몰 위험영향 분석 및 의사결정 기술을 개발한다.

한국철도기술연구원의 '도시철도 지하구조물 및 주변 지반 감시 기술 개발' 연구는 도시철도 지하구조물 및 주변 지반의 위험도 영향인자를 계측하고, 이에 대한 위험도 평가 알고리즘을 제시하여 위험도 등급(안심지수)을 수요처에 서비스(재난 예·경보, 유지보수 알림 서비스 등)로 제공하기 위한 요소 및 융합 기술과 도시철도 주변 지반의 지반 이완 및 공동 가능성 평가 시험 기술을 개발한다.

한국지질자원연구원의 '도시 지하수 및 지질 환경 실시간 예측 기술 개발' 연구는 도심지역의 지질과 지하수 변화를 실시간으로 예측하여 인위적, 또는 자연적인 복합 재난재해를 조기에 감지하고 사전 예방할 수 있는 기술을 개발하는 것으로, 도시 지하수 및 지반변형 감지 센서를 개발하고 최적의 관측망을 구축하여 모니터링하며, 지하굴착공사, 토목건설 등에 의해 지하수계가 영향을 받아 재해 또는 재난으로 파생되는지에 대한 과학적인 규명 및 정량적인 평가 기술을 개발한다.

UGS 융합연구단의 연구개발을 통하여 지하공간의 상하수도관로, 도시철도 구조물 및 주변 환경, 지하수 및 지질환경 변화 등의 복합감시(상시감시, 확인감시, 광역감시)를 통해 수집한 지하공간 빅 데이터를 분석하여 지하공간 상황을 조기에 감지, 예측, 대응하는 서비스를 제공할 수 있을 것이다. ☐

3. 지하매설물 훼손에 의한 지반함몰(싱크홀) 발생 개념도 4. 지표레이더(Ground Penetrating Radar, GPR) 탐사 원리와 장비