싱크홀 현황과 그 대책

박 인 준
한서대학교 토목공학과 교수

2014년부터 최근까지 꾸준히 국민들을 공포에 떨게 하는 싱크홀 현황과 그 대책에 대해서 알아보고자 한다.

1. 싱크홀의 정의

싱크홀이란 지하 암석이 용해(dissolution)되거나 지하공동(underground cavity)이 붕괴되며 지반이 원기둥이나 깔때기 모양으로 가라앉는 현상을 말한다. 여기서 암석의 용해란 지표수가 이산화탄소를 흡수하는 과정과 식물의 대사 작용에 참여하는 과정을 통해 산성화가 되는데, 이 산성화된 지표수가 기반암으로 흘러가면 암석의 구조적 결속력(structural integrity)을 약화시킨다. 특히, 기반암(bedrock)이 석회석이나 탄산염암석과 같은 부드러운 광물로 이루어졌을 때 이런 현상이 두드러지게 나타난다. 싱크홀의 발생 개념도를 그림 1에 도식화 했다.

이러한 현상의 주요원인에는 두 가지가 있는데 하나는 지하수위의 저하이고, 다른 하나는 지표수 흐름의 변화라고 보고되어지고 있다. 이를 좀 더 자세하게 알아보면 다음과 같다.

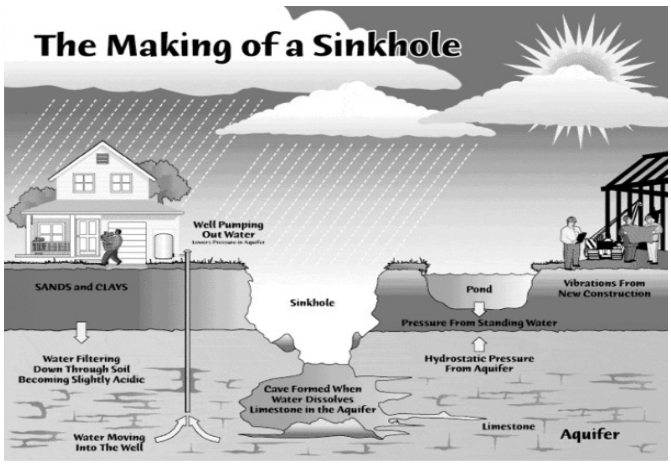

그림 1. 싱크홀의 발생 개념도

1) 자연발생적 싱크홀

- 주로 용해가 잘 되는 석회암 지역에서 발생하는데 오랜 기간 동안 흐르는 지하수에 의해 석회암이 녹게 되고 이러한 현상이 지속되면 지하수 길이 점점 커지며 결국 큰 공동이 형성된다. 땅속으로 2.5m 깊이 들어갈 때마다 1기압씩 압력이 증가하므로, 깊이 25m의 암반층에는 10기압이, 250m 지점에는 100기압의 압력을 받는데, 이러한 힘을 지하수가 버티고 있다가, 어느 순간 지하수위가 저하되면 물로 가득 차 있던 공동이 비어있는 상태가 되고 지하수로 인해 존재하던 수압이 사라지게 되면서, 결국 상부 하중(overburden pressure)을 견디지 못한 공동이 무너지며 싱크홀이 발생하게 되는 것이다.
- 이런 자연현상으로 만들어지는 싱크홀은 크게 세 가지로 분류할 수 있다.

① 지표 붕괴형 싱크홀(Cover-collapse sinkhole): 이 형태의 싱크홀은 상부 퇴적물이 점토같이 부드러운 물질로 되어있을 때 발생한다. 지하공동이 기반암 아래에 생겨 상부퇴적물의 일부가 공동에 의해 만들어진 빈 공간으로 떨어져 들어가 표토층을 점차 약하게 만들어진다(아래 그림 2 참조). 결국은 약해진 상부퇴적물이 함몰되며 붕괴가 일어난다. 대부분 대규모의 싱크홀이 생기면 매우 오랜 시간이 걸리지만 붕괴는 갑작이 일어나기 때문에 피해가 매우 심각하다.

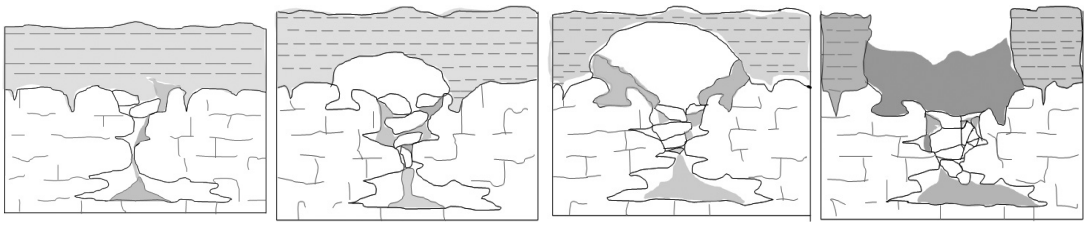

그림 2. 지표 붕괴형 싱크홀의 발생 개념도

② 지표 침하형 싱크홀(Cover-subsidence sinkhole): 이 형태의 싱크홀은 작은 규모로 발생한다. 표층이 사질토인 경우가 많으며 동시에 지하수가 지표에 가까울 경우 주로 발생한다. 점진적으로 가라앉는 것이 특징이며 대부분의 경우 주택의 정원 내에서 발생하기도 한다.

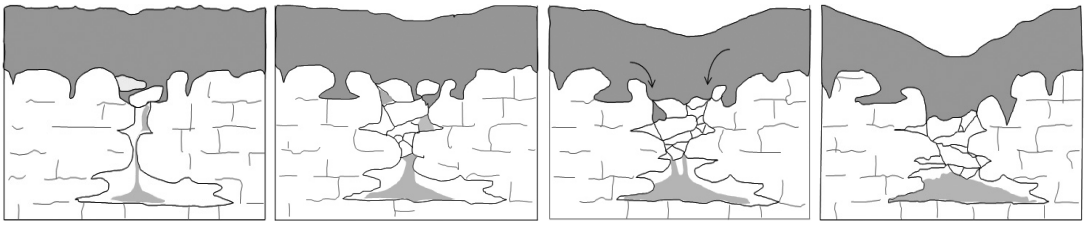

그림 3. 지표 침하형 싱크홀의 발생 개념도

③ 지표 용해형 싱크홀(Dissolution sinkhole): 이 형태의 싱크홀은 가시적으로 침하되지 않는 경우가 많으며, 지표수 흐름의 변화로 인해 얕은 지표층의 용해가 급속도로 진행되어 결국에는 기반암까지 침식되어 파이는 현상이다.

2) 인공적 싱크홀 (지반함몰 또는 지반침하)

- 도심에 생기는 싱크홀은 지하수 네트워크에 이상이 생기면서 만들어진 것인데, 지하수를 너무 많이 끌어다 쓰면 지하수위가 낮아지면서 지하수가 감당하던 압력을 땅 속 공간이 고스란히 받게 되고, 그 결과로 지표가 무너져 싱크홀이 만들어진다. 지하수를 대량으로 양수(pumping)할 경우(대규모 식수개발, 대규모 지하 터파기, 지하철공사 등)에 멀리 떨어진 곳의 지반도 내려앉는데, 이는 지하수도 지표수처럼 높은 곳에서 낮은 곳(수두차)을 향해 흐르므로, 지하수위가 낮은 지점에서 물을 많이 끌어 쓰면 높은 곳에 있는 지하수가 이동해 공동이 생기면서 땅이 내려앉게 되는 것이다. 2005년 6월 전남 무안과 2008년 5월 충북 음성에서 발생한 싱크홀도 이와 같은 원인으로 발생한 것으로 밝혀졌다.
- 또한, 이 밖에도 지표수 물길을 다른 곳으로 돌릴 경우 그동안 물이 많지 않았던 흙에 물이 가득해질 수 있는데, 평소 물이 많지 않던 지반에 지표수가 유입되면 지반의 유효응력이 감소하게 되고 이로 인해 상재하중을 견디지 못한 지반이 무너져 내리게 되기도 한다. 또한 공장에 쓸 저수지를 모래가 많은 지표층 위에 만들거나 도시 상하수관이 새면서 주변 흙에 물이 많이 스며들어도 싱크홀이 생길 수도 있다.
- 인공적인 싱크홀 발생 원인을 정리하면 다음과 같다.

① Life Line(상하수도, 전력통신구 및 가스관로) 중 상하수도 지하 매설관로 노후로 인한 누수발생 후 주변지반의 급속한 동공화 (그림 4 참조).

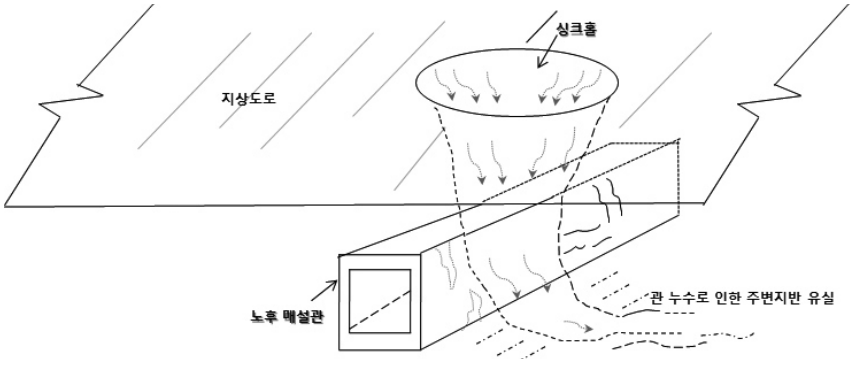

그림 4. 지하 매설관로 노후로 인한 싱크홀 모식도

특히 하수도 또는 우수관 등의 비압력 지하 매설관로 시공부실 및 노후화에 따른 균열부위 주변 토사의 유입(사진 1 참조)으로 인한 급속한 동공발생 및 그 확대로 기인한 지반침하 가능성 증가. 최근까지 도심지 싱크홀의 주원인으로 의심되고 있음.

사진 1. 부실 우수관로 균열부 및 주변 토사 침전물

② 조립토(실트질 지반 일부) 지반 내에 대규모건축물 기초터파기 공사 시 차수벽 시공부실 및 양수를 목적으로 하는 무분별한 지하수 방출과 더불어 기초주변 토사의 급격한 유실로 인한 싱크홀 발생(그림 5 참조)

③ 조립토(실트질 지반 일부) 지반 내에 대규모건축물 기초터파기 공사 중 암반 내 피압대수층(Confined Aquifer)을 교란시켜 다량의 대수층의 지하수를 양수하게 됨으로써 지표층의 대수층 유입을 유도하게 되어 발생하는 싱크홀 현상 (그림 5 참조)

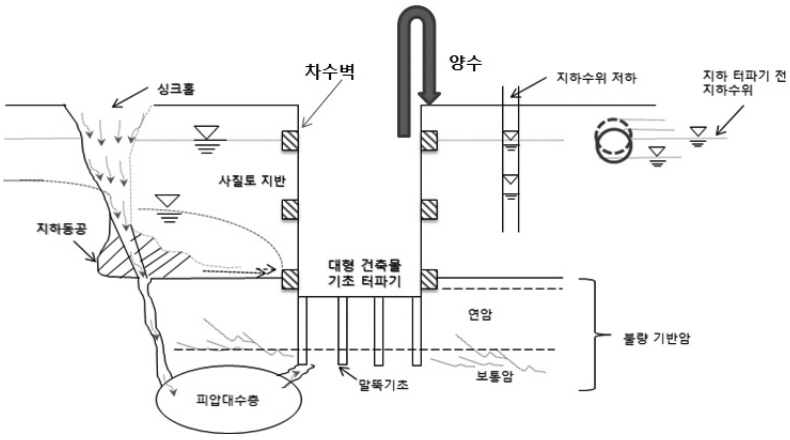

그림 5. 건축물 기초터파기로 인한 싱크홀 모식도

④ 조립토(실트질 지반 일부) 지반 내에 개착공법으로 시공된 지하차도 하부의 지하수이동에 의한 국부적인 동공화로 인한 지표면 싱크홀 발생 (그림 6 참조).

⑤ 조립토(실트질 지반 일부) 지반 내에 지하구조물 건설시 막장면 관리 부실로 다량의 지하수 유입으로 인한 상부 지표면 동공발생 (그림 6 참조).

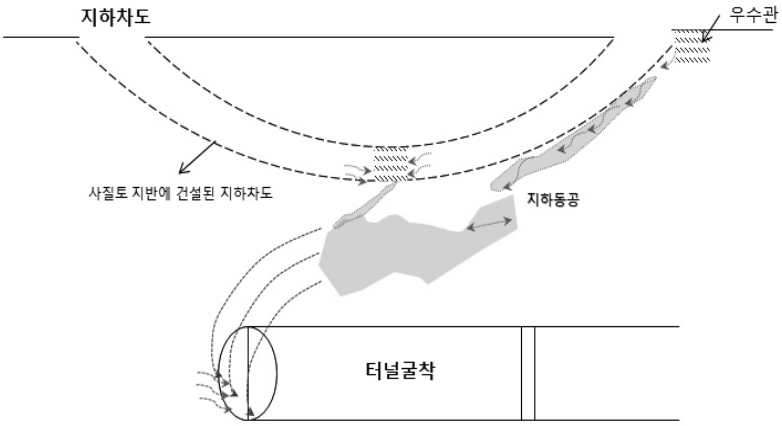

그림 6. 지하수 유입으로 인한 싱크홀 모식도

⑥ 조립토(실트질 지반 일부)지반 내 건설된 지하구조물의 공법차이로 인한 구조물 접하부 지하수 누수 현상 발생으로 인한 상부 지반의 동공화 발생 (그림 7 참조).

[설명] 터널시공 시 지반 및 교통조건에 의해 개착시공과 NATM 시공부, 비개착시공과 NATM 시공부, TBM시공과 NATM시공부 등으로 나누어 공사가 진행되는데, 최종 구조물이 상호 접합하는 부분에서 방수기법이 달라서 발생하는 접합부 누수현상.

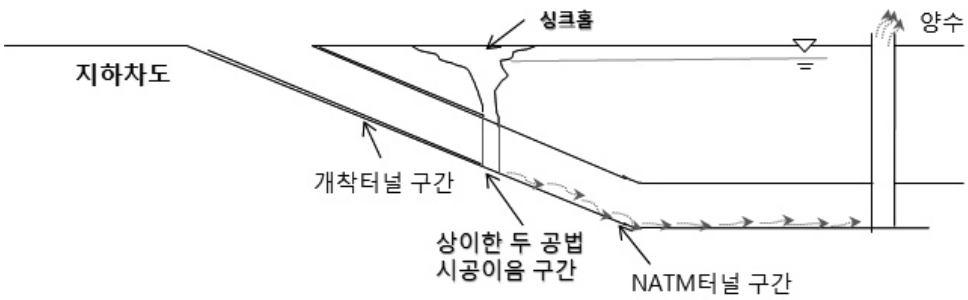

그림 7. 방수기법 차이로 인한 접합부 누수현상

• 위의 발생 원인들이 단독으로 싱크홀에 기여할 수 있고 또는 복합적으로도 기여하는 경향이 있다. 특히, 도심지의 경우는 위 원인이 복합적으로 기여하는 싱크홀 발생 경향이 뚜렷하다.

2. 국내 · 외 싱크홀 사례

1) 국외 싱크홀 사례

- 2010년 5월 과테말라 과테말라시티 공장 지대 일부가 땅 밑으로 꺼지면서 지름 20m, 깊이 30m의 싱크홀이 생겼다. 이 과정에서 3층 높이의 공장이 그대로 붕괴됐고 15명이 숨졌다. 과테말라 정부는 중남미를 강타한 열대성 폭풍인 '애거사'가 몰고 온 집중호우로 인하여 지하지반이 휩쓸려 생긴 싱크홀 이라고 발표하였지만, 현지 지역주민 및 지질학자들은 부실한 배수체계 및 노쇠한 배수관이 파손되면서 흘러나온 물로 인한 토사 유실이 원인이라고 추정하였다.
- 2013년 8월 미국 플로리다 주(州) 디즈니월드 인근 리조트에서 싱크홀이 발생해 3층 건물이 무너져 투숙객들이 대피했다. 지름 18m, 깊이 5m의 싱크홀로 3층짜리 리조트 건물이 땅 속으로 사라졌고, 옆 건물들도 크게 기울었다. 플로리다에서 발생한 싱크홀은 지하수가 마르면서 지반을 약화시키고, 노후화된 배수관에서 흘러나온 물로 인한 토사유실이 원인으로 밝혀졌다.
- 2013년 5월말에 중국 허베이성의 우안시 허우산촌에 있는 공장부지가 싱크홀에 의해 갑자기 무너져 내려 건물 안에서 자고 있던 16명의 건설노동자가 참변을 당했다. 당시 싱크홀은 지름 50m, 깊이 20m로 초대형 규모에 속한다. 허베이성 싱크홀의 경우 정확한 원인은 밝혀지지 않았지만 전문가들은 무분별한 도시 개발과 채굴을 참사의 주된 원인으로 추정하였다. 중국 전역에서 발생하는 이 같은 싱크홀 현상은 아직 분명하게 규명되지 않았지만, 전문가들은 무분별한 지하수 개발로 지반이 약해지는 현상과 일정부분 연관이 있다는 분석을 내놓고 있다.

2) 국내 싱크홀 사례

그림 8. 과테말라시 싱크홀[7]

그림 9. 미국 플로리다 주 싱크홀[8]

- 2005년 1월, 전남 무안군 무안읍에서 발생한 싱크홀로 전날까지 멀쩡하던 방앗간이 땅 속으로 사

라져 버렸다. 전남 무안에서는 13년간 19번의 싱크홀이 발생했다. 석회암 지반을 가진 무안지역에서 과도한 지하수 개발 및 사용으로 인하여 지반이 약화되었고, 많은 싱크홀이 발생하게 되었다.

- 무안에서 발생한 싱크홀과 같은 원인으로 2008년 5월, 충북 음성군에 싱크홀이 발생하였다. 폐쇄된 금광 갱도로 지하수가 흐르는 과정에서, 과다한 지하수의 사용으로 인해 토양이 유실되었고, 그 결과 싱크홀이 발생하였다.
- 충북 청원군에서는 광산업자의 무분별한 개발로 2007년과 2012년 청원 광산 부근의 논이 두 차례나 내려앉고 2010년에는 마을 저수지 바닥에 구멍이 생겨 농업용수 수천톤이 사라지는 일이 발생하였다.
- 2012년 2월, 인천도시철도 2호선 201공구 공사장 인근인 서구 왕길동의 한 아파트 앞 6차선 도로에서 지반 침하 현상이 발생, 오토바이를 타고 지나가던 남성이 함몰되어 사망하는 사고가 발생했다. 폭 12m, 깊이 27m 규모의 싱크홀은 지하철 터널 공사로 인해 그 위에 상수도관을 떠받치고 있던 흙이 내려앉자 싱크홀이 발생한 것으로 파악하고 있다.
- 올해 6월에는 서울시 강서구 9호선 증미역 근처 도로의 지반이 내려앉았다. 폭 1.5m, 길이 3m, 깊이 1m의 깊고 큰 구멍이 생겼지만, 인명피해는 발생하지 않았다. 강서구청 측은 지반이 내려앉은 도로에 하수관로 매설 공사를 했는데, 국지성 호우가 내리면서 도로 포장층 아랫부분 흙이 유실돼 발생한 것으로 설명하였다.
- 최근엔 건설 중인 서울 잠실 '제2롯데월드' 부근 석촌 지하차도 부근에서 대형 싱크홀이 발견되었다. 석촌 지하차도 싱크홀은 지하철 9호선 공사가 주요 원인인 것으로 잠정적인 결론이 나오고 있지만, 인근에서 공사가 진행 중인 제2롯데월드 공사 초기부터 전문가들이 주변 침하 가능성을 끊임없이 제기해왔기 때문에 복합적인 요인으로 인해 싱크홀이 발생한 것으로 추정되고 있다.

그림 10. 전남 무안군 싱크홀[1)]

그림 11. 충북 음성군 싱크홀[2)]

그림 12. 충북 청원군 싱크홀3)

그림 13. 인천 왕길동 싱크홀[4)]

그림 14. 증미역 부근 싱크홀[6)]

그림 15. 석촌 지하차도 싱크홀[7)]

3. 예방대책

• 인구밀도가 높은 도심지에서 갑자기 거대한 싱크홀이 발생할 경우 많은 인명 피해가 우려된다. 국내에서도 2012년 인천의 지하철 공사 현장 인근에서 발생한 싱크홀로 인해 인명 피해까지 발생하였다. 도심지 싱크홀 발생으로 인한 피해를 예방하기 위한 예방 및 대책 방안을 다음과 같이 모색할 수 있다.

① 도심지 내 건설공사 수행 시 계획단계에서부터 지질의 변화나 지하수의 흐름에 대한 철저한 지반조사가 수행하도록 의무화해야 한다. 특히, 싱크홀 발생 가능성이 높은 강변 및 사질토 퇴적층 지역에서의 공사를 위해서는 이들 지역을 '침하가능지역'으로 지정 · 관리해야 한다. 이런 지정 · 관리를 위해서는 일본의 "대심도 지하의 공공이용에 관한 특별조치법"과 같은 특별법을 조속히 시행하여 관련 법규가 이런 의무시행을 돕도록 해야 한다.

② 무엇보다도 먼저 관 발주 공사 시 수행하는 지반조사보고서를 DB화하는 작업을 실시하고 추후 민간발주 공사 지반보고서를 의무적으로 DB화하도록 해야 한다.

③ 이렇게 과학적이고 체계화된 지반조사 DB를 통합하고 분석 처리할 연구센터를 조속하게 구축해야 한다.

④ 이런 연구센터를 통해 지하시설물(life line으로 대표되는 지하매설물 및 지하철 등으로 대표되는 지하구조물)정보 DB 와 지반(지질 및 지하수 등)정보 DB를 3차원으로 통합하여 "지하공간 통합지도"를 조속히 완성해야 한다.

⑤ 끝으로 이를 이용해서 필요한 모든 국민이 손쉽게 사용 할 수 있도록 교육과 홍보가 이루어져야 한다.

⑥ 첨단 해외 사례를 들면, 미국 항공우주국(NASA)은 공중레이더, 위성 및 드론 등으로 지형자료를 분석해 싱크홀을 예견하는 연구를 진행 중에 있다. 국내에서는 아직 싱크홀에 대한 연구가 본격적으로 추진되지 않고 있는 바, 우선적으로 지반 침하 · 붕괴로 인해 재해가 예상되는 지역에 대해 공중레이더, 위성 및 드론을 이용해서 1차적으로 지반 재해 위험지도를 작성해야 하며, 또한 이들 지역에서 건설공사가 착공되거나 진행될 경우 특별관리 대상으로 지정해 계측 · 모니터링을 강화해 싱크홀(침하 · 붕괴) 위험에 대비해야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 국내에서 발생하는 싱크홀은 해외의 그것과는 원인부터가 상이한 현상으로써 향후에는 싱크홀이라는 단어보다는 지반함몰 또는 지반침하로 용어를 통일화 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

사진출처

1. "제2롯데월드 주변 의문의 구덩이, 엄습하는 '싱크홀'의 공포", 〈위키트리〉, 2014년 7월 1일, http://wikitree.co.kr/ (2014.9.4.).
2. "'숨겨진 도심 폭탄' 싱크홀, 대책은?", 〈MBC뉴스〉, 2013년 9월 3일, http://imnews.imbc.com (2014.9.4.).
3. "'숨겨진 도심 폭탄' 싱크홀, 대책은?", 〈MBC뉴스〉, 2013년 9월 3일, http://imnews.imbc.com (2014.9.4.).
4. "순식간에 아스팔트 도로 집어 삼킨 싱크홀...CCTV 화면 '경악'", 〈뉴스한국〉, 2012년 4월 12일, http://www.newshankuk.com/ (2014.9.4.)
5. "갑자기 '쿵'...도심 도로 한가운데 1m 싱크홀", 〈SBS뉴스〉, 2014년 6월 18일, http://news.sbs.co.kr/ (2014.9.4.)
6. "서울시, 석촌 지하차도 싱크홀 굴착조사 착수", 〈연합뉴스〉, 2014년 8월 8일, http://www.yonhapnews.co.kr/ (2014.9.4.)
7. "당신이 싱크홀에 관해 묻고 들어야 할 11개의 질문", 〈허핑턴포스트〉, 2014년 8월 25일, http://www.huffingtonpost.kr/ (2014.9.4.).
8. "40개 방 집어삼킨 플로리다 리조트 '싱크홀'", 〈위키트리〉, 2013년 8월 13일, http://www.wikitree.co.kr/ (2014.9.4.).