KEI Working Paper 2015-01

싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선 방안 연구

김윤승

한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 김윤승 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)

산학연정 연구자문위원

이성진 (한국철도기술연구원 선임연구원)
현윤정 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)

ⓒ 2015 한국환경정책·평가연구원

발행인 박광국
발행처 한국환경정책·평가연구원
세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지
B동(과학·인프라동) (우편번호) 30147
전화 044)415-7777 팩스 044)415-7799
http://www.kei.re.kr
인쇄 2015년 9월 25일
발행 2015년 9월 30일
등록 제17-254호(1998년 1월 30일)
ISBN 978-89-8464-942-2 93530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.
김윤승. 2015.「싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선 방안 연구」. 한국환경정책·평가연구원.

값 5,000원

서 언

최근 도심지에서 부지불식간에 땅이 꺼지고 방금까지 달리던 차량과 거리를 걷던 시민들이 땅으로 빨려 들어가는 사태가 발생하였습니다. 소위 도심 "싱크홀"의 문제입니다. 특히 세월호 사건 등으로 '국민 안전'에 대한 불안이 최고조에 이른 상태에서 전국적으로 불거진 싱크홀 사태는 더욱 주목을 받았습니다. 공법의 눈부신 발달로 인해 도심의 빽빽한 건축물, 복잡한 교통 상황 등의 제약조건에도 불구하고 수많은 건설과 토목공사가 이루어지고 있습니다. 차단벽과 임시상판으로 가려진 채 소음과 먼지조차 거의 발생시키지 않으며 짧은 시간 안에 완성되어 가는 새로운 구조물들에 익숙해진 현대인들에게 싱크홀의 문제는 큰 충격과 함께 인간이 자연을 상대로 얼마나 위태로운 게임을 벌여왔는지, 공학의 발달이 오만한 안전 불감증을 불러오지 않았는지 반성하게 하는 계기가 된 듯합니다. 이제 우리는 세계시장 점유율 6위의 건설기술 선진국으로서의 자존심을 걸고 도심의 싱크홀 문제를 해결해 나가기 위해 힘을 모으고 있습니다. 본보고서는 그 중에서 환경영향평가제도가 싱크홀 문제의 방지를 위해 어떠한 역할을 할 수 있는지 살펴보고, 평가 대상, 평가 방법론 등에서 개선할 점을 제안하고 있습니다. 이와 같은 제도개선(안)은 현재 국토교통부가 구상하고 있는 "지하영향평가제도"의 구체적인 내용과 맞물려 싱크홀 방지를 위한 적절한 평가제도 마련을 위한 좋은 기초 작업이 되리라 믿습니다.

본 연구를 수행해 주신 김윤승 박사의 노고에 감사를 표합니다. 아울러 자문위원으로서 연구의 질 향상에 도움을 주신 한국철도기술연구원의 이성진 박사, 우리원 현윤정 박사께도 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

2015년 9월

한국환경정책·평가연구원

원 장 박 광 국

국문 요약

본 연구에서는 대규모 지반침하로 인해 도심안전에 큰 위협이 될 뿐 아니라 공유재인 지하공간의 환경적 건전성을 크게 훼손시키는 “싱크홀”을 환경영향평가 제도를 활용하여 사전에 방지할 수 있도록 개선 방안을 도출하였다.

싱크홀은 고체 입자와 그 사이를 흐르는 지하수로 이루어진 다상(multi-phase) 물질인 지반 내부에서 지하수의 과도한 흐름에 의해 고체 입자에 미치는 침투력(seepage force)이 상승되어 지지력(유효응력)이 상실되면서 발생한다. 싱크홀이 발생하려면 ①발생 가능성이 있는 취약한 지반, ②함몰된 지반이 이동할 수 있는 빈 공간, ③지하수 흐름의 급격한 증가가 요구되며 지하수위 상부의 불포화토에서는 시설 관거 주변에서 뒷채움재나 원지반이 누수나 강우침투로 쓸려 내려가면서 생기고(제1형 싱크홀) 포화지반에서는 터널이나 터파기 공사가 유발시킨 지하수 흐름이 원인이 되어 발생한다(제2형 싱크홀).

현행 환경영향평가제도 하에서 싱크홀이 발생할 수 있는 대상사업은 도시개발, 도로/철도의 건설 등이며, 관련 주요 검토항목은 지하수와 지형·지질이다. 최근 싱크홀 문제가 불거지면서 실시설계보고서에 바탕을 둔 구조해석 및 계측계획 등이 추가된 환경영향평가서가 작성되고 있으나 예측과 평가가 지반이 구조적인 안정성을 유지한다는 가정 하에 수행되어 제2형 싱크홀과 같은 침투 파괴에는 적합하지 않은 점, 사업지구 내에서의 조사와 계측계획에 한정되어 싱크홀의 환경영향 범위를 충분히 반영하지 못하는 점 등 싱크홀 방지대책으로서는 부족한 것으로 판단된다.

이에 자연충적층이나 공유수면매립지 등의 광범위한 분포, 강한 침투력을 발생시키는 임계 수리경사 등 싱크홀 취약성의 요소를 특정하고, 싱크홀 취약성 사업의 환경영향평가를 위한 지하수와 지반안정성 분야 주요 개선점을 도출하였다. 이를 바탕으로 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가의 예측 기법 및 저감방안과 모니터링에 관한 종합적인 지침을 마련하였는데, 이는 (1)굴착 전 지하매설물 검토 (2)싱크홀 취약성 예측, (3)싱크홀 취약 지반 굴착 시

저감방안, (4)지하수 유동-지반 변위 연계 사후모니터링의 주요 부분으로 이루어져 있다.

마지막으로 최근 마련된 “지하영향평가제도” 등 지하공간 이용에 관한 각종 위험성(risk)평가제도에 대한 검토와 효율적인 운용을 위한 연구 등 후속연구를 제안하였다.

주제어: 싱크홀, 환경평가, 환경영향평가, 지하수, 지반 침하

차 례

제1장 서 론 ····· 1

1. 연구의 배경 ····· 1

가. 싱크홀 현황 ····· 1

나. 싱크홀 발생의 조건 ····· 3

2. 싱크홀과 환경영향평가 ····· 6

가. 환경문제로서의 싱크홀 ····· 6

나. 환경영향평가제도 ····· 7

3. 연구 내용 및 구성 ····· 8

제2장 환경영향평가 항목 및 현황 분석 ····· 9

1. 환경영향평가 대상 사업 및 작성 방법 ····· 9

2. 환경영향평가서 싱크홀 관련 작성 사례 ····· 16

3. 시사점 ····· 18

제3장 싱크홀 취약성과 환경영향평가 ····· 21

1. 싱크홀 취약 지반 ····· 21

2. 지하수위 및 경사 변화 ····· 27

3. 싱크홀 환경영향평가 시 예측기법 개선점 ····· 29

가. 지하수 유동 ····· 29

나. 지반 안정성 ····· 33

4. 싱크홀 방지를 위한 저감방안 및 모니터링 기법 개선 ····· 35

가. 지하매설물 현황 검토 ····· 36

나. 지하수 유동과 지반 변위의 연계 계측 ····· 36

다. 광역, 장기 지하수위 측정 ····· 40
라. 싱크홀 비파괴 탐사 ····· 41

제4장 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 작성 지침(안) ····· 44
1. 터널로 인한 지하수 영향 검토 ····· 45
2. 지반 및 사면안정성 ····· 46
3. 지반 함몰(싱크홀) 취약 지반 굴착 시 예측 및 처리대책 ····· 46
4. 후속 연구 과제 ····· 50
가. 기술 분야 ····· 50
나. 정책 분야 ····· 51

참고문헌 ····· 53

Abstract ····· 55

표 차례

<표 1-1> 주요 싱크홀 사건과 추정원인 ····· 2
<표 1-2> 싱크홀 유형별 특징 ····· 4
<표 2-1> 환경영향평가 대상사업 중 싱크홀 연관 사업 ····· 10
<표 2-2> 환경영향평가에서의 분야별 검토항목 ····· 11
<표 2-3> 환경영향평가서의 항목별 작성 순서와 내용 ····· 11
<표 2-4> 싱크홀과 관련된 환경영향평가 항목 및 내용 ····· 12
<표 2-5> 수질 및 지형지질 예측평가, 저감방안 작성 지침 ····· 13
<표 2-6> 지하수 분야 작성 매뉴얼 ····· 14
<표 2-7> 지형·지질 분야 작성 매뉴얼 ····· 15
<표 3-1> 연약지반 판정기준 ····· 22
<표 3-2> 터널 설치 시 모래/자갈층 거동 ····· 23
<표 3-3> 지반 안정성 검토가 필요한 지반 조건 ····· 27
<표 3-4> 파이핑(piping) 촉발 임계 수리경사 ····· 29
<표 3-5> 서울 지하철 지하수 유출량 3,000톤 이상 역사 ····· 30
<표 3-6> 경험식에 의한 터널 유출량 원단위 ····· 31
<표 3-7> 지하수위 모사를 위한 입력계수와 일반적인 출처 ····· 33
<표 3-8> 지반정보 DB 현황 ····· 35
<표 3-9> 터널 지하수 영향 모니터링 방안 ····· 39
<표 3-10> 운영 시 지하수 영향 모니터링 계획 수립 ····· 40
<표 3-11> 싱크홀 탐사를 위한 비파괴 검사 종류 ····· 42
<표 4-1> 굴착 전 지하매설물 검토사항 ····· 47
<표 4-2> 싱크홀 검토가 필요한 지반 조건 ····· 48
<표 4-3> 투수성이 높은 지반에서의 심각한 지하수 영향 ····· 49

그림 차례

<그림 1-1> 싱크홀 발생 보도 사진 모음 ····· 3

<그림 1-2> 제1, 2형 싱크홀 ····· 5

<그림 2-1> 지하수 유동 모사 ····· 17

<그림 2-2> 계측계획도(일부) ····· 18

<그림 3-1> 매립 이전과 이후의 잠실섬 ····· 24

<그림 3-2> 서울시 지질도 중 충적층 분포 및 싱크홀 발생 건수 ····· 25

<그림 3-3> 부산 수영구 민락동 공유수면 매립지 및 미고결 퇴적층 ····· 26

<그림 3-4> 터널 계측항목별 측정빈도 ····· 38

<그림 3-5> 터널 설계 및 공사 시 지하수위 측정 빈도 ····· 39

제1장 서 론

지하공간은 공간, 지하수, 지열에너지, 토양 및 암반의 네 가지 자원 요소를 지니며 보전과 지속 가능한 사용이 필요한 중요한 자연 자원이다(김윤승, 2012).[1] 대규모 지반 함몰(싱크홀[2])의 발생은 지하공간의 자원 가치를 크게 손상시키므로 사전 예방적 조치가 반드시 필요하다. 본 연구의 목적은 사전배려원칙(precautionary principle)에 입각한 환경영향 예방을 위한 대표적인 장치인 환경영향평가제도 하에서 싱크홀과 관련된 항목을 효과적으로 작성, 검토 및 평가하여 지반 붕괴가 가져올 수 있는 각종 환경영향을 효율적으로 방지함에 있다. 1장에서는 싱크홀을 그 원인에 따라 두 가지 유형으로 나누어 보고 싱크홀의 예방을 위한 환경영향평가제도의 필요성을 간략하게 서술하고자 한다.

1. 연구의 배경

가. 싱크홀 현황

싱크홀은 흙이나 암석 등 자연 재료로 채워져 있던 지하공간이 일부 손실되면서 나타나는 대규모의 지반 침하 현상으로 2014년 송파지하차로 일대에서 대규모 동공군(洞)의 발견으로 큰 주목을 끌었지만 그 전에도 이미 전국적으로 그 발생이 보고되어 왔다(이현종 외 2015[3]). 그러나 몇몇 싱크홀의 발생 원인은 아직 명확히 규명되지 않았는데, 공학적인 복잡성 외에도 책임소재에 따른 배상 등의 문제가

1) 김윤승(2012), “도시 지하공간 조성에 따른 환경영향 관리 방향 연구”. 한국환경정책·평가연구원.
2) “땅꺼짐”이라고도 함. 원래 주로 석회암지역에서 암석의 용해로 발생하는 지하 동공이 지표면까지 확장되어 생기는 대규모 함몰을 가리키는 말로 쓰이므로 현재 문제가 되고 있는 지반침하 문제에 사용하기에는 적절하지 않은 점이 지적되어 서울시 등에서 대체 용어로 “도로함몰”을 제안하기도 했으나 이미 통칭으로 굳어진 점을 반영하여 본 연구에서도 그대로 쓰고자 함
3) 이현종 외(2015), “도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발 기획”. 국토교통과학기술진흥원

따르기 때문에 쉽게 결론을 도출하기 어려운 것으로 보인다. 언론에 보도된 주요 싱크홀 사건과 그 추정 원인은 <표 1-1>과 같다.

〈표 1-1〉 주요 싱크홀 사건과 추정원인

사건 개요	추정 원인
2005-2015년 전남 무안(10여 차례) 2008년 충북 음성 2013년 충청북도 청원	석회암 지대, 폐광 등
2012.02.18 인천시 서구 왕길동 대림아파트 앞에서 폭 10-40m, 깊이 20m 규모 지반 침하 발생, 1명 사망	인천 지하철 2호선 건설(201 공구)에 따른 지하수 유출
2014.08.05 송파구 석촌동 지하차도에서 최초 발견 후 지반 조사에서 추가 싱크홀까지 총 6개 발견 (최대 폭 5-8m, 깊이 4-5m, 연장 80m)	9호선 지하철 터널 굴착 중 지하수/토사 유출
2014.06.19, 07.17 여의도 국회의사당 앞에서 폭 3m, 깊이 4m와 폭 1m, 깊이 1.5m 두 개의 싱크홀이 약 2m 간격으로 발생	명확한 원인을 찾지 못함
2015.02.22 용산역 인근 인도에서 폭 1.2m 크기의 지반이 약 3m 아래로 내려앉아 행인 2명 부상	인근 아파트 터파기 공사 중 흙막이 누수로 발생
2015.06.19 인천 연수구 송도동 횡단보도에서 폭 2m, 깊이 4m 크기로 발생	지중송전선로 매설공사 중 침하

자료: 언론보도 취합

최근 10년(2005년-2015년) 사이에 국내에서 보고된 싱크홀 현황을 종합하여 추정원인별로 분석(국립재난안전연구원, 2015[4])한 결과에 따르면, 총 36개의 싱크홀 중 상하수도 관거누수(11건, 51.5%), 터파기, 지하철 공사 등 지하공간 개발(5건, 27.3%), 자연발생(4건, 21.2%) 등으로 나타났다. 이중 인공적인 원인에 의한 싱크홀 현상을 보다 면밀히 살펴보면, 가장 많이 발생하는 상하수도 관거누수에 의한 싱크홀은 자연지하수면 위에서, 지하공간 개발에 의한 싱크홀은 일반적으로 더 깊은 심도인

4) 국립재난안전연구원(2015.7.16.), "실증실험을 통한 대국민 재난안전 서비스(싱크홀) 시행".

〈2012년도 전국에서 발생한 도로함몰 사례(조선일보, 부산일보, Newsis)〉

자료:이현종 외(2015)

〈그림 1-1〉 싱크홀 발생 보도 사진 모음

지하수면 아래에서 인공적인 배수에 의해 일어난다는 것을 알 수 있다. 이처럼 '싱크홀'로 총칭되는 심각한 지반 함몰의 발생에는 다양한 원인이 있을 수 있다.

나. 싱크홀 발생의 조건

싱크홀은 지중에서 일정한 부피의 지반이 손실되었을 때, 주변 지반이 지지력을 상실하여 지표면이 함몰되는 현상이다. 토양이나 암석은 고체 입자와 그 사이를 메운 유체(공기나 지하수)로 이루어진 다상(multi-phase)물질로, 유체의 흐름이 있을 때는 마찰에 의해 고체 입자의 벽에 흐름 방향으로 침투력(seepage force)이 작용하게 된다. 상부 구조물과 지층 자체의 무게를 견디는 지지력은 입자의 지지력(유효응력[5])과 유체의 압력에 의해 결정되며, 지반이 지지력을 상실한다는 것은 미시적인 관점에서 보면 고체 입자가 구조적 안정성과 유효응력을 상실한다는 것과

동등하다. 이러한 맥락에서 싱크홀 발생의 세 가지 전제 조건을 특정할 수 있는데, 곧 ①싱크홀 발생 가능성이 있는 취약한 지반의 존재, ②함몰된 지반이 이동할 수 있는 빈 공간의 존재, ③지하수 흐름의 급격한 증가가 그것이다. 특히 세 번째 조건인 지하수 흐름은 유효응력 상실의 직접적인 원인을 제공하는데, 지하수 흐름의 증가는 포화층(대수층)뿐만 아니라 지반 내 공극이 완전히 채워지지 않은 불포화층에서도 발생할 수 있다는 점을 간과해서는 안 된다. 즉, 일반적으로 불포화토에 설치되는 상하수도 등 관거 주변의 뒷채움재나 원지반도 누수나 강우 침투로 인해 일시적으로 지하수 흐름이 발생함에 따라 함께 쓸려 내려가면서 싱크홀을 발생시킬 수 있는 것이다. 반면, 공사 시 배수에 의한 싱크홀의 경우 포화된 지층에서 지하수 흐름이 빨라지면서 나타난다. 본 연구에서는 편의상 전자의 싱크홀을 '1형 싱크홀'로, 후자를 '2형 싱크홀'로 구분하고자 한다. <표 1-2>는 두 유형의 주요 특징을 요약한 것이며, <그림 1-2>는 각 유형별 발생 과정을 도식적으로 보여준다.

〈표 1-2〉 싱크홀 유형별 특징

특징	1형	2형
발생원인	시설관거 누수	터널, 터파기 공사 및 관련 시설 운영
심도 및 범위	천심도	천심도-대심도에 걸쳐 발생
배수조건	지하수위 상부 불포화 층을 통한 부정류(transient) 배수	포화층 내 공사 중 부정류, 운영 시 정류 배수
대상 지반	매립토, 뒷채움흙	기반암, 풍화토, 퇴적/매립층을 포함하는 구조물 및 상부 지층

자료: 저자 작성

5) Effective stress. 전체 응력에서 수압을 뺀 값을 말하며 지반에서 공극수를 뺀 흙이나 암반의 입자가 지탱하는 응력으로 지반 붕괴 조건을 계산하는 기준이 됨

2014년 서울시내 도심지 고위험 등급 동공 발생 원인 자료 : 서울시

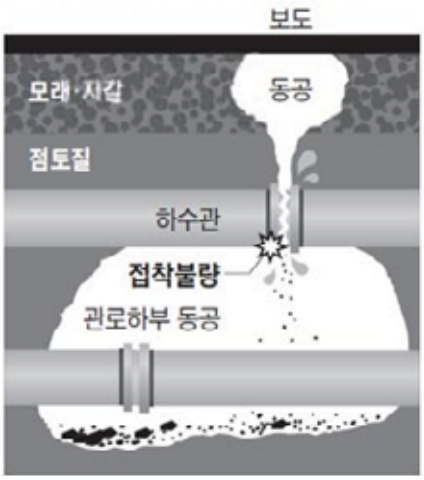
원인	관로 연결부 손상	굴착공사 복구 미숙	총계
수	13	12	25

연결부 손상 관로의 종류

원인	하수관 접속부	통신관 접속부	전력관 접속부	총계
수	11	1	1	13

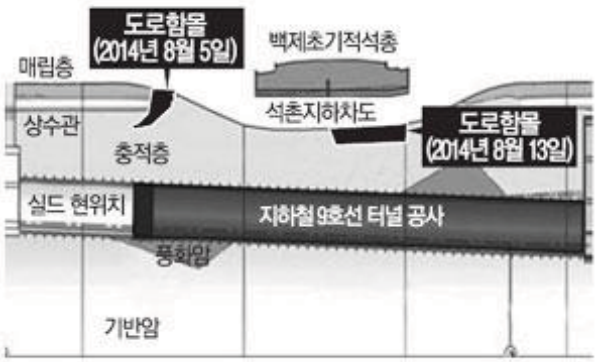
하수관 접합부 싱크홀 발생 원인

불량 시공된 하수관 접합부 사이로 새어나온 물이 주변 흙을 쓸어가 버려 동공 발생



자료: 조선일보(2015.4.18.), "지하가 위험하다".

a. 손상 관로에 의해 유발되는 제1형 싱크홀



자료: 서울시 발표 싱크홀 발생 지하철 9호선공사 투시도

b. 지하 구조물 설치 시 토사 유출에 의해 유발되는 제2형 싱크홀

〈그림 1-2〉 제1, 2형 싱크홀

2. 싱크홀과 환경영향평가

가. 환경문제로서의 싱크홀

싱크홀이 발생했을 때 예상되는 막대한 재산 손실과 인명피해는 일반적인 지반 침하로 인한 노면, 매설 시설물, 인접 건물 등의 피해보다 한 차원 높은 수준이다. 뿐만 아니라 전술한 싱크홀 발생의 조건을 상기해 보면 유발 전에 이미 빈 공간을 남길 정도의 지반의 손실이 있어야 하고 지하수 흐름의 급격한 변화 또한 막대한 양의 지하수 손실이 전제된 경우가 대부분으로, 싱크홀이라는 임계점에 이르기 전까지 이미 장시간, 넓은 지역에 거쳐 지하공간의 건전성을 손상시키는 변화가 있었음을 알 수 있다. 또 지하수의 손실, 흐름의 변화는 수계 순환시스템 전체에 영향을 미칠 수 있고, 이는 단순히 수자원의 양적인 이용 측면에서뿐 아니라 수질과 수생태계 건강성의 저하를 불러올 수 있다.

일반적인 건축 공사 시 발생하는 제반 문제의 경우 많은 부분 토지나 건물소유주, 사업주체, 시공사 등 명확한 법적 주체들 간의 계약에 의해 해결될 수 있다. 그러나 싱크홀의 문제처럼 손해의 범위가 확대되어 불특정 다수와 생태계로 확장될 경우 환경문제의 가장 큰 특징인 외부성(externality), 곧 시장주체가 책임질 수 없는 공공재 손실이 발생된다. 이처럼 싱크홀은 일반적인 소유권 방해(nuisance)의 문제를 뛰어넘는 특성을 가지고 있으며 정부의 개입과 규제를 필요로 한다고 하겠다. 환경정책과 규제의 일차적인 목적은 일단 발생하면 자연이 회복 가능한 임계점을 넘는 손상으로 인한 파급효과의 범위가 특정할 수 없이 큰 환경문제의 특징 상 책임소재의 파악, 인과관계의 규명 및 손해의 보상보다는 사전예방에 있다. 현재 전 세계적으로 대표적인 사전예방장치의 역할을 하고 있는 제도가 환경영향평가이며 이는 싱크홀의 문제를 유발할 수 있는 대표적인 대형개발사업의 안전하고 환경친화적인 추진을 위해 가장 적합한 체계를 갖추고 있다.

나. 환경영향평가제도

환경영향평가제도는 환경오염 사전예방 수단으로, 사업계획을 수립·시행함에 있어서 당해사업의 경제성·기술성뿐만 아니라 환경성까지 종합적으로 고려하여 환경적으로 건전한 사업계획안을 모색하는 과정이자 계획기법이라 할 수 있으며 사업 시행 전 미리 환경보전측면에서 충분한 고려가 이루어지도록 함으로써 환경오염을 사전에 예방하는 데 그 의의가 있다. 통합 「환경영향평가법」 제1조에서는 "환경영향평가대상 사업의 사업계획을 수립·시행함에 있어서 당해 사업이 환경에 미치는 해로운 영향을 미리 예측·분석하고 이에 대한 대책을 강구하는 것"이라 정의하고, 그 목적을 "환경적으로 건전하고 지속 가능한 개발이 되도록 함으로써 쾌적하고 안전한 국민생활을 도모함"이라 규정하고 있다(환경부, 환경영향평가제도 소개자료[6]). 현재의 환경평가제도는 전략환경영향평가, 환경영향평가 및 소규모 환경영향평가로 구분되어 있는데, 행정계획이나 시행이 확정되지 않은 상위 개발계획에 대해서는 우선 전략환경영향평가를, 실시단계의 개발사업은 그 규모에 따라 환경영향평가 또는 소규모 환경영향평가를 받도록 되어있다.

전략환경평가에서는 상위계획의 환경보전계획과의 부합 여부 확인 및 대안의 설정·분석 등을 통하여 환경적 측면에서 해당 계획의 적정성 및 입지의 타당성 등을, (소규모)환경영향평가에서는 실시계획·시행계획 등이 환경에 미치는 영향을 미리 조사·예측·평가하여 해로운 환경영향을 피하거나 제거 또는 감소시킬 수 있는 방안을 마련하게 된다(「환경영향평가법」 제2조).

환경영향평가 대상 사업 중 싱크홀과 관련된 사업은 크게 도로, 철도, 지하철도의 건설을 위한 터널 공사, 대규모 주거지구(고층아파트) 건설을 위한 터파기 공사 등으로 나눌 수 있는데, 본 연구의 대상인 싱크홀 방지는 상위정책이나 계획 수립보다는 개발의 실시·시행계획과 연관성이 더 높다고 할 수 있으므로 연구 대상

6) 환경부, http://www2.me.go.kr/web/185/me/c3/page3_12_10_1.jsp

‘환경영향평가제도’는 주로 환경영향평가를 염두에 두고 서술한 것이다. 그러나 대단위 택지개발 사업 등 전략환경영향평가 대상 계획 또한 대규모 터파기 공사, 도로 계획 등 지하공간의 이용과 지하수 흐름에 큰 영향을 주어 싱크홀을 유발시킬 수 있다는 점을 간과해서는 안 될 것이며, 그와 같은 영향이 예상될 경우 전략환경영향평가에서도 본 연구의 방법론을 따라 싱크홀에 대한 검토와 방지대책 수립이 필요할 것이다. 또, 서울시를 비롯한 지방자치단체의 자체 조례에 의한 (지역) 환경영향평가의 대상으로 대규모 건설공사, 특히 연면적 10만m^2 이상의 대형 건축물이 포함되므로, 본 연구의 적용 범위는 「환경영향평가법」에 의한 전략환경영향평가, 환경영향평가 및 소규모환경영향평가와 지자체 환경영향평가를 포괄한다.

한편, 환경영향평가에 포함되는 평가분야는 대기환경, 수환경, 토지환경, 자연생태환경, 생활환경, 사회·경제 등 6가지가 있으며 이 중 싱크홀과 관련 있는 항목은 수환경 분야의 ‘지하수’와 토지환경 분야의 ‘지형·지질’ 및 ‘토지이용’을 들 수 있다.

3. 연구 내용 및 구성

서론에 이어 2장에서 환경영향평가에서 싱크홀 관련 항목 및 그 주요 내용을 살펴보고, 특히 최근 잦은 싱크홀 발생으로 도심 지하공간 개발 사업 시 싱크홀 발생 가능성 검토의 필요성에 대두된 후 작성된 환경영향평가서의 내용을 살펴봄으로써 싱크홀과 관련 환경영향평가서 작성 현황을 파악하였다. 제3장에서는 싱크홀 발생의 메커니즘을 보다 자세히 알아보고, 이에 따라 평가서 작성을 위한 조사, 분석 및 저감 방안 마련 시 싱크홀 방지를 위해 보완 또는 추가되어야 할 주요 내용을 각각 지하수, 지반 안정성 및 계측 계획의 측면에서 알아보았으며, 4장에서 이들을 종합하여 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가서 작성 지침을 제시하고 추가적으로 필요한 연구를 제안하였다.

제2장 환경영향평가 항목 및 현황 분석

「환경영향평가법」에 포함된 전략환경영향평가, 환경영향평가, 소규모환경영향평가와, 지방자치단체 소관 환경영향평가 등 광의의 환경영향평가제도를 대상으로 싱크홀 관련 대상사업과 각 대상사업별 평가 항목을 분석하여 보았다. 싱크홀은 침하가 일어나던 지반이 구조적인 안전성을 잃으면서 발생하므로 지반의 지질학적 분류 및 거동과 관련된 지형·지질항목과 지하수에 관한 내용을 포함하는 수질 항목과 가장 밀접하게 연관되어 있다. 본 장에서는 실제 제출된 환경영향평가서에서 이 두 항목별로 제시된 지반 안전성 관련 내용을 분석해 보고, 이로부터 싱크홀 발생 가능성 예측과 방지를 위해 추가로 제시되어야 할 내용과 관련 정보 수집 및 평가서 작성 방법에 대한 시사점을 얻고자 한다.

1. 환경영향평가 대상 사업 및 작성 방법

현행 환경영향평가법 및 전략환경영향평가법에 포함된 대상 사업 중 싱크홀 현상을 유발할 수 있는 사업, 곧 터파기, 터널 굴착 등 지중 공사와 지하수 배수가 필요한 사업으로는 도로, 철도, 상하수도 설치, 도시계획시설사업에 포함된 주차장시설(10만-20만m^2)이나 공동주택단지(30만m^2 이상) 건설 등이 있다. 이밖에도 서울시는 조례를 두어 제2롯데월드 등 연면적 10만m^2 이상 건축물의 경우 환경영향평가를 의무화하고 있다. 아래 <표 2-1>은 환경영향평가법의 대상사업을 표시한 것으로 그중 싱크홀 연관 사업은 도시개발, 도로건설, 철도(도시철도) 분야이다.

〈표 2-1〉 환경영향평가 대상사업 중 싱크홀 연관 사업

사 업 분 야	세부사업명 및 규모
1)도시개발	**택지개발(30만㎡ 이상) 등 12개 사업**
2)산업입지	국가·지방·농공단지(15만㎡ 이상) 등 7개 사업
3)에너지개발	에너지개발을 위한 해저광업 등 6개 사업
4)항만건설	항만(외곽시설) 등 4개 사업
5)도로건설	**도로신설(4km 이상)·도로확장(2차선 이상인 10km 이상)**
6)수자원개발	댐(면적 200만㎡나 용량 2,000만㎥이상) 등 2개 사업
7)철도(도시철도)	**철도(1km 이상), 삭도·궤도(2km 이상) 등 4개 사업**
8)공항건설	비행장활주로(500m 이상), 기타시설(20만㎡ 이상)
9)하천개발	하천공사(10km 이상)
10)매립·개간	매립(30만㎡ 이상)·개간(100만㎡ 이상)
11)관광단지	온천개발(20만㎡ 이상) 등 6개 사업
12)체육시설	스키장(25만㎡ 이상) 등 5개 사업
13)산지개발	초지조성(30만㎡ 이상) 등 3개 사업
14)특정지역개발	지역균형개발 및 지방중소기업육성에 관한 법률에 의하여 시행되는 1)분야 내지 13)분야의 사업들
15)환경기초시설	분뇨처리시설(100㎘/일 이상) 등 2개 사업
16)국방군사시설	국방군사시설(33만㎡ 이상) 등 3개 사업
17)토석등 채취	산림 내 토석 등 채취(10만㎡ 이상) 등 4개 사업

자료: 환경영향평가법 시행령 별표3

환경영향평가 항목 중 싱크홀 관련 항목은 크게 수환경분야의 수질, 그리고 토지환경분야의 지형·지질과 토지이용 항목이다(표 2-2 참조). 「환경영향평가서등 작성 등에 관한 규정」은 전략환경 및 환경영향평가서(소규모 포함)등의 작성 방법을 정하고 있는데, 그 중 사업이나 계획의 이행이 환경에 미치는 실질적인 영향은 전략환경영향평가의 경우 "11. 입지의 타당성," 환경영향평가의 경우 "VII. 환경현황 조사, 저감 방안 및 사후환경영향조사," 소규모의 경우 "VI. 환경에 미치는 영향의 조사·예측·평가 및 환경보전 방안"에서 작성하게 되며, 현황조사→영향예측→관련 방안 마련의 순서를 따라 작성하도록 규정하고 있다. 이 과정이 가장 구체적으로 나타난 환경영향평가서 작성의 순서와 내용은 <표 2-3>과 같다.

〈표 2-2〉 환경영향평가에서의 분야별 검토항목

분야	평가항목
대기환경분야	기상, 대기질, 악취, 온실가스
수환경분야	수질(지표·**지하**), 수리·수문, 해양환경
토지환경분야	**토지이용**, 토양, **지형·지질**
자연생태환경분야	동·식물상, 자연환경자산
생활환경분야	친환경적 자원순환, 소음·진동, 위락·경관, 위생·공중보건, 전파장해, 일조장해
사회·경제분야	인구, 주거(이주의 경우 포함), 산업

자료: 환경영향평가법 시행령 별표1

〈표 2-3〉 환경영향평가서의 항목별 작성 순서와 내용

항목	내용
현황조사	사업시행에 따라 영향을 받을 지역의 환경을 조사분석하여 기술(현황조사 일시, 지점, 분석방법 등)
영향예측 및 평가	사업시행으로 인하여 환경 및 인체에 미칠 모든 영향을 과학적인 방법으로 예측평가하여 기술(발생 가능성, 정도, 시기 및 지역과 각 영향의 중요성)
저감방안	환경영향을 최소화할 수 있도록 방지대책을 검토, 현재의 기술적, 경제적 수준으로 실시 가능한 최선의 방안을 제시. 저감효과 분석을 실시하고 저감대책을 고려한 영향예측을 실시
사후환경영향조사	환경에 영향을 미칠 것으로 예상되는 지역에서의 환경영향조사지점, 방법, 횟수 등을 정하여 공사기간 및 운영기간 중의 조사계획을 수립

자료: 환경영향평가서등 작성 등에 관한 규정

수환경-수질 분야와 토지환경-지형지질, 그리고 토지이용 분야의 작성방법 중 싱크홀 관련 내용(진하게 표시)을 살펴보면 아래 <표 2-4>와 같다.

〈표 2-4〉 싱크홀과 관련된 환경영향평가 항목 및 내용

분야	항목	내용
수 환경 분야	수질 (지표·지하)	○ 조사항목 - 지하수 수질 - 지하수 이용 현황 ○ 영향예측항목 - 지하수 환경변화 ○ 영향예측범위 - 공간적 범위는 조사범위를 기준으로 하되 대상사업의 실시로 인하여 영향이 미칠 것으로 예상되는 지역 포함 - 시간적 범위는 공사 시와 운영 시로 구분하되 수질에 미치는 영향이 최고가 되는 시점 포함 ○ 영향예측방법 - 예측모델을 이용한 **수치해석, 수리모형시험, 유사사례에 의한 방법 중에서 적절한 방법**을 선택
토지 환경	토지 이용	○ 조사항목 - 사업지구 내·외 지역의 교육시설, **공공시설, 교통체계 등의 현황 및 계획** ○ 영향예측항목 - 토지이용계획 - **시설물 배치 계획**
	지형·지질	○ 조사항목 - **지형형상, 지질 및 토양상황** - **지질재해** - 동굴 및 특이지형·지질(매립지, 습지, 연안, 해안, 침식지 등) ○ 조사범위 - **대상사업의 종류, 규모 및 지역의 지형적 요소와 지질 특성, 지하수, 지반특성 등을 고려하여 설정** ○ 영향예측방법 - 대상지역의 환경적 특성, 지형·지질 특성 등을 고려하여 **유사사례를 참조하는 등의 방법**

자료: 환경영향평가서등 작성 등에 관한 규정 별표4

현재 작성 지침에 따른 환경영향평가 수질 및 지형·지질 분야의 작성의 주목적은 수질영향 최소화와 지형훼손 및 주요 지질자원(지맥 등)의 보호로, 이는 각 분야의

영향예측 평가와 그에 따른 저감방안에 대한 작성 지침에 잘 드러나 있다(표 2-5 참조).

〈표 2-5〉 수질 및 지형지질 예측평가, 저감방안 작성 지침

분야	항목	내용
수환경 분야	수질(지표·지하)	○ 예측평가 - 영향 예측결과를 바탕으로 환경기준과의 비교, 현황농도대비 증가량(%) 등을 검토하여 **사업 시행으로 인한 수질 및 수자원 이용에 대한 영향을 평가한다**. ○ 저감방안 - 평가결과를 토대로 하여 환경기준 및 관련수역과 기타 지역의 환경적 특성을 고려하여 사업규모 조정, 저감시설의 설치, 저영향개발(LID)기법 적용 등 **수질에 미치는 영향을 저감할 수 있는 방안**을 구체적으로 수립 제시 - 저감방안 수립 후 **수질 및 수자원 이용에 미치는 영향을 평가**
토지환경	지형·지질	○ 예측평가 - **해당 사업의 시행이 지형·지질에 미치는 영향을 훼손 정도, 현 지형 대비 변화 정도 등을 고려하여 평가** ○ 저감방안 - 평가결과를 토대로 지역의 환경적 특성을 고려하여 지형훼손, 토양교란, 보존가치가 있는 지형·지질의 영향 등 예측된 항목들과 이들을 종합하여 저감방안을 수립 - **저감방안 수립 후 사업으로 인해 지형·지질에 미치는 영향을 평가**

자료: 환경영향평가서등 작성 등에 관한 규정 별표4

한편, 대상사업별 환경영향평가서 검토 및 작성매뉴얼(한국환경정책·평가연구원, 2015[7])에서는 상세한 지하수 영향 및 지반 안정성 관련 항목 작성 지침을 <표 2-6> 및 <표 2-7>과 같이 제시하고 있다.

7) 한국환경정책·평가연구원(2015), 「환경영향평가서 검토 및 작성매뉴얼」.

〈표 2-6〉 지하수 분야 작성 매뉴얼

〈터널로 인한 지하수 영향〉

□ 터널지역의 지하수 현황 및 양수시험 결과를 작성하고 터널공사로 인한 지하수 영향을 검토
- 지반고와 지하수위 분포 및 터널예정고도 등을 도면으로 작성하고 구간별 지하수위 저하, 저하시간, 회복시간, 회복수위 등을 예측
- 터널상부지역에서 하향 시추가 곤란한 경우 그 사유를 명시

□ 터널 공사시 다량의 지하수 유출이 예측될 경우, 공사구간 주변지역을 대상으로 지하수 이용현황(수위, 수량 등)을 조사하고, 필요시 주변지역의 지하수 이용에 대한 영향이 발생하지 않도록 대책 수립
- 공사시 정기적으로 지하수 현황을 조사·비교할 수 있도록 사후환경영향조사계획 수립

□ 터널 공사시 지하수 유출량은 지형과 지질 여건에 따라 매우 다르게 나타날 수 있으므로, 터널 공사 초기에 지하수 유출량 및 터널 폐수 발생량을 모니터링하고 터널 폐수 발생증가량에 적합한 처리 계획(시설용량) 수립
- 지하 수맥 단절이나 지하수위 저하 등으로 인접 마을 지하수 이용(농업용수 등)에 피해가 발생하지 않도록 사전 계획을 수립

□ 암반에서 유출되는 지하수는 완전방수를 목표로 설정하고 제반 여건상 불가피할 경우 차수율을 높여서 지하수위의 회복이 조기에 달성할 수 있도록 방안을 수립
- 국내·외 터널의 지형적 분포(산악터널, 하저터널, 평지지하터널, 해저터널 등)에 따른 배수형태를 조사하고 자료를 작성
- 일률적인 완전배수 혹은 부분배수 방식의 적용보다는 실제로 지하수압의 예상치를 설정하여 그에 따른 배수방식을 선정(기존 공사 구간의 수압 측정 조사자료를 근거로 하여 설정)

□ 지하수 영향 모니터링 방법
① 지하수 영향의 조사목적은 자연환경의 변화에 중점을 두고 실시
② 공사시 터널 지하수의 유출량을 조사·기록
③ 일별로 터널 굴착실시 여부, 유출량, 일기변화, 수질 등을 조사·기록
④ 주변 지하수, 천연샘 및 인공샘 등의 수위 변화, 지표수량의 변화 등을 조사
⑤ 지하수 영향과 그로 인한 환경영향에 대한 원인 분석 및 대책 기록

자료: 한국환경정책·평가연구원(2015)

〈표 2-7〉 지형·지질 분야 작성 매뉴얼

〈지반 및 사면안정성〉

가. 지반안정성 검토

□ 하천변의 충적층 등과 같이 연약지반이 분포할 가능성이 있는 지역은 지반침하 등의 영향을 예측하고 지반개량 등의 저감방안 수립
- 석회암 지대는 석회동굴이나 동공 등이 발달하여 지반침하가 발생할 수 있으므로 지질조사와 물리탐사 등 수행
- 지하수 개발이 과다한 지역은 지반침하가 발생할 수 있으므로 주변 개발이나 지하수 개발 현황 등을 고려
- 물과 접촉할 경우 팽창성을 가지는 점토광물이 분포하는 지역(주로 제3기 미고결층 분포지역)은 지질조사 및 점토광물의 종류, 함량, 습윤팽창 등을 검토

나. 연약지반 처리대책

□ 현장조사와 시추조사 결과를 토대로 연약지반의 존재 여부를 검토하고, 연약지반 판단근거와 존재시 대책 수립 및 안정성 검토

□ 현장시험 및 토질시험결과에 근거하여 연약지반의 특성에 따른 대책의 장·단점을 비교·분석 후 현장여건에 적합한 대안을 선정

□ 구조물 등이 계획된 지역에 대한 대책 수립이 필요할 경우 분포특성 및 지반특성 등을 작성하고 이에 적합한 대책을 비교·검토하여 최적안을 선정
- 추가적인 토량 및 재료가 필요한 경우 소요량을 예측하고 공급계획을 수립
- 처리기간, 재료수급 방안 등을 고려하여 대책 수립

자료: 한국환경정책·평가연구원(2015)

이상에서 살펴보았듯이 현행 환경영향평가서의 작성은 싱크홀이 발생할 수 있는 매립토, 퇴적토 등 미고결 충적층, 연약지반, 암반 파쇄대 등 문제 지반 조건을 선별해 낼 수 있는 기본적인 요소는 갖추고 있으나 이들 요소를 선별해 내는 목적이 수질 보호와 지형·지질 보호에 있다는 점을 고려할 때 싱크홀 방지를 위해 실효성 있는 적극적인 지반 안정성 대책을 수립하기에는 한계가 있음을 알 수 있다.

2. 환경영향평가서 싱크홀 관련 작성 사례

본 장에서는 최근 싱크홀 위험성이 크게 문제가 되면서 관련 내용을 포함하여 작성된 환경영향평가서 작성 사례를 검토해 봄으로써 현행 제도가 지반 안전성 보전에 대하여 가지는 한계를 보다 구체적으로 짚어내고자 한다. 사례로 채택된 사업은 수도권의 지하도로 건설 사업으로 그 연장이 4km를 상회하여 환경영향평가 실시 대상이 되었다. 노선 구간이 매립층 포함 최대 40m에 이르는 하상 충적층을 통과하고 서울시 지하철 구간과도 교차하는 등 과거 싱크홀 발생 시 관찰되었던 특성을 가진 점에 주목한 협의 및 관계기관에서는 싱크홀 관련 검토의 필요성을 제시하였는데, 그 내용 중 일부를 살펴보면 아래와 같다.

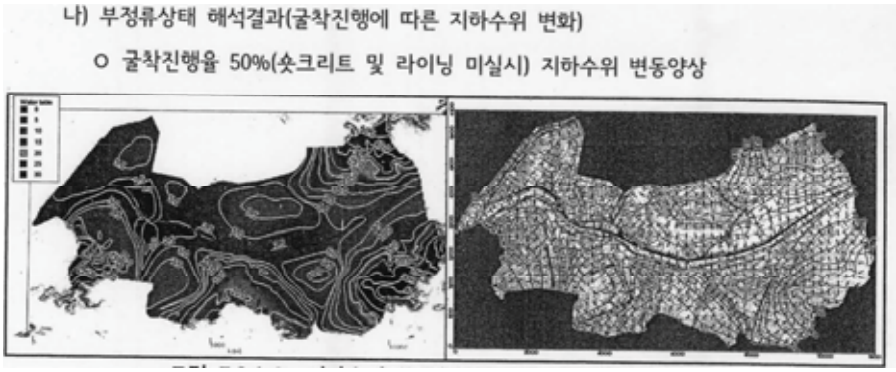
> 〈○○지하도로 사업 환경영향평가 본안 관계기관 검토 의견 중 발췌〉
>
> 수환경 분야 검토의견 중 일부
> ... 터널굴착에 따른 지반침하, 싱크홀 발생 등 지반변형에 취약한 지역을 평가하고, 필요시 저감방안 등 마련...
>
> 지형·지질 분야 검토의견 중 일부
> ... 하천퇴적층으로 이루어진 주변 토지에 대한 변형은 싱크홀 발생의 직·간접적인 원인이 될 수 있으므로, 천부에 위치한 지하도로의 진입부 주변에 대하여 지반 안정성을 비롯한 면밀한 지형·지질 조사를 수행하여 안전대책을 강화하고, 사후환경영향조사를 통해서 지속적으로 모니터링을 강화하는 계획을...

이와 같은 의견을 반영하여 제출된 환경영향평가서(보완서)에는 싱크홀과 관련한 예측 및 저감방안이 포함되었는데, 각 항목별 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

① 수환경 분야

지하수영향평가를 통해 터널 굴착에 따른 지하수계의 유동변화를 검토하였으며 본안에 제시된 지하수의 함양률(문헌), 수리전도도(현장 측정), 저류계수(현장 측정)

등 관련 입력계수의 타당성을 유사사례 등과 비교하여 제시하였다. 이들 자료를 바탕으로 수치해석(Visual MODFLOW[8] 사용)에 따른 지하수위 하강 및 지하수 유출수량 결과를 제시하였다. 그 결과 예측되는 지하수 유동 영향은 미미한 것으로 평가하였으며, 지하수 영향 예측의 불확실성이 높은 점을 감안하여 공사 및 운영시(공사준공 후 3년) 사후환경영향조사계획을 추가 수립하였다.



자료: ○○지하도로 사업 환경영향평가서

〈그림 2-1〉 지하수 유동 모사

② 지형·지질 분야

토피고가 낮고 퇴적층이 깊은 단면에 대한 구조해석(Midas[9]사용)을 실시하고 터널 내 변위 및 라이닝 응력을 결과로 제시하여 안정성 확보를 예측하였다.

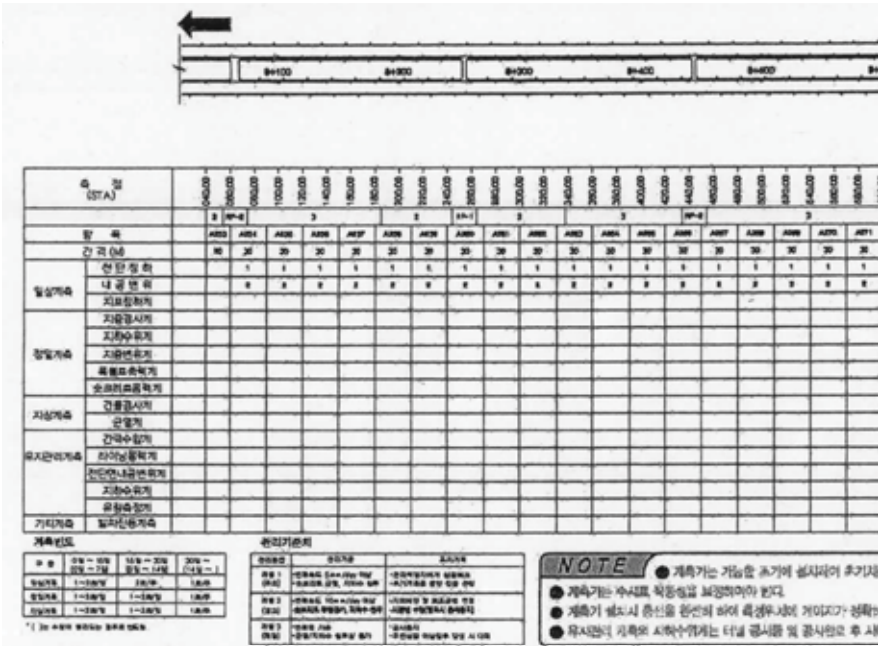
③ 계측 분야

수환경과 지형·지질 분야의 사후환경영향조사 계획의 일부로 모두 계측관리 계획을

8) USGS(U.S. Geological Survey)에서 개발한 지하수 유동 수치해석 프로그램인 MODFLOW를 상용화한 것으로 우리나라를 비롯한 전 세계적으로 널리 활용됨

9) 구조해석을 위한 유한요소 모델 기반 상용 프로그램으로 국내 건축·토목 분야에서 널리 활용됨

포함하여 제시하였다. 관련 계측 내용은 공사 중 지중경사계, 지하수위계, 지중변위계, 건물경사계, 균열계 등을 이용한 월 1회 단면(지중 및 지상) 측정, 운영 중에는 간극수압계, 응력계, 지하수위계, 유량계, 건물경사계, 균열측정계를 이용한 유지관리 계측과 건물의 계측계획(분기 1회)을 포함하고 있다.



자료: ○○○○지하도로 사업 환경영향평가서

〈그림 2-2〉 계측계획도(일부)

3. 시사점

이상에서 살펴 본 싱크홀 유발이 의심되는 사례 사업의 환경영향평가서는 수환경과 지형·지질 분야에서 지하수 유동 및 지반 안정성에 대한 수치해석을 실시하고, 이를 바탕으로 계측관리를 포함한 사후환경영향조사계획을 제시하는 방식으로 작성되었으며 이는 다른 도시철도 사업 영향평가서[10]에서도 유사하게 나타나는 것으로

보인다. 그러나 싱크홀 유발 가능성에 초점을 맞춘 조사, 예측, 평가, 저감방안 및 사후모니터링 대책이 마련되었다기보다는 실시설계의 과정에 일반적으로 포함되는 지반조사와 계측계획을 추가로 제시하는 데 머무르고 있어 적절한 싱크홀 예측 및 방지 대책이라고 보기에는 다음과 같은 한계점이 있다.

① 싱크홀 발생 방지를 목적으로 한 발생의 세 조건, 곧 취약 지반의 존재, 함몰된 지반이 이동할 수 있는 빈 공간의 존재, 지하수 흐름의 급격한 변화에 대한 유기적인 조사가 이루어지지 못함. 지반조사는 기존 자료를 포함하여 km 당 7-8공의 빈도로 이루어져 지반 조건을 연속적으로 판단할 수 없으며 단층파쇄대, 절리 등 이상 지반의 분포 검토를 위한 물리 탐사도 실시되지 않았음

② 실시설계보고서에 바탕한 지반조사 범위가 환경영향평가 대상지역 범위에 비해 현저하게 좁아 사업으로 인해 싱크홀이 발생하였을 때 환경영향이 예상되는 대상지역에 대한 조사 자료와 사후모니터링의 범위가 불충분함. 지하수 조사 및 사후모니터링 계획의 경우 주변 지하수 유동을 판단하기에 범위가 좁으며 지하수위 변동의 배경(background)정보인 계절적 변화를 파악하기 위한 장기 지하수위 변화 분석(3개 공에서 각각 57, 64, 73일)도 제한적으로 이루어짐

③ 공사 중 과도한 지반 침하의 징후가 있을 때 추가 조사 계획이 명확하지 않음. 실시설계보고서에 따른 계측 계획은 터널 단면 측정과 주변 건물 조사에 초점이 맞추어져 있어 실질적으로 싱크홀 발생 위험을 탐지할 수 있는 지표 및 지중 탐사 계획이 수립되지 않았음

이상에서 살펴본 바와 같이 현재의 싱크홀 방지 대책은 수십 mm 수준의 지반 침하를 전제로 한 지반공학적 예측과 계측관리에 바탕을 두고 있으며, 환경영향평가에서 설정하는 환경영향 범위에 비해 현저하게 좁은 범위에 대해 실시된 지반조사 및 계측계획에 기반하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 사업지구에 한정된 조사와

10) △△ 복선전철 건설사업(4·5공구) 환경영향평가서, ◇◇◇~□□ 복선전철 환경영향평가서 등

계측은 송파지하차도 등의 전례에서 이미 싱크홀 방지에 대한 한계를 드러냈다는 점을 상기할 때 싱크홀 취약 지반 및 지하수 유동 등 유발 요인에 대한 이해를 바탕으로 한 새로운 대책 마련의 필요성을 잘 보여준다.

제3장 싱크홀 취약성과 환경영향평가

제1장에서 서술한 바와 같이 싱크홀 발생의 세 조건은 ①싱크홀 발생에 취약한 지반의 존재, ②함몰된 지반이 이동할 수 있는 공간의 존재, ③지하수 흐름의 급격한 증가이다. 이 중 두 번째 조건인 지하 공동은 제1형 싱크홀의 경우 관거 내부 및 그 주변에, 제2형의 경우 지중 시설물 상부에 형성되어 있는 공동과 지보의 불량, 또는 손실로 인해 발생할 수 있는 틈 등에 의해 발생할 수 있다. 본 장에서는 첫 번째와 세 번째 조건인 싱크홀 취약 지반과 지하수 흐름의 급격한 증가에 대해 구체적으로 분석하여 보고 이를 고려한 환경영향평가 개선 방안을 도출하였다

1. 싱크홀 취약 지반

지반공학에서 구조적으로 불안정한 지반은 “연약 지반”으로 통칭되며, 지지력이 작고 압축성이 큰 점토질 지반이나 느슨한 사질토 지반을 의미한다(표 3-1참조). 점토지반은 투수성이 낮기 때문에 하중을 가하였을 때 일시적으로 수압이 증가(과잉간극수압)하고 시간이 흐름에 따라 공극수가 배수되면서 침하가 발생하는 압밀현상이 발생한다. 반면 사질토 지반은 투수성이 좋아 압밀 침하가 발생하지는 않지만 느슨한 구조를 이루고 있을 경우 하중의 재하와 함께 발생하는 침하(즉시 침하)량이 상당할 수 있으며 특히 동적하중에 취약하여 운영 시 발생하는 진동 등에 의해 쉽게 안정성을 상실할 수 있다.

〈표 3-1〉 연약지반 판정기준

구분	점토질 지반		사질토 지반
두께	10m 미만	10m 이상	-
SPT N치[11]	4 이하	6 이하	10 이하
일축압축강도(kN/m²)	6 이하	10 이하	-
CPT 저항 qc(kN/m²)	80 이하	120 이하	400 이하
상대 밀도 Dr	-	-	35% 이하

자료: 국토해양부(2008), 국도건설공사 설계실무 요령

그러나 터널이나 터파기와 같이 지반에 대규모 공동이 발생하는 경우에는 비록 연약지반 판정기준보다 강도나 상대밀도가 높더라도 유효응력을 상실한 토사가 원지반에서 떨어져 나오거나(일부일 경우 'raveling', 대량이면 'running' 현상이라고 칭함) 더욱 심하면 마치 물과 같이 흐르는(flowing) 현상이 발생할 수 있다. Terzaghi(1977)[12]는 모래/자갈층 특성과 터널 설치 시 발생할 수 있는 토사 유출 현상을 <표 3-2>와 같이 묘사하였다.

11) 환경영향평가 작성 및 검토 매뉴얼 한국환경정책·평가연구원(2015)에서는 점토질 지반일 경우 SPT N치 0-4, 사질토 지반은 10이하로 제시하고 있음

12) Terzaghi(1977), "Earth Tunneling with Steel Supports".
AASHTO*(2010), *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements*에서 재인용
* AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

〈표 3-2〉 터널 설치 시 모래/자갈층 거동

구분	다짐 정도 (N치)	거동	
		지하수면 위	지하수면 아래
극세립(very fine) 모래	느슨 (N≤10) 조밀 (N>30)	running, 급격한 raveling, flowing	flowing
점토질을 포함한 세립 모래	느슨 (N≤10) 조밀 (N>30)	급격 또는 느린 raveling, flowing	slow raveling
점토질을 포함한 모래와 자갈	느슨 (N≤10) 조밀 (N>30)	급격한 raveling	급격 또는 느린 raveling,
중-조립 모래와 자갈	균등(Cu*<3) 하고 느슨 (N<10)	대량의 running	대량의 지하수 흐름을 동반한 flowing
	입도양호(Cu>6)하고 조밀(N>30)	비교적 소량의 running	

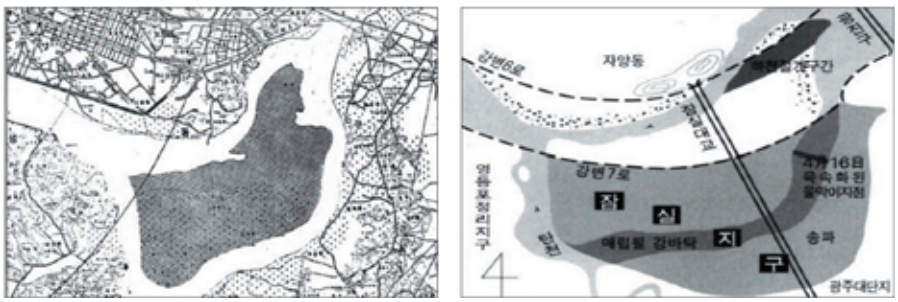
주: Cu=통일분류법(USCS)에 사용되는 균등계수. 낮을수록 입자 크기의 균등도가 높음
자료: Terzaghi(1977). ASSHTO(2010)에서 재인용.

따라서 싱크홀 취약 지반은 지반공학적으로 정의되는 연약지반의 판정기준보다 더 광범위하게 정의되어야 할 필요가 있으며 실질적으로 미고결 지반 전체를 대상으로 판정하여야 할 것으로 판단되어야 한다.

자연 충적층인 신생대 제 4기 충적층, 홍적층(지질도 상 시대기호 Qa, Qd) 및 수면 매립으로 형성된 미고결 퇴적층 지반은 암반과는 달리 쉽게 지지력을 상실하여 유출될 수 있는 특성을 지니고 있어 싱크홀을 유발시킬 수 있는 조건이 된다. 특히 공사구간이 직접적으로 미고결지반과 중첩되지 않더라도 지지력 상실이 발생할 수 있는데, 이는 공사나 운영 중의 배수, 또는 주변 지역의 지하수 이용 조건 등에 따라 하부의 고결구조, 또는 고결-미고결 구조 사이에서 이루어지는 공사도 상부 미고결지반의 지지력 상실을 유발할 수 있기 때문이다.

특히 이와 같은 미고결지반은 1962년 제정된 「공유수면매립법」에 따라 1980년대까지 도시의 폭발적 성장이 일어날 때 대도시에 조성된 매립 구역에서 광범위하게

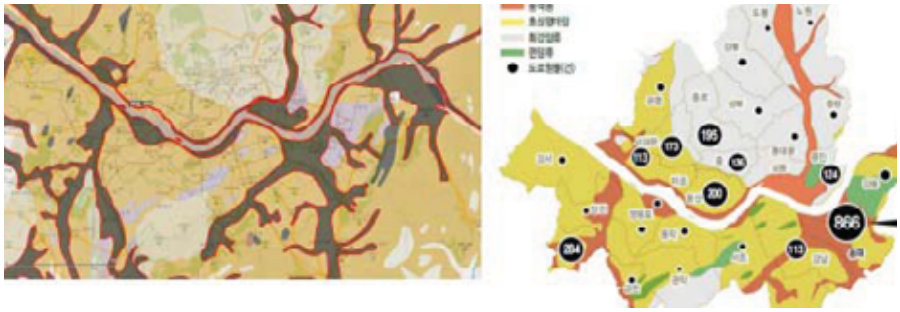
관찰된다. 서울시의 경우 1967년 설립된 “한국수자원개발공사”가 동부이촌동을 시작으로 강남의 압구정동, 잠실, 반포 등 대규모 아파트 단지 조성을 위해 한강 백사장을 매립하였다.[13] 상습 침수구역으로 한강 쪽으로 반도를 이루고 있던 잠실 또한 71년 잠실 공유수면매립에 의해 조성되었으며, 이 때 매워진 송파강의 흔적으로 남은 것이 석촌호수이다(손정목, 2003[14])(그림 3-1참조). <그림 3-2>는 서울시 지질도에서 충적층으로 분류되는 지역(왼쪽 그림 회색부분)을 표시한 것과 서울시 발표 도로함몰 조사 건수를(오른쪽 그림) 대비한 것으로 잠실 등 매립구역에서의 도로함몰이 다수 발생하였음을 보여준다.



자료: 손정목(2003). 장경석(2010)에서 재인용

〈그림 3-1〉 매립 이전과 이후의 잠실섬

13) 중앙일보(2005.5.21), “[서울만들기] 17. 공유수면 매립”, 한겨레신문 “한강 흐름과 잠실 변천사,”.
14) 손정목(2003), “서울도시계획이야기 3”. 한울. 장경석(2010)에서 재인용.
장경석(2010), “한강변 모래밭과 아파트 단지”.「하천과 문화」6(3).



자료: 서울특별시 지반정보통합관리시스템, 서울시 석촌동 동공 발생원인 조사위원회 발표자료

〈그림 3-2〉 서울시 지질도 중 충적층 분포 및 싱크홀 발생 건수

인천, 마산, 부산 등 해안도시의 경우 원래의 해안선을 찾을 수 없을 정도로 대규모 매립의 역사를 가지고 있다. 부산의 경우 최초의 매립 기록은 1888년에 찾을 수 있으며(부산발전연구원, 2002[15]), 대규모 매립의 반복으로 2007년 해양수산부 실태 조사 시 총 19.5km^2, 부산시 전체 면적(767.4km^2)의 2.5%에 달하는 면적이 매립된 것으로 조사되었다.[16] 이처럼 연안 퇴적층이 잘 발달해 있는 해안도시에 매립층이 더해진 경우는 광범위한 충적층의 분포를 볼 수 있는 또 하나의 예이다 (그림 3-3 참조).

미고결 퇴적층이 광범위하게 분포한 것으로 파악되는 지역에서는 그 두께와 범위를 기존 문헌 자료, 인근 개발 사업 시 조사 자료 등을 근거로 파악할 필요가 있다. 일반적으로 토사층 두께가 얇게 분포하고 지하수위가 낮게 형성될수록 굴착이나 터널 설치 등에 의한 수평변위 및 침하가 적어 지반 안정성이 증가한다. 지반 물성치와 거동 특성을 비롯한 제반 조건에 따라 달라지지만 터널의 경우 주요 변형(최대 침하량의 60%까지)이 발생하는 범위는 터널 양 옆으로 터널 깊이(H)의 0.35-0.5에서, 변형범위는 그 2.5배인 0.9H-1.3H(Sugiyama et al., 1999[17])에서 형성된다.

15) 부산발전연구원(2002), "북극정책포럼: 부산의 공유수면 매립"..
16) 해양수산부(2007), "공유수면 매립지 실태조사 및 관리방안 연구". 부처협동(2009)에서 재인용.

자료: 지질자원연구원

〈그림 3-3〉 부산 수영구 민락동 공유수면 매립지(회색) 및 미고결 퇴적층(노란색)

한편 터파기(깊이H)의 경우 수평적 영향범위는 벽체와 바닥면이 만나는 지점에서의 각도(지지각) 30도에서 45도 이내, 곧 H-1.75H에서 결정되는 것이 일반적이다. 따라서 터널이나 흙막이 벽체를 설치할 때는 설치심도와 미고결층의 수평 범위를 고려하여 싱크홀 유발 가능 지반의 범위를 판단하여야 한다. 한편 층위가 두텁지 않더라도 배수조건이 나쁜 점토층이 있을 경우에는 압밀에 의한 장기적 침하가 예상되므로 지반 안정성 검토가 필요하다(표 3-3 참조).

17) Sugiyama, T. et al.(1999), "Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension-East London," *Soils and Foundations*, 39(3): 99-112.

〈표 3-3〉 지반 안정성 검토가 필요한 지반 조건

구분	지반 조건
터파기(심도 H)	수직범위H, 수평범위 1H-1.75H 이내 지반의 대부분이 미고결 퇴적층인 경우
터널(심도 H)	수직범위H, 수평범위 0.9H-1.3H 이내 지반의 대부분이 미고결 퇴적층인 경우
공통	배수층이 없거나 얇은 3-4m 이상의 투수성이 나쁜 점토층이 있는 경우

자료: 저자 작성

한편 암층에서도 고결상태가 불량한 이암이나 셰일층의 경우 수분흡수 시 팽창하면서 급격히 약화되어 토사화할 수 있는 것으로 알려져 있으므로[18] 필요시 싱크홀 유발 가능성이 점검되어야 한다.

2. 지하수위 및 경사 변화

지하수 유량, 유속 등의 증가는 싱크홀을 직접적으로 유발시키는 조건으로 볼 수 있다. 제1형 싱크홀은 도로 및 천층 구거(상하수도 관로 등) 주변 뒷채움재에서의 투수-불투수 조건 반복에 의한 지반 연약화로 발생한다. 공극에 물과 공기를 모두 포함하고 있는 불포화토는 3상(흙입자, 수분, 공기) 구조를 이루면서 동시에 물과 공기의 접촉면에서 발생하는 수축막(contractile skin)에서 발생하는 장력의 영향도 받게 되어 그 거동이 매우 복잡하고 해석도 어렵다. 불포화토의 특성을 가장 잘 정량화하는 것으로 알려진 것이 함수특성곡선(soil-water characteristics curve, SWCC) 또는 수분보유곡선(soil-water retention curve, SWRC)으로 이는 지반의 수분 포화도에 따른 모관흡수력(matric suction) 사이의 관계를 정의한다. 이처럼 불포화토에서 강우 등 지표 조건에 따라 발생하는 지반 안정성 문제라는 점에서

18) 김태훈 외(2006), "이암/셰일지역에서의 터널 설계 사례". 대한토목학회 정기학술대회.

제1형 싱크홀은 산사태 재해와도 유사하다고 볼 수 있는데, 산사태 취약성의 정량적 평가에서는 SWCC, SWRC 등 불포화토 함수특성 외에 사면경사, 누적강우량, 수리경사, 불포화 전단강도, 투수계수 등의 많은 지반 물성치를 필요로 한다. 이처럼 불포화토 거동에 대한 해석적 접근이 현실적으로 매우 어렵다는 점을 고려할 때, 관찰과 계측의 중요성이 매우 크며 환경영향평가 시에도 공사장 내외부 관거의 노후화 정도, 노출된 관거 주변의 육안 관찰을 통한 다짐 불량, 누수 흔적 등의 확인, 필요시 누수 시험 결과 등으로 제1형 싱크홀의 발생 가능성을 판단하도록 하여야 한다.

한편, 2형 싱크홀의 경우 터파기나 터널의 설치로 인해 지반에 생기는 대형 공동으로 지지력을 상실하는 침투 파괴(seepage failure)현상이므로 지하수 유동 조건의 변화와 그에 따른 지반의 강도 변화를 함께 관찰하여야 한다. 지하수 흐름이 유발하는 토사 유출 현상은 투수성이 나쁜 점성토 불투수 층에서는 융기(heaving), 투수성이 좋은 사질토 지층의 보일링(boiling), 파이핑(piping) 등으로 불리며 본질적으로 모두 강한 지하수압의 작용으로 발생하는 지반 한계상태(hydraulic induced limit states)를 가리킨다. 이처럼 강한 지하수압은 인공적으로 발생된 지하수두의 차이로부터 생기므로 터파기, 댐설치 등의 공사 관리에서는 한계상태를 유발하는 수리경사[19]인 임계 수리경사(critical gradient)를 정의하여 안정성을 평가한다. 임계 수리경사의 값은 개략적으로 1 전후에서 형성되는 것으로 평가되나(Harr, 1962[20]) 유동을 최초로 촉발시키기 위한 수리경사는 더 작을 수 있다는 점 등, 다양한 안전율을 고려한 임계 수리경사는 0.1-0.25 정도로 평가된다(Perzlmaier 등, 2007,[21] 표 3-4참조).

19) Hydraulic Gradient. "동수경사"로도 불린다. 단위 거리 당 지하수위 차를 가리키며, 지하수 흐름의 속도는 수리경사에 비례한다.

20) Harr, M.E.(1962), *Groundwater and Seepage*, Courier Corporation.

21) Perzlmaier, S., Muckenthaler, P. and Koelewijn, A.R.(2007), "Hydraulic Criteria for Internal Erosion in Cohesionless Soil, in Proceedings Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees - Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD" *Contributions to the Symposium in Freising, Germany, September 2007.*

〈표 3-4〉 파이핑(piping) 촉발 임계 수리경사

발표 논문	토양 종류			
	자갈	조립질 모래	중간 모래	세립질 모래
Chugaev	0.25	0.25	0.11	0.10
Bligh	0.11	0.083	-	0.067
Lane	0.095	0.067	0.056	0.048
Mueller-Kirchenbauer, lower limit	-	0.12	0.08	0.06
Mueller-Kirchenbauer, upper limit	-	0.17	0.10	0.08
Weijers and Sellmeijer, Cu=1.5	0.28	0.18	0.16	0.09
Weijers and Sellmeijer, Cu=3	0.34	0.28	0.24	0.14

자료: Perzlmaier et al.(2007)

3. 싱크홀 환경영향평가 시 예측기법 개선점

본 장에서는 싱크홀 방지를 위해 현행 환경영향평가 중 예측기법 중 개선이 필요한 사항을 지하수 유동과 지반 안정성 분야로 나누어 살펴보았다.

가. 지하수 유동

지하공간 이용 중 중요한 부분을 차지하는 도시철도는 대부분 완전방수가 아닌 부분방수 방식으로 시공되며, 이에 따라 운영 시에도 지속적으로 막대한 양의 지하수 유출을 불러 일으켜 도시 지역의 지하수위 강하를 일으키는 주요 원인으로 지적되어 왔다. 〈표 3-5〉는 서울시 지하철역사 중 유출수량이 많은 주요 역에서의 유출수량(추정)을 보여준다.

〈표 3-5〉 서울 지하철 지하수 유출량 3,000톤 이상 역사(2014년 기준)

선/역명	지하수 유출량(톤/일)
분당선 서울시민의 숲 역	9,927
분당선 대모산역	7,176
9호선 구반포역	6,606
6호선 고려대역	3,600
5호선 양평역	3,506
7호선 노원역	3,234
3·7·9호선 고속터미널역	3,131

자료: 서울시

「서울시 지하철 9호선 1단계 건설사업 환경영향평가서, 2001」를 보면 1단계 공사구간인 공사 시 유출량은 서울시 제2기 지하철 공사 시 지하수 유출량 0.15-1.89m^3/km/min을 기준으로 제시하고 있고, 운영 시에 대해서는 정량적인 유출량 예측은 제시하고 있지 않으며 방지 대책으로 방수공법의 적용 및 정거장 내 청소, 화장실 용수 등의 활용방안을 제시하고 있을 뿐이다. 1단계 구간 중 구반포역은 굴착깊이 33m의 개착 4층 정거장이며 개화 기점 23km 792.5m에서 23km 980m까지 총길이 187.5m로 계획되어 있다. 이전 역인 동작역(22km787.5)과 다음 역인 신반포역(24km582.5) 정거장 사이에서 구반포역으로 집수되는 구간이 어디인지는 명확히 알 수 없으므로 동작역과 신반포역 사이 총 길이인 1.795km에 제시된 유출량을 적용해 보면 387m^3/일-4,885m^3/일로, 최대 집수구간 길이와 최대 지하수 유출량을 적용하여도 운영 시 실제 유출량에 못 미치는 것을 알 수 있으며, 이는 터널의 라이닝 등 완전, 또는 부분 방수를 위한 영구적 차수 시설의 설치 이후의 운영 시 유출량임을 고려할 때 예측을 훨씬 넘어서는 수치라고 할 수 있다.

정상용(2010)은 서울시 1-8호선 지하철 운영 시 지하수 유출량을 기반으로 다음과 같은 경험식을 도출하였다.

$$Q(m^3/\text{년}) = 258,332e^{0.0773 \cdot L(km)}$$

위 식을 활용하여 계산한 유출량 원단위는 <표 3-6>과 같은데, 그 범위는 환경영향평가에서 흔히 사용되는 원단위인 국토교통부(2009)의 0.3m^3/min·km과도 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

〈표 3-6〉 경험식에 의한 터널 유출량 원단위

터널 연장	지하수 유출량(톤/min·km)
1	0.53
5	0.14
10	0.10
20	0.11
30	0.15
40	0.23
50	0.38

자료: 정상용(2010)을 바탕으로 계산

서울시 도시철도 운영 시 관찰되는 예측 지하수량과 실측 지하수량 사이의 큰 격차는 환경영향평가서 작성의 고질적인 문제점을 잘 드러내 준다. 곧, 도시 철도를 비롯한 터널이 포함된 대규모 선형 공사 시 지하수나 지형·지질 분야의 작성이 실시설계를 염두에 둔 지반조사결과에 따라 이루어지는 탓에 공사 시 안전에만 초점을 맞추게 되고, 따라서 지하수의 배수와 그에 따른 간극수압의 상실로 인한 지반약화로 인해 보강이 필요한 공사 시 지하수 유출에 대한 저감대책만 마련될 뿐 시공 후 운영 시 지하수 유출에 대한 예측, 계측 및 저감대책 마련이 소홀한 것이 현실이다.

「지하수법」 관련 규정과 절차에 따라 지하시설물에서의 유출량이 300m^3/일(고층/대형 건축물의 경우 30m^3/일)을 넘을 경우 이용계획을 수립하는 내용이 법에 포함되어 있으나 현실적인 재활용수(중수)의 사용의 어려움과 관계 행정기관의 역량부족 등을 이유로 유명무실한 상태에 있음은 현윤정 외(2012)[22]를 비롯한 여러 연구에서

지적되어 왔다. 서울시에서는 관내 200여개 지점에서 주기적으로 지하수 수위 변화를 측정하고 있어 현재 지반침하 관련 연구개발, 정책개발 및 타도시 사례 등으로 중요한 자료가 되고 있으나, 도시지역의 지하 시설물에서의 과도한 유출에 의한 지하수위 강하의 징후가 뚜렷함(서울시 지하수 보조관측망 지하수위 분석결과, 윤상웅 외, 2014[23] 등)에도 불구하고 이에 대한 대책 마련으로까지는 이어지지 못하고 있는 실정이다.

지하수위의 예측에 있어서는 수치해석프로그램(Visual MODFLOW 등)을 활용한 지하수 거동 모사도 널리 활용된다. 이 때 예측되는 유출수량이 대부분의 경우 원단위 예측 결과보다 그 양이 적다는 점에 주목할 필요가 있는데, 이는 모델의 격자 간격 설정 등에 의해 지반과 지반 내 구조물 사이에 실제 발생하는 급격한 지하수위 변화를 모사하는 데 한계가 있기 때문인 것으로 보이며, 모델 예측이 지하수위 변동을 과소평가할 가능성을 보여주어 주의가 요구된다. 특히 지하수 유동 모델을 이용한 수치해석의 신뢰도는 적절한 입력계수 값 선정에 달려있는데, 다음 <표 3-7>에서 제시한 바와 같이 지하수위 예측 시 사용되는 입력 자료와 획득 방법은 여러 가지 측면에서 문제점을 드러내고 있어 대다수의 경우 지하수위나 지하수량의 모델 예측 자료의 질은 높이 평가하기 어렵다. 여기에 지반의 불균질성과 공사나 운영 중 발생할 수 있는 제반 조건의 변화 가능성을 고려할 때, 지하수 유동의 예측 결과의 신뢰성은 그 한계가 뚜렷하며, 반드시 실측을 통한 보완이 필요하다는 점을 강조할 필요가 있다.

22) 현윤정 외(2012), “오염지하수 관리 강화를 위한 제도적 지원 방안”. 한국환경정책·평가연구원.
23) 윤상웅, 최현미, 이진용(2014), “국내 6개 대도시 지하수 수위 및 수질특성 비교”. 지질학회지 50(4): 517-528

〈표 3-7〉 지하수위 모사를 위한 입력계수와 일반적인 출처

자료	출처	문제점
지층정보	현장시험(SPT 등), 실내실험(입도, 비중, 함수비, 액성한계, 소성한계, 밀도, 공극률, 간극비, 포화도, 전단강도 등) 문헌조사	주변에 동일 사업자에 의한 사업이 진행되었을 경우 이외에는 문헌조사 결과가 제시되는 경우가 드묾
투수계수	현장시험 및 문헌조사	시험 및 해석 결과의 범위가 넓어 대표성을 담보하지 못하는 경우가 다수
지하수위	시추공 및 인근 관정	인근 관정 조사를 포함하지 않는 경우도 다수
특이 지질구조 (파쇄대, 단층 등)	현장 탄성파/전기비저항 시험	현장 탄성파 시험을 거치지 않는 경우도 다수

자료: 저자 작성

나. 지반 안정성

지반 안정성 평가는 환경평가 단계에서 구체적으로 이루어지기 힘든데, 이는 전략 또는 영향평가가 구조물의 실시설계 전에 이행되는 경우가 많아 지반 물성치 조사나 해석이 자세히 이루어지기 힘든 여건 탓이다. 지반공학적 설계는 수준에 따라 “기본설계”와 “실시설계”로 나뉘는데, 이들은 그 성격에 따라 같이 실시하거나 따로 실시 할 수 있다. 현재 국토교통부 지침 「기본설계 등에 관한 세부시행기준」에 따르면 구조물별 설계기간은 가장 긴 지하철의 경우 실시설계 기준 24개월(100-500억)에서 30개월(1,000억 이상), 일반 건축의 경우 7개월-8개월로 공사의 복잡성과 공사비에 대비하여 증가하며 관계기간 협의, 환경영향평가, 교통영향평가 등에 소요된 기간을 제외하고 계산하도록 설정되어 있어 환경영향평가 기간과 설계기간이 겹치는 경우가 다수 발생하는 것으로 파악된다.

이에 현재는 일부 기획재정부의 예비타당성조사를 거쳐야 하는 대상사업 등 대규모 주요 공공사업인 경우에만 실시설계 결과를 인용하여 환경영향평가서에 지반 침하 예측 등 지반 안정성 예측 내용이 포함되기도 한다. 그러나 이러한 경우에도 침하

예측량이 최대 수십 mm의 수준을 벗어나지 않아 이를 바탕으로 싱크홀에 대한 지반의 안정성을 판단하는 데는 무리가 있다.

이는 싱크홀이 본질적으로 붕괴(failure)의 특성을 가지고 있기 때문이다. 지반은 자체 하중과 상부 구조물의 하중을 지탱하는 구조물(structure)로의 특성을 지니고 있다. 하중이 과다하거나 배수조건의 변화로 인한 유효응력의 상실로 지반의 붕괴가 일어날 수 있다. 이와 같이 붕괴가 일어나면 지반이 구조물로서의 성격을 상실하고 자유도가 높은 상태에서 운동하게 된다. 이처럼 지반의 침하-안정성 상실로 이어지는 과정에서 지반의 거동에 대한 지배방정식은 구조역학에서 운동역학으로 바뀌게 되며 따라서 지반 안정성을 예측하는 방법론도 하중-침하거동을 해석하는 구조해석(structural analysis)에서 사면안정성 해석 등 구조체의 안정성 유지 여부를 판단하는 한계상태해석법(limit state analysis)으로 전환되어야 한다. 구조해석 단계에서는 지반이 안정성을 유지한다는 가정 하에 지반침하의 양을 계산하기 때문에 최대 침하량은 최대 수십mm 수준에서 산정될 수밖에 없고, 이를 바탕으로 싱크홀에 대한 지반의 안정성을 판단하는 데는 무리가 있다. 반면 사면안정성 해석에 이용되는 한계상태해석법은 이미 존재하는 동공이 있는 경우가 아니면 적용하기 힘들어 싱크홀 발생예측에 직접 적용하기는 힘들다.

한편 구체적인 지반 조사 자료가 없는 경우에도 각종 데이터베이스를 활용하여 대상 지반의 특성을 파악하면 싱크홀 유발 가능성을 판단하는 데 중요한 자료가 될 수 있다. 다음 <표 3-9>는 지반 물성치와 관련하여 현재 각 기관에서 개별적으로 구축하고 있는 데이터베이스를 모은 것이다(박용부 외, 2015[24]).

24) 박용부 외(2015), “LH 지반 빅데이터 활용 시스템 개발(I)”. LH 토지주택연구원.

〈표 3-8〉 지반정보 DB 현황

기관	명칭	사이트	내용
지질자원연구원	지질정보시스템	geoinfo.kigam.re.kr	지질도/지형도 지구화학/물리 정보
한국광물자원공사	광물자원지리 정보망	kmrgis.net	기본도, 광산지질도, 물리지화학탐사도, 시추탐사도
건설기술연구원	국가지반정보 통합 DB센터	geoinfo.or.kr	지질, 지반조사용 시추공 정보-2014년 6월 30일 현재 179,110공 물리탐사 및 동적 시험정보
서울시	서울시 지반정보통합관 리시스템	surveycp.seoul.go.kr	15,000 가량의 시추 데이터 기반 암석 종류, 단층분포, 흙의 깊이, 지하수위, 암석의 파쇄정도 등 3D정보 제공
한국도로공사	사면관리시스템 (HSMS)	-	고속도로 절토사면 현황, 붕괴사고 관련 자료 등
한국시설안전공단	시설물정보 종합관리시스템	fms.or.kr	관리대상 시설물 및 안전등급, 관련 설계도서, 사고사례 등 자료
	도로절토사면 유지관리 시스템(CSMS)	-	국도 비탈면 및 위험비탈면 관리, 조사, 상시계측 결과

자료: 박용부 외(2015) 및 저자 수집

4. 싱크홀 방지를 위한 저감방안 및 모니터링 기법 개선

싱크홀은 지반 상태가 격변하면서 발생하는 안정성 손실의 문제이므로 발생 예측이 어려운 특징을 지닌다. 따라서 지반 보강을 통한 사전 방지 조치 이외에도 현장 관찰과 관측 장비를 활용한 계측 관리를 통해 발생 징후를 꾸준히 모니터링 하는 것이 매우 중요하다. 본 장에서는 현재 지하수와 지형·지질 분야 환경영향평가 시 저감방안 및 모니터링 기법과 관련하여 국내에서 이루어지고 있는 저감방안 및 모니터링 기법으로서의 계측 관리 적용 현황을 알아보고, 향후 싱크홀 방지를 위한

개선 방안을 살펴보고자 한다.

가. 지하매설물 현황 검토

싱크홀 유형 중 1형 싱크홀의 경우 주로 노후관로에서 발생한다. 2015년 기준 국내에 20년 이상 된 광역상수도의 비율이 26%(수도권 45%)[25]에 이르고 서울시 하수관로의 30.5%가 50년 이상 노후된 상태[26]인 등, 노후 상하수도 관거 교체 사업이 시급한 형편이다. 현재 환경부가 싱크홀 방지를 위한 노후 하수관로 전면 조사와 교체 사업, 관리 강화를 추진하는 등 관리 강화가 이루어지고 있으며(환경부, 2015[27]), 서울시와 국토부에서 지하3D 지도 작성 등의 데이터베이스 구축에 착수하였으므로 향후 보다 체계적인 관리를 전제로 할 때, 환경영향평가 시 제1형 싱크홀에 대한 주요 저감방안은 지하매설물의 현황 자료에 기초하여 공사 계획을 수립하는 것이 될 것이다. 관련 법에 따라 지장물 보호조치를 철저히 하되, 공사 진행 시 매설관로 주변 누수 및 침하 현황을 육안으로 관찰하여 누수, 뒷채움재의 교란이나 유출을 의심할만한 징후가 있을 경우 즉시 공사를 중단하고 추가 조사와 보수를 이행할 수 있도록 계획하여야 한다.

나. 지하수 유동과 지반 변위의 연계 계측

현재 지하수 및 지반 안정성 평가 항목에서 사용되는 싱크홀 관련 사후 모니터링은 터널 굴착 시 지하수위 측정, 유출지하수량(터널 폐수량) 측정이 대표적이고, 지형·지질 항목에서는 지반 안정성과 관련한 평가 및 예측이 이루어진 경우라 해도 별도의 모니터링 방안이 마련되지는 않는 것이 일반적이다. 그러나 전술한대로 싱크홀

25) 국회의원 강동원 보도자료(2015.9.21), “수자원공사, 수돗물만 팔아먹고, 노후관 개량에는 관심 없다”.
26) 중앙일보(2015.9.23), “서울 하수관로 30% 반세기 전 설치돼”.
27) 환경부 보도자료.(2015.4.8), “환경부, 국가안전대진단 ‘싱크홀’ 대응에 집중키로”.

취약성은 지반과 지하수의 상호작용으로부터 발생하므로 싱크홀 발생 관리(조사) 모니터링에서는 지하수 유동과 지반 변위는 반드시 연계 계측되어야만 상호 보완을 통해 그 정보가치를 획득할 수 있다. 또한 지반과 지하수는 본질적으로 불확실성이 높은 특성을 지니고 대상 사업의 시행뿐 아니라 주변의 추가적인 개발 등에 의한 누적 영향 등과 맞물리면 그 복잡성이 더욱 높아지므로 예측과 평가의 신뢰도가 낮아진다. 따라서 예측과 평가를 통해 차수 및 지반보강 등 저감대책을 마련했다 하더라도 공사 시 싱크홀 발생에 대한 모니터링을 실시하고, 지반 불안정성의 징후가 보이면 공사를 중단하고 보다 정밀한 관찰을 통해 원인을 파악하도록 계획하여 이를 보완해 주어야 한다.

현재 지하수위 계측은 국토교통부 전문시방서(일반국도공사, 2015)에 따른 터널 공사 관리를 위한 일반 계측(계측A)이나 대표단면의 건전성을 파악하기 위한 정밀 계측(계측B)에 포함되어 있지 않다(그림 3-4 참조). 또, 국토교통부(2009)의 「유출지하수 관리 요령」은 시공단계에서 적산유량계 등을 이용한 지하수 유출량의 측정 및 운영단계에서의 모니터링에 대한 포괄적인 내용이 제시되어 있으나 계측의 빈도, 간격, 범위 등은 특정되어 있지 않다. 이에 이정호 외(2005)[28]는 터널로 인한 지하수 영향 저감방안의 하나로 지하수 영향 모니터링 계획의 구체적인 내용을 제시하였는데, 그 내용은 <표 3-9>와 같다.

28) 이정호, 이영준, 이수재(2005), “터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구”. 한국환경정책·평가연구원

구분	계측항목	계측간격	배 치	계측기 설치시기 및 위치	측정빈도[1]			비 고
					0~15일 (0~7일)	15~30일 (8~14일)	30일~ (15일~)	
계측 A (일상 계측)	터널 내 관찰	전 연장	전 막장	-	매 막장 마다	매 막장 마다	매 막장 마다	록볼트 인발시험은 록볼트 품질관리 시험으로 실시함
	내공변위	10 m~50 m	수 평 2 대각선 4	막장후방 1 m~3 m 또는 굴착 24시간 이내[2]	1~2 회/일	2회/주	1회/주	
	천단침하	10 m~50 m	1군데	막장후방 1 m~3 m 또는 굴착 후 4시간 이내[2]	1~2 회/일	2회/주	1회/주	
	록볼트 인발시험	20 m 마다 3개소	측벽부 천장부 어깨	-	-	-	-	
계측 B (정밀 계측)	지표침하 지중침하	300 m ~600 m	터널상부 3~5군데	막장전방 30 m	1회/일	1회/주	1회/2주	각 항목별 계측기를 동일한 단면에 설치하여 종합적으로 계측
	숏크리트 응력	200 m ~500 m	3~5군데 (반지름방향, 접선방향)	막장후방 1 m~3 m 또는 굴착 후 24시간 이내[2]	1회/일	1회/주	1회/2주	
	지중변위	200 m ~500 m	3~5군데 (3~5개의 다른 심도)	막장후방 1 m~3 m 또는 굴착 후 24시간 이내[2]	1~2 회/일	1회/2일	1회/주	
	록볼트 축 력	200 m ~500 m	3~5군데 (3~5개의 다른 심도)	막장후방 1 m~3 m 또는 굴착 후 24시간 이내[2]	1~2 회/일	1회/2일	1회/주	

※ 1) 빈도란 중에 있는 ( )는 수렴이 빨리 되는 경우의 빈도임.
2) 막장 후방 1 m ~ 3 m 또는 굴착 후 24시간 이내 중 빠른 시기를 기준으로 함.

자료: 국토교통부(2015), 표 7-10-1.

〈그림 3-4〉 터널 계측항목별 측정빈도

〈표 3-9〉 터널 지하수 영향 모니터링 방안

검사명	빈도 및 기간
공사시 지하수 유출량	매일
일기 변화	매일
수질	매일
주변 지하수, 천연샘 및 인공샘 등 수위 변화	명시되지 않음
지표수량 변화	명시되지 않음
운영 시 모니터링	빈도 명시 없음, 3년 이상

자료: 이정호 외(2005)

터널 관련 시공 협회 등에서도 지하수 유동이 지반 거동에 미치는 중요성을 반영하여 B계측의 일부로 지하수위 및 간극수압의 측정을 포함시켜 차수 그라우팅의 효과를 측정하고자 강화된 측정 빈도에 관한 자체적인 기준을 제시하고 있는데, 그 중 한 예는 〈그림 3-5〉와 같다.[29]

구 분	측 정 방 법	관 리 계 획
설 계 시 관리계획	• 매월 1회 이상 측정 • 기상상태를 고려하여 탄력적으로 조정	• 1차관리 : 설계용역사 – 관측관리 • 2차관리 : 설계감리사 – 관측관리 종합
공 사 중 관리계획	• 민원발생 예상지역 초기 관측정 천정 • 자동관측 – 1일 8회 이상 측정	• 1차관리 : 전문기관에 조사의뢰 • 2차관리 : 시공 감리사
기타사항	• 지하수위 측정방법 및 측정기록 DB 표준화 • 체계적인 관리를 위하여 1개 기관 선정 • 설계단계의 측정자료 종합하여 시공 감리사로 이관(설계감리 주관)	

자료: 이근병 외(2009)

〈그림 3-5〉 터널 설계 및 공사 시 지하수위 측정 빈도

이와 같은 지하수-지반 변위 연계 계측의 강화를 통한 2형 싱크홀의 방지 효과는 매우 클 것으로 기대된다. 특히 NATM터널은 본질적으로 계측의 결과를 반영하여 지보패턴을 시공하는 탄력적인 터널 시공 기법임을 고려할 때, 국내 터널 현장에서 계측과 그 관리의 강화 필요성은 크다고 할 수 있다.

29) 이근병, 홍관석, 김광식(2009), "지반환경 및 지하수 영향검토에 의한 터널설계". 「유신기술회보」.

다. 광역, 장기 지하수위 측정

한편, 전술한 바와 같이 도시철도 터널의 경우 공사 시 뿐 아니라 운영 중에도 장기적인 지하수의 누출로 인해 지속적인 지하수 유동(수량 및 수위)에 영향을 미치므로 싱크홀 취약 지반 지역에서는 싱크홀 발생의 가능성을 지속 모니터링 하여야 한다. 또한 지하수의 장기적인 유출은 지하수 유동에 미치는 영향 범위 또한 크게 확대시킬 수 있으므로 보다 넓은 시공간적 관측 범위(광역, 장기)의 지하수위 계측이 요구된다. 지하수위의 계측 계획을 수립할 때에는 터널 내에서의 지하수위 변동뿐 아니라 주변의 지하수위 경사가 싱크홀 발생을 유발한다는 점에 주목할 필요가 있다. 이에 따라 측정 지점의 선정 시 지하수위 변화 예측 결과를 토대로 주요 지하수위 영향 범위 내의 측정 지점을 선정하되, 수리경사를 파악하기에 충분한 수의 관정을 설치하여 적정한 측정 밀도를 확보하며, 특히 영향 범위 밖의 지하수위 및 그 계절적 변화에 대한 배경(background) 정보를 반드시 수집하여 자연적인 지하수위 및 수리경사를 제외한 변화의 정도를 판단할 수 있도록 하여야 한다.

〈표 3-10〉 운영 시 지하수 영향 모니터링 계획 수립

계획	내용
배경 정보	사업 및 주변 지하수 이용에 따른 영향이 없는 지점에서 평수위 및 계절적 변동 측정
관측정 개수	영향 범위와 지반의 수리지질학적 특성에 따라 달라지나 수평적 수리경사 특정을 위해 영향 범위 내에서 적어도 3개 이상의 측정 결과와 수직적 수리경사 특정을 위해 지층별 1개 이상을 계획
측정 기간	운영기간 내
측정 빈도	계절별(분기) 1회 이상
지표수량	영향범위 내 지표수에 대해 필요시 측정
유출 지하수량	연속, 자동 측정

자료: 저자 작성

한편, 현재고속도로/철도, 지하철, 댐 등의 시설물, 공공청사, 대형 건축물 등은 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」, 「재난 및 안전관리 기본법」 등에 의거하여 운영기한 내에서 지속적으로 정기적인 안전점검이 이루어져 (터널의 경우 정기안전점검 반기 1회, 안전등급과 운영 시기에 따라 정기 및 정밀 안전진단) 자동화된 유지관리계측 시스템의 설치가 점차 일반화되고 장기거동을 측정하기 위해 시스템의 내구성을 향상시키고 실시간 계측 시스템을 도입하는 등 그 성과를 높이기 위한 노력이 계속되고 있다. 이처럼 안전관리 유지관리계측은 일반적으로 운영 개시 후 3년 이내로 그치는 환경영향평가제도 하의 사후환경영향평가제도보다 장기 계측에 더 적합하다고 할 수 있다. 따라서 터널 주변으로 싱크홀 취약 지반이 있을 경우에는 유지관리계측 운영 중 지하수위측정을 유지관리계측에 반영할 필요가 있다.

라. 싱크홀 비파괴 탐사

한편, 싱크홀의 발생이 대부분 전면적인 지반조사를 수행하기 힘든 도심지역에서 일어나고 있어 싱크홀의 사전 조사 및 발생 징후가 있을 경우 정밀 측정 방법의 하나로 물리파 등을 이용한 비파괴 검사 기법의 중요성이 대두되고 있다. 환경영향평가 시 가장 흔하게 사용되는 조사 기법은 수직 전기 비저항탐사와 탄성파 굴절탐사인데, 추가적으로 활용할 수 있는 조사 기법과 그 특징은 <표 3-11>과 같다 (동해이엔지, 2015)[30].

30) 동해이엔지(2015), “지반 내 공동(싱크홀)탐지를 위한 조사”(자사 소개 자료).

〈표 3-11〉 싱크홀 탐사를 위한 비파괴 검사 종류

검사명	원리	장점	단점
전기비저항	흘려준 전류에 의해 발생한 전위차 측정	대형 공동 탐지 유리, 누수 경로 파악 가능	포장 구간 불리
탄성파토모그래피	시추공 내에서 발생시킨 탄성파의 전파 시 반사, 굴절, 회절 등 특성을 수신용 시추공에서 측정	탐사 심도 제한 없음	시추공 굴착 필요
지표투과레이다 (GPR)	지표에서 전자기파 방사 후 반사파의 진폭 및 위상 변화 측정	탐사 신속, 포장 구간에서 용이	탐사 심도 제한 (최대 8m이내, 일반적으로 5m)
InSAR(interferometric synthetic aperture radar)	시간차를 둔 고해상도 위성영상의 비교	장기간 침하 추세 감시에 적합	탐사 심도 제한
Lidar(light detection and ranging)	장비를 장착한 항공기 등 에서 발사한 레이저의 표적 도달시간 측정	장기간 침하 추세 감시에 적합	탐사 심도 제한
RWD/FWD (rolling/falling wheel deflectometer)	도로에 순간적인 충격하중을 전달한 후 처짐을 측정	측정 및 해석 기법이 단순, 포장 구간에서 용이	탐사 심도 제한

자료: 동해이엔지(2015)를 바탕으로 재구성

현재 싱크홀과 관련해 가장 주목받고 있는 검사는 GPR로 일본에서 1990년 차량에 탑재하여 신속하게 이동하면서 도심지 지하 공동 현황을 파악할 수 있는 보도 탐사차의 형태로 개발되어 운용되고 있다(강대홍, 2014 [31]). 서울시에서 자체적으로 GPR 장비를 보유하고 있고, 환경부 또한 노후 하수관로에 대한 내부영상촬영(CCTV)기법과 동시에 GPR을 적용하여 관거의 내/외부 환경을 모두 측정하는 기술을 개발중이다(환경부 보도자료 2015.07.10 “노후 하수관로 평가기법 개발로 지반침하

31) 강대홍(2014), “함몰구멍 예방기술 및 특허출원동향”. 「대한토목학회소식지」 62(11).

예방한다"). 향후 다양한 기술의 시험 도입과 비교 분석을 통한 정착을 유도해야 하며, 싱크홀 취약지반에서는 실시 설계를 위한 시추공 설치와 상세 지반조사와 더불어 예방적인 비파괴 탐사 방법의 적용을 통해 측정의 연속성을 높이는 방안을 강구해야 할 필요가 있다.

제4장 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 작성 지침(안)

본 장에서 검토한 1, 2형 싱크홀 방지를 위한 예측 및 저감방안을 종합하여 아래와 같이 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 작성 지침(안)을 도출하였으며, 기존 지침(한국환경정책·평가연구원, 2015)에 추가되는 부분(진하게 표시)을 포함한 지침(안)을 '터널로 인한 지하수 영향,' '지반 및 사면 안정성'으로 나누어 아래와 같이 제시하였다. 한편 싱크홀 취약 지반과 관련된 주요 내용은 별도의 항목으로 분리하여 제시하였는데, '지반 함몰(싱크홀) 취약 지반 굴착 시 예측 및 처리대책'으로 싱크홀 취약 지반의 특성 및 취약 지반에서 굴착이 이루어질 때 환경영향평가에 포함하여야 할 예측 및 처리대책을 포괄적으로 정리하였다.

1. 터널로 인한 지하수 영향 검토

<터널로 인한 지하수 영향>

□ 터널지역의 지하수 현황 및 양수시험 결과를 작성하고 터널공사로 인한 지하수 영향을 검토
- 지반고와 지하수위 분포 및 터널예정고도 등을 도면으로 작성하고 구간별 지하수위 저하, 저하시간, 회복시간, 회복수위 등을 예측
- 터널상부지역에서 하향 시추가 곤란한 경우 그 사유를 명시

□ 터널 공사시 다량의 지하수 유출이 예측될 경우, 공사구간 주변지역을 대상으로 지하수 이용현황(수위, 수량 등)을 조사하고, 필요시 주변지역의 지하수 이용에 대한 영향이 발생하지 않도록 대책 수립
- **지역 지하수의 함양특성을 파악하고 장기적인 지하수위 모니터링 시 터널 공사에 의한 영향과 계절적 강우량 변화 등 자연적인 지하수위 변화를 구분할 수 있도록 주변 지하수 관측망 자료 등 관련 문헌자료 수집**
- 공사시 정기적으로 지하수 현황을 조사·비교할 수 있도록 사후환경영향조사계획 수립

□ 터널 공사시 지하수 유출량은 지형과 지질 여건에 따라 매우 다르게 나타날 수 있으므로, 터널 공사 초기에 지하수 유출량 및 터널 폐수 발생량을 모니터링하고 터널 폐수 발생증가량에 적합한 처리 계획(시설용량) 수립
- 지하 수맥 단절이나 지하수위 저하 등으로 인접 마을 지하수 이용(농업용수 등)에 피해가 발생하지 않도록 사전 계획을 수립

□ 암반에서 유출되는 지하수는 완전방수를 목표로 설정하고 제반 여건상 불가피할 경우 차수율을 높여서 지하수위의 회복이 조기에 달성할 수 있도록 방안을 수립
- 국내·외 터널의 지형적 분포(산악터널, 하저터널, 평지지하터널, 해저터널 등)에 따른 배수형태를 조사하고 자료를 작성
- 일률적인 완전배수 혹은 부분배수 방식의 적용보다는 실제로 지하수압의 예상치를 설정하여 그에 따른 배수방식을 선정(기존 공사 구간의 수압 측정 조사자료를 근거로 하여 설정)

□ 지하수 영향 모니터링 방법

① 지하수 영향의 조사목적은 자연환경의 변화에 중점을 두고 실시

② **공사시 터널 지하수의 유출량 및 지하수위를 조사·기록. 연속 유량계 및 지하수위계 (pressure transducer)를 활용한 연속 측정이 바람직**

③ 일별로 터널 굴착실시 여부, 유출량, 일기변화, 수질 등을 조사·기록

④ 주변 지하수, 천연샘 및 인공샘 등의 수위 변화, 지표수량의 변화 등을 조사

⑤ 지하수 영향과 그로 인한 환경영향에 대한 원인 분석 및 대책 기록

2. 지반 및 사면안정성

<지반 및 사면안정성>

가. 지반안정성 검토

□ 하천변의 충적층, **광범위한 매립층** 등과 같이 연약지반이 분포할 가능성이 있는 지역은 지반침하 등의 영향을 예측하고 지반개량 등의 저감방안 수립
- **매립토 지반,** 석회암 지대, **광산 지대 등은** 석회동굴이나 동공 등이 발달하여 지반침하가 발생할 수 있으므로 지질조사와 물리탐사 등 수행
- 지하수 개발이 과다한 지역, **지하철 역사, 터널 등 유출지하수 발생 지역**은 지반침하가 발생할 수 있으므로 주변 개발이나 지하수 개발 현황 등을 고려
- 물과 접촉할 경우 팽창성을 가지는 점토광물이 분포하는 지역(주로 제3기 미고결층 분포지역)은 지질조사 및 점토광물의 종류, 함량, 습윤팽창 등을 검토

나. 연약지반 처리대책

□ **시추조사 데이터베이스 및 과거 주변 지역 공사 시 시추조사 및 현장/실내 시험 결과를 검토**

□ **문헌,** 현장조사와 시추조사 결과를 토대로 연약지반의 존재 여부를 검토하고, 연약지반 판단근거와 존재시 대책 수립 및 안정성 검토

□ 현장시험 및 토질시험결과에 근거하여 연약지반의 특성에 따른 대책의 장·단점을 비교·분석 후 현장여건에 적합한 대안을 선정

□ 구조물 등이 계획된 지역에 대한 대책 수립이 필요할 경우 분포특성 및 지반특성 등을 작성하고 이에 적합한 대책을 비교·검토하여 최적안을 선정
- 추가적인 토량 및 재료가 필요한 경우 소요량을 예측하고 공급계획을 수립
- 처리기간, 재료수급 방안 등을 고려하여 대책 수립

3. 지반 함몰(싱크홀) 취약 지반 굴착 시 예측 및 처리대책

□ 싱크홀의 발생 원리

싱크홀은 지반의 물리적 유실에 따른 지지력 붕괴와 함몰 현상으로 ①싱크홀 발생에 취약한 지반의 존재, ②함몰된 지반이 이동할 수 있는 빈 공간의 존재, ③지하수 흐름의 급격한 증가가 동반될 때 발생할 수 있음

□ 지하매설물 검토

굴착 전 상수도, 하수도, 가스, 통신, 전력 등 지하매설물의 위치를 확인하여 배관 및 관로의 파손을 방지하고, 손상으로 인한 오염물질의 누출, 지반 함몰(싱크홀) 등의 영향이 발생하지 않도록 계획

〈표 4-1〉 굴착 전 지하매설물 검토사항

구분	검토사항
상수도	관망도 검토 및 관계기관과 합동으로 현황 및 제수변 위치 파악
하수도	관계기관과의 시공방법 협의 및 응급처리계획 수립
가스	작업자 안전교육 실시
통신	매설 의심구간은 시험굴착을 시행, 관 노출시 인력으로 안전굴착 시행
전력	작업자 안전교육 실시

- 굴착 시 사전 지장물 보호조치를 통하여 시설물을 보호하고 미 예측된 지장물 발견 시 즉시 공사 중단 및 관계 기관에 신고
- 굴착에 의해 영향을 받을 수 있는 관거, 설비의 종류와 노후 정도 등을 조사하며, 대규모 터파기나 개착식 터널의 경우와 같이 천층부 굴착 단면이 큰 경우 특히 주의를 요함
- 굴착 시 관거 주변에서 뒷채움재 교란, 누수 흔적, 지하수의 용출 등 지반 함몰 가능성 발견 시 즉시 공사 중단 및 관계 기관에 연락하여 적정한 보수 등이 이루어지도록 하여야 함

□ 싱크홀 취약성 예측

대규모 터파기, 터널 굴착 등 지하수 흐름에 심각한 영향을 주는 사업에 대해서는 지반 함몰(싱크홀) 취약 지반의 위치를 확인하여야 함

- 싱크홀 취약 지반은 퇴적/매립토 지반, 연약지반, 석회암 지대, 광산(휴폐광산 포함) 지대, 고결상태가 불량한 팽창성 셰일/이암 등 지하수 배수 조건 변화에 의해 지지력을 잃을 수 있는 지반을 말하며, 입도분포가 균등한 모래·자갈 지반의 경우 다짐이나 강도조건에서 연약지반 기준을 상회하더라도 싱크홀에 취약할 수 있음

〈표 4-2〉 싱크홀 검토가 필요한 지반 조건

지반 조건
터파기나 터널(심도 H) 설치 대상 지반(지표 하 수직범위 H, 수평범위 각 방향 1H-2H 이내)의 대부분이 미고결 퇴적층인 경우
연약지반, 석회암 지대, 팽창성 지반 등 문제 지반이 있을 때
다짐/강도가 연약지반 기준을 상회하나 토사 유출을 일으킬 수 있는 입도분포가 균등한 모래·자갈 지반이 있을 때

- 매립지반의 경우 그 범위(수직 및 수평)를 특정하고 매립 시점, 과거 과다한 침하의 문제가 발생한 적이 있는지 등에 대한 문헌 및 청문조사 실시
- 굴착 전 시추, GPR, 탄성파 조사 등 비파괴검사를 통해 지지력을 잃은 지반이 이동할 수 있는 경로가 되는 동공 확인
- 공사 구간 내에서 예측되는 지하수위의 변화가 자연적인 계절적 변화의 폭을 크게(5-10배) 상회하거나, 수리경사가 정류 상태에서 측정한 것 보다 크게(10배 이상) 상승할 것으로 예측될 경우 심각한 영향으로 판단하여야 함. 이 때 '정류 상태'는 자연적인 수계 순환에 의해 유발되는 수리경사를 크게 벗어나지 않는 상태를 말하므로 도심 지역 등에서 주변 지역 지하공간시설의 운영이나 다른 토공작업으로 인해 인위적인 지하수 흐름이 형성되어 있을 경우 반드시 누적영향을 고려하여야 함
- 투수성이 좋은 지반에서 심각한 지하수 영향을 나타내 주는 수리경사, 지하수위 변화의 예는 아래 표 참조

※ 일반적인 수평 수리경사는 평균 0.001, 수직 수리경사는 0.01-0.001의 범위에서 결정되며, 투수성이 좋은 지반일수록 수리경사가 낮음

〈표 4-3〉 투수성이 높은 지반에서의 심각한 지하수 영향

지반 특성	투수성	정류 상태 수리경사*	공사/운영 중 예측치	
			수리경사	지하수위
자갈, 균등한 입도의 모래로 이루어진 퇴적/매립층	매우 높음	0.001-0.005	0.25 이상	10m 간격의 관정에서의 수두의 차가 2.5m 이상일 때, 또는 한 관정에서의 수위 변화가 10m 이상
중간-가는 모래로 이루어진 퇴적/매립층	높음	0.005-0.01	0.1 이상	10m 간격의 관정에서의 수두의 차가 1m 이상일 때, 또는 한 관정에서의 수위 변화가 10m 이상

□ 싱크홀 취약 지반 굴착 시 저감방안

싱크홀 취약 지반에서의 굴착 시 다음과 같은 사항을 포함한 저감방안 수립

- 지하수 유출량을 최소화할 수 있는 배수공법과 방수재를 선정하고 임시/영구 지보구조물 설계 및 지반보강공법 선정에 반영. 굴착 전 채움 및 지반보강을 실시
- 지하수위 강하에 대한 조치 수준(action level)을 정립하여 정해진 수준 이상의 지하수위 강하가 일어날 경우를 대비한 주입(recharge) 관정설치를 비롯한 지하수위 강하 대응책 마련
- 공사 시 계측 계획에 싱크홀 취약 지반이 모두 포함되도록 하여야 하며, 공사 진행 시 싱크홀 유반 지반이 추가 발견되면 계측 계획을 확대
- 육안 관찰 또는 계측에 의해 지반의 과도한 응력 상실, 지표면의 침하 및 그로 인한 도로포장이나 인근 건축물에 균열이 유발되는 등 불안정성 징후가 관찰되면

공사를 중단하고 일정한 기간 동안 시추공 설치, 비파괴 검사 등을 통한 정밀 모니터링을 실시하여 원인을 파악하고 대책을 수립하여야 함

□ 지하수 유동-지반 변위 연계 사후모니터링

예측된 지반 함몰(싱크홀) 취약 지반의 변위와 응력 상태 변화를 계측 및 육안관찰 등의 방법으로 지속 관찰하여야 함

- 대상 시설물이 부분배수 조건으로 운영되어 지속적인 지하수 유출이 예상 될 경우, 운영 시 장기적인 지하수위 및 수리경사의 모니터링을 통해 싱크홀 유발을 사전에 감지할 수 있도록 체계적인 사후환경조사계획을 수립. 특히 대상 지반의 투수성이 좋을 경우 토사의 유출이 용이하므로 더욱 유의하여야 함
- 도시 철도와 같이 운영 시 장기 지하수 유출에 의한 싱크홀 발생 위험이 존재하는 시설물이 설치될 경우 유지관리계측의 범위에 싱크홀 취약 지반이 모두 포함되어야 하며 대표 단면에 대한 지표 및 지중침하 측정과 지하수위 측정을 병행
- 장기, 광역 지하수 모니터링 계획 수립 및 이행. 지하수 장기 모니터링 계획에는 싱크홀 취약 지역의 범위, 지하수위 측정 지점 및 선정 근거를 포함해야 하며 수평적, 수리적 경사를 측정할 수 있는 개수의 관측정을 확보하여야 함. 계절별 변화와 사업 시행의 영향을 구분할 수 있는 빈도로 측정하며, 유출 지하수량은 자동 측정하여 수리경사 변화와 함께 모니터링

4. 후속 연구 과제

가. 기술 분야

현재 싱크홀에 대해서는 미래창조과학부 산하 “Under Ground Safety 융합연구단”을 비롯하여 기초과학 및 기술 분야에서 다양한 연구가 진행되거나 기획되고 있다. 본 연구에서 제시된 싱크홀 취약성, 임계 수리경사, 장기/광역 지하수 모니터링

방안, 지하수 유동-지반 변위 연계 계측 등의 개념과 방안은 모두 구체적인 실증 연구를 통해 보완되고 현장에 적용할 수 있는 정량적인 기준으로 뒷받침되어야만 실효성을 가질 수 있다. 특히 일반적으로 측정되는 지반공학적, 수리지질학적 물성치들로부터 싱크홀 취약성을 도출해 낼 수 있는 연구가 필요하다. 또 싱크홀 취약성을 터널 방수 설계에 반영하도록 하기 위한 설계지침의 마련도 뒤따라야 한다.

싱크홀 취약 지반 중에서도 특히 심각한 문제를 일으킬 수 있는 것으로 보이는 매립지반의 경우, 우선적인 정보 수집이 필요할 것으로 보인다. 많은 대도시가 장기간에 걸쳐 공유수면매립을 통해 부지를 확보해왔으나 성장우선주의 하에서 매립토의 선정이나 시공과정에서 제대로 관리되었는지는 의문이다. 따라서 지금이라도 도심 매립지반의 특성에 대한 대대적인 정보 수집과 연구가 반드시 필요할 것으로 보인다. 특히 많은 매립지반에서 토양 및 지하수 오염의 개연성 또한 짐작할 수 있어 도심 매립지반의 조사는 환경적 측면에서 더욱 의미가 있을 것으로 보인다.

나. 정책 분야

최근 서울시는 지난 2005년 건축법 규제완화 차원에서 폐지했던 "굴착심의제도"를 10년 만에 부활시켜 깊이 10m 이상(또는 지하 2층 이상) 굴착공사에 대해 허가권자(건축위원회)의 사전심의를 받도록 건축조례를 개정한 바 있다. 또 국회는 "지하의 안전관리에 관한 특별법"을 제정하고 2016년부터 본격 시행을 앞두고 있다. 싱크홀 특별법에는 "지하영향평가"제도가 포함되므로, 환경영향평가서의 대상 사업 중 싱크홀을 유발할 수 있는 사업의 경우 거의 예외 없이 지하영향평가의 대상이 될 것으로 보인다. 발의된 지하안전관리에 관한 특별법은 ①중앙부처와 지자체가 지하안전관리 계획을 수립 시행토록하고 ②일정한 규모 이상의 지하 굴착공사를 수반하는 사업은 심의기구인 굴착심의위원회에 의한 승인절차를 거친 후 ③지하안전영향평가 및 사후지하안전영향조사를 실시하여 시설안전공단을 비롯한 관계기관의 검토를 받게 하며 ④지하정보통합체계를 구축하는 내용을 골자로 하고 있다. 비록 반복되는 싱크

홀의 발생으로 국민의 불안이 높아지고, 재산상 피해의 규모와 범위도 시장 내 해결의 범위를 넘어서는 등 시급한 대처의 필요성에 적절히 대응한 점도 있지만 이처럼 급속도로 도입된 제도는 실행 측면에서 자칫 여러 가지 문제점을 드러낼 수 있다. 무엇보다 아직 지하공간의 소유 및 관리에 대한 권리 및 규제 주체가 명확하지 않고 국토계획이나 환경계획 어느 쪽에서도 지하공간을 대상으로 하고 있지 않아 지하공간 이용에 대한 정책적 비전이 없는 상태이므로 장·단기적 목적이나 방향성 없이 규제력이 낭비될 가능성이 크다. 따라서 향후 추가 정책연구를 통해 환경영향평가제도와 지하영향평가제도 (관급공사 계약시 제출하도록 되어 있는) 위험도조사보고서(risk survey report), 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」 대상 시설물에 대한 안전관리계획서, 국민안전처 소관의 사전재해영향성평가 제도 등 지하공간의 이용 관련 각종 위험성(risk)평가제도를 총괄적으로 면밀히 검토하여 보고 각 제도의 수립 목적과 특징에 맞게 서로 중첩되지 않으며 효율적으로 운행될 수 있는 방안을 모색해 볼 필요가 있다. 나아가 환경적인 측면에서 지하공간의 가치를 정립하고, 그 지속 가능한 활용 방안을 마련하여 장기적인 관점에서 환경영향평가제도가 지향하는 지속 가능한 지하공간 활용 비전과 보전 방안을 제시하는 연구도 반드시 수반되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

<국문 자료>

강대홍. 2014. “함몰구멍 예방기술 및 특허출원동향”. 「대한토목학회소식지」 62(11)

국립재난안전연구원. 2015.7.16. “실증실험을 통한 대국민 재난안전 서비스(싱크홀) 시행”.

국토교통부. 2008. “국도건설공사 설계실무 요령”.

국회의원 강동원 보도자료. 2015.9.21. “수자원공사, 수돗물만 팔아먹고, 노후관 개량에는 관심없다”.

_____. 2009. “터널 유출수 종합대책”.

_____. 2015. “국토교통부 전문시방서-일반국도공사”.

김윤승. 2012.「도시 지하공간 조성에 따른 환경영향 관리 방향 연구」. 한국환경정책·평가연구원.

김태훈 외. 2006. “이암/셰일지역에서의 터널 설계 사례”「대한토목학회 정기학술대회」

동해이엔지. 2015. “지반 내 공동(싱크홀)탐지를 위한 조사” (자사 소개 자료)

박용부, 진규남, 박중배, 임재등. 2015.「LH 지반 빅데이터 활용 시스템 개발(I)」. LH 토지주택연구원.

부산발전연구원. 2002.「북극정책포럼: 부산의 공유수면 매립」.

손정목. 2003. “서울도시계획이야기 3”. 한울, 장경석. 2010에서 재인용

윤상웅, 최현미, 이진용. 2014. “국내 6개 대도시 지하수 수위 및 수질특성 비교”.「지질학회지」 50(4): 517-528.

이근병, 홍관석, 김광식. 2009. “지반환경 및 지하수 영향검토에 의한 터널설계”.「유신기술회보」.

이정호, 이영준, 이수재. 2005. “터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구”. 한국환경정책·평가연구원.

이현종 외. 2015. “도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발 기획”. 국토교통과학기술진흥원.

장경석. 2010. “한강변 모래밭과 아파트 단지”.「하천과 문화」 6(3)

정상용. 2010. “서울시 지하철 유출지하수에 의한 지하수 장해와 대책”. 「지질학회지」 46(1): 61-72.

중앙일보. 2005.5.21. “[서울만들기] 17. 공유수면 매립”.

_____. 2015.9.23. “서울 하수관로 30% 반세기 전 설치돼”.

한국환경정책·평가연구원 2015. 「환경영향평가서 검토 및 작성매뉴얼」

한겨레신문(2005.2.14). “한강 흐름과 잠실 변천사”.

현윤정, 김윤승, 안정이, 이주연. 2012. 「오염지하수 관리 강화를 위한 제도적 지원 방안」. 한국환경정책·평가연구원.

환경부 보도자료. 2015.4.8. “환경부, 국가안전대진단 ‘싱크홀’ 대응에 집중키로”.

해양수산부. 2007. “공유수면 매립지 실태조사 및 관리방안 연구”. 부처 협동. 2009. 「부산연안환경관리기본계획」에서 재인용

<영문 자료>

Sugiyama, T., Hagiwara, T., Nomoto, T., Nomoto, M., Ano, Y., Mair, R.J., Bolton, M.D, and Soga, K. 1999. “Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension-East London”. *Soils and Foundations*, 39(3): 99-112.

Harr, M.E. 1962. *Groundwater and Seepage*. Courier Corporation.

Perzlmaier, S., Muckenthaler, P., and Koelewijn, A.R. 2007. “Hydraulic Criteria for Internal Erosion in Cohesionless Soil”. *Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees - Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD.*

Terzaghi. 1977. “Earth Tunneling with Steel Supports”. Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown. OH, AASHTO. 2010. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements*에서 재인용

<온라인 자료>

환경부. http://www2.me.go.kr/web/185/me/c3/page3_12_10_1.jsp

Abstract

Environmental Impact Assessment and Prevention of Urban "Sinkholes"

An urban "sinkholes" indicates road failure over manmade cavities that consequently leaves large volume of ground lost(hence, appearing like the natural sinkholes caused by the karst process), is threatening the health and safety of citizens and causing irrecoverable damages to the environmentally valuable resources that underground space offers. This study considers on the environmental impacts caused by urban sinkholes and suggests key elements to be incorporated into the current environmental impact assessment(EIA) practice.

Urban sinkholes are stability problems that occur when multi-phase geomaterials lose their effective stresses in the solid skeleton due to seepage forces exerted by pore-fluid. Three conditions, (1)loosely structured soil or rock (2)cavities into which failed material can move (3)groundwater seepage at rates enough to cause failures, constitutes the formation of urban sinkholes. These conditions may most often be met around the leaking utility pipelines in the unsaturated layer(Type1) and partly waterproofed excavations beneath the saturated depths(Type2).

Many of the large-scale construction projects including planned unit developments and underground roadways are subject to the EIA regulation. Some recent EIA statements include assessments for the urban sinkholes on their hydrogeological impacts. However, they are often based on the results of structural analyses of detailed engineering designs, and hence largely underestimate the full scope of the possibilities and impacts of sinkholes.

Sinkhole vulnerability is a function of the extent of natural or artificial alluvial deposits and the degree of hydraulic gradient. Measures to improve EIA for sinkhole-vulnerable projects were identified, and

complied into a draft guideline that includes (1)pre-excavation verifications and protection of utility lines, (2)sinkhole vulnerability analysis, (3)mitigation measures of groundwater control and ground improvement, and (4)integrated monitoring plans for groundwater flow and ground settlements.

Additional studies on the policy implementation of geo-risks regulations including the recently passed bill on the underground use and safety.

Keywords : Sinkhole, Underground Development, Ground Settlement, Groundwater Flow, Environmental Assessment

연구진 약력

김윤승

미국 매사추세츠 공과대학교 지반환경공학 박사

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)

E-mail : kimys@kei.re.kr

주요 논문 및 보고서

「지역 오염부지 재이용 비전과 전략 I, II」(2012-2013, 한국환경정책·평가연구원)

「도시 지하공간 조성에 따른 환경영향 관리 방향 연구」(2012, 한국환경정책·평가연구원)

「토양분야 위해성평가 모델 개발/확대 연구」(2011-2012, 환경부)

| KEI Working Paper 목록 | 2013~2015

2015년
2015-01 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선방안 연구(김윤승)
2015-02 이슈스캐닝(Horizon Scanning)기법 활용을 통한 물환경관리 부문 이머징 이슈 발굴 연구(한혜진)
2015-03 기후경제통합-지역평가모형(Regional Integrated Assessment Model of Climate and the Economy) 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구(황인창)
2015-04 기후변화로 인한 고온환경 근로자의 작업역량 저하 추정과 공간적 군집 파악(김동현)
2015-05 환경영향평가 설명회·공청회 운영현황 분석(조공장)
2015-06 도로 및 철도 사업의 토양분야 환경영향평가 사례 연구(신경희)
2015-07 빅데이터를 활용한 환경보건서비스에 관한 기초연구(간순영, 윤성지)
2015-08 자원순환분야 지속가능발전목표(SDGs) 이행 기반 마련을 위한 기초연구(임혜숙)
2015-09 내륙습지에 대한 환경영향평가 개선방안 연구 I
– 환경부 전국내륙습지 조사 지침(2011)의 적용을 중심으로(방상원)
2015-10 자원순환성 평가제도 대상 확대를 위한 기초연구(이소라)
2015-11 환경소음 빅데이터의 정책 활용성 제고 방안(박영민)
2015-12 인과지도(Causal Loop)를 활용, 미래 물수급관리 정책 지원을 위한 기초연구(류재나)
2015-13 생물안전 법제 기초연구(홍현정)
2015-14 지방자치단체 환경영향평가 조례 운영현황 및 효율화 방안(선효성)
2015-15 개발사업의 비점오염 영향평가방법 개발을 위한 기초연구(이진희)
2015-16 환경영향평가제도에서의 생태계보전협력금 활용 개선방안(이상범)
2015-17 환경가치 중장기 연구수요 조사(곽소윤)
2015-18 세종특별자치시의 대기질 관리 기획 연구(심창섭)
2015-19 2015 국민환경의식조사 연구(곽소윤)

2014년
2014-01 국내 지하수의 자원·환경적 가치 확립을 위한 기초연구(현윤정)
2014-02 층간소음의 건강영향에 대한 기초연구(박영민)
2014-03 소음원 종류에 따른 3차원 소음예측모델 적용방안 마련(선효성)
2014-04 개발사업 입지 및 계획기준의 조사·분석에 관한 연구(주용준)
2014-05 기후변화 취약 근로 직종 파악을 위한 기초 연구(김동현)
2014-06 불확실성을 고려한 수질오염총량관리 안전율 산정 기초연구(정선희)
2014-07 기후변화 적응을 위한 공간계획 수립 시 도시/환경/방재분야 공간정보 연계·활용방안 연구(김태현)
2014-08 기후변화를 반영한 내수침수 리스크 평가 방법론 고찰(류재나)
2014-09 SEA 사후관리를 위한 해외 사례연구(조한나)

2014-10 농어촌 관련 정책 및 계획에서의 기후변화 적응 고려 방안(임영신)
2014-11 소음·진동 사후관리를 위한 기초연구(선효성)
2014-12 2014 국민환경의식조사 연구(이미숙)

2013년
2013-01 토양자원 유실 최소화를 위한 국내외 환경영향평가 사례 연구(신경희)
2013-02 PM-2.5 환경영향평가 방안 연구(이영수)
2013-03 지자체 적응대책 수립지원을 위한 기후변화 시나리오 자료 활용 방안(정휘철)
2013-04 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련(이명진)
2013-05 비전통가스 개발의 환경영향평가 가이드라인 마련을 위한 기초연구(조한나)
2013-06 모니터링을 통한 친환경 계획기법의 적절성 검증 기초연구 – 도시공간에서의 stepping stone을 중심으로(최희선)
2013-07 국가와 지자체의 기후변화 적응대책 실효성 제고를 위한 연계강화 방안(임영신)
2013-08 KEI 환경정보체계 발전방안(전성우)
2013-09 도시하천 유역의 환경평가 방법 마련을 위한 기초 연구(홍현정)
2013-10 제조업 환경비용의 국제비교(조일현)
2013-11 바이오가스의 신재생연료 의무혼합제도에 관한 해외사례 분석(조지혜)
2013-12 자연경관심의제도의 현황분석 및 제도 개선방안(주용준)
2013-13 층간소음 관리를 위한 기초연구(박영민)
2013-14 지속가능성 관점에서의 산업구조 변화 분석(이미숙)
2013-15 KEI 중국환경 중장기 연구계획 수립을 위한 기획연구(추장민)
2013-16 기후변화 적응관련 취약계층 지원대책 현황조사 및 분석 연구(신지영)
2013-17 한국 ODA사업의 환경평가 모니터링 현황과 해외사례 비교 연구 – 사업 종료 후 모니터링 사례를 중심으로(김태형)
2013-18 국내 전략환경평가의 사회·경제성 부문 기능 확립을 위한 기초연구(이상윤)
2013-19 환경영향평가시의 시설별 유해대기오염물질 배출량 산정을 위한 기초연구(주현수)
2013-20 지형장애물 분석을 통한 환경현황자료 작성방안(김지영)
2013-21 상수원보호구역 상·하류의 수변지역 관리방안 연구 – 잠실상수원 보호구역과 팔당상수원 보호구역 구간 중심으로(김태윤)
2013-22 2013 국민환경의식조사 연구(이미숙)

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지(www.kei.re.kr)에서 보실 수 있습니다.

KEI Working Paper 2015-01

싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선 방안 연구

한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

30147 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 B동(과학 · 인프라동)
Tel 044.415.7777 Fax 044.415.7799
http://www.kei.re.kr

93530
ISBN 978-89-8464-942-2