서울시 도로함몰 예방대책 및 관리방안

윤 진 성
서울특별시 품질시험소
도로포장연구센터 주무관
jsyoon94@seoul.go.kr

1. 머리말

2014년 7월, 국회 앞과 송파 지역 도로 등에서 크고 작은 도로함몰 이 발생하기 시작했다. 당시 언론은 이러한 현상을 외국의 대규모 '싱크홀' 사례와 비교하여 집중적으로 보도하였으며 연이어 "석촌지하차도에서 의 대형 도로함몰과 지하의 숨은 빈 공간이 발견(2014. 8. 5)"되면서 싱크홀이 사회적 이슈로 급부상하였다. 당시는 3개월 전 일어난 세월호 사건으로 '안전'이 국가적인 이슈로 떠 오르고 그 어느 때보다 관심이 고조되어 있었던 시기였다. 언제 터질지 모를 시한폭탄과도 같은 도로함몰은 도시의 새로운 재난으로 인식되기 시작했다. 이때까지만 해도 도로함몰과 같은 땅꺼짐에 대해서는 알려진 정보가 거의 없었고, 도로함몰 현상에 대해 처음 접근하는 단계에 있었던 시기인 만큼 서울에서의 도로함몰 발생은 우리나라에서 당연한 사회문제가 되었다.

그림 1.
도로함몰 발생 사례

송파구 가락로36길 연결관 노후 '14.7.5.

영등포구 국회대로 노후하수관 손상 '14.7.5.

석촌지하차도 공사중 시공미흡 '14.8.5.

용산구 용산역 앞 공사장 내부 토사유입 '15.2.20.

서울의 도로는 포장을 시작한지 84년이 되었으며 그 평균 나이도 40년이 훌쩍 넘어 노후화의 길로 진입하는 시대적 상황에 직면하였다. 겉으로 드러난 도로뿐만 아니라 드러나지 않은 도로 아래에서도 노후화의 문제가 크다. 상하수도 등 도시기반시설의 노후화가 도로함몰의 주원인으로 작용하고 있는 것이다. 30년 이상 노후화된 하수관로, 상수관로, 도로 시설물은 각각 48.7%, 7.3%, 29.6%에 이른다. 여기에 기후변화의 심화, 교통량의 증가 등 환경적인 변화가 가중되면서 포트홀 발생도 2010년 이후에 급속한 증가 추세를 보이며 새로운 도시재난의 징후로 부상하고 있다. 또한 발생한 도로함몰을 포함하는 도로침하는 2010년 436건, 2011년 572건, 2012년 691건, 2013년 850건, 2014년 779건, 2015년 734건, 2016년 597건으로 총 4,659건이 발생했다. 연평균 665건, 일평균 1.8건이다.

이에 따라 서울시에서는 시민 불안을 조속히 해소하고 도로함몰로 인해 발생하는 인적 · 물적 피해를 예방하기 위해서 '도로함몰 특별관리대책(2014.8.28.)'을 수립하여 시행하였다. 분야별 주요 대책은 아래와 같다.

① 도로함몰 사고가 가장 많이 발생하고 있는 노후하수관 관리강화대책

② 함몰되기 직전의 숨은 동공을 찾아내는 탐사활동 강화대책

③ 굴착공사장 및 지하수 관리강화대책

④ 도로함몰 관리에 대한 인적역량 강화대책

특히 탐사활동 강화대책은 함몰사고 개연성이 높은 주요 간선도로를 대상으로 노면하부 동공탐사를 정기적으로 실시하여 도로함몰의 원인을 사전에 찾아 치유하고 땅 속의 빈 공간을 밀실하게 채워서 도로함몰을 방지하는 대책이다.

〈용어정리〉

- 침하(depression) : 지반이나 포장면이 아래로 처지는 현상을 광의적으로 표현
- 도로함몰(cave-in) : 서울과 같은 도시 지역에서 지하시설물 노후화나 굴착복구 공사 등으로 인하여 땅 속에 생긴 빈 공간(동공)이 그 상부 지반의 지지력을 잃고 꺼지는 지반 붕괴 현상

• 동공(cavity) : 함몰 직전의 땅 속에 숨은 빈 공간, 서울 지역에서는 주로 노후하수관 손상부로 흙이 유실되거나 복구 당시 땅 속에 매립된 관로, 불량 재료 사이에 빈 공간을 제대로 메우지 못하면서 생긴 현상

• 싱크홀(sinkhole) : 지반의 화학적인 반응. 즉 석회암질, 화산재질 지반에서 빗물이나 지하수로 인해 녹거나 침식되면서 지반이 자연적으로 붕괴되는 현상. 이와 같은 지역에서 싱크홀이라고 표현

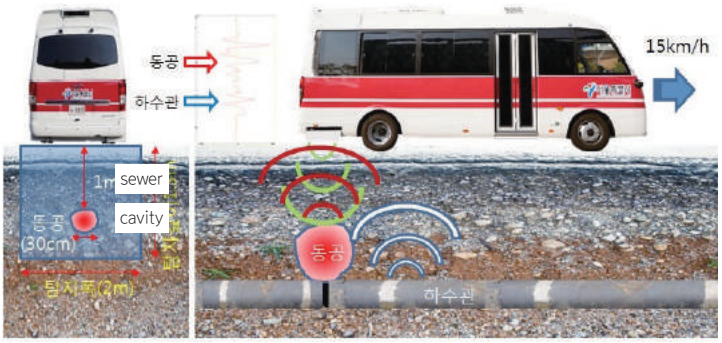
• 포트홀(pot hole) : 아스팔트 포장도로에서 포장 재료가 깨지거나 패이는 현상

2. 도로함몰 예방을 위한 동공탐사

도로함몰이 발생하기 전 땅속의 빈 공간(동공, cavity)를 사전에 탐지하여 굴착복구를 실시하고 있다. 사전탐지활동은 GPR(Ground Penetrating Radar, 지반투과레이다) 장비에 의한 비파괴조사를 통해 이루어진다. 도로하부 빈공간을 파악하는 물리탐사방법으로는 일반적으로 전기비저항탐사, 표면파탐사, GPR탐사를 수행하지만, 전기비저항탐사 및 표면파탐사는 차량이 지속적으로 이동하는 도로상에서 조사하기에는 제약이 있지만, GPR탐사는 이동과 동시에 신속하게 조사를 수행할 수 있다. GPR탐사법이 조사심도가 매우 낮으며 전기적 잡음에 취약하다는 단점이 있으나 상기 3개의 탐사 중 가장 정밀도가 높다.

동공탐사는 지반을 손상시키지 않는 비파괴 방법으로 신속하게 광범위 한 도로를 대상으로 실시할 필요가 있다. 광활한 도로면적을 신속하게 조사하기 위해서는 탐사속도가 높은 기동성을 가진 탐사장비여야 목적 하는 기간 내에 목적하는 대상(동공)을 발견하여 함몰 사고를 방지할 수 있다. 신속한 탐사속도나 개발된 장비의 사용성 등을 고려할 때 아직 까지는 도로하부의 동공탐사 장비로 적용할 수 있는 실질적인 기술은 GPR 탐사가 유일하다고 볼 수 있다. 서울시는 GPR장비를 짧은 시간에 서울시 전체 도로를 탐사할 수 있도록 하는 서울형 동공탐사 장비를 개발한다는 계획을 수립하였다. 그 결과 약 1년(2014년 12월 ~ 2015년 12월)에 걸쳐 차량 교통흐름에 방해되지 않고 광폭(1차로 전체)탐사를 수행하는 차량형 동공탐사 장비를 자체 개발하였다.

그림 2.
도로동공 탐사장비 :
차량형 GPR



도로동공탐사는 1차 탐사와 2차 탐사로 이루어진다. 1차 탐사는 차량에 설치한 GPR장비에 의해 도로하부를 탐지(scanning)하여 동공으로 의심되는 지점을 파악한다. 2차 탐사에서는 1차 탐사에서 파악한 동공의심지점에 대하여 천공을 실시하고 동공의 존재유무 및 규모를 파악하게 된다.

그림 3.
도로동공 탐사방법

동공탐지
1차 탐사

의심동공 중심파악

천공-동공유무파악
2차 탐사

동공규모 파악

3. 서울시 동공관리 기준

GPR탐사로 발견된 동공의 상부 지반 두께(아스팔트 포함)는 최소 10㎝ 에서 최대 100㎝까지 형성되어 있으며, 도로 포장층(두께 80cm) 이내에 위치하는 동공이 전체 발견된 동공의 81% 이상을 차지하고 있다. 탐지된 동공은 장기간에 걸쳐 생긴 것으로 당장의 함몰 위험은 없으나, 서울시는 보수 또는 관리 우선순위 등을 고려하여 관리 등급을 설정하고 그에 따라 복구하는 관리기준을 마련했다. 발견된 동공은 가장 위험한 순으로 긴급복구, 우선복구, 일반복구, 관찰 대상의 4가지로 구분하여 관리한다. 동공탐사기술 도입 초기에는 일본으로부터 관련 기술을 습득하는 과정에서 '일본의 간선도로 기준' 으로 설정된 등급을 그대로 사용했으나 탐사 장비로 발견한 동공을 굴착하여 복구하는 과정에서 서울 지역 동공이 일본과는 다른 특징이 있다는 것을 확인하였다. 즉 대부분의 동공이 아스팔트콘크리트(AC) 포장 직하부까지 도달해 있고, 동공 파괴실험 결과 AC포장 두께에

따라 붕괴되는 지지력이 각각 다르게 나타나는 것을 알게 되었다. 2016년에 실시한 동공파괴실험, 동공투수실험 등을 통해 서울형 동공관리등급을 마련했다.

그림 4.
서울시 동공관리 등급 개념도

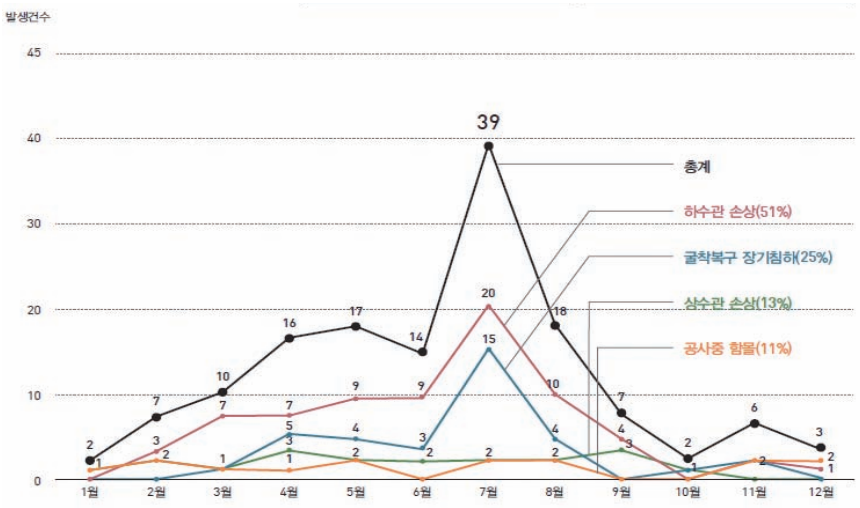
표 1.
서울시 동공관리등급 분류 및 복구기준

등급	분류기준	복구기준
긴급복구	AC포장 두께 10cm 이내인 동공 중 동공 토피 20cm 이내인 동공, 포장 균열 깊이가 50% 이상 진 행된 모든 동공	탐사 중 동공 상태 확인 즉시 복구(4시간 내)
우선복구	AC포장 두께 10~20cm 이내인 동공 중 동공 토피 10~30cm 이내인 동공, 동공 최소 폭 1.5m 이상인 모든 동공, 포장 균열 깊이가 10~50% 진행된 모든 동공	신속한 조치계획 수립 및 복구
일반복구	긴급/우선/관찰 등급을 제외한 모든 동공	우기철 이전까지 복구
관찰대상	AC포장 두께 30cm 이상인 동공 또는 동공 토피 40cm 이상인 동공 중에서 동공 평균 폭 80cm 미만인 동공	지속 관찰 후 반복탐사 시작 연도 우기철 이전까지

4. 동공원인 및 발생 매커니즘

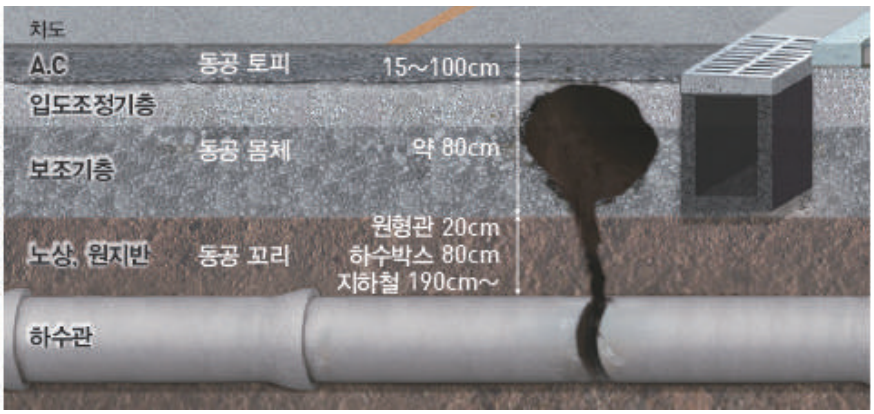
도로함몰 관리대책이 수립된 2014년 8월 이후부터 2016년 12월까지 서울시에서 발생한 총 148건의 도로함몰 발생 특성을 살펴보면, 하수관 손상이 51%를 차지하며, 굴착복구 장기침하 25%, 상수관 손상 13%, 공사 중 함몰 11%로 나타났다. 여기에 강수량과 온도 변화도 도로함몰에 영향을 미쳐서 우기(6~8월) 에 53%, 해빙기(3~5월)에 29%, 동절기(12~2월)에 8%가 일어나는 특성을 보인다. 하수관 손상과 굴착복구 장기침하는 우기에 집중발생 (75%)하며, 상수관 손상과 공사 중 함몰은 25%로 연중

그림 5.
월별 서울시 도로함몰 발생 특성 분석
(2014년 8월 ~ 2016년 12월 총 148건 대상)



동공탐사에 의해 발견된 동공의 일반적인 구조를 살펴보면, 동공을 지지 하는 상부의 토피, 대부분의 공간을 차지하는 몸체, 흙의 유실 경로가 되는 꼬리의 세 부분으로 구성되어 있다. 토사가 유실되면 동공이 확대되고 토피 지지력이 점점 약해져서 한계에 도달하는 순간 도로함몰이 발생한다.

그림 6.
도로동공의 일반적인 구조



도로함몰의 메커니즘은 흙이 어떻게 유실되어 땅 속에 빈 공간이 생기는 것인지 밝히는 것이다. 서울시 도로의 동공을 직접 탐사한 결과 흙이 어떤 원인으로 인해 유실되는지 그 메커니즘을 살펴볼 수 있었다. 탐사결과 나타난 흙의 유실경로는 지하 매설물 주변에서 유실되는 세 가지 유형(하수관 유입형, 불량 매립재 공간 유입형, 매설관 하부 공간 유입형)과 공사장 내부로 유실되는 두 가지 유형(굴착공사장 유입형, 터널공사장 유입형)의 총 다섯 가지로 구분된다.

그림 7.
도로함몰 매커니즘

하수관 불량 매립재 공간 매설관 하부 공간 굴착공사장 터널공사장

지하 매설물 주변 유실 유형 공사장 내부 유실

5. 동공자료 관리 및 대응방안

발견된 동공은 자료를 정리하여 보고서작성 및 현황정리 후 구축된 데이터베이스에 업데이트하게 된다. 이와 동시에 동공관리등급에 의해 복구우선순위를 선정하여 원인분석 및 복구를 실시한다. 복구 후 파악된 원인을 포함한 복구보고서를 상기 데이터베이스에 업데이트 하게 되어 향후 도로관리를 위한 자료로 활용하게 된다.

동공자료에 근거한 도로함몰 관리시스템은 도로함몰 관리시스템은 서울시가 2014년부터 자체 탐사장비와 민간용역 등을 통해 발견한 서울 전역의 동공 정보와 그동안 발생된 도로함몰 · 침하 정보 및 조치 결과 등 빅데이터를 GIS지도로 구축 · 관리하는 시스템이다. 지하매 설물(21종) 노후화 정보와 굴착복구 정보 같은 관련 정보도 연계한다. 이를 통해 도로함몰을 사전에 예측, 분석하여 도로를 관리 하는 것이다.

또한 차량 안전사고의 위험성이 매우 큰 도로함몰이 신고되면, 도로함몰 신고접수자(도로관리과, 사업소, 도로과, 치수과, 주민센터)는 도로함몰 담당자(팀장, 과장, 상위부서 담당 등)를 카톡방에 초대한 뒤 접수내용과 위치를 알린다. 도로함몰 접수자로부터 초대받은 도로함몰 담당자(사업소, 도로과, 치수과, 공사부서)는 즉시 직계간부(구청, 본청 모두 국장까지)와 관련 담당자를 초대, 지시에 따라 현장에 출동하여 도로함몰 발생 원인을 굴착조사하고 복구조치한 뒤 조치결과를 카카오톡 채팅창에 올린 후 상황을 종료한다.

그림 8.
도로함몰 발생 시
대응체계

그림 9.
도로동공 굴착복구

포장커팅 동공확인 원인분석 복구

6. 맺음말

동공탐사 등 실질적인 도로함몰 예방업무를 국내에서 최초로 시행된 만큼 초기에는 일본 도쿄도의 탐사법을 벤치마킹하여 장비의 국산화 도입 및 기술전파를 실시하였다. 또한 도로동공 원인 및 발생 매커니즘을 규명하기 위하여 2014년 12월 일본업체에 의한 무상탐사를 추진하여 발견한 동공을 굴착하여 주요 원인을 파악하였다. 그 결과 직접 제작한 동공탐사 장비를 통해 국내 최초로 동공을 찾는 수준까지 탐사기술을 확보하였으며, 이와 동시에 동공관리기준 수립을 위하여 동공파괴 실험과 지지력 평가를 실시하여 서울시 자체 동공관리기준을 수립하였다. 서울시 자체보유 탐사장비와 국내 민간 업체 그리고 일본업체의 기술협력으로 발견한 동공은 2016년까지 572개에 달하며 이와 같은 동공 발견 조치로 서울시는 장래에 발생할 도로함몰(2015년 56건, 2016년 85건 발생)의 87%를 사전에 예방하게 되었고, 동공 발생 및 탐사기술 개발에 대한 연구 기반을 마련하는 데도 기여하였다. 그러나 현재 GPR탐사 차량운행에 의한 사전예방 활동을 수행하므로 시간상의 제약이 발생하고, 따라서 실시간 모니터링 탐지기술 개발이 이루어지면, 더욱 효율적인 도로관리가 이루어질 것으로 판단된다. 또한 굴착공사장 및 터널공사장과 같은 깊은 곳 및 철근콘크리트와 같은 구조물 하부에서 발생하는 동공은 GPR에 의한 사전탐지가 어렵다. 따라서 현재의 한계점을 극복하는 기술의 실용화가 이루어진다면 더욱 안전한 도로환경을 확보할 수 있을 것이다.