

기술리포트

# TECHNICAL EXCELLENCE

September 2020 Vol. 5

## 투수성포장의 성능 유지를 위한 3차원 영상분석 기법

- 01 기후 재난을 가중시키는 불투수면,  
저감대책 시급
- 02 불투수면 저감을 위한 투수성포장의 적용,  
그러나 공극막힘으로 기능 상실
- 03 3차원 영상분석 기법을 활용한  
투수성포장의 성능 관리

이진욱  
오한진

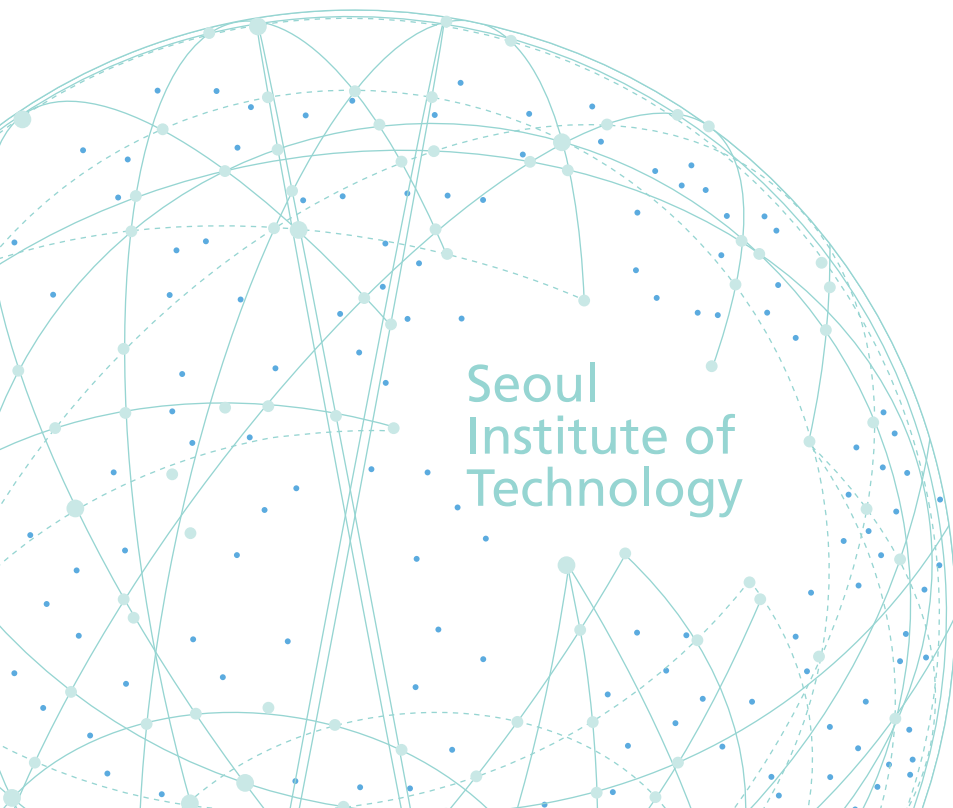
Seoul  
Institute of  
Technology

## 투수성포장의 성능 유지를 위한 3차원 영상분석 기법

01 기후 재난을 가중시키는 불투수면, 저감대책 시급

02 불투수면 저감을 위한 투수성포장의 적용, 그러나 공극막힘으로 기능 상실

03 3차원 영상분석 기법을 활용한 투수성포장의 성능 관리



이진욱 수석연구원    오한진 수석연구원  
wook@sit.re.kr      ohj@sit.re.kr

## 투수성포장의 성능 유지를 위한 3차원 영상분석 기법

투수성포장은 내부 공극을 통해 도로 하부 지표면에 빗물의 침투량을 증가시켜 유출량을 저감하는 빗물침투시설이다. 이러한 투수성포장 중 투수블록포장은 보도를 투수면으로 전환하여 불투수로 인해 발생하는 다양한 문제를 줄이는 효과로 주목받고 있다. 그러나 시공 후 공극이 막혀 투수능력이 저하되어 투수지속성 유지를 위한 적절한 청소 방법이 필요하다. 청소 효과를 분석하기 위해서 투수능력에 영향을 미치는 단면구조, 공극률과 같은 변화 원인을 파악할 수 있어야 하지만, KS F 4419와 같은 기존의 투수성 시험만으로 원인을 파악하는 것은 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 공극막힘 메커니즘을 규명하여 투수성포장의 성능을 극대화할 수 있는 3차원 영상분석 기법을 소개하고자 한다.

### II 기후 재난을 가중시키는 불투수면, 저감대책 시급

최근 들어 기후변화로 인한 재난이 심상치 않다. 2018년 최악의 폭염, 2019년 최다 태풍, 2020년 최장 장마 등 이상 기후가 매년 반복되어 막대한 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 이상 기후의 피해를 더욱 크게 하는 것이 불투수면이다. 불투수면은 자연계 물순환을 왜곡하고 폭염 현상을 심화하는 등 도시의 다양한 환경문제를 발생시킨다. 2013년 환경부 조사에서 서울시의 불투수율은 54.4%로써 전국 지자체 2위로 집계되었으며, 시가지역은 더욱 심각한 평균 86%로 나타났다. 도시의 지속가능성 확보를 위한 서울시 불투수면 저감 방안 마련이 시급하다.

### II 불투수면 저감을 위한 투수성포장의 적용, 그러나 공극막힘으로 기능 상실

2019년 통계에 따르면 대표적 불투수 시설인 도로는 서울시 전체 면적의 14.2%를 차지하고 있다. 하지만, 투수성포장 적용 시 도로는 투수가 가능해져 불투수율을 저감한다. 서울시는 물순환 회복을 위해 2014년 조례를 제정하고 빗물관리시설 설치를 의무화하여 투수성포장 적용이 확대되었다. 그러나, 공용 중 공극막힘으로 인해 투수능력이 저하되고 불투수 되는 문제점이 나타나 이를 해결할 수 있는 관리 방법이 필요하게 되었다.

### II 3차원 영상분석 기법을 활용한 투수성포장의 성능 관리

투수성포장은 성능 유지를 위해 청소를 통한 관리가 필수적이다. 청소 효과를 정확히 알기 위해서 청소로 인해 투수능력이 변화하는 원인(단면구조, 유효 공극의 변화 등)을 파악할 수 있어야 하지만, KS F 4419와 같은 기존의 투수성 시험만으로 그 원인을 파악하는 것은 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 내부의 다양한 정보를 시각화하여 여러 관점에서 투수성포장의 청소 효과를 분석할 수 있는 3차원 영상분석 기법의 활용방안을 제시하였다.

※ 이 기술리포트는 연구보고서 「투수포장의 투수지속성 유지관리 방안」을 근거로 작성되었습니다.

※ 이 기술리포트의 내용은 서울특별시 정책과 다를 수 있습니다.

# 01

## 기후 재난을 가중시키는 불투수면, 저감대책 시급

일상이 된 이상한 날씨,  
 기후 재난으로 이어져

최근 들어 기후변화로 인한 이상 기후 재난이 심상치 않다. 2018년 서울의 여름은 기상관측 시스템 도입 이후 111년 만에 최악의 폭염을 기록했으며, 2019년엔 최다 태풍이 몰려왔고, 2020년 장마는 54일째 이어져 기존 최장 장마 기록(2013년, 49일)을 깨트리는 등 이상 기후가 매년 반복되고 있다.

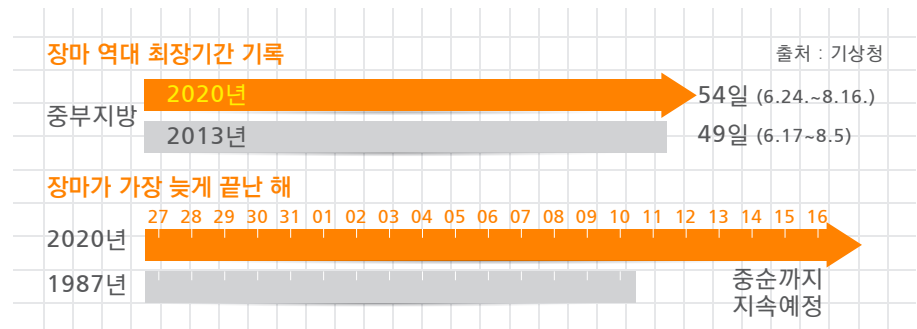


그림 1 | 2020년 최장 장마 기록

이상 기후로 인해 대규모 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 2018년 폭염으로 인해 온열질환자 4,526명이 발생하였고 이 중 48명이 사망한 것으로 집계되었다. 또한, 올해 최장기간 장마 동안 전국적으로 사망자 36명, 실종자 6명, 부상자 8명 등 50명의 인명피해와 8,000명의 이재민이 발생했다. 최근 현대경제연구원에서 발간한 보고서에 따르면 2010~2019년 동안 태풍과 호우로 인해 연평균 약 3,139억 원의 피해가 발생했으며, 올해는 집중 강우를 동반한 최장 장마로 인한 경제적 피해가 최대 1조 원에 이를 것이라고 분석했다.



그림 2 | 최근 3년간 이상 기후 피해 현황

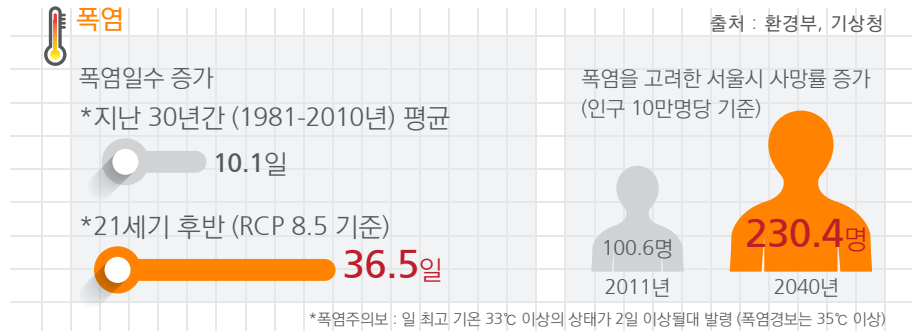


그림 3 | 기후변화 예상 결과

문제는 이상 기후가 일시적 현상이 아니라 이제 시작이고 점점 더 심각해질 것이라는 사실이다. 최근 기상청과 환경부가 공동 발간한 ‘한국 기후변화 평가보고서 2020’에 따르면 여름 집중호우는 1990년대 후반 이후 증가세가 뚜렷하며, 21세기 후반 폭염일수는 3.5배 증가할 것으로 예측하는 등 이상 기후 현상이 계속될 것으로 전망했다.

**기후 재난을 가중  
 시키는 불투수면,  
 저감대책 시급**

이러한 이상 기후의 피해를 더욱 크게 하는 주범은 도시의 불투수면이다. 불투수면의 증가는 도시 홍수의 발생 가능성을 높이고 폭염 현상을 심화시켜 이상 기후로 인한 피해를 더 크게 한다. 또한, 도시의 자연계 물순환을 왜곡해 수질 악화, 하천 건천화 등의 다양한 환경문제의 원인이 되고 있다.

2013년 환경부 조사에 따르면 서울시의 불투수율은 54.4%로써 전국 지자체 2위로 집계되었으며, 시가지역은 더욱 심각한 평균 86%로 나타났다. 도시의 지속가능성을 확보하기 위해 불투수면 저감을 통한 서울시의 물순환 구조 개선이 시급한 이유이다.

표 1 | 2013년 불투수율 지자체 순위

No.	지역	불투수면 (%)
1	경기 부천시	61.71
2	서울특별시	54.37
3	경기 수원시	49.28
4	전남 목포시	46.30
5	경기 광명시	43.85

출처: 환경부



그림 4 | 도시화에 따른 물순환계 영향

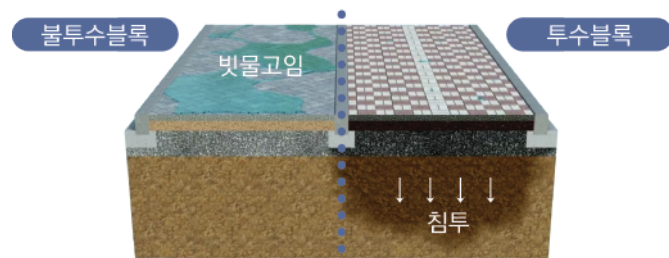
## 불투수면 저감을 위한 투수성포장의 적용, 그러나 공극막힘으로 기능 상실

“도로”  
대표적 불투수 시설,  
서울시의 14.2% 차지

“투수성포장”  
도로를 투수면으로  
전환하는 기능성 포장

도시의 불투수율이 높은 이유는 도시가 발전하는 과정에서 토지이용 형태의 변화로 불투수면이 증가하기 때문이다. 도로는 도시의 대표적 인프라 시설인 동시에 불투수 시설이다. 2019년 서울시 면적은 605.24km<sup>2</sup>로 조사되었으며 이 중 도로의 면적은 85.91km<sup>2</sup>로써 서울시 전체 면적의 14.2%를 차지하고 있다. 과거 도로는 주기적인 물류 운송을 담당하기 위한 내구성 확보에만 주안점을 두었지만, 현재는 도시의 다양한 환경에 적용할 수 있는 여러 기능성 도로가 개발되었다. 기능성 포장 공법 중 도로를 투수가 가능하게 전환하는 공법이 투수성포장이다.

투수성포장은 공극을 통해 우수를 도로 하부로 침투시켜 빗물의 유출을 줄이는 빗물침투시설의 하나이다. 투수성포장의 종류로는 배수성 아스팔트, 투수성 아스팔트, 저소음 아스팔트, 투수 콘크리트, 투수블록 등이 있다.



출처 : 환경부, 토지주택연구원

그림 5 | 일반 포장(좌), 투수성 포장(우) 비교

불투수율 저감을 위한  
투수성포장 적용

서울시는 도시의 물순환 구조 개선을 위하여 2013년 “건강한 물순환 도시 조성 종합계획”을 수립하였다. 이 중 도로의 불투수면 저감을 위하여 보도 노후구간 정비 및 신규 포장 시 투수성포장을 우선 적용하도록 하였으며, 폭 8m 이하 차량통행 이면도로도 단계적으로 투수성포장을 추진하도록 하였다. 2014년에는 “서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본조례”를 통해 폭 8m 이하 도로(차도 또는 보도)의 신설 및 전폭보수 시 빗물관리시설을 설치하도록 하여 서울시 보도에 투수블록포장이 본격적으로 적용되었다. 또한 투수성능 지속성을 확보하기 2년마다 현장 침투능시험을 시행하고 투수능력이 유지되도록 관리하게 하였다.

그러나  
 막혀서 다시  
 불투수면으로 되는  
 투수성포장

투수성포장은 도시의 불투수율을 개선해줄 방법으로 기대를 모았다. 그러나, 공용 중 보행자와 차량의 통행, 미세먼지, 가로수 낙엽, 이물질 등이 침투하여 공극이 막히고 투수능이 저하되어 다시 불투수로 되는 문제점이 나타났다. 투수블록포장 또한 예외는 아니다. 2017년 서울시 자체 조사 결과 시공 1년 후 투수능은 약 45% 수준으로 저하되고, 공용기간 3년 이후부터 투수능 기준인 0.1mm/sec 이상 적합률이 75% 수준으로 저하되는 것으로 조사되었다.

그림 6은 2016년 서울시 가락동에 설치한 투수블록포장의 투수능을 모니터링한 결과이다. 시공 초기 투수계수는 1.58 mm/sec로써 서울시 기준인 0.1 mm/sec를 크게 상회했지만 시공 5개월 후와 10개월 후 측정된 투수계수로 추정한 결과 시공 3.5년 후에는 투수능 기준을 불만족하는 것으로 나타났다.

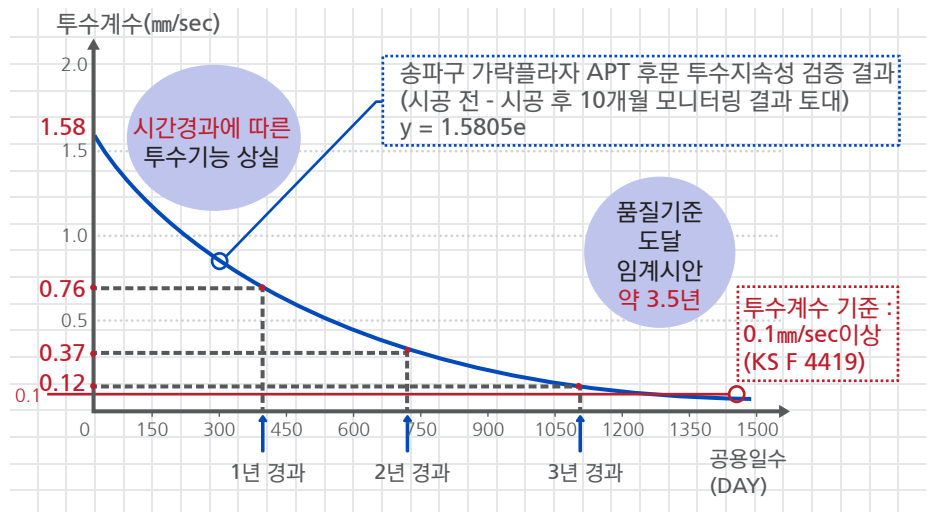


그림 6 | 투수블록 포장 투수성능 관측 사례 (가락동 투수성포장 시험시공구간)

투수지속성 유지를 위한  
 관리 방법 필요

투수블록 포장의 투수 성능을 유지하기 위해서는 막힌 공극을 뚫어 투수 성능을 회복할 수 있는 관리 방법(청소 방법 및 주기) 마련이 필요하게 되었다.

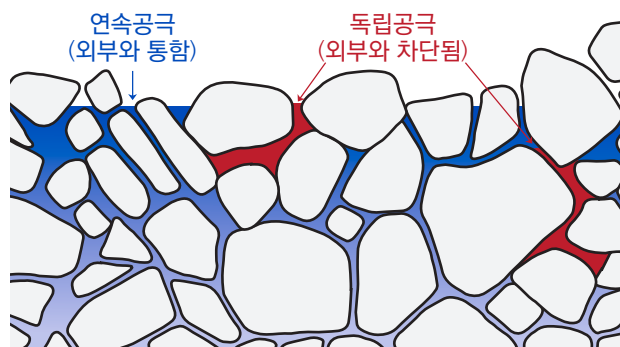


그림 7 | 공극막힘 청소 전(좌), 청소 후(우)

# 03

## 투수포장의 회복을 위한 “속보이는 방법” (3차원 영상분석 기법) 활용 방안

투수블록포장  
 관리 방법  
 개선을 위한  
 시범사업 진행

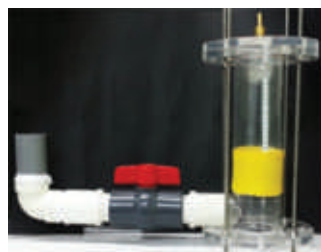
서울시는 2018년 마장로 일대에 투수블록의 관리방법 개선을 위한 시범사업을 진행하였다. 이 시범사업의 목적은 시간 경과에 따른 투수성능 변화를 측정하는 동시에 청소로 인한 성능회복 효과를 분석하고자 하였다. 이를 위해 기존 고압 살수 방식의 청소 장비를 고압 살수 및 진공 흡입 방식으로 개선하였고, 시공 후 6개월과 12개월이 지난 시점에 청소 전과 후의 투수블록 성능을 비교하여 효과를 분석하였다.



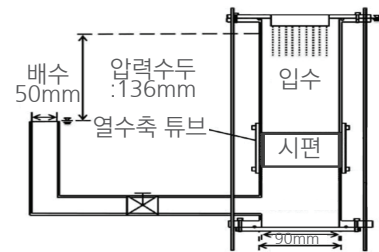
그림 8 | 투수포장 공극회복 장비(고압 살수 및 진공 흡입 방식)

투수성능 변화 원인  
 파악을 위한 3차원  
 영상분석 방법 도입

기존의 투수성능 확인 방법은 그림 7과 같이 정수위 투수시험 장비에 시편을 거치 후 일정 시간 동안 투수 되는 물의 양을 측정하여 도출된 투수계수의 크기 및 변화를 통해 성능을 판별해 왔다. 하지만 투수성포장은 공극의 양과 크기, 연결도 등 단면의 구조적 특성이 투수성능에 많은 영향을 미치지만, KS F 4419와 같은 기존의 투수성 시험만으로 내부구조를 파악하는 것은 불가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 3차원 영상분석 기법을 도입하여 청소 전후의 투수블록 내부 공극 변화를 관찰하고, 청소에 따른 투수성능 회복 효과를 분석하였다.



(a) 정수위 투수시험 장비 사진



(b) 정수위 투수시험 장비 구성

그림 9 | 투수포장 공극회복 장비(고압 살수 및 진공 흡입방식)

**“3차원 영상분석”  
 내부구조를 3차원 기반  
 시각화, 정보화 가능**

영상분석의 목적은 주어진 영상으로부터 정보를 추출하거나, 이를 시각화하는 것이며, 주로 의료 분야에서 많이 활용돼왔다. 도로 분야도 영상분석 기법을 활용한 연구가 수행되었지만, 장비와 분석 방법의 한계로 인해 2차원 영상만을 분석하거나 2차원 단면 영상을 인위적으로 연결하여 3차원 분석을 수행해 왔다. 현재는 촬영 장비의 발전으로 3차원 영상 촬영이 가능해졌으며, 빅데이터 분석의 발전으로 영상을 통해 더 많은 정보를 취득할 수 있게 되었다.

3차원 영상분석을 위해서 X-ray computed tomography(CT) 촬영을 통한 영상정보 획득이 필요하며, 원리를 개략적으로 설명하면 다음과 같다.

- 그림 10과 같이 X선이 재료를 투과하는 동안 감쇠된 에너지의 크기를 CCD Panel에 기록하고 그 관측값을 역산하여 재료의 HU (Hounsfield Unit) 값을 도출
- ※ Hounsfield Unit : X선이 투과할 때 밀도에 의해 흡수된 정도를 상대적으로 표현한 것(물 : 0, 공기 : -1000, 뼈 : +1000)



그림 10 | X-ray CT 촬영과정

- 도로포장 재료의 HU 값은 대체로 밀도에 지배되며, 그림 11과 같이 HU 값이 작을수록 저밀도로서 검게 표현되며 검은색은 공극에 해당하며, HU 값이 클수록 고밀도로서 하얗게 표현되며 골재에 해당함

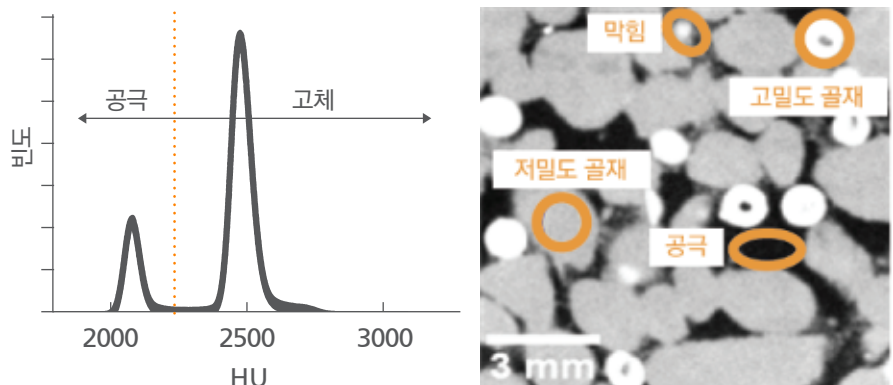


그림 11 | X-ray CT 히스토그램(좌측)과 X-ray CT 영상(우측)

다공성 재료인 투수블록의 경우 그림 12와 같은 X-ray CT 이미지를 획득할 수 있으며, 밝기 차이로부터 시편 내부의 공극과 고체의 구분이 가능하다.

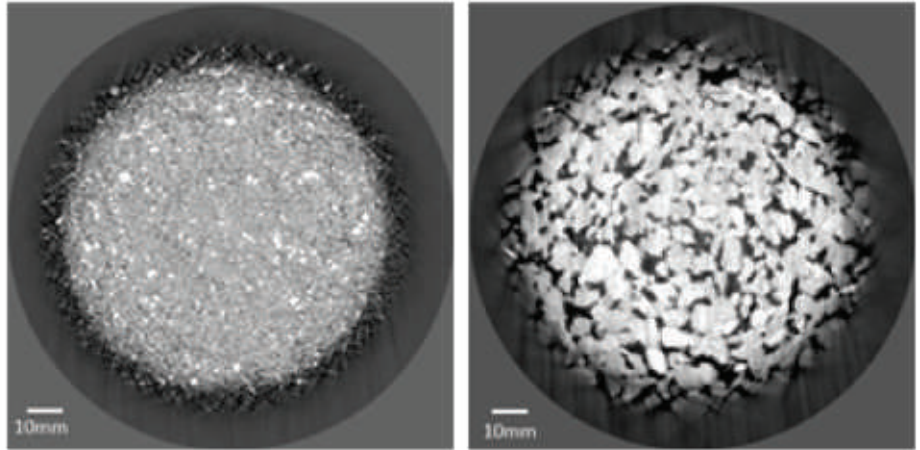
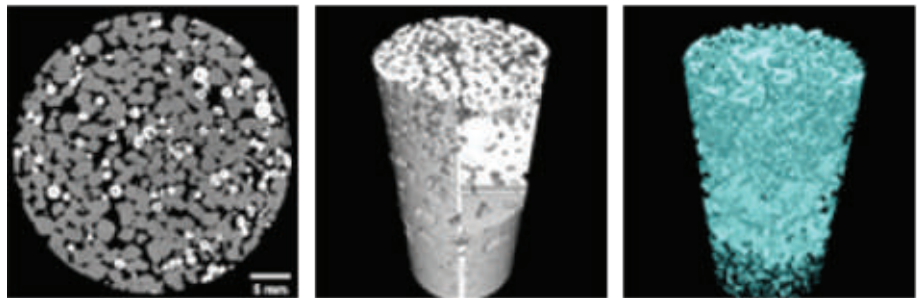


그림 12 | 투수성 보도블록의 X-ray CT 이미지(왼쪽: 상부, 오른쪽: 하부)

### 자유자재로 분석 가능한 3차원 영상분석

3차원 영상분석은 한 번의 촬영을 통해 시편 전체의 3차원 영상정보 획득이 가능하다. 그림 13과 같이 취득한 영상을 활용하여 X, Y, Z 축 어떠한 방향 및 각도에서도 자유롭게 수직 방향의 2차원 단면 영상을 추출할 수 있다. 영상 분석을 통해 고체 또는 공극만을 시각화하는 것이 가능하고 이를 수치화하여 분석함으로써 다양한 해석이 가능하다.



(a) 2차원 영상      (b) 고체의 3차원 영상      (c) 공극의 3차원 영상

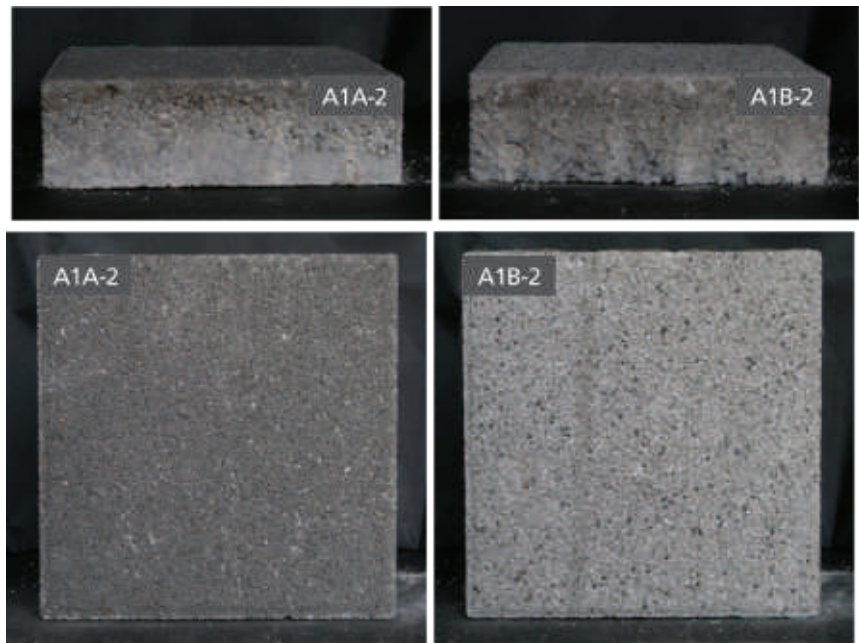
그림 13 | 3차원 X-ray CT 영상

서울시는 투수성포장의 청소 효과를 분석하기 위한 시범사업을 수행하였으며, 3차원 영상분석 기반으로한 효과 분석을 통해 그 활용성을 제시하고자 한다. 본 연구의 시험 개요는 다음과 같다.

- 목 적 : 투수블록 청소 전·후 투수성능 변화 비교를 통한 효과 분석
- 적용재료 : 시범사업 구간 적용 4개사 제품(A형, B형, C형, D형)
- 시험조건 : 원재료 1회, 시공 6개월 후 청소 전, 시공 6개월 후 청소 후
- 시험방법 : 정수위 투수실험(KS F 4419), 3차원 영상분석

**영상분석 활용법 ①**  
**육안으로 불가능한**  
**단면구조 확인**

그림 14와 같이 투수블록은 겉으로는 유사한 시편으로 보이며 눈으로는 내부의 구조 및 변화를 확인할 수 없다. 그러나 영상분석 방법을 활용하면 그림 15와 같이 내부 단면구조, 골재 크기, 공극 분포의 확인이 가능하여 육안으로는 구분할 수 없는 A형 시편과 B형 시편의 단면구조 차이도 확인이 가능하다.



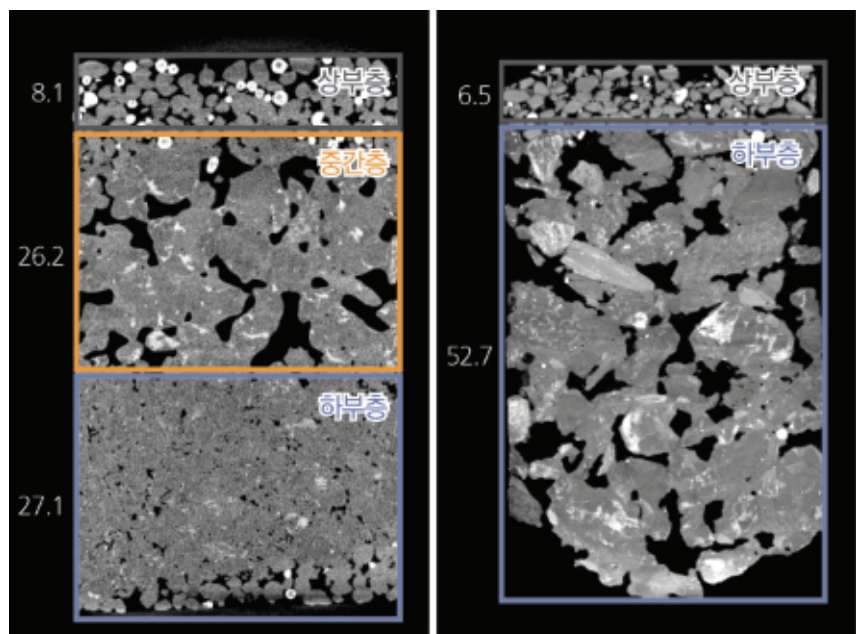
A형 투수블록 측/상면

B형 투수블록 측/상면

그림 14 | 현장 투수블록 측면 및 상면 사진

10mm

10mm



(a) A형 투수블록 수직단면

(b) B형 투수블록 수직단면

그림 15 | X-ray CT 수직단면

**영상분석 활용법 ②**  
**청소 전 · 후 공극내**  
**이물질 변화를 통해**  
**청소효과 파악**

그림 16 부터 그림 18은 A형 투수블록 원재료와 시공 후 6개월이 지나 이물질이 유입된 청소 전 시편과 공극막힘을 해소하기 위해 청소를 진행한 청소 후 시편의 X-Ray CT 영상이다. 그림 17과 같이 S는 골재, P는 공극, C는 이물질을 의미한다. 그림 16은 시공 전 A형 투수블록 원재료의 수평 단면 영상으로써 골재와 공극으로 구성되어 있다. 시공 6개월 후에는 청소 전 시편(그림 17)에는 상당 부분의 공극에 이물질이 존재하지만, 청소 후 시편(그림 18)에는 이물질이 제거되었다. 영상을 비교한 결과 공극이 큰 부분은 이물질이 제거됐지만 공극이 작은 부분은 이물질이 남아 있었다. 이를 통해 공극의 크기가 클수록 이물질 제거가 용이하여 청소 효과가 크다는 것을 확인하였다.

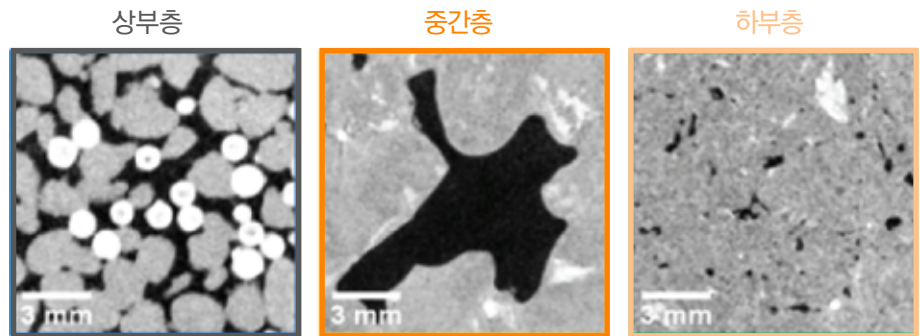


그림 16 | A형 투수블록 원재료 영상

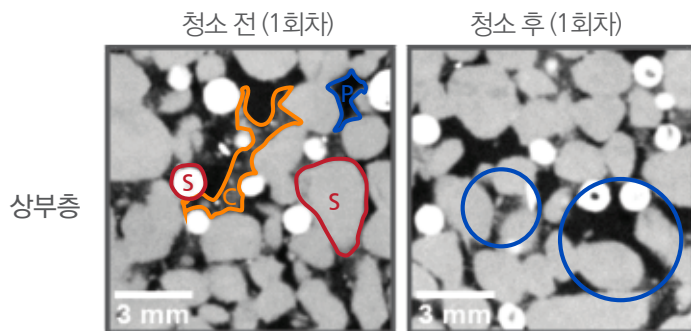


그림 17 | A형 투수블록 상부층 청소 전 · 후 영상

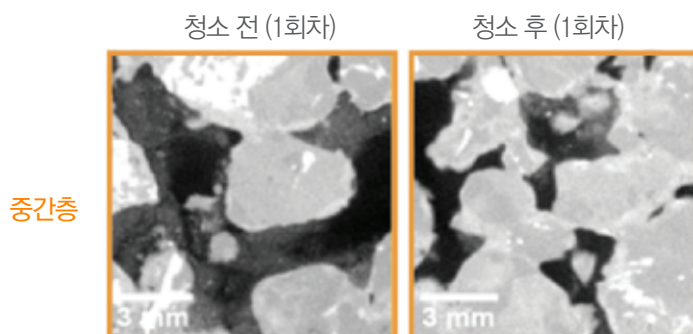


그림 18 | A형 투수블록 중간층 청소 전 · 후 영상

**영상분석 활용법 ③**  
**HU 히스토그램 분석을**  
**통한 청소효과 정량화**

HU 히스토그램(histogram) 분석을 통해 골재, 공극, 이물질 각각의 함량을 확인할 수 있다. 그림 19는 A형 투수블록의 3차원 X-ray CT 영상 히스토그램 변화를 나타낸 것으로서 그림 (a)는 상부층 수평 단면이며 표시된 숫자는 각각 1(공극), 2(이물질), 3(저밀도 골재), 4(고밀도 골재)를 의미한다. 이는 상부층 영상의 히스토그램 그림 (c) 부터 그림 (e)에 숫자로 표기된 영역에 해당한다. 각 영역 넓이의 합은 1이며 이는 영상의 pixel 수를 정규화한 것이다.

원재료와 비교해 시공 6개월 후 시편의 청소 전에는 공극에 해당하는 1번 영역이 감소했다가 청소 후에 증가하고, 이물질에 해당하는 2번 영역은 증가했다가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 시공 후 이물질의 유입으로 공극이 막혔다가 청소를 통해 이물질이 제거되어 공극막힘이 해소되었다는 것을 의미한다. 이처럼 HU 히스토그램 분석을 통해 각 영역을 정량화하여 청소 효과를 확인하였다.

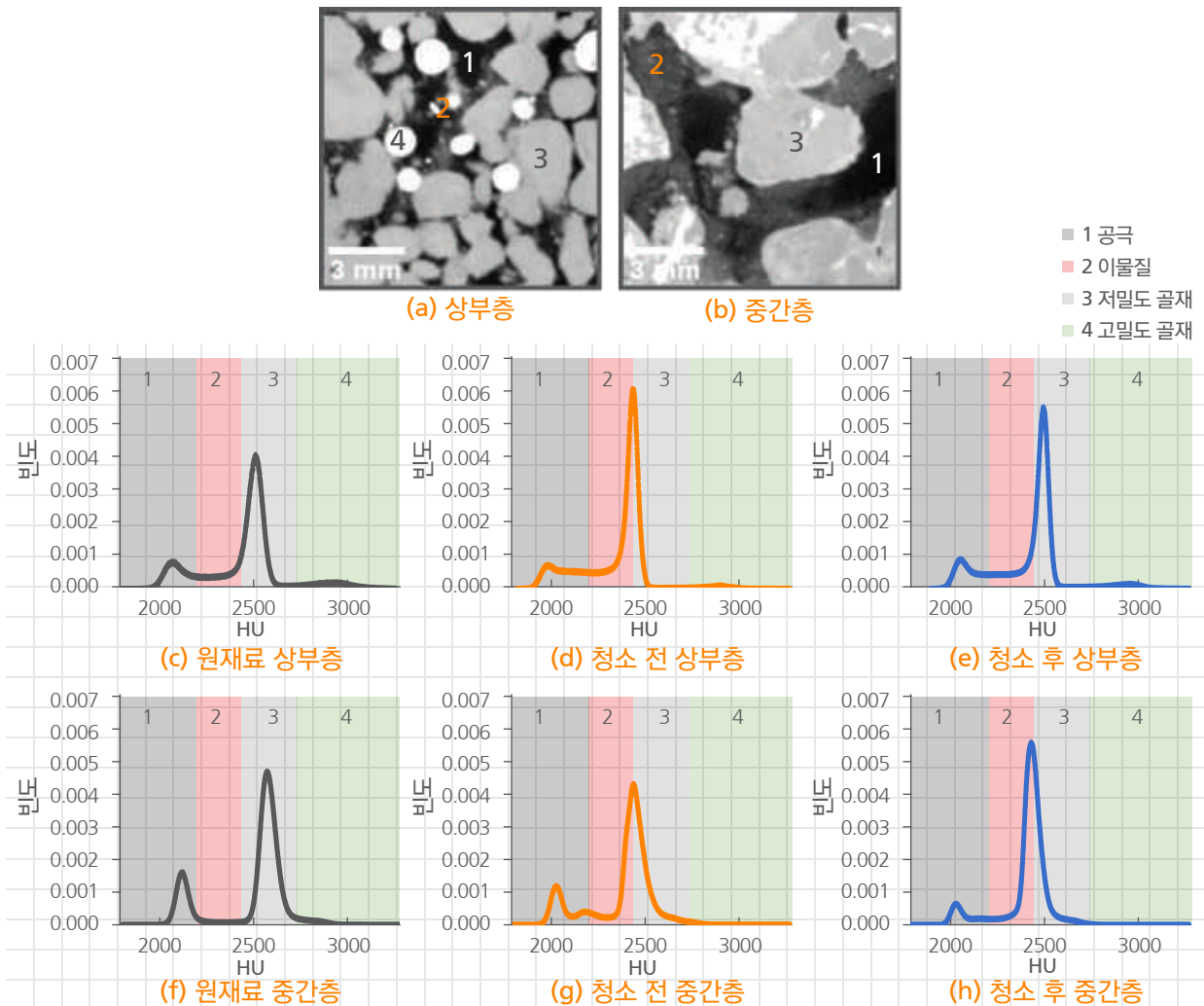


그림 19 | 투수블록의 3차원 X-ray CT 영상 히스토그램 변화

**영상분석 활용법 ④**  
**깊이별 공극량**  
**변화정량화**

3차원 영상분석을 활용하여 시편의 깊이별 수평 단면의 공극 분포를 확인할 수 있으며, 그림 20은 원재료와 청소 전후의 공극률 분포를 비교한 결과이다. 투수블록의 단계별 공극의 분포를 비교한 결과, 대체로 붉은 선으로 표시된 청소 전(Before cleaning) 시편에 비해 녹색 선으로 표시된 청소 후(After cleaning) 시편 상부층의 공극이 증가하여 청소가 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

한편, A형 투수블록 모든 시편에서 상부층과 중간층의 접합면에 공극이 급감하는 것을 볼 수 있었다. 이는 특성을 보여 청소 시 상부층과 중간층의 접합면에서 청소 효과가 공극량이 작아 청소 효과를 저해할 가능성을 나타낸다. D형 투수블록은 원재료의 하부층(Bottom) 공극 분포가 청소 전후 시편과 현저한 차이를 나타낸 것으로 미루어 연구를 위해 제공된 원재료 시편이 실제 현장에 적용된 제품과 다른 제품임을 확인할 수 있었다.

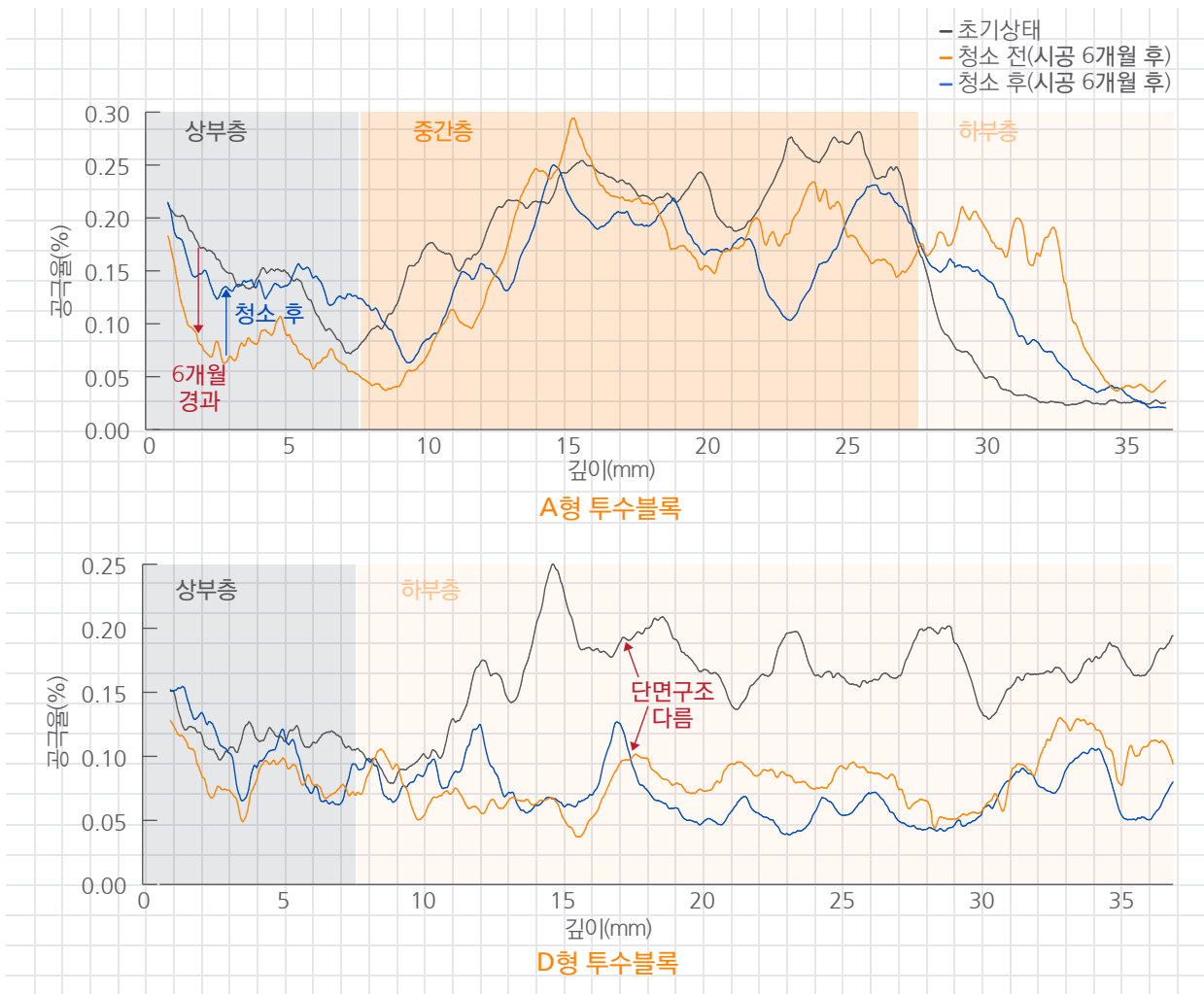


그림 20 | 투수블록 Image porosity 주상도

**영상분석 활용법 ⑤**  
**유효깊이 산정을 통한**  
**청소효과 전달 범위**  
**파악**

영상분석을 통해 유형별 투수블록의 청소 효과 유효깊이를 분석하였다. 그림 21과 같이 골재(●), 막히지 않은 공극(●), 막힌 공극(●)으로 분류하였다. 전체 공극 면적(● + ●) 대비 유입된 이물질로 막힌 공극 면적(●) 비율을 산정하여 그림 22와 같이 깊이에 따른 공극막힘 비율을 나타내었다.

그림 22와 같이 청소 전과 후의 공극막힘 비율이 역전되는 깊이를 청소 유효깊이로 산정하였고 일정 깊이 이상에서는 표면층의 청소 효과가 전달되지 않는 현상을 확인하였다. 이를 통해 투수블록 공극의 크기, 연결도와 같은 구조적 특성이 청소 효과에 영향을 주며, 부적합한 단면구조를 가진 투수블록은 청소를 해도 투수성능 회복 효과가 미미하다는 것을 의미한다.

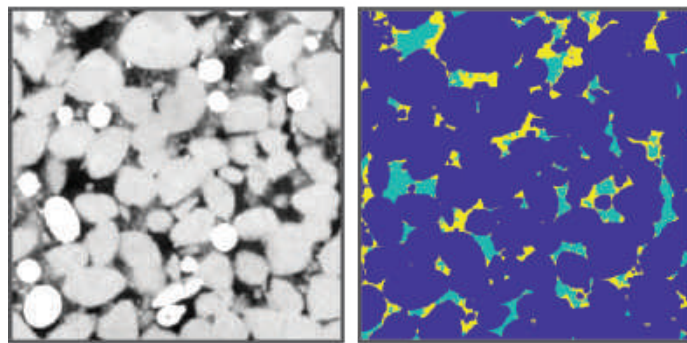


그림 21 | X-ray CT 영상의 영역별 분할 영상

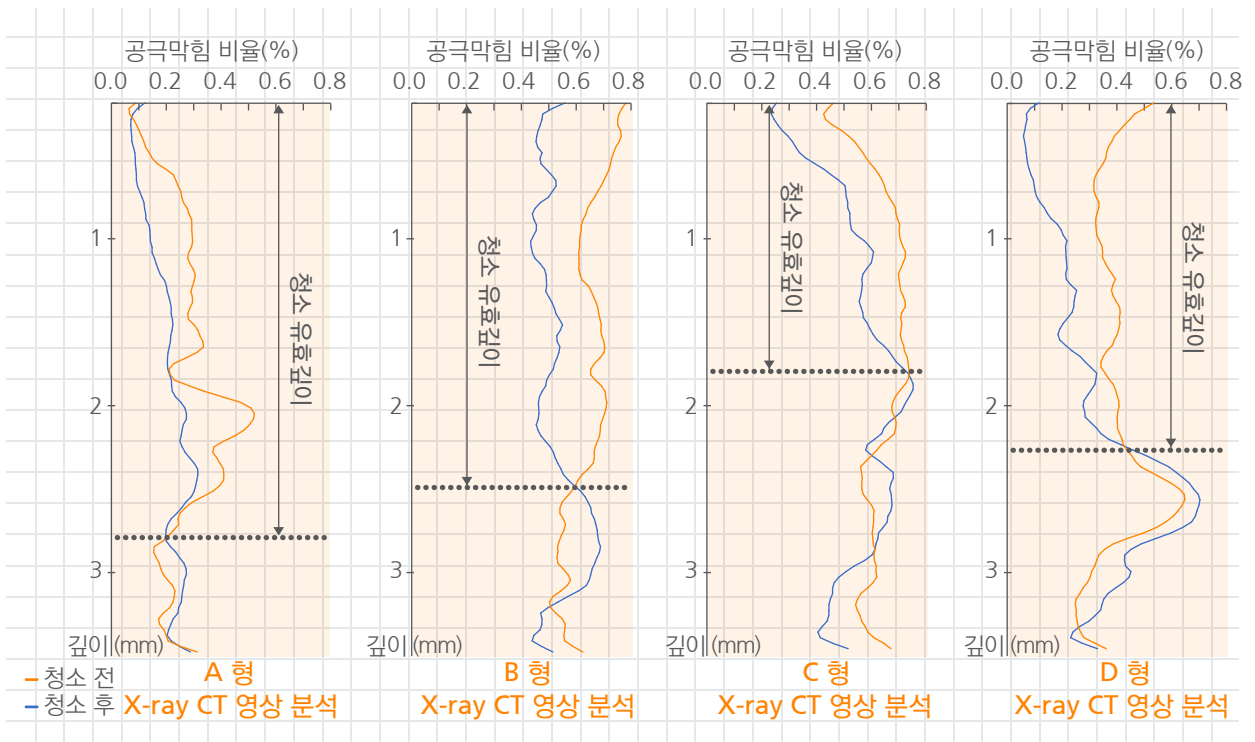


그림 22 | 투수블록 유형별 공극막힘 비율 및 청소 유효 깊이

**영상분석 활용법 ⑥**  
**실험 없이 투수계수**  
**산출 가능**

다양한 공학 분야에서 다공 매질의 투수계수를 정확하게 예측하는 것은 중요한 사안이다. 최근 X-ray CT 장비의 발전은 고해상도의 이미지를 해상도 손실 없이 그대로 수치해석에 사용하는 것을 가능하게 했다.

고해상도 3차원 공극 구조 이미지를 이용하여 격자 볼츠만 방법(Lattice Boltzmann Method)을 수행하였다. 이를 통한 수치 유동 해석을 수행하여 투수계수를 산출 후 실제 정수위 투수시험 중 유형별 투수계수 최대값 결과와 비교하였다. (A형 투수블록은 단면 구조의 특수성으로 제외)

※ 격자 볼츠만 방법 : 유체 입자들의 통계 역학적 거동을 수치적으로 푸는 방법으로 미시 스케일의 유체 입자들의 운동을 통계적으로 모사하여 거시 스케일에서 유체의 상태를 모사하는 방법

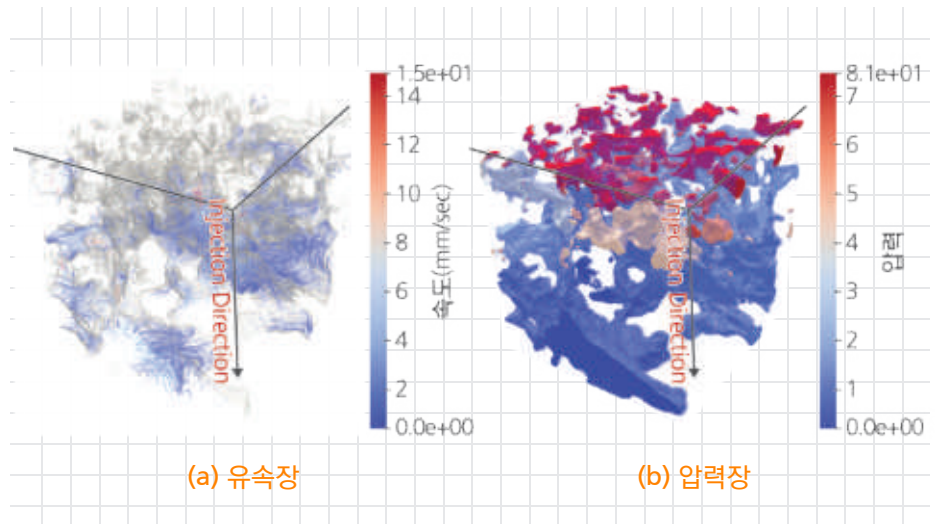


그림 23 | 격자 볼츠만 기법을 통해 구해진 속도 및 압력장

표 2와 같이 원재료 시편의 수치해석 결과는 정수위 투수시험 중 최대 투수계수 결과와 매우 유사하게 해석되었다.

표 2 | 정수위 투수시험(최대값)과 수치해석 투수계수 비교

투수블록 종류	정수위 투수시험 결과(최대값)	LBM 수치해석 결과
B형	1.044 mm/sec	1.160 mm/sec
C형	0.744 mm/sec	0.878 mm/sec
D형	1.083 mm/sec	1.460 mm/sec

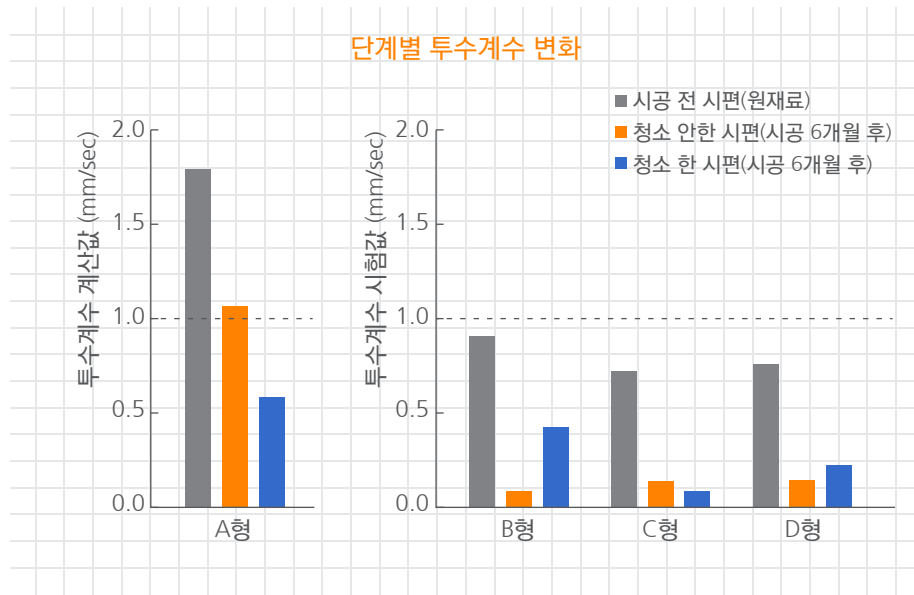
이와 같은 결과를 통해 수치해석 방법 고도화 시 실험 없이 영상분석만으로 투수계수 도출이 가능하다는 것을 확인하였다.

**영상분석 활용법 ⑦**  
**회복율이 클수록**  
**투수계수가 큰 것으로**  
**나타남**

본 연구에 사용된 투수블록의 평균 상부층 높이 7.6mm 대비 청소를 통해 공극률이 회복된 유효 깊이 비를 표 3은 투수블록 유형별 회복율을 산정한 결과이다. 회복율의 크기와 투수계수의 투수성능 회복과의 연관성을 찾기는 어려우나 그림 24와 같이 회복율이 큰 유형일수록 청소 후 투수계수가 크게 나타났다.

**표 3 | 투수블록 유형별 Recovery ratio (%)**

투수블록 종류	A형	B형	C형	D형
Recovery ratio (%)	39.0	33.5	23.0	30.9



**그림 24 | 투수블록 유형별 단계별 투수계수**

**영상분석 활용법 ⑧**  
**실제 투수가 이루어지는**  
**유효공극과 연결도 파악**

연구에서 사용된 4가지 종류의 투수블록이 각기 다른 단면구조와 공극률을 갖고 있어 공극률 자체를 대상으로 청소 효과를 정량화하는 것은 불가능하다. 중량의 변화를 측정하여 공극률을 구하는 실험적인 방법과 달리 CT 영상은 전체 공극에서 시편 내 투수에 기여하는 유효공극률을 구분할 수 있다. 공극이 막혀 투수에 기여할 수 없는 독립공극률로 정의하여 공극의 연결도를 그림 25와 같이 나타내었다

$$\text{연결도}(\%) = \frac{\text{유효공극}(\%)}{\text{유효공극}(\%) + \text{독립공극}(\%)}$$

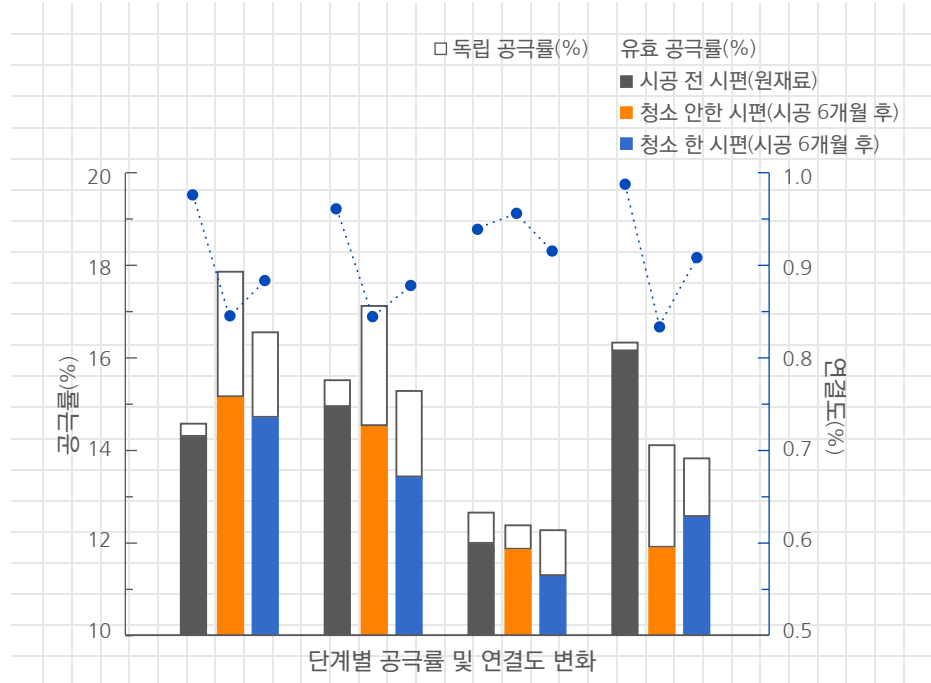


그림 25 | X-ray CT 영상의 영역별 분할 영상

### 3차원 영상정보를 활용한 청소 효과 분석 결과

3차원 영상 분석기법을 통해 골재 크기, 공극의 양과 분포 등 단면 내부의 다양한 정보를 시각화할 수 있었다. 이를 토대로 정보를 정량화하여 도출한 청소 유효깊이, 회복율, 유효공극률과 연결도 등을 통해 투수성능의 변화 원인을 여러 가지 관점에서 분석하였다. 3차원 영상분석을 통해 청소 효과를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 회복율이 30% 이상 시 청소 후 연결도가 회복된 반면, 30% 미만인 C형 시편은 청소 후 연결도가 오히려 감소함
- C형 시편은 원재료의 공극 연결도가 낮은 구조적 특성으로 청소 과정 중 살포된 물의 유압으로 이물질이 하부로 이동 후 공극을 막아 시편 전체의 유효공극률이 저감 되는 결과를 초래한 것으로 나타남
- B형과 D형 일부는 청소 후 투수성능이 저하되었으며, 회복된 경우의 투수성능 역시 초기 시편의 50%에 미치지 못하는 결과를 나타냄
- A형 투수블록의 경우 원재료의 투수계수가 매우 커서 청소 전후의 투수계수도 다른 유형에 비해 매우 크지만, 청소의 효과는 크지 않은 것으로 나타남
- 청소를 통해 연결도가 회복되는 것은 시편 공극의 구조적 특성에 의해 좌우되는 것으로 나타남
- 성능회복 효과를 극대화하기 위해 투수블록이 청소에 유리한 단면구조를 가져야 함

**3차원 영상분석 기법에 의한 투수포장 관리 및 도로 연구 활용방안**


청소 시 투수성능 회복 효과가 커진다면 청소 횟수를 줄일 수 있어 관리가 쉬워지며 투입되는 인력과 비용을 절감할 수 있다. 유효공극률, 연결도 등을 기준으로 제시하면 청소 시 성능회복 효과가 큰 단면구조를 가진 재료가 적용되도록 유도할 수 있다.

다른 대안은 성능 중심의 유지관리 방법을 도입하는 것이다. 표 4와 같이 투수 성능에 따라 청소 시기를 달리하여 성능 중심의 합리적인 관리가 가능하다.

※ 제시한 투수계수 값과 청소 시기는 예시일 뿐 기준 도입 시 관련 연구 필요

**표 4 | 투수포장 성능에 따른 유지관리 방향**

구분	매우 좋음	좋음	보통	나쁨	매우 나쁨
투수계수 (mm/sec)	1.0 이상	0.5 이상 1.0 미만	0.1 이상 0.5 미만	0.05 이상 0.1 미만	0.05 미만
청소 및 투수계수 측정 시기	2년 후	1년 후	6개월 후	1개월 이내	1개월 이내, 재측정 시 매우 나쁨일 경우 재시공

3차원 영상분석 기법은 도로 분야에서 다방면으로 활용이 가능할 것으로 예상된다. 투수지속성 향상을 위한 투수성포장의 단면구조 개선, 아스팔트 혼합물의 공극률과 아스팔트 함량 정량화, 저소음 포장의 소음 메커니즘과 같은 연구에 활용 가능하다. 다양한 도로 분야에서 보이지 않던 것을 볼 수 있게 됨으로써 도로의 기능과 성능 발전에 기여하기를 희망하며 이 글을 마무리하고자 한다. 

**참고문헌**

- 1) 현대경제연구원, "여름철 집중호우의 경제적 피해 분석", 2020
- 2) 환경부 · 기상청, "한국 기후변화 평가보고서 2020", 2020.
- 3) 환경부, "전국 불투수면적률 조사 및 개선방안 연구", 2013.
- 4) 김영란. "Part 01. 도시화가 물순환에 미치는 영향과 서울시 현황" 워터저널 97 (2012): 27.
- 5) 서울시 물관리정책과, "건강한 물순환 도시 조성 종합계획", 2013
- 6) 김대성, "도심지 열섬완화를 위한 도로포장공법에 관한 연구", 경일대학교 대학원, 2011.
- 7) 서울시 보행정책과, "투수블록 시범사업 모니터링 세부 추진계획", 2013
- 8) 서울특별시 품질시험소, "차열 / 투수성 도로포장 재료 및 기술개발", 2017.
- 9) 이예하 외, "의료영상 분석을 위한 딥러닝 기반의 특징 추출 방법", 대한의학영상정보학회지 20 (2014): 1-12.
- 10) 신광호, 김성겸, 이관호. "CT Scanner를 이용한 아스팔트 혼합물의 공극특성 평가." 한국방재학회논문집 12 no.3 (2012): 169-175.
- 11) 손정탄 외, "Digital Image Analysis를 이용한 동적수침시험 평가방법의 개선 연구", 한국도로학회 논문집 18 no.4 (2016): 47-53.

제 5호 투수성포장의 성능 유지를 위한  
3차원 영상분석 기법

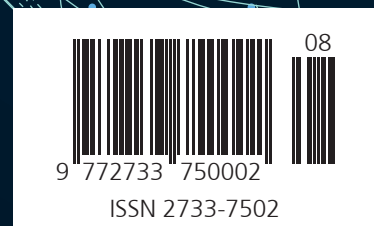
발행인 고인석

편집인 편집위원회

발행처 서울기술연구원  
03909 서울특별시 마포구 매봉산로37(상암동)  
www.sit.re.kr

발행일 2020년 09월 24일

**SIT** 서울기술연구원  
Seoul Institute of Technology



08

9 772733 750002

ISSN 2733-7502