

투수성 포장재 투수성능 지속성 확보 방안



박 대 근 | 서울특별시 도시안전실 보도환경개선과 주무관
 임 무 광 | 중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
 조 윤 호 | 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

1. 개요

도시화가 진행되면서 지표의 불투수화가 급격하게 진행되었다. 서울시의 경우 불투수 면적이 1962년 7.8%에서 2011년 48%로 7배 가까이 증가하였다. 이로 인해 강우 시 침투유출시간이 감소하고 단기간 집중유출이 증대되어 폭우로 인한 도시홍수 등이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 국내·외에서는 투수성아스팔트, 투수콘크리트, 자체투수블록 등의 투수포장이 도입되었다. 하지만 공극막힘 현상으로 인하여 공용 2개월 만에 포장이 불투수화 되는 등 빗물 침투기능에 문제가 발생하고 있다. 투수포장의 침투성능을 확인하기 위해 현재 이용되는 검증시험으로는 현장 투수시험 방법(KS F 2394) 및 정수위 투수시험 방법(KS F 2322)이 있지만 공용 후의 상황을 모사하지 못하여 현장시공 후 투수포장재의 투수성능을 예측하지 못한다는 단점이 있다.

이러한 공극막힘을 해소, 혹은 복원시키기 위해 투수성 포장은 포장체에 대한 주기적 청소가 필요하

다고 알려져 있다. 미국, 캐나다 및 영국에서는 투수블록의 공극막힘 현상을 예방하기 위해 투수블록 포장의 설계·시공 및 유지관리지침에 1년에 두 번 정도의 청소를 권장하고 있다.

2. 공극막힘 현상

공극막힘 현상이란 공용 후 일정기간이 지나면 먼지, 모래 등 도로상의 여러 가지 이물질이 투수포장으로 들어가 공극이 막혀 제 기능을 상실하게 되는 현상으로 투수계수(Coefficient of permeability) 및 수리전도도(Hydraulic Conductivity)를 저하시키는 것을 의미한다.

도로 위의 오염물은 크기에 따라 그림 1과 같이 도약(saltation), 부유(suspension), 구르기(creep)로 나누어져 움직인다(Amirjani, 2010). 도약은 직경 70~500 μ m의 작은 입자들의 움직임으로 포장의 표면으로부터 날아가 공기의 저항과 중력을 받으며 궤도모양을 따라 움직이는 것으로 전체 이동

의 55~72%를 차지한다. 부유는 바람에 의해 입자들이 공기 중에 떠서 움직이는 것으로 침전되기 전에 긴 거리를 이동하게 된다. 입자의 크기는 직경이 70µm 보다 작은 것들로 이루어져 있으며 전체 이동의 3~10%를 차지한다. 구르기는 모래 및 골재크기의 입자가 도약하는 입자의 영향을 받아 굴러가거나 서서히 가는 현상으로 전체 이동의 7~25%를 차지한다. 이렇게 이동한 입자들 중 크기가 상대적으로 큰 모래가 투수포장재 위에 쌓이고 그 사이를 분진이나 포장 표면, 자동차 타이어 등에서 마모되어 발생된 미세입자들이 막으면 서서히 투수성능이 감소하고 공극이 막혀 불투수화 된다.

Dierkes 외 3인은 20년 간 경험으로 보았을 때 대부분의 포장은 5~10년 사이에 공극이 막힌다고 주장하였다(2002). 남정만 외 3인은 제주지역 투수콘크리트 포장의 현장투수시험을 실시한 결과, 투수콘크리트 포장재의 수명한계는 약 22개월로 확인되었다고 하였다(2011). 그림 2는 서울시 광진구에 시험시공된 자체투수블록포장 공용 전과 2개월 후의 침투능을 보여

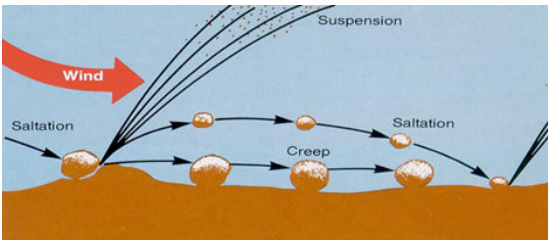


그림 1. 도로 위 오염물의 크기에 따른 움직임(Amirjani, 2010)

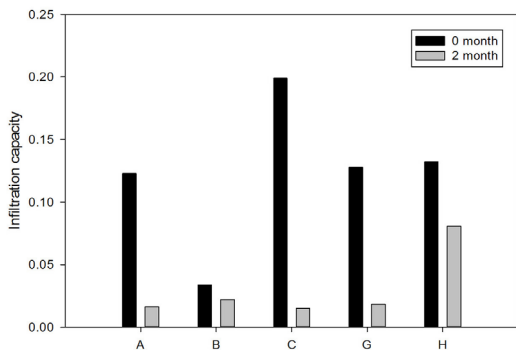


그림 2. 현장 침투능 실험 결과(서울시, 2011)

주고 있다, 공용 2개월 후 투수성능이 기준치 이하로 저하되는 것을 확인할 수 있었다(서울시, 2011).

3. 공극막힘 해소 방안

3.1 주기적 청소를 통한 투수성능 유지

투수성 포장체의 침투능을 확보하기 위해 통상적으로 두 가지 방법을 사용한다. 하나의 방법은 실제 공용 후에 지속적으로 포장체의 침투성능을 평가하고 필요에 따라 유지관리를 실시하여 투수성능을 확보해 주는 방법이 있다. 이러한 방법은 잦은 유지관리로 인해 비용이 증가하게 된다.

일본의 경우, 투수기능 상실의 문제점을 해결하기 위해 고압살수/흡입장비를 이용하여 공극 속의 이물질을 빨아들이면서 포장의 공극을 확보하는 방법을 사용한다.

초기 공극 청소장비는 높은 수압을 이용한 살수 방식이었다. 그러나 작업속도가 느려 교통 흐름에 방해가 될 뿐만 아니라 청소에 사용된 물의 일부가 주위로 스며들어 다시 공극을 채우고 비점오염의 원인이 되었다. 이런 문제점을 개선하고자 그림 3과 같이 공기를 이용함으로써 청소에 쓰인 물의 유출을

표 1. 공극청소방법에 따른 작업성 특징(김주원 외 1명, 2000)

방 법	작 업 성	평 가
고압수 방식	펌프의 능력이 큰 장비를 사용, 작업성이 좋음	회복능력이 높고, 작업 속도도 빨라 좋은 방법이나, 사용된 물의 회수, 재이용이 필요.
흡입 방식	흡입부를 노면에 누르면서 작업하여 작업속도 제한	전용기계 필요, 프랑스에서 정상적으로 사용되고 있어 효과가 인정됨.
	고압수 + 흡입	흡입작업에서 작업 속도 제한됨

방지하여 비점오염의 발생을 최소화하는 방식이 사용되었다. 또한 공기압을 이용하여 공극 내 이물질 제거를 용이하게 함으로써 작업속도가 빨라져서 그림 4에서 볼 수 있듯이 물만을 사용한 것보다 이물질 수집비율이 높게 나타났다. 표 1은 공극청소 방법에 따른 작업성 특징을 보여주고 있다(김주원 외 1명, 2000).

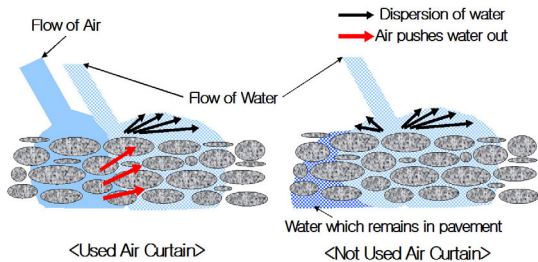


그림 3. 물과 공기혼합방식(좌) / 물만 활용방식(우)
(건설교통부, 2006)

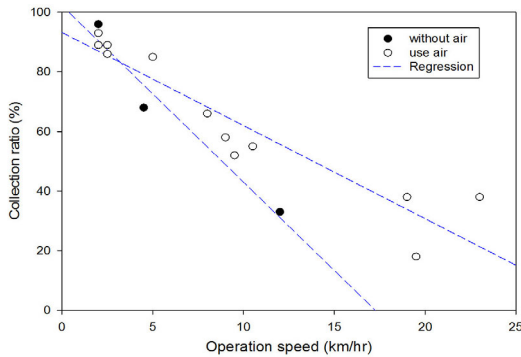


그림 4. 공기 사용유무에 따른 작업속도별 이물질 수거율
(건설교통부, 2006)

3.2 투수성 포장재에 대한 사전 품질관리

공극해소 두 번째 방법은 투수포장 공용 전 투수성 포장재의 투수계수 등의 물리적 결과를 통해 사전 관리하는 방법이 있다. 하지만 이 경우, 일반적으로 공극이 오염되지 않은 새 제품을 사용하여 정수위 투수 실험을 실시한다. 이러한 방법은 공용초기의 성능은 확인할 수 있으나, 공용 후의 성능지속성 평가는 불

가능하다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 사전 품질관리 단계에서 투수포장재의 침투지속성을 확인할 수 있는 실험법이 최근에 개발되었으며, 다음 장에서 자세하게 소개하고자 한다.

4. 투수성 포장재의 침투지속성 평가 방법

투수성 포장재의 침투지속성 평가방법은 2012~2013년 서울시 보도환경개선과에서 주관하여 중앙대학교 도로교통연구실에서 수행하였다. 관련연구는 실제 도로상의 분진 모사를 위한 오염물 수집 및 분석, 오염물 침투실험장치 및 실험방법 개발, 평가방법에 대한 검증실험까지 포함하였다.

4.1 도로상 분진 오염물 수집 및 분석

4.1.1 도로상 분진 오염물 수집

서울시 미세분진 특성을 파악하기 위하여 2011년 9월 27일 약 5시간에 걸쳐 은평구 분진청소차를 탑승하여, 현재 서울시에서 사용하고 있는 도로 청소장비 및 분진청소방법에 대하여 조사하였다. 또한 청소차 담당 운전기사와의 면담으로 실제 작업 패턴에 대해서도 파악하였다. 주행한 구간은 수색로~증산로~은평로~서오릉로~진흥로~통일로~연서로를 경유하는 총 45km 구간이다. 은평구청에서 분진청소 시 사용된 차량은 공기고압흡입식으로, 한 개 차로 전폭흡입 및 측구흡입장치로 구성되어 있으며 수거된 슬러지는 차량 뒤에 장착된 분진수거함에 자동저장된다. 차량의 권장 주행속도는 10~15km/hr이다. 공기고압흡입식의 청소방법은 비온 날을 제외한 모든 기후조건에서 작업이 가능하다는 장점이 있다. 조사구간은 모두 보조간선도로 이상의 아스팔트 포장이다. 은평구의 분진청소차 작업패턴은 비가 오는 날과 일요일을 제외하고, 일 단위로 진행되는 것으로 조사되었다.

월요일에서 토요일까지 하루에 왕복 한 개 차로만 청소한다. 따라서 차로당 평균 이틀에 한 번씩 청소하는 것을 알 수 있다. 또한 일요일은 작업을 하지 않기 때문에 월요일과 화요일에 수거된 슬러지량은 상대적으로 많을 것으로 예상된다. 작업은 평균적으로 4~5시간 정도 소요되고 40~50km를 주행한다. 현장조사일은 수요일 새벽이며 하루 전, 즉 화요일 새벽의 오염물이 폐기되지 않은 상태로 화요일 및 수요일 새벽에 수거된 오염물을 수집할 수 있었다. 날씨가 다르게 수거된 오염물을 각각 밀봉하여 수집하였다. 그림 5는 오염물 수집과정을 보여주고 있다.



① 도로분진청소차 ② 협잡물 수거 ③ 협잡물 입도 분석

그림 5. 오염물 수집과정

4.1.2 분진오염물 분석 및 대체 오염물 합성

공극막힘에 영향을 주는 도로분진의 특성을 살펴보기 위하여 오염물의 평균입도를 분석하였다. 오염물의 평균입도는 KS F 2502에 준하여 산출하였으며, 큰 오염물 및 미세분진에서 각각 6개의 샘플을 채취하였다. t분포, 95% 신뢰도를 따르는 큰 오염물과 미세분진의 입도는 그림 6과 같다. No.4체에서 걸러진 오염물은 대부분 낙엽이나 담배꽂초와 같은 쓰레기로 시간에 따른 공극막힘에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 오염물에서 가장 많은 부분을 차지하는 입도는 No.30체와 No.50체 사이의 크기를 갖는 입자들로 약 0.6~0.355mm의 입경을 갖는 모래 및 분진들이며 이러한 작은 입자들이 물과 만나 뭉쳐져 공극막힘의 원인이 되는 것으로 사료된다.

오염물의 합성은 수집된 큰 오염물과 미세분진의 중량비(0.56 : 0.44)에 따라 합성하였다. 체가름 시

험의 시료는 은평구로 제한된 구간에서 수집된 시료이기 때문에 서울시 전체의 오염물을 대표하기 어렵다. 따라서 5~30%의 오차를 두어 합성입도를 산출하여 신뢰구간을 그림 7에 나타내었다.

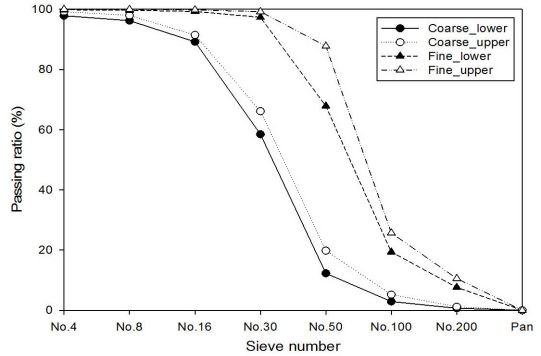


그림 6. 큰 오염물과 미세분진의 신뢰구간

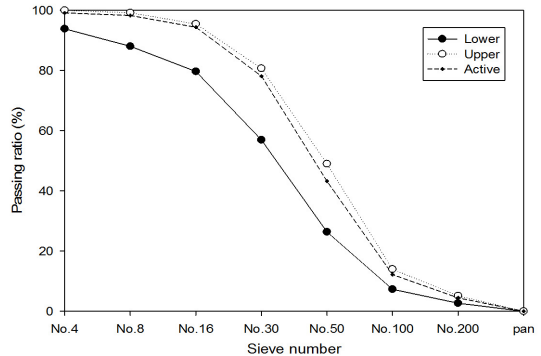


그림 7. 합성된 오염물의 신뢰구간

4.1.3 공용년 대비 오염물 투입량 결정

투수포장은 시공 후 공용기간이 길어짐에 따라 투수성능이 저하된다. 이러한 투수성능과 공용기간과의 관계를 알아보기 위해 수집된 오염물의 양을 바탕으로 상관관계를 분석해보았다. 은평구 도로분진 수거차량 현장조사에서 2일분의 오염물을 수거하여 분석한 결과, 날씨에 따른 오염물 양의 변화는 크지 않았다. 따라서 매년 동일한 양의 오염물이 발생하는 것으로 가정하였다. 일일 오염물의 양은 332mg/m²/day으로 이를 공용기간에 따라 일반화

한 값은 표 2와 같으며 투수실험을 진행 시 투입되는 오염물량은 시료의 면적에 따라 달라진다.

표 2. 공용년도에 따른 오염물 투입량

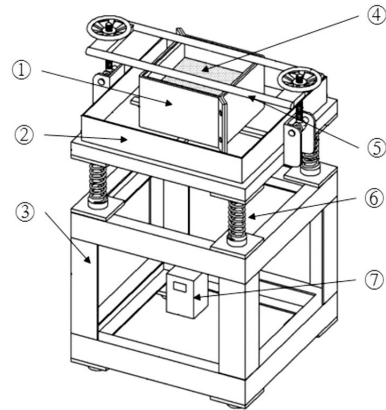
공용기간 (년)	1	2	3	4	5
오염물량 (g/m ²)	121	242	364	485	606

4.2. 오염물 침투장비 및 실험방법

4.2.1 장비의 구성

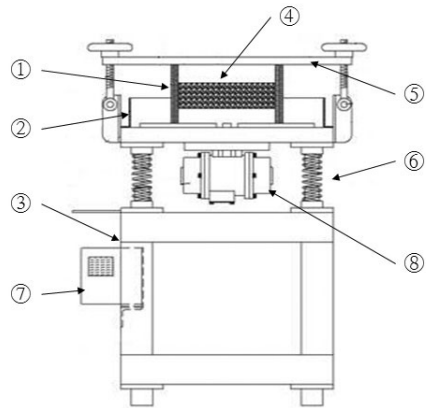
오염물 침투장치는 오염물 및 물을 투입하여 투수포장체의 공극이 막힐 수 있는 환경을 모사하는 목적으로 개발하였다. 또한 진동모터를 장착하여 도로상 차량통행에 의한 차량진동을 모사하도록 하였으며 몰드를 이용하여 자체투수블록 등의 투수포장체를 평가할 수 있도록 하였다. 투수실험장치는 몸체, 테이블, 고정틀로 구성된다.

차량진동을 모사할 수 있는 진동모터의 제어간격은 0~120Hz로 크기는 0.1Hz 단위로 조정가능하다. 몸체와 테이블은 스프링으로 고정하여 테이블의 진동발생 시 몸체의 영향이 최소화 되도록 제작하였다. 투수포장체를 장착할 수 있는 몰드의 크기는 200×200×150mm로 현재 가장 많이 판매되고 있는 자체투수블록을 실험할 수 있다. 몰드는 철판에 스펀지를 부착하여 시료고정 시 몰드와 시료사이에 틈이 생기지 않도록 구성하였다. 투수성아스팔트 및 투수콘크리트의 경우, 몰드의 크기와 동일하게 제작하여 사용할 수 있다. 고정틀은 몰드를 테이블 위에 설치하고 진동발생 시 고정할 수 있도록 한 것으로 너트를 달아 조일 수 있게 하였다. 테이블에는 호스를 달아 물을 넣어 실험 시 배수가 가능하도록 하였으며, 장치의 밑에는 바퀴를 달아 이동이 쉽도록 제작하였다. 그림 8은 실제 제작된 투수실험장치의 모습이다.



- ① 거푸기 ② 물막이판 ③ 몸체 ④ 투수포장체
- ⑤ 거푸기 고정대 ⑥ 스프링 ⑦ 제어기 ⑧ 진동발생기

(a) 사시도



(b) 정면도



(c) 실제사진

그림 8. 오염물 침투장치

4.2.2 오염물 침투시키는 절차

오염물 침투장치를 이용하여 자체투수블록의 오염물에 의한 공극막힘을 평가하기 위하여 실험방법을 표준화하였으며 그림 9에 간략히 나타내었다. 실험을 하기 위해서는 수평계를 이용하여 장비 하단에 부착된 나사로 장비의 수평을 맞춘다. 투수시료를 몰드에 장착하고 몰드와 시료사이의 틈이 최소화될 수 있도록 너트를 이용하여 조여준다. 시료를 투수실험장치의 중앙에 놓고 고정틀을 이용하여 고정시킨다. 이때 헨지부분에 장착된 고정틀의 볼트를 충분히 조여주지 않으면 진동발생 시 몰드와 테이블 간의 마찰로 인하여 소음의 발생이 클 수 있다. 몰드를 고정시킨 후 시료 위에 개량된 오염물을 일정량 뿌려준다. 그리고 오염물이 시료 위에 고르게 퍼질 수 있도록 브러시질을 한다. 브러시질을 너무 강하게 할 경우 오염물이 날아갈 수 있기 때문에 주의한다. 진동발생기를 이용하여 진동을 가하며 오염물이 투입되는 것을 확인한다. 일정시간이 지나면 진동을 멈추고 깨끗한 물 400ml를 넣어 하부로 물이 투수되는 시간을 측정한다. 투수실험이 끝난 후에는 시료를 몰드에서 분리하고 정수위 투수시험을 실시한다.

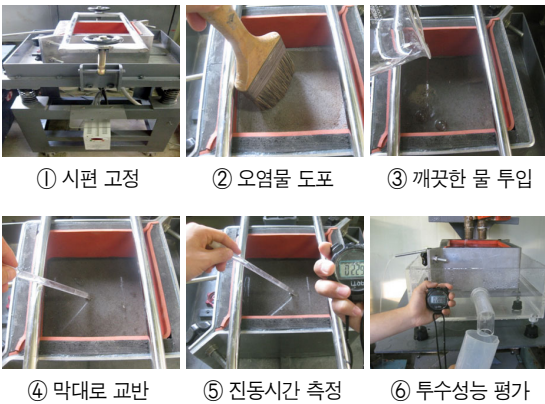


그림 9. 오염물 침투시키는 방법

4.3. 오염물 침투장비의 검증

4.3.1 진동시간 및 빈도에 따른 공극막힘

이태근과 김병삼에 따르면 범프나 돌기에 의한 타이어 충격은 20~100Hz 주파수대 진동의 주된 요인으로 이러한 진동은 불쾌감이나 소음으로 명백히 나타나는 하쉬니스(harshness)와 관련이 있다고 하였다(2003). 따라서 차량진동을 모사할 수 있는 최적의 진동수를 설정하기 위하여 20~100Hz의 중간 진동수인 40Hz, 60Hz, 80Hz로 변화시켜 실험을 진행하였다. 투수포장재 시료는 자체투수블록으로 동일한 업체에서 생산된 60mm 두께의 시료를 사용하였으며 각 변수 당 3개씩 평가하였다. 투입된 오염물은 앞서 서술한 대체오염물 합성비에 따라 제조하였다. 오염물의 투입량은 10g과 20g으로 설정하였으며 앞서 정립한 실험방법에 따라 진행하였다. 또한 진동시간 변화에 따라 공극막힘 현상이 어떻게 영향을 받는지 알아보기 위하여 진동시간을 30초, 45초, 60초로 하여 실험을 진행하였다.

진동시간과 진동빈도에 따른 실험결과는 그림 10에 나타내었다. 실험결과에 의하며, 진동시간이 길어질수록 투수시간도 같이 늘어난 것을 알 수 있다. 또한 진동수가 40Hz에서 60Hz로 증가했을 때 투수시간도 같이 증가하지만, 진동수가 80Hz로 증가했을 때는 오히려 투수시간이 단축된 것을 알 수 있었다. 그 이유는 진동수가 커지면 오염물의 입자가 오히려 날려서 공극막힘 현상을 완화시키는 역할을 했다고 판단된다. 따라서 진동수가 60Hz로 설정했을 때 오염물이 투수포장으로 가장 많이 들어가 공극이 막힌 상태를 모사하였다고 판단된다. 오염물 투입량에 따른 실험결과는 그림 11에 나타내었다. 동일한 진동수 60Hz에서는 투입된 오염물의 양이 많을수록 투수시간이 길어짐을 확인할 수 있었다. 이는 투수포장체의 오염이 심할수록 공극막힘 현상이 더 쉽게 발생할 수 있다고 판단된다.

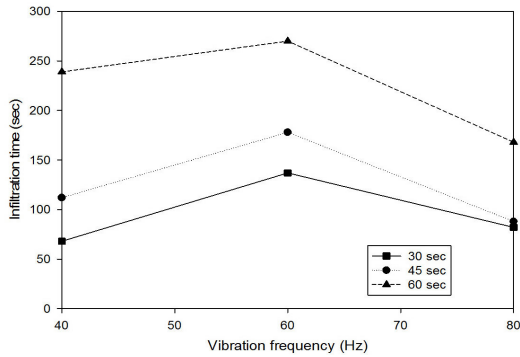


그림 10. 진동빈도와 시간에 따른 침투시간 변화(20g)

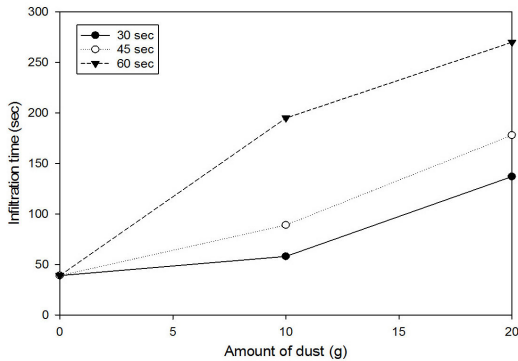


그림 11. 오염물 투입량에 따른 침투시간 변화(60Hz)

4.3.2 블록 종류에 따른 공극막힘 실험

본 실험에서 사용된 투수포장체 시료는 5개 업체에서 제작된 자체투수블록으로 그림 12에 나타내었으며 시료의 두께는 모두 60mm로 각 시료당 3개씩 실험을 진행하였다. 투입된 오염물의 양은 공용년수 대비 오염물량 상관관계에서 시료의 면적을 고려하여 공용 3년에 해당하는 15g과 5년에 해당하는 24g을 투입하여 공용기간에 따른 투수성능의 차이를 살펴보고자 하였다. 투입된 오염물은 은평구 현장에서 수집된 오염물의 입도를 만족하도록 합성한 것을 사용하였다. 공극막힘을 고려한 투수실험을 진행한 후의 시료의 투수계수를 측정하기 위해서 정수위 투수 실험을 실시하였다.

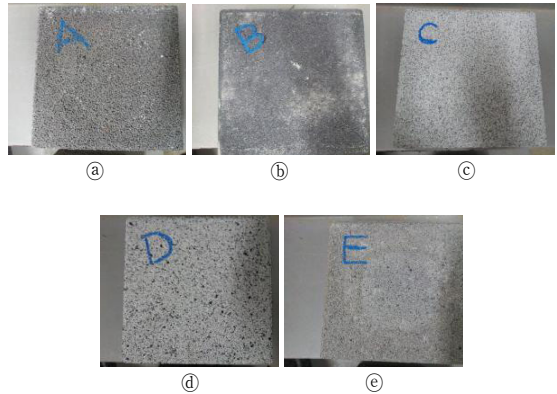


그림 12. 실험에서 사용된 투수블록의 종류

블록 종류에 따라 공극막힘 현상을 고려하여 투수성능을 실험한 결과, 제작된 업체별로 투수성능의 차이를 확인할 수 있었다. 또한 투수실험장치 검증 실험결과와 동일하게 오염물 투입량(공용기간)이 많아질수록 투수시간이 길어지는 것을 확인하였다. 실험결과와 오염물 투입량(공용기간)에 따라 그림 13에 비교하여 나타내었다. 동일한 업체의 각각 다른 3개 블록에서도 투수실험결과와 표준편차가 크게는 약 180초까지 발생하였는데 이는 블록제작과정에서 일정한 품질유지가 어렵기 때문에 블록의 투수성능에 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

공극막힘을 고려한 투수실험 진행 후, 공인기관을 통하여 정수위투수시험으로 산출된 투수계수는 오염물 투입량(공용기간)에 따라 그림 14에 비교하여 나타내었다. 기존의 정수위투수시험을 통하여 구한 투수계수를 살펴보면 모두 KS기준인 0.1mm/sec를 만족하였으며 오염물 투입량에 따른 차이를 구분할 수 없었다. 하지만 오차발생에 있어서 공극막힘을 고려한 투수실험보다 상대적으로 적게 나타남을 확인하였다.

공극막힘을 고려한 투수실험장치는 공용기간에 따른 투수포장체의 투수성능을 뚜렷하게 확인할 수 있지만 실험하는 사람의 숙련도에 따라 실험결과에 영향을 많이 받고 그 오차발생범위가 크기 때문에 정수위투수시험장치의 보조적인 실험방법으로 이용될 수 있다고 판단된다.

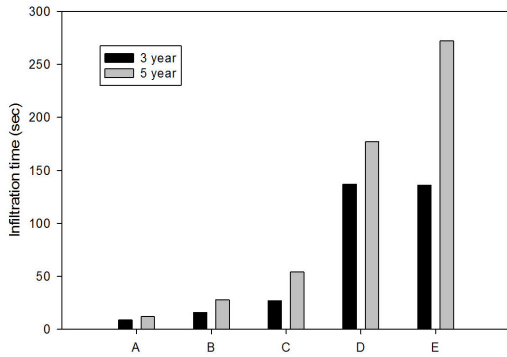


그림 13. 블록 종류에 따른 침투시간

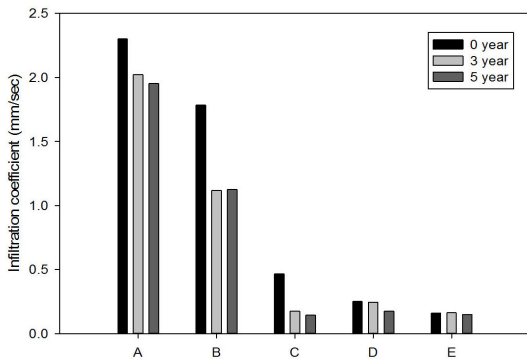


그림 14. 블록 종류에 따른 정수위투수시험 결과

5. 결론

투수성 포장은 도시의 물 순환체계를 개선하기 위한 하나의 수단으로 최근에 많이 사용되고 있다. 하지만, 공용 2개월 만에 투수블록이 불투수화 되는 등 기능성 유지에 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 일반적으로 사용하는 두 가지 방법을 소개하였다. 첫째는 실제 공용 중인 투수성

포장체에 대한 침투성능평가 결과로 판단하여, 주기적으로 고압살수와 공기를 동시 혼입하는 형태로 1~2회/년로 유지관리(청소)를 실시하는 것을 권장한다. 둘째는 투수성 포장체에 대한 사전 품질관리를 실시하는 것이며, 실제 도로상의 오염물을 모사하여 투수성 포장체를 오염시킨 뒤 투수성능을 평가하는 방법이다. 이러한 방법은 사전에 포장재의 투수지속성 평가를 통해 기능·수명연장에 도움이 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Interpave, 2008. Guide to The Design, Construction and Maintenance of Concrete Block Permeable Pavements Edition 5. The Precast Concrete Paving and Kerb Association
2. Amirjani, M., 2010. Clogging of Permeable Pavements in Semi-arid Areas. MA thesis. Delft University of Technology.
3. Dierkes, C., Göel, P., Benze, W. and Wells, J., 2000. Next generation water sensitive storm water management techniques. 2nd National Conference on Water Sensitive Urban Design, Brisbane.
4. 남정만, 윤중만, 김승현, 송영석, 2011. "투수콘크리트의 공극막힘현상에 대한 실험적 연구", 대한토목학회논문집 D, 31(4D), pp.577-854, 2011
5. 건설교통부, 2006. 친환경 4S 포장시스템 개발 연구
6. 서울특별시, 2011. 친환경 투수 블록포장 시험시공 및 개선방안 도출
7. 김주원, 박태순, 2000. 배수성 포장 외국의 사례를 중심으로, 한국도로학회, 도로 제2권 3호 pp.92-101