

슬러지 투입 및 휠트래킹 시험을 이용한 블록 포장의 기능적 투수평가

Functional Drainage Evaluation of Block Paving through the Usage of Sludge and Wheel Tracking Test

이 상 염	Lee, Sangyum	정희원 · 서울시청 도시안전본부 도로관리과 주무관 · 주저자 (E-mail : slee11@seoul.go.kr)
정 훈 희	Jung, Hoon Hee	정희원 · 서울과학기술대학교 건설공학부 대학원생 (E-mail : wonangs@paran.com)
문 성 호	Mun, Sungho	정희원 · 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)
박 대 근	Park, Dae Geun	정희원 · 서울시청 도시안전본부 도로관리과 주무관 (E-mail : dgpark94@seoul.go.kr)
박 경 민	Park, Kyong Min	서울과학기술대학교 건설공학부 학부생 (E-mail : pikem@naver.com)

ABSTRACT

As the percentage of permeable ground is reduced due to the increased impermeable roads of major cities, a heat island phenomenon can be dominantly observed, resulting in increased temperature. In addition, rainfall that would have been naturally absorbed and retained by the permeable ground is overflowed due to large volumes of run-off water, resulting in more sewer failures and increased erosion. In terms of permeable pavement system, block paving has been used anywhere as well as provides many years of service. The permeable block paving is an effective alternative to the more traditional asphalt or plain concrete for minor roads; furthermore, it looks a lot better than other pavements. In this study, the functional drainage evaluation of block paving was carried out, considering the usage of experimental sludge and wheel tracking test, in order to simulate the field condition of roads.

KEYWORDS

block paving, permeability, functional drainage evaluation, wheel tracking

요지

주된 도시들의 불투수성 포장화에 따른 현상으로 토양의 사막화를 일으키고 있으며, 나아가, 도시 온난화 현상을 발생시켜 도시지역의 평균 온도를 올리는 원인이 되고 있다. 이로 인해 우수가 투수성 토양에 흡수되거나 잔류되어야 하는 양이 줄어들어 따라 자주 도심지내에서 범람이 되는 현상을 보여주고 있다. 결국은 우수시스템이 제대로 작동하지 않고 침식이 발생하고 있다. 투수성 포장시스템과 관련해서는 블록 포장이 여러 군데서 수년 동안 사용되어 왔다. 또한 투수성 블록 포장은 전통적으로 사용된 아스팔트 포장 및 콘크리트 포장에 비해 다양한 형태로 사용될 수 있는 장점과 더불어 타 포장보다 미적으로 낫은 면을 보여 주고 있다. 따라서 도로의 현장 조건을 모사하기 위해 본 연구에서는 실험용 슬러지 및 휠 트래킹 장비를 이용한 블록 포장의 기능적인 투수성 평가를 실시하였다.

핵심용어

블록 포장, 투수성, 기능적 투수평가, 휠 트래킹

1. 서론

차량용 도로는 대부분 콘크리트나 아스팔트로 표면을 처리하는 것이 보통이다. 따라서 아스팔트 포장과 콘크리트 포장의 장단점에 대한 연구가 진행되어 왔다. 포장

재료로 블록 포장이 많은 장점이 있으나, 국내에서는 아스팔트 포장을 선호하여, 상대적으로 차량용 블록 포장은 낮은 비율을 보이고 있다. 하지만, 유럽의 네덜란드나 독일에서는 콘크리트를 벽돌 크기의 블록으로 만들

어 도로의 표면 재료로 사용하고 있다. 미국에서도 점차적으로 블록의 사용량이 증가하고 있다. 이처럼 보도블록은 제조공정이 간단하고 저렴하여 대량 소비가 가능해 오래 전부터 도로 및 토목 시공에 널리 이용하고 있다. 일반적으로 블록 포장은 인접 구조물과 색상의 조화를 통한 심미적 포장을 가능케 하고, 부분 파손에 대한 보수가 용이하다. 더불어 차량의 통행 속도를 별 다른 제한 없이 통제할 수 있어, 안전한 도로의 구현이 가능하다(Ferguson, 2005).

최근 우수의 침투 및 투수 기능이 원활하지 않아 토양의 사막화를 일으키고, 나아가 도시 온난화 현상(Heat Island 현상)을 발생시켜 도시지역의 평균 온도를 올리는 원인이 되고 있다. 이를 개선하기 위한 투수성 블록 포장을 이용하는 방법 등을 최근 제안하고 있다. 이와 더불어 투수성 포장인 블록을 이용함으로써 기존 불투수성 면적을 줄일 수 있는 효과를 얻음으로써 물순환 체계를 개선할 수 있는 계기를 마련하고 이를 통해 자연 상태의 우수형태를 모방한 형태로 자연배수로로 유입되도록 함으로써 유속을 감소시키는 한편 자연정화 효과로 오염물질을 저감할 수 있다고 한다(조용주, 2010; Raymond, 2009).

또한, 최근 UN의 발표 자료에 의하면, 우리나라는 연강수량이 높은 반면, 연중 강수량이 일정치 않고, 우기에 집중되어 2005년부터 물 부족 국가로 분류되고 있다. 따라서 국내에서는 도시 온난화 방지와 수자원 확보 차원에서 투수성 블록 포장을 개발하고 적용하게 되었다. 일반적으로 자연 상태 지반의 우수 침투율은 50%인데 반해 서울시 연간 우수 침투율은 23%(2004년도)로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

또한 서울시 수자원장기종합계획(2006~2020)에서 제시한 기준물수요 시나리오에 의한 결과를 살펴보면 지역별 부족량의 합은 2011년 797백만 m^3 , 2016년 975백만 m^3 , 2020년 925백만 m^3 이며, 잉여수자원을 활용할 경우, 물 부족량은 2011년에 340백만 m^3 , 2016년에 500백만 m^3 , 2020년에 439백만 m^3 로 전망되었다(서울지역환경기술개발센터, 2008).

더구나 투수성 포장의 효과는 다양한 요소들에 의해서 나타난다. 이 요소들은 지반의 특성, 소요 목적, 구조적 수리학적 요구, 축적물 잔류 용량과 지지층의 축적물에 의한 공극 막힘 등 여러 가지 항목들을 포함하고 있다. 게다가, 공사비용과 유지비용, 공용 수명 등의 경제적 요소와 심미적, 사회적인 요소를 고려해야 한다. 투수성 포장은 모든 장소에 적용할 수 없다. 따라서 시공

전 철저한 사전조사를 통해 주변 환경과의 적합성 여부를 판단해야 한다.

본 연구에서는 투수성을 확보하기 위해 시공된 블록 포장들이 어느 공용년수가 지남에 따라 공극의 막힘 현상에 따른 당초에 기대했던 배수기능을 상실함에 따라 현장에서 수거한 슬러지 입도에 근거해서 석분 및 골재 등을 이용하여 실험용 슬러지를 만들어 투입량과 교통하중을 모사하기 위해 블록위에 쌓인 실험용 슬러지 상태에서 실험을 실시하였고 또한 휠 트래킹(Wheel Tracking)을 한 후 투수의 변화를 실험하였다.

2. 실험장비 및 휠 트래킹 시험 (Wheel Tracking Test)

투수성 블록의 투수 성능을 확인하기 위해서 기존의 현장 투수시험기를 활용하였다. 현장 투수시험 장비에 대한 실험 방법과 개요를 알아보면 다음과 같다. KS F 2394의 절차에 따라 400ml의 물이 모두 투수되는데, 소요되는 시간을 측정한다. 수압에 의해 접촉부에서의 물 손실이 발생하지 않도록, 도넛형의 5kg 이상의 것을 이용한다. 특히 본 시험에서는 누수를 방지하기 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 저반과 블록 표면이 접촉하는 부분에 유성 점토를 발라 물의 유출을 막았다. 본 연구에서 측정시 매번 3회 반복 시험한 후 기록을 평균하였다. 각 측정마다 1분 이상의 간격을 두었다.

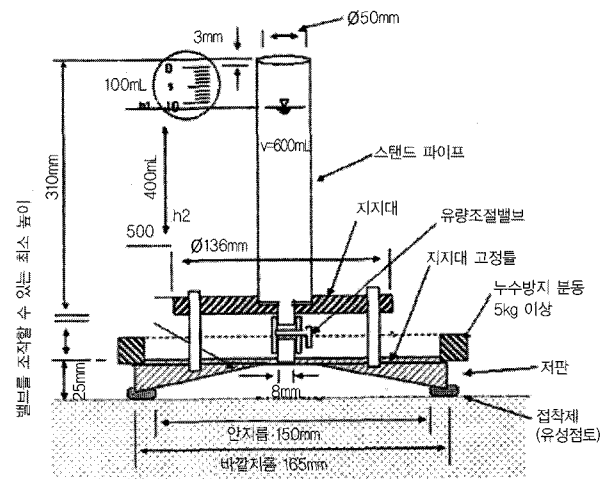


그림 1. 현장 투수 시험기 모식도 (KS F 2394)

휠 트래킹 시험은 영국의 도로교통운수연구소(TRRL)에서 개발된 것으로 실제도로에서 중차량에 의해 생기는 소성변형이나 니딩(Kneading)작용의 영향을 실내에서 모사 및 재현하여 아스팔트 혼합물의 유동성을 평

가하는 시험이다. 휠 트래킹 시험 결과는 변형률(Rate of Deformation)과 동적안정도(Dynamic Stability)로 나타내는데 변형률은 변형량의 증가율이 거의 일정하게 되는 45분에서 60분까지의 15분간 주행의 변형량을 말한다. 동적안정도는 1mm 변형하는데 소요되는 차륜의 통과회수를 나타낸 것이다. 일반적으로 동적안정도가 큰 혼합물이 소성변형에 대한 저항성이 좋은 혼합물로 판정하게 된다. 본 연구에서는 실험용 슬러지를 블록에 투입시키고 소성변형량이 변화가 없을 때까지 휠 트래킹의 하중을 가하여 도로용 블록이 차륜바퀴에 의해 슬러지가 공극을 막는 현상을 모사하였다.

3. 시험용 몰드제작

그림 2는 기존의 휠 트래킹 몰드를 기초로 하여, 새로 제작한 블록용 휠 트래킹 몰드의 장비이다. 이 시험 장비를 이용하여 투수 시험과 휠 트래킹 시험을 수행할 수 있었다. 투수 시험시 물의 배출을 위해 몰드의 양쪽에 밸브를 각각 4개씩 설치하였고, 내부 용적은 25×25×8cm이다. 기존 휠 트래킹 몰드의 고정 방식을 동일하게 적용하였다. 따라서 기존에 차량 하중을 모사하는데 사용하던 휠 트래킹 실험 장비를 그대로 적용할 수 있었다.

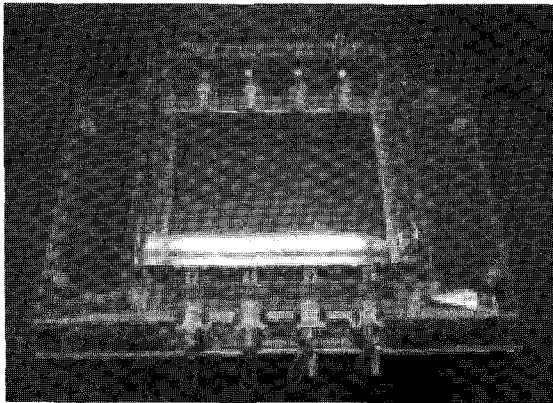


그림 2. 새로 개발된 휠 트래킹 몰드

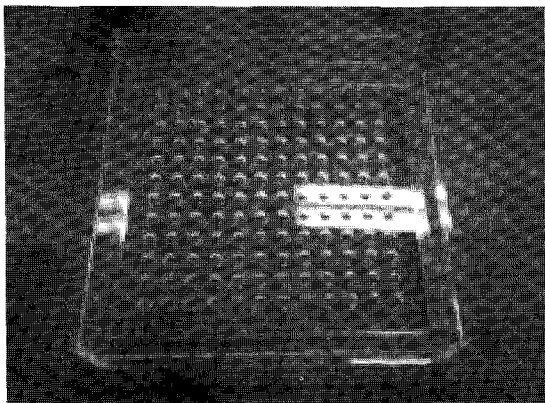


그림 3. 슬러지 살포 장치

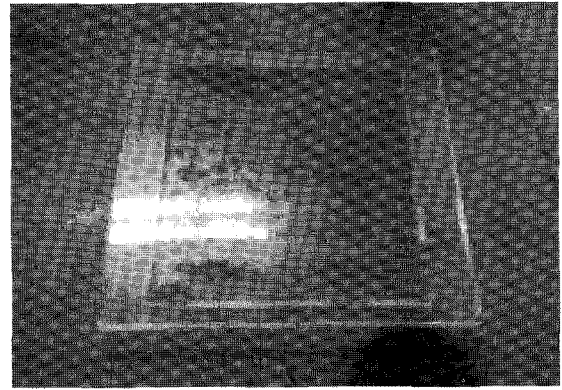


그림 4. 휠 트래킹 재하 덮개

그림 3, 그림 4는 각각 실험용 슬러지 살포 장치와 휠 트래킹 재하 덮개로써, 투수성 포장 표면에 슬러지 등의 유입 과정과 차량 하중에 의해 공극 막힘 현상을 모사할 수 있다. 또한 그림 5, 그림 6은 슬러지 살포와 휠 트래킹 재하 덮개를 사용하여 실험하는 장면을 보여준다.

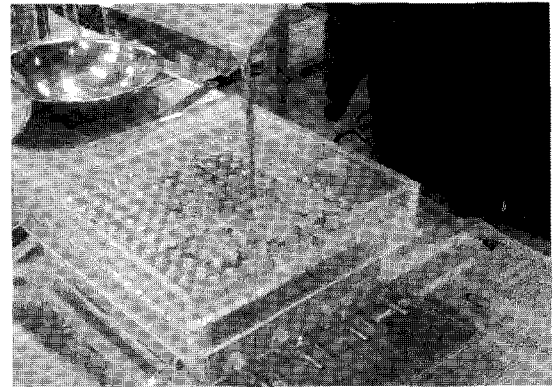


그림 5. 슬러지 살포

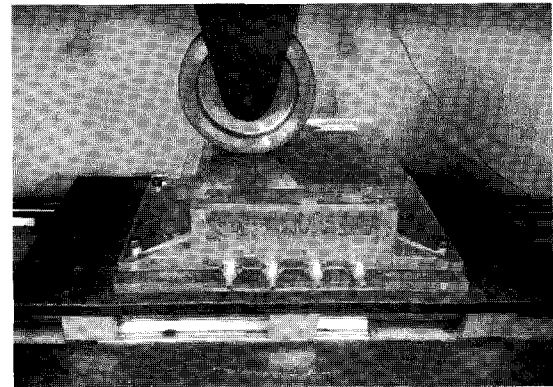


그림 6. 휠 트래킹 시험

4. 실험재료 및 투수성 블록

4.1. 실험재료

그림 7은 투수 시험시 재료의 구성을 보여준다. 3cm 깊이의 모래층을 설치한 후, 그 위에 블록의 측면

이 실리콘 처리된 6cm 두께의 투수성 블록을 놓고, 실험의 조건에 따라 0, 0.5, 1, 1.5cm의 슬러지를 투입하여 투수시험을 진행하였다. 그림 8은 투수계수시험기 설치 장면을 보여준다. 2011년 2월 관악구청의 협조를 얻어 실제 수거된 슬러지 입도를 다음의 표 1에서 보는 바와 같이 측정할 수 있었고 본 분포를 측정하기 위해 3회를 측정하고 평균값을 이용하였다. 또한 3cm의 모래층에 사용될 모래는 일반적으로 블록 포장 하부에 사용되는 재료를 이용하였으며 입도는 표 2와 같다. 또한 슬러지의 밀도는 $1.503\text{g}/\text{cm}^3$ 로 측정되었다. 따라서 실제의 슬러지의 입도에 근거해 실험용 슬러지를 제작하여 본 실험에 이용할 수 있었다.

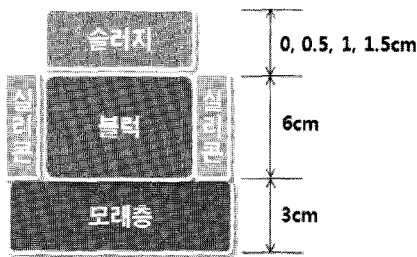


그림 7. 실험 재료의 구성

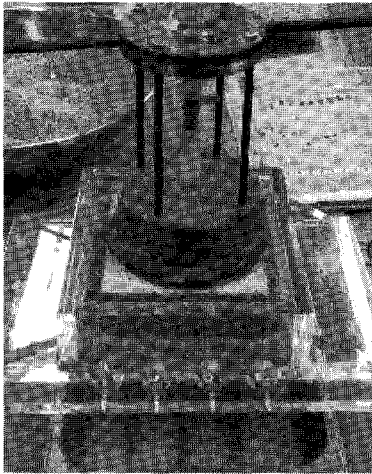


그림 8. 투수 계수 시험기의 설치

표 1. 슬러지 층의 입도 분포

체크기(mm)	통과율(%)
20	100
13	100
10	100
5	96.3
2.5	88.3
0.6	59.2
0.3	36.1
0.15	20.9
0.075	8.6

표 2. 모래층의 입도 분포

체크기(mm)	통과율(%)
20	100
13	99.4
10	99.4
5	97.7
2.5	89.3
0.6	49.8
0.3	10.9
0.15	3.1
0.075	1.1

4.2. 투수성 블록

투수성 블록은 국내에서 생산된 4개의 제품을 이용하였다. 또한, 신뢰성을 확보하기 위해서 각각의 제품 당 3개의 블록에 대해서 각 블록에 대하여 3회씩 실험을 진행하여, 한 제품에 대하여 총 9회의 실험을 진행하였다. 그림 9는 실험에 사용된 공시체를 보여준다. 각각의 공시체는 그림 10에서 보이는 바와 같이 실리콘 처리를 하여, 측면의 누수를 방지하였다. 표 3은 실험에 사용된 국내 업체 4개 제품의 투수성 블록의 앞, 뒷면의 모습을 보여준다. 최대 골재의 크기는 A 제품이 가장 크고, C 제품이 가장 작은 것으로 확인되었다. 또한 표 3에서 보는

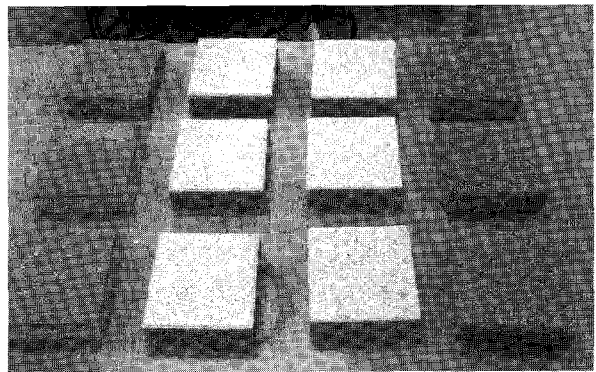


그림 9. 실험에 사용된 공시체 모습

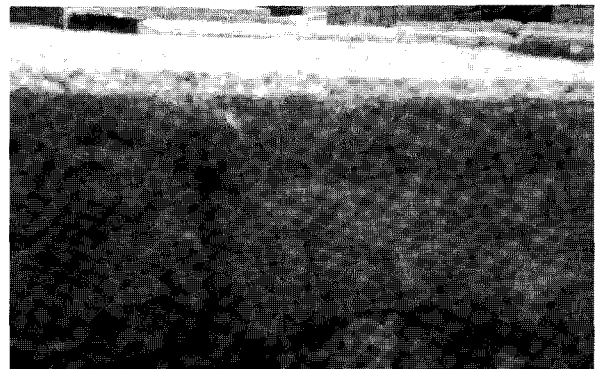


그림 10. 블록 측면에 실리콘 처리

표 3. 4개 제품의 투수성 블록의 형태

구분	A 제품	B 제품	C 제품	D 제품
앞면				
뒷면				

바와 같이 C 제품의 경우에는 뒷면에 최대지름 2.15cm, 깊이 5.5cm의 5개의 구멍이 있음을 확인하였다.

5. 실험절차 및 휠 트래킹의 시험조건

표 4는 투수성 블록의 투수 성능 실험 절차를 보여준다.

다. 투수성 블록의 투수 성능 확인은 슬러지를 살포하기 전과 후로 나누어 시험하였다. 또한 슬러지 살포 후의 실험은 두 가지로 나누어 실시하였다. 즉, 휠 트래킹 시험 전·후로 나누었고, 휠 트래킹 시험 후의 실험 조건은 휠 트래킹 시험 전의 데이터를 근거로 하여 정하였다. 0.5, 1, 1.5cm의 슬러지를 적용하여 실험을 해본다.

표 4. 투수 성능 확인 절차

	① 측면 누수 차단	② 투수시험 실시	③ 슬러지 살포 (0.5, 1, 1.5cm)	④ 투수시험 실시
휠 트래킹 하중조건이 없는 경우				
	① 슬러지 살포 (1cm)	② 휠 트래킹 시험	③ 투수시험 실시	④ 슬러지 제거
휠 트래킹 하중조건이 있는 경우				
	⑤ 투수시험 실시	⑥ 물 세척	각각의 조건별 투수시험 실시 (슬러지 있는 상태, 제거, 물 세척)	

결과, 1cm 이상의 슬러지를 적용하면, 투수계수가 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 휠 트래킹 시험을 실시하는 경우는 실험용 슬러지 두께가 1cm인 경우에만 실험하였다. 또한, 휠 트래킹 시험 후의 투수 시험은 표면에 있는 실험용 슬러지 제거한 후 투수 시험을 실시하였고 물로 세척한 후 실험을 진행하였다. 슬러지를 그냥 제거한 경우는 일반적인 청소차량이 도로표면을 청소한 경우를 고려한 것이고 물로 세척한 경우는 빗물 등에 의해 슬러지가 제거된 상태 혹은 물청소를 한 경우를 고려한 것이다.

휠 트래킹 시험의 과정은 공용 중 반복적인 차량하중에 의한 블록 포장의 공극에 슬러지가 침투하는 현상을 모사하기 위한 실험이었다. 현장 모사를 하기에 적절한 차량 하중의 반복수는 휠 트래킹 시험 결과에 따라 정하였다. 즉 2절의 휠 트래킹 시험 절차에 따라, 반복하중을 60분 동안 적용하였다. 그림 11을 보면, 차량 하중이 400회 통과할 때까지, 1.04mm의 변형이 발생하였으나, 이후 800회의 차량 하중이 더해졌지만, 0.2mm의 변형만 발생을 하였다. 따라서 변형이 더 이상 많이 진전이 되지 않은 한계점을 블록의 공극 내에 슬러지 침투가 더 이상 발생하지 않는다고 가정하고 본 연구에서 실시한 휠 트래킹 시험에서는 400회 까지만 수행하였다.

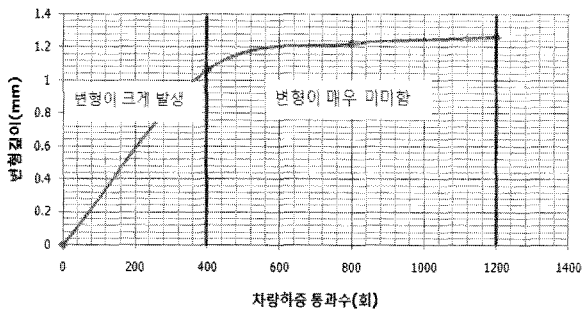


그림 11. 휠 트래킹 통과 횟수에 따른 변형 깊이의 변화

6. 실험결과

본 연구에서 수행한 시험은 크게 휠 트래킹 시험을 하지 않은 경우와 한 경우로 나눌 수 있고 또한 휠 트래킹 하지 않은 경우에는 슬러지 살포가 없는 경우와 살포를 한 후 투수시험을 실시한 경우로 나눌 수 있다. 따라서 본 시험 방법들에 따라 다음과 같이 블록포장의 투수성을 평가하였다.

6.1. 휠 트래킹을 실시하지 않은 경우

6.1.1. 실험용 슬러지를 살포하지 않은 경우

그림 12는 블록에 실험용 슬러지를 살포하기 전의 투수 성능 비교 결과이다. 따라서 KS F 2394 시험에 의거해서 400ml의 물이 모두 투수하는데, D사 제품은 약 10초가 소요되었고, 나머지 3가지 제품 모두 약 7초가 소요되어, KS F 2394에서 산출하는 투수량인 15초 동안 흘러 내려간 수량을 산출하고 ml/15sec의 투수량을 계산하게 되어있는데 실험에 사용된 모든 제품이 15초 안에 400ml의 물을 모두 투수함에 따라 현장 투수시험에서 요구되는 기준을 만족함을 알 수 있다.

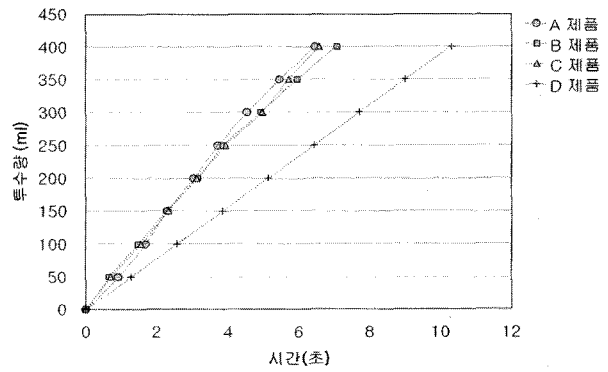


그림 12. 실험용 슬러지를 살포하지 않은 경우의 투수 성능 평가

6.1.2. 실험용 슬러지를 살포한 경우

그림 13, 그림 14, 그림 15는 각각 0.5, 1, 1.5cm의 슬러지를 투입한 후, 4개의 제품에 대해 투수의 성능을 확인한 결과이다. 세 조건 모두에서 C 제품이 가장 우수한 투수 성능을 나타내었다. A 제품의 경우에는 모든 실험용 슬러지 두께(0.5, 1, 1.5cm)에서 투수 성능이 가장 좋지 않은 것으로 평가되었으며 슬러지 두께가 증가됨에 따라 모든 제품들이 투수의 기능이 저하되는 것을 알 수 있다. 제품에 대한 평가에서 0.5cm 두께의 실험용

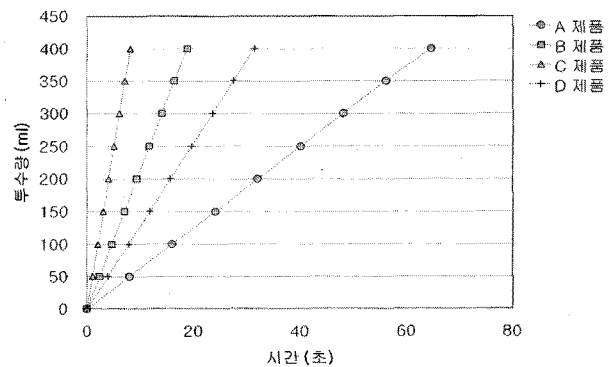


그림 13. 0.5cm 두께로 실험용 슬러지를 살포한 경우의 투수 성능 비교

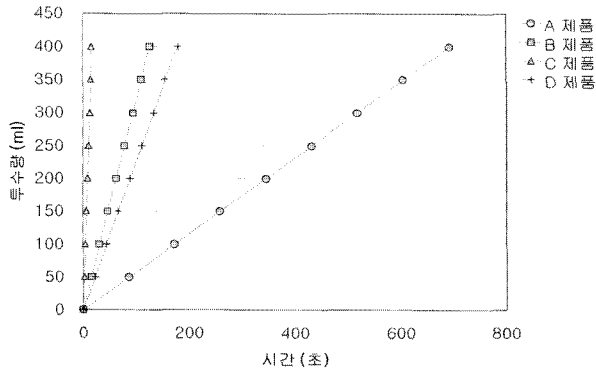


그림 14. 1cm 두께로 실험용 슬러지를 살포한 경우의 투수 성능 비교

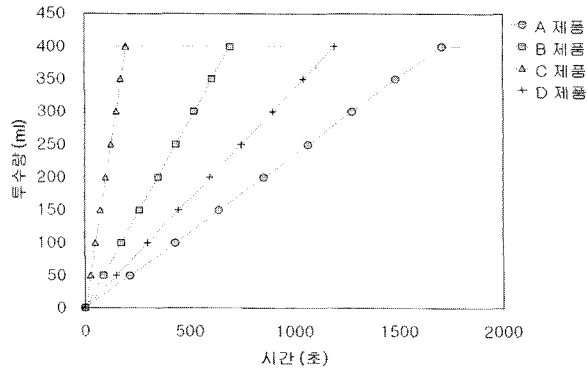


그림 15. 1.5cm 두께로 실험용 슬러지를 살포한 경우의 투수 성능 비교

슬러지 투여 조건에서 나온 투수 기능의 성능은 두께가 변하더라도 제품에 따른 투수 성능의 순위는 변함이 없는 것을 알 수 있다.

6.2. 휠 트래킹을 실시한 경우

그림 16, 그림 17, 그림 18은 각각 휠 트래킹 하중재하 후 실험용 슬러지가 표면에 있는 경우, 휠 트래킹 하중재하 후 주걱으로 표면의 슬러지를 제거한 경우, 휠 트래킹 하중재하 후 블록표면을 물세척한 경우의 투수 성능 실험 결과이다. 여기서 주걱으로 표면의 슬러지를 제거한 경우는 도로에서 청소차량 등에 의해 도로표면의 슬러지가 제거된 경우를 모사한 것이며 물세척한 경우는 물청소차량이나 우기 때 빗물에 의해 슬러지가 제거된 경우를 모사한 것이다. 휠 트래킹 실험 전 블록의 결과와 마찬가지로, C사 제품의 투수 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

그림 17의 경우 A와 B 제품의 경우 슬러지를 제거하지 않은 경우인 그림 16과의 비교시 별다른 투수기능이 향상되는 것을 볼 수 없으나, C와 D 제품의 경우는 상당히 투수성능이 향상되는 점을 볼 수 있다. 그리고 물

세척의 경우인 그림 18에서는 B, C, D 제품의 경우가 상당히 투수성능이 회복되는 점을 볼 수 있다.

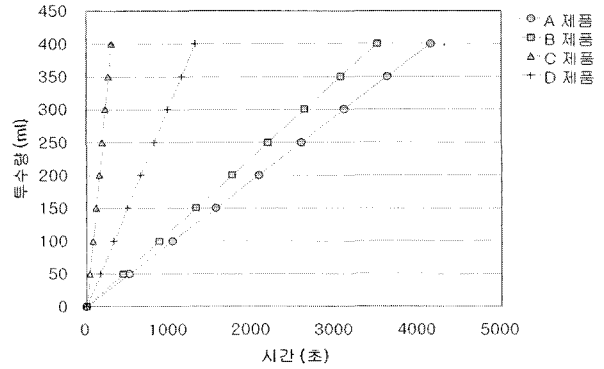


그림 16. 휠 트래킹 하중을 재하한 후 투수 성능 비교

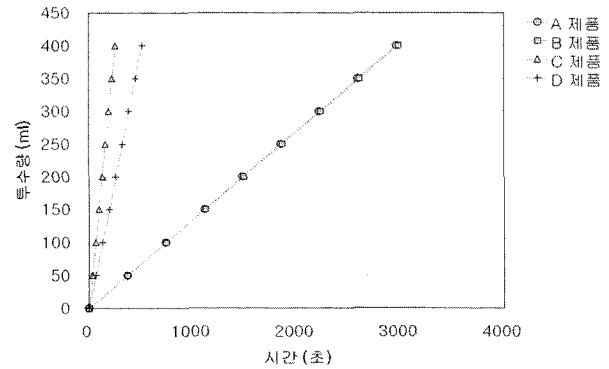


그림 17. 휠 트래킹 하중을 재하하고 표면의 슬러지를 제거한 후 투수 성능 비교

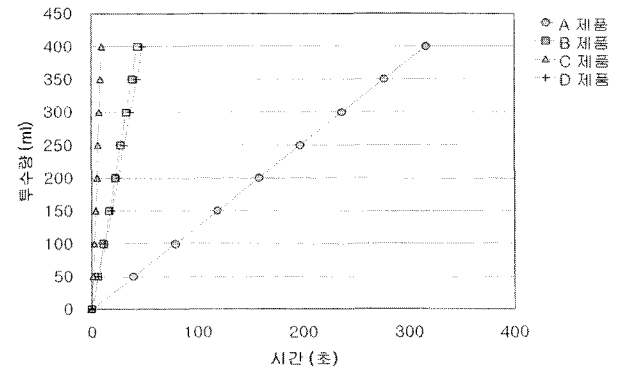


그림 18. 휠 트래킹 하중을 재하하고 표면의 슬러지를 물로 세척한 후 투수 성능 비교

표 5. 슬러지 살포 전·후의 투수계수 변화(휠 트래킹 시험 전)

투수계수 (ml/sec)	슬러지 투여 두께(cm)			
	0	0.5	1	1.5
A사	61.89	6.19	0.58	0.23
B사	56.58	21.24	3.15	0.57
C사	60.82	49.02	23.65	2.02
D사	38.83	12.71	2.21	0.33

표 6. 슬러지 살포 후의 투수계수 변화(휠 트래킹 시험 후)

투수계수 (ml/sec)	슬러지 제거 전	슬러지 제거 후	물 세척 후
A사	0.10	0.13	1.26
B사	0.11	0.13	9.06
C사	1.32	1.59	42.15
D사	0.30	0.77	8.24

7. 결론

본 연구에서는 국내 투수 블록 포장 업체에서 생산된 4종류의 제품을 이용하여, 슬러지의 두께와 유무에 따른 투수성능의 변화를 알아보고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

슬러지를 살포하기 전, 즉 공극의 막힘이 진행되기 이전 시점에서 A, B, C 제품의 경우 모두 400ml의 물을 투수하는데 약 7초가 소요되어 비슷한 투수 성능을 보였으며 D 제품의 경우 약 10초가 소요되었다.

슬러지를 살포한 후에는, 살포한 슬러지의 두께에 따라 투수 성능이 급격히 하락하는 결과를 보였다. 특히 A 제품의 경우가 표 5에서 보는 바와 같이 급격히 그 성능이 하락하는 것을 볼 수 있으며 C 제품의 경우는 그 투수기능의 저하가 다른 제품에 비해 상당히 적음을 알 수 있다. 예를 들어, 0.5cm 두께의 슬러지 양에 있어 A, B 및 D의 제품의 경우는 슬러지가 없는 경우와 비교 시 각각 약 10%, 37% 및 31%로 투수기능이 유지되는 것을 알 수 있으나 C의 경우 약 82%의 투수기능이 유지됨에 따라 상당히 우월한 기능을 발휘함을 알 수 있다.

휠 트래킹 시험 후에는 슬러지가 있는 상태, 블록 표면의 슬러지가 제거된 상태, 물 세척을 한 상태로 나누어 투수시험을 실험하였다. 특히 C 제품이 모든 경우에서 가장 뛰어난 투수 성능을 보였고, 특히, 물 세척 후 약 70%의 정도가 원래의 투수기능으로 회복됨을 알 수 있다(표 6 참조).

마지막으로 본 실험의 결과에서 본 바와 같이 시간에 따른 투수량은 선형으로 표현될 수 있음을 그림 12부터 그림 18에서 알 수 있었다. 따라서 표 5 및 표 6은 그림에서 기울기를 나타낸 값을 표기하였다.

참고 문헌

- 서울지역환경기술개발센터(2008). 분산형 빗물관리시스템의 설계 및 유지관리 가이드라인 개발최종보고서, 서울지역 환경기술개발센터.
- 조용주(2010). 환경과 성장을 추구하는 지속가능 녹색도로, 한국건설기술연구원.
- Ferguson, B.K.(2005) Porous pavement. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Raymond, K., Ross, C., and Joshua, J.(2009) "Improvement Of Water Quality By Coarse Grade Aggregates In Permeable Pavements", *International Conference on Concrete Block Paving*.

접 수 일 : 2011. 5. 11
 심 사 일 : 2011. 5. 11
 심사완료일 : 2011. 6. 29