

투수성 포장재를 통한 유출저감효과 분석

이재응 (아주대학교 환경도시공학부 조교수)

여운광 (명지대학교 토목환경공학과 교수)

심재현 (국립방재연구소 연구관)

강태호 (DATAPCS 부장)

1. 서론

우리나라는 6월과 9월의 호우기에 연평균 강우의 2/3가 집중해서 발생하고 10월부터 다음해 3월까지의 연평균 강우의 1/5밖에 발생하지 않는 등, 시간적으로 강우가 불균형하게 분포하는 특성을 가지고 있으므로 수자원의 관리측면에서 매우 불리한 형편이다. 또한 하천을 따라 도시화가 진행되면서 불투수면적이 증가하여, 호우 발생시 하천으로의 유출량과 침투유량이 증가할 뿐만 아니라 침투유출량의 발생 시간도 감소하는 등 방재 측면에서도 불리한 여건이 심화되고 있다.

홍수피해를 절감시킬 수 있는 대책으로는 저수지와 같은 저류시설을 이용하여 침투홍수량을 감소시키는 방법, 일정 규모 이하의 홍수량만 하도 내에 소통시키도록 제방 또는 암거를 축조하는 방법, 하천 개수 등을 통하여 흐름의 소통을 원활하게 하여 침투수위를 낮추는 방법, 유역변경으로 홍수유량을 해일로 방류시키는 방법 등의 구조적 방법과 홍수 예·경보 등의 대피 체계 강화, 홍수 상습 피해지역의 토지 이용도 제한, 홍수보험제도에 의한 피해 보상 등의 비구조적 대책을 고려할 수 있다.

제방 축조, 하천정비, 유수지 및 펌프장의 증설 등 정부와 지방자치단체들의 노력에도 불구하고 호우로 인한 홍수피해는 계속 발생하고 있다. 특히, 1996년, 1998년, 그리고 1999년 연속 발생한 경기도 북부지역의 홍수는 막대한 인명 및 재산피해를 유발시켜 호우로 인한 피해를 경감시키기 위한 다양한 대책이 요

구되고 있는 형편이다. 본 연구에서는 도시 유역에서 발생한 우수로 인한 유출을 저감시키는 방안 중 투수성 포장재를 사용하는 방안을 고려하였다.

2. 투수성 포장재 실험시설의 설치

투수성 포장재는 도시에서 발생하는 우수의 지하 침투, 도시유출에서 용해성 오염물질과 미세한 오염물질의 제거, 지하수 함양, 제방 세굴 조절 등의 기능을 가지고 있다. 투수성 포장재의 사용은 일반 포장재와 비교할 때 강도가 떨어지기 때문에 주차장, 보도 등으로 사용이 제한되어 왔지만 최근 강도를 높이기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. 투수성 포장재는 경사가 완만하고, 토양의 투수성이 양호하며, 지하수위가 깊은 장소에 비교적 적합하다. 이러한 조건을 충족시킬 수 있다면, 투수성 포장재의 사용은 다른 우수유출 저감시설에 비하여 가격 면에서 효율적이고, 특히, 지역의 유출억제시설이 큰 효과를 발휘하지 못하는 지역에 적합하다. 반면에 투수성 포장재 사용의 단점은 공극이 막혔을 경우 복원하기가 어렵고, 일반 포장재에 비하여 가격이 비싸다는 점이다. 유지·관리 측면은 최근에 개발된 흡입식 설비를 사용하여 일정기간마다 관리하면 어느 정도 해소가 가능하다. 그림 1.에 대표적인 투수성 포장재 단면의 모식도를 제시하였다.

유출은 6-10cm 두께의 공극 아스팔트 층을 통하여 기층으로 침투하므로 결국 침투성 포장재의 저류 능력은 기층의 두께와 밀접한 관계가 있다. 침투성 포

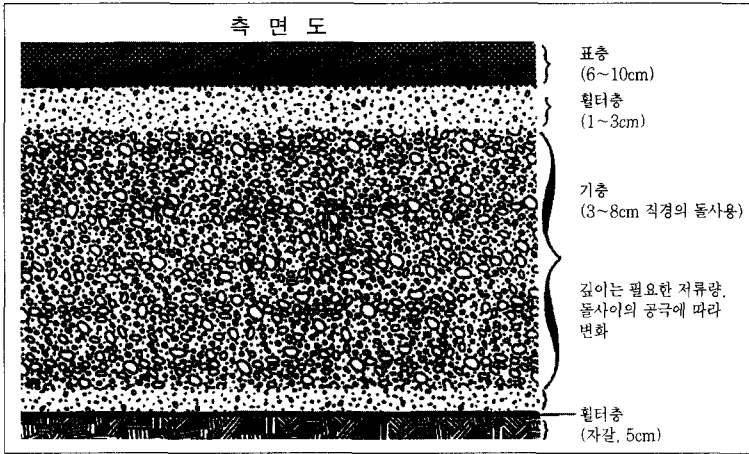


그림 1. 투수성 포장재 단면 모식도

장재를 사용하면 설계강우나 설계강우보다 작은 강우에 대해 침투유량을 개발 전의 단계까지 조절할 수 있다. 투수성 포장 시스템의 한계는 큰 설계강우로부터의 유출량을 수용할 수 있는 기층의 깊이가 충분하지 않을 수 있다는 것이다.

투수성 포장재를 설치했을 경우 우수유출 저감효과를 검토하기 위한 실험장치를 설치하였다. 5m×6m의 넓이에 표층, 기층 및 보조기층의 깊이를 다르게 한 두 종류의 투수성 포장재와 일반 포장재 등 세 가지 종류의 포장재를 설치하였다. 표면에 2%의 경사를 주었으며, 집수된 물이 흐를 수 있도록 세 개의 측면수로 만들었다. 각 수로의 끝에는 삼각형 웨어를 설치하여 침투 후 발생된 유출량을 측정할 수 있도록 하였다. 유출은 다시 주 수로를 거쳐서 수조로 환원한 뒤 인공강우로 재사용될 수 있도록 하였다.

표 3. 포장재 설치 토양의 투수계수

	횟수	시간(sec)	처음수위(cm)	마지막수위(cm)	두께(cm)	투수계수(cm/sec)
보조기층(콘크리트)	2	133.89	50.3	49.8	30	6.2×10^{-3}
보조기층(투수콘크리트)	2	163.98	48.5	47.5	30	10.5×10^{-3}
혼합기층(콘크리트)	2	82.09	48.8	47.8	30	21.02×10^{-3}
쇄석기층(투수콘크리트)	2	10.27	47.3	38.8	30	156.1×10^{-3}
쇄석기층(투수콘크리트)	2	2	48.8	38.8	7	223×10^{-3}
표층(투수콘크리트)	2	10.8	48.8	38.8	20	117.9×10^{-3}
표층(투수콘크리트)	2	4.4	48.8	38.8	7	101.1×10^{-3}

투수성 포장재에 우수를 공급할 수 있는 인공강우 발생장치도 설치했으며 2마력의 수중펌프 1개와 대, 중, 소의 81개 살수 노즐을 포함하고 있어, 최소 10mm/hr의 강우로부터 최대 150mm/hr의 강우까지 발생시킬 수 있도록 하였다.

인공강우 발생장치는 물을 공급할 수 있는 3m×2m×1m 규모의 수조, 유량 조절 밸브, 표면에서 3m 높이에 위치하는 세 개의 파이프로부터

인공강우를 발생시킬 수 있는 9개의 노즐로 구성되어 있다. 세 개의 파이프는 각각 1.5m의 간격을 가지고 있으며 강우는 노즐로부터 시험 표면에 균등하

표 1. 투수성 포장재와 일반 포장재의 각 층의 깊이

구분	표층(cm)	기층(cm)	보조기층(cm)	계(cm)	비고
투수성 콘크리트	20	30	30	80	차도
일반 콘크리트	20	30	30	80	차도
투수성 콘크리트	7	7	5	19	보도

표 2. 인공강우 시설

구분	규격	수량	단위	비고
모터펌프	2마력	1	대	
파이프	80~100A	200	m	
살수 노즐	대, 중, 소(3조)	81	개	
밸브		4	개	
전기선		4	선	

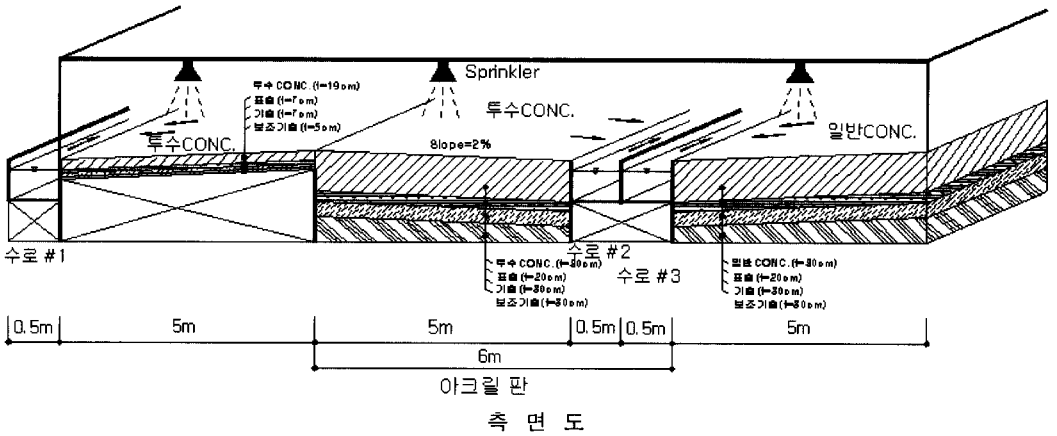


그림 2. 투수성 포장 실험장치

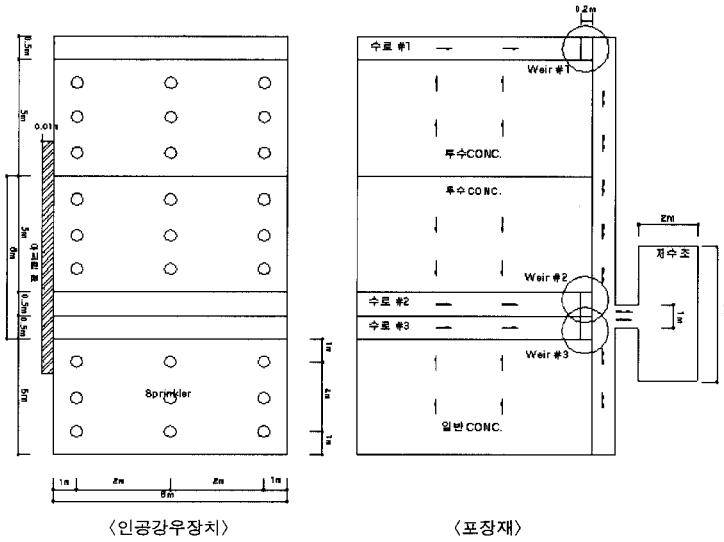


그림 3. 인공 강우 발생장치

게 분포되도록 설계되었다.

포장재와 인공강우 시설에 대한 세부현황을 표 1과 표 2에 각각 제시하였고, 투수성 포장재 설치를 위한 토양 굴착시 측정된 투수시험 결과를 표 3에 제시하였다. 또한, 그림 2.와 3.에 각각 투수성 포장 실험장치와 인공강우 발생장치의 모식도를 제시하였다.

3. 우수 유출 저감효과 분석

3.1 우수 유출 저감효과 분석을 위한 실험조건

일반 포장재와 투수성 포장재에 동일한 강우강도의 강우가 발생했을 때, 유출 효과를 서로 비교하기 위해 다음과 같은 조건으로 실험을 실시하였다.

첫째, 선행강우가 없는 경우에 대해서만 실험한다.

둘째, 우선 인공강우 발생장치 최대용량인 150mm/hr 강우강도가 발생한 경우에 대하여 실험한다.

셋째, 강우 지속기간이 각각 30분, 1시간, 2시간인 경우에 대해서 실험한다.

이상과 같은 경우, 불투수 포장

재, 20cm 두께의 기층을 갖는 투수성 포장재, 80cm 두께의 기층을 갖는 투수성 포장재의 유출을 측정하여 각각의 침투량을 계산하고 우수 유출 저감효과를 비교·분석하였다.

실험과정과 실험에 사용된 가정은 다음과 같다.

1. 투수성 포장재는 기층, 보조기층 및 하부 토양의 종류에 따라 투수효과의 효과에 차이가 발생하지만 본 실험에서는 이의 영향을 고려하지 않는다.
2. 가능한 한 바람이 잔잔한 날을 선택하여 실험을 하고, 바람이 인공적으로 발생된 강우에 미치는

- 영향은 미미하다고 가정하여 무시한다.
3. 기층으로의 침투 이외의 손실은 없다고 가정한다.
 4. 강우강도를 측정하기 위해 실험 구역에 우량관측계를 3개 이상 설치하여 가능한 한 정확한 강우강도를 측정할 수 있도록 한다
 5. 유출량을 정확히 측정하기 위해 삼각웨어 안 쪽은 실험 전에 정지유속을 가질 수 있도록 웨어 밑면까지 물을 채워놓는다.
 6. 이번 실험은 선행강우가 없는 조건에 대한 실험이므로, 실험이 끝난 후 최소한 이틀은 실험을 중지하여 투수성 포장재를 완전히 건조시킨다.

1) 강우량의 산정

인공강우 발생장치로부터 실험구역에 발생한 총 강우량은 측정된 강우강도와 실험구역의 면적, 그리고 강우 지속시간을 고려하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q = C \times I \times A \times T \quad (1)$$

여기서, Q 는 실험구역에 발생한 총 강우량(m^3), C : 단위환산 계수, I : 강우강도(mm/hr), A : 실험구역의 면적(m^2), T : 강우 지속시간(hr)이다.

2) 유출량의 산정

웨어는 유량측정 목적으로 수로를 횡단하여 설치한 수리구조물이다. 웨어의 형상에는 장방형, 사다리꼴형, 삼각형, 포물선형 등이 있고 구조나 사용목적 등에 의하여 여러 종류로 구분된다. 웨어의 광범위한 사용목적으로는 첫째, 유량측정 및 조절, 둘째, 취수 또는 유지유량을 확보하기 위한 수위증가, 셋째, 유량배분 등이 있다. 웨어의 장점으로는 수리가 간단하고 유지관리에 유리하다는 점과 관련계수를 정확하게 산출한 후에는 상당히 정확한 유량측정이 가능하다는 점을 들 수 있고, 단점으로는 관련 경험계수를 각종 웨어마다 일일이 측정하여 결정하여야 한다는 점과 초정밀 계측이 불가능하다는 점을 들 수 있다.

본 실험에서는 초정밀 계측은 필요하지 않으므로 삼각형 웨어를 사용하여 유출되는 양을 산정하였다.

삼각형 웨어는 일반적으로 개수로에서 유량이 작을 경우 이용되므로 이번 실험에 가장 적합한 것으로 판단되었다. 삼각형 웨어를 통과하는 유량은 다음 공식을 사용하여 산정할 수 있다.

$$O_t = C_{at} \frac{8h_t^2}{15} \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh_t} \quad (2)$$

여기서, O_t 는 웨어를 통해 시간 t 에 유출된 양(m^3/s), C_{at} 는 유량계수, h_t 는 시간 t 에 웨어에서 수심(m), θ 는 삼각웨어의 중심각, g 는 중력가속도, $9.81(m/s^2)$ 이다.

식 (2)를 통해 얻은 유출량을 총 유출 지속시간에 걸쳐 누적하면 유출량을 산정할 수 있다.

3) 침투량의 산정

일반 포장재는 불투수성이므로 발생한 강우의 전부가 유출로 나타난다. 그러나 투수성 포장재에서는 기층으로의 침투가 발생하므로 강우의 일부만이 유출로 나타난다. 침투 이외의 다른 손실은 없다고 가정하였으므로 총 유출 지속시간에 걸친 총 침투량은 다음과 같이 계산된다.

$$F = Q - \sum_{t=0}^n O_t \quad (3)$$

여기서 F 는 총 침투량이다.

3.2 실험결과 및 분석

1) 강우강도 150mm/hr, 지속시간 30분인 강우

강우강도가 150mm/hr이고 지속시간이 30분인 강우에 대한 실험은, 불투수층 실험을 2000년 10월 20일, 20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험을 2000년 10월 19일, 80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험을 2000년 10월 20일 각각 실시하였다. 30분 동안 실험구역에 발생한 총 강우량은 2.25m³로 측정되었고, 웨어에서 계측된 유출량은, 불투수층 실험의 경우 2.21m³, 20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 0.43m³, 80cm 두께의 투수성 포장

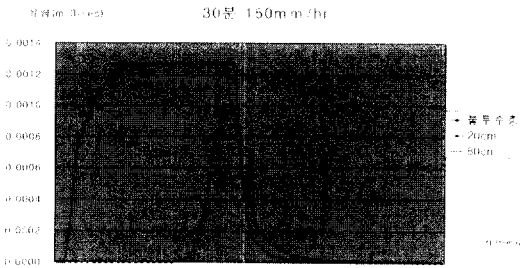


그림 4. 강우강도 150mm/hr, 지속기간 30분 강우의 실험 결과

재에 대한 실험의 경우 0m의 결과를 얻었다. 이를 도시하면 그림 4.와 같다.

불투수층의 경우 강우발생 약 10분 후에 침투유출량에 도달하는 것을 볼 수 있으며 강우가 지속되는 30분까지 침투유출량을 유지하다, 강우가 멈추면서 유출량이 급격하게 감소한다.

20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 강우발생 약 19분 경과까지 유출이 전혀 발생하지 않았다. 즉, 모든 강우는 포장재를 통하여 지면 하로 침투되었다. 강우발생 19분 후부터 강우가 지속되는 30분까지 유출량은 점차적으로 증가하다, 강우가 멈추면서 유출량은 급격하게 감소한다.

80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 전혀 유출이 발생하지 않았다. 즉, 모든 강우는 포장재를 통하여 지면 하로 침투되었다.

강우강도가 150mm/hr이고 지속기간이 30분인 강우의 경우 선행강우가 없었다면, 80cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 100%, 20cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 약 81%를 지표 하로 침투시켜 지표수 유출을 저감시키는 효과를 얻을 것으로 판단된다.

2) 강우강도 150mm/hr, 지속기간 60분인 강우

강우강도가 150mm/hr이고 지속기간이 60분인 강우에 대한 실험은, 불투수층 실험을 2000년 10월 31일, 20cm와 80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험을 2000년 11월 1일 각각 실시하였다. 60분 동안 실험유역에 발생한 총 강우량은 4.5m³으로 측정되었고, 웨어에서 계측된 유출량은, 불투수층 실험의 경우 4.41m³, 20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험

의 경우 2.99m³, 80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 0.32m³의 결과를 얻었다. 그림 5에 이 결과를 제시하였다.

불투수층의 경우 강우 지속기간이 30분인 경우와 큰 차이 없이, 강우발생 약 10분 후에 침투유출량에 도달하는 것을 볼 수 있으며 강우가 지속되는 60분까지 침투유출량을 유지하다, 강우가 멈추면서 유출량이 급격하게 감소한다. 그림에 나타나는 약간의 교란은 바람, 측정오차의 영향인 것으로 생각되지만, 전체 결과에 큰 영향은 없는 것으로 판단된다.

20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 강우발생 약 18분 경과까지 유출이 전혀 발생되지 않았다. 즉, 모든 강우는 포장재를 통하여 지면 하로 침투되었다. 강우발생 18분 후부터 유출량은 점차적으로 증가하다 강우발생 약 29분 후에 침투유출량에 도달하여 강우가 지속되는 60분까지 침투유출량을 유지하고 강우가 멈추면서 유출량이 급격히 감소한다. 또한 20cm 두께의 투수성 포장재에서 발생하는 침투유출량은 불투수성 포장재에서 발생하는 침투유출량보다 약간 감소된 양이므로 소량의 침투는 지속되는 것으로 판단된다.

80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 강우발생 약 56분 경과까지 유출이 전혀 발생하지 않았다. 즉, 모든 강우는 포장재를 통하여 지면 하로 침투되었다. 강우발생 56분 후부터 강우가 지속되는 60분까지 유출량은 점차적으로 증가하다, 강우가 멈추면서 유출량은 급격하게 감소한다. 80cm 두께의 투수성 포장재에서 강우발생 60분에 발생한 최고유출량과 20cm 두께의 투수성 포장재의 침투유출량 사이에는 상당한 차이가 있으므로, 80cm 두께의 투수성 포장재 아래의 지층은 강우 지속기간 60분 동안 아직 포화상태에 도달하지 않은 것으로 판단된다.

강우강도가 150mm/hr이고 지속기간이 60분인 강우의 경우 선행강우가 없었다면, 80cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 약 93%, 20cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 약 32%를 지표 하로 침투시켜 지표수 유출을 저감시키는 효과를 얻을 것으로 판단된다.

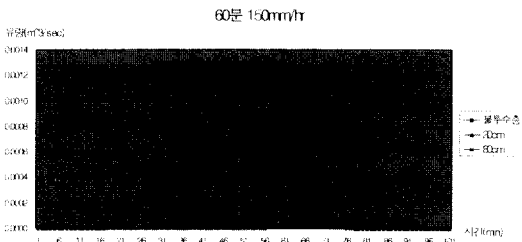


그림 5. 강우강도 150mm/hr, 지속기간 60분 강우의 실험 결과

3) 강우강도 150mm/hr, 지속기간 120분인 강우

강우강도가 150mm/hr이고 지속시간이 120분인 강우에 대한 실험은, 불투수층 실험을 2000년 11월 2일, 20cm에 대한 실험을 2000년 11월 3일, 80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험을 2000년 11월 14일 각각 실시하였다. 120분 동안 실험유역에 발생한 총 강우량은 9m³으로 측정되었고, 웨어에서 계측된 유출량은, 불투수층 실험의 경우 8.86m³, 20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 6.35m³, 80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 3.93m³의 결과를 얻었다. 그림 6.에 이 결과를 제시하였다.

불투수층의 경우 강우 지속시간이 30분이나 60분인 경우와 큰 차이 없이, 강우발생 약 10분 후에 침투유출량에 도달하는 것을 볼 수 있으며 강우가 지속되는 120분까지 침투유출량을 유지하다, 강우가 멈추면서 유출량이 급격하게 감소한다.

20cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 강우발생 약 21분 경과까지 유출이 전혀 발생되지 않았다. 즉, 모든 강우는 포장재를 통하여 지면 하로 침투되었다. 강우발생 21분 후부터 유출량은 점차적으로 증가하다 강우발생 약 33분 후에 침투유출량에 도달하여 강우가 지속되는 120분까지 침투유출량을 유지하고 강우가 멈추면서 유출량이 급격히 감소한다. 지속시간이 60분인 경우와 비교하여 발생하는 3-4분의 시간 차이는 바람, 측정오차의 영향인 것으로 판단된다.

80cm 두께의 투수성 포장재에 대한 실험의 경우 강우발생 약 57분 경과까지 유출이 전혀 발생되지 않았다. 즉, 모든 강우는 포장재를 통하여 지면 하로 침투되었다. 강우발생 57분 후부터 유출량은 점차적

로 증가하다 강우발생 약 78분 후에 침투유출량에 도달하여 강우가 지속되는 120분까지 침투유출량을 유지하고 강우가 멈추면서 유출량이 급격히 감소한다. 또한 80cm 두께의 투수성 포장재에서 발생하는 침투유량은 불투수성 포장재에서 발생하는 침투유량보다 약간 감소된 양이므로 소량의 침투는 지속되는 것으로 판단된다.

강우강도가 150mm/hr이고 지속시간이 120분인 강우의 경우 선행강우가 없었다면, 80cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 약 56%, 20cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 약 28%를 지표 하로 침투시켜 지표수 유출을 저감시키는 효과를 얻을 것으로 판단된다.

투수성 포장재를 사용한 지점의 토양에서 그림 7.과 같이 20cm와 80cm 투수성 포장재를 통하여 시간에 따른 침투량의 변화곡선을 작성하였다. 이 곡선으로부터 투수성 포장재는 강우의 초기에 최대 148.3mm/hr, 종기에 최소 14.4mm/hr의 침투능력을 가짐을 알 수 있다.

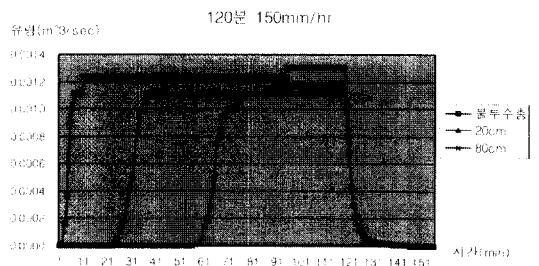


그림 6. 강우강도 150mm/hr, 지속기간 60분 강우의 실험 결과

지속시간 120분, 강우강도 150mm/hr 침투곡선

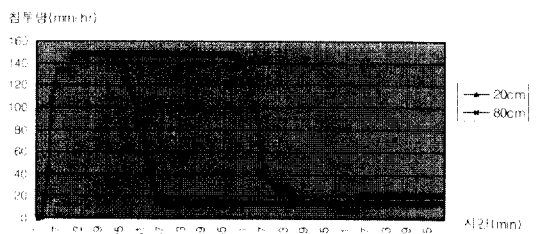


그림 7. 침투곡선

4. 결론

본 과업에서는 투수성 포장재를 통한 치수효과를 분석하였다. 투수성 포장재와 같은 우수유출 저감시설은 선행강우가 없다는 가정에서 150mm/hr의 강우가 각각 30분, 60분, 120분 동안 지속될 경우, 80cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 거의 전부, 93%, 56%를, 20cm 두께의 투수성 포장재는 총 유출량의 약 81%, 32%, 28%를 지표 하로 침투시켜 지표수 유출을 저감시키는 효과를 얻을 것으로 판단

된다. 또한, 투수성 포장재 설치에 따른 효과는 총 유출량과 침투유출량을 감소시키고 침투유출 발생시간 및 유출 시작시간을 지체시켜 우수 집중현상을 분산시킬 수 있으므로 저지대 및 하류지역의 홍수 부담을 감소시켜 재해예방에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

투수성 포장장치 시설의 설치를 지원해주신 삼기건설산업주식회사에게 감사드립니다. ●●