

침투트렌치의 수문학적 해석

A Study of Hydrological Analysis for Infiltration trench



이 지 호
고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정



김 상 단
부경대학교 환경시스템공학과 조교수



윤 재 영
고려대학교 환경공학과 조교수



유 철 상
고려대학교 건축사회환경공학과 교수

1. 서론

일반적으로 우수침투시설이란 강우의 일부 또는 전부를 토양 속으로 침투시켜 직접유출의 절대량을 감소시키는 시설을 총칭한다. 특히 하류하천의 홍수부담이 클 경우에 상류지역에서 주로 고려되는 시설들이다. 침투시설을 확충하는 경우 토지의 다목적 이용이 가능하게 되므로, 과거 방재목적의 조정지와 같은 저류형 유출억제시설을 대체하거나 또는 기존에 설치된 방재조정지에 침투시설을 보강하여 그 효율을 증대시키는 추세이다.

이러한 침투시설은 과거 그 효과가 저류지에 비해 현저

히 떨어지므로 많이 고려되지 못하였다. 그러나 도시지역에서와 같이 불투수면의 과도한 증가 및 저류지 공간 확보의 어려움 등으로 특히 추가의 홍수유출저감효과를 목적으로 다시 주목받고 있는 상태이다. 따라서 관련 연구 등은 대부분 도시하천유역으로 한정되는 것도 당연한 일이다.

침투시설은 침투형 우수유출저감시설을 의미한다. 침투트렌치, 침투측구, 투수성 포장 및 블록, 침투통, 침투지 등 다양한 시설이 여기에 포함된다. 이러한 침투시설은 그 목적을 고려하여 다음과 같이 구분될 수 있다. 먼저, 기존의 침투유역 즉 공원, 녹지 등에 설치하여 침투율을 증진시키는 경우이다. 침투통 및 침투트렌치 등이 여기에 포함

된다. 또 다른 경우는 주차장 등 불투수면으로 구성되어 있는 지역의 일부분에 대해 그 구조나 재질을 변경하여 침투가 가능하도록 변경한 경우이다. 침투블록이나 쇄석공극저류지 등이 대표적인 시설들이다. 이들 시설들은 또한 침투의 방식으로 다시 구분하면 크게 우물법, 확수법 및 쇄석공극저류법으로 나눌 수 있다(서울시정개발연구원, 1995).

본 고에서는 이러한 시설들 중 침투트렌치에 한정하여 그 특징, 제원, 설계방법 및 궁극적으로 이들 시설의 수문학적 해석방법에 대해 살펴보고자 한다. 침투트렌치의 경우 그 도입 역사가 짧아 어떤 정형화된 설계 및 해석방법이 존재하지는 않는다. 따라서 여러 연구자들에 의해 다양한 해석 및 설계 방법 등이 제시되어 왔다. 본고는 이러한 부분에 초점을 맞추어 조사 분석하는 것을 목적으로 한다. 특히, 국내에 적용되었던 사례를 집중적으로 비교 평가해 보고자 한다.

2. 침투형 유출저감시설과 침투트렌치

2.1 침투형 유출저감시설

침투형 우수유출저감시설은 기존의 침투구역 즉 공원, 녹지 등에 설치하여 침투율을 증진시키는 경우와 보도, 주차장 등 불투수면으로 구성되어 있는 지역의 일부분에 대해 그 구조나 재질을 변경하여 침투가 가능하도록 변경한 경우 등으로 나눌 수 있다(행정자치부, 1998; 한국토지공사, 2005). 침투형 유출억제시설의 종류를 구체적으로 살펴보면 표 1과 같다. 또한 이들 시설을 침투의 방식으로 구분하면 크게 우물법, 확수법 및 쇄석공극저류법으로 크게 나눌 수 있다. 이들 방법은 각각 우물에 우수를 주입하여 침투시키는 경우, 유역의 표층에서부터 물을 침투시키는 경우, 저류 및 침투의 두 가지 기능을 동시에 가지는 경우를 나타낸다.

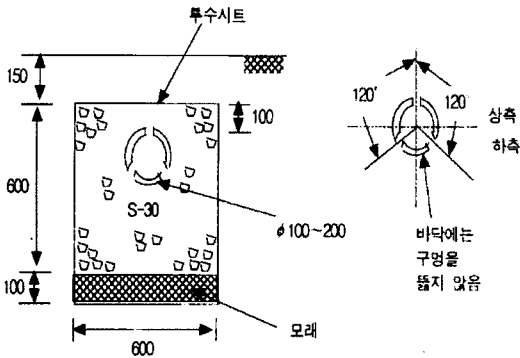
(표 1) 침투시설 종류에 따른 분석(행정자치부, 2000)

구분	특 성
침투통	건물 및 도로의 빗물받이 바닥에 자갈과 모래를 포설하여 침투유도
침투트렌치	우수관 사이를 잇는 지하시설로서 유공 및 투수성 콘크리트로 시공하여 침투유도
침투측구	투수성 콘크리트 등을 사용하여 공원 및 운동장 주변 배수 시설물 시공, 침투유도
투수성 포장	주차장, 보도 등을 투수성으로 시공하여 침투유도
투수보도블럭	보도를 투수성 재료로 시공, 침투유도
쇄석공극저류	주택사이 공간 등에 자갈과 모래를 포설하여 침투유도

2.2 침투트렌치

침투트렌치는 굴착한 도랑에 쇄석을 충전하고 침투통과 연결되는 침투관을 설치해서 우수를 도입, 쇄석의 측면 및 저면에서 불포화대 혹은 포화대를 통과해 지중으로 분산시키는 시설이다(행정자치부, 1998). 이 시설은 주로 건물 주변의 녹지, 광장 등에 침투통과 조합하여 설치한다(행정자치부, 1999). 침투트렌치는 침투, 저류기능 외에 하수관거와 같은 통수기능을 가지고 있으므로 하수관거에 대체해서 사용할 수 있다.

침투트렌치는 투수관, 충전쇄석, 모래, 투수시트, 관입구 필터로 구성된다. 침투트렌치는 유입되는 토사 등의 청소가 곤란하기 때문에 트렌치 전후에 침투통을 설치하여 토사 등의 유입을 방지할 필요가 있다. 모래는 굴착 바닥면 침투면이 시공 시에 다짐이 됨으로써 침투능력이 저하하는 것을 막기 위한 쿠션제로 이용된다. 충전쇄석은 시설 본체와 침투면 사이에 충전하고 침투면의 보호와 저류량 및 설계수두의 확보를 도모하기 위해 사용된다. 투수시트는 토사가 쇄석 안으로 유입되는 것을 막음과 동시에 지면의 함몰을 막는다. 관입구 필터는 투수관으로의 쓰레기 등의 유입을 방지하는 목적으로 설치한다(행정자치부, 2001). 다음 그림 1은 침투트렌치의 구조를 나타낸다.



(그림 1) 침투트렌치의 구조(서울시정개발연구원, 1998)

원칙적으로 침투트렌치는 통수기능과 침투기능을 겸하고 있으므로 통수기능 자체를 무시할 수 없다. 따라서 투수관내로의 퇴적된 토사 등을 소통시킴과 동시에 막힘에 의해 침투능력의 저하되는 경우를 방지하고 통수기능을 유지하기 위해 중단계획이 필요하다. 일반적으로 투수관의 중단경사는 대체로 1~2% 정도로 하는 것을 표준으로 하며, 지형이나 규모에 따라 달리 결정하는 경우도 있다(행정자치부, 2000a). 침투시설은 유효한 수두를 얻을 수 있는 구조로 하여야 하며, 따라서 침투통과 침투트렌치 연결시 침투통 유출부의 투수관은 다음 침투통 유입측과 비교하여 높은 곳에서 연결하여야 한다. 충전쇄석의 중단경사는 설계수두를 균등하게 할 수 있는 의미에서 수평 되게 하는 것이 바람직하나, 지형경사가 있는 경우 지형경사에 맞추는 것이 좋다. 아울러 침투트렌치와 침투통의 충전쇄석은 연결되는 것을 원칙으로 한다. 단, 지형 경사가 있는 경우에는 쇄석 공극 사이에서 생성되는 물의 유입에 의해 주변토사가 쓸려 내려가게 되어 지표면이 함몰되고 또한 오염물질이 트렌치 내부로 유입될 수도 있으므로 충전쇄석 부분이 연속되지 않도록 하여야 한다. 이 간격은 1 정도를 표준으로 하며, 이를 통하여 침투트렌치 내부의 유효수두를 극대화할 수 있다.

3. 침투트렌치에 대한 국내외 연구동향

3.1 국외의 연구동향

먼저 국외의 관련연구를 살펴보면, 침투트렌치의 개념이 우리나라에서의 그것보다 훨씬 넓게 쓰이고 있음을 확인할 수 있다. 예를 들어 우리나라에서 측구라고 표현되는 것도 모두 침투트렌치로 표현된다. 저류침투지, 침투통, 쇄석을 채운 저류지 또한 포괄적으로 침투트렌치로 관련하여 해석되기도 한다. 본 고에서는 이들을 구분하여 조사하고 정리하였다.

침투트렌치와 관련해서는 먼저 Watanabe(1995)의 연구를 살펴볼 수 있다. 이 연구에서는 침투트렌치의 효과를 수정 RRL 방법을 이용하여 해석하고 있다. 이때 침투량은 설계침투량으로 가정하였고, 강우입력에서 차감하는 형태를 취하였다. 그러나 침투시설의 분석의 있어서 지하수의 영향이 고려되지 않은 문제점이 있다. Wada et al.(1997)의 경우에는 침투트렌치에서의 침투 및 유출 모의를 탱크모형을 이용하여 수행하였다. 특히 탱크의 유출고는 침투관 아래 쇄석 내 공극과 쇄석 하단부에서 지하수 위사이 공극의 합으로 나타냄으로서 지하수위의 영향이 고려되게 하였다. 그러나 침투트렌치에의 침투율은 수위에 증가에 따라 증가하는 양상을 보이나, 분석에 있어서는 수위변화를 고려하지 않은 단점이 있다.

Jia et al. (2002)의 연구에서는 WEP(Water and Energy transfer Processes) 모형을 적용하여 도시지역 물순환을 해석하였다. 특히, 도시화로 인한 물순환 회복 방안으로 침투트렌치의 사용을 제안하였으며, 그 효과를 검토하였다. 일본의 Ebi강 유역을 대상으로 한 적용사례의 경우 침투트렌치는 지붕과 직접 연결되어 있으며 아울러 전 유역에 균일하게 분포되었다고 가정하고 있다. 기타 침투트렌치의 배치나 형태는 일본 우수저류침투기술협회(Association for Rainwater Storage and Infiltration Technology: ARSIT)의 연구결과를 직접 이용하였다. 참고로 WEP 모형에 적용된 ARSIT의 연구결과는 먼저, 지

면의 경사는 10%이하이어야 하고, 지하수위는 지표로부터 2m이상 아래에 위치하고 있어야 한다. 기본적으로 점토성 토질에는 사용하지 않는 게 좋으며, 설치밀도는 450 m/ha이하로 제한되어야 한다. 위 기준을 이용하여 침투트렌치를 설치하였을 경우와 설치하지 않을 경우를 비교한 결과, 총 1463mm강우 중 200mm의 표면유출 감소율을 보였으며, 지하수 함량은 25mm가 증가함을 확인하였다. 이러한 결과를 근거로 침투트렌치 설치로 인해 물순환의 개선효과는 입증되었으나, 이는 장기적 측면에서의 표면유출 감소이며, 단기 호우사상에 대한 효과에 대해서는 구체적으로 설명되지 않고 있다.

이상과 같은 연구 외에도 Smith and Bui(2001)의 연구에 주목할 수 있다. 이들은 우리나라의 침투지와 유사한 형태인 단순 침투트렌치(simple exfiltration trench)와 침투트렌치와 유사한 Etobicoke 침투트렌치를 수정 Puls 모형을 이용하여 해석하였다. 이 연구의 결과는 MIDUSS 모형으로 발전되었으며, 이후 Smith(2004)에 의해 MIDUSS 2004 모형으로 개선되게 된다.

Warnaars et al.(1999)은 두 개의 침투트렌치를 Copenhagen의 도심지역에 설치하여 모니터링을 수행하고 평가하였다. 특히 침투트렌치의 성능이 막힘에 의한 영향보다 토양의 투수계수 자체에 더 큰 영향을 받는다고 지적하고 있다. Li et al.(1999)는 불투수지역에서의 유출량 증가와 수질악화를 개선하기 위하여 Partial Exfiltration Trench(PET)의 효용성을 검토하기도 하였다. PET는 상부에 다공성 포장과 모래층으로 구성되어 있으며 모래층에는 암거가 매설 되어있어 쇄석공극저류지의 형태에 보다 가까운 것으로 판단된다. PET의 수문학적 거동을 분석을 위해 SWMS_2D(Simunek et al., 1994) 모형을 이용하였다. 캐나다 서부지역 및 미국의 53개 도시를 대상으로 침투트렌치의 사용실태를 조사한 Abida and Sabourin(2006)의 연구도 주목할 만하다. 약 50%의 지자체에서 침투트렌치를 우수관거에 연결해서 사용하고 있으며, 단지 몇 개의 도시에서만 침투증가를 위해 초지에

침투트렌치를 설치 사용하고 있는 것으로 조사되었다.

기타 측구 또는 침투지 형태의 침투트렌치의 해석사례도 여럿 찾아볼 수 있다. Kuo et al.(1989)는 Darcy의 법칙 및 연속방정식을 유한요소법을 적용하여 해석하였고, Duchene et al.(1994)는 Richard Equation을 가지고 역시 유한요소법으로 해석하여 수평 및 연직방향 흐름은 파악하였다. Gou(1998)은 침투지의 효과를 지표 및 지표하 흐름에 대해 2차원 흐름망(flow net)모형을 이용하여 침투 유역을 모의하였다. Guo(2001)은 침투지에서의 침투 현상을 3차원 potential flow 모형으로 해석하고 이를 MODFLOW 모형의 결과와 비교하였다. Guo and William(2001)은 침투지의 설계 시의 월류위험(overflow risk)을 판단할 수 있는 방안을 제시하였다. 이 분석에는 평균 강우깊이와 강우간격이 이용된다.

Kronaveter and Shamir(2001)는 쇄석공극침투지를 해석하기 위해 SWMM 모형을 수정하여 소유역에 적합한 HMM(hydrological micromodel) 모형을 개발하였다. 침투트렌치 바닥을 통한 침투과정은 Green-Ampt 방법으로 모의하였으며, 침투트렌치의 옆면에서의 침투는 기존 연구와 같이 1/4이 침투트렌치 옆면에서, 3/4는 바닥에 침투된다고 가정하였다. Akan(2002)도 Green-Ampt 모형을 이용하여 쇄석공극침투지를 해석하였다. 침투지의 구체적 설계절차에 대해서는 Massmann(2003)의 연구를 살펴볼 수 있다.

이상과 같은 연구를 살펴보면 우리나라의 침투트렌치와 동일한 개념은 대부분 일본에서의 연구에서 찾아볼 수 있다. 따라서 우리나라에서의 관련 연구가 주로 일본의 연구를 참고하고 있는 것도 크게 무리는 아니다.

3.2 국내의 연구동향

침투트렌치와 관련한 국내의 연구는 서울시정개발연구원(1995)의 연구로부터 시작된다. '우수유출률 저감대책'이라는 보고서를 통해 우수유출률 저감대책 중 하나로 침투트렌치를 고려하고 그 해석 및 설계기준을 제시한 것이

다. 침투량의 시간변화는 Horton 식에 근거하고 있다. 특히 설계조건에 해당하는 중기침투능의 경우에는 매설조건, 강우특성, 막힘 등이 고려될 수 있도록 하였다. 이러한 연구는 1998년에 보완되어 지하수의 영향이 고려되도록 하였고 아울러 안전계수의 개념이 도입되어 보다 현실적인 기준이 되도록 하였다.

행정자치부(1998)에서는 '우수유출저감시설 설치기법 연구'라는 일련의 연구를 통하여 침투트렌치의 설치효과를 제시하였다. 행정자치부(1998)의 연구에서는 침투트렌치 설치에 따른 효과를 분석하기 위한 예비 작업으로 설치비용을 미국의 기준으로 추정하였다. 행정자치부(1999)에서는 ILLUDAS 모형을 수정하여 유출해석모형으로 이용하였으며, 침투트렌치의 설치의 영향은 설계침투량의 개념으로 강우기간 동안 일정하게 유지되는 것으로 가정하고 있다. 즉, 침투트렌치의 단위 설계침투량은 시설의 형상과 설계수두를 변수로 하는 간편식을 이용하여 기준 침투량을 산정한 후 여기에 영향계수를 곱해서 산정하게 된다. 이렇게 추정된 설계침투량은 강우량에서 차감되어 유출모형의 입력으로 사용되게 된다. 2002년까지 지속된 이 연구에서는 또한 4개의 시범구역에 대해 침투시설과 저류시설의 연계운영 효과를 모의하였으며, 특히 침투시설로서 도로 침투집수정 이외에 침투트렌치를, 저류시설 중 운동장 및 주차장 저류시설을 추가하였다. 침투트렌치는 도로 침투집수정 사이에 연결되어 설치되는 것으로 가정하였다.

행정자치부(2000a)는 국내의 기성제품을 조사, 적용가능한 시설의 유형과 제품을 제시하였으며 국내의 시설기준 현황에 언급하고 있다. 행정자치부(2000b)의 연구는 행정자치부(1999, 2000a)의 연구를 기초로 하고 있다. 먼저, 우수유출 저감시설의 치수효과를 동일한 ILLUDAS 모형을 이용하여 분석하였고, 침투트렌치의 고려도 일본의 표준 설치안을 따라 수행된다고 가정하였다. 2000년 문산 지역에 대한 강우분석을 토대로 2시간 이하 경우 Huff 2분위가 지배적임을 확인하고, 20년 빈도의 120분

지속기간의 강우를 입력으로 적용하였다. 모의 결과 침투트렌치가 유출저감효과에 미치는 영향은 침투유량과 유출용적이 각각 9.7%와 15.1%로 나타났다고 보고하였다. 행정자치부(2001)는 침투트렌치를 포함한 투수성 유출저감시설의 설계, 시공 및 시공 시 주의점들을 포함한 설치기준을 제시하였으며, 이 내용은 소방방재청(2004)의 연구에서 다시 인용되고 있다. 행정자치부(2002)는 설치확대를 위한 법적기준에 대해 언급하고 있다.

이후 소방방재청(2003)은 침투트렌치와 관련하여 시설 운영시 대두될 수 있는 문제점을 파악하였고, 유지관리 방안에 대해 제시 하였다. 특히, 주목하여야 할 문제점으로는 장기간 사용(5년 이상)으로 인해 침투량의 큰 저하가 가능하므로 주의를 요하고, 이를 피하기 위해서는 침투통과의 접속부나 관입구 필터를 주기적으로 청소해야 한다고 밝히고 있다. 소방방재청(2004)의 연구는 행정자치부(2001)와 동일하다. 이외에 인천지역환경기술개발센터(2004)에서도 침투트렌치 구조와 일본의 시공사례를 제시하고, 아울러 국내 시범사업지역에 대해 침투트렌치를 설치하였을 경우의 효과를 분석한 바 있다.

서울특별시(2004)에서도 도시화 따른 문제점에 대한 대안방안으로 침투시설을 제안하고, 이를 SHER(Similar Hydrologic Element Response) 모형을 이용하여 해석하였다. SHER 모형에서는 빗물침투시설(침투통, 침투트렌치 등)이 모두 침투트렌치의 길이로 환산되어 해석된다. 이승중 등(2005)의 연구에서는 WEP(Water and Energy transfer Process) 모형을 적용하여 물순환 모의를 수행하였다. 왜곡된 물순환을 회복하기 위한 대안으로 침투트렌치와 투수성포장재를 고려하고, 그 설치효과를 도립천구역에 대한 모의를 통해 파악하였다. 마지막으로 이정민(2007)은 SWMM 모형을 수정하여 침투트렌치의 수문학적 효과가 분석될 수 있도록 수정하였다. 침투트렌치를 모형화하기 위하여 Smith(2004)에 의해 개발된 MIDUSS 모형을 기반으로 하였으며, SWMM 4.4H 모형으로 수정·보완하였다.

이상과 같은 국내 연구를 종합해 보면 국내에서는 침투 트렌치 자체의 해석보다는 그 효과의 검토에 더 많은 관심을 가지고 있으며, 아울러 다양한 유출모형이 시도되고 있는 것으로 파악된다. 침투트렌치에 의한 침투효과가 정량적으로 파악될 수 있는 경우도 있으나, 설계침투량의 개념을 적용하는 경우도 많다. 두 경우에 대한 차이는 아직 검토되고 있지 못한 것으로 보인다.

4. 침투트렌치의 해석의 주요사례 검토

국내의 경우 침투트렌치의 설계와 관련해서는 그 기준으로 종기침투능의 개념을 도입하고 있다. 즉, 강우가 일정시간 이상 지속되는 경우 토양이 포화된 경우에 가능한 침투량을 기준으로 하는 것이다. 이와 같은 종기침투능의 추정에는 토양의 특성, 부유물에 의한 막힘의 영향, 지하수위의 영향 등이 고려된다(서울시정개발연구원, 1995). 아울러 이에 대한 영향은 관측된 자료를 근거로 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 침투트렌치의 설치로 인한 유출 특성의 변화를 파악하는 데에는 위와 같은 설계조건은 아주 제한적인 정보만을 제공해 준다. 강우 초기부터 중단시까지의 강우지속기간동안의 유출특성 변화를 파악할 수 있어야만 침투트렌치와 같은 시설의 영향을 보다 정량적으로 파악할 수 있다. 본 고에서는 이러한 해석에 초점을 맞추어 기존의 연구를 정리해 보고자 한다.

먼저, 침투트렌치와 관련된 수문해석은 크게 일정침투량 또는 Horton 식과 같은 침투모형을 위주로 하는 경우(서울시정개발연구원, 1995; 행정자치부, 1999)와 연속방정식을 근거로 하는 경우(서울특별시, 2004)로 크게 나눌 수 있다. 위 두 경우 다 기본적으로 연속방정식을 만족해야 하므로, 전자의 경우에는 침투량의 변화를 주어진 침투모형으로 먼저 결정하고, 이를 연속방정식에 적용하는 경우가 되며, 후자의 경우는 침투량의 결정을 경험식 또는 지하수를 고려한 Darcy의 식을 이용하는 형태를 취한다. 따라서 위의 방법들은 침투량이 시간적으로 변동하는 경

우와 일정량의 침투량이 계속 유지되는 경우로 구분될 수도 있다.

4.1 침투모형을 이용하는 경우

4.1.1 서울시정개발연구원(1995, 1998)

서울시정개발연구원(1995, 1998)은 우수유출률 저감대책 중 하나로 침투트렌치를 고려하였다. 침투량의 시간변화 즉, 주수시간과 침투량과의 관계를 Horton의 모형에 근거하고 있다.

$$Q_t = Q_c + (Q_0 - Q_c)e^{-kt} \quad (1)$$

여기서 Q_t 는 주수시간(t)에 있어 침투량(l/hr), Q_0 는 초기침투량(l/hr), Q_c 는 최종침투량(l/hr), k 는 감소계수이다. 강우시작 후 일정 시간이 지나면 침투량은 최종 침투능에 수렴하게 되고, 이때의 침투량을 침투면적 A 및 수심을 H 으로 나누면 침투능력계수 $a=Q/H/A(l/hr)$ 를 산정할 수 있게 된다. 산정된 침투능력계수를 침투면적으로 나누면 다음과 같은 최종침투량과 수심관계를 산정할 수 있다.

$$q_c = 14.6H \quad (2)$$

여기서 q_c 는 침투트렌치 1m에 해당되는 최종침투량(l/hr), H 는 수심(m)이다. 그러나 이와 같은 최종침투량은 침투트렌치의 매설조건, 막힘 등 다양한 조건에 영향을 받으므로 적절히 조정되어야 한다. 시정개발연구원(1995)에서는 매설조건, 강우에 의한 저하율, 막힘에 의한 저하율만이 고려되었으나, 이후 서울시정개발연구원(1998)에서는 안전계수와 지하수위에 의한 영향이 추가되었다. 즉,

$$f_c = C \times S \times Y_s \times (1-D) \times (1-E) \times I_c \quad (3)$$

여기서 f_c 는 단위설계침투량($l/m/min$), C 는 안전계수($= 0.8$), S 는 매설조건에 따른 계수, Y_s 는 사용기간 중의 막힘에 의한 저하율, D 는 강우에 의한 저하율, E 는 지하수의 영향에 의한 저하율, I_c 는 현장주입 실험에 의해 측정된 최종침투량 q_c 에 각각의 침투시설 구조에 따른 보정을 실시한 값(l/m)이다. 강우시에 최종침투량은 평상시에

비하여 5~10%정도 저하되므로, 강우 시 최종 침투량의 저하율 D 를 10%로 하는 것이 바람직하다고 밝히고 있다. 또한 지하수 상승이 예상되는 장소에서의 지하수 영향은 다음 식에 의해 산정하였으며 침투저면과 지하수위와의 거리가 $1m$ 이상일 때는 지하수의 영향이 없다고 하였다. 즉,

$$E = 0.47 - 0.47G, \quad 0 < G < 1$$

$$= 0 \quad G \geq 1 \quad (4)$$

여기서, G 는 침투저면과 지하수위와의 거리(m)로 ($0 < G < 1m$)의 범위를 갖는다. 이와 같은 결과를 정리하면 다음 표 2와 같다.

[표 2] 침투트렌치와 설계침투량(계산을 위한 계수결정)

토질 및 매설조건	안전계수	매설조건에 따른 계수S	강우에 의한 저하율D	막힘에 의한 저하율 γ_0
자연지반으로 Loam층 두께(1.5m이상)	0.8	1.0	0.1	0.5
자연지반으로 Loam층 두께(1.5m미만)	0.8	0.5	0.1	0.5
성토지반 또는 점성토	0.8	0	0.1	0.5

총침투량(F_c)은 Horton 식에 근거하는 경우 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$F_c(t) = \int_0^t Q(t) dt = Q_c t + \frac{1}{k} (Q_0 - Q_c) (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

위 식에서 초기침투능 및 종기침투능은 각각 토양특성, 오염물질부하량, 매설조건 등을 고려하고, 아울러 침투트렌치의 길이를 고려하여 계산한다. 또한 위 식을 설계조건에 해당하는 강우사상에 적용하면 총 침투량을 계산할 수 있다. 침투량의 시간별 변화량도 위 식을 통해 추정가능하다. 그러나 설계조건에서는 위식과 달리 아래와 같은 식을 적용한다. 이 식은 식 (7)에 비해 좀 더 보수적으로 침투량을 산정한 것에 해당한다. 즉,

$$F_c = \frac{f_c \times 60}{A \cdot f/L} \quad (6)$$

위 식에서 F_c 는 총 침투량(mm/hr), f_c 는 단위설계침투량($l/m/min$), A 는 집수면적(m^2), f 는 유출계수, L 는 시설

연장(m)이다. 위 식에서 60을 곱한 이유는 분단위의 침투량을 시간단위의 침투량으로 바꾸어 주었기 때문이다. 아울러 침투트렌치내의 총 저류량(R_v , mm/hr)은 표준적인 침투트렌치의 단위시설저류량($r_v=108 l/m$)을 적용하여 계산하도록 하고 있으며 분모항은 침투트렌치의 설치밀도(m)이다.

$$R_v = \frac{108}{A \cdot f/L} \quad (7)$$

4.1.2 행정자치부(1999, 2000b)

행정자치부(1999, 2000b)는 ILLUDAS 모형을 수정하여 침투트렌치의 설치시 효과를 모의하였다. 4개의 시범 유역에 대해 침투시설과 저류시설의 연계운영 효과를 모의하였으며, 특히 침투시설로서 도로 침투집수정 이외에 침투 트렌치를, 저류시설 중 운동장 및 주차장 저류시설을 추가하였다. 침투트렌치는 도로 침투집수정 사이에 연결되어 설치되는 것으로 가정하였다. 아울러 이 연구에서는 침투의 시간적 변화는 고려하지 않고 일정한 침투량을 갖는 것으로 가정하였다.

침투트렌치의 경우 단위설계침투량은 시설의 형상과 설계수두를 변수로 하는 간편식을 이용하여 기준 침투량을 산정한 후 영향계수를 곱해서 다음과 같이 산정하였다. 이 방법은 일본 우수저류침투기술협회(1995)의 연구에 기초를 두고 있다.

$$Q = C \times Q_r \quad (8)$$

$$Q_r = \frac{Q_0}{K_t} \times K_r = k_0 \times K_r \quad (9)$$

$$K_r = 3.093H + 1.34W + 0.677 \quad (10)$$

여기서, Q 는 침투트렌치의 단위 설계침투량(m^3/hr), Q_r 는 침투트렌치의 기준침투량(m^3/hr), C 는 영향계수(일반적으로 지하수위의 영향(0.9)공극 막힘에 의한 영향(0.9)=0.81), Q_0 는 침투트렌치의 종기침투량(m^3/hr), K_r 는 설치시설의 비침투량(m^2), K_t 는 시험시설의 비침투량

(m^2), k_o 는 토양의 포화투수계수(m/hr), H 는 설계수두(m), W 는 폭(m)을 나타낸다. 행정자치부(1999)에서는 H 와 W 를 각각 $1.5m$ 로 가정하였다. 위 식의 적용을 위해서는 기준침투량의 추정이 필요하며, 이를 현장실험을 통해 산정한다(우수저류침투기술협회, 1995).

행정자치부는 침투트렌치와 침투집수정이 연계되었을 때의 경우에 대해 연구를 수행하였다. 따라서 침투트렌치만의 효과를 정량적으로 알 수는 없으나, 침투집수정의 효과와 두 시설의 동시에 설치되었을 때의 차이를 감안한다면 침투트렌치의 효과를 간접적으로 추정할 수 있다. 침투트렌치를 $450m/ha$ 의 밀도로 청주, 성남, 안산, 마산 4개의 대상유역에 설치되었을 때 지속시간 60분의 재현기간 30년의 강우사상에 대해 침투유량은 4.7%, 총 유출량은 6.4%가 감소하는 것으로 분석하였다.

행정자치부에 제시된 단위설계침투량 산정방법과 이에 따른 시험시설의 결과는 모두 일본 우수저류침투협회에서 제시된 값을 사용하고 있다. 따라서 우리나라 실정에 부합되는지 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 연속방정식에 근거하는 경우

4.2.1 서울특별시(2004)

서울특별시(2004)는 도시화 따른 문제점에 대한 대안 방안으로 침투시설을 제안하고, 이를 SHER(Similar Hydrologic Element Response) 모형을 이용하여 해석하였다. SHER 모형은 빗물침투시설(침투통, 침투트렌치 등)들은 침투트렌치의 길이로 환산되며, 침투트렌치로 모형화 하였다. 미리 설정한 침투면적의 강우량을 저장능까지 저장하고, 저장분을 일정한 침투능으로 부압지하수에 직접 함양시키는 구조로 되어 있다. 침투트렌치 내부에서의 연속방정식은 다음과 같이 표현할 수 있으며 침투트렌치내의 저류효과는 무시할 수 있는 범위라고 가정하고 있다. 즉,

$$\frac{dS_t}{dt} = Q_t - Q_{inf} - Q_{tovf} = 0 \quad (11)$$

여기서, S_t 는 침투트렌치 내 저류량, Q_t 는 침투트렌치의 유입량, Q_{inf} 는 침투트렌치에서 부압지하수로의 함양량(계획 능력치), Q_{tovf} 는 침투트렌치에서의 월류량으로 $Q_t > Q_{inf}$ 의 때 $Q_{tovf} = Q_t - Q_{inf}$ 로 계산된다. 부압지하수로의 함양량은 지하수위의 수두차를 이용한 경험식이 적용된다.

4.2.2 이승종 등(2005)

이승종 등(2005)은 도시화로 인해 왜곡된 물순환 형태를 보이는 도림천 유역에 대해 WEP(Water and Energy transfer Process) 모형을 적용하여 물순환 모의를 수행하였다. 왜곡된 물순환을 회복하기 위한 대안으로 침투트렌치와 투수성포장재를 고려하였고, 그 설치효과를 분석하였다. 분석에 이용된 WEP 모형은 일본에서 Jia에 의해 1997년에 처음 개발되었으며, 국토교통성을 중심으로 도시유역에서의 물순환 체계의 개선을 위해 적용되었으며 추가로 모형을 보완되었다. WEP 모형은 모형내에 침투트렌치가 설치 가능한 위치를 확인해 주고, 아울러 가능한 길이를 추정해 주는 기능이 있다. 비록 트렌치의 제원이 $1.5m(\text{폭}) \times 1.0m(\text{깊이})$ 를 기본 값(Jia et al., 2001)으로 하여 수행된다는 제한이 있으나 매우 유용한 도구임에 틀림없다. WEP 모형에서 제시된 침투트렌치의 관한 식은 다음과 같다.

$$\frac{dS_t}{dt} = Q_t - Q_{inf} - Q_{tovf} \quad (12)$$

여기서 S_t 는 저류량, Q_t 는 유입량, Q_{inf} 는 침투량, Q_{tovf} 는 월류량을 나타낸다. 이들 값은 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$S_t = nLWH \quad (13)$$

$$Q_{inf} = KoL(aH+b) \quad (14)$$

$$Q_{tovf} = cL(H-H_m)^{3/2}, \quad H > H_m \\ = 0, \quad H \leq H_m \quad (15)$$

여기서, n 는 침투트렌치 내 공극률, L 은 침투트렌치 길

이, W 는 폭, H 는 깊이(수심), H_m 은 계획수심(최대설계 깊이), K_o 은 트렌치 바로 아래의 토양 포화투수계수, a, b, c 는 상수이다. 상수 a 와 b 는 일본 우수저류침투기술협회(1998)와 토목연구소(2002)에 따라 결정하며, 상수 c 는 $0.4\sqrt{2g}(\approx 1.77)$ 의 값을 갖는다.

4.2.3 이정민(2007)

이정민(2007)은 침투트렌치의 수문학적 효과를 분석할 수 있도록 SWMM 모형을 수정하였다. 침투트렌치를 모형화하기 위하여 Smith(2004)에 의해 개발된 MIDUSS 모형을 기반으로 하였으며, SWMM 4.4H 모형을 수정·보완하였다. MIDUSS 모형은 기본적으로 저수지 추적방법 중 수정 puls 방법과 유사하다. 수정 puls 방법과 다른 점은 침투트렌치에서 침투되는 양을 고려한 것이다. 침투트렌치의 해석은 유입 및 유출량, 침투트렌치 내 저류량의 변화, 지하로의 침투량을 고려한 연속방정식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = I - Q - X \quad (16)$$

여기서 I 는 유입량, Q 는 유출량, X 는 침투량, V 는 저류량이다. 위 식에서 침투트렌치 단위길이 당 침투되는 양 dX 는 다음과 같이 계산된다.

$$dX = (2\alpha y + \beta B) K S r \quad (17)$$

여기서 α 는 침투트렌치의 단면형태에 따라 결정되는 상수로서, 상부폭 T , 바닥폭 B 및 높이 h 가 고려된다.

$$\alpha = \sqrt{1 + \left(\frac{T-B}{2H}\right)^2} \quad (18)$$

따라서 직사각형일 경우 $\alpha = 1$ 이 된다. β 는 침투트렌치 바닥 유출구의 개폐여부에 따라 결정되어서는 상수로서 바닥 유출구의 개폐시는 1이며 폐쇄시는 0의 값을 갖는다. y 는 침투트렌치 내의 수심을 침투트렌치 바닥을 기준으로 산정한 값이며, K 는 토양의 투수계수, S 는 마찰경사를 나타낸다. 마찰경사의 경우는 다음과 같은 관계로부터 결

정된다.

$$S_r = \frac{P+y/2}{P} = 1 + \frac{y/2}{P} \quad (19)$$

여기서 P 는 침투트렌치 바닥면과 지하수위 사이의 연직 거리를 나타낸다.

국내의 침투트렌치에 관련한 연구를 살펴본 결과 수문 해석은 크게 Horton 식과 같은 침투모형을 이용하거나 연속방정식을 근거로 하는 경우로 크게 나눌 수 있다. 이에 관련된 국내의 침투트렌치 해석방법 및 문제점을 표 3에 정리하였다.

(표 3) 국내의 침투트렌치의 수문해석 방법

연구기관 및 저자	침투트렌치 해석 방법	문 제 점
시정개발연구원(1995, 1998)	Horton, 단위설계침투법	설계침투량 산정을 위한 계수의 검증 부족
행정자치부(1999, 2000b)	ILLUDAS, 단위설계침투법	일본의 기준을 채택하고 있으며 이에 대한 검증 부족
서울특별시(2004)	SHER 모형	침투량 산정을 위한 경험식 검증 부족
이승중 등(2005)	WEF 모형	침투량 산정을 위한 경험식의 계수 추정 방법 검증 부족
이정민(2007)	수정 SWMM 모형	MIDUSS 모형에서 이용된 침투량 산정방법 검증 부족

4.3 침투트렌치 해석상의 문제점 검토

국내에서의 침투트렌치는 크게 두 가지 방법에 의해 해석되고 있다. 중기침투능 산정 후 안전율을 고려한 설계침투량 산정방법과 연속방정식에 근거하여 해석하는 방법이 이용되고 있다. 설계침투량 방법은 일본에서 제안된 방법이며, 기준에 관하여서도 일본의 기준을 채택하고 있는 실정이다. 그러나 이에 대한 적정성 평가는 이루어지지 못하고 있다. 설계침투량 산정방법에서는 토양의 특성, 막힘의 영향, 지하수의 영향 등을 고려하고는 있으나 이에 대한 평가는 미미한 수준이다.

아울러 정량적 평가를 위해서는 수문학적 해석 방법 개발 및 이를 검증할 수 있는 장기간의 모니터링, 수리모형 실험 역시 수행되어야 하나 이 역시 미미한 실정이다. 수

문학적 해석 시 침투트렌치의 설치효과에 영향을 줄 수 있는 인자들에 대한 폭 넓은 고려가 필요할 것이다. 영향을 줄 수 있는 인자들로는 토양의 조건, 부유물에 의한 막힘 현상, 선행강우, 침투트렌치의 재료 및 제원, 지하수위 등이 있다. 위 조건을 고려하였을 때 보다 정확한 침투량 산정에 관한 경험식 개발도 가능할 것이다.

6. 결론

본 고에서는 침투트렌치에 한정하여 그 특징, 제원, 설계방법 및 궁극적으로 이들 시설의 수문학적 해석방법에 대해 살펴보았다. 침투트렌치의 경우 그 도입 역사가 짧아 어떤 정형화된 설계 및 해석방법이 존재하지는 않는다. 따라서 여러 연구자들에 의해 다양한 해석 및 설계 방법이 제시되어 왔다. 침투트렌치와 관련한 국내의 연구는 서울시정개발연구원(1995)의 연구로부터 시작되었으며 행정자치부(1998, 1999, 2000a, 2000b, 2001, 2002) 등에 의해 연구가 수행되었다. 국내 연구를 종합해 보면 침투트렌치 자체의 해석보다는 그 효과검증에 더 많은 관심을 가지고 있으며, 아울러 다양한 유출모형이 시도되고 있는 것으로 파악된다. 침투트렌치에 의한 침투효과가 정량적으로 파악될 수 있는 경우도 있으나, 설계침투량의 개념을 적용하는 경우도 많다. 두 경우에 대한 차이는 아직 검토되고 있지 못한 것으로 보인다.

설계침투량은 지수함수로 가정한 Horton 식을 주로 이용하여 산정하고 있으며, 침투트렌치의 설치 시의 우수유출저감 효과는 주로 ILLUDAS 모형과 연속방정식으로 근거하여 분석되고 있다. 반면에 국외의 경우 침투시설의 수문학적 거동에 대한 해석을 위해 지배방정식과 유한차분법을 이용하고 있다. 복잡한 계산과정은 수치해석을 이용하고 있으며 지하수 영향의 고려 및 침투과정에 대해 연구가 진행 중이다.

국내외 연구 사례를 살펴본 결과 우리나라에서의 침투트렌치 해석에 대한 문제점은 다음과 같이 파악되었다. 첫

번째로 침투트렌치의 설계는 주로 일본의 기준을 채택하고 있으나, 이에 대한 정량적 평가는 폭 넓게 진행되지 못하고 있다. 두 번째로 침투트렌치에 대한 정량적 평가를 위해서는 장기간 모니터링, 수리모형 실험이 선행되어야 하나 국내에서는 아직 미비한 실정이다. 세 번째로 침투트렌치의 효과에 영향을 주는 인자 즉, 토양의 조건, 선행강우, 침투트렌치의 재료 및 제원, 지하수위 등에 대한 연구가 부족한 실정이다.

침투트렌치의 정량적 및 효과적인 분석을 위해서는 해외의 경험식을 국내에 적용 시 적절한 검증이 필요할 것을 판단된다. 장기간의 모니터링 및 수리모형 실험도 병행하여야 할 것이며 이는 모형화에 대한 기초 작업이 될 것이다. 아울러 침투트렌치에 영향을 줄 수 있는 인자들에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이에 대한 연구가 수행되었을 때 국내여건에 적합한 침투모형이 개발될 수 있을 것이다. 아울러 빗물유출 저감시설 설치 실무 지침서 작성을 통해 설계 시의 혼란을 피할 수 있을 것이다. 더 나아가 내배수 재해의 특성별 지역화를 통해 우리나라의 실정에 적합한 내배수 홍수분담시설의 정량적 평가모형 및 빗물유출 저감시설에 대한 해석모형 개발도 가능할 것이다.

감사의 글

이 고는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(NEMA-06-NH-03) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 서울시정개발연구원(1995), 우수유출률 저감 대책
- 서울시정개발연구원(1998), 서울우수유출저감시설기준연구-설계 및 적용.
- 서울특별시(2000), 우수유출 저감시설 시범사업 검토연구.
- 서울특별시(2004), 서울시 물순환기본 계획 연구.
- 소방방재청(2003), 대표시험유역과 저류·침투시설 운영을 통한 재해저감기법 개선(I).
- 소방방재청(2004), 대표시험유역과 저류·침투시설운영을 통한 재해저감기법 개선(II).

- 우수저류침투기술협회(1995). 우수침투시설기술지침.
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성(2005). "WEP 모형을 이용한 도림천 유역 물순환 모의." 한국수자원학회, 한국수자원학회 논문집, 제 38권, 6호, pp. 449-460.
- 이정민(2007). 투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용. 박사학위논문, 부경대학교.
- 인천지역환경기술개발센터(2004). 인천도심 내 빗물이용시설 설치방안.
- 한국토지공사(2005). 침투형 우수유출저감시설 성능평가에 관한 연구 (I).
- 행정자치부(1998). 우수유출저감시설 설치기법연구 (I).
- 행정자치부(1999). 우수유출저감시설 설치기법연구(II).
- 행정자치부(2000a). 우수유출저감시설 설치기법연구(III).
- 행정자치부(2000b). 우수유출 저감시설의 적용을 위한 시범 지역 운영방안.
- 행정자치부(2001). 우수유출저감시설 설치기법연구(IV).
- 행정자치부(2002). 우수유출저감시설 설치기법연구(V).
- Abida, H., Sabourin, J.F.(2006). "Grass Swale-Perforated Pipe Systems for Stormwater Management." Journal of irrigation and drainage engineering, Vol. 132, Issue 1, pp. 55-63.
- Akan, A.O.(2002). "Sizing stormwater infiltration structures" Journal of Hydraulic Engineering 128 (5) pp. 534-537.
- Duchene, M., McBean, E.A., Thomson, N.R.(1994). "Modeling of infiltration from trenches for storm-water control." Journal of Water Resources Planning & Management, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp 276-293.
- Guo, J.C.Y.(1998). "Surface-Subsurface Model for Trench Infiltration Basins." Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 124, No. 5, pp. 280-284.
- Guo, J.C.Y.(2001). "Design of circular infiltration basin." Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 127, No. 1, pp. 58-65.
- Guo, J.C.Y., William, H.(2001). "Storage Volume for Infiltration Basin," ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 127, No. 3.
- Jia, Y., Ni, G., Yoshitani, J., Kawahara, Y., Kinouchi, T.(2002). "Coupling Simulation of Water and Energy Budgets and Analysis of Urban Development Impact." J. Hydrologic Engrg., Volume 7, Issue 4, pp. 302-311.
- Kronaveter, L., Shamir, U.(2001). "Water-Sensitive Urban Planning: Modeling On-Site Infiltration." Journal water resource, planning and management, Vol. 127, Issue 2, pp. 78-88.
- Kuo, C.Y., Zhu, J.L., Dollard, L.A.(1989). A Study of Infiltration Trenches. Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Bulletin 163.
- Li, Y., Buchberger, S.G., Sansalone, J.J.(1999). "Variably Saturated Flow in Storm-Water Partial Exfiltration Trench." Journal of environmental . engineering, Vol. 125, Issue 6, pp. 556-565.
- Massmann, J.W.(2003). "A Design Manual for Sizing Infiltration Ponds." Washington State Department of Transportation, Research Project Agreement No. Y8265.
- Simunek, J., Vogel, T., van Genuchten, M. Th.(1994). "The SWMS_2D code for simulation water flow and solute transport in two dimensional variably saturated media, Version 1.21." Res. Rep., U.S. Salinity Laboratory, Riverside, Calif.
- Smith A.A (2004). MIDUSS version 2 reference manual. Alan A. Smith Inc. pp. 310-314.
- Smith, A.A, Bui, T.D.(2001), "Design Construction and Performance of Exfiltration Trenches." Urban Drainage Modeling, Conference Proceeding, pp. 482-493.
- Wada, Y., Miura, H., Tada, R., Kodaka, Y.(1997). "Evaluation of an improvement in runoff control by means of a construction of an infiltration sewer pipe under a porous asphalt pavement." Water Science and Technology, Vol. 36, Issues 8-9, pp. 397-402.
- Warnaars, E, Larsen, A.V., Jacobsen, P., Mikkelsen, P.S(1999). "Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2 3/4 years of operation." Water Science and Technology, Vol. 39, No 2, pp. 217-224.
- Watanabe, S.(1995). "Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes." Water Science and Technology, Vol. 32, No 1, pp. 25-32.