

미국의 우수침투 적용사례 및 침투시설에 대한 고찰

이도훈 (경희대학교 토목공학과 교수)

1. 서론
 2. 우수침투시설
 - 2.1 지표침투표면
 - 2.2 지하침투시설
 3. 미국에서의 우수침투 사례
 - 3.1 Long Island
 - 3.2 Maryland
 - 3.3 Hawaii
 - 3.4 Dell City, Texas
 - 3.5 California
 4. 배수우물의 설치에 관련된 지침 및 규정
 5. 결언
- 참고문헌

1. 서론

우수유출은 강우나 눈 녹은 물이 땅속으로 침투하지 않고 건물이나 지표면을 통해 흐르는 물로서 특정 지역의 범람을 방지하기 위하여 적절하게 배수·관리되어야 한다. 우수유출 처리 방법은 우수지나 저류지를 설치하거나, 우수/하수관로를 통한 처리, 우수침투 등 다양한 우수유출 처리 방법이 존재하는데, 본 고에서는 우수를 땅속에 침투시켜 처리하는 우수침투 처리방법에 관하여 검토하였다. 우수의 직접적인 침투는 지하수를 함양하고, 우수배제에 필요한 관로 시설 물을 최소화할 수 있는 장점과 함께 오염된 우수의 침투는 지하수를 오염시킬 수 있는 잠재성이 있다. 본 고에서는 Ferguson(1994) 및 미국 환경청(www.epa.gov/reg5oh2o/storm)의 내용을 발췌하여 미국에서 시행되었던 우수침투시설 및 적용사례 등을 조사·검토하여 미국의 우수침투 현황을 파악하고자 하였다.

2. 우수침투시설

우수침투시설은 토양의 침투능을 증가시키기 위해 만든 인위적인 시설이나 또는 자연적인 지표면의 침투특성을 활용하여 조성한 침투시설로서 크게 지표침투시설과 지하침투시설로 구분할 수 있으며, 그 특성을 요약하면 다음과 같다.

2.1 지표침투표면

지표침투표면은 특정지역에 다공성 표면을 조성하여 지표면의 침투능을 유지하거나 증가시킬 수 있다. 불투수성 포장면의 투수성을 증진시켜서 우수의 침투를 원활히 하고, 우수유출량을 저감시키는 목적으로 다공성 아스팔트 또는 다공성 콘크리트 등으로 지면을 포장하는 것이 일반적인 방법이다. 또는 식생된 지표면을 최대화하여 우수침투를 증가시킬 수 있다.

다공성 포장은 주로 다공성 아스팔트, 다공성 콘크리트, open-celled 포장공 등을 포함하여 다양한 재료로 만들어질 수 있다. 대부분의 다공성 포장은 도시지역의 주차장, 도보, 교통량이 적은 국지도로 등에 적용되어 진다. 다공성 포장의 시공 및 유지관리비는 일반 포장도로보다 약 10% 정도 많이 소요되지만, 우수배수시스템에 필요한 시공관리비가 월등히 저렴하여 어떤 특정 지역 전체를 생각할 때, 다공성 포장이 일반 불투수성 포장보다 약 12-38 % 정도 경제적일 수 있다고 보고된다 (Sorvig, 1993).

2.1.1 다공성 아스팔트

그림 2.1에 제시된 것처럼 다공성 아스팔트도 일반 아스팔트처럼 자갈골재와 아스팔트로 구성

되어 있다. 그러나 일반 아스팔트와는 다르게 다공성 아스팔트는 모래 같은 세골재를 거의 포함하지 않으며 부피당 공극율은 약 12% 정도로서 일반 아스팔트보다 높은 공극율을 유지하고 있다. 또한 아스팔트의 양은 포장혼합물 무게의 약 5.5-6% 정도를 차지한다. 다공성 아스팔트 포장의 마찰안정도 특성은 일반 아스팔트와 유사하며, 처짐 및 내구성도 일반 아스팔트와 거의 같다.

다공성 아스팔트 포장은 1970년 초에 미국환경청(EPA)의 지원에 의해 Franklin 연구소에서 개발되어 졌으며, 그 후 미국내에서 많은 설치가 이루어 졌다.

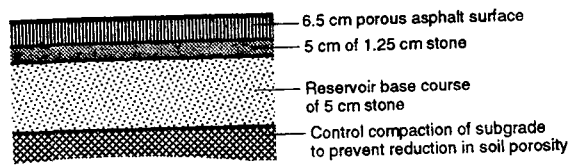


그림 2.1 다공성 아스팔트 포장의 단면도 (Thelen and Howe, 1978)

그림 2.2는 1973년 Delaware 대학교 주차장에 설치된 다공성 포장의 예를 나타낸다. 설치된 장소는 경사가 2%이고 침투율이 0.6-1.3 cm/hr이며, 다공성 포장면의 두께는 약 6.5cm로 5.5%의 아스팔트가 함유되어 있으며 기초부분의 두께는 30cm로 물이 저장될 수 있으며, 저장된 물은 다시 침투가 이루어질 수 있다. Delaware 대학교의 다공성 포장은 보수없이 20년 이상 사용되었으며, 포장 공극이 막히지 않도록 주의하여 청소하는 것이 필요하였다.

다공성 포장은 노면배수조절에 필요한 연석이나 수로가 필요하지 않으며, 노면이 젖었을 경우에 미끄럼에 대한 저항이 일반 아스팔트보다 우수하고 호기성 박테리아의 존재로 오염물질을 분해할 수 있는 좋은 장점들을 가지고 있다.

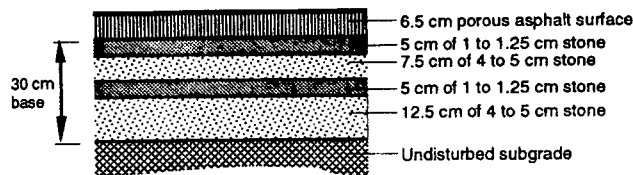


그림 2.2 University of Delaware 주차장에 시공된 다공성 아스팔트 포장 (Bachtle, 1974)

2.1.2 다공성 콘크리트 포장

1970년대에 개발된 다공성 콘크리트 시멘트 포장은 주로 주차장과 차량통행이 적은 도로 등

에 건설되어 졌으며, 특히 미국의 플로리다주에서는 1990년까지 90,000m² 이상의 면적에 건설되어 졌다. 다공성 콘크리트의 조립골재의 최대크기는 약 1cm정도이고, 세립골재를 제외시켜서 15-25%의 공극율을 보장하게 된다. 다공성 콘크리트의 밀도는 일반 콘크리트 포장의 70-80% 정도로서 골재종류와 다짐정도에 따라 차이가 날 수 있다. 다공성 콘크리트의 수축균열은 일반 콘크리트보다 훨씬 더 적으며 다공성 콘크리트의 투수성은 140cm/hr에 이르며 설치 후 오랜 기간 동안 투수성이 변하지 않으며 포장표면의 막힘 현상도 발생되지 않는 것으로 보고된다.

2.1.3 Open-celled paver

Open-celled paver는 대형주차장의 열섬효과를 감소시키기 위한 목적으로 1961년에 독일의 Stuttgart에서 처음 개발되었다. 1960년대 후반기와 1970년 초에 미국에 도입되었으며, 미국토양보전국은 하천제방의 침식방지에 적용하였다. 그림 2.3에 보여진 것처럼 open-celled paver는 콘크리트 또는 플라스틱으로 만든 열린 cell을 가진 paver로 열린 cell 내부는 다공성 골재 또는 잔디를 심은 흙 등으로 채워진다. open-celled paver는 교통하중이 작은 주차장배수로나 비상도로 등에 주로 설치되었다. open-celled paver의 건설비용은 다공성 아스팔트 포장보다 많이 소요되지만, 배수시설 비용을 고려할 경우에 open-celled paver는 불투수성 포장보다 더 저렴할 수 있다. 실내실험 결과에 의하면 open-celled paver의 유출계수는 0.05~0.35 정도로 추정되었다.

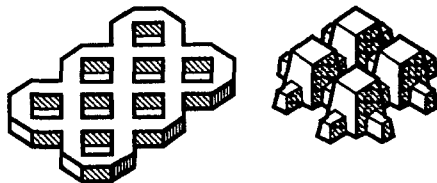


그림 2.3 두 종류의 open-celled pavers (Southerland, 1984)

2.2 지하침투시설

2.2.1 지하저류지

지하침투지는 물을 저류하고 투수성을 확보할 수 있도록 땅속에 설치한 돌, 파이프, 제작된 수실 등의 공간을 이용하는 것이다. 일반적으로 지하시설은 지표시설보다 건설비가 비싸지만, 지표시설 설치를 위한 공간이 제약될 경우에 좋은 대안이 될 수 있고 증발로 인한 손실이 최소화 될 수 있다. 그림 2.4는 지하침투저류지의 예로 몇 센티미터 크기의 돌로 저류층을 형성하고, 저류층 위에 다공관을 설치하였으며, 저류층 상층부에 15cm 두께의 작은 돌로 덮여 있다.

다른 종류의 지하침투지는 그림 2.5에 보여진 침투트렌치를 들 수 있다. 침투트렌치는 땅을 파

서 돌로 채운 저류지로서 트렌치에 유입된 우수는 주변 토양으로 스며들게 된다. 트렌치의 막힘을 방지하기 위해 유입구 필터나 오일/무기물질 분리기 등을 설치할 수 있다.

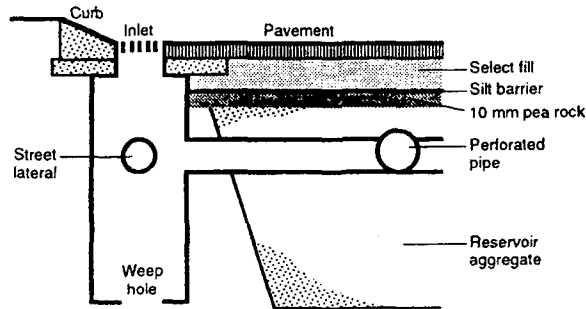
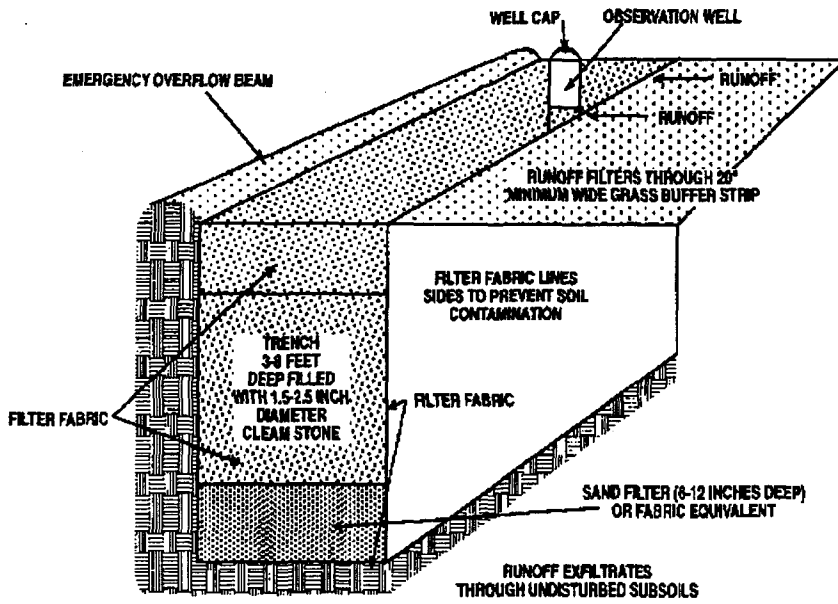


그림 2.4 침투저류지의 예



Source: Debo & Reese 1995

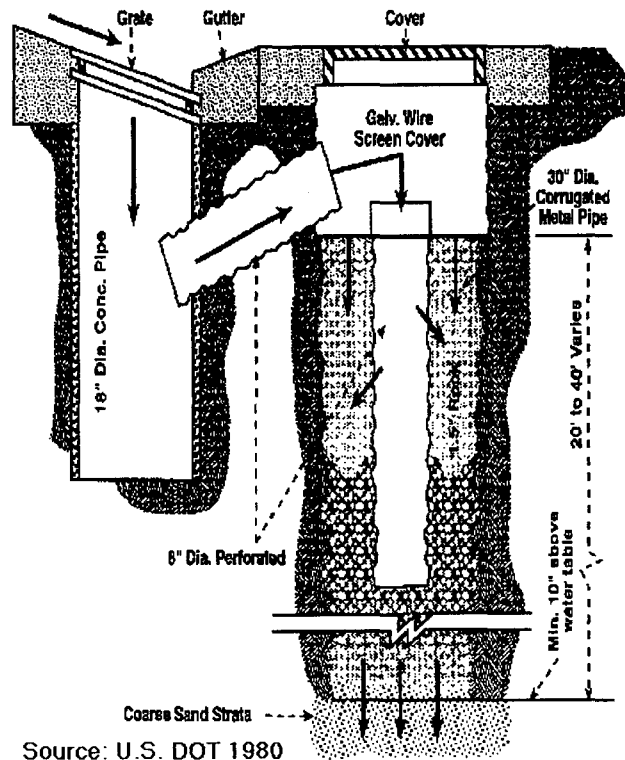
그림 2.5 침투트렌치의 예

2.2.2 주입우물

미국 환경청은 지하주입우물을 class I 에서 class V 까지 5 등급으로 분류하였는데, 각각의 등급은 주입유체의 특성에 좌우된다. 이 등급 중에서 class V 주입우물은 지하수에 유해하지 않는

유체를 주입시키는 우물로서 배수우물, 지열주입우물, 생활하수주입우물, 광물/석유회수우물, 산업용수처리우물, 함양우물 등 세부적으로 분류된다.

이 우물들 중에서 우수침투의 처리에 관련되는 우물은 배수우물(drainage well, dry well)과 함양우물(recharge well)로서 함양우물은 대수층을 직접 함양시키는데 이용되고, 배수우물은 농업배수우물, 우수배수우물, sinkholes, 산업배수우물, 특수배수우물 등으로 다시 분류할 수 있다. 농업배수우물은 관개용수나 축산폐수 등을 주입하는 우물이고, 우수배수우물은 주차장, 도로, 지붕 같은 불투수 포장지역의 우수유출을 주입할 수 있는 우물이다. sinkholes은 카르스트 지형에서의 개발로 인하여 유출되는 우수를 처리하는 우물이고, 산업배수우물은 산업지역의 우수유출을 처리할 수 있으며 산업오염물에 취약한 우물이고, 특수배수우물은 강우이외의 다른 원인에 의해 발생한 물을 처리할 수 있는 우물을 의미한다.



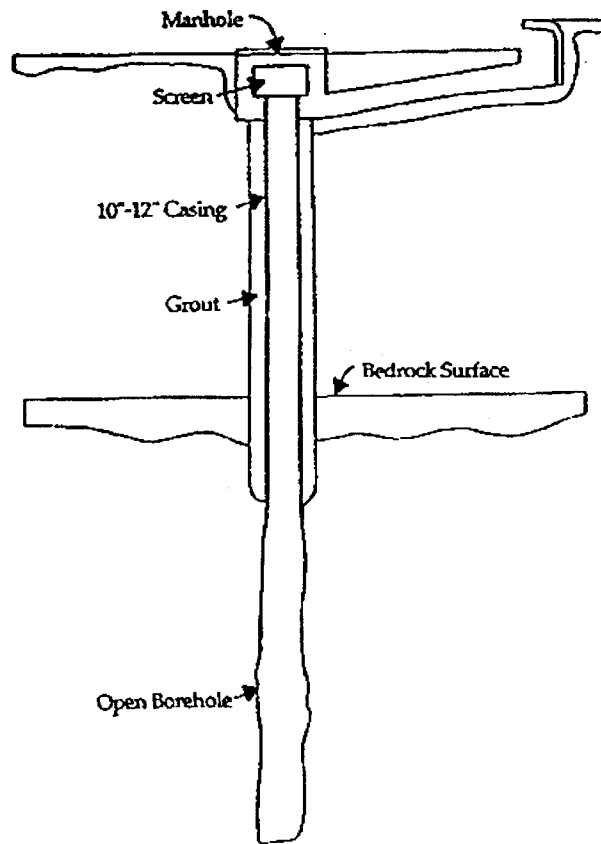
Source: U.S. DOT 1980

Note: Arrows depict flow of storm water.

그림 2.6 Modesto 시의 dry well의 예

그림 2.6은 배수우물(dry well)의 한 예를 나타낸다. 배수우물은 지하수위 위에 땅을 파서 설

치한 것으로 물이 우물로 유입된 후에 배수가 되면 보통 마른 상태를 유지한다. 캘리포니아주 Modesto 시는 그림 7에 보여진 것처럼 도시도로를 배수하기 위하여 dry well을 설치하였다. 이 우물들은 보통 지하수위로부터 10피트 위에 설치되고, 18인치 직경의 콘크리트 파이프가 설치되어 토사나 고형물을 침전시키는 침전지 역할을 하며, 침전지를 통과한 우수는 다른 관을 통하여 우물에 주입되게 된다. 우물의 측면은 1.5인치 크기의 돌로 채워지며 바닥은 조립모래로 채워진다.

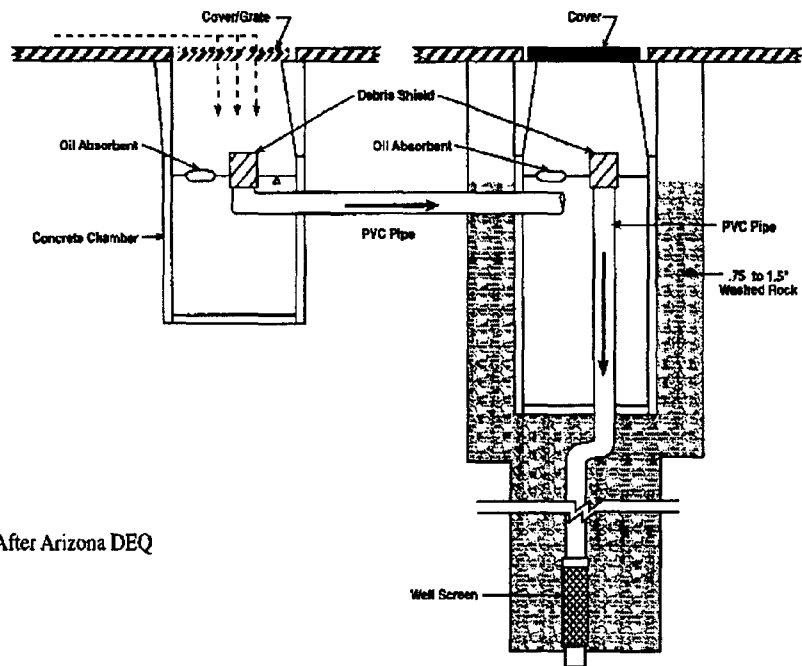


Source: Ohio EPA 1994

그림 2.7 천공우물

다른 종류의 주입우물로는 그림 2.7에 제시된 천공우물을 들 수 있다. 천공우물은 적어도 40피

트 이상 깊이의 석회암이나 사암 등의 암반층에 설치된다. 미국의 일부 주에서는 천공우물을 우수유출 처리우물로 금지하여, 암반층에 물이 직접 주입할 수 없게 된다. 그림 2.7에 보여진 것처럼 우수는 필터 스크린을 통과한 후에 암반층의 균열대에 주입된다. 애리조나 주에서는 변형된 천공우물(그림 2.8)을 설치하였는데, 여기에는 침전지, 잠물마개가 달린 파이프, 기름을 거를 수 있는 오일흡수판 등이 포함되었다.



Source: After Arizona DEQ

그림 2.8 애리조나 천공우물

3. 미국에서의 우수침투 사례

미국의 특정지역에서는 우수침투를 적극적으로 시행하여 수자원의 재이용 및 보호에 상당한 효과를 거두었지만, 우수침투를 전혀 시행하지 않은 지역들도 존재한다. 이 전에 시행되었던 사례 검토를 통하여 성공과 실패의 원인 및 시행동기, 사회·환경 영향 등을 파악할 수 있다. 미국의 각 주에서 시행되었던 우수침투의 사례를 요약하면 다음과 같다.

3.1 Long Island

미국 뉴욕주의 Nassau와 Suffolk County는 우수침투의 오랜 경험을 가지고 있다. 롱 아일랜드 지역의 유일한 용수공급원인 지하수를 함양하고, 우수관로의 건설을 최소화하기 위한 목적으로 1935년부터 우수침투 프로그램이 시행되었다. 특히 2차대전 후에 주택건설의 활성화에 따라서 우수침투지의 수가 급격히 증가하여 3,000개 이상의 우수침투지가 건설되었다. 연평균 강수량이 약 1,100mm이고 투수성이 양호한 사질토양에 건설된 롱 아일랜드의 침투지는 0.4-12 ha 정도의 크기로 3-4.5m의 깊이로 건설되었다. 대부분의 침투지는 과잉의 우수유출에 대비한 월류구조물이 설치되었다.

침투지의 전체 배수면적은 Nassau와 Suffolk County 면적의 약 10%에 해당하는 30,000ha에 이르며, 개별 침투지의 평균 배수면적은 14ha 정도이다. 침투지의 배수지역은 주거지역 80%, 도로 17%, 상업 및 공업지역 3%로 분포된다. 대부분의 침투지는 지방정부기관에 의해 소유·관리되며, 침투지의 관리는 주로 침투지 바닥의 잔디를 짜르고, 고르거나 토석을 제거하는 것이다.

개개 침투지의 연평균 함양량은 배수면적과 우수유출특성에 따라 변하며, 1969년 조사자료에 의하면 2,124개의 침투지로부터 함양량은 년 6억7천만 m³에 이르는 것으로 추정되었다. 이 함양량은 배수지역의 주거자들에게 필요한 지하수 수요량을 초과하는 양으로 롱 아일랜드 지역은 침투지의 건설을 통하여 지역개발을 지속할 수 있었다. 그리고 모든 롱 아일랜드의 침투지는 1990년에 지하수 함양지역으로 지정되어 보호되고 있다.

3.2 Maryland

메릴랜드주는 1980년대에 미국에서 가장 창의적이고 선도적인 우수침투 프로그램을 개발하여 시행하였다. 이 프로그램은 우수유출의 저감, 기저유출의 증가, 수질개선, 지하수 함양 등의 여러 목적들을 달성하기 위하여 시도되었다. 그리고 1984년에는 투수계수가 0.68 cm/hr인 실트로움 이상의 투수성을 가지는 현장의 개발에서는 침투시설을 설치하는 것을 고려하도록 하는 우수침투 시방기준 및 표준을 설정하였다. 메릴랜드주에서는 1992년까지 약 1,000개의 다양한 침

투지가 건설되었지만, 일부 침투지의 기능저하 및 주지방 행정기관의 채편 등으로 우수침투 프로그램은 쇠퇴하게 되었다. 침투지의 기능저하의 원인으로는 토사와 잡물의 침전, 유지관리 부족, 투수계수의 미비한 조사 및 시공의 오류 등에 기인되었다.

3.3 Hawaii

하와이주는 오래 전부터 침투우물을 설치하여 우수유출을 처리하여 왔는데, 이 침투우물의 적용은 주로 물리적인 요인보다는 경제성의 확보에 의해 결정되었다. 하와이의 Hilo시에는 지표면의 배수를 원활히 하기 위해 1970년까지 26개의 침투지가 주거지와 공업지역에 건설되었으며, 거리의 낮은 부분에는 철격자로 유입구를 덮은 함양우물을 설치하였으며, 이 우물의 샤프트는 직경 1.5m, 깊이 2-9m 정도였다.

하와이주의 Maui 카운티는 집중호우 후의 우수유출을 제어하기 위해 그림 3.1에 보여진 것처럼 함양우물이 설치된 저수공간을 조성하였다. 직경 2m의 우수배수 관로 유출구의 측면에 한 쌍의 우물을 설치하고, 관로에서 유출되는 물은 퇴적물과 잡물의 우물유입을 방지하기 위하여 그림에 화살표로 흐름 진행방향이 표시된 것처럼 순환되도록 설계되었다. 함양우물의 직경은 40cm, 깊이는 85m에 이르며, 우물의 상층부 40m 깊이까지는 케이싱을 설치하여 지하수와 우수의 직접적인 혼합을 방지하여 우수유출은 함양우물의 하층부 45m로부터 주입되었다.

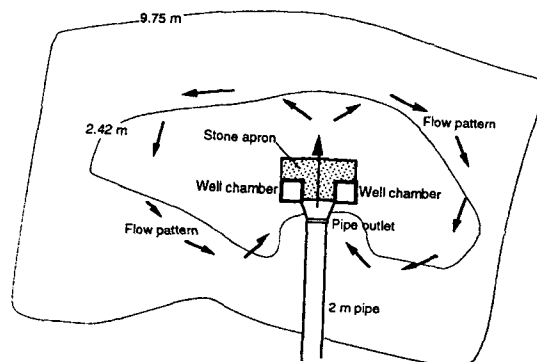


그림 3.1 우물이 설치된 침투지

3.4 Dell City, Texas

텍사스 주의 Dell 시는 계곡에 위치한 도시로 불규칙한 강우패턴을 가지고 있으며, 가끔씩 강한 폭우로 인하여 홍수피해가 발생하고 있다. 그리고 60-450 m 깊이에서 양수되는 지하수는 이 지역의 관개에 이용되고 있는데, 많은 양의 관개용수 사용으로 인하여 지하수위가 계속 감소하

고 있다. 또한 양수되는 지하수는 염분을 함유하고 있어서 생활용수로 사용하는 것이 어려우며, 염분을 함유한 관개수의 침투로 인하여 지하수수질은 악화되고 있는 상태였다.

따라서 홍수피해저감, 지하수위저하 방지 및 수질개선을 목적으로 토양보전국(Soil Conservation Service)은 홍수조절댐을 건설하고, 댐의 직하류에 함양우물을 설치할 것을 제안하였다. 따라서 홍수시에 발생하는 유출량은 댐에 저류된 후에 지하수 함양우물로 운반하여 약 2천4백만 m³의 지하수를 함양하도록 설계되었다. 1990년 현재 2개의 댐이 건설되었고, 직경 50 cm의 함양우물이 11개 설치되어 테스트되고 있다.

3.5 California

Modesto 시는 1980년까지 도시지역의 70%에 해당하는 거리가 우물에 의해 배수되어 대수층에 주입되었다. 이 시에서 설치한 우물의 형태는 아래 그림 3.2와 같고, 우물의 직경은 약 76cm, 심도는 6 - 12m에 이른다. 정기적인 유지관리에도 불구하고 일부 우물들은 배수가 되지 않아서 월류가 발생되었으며, 그 원인은 보고가 되지 않았다.

캘리포니아주 교통국은 1935년이래 Fresno 지역에 100개 이상의 배수우물을 설치하였다. 우물의 평균깊이는 약 10m 정도로 지하수위는 30m 깊이에 위치하였으며 지하수위 위는 실트층에 의해 분리된 모래층이 형성되어 있어서 좋은 배수조건을 가지고 있었다.

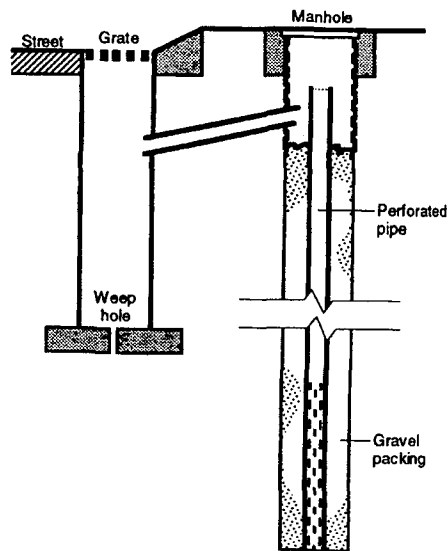


그림 3.2 Modesto 시의 배수우물

4. 배수우물의 설치에 관련된 지침 및 규정

우수침투 시설 설치로 인하여 지표수 및 지하수 수원에 대한 오염을 방지하기 위해 규정한 미국의 배수우물 설계지침을 검토하면 다음과 같다. 배수우물의 위치설정을 위한 지침은 지표수체로부터 최소거리, 음용수 공급우물로부터 최소거리, 지하수위로부터 최소거리, 특정 중요지역내의 설치 금지, 토양의 적합성 등을 규정하고 있다.

① 지표수체로부터 최소거리: 배수우물과 지표수사이의 거리를 두어서 우수가 토양 층을 통과하여 여과된 후에 지표수로 유입되도록 하기 위한 목적으로 미국 Rhode Island 주의 규정은 지표수원으로부터 최소 200 피트, 해안지역 못으로부터는 150피트, 비수원 지표수로부터는 50피트 거리를 유지하도록 규정하고 있다.

② 음용수 공급우물로부터 최소거리: 오염물이 음용수 공급우물로 이동하는 특성은 우물심도, 강우특성, 주입우수의 오염정도, 토양종류, 토양의 오염물질 제거특성, 지하수 유동 특성 등에 좌우될 수 있다. 배수우물과 음용수 공급우물사이의 최소거리에 대한 미국의 지침은 주에 따라서 약간의 차이가 있다.

Arizona 주: 최소 100 피트를 유지하도록 권장함.

Illinois 주: 최소 200 피트를 유지하도록 규정함.

Maryland 주: 최소 100 피트를 유지하도록 권장함.

Rhode Island 주: 공공우물로부터는 400피트, 개인우물로부터는 100피트를 유지하도록 규정함.

③ 지하수위로부터 최소거리: 배수우물의 말단부분이 지하수위에 잠기지 않고 간격을 유지하여 오염물질이 토양에 흡착되도록 배수우물과 지하수위사이의 최소거리를 미국 여러 주에서는 약 2 - 10 피트 정도 유지하도록 권장하고 있다.

Arizona 주: 최소 10 피트를 유지하도록 권장함.

Maryland 주: 최소 2-4 피트를 유지하도록 권장함.

Oregon 주: 현장 조사 및 분석을 통해 결정하도록 규정함.

Rhode Island 주: 최소 3 피트를 유지하도록 규정함.

④ 특정지역에서의 설치금지: 수원보호구역, 우물보호구역, 수질이 매우 우수한 수체 인접지역, 오염정화지역, 산사태 및 사면 불안정지역 등에서는 배수우물의 설치를 금지하고 있다.

⑤ 토양의 적합성: 일반적으로 침투시설의 설계에서는 실트나 점토성분이 높은 토양과 침투율이 낮은 토양에서는 침투시설의 설치를 피할 것을 권장하고 있는데, 토양의 침투능과 여과능이 적절하게 조화되도록 설계해야 한다. 침투율이 너무 크면 물이 너무 급속하게 침투하여 여과효율이 떨어지게 되고, 반대로 점토성분이 높은 토양은 오염물의 여과에는 효과적이지만, 침투능

의 지하로 침투시설의 실행에 제약이 받게 된다. Rhode Island 주는 배수우물 설치지역의 침투율은 0.27 - 7.5 inch/hr 정도로 규정하고 있다.

이상의 배수우물 위치선정에 관한 지침이외에 지하수 수질보호를 위한 배수우물의 설계, 장치 및 운영에 관한 최적관리기법은 미국환경청 홈페이지(www.epa.gov/reg5oh2o/storm)를 참조할 수 있다.

5. 결론

미국에서는 오래 전부터 우수를 처리하기 위한 수단으로 여러 가지의 다양한 우수침투시설을 개발하여 활용하여 왔다. 과학적으로 잘 설계되고 체계적으로 운영되는 우수침투시설은 홍수유출의 저감뿐만 아니라 지하수 함양, 하천의 기저유출 확보, 생태계 보호 등에 기여하는 자원으로 그 중요성이 클 뿐만 아니라, 도시배수시스템에 필요한 시설의 최소화로 경제적 효과도 크다고 생각할 수 있다. 우리나라도 선진 외국의 성공과 실패사례를 면밀히 분석하고, 타당성 조사 방법, 우수침투의 설계 및 관리에 필요한 지침을 마련하는 등 우수침투의 현장적용에 필요한 기술을 발전시키고, 우수침투 프로그램을 효율적으로 실행하여 수자원의 지속적인 확보 및 홍수재해 방지 등에 적극적으로 활용할 필요가 있다.

참고문헌

미국 환경청 <http://www.epa.gov/reg5oh2o/storm/>

미국 환경청 <http://www.epa.gov/grtlakes/seahome/inject/src/main.htm>

Bachtel, Edward R., 1974, The rise of Porous Paving, Landscape Architecture Vol. 65, pp. 385-387.

Ferguson, Bruce K, 1994, Stormwater Infiltration, Lewis Publishers

Sorvig, Kim 1993, Porous Paving, Landscape Architecture, Vol. 83, No. 2, pp. 66-69.

Thelen, Edmund and L. Fielding Howe, 1978, Porous Pavement, Philadelphia, Franklin Institute Press.