

불포화 토양에서 공기의 배출/제한이 침투속도에 미치는 영향

Effects of Air Drain and Confined Conditions to Infiltration Rate in Unsaturated Soils

김상래¹ · 기재홍¹ · 김영진² · 한무영^{1*}

Sangrae Kim¹ · Jaehong Ki¹ · Youngjin Kim² · Mooyoung Han^{1*}

1 서울대학교 빗물연구센터, 2 서울대학교 SIR BK사업단

(2008년 11월 17일 접수; 2008년 12월 4일 수정; 2008년 12월 8일 채택)

Abstract

It is well known that the water infiltration rate depends on soil properties such as soil water content, water head, capillary suction, density, hydraulic conductivity, and porosity. However, most of proposed infiltration models assume that the air phase is continuous and in equilibrium with the atmosphere or air compression and air entrapment on infiltration was not considered. This study presents experimental results on unsaturated water infiltration to relate air entrapment and hydraulic conductivity function based on soil air properties. The objectives of this study were to measure change of soil air pressure ahead of wetting front under air drain and air confined condition to find the confined air effect on infiltration rate, to reduce the entrapped air volume related with soil air pressure to increase the soil permeability, and to make a basis of infiltration process model for the purpose of improvement of infiltration rate in the homogeneous soil column. The results of the work show that soil air pressure increases according to increasement of the saturated soil depth rather than the wetting front depth during infiltration process.

Key words : Infiltration rate, air confine, air drain, air entrapment, unsaturated soil, rainwater runoff reduction

주 제 어 : 침투속도, 공기제한, 공기배출, 갇힌공기, 불포화토양, 빗물유출저감

1. 서론

강우시 토양 침투는 지표면에서 물의 흐름과 지표 하에서 물의 이동에 직접적인 영향을 미치게 되므로 물순환의 이해에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 침투현상의 수리적 특성에 대한 연구는 농학, 토양학, 지반공학, 수리·수문학, 지하수학 등 여러 학문분야에서 관점을 달리하여 널리 연구되어 온 분야이다. 이러한 학문분야별 토양의 수리적 특성에 대한 관점을 살펴보면 이론적(theoretical) 해석방법과 경험

적인(empirical) 해석방법을 통해 침투 거동을 규명하면서 발전되어 왔음을 알 수 있다. 이론적인 해석방법은 토양의 포화 및 불포화 수리특성, 함수율과 모세관흡입수두의 함수와 같은 토양의 고유특성을 고려하여 토양내 물 흐름의 물리적 변수에 의미를 부여하고 있다. 또한 이론적 해석방법은 Green-Ampt식(1911)을 바탕으로 하는 거시적 해석방법과 Richards식(1931)을 바탕으로 하는 미시적 해석방법을 통해 여러 학문분야에서 관점을 달리하여 침투이론을 발전시켜왔다. 경험적 해석방법은 실험실 또는 현장실험을 통해 확

*Corresponding author Tel: +82-2-880-8915, FAX: +82-2-885-7376, E-mail: myhan@snu.sc.kr(Han, M.Y.)

보된 데이터를 바탕으로 변수에 물리적 의미를 부여하는 준경험식(semi-empirical equation)과 물리적 의미가 부여되지 않는 단순한 경험식(empirical equation)으로 구분할 수 있다. 준경험식으로는 Horton식(1938)과 Holtan식(1961) 등이 있으며, 경험식으로는 SCS-CN과 Kostiaikov식(1932)을 그 예로 들 수 있다 (Kim and Han, 2008).

침투는 토양 표면을 통해 물이 토양 공극 속으로 유입되는 과정으로 정의되며, 초기 침투연구에서는 물이 토양 공극 속으로 유입 될 때 동일한 부피의 토양 내 공기가 대기압 조건에서 빠져나가는 것으로 가정한 연구가 지배적이다 (Philip, 1957). 침투에 관한 선행 연구자들의 결과에 따르면 침투속도에 영향을 미치는 인자는 함수율, 수두, 토양 입자 특성, 모세관 흡입수두, 공극율 등 여러 가지가 있다(Bond and Collis-George, 1981; Touma et al., 1983; Ward and Trimble, 2004). 토양에서의 모세관 실험을 통해 갇힌 공기(entrapped air)의 개념을 Zimmerman(1936)이 처음으로 발표한 이후 Free and Parmer(1940)는 침투시 토양 내 공극의 크기에 따른 공기 배출이 침투속도에 영향을 미친다는 실험 결과를 처음으로 제시하였다. 침투시 공기와 물의 거동에 대한 다수의 이론 연구가 있지만 갇힌공기에 대한 직접적인 실험은 1960년대에 들어 비로소 연구되기 시작했다. Wilson and Luthin(1963)은 마노미터를 이용한 공기압 측정으로 습윤선(wetting front) 아래 공기압의 증가와 함께 침투속도가 느려진다는 것을 제시하였다. 또한 Gupta and Swartzendruber (1964)에 의해 갇힌공기의 거동에 관한 실험적 증거가 이루어졌다. 이후 많은 현장 및 실내 연구를 통해 갇힌공기의 양이 토양 체적(bulk volume)의 0~20%의 범위에서 침투속도 및 특성에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 연구들이 이루어졌다(Jarrett and Fritton, 1978; Fayer and Hillel, 1986; Faybishenko, 1995; Wang et al., 1998; Sakaguchi et al., 2005).

침투시 공기의 영향에 대한 이론적 분석, 실험, 수학적 모델을 통한 선행연구에서 피압된 공기 또는 갇힌공기와 침투속도와 관계가 있음을 보이고 있으나 완전하게 정리된 결과는 제시되지 못하고 있다. 또한 피압된 공기의 거동연구를 통해 침투속도를 개선 할 수 있는 방법에 대한 연구는 유리 비드(glass bead)나 돌이 포함된 흙(stony loam)과 같이 매우 제한된 조건에서만 시도된 바 있다(Breckenridge et al, 1985; Hoover and Jarrett, 1989). 따라서 본 연구에서는 물이 토양속으로 침투될때 습윤선 아래 공기의 배출이 제한된 조건(confined condition)과 배출조건(drained condition)에서 압력변화를 측정하고, 습윤선 아래 공기의 압력이 변화함에 따라 침투속도와 포화도 및 침투량에 미치는 영향을 제시하고자 한다. 이때 습윤선의 깊이에 따른 공기의 거동 특성을 새롭게 제시하고, 이를 바탕으로 침투속도

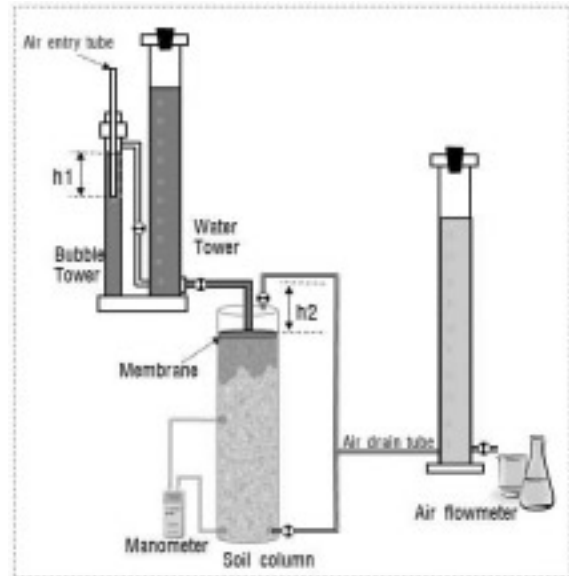


Fig. 1. Experimental setup for simulating the effect of air entrapment.

를 증가시킬 수 있는 근거를 마련하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1에서와 같이 토양결렬, 장력침투계, 공기량 측정장치, 공기압력 측정장치로 구성된다.

장력침투계는 토양표면에 일정한 수두로 물을 공급해 주는 역할을 하며 공기유입 타워(bubble tower), 매리엇 저장조(mariotte bottle), 멤브레인의 원형관으로 구성된다. 버블타워에서는 공기유입 튜브(air entry tube)의 깊이 조절이 가능하도록 하였으며, 공기유입튜브의 깊이(h1)와 매리엇 저장조 유출구에서 멤브레인까지 높이(h2)의 차이를 이용해 토양표면에 작용하는 수두를 결정한다. 즉, 토양표면에 작용하는 수두 $H = h2 - h1$ 이 된다. 따라서 h1이 h2보다 큰 경우에는 토양표면에 음의 수두가 작용하게 된다. 본 연구에서는 토양표면의 수두를 5cm로 고정하여 실험을 수행하였다. 매리엇 저장조에서 빠져 나오는 물을 토양에 직접 공급하는 원형관 공급장치의 표면은 35마이크로미터의 공극과 수두 32cmH₂O까지 조작이 가능한 투수성 막(membrane)으로 싸여 있다. 침투가 진행됨에 따라 장력침투계의 매리엇 저장조의 수위 변화를 측정하여 토양속으로 침투되는 물의 양을 계산하였고, 이를 바탕으로 침투속도를 산출하였다.

토양 결렬은 높이 45cm, 내경 8.2cm의 투명한 폴리프로필렌 재질의 용기에 공기압력을 측정할 수 있도록 제작하였다. 흙은 침투속도를 조절하기 위해 40번체를 통과한 실트 및 점토질 흙에 주문진사를 혼합하였으며, 그 구성은 모래 83.04%, 실트질 10.84%, 점토질 6.12%, 진밀도 2.4g/cm³의 사질토(loamy sand)이다. 이 흙을 용기의 바닥으로부터

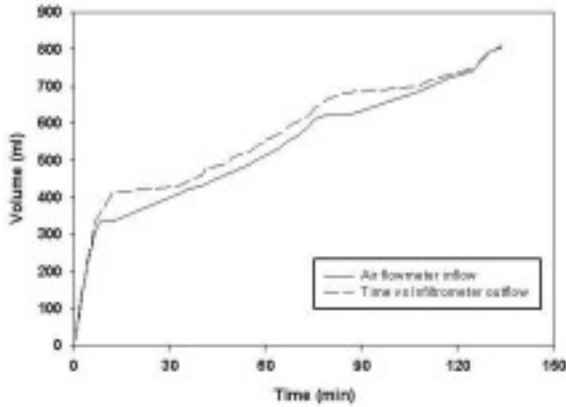


Fig. 2. Comparison of the outflow water from infiltrometer and air inflow into air-flowmeter.

37cm 높이까지 공극률($39 \pm 0.2\%$)에 맞춰 다짐 후 실험을 수행하였다. 토양 컬럼에 흙을 채우고 상부는 실리콘 마개를 이용하여 공기가 새지 않도록 하고 마개에는 공기 배출관이 연결될 수 있도록 하였다. 토양컬럼에는 토양표면으로부터 30cm 되는 지점에 피압된 공기의 압력을 측정하기 위한 Lutron사의 디지털 마노미터(PM9100)를 연결하여 시간에 따른 공기압의 변화를 측정하였다. 또한 토양표면 아래 36cm 지점에 공기 배출관이 연결되어 있고 이 관에 설치된 밸브를 조절하여 공기의 배출조건과 제한조건을 모사하였다. 공기 배출조건에서는 아래쪽의 공기 배출관의 밸브를 열고 침투의 진행과 함께 공기가 배출되어 공기 포집장치로 흘러들어가도록 하였다. 공기 제한조건에서는 아래쪽의 공기 배출관의 밸브를 닫고, 실리콘 마개에 연결된 공기 배출관의 밸브를 열어 물이 침투됨에 따라 토양표면을 통해 빠져나오는 공기를 공기 포집장치로 흘러들어가게 장치하였다. 침투 과정에서 이동하는 습윤선의 최대 및 최소 깊이는 육안을 통해서 측정하였다.

침투과정에서 토양컬럼으로부터 배출된 공기는 공기 포집장치로 유입되는데, 공기 포집장치에서는 유입된 공기에 상응하는 부피의 물이 빠져나간다. 따라서 공기 포집장치에서 빠져나간 물의 무게를 측정하고 여기에 물의 밀도를 나누어 토양컬럼에서 배출된 공기의 부피를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 시간에 따라 장력침투계에서 빠져나가는 물의 양과 공기포집장치에서 포집된 공기의 양을 나타낸 것이다. Christiansen(1944)은 침투과정에서 토양 간극사이에 갇힌 공기(entrapped air)가 간극사이에 채워지는 물에 용해되면서 침투속도가 갑자기 증가 할 수 있음을 발표한 바 있다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 장력침투계를 통해 흙 속의

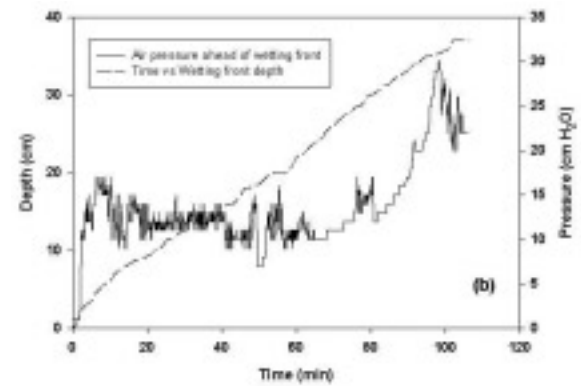
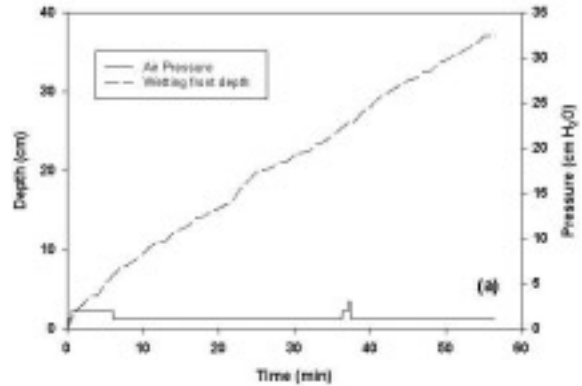


Fig. 3. Relationships between wetting front depth and air pressure under the air drain condition(a), the air confined condition(b).

로 침투되는 물의 양과 토양컬럼에서 빠져나오는 공기의 양이 침투 전 과정에 걸쳐 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 실험종료 후 공기포집장치에 포집된 공기의 양에 상응하는 양의 물을 장력침투계의 매리트 저장조에 채우는 경우 실험 시작시의 수위를 회복하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구의 경우 침투시 공극 속을 차지하고 있던 공기가 물에 용해되는 양은 무시할 만큼 적다는 사실을 알 수 있었다. 또한 실험과정에서 공기의 양을 측정하기 위한 장치에서 발생하는 공기량의 손실이 없다는 결과를 얻었다.

Fig. 3은 침투시간에 따른 습윤선의 깊이 및 습윤선 아래 공기의 압력변화를 공기배출조건(a)과 공기배출 제한조건(b)에서 나타낸 것이다. 공기의 압력은 토양표면 아래 30cm 지점에서 측정되었다. Fig. 3(a)는 공기배출 상태에서의 변화를 나타낸 것으로, 습윤선의 깊이가 시간에 따라 깊어지는 데 반해 공기의 압력은 변화가 거의 없이 일정하고 매우 낮은 값을 유지하고 있다. 공기배출 조건에서 공기의 압력은 모든 실험에서 0~3cmH₂O 수두의 범위에서 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있었다.

공기가 배출되는 조건에서의 공기의 압력은 이론적으로는 0 cm 의 값을 나타내어야 하나, 일정한 수두(3 cmH₂O 이내의 범위에 있는 낮은)의 값을 유지하는 경우는 토양컬럼

의 다짐과정에서 공기배출 관의 입구에 토양 입자가 압밀되어 공기의 배출을 방해하는 현상이 발생한 것으로 판단된다. Fig. 3(b)는 공기배출의 제한조건에서 침투가 진행됨에 따라 습윤선 아래 공기의 압력이 발생하는 현상을 나타낸다. 공기의 압력은 침투가 시작된 직후 급격하게 증가하여 6분 30여초가 경과한 이후에는 17cmH₂O의 수두에 상당하는 값까지 증가하였다가 15분 이후로는 10~15cmH₂O 수두의 범위에서 변동하는 모습을 볼 수 있다. 특히 공기의 이동을 제한한 조건에서의 피압공기의 압력은 공기 배출 상태와 비교하였을 때 단순히 증가하는 것만이 아니라 증가와 동시에 작은 범위에서 지속적으로 증가와 감소를 반복하는 것을 알 수 있다. 이것은 습윤선 아래의 피압된 공기가 습윤선 위를 통과해 흙의 표면으로 배출되기 때문이다. 즉, 물이 흙 속으로 침투함에 따라 공극을 차지하고 있던 공기의 부피가 줄어들면서 피압공기의 압력이 높아지게 되고, 압력이 일정 수준에 도달하면, 토양표면으로 배출되어 다시 압력이 낮아지는 현상을 반복하는 것이다.

Wang 등(1998)은 기존의 연구에서 습윤선 아래의 피압공기의 압력은 습윤선의 깊이와 밀접한 관련이 있다고 밝혔다. Fig. 4에서 H는 토양 표면에 형성된 수위를 나타내고, Z는 침투시 형성되는 습윤선의 깊이를 나타낸다. Wang 등(1998)은 습윤선 아래의 피압공기는 물의 침투에 따라 압력이 증가하다가, 압력이 H + Z의 수두에 해당하는 값이 이르게 되면, 토양표면을 통해 배출된다고 밝히고 있다. 이는 습윤선 위의 토양은 포화도가 100%에 이르거나 혹은 습윤선이 이동하는 과정에서 습윤선 위의 공기는 산발적으로 포집된 형태로만 존재하며(entrapped air) 습윤선 아래의 공기와는 완전히 차단되어 있다는 가정에서 설명하고 있다. 이러한 명확한 습윤선(sharp wetting front)의 가정은 흔히 피스톤 흐름(piston flow)이라고 불리는 지표하 흐름이며, Green-Ampt식에서도 잘 나타나 있다. 하지만 실제로 실험을 수행한 결과 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 습윤선의 깊이가 깊어짐에 따라 피압공기의 압력이 증가하는 경향은 나타나지만, 습윤선과의 명확한 관계를 규명하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 습윤선을 기준으로 아래쪽과 위쪽에 존재하는 공기가 완벽하게 차단되지 않았기 때문으로 판단된다. 앞에서 설명한 바와 같이 선행연구에 부합하는 결과를 나타내기 위해서는 Z 지점을 기준으로 공기의 차단이 이루어져야 하지만, 실제로 공기가 차단되는 기준점은 Z보다 위에 있는 Z_s 지점에 형성되어 피압공기의 압력이 H + Z_s만큼의 수두에 달했을 때 토양표면을 통한 배출이 일어나는 것이다. 실제 실험과정에서 육안으로 관찰한 결과 습윤선 윗부분에 포화도의 차이를 명확하게 나타내는 경계면 Z_s가 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5의 (a)와 (b) 두 실험 모두 공기의 배출이 차단된 조

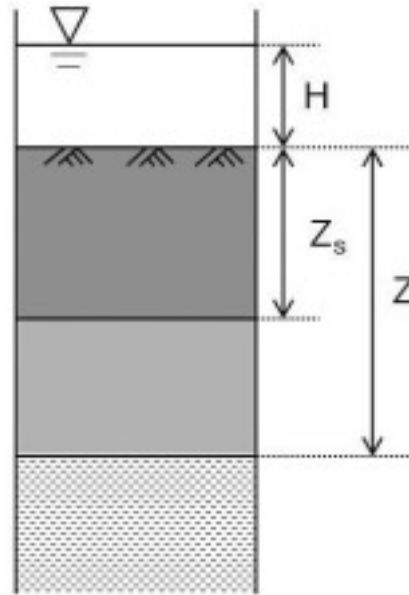


Fig. 4. Wetting front in Unsaturated flow.

건에서 시간에 따른 공기 압력의 변화와 침투속도의 변화를 나타낸 그래프이다. Horton(1940)이 제시한 경험식에서 침투속도는 침투 초기에 큰 값을 나타내다가 지수함수의 그래프를 따라 감소하면서 일정한 시간이 지나면 특정 값으로 수렴하는 특징을 나타낸다고 밝혔다. Fig. 5(b)에서 측정된 침투속도의 변화를 보면, 초기 10분여 동안에는 최고 0.77cm/min에 이르는 높은 값을 나타내다가 이후 급격히 줄어들어 시간이 지남에 따라 0.02~0.21cm/min 사이의 값에 비교적 균일한 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이 실험 결과를 보면 침투속도가 비록 지수함수의 형태를 띠면서 감소하지는 않았지만, 초반의 높은 값을 나타낸다는 점과 후반에 일정한 값으로 수렴한다는 점에서 Horton식을 따르는 것처럼 보인다. 하지만 실험 1(a)의 결과에서는 침투 속도가 시간에 따라 감소되는 경향을 보이긴 하지만 시간의 경과와 함께 침투속도가 어느 한 값으로 수렴된다고 보기는 힘들다. 실험 1(a)에서 침투속도는 침투가 시작된 직후 0.65cm/min에 이르는 높은 값을 나타내지만 이후 급격히 감소하고, 침투가 진행되어도 최소 0.01cm/min에서 최대 0.35cm/min의 범위에서 큰 폭으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 이해하기 위해서는 침투속도의 변화 그래프와 같이 나타나 있는 공기의 압력 변화 그래프를 유심히 살펴 볼 필요가 있다. 실험 1(a)과 실험 2(b)에서 피압된 공기(confined air)의 압력이 변화하는 양상은 확연한 차이를 가지고 있다. 두 가지 경우 모두에서 공기압의 변화폭이 비교적 크긴 하지만, 실험 1(a)의 경우는 전체적으로 압력의 크기가 커지는 경향을 보이고 있고, 실험 2(b)의 경우에는 변화가 일정한 범위에서 이루어지고 있다. 일정 수준 이상의 공기압이 형성된

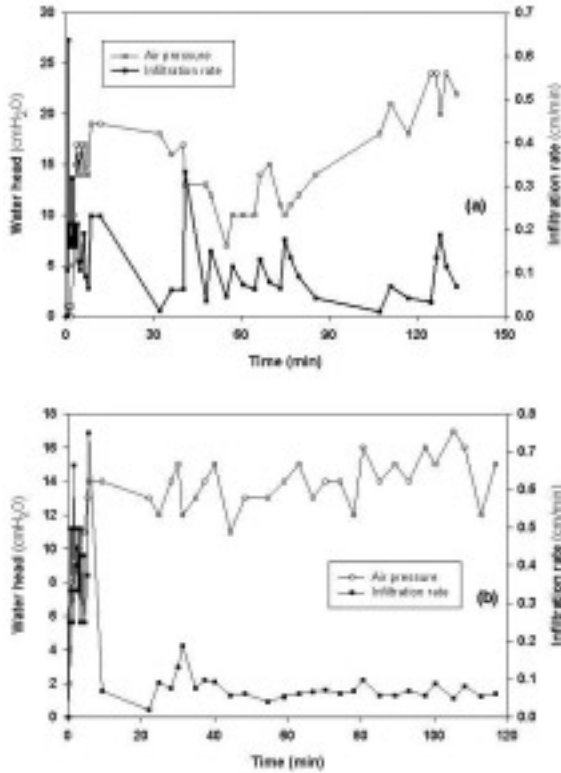


Fig. 5. Relationships between infiltration rate and air pressure in the air confined condition experiment 1(a), experiment 2(b). Water head express air pressure unit.

10분 이후의 결과를 살펴보면, 수두로 나타난 공기압의 값이 실험 1(a)에서는 최소 7cm에서 최대 24cm 사이에 분포하여 큰 편차를 보이는 데 반해, 실험 2(b)에서는 최소 11cm에서 최대 17cm 사이에 분포하여 비교적 일정한 것을 알 수 있다. 여기서 주목할 점은 공기압의 변화와 침투속도의 변화가 상관관계를 보인다는 점인데, 공기압이 높아지면 침투속도가 감소하고, 공기압이 낮아지면 침투속도가 증가하는 경향을 위의 그래프에서 확인할 수 있다. 침투가 진행됨에 따라 피압된 공기가 토양표면을 통해 배출되면, 공기의 압력은 줄어들고 이 때 공기가 빠져나간 공극을 물이 차지하면서 침투속도가 빨라지게 된다.

Fig. 6은 공기의 배출 조건과 제한 조건에서 침투속도의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 두 조건 모두 초기에 침투속도가 0.6 cm/min을 넘어서는 높은 값을 보이다가 시간이 지남에 따라 감소하는 추세를 보이고 있다. 하지만 시간의 경과와 더불어 침투속도가 감소하여 어느 정도 안정된 다음에는 공기 배출 조건하에서의 침투속도가 공기 제한 조건하에서의 침투속도에 비해 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 침투시 형성되는 습윤선이 토양컬럼의 바닥에 도달하는 시간이 Fig. 7에서 보는 바와 같이 2배 이상 차이가 나게 된다. 수차례 실험을 거친 결과 습윤선이 토양컬럼의 바닥에

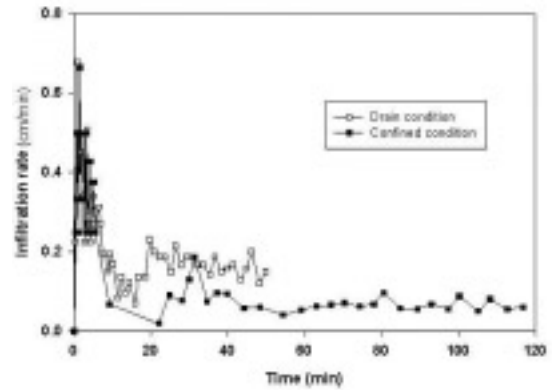


Fig. 6. Comparison of infiltration under air confined/drain condition.

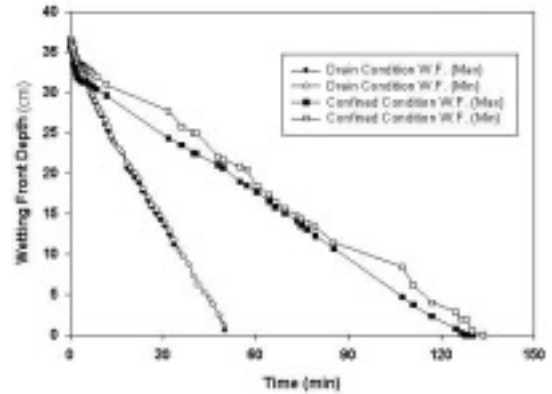


Fig. 7. Comparison of depth of wetting front under air confined/drain condition.

도달하는 시간은 공기 배출 조건의 경우 50분에서 56분 사이에 분포되었으며, 공기 제한 조건의 경우 101분에서 133분의 범위에 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 공기의 배출조건과 제한조건에서 형성되는 습윤선의 시간에 따른 최대값과 최소값을 동시에 나타내었는데, 공기의 배출조건에서는 최대값과 최소값이 거의 같은 값을 가지는데 비해 공기의 제한조건에서는 두 값의 차이가 비교적 크게 나는 것을 볼 수 있으며, 이 차이는 최대 3.7 cm에 이른다. Wang and Feyen(1997)의 연구에서와 마찬가지로 2차원 침투실험에서 공기의 흐름이 제한되었을 경우 습윤선이 안정적으로 이루어지지 않으며, 선택적 흐름(preferential flow)의 일종인 핑거링(fingering)현상이 일어나는 것을 실험을 통해 증명하였다. 따라서 습윤선 아래의 피압공기의 존재는 안정적인 습윤선의 형성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

본 실험은 공기의 배출 조건과 제한 조건에서 장력침투계를 통해 토양컬럼에 물을 공급한 다음 침투시 형성되는 습윤선이 토양컬럼의 바닥에 닿는 시점을 실험의 종료시점으로 설정하였다. 실험이 종료된 이후에는 토양컬럼에서 빠져나온 공기량을 측정하였다. 앞에서 밝힌바와 같이, 토양컬럼을

Table 1. Degree of saturation of soil column for air drain/confined condition

	공기배출	공기제한
공극의 부피(ml)	762	762
토양컬럼을 빠져나온 공기의 총량(ml)	630	540
포화도(%)	82.7	70.9

빠져나온 공기의 총량은 장력침투계를 통해 토양 속으로 침투된 물의 총량과 같다. 따라서 측정된 공기의 양을 토대로 실험이 종료된 이후 토양컬럼의 포화도를 계산할 수 있다. 포화도는 토양컬럼을 빠져나온 공기의 부피를 공극률을 통해 계산되는 공극의 부피로 나누어서 구했으며, 그 값은 Table 1에 나타내었다. 공기의 배출조건과 비교해서 공기의 제한조건에서는 90ml의 공기가 덜 빠져나온 것을 알 수 있고, 이로 인해 토양기둥의 포화도에 있어서도 12% 가량이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이 결과는 침투시 토양 간극내 공기를 빼주는 것이 침투속도 뿐만이 아니라 침투량에 있어서도 긍정적인 영향을 미친다는 것을 나타낸다.

4. 결론

본 연구는 불포화 침투시 토양 간극내 피압된 공기가 침투속도와 침투량에 미치는 영향을 나타내기 위하여 장력 침투계와 토양컬럼, 압력 및 공기량 측정장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 침투시 토양 간극내 공기가 외부로 자유롭게 배제되는 배출조건(drain condition)과 습윤선 상부의 토양 표면을 통해 공기가 배출되는 제한조건(confined condition)에서 토양컬럼 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 장력침투계를 통해 토양컬럼에 공급된 물의 양과 토양 간극내 공기의 양을 비교한 결과 침투과정에서 피압된 공기가 물에 용해되는 양은 극히 적거나 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있었다. 이는 피압된 공기가 물에 용해되면서 침투속도가 증가할 수 있다는 기존 연구 내용과는 다른 결과이다. 또한 공기의 양을 측정하기 위한 장치에서 공기의 누출 등의 손실이 없었음을 알 수 있었다.
2. 공기의 배출조건과 제한조건에서의 토양컬럼내 공기의 압력은 배출조건에서는 0~3cmH₂O의 압력이, 제한조건에서는 최소7cmH₂O에서 최대 30cmH₂O의 압력이 발생하였다. 제한조건에서 피압공기의 압력은 배출조건과 비교할 때 단순히 증가하는 것이 아니라 10~15cmH₂O의 범위내에서 증가와 감소를 반복 하는 것을 알 수 있었다.
3. 기존의 연구에서는 습윤선 아래의 피압공기의 압력은 습윤선의 깊이와 밀접한 관계가 있음이 제시되고 있으

나, 본 연구 결과 습윤선의 깊이 보다는 습윤선 상부의 포화대 깊이와 관련이 있음을 제시하였으며 향후 추가 실험을 통해 정량적인 관계를 제시하고자 한다.

4. 공기의 배출조건에서 침투속도가 제한조건에 비해 2배 이상 빠르며 침투된 물의 양도 12% 많음을 알 수 있었다. 또한 배출조건에서는 제한조건과 달리 선택적 흐름 즉, 핑거링(fingering)현상이 나타나지 않아 안정적인 습윤선을 형성하였다.

본 연구 결과, 침투시설에 공기를 배출하는 기능을 추가하면 침투속도 및 침투량을 증대시켜 궁극적으로 강우시 유출저감 시설로서 그 효과를 개선 할 수 있음을 확인하였다.



감사의 글

본 연구는 서울대학교 공학연구소와 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B02)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다. 아울러 농업과학기술원 토양수분연구실 하상건박사님과 허승오박사님의 조언에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bond, W.J. and Collis-George N. (1981) Ponded infiltration into simple soil systems. 1. The saturation and transition zones in the moisture content profiles, *Soil Sci. Soc. of Am. Journal*, 131, pp. 202-209
2. Breckenridge, R.P., Jarrett A.R. and Hoover J.R. (1985) Runoff reduction by venting with shallow subsurface drainage, *Transaction of the ASAE*, 28(2), pp. 476-479
3. Christiansen, J.E. (1944) Effect of entrapped air upon the permeability of soils, *Soil Sci*, 58(5), pp 355-365
4. Faybishenko, B.A. (1995) Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air, *Water Res. Res.* 31(10):2421-2435.
5. Fayer, M.J. and Hillel, D. (1986) Air Encapsulation: I. Measurement in a field soil, *Soil Sci. Soc. of Am. Journal*, 50, pp. 568-572.
6. Free, G.R. and Palmer, V.J. (1940) Interrelationship of infiltration, air movement, and pore size in graded silica sand, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 5, pp.390-398.
7. Gupta R.P. and Swartzendruber, D. (1964) Entrapped air

- content and hydraulic conductivity of quartz sand during prolonged liquid flow, *Soil Sci. Soc. of Am. Journal*, **28**, pp. 9-12.
8. Hoover, J.R. and Jarrett, A.R. (1989) Field Evaluation of shallow subsurface drains to vent soil air, improve infiltration, and reduce runoff, *Transaction of the ASAE*, **32**(4), pp. 1358-1364
 9. Horton, R.E. (1940) An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity, *Soil Sci. Soc. of Am. Journal*, **5**, pp. 399-417.
 10. Jarrett, A.R. and Fritton, D.D. (1978) Effect of entrapped soil air on infiltration. *Transactions of the ASAE*, **21**(5), pp.901-906.
 11. Kim, S.R. and Han M.Y. (2008) Trends in infiltration research and the effect of air entrapment on the soil permeability, *Proceedings of the 3rd IWA RWHM Workshop*, Vienna, Austria, Sep. 11.
 12. Philip, J.R. (1957) The theory of infiltration 3, Moisture profiles and relation to experiment, *Soil Sci*, **84**, pp 163-178
 13. Sakaguchi, A., Nishimura, T. and Kato, M. (2005) The effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity, *Vadose zone J.*, **4**, pp.139-144.
 14. Touma, J., Vachaud, G. and Palange, J. -Y. (1983) Air and water flow in a sealed, ponded vertical soil column: experiment and model, *Soil Sci*, **137**(3), pp 181-187
 15. Wang, Z. and Feyen, J. (1997) Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects, *Water Res. Res.* **33**(12) pp.2759-2767.
 16. Wang, Z., Feyen, J., van Genuchten, M.T. and Nielsen D.R. (1998) Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability, *Water Res. Res.* **34**(2) pp.213-222.
 17. Ward, A.D., Trimble, S.S. (2004) *Environmental Hydrology* -Second edition, Lewis Publishers, 55p.
 18. Wilson, L.G. and Luthin, J.N. (1963) Effect of air flow ahead of the wetting front on infiltration, *Soil Sci*, **96**(2), pp 136-143
 19. Zimmerman, B.C. (1936) Determining entrapped air in capillary soils, *Eng. News Rec.*, **117**, pp.186-187