

## 불포화 토양에서 빗물의 침투특성 : 유한요소 모델과 실험결과 비교

유건선<sup>1</sup> · 김상래<sup>2</sup> · 김충일<sup>3</sup> · 윤현식<sup>4</sup> · 한무영<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>한라대학교 토목공학과

<sup>2</sup>서울대학교 공학연구소

<sup>3</sup>두산중공업

<sup>4</sup>한국환경공단 물산업진흥팀

<sup>5</sup>서울대학교 건설환경공학부

## Rainwater Infiltration Characteristics in the Unsaturated Soil : Comparison of Finite Element Model with Experimental Results

Kun-Sun Yoo<sup>1</sup> · Sangrae Kim<sup>2</sup> · Tschung-il Kim<sup>3</sup> · Hyunsik Yoon<sup>4</sup> · Mooyoung Han<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Halla University

<sup>2</sup>Engineering Research Institute, Seoul National University

<sup>3</sup>Doosan Heavy Industries & Construction, Water BG

<sup>4</sup>Water Industry Promotion Team, Korea Environment Corporation

<sup>5</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

Infiltration plays an important role in the urban water cycle. Infiltration has a potential to contribute to groundwater recharge in addition to runoff reduction. However, infiltration in urban areas has been considered only as a means of runoff reduction. Conventional design methods for infiltration facilities assume soils to be fully-saturated for the sake of simplicity. The amount of groundwater recharge can not be estimated properly with this scheme. Hence, the characteristics of the unsaturated soil condition need to be considered. The finite element model using SEEP/W to estimate infiltration under the unsaturated condition is presented. Infiltration tests for Joomonjin sand are performed and the infiltration behavior of Joomonjin sand under the unsaturated condition is measured experimentally to verify the validity of the finite element model. The results from comparing infiltrated volume between the saturated and the unsaturated conditions under the same soil and rainfall conditions show that the infiltrated volume in the unsaturated condition is two times bigger than that in the saturated condition.

**Key words :** Rainwater infiltration, Unsaturated soil, Finite element model

### 1. 서 론

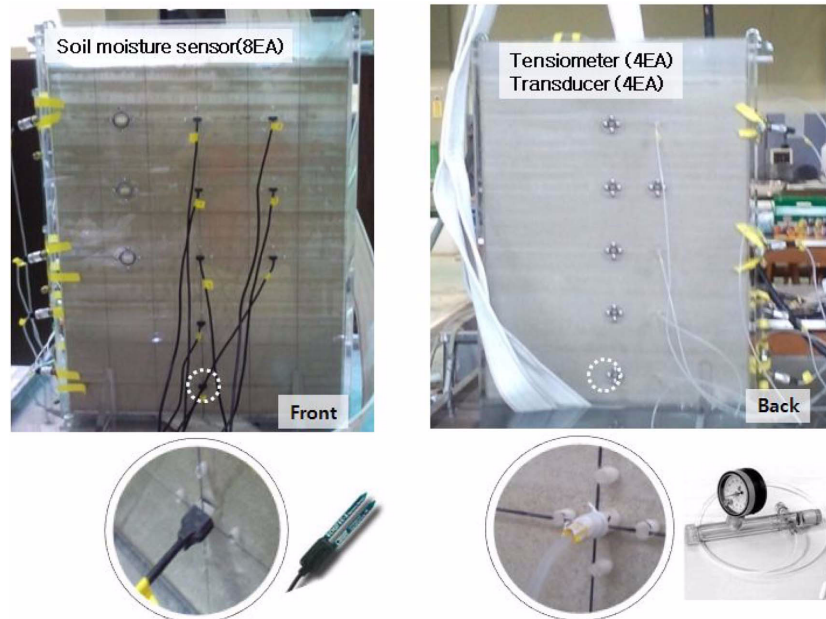
강우 유출수 관리 및 도시 물순환 개선을 목적으로 침투트렌치, 침투측구, 침투통이 설치되고 있으며, 최근에는 PE 재질의 가볍고 시공이 간편한 침투시설이 개발되고 있다. 이러한 침투시설들은 불포화 토양에 설치된다. 하지만 대부분의 침투시설 설계방법과 침투모델 연구에서는 계산의 간편성 때문에 침투시설이 포화토(saturated soil)에 설

치되는 것으로 가정한다. 침투율이 가장 낮은 포화조건에서의 적용은 최소한의 침투량이 유출저감에 적용됨으로써 홍수 안전성은 확보 될 수 있으나 침투량을 정량화 하기에는 한계가 따른다. 침투량 및 물순환의 정량화를 위해서는 불포화 토양 내 빗물의 침투거동특성에 관한 연구의 필요성이 요구된다.

불포화 토양이란 토양입자간 간극수압과 투수계수의 관계에서 부(-)의 간극수압이 0이 되는 지점까지의 불포화

\*Corresponding author : myhan@snu.ac.kr

원고접수일 : 2011. 4. 7 심사일 : 2011. 10. 10 게재승인일 : 2011. 10. 10  
질의 및 토의 : 2012. 2. 29 까지



**Fig. 1.** Acryl column for the visualization of infiltration flow in unsaturated soil and measurement apparatus: FDR sensors, Tensiometers and pressure transducers.

영역을 갖는 토양이다. 불포화 영역의 물의 흐름을 지배하는 요소로서는 불포화토의 침투특성인 불포화투수계수와 간극수압이 있으며 이들은 통상 함수율에 따라 변화한다(Fredlund and Rahadjo, 1993; Lu and Likos, 2004; Miyazaki, 2006). 부(-)의 간극수압은 일반적으로 체적함수율(volumetric water content)과의 관계로 나타내어지는데 이러한 관계곡선을 토양함수특성곡선(soil water characteristic curve, SWCC)이라 하며, 불포화토의 거동을 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램을 이용한 침투시설 설계인자의 모의를 위해서 주문진 표준사의 불포화 침투거동에 대한 실험과 동일한 경계조건에서 모델링을 수행하여 SEEP/W 모델의 유효성을 검토하고자 하였다. 또한 동일한 조건에서 포화조건과 불포화조건에서의 침투량을 비교하였다.

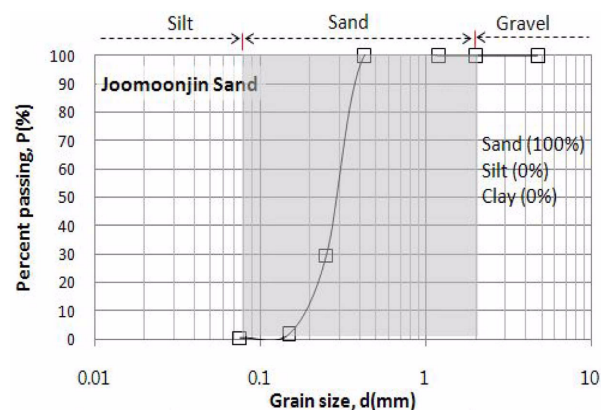
## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험방법

침투실험을 위해 투명한 아크릴 컬럼(H900, L600, W100, 15T, 이하 단위 mm)을 제작하였다. 실험에 사용된 침투박스(H40, L100, W50)는 아크릴로 제작하였으며, PE 재질의 실제 침투박스(H400, L1,000, W500, 독일 Elwa社 제품)의 1/10 스케일로 제작하였다. 아크릴 컬럼의 바닥면과 침투박스 침투면의 개구비는 실험토양(주문진표준

**Table 1.** Physical properties of the Joomoonjin sand

건조단위중량( $\gamma_d$ )	1.6 g/cm <sup>3</sup>
비중( $G_s$ )	2.65
간극비( $e$ )	0.656
포화체적함수비( $\theta_s$ )	0.396
포화중량함수비( $w$ )	0.248
포화투수계수 ( $K_s$ )	$5.74 \times 10^{-4}$ m/s



**Fig. 2.** Grain-size distribution.

사)의 공극률보다 충분히 크게 하여 수리적 상사성을 유지하도록 하였다(James et al., 2007). 컬럼내부 벽면과 토양의 접촉면에서 선택흐름(preferential flow)을 방지하기 위해 공극 1 mm의 아크릴 메쉬를 부착하였으며, 토양의 물리적 특성을 측정하기 위해 토양수분센서와 텐시오

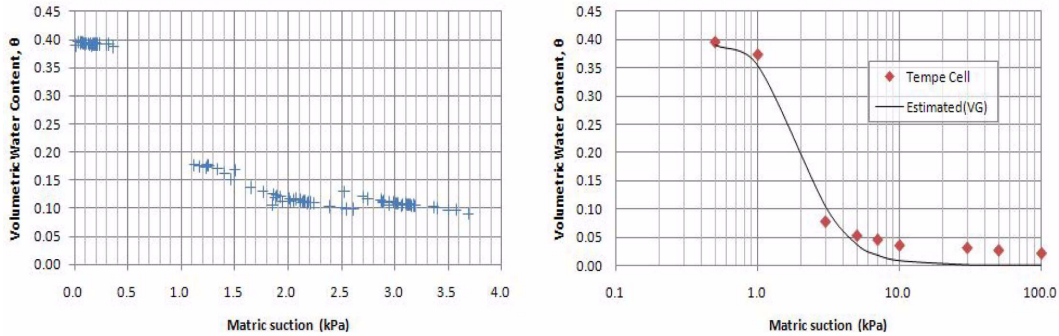


Fig. 3. SWCC of Joomoonjin sand using measured suction from Tensiometers (a) and Tempe pressure cell (b).

미터를 설치하였다.

토양의 함수율과 간극수압 변화를 측정하기 위해 Fig. 1의 왼쪽과 같이 8개의 FDR 토양수분센서(EC-5)와 오른쪽과 같이 4개의 Jet-fill 텐시오미터(2100F)와 트랜스듀서 (pressure transducer)를 설치하여 각각의 데이터는 2개의 데이터로거(Data Taker-Logosense 2)에서 수집하였다. 실험에 사용된 토성은 주문진표준사로서 물성치를 측정하여 Table 1에 나타내었으며 입경분포는 Fig. 2에 제시하였다.

물성치의 측정을 위한 실험순서는 5 mm Soil Funnel Cone을 이용하여 높이 80 cm에서 강사법으로 채적을 구한 몰드에 다져 건조단위중량을 측정하였으며, 동일한 방법으로 컬럼내에 토양을 다지면서 텐시오미터를 설치하였다. 이후 12시간 이상 수침 후 포화투수계수를 측정하였다. 토양컬럼을 수조에서 꺼내어 수분센서를 설치하고 24 시간동안 중력배수를 실시한 후 침투실험을 실시하였다. 침투실험시 물 공급은 Mariott Bottle 원리를 이용하여 침투박스내 물이 항상 만수위를 유지하도록 하였으며 침투된 유량은 전자저울(FG-20K)을 이용하여 무게를 자동 측정하였다.

## 2.2. 유한요소모델(Finite Element Model)

상용 유한요소해석 소프트웨어 SEEP/W에서는 Darcy식으로부터 유도되는 Richards식을 이용하며 유한요소법에 의하여 근사해를 구한다. 2차원 침투해석을 위한 지배방정식은 식(1)과 같이 나타내며, 불포화토 해석을 위해 간극수압을 고려한 SEEP/W의 유한요소 지배방정식은 식 (1)~식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 유도된다(Krahn, 2004). 토양수분 특성시험을 통한 결과를 바탕으로 함수특성곡선을 예측하는 대표적인 경험식은 Fredlund and Xing (1994), Van Genuchten (1980), Mualem (1976), Gardner (1958), Green and Corey (1971)에 의해 발표되었으며, 본 연구에서 사용한 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W에서는

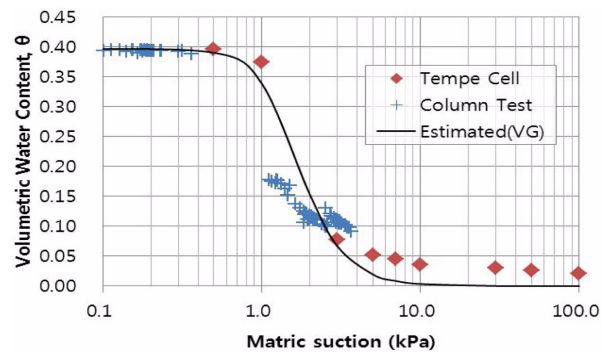


Fig. 4. Combined SWCC of Joomoonjin sand using Tempe cell and Column test.

Fredlund and Xing식, Van Genuchten식 그리고 Green and Corey식을 이용하여 함수특성곡선을 예측한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (2)$$

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

여기서,

$H$  = total head,  $K_x$  = hydraulic conductivity in the  $x$ -direction,

$K_y$  = hydraulic conductivity in the  $y$ -direction,  $Q$  = applied boundary flux

$\theta$  = volumetric water content,  $t$  = time,  $u_w$  = pore-water pressure,

$m_w$  = slope of the storage curve,  $\gamma_w$  = unit weight of water, and  $y$  = elevation

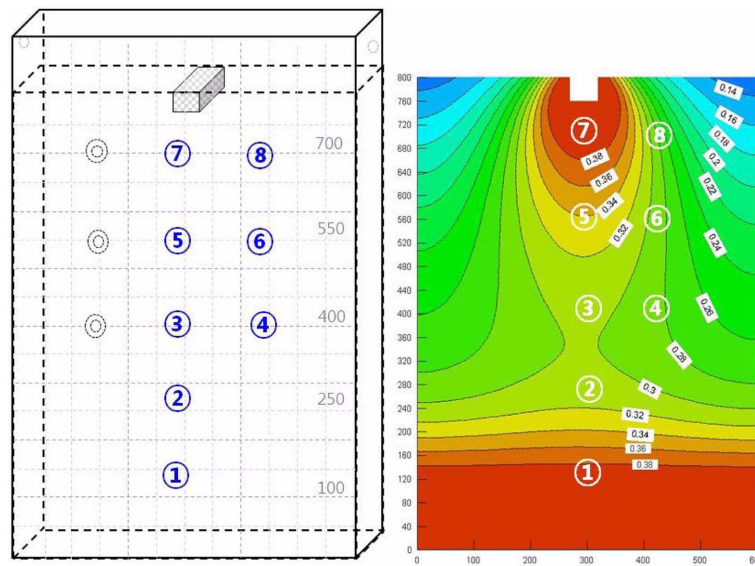


Fig. 5. Illustration of soil moisture sensors in the soil column.

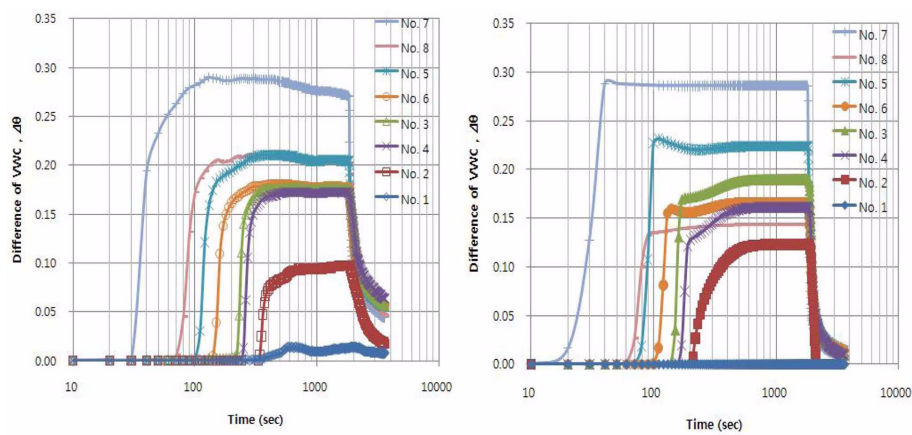


Fig. 6. Time response of measured volumetric water content from the sensors (a) and Time response of estimated volumetric water content (b).

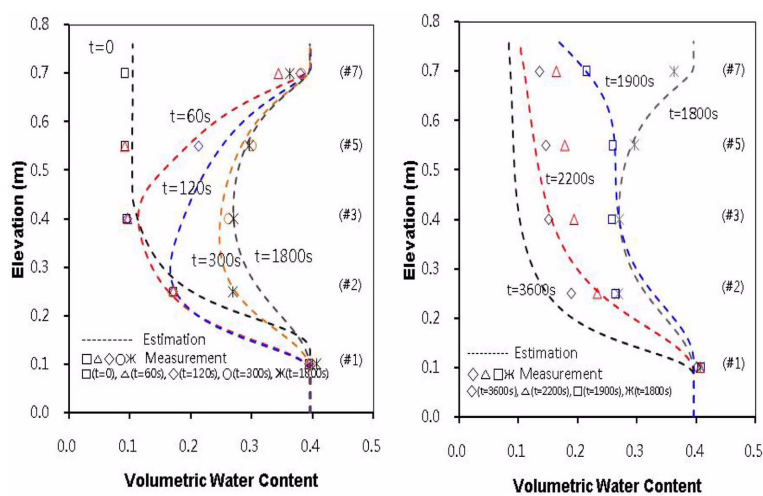


Fig. 7. Comparison between estimated and measured data for adsorption (a) and for desorption (b) conditions with Joomeonjin sand.

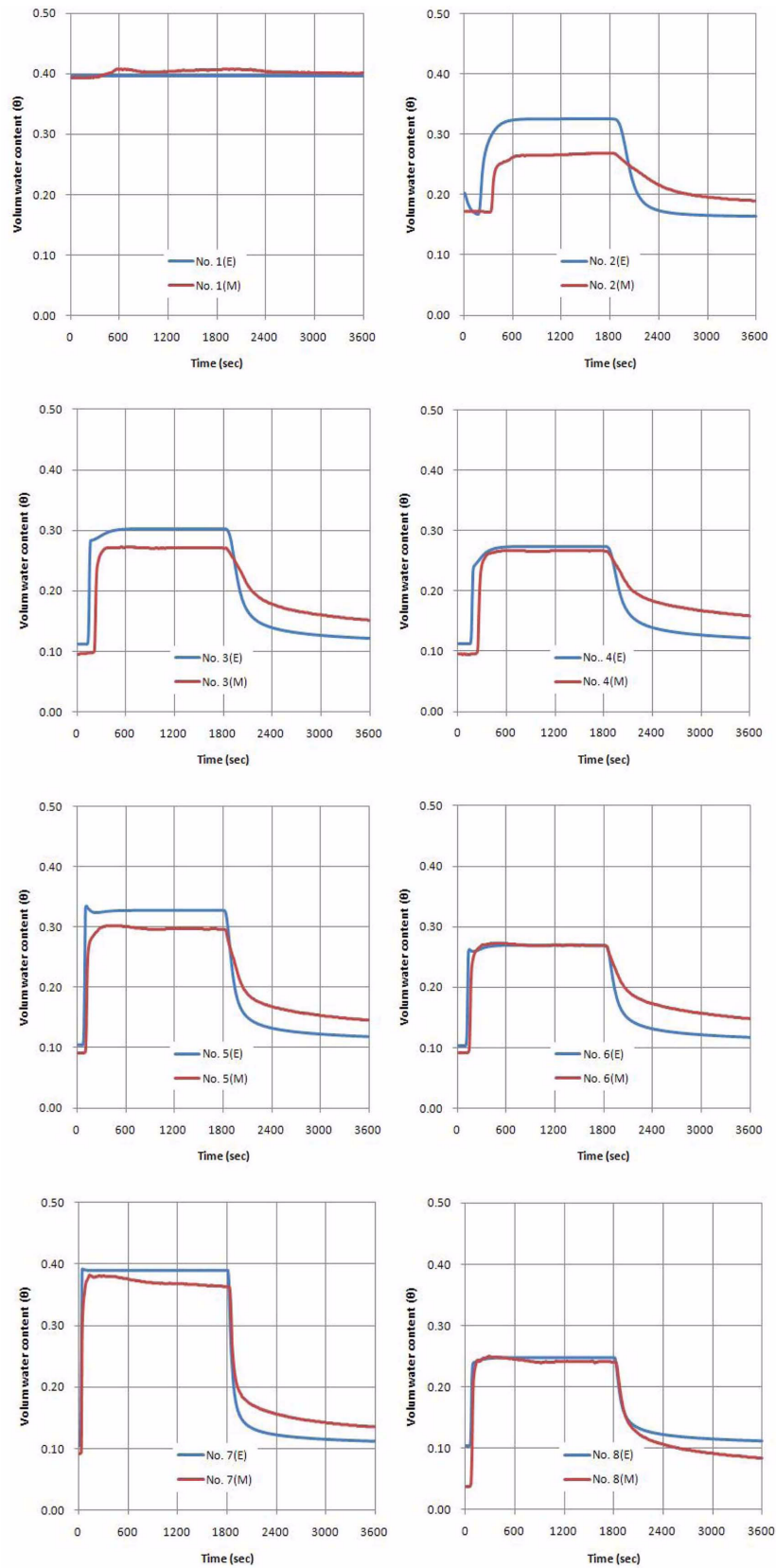


Fig. 8. Comparison of VWC between estimated and measured data for Joomoonjin sand.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 주문진표준사의 함수특성

텐시오미터를 이용하여 측정한 토양흡입력과 토양수분 센서로부터 측정한 토양함수율의 관계를 통해 낮은 토양 흡입력 범위의 토양함수특성곡선(SWCC)을 구하였다(Fig. 3(a)). 상대적으로 큰 토양흡입력 범위에서는 ASTM D2325-68(Fredlund and Rahardjo, 1993)에 의거한 방법 대로 Tempe Cell을 이용하여 측정하였다(Fig. 3(b)). Van Genuchten식(1980)과 최소사승법을 이용하여 얻어진 주문진표준사의 SWCC를 Fig. 4에 제시하였다.

#### 3.2. 체적함수율

주문진표준사를 80 cm 높이에서 강사하여 아크릴 컬럼에 채우고 토양수분센서를 이용하여 체적함수비를 측정하였다. 토양수분센서는 Fig. 5(a)과 같이 배치하였으며 각 센서의 간격은 15 cm 간격으로 하였다. Fig. 5(b)는 체적함수비 0.14~0.38의 범위에서 0.02단위로 구분하여 나타내었다. 컬럼내 침윤선은 침투박스를 중심으로 좌우 대칭을 이루어 동일한 것으로 가정하였다. 각 센서의 번호는 컬럼의 바닥에서부터 No.1~8번으로 설정되었다. Fig. 6(a)는 30분간 침투 이후 30분간 중력배수 시켜 총 1시간 동안 측정한 체적함수비 변화 그래프이다. Fig. 6(b)은 유한요소해석 모델에 의한 모의값을 나타내었다. 함수비 변화량은 나중함수비에서 초기함수비를 빼준 순수한 변화량을 의미한다. 각 지점에서의 시간에 따른 체적함수율 변화 범위에서는 다소 차이를 보였으나 반응시간과 반응순서는 유사한 양상을 보였다.

침투시간에 따른 컬럼내 주문진 표준사 체적함수율 변화의 실험값과 불포화 침투모델의 모의값을 비교하였다. Fig. 7에는 토양컬럼의 깊이로 따른 시간대별 토양함수비의 변화를 비교하였다. 컬럼깊이와 침투시간에 따른 함수비의 비교 결과 강우시 침투가 진행되는 과정(adsorption condition, 30분)에서는 실험결과와 모의결과가 정확히 일치함을 보였으나, 강우종료 후 중력배수가 진행되는 과정(desorption condition, 30분)에서는 모의결과가 실험결과에 비해 체적함수비가 낮은 경향을 보였다. 이러한 현상은 동일한 흙이라도 침투시와 중력배수시의 토양함수특성곡선이 다르게 나타나지만(SWCC hysteresis), 수치해석에서는 같다고 가정하였기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 8에서는 각 수분센서별 시간에 따른 함수비를 비교하였다. 컬럼 깊이별로 설치된 8개의 토양수분센서가 설치된 지점에서 침투시간에 따른 함수비의 실험값과 모의값이 비교적 일치함을 보였다. 침투가 진행되는 과정에서

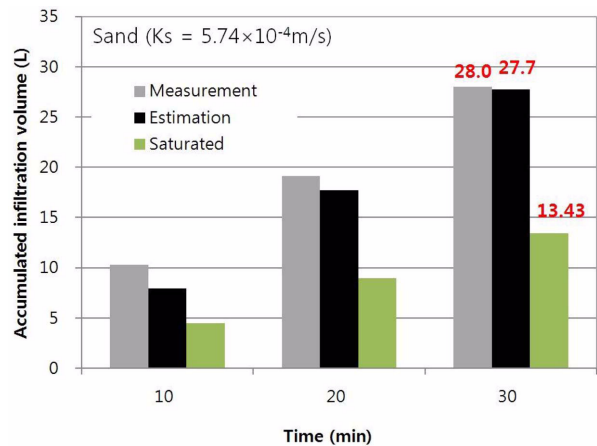


Fig. 9. Comparison of infiltrated volumes for half an hour between the unsaturated and saturated conditions for Joomoonjun sand.

수분센서 2번 지점(바닥면에서 25 cm)의 체적함수비가 가장 큰 차이를 보였는데, 이는 침윤선과 지하수위가 접하는 지점으로 함수율이 민감하게 반응하는 부분이어서 다른 지점에 비해 실측치와 예측치의 정확성이 비교적 떨어진 것으로 판단된다.

#### 3.3. 침투량 비교

불포화 영역에서 주문진 표준사( $K_s = 5.74 \times 10^{-4}$  m/s)의 침투특성을 파악하기 위해 컬럼실험과 침투모델의 30분간 누적침투량을 비교하였다. 또한 동일한 토양조건에서 포화토와 불포화토 침투량의 차이를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 실험결과 30분 동안 총 28.0 L 침투되었으며 SEEP/W 모의결과 27.7 L 침투되는 것으로 나타났다. 반면 포화조건에서의 30분 침투량은 13.4 L로 불포화조건의 침투량이 포화조건에 비해 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 포화조건에서의 침투량은 식 (5)를 통해 구하였다.

$$\begin{aligned}
 Q_{sat} &= V_{sat} \cdot A \cdot t = (K_{sat} \cdot i) \cdot A \cdot t \\
 &= (5.74 \times 10^{-4} \times 1) \times (0.05 + 0.04 \times 2) \times 0.1 \times (30 \times 60) \\
 &= 0.0134 m^3 = 13.4 L
 \end{aligned} \quad (5)$$

### 4. 결 론

본 연구에서는 불포화토의 침투특성을 파악하기 위해 투명 아크릴 컬럼 토조를 제작하여 침투실험을 실시하였으며 동일한 경계조건에서 모델링을 실시하여 실측값과 모의값을 비교하였고 동일한 토양에서 포화조건과 불포화

조건에서의 침투량을 비교하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 불포화토에서의 침투시설 거동해석을 위한 유한요소 해석 모델을 제시하였으며 그 검증을 위하여 토양컬럼에서 침투실험을 실시하였다. 토양수분센서를 이용한 아크릴 컬럼에서의 체적함수비 실측 결과와 SEEP/W 모델을 통한 예측 결과가 비교적 일치하였다.

2) 체적함수비 변화량과 센서 반응시간에 대해 실측값과 모델 예측값을 semi-log 그래프로 비교한 결과 각 센서별 반응 순서 및 시간은 정확히 일치함을 보였으나 함수비 변화량에서는 다소 차이를 보였다.

3) 토양컬럼의 깊이에 따른 시간대별 토양함수비 변화와 각 센서별 토양함수비의 변화를 비교하였다. 침투가 진행되는 과정(adsorption condition)에서는 실험값과 모의값이 비교적 정확히 일치함을 보였다. 8개의 토양수분센서 각각의 침투시간에 따른 체적함수비의 비교 결과에서도 실험값과 예측값이 일치함을 보였다.

4) 불포화조건에서의 침투량과 포화조건에서의 침투량을 비교한 결과 불포화조건에서의 실측값 및 예측값은 각각 28.0 L와 27.7 L였으며 포화조건에서의 침투량은 13.4 L로 포화조건에 비해 불포화조건에서 2배 이상 침투량이 큰 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 고려하면, 포화조건만을 고려한 침투량은 침투시설의 설계 및 용량결정시 침투량이 과소평가될 수 있어 토양의 불포화 조건을 고려한 설계 및 용량결정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구의 다음 단계에서는, 강우패턴에 따른 토성별 불포화 조건을 고려하여 포화조건에서의 침투량과 비교하여 침투시설의 설계 범위를 제시하고자 한다. 이를 위해 선행 무강우 일수, 침투시설과 지하수위까지의 거리, 침투시설간의 간격, 침투시설내 수위에 따른 영향을 모의하고자 한다.

## 사 사

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B02)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다. 아울러 농업과학원 하상건 박사님과 한경화 박사님의 조언에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- Fredlund, D.G. and Xing, A., 1994, Prediction of the permeability function for unsaturated soils using the soil water characteristics curve, *Can. Geotechnical J.*, **31**, 533-546.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., 1993, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, New York, 517p.
- Gardner, W.R., 1958, Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.*, **85**, 228-232.
- Green, R.E. and Corey, J.C., 1971, Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods, *Soil Science Society of America Proc.*, **5**, 3-8.
- James, F.C., Mohsen, M.S., and Vijay, P.S., 2007, *Elementary hydraulics*, Thomson Nelson, Toronto, 560p.
- Krahn, J. 2004, *Seepage Modeling with SEEP/W*, Geo-Slope International Ltd, Calgary.
- Lu, N. and Likos, W.J., 2004, *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 398p.
- Miyazaki, T., 2006, *Water Flow in Soils*, 2nd ed., Taylor and Francis London, 418p.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resource Research*, **12**, 513-522.
- Van Genuchten, M.T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America J.*, **44**, 892-898.