

불포화 인공 식재 지반의 배수 성능과 식생 가능 조건에 대한 수치해석적 분석

Numerical Analysis on Drain Capacity and Vegetation Potential of Unsaturated Made-Planting Soil

김성민¹⁾ · 김충언²⁾ · 정영훈[†]

Sung-Min Kim · Choong-Eon Kim · Young-Hoon Jung

Received: April 14th, 2016; Revised: May 2nd, 2016; Accepted: May 20th, 2016

ABSTRACT : This study attempted to investigate drain capacity and vegetation potential of made-planting soil via finite element simulations. Engineering drain capacity of made-planting soil can be evaluated by an analysis of unsaturated soils. In a perspective for vegetation landscape, it is necessary to check whether the minimum amount of water in the made-planting soil can be supplied for the survival of plants. Herein, 1-m high soil column covered by made-planting soil were numerically simulated. Numerical results showed that how the coefficient of permeability of saturated soil and soil-water characteristics of unsaturated soil are considered significantly influences the drain capacity of soils. Variation in the volumetric water content within the Least Limiting Water Range (LLWR) provides us with information on whether the soil can contain a sufficient amount of water for the plants to survive the drought.

Keywords : Made-planting soil, Unsaturated soil, Drain capacity, Vegetation, Least limiting water range

요 지 : 본 연구에서는 인공 식재 지반의 공학적 배수 성능과 생물학적 식생 가능성을 평가하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 불포화토 해석을 통해 인공 식재 지반의 공학적 성능 평가가 가능하다. 하지만 식생 조경의 관점에서 조경 식물이 생존하기 위해서는 인공 식재 지반이 최소한의 수분을 제공하는지 확인해야 한다. 화강 풍화토로 이루어진 인공 식재 지반을 1m 높이의 사각형 토체 기둥으로 모사하여 해석하였다. 해석 결과 토체의 배수 성능이 포화 투수계수와 불포화토 함수특성의 조합에 따라 크게 달라질 수 있음을 보였다. 체적 함수비의 변화가 최소 한계 수분 범위(LLWR) 이내에서 발생하는지 확인하여 식물이 갈수기 동안 생존할 수 있는 최소한의 수분을 인공 식재 지반이 제공할 수 있음을 파악할 수 있다.

주요어 : 인공 식재 지반, 불포화토, 배수 성능, 식생, 최소 한계 수분 범위

1. 서 론

인공 식재 지반은 식물 생육이 부적합한 불투수층의 구조물 위에 조성되는 인공지반의 조경에 적용되는 토층이다. 인공 구조물에 포설되는 인공 식재 지반은 토목공사 중 절성토부 및 건축물의 정원 등 다양한 시설물의 경관 조경을 위해 사용된다. 조경 설계의 관점에서 인공 식재 지반의 주요 목적은 표층부에 초본(풀, grass)과 관목(shrub)이 조경 유지 관리 기간 동안 고사하지 않도록 함에 있다. 하지만 인공 식재 지반의 특성은 공학적으로도 중요한데 일례로 수자원 설계를 위한 유출계수의 결정을 위해서는 인공 식재 지반을 포함한 지표의 식생 특성이 필요하다. 토질 역학적으로 볼 때 지표에 위치한 인공 식재 지반은 일종의 불포

화토(unsaturated soil)이다.

최근 식생 조경을 이용한 주거 환경 개선 요구가 폭발적으로 증가하고 있지만, 공학적인 요구 조건과 식생을 위한 토양학적 요구 조건이 서로 상충되는 문제로 인해 이러한 개선 요구를 쉽게 해소하지 못하는 실정이다. 토목 기술자는 공학적인 관점에서 표층부에 놓인 인공 식재 지반의 배수 성능을 가장 중요하게 다루겠지만, 조경 기술자는 식생 가능성을 강조할 것이다. 즉 동일한 토질 재료가 서로 다른 관점으로 발생하는 두 가지 성능을 동시에 만족해야 하는 문제가 발생한다. 불포화토 역학에서 표층부의 식물은 지표면의 유동 경계 조건(flux boundary condition) 중 하나인 발산 작용(transpiration)을 일으키는 주요 요소이다(Fredlund et al., 2012). 따라서 식물의 성장과 죽음은 표층부의 수분

1) Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

2) Samhyun PF

† Department of Civil Engineering, Kyung Hee University (Corresponding Author : jyounghoon@khu.ac.kr)

상태와 지표면의 증·발산에 대한 유동 조건을 결정짓는 중요한 요인이다.

본 연구에서는 불포화토로 이루어진 인공 식재 지반에 대해 배수와 식생 가능성에 대한 공학적인 성능 평가 방법을 논의하고, 특정 조건에서 이 두 가지 성능을 만족하는지 확인할 수 있는 수치해석 기법을 제시하였다. 홍수기 동안 강우 유입량과 유출량을 비교하여 인공 식재 지반의 배수 성능을 평가하였다. 식물 생존을 위한 토양의 최소 수분 범위에 체적 함수량이 유지되는지를 확인하여 식생 가능성을 평가하였다. 갈수기 동안 수분량의 발생 가능한 변화 범위를 파악하기 위해 국내 불포화토의 함수 및 투수 특성 범위를 고려하여 해석 조건을 산정하였고 이에 대한 결과를 비교·분석하였다.

2. 인공 식재 지반의 배수 및 식생 가능성 평가

2.1 포화된 토층에서 강우 유입 시 배수와 간극수압

완전 포화된 지층의 상부 지표면에서 강우로 인해 일정한 침투 유입량이 발생하고 토층 하부에서 충분한 배수가 가능하여 과잉간극수압이 발생하지 않는다면 Fig. 1과 같은 흐름 상태를 가정할 수 있다.

지층의 포화 투수계수가 k_s 로 일정하다고 하자. 연속 방정식(equation of continuity)에 의해 침투 유입량 q_{in} 은 하부 배수 경계면에서의 유출량 q_{out} 과 동일하므로,

$$q_{in} = v_{in}A = q_{out} = v_{out}A \quad (1)$$

여기서 v_{in} 과 v_{out} 은 각각 침투수의 유입과 유출 속도이다. Fig. 1과 같이 단면이 A로 일정하면, $v_{in}=v_{out}$ 이다. 유출입 속도 $v=v_{in}=v_{out}$ 은 Darcy의 법칙에 따라서,

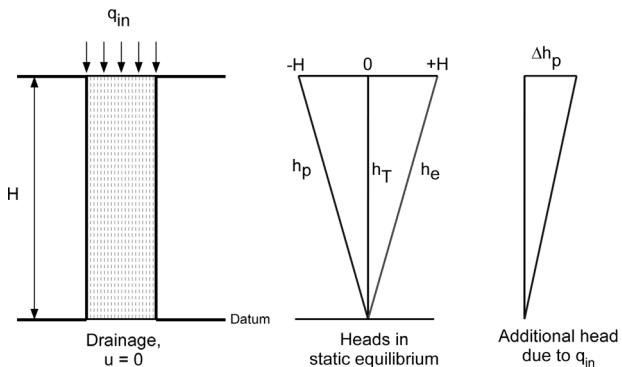


Fig. 1. Heads in soils under infiltration

$$v = k_s i = k_s \frac{\Delta h}{H} \quad (2)$$

여기서 i 는 동수경사(hydraulic gradient)이고, Δh 는 전수두차(total head difference), H 는 침투 경로의 길이로 Fig. 1에서 토층의 높이와 같다. 흐름이 발생하지 않은 정적 평형 상태(static equilibrium)에서 높이에 따라 증가하는 위치 수두(elevation head)는 지하수위 위에서 음의 값으로 발생하는 압력 수두(pressure head)로 인해 전수두(total head)는 깊이에 따라 일정하다. 따라서 강우가 유입된 이후의 정상류(steady flow) 흐름과 관계된 Eq. (2)에서 Δh 는 압력 수두의 변화량 Δh_p 과 같다. 토체 하부의 간극수압은 항상 0이므로 상부 지표면에서의 압력 수두는 Eq. (2)의 Δh 와 같아야 하며, 상부 지표면에서 강우 유입으로 발생하는 간극수압의 변화량 Δu 는 Eq. (1)과 (2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta u = \gamma_w \Delta h_p = \gamma_w \Delta h = \gamma_w q_{in} H / k_s A \quad (3)$$

여기서 γ_w 는 물의 단위중량이다. Eq. (3)은 강우 시 일정한 침투수 유입량이 발생할 때 강우로 인한 토층 상부의 간극수압 변화량은 토체의 두께 H 가 커질수록 그리고 포화 투수계수 k_s 가 작아질수록 커진다. 토층 상부에서 과도하게 발생하는 간극수압 증가는 유효응력을 크게 감소시켜 지표면이 역학적으로 불안정해질 수 있다.

2.2 강우 종료 후 불포화된 토층의 배수

강우가 종료된 후 갈수기 동안 토층을 포화시키던 물이 배수되는데 불포화 상태의 지하수위 상부 토층에서 간극수압이 모관흡수력(matric suction)과 같아지면 흐름이 멈추고 정적 평형 상태에 놓이게 된다. Fig. 2는 강우로 인해 토체가 포화된 상태에서 강우가 멈춘 후 불포화토 상태로 변하는 동안 압력 수두와 체적 함수비의 변화 과정을 설명

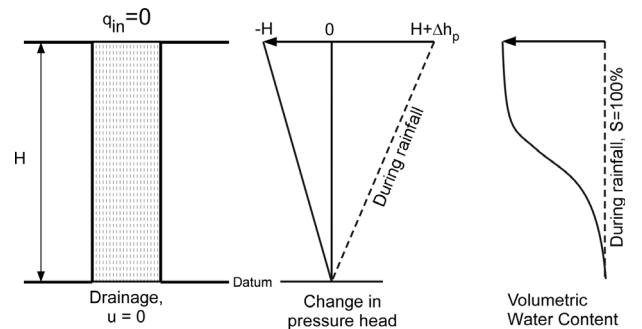


Fig. 2. Pressure head and volumetric water content after rainfall

한다.

불포화 평형 상태에서 토체 상부의 간극수압은 모관흡수력에 의해 $u = -\gamma_w H$ 로 결정된다. 하부 배수면(또는 지하수위)에서 상부로 갈수록 포화도가 떨어지며, 따라서 다음의 식으로 정의되는 체적 함수비(volumetric water content, θ) 역시 감소한다.

$$\theta = V_w / V_t = S_n \quad (4)$$

여기서 V_w 는 간극수의 부피, V_t 는 전체 토체의 부피, 그리고 n 은 간극률이다. 모관흡수력과 체적 함수비의 관계는 함수특성곡선을 통해 결정된다. 불포화토 지반의 투수 특성은 ① 포화 투수계수 k_s , ② 모관흡수력과 체적함수비 관계에 대한 불포화토의 함수특성곡선, ③ 불포화토의 투수계수 k_{us} 로 결정된다.

불포화 상태의 투수계수 k_{us} 는 일정한 값이 아니라 포화도에 따라 변하는 값이다. 불포화 투수계수는 함수특성곡선(SWCC)으로부터 추정할 수 있으며(Fredlund et al., 2012), 다음의 단계를 거쳐 결정된다: ① 간극수압이 0이 되는 지하수위면에서의 높이 z_a 에서 모관흡수력은 $u_w = -\gamma_w z_a$ 으로 결정되고, ② 정해진 모관흡수력에 따라 함수특성곡선에 따라 체적 함수비와 포화도가 결정되고, 또한 ③ 정해진 모관흡수력에 따라 불포화 상태의 투수계수 k_{us} 가 결정된다. 이러한 단계로 결정된 특정 깊이에서의 체적 함수비 이상으로 함유된 수분은 하단의 배수 경계로 배수되는데 이때 배수 속도를 결정하는 불포화 투수계수는 위치에 따라 서로 다르게 결정되므로 불포화토의 흐름 해석은 매우 복잡한 비선형 문제가 된다.

2.3 식생을 위한 토양의 최소 수분 범위

갈수기 동안 토층에 포함되어 있던 수분이 충분히 배수되지 못하면 과도한 수분량으로 인해 식물의 뿌리가 괴사하며, 반대로 너무 과도하게 수분이 배출되면 식물이 수분 부족으로 시들어 죽게 된다. 따라서 식재용 토양이 되기 위해서는 갈수기 동안 일정 수준의 수분량을 유지하는 것이 중요하다. 이러한 식물의 생존을 위해 필요한 수분량의 범위를 최소 한계 수분 범위(Least Limiting Water Range, LLWR)라 하며, da Silva & Kay(1997)가 처음 제안한 이후 여러 관련 연구자들에 의해 연구되었다. 최소 한계 수분 범위는 식물의 식생을 위한 4가지 체적 함수비의 범위, 즉 포장 용수량(field capacity)과 기상률(air-filled porosity)에 의해 결정되는 습윤 측 경계, 위조점(permanent wilting point)과 토양 저항(soil resistance)에 의해 결정되는 건조 측 경계로

결정된다. 캐나다 온타리오 주에 있는 농장에서 채취한 흙으로 실험한 결과를 통해 da Silva & Kay(1997)가 제시한 LLWR의 식은 Eq. (5)~(8)과 같다.

$$\ln \theta_{fc} = -4.15 + 0.69 \ln CLAY + 0.40 \ln OC + 0.27 \ln \rho_b + (-0.55 + 0.11 \ln CLAY + 0.02 \ln OC + 0.01 \ln \rho_b) \ln \psi \quad (5)$$

$$\theta_{afc} = 0.9 - 0.38 \rho_b \quad (6)$$

$$\ln \theta_{wp} = -4.15 + 0.69 \ln CLAY + 0.40 \ln OC + 0.27 \ln \rho_b + (-0.55 + 0.11 \ln CLAY + 0.02 \ln OC + 0.10 \ln \rho_b) \ln \psi \quad (7)$$

$$\ln \theta_{sr} = \frac{(\ln SR + 3.67 + 0.14 CLAY - 0.77 OC)}{-(3.85 + 0.10 CLAY) \ln \rho_b - 0.48 - 0.12 CLAY + 0.21 OC} \quad (8)$$

여기서 θ_{fc} 는 포장 용수량에 대한 체적 함수비, θ_{afc} 는 기상률에 대한 체적 함수비, θ_{wp} 는 위조점에 대한 체적 함수비, θ_{sr} 는 토양저항에 대한 체적 함수비, $CLAY$ 는 대상 토양의 점토 함유량(단위는 %), OC 는 대상 토양의 유기 탄소(Organic Carbon, 단위는 %), ψ 는 모관흡수력(단위는 MPa), 그리고 ρ_b 는 대상 토양의 체적 밀도(bulk density, 단위는 g/cm^3)이다. 체적 함수비 θ 의 단위는 cm^3/cm^3 이다. Eq. (5)~(8)의 체적 밀도-체적 함수비의 관계를 Fig. 3(a)에 도시하였다.

포장 용수량과 기상률에 의한 습윤 측 한계는 Fig. 3(a)의 체적 밀도-체적 함수비 공간에서 상한 경계를 이루며, 위조점과 토양 저항에 대한 건조 측 한계는 하한 경계를 이

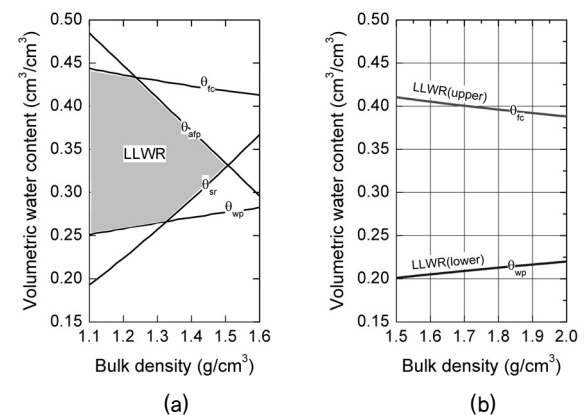


Fig. 3. Volumetric water content variation with bulk density at critical levels of field capacity, wilting point, air-filled porosity, and soil resistance: (a) redrawn from da Silva & Kay (1997); (b) LLWR for Korean granite residual soils

른다. 따라서 식물이 생존하기 위해서는 토양의 체적 함수비가 Fig. 3(a)에 표시한 최소 한계 수분 범위(LLWR) 내부에 위치하여야 한다.

Fig. 3(a)의 LLWR은 경운(tillage)되지 않은 흙의 토양 저항이 2MPa, 점토 함유량(CLAY)은 36%, 그리고 OC가 23g/kg 또는 2.3%일 때 산정된 범위(da Silva & Kay, 1997)이다. Fig. 3(a)를 살펴보면 LLWR을 만족하기 위해서는 체적 함수비는 대략 0.3~0.4의 범위가 되어야 하고, 체적 밀도는 1.5g/cm³ 이하가 되어야 한다.

하지만 1.5g/cm³ 이하의 체적 밀도 또는 14.7kN/m³ 이하의 전체 단위 중량은 일반적인 토질 재료에서 예상되는 값보다 크게 낮은 값이다. 이렇게 낮은 체적 밀도 범위는 LLWR의 개념이 농작물의 식생과 연관되어 있고 대부분의 농토는 경작을 통해 충분한 공기량을 가질 수 있기 때문이다. Fig. 3(a)를 다시 살펴보면 1.5g/cm³ 이하의 LLWR을 위한 체적 밀도는 기상물(air-filled porosity)을 만족하기 위한 습윤 측 한계선과 토양 저항(soil resistance)을 만족하기 위한 건조 측 한계선에 의해 결정됨을 알 수 있다. 기상물이 10% 이상이 되어야 한다는 조건으로 기상물의 한계가 설정되고 토양 저항 SR의 값이 2MPa 이상이 되어야 토양 저항에 대한 한계선을 조정할 수 있으나, 추가의 생태학적 연구가 없이 기상물과 토양 저항에 대한 값을 조정하기 어려워 본 연구에서는 이 두 가지 한계 조건을 제외시켰다.

기상물과 토양 저항에 대한 한계 조건을 제외하면 포장 용수량과 위조점에 대한 두 가지 한계 조건으로 LLWR 범위가 이루어진다. θ_{fc} 와 θ_{wp} 를 결정하기 위해서는 Eq. (5)와 (7)에서 토양의 점토 함유량(CLAY)과 유기탄소(Organic Carbon, OC)의 값이 필요하다. 국내 표토는 일반적으로 사질(sand) 41.7%, 미사질(silt) 41.5% 및 점토질(clay) 16.8%로 구성되어 있어 USDA의 토성 분류에 따라 롬(loam)으로 분류된다. 국내 토양의 토성을 논토양(paddy soil), 밭토양(upland

soil) 및 산림토양(forest soil)으로 구분하여 조사한 Jung (2014)의 결과를 Table 1에 제시하였다.

대부분의 토목공사에서 식생토가 필요한 경우 주변 산지에서 획득하여 포설하는 것이 일반적이므로 Table 1의 항목 중 산림토양에 대한 점토 함유량을 사용하는 것이 타당할 것이다. 따라서 Eq. (5)와 (7)에서 CLAY=20%로 산정하였다. Jung(2014)에 따르면 우리나라 대부분의 토양은 유기물 함량이 비교적 낮은 수준이며, 따라서 유기탄소 OC=3%로 산정하였다. Eq. (5)와 (7)에서 필요한 모관흡수력 ψ 는 포장 용수량에 대해서는 10kPa, 위조점에 대해서는 1.5MPa로 산정하는 것이 일반적이다. 따라서 정해진 ψ , CLAY, 그리고 OC의 값을 이용한 LLWR의 범위는 Fig. 3(b)와 같으며, 식물 생존을 위한 체적 함수비의 범위는 대략 0.2~0.4 cm³/cm³이 된다.

3. 수치 해석 방법

3.1 불포화토의 투수 특성

불포화토의 투수 특성을 모사하기 위해서는 대상 지반의 포화 투수계수(k_s), 함수특성곡선과 체적함수비의 관계, 모관흡수력에 따른 불포화토의 투수계수(k_{us})에 대한 정보가 필요하다.

본 연구의 인공 식재 지반은 국내 산지 대부분의 표토층을 이루는 화강풍화토로 이루어져 있다고 가정하였고, 이에 대한 포화 투수계수로 양호한 배수 상태를 가정할 때는 $k_s=10^{-2}$ m/sec로 불량한 배수 상태를 가정할 때는 10^{-6} m/sec를 사용하였다. Lee et al.(2009)이 제안한 국내 화강풍화토의 정규화 함수특성곡선식을 사용하여 대상 지반의 모관흡수력과 체적함수비 관계를 결정하였다. 인공 식재 지반의 불포화 특성을 고려하기 위해 Eq. (9)의 Fredlund & Xing (1994)의 모델식을 이용하여 Lee et al.(2009)이 제안한 국내 화강풍화토에 대한 함수특성곡선식을 사용하였다.

$$\theta/\theta_s = 1/(\ln[e + (\psi/a)^n])^m \quad (9)$$

여기서 θ 는 불포화토의 체적함수비, θ_s 는 포화토의 체적함수비, e 는 자연대수(2.71828), ψ 는 모관흡수력, a , n , m 은 불포화토 특성을 결정짓는 매개변수이다. Lee et al.(2009)은 국내 화강풍화토에 대한 불포화토 실험 결과의 데이터 베이스를 분석하여 Table 2와 Fig. 4에 정리한 함수특성곡선의 상한, 평균, 하한선을 제시하였다. Lee et al.(2009)은 또한 세 가지 함수특성곡선식에 대한 k_{us}/k_s 의 비율을 수학

Table 1. Characteristics of Korean soils (Jung, 2014)

Category	Soil classification*	Topsoil	Subsoil	Overall
Paddy soil	Sand	34.9	35.1	35.0
	Silt	45.3	43.5	44.4
	Clay	19.8	21.4	20.6
Upland soil	Sand	39.3	38.9	39.2
	Silt	41.0	38.0	39.4
	Clay	19.7	23.1	21.4
Forest soil	Sand	42.9	40.8	41.9
	Silt	39.8	38.4	39.1
	Clay	17.3	20.8	19.0

* Following USDA system (Das, 2005)

Table 2. Ranges of parameters, a, n, and m (Lee et al., 2009)

Parameters	a (kPa)	n	m
Upper limit	76.319	1.148	0.968
Average	43.539	0.754	1.426
Lower limit	12.479	0.772	1.467

Table 3. Analysis conditions

Conditions	k_s (m/sec)	k_{us}/k_s
Case 1	10^{-6}	Ratios for lower limit of SWCC
Case 2	10^{-2}	Ratios for upper limit of SWCC
Case 3	10^{-6}	Ratios for upper limit of SWCC
Case 4	10^{-2}	Ratios for lower limit of SWCC
Case 0	10^{-4}	Ratios for average SWCC

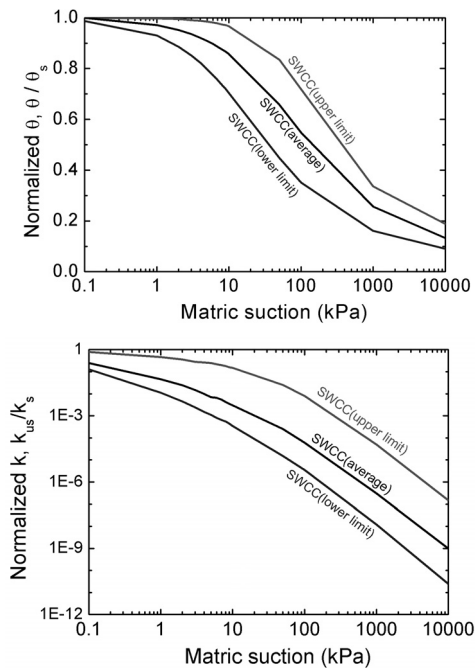


Fig. 4. Soil-water characteristic curves and permeability ratios

적으로 유도하여 제시하였다.

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2009)를 사용하여 불포화토의 투수 해석을 실시하였다. ABAQUS에서 절점 변위를 강제로 억제하면 간극수압의 변화만을 해석할 수 있다. ABAQUS에서는 포화 투수계수, 간극비에 따른 k_{us}/k_s 의 변화, 그리고 함수특성곡선을 직접 입력할 수 있다. 매개변수 해석을 위해 포화 투수계수의 범위와 불포화토의 상한, 평균, 하한 함수특성곡선에 대한 k_{us}/k_s 를 조합하여 Table 3에 정리한 해석 조건을 결정하였다.

3.2 홍수기와 갈수기의 투수 해석 단계

불포화토로 이루어진 토층의 투수 해석에서는 초기 수분

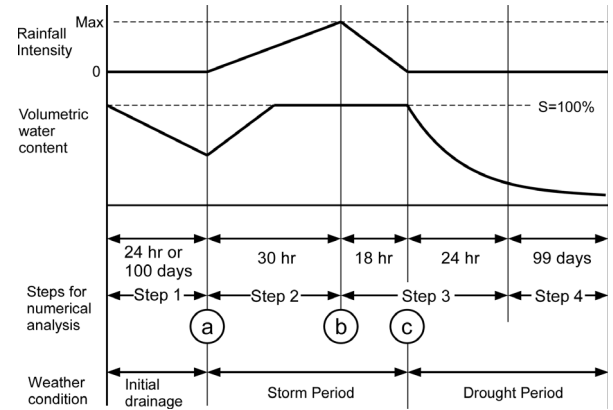


Fig. 5. Steps for numerical analysis

량의 분포가 최종 해석 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 ① 초기 수분량 분포를 얻기 위한 24시간 또는 100일간의 배수 기간(initial drainage), ② 48시간의 집중 호우 발생 기간(storm period), ③ 100일간의 갈수기 기간(drought period)으로 나누어 해석을 진행하였다. 실제 수치 해석 단계는 Fig. 5와 같이 다음의 총 4개의 단계로 구분하였다.

- 단계 1(Step 1): 불포화토의 수분량 분포를 얻기 위한 초기 배수 해석(initial drainage)
- 단계 2(Step 2): 호우 발생 시작 후 최대 강우 강도 도달 시점까지의 30시간 투수 해석
- 단계 3(Step 3): 최대 강우 강도 도달 이후 18시간과 강우 종료 후 24시간 해석
- 단계 4(Step 4): 99일간의 갈수기 동안의 배수 해석
단계 3에서는 18시간의 홍수기 투수 해석과 24시간의 갈수기 배수 해석을 동시에 실시하였는데 이는 강우 종료 시 급격히 변하는 경계조건의 영향을 최소화시키고 단계 2가 끝나는 최대 강우 도달 시점에서 해석 결과를 쉽게 얻기 위해서이다. 집중 호우 기간의 단계를 쉽게 구분하기 위해 강우 발생 시작 시점을 ㉠, 최대 강우 강도 발생 시점을 ㉢, 그리고 강우 종료 시점을 ㉡로 Fig. 5에 표시하였다.

3.3 해석 모형과 유한 요소 해석

인공 식재 지반의 투수 해석은 깊이 1m의 사각형 기둥 형태의 토체에서 일어나는 투수-배수 과정을 모사하여 실시하였다. 유한요소해석망은 모든 절점에서 간극수압에 대한 자유도를 가지는 3차원 8절점 사각형 요소를 이용하였다. 해석망의 하부 절점을 통해 배수가 일어난다고 가정하였고 따라서 간극수압을 0으로 유지하였다. 홍수기 동안에 입력 강우는 0.1m×0.1m 면적의 상부면으로 유입된다고 가정하였다. Fig. 6은 해석 조건과 유한요소망을 보여준다.

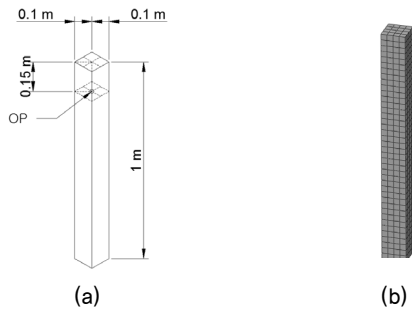


Fig. 6. Model geometries and finite element meshes: (a) dimension of soil column; (b) finite element mesh of the soil column

4. 해석 결과

Fig. 7은 Case 0 조건에서 토체의 간극수압 분포를 각 해석 단계별로 정리한 그림이다. 기둥의 하단면이 간극수압이 0인 배수면, 또는 지하수위므로 기둥의 상단면에서는 최대 음의 간극수압, 즉 최대 모관흡수력이 10kPa로 작용한다. 여기서 물의 단위중량은 10kN/m^3 의 값을 사용하였다. 최대 강우 강도가 발생하는 $t=54\text{hr}$, 즉 단계 2(step 2)의 종료 시점에서 음의 간극수압은 거의 사라지지만, 이후 강우가 종료되고 갈수기 동안의 배수가 진행되면 다시 최대 모관흡수력이 10kPa로 복구된다. Fig. 8은 Case 0 조건에서 해석 단계별 체적함수비 분포의 변화를 보여준다. 체적함수비는 포화도가 100%일 때 최대값인 0.33이 되고, 최소값은 불포화토의 함수특성에 따라 달라진다. 토체의 배수 성능은 강우량(precipitation) 또는 침투 유입량과 배수면에서 평가한 유출량(outflow rate)을 비교하여 간접적으로 평가할 수 있다. Fig. 9는 48시간의 강우 지속 시간과 이후 24시간의 배수 기간 동안 발생한 유입/유출량의 변화를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 강우 초기에는 유입량보다 유출량이 적는데 이는 강우 발생 초기에 불포

화 상태인 토체가 포화되는 과정이 필요하기 때문이다. 유입량과 유출량이 동일해지는 시점은 해석 조건별로 다르지만 대략 6시간 정도가 필요하다.

해석 조건별 결과의 차이를 이해하기 위해서는 불포화토 함수특성곡선(SWCC)의 상하한선에 대한 물리적 의미를 파악해야 한다. 상대적으로 작은 입경의 토질 재료에서는 작은 크기의 간극에 의해 모관 발달이 상대적으로 쉬우며, 따라서 동일한 모관흡수력(또는 지하수위로부터의 높이)에 대해 높은 포화도를 유지할 수 있으므로 SWCC의 상한선을 이룬다. 또한, 토체 내부에서 발달된 모관으로 인해 유로 형성이 상대적으로 쉬우므로 포화 투수계수와 큰 차이가 없는 불포화 투수계수(즉 상대적으로 높은 k_{us}/k_s)가 나타난다. 반대로 상대적으로 큰 입경의 토질 재료에서는 간극의 크기가 크므로 모관 발달이 상대적으로 어려워서 동일한 모관흡수력에 대해 낮은 포화도만을 유지할 수 있으므로 SWCC의 하한선을 이룬다. 또한, 낮은 포화도로 인해 연결된 유로 형성이 상대적으로 어려워 포화 투수계수보다 크게 낮은 불포화 투수계수(즉 상대적으로 낮은 k_{us}/k_s)가 나타난다.

Case 1 조건은 포화 투수계수 k_s 가 10^{-6}m/sec 로 매우 낮은 값이고 불포화토의 SWCC는 하한선을 적용하여 불포화 상태에서 낮은 포화도와 낮은 불포화 투수계수가 발생하는 조건이다. 따라서 Case 1은 가장 낮은 투수성을 가지는 조건이다. Fig. 9에서 Case 1에 대한 곡선을 살펴보면 강우가 시작하는 시점(Period of heavy rainfall=0hr)에도 이미 약 0.5mm/hr 의 유출량이 발생하고 있는데 이는 매우 낮은 투수성 때문에 Step 1에서 배수가 완료되지 못하였기 때문이다. 또한, 유출량이 본격적으로 증가하는 시점도 강우 시작 후 5시간이 경과되어야 한다. 하지만 일단 증가가 시작되면 매우 빠르게 유출량이 유입량과 동일해진다. Case 2 조건

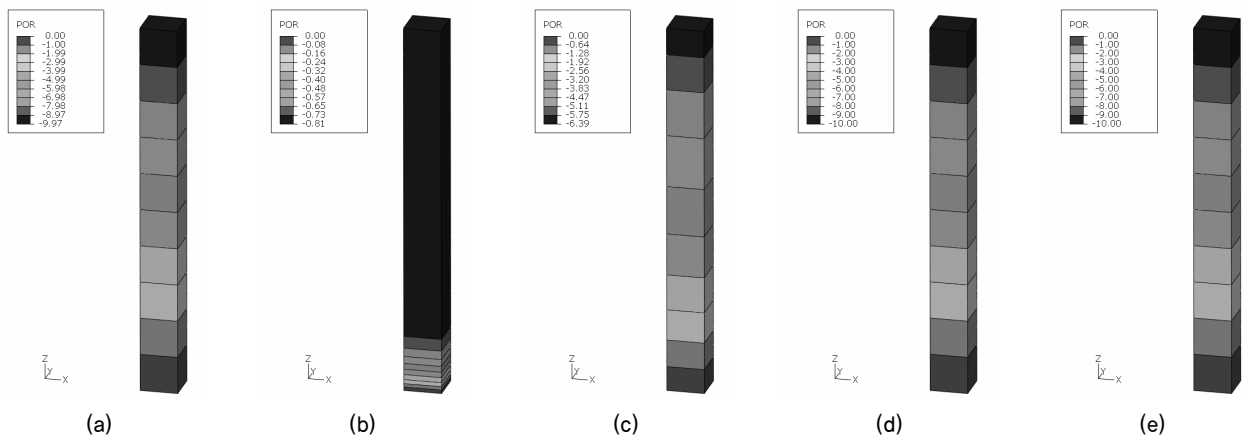


Fig. 7. Pore water pressure (POR) in the soil column: (a) $t=24\text{ hr}$ (step 1); (b) $t=54\text{ hr}$ (peak rainfall-step 2); (c) $t=72\text{ hr}$ (end of rainfall); (d) $t=4\text{ days}$ (step 3); (e) $t=100\text{ days}$ (step 4)

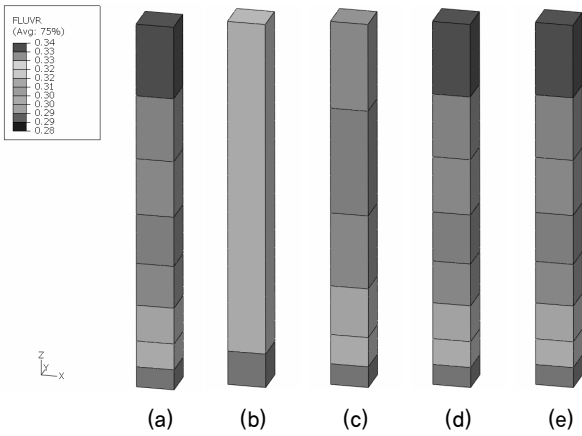


Fig. 8. Volumetric water content (FLUVR) in the soil column: (a) $t=24$ hr (step 1); (b) $t=54$ hr (peak rainfall-step 2); (c) $t=72$ hr (end of rainfall); (d) $t=4$ days (step 3); (e) $t=100$ days (step 4)

은 10^{-2} m/sec의 높은 포화 투수계수를 가지며 불포화토 상태에서 높은 포화도가 나타나고 k_{us} 와 k_s 의 차이가 상대적으로 크지 않아 가장 높은 투수성을 가지는 조건이다. Fig. 9에서 Case 2에 대한 곡선을 살펴보면 강우 시작 시점부터 강우 유입량과 유출량이 거의 같은 곡선으로 나타난다. Case 3 조건은 Case 1과 같이 포화 투수계수는 매우 낮은 값이지만 SWCC의 상한선을 사용하여 불포화토의 투수계수가 포화 투수계수와 상대적으로 큰 차이가 없어서 포화 및 불포화 상태 모두에서 낮은 투수성을 가지는 조건이다. Fig. 9에서 Case 3에 대한 결과를 살펴보면 강우 시작 시점과 강우 종료 시점에서 모두 시간 차이를 두면서 유입량이 유출량에 근접해 감을 알 수 있다. Case 4 조건은 포화 시 높은 투수계수를 가지지만, SWCC의 하한선을 사용하여 불포화토의 투수계수는 매우 낮아지는 조건이다. Fig. 9에서 Case 4에 대한 결과를 보면 Case 2와 유사한 곡선 형태이지만 유출량이 유입량과 같아지는데는 좀더 많은 시간이 필요함을 알 수 있다. Case 0 조건은 10^{-4} m/sec의 평균 포화투수계수와 SWCC의 평균선을 사용하였고, Fig. 9에서 Case 1을 제외하면 포화도 진행이 가장 서서히 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 각 조건에서 체적 밀도와 시간에 따른 체적 함수비의 변화 양상을 비교한 그림이다. 일반적인 초본류 뿌리의 근입 심도는 대략 30cm 정도이므로 이 범위의 중앙값인 15cm 심도에 Fig. 6(a)에 표시한 바와 같이 관측 지점 (Observation Point, OP)을 설정하였다.

Fig. 10에서 Case 1과 Case 4의 결과를 먼저 살펴보면 두 조건 모두 동일한 SWCC의 하한선을 사용하므로 불포화토 상태에서 정적 평형 조건에 도달하면 동일한 체적 함수비에 도달해야 한다. 하지만 단계 1(step 1)의 24시간 배

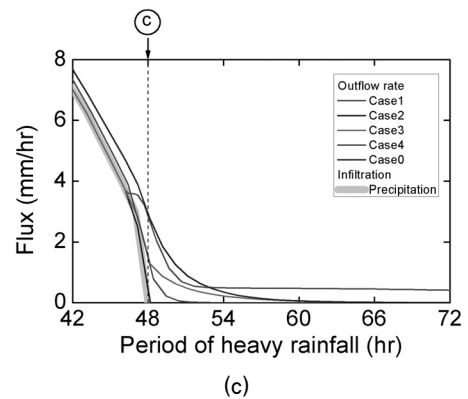
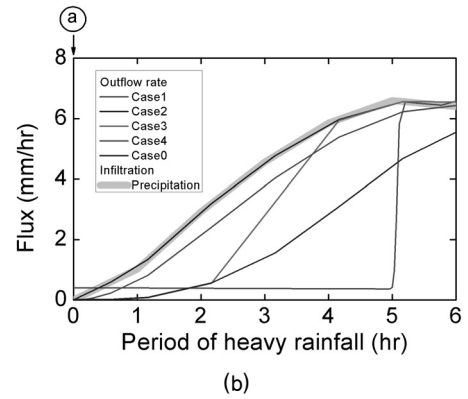
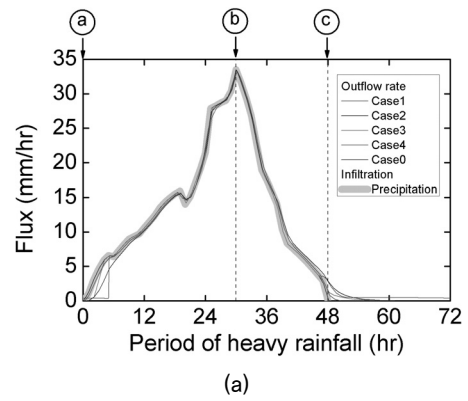


Fig. 9. Variation in the flux of precipitation and outflow rate in the soil column: (a) overall results; (b) for 24 hours after beginning; (c) after the end of precipitation

수 기간 동안 감소한 체적 함수비의 크기는 매우 다른데 매우 높은 k_s 를 가지는 Case 4에서는 3시간 이내에 약 0.24의 평형상태의 체적 함수비에 도달하지만, 매우 낮은 투수성을 가지는 Case 1의 경우 24시간의 배수 기간 동안에도 최종 평형 상태의 체적 함수비에 도달하지 못한다. Case 1의 경우에는 단계 1(step 1)에서 충분히 배수가 일어나지 못해 이미 포화도가 상대적으로 높은 상태였으므로 강우가 시작되면 다시 쉽게 포화도가 100%에 도달하며 체적 함수비가 포화 상태에 대한 값으로 빠르게 회복된다. 하지만 Case 4의 경우에는 매우 높은 배수 성능으로 인하여 강우 기간 동안에 포화도가 쉽게 100%에 도달하지 못하고 따라서 체

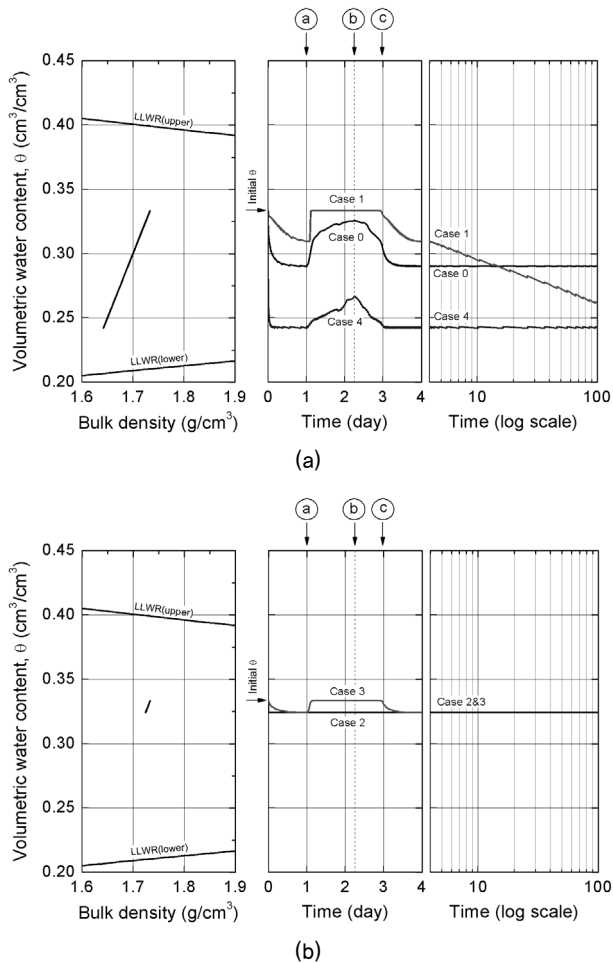


Fig. 10. Variation in the volumetric water content plotted against bulk density and time in the soil column: (a) for case 1, 4, and 0; (b) for case 2 and 3

적 함수비도 포화 상태에 대한 높은 값으로 증가하지 못한다. Case 2와 3의 경우에는 SWCC 상한선을 사용하므로 갈수기 동안 정적 평형 상태에서 약 0.32의 상대적으로 큰 체적함수비를 가진다. Case 2는 매우 높은 포화 투수계수를 가지므로 Fig. 10에서 시간에 따른 체적 함수비의 변화를 거의 찾기 어려울 정도로 배수가 빠르게 일어난다. Case 3은 낮은 포화 투수계수를 가지지만 불포화 상태의 투수성이 포화 상태와 크게 다르지 않으므로 강우가 시작하면 쉽게 포화되고 강우가 종료되면 매우 빠르게 24시간 이내에 불포화토의 정적 평형 상태에 도달한다.

Fig. 10에서 체적밀도에 대한 체적함수비의 변화를 살펴보면 Case 1과 4에서는 초기 0.33에서 100일의 갈수기 동안 0.24까지도 감소할 수 있지만 모두 LLWR의 상하한 경계 내부에서 변화하므로 표층부의 식생에는 큰 문제가 없다. Case 2와 3의 경우에는 체적 함수비가 초기 0.33에서 0.32로 매우 작은 변화만이 나타나는데 이는 SWCC 특성상 높은 포화도가 유지될 수 있기 때문이며, 이러한 변화폭은

LLWR의 경계 내부이므로 역시 식생에는 문제가 없다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지표층에 포설되는 인공 식재 지반의 공학적 배수 성능과 생물학적 식생 가능성을 평가하기 위해 수치해석을 실시하였다. 토질 역학적으로 볼 때 인공 식재 지반은 일종의 불포화토이지만, 식생 조경의 관점에서는 인공 식재 지반은 조경 식물이 생존하기 위한 최소한의 수분을 제공할 수 있어야 한다. 인공 식재 지반의 이러한 두 가지 관점의 성능 평가가 가능한 유한요소 수치해석 기법을 제시하였다. 인공 식재 지반의 배수 성능은 최대간극수압과 전체 유입-유출량을 비교하여 평가하였다. 최소 한계 수분 범위(Least Limiting Water Range, LLWR) 개념을 도입하여 대상 식재 지반의 수분량이 식생에 적절한 범위에 놓이는지 확인하였다. 초기 배수-48시간의 집중 호우 발생-100일간의 갈수기를 거치는 현실적인 상황을 가정하여 해석 단계를 설정하였다. Lee et al.(2009)이 제안한 국내 화강풍화토에 대한 불포화토 특성을 반영하여 5가지의 해석 조건을 결정하였고 이를 깊이 1m의 사각형 토체 기둥에 적용하여 해석하였다.

사각형 토체 기둥에 대한 해석 결과는 토체의 배수 성능이 포화 투수계수와 불포화토 함수특성의 조합에 따라 크게 달라질 수 있음을 보였다. 갈수기 동안 체적 함수비의 변화 폭은 불포화토 함수특성에 따라 결정되지만, 변화 속도는 포화 투수계수와 불포화토 투수계수 비의 조합에 따라 결정되었다.

해석 조건에서 체적 함수비의 변화가 LLWR의 식생 가능 범위 이내에서 발생하여 조경 식물이 생존할 수 있는 최소한의 수분을 대상 인공 식재 지반이 제공할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술혁신연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C078832-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. ABAQUS (2009), ABAQUS User's manual version 6.1.
2. da Silva, A. P. and Kay, B. D. (1997), Estimating the least

- limiting water range of soils from properties and management, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 61, pp. 877~883.
3. Das, B. M. (2005), Principles of geotechnical engineering, 7th edition, Cengage Learning, pp. 96.
 4. Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. (2012), Unsaturated soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 200~203.
 5. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 533~546.
 6. Jung, M. C. (2014), Environmental soil science, Resource from web page: <http://venus.semyung.ac.kr/~jmc65> (in Korean).
 7. Lee, S.-R., Oh, T.-K., Kim, Y.-K. and Kim, H.-C. (2009), Influence of rainfall intensity and saturated permeability on slope stability during rainfall infiltration, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 25, No. 1, pp. 65~76 (in Korean).