

불포화 특성을 고려한 투수성 포장 시스템의 침투성 수치해석

Numerical Analysis of Infiltration in Permeable Pavement System considering Unsaturated Characteristics

Seungbae Kim^{a,1}, Jaehun Ahn^{b,*}, Bertrand Teodosio^{c,2}, Hyunjun Shin^{d,3}

^a School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro Geumjeong-gu, Busan 609-735, Republic of Korea

^b School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro Geumjeong-gu, Busan 609-735, Republic of Korea

^c School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro Geumjeong-gu, Busan 609-735, Republic of Korea

^d Department of Architecture, Hannam University, 133 Ojeong dong Daedeok-gu, Daejeon 306-791, Republic of Korea

ABSTRACT

Effective urban flood reduction and restoration of natural water cycle at present include the application of permeable pavements. The application of permeable pavement addresses urban water cycle and disaster related events which gained attention internationally. However, few researches have been conducted to investigate unsaturated behavior and evaluate the water characteristics curves of these type of pavement materials most especially in the unsaturated state. In this study, first the saturated permeability and the soil-water characteristics curve of a pervious concrete are evaluated based on laboratory tests, and, based on experimental results, the infiltration of permeable pavement system is numerically modelled. In the soil-water characteristics curve of a pervious concrete, the volumetric water content drops very steeply after the air entry value with increasing matric suction. From the finite element analyses, the performance of the permeable pavement when compared to impermeable pavement, confirmed that the whole system effectively delayed and reduced runoff.

KEYWORDS

Permeable
Pavement
Pervious Concrete
Infiltration
Green-Ampt
Numerical
Analysis

효과적인 도심 홍수 감소 및 물순환 기법 중 하나로 투수성 포장의 적용을 들 수 있다. 도심 물순환 및 방재를 위한 수단으로 투수성 포장의 적용은 국제적으로 점차 확대되고 있는 실정이다. 투수성 포장 내의 침투는 대부분의 경우 불포화 상태에서 시작하나, 현재 투수성 포장재의 흡-수분특성곡선의 산정 및 이를 바탕으로 한 투수성 포장 시스템의 침투성에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 본 연구에서는, 먼저 실내시험을 통해 투수성 포장재의 포화투수계수와 흡-수분특성곡선을 산정하고, 이를 바탕으로 유한요소해석을 통해 강우시 특정 투수성 포장 시스템의 침투특성 및 홍수 저감 효과를 분석하는 것을 그 목적으로 한다. 실험에 사용된 현장 투수성 콘크리트 시료의 흡-수분특성곡선은, 모관흡입력이 증가함에 따라 공기 유입 후 체적함수비가 상대적으로 급격하게 감소하였다. 유한요소해석 결과로부터, 불투수성 포장과 비교하였을 때, 즉 강우가 침투 없이 바로 유출이 되는 경우와 비교하여, 투수성 포장 시스템의 노반으로 침투가 불가능한 경우에도, 투수성 포장 시스템이 강우의 지표유출을 효과적으로 지체 및 감소시키는 것을 확인하였다.

투수성 포장
투수성 콘크리트
침투성
Green-Ampt
수치해석

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-51-510-7627. Fax. 82-51-513-9596.
Email. jahn@pusan.ac.kr

1 Tel. 82-51-510-7656. Email. updownk@nate.com

2 Tel. 82-51-510-7656. Email. bertrand.teodosio@gmail.com

3 Tel. 82-42-629-7555. Email. hjshin@hnu.kr

ARTICLE HISTORY

Received Sep. 24, 2014

Revised Oct. 15, 2014

Accepted Apr. 10, 2015

1. 서론

최근 기후 변화에 따라 강우강도 및 강우량의 변화가 급격하게 발생하고 있는 추세이며, 이에 더해 도시화의 진행에 따른 건물 옥상 및 도로 포장 면적, 즉, 불투수면의 증가는 도시의 홍수문제를 심화시키는 원인이 되고 있다. 도심홍수는 수많은 인명피해와 물질적 재산을 앗아가고 그 규모가 클수록 국가적 재난 사태에 이르기까지 한다는 것은 여러 매체를 통해 흔히 알 수 있다. 이러한 도심 홍수 문제 해결 방안의 하나로 투수성 포장의 적용을 들 수 있다. 투수성 포장은 도심 면적의 큰 비율을 차지하는 도로 및 주차장 포장면에 우수 침투를 가능하게 하여, 배수시설로 유입되는 전체유량을 줄이거나 혹은 최대 유량을 감소 및 지체시켜 홍수로 인한 피해를 감소시키는 효과가 있다(Yoo and Yoon, 2011). 실제로, 효과적인 도심 물순환 및 방재를 위한 수단으로 투수성 포장의 적용은 국제적으로 점차 확대되고 있는 실정이다. 미국과 일본의 경우 1970년대부터 투수성 포장에 대한 연구가 진행되었고 특히 최근 물순환 및 오염저감 효과를 근거로 적용이 확대되고 있으며(Thelen and Howe, 1978; Hunt, 2009; Takahashi et al., 2011), 국내에서는 1990년대부터 배수성 포장이 소개된 이래 역시 최근 투수성 포장의 적용이 빠른 속도로 확대되고 있는 실정이다.

현재 투수성 포장의 수문학적 설계치로 가장 주요한 인자는 공극률이며(Tennis et al., 2004; Leming et al., 2007; ACI, 2010), 포장재료의 공극률은 포화시 및 건조시 포장재료의 무게를 측정하는 것으로 산정할 수 있다. 투수성 포장재의 공극률에 대한 연구는 Montes et al.(2005), Neithalath et al.(2006), Ahn et al.(2012, 2013)에 의해 진행된 바 있다. 투수성 포장재의 포화투수계수는 실내 정수위 혹은 변수위 시험을 통해 산정할 수 있으며(McCain, 2009; Lee, 2013), X-Ray CT 해석을 통한 투수계수의 예측도 최근 연구된바 있다(Piller, 2009). 또한, Klenzendorf et al.(2010)은 실제 배수조건과 유사하게 2차원적 투수의 영향을 고려한 포장체의 침투특성을 산정하였다. 하지만 대부분의 지반이 불포화토로 이루어져 있으므로 투수성 포장 내의 침투 또한 대부분 불포화 상태에서 시작한다. 따라서 투수성 포장 시스템 침투특성의 모사를 위해서는 지반공학에서 불포화토의 침투해석에 사용되는 재료의 흡-수분특성곡선(Soil-Water Characteristics Curve, SWCC)이 수치해석의 필수적인 입력치고 불포화토의 역학적 거동을 해석하기 위해 중요한 요소지만, 현재 투수성 포장재의 흡-수분특성곡선의 산정 및 이를 바탕으로 한 투수성 포장 시스템의 침투성에 대한 연구가 국내에서는 거의 찾아볼 수 없거나 미비한 실정이다.

본 연구에서는 먼저 실내시험을 통해 투수성 포장재의 포화투수계수와 흡-수분특성곡선을 산정하고, 이를 바탕으로 유한요소해석을 통해 강우시 특정 투수성 포장 시스템의 침투특성 및 홍수 저감 효과를 분석하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 투수성 콘크리트

본 연구에 사용된 투수성 포장재는 부산광역시 강서구의 낙동강변 자전거 도로에 시공된 투수성 콘크리트로서, 직경 50 mm의 코어 샘플러로 시료를 채취하였다(GL E&C, 2012). 채취된 시료는 측정결과 직경 48 mm, 높이 약 80 mm의 형상을 가지고 있었으며, 시료의 상·하단부를 평탄하게 만들기 위해 암석절단기로 시료의 양 끝을 절단하였다. 절단 후 시료의 높이는 52 mm로 측정되었으며, 본 시료가 Fig. 1에 제시되어 있다. 현장에서 채취한 시료이기 때문에 콘크리트 배합에 사용된 골재의 정확한 입도는 알 수 없었으나, 골재의 최대입경은 6 mm 정도였으며, 측정된 공극률은 약 30%로서 다른 투수성 포장재에 비해 약간 큰 편에 속했다(Ahn et al., 2013). 본 투수성 콘크리트의 제작에 사용된 배합비는 Table 1에 보인 바와 같다.



Fig. 1. Pervious concrete sample

Table 1. Mixture contents of the pervious concrete (GL E&C, 2012)

구 분	중 량 (kg/m^3)	중량비 (%)
골 재	1213.0	76.82
시멘트	279.0	17.67
물	83.7	5.30
안 료	2.5	0.16
혼화제	0.8	0.05
합 계	1579.0	100.00

2.1 포화 투수계수

투수성 콘크리트 시료의 포화투수계수는 정수두 시험을 통해 산정하였으며(Neithalath et al., 2006; Lee, 2013), 본 시험에 사용된 투수계가 Fig. 2에 제시되어 있다. 본 정수두 시험의 원리는 흙의 투수시험(KS F 2322, 2000)의 원리와 같으며, 투수시험은 다음의 과정을 통해 수행되었다(Lee, 2013). 먼저 시료의 직경(D) 및 높이(L)를 측정한다. 시료의 단면적 A를 계산한다. 투수계 내 시료 측면으로의 누수 방지를 위해 시료의 측면을 고무테이프로 감싼다. 고무테이프로 감싼 시료를 투수계 원통 내에 삽입한다. 투수계 내의 시료를 포화시킨다. 필요할 경우 약간의 충격을 가해 시료 내부의 기포를 빼내 포화를 가속시킨다. 원통을 투수계에 연결하고 정해진 수위차(h)를 이용하여 시료 내 투수를 발생시킨다. 투수 시 배수 유량(Q) 및 유량계측 시작·마침시각(t_1, t_2)을 기록한다.



Fig. 2. Constant head permeameter (Lee, 2013)

계측된 시료의 직경(D) 및 길이(L), 수위차(h), 유량(Q), 유량계측 시작·마침시각(t_1, t_2)을 바탕으로 다음과 같이 포화투수계수(K_s)를 산정할 수 있다.

$$K_s = \frac{L}{h} \times \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \tag{1}$$

본 과정을 반복하여 동일한 시료의 포화투수계수를 여러 번 측정하였으며, 포화투수계수의 평균치는 $K_s = 0.129$ cm/s로 산정되었다.

2.2 흡-수분특성곡선(SWCC)

흡-수분특성곡선은 지반재료의 체적함수비와 모관흡수력의 관계를 나타내며, Fig. 3에 보인 압력판 셀 시험장치를 사용하여 산정할 수 있다. 시험 방법은 다음과 같은 절차를 따른다. 먼저 압력조절장치를 통해 포화된 시료 내에 공기압을 증가시킨다. 이 때 공기압의 증가는 시료 내 모관흡수력의 증가로 이어지며, 시료가 가지는 일정한 공기함입치를 넘어서게 되면 시료 내부에 있는 간극수가 배출되게 된다. 이와 같은 절차를 거치며 배수량을 측정하는 것으로 건조과정에 대한 흡-수분특성곡선을 산정할 수 있다. 반대로 공기압을 단계별로 감소시켜 시료 내 간극수를 유입하는 것으로 습윤과정에 대한 흡-수분특성곡선을 산정할 수 있다(Fredlund et al., 2012; Song, 2013).

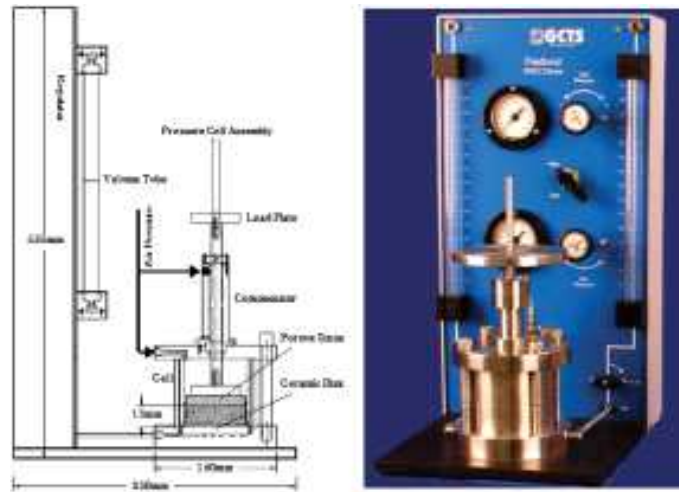


Fig. 3. Single specimen pressure plate cell (GCTS, 2014)

흡-수분특성곡선을 나타내는 모델 중 대표적인 것들로는 Brooks and Corey(1964), van Genuchten(1980), Fredlund and Xing(1994) 등의 제안식들이 있으며, 이 중 Fredlund and Xing(1994)의 제안식은 다음과 같다.

$$\theta = \theta_s \left\{ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right\} \left[\frac{1}{\left[\ln\left\{ \exp(1) + \left(\frac{\psi}{\alpha_f}\right)^{n_f} \right\} \right]^{m_f}} \right] \quad (2)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화체적함수비, ψ 는 모관흡수력, h_r 은 잔류함수비에 따른 모관흡수력이며, α_f 는 공기 유입시 모관흡수력, n_f , m_f 는 피팅(fitting) 매개변수이다. 이 때, 포화체적함수비 θ_s 는 간극률 n 과 동일하다.

위의 시험장치 및 시험과정을 바탕으로 투수성 콘크리트 현장시료의 흡-수분특성곡선을 산정하였다. Fig. 4에는 강우시 투수성 포장 시스템의 침투성에 사용할 습윤과정에 대한 흡-수분특성곡선의 결과와 이를 Fredlund and Xing(1994) 모델에 맞춘 결과를 나타낸다. 또한 이에 따른 Fredlund and Xing(1994)의 매개변수는 Table 2에 나타내었다. 투수성 콘크리트는 화강풍화토 등 국내 일반적인 지반재료보다 공극의 크기가 크기 때문에, 모관흡입력이 증가함에 따라 공기 유입 후 체적함수비가 상대적으로 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

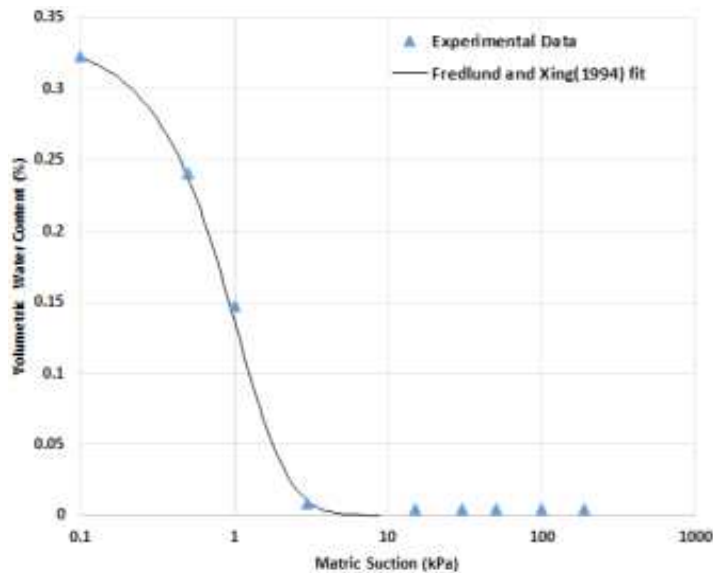


Fig. 4. Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) of pervious concrete (wetting)
(Lim and Kim, 2012)

Table 2. Saturated permeability and SWCC model parameters of pervious concrete and Diack basalt

Material	Saturated permeability K_s (cm/s)	SWCC model (Fredlund and Xing, 1994) parameters				
		θ_s	α_f (kPa)	n_f	m_f	h_r (kPa)
Pervious concrete	0.129	0.322	2.234	1.625	8.597	0.210
Diack basalt (Ba et al., 2013)	4.5×10^{-4}	0.2625	0.215	25.458	0.269	100

3. 투수성 포장 시스템 침투성

본 절에서는 먼저 유한요소해석(Thode and Fredlund, 2013)을 통해 단일층으로 이루어진 지반의 침투성을 해석하여 이를 Green-Ampt 모델(Green and Ampt, 1911)의 결과와 비교 검증한 뒤, 검증된 유한요소모델을 통해 투수성 포장 시스템의 침투성을 산정한다.

3.1 단일 지반층 침투성 해석

수문해석에 필요한 지반의 침투능 모델 중 널리 사용되는 것으로는 Horton의 침투 모델(Horton, 1933), SCS 유출곡선 지수방법(Ponce et al., 1996), Green-Ampt 침투 모델(Green and Ampt, 1911) 등을 들 수 있다. 이 중, Green-Ampt 모델은 1911년에 처음 발표된 후 여러 학자들의 지속적인 연구로 개선되어 왔으며, 다른 모델들과 달리 이론에 근거한 침투능 결정 방법이다(Green and Ampt, 1911; Mein and Larson, 1973). 본 모델은 일차원 연직흐름, 습윤선에서의 일정한 모관흡수력, 그리고 습윤선 위 부분에서의 초기 토양수분 미흡량과 투수계수가 일정하다는 가정을 바탕으로 침투능을 산정한다. Green-Ampt 모델에서 침투율 $f(t)$ 누적침투량 $F(t)$ 는 Darcy's Law(Darcy, 1856)에 근거하여 다음과 같이 유도된다(Kim, 2008; Yoon, 2007).

$$f(t) = K_s \left\{ \frac{\psi_s(\theta_s - \theta_i)}{F(t)} + 1 \right\} \tag{3}$$

$$F(t) = K_s t + \psi_s(\theta_s - \theta_i) \ln \left\{ 1 + \frac{F(t)}{\psi_s(\theta_s - \theta_i)} \right\} \tag{4}$$

이 때, ψ_s 는 습윤선에서의 모관흡수력을, θ_i 는 초기 체적함수비를 나타낸다. 여기서 사용된 습윤선에서의 모관흡수력 ψ_s 은 Eqn. 2 및 Table 2의 공기 유입시 모관흡수력 α_f 와 같다.

본 Green-Ampt 모델을 바탕으로 포장의 기층 재료로 널리 사용되는 지반재료의 하나인 Diack basalt(Ba et al., 2013)으로 이루어진 지반 단일층에 대한 침투 곡선을 산정하였다. 해석에 사용된 Green-Ampt 모델의 매개변수인 포화 시의 투수계수 K_s , 체적함수비 θ_s , 습윤선에서의 모관흡수력 ψ_s ($\psi_s = \alpha_f$)은 Table 2에 보인 바와 같다. 초기 체적함수비 θ_i 는 지반재료의 포화도 $S=30\%$ 에 해당하는 값을 사용하였으며, 네 가지 균일한 강우강도 $I=25, 50, 75, 100$ mm/hr 하의 침투율을 산정하였다. 본 해석의 결과가 Fig. 5에 제시되어 있으며, Fig. 5(a)와 5(b)는 각각 30 min, 300 min 까지의 강우지속시간 하 결과를 나타낸다. 해석에 사용된 모든 강우의 경우에, 강우 초기에는 모든 강우가 침투하다가 이후 침투율이 감소하며, 지반이 모두 포화된 후에는 강우강도에 상관없이 모두 일정한 중기 침투능을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다. 침투율의 결과가 일정한 중기 침투능에 수렴하게 되는 것은 Green-Ampt 모델에서 하부 경계가 무한한 지반을 해석하기 때문이다.

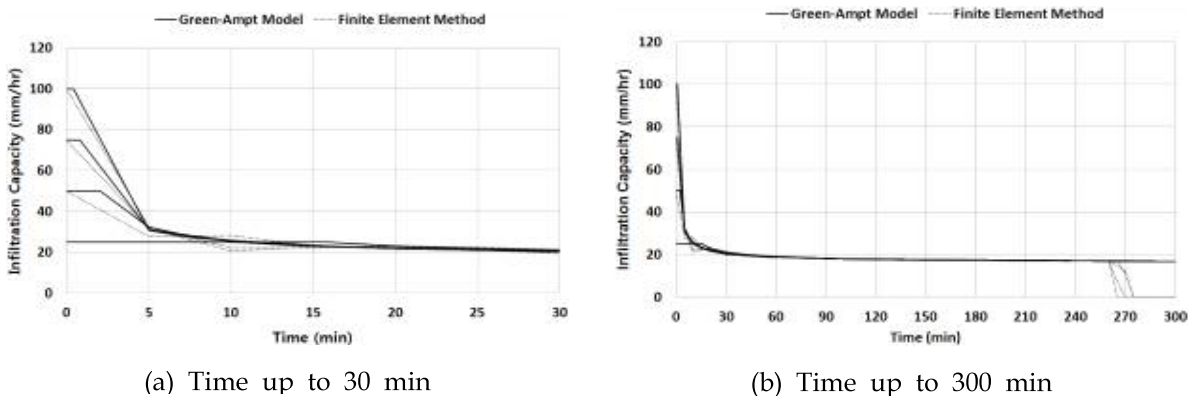


Fig. 5. Infiltration based on Green-Ampt and finite element models

위 해석에 사용된 Diack basalt의 물성치를 바탕으로 단일 지반층의 침투율을 유한요소해석을 통해 산정하였다. 지반 재료의 불포화 투수해석에는 흡-수분함수특성곡선과 모관흡입력에 따른 상대투수계수(불포화투수계수와 포화투수계수의 비)가 필수적인 입력치이나, 불포화투수계수와 흡-수분함수특성곡선의 연관성에 기인해 흔히 지반의 흡-수분특성곡선으로부터 모관흡입력에 따른 상대투수계수를 산정하는 경험식이 사용된다. 흡-수분특성곡선으로부터 상대투수계수를 산정하는 방법으로 Brooks and Corey(1964), Modified Campbell(1973), van Genuchten(1980) 등의 제안식이 있으며, 본 논문에서는 흡-수분특성곡선 모델로는 Fredlund and Xing(1994)을, 상대투수계수 산정 모델로는 Modified Campbell(1973)의 제안식을 적용하였다. Diack basalt의 포화투수계수 및 흡-수분특성곡선 매개변수는 Table 2에 주어진 값을 사용하였다. 또한, Green-Ampt 모델의 해석조건과 마찬가지로 포화도 $S=30\%$ 에 해당하는 초기 체적함수비 θ_i 하에 균일한 강우강도 $I=25, 50, 75, 100$ mm/hr을 가정하였다. 유한요소 침투해석 프로그램 SVFLUX(2013)을 사용하였으며, 해석에는 폭 1 m, 높이 0.45 m 2차원 단면을 사용하여 수행하였으며, 지반의 하부 경계조건은 불투수면을 가정하였다. 해석에 사용한 유한요소모델은 Fig. 6에 보인 바와 같다. 단, 그림에 보인 요소망은 초기 요소망이며 SVFLUX 프로그램의 기능에 따라 본 요소망은 강우 시작 시에 모델 상부에 촘촘하게 되었다가 습윤선이 내려오면서 요소망의 촘촘한 부위가 이를 따라 하부로 향하게 된다(Thode and Fredlund, 2013).

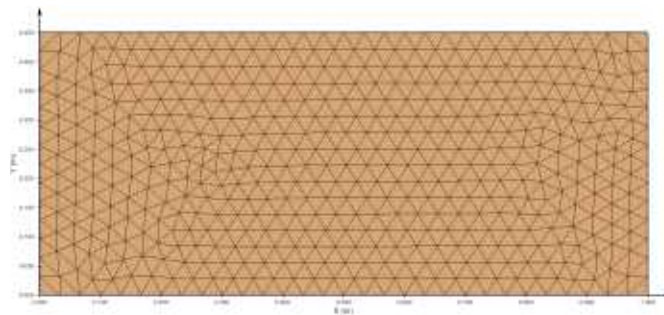


Fig. 6. Finite element model of a single soil layer

유한요소해석의 결과가 Fig. 5에 Green-Ampt 모델의 결과와 비교되어 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 유한요소해석과 Green-Ampt 모델의 결과는 약간의 차이는 보이나 전체적인 경향은 동일함을 할 수 있다. 강우 초기 침투율에 미세한 차이가 있는 것은 Green-Ampt 모델은 먼저 유한요소해석에 비해 단순화된 모델이며, 즉 지배방정식이 다르며, 또한 이에 따라 동일한 재료의 입력 물성에도 두 모델 사이에 차이가 생기기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Green-Ampt 모델은 지반 하부에 경계가 없는, 즉 무한대인 지반에의 침투를 반영하는데 반해, 유한요소해석의 경우 상부에서 깊이 45 cm인 지점에 불투수면이 존재하므로 Fig. 5(b)와 같이, 시간이 충분히 흘러 지반이 모두 포화되는 경우에는 더 이상 지반에 침투가 허용되지 않는 것을 확인할 수 있다.

3.2 투수성 포장 시스템 침투성 해석

본 절에서는 투수성 포장 시스템에서의 침투 경향을 알아보기 위해, 유한요소해석을 통해 투수성 콘크리트와 Diack basalt의 두 층으로 구성된 투수성 포장 시스템의 침투성을 해석하였다. 깊이 0.15 m의 투수성 콘크리트와 깊이 0.45 m의 Diack basalt, 폭 3 m로 구성된 포장 시스템을 가정하였다. 앞서 단일 지반층 해석의 경우와 마찬가지로, 투수성 콘크리트와 Diack basalt의 흡-수분특성곡선 모델로는 Fredlund and Xing(1994)을, 상대투수계수 산정 모델로는 Modified Campbell(1973)의 제안식을 적용하였으며, 각 층의 입력 물성치는 Table 2에 제시된 바와 같다. 기층 하부 노반의 투수계수가 매우 낮은 경우를 가정하기 위해, 유한요소모델의 바닥 경계면은 불투수면으로 설정하였다. 실제로 투수성 포장 시공시 안정성 확보를 위해 노반의 다짐을 95%로 수행하는 경우, 노반의 투수계수는 매우 낮을 것으로 예상할 수 있다. Fig. 7에 해석에 사용된 유한요소모델을 나타내었다.

침투 해석은 전체 시스템의 초기포화도가 $S=30\%$ 인 경우 $I=25, 50, 75, 100$ mm/hr의 균일한 강도강우에 대해, 또한 $I=25$ mm/hr인 경우 $S=30, 60, 90\%$ 에 대해 수행하였으며 이는 Table 3에 요약한 바와 같다.

Table. 3 Analysis cases

Degree of saturation, S (%)	Rainfall intensity, I (mm/hr)
30*	25*
	50
	75
	100

*Baseline analysis

투수성 포장 시스템의 초기포화도가 $S=30\%$ 인 경우의 침투율 해석결과가 Fig. 8에 주어져 있다. 그림으로부터 투수성 포장층과 기층의 물성차이에 따른 침투율의 변화를 확인할 수 있다. 예를 들어, $I=100$ mm/hr의 균일한 강우가 발생하는 경우, 강우 발생 초기(강우 발생 후 28 min까지)에는 투수성 콘크리트의 투수계수가 강우강도를 상회할 정도로

충분히 크므로 강우가 모두 침투하고 유출이 생기지 않다가, 이후 강우의 침투가 하부의 기층에 이르게 되는 순간 포장 시스템의 침투율이 100 mm/hr에서 50 mm/hr 이하로 급격하게 감소하다가 다시 완만한 감소상태에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이 후 포장 시스템의 침투율은 하부 Diack basalt 층에 지배되어 종기침투능에 해당하는 22 mm/hr까지 점진적으로 감소하다 투수성 시스템이 모두 포화되는 순간(184 min)에 지반의 침투가 멈추고 강우가 모두 유출이 되는 결과를 보인다. 본 논문에 보인 해석에서는 하부 기층의 저면이 불투수층이라고 가정하였으나, 기층 하부의 노반으로 침투가 가능한 경우에는, 즉 노반의 종류와 다짐도가 침투가 가능하도록 이루어진 경우에는, 투수성 포장 시스템의 장기적인 침투성은(예를 들어, 100 mm/hr 강우시 184 min 이후) 하부 노반의 투수성에 직접적인 영향을 받을 것으로 판단한다. 이와 같은 경향을, 강우강도 $I=50, 75$ mm/hr인 경우에도 동일하게 나지만, $I=25$ mm/hr인 경우에는 강우강도가 시스템의 종기침투능 22 mm/hr와 유사한 값을 가지므로 초기부터 침투율에 큰 변동이 없다가 시스템이 포화되면(285 min) 더 이상 침투가 일어나지 않는다. Fig. 9는 시간에 따른 누적유출량을 나타내며, 이는 강우강도에서 Fig. 8의 침투율을 제한 부분을 적분한 결과에 해당한다. Fig. 8에서 유출(=강우강도-침투)에 해당하는 부분이 사각형에 가까운 형상을 보이기 때문에, Fig. 9의 누적 유출은 선형에 가까운 형상을 보인다. Fig. 9(혹은 Fig. 8)의 해석결과로부터 강우강도 $I=25, 50, 75, 100$ mm/hr인 경우에 시스템이 포화되고 침투가 멈추는 시각이 각각 285, 206, 190, 184 min인 결과를 보인다. 따라서, 강우강도에 따라 유출 지체효과에 차이가 있는 것을 확인할 수 있으며, 본 해석의 경우와 달리 노반에 우수 침투가 가능한 경우에는 더 큰 유출 지체효과를 얻을 수 있을 것으로 판단한다.

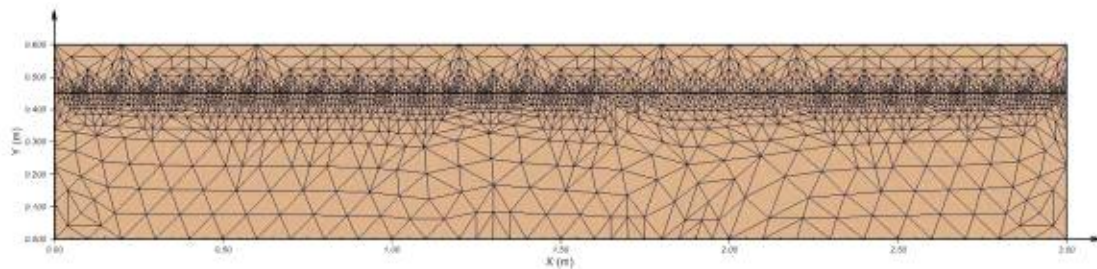


Fig. 7 Finite element model of a permeable pavement system

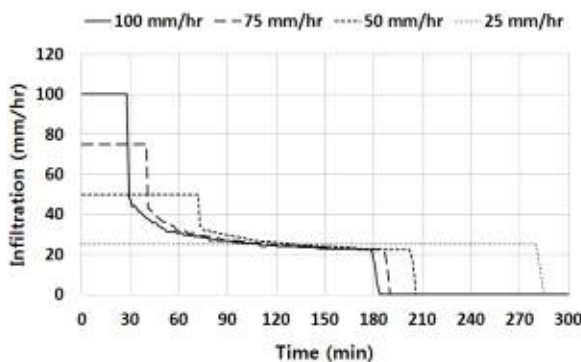


Fig. 8. Infiltration into permeable pavement system with varying rainfall intensities

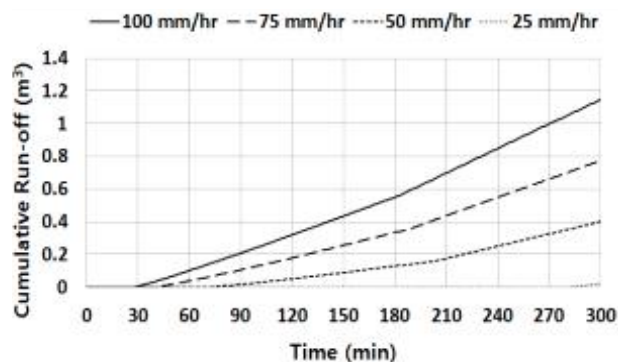


Fig. 9. Cumulative runoff of permeable pavement system with varying rainfall intensities

투수성 포장 시스템의 초기포화도가 $S=30, 60, 90\%$ 인 경우, 강우강도 $I=25$ mm/hr 하의 침투율과 누적 유출량의 결과가 Fig. 10과 Fig. 11에 주어져 있다. 앞서 언급한 대로 강우강도 25 mm/hr는 하부지반 Diack basalt에 의해 지배되는 종기침투능 22 mm/hr과 유사한 값이므로, 강우 침투가 투수성 콘크리트를 지나 하부 Diack basalt에 도달할 때 갑작스런

침투율의 변화가 나타나지 않는다. 예를 들어, 초기포화도가 $S=90\%$ 인 경우, 강우발생 약 25 min까지는 강우가 모두 침투하여 유출이 생기지 않다가, 이후 침투 습윤면이 바닥 불투수면에 도달하여 시스템이 포화하게 되면 침투율이 25 mm/hr에서 0으로 급격히 감소하며, 더 큰 강우($I=50, 75, 100$ mm/hr)가 발생했을 때 보였던, 침투가 콘크리트에서 Diack basalt 층으로 진행할 때의 침투율의 감소는 관찰할 수 없다. Fig. 10에서 침투율은 초기포화도 $S=30, 60, 90\%$ 인 경우에 강우 후 각각 285, 156, 26 min인 시점에서 감소하게 되며, 이는 Fig. 11에서 유출이 시작되는 시각과 일치한다. 불투수성 포장과 비교하였을 때, 즉 강우가 침투 없이 바로 유출이 되는 경우와 비교하여, 투수성 포장 시스템의 노반으로 침투가 불가능한 경우에도, 투수성 포장 시스템이 강우의 지표유출을 효과적으로 지체 및 감소시키는 것을 알 수 있다.

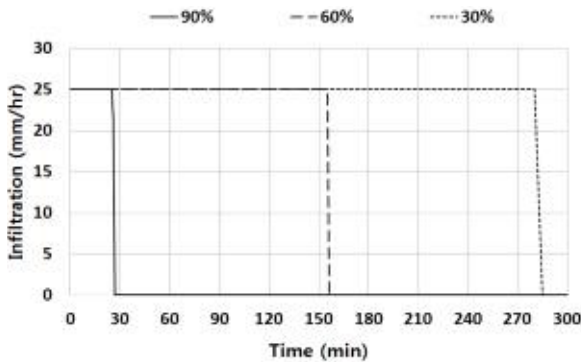


Fig. 10. Infiltration of pervious system having different initial saturations

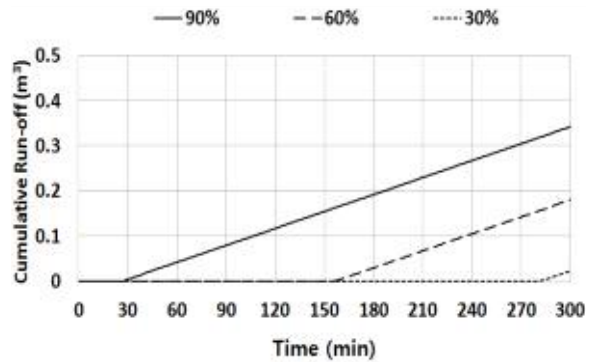


Fig. 11. Cumulative run-off of pervious system having different initial saturations

4. 결론

본 연구에서는 먼저 실내시험을 통해 투수성 포장재의 포화투수계수와 흡-수분특성곡선을 산정하였다. 시험에 사용된 현장 투수성 콘크리트 시료의 공극 크기와 공극률(약 30%)이 일반적인 지반재료(예를 들어, 화강풍화토)보다 큰 값을 가지기 때문에, 상대적으로 큰 값의 포화투수계수가 측정되었다. 또한, 같은 이유로 흡-수분특성곡선의 경우, 모관흡입력이 증가함에 따라 공기 유입 후 체적함수비가 상대적으로 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 단일 지반층(Diack basalt)에 대하여 흡-수분특성곡선을 입력치로 하는 유한요소해석 프로그램과 Green-Ampt 모델의 침투해석 결과를 비교하였으며, 모델 내 지배방정식 및 입력물성의 차이에 따른 두 모델 간 침투율 해석의 약간의 차이는 있었으나, 전체적으로 매우 유사한 해석 결과를 나타내었다.

검증된 유한요소해석 프로그램을 통해 투수성 콘크리트와 Diack basalt의 두 층으로 이루어진 투수성 포장 시스템의 침투율을 해석하였다. 이 때, 유한요소모델의 바닥면으로는 침투가 일어나지 않는다고 가정하였으며, 이는 투수성 포장 시공시 안정성 확보를 위해 노반의 다짐을 95%로 수행하여 노반의 투수계수는 매우 낮은 값을 가지는 경우와 유사한 경계조건을 가진다. 해석 결과로부터, 불투수성 포장과 비교하였을 때, 즉 강우가 침투 없이 바로 유출이 되는 경우와 비교하여, 투수성 포장 시스템의 노반으로 침투가 불가능한 경우에도, 투수성 포장 시스템이 강우의 지표유출을 효과적으로 지체 및 감소시키는 것을 확인하였다.

본 논문에서 투수성 포장의 흡-수분특성곡선의 실험적 측정을 바탕으로, 투수성 포장 시스템의 침투성이 기존의 Green-Ampt 모델의 결과와 유사한 신뢰성 있는 값을 가지는 것을 확인하였으며, 향후 투수성 포장 시스템의 여러 형태의 층 구성과 및 흐름 형상(예를 들어, 경사진 포장에서의 2차원 흐름), 다양한 초기 함수비 및 강우 하 투수성 포장의 성능에 대한 연구를 실증실험과 연계하여 지속할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C04)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- ACI Committee 522(2010). Report on pervious concrete, American concrete institute. Miami, US.
- Ahn, J.H., Lee, Y.S., Vaidya, S., Kim, J.H. and Lee, S.W. (2013). "Estimation the Porosity of Pervious Concretes based on X-Ray CT and Submerged Weight." *Journal of the Korean Society Hazard Mitigation*, Vol.13, No.4, pp.77-81.
- Ba M., Nokkaew K., Fall M. and Tinjum J. (2013). "Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses." *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.31, Issue 5, pp.1497-1510.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media, Colorado State University Hydrology paper, No.3, Colorado, US.
- Campbell, J.D. (1973). Pore pressures and volume changes in unsaturated soils. Ph.D. Thesis, University of Illinois, US.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.521-532.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. and Fredlund M.D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New Jersey, US.
- GCTS (2014). www.gcts.com
- GL E&C (2012). Personal Communication, www.glenc.co.kr.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911). "Studies on soil physics: 1. the flow of air and water through soils." *Journal of Agricultural Science*, Vol.4, No.1, pp.1-24.
- Horton, R.E. (1933). "The role of infiltration in the hydrologic cycle." *American Geophysical Union 14th*, US, pp.446-460.
- Hunt, W.F. (2009). *Urban Waterways Maintaining Permeable Pavements*, North Carolina State University, North Carolina Cooperative Extension.
- Kim, K.W., Kim, B.J. and Park, J.J. (2008). "A Study of Stability Analysis on Unsaturated Soil Slopes Considering Rainfall." *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.7, No.4, pp.9-18.
- Klenzendorf J.B., Charbeneau R.J. and Barrett M.E. (2010). *Hydraulic Conductivity Measurement of Permeable Friction Course (PFC) Experiencing Two-Dimensional Nonlinear Flow Effects*, Technical Report 10-01, Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin, Texas, US.
- KS F 2322 (2000). Test methods for permeability of saturated soils, Korean Industrial Standards.
- Lee, Y.S. (2013). Estimation the Porosity of Pervious Concretes. Master's Thesis, Pusan National University, Busan
- Leming, L.M., Malcom, R.H. and Paul, D.T. (2007). *Hydrologic design of pervious concrete*, Portland Cement Association, Illinois, US, ISBN.978-0-89312-255-3 EB303.
- Lim, B.K. and Kim, Y.T. (2012). Personal Communication.
- Mein, R.G. and Larson, C.L. (1973). "Modeling infiltration during a steady rain." *Journal of Water Resources Research*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
- Montes, F., Valavala, S. and Haselbach, M.L. (2005). "A New test method for porosity measurements of portland cement pervious concrete." *Journal of ASTM International*, Vol.2, No.1.
- Neithalath, N., Weiss, J. and Olek, J. (2006). "Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to

- predict acoustic and hydraulic performance." *Cement and Concrete Research*, Vol.36, No.11, pp.2074-2085.
- Piller M., Schena G., Nolich M., Favretto S., Radaelli F. and Rossi E. (2009). "Analysis of Hydraulic Permeability in Porous Media: From High Resolution X-ray Tomography to Direct Numerical Simulation." *Transp Porous Media* 80, pp.57-78
- Ponce, V.M. and Hawkins, R.H. (1996). "Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?." *Journal Of Hydrologic Engineering*, Vol.1, No.1.
- Song, Y.S. (2013). "Estimation on Unsaturated Hydraulic Conductivity Function of Jumoonjin Sand for Various Relative Densities." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.6, pp.2369-2379.
- SVFLUX (2013). User's manual, SoilVision System Ltd., Canada 2005.
- Takahashi S., Toda K., Kikuchi Y., Sugano T., Kuriyama Y. and Yamazaki H. (2011). "Urgent Survey for 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami Disaster in Ports and Coasts." Technical Note of The Port and Airport Research Institute, ISBN.1346-7840.
- Tennis, P.D., Leming, M.L., and Akers, D.J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Portland Concrete Association, Illinois, US; National Ready Mixed Concrete Association, Illinois, US, ISBN.0-89312-242-4 EB302.02
- Thelen, E. and Howe, L.F. (1978). *Porous pavement - including the principles of development and a porous pavement design manual*. First Edition, The Franklin Institute Press, Philadelphia, US.
- Thode, R. and Fredlund, M. (2013). *SVFlux Tutorial Manual*, Saskatchewan, Canada: SoilVision Systems Ltd.
- van Genuchten, M.T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Journal of Soil Science Society of America*, Vol.44, No.5, pp.892-898.
- Yoon, Y.N. (2007). *Hydrology Basic and Application*, Cheong Moon Gak, Seoul.
- Yoo, I.K. and Yoon, K.H. (2011). "Permeable Pavement as Urban Flood Reduction Measures." *Journal of the Korean Society Hazard Mitigation*, Vol.11, No.3, pp.31-38.