

불포화투수계수를 이용한 지반의 연속 침투능 산정

한희수¹ · 이정식^{2*} · 장진욱³ · 양남용³

¹금오공과대학교 토목환경공학부, ²금오공과대학교 토목환경공학부, ³금오공과대학교 대학원 토목공학과

Estimation of Continuous Infiltration Process by Unsaturated Permeability

Heui-Soo Han¹, Jung-Sik Lee^{2*}, Jin-Uk Jang³, and Nam-Young Yang³

¹Associate Professor, School of Civil and Environmental Engrg., Kumoh National Institute of Technology

²Professor, School of Civil and Environmental Engrg., Kumoh National Institute of Technology

³Course Student, Department of Civil Engrg., Graduate School, Kumoh National Institute of Technology

강우시 침투량 산정을 위하여 일반적으로 기존의 침투능 산정식인 Horton 공식 및 Green-Ampt 공식으로 지반 내 침투능을 산정해 왔다. 하지만, 실제 강우로 인한 지반 침투는 연속적으로 침투가 이루어지므로, 이와 같은 불연속적인 침투량 산정공식의 단점을 보완하고자 연속적인 침투능 산정공식을 새로이 유도하여, 침투능 및 침투량을 비교 분석하고자 하였다. 유도된 식 및 기존의 침투공식을 검증하기 위한 침투실험을 행하여 각 식의 결과들을 비교분석하였다. 함수비 혹은 포화도의 함수인 불포화투수계수는 직접적으로 침투능 및 침투량에 영향을 끼치므로, 새로이 유도된 식은 침투과정에 따른 불포화투수계수의 변화를 이용하여 보다 정확한 침투능 및 침투량을 산정하고자 하였으며, 침투로 인한 구조물의 안정 및 지하수 거동을 보다 정확히 해석하기 위한 것이다.

주요어 : 침투능, 침투량, 불포화투수계수, 포화도, 함수비

To estimate the accumulated infiltration, Horton's and Green-Ampt's equations are usually applied. Because the real infiltration is penetrated into the soil continuously, to cover the problems of the conventional equations derived from the discontinuous infiltration system, new infiltration equation is derived from the concepts of continuous infiltration system. Furthermore, infiltration tests were done to compare the results from the conventional Horton's and Green-Ampt's equations and newly derived equation. Unsaturated permeability is the function of water content ratio or saturation degree, which affects directly to the infiltration capacity and accumulated infiltration. Therefore, the variation term of unsaturated permeability is inserted into the new equation to estimate the proper infiltration capacity and accumulated infiltration. It will make the more accurate analysis for the safety of structure and the behavior of groundwater.

Key words : Infiltration capacity, Accumulated infiltration, Unsaturated permeability, Saturation degree, Water content ratio

서 론

기상이변 현상으로 인한 강우량의 증가는 여러 문제를 발생시키고 있으며, 특히 강우의 지반침투로 인한 구조물 및 사면붕괴로 해마다 많은 피해가 발생하여 이에 대한 예방대책이 필요한 실정이다. 이를 위해서는 강우로 인한 지반 내 침투과정의 명확한 분석이 선행되어야 하며, 분

석된 결과를 통해 강우 침투에 따른 각종 피해를 사전에 예방할 수 있을 것이다. 이와 관련하여 선행된 연구들을 살펴보면 먼저 국내의 경우, 홍원표 등(1996)은 SPILE를 이용하여 불포화지반의 강우 지중침투에 따른 사면지반의 거동을 예측하였으며, 조성은과 이승래(2001)는 Green-Ampt 공식을 이용하여 모의강우에 의한 얇은 사면파괴를 분석하였다. 사공명 등(2009)은 사면 토층두께의 변화에

*Corresponding author: jungsik@kumoh.ac.kr

다른 사면활동 양상 및 토체 내에서 변화하는 matrix suction과 체적함수비의 변화를 분석하였다. 국외의 경우에는 Pradel과 Raad(1993)는 점토와 실트질 사면의 지배방정식과 투수계수에 대한 포화심도를 분석하였으며, Chen과 Young(2006)은 사면에 작용하는 침투량에 Green-Ampt 공식을 적용하였다.

강우로 인해 물이 지반내로 침투하는 과정은 강우시 물의 중력과 표면장력에 의한 일종의 모세관 현상에 의해 흙의 표면으로부터 침투하며, 이때 침투된 물은 지반 내 흙 공극에 직접적인 영향을 미친다. 침투된 물은 연직방향으로 흘러감에 따라 지반내의 흙은 포화에 이르게 되며, 공극이 포화됨에 따라 지반내의 침투능이 변하게 되어 침투량은 감소하게 된다. 침투능이란 주어진 지반 조건 하에서 어떤 지면을 통해 물이 침투할 수 있는 최대율 (mm/hr, in/hr)을 말하며, 침투능은 상부의 포화도에 따라 달라지게 된다. 즉 침투능 지배인자는 지반 내 흙의 공극 크기, 지면보유수의 깊이와 포화층의 두께, 함수비, 지반 다짐정도, 식생피복, 동결 등의 의해 그 값이 달라지며 그중 가장 중요한 지배인자는 지반내의 공극의 크기로 볼 수 있다(이재수, 2006).

이러한 침투능 지배인자들은 지반의 초기조건과 강우 침투에 따라 모두 연속적인 거동을 나타내지만 기존의 지반침투공식들은 현장의 조건과는 다른 불연속적 침투거동을 고려한 식으로, 지반 침투량을 산정하기 위한 다양한 경험식 및 이론식이 제시되어 있다. 경험식으로는 주로 Horton 공식이, 이론식의 경우에는 Green-Ampt 공식이 많이 사용되고 있으며, Horton 공식의 경우 현장의 침투능 및 침투량의 지수적 거동을 모사하여 다른 공식보다 상대적으로 정확하나, 현장의 초기 함수비에 따른 지반조건을 나타낼 수 없다는 약점이 있고, Green-Ampt 공식의 경우, 지반을 포화구간 및 불포화구간의 불연속면으로 구분 한 후 유도된 이론식으로 현장 함수비의 지수적 증가현상을 나타내지 못한다는 약점이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 연속적인 침투거동 및 현장 침투량의 지수적 거동을 표현할 수 있는 새로운 해석기법이 필요하다고 하겠다.

이를 위하여 기존 침투능식들의 단점들을 보완하기 위해 새로운 이론식을 유도하였으며, 본 연구에서 제안한 이론식과 기존 식들의 비교분석을 위한 실내실험을 행하였다. 유도된 식은 실제현장의 지반조건을 따르기 위해, 침투에 따른 불포화투수계수 변화를 주요한 인자로 사용하였고, 비교분석을 위한 실내실험에 사용된 흡시료는 실제 국내의 사면토양에서 수집하였다.

침투능 산정공식

Horton 공식

Horton은 실험을 통한 침투능 공식을 제안 하였는데 식 (1)과 같은 Horton 공식을 살펴보면 강우에 의한 침투능은 시간에 따라 감소하여 거의 일정한 값에 도달하게 된다는 것을 보여준다(이재수, 2006).

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

여기서 f 는 시간 t 에서 침투능(mm/hr), f_0 는 강우 초기에 중력수두와 흡인수두의 합인 초기침투능, f_c 는 지반이 포화되었을 때의 침투능인 종기침투능, k 는 감소상수이다.

식 (1)을 식 $t=0$ 에서 $f=f_0$ 이고 $t=\infty$ 이면 $f=f_c$ 인 초기조건에 따라 적분하면 누가침투량은 식 (2)와 같다.

$$F = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

Green-Ampt 공식

Green-Ampt 공식은 간단하고, 여러 다양한 토질에 적용이 가능하면서 또한 Darcy법칙에 따른 이론식의 대표적인 식으로서 침투능 와 누가침투량 를 다음과 같이 제시하였다(이재수, 2006).

$$f(t) = K \left\{ \frac{\Psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right\} \quad (3)$$

$$F(t) = Kt + \Psi \Delta \theta \ln \left\{ 1 + \frac{F(t)}{\Psi \Delta \theta} \right\} \quad (4)$$

여기서 K 는 투수계수, Ψ 는 습윤선에서의 토양흡인수두이며, $\Delta \theta$ 는 함수비의 변화로 초기함수비와 포화함수비의 차이이다.

Green-Ampt 공식을 적용하기 위해서는 매개변수인 투수계수 K , 공극비 η , 습윤선에서의 토양흡인수두 Ψ , 유효공극비 θ_e , 그리고 함수비의 변화 $\Delta \theta$ 를 산정하여야 한다. $\Delta \theta$ 를 산정하기 위해 유효포화도 S_e 를 도입하며, 토양이 완전히 배수된 후에도 남아 있는 수분을 잔류함수량을 θ_r 라 하면 유효포화도 S_e 는 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\eta - \theta_r} \quad (5)$$

여기서 $\eta - \theta_r$ 를 유효공극비 θ_e 라 하고 $\Delta \theta = \eta - \theta_r$ 를

적용하여 식 (5)를 다시 정리하면 다음과 같이 를 산정할 수 있다.

$$\Delta\theta = (1-S_e)\theta_e \quad (6)$$

포화투수계수의 연속된 침투량 산정방법

지반의 침투능은 중력에 의한 중력수두항과 지반 내 부압을 유발하는 matric suction에 의한 흡인수두항의 합이다. 이 두 항은 지반의 깊이에 따라 연속적으로 변하므로 지반의 침투량 역시 불연속적인 계산방법이 아닌 연속화된 예측모델을 사용해야 할 것이다. 현재 사용되고 있는 경험적인 Horton 공식과 이론적인 Green-Ampt 공식은 모두 불연속적인 침투능 산정식을 이용하여 강우시 지반 내에 불연속 침투과정으로 실제 현장에 적용하기에는 많은 오차가 있었다. 즉, 실제 강우시 침투과정은 연속적이지만, 계산상 편리하기 위해 불연속 침투과정으로 산출해 왔다.

불연속적인 거동은 구간의 포화도에 따른 상부가 완전 포화된 후 하부로 침투한다고 가정하였지만 연속적인 거동은 어느 침투구간이 완전히 포화되지 않았다 하더라도 불포화투수과정에 의해 하부로 지하수가 침투한다. 즉, 침투능은 불포화지반내의 중력수두와 흡인수두의 연속적인 거동해석으로 볼 수 있다.

연속적 지하수침투과정을 모사하기 위한 지반 내 함수량의 전제조건은 Fig. 1에 보인 바와 같다. Fig. 1의 A점은 모관흡수력의 작용이 완전히 소멸된 지점으로 공극은 공기로만 차있으며, B점은 완전히 포화되어 모든 공극이 지하수로 차있다.

불포화투수계수

지반내의 공극은 지하수의 침투로 인하여 감소하며, 침투능은 공극의 크기, 물의 점성 등과 관련된 지반의 불

포화투수계수와 직접적 관련이 있다. 불포화투수계수가 크면 공극의 빈 공간은 빠르게 감소하므로, 불포화투수계수와 빈 공극의 감소량은 역수관계임을 알 수 있다. 불포화된 지반의 포화도변화에 따라 증가된 침투량은 시간의 역수단위를 사용하는 누적상수 K_a 라는 개념을 도입하여 구할 수 있다. 침투거리는 침투속도(불포화투수계수)와 시간의 곱으로 표현된다. 이를 침투량으로 나타내면 침투능과 시간의 곱으로 표현할 수 있다.

지반의 침투속도, 즉, 침투능은 불포화투수계수로 표현되며, 이는 잔류함수량을 제외한 포화도인 유효포화도와 포화투수계수의 항으로 구성된 식 (7)을 이용할 수 있다. 불포화투수계수를 계산하기 위한 여러 방법들 중 유효포화도의 함수로서 표시하는 경우, 식 (7)과 같다.

$$K = K_s S_e^a \quad (7)$$

여기서 K_s 는 포화투수계수(cm/s), K 는 각 함수비에서 불포화투수계수(cm/s), S_e 는 유효포화도이며, a 는 계수이다. Brook과 Corey(1964)는 입도 균등한 흙에 대해 $a=3$ 을 제안하였으며, Irmay(1954)는 이론적으로 $a=3$ 임을 밝혔고, 이후 이를 실험적으로 증명하였다.

불포화투수계수를 고려한 지하수증가량의 물질 수지식을 세우기 위하여, 누적상수 K_a 를 도입하여 계산할 수 있다. 이는 Horton 공식의 경우 사용된 침투능 감소상수와 같은 차원을 가지며 침투능은 시간에 따라 감소하여 수렴하지만, 침투량은 시간에 따라 누적되어 증가하므로, 이를 누적상수라 명하였으며, 누적상수 는 식 (8)과 같다.

$$K_a = \frac{K_s S_e^3}{\Delta h} \quad (8)$$

여기서 Δh 는 침투거리이다.

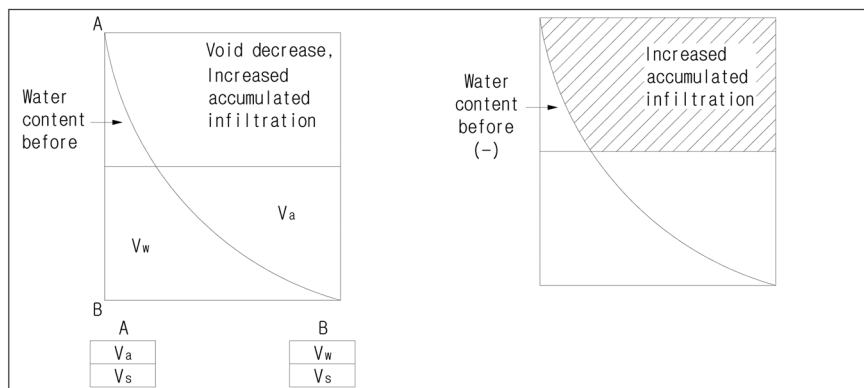


Fig. 1. Initial conditions to revise accumulated infiltration.

산정식 유도

전체 지하수증가량은 현장의 함수비와 불포화투수계수에 따른 누적상수와 단위시간당의 지하수 증가량의 곱으로 표현되며, 증가된 지하수량은 전체 지하수 증가량에서 기존의 지하수량을 제외하면 되므로 불포화된 지반의 연속침투방정식을 구하기 위한 전체 지배 미분방정식은 다음과 같은 식으로 나타내게 된다.

$$W_t = \frac{1}{K_a} \frac{dW_t}{dt} - W_0 \quad (9)$$

여기서 W_t 는 침투지하수량이며, W_0 는 기존 지하수량이다. 지배방정식을 일차미분방정식의 형태로 전개하면, 식 (10)과 같다

$$W_t' - K_a W_t = K_a W_0 \quad (10)$$

만약 식 (10)에서 $\beta = -K_a$, $\alpha = -K_a W_0$ 로 둔다면, 식 (10)은 다음 식과 같은 베르누이 비제차 방정식이 된다.

$$W_t' + \beta W_t = \alpha \quad (11)$$

적분인자 $e^{\int \beta dt} = e^{\beta t}$ 를 사용하고, 이를 양변에 곱하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(W_t e^{\beta t})' = \alpha e^{\beta t} \quad (12)$$

식 (12)를 적분하여 해를 구하면 식 (13)과 같다.

$$W_t = \frac{\alpha}{\beta} + C e^{-\beta t} \quad (13)$$

적분상수를 구하기 위한 경계조건에서 $t=0$ 이면, $0 = \alpha/\beta + C e^{-0}$ 이므로 $C = -\alpha/\beta$ 라고 할 수 있으며, 식 (13)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$W_t = -W_0 + W_0 e^{K_a t} \quad (14)$$

또한 식 (14)에 식 (9)를 대입하면 식 (15)와 같이 된다.

$$W_t = W_0 \left(e^{\frac{K_a S_e^3}{M_t}} - 1 \right) \quad (15)$$

여기서 W_t 는 함수비 증가분, W_0 는 초기함수비, K_a 는 누적상수 또는 반응상수이다.

따라서, 식 (15)는 현장의 기존 지하수량을 고려한 연속된 침투능을 산정하는 공식이 된다. $\frac{K_a S_e^3}{M_t}$ 항은 중력수두와 관련된 포화투수계수항 K_s 와 유효포화도 S_e 의 함수로 나타나는 matric suction에 의한 흡인수두항이 하나의

항으로 결합되어 지수적으로 변화하므로, 지수함수적으로 변하는 현장의 침투량 변화조건과 일치한다고 할 수 있다.

실험 및 분석

실내실험

강우시 불포화투수계수를 이용한 지반의 연속적 침투량을 산정하기 위하여 실내실험과 이론적 해석을 실시하여 비교하였다. 실내실험 장비는 Fig. 2와 같으며, ①은 nozzle을 이용한 강우량 모의장치, ②는 control box, ③은 강우 강도를 제어 할 수 있는 강우량 제어 부분, ④는 침투가 일어나는 지반을 나타낸다. 실험 장치 하부에 지속적으로 일정한 지하수가 흐를 수 있도록 얇은 쇠석을 깔 후 지하수로 인한 실트질 흙의 하부 세굴을 방지하기 위하여 부직포를 덮어 현장의 지하수 조건을 구현하도록 하였다. 부직포 상부에 흙을 덮어 1일을 경과한 후 지반이 모세관 현상에 의해 일정한 함수비를 유지할 수 있도록 하였다. 그 후 초기함수비를 측정된 후 강우재현 및 깊이별 함수비를 측정하였다.

실험에 사용된 흙은 충북 영동군에서 채취한 실트질 흙을 이용하였다. 흙 시료는 실내물성실험을 하여 이론적 해석에 사용될 지반조건들을 구하였으며, 지반조건들은 Table 1과 같다.

실험에 사용된 강우강도는 우리나라의 일반적인 여름철 강우강도인 60 mm/hr이며, 균일하게 지하수 및 강우가 지반 내에 침투하도록 흙은 일정한 압력으로 균등하게 다졌다. 다짐에너지는 한국지반공학회에서 제시한 시방서의 C 유형을 선택하였다(한국지반공학회, 2006). 강우 실험



Fig. 2. Rainfall device.

Table 1. Soil conditions for experiment.

Permeability K_s (cm/hr)	Depth (cm)	Porosity	Water content ratio	Specific gravity	Saturation degree
2.99	40	0.6	0.09	2.65	0.4



Fig. 3. TDR sensor to measure water content ratio.

Table 2. Soil condition for Horton's equation.

Soil	Initial permeability (cm/hr)	Final permeability (cm/hr)	Decreasing coefficient (1/hr)
Robertsdale loamy sand	31.52	2.99	21.75

후 함수비 측정은 짧은 시간에 많은 계측을 할 수 있도록 Fig. 3과 같은 상대적 정확성을 검증받은 probe형 TDR 센서를 이용하였다.

적용 및 해석

Horton 공식

실험에 사용된 현장지반조건은 Horton이 제시한 Table 2의 Robertsdale loamy sand의 지반변수값에 근사하므로, 연구에 필요한 지반조건은 이를 이용하였다.

Horton 공식의 경우 대상지반의 초기포화도 혹은 초기함수비에 대한 항이 없어 지반의 초기함수량에 따른 침투거동을 알 수 없다. 초기함수비에 따른 흡인수두와 관련된 초기침투능 f_0 와 감소상수 k 는 같은 흡이라도 지반의 초기함수비의 영향을 받는다. 지반의 초기함수비와 무관한 중기침투능 f_c 은 포화투수계수로 흡인수두와 무관하여 상수이다.

시간에 따른 침투능의 변화를 도시하면 Fig. 4와 같으며, Fig. 4를 살펴보면, 초기에 지수적으로 침투능이 감소하다가 일정한 중기침투능(포화투수계수)로 수렴함을 알 수 있다. 이 지반의 경우 약 20분 경과 후 중기침투능으로 수렴함을 알 수 있다. 초기침투능은 31.52 cm/hr에서 중기 침투능 2.99 cm/hr로 수렴되는 것을 볼 수 있으며, 이는 지반 내 포화도의 증가로 야기된 흡인수두의 감소에 따른 침투능의 변화이다.

시간에 따른 침투량의 변화를 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5를 살펴보면, 초기에 지수적으로 침투량이 증가하

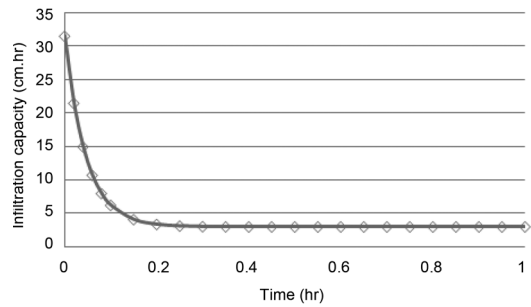


Fig. 4. Variation of infiltration capacity by Horton's equation.

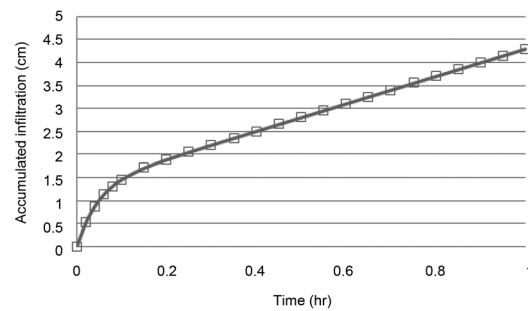


Fig. 5. Variation of accumulated infiltration by Horton's equation.

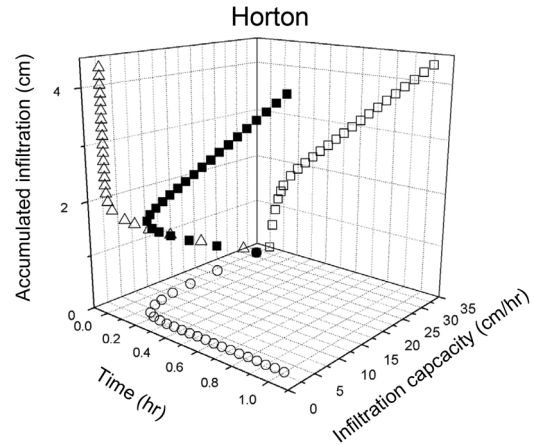


Fig. 6. 3-dimensional variation of accumulated infiltration by Horton's equation.

다가 일정한 중기 침투능(포화투수계수)로 수렴 후 직선적으로 침투량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 지반조건인 경우 약 20분 정도 지수적으로 증가하다 중기침투능이 일정한 값으로 수렴한 후 직선적으로 증가함을 알 수 있으며, 1시간의 침투시간에 따른 침투량은 4.30 cm이다.

침투시간과 침투능의 변화에 따른 침투량을 구하기 위하여 Horton 공식의 3차원 침투량 변화를 나타내면 Fig. 6

Table 3. Soil condition for Green-Ampt's equation.

Soil	Porosity	Effective porosity	Wetting matric suction (cm)	Permeability (cm/hr)
Loamy sand	0.437	0.401	6.13	2.99

과 같다. Fig. 6을 살펴보면, 흡인수두가 작용하는 초기에는 3차원 곡선의 형태를 나타내다가 포화 후 중력수두만 작용하는 경우 3차원 직선의 형태를 보임을 알 수 있다.

Green-Ampt 공식

실험에 사용된 현장지반조건은 Green-Ampt가 제시한 Table 3의 loamy sand의 지반변수 값에 근사하므로, 연구에 필요한 지반조건은 이를 이용하였다.

Green-Ampt 공식의 경우 대상지반의 초기포화도를 고려하였으며, 이는 유효공극비 θ_0 와 흡윤선 흡인수두항으로 나타내었다. 그러나 전술한 식은 포화구간과 불포화구간의 불연속면을 가정하여 유도된 이론식으로 현장의 연속적인 침투거동을 나타내지 못하며, 항상 포화구간과 일정한 값의 불포화구간으로 양분된 후, 침투에 따라 완전포화구간으로 변화한다.

시간에 따른 침투능의 변화를 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7을 살펴보면, 침투능이 지속적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. Green-Ampt 공식의 경우 1시간 경과 후에도 침투능은 3.83 cm/hr 정도로 여전히 높은 값이며, 이는 종기 침투능인 2.99 cm/hr과 비교하면 여전히 흡인수두가 작용하는 것으로 계산된다. 포화 종기침투능에 수렴하기 위해서 Green-Ampt 공식은 약 3,000시간, 즉, 4개월 정도의 거의 무한대에 가까운 시간이 필요하였다. 이는 흡인수두 항이 제거되는데 너무 많은 시간이 필요하며, 이로 인한 과도한 침투량이 산정될 것으로 판단된다.

시간에 따른 침투량의 변화를 도시하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8을 살펴보면, 자연 log 항을 식에 포함하고 있으나 결과값은 거의 직선에 가까운 형태로 침투량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 실제 지반의 침투과정의 지수적 변화와는 다소 차이가 있을 수 있다. 또한 1시간이 경과한 후의 침투량은 5.22 cm로 다소 과도한 침투량 값을 알 수 있다.

침투시간과 침투능의 변화에 따른 침투량을 구하기 위하여 Green-Ampt 공식의 3차원 침투량 변화를 나타내면 Fig. 9와 같다. Horton 공식의 경우 3차원의 곡선과 직선의 두 가지 형태를 동시에 볼 수 있었으나, Green-Ampt 공식의 경우 1시간 이내에는 여전히 흡인수두가 소진되지 않은 것으로 계산되어 3차원 곡선의 형태만 볼 수 있다.

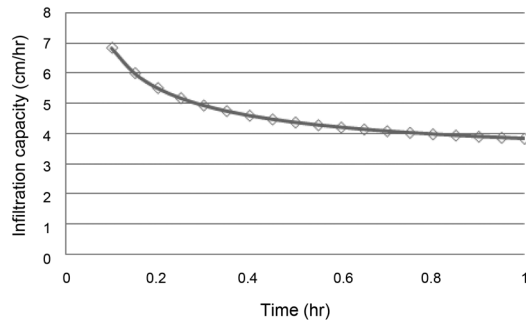


Fig. 7. Variation of infiltration capacity by Green-Ampt's equation.

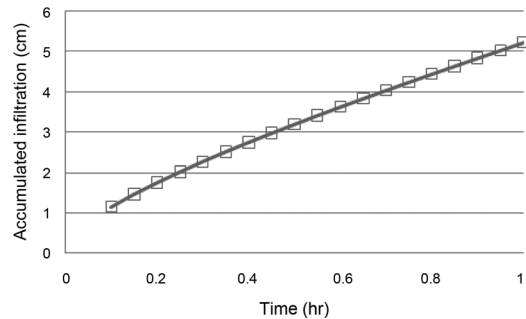


Fig. 8. Variation of accumulated infiltration by Green-Ampt's equation.

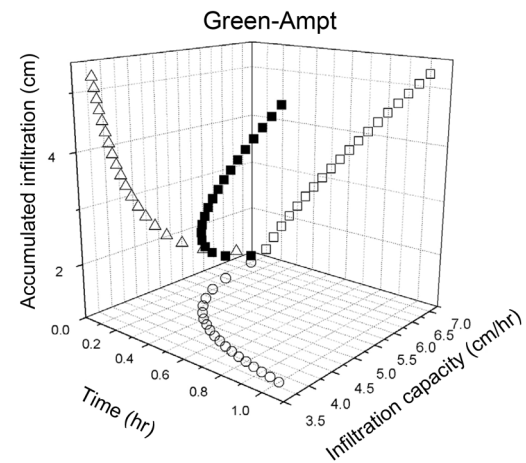


Fig. 9. 3-dimensional variation of accumulated infiltration by Green-Ampt's equation.

Horton 공식과 Green-Ampt 공식의 결과 비교

Horton 공식과 Green-Ampt 공식에 의한 시간에 따른 침투능의 변화를 나타내면 Fig. 10과 같다. Fig. 10을 살펴보면, Horton 공식에 비해 Green-Ampt 공식이 상대적으로 높은 값을 나타내며, Horton 공식이 초기에 수렴되는 것과

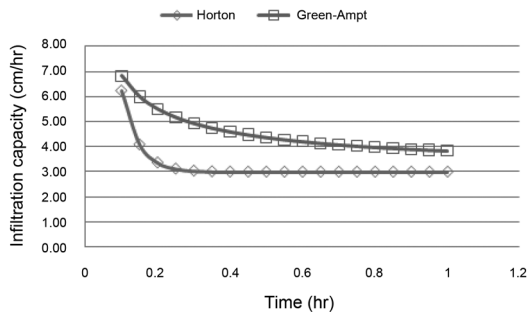


Fig. 10. Comparison of infiltration capacities.

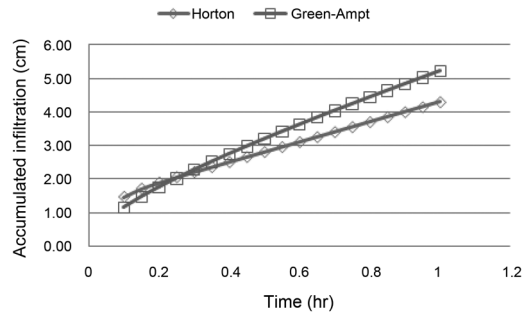


Fig. 11. Comparison of accumulated infiltrations.

달리 Green-Ampt 공식은 1시간 경과 후에도 여전히 수렴되고 있지 않음을 알 수 있다. Horton 공식의 경우 약 20분 후 중기침투능에 수렴하여, 흡인수두항의 영향이 사라지나, Green-Ampt 공식의 경우 여전히 수렴전으로, Horton 공식에 비해 높은 침투능을 보이고 있다.

Horton 공식과 Green-Ampt 공식에 의한 시간에 따른 침투량의 변화를 나타내면 Fig. 11과 같다. Fig. 11을 살펴보면, Horton 공식은 초기에 약간 높은 값을 보이나, Green-Ampt 공식의 경우 최종침투능에 수렴하는데 많은 시간이 걸려 점차 높은 침투량 값을 보이고 있다. 이로 인해 1시간의 침투과정에 의한 침투량은 5.22로 Horton 공식에 의해 계산된 4.30 cm에 비해 많은 침투량을 알 수 있다.

불포화투수계수를 고려한 침투량 산정

불포화투수계수를 고려한 침투량 산정을 위하여 사용된

지반조건은 Horton 공식과 Green-Ampt 공식에 적용된 지반조건과 맞추기 위해 Table 4에 보인 바와 같다. 포화 투수계수는 2.99 cm/hr로 이는 실트질 흙에 해당되며, 이에 해당하는 공극비는 중간상태의 공극비 0.6을 선택하였다. 지층깊이는 실험치와 비교하기 위하여 40 cm를 적용하였다.

Table 4에서 제시된 지반상수 값을 이용하여 함수비 변화에 따른 포화도, 불포화투수계수, 단위시간당 함수비증가량과 침투량을 산정하였으며, 이들 결과는 Table 5와 같

Table 4. Soil conditions to calculate accumulated infiltration by unsaturated permeability.

Permeability K_s (cm/hr)	Depth (cm)	Porosity	Water content ratio	Specific gravity	Saturation degree
2.99	40	0.6	0.09	2.65	0.3975

Table 5. Calculated infiltration capacities by unsaturated permeability.

Time	Water content ratio	Saturation degree	Unsaturated permeability	Increase of water content ratio	Accumulated infiltration (cm)
0	0.090000	0.397500	5.22E-05	0	0
1	0.091917	0.405936	5.56E-05	6.66E-06	0.001917
2	0.094008	0.415170	5.95E-05	7.29E-06	0.004008
3	0.096303	0.425305	6.39E-05	8.03E-06	0.006303
4	0.098841	0.436508	6.91E-05	8.91E-06	0.008841
5	0.101669	0.448993	7.52E-05	9.97E-06	0.011669
6	0.104851	0.463042	8.25E-05	1.13E-05	0.014851
7	0.108473	0.479032	9.13E-05	1.29E-05	0.018473
8	0.112654	0.497487	0.000102	1.50E-05	0.022654
9	0.117564	0.519160	0.000116	1.78E-05	0.027564
10	0.123459	0.545183	0.000135	2.17E-05	0.033459
11	0.130749	0.577356	0.000160	2.73E-05	0.040749
12	0.140137	0.618777	0.000197	3.60E-05	0.050137
13	0.152972	0.675403	0.000256	5.11E-05	0.062972
14	0.172341	0.760808	0.000366	8.22E-05	0.082341
15	0.207833	0.917161	0.000641	0.000174	0.117833
15.30333	0.226609	0.999772	0.000830	0.000245	0.136609

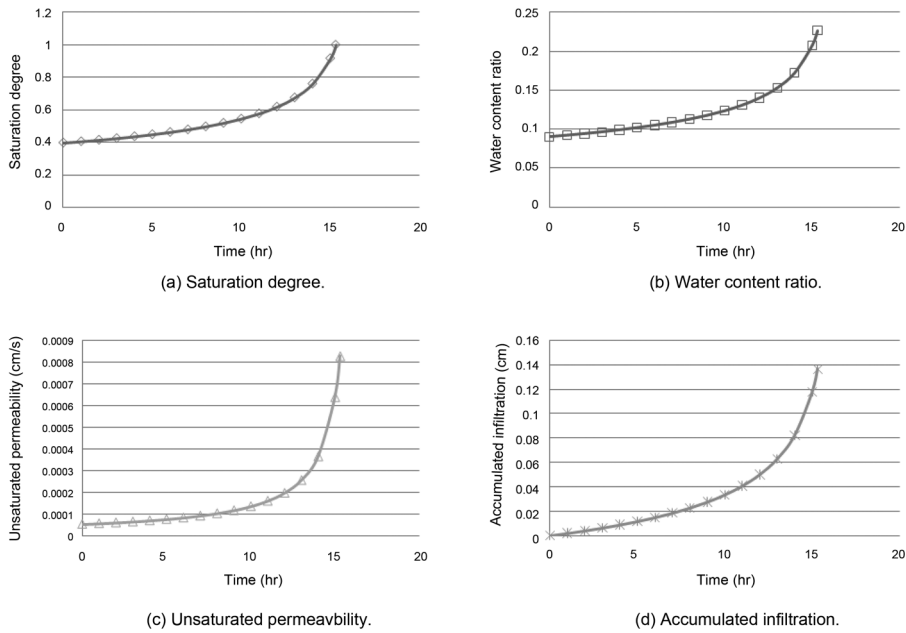


Fig. 12. Infiltration process of this study.

다.

침투시간에 따른 포화도와 함수비의 변화는 Fig. 12(a)와 12(b)로 나타난다. Fig. 12(a)와 12(b)를 살펴보면, 포화도와 함수비의 변화는 지수적으로 증가하는 양상을 볼 수 있다. 즉, 초기에 포화도가 낮을 때 흡인수두가 조금씩 작용하다가 포화도가 증가하여 중력수두의 작용력이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 이는 흡인수두항보다 중력수두항이 지하수 침투량에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 중력수두만의 항인 중기침투능(포화투수계수)이 지하수 침투과정의 중요한 요소임을 말해 준다. 계산에 사용된 지반의 경우 약 15시간 경과 후 완전히 포화되는 것을 볼 수 있다. 침투시간에 따른 지반의 침투능(불포화 투수계수)의 변화를 나타내면 Fig. 12(c)와 같으며, 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 불포화투수 계수는 흡인수두항과 중력수두항이 결합된 투수계수이며, 이는 완전포화시 흡인수두항이 소멸되면 포화투수계수, 즉 중기침투능에 이르게 된다. Table 5와 Fig. 12(c)에 의하면, 초기에 포화도가 낮아 중력수두항의 역할이 미미하여, 불포화투수계수의 증가량이 작다가 포화도가 증가함에 따라 중력수두항 증가량에 의해 급격히 지수적으로 증가하며, 약 15시간 경과후 완전히 포화되어 중기침투능인 최대값 2.99 cm/hr에 도달하게 되는 것을

볼 수 있다. 완전포화에 이르는 동안의 시간에 따른 침투량의 변화는 Fig. 12(d)에 보인 바와 같으며, 지수적으로 증가하는 양상을 보이고 있다.

시간과 포화도의 변화에 따른 침투량을 구하기 위하여 이론식을 3차원으로 나타내면 Fig. 13과 같다. Fig. 13을 살펴보면, 완전히 포화된 후의 지하수 흐름은 일정한 상수값을 가지므로 도시된 침투량은 지반이 완전히 포화되는 포화도 100%까지 계산된 것이며, 흡인수두가 주로 작용하는 초기에는 작은 값의 변화를 보이다가, 중력수두항이 크게 영향을 미치는 높은 포화도에서는 불

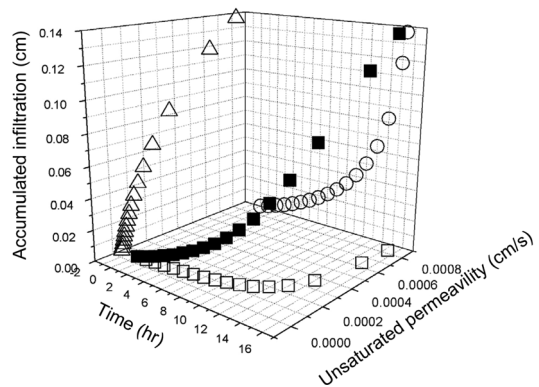


Fig. 13. 3-dimensional variation of unsaturated permeability.

포화투수계수 역시 급격한 증가추세를 보이고 있다.

비교 고찰

실험에 사용된 지반 및 강우조건에 따라, 연속적 침투 방정식을 적용한 지반내 강우의 이론적 침투결과와 실험 결과를 나타내면 Table 6과 Fig. 14와 같다. Fig. 14를 살펴보면, 현장의 침투 결과와 같이 지수적으로 증가하고 있으며, 포화도는 100%가 최대값이므로 완전 포화 후 해석을 마쳤다. 함수비는 초기값 0.090에서 최종값 0.221로 변화되어, 함수비증가량은 0.131이며, 이는 완전 건조된 흙 1 kg당 0.131 kg정도의 지하수가 지반 속에 침투되었음을 의미한다.

불포화투수계수는 일정한 값이 아닌, 지반의 포화조건에 따라 변하는 종속변수이며, 이 값들은 지반의 포화도가 지수적으로 증가함에 따라 동시에 지수적으로 증가하는 것을 Table 6과 Fig. 14와 같이 지반의 함수비 변화량에서 유추할 수 있다.

침투량의 지반포화시까지의 침투량을 나타내면 Fig. 15와 같다. Fig. 15을 살펴보면, Horton 공식의 경우 약 0.4시간에 종기침투능에 도달하였으며, 이때 침투량은 2.51 cm이다. Green-Ampt 공식의 경우 종기침투능 도달까지 약 4개월의 거리므로 0.5시간까지의 침투량인 3.19 cm를 도시

Table 6. Water content ratio comparison between theoretical and experimental results.

Time	Theory	Experiment	Time	Theory	Experiment
0	0.090	0.090	9	0.118	0.132
1	0.092		10	0.123	
2	0.094		11	0.131	
3	0.096	0.098	12	0.140	0.154
4	0.099		13	0.153	
5	0.102		14	0.172	
6	0.105	0.112	15	0.208	0.221
7	0.108		15.30333	0.227	
8	0.113				

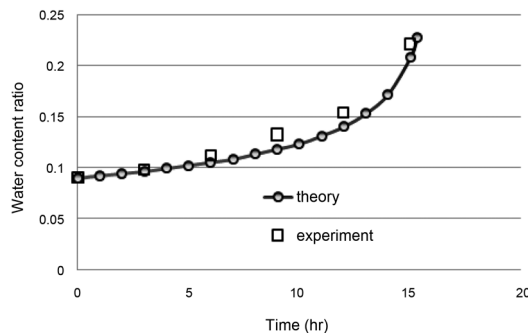


Fig. 14. Comparison of water content ratio.

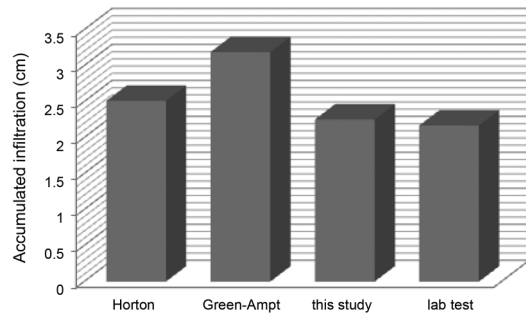


Fig. 15. Variation of accumulated infiltration until saturation (Green-Ampt : still unsaturated).

하였다. 새 이론식의 경우 종기침투능을 보이는 완전포화 시까지 15시간이 걸리므로, 이때까지의 침투량 2.25 cm이며, 실험에 사용된 흙의 경우, 약 15시간이 걸려, 이때의 침투량인 2.17 cm를 이용하였다. Fig. 15에 의하면 Green-Ampt 공식의 결과는 지반이 포화되지 않았다고 계산되었음에도 불구하고 과다 산정됨을 알 수 있으며, 나머지 Horton 공식에 의한 결과, 새 이론식에 의한 결과 및 실험에 의한 침투량 결과는 거의 유사함을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 지반의 침투능을 계산하기 위해 기존의 침투공식을 검토하고 불포화투수계수를 이용한 연속화된 침투능 산정모형을 제시하였다. 제시한 모형과 기존의 침투공식을 검증하기 위한 침투실험을 수행하여 각 공식의 결과를 비교·분석하였으며, 이론적 해석 및 실내 실험에 의한 결과는 다음과 같다.

- (1) 100%의 완전 포화까지 해석을 한 결과, 지반내의 포화도 및 함수비변화는 현장의 침투 결과와 마찬가지로 지수적으로 증가하였다. 침투량의 변화 역시 모든 식 및 실험에서 초기에 지수적으로 침투량이 증가하다가 일정한 종기 침투능(포화투수계수)로 수렴후 직선적으로 침투량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 지수적 증가 양상은 초기에 포화도가 낮을때 흡인수두가 조금씩 작용하다가, 포화도가 증가하여 중력수두의 작용력이 크게 작용하여 나타나는 것으로, 이는 흡인수두항보다 중력수두항이 지하수 거동에 크게 영향을 미침을 의미한다.
- (2) 불포화투수계수(불포화시 흡인수두항과 중력수두의 항의 합)는 일정한 값이 아닌, 지반의 포화조건에 따라 변하는 종속변수이며, 이 값들은 지반의 포화

도가 지수적으로 증가함에 따라 동시에 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 완전히 포화된 후에는 일정한 종기침투능(포화투수계수)값을 가짐을 알 수 있다.

- (3) Horton 공식, Green-Ampt 공식과 새 이론식 및 실험 등의 모든 경우에, 침투능의 변화는 초기에 지수적으로 침투능이 감소하다가 일정한 종기 침투능(포화투수계수)로 수렴함을 알 수 있다.
- (4) Horton 공식의 경우 대상지반의 초기포화도 혹은 초기함수비에 대한 항이 없어 지반의 초기함수량에 따른 침투거동을 알 수 없다, Loamy sand를 이용한 Horton 공식에 의한 침투능의 변화의 경우 약 20분 경과 후 종기침투능으로 수렴하며, 초기침투능은 31.52 cm/hr에서 종기 침투능 2.99 cm/hr로 수렴되는 것을 볼 수 있으며, 이는 지반 내 포화도의 증가로 야기된 흡인수두의 감소에 따른 침투능의 변화이다. 침투량의 경우 약 20분 정도 지수적으로 증가하다, 종기침투능이 일정한 값으로 수렴한 후 직선적으로 증가함을 알 수 있으며, 1시간의 침투시간에 따른 침투량은 4.30이다.
- (5) Green-Ampt 공식의 경우 대상지반의 초기포화도를 고려하였으나, 포화구간과 불포화구간의 불연속면을 가정하여 유도된 이론식으로 현장의 연속적인 침투 거동을 나타내지 못한다. Green-Ampt 공식의 경우 지수적으로 침투능이 감소하나, Loamy sand를 이용한 Green-Ampt 공식에 의한 침투능의 변화의 경우 종기침투능이 2.99 cm/hr로 수렴하기 위해서는 4개월 정도의 시간이 필요하여 이로 인한 과도한 침투량이 산정된다.

사 사

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문으로 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 사공명, 유재호, 이성진, 2009, 강우로 인한 조립토사면에서의 토층두께변화에 따른 사면의 활동 분석 : 실 내모형실험, 한국지반공학회논문집, 25(4), 91-103.
 이재수, 2006, 수문학, 구미서관, 201-226
 조성은, 이승래, 2001, 불포화 토사사면의 얽은파괴 해석에 대한 비교 연구, 한국지반공학회논문집, 7(4), 133-143.
 한국지반공학회, 2006, KS F 2312.

홍원표, 최승호, 한중근, 황인철, 1996, 강우시 사면안정해석법에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 195-198.

Brook, R.H., and Corey, A.T., 1964, Hydraulic Properties of Porous Media, Colorado State University Hydrology Papers, 3, 1-27.

Chen, L., and Young, M.H., 2006, Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces, Water Resources Research, 42(7), 1-9.

Irmay, S., 1954, On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Trans Am. Geophys. Union, 35(3), 463-467.

Pradel, D., and Raad, G., 1993, Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes, Journal of Geotechnical Engineering, 119(2), 315-332.

2010년 4월 28일 원고접수, 2010년 6월 8일 게재승인

한희수

금오공과대학교 토목환경공학부
 730-701 경상북도 구미시 양호동 1번지
 Tel: 054-478-7618
 Fax: 054-478-7629
 E-mail: hanhs@kumoh.ac.kr

이정식

금오공과대학교 토목환경공학부
 730-701 경상북도 구미시 양호동 1번지
 Tel: 054-478-7613
 Fax: 054-478-7629
 E-mail: jungsik@kumoh.ac.kr

장진욱

금오공과대학교 대학원 박사과정 토목공학과
 730-701 경상북도 구미시 양호동 1번지
 Tel: 054-478-7625
 Fax: 054-478-7629
 E-mail: jangjinuk@hanmail.net

양남용

금오공과대학교 대학원 박사과정 토목공학과
 730-701 경상북도 구미시 양호동 1번지
 Tel: 054-478-7624
 Fax: 054-478-7629
 E-mail: nyyang2053@hanmail.net