토성별 특정 수심의 저류된 유출수의 지하침투 소요시간 산정에 관한 연구

- Green-Ampt 방정식 적용을 중심으로 -

권경호* · 안동만**

*서울대 대학원 생태조경학과 졸업 · **서울대 조경학과 교수

Estimation of Ponding Times for various Soil Textures and Ponding Depths

- Using the Green-Ampt Infiltration Model -

Kwon, Kyung-Ho* · Ahn, Tong-Mahn**

* Master of Landscape Architecture, Graduate School, Seoul National University
** Prof., Department of Landscape Architecture, Seoul National University

ABSTRACT

The surface-drainage system, which consists of bio-swale and detention-infiltration Basins and carries out the function of temporary detention-infiltration of runoff, is defined as the "natural drainage system". It is an environmentally sound and economically beneficial practice to reduce run-off by retaining it in swales as much as possible and letting run-off infiltrate into the ground.

In order to estimate appropriate capacity of swales, it is necessary to know how long will it take for certain depths of water to infiltrate. The ponding times, or infiltration times, of various depths and of various soil textures, could be estimated with the Green-Ampt Infiltration Model Included soil textures are loamy sand, sandy loam, loam, silty loam, sandy clay loam and clay loam. Ponding depths are from 10cm to 100cm at 10cm intervals. Newton-Raphson method is used for the solution of the Green-Ampt equation by a computer program. The computer program was written with the FORTRAN Developer 4.0 v..

Selected ponding depth is acceptable when the sum of the ponding time and the breeding time of mosquitoes is less than the tolerance period of innundation of grasses and trees.

Key Words : natural drainage system, detention-infiltration, Green-Ampt infiltration model

I. 서론

1. 연구 배경

인구증가와 생활 수준의 향상 및 산업화의 영향으로 도시화가 급속히 진행됨에 따라 고밀도 토지 이용이 늘어났다. 이러한 토지 이용의 변화는 불투수성 지표면을 넓혀서 유출수를 증가시켰고, 도시 물순환 변화를 초래하였다. 유출수 증가는 홍수피해 증가, 하천수질 오염 및 유지유량 확보의 어려움, 수자원 고갈 등 여러가지 환경 문제를 야기시켰다.

이에, 미국, 독일, 일본 등에서는 불투수성 지표면을 개발 규제, 환경 관리를 위한 지표로 활용하고 있으며, 우리 나라는 자연재해대책법에서 홍수시 유출량을 증대시키고, 하천의 수위를 증가시키는 도시 및 산간 지역과 하천 인접 지역의 대규모 개발사업에 대한 재해 영향 평가서를 작성토록 하고 있으며, 그 영향을 줄일 수 있는 방안을 강구하여야 한다고 명시하고 있다. 저밀도 주거지역, 공원과 골프장 등 비교적 녹지 면적이 넓고 지하 매설물이 적은 곳에 오목한 녹지대나 잔디도랑(swale) 등을 조성해서 유출수를 일시 저류·침투시키는 방안이 실제 독일, 미국 등에서 이루어지고 있다.

단지내에서 발생된 유출수가 식생 피복된 오목한 낮은 녹지대에 모여서 토양층을 통해 서서히 침투된다고 가정하면, 일정 수심으로 저류된 물이 식생 피복면을 통해 토양층으로 모두 침투하는 데 걸리는 시간은 해당 피복식생의 생육에 중요한 영향을 미친다. 또, 모기 발생을 억제시키는 측면에서 모기가 알에서 유충, 번데기를 거쳐 성충이 되기 전에 저류된 물이 모두 침투되어 표면이 말라야 한다. 그리고 부가적으로 이러한 녹지대를 여가, 놀이 공간으로 활용하는데 있어서 침투소요시간은 중요하다.

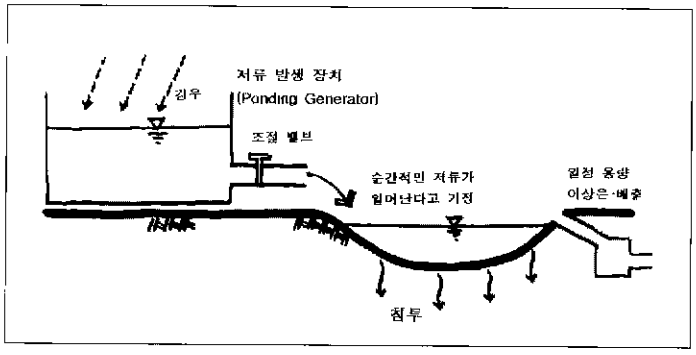


그림 1 침투 모형 모식도

2. 연구 목적

강우를 일정 용량 저류시키고, 그 이상은 배출하는 가상적인 저류발생장치(ponding generator)를 만들어 일정 높이의 저류수심을 갖는 저류량이 순간적으로 유수녹지에 저류된다고 가정할 때, 저류된 유출수가 토양층으로 완전히 침투하기까지 걸리는 시간을 토성별, 저류 수심별로 계산하는 것이 이 연구의 목적이다.

II. 연구사

유출수 증가로 인해 야기되는 환경문제를 저감시키기 위해 잔디도랑(swale)이나 녹지대를 유출수 저류·침투지로 이용할 것을 제시한 논문은 다음과 같다. Simonds(1983)와 Robinette(1984)는 잔디도랑이나 녹지대에 유출수를 저류하여 본래의 수량과 수질을 자연으로 돌려보내자고 주장하였다. Gelderen(1996)은 조경설계에서 지하매설관 대신 잔디도랑, 연못, 녹지대 등을 이용한 자연배수체계를 통해 수자원 보전, 토목공사량 감소, 토양 보전, 동식물 서식처 제공, 미적가치 제고의 이점이 있음을 밝혔다.

Arnold와 Gibbons(1996)은 불투수성 면적 증가로 인한 문제점과 개선방안 및 환경지표로서의 중요성을 말했으며, 주차장 녹지대에 유출수를 저류·침투시키는 방안을 제시하였다.

Thompson(1997)은 美 Oregon주 과학산업박물관 주차장에 실험적으로 조성된 우수침투 녹지 사례를 소개하면서, 유출수 침투를 통한 수질개선 효과를 주장하였고, Leccese M.(1998)과 Bennett P.(1998)은 유출수를 녹지대에 유입시켜 인공습지형 저류지를 조성하고자 하였다. 이은희(1997)는 도시 빗물 순환체계 개선을 위해 도로변 식재대를 고랑의 형태로 만든 후, 표면에 자갈층을 조성하거나 잔디를 씌울 것을 제안하였다.

침투시설을 통해 침투되는 우수량을 계산한 논문으로는, 서울시정개발연구원(1995)이 서울시에 설치 가능한 우수 저류 · 침투시설의 종류를 살펴보았고, 대상지 2곳을 선정해서 대상지 내 학교, 공원, 놀이터, 주차장 등에 유출수가 현지 저류되고, 투수성 포장으로 침투되는 것으로 가정하여, 유출수 저감 효과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 김두하 등(1997)는 분당 주거단지에 침투측구, 침투트렌치, 침투통 설치를 가정하여 강우침투량 증대 가능성을 예측하였다. 이 연구에서 사용한 Green-Ampt 방정식과 관련된 변수, 계산방법에 관련된 것으로, Moore and Eigel(1981)은 Green-Ampt 방정식이 일반적으로 침투율을 잘 예측한다고 하였고, Taylor and Blake(1982)는 잔디 탯취(thatch)가 침투속도에 아무런 영향을 미치지 않는다고 하였다. Rawls et al.(1983)은 Green-Ampt 방정식에 적용되는 변수를 실험을 통해 찾아내었고, Chow et al.(1988)은 방정식 계산 방법 및 변수에 관해 정리하였다. Partsch et al.(1993)은 주거지 잔디밭의 표토 제거와 다짐이 침투 특성에 미치는 영향을 실험을 통해 확인하였고, 그 값을 Green-Ampt 방정식에 적용하고자 하였으며, Ferguson (1994)은 Green-Ampt 방정식에서 담심 h_0를 일정 수심으로 놓아 누가침투량을 계산하였다.

III. 연구 범위 및 방법

1. 연구 범위

이 연구는 기존 선행 연구된 침투 방정식을 응용해서 이론적인 침투 소요시간을 계산 · 예측하였으며, 수리 전도도가 매우 작은 미사질식양토(silty clay loam) 이하의 토성은 계산 대상에서 제외하였으며, 침투소요시간은 초기에 일정 저류수심으로 저류된 후부터 그 수심의 물이 모두 지하로 침투하는데 걸리는 시간으로 한정하였다.

2. 연구 방법

이 연구는 여러 침투 방정식중 Green-Ampt 방정식을 사용하였고, 이 방정식의 해를 구하기 위해 수치해석의 한 방법인 Newton-Raphson 법을 적용하였다. 이 방법을 수행하기 위해 Fortran Developer 4.0 v.으로 프로그래밍 하였으며, DOS에서 실행하여 변수값을 입력하고, 계산값을 출력하였다. 선행 연구자 Ferguson(1994)이 제시했던 특정 저류수심 75cm, 미사질양토(silty loam)에서의 침투소요시간 값과 그래프를 이 연구를 통해 구한 값, 그래프와 비교를 통해 그 유사성을 확인하였다.

1) Green-Ampt 방정식

Green-Ampt 모형은 다음과 같은 이유로 최근에 새로이 연구에 관심이 모아지고 있으며, 적용 부분에서도 선호되고 있다. 첫째, 간단하며, 둘째, Darcy의 법칙을 그 이론적 배경으로 하고 있고, 셋째, 매개 변수는 토양 특성으로부터 계산될 수 있는 물리적 특징이 있다. 그리고 깊이가 깊어짐에 따라 조밀해지는 토양 단면, 수리 전도도가 증가하는 토양 단면, 부분적으로 밀폐된 표면이 있는 토양, 초기 함수비가 균일하지 않는 토양 등의 여러 경우에서 좋은 결과를 보여 왔다 (Gupta, R.S., 1989).

그림 2와 같은 균일한 함수비 θ_i를 갖고 깊이가 무한한 균질 토양 기둥을 생각한다. 토양 표면에서부터 침투가 시작되고, 습윤 전선(wetting front)이 하향 진행함에 따라 토양의 함수비도 습윤 전선을 경계로 θ_i에서 포화 함수비 θ_s (공극률 η)로 증가하게 된다.

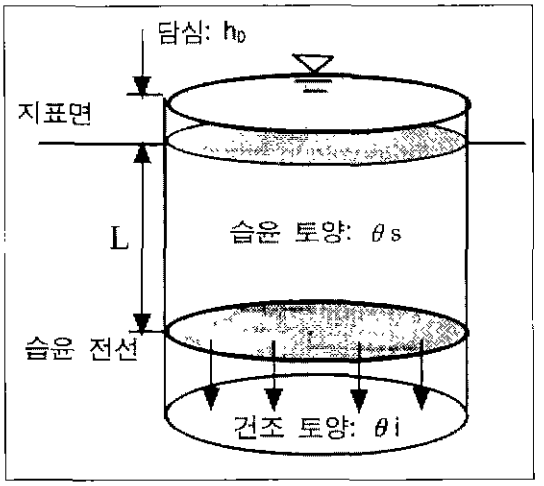


그림 2. Green-Ampt식의 침투모형

그리고, 침투 시작 후 t시간이 경과된 후의 습윤 전선 통과 깊이를 L이라 하고, 지면에 물이 고이는 수심인 담심(ponding depth: h_o)은 t=0에서부터 일정하게 유지되는 것으로 가정한다(Chow 등, 1988).

이 때, t시간 경과시의 누가 침투량 F(t)를 수심 단위(cm)로 표현하면 다음과 같다.

$$F(t) = kt + \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left[1 + \frac{F(t)}{\psi \cdot \Delta\theta}\right] \quad (식\ 1)$$

여기서 Ferguson(1994)은 담심 h_o를 0으로 놓지 않고, 일정 값을 갖는다고 가정하여, 아래와 같이 정리하였다.

$$F(t) = kt + (\psi + h_o) \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left[1 + \frac{F(t)}{(\psi + h_o) \cdot \Delta\theta}\right] \quad (식\ 2)$$

이 방정식을 적용하려면, 식 2에서 k값에는 포화된 토양의 수리전도도 Ks가 필요하고, 습윤지역의 토양 흡수수두 ψ, 토양 함수비 변화값 $\Delta\theta$가 필요하다. h_o는 담심(cm) 값이고, t는 경과 시간(hr)이며 임의로 주어진다.

Rawls, Brakensiek and Miller(1983)와 Rawls, Brakensiek and Saxton(1982)은 미국 전역에 걸쳐 1,200여 개의 토양 단면에서 5,000여 개의 토양층을 분석해서 Green-Ampt 방정식 적용에 필요한 매개변수 Ks, ψ, θ_e값의 범위와 평균값을 찾아내었다. 표 1은 그 값 중에서 일부분을 표로 정리한 것이며, 포화토양의 수리전도도가 0.76 cm/h 보다 작은 곳은 저류·침투시설 입지에 적합하지 않기에(Urbonas 등, 1993) 이 연구에서는 수리 전도도가 매우 작은 토성을 제외하고, 양질사토(壤質砂土 loamy sand)에서 식양토(埴壤土 clay loam)까지만 다루었다. 여기서, 토양의 유효 공극율 θ_e는 토양 공극율에서 배수가 끝나도 토양 속에 남아있는 수분량을 뺀 값이다. 토양 함수비 변화값 $\Delta\theta$는 θ_e값에서 구할 수 있는데, Rawls 외(1982)는 $\Delta\theta = (1-Se) \cdot \theta_e$의 관계가 있고, Se는 습윤 구역 아래의 유효 포화도이며 보통 그 값을 0.3으로 보았다.

2) Newton-Raphson 법

함수 f(x)의 해를 구하기 위한 모든 방법 중 가장 잘 알려진 방법은 Newton-Raphson 방법이다. 이 방법은 적은 반복으로 짧은 시간에 정확한 결과를 산출하는 컴퓨터 연산을 이용한 수치해석 방법의 하나이다(이경환 등, 1996).

따라서, 방정식 f(x)=0에 대한 근사값 X_{n+1}은 근사

표 1. Green-Ampt Model 적용 기준

토 성	유 효 공 극 (Effective porosity θ_e: cm^3/cm)	토양 흡수 수두 (Suction head Ψ below wetting front(cm))	포화상태의 수리 전도도 (Saturated hydraulic conductivity Ks (cm/h))	수리 전도도 (Hydraulic conductivity K(cm/h))
양질사토	0.401 (0.329~0.473)	6.13 (1.35~27.94)	6.11	2.99
사양토	0.412 (0.283~0.541)	11.01 (2.67~45.47)	2.59	1.09
양토	0.434 (0.334~0.534)	8 89 (1.33~59.38)	1.32	0.34
미사질양토	0.486 (0.394~0.578)	16.68 (2.92~95.39)	0.68	0 65
사질식양토	0.330 (0.235~0 425)	21.85 (4.42~108.0)	0.43	0.15
식잉토	0.309 (0 279~0.501)	20.88 (4.79~91.10)	0.23	0.10

자료 : Rawls, Brakensiek and Miller 1983 ; Rawls, Brakensiek and Saxton 1982

값 X$_i$로부터 다음과 같이 계산된다.

$$X + 1 = X_i - \frac{f(X_i)}{f'(X_i)}$$

(식 3)

이 방법이 빠른 속도로 근에 수렴하는 특징이 있는 반면에, 두 가지 단점이 있다. 두번째는 반드시 도함수 f′(x)를 구할 수 있어야 하며, 첫째는 근에 가까운 적당한 초기치 X$_0$를 정해주어야 한다. 이 연구에서는 Green-Ampt 방정식의 도함수를 아래와 같이 찾았고, 초기치 X$_0$값은 건조 토양의 수리전도도(cm/hr) 값으로 설정하였다.

Green-Ampt 방정식을 Newton-Rapson 법으로 풀기 위해 구하고자 하는 누가침투량 F(t)를 x로 치환하고 이항하였다.

$$F(t) = Kt + (\Psi + h_0)\Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{F(t)}{(\Psi + h_0)\Delta\theta}\right)$$

(식 4)

$$x = Kt + (\Psi + h_0)\Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{(\Psi + h_0)\Delta\theta}\right)$$

(식5)

$$Kt + (\Psi + h_0)\Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{(\Psi + h_0)\Delta\theta}\right) - x = 0$$

(식6)

위의 식을 F(x)라 하고, 그 도함수를 구하였다.

$$F(x) = Kt + (\Psi + h_0)\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{x}{(\Psi + h_0)\Delta\theta}\right) - x = 0$$

(식7)

$$F'(x) = \frac{-x}{(\Psi + h_0)\Delta\theta}$$

(식8)

위의 식 F(x), F′(x)를 〈식 3〉에 대입해서 X$_{i+1}$와 X를 찾는다.

이 때, 찾아진 X$_{i+1}$와 X$_i$의 차이 X$_{i+1}$ - X ≤ ε (설정된 오차)일 때의 X$_i$값이 구하고자 하는 근이 된다.

3) FORTRAN 프로그램

그림 3은 Newton-Raphson 방법으로 Green-Ampt 방정식의 근사해를 찾기 위한 컴퓨터 프로그램의 순서도이다. 이 프로그램은 Fortran Developer 4.0 v.으로 짰으며, DOS에서 실행시켰다.

입력 자료는 키보드로 Xnext, h, k, s, d, h$_1$값을

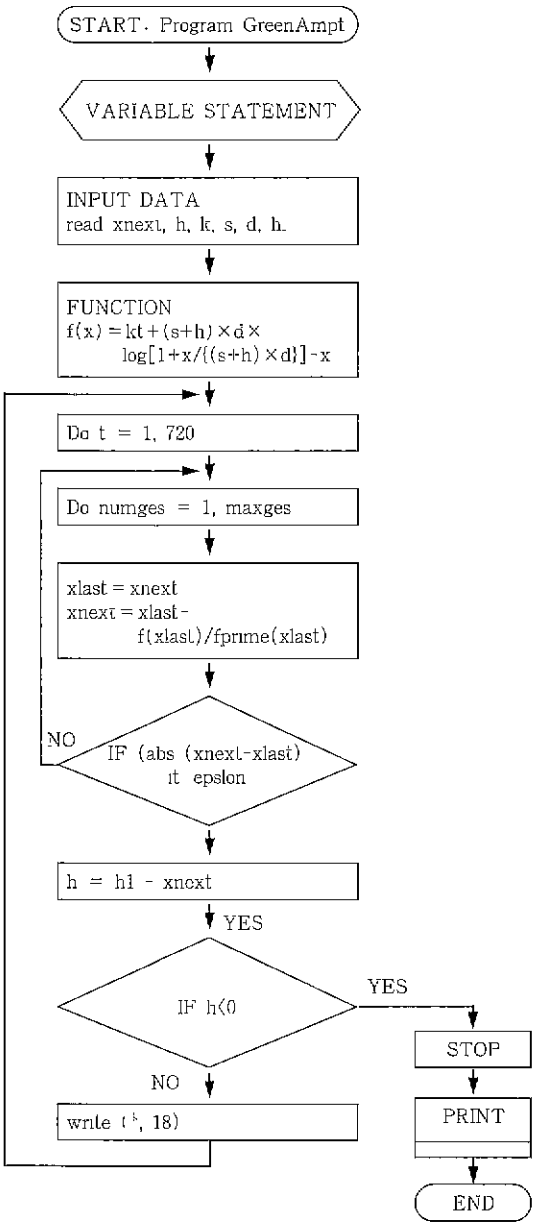


그림 3 Newton-Raphson 법을 적용한 프로그램 순서도

차례대로 입력시키며, h, h_1값은 임의의 최초 저류수심(담심. h_0)으로, 10cm～100cm까지 10cm 단위로 각각 입력하였다.

Newton-Raphson 방법에서 $X_{i+1} - X_i$값이 설정된 오차 범위 0.001보다 작아질 때까지 최대 1,000회까지 반복 계산하도록 프로그래밍 했으며, 이 때 찾아진 Xi 값이 바로 해당 시간까지 침투한 누가 침투량이다.

초기 저류수심은 주어진 값 h에서 시작하는 것으로 하였으며, 매 1시간마다 침투된 양만큼 줄어든 수심 값을 다시 본래의 누가 침투량 계산식에 대입해서 계산이 이루어지도록 하였다.

이러한 계산은 최초 저류수심 h가 0보다 작아질 때까지 반복 실행되며, h<0일 때의 t값(최대 720시간 범위 내)이 구하고자 하는 수심 h의 침투소요시간이 된다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

1. 프로그램 입력값

표 2. 토성별 변수 입력값

	프로그램 기호	토성					
		양질사토	사양토	양토	미사질양토	사질식양토	식양토
초기값 X_1 (cm/hr)[a]	Xnext	2.99	1.09	0.34	0.65	0.15	0.1
초기 수심(담심 : cm)[b]	h	10cm, 20cm, … , 100cm					
포화상태의 수리 전도도(Ks : cm/hr)[c]	k	6.11	2 59	1 32	0.68	0.43	0.23
토양 흡수 수두[c] (Soil Suction Head : ψcm)	s	6.13	11.01	8 89	16.68	21.85	20.88
유효 함수비 변화값[d] $\Delta\theta = (1-Se)\cdot\theta e$	d	0.2807	0.2884	0.3038	0 3402	0.231	0.2163
변화 수심(cm)[b]	h_1	10cm, 20cm, … , 100cm					

[a]. 초기값 X0는 건조 토양의 수리 전도도 K 값을 대입하였다

[b]. 초기 수심과 변화 수심의 값은 모두 10cm～100cm까지 각각 대입하였고, 변화 수심은 주어진 초기값에서 1시간 간격으로 감소한 수심 만큼 땐 값을 계산에 다시 대입하기 위해 만든 프로그램 상의 변수값이다

[c] 표 1에서의 값을 적용하였다.

[d] 표 1에서의 θe값에 Se값을 0.3으로 간주하여 계산한 값이다.

2. 프로그램 결과값

초기 저류수심(담심: h_0)을 10cm～100cm까지 10cm 단위로 h_0, h_1에 대입하여 프로그램을 실행한 결과, 담심 h_0가 모두 토양으로 침투하기까지 걸린 시간은 표 3과 같다.

여기서, 만일 미사질양토에 저류수심이 100cm였다면, 그 물이 모두 침투하는데 걸리는 시간은 이론적으

표 3. 토성 - 저류 수심별 침투 소요 시간 (단위.hr)

토성 / 담심.hc	양질사토	사양토	양토	미사질양토	사질식양토	식양트
10cm	0.7	1.7	4.5	6 3	10.5	20.5
20cm	2.3	5.2	10.8	16.7	27 7	53.8
30cm	4.2	8.7	17.5	28.7	46.9	90.3
40cm	5.7	11.9	24.6	41.2	67.0	128.9
50cm	6.9	16.0	31.7	53.9	87.9	168 4
60cm	8.8	19.2	38.9	67 6	109.5	208 8
70cm	9.8	23.2	46.2	80.9	130.2	249.1
80cm	11.8	26 8	53 3	94.9	153.0	289.9
90cm	13.3	29 9	61 1	108.8	174.8	331.6
100cm	15.3	33.9	68.1	122.1	196.9	373.1

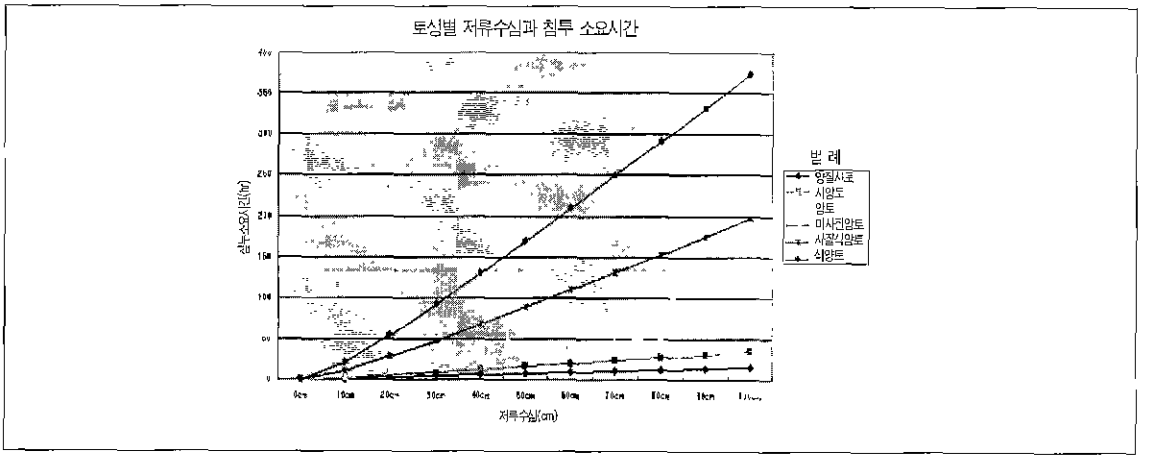


그림 4. 토성별 저류 수심과 침투 소요시간

로 122.1hr가 됨을 알 수 있다. 이 표를 그래프로 표현하면 다음과 같다.

3. 선행 연구와의 비교

토성이 미사질양토이고, 저류수심이 75cm일 때, 이 저류수심이 모두 침투할 때까지의 누적 침투량 변화(수심변화)를 경과 시간별로 나타내면 그림 5와 같다. 이 그래프에서 만일 저류 후 28시간이 지나면, 누가 침투량은 40cm가 되며, 수심은 초기저류수심(75cm)에서 누가 침투량(40cm)을 뺀 35cm가 된다.

미사질양토에서 수심 75cm의 저류수가 모두 침투하는데 약 87시간이 소요되며, 이 값과 그래프의 변화는 Ferguson(1994· 111)[11]이 제시한 그래프에 거의 일치함을 알 수 있다.

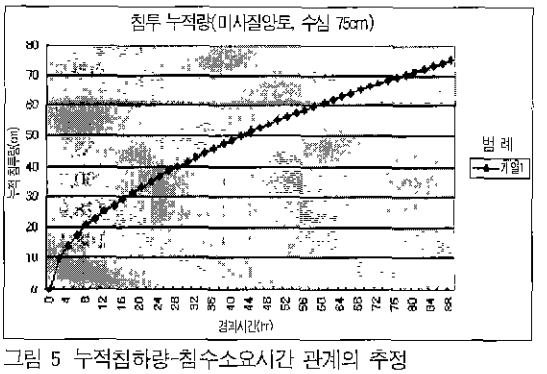


그림 5 누적침하량-침수소요시간 관계의 추정
(프로그램 적용결과· 미사질양토(Silty Loam, 저류수심 75m)

4. 고찰

일정수심의 저류가 순간적으로 일어난다는 가정하에 계산된 침투소요시간이므로, 그러한 저류수심이 되기까지 걸린 시간을 더해 주어야 실제 저류된 시간에 가까운 값이 나온다. 또, 이 계산 프로그램에서는 1시간 간격으로 변화된 수심값을 대입해서 침투된 양을 계산하고, 그 만큼 내려간 수심을 다시 계산식에 대입하는 방법을 사용했다. 예를 들면, 초기 저류수심이 50cm일 경우 이 수심이 1시간 동안 유지된다고 가정하고 침투량을 구했을 때, 4cm가 침투되었다면, 그 다음 계산에는 46cm를 수심값으로 다시 대입하였다. 실제 수심은 시간의 변화에 대해 연속적이므로, 1시간 단위 사이의 시간동안 내려간 수심만큼 변화된 수두차로 인한 침투량 감소를 고려하지 않았으므로, 저류시간 값이 실제보다 약간 짧게 나타나게 된다. 입력되는 수심의 시간간격을 1시간에서 30분 또는 그 이하로 줄이면 이 시간적 차이를 줄일 수 있다.

V. 결론

이 연구를 통해 각 토성별 -양질 사토, 사양토, 양토, 미사질 양토, 사질 식양토, 식양토-로 저류수심 10cm ~100cm까지의 침투 소요시간을 Green-Ampt 방정식을 이용해서 계산하였다. 침투소요 시간은 저류수심이 깊어짐에 따라 거의 정비례해서 늘어남을 알 수

있다. 일정 수심으로 저류했을 때, 저류 초기에는 큰 수두차로 인해 많은 양이 침투하다가 점차 완만해지는 경향이 있음을 알 수 있다.

단지 내에서 발생한 유출수가 기존의 지하 우수관망으로 바로 배출되는 것이 아니라, 잔디도랑을 통해 녹지대로 모여 일시 저류된 후 지하로 침투, 증발산 되는 자연 배수체계는 환경적으로나 경제적으로 유리한 배수체계이다. 이러한 배수체계를 적용함에 있어 고려해야 할 중요한 요소는 저류된 유출수가 모두 지하로 침투하기까지 저류되는 시간이다. 이 시간은 유수녹지 표면에 식재된 식생의 생육과 모기 발생, 이용 및 관리 측면에 중요한 영향을 미치기 때문이다.

따라서, 모기가 성충이 되기까지 필요한 담수 시간, 잔디나 수목이 침수 피해를 받지 않는 최대저류시간 이하로 해당 토성에 맞는 저류 수심을 구하고 그 이상의 유출수는 다른 곳으로 유도하는 세부설계가 필요하다.

앞으로 이 지하 침투소요시간에 관한 실험적인 연구가 계속 진행되어야 할 것이며, 또한 유출수가 유수녹지로 유입되는 통로의 침식·침전물 방지 방안, 기존 우수관망 체계와의 상호 호환성 및 연계성 확보 방안에 관한 추후 연구가 필요하리라 생각한다.

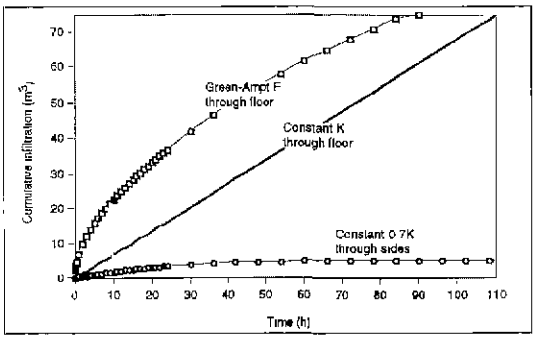


그림 6. Ferguson이 제시한 누적 침투량-침투소요시간 관계의 추정(미사질양토(Silty Loam), 저류수심 75cm)

자료: Feruguson(1991) p.11

주1 Ferguson은 다만 저류수심 75cm, 미사질양토(Silty Loam)에서 침투소요시간 값을 Green-Ampt 방정식을 이용해서 계산했으며, 구체적인 계산 방법이나 다른 토성, 다른 저류수심에서의 그 값에 대한 언급은 없었다.

인용문헌

1 권경호(1999) 유출수 저류·침투를 위한 자연배수체계 설계 지침에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문.

2 김규철 외(1993) 알기쉬운 수치해석. pp. 47-51

3 김두하, 박원규, 안동만(1997) 단지 개발에 있어 강수량 지하 침투증대를 위한 침투 가능성 연구 한국조경학회지 25(1) 62-72.

4. 왕창종(1996) 구조적 FORTRAN 프로그래밍. pp. 357-358.

5. 윤용남(1997) 수리학. 서울: 청문각 pp. 541-543

6. 이경환, 윤경현, 전준철(1996) 수치해석. 서울: 집문당. pp. 50-53.

7. 이은희(1997) 생태학적 측면에서 고찰한 빗물 순환체계와 도시화와의 관계 한국조경학회지 21(1): 123-131.

8. Arnold, C.L., Jr. and James Gibbons(1996) Impervious Surface Coverage The Emergence of a Key Environmental Indicator The Journal of the American Planning Association 62(2): 243-258.

9. Bonnett P (1998) Ecologizing Olmsted Landscape Architecture June: 52-57.

10. Chow, V T et al (1988) Applied Hydrology New york: McGraw Hill pp 101-123.

11 Ferguson, Bruce K.(1994) Stormwater Infiltration. Boca Raton, Lewis Publishers. pp. 55-66. 111.

12 Gelderen(1996) Hand-On Approach to Recycling Water in the Landscape. Landscape Australia Jan.: 31-36.

13. Gupta, R S.(1989) Hydrology and Hydraulic Systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. pp. 90-97.

14. Leccese M.(1998) Rocky Mountain Retrofit-A Colorado *center will demonstrate how landscapes can* be rethought to cleanse polluted storm water. Landscape Architecture May: 58-63.

15. Moore, I.D. and J.D Eigel(1981) Infiltration into two-layer soil profiles. Transactions of the ASAE 24(6): 1496-1503.

16. Partsch, C M., A R. Jarrett, and T.L. Watschke(1993) Infiltration Characteristics of Residental Lawns. Transactions of the ASAE 36(6) 1695-1701.

17. Rawls W.J., D L Brakensiek and N. Miller(1983) Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. Journal of Hydraulic Engineering 109(1): 62-70.

18. Rawls W J, D.L. Brakensiek and Saxton(1982) Estimation of soil water properties. Trans of the ASAE 25(5): 1316-1320, 1328.

19. Robinette G O.(1984) Water Conservation in Landscape Design and Management

20. Simonds J. O.(1983) Landscape Architecture(2nd ed.). New York: John wiley & Sons. pp. 47-54

21. Skaggs,R W, L E.Huggins, E J Monke and *G.R.Foster(1969) Experimental evaluation of* infiltration equations. Transactions of the ASAE 12(6): 822-828

22 Taylor, D.H. and G.R Black(1982) The effect of turfgrass thatch on water infiltration rates Soil Sci. Soc Am.J 46(3): 616-619.

23. Thompson William J.(1996) Let That Soak In Landscape Architecture Nov. 60-67

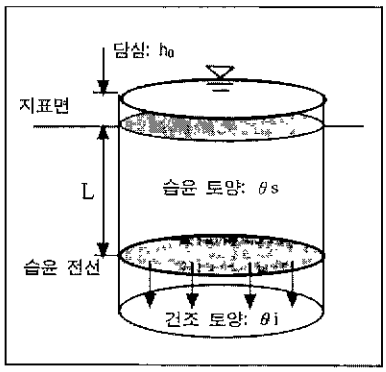
24 Urbonas Ben and Stahre Peter(1993) Stormwater : Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage, and CSO Management. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall. pp 7-31, 373-417.

부록 1. Green-Ampt 침투모형에 관한 이론적 배경

Chow, V.T. et al.,(1988), Gupta, R.S.(1989), Ferguson, Bruce K.(1994), 윤용남(1997) 내용 요약 정리

아래 그림과 같은 균일한 함수비 θ_i를 갖고 깊이가 무한한 균질 토양 기둥을 생각한다. 토양 표면에서부터 침투가 시작되고, 습윤 전선(wetting front)이 하향 진행함에 따라 토양의 함수비도 습윤 전선을 경계로 θ_i에서 포화 함수비 θ_s (공극률 η)로 증가하게 된다.

그리고, 침투 시작 후 t시간이 경과된 후의 습윤 전선 통과 깊이를 L이라 하고, 지면에 물이 고이는 수심인 담심(ponding depth: h_0)은 t=0에서 부터 일정하게 유지되는 것으로 가정한다(Chow 등, 1988).



Darcy는 다공성 물질을 통한 유량이 비교적 적을 때, 유량 Q(m^3/s)는 손실수두(head loss) $h_1 - h_2$에 직접 비례함을 증명하였다.

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{ds} \qquad (식\ 1)$$

여기서, h_1은 유입수가 갖는 수두이며, h_2는 유출수가 갖는 수두, ds는 흐름의 길이, A(m^2)는 다공성 물질의 단면적, k(m/s)는 비례 상수로서 투수계수이다. 이때, 연속 방정식(continuity equation)을 생각하면, 다공층을 통해 흐르는 물의 평균유속(m/s)은 다음과 같다(윤용남, 1997).

$$Q = AV \qquad (식\ 2)$$

$$Q = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{ds} \qquad (식\ 3)$$

이 Darcy의 법칙을 그림 2의 침투 모형에 적용시키면, d_s는 L이며, 표면 수두 h_1은 담심 h_0와 같고, 습윤 전선 아래 건조 토양에서의 수두 h_2는 $-(\psi+L)$과 같다. 여기서 ψ는 습윤 전선에서의 토양 흡수수두 값인데, 표 1와 같이 토양 입자의 크기가 작을수록 그 값이 커진다. 침투 속도 f는 다음과 같이 표현될 수 있다(Chow 등, 1988).

$$f = k \cdot \left[\frac{h_0 - (-\psi - L)}{L}\right] \qquad (식\ 4)$$

여기서, ψ값과 L에 비해서 h_0값이 무시할 수 있을 정도로 작다면 $h_0=0$으로 놓으면 다음과 같다.

$$f = k \cdot \frac{\psi + L}{L} \qquad (식\ 5)$$

이때, t시간까지의 총 누가 침투량 F는 토양 내 투가침투 깊이로 표현되며, 그 량을 깊이 단위로 표현하면 다음과 같다.

$$F = (\theta_s - \theta_1) \times L = \Delta\theta \cdot L \qquad (식\ 6)$$

$L = \frac{F}{\Delta\theta}$ 를 (식 5)에 대입하면 다음과 같다.

$$f = k \cdot \left[\frac{\psi \cdot \Delta\theta + F}{F}\right] \qquad (식\ 7)$$

또, 침투 속도 f는 누가 침투량 F, 시간 t와의 사이에 f=dF/dt의 관계가 있으므로, 아래와 같다.

$$\frac{d}{dt}F = k \cdot \left[\frac{\psi \cdot \Delta\theta + F}{F}\right] \qquad (식\ 8)$$

이 식을 시간 t에 관해 적분하면 다음과 같다.

$$F(t) = kt + \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left[1 + \frac{F(t)}{\psi \cdot \Delta\theta}\right] \qquad (식\ 9)$$

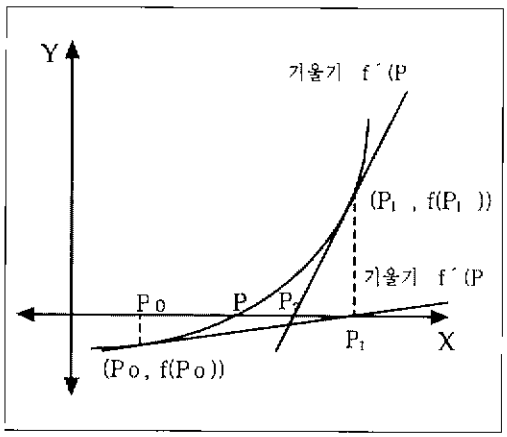
이 때, Ferguson(1994)은 식 4에서 $h_0=0$으로 놓지 않고, 일정 값을 갖는다고 하면, 식 9는 아래와 같다.

$$F(t) = kt + (\psi + h_f) \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left[1 + \frac{F(t)}{(\psi + h_o) \cdot \Delta\theta}\right] \quad \text{(식 10)}$$

부록 2. Newton-Raphson 법의 원리

김규철 외(1993), 이경환 외(1996)의 내용 정리

이 Newton-Raphson방법은 다음과 같은 계산과정을 통해 그 해를 찾을 수 있다.



P_o를 방정식 $f(x)=0$의 근 P에 대한 초기 근사값이라 하자. 함수 f는 근 근처에서 충분히 미분 가능하며, P 에 대한 모든 근사값을 포함하는 구간에서 f'가 존재한다고 가정하자. 점 $(P_o, f(P_o))$에서 f에 대한 접선의 기울기는 $f'(P_o)$이므로, 접선의 방정식은

$$y - f(P_o) = f'(P_o)(x - P_o) \quad \text{(식 1)}$$

이 된다. 이 접선은 y좌표의 값이 0일 때 x축과 만나므로, P_o에 대한 다음 근사값 P_1은

$$0 - f(P_o) = f'(P_o)(P_1 - P_o) \quad \text{(식 2)}$$

을 만족시킨다. $f'(P_o) \neq 0$일 때, 이 식을 정리하면 다음과 같다.

$$P_1 = P_o - \frac{f(P_o)}{f'(P_o)} \quad \text{(식 3)}$$

이러한 방식으로 P에 대한 근사값을 계속 만들어 간다.

따라서, $f(x)=0$의 근에 대한 근사값 P_{i-1}은 근사값 P_i로부터 다음과 같이 계산된다.

$$Pi\text{-}1 = Pi - \frac{f(Pi)}{f'(Pi)} \quad \text{(식 4)}$$

만일, 방정식 $f(x)=x^2-2=0$의 양의 근을 구한다면 아래와 같다.

$f(x)=x^2-2$이므로 $f'(x)=2x$이며, 이 식을 위의 계산식에 대입하면 다음과 같다.

$$Xi\,1 = X_1 - \frac{X_1^2 - A}{2Xi} = \frac{1}{2}\left(Xi + \frac{A}{Xi}\right) \quad \text{(식 5)}$$

초기치 $X_0=1.4$라 하여 적용하면 아래와 같다.

$X_o = 1.4$

$X_1 = \frac{1}{2}\left(1.4 + \frac{2}{1.4}\right) = 1.4142857$

$X_2 = \frac{1}{2}\left(X_1 + \frac{2}{X_1}\right) = 1.4142136$

$X_4 = \frac{1}{2}\left(X_2 + \frac{2}{X_2}\right) = 1.4142136$

… … …

이런 형태로 그 값은 $\sqrt{2}$ 의 값에 가까워짐을 알 수 있다.

부록 3. FORTRAN 프로그램

```
program GreenAmpt
real epslon
integer maxges
parameter (epslon = 0.001, maxges = 1000)
real xlast, xnext
integer numges

real f, fprime, x, k, s, d, h, h1,
integer t

f(x)=k*t+(s+h)*d*log(1+x/((s+h)*d))-x
```

```
fprime(x)=-x/((s+h)*d+x)
print *, 'Enter the initial xnext, h, k, s, d, h1:'
read *, xnext, h, k, s. d. h1
do 23 t=1, 720
do 20 numges = 1, maxges

   xlast = xnext
   xnext = xlast - f(xlast) / fprime(xlast)
   if (abs(xnext - xlast) .lt. epslon) then
      h=h1-xnext
        if(h.lt.0) goto 99
        write(*,18) t, h
        xnext = h1-h
18    format (1h ,i3,1x,f6.2)

   endif
20 continue
23 continue
   print 25, 'root not found before', maxges, 'guesses.'
25 format (1X, a, i3, a)
99 continue

   stop
   end
```