

耕耘土壤의 物理的 特性變化를 考慮한 Green and Ampt 媒介變數의 推定

Green and Ampt Parameter Estimation Considering Temporal Variation of Physical Properties on Tilled Soil

鄭 夏 禹* · 金 成 俊**
Chung, Ha Woo · Kim, Seong Joon

Summary

This study refers to temporal variation of physical properties of tilled soil under natural rainfalls. Field measurements of porosity, average hydraulic conductivity and average capillary pressure head on a tilled soil were conducted by soil sampler and air-entry permeameter respectively at regular intervals after tillage. Temporal variation of these physical properties were analysed by cumulative rainfall energy since tillage. Field experiment was conducted on a sandy loam soil at Suwon during April~July in 1989.

The followings are a summary of this study results ;

1. Average porosity just after tillage was $0.548\text{cm}^3/\text{cm}^3$. As cumulative rainfall energy were increased in 0.1070, 0.1755, 0.3849 J/cm^2 , average porosity were decreased in 0.506, 0.495, $0.468\text{cm}^3/\text{cm}^3$ respectively.

2. Average hydraulic conductivity just after tillage was 45.42cm/hr. As cumulative rainfall energy were increased in 0.1755, 0.2466, 0.2978, 0.3849 J/cm^2 average hydraulic conductivity were decreased in 15.34, 13.47, 9.58, 8.65cm/hr respectively.

3. As average porosity were decreased in 0.548, 0.506, 0.495, $0.468\text{cm}^3/\text{cm}^3$ average capillary pressure head were increased in 6.1, 6.7, 6.9, 7.4cm respectively.

4. It was found that temporal variation of porosity, average hydraulic conductivity on a tilled soil might be expressed as a function of cumulative rainfall energy and average capillary pressure head might be expressed as a function of porosity.

5. The results of this study may be helpful to predict infiltration into a tilled soil more accurately by considering temporal variation of physical properties of soil.

* 서울대학교 農科大學

** 서울대학교 農業開發研究所

키워드 : Green and Ampt 媒介變數, 耕耘土壤,
自然降雨, 降雨에너지

I. 緒 論

耕耘은 지표면의 粗度와 空隙率을 증가시키므로서 土壤의 物理的 特性인 透水係數, 毛管水頭, 貯藏能力 등에 영향을 미친다. 또한 耕耘토양은 시간이 경과하면서 사람이나 농기계에 의한 짓밟음이나 降雨 또는 灌溉에 의하여 굳은 표층이 형성되어 토양의 물리적인 특성이 변화하게 된다. 이와 같은 현상은 耕耘에 의하여 증가되었던 토양의 浸透率이 계속 감소하여 地表流出을 증가시키게 되고 有效雨量의 감소를 유발시킨다.

최근 들어 耕耘토양에서의 침투에 관한 연구가 외국에서 활발하게 진행되어 왔는데, Rawls 등(1983), Chu 등(1985, 1986)은 여러가지 浸透模型중에서 Green and Ampt 침투 모형을 대상으로 耕耘토양에서의 침투현상을 해석하고자 모형 개발 및 여러가지 耕耘 방식에 따른 空隙率, Green and Ampt 매개변수인 평균 透水係數, 평균 毛管水頭 등을 추정하는 방법을 제시한 바 있다. 한편 이들 土壤의 물리적 특성들은 작물의 생육기간 중에는 시간에 따라 변화하지 않는 것으로 간주되어 왔다.

그러나 耕耘初期부터 作物 생육기간의 토양의 물리적 특성들의 변화를 안다는 것은 발작물의 안정적인 用水供給의 관점에서 강우 또는 灌溉水の 효율적인 이용을 위하여 필요하다고 생각된다.

따라서, 본 연구는 圃場실험을 통하여 耕耘 초기부터 土壤의 物理的인 특성인 空隙率, 透水係數, 毛管水頭가 自然降雨에 의하여 변화되어 가는 과정을 살펴보고, 이들 土壤의 물리적 특성과 降雨에너지와의 관계를 究明하고자 한다.

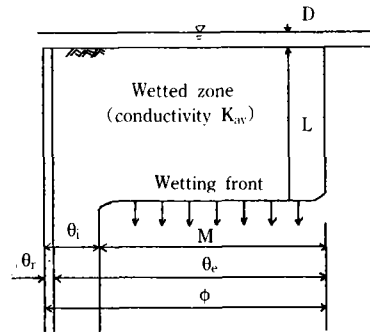
II. 基本理論

1. Green and Ampt 浸透式

Green and Ampt(1911)는 Fig. 1과 같이 土壤이 均質하다는 가정하에서 湛水상태에서의 浸透현상을 해석하기 위하여 연속방정식과 Darcy법칙을 이용하여 유도한 결과는 식(1)과 같다. 식(1)은 陰函數이므로 수치해법등을 통하여 그 해를 구할 수 있다.

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = K_{av}(1 + S_{av} \times \frac{M}{F}) \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, $f(t)$: 浸透率(cm/hr)
- K_{av} : 濕潤區域의 平均透水係數 (cm/hr)
- S_{av} : 濕潤先端의 平均毛管水頭 (cm)
- M : 浸透前後의 土壤含水量差 (= 浸透能)(cm^3/cm^3)
- M : 累加浸透量(cm)
- t : 時間(hr)



- D : Ponding depth(cm)(negligible)
- L : Wetting depth(cm)
- ϕ : Total porosity(cm^3/cm^3)
- θ_i : Initial soil moisture content(cm^3/cm^3)
- θ_e : Effective soil moisture content(cm^3/cm^3)
- θ_r : Residual soil moisture content(cm^3/cm^3)

Fig. 1. Schematic sketch of Green and Ampt infiltration model

2. 濕潤區域의 平均透水係數

平均透水係數(Kav)는 Bouwer(1966)가 제안한 바와 같이 土壤水分의 吸着(sorption)과 脫着(desorption)과정에서의 透水係數와 毛管水頭의 관계로 부터 飽和透水係數(Ks)의 1/2로 추정할 수 있다. 飽和透水係數는 여러가지 방법에 의하여 추정이 가능하지만 여기서는 Bouwer(1966)의 Air-entry permeameter를 사용하여 포장에서 직접 측정할 수 있다.

이 기구는 기본적으로 실린더의 상부를 밀폐시킬 수 있는 뚜껑과 지름 25cm의 실린더 浸透計로 구성되어 있으며, 뚜껑에는 물供給水槽를 지지하는 60cm높이의 물供給管이 장치되어 있다. 물공급수조로 물을 계속 공급하여 실린더 내부를 채운 후에는 토양내로 침투된다. 浸透가 어느 정도 진전되었다고 생각될 때, 물공급밸브를 닫기 직전의 물공급수조내의 水位降下率을 측정하므로써 浸透率을 구한다. 물공급밸브를 닫은 후의 실린더 내부의 최고의 水壓상태에서 시간이 경과할수록 지표면으로 탈출하려는 氣泡가 증가하면서 壓力은 계속 감소하여 氣泡가 지표면을 탈출하기 바로 직전에 最低壓力(氣泡壓力)에 이르게 된다. 이때 세개의 밸브를 잠근 상태에서 실린더 뚜껑과 침투계를 함께 들어 올려 침투계 하단부의 토양을 제거하면서 浸透깊이를 측정한다. 이상 물공급 水槽내의 水位降下率, 眞空計로 부터의 最低壓力值 및 浸透깊이를 이용하여 飽和透水係數를 구할 수 있다.

3. 濕潤先端의 平均毛管水頭

濕潤先端에서의 平均毛管水頭를 추정하는 데에는 여러가지가 있으나, 본 연구에서 적용한 방법은 Brakensiek(1977)이 제시한 空隙分布指數(pore size distribution index)의 함수로서 식(2)와 같다.

$$S_{av} = \frac{2+3\lambda}{1+3\lambda} \times P_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S_{av} : 平均毛管水頭(cm)
 P_b : 氣泡壓力(cm)
 λ : 空隙分布指數

식(2)의 氣泡壓力은 Bouwer(1966)의 Air-entry permeameter를 이용하여 圃場에서 직접 구하거나, 식(3)과 같이 Brooks and Corey의 有效飽和度(effective saturation)와 毛管水頭의 관계로 부터, 有效飽和도가 1.0일때의 毛管水頭로 구할 수 있다. λ 는 有效飽和도와 毛管水頭의 관계에서의 기울기를 나타낸다. 殘餘土壤含水量(residual soil moisture content)은 飽和도와 毛管水頭의 관계로 부터의 殘餘飽和度(residual saturation)에 의하여 구할 수 있다.

$$P_b = P \times S_e$$

$$= P \times \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서, P_b : 氣泡壓力(cm)
 P : 毛管水頭(cm)
 S_e : 有效飽和度
 ϕ : 總空隙率(cm^3/cm^3)
 θ : 土壤含水量(cm^3/cm^3)
 θ_r : 殘餘土壤含水量(cm^3/cm^3)

III. 材料 및 方法

1. 材 料

- 가. 實驗期間 : 1989年 4月~7月
 - 나. 實驗場所 : 수원 농업기술연구소 포장
 - 다. 實驗土壤 : 砂壤土
- 실험토양의 이화학적 특성은 Table-1과 같다.

Table-1. Physicochemical properties of tilled layer.

Specific gravity	PH	O.M. (%)	Mechanical analysis			Textural triangular classification
			Sand	Silt	Clay	
2.56	6.4	1.21	70	23	7	Sandy Loam

라. 降雨資料

降雨資料는 실험포장에서 약 0.8km 떨어진 水原측후소에서 관측된 자료를 인용하였다.

마. 實驗기구

土壤의 空隙率을 구하기 위하여 100cm³의 Core를 사용하였으며, 透水係數와 毛管水頭를 측정하기 위하여 Air-entry permeameter를 사용하였다.

바. 耕耘日 및 耕耘方式

경운일 : 4월 25일

경운방식 : Rotary-tiller

2. 方 法

降雨로 인한 耕耘土壤의 空隙率의 變化를 알아보기 위하여 耕耘初期부터 일주일 간격(또는 降雨 다음날)으로 3~4개의 토양시료를 채취하였으며, 平均透水係數 및 平均毛管水頭는 경운 초기부터 일주일 간격으로 5~6회의 반복실험을 실시하였다.

이들 土壤의 物理的 特性的 時間적 變化는 降雨의 代表적인 특성중의 하나인 降雨에너지를 선정하여 분석하였다. 降雨에너지는 地域에 따라 降雨粒子的 크기, 降雨의 終速度 등이 다르므로 三原義秋(1951), Carter등(1974), McGregor and Mutchler (1977), 盧(1984) 등에 의하여 연구된 바 있으나, 여기서는 일반적으로 사용되고 있는 Wischmier and Smith(1978)가 제시한 다음 식을 사용한다.

$$E(t) = [0.02062 - 0.00379 \times L_n(i)] \times i \times t \dots\dots\dots (4)$$

여기서, E(t) : t시간에서의 累加降雨에너지 (Joule/cm²)

i : 降雨強度 (cm/hr)

t : 時間 (hr)

IV. 結果 및 考察

1. 空隙率의 時間적 變化

耕耘 깊이는 평균 16.5cm(15.0~18.0cm)였으며, 耕耘後부터 측정기간(4/26~7/31)동안 耕耘土壤의 空隙率은 자연강우에 의하여 점차 감소되었으며, 이를 도시하면 Fig. 2와 같으며, 이 기간중의 강우별(10mm 이상) 累加降雨에너지 값은 Table-2와 같다.

Table-2. Cumulative rainfall energy(CRE) after tillage during experimental period (4/26/89~7/31/89)

Date (mon/day)	Days after tillage	Rainfall (mm)*	C R E (J/cm ² /day)	C R E (J/cm ²)
5/11	15	14.5	0.0197	0.0197
6/05	40	44.5	0.0873	0.1070
6/08	43	41.9	0.0685	0.1755
6/14	49	37.3	0.0689	0.2443
6/29	64	21.5	0.0534	0.2978
7/08	73	26.4	0.0457	0.3434
7/11	76	23.3	0.0415	0.3849
7/16	81	11.0	0.0268	0.4118
7/21	86	17.2	0.0403	0.4520
7/25	90	60.4	0.1460	0.5981

*Rainfall greater than 10mm/day

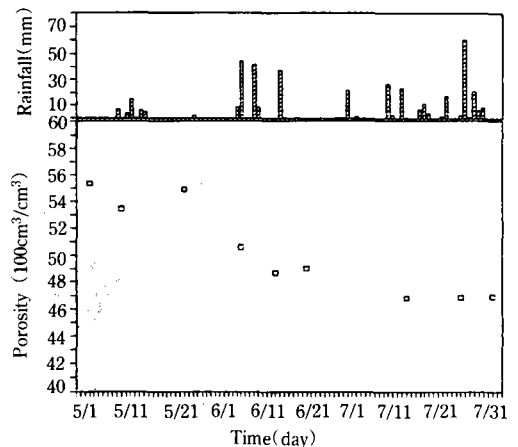


Fig. 2. Porosity change of tilled layer after tillage by natural rainfalls(4/26/89~7/31/89)

耕耘直後の 平均空隙率は $0.548\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로서, 耕耘前の 平均空隙率인 $0.474\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 와 비교하여 보면 1.16배의 증가를 보였고, 7월 12일 이후에는 平均空隙率이 $0.468\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로서 거의 안정된 값에 도달하여 耕耘初期의 空隙率과 비교하여 보면 0.85배의 감소를 보였으며, 이때까지의 누가강우에너지는 $0.3849\text{J}/\text{cm}^2$ 이었다. 특히 6월 5일과 6월 8일의 강우에 의하여 平均空隙率은 $0.506\sim 0.495\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 급격히 감소하였으며, 두 降雨의 累加降雨에너지의 범위는 $0.1070\sim 0.1755\text{J}/\text{cm}^2$ 이었다.

2. 平均透水係數의 時間的 變化

경운초기부터 Air-entry permeameter에 의한 平均透水係數의 變化를 조사하였던바 이를 도시하면 Fig. 3과 같다. 耕耘초기의 平均透水係數는 $45.42(33.34\sim 56.35)\text{cm}/\text{hr}$ 로서, 경운이전의 平均透水係數인 $11.27(6.27\sim 16.27)\text{cm}/\text{hr}$ 와 비교하여 보면 4.03배의 증가를 보였다. 6월 5일과 6월 8일의 降雨에 의하여 平均透水係數는 $18.59\sim 12.13\text{cm}/\text{hr}$ 로 급격히 감소하였으며, 7월 16일 이후에는 $8.64\text{cm}/\text{hr}$ 로 거의 안정된 값에 도달하여 경운초기의 空隙率과 비교하여 보면

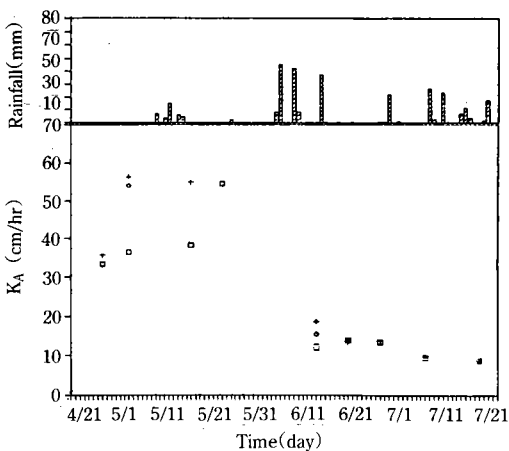


Fig. 3. Temporal variation of average hydraulic conductivity (K_a) on tilled layer by air-entry permeameter

평균 0.19배의 감소를 보였고, 이때까지의 累加降雨에너지는 $0.4118\text{J}/\text{cm}^2$ 이었다.

3. 平均毛管水頭의 時間的 變化

Air-entry permeameter에 의한 耕耘層 平均毛管水頭의 측정치는 空隙率이나 平均透水係數와 같은 뚜렷한 變化양상을 보이지 않았다. 이는 본 실험토양인 砂壤土에서의 氣泡壓力이 작고, 또한 土壤의 공간적 變化, 실린더를 설치할 때 생기는 攪亂 및 실린더의 수평여하에 민감한 반응을 보이기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 耕耘層에서의 平均毛管水頭는 Brakensiek의 이론을 적용하여, Brooks and Corey의 매개변수인 殘餘土壤含水量(θ_r), 氣泡壓力(P_b) 및 空隙分布指數(λ)를 각각 구하여 추정하였다.

殘餘土壤含水量을 구하기 위하여, 우선 飽和도와 毛管水頭의 관계로 부터의 殘餘飽和度(S_r)는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 空隙率 0.548, 0.506, 0.495, $0.468\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에 대하여 각각 0.20, 0.218, 0.222, 0.235로서, 殘餘土壤含水量은 모두 $0.11\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 나타났다.

殘餘土壤含水量을 이용하여, 각각의 空隙率에 대한 有效飽和도와 毛管水頭의 관계를 도시하면 Fig. 5와 같은 바, 氣泡壓力(P_b) 즉, $S_e = 1.0$ 일때의 毛管水頭는 각각 9.4, 10.3, 10.6, 11.3 cm로 나타났다. 또한 λ 는 空隙率에 관계없이 0.77로 나타났다. 위에서 얻은 매개변수들을 이용한 耕耘토양의 平均毛管水頭의 變化는 Table-3과 같다.

Table-3. Average capillary pressure(S_a) on tilled layer

Porosity (cm^3/cm^3)	Bubbling pressure (cm)	Capillary pressure (cm)
0.548	9.4	6.1
0.506	10.3	6.7
0.495	10.6	6.9
0.468	11.3	7.4

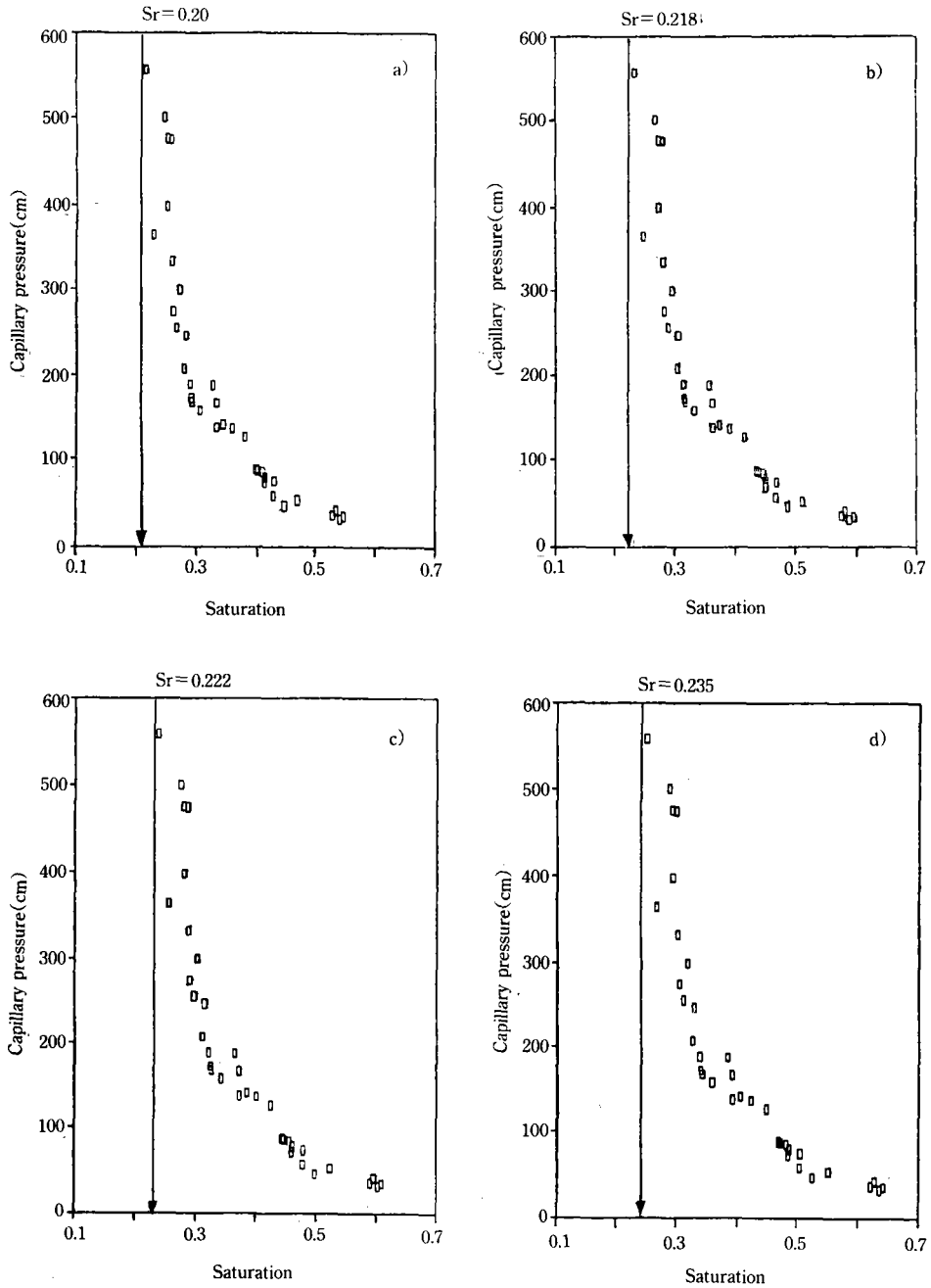


Fig. 4. Capillary pressure head as a function of saturation
 a) Porosity : $0.548 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ b) Porosity : $0.506 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
 c) Porosity : $0.495 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ d) Porosity : $0.468 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

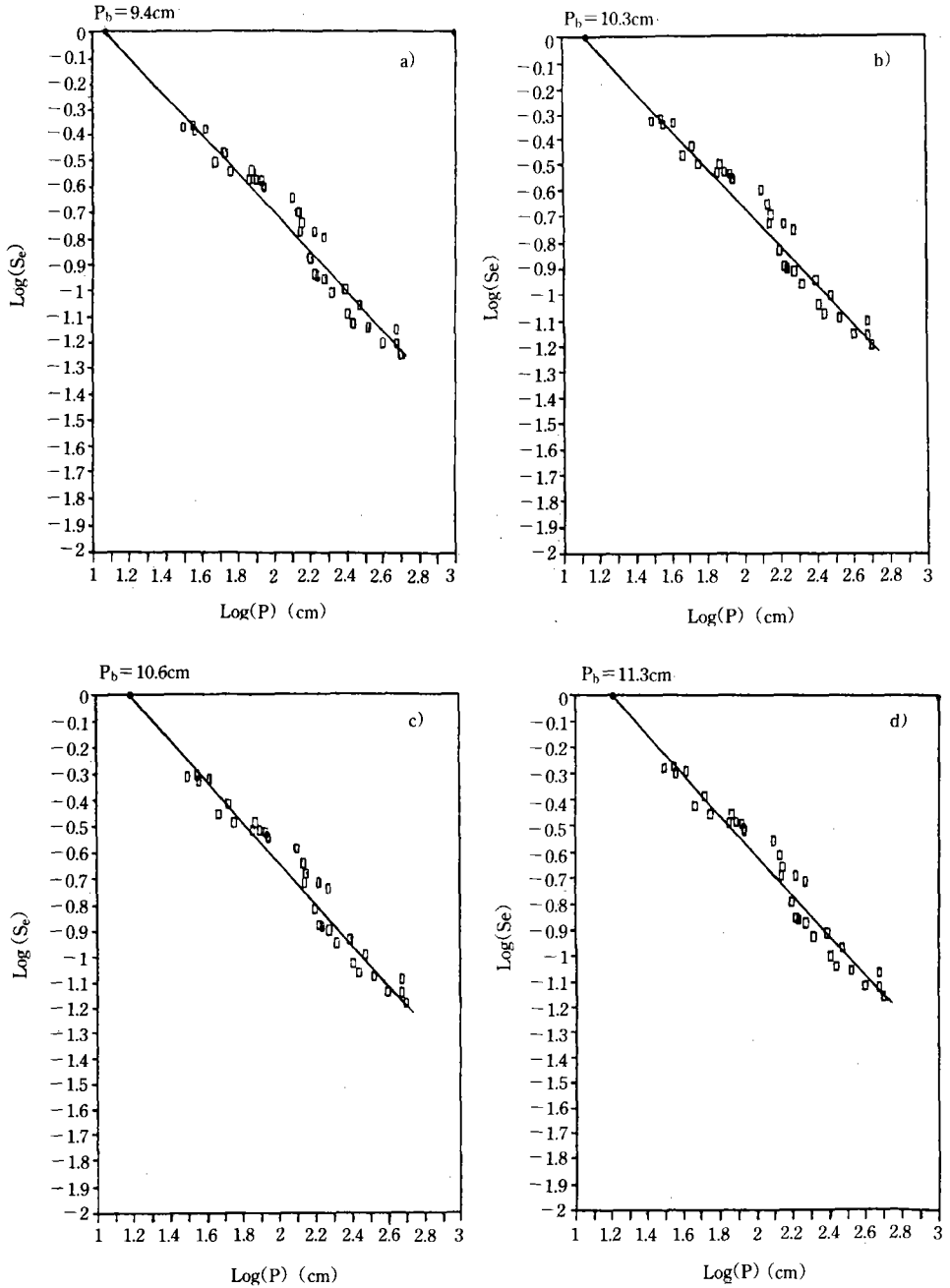


Fig. 5. Capillary pressure head as a function of effective saturation
 a) Porosity : $0.548 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ b) Porosity : $0.506 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
 c) Porosity : $0.495 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ d) Porosity : $0.468 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

4. 空隙率, 平均透水係數와 降雨에너지와의 關係

耕耘이후부터 측정기간동안(4/26~7/13)의 空隙率 및 平均透水係數를 누가강우에너지와 비교하여 정리하면 Table-4와 같다.

空隙率과 平均透水係數는 모두 누가강우에너지와 비선형적인 관계를 보였는 바 이들을 대수지에 도식한 결과, Fig. 6, Fig. 7과 같이 선형관계를 보였으며, 決定係數(R²)는 각각 0.989, 0.978로서 높은 상관성을 보였다.

空隙率과 累加降雨에너지와의 선형대수식은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \text{Exp}(3.80516 - 0.05144 \text{ Ln}(E))/100. \\ &\quad \text{for } 0 < E < 0.41 \\ &= 0.47 \quad \text{for } E \geq 0.41 \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

여기서, ϕ : 總 空隙率 (cm³/cm³)
 E : 累加降雨에너지 (Joule/cm²)

Air-entry permeameter에 의한 平均透水係數와 累加降雨에너지와의 선형대수식은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} K_a &= \text{Exp}(1.70458 - 0.54542 \text{ Ln}(E)) \\ &\quad \text{for } 0 < E < 0.41 \\ &= 8.93 \quad \text{for } E \geq 0.41 \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

여기서, K_a : 耕耘層의 平均透水係數(cm/hr)

Table-4. Temporal variation of average hydraulic conductivity (K_a) and porosity on tilled layer with respect to cumulative rainfall energy (CRE) (4/26/89~7/31/89).

Period	K _a (cm/hr)	Porosity (cm ³ /cm ³)	C R E (J/cm ²)
4/26~6/04	45.42	0.548	0.0197
6/05~6/07	-	0.506	0.1070
6/08~6/13	15.34	0.495	0.1755
6/14~6/28	13.47	-	0.2443
6/29~7/07	9.58	-	0.2978
7/12~	8.65	0.468	0.3850

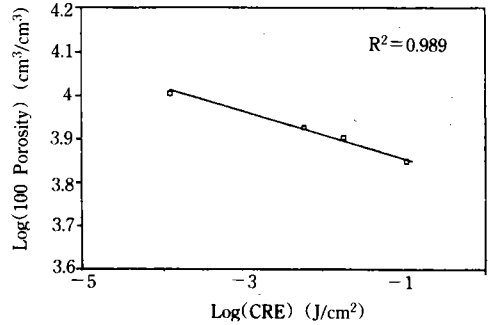


Fig. 6. Relationship between porosity on tilled layer and cumulative rainfall energy

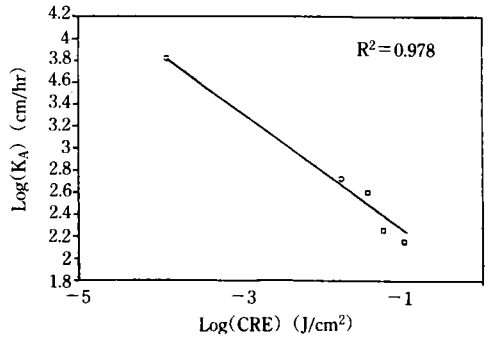


Fig. 7. Relationship between average hydraulic conductivity (K_a) on tilled layer and cumulative rainfall energy

5. 平均毛管水頭와 空隙率과의 關係

毛管水頭는 土壤이 가지고 있는 고유의 성질로서 여기서는 空隙率을 선택하여 비교하였다. 平均毛管水頭와 空隙率 또한 비선형적인 관계를 보였는 바, 이를 대수지에 도식하면 Fig. 8과 같으며, 결정계수는 0.999로서 높은 상관성을 보였다. Brakensiek 이론에 대한 선형 대수식은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} S_a &= \text{Exp}(6.51458 - 1.17520 \text{ Ln}(100\phi)) \\ &\quad \text{for } 0.47 \leq \phi \leq 0.548 \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

여기서, S_a : 耕耘層의 平均毛管水頭(cm)

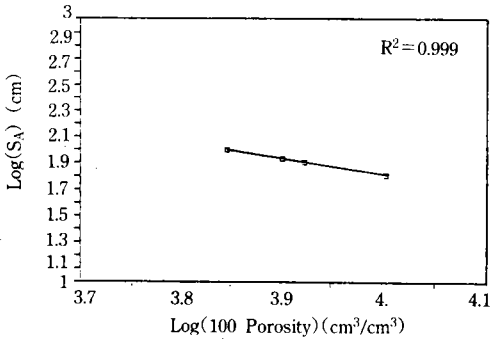


Fig. 8. Relationship between average capillary pressure(S_a) and porosity on tilled layer

V. 結 論

본 연구는 土壤의 物理的 特性인 空隙率, 透水係數, 毛管水頭에 대하여 耕耘直後부터 自然降雨에 의한 변화과정을 살펴 보았으며, 이들 토양의 물리적인 특성과 降雨에너지와의 관계를 究明하였다. 圃場실험은 1989년 4월~7월 동안 수원 소재 농업기술연구소 포장의 砂壤土 조건에서 실시하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 耕耘 직후의 平均空隙率은 $0.548\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 으로서, 누가강우에너지가 0.1070, 0.1755, 0.3849 J/cm^2 일 때의 平均空隙率은 각각 0.506, 0.495, $0.468\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 으로 감소하였다.

2. 경운 직후의 平均透水係數는 45.42 cm/hr 로서, 누가강우에너지가 0.1755, 0.2443, 0.2978, 0.3849 J/cm^2 일 때의 平均透水係數는 각각 15.34, 13.47, 9.58, 8.65 cm/hr 로 감소하였다.

3. 경운토양의 平均毛管水頭는 平均空隙率이 0.548, 0.506, 0.495, $0.468\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 일 때 각각 6.1, 6.7, 6.9, 7.4 cm 로 증가하였다.

4. 강우에너지에 의한 耕耘토양의 물리적인 특성의 시간적 변화를 포장실험에 의하여 조사하였던바, 空隙率과의 平均透水係數는 누가강우에너지의 함수로 나타낼 수 있었으며, 平均毛管水頭는 空隙率의 지수함수로 나타낼 수 있

었다.

5. 본 연구의 결과는 강우에 의한 土壤내로의 浸透現象을 해석하고자 할 때 토양의 物理的 特性의 변화를 고려하므로서 既存의 方法보다 정확하게 해석할 수 있을 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1. Bouwer, H., 1966, Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis, *Water Resour. Res.*, 2(4), pp. 729-738.
2. Bouwer, H., 1969, Planning and interpreting soil permeability measurements, *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proc., ASCE*, 95(IR3), pp. 391-402.
3. Brakensiek, D. L., 1977, Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation, *Water Resour. Res.*, 13(3), pp. 680-682.
4. Brakensiek, D. L. and C. A. Onstad, 1977, Parameter estimation of the Green-Ampt infiltration equation, *Water Resour. Res.*, 13(6), pp. 1009-1012.
5. Brakensiek, D. L., R. L. Engleman and W. J. Rawls, 1981, Variation within texture classes of soil water parameters, *Trans. of the ASAE*, 24(2), pp. 335-339.
6. Brooks, R. H. and A. T. Corey, 1964, Hydraulic properties of porous media, *Colorado State Univ., Hydrology Paper No. 3.*, pp. 27.
7. Kutilek, M., 1977, Comment on 'Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt' by Shlomo P. Neuman, *Water Resour. Res.*, 13(4), pp. 799-800.
8. McCuen, R. H., W. J. Rawls and D. L. Brakensiek, 1981, Statistical analysis of the

- Brooks-Corey and the Green and Ampt parameters across soil textures, *Water Resour. Res.*, 17(4), pp. 1005-1013.
9. Mein, R. G. and D. A. Farrell, 1974, Determination of wetting-front suction in the Green-Ampt equation, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, pp. 872-876.
10. Neuman, S. P. 1976, Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt, *Water Resour. Res.*, 12(3), pp. 564-566.
11. Rawls, W. J., et al., 1982, Estimating Green and Ampt infiltration parameters from soil properties, *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 108(IR2), pp. 166-174.
12. Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and K. E. Saxton, 1982, Estimation of soil water properties, *Trans. of the ASAE*, 25, pp. 1316-1320, 1328.
13. Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek, 1983, A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters, *Proceedings of the ASAE Conference on Advances in Infiltration*, pp. 102-112, Chicago, IL.
14. Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and B. Soni, 1983, Agricultural management effects on soil water process, Part I. Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters, *Trans. of the ASAE*, 26(6), pp. 1747-1752.
15. Wolfe, M. L., C. L. Larson and C. A. Onstad, 1988, Hydraulic conductivity and Green-Ampt infiltration modeling for tilled soils, *Trans. of the ASAE*, 31(4), pp. 1135-1140.
- (接受日字 : 1991. 5. 9)