

밭 土壤에서의 有效降雨量 算定을 爲한
電算모델 開發에 關한 研究

A Study on Development of Computer model for
Evaluating the Effective Rainfall on Upland Soil

高 德 九* · 鄭 夏 禹*
Deuk Koo Koh, Ha Woo Chung

Summary

To maintain an optimum condition for the plant growth on upland soil, the irrigation planning after the natural rainfall should be given enormous considerations on the rainfall effectiveness.

This study has been intended to develop the computer model for estimating the effectiveness of the rainfall. The computer model should also estimated the infiltration due to the rainfall and the soil moisture deficiency at the root zone of the plant.

For this purpose, the experiments of infiltration using rainfall simulator and the observations of the change of soil moisture content before and after rainfall were carried out.

Needed input data for the developed model include final infiltration capacity and field capacity of the soil, porosity of the top soil, root depth of the plant, rainfall intensity and duration, and the Horton's decay coefficient.

Among the needed input data for the developed model, final infiltration capacity and Horton's decay coefficient were determined by the experiments of infiltration. And from the result of the experiments, it is found that there is a great correlation between initial infiltration capacity and initial moisture content. And it is also found that the infiltration due to rainfall can be estimated with the Horton's equation.

The developed model was tested by the experimental data with two rainfall intensities. Tests were conducted on the different root depths at each rainfall.

Observed and estimated effective rainfalls were found to have great correlation. The result of the experiments showed that the effectiveness of the rainfall were 100%, so the comparisons were conducted by the consumption rates of infiltration at each depth.

The developed model can be also used for estimating the deficiency of rainfall, if the rainfall is not sufficient to the needed soil moisture. But, test was not carried out.

* 서울大學校 農科大學

I. 緒 論

人口增加에 따라 食糧需要가 急增하여 田作物의 重要性이 대두되고 있는 現今의 實情에서, 우리나라는 아직도 畝作中心의 農業에서 크게 벗어나지 못하고 있었다. 따라서 田作物의 自給을 爲하여 野山이나 傾斜地를 開發하고, 河口堰 및 揚水場 등을 建設하여 用水 供給에 勞力하고 있으나, 田作物에 對한 用水源 計劃에 必要한 基礎資料는 크게 貧弱한 形便이다.

作物이 成長하는데 必要한 限界要素(Critical element)로는 土壤, 열, 빛, 물 등이 있으나, 그 中 물은 植物體 成分의 約 75%以上을 차지하는 要素로서, 그의 過不足에 따라 植物에 미치는 影響은 다른 어느 要素보다도 크다고 할 수 있다.¹⁾²⁾ 植物은 必要한 물을 土壤水分에서 供給받으며, 土壤水分은 降雨나 地下水로 부터, 또는 灌溉에 依해 供給되어 진다. 降雨로 부터 얻어지는 土壤水分의 量은 土壤內의 空隙, 初期水分量, 土粒子의 크기와 降雨의 特性인 量(amount), 頻度(frequency), 強度(intensity) 등에 따라 달라진다.

우리나라에서의 年平均 降水量은 1,159mm로, 量에 있어서는 全體적으로 充分하다고 할 수 있으나, 地域의 分布가 고르지 못하고 夏節期에 편중되는 氣候의 偏奇 現象을 나타낸다. 그러므로 田作物의 生育期에 있어서, 降雨의 實際 利用率은 낮은 편이다. 따라서 人爲的 灌溉의 必要性이 늘어남에 따라, 降雨 및 그의 土壤內 浸透現狀에 對한 究明이 切實한 것이다. 그러나 우리나라에서는 아직 이러한 分野에 對한 研究가 별로 이루어지지 못하고 있다.

따라서 本 研究에서는, 우리나라의 代表的인 밭 土壤에 對하여 人工降雨를 適用, 그의 土壤內 浸透量과 浸透된 水分의 移動狀態를 觀察하여, 이로부터 有效雨量의 算定을 爲한 電算 model을 開發하는데 그 目的을 두었다.

II. 研究史

1. 土壤의 浸透

지금까지 土壤 浸透에 關한 研究는 크게 두가지의 傾向이 있었다. 첫째, 實驗에 依해 浸透量을 觀測하여 經驗式을 考案하고자 한 方法과 둘째, Darcy의 土壤水分 移動式을 數學적으로 풀어, 이로부터

理論式을 誘導하고자 하는 方法이 있다. 前者의 例로는 Kostikov (1932), Horton (1940)³⁾, Holtan (1961)⁹⁾과 Huggins and Monk (1967)¹⁰⁾ 등의 研究가 있고, 後者의 例로는 Green and Ampt(1911)⁶⁾, Philip(1957)¹⁵⁾, Mein and Larson(1971)과 Snyder (1971)¹²⁾ 등의 研究를 들 수 있다.

Kostiakov (1932)는 實驗을 통해 얻어진 資料를 分析하여 다음과 같은 經驗式을 考案하였다.

$$I = Kt^a \quad (II \cdot 1)$$

여기에서

I ; 浸透가 시작된 後 t 時間이 經過했을 때의 累加浸透量

t ; 浸透가 시작된 後 經過된 時間

K, a ; 常數

Horton(1940)은 土壤의 浸透가 시작된 後, 一定한 時間 間隔을 두고 浸透率(infiltration rate)을 測定하여 Curve-fitting에 依해 다음과 같은 經驗式을 考案하였다.²⁾⁶⁾⁹⁾

$$f = f_c + (f_i - f_c)e^{-kt} \quad (II \cdot 2)$$

여기에서

f ; 浸透가 시작된 後 t 時間이 經過했을 때의 浸透能

f_i ; 初期 浸透能(initial infiltration capacity)

t ; 浸透가 시작된 後 經過된 時間

k ; 減少係數(decay coefficient)

f_c ; 終期浸透能(final infiltration Capacity)

Holtan(1961)은 土壤內 殘餘空隙量의 函數로서 浸透能을 나타내었다.¹¹⁾¹²⁾¹³⁾

$$f = f_c + a(S_t - F)^n \quad (II \cdot 3)$$

여기에서

S_t ; 土壤의 含水能(potential storage capacity)

F ; 累加 浸透量(accumulated infiltration)

(II·3)式에서 a 와 n 은 $(f - f_c)$ 對 $(S_t - F)$ 의 對數座標에서 各各 切點과 기울기를 나타내는 係數이다.

Holtan (1961)에 依해 開發된 (II·3)의 經驗式은 Huggins and Honk (1967)¹⁰⁾, Holtan and Lopez (1971)⁹⁾ 등의 研究에서도 계속 利用된 바 있다.

最近의 傾向을 보면 實際適用에 있어서, Horton (1940)이나 Holtan(1961)의 經驗式이 가장 많이 利用되고 있다.²⁾¹¹⁾ 그것은 理論式을 適用하는데 필요한 透水係數(Hydraulic Conductivity)와 擴散度

(Diffusivity)는 아직 實驗室에서도 그 값을 正確히 決定하기 힘들기 때문이다.

Hillel and Gardener(1969)에 依하면 時間에 따른 浸透量 및 浸透率은 Fig.1에서와 같이 變化하며, Rubin(1966)에 依하면 降雨의 土壤 浸透率은 Fig.2에서와 같이 變化하는 것으로 나타났다.

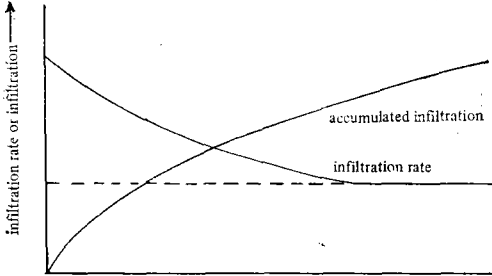


Fig. 1. Relation between infiltration rate and accumulated infiltration at each instant

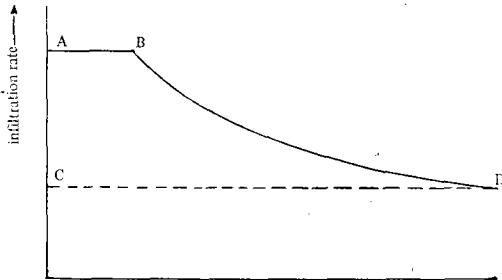


Fig. 2. Infiltration rate at each instant during infiltration into soil due to rainfall

2. 圃場容水量

Alway and Mcdole(1917), Richards and Moore(1952), Vaihmeier and Hendrickson(1931) 등은 土壤이 水分에 依해 飽和된 後, 數日이 經過하면 土壤內 水分의 移動과 含水量의 變化가 거의 停止하게 되는 것을 알 수 있다. 이 때의 水分량을 圃場容水量(field capacity)이라 하고, 同一 土壤內에서는 거의 같은 값을 갖는다고 하였다.³⁷⁾

圃場容水量을 決定하는 데는 다음과 같은 方法들이 있다.⁴⁾

1) 土壤의 種類에 따라 다르지만, 대체로 土壤이 飽和된 後 24~48時間이 經過되었을 때의 含水量을 圃場容水量이라 한다.

2) 土壤을 不覺亂狀態로 採取한 後, 實驗室에서 試料를 完全히 飽和시키고 여기에 壓力을 加하여 水

分을 排除시켜 그 壓力이 1/10~1/3氣壓일때의 含水量을 圃場容水量이라 한다.

3. 有効 雨量

有効 雨量(Effective Rainfall)이란 概念은 導入하는 分野에 따라, 다른 뿐 아니라 同一分野에서도 目的에 따라 各各 달리 定義할 수 있다. 灌溉分野에서도 지금까지 有効雨量에 對해 다음과 같이 여러 가지로 定義하여 왔다.³⁾

1) Hay and Buell(1955)은 總 降雨量에서 流出과 蒸發을 뺀 나머지 量을 有効雨量이라 했다.

2) Ogrosky and Mockus(1964)은 作物의 生育 期間 中에 내린 總 降雨量에서, 土壤이 飽和水分狀 態일 때나 灌溉를 한 直後에 내린 降雨를 除外한 量을 有効雨量이라 했다.

3) Hershfield(1964)은 作物 生育期間中 내린 全 降雨量을 有効雨量이라 했다.

그러나 가장 簡單한 意味의 有効降雨란 土壤의 空 隙內에 貯藏되어 實際로 利用될 수 있는 量으로 定義할 수도 있다.⁴⁾

Ⅲ. 밭土壤에서의 有効降雨

1. 基本 概念

降雨가 發生하여 地表面에 내린 빗물은 地表面을 通하여 一部 流出되고, 一部는 土壤 內로 浸透하게 된다. 이 浸透된 水分 中에서 作物이 生育하는데 直接 利用될 수 있도록, 作物의 根域 內에 殘留하는 水分만을 有効雨量이라 할 수 있을 것이다.

앞서 研究史에서 본 바와 같이 土壤內에 浸透된 빗물은 表土層을 飽和시킨 다음, 계속 深層으로 移動한다. 그러나 時間이 經過함에 따라 重力水가 排除되어, 飽和되었던 水分량은 점차 減少하여 일정 水分量에 이르게 된다. 그러므로 實際 土壤 內에서 增加된 水分량은 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{(FSM - ASM)}{100} \times DEP \quad (III \cdot 1)$$

여기에서

$\Delta\theta$; 土壤水分의 增加量(mm)

FSM ; 最終 水分量(%)

ASM ; 初期 水分量(%)

DEP ; 作物 根域의 깊이(mm)

한편, 土壤內의 浸透量은

$$I = P - R \quad (II \cdot 2)$$

여기에서

I ; 浸透量(mm)

P ; 降雨量(mm)

R ; 流出量(mm)

과 같고, 여기에는 重力수가 포함되어 있으므로, 作物의 根域內에 殘溜하는 水分量은

$$EFR = I - DP \quad (III \cdot 3 \cdot a)$$

또는

$$EFR = P - R - DP \quad (III \cdot 3 \cdot b)$$

여기에서

EFR ; 有効 雨量(mm)

DP ; 深層 浸透水(mm)

과 같고, (II·1)식과 (II·3)식으로 부터 다음과 같은 관계가 成立한다.

$$EFR = A\theta \quad (II \cdot 4)$$

降雨 直前 作物 根域 內의 初期水分 不足量은 圃場 容水量에 對한 初期水分의 不足量으로 나타낼 수 있다.

$$IMD = \frac{(F.C - ASM)}{100} \times DEP \quad (II \cdot 5)$$

여기에서

IMD ; 初期 水分 不足量(%)

$F.C$; 圃場 容水量(%)

따라서 降雨의 有効도는 初期 水分 不足量에 對한 浸透量의 比率로 다음과 같이 나타낸다.

$$ERR = \frac{I}{IMD} \times 100 \quad (II \cdot 6)$$

여기에서

ERR ; 降雨의 有効度(%)

또한 降雨 및 浸透水의 有効率은 그의 實際 利用率로서 다음과 같이 나타낸다.

$$CRP = \frac{A\theta}{P} \times 100 \quad (II \cdot 7)$$

여기에서

CRP ; 降雨의 有効率(%)

또는

$$CRI = \frac{A\theta}{I} \times 100 \quad (II \cdot 8)$$

여기에서

CRI ; 浸透水의 有効率(%)

한편 降雨에 依해 增加된 水分量은 有効 雨量과 같으므로, (II·7)식과 (II·8)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CRP = \frac{EFR}{P} \times 100 \quad (III \cdot 9)$$

$$CRI = \frac{EFR}{I} \times 100 \quad (III \cdot 10)$$

2. 浸透能의 算定

時間經過에 따른 降雨의 浸透率은 다음과 같이 표시한다.

$$1) f_i \leq P_i (P_i \text{는 降雨強度})$$

降雨 強度가 初期 浸透能보다 큰 境遇의 浸透率은 土壤의 浸透能과 一致하는 것으로 한다.

$$2) f_i > P_i \geq f_c$$

降雨 強度가 土壤의 初期浸透能보다는 낮고, 終期 浸透能보다 큰 경우에는, 浸透率이 初期에는 降雨 強度와 一致하나, 降雨 強度와 土壤의 浸透能이 같게 된 後에는 그 土壤의 浸透能과 一致하는 것으로 한다.

$$3) P_i < f_c$$

降雨 強度가 土壤의 終期浸透能보다 낮은 경우의 浸透率은 降雨 強度와 一致하는 것으로 한다.

降雨에 依해 土壤內로 浸透한 總量은 다음과 같이 時間에 따른 浸透率을 降雨의 持續時間까지 時間에 對해 積分하여 求한다.

$$F = \int_0^D f(t) dt \quad (III \cdot 11)$$

여기에서

F ; 總 浸透量

$f(t)$; 時間에 따른 浸透率의 函數

D ; 降雨 持續 時間

3. 根域內에서의 水分不足量

本 試驗에서는 降雨 後 48時間이 經過했을 때의 水分量을 圃場容水量으로 하였다. 또한 土壤의 初期水分不足量은 降雨 直前의 水分量을 測定하여 (II·5)식에서와 같이 구했다.

有効降雨은 앞서와 같이 算定된 浸透量이 初期水分不足量을 充足시켰을 때의 降雨를 나타내며, 降雨의 有効率 및 有効도는 (II·6) 및 (II·7), (II·9)식에서와 같이 나타낸다.

4. model의 開發

開發된 program EFRAIN은 降雨의 強度와 持續 時間에 依해 土壤內의 浸透量을 計算하고, 作物根域에서의 初期 水分 不足量과 比較하여 降雨의 有効도와 過不足量을 推定하도록 되어있다.

浸透量은 時間에 따른 浸透率을 積分하여 計算한다. 本 program에서는 사다리꼴 法則(trapezoidal

rule)에 의해, 時間의 增分을 1分으로 하여 數值積分(numerical integration)을 遂行토록 하였다.

$$INFIT = \sum_{i=1}^{n-1} (F(i) + F(i+1)) * 1. / 6.0 * 0.5 \quad (III \cdot 12)$$

여기에서

$F(i)$; 時間에 따른 浸透率
 $INFIT$; 累加 浸透量
 i ; 時間

初期 水分 不足量은 0~15, 15~25, 25~35, 35~45, 45~55, 55~65, 65~75, 75~85cm의 各層에서의 水分不足量을 測定하여 이를 作物의 根域까지 累加하여 求하였다. 그것은 neutron probe를 利用하여 土壤水分을 測定하면, 위와 같은 層別로 測定되기 때문이다.

$$IMD(i) = FICPT(i) - ASM(i) \quad (III \cdot 13)$$

$$TD = \sum_i IMD \quad (III \cdot 14)$$

여기에서

IMD ; 各層別 初期水分不足量
 $FICPT$; 各層別 圃場容水量
 ASM ; 各層別 初期水分量
 TD ; 總 初期水分不足量
 n, i ; 土層數

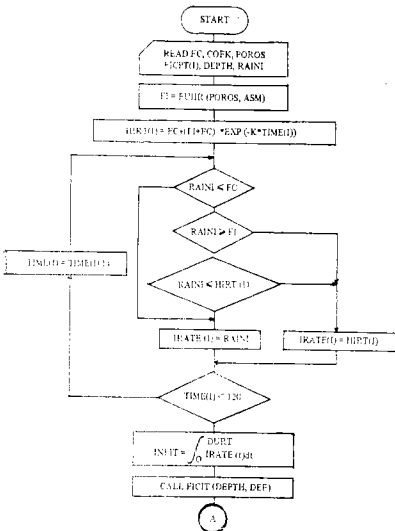


Fig. 2. Flow chart of EFRAIN

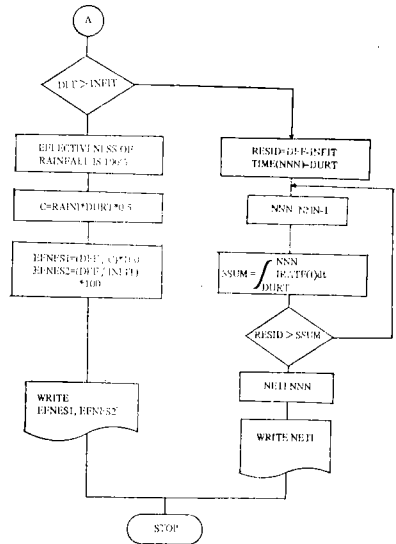


Fig. 3. Continued

本 program에서는 위에서 計算된 $INFIT$ 와 TD 를 比較하여 降雨의 有效度($INFIT/TD$)를 出力하고, $INFIT/TD \geq 1$ 인 경우에는 降雨의 有效率($IMD/INFIT$), 또는 IMD /總降雨量을, $INFIT/TD < 1$ 인 경우에는 土壤水分의 殘餘不足量을 함께 output로 하였다.

本 program의 flow chart는 Fig.3과 같고, 入力資料는 다음과 같다.

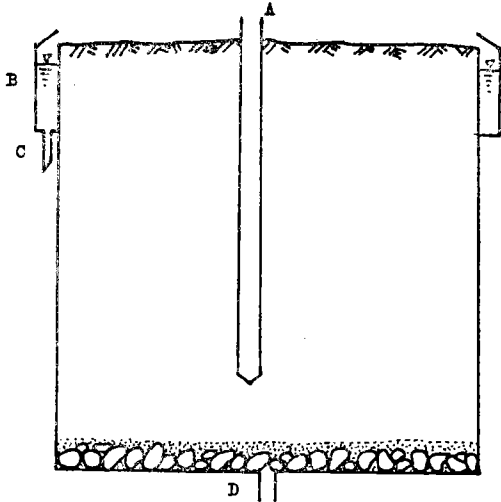
- 1) FC ; 土壤의 終期 浸透能
- 2) $FICPT$; 土壤의 깊이에 따른 圃場容水量
- 3) ASM ; 土壤의 깊이에 따른 初期水分量
- 4) $POROS$; 表土層의 空隙量
- 5) $RAIN$; 降雨 強度
- 6) DUR ; 降雨 持續 時間
- 7) $DEPTH$; 作物의 根域깊이
- 8) $COFK$; Horton式의 減少係數

IV. 材料 및 方法

1. 實驗 場所

本 實驗은 用水의 便利를 위하여 서울大學校 農科大學 構內에서 遂行하였다.

利用된 土壤은 우리나라의 代表的인 밭 土壤이라 할 수 있는 禮山統 地域에서 採集하였다. 實驗土壤은 그의 均一性을 위하여 地表面으로 부터 15cm以內的 흙만을 採取하였으며, 實驗에 使用되기 前에 充分히 乾燥시켜 混合하였다. 이 土壤을 粒度 分析한 결과, 모래 26.2%, 微砂 47.6%, 粘土 26.3%로서 LISDA의 土壤分類法에 依하면 粘土(clay)에



- **A ; Neutron Probe Access Tube
- **B ; runoff integrating device
- **C ; runoff measuring device
- **D ; drainage hole
- **E ; Soil

Fig. 4 Cross section of the Lysimeter

Table-1. Physical characteristics at each soil depth

Plot	Depth (cm)	Bulk density	Porosity (%)	Moisture content at pF 2.54 (%)
A	0—15	1.43	48.1	25.0
	15—30	1.45	46.5	25.1
	30—50	1.50	44.4	24.3
	50—90	1.40	48.7	23.6
	Average	1.45	47.0	24.5
B	0—15	1.44	46.9	24.9
	15—30	1.44	46.7	25.0
	30—50	1.42	44.3	24.3
	50—90	1.46	46.2	26.0
	Average	1.44	46.0	25.1
Total Average	1.45	46.5	24.8	

속하는 것으로 나타났으며, 라이시메타(lysimeter) 내에서의 물리적 特性은 Table-1과 같았다.

라이시메타는 두께 2mm의 스테인레스-스티일鋼板을 加工하여 1m×1m×1m의 正六面體로 製作하였다. 여기에 排水裝置와 流出水集水裝置를 附着하였다. 바닥에는 모래와 자갈을 깔아 filter層을 설치하고 內壁에는 接着劑를 발라 급속한 水分移動을 防止하였다. 또한 土壤水分의 測定을 위한 neutron probe access tube를 中心部에 埋設하였다. (Fig.4)

2. 處 理

Horton의 浸透方程式을 算定하기 爲하여 降雨強度를 25mm/hr, 50mm/hr, 75mm/hr로 하여 各 2회씩, 100mm/hr의 降雨強度로 1회를 實施하였고, 初期 水分 不足量은 各各 달리하였다.

한편, 開發된 model은 降雨強度를 100mm/hr와 180mm/hr의 2가지로 하고 各各에 對하여 作物根域의 깊이를 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85cm의 8가지로 하여 16個의 處理를 하였다.

3. 人工降雨器

本 研究에서는 降雨強度를 임의로 調節하고, 實驗의 편의를 도모하기 爲하여 人工降雨器를 利用하였다.

利用된 人工降雨器는 移動式 雨滴發生器의 Type로써 直接 製作되었다. 人工降雨器는 主管에 11個의 支管을 달고, 여기에 總 187個의 nozzle을 附着하여 振動裝置에 依하여 降雨가 發生하도록 하였다. 降雨強度는 水源에 連結되어 있는 벨브를 利用하여 調節되며, 이에 依한 有效降雨面積은 10cm×100cm이고, 有效降雨強度는 20~200mm/hr이었다.

4. 測 定

降雨時의 浸透量은

$$f = P_i - R \quad (VI.1)$$

여기에서

f ; 浸透量 (mm/hr)

P_i ; 降雨 強度 (mm/hr)

R ; 流出量 (mm/hr)

의 式으로 부터 計算하여 求할 수 있다. 流出量은 降雨가 시작된 뒤 初期에는 1, 2, 3, 5분까지의 累加量을 메스실린더로 測定하고, 그 後에는 每 5分間隔으로 測定하였다. 이를 라이시메타의 表面積으

로 나누어 單位面積當 流出量으로 換算하였다. 流出量의 變化가 中止하면, 이 때에 終期 浸透能에 到達하였다고 볼 수 있으므로, 流出量의 測定은 流出量이 10分 以上 一定하여질 때까지 계속하였다.

土壤水分의 測定은 라이시메타의 中心部에 埋設된 neutron probe access tube를 통해 地表面으로부터 10cm에서의 80cm의 깊이까지 每 10cm間隔으로 測定하였다. 土壤水分量은 neutron probe sill內에서 2回 反復 測定된 값의 平均値를 標準値로 하고, 各 깊이의 測定値를 標準値로 나누어 (VI·2)式에서와 같이 그 比率를 求한 後, 이들을 (VI·3), 또는 (VI·4)式에 代入하여 求한다.

$$SR=C/S \quad (VI·2)$$

여기에서

SR; 標準値에 對한 各 깊이에서의 測定値의 比率

C; 各 깊이에서의 測定値

S; 標準値

(1) 地表面으로부터 10cm以內의 깊이

$$\theta_0=0.373 \times SR-0.028 \quad (VI·3)$$

(2) 地表面으로부터 10cm以上의 깊이

$$\theta_0=0.312 \times SR-0.053 \quad (VI·4)$$

여기에서 θ_0 는 土壤 全體의 容積에 對한 水分 容積의 百分率(%)로 나타낸다. 初期 土壤水分量은 降雨 直前に 測定된 水分量으로 하였으며, 圃場容水量은 降雨後 48時間이 經過했을 때 測定된 水分量으로 하였다.

降雨強度는 簡易雨量計에 收集된 雨量을 雨量計 斷面積과 收集時間으로 나누어 求하였다.

6. 土壤 浸透能의 決定

降雨의 浸透率을 求하기 爲해서는 時間의 函數로써 土壤의 浸透能을 나타내는 Horton의 浸透方程式(1940)을 適用하는 것이 가장 適合하다고 判斷되었다.

Horton方程式의 係數算定을 爲하여, 人工降雨器에 依한 浸透實驗을 통해 時間에 따른 土壤의 浸透能과 終期浸透能을 測定하고, $(f-f_c)$ 와 t 를 半對數紙에 plot하여 이 點들을 通過하는 回歸直線의 기울기와 切點을, 各各 $-k$ 와 $\ln(f_i-f_c)$ 으로 하였다. 이로부터 k 를 Horton의 減少係數(decay coefficient)로 하고 $\ln(f_i-f_c)$ 의 指數値로 부터 初期浸透能을 求하였다.

한편 土壤의 初期浸透能은 表土層에서의 殘餘空

隙量에 依해 影響을 받으므로, 測定된 表土層에서의 殘餘空隙量과 算定된 土壤의 初期 浸透能과의 關係로 誘導하였다.

7. 電算 模擬 計算

電算 model의 入力資料로써, Horton의 減少係數는 土壤 浸透 實驗에서 얻어진 資料로 Horton의 浸透方程式을 算定하여 求하였으며, 土壤의 終期浸透能은 9回의 實驗에서 測定된 값의 平均値를 取하였다. 表土層에서의 空隙量은 不攪亂 試料를 採取, 實驗室에서 分析하여 求하였다.

土壤의 圃場容水量은 降雨가 내린後 48時間 後에 測定된 水分量을 平均하여 決定하였으며, 降雨 直前に 測定된 水分量에 依해 初期 水分 不足量과 表土層에서의 殘餘空隙量을 計算하고, 初期 水分 不足量과의 關係式으로 부터 推定하였다. 本研究에 利用된 土壤에서의 終期浸透能과 Horton의 減少 係數는 다음과 같았다.

終期浸透能; 45.6mm/hr

Horton의 減少係數; 0.076

V. 結果 및 考察

1. 浸透量의 算定

浸透實驗에 依해 測定된, 時間에 따른 浸透率 f 를 $\ln(f-f_c)$ 로 變形하여 t 와의 關係를 線形 回歸의 方法으로 求하여, $\ln(f_i-f_c)$ 와 k 를 計算할 수 있었다. 다시 $\ln(f_i-f_c)$ 에 指數를 取하여 f_i 를 求한 結果는 Table-2에서와 같았다. 보는바와 같이 $\ln(f-f_c)$ 와 t 사이에는 相當히 큰 相關關係가 있는 것으로 나타났다. 그러나 이 分析에서 25mm/hr의 降雨強度로 遂行된 2個의 實驗에 依한 資料는 除外되었다. 그것은 이 土壤의 終期浸透能이 降雨強度보다 커서 全量이 持續적으로 浸透된다고 볼 수 있기 때문이다.

위의 結果에서 보는 것처럼 降雨의 浸透率을 算定하는데 있어서 Horton의 方程式을 適用할 수 있다는 事實을 알 수 있었다.

Horton의 浸透方程式에서, 減少係數 k 는 同一 土壤에서는 거의 一定하며, 土壤의 初期浸透能은 表土層의 含水量으로부터, 終期浸透能은 地表面의 被覆狀態와 表土層의 두께에 依해 決定된다. 土壤의 一般의 終期浸透能은 5~60mm인 것으로 알려져 있으며²⁾, 本 實驗에서는 43.3~51.0mm로써 나타났

다. 그러나 실험구 설치후 약 4개월이 경과하였으므로 그 기간이 짧아 아직 土層이 完成되지 않았을 것으로 보며, 따라서 나타난 結果는 다소 큰 값일 것으로 생각된다. 한편 減少係數 k 는 0.0445~0.1192로 나타났으나, 이 값은 實驗의 持續時間에 따라 다소 큰 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 그러므로 浸透量을 算定하는데 있어서 보다 正確한 k 값을 求할 수 있는 研究가 行해져야 할 것이다.

Table-2. Evaluated parameters of Horton's equation

Expt'l No.	f_i	k	r
1	61.6	0.0611	0.851
2	95.8	0.0445	0.924
3	113.3	0.1192	0.977
4	138.7	0.0496	0.928
5	123.3	0.1055	0.934
Average		0.0760	0.923

(r ; correlation coefficient between $\ln(f-f_c)$ and t)

土壤의 初期浸透能은 表土層에서의 含水量과의 關係를 求하여, 다음 (V·1)식을 誘導하여, 그 式으로 부터 求할 수 있도록 하였다.

$$f_i = 8.80e^{0.17 \times IMDT} \quad (V \cdot 1)$$

여기에서

f_i ; 土壤의 初期 浸透能 (mm/hr)

$IMDT$; 表土層의 殘餘空隙量 (%)

2. 有効 雨量의 算定

따로 實施된 檢定實驗을 通하여 測定된 土層의 깊

Table-3. Deep percolation for 48 hours after rainfall at each depth

Expt'l No.	I	II
Depth	Deep percolation	Deep percolation
0-15	71.83mm	49.14mm
0-25	71.66	46.73
0-35	70.47	44.04
0-45	69.66	40.72
0-55	68.43	38.63
0-65	67.58	35.73
0-75	66.35	32.28
0-85	63.53	28.11

이에 따른 深層浸透水의 量은 Table-3에서와 같았다.

有効雨量은 (II·4)式에서와 같이 $P-R-DP$ 로 算定된다. 그러므로 實驗을 通해서 測定된 總降雨量에서 地表面 流出量과 Table-3의 深層浸透水를 뺀 量으로 土層의 깊이에 따른 有効雨量을 算定하여 Table-4와 Table-5에서와 같은 結果를 얻었다.

Table-4. Observed effective rainfall and consumption rate of infiltration for test experiment No.I

Depth(cm)	EFR(mm)	RR(%)
0-15	8,895	11.03
0-25	9,065	11.23
0-35	10,255	12.71
0-45	11,065	13.71
0-55	12,295	15.24
0-65	13,145	16.29
0-75	14,375	17.82
0-85	17,195	21.31

Table-5. Observed effective rainfall and consumption rate of infiltration for test experiment No.II

Depth(cm)	EFR(mm)	RR(%)
0-15	0.45	0.91
0-25	2.86	5.77
0-35	5.55	11.20
0-45	8.87	17.89
0-55	10.96	22.11
0-65	13.86	27.96
0-75	17.31	34.92
0-85	20.89	42.14

3. model의 檢定

開發된 電算 program EFRAIN에 檢定實驗에서 測定된 降雨強度와 持續時間, 初期水分量과 使用된 土壤의 空隙量과 圃場容水量, 그리고 앞서 算定된 減少係數와 終期浸透能을 入力하여 나온 結果와 作物根域의 깊이를 8個의 層으로 나누어 測定한 값을 Table-6과 Table-7에 나타내었다.

實驗의 結果에서 보던 test experiment No. 1과

Table-6. Comparison of observed and estimated rainfall effectiveness for test experiment No.I

Depth	Effective rainfall (mm)		Consumption rate (%)	
	Observed	Estimated	Observed	Estimated
0-15	8,895	5.16	11.03	5.82
0-25	9,065	4.93	11.23	5.56
0-35	10,255	5.52	12.71	6.22
0-45	11,065	5.84	13.71	6.58
0-55	12,295	6.49	15.24	7.31
0-65	13,145	7.08	16.29	7.98
0-75	14,375	7.87	17.82	8.87
0-85	17,195	10.57	21.31	11.91
$r^a)$	0.9796		0.9796	
$F^b)$	142.57**		142.57**	

a) correlation coefficient
 b) F-value
 ** significant at 1% level

tesst experiment No. II에서는 모두 浸透量이 土壤內的 殘溜水分量을 超過하였다. 즉 降雨의 有効度는 100%였다. 그러므로 有効降雨의 檢定은 浸透水의 利用率에 依하여 遂行하도록 하였다.

Table-7. Comparison of observed and estimated rainfall effectiveness for test experiment No. II

Depth	Effective rainfall (mm)		Consumption rate (%)	
	Observed	Estimated	Observed	Estimated
0-15	0.45	-1,905	0.91	—
0-25	2.86	0.255	3.77	0.42
0-35	5.55	2,665	11.20	4.37
0-45	8.87	5,815	17.89	9.53
0-55	10.96	7,685	22.11	12.60
0-65	13.87	10,325	27.96	16.93
0-75	17.31	13,215	34.92	21.66
0-85	20.89	16,425	42.14	26.93
$r^a)$	0.9999		0.9999	
$F^b)$	29995**		24996**	

a) correlation coefficient
 b) F-value
 **significant at 1% level

Table-6과 Table-7에는 算定値와 測定値를 統計的으로 分析한 結果도 함께 나타나 있다. 그 結果를 보면 電算 program EFRAIN으로 부터 推定된 有効降雨과 浸透水의 利用率은 모두 觀測値와 相當히 큰 有意性이 있음을 알 수 있었다.

그러나 開發된 model을 實際 圃場에서 適用하기 爲해서는 보다 더 많은 實驗을 通해 算定値와 測定値 사이의 相關關係를 탐험으로써 本 電算 program을 補充해 나가야 할 것으로 생각된다.

IV. 結 論

降雨의 浸透量을 算定하고, 土壤內的 不足水分量을 求하여, 그 降雨가 土壤 水分의 增加에 미치는 影響을 推定하므로써, 降雨 後 土壤 內 水分의 過不足을 判定하는 것은 밭 土壤에서의 灌溉計劃을 세우는 데 相當히 重要한 因子이다.

本 研究에서는 降雨의 밭 土壤에서의 浸透量 및 土壤水分의 移動을 觀察하고 이에 依해 有効降雨量 算定 model을 開發 檢定하고자 하였다. 實驗을 通해 降雨의 浸透量을 推定하기 爲해서는 Horton의 浸透方程式을 利用하는 것이 適合하다는 事實을 確認하였다. 한편 Horton의 方程式을 利用하기 爲해서는, 各 土壤에 對한 浸透實驗이 先行되어 그의 終期 浸透能이나 減少係數와 같은 特性値를 먼저 밝혀야 할 必要가 있었다.

電算 Program에서는 土壤의 終期浸透能, 圃場容水量, 初期水分量과 表土層의 空隙量, 降雨의 強度와 持續 時間, Horton의 減少係數 등이 入力資料로 使用되었으며, 이 model에 依해 推定된 有効降雨를 實驗에서 얻어진 測定値와 檢定한 結果 相當히 有意性이 있는 것으로 나타났다.

本 model은 降雨의 土壤浸透量과 土壤內的 水分 不足量을 算定하므로써 降雨의 有効度와 함께 그의 過不足을 判定하는 데도 利用할 수 있도록 開發되었다.

參 考 文 獻

1. Baver, L.D. and W.H. Gardner, W.R. Gardner (1972): Soil Physics, John Wiley & Sons, Inc.
2. Chow, V.T. (1964): Handbook of Applied Hydrology, Mcgrow Hill Book Co.

3. FAO(1974) : Effective Rainfall, FAO Irrigation and Drainage Papers 25, Water resources and development Service, Land and water development division of FAO.
4. FAO (1971) : Irrigation Practice and Water Management, FAO Irrigation and Drainage Paper 1.
5. Gert Aron, C. Miller, Jr., D. F. Lakatos (1977) : Infiltration Formula Based on SCS Curve Number, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 103, No. IR4, pp. 419~427.
6. Green, W.H. and G.A. Ampt(1911), Studies on Soil Physics, J of Agric. Sci. 4, pp.1-24.
7. Hillel (1971) : Soil and Water, physical principles and processes, Academic Press.
8. Holtan, H.N. and N.C. Lopez (1971) : VSD-AHL-70, Model of watershed hydrology, DSDA Techn. Bull. No. 1435.
9. Horton, R.E. (1940) : An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity, Soil Soc., Amer. Proc. 5, pp. 339~417.
10. Huggin & Monke(1967) : A Mathematical Model for Simulating the Hydrologic Response of a Watershed, Water Resources. 4, pp. 529~539.
11. Holtan H. N., C. B. England and V.O. Shanheltz (1965) : Concepts in Hydrologic Soil Grouping, Trans. of ASAE 10(3), pp.407~410.
12. Holtan H.N. (1961) : A Concept for Infiltration Estimation Estimates in Watershed Engineering, ARS Paper 41-51.
13. Idike, F. I. and C.L. Larson, D.C. Slack, R. A. Young (1979) : Experimental Evaluation of Two Infiltration Models, trans. of ASAE 23, pp.1428~1433.
14. Ministry of Agriculture and Fisheries (1980): Year Book of Agriculture and Forestry Statistic, Republic of Korea.
15. Philip, J.R. (2957) : The Theory of Infiltration. (1) The Infiltration Equation and its Solutions, Soil Sci. 83, pp.345~357. (2) Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations, Soil Sci. 84. pp.257~264.
16. Rubin, J. (1966) : Initially drier than their field capacity and its applications, Water Resources Res. 2, pp. 739~749.
17. J. Rubin and R. Steinhardt(1962) : Soil Water Relations During Rain Infiltration; I. Theory, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27, 246~251, (1964) Soil Water Relations During Rain Infiltration; III, Water uptake at incipient ponding. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28, 614~619.
18. Snyder, W.M. (1971) : A Proposed Watershed Retention Function, J. Irrig. Drain. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 97 (IRI), pp. 193~201.
19. Winter, E.J. (1974) : Water, Soil and the Plant, The Macmillan Press, Ltd.
20. 農村振興廳(1971) : 土壤通 說明書, 農業技術研究所
21. 尹龍男(1975) : 水文學, 清文閣
22. 趙成鎮, 朴天緒 等(1977) : 新稿 土壤學, 鄉文社