

밭에서의 有效雨量 算定模型 開發

Modeling Effective Rainfall for Upland Crops

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

Summary

A model for estimating daily effective rainfall of upland crops was developed. The infiltration process was described by Green-Ampt infiltration model developed by Chu(1978). The model considers delayed surface ponding and surface detention storage under a uniform soil profile. The Green-Ampt parameters, that is, average hydraulic conductivity and average capillary pressure head on a sandy loam soil were determined from field experiment using Air-entry permeameter developed by Bouwer(1966). The model was verified by comparing measured and simulated surface runoff. The ratios of effective rainfall to total rainfall for red pepper, soybean, sesame and Chinese cabbage were evaluated using Borg's root growth model(1986) respectively.

The followings are a summary of this study results ;

1. In a sandy loam soil, average hydraulic conductivity was 3.28cm/hr and average capillary pressure head was 3.00cm.
2. The root growth of upland crops could be expressed by Borg's root growth model successively.
3. The measured and simulated surface runoff was agreed well with each other.
4. As the rainfall amount was increased, the ratio of effective rainfall to total rainfall was decreased exponentially till a certain growing period.

* 서울대학교 農業生命科學大學

** 서울대학교 農業開發研究所

키워드 : 有效雨量, Green-Ampt 浸透式, 地表流出, 뿌리成長

I. 緒 論

우리나라의 降雨은 계절적으로 하절기에 장마의 형태로 편중되는 반면에 봄과 가을에는 旱魃이 빈번하게 발생하는 독특한 特性으로 보아, 灌漑 計劃樹立에 있어 有效雨量의 正確한 算定은 次期 灌漑時期 및 灌漑量의 적절한 決定을 통하여 궁극적으로 灌漑水의 節約, 作物의 정상적인 生育으로 品質向上과 收穫量의 증대, 灌漑施設 規模의 經濟的인 決定 등에 寄與할 것으로 생각된다.

作物生育時期 중 밭에서의 有效雨量은 여러 가지 복합적인 인자들에 의해 결정되어진다. 즉 有效雨量은 降雨의 特性(降雨量, 降雨強度)과 土壤의 特性(土壤의 종류, 浸透率, 地表貯留能) 및 作物의 特性(遮斷, 蒸發散量, 根群域) 등에 의해 달라지며 또한, 初期 土壤 含水量 狀態 및 地下水位의 有無에 따라 크게 변화한다.

有效雨量을 보다 精確하게 計算하기 위해서는 基本的으로 降雨에 의한 浸透現象을 알아야 하며 둘째로, 作物의 生育時期別 根群域을 알고 있어야 하고 셋째로, 降雨前의 土壤含水量 狀態를 알아야 하는데 이를 위해서는 土壤含水量의 觀測 또는 豫測이 先行되어야 한다.

현재까지 알려진 浸透式들 중에서 灌漑組織 設計 및 水文模型에 자주 적용되고 있는 Green-Ampt 浸透式은 物理的인 매개변수를 가지며 사용하기가 간단하여 자주 적용되어 왔다. 한편 Chu(1978)는 均質土壤조건에서 강우초기의 地表貯留를 고려하여 강도가 일정하지 않은 降雨에도 적용이 가능하도록 원래의 Green-Ampt 浸透式을 개선한 바 있다.

본 연구는 Chu의 Green-Ampt 浸透式을 이용한 降雨의 有效雨量 算定模型을 開發하고, 개발된 模型으로 3개년('88~'90) 간의 降雨資料와 고추, 콩, 참깨, 배추 등의 根群域資料를 이용하여 作物의 生育時期別 降雨의 有效率을 산정하는데 그 目的을 두었다.

II. 基本理論

1. Green-Ampt 浸透式

Green-Ampt(1911)는 土壤이 均質하다는 가정하에서 貯留상태에서의 浸透現象을 해석하기 위하여 연속방정식과 Darcy법칙을 이용하여 식(1)을 유도하였다.

$$f(t) = \frac{dF}{dt} \\ K(1+S \times \frac{M}{F}) \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서, f(t) : 浸透率(cm/hr)
- K : 濕潤區域의 平均透水係數(cm/hr)
- S : 濕潤先端의 平均毛管水頭(cm)
- M : 浸透前後의 土壤含水量差(cm³/cm³)
- F : 累加浸透量(cm)
- t : 時間(hr)

가. 濕潤區域의 平均透水係數

平均透水係數(K)는 Bouwer(1966)가 제안한 바와 같이 透水係數와 毛管水頭의 관계로 부터飽和透水係數(K_s)의 1/2로 추정할 수 있다.

나. 濕潤先端의 平均毛管水頭

濕潤先端에서의 平均毛管水頭는 Brakensiek(1977)이 제시한 空隙分布指數(pore size distribution index)의 함수로서 식(2)와 같다.

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

- 여기서, S : 平均毛管水頭(cm)
- P_b : 氣胞壓力(cm)
- λ : 空隙分布指數

氣胞壓力는 Bouwer(1966)의 Air-entry permeameter를 이용하여 圃場에서 직접 구하거나, Brooks and Corey의 有效飽和度(effective satu-

ration)와 毛管水頭의 관계로 부터 구한다.

2. 뿌리 成長函數

作物의 뿌리성장은 일반적으로 作物의 最大 뿌리깊이와 時間의 函數로 표현하는 바, 시험 결과에서 적합한 것으로 인정된 Borg(1986)의 sin 函數를 선정하였다.

$$RD_r = a + b \sin(3.03 Tr - 1.47) \dots\dots\dots(3)$$

여기서, RD_r : 相對뿌리깊이(現 뿌리깊이/最大 뿌리깊이)

Tr : 相對時間(播種後 現在日數/全 生育日數)

a, b : 決定係數

3. 有效雨量의 計算

降雨에 의한 有效雨量은 地表流出이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우로 구분할 수 있는 바, 浸透깊이가 根깊이보다 작거나 같으면 전자의 경우는 降雨量에서 地表流出量을 뺀 값이 유효우량이 되고, 후자의 경우는 강우량이 곧 유효우량이 된다. 또한 지표유출의 有無에 관계없이 浸透깊이가 根깊이보다 크면 유효우량은 총강우량에서 지표유출량을 빼고 根깊이 이하의 浸透量을 뺀 값이 된다.

III. 模型의 開發

1. Green-Ampt 침투모형

圃場에서 降雨나 灌溉에 의한 浸透現象은 一般적으로 土壤水分이 다르고 透水係數가 다른 상태에서의 土壤水의 이동이다. 降雨의 浸透現象은 貯留조건과 非貯留條件에 따라 다르다. 地表貯留下에서의 浸透는 降雨의 時間적인 分布에 따라 다르며 이때의 浸透率은 最終浸透率이다. 地表貯留가 없는 狀態에서는 모든 降雨가 土壤內로 浸透하게 되며 이때의 浸透率은 降雨強度와 同一하다. 위의 두 기간을 分離하여

생각할 수 있도록 Mein and Larson(1971)이 Green-Ampt 浸透式에 貯留開始時間(ponding time)을 考慮하였다.

浸透式은 식(4)와 같이 물收支式으로 표현되며, 이를 時間에 대한 變化率로 나타내면 식(5)와 같다.

$$P(t) = F(t) + G(t) + R(t) \dots\dots\dots(4)$$

여기서, $P(t)$: 累加降雨量(mm)

$F(t)$: 累加浸透量(mm)

$G(t)$: 貯留深(mm)

$R(t)$: 累加流出量(mm)

t : 時間(hr)

$$i = f + dG(t)/dt + r \dots\dots\dots(5)$$

여기서, i : 降雨強度(mm/hr)

f : 浸透率(mm/hr)

r : 流出率(mm/hr)

地表貯留下에서의 流出率은 降雨強度에 浸透率을 뺀 값이 되고, 地表貯留가 없는 狀態에서의 流出率은 0이다.

$$r = i - f_p; G = D, i > f_p \dots\dots\dots(6)$$

$$r = 0; G < D \text{ or } i \leq f_p \dots\dots\dots(7)$$

여기서, f_p : 地表貯留下에서의 浸透率(mm/hr)

D : 最大 地表貯留深(mm)

累加流出量은 流出率의 時間에 대한 積分式으로 나타낼 수 있으며, 다음 식과 같다.

$$R(t) > R(t'); G = D, i > f_p \dots\dots\dots(8)$$

$$R(t) = R(t'); G < D, \text{ or } i < f_p \dots\dots\dots(9)$$

여기서, t' : 時間 t 의 以前 時間(hr)

Green-Ampt 浸透式의 해를 구하기 위해서는 우선 積分條件을 알아야 한다. 降雨發生後 최초의 貯留開始時間(t_p)을 생각해 보면, 地表貯

留되기 전에 $G=0$ 이므로 t_p 에서의 累加 浸透量은 식(4)와 식(9)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t_p) = P(t_p) - R(t_p) = P(t_p) - R(t') = F_0 \quad \dots(10)$$

여기서, F_0 = 貯留開始時間(t_p)에서의 累加浸透量(mm)

따라서 식(1)에 대한 積分條件은 식(10)과 같고, 이를 이용하여 식(1)을 $t_p \leq t \leq t$, $F_0 \leq F \leq F_p$ 구간에 대하여 적분, 정리하면 식(11)과 같으며, 여기서 $F_0/SM - \ln(1 + F_0/SM)$ 를 t_s 로 놓으면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다. 이 식은 Mein and Larson(1971)이 지표저류 조건을 고려하고 강우강도가 일정한 강우에 적용할 수 있도록 Green-Ampt 浸透式을 수정한 식이다.

$$F_p/SM - \ln(1 + F_p/SM) - F_0/SM + \ln(1 + F_0/SM) = K(t - t_p)/SM \quad \dots(11)$$

$$F_p/SM - \ln(1 + F_p/SM) = K(t - t_p + t_s)/SM \quad \dots(12)$$

여기서, F_p : 地表貯留下에서의 累加浸透量(mm)

t_s : 貯留開始時間(t_p)에서 t_p 이전의 累加浸透량의 영향에 의한 假象時間(hr)

降雨強度가 일정하지 않은 강우에 적용이 가능하려면, t_p 와 t_s 를 구해야 한다. 貯留開始時間 t_p 에서 降雨強度와 浸透率은 일치하므로 식(13)과 같다. 식(10)과 식(13)을 식(1)에 대입하면 식(14)와 같으며 이로부터 t_p 를 구할 수 있다. t_s 는 식(10)과 식(12)로부터 정리된 식(15)에 의해 구할 수 있다.

$$i(t_p) = f_p \quad \dots(13)$$

$$P(t_p) - R(t') - KSM/[i(t_p) - K] = 0 \quad i > K \quad \dots(14)$$

$$Kt_s/SM = [P(t_p) - R(t')]/SM - \ln\{1 + [P(t_p) - R(t')]/SM\} \quad \dots(15)$$

일반적으로, 自然降雨는 降雨強度가 서로 다른 여러기간으로 나뉘어져 발생한다. 이러한 降雨에서는 적어도 한번이상 地表貯留가 발생될 수 있는 가능성이 있으므로 그때마다 t_p 와 t_s 를 구하여야 한다. 따라서 地表貯留의 有無에 대한 두가지 地表面條件을 고려해야 한다.

첫째로 降雨의 開始時間에 地表貯留가 없는 조건에서 終了時間에도 地表貯留가 발생하지 않는 경우에는 식(9)에 의하여

$$G(t_n) = G(t_{n-1}) = 0 \quad \dots(16)$$

$$R(t_n) = R(t_{n-1}) \quad \dots(17)$$

여기서, n : 임의기간

t_{n-1} : 임의기간의 開始時間(hr)

t_n : 임의기간의 終了時間(hr)

또한 식(1)에 의하여

$$I < f_p = K [1 + SM/F(t_n)] \quad \dots(18)$$

또는

$$F(t_n) < KSM/(I - K) < K \quad \dots(19)$$

이며, 식(16), (17), (19)를 식(4)에 대입하면 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$C_u = P(t_n) - R(t_{n-1}) - KSM/(I - K), \quad C_u > 0, I > K \quad \dots(20)$$

여기서, C_u : 降雨開始時間에서 地表貯留가 존재하지 않는 경우의 地表面條件

降雨終了時間에 地表貯留가 발생하는 경우에는

$$G(t_n) > 0 \quad \dots(21)$$

$$R(t_n) \geq R(t_{n-1}) \quad \dots(22)$$

$$F(t_n) = F_p \quad \dots(23)$$

$$I > f_p = K(1 + SM/F_p) \quad \dots(24)$$

또는

$$F(t_n) = KSM / (I - K) \dots\dots\dots(25)$$

식(21), (22), (25)을 식(4)에 대입하면 다음과 같다.

$$C_u = P(t_n) - R(t_{n-1}) - KSM / (I - K), \\ C_u > 0 \dots\dots\dots(26)$$

둘째로, 降雨의 開始時間에 地表貯留가 발생 하는 조건에서 終了時間에 地表貯留가 발생 하는 경우에는 식(21), (22), (23)이 적용되며, 식(4)에 대입하면 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$C_p = P(t_n) - F_p(t_n) - R(t_{n-1}), C_p > 0 \dots\dots(27)$$

여기서, C_p : 降雨開始時間에 地表貯留가 존재하는 경우의 地表面條件
降雨終了時間에 地表貯留가 발생하지 않는 경우에는,

$$G(t_n) = 0 \dots\dots\dots(28)$$

$$R(t_n) = R(t_{n-1}) \dots\dots\dots(29)$$

$$F(t_n) < F_p(t_n) \dots\dots\dots(30)$$

이며, 위의 식들을 식(4)에 대입하면 다음의 조건을 얻을 수 있다.

$$C_p = P(t_n) - F_p(t_n) - R(t_{n-1}), C_p < 0 \dots\dots(31)$$

위의 경우들을 요약하면, 降雨開始 및 終了時間에 地表貯留가 존재할 경우에는 地表面條件(C_u 또는 C_p)이 0 보다 크고, 地表貯留가 존재하지 않는 경우에는 地表面條件이 0 보다 작다.

2. 模型의 構成

Chu의 Green-Ampt 浸透式을 이용하여 電算模型을 작성하였으며, 모형의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 모형의 入力資料는 ① 實驗場所 및

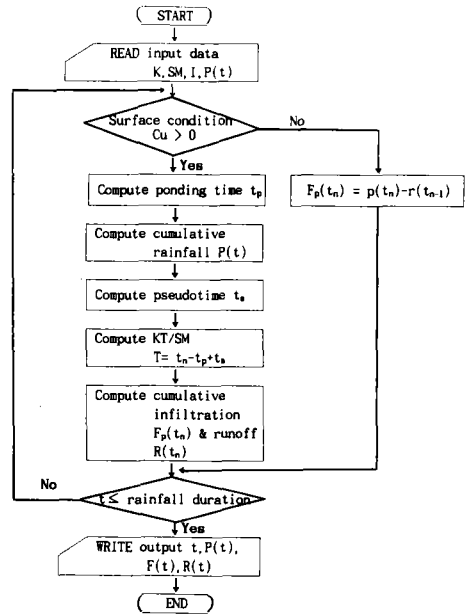


Fig. 1. Flow chart of the effective rainfall model using Green-Ampt infiltration equation

土壤의 種類 ② 降雨발생일 ③ 수치해법 조절변수 ④ Green-Ampt 媒介變數 ⑤ 초기토양함수량 ⑥ 實測地表流出深 ⑦ 時間別 降雨資料 등이며, 출력내용은 ① 入力資料 ② 地表貯留條件, 貯留開始時間, 假象時間, 累加浸透量, 累加地表流出量, 累加浸透깊이 등이다.

IV. 圃場實驗 및 資料

본 實驗은 1989년 4월~8월 동안 京畿道 水原市 農村振興廳 農業技術研究所 圃場에서 실시하였으며, 降雨資料는 實驗圃場에서 약 0.8km 떨어진 水原測候所의 資料를 사용하였다. 圃場土壤의 理化學的 特性은 Table-1과 같다. 作物의 뿌리성장 조사는 高추, 콩, 참깨, 배추 등 4가지 作物을 대상으로 하였다.

Table-1. Physiochemical properties of the experimental soil

| Specific gravity | pH | O.M. (%) | Porosity (cm ³ /cm ³) | Mechanical analysis | | | Soil classification |
|------------------|-----|----------|--|---------------------|------|------|---------------------|
| | | | | Sand | Silt | Clay | |
| 2.59 | 6.7 | 1.11 | 0.44 | 70 | 22 | 8 | sandy loam |

Table-2. The Kolmogorov-Smirnov normal and log-normal test for saturated hydraulic conductivity(K) on subsoil

| m | K | F(K) | F ₀ (K) | A ₁ | B ₁ | Y | F(Y) | F ₀ (Y) | A ₂ | B ₂ |
|----|-------|------|--------------------|----------------|----------------|------|------|--------------------|----------------|----------------|
| 1 | 2.89 | 0.04 | — | — | — | 1.06 | 0.04 | — | — | — |
| 2 | 4.07 | 0.08 | — | — | — | 1.40 | 0.08 | — | — | — |
| 3 | 4.57 | 0.12 | 0.04 | 0.08 | 0.04 | 1.52 | 0.12 | 0.03 | 0.09 | 0.05 |
| 4 | 4.70 | 0.15 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 1.55 | 0.15 | 0.05 | 0.10 | 0.07 |
| 5 | 4.78 | 0.19 | 0.08 | 0.11 | 0.07 | 1.56 | 0.19 | 0.06 | 0.13 | 0.09 |
| 6 | 5.50 | 0.23 | 0.22 | 0.01 | 0.03 | 1.70 | 0.23 | 0.25 | 0.02 | 0.06 |
| 7 | 5.64 | 0.27 | 0.26 | 0.01 | 0.03 | 1.73 | 0.27 | 0.30 | 0.03 | 0.07 |
| 8 | 5.72 | 0.31 | 0.28 | 0.03 | 0.01 | 1.74 | 0.31 | 0.33 | 0.02 | 0.06 |
| 9 | 6.12 | 0.35 | 0.40 | 0.05 | 0.09 | 1.81 | 0.35 | 0.48 | 0.13 | 0.17 |
| 10 | 6.30 | 0.38 | 0.46 | 0.08 | 0.11 | 1.84 | 0.38 | 0.55 | 0.17 | 0.20* |
| 11 | 6.40 | 0.42 | 0.49 | 0.07 | 0.11 | 1.86 | 0.42 | 0.58 | 0.16 | 0.20* |
| 12 | 6.40 | 0.46 | 0.49 | 0.03 | 0.07 | 1.86 | 0.46 | 0.58 | 0.12 | 0.16 |
| 13 | 6.46 | 0.50 | 0.51 | 0.01 | 0.05 | 1.87 | 0.50 | 0.60 | 0.10 | 0.14 |
| 14 | 6.51 | 0.54 | 0.53 | 0.01 | 0.03 | 1.87 | 0.54 | 0.62 | 0.08 | 0.12 |
| 15 | 6.69 | 0.58 | 0.56 | 0.02 | 0.02 | 1.90 | 0.58 | 0.68 | 0.10 | 0.14 |
| 16 | 6.72 | 0.62 | 0.57 | 0.05 | 0.01 | 1.91 | 0.62 | 0.69 | 0.07 | 0.11 |
| 17 | 6.75 | 0.65 | 0.58 | 0.07 | 0.04 | 1.91 | 0.65 | 0.70 | 0.70 | 0.08 |
| 18 | 6.84 | 0.69 | 0.61 | 0.08 | 0.04 | 1.92 | 0.69 | 0.73 | 0.04 | 0.08 |
| 19 | 6.93 | 0.73 | 0.64 | 0.09 | 0.05 | 1.94 | 0.73 | 0.76 | 0.03 | 0.07 |
| 20 | 7.11 | 0.77 | 0.70 | 0.07 | 0.03 | 1.96 | 0.77 | 0.81 | 0.04 | 0.08 |
| 21 | 7.43 | 0.81 | 0.80 | 0.01 | 0.03 | 2.01 | 0.81 | 0.89 | 0.08 | 0.12 |
| 22 | 8.75 | 0.08 | 1.00 | 0.15 | 0.19* | 2.17 | 0.85 | 1.00 | 0.15 | 0.19 |
| 23 | 9.02 | 0.88 | — | — | — | 2.20 | 0.88 | — | — | — |
| 24 | 9.17 | 0.92 | — | — | — | 2.22 | 0.92 | — | — | — |
| 25 | 12.53 | 0.96 | — | — | — | 2.53 | 0.96 | — | — | — |

Note. $F(K) = \frac{m}{N+1}$ $A_1 = F(K_i) - F_0(K_i)$ $B_1 = F(K_{i-1}) - F_0(K_i)$ $A_2 = F(Y_i) - F_0(Y_i)$ $B_2 = F(Y_{i-1}) - F_0(Y_i)$

1. Green-Ampt 浸透式的 媒介變數 決定

平均透水係數와 平均毛管水頭를 결정하기 위하여 Bouwer(1966)의 Air-entry permeameter를 제작하여 실험을 실시하였다. 反復 測定한 平均透水係數, 平均毛管水頭의 값들은 土壤의 空間的 變異(spatial variation of soil)로 인하여

넓은 범위에 걸쳐 분포하므로 實驗土壤에 대한 代表值를 選定하는데 문제점이 있다. 따라서, 觀測된 資料가 어떤 分布型에 속하는지 檢討하였고, 이에 대한 適正 檢定은 Kolmogorov-Smirnov 方法을 택하였다.

飽和透水係數는 Table-2와 같이 正規分布,

對數正規分布의 $D(=Max|F(x)-F_0(x)|)$ 가 각각 0.19, 0.20으로서 자료수 25개에 대한 5% 유의수준치 0.264보다 작으므로 K-S 檢定 결과 두 分布型이 모두 인정되지만, D가 작은 正規 分布型을 택하여 飽和透水係數는 6.56cm/hr, 平均透水係數인 3.28cm/hr로 결정하였다.

平均毛管水頭는 Table-3과 같이 正規分布, 對數正規分布의 D가 각각 0.25, 0.30으로서, 자료수 20개에 대한 5% 유의수준치 0.294와 비교하여 보면 正規分布型이 인정된다. 따라서 濕潤先端에서의 平均毛管水頭는 3.00cm로 결정 하였다.

2. 初期 土壤含水量의 測定

降雨前の 土壤含水量을 결정하기 위하여 디

지탈식 tensionmeter로 土壤含水量을 매일 측정하였다. 土壤水分 特性曲線에 의한 관계로부터 土壤含水量은 식(32)를 사용하여 계산하였다.

$$S_M = \exp(4.56 - 0.33 \ln C_s) \dots\dots\dots(32)$$

여기서, S_M : 土壤含水量(cm^3/cm^3)

C_s : tensionmeter에 의한 土壤空隙 壓力(cm)

3. 地表 流出

圃場에서의 浸透量을 계산하기 위하여 직경 1.0m의 流出 pot에 自己水位計를 부착시킨 地表流出 측정장치를 제작하였다. 地表流出 區域 내에서의 地表面은 수평기를 사용하여 전체적

Table-3. The Kolmogorov-Smirnov normal and log-normal test for average capillary pressure (S) on subsoil

| m | K | F(K) | F ₀ (S) | A ₁ | B ₁ | Y | F(Y) | F ₀ (Y) | A ₂ | B ₂ |
|----|------|------|--------------------|----------------|----------------|-------|------|--------------------|----------------|----------------|
| 1 | 0.50 | 0.05 | - | - | - | -0.69 | 0.05 | - | - | - |
| 2 | 0.59 | 0.10 | - | - | - | -0.53 | 0.10 | - | - | - |
| 3 | 0.65 | 0.14 | 0.01 | 0.13 | 0.09 | -0.43 | 0.14 | 0.00 | 0.14 | 0.10 |
| 4 | 1.05 | 0.19 | 0.06 | 0.13 | 0.08 | 0.05 | 0.19 | 0.09 | 0.10 | 0.05 |
| 5 | 1.09 | 0.24 | 0.07 | 0.17 | 0.12 | 0.09 | 0.24 | 0.10 | 0.14 | 0.09 |
| 6 | 1.16 | 0.29 | 0.08 | 0.21 | 0.16 | 0.15 | 0.29 | 0.13 | 0.16 | 0.11 |
| 7 | 1.34 | 0.33 | 0.11 | 0.22 | 0.18 | 0.29 | 0.33 | 0.20 | 0.13 | 0.09 |
| 8 | 1.69 | 0.38 | 0.18 | 0.20 | 0.15 | 0.52 | 0.38 | 0.35 | 0.03 | 0.02 |
| 9 | 1.71 | 0.43 | 0.18 | 0.25 | 0.20 | 0.54 | 0.43 | 0.36 | 0.07 | 0.02 |
| 10 | 1.94 | 0.48 | 0.23 | 0.25 | 0.20 | 0.66 | 0.48 | 0.45 | 0.03 | 0.02 |
| 11 | 2.18 | 0.52 | 0.29 | 0.23 | 0.19 | 0.78 | 0.52 | 0.54 | 0.02 | 0.06 |
| 12 | 2.87 | 0.57 | 0.48 | 0.09 | 0.04 | 1.05 | 0.57 | 0.75 | 0.18 | 0.23 |
| 13 | 3.46 | 0.62 | 0.58 | 0.04 | 0.01 | 1.24 | 0.62 | 0.87 | 0.25 | 0.30* |
| 14 | 3.68 | 0.67 | 0.64 | 0.03 | 0.02 | 1.30 | 0.67 | 0.90 | 0.23 | 0.28 |
| 15 | 3.91 | 0.71 | 0.70 | 0.01 | 0.03 | 1.36 | 0.71 | 0.93 | 0.22 | 0.26 |
| 16 | 5.08 | 0.76 | 0.92 | 0.16 | 0.21 | 1.63 | 0.76 | 1.00 | 0.24 | 0.29 |
| 17 | 6.07 | 0.81 | 0.99 | 0.18 | 0.23 | 1.80 | 0.81 | - | - | - |
| 18 | 6.77 | 0.86 | - | - | - | 1.91 | 0.86 | - | - | - |
| 19 | 7.04 | 0.90 | - | - | - | 1.95 | 0.90 | - | - | - |
| 20 | 7.13 | 0.95 | - | - | - | 1.96 | 0.95 | - | - | - |

Note. $F(S) = \frac{m}{N+1}$ $A_1 = F(S_i) - F_0(S_i)$ $B_1 = F(S_{i-1}) - F_0(S_i)$ $A_2 = F(Y_i) - F_0(Y_i)$ $B_2 = F(Y_{i-1}) - F_0(Y_i)$

으로 지표면의 傾斜와 粗度가 생기지 않도록 처리하였기 때문에 경사와 조도의 효과는 무시하였다.

'89년 6월 5일~8월 30일 동안의 9개 降雨 事象에 대한 시간별 流出을 측정하였다.

4. 뿌리 成長

作物別 뿌리성장 調査는 3개년('87~'89)간 에 걸쳐 實施하였다. 調査方法은 토양을 제거 하면서 最大深度를 찾아내는 굴삭법을 이용하였으 며, 播種後 일주일 간격으로 조사하였다. Borg 함수에 의한 作物別 뿌리성장함수는 다음과 같다.

$$\text{고추} : RDr = 0.72 + 0.45 \sin(3.03 Tr - 1.47) \dots\dots\dots (33)$$

$$\text{콩} : RDr = 0.59 + 0.30 \sin(3.03 Tr - 1.47) \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{참깨} : RDr = 0.61 + 0.51 \sin(3.03 Tr - 1.47) \dots\dots\dots (35)$$

$$\text{배추} : RDr = 0.45 + 0.47 \sin(3.03 Tr - 1.47) \dots\dots\dots (36)$$

V. 模型의 適用

1. 模型의 檢定

實驗期間 동안에 측정한 地表流出量과 模型에 의하여 模擬發生된 地表流出量을 정리하면 Table-4와 같다. 9개 地表流出量에 대한 實測值과 模擬發生值 사이의 相關係數(r)는 0.977로서 높은 有意性을 나타내었다.

한편 7월 25일과 8월 21일의 시간별 실측 지표유출량과 모의발생 지표유출량을 비교하면 Fig. 2~Fig. 3과 같다. 7월 25일의 결과를 보면 流出初期에 약 2.0mm의 流出量의 차이를 보이다가 6시~8시 동안의 降雨에 의하여 5.0mm 정도의 유출량이 적게 모의발생되었다. 8월 21

Table-4. Observed and simulated surface runoff('89/6/5~'89/8/22)

| Time (mon./day) | Rainfall (mm) | Surface runoff unit : mm/day | |
|--------------------|------------------|---------------------------------|-----------|
| | | Observed | Simulated |
| 6/05 | 44.5 | 0.20 | 0.18 |
| 6/29 | 37.3 | 0.43 | 0.40 |
| 7/11 | 31.8 | 0.17 | 0.04 |
| 7/16 | 10.6 | 0.17 | 0.10 |
| 7/25 | 60.4 | 2.96 | 2.50 |
| 8/12 | 28.5 | 1.11 | 0.65 |
| 8/20 | 25.3 | 0.17 | 0.68 |
| 8/21 | 107.9 | 6.37 | 2.65 |
| 8/22 | 29.8 | 0.84 | 1.01 |

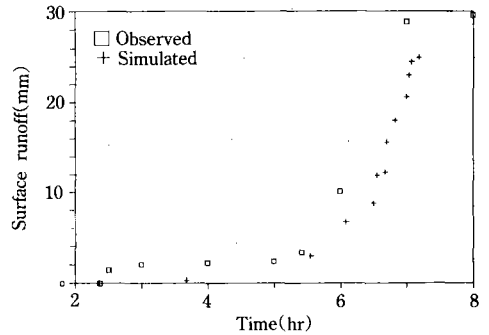


Fig. 2. Observed and simulated surface runoff(7/25/89)

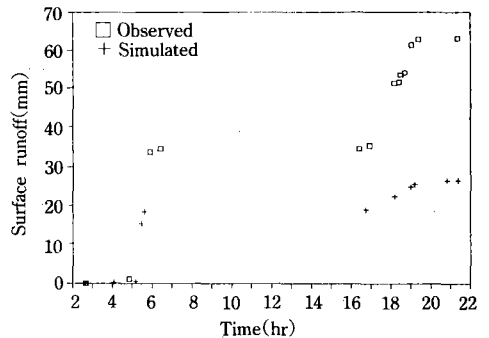


Fig. 3. Observed and simulated surface runoff(8/21/89)

일의 결과를 보면 流出初期의 5시~7시 동안에 약 15.0mm의 유출량 차이를 보이다가 17시~19

시 동안의 강우에 의하여 총 37.2mm의 流出量이 적게 모의발생되었다.

이와 같이 8월 21일의 流出量이 적게 모의 발생된 이유는 본 모형의 기본가정 즉, 강우 중에는 土壤의 物理的인 특성인 透水係數, 土壤空隙壓力 등이 변하지 않는 것으로 간주하였지만, 실제로는 降雨에너지에 의한 地表密封 (surface sealing), 地表殼(surface crust)의 形成 등으로 地表面에서의 水理特性이 계속 변화하기 때문에 생각된다.

2. 作物別 有效雨量의 計算

3개년('88~'90)간의 강우자료로 모의발생된 地表流出을 이용하여 作物別 有效雨量을 계산하였다. 分布을 위하여 作物別 生育時間은 Table-5와 같이 유묘기 1단계, 개화기 2단계 및 성숙기 2단계의 총 5段階로 區分하였다.

地表流出과 作物의 뿌리成長函數를 利用하여

Table-5. Cumulative days of each crop stages for 4 upland crops

| Stage Crop No. | Vegetation | | Development | | Maturation | |
|-------------------|------------|----|-------------|-----|------------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Red pepper | 34 | 67 | 84 | 115 | 145 | |
| Soybean | 23 | 43 | 65 | 83 | 110 | |
| Sesame | 19 | 36 | 55 | 85 | 104 | |
| Chinese cabbage | 18 | 28 | 48 | 68 | 84 | |

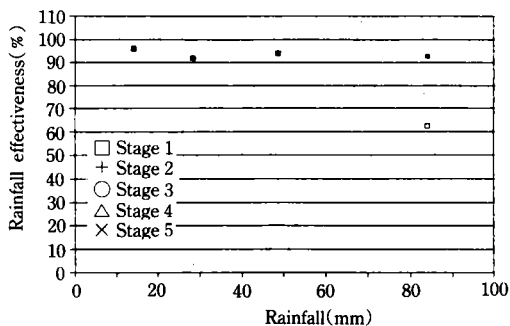


Fig. 4. Rainfall effectiveness during growing period of red pepper

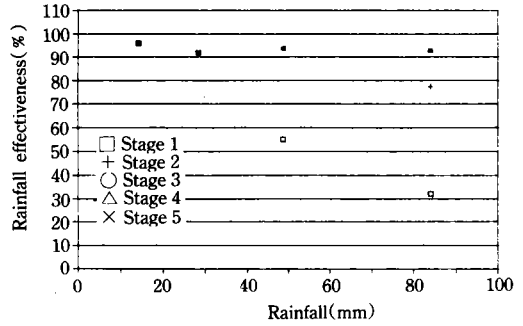


Fig. 5. Rainfall effectiveness during growing period of soybean

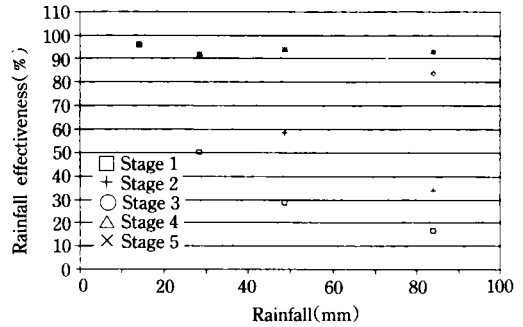


Fig. 6. Rainfall effectiveness during growing period of sesame

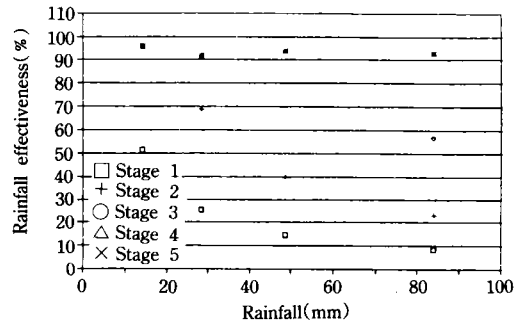


Fig. 7. Rainfall effectiveness during growing period of Chinese cabbage

作物別 降雨量에 따른 降雨의 有效率을 구한 結果는 Fig. 4~Fig. 7과 같다.

고추에 대한 結果를 보면 生育 1段階에서 降雨量이 증가할수록 강우의 有效율이 감소하

였으며, 生育 2段階 이후에는 降雨量에 관계없이 안정된 강우의 유효율을 보여 주었다. 고추의 降雨의 유효율이 全 生育期에 걸쳐 높게 나타난 것은 他作物의 播種과는 달리 移植을 하기 때문에 生育初期에 일정 깊이의 根群域을 가지기 때문으로 생각된다.

콩의 경우는 生育 1段階에서 강우량이 증가할수록 강우의 유효율이 급속히 감소하였으며, 生育 2段階부터는 강우의 유효율이 전반적으로 안정된 값을 보였다.

참깨의 경우는 生育 2段階까지 강우량이 증가할수록 降雨의 유효율이 급속히 감소하였으며, 생육 3단계 이후부터는 안정된 값을 보였다.

배추의 경우는 生育 1段階에서 50% 이하의 낮은 降雨의 유효율을 보이면서 生育 3段階까지 降雨량이 증가할수록 降雨의 유효율이 급속히 감소하는 것을 볼 수 있었다.

콩은 생육 1단계, 참깨는 생육 2단계, 배추는 생육 3단계까지 降雨量에 따라 降雨의 유효율에 영향을 미치고 있는데, 이는 파종후 동일시기의 뿌리깊이를 비교하여 볼 때 참깨보다는 콩이, 배추보다는 참깨의 뿌리成장이 빠르기 때문으로 생각된다.

VI. 結 論

밭에서의 有效雨量을 보다 정확하게 산정하여 보고자 Chu(1978)의 Green-Ampt 浸透式을 이용한 降雨의 有效雨量 算定模型을 開發하였다. 土壤이 사양토인 조건에서 圃場實驗을 통하여 Green-Ampt 浸透式의 媒介變數인 平均透水係數, 平均毛管水頭를 決定하였으며, 模型에 의해 模擬發生된 地表流出量과 實測 地表流出量을 比較하므로써 開發된 模型의 適用性을 검토하였다. 고추, 콩, 참깨 및 배추 등 作物의 뿌리 成長函數를 이용하여 作物別 降雨의 유효율을 산정하였으며, 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. Green-Ampt 媒介變數인 濕潤區域에서의 平均透水係數는 3.28cm/hr, 濕潤先端에서의 平均毛管水頭는 3.00cm로 나타났다.

2. 고추, 콩, 참깨 및 배추의 뿌리성장과정은 Borg(1986)의 sin 函數로 표면이 가능하였다.

3. '89년 6월~8월 동안의 9개의 강우사상에 대한 實測 地表流出量과 模擬發生 地表流出量 간의 相關係數는 0.977로서 높은 유의성을 보였다.

4. 作物의 뿌리성장함수를 이용하여 降雨量에 대한 降雨의 유효율을 生育時期別로 모의발생하였는 바, 고추, 콩은 생육 1段階인 播種後 34, 23일까지, 참깨는 생육 2단계인 파종후 36일까지, 배추는 生育 3단계인 48일까지 降雨量이 증가할수록 강우의 유효율은 指數函數의 형태로 감소하는 것을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

1. Borg, H. and D. W. Grimes, 1986, Depth Development of Roots with Time : An Empirical Description, Trans. of the ASAE, 29 (1), pp. 194-197.
2. 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.
3. Brakensiek, D. L., 1977, Estimating the Effective Capillary Pressure in the Green-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. Brooks, R. H. and A. T. Corey, 1964, Hydraulic Properties of Porous Media, Colorado

- State Univ., Hydrology Paper No. 3, pp. 27.
6. Buckingham, E., 1907, Studies on the Movement of Soil Moisture, U. S. Dept. Agric. Soils Bull. 38.
 7. Chow, V. T., D. R. Maidment and L. W. Mays, 1988, Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, pp. 572.
 8. Chu, S. T., 1978, Infiltration During and Unsteady Rain, Water Resour. Res., 14(3), pp. 463-365, 470.
 9. Fok, Yu-Si, 1975, A Comparison of the Green-Ampt and Philip Two-Term Infiltration equations, Trans. of the ASAE, 18, pp. 1073-1075.
 10. Green, W. H. and G. A. Ampt, 1911, Studies in Soil Physics, I. The Flow of Air and Water Through Soils, J. Agric. Sci., 4, pp. 1-24.
 11. Mein, R. G. and C. L. Larson, 1973, Modeling Infiltration During a Steady Rain, Water Resour. Res., 9(2), pp. 384-394.
 12. Smith, R. E., 1973, Comments on 'Modeling Infiltration During a Steady Rain' by Russel G. Mein and Curtis L. Larson, Water Resour. Res., 9(5) pp. 1475.
 13. Swartzendruber, D., 1974, Comments on 'Modeling Infiltration During a Steady Rain' by Russel G. Mein and Curtis L. Larson, Water Resour. Res., 10(4), pp. 888.
 14. Swartzendruber, D., 1974, Infiltration of Constant-flux Rainfall into Soil as Analysed by the Approach of Green-Ampt, Soil Sci., 117(5), pp. 272-281.
 15. 權純國 外, 1985-1986, 流出量推定 電算模型 開發, 서울大學校 農科大學 附屬 農業開發 研究所.
 16. 鄭夏禹, 류기희, 1983, 밭 灌溉를 위한 透水方程式의 實驗的 考察, 서울大 農學研究, 8(1), pp. 103-112.
 17. 鄭夏禹 外, 1987-1990, 밭作物消費水量 算定方法 定立研究, 서울大 農大 附屬 農業開發 研究所.