

排水改善工法開發에 關한 研究(Ⅱ)

Studies on the Development of Improved Subsurface Drainage Methods

— 畚圃場에서의 물 收支 模型 —

— Development of the Water Budget Model in the Water-logged Paddy Field —

金 哲 會* · 李 根 厚* · 柳 時 昶* · 徐 元 明*
Chul Hoe Kim, Keun Hoo Lee, Si Chang You, Won Myung Suh

1. 序 論

圃場은 農作物이 栽培되는 場所이므로 作物에 좋은 生育環境이 保存되는 것과 二 栽培管理를 圓滑하게 할 수 있도록 하는 農作業環境이 造成되는 일의 두가지 條件을 具備하지 않으면 안된다⁽¹⁴⁾.

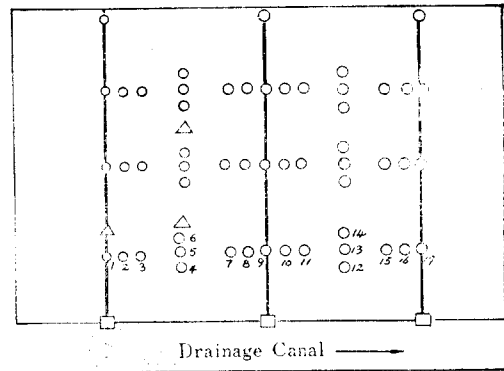
生育環境은 地溫, 氣溫, 土壤水分, 土壤空氣 등의 物理的 條件 및 有害成分 등의 化學的 條件에 따라 左右되며 그 最適狀態와 作物의 種類와 生育時期, 其他의 條件에 따라 다르다⁽¹⁵⁾. 農作業環境에 있어서는 土壤이 作業者의 通行 및 作業機의 走行等 農作業에 支障을 주지 않는 程度의 硬度가 必要하다. 이들 中에는 溫度 化學的 成分, 및 地形立地條件의 影響도 있겠지만 土壤水分에 의하여 直接 間接의 影響을 받는 일이 많다. 따라서 圃場의 土壤水分의 適正調節에 따라 農作物 生育環境을 圖謀하고 農作業機械의 作業能率을 높이 주기 위하여 水分過剩狀態로 부터 適正化하는 것이 排水인 것이다. 則 適正土壤水分을 만들어 주기 爲하여 人爲的으로 地下水位를 낮추어 주므로써 根群域의 土壤을 適當히 乾燥 시켜 주는 일이라고 生覺할 수가 있다⁽¹⁶⁾.

複雜한 물의 水文의 循環 過程에서 降雨, 流出, 土壤水分, 地下水의 變動 및 暗渠排水 등의 諸 現象의 물 收支 關係로 부터 土壤水分의 變動을 測定하는 일이 可能하게 되는 것이다.

따라서 畚圃場의 排水는 窮極의으로 畚裏作을 目標로 한다는 前題下에 非灌漑期를 對象으로 數學的인 물 收支 模型을 開發하기 爲하여 各 要素들을 調査分析하였다.

2. 材料 및 方法

1) 試驗圃場



Legend : \triangle : Gypsum block
 \square : Relief well
 \circ : Drains
 \blacksquare : Flume

Fig. 11. Layout of Measuring Devices in Test Plot.

圃場의 位置는 慶南 晉陽郡 晉城面 泉谷里(33.6ha)이며 圃場의 配置는 Fig. 11.과 같고 피조메타의 設置

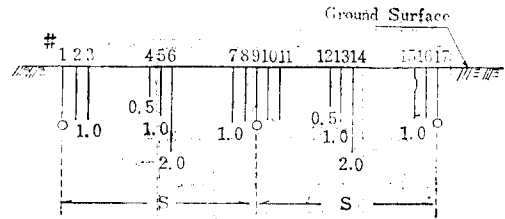


Fig. 12. Profile of Piezometer arrangement

는 管暗渠上(1), 暗渠管에서 0.4m의 거리(2), 暗渠管에서 S/8距離(3), 暗渠管에서 S/2距離에 0.5m길이(4), 暗渠管에서 S/2距離에 1.0m길이(5)와 2.0m길이

* 慶尙大學 農工科
 [學會誌(Vol. 21 No. 3) pp 120 繼續]

(6)로 埋設하였다. 開渠開發區에서는 開水路에서 2m, 25m, 50m, 75m, 100m의 距離에 Piezometer를 設置하였다.

2) 土壤의 性質

* 母材: 河成沖積層

Table. 11. Physical Properties of Soil

Item \ Depth	Soil texture	Bulk density	Void Ratio(%)	Coefficient of Permeability	Soil Series	Drainage and Premeability
50cm	Silty clay loam	1.64	3.43	4.935×10^{-6}	Pyung taek	Poorly drained
100cm	"	1.43	4.59	2.993×10^{-6}	"	"

3) 調查方法

- ① 降雨量.....自己雨量計
- ② 流出量.....一定容器使用.....1日2回

3. 물 收支模型

圃場에서의 물의 流入, 流出은 Fig. 13. 과 같이 模式化 할 수 있다.

流入하는 물은 降雨(R), 灌溉水(I), 圃場外部에서 的 地下水流入水(G₁)이고 流出水는 蒸發散(Et+T), 地表流出水(S_o), 地下流出水(Q) 및 降下浸透(G_o)가 있다⁽²⁴⁾.

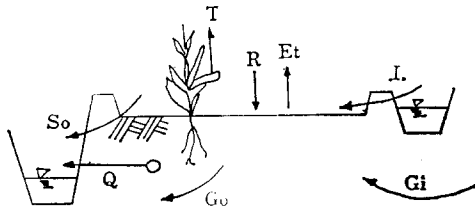


Fig. 13. Schematic Diagram for Thorough Hydrological Field Water Balance

- ③ 蒸發散量.....四角堰設置 Lysimeter設置... "
- ④ 地下水位.....Piezometer設置.....1日 2回
- ⑤ 土壤水分.....Gypsumblock.....3層位 2反復

圃場內의 土壤水分量은 이들 要素들의 平衡(balance)에 依하여 決定되므로 畜에서 的 物收支(Water balance)라 한다.

Fig. 14. 에서 任意의 期間동안의 物收支를 나타내는 貯溜量 方程式은

$$R - (D_2 - D_1) - (E + T) - (G_2 - G_1) - S = 0 \dots \text{式}(14)$$

여기서 R=降雨量

D₁=流出量

D₂=流入量

E=土壤面蒸發量

T=蒸散量

G₁=地下水流入量

G₂=地下水流出量

S=土壤中貯溜量

即, 地表面 貯溜量+土壤中貯溜量=(降雨量-地表流出量+灌溉水量+土壤面蒸發量)+水平方向의 滲透量-垂直方向의 滲透量-排水量으로 表示할 수 있다.

1) 土壤水分含量的 數學的 模型

廣域畜에서 土壤中的 水分의 移動은 動水句配, 뿌리 的 吸水力, 土壤의 擴散係數에 左右되는데 外水位의 影響을 無視한다면 水垂方向의 水의 移動은 降雨量 및 蒸發量測定에 依한 土壤水分 未洽量으로 算定하는 方法이 있다⁽²⁵⁾.

流域으로부터 的 土壤의 初期含水量條件을 量的으로 表示하는 方法에는 先行降水指數, 豪雨初期의 地下水 流量으로 算定하는 方法과 蒸發量測定에 依한 土壤水分 未洽量으로 算定하는 方法이 있다.

따라서 流域으로 부터 的 土壤의 初期含水量條件을 量的으로 表示하는 方法으로 蒸發散量 資料를 使用하면 便利하다. 蒸發散現象은 土壤으로 부터 水分을 繼

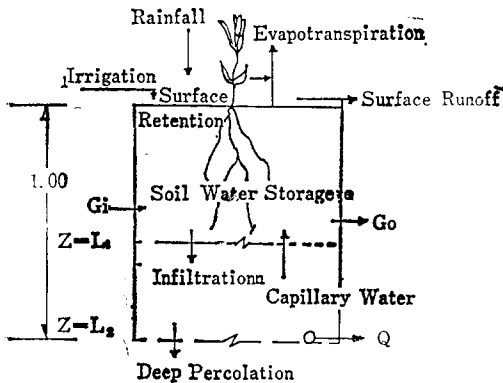


Fig. 14. Schematic Diagram Describing Mathematical Model for Estimating Soil Water Depletion in Root zone

續離脫시키는 反面에 降水는 水分을 供給하므로 이 두 가지 量을 繼續하여 測定하던 土壤水分未洽量을 算定할 수 있다.

여기에서는 물 收支의 數學的 解析을 위하여 土壤水分未洽量法을 導入하였다.

土壤水分 未洽量을 D 로 表示하면 圃場容水量(F_c)와 現在の 土壤水分含量(SM)의 差로 定義할 수 있다.

어느 時期에 根群域에서 土壤水分(SM_t)을 計量하는 方法은 前期의 土壤水分의 量(SM_{t-1})에다 前期 이래 毛細管上向移動(Ct) 有効雨量(Re), 灌溉水量(It)을 加하고 蒸發散量(ET) 및 滲透 및 流出量을 (Wdt) 빼주던 된다. (16)

即,

$$SM_t = SM_{t-1} + Re + It + Ct - Et - Wdt \dots (15)$$

但, $PWP \leq SM_t \leq F_c$ 가 된다.

따라서 土壤水分未洽量은

$$D = F_c - SM_t \dots (16)$$

와 같다.

한편 물 收支解析을 容易하게 하기 위하여 水分未洽量을 貯溜量方程式에 適用하여 數式으로 誘導하기 爲하여 水平方向의 滲透를 無視하면(20) 물 收支模型으로서 n 日後의 土壤水分未洽量 D 는

$$D = \sum_{i=1}^n (Et - Re - I + Wd) \dots (17)$$

이다.

여기서 Et 는 日別蒸發散量 (mm), Re 는 日別有効雨量 (mm), I 는 有効灌溉水量 (mm), Wd 는 日別排水量 (mm)이다.

여기서 $i=1$ 은 充分한 降雨나 灌溉에 依하여 土壤水分 含量이 圃場容水量에 達하여 $D=0$ 가 되는 最初日

이며 n 는 推定日數이다.

2) 蒸發數量 決定

(1) 潛在蒸發散量(Et_p)

植物-土壤水分量 模型의 境遇는 實蒸發量의 計算法 根群域에서 土壤水分量의 計算法, 各時期別 作物生長에 關係되는 供給方法과 그 期間의 水分應力の 增減等 이 包含되어야 한다. 그 中에서도 가장 重要한 因子는 蒸發散量이다(21). 이 量을 決定하자면 Lysimeter, Pot, Chamber, Tensionmeter, Gypsum block 等を 使用하여 實測하는 方法과 潛在蒸發量을 導入하여 決定하는 方法이 있다. 完全한 實測值가 準備되어 있지 않는 곳에서는 微氣象要素들을 利用하여 算定하는 間接的 方法이 바람직 한 것이다(22). 土壤水分含量이 充分한 境遇作物의 蒸發散量은 自由水面蒸發量과 高度의 正相關을 보임은 많은 實驗結果에서 立證되었고 作物은 生育 期間中 最盛期를 除外하고는 自由水面蒸發量에 못미치기 때문에 自由水面蒸發量을 潛在蒸發量의 算定에 利用함이 妥當할 것이다.

우리 나라에서 蒸發散量의 公式으로 利用되어온 것은 Blaney and Criddle 公式(2), 殿(1976)^{33,34} 등이 Hargreaves式을 槓(1976)^{33,34} 등은 $B-C$ 公式 Penman, Jensen Haise, Thornth-Waite, Turc 등 4個值의 中間程度라고 發表하였으며 金(1977)^{35,36}은 Penman에 의한 結合法은 우리나라에서 適用성이 매우 높다고 하였으며 具(1977)³⁷는 蒸發計 蒸發量의 利用은 20年 內외의 比較的 短期間의 實測值로 부터 그 統計量을 基準으로 分析할 수 있다. 筆者는 水原地方에 이어서 晉州地方에 代表的인 潛在蒸發量의 推定公式을 選擇할 目的으로 自由水面 蒸發量과의 關係를 比較하여 보았다. 實測值와 컴퓨터에 의한 計算值의 旬別 比較值는 Table. 12. 와 같다.

Table-12. Evapotranspiration Observed and Those Calculated by Various Method

Month	Class Methods	observed value		Calculate value				
		Small	Large pan	Penman	Jensen-Haise	Blaney	Thorth-waite	Turc
1	F	8.3		6.7	2.6	5.6	—	43.4
	M	20.7		22.4	5.2	4.5	—	44.9
	L	17.9		18.6	4.0	3.6	—	43.6
	S.T	46.9		47.7	11.8	13.7	—	131.9
2	F	11.6		9.0	3.8	7.3	—	44.2
	M	23.6		25.0	10.3	9.5	—	44.2
	L	19.4		20.3	7.8	8.1	—	41.5
	S.T	54.6		54.3	1.9	24.9	—	129.9

3	F	14.8		12.3	8.0	18.4	—	45.3
	M	23.7		30.4	16.6	16.6	—	46.2
	L	24.7		23.9	16.8	25.5	—	45.3
	S.T	68.2		66.6	41.4	60.5	—	136.8
4	F	21.9	24.1	17.9	17.2	49.2	0.11	47.0
	M	35.6	22.4	37.0	30.0	31.5	0.29	45.0
	L	29.3	26.1	27.6	2.66	46.9	0.47	46.2
	S.T	86.8	72.6	72.5	73.8	118.6	0.87	138.2
5	F	27.7	27.9	22.7	22.7	40.1	0.69	44.3
	M	43.8	32.2	44.1	40.5	44.6	1.19	46.0
	L	23.6	33.2	26.9	29.7	57.1	1.69	45.4
	S.T	100.1	93.3	93.7	92.9	141.8	3.57	135.7
6	F	29.0	30.0	26.6	30.5	57.1	2.34	44.4
	M	42.1	28.5	41.9	42.1	41.8	2.92	43.2
	L	31.6	31.8	26.3	31.3	65.4	4.03	44.6
	S.T	102.7	90.3	94.8	103.9	164.3	9.29	132.2
7	F	31.4	27.8	29.3	32.8	51.6	5.80	41.4
	M	40.3	27.6	41.4	44.3	40.5	7.04	41.0
	L	33.7	35.4	29.2	35.6	85.7	9.52	45.6
	S.T	105.4	90.8	99.9	112.7	177.8	12.36	128.0
8	F	42.3	35.4	40.8	47.2	50.7	10.20	40.9
	M	52.0	34.9	54.0	59.2	70.0	8.92	47.4
	L	25.5	28.3	22.4	27.6	67.4	6.59	43.0
	S.T	119.8	98.6	117.2	133.0	218.1	25.71	131.3
9	E	35.0	24.8	34.1	37.7	52.4	5.35	42.7
	M	38.2	24.8	39.0	39.7	49.9	3.18	42.7
	L	20.3	23.4	15.9	21.0	56.4	1.82	43.7
	S.T	93.5	73.0	89.0	98.4	158.7	10.35	129.1
10	F	30.4	21.1	31.2	31.5	42.3	1.06	44.0
	M	33.6	19.0	35.8	33.0	38.0	0.68	45.3
	L	15.1	16.6	11.7	14.7	42.0	0.28	43.9
	S.T	79.1	56.7	78.7	79.2	122.3	2.02	133.2
11	F	26.0		27.5	22.5	26.6	0.12	43.4
	M	24.5		26.8	17.8	19.4	0.03	43.3
	L	10.4		7.9	7.1	19.7	—	45.3
	S.T	50.9		61.2	47.4	65.7	0.15	132.0
12	F	21.7		24.0	11.0	10.9	—	43.1
	M	20.7		20.7	9.4	9.9	—	43.4
	L	8.8		7.4	3.1	6.5	—	42.3
	S.T	51.2		52.1	23.5	27.3	—	128.8

Table-13. Ten-day N-& Qa-Values in JinJu Area

Item 10days Month	Qa-Value			N-Value		
	First	Mid	Last	First	Mid	Last
Jan.	404.84	427.43	462.43	9.88	10.05	10.29
Feb.	505.02	555.21	605.39	10.61	10.54	11.27
Mar.	652.98	700.76	750.94	11.58	11.97	12.30
Apr.	798.72	846.49	884.27	12.70	13.08	13.41
May	917.04	944.82	765.00	13.72	14.01	14.25
Jun	975.18	982.77	782.77	14.43	14.52	14.52
JUL.	975.18	965.18	944.82	14.47	14.31	14.09
Aug.	919.63	886.86	849.08	13.79	14.49	13.17
Sep.	806.31	758.53	708.35	12.78	14.42	12.07
Oct.	655.57	607.80	555.21	11.68	11.32	10.97
Nov.	510.02	467.43	432.25	10.62	10.33	10.09
Dec.	407.25	392.25	392.25	9.91	9.80	9.80

N: Possible Sunshine Hours

Q_A: Extra-Terrestrial radiation(cal/cm²/day)

Fig. 15는 Penman式的 推定値와 小型 Pan(直徑 20×높이10cm), 大型 Pan(直徑 120×높이 25cm)의 自由水面蒸發量과의 比較이며 小型 Pan 蒸發量이 高度

의 正相關을 보여 주었으며 Penman値는 大型蒸發量 보다는 적은 값을 보여줌을 알 수 있다.

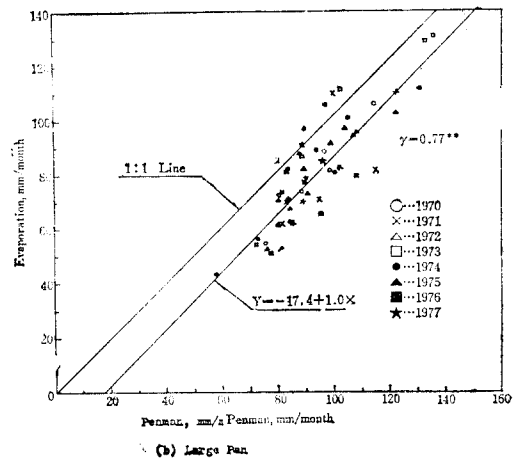
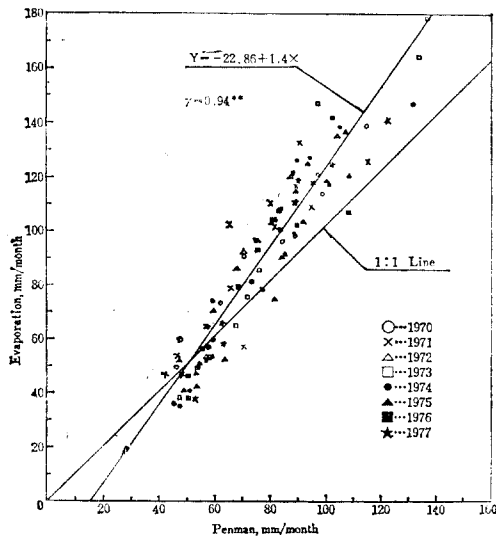


Fig. 15. Correlation between Evaporation from free Water Surface and Those Estimated by Penman Method

(2) 圃場에서의 蒸發散量

一般的으로 畚圃場에서 作物의 蒸發散量은 다음의 4가지 境遇에서 潜在蒸發量과 比例關係가 成立한다.

하나는 Free Water Surface Level(湛水狀態)로서 $EtP < Ea$ 의 경우이고, 두번째는 Non-Limited Moisture Level(飽和狀態)인 $EtP > Ea$ 의 경우, 세번째는 Limited

Moisture level(制限水分狀態)로써 $EtP > Ea$, 그리고 Very Limited Moisture Level(極度制限水分狀態)로써 $EtP \gg Ea$ 境遇로 생각할 수 있다.

이것들은 作物의 種類(b)와 生育時間(s) 등으로 支配될 수 있기 때문에 消費係數(Consumptive Coefficient) 또는 作物係數(Crop Coefficient)라고 하는 Kc를

다음과 같이 定義하였다^{29,30,34}.

$$Kc=f(C, S, SM, SC) \dots\dots\dots(18)$$

- C : 作物種類
- S : 生育時期
- SM : 土壤水分
- SC : 地表面의 水分狀態

따라서

$$Et=Kc \cdot Etp \dots\dots\dots(19)$$

와 같이 定義할 수 있다.

Blaney(1942)²⁹는 Kc의 값을 溫度와 日照時間의 함수로 表示하였으며 Penman(1948)⁴¹는 潛在蒸發量과 自由水面蒸發量의 比로 定義하였고 Jensen(1968)²⁴은 蒸發散比를 輻射에너지의 入射率로부터 定義되는 理論式을 誘導하고 있다. 여기서는 筆者가 水原地方에서 開發한

$$Kc=Kco \cdot Ka+Ks \dots\dots\dots(20)$$

로 表示하였다. Kco는 作物의 種類 및 生育時期에 따른 係數이며, Ka는 土壤水分係數, Ks는 地表面의 狀態에 따른 補正係數이다.

① 作物係數(Kco)

畝裏作에서 主로 고려되고 있는 보리의 生育期間中 蒸發散을 實測하여 各 旬別 K값을 決定하여 生育段階別 作物係數로 定義한 結果는 Fig. 16. 와 같다.

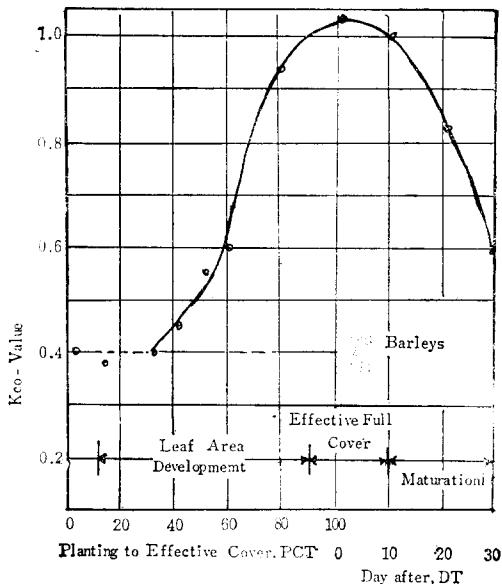


Fig. 16. Change in Crop Coefficient as Influenced by Stage of Growth and Wet Soil for Barley

② 土壤水分係數(Ka)

水分量에 따른 蒸發散量의 變化에 대하여 Jensen(1968)²⁴은 土壤水分減少에 따른 蒸發散率은 有效水分量

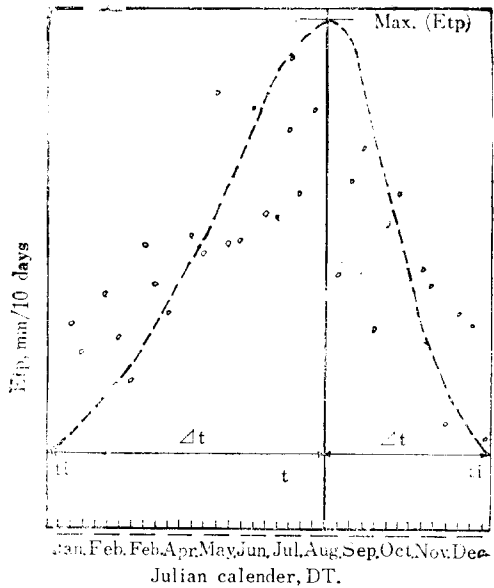


Fig. 17. Comparison between Expected Potential Evapotranspiration and Actual Values

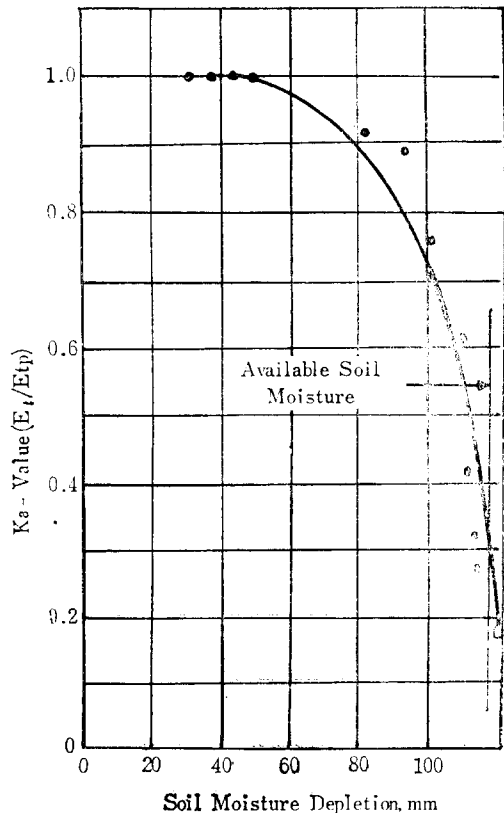


Fig. 18. Relationship between Evapotranspiration Rate and Soil Moisture Depletion

의 自然對數에 比例한다고 하였으며 筆者(1977)^{23,24)}가 水原地方에서 調査하였던 結果는 有效水分量의 指數 函數的으로 變하였던 바, 本試驗圃의 土壤에서도 指數의 關係가 成立하였다. 本試驗圃場에서 얻어진 값은 Fig.18. 과 같다.

③ 補正係數(Ks)

降雨나 灌溉直後에 地表面에 남아있는 水分은 쉽게 變하지만 地表面의 濕潤狀態에 따라 地表面에서 氣化되는 抵抗은 크게 달라진다. 一般的으로 Kc의 最大値는 大部分의 作物에서 1.0을 초과하지 않는다. Jensen 公式은²⁹⁾

$$Ks = (K_1 - Kci)e^{-Kt}, K_1 > Kci \dots\dots\dots(21)$$

으로 定義하고 있으며 Pierce(1960)는 降雨初日에 限하여 $Ks = 1 - Kco \cdot Ka$ 로 하여 自由水面蒸發量과 같은 量의 蒸發散을 考慮하였다.

3) 降雨量

(1) 降雨強度(It)

Table— 14. Probable Daily Rainfall unit: mm/day

Return periods	5	10	15	20	25	30	50	100
Rainfall	120.3	134.1	141.9	147.4	151.6	155.2	164.6	177.4

Table— 15. Probable Rainfall Intensity unit: mm/hr

Return periods	5	10	15	20	25	30	50	100
Duration (min)								
30	62.0	75.3	82.8	88.2	92.2	95.8	104.8	117.2
60	47.1	55.9	60.8	64.3	67.0	69.3	75.2	83.4
120	31.9	37.5	40.7	43.0	44.7	46.2	50.1	55.4
180	25.6	30.1	32.7	34.5	35.8	37.0	40.1	44.3
360	17.7	20.9	22.7	24.0	24.9	25.8	28.0	31.0

Table— 16. Estimated Parameters of Models for Various Return Periods

Models	Parameter	Return Period			
		10	20	50	100
Monobe	n	—	—	—	—
	a	1.95	1.97	1.96	1.93
	b	28.6	30.4	31.3	32.0
KawaKami	χ^2 -value	2.10	3.05	3.46	4.72
	a	-0.092	-0.091	-0.107	-0.112
	b	8.8	9.3	9.6	9.8
Ito	χ^2 -value	0.25	0.18	0.42	0.76

* $\chi^2_{\alpha} = 0.05 = 7.82$

耕地圃場에서 流出量을 左右하는 가장 重要한 因子는 降雨特性이다. 이는 降雨強度, 持續時間, 降雨量等을 말하는 것으로 排水計劃을 세우는데 重要한 것이다. 實際 排水組織設計에 必要한 降雨強度를 算定하였으며 晉州地域에 가장 適合한 計算模型과 係數를 찾아낼 수 있었다. 一般的으로 變量이 어느 特定値와 같거나 또는 그 以上の 값이 發生하는 頻度가 大體로 T年에 1回 있을 때 이를 確率定하고 이들 確率量의 推定에는 Hazen의 Plotting Position에 의한 方法, Log-normal distribution method, 積率法, Gumbel-chow method Slade 및 Iwais法 등이 있지만 本章에서는 韓國의 水理設計上 比較의 많이 使用하고 있는 Gumbel-chow 方法에 의하여 分析하였다.

年度別 日最大降雨量 및 降雨強度 調査期間中 每年의 日降雨量 資料로부터 持續時間 30分, 60分, 120分, 180分, 360분에 대한 降雨強度를 分析하였다.

晉州地方에 適合한 降雨強度의 推定公式을 위하여 基本公式을 利用 線型回歸分析에 의거 常數項을 決定하였으며 計算值의 適合性을 χ^2 -test에 의하여 檢定하였다. 그 結果는 다음과 같다.

① 日降雨量 資料로부터 時間降雨量을 推定하는에는 Ito式이 가장 適合하다. 則

$$r_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{b}{\sqrt{t+a}} \right) \text{式으로서 } a, b \text{는 Table.16.과 같다.}$$

② 降雨資料없이 晉州地方의 持續時間別 確率降雨強度를 推定하는에는 Japanese型公式이 適合하며 公式

$$I_t = \frac{b}{\sqrt{t+a}} \text{의 再現期間別 常數 } a, b \text{는 Table-17. 과 같다.}$$

Table-17. Estimated Parameters of Models for Various Return Periods

Models	Parameters	Return Periods(Yrs)			
		10	20	50	100
Taldot	a	—	—	—	—
	b	—	—	—	—
	λ^2 -value	—	—	—	—
sherman	n	0.527	0.535	0.538	0.543
	a	54.0	62.5	73.3	81.3
	λ^2 -value	0.78	0.12	0.08	0.08
Japanese	a	50.0	56.8	66.2	72.5
	b	-0.0750	0.0852	-0.0993	-0.1014
	λ^2 -value	0.25	0.19	0.20	0.17
Modified	a	—	—	—	—
	b	—	—	—	—
	λ^2 -value	—	—	—	—

* $\lambda^2=7.82 \alpha=0.05$

③ sherman型 公式 $I_t = \frac{a}{t^n}$ 은 晉州地方에 使用이 可能하며 이때 n, a의 常數는 Table-17. 와 같다.

(2) 有効雨量(Re)

이것을 決定하기란 참으로 복잡하고 어렵다. Hagen 等은(17) U.S.D.A. 有効雨量 算定表를 導入하였고 David (1966)는 貯溜方程式의 實驗式을 誘導하였으나 制限要素가 많다. 本研究에서는 日別土壤水分 未洽量의 程度에 따른 補正만으로 다음의 假定下에 有効雨量을 決定하였다.

첫째는, 가벼운비는 주로 作物의 앞에 차단되거나 土壤의 表面層을 적시기 때문에 5mm이하의 降雨는 無視하였다(18).

둘째는 上部 3제 根群域이 圃場容水量으로 上昇시키는데 不充分한 降雨는 土壤의 上層에서 積유되어 나머지 作物根域에 있는 土壤水分에 關係없이 E_i의 比에 使用된다.

셋째는 流出은 土壤層이 圃場容水量에 到達하기 까지는 일어나지 않는다. 따라서 다음式으로 表示하였

다(20,24).

$$R-D \geq 0 \text{ 이면 } Re=D \text{(22)}$$

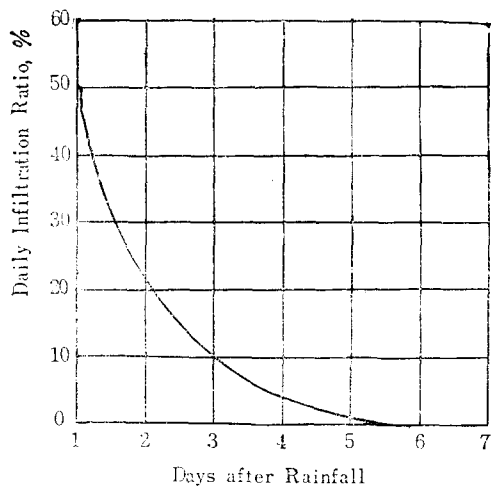


Fig. 19. Variation of Daily Infiltration Ratio with respect to Days after Rainfall

$$R - D < 0 \text{ 이면 } Re = R \dots\dots\dots(23)$$

여기서 R는 日雨量(mm)이다.

4) 排水量(Wd)

排水量은 圃場에서 土壤中の 動水勾配나 外水位의 影響에 따라 土壤의 物理的 特性의 函數로서 定義된 것이다. 有效雨量 計算時 $R - D \geq 0$ 일 경우 $Wd = R - D$ 로 定義하였다. 또 $Wd > 0$ 이면 土壤水分이 圃場容水量으로 될 때까지의 時間變數 t_f 를 考慮하면 貯溜量 方程式은^(20,24)

$$Wd = 0 \text{ 이면, } D = \sum_{i=1}^n (Et - Re - I - Wd) \dots\dots(24)$$

$$Wd > 0 \text{ 이면, } D = \sum_{i=1}^{n-t_f} (Et - Re - I - Wd) \dots\dots(25)$$

式으로 表示된다. 또한 暗渠流出에 따른 減少量은 貯水係수에 따른 比를 加算하였다.

5) 土壤水分 豫測

(1) 基本假定

① 土壤水分의 豫測은 初期의 土壤水分未治量을 基準으로 行하여지며 따라서 初期의 土壤水分 未治量이 實測으로 提供되어야 한다.

② 土壤水分의 豫測은 日單位로 實施하여 灌溉時期의 推定이 可能토록 하였다. 豫測은 最大 7日로 하였으나 實測值를 利用 補完이 必要하다.

③ 模型을 設定할 때 垂直方向의 물收支만을 對象으로 하였다.

④ 土壤水分 未治量에 의한 蒸發散量의 算定으로 Feed Back System을 採擇하였다.

(2) 模型의 完成

Fig. 20.은 土壤水分未治量에 따른 Computer Flow Chart이다. 本 模型에서는 氣象, 土壤, 作物等에 關한 資料를 利用하여 蒸發散量, 降雨量, 土壤水分未治量 및 그에 따른 排水調節時期 및 그 量에 따른 灌溉時期의 與否의 判斷과 灌溉量等에 關한 資料를 提供토록 設定되었으며 豫測期間은 資料의 有用性에 따라 任意로 調節할 수 있겠으나 實測資料와 均衡을 이루도록 하였으나 本 模型의 各過程에 대한 主要內容은 다음과 같다.

① Subroutine ETP;

潛在蒸發散量의 計算을 위한 Subroutine으로 實測氣象資料를 利用하여 Penman式에 의해 計算한다.

② Subroutine E(ETP/JEN);

潛在蒸發散量(Etp)의 計算을 위한 Subroutine으로 氣象豫報資料가 주어질 경우 이에 따른 豫想 潛在蒸發散量을 산정한다. 이때 氣象豫報로서 주어질 溫度 및 日

照時數 등에 의하여 計算이 可能할 수 있도록 Jensen-Haise法을 利用하는 바, Jensen-Haise法은

$$Etp = (0.025 + 0.08) \frac{Hsh}{59} \dots\dots\dots(26)$$

로서 定義되며 여기서 T는 溫度(°C), Hsh는 短波輻射量(cal/cm²/day)으로서 다음 式으로 計算된다.

$$Hsh = (0.2 + 0.53n/N) \times Qa \dots\dots\dots(27)$$

여기서 n는 日別 日照時數(hr), N는 可照時數(hr)이며 Qa는 extra-terrestrial radiation(cal/cm²/day)이다. 이때 N 및 Qa는 緯도에 따라 決定되며 Table-13은 晉州地方의 旬別值를 보여준다.

Jensen-Haise法에 의하여 豫測資料를 提供토록 한 것은 Penman法의 계산에는 보다 많은 精密氣象資料 등이 要求되는 바 이의 豫報는 現實의 困難할 것으로 判斷되었기 때문이며 實際로 두 方法間의 推定值가 相關性이 높을 뿐만 아니라, Jensen-Haise方法으로 산정한 값이 Penman의 것보다 약간 큰 값을 나타내기 때문에 豫測資料로서 그 利用性이 있다고 判斷된다.

③ Subroutine E(ETP)

潛在蒸發散量 豫測值를 算定하기 위한 Subroutine으로 氣象 豫報資料가 提供되지 않았을 경우, 潛在蒸發散量의 推定을 위한 것이다. Table-13.은 晉州地方의 1969~1977年의 潛在蒸發散量의 旬別 變化를 圖示해 주는바, 이로부터 灌溉 豫測期間을 10~4月로 假定하고 每 旬別 潛在蒸發散量이 年中 最大를 보이는 8月中旬頃의 最大潛在蒸發散量 Max(Etp)를 利用하여 다음 式으로 求하였다.

$$E(Etp) = \text{Max}(Etp) \cdot \text{Exp}\left(-a \frac{|ti-t|}{\Delta t}\right)^b \dots\dots(28)$$

여기서 E(Etp)는 1月1일부터 ti日後 및 12月31일부터 ti日前의 潛在蒸發散量(mm/day), Δt는 潛在蒸發散量의 最大值를 보여주는날(北區에서는 7月15日~7月25日)頃으로 報告되었다⁽²⁵⁾을 8月로 平均 ETP를 써서 이날까지의 期間으로 定義하며 또한 a 및 b는 상수이다.

a, b의 常數는 本 模型에서 $-a = \ln(\overline{Etp}/\text{max}(Etp))$ 로서 定義하였던 바 $\overline{Etp}/\text{max}(Etp) = 0.160$ 으로 $a = .833$ b는 初期條件과 最小自乘法에 의하여 간단히 決定될 수 있으며, 여기서는 1.5~3.0內의 값으로 算出되며 b=1.5으로 해서 標準偏差가 작은 값을 얻었고 또한 利用上 便利하므로써 이를 採擇하였다.

④ Subroutine Crop Calender;

模型의 人力資料로서 Julian Calender를 基準하던 現實의 氣象資料의 活用이 可能하다. 그러나 作物의 生育時期는 반드시 Julian Calender에 準하지 아니하고 同一한 月曆에도 地方에 따른 差 및 同一地域에

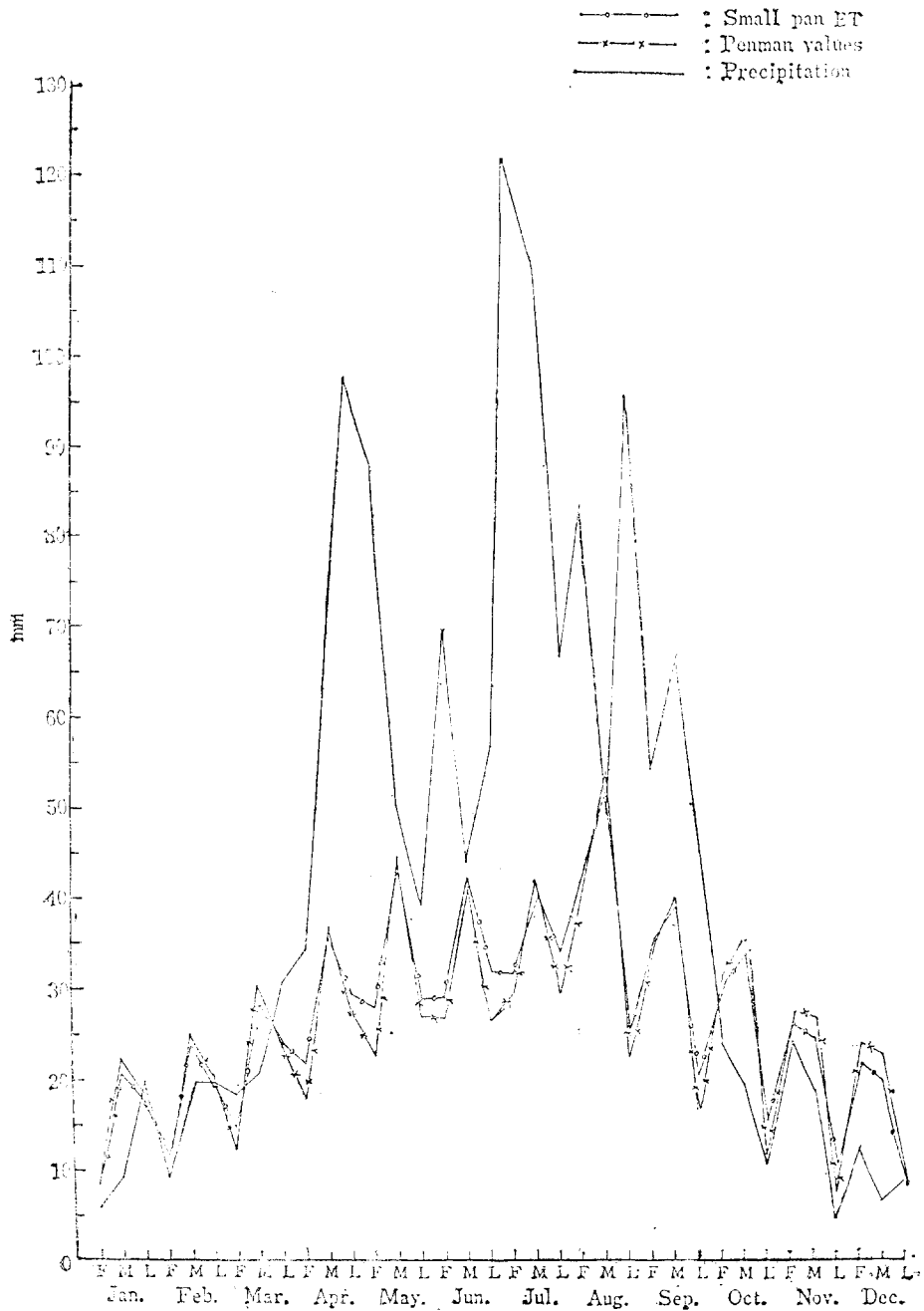


Fig. 20. Estimated Long Term Water Balance in Jin Ju Area

서도 作物의 播種時期나 肥培管理 등의 差로서 作物資料는 同質性的 것으로 解析할 수 없게 된다. 따라서 Julian Calender를 補充 作物의 有效被覆效果의 最大 值를 보이는 時期를 基準하는 作物月曆을 算定하기 위하여 Subroutine을 두었다. 여기서는 播種日, 最大 有效被覆時期 등의 資料에 의하여 定義된다.

⑤ Subroutine Predicting Irrigation;

灌溉時期 및 灌溉量을 算定하기 위한 이다. 土壤水分未洽量이 適正 土壤水分未滿일 경우 그 時期와 이때 圃場面積 및 灌溉方法과 灌溉效率에 따른 灌溉量의 算定이 可能하도록 하였다. 이때 灌溉量 $E(IRR)$ 은

$$E(IRR) = \sum E_i A_i W_i \dots \dots \dots (29)$$

로서 表示한 바, 여기서 $E(IRR)$ 은 圃場面積 A_i 의 灌溉豫想量(m^3), E_i 는 A_i 面積의 圃場에 대한 灌溉效率 이다.

4. 模型의 檢定

1) 降雨 및 蒸發量 調査

晉州地方에서 8年동안 實測한 降雨量과 蒸發量을 旬

別平均하여 比較한 것은 Fig. 21과 같으며 畝裏作期間인 10月부터 다음해 5月까지를 比較할 때 降雨量이 蒸發量에 못미치고 있는바, 10月부터 12月까지는 降雨量이 64.3mm가 모자랐으며 1月부터 3月까지는 16.2mm 4月부터 5月까지는 降雨量이 많음을 볼 수 있다.

實際로 耕地排水計劃의 頻度를 5~10年으로 볼때 地形의 條件에 따른 流入水가 問題될 수 있어 地表排水組織이 重要時 될 것이며 오히려 不足水量의 供給이 새로운 問題로 提起될 것이다.

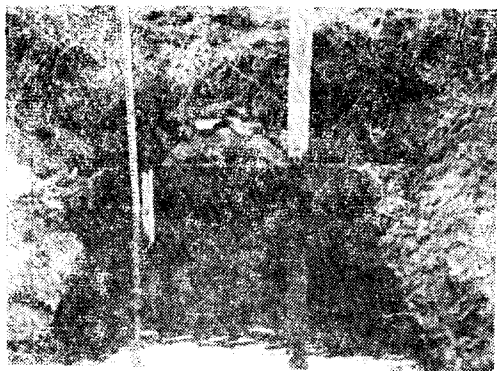
蒸發量의 實測值과 Penman式에 의한 計算值와의 對比表는 Fig. 15과 같으며 高度의 有意性을 보여주고 있어 Penman值의 正確性을 볼 수 있다. 其他方法間에 關係는 本論文에는 收錄치 아니하였다.

2) 流出量 調査

地下水 流出量은 一定用器를 使用하여 1日 2回를 測定하여 決定하였으며 末端部에 四角銳堰頂 Weir를 設置하여 全圃場의 流出量을 調査하였다.

Table—18. Comparison between Observed Data by Small pan and Those Calculated by Penman

Month	Periods	Penman(mm)	Small Pan(mm)	Month	Periods	Penman(mm)	Small Pan (mm)
Jan.	F	6.7	8.3	Jul.	F	29.3	31.4
	M	22.4	20.7		M	41.4	40.3
	L	18.6	17.9		L	29.2	33.7
Feb.	F	9.0	11.6	Aug.	F	40.8	42.3
	M	25.0	23.6		M	54.0	52.0
	L	20.3	19.4		L	22.4	255
Mar.	M	12.3	14.8	Sep.	F	34.1	35.0
		30.4	28.7		M	39.0	8.03
		23.9	24.7		L	15.9	20.3
Apr.	F	17.9	21.9	Oct.	F	31.2	30.4
	M	37.0	35.6		M	35.8	33.6
	L	27.6	29.3		L	11.7	15.1
May.	F	22.7	27.7	Nov.	F	27.5	26.0
	M	44.1	43.8		M	26.8	24.5
	L	26.9	28.6		L	7.9	10.4
Jun.	F	26.6	29.0	Dec.	F	24.0	21.7
	M	41.9	42.1		M	20.7	20.7
	L	26.3	31.6		L	7.4	8.8



Phot. 6. Measurements of Outflow



Photo. 7. Soil Moisture Observation

Table-19. Tile Flow Rate after Rainfall through Pipe Line

Event 1		Event 2		Remarks
Date	Q, m ³ /day	Date	Q, m ³ /day	
May. 1	8.60	Nov. 17 AM	11.17	
" 3 AM	36.08	" 17 PM		
" 3 PM	21.50	" 18 AM	3.98	
" 4 PM	19.35	" 18 PM		
" 6 AM	11.14	" 19 AM	2.33	
" 6 PM	8.39	" 19 PM		
" 7 AM	6.89	" 20 AM	1.61	
" 7 PM	3.35	" 20 PM		
" 8 AM	2.84	" 21 AM	0.9	
" 9 PM	2.37	" 21 PM		
" 12 AM	0.80			
" 16 AM	0.72			

3) 土壤水分 調査

實驗圃場에 土深 15cm, 30cm, 45cm 깊이로 Pipe暗渠

位置의 上部와 暗渠管과 暗渠管의 中間部에 2反復處理로 埋設하여 Soil Moisture Meter와 Agri-multimeter 두 計測器로 測定한 結果는 Fig. 21. ~ Fig. 25. 와 같다.

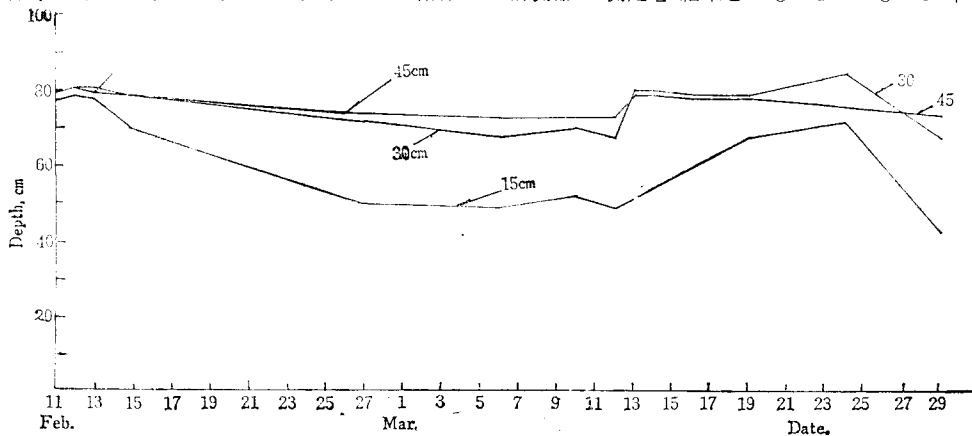


Fig. 21. Changes in Soil Moisture Content with respect to Days after Last Rainfall(over Pipe Line)

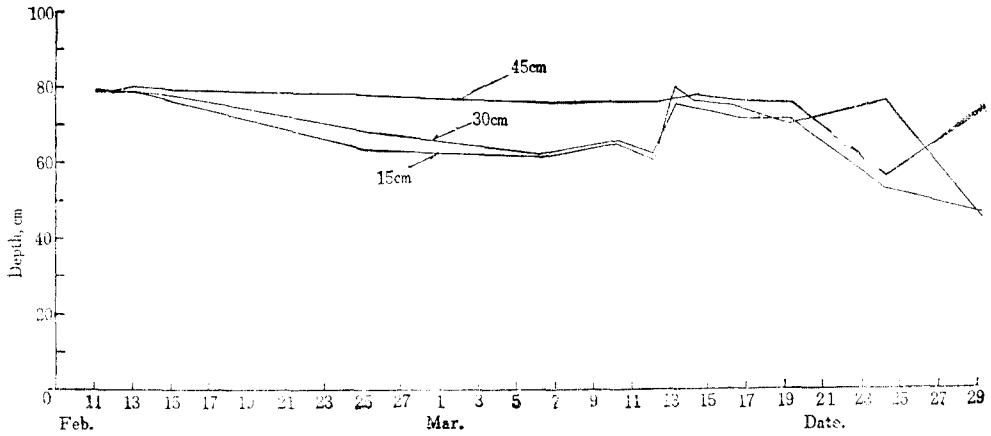


Fig. 22. Changes in Soil Moisture Content with respect to Days after Last Rainfall (between Pipe Line)

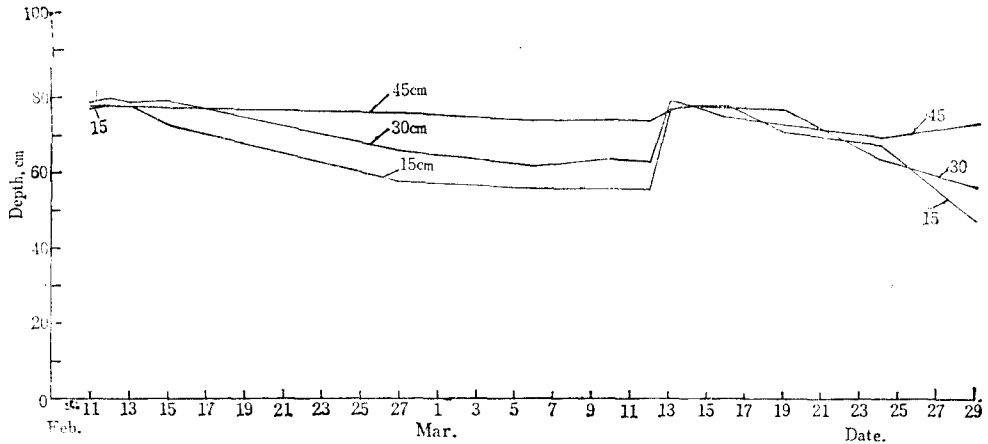


Fig. 23. Changes in Soil Moisture Content with respect to Day after Last Rainfall (Mean Value)

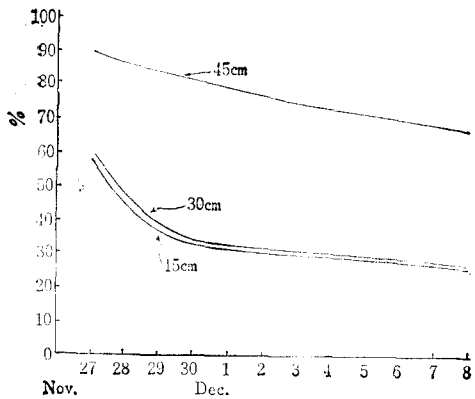


Fig. 24. Changes in Soil Moisture Content with respect to Days after Last Rainfall (between Pipe Line)

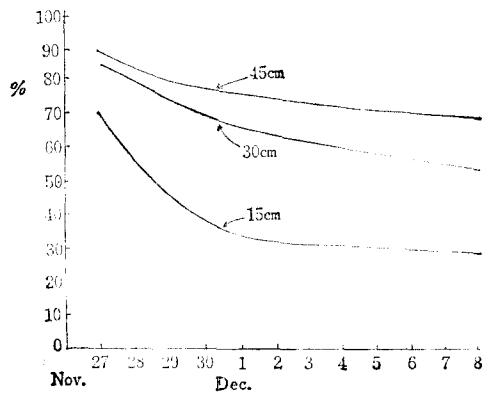


Fig. 25. Changes in Soil Moisture Content with respect to Days after Last Rainfall (between Pipe Line)

4) 地下水位 調査

暗渠管 上部와 두 暗渠管사이 그리고 開渠開發地區에 設置한 Piezometer에서 測定한 값은 Fig. 27~Fig. 29와 같다.



Photo. 8. Measurement of Ground Water Level.

한편 降雨가 發生한 후 使用한 暗渠材料에 따라 地下水位變化圖를 그려본 結果는 Fig. 30. 과 같다.

여기서 P는 被覆을 하지않은 P.V.C 주름관, P_r는 짚으로 被覆한 주름관, P_s는 화석被覆을 한 주름관, C는 被覆을 하지않은 土管, C_r는 짚被覆을 한 土管이며 P₃₀은 30m間隔의 無被覆 주름관 P₁₅는 15m間隔으로 埋設한 無被覆 주름관이다.

5) 檢 定

Skaggs⁽⁴⁵⁾는 물 管理體系의 물收支 模型을 다음의 3가지로 區分, 評價하고 있다. 1) 地表와 地下排水로 하는 Conventional Drainage(普通排水), 2) 地下水位 調節로만 하는 Controlled Drainage(調節排水), 3) 生育期間中 一定水位를 維持하기 위한 Subirrigation(地下灌溉)로 設計하여 効用性을 다음으로 評價하고 있다. 즉 하나는 苗板準備 혹은 播種準備期間中의 作業條件, 다른 하나는 生育期間中 作物生育에 必要한 適正排水, 그리고 水分不足으로 인한 生育의 支障을 招來하지 않는 土壤水分條件으로 評價하고 있는데, 實際方法으로 1) 苗板設置期間前 1個月 동안의 Working Days(作業可能日數)로서 降雨가 土壤容水量보다 적게 發生하였을 때와 耕耘層의 含水量이 最大值를 超過하지 않을 때의 日數를 잡고 있다. 2) 30cm以上の 過剩水의 量에 相當하고 生育期間中 過剩水分狀態의 程度를 提供하는 SEW30, 即,

$$SEW30 = \sum_{i=1}^n (30 - X_i) \dots \dots \dots (30)$$

여기서 X_i는 i일의 地下水位이고 i=1이면 降雨後 最初日이며 n는 生育期間의 日數이다. X_i가 30을 넘으면 無視하고 있다. SEW30이 100~200cm보다 크면 收量減少를 가져오며 100cm以內에 있으면 좋은 것이다. 그리고 生育期間中 實蒸發散量 (Ea)이 土壤水分供給量보다 클 境遇로 하는 Dry Days(乾燥日數)로서 적을 수록 좋다고 하였다.

한편 Hiler⁽⁴⁶⁾는 Stress Day Index(應力日指數)를 使用하고 있는데 SDI(應力日指數)는 다음과 같이 定義하고 있다. 即,

$$SDI = \sum_{i=1}^n (SD_i \times CS_i) \dots \dots \dots (31)$$

여기서 n는 고려된 生育段階의 數. SD는 應力日因子로서 作物이 經驗한 水分不足量과 酸素不足, 滲透應力, 地下水位 등의 값을 極限値와 關聯하여 얻어진 값이며 CS는 作物의 感度로서 各 生育段階別 不足量에 대한 感度이다.

筆者는 資料의 不完全으로 完全한 比較는 어려우나 Skaggs의 方法을 導入하면 Working Days가 30으로 良好하며, Dry Days 36日로 降雨가 相當히 不足하였으며 SEW30은 45cm로서 作物生育에 좋은 條件을 주고 있었다.

土壤水分未治量公式을 利用한 豫測値와 實測値間의 比較는 Table. 20. 와 같다. 實測値와 計算値의 差를 實測値로서 나눈 값 즉 相對誤差는 5.5%로서 模型은 適用이 可能하다.

Table-20. Comparison between Estimated Soil Moisture Contents by Model and Measured Values

Item Date	Measured Values(mm)	Calculated Values(mm)	Relative Error(%)
Nov. 9	122.15(F.C)	122.15	0
10	108.58	114.99	5.9
11	103.14	106.21	3.0
12	95.79	103.24	7.8
13	94.26	99.66	5.7
14	90.91	97.60	7.4
15	88.37	96.01	8.6
16	88.50	94.54	6.8
17	101.80	110.39	8.4
18	98.64	100.17	1.6
19	96.48	99.17	2.8
20	92.71	94.49	2.0

5.5**(Mean)

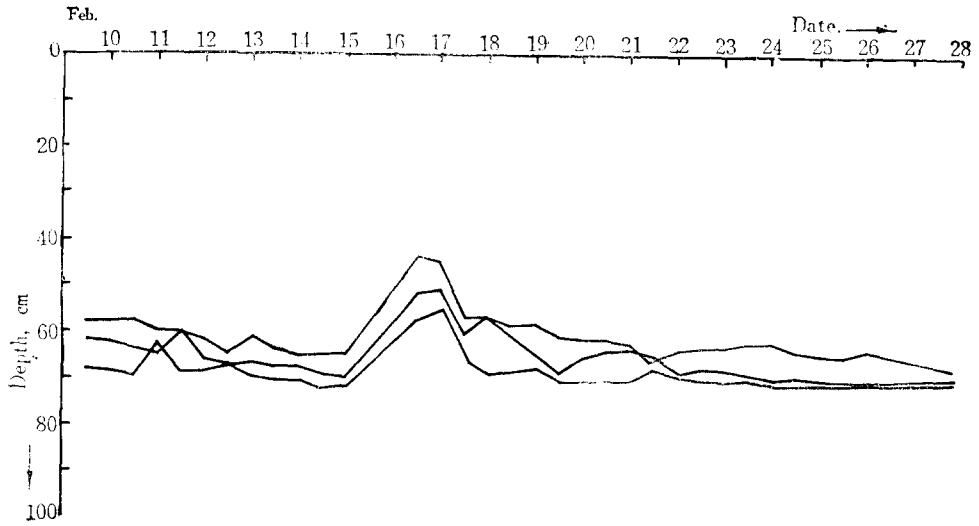


Fig. 26. Fluctuation of Ground Water Level (over Pipe Line)

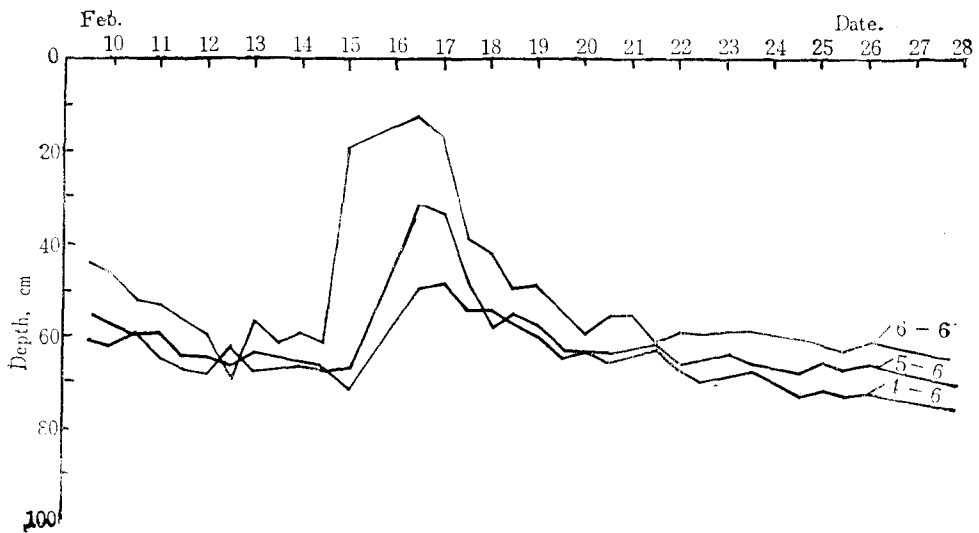


Fig. 27. Fluctuation of Ground Water Level (between Pipe Line)

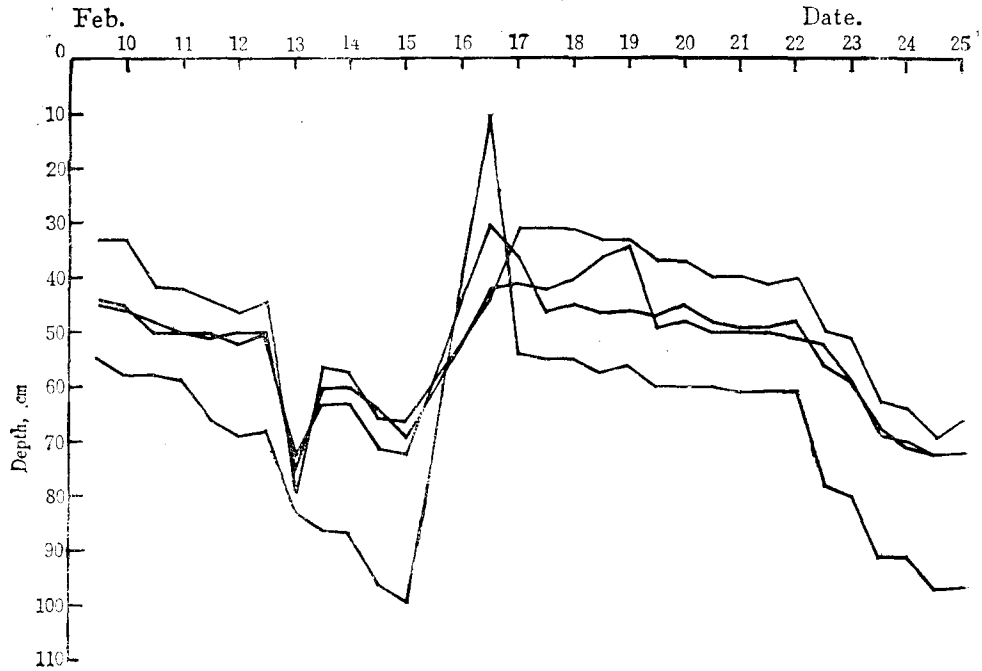


Fig. 28. Fluctuation of Ground Water Level(Open Ditch)

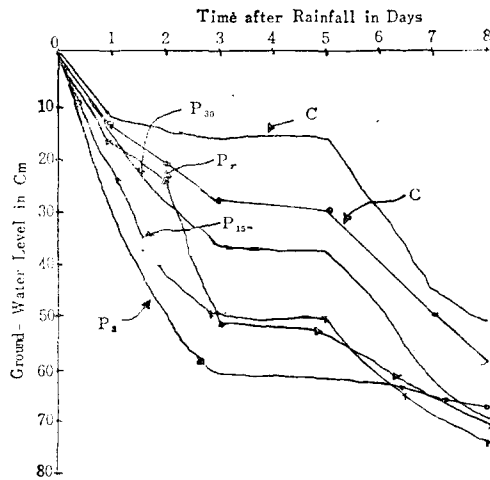


Fig. 29. Changes in Ground Water Level due to Various Drain Materials

5. 考 察

暗渠排水施設이 갖추어짐으로 인하여 圃場에서 土壤水分含量이 어떻게 變할 것인가를 豫測하기 위한 模型을 設定하여 實測資料와 比較檢討한바 土壤水分未 洽量의 물 收支概念을 導入한 數學的模型은 理論的 背

景이 優秀하고 氣象資料를 利用하여 土壤水分의 變化量을 豫測할 수 있다는 長點이 있고 豫測值의 精密度가 높아서 實用化에 適用이 可能할 것으로 思料된다.

畚裏作 即 田作에 있어서 보다 合理的인 물 收支 配分을 通하여 適正收量을 確保하기 위하여는 計劃排水 및 計劃灌溉의 運用이 必要하며 이들 두가지 물管理體制의 確立은 食糧增産에 至極大로 寄與할 것이

다.

몇個月 間의 短期的 實測資料를 가지고 結論을 내리 기에는 不足한 點이 많으나 暗渠施設로 因한 諸現象의 發生과 그 順序 및 解決方法을 理解할 수 있었음에 滿足하며 土地의 生産性을 높이고 土壤利用의 高度化를 期하기 위하여 適正水分保存을 위한 研究가 現實의 으로 보다 長期間의 發展의 研究가 必要할 것이다.

6. 摘 要

本 研究는 低濕畚의 排水改善을 通하여 畚裏作物을 誘導함과 同時에 밭作物의 充分한 收量確保를 위하여 좋은 生育環境을 保存하는데 있어서 調節可能因子의 하나인 土壤水分의 豫測模型을 開發하여 適正水分維持의 물管理 體制를 樹立하고자 遂行되었다.

土壤斷面에서의 물收支概念을 導入한 土壤水分未洽量에 關한 數學的模型이며 模型構成要素가되는 蒸發散量, 降雨量, 排水量 等に 關한 算定方法의 論議와 既存資料로 부터 各要素들의 算定에 必要한 媒介變數들의 推出을 試圖하였다. 設定된 模型을 利用하여 土壤水分을 豫測하고 實測值와의 比較로 檢討되었다. 以上の 結果를 要約하면 (17)과 같다.

1) 任意的 圃場土壤斷面에 對한 물收支 模型으로 土壤水分未洽量 D는 다음式으로 나타낼 수 있었다.

2) 微氣象要素를 利用하여 晉州地方의 潛在蒸發量을 算定하여 小型 Pan 또는 大型 Pan의 蒸發量과 잘 符合되는 結果를 주는式은 Penman式으로서 小型蒸發計와 가장 잘 맞았으며 實測值(X)와 Penman式의 算定值(Y)와는 $Y=1.4X-22.86$ 의 回歸關係가 成立되었고 相關係數 $r=0.94^{**}$ 이었다.

3) 圃場에서 蒸發散量의 推定을 위한 消費係數 Kc는 作物의 特性 및 土壤의 特性의 函數로서 定義하였다. 即,

$$Kc = Kco \cdot Ka + Ks$$

여기서 Kco, Ka, 및 Ks는 各各 作物係數土壤水分係數, 補正係數인데

Kco는 Fig. 16.에서, Ka는 Fig. 17.에서 얻을 수 있으며 Ks는 $Kco \cdot Ka \geq 1.0$ 이면 $Ks=0$ 으로, $Kco \cdot Ka < 1.0$ 이면 $Ks=1-Kco \cdot Ka$ 에 의하여 推定하였다.

4) 地表排水組織을 위한 降雨強度의 推定에 있어 日降雨量資料로부터 時間降雨量을 推定하는데는 Ito式이 가장 適合하다. 即, $r_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{b}{\sqrt{t+a}} \right)$ 式으로서 a, b는 Table. 16. 와 같다.

5) 降雨強度없이 晉州地方의 持續時間別 確率降雨強度를 推定하는데는 Japanese型式이 適合하다. 即,

$It = \frac{b}{\sqrt{t+a}}$ 의 式에서 再現期間別常數 a, b는 Table. 17. 와 같다.

6) 有效降雨量 (Re)는 5mm를 最大無效降雨量으로 하고

$R-D \geq 0$ 이면, $Re=D$ 로 하였으며

$R-D < 0$ 이면, $Re=R$ 로 算定하였으며

1968년부터 10個年值를 考慮하였다.

7) 排水量을 原則的으로 降雨量과 土壤水分未洽量의 差로서 計算할 수 있었다. 이때 $Wd=0$ 이면 土壤水分未洽量公式이 그대로 成立되고, $Wd>0$ 인 경우에는 圃場容水量에 達하는 2~3日의 지체시간을 考慮하였으며 暗渠流出에 따른 減少量은 貯水係數 (u)에 따른 比를 加算하였다.

8) 模型의 檢定을 위하여 降雨發生後 實測值와 豫測值間의 相對 誤差는 5.5%이었다.

9) 長期的인 물收支를 考慮할때 Fig. 20.에서와 같이 晉州地方에서는 畚裏作期間인 10월부터 다음해 3월까지의 降雨量이 284.3mm, 蒸發量이 360.9mm로서의 用水量이 不足한 것으로 나타났으며 地表排水組織의 改善이 必要할 것으로 생각된다.

10) 圃場에서의 排水는 灌溉期 非灌溉期에 따른 地表排水 地下排水 地下灌溉의 組織과 運用이 合理的이며 서로 獨立的인 수가 없고 複合的으로 解析計劃되어야 할 것으로 생각된다.

11) 1年의 圃場試驗 調査로서 結論을 내린다는 것은 어려운 일로서 本研究는 계속하여 發展시킬 必要性이 있다고 생각된다.

參 考 文 獻

1. Benz, L.C., et al. 1976. Evaluation of some subsurface drainage envelopes. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 31-33.
2. Blaney, H.F. and W.D. Criddle. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. Agr. Res. Ser., USDA Tech. Bull. No. 1275, pp. 1-59.
3. Bouwer, H. 1974. Developing drainage design criteria. Ch. 5. in Drainage for Agriculture, J. van Schilfgaarde, ed., American Society of Agronomy, Madison, WI.

4. Bouwer, H. 1966. Developing design requirements for parallel drains. Drainage for Efficient Crop Production Conference Proceedings, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 62-65.
5. Broughton, R.S., et al. 1976. Tests of filter materials for plastic drain tubes. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium. ASAE, St. Joseph, MI, pp. 34-39.
6. Davis, S., et al. 1971. Drain envelope performance in a sandy soil. Proc. ASAE, National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 8-10, 19.
7. DeBoer, D.W., et al. 1971. Envelope performance in a coarse-silt base material. Proc. ASAE, National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 5-7.
8. Denmead, O.T. and R.H. Shaw. 1961. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agron. Jour., pp.385-390.
9. Denmead, O.T. and R.H. Shaw. 1961. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. Agron. Jour., pp. 272-274.
10. Dinc, G., G.E. Merva and E.H. Kidder. 1971. Hydraulic roughness of corrugated plastic drain tubing. Proc. ASAE, National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 11-14.
11. Doering, E. J., et al. 1976. Drainage requirements for corn grown on sandy soil. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 144-147.
12. Donnan, W.W. 1975. An overview of drainage worldwide. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 6-9.
13. Drablos, C.J.W., P.N. Walker and J.L. Scarborough. 1976. Field evaluation of corrugated plastic drain tubing. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 69-74.
14. F.A.O. 1976. Drainage testing irrigation and drainage. Paper 28, FAO, Rome, pp. 69.
15. F.A.O. 1976. Irrigation and drainage. Paper 28, FAO, Rome, pp. 29-34.
16. Flinn, T.C. 1972. The simulation of crop-irrigation systems.
17. Hagøn, R.M. and J. I. Stewart. 1972. Water deficits-irrigation design and programming. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proc. of ASAE, (IR2):215-237.
18. Hermsmeier, L.F. 1976. Economical envelopes for subsurface drains in irrigated lands. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 18-21.
19. Hiler, E.A. 1976. Drainage requirements of crops. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp.127-129.
20. Hiler, E.A. 1969. Quantitative evaluation of crop drainage requirements. TRANSACTIONS of the ASAE 12(3):499-505.
21. Hiroshi, E.A. Computer-oriented mathematical model simulation techniques for design and management of drainage systems. pp. 375-392.
22. Hudson, A.W., et al. 1962. The draining of farm lands.
23. 福田, 野口, 緒形. 1960. 広い水田地域における水収支の考え方. 農土研 第28號, pp.443-449.
24. 富士岡義一. 1973. かんがい排水學の歩み. 富士岡義一教授 論文集, pp.52-55, 272-283.
25. 富士岡義一, 丸山利輔. 1971. 水理的にみた暗キヨ組織の合理的 決定法. 農業土木學會 論文集 第37號 pp.33-38.
26. 富士岡義一, 丸山利輔, 1971. 田面タン水と暗キヨ排水量關係の一考察. 農業土木學會 論文集 第37號, pp.26-32.
27. 富士岡義一, 丸山利輔. 1971. 粘質土壌水田にお

- る暗キヨ排水に 關する研究. 農業土木學會論文集 第 35號, pp.47-53.
28. Ibrahim, W.R. 1976. Drainage effects on soil characteristics and crop production. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp.117-122.
29. Jensen, M.E. 1972. Irrigation water requirements and management. AE 795 AX, Colorado State University Press, Ft. Collins, Colo.
30. Jensen, M.E. 1972. Water consumption by agricultural plants. pp. 1-22.
31. Johnson, H.P. 1971. Hydraulic roughness in drain tile. Proc. ASAE, National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 15-19.
32. 金子良. 1957. 水田用水量の水文學的考察. 農土研 25.
33. 金哲會, 高在君. 1977. 土壤水分含量豫測 및 計劃灌溉模擬模型 開發에 關한 研究(II). 韓國農工學會誌, 19(2):25-34.
34. 金哲會, 高在君. 1977. 土壤水含量 豫測 및 計劃灌溉模擬模型 開發에 關한 研究(I). 韓國農工學會誌, 19(1):1-17.
35. 木俣勳, ほか, 1971. 暗キヨ流出解析へのユニットグラフ法の適用と暗キヨ流出量の長期變動の推定, 農業土木學會 論文集 第38號, pp.59-65.
36. 木俣勳, ほか. 1971. 輪換畑における降雨と暗キヨ流出に關する研究. 農業土木學會 論文集 第35號, pp. 42-47.
37. 具滋雄. 1977. 蒸發計 蒸發量의 時系列 및 統計的 特性分析. 韓國農工學會誌, 19(3):58-68.
38. 李昌九. 1975. 排水系統의 設計와 管理. 文教部, 서울, pp.171-191, 201-235.
39. 李淳赫. 1974. 土壤別 地表, 地下水 排水面 土壤水分變化에 關한 研究. 韓國水文學會誌 7(2):75-82.
40. Panu, U.S. and W.N. Stammers. 1976. Effect of drain boundary on subsurface drain design. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 22-26, 30.
41. Penman, H.L. 1948. Estimating seasonal and short-term fluctuations in evapotranspiration from meadow crops. Bull. Amer. Meteor. Soc. 39(2):73-78.
42. Pruitt, W.O. 1960. Relation of consumptive use of water to climate. TRANSACTIONS of the ASAE 3:9-13, 17.
43. Schwab, G.O. 1976. Age effects on surface and subsurface drain flow. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MJ ,pp. 10-13.
44. Schawb, G.O., N.R. Fausey and D.W. Michener. 1974. Comp methods in a heavy textured soil. TRANSACTIONS of the ASAE 17(3):424-425. 428.
45. Skaggs, R.W. 1976. Evaluation of drainage-water table control systems using a water management model. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 61-68.
46. Skaggs, R.W. 1975. A water management model for high water table soils. ASAE Paper No. 75-2524, ASAE, St. Joseph, MI.
47. Skaggs, R.W., L.G. Wells and S.R. Ghatе. 1975. Predicted versus measured drainable porosities. ASAE Paper No. 75-2527, ASAE, St. Joseph, MI.
48. Sommerfeidt, T.G. Outflow from various subsurface drainage materials.
49. Sovern, D.T. 1969. Flow in envelopes for tile drains. M.S. Thesis. Colorado State University, Ft. Collins, Colo.
50. Stewart, J.I. and R.M. Hagan. 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. of ASAE (IR4):421-439.
51. Stewart, J.I., R.M. Hagan and W.O. Pruitt. 1974. Functions to predict optimum irrigation programs. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. of ASCE(IR2):179-199.
52. 徐承德, 金照雄. 1977. 低濕畝에 있어서 暗渠排水方法이 作物收量에 미치는 效果에 關한 試驗研究. 韓國農工學會誌, 19(3):35-47.
53. Torey, R. 1964. Alfalfa growth as influ-

- enced by static and fluctuating water table. TRANSACTIONS of the ASAE 7:320-312.
54. van Schilfgaard, J. 1974. Drainage for agriculture. Amer. Soc. Agron. Trans. 13: 216-220.
55. van Schilfgaard, J. 1971. Drainage yesterday, today, and tomorrow. Proc. ASAE, National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 2-4, 7.
56. van Schilfgaard, J. 1965. Design for drainage systems and rainfall distribution. Conf. Proc., ASAE, St. Joseph, MI, pp.66-68.
57. van Schilfgaard, J. 1965. Transient design of drainage systems. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE 91 (IR3):9-22.
58. van Staveren, J.M. 1974. Drainage principles and applications; III. Surveys and investigations. International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication 16, Vol. Ⅱ, ILRI, Wageningen, The Netherlands, pp.155-51, 53-111.
59. Whisler, F.D. and A. Klute. 1967. Rainfall infiltration into a vertical soil column. TRANSACTIONS of the ASAE 10(2):391-395.
60. William, R.E. and G.J. Kriz. 1970. Response of agricultural crops to flooding, depth of water table and soil gaseous composition. TRANSACTIONS of the ASAE 13:216-220.
61. Willardson, L.S. and L.A. Kahn. 1976. Hydraulic head loss near a simulated drain opening with envelope material. Proc. ASAE, Third National Drainage Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, pp.27-30.
62. Winger, R.J., Jr. and J. N. Luthin. 1966. Guide for investigations of subsurface drainage problems on irrigated lands. ASAE SW-234, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 18-37.
63. Young, T.C. and J.T. Ligon. 1972. Water table and soil moisture probabilities with tile drainage. TRANSACTIONS of the ASAE 15(3):448-451. <끝>