

土壤속의 물과 熱의 흐름에 대한 모델링

慶北大學校 農科大學
教授 鄭 相 玉



要 約

土壤속의 물과 熱의 二次元 흐름을 考察하기 위하여 ADI 有限差異法을 利用한 컴퓨터 모델을 개발하였다. 土壤 表面의 一部分이 멀치로 덮여있는 경우를 고려하였으며, 地表面에서의 境界條件인 土壤表面의 溫度 및 蒸發量은 에너지 收支 方程式을 利用하여 계산하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 필요한 入力 資料로는 日氣條件, 멀치 條件 및 토양의 物理的 性質등이다. 여러 가지 토양 및 멀치 조건에 대하여 15일간의 시뮬레이션을 수행하였다. 日氣條件으로는 第3日째 80mm의 降雨가 있었으며, 그 밖에는 맑은 날로 가정하였다. 시뮬레이션 結果를 고찰한 결과 本 모델이 토양속의 물과 熱의 흐름을 合理的으로 推定하였다고 判斷된다. 따라서 本 모델은 토양학이나 農工學에서 많이 응용될 수 있을 것이다.

I. 序 論

土壤속의 물과 熱의 흐름은 서로 영향을 미치기 때문에 이 둘을 同時에 고려하여야 한다. Philip and De Vries¹⁶⁾가 처음으로 토양속의 물과 熱의 흐름에 관한 理論을 전개하였으며, Van Bavel and Hillel^{20, 21)}, Sophocleous¹⁹⁾, 및 Milly¹⁴⁾가 위의 이론을 발전시켰다.

토양 표면의 일부를 멀치로 덮으면 地表面에서의 에너지收支, 증발량, 토양속의 온도 및 水分의 分布등에 많은 영향을 미친다. 멀치는 主로 表土流失의 防止나 蒸發억제를 위하여 사용된다. 멀치가 토양속의 물과 熱의 이동에 미치는 영향에 대한 研究가 여러 學者들에 의하여 수행되었다. Mahrer¹¹⁾, Mahrer and Katan¹²⁾, Mahrer 등¹³⁾, Jury and Bellantuoni^{8, 9)}등이 一次元 또는 二次元의 토양 수

분이나 熱의 흐름에 대하여 연구하였다.

本 研究에서는 地表의 一部分을 옥수수대 등으로 멀칭하였을 때 토양속의 물과 熱의 흐름에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 ADI 有限差異法을 이용한 컴퓨터 모델을 개발하였다. 本 研究의 目的은

첫째, 數理모델을 개발하는 것이고,

둘째, 개발된 모델을 이용한 시뮬레이션 結果를 分析하는데 있다.

II. 數理 모델

本 數理 모델은 土壤層, 멀치層 및 大氣層으로 構成되는 시스템을 대상으로 한다. 옥수수, 콩등 곡물 잔재를 이용하여 作物(row crop)의 株間隔 사이에 等間隔으로 平行하게 멀칭을 하였을 경우에 대하여 고려하였다. 그림.1은 흐름 區域(flow region)을 나타낸다.

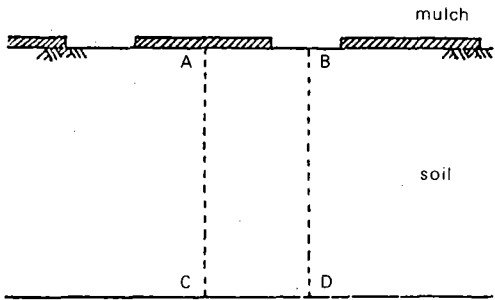


그림.1. Schematic diagram of the flow region

모델링에서는 대칭관계로 因하여 四角形 ABCD 區域만 고려하면 된다.

1. 흐름 方程式

토양속에서의 열과 물의 不定流의 支配方程式은 Philip and De Vries¹⁶⁾에 의해 아래의 식 (1)과 (2)로 각각 개발되었다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta) \dots (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) - \frac{\partial K}{\partial z} \dots (2)$$

여기서 C는 토양熱容量, T는 토양溫度, t는 時間, λ는 토양熱傳導係數, L은 蒸發潛熱, θ는 토양함수량, D_{θv}는 等溫수증기 擴散係數, K는 透水係數, h는 公극 壓力水頭, z는 연직거리(下向이 陽), ∇는 gradient operator이다.

本 研究에서는 수증기의 흐름은 地表面에서만 고려하였다. 따라서 土壤속에서 열의 흐름에 대한 지배방정식은 식(1)에서 右邊의 둘째항은 무시하였다. (2)식을 壓力水頭로 表示하면,

$$F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) - \frac{\partial K}{\partial z} \dots (3)$$

여기서 F는 比水分當量이다.

有限差異法 方程式은 偏微分方程式 (1)과(3)에서 偏微分을 差異法으로 表示하면 求해진다. 二次元 흐름 문제에 關하여 과거에 ADI

有限差異法이 성공적으로 使用되었다¹⁸⁾. ADI 技法에 대하여는 Lapidus and Pinder¹⁰⁾의 책에 상세히 설명되어있다. 그림.2는 흐름區域을 有限差異 格子로 나누었을 경우를 보여준다.

本 ADI 방법에서 使用된 토양속에서의 溫度와 壓力水頭를 계산하는 순서는 다음과 같다.

- (1)時刻 n에서 흐름방정식의 各 係數를 計算한다.
- (2)時刻 n+1에서의 土壤溫度를 구한다.
- (3)時刻 n+1에서의 壓力水頭를 구한다.
- (4)時刻 n+1에서 흐름방정식의 各 係數를 계산한다.

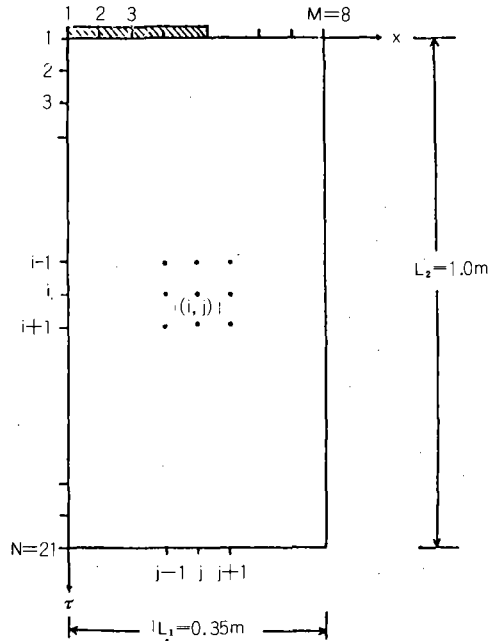


그림.2. Finite difference discretization of the flow region

- (5)時刻 n+2에서의 토양온도를 구한다.
 - (6)時刻 n+2에서의 壓力水頭를 구한다.
- 위의 過程을 各 時間 間隔마다 반복한다. 이때 두 인접 格点사이의 媒介變數는 두 점에

서의 산술평균치 보다 좋은 결과를 준다고 보고된 幾何平均値를 사용하였다^{3,17}).

支配方程式 (1)과 (3)을 풀기 위하여는 初期條件과 境界條件이 필요하다. 本研究에서 그림2의 左右側面에서는 대칭조건에 의하여 no flow 조건을 사용하였다. 地表面 境界에서는 后述될 에너지 收支 방정식에 의하여 溫度 및 증발량을 계산하여 境界조건으로 사용하였으며, 下部의 境界조건은 一定한 溫度와 重力에 의한 물의 흐름을 사용하였다. 降雨時에는 地表面의 溫度는 空氣의 온도와 같다고 가정하였으며 浸透量은 Darcy의 法則으로 계산하였다.

2. 에너지 收支 方程式

지표면에서의 온도와 증발량은 에너지 分配法則에 의하여 결정하였다. 그림.3은 地表

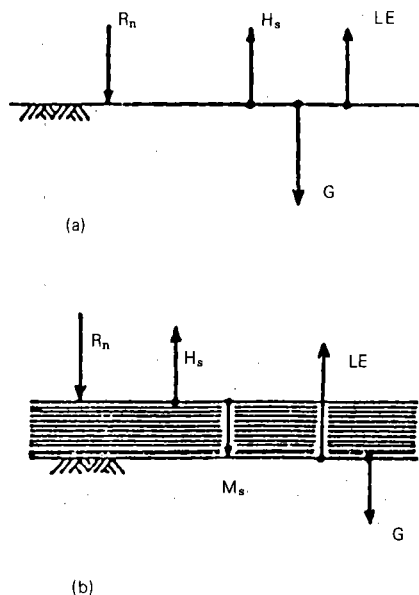


그림. 3. Diagram of energy flow on the soil surface: (a) bare soil, (b) mulch covered soil

에 멀치가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 에너지 分配를 보여준다. 裸地에서의 에너지 收支 方程式은

$$R_n - H_s - LE - G = 0 \dots\dots\dots(4)$$

여기서 R_n 은 純輻射熱(下向이 陽), H_s 는 顯熱 즉 地表와 大氣사이에서 대류나 전도로 전해지는 sensible heat의 흐름(上向이 陽), LE 는 증발 潛熱 흐름(上向이 陽), 그리고 G 는 土壤속으로의 열의 흐름(下向이 陽)이다. 멀치로 덮여있는 경우에는 에너지 收支 방정식을 멀치表面에서와, 멀치와 地表面 境界에서 각각 한번씩 적용하여야 한다. 먼저 멀치 표면에서의 에너지 收支 方程式은

$$R_n - H_s - M_s = 0 \dots\dots\dots(5)$$

여기서 M_s 는 멀치속으로의 열의 흐름(下向이 陽)이며 나머지는 식(4)에서와 같다. 멀치와 地表面의 境界에서의 에너지 收支 方程式은

$$M_s - LE - G = 0 \dots\dots\dots(6)$$

식(4)와 (6)의 各要素들은 모두 地表面 溫度의 함수로, 식(5)의 各要素들은 모두 멀치 표면 온도의 함수로 표시되며 이들은 根의 解法을 반복적으로 사용하여 구할 수 있다. 에너지 收支 方程式에 대하여 더 자세한 내용은 Van Bavel and Hillel^{20,21}이나 Horton 등⁷)을 참고하기 바란다.

3. 컴퓨터 모델에 필요한 入力資料

本 컴퓨터 모델에 필요한 入力資料로는 日氣, 멀치 및 土壤등에 대한 變數들이다. 日氣 자료로는 日總輻射熱, 日최고 및 최저 기온, 日최고 및 최저 露點온도 그리고 日平均 風速등이다. 멀치자료로는 두께, 幅, 熱傳導係數, 증기 擴散係數(Vapor diffusion coefficient), 공극율 및 曲折係數(tortuosity)등이다. 토양 變數로는 地表面 放射係數(emissivity)와 albedo, 透水係數, 증기 擴散係數,

比水分當量(specific water capacity) 등이
 含水量의 함수로 表示되며, 또, 토양水分特
 性 曲線(Soil water characteristic curve)
 이 주어져야 한다. 또, 일반적인 入力資料로
 는 格子 間隔, 時間 間격, 日照時間, 太陽 正
 午(solar noon), 및 地表 粗度길이(surface
 roughness length) 등이 있다.

日氣 入力資料는 日氣條件을 時間의 함수
 로 경험방정式으로 표시하였다. 즉, 純輻射
 熱의 分布는 日照時間內에서 Sine曲線을 따
 른다고 보았으며, 大氣 및 露點 溫度도 Sine
 曲線을 따른다고 가정하였다.

本 研究에서는 토양 媒介變數들을 方程式
 으로 표시하였다. 放射係數와 albedo는 Van
 Bavel and Hillel²¹⁾이 提示한 式을 이용하였
 고 熱傳導係數는 經驗式을 이용하였다. 토양
 熱當量은 De Vries²⁾의 式을 사용하였으며,
 토양 水分 特性 곡선, 투수계수, 比水分當量
 등은 Van Genuchten²²⁾의 經驗式을 利用하
 였다.

Ⅲ. 모델 檢定

開發된 數理모델은 그 解가 理論의인 解나
 實測値와 比較하여 근사한 값을 주는지 여부
 를 조사하여야 한다. 그러나 토양속의 물과 열
 의 흐름을 同時에 푸는 理論의인 解는 없으
 며 實測値도 구하기 어렵다. 따라서 本 研究
 에서는 열의 흐름과 물의 흐름을 分離하여 理
 論値 또는 實測値와 數理 모델의 解를 比較
 함으로써 모델 檢定을 하였다.

모델 檢定에 있어서 열의 흐름은 Van Wijk
 and De Vries²³⁾의 一次元 흐름의 理論的인
 解를 利用하였고, 물의 흐름은 Philip¹⁵⁾의
 準理論的인 解를 利用하였다. 兩 結果値를 比
 較한 결과 물의 흐름 및 열의 흐름 모두 매우
 近似한 값을 보여 주었으며, 이로서 개발된
 數理 모델은 合理的인 推定値를 提供 한다고
 판단하였다.

Ⅳ. 시뮬레이션 結果

여러가지 다른 종류 의 토양, 멀치幅, 日氣
 條件 등에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.
 토양은 均質이고 等方性이라 가정하였다. 本
 論文에서는 代表的인 결과만 論議하고자 한
 다. 本 研究에서 各 토양에 대한 토양 수분
 特性 곡선과 透水係數와 含水量의 關係式은
 Hillel and Van Bavel⁵⁾로 부터 인용하였다.
 또, 熱傳導係數와 含水量과의 關係式은 Wier-
 renga²⁴⁾과 Horton and Wierenga⁶⁾에 있
 는 資料를 利用하였다.

本 研究에서는 멀치의 두께를 2.5cm로 줄
 作物의 株間격은 70cm로 가정하였다. 흐름
 區域은 地下 1m 깊이까지로 하였다. 멀치의
 幅은 株間격의 0%, 50%, 80%, 및 100% 인
 경우를 고려하였다. 15日間에 대하여 시뮬레
 이션을 하였으며 3日째 0시에서 6시 사이에
 80mm의 降雨가 있었다고 가정하였다. 시뮬레
 이션에서 格子 間격은 5cm를, 時間 間격은 5
 分을 使用하였다. 降雨 時間을 前後해서 時
 間 間격을 원래의 1/10내지 1/200로 줄여 사
 용하였다.

시뮬레이션 결과로는 土壤內의 溫度分布와
 地表面에서의 單位時間當 및 累積 純輻射熱
 의 흐름, sensible heat의 흐름, 증발 잠열
 의 흐름 및 토양속으로의 열의 흐름등의 熱
 環境과 공극의 壓力水頭 및 含水量의 分布와
 單位時間當 및 累積 浸透量, 증발량, 排水量
 등과 토양 蓄積 水量등의 水理環境이 있다.
 아래에서 로움(loam) 토양에 대한 15日間의
 시뮬레이션 結果를 고찰하고자 한다.

1. 熱의 흐름

그림. 4는 株間격의 50%가 멀치로 덮여 있
 는 경우에 지표면 또는 멀치표면에서의 累積
 된 熱의 흐름을 推定한 結果이다. 그림에서
 格點 1은 멀치의 中間 부분이고 格點 8은 裸
 地의 中間 부분을 나타낸다. 멀치로 덮여 있
 는 格點 1에서는 純복사열과 sensible heat

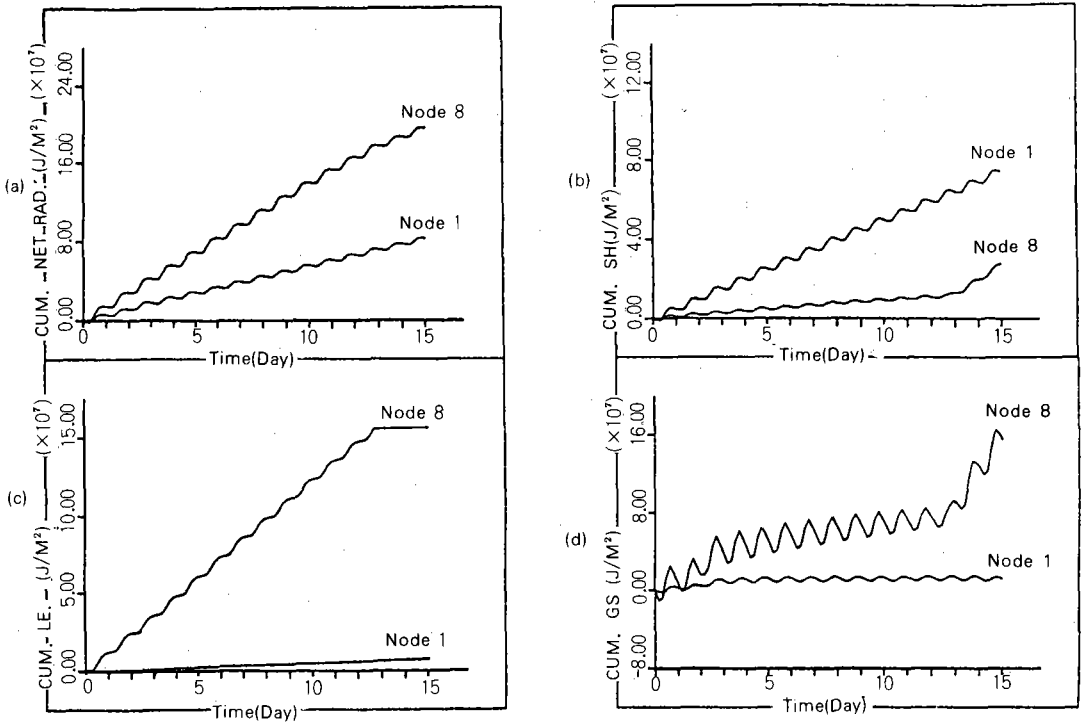


그림 4. Predicted cumulative heat flux of net radiation(a), sensible heat(b), latent heat(c), and soil heat(d) for the loam soil with a half-width mulch cover and a rainfall for a 15-day simulation

의 흐름은 멀치표면에서 발생하고 증발잠열과 토양열의 흐름은 地表面에서 발생한다. 裸地표면에서의 純복사열은 멀치로 덮힌 경우보다 2倍以上 컸으며, 이는 멀치표면의 albedo 값이 큰데 基因한다. 14日째, 즉 강우후 11日째에 裸地表面에서의 sensible heat, 증발잠열, 및 토양열의 흐름이 갑자기 變化하였다. 累積증발잠열은 一定하였는데 이는 지표 가까이는 거의 乾燥하여졌기 때문이다. 그림 5는 地表面, 깊이 10cm 및 40cm에서의 溫度의 變化를 보여주고 있다. 格點 1(멀치중간)에서의 온도의 변화는 格點 8(裸地중간)에서 보다 작다. 14日째 부터 地表 가까운 溫度는 급격히 증가하였는데 이는 토양수분의 減小로 純복사열이 증발 잠열이 아니라 토양열로 主로 사용되었기 때문이다. 깊이 40cm에서의 日變化의 振幅은 매우 작으

며 格點 1과 8사이의 溫度差異가 거의 없었다. 그림 6은 4日째와 15日째 午後 2時의 地溫, 含水量 및 壓力水頭의 分布狀態를 보여준다. 비온 다음날인 4日째의 경우 地溫分布가 地下 30cm까지는 二次元的이었으며, 地表의 멀치와 裸地의 境界부분에서 급격한 온도 변화가 있었다. 그以後 큰 變化가 없다가 15日째에는 裸地表面이 乾燥해지면서 地表面의 溫度가 급격히 상승하였다. 表-1은 格點 8(裸地 中間)에서의 에너지收支方程式의 各項目別 日合計와 最高, 最低 溫度를 보여주고 있다. 14日째부터 純복사열과 증발잠열은 갑자기 감소하는 반면 sensible heat, 토양열흐름 및 溫度는 갑자기 增加하였다. 이는 裸地表面에서 含水量이 매우 減小한데 基因한다.

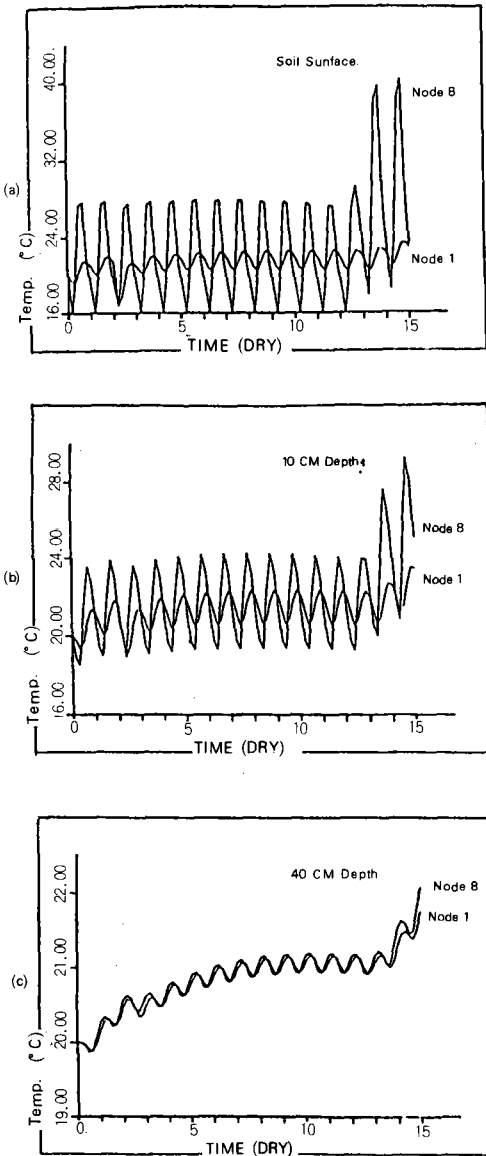


그림. 5. Predicted soil temperature at the soil surface(a), at the 10-cm depth(b), and at the 40-cm depth(c) for the loam soil with a half-width mulch cover and a rainfall for a 15-day simulation

2. 물의 흐름

이節에서는 로움(loam) 토양에서 여러가지 멀치幅의 경우에 대한 시뮬레이션 결과인

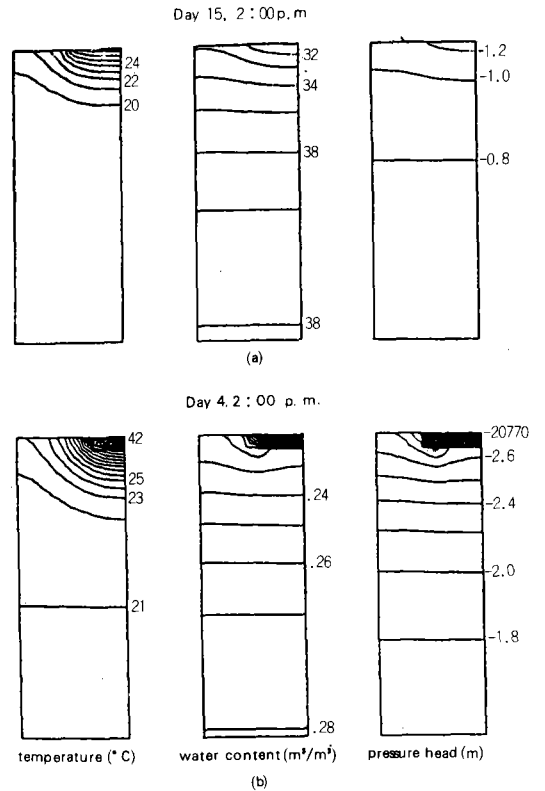


그림. 6. Contour plots of temperature, water content and pressure head in the 0.35×1.0 m flow region at 2:00 p.m. for day 4 (a) and day 15 (b) for the loam soil with a half-width mulch cover and a rainfall for a 15-day simulation

含水量, 壓力水頭, 증발량, 배수량 및 토양蓄積水分에 대하여 고찰하고자 한다.

그림. 7은 格点1(멀치 중간)과 格点8(裸地 중간)에서의 含水量의 變化를 보여준다. 3日째의 강우후에 含水量의 증가를 보여주었다. 地表面과 10cm 깊이에 있어서의 日變化는 멀치로 덮힌 부분은 거의 없으나 裸地の 경우는 컸다. 裸地에서 地表面 가까이 含水量은 점차 감소하였으며 14日째 부터는 최저含水量을 나타내었다.

그림. 8은 여러가지 멀치幅에 대하여 單位 두께에 대한 흐름區域의 水分蓄積과 下部경

表-1. Daily totals of net radiation (R), sensible heat (S_n), latent heat (LE), and soil heat (G), and the maximum and minimum temperature on the bare soil surface (node 8) of the loam soil with a half-width mulch cover and a rainfall on day 3

Day	R_n (MJ/m ²)	S_n (MJ/m ²)	LE (MJ/m ²)	G (MJ/m ²)	$T_{s, \max}$ (°C)	$T_{s, \min}$ (°C)
1	13.83	0.80	12.15	0.861	27.7	15.8
2	13.92	0.88	12.34	0.682	27.8	15.9
3	14.51	1.01	11.24	2.283	27.6	16.7
4	13.74	0.86	12.28	0.574	27.7	16.0
5	13.88	0.93	12.46	0.475	27.8	16.0
6	13.99	0.97	12.58	0.431	27.9	16.0
7	14.00	0.98	12.61	0.378	27.8	16.0
8	13.91	0.97	12.57	0.366	27.8	16.0
9	13.75	0.94	12.47	0.342	27.8	16.0
10	13.53	0.80	12.31	0.333	27.7	16.0
11	13.28	0.82	12.14	0.324	27.5	15.9
12	12.83	0.72	11.83	0.286	27.3	15.9
13	11.56	2.32	8.22	1.728	29.2	15.9
14	9.43	7.02	0.36	3.681	39.6	17.7
15	9.15	7.56	0.33	2.803	40.3	18.3

表-2. Daily totals of evaporation (E), drainage (D), and the maximum and minimum water content and pressure head on the bare soil surface (node 8) of the loam soil with a half-width mulch cover and a rainfall on day 3

Day	E (mm)	D (mm)	θ_{\max} (m ³ /m ³)	θ_{\min} (m ³ /m ³)	h_{\max} (m)	h_{\min} (m)
1	4.98	35.0	0.325	0.297	-1.13	-1.45
2	5.08	15.4	0.309	0.274	-1.31	-1.79
3	4.61	17.3	0.478	0.343	-0.03	-0.96
4	5.04	22.5	0.338	0.305	-1.00	-1.36
5	5.11	14.7	0.311	0.276	-1.28	-1.76
6	5.16	10.4	0.293	0.253	-1.51	-2.19
7	5.17	7.9	0.277	0.231	-1.74	-2.71
8	5.16	6.3	0.263	0.210	-1.99	-3.38
9	5.11	5.1	0.248	0.189	-2.29	-4.30
10	5.05	4.3	0.233	0.160	-2.66	-6.16
11	4.98	3.7	0.213	0.129	-3.26	-9.94
12	4.85	3.1	0.178	0.084	-4.92	-26.05
13	3.37	2.7	0.097	0.014	-18.67	-11260
14	0.15	2.4	0.017	0.013	-2936	-18800
15	0.13	2.1	0.016	0.012	-3500	-19900

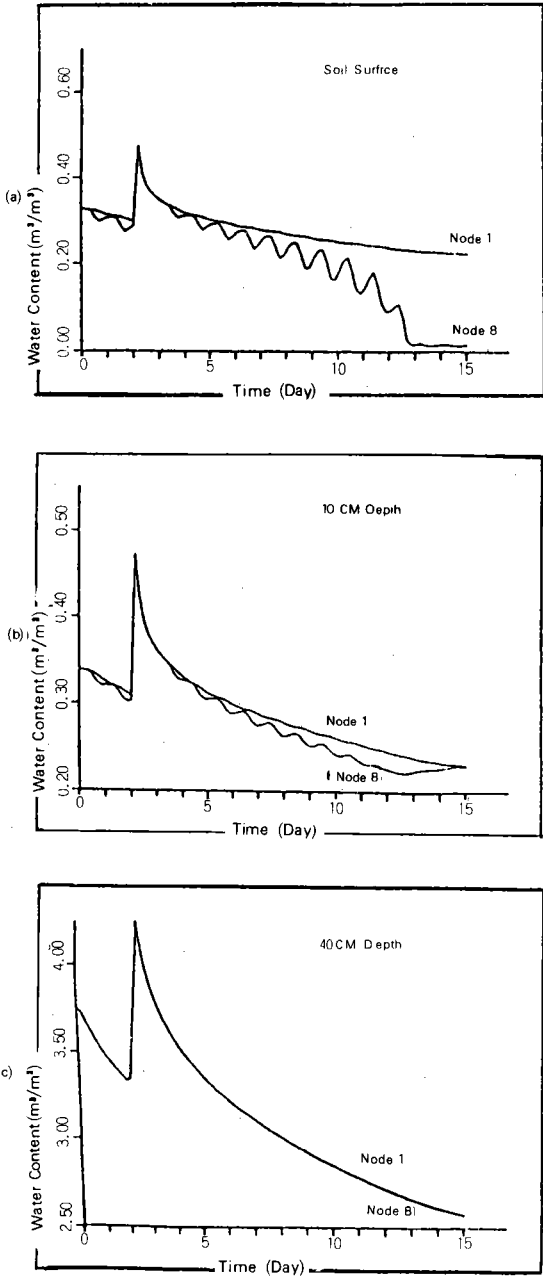


Fig. 7. Predicted water content at the soil at the 40-cm depth(c) for the loam soil surface(a), at the 10-cm depth(b), and with a half width mulch cover and a rainfall for a 15-day simulation

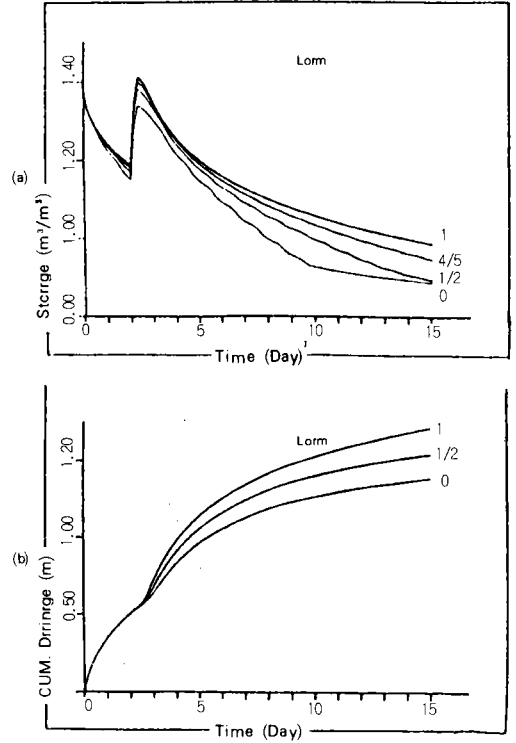


Fig. 8. Predicted water storage in the $0.35 \times 1.0\text{m}$ flow region in unit thickness (a) and cumulative drainage across the bottom boundary (b) for the loam soil with a half-width mulch cover and a rainfall for a 15-day simulation

계를 통한 累積排水量을 보여준다. 제 3일에 80mm의 강우로 인하여 수분축적량이 급격히 증가하였다가 시간이 흐를수록 증발과 배수로 인하여 점차 감소하였다. 또, 멀치幅이 넓을수록 증발손실을 억제되기 때문에 수분축적량이 크다는 것을 알 수 있다. 累積排水曲線을 보면 강우 시작후 10여 시간후에 곡선의 경사가急變하는 것을 볼 수 있다. 이는 침투한 물이 1m 깊이의 下部境界에 도달하는데 10여 시간이 소요된다는 것을 보여준다.

그림. 6에서 4日째와 15日째의 含水量 및 壓力水頭의 分布狀態를 보여준다. 15日째날 裸地表面에서의 含水量과 壓力水頭의 變化率은

매우 크다. 그리고 地下 40cm 以下에서는 흐름은 거의 一次元的인 것을 알 수 있다.

表-2는 日總증발량, 排水量 및 格点8(裸地中間) 地表面에서의 日최고 및 최저 涵수량과 압력수두의 값을 보여준다. 涵水量은 14 日째 부터 급격히 감소하였고 涵수량과 밀접한 관계가 있는 증발량도 같은 추세를 보여준다.

V. 摘要 및 結論

地表面의 一部가 멀치로 덮었을 경우의 二次元的인 土壤속의 물과 熱의 흐름 문제를 풀기 위하여 ADI 有限差異法을 이용한 컴퓨터 모델을 개발하였다. 地表面의 경계조건인 溫度와 蒸發量은 에너지 收支 方程式을 이용하여 구하였다. 여러가지 시뮬레이션 결과중 代表的인 一部가 論議되었다. 本 시뮬레이션 결과에 의하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 本 研究에서 개발된 ADI 모델은 토양속의 물과 열의 흐름을 合理的으로 推定하였다.

(2) 純輻射熱은 地表面이 습윤할 때는 주로 蒸發潛熱로, 乾燥할 때는 주로 sensible heat와 土壤熱로 이용되었다.

(3) 地溫, 含水量 및 壓力水頭의 日變化의 振幅은 裸地の 경우 훨씬 컸다.

(4) 地下 40cm 以下에서는 흐름이 거의 一次元的이었다.

(5) 멀칭이 증발량을 크게 감소시켰다.

本 研究에서 개발된 ADI 모델은 農工學에서 많이 應用될 수 있다. 本 모델은 장차 實際로 利用되기에 앞서 시뮬레이션 결과와 實測值를 比較함으로써 다시 檢定하여야 할 것이다.

參 考 文 獻

1. De Vries, D. A. 1958. Simultaneous transfer of heat and moisture in Porous media. *Trans. Am. Geophys Union* 39 : 909-916.
2. De Vries, D. A. 1963. Thermal properties of soils. In : W. R. Van Wijk (ed.), *Physics of Plant Environment*. North Holland, Amsterdam.
3. Haverkamp, R., and M. Vauclin. 1979. A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transient unsaturated flow problems. *water Resour. Res.* 15 : 181-187.
4. Haverkamp, R., M. Vauclin, J. Touma, P. J. Wierenga, and G. Vachaud. 1977. A comparison of numerical simulation models for onedimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41 : 285-294.
5. Hillel, D., and C. H. M. van Bavel. 1976. Simulation of profile water storage as related to soil hydrologic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 : 807-815.
6. Horton, R., and P. J. Wierenga. 1984. The effect of column wetting on soil thermal conductivity. *Soil Sci.* 138 : 102-108.
7. Horton, R., O. Aguirre-Luna, and P. J. Wierenga. 1984. Soil temperature in a row crop with incomplete surface cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 1225-1232.
8. Jury, W. A., and B. Bellantuoni. 1976a. Heat and water movement under surface rocks in a field soil : I. Thermal effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 : 505-509.
9. Jury, W. A., and B. Bellantuoni. 1976b. Heat and water movement under surface rocks in a field soil : II. Moisture effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 : 509-513.
10. Lapidus, L., and G. F. Pinder. 1982. Numerical solution of partial differential equations in science and engineering. Wiley-Interscience, New York.
11. Mahrer, Y. 1979. Prediction of soil temperature of a soil mulched with transparent polyethylene. *J. Appl. Meteorol.* 18 : 1263-1267.
12. Mahrer, Y., and J. Katan. 1981. Spatial soil

- temperature regime under transparent polyethylene mulch : Numerical and experimental studies. *Soil Sci*, 131 : 82-87.
13. Mahrer, Y., O. Naot, E. Rawitz, and J. Katan. 1984. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 362-367.
 14. Milly, C. P. D. 1982. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media : A matric head-based formulation and a numerical model. *Water Resour. Res.* 18 : 489-498.
 15. Philip, J. R. 1957. The theory of infiltration : 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* 83 : 345-357.
 16. Philip, J. R., and D. A. De Vries. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 38 : 222-232.
 17. Schnabel, R. R., and E. B. Richie. 1984. Calculation of internodal conductances for unsaturated flow simulations : A comparison. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 1006-1010.
 18. Selim, H. M., and D. Kirkham. 1973. Unsteady two-dimensional flow of water in unsaturated soil above an impervious barrier. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37 : 489-495.
 19. Sophocleous, M. 1979. Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media. *Water Resour. Res.* 15 : 1195-1206.
 20. Van Bavel, C. H. M., and D. I. Hillel. 1975. A simulation study of soil heat and moisture dynamics as affected by a dry mulch, p. 815-821. *In* *proc. 1975 Summer Computer Simulation Conf.*, San Francisco, CA. Simulation Councils, Inc., La Jolla, CA.
 21. Van Bavel, C. H. M., and D. I. Hillel. 1976. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agric. Meteorol.* 17 : 453-476.
 22. Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 : 892-898.
 23. Van Wijk, W. R., and D. A. De Vries. 1963. periodic temperature variations in a homogeneous soil. *In* : W. R. Van Wijk (ed.), *Physics of Plant Environment*. North Holland, Amsterdam.
 24. Wierenga, P. J., D. R. Nielsen, and R. M. Hagan. 1969. Thermal properties of a soil basid upon field and laboratory measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33 : 354-360.