

멀칭에 따른 지온변화 모델의 작성 및 토양온도의 추정*

최일선 · 이변우

서울대학교 농업생명과학대학

(1999년 11월 25일 접수)

Simulation Model for Estimating Soil Temperature under Mulched Condition*

RiXian Cui and Byun-Woo Lee

Department of Agronomy, College of Agriculture and Life Sciences,

Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

(Manuscript received 25 November 1999)

ABSTRACT

A numerical model using soil surface energy balance and soil heat flow equations to estimate mulched soil temperature was developed. The required inputs data include weather data, such as global solar radiation, air temperature, wind speed, atmospheric water vapor pressure, the optical properties of mulching material, and soil physical properties. The observed average soil temperature at 50 cm depth was used as the initial value of soil temperature at each depth. Soil temperature was simulated starting at 0 hour at an interval of 10 minutes. The model reliably described the variation of soil temperature with time progress and soil depth. The correlation between the estimated and measured temperature yielded coefficient values of 0.961, 0.966 for 5cm and 10cm depth of the bare soil, respectively, 0.969, 0.965 for the paper mulched soil, and 0.915, 0.938 for the black polyethylene film mulched soil. The percentages of absolute differences less than 2°C between soil temperatures measured and simulated at 10 minute interval were 97.4% and 98.5% for 5 cm and 10cm for the bare soil, respectively, and 95.8% and 97.4% for the paper mulched soil, and 70.1% and 92.5% for the polyethylene film mulched soil. The results indicated that the model was able to predict the soil temperature fairly well under mulched condition. However, in the night time, the model performance was a little poor as compared with day time due to the difficulty of accurate determination of the atmospheric long wave radiation.

Key words : soil temperature, simulation model, mulch material, mulching

I. 서 론

멀칭은 지온조절, 토양수분조절, 토양침식의 방지, 잡초발생 억제 등 목적으로 실제 작물재배에 이용되고 있다. 1960년대 이전까지는 멀칭재료로 벚짚, 작물 잔여물 등이 많이 이용되었으나 플라스틱 필름이 개발되면서부터는 이로 대체되었다. 최근에는 환경오염에 대한 우려와 농산물의 안정성에 대한 관심으로 플라스틱

필름의 대체용으로 재생 종이 멀칭에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다(Adams, 1970; Anderson, *et al.* 1995; Courter, Jensen, 1988; Lamb and Chapman, 1943).

최근 30여년간 멀칭에 따른 토양환경 특히 토양온도의 변화에 대해 많은 연구가 진행되었고(Ekern, 1967; Clarkson, 1960; Ham, *et al.* 1993), 또한 멀칭에 따른 토양온도를 모의할 수 있는 모델이 다수 개발되었다(Wu *et al.* 1996; Mahrer *et al.* 1984; Sui *et al.* 1992;

Corresponding Author : RiXian Cui(chis@plaza1.snu.ac.kr)

*본 연구는 농림부 농림수산특정연구사업비에 의하여 수행된 것임.

Bristow and Campbell, 1986; Horton and Chung, 1991). 그러나 종이멀칭에 따른 지온 변화와 이를 모의할 수 있는 모델에 대한 연구는 매우 적다.

본 연구는 나지와 토양표면의 멀칭, 특히는 재생 종이멀칭에 의한 토양온도변화를 추정할 수 있는 모델을 개발하여 경지의 멀칭처리에 따른 지온변화를 미리 예측함으로써 작기 이동, 멀칭의 시기 및 멀칭재료의 선택 등에 관한 정보를 제공하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서 작성한 모델은 토양 표면의 에너지 수지식과 토양 열흐름 방정식을 수치적으로 값을 구하여 토양온도를 추정하는데, 입력되는 자료로는 시작시의 토양 물리성, 토양수분 및 일반적인 기상관측자료 즉, 대기 일사량, 풍속, 대기온도 및 대기 수증기압이다.

II. 모델의 이론

토양표면과 멀칭표면의 에너지 수지는 다음 [1]식과 같이 나타내었다.

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad [1]$$

이 식에서 R_n ($W m^{-2}$)는 순복사, H ($W m^{-2}$)는 현열 플럭스, LE ($W m^{-2}$)는 잠열 플럭스, G ($W m^{-2}$)는 지중열류이다. 여기서 H 와 LE 는 플럭스가 대기를 향하는 경우를 정의 값을, G 는 지중을 향하는 경우를 정의 값으로 하였다.

토양온도는 수직방향의 일차원열전도만을 고려하여 다음의 열전달 방정식을 수치해석하여 계산하였다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [2]$$

식 [2]에서 C 는 토양의 용적열용량($J m^{-3} K^{-1}$)이며, λ 는 열전도도($W m^{-1} K^{-1}$)이며, T 는 토양온도(K), t 는 시간(s), z 는 토양 깊이(m)를 나타낸다.

C 및 λ 는 de Vries(1963)의 방법에 의해 계산하였다. 일반적으로 유기물과 광물질의 열용량이 비슷하므로 C 는 식 [3]에 의해 계산하였다.

$$C = C_m(1 - \Phi_f) + C_w \theta \quad [3]$$

식 [3]에서 C_m 은 토양 광물질의 용적열용량이며, Φ_f 는 토양孔隙率이고, C_w 는 물의 용적열용량이고, θ 는 용적 수분함량이다.

열전도도는 다음 식 [4]에 의해 계산하는데, 식에서 A, B, C, D 는 계수로서 토양假比重, 용적水分含量, 粘土成分이 차지하는 비율 등에 의해 계산하며, E 의 값은 4로 하였다(Campbell, 1985).

$$\lambda = A + B\theta - (A - D)\exp[-(C\theta)^E] \quad [4]$$

2.1. 무멀칭 地表面의 熱收支項 計算

토양표면의 순복사량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_s + \epsilon_s \epsilon_{\alpha} \sigma T_{\alpha}^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad [5]$$

식 [5]에서 α_s 는 토양의 albedo이고, R_s 는 일사량이며, ϵ_s 는 토양의 복사능, ϵ_{α} 는 대기의 유효복사능으로서 Monteith and Unsworth(1990)의 방법에 따라 계산하였으며, T_{α} 는 기온(K), T_s 는 토양표면온도(K), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($56.7 \times 10^{-9} W m^{-2} K^{-4}$)이다.

顯熱플럭스($W m^{-2}$)는 식 [6]에 의해 계산하였다. ρC_p 는 공기의 용적열용량($J m^{-3} K^{-1}$)이며, r_H 는 열傳達抵抗($s m^{-1}$)인데, Campbell(1977)에 따라서 다음과 같이 계산하였다.

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / r_H \quad [6]$$

$$r_H = \{ \ln[(Z - d + z_H) + \Psi_H] \} / (u^* k) \quad [7]$$

$$u^* = uk / \{ \ln[Z - d + z_m / z_m] + \Psi_m \} \quad [8]$$

식 [8] 중의 Ψ_m (stability correction for momentum)는 운동량에 대한 대기안정도 보정계수로서 열에 대한 대기안정도 보정계수 Ψ_H (stability correction factor for heat)에 의해 추정하는데, 대기가 안정된 상태에서는 $\Psi_m = \Psi_H$ 이고, 안정되지 않은 상태에서는 $\Psi_m = 0.6 \Psi_H$ 이다. 안정도 보정계수(Ψ_H)는 안정계수(S_p)로부터 다음과 같이 계산된다(Campbell, 1977).

$$S_p = -k(Z - d)gH / [\rho C_p T_a u^{*3}] \quad [9]$$

$$S_p > 0 \text{ 일 때 (安定狀態), } \Psi_H = 4.7 S_p \quad [10]$$

$$S_p < 0 \text{ 일 때 (不安定狀態), } \Psi_H = -2 \ln((1 + (1 - 16 S_p^{1/2}) / 2)) \quad [11]$$

위 식 (10)에서 u^* 는 摩擦速度이고, $K(0)$ 은 境界面

表面의 傳導度이며, k 는 von Karman 상수로서 그 값은 0.41이고, T_s 는 토양표면의 온도이며, T_a 는 기온이고, u 는 풍속이며, Z 는 풍속을 측정된 높이이다. d 는 영면 修正高(zeroplane displacement height)이며, z_H 및 z_m 은 열과 운동량의 거칠기 길이(roughness length)이다. 潛熱플럭스(LE)는 식 [12]~[17]로 계산하였다.

$$LE = L(x_s - x_a)/(r_H + r_s) \quad [12]$$

$$r_s = 100(-8.05 + 41.4(\theta_s - \theta)) \quad [13]$$

$$x_a = 2.17e_a \times 10^{-6}/T_a \quad [14]$$

$$x_s = x_o \exp(h/46.97T_s) \quad [15]$$

$$x_o = 1.323 \exp(17.27(T_s - 273.16)/(T_s - 35.86))/T_s \quad [16]$$

$$h = \frac{1}{\alpha} \left\{ \left[\frac{(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} \quad [17]$$

식 [12]에서 L (J/kg)는 수증기 증발 잠열로서, $L = 2.49463 \times 10^6 - 2.247 \times 10^3 \times (T_s - 273.16)$ 로 계산하였으며(Horton and Chung, 1991), x_a 는 대기 절대습도이며, 식 [14]에서 e_a , T_a 는 대기의 수증기압(KPa) 및 대기의 온도(K)이다. x_s 는 토양표면의 絕對濕度이며, van Bavel(1976)의 방법에 따라 계산하였는데, 식 [16]에서 x_o 는 토양표면의 飽和絕對濕度이며, 飽和濕度의 계산식은 Murray(1967)의 방법을 이용하였으며, h 는 토양표층의 水分壓力水頭(soil water pressure potential head of surface layer)인데, Ten Berge (1990)의 방법에 따라 계산하였다. 식 [17]에서 θ , θ_s , θ_r 는 각각 실제 수분함량, 포화상태의 수분함량 및 잔여수분함량이다. 단위는 m^3/m^3 로 표시한다. a , n 는 Van Geunchten 계수인데, 토성에 따라 달라진다. r_H 는 熱傳達抵抗이며 r_s 는 表面抵抗($s \cdot m^{-1}$)으로서, Camillo and Gurney (1986)의 방법에 따라 계산하였다. 식 [15] 및 [16]에서의 T_s 는 토양표면의 온도이다.

地中熱流 G 는 토양 층위의 온도구배에 의해 식 [18]와 같이 계산하였는데, 이 식에서 λ 는 열전도도(thermal conductivity)로서 식 [4]에 의해 계산하였다.

$$G = \lambda(\partial T/\partial z) \quad [18]$$

2.2. 멀칭을 한 경우의 熱收支項 計算

멀칭층 아래의 토양표면 純輻射는 토양표면과 멀칭 사이의 多重反射를 고려하여 다음 식으로 나타내었다(Wu *et al.*, 1996)

$$R_n = R_s \tau_s (1 - \alpha_s) / (1 - \rho_s \alpha_s) + \epsilon_a \sigma T_a^4 \epsilon_s \tau_s / (1 - \rho_1 + \rho_1 \epsilon_s) + \epsilon_s \epsilon_m \sigma T_m^4 / (1 - \rho_1 + \rho_1 \epsilon_s) - (1 - \rho_1) \epsilon_s \sigma T_s^4 / (1 - \rho_1 + \rho_1 \epsilon_s) \quad [19]$$

식 [19]에서 τ_s , τ_i , ρ_s , ρ_i 는 단파복사 및 장파복사의 멀칭자재에 의한 투과율과 반사율이며, ϵ_a , ϵ_s , ϵ_m 는 각각 대기, 토양 및 멀칭표면의 복사능이며, T_a , T_m 및 T_s 는 각각 대기, 멀칭표면 및 토양표면 온도(K)이다.

멀칭층과 토양표면사이의 대류에 의한 顯熱플럭스는 Garzoli and Blackwell(1981)의 방법에 따라 계산하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$H = h_i(T_s - T_m) \quad [20]$$

이 식에서 h_i 는 停滯空氣層의 熱傳達係數로서 그 값은 $7.2 \text{ W } m^{-2} \text{ K}^{-1}$ 이며(Garzoli and Blackwell, 1981), T_m , T_s 는 각각 멀칭면과 토양표면의 온도이다.

수분증발에 의한 潛熱플럭스는 무멀칭의 경우와는 달리 멀칭층에 의한 저항이 있게 된다. 폴리에틸렌 필름의 경우 멀칭에 의한 저항은 무한히 크므로 潛熱플럭스는 영이 된다(Mahrer, 1979). 地中熱流 G 는 무멀칭의 경우와 같으므로 같은 식 [18]를 이용하여 계산하였다.

멀칭표면의 순복사는 다음과 같이 계산하였다.

$$R_n = R_s((1 - \rho_s) - \tau_s(1 - \alpha_s + \tau_s \alpha_s) / (1 - \rho_s \alpha_s)) + \epsilon_a \sigma T_a^4((1 - \rho_1) - \tau_1(\tau_1 + \epsilon_s(1 - \tau_1)) / (1 - \rho_1 + \rho_1 \epsilon_s)) - \epsilon_m \sigma T_m^4(2 - (1 - \epsilon_s)(1 - \tau_1 - \rho_1) / (1 - \rho_1 + \rho_1 \epsilon_s)) + \epsilon_s \sigma T_s^4(1 - (\tau_1 + \rho_1) / (1 - \rho_1 + \rho_1 \epsilon_s)) \quad [21]$$

이 식에 표시된 기호는 식 [19]과 같다.

멀칭표면에서의 대류에 의한 顯熱플럭스는 멀칭면과 대기와의 대류에 의한 부분과 멀칭면과 토양표면과의

대류에 의한 부분의 합이다.

$$H = \rho c_p(T_m - T_a)/r_H + h_i(T_m - T_s) \quad [22]$$

식 [22]에서 T_m , T_a 및 T_s 는 각각 멀칭면의 온도, 대기 온도 및 토양표면의 온도이며, 그 외의 것은 식 [6]과 식 [20]에서의 표기와 같다.

潛熱플럭스 LE는 폴리에틸렌 필름과 종이멀칭의 경우, 영으로 하였다.

멀칭면의 온도 T_m 과 토양표면의 온도 T_s 는 각 time step에서 에너지 수지식(식 [1])을 Newton-Raphson 반복계산법(Remson *et al*, 1971)에 의하여 해를 구하여 계산하였다.

식 [2]는 다음과 같은 유한차분식(implicit difference equation)으로 표시하였다.

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{D_{i+1/2}^{n+1/2}(T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) - D_{i-1/2}^{n+1/2}(T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1})}{(\Delta z)^2} \quad [23]$$

식에서 i 는 토양 층위를 나타내고, n 는 time step을 나타내는 계수이며, t 는 시간이고 z 는 토양 깊이이며 $D\left(= \frac{\lambda}{C}\right)$ 는 熱擴散係數($m^2 s^{-1}$)이며 특정 층위의 熱擴散係數 D 는 인접한 上, 下層의 열확산계수의 평균에 의해 구하였다. 각 층위에 대하여 식 [23]를 적용하면 $m+2$ 개의 미지수와 m 개의 연립방정식이 구성되는데 앞에서 구한 토양표면의 온도 T_s 와 基底層의 온도 T_{m+1} 를 境界條件으로 대입하면 연립방정식을 해할 수 있다. 이 연립방정식은 Gauss의 部分消去法으로 해를 구하여 각 층위의 지온을 계산하였다.

III. 재료 및 방법

본 실험은 1998년 8월20일~1998년 9월20일 사이에서 서울대학교 농업생명과학대학 실험농장에서 수행되었다. 사용된 멀칭재료 및 멀칭처리는 다음 Table 1과 같다.

Table 2는 본 실험이 수행된 토양의 물리성, 사용된 멀칭재료의 광학적 특성 및 모델에 사용된 상수들의 값을 나타낸 것이다.

Table 1. Mulch materials and mulch treatments in 1998 fall season experiment

Treatment	Remarks
BS	not mulched
BPF	mulched with black polyethylene film (0.01mm)
PM	mulched with mulch paper(110 g/m ²)

모델의 입력자료로 하는 기상자료는 다음과 같이 측정하였다. 대기일사량은 1 m 높이에 수평면일사계(Campbell사, 모델 LI1200)를 설치하여 측정하였고, 풍속은 3배풍속계(Campbell사, 모델 03001 wind sentry)를 3 m 높이에 설치하여 측정하였으며 건, 습구온도와 대기수증기압 및 포화수증기압은 1.5 m 높이에 건, 습구온도계를 설치하여 측정하였다. 모델의 검증을 위하여 멀칭재료의 내면, 외면의 온도, 토양표면 및 토심 5, 10, 20, 30, 50 cm의 온도를 thermocouple (chromel-alumel; $\Phi=0.13$ mm)로 측정하였다. 측정된 데이터는 Data logger(Campbell사, 모델 CR10)로 실험기간 중 연속 관측하여 매 10분간의 평균치를 수집하였다.

측정 기상요소는 대기 일사량, 대기 온도, 대기 습도 및 풍속 등이며, 매 시간별 토양표면 에너지 수지식에 대입하여 각 항을 계산하고 수치해석을 통한 토양 표면온도를 계산하였다. 토양 물리성 및 토양수분 함량 자료로 각 층위별 토양 열용량과 열전도도를 계산하였다. 각 층위에 대하여 식 [23]을 적용하여 연립방정식을 구성하며 위에서 구한 토양 표면온도와 기저층의 온도를 경계조건으로 하여 이 연립방정식을 解함으로써 각 층위의 토양온도를 계산하였다. 다음 Fig. 1은 지온 추정모델의 간략한 흐름을 나타낸 것이다.

IV. 결과 및 고찰

모델의 지온 추정 정확도를 검증하기 위하여 1998년 8월25일부터 8월29일까지 5일간 10분 간격으로 각 층위의 지온을 추정하였으며, 이러한 추정지온을 이 기간 중의 실측한 지온과 비교하였다. Fig. 2는 무멀칭에서의 5 cm 및 10 cm 깊이의 실측지온과 모델에 의한 추정값을 비교한 것이다. 모델 추정치와 실측치가 비교적 잘 일치하였으나 시간경과에 따라서 오차가 다소 커지는 경향이었는데 이는 모델에서 수분함량의 변화를 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2. Soil properties, optical properties of mulch materials and other parameter values used in .model simulation

Description	Symbol	Value	Unit
Soil properties			
bulk density		1.03	g/cm ³
particle density of soil		2.65	g/cm ³
saturated soil moisture	θ_s	0.48	m ³ /m ³
residual soil moisture	θ_r	0.04	m ³ /m ³
fraction of clay		0.15	
Optical properties of mulch materials			
1. mulch paper			
transmissivity of solar radiation	τ_s	0.01	
transmissivity of long wave radiation	τ_l	0.04	
reflectivity of solar radiation	ρ_s	0.45	
reflectivity of long wave radiation	ρ_l	0.22	
2. black polyethylene film			
transmissivity of solar radiation	τ_s	0.02	
transmissivity of long wave radiation	τ_l	0.14	
reflectivity of solar radiation	ρ_s	0.04	
reflectivity of long wave radiation	ρ_l	0.01	
Parameters			
van Genuchten parameter	α	1.55	
van Genuchten parameter	n	1.50	
surface roughness length (bare soil)	z_0	0.001	m
surface roughness length (mulched soil)	z_0	0.0001	m
zeroplane displacement height	d	0.01	m

Fig. 3은 종이멀칭에서의 5 cm 및 10 cm 깊이의 실측지온과 모델에 의해 추정된 지온을 비교한 것이고, 그림 4는 흑색 폴리에틸렌 필름 멀칭처리에서의 결과

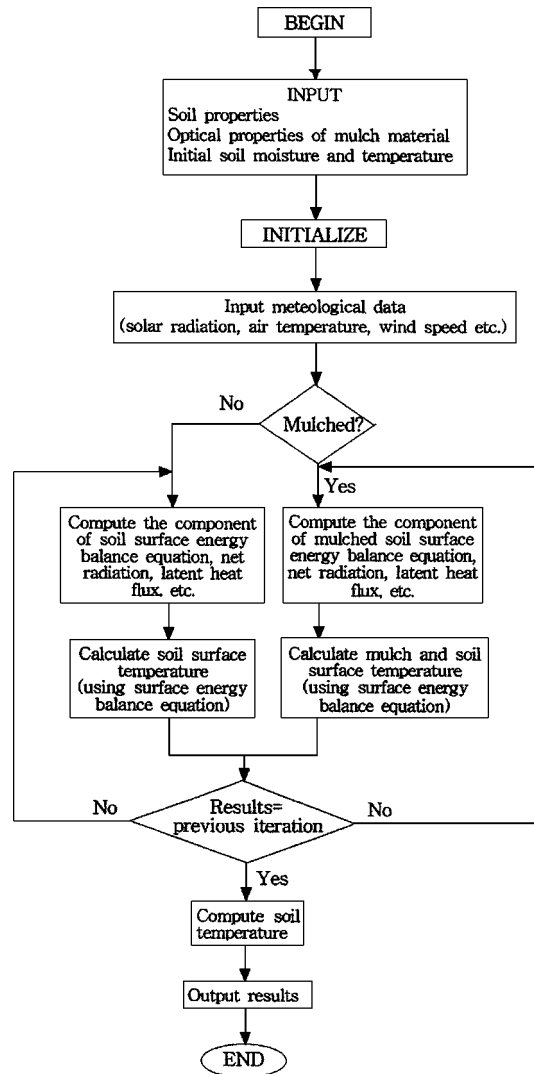


Fig. 1. Simplified flow chart of the simulation model.

를 비교한 것이다. 종이 및 폴리에틸렌 필름 멀칭에서 모두 모델에 의한 추정 지온과 실측지온이 잘 일치하여 본 모델은 멀칭조건에서도 무멀칭의 경우와 같이 지온 추정이 가능하였다.

모델에 의해 추정된 지온변화추세의 정확성을 검토하기 위하여 모델에 의해 10분 간격으로 추정된 값과 실측치와의 상관관계를 계산하였는데, 무멀칭에서의 상관관계수(r , $n=720$)값은 5 cm 및 10 cm에서 각각 0.961, 0.966이었으며, 종이멀칭에서는 각각 0.969, 0.945이었고, 흑색 폴리에틸렌 필름 멀칭에서는 각각 0.915, 0.938이었다. 이러한 결과는 본 모델에 의해

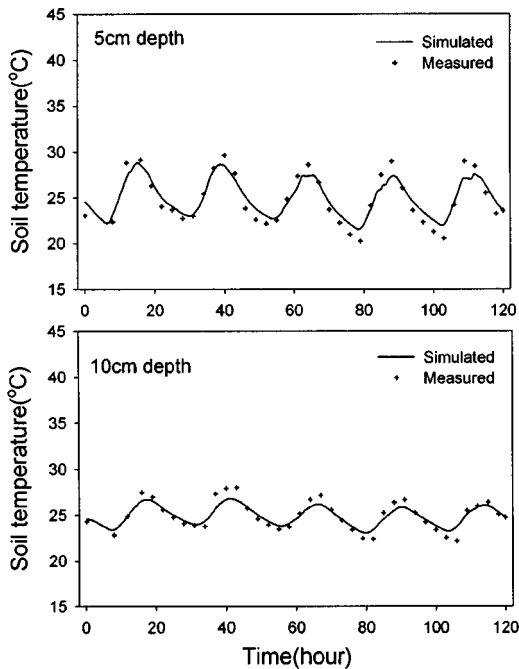


Fig. 2. Comparison between measured and simulated bare soil temperature at the depths of 5 cm and 10 cm from Aug. 25 to Aug. 29 1998, Suwon.

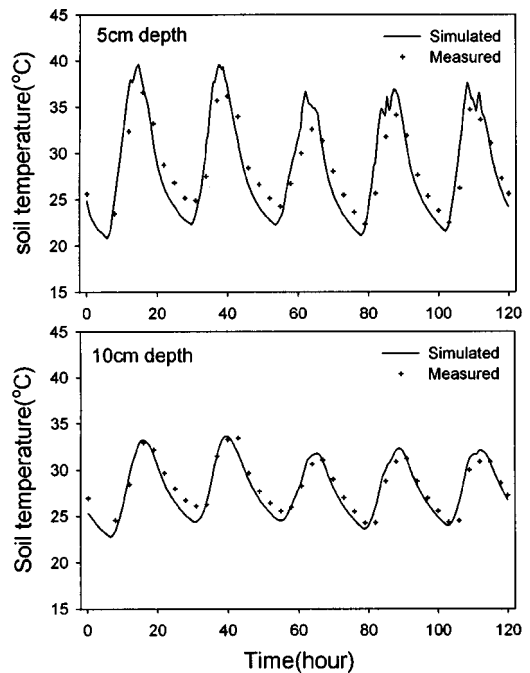


Fig. 4. Comparison between measured and simulated soil temperature at the depth of 5 cm and 10 cm under black polyethylene film mulching from Aug. 25 to Aug. 29 1998, Suwon.

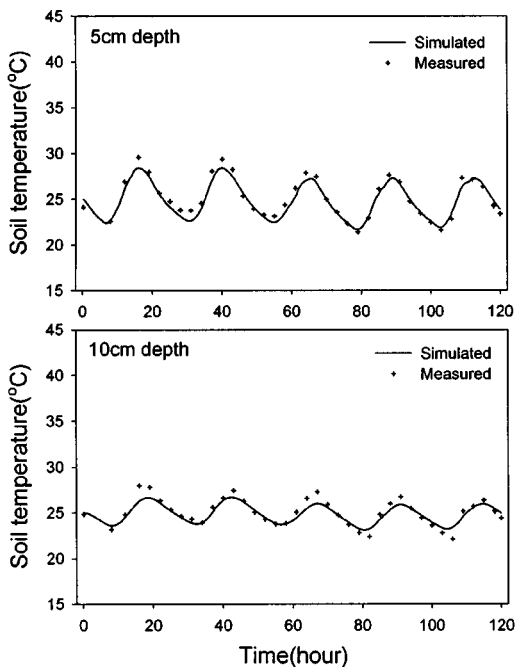


Fig. 3. Comparison between measured and simulated soil temperature at the depth of 5 cm and 10 cm under paper mulching from Aug. 25 to Aug. 29 1998, Suwon.

추정된 지온의 변화가 실제 지온의 변화추세와 잘 일치하다는 것을 시사하는 것이라 할 수 있다. 또한 모델에 의해 추정된 값들과 실측치와의 차이를 비교하기 위하여 모델에 의해 추정된 값들이 실측치 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 범위안에 들어가는 추정치들의 전체 추정치중에서 차지하는 비율을 조사하였는데, 무멀칭처리 5 cm 및 10 cm 깊이의 비율은 각각 97.4%, 98.5% 이었고, 종이멀칭처리에서는 각각 98.8%, 97.4% 이었으며, 흑색 폴리에틸렌 필름 멀칭처리에서는 70.1%, 92.6% 이었다.

지온 모델에 있어서 관건은 토양 표면 에너지 수지식의 각 항목들을 정확하게 추정하는 것이다. 멀칭면과 토양표면간의 온도차이에 의한 顯熱은 $\rho C_p (T_s - T_m)^{1/3}$ 식에 의한 계산과 $Hi(T_s - T_m)$ 에 의한 계산방법이 있는데, 전자에 의한 계산은 후자에 의한 결과보다 조금 높게 추정되었고, 토양표면 에너지 수지식을 수치해석하는 과정에서 수렴이 되지 않을 때가 있었다. 따라서 본 모델에서는 $Hi(T_s - T_m)$ 식을 채용하였다. 한편, 야간 장파복사의 방사에 의해 지표면 에너지 수지가 많이 달라지는데, 대기로부터 지면으로의 장파복사의 방사는 대기의 복사

Table 3. LIST OF SYMBOLS

Symbol	Definition	Units
u	Wind speed	m s ⁻¹
z	Soil depth	m
α	Van Geunchten parameter	
ϵ_a	Atmospheric emissivity	
ϵ_m	Mulch emissivity	
ϵ_s	Soil emissivity	
θ	Volumetric water content of the surface laye	m ³ m ⁻³
θ_r	Residual water content of the surface layer	"
θ	Volumetric water content of the surface layer	m ³ m ⁻³
θ_r	Residual water content of the surface layer	"
θ_s	Saturated water content of the surface layer	"
λ	Soil thermal conductivity	W m ⁻¹ K ⁻¹
ρ	Air density	kg m ⁻³
ρ_l	Reflectivity of the mulch to long-wave radiation	
ρ_s	Reflectivity of the mulch to solar radiation	
σ	Stefan-Boltzmann constant	W m ⁻² K ⁻⁴
τ_l	Transmissivity of the mulch to long-wave radiation	
τ_s	Transmissivity of the mulch to solar radiation	
Φ_f	Total porosity of the soil	
A,B,C,D,E	Coefficients used in calculating soil thermal conductivity	
α_s	Soil albedo	
C	Volumetric heat capacit	J m ⁻³ K ⁻¹
C_m	Specific heat of mineral	J m ⁻³ K ⁻¹
C_w	Specific heat of water	J m ⁻³ K ⁻¹
c_p	Specific heat capacity of air	J kg ⁻¹ K ⁻¹
D	Thermal diffusivity	m ² s ⁻¹
d	Zero plane displacement	m

Table 3. (Continued)

Symbol	Definition	Units
e_a	Vapor pressure of the air	KPa
G	Soil heat flux	W m ⁻²
H	Sensible heat flux	W m ⁻²
x_a	Air humidity	kg m ⁻³
x_s	Air humidity in the soil surface layer	kg m ⁻³
x_o	Saturated humidity of the surface layer	kg m ⁻³
h	Soil water pressure head of surface layer	m
h_i	Heat transfer coefficient inside the mulch	W m ⁻² K ⁻¹
L	Latent heat of vaporization	J kg ⁻¹
LE	Latent heat flux	W m ⁻²
n	Van Genuchten parameter	
r_H	Aerodynamic resistance to heat flow	s m ⁻¹
R_n	Net radiation	W m ⁻²
R_s	Solar radiation	W m ⁻²
r_s	Surface resistance	s m ⁻¹
S_p	Stability parameter	
T	Soil temperature	K
t	Time	s
T_a	Air temperature	K
T_m	Mulch temperature	K
T_s	Soil temperature	K

계수에 정비례하는데, 본 모델에서는 대기의 복사계수의 계산에서 일사량이 0보다 클 경우에는 단파복사의 투과계수에 의해 운량(cloud cover)을 계산하고 계산된 운량으로 대기의 복사계수를 정확하게 추정할 수가 있었지만 일사량이 0보다 작을 때, 즉 해가 진 다음에는 운량(cloud cover)의 계산이 불가능하여 야간의 대기로부터 지면으로의 장파복사의 방사를 정확히 추정할 수가 없어 夜間 지온의 오차가 다소 커지는 원인이었던 것으로 판단되었다.

V. 요약

대기 온도, 대기 일사량, 풍속, 대기 수증기압 등의 기상자료, 멀칭재료와 토양의 광학적 특성 및 열적 특성을 입력자료로 하여 토양 표면의 에너지 수지식과 토양 열흐름 방정식을 수치해석하여 멀칭한 토양의 온도를 추정하는 모델을 작성하였으며 또한 실측자료를 이용하여 모델을 검증하였다.

모델에 의한 지온의 추정에 있어서 토양온도의 초기치는 시작일의 50 cm 깊이의 실측지온으로 하였으며, 계산은 0시에 시작하여 10분 간격으로 하였다. 모델은 지온의 시간 및 토층에 따른 변화를 잘 묘사하였다. 모델에 의해 추정된 값과 실측치와의 상관관계는 무멀칭의 5 cm 및 10 cm에서 상관계수($n=720$)가 각각 0.961, 0.966이었고, 같은 층위의 종이멀칭에서는 각각 0.969, 0.945이었고, 흑색 폴리에틸렌 필름 멀칭에서의 상관계수는 각각 0.915, 0.938이었다. 모델에 의해 추정된 값들이 실측치 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 범위안에 들어가는 수가 전체 추정치중에서 차지하는 비율은 무멀칭처리의 5 cm 및 10 cm에서 각각 97.4%, 98.5%이었고, 종이 멀칭에서는 각각 95.8%, 97.4%이었고, 흑색 폴리에틸렌 필름 멀칭에서 70.1%, 92.6%이었다. 이상의 결과에 의하면 멀칭에 따른 지온을 대체로 잘 묘사하는 것으로 판단된다. 다만 야간 지온추정에서 오차가 다소 컸는데 이는 야간의 대기 장파복사의 평가가 어렵기 때문이며 이에 대한 보완이 필요하다.

인용문헌

- Adams, J.E., 1970: Effect of mulch and bed configuration. II. Soil temperature and growth and yield response of grain sorghum and corn. *Agron. J.*, **62**, 785-790.
- Anderson, D.F., M.A. Garisto, J.C. Bourrut, M.W. Schonbeck, R. Jaye, A. Wurzberger and R. Degregorio, 1995: Evaluation of a paper mulch made from recycled materials as an alternative to plastic film mulch for vegetables. *J. Sustain. Agric.*, **7**, 39-61
- Bristow, K.L. and G.S. Campbell, 1986: Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue-soil system. *Agric. For. Meteorol.*, **36**, 123-131.
- Camillo, P.J. and R.J. Gurney, 1986: A resistance parameter for bare-soil evaporation models. *Soil Sci.*, **141**, 95-105.
- Campbell, G.S., 1985: *Soil Physics with BASIC*. Elsevier Inc., 12-36.
- Campbell G.S., 1977: *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer-Verlag, New York, pp 40-45
- Clarkson, V.A., 1960: Effect of black polyethylene mulch on soil microclimate temperature and nitrate level. *Agron. J.*, **52**, 307-309.
- Courter, H.J., 1964: Comparisons of paper and polyethylene mulching on yield of certain vegetable crops. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **85**, 526-531.
- De Vries, D.A., 1963: Thermal properties of soils. In : W. R. Van Wijk(ed.) *Physics of Plant Environment*. North-Holland, Amsterdam, pp. 203-214.
- Ekern, P.C., 1967: Soil Moisture and soil temperature changes with the use of Black vapor-barrier mulch and their influence on pineapple. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31**, 270-275.
- Garzoli, M. and J. Blackwell, 1981: An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.*, **26**, 203-214.
- Ham, J.M., G.J. Kluitenberg and W.J. Lamon, 1993: Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime. *J. Amer. Hort. Sci.*, **118**, 188-193
- Horton, R. and S. Chung. 1991: Soil heat flow. In: J. Hanks and J.T. Ritchie(eds.), *Modeling Plant and Soil Systems*. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, pp 397-438
- Jensen, M.H., 1988: The achievements on the use of plastics in agriculture. In: *International seminar on the utilization of the plastics in agriculture*. 1988. FFTC & RDA, pp. 1-17.
- Lamb, J. and J.E. Chapman, 1943: Effect of surface stones on erosion, evaporation, soil temperature, and soil moisture. *J. Amer. Soc. Agron.*, **35**, 567-578
- Mahrer, J. and J. Katan, 1981: Spatial soil temperature regime under transparent polyethylene mulch: numerical and experimental studies. *Soil Sci.*, **131**, 82-87.
- 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.
- Murray, F.M., 1987: On the computation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteorol.*, **6**, 203-205.
- Remson, L.B., G.M. Hornberger and F.J. Molz, 1971: *Numerical Methods in Subsurface Hydrology*. John Wiley and sons Inc., New York.
- Sui, H., D. Zeng and F. Chen, 1992: A numerical model for simulating the temperature and moisture regimes of soil under various mulches. *Agric. For. Meteorol.*, **61**, 291-299.
- Ten Berge, H.F.M., 1990: Heat and water transfer in bare topsoil and the lower atmosphere. *Center for Agricultural Publishing and Documentation*, Wageningen.
- Van Bavel, C.H.M. and D.I. Hillel, 1976: Calculating potential and actuary evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agric. Meteorol.*, **17**, 453-476.
- Wu Y., B.P. Katharine and J.B. Ristaino, 1996: Estimating temperature of mulched and bare soil from meteorological data. *Agric. For. Meteorol.*, **81**, 287-298.