

적외선 조사된 토양에 대한 열전달 모델

Heat Transfer Model for Soil Irradiated by Infrared

강 화 석* 이 귀 현* 강 위 수* 오 재 현*
 정회원 정회원 정회원 정회원
 W. S. Kang G. H. Lee W. S. Kang J. H. Oh

ABSTRACT

The temperature distributions at various soil depths were predicted by heat transfer model during and after infrared irradiation on sand loam or loam soil. At each soil depth, predicted and measured temperature distributions were compared with using the mean relative percentage deviation and standard error. The mean relative percentage deviation was less than 10% between predicted and measured temperature distributions at each soil depth. Thus, it was concluded that the temperature distribution at each soil depth could be predicted satisfactorily by heat transfer model. Also, it is expected that these predicted temperature distributions can be used as basic information for determining the working speed of weeder and the size when the real weeder is constructed.

주요 용어(Key Words) : 열전달 모델(Heat Transfer Model), 양토(Loam), 사양토(Sandy Loam), 적외선(Infrared), 토양 가열(Soil Heating)

1. 서론

최근 제초제 사용의 급속한 양적인 증가는 환경오염을 유발시킬 뿐 아니라 농산물에도 잔류하여 인체에 해로운 영향을 미칠 것으로 생각된다. 농약에 대한 경각심과 거부감으로 인한 농산물 소비자들의 유기농업에 대한 관심이 증가되고 있으며, 제초제의 사용을 대신할 수 있는 잡초방제 기술개발에 대한 연구가 시급한 실정이다. 화학 제초제를 사용하지 않는 제초 방법으로는 수취에 의한 것파, 기계적인 또는 열처리에 의한 잡초방제 방법이 있다. 토양 열처리에는 생육 중인 잡초나 휴면중인 잡초 종자의 발아 억제 및

사멸을 유도하는 데 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 넓은 의미에서 열처리 잡초방제 방법은 적외선 방사(Parish, 1989), 뜨거운 물(Berling, 1993), 냉동(Fergedal, 1993) 및 전열처리(Diprose & Benson, 1984; Mattsson, 1993; Mätzler, 1993)를 포함하고 있다.

농경지에서의 잡초발생은 그 대부분 종자에 의해서 발생하며, 잡초종자는 대부분 80°C 이상의 온도에서 발아력을 상실할 뿐만 아니라 상당부분의 병충해도 무력화될 수 있다. 그러므로 가격이 저렴한 LPG와 같은 연료를 사용하여 농경지 토양의 온도를 80°C 이상으로 상승시킬 수 있는 잡초방제기 개발이 필요하다. 열원에 의

* 강원대학교 농업생명과학대학 농업기계공학과

한 토양 가열시 시간의 경과에 따른 토양내의 온도분포는 토양중의 잠초종자와 병해충을 사멸시키는 데 필요한 투입열량을 계산해 내는데 중요한 정보이다. 또한 토양을 일정한 시간 가열 후 적외선 가열장치를 제거한 다음 토양내의 온도 분포를 분석함으로써 실제 규모의 제초기를 제작하였을 때, 잠초종자와 병해충을 사멸시키는 데 필요한 치사온도의 유지시간을 토양의 깊이에 따라 결정할 수 있을 것이다. 그러므로 이러한 토양의 온도분포에 대한 자료는 잠초방제기의 효율적인 작업속도를 결정하는 데 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 목적은 적외선 열처리에 의한 토양의 가열시 토양 내부의 온도분포를 열전달 모델에 의해 예측하고 실험에 의해 얻어진 계측치와 비교 분석하여 잠초방제기의 개발을 위한 기초 자료를 얻기 위한 것이다.

2. 재료 및 방법

가. 실험 재료 및 방열장치

본 실험에 사용된 토양은 사양토와 양토였으며, 강원대학교 농과대학 부설 농장의 밭에서 토양 시료 채취법(KSF 2301)에 의하여 채취되었다. 본 실험에 이용된 적외선 방열장치는 honeycomb type의 세라믹 재료로 만들어졌으며, 공기를 0.002m³/s로 공급하여 LPG를 세라믹 방사판에 연소시켜 방사판으로부터 방사되는 적외선을 토양 가열을 위한 열원으로 사용하였다(강화석 등, 1996). 잠초의 종자가 토양 중에서 발아하는 깊이는 종류에 따라 다르며, 대부분은 토양 표면으로부터 25mm 이내에서 발아하는 것으로 알려져 있다(양환승 등, 1990). 그러므로 본 실험에서 토양내의 온도는 표면으로부터 27mm까지 3mm 간격으로 측정되었다.

나. 열전달 모델

가열된 토양에 대한 온도분포는 반무한고체에

대한 1차원 열전도 방정식의 해를 수치해석으로 구함으로써 예측되었다. 본 실험은 상온상태의 실험실에서 실시되었기 때문에 적외선 가열 동안은 복사에 의해 열이 토양 표면에 전달되며 가열이 끝난 후에는 토양 표면으로부터 자연대류와 복사에 의해 열손실이 발생한다(그림 1). 따라서 열전달 모델은 토양이 가열될 때와 가열된 후에 서로 다른 경계조건을 사용함으로써 분석되었다. 복사열전달로 인한 비선형 경계조건이 적용될 때는 열전도 방정식의 완전해를 해석적으로 구하기가 어렵다. 그러나 이러한 조건을 갖는 열전도 방정식은 수치해석적 접근 방법을 이용하여 해를 얻을 수 있으며, 여기서는 FDM(Finite-Difference Method)의 Crank-Nicolson method를 사용였다.

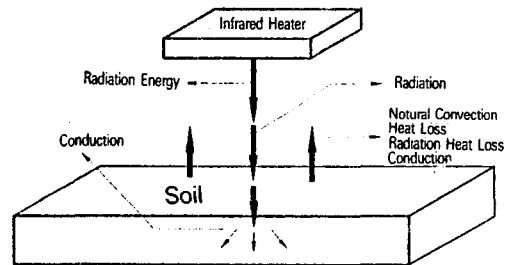


Fig. 1 Heat transfer process between infrared irradiator and soil.

1) 열전도 방정식

$$1차원 열전도 방정식 : \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

여기서 T=토양의 온도(°C),

t=시간(sec), x=토양의 깊이(m),

α=열확산율(m²/s)

초기조건 : 0 ≤ x ≤ ∞, t=0에서 T=T_{in}(초기온도(°C))

토양표면이 가열될 때 열전달 방정식의 경계조건 :

$$x=0, t>0 \text{에서 } -k \frac{\partial T}{\partial x} = h_r(T_s - T)$$

여기서,

$$h_r = \frac{\sigma(T_s + T + 546) \{ (T_s + 273)^2 + (T + 273)^2 \}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

k = 토양의 열전도계수 ($W/m^\circ C$),

h_r = 복사열전달계수 (W/mK), σ = Stefan-Boltzmann 상수 ($5.6697 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$),

T_s = 가열장치의 표면온도 ($^\circ C$), ϵ_1 = 방사체의 방사율, ϵ_2 = 토양의 방사율

$x \rightarrow \infty, t >$ 에서 $T = T_{in}$

토양표면이 가열된 후 열전달 방정식의 경계 조건 :

$$x=0, t>0 \text{에서 } -k \frac{\partial T}{\partial x} = (h_r + h) (T_x - T)$$

여기서, T_x = 대기온도 ($^\circ C$), h = 대류열전달계수 ($W/m^2 C$)

자연대류에 있어서 열전달계수의 결정은 Nusselt 수 (Nu), Prandtl 수 (Pr) 및 Grashof 수 (Gr)와 같은 무차원수의 관계로부터 결정되어진다.

$$Gr = \frac{g\beta(T - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

여기서 g = 중력가속도 ($9.8m/s^2$),

β = 체적열팽창 계수 ($1/K$),

ν = 공기의 동점성계수 (m^2/s)

$L = \frac{A_s}{P}$ = 특성치수 (m) (A_s = 토양상자의 표면적, P = 토양상자의 주변길이)

자연대류의 경우 일반적으로 Nusselt 수는 Grashof 수와 Prandtl 수에 종속되며 다음의 형태로 표시된다.

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (3)$$

여기서 $Nu = \frac{hL}{k_a}$, $Pr = \frac{C_p \mu}{k_a}$

(C_p = 공기의 정압비열, $kJ/kg^\circ C$, μ = 공기의 점성계수, $kg/m s$, k_a = 공기의 열전도계수, $W/m^\circ C$)

수평평판을 흐르는 유체의 자연대류 열전달에 관한 실험적 무차원수의 상호관계는 다음과 같다 (Incropera와 DeWitt, 1981).

$$Nu = c(Gr Pr)^n = c Ra^n \quad (4)$$

여기서 $Ra = Gr Pr = \frac{g\beta(T - T_\infty)L^3}{\alpha \nu}$, c 와 n = 상수

Ra 값의 범위에 따라 Nu , Pr , Gr 의 관계는 다음과 같다.

$$Nu = 0.54(Gr Pr)^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra \leq 10^7) \quad (5)$$

$$Nu = 0.15(Gr Pr)^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra \leq 10^{11}) \quad (6)$$

식 (5)는 층류인 경우이고 식(6)은 난류인 경우의 상수 c , n 값을 나타낸 것이다. 이와 같은 식들을 이용하여 다음의 식에 의해 자연대류 열전달계수를 구할 수 있다.

$$h = \frac{k_a Nu}{L} \quad (7)$$

2) 유한 차분화

식(1)의 편미분 방정식을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} = \frac{\alpha}{2}$$

$$\left[\frac{T_{m-1}^{i+1} - 2T_m^{i+1} + T_{m+1}^{i+1}}{(\Delta x)^2} + \right.$$

$$\left. \frac{T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$2T_m^{i+1} - 2T_m^i = rT_{m-1}^{i+1} - 2rT_m^{i+1} + rT_{m+1}^{i+1} +$$

$$rT_{m-1}^i - 2rT_m^i + rT_{m+1}^i \quad (8)$$

$$2(1+r)T_m^{i+1} - r(T_{m-1}^{i+1} + T_{m+1}^{i+1}) = rT_{m-1}^i + 2(1-r)T_m^i + rT_{m+1}^i \quad (m=2, 3, \dots, M-1) \quad (9)$$

여기서, $r = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$

토양표면이 가열될 때 열전달 방정식의 경계 조건을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$-k \frac{T_2^{i+1} - T_0^{i+1}}{2\Delta x} = h_r(T_s - T_1^{i+1})$$

$$T_0^{i+1} = T_2^{i+1} - 2h_r Ci(T_1^{i+1} - T_s) \quad (10)$$

$$T_0^i = T_2^i - 2h_r Ci(T_1^i - T_s) \quad (11)$$

$$2(1+r)T_1^{i+1} - r(T_0^{i+1} + T_2^{i+1}) = rT_0^i + 2(1-r)T_1^i + rT_2^i \quad (\text{식(9)에서, } m=1 \text{일때}) \quad (12)$$

(12)식에 (10)식과 (11)식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_1^{i+1} = \frac{1}{2[1+r(1+Cih_r)]}$$

$$[2rT_2^{i+1} + 2\{1-r(1+Cih_r)\}T_1^i + 2rT_2^i + 4rCih_rT_s] \quad (13)$$

여기서, $Ci = \frac{\Delta x}{k}$

토양표면이 가열된 후 열전달 방정식의 경계 조건을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$-k \frac{T_2^{i+1} - T_0^{i+1}}{2\Delta x} = (h_r + h)(T_\infty - T_1^{i+1})$$

$$T_0^{i+1} = T_2^{i+1} - 2(h_r + h)Ci(T_1^{i+1} - T_\infty) \quad (14)$$

$$T_0^i = T_2^i - 2(h_r + h)Ci(T_1^i - T_\infty) \quad (15)$$

(12)식에 (14)식과 (15)식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_1^{i+1} = \frac{1}{2[1+r\{1+C_i(h_r+h)\}]}$$

$$[2rT_2^{i+1} + 2\{1-r(1+C_i(h_r+h))\}T_1^i + 2rT_2^i + 4rC_i(h_r+h)T_\infty] \quad (16)$$

여기서

$$h_r = \frac{\sigma(T_s + T_1 + 546) \{(T_s + 273)^2 + (T_1 + 273)^2\}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

3. 결과 및 고찰

토양 깊이별 온도분포에 대한 실측치와 예측치를 얻기 위해 사용된 실험조건 및 토양의 열특성값은 Table 1과 같다. 여기서 토양의 열특성값은 반실험적 방법에 의해 구하여졌다. 즉, 토양의 열전달계수(k) 및 열확산율(α)은 시행착오(trial and error)에 의해 여러 다른 수치를 열전달 모델에 적용하여 토양깊이 12mm에서 얻어진 온도분포와 실측치에 대한 표준오차가 가장 작을 때의 값들을 토양의 열특성값으로 가정

Table 1 Experimental conditions and thermal properties of soil used in the heat transfer model

M.C. of Soil,	Sandy Loam (0%, wb) Loam(0%, wb)
Irradiation time	30sec
Initial temperature of soil	29~34°C
Size of emitter	0.27×0.063m ²
Temperature of emitter	100°C
Emissivity of emitter †	0.85
Emissivity of soil †	0.95
Thermal conductivity	0.55W/m°C, 0.68W/m°C
Thermal diffusivity	1.83×10 ⁻⁷ m ² /s, 1.85×10 ⁻⁷ m ² /s
Size of soil box	0.9×0.4×0.1m ³
Step size of time length (Δt)	2sec
Step size of soil depth (Δx)	3mm
Distance from heater to soil	5cm
Characteristic length(L)	0.138m

† T3 Operator's Manual of IR 639 Pyrometer

하였다. 토양 깊이별 열전달 모델에 의해 예측된 온도분포와 실측치에 대한 평균상대편차 백분율(P) 및 표준오차(S.E.)는 다음의 식에 의해 계산되었다.

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{(Y - Y')}{Y}, \text{ S.E.} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{df}}$$

여기서, Y=토양 깊이별 온도의 실측치, Y'=모델에 의한 토양 깊이별 온도의 예측치, N=data의 수, df=예측모델의 자유도 사양토와 양토의 토양 깊이별 온도분포의 실측치와 모델에 의한 예측치에 대한 평균상대편차 백분율(P)과 표준오차(S.E.)가 Table 2에 보여지고 있으며, 그림 2는 토양 깊이별 시간에 따른 온도 변화에 대한 실측치와 예측치를 나타내고 있다. 사양토에서는 토양깊이 3mm부터 27mm까지의 평균상대편차가 6.02~9.86%였고 토양 깊이별 온도분포 예측치의 표준오차는 3.85~11.30°C로 토양 깊이 3, 6mm를 제외한 다른 토양 깊이에서는 비교적 잘 예측되고 있는 것으로 나타났다. 양토에서는 토양깊이 3mm에서부터 27mm까지 평균상대편차가 2.77~6.91%였고 토양 깊이별 온도분포 예측치의 표준 오차는 1.21~10.24°C로 사양토와 마찬가지로 토양깊이 3mm, 6mm를 제외한 다른 토양 깊이에서는 비교적 잘 예측되고 있는 것으로 나타났다(Table 2). 그림 2에서 보여지는 것과 같이 30초의 토양 가열이 끝난 후인 약 400초 이후부터는 실제 측정된 온도보다 모델에 의한 예측온도가 높은 것은 토양 가열 실험시 토양상자의 깊이가 10cm로 공시토양의 깊이가 낮았기 때문에 열이 바닥부분으로 유출되어서 실제 측정된 토양내의 온도가 모델에 의한 예측온도보다 낮아진 것으로 사료된다. 또한 열전달 모델에 의한 온도분포의 예측치와 실측치 사이의 편차를 낚을 수 있는 다른 이유는 토양의 열특성값이 온도의 함수이나 본 열전달 모델에서는 상수 값을 사용하였으며, 또한 실험에 사용된 토양상자의 크기를 반무한고체로 가정하기에는 조금 작았기 때문인 것으로 사료된다. 토양 깊이별 온도분포의 예측을 위한 열전달 모델이

사양토보다 양토에 더 적합한 것으로 나타났다(Table 2). 그 이유는 양토가 사양토보다 토양내의 공극이 적음으로 균일 물질의 고체 열전달 문제에 적합한 열전도 방정식이 사양토보다 양토에 더 잘 적용되고 있기 때문인 것으로 사료된다. 이상의 결과를 종합하면 본 열전달 모델은 실험치와 예측치의 평균상대편차가 10% 미만으로 실험치와 예측치의 온도분포가 비교적 잘 일치하였다. 그러므로 방사체로부터 일정한 열량(온도)이 가해질 때와 가해진 후의 시간 변화에 따른 토양내의 온도분포를 수치해석적 방법으로 예측할 수 있고, 실제 규모의 잡초방제기 제작시 그의 크기 및 효율적인 작업속도 등의 산정에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. The mean relative percentage deviation(P) and standard error(S.E.) between measured and predicted temperature distributions for sandy loam and loam soils

Soil Type Soil Depth	Sand Loam		Loam	
	P(%)	S.E.(°C)	P(%)	S.E.(°C)
3	9.86	11.30	6.91	10.24
6	7.65	6.20	5.32	5.27
9	6.25	4.57	4.09	3.48
12	6.02	3.93	3.07	2.20
15	6.91	4.27	3.98	2.55
18	8.18	4.80	4.45	2.50
21	7.49	4.40	3.19	1.76
24	8.41	4.59	3.43	1.96
27	7.78	3.85	2.77	1.21

4. 요약 및 결론

적외선 열처리에 의한 토양의 가열시 시간에 따른 토양내부의 온도분포가 열전달 모델에 의해 예측되었고, 평균상대편차 백분율(P)과 표준오차(S.E.)의 계산에 의해 실험에 의한 토양 깊이별 온도 측정치와 예측치가 비교 분석되었다. 온도분포에 대한 실측치와 예측치의 평균상대

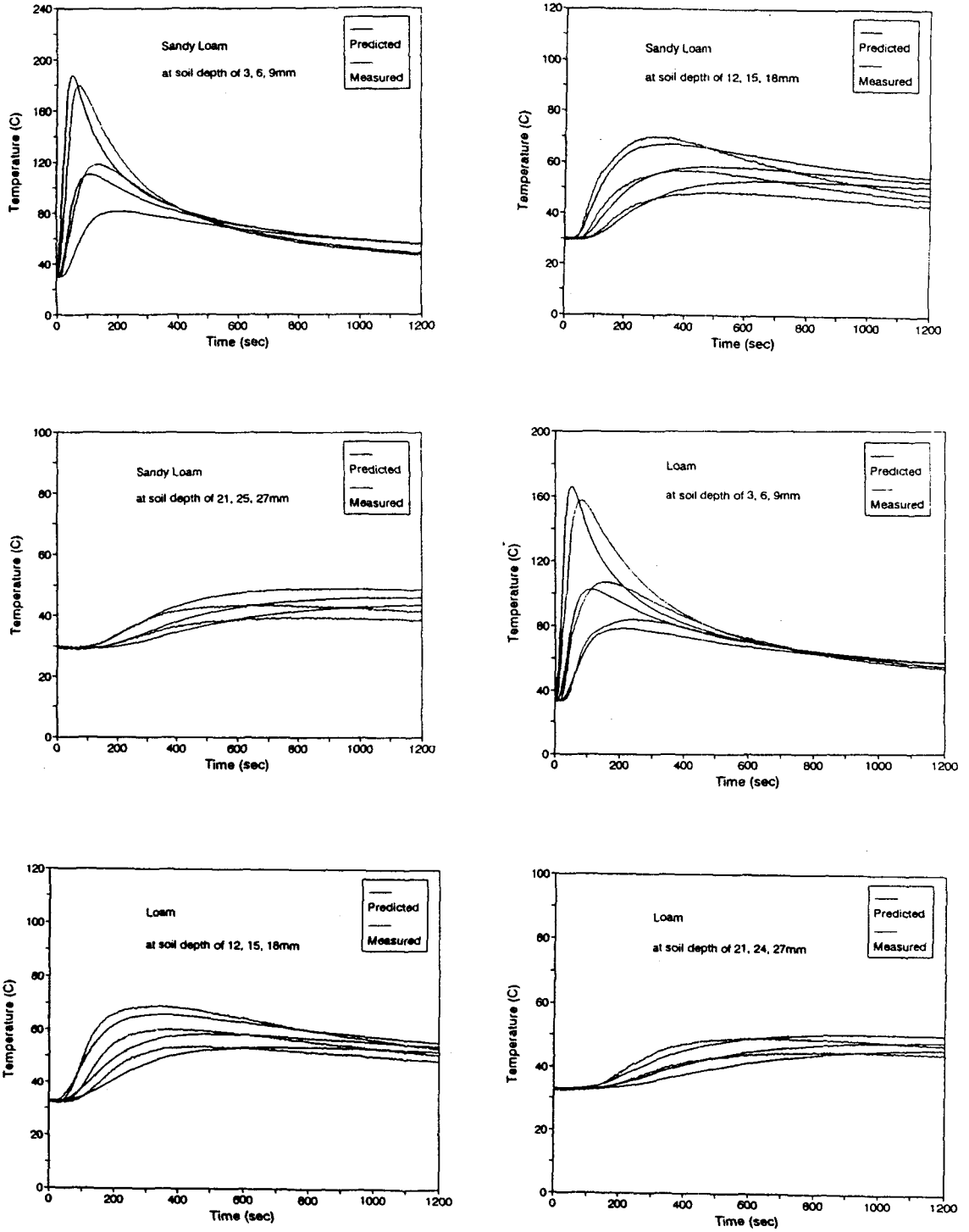


Fig. 2. Comparison of measured and predicted temperatures at various soil depth.

편차는 10% 미만으로 비교적 잘 일치하였다. 그러므로 일정한 투입 열량(온도)하에서 시간에 따른 토양내부의 온도분포를 열전달 모델에 의해 예측할 수 있고, 실제 규모의 잡초방제기의 제작시 규모 및 효율적인 작업속도 등의 산정에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 강화석, 이귀현, 강위수, 오재현. 1996. 적외선 조사된 토양의 열전달에 대한 수치해석. 한국 농업기계학회 학술회지.
2. 양환승, 구자옥, 변종영, 권용융. 1990. 최신 잡초방제학. 향문사.
3. Berling, J. 1993. Getting weeds in hot water. Farm Industry News, January, 44.
4. Diprose, M. F. and F. A. Benson. 1984. Electrical methods of killing plants. Journal of Agricultural Engineering Research 30 : 197-209.
5. Fergedal, S. 1993. Weed control by freezing with liquid nitrogen and carbon dioxide snow-A comparison between flaming and freezing. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 165 : 38.
6. Incropera, F. P. and D. P. DeWitt, 1981. Fundamentals of Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York.
7. Mattsson, B. 1993. Weed control by microwaves-a review. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 171 : 48.
8. Mätzler, C. 1993. Feasibility of electrothermal weed control from d.c. to infrared. In Abstracts International Workshop on Electromagnetic Weed Control with Special Attention to Applications on Railways, ed. C. Mätzler. 19-20. Institute of Applied Physics, University of Bern, Switzerland.
9. Parish, S. 1989. Weed control-testing the effects of infrared radiation, Agricultural Engineer, Summer : 53-55.