

적외선 조사된 토양의 열전달에 대한 수치해석

Numerical Analysis for Heat Transfer of Soil Irradiated by Infrared

강화석*	이귀현**	강위수*	오재현*
정희원	정희원	정희원	정희원
W. S. Kang	G. Lee	W. Kang	J. H. Oh

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 잡초 방제 기술개발에 대한 연구가 시급한 실정이다. 화학 제초제를 사용하지 않는 제초 방법으로는 수취에 의한 것과, 기계적인 또는 열처리에 의한 잡초방제 방법이 있다. 열처리 방법은 생육중인 잡초나 휴면중인 잡초 종자의 발아 억제 및 사멸을 유도하는데 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 넓은 의미에서 열처리 잡초방제 방법은 적외선 방사(Parish, 1989), 뜨거운 물(Berling, 1993), 냉동(Fergedal, 1993) 및 전열처리(Diprose & Benson, 1994; Mattsson, 1993; Mätzler, 1993)를 포함하고 있다.

대부분 농경지의 잡초는 토양속에 묻혀 있는 잡초 종자에 의해서 발생하며, 80°C 이상의 온도에서는 잡초 종자의 발아력이 상실될 뿐만 아니라 상당부분의 병충해도 무력화될 수 있다. 그러므로 농경지 토양의 온도를 80°C 이상으로 상승시킬 수 있는 잡초방제기의 개발이 필요하다. 열원에 의한 토양 가열시 시간의 경과에 따른 토양내의 온도분포는 토양중의 잡초 종자와 병해충을 사멸시키는데 요구되는 열량을 계산하는데 있어 중요한 정보이다. 그러므로 토양을 일정한 시간 동안 가열한 후 토양내의 온도분포를 분석함으로써 잡초 종자와 병해충을 사멸시키는데 필요한 치사온도의 유지시간을 토양의 깊이에 따라 결정할 수 있을 것이다. 또한 이러한 토양의 온도분포에 대한 자료는 잡초방제기의 효율적인 작업속도를 결정하는데 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 실험의 목적은 적외선 열처리에 의한 토양의 가열시 토양내부의 온도분포를 수치해석으로 예측하고 실험에 의하여 얻어진 측정치와 비교 분석하여 잡초방제기의 개발에 필요한 기초 자료를 얻기 위한 것이다.

2. 재료 및 방법

(1) 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 사용된 적외선 방열장치, LPG 공급장치, 송풍기 및 자료 수집 장치는 그림 1과 같다. 적외선 방열장치는 크기 66 × 93 × 13 mm인 honeycomb type의 세라믹 기판 3개를 연결하여 만들어졌으며, 공기를 2,000 SCCM으로 공급하여 LPG를 세라믹 방사판에 연소시켜 토양 가열을 위한 열원으로 사용하였다.

* 강원대학교 농업기계공학과

** 강원대학교 부설 농업과학연구소

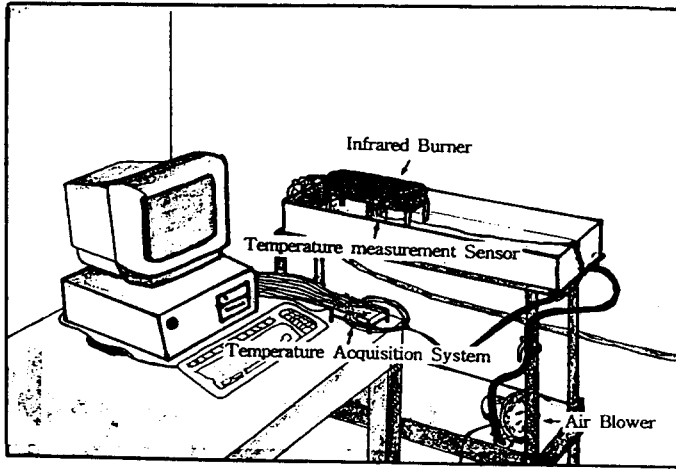


Fig. 1. Infrared irradiation apparatus and data collection instruments.

초음파가 토양내에서 발하는 깊이는 종류에 따라 다르며, 대부분은 토양 표면으로부터 25mm 이내에서 발하는 것으로 알려져 있다(양환승 외 3인, 1990). 그러므로 본 실험에서 토양 내의 온도는 표면으로부터 27mm 까지 3mm 간격으로 측정되었다. 온도 측정을 위한 열전대(K type)는 Al_2O_3 다공판의 세공(1 × 1mm)에 넣고 접점을 전기 용접하여 사용하였다. 방열장치를 토양 표면으로부터 6mm 높이의 일정한 위치에 설치하기 위하여 토양 상자(H × L × W = 10 × 90 × 40cm) 중앙에 8.5 × 24.5cm 크기의 직사각형 4개의 모서리에 10cm 높이를 가진 봉 4개를 고정시켜 그 위에 방열장치(적외선 방사판: L × W = 66 × 279mm)를 설치하였다. 토양상자 중앙 부분에는 9개의 온도센서가 부착된 다공판을 설치하였고, 그 위와 주변에 토양 시료를 산포시켜 온도 측정을 위한 토양의 깊이를 정확히 유지시켰다. 적외선 방사판에 LPG 및 공기를 혼합시켜 점화한 다음 토양을 30초 동안 가열한 후, LPG와 공기의 공급을 차단하고 방사판을 제거하여 토양의 온도가 80°C이하로 될 때까지 토양 깊이별 온도를 매 2초마다 자동 온도 기록장치로 측정하였다.

(2) 열전달 모델

가열된 토양에 대한 온도분포는 반무한고체에 대한 1차원 열전도 방정식의 해를 수치해석으로 구함으로써 예측되었다. 본 실험은 상온의 실험실에서 수행되었기 때문에 적외선 가열 동안은 복사에 의해 열이 토양 표면으로 전달되며 가열이 끝난 후에는 토양 표면으로부터 자연대류와 복사에 의해 열손실이 발생한다. 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 사용하였다. 열전도 방정식을 수식화 하면 다음과 같다.

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

여기서, T = 토양의 온도 (°C), t = 시간 (sec), x = 토양의 깊이 (m),
 α = 열확산율 (m^2/s)

초기조건: $0 \leq x \leq \infty$, $t = 0$ 에서 $T = T_{in}$ (초기온도(°C))

토양표면이 가열될 때 열전달 방정식의 경계조건:

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

$$\text{여기서, } h_r = \frac{\sigma(T_s + T)(T_s^2 + T^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad k = \text{열전도계수 (W/m}^\circ\text{C)},$$

h_r = 복사열전달계수 (W/mK), σ = Stefan-Boltzmann 상수 ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$),
 T_s = 가열장치의 표면온도 (°C), ε_1 = 방사체의 방사율, ε_2 = 토양의 방사율

$x \rightarrow \infty$, $t > 0$ 에서 $T = T_{in}$

토양표면이 가열된 후 열전달 방정식의 경계조건:

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

여기서, T_∞ = 대기온도 (°C), h = 대류열전달계수 (W/m²°C)

식(1)의 편미분 방정식을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{\alpha}{2} \left[\frac{T_{n-1}^{i+1} - 2T_n^{i+1} + T_{n+1}^{i+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{n-1}^i - 2T_n^i + T_{n+1}^i}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$2T_n^{i+1} - 2T_n^i = rT_{n-1}^{i+1} - 2rT_n^{i+1} + rT_{n+1}^{i+1} + rT_{n-1}^i - 2rT_n^i + rT_{n+1}^i \quad (2)$$

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

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

토양표면이 가열될 때 열전달 방정식의 경계조건을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

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

$$T_0^{i+1} = T_2^{i+1} - 2h_r C_i (T_1^{i+1} - T_s) \quad (4)$$

$$T_0^i = T_2^i - 2h_r C_i (T_1^i - T_s) \quad (5)$$

$$2(1+r)T_1^{i+1} - r(T_0^{i+1} + T_2^{i+1}) = rT_0^i + 2(1-r)T_1^i + rT_2^i \quad (\text{식(3)에서, } m = 1 \text{ 일때}) \quad (6)$$

식(6)에 식(4)와 (5)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_1^{i+1} = \frac{1}{2\{1+r(1+C_i h_r)\}} [2rT_2^{i+1} + 2\{1-r(1+C_i h_r)\}T_1^i + 2rT_2^i + 4rC_i h_r T_s] \quad (7)$$

$$\text{여기서, } C_i = \frac{\Delta x}{k}$$

토양표면이 가열된 후 열전달 방정식의 경계조건을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

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

$$T_0^{i+1} = T_2^{i+1} - 2(h_r+h)Ci(T_1^{i+1} - T_\infty) \quad (8)$$

$$T_0^i = T_2^i - 2(h_r+h)Ci(T_1^i - T_\infty) \quad (9)$$

식(6)에 식(8)과 (9)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_1^{i+1} = \frac{1}{2[1+r\{1+Ci(h_r+h)\}]} [2rT_2^{i+1} + 2(1-r(1+Ci(h_r+h)))T_1^i + 2rT_2^i + 4rCi(h_r+h)T_\infty] \quad (10)$$

$$\text{여기서, } h_r = \frac{\sigma(T_s+T_1)(T_s^2+T_1^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

3. 결과 및 고찰

토양 깊이별 온도분포에 대한 실측치와 예측치를 얻기 위해 사용된 실험조건 및 토양의 열특성값은 Table 1과 같다. 토양 깊이별 열전달 모델에 의해 예측된 온도분포와 실측치에 대한 평균 상대편차 백분율(P) 및 표준오차(S.E.)는 다음의 식에 의해 계산되었다.

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

여기서, Y = 토양 깊이별 온도의 실측치, Y' = 모델에 의한 토양 깊이별 온도의 예측치, N = data의 수, df = 예측모델의 자유도

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	30 sec
Initial temperature of soil surface	29 ~ 34°C
Size of emitter	0.27 × 0.063 (m ²)
Temperature of emitter	1000°C
Emissivity of emitter†	0.85
Emissivity of soil†	0.95
Thermal conductivity	0.55 W/m°C, 0.68 W/m°C
Thermal diffusivity	1.83×10 ⁻⁷ m ² /s, 1.85×10 ⁻⁷ m ² /s

† T3 Operator's Manual

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 3mm에서 부터 27mm 까지 평균상대편차가 6.02 ~ 9.86%였고 토양 깊이별 온도분포 예측치의 표준오차는 3.85 ~ 11.30°C로 토양깊이 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 표준오차는 1.21 ~ 10.24°C로 사양토와 마찬가지로 토양깊이 3mm, 6mm를 제외한 다른 토양 깊이에서는 비교적 잘 예측되고 있는 것으로 나타났다(Table 2). 그림 2에서 보여 지는 것과 같이 토양의 가열이 끝난 후 약 400초 이후부터는 실제 측정된 온도보다 모델에 의한 예측온도가 높은 것은 토양 가열 실험시 토양상자의 깊이가 10cm로 공실토양의 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 낳을 수 있는 다른 이유는 토양의 열특성값이 온도의 함수이나 본 열전달 모델에서는 상수 값을 사용하였기 때문인 것으로 사료된다.

토양 깊이별 온도분포의 예측을 위한 열전달 모델이 사양토 보다 양토에 더 적합한 것으로 나타났다(Table 2). 그 이유는 양토가 사양토보다 토양내의 공극이 적음으로 균질물질의 고체 열전달 문제에 적합한 열전도 방정식이 사양토 보다 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, 실제규모의 잠초방제기 제작시 그의 크기 및 효율적인 작업속도등의 산정에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. Percentage of mean relative deviation (P) and standard error (S.E.) between measured and predicted temperature in two 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

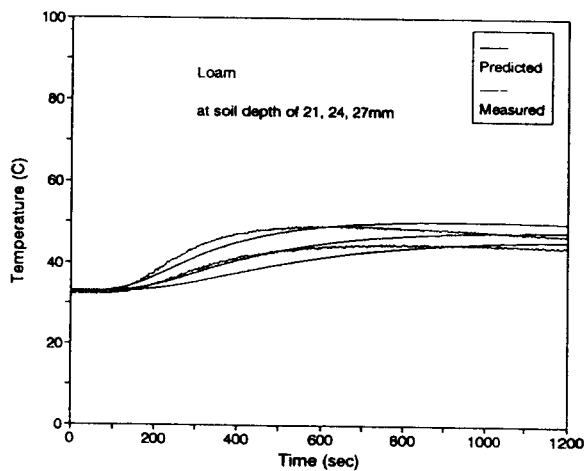
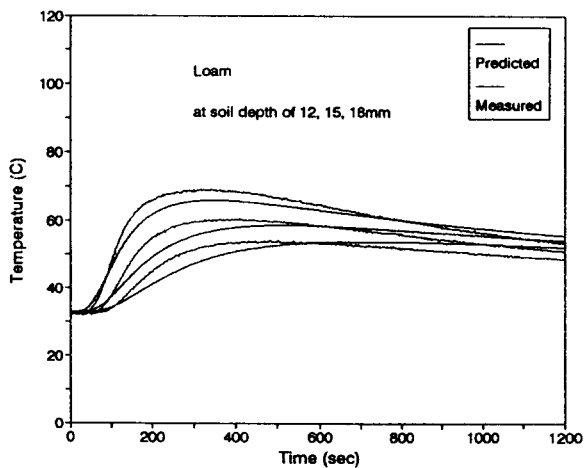
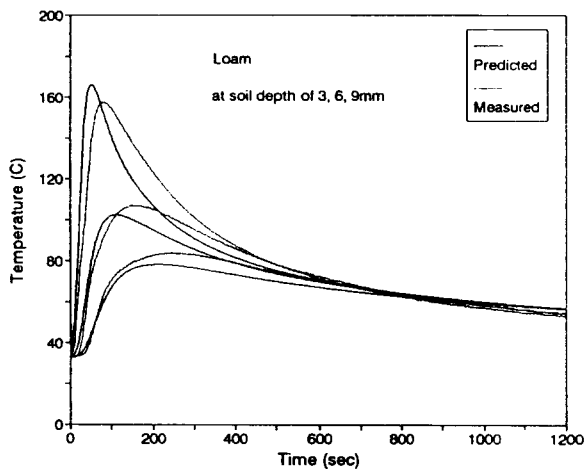
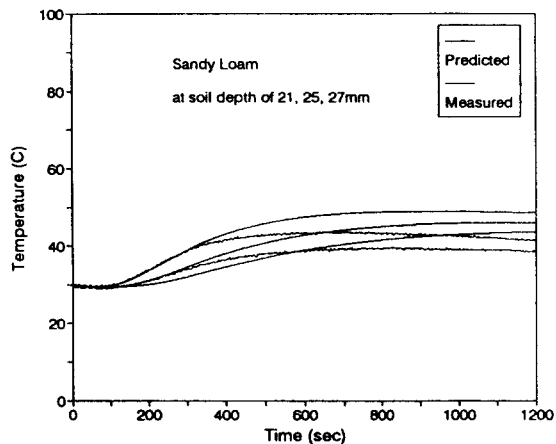
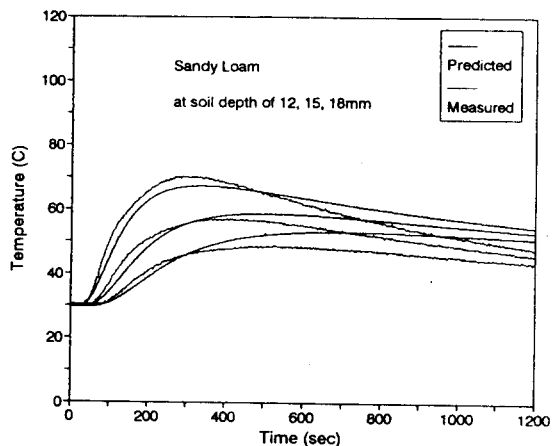
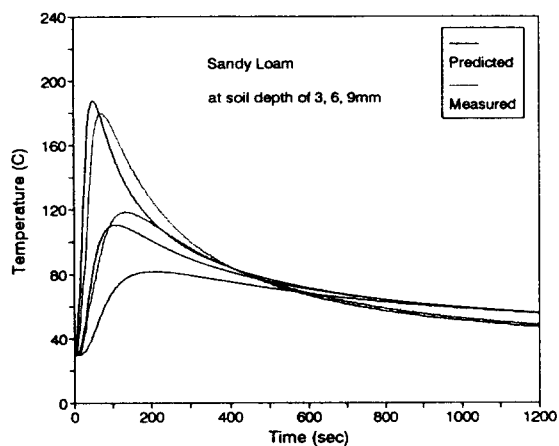


Figure 2. Comparison of measured and predicted temperatures at various soil depth.

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 깊이 별 온도 측정치와 예측치가 비교 분석되었다. 온도분포에 대한 실측치와 예측치의 평균상대편차는 10% 미만으로 비교적 잘 일치하였다. 그러므로 일정한 투입 열량(온도)하에서 시간에 따른 토양내부의 온도분포를 열전달 모델에 의해 예측할 수 있고, 실제규모의 잡초방제기의 제작시 규모 및 효율적인 작업속도등의 산정에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. 양환승, 구자옥, 변종영, 권용용. 1990. 최신 잡초방제학. 향문사.
2. Berling, J. 1993. Getting weeds in hot water. *Farm Industry News*, January, 44.
3. Diprose, M. F. and F. A. Benson. 1984. Electrical methods of killing plants. *Journal of Agricultural Engineering Research* 30:197 - 209.
4. 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*.
5. Mattsson, B. 1993. Weed control by microwaves - a review. *Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 171:48*.
6. 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.
7. Parish, S. 1989. Weed control-testing the effects of infrared radiation, *Agricultural Engineer*, Summer:53-55