

엔진구동 지열 열펌프의 성능 분석 (I)⁺

- 부산 · 진주지방 지중온도 예측 -

Performance Analysis of a Geothermal Heat Pump System Operated by a Diesel Engine (I)⁺

- Soil temperature prediction in Pusan and Chinju -

김 영 복*

정희원

Y. B. Kim

ABSTRACT

The equation to predict the soil temperature of Pusan and Chinju city as a function of time and soil depth for the geothermal energy utilization system and agriculture was devised. The equation was $T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos\{\omega \cdot [t-t_o-x/(2 \cdot \alpha \cdot \omega)^{0.5}]\}$ with the soil thermal diffusivity, α , of 0.4 m²/day, 0.0375 m²/day and phase zero point, t_o , of 24 days, 22.4 days in Pusan and Chinju city, respectively, during ten years from 1987 to 1996. The predicted and measured soil temperatures agreed well with the coefficient of determination of 0.95 at the soil depth of 0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 m. The maximum and minimum temperature in Pusan 3.7, 30.1°C at soil surface and 14.3, 18.0°C at the depth of 5.0 m. The total mean temperature of soil in Pusan and Chinju city was about 16.3, 16.0°C, respectively.

주요용어(Key Words): 토양(soil), 온도(temperature), 진주(Chinju), 부산(Pusan), 예측(prediction), 지온예측(soil temperature prediction)

1. 서 론

자연에너지인 지열을 열원으로 이용하는 열기계의 설계나 성능분석을 위해서는 지중의 온도분포나 최대·최소온도가 나타나는 기간에 대한 정보는 매우 중요하며, 또한 농업에서는 토양의 온도가 식물과 미생물의 활동과 생육, 그리고 토양의 생성작용

에도 영향을 미치게 되므로 토양온도에 대한 예측 분석 정보는 꼭 필요하다. 지표면은 주간에는 가열되고 야간에는 냉각되는데 이러한 가열과 냉각의 효과는 1일 주기의 열파동 형태로 지중으로 전파되어 가며, 1일 중의 지표면 가열냉각은 지중 0.9~1.2 m 까지 전파되어 간다. 그리고 여름에는 겨울에 비해 보다 많이 가열되어 1년 주기의 열파동 형태로 전파

⁺ 본 연구는 1997년도 학술진흥재단의 공모과제연구비에 의하여 연구되었음.

* 경상대학교 농업기계공학과

되어 가는 데 1년 중 여름과 겨울의 가열냉각효과는 18 ~ 21m 정도까지 관찰되는 것으로 알려져 있다 (Carslaw, 1959). 토양의 열원은 주로 태양광선이며, 그밖에 濕潤熱, 유기물의 분해열, 비 등을 생각할 수 있는데 토양열의 대부분은 태양의 복사에너지에서 얻어지게 된다.

토양온도는 受熱과 전열에 관계하는 인자인 토양 함수율, 토양입자의 밀도, 공극율, 비열, 열전도계수, 토양표면의 색깔 · 피복물 · 경사도 · 방향 등과 放熱에 관계하는 인자인 토양으로부터의 열복사, 토양수분의 이동 등에 의해 결정된다. 토양내의 전열특성에 관해서 Kersten(1949)는 토양함수율이 높을수록, 토양밀도가 클수록 열전도율이 증가한다고 하였다. 토양의 색깔에 따라서는 토양의 색깔이 暗色土인 경우가 灰色土보다 지온이 높는데 실험에 의하면(조, 1996) 흑색은 백색에 비해 평균 7℃가 높다고 한다. 토양의 열확산계수는 토양의 종류와 토양함수율 등에 따라 달라지는데 보통 건조한 토양에서는 0.02 m²/day, 수분이 많은 토양에서는 0.09 m²/day로 나타나는 데(NRECA, 1988), Carslaw(1959)는 토양평균값이 0.04 m²/day 정도라고 하였다. Wierenga 등(1969)에 의하면 겉보기열확산계수(apparent thermal diffusivity)는 진폭방정식(amplitude equation) $\alpha = (\omega/2) \cdot [(x_2 - x_1)/(\ln(T_s/T_{s_2}))]^2$ 과 상방정식(phase equation) $\alpha = [(x_2 - x_1)/\delta]^2/(2\omega)$, 수치해석법과 같은 방법으로 계산될 수 있다고 하였으며, 이 중에서 토양의 열확산계수값을 증가시켜 가며 계산한 예측값과 실측값의 오차가 최소가 되는 점을 찾는 수치해석법에 의한 결과가 가장 잘 맞는다고 하였다. 지온은 지하 100 m 마다 2~3℃씩 상승한다고 알려져 있으며(전, 1990), 지표면 최고온도는 북아메리카 아리조나사막의 71.5℃, 최저온도는 시베리아사막의 -70℃로 알려져 있다(조, 1996). 그리고 평균 토양온도는 고도에 따라서 낮아지므로 고산지대 식물이 저온이 된다(임, 1986). 지중 약 60 m 이하에서는 평균온도가 비교적 일정하여 지하수온도와 같다고 할 수 있으며 연간 대기온도보다 약 1℃ 높다고 한다(NRECA, 1988). 그리고 지중 2~5km에서는 250~350℃ 정도가 된다(전, 1990).

지온예측방정식에 대한 연구로서 최(1983)는 지온 이용 환풍장치 설계를 위해 Fourier 급수를 이용하여 진주시방의 1981년도 지온예측을 시도하였던 바 토양의 열확산계수값을 0.9×10^{-6} m²/s로 대입하여 분석한 결과 일부 구간을 제외하고는 이론 예측치와 실측값이 잘 일치한다고 하였다. Hanks 등(1971)은 1차원 비정상 열전도방정식을 유한차분법에 의해 수치 해석하므로써 토양온도를 예측한 바 있으며, Wierenga 등(1970)은 4계 Runge-Kutta Variable Step method를 이용한 적분법으로 토양내 열 전달을 시뮬레이션하였다. Kimball과 Jackson(1979), van Wijk와 de Vries(1963)는 지중 깊이 x에서의 온도를 다음과 같은 식으로 근사한 바 있다.

$$T(x,t) = T_m + T_x \cdot \sin(\omega \cdot t + \xi x) \dots\dots\dots (1)$$

그리고 Penrod와 Prasanna(1964)는 지열을 이용하기 위해 지중에 파이프를 매설할 경우 매설파이프 주위의 온도변화에 대해서 Kelvin line source theory에 의해 설명할 수 있다고 하였으며, 균일하고 연속된 무한 물질내에 정상 선형 열원이 있는 경우의 온도변화에 대해 분석한 바 있다. 이 방정식은 공급열원의 형태가 on/off 혹은 주기적일 때, 正弦함수형일 때의 지온예측에 이용된다고 하였다(Claesson, 1983). 그리고 Daniel(1980)은 1일 중 변화량과 연간 변화량을 함께 고려한 예측식을 제안하기도 하였다.

본 연구에서는 자연에너지인 지열을 열원으로 하는 지열 열펌프의 설계와 성능 분석을 위해, 그리고 농업에 필요한 정보로서 지중의 온도분포나 변화를 예측하기 위해서 지온 예측 방정식을 정립하고 이를 부산 · 진주시방에 적용하여 최적 방정식을 탐색하였다.

2. 재료 및 방법

지표면에서의 온도변화가 지중으로 전파되어 갈 때 토양 열특성과 여러 가지 전열관계인자들을 고려한 겉보기열확산계수(apparent thermal diffusivity: Wierenga, 1969)를 이용하여 토양내 열흐름을 1차원적으로(Carslaw, 1959) 수식화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots (2)$$

방정식 (2)의 해는 그 경계조건에 따라서 달라지는데 지중 모든 깊이에서의 평균값이 T_m 이고 지온이 평균값 주위로 餘弦함수적으로 진동한다면 이를 방정식 (2)에 대입하여 그 해로서 방정식 (4)를 얻을 수 있는데 이들을 수식화하면 다음과 같다(Daniel, 1980 : Carlslaw, 1959).

경계 · 초기 조건

$$t = 0, x = 0; T(x,t) = T_m \dots\dots\dots (3-a)$$

$$t = t, x = x; T(x,t) = T_m \dots\dots\dots (3-b)$$

$$t = t, x = 0; T(x,t) = T_m - T_o \cdot \cos(\omega \cdot t) \dots (3-c)$$

위치 x , 시간 t 에서의 지온방정식

$$T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos(\omega \cdot t - \xi) \dots (4)$$

방정식 (4)에서 ξ 는 무차원량으로서 $\xi = x \cdot (\omega / (2 \cdot \alpha))^{0.5}$ 인데 이 식 중의 $(\omega / (2 \cdot \alpha))^{0.5}$ 는 특성깊이(characteristic depth, damping depth)의 역수로서 토양의 열확산계수와 온도변동의 주기에 따라 결정된다. 지온의 최고 · 최저온도가 나타나는 시점은 지표면에서 지중으로 들어갈수록 지연되는데 이것은 열전달시간과 전열경로상의 축열 등에 기인하며 그 크기는 $-\xi$ 로서 이를 相移動(phase shift), 또는 相遲延(phase lag)라 한다. 그런데 실제의 기상자료는 항상 예측기간의 평균치나 최대 · 최소점에서 출발하는 것이 아니므로 시간척도상에서 임의의 원점 t_0 를 도입하면 방정식 (4)는 다음과 같이 된다(Carlsaw, 1959 : NRECA, 1988).

$$T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_0) - x \cdot (\omega / (2 \cdot \alpha))^{0.5}] \dots\dots\dots (5-a)$$

$$T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos\{\omega \cdot [t-t_0 - x / (2 \cdot \alpha \cdot \omega)^{0.5}]\} \dots\dots\dots (5-b)$$

방정식 (5-a)에서의 $(-\omega \cdot t_0)$ 를 相常數(phase constant)라고 하며(Daniel, 1980), 相原點 t_0 는 지표면 온도의 최소점이 나타나는 시기를 나타내는데 Kusuda(NRECA, 1988)에 의하면 이 값은 35 ± 10 일로서 지표면의 최저온도는 1월 25일부터 2월 15일 사이

에 나타난다고 하였다.

본 연구에서는 방정식 (5-a)를 이용하여 년도별 · 지역별 지온을 예측하였으며, 방정식에 대입하는 평균기온과 지표면 온도 진폭은 측정값을 이용하였다. 그리고 토양의 열확산계수와 相原點은 컴퓨터프로그램을 작성하여 각각의 값들이 분포할 수 있는 최저값에서부터 최고값까지 축차적으로 증가시켜 가며 각 시기에 대한 이론예측치를 계산하여 실측치와의 오차가 가장 작은 값을 탐색하여 결정하였다.

가. 기상자료

본 연구에서 사용된 기상관측자료는 부산과 진주 지방의 1987년부터 1996년까지의 10년간 측정자료이며 월평균지온을 이용하였다. 측정하는 지중깊이는 지역에 따라 다르며 농업기상관서에서는 0.0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 5.0 m 위치에서 측정관리하고 있으나 보통의 관서는 1 m까지, 일부 관서에서는 지표면인 0.0 m 위치에서만 측정하고 있었다. 본 연구에서는 지열이용 실험장치가 설치될 위치와 지온측정 여부를 고려하여 부산과 진주지방을 우선 대상을 하여 0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 m에서의 지온을 분석하였다. 지온의 계측은 잔디가 깔린 포장에서 가는 파이프를 매설하여 그 속에 각 위치별로 온도계를 설치, 매일 아침 9시에 측정하여 월평균을 구한 값으로서 기상대의 자료를 이용하였다.

나. 열확산계수와 相原點의 결정방법

이론예측방정식 (5-a)에 나타난 열확산계수와 相原點을 결정하는 방법은 토양열확산계수가 분포할 수 있는 최대범위인 0.02~0.09 m^2/day (NRECA, 1988 : Carlsaw, 1959)내에서, 그리고 相原點은 Kusuda(NRECA, 1988)의 분석을 참고하여 0~50 days 범위 내에서 실측치와 가장 오차가 적은 값을 탐색하여 구하였다. 최적값의 탐색은 열확산계수와 相原點의 값들을 이론방정식에 대입하여 가며 예측하고자 하는 기간내의 관측점에서의 이론예측치를 계산하고 이 계산된 값과 그 실측치들과의 편차제곱합을 구하

여 그 최소값이 나타나는 값으로 결정하였다. 이때 열확산계수와 相原點의 크기에 따라서 편차제곱합이 어떻게 변하는가의 전체적인 경향을 분석하여 최적값이 어느 한 값으로 수렴하는 것을 확인한 후 각각의 값을 축차적으로 증가시켜 가며 최적값을 탐색하였다. 최적값의 탐색은 설정한 범위에서 각각의 최소값에서 시작하여 증분을 0.005 m²/day, 1 day로 하여 일차적인 최적범위를 구하고, 구해진 일차적인 범위내에서 그 구간을 다시 10등분하여 0.0005 m²/day, 0.1 day를 증분으로 하여 2차계산을 하였으며, 이러한 과정을 반복하여 편차제곱합이 증분의 크기가 변하기 전의 편차제곱합보다 10⁻⁴ 이하일 때 수렴된 것으로 판단하였다. 이러한 방법은 탐색시간을 현저하게 줄일 수 있었는데 모든 계산에서 4차 계산 단계 이내에서 수렴하는 것을 알 수 있었다.

값을 결정하기 위한 탐색과정에서의 수렴시간은 자료의 수에 따라 다소 다르지만 10년간 600개의 자료를 분석 예측하는데 Pentium PC로서 약 150초 정도가 소요되었다. 따라서 본 연구에서의 최적값 탐색에서 각각의 증분을 처음에는 크게, 그리고 다음 단계로 갈수록 전단계에서 구해진 넓은 범위내에서 더욱 작은 증분으로 탐색해 가는 방법이 매우 유용함을 확인할 수 있었다. 그리고 상관관계를 확인하기 위해 부산지방의 지표면에서의 실측치와 이론예측치와의 관계를 회귀분석해 보면 결정계수는 r²=0.96으로서 매우 상관관계가 크며, F검정에서의 유효값을 비교하면 1%의 유효수준으로 고도로 유의한 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

가. 최적값 수렴 특성

이론예측방정식 (5-a)에서의 열확산계수와 相原點

나. 연도별 지중온도 분석

부산과 진주지방의 지온변화를 예측하기 위한 이론예측방정식 (5-a)에 대입할 최적변수값들은 표 1에 나타낸 바와 같이 결정되었으며, 이 값들로서 하나의 방정식으로 장기간에 걸친 깊이별 온도를 예측할 수 있다. 연도별 지중온도의 예측방정식에 의한

Table 1(a) Constant for the predicting equation

City	Period	X: Depth (m)	α : Thermal diffusivity (m ² /s)	to : Phase zero point (days)	Tsm (°C)	To (°C)	Ta (°C)	Figure No.
Pusan	1987~1996	0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.040	24	16.28	13.180	14.66	Fig. 2(a)-2(c)
Chinju	1987~1996	0, 0.5, 1.0	0.0375	22.4	15.59	13.685	12.97	Fig. 1(a)-1(c)
Chinju	1987~1990	0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.0547	24.650	15.98	13.013	13.15	Fig. 1(c)

Table 1(b) Constant for the predicting equation

City	Period	X: Depth (m)	α : Thermal diffusivity (m ² /s)	to : Phase zero point (days)	Tm (°C)	To (°C)	Ta (°C)	Figure No.
Chinju	1987	0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.0487	22.784	15.027	12.85	12.825	Fig. 1(c)
	1988		0.0581	26.150	15.53	13.1	12.65	
	1989		0.0631	22.896	16.44	11.4	13.342	
	1990		0.05	26.56	16.935	14.7	13.783	

예측치와 실측치를 진주의 경우 그림 1(a)에서 그림 1(c)까지, 부산의 경우 그림 2(a)에서 그림 2(c)까지 나타내었다. 그림 1(a)는 진주지방의 지표면과

1.0 m 위치에서의 1987년부터 1996년까지의 이론예측치와 실측치를 나타내고 있는데 1991년과 1994년의 여름철 최고온도 일부를 제외하면 상당히 잘 일

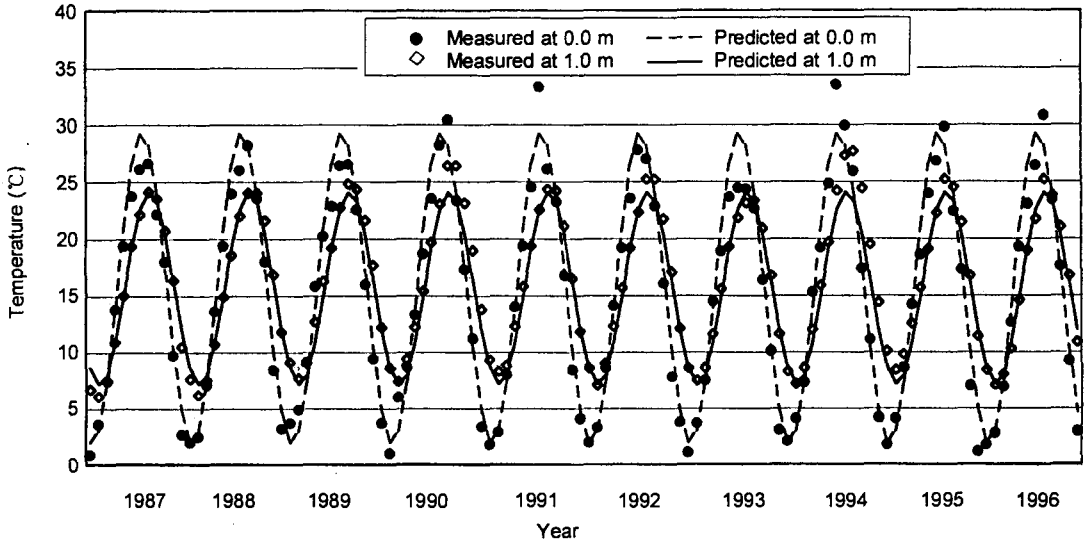


Fig. 1(a) Measured and predicted temperature history for soil surface and 1.0 m of soil depth. Chinju, 1987~1996.

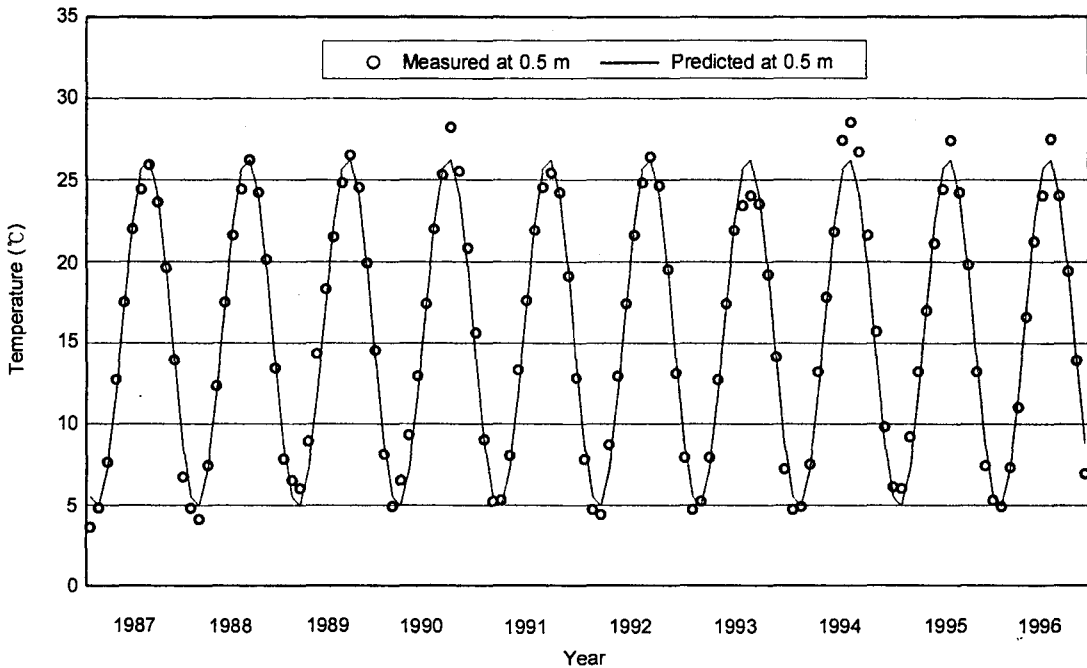


Fig. 1(b) Measured and predicted temperature history in Chinju during 1987~1996 at 0.5 m depth.

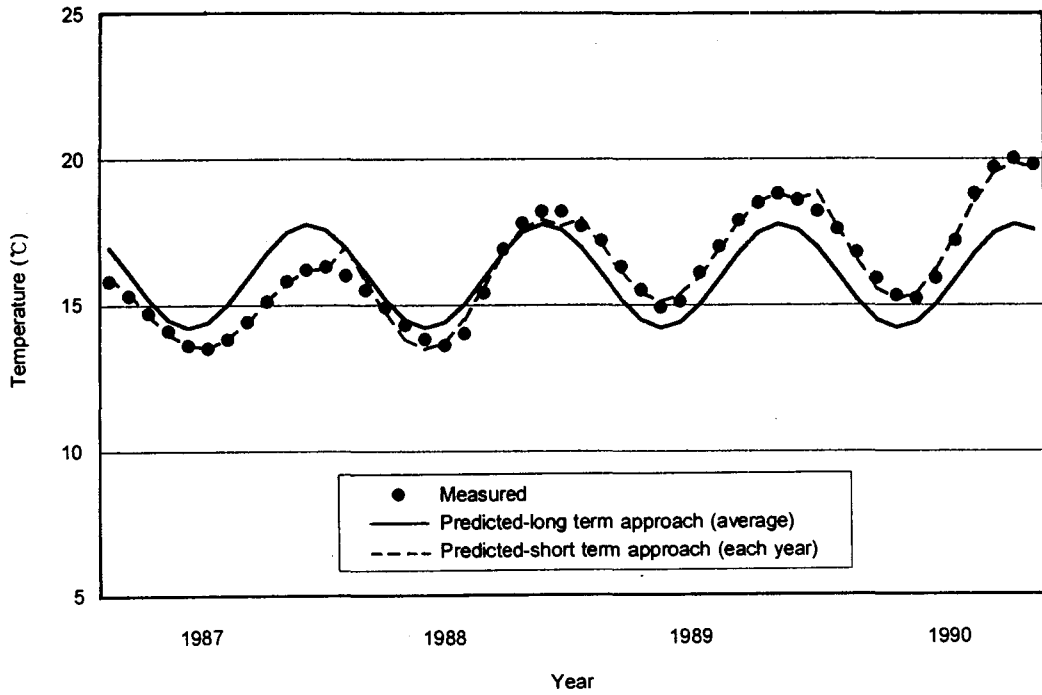


Fig. 1(c) Measured and predicted temperature at 5.0 m Chinju, 1987~1990.

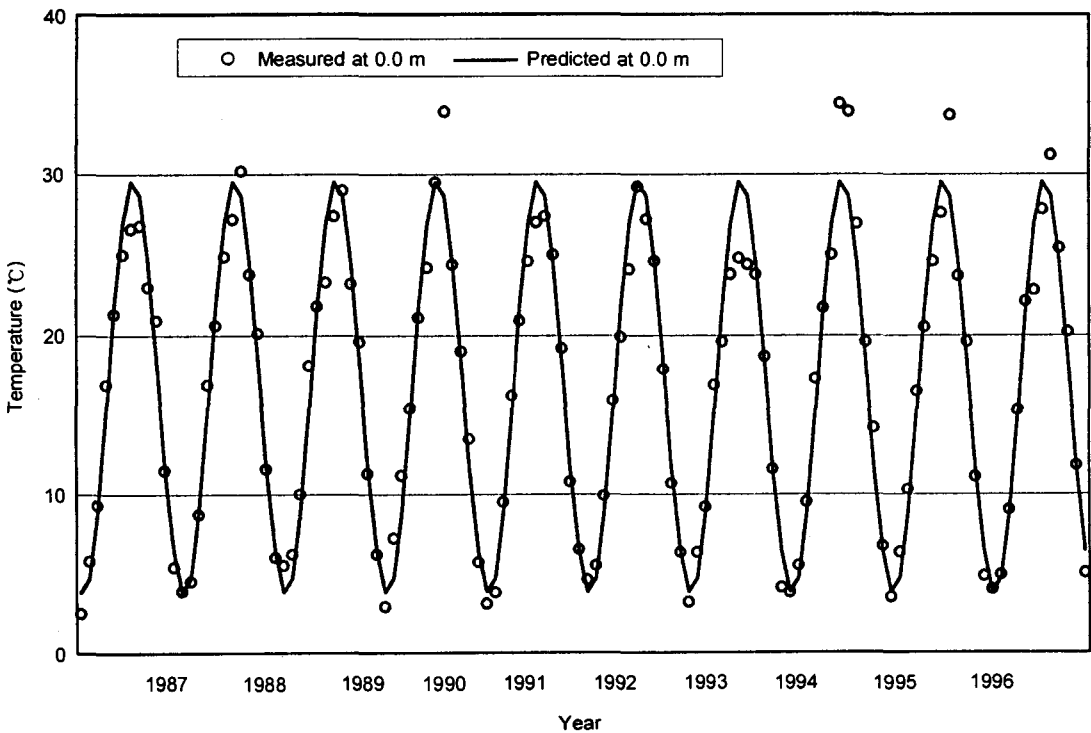


Fig. 2(a) Measured and predicted temperature at soil surface Pusan, 1987~1996.

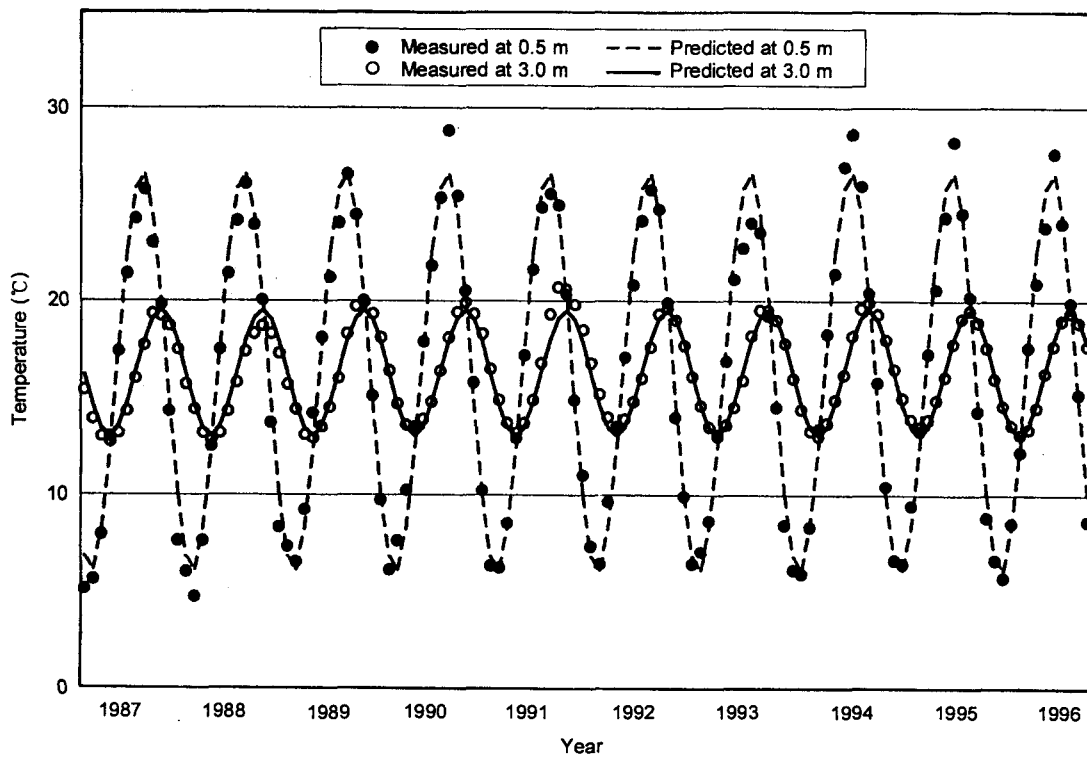


Fig. 2(b) Measured and predicted temperature for 0.5 m and 3.0 m of soil depth, Pusan, 1987~1996.

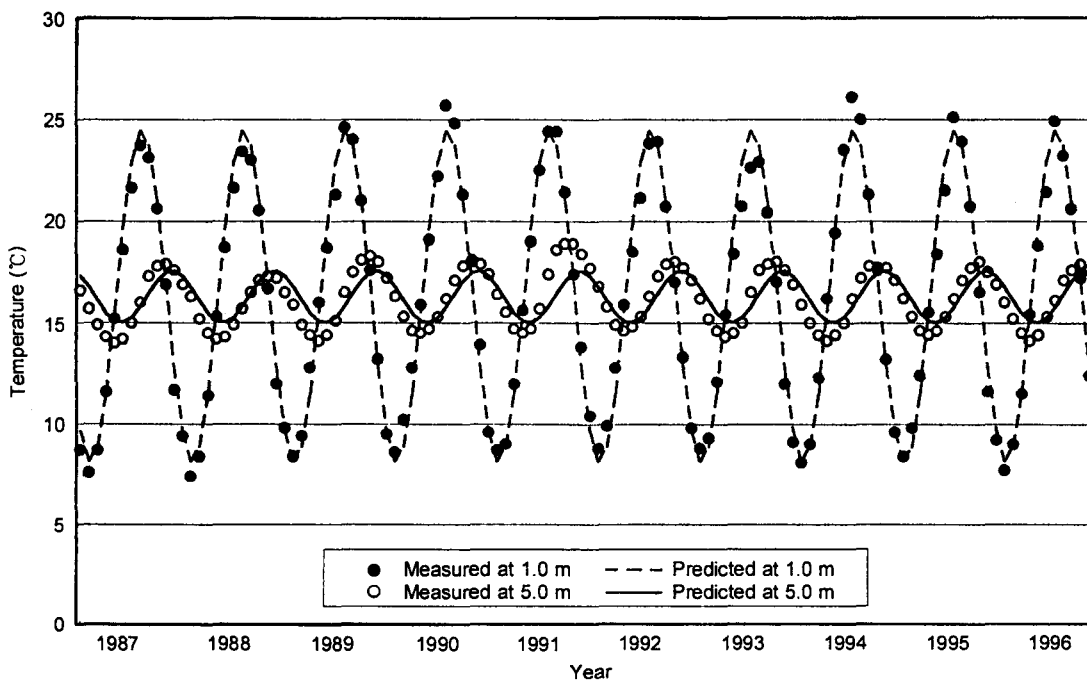


Fig. 2(c) Measured and predicted temperature for 1.0 m and 5.0 m of soil depth, Pusan, 1987~1996.

치하고 있다. 지표면과 1 m 위치에서의 실측치와 이론예측치와의 관계를 회귀분석해 보면 각각의 결정계수는 0.97, 0.95이며, 모두 유의수준 1%로서 고도로 유의한 관계로 나타났다. 그러나 진주지방에서 3 m 이하에서는 1987년부터 1990년까지 지온이 상당히 상승하는 것으로 관측되었고 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 연도별로 꾸준히 상승하였던 것으로 나타났기 때문에 1987년부터 1990년까지를 하나의 방정식으로 예측하는 장기예측식 접근법(long term approach)으로는 상당히 오차가 큰 것을 알 수 있고 매년 하나씩의 예측방정식으로 표현하면(short term approach) 비교적 오차가 적어지는 것을 알 수 있다. 그리고 부산지방의 경우는 전체적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다.

한편, 부산과 진주지방의 열확산계수는 1987년부터 1996년까지의 10년간 장기적인 관점에서 볼 때 부산과 진주 각각 0.04 m²/day, 0.0375 m²/day 정도로서 보통 정도의 열확산계수값을 나타내었으나 진주지방의 경우 1987년부터 1990년까지는 지중 3~5 m 부근에서 온도가 상당히 상승하였던 것으로 나타났던 바 열확산계수가 조금 크게 나타났다. 그리고 相原點은 餘弦함수로 나타낸 예측방정식에서 최저값을 나타내는 위치인데 진주, 부산 각각 22.4, 24 days로 나타났다. 이것은 실측치가 매월 평균값으로서 그 달의 중앙에 놓이게 되므로 相原點이 22.4일로 나타난 진주지방의 경우 (15 + 22.4 = 37.4 days)로서 지표면이 가장 추운 날은 1월 1일을 기준으로 약 37일이 지난 2월 7일경이 되며, 부산지방의 경우 1월 15일부터 24일이 지난 2월 9일경이 최저온도를 나타내는 것으로 나타났다.

지중깊이별 최저온도는 지표면에서 최저온도가 나타난 시점에서부터 전열에 소요되는 시간이 지난 후에 지중에서 나타나게 되는데 방정식 (5-b)에 포함된 식으로 토양열확산계수에 따라 일정깊이에까지 전달이 지연되는 시간인 相遲延을 계산하면 표 2에 나타낸 바와 같다. 표 2에서 살펴보면 부산지방의 열확산계수값인 0.4 m²/day일 때의 경우 지중 1 m 위치에서 최저온도가 나타나는 시기는 지표면에서 최저온도가 나타난 이후 26.9일이 지난 후가 된다. 이

지연기간을 고려하여 1 m 위치에서 최소온도가 나타나는 시기를 계산하면 부산과 진주 각각 3월 8일, 3월 7일이 된다.

Table 2 Phase shift depending on soil thermal diffusivity

		Thermal diffusivity (m ² /day)		
		0.02	0.04	0.09
Depth (m)	1	38.1	26.9	18.0
	3	114.3	80.8	53.9
	5	190.5	134.7	89.8

한편, 지표면온도가 1 day, 혹은 365 days 주기로 변할 때 그 기간동안에 해당하는 특성깊이(Characteristic depth, damping depth)는 토양의 열확산계수를 0.02 m²/day에서 0.09 m²/day까지로 하여 방정식 (5-a)에 포함된 바와 같은 식으로 계산하면 표 3과 같다.

Table 3 Characteristic depth depending on soil depth and period

		Period:	Period:
		1 day	365 days
Thermal diffusivity (m ² /day)	0.02	0.080	1.524
	0.04	0.113	2.156
	0.09	0.169	3.234

다. 연도별 평균온도 변화

깊이별 지온 평균온도의 변화를 살펴보면 그림 3(a), 3(b), 표 4에서 보는 바와 같은데 각 위치에서의 최대·최소·평균은 각 연도별 값을 평균한 것으로서 부산과 진주의 지온 총평균은 각각 약 16.3, 16.0 °C로 나타났다. 부산지방의 경우 지표면 온도는 최저 2.5°C에서 최고 34.4°C까지 변하는데 연도별 평균값으로 살펴보면 약 3.7°C에서 30.1°C까지 변하며, 1 m와 5 m 위치에서는 각각 8.3~24.5 °C, 14.3~18.0

Table 4 Maximum, minimum and average temperature, temperature swing, average air temperature, average soil temperature

	X	Tmax	Tmin	Tave	As	Ta	Tsm
Pusan, 1987~1996	0	30.06	3.7	16.662	13.18	14.663	16.28
	0.5	26.66	5.94	16.07	10.36		
	1.0	24.47	8.25	16.195	8.11		
	3.0	19.64	13.13	16.306	3.255		
	5.0	18.02	14.28	16.182	1.87		
Chinju, 1987~1996	0	29.13	1.76	14.932	13.685	12.973	15.59
	0.5	26.6	4.85	15.668	10.875		
	1.0	25.02	7.3	16.183	8.860		
Chinju, 1987~1990	0	27.925	1.9	14.913	13.013	13.15	15.983
	0.5	26.7	4.65	15.777	11.025		
	1.0	24.825	6.85	16.05	8.987		
	3.0	21.825	12.425	16.9	4.7		
	5.0	18.325	14.3	16.275	2.0135		

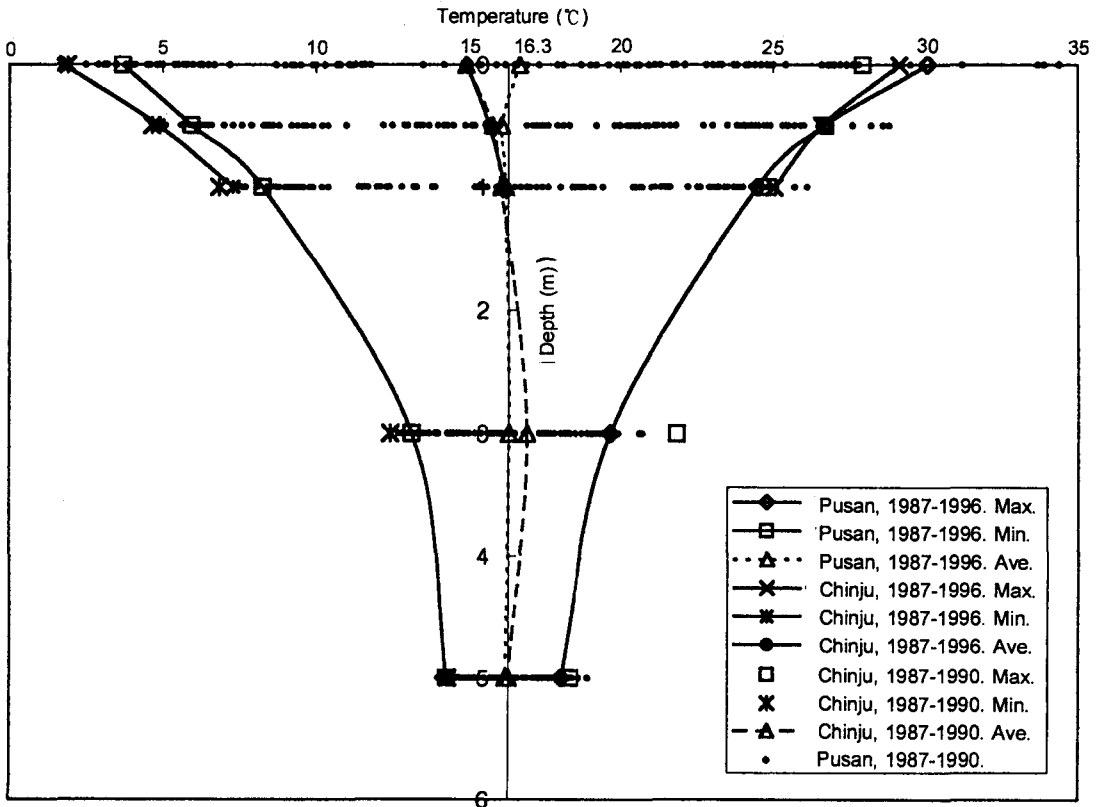


Fig. 3(a) Temperature distributions depending on soil depth.

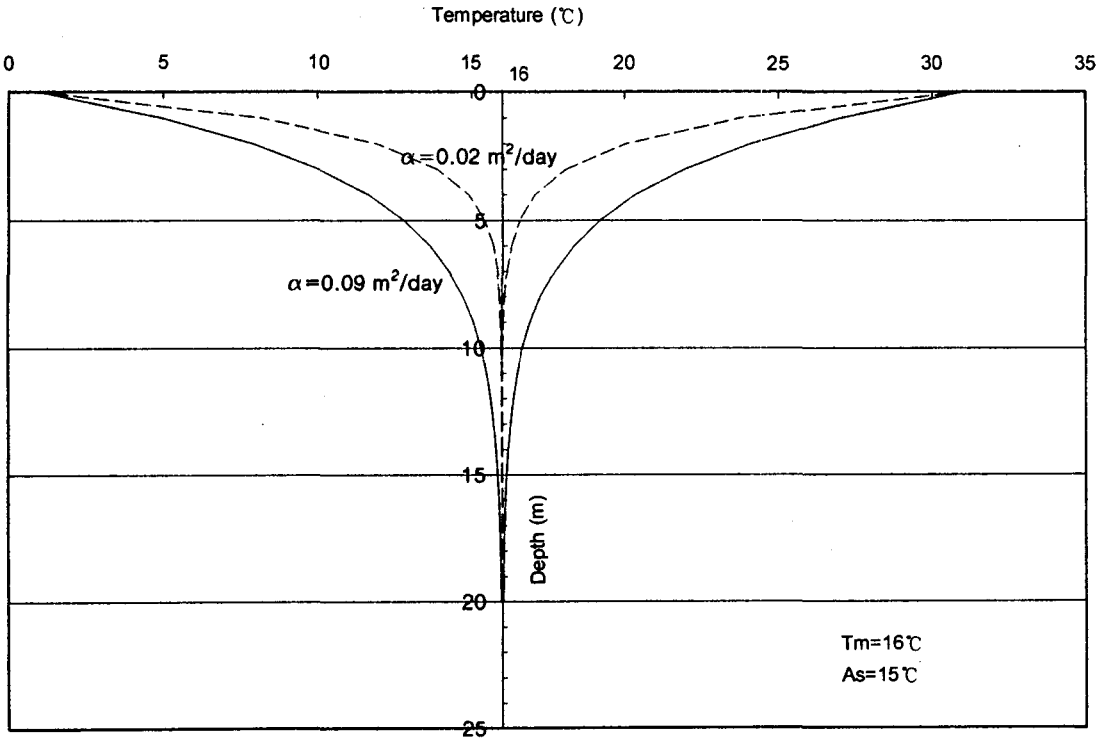


Fig. 3(b) Theoretical temperature distribution depending on the soil thermal diffusivity.

℃ 범위에서 변하고 있었다. 이로보아 지온변화의 폭은 지중깊이 갈수록 그 변화는 줄어들어 지하수 온도로서 약 16.3℃ 정도가 되는 것을 예상할 수 있다. 그런데 그림 3(b)에 나타난 것을 보면 부산지방의 최대·최소 변동의 폭이 진주지방에 비해 다소 작은 것을 알 수 있었다. 진주지방의 경우는 1987년부터 1990년까지 지온이 조금씩 상승하였던 것을 알 수 있었는데 특히 3m 위치의 경우 15℃에서 18℃로 상승한 것을 알 수 있었으며, 그 이후의 자료는 관측되지 않아 분석할 수 없었으나 지속적인 상승은 일어나지 않은 것으로 판단된다. 그 이유는 1987년부터 1996년까지의 평균온도를 보면 지표면이 약 14.9℃, 0.5 m 위치에서 약 15.7℃, 1 m 위치에서 약 16.2℃ 정도로 나타나 1989, 1990년보다 낮았기 때문이다.

그리고 그림 3(b)에는 지온평균 $T_m=16^\circ\text{C}$, 지표면

온도진폭 $A_s=15^\circ\text{C}$, 열확산계수 0.02, 0.09 m^2/day 일 때의 지중깊이별 최대·최소온도분포를 나타내었는데 지중 10 m 이하에서는 비록 열확산계수가 큰 토양이라 하더라도 2℃ 미만의 온도변화를 나타내게 된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 자연에너지인 지열을 열원으로 하는 지열 열펌프의 설계와 성능분석을 위해, 그리고 농업에 필요한 정보로서 지중의 온도분포나 변화를 예측하기 위해서 부산·진주지방의 최적 지온예측 방정식을 정립하고 그 대입 상수값들을 결정하였으며, 지온변화를 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 지중깊이 x , 시기 t 에서의 지온예측방정식은 $T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_o) - x \cdot (\omega/(2 \cdot \alpha))^{0.5}]$ 로 나타낼 수 있으며, 방정식에 포함되는 토양의 열확산계수와 相原點값은 대입법으로 탐색하여 최적값을 결정하였던 바 부산과 진주지방의 1987년부터 1996년까지의 10년간 지온예측방정식에서 열확산계수는 각각 $0.04 \text{ m}^2/\text{day}$, $0.0375 \text{ m}^2/\text{day}$ 정도로서 보통정도의 열확산계수값을 나타내었고, 相原點은 각각 24, 22.4 days로 나타났다. 이때, 이론예측치와 실측치와의 결정계수는 0.95 이상으로 나타났다.

나. 부산지방의 지표면 최저기온은 2월 9일경이 되고, 진주지방의 경우 2월 7일경이 되는 것으로 나타났다으며, 지중 1m 깊이에서는 각각 3월 8일, 3월 7일로 나타났다.

다. 토양열확산계수에 따른 지온전달 지연시간계산에서 열확산계수값인 $0.4 \text{ m}^2/\text{day}$ 일 때의 경우 지중 1 m 위치에서 최저온도가 나타나는 시기는 지표면에서 최저온도가 나타난 이후 26.9일이 지난 후로 계산되었다.

라. 토양온도의 총평균은 부산과 진주 각각 약 $16.3, 16.0^\circ\text{C}$ 였으며, 부산지방의 최대·최소 변동의 폭이 진주지방에 비해 작은 것으로 나타났다. 부산지방의 지표면, 1 m, 5 m 깊이에서의 최소·최대 온도 변동은 각각 $3.7\sim 30.1^\circ\text{C}$, $8.3\sim 24.5^\circ\text{C}$, $14.3\sim 18.0^\circ\text{C}$ 로 나타났다.

Nomenclature

- t, t_o : 시간(days), 相原點(days)
- T_a : 공기온도평균($^\circ\text{C}$)
- T_{ave} : 년도별 평균지온($^\circ\text{C}$)
- T_m : 지표면 측정평균온도($^\circ\text{C}$)
- T_{max}, T_{min} : 년도별 평균 최대, 최소온도($^\circ\text{C}$).
- T_o : 지표면에서의 온도진폭 (= (평균최대온도 - 평균최저온도)/2)($^\circ\text{C}$).

- T_{sm} : 지중온도 총평균($^\circ\text{C}$)
- $T_{s_1}, T_{s_2}, T_{x_s}$: 지중깊이 x_1, x_2, x 에서의 온도 진폭($^\circ\text{C}$)
- x, x_1, x_2 : 토양내 위치. 지중깊이(m)
- α : 열확산계수(thermal diffusivity, m^2/day)
- ξ : 열확산에 따른 온도지연을 나타내는 량.
 $\xi = x \cdot (\omega/(2 \cdot \alpha))^{0.5}$
- ξx : 지중깊이 x 에서의 相지연기간을 나타내는 량
- δ : 지중깊이 x_1, x_2 에서 최대온도가 나타나는 시기 사이의 간격
- ω : 각주기(radial frequency). $2\pi/\text{주기}=2\pi/365$ (radian/day)

참 고 문 헌

1. 임선욱. 1986. 토양학통론. 문운당.
2. 전춘생. 1990. 신에너지공학. 동명사
3. 조성진 등 11명. 1996. 토양학. 향문사.
4. 최홍립. 1983. 진주지방의 지온이용 환풍장치설계를 위한 지온예측에 관한 연구. 경상대학교 농업자원이용연구소보 제 17-1호.
5. Carslaw, H. S., and J. C. Jaeger. 1959. Conduction of heat in solids. Oxford.
6. Claesson, Johan. 1983. Earth heat: A handbook on thermal analysis. Lund Technical Univ. in Swedish.
7. Daniel Hillel. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic press.
8. Hanks, R. J., D. D. Austin, and W.T. Ondrechen. 1971. Soil temperature estimation by a numerical method. Soil Science Society of America. Proceedings. September-October. No. 5 pp. 665-667.
9. Kersten, M. S. 1949. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Bulletin No. 28. Engineering Experiment Station. University of Minnesota, Minneapolis, MN.
10. Kimball, B. A., and R. D. Jackson. 1979. Soil heat flux in B. J. Barfield and J. F. Gerber(eds.). Modi-

- fication of the Aerial Environment of Plants, ASAE, ST. Joseph, MI 49085. pp. 211-229.
11. NRECA. 1988. Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems. National Rural Electric Cooperative Association.
 12. Penrod, E. B., and K. U. Prasanna. 1964. Analysis of a proposed solar earth heat pump. Univ of Kentucky. Engineering Research Bulletin. No. 74. December.
 13. van Wijk, W. R., and D. A. de Vries. 1963. Periodic temperature variations in homogeneous soil. In "Physics of Plant Environment" (W. R. van Wijk, ed.). North-Holland Publ., Amsterdam.
 14. Wierenga, P. J., D. R. Nielsen, and R. M. Hagen. 1969. Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurement. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Vol. 33. pp. 354-360.