

엔진구동 지열 히트펌프의 성능분석(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*

Y. B. Kim

1. 서론

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 생성작용에도 영향을 미치게 되므로 토양온도에 대한 예측분석정보는 꼭 필요하다. 지표면은 주간에는 가열되고 야간에는 냉각되는데 이러한 가열과 냉각의 효과는 하루주기의 열파동형태로 지중으로 전파되어 가며, 하루 중의 지표면 가열냉각은 지중 0.9~1.2 m까지 전파되어 간다. 그리고 여름에는 겨울에 비해 보다 많이 가열되어 일년주기의 열파동형태로 전파되어 가는데 일년 중 여름과 겨울의 가열냉각효과는 18~21 m 정도까지 관찰되는 것으로 알려져 있다(Carlsaw, 1959).

토양온도는 受熱과 전열에 관계하는 인자인 토양함수율, 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 열확산계수는 토양의 종류와 토양함수율 등에 따라 달라지는데 보통 건조한 토양에서는 $0.02 \text{ m}^2/\text{day}$, 수분이 많은 토양에서는 $0.09 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 나타나는데(NRECA, 1988), Carlsaw(1956)는 토양평균값이 $0.04 \text{ m}^2/\text{day}$ 정도라고 하였다. Wierenga(1969)는 겉보기열확산계수(apparent thermal diffusivity)를 측정온도값들을 이용해 수치적으로 계산한 바 있다.

지온예측방정식에 대한 연구로서 최(1983)는 지온이용환풍장치설계를 위해 Fourier급수를 이용하여 진주지방의 1981년도 지온예측을 시도하였던 바 토양의 열확산계수값을 $0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 대입하여 분석한 결과 일부구간을 제외하고는 이론예측치와 실측값이 잘 일치한다고 하였다. Kimball and Jackson(1979), van Wijk(1963)는 지중온도를 餘弦함수를 이용해 근사한 바 있다. 그리고 Penrod(1964)는 지열을 이용하기 위해 지중에 파이프를 매설할 경우 매설파이프 주위의 온도변화에 대해서 Kelvin line source theory에 의해 설명할 수 있다고 하였으며, 균일하고 연속된 무한물질내에 정상선형열원이 있는 경우의 온도변화에 대해

+ 본 연구는 1997년도 학술진흥재단의 공모과제연구비에 의하여 연구되었음.

* 경상대학교 농업기계공학과

분석한 바 있다. 그리고 Danil(1980)은 하루 중 변화량과 연간변화량을 함께 고려한 예측식을 제안하기도 하였다.

본 연구에서는 자연에너지인 지열을 열원으로 하는 지열히트펌프의 설계와 성능분석을 위해, 그리고 농업에 필요한 정보로서 지중의 온도분포나 변화를 예측하기 위해서 지온예측방정식을 정립하고 이를 부산·진주지방에 적용하여 최적방정식을 탐색하였다.

2. 재료 및 방법

지표면에서의 온도변화가 지중으로 전파되어 갈 때 토양열특성과 여러 가지 전열관계인자들을 고려한 겔보기열확산계수(apparent thermal diffusivity : Wierenga, 1969)를 이용하여 토양내 열흐름을 일차원적으로(Carlslaw, 1959) 수식화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \text{-----} (1)$$

방정식 (1)의 해는 그 경계조건에 따라서 달라지는데 지중 모든 깊이에서의 평균값이 T_m 이고 지온이 평균값주위로 餘弦함수적으로 진동한다면 이를 방정식 (1)에 대입하여 그 해로서 위치 x , 시간 t 에서의 지온방정식 (2)를 얻을 수 있다(Danill, 1980 : Carlslaw, 1959).

$$T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos(\omega \cdot t - \xi) \text{-----} (2)$$

그런데 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)이라 한다. 그리고 실제의 기상자료는 항상 예측기간의 평균치나 최대·최소점에서 출발하는 것이 아니므로 시간척도상에서 임의의 원점 t_o 를 도입할 수 있는데 이때 $(-\omega \cdot t_o)$ 를 相常數(phase constant)라고 하며(Danill, 1980) 방정식 (2)는 다음과 같이 된다(Carlslaw, 1959 : NRECA, 1988).

$$T(x,t) = T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos(\omega \cdot [t - t_o - x / (2 \cdot a \cdot \omega)^{0.5}]) \text{-----} (3)$$

방정식 (3)에서의 相原點 t_o 는 지표면온도의 최대점이 나타나는 시기를 나타내는데 Kusuda(NRECA, 1988)에 의하면 이 값은 35 ± 10 일로서 지표면의 최저온도는 1월 25일부터 2월 15일 사이에 나타난다고 하였다.

본 연구에서는 방정식 (3)을 이용하여 년도별·지역별 지온을 예측하였으며, 방정식에 대입하는 평균기온과 지표면온도진폭은 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.

나. 기상자료

본 연구에서 사용된 기상관측자료는 지열이용실험장치가 설치된 위치와 지온의 측정여부를 고려하여 부산과 진주지방의 1987년부터 1996년까지의 10년간 지중 0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 m에서의 측정자료로서 월평균지온을 이용하였다. 지온의 계측은 잔디가 깔린 노장에서 가는 파이프를 매설하여 그 속에 각 위치별로 온도계를 설치, 매일아침 9시에 측정하여 월평균을 구한 값으로서 기상대의 자료를 이용하였다.

다. 열확산계수와 相原點의 결정방법

이론예측방정식 (3)에 나타난 열확산계수와 相原點을 결정하는 방법은 토양열확산계수가 분포할 수 있는 최대범위인 $0.02 \sim 0.09 \text{ m}^2/\text{day}$ (NRECA, 1988 : Carslaw, 1956)내에서, 그리고 相原點은 Kusuda(NRECA, 1988)의 분석을 참고하여 0~50 days 범위내에서 이론치와 실측치의 편차제곱합이 최소가 되는 값을 탐색하여 구하였다. 최적값의 탐색은 설정한 범위에서 각각의 최소값에서 시작하여 증분을 $0.005 \text{ m}^2/\text{day}$, 1 day로 하여 일차적인 최적범위를 구하고, 구해진 일차적인 범위내에서 그 구간을 다시 10등분하여 $0.0005 \text{ m}^2/\text{day}$, 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 4차계산단계이내에서 수렴하는 것을 알 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

가. 최적값 수렴특성

이론예측방정식 (3)에서의 열확산계수와 相原點값을 결정하기 위한 탐색과정에서의 수렴시간은 자료의 수에 따라 다소 다르지만 10년간 600개의 자료를 분석예측하는데 Pentium PC로서 약 150초정도가 소요되었다. 따라서 본 연구에서의 최적값탐색에서 각각의 증분을 처음에는 크게, 그리고 다음단계로 갈수록 전단계에서 구해진 넓은 범위내에서 더욱 작은 증분으로 탐색해 가는 방법이 매우 유용함을 확인할 수 있었다. 그리고 상관관계를 확인하기 위해 부산지방의 지표면에서의 실측치와 이론예측치와의 상관관계를 회귀분석해 보면 결정계수는 $r^2=0.96$ 으로서 매우 상관관계가 크며, F검정에서의 유효값을 비교하면 1%의 유효수준으로 고도로 유의한 것으로 나타났다.

나. 연도별 지중온도분석

부산과 진주지방의 지온변화를 예측하기 위한 이론예측방정식 (3)에 대입할 최적변수값들은 표 1에 나타난 바와 같이 결정되었으며, 이 값들로 나타난 하나의 방정식이 그림 1, 2에 나타난 바와 같이 장기간에 걸친 깊이별온도를 예측할 수 있었다. 그림 2는 진주지방의 지표면과 1.0 m위치에서의 1987년부터 1996년까지의 이론예측치와 실측치를 나타내고 있는데 1991년과 1994년의 여름철 최고온도일부를 제외하면 상당히 잘 일치하고 있다. 지표면과 1 m위치에서의 실측치와 이론예측치와의 관계를 회귀분석해 보면 각각의 결정계수는 0.97, 0.95이며, 모두 유의수준 1%로서 고도로 유의한 관계로 나타났다.

한편, 부산과 진주지방의 열확산계수는 1987년부터 1996년까지의 10년간 장기적인 관점에서 볼 때 부산과 진주 각각 $0.04 \text{ m}^2/\text{day}$, $0.0375 \text{ m}^2/\text{day}$ 정도로서 보통정도의 열확산계수값을 나타내었으나 진주지방의 경우 1987년부터 1990년까지는 지중 3~5 m부근에서 온도가 상당히 상승하였던 것으로 관측되었던 바 열확산계수가 조금 크게 나타났다. 그리고 相原點은 餘弦함수로 나타난 예측방정식에서 최저값을 나타내는 위치인데 진주, 부산 각각 22.4, 24 days로 나타났다. 이것은 실측치가 매월평균값으로서 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.

Table 1 Constant for the predicting equation

City	Period	α : Thermal diffusivity(m ² /s)	t_0 : Phase zero point(days)	T (°C)	To (°C)	Ta (°C)
Pusan	1987-1996	0.040	24	16.28	13.180	14.66
Chinju	1987-1996	.0375	22.4	15.59	13.685	12.97
Chinju	1987-1990	.0547	24.650	15.98	13.013	13.15

지중깊이별 최저온도는 지표면에서 최저온도가 나타난 시점에서부터 전열에 소요되는 시간이 지난 후에 지중에서 나타나게 되는데 방정식 (3)에 포함된 식으로 토양열확산계수에 따라 일정깊이에까지 전달이 지연되는 시간인 相遲延을 계산하면 표 2에 나타난 바와 같다. 표 2에서 살펴보면 부산지방의 열확산계수값인 0.4 m²/day일 때의 경우 지중 1 m위치에서 최저온도가 나타나는 시기는 지표면에서 최저온도가 나타난 이후 26.9일이 지난 후가 된다. 부산과 진주의 지중 1m깊이에서의 최저온도가 나타나는 시기를 계산하면 각각 3월 8일, 3월 7일로 나타났다.

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

다. 년도별 평균온도변화

그림 3에 나타난 최대·최소·평균은 각 년도별 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 m위치에서는 각각 8.3~24.5 °C, 14.3~18.0 °C 범위에서 변하고 있었다. 이로 보아 지온변화의 폭은 지중깊이 갈수록 그 변화는 줄어들어 지하수 온도로서 약 16.3 °C정도가 되는 것을 예상할 수 있다. 그리고 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 °C에서 18 °C로 상승한 것을 알 수 있었으며, 그 이후의 자료는 관측되지 않아 분석할 수 없었으나 지속적인 상승은 일어나지 않은 것으로 판단된다. 그 이유는 1987년부터 1996년까지의 평균온도가 1989, 1990년 보다 낮았기 때문이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 자연에너지인 지열을 열원으로 하는 지열히트펌프의 설계와 성능분석을 위해, 그리고 농업에 필요한 정보로서 지중의 온도분포나 변화를 예측하기 위해서 부산·진주 지방의 최적 지온예측방정식을 정립하고 그 대입상수값들을 결정하였으며, 지온변화를 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 지중깊이 x , 시기 t 에서의 지온예측방정식은 $T(x,t)=T_m - T_o \cdot \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_o)-x \cdot (\omega/(2 \cdot a))^{0.5}]$ 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 0.95이상으로 나타났다.

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

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

라. 토양온도의 총평균은 부산과 진주 각각 약 16.3, 16.0 °C였으며, 부산지방의 최대·최소 변동의 폭이 진주지방에 비해 작은 것으로 나타났다. 부산지방의 지표면, 1 m, 5 m깊이에서의 최소·최대온도변동은 각각 3.7~30.1 °C, 8.3~24.5 °C, 14.3~18.0 °C로 나타났다.

Nomenclature

- t, t_o : 시간(days), 相原點(days)
- T_a : 공기온도평균(°C)
- T_{ave} : 년도별 평균지온(°C)
- T_m : 지표면 측정평균온도(°C)
- T_{max}, T_{min} : 년도별 평균 최대, 최소온도(°C).
- T_o : 지표면에서의 온도진폭(=(최대온도-최저온도)/2)(°C).
- x, x_1, x_2 : 토양내 위치. 지중깊이(m)
- a : 열확산계수(thermal diffusivity : m^2/day)
- ξ : 열확산에 따른 온도지연을 나타내는 량. $\xi=x \cdot (\omega/(2 \cdot a))^{0.5}$
- ω : 각주기(radial frequency). $2\pi/\text{주기}=2\pi/365$. (radian/day)

참고문헌

1. 임선욱. 1986. 토양학통론. 문운당.
2. 최홍림. 1983. 진주지방의 지온이용 환풍장치설계를 위한 지온예측에 관한 연구. 경상대학

교 농업자원이용연구소보 제 17-1호.

3. 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.
4. Kimball, B. A. and R. D. Jackson. 1979. Soil heat flux in B. J. Barfield and J. F. Gerber(eds.). Modification of the Aerial Environment of Plants, ASAE, ST. Joseph, MI 49085. pp. 211-229
5. NRECA. 1988. Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems. National Rural Electric Cooperative Association
6. Penrod, E.B., and Prasanna, K. U. 1964. Analysis of a proposed solar earth heat pump. Univ of Kentucky. Engineering Research Bulletin. No.74.. December
7. van Wijk, W. R., and de Vries, D. A. 1963. Periodic temperature variations in homogeneous soil. In "Physics of Plant Environment" (W. R. van Wijk, ed.). North-Holland Publ., Amsterdam
8. 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

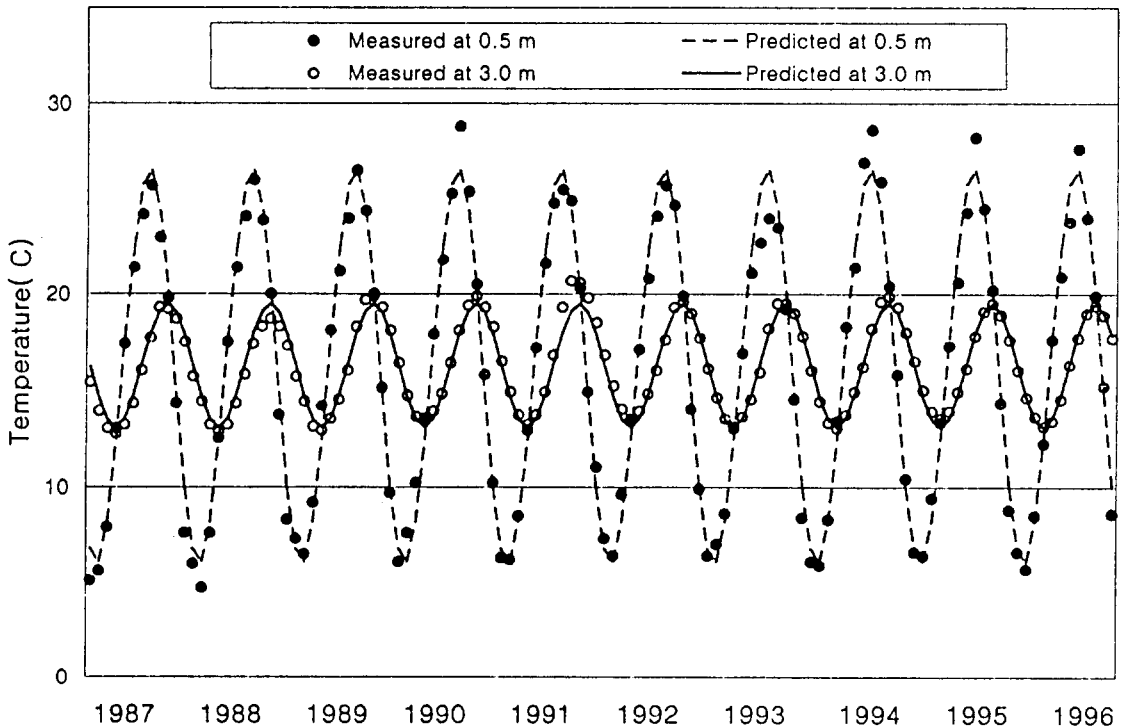


Fig.1 Measured and predicted temperature for 0.5 m and 3.0 m of soil depth, Pusan, 1987-1996

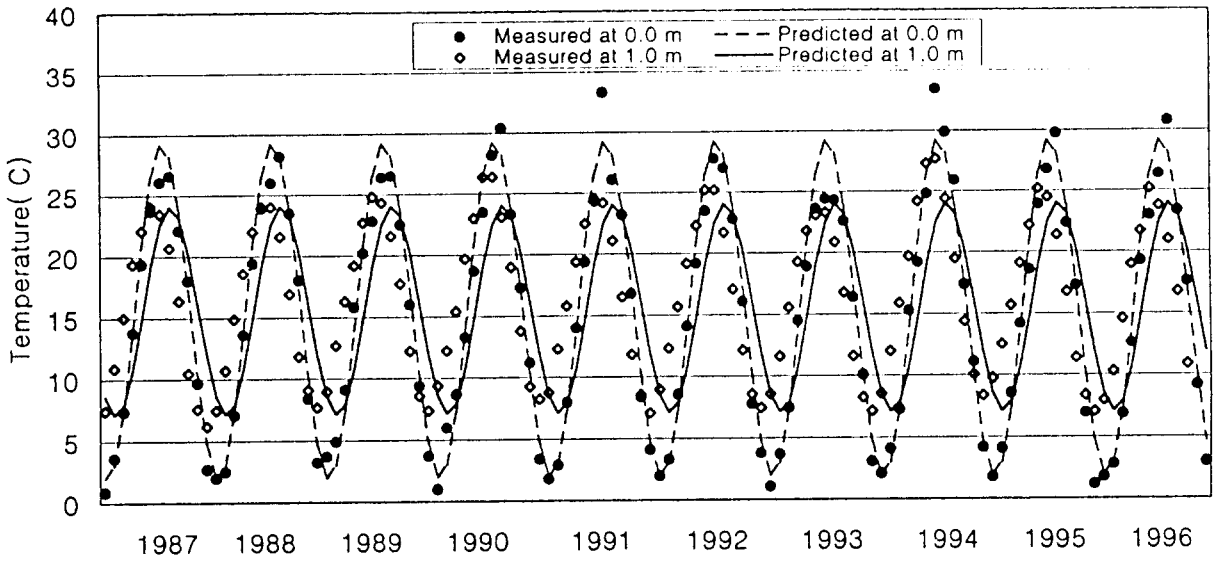


Fig.2 Measured and predicted temperature history for soil surface and 1.0 m of soil depth. Chinju, 1987-1996

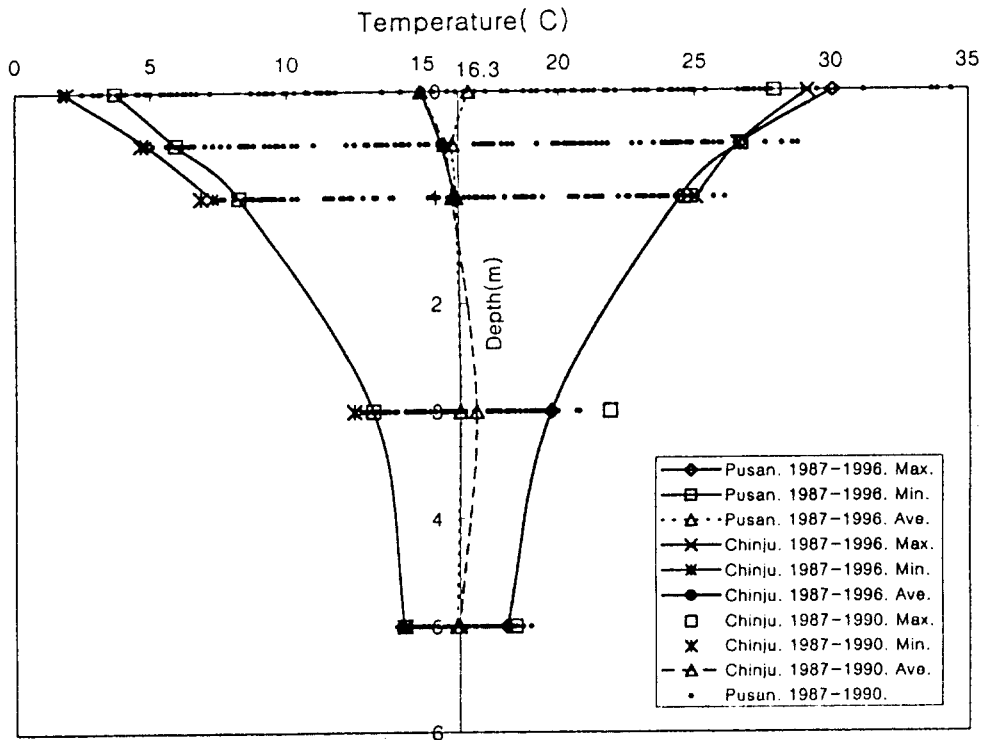


Fig.3 Temperature distributions depending on soil depth