

**한국의 지온 분석과 예측(I)**  
**- 경기·강원지역의 지온 분석과 예측방정식 -**  
**Soil temperature analysis and prediction of Korea(I)**  
**- Soil temperature analysis and prediction in**  
**Kyonggi · Kangwon province**

김 영 복\*

정회원

Y. B. Kim

**1. 서론**

농업에서는 토양의 온도가 식물과 미생물의 활동과 생육, 그리고 토양의 생성작용에도 영향을 미치게 되고, 지하 저온저장고와 같은 시설의 설계 운영에도 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 자연에너지인 지열을 열원으로 이용하는 열기계의 설계나 성능분석을 위해서는 지중의 온도분포나 최대·최소온도가 나타나는 기간을 알아야 한다.

지표면은 주간에는 가열되고 야간에는 냉각되는데 이러한 가열과 냉각의 효과는 하루중기의 열파동형태로 지중으로 전파되어 가며, 하루 중의 지표면 가열냉각은 지중 0.9~1.2 m까지 전파되어 간다. 그리고 여름에는 겨울에 비해 보다 많이 가열되어 일년중기의 열파동형태로 전파되어 가는데 일년 중 여름과 겨울의 가열냉각효과는 18~21 m 정도까지 관찰되는 것으로 알려져 있다. 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.

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. 그리고 본 연구자의 논문(김, 1999)에서는 부산·진주지방의 지온을 예측하여 부산지방의 경우 기여율 약 0.96 이상의 일치도로서 예측하였다.

본 연구에서는 농업에 필요한 정보로서, 그리고 지열이용시스템에서의 응용을 목적으로, 강원도와 경기도의 서울, 수원, 인천, 원주, 춘천, 강릉, 울릉도의 지온변화를 분석하고, 컴퓨터프로그래밍을 이용하여 최적 지온 예측방정식을 제시하였다.

---

\* 경상대학교 농업공학부, 농업지원이용연구소

## 2. 재료 및 방법

### 가. 이론 방정식

지표면에서의 온도변화가 지중으로 전파되어 갈 때 토양내 열흐름을 토양열특성과 여러가지 전열관계인자들을 고려한 겉보기열확산계수(apparent thermal diffusivity)를 이용하여 일차원적으로 수식화하면 식 (1)과 같다.

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

a : 토양의 겉보기 열확산계수(thermal diffusivity : m<sup>2</sup>/day)

T : 토양온도(°C)

t : 시간(days)

x : 토양의 지표면으로부터의 깊이(m)

방정식 (1)의 해는 그 경계조건에 따라서 달라지는데 지중 모든 깊이에서의 온도 평균값이 T<sub>m</sub>이고 지온이 평균값주위로 餘弦함수적으로 진동한다면 이를 방정식 (1)에 대입하여 그 해로서 위치 x, 시간 t에서의 지온방정식을 얻을 수 있다. 그런데 최고·최저온도가 나타나는 시점은 지표면에서 지중으로 들어갈수록 지연되는데 이것은 열전달시간과 전열경로상의 축열 등에 기인하며, 이를 相移動(phase shift), 또는 相遲延(phase lag)이라 한다. 그리고 실제의 기상자료는 매년 예측기간의 평균치나 최대·최소점에서 출발하는 것이 아니므로 시간척도상에서 임의의 원점 t<sub>0</sub>를 도입할 수 있는데 이때 (-ω·t<sub>0</sub>)를 相常數(phase constant)라고 하며, 이를 도입하여 방정식 (1)의 해로서 년중 시간 t일 때 지중 깊이 x에서의 지온예측방정식은 다음과 같이 된다(NRECA, 1988).

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

방정식 (2)의 이론예측방정식에서 t는 알고자 하는 시기로서 매년 초로부터 그때까지의 기간을 나타내며, x는 지표면으로부터의 깊이, T<sub>m</sub>은 측정값을 평균한 지중 총평균온도, T<sub>so</sub>는 지표면에서의 온도진폭으로서 (지표면최대온도-지표면최저온도)/2의 식으로 계산된다. ξ는 열확산에 따른 온도지연을 나타내는 량으로서 ξ=x·(ω/(2·a))<sup>0.5</sup>으로 계산된다. t<sub>0</sub>는 相原點(days)으로서 작성된 컴퓨터프로그램에 지온실측치를 대입하여 결정하게 되는 값이다. 그리고, ω는 각주기(radial frequency: radian/day)로서 365일을 주기로 하는 년주기계산에서는 ω=2π/365≒0.0172의 관계식으로 계산된다.

본 연구에서는 방정식 (2)을 이용하여 지역별·년도별 지온을 예측하였으며, 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. 최적값 탐색방법과 그와 관련한 컴퓨터프로그램은 본 연구자가 개발한(김, 1999) 것을 이용하였으며, 대상지역은 경기도와 강원도의

서울, 수원, 인천, 원주, 춘천, 강릉, 울릉도 지역으로 하였고, 지중깊이별로는 지표면, 1m, 3m, 5m의 측정값을 이용하였다. 지온예측방정식은 대부분 1998년까지의 최근의 자료를 토대로 분석하였고, 지온변화를 위한 비교자료로서는 1960년대를 기준으로 하여 최근 1990년대와 비교하였다. 그리고 지역별로 측정자료 형식이 균일하지 않고, 시기와 지중깊이에 따라 이상하게 급변할 때가 있었으므로 이러한 자료들은 포함되지 않도록 시기를 선정하였다. 이러한 이유로 적용기간이 지역에 따라 다르게 나타나는 경우가 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 각 지역별 지온예측방정식

경기도와 강원도의 7개 지역에 대한 지온예측방정식은 표 1에 나타난 계수들을 방정식 (2)에 대입하면 된다. 예를들어, 수원지역 지중 1m 깊이에서의 1월 지온을 살펴보면,  $t$ 는 1월 15일(0.5개월)을 기준으로 하여 연초부터의 기간을  $t=(365/12) \times 0.5=15.21$  days으로 하고, 표 2에 나타난 계수값들을 방정식 (3)에 대입하면 다음과 같이 계산된다. 즉,  $x=1$ ,  $t=15.21$ ,  $T_m=13.97$ ,  $T_{so}=14.76$ ,  $\omega=0.0172$ ,  $a=0.052$ ,  $\xi=x \cdot (\omega/(2 \cdot a))^{0.5}=1 \times (0.0172/(2 \times 0.052))^{0.5}=0.4067$ ,  $t_0=21.04$ ,  $T(1, 15.21)=13.97-(14.76) \times \text{Exp}(-0.4067) \cdot \cos\{0.0172 \times [15.21-21.04-1/(2 \times 0.052 \times 0.0172)^{0.5}]\}=5.38$  (°C)

따라서, 수원 1월 15일을 기준으로 지중 1m에서의 예측온도는 5.38 °C로 예측되며, 이에 대한 실측온도는 1994년부터 1998년까지의 1m 지점 1월 평균이 각각, 5.5, 5.7, 4.7, 5.6, 6.2 °C이었다.

한편, 서울지역의 경우 1995년부터 1998년까지의 지온측정자료를 토대로 만들어진 예측방정식의 상수값들을 표 1에서 찾아 대입하면 다음과 같이 나타나게 된다.

$$T(x,t)= 14.59 - (15.01) \times \text{Exp}(-\xi) \cdot \cos\{0.0172 \times [t-20.4-x/0.04692]\} \text{-----} \quad (3)$$

$$\text{단, } \xi=x \cdot (0.0172/(2 \cdot 0.064))^{0.5}=0.3666x, (2 \cdot a \cdot \omega)^{0.5}=0.04682$$

위 방정식을 이용하여 서울지역 지표면( $x=0$ )에서의 2월 평균온도를 예시하면 2월 15일을 기준으로 하여  $t=31+15=46$ 이므로 방정식 (3)에  $x=0$ ,  $t=46$ 을 대입하게 된다. 그러면, 예측온도는  $T(0,46)=14.59 - (15.01) \times \text{Exp}(-0.3666 \times 0) \cdot \cos\{0.0172 \times [46-20.4-0/0.04692]\}=1.01$  °C가 된다. 그런데 실제 측정된 서울의 2월평균온도는 1995년부터 1998년까지 각각 0.5, -1.3, 0, 1.8 °C이었다.

전체적으로 살펴볼 때 토양의 년중 평균온도는 약 14 °C로서 지표면온도의 최대·최저변화는  $T_{so}$ 의 2배, 즉, 약 30 °C정도가 된다. 그리고 토양의 겉보기 열확산계수는 울릉도를 제외한 지역에서는 약 0.05~0.07  $m^2/day$  정도로 나타났다. 그리고 지온을 표 1에 제시한 상수값들을 이용하여 예측할 때 실측값과의 일치도를 살펴보면 표 1에 나타난 지중깊이별 상관관계수에서 나타난 바대로 0.90에서 0.995까지의 범위에 있으며, 전체적으로 잘 일치하는 것으로 나타났으나 지중깊이 들어갈수록 일치도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 일반적으로 지상부의 열변화가 지온에 미치는 영향이 지중 심층부로 갈수록 줄어들고 심층부 온도변화가 적다고 볼 때 예측식에 의한 값과 실측에 의한 값은 심층부로 갈수록 더욱 잘 일치해야 함에도 불구하고 이러한 현상이 나타나는 것은 최근들어 지중온도가 깊이 들어갈수록 온도

상승이 크게 되기 때문으로 판단되었다. 즉, 표 2에 나타난 바 대로 지표면의 온도는 그다지 변화가 없으나 지중깊이 들어갈수록 온도가 상승하고 있기 때문으로 판단되었다.

Table 1 Constant of the prediction equation

City	Period	Mean soil temp.: $T_m(^{\circ}C)$	Soil surface Temp. swing: $T_{so}(^{\circ}C)$	Thermal diffusivity: $a(m^2/day)$	Phase zero point: $t_0(days)$	Mean Air temp.: $T_a(^{\circ}C)$	Correlation factor at 0, 1, 3, 5 m depth
Seoul	1995-1998	14.59	15.01	0.064	20.40	12.77	0.99, 0.99, 0.98, 0.95
Suwon	1994-1998	13.97	14.76	0.052	21.04	12.63	0.99, 0.99, 0.97, 0.91
Inchon	1989-1997	14.47	14.49	0.0517	21.85	12.02	0.99, 0.99, 0.99, 0.93
Wonju	1989-1990	14.36	14.48	0.070	20.00	11.67	0.98, 0.995, 0.99, 0.98
Chunchon	1989-1998	14.48	15.13	0.0525	19.40	11.15	0.99, 0.99, 0.98, 0.94
Kangnung	1996-1998	14.34	13.33	0.0681	22.22	13.35	0.98, 0.98, 0.98, 0.98
Ullungdo	1991-1998	13.47	13.26	0.0288	23.21	12.53	0.98, 0.99, 0.97, 0.90

#### 나. 지온의 변화

경기·강원지역의 1960년대부터 1990년대까지의 지온변화를 살펴보면 표 2에 나타난 바 대로 전체적으로 지온은 상승하고 있는 것으로 나타났으며, 지중깊이 들어갈수록 지온상승이 더욱 증가하고 있는 것으로 나타났다. 지역별로 보면 평균지온상승은 서울 0.53, 수원 1.04, 인천 0.42, 추천 1.83, 강릉 0.11  $^{\circ}C$  상승한 것으로 나타났다. 이러한 지온 상승은 우선적으로 판단하기로는 공기의 온도가 지역에 따라 다소 다르기는 하지만 약 0.3 $^{\circ}C$ 에서부터 1.62  $^{\circ}C$ 까지 상승한 것이 한 원인일수가 있으나 각 지역별로 지중 5m 위치에서의 지온이 급격하게 변동하는 것이 많아지고 있는 것으로 보아 지진과 같은 지중심층부의 변화에 기인한 것일 가능성이 더욱 큰 것으로 판단된다. 따라서 이에 대한 분석은 앞으로 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업에 필요한 정보로서, 그리고 지열이용시스템에서의 응용을 목적으로, 강원도와 경기도의 7개 지역의 지온변화를 분석하고, 컴퓨터프로그램을 이용하여 최적 지온 예측방정식을 제시하였다.

대상지역을 전체적으로 살펴볼 때 토양의 년중 평균온도는 약 14  $^{\circ}C$ 이었으며, 최근까지 약 30년 동안 지역별로 보면 평균지온상승은 서울 0.53, 수원 1.04, 인천 0.42, 추천 1.83, 강

를 0.11 °C 상승한 것으로 나타났다. 이러한 지온상승은 지중깊이 들어갈수록 더욱 증가하고 있는 것으로 나타났는데 이러한 지온 상승은 우선 공기의 온도가 상승한 것이 한 원인일수가 있으나 각 지역별로 지중 5m 위치에서의 지온이 급격하게 변동하는 것이 많아지고 있는 것으로 보아 지진과 같은 지중심층부의 변화에 기인한 것일 가능성이 더욱 큰 것으로 판단되었다.

각 지역별로 최적의 지온예측방정식을 제시하였으며, 예측값과 실측값 사이의 상관계수는 지중깊이에 따라 0.90에서 0.995까지의 범위에 있었으며, 지중깊이 들어갈수록 일치도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 이것은 최근들어 지중온도가 깊이 들어갈수록 온도상승이 크게 되기 때문으로 판단되었다.

Table 2 Mean temperature(°C) of soil depending on soil depth

	Period	Air	Soil				
		average	0 m	1 m	3 m	5 m	Ave.
서울	1959-1962	11.99	13.62	14.08	14.37	14.20	14.06
	1995-1998	12.77	13.53	14.33	15.26	15.25	14.59
	Variation	+0.78	-0.09	+0.25	+0.89	+1.05	+0.53
Suwon	1966-1968	11.01	12.61	12.96	13.02	13.16	12.93
	1994-1998	12.63	13.38	14.00	14.35	14.18	13.97
	Variation	+1.62	+0.77	+1.04	+1.33	+1.02	+1.04
Inchon	1959-1968	11.40	14.09	13.64	14.20	14.29	14.05
	1989-1997	12.02	13.82	14.42	14.82	14.84	14.47
	Variation	+0.62	-0.27	+0.78	+0.62	+0.55	+0.42
Chunchon	1966-1967	10.38	12.02	12.12	12.99	13.48	12.65
	1989-1998	11.15	12.79	14.21	15.32	15.62	14.48
	Variation	+0.77	+0.77	+2.09	+2.33	+2.14	+1.83
Kangnung	1959-1962	13.03	14.94	14.14	14.03	13.84	14.23
	1996-1998	13.35	13.92	14.38	14.71	14.38	14.34
	Variation	+0.32	-0.02	+0.24	+0.68	+0.54	+0.11

## 5. 참고문헌

1. 김영복. 1998. 엔진구동 지열히트펌프의 성능분석 -부산·진주지방 지온예측분석 - 한국농업기계학회지 제23권 제2호, pp.135-146
2. 최홍림. 1983. 진주지방의 지온이용 환풍장치설계를 위한 지온예측에 관한 연구. 경상대학교 농업자원이용연구소보 제 17-1호.
3. NRECA. 1988. Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems. National Rural Electric Cooperative Association

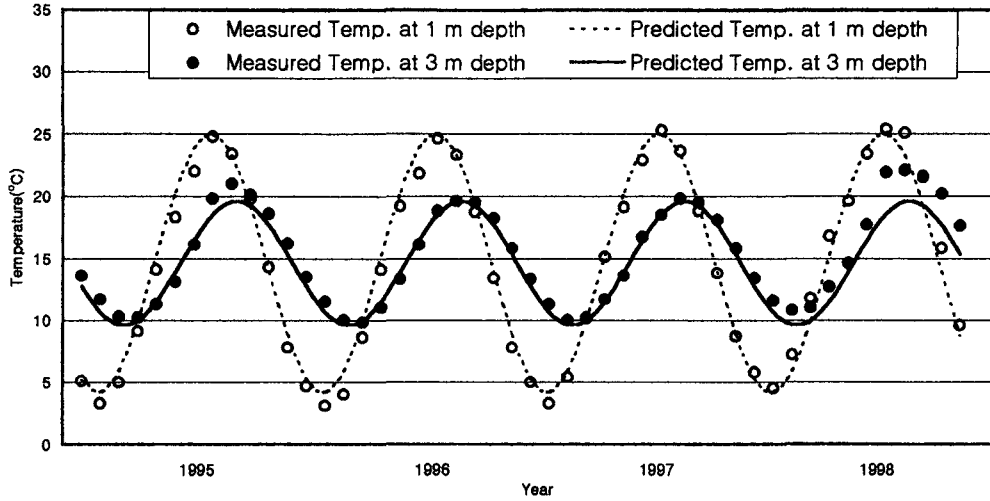


Fig.1 Measured and predicted temperature history for soil surface and 3 m of soil depth, Seoul, 1995-1998

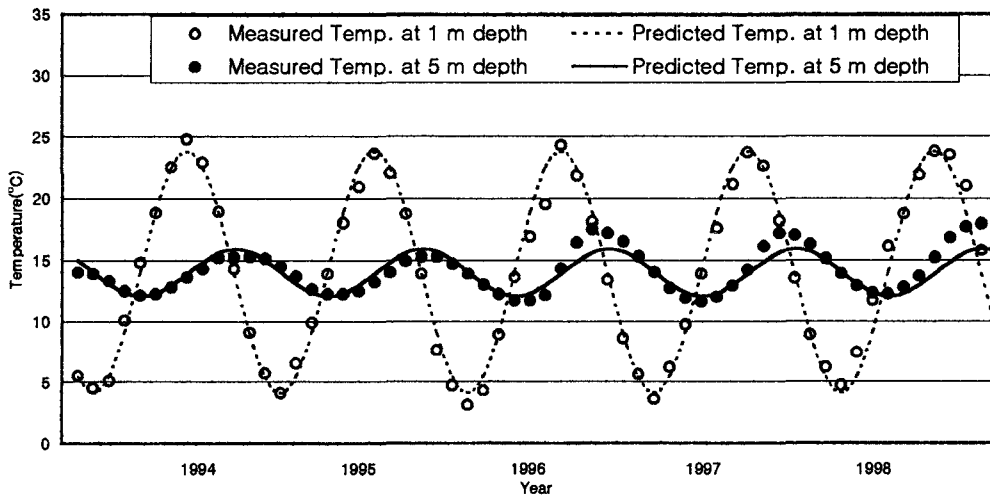


Fig.2 Measured and predicted temperature history for 1 m and 5 m of soil depth, Suwon, 1994-1998