

한국의 지온 예측과 지리적 영향 분석

Prediction Equation and Geographical Effect Analysis of the Soil Temperature in Korea

김 영 복
정회원
Y. B. Kim

이 승 규
정회원
S. K. Lee

김 성 태
정회원
S. T. Kim

SUMMARY

For the analysis of geothermal energy utilization in agriculture, the relations between soil temperature and geographical variables such as latitude, longitude, and sea level in Korea were analyzed and the regression equations were suggested among them. The measured soil temperature data for four years in eighteen cities were used to get the soil temperature fitting equation depending on the soil depth and the time of year in each city. The mean correlation coefficient for those data fitting was 0.980. The correlation coefficient of regression analysis for the mean soil temperature(T_m) on the geographical variables such as latitude, longitude and height above sea level was 0.958, and those for soil surface temperature amplitude(T_{ss}) and phase constant(tp) were 0.889, 0.835, respectively. The relation between the apparent thermal diffusivity of the soil and the three geographical variables was not significant. The regression equations for the mean soil temperature(T_m), soil surface temperature amplitude(T_{ss}) and phase constant(tp) adopting latitude(X_1), longitude(X_2), height above sea level(X_3) were as follows : $T_m = 50.049 - 0.849X_1 - 0.03131X_2 - 0.00622X_3$, $T_{ss} = -6.970 + 0.584X_1 + 0.00530X_2 - 0.00214X_3$, $tp = 70.353 - 1.404X_1 + 0.02098X_2 + 0.00312X_3$

주요용어(Key Words) : 토양(Soil), 온도(Temperature), 지온예측(Soil temperature prediction), 지리적 영향(Geographical effect)

1. 서 론

농업에서는 토양의 온도가 식물과 미생물의 활동과 생육, 그리고 토양의 생성작용에도 영향을 미치게 된다. 그리고 지하 저온저장고와 같은 시설의 설계 운영이나 지열을 열원으로 이용하는 기계의 설계나 성능분석을 위해서는 지중의 온도분포나 변화에 대한 정보를 알아야 하며, 특히, 지중 열 이용시스템을 이용할 경우는 열교환 유체와 지

온과의 온도차를 알아야 열교환성능 분석이 가능해진다. 지온에 대한 정보는 실측값이 유용하지만 현실적으로 기상자료가 모든 지역을 다 포함하고 있지는 않으므로 어떤 지역의 지리적인 변수, 즉, 경도, 위도, 해발과 같은 값들을 이용하여 그 지역의 지온에 대한 정보를 예측할 수 있으면 매우 유용할 것이다. 따라서 본 논문에서는 지리적인 위치 변수값을 이용하여 지온을 예측할 수 있는가를 검토하고 유의성이 입증되면 회귀방정식을 구하여

This article was submitted for publication in September 2000; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2000. The corresponding author is Y. B. Kim, Department of agricultural machinery engineering and The Institute of Agriculture and Fishery Development, Gyeongsang national university, 900 Gazadong, Chinju city, 660-701, Korea, E-mail: <youngkim@nongae.gsnu.ac.kr>.

제시하므로써 우리나라의 임의 지역의 평균지온, 지표면온도진폭, 최저온도가 나타나는 시기를 예측할 수 있도록 하고자 하였다. 지온예측방정식에 대한 연구로서 김(1999)은 일년 중의 어느 특정시기의 지중깊이별 지온에 대한 적합방정식을 제시하였는데, 김에 의한 지온의 적합방정식 탐색방법은 Wierenga(1969)에 의한 측정지온값을 이용하여 토양의 겔보기열확산계수값을 구하는 방법과 NRECA(1988)에 의한 이론예측방정식모델을 결합한 것으로서 축차대입법과 최소자승법을 이용하여 필요한 계수값들을 구하고 있다. 김에 의한 방법은 지표면최저온도가 나타나는 시기와 같이 본 연구에 필요한 값을 구하는데 매우 유용하다.

한편, 경도나 위도, 해발과 같은 지리적 위치의 변화가 평균지온이나 최저온도가 나타나는 시기 등에 미치는 영향에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면, 미국의 경우 측정지온값을 이용하여 최소자승법으로 분석한 결과로서, 위치가 북쪽으로 갈수록 평균지온은 낮아지고, 지표면온도변화 진폭은 커지는 것으로 나타나고 있다(NRECA, 1988).

본 연구에서는 농업에 필요한 정보로서, 그리고 지열이용시스템에서의 응용을 목적으로, 우리나라 전국에 걸쳐 측정된 지온데이터를 이용하여 연중 특정시기, 특정깊이의 지온에 대한 지온적합방정식을 탐색하고, 그 결과를 분석하여 경도와 위도, 해발과 같은 지리적인 변수가 평균지온, 지표면온도진폭, 지표면 최저온도가 나타나는 시기, 겔보기열확산계수에 영향을 미치는지 살펴본 다음 유의성이 인정되는 경우 회귀분석을 통하여 그 회귀방정식을 제시하였다. 이를 통하여 우리나라 임의 지역의 지리적인 변수값을 대입하므로써 지온정보를 획득하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 일별 지중깊이별 지온적합방정식

측정기상자료가 있는 지역의 일년 중 특정일의 특정 지중깊이에서의 지온적합방정식은 김(1999)의 연구방법에 의해 구할 수 있으며, 그 결과로서 본 연구에서 측정지온정보가 없는 지역에서의 지온정보도 획득할 수 있게 해 주는 방정식을 만드는 데 필요한 값들이 구해진다. 본 연구에서 특정

일의 특정 지중깊이에 대한 지온적합방정식의 결정은 김에 의해 개발된 컴퓨터 프로그램을 이용하였는데 그것은 최소자승법과 축차대입법을 결합한 것으로서, 그 방정식 형식은 다음과 같다.

$$T(x,t) = T_m - T_{ss} \cdot \exp(-\xi) \cdot \cos\{\omega \cdot [t - t_p - x / (2 \cdot a \cdot \omega)^{0.5}]\} \dots\dots\dots (1)$$

단, t, t_p : 시간(days), 상상수(Phase constant:days)

T : 토양온도(°C)

T_m : 지표면 측정 연평균온도(°C)

T_{ss} : 지표면에서의 온도진폭(°C)

x : 토양내 위치. 지중깊이(m)

a : 겔보기열확산계수(m²/day)

ξ : 相遅延= $x \cdot (\omega / (2 \cdot a))^{0.5}$

ω : 각주기(radial frequency)= $2\pi/365$ (radian/day)

위 방정식에서의 상상수(相常數) t_p 는 지표면 최저온도가 나타나는 시기를 결정해 주는 상수로서 년중 1월 1일부터 계산하여 이 상수값을 더해주면 최저온도가 나타나는 시기가 된다. 그리고 임의의 지중깊이에서의 최저온도가 나타나는 시기는 相遅延을 고려해주면 계산된다(김, 1998). 적합방정식으로 결정된 관계식을 이용하여 특정지역의 특정깊이의 지온을 예측할 때의 적합성을 판단하기 위하여 상관계수를 분석하였는데, 그것은 어떤 지역에서 결정된 상수계수값을 갖는 적합방정식에 특정일과 특정깊이값을 대입하여 계산된 값을 예측값으로 하고 이를 그 시기, 그 지중깊이에서의 실측값과 비교하는 방식으로 결정하였다. 상관계수는 각 지역에서 지중깊이별로 구하였으며, 각각 적용데이터는 4년동안 월평균자료로서 모두 48개씩을 대입하여 구하였다.

나. 분석에 사용된 측정 지온데이터

본 연구에서 예측방정식을 만들기 위해 사용된 실측 지온 자료는 기상대 관측기록을 이용하였다(기상대, 1993~1998). 지온분석 대상지역은 가능하면 넓은 범위에 걸쳐, 그리고 지중깊이별로는 가능하면 심층위치까지의 자료를 포함하고자 하였으나 기상대의 실측 보유자료의 한계로 인하여 지역의 선택은 기간이나 지중깊이의 실측자료가 공통적으로 기록되어 있는 범위에서 전국 18개 지역

을 대상으로 하였다. 따라서 공통적인 자료가 기록되어 있는 범위내에서 지역을 선택하고 각 지역에서의 기간과 지온깊이를 결정하였으며, 그 결과 대전을 위시한 9개 지역은 1994~1997년사이의 4년간 지중 0, 1, 3, 5 m 위치에서의 자료, 진주를 위시한 8개지역은 1993~1996년 사이의 4년간 지중 0, 0.1, 0.5, 1.0 m 위치에서의 자료를 이용하였으며, 서울은 기간의 공통성을 찾기 어려웠으나 우리나라 수도인 점을 감안해 자료를 포함시킬 목적으로 1995~1998년 사이의 4년간 지중 0, 1, 3, 5 m 위치에서의 자료를 이용하였다. 실측자료는 월평균온도를 이용하였으며, 따라서 각 지역별 이용된 실측자료는 48개월간에 걸쳐 지중 4곳 위치에서의 192개 측정점 자료이며, 이것으로 적합방정식을 탐색하고 통계분석에 이용하였다.

다. 지리적 위치 변수값을 이용한 회귀방정식

경도, 위도 해발과 같은 지리적인 위치가 지온에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각 대상지역별 지리적인 변수값과 지온평균, 지표면온도변화진폭, 지표면최저온도출현시기, 토양의 결보기열확산계수와의 관계를 컴퓨터소프트웨어 액셀을 이용하여 회귀분석하였으며, 그 결과 유의한 값들에 대하여 회귀관계식을 찾고, 통계값을 이용하여 그 기율기계수의 유용성을 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 일별 지중깊이별 지온적합방정식

선택된 지역에서의 실측자료를 토대로 한 일별 지중깊이별 지온적합방정식의 탐색결과는 표 1의 상수계수값들을 방정식 (1)에 대입하면 된다. 표의 지역별 배치순서는 기상대 자료관측점 번호순서로 하였다. 이와 같은 방정식으로 예측할 때 실측값

Table 1 Constants of the predicting equations

City	Year (Depth:m)	Latitude :X ₁ (Deg.)	Longitude :X ₂ (Deg.)	Height* :X ₃ (m)	Soil mean temp. :T _m (°C)	Soil surface swing :T _{ss} (°C)	App. thermal diff. :(m ² /day)	Phase const. :t _p (day)
Taekwanryung		37.68	128.75	842.0	8.74	13.99	0.048	23.00
Muan	1993 ~ 1996	35.10	126.28	23.3	15.77	14.06	0.025	24.64
Miryang		35.48	128.75	12.5	14.90	14.68	0.034	20.05
Sogwipo		33.23	126.57	51.9	18.54	12.16	0.023	28.20
Chinju		35.20	128.10	21.5	15.47	14.04	0.037	23.21
Changsu	(0.0, 0.1, 0.5, 1.0)	35.65	127.52	405.9	12.96	13.74	0.065	22.21
Chungju		36.97	127.92	50.0	13.55	15.36	0.090	20.72
Chorwon		38.15	127.32	154.9	12.22	15.68	0.049	20.70
Taejon		36.30	127.40	77.1	14.34	15.76	0.067	20.91
Mokpo		34.78	126.38	53.4	16.08	13.53	0.100	25.00
Pusan	1994 ~ 1997	35.10	129.03	69.2	16.52	14.31	0.039	23.89
Seoul*		37.57	126.97	85.5	14.57	15.01	0.064	20.07
Suwon		37.27	126.98	36.9	13.75	15.04	0.050	21.00
Inchon		37.48	126.63	68.9	14.47	15.33	0.048	21.24
Yosu	(0.0, 1.0, 3.0, 5.0)	34.73	127.73	67.0	15.87	14.30	0.043	26.19
Ullungdo		37.48	130.90	221.1	13.31	14.45	0.026	23.37
Cheju		33.52	126.53	22.0	17.80	13.56	0.066	25.64
Chunchon		37.90	127.73	74.0	14.31	15.94	0.050	20.00

Height* : Height above mean sea level, Seoul* : Data period is 1995~1998.

과의 적합성을 나타내는 상관계수값은 그림 1에 나타난 바와 같으며, 상관계수의 총평균값은 0.980 으로서 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림에는 18개 지역의 지중깊이별 상관계수값을 나타내고 있는데 전체적으로 볼 때 지표면 부근에서는 적합식이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 지중깊이 5 m 부근에서는 상대적으로 그 적합성이 저하되는 것으로 나타났다. 그것은 표 2에서 보는 바와 같이 지중깊이별 상관계수의 평균값들을 살펴보면 알 수 있는 바와 같이 지중 5 m에서는 그 평균값이 0.936 으로서 상대적으로 작은 값을 나타내고 있는 것을 보아도 알 수 있다. 이것은 지중깊이가 증가할수록 지온의 변화가 규칙적이지 않다는 것으로 해석할 수도 있는데 실제 어떤 지역의 경우 측정데이터의 연도별 변화를 그래프로 나타내어 보면 때로는 급격하게 변하는 시기가 나타나는 것을 알 수 있었는데 이것은 지중깊이 들어갈수록 지온의 년중 온도변동범위는 지표면에 비해 적지만 일년을 주기로 한 규칙성의 측면에서 본다면 상당한 변동이 있다는 것을 예견해 볼 수 있으며, 이것은 지층 내부의 상태변화로 기인된 것으로 판단되지만 추가의 검토가 필요할 것

으로 판단된다.

표 1에서 나타난 결과를 살펴보면 분석대상인 18개 지역의 평균지온은 대관령이 8.74°C인 경우를 제외하면 12.22~18.54°C 범위내에 있었으며, 지표면 온도진폭은 12.16~15.94°C, 토양의 겉보기 열확산계수는 0.023~0.100 m²/day로 나타났다. 그런데 토양의 열확산계수는 일반적으로 0.02~0.09 m²/day(NRECA, 1988)로 분포하고 있는 바 본 연구에서의 겉보기열확산계수는 적합방정식에서의 하나의 계수로서 전열방정식에 비추어 볼 때 열확산계수에 대응한다는 것으로서, 이것은 기본적인 토양의 열확산계수값이 아니라 온도의 변화로 나타나는 데 기여한 모든 전열에 영향을 미치는 인자를 모두 열확산계수라는 변수로 등가한 값을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 범위를 벗어나는 지역의 경우 토양의 열확산계수에 영향을 미치는 토양의 열전도율, 밀도 및 비열 외에 전열에 영향을 미치는 다른 인자가 많은 것으로 판단된다. 그리고 지표면 최저온도가 나타나는 시기인 상상수의 경우 20.05~26.19 days로 나타났는데 이 범위는 Kusuda(NRECA, 1988)에 의하면 35±10days 범위내에 있게 되는데 대상지역들의 경우 전부 이 범위에 있는 것을 알 수 있었다.

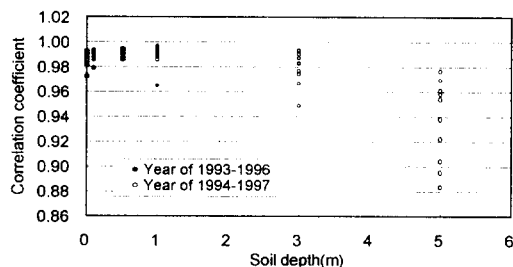


Fig. 1 Correlation coefficient for time dependent temperature fitting equation.

나. 지리적 위치 변수값을 이용한 회귀방정식

지리적 변수로서 위도, 경도, 해발의 크기가 평균지온, 지표면 온도변화진폭, 대상지역 토양의 겉보기열확산계수, 지표면 최저온도가 나타나는 시기에 미치는 영향을 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 결과 표 3과 같은 결과를 얻었다. 즉, 평균지온, 지표면 온도변화진폭, 지표면 최저온도가 나타

Table 2 Mean correlation factor depending on soil depth

	Soil depth(m)				Average
	Mean correlation factor				
1993~1996	0.0	0.1	0.5	1.0	0.988
	0.985	0.989	0.990	0.988	
1994~1997 (Seoul*)	0.0	1.0	3.0	5.0	0.974
	0.986	0.992	0.979	0.936	

Seoul* : Data period is 1995~1998.

Table 3 Analysis of variance and correlation coefficient

	Multiple correlation coefficient	Determination coefficient	Standard error	F value	Significant F value
T _m	0.958	0.918	0.694	52.027	7.75E-08
T _{ss}	0.889	0.790	0.485	17.529	5.15E-05
a	0.387	0.150	0.021	0.823	5.03E-01
t _p	0.835	0.697	1.471	10.725	6.34E-04

Table 4 Results of regression analysis

	Coefficient of equation				t value			
	Constant	X ₁	X ₂	X ₃	Constant	X ₁	X ₂	X ₃
T _m	50.049	-0.849	-0.03131	-0.00622	2.567	-7.116	-0.200	-6.748
T _{ss}	-6.970	0.584	0.00530	-0.00214	-0.511	6.999	0.048	-3.320
t _p	70.353	-1.404	0.02098	0.00312	1.702	-5.551	0.063	1.597

* Significant t value : t(14, 0.05)=2.145, t(14, 0.01)=2.977.

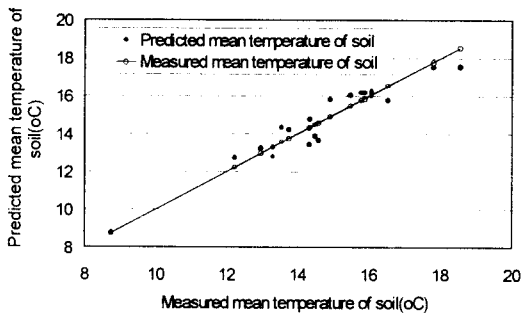


Fig. 2 Comparison of predicted data with measured data of mean temperature of soil for geographical effect analysis.

나는 시기는 F통계량이 F임계량보다 각각 크게 나타났고, 지리적인 변수가 영향을 미치는 것으로 나타났으나 토양의 깊고기 열확산계수에 대해서는 F통계량이 F임계량보다 작게 나타났으며, 그 유용성이 인정될 수 없는 것으로 나타났다. 지리적 변수에 특히 큰 영향을 받는 것은 평균지온으로서 다중상관계수 0.958로 나타났으며, 지표면 온도 변화진폭과 최저온도 출현시기는 다중상관계수가 각각 0.889, 0.835로서 상당한 관계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과를 토대로 회귀관계식을 구해 보면, 표 4에 나타난 바와 같은데 표에는 그 지리적 변수에 대한 기울기계수와 그 유용

성을 검정하기 위한 t 판측값도 나타나 있다. 표 4에 나타난 계수들을 대입하여 어떤 지역의 지리적 변수를 포함하는 방정식들을 만들면 각각 다음과 같이 된다.

$$T_m = 50.049 - 0.849X_1 - 0.03131X_2 - 0.00622X_3 \dots (2)$$

$$T_{ss} = -6.970 + 0.584X_1 + 0.00530X_2 - 0.00214X_3 \dots (3)$$

$$t_p = 70.353 - 1.404X_1 + 0.02098X_2 + 0.00312X_3 \dots (4)$$

단, X₁=위도, X₂=경도, X₃=해발(m)

평균지온을 계산할 수 있는 방정식 (2)에 우리나라 18개 지역의 지리적 변수값들을 대입하여 계산한 온도값과 실제 측정된 값들을 비교하기 위해 그림으로 나타내면 그림 2와 같으며, 그림에는 가로축에 실측값을 나타내고 세로축에 회귀결과값을 나타내어 서로 비교하였던 바 이때의 상관계수는 0.958로 나타난다. 한편, 지리적 변수값이 평균지온을 예측하는데 어느 정도 유용한가를 나타내는 척도로서의 t값을 살펴보면, 이 분석에서의 자유도는 14이며, 이때 t 임계값은 확률 0.05일 때 2.145, 확률 0.01일 때 2.977로서 평균지온 T_m의 경우 위도와 해발은 고도로 유의하며, 변수값이 커질수록, 즉, 위도와 해발이 커질수록 평균온도가 낮아지는

결과로 나타났으나, 경도, 즉, X_2 는 t통계량 값이 t 임계량값보다 낮으므로 경도는 평균지온에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 지표면 온도변화진폭, 즉, T_{ss} 에 대해서도 마찬가지로 경도는 유용성이 아주 약하며, 위도와 해발은 고도로 유의한 것으로 나타났다. 즉, 위도는 높아질수록, 해발은 낮아질수록 지표면 온도변화진폭은 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 지표면 최저온도가 나타나는 시점인 t_p 의 경우 위도는 고도로 유의한 것으로 나타났으나 경도와 해발은 유의성이 떨어지는 것으로 나타났으며, 위도가 증가할수록 지표면 최저온도가 나타나는 시기는 빨라지는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업에 필요한 정보로서, 그리고 지열이용시스템에서의 열교환능 분석의 목적으로, 경도와 위도, 해발과 같은 지리적인 변수가 평균지온, 지표면 온도진폭, 지표면 최저온도가 나타나는 시기, 겔보기열확산계수에 어떠한 영향을 미치는지 살펴본 다음 우리나라 임의 지역의 지리적인 변수값을 이용하여 지온정보를 획득하는 회귀방정식을 구하고자 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전국의 18개 지역의 실측자료를 토대로 하여 일별 지중깊이별 지온적합방정식을 탐색하였으며, 예측치와 실측치 사이의 상관계수는 총평균 약 0.980으로서 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났고, 지중깊이별로 볼 때 지표면 부근이 더욱 잘 일치하는 것으로 나타났다.

2) 분석 대상지역의 평균지온은 대관령이 8.74°C인 경우를 제외하면 12.22~18.54°C 범위내에 있었으며, 지표면 온도진폭은 12.16~15.94°C, 토양의

겔보기 열확산계수는 0.023~0.100 m²/day로 나타났다. 그리고 지표면 최저온도가 나타나는 시기인 상상수의 경우 20.05~26.19 days로 나타났다.

3) 위도, 경도, 해발의 지리적 변수에 특히 큰 영향을 받는 것은 평균지온으로서 다중상관계수 0.958로 나타났으며, 지표면 온도변화진폭과 지표면 온도진폭은 다중상관계수가 각각 0.889, 0.835로서 상당한 관계가 있는 것으로 나타났다. 그러나 토양의 겔보기 열확산계수는 관계가 없는 것으로 나타났다.

4) 지리적 변수값을 알고 있는 지역의 평균지온, 지표면 온도진폭, 지표면최저온도가 나타나는 시점을 구하는 회귀관계식은 각각 다음과 같이 결정되었다. $T_m=50.049 - 0.849X_1 - 0.03131X_2 - 0.00622X_3$, $T_{ss}=-6.970 + 0.584X_1 + 0.00530X_2 - 0.00214X_3$, $t_p=70.353 - 1.404X_1 + 0.02098X_2 + 0.00312X_3$,

참고 문헌

1. Kim, Y. B. 1998. Performance analysis of a geothermal heat pump system operated by a diesel engine(I) -Soil temperature prediction in Pusan and Chinju. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 23(2):135-146 (In Korean)
2. Monthly weather report. 1993. 1~1998. 12, Weather station.
3. NRECA. 1988. Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems. National Rural Electric Cooperative Association.
4. 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.