

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 4, 2006

일사영향권내 비균질 토양의 열적거동 예측 모델

김용환*, 현명택*, 강은철**, 박용정***, 이의준**

*제주대학교(yhkim@kier.re.kr, mthyun@cheju.ac.kr), **한국에너지기술연구원(kec8008@kier.re.kr, ejlee@kier.re.kr)
*** (주)공간코리아(yjpark@kongkankorea.com)

Model to Predict Non-Homogeneous Soil Temperature Variation Influenced by Solar Irradiation

Kim, Yong-Hwan*, Hyun, Myung-Taek*, Kang, Eun Chul**,
Park Yong Jung***, Lee, Euy-Joon**

*Dept. of Mechanical Eng, Cheju National University(yhkim@kier.re.kr, mthyun@cheju.ac.kr)
**Korea Institute of Energy Research(kec8008@kier.re.kr, ejlee@kier.re.kr)
***Kongkankorea Co.Ltd.(yjpark@kongkankorea.com)

Abstract

This study is to develop a model to predict the soil temperature variation in Korea Institute of Energy Research using its thermal properties, such as thermal conductivity and diffusivity.

Soil depth temperature variation is very important in the design of a proper Ground Source Heat Pump (GSHP) system. This is because the size of the borehole depends on the soil temperature distribution, and this can decrease GSHP system cost. If the thermal diffusivity and thermal conductivity are known, the soil temperature can be predicted by either the Krarti equation or the Spitler equation. Then a comparison with the Krarti equation and Spitler equation data with the real measured data can be performed. Also, the thermal properties can be reasonably approximated by performing a fit of the Krarti and Spitler equations with measured temperature data. This was done and, as a result, the Krarti equation and Spitler equation predicted values very close to the measured data. Although there is about a 0.5°C difference between the deep subsurface prediction (16m - 60m), with this equation, were expected to have model this Non-Homogeneous Soil Temperature phenomenon properly. So, it has been shown that a prediction of non-homogeneous soil temperature variation influenced by solar radiation can be achieved with a model.

Keywords : Krarti 지중온도 예측식 (Krarti equation), Spitler 지중 온도 예측식 (Spitler equation), 열확산율 (thermal diffusivity), 열전도율 (thermal conductivity)

접수일자:2006년 8월 14일, 심사완료일자:2006년 11월 27일

기 호 설 명

- T_g : 지중 온도(°C)
- T_m : 연간 지표면 평균온도(°C)
- A : 온도변동진폭(°C)
- t : 연중일(day)
- t_o : 시작일(day)
- a : 열확산계수($m^2/s, ft^2/day$)
- k : 열전도계수(W/mK)
- x : 깊이(m)
- ω : 각진동수(rad/s)

1. 서 론

계절과 깊이에 따른 지중 온도의 변화는 오늘날 지열 연구에 있어 매우 중요한 부분을 차지한다. 많은 지중열전도 문제들은 지중 온도속성이 균일하다는 조건에서 해결하거나 천공작업시 시료를 채취하여 측정하였다. 그러나 실질적인 지중 온도는 지하 깊이와 지표면 온도의 시간에 따른 변화에 영향을 받을 뿐만 아니라 지표면 위에서 발생하는 기후상태의 변화, 음영, 토양의 열확산계수, 지하수 유동 등에도 영향을 받는다. (1) 이에 정확한 지중 온도를 예측할 수 있는 방법을 모색하고 이러한 요소들의 이해를 돕기 위해 지하수의 유무, 화학적인 구성, 공극률과 토양의 깊이에 따른 열물성에 관한 사전지식이 요구된다. (1) (2) 그러나 이러한 요소에도 불구하고 Krarti 지중온도 예측식 (2) 과 Spitler 지중온도 예측식 (3) 같은 비균질 토양 온도 예측식은 지표면의 온도와 열확산계수(a)의 값만을 가지고 정확한 지중 온도를 예측할 수 있다.

본 연구는 원위치(in-situ) 열전도 측정기인 wireless probe를 이용하여 한국기술에너지연구원내 시추되어진 시추공에서 측정되어진 지중 온도 데이터를 Krarti 지중온도 예측식과 Spitler 지중온도 예측식을 이용하여 실제 이 두 식에 의해 지중 온도측정 및 온도분포 파악이 가능한지에 대해서 분석하였고, 이를 통해 비균질 토양 지층의 열

적 예측모델을 개발/검증하였다.

2. 해석적 모델

그림 1에서 보여주는 것과 같이 지표면과 지표면으로부터 지표온도의 영향으로 온도변화가 크다가 일정깊이 이상에 도달하면 지층이 일정한 온도로 변화됨을 확인할 수 있다. 여기서 보여주는 세계의 선도는 지역의 기후특성에 따른 지중열 온도변화를 보여주는 것으로 지표면과 가까운 일정깊이까지는 지표 온도의 영향을 받아 온도변화폭이 크고 깊은 지층으로 갈수록 온도변화폭이 작아짐을 보여주고 있다.

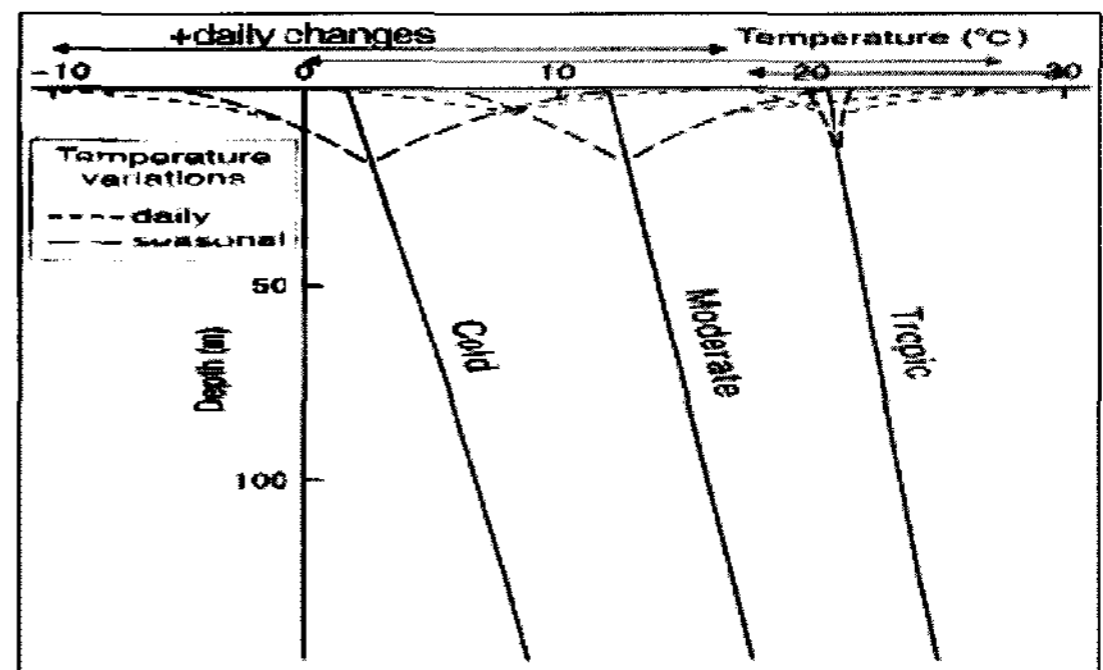


그림 1 지중 온도 경향

본 연구에서는 그림 1과 같은 지중 온도변화를 예측하기 위한 방법으로 지중의 열확산계수(a)값을 이용하여 지중의 온도를 예측할 수 있는 Krarti 지중온도 예측식과 Spitler 지중온도 예측식 사용하였고 그에 관한 관계식은 다음의 식(1)에 기초하였다.

$$T_g = T_m + A_g \quad \text{식(1)}$$

식(1)에서 T_g (°C)는 예측 지중 온도이고 T_m (°C)은 지표면의 평균온도, A_g (°C)는 깊이에 따른 지중온도 변동폭이다. 여기서 지중온도 변동폭인 A_g 는 다양한 수식으로 표현될 수 있으며 실질

적인 지중 온도를 좌우한다. 예를 들어, 지표면에서 온도변동폭이 $\pm 20^\circ\text{C}$ 이더라도 지표면밑의 30m 깊이에선 지중온도 변동폭인 A_g 에 의해 변동폭이 거의 없게 된다.

2-1. Krarti 지중온도 예측식

Krarti 지중온도 예측식은 복소수를 사용하여 A_g 부분을 식(2)와 같은 식⁽¹⁾으로 표현하였다.

$$T_g = T_m + A \cdot e^{\left(-\frac{(1+i) \cdot x}{D}\right)} \quad \text{식(2)}$$

이 식에서 A_g 는 지표면의 온도변동, 열적 속성과 깊이에 대한 함수이며 A 는 지표면 온도변동진폭 ($^\circ\text{C}$)이고, 지중열 속성을 $D(\sqrt{\frac{2a}{w}})$ 로 가정하였을 때 x 는 요구되는 근사값의 깊이이다. 이는 그림 2에서 보여주고 있고 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

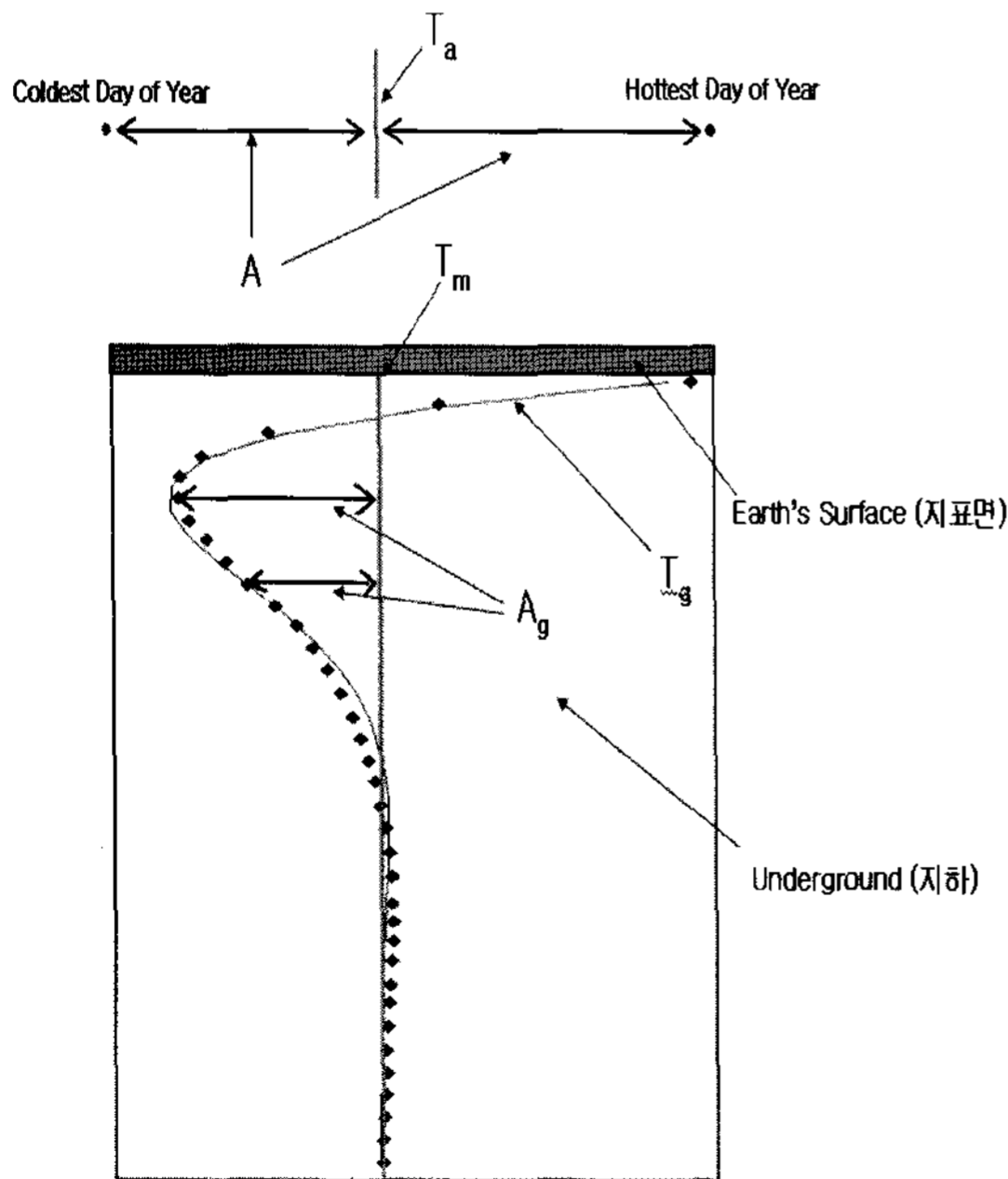


그림 2 지표면과 지하면의 온도변화

$$-\frac{(1+i)}{D} = \sqrt{\frac{i \cdot w}{a}} \quad \text{식(3)}$$

여기서, a 는 토양의 열확산계수(m^2/s)이고 $i = \sqrt{-1}$, w 는 각진동수이고, A_g 의 변화율이 된다. 그러므로 $\frac{\text{radians}}{\text{s}}$ 의 단위를 사용한다.

2-2. Spitler 지중온도 예측식

Spitler 지중온도 예측식은 복소수를 사용하지 않고 시간을 변수로 사용한다는 것을 제외하고는 Krarti 지중온도 예측식과 비슷하다.

이 식 또한 식(1)에 대입하지만 여기서, A_g 는 식(4)와 같다.⁽³⁾

$$A_g = A \cdot e^{\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot a}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left[t + t_o - \frac{x}{2} \sqrt{\frac{365}{a \cdot \pi}}\right]\right) \quad \text{식(4)}$$

여기서, 열확산계수 a 의 단위는 $\frac{\text{m}^2}{\text{day}}$ 이고, t_o 는 시작점(만약 $t_o = 0$ 라면 1월 1일을 시작으로 사용한다.)을 설명하는 위상상수, $t(\text{day})$ 는 t_o 를 기준으로 일정시간만큼 지나 측정되어지는 연중일(day of the year)이다. 그러므로 만약 $t_o = 0$ 이고 $t = 4$ 라면, 이 식은 1월 5일의 지중열을 예측할 것이고, 만약 $t_o = 10$ 이고 $t = 4$ 라면, 1월 15일의 지중열을 예측할 것이다.

여기서 주목할 점은 좀 더 편한 수식을 위해 Spitler 지중온도 예측식에서 $T_g = \dots[t - t_o - \dots]$ 을 사용한 것을, 본 논문에선 $T_g = \dots[t + t_o - \dots]$ 으로 바꾸어 사용하였다. 그 이유는 12월 22일(1월 1일을 기준으로 역방향) 대신에 1월 11일(1월 1일을 기준으로 정방향)인 $t_o = 10$ 이 더 쉽게 풀이할

수 있기 때문이다.

3. 지중온도 측정

본 연구의 모니터링을 위해 **그림 3**과 같은 스위스 Geowatt사의 wireless probe⁽⁴⁾를 이용하여 한국에너지기술연구원내에 시추되어진 시추공의 지중 온도를 측정하였다. 여기서 이용되어진 wireless probe는 고속/고성능의 지중 온도 측정기로 지하 300m 깊이를 기준으로 하였을 때, 시추공내 심도별 온도측정시간 약 1시간이다. 따라서 측정 지점은 지열류량을 미리 알고 있다면 측정된 심도별 온도변화로부터 지온경사를 알 수 있으므로 간편하게 지중 열전도도를 알 수 있게 된다. 이는 기존의 열반응 시험(Thermal Response Test)이 약 50시간을 필요로 하는데 반해 50배 이상의 시간절약을 할 수 있음을 말해준다.

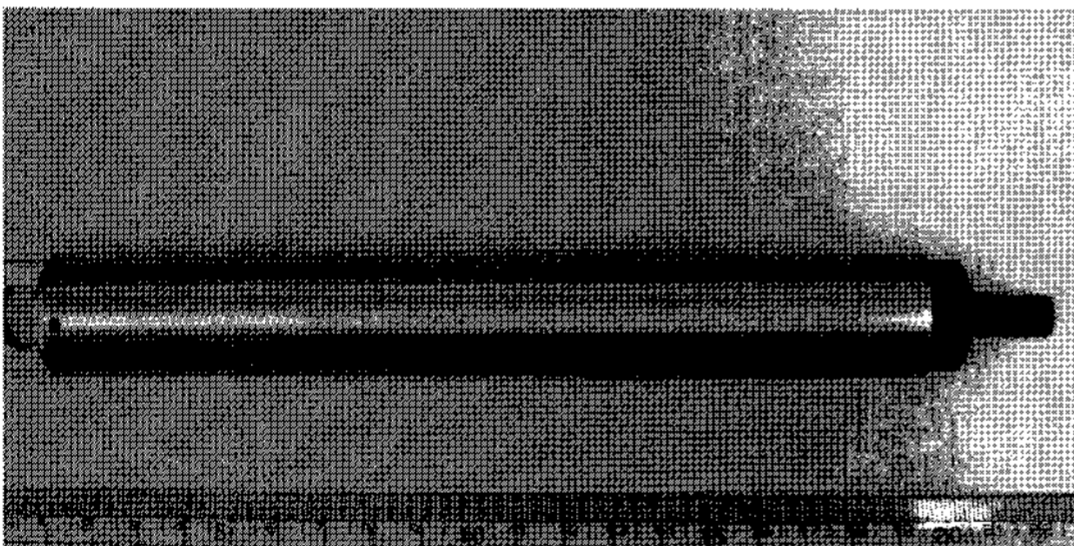


그림 3 wireless probe (1:3)

4. 계산 및 검증

본 연구에서는 **그림 4**의 대전지역 평균연중기후 데이터⁽⁵⁾와 **그림 5**의 대전지역 한국에너지기술연구원에서 두개의 wireless probe를 이용하여 측정되어진 지중 온도 측정자료를 근거로 Krarti와 Spitler 지중온도 예측식에 의해 도출되는 결과값과 실제 측정한 값이 어떠한 차이를 보이는지에 대해 분석해 보았다.

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균 기온 (°C)	-1.8	0.2	5.4	12.4	17.6	22.0	25.3	25.5	20.3	13.8	6.8	0.7
최고 기온 (°C)	3.3	5.7	11.5	19.0	23.8	27.4	29.7	30.2	26.0	20.4	12.8	6.1
최저 기온 (°C)	-6.3	-4.4	0.2	6.3	11.7	17.2	21.8	21.8	15.8	8.3	1.9	-3.9
강수량 (mm)	29.7	37.3	60.5	87.3	96.9	174.5	292.3	296.7	141.8	56.6	51.6	30.2

그림 4 대전지역 기후데이터(1971년~2000년)

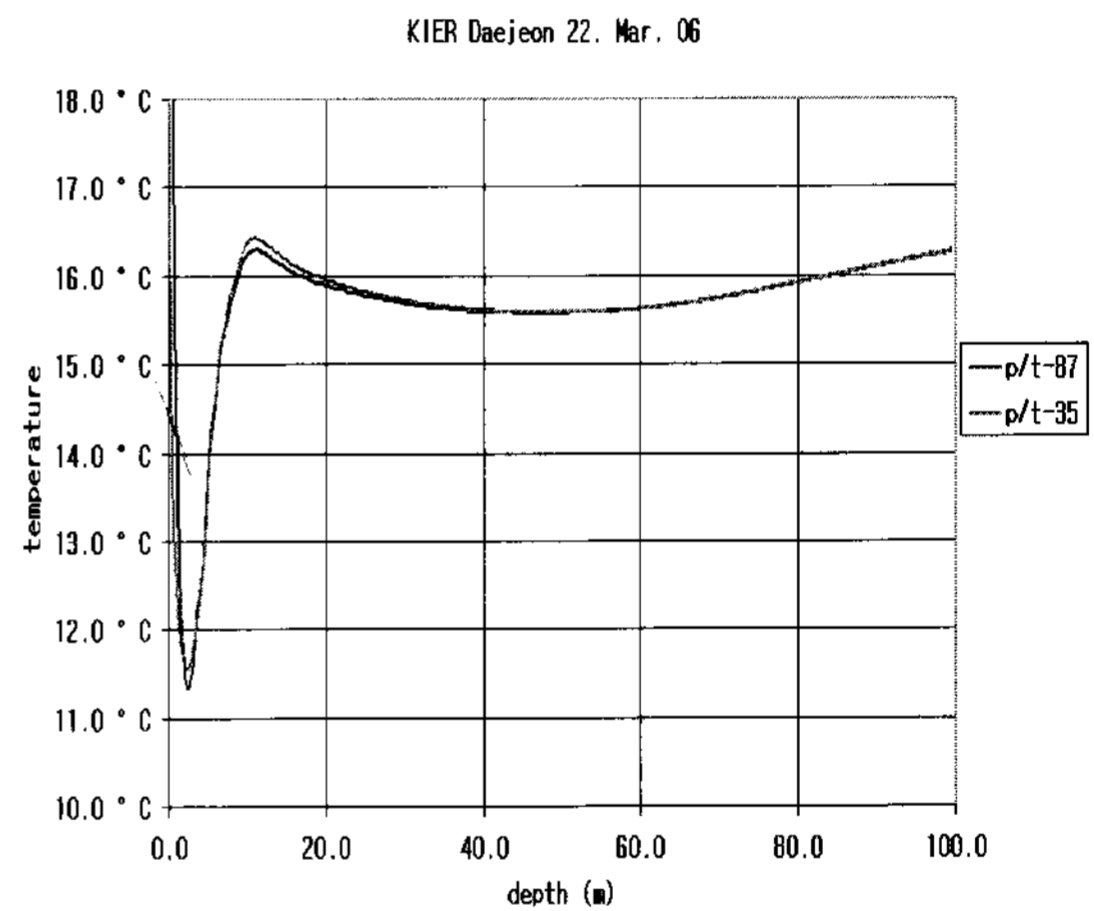


그림 5 한국에너지기술연구원 시추공에서 측정된 지중 온도 (2006년 3월 22일)

그림 6은 Spitler 지중온도 예측식에 대전지역의 연평균 기온자료와 **표 1**의 입력 변수를 대입하여 계산된 결과를 그래프로 나타낸 것으로 붉은선은 여름의 온도변화를 푸른색은 겨울의 온도변화를 나타내고 있다. 여기서 일정 깊이까지는 외기온도 및 시간의 변화에 영향을 받아 변화하지만 16m 이상에서는 외기온도 및 시간의 변화에 관계없이 일정한 온도를 보이고 있음을 알 수 있다. **표 1**에서 보여주고 있는 입력변수에는 측정지역의 연평균 지표면온도 T_a (°C), 열확산계수 a (m²/day), 연

간표면온도진폭 T_m (°C), 위상정수 t_0 (day), 연중일 t (day)가 있다. 여기서 T_a 는 연평균 지표면 온도이고, 열확산계수 a 는 표 1에서 미리 측정되어진 나머지 입력변수를 Spitler 지중온도 예측식에 입력함으로써 산출되어진 추측값이며, 연간표면온도 진폭을 나타내는 T_m 은 대전지역의 가장 더운날과 추운날의 온도차이를 반으로 나눈 값이다. 그리고 위상정수(t_0)는 계절의 시작인 봄이 시작되는 날을 3월 21일로 했을 때 1월1일을 기준으로 79일이 되는 날이기 때문에 위상정수(t_0)를 79로 두었다. 그리고 시간 및 계절적 변화에 따른 연간 지중열 온도 분석을 위한 연중일(t)은 보다 명확한 지중열 데이터 경향을 보기 위하여 365일을 18.25일로 20등분하여 나타내었다.

표 1 입력변수

변수	값
T_a	13.7°C
T_m	12.7°C
a	0.082114 m ² /day
t_0	79
t	1 : 18.25 : 365

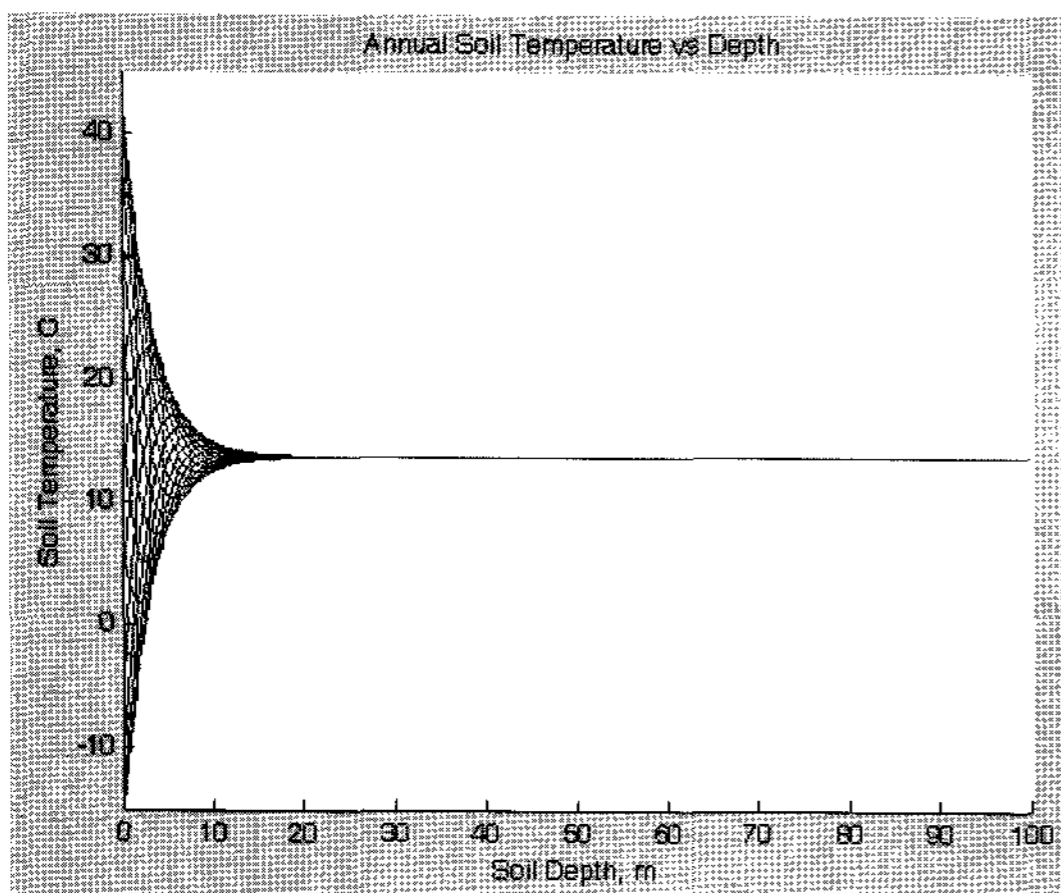


그림 6 깊이에 따른 연간 지중 온도(대전)

식(5)와 같은 Spitler 지중온도 예측식과 한국 에너지기술연구원내에 시추되어 측정되어진 지중 온도 자료를 이용하여 그림 7과 같은 그래프와 표 2, 표 3과 같은 결과값을 얻을 수 있었다. 여기서, t_0 는 봄이 시작되는 날을 각각 30일, 79일(1월 1일 기준)로 가정한 것이다. 그림 7의 녹색 점선은 실제로 얻어진 측정값이고 붉은 실선은 한국에너지 기술연구원에서 얻어낸 측정값을 Spitler 지중온도 예측식에 대입하여 나타난 예상값이다.

$$\text{model}(x) = T_m - T_a \cdot \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi}{365a}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left[t + t_0 - \frac{x}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi a}}\right]\right) \quad \text{식(5)}$$

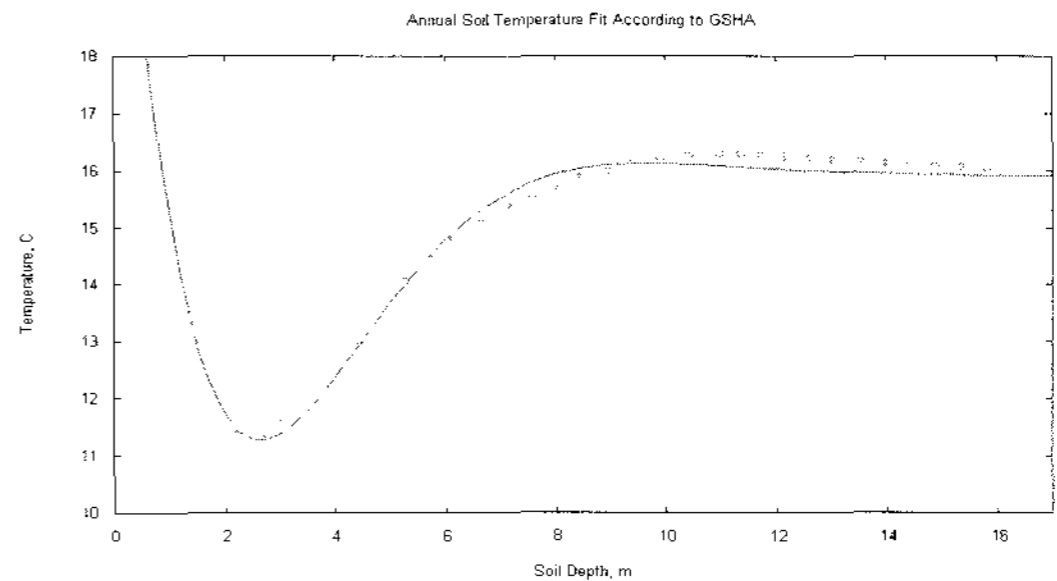


그림 7 Spitler 지중온도 예측식에 의한 그래프

표 2 Spitler 지중온도 예측식에 의한 결과값($t_0=30$)

변수	결과값	오차값(범위)
T_a	16.0681	+/- 0.0128 (0.07963%)
T_m	5.9709	+/- 0.5056 (8.468%)
t	86.2004	+/- 0.5715 (0.663%)
a	0.444332	+/- 0.01468 (3.303%)

표 3 Spitler 지중온도 예측식에 의한 결과값($t_0=79$)

변수	결과값	오차값(범위)
T_a	15.931	+/- 0.06152 (0.3861%)
T_m	3.60847	+/- 0.5355 (14.84%)
t	34.9823	+/- 0.9302 (2.659%)
a	0.471687	+/- 0.01854 (3.932%)

다음으로 식(6)과 같은 Krarti 지중온도 예측식에 한국에너지기술연구원에서 측정한 지온 자료를 이용하여 그림 7과 같은 그래프와 표 4, 표 5와 같은 결과를 얻게 되었다. 여기서 b 는 Matlab 프로그램으로 Krarti 지중온도 예측식을 구현할 때 그래프에 나타나는 깊이를 보정하기 위한 값이다. 녹색점선은 측정되어진 실제데이터이고 붉은실선은 Krarti 지중온도 예측식을 이용하여 얻어낸 결과이다.

$$model(x) = T_m - real(A * \exp(-(1 + \{0,1\}/D * (x - b))) \quad \text{식(6)}$$

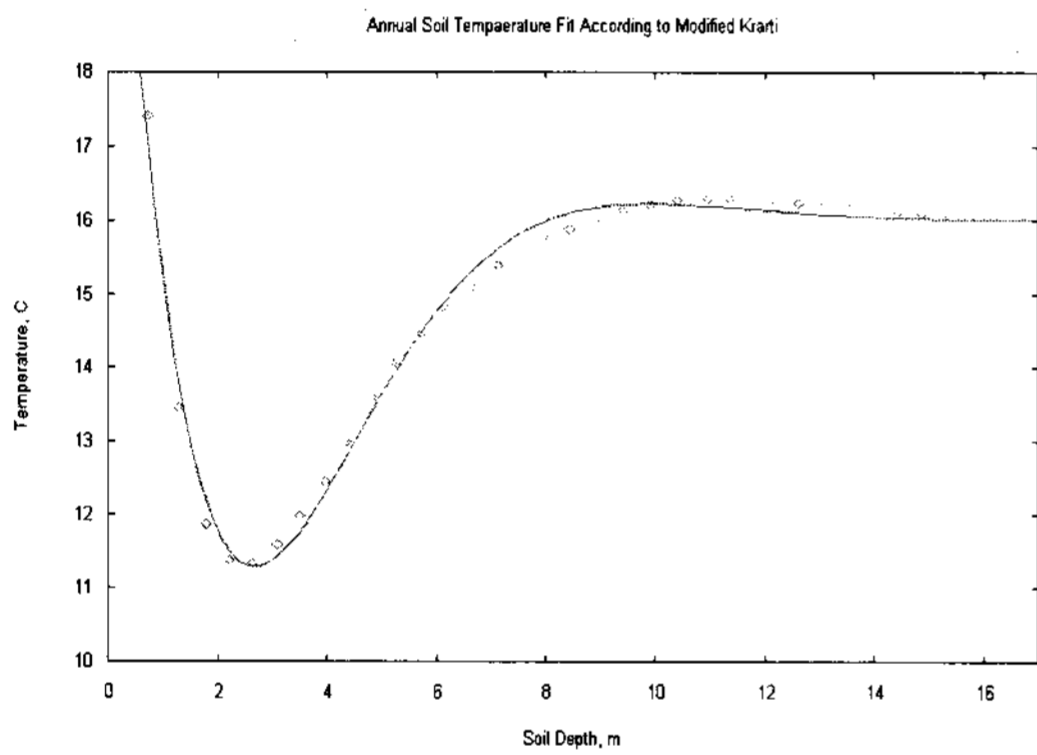


그림 8 Krarti 지중온도 예측식에 의한 그래프

표 4 Krarti 지중온도 예측식에 의한 결과값 (깊이 16m이전)

변수	결과값	오차값(범위)
T_m	15.9915	+/- 0.0128 (0.3556%)
A	3.16519	+/- 0.07604 (2.402%)
D	2.16396	+/- 0.0378 (1.747%)
b	4.34776	+/- 0.06352 (1.461%)

표 5 Krarti 지중온도 예측식에 의한 결과값 (100m 까지)

변수	결과값	오차값(범위)
T_m	16.0686	+/- 0.01278 (0.07951%)
A	3.2133	+/- 0.05517 (2.202%)
D	2.19028	+/- 0.03657 (1.654%)
b	4.38106	+/- 0.06389 (1.458%)

위의 결과에서 알 수 있듯이 Krarti 지중온도 예측식과 Spitler 지중온도 예측식은 실제 측정 결과와 거의 같은 값을 얻어낼 수 있음을 확인할 수 있다. Krarti 지중온도 예측식과 Spitler 지중온도 예측식을 실제 측정데이터와 비교, 분석을 하기 위한 프로그램으로 수식계산, 알고리즘 개발, 상황 모델링 및 data분석, 그리고 공학적인 그래픽을 표현할 수 있는 Matlab 프로그램을 사용하였다.

Matlab으로 구현하여 나온 결과와 실제데이터는 그림 9와 같이 붉은 점선의 실제데이터와 녹색 실선의 Matlab 시뮬레이션 데이터가 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 단, 16m~60m 구간의 온도분포에서 0.5°C 온도차이를 보였으나 이는 오차 온도 범위내에 있기 때문에 무시할 수 있다.

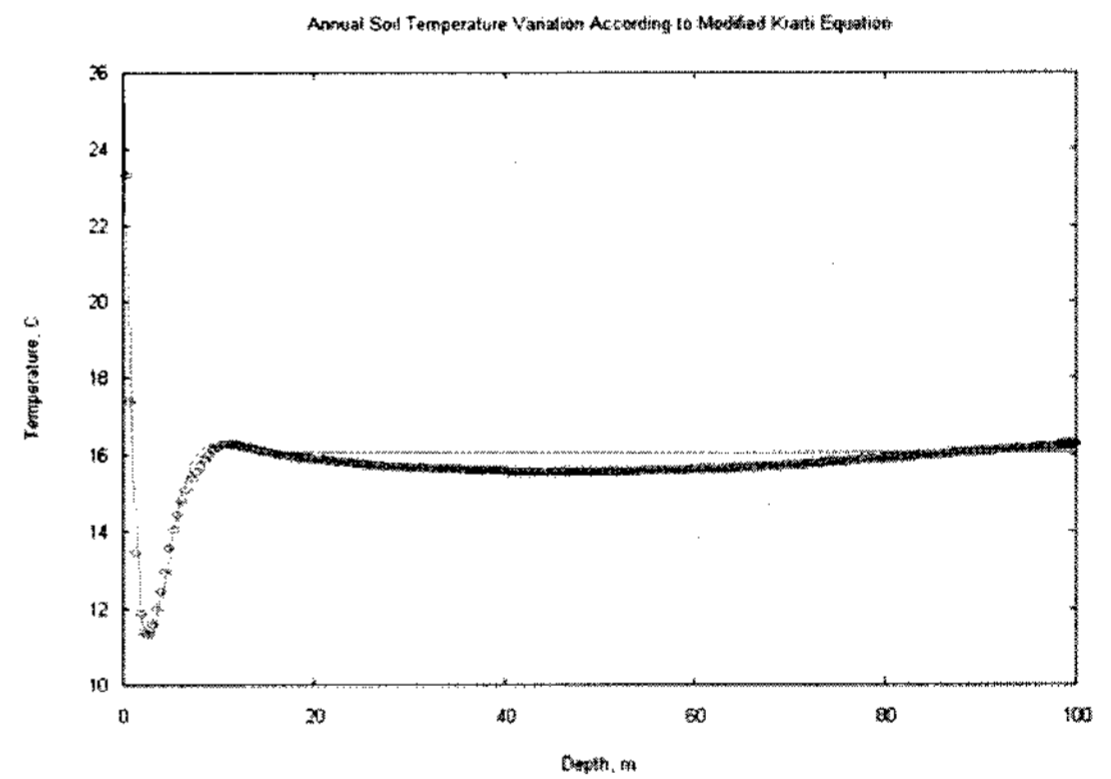


그림 9 100m 깊이까지의 지중 온도분포

5. 결론 및 고찰

본 연구는 지금까지 연구되어진 지중 온도 예측식 중 간단한 표현인 Krarti 지중온도 예측식과 Spitler 지중온도 예측식 그리고 모니터링 도구인 wireless probe를 이용하여 깊이에 따른 지중 온도를 예측하고 Matlab 시뮬레이션 도구를 이용하여 모델을 개발/검증하는 것이다. 일반적으로 일정 깊이 이상에서의 지중 온도는 일정한 온도 기울기를 갖기 때문에 온도분석에 대해 큰 어려움은 없으

나 대기 온도 및 일사량등에 영향을 받는 지표면과 15 m 이내 천부 지층의 온도는 그 변화를 무시할 수 없다. 그렇기 때문에 이러한 지층에 대한 지중 온도 성향을 예측하기 어렵다. 이러한 이유로 지중 온도에 관한 여러가지 수식이 제안되었고 그중에 본 논문은 지중온도 예측식과 Spitler 지중온도 예측식을 이용하여 지표면과 지표면으로부터 얇은 깊이까지의 온도를 예측하고 실제 지중 온도 데이터와의 비교를 통해 개발/검증하였다.

참 고 문 헌

1. Krarti, M., Claridge, D.E., and Kreider, J. F., 1995, "Analytical Model to Predict Nonhomogeneous Soil Temperature Variation," Journal of Solar Energy Engineering, Vol, 117, pp.100-107.
2. Krarti, M., Lopez-Alonzo, C., Claridge, D.E.,and Kreider, J. F., 1995, "Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation," Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117, pp91-99
3. RETScreen ground-source heat pump project analysis chapter, pp27-28
4. Rohner, E., Rybach, R., and Scharli, U., 2005, "A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design", World Geothermal Congress.
5. 기상청 홈페이지 (<http://www.kma.go.kr>)