

기상관측소 지중온도 및 국가지하수관측망 수온 자료 분석

구민호¹ · 송윤호² · 이준학³

¹공주대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원, ³(주)인텔리지오
e-mail: koo@kongju.ac.kr

요약문

58개 기상관측소에서 최근 22년간 측정된 천부 지중온도 자료와 국가지하수관측망의 169개 암반 및 95개 층적층 관측소에서 측정된 지하수 온도 자료를 이용하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 우리나라 대기, 지면 및 지하수의 연평균 온도분포도를 제시하였으며, 다중 회귀분석을 통하여 대기 및 지면온도를 추정할 수 있는 회귀식을 산정하였다. 둘째, 지면온도에 영향을 미치는 기상 요소로서 일사량, 지구복사, 강수량 및 적설량 자료를 분석하였다. 마지막으로 열전도 모델을 이용하여 심도별 열확산계수를 산정하고 통계 자료를 제시하였다.

Key word : 열전도, 열확산계수, 토양, 지하수, 기상관측소, 국가지하수관측망

1. 서론

지열 열펌프시스템(ground source heat pump; GSHP)은 연중 일정한 온도를 유지하는 천부 지반이나 지하수의 열에너지를 추출하는 기술로서 최근 국내에서도 이를 이용한 건물 냉난방 시설의 보급이 급속하게 증가하고 있는 추세이다. 또한 지열 열펌프시스템이 여러 학회에 소개되면서(한정상, 2005), 실제 시스템에 대한 성능 평가(손병후 외, 2005), 시뮬레이션 모델개발(심병완, 2005) 등 관련 연구도 활발히 수행되고 있다. 지열 열펌프시스템의 경제적 효율성은 시추공 열교환기(borehole heat exchanger; BHE)의 최적 시공 여부에 의해 결정되는데, BHE의 설계를 위해서는 냉난방 부하량 및 시추공과 U-tube의 제원과 같은 시공 변수와 함께 지하 매질의 열전도도, 열확산계수 및 지중온도 등의 입력 변수가 필요하다(Kavanaugh and Raffert, 1997). 지중온도는 지열 열펌프시스템 설계의 주요 입력 변수로서 지하 50 m 내외의 평균 온도를 많이 이용하며 주로 시추공 검층 자료를 통하여 산정한다. 온도 검층자료가 없을 경우 지표면의 연평균 온도를 이용하여 지중온도를 추정하기도 하는데, 이는 천부 지반의 지중온도가 일주기 또는 연주기의 변동을 보이는 지면온도의 지배적인 영향을 받기 때문이다. 따라서 지면온도는 지열에너지자원 활용기술 분야에서 매우 중요한 평가 요소이며, 최근 이와 관련된 많은 연구가 수행된 바 있다(Safanda, 1999; Paul et al., 2004). 본 연구에서는 58개 기상관측소에서 1981년부터 2002년까지 관측한 심도별(0~5 m) 지중 온도와 국가지하수관측망의 264개 암반(169개) 및 층적(95개) 관측소에서 2001년 12월 31일까지 측정된 지하수 온도를 분석 자료로 이용하였다. 우리나라 지면온도의 공간적 분포도를 작성하고 다중선형회귀분석을 통하여 위치 정보만으로 평균 지중온도를 추정할 수 있는 회귀모형을 제시하였으며, 온도 관측자료를 이용하여 지중의 열전달을 결정하는 주요 열물성인 열확산계수를 산정하였다.

2. 결과 및 고찰

1) 우리나라 기온 및 지면온도 변화

58개 기상관측소의 기온 및 지면온도 시계열 자료를 이용하여 각 관측소의 연평균기온(mean surface air temperature: MSAT) 및 지면온도(mean ground surface temperature: MGST)를 산정하였다. 연평균기온은 6.56(대관령)~16.48℃(서귀포)의 범위를 보이며, 평균 12.57℃로 나타났다. 연평균지면온도는 8.58(대관령)~18.31℃(서귀포), 평균 14.52℃로 일사의 영향으로 대기온도보다 약 2℃ 높게 나타났다(Fig. 1). MSAT와 MGST는 주로 위도와 지면고도에 지배적인 영향을 받으므로(Signorelli and Kohl, 2004), 관측소별로 계산된 MSAT 및 MGST와 각 관측소의 위경도 및 고도 자료를 이용하여 다중선형회귀분석을 수행하여 다음과 같이 MSAT와 MGST의 회귀식을 구하였다.

$$MSAT_{reg} = 42.3 - 0.81\phi - 6.4H \quad (1)$$

$$MGST_{reg} = 44.6 - 0.82\phi - 5.7H \quad (2)$$

식에서 ϕ 는 관측소의 위도, H 는 고도(km)를 나타낸다.

MSAT와 MGST의 위도에 대한 회귀계수 추정치는 각각 -0.81과 -0.82℃/degree 로 유사한 값을 가지며, 표준오차는 0.084와 0.063으로 분석되었다. MSAT의 고도에 대한 회귀계수는 -6.4℃/km로 대류권의 평균 기온감률인 6.5℃/km에 거의 일치하였으며, 추정치의 표준오차는 0.81로 산정되었다. MGST의 고도에 대한 회귀계수는 -5.7℃/km로 MSAT의 값보다 작게 나타났는데, 이는 고도가 높아질수록 지면에 도달하는 일사량이 증가하여 고도효과에 의한 온도 저하가 다소 약화되기 때문인 것으로 해석된다. 회귀계수의 표준오차는 0.61로 산정되었다. 회귀식을 통해 계산된 MSAT 및 MGST와 관측값의 결정계수는 각각 0.81과 0.87이며, 회귀의 표준오차는 0.69와 0.52로 분석되었다. MSAT의 경우 서울, 부산, 대구, 포항 등의 대도시에서 회귀모형에 의한 추정값이 관측값보다 1.0℃ 이상 작게 산정되었는데, 이는 도시화에 따른 승온 효과에 의하여 주변 지역보다 온도가 상승하였기 때문인 것으로 해석된다. 또한 동해안 일대 및 제주도, 울릉도 등의 도서 지역에서도 추정값이 관측값보다 작게 나타났는데, 이는 태백산맥을 따라 남북으로 발달된 분수령을 경계로 동안 및 서안 기후로 구분되는 국내의 기후 특성과 관련된 것으로 짐작된다.

Fig. 2a는 춘천 관측소에서 하절기에 측정된 GST와 SAT의 일변화이며, 강수가 GST 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 강수가 없는 맑은 날의 경우 GST와 SAT의 차이는 일사의 영향으로 15시 관측 자료에서 8℃ 정도로 가장 크게 나타났으며, 이후 점차 감소하여 21시에는 두 값의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 여름철 집중 강우 시에는 GST와 SAT의 일중 온도차가 거의 발생하지 않는데 이는 강우 시 일사량이 감소하고 동시에 토양 함수비 증가로 인하여 토양의 열용량(heat capacity)이 증가하기 때문인 것으로 해석된다.

Fig. 2b는 춘천 관측소에서 일사량이 높은 6월의 무강우기에 관측된 자료를 이용하여 GST와 SAT의 차를 일사량으로 나눈 값을 도시한 것이다. 이 값은 동일한 일사량에 대하여 지면이 어느 정도 가열되는지를 나타내므로 GST 일사계수로 정의될 수 있으며 지면의 열용량과 밀접한 관련이 있다. 그림과 같이 GST 일사계수는 무강우가 지속된 6월 초순부터 중순까지 선형적인 증가 경향을 보였다. 이 시기에는 일사량이 연중 최고조에 달하므로 지면의 수분 증발량이 매우 높고 결과적으로 지면 토양의 함수비가 빠르게 감소한다. 따라서 이 시기에 관측된 GST 일사계수의 선형적인 증가는 함수비 감소에 의한 토양 열용량의 감소에 기인한 것으로 해석된다.

Fig. 2c는 대관령 관측소에서 동절기에 측정된 자료이며, 적설이 GST 변화에 미치는 영향을 잘 보여준다. 적설 전 맑은 날의 경우 GST와 SAT의 차이는 하절기와 유사한 일변화를 보인다. 적설 시에는 스파이크 파형의 일변화가 교란되며, 2월 22일의 관측 자료에 나타난 바와 같이 GST는 SAT에 비해 6시간 정도의 시간 지연이 발생하면서 일변화를 보인다. 이는 20 cm 정도의 적설이 대기와 지면을 차단하면서 열전도체 역할을 하였기 때문인 것으로 해석되며, 이러한

경향은 신적설이 없는 맑은 날에도 기존 적설량이 점차 감소하여 사라질 때까지 지속되는 것으로 나타났다. 눈의 열확산계수는 평균 $0.5 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 이므로, 1차원 열전도 방정식의 해(구민호 외, 2003)를 이용하여 20 cm 심도에서의 일변화에 대한 위상차를 계산하면 6.2시간이다. 따라서 적설 시 관측되는 GST와 SAT의 시간 지연은 열전도 모델에 의한 계산 결과와 잘 부합한다.

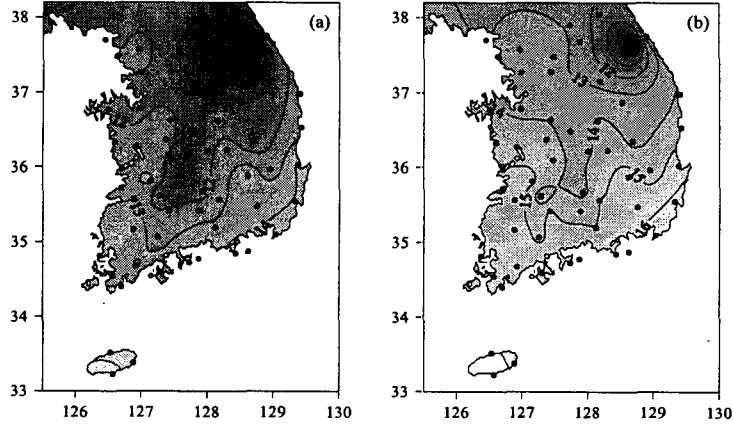


Fig. 1. Contour maps showing (a) MSAT and (b) MGST.

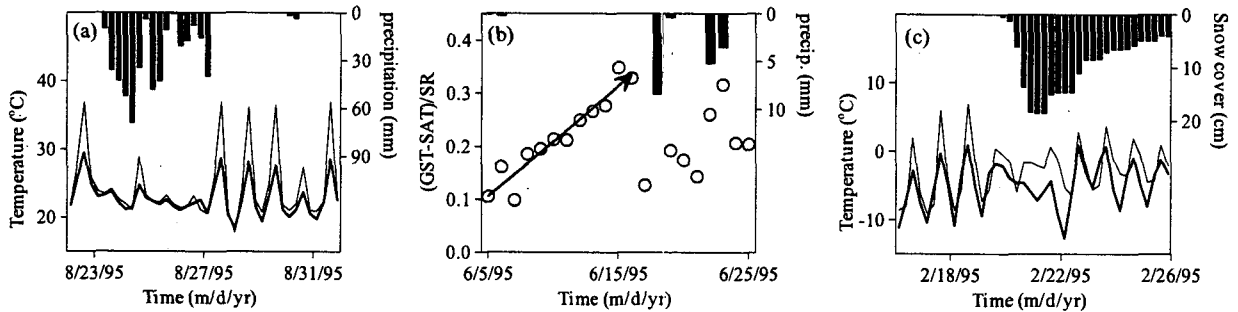


Fig. 2. Variations of GST as affected by (a) precipitation, (b) soil water content, and (c) snow cover.

2) 열확산계수 산정

기상관측소에서 측정된 지중 온도 자료를 이용하여 관측소 천부 토양의 열확산계수를 산정하였다. 심도가 다른 두 시계열 자료의 교차상관분석으로부터 위상차를 구하였으며, 위상방정식을 이용하여 열확산계수를 산정하였다(구민호 외, 2003). 또한 두 시계열 자료의 위상을 일치시킨 후 선형회귀분석을 통하여 두 시계열의 진폭비를 산정하였으며, 진폭방정식을 이용하여 열확산계수를 산정하였다. Fig. 3a는 58개 KMA 기상관측소에서 측정된 심도별 지중온도로부터 산정된 위상차와 진폭비 및 열전도모델에 의해 계산된 이론곡선을 도시한 것이다. 1 m 이하 심도의 경우 대부분 이론값이 나타내는 곡선 상에 도시된 반면, 0.5 m 심도의 경우 대부분 곡선 하단부에 도시되어 위상차가 과소평가되는 것으로 나타났다. 0.5 m 이내 천부 토양은 강수 및 증발산에 의한 함수비의 계절적 변화가 커 열 물성 변화가 하부에 비하여 크게 발생하는 구간이며, 또한 수직적인 물의 흐름, 동결기 토양의 동결 및 융해 시 동반되는 잠열 효과 등 비전도성 열전달 기작이 활발하다. 천부 토양의 분석 결과가 이론값에 부합되지 않는 것은 이 구간에서 전도 및 비전도성 열전달 기작이 동시에 복합적으로 발생하였기 때문이며, 비전도성 열전달 기작은 주로 위상차를 감소시키는 역할을 한 것으로 해석된다. Fig. 3b는 진폭방정식으로 산정된 58개 기상관측소 토양의

심도별 열확산계수의 분포를 도시한 것으로 심도가 증가할수록 열확산계수가 커지는 경향이 뚜렷하며, 특히 0.5 m 하부에서 그 값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 천부 0.5 m 이내 토양의 열확산계수가 뚜렷하게 작은 값을 보이는 것은 구민호 외(2003)의 해석과 같이 천부 토양이 나타내는 일반적인 특징, 즉 입단(aggregate) 구조 발달에 의한 높은 공극률, 증발산 작용에 의한 함수비가 감소, 높은 유기물 함량과 관계된 것으로 추정된다.

연주기의 수온 변동을 보이는 국가지하수 관측망의 95개 층적 및 암반 관측소의 수온 자료를 이용하여 관측소 하부 지반의 열확산계수를 산정하였다. 분석을 위하여 관측소에서 가장 가까운 곳에 위치하는 기상관측소의 GST 자료를 지면온도로 활용하였다. Fig. 4a는 위상차와 진폭비와의 관계를 도시한 것으로, 기상관측소의 분석 결과와 달리 많은 지하수 관측소의 분석 결과가 이론곡선과 큰 차이를 보인다. 또한 대부분의 분석치가 이론곡선 하단에 위치하여 관측된 자료의 위상차 또는 진폭비가 열전도모델이 제시하는 이론값보다 저평가되었음을 보여준다. Fig. 4b는 위상 및 진폭 방정식을 이용하여 산정한 열확산계수를 나타낸다. 토양 및 암석이 일반적으로 나타내는 열확산계수의 범위는 0.2~1.5 mm²/sec 정도이므로 10여개의 분석 자료를 제외한 대부분은 지나치게 큰 값을 보여 관측소 지반의 열확산계수로 간주하기 어렵다. 특히 암반의 분석 결과는 모두 높은 값으로 나타나 층적의 분석 결과와 뚜렷한 대조를 보인다.

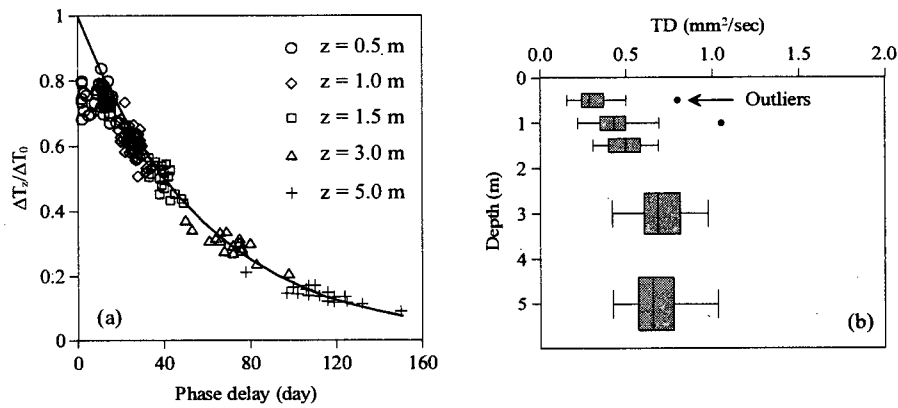


Fig. 3. (a) Estimated phase delay and amplitude damping with depth: the solid line represents theoretical values calculated from the solution of 1-D heat conduction equation, and (b) variations of the estimated thermal diffusivity with depth.

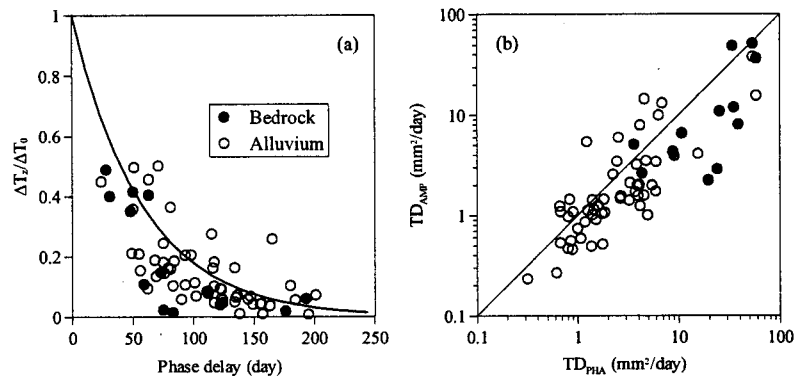


Fig. 4. Comparisons of (a) estimated values of phase delay and amplitude damping with the theoretical curve (solid line), (b) the thermal diffusivities obtained by phase and amplitude equations.

3. 결론

1) 본 연구를 통하여 제시된 회귀모형은 관측 자료가 없는 지역의 MSAT 및 MGST를 추정하는데 유용하게 이용될 수 있다. 특히 MGST는 지열 열펌프시스템 설계의 주요 입력 변수인 지중온도를 대신하는 값으로 이용될 수 있으므로 제시된 MGST 회귀식의 실용적 가치는 상당하다고 할 수 있다. 송운호 외(2004)는 588개의 심부 시추공 자료를 이용하여 우리나라의 지온경사 분포도를 작성한 바 있으므로 앞으로 두 자료의 상관분석을 통하여 국지적인 GST 분포 특성에 관한 연구가 이루어진다면 좀 더 정밀도가 높은 지표온도 분포도가 도출될 것이다.

2) 열확산계수 산정을 목적으로 국가지하수 관측소에서 측정된 수온 자료를 이용할 경우 기상관측소의 자료와 비교할 때 여러 가지 문제점이 대두되었다. 그 하나는 GST 자료 부재로 인근 기상관측소에서 측정된 지면온도 자료를 이용해야하는 점이고, 다른 하나의 문제점은 계측기 오작동으로 인한 자료의 품질저하 및 계측기 설치 심도에 대한 부정확한 정보이다. 그러나 분석 결과의 신뢰도를 저하시킬 수 있는 이러한 요인들을 모두 고려하더라도 여전히 대부분의 암반 자료를 포함하는 많은 분석 결과가 지나치게 높은 열확산계수를 보인다. 따라서 시추공 지하수에서는 전도보다 더 효과적인 방식의 열전달이 발생하고 있음을 시사하며, 대류에 의한 시추공 내 지하수의 혼합은 이를 설명할 수 있는 열전달 기작이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '지열자원 부존특성 규명 및 활용 기반기술 연구'의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

4. 참고문헌

- Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K., 1997, Ground-source heat pump: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 167p.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Smethurst, P.J., O'Connell, A.M., Carlyle, C.J. and Khanna, P.K., 2004, Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 121, p. 167-182.
- Safanda, J., 1999, Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field. *Tectonophysics*, v. 306, p. 367-375.
- Signorelli, S. and Kohl, T., 2004, Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Glob. Planet. Change*, v. 40, p. 267-284.
- 구민호, 김용제, 서만철, 서명석, 2003, 온도 시계열 자료를 이용한 국내 토양의 열확산계수 산정, *지질학회지*, 39, 301-317.
- 손병후, 조정식, 신현준, 안형준, 2005, 지열원 열펌프 시스템의 냉·난방 성능 평가. *설비공학논문집*, v. 17(1), p. 71-81.
- 송운호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이성곤, 이종철, 이병태, 박인화, 이태종, 이철우, 문상호, 김연기, 이병대, 임현철, 2004, 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구. 한국지질자원연구원 기본사업연차보고서 KR-04(연차)-08, 국무총리, 123p.
- 심병완, 2005, 대수층 축열 에너지(ATES) 시스템 모델에서 지하수 유동 영향에 의한 지반내 온도 분포 예측 시뮬레이션. *한국지열에너지학회논문집*, v. 1(1), p. 1-8.
- 한정상, 2005, 지열 열펌프시스템의 개념과 기술수준. *지열에너지저널*, v. 1(1), p. 10-18.