

국내 지면온도의 시공간적 변화 분석

구민호¹ · 송윤호^{2*} · 이준학³

¹공주대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원, ³(주)인텔리지오

Analyzing Spatial and Temporal Variation of Ground Surface Temperature in Korea

Min-Ho Koo¹, Yoonho Song^{2*} and Jun-Hak Lee³

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

²Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

³Intellegeo Co., Ltd, Seoul 152-790, Korea

Recent 22-year (1981-2002) meteorological data of 58 Korea Meteorological Administration (KMA) stations were analyzed to investigate spatial and temporal variation of surface air temperature (SAT) and ground surface temperature (GST) in Korea. Based on the KMA data, multiple linear regression (MLR) models, having two regression variables of latitude and altitude, were presented to predict mean surface air temperature (MSAT) and mean ground surface temperature (MGST). Both models showed a high accuracy of prediction with R^2 values of 0.92 and 0.94, respectively. The prediction of MGST is particularly important in the areas of geothermal energy utilization, since it is a critical parameter of input for designing the ground source heat pump system. Thus, due to a good performance of the MGST regression model, it is expected that the model can be a useful tool for preliminary evaluation of MGST in the area of interest with no reliable data. By a simple linear regression, temporal variation of SAT was analyzed to examine long-term increase of SAT due to the global warming and the urbanization effect. All of the KMA stations except one showed an increasing trend of SAT with a range between 0.005 and 0.088°C/yr and a mean of 0.043°C/yr. In terms of meteorological factors controlling variation of GST, the effects of solar radiation, terrestrial radiation, precipitation, and snow cover were also discussed based on quantitative and qualitative analysis of the meteorological data.

Key words : GST, SAT, Multiple linear regression analysis, Ground source heat pump system

58개 기상관측소에서 최근 22년간(1981-2002) 측정된 기상 자료를 이용하여 국내의 기온(SAT) 및 지면온도(GST)의 시공간적 변동 경향을 분석하였다. 먼저 관측 자료로부터 각 관측소의 평균기온(MSAT)과 평균지면온도(MGST)를 계산하였으며, 다중선형회귀분석을 통해 MSAT와 MGST를 예측할 수 있는 회귀식을 산정하였다. 회귀모형의 회귀변수는 관측소의 위도 및 고도이다. 회귀모형의 추정치와 실제 관측값의 결정계수(R^2)는 각각 0.92와 0.94로 나타나 모형의 예측 정확성이 매우 높은 것으로 분석되었다. MGST는 지열펌프 시스템 설계의 주요 입력 변수이므로 최근 지열에너지자원 활용 분야에서 매우 중요하게 다루어지는 변수이다. 따라서 제시된 회귀모형은 신뢰할만한 관측 자료가 없는 지역에서 MGST를 추정하는데 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 예상된다. SAT 자료에 대한 선형회귀분석을 통해 지구온난화 및 도시화에 기인한 기온 상승의 장기 추세 변동성을 탐색하였다. 1개 관측소를 제외한 57개 관측소에서 0.005~0.088°C/yr 범위의 기온증가율을 가지는 추세 변동이 확인되었다. 또한 GST에 영향을 미치는 기상 요소로서 일사량, 지구복사, 강수량 및 적설량 자료를 분석하였다. GST는 주로 SAT 및 일사량에 의하여 결정되지만 강수 및 증발에 의한 토양의 열용량 변화, 적설에 의한 대기와 지표면 차단, 지구복사에 영향을 줄 수 있는 대기의 조건 변화 등이 복합적인 변동 요인으로 작용하는 것으로 나타났다.

주요어 : 기온, 지면온도, 다중선형회귀분석, 지열펌프 시스템, 한국

*Corresponding author: song@kigam.re.kr

1. 서 론

지열펌프 시스템(geothermal heat pump 또는 ground source heat pump; GSHP)은 천부 지반이나 지하수의 열에너지를 추출하는 기술로서 최근 국내에서도 이를 이용한 건물 냉난방 시설의 보급이 급속하게 증가하고 있는 추세이다. 또한 지열펌프 시스템이 여러 학회에 소개되면서(이기우, 1992; 안형준, 2002; 이용범, 2004; 이화룡, 2004; 한정상, 2005), 실제 시스템에 대한 성능 평가(손병후 등, 2005), 시뮬레이션 모델개발(심병완, 2005; 이용범 등, 2005) 등 관련 연구도 활발히 수행되고 있다. 지열펌프 시스템의 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 Rafferty, 1997; 한정상 등, 2005).

지중온도는 지열펌프 시스템 설계의 주요 입력 변수로서 지하 50 m 내외의 평균 온도를 많이 이용하며 주로 시추공 검층 자료를 통하여 산정한다. 온도 검층 자료가 없을 경우 지표면의 연평균 온도를 이용하여 지중온도를 추정하기도 하는데, 이는 천부 지반의 지중온도가 일주기 또는 연주기의 변동을 보이는 지면온도(ground surface temperature; GST)의 지배적인 영향을 받기 때문이다. 따라서 GST는 지열에너지자원 활용기술 분야에서 매우 중요한 평가 요소이며, 최근 이와 관련된 많은 연구가 수행된 바 있다. GST의 변화는 기온(surface air temperature; SAT)의 변화와 강하게 연동되어 있으며(Smerdon *et al.*, 2004), 지표 토양의 열적 특성, 지표면의 고도, 일조량, 식생 등 여러 요인의 영향을 받는다(Safanda, 1999; Lewis, 1998; Paul *et al.*, 2004).

또한 GST는 지난 수세기 또는 수천 년 동안의 고기후 변화를 복원하려는 연구의 주요 관심사이기도 하다. 지구 내부의 온도는 지질학적인 시간 규모에서 매우 서서히 변하게 되므로 정류 상태(steady state)에 있다고 할 수 있다. 따라서 최근 수백 또는 수천 년 동안 대기권에서 발생한 온도 변화는 지표면을 통해 지구 내부로 전달되면서 정류 상태의 내부 온도를 교란시키므로 현재 시추공에서 관측되는 온도 검층 자료에 그 흔적(signature)이 남을 수 있다. Lachenbruch and Marshall (1986)에 의하여 촉발된 지면온도사(GST history) 또는 고기후 복원에 관한 연구는 1990

년대 후반 이후 세계 각지 지구물리학자들의 주요 관심사가 되고 있다(Huang *et al.*, 1995; Velicic and Safanda, 1998; Cermak and Bodri, 2001; Dorofeeva *et al.*, 2002; Gosselin and Mareschal, 2003).

GST의 평균은 지중온도를 대표하는 값으로 지열펌프 시스템 설계 시 이용될 수 있다. 평균 GST는 시추공에서 측정된 지온경사 자료를 역산하는 방식으로 산정되기도 하는데(Rajver *et al.*, 1998; Pollack *et al.*, 2003), 대부분의 경우 시추공의 수가 제한적이며 또한 지역적으로 편재되어 있어 광역적인 GST 분포도를 구하기 어려운 단점이 있다. 따라서 우리나라 전체의 GST 분포를 구하고자 할 때에는 시추공 자료가 거의 없는 산악지역에 대한 자료가 제한될 수밖에 없으므로, 이와는 다른 접근방법이 필요하다.

최근 Signorelli and Kohl (2004)은 기상관측소의 SAT 자료를 이용해서 스위스 전체의 GST 분포도를 작성한 후, 이를 시추공 자료를 이용하여 검증한 바 있다. 한편 국내의 경우 기상청은 지난 수십 년간 주요 기상 요소의 하나로 지면 및 천부 지중온도를 관측하여 방대한 양의 장기 관측 자료를 확보하고 있다. 기상관측소의 지중온도 자료를 이용한 연구가 일부 수행된 바 있으나(송관철 등, 1992; 김영복 등, 2000; 구민호 등, 2003; 김승욱 등, 2005) 지중온도 자료의 활용성에 대한 담당 기관의 인식 부족으로 관측 자료에 대한 종합적이고 체계적인 연구는 수행되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 58개 기상관측소의 GST 관측 자료를 이용하여 우리나라 GST의 공간적 분포도를 작성하고 지열펌프 시스템 설계 시 우리나라 임의지역의 위치 정보만으로 대략적인 평균 지중온도를 추정할 수 있는 회귀모형을 제시하는데 있다.

2. 자료 및 방법

58개 기상관측소(Fig. 1)에서 1981년부터 2002년까지 관측한 강수량, 적설량, 일사량, 기온 및 지면온도 등의 기상청 전산 자료를 수집하여 분석 자료로 이용하였다. 일사량의 경우 일사계가 설치된 19개 관측소의 자료를 이용하였다. 원시 자료의 강수량, 기온 및 일사량의 관측 시간간격은 1시간이며, 적설량은 3시간, 지면온도는 6시간이다.

분석을 위한 전처리 과정으로 모든 기상 자료를 동일한 시간간격(6시간 또는 24시간)을 가지는 시계열 자료로 변환하였다. 이 과정에서 기온 및 지면온도는 시계열의 시간간격 동안 측정된 자료를 평균하였으며, 강

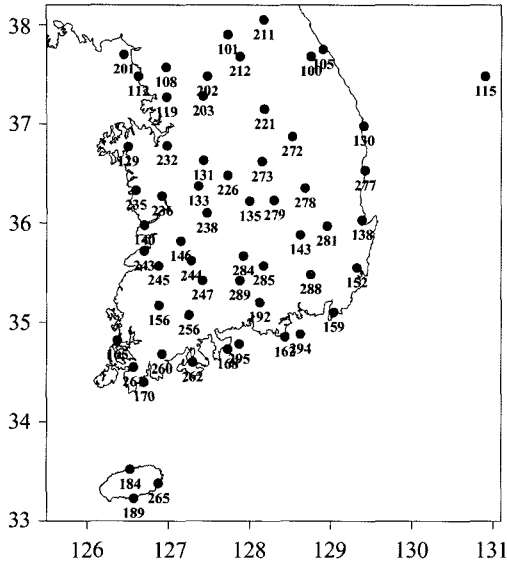


Fig. 1. Location of 58 surface synoptic stations of the Korea Meteorological Administration (KMA).

수량, 적설량 및 일사량은 측정값을 누적하였다. 방대한 양의 전산 자료에는 입력 오류로 예상되는 일부 이상값들이 포함되어 있어 관측 자료에 대한 품질관리(Quality Control)를 목적으로 자료 분석 전단계에서 이들 자료를 제거하였다. 58개 관측소의 시계열 자료 생성과 불량 자료의 확인 및 제거는 Fortran 프로그램을 통하여 수행되었다. Fig. 2는 서울 관측소에서 측정된 강수량, 일사량, 적설량, 기온 및 지면온도의 시계열 자료를 도시한 것이다. 강수량과 적설량은 연도별 변동성이 크게 나타난 반면 일사량, 기온 및 지면온도는 연주시의 규칙적인 변동 양상을 잘 보여준다. 전처리 과정을 통하여 생성된 58개 관측소의 시계열 기상 자료를 이용하여 다음과 같은 통계분석을 수행하였다.

첫째, 58개 기상관측소의 기온 및 지면온도 시계열 자료를 이용하여 각 관측소의 연평균기온(annual mean surface air temperature: MSAT) 및 연평균지면온도(annual mean ground surface temperature: MGST)를 산정하였다. 전술한 바와 같이 22년의 관측 자료에는 결측 또는 불량 자료가 일부 포함되어 있으므로, 이를 제외한 나머지 자료를 산술평균할 경우 겨울이나 여름철 결측 자료에 의하여 MSAT 또는 MGST가 과대 또는 과소 산정될 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 관측 자료를 365일 대역폭(band width)으로 이동평균(moving average)하여 새로운 시계열 자료를 생성하였다. 이동평균 시 결측 자료가 1

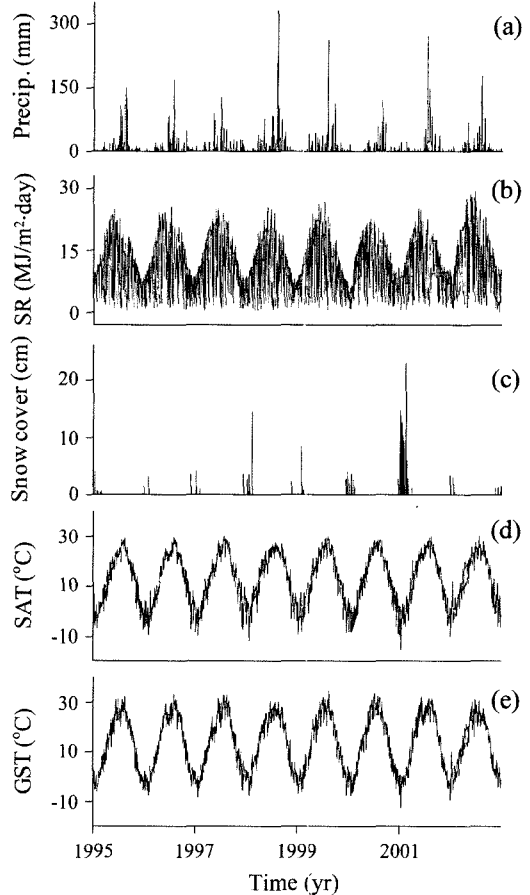


Fig. 2. Annual variation of (a) daily precipitation, (b) solar radiation (SR), (c) snow cover, (d) surface air temperature (SAT), and (e) ground surface temperature (GST) measured at the Seoul KMA station.

개 이상 포함될 경우 새로운 시계열 자료에서 제거하였으며, MSAT와 MGST는 이동평균으로 구한 시계열 자료를 산술평균하여 구하였다.

둘째, MSAT와 MGST는 주로 위도와 지면고도에 지배적인 영향을 받으므로(Signorelli and Kohl, 2004), 관측소별로 계산된 MSAT 및 MGST와 각 관측소의 위경도 및 고도 자료를 이용하여 다중선형회귀분석(multiple linear regression analysis) 수행하여 다음과 같이 MSAT와 MGST의 회귀식을 구하였다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (1)$$

여기서 Y는 회귀모형의 종속 변수인 MSAT 또는 MGST이며, X_1 과 X_2 는 회귀변수인 위도와 고도를 나타낸다. ε 는 회귀식의 추정오차를 나타낸다. 최소제곱법을 이용하여 회귀계수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2)$$

셋째, 58개 관측소의 SAT 시계열 자료를 이용하여 각 관측소의 장기 기온 변동 추세를 분석하였다. MSAT 분석과 마찬가지로 관측 자료를 365일 대역폭으로 이동평균하여 새로운 시계열 자료를 생성하였으며, 선형회귀분석을 통하여 기온상승률을 구하였다.

마지막으로 관측 자료를 통하여 SAT, 일사량, 강수량 및 적설량과 같은 기상조건의 계절적 변화가 GST에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 우리나라 기온 및 지면온도 연평균 분포

지중온도는 지열펌프 시스템의 운영 효율성을 결정하는 주요 설계 변수이다. 천부 지반의 지중온도는 지면온도의 지배적인 영향을 받으므로 천부 지반의 연평균 지중온도는 MGST에 의하여 결정된다고 할 수 있다. GST는 일변화 또는 연변화를 보이는 SAT와 거의 유사한 값의 변화를 보이지만, 기상이나 지표면의 상태에 따라 지면의 일사(solar radiation) 흡수, 장파복사, 대기와의 열교환 등이 현저하게 달라질 수 있으므로 SAT와의 시공간적인 온도 차가 크게 발생할 수 있다. 특히 일사는 지면을 가열시키므로 보통의 기상조건에서 일사량이 많은 시기의 GST는 SAT보다 높게 나타난다. 따라서 일사량이 많은 국내의 경우 MGST는 일반적으로 MSAT보다 높으며, 그 차이는 지면에 도달하는 연평균 일사량, 지면의 구성 물질 및 식생 분포 여부 등에 따라 달라질 수 있다.

Table 1은 시계열 자료로부터 계산된 각 관측소의 MSAT와 MGST를 보여준다. 58개 관측소의 MSAT는 6.56(대관령)~16.48°C(서귀포)의 범위를 보이며, 평균 12.57°C로 나타났다. MGST는 8.58(대관령)~18.31°C

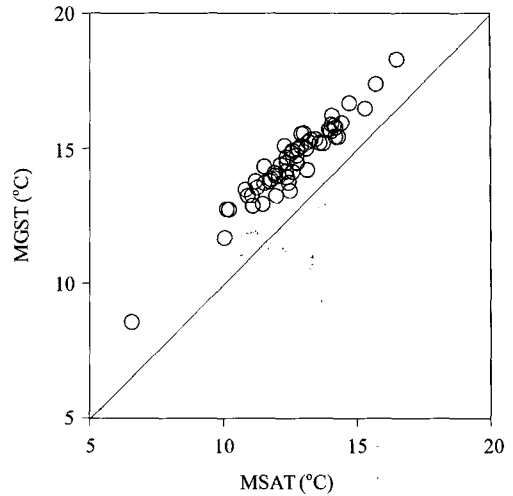


Fig. 3. Comparison of mean surface air temperature (MSAT) and mean ground surface temperature (MGST) of KMA stations.

(서귀포), 평균 14.52°C로 일사의 영향으로 MSAT보다 약 2°C 높게 나타났다(Fig. 3). Fig. 4는 Table 1을 이용하여 도시한 등온도 분포도이다. 그림과 같이 MSAT와 MGST는 매우 유사한 공간적 분포를 보이며 고위도로 갈수록 온도가 감소하는 위도 효과와 지면고도가 높을수록 온도가 감소하는 고도 효과를 잘 보여준다. 제주도의 경우 3개 기상관측소(제주, 서귀포, 성산포)가 모두 해안가에 위치하여 한라산의 고도 효과가 Fig. 4에 전혀 반영되지 않았다.

이상과 같이 우리나라의 MSAT와 MGST는 주로 위도와 지면고도에 의해 지배되므로 58개 관측소에 대한 다중선형회귀분석을 통하여 MSAT와 MGST의 회귀식을 산정하였으며 결과는 다음과 같다.

$$MSAT_{reg} = 42.3 - 0.81\phi - 6.4H \quad (3)$$

$$MGST_{reg} = 44.6 - 0.82\phi - 5.7H \quad (4)$$

Table 1. KMA stations and their annual mean values of SAT and GST averaged over the period of measurements.

ID	Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	MSAT (°C)	MGST (°C)	SAT change (°C/yr)
100	Daegwallyeong	128.75	37.68	842.0	6.56	8.58	0.055
101	Chuncheon	127.73	37.90	74.0	11.09	12.90	0.035
105	Gangneung	128.90	37.75	26.0	13.12	14.21	0.067
108	Seoul	126.97	37.57	85.5	12.49	13.45	0.071
112	Incheon	126.63	37.48	68.9	12.05	14.01	0.079
115	Ulleungdo	130.90	37.48	221.1	12.44	13.75	0.049
119	Suwon	126.98	37.27	36.9	11.97	13.26	0.088
129	Seosan	126.50	36.77	26.9	11.93	14.01	0.026
130	Uljin	129.40	36.98	49.5	12.58	14.15	0.060

Table 1. Continued.

ID	Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	MSAT (°C)	MGST (°C)	SAT change (°C/yr)
131	Cheongju	127.43	36.63	59.0	12.36	13.96	0.072
133	Daejon	127.37	36.37	68.3	12.73	14.48	0.052
135	Chupungnyeong	128.00	36.22	244.8	11.76	13.88	0.027
138	Pohang	129.38	36.03	5.0	14.20	15.79	0.076
140	Gunsan	126.70	35.98	26.0	12.90	15.09	0.044
143	Daegu	128.62	35.88	57.6	14.01	15.65	0.073
146	Jeonju	127.15	35.82	51.0	13.26	15.33	0.067
152	Ulsan	129.32	35.55	33.6	14.06	16.22	0.062
156	Gwangju	126.88	35.17	73.9	13.73	15.19	0.049
159	Busan	129.03	35.10	69.2	14.70	16.69	0.068
162	Tongyeong	128.43	34.85	31.7	14.41	15.95	0.041
165	Mokpo	126.37	34.82	36.0	13.95	15.71	0.034
168	Yeosu	127.73	34.73	67.0	14.29	15.45	0.059
170	Wando	126.70	34.40	37.5	14.19	15.45	0.010
184	Jeju	126.53	33.52	22.0	15.71	17.40	0.059
189	Seogwipo	126.57	33.23	51.0	16.48	18.31	0.072
192	Jinju	128.12	35.20	21.3	13.10	15.00	0.049
201	Ganghwa	126.45	37.70	46.0	11.08	12.89	0.026
202	Yangpyong	127.48	37.48	45.0	11.06	13.27	0.073
203	Icheon	127.43	37.28	75.0	11.46	12.95	0.038
211	Inje	128.17	38.05	199.0	10.03	11.70	0.044
212	Hongchon	127.88	37.68	141.0	10.20	12.75	0.041
221	Chechon	128.18	37.15	264.4	10.12	12.77	0.005
226	Poun	127.73	36.48	170.0	10.82	13.50	0.039
232	Onyang	126.98	36.78	24.5	11.72	13.80	0.025
235	Taecheon	126.60	36.33	33.0	12.35	14.68	0.066
236	Puyo	126.92	36.27	16.0	12.13	14.41	0.052
238	Kumsan	127.47	36.10	170.7	11.51	14.34	0.011
243	Puan	126.70	35.72	7.0	12.54	14.85	0.035
244	Imshil	127.28	35.62	244.0	10.91	13.27	0.023
245	Chongju	126.88	35.57	40.5	13.01	15.57	0.040
247	Namwon	127.42	35.42	115.0	12.29	15.11	0.016
256	Sungju	127.25	35.07	74.0	12.59	14.93	0.029
260	Changhung	126.92	34.68	40.0	12.92	15.56	0.018
261	Haenam	126.57	34.55	22.1	13.44	15.35	0.027
262	Kohung	127.30	34.60	32.4	13.60	15.21	0.016
265	Songsanpo	126.88	33.38	17.5	15.29	16.49	0.018
272	Yongju	128.52	36.87	208.0	11.25	13.57	0.052
273	Chomchon	128.15	36.62	172.1	11.91	14.11	-0.010
277	Yongdok	129.42	36.53	40.5	12.74	14.46	0.024
278	Uisong	128.68	36.35	73.0	11.18	13.80	0.030
279	Sonsan	128.30	36.23	40.0	12.36	14.49	0.076
281	Yongchon	128.95	35.97	91.3	12.34	14.17	0.046
284	Kochang	127.92	35.67	224.9	11.53	13.74	0.035
285	Hapchon	128.17	35.57	32.4	12.77	15.00	0.043
288	Miryang	128.75	35.48	12.5	13.17	15.25	0.045
289	Sanchong	127.88	35.42	141.8	12.73	14.75	0.015
294	Koje	128.62	34.88	12.0	14.04	15.90	0.019
295	Namhae	127.87	34.78	49.8	14.14	15.86	0.018

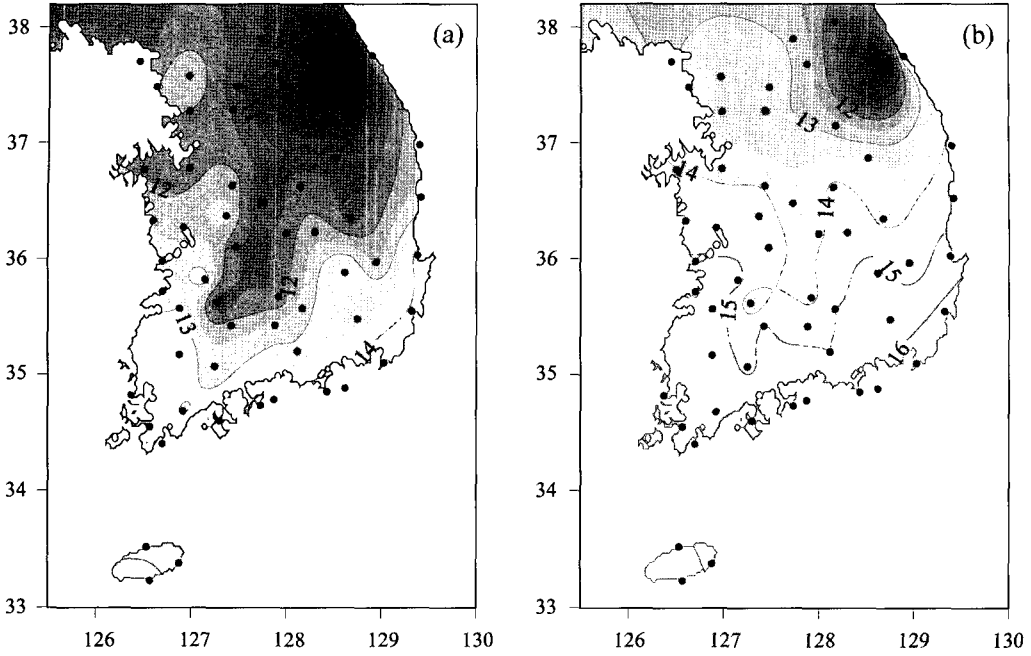


Fig. 4. Contour maps showing (a) MSAT and (b) MGST.

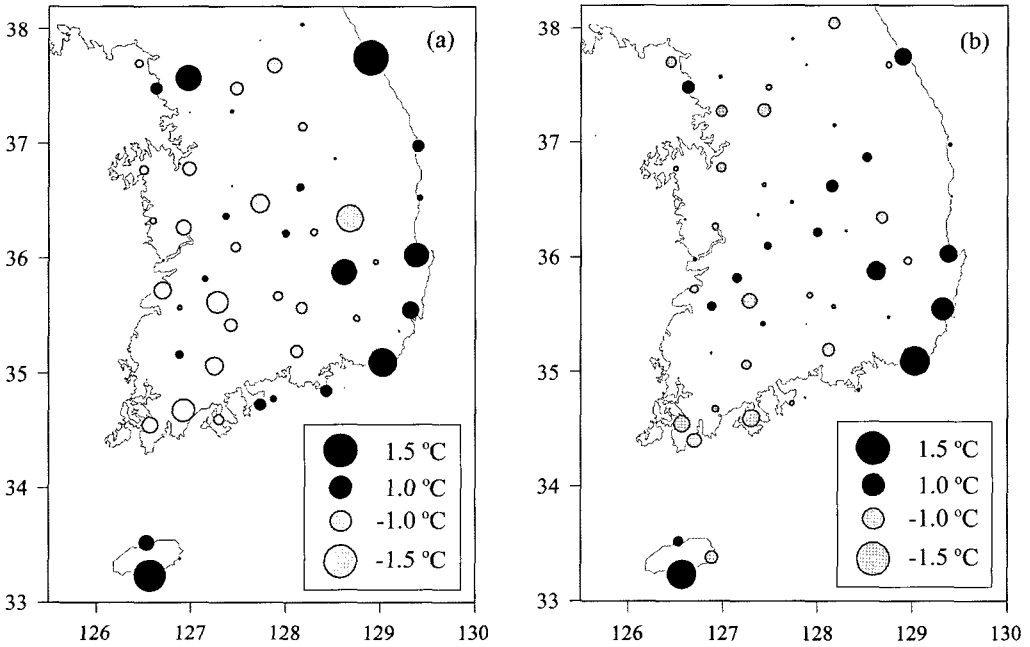


Fig. 5. Bubble plots showing the estimation error (ϵ) of the regression model: (a) MSAT and (b) MGST.

식에서 ϕ 는 관측소의 위도, H 는 고도(km)를 나타낸다. MSAT와 MGST의 위도에 대한 회귀계수 추정치는 각각 -0.81 과 $-0.82^\circ\text{C}/\text{degree}$ 로 유사한 값을 가지

며, 표준오차(standard error)는 0.084 와 0.063 으로 분석되었다. MSAT의 고도에 대한 회귀계수는 $-6.4^\circ\text{C}/\text{km}$ 로 대류권의 평균 기온감율(lapse rate)인 $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$

에 거의 일치하였으며, 추정치의 표준오차는 0.81로 산정되었다. MGST의 고도에 대한 회귀계수는 $-5.7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 로 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 결정계수(R^2)는 각각 0.81과 0.87이며, 표준오차(standard error of estimate: SEE)는 0.69와 0.52로 분석되었다.

Fig. 5는 실제 관측값과 회귀모형의 추정치와의 차이를 도시한 것이다. 그림에서 검은색 원은 추정값이 관측값보다 작은 관측소를, 회색 원은 추정값이 관측값보다 큰 관측소를 나타낸다. MSAT의 경우(Fig. 5a) 주로 서울, 부산, 대구, 포항 등의 대도시에서 회귀모형에 의한 추정값이 관측값보다 1.0°C 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. 한편 MGST의 경우(Fig. 5b) MSAT의 결과와 매우 유사한 경향을 보이나 전체적으로 추정값과 관측값 사이의 오차가 감소하였으며, 내륙 지역의 경우 회귀오차의 분포 경향이 MSAT와 다소 다

르게 나타났다.

이상과 같이 식 (3)과 (4)의 회귀모형은 일부 관측소의 도시화에 기인한 온도 상승효과가 반영되어 있으므로 우리나라 전체 또는 도시화와 관련이 없는 산지나 농림지역의 MSAT나 MGST를 예측할 수 있는 모형으로 이용할 경우 다소의 오차를 포함할 수밖에 없다. 따라서 회귀모형의 신뢰도를 높이기 위해 회귀값과 관측값 사이의 오차가 큰 자료를 순차적으로 제거하면서 회귀분석을 반복 수행하였다. Fig. 6은 58개 전체 관측 자료를 시작으로 추정오차가 가장 큰 자료를 하나씩 제거하면서 계산된 회귀계수 및 표준오차의 변화를 나타낸 것이다. 제거된 자료는 58개 자료에 대한 초기 회귀모형에서 추정오차가 크게 나타난 관측소들을 포함한다. 그림과 같이 오차가 큰 관측소들이 회귀모형에서 순차적으로 제거되면서 초기에는 회귀계수가 크게 변하다가 점차 안정된 값을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 예상했던 바와 같이 회귀모형의 표준오차(SEE)는 지속적으로 감소하면서 회귀모형의 신뢰도가 점차 향상되었다(Fig. 6d).

추정오차가 큰 10개의 자료를 제거한 후의 MSAT와 MGST의 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{MSAT}_{\text{reg}} = 44.1 - 0.86\phi - 6.1H \quad (5)$$

$$\text{MGST}_{\text{reg}} = 43.0 - 0.78\phi - 5.6H \quad (6)$$

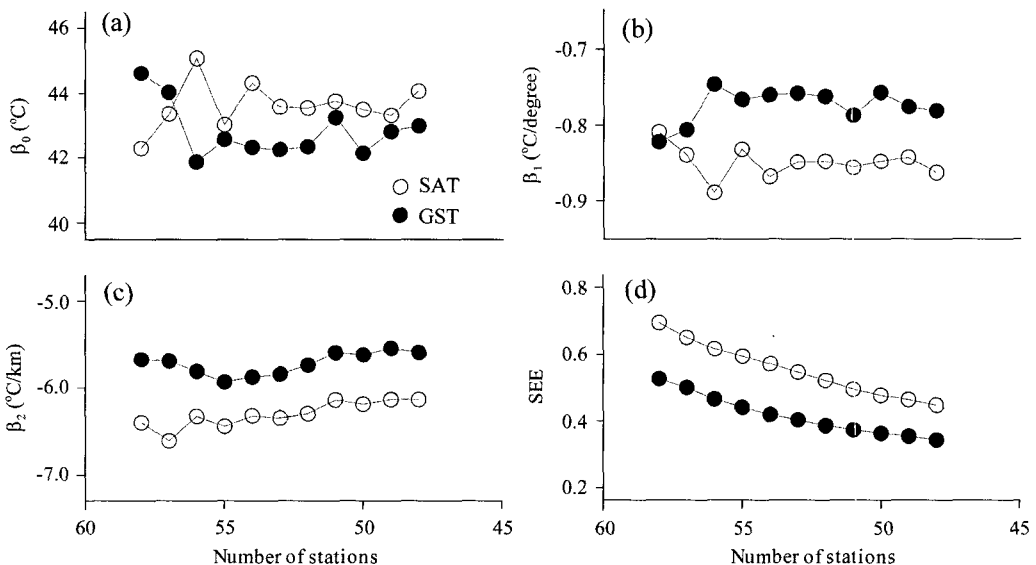


Fig. 6. Variation of regression coefficients with reducing the number of regression data; the data showing the greatest prediction error is consecutively eliminated: (a) β_0 , (b) β_1 , (c) β_2 , and (d) standard error of estimate (SEE).

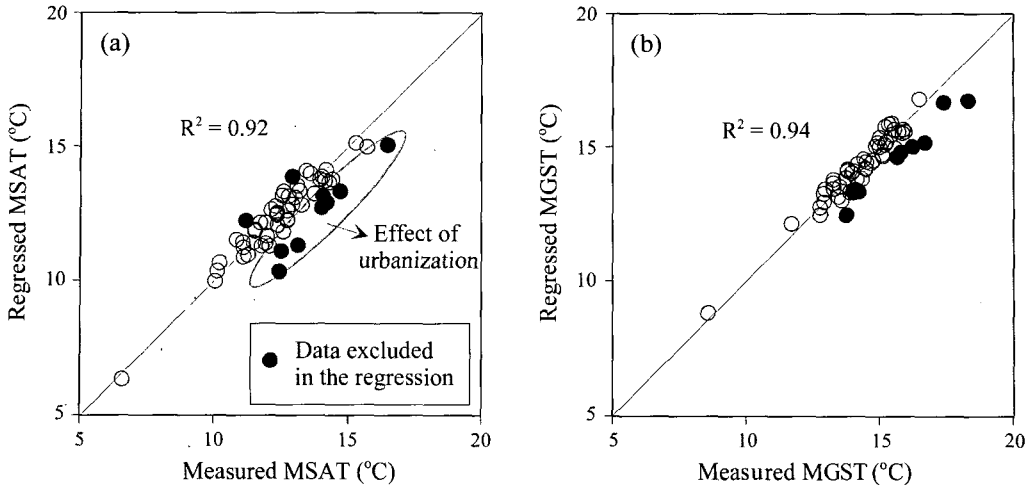


Fig. 7. Results of multiple linear regression for predicting (a) MSAT and (b) MGST: latitude and altitude are two independent variables of the model.

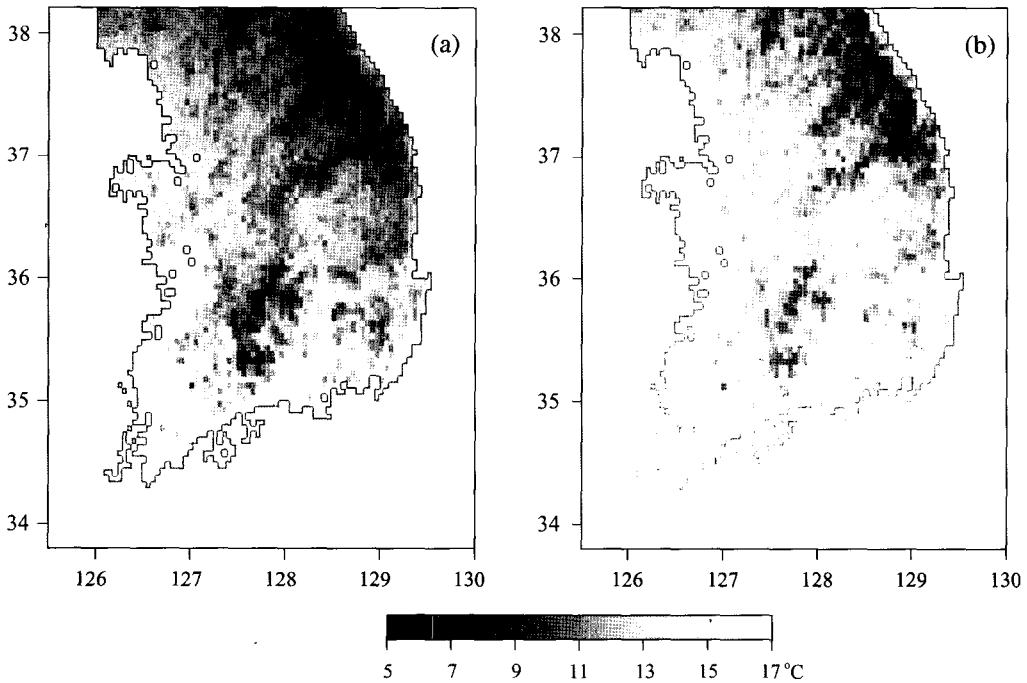


Fig. 8. Maps showing distribution of (a) MSAT and (b) MGST generated from the regression model by using Digital Mean Elevation Data (DMED) with a cell size of 1 km.

Fig. 7은 위 회귀식으로부터 계산된 추정치와 실제값을 비교한 것이다. MSAT와 MGST의 회귀모형의 결정계수는 각각 0.92와 0.94로 초기 모형에 비하여 크게 증가하였으며, 표준오차는 0.45와 0.34로 감소하였다. 이러한 분석 결과는 우리나라의 경우 위도와 고도가

MSAT와 MGST에 영향을 주는 주된 변수임을 보여주며, 따라서 식 (5)와 (6)의 회귀모형은 관측 자료가 없는 지역의 대기 또는 지면의 연평균 온도를 추정하는데 이용될 수 있다. Fig. 7에서 검은색 원으로 표시된 점은 회귀분석에서 제외된 관측소로 대도시와 울릉도

및 서귀포 관측소 등을 포함하며, 식 (5)와 (6)의 회귀모형을 적용할 경우 1~2°C 정도의 추정오차를 보인다. 따라서 이들 지역은 회귀모형 적용 시 도시화의 영향 또는 도시 지역의 지리적 특수성으로 인해 발생한 오차를 보정할 필요가 있다. 윤진일(2002)은 14개 기상관측소의 기온자료와 관측소가 위치한 지역의 인구변동 자료를 이용하여 도시화에 의한 승온 효과를 정량적으로 분석한 바 있다.

Fig. 8은 식 (5)와 (6)의 회귀모형을 통해 추정된 우리나라 MSAT 및 MGST의 분포도이다. 1 km의 격자 크기를 가지는 DMED (Digital Mean Elevation Data)를 이용하여 작성하였으며, 도시화에 의한 승온 효과는 고려되지 않았다.

3.2. 기온의 장기 추세

지구온난화에 관한 최근의 연구들은 지구의 평균기온이 19세기 말 이후 0.3~0.6°C/100yr 정도로 증가하고 있는 것으로 추정하고 있으며, 특히 Hulme *et al.* (1994)은 동아시아 지역의 기온이 지구 평균보다 다소 크게 상승하고 있음을 보여주었다. 이명인과 강인식(1997)은 20세기 초반부터 장기 관측이 이루어진 국내 5개 기상관측소의 기온 자료를 이용하여 한반도 기온의 시공간적 변동성을 고찰하였다. 이명인과 강인식(1997)에 의하면 한반도 기온은 지난 100년간 지구평균보다 다소 큰 0.5°C 정도로 상승하였으며, 대도시 관측소의 경우 도시화에 따른 승온 효과가 포함되면서 평균 기온에 편향을 주어 60년대 이후 급격한 상승경향을 나타낸다고 하였다.

58개 기상관측소에서 1981년부터 2002년까지 관측된 기온 자료를 이용하여 각 관측소의 22년간 장기 기온 변동 추세를 분석하였다. Fig. 9는 기온상승률이 가장 높게 나타난 수원관측소 기온 자료의 장기 변동 추세를 도시한 것으로 지난 20여 년간 평균 0.088°C/yr의 기온 상승이 발생하였음을 보여준다. 각 관측소에 대한 분석 결과는 Table 1과 같다. 1개 관측소를 제외한 57개 관측소의 기온상승률이 0.005~0.088°C/yr의 범위를 보이며, 평균과 표준편차는 각각 0.043°C/yr, 0.021°C/yr로 나타났다. 이러한 분석 결과는 지난 100년간의 지구온난화 연구 결과와 비교할 때 매우 높은 값이며, 이는 최근 20~30년 동안 온난화가 급격히 가속되고 있음을 시사한다. Fig. 10은 기온상승률의 공간적 분포를 도시한 것으로 서울 및 주변지역, 부산, 대구 등 대도시 지역에서 기온상승이 크게 나타나 이명인과 강인식(1997)의 연구와 같이 도시화에 따른 승온

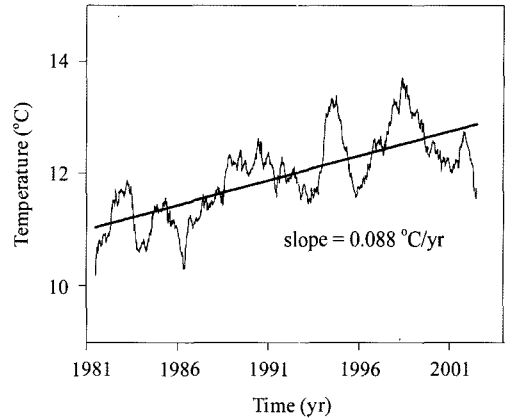


Fig. 9. Plot showing increasing trend of SAT measured at the Suwon station (1981-2002); the graph represents moving-averaged values with 365-day width.

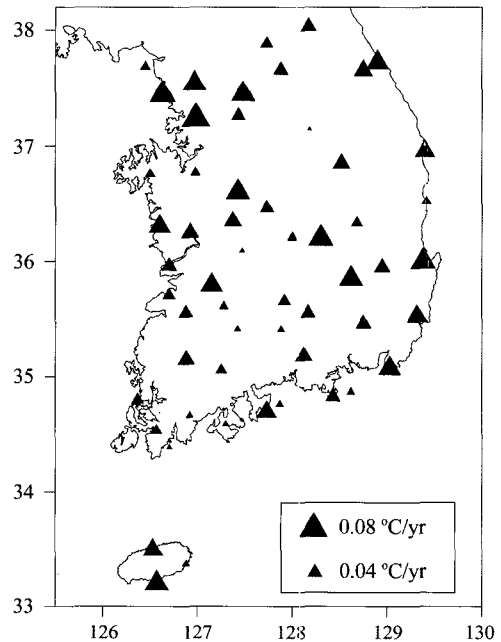


Fig. 10. Recent (1981-2002) temperature increase rates (°C/yr) of SAT measured at KMA stations; the rates are calculated from the linear regression of 365-day moving averaged data over the period of measurements.

효과와 온난화가 동시에 진행되면서 기온상승률을 증가시킨 것으로 해석된다.

3.3. 기상 조건에 따른 지면온도 변화

전술한 바와 같이 GST는 천부 지반의 온도를 결정하므로 식생의 발아 및 성장과 같은 생태학적 과정,

토양 미생물의 활동, 천부 지반의 열에너지를 추출하는 지열펌프 시스템의 설계 등에 매우 중요한 변수로 작용한다. GST는 주로 SAT와 지면 일사량과 같은 기상조건에 의해 지배되지만, 토양의 조성, 함수비, 반사율(albedo)과 같은 물리적 성질, 지면의 고도, 기울기, 방향과 같은 지형학적 변수 및 식생의 잎면적지수(leaf area index: LAI) 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 결정된다. 따라서 이러한 변수들의 효과를 고려하여 GST의 시공간적 변화를 예측하는 경험모델(empirical model)에 대한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다(Zheng *et al.*, 1993; Kang *et al.*, 2000).

기상관측소의 경우 지면온도 관측지점이 수평면에 위치하며, 잔디로 덮여있어 지형학적 변수와 식생의 조건은 비교적 동일한 것으로 예상되므로 GST는 주로 SAT, 지면 일사량 및 토양의 물성에 의해 결정될 것으로 판단된다. 기상관측소 토양의 물성에 관한 정보는 현재까지 체계적으로 조사된 바 없다. 하지만 본 논문의 저자들은 현재 기상관측소 토양의 물성 분석을 위한 목적으로 연구 과제를 수행하고 있으며, 이를 통하여 15개 관측소에서 채취한 1m 두께의 불교란 시료에 대한 토양 물성 자료가 확보될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3과 같이 MGST는 일사의 영향으로 MSAT보다 약 2°C 높게 나타났다. 본 절에서는 SAT, 일사량, 강수량, 적설량과 같은 기상조건에 계절적 변화가 GST에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 11a는 춘천 관측소에서 최근 관측된 일사량의 변화를 도시한 것으로 태양의 남중고도에 비례하는 연주기 변동과, 운량과 같이 지면에 도달하는 일사량을 감소시키는 기상 조건이 변화하면서 발생한 불규칙적인 변동 성분을 동시에 볼 수 있다. Fig. 11b는 동일 관측소에서 측정된 GST와 SAT의 차이를 도시한 것으로 Fig. 11a의 일사량 변화와 동조하는 경향을 보인다. 춘천 관측소의 연평균일사량(mean solar radiation: MSR)은 12.58 MJ/m²·day이며, 그림과 같이 6~7월에 30 MJ/m²·day까지 증가하며 12~1월에 10 MJ/m²·day이하로 감소하여 최대 일사량과 최소일사량이 3배 정도 차이로 연주기 변동을 보이는 것으로 나타났다. 일사량이 최고점에 이르는 6월말 무강수기에 GST와 SAT의 차이는 5°C 내외까지 증가하며, 이후 점차 감소하여 동절기에 낮은 값을 보이거나 GST가 SAT보다 낮게 관측되기도 한다.

Fig. 12는 GST가 SAT보다 1.5°C 이상 낮게 관측된 날의 월별 상대빈도수를 도시한 것으로, 주로 늦가을에서 초봄까지의 동절기에 빈도수가 높은 것으로 나

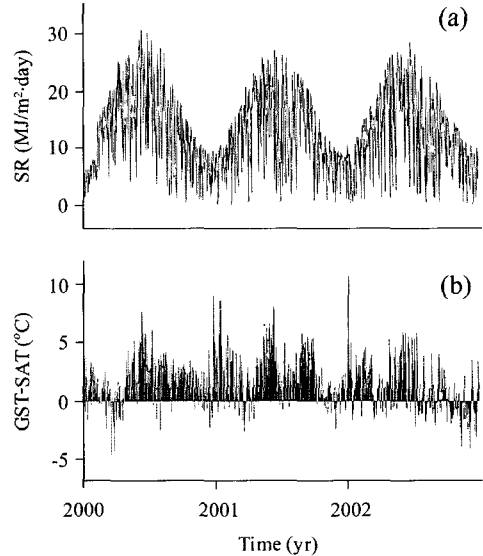


Fig. 11. Annual variation of (a) solar radiation (SR) and (b) the difference between GST and SAT measured at the Chuncheon station.

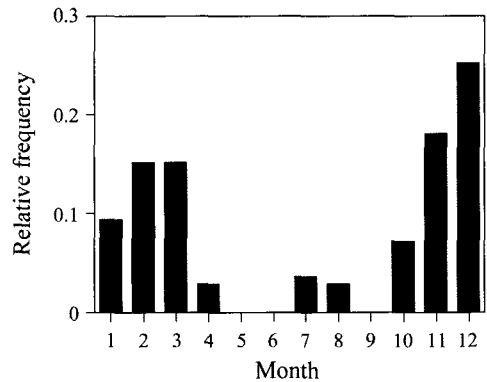


Fig. 12. Relative frequency of the number of days when GST is lower than SAT by 1.5°C or more.

타났다. 이 시기에는 Fig. 11a와 같이 하절기에 비하여 일사량이 감소하여 지면 가열에 의한 온도 상승이 약화되며, 대기가 건조해지면서 일몰 후 지구복사에 의한 지면의 온도 하강이 크게 발생한다. Fig. 13a는 춘천 관측소에서 11월말에서 12월초까지 관측된 SAT와 GST의 6시간 간격 관측 자료(3, 9, 15, 21시)를 도시한 것으로, 야간에 지구복사에 의한 지면의 냉각이 강하게 발생하였음을 잘 보여준다.

Fig. 13b는 춘천 관측소에서 하절기에 측정된 GST와 SAT의 일변화이며, 강수가 GST 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 강우가 없는 맑은 날의 경우

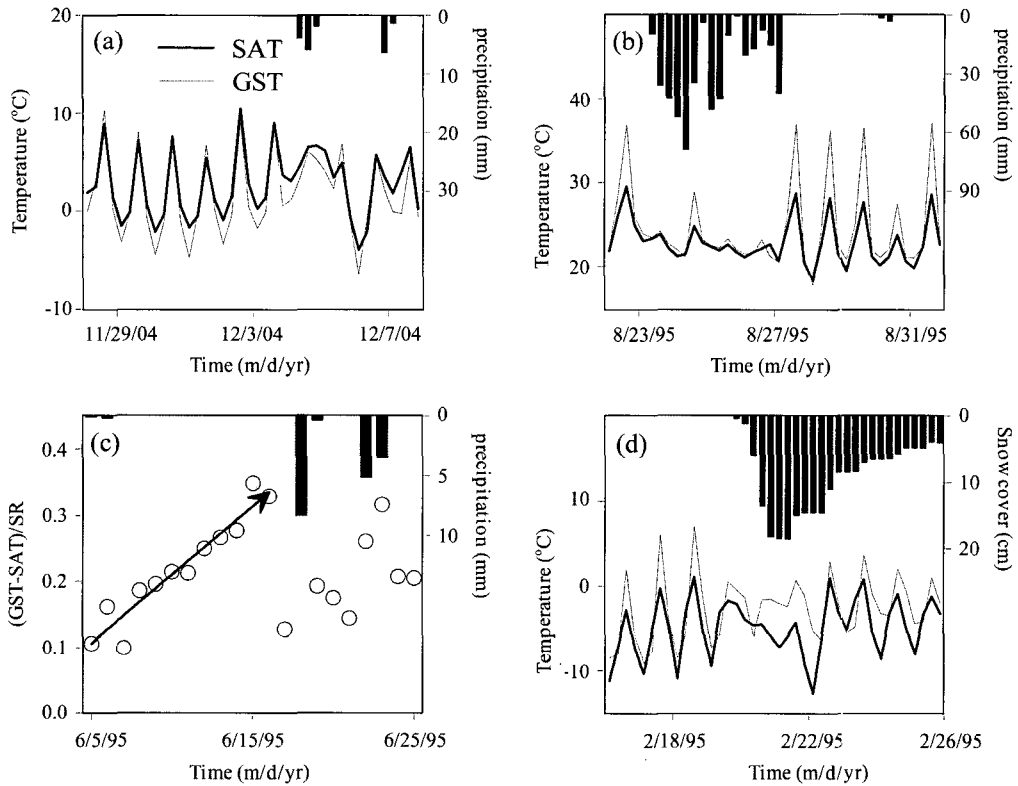


Fig. 13. Variations of GST as affected by (a) terrestrial radiation (Chuncheon station), (b) precipitation (Chuncheon station), (c) (GST-SAT)/SR (Chuncheon station), and (d) snow cover (Daegwallyeong station).

GST와 SAT의 차이는 일사의 영향으로 15시 관측 자료에서 8°C 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. 13c는 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 Fig. 11a와 같이 일사량이 연중 최고조에 달하므로 지면의 수분 증발량이 매우 높고 결과적으로 지면 토양의 함수비가 빠르게 감소한다. 따라서 이 시기에 관측된 GST 일사

계수의 선형적인 증가는 함수비 감소에 의한 토양 열용량의 감소에 기인한 것으로 해석된다.

Fig. 13d는 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 스펀지 파형의 일변화가 교란되며, 2월 22일의 관측 자료에 나타난 바와 같이 GST는 SAT에 비해 6시간 정도의 시간 지연이 발생하면서 일변화를 보인다. 이는 20cm 정도의 적설이 대기과 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 mm²/sec이므로(Carlsaw and Jaeger, 1959), 1차원 열전도 방정식의 해(구민호 등, 2003)를 이용하여 20cm 심도에서의 일변화에 대한 위상차를 계산하면 6.2시간이다. 따라서 적설 시 관측되는 GST와 SAT의 시간 지연은 열전도 모델에 의한 계산 결과와 잘 부합한다.

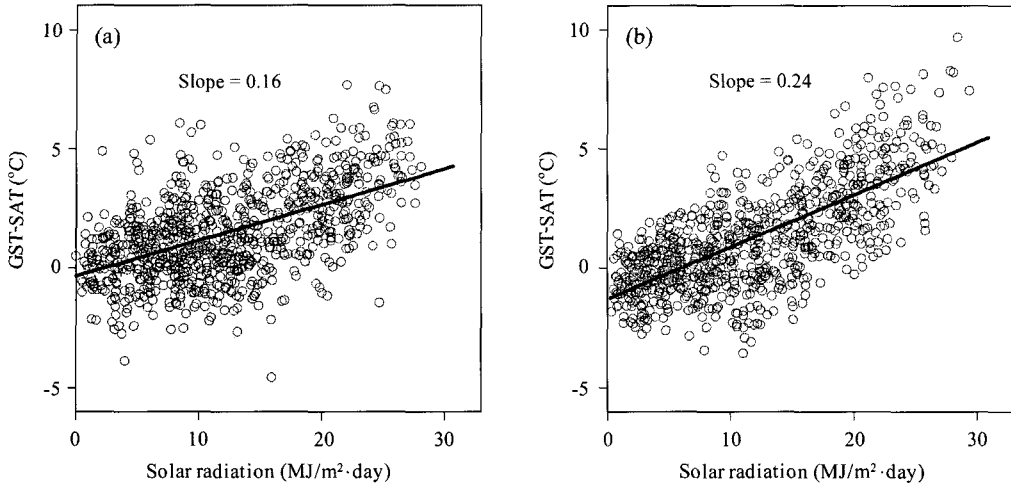


Fig. 14. Linear relationship between solar radiation and the difference between GST and SAT: (a) Chuncheon station and (b) Jeju station.

이상의 분석 결과를 종합하면, GST는 주로 SAT와 일사량에 의하여 결정되지만 강수 및 증발에 의한 토양의 열용량 변화, 적설에 의한 대기와 지표면 차단 효과, 지구복사에 영향을 줄 수 있는 대기의 조건 변화 등이 복합적으로 작용하여 GST가 달라진다고 할 수 있다. 일사량이 GST와 SAT의 온도차에 미치는 영향을 정량화하기 위해 일사량이 관측된 19개 기상관측소 자료를 이용하여 선형회귀분석을 수행하였다. Fig. 14는 춘천 및 제주 관측소에 대한 분석 결과이며, 19개 관측소의 분석 결과는 Table 2와 같다. 단위일사량 증가에 따른 GST-SAT의 증가량은 0.11(대관령)~0.26°C(제주)의 범위를 보이며 평균 0.18°C이다. 또한 Table 2와 같이 증가량이 클수록 상관계수도 크게 나타났다. 대관령 관측소의 온도 증가율이 가장 작게 나타난 것은 관측소의 지면고도가 높아 지구복사에 의한 냉각 효과가 다른 관측소에 비하여 상대적으로 크게 발생하였기 때문인 것으로 추정된다. 관측소 별 증가율의 변화는 주로 지면의 열용량 변화와 관련된 토양의 물리적 특성 차이에 기인한 것으로 짐작된다.

지표면 부근의 토양은 고상의 광물 입자, 액상의 물 및 기상의 공기로 구성되므로 각 성분의 구성비(volume fraction)에 따라 열용량이 달라지며, 다음 식과 같이 가산혼합법칙(additive mixing law)에 의하여 계산될 수 있다(de Vries, 1963).

$$\rho c = (1-n)\rho_m c_m + \theta \rho_w c_w + (n-\theta)\rho_a c_a \quad (7)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열, n 은 공극률, θ 는 함수

Table 2. Slope and correlation coefficient of the linear regression between solar radiation and GST-SAT for 19 KMA stations.

Station	MSR	MSAT	MGST	slope	r
100	12.38	7.01	8.95	0.11	0.32
101	12.58	11.28	12.88	0.16	0.55
105	12.46	13.43	14.20	0.13	0.44
108	11.43	12.91	13.62	0.20	0.61
112	13.08	12.55	14.21	0.18	0.63
114	12.75	11.65	13.59	0.18	0.59
119	12.07	12.43	13.48	0.13	0.45
129	13.18	12.05	13.81	0.15	0.56
131	12.91	12.8	13.98	0.11	0.42
133	13.59	13.04	14.66	0.17	0.57
135	11.94	11.84	14.09	0.18	0.56
138	13.31	14.55	16.22	0.24	0.64
143	12.85	14.36	15.63	0.22	0.63
146	12.16	13.66	15.31	0.19	0.57
156	13.06	13.94	15.56	0.20	0.64
159	12.97	14.96	16.68	0.26	0.71
165	14.07	13.99	16.10	0.15	0.62
184	12.41	16.06	17.61	0.24	0.76
192	13.51	13.38	15.24	0.14	0.57

비를 나타내며, 아래 첨자 m, w, a 는 각각 토양을 구성하는 기질(matrix), 물, 및 공기를 나타낸다.

공기의 열용량(0.00031)은 물(1 cal/cm³·K)에 비해 매우 작으므로 식 (7)에서 공기의 열용량 성분은 거의 무시될 수 있으며, 따라서 토양의 열용량은 함수비와 선형적인 비례 관계를 가진다. 천부 토양의 공극률은 일반적으로 0.3~0.5사이의 값을 가지므로, 강수와 증

발에 의하여 천부 토양의 함수비가 지속적으로 변할 경우 열용량은 2~3배 정도의 차이가 생길 수 있다(구민호 등, 2003). Fig. 13c에 나타난 GST 일사계수의 변화는 이를 뒷받침하는 간접적인 증거이다. 한편 강수에 의한 함수비의 시간적 변화는 토양의 투수성과 깊은 관련이 있으며, 이는 주로 토양 기질의 입자 크기에 의하여 결정된다. 세립질 토양일수록 투수성이 불량하여 강수의 침투(infiltration) 및 투과(percolation)에 의한 함수비 변화가 빠르게 발생하지 않는다.

따라서 기질의 열용량과 공극률이 동일한 토양이라도 기질 입자의 크기에 따라 강수 및 증발산에 의한 함수비 변화가 다르게 발생하며, 결과적으로 열용량의 시간적 변화가 달라질 수밖에 없다. 결론적으로 Table 2와 같이 일사량 변화에 따른 GST-SAT의 증가율이 관측소 별로 다르게 나타난 것은 주로 지면의 열용량 변화와 관련되며, 이는 토양의 공극률, 토양을 구성하는 기질의 열 물성과 입자 크기에 의하여 결정될 것으로 추론되므로 이에 관한 실험적 연구가 요망된다. 본 논문의 저자들은 기상관측소에서 채취한 불교란 토양 시료의 수리 및 열 물성에 관한 연구를 수행하고 있으며, 이를 통하여 지면을 구성하는 토양의 물성이 GST 변화에 미치는 영향을 정량적으로 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

58개 기상관측소에서 최근 22년간 관측한 강수량, 적설량, 일사량, 기온 및 지면온도 등의 기상청 전산 자료를 이용하여 국내 대기 및 지면온도의 시공간적 변화를 분석하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 위도 및 고도 자료를 이용하여 MSAT와 MGST를 추정할 수 있는 다중선형회귀모형을 제시하였다. 회귀모형의 신뢰도를 높이기 위하여 회귀오차가 크게 나타난 대도시 및 도서 지역 관측소 자료를 제거하면서 분석을 수행하였다. MSAT 및 MGST 회귀모형의 결정계수는 각각 0.94와 0.92로 매우 높게 나타났으며, 이는 위도 및 고도가 국내 MSAT 및 MGST를 결정하는 주요 변수임을 보여준다. 따라서 본 연구를 통하여 제시된 회귀모형은 관측 자료가 없는 지역의 MSAT 및 MGST를 추정하는데 유용하게 이용될 수 있다. 특히 MGST는 지열펌프 시스템 설계의 주요 입력 변수인 지중온도를 대신하는 값으로 이용될 수 있으므로 제시된 MGST 회귀식의 실용적 가치는 상당하다고 할 수 있다.

둘째, 기상관측소의 22년 기온 자료에 대한 추세 변동 분석 결과 1개 관측소를 제외한 57개 관측소의 기온상승률이 0.005~0.088°C/yr의 범위를 보이며, 평균은 0.043°C/yr로 매우 높게 나타났다. 이는 이명인과 강인식(1997)과 같이 최근 20~30년 동안 가속된 지구 온난화 및 도시화에 따른 승온 효과가 증첩되면서 기온 상승이 증폭된 것으로 해석된다.

셋째, GST의 변화는 주로 SAT 및 일사량에 의하여 결정되지만 강수 및 증발에 의한 토양의 열용량 변화, 적설에 의한 대기과 지표면 차단 효과, 지구복사에 영향을 줄 수 있는 대기의 조건 변화 등이 복합적으로 변동 요인으로 작용한다. 기상관측소 관측 자료를 통하여 이에 대한 정성적, 정량적 분석 결과를 제시하였다.

전술한 바와 같이 지표면 관측 자료가 없는 지역의 GST는 시추공에서의 온도검층 자료의 역산을 통하여 구할 수 있다. 송운호 등(2004)은 이미 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.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 심부 지열에너지 개발 사업 연구비 지원에 의해 수행되었다. 기상청 전산 자료를 제공하여 주신 공주대학교 대기과 학과 서명석 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 구민호, 김용제, 서만철, 서명석 (2003) 온도 시계열 자료를 이용한 국내 토양의 열확산계수 산정. 지질학회지, v. 39, p. 301-317.
- 김승욱, 서명석, 광중홀 (2005) 우리나라 지중온도 변동의 기후학적 특성. 한국지구과학회지, v. 26, p. 93-105.
- 김영복, 이승규, 김성태 (2000) 한국의 지온 예측과 지리적 영향 분석. 한국농업기계학회지, v. 25, p. 497-502.
- 손병후, 조정식, 신현준, 안형준 (2005) 지열원 열펌프 시스템의 냉·난방 성능 평가. 설비공학논문집, v. 17, p. 71-81.
- 송관철, 정영상, 김병인, 안윤수, 엄기태 (1992) 기상청 지온 측정 토양의 물리적 성질과 겉보기 열확산 계수 산정. 한국토양비료학회, v. 25, p. 220-230.
- 송운호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이성근, 이종철, 이병태, 박인화, 이태중, 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, p. 1-8.
- 안형준 (2002) 저온지열을 이용한 지열히트펌프시스템. 터널과 지하공간, v. 12, p. 229-236.
- 윤진일 (2002) 우리 나라의 기온상승-도시효과인가 지구 온난화인가. 한국농림기상학회지, v. 4, p. 58-63.
- 이기우 (1992) 지열이용 히트펌프기술. 공기조화·냉동공학, v. 21, p. 306-315.
- 이명인, 강인식 (1997) 한반도 기온변동성과 온난화. 한국기상학회지, v. 33, p. 429-443.
- 이용범 (2004) 지열의 일반적 고찰. 바이오시스템공학, v. 29, p. 475-480.
- 이용범, 조성인, 강창호, 정인규, 이충근, 성제훈, 정선옥, 김영복 (2005) 지열 열교환시스템 개발을 위한 지중 열유동 특성분석. 바이오시스템공학, v. 30, p. 185-191.
- 이화룡 (2004) 지열에너지 활용 학교 계획. 한국교육시설학회지, v. 11, p. 100-108.
- 한정상 (2005) 지열 열펌프시스템의 개념과 기술수준. 지열에너지저널, v. 1, p. 10-18.
- 한정상, 한규상, 한희상, 한찬 (2005) 지열펌프 냉난방 시스템. 도서출판 한림원.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959) Conduction of heat in solids. 2nd(ed.), Oxford University Press, London, 510p.
- Cermak, V. and Bodri, L. (2001) Climate reconstruction from subsurface temperatures demonstrated on example of Cuba. Physics of The Earth and Planetary Interiors, v. 126, p. 295-310.
- de Vries, D.A. (1963) Thermal properties of soils. In: van Wijk, W.R.(ed.) Physics of Plant Environment. North-Holland, Amsterdam, p. 210-233.
- Dorofeeva, R.P., Shen P.Y. and Shapova, M.V. (2002) Ground surface temperature histories inferred from deep borehole temperature-depth data in Eastern Siberia. Earth and Planetary Science Letters, v. 203, p. 1059-1071.
- Gosselin, C. and Mareschal, J.C. (2003) Variations in ground surface temperature histories in the Thompson Belt, Manitoba, Canada: environment and climate changes. Glob. Planet. Change, v. 39, p. 271-284.
- Huang, S., Pollack, H.N., Wang, J. and Cermak, V. (1995) Ground surface temperature histories inverted from subsurface temperatures of two boreholes located in Panxi, SW China. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, v. 12, p. 113-120.
- Hulme, M., Zhao, Z.C. and Jiang, T. (1994) Recent and future climate change in East Asia. Int. J. Climatol., v. 14, p. 637-658.
- Kang, S., Kim, S., Oh, S. and Lee, D. (2000) Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. Forest Ecology and Management, v. 136, p. 173-184.
- 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.
- Lachenbruch A.H. and Marshall B.V. (1986) Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. Science, v. 234, p. 689-696.
- Lewis, T. (1998) The effect of deforestation on ground surface temperatures. Glob. Planet. Change, v. 18, p. 1-13.
- 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.
- Pollack, H.N., Demezhko, D.Y., Duchkov, A.D., Golovanova, I.V., Huang, S., Shchapov, V.A. and Smerdon, J.E. (2003) Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. J. Geophys. Res., v. 108, p. 2180.
- Rajver, D., Safanda, J. and Shen, P.Y. (1998) The climate record inverted from borehole temperatures in Slovenia. Tectonophysics, v. 291, p. 263-276.
- 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.
- Smerdon, J.E., Pollack, H.N., Cermak, V., Enz, J.W., Kresl, M., Safanda, J. and Wehmiller, J.F. (2004) Air-ground temperature coupling and subsurface propagation of annual temperature signals. J. Geophys. Res., v. 109, D21107.
- Veliciu, S. and Safanda, J. (1998) Ground temperature history in Romania inferred from borehole temperature data. Tectonophysics, v. 291, p. 277-286.
- Zheng, D., Hunt Jr., E.R. and Running, S.W. (1993) A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. Climate Research, v. 2, p. 183-191.