

한국의 지중온도를 이용한 기후변화연구

이 영민¹⁾, 김 형찬²⁾, 송 윤호³⁾

Climate change in Korea inferred from subsurface temperatures

Youngmin Lee, Hyoung Chan Kim, Yoonho Song

Key words : paleoclimate(고기후), global warming(온난화), ground surface temperature(지표온도), borehole temperature (시추공온도), surface air temperature(지표대기온도)

Abstract : On long time scale and over large areas, ground surface temperatures (GSTs) track surface air temperatures (SATs). Additionally, GST changes penetrate into the subsurface and are recorded as transient temperature perturbation to the background thermal filed. Therefore, climate change can be reconstructed from borehole temperature measurements.

We present GST history reconstructed from temperature measurements in a borehole at Pocheon. The result shows that GST had a cold period in the late 19th century and then increased by about 2 K to 1990. GST history matches well with surface air temperatures measured from 1907 to 2001 at the Seoul Meteorological Station and GST history reconstructed from temperature measurements in three boreholes at Ulsan.

Nomenclature

T: temperature, K
t: time, sec
k: thermal diffusivity, m²/sec
z: depth, m
T_m: temperature at a step m, K
t_m: time at a step m, sec

subscript

erfc : complementary error function

1. 서 론

지구 대륙의 평균지표온도는 과거 약 500년동안 약 1K 가 상승하였는데, 그 중 약 50% 는 20세기에 들어 상승한 것이다. 인간이 기후변화에 어떠한 영향을 미치는 가에 대한 논의를 위해서는 인간의 인구가 급속히 늘기 전의 기후와 급속한 산업화가 되기 전의 기후가 어떠한냐에 대한 질문이 선행되어야 한다. 과거의 온도를 알 수 있

는 가장 좋은 도구는 기상관측소에서 기상예보를 위해 측정된 지표대기온도(surface air temperature, SAT) 이다. 이 지표대기온도로 최근 약 100년 전까지의 온도변화를 알 수 있다. 그러나 기상관측소에서 측정된 지표대기온도는 19세기 말 이전의 자료가 존재하지 않기 때문에 긴 시간의 기후변화를 복원하는데 한계가 있다. 과거의 지표온도변화를 알 수 있는 또 하나의 도구는 지표온도(ground surface temperature, GST) 이다. 넓은 지역과 긴 시간범위에서 지표온도(GST)는 지표대기온도(SAT)에 따라 변화하고 지하로 전파되어 지중온도로 기록이 된다. 따라서 지중온도를 분석하면 지표온도(GST)의 변화를 복

- 1) 한국지질자원연구원/서울대학교 기초과학연구원
E-mail : ylee@kis.kigam.re.kr
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)868-3358
- 2) 한국지질자원연구원
E-mail : khc@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3074 Fax : (042)868-3358
- 3) 한국지질자원연구원
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)868-3358

원할 수 있는 것이다. Lachenbruch and Marshall⁽¹⁾이 1986에 알라스카의 시추공에서 측정한 온도자료를 복원하여 과거 100년동안 이 지역의 온도가 약 2-4K 정도 상승하였다는 논문을 발표하였다. 그 이후 지중온도를 이용해서 지표온도를 복원하는 연구는 전 세계의 지열학자들 사이에서 많이 행해지고 있다.

2. 이론

지표온도의 변화에 따른 지중온도의 변화는 열전도만 일어난다는 가정하에 다음과 같이 1차원의 확산방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

T 는 온도이고(K), κ 는 암석의 열확산율(thermal diffusivity: m^2/sec), z 는 깊이(m), 그리고 t 는 시간(sec)이다. 암석의 열확산율은 깊이에 따라 변하나, 큰 변화가 없으면 지각의 평균 열확산율로 사용할 수 있다. 현재로부터 거슬러 올라간 시간 t 에 지표면 온도가 순간적으로 ΔT 만큼 변화했을 때, 지중온도에 대한 식 (1)을 풀면 다음과 같이 표현된다.

$$T(z, t) = \Delta T \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \quad (2)$$

여기서 erfc 는 complementary error function이다. 지표온도(GST)의 전파깊이는 주로 지중암석의 열확산율에 의존하는데, 20년 전, 200년 전, 그리고 500년 전에 일어난 지표온도(GST)의 대부분의 변화는 100m, 200m, 그리고 300m 깊이까지에서의 현재의 지중온도에 나타난다. 따라서, 200-300년 단위의 기후변화는 200m 정도의 시추공 온도자료로 복원할 수 있으며, 시추공이 깊을수록 오래 전의 기후변화의 복원이 가능하다.

만약 지표면의 온도가 과거의 시간 t_m 에 M step으로 변하는 함수 (T_m) 이라면 지중온도의 변화는 다음과 같은 식에 의하여 구해질 수 있다.

$$T(z, t) = \sum_{m=1}^M T_m \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t_m}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t_{m-1}}}\right) \right) \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 현재의 시추공에서 측정한 지중온도($T(z, t)$)를 가지고 과거의 지표면의 온도(T_m)을 구하는 데는 역산(inversion)이 주로 사용된다.

3. 한국의 지중온도를 이용한 기후복원

동북아시아는 지리적으로 전지구적인 기후변화를 연구하는데 매우 중요한 지역이다. 그럼에도 불구하고 동북아시아에서의 기후변화는 연구가 많이 되고 있지 않은 형편이다. 특히 한국에서는 지중온도를 이용한 기후변화연구가 최근에

와서야 극 소수의 연구자에 의해 행해졌다.^{(2),(3)}

이 장에서는 이미 발표된 한국에서의 지중온도를 이용한 기후변화 연구에 대해 소개를 하고 또한 경기도 포천의 시추공온도를 이용해 복원한 기후변화에 대한 결과에 대해서도 소개를 할 것이다.

3.1 Okubo 그룹에 의한 고기후 복원⁽²⁾

Okubo와 그의 연구 그룹은 서울, 가평, 울산, 포항 네 지역에서 측정된 시추공온도를 이용하여 기후를 복원하였다(그림 1)⁽²⁾.

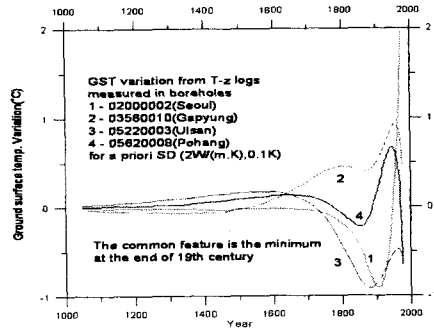


Fig. 1 Paleoclimate reconstruction at Seoul, Gapyong, Ulsan, Pohang⁽²⁾

그림1을 보면 1600년 이후 4곳의 지표온도변화가 매우 다르게 나타나는데 이것은 실제로 4곳이 서로 다른 기후변화를 겪었다는 것보다 깊이에 따른 불균질한 암석의 열전도도 때문인 것으로 해석된다. 그럼에도 불구하고 4곳에서 복원한 지표온도는 공통적으로 19세기 후반에 온도가 낮은 시기가 있었고, 그 이후 온도가 상승하였다는 공통점이 있다. 특히 서울에서 복원된 지표온도를 보면 19세기 말 이후에 현재까지 약 3K가 상승하였는데 이는 서울의 기상관측소에서 1907년 이후에 약 100년간 측정된 지표대기온도와 비교해도 비슷한 결과를 보여준다.

3.2 Goto 그룹에 의한 고기후 복원⁽³⁾

Goto와 그의 연구 그룹은 한국의 남동부에 있는 울산지역의 세 개의 시추공에서 측정된 온도를 이용해 과거의 지표온도를 복원하였다.⁽³⁾ Okubo의 결과⁽²⁾와 달리 울산지역의 시추공온도를 이용하여 복원한 과거의 지표온도는 서로 매우 비슷한 결과를 보여준다(그림 2).

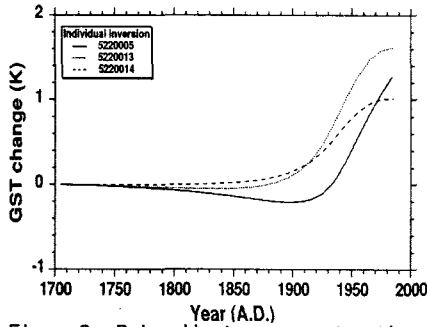


Fig. 2 Paleoclimate reconstruction at Ulsan⁽³⁾

1900 년경에 온도가 상승하기 시작하여 현재까지 약 100년 동안 온도가 1.5K 정도 상승하였다. 또한 Goto는 울산지역에서 복원한 지표온도와 중국 (ice core, tree ring, 호수퇴적물, 역사기록)과 몽고(tree ring)지역에서의 여러 가지 proxy 를 이용해 복원한 고기후를 비교하여 동북아시아에 고기후의 공간적인 변화가 있다는 결론을 내렸다.⁽³⁾

3.3 포천의 지중온도를 이용한 기후변화

경기도 포천군 일동면 기산리에 있는 시추공에서 측정된 온도를 이용하여 고기후를 복원하였다 (그림 3). 약 80년 전부터 온도가 상승하기 시작하여 현재까지 약 2K 정도의 온도가 상승하였다 (그림3의 점선). 그림3에서 실선의 고주파를 보이는 온도 변화는 포천에서 가까운 서울의 기상관측소에서 1907년 이후에 측정된 지표대기온도의 변화를 나타낸 것이다.

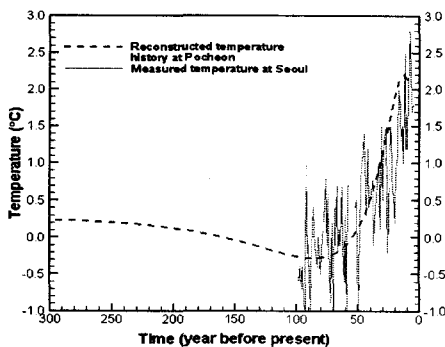


Fig. 3 Paleoclimate reconstruction at Pocheon

시추공온도로 복원한 지표온도(그림3의 점선)에서는 고주파의 지표온도변화가 나타나지 않고 있는데 그 이유는 고주파를 가지는 지표대기온도

가 지중으로 전파될 때 지표대기온도의 고주파 부분이 고주파를 제거하는 필터 역할을 하는 지구 물질에 의해 제거되기 때문이다. 하지만 시추공온도로 복원된 지표온도와 기상관측소에서 측정한 지표대기온도를 비교하면 서로 비슷한 온도 상승 형태를 지닌다(그림 3).

4. 결 론

포천의 시추공에서 측정된 지중온도를 이용하여 복원한 지표온도는 과거 약 80년 동안 2K 정도가 상승하였다. 이는 Goto에 의해 울산에서 측정된 시추공온도를 이용해 복원된 과거의 지표온도⁽³⁾와 비슷한 결과이고, 또한 서울의 기상관측소에서 1907년 이후 측정된 지표대기온도와도 잘 일치하는 결과이다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업 '심부지열에너지 개발 사업' (OAA2003001)의 지원으로 수행되었다.

References

- [1] Lachenbruch, A. H., and Marshall, B. V., "Changing climate : geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic," Science, Vol. 234, pp. 689-696, 1986.
- [2] Okubo, Y., Kim, H. C., Uchida, Y., and Safanda, J., 2002, Borehole data and climate reconstruction in Korea, in Geothermal/Dendrochronological paleoclimate reconstruction across eastern margin of Eurasia (eds. M. Yamano, T. Nagao, and T. Sweda), Proceedings 2002 International Matsuyama Workshop.
- [3] Goto, S., Kim, H. C., Uchida, Y., and Okubo, Y., "Reconstruction of the ground surface temperature history from the borehole temperature data in the southeastern part of the Republic of Korea, Journal of Geophysics and Engineering, Vol. 2, pp. 312-319.