

시추공 온도자료를 이용한 고기후 연구에 대한 개관

이영민^{1,2} · 김형찬¹ · 송윤호¹

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²서울대학교 기초과학연구원

A Review on the Paleoclimate Change Inferred from Borehole Temperatures

Youngmin Lee^{1,2}, Hyoung Chan Kim¹ and Yoonho Song¹

¹Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²The Research Institute of Basic Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

To properly interpret and define climatic warming trends of the last 100~150 years, climatic changes over the past several centuries must be constrained. High resolution surface air temperatures (SATs) to reconstruct global temperature trends extend back only to the late of 19th century. Fortunately, on long time scale and over large areas, ground surface temperatures (GSTs) track SATs. GST changes penetrate into the subsurface and are recorded as transient temperature perturbation. Therefore, borehole temperatures can be used to recover climate change over the last millennium in an area; paleoclimate change inferred from borehole temperatures can be used to interpret global warming over the last century, little ice age, and medieval warm period.

Key words : climate change, SAT, GST, borehole temperature, global warming

19세기말부터 진행된 지구온난화를 규정하기 위해서는 기상관측목적의 지표대기온도(Surface air temperature; SAT) 측정이 시작된 19세기말 이전의 온도 자료가 필요하다. 다행히 과거의 지표온도(Ground surface temperature; GST)가 지중으로 전파되어 기록된 시추공 온도자료로 일반적으로 과거 약 1,000년전까지의 기온변화에 대한 정보를 얻을 수 있다. 시추공 온도자료로부터 복원된 과거의 기온변화의 정보는 19세기말부터 시작된 지구온난화를 규정하고 또한 그 이전에 있었던 소빙하기(Little Ice Age)와 중세온난기(Medieval Warm Period) 같은 기후변화를 알아내는데 유용하게 사용될 수 있다.

주요어 : 기후변화, 지표대기온도, 지표온도, 시추공 온도, 지구온난화

1. 서 론

기후변화는 사회적, 경제적, 환경적인 면에서 중요성을 지니기 때문에 근래에 와서 중요성이 매우 부각되고 있는 분야이다. 기후변화를 특징짓우는 가장 중요한 인자중의 하나는 온도의 변화이다. 최근 약 100년 전까지의 온도변화는 기상예보를 위해 기상관측소에서 측정된 지표대기온도(Surface air temperature; SAT)의 정보로 알 수 있다. 그러나 기상관측소에서 기록된 지표대기온도는 19세기말 이전의 자료가 존재하지 않기 때문에 긴 시간 동안의 기후변화를 복원하는데 한

계가 있다. 예를 들면, 지표대기온도만으로는 지난 약 100년 동안의 온도의 상승이 온실효과에 의해 발생한 지구온난화때문인지, 아니면 19세기 후반부의 상대적으로 낮았던 온도가 정상온도로 되돌아가는 것인지 구분할 수가 없다(Deming, 1995).

다행스럽게 긴 시간범위와 넓은 지역에서 지표온도(Ground surface temperature; GST)는 지표대기온도(SAT) 변화에 따라 변하고 이러한 지표온도(GST)의 변화는 지하로 전파되어 지중온도로 기록이 된다(Chapman *et al.*, 1992; Deming and Borel, 1995; Beltrami *et al.*, 2005). 이때 지하내부에서 올라오는

*Corresponding author: ylee@kis.kigam.re.kr

지열에 의해 지표근처의 온도가 영향을 받을 수 있으나, 시추공온도자료를 이용한 고기후연구의 일반적인 관심대상인 1,000년 정도의 시간범위내에서는 지하내부에서 올라오는 지열을 일정한 것으로 간주하여 무시하여도 된다(Pollack *et al.*, 2003).

시추공에서 온도를 측정할 때 과거의 지표온도(GST) 변화가 중요하다는 것은 20세기 초부터 인식이 되어왔다(Lane, 1923; Hotchkiss and Ingersoll, 1934). 그러나 지구내부로부터 올라오는 지열유량을 측정하는 목적으로 시추공에서 온도를 측정할 경우 지표의 온도변화에 의한 지중온도의 교란은 관심의 대상이 아니라 제거해야하는 잡음(noise)으로 간주되어 주로 기후보정(climate correction)에 의해 제거되었다(Benfield, 1939; Bullard, 1939; Birch, 1948). 약 20년전에 Lachenbruch and Marshall (1986)이 미국 알라스카의 시추공에서 측정된 온도자료를 이용하여 약 100년 전 이후로 온도가 2~4K 정도 상승하였다는 논문을 발표한 이후에 지열연구자들 사이에서 시추공에서 측정된 온도자료가 지구온난화를 밝히는데 중요한 역할을 할 수 있다는 공감대가 형성되어 전세계적으로 지금까지 많은 연구가 되어 오고 있다.

본 논문에서는 시추공 온도자료를 이용하여 과거의 지표온도의 변화를 복원하는 원리와 각국의 연구결과 등을 제시함으로써 시추공 온도자료를 이용한 고기후 연구를 소개하고자 한다.

2. 지표온도의 변화에 따른 지중온도의 변화에 대한 이론식

지표온도의 변화에 따른 지중온도의 변화는 1차원 확산방정식으로 표현될 수 있다.

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

T 는 온도(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 상수로 간주될 수 있다.

현재로부터 거슬러 올라간 시간 t 에 지표면 온도의 순간적인 변화 ΔT 에 대한 지중온도에 대해 식 (1)을 풀면 다음과 같이 표현된다(Carlsaw and Jaeger, 1959).

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

여기서 erfc 은 complementary error function 이다.

지표온도(GST)의 전파깊이는 지표온도 변화의 주기와 진폭 그리고 지중암석의 열확산율에 의존한다. Fig. 1은 식 (2)를 이용하여 지표면의 온도가 16°C에서 18°C로 2K 만큼 갑자기 증가했을 때 이로 인한 지중온도의 변화를 각 시간별로 나타낸 것이다. 암석의 평균확산율은 $10^{-6} m^2/sec$ 로 가정하였다. Fig. 1(a)는 시간에 따른 지중온도변화를 우리나라 평균 지온경사를 (25°C/km)을 더하여 그린 것이고, Fig. 1(b)는 지표온도의 변화에 따른 지중온도의 변화만 그린 것이다. Fig. 1을 보면 시간이 길어질수록 지표온도가 지하로 더 깊이 전파된다는 것을 알 수 있다. 20년전, 200년전, 그리고 500년전에 일어난 지표온도(GST)의 대부분의 변화는 100 m, 200 m, 그리고 300 m 깊이까지에서의 현재의 지중온도에 나타난다. 따라서 200~300년 단위의 기후변화는 200 m 정도의 시추공 온도자료로 복원할 수 있다는 것을 알 수 있으며, 시추공이 깊을수록 오래 전의 기후변화의 복원이 가능하다.

만약 지표면의 온도가 과거의 시간 t_m 에 M 스텝으

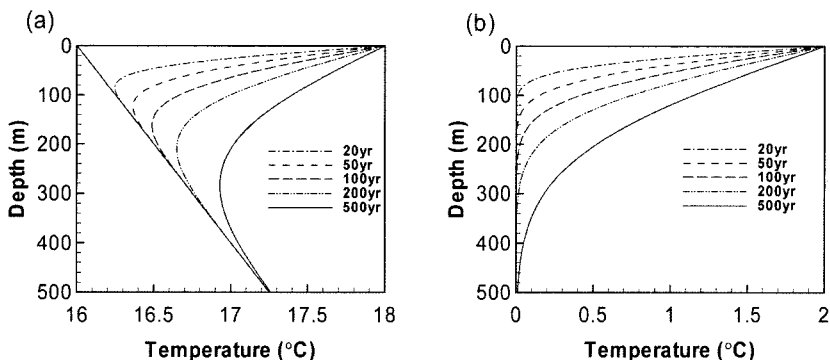


Fig. 1. Downward penetration of an instantaneous 2 K surface temperature increase at various times after the event. (a) Curves are superimposed on average geothermal gradient (25°C/km) with depth. (b) Curves represent the perturbation only.

로 변하는 함수(T_m)라면 지중온도 변화는 다음과 같은 식에 의하여 구해질 수 있다.

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

윗 식을 이용하여 측정된 지중온도자료를 이용하여 과거의 지표면의 온도변화를 계산할 수 있고, 또한 역산(inversion)방법을 이용하여 과거의 지표면의 온도변화를 추정할 수 있다. 지중온도자료를 이용하여 역산방법으로 과거의 지표온도변화를 알아내는 것은 Vasseur *et al.* (1983)에 의해 시작되었고, 그 이후 많은 역산방법들이 개발되었으나 현재는 세가지 역산방법이 주로 사용되고 있다. 첫번째 방법은 Lachenbruch and Marshall (1986)이 사용한 ramp와 step 함수를 이용한 역산방법인데, 특징은 다른 방법에 비해 간단하다는 것이다. 그리고 두번째 방법은 singular value decomposition (SVD)를 사용한 방법(Beltrami and Mareschal, 1991; 1992)이다. 마지막 세번째 방법은 functional space inversion (FSI)인데 Shen and Beck (1991)에 의해 개발이 되었다. Shen *et al.* (1996)는 SVD를 이용한 방법과 FSI를 이용한 방법이 거의 비슷한 결과를 낸다는 것을 증명하였다.

Fig. 2는 식(3)를 이용하여 과거의 지표온도의 변화에 따라 지중온도가 어떻게 변한다는 것을 보여 준다. Fig. 2(a)는 100년 전에 온도가 갑자기 0.5K, 1.0K, 1.5K 증가한 것을 나타내며, Fig. 2(b)와 (c)는 이에 따라 지중온도가 어떻게 변하는 것을 보여주고 있다. 100년전의 온도가 가장 많이 증가했을 때(1.5K)가 지중온도가 가장 많이 증가했다(Fig. 2(b), (c)). 그리고 100년전에 변한 온도는 지하 약 150m 까지 전파된다는 것을 알 수 있다(Fig. 2(b), (c)). 실제 시추공 온도

자료를 이용한 고기후연구에서는 Fig. 2(c)와 같은 깊이 에 따른 지중온도를 측정하여 식(3)를 이용하여 Fig. 2(a)와 같이 과거의 지표온도를 알아내는 것이다.

3. 시추공온도를 이용한 기후변화연구의 사례

북반구 전역에서 획득된 시추공 온도자료를 이용하여 지표온도를 복원한 결과를 보면 AD1,500부터 현재 까지 북반구전체의 평균 지표온도가 0.8°C에서 1.0°C 까지 변하였다(Pollack *et al.*, 1998; Huang *et al.*, 2000; Harris and Chapman, 2001). 각 지역에 있는 시추공들에서 측정된 지중온도를 이용해 복원한 과거의 지표온도변화는 지역마다 차이를 보이는 데, 그 이유는 기후변화가 지역마다 다르게 나타날 수 있기 때문이며, 또한 시추공들이 산업화된 지역 부근에 있을 때 인간의 산업활동에 영향을 받아 온도가 다른 곳에서 보다 높게 나올 수 있기 때문이다. 다음은 각 대륙 마다의 시추공 온도자료를 이용한 기후변화연구의 예 들이다.

3.1. 아시아

Okubo *et al.* (2002)은 서울, 가평, 울산, 포항의 네 지역에서 측정된 시추공 온도자료를 이용하여 과거의 지표온도변화를 밝혀내었는데 이들 네 시추공에서 복원된 지표온도변화는 서로 차이를 보이고 있다. 이는 깊이에 따른 불균질한 암석의 열전도율 때문에 생긴 것으로 간주된다(Okubo *et al.*, 2002). 비록 지리적으로 다른 네 지역에서 복원된 지표온도가 불일치한 것으로 나타나더라도 네 시추공 모두에서 19세기 후반에 온도가 낮은 시기가 있었고 그 이후 현재까지 온난화가 진행되었다는 공통된 결과를 보여준다. 특히 서울

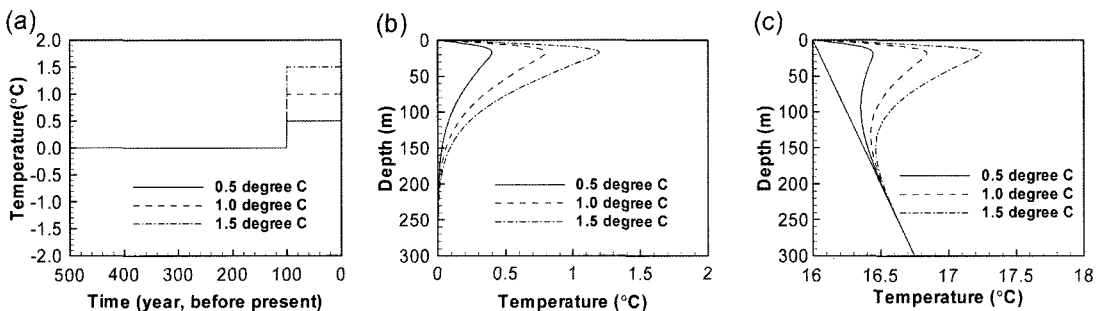


Fig. 2. (a) Ground surface temperature (GST) history. Temperature increased abruptly 100 years ago. (b) subsurface temperature perturbations due to the abrupt increase of temperature in (a). (c) temperature perturbations are superimposed on the average geothermal gradient (25°C/km).

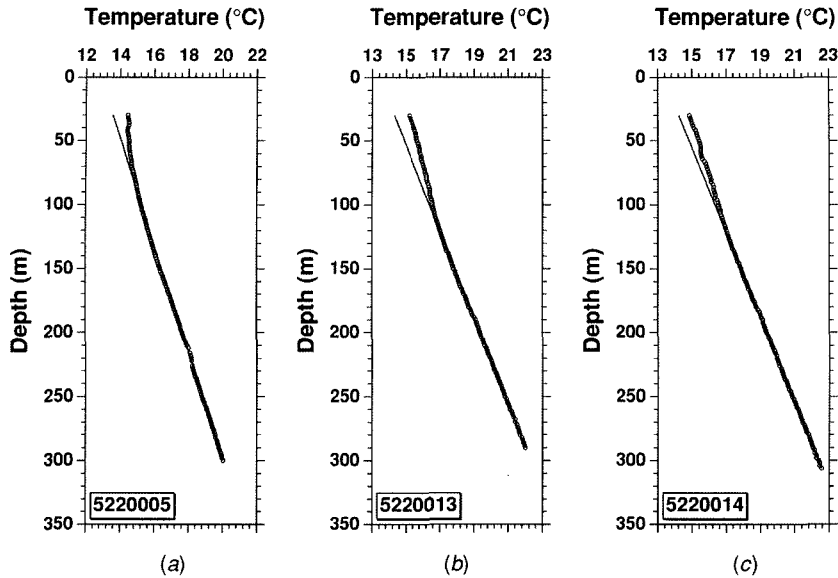


Fig. 3. Temperature profiles in selected boreholes in Ulsan, The open circles represent measured temperatures. The solid lines are background thermal regime calculated from temperatures at depths below 180 m(after Goto *et al.*, 2005b).

에서의 복원된 지표온도를 보면 낮은 온도를 보인 19세기 이후에 3K정도의 온도가 더 상승하였다. 이러한 3K 온도상승은 서울에서 기상관측소에서 1907년부터 측정된 지표대기온도와 비교해도 같은 결과가 나온다. 이것은 도시화가 급속히 일어나는 지역에서 흔히 볼 수 있는 열섬효과(heat island effect)가 반영된 것이라 생각된다.

Goto *et al.* (2005b)는 울산지역 세 곳에서 측정된 지중온도를 이용하여 지표온도(GST)를 복원하였다(Fig. 3, Fig. 4). Okubo *et al.* (2002)와 마찬가지로 19세기 말경에 온도가 낮은 시기가 있었고 그 이후 현재까지 온난화가 지속적으로 진행이 되었다. 구체적으로 19세기까지의 온도가 낮은 시기 이후 1980년까지 약 1.5K의 지표온도상승이 있었다. 또한 Goto *et al.* (2005b)는 울산지역에서 복원된 지표온도와 중국(ice cores, 나무의 나이테, 호수퇴적물, 역사기록)과 몽고(나무의 나이테)지역에서 여러가지 대안방법(proxy)을 이용해 복원된 지표온도와 비교를 하여 동북아시아에 기후의 공간적 변화가 있다는 결론을 내렸다.

일본의 비와호수(Lake Biwa) 가의 790 m 깊이의 시추공으로부터 측정된 시추공 온도자료로 지금부터 3000년 전까지의 지표온도를 복원하였다(Goto *et al.*, 2005a). 결과를 보면 8세기부터 12세기까지 소위 중세 온난기(Medieval Warm Period)라 불리는 따뜻한 시기가 있었고, 그 후 15세기에서 18세기까지 소빙하기

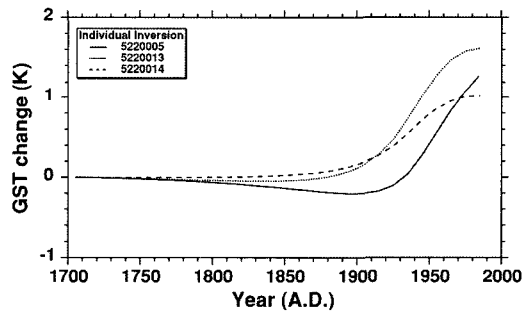


Fig. 4. Results of GST history reconstructed from individual borehole temperatures (after Goto *et al.*, 2005b).

(Little Ice Age)라 불리는 온도가 낮은 기간과 그 이후 온도의 상승이 지금까지 계속되고 있다. 그러나 이곳의 과거 지표온도의 변화를 보면 다른 곳의 결과보다 매우 큰 온도의 변화폭을 보이고 있다. 기원전 10세기에서 10세기까지 지표면의 온도가 3.5K 증가했고, 12세기부터 17세기까지 4K가 감소했으며, 그 이후로 현재까지 5K가 증가했다. Goto *et al.* (2005a)는 이러한 큰 폭의 온도변화를 순수한 기후변화와 더불어 비와호수의 수면의 변화에 의한 환경변화 때문이라고 설명하였다.

Huang *et al.* (1995)은 중국남서부의 Panxi에서 200km 떨어진 곳에 있는 두 개의 시추공에서 측정된 온도를 분석하여 AD1,600부터 AD1,900까지 온도가 약 1°C 상승하였다는 것을 알아내었다.

3.2. 북미

북미지역은 시추공온도를 이용한 고기후연구가 초기부터 진행이 되어왔다(예, Lachenbruch and Marshall, 1986; Chisholm and Chapman, 1992; Wang and Lewis, 1992; Deming, 1995; Deming and Borel, 1995; Harris and Chapman, 1995; Putnam and Chapman, 1996; Gosselin and Mareschal, 2003, Majorowicz *et al.*, 2004). 시추공 온도자료로 복원한 과거의 지표온도변화를 보면 북미대륙의 동부에서 19세기 중반부터 현재까지 약 1.0K에서 1.5K 정도의 온도가 상승했고, 서부에서는 고위도의 알래스카지역을 제외하고는 전체적인 온도증가가 동부보다 적다(Deming, 1995). 캐나다의 고위도 지역(60°~82°N)은 18세기부터 온도가 상승하기 시작하여 현재까지 약 2K 정도의 지표면 온도가 상승하였다(Majorowicz *et al.*, 2004).

3.3. 유럽

유럽은 북미대륙과 마찬가지로 시추공 온도자료를 이용한 고기후학 연구가 활발하게 전개된 곳이다(예, Mareschal and Vasseur, 1992; Clauser and Mareschal, 1995; Kukkonen and Šafanda, 1996; Bodri and Cermak, 1998; Rajver *et al.*, 1998; Correia and Šafanda, 1999; Golovanova *et al.*, 2001; Šafanda and Rajver, 2001; Pollack *et al.*, 2003; Bodri and Dovenyi, 2004). Pollack *et al.* (2003)은 러시아전역에서 101개의 시추공에서 측정된 온도자료를 가지고 과거의 지표온도를 복원하였다. 러시아에서는 과거 500년동안 1K정도의 온도가 상승하였고, 그 중 50%는 20세기에 상승하였고, 70~80%정도는 19세기와 20세기에 상승하였다. 프랑스 중부지역에서 측정된 시추공 온도자료로부터 획득된 고기후자료는 프랑스 중부지역이 (1) AD1,100경에 온난화의 최고점에 다다랐고, (2) AD1,400과 AD1,500 사이에 냉각이 시작되었으며(소빙하기), (3) AD1,800 정도에 온난화가 다시 시작되어 그 이후에 냉각과 온난화가 일어났다. 그리고 프랑스 중부지역에서의 지난 1,000년동안의 지표온도의 변화의 폭은 1.5K 이다(Mareschal and Vasseur, 1992). 독일 남동부와 체코 서부에서 측정된 시추공 온도자료를 분석해 나온 과거 기온변화는 (1) AD1,750~AD1,800로부터 AD1,930~AD1,950까지 냉각기(0.85K가 낮음)가 있었고, (2) 그 이후에 주기가 짧은 냉각기와 온난기가 현재까지 지속되었다(Clauser and Mareschal, 1995). Correia and Šafanda (1999)는 포르투갈에서 측정된 시추공 온도자료

를 가지고 과거의 지표면온도를 복원하였는데, 그 결과는 18세기 후반부터 온난화가 시작되어 1940년대에 온난화의 최고점에 도달할 때까지 0.5~0.6K의 온도 상승이 있었고, 그 이후 1980년대까지 0.2K의 냉각기가 현대까지 지속되고 있다는 결과를 얻었다.

유럽에서는 심부 시추공에서 측정된 온도자료를 이용하여 100만년 전까지 지표온도를 복원하였다(Clauser *et al.*, 1997; Šafanda and Rajver, 2001). 깊이가 9.1 km에 이르는 독일의 KTB 심부 시추공에서 과거의 100만년 전까지의 지표면온도를 복원 하였는데(Clauser *et al.*, 1997), 결과를 보면 BC40,000 경에 온난화가 시작되어 온도가 10K 정도 상승하였고, 이 온난화는 BC3,000 경에 최고조에 달한다. 또한 깊이가 1.5~2.4 km에 이르는 체코에 있는 3개의 시추공과 슬로베니아에 있는 2개의 시추공을 이용하여 복원한 과거의 지표면의 온도를 보면 19,000-10,000년 전에 온도가 가장 낮은 시기가 있었고, 그 이후에 6~15K 정도의 온도가 상승하였다(Šafanda and Rajver, 2001).

3.4. 그외 지역

쿠바에서 분석한 시추공 온도자료는 쿠바가 200~300년 전부터 현재까지 약 2~3K 온도가 상승하였다는 것을 보여주고 있다(Cermak *et al.*, 1992). 상승한 온도 2~3K는 순수하게 지구온난화에 의해 상승한 효과와 쿠바 전역에서 행해진 벌목에 의해 인위적으로 상승한 온도가 같이 포함되어 있다(Cermak *et al.*, 1992). Jones *et al.* (1999)은 남아프리카공화국에서 측정된 시추공 온도자료로 고기후를 복원하였는데, 약 170년 전에 19세기와 20세기의 급격한 온난화가 시작되었고 이 기간동안에 온도는 1.1 K가 상승하였다는 연구결과를 내었다. 또한 중앙아프리카의 자이레에서 시추공 온도자료로 고기후를 복원하여 40~90년 이전부터 지금까지 3~4K의 온도상승이 있었고 이 온도상승의 이유는 광산개발과 도시화에 의한 환경변화에 있다고 결론지은 바 있다(Sebagenzi *et al.*, 1992).

4. 토 의

고기후복원을 위해 사용하는 시추공의 수백 m 깊이에서 측정된 온도에는 과거의 지표온도변화외에도 많은 요인에 의한 온도교란이 같이 포함되어 있을 수 있다. 예를 들면, 시추에 의한 온도교란(Lachenbruch and Brewer, 1959; Jaeger, 1961; Edwardson *et al.*, 1962), 물의 주입과 양수에 의한 온도교란(Yamano and

Goto, 2005), 지하수의 유동에 의한 온도교란(Mansure and Reiter, 1979; Drury and Lewis, 1983; Drury *et al.*, 1984; Bodri and Cermak, 2005), 열전도도의 불균질(Huenges *et al.*, 1990; Clauser and Huenges, 1993; Pribnow *et al.*, 1993), 시추공주변의 지형(Lees, 1910; Jeffreys, 1937; Lachenbruch, 1968), 삼림 벌채(Cermak *et al.*, 1992; Lewis and Wang, 1992; Lewis and Wang, 1998), 도시화(Taniguchi and Uemura, 2005) 등의 요인들도 기후변화가 지중온도에 미칠 수 있는 비슷한 정도의 온도교란을 일으킬 수 있다. 따라서 지중온도에 대한 기후변화 외적인 영향이 최소화될 수 있도록 시추공을 선택하여 온도를 측정하여야만 순수한 지구온난화에 의한 과거의 지표온도의 변화를 복원을 할 수 있다. 역으로, 지구온난화 외적인 요인에 의해 교란된 지중온도자료를 이용하여 인간의 인위적인 활동이 지구온난화에 얼마만큼 영향을 미쳤는지와 그 시기를 시추공 온도자료로부터 복원된 과거의 온도로부터 알 수도 있다(예, Cermak *et al.*, 1992; Lewis and Wang, 1992; Tani-guchi and Uemura, 2005). 예를 들어, Lewis and Wang(1998)은 캐나다에서 시추공 온도자료를 이용하여 과거의 지표면의 온도를 복원하여 이로부터 과거에 있었던 벌목의 시기를 결정하였다.

동북아시아는 지리적으로 전지구적인 기후변화의 형태를 연구하는데 중요한 지역이다(Goto *et al.*, 2005b). 그럼에도 불구하고 이 지역에서는 기후변화에 대한 연구가 많이 되어 있지 않은 실정이다. 특히, 한국에서는 지중온도를 이용한 기후변화에 대한 연구가 현재까지 극소수에 불과하다(예, Okubo *et al.*, 2002; Goto *et al.*, 2005b). 그리고 일본과 중국도 북미대륙이나 유럽에 비하면 시추공 온도자료를 이용한 고기후연구가 활발히 전개되지 않고 있다. 이를 극복하기 위해 한국, 중국, 그리고 일본의 공동연구가 이루어진다면, 연구의 결과들은 전지구적 기후변화의 형태를 파악하는데 중요한 역할을 할 것이다.

국제지열류량위원회(International Heat Flow Commission, IHFC)는 전세계의 시추공 온도자료를 수집하고 이 자료를 이용하여 전지구적 고기후를 복원하고 있으나(Pollack and Chapman, 1993) 국제지열류량위원회에 의해 수집된 한국의 시추공온도자료는 없는 실정이므로 우리나라도 시추공온도자료를 제출하여 국제지열류량위원회에 참여하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결 론

시추공 온도자료를 이용한 고기후연구는 과거의 온도를 간접적으로 추정하는 대안방법(proxy; 예, 나무의 나이테, ice-core 등)과 달리 직접 과거의 지표온도(GST)를 산출하는 것이며, 깊은 시추공에서(780 m의 시추공, Goto *et al.*, 2005a) 획득한 온도자료는 과거 3000년 전까지의 지표온도를 복원하게 해 주었다. 이러한 시추공온도를 이용한 고기후연구는 지난 한 세기 동안 급속하게 진행된 지구온난화와 그외 많은 기후관련 문제들(예, 중세온난기, 소빙하기, 도시화의 산물인 열섬효과등)을 연구하는데 좋은 도구가 될 것이다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원의 기본사업 '심부 지열에너지 개발 사업'(OAA2003001)의 지원으로 작성되었다.

참고문헌

- Beltrami, H., Ferguson, G., and Harris, R. N. (2005) Long-term tracking of climate change by underground temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, v. 32, doi:10.1029/2005GL023714.
- Beltrami, H., and Mareschal, J. C. (1991) Recent warming in Eastern Canada: evidence from geothermal measurements. *Geophys. Res. Lett.*, v. 18, p. 605-608.
- Beltrami, H., and Mareschal, J. C. (1992) Ground temperature histories for Central and Eastern Canada from geothermal measurements: little ice age signature. *Geophys. Res. Lett.*, v. 19, p. 692-698.
- Benfield, A. E. (1939) Terrestrial heat flow in Great Britain. *Proc. R. Soc. London, Series A*, v. 173, p. 428-450.
- Birch, F. (1948) The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients. *Am. J. Sci.*, v. 246, p. 729-760.
- Bodri, L., and Cermak, V. (1998) Last 250 years climate reconstruction inferred from geothermal measurements in the Czech Republic. *Tectonophysics*, v. 291, p. 251-261.
- Bodri, L., and Cermak, V. (2005) Borehole temperatures, climate change and the pre-observational surface air temperature mean: Allowance for hydraulic conditions. *Global and Planetary Change*, v. 45, p. 265-276.
- Bodri, L., and Dovenyi, P. (2004) Climate change of the last 2000 years inferred from borehole temperatures: data from Hungary. *Global and Planetary Change*, v. 41, p. 121-133.
- Bullard, E. C. (1939) Heat flow in South Africa. *Proc. R. Soc. London, Series A*, v. 173, p. 474-502.
- Carlsaw, H. S., and Jaeger, J. C. (1959) *Conduction of heat in solids*. 2nd edn, Oxford University Press, Oxford.

- Cermak, V., Bodri, L., and Šafanda, J. (1992) Recent climate change recorded in the underground evidence from Cuba. *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 98, p. 219-223.
- Chapman, D. S., Chisholm, T. J., and Harris, R. N. (1992) Combining borehole temperature and meteorologic data to constrain past climate change. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 98, p. 269-281.
- Chisholm T. J., and Chapman, D. S. (1992) Climate change inferred from analysis of borehole temperatures: An example from western Utah. *J. Geophys. Res.*, v. 97, p. 14155-14175.
- Clauser, C., Giese, P., Huenges, E., Kohl, T., Lehmann, H., Rybach, L., Šafanda, J., Wilhelm, H., Windloff, K., and Zoth G. (1997) The thermal regime of the crystalline continental crust: Implications from the KTB. *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 18417-18441.
- Clauser, C., and Huenges, E. (1993) KTB thermal regime and heat transport mechanisms-current knowledge. *Scientific Drilling*, v. 3, p. 271-281.
- Clauser, C., and Mareschal, J.-C. (1995) Ground temperature history in central Europe from borehole temperature data. *Geophys. J. Int.*, v. 121, p. 805-817.
- Correia, A., and Šafanda, J. (1999) Preliminary ground surface temperature history in mainland Portugal reconstructed from borehole temperature logs. *Tectonophysics*, v. 306, p. 269-275.
- Deming, D. (1995) Climatic warming in North America: Analysis of borehole temperatures. *Science*, v. 268, p. 1576-1577.
- Deming, D., and Borel, R. A. (1995) Evidence for climatic warming in northcentral Oklahoma from analysis of borehole temperatures. *J. Geophys. Res.*, v. 100, p. 22017-22032.
- Drury, M. J., Jessop, A. M., and Lewis, T. J. (1984) The detection of ground water flow by precise temperature measurements in boreholes. *Geothermics*, v. 13, p. 163-174.
- Drury, M. J. and Lewis, T. J. (1983) Water movement within Lac du Bonnet Batholith as revealed by detailed thermal studies of three closely-spaced boreholes. *Tectonophysics*, v. 95, p. 337-351.
- Edwardson, M. J., Girner, H. M., Parkison, H. R., Williams, C. D., and Matthews, C. S. (1962) Calculation of formation temperature disturbances caused by mud circulation. *Journal of Petroleum Technology*, April, p. 416-426.
- Golovanova, I. V., Harris, R. N., Selezniova, G. V., and Stulc, P. (2001) Evidence of climatic warming in the southern Urals region derived from borehole temperatures and meteorological data. *Global and Planetary Change*, v. 29, p. 167-188.
- Gosselin, C., and Mareschal, J.-C. (2003) Recent warming in northwestern Ontario inferred from borehole temperature profiles. *J. Geophys. Res.*, v. 108, doi: 10.1029/2003JB002447.
- Goto, S., Hamamoto, H., and Yamano, M. (2005a) Climatic and environmental changes at southeastern coast of Lake Biwa over past 3000 years, inferred from borehole temperature data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 152, p. 314-325.
- Goto, S., Kim, H. C., Uchida, Y., and Okubo, Y. (2005b) 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*, v. 2, p. 312-319.
- Harris, R. N., and Chapman, D. S. (1995) Climatic change on the Colorado Plateau of eastern Utah inferred from borehole temperatures. *J. Geophys. Res.*, v. 100, p. 6367-6381.
- Harris, R. N., and Chapman, D. S. (2001) Mid-latitude (30°-60°N) climatic warming inferred by combining borehole temperatures with surface air temperature. *Geophys. Res. Lett.*, v. 28, p. 747-750.
- Hotchkiss, W. O., and Ingersoll, L. R. (1934) Post-glacial time calculations from recent geothermal measurements in the Calumet copper mines. *J. Geol.*, v. 42, p. 113-142.
- Huang, S., Pollack, H. N., and Shen, P.-Y. (2000) Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperature. *Nature*, v. 403, p. 756-758.
- Huang, S., Pollack, H. N., Wang, J.-Y., and Cermak, V. (1995) Ground surface temperature histories inverted from subsurface temperatures of two boreholes located in Panxi, SW China. *Journal of Southeastern Asian Earth Sciences*, v. 12, p. 113-120.
- Huenges, E., Burkhardt, H., and Erbas, K. (1990) Thermal conductivity profile of the KTB pilot borehole. *Scientific Drilling*, v. 1, p. 224-230.
- Jaeger, J. C. (1961) The effect of the drilling fluid on temperatures measured in boreholes. *J. Geophys. Res.*, v. 66, p. 563-569.
- Jeffreys, H. (1937) The disturbances of the temperature gradient in the earth's crust by inequalities in height. *Mon. Not. R. Astr. Soc. Geophys. Suppl.*, v. 4, p. 309-312.
- Jones, M. Q. W., Tyson, P. D., and Cooper, G. R. J. (1999) Modelling climatic change in South Africa from perturbed borehole temperature profiles. *Quaternary International*, v. 57/58, p. 185-192.
- Kukkonen, I. T., and Šafanda, J. (1996) Paleoclimate and structure: the most important factors controlling subsurface temperatures in crystalline rocks. A case history from Outokumpu, eastern Finland. *Geophys. J. Int.*, v. 126, p. 101-112.
- Lachenbruch, A. H. (1968) The effect of two-dimensional topography on superficial thermal gradients. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1203 E, U.S. Geological Survey.
- Lachenbruch, A. H., and Brewer, M. C. (1959) Dissipation of the temperature effect of drilling a well in arctic Alaska. *Geological Survey Bulletin*, 1083 C, U.S. Geological Survey.
- Lachenbruch, A., and Marshall, B. V. (1986) Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, v. 234, p. 689-696.
- Lane, E. C. (1923) Geotherms of the Lake Superior copper country. *J. Geol.*, v. 42, p. 113-122.
- Lees, C. H. (1910) On the shapes of the isogeotherms under mountain ranges in radio-active districts. *Proc. R. Soc. A.*, v. 83, p. 339-346.
- Lewis, T. J., and Wang, K. (1992) Influence of terrain on bedrock temperatures. *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 98, p. 87-100.

- Lewis, T. J., and Wang, K. (1998) Geothermal evidence for deforestation induced warming: Implications for the climate impact of land development. *Geophys. Res. Lett.*, v. 25, p. 535-538.
- Majorowicz, J. A., Skinner, W. R., and Šafanda, J. (2004) Large ground warming in the Canadian Arctic inferred from inversions of temperature logs. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 221, p. 15-25.
- Mansure, A. J., and Reiter M. (1979) A vertical ground water movement correction for heat flow. *J. Geophys. Res.*, v. 84, p. 3490-3496.
- Mareschal, J.-C., and Vasseur, G. (1992) Ground temperature history from two deep boreholes in Central France. *Paleogeog. Paleoclimat. Paleoecol.*, v. 98, p. 185-192.
- Okubo, Y., Kim, H.-C., Uchida, Y., and Šafanda, J. (2002) Borehole data and climate reconstruction in Korea, in *Geothermal/ Dendrochronological Paleoclimate Reconstruction across Eastern Margin of Eurasia*. Edited by M. Yamano, T. Nagao, and T. Sweda, *Proceedings 2002 International Matsuyama Workshop*.
- Pollack, H. N., and Chapman, D. S. (1993) Underground records of changing climate. *Scientific American*, June, p. 44-50.
- 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, doi: 10.1029/2002JB002154.
- Pollack, H. N., Huang, S., and Shen, P. Y. (1998) Climate change record in subsurface temperatures: A global perspective. *Science*, v. 282, p. 279-281.
- Pribnow, D., Williams, C. F., and Burkhardt, H. (1993) Well log derived estimates of thermal conductivity in crystalline rocks penetrated by the 4-km deep KTB Vorbohrung. *Geophys. Res. Lett.*, v. 20, p. 1155-1158.
- Putnam S. N. and Chapman, D. S. (1996) A geothermal climate change observatory: First year results from Emigrant Pass in northwest Utah. *J. Geophys. Res.*, v. 101, p. 21877-21890.
- Rajver, D., Šafanda, J., and Shen, P. Y. (1998) The climate record inverted from borehole temperatures in Slovenia. *Tectonophysics*, v. 291, p. 263-276.
- Šafanda, J., and Rajver, D. (2001) Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. *Global and Planetary Change*, v. 29, p. 241-257.
- Sebagenzi, M. N., Vasseur, G., and Louis, P. (1992) Recent warming in southeastern Zaire (Central Africa) inferred from disturbed geothermal gradients. *Paleogeog. Paleoclimat. Paleoecol.*, v. 98, p. 209-217.
- Shen, P. Y., Beck, A. E. (1991) Least squares inversion in borehole temperature measurements in functional space. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 19965-19979.
- Shen, P. Y., Pollack, H. N., and Huang, S. (1996) Inference of ground surface temperature history from borehole temperature data: a comparison of two inverse methods. *Global Planetary Change*, v. 14, p. 49-57.
- Taniguchi, M., and Uemura, T. (2005) Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan. *Physics and the Earth and Planetary Interiors*, v. 152, p. 305-313.
- Vasseur, G., Bernard, Ph., Van de Meulebrouck, J., Kast, Y., and Jolivet, J. (1983) Holocene paleotemperatures deduced from geothermal measurements. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, v. 43, p. 237-259.
- Wang, K., and Lewis, T. J. (1992) Geothermal evidence from Canada for a cold period before recent climatic warming. *Science*, v. 256, p. 1003-1005.
- Yamano, M., and Goto S. (2005) Long-term monitoring of the temperature profile in a deep borehole: Temperature variations associated with water injection, experiments and natural groundwater discharge. *Physics and the Earth and planetary interiors*, p. 326-334.