

## 지중열 활용에 따른 지중 온도변화 모니터링

이태중\*<sup>†</sup>, 심병완\*, 송윤호\*

\*한국지질자원연구원 지열연구실

### Monitoring of Subsurface Temperature Variation as Geothermal Utilization

Tae Jong Lee\*<sup>†</sup>, Byoung Ohan Shim\*, Yoonho Song\*

\*Geothermal Resource Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

#### Abstract

Long-term temperature monitoring has been performed for ground heat exchanger at the Earthquake Research Center (ERC) building in Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM). For the 3 years of monitoring, overall temperature increases are observed at various depths within a borehole heat exchanger. But monitoring of ground temperature variation at the monitoring well beforehand showed that geothermal utilization is not the only source for the temperature increase. Because various kinds of sources can cause the ground temperature change, more thorough investigation should be followed.

**Key words** : Geothermal(지열), Long-term monitoring(장기 모니터링), ground heat exchanger, ground temperature(지중 온도), Earthquake research center(지진연구센터)

#### 1. 서론

21세기가 시작되던 2000년 서울의 미국 대사관 건물에 지열 냉난방 시스템이 처음 설치된 이래로, 현 정부의 저탄소 녹색성장의 기조에 발맞추어 국내 지열 냉난방 시스템의 보급 및 설치용량은 매년 1.5배 이상의 성장을 지속하고 있으며, 2008년 말 현재 지열 냉난방 시스템의 총 설치용량은 100 MWt를 돌파한 것으로 나타나고 있다(2008년 신·재생에너지보급통계, 에너지관리공단). 이러한 지열 냉난방 시장의 급속한 성장은

에너지관리공단을 통한 일반 보급사업, 지방 보급사업 및 각종 융자 정책 등 정부의 적극적인 보급·지원 정책에 힘입은 바 크며, 그 결과로 최근에는 중원대학교와 같이 정부 지원을 받지 않고도 자체자금으로 지열 냉난방시스템을 설치하는 사례도 보고되고 있다. 이는 신재생에너지에 대한 사회적인 인식 확대와 지열 냉난방 시스템의 경제적 가치가 결합되어 나타나는 시너지효과로 분석되며 향후 이러한 성장은 당분간 지속될 것으로 전망되고 있다.

이러한 지열 냉난방 시스템의 급속한 보급·확산의 이면의 일각에서는 아직 국내 지질환경에서 지중열교환에 따른 지중 환경 변화나 지속가능한 이용에 대한 철저한 연구와 검증이 이루어지지 않은 상태에서 지열시스템의 보급 및 확산이 이루어지고 있다는 우려가 있는 것도 사실이다.

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel: +82-42-868-3051, Fax: +82-42-868-3413

E-mail: megi@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 4월 12일

심사일 : 1차 2010년 4월 15일, 2차 4월 28일

채택일 : 2010년 5월 20일

선진국의 경우, 지열시스템의 장기 가동에 따른 지중 온도변화(Rybach et al.<sup>[7][8]</sup>, Khan et al.<sup>[6]</sup>)나 지중 열교환기에 의한 열간섭 영향 범위(Katsura et al.<sup>[4]</sup>), 경사 시추공에 의한 영향(Marcotte and Pasquier<sup>[5]</sup>) 등 지열자원의 지속가능한 활용을 위한 다양한 연구개발이 이루어져 왔으나 국내에서는 이에 대한 연구개발이 충분히 이루어지지 못한 것이 현실이다.

본 연구에서는 지열시스템의 가동에 따른 지중 온도 변화를 장기적으로 관측하고, 그 결과로부터 지열시스템의 지속가능성에 대하여 고찰하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 한국지질자원연구원 지진연구동에 설치된 수직밀폐형 지중열교환기에 온도모니터링 센서를 부착하고 지열 냉난방시스템의 가동에 따른 심도별 온도변화를 관측하고 그 변화를 고찰하였다.

## 2. 한국지질자원연구원 지진연구동 냉난방 시스템 개요

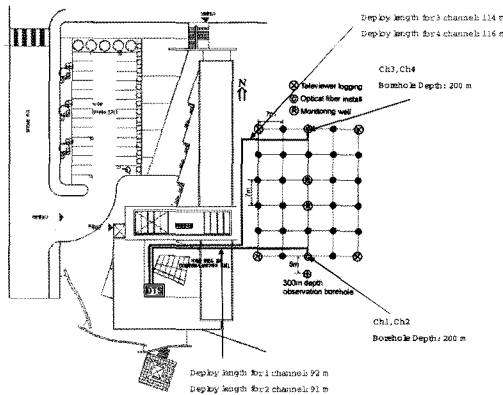


Fig. 1 Layout of borehole heat exchangers(BHE) and the monitoring system for Earthquake Research Center (ERC) building at Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM).

대전광역시 유성구에 위치한 한국지질자원연구원의 지진연구동은 국내 지진관련 연구의 메카로서 전국에 분포하는 지진관측소들로부터 수신되는 모든 지진기록이 모이는 종합상황실을 비롯하여 지진연구를 위한 실험실 및 연구실로 구성되어 있다. 건물은 층별로 약 700 ~ 900 m<sup>2</sup>로 연면적 2,435.4 m<sup>2</sup>의 3층으로 이루어져 있으며 2005년

말에 준공되었다. Fig. 1은 한국지질자원연구원 내의 지진연구동에 설치된 지열냉난방 시스템 및 모니터링 시스템의 계통도를 보인 것이다.

지중열교환기는 직경 165 mm, 심도 200 m의 시추공에 총 28개의 이중관방식(double U-tube type)을 설치하였으며, Fig. 1과 같이 6 × 5 배열로 설치하였다. 시추공간 간격은 공간 간섭을 고려하여 7 m로 설계하였다. 이때, CH-3, CH-4를 포함하는 가장 북쪽의 2줄, 10개의 지중열교환기는 2층을, 중간의 2줄, 8개는 1층을, CH-1 및 CH-2를 포함하는 가장 남쪽의 2줄, 10개는 3층을 담당하도록 배관이 이루어졌다.

지열냉난방시스템 가동에 따른 지중온도 변화를 모니터링하기 위하여 지하수 흐름의 하류에 해당하는 남쪽에 300 m 심도의 모니터링 시추공을 설치하였으며, 지중 열교환기 시추공 2개소에서는 주입수와 유출수의 온도측정을 위한 광케이블 센서(fiber optic cable sensor)를 U-tube 표면에 부착하였다(Fig. 2).

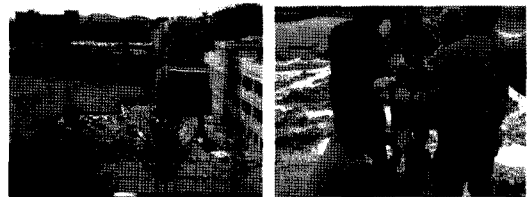


Fig. 2 Drilling for installation of BHE(left) and installation of fiber optic cable attached to the U-tube(right).

또한 300 m 관측공에서는 전구간에서 코어를 회수하여 물성 및 열물성을 측정하였고 온도 변화를 장기적으로 추정하기 위하여 광케이블 센서를 이용하여 0.5 m 간격으로 주기적으로 온도 측정을 실시하였다(Fig. 3). 측정된 시간별 온도-심도 곡선이 서로 다르게 나타나는 것은 시추로 인한 지하 온도의 교란 및 지하수 유동 등에 의해 생긴 것으로 생각되며, 0-20 m 구간에서 온도 변화가 심하게 나타나는 것은 지표 온도 변화에 대한 영향이 얕은 심도에서 크게 반영되기 때문이다. 그리고 심도별 고주파의 온도변화는 지반 내 열물성과 측정기기의 잡음(white noise)도 포함되어 있는 것으로 판단된다.

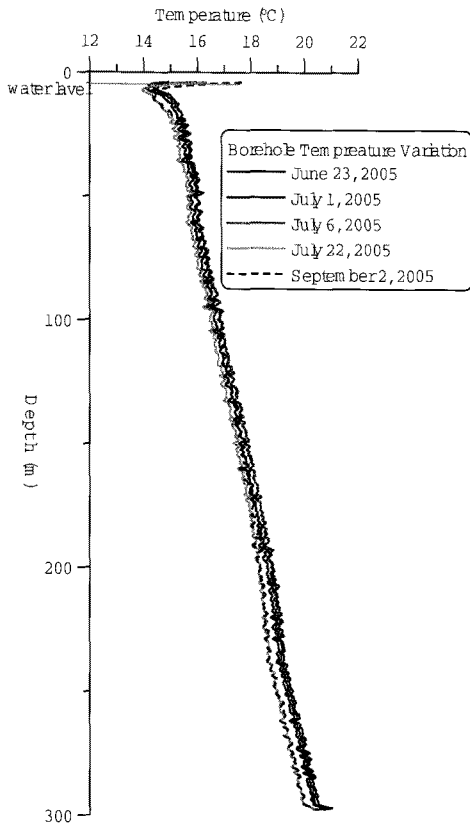


Fig. 3 Temperature profile measured by optical fiber sensor at the 300 m monitoring well (Shim et al.[1]).

### 3. 지질구조

지중열교환기의 설치가 이루어진 한국지질자원연구원 부지는 주라기 복운모 화강암이 분포하는 지역으로 본 연구에서는 암석의 열물성 등을 측정하기 위하여 300 m 심도의 시험시추를 실시하였다. 코어링을 통하여 확인한 결과, 지중 약 7 m 까지 충적층이, 그 하부 약 13.5 m까지 풍화암이, 그리고 그 하부에 기반암이 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 기반암은 일부 파쇄된 구간을 제외하면 매우 신선한 암반으로 구성되어 있으며 불연속면의 구간별 간격은 5 ~ 60 cm의 범위로 나타났다. 동일한 시추공에서 시추공 Televiewer 검층을 수행하고 단열구조에 대한 연장선을 해석한 결과 Fig. 5와 같이 절리구조가 발달된 것으로 나타났으며 지하 20 m 부근에 다수의 불연속면이 시추공과 교차하는 것을 알 수 있다.

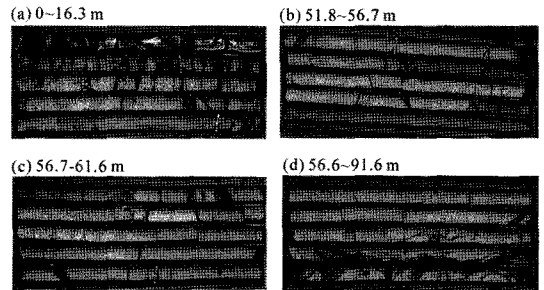


Fig. 4 Some examples of cores from 300 m monitoring well in KIGAM.

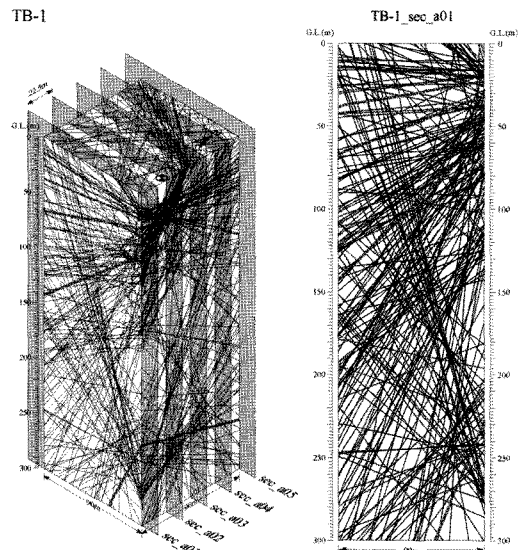


Fig. 5 Analysis of fractures intersecting the monitoring well (300 m) from televiewer logging (Shim et al.[1]).

시험시추공에서 회수된 Fig. 4와 같은 코어로부터 61개의 샘플을 채취하여 암석의 열전도도를 측정한 결과를 Fig. 6에 보였다. 동일한 화강암 시료이나 심도별로 암석을 구성하는 조암광물의 구성과 공극률 등이 다르기 때문에 Fig. 6과 같이 측정되는 열전도도는 2.5 ~ 3.63 W/m-K의 매우 큰 편차를 보인다. 이들의 평균은 2.98 W/m-K으로 나타났으며 인접한 200 m 심도 시추공에 설치된 지중열교환기를 이용하여 열응답 시험을 실시한 결과 3.28 W/m-K으로 나타나 열응답시험의 결과가 암석으로부터의 측정값보다 약 10% 높게 나타났다. 이러한 차이는 주로 공극이 물(약 0.6 W/m-K)로 채워진 경우와 공기(약 0.024 W/m-K)로 채워진 경우에 의한 차이로부터

발생되는 것으로(Woodside and Messmer<sup>[2]</sup>), 즉 암석 샘플을 이용하여 측정된 열전도도는 건조한 시료에 대한 측정값이고 열응답시험에 의한 결과는 현장에서 암석의 공극이 수분으로 채워진 상태에서 측정된 값이다. 이때, 이 지역의 지하수위는 약 4.2 m이다.

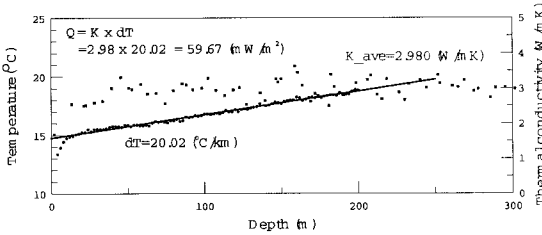


Fig. 6 Temperature profile and thermal conductivity of the rock samples from the 300 m monitoring well (Shim et al.<sup>[1]</sup>).

#### 4. 온도 모니터링

이상과 같은 지질환경에서 지중열교환기를 통한 지열의 활용에 따른 지중의 온도변화를 장기적으로 고찰하고자 U-tube에 부착된 광섬유센서를 이용하여 온도변화를 측정하였다. Fig. 7은 2005년 11월 6일 ~ 11월 8일까지 3일간의 지중열교환기내 온도변화를 심도별로 측정된 결과를 도시한 것이다. 이때 CH2는 지상에서 지중으로 주입되는 tube에, CH1은 지중에서 지상으로 환원되는 tube에 광섬유 센서를 부착하였다. 건물의 난방을 위해 지중 순환수의 순환이 이루어진 11월 6일의 경우, 상대적으로 차가운 순환유체가 지중으로 유입되기 때문에 CH2의 약 20 m 하부에서는 약 16.5°C의 온도를 보이다가 심부로 갈수록 점점 온도가 높아져 200 m 심도에서는 약 18.8°C로 높아진다. 다시, CH1을 따라 지상으로 상승하면서 점차 온도가 낮아져 20 m 심도에서는 약 17.5°C의 온도를 보인다. 온도센서를 U-tube의 외벽에 부착했기 때문에 이 온도를 순환수의 온도와 같다고 보기는 어려우나 이러한 측정결과로부터 순환수의 지중 순환에 의한 지중온도의 거동에 대한 정성적인 변화를 관찰할 수 있다.

난방 가동을 멈추고 다음날인 11월 7일의 온도 그래프에서는 유입관과 유출관 사이의 온도차 폭

이 난방 가동 중일 경우에 비해 작아졌으며, 시추공 내 온도가 전반적으로 낮아져 있음을 알 수 있다. 여기서 다시 하루가 지난 11월 8일의 온도 그래프에서 유입관과 유출관의 온도차는 사라졌으나 시추공내의 온도는 11월 6일에 비해 낮음을 알 수 있다. 즉, 11월 6일과 11월 8일의 CH2 그래프를 비교하면 약 15 m 심도에서 약 0.5°C의 차이가 보인다. 이러한 결과로부터 냉난방 가동이 멈춘 후 시추공내 온도는 2 ~ 3일이면 평형을 이루지만, 전반적으로 변화된 지중 온도는 회복하는데 더 많은 시간이 필요함을 말해준다.

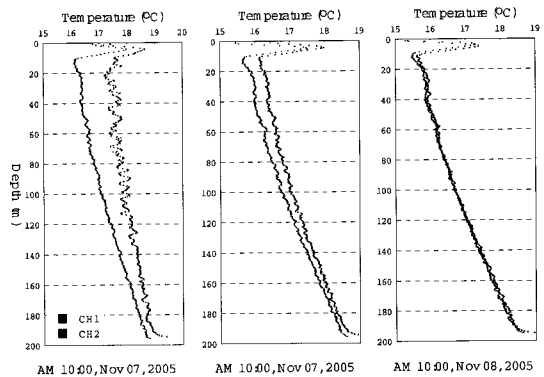


Fig. 7 Temperature profile measured by optical fiber sensors attached to the U-tubes within the borehole heat exchangers. CH1 and CH2 represents the temperatures due to down-going and up-coming flows, respectively.

Fig. 8은 Fig. 1에 보인 바와 같이 설치된 지중열교환기의 남쪽(CH1, CH2)과 북쪽(CH3, CH4)의 U-tube에 광섬유 센서를 이용하여 심도별로 장기 온도관측한 결과에서 대표적인 몇몇 심도에서의 온도변화를 보인 것이다.

그래프에서 2006년 11월-2007년 3월까지와 2008년 11월부터 2009년 3월까지의 난방기간에는 전체적으로 모든 심도에서 온도가 낮아져 있고 또한 2007년 6월-8월까지 냉방기간에는 전체적으로 지중 온도가 높은 것을 확인할 수 있으며 온도 변화폭이 큰 것으로부터 냉난방의 가동상태임을 확인할 수 있다. 특히, 2008년 3월과 7월의 경우 CH-3은 가동 상태, CH-1은 가동되지 않는 상태였음을 알 수 있다. 자료가 없는 구간은 온도모니터링 시스템을 다른 곳에서 사용했기 때문이다.

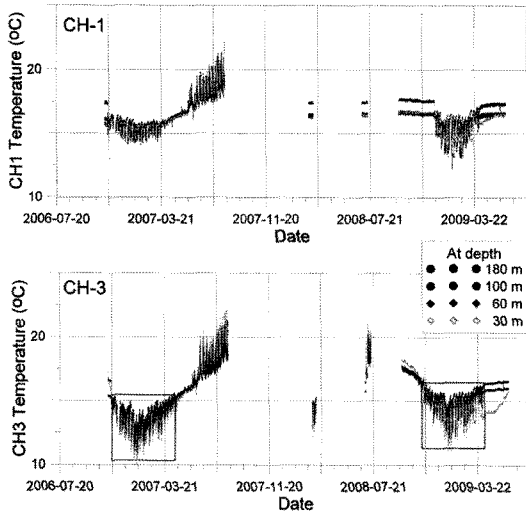


Fig. 8 Long-term temperature monitoring with fiber optic temperature sensor at various depths within the borehole heat exchangers.

지열 냉난방시스템의 장기 가동에 따른 지중온도 변화를 고찰하기 위해 냉난방 시스템이 가동되지 않은 2006년 11월과 2007년 6월, 2009년 6월의 모니터링자료 중 90 ~ 100 m 구간의 온도를 평균한 값을 Table 1에 나타내었다.

표에서 CH1과 CH3의 경우 2006년 겨울과 2007년 여름에 각각 +0.62°C, +0.39°C의 온도차를 보였으며 이러한 온도 증가는 냉난방의 특성으로 보아 당연한 결과로 해석된다. 또한 2007년 여름과 2009년 여름의 경우를 비교하면 CH1의 경우는 -0.10°C로 온도가 오히려 감소한 것으로 나타났으나 이는 측정기기의 오차범위에 속하므로 온도의 변화는 없다고 보아도 무방할 것으로 판단된다. 그러나 이와는 달리 CH3의 경우는 2년간 +0.17°C의 온도증가를 보였다. 비록 이러한 증가폭 또한 측정기기의 오차범위에 속하기는 하나 무시할 수는 없을 것이라 판단된다. 그 이유는 Fig. 8의 2006-2007년 겨울과 2008-2009년 겨울의 난방 가동기간의 온도변화 그래프를 비교하면 전반적으로 2008 ~ 2009년 겨울의 온도변화가 2006 ~ 2007년 겨울의 온도변화에 비해 약간이나마 상승한 상태로 나타나기 때문이다.

이를 좀 더 명확히 살펴보기 위하여 Fig. 9에 2008 ~ 2009년 겨울과 2006 ~ 2007년 겨울에 측정된 지중온도를 11월 10을 기준으로 경과일수에

따라 동일 축 상에 비교하여 도시하였다.

Table 1. Average temperature variations at borehole depths between 90 to 100 m for channels 1 and 3.

Date	Average Temp. (°C)			
	CH1	Diff.	CH3	Diff.
2006-11-10	16.09	-	15.40	-
2007-06-03	16.71	+0.62	15.81	+0.39
2009-06-03	16.61	-0.10	15.97	+0.17

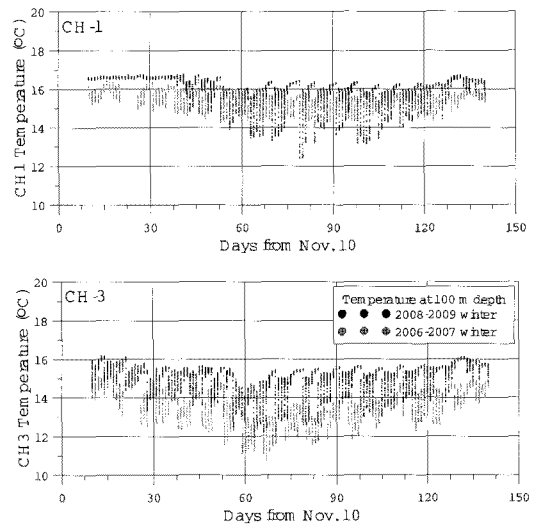


Fig. 9 Comparison of temperature variations at 100 m depth between the winter seasons of 2006-2007 and 2008-2009.

그림에서 지열 냉난방시스템의 가동으로 100 m 하부의 지중온도가 하루 중에도 변화를 보인다. 특히, CH-1의 경우 2006-2007년 겨울보다 2008-2009년 겨울의 일변화폭이 큰 것으로부터 냉난방부하가 증가된 것을 유추할 수 있다. 이는 신축건물인 진진연구센터 건물의 CH-1이 담당하는 3층 사무실이 2006-2007년 겨울에는 상당부분 비어 있는 상태였으나 2008-2009년에는 연구원들이 입주하여 대부분의 사용되었기 때문이다. 이에 반해 처음부터 모든 사무실이 사용된 2층의 부하를 담당하는 CH-3의 경우는 일변화폭이 전반적으로 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. CH-1의 경우, 일변화폭이 증가하여 100 m하부의 온도의 증감에 대해서는 언급하기 어려우나, CH-3의

경우는 비슷한 일변화폭을 보이면서 2008-2009년 겨울의 온도가 전반적으로 0.5 ~ 1℃가량 상승한 상태로 운전되고 있는 것이 관찰된다.

그러나 이러한 온도변화의 원인을 냉난방시스템의 가동에 의한 영향이라고 결론내리기는 어렵다. 지온을 증가시키는 요인은 수십 년에 걸쳐 진행되어온 지구온난화의 영향이 지중으로 전파하거나(Chisholm and Chapman<sup>[3]</sup>), 개발에 따른 표층교란이나 생활하수의 지중침투로 인한 지하수 오염 등 다양할 수 있기 때문이다. 일례로, Fig. 10은 2005-2006년의 약 1.5년에 걸쳐 코어실협이 이루어진 300 m 시추공의 10 m 깊이에서의 온도변화를 관찰한 것이다. 그림에서 관측공의 10 m 깊이에서 연중 최소온도를 보이는 2005년과 2006년 6월 사이에는 겨울동안 난방시스템만 가동되었을 뿐 냉방시스템은 가동되지 않았음에도 불구하고 지중온도는 오히려 약 0.4℃ 증가했음을 알 수 있다. 이는 지중열교환에 의한 영향뿐 아니라 여타의 요인에 의해 지중의 온도가 변화하고 있었음을 반증하는 것이다.

10m 하부 천부의 지하수는 지형에 의한 지하수 유동의 영향을 많이 받을 수 있으며, 특히 강우에 의한 영향이 크게 작용할 수 있다. 그러나 이러한 온도변화가 일정하게 상승하며 수년간 지속될 경우는 냉난방시스템 가동 및 지중열교환에 의한 영향이 크게 작용하는 것으로 판단할 수 있으므로 이러한 온도변화를 장기적으로 관측하는 것이 매우 중요하다 할 수 있다.

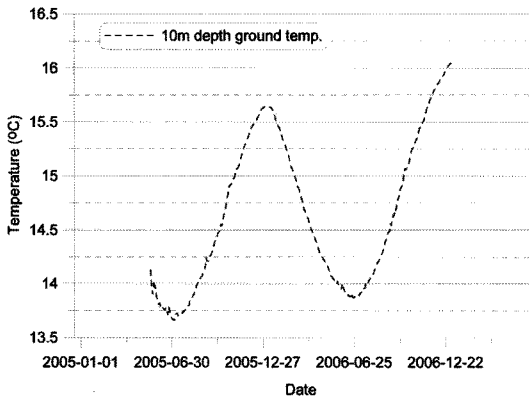


Fig. 10 Ground temperature variation at 10 m depth of the 300 m deep monitoring well. Note that minimum temperature increases about 0.4 °C in a year.

## 5. 결론

이상과 같이 한국지질자원연구원 지진연구동에 설치된 지열 냉난방시스템 가동에 따른 지중 온도변화를 장기적으로 모니터링하고 그 결과를 고찰하였다. 지열 냉난방 시스템의 가동에 의해 지중온도는 겨울에는 낮아지고 여름에는 높아져 연중 변화를 거듭하며, 특히 냉난방 시스템의 가동을 멈추면 그라우팅재로 채워진 시추공 내에서는 3일 이내에 온도의 평형상태에는 도달하나 지중온도가 이전상태로 원상회복되는 데는 많은 시간이 소요된다.

지중열교환기에 부착된 광섬유센서를 이용하여 장기적으로 심도에 따른 지중온도를 모니터링한 결과, 냉난방부하가 상대적으로 큰 지중열교환기(CH-3 & CH-4)에서 온도의 증가가 관찰되었다. 특히, 2006-2007년 겨울에 비해 2008-2009년 겨울에는 100 m 심도에서의 온도가 약 0.5 ~ 1℃ 상승한 상태로 운전되고 있었음이 관찰되었다. 그러나 이러한 온도의 상승이 냉난방시스템의 가동에 의한 영향만은 아닌 것으로 판단되며, 이는 지중열교환기의 가동 전부터의 지하수 온도 모니터링자료로부터 유추할 수 있었다.

이러한 지중온도의 변화를 좀 더 정량적으로 해석하고 지열 냉난방시스템의 가동에 의한 영향을 파악하기 위해서는 좀 더 장기적이고 체계적인 지중 온도 모니터링과 최근 수년 동안의 지표 온도의 변화, 그리고 지하수 흐름을 고려한 지중 온도변화 시뮬레이션 등 다각적인 고찰이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 현재 가동되고 있거나 향후 설치될 대규모 지열시스템의 가동에 따른 지중 온도 변화 및 지속가능성에 대한 연구가 체계적이고 과학적인 방법으로 시급히 수행되어야 할 것이다.

## 후 기

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 심병완, 이영민, 김형찬, 송윤호, 2006, 지중 열

- 교환기 효율 분석을 위한 지반내 열적·수리적 특성 조사, 한국지구시스템공학회지, Vol. 43, No. 2, pp. 1-7.
2. Woodside, W. H., and Messmer, J. H., 1961, Thermal conductivity of porous media: 2. Consolidated rocks, *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, pp. 1699-1706.
  3. Chisholm, T. J. and Chapman, D. S., 1992, Climate change inferred from analysis of borehole temperatures: An example from Western Utah, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 14155-14175.
  4. Katsura, T., Nagano, K., Takeda, S., 2008, Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1995-2004.
  5. Marcotte, D. and Pasquier, P., 2009, The effect of borehole inclination on fluid and ground temperature for GLHE systems, *Geothermics*, Vol. 38, pp. 392-398.
  6. Khan, M. H., Varanasi, A., Spitler, J. D., Fisher, D. E., and Delahoussaye, R. D., 2003, Hybrid ground source heat pump system simulation using visual modelling tool, *Proceedings of Building Simulation 2003*, Eindhoven, The Netherlands, August 11-14, 2003, pp. 641-648.
  7. Rybach, L., Eugster, W. J., Hopkirk, R. J., and Kaelin, B., 1992, Borehole heat exchangers: Long-term operational characteristics of a decentral geothermal heating system, *Geothermics*, Vol. 21, pp. 861-867.
  8. Rybach, L., Hopkirk, R. J., Eugster, W. J., and Burkart, R., 1990, Design and long-term performance characteristics of vertical earth heat exchangers, *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 14, pp. 343-349.