

다중 온도 모니터링을 통한 충적층 및 하상의 지열특성 평가 연구 A Study on Geothermal Evaluation of Alluvium and Riverbed using Thermal Line Temperature Monitoring

정우성¹⁾, Woo-Sung Jung, 김형수²⁾, Hyoung-Soo Kim, 박동순³⁾, Dong-Soon Park,
안영섭⁴⁾, Young-Sub Ahn

- 1) 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation
- 2) 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원, Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation
- 3) 한국수자원공사 수자원연구원 토목4급, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation
- 4) 한국수자원공사 수자원연구원 공동연구원, Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

SYNOPSIS : In advanced countries, state-of-the-art temperature monitoring technique is widely used for effective use of geothermal resources. But these kind of modern tools such as Thermal Line Sensor has not been applied to find geothermal characteristics of alluvium and riverbed in domestic area. In this research, state-of-the-art thermal line temperature sensor monitoring was introduced. And long term field test using this type of sensor was performed to find geothermal characteristics of alluvium and riverbed and evaluate the availability for heat energy source. As a result, temperature monitoring technique through thermal line sensor was very effective to obtain basic geothermal information of alluvium deposit and riverbed. Also, it was found that the groundwater temperature phase showed its potential of utilization as a energy source of heat pump. It is estimated that further study shows a specific correlation between temperature monitoring data and its availability as a energy source.

Key words : Geothermal, Temperature monitoring, Thermal line sensor, Energy source, Heat pump

1. 서론

최근 국내외적으로 환경문제가 대두되면서 지반공학 분야에도 지반환경 분야를 비롯하여, 종래의 전통적인 토질 및 기초 공학으로는 설명할 수 없는 복잡 다단한 문제들을 접하게 되었다. 이는 다른 여러 요소 기술들의 결합을 가져오게 되었으며, 그중 하나는 지반공학 분야에서의 지중 열역학적 사고의 도입이다. 최근 이러한 배경과 신재생에너지 사업의 부각에 따른 지열 냉난방시스템은 근본적으로 기계 설비분야의 기술이 주를 이루지만, 그 원인 및 가치 추정에 있어서는 지중 매체에 대한 토질공학적 사고와 더불어 지열학적인 판단이 매우 중요한 분야로 부상하였다.

특히 지중에서의 온도변화는 모든 물성 측정의 기본적 자료이며, 그 위에 세워지는 지반 구조물의 안정성은 그 온도 분포가 시·공간적으로 평형을 이루는가와 여부를 판단함에 따라 추정이 가능하므로 매우 광범위한 활용성을 갖는 중요한 측정치이다.

본 연구에서는 일차적으로 최근 새로운 온도센싱 기술로 부상한 단일 라인 다중 온도 모니터링 시스템에 대하여 논하고, 하상 및 충적층에서의 열전도 지식에 기초하여, 지열학적 관점에서 지중에서의 열적 흐름 특성을 고찰하였고, 현장실험을 통하여 하상 및 충적층에 있어서의 다중 온도센서 모니터링 기술이 제공하는 활용성을 검토하였다. 더 나아가 이러한 기초 조사 및 시험을 통하여 국내에서는 최초로 하상 및 충적층에서 수온차를 이용한 지열 냉난방시스템의 타당성을 평가할 수 있는지를 검토하였다.

2. 다중 온도 센서의 도입

종래의 온도 측정은 대체로 단일 센서에 바탕을 두고 있었기 때문에 그의 공간적인 온도 측정 면에서는 기술적 및 경제적 등 여러 측면에서 제약적이었다. 이러한 문제를 극복하기 위해 단일 센서 케이블을 여러 개 묶어 온도를 측정한다는 것은 우선 전체 케이블 다발의 두께에 대한 제한성과 더불어 측정 데이터의 제어에서 오는 문제점, 그리고 케이블 다발을 이동하며 반복 측정함으로써 인한 인력과 시간의 소모에서 오는 문제점 등을 야기하게 되었다. 이러한 여러 가지 문제점을 해결하고 동시에 온도 측정의 현실화를 실현하기 위해 본 연구에 적용된 개념이 단일 케이블 내 다중 센서 배열 방식이다. 즉 국부적 개소에 대한 제한된 온도의 측정 개념이 아닌, 수평, 혹은 연직으로 다중계측을 가능케 하는 방식이 필요하게 되었다. 이 목적으로 설계시, 가장 중요한 개념은 단일 케이블내에 다중 온도센서 배열을 통한 온도 모니터링이 가능해야 한다는 점이다. 이를 가리켜 Thermal Line Sensor 방식이라 지칭한다. 기존의 방식과의 차이점은 다음과 같이 요약된다.

- 기존의 방식 : 한 케이블의 말단에 온도센서 한 개를 대응하여 계측하는 방식으로, 다중 포인트에 대해 온도를 동시에 계측하고자 할 경우 단일 센서가 부착된 단일 케이블을 입력으로 조정하면서 수많은 계측을 반복해야 함.
- 개선된 방식 : 동일 케이블 내에 User의 요구 조건에 따라 온도센서를 자유자재로 인입하고, 단일 케이블 끝에 레코더를 연결시키는 방식으로, 사용자 설정에 따라 실시간으로 깊이별, 간격별로 다중 포인트에 대한 온도 모니터링이 가능해짐
- 따라서 소기의 연구목적과 일회성이 아닌 반복적인 활용성을 위해서는 다음의 기술이 설계의 관건임
 - 단일 케이블 내 다중 센서 배열 방식
 - 사용자 중심의 계측 간격 설정이 가능할 것
 - 실시간으로 온도 계측 data가 축적될 수 있을 것

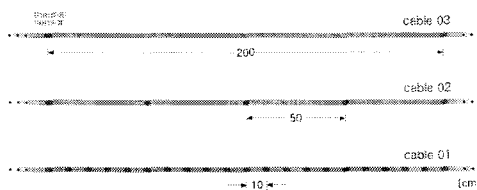


그림 1. Thermal Line Sensor의 예

따라서 본 연구에 있어서 온도 모니터링 측정 시스템(Temperature Monitoring System : TMS)은 단일 케이블 내 다중 온도센서 배열(Thermal Line Sensor) 개념에 바탕을 두고 있다. 각 센서는 변조 신호(modulation signal)를 받아들여 자기 위치를 알릴 수 있는 기능을 갖고 있으며(addressable thermal sensor), 모니터링 장치는 각 측정 때마다 변조 신호를 송신하여 각 센서의 위치를 확인하고 동시에 온도 측정 데이터를 받아들여 저장한다. 이러한 측정은 임의의 설정된 시간 간격마다 장기간 자동으로 반복될 수 있게 되어 있다.

3. 하상 및 충적층에서의 열적 흐름 특성

온도 모니터링을 통하여 지중의 수온차 열원의 에너지 활용 가치를 평가하기 위해서는 가장 중요한 개념이 지중 다공질 지반에서의 물의 열적 흐름 특성을 아는 일이다. 물은 이 세상에 존재하는 물질 중에서 열을 가장 많이 저장·운반하는 물질이다. 단위 질량당 온도를 1℃ 상승시키는데 필요한 열에너지를 비열(specific heat)이라 하며, 물은 비열이 가장 높다. 지하에 부존되어 있는 지하수는 해당지역의 지중에 존재하는 지열 때문에 그 온도는 해당지역의 지열온도와 동일하게 되면서 열에너지(지열)를 저장한다. 그러므로 지하수 이용은 바로 지열 에너지를 이용하는 것과 동일하다. 즉 땅속의 지열을 지하수라는 매체를 통하여 간접적으로 사용할 수 있다는 뜻이다(한정상 외, 2005).

지중에서 일어나는 열흐름 저항은 암석의 종류에 따라 좌우된다. 일반적인 토양과 암석의 열적특성은 다음 표와 같다. 그러나 이 값들은 일부 극단적인 값에 불과한데, 이는 점토와 모래는 함수비가 커짐에 따라 열전도도가 커지며, 토양/암석 가운데 점토와 모래의 함수비는 열전도도에 큰 영향을 미치기 때문이다(한정상 외, 2005).

표 1. 모래와 점토질 토양의 함수비에 따른 열전도도와 열확산계수(한정상 외, 2005)

토양 종류	건조 밀도 (g/cm ³)	함수비 5%		함수비 10%		함수비 15%		함수비 20%	
		K	α	K	α	K	α	K	α
조립질 100% 모래	1.92	1.79~2.8	0.089~0.014	2.1~2.98	0.096~0.12	2.38~3.27	0.085~0.11	-	-
	1.60	1.19~2.1	0.072~0.12	1.79~2.23	0.089~0.11	1.93~2.38	0.083~0.1	2.1~2.53	0.07~0.693
	1.28	0.74~1.64	0.056~0.12	0.89~1.64	0.05~0.1	0.89~1.79	0.047~0.093	1.04~1.79	0.048~0.084
세립질 100% 점토질	1.92	0.89~1.19	0.045~0.06	0.89~1.19	0.037~0.049	1.19~1.64	0.043~0.06	-	-
	1.60	0.74~0.89	0.045~0.054	0.74~0.89	0.037~0.023	0.89~1.04	0.034~0.023	0.89~1.19	0.038~0.051
	1.28	0.45~0.74	0.033~0.056	0.52~0.74	0.036~0.047	0.6~0.82	0.32~0.022	0.6~0.89	0.028~0.042

주) 열전도도(K) : Kcal/h·m·℃ , 열확산계수(α) : m²/day, 조립질 : 0.075 ~ 5 mm, 세립질 : 0.075mm 이하

지하 대수층과 대수층내에 부존되어 있는 지하수 사이에는 열적평형을 이루고 있다. 따라서 지하수 수온과 지하수가 부존되어 있는 지역의 지중온도는 서로 동일하다. 지중온도가 변하는 구간에 포장된 지하수는 지중온도와 함께 일간 및 연간으로 변화한다. 다만 지하수를 포장하고 있는 포화 다공질층은 건조한 비포화 다공질층에 비해 열전도도(K)가 크고, 열확산계수(α)가 적어 온도변화폭(ΔT)은 적어지며, 온도변화에 미치는 깊이도 얕아진다.

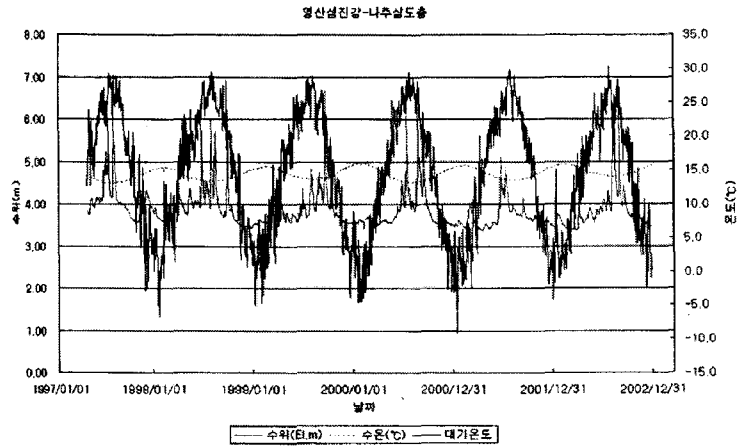


그림 2. 국내 지하수의 경시별 수온변화

지중열이 높은곳에서 낮은곳으로 전도에 의해 이동하는 현상은 Furier 법칙으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H = -K \text{ grad}T \quad (1)$$

여기서, H : 열유량(heat flux, Kcal)

K : 비례상수로서 열전도도(Kcal/h·m·℃)

T : 온도

gradT : 온도구배

지하수가 유동하고 있는 수문지열계내에서 열이동은 주로 지하수유동에 의해 대류성 열전달 형태를 띤다. 외적인 작용으로 인한 강제 열전달이 있는가 하면, 순수한 온도구배에 의해 형성된 밀도변화에 기인하여 거동하는 자유 열전달이 있다. Darcy 법칙이 적용되는 강제 열전달(유체이동)과 열전도(conduction)을 이용한 3차원 열이동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$H = -K_e \text{ grad}T + n\rho_w C_w V \quad (2)$$

여기서, V : 지하수의 유속벡터

4. 현장 실험

온도센서 활용 방안의 일환으로, 하상 및 충적층의 지하 열자원을 활용성을 확인하기 위한 온도계측을 수행하였다.

4.1 조사지역 위치 및 특성

온도센서를 활용한 온도 계측 조사는 금강 대청댐 하류 지역에서 수행되었으며, 대청댐으로부터 하류 방향으로 약 7km 내외의 지역에 해당된다. 조사 지역은 크게 3개소로 구분하였으며, 대상 구간 지역에 대하여, 상류, 중류, 하류로 구분하여 수행하였다. 이중 상류 및 중류 지역은 실제 대청조정지댐의 상류 저수지 구간에 해당되며, 하류는 경부선 금강 철교 직하류에 해당된다.

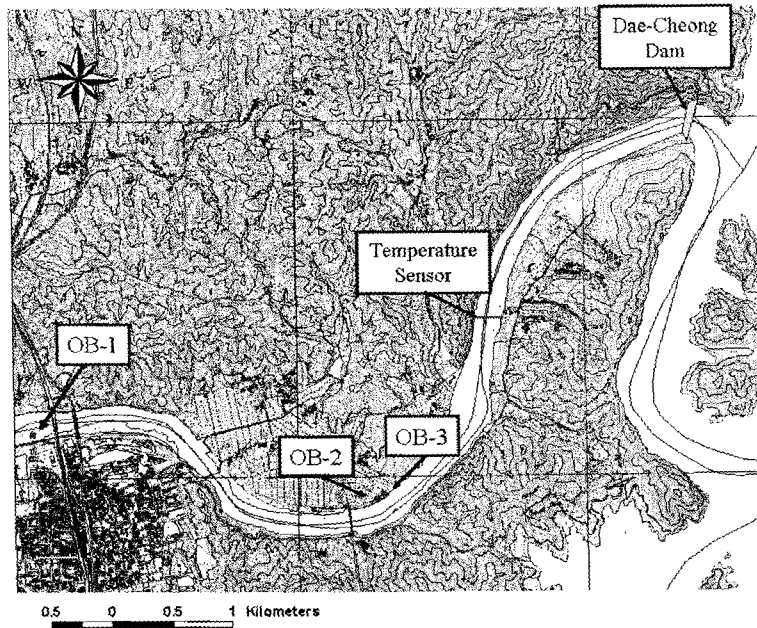


그림 3. 온도센서 활용 대수층 및 하상 온도 측정 위치도

상류에는 하상의 온도를 측정하기 위해 길이 100m의 온도센서를 설치하였다. 다중 온도센서 케이블은 단일 케이블 내에 사용목적에 따라 일정한 간격으로 자기 위치를 인식하는 온도센서(addressable thermal sensor)를 장착한 것이다.

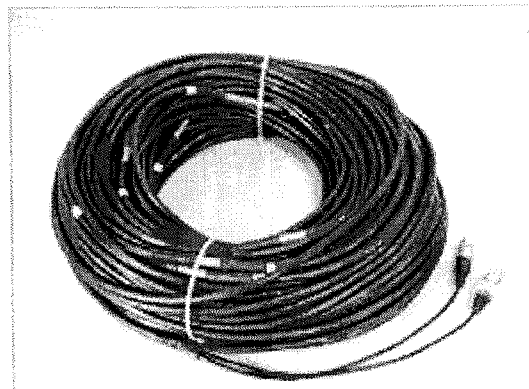


그림 4. 하상에 설치된 다중채널 온도센서(addressable thermal sensor)

실제 현장에서의 온도센서의 설치는 센서 손상을 방지하기 위해 보호용 케이블 내부에 온도센서를 삽입하여 고정시켰다. 그리고 수면으로의 부상을 방지하기 위하여 5m 간격으로 추를 매달아 하상에 설치하였다. 온도 측정은 1시간 간격으로 설정하였다. 상류 다중 온도센서의 설치 위치는 대청댐으로부터 2.4 km 정도 떨어져 있으며 하상의 수심은 최저 1m에서 최고 6m정도 되었다. 다음 그림 5는 다중채널 온도센서의 설치 위치 평면도를 보여주며, 그림 6은 다중 온도 센서 케이블이 설치된 하상의 개략 단면을 보여준다.

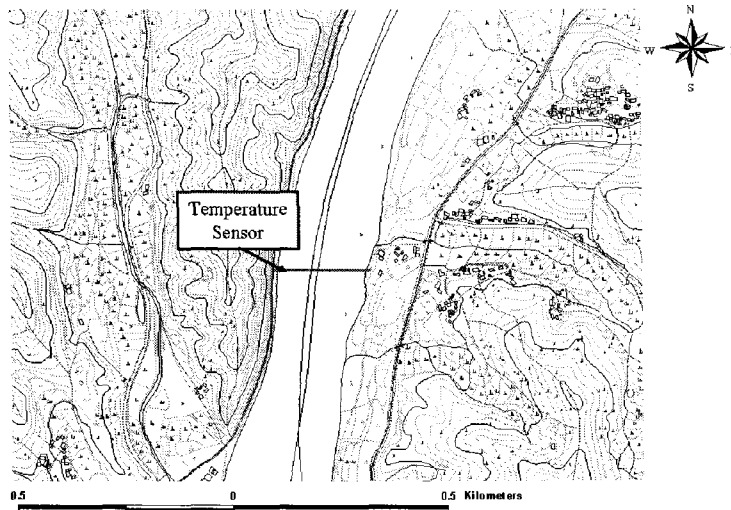


그림 5. 상류 다중채널 온도 센서 설치 위치도

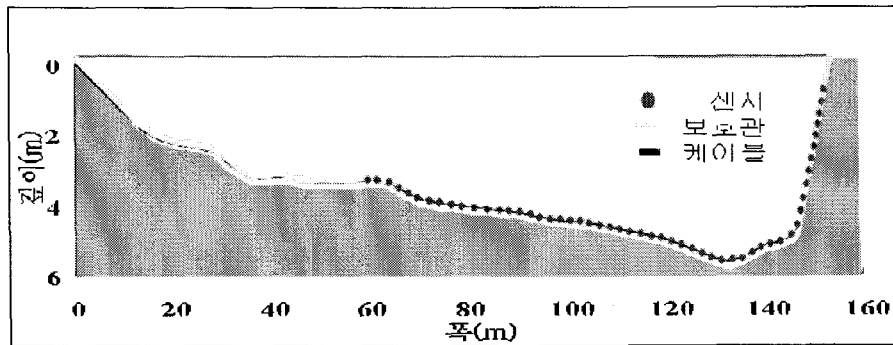


그림 6. 하상의 온도 모니터링을 위한 온도 센서 설치 모식도

중류와 하류 지역에서는 중적 대수층내의 온도를 측정하였으며, 인력을 이용한 직접 굴착을 통해 온도 모니터링을 위한 간이관정을 설치하였다. 중류에 설치된 관정은 OB-2, OB-3는 대청댐으로부터 4.1 km 정도 떨어져 있으며 각각 1.5m, 2.5m 깊이의 관정을 굴착하여 자동 수위-온도 측정기(Diver)를 설치하였다. 이 지역은 깊이에 따른 대수층의 온도 변화를 관찰하기 위해 2.5m, 1.5m로 굴착 심도를 조정하였다.

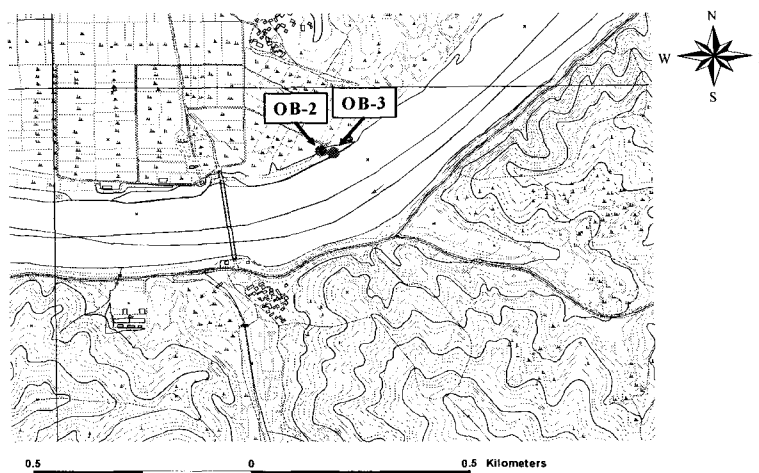


그림 7. 중류 지역 온도센서(Diver) 설치 위치 (OB-2 및 OB-3)



그림 8. 간이 관정 굴착 장치를 이용한 온도 센서 설치용 정호 굴착

하류지점의 위치는 대청댐으로부터 약 7.3km정도 떨어져 있으며 경부선 철교 인근에 깊이 3m의 관정을 증류 조사 지점과 동일한 방식으로 간이 관정 굴착 장치를 이용하여 관측용 정호를 형성한 후, 자동 온도 계측 장비인 Diver를 설치하였다. 그림 9는 하류지점 설치 위치를 보여준다.

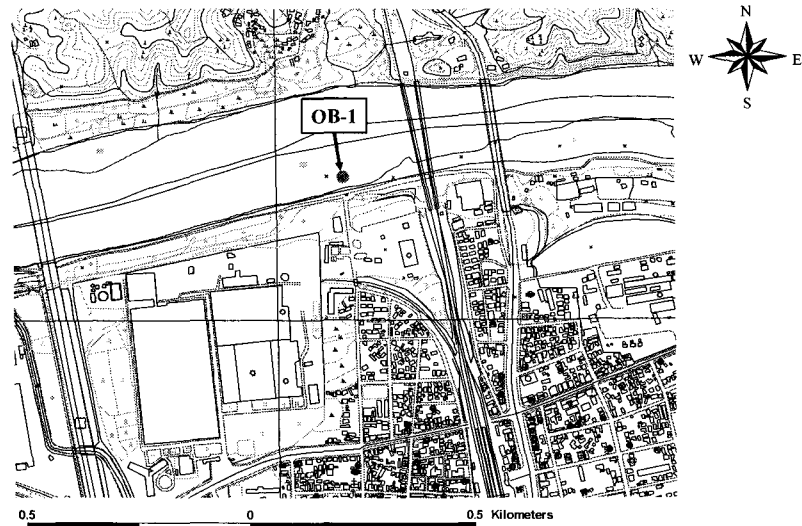


그림 9. 하류 지역 온도센서(Diver) 설치 위치 (OB-1)

4.2 현장 시험 결과

현장시험 결과, 하상 및 충적층에서의 물의 흐름에 수반되는 열적 특성은 다중 온도센서 모니터링을 통해 훌륭하게 파악이 가능하며, 그 모니터링 결과는 응용기술로 최근 부각되고 있는 수온차 지열에너지의 열원으로서 활용가능성을 평가하는 직접적인 인자를 제공해 준다. 즉 연속적인 온도 측정을 공간적으로 다중 라인으로, 다양한 심도, 길이로 측정 가능케 해주는 측정방식은 온도라는 물리량으로 대표되는 지중에서의 열적 흐름 특성 파악 및 에너지원으로서의 가치 추정에 매우 유용하게 사용 가능하다.

하천수의 수온은 지역별로 다소 차이는 있으나 연간, 일간 온도변화가 작아 열원으로서의 이점을 가지고 있다. 하천수와 같은 온도차에너지는 통상 하절기에는 수온이 외기온도보다 약 5℃ 정도 낮고, 동절기에는 10℃ 정도 높은 특성을 가지고 있다. 따라서 하천수 열에너지를 동절기에는 가열열원으로, 하절기에는 응축기의 냉각열원으로 이용하면 단위건물의 열공급 열원으로 이용할 수 있다.

한편, 계측이 수행된 충적층 지하수의 경우는 하천수보다도 더욱 유용한 열자원 매체로 활용될 수 있음

이 확인되었다. 또한 15m 이상 심도의 충적층 지하수의 경우, 연간 변화는 5℃를 크게 넘지 않는 것으로 평가되며, 상대적으로 수온차 에너지로 활용 가능성이 높음을 온도 센서 장기 계측을 통해 추정할 수 있었다.

다중채널 온도센서와 Diver를 통한 온도 계측은 하상 혹은 충적 대수층의 온도가 대기의 온도와 하절기 및 동절기에 뚜렷한 차이를 보여줄 수 있음을 확인 할 수 있었으며, 이러한 온도차이는 하상 혹은 충적 대수층의 지하열을 활용한 냉난방시스템의 타당성을 평가하는데 이용될 수 있는 것으로 확인되었다. 궁극적으로 온도센서를 통한 장기간의 온도 계측은 지하수 및 지표수가 가지고 있는 온도와 대기의 온도 사이의 편차를 직접 확인함으로써, 이러한 수온차이를 냉난방에 이용하기 위한 기초 평가 자료로 활용될 수 있음을 보여주었다.

5. 결론

본 연구에서는 일차적으로 최근 새로운 온도센싱 기술로 부상한 단일 라인 다중 온도 모니터링 시스템에 대하여 논하고, 하상 및 충적층에서의 열전도 지식에 기초하여, 지열학적 관점에서 지중에서의 열적 흐름 특성을 고찰하였고, 현장실험을 통하여 하상 및 충적층에 있어서의 다중 온도센서 모니터링 기술이 제공하는 활용성을 검토하였다. 더 나아가 이러한 기초 조사 및 시험을 통하여 국내에서는 최초로 하상 및 충적층에서 수온차를 이용한 지열 냉난방시스템의 타당성을 평가할 수 있는지를 검토하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 하상 및 충적층에서의 물의 흐름에 수반되는 열적 특성은 다중 온도센서 모니터링을 통해 용이하게 파악 가능하다.
- 2) 하상 및 충적층에서의 온도 모니터링 결과는 응용기술로 최근 부각되고 있는 수온차 지열에너지의 열원으로서 활용가능성을 평가하는 직접적인 데이터를 제공해 준다.
- 3) 계측이 수행된 충적층 지하수의 경우, 하천수보다도 더욱 유용한 열자원 매체로 활용될 수 있음이 확인되었다. 또한 15m 이상 심도의 충적층 지하수의 경우, 연간 변화는 5℃를 크게 넘지 않는 것으로 평가되며, 상대적으로 수온차 에너지로 활용 가능성이 높음을 온도 센서 장기 계측을 통해 추정할 수 있었다.
- 4) 다중채널 온도센서와 수압센서(Diver)를 통한 온도 계측은 하상 혹은 충적 대수층의 온도가 대기의 온도와 하절기 및 동절기에 뚜렷한 차이를 보여줄 수 있음을 확인 할 수 있었으며, 이러한 온도차이는 하상 혹은 충적 대수층의 지하열을 활용한 냉난방시스템의 타당성을 평가하는데 이용될 수 있는 것으로 확인되었다.

추후 연구를 통해, 보다 구체적으로 하상 및 충적층에서의 장기 온도 모니터링 결과와 에너지원으로서의 상관관계를 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 에너지자원기술개발 사업의 일환으로 에너지관리공단에서 지원하고 한국지질자원연구원에서 주관한, “강변여과수(충적층 및 하상)열자원 활용기술”의 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 수자원연구원(2005), 수자원시설물 관리를 위한 온도 모니터링 기법의 활용방안 연구(1차년도) 보고서, 한국수자원공사 연구보고서
2. 한정상,한규상,한혁상,한 찬(2005), 지열펌프 냉난방 시스템, 도서출판 한림원