

## 시계열 분석을 이용한 지열히트펌프 가동에 따른 지하수특성변화 해석

목종구<sup>1</sup> · 임홍균<sup>2</sup> · 장범주<sup>1</sup> · 박유철<sup>3</sup> · 이진용<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)지오쓰리이코, <sup>2</sup>강원대학교 지질학과, <sup>3</sup>강원대학교 지구물리학과

### Time Series Analysis of the Effect of Ground-source Heat Pumps on Groundwater Characteristics

Jong-Gu Mok<sup>1</sup>, Hong-Gyun Lim<sup>2</sup>, Bum-Ju Jang<sup>1</sup>, Yu-Chul Park<sup>3</sup>, and Jin-Yong Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Geo3eco Co. Ltd., Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

본 연구에서는 원주에 위치한 상지대와 괴산에 위치한 중원대의 여름철 지열히트펌프 가동에 따른 지하수 특성 변화를 이해하기 위해 각 관측정의 2010년 5월 21일에서 10월 12일까지의 수위, 수온, 전기전도도에 대하여 시계열분석을 실시하였다. 지하수를 직접 이용하는 수주지열정 방식의 지열히트펌프가 설치된 상지대의 경우 지열히트펌프 가동에 따른 영향을 많이 받아 지하수 특성이 많이 변화하였다. 반면에 유체를 통해 열교환을 하는 수지밀폐형 방식의 지열히트펌프가 설치된 중원대의 경우 지열히트펌프 가동에 영향을 많이 받지 않아 지하수의 특성 변화가 일어나지 않았다. 이와 같은 결과는 지열히트펌프시스템의 설치 종류에 따른 지하수 특성 변화를 이해하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어 :** 지열히트펌프, 지열에너지, 시계열분석, 지하수

Time series analysis was applied to groundwater level, water temperature, and electrical conductivity data obtained from monitoring wells around ground-source heat pumps at Sangji University of Wonju (standing column well type) and at Jungwon University of Goesan (closed loop type), from 21 May to 12 October 2010. We found large temporal variations in the characteristics of groundwater at Wonju, but only minor variations at Goesan. These results may improve our understanding of the effects of ground-source heat pumps on the characteristics of surrounding groundwater, according to the installation method for the pumps.

**Key words:** Ground-source heat pump, Geothermal energy, Time series analysis, Groundwater

### 서 론

최근 화석연료 고갈에 따른 유가폭등과 이산화탄소 증가에 따른 지구 온난화 등의 영향으로 친환경적이면서 영구하게 사용할 수 있는 신·재생에너지에 대한 관심과 사용이 증가하고 있다. 우리나라에서도 이러한 영향을 받아 정부에서는 신·재생에너지 설치와 사용에 대한 보조금을 지원하고 있다(이진용 외, 2008; Lee, 2009). 이러한 총 11개의 신·재생에너지 분야 중에서도 가장 효율적이고 친환경적이며 우리나라에서 적용성이 뛰어난 지열에너지

는 더욱 관심을 받고 있다(최상규, 2003). 지열시스템은 천부 지열 또는 지하수의 일정한 온도를 이용하여 여름철에는 대기보다 낮은 온도를 이용하여 냉방을 하고, 겨울철에는 대기보다 높은 온도를 이용하여 난방을 위해 사용된다(Lee and Hahn, 2006).

일반적으로 지열을 이용하는 히트펌프(Ground Source Heat Pump)시스템은 열원에 종류에 따라 지반 이용 히트펌프(Ground Coupled Heat Pump), 지하수 이용 히트펌프(Ground Water Heat Pump), 지표수 이용 히트펌프(Surface Water Heat Pump) 및 복합 지열원 히트펌프

\*Corresponding author: hydrolee@kangwon.ac.kr

(Hybrid Ground Source Heat Pump)시스템으로 크게 4가지로 분류한다(신현준, 2004). 또한 열교환 유체의 순환에 따라 밀폐형(closed loop)과 개방형(open loop)으로 분류한다(조운주 외, 2009). 지반이용 히트펌프(GCHP)는 열교환 유체를 지반에 설치된 루프를 통해 순환시켜 사용하는 시스템이다. 또한 열교환기 설치방법에 따라 수직형, 수평형 또는 에너지피일형으로 구분한다(조운주 외, 2009). 그리고 지하수 이용 히트펌프(GWHP)는 지하수가 직접 순환하여 열교환을 하는 시스템으로 지하수의 재주입 방법에 따라 복수관정형(개방형)과 수주지열정(Standing Column Well, SCW)으로 분류한다(조운주 외, 2009).

우리나라에서는 주로 지반이용(수직밀폐형)과 지하수 이용(SCW) 방식을 이용하여 지열히트펌프시스템을 가동하고 있다(Lee, 2009). 두 방식은 위와 같이 열교환 유체의 종류가 다르지만 직·간접적으로 지하수의 특성에 영향을 미친다. 본 논문에서는 지하수이용 히트펌프 중 수주지열정(SCW)을 사용하는 상지대와 지반이용 히트펌프 중 수직밀폐형을 사용하는 중원대에 설치된 지열히트펌프 시스템이 각각 여름철 가동에 따라 지하수 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 한다.

**연구지역 및 방법**

연구지역은 상지대의 경우 강원도 원주시(위도 37°22'12", 경도 127°55'35")에 위치하고 있으며 중원대의 경우 충청북도 괴산군(위도 36°48'52", 경도 127°47'57")

에 위치한다(Fig. 1(a)). 상지대 부근의 지질은 선캠브리아기의 편마암류와 이를 관입한 주라기의 흑운모 화강암 및 복운모 화강암으로 구성되어 있으며 이를 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(박병권 외, 1989). 상지대의 지열히트펌프 시스템은 수주지열정(SCW) 방식을 도입하고 있으며 굴착심도가 500 m인 4개의 지하수관정 중 SJ-1 관정을 이용하여 모니터링을 실시하였다(Fig. 1(b)). SJ-1은 0~28 m까지 풍화토 및 마사토로 퇴적되어 있으며, 구성물질은 실트, 모래 및 소량의 점토와 자갈로 구성되어 있다. 28 m이후로는 기반암층이 양호하게 나타난다. 케이싱은 200 mm폭으로 28~42 m구간에 설치되어 있다. 수리전도도는  $3.62 \times 10^{-4}$ ~ $3.58 \times 10^{-4}$  cm/day로 비교적 높게 나타나며, 투수량계수는 1.397~1.383 cm<sup>2</sup>/day으로 나타난다.

중원대 부근의 지질은 캠브리아기의 편암류 및 결정질 석회암류와 이를 관입한 조립질 반상화강암 및 화강 섬록암으로 구성되어 있으며 이를 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(이종혁과 김정환, 1972). 중원대의 지열히트펌프 시스템은 수직 밀폐형 방식의 굴착심도가 150 m의 245개의 관정 중 관측정으로 사용하는 JW-1 관정을 이용하여 모니터링을 실시하였다(Fig. 1(b) 참조). JW-1은 0~14 m까지 풍화토 및 마사토가 퇴적되어 있으며, 구성물질은 실트, 모래 및 소량의 점토와 자갈로 구성되어 있다. 이후 기반암층이 양호하게 발달되어 있다. 케이싱은 165 mm 폭으로 0~14 m 구간에 설치되어 있다. 수리전도도는  $2.10 \times 10^{-4}$ ~ $2.50 \times 10^{-4}$  cm/day로 비교적 높게 나타나며, 투수량계수는 2.089~2.479 cm<sup>2</sup>/day으로 나타난다.

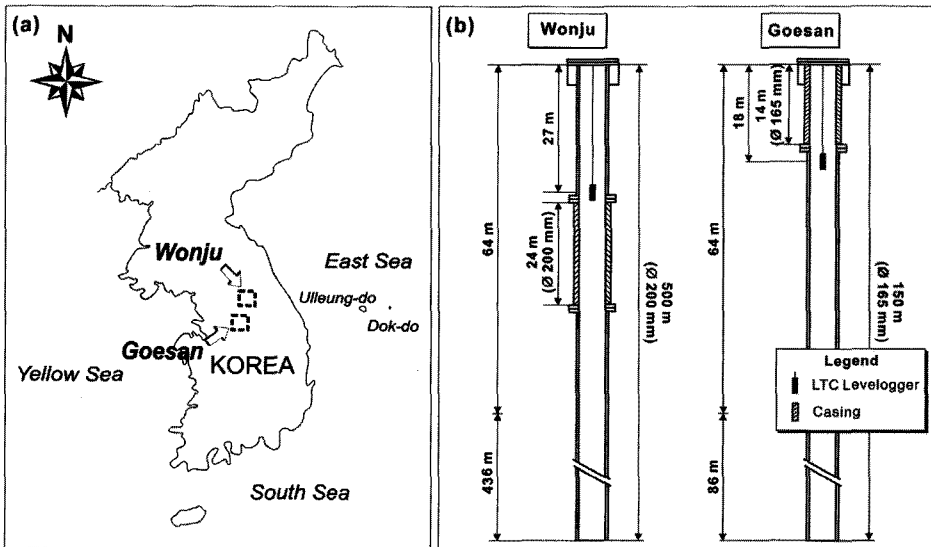


Fig. 1. (a) Location map of the two study areas and (b) the specifications of monitoring wells.

상지대의 SJ-1 관정과 증원대의 JW-1 관정에 수위, 수온 및 전기전도도를 파악하기 위하여 관측기기를 설치하여 2010년 5월 21일부터 10월 12일까지 모니터링을 수행하였다. 강수량과 대기온도는 상지대의 경우 원주 기상대의 일별 평균자료를 이용하였고, 증원대의 경우 충주 기상대의 일별 평균자료를 이용하였다. 각 관정의 대기압 보정을 위한 기압관측기기(Barologger, Solinst, Canada)와 수위, 수온 전기전도도 관측을 위한 자동측정기기(LTC levelogger, Solinst, Canada)를 각 관정에 설치하였다. SJ-1의 경우 지표 아래 약 27 m에 자동관측기기를 설치하여 1시간 간격으로 측정하였다(Fig. 1(b) 참조). JW-1의 경우 지표로부터 약 18 m 아래에 자동관측기기를 설치하였으며 SJ-1과 마찬가지로 1시간 간격으로 측정하였다.

**시계열분석 방법**

연속적인 지하수자료는 각각의 시계열적 특성을 갖고, 이러한 특성들을 파악하기 위하여 각 자료의 연속적인 신호를 시간 및 주파수영역에서 해석할 수 있다(Larocque et al., 1998; Lee and Lee, 2000; 김유리 외 2008). 여름철 지열히트펌프 가동 시 지하수의 특성과 강수와 대기온도 변화에 대한 관계를 알아보기 위해 수리자료 해석에 흔히 사용되는 자기상관(auto-correlation), 스펙트럼밀도(spectral density) 및 교차상관(cross-correlation)함수를 이용하였다(Larocque et al., 1998; Lee and Lee, 2000; 이봉주 외, 2001; 이진용과 이강근, 2002).

자기상관함수는 측정된 시계열자료에 연속적인 자기상관값의 기억효과가 얼마나 지속되는지를 나타낸다. 예를 들어 시계열 자료의 결과가 주어진 오랜 시간동안 기억효과가 나타나면 자기상관함수의 기울기는 천천히 감소하며 짧은 시간동안 기억효과가 나타나면 자기상관함수의 기울기는 빠르게 감소한다(Larocque et al., 1998; 이진용과 이강근, 2002). 스펙트럼밀도함수는 이러한 자기상관함수의 푸리에 변환을 통해 시계열 자료의 주기성을 알 수 있으며 조절시간(regulation time)을 통해 입력신호에 대한 지속시간과 대상에 대한 충격의 지속시간을 나타낼 수 있다(Mangin, 1984; Davis, 1986; Padilla and Pulido-Bosch, 1995; Larocque et al., 1998; 이봉주와 황세호, 2008). 자기상관함수, 스펙트럼 밀도함수 및 조절시간은 다음과 같이 계산한다.

$$\gamma_k = \frac{C(k)}{C(0)} \tag{1}$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} [(x_i - \bar{x}) - (x_{i+k} - \bar{x})] \tag{2}$$

$$S(f) = 2 \left[ 1 - 2 \sum_{k=1}^m w(k) \gamma_k \cos(2\pi f k) \right] \tag{3}$$

$$T_{reg} = \frac{S(f=0)}{2} \tag{4}$$

여기서,  $\gamma_k$ 는 자기상관함수,  $k$ 는 0에서  $m$ 값의 범위를 가지며,  $m$ 은 절삭점(cutting point),  $n$ 은 시계열 자료의 길이,  $\bar{x}$ 는 시계열 자료의 평균,  $S(f)$ 는 스펙트럼 밀도함수,  $T_{reg}$ 는 조절시간을 의미한다.

교차상관함수는 두 시계열 자료의 상호의존성을 나타내는 것으로  $\pm 1$ 의 범위를 가지며 최고점에 도달한 시간을 지연시간(time delay)이라 한다. 예를 들어 지연시간은 강수, 대기온도 등의 입력자료로부터 수위, 수온 및 전기전도도 등의 출력자료가 첫 번째의 최대로 높은 교차상관함수를 가질 때의 시간을 말한다(Larocque et al., 1998; 이진용과 이강근, 2002; 송성호 외, 2007). 교차상관함수는 다음과 같이 계산한다.

$$\gamma_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{5}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} [(x_i - \bar{x}) - (y_{i+k} - \bar{y})] \tag{6}$$

여기서  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 는  $x_t$ 와  $y_t$ 의 표준편차,  $\gamma_{xy}(k)$ 는  $k > 0$ 에서의 교차상관 함수,  $n$ 은 시계열 자료의 길이,  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 시계열자료  $x_t$ 와  $y_t$ 의 평균을 의미한다.

또한 장주기를 가지는 시계열분석에서 좀 더 명확한 결과 해석이 가능하게 하는 변동경향성 제거는 기존의 시계열에서 선형회귀직선의 함수 값을 빼주는 것으로 자연적 혹은 인위적인 영향을 제거하는데 목적이 있다(Molénat et al., 1999; Hanson et al., 2004). 변동경향성 제거는 다음과 같이 계산한다.

$$Y_d = Y_{raw} - Y_{reg} \tag{7}$$

여기서  $Y_d$ 는 변동경향성 제거된 시계열(detrended time series data),  $Y_{raw}$ 는 원래의 시계열(original time series data),  $Y_{reg}$ 는 선형회귀직선(linear regression)의 함수이다.

**결과 및 토의**

**수위, 수온 및 전기전도도 변동특성**

SJ-1과 JW-1에서 측정된 수리자료의 변동특성을 살펴 보기 위해 Fig. 2에 함께 나타내었다. SJ-1에서 5월부터

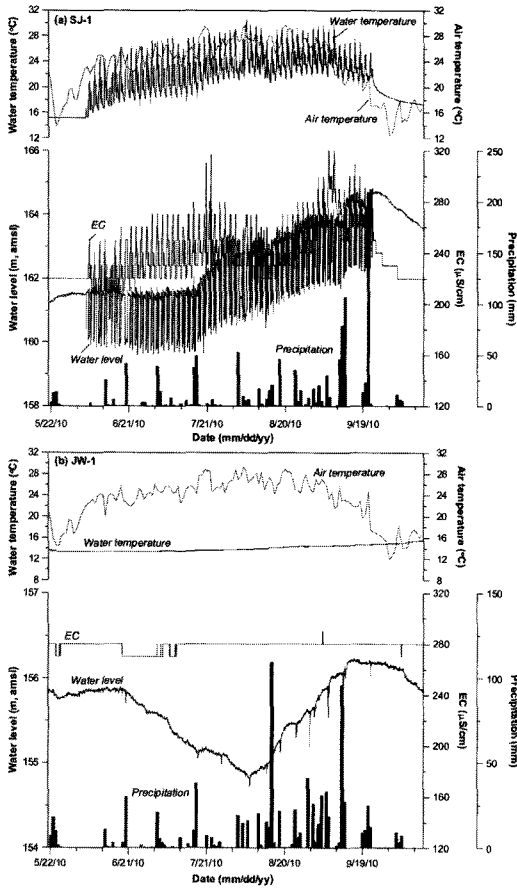


Fig. 2. Time series of water level, water temperature, EC, precipitation, and air temperature from 21 May to 12 October 2010.

10월까지의 수위, 수온, 전기전도도의 평균값은 각각 162.27 m, 22.17°C, 243.88  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났으며 중앙값은 각각 161.84 m, 22.28°C, 240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났다(Table 1). 또한 JW-1에서 5월부터 10월까지의 수위, 수온, 전기전도도의 평균값은 각각 155.57 m, 13.9°C, 278.56  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났으며 중앙값은 각각 155.60 m, 13.75°C, 280  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났다. SJ-1의 경우 수위는 약 1.5m 변동을 반복하며 온도는 약 8°C, 전기전도도는 약 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$  변동을 반복하였지만 전체적으로 10월까지 증가하는 경향성을 보였다(Fig. 2). 반면 JW-1의 경우 수위는 5월부터 8월까지 약 1m 하강하다가 8월에서 9월까지 약 1m 상승하였고 온도는 약 2°C 정도 상승하였다. 그리고 전기전도도는 거의 변화가 없으며, SJ-1과는 다른 결과가 나타났다. 이는 계절적 변동이기 보다는 지열히트펌프 시스템의 종류의 차이에 의해 나타나는 현상이다. SJ-1은 수주지열정 방

Table 1. Comparison of data on water level, water temperature, EC, site precipitation, and fluctuations in air temperature between SJ-1 and JW-1 wells.

Well	Interval	Time series data	Mean	Median
SJ-1	Hours	water level	162.27	161.84
		water temperature	22.17	22.28
		EC	243.88	240.00
	Daily	Precipitation	8.86	0.50
		Air temperature	24.47	24.90
JW-1	Hours	water level	155.57	155.60
		water temperature	13.90	13.75
		EC	278.56	280.00
	Daily	Precipitation	6.52	0.20
		Air temperature	24.16	24.60

식(지하수를 같은 관정에서 양수하고 채주입하는 방식)이기 때문에 변동이 자주 발생하는 반면 JW-1의 경우는 수직밀폐형(GCHP)이기 때문에 큰 변동은 나타나지 않는다.

SJ-1 관정의 시계열분석 결과

SJ-1 관정의 여름철 지열히트펌프시스템 가동시 지하수 특성을 파악하기 위해 자기상관함수와 스펙트럼 밀도함수를 분석하였다. 일일 수위, 수온, 전기전도도는 여름철 지열히트펌프가 가동되는 2010년 6월 1일부터 2010년 9월 30일까지의 측정자료(일평균)를 이용하였으며, 일일 강수량, 대기온도는 원주 기상대의 자료를 이용하였다(Fig. 3). 수위, 수온과 전기전도도는 히트펌프시스템 가동에 따른 영향이 반영되어 수위, 수온 및 전기전도도의 지연시간이 각각 7, 19, 11일로 자기상관함수가 빠르게 감소하며 잦은 변동양상을 보였다. 강수량과 대기온도도 마찬가지로 지연시간이 각각 1, 23일로 비교적 자기상관함수가 빠르게 감소하며 나타났다(Table 2). 이는 짧은 지연시간에 대해 빠르게 0으로 감소하는 약한 자기상관성을 나타내고 있다. 스펙트럼 밀도함수는 전기전도도를 제외하고 약 0.007에 최고치를 보여주고 있으며 외부 스트레스에 의한 반응 정도를 나타내는 조절시간(regulation time)은 수위, 수온, 전기전도도, 강수량, 대기온도 각각 0.0067, 0.0127, 0.0011, 0, 0.0117일로 강수량이 0일로 가장 짧게 나타났다. 자기상관분석과 스펙트럼 밀도분석 결과 수위, 수온, 전기전도도, 강수량, 대기온도 모두 약한 자기상관성을 보여준다. 그러나 이들에 영향인자는 차이가 있다. 지하수를 직접 이용하는 수주지열정인 SJ-1에서

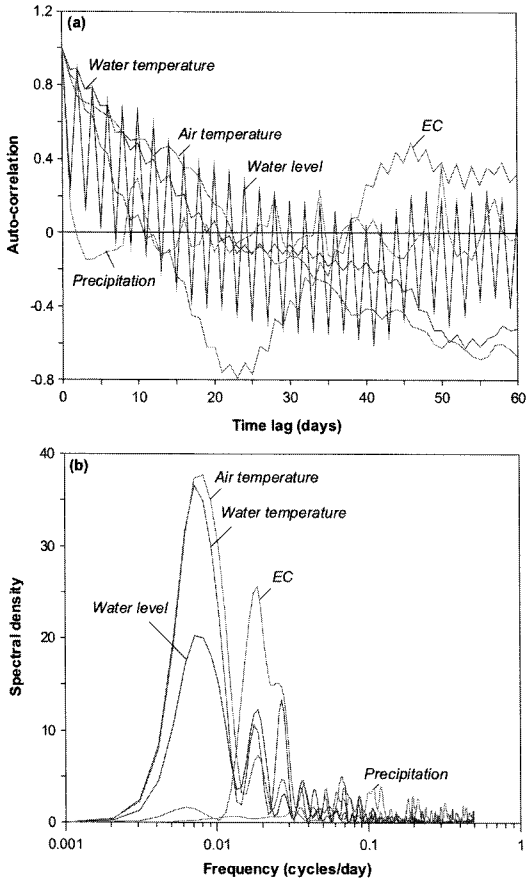


Fig. 3. Functions of (a) auto-correlation and (b) the spectral density of daily water level, water temperature, EC, site precipitation, and site air temperature at SJ-1.

Table 2. Time lags and regulation times for water level, water temperature, EC, site precipitation, and air temperature.

Well	Time series data	Time lag (days)	Regulation time (days)
SJ-1	Water level	7	0.0067
	Water temperature	19	0.0127
	EC	11	0.0011
	Precipitation	1	0
	Air temperature	23	0.0117

지하수위, 지하수온과 전기전도도는 히트펌프 가동 시에 수위의 차이가 약 2m 정도 발생하기 때문에 수위가 지속적이지 못하고 자기 기억효과가 작다. 이는 히트펌프를 가동에 의한 인위적인 변화가 영향을 주어 자기상관성이 작아진다고 판단된다. 강수량과 대기온도의 경우에는 불

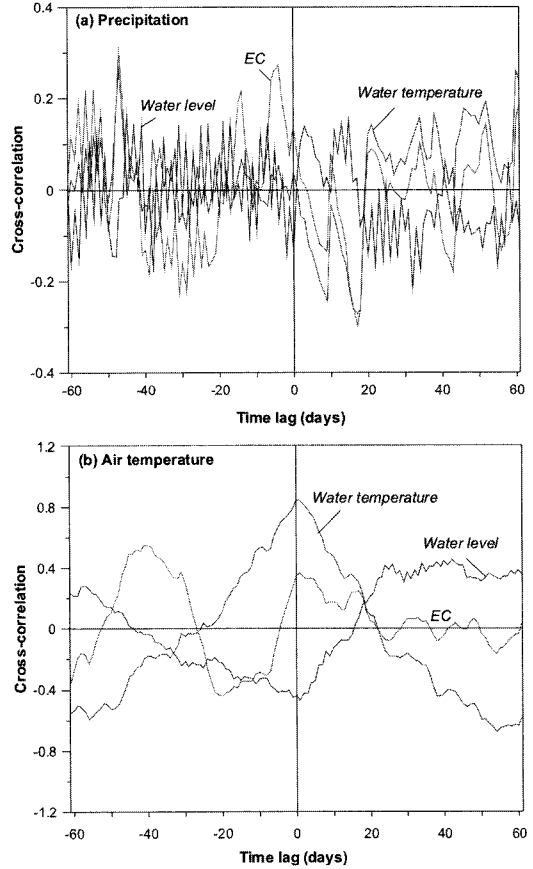


Fig. 4. Cross-correlation of daily water level, water temperature, and EC with (a) site precipitation and (b) site air temperature in SJ-1.

규칙한 자연현상에 의한 영향인자가 적용되는 것으로 판단된다.

SJ-1의 강수량과 수위, 수온, 전기전도도의 상호연관성과 대기온도와 수위, 수온, 전기전도도 상호연관성을 파악하기 위해 일평균 자료를 이용하여 상호상관함수를 계산하였다(Fig. 4). 강수량을 입력으로 수위, 수온과 전기전도도의 변화를 출력으로 간주하였을 때 수위, 수온, 전기전도도 각각 최대 교차상관값이 0.12, 0.14, 0.07로 나타났다 이는 강수량에 대하여 작은 상호상관성을 보여주며, 최고 상관성을 보이는 지연시간(time delay)은 강수량이라는 영향요인에 전파속도를 의미하는 것으로 또한 각각 5, 21, 10일로 비교적 지하수위가 가장 짧은 시간에 영향을 받는 것을 알았다. 이는 여러 가지 영향요인이 작용하지만 수리지질학적 특성보다는 지열히트펌프 가동에 의하여 지하수 함양이 빠르게 일어나기 때문이라고 판단된다(Table 3).

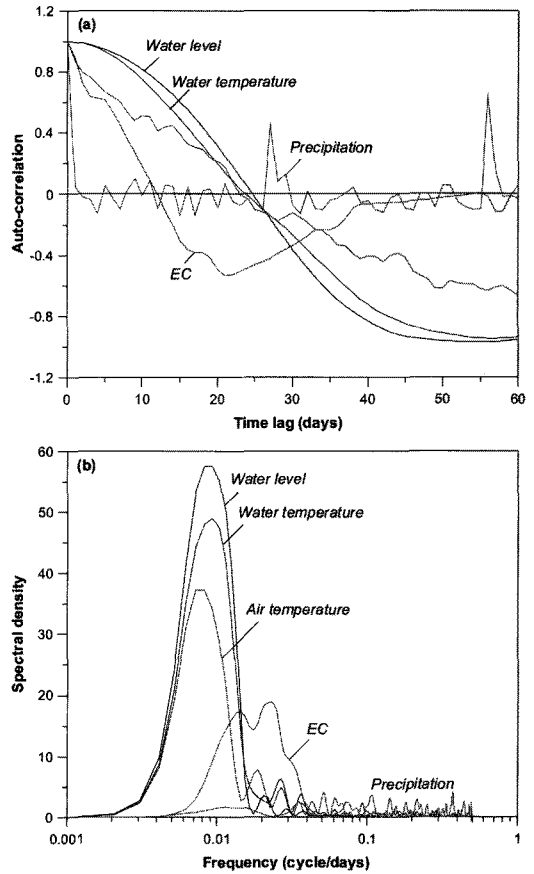
**Table 3.** Time delays and maximum cross-correlations of water level, water temperature, EC with precipitation, and air temperature.

Well	Input data	Output data	Time delay (days)	Maximum cross-correlation
SJ-1		Water level	5	0.12
	Precipitation	Water temp.	21	0.14
		EC	10	0.07
		Water level	42	0.45
	Air temp.	Water temp.	1	0.85
		EC	1	0.36

대기온도를 입력으로 수위, 수온과 전기전도도의 변화를 출력으로 간주하였을 때는 수위, 수온, 전기전도도의 최대 교차상관값이 각각 0.45, 0.85, 0.36으로 나타났다. 여기서 지하수온은 매우 큰 상호상관성을 보여주며 지연시간도 1일로 매우 짧게 나타났다. 이에 반해 수위와 전기전도도는 상대적으로 작은 상호상관성을 보여주지만 지연시간은 전기전도도가 1일로 짧게 나타나는 반면 수위는 42일로 나타난다. 이는 대기온도에 의해 전기전도도가 수위에 비해 빨리 영향을 받는다는 것을 의미한다. 상지대의 지열히트펌프 시스템은 수주지열정으로 지하수를 직접 양수하고 주입하여 열교환을 하기 때문에 수위는 강수량이나 다른 기작의 영향보다 지열히트펌프에 의한 영향을 더 받는다고 판단된다. 수온 역시 지하수를 직접 열교환 유체역할을 하기 때문에 히트펌프 가동에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단된다.

**JW-1 관정의 시계열분석 결과**

JW-1 관정의 여름철 지열히트펌프시스템 가동시 지하수 특성을 파악하기 위해 자기상관함수와 스펙트럼 밀도함수를 분석하였다. 일일 수위, 수온, 전기전도도는 여름철 지열히트펌프가 가동되는 2010년 6월 1일부터 2010년 9월 30일까지의 측정자료(일평균)를 이용하였으며, 일일 강수량, 대기온도는 충주 기상대의 자료를 이용하였다 (Fig. 5). 수위, 수온과 전기전도도의 지연시간이 각각 25, 24, 12일로 SJ-1과 비교했을 때 상대적으로 자기상관함수가 느리게 감소하고 드문 변동양상을 보였다. 특히 수위는 지연시간의 차이가 컸는데 이는 JW-1이 지하수를 직접 이용하지 않는 수직밀폐형이기 때문에 히트펌프시스템의 영향인자가 제거됨으로서 상대적으로 자기상관성이 증가되었다고 판단된다. 강수량과 대기온도는 지연시간이 각각 2, 23일로 비교적 SJ-1과 비슷하게 나타났다(Table 4).



**Fig. 5.** Functions of (a) auto-correlation and (b) spectral density of daily water level, water temperature, EC, site precipitation, and site air temperature in JW-1.

**Table 4.** Time lags and regulation times for water level, water temperature, EC, site precipitation, and air temperature.

Well	Time series data	Time lag (days)	Regulation time (days)
JW-1	Water level	25	0.0135
	Water temperature	24	0.0124
	EC	12	0.0003
	Precipitation	2	0.0003
	Air temperature	23	0.0119

스펙트럼 밀도함수는 전기전도도를 제외하고 약 0.007에 최고치를 보여주고 있으며 외부 스트레스에 의한 반응 정도를 나타내는 조절시간(regulation time)은 수위, 수온, 전기전도도, 강수량, 대기온도 각각 0.0135, 0.0124, 0.0003, 0.0003, 0.0119 일로 전기전도도와 강수량이 가장 짧게

나타났다. 자기상관분석 및 스펙트럼 밀도분석결과 수위, 수온, 전기전도도, 강수량, 대기온도는 약한 자기상관성을 보여준다. 그러나 SJ-1과 비교했을 때는 상대적으로 높은 자기상관성을 보여준다. 이는 지하수를 직접 이용하지 않는 수직 밀폐형인 JW-1은 히트펌프 가동에 따른 영향을 받지 않기 때문에 상대적으로 자기 기억효과가 증가된다고 판단된다. 강수량과 대기온도의 경우는 SJ-1과 마찬가지로 불규칙한 자연현상에 의한 영향 인자가 적용되어 자기 기억효과가 작은 것으로 판단된다.

JW-1 관정의 강수량과 수위, 수온, 전기전도도의 상호 연관성과 기온과 지하수위, 지하수온, 전기전도도 상호연관성을 파악하기 위해 일평균 자료를 이용하여 상호상관 함수를 계산하였다(Fig. 6). 강수량을 입력으로 수위, 수온과 전기전도도의 변화를 출력으로 간주하였을 때 수위, 수온, 전기전도도 각각 최대 교차상관값이 0.15, 0.18, 0.07

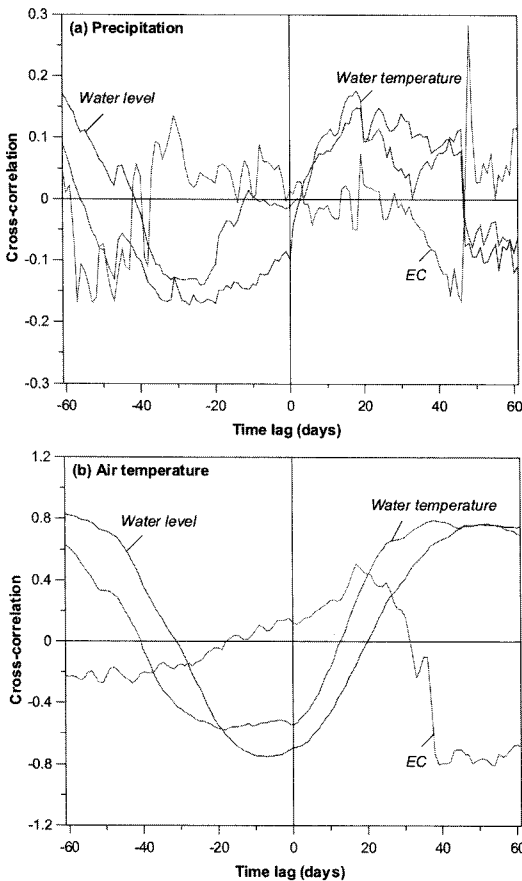


Fig. 6. Cross-correlation of daily water level, water temperature, and EC with (a) site precipitation and (b) site air temperature at JW-1.

Table 5. Time delays and maximum cross-correlations between water level, water temperature, and EC versus precipitation and air temperature.

Well	Input data	Output data	Time delay (days)	Maximum cross-correlation
JW-1		Water level	18	0.15
	Precipitation	Water temp.	18	0.18
		EC	19	0.07
		Water level	50	0.77
	Air temp.	Water temp.	38	0.79
		EC	17	0.51

로 나타났다. 이는 강수량에 대하여 작은 상호상관성을 보여주며, 최고 상관성을 보이는 지연시간은 강수량이라는 영향요인에 전파속도를 의미하는 것으로 각각 18, 18, 19일로 지하수위의 경우 SJ-1에 비해 지연시간이 긴 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 여러 가지 영향요인이 작용하지만 SJ-1과는 다르게 지열히트펌프의 가동에 의한 영향보다는 상부불포화대가 두꺼워 지하수 함양이 상대적으로 느리게 일어나기 때문으로 판단된다(Table 5).

대기온도를 입력으로 수위, 수온과 전기전도도의 변화를 출력으로 간주하였을 때는 수위, 수온, 전기전도도의 최대 교차상관값이 각각 0.77, 0.79, 0.51로 나타났다. 수위와 수온이 큰 상호상관성을 보여주나 기온에 대한 지연시간이 각각 50, 38일로 SJ-1과 비교하여 매우 긴 지연시간을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 대기온도에 의한 전파속도가 매우 느리다고 할 수 있다. 이는 밀폐형 지열히트펌프의 특성상 지하수를 직접 이용하는 SJ-1에 비해 전파속도가 느려 나타나는 것으로 판단된다. 한편 전기전도도는 수위와 수온보다 작은 상호상관성을 보여주며 지연시간은 17일이다. 전파속도는 상대적으로 빠르게 나타나지만 작은 상호상관성을 보여주기 때문에 대기온도에 의한 스트레 강도는 작다. 증원대의 히트펌프시스템은 수직밀폐형으로 유체를 이용하여 열교환을 하기 때문에 수위 변화는 히트펌프에 의한 영향보다 강수량 또는 다른 기작에 영향을 더 받는다고 판단된다. 수온과 전기전도도 또한 마찬가지로 유체를 이용하여 열교환을 하기 때문에 지열히트펌프 가동에 의한 영향보다는 다른 기작에 의한 영향이 더 크다고 판단된다.

결론

본 연구에서는 지열히트펌프시스템 중 수주지열정을

이용하는 상지대와 수직밀폐형을 이용하는 중원대에서 관측된 자료를 이용하여 시계열분석을 실시하였다. 연구에서 자기상관함수, 스펙트럼 밀도함수, 교차상관함수를 사용하여 시계열특성을 파악하였다. 수주지열정을 사용하는 상지대의 수위, 수온, 전기전도도는 수직밀폐형을 사용하는 중원대와 비교하여 상대적으로 자기상관성이 작게 나타났다. 이는 지열히트펌프시스템의 열교환 유체의 차이가 가장 큰 요인으로 작용한다.

지하수가 직접 열교환 유체의 역할을 하는 상지대의 히트펌프시스템은 상대적으로 대기온도 스트레스에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 수리전도도는 상지대와 중원대 모두 비교적 높아 지하수의 유동이 크지만 상대적으로 지하수를 이용하지 않고 지중에 설치된 루프를 이용하여 열교환 유체를 순환시키는 중원대의 지열히트펌프시스템은 상대적으로 강수 스트레스에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 한편 전기전도도의 경우 지속적으로 지하수가 순환하는 상지대보다 중원대의 전기전도도가 안정적인 상태를 보이지만, 정교한 측정을 통한 시계열분석이 필요하다. 본 연구에서는 여름철 지열히트펌프 가동에 따른 지하수 특성 변화가 지열시스템의 종류에 따라 어떻게 변화하는지 보여주었다. 그러나 겨울철 지열히트펌프시스템에 따른 지하수 특성의 변화와 다양한 지열시스템의 종류에 대한 지하수 특성 변화에서는 예측할 수 없었다. 앞으로 좀 더 다양한 지열시스템 종류와 계절적 특성에 따른 지하수 특성 변화에 대한 연구가 필요하다.

## 사 사

본 논문은 환경부 “토양·지하수오염방지기술개발사업(171-101-011)”에서 지원받았으며 이에 감사드립니다. 좋은 심사의견을 주신 경북대 박은규 교수님과 익명의 “심사위원님께” 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김유리, 우남철, 이상덕, 홍태경, 김준, 2008, 광릉 수문연구부지 내 원두부 소유역에서 지하수면의 주기적 변동 특성, *지하수토양환경*, 13, 43-51.
- 박병권, 장호완, 우영균, 1989, 원주도폭 지질보고서(축척 1:50,000), 한국동력자원연구소, 37p.
- 송성호, 이규상, 성백옥, 김영규, 김양빈, 이진용, 이명재, 2007, 시계열분석법을 이용한 해수침투 관측망 자료 평가, 제2회 국제지구과학올림피아드 국제회의 및 한국 지구과학회 2007년 춘계학술발표회, 조선대학교, 4월 12-13일, 227-235.
- 신현준, 2004, 지열원 열펌프 시스템 관련 기술 및 적용 사례, 공공기관 대체에너지 이용 의무화 제도 및 적용 모듈 설명회, 1-65.
- 이봉주, 문상호, 조병욱, 성익환, 이철우, 2001, 스펙트럼 분석을 통한 지하수위 변동의 원인 규명, *지질학회지*, 37, 287-296.
- 이봉주, 황세호, 2008, 지하수위 변동 특성에 근거한 해수 침투 특성평가: 영광 백수지역, *지질학회지*, 44, 233-240.
- 이종혁, 김정환, 1972, 괴산 지질도폭 설명서(축척 1:50,000), 국립지질조사소, 47p.
- 이진용, 이강근, 2002, 강우에 대한 지하수위 반응양상 비교분석: 강원도 원주지역과 경기도 의왕지역, *지하수 토양환경*, 7, 3-14.
- 이진용, 이종규, 김정우, 김창균, 2008, 지열 시스템이 토양·지하수에 미치는 영향에 관한 연구, 최종보고서, 환경부, 240p.
- 조윤주, 이진용, 임수영, 홍경표, 2009, 지열히트펌프시스템의 설치 및 운영이 토양·지하수에 미치는 영향에 대한 고찰, *지하수토양환경*, 14, 22-31.
- 최상규, 2003, 지열히트펌프는 국내 여건에 최적인 대체 에너지, *에너지경제신문* 2003년 2월 15일자, <http://www.ekn.kr>.
- Davis, J.C., 1986, *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, New York, 646p.
- Hanson, R.T., Newhouse, M.W. and Dettinger, M.D., 2004, A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic time series in the southwestern United States, *Journal of Hydrology*, 287, 252-269.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. and Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a karst aquifer (Charente, France), *Journal of Hydrology*, 205, 217-231.
- Lee, J.Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1560-1568.
- Lee, J.Y. and Hahn, J.S., 2006, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: implications for heat pumps, *Journal of Hydrology*, 329, 514-526.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, *Journal of Hydrology*, 229, 190-201.
- Mangin, A., 1984, Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale, *Journal of Hydrology*, 67, 25-43.
- Molénat, J., Davy, P., Gascuel-Oudoux, C. and Durand, P., 1999, Study of three subsurface hydrologic systems based on spectral and cross-spectral analysis of time series, *Journal of Hydrology*, 222, 152-164.
- Padilla, A. and Pulido-Bosch, A., 1995, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Journal of Hydrology*, 168, 73-89.



**목종구**

(주)지오쓰리에코  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 070-7579-1205  
Fax: 033-244-8580  
E-mail: mokjk09@hamail.net

**임홍균**

강원대학교 지질학과  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 033-250-8551  
Fax: 033-242-8550  
E-mail: dnamy@nate.com

**장범주**

(주)지오쓰리에코  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 070-7579-1205  
Fax: 033-244-8580  
E-mail: bumju79@hamail.net

**박유철**

강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 033-250-8586  
Fax: 033-244-8580  
E-mail: parkyc@kangwon.ac.kr

**이진용**

강원대학교 지질학과  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 033-250-8551  
Fax: 033-242-8550  
E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr