

강우에 대한 지하수위 반응양상 비교분석 :  
강원도 원주지역과 경기도 의왕지역

이 진 용<sup>1\*</sup> · 이 강 균<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)지오그린21, <sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부

**A comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the  
two aquifer systems**

Jin-Yong Lee<sup>1\*</sup> · Kang-Kun Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoGreen21 Co., Ltd.

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

## ABSTRACT

We analyzed hydrologic time-series data obtained from a fractured aquifer in Wonju and a porous shallow aquifer in Uiwang area. Auto-correlation, spectral density, and cross-correlation functions were used for the analyses. Water level at a shallow well in Wonju was weakly auto-correlated and it was sensitive to direct infiltration from rainfall through soil zone while that at a well screened in the fractured zone showed a relative stability to an outer stress (rainfall), which was derived from a delayed transmission of recharge stress through a fracture network from a remote area. Characteristics of time-series data in Uiwang area were similar to those in the fractured zone in Wonju. This was caused by a regional recharge from a distant area rather than a direct infiltration. This study demonstrated a usefulness of time series analyses for identification of recharge mechanism.

## 요약문

강원도 원주지역 암반대수층과 경기도 의왕지역 천층대수층에서 측정한 연속지하수위자료에 대해 시계열분석

\* Corresponding author : hydrolee@netian.com

원고접수일 : 2001. 6.19 개재승인일 : 2001.12.28

을 하였다. 연구에 사용한 시계열특성함수는 자기상관함수, 스펙트럼밀도함수, 그리고 상호상관함수이다. 분석결과 강원도 원주지역의 천층대수층의 지하수위는 자기상관성이 상대적으로 작고 상부토양층을 통한 강우의 직접적 침투에 민감하고 단열암반대수층의 지하수위는 상대적으로 외부자극(강우)에 안정적인데 이는 먼 곳으로부터 단열망을 통한 자극의 전파에 기인하거나 혹은 중간에 투수성이 낮은 비포화편마암대의 영향으로 보인다. 의왕지역의 지하수위의 시계열적 특성은 원주지역의 단열암반대수층의 그것과 유사하다. 이는 지하수위측정 지역의 지하수함양이 직접적 강우침투보다는 광역적 함양과 그 스트레스의 전파에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 강우와 지하수위와의 시계열 분석이 지하수 함양기작 이해에 어떻게 이용되는지를 보여주었다.

## 1. 개 요

최근 수자원으로서 지하수의 이용에 대한 관심이 증대되면서 지하수함양에 대한 많은 연구가 전개되고 있다. 국내에서도 지하수함양에 대한 활발한 연구가 진행되고 있고 상당한 연구성과들을 거두고 있다<sup>[1-4]</sup>. 특히 대수층의 특성에 따른 지하수위의 변화양상을 이용하여 지하수 함양량을 추정하려는 시도가 국제적으로 활발하다. 또 이를 위한 기초연구로 지하수위 시계열 자료분석 연구도 많다<sup>[5-7]</sup>.

강우에 대한 지하수위의 반응양상은 대상 대수층의 여러 가지 지형적, 수리지질학적 인자 및 인위적인 요인들의 지배를 받는다. 수리지질학적 요인들에는 대수층의 수리전도도, 비저류계수 및 상부 불포화대의 두께, 대수층의 형태(피압 대수층 혹은 자유면 대수층)와 구성매질의 형태(단열암반 혹은 다공성매질) 등이 있다. 이외에도 다양한 인자들이 있으며 이들은 서로 독립적이거나 많은 경우 서로 상관성을 가지고 있다. 또 지형적인 기복은 강우시 지표면 흐름(surface runoff)과 침투율(infiltration rate)에 직접적인 영향을 미쳐 결과적으로 수위반응 양상도 달라지게 된다. 어떤 산간지역은 직접적인 침투보다는 산간상부에 노출된 노두의 단열에 강우가 침투하여 단열망을 따라 주로 지하수가 함양되는 경우도 있다. 이와는 달리 평평한 지형의 경우 광역적 지하수 함양과 함께 국지적이고 직접적인 강우 침투에 지하수위가 더 민감하게 반응하는 경우도 있다<sup>[8]</sup>.

지하수위 시계열자료를 이용하여 대상 지하수시스템의 변동양상을 분석하는 기법은 초기에는 주로 선형시

스템이라고 간주하는 카르스트지형에 많이 적용되었다. 그리고 이후 이와 같은 분석은 다양한 대수층에 적용되었다. 그리고 최근 이런 분석법을 단열암반 대수층에까지 확대하여 수위변동양상과 지하수시스템에 대한 이해를 증대시켰다<sup>[5,8]</sup>.

이러한 지하수위 시계열 분석법의 가장 큰 장점은 대수층 자체의 수리지질학적 혹은 물리적 수리상수에 대한 정밀한 정보없이 입력값(강우)과 출력값(지하수위)만으로 대상 대수층에 대한 이해를 시도한다는 것이다. 즉 어떤 연속적인 자료들만으로 두 변수간의 신호적 반응양상을 해석하는 것이다. 그러나 앞서 말한 바와 같이 이러한 시계열적 분석의 가장 큰 단점은 대상 시스템에 대한 물리적 이해 고리가 약하다는 것이다. 그러나 최근 많은 연구자들의 노력으로 대수층의 지하수위 변화에 대한 다양한 시계열 함수들에 대한 물리적 이해를 증진시켰다<sup>[9]</sup>.

본 연구에서는 수리지질학적 배경이 다른 두 대수층에서 획득한 지하수위자료를 시계열분석하고 이를 통해 해석 가능한 정보들을 두 대수층에 대한 기준의 수리지질학적 정보와 결합함으로써 장기 지하수위 관측 자료의 지하수 함양기작 이해를 위한 이용 예를 제시하였다. 비교대상은 강원도 원주시 부론면에 위치한 단열암반 대수층<sup>[10,11]</sup>과 경기도 의왕시의 다공성 매질(사질)로 구성된 천층 대수층<sup>[12,13]</sup>에서 획득한 지하수위 변동자료이다. 선행연구들<sup>[10,13-18]</sup>이 두 지역에 대한 수리시험 및 지하수오염에 연구초점이 맞추어졌다면, 본 논문에서는 두 지역에서 획득한 수위자료를 해석함으로써 해석결과의 물리적 의미와 지역적 차이를 유발하는 원인을 규명하고자 하였다. 특별히 강원도 원주 지

역의 수위자료 시계열 해석결과는 다른 선행 연구<sup>5</sup>에서 상당부분 규명되었지만, 대수층의 수리지질학적 배경이 다른 의왕지역과의 비교를 위해 본 논문에 일부 인용하였다.

## 2. 연구지역, 수위자료 및 방법

### 2.1 일반수리지질

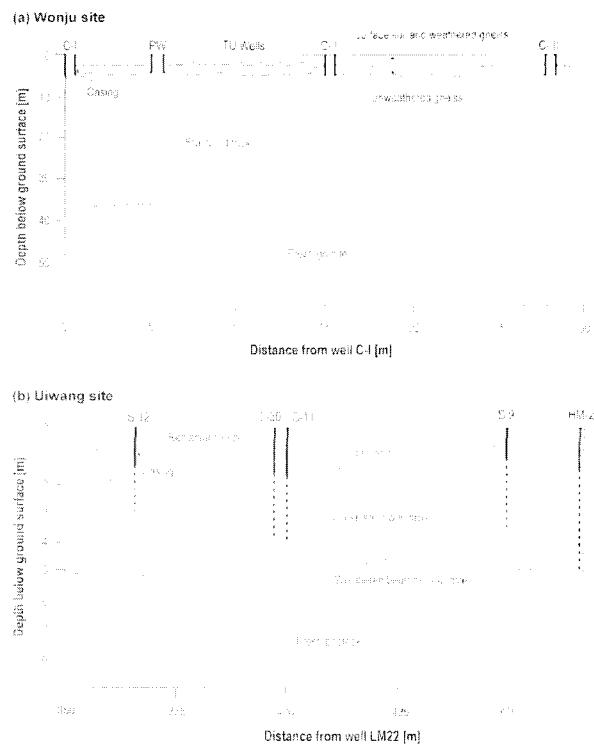
연구대상지역중 하나인 강원도 원주시 부론면 홍호리에는 농업기반공사(전 농어촌진흥공사)에서 농촌지역의 지하수내 오염물질의 거동에 관한 연구수행을 위해 설치한 소규모의 시험용 관정군(well field)이 있다<sup>14</sup>. 일반 농어촌 지역과 마찬가지로 이 지역도 다양한 농업활동에 의한 지하수오염 가능성이 있고 특별히 시험용 관정군이 설치된 곳으로부터 약 500 m 상부에 중소규모의 양돈단지가 있다<sup>10,16,19</sup>. 이외에도 주위에는 개별적인 소, 돼지 사육장이 산재되어 있다.

연구지역의 주봉은 긴경산(352 m)으로 산릉이 동서 방향으로 발달해 있다. 연구지역의 층서단위는 선캠브리아기의 편마암을 기저로 이를 관입한 쥬라기의 화강암과 백악기 맥암 및 제3기 충적층으로 이루어져 있다. 곳에 따라서는 최상부에 복토층이 분포한다. 선캠브리아기의 기저편마암은 주로 흑운모편마암, 호상편마암, 화강편마암으로 구성되어 비교적 단조로운 분포를 보인다. 조사지역에 집중적으로 분포하는 흑운모편마암은 편암류처럼 심하지는 않으나 부분적으로 엽상구조를 보인다. 이를 편마암류는 중생대 쥬라기의 심성암-소위 대보화강암의 관입을 받았다. 본 지역의 화강암류는 조립질내지 중립질의 흑운모화강암으로 백운모를 소량 함유하고 있는 복운모 화강암과는 점이적인 경계를 이루고 있다<sup>20</sup>.

특별히 수위자료를 획득한 시험용 관정군이 설치된 곳의 수직적인 수리단위를 살펴보면 상부 1 m 깊이 정도까지 복토 혹은 풍화된 편마암층, 깊이 약 4 m 정도까지는 풍화되지 않은 편마암층이 있고 그 하부에는 단열이 발달한 화강암층이 약 지하 35 m까지 분포하고 그 하부는 균열이 거의 없는 화강암층이다. 이 층은 하부 불투수층으로 작용한다(Fig. 1a).

연구지역의 지형적 혹은 지리적 특성을 살펴보면 화강암류가 분포하는 비교적 풍화에 강한 지역은 완만한 구릉으로 나타나고 풍화에 약한 부분은 소규모의 평지 를 이루어 경작지로 이용되고 있다. 시험용 관정군의 상부 약 500 m에는 중소규모 양돈 축사가 있고 이 위치에 화강암의 노두가 관찰된다. 그리고 관측정망 하부 약 1 km 정도에 주민의 거주지역이 있다. 관측정망 좌측에 소하천이 있으며 건기에는 건천상태이나 우기에는 상당량의 물이 흐른다. 소하천의 흐름 방향과 지하수의 평균흐름방향은 유사하다. 본 논문에서는 소규모 관측망내 관정중 단열암반 대수층에 스크린이 설치된 하나의 관정(PW) 및 상부 천층대수층에 설치된 관정(TU-8)에서 수집한 지하수위 변동자료 해석에 초점을 맞추었다.

또 다른 연구대상지역의 하나는 경기도 의왕시에 있



**Fig. 1. Representative vertical cross sections of the two study sites. The upper figure was modified from Lee and Lee(2000). Location of well LM22 is not shown in this figure.**

는 천층대수층이다<sup>13,17,18</sup>. 연구지역은 서울에서 남서쪽으로 약 45 km 떨어진 경기도 의왕시에 위치한다. 1974년 항공사진에 의하면 원래 이 지역은 고하천의 주변으로 범람에 의해 생성된 충적층이다. 1973년 이후로 이 지역에 각종 공장과 회사가 들어서기 시작하였다.

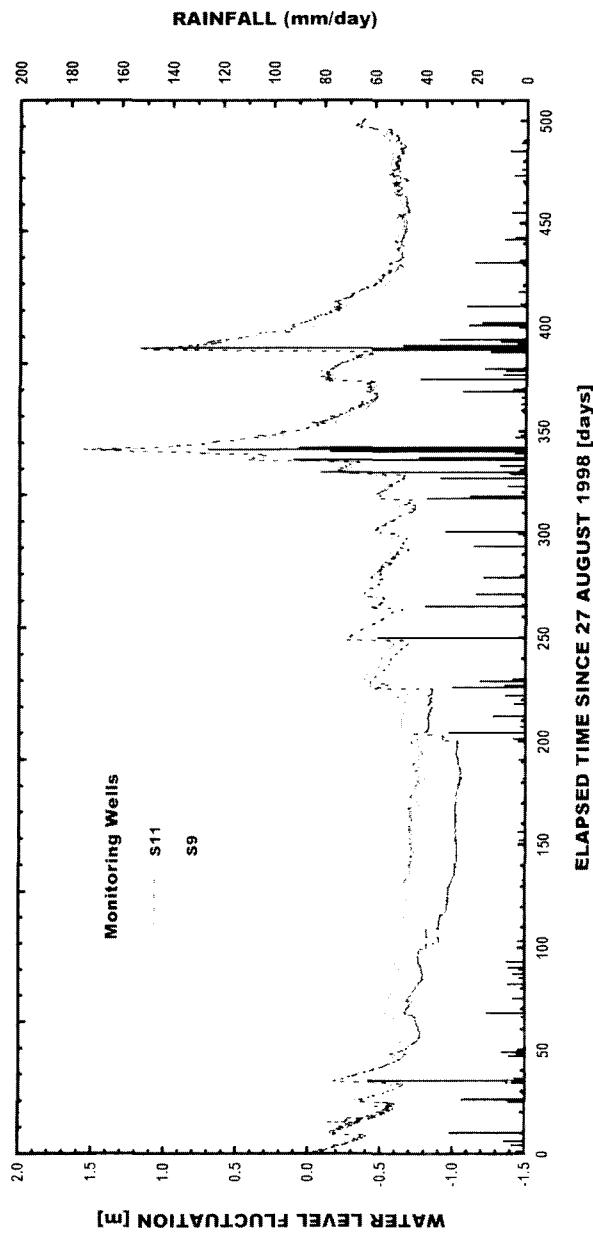
연구지역에는 상부에 지표물질인 복토가 약 0.5~1 m 두께 정도 분포하고 있다. 공장지역과 도로지역은 아스팔트로 포장되어 있다. 그 하부 6 m까지는 충적층 물질로 이루어져 있다. 충적층은 세립질 모래와 조립 혹은 역질 모래로 구성되어 있는데 평균지하수면이 지하 1.5 m~3.5 m로 자유면 대수층을 이루고 있다. 지하 평균 6 m 이하에서는 풍화된 편마암이 나타나는데 상부 자유면 대수층의 실질적인 하부경계 역할을 하고 있다. 풍화대 아래는 단열이 거의 발달하지 않은 편마암이 나타난다(Fig. 1b). 본 연구는 상부 자유면 대수층을 대상으로 한 것이다.

지하수의 평균 흐름방향은 남동쪽에서 북서쪽으로 연구지역내에 있는 소하천과 거의 평행한 방향으로 흐른다. 국부적으로 나타나는 지하수 흐름방향의 변화는 공장내 다양한 지하시설과 계절적인 함양량의 차이에 기인한다. 연구지역의 중앙을 가로지르는 도로는 지하수 흐름에 큰 영향을 주지 않는 것으로 파악되었다. 평균 수두구배는 약 0.006 내외이고 우기에는 0.014로 증가한다.

이 지역에는 각종 연구를 위해 여러 연구자들이 설치한 관정들이 약 100여개 분포한다. 특별히 본 연구에서는 앞서 말한 바와 같이 천층 자유면대수층에 스크린이 설치된 관정에서 획득한 지하수위 변동자료를 해석하였다(Fig. 2).

## 2.2 지하수함양 개념모델

두 연구지역의 수리지질에 대해서는 저자를 비롯한 많은 연구자들<sup>10,12~19</sup>에 의해 잘 특성화되어 있다. 수위 자료를 획득한 위치를 포함한 두 지역의 대표적인 수리지질 단면은 Fig. 1과 같으며 이러한 두 지역의 대



**Fig. 2. Water level fluctuations of the shallow wells (S11 and S9) at the Uiwang site.**

표적 수리지질단위에 대한 기본적인 수리상수들은 Table 1과 같다.

원주 지역의 주 대수층은 하부의 단열암반으로 대부분의 지하수들이 이 구역에 발달한 단열망을 통해 흐른다<sup>10</sup>. 그런데 앞서 말한 바와 같이 관정망이 설치되

**Table 1.** Hydraulic conductivity estimates of representative hydrogeologic units of the two sites.

Site	Hydrogeologic unit	Hydraulic conductivity (cm/sec)
Wonju site	surface soil and weathered gneiss	$1.63 \times 10^{-3} \sim 3.43 \times 10^{-3}$
	unweathered gneiss	$\sim 2.0 \times 10^{-5}$
	fractured rock	$1.84 \times 10^{-4} \sim 1.93 \times 10^{-4}$
	fresh granite	not available
Uiwang site	reclamation soil(silty sand)	$< 10^{-4}$
	fine sand	$1.5 \times 10^{-3} \sim 7.6 \times 10^{-3}$
	coarse sand with gravel	$5.0 \times 10^{-2} \sim 1.85 \times 10^{-1}$
	weathered bedrock	not available
	fresh bedrock	not available

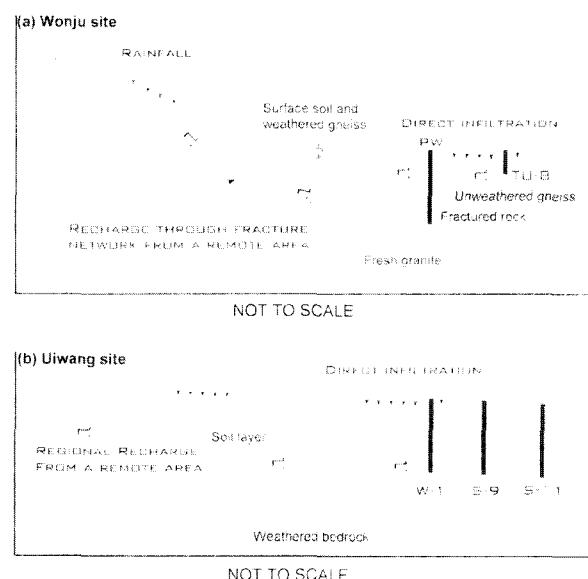
어 있는 곳으로부터 약 500 m 이상 상부에 화강암 노두들이 발견되고 이 노두들에서 여러 방향의 단열들이 발달되어 있다<sup>10</sup>. 그러므로 이 암반대수층의 주된 함양 경로는 강우시 노출된 화강암 노두의 단열을 따라 침투가 일어나고 이들이 단열망을 통해 전파되는 것으로 이해된다(Fig. 3a). 즉 관정망이 설치된 지역에서 직접적인 침투는 상부 천층대수층에 국한된다고 판단된다. 이는 단열암반층의 상부에 있는 수리자질학적 단위인 약간 혹은 거의 풍화를 받지 않은 편마암층의 수

리전도도가 바로 위의 토양층에 비해 100배 이상 낮은 것으로부터도 알 수 있다. 실제로 이 비풍화 편마암층은 하부 단열암반 대수층의 실질적인 상부피압층으로 작용한다<sup>10</sup>. 그런데 상부 토양층에서도 지하수위가 형성되는데 이는 수평적 연속성은 약한 부유대수층으로 평가되었다<sup>10</sup>.

의왕시 지역은 전형적인 충적층 대수층의 성격을 보여주고 있다. 하부로 갈수록 대수층 구성입자의 크기도 증가하고 섞여서 나오는 자갈들에서 이동중에 생긴 마모의 흔적들을 발견할 수 있다. 이 지역에서 지하수 함양은 두 가지 기작으로 볼 수 있는데 하나는 연구지역 상부 최소 2-3 km 거리의 산지지역으로부터 함양되는 광역적 형태와 또 강우의 직접적인 침투에 의한 것으로 볼 수 있다(Fig. 3b). 그러나 현재로선 정량적으로 각각 어느 정도의 기여를 하는지는 알기 어렵다.

### 2.3 시계열분석 방법

일반적으로 연속적인 수리 수문자료는 각기 고유의 시계열적 특성을 가진다. 그러므로 이러한 특성들을 파악하기 위해 각 자료를 연속적인 신호로 간주하여 시간 및 주파수영역(time and frequency domain)에서 분석할 수 있다. 본 연구에서 이용한 시계열 특성함수는 자기상관함수(auto-correlation), 스펙트럼 밀도함수(spectral density), 조절시간(regulation time), 그리고 상호상관함수(cross-correlation) 등이다<sup>9</sup>. 이에 대한 간단한 설명은 아래와 같다.

**Fig. 3.** Conceptual recharge models for the two study sites.

### 1) 자기상관함수 및 스펙트럼밀도 함수

$$\gamma_k = Cov(x_p, x_{t+k}) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \mu_x) - (x_{t+k} - \mu_x)] \quad (1)$$

$$\rho_k = \frac{Cov(x_p, x_{t+k})}{Cov(x_p, x_t)} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (2)$$

여기서  $x_t$ =시계열자료,  $\gamma_k$ =자기분산함수,  $\rho_k$ =자기상관함수,  $\mu$ =시계열자료의 평균,  $k$ =지연시간(time lag),  $n$ =시계열자료의 길이이다. 자기상관함수는 주어진 시간길이에 대해 연속적인 자기값의 선형성<sup>9</sup>과 기억효과<sup>21</sup>를 나타낸다. 만약 시계열자료가 임의적이라면 (random), 예를 들어 일반적인 강우형태, 자기상관함수는 빠르게 감소할 것이고 짧은 지연시간에 대해 0의 값에 수렴할 것이다. 반대로 시계열자료가 강한 자기상관성과 긴 기억효과를 가진다면 자기상관함수는 천천히 감소하는 경향을 보일 것이고 장기간의 지연시간에 대해서 0 이상의 값을 가질 것이다.

주파수영역의 스펙트럼 밀도함수는 자기상관함수의 푸리에 변환이다. 이 스펙트럼 밀도함수로부터 시계열자료의 주기성 등을 확인할 수 있다.

$$S(f) = 2 [1 + 2 \sum_{k=1}^m w(k) \rho_k \cos(2\pi fk)] \quad (3)$$

여기서  $w$ =Tukey filter인데 이 필터는 수리학에 많이 사용되며 제한된 길이의 시계열자료를 사용할 때 발생하는 bias 나 truncation 오차를 극복하는데 유용하다<sup>22,23</sup>. 그리고 조절시간(regulation time),  $T_{reg}=S(0)/2$ 는 스펙트럼 밀도함수로부터 얻을 수 있는데 input (예를 들어 강우) 영향의 지속시간과 해당 시스템 혹은 대수총의 스트레스-반응의 길이를 나타낸다<sup>9</sup>.

### 2) 상호상관함수 및 스펙트럼밀도 함수

$$\gamma_{xy}(k) = Cov(x_p, y_{t+k}) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \mu_x) - (y_{t+k} - \mu_y)] \quad (4)$$

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5)$$

여기서  $\mu_x$ =시계열자료  $x_t$ 의 평균,  $\mu_y$ =시계열자료  $y_t$

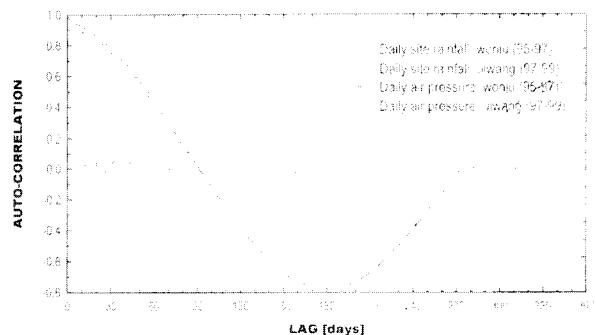
의 평균,  $\sigma_x = \sqrt{x}$ 의 표준편차 그리고  $\sigma_y = \sqrt{y}$ 의 표준편차이다. 이 상호상관함수는 두 시계열 자료간의 상호의존성을 나타낸다. 또 time delay ( $k = 0$ 과 최대상호상관사이의 시간차)는 그 시스템의 스트레스 전파속도를 나타낸다.

## 3. 결과 및 토론

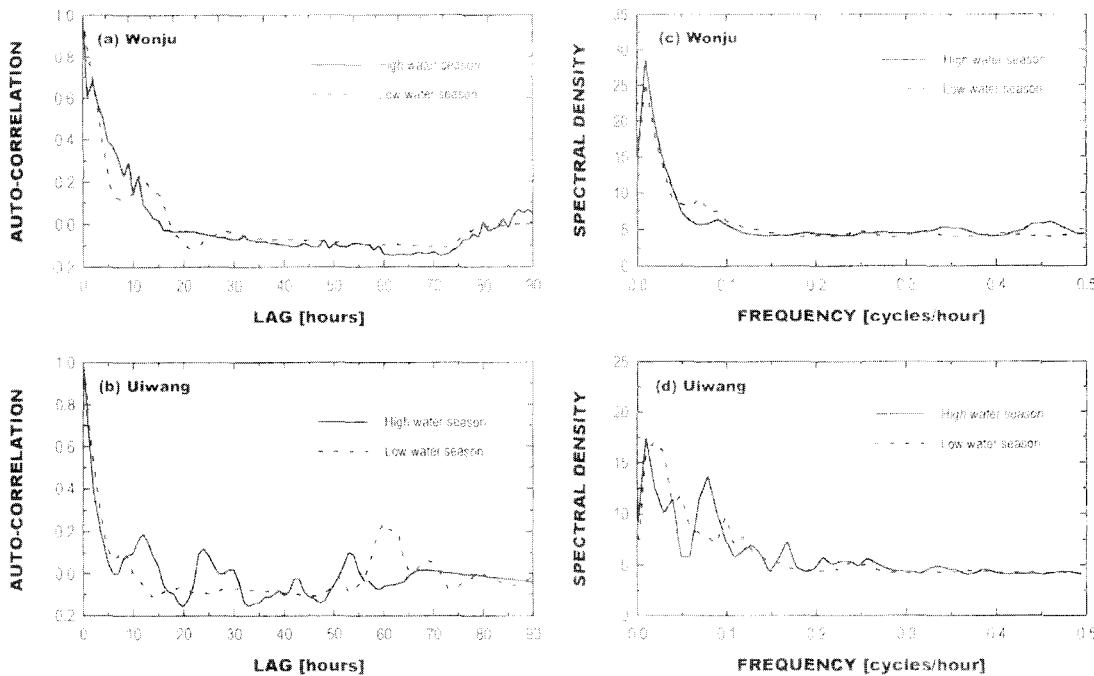
### 3.1 자기상관함수

#### 3.1.1 기압 및 강수량

해당 연구지역의 일일기압과 일일강수량의 변화특성을 이해하기 위해 자기상관함수를 분석하였다. 원주지역에 대해서는 1995-1997년 일일기온 및 일일강수량 자료를 그리고 의왕지역에 대해서는 1997-1999년 일일기압 및 일일강수량자료를 이용하였다. 이때 분석기간은 1000일이고 truncation point는 360일이었다. Fig. 4는 두 지역의 일일기압과 일일강수량의 자기상관함수를 보여준다. 두 지역 모두에서 일일기압의 자기상관계수는 긴 지연시간에 대해 천천히 감소하며 이는 강한 자기상관성을 나타낸다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 연주기성을 확실히 보여준다. 이에 반해 일일강수량은 매우 다른 모습을 보인다. 즉 일일강수량의 자기상관함수는 짧은 지연시간에 대해 빠르게 0에



**Fig. 4. Auto-correlation functions of daily air temperature and daily site rainfall for the two study sites. The truncation points are all 360 days.**



**Fig. 5. Auto-correlation and spectral density functions of hourly rainfall for the two sites.**

도달한다. 이는 일일강수량이 서로 강한 연관성을 가지지 않음을 나타낸다<sup>20)</sup>.

Fig. 5는 두 지역의 시강수량(hourly rainfall)의 시계열적 특성을 보여준다. 우리나라는 강우에 대해 우기(7-9월)와 건기(11-2월)가 특징적으로 나타나는데<sup>9)</sup> 이 두 계절에 대해 따로 분석하여 비교하였다. 두 지역에서 시강수량은 두 시기에 대해 비슷한 시계열적 특성을 보인다. 이 시강수량은 일일강수량의 자기상관함수와 비교해 볼 때 약간의 지연시간에 대해 보다 완만히 감소하는 경향을 볼 수 있다. 그러므로 이 시강수량은 약 15h의 지연시간을 보임으로써 자기의존성을 나타내어 임의적인(random) 변수로 보기 어렵다. 스펙트럼 밀도함수는 0.01(100h 주기)에 최고치를 보였다. 두 시기(우기 및 건기)에 대해서는 두 지역 모두 비슷한 특성을 보이고 있으나 지역적으로는 약간의 차이를 보이고 있다. 원주지역에 비해 의왕지역의 시강수량은 보다 짧은 지연시간에 대해 자기상관함수가 급격히 감소한 반면 이후 지연시간에 대해서 주기적으로 자기상관성이 증감하는 경향을 보이고 있다.

이는 스펙트럼밀도 함수에서도 뚜렷히 나타나는데 단주기(예를 들어  $f=0.1$ )의 특성도 보인다. 이러한 현상은 원주 시강수량이나 두 지역의 일일강수량에서는 찾을 수 없었던 특성이다. 이러한 기후학적 특성에 대한 깊은 논의는 본 연구의 범위를 벗어나는 것으로 차후에 다른 연구를 통해 특성화가 가능할 것으로 판단된다.

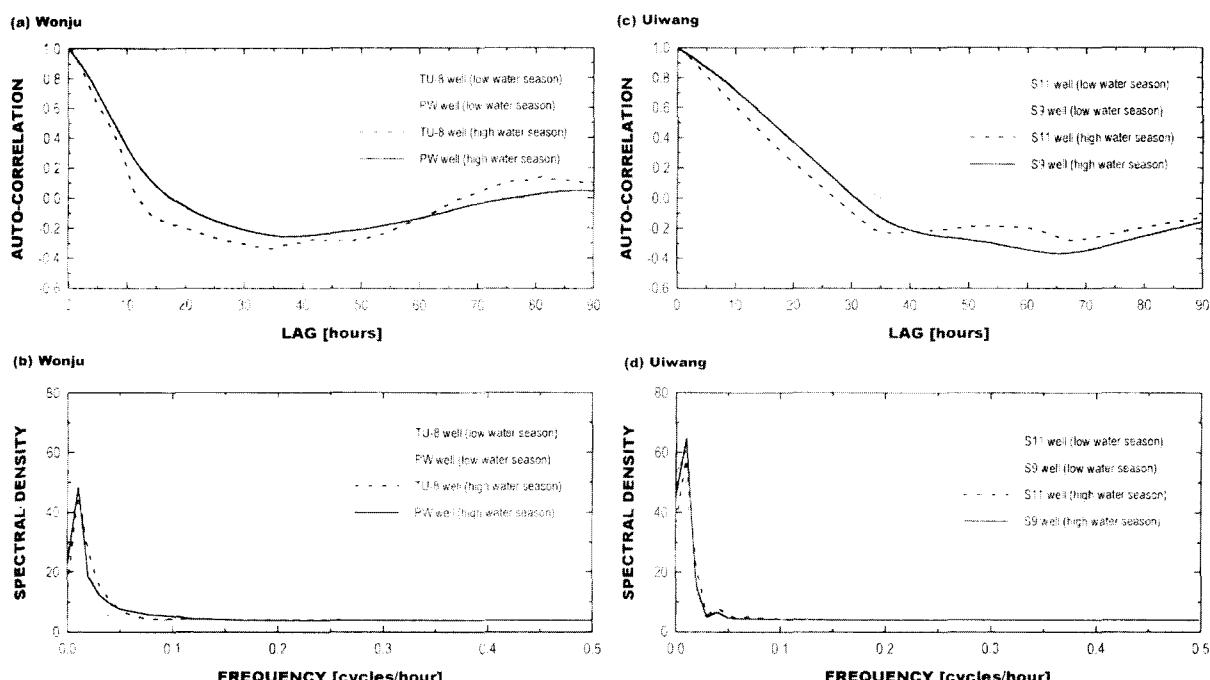
### 3.1.2 지하수위

Fig. 6은 두 지역에서 관측한 시간별 지하수위의 자기상관 및 스펙트럼 밀도함수이다. 단열대수총에 설치된 PW관정 지하수위의 자기상관함수는 우기 및 건기에 각각 17.5h와 34.8h의 지연시간에 0에 도달한다. 이때 조절시간(regulation time)은 각각 7.3h와 26.1h이다(Table 2).

이에 반해 상부천총대수총에 설치된 TU-8관정의 지하수위의 자기상관함수는 우기 및 건기에 대해 각기 12.0h와 27.0h의 지연시간이 지나야 0에 도달한다. 이때 조절시간은 각각 5.3h와 18.7h이다. 두 관정

속  
적  
이  
며  
기  
역  
효  
과  
가  
큰  
것  
으  
로  
보  
이**Table 2.** Results of the hourly basis analyses with the water levels at the two sites.

Site	Well	Season	Time lag(h) (auto-correlation=0)	Regulation time (h)
Wonju	PW	High	17.5	7.3
		Low	34.8	26.1
	TU-8	High	12.0	5.3
		Low	27.0	18.7
Uiwang	S11	High	27.5	18.1
		Low	35.4	23.1
	S9	High	30.7	22.7
		Low	35.2	26.4

**Fig. 6.** Auto-correlation and spectral density functions of hourly water level fluctuations at PW and TU-8 wells for Wonju and at S11 and S9 wells for Uiwang.

모두에 대해 우기일 때 자기상관함수가 가파른 감소경향을 보이고 있다. 특히 두 계절 모두 천총의 TU-8 관정의 지하수위 자기상관함수가 PW관정의 그것에 비해 빠른 감소를 보이고 있다. 이를 통해 볼 때 우기의 지하수위는 자기상관성이 전기에 비해 떨어지고 반면에 전기의 지하수위는 자기상관성이 상대적으로 지

다. 다시 말하면 전기의 지하수위는 우기의 지하수위에 비해 보다 안정적임을 지시한다.

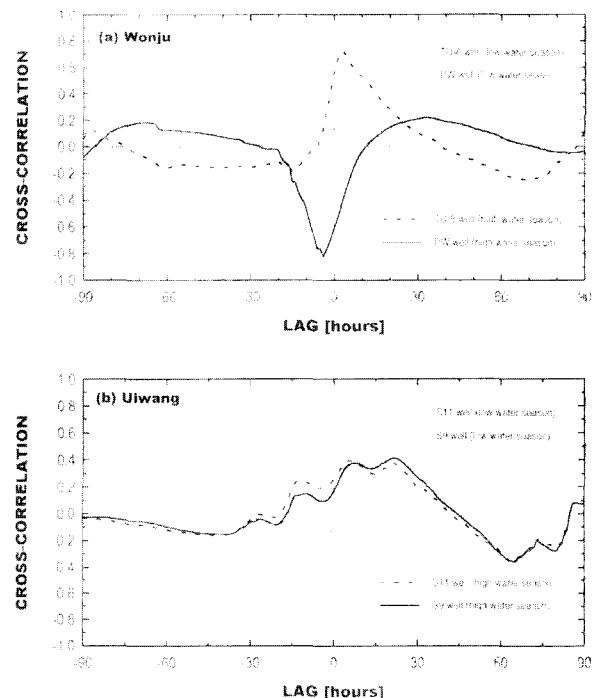
위 원주지역 지하수위의 상관함수에 비해 의왕지역 지하수위의 자기상관함수의 변화양상은 다르다(Fig. 6c,d). 주목할 것은 우기 및 전기의 자기상관함수가

거의 차이가 없다는 것이다. 두 관정 모두 천층 대수층에 설치된 것으로 관정간의 의미있는 차이 또한 발견되지 않는다. 흥미로운 것은 원주지역의 천층대수층 관정 TU-8의 전기시의 변화양상과 거의 흡사하다는 것이다. 이는 시계열 특성함수값(Table 2 참조)에서도 확인된다. 원주지역에 비해 의왕지역의 지하수위의 지연시간 및 조절시간이 전체적으로 크다는 것은 이 지역의 지하수함양 기작(Fig. 3 참조) 및 수리지질학적 배경을 고려할 때 지하수함양지역이 이들 관측점과 원거리에 있음을 나타낸다. 이는 이들 두 지역의 지형적 특성과도 상당히 잘 맞는 설명이다(이에 대한 좀 더 상세한 설명은 다음 장에서 논한다). 또한 의왕지역의 지하수위가 계절적으로 적지 않은 변동(Fig. 2 참조)을 보임에도 불구하고 이들 지하수위의 변화양상은 계절에 상관없이 상당히 안정적임을 알 수 있다.

### 3.2 강우와의 상호상관함수

두 지역에서 지하수위와 강수량과의 상호연관성을 파악하기 위해 상호상관함수를 계산하였다. 이때 강우를 input으로 지하수위변화를 output으로 간주하였다. Fig. 7은 원주 및 의왕지역 관측 지하수위의 강우와의 상호상관함수를 우기 및 전기로 나누어 각각 보여준다. 원주지역의 두 관정에서 강우에 대한 반응은 서로 다른데 우기의 경우 천층관정인 TU-8관정은 매우 큰 상호상관성을 보여주는데 반해 (최대 0.73) 단열암반내 관정 PW의 지하수위는 이보다 훨씬 작은 상관성(최대 0.23)을 보여준다(Table 3). 또 최고 상관

성을 보이는 지역시간(time delay)도 매우 달라 PW 관정은 33h이고 TU8관정은 3h로 매우 짧다. 이는 2.2절에서 말한바와 같이 암반대수층의 지하수는 상대적으로 먼거리에서 단열을 따라 지하수가 함양되는 형



**Fig. 7. Cross-correlation functions of hourly water level fluctuations at PW and TU-8 wells for Wonju and at S11 and S9 wells for Uiwang as output and hourly rainfall as input.**

**Table 3. Time delays obtained from cross-correlation analysis with the water levels at the two sites.**

Site	Well	Season	Time delay (h)	Maximum cross-correlation
Wonju	PW	High	33	0.23
		Low	70	0.22
	TU-8	High	3	0.73
		Low	62	0.14
Uiwang	S11	High	42	0.40
		Low	68	0.32
	S9	High	44	0.38
		Low	68	0.15

태이며 천층대수층의 지하수는 강우가 얕은 상부 불포화대를 거쳐 직접 함양되는 것에 기인하는 것으로 보인다.

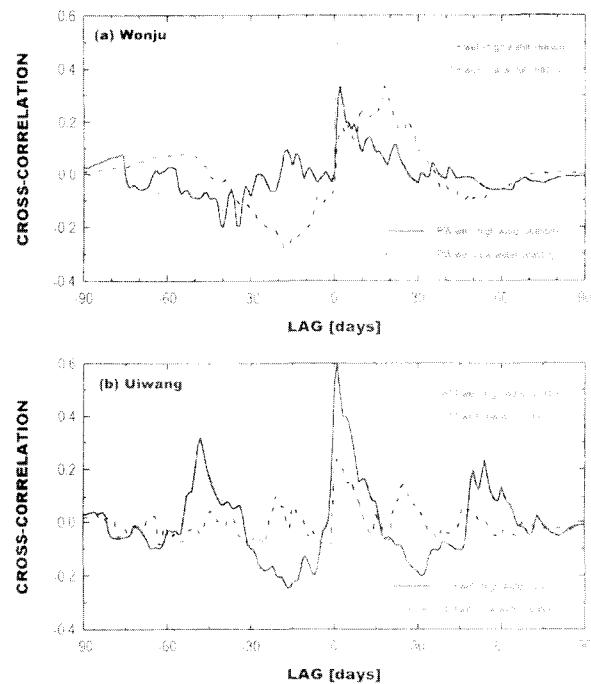
물론 이러한 양상은 전기에는 상당한 변화를 보이는 데 두 관정 모두 이 시기에는 강우와 약한 상관성을 보인다(최대상관성 0.14-0.22). 그러나 천층대수층의 지하수위변화에 비해 단열암반층 지하수위는 계절적인 시계열 특성함수가 상대적으로 안정되어 있다(Table 3 참조). 이는 PW관정의 최고상관성을 보이는 지연시간(time delay)과 최고 상호상관성으로부터 알 수 있다. 강우에 대한 두 관정의 상호상관성이 줄어들고 지연시간이 늘어난 것은 전기에는 상부불포화대의 두께가 증가하여 혹은 강우스트레스의 전파거리가 증가하여 시계열적 신호의 전달이 느려졌고 또 전달되는 동안 스트레스강도가 감쇄되어 나타나는 현상으로 파악된다<sup>5</sup>.

Fig. 7b는 의왕지역의 천층대수층 지하수위의 강우와의 상호상관성을 보여준다. 원주지역과는 상당히 다른 양상이다. 두 관정(S11, S9)간의 차이는 거의 없는 데 이는 두 관정이 바로 인접해 있으며 모두 같은 천층대수층에 설치되어 있기 때문이다. 그러나 우기와 건기에 따라서는 변화를 보이고 있다. 우기에 지연시간이 짧고 또 상호상관성이 보다 높은 것은 원주지역과 같다. 그러나 원주지역에 비해 지연시간이나 상호상관성면에서 계절적인 안정성을 보이고 있다. 이는 이 지역의 지하수 함양이 상부 불포화대를 통한 직접적인 침투를 통해 이루어진다기 보다는 개념모델에서 상정한 것처럼 먼 함양지역으로부터 이루어지기 때문에 판단된다. 이는 원주지역의 암반대수층의 시계열적 특성과 일맥상통하는 점이다.

위의 이런 특성들은 앞서의 시강수와 시수위자료를 이용한 분석과 일일자료를 이용한 상호상관성분석을 비교하면 더욱 명확해진다. 특별히 수리지질학적 연속 측정자료의 해석은 측정빈도에 매우 민감하다. 만약 어떤 수리지질학적 자료들의 특성이 아주 빠른 시간내에 나타나고 사라진다면 시계열분석에 시자료를 이용하는 것이 보다 바람직할 것이고 그렇지 않은 경우 일일자료를 이용하여 해석하는 것이 좋다. 그러나 반드시

시 측정주기를 짧게 하는 것이 좋은 것만은 아니다. 측정주기에 따라서 인식할 수 있는 수리학적 특성이 각기 다르기 때문이다. Fig. 8은 일일자료의 분석결과이다. 두 지역 모두에 대해 재미있는 결과는 강우에 대해 상대적으로 반응이 빠른 경우(예를 들어 TU-8 관정수위: 우기)는 시강우와 시수위 사이에서 높은 상관성을 보이고 상대적으로 시스템이 안정되거나 혹은 함양거리가 먼(스트레스 전파속도가 느린 혹은 전달시간이 큰 경우) 경우는 오히려 일강우와 일수위사이에 더 큰 상관성을 보였다. 다시 말하면 스트레스의 전파가 빠른 경우 긴 관측주기의 자료를 이용하면 신호의 특성이 관측주기에 lumping되어 그 특성을 파악하기 어렵고 그 반대인 경우는 장주기적 특성을 제대로 파악하지 못할 수 있다.

위의 분석을 종합하여 해석해보면 원주지역의 천층대수층의 지하수위는 안정성이 적고 강우에 대해 직접



**Fig. 8. Cross-correlation functions of daily water level fluctuations at PW and TU-8 wells for Wonju and at S11 and S9 wells for Uiwang as output and daily rainfall as input.**

적인 침투형태로 함양되며 암반대수층 및 의왕지역 천 층대수층의 지하수위는 상대적으로 안정적이고 또 상 대적으로 먼 곳으로부터 지하수 함양이 이루어지는 것 으로 판단된다. 이는 의왕지역 수위관측지점 주변은 아스팔트 혹은 매우 낮은 저투수성 표면( $10^4 \text{ cm/sec}$  미만, Table 1 참조)으로 되어있다는 것과 상당한 연 관성을 갖는다.

#### 4. 정리 및 결론

본 연구에서는 강원도 원주 산간지역과 경기도 의왕 지역에 설치된 지하수 관측망에서 얻은 수위자료에 대해 시계열분석을 실시하였다. 강원도 원주지역은 상부 천층 대수층과 하부 단열 암반대수층으로 구성되어있고 경기도 의왕지역은 사질 천층대수층이다. 연구에 사용한 시계열특성함수는 자기상관함수, 스펙트럼밀도 함수, 그리고 상호상관함수였다. 분석결과 강원도 원 주지역의 천층 대수층의 지하수위는 자기상관성이 상 대적으로 작고 상부토양층을 통한 강우의 직접적 침투에 민감한 반면 단열 암반대수층의 지하수위는 상대적으로 외부자극(강우)에 안정적이며 이는 먼 곳으로부터 단열망을 통한 자극의 전파에 기인한다. 의왕지역의 지하수위의 시계열적 특성은 원주지역의 단열암반 대수층의 그것과 유사하다. 이는 지하수위측정 지역의 지하수함양이 직접적 강우침투보다는 광역적 함양과 그 스트레스의 전파에 기인하는 것으로 판단된다. 또 대수층의 반응이 계절적으로 다르게 나타나는 이유는 지하수위가 오르고 내리면서 강우스트레스에 대한 그 시스템의 전달 속도가 달라지기 때문이다. 본 연구에 서는 강우와 지하수위와의 시계열적 상관성분석이 지 하수 함양기작 이해에 어떻게 이용되는지를 보여주었다.

정량적 분석을 위해서는 보다 정교하고 물리적으로 잘 정의된 시계열적 특성함수가 필요하다. 또한 의왕 지역에서는 천층과 암반대수층으로 나누어 분석하지 못하였는데 보다 완결된 비교연구를 위해서는 의왕지역에서도 암반대수층의 지하수위 변화자료 수집이 요구된다. 시계열분석에서 가장 중요한 것은 연속적인

자료의 측정이다. 그러나 최근에는 중간에 단속된 자료들을 보정하는 시계열 통계기법에 대한 연구가 국내에서도 활발하다<sup>24)</sup>.

#### 사사

이 연구는 제2저자를 통한 학술진흥재단 기초과학 지원연구비에 의해 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 최병수, 안중기 “지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구”, 지하수환경 5(2), pp.57-65(1998).
2. 박재성, 김경호, 전민우, 김지수 “소유역의 지하수 함양율 추정기법”, 지하수환경 6(2), pp.76-86(1999).
3. 문상기, 우남칠 “누적강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양율 산정기법”, 추계학술대회 논문집, 한국지하수토양환경학회, pp.23-30(2000).
4. 박창희, 구민호, 김형수, 안경환 “지하수 수위의 장기판측 자료를 이용한 함양율 산정기법”, 추계학술대회 논문집, 한국지하수토양환경학회, pp.246(2000).
5. Lee, J. Y., and Lee, K. K. “Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system”, *J. Hydrol.*, 229, pp. 190-201(2000).
6. 이명재, 이강근 “불규칙한 판측주기를 갖는 지하수자료를 이용한 지하수위변동의 시계열분석”, 추계학술대회 논문집, 한국지하수토양환경학회, pp. 64-68(2000).
7. 김규범, 최영진, 유영권, 류정아, 손영철 “국가 지하수관측소의 장기판측자료에 의한 지하수 변동 특성 분석”, 추계학술대회 논문집, 한국지하수토양환경학회, pp.36-39(2000).
8. Kim, T., Lee, K. K., Ko, K. S., Chang, H. W. “Groundwater flow system inferred from hydraulic stresses and heads at an underground LPG storage cavern site”, *J. Hydrol.*, 236(3-4), pp. 165-184(2000).
9. Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., and Banton, O. “Contribution of correlation and spectral analyses to the

- regional study of a karst aquifer (Charente, France)", *J. Hydrol.*, 205, pp.217-231(1998).
10. 이진용, 이강근, 정형재, 배광옥 “강원도 홍호리 지역 암반대수층의 수리지질 및 지하수 오염취약성 예비조사”, *지질공학* 10(1), pp.27-38(2000).
11. Lee, J. Y., and Lee, K. K. “Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured aquifer system in Wonju, Korea”, *Ground Water*, 37(5), pp. 1531-1537(1999).
12. Cheon, J. Y., Field and numerical studies on groundwater and soil environments of an LNAPL-contaminated site, M.S thesis, Seoul National University(2000).
13. Lee, C. H., Site assessment and in-situ remediation technology application for contaminated sites, Ph.D dissertation, Seoul National University(2000).
14. 농어촌진흥공사, 지하수내 오염물질의 거동에 관한 연구, 농어촌연구원 연구보고서 96-05-04(1996).
15. 이석영, 이민효, 윤정기, 박종환, 이문순, 강진규 “오염부지의 자연정화법 적용 전망”, ‘99 세계 환경의 날 기념 국제세미나: 21세기 토양환경관리를 위한 발전 방향, 국립환경연구원, pp. 131-146(1999).
16. Cho, J. C., Cho, H. B., and Kim, S. J. “Heavy contamination of a subsurface aquifer and a stream by livestock wastewater in a stock farming area, Wonju, Korea”, *Environ. Pollution*, 108, pp. 1-10(1999).
17. Lee, J. Y., Cheon, J. Y., Lee, K. K., Lee, S. Y., and Lee, M. H. “Statistical evaluation of geochemical parameters distribution in a ground water system contaminated with petroleum hydrocarbons”, *J. Environ. Qual.*, 35(5), pp.1548-1563(2001).
18. Lee, J. Y., Cheon, J. Y., Lee, K. K., Lee, S. Y., and Lee, M. H. “Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer”, *J. Cont. Hydrol.*, 50(1-2), pp.139-158(2001).
19. 이진용, 이강근, 정형재, 배광옥 “순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수추정의 문제점 분석”, *지하수환경* 6(1), pp.14-22(1999).
20. KIER (Korea Institute of Energy and Resources), Geological report of the Munmak sheet, KIER, pp.1-17(1989).
21. Angelini, P. “Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in Central Italy”, *Hydrol. Sci. J.*, 42(3), pp.425-439(1997).
22. Mangin, A. “Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques partir des analyses corrélatoire et spectrale”, *J. Hydrol.*, 67, pp.25-43(1984).
23. Padilla, A., and Pulido-Bosch, A. “Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis”, *J. Hydrol.*, 168, pp.73-89(1995).
24. Yi, M. J., Transfer function-noise modeling of irregularly observed groundwater heads with precipitation data, M.S thesis, Seoul National University(2001).