

## 강원도 도시와 농촌지역의 지하수변동 및 함양특성 비교연구

윤상웅<sup>1</sup> · 김예슬<sup>2</sup> · 김동현<sup>2</sup> · 김호철<sup>2</sup> · 신민철<sup>2</sup> · 박재용<sup>2</sup> · 김희정<sup>3</sup> · 이진용<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과

<sup>2</sup>강원과학고등학교

<sup>3</sup>서울대학교 지구환경과학부

### 요 약

본 연구는 강원도의 대표적 도시지역인 원주시와 전형적 농촌지역인 양구군을 선정하여 강우이벤트에 대한 지하수위 변동 및 지하수 함양특성을 비교·분석하였다. 이를 위해 국가지하수관측소 지하수위 자료와 일반관측정의 수위자료를 이용하여 시계열분석을 수행하고 또 지하수위변동법으로 지하수함양율을 분석하였다. 자기상관분석 및 교차상관분석 결과 농촌지역인 양구가 도시지역인 원주보다 상대적으로 지연시간이 짧고 강우에 대한 교차상관성이 높은 것으로 나타났다. 이는 강우이벤트에 대한 지하수위 민감도가 원주보다 상대적으로 양구가 큰 것을 지시한다. 또한 지하수위변동법과 수정 지하수위변동법을 통해 지하수함양율을 추정한 결과 원주는 각각 평균 5.6%, 5.1%, 양구는 각각 평균 16.1%, 17.9%로 추정되었다. 결과적으로 농촌지역인 양구가 도시지역인 원주에 비해 지하수함양율이 약 3~3.5배로 크게 나타나 보다 지하수함양이 원활하다는 것을 지시한다.

**주요어:** 지하수위 변동, 지하수 함양, 강우이벤트, 지하수위변동법

**Sang Woong Yun, Ye Seul Kim, Dong Hyun Kim, Ho Chul Kim, Min Cheol Shin, Jae Yong Park, Heejung Kim and Jin-Yong Lee, 2013, Comparative study on waterlevel fluctuation and recharge characteristic in groundwaters of urban and rural areas in Gangwon Province. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 4, p. 503-516**

**ABSTRACT:** This study was conducted to identify characteristics of waterlevel fluctuation and recharge due to rainfall events in a representative urban Wonju city and rural Yanggu county. For these purposes, groundwater monitoring data were obtained from national groundwater monitoring stations and existing monitoring wells. Using these data, we have carried out hydrologic time-series analyses and estimated groundwater recharge using watertable fluctuation method (WTF). According to the results of auto-correlation and cross-correlation analyses, rural groundwater (Yanggu) showed a relatively shorter time lag and a higher correlation with rainfall than urban groundwater (Wonju). Consequently, the waterlevel in Yanggu was more sensitive than Wonju with rainfall events. Also, WTF and modified WTF method yielded mean recharge ratios of 5.6% and 5.1% in Wonju and 16.1% and 17.9% in Yanggu, respectively. These results indicate that groundwater recharge is more efficient in Yanggu than in Wonju.

**Key words:** Waterlevel fluctuation, Groundwater recharge, Rainfall event, Watertable fluctuation method

(Sang Woong Yun and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Ye Seul Kim, Dong Hyun Kim, Ho Chul Kim, Min Cheol Shin and Jae Yong Park, Kangwon Science High School, Wonju 220-120, Korea; Heejung Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea)

### 1. 서 론

최근 지구온난화에 따른 영향으로 다양한 이상기후들(미증유의 홍수 및 극한 가뭄 등)이 전 세계적인

로 빈발하고 있어 이에 대한 심각성과 대비의 필요성을 경고하고 있다(Sheffield and Wood, 2008; Middleton and Kleinebecker, 2012; Al-Amin *et al.*, 2013). 최근 독일을 비롯한 중유럽의 다수의 국

\* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

가가 과거에 겪지 못한 극심한 홍수로 인해 도시 전체가 물에 잠기는 등 기후변화로 인한 직접적 고통을 당하고 있으며, 이런 현상은 1990년 이후 2013년 현재까지 점점 강화되는 양상을 보여주고 있다 (Hattermann *et al.*, 2013). 우리나라가 속한 아시아 지역도 예외가 아니며 중국, 태국, 방글라데시 등의 나라에서도 심한 가뭄과 홍수가 최근 빈발하고 있다 (Kumar, 2013; Zhang *et al.*, 2013).

한편 우리나라의 경우 기후변화에 따라 과거 51년간(1960-2010) 기온이 연간 평균 0.023~0.04℃의 속도로 증가하였고(Ham and Lee, 2013), 강수량의 경우에도 1910년대 평균 1,250 mm에서 2010년 평균 1,700 mm로 큰 폭으로 상승하였다(KMA, 2013). 이런 큰 폭의 강수량 증가는 대부분 우기(여름철) 강수량 증가에 기인한다(Lee *et al.*, 2012). 특히 여름철 극한 강수 혹은 집중호우의 빈도와 규모가 크게 증가하는 것으로 나타났다(Choi *et al.*, 2013; KMA, 2013). 이와는 반대로 강원도를 중심으로 극심한 가

뭍도 자주 발생하고 있다(Jeong and Lee, 2012).

그런데 대부분의 다른 나라와 마찬가지로 우리나라의 농촌과 도시는 토지이용 측면에서 매우 큰 차이가 난다. 전형적인 농촌의 경우 정주공간을 제외하고 주변은 상대적으로 지하수 함양에 유리한 숲, 과수원 혹은 논밭으로 구성되어 있으나 도시의 경우 일부 공원과 아파트 주변의 녹지를 제외하고는 도로, 빌딩 및 각종 인공시설 부지 대부분이 불투수성 지표면으로 피복되어 있다. 이런 이유로 도심의 경우 지하수 함양이 크게 줄어들고 오히려 직강화 혹은 자연하천의 인공화(하천바닥 혹은 하천사면의 불투수성 마감)로 인해 홍수가 빈발하는 원인이 되고 있다(Lawrence *et al.*, 1998; Lee and Koo, 2007).

그러므로 기후변화로 유발되는 강수패턴의 변화는 농촌과 도시지역에 다른 방식의 반응을 초래할 것이며 이에 대비하기 위해서는 두 지역의 다른 강수반응에 대한 기초적 이해가 필요하다. 본 연구의 목적은 강원도의 대표적 도시인 원주시와 전형적 농

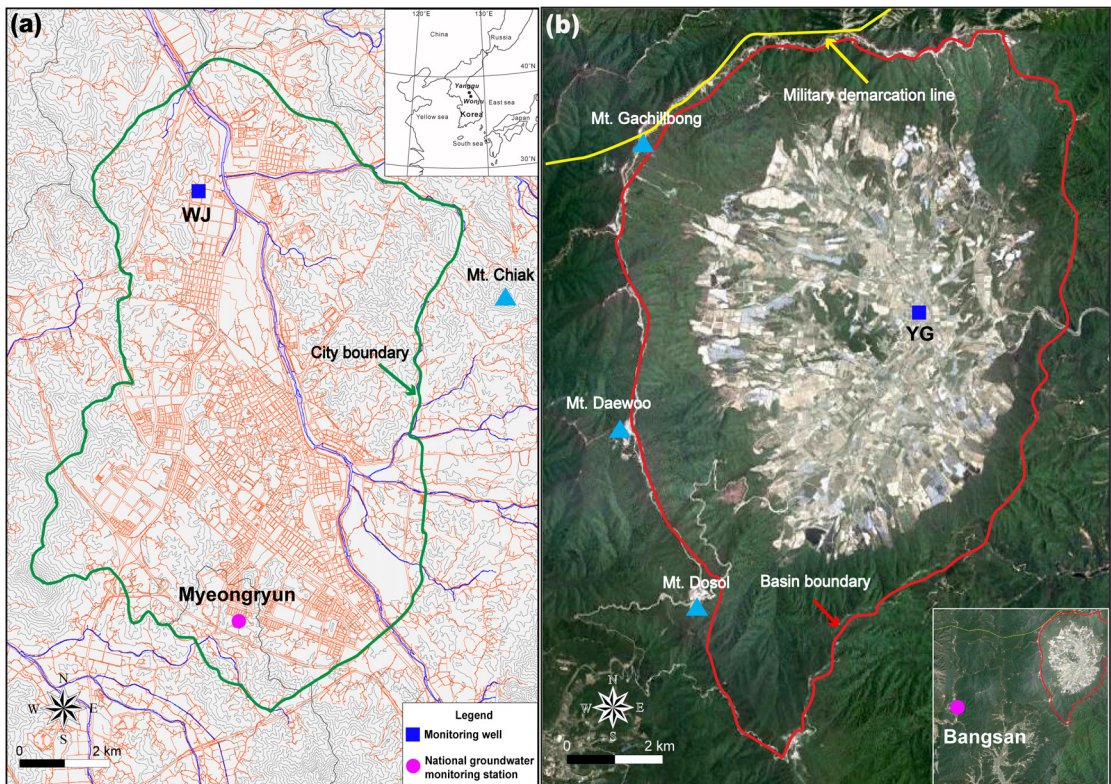


Fig. 1. (a) Topographic map of Wonju, and (b) Goggle map of Yanggu showing the basin boundary and major mountains. Modified from Lee (2009).

촌지역에 해당하는 양구군에서 획득한 지하수위 관측자료를 이용하여 강우에 대한 반응양상과 지하수 함양 특성을 도·농간에 비교·분석하였다.

## 2. 연구지역 및 방법

### 2.1 연구지역

연구대상지역 중 하나인 강원도 원주시는 행정구역상 1읍, 8면, 16동, 60리로 구성되어 있으며, 지리적 방위는 동경 129°13'~127°45'이고 북위 37°08'~37°30'이다(그림 1). 또한 동쪽으로 영월군, 횡성군 그리고 서쪽은 경기도 여주군, 양평군을 접하고 있으며 남쪽은 충청북도 충주시, 제천시, 북쪽은 횡성군과 경계를 이루고 있다(MLTM and K-water, 2011). 연구지역은 행정구역 중 동쪽 지역으로 시 전체면적(867 km<sup>2</sup>)의 약 10%(85 km<sup>2</sup>)에 불과하지만 원주시 총인구(310,000명)의 약 81%(251,000명)가 도심인 동쪽지역에 밀집하고 있고 인구밀도는 2,978명/km<sup>2</sup>이다(Wonju City, 2013). 연구지역은 1964년까지 농업이 주로 행해졌지만 1970년부터 산업화로 인한 인구 증가와 함께 각종 아파트, 빌딩, 도로 등 도시화가 빠

른 속도로 진행되었다(Lee *et al.*, 2005; Baek and Lee, 2011).

기상청의 최근 10년간(2001-2010) 자료에 의하면 연평균 강수량은 1,438.7 mm이고(그림 2a), 7~9월에 연중 우기로 월평균 강수량이 193.0~416.8 mm, 11월~3월은 건기로 월평균 강수량 17.5~53.3 mm의 범위를 보여 건기와 우기가 확연히 구분된다(그림 2b; KMA, 2013). 지형은 서쪽의 포복산(419 m)에서부터 남쪽으로 백운산(981 m), 동쪽의 치악산(1,288 m), 매봉산(1,042 m) 등을 거쳐 높은 산계를 형성하고 있다. 해발고도는 동쪽 치악산에서 높게 나타나며 중앙부의 원주시내 지역은 평지부가 위치하고 있다. 평균 해발고도는 349.8 m로 비교적 높게 나타나며, 지표의 평균 경사도는 17.77°이다(MLTM and K-water, 2011). 연구지역에는 원주천을 중심으로 장양천, 홍양천 및 화천이 흐른다. 원주의 일반지질은 선캄브리아기의 편마암을 기반암으로, 주라기 섬록암 및 화강암류가 관입하였고 하천을 따라 제4기 충적층이 분포하고 있다(MLTM and K-water, 2011).

또 연구대상지역의 다른 하나인 강원도 양구군은 행정구역상 1읍, 4면, 60리로 구성되어 있으며, 지리적

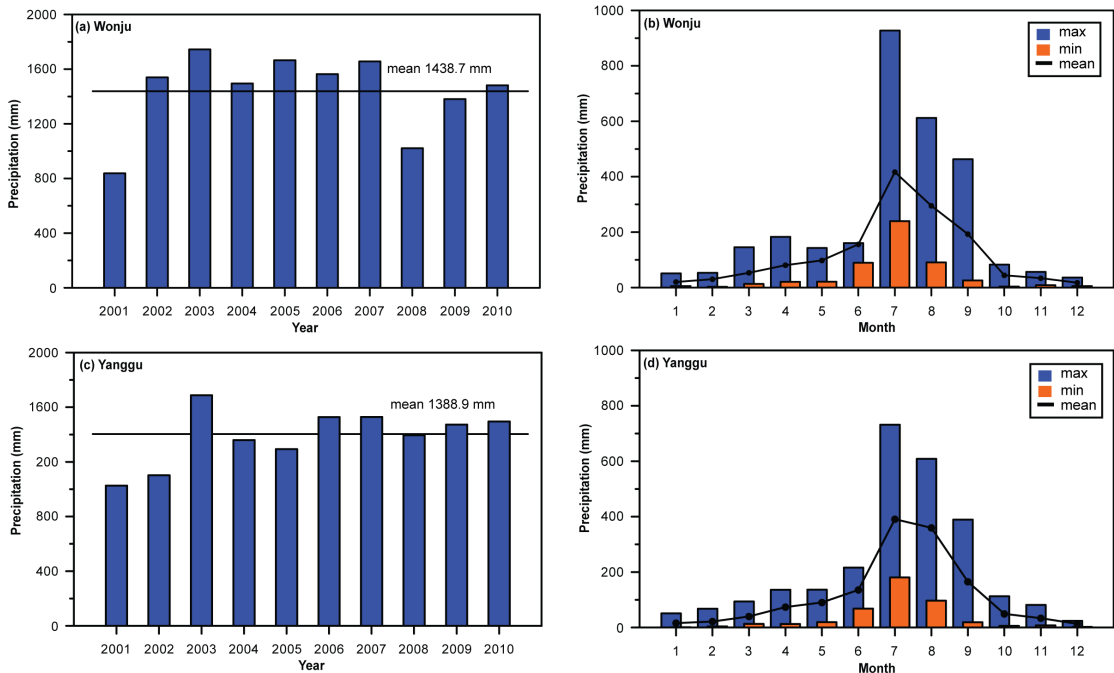


Fig. 2. Annual and monthly precipitations of Wonju city and Yanggu county for 2001-2010. Data are from KMA (2013).

방위는 동경 128°10'~127°51', 북위 37°59'~37°19'이다(그림 1). 동쪽은 인제군, 서쪽은 화천군, 남쪽은 춘천시, 북쪽은 군사분계선을 두고 북한의 금강군과 창도군으로 경계를 이루고 있다. 연구지역은 행정구역 중 해안면으로 양구군 전체 면적(701 km<sup>2</sup>)의 약 9%(62 km<sup>2</sup>)를 차지하고 양구군 총인구(22,588명)의 약 6%(1,508명)가 거주하고 인구밀도는 24명/km<sup>2</sup>이다(Yanggu County, 2012). 기상청 자동관측망의 자료에 의하면 2001~2010년 연평균 기온은 8.1~9.3°C이며, 당해 기간 기온증가율은 0.016°C로 알려져 있다(Lee and Han, 2013). 강수량의 경우 2001년~2010년 연평균강수량은 1,388.9 mm(그림 2c)이며, 7~9월에 연중 우기로 월평균 강수량이 165.3~390.8 mm, 11월~3월은 건기로 월평균 강수량 13.2~39.9 mm의 범위를 보여 도시인 원주와 비슷한 양상을 보여 준다(그림 2d). 또한 Lee and Han (2013)에 의하면 1973년 연강수량 719 mm에서 2010년에는 1,354.1 mm로 10.41 mm/yr의 증가속도를 보였고 이러한 증가의 대부분이 여름철 강우의 증가에 기인한다. 분지 내에는 도솔천, 성황천, 만대천 등 여러 하천이 흐른다. 해안면의 일반지질은 분지 외륜과 바로 바깥은 선폼브리아기의 화강편마암, 그리고 분지 내부는 풍화를 심하게 받은 주라기 화강암 그리고 하천을 따라 일부 제4기 충적층이 분포한다(Lee, 2009; Choi and Lee, 2010).

## 2.2 연구방법

### 2.2.1 자료수집

본 연구에 사용된 지하수위 자료는 연구지역에 위치하는 국가지하수관측망의 자료와 기존의 관정을 이용하여 직접 관측한 자료로 구성된다. 국가지하수관측망의 경우 원주시 명륜동에 위치하는 원주 명륜 관측소(그림 1a의 Myeongryun)가 그 하나이다. 본 연구에는 관정깊이 70 m인 암반관측정 수위 자료를 이용하였다. 이 관측정은 구곡 오수가압장 내에 설치되어 있으며 스크린 구간은 20~56 m, 해당구간(화강암)의 수리전도도는  $1.04 \times 10^{-5}$  cm/sec이다(GIMS, 2013). 다른 하나의 국가지하수관측소는 양구군 방산면 현리 방산초등학교(그림 1b의 Bangsan)에 위치하며 관정깊이는 70 m, 스크린 구간 46~66 m, 해당구간(편마암)의 수리전도도는  $4.51 \times 10^{-6}$  cm/sec이다(GIMS, 2013). 원주시 국가관측소 관측정은 양구

군 국가관측소에 비해 풍화대 및 파쇄대가 발달하여 수리전도도가 약 2배정도 크다. 이들 국가지하수관측소에서는 1시간 간격으로 지하수위, 지하수온 및 전기전도도를 관측하고 있으며 해당 자료는 국가지하수정보센터(GIMS)에서 취득하였다(GIMS, 2013).

원주의 다른 관측정 하나는 우산동 도로관리사업소 내에 있으며(그림 1a의 WJ) 관정깊이는 15 m, 주변은 논밭이며 수리전도도는  $1.60 \times 10^{-4}$  cm/sec이다. 그리고 양구군의 다른 관측정 하나(그림 1b의 YG)는 해안면 논가에 있으며 관정깊이는 3.3 m 그리고 수리전도도는  $4.94 \times 10^{-5}$  cm/sec이다(Kim *et al.*, 2013). 이들 관측정에 대하여는 자동수위측정기(DIVER, Solinst)를 이용하여 1시간 간격으로 지하수위를 측정하였다. 기록한 지하수위는 인근 기상관측소에서 측정된 대기압 자료를 이용하여 기압보정을 실시하였다. 한편 본 연구에 사용한 강수량은 원주의 경우 기상청 원주기상대 그리고 양구군의 경우 해안면 사무소에 설치된 자동기상측정망(AWS)의 자료를 이용하였다.

### 2.2.2 시계열 분석 및 지하수 함양을 산출

시계열 분석은 연속적인 측정자료의 자기상관성 혹은 주기적 특성을 알아내고자 할 때 사용되며, 또 다수의 연속자료에 대해서는 시계열간의 상관성 분석에 흔히 이용된다(Choi and Lee, 2010). 본 연구에 사용한 시계열함수는 자기상관(auto-correlation) 함수, 스펙트럼밀도(spectral density) 함수 그리고 교차상관(cross-correlation) 함수 등이다. 이들에 대한 이론과 다양한 적용 사례들을 다수의 문헌에서 찾을 수 있다(e.g., Lee *et al.*, 2001; Lee and Lee, 2002; Lee *et al.*, 2005; Ha *et al.*, 2006; Choi and Lee, 2010; Jeong *et al.*, 2010).

지하수함양은 물순환에서 매우 중요한 요소의 하나이나 이를 추정하는 여러 방법에 대해서는 모두 장단점을 가지고 있다(Healy and Cook, 2002; Scanlon *et al.*, 2002; Yun *et al.*, 2009). 본 연구에서는 그 이론의 명징성과 계산의 단순성 및 정확성의 이유로 지하수함양을 추정법으로 개별 강수이벤트에 대한 지하수위변동법(WTF; 시간( $\Delta t$ )에 따른 수위상승이 아닌 강수이벤트( $\Delta P$ ) 당 수위상승 적용)과 각 강수이벤트의 평균적 추정에 해당하는 수정지하수위변동법(modified WTF)(Moon *et al.*, 2004)을 적용하였

다. 지하수위변동법과 수정지하수위변동법은 아래 식과 같이 주어진다.

$$R = S_y \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} = S_y \frac{\sum h}{\sum P} \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 지하수함양율(recharge ratio),  $S_y$ 는 비산출율,  $P_n$ 는  $n$ 번째 강수이벤트의 강수량, 그리고  $h_n$ 는  $n$ 번째 수위 상승량이다(Moon *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2005). 비산출율은 해당 관측점에서 혹은 최근 접 관점에서 수행한 장기양수시험을 통해 추정된 값을 적용하였다(Lee *et al.*, 2005; Yun *et al.*, 2009).

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 도농지역의 지하수 변동특성

그림 3은 원주명륜 및 양구방산 국가지하수관측소의 지하수위, 지하수온 및 전기전도도 변화를 보여준다. 원주의 경우 지난 6년간(2005~2010) 지하수위는 우기에 높아지고 건기에 낮아지는 계절적 반복 현상을 잘 보여준다(그림 3a). 수위상승에서는 가파르게 증가하고 하강은 천천히 발생하는 비대칭적 양상을 보인다. 이에 반해 양구의 경우 계절적 상승과 하강패턴은 원주와 매우 유사하다(그림 3b). 그러나 상승과 하강모양이 상당히 대칭적이다. 이는 양구의 경우 수위상승기에 적은 강수량에도 지하수함양이 잘 일어나 점진적으로 수위가 상승하나(즉 지하수함양(수위상승)을 발생시키는 강수문턱값이 작음), 원주의 경우 강수량이 일정 이상 많은 경우에만 지하수 함양이 이루어짐을 알 수 있다(Yun *et al.*, 2013). 특히 양구는 우기 강우가 매우 많을 때 급격히 수위가 상승하는 것(그림 3b 수위그래프에서 뾰족한 부분)은 이 농촌지역의 빠른 지하수 함양을 의미한다(Lee *et al.*, 2013).

전기전도도의 경우 두 관측소 모두에서 매우 불규칙한 변동을 보인다(그림 3c와 3d). 원주의 경우 설치 초기 1년 동안 약간 하강하다 이후 상승하고 또 강우 시 일부 상승하는 패턴을 보여 지표오염물질의 유입이 의심되나 그 반대 즉 많은 강우 시 전기전도도가 하강하는 경우도 있어 일반화하기 어렵다. 그런데 특이하게도 지하수위가 비정상적으로 낮아지는 시점(이는 국가지하수관측소에 대한 수질분석 시료채취 혹

은 정기청소점검 시 단기간 양수를 함: 그림 3a에서 수위가 아래로 뾰족하게 나온 부분)과 전기전도도가 크게(뾰족하게) 증가하는 시점이 일치한다. 이는 인위적인 양수로 인해 보다 오염된 주변 지하수가 도래한 까닭으로 볼 수 있다. 이후 증가한 전기전도도가 영향의 해소로 하강, 회복되는 것을 볼 수 있다.

양구의 경우 원주와 거의 정반대의 현상을 보인다. 원주만큼 점검 시 수위강하가 크고 뚜렷하지는 않지만(그림 3b에서 간헐적으로 아래로 뾰족하게 나온 수위 참조), 이와 같은 수위강하 시에 전기전도도가 크게(거의 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 하강하였다가 다시 상승회복을 반복한다(그림 3d). 이는 주변에 보다 깨끗한 지하수가 관측점으로 유입되어 전기전도도가 하강하였다가 이의 영향이 해소되는 과정을 의미한다. 한편 전기전도도의 상승, 하강을 강우와 관련지어 계절적 변화로 해석할 여지가 있으나 이들의 변동주기가 계절적인 강우주기와 맞지 않고 매우 불규칙한 것이 이러한 해석과 배치된다. 결국 이들 두 관측소의 전기전도도 변화는 인위적 시료채취/청소점검에 의한 것으로 국토부·K-Water는 이에 대한 세심한 주의와 저감방안의 마련이 필요하다.

두 관측소의 지하수온은 기온과 달리 매우 불규칙한 변동을 보인다(그림 3e와 3f). 원주의 경우 기온이  $-10\sim 30^\circ\text{C}$  범위에서 계절적 및 연간 반복적 변화를 보이는 반면 지하수온은  $14.1^\circ\text{C}$ 에서  $13.5^\circ\text{C}$ 로 점진적으로 하강하는 양상을 보인다(그림 3e). 이는 우리나라의 지하수온이 기온상승(기후변화)의 영향으로 대체로 증가하는 경향에 있음을 고려할 때(Park *et al.*, 2011), 크게 자연스럽지 않으며 오히려 측정센서의 감도저하 등 다른 문제가 있는 것으로 보는 것이 타당하다. 양구의 경우에도 기온이  $-15^\circ\text{C}$ 에서  $25^\circ\text{C}$  사이에서 연간 반복적 변동을 보이는 반면 지하수온은  $12.9\sim 13.6^\circ\text{C}$  범위에서 매우 불규칙적이다(그림 3f). 이러한 비정상적인 변화에 대해서 어떤 합리적 이유를 찾기 어렵고 다만 앞서와 마찬가지로 온도센서의 문제로 귀결시킬 수밖에 없다. 그러나 두 지역의 위도(원주  $37^\circ 22'$ , 양구  $38^\circ 17'$ )의 영향과 양구가 농촌이고 원주가 도시라는 단순한 관점에서 볼 때 이들의 상대적 온도범위(기온 및 지하수온)는 비교적 합리적이라고 판단된다. 일반적으로 위도가 동일한 경우 도시의 기온과 지하수온이 농촌의 그것보다 높으며 이는 지구적 기후변화와 도시의 열섬현상

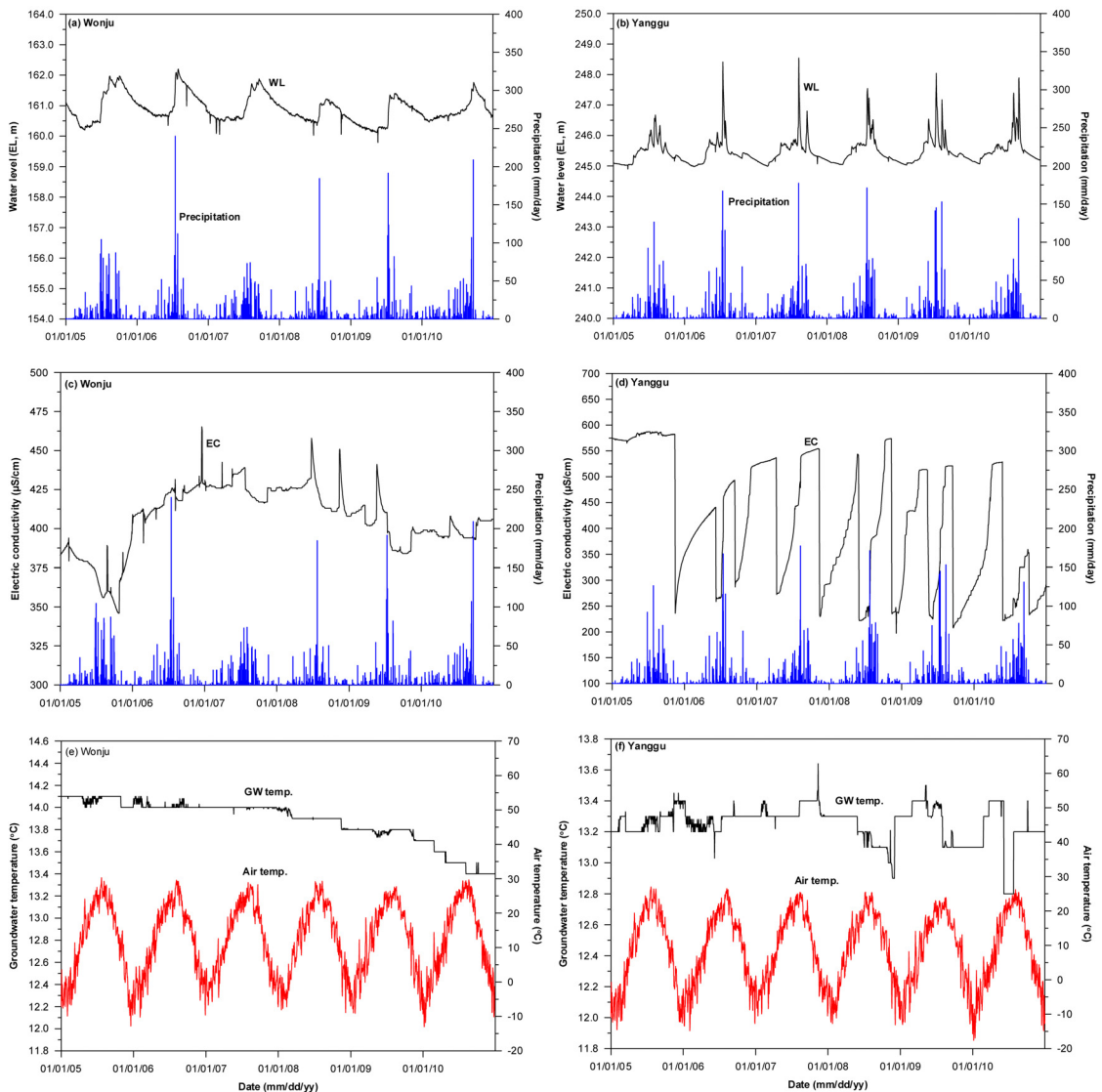
과 관련된다(Taniguchi *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2011; Ham and Lee, 2013).

한편 국가지하수관측소가 아닌 일반관측정에서 지하수위 변동양상도 유사하다(그림 4). 원주관측정(WJ)의 경우 2009년 9월~11월 지하수위 자료로 계절적 영향으로 지하수위가 하강하는 경향에 있으면서 주로 다량의 강수에 대해 지하수위가 상승하는 모습을 보인 반면, 양구(YG)의 경우 2013년 3~5월 건기의 지하수위 자료로 적은 강수량에도 불구하고

지하수위가 보다 민감하게 상승하는 것을 알 수 있다. 특히 단위 강수량당 지하수위 상승이 양구지역에 상대적으로 훨씬 크다(WTF를 이용한 지하수함양율 산정에도 크게 영향을 미침). 이는 농촌지역이 도시지역보다 지하수함양이 보다 원활함을 지시한다.

### 3.2 선형회귀분석 및 시계열 특성

표 1은 두 국가지하수 관측소 자료와 기상자료에 대한 선형회귀분석(linear regression analysis) 결



**Fig. 3.** Groundwater monitoring data (2005-2010) from national groundwater monitoring stations including Myeongryun in Wonju and Bangsan in Yanggu. The data are from GIMS (2013).

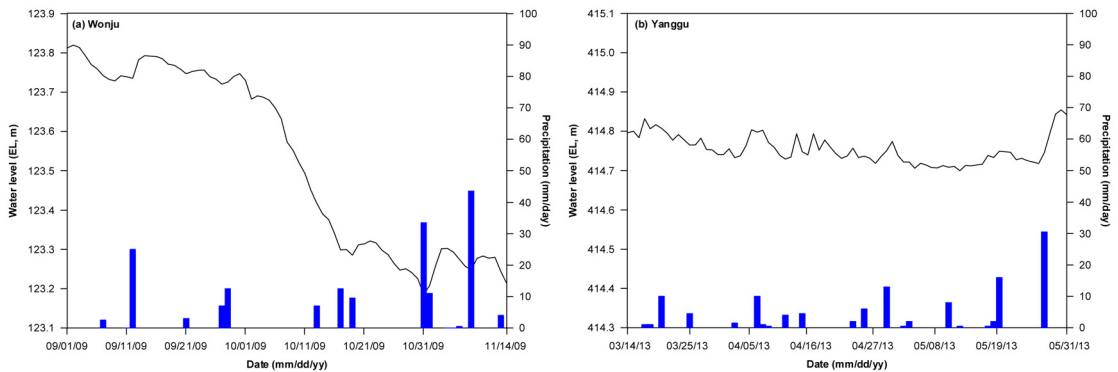
과를 보여준다. 우선 두 지역의 강수량은 원주, 양구에 대하여 각각 연간 8.8 mm 및 36.99 mm씩 증가하였다. 이와 같은 연강수량의 점진적 증가는 도농과 관계없이 우리나라 기후변화의 전반적인 특징으로 보인다(Park *et al.*, 2011). 그러나 호주와 같이 면적이 매우 큰 국가의 경우 서부는 강수량이 감소하고 동부는 증가하는 등 대비현상을 보이기도 한다(Beer, 2013).

한편 이러한 강수량 증가에도 불구하고 원주의

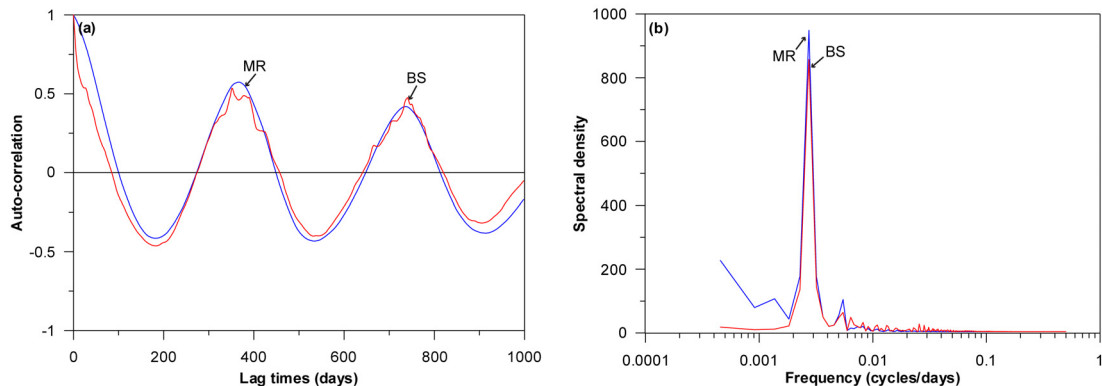
경우 연간 4.75 cm씩 지하수위가 감소한 것으로 나타났다. 이는 주변 도시개발(주변 다수의 아파트 건설)에 따른 불투수성 표면증가에 의한 지하수함양 감소 또는 지하수 양수 증가를 원인으로 볼 수 있다. 이에 반해 양구 방산의 경우 약간씩 수위가 상승함으로써 증가된 강수량의 함양증진 효과로 해석된다. 그런데 앞서 언급한 바와 같이 두 지역의 기온은 지난 6년간 점진적으로 상승하였는데 도시인 원주는 연간 0.292°C 그리고 농촌인 양구는 그것의 약 63%

**Table 1.** Linear regression results of groundwater levels, water temperature and ECs for two National Groundwater Monitoring Stations (NGMS).

NGMS	Water level (cm/yr)	Water temperature (°C/yr)	Air temperature (°C/yr)	EC (μS/cm/yr)	Annual precipitation (mm/yr)
Myeongryun	-4.75	-1.095	+0.292	+1.83	+8.80
Bangsan	+3.25	-0.019	+0.183	-37.60	+36.99



**Fig. 4.** Water level fluctuation of the monitoring wells: (a) Wonju (WJ) and (b) Yanggu (YG).



**Fig. 5.** Auto-correlation and spectral density functions of groundwater level at the two national groundwater monitoring stations (MR: Wonju Myeongryun, BS: Yanggu Bangsan).

인 연 0.183°C의 증가율을 보여주었다(표 1 참조). 이는 확실히 기후변화 속에서도 도시의 열섬현상이 크게 영향을 주고 있음을 지시한다(Ham and Lee, 2013). 그러나 지하수온과 전기전도도의 경우 선형 회귀분석 결과를 도출하였으나 그 측정값의 신뢰성이 낮으므로 회귀분석 결과도 크게 신뢰하기 어렵다.

한편 정확한 시계열 자료를 해석을 위해 일반관 측정(WJ 및 YG) 비해 인위적인 양수에 영향을 받지 않는 국가지하수관측소(원주명륜, 양구방산)를 선정하여 분석하였다. 그림 5는 국가지하수관측소 지

하수위의 자기상관함수 및 스펙트럼밀도함수를 보여준다. 두 지하수위 모두 자기상관성과 기억효과가 큰 것으로 판단되나 상대적으로 도시인 원주 명륜관측소 지하수위가 자기상관성이 보다 장기적인 것으로 나오는데(자기상관성이 0이 되는 지연시간: 원주는 100일, 양구는 85일) 이는 농촌인 양구방산의 경우 외부자극(강수)에 대해 상대적으로 민감하여 보다 임의적(random) 혹은 단기적 변화가 많기 때문으로 사료된다(Larocque *et al.*, 1998). 이러한 해석은 그림 5b 스펙트럼 밀도함수에서도 확인이 가능한데, 두 지역 지하수위 모두 진동수(frequency) 0.002738 cycles/d(주기=365.2 d)에서 최고 피크를 보여 연주기적 변화를 잘 반영하면서도 방산의 경우 고진동수(high frequency)의 작은 피크들이 쉽게 발견된다.

그림 6은 국가지하수관측소 지하수위와 강수량의 교차상관도(cross-correlation)이다. 두 관측소 모두 강수량과 유의미한 상관관계를 보여준다. 농촌 지역인 양구방산의 경우 지연시간 2일에 대하여 최고 상관계수 0.498 그리고 도시지역인 원주명륜의 경우 지연시간 42일에 대해 최고 상관계수 0.237을 보인다. 이와 같은 상관함수에서도 주변에 아스팔트로 둘러싸인 도시지역에 비해 농촌지역인 양구방산이 보다 지하수 함양이 용이하게(빠르게) 발생하는 것을 알 수 있다.

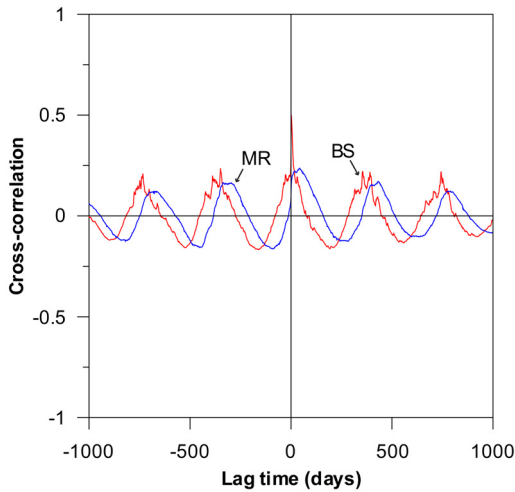


Fig. 6. Cross-correlation function (truncation=1,000 days) for precipitation-water level at the two national groundwater monitoring stations (MR: Wonju Myeongryun, BS: Yanggu Bangsan).

3.3 도농지역의 지하수 함양 특성

표 2는 원주명륜(Myeongryun), 양구방산(Bangsan) 국가지하수관측소 및 두 지역 일반관측정(WJ 및

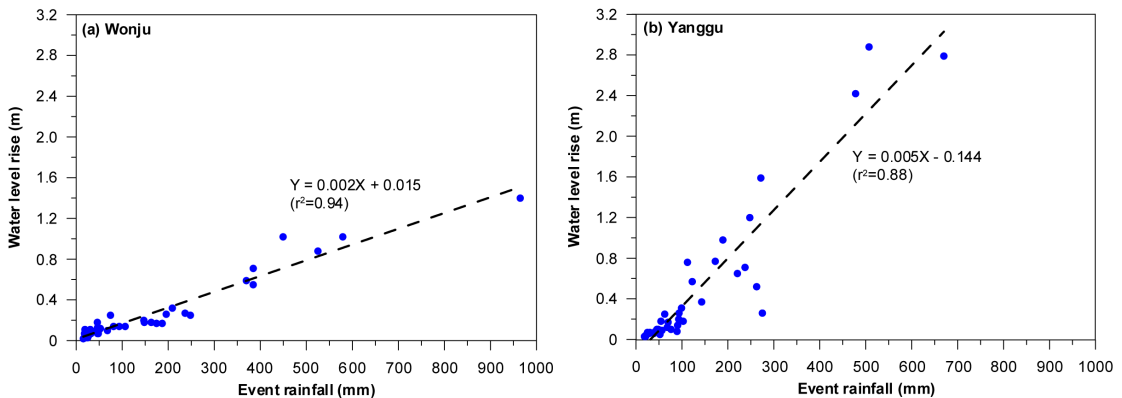


Fig. 7. Relationship between the water level rise and amount of the rainfall event at the two national groundwater monitoring stations.



**Table 2.** Groundwater recharge ratios estimated using WTF method.

Study area	Monitoring well	$\Delta H_x$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta H_x/\Delta P_x$	Recharge ratio (%)	Mean (%)	
WJ	$\Delta H_1$	58	$\Delta P_1$	25.0	2.32	7.0	
	$\Delta H_2$	27	$\Delta P_2$	19.5	1.39	4.2	
	$\Delta H_3$	23	$\Delta P_3$	22.0	1.05	3.1	
	$\Delta H_4$	117	$\Delta P_4$	44.5	2.63	7.9	
	$\Delta H_5$	34	$\Delta P_5$	43.5	0.78	2.3	
	$\Delta H_1$	120	$\Delta P_1$	52.5	2.29	6.9	
	$\Delta H_2$	70	$\Delta P_2$	25.5	2.75	8.2	
	$\Delta H_3$	50	$\Delta P_3$	26.0	1.92	5.8	
	$\Delta H_4$	60	$\Delta P_4$	20.5	2.93	8.8	
	$\Delta H_5$	110	$\Delta P_5$	19.0	5.79	17.4	
	$\Delta H_6$	70	$\Delta P_6$	18.0	3.89	11.7	
	$\Delta H_7$	50	$\Delta P_7$	20.0	2.50	7.5	
	$\Delta H_8$	1020	$\Delta P_8$	449.5	2.27	6.8	
	$\Delta H_9$	590	$\Delta P_9$	369.7	1.60	4.8	
	$\Delta H_{10}$	320	$\Delta P_{10}$	208.9	1.53	4.6	
Wonju	$\Delta H_{11}$	140	$\Delta P_{11}$	106.5	1.31	3.9	
	$\Delta H_{12}$	30	$\Delta P_{12}$	21.2	1.42	4.2	
	$\Delta H_{13}$	60	$\Delta P_{13}$	27.5	2.18	6.5	
	$\Delta H_{14}$	140	$\Delta P_{14}$	93.5	1.50	4.5	
	$\Delta H_{15}$	1400	$\Delta P_{15}$	964.7	1.45	4.4	
	$\Delta H_{16}$	70	$\Delta P_{16}$	23.9	2.93	8.8	
	$\Delta H_{17}$	130	$\Delta P_{17}$	46.5	2.80	8.4	
	Myeongryun	$\Delta H_{18}$	140	$\Delta P_{18}$	81.1	1.73	5.2
		$\Delta H_{19}$	180	$\Delta P_{19}$	46.0	3.91	11.7
		$\Delta H_{20}$	70	$\Delta P_{20}$	32.0	2.19	6.6
		$\Delta H_{21}$	260	$\Delta P_{21}$	195.6	1.33	4.0
		$\Delta H_{22}$	880	$\Delta P_{22}$	525.2	1.68	5.0
		$\Delta H_{23}$	270	$\Delta P_{23}$	236.6	1.14	3.4
		$\Delta H_{24}$	180	$\Delta P_{24}$	163.0	1.10	3.3
		$\Delta H_{25}$	70	$\Delta P_{25}$	48.0	1.46	4.4
		$\Delta H_{26}$	30	$\Delta P_{26}$	25.0	1.20	3.6
		$\Delta H_{27}$	100	$\Delta P_{27}$	43.0	2.33	7.0
		$\Delta H_{28}$	60	$\Delta P_{28}$	23.0	2.61	7.8
		$\Delta H_{29}$	70	$\Delta P_{29}$	46.6	1.50	4.5
		$\Delta H_{30}$	710	$\Delta P_{30}$	384.7	1.85	5.5
		$\Delta H_{31}$	200	$\Delta P_{31}$	147.0	1.36	4.1
		$\Delta H_{32}$	110	$\Delta P_{32}$	50.5	2.18	6.5
		$\Delta H_{33}$	40	$\Delta P_{33}$	25.3	1.58	4.7
		$\Delta H_{34}$	50	$\Delta P_{34}$	19.0	2.63	7.9
		$\Delta H_{35}$	60	$\Delta P_{35}$	19.5	3.08	9.2

Table 2. Continued.

Study area	Monitoring well	$\Delta H_x$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta H_x/\Delta P_x$	Recharge ratio (%)	Mean (%)		
Wonju	Myeongryun	$\Delta H_{36}$	100	$\Delta P_{36}$	67.9	1.47	4.4	
		$\Delta H_{37}$	70	$\Delta P_{37}$	31.0	2.26	6.8	
		$\Delta H_{38}$	50	$\Delta P_{38}$	26.5	1.89	5.7	
		$\Delta H_{39}$	1020	$\Delta P_{39}$	579.2	1.76	5.3	
		$\Delta H_{40}$	180	$\Delta P_{40}$	148.0	1.22	3.6	
		$\Delta H_{41}$	40	$\Delta P_{41}$	19.5	2.05	6.2	
		$\Delta H_{42}$	90	$\Delta P_{42}$	41.4	2.17	6.5	
		$\Delta H_{43}$	110	$\Delta P_{43}$	30.6	3.59	10.8	
		$\Delta H_{44}$	80	$\Delta P_{44}$	24.5	3.27	9.8	6.3
		$\Delta H_{45}$	20	$\Delta P_{45}$	15.5	1.29	3.9	
		$\Delta H_{46}$	70	$\Delta P_{46}$	27.5	2.55	7.6	
		$\Delta H_{47}$	250	$\Delta P_{47}$	74.5	3.36	10.1	
		$\Delta H_{48}$	50	$\Delta P_{48}$	27.0	1.85	5.6	
		$\Delta H_{49}$	170	$\Delta P_{49}$	174.5	0.97	2.9	
		$\Delta H_{50}$	170	$\Delta P_{50}$	186.9	0.91	2.7	
		$\Delta H_{51}$	550	$\Delta P_{51}$	384.6	1.43	4.3	
$\Delta H_{52}$	250	$\Delta P_{52}$	248.1	1.01	3.0			
YG		$\Delta H_1$	40	$\Delta P_1$	11.0	3.64	18.2	
		$\Delta H_2$	30	$\Delta P_2$	8.0	3.75	18.8	
		$\Delta H_3$	56	$\Delta P_3$	13.0	4.31	21.5	
		$\Delta H_4$	20	$\Delta P_4$	8.0	2.50	12.5	
		$\Delta H_5$	37	$\Delta P_5$	18.5	2.00	10.0	
		$\Delta H_6$	130	$\Delta P_6$	30.5	4.26	21.3	
Yanggu		$\Delta H_1$	60	$\Delta P_1$	27.5	2.18	10.9	
		$\Delta H_2$	260	$\Delta P_2$	274.0	0.95	4.7	
		$\Delta H_3$	710	$\Delta P_3$	236.3	3.00	15.0	
		$\Delta H_4$	100	$\Delta P_4$	75.2	1.33	6.6	
		$\Delta H_5$	260	$\Delta P_5$	92.7	2.80	14.0	
		$\Delta H_6$	30	$\Delta P_6$	19.9	1.51	7.5	
		$\Delta H_7$	250	$\Delta P_7$	61.5	4.07	20.3	
		$\Delta H_8$	370	$\Delta P_8$	141.9	2.61	13.0	
		$\Delta H_9$	2790	$\Delta P_9$	669.0	4.17	20.9	13.9
		$\Delta H_{10}$	570	$\Delta P_{10}$	121.4	4.70	23.5	
		$\Delta H_{11}$	80	$\Delta P_{11}$	52.4	1.53	7.6	
$\Delta H_{12}$	180	$\Delta P_{12}$	101.7	1.77	8.8			
$\Delta H_{13}$	100	$\Delta P_{13}$	44.5	2.25	11.2			
$\Delta H_{14}$	100	$\Delta P_{14}$	47.3	2.11	10.6			
$\Delta H_{15}$	40	$\Delta P_{15}$	20.0	2.00	10.0			
$\Delta H_{16}$	60	$\Delta P_{16}$	37.8	1.59	7.9			
$\Delta H_{17}$	40	$\Delta P_{17}$	20.0	2.00	10.0			

Table 2. Continued.

Study area	Monitoring well	$\Delta H_x$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta H_x/\Delta P_x$	Recharge ratio (%)	Mean (%)	
Yanggu	Bangsan	$\Delta H_{18}$	200	$\Delta P_{18}$	91.9	2.18	10.9
		$\Delta H_{19}$	170	$\Delta P_{19}$	68.9	2.47	12.3
		$\Delta H_{20}$	30	$\Delta P_{20}$	17.4	1.72	8.6
		$\Delta H_{21}$	2880	$\Delta P_{21}$	506.2	5.69	28.4
		$\Delta H_{22}$	80	$\Delta P_{22}$	88.3	0.91	4.5
		$\Delta H_{23}$	1200	$\Delta P_{23}$	246.7	4.86	24.3
		$\Delta H_{24}$	180	$\Delta P_{24}$	53.3	3.38	16.9
		$\Delta H_{25}$	50	$\Delta P_{25}$	51.2	0.98	4.9
		$\Delta H_{26}$	70	$\Delta P_{26}$	42.6	1.64	8.2
		$\Delta H_{27}$	1550	$\Delta P_{27}$	587.6	2.64	13.2
		$\Delta H_{28}$	520	$\Delta P_{28}$	261.6	1.99	9.9
		$\Delta H_{29}$	140	$\Delta P_{29}$	89.6	1.56	7.8
		$\Delta H_{30}$	70	$\Delta P_{30}$	29.1	2.41	12.0
		$\Delta H_{31}$	70	$\Delta P_{31}$	24.0	2.92	14.6
		$\Delta H_{32}$	120	$\Delta P_{32}$	67.0	1.79	9.0
		$\Delta H_{33}$	760	$\Delta P_{33}$	111.0	6.85	34.2
		$\Delta H_{34}$	2420	$\Delta P_{34}$	476.9	5.07	25.4
		$\Delta H_{35}$	650	$\Delta P_{35}$	219.7	2.96	14.8
		$\Delta H_{36}$	80	$\Delta P_{36}$	41.3	1.94	9.7
		$\Delta H_{37}$	80	$\Delta P_{37}$	47.9	1.67	8.4
		$\Delta H_{38}$	310	$\Delta P_{38}$	98.1	3.16	15.8
$\Delta H_{39}$	980	$\Delta P_{39}$	188.1	5.21	26.0		
$\Delta H_{40}$	770	$\Delta P_{40}$	171.5	4.49	22.4		
$\Delta H_{41}$	1590	$\Delta P_{41}$	270.7	5.87	29.4		

YG) 수위자료를 이용하여 개별 강수이벤트(추출 가능한 5개 이벤트)에 대하여 추정된 지하수함양율을 보여준다. 원주 일반관측정(W)의 경우 강수량대 지하수위상승비는 0.78~2.63으로 이에 비산출율을 곱한 지하수함양율은 2.3~7.9% 범위 그리고 평균은 4.9%로 추정되었다. 또한 국가지하수관측소 원주명륜 관정에 대해서는 추출 가능한 52개 강수이벤트에 대하여 강수량대 지하수위상승비가 0.91~5.79 범위 그리고 이에 해당하는 지하수함양율은 2.7~17.4% 범위 및 평균 6.3%로 추정되었다. 한편 이러한 평균 함양율 추정치들은 한국수자원공사(KOWACO, 2005)의 강원도 전체 지하수함양율 추정치 평균 12.7% 그리고 수위강하곡선을 이용한 우리나라 전체 지하수함양율 추정치 평균 14%(Kim *et al.*, 2004) 보다 훨씬 작은 값으로 도시의 특성을 반영한다고 볼 수 있

다(Lee *et al.*, 2005).

한편 양구방산의 경우 일반관측정(YG)은 추출 가능한 6개의 강수이벤트에 대하여 강수량대 지하수위상승비는 2.00~4.31 그리고 해당 지하수함양율의 경우 10.0~21.5% 및 평균 18.2%로 추정되었다(표 2 참조). 또한 양구방산 국가지하수관측소의 경우 41개 강수이벤트에 대하여 강수량대 지하수위상승비는 0.91~6.85 그리고 해당 지하수함양율은 4.5~34.2% 및 평균 13.9%로 추정되었다. 이들 평균 값들은 농촌지역 혹은 산림지역 지하수함양율로 적절한 것으로 사료되며 도시 원주지역에 비해 2~3배 큰 값이다. 표 3은 개별 강수이벤트가 아닌 누적 강수이벤트와 누적수위상승을 이용한(수정 WFT 방법; Moon *et al.*, 2004) 추정 지하수함양율이다. 앞서와 유사하게 원주의 경우 평균 5.1% 그리고 양구의

**Table 3.** Groundwater recharge ratios estimated using modified WTF method.

Study area	Well ID	$\Sigma H$ (mm)	$\Sigma P$ (mm)	$\Sigma H/\Sigma P$	Recharge ratio (%)	Mean (%)
Wonju	WJ	259	155	1.68	5.1	5.1
	Myeongryun	11,180	6,712	1.67	5.0	
Yanggu	YG	313	89	3.52	17.6	17.9
	Bangsan	19,510	5,362	3.64	18.2	

경우 평균 17.9%의 함양율을 보여 도·농간 약 3.5배의 차이를 나타낸다. 이러한 차이의 근본적 원인은 지하수위변동법은 강수량 대비 수위상승값에 기반하기 때문이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 대체로 두 지역 모두 강수량에 비례하여 수위상승이 발생하지만 농촌지역인 양구방산의 경우 그 기울기(0.005)가 원주명륜(기울기=0.002)에 비해 2.5배 크다. 이는 동일 강우이벤트(강수량)에 대하여 양구방산의 지하수위상승이 크다는 의미이며 그 만큼 이 지역의 지하수 함양이 도시인 원주보다 원활하다는 것을 지시한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국가지하수관측소 지하수위 관측 자료와 일반관측정의 지하수위 자료를 이용하여 강원도 도농간(원주시와 양구군) 강우에 대한 지하수위의 변동양상과 지하수 함양특성을 비교·분석하였다. 그 결과 농촌지역인 양구방산의 경우 강우이벤트에 대한 수위민감도가 상대적으로 크며 상관성도 짧은 지연시간에 대하여 크게 나타났다. 또한 지하수위변동법을 이용한 지하수함양율 추정에서도 원주에 비해 3~3.5배 크게 나타나 농촌지역의 지하수 함양이 보다 원활함을 보여주었다. 그러나 본 연구에서는 강원도 원주와 양구라는 한 지역 그리고 소수의 관측정 자료를 이용한 비교로 본 연구의 결과가 모든 도농에 일반적 결과로 결론내리기는 어려우며, 특히 모니터링의 위치에 따른 특이성도 있을 수 있다. 향후 다수의 도농지역 그리고 다수의 관측정 자료를 이용한 비교연구가 필요하다.

#### 사 사

본 논문은 2012년 과학고등학교 R&E 프로그램지원사업(No. C1008804-01-01)과 2012년 정부(교육과

학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2012-0002628/No. 2010-0001449). 건설적인 심사의견을 주신 전남대 여인옥 교수님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

#### REFERENCES

- Al-Amin, A.Q., Kari, F. and Alam, G.M., 2013, Global warming and climate change: prospects and challenges toward long-term policies in Bangladesh. *International Journal of Global Warming*, 5, 67-83.
- Baek, W. and Lee, J.Y., 2011, Source apportionment of trichloroethylene in groundwater of an industrial complex in Korea: a 15-year dispute and perspective. *Water and Environment Journal*, 25, 336-344.
- Beer, T., 2013, Climate variability and change. *Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society*, Brisbane, p. 7.
- Choi, H.M. and Lee, J.Y., 2010, Groundwater level distribution and rainfall response characteristics in Haean Basin of Yangu. *Journal of Soil & Groundwater Environment*, 15, 108 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.E., Lee, H.S. and Kwon, J.I., 2013, Recent change on frequency-magnitude of summer extreme rainfall events over the Republic of Korea. *Korean Journal of Land and Geography*, 47, 83-97 (in Korean with English abstract).
- GIMS (Integrated Groundwater Information Service), 2013, Homepage of GIMS (<http://www.gims.go.kr>). Accessed on May 21, 2013.
- Ha, K., Ko, K.S., Koh, D.C., Yum, B.W. and Lee, K.K., 2006, Time series analysis of the responses of the groundwater levels at multi-depth wells according to the river stage fluctuations. *Economic and Environmental Geology*, 39, 269-284 (in Korean with English abstract).
- Ham, B.S. and Lee, J.Y., 2013, Soil temperatures in four metropolitan cities of Korea for 1960-2010: implications for climate change and urban heat. *Environmental Earth Sciences* (submitted).
- Hattermann, F.F., Kundzewicz, Z.W., Huang, S., Vetter, T.,

- Gerstengarbe, F.-W. and Werner, P., 2013, Climatological drivers of changes in flood hazard in Germany. *Acta Geophysica*, 61, 463-477.
- Healy, R.W. and Cook, P.G., 2002, Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109.
- Jeong, J.H. and Lee, S., 2012, Estimating the economic impacts of extreme climate events of agriculture: the case of Gangwon-do. *Journal of the Korean Geographical Society*, 47, 459-470 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.M., Park, Y.C., Jo, Y.J. and Lee, J.Y., 2010, Time series analysis of groundwater level fluctuation data in Cheonjeonri, Chuncheon, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 171-176 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Yi, M.J., Kim, J.W., Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2004, Evaluation of estimating groundwater recharge using waterlevel data obtained from the National Groundwater Monitoring Stations. *The Journal of Engineering Geology*, 14, 313-323 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Lee, K.K. and Lee, J.Y., 2013, Spatial and temporal variations in stream and groundwater chemistry and microbial community in a heavy agricultural area. *Journal of Hydrology* (in preparation).
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2013, Homepage of KMA (<http://www.kma.go.kr>). Accessed on April 6, 2013.
- KOWACO (Korea Water Resources Corporation), 2005, A Basic Plan on Management of Groundwater Resources in Gangwon Province. KOWACO, Daejeon. (unpublished)
- Kumar, C.B., 2013, Climate change and asian cities: so near yet so far. *Urban Studies*, 50, 1456-1468.
- 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.
- Lawrence, A.R., Morris, B.L. and Foster, S.S.D., 1998, Hazards induced by groundwater under rapid urbanization. *Geohazards in Engineering Geology*, Engineering Geology Special Publication, Geological Society, London, 15, 319-328.
- Lee, B.J., Moon, S.H., Cho, B.W., Sung, I.H. and Lee, C.W., 2001, Identification of influences on groundwater fluctuations using spectrum analysis. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 287-296 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., 2009, Importance of hydrogeological and hydrologic studies for Haean basin in Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 405-414 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Han, J., 2013, Groundwater use and its perspective in Haean Basin, Yanggu County of Gangwon Province. *Journal of Wetlands Research*, 15, 179-189 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Jeon, W.H., Park, Y. and Lim, H.G., 2012, Status and prospect of groundwater resources in Pyeongchang, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 435-444 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on groundwater environment. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 517-528.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002, A comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the two aquifer systems. *Journal of KoSSGE*, 7, 3-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Lee, K.S., Park, Y., Choi, H.M. and Jo, Y.J., 2013, Chemical and isotopic compositions of groundwater and stream water in a heavy agricultural basin of Korea. *Journal of Geological Society of India* (in press).
- Lee, J.Y., Yi, M.Y. and Hwang, D., 2005, Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment. *Geosciences Journal*, 9(3), 277-286.
- Middleton, B.A. and Kleinebecker, T., 2012, The effects of climate-change-induced drought and freshwater wetlands. *Global Change Ecology and Wetlands*, 1, 117-147.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) and K-water, 2011, Basic Investigation Report on Groundwater in Woju. K-water, 149 p (in Korean).
- Moon, S.K., Woo, N.C. and Lee, K.S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater. *Journal of Hydrology*, 292, 198-209.
- Park, Y.C., Jo, Y.J. and Lee, J.Y., 2011, Trends of groundwater data from the Korean National Groundwater Monitoring Stations: indication of any change? *Geosciences Journal*, 15, 105-114.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. and Cook, P.G., 2002, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39.
- Sheffield, J. and Wood, E.F., 2008, Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, 31, 79-105.
- Taniguchi, M., Uemura, T. and Jago-on, K., 2007, Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities. *Vadose Zone Journal*, 6, 591-596.
- Wonju City, 2013, Homepage of Wonju City (<http://www.wonju.go.kr>). Accessed on April 7, 2013.
- Yanggu County, 2012, Annual Statistical Report of Yanggu

- County in Gangwon Province, 24 p (in Korean).
- Yun, S.W., Jo, Y.J. and Lee, J.Y., 2009, Comparison of groundwater recharges estimated by waterlevel fluctuation and hydrograph separation in Haeon basin of Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 391-404 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.W., Kim, Y.S., Kim, D.H., Kim, H.C., Shin, M.C., Park, J.Y., Kim, H. and Lee, J.Y., 2013, Comparative study on change in groundwaters of rural and urban areas in Korea: effects of climate change. 2013 EGU, Vienna, April 7-12, EGU2013-3774-1.
- Zhang, J., Li, D., Li, L. and Deng, W., 2013, Decadal variability of droughts and floods in the Yellow River basin during the last five centuries and relations with the North Atlantic SST. *International Journal of Climatology* (in press).

---

투 고 일 : 2013년 7월 6일

심 사 일 : 2013년 7월 9일

심사완료일 : 2013년 8월 27일