

국가 지하수관측소 지하수위, 전기전도도 및 수온자료에 대한 모수적 및 비모수적 변동 경향성 분석

이진용¹ · 이명재¹ · 이재명² · 안경환² · 원종호^{2*} · 문상호³ · 조민조³

¹지오그린21, ²한국수자원공사, ³한국지질자원연구원

Parametric and Non-parametric Trend Analysis of Groundwater Data Obtained from National Groundwater Monitoring Stations

Jin-Yong Lee¹ · Myeong-Jae Yi¹ · Jae-Myeong Lee² · Kyoung-Hwan Ahn²
Jong-Ho Won^{2*} · Sang-Ho Moon³ · Minjoe Cho³

¹GeoGreen21 Co., Ltd., SEK Building, Gwanak-gu, Seoul 151-812, Korea

²Groundwater Investigation Section, KOWACO, Daejeon 306-711, Korea

³Groundwater & Geothermal Resources Division, KIGAM, Daejeon 305-350, Korea

ABSTRACT

Trends of variation in groundwater levels, electrical conductivities and water temperatures obtained from the national groundwater monitoring stations (95 shallow and 169 deep wells) of Korea were evaluated. For the analysis, both parametric (linear regression) and non-parametric (Mann-Kendall test, Sen's test) methods were adopted. Results of linear regression analysis indicated that about 50% of the monitoring wells showed increasing trends of groundwater levels, electrical conductivities, and water temperatures and the others showed decreasing trends. However, the non-parametric analyses with monthly median values revealed that 14.8~20.0% of water levels were decreased, 24.2~36.9% of electrical conductivities were increased, and 27.4~32.5% of water temperatures were increased at a confidence level of 99%. Highly proportions of increasing or decreasing trends were unexpected and they resulted from the relatively short term of data collection (maximum 6 years). Meanwhile, the investigation of groundwater around the national groundwater monitoring stations showed that the decreasing or increasing trends of water levels, electrical conductivities, themselves, didn't indicate directly groundwater hazards such as groundwater depletion or groundwater contamination. Both the values and variation rates (slopes) of water level, electrical conductivity and temperature in the longer period are considered simultaneously. This study is the first comprehensive work in analyzing trends of groundwater data obtained from the national groundwater monitoring stations. Based on this study, the periodical and regular analysis of groundwater data is essentially required to grasp the overall variational trend of groundwater resources in the country.

Key words : National groundwater monitoring stations, Non-parametric trend analysis, Groundwater level, Confidence level

요 약 문

본 연구에서는 국가 지하수관측소에서 획득한 지하수위, 전기전도도 및 수온 관측자료에 대해 모수 및 비모수 경향 분석을 실시하였다. 분석대상은 2003년까지 3년 이상 모니터링을 실시하고 있는 관측소의 지하수 자료이며, 이에는 층적관측정 95개소와 암반관측정 169개소가 해당된다. 모수분석으로 일평균 및 월중양값에 대해 선형회귀분석을, 그리고 비모수분석으로 월중양값에 대해 Mann-Kendall test 및 Sen's test를 적용하였다. 선형회귀분석을 통해서는 약 50%의 관측정에서 수위, 전기전도도 및 수온이 증가경향을 나타내었고 나머지 절반은 감소하는 것으로 나타났다. 그

*Corresponding author : jhwon@kowaco.or.kr

원고접수일 : 2005. 10. 31 게재승인일 : 2006. 3. 4

질의 및 토의 : 2006. 6. 30 까지

라나 월중양값을 이용한 비모수 경향분석에서는 99% 신뢰수준에서 지하수위는 14.8~20.0%가 감소경향으로 나타났고, 전기전도도는 24.2~36.9%가 증가경향을 보였으며, 수온의 경우에는 27.4~32.5%가 증가경향을 보였다. 높은 비율의 관측정에서 증가 혹은 감소의 경향성을 보이는 것은 분석대상 기간이 상대적으로 짧은(최장 6년) 것에 기인한 결과일 수 있다. 한편 현장조사를 실시하여 평가한 결과에서 나타난 지하수위 혹은 전기전도도의 감소 혹은 증가경향 자체가 직접적인 지하수 장애를 의미하지는 않는다. 결국 장기적인 경향성과 더불어 해당 인자의 값 자체 및 감소율을 고려하여야 한다. 본 연구는 국가 지하수관측소 자동 측정자료에 대한 최초의 전면적인 경향분석 결과이다. 이번 연구 사례를 토대로 국내 지하수 자원의 전체적인 변동상황을 파악하기 위해서는 정기적인 경향분석을 수행할 필요가 있다.

주제어 : 국가 지하수관측소, 비모수적 경향분석, 지하수위, 신뢰수준

1. 서 론

건설교통부와 한국수자원공사에서는 국내 지하수자원의 양 및 질적 변동을 감시하고 국가의 기초 지하수 자료축적을 위해 1995년부터 연차적으로 국가 지하수관측소를 설치·운영해 오고 있으며(이명재 외, 2004, 2005; Lee et al., 2006a, b), 2004년말 현재 전국에 293개의 국가 지하수관측소가 설치되었다. 지하수관측소에서는 매 6시간 간격으로 지하수위, 전기전도도 및 수온을 측정하고 일일 1회 자동으로 측정자료가 한국수자원공사 수신서버로 전송된다. 기본적으로 각 관측소에는 충적층 대수층 지하수관측을 위한 충적관측정(약 20 m 깊이)과 암반대수층의 관측을 위한 암반관측정(약 70 m 깊이)이 있다. 이들 관측소로부터 획득하는 자료의 품질을 보장하기 위하여 한국수자원공사에서는 상시점검팀과 비상점검팀을 구성하여 정기적으로 점검업무를 수행하고 있다.

최근 국가 지하수관측소 측정자료에 대한 한국수자원공사의 내부 분석결과, 일부 지역에서 지하수위 저하 및 수질오염이 예상되었고, 국정감사(2004년 10월 15일, 주승용 의원)와 중앙일보(2004년 10월 16일) 등에서 국가 지하수관측소의 지하수위 저하와 관련한 지적이 있었다. 이에 건설교통부와 한국수자원공사에서는 저감대책 마련을 위해 지하수장해 예상지역에 대한 조사사업을 수행하고 있다(Lee et al., 2006c). 그러나 앞서의 국가 지하수관측 자료에 대한 검토와 지적은 다소 임의적인 측면이 강하며(예를 들어 관측초기 수위와 비교하여 현시점의 수위가 몇 m 이상 하강했다는 지적 혹은 관측기간동안 최고 수위와 최저 수위를 비교한 경우 등) 시계열적 도시자료에 대한 직관적 판단에 의존하였다.

한편 국가 지하수관측소가 설치·운영된 이래 측정자료는 연구 및 실용적 측면에서 다양하게 활용되고 있다. Moon et al.(2004)은 국가 지하수관측소의 수위자료를 변동특성에 따라 5개의 전형적인 그룹으로 분류하고 지하수위 변동법을 이용하여 지하수 함양율을 산정하는 방법을

제시하였다. 이명재 등(2004)은 266개 국가 지하수관측소의 수위자료를 분석하고 특히 한강권역의 지하수위 자료에 대해 칼만필터링을 이용한 시계열모형의 적용가능성을 평가하였다. 한정상 등(2004)은 친환경적이며 재생가능한 에너지 자원으로서의 지하수(지열)의 이용을 강조하고 국가 지하수관측소의 수온 자료를 이용하여 전국의 지하수의 온도 분포 및 변동 특성을 분석하였다(Lee and Hahn, 2006). 또한 Lee et al.(2006a)은 국가 지하수관측소 설치 당시 취득한 수리지질, 지하수 화학 자료 및 이후 관측자료를 이용하여 우리나라에서 지하수 지열펌프(특히 개방형 지하수열펌프)의 적용 가능성을 평가하였다.

앞서의 활발한 연구에도 불구하고 국가 지하수관측소 설치이래 길게는 8-9년 간의 지하수위, 전기전도도 및 수온자료가 축적되었지만 변동 경향성(trend)에 대한 정량적이며 전면적인 분석은 미흡하였다. 다만 Kim(2005)은 국가 지하수관측소에서 매년 상하반기 총 2회에 걸쳐 실시한 정기 지하수 수질분석 자료(1995~2001)에 대해 정량적 통계 및 경향 분석을 수행한 바 있다. 이 연구에서 6개의 수질인자(pH, COD, Coliform, Cl, NO₃-N, EC)들의 양방향 경향성을 평가하기 위해 비모수분석법인 Mann-Kendal 법과 Sen's 방법을 적용하였다.

본 연구에서는 국가 지하수관측소에서 획득한 지하수위, 전기전도도 및 수온자료에 대해 정량적 경향분석을 실시하였다. 이를 위해 2003년 12월 31일까지 최소 3년 이상의 관측자료가 있는 국가관측소(264개 관측정)를 분석대상으로 하였으며 또한 전국에 분포한 국가 지하수관측소 인접 76개 기상관측소의 강수량 자료에 대해서도 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 국가 지하수관측소 측정자료

국가 지하수관측소는 앞서 언급한 바와 같이 1995년 15개 관측소 설치를 시작으로 순차적으로 매년 15~45개의 관측소를 전국에 걸쳐 설치하고 있다(Fig. 1). 2004년

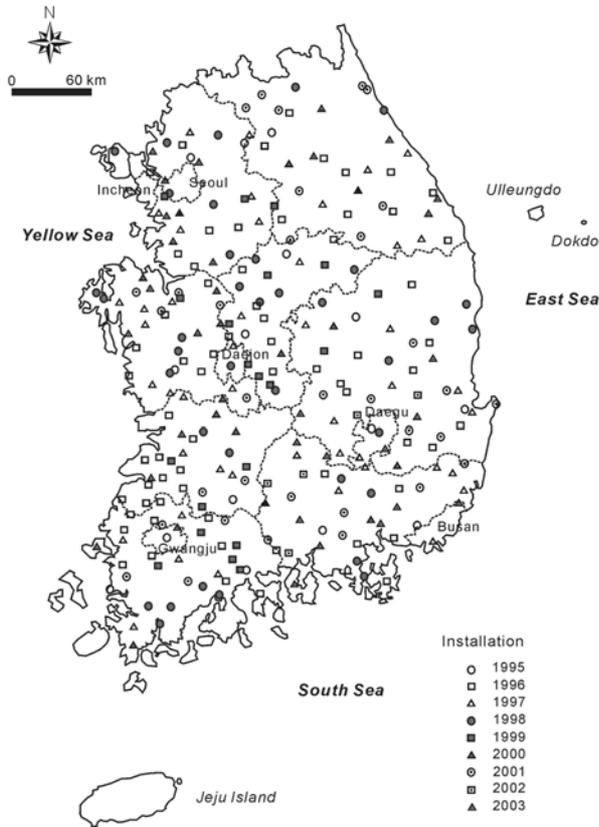


Fig. 1. Locations of the national groundwater monitoring stations showing progressive installation since 1995.

에 설치관측소는 293개소에 달하며 2005년까지 총 320개 관측소가 설치·완료될 예정이다. 국가 지하수관측소는 자동측정과 자동 자료전송으로 운영되고 있다. 상시적인 점검정비를 통해 최적의 자료품질을 유지하고 또 장비이상 등과 같은 오류에 의한 영향을 최소화하기 위해 웹기반의 국가 지하수관측망 관리시스템을 가동하고 있다. 그러나 주기적인 관측소 현장점검과 노후화 혹은 고장난 관측장비 교체 및 수리 등의 노력에도 불구하고 자동 관측 및 전송의 내재적 한계로 인하여 부분적으로 결측(missing value)과 이상값(outliers)이 발생하고 있다(이명재 등, 2005).

변동경향을 신뢰성있게 판단하기 위해서는 보다 장기간의 자료를 이용할수록 좋다. 본 연구에서는 2003년까지 3년 이상 모니터링을 실시한 관측소의 지하수 자료를 이용하였으며 이에 중적관측정 95개소와 암반관측정 169개소가 해당되는데(Table 1), 각각 264개 세트의 지하수위, 전기전도도 및 수온의 시계열 자료로 정리할 수 있다. 본 연구에서는 일평균(daily average) 자료 및 월중앙(monthly median) 자료에 대해 모수적 경향분석을, 또 월중앙 자료에 대해 비모수적 분석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 6시간 자료나 일일자료의 경우 자기상관성이 크거나 해당인자의 변동폭이 커 장기적인 변화경향을 평가하는데 있어 통계적인 가정을 만족하지 못할 수 있어 비모수 분석에 적절하지 못한 경우가 있다(Hamed and Rao, 1998). 또한 월평균(monthly average)값은 특정 이상값에 의하여 월평균값이 크게 영향을 받는 경우가 발생할 수 있어 비모수 통계값인 중앙값을 분석에 사용하였다.

2.2 분석 방법

경향성을 파악하는 방법에는 크게 모수적 방법과 비모수적 방법이 있다(Kim, 2005). 모수적 방법의 대표적인 예로 선형추세분석(linear trend analysis) 혹은 선형회귀분석(linear regression)이 있다. 어떤 관측자료가 단조증가 혹은 단조감소하는지에 대한 경향성을 판단하기 위해 적절한 직선식에 부합시켜 기울기를 보고 평가하는 것이다. 선형회귀분석은 통계학의 최소자승법(least square)을 이용한다. 이 때 선형회귀직선이 어느 정도 잘 부합되었는지는 결정계수(r^2)로 나타낸다. 이 결정계수는 총변동을 회귀선에 의해 설명되는 변동으로 나눈 값이다. 결정계수가 클수록 선형식에 의하여 관측값이 잘 설명된다는 의미이다. 그러나 이와 같은 선형회귀식은 결측값 및 이상값을 적절히 다루지 못하며 분석결과가 이들에 큰 영향을 받을 수 있다.

다른 모수적 방법으로는 전통적인 시계열분석(time series) 방법이 있다. 이들의 대표적인 예로 정상시계열모형인 자기회귀이동평균모형(ARMA모형)과 비정상시계열모형인 누

Table 1. Summary of groundwater data analyzed for this study

Parameters		Groundwater levels	Electrical conductivities	Groundwater temperatures	Precipitation
Number of data set	Shallow wells	95 ^a (128) ^b	95 (128)	95 (128)	76 (76)
	Deep wells	169 (236)	168 ^c (236)	169 (236)	
	Total	264 (364)	263 (364)	264 (364)	76 (76)

^aNumber of data set whose length is greater than 3 years (36 months)

^bTotal number of monitoring wells

^cEC data are missing for one well

적자기회귀이동평균모형 (ARIMA모형) 등이 있다(Box and Jenkins, 1976). 이들 시계열분석을 통한 장기적 경향예측은 통계적 추정 및 검정을 통하여 시계열 모형을 수립하는 것으로 시작된다. 이명재 등(2004)은 국가 지하수관측소 중 한강유역권에 속한 지하수 관측망 수위자료에 대하여 상관성 분석과 지하수위 변동유형 분류를 통해 시계열 모형을 수립하고 장기변동 경향을 예측한 바 있다. 또 이들은 지동관측의 내재된 결측값을 보완하기 위하여 칼만 필터링을 적용하였다. 시계열 분석을 통한 장기예측의 신뢰성은 적절한 시계열모형을 수립하기 위한 단계의 분석자의 전문지식에 의존하고 또 일정시간 간격의 결측없는 자료가 필요하다는 단점이 있다.

앞서 언급한 비와 같이 선형추세식과 같은 전통적 모수적 방법은 자료의 결측이나 이상값에 크게 영향을 받는 단점이 있다. 또 선형추세의 유의성을 확인하는 결정계수의 경우 직선에 가까이 모였는지를 확인하는 것으로 계단 형태나 빈번히 변동하며 경사형태로 증가 혹은 감소하는 관측값에 대하여 적절한 추세의미를 부여하기 어렵다. 반면 비모수적 방법은 관측값을 직접 사용하는 것이 아니라 관측값의 서열 혹은 변동 기울기 등을 이용하기 때문에 결측값과 이상값을 적절히 다룰 수 있으며 그 영향에도 민감하지 않다. Sen's test(Sen, 1968)와 Mann-Kendall test (Mann, 1945; Kendall, 1975)는 지하수질과 같은 지하수 환경 분야에서 많이 사용되는 대표적인 비모수 경향분석 방법으로 자료가 정규분포가 아닌 경우에도 적합하다(Yue and Wang, 2002). 본 연구에서도 이 두 방법을 적용하였다.

2.2.1. Sen's trend test

Sen(1968)은 특히 지하수 관측 자료에 사용할 수 있는 간단한 비모수적 방법을 발전시켰는데, 이 방법은 이상값, 결측값, 감지되지 않은 값(non-detect)이 있을 경우에도 강력한 결과를 낼 수 있다. Sen의 경향성 추정자(estimator)를 구하기 위해서는 다음과 같은 개의 기울기 추정값 (slope estimate) 를 구한다(Salmi et al., 2002).

$$Q = \frac{x_j - x_i}{j - i} \tag{1}$$

여기서, x_j 와 x_i 는 각 관측시점 j 과 i 에서 측정된 관측값이며, i 는 관측된 일련 순서이고 $j > i$ 이다. 따라서 $N = n(n-1)/2$ (n 은 관측값의 개수)이다.

Q 값이 구해지면, 그 크기에 따라 새로 나열하여 중앙값(median)을 다음과 같이 구한다.

$$S = Q_{[N'+1]2} \quad (N': \text{홀수}) \tag{2a}$$

$$S = Q_{[N'/2]} + Q_{[N'+1]2}/2 \quad (N': \text{짝수}) \tag{2b}$$

가설검정을 하기 위해서는 S 에 대한 분산값이 필요한데, Gilbert(1987)는 작은 수의 자료에 적용시킬 수 있는 Kendall(1975)의 식을 수정하여 다음과 같은 분산 추정값을 구하는 식을 제시하였다.

$$\text{var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \tag{3}$$

여기서 t_p 는 서로 같은 관측값을 갖거나 감지되지 않은 (non-detect) 관측값의 수를 뜻하며, q 는 이러한 경우의 수이다. 이들 값을 이용하면 다음과 같이 신뢰구간을 구할 수 있다.

$$M_1 = \frac{N' - Z_{1-a} [\text{var}(S)]^{1/2}}{2} \tag{4a}$$

$$M_2 = \frac{N' + Z_{1-a} [\text{var}(S)]^{1/2}}{2} \tag{4b}$$

여기서 Z_{1-a} 는 정규분포의 $(1-a)100\%$ 지점이다. 경향성이 없다는 귀무가설(null hypothesis)에 대하여 M_1 과 M_2 에 해당되는 Q 값이 0을 포함하지 않으면 귀무가설은 기각되어 경향성이 있다고 판단할 수 있다.

2.2.2. Mann-Kendall trend test

Sen's test와 함께 환경자료의 경향분석에 많이 쓰이는 방법으로 기본원리는 각 관측값을 쌍으로 비교하여 증가(1), 감소(-1), 상등(0)의 값을 이용하는 것이다. 먼저 어떤 시점 i ($1 \leq i \leq n$)에서의 관측값을 x_i 라고 하면 Sen's test와 마찬가지로 N 개의 $x_j - x_i$ ($j > i$) 차분쌍이 나온다. 이 차분의 부호를 계산하여 다음과 같이 표현한다.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{5}$$

그리고 Mann-Kendall 통계량은 다음과 같이 계산한다 (Salmi et al., 2002).

$$S^* = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{6}$$

관측값의 수 n 과 Mann-Kendall 통계량 S^* 를 이용하여

Table 2. Results of simple linear regression for daily basis groundwater data

Parameters	Water levels		Electrical conductivities		Water temperatures	
	Shallow	Deep	Shallow	Deep	Shallow	Deep
Slope						
Positive	47.4% (45 ^a /95 ^b)	50.9% (86/169)	49.5% (47/95)	59.5% (100/168)	61.1% (58/95)	58.6% (99/169)
Negative	52.6% (50/95)	49.1% (83/169)	50.5% (48/95)	40.5% (68/168)	38.9% (37/95)	41.4% (70/169)

^aNumber of wells showing positive slope^bNumber of wells analyzed**Table 3.** Results of simple linear regression for monthly median groundwater data

Parameters	Water levels		Electrical conductivities		Water temperatures	
	Shallow	Deep	Shallow	Deep	Shallow	Deep
Slope						
Positive	48.4% (46 ^a /95 ^b)	52.1% (88/169)	50.5% (48/95)	58.9% (99/168)	63.2% (60/95)	59.2% (100/169)
Negative	51.6% (49/95)	47.9% (81/169)	49.5% (47/95)	41.1% (69/168)	36.8% (35/95)	40.8% (69/169)

^aNumber of wells showing positive slope^bNumber of wells analyzed

증가하는 경향성이 없다는 가설(귀무가설 $S^* = 0$)에 대한 확률을 구할 수 있다. 감소하는 경향성에 대해서는 S^* 의 부호를 반대로 하여 구할 수 있다. 또한 $n > 10$ 인 경우에는 정규분포를 가정하고 다음과 같은 Gilbert (1987)의 식을 이용한다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S^* - 1}{[\text{var}(S^*)]^{1/2}} & \text{if } S^* > 0 \\ 0 & \text{if } S^* = 0 \\ \frac{S^* + 1}{[\text{var}(S^*)]^{1/2}} & \text{if } S^* < 0 \end{cases} \quad (7)$$

3. 분석결과 및 토론

3.1. 선형회귀 분석

국가 지하수관측소에서는 일일 4회(6시간 간격) 지하수위, 전기전도도 및 수온을 측정하고 있는데, 건설교통부와 한국수자원공사는 해당 관측소의 일평균값을 공식적인 관측자료로 하여 매년 관측연보를 발행하고 있다. 경향성을 평가하는 가장 기초적인 접근법으로 최소자승법(least square)을 이용한 선형회귀 방법을 적용하였다.

Table 2는 일평균 지하수위, 전기전도도 및 수온에 대한 선형회귀 분석결과이다. 총적관측정의 수위는 47.4%가 양의 기울기(증가경향), 52.6%가 음의 기울기(감소경향)를 보였다. 또 암반관측정의 수위는 50.9%가 양의 기울기를, 49.1%가 음의 기울기를 보였다. 두 관측정을 모두 합치면 49.6%가 양의 기울기를, 50.4%가 음의 기울기를 보였다. 전기전도도의 경우 총적관측정은 양과 음의 기울기가 거

의 같은 비율을 보였으나 암반관측정의 경우 양의 기울기가 9% 우세하게 나타났다. 수온의 경우 총적 및 암반관측정 모두에서 양의 기울기가 약 10% 크게 나타났다. 월 중앙값을 이용한 단순회귀분석 결과도 일평균에 기초한 결과와 거의 유사하였다(Table 3). 다만 전기전도도의 경우 총적관측정의 양과 음의 기울기 비율이 반대로 나타났으나 근소한 차이에 불과하다.

한편 선형회귀 분석에서 양과 음의 기울기는 각각 단조 증가 및 단조감소의 경향성을 지시한다. 그러나 선형회귀를 통해 얻은 기울기들이 같은 신뢰성을 가지는 것은 아니다. 결정계수(coefficient of determination, r^2)는 관심인자의 변동이 얼마나 선형에 가까운지(goodness of linear fit)를 나타내지 증가 혹은 감소(양과 음의 기울기) 경향의 신뢰도를 나타내지는 않는다. 예를 들어 결정계수가 작더라도 계단식 변화나 경사변화의 경우 변동 경향이 매우 뚜렷할 수 있다. Fig. 2는 일별 지하수위, 전기전도도 및 수온의 선형 회귀분석결과 기울기와 결정계수 사이의 관계를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 선형회귀 기울기는 결정계수와 양의 지수함수(exponential function) 관계를 가지며 수위의 경우 지수 1.28 ~ 1.30($r^2 = 0.65 \sim 0.71$), 전기전도도는 지수 0.88 ~ 1.11($r^2 = 0.44 \sim 0.61$) 그리고 수온의 경우 지수 1.33 ~ 1.41($r^2 = 0.52 \sim 0.57$)의 관계를 보였다. 이와 같은 단조증가 함수의 경우 변동의 기울기가 커질수록 결정계수가 커지며 또한 역으로 결정계수가 클수록 변동의 기울기가 크음을 의미한다. 특히 수위의 자연적인 변동은 인위적인 변동(대량의 지하수 개발, 혹은 인근 지역의 대규모 토목공사)에 비해 시간에 따라 천천히 발생하므로 그 변동 기울기(여기서는 음의 기울기)

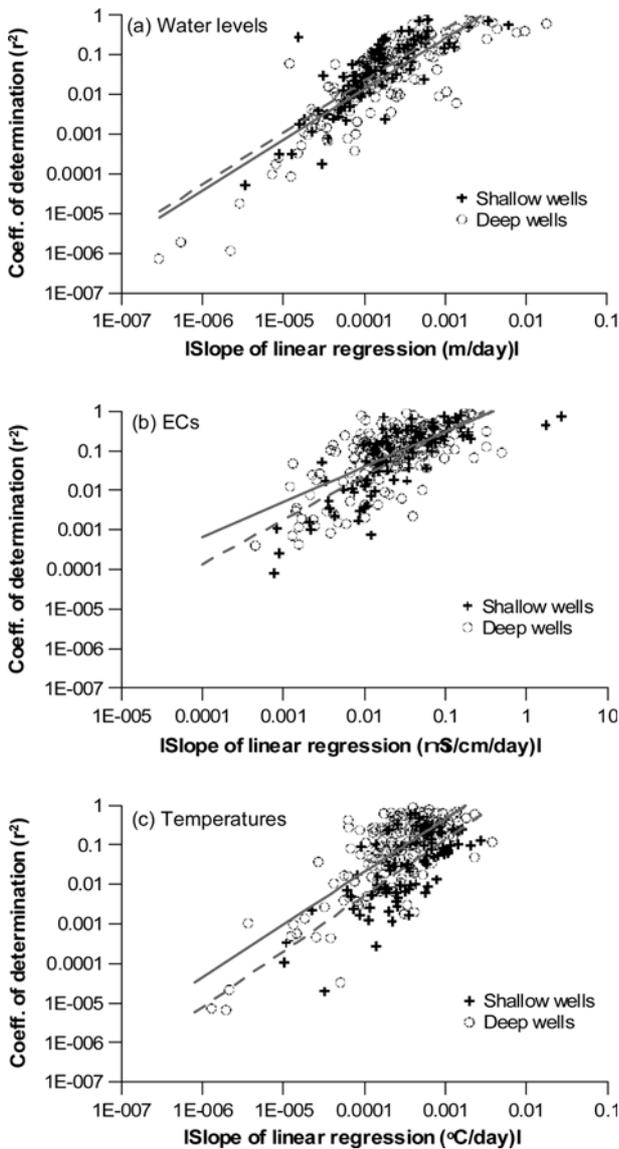


Fig. 2. Relationship between slope of linear regression and coefficient of determination (r^2).

가 작다. 반면 큰 변동기울기를 갖는 경우는 대부분 인위적인 작용에 의한 것이므로 이 경우에는 결정계수도 높다. 결국 국가지하수 관측소의 지하수위의 경우 선형 결정계수가 크면 변동 기울기도 크고 이는 인위적인 영향으로 파악할 수 있다.

3.2. 비모수 경향분석

지하수위, 전기전도도 및 수온의 월중앙값에 대하여 비모수 경향분석을 실시하였다. Table 4는 월중앙 수위값에 대한 분석결과이다. 두 비모수 분석방법은 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 수위의 경우 수위강하가 주요 관심사인데 95% 및 99% 신뢰수준에서 증적관측정은 27.4% 및 20.0%, 암반관측정의 경우 각각 23.7% 및 14.8%가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 50% 이상의 관측정에서는 감소 혹은 증가추세를 보여주지 않았다.

95% 신뢰수준에서 수위가 감소 혹은 증가하는 경향을 보인 관측정의 지역적 분포는 Fig. 3과 같다. 특별히 수위가 하강하는 경향으로 판단되는 지역은 빗금으로 표시하였다. 증적관측정의 경우 수위하강 경향은 전라도 중부 지역, 대구 및 경상북도 남부지역 그리고 경상북도 북부 및 대전지역에서 주로 나타났다. 경기중부 및 강원지역은 수위상승 경향을 보였다. 한편 암반관측정의 경우 수위강하 현상이 매우 산점상으로 흩어져 나타났다. 그러므로 수위변동 경향은 국지적 조건에 영향을 주로 받는 것으로 사료된다. 특히 국가 지하수관측소 주변의 대형토목공사, 간이취수정 개발 등은 수위강하의 주요 원인이 되고 있다 (Lee et al., 2005c). 신뢰도 99% 수준에서 지하수위의 변동경향도 95%와 크게 다르지 않다(Fig. 4). 다만 신뢰도 증가에 따라 수위강하 경향 관측소의 수가 감소하였다 (Table 4 참조). 전체적으로 수위강하 경향 지역은 증적층과 암반층이 크게 다르지 않다.

Table 4. Results of non-parametric trend analysis for monthly median water levels

Wells	Trend	Mann-Kendall test		Sen's test	
		95% confidence	99% confidence	95% confidence	99% confidence
Shallow	Increasing	22.1% (21 ^a /95 ^b)	16.8% (16/95)	22.1% (21/95)	16.8% (16/95)
	Decreasing	27.4% (26/95)	20.0% (19/95)	27.4% (26/95)	20.0% (19/95)
	No trend	50.5% (48/95)	63.2% (60/95)	50.5% (48/95)	63.2% (60/95)
Deep	Increasing	26.0% (44/169)	16.0% (27/169)	26.0% (44/169)	16.6% (28/169)
	Decreasing	23.7% (40/169)	14.8% (25/169)	23.7% (40/169)	14.8% (25/169)
	No trend	50.3% (80/169)	69.2% (117/169)	50.3% (80/169)	68.6% (116/169)

^aNumber of wells showing positive slope

^bNumber of wells analyzed



Fig. 3. Spatial distribution of variation trend of water level at confidence level of 95%.

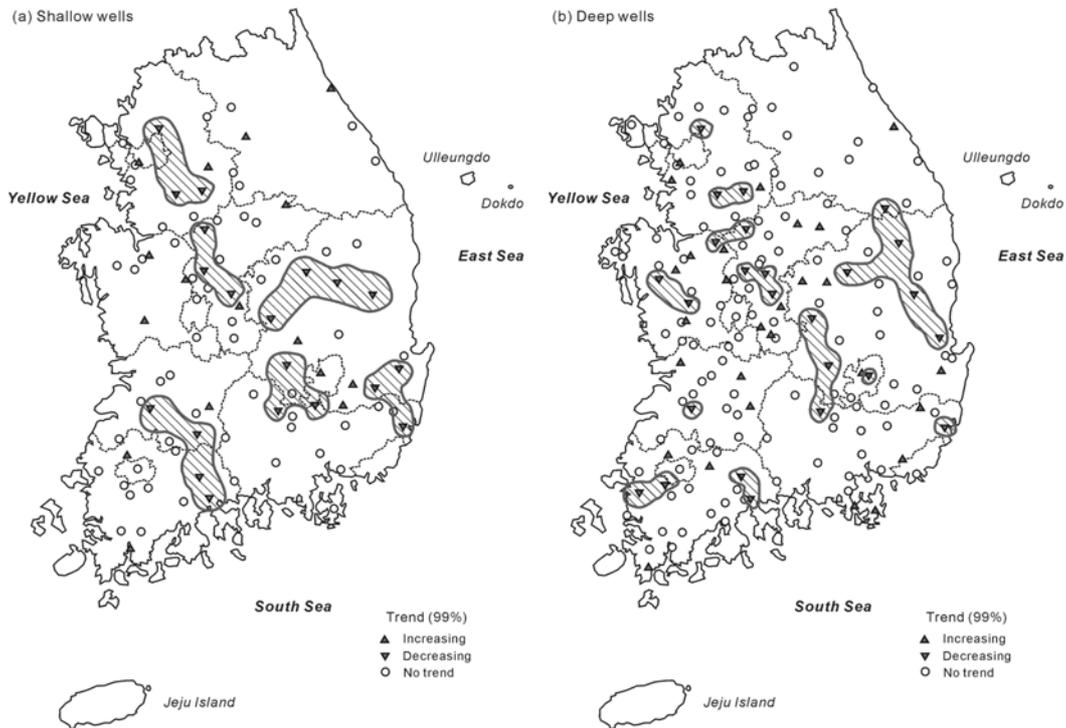


Fig. 4. Spatial distribution of variation trend of water level at confidence level of 99%.

한편 1996년 이후 우리나라의 연강수량의 변화를 살펴 보면 1998~1999년도에 최고 강수량에 도달하였다가 2001

년도에 다시 최저 강수량을 기록하였고 이후 증가하는 양상을 보였다(Fig. 5). 단순히 강수량의 영향만 고려할 경

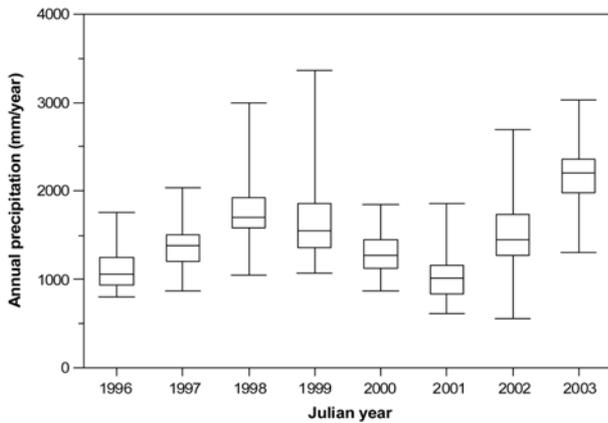


Fig. 5. Box plot of annual precipitation recorded at 65 weather stations of KMA (Korea Meteorological Administration).

우 지하수위는 대체로 상승경향을 보이는 것이 자연스럽다(지하수위는 최장 1996~2003년 자료). 그러나 강수량은 각 개별 관측소별로 연강수량에 있어 차이를 보이고 통계적으로는 증가경향은 아닌 것으로 평가되었다. 96개 기상 관측소 연강수량 자료중 95% 신뢰수준에서 증가하는 경향을 보이는 관측소는 단 2개 관측소(2.1%)에 불과하였다. 또 월강수량은 95% 신뢰수준에서 증가하는 관측소는 4개

관측소(4.2%), 감소하는 관측소는 6개 관측소(6.3%)로 나타났다. 나머지 관측소의 강수량은 동일 수준의 신뢰도에서 증가 혹은 감소경향이 있지 않은 것으로 나타났다.

Table 5는 전기전도도의 월중양값에 대한 비모수 경향 분석 결과이다. 총적관측정의 경우 95% 및 99% 신뢰수준에서 29.5%와 24.2%가 증가경향을 보였다. 이에 비해 암반관측정은 동일수준 신뢰도에서 훨씬 높은 증가경향 비율을 보였다. 95% 및 99% 신뢰수준에서 각각 42.3~42.8% 및 35.7~36.9%가 증가경향을 보였다. 특히 암반관측정의 경우 내륙뿐만 아니라 해안지역에서도 전기전도도의 뚜렷한 증가경향이 나타나는데(Fig. 6), 과다양수에 의한 염수침입의 영향이 주요 요인으로 사료된다(Lee et al., 2005d). 내륙지역과 대도시의 경우 전기전도도 증가는 다양한 원인에 의한 지하수 오염과 연관된 것으로 사료된다.

Table 6은 지하수온의 월중양값에 대한 비모수 경향 분석 결과이다. 총적관측정의 경우 95% 및 99% 신뢰수준에서 각각 36.9~37.9%, 27.4~29.5%가 상승경향을 보였다. 그러나 상당 비율의 관측소의 지하수온이 하강경향을 보였다. 특히 암반관측정에서 지하수온의 하강경향이 총적 관측정에 비해 약 20% 이상 큰 비율을 보였다. 증가 혹

Table 5. Results of non-parametric trend analysis for monthly median electrical conductivities

Wells	Trend	Mann-Kendall test		Sen's test	
		95% confidence	99% confidence	95% confidence	99% confidence
Shallow	Increasing	29.5% (28 ^a /95 ^b)	24.2% (23/95)	29.5% (28/95)	24.2% (23/95)
	Decreasing	32.6% (31/95)	27.4% (26/95)	32.6% (31/95)	28.4% (27/95)
	No trend	37.9% (36/95)	48.4% (46/95)	37.9% (36/95)	47.4% (45/95)
Deep	Increasing	42.3% (71/168)	35.7% (60/168)	42.8% (72/168)	36.9% (62/168)
	Decreasing	26.2% (44/168)	20.2% (34/168)	27.4% (46/168)	20.8% (35/168)
	No trend	31.5% (53/168)	44.1% (74/168)	29.8% (50/168)	42.3% (71/168)

^aNumber of wells showing positive slope

^bNumber of wells analyzed

Table 6. Results of non-parametric trend analysis for monthly median groundwater temperatures

Wells	Trend	Mann-Kendall test		Sen's test	
		95% confidence	99% confidence	95% confidence	99% confidence
Shallow	Increasing	36.9% (35 ^a /95 ^b)	27.4% (26/95)	37.9% (36/95)	29.5% (28/95)
	Decreasing	10.5% (10/95)	8.4% (8/95)	11.6% (11/95)	8.4% (8/95)
	No trend	52.6% (50/95)	64.2% (61/95)	50.5% (48/95)	62.1% (59/95)
Deep	Increasing	35.5% (60/169)	30.2% (51/169)	43.8% (74/169)	32.5% (55/169)
	Decreasing	31.4% (53/169)	26.6% (45/169)	34.3% (58/169)	29.6% (50/169)
	No trend	33.1% (56/169)	43.2% (73/169)	21.9% (37/169)	37.9% (64/169)

^aNumber of wells showing positive slope

^bNumber of wells analyzed

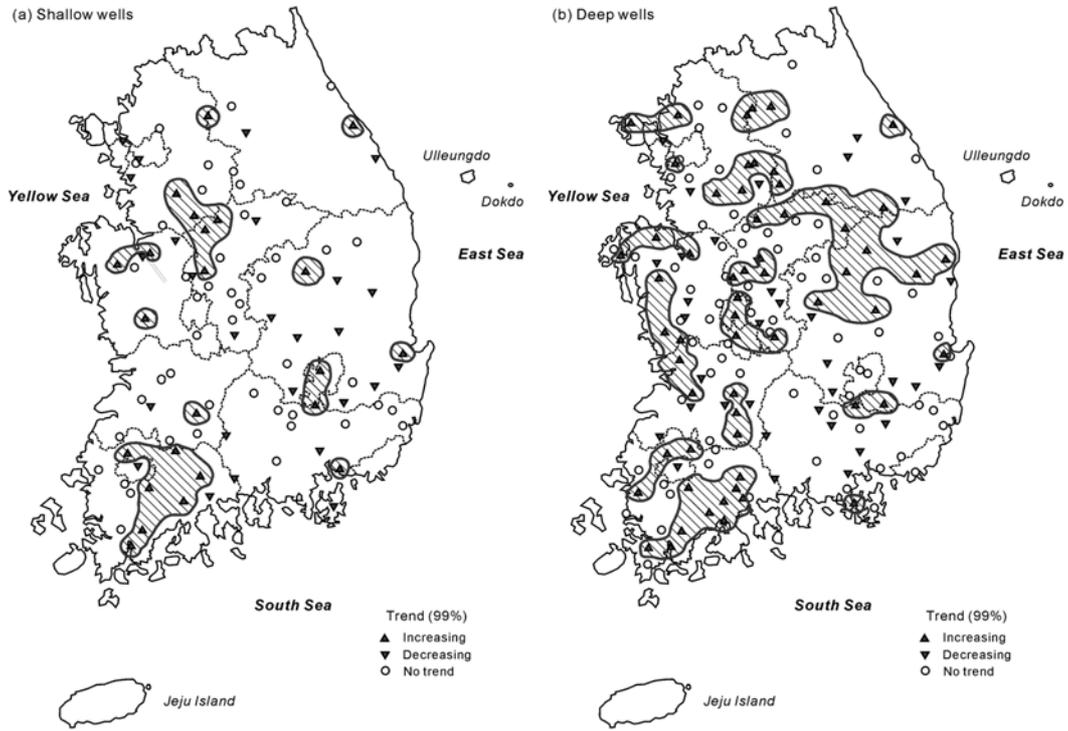


Fig. 6. Spatial distribution of variation trend of electrical conductivity at confidence level of 99%.

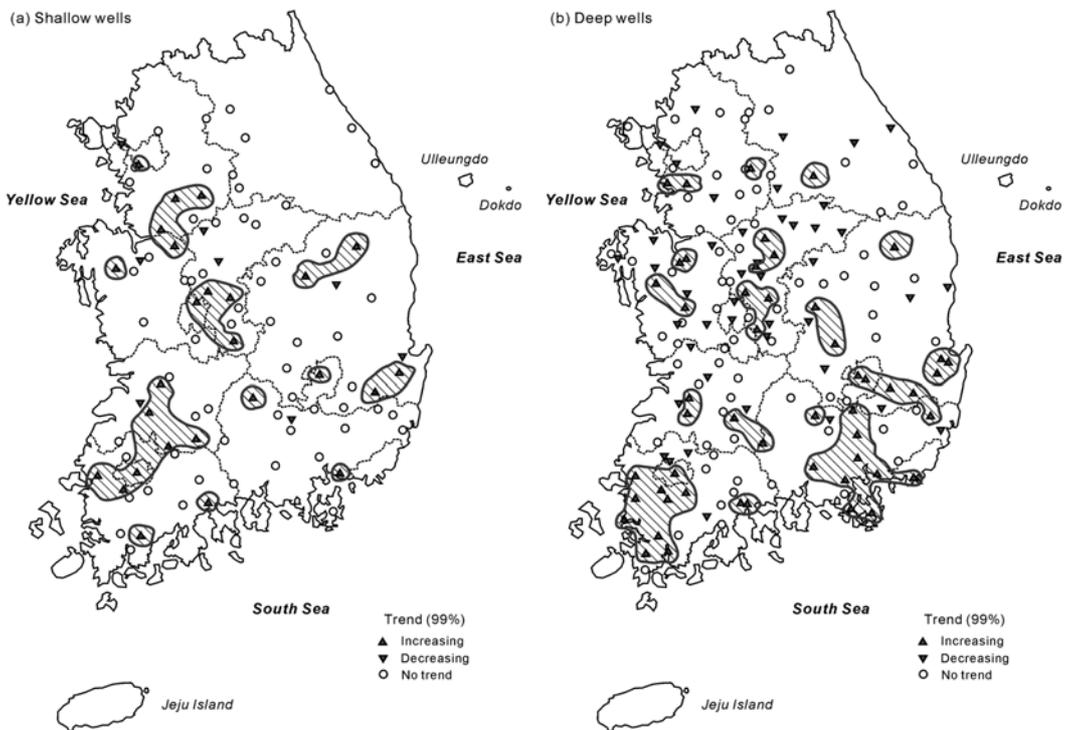


Fig. 7. Spatial distribution of variation trend of groundwater temperatures at confidence level of 99%.

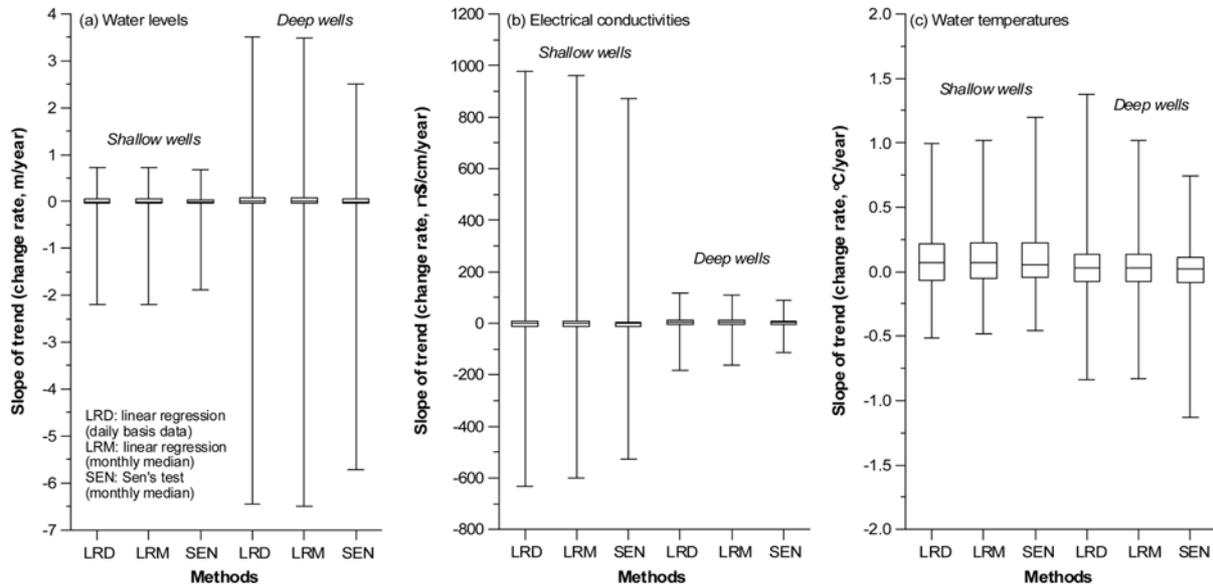


Fig. 8. Comparison among slopes of variation estimated from three different methods.

은 감소경향의 지역적 분포는 매우 불규칙적으로서(Fig. 7), 현재로서는 이런 현상의 원인을 단정하기 힘들다. 한편 천부지하수의 수온은 대체로 연평균 대기온과 선형적 관계를 보이고 있어 우리나라의 장기적인 기후변화 추세와의 수온 연관성 연구를 위해서는 보다 장기적인 관측자료가 필요하다(한정상 외, 2004).

3.3. 모수 및 비모수 경향분석 비교

선형회귀분석과 비모수 경향분석의 해석결과를 비교하였다. 선형회귀분석은 변동경향에 대한 정량적 신뢰도 정보를 주지 못하는 반면 비모수 경향분석은 증감경향에 대한 신뢰수준 정보를 제공한다. Fig. 8은 모수적 경향분석과 비모수적 경향분석 결과 증감기울기를 보여준다. 상자그림(box plot)에서 수위변동 기울기의 25~75% 구간은 세 가지 방법(일평균 선형회귀분석, 월중앙 선형회귀분석, 비모수 Sen's test) 모두 비슷한 결과를 보여주었다(Fig. 8a). 그러나 전체범위에 있어서는 흥미로운 특징적인 결과가 나왔다. 일자료를 이용한 선형회귀(LRD)와 월중앙값을 이용한 선형회귀(LRM)가 유사한 변동 기울기(slope) 범위를 보인데 비해 비모수 경향분석은 보다 작은 범위의 기울기를 보였다. 이와 같은 경향은 지하수위의 경우 충전관측정 및 암반관측정 모두에서 발견되었다. 선형회귀분석의 경우 일별 혹은 월별로 나타나는 극값 혹은 이상값에 민감하게 영향을 받는 반면 비모수경향분석의 경우 값 자체보다 값의 순서 혹은 기울기의 순서에 좌우되므로

개별값의 영향이 최소화되어 기울기의 범위가 감소하는 것으로 사료된다(Salmi et al., 2002).

흥미로운 것은 충전관측정의 변동기울기의 범위가 암반관측정의 범위에 비해 매우 작다는 점이다. 최근 깨끗한 물에 대한 사회적 요구가 확대되면서 지하수 이용관정의 심도가 대폭 증가하였고 이에 따라 암반대수층의 지하수 이용이 크게 증가하였다(Lee et al., 2006b). 이에 따라 국가 지하수관측소의 암반관측정에서의 지하수위 강하가 충전관측정에 비해 상대적으로 크게 발생한 것으로 사료된다. 물론 동일한 양을 양수하더라도 암반 대수층의 수위강하가 더 큰 것도 하나의 이유가 될 수 있다. 또한 충전층이 강수에 의해 보다 빠르게 함양되는 반면 암반대수층의 경우 상대적으로 지하수 함양이 느린 것도 원인이 될 수 있다. 그러나 양의 기울기(수위 상승)도 암반관측정에서 더 큰 이유는 쉽게 설명하기 어려울 것으로 사료된다.

전기전도도의 경우 지하수위와 정반대의 경향을 보인다(Fig. 8b). 25~75%의 구간은 암반관측정이 충전관측정에 비해 큰 반면, 전체적인 변동기울기는 충전관측정이 훨씬 크고 넓게 나타났다. 이는 지표에 가까운 충전관측정은 오염 혹은 강수에 민감하여 전기전도도 변동 기울기가 큰 반면 암반관측정은 이러한 영향에 상대적으로 안정적이어서 작은 변동기울기를 보이는 것으로 사료된다. 지하수온의 경우 충전 및 암반관측정 모두 가장 작은 연중 변동을 보였다. 대부분의 관측정은 연 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 이내의 변동

기울기를 보였다. 물론 이러한 안정적인 수온은 지하수 지열펌프 적용의 좋은 조건으로 평가되고 있다(Lee and Hahn, 2006; Lee et al., 2006a). 25~75% 범위에 있어서 암반관측정이 층적관측정보보다 좁은 범위의 변동기울기를 보였으나 일부 관측정의 경우 층적관측정보보다 큰 수온 증가 혹은 감소율(변동기울기)을 보였다. 보다 안정적인 것으로 기대되는 암반관측정에서 이와 같이 큰 변동율을 보이는 것은 고심도의 지하수 이용과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1995년이래 건설교통부와 한국수자원공사에서 국가 기본관측망으로 전국에 걸쳐 설치하고 있는 국가 지하수관측소에서 얻은 지하수위, 전기전도도 및 수온 자료에 대해 모수 및 비모수 경향분석을 실시하였다. 선형회귀분석을 통해서는 약 50% 관측정의 수위, 전기전도도 및 수온이 증가경향(양의 기울기)을 나타내었고 나머지 절반은 감소하는 것으로 평가되었다. 그러나 월중양값을 이용한 비모수 경향분석에서는 95~99% 신뢰수준에서 지하수위는 14.8~27.4%가 감소경향으로 나타났고 전기전도도의 경우 동일 신뢰수준에서 24.2~42.8%가 증가경향을 보였다. 수온의 경우 29.5~43.8%가 증가경향을 보였다.

실제로 연구자들이 애초에 기대한 바와 달리 지나치게 높은 비율이 증가 혹은 감소의 경향성을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 본 연구의 분석대상 기간이 상대적으로 짧은(최장 6년 = 72개월) 것에 기인한 결과일 수 있다. 향후 보다 장기적인 경향분석을 위해서는 지속적인 관측과 신뢰성 있는 자료의 축적이 필수적이다.

한편 현장조사를 실시하여 평가한 결과에서 나타난 지하수위, 전기전도도 및 수온의 증가 혹은 감소경향 자체가 직접적인 지하수 장해(지하수 고갈 등)를 의미하지는 않는다. 결국 장기적인 경향성과 더불어 해당 인자의 값 자체 및 감소율(기울기)을 고려하여야 지하수 장해 발생 가능성을 평가할 수 있다. 예를 들어 지하수위가 높은 신뢰수준에서 감소경향을 보이더라도 그 기울기(감소속도)가 작다면 단기적으로 문제가 되지 않으며 장기적인 지속 관측으로 충분하다. 본 연구는 국가 지하수관측소 자동 측정자료에 대한 최초의 전면적인 경향분석 결과이다. 이번 연구사례를 토대로 국내 지하수 자원의 전체적인 변동상황을 파악하기 위해서는 정기적인 경향분석을 수행할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사와 한국지질자원연구원의 지하수 장해우려지역 대책방안 연구의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이명재, 김규범, 손영철, 이진용, 이강근, 2004, 국가 지하수관측소 지하수위 자료에 대한 시계열분석 연구, 지질학회지, **40**, 305-329.
- 이명재, 이진용, 김규범, 원종호, 2005, 국가지하수 관측소 측정 자료의 이상값 분석, 지하수토양환경, **10**, 65-74.
- 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2004, 친환경, 대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템, 한림원, 서울, p. 14-69.
- Box, G.E.P. and Jenkins, G.M., 1976, Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden-Day, San Francisco, p. 531.
- Gilbert, R.O., 1987, Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Van Nostrand Rienhold Company, Inc., New York, p. 127.
- Hamed K.H. and Rao A.R., 1998, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *J. Hydrol.*, **204**, 182-196.
- Kendall, M.G., 1975, Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London, p. 202
- Kim, G.B., 2005, Nationwide Monitoring and Assessment of Groundwater in Korea, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, p. 391.
- Lee, J.Y. and Hahn, J.S., 2006, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: implications for heat pumps, *J. Hydrol.* (in press).
- Lee, J.Y., Won, J.H., and Hahn, J.S., 2006a, Evaluation of hydrogeologic conditions for groundwater heat pumps: analysis with data from national groundwater monitoring stations, *Geosci. J.*, **10**, 91-99.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Yoo, Y.K., Ahn, K.H., Kim, G.B., and Won, J.H., 2006b, A review of national groundwater monitoring network (NGMN) in Korea, *Hydrol. Proc.* (in press).
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Lee, J.M., Ahn, K.H., Won, J.H., Moon, S.H., and Cho, M., 2006c, Causes of substantial water-level decline at a national groundwater monitoring station in Daegu, Korea, *Quar. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* (Submitted).
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Song, S.H., and Lee, G.S., 2005d, Monitoring of seawater intrusion in Korea: analysis of data for 1998-2004, *Water Int.* (submitted).

- Mann, H.B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, **13**, 245-259.
- Moon, S.K., Woo, N.C., and Lee, K.S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge, *J. Hydrol.*, **292**, 198-209.
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., and Amnell, T., 2002, Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by The Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates -The Excel Template Application Makesens, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, p. 35.
- Sen, P.K., 1968, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. Amer. Stat. Assoc.*, **63**, 1379-1389.
- Yue, S. and Wang, C.Y., 2002, Discussion: a study of variability of annual river flow of the southern African region, *Hydrol. Sci. J.*, **47**, 983-989.