

국가지하수관측소 총적관측정의 수위 변동 유형 분류 및 특성 비교

김규범^{1*} · 염병우²

¹한국수자원공사 국가지하수정보센터(미국지질조사소)

²한국지질자원연구원 지하수지열연구부(미국지질조사소)

Classification and Characterization for Water Level Time Series of Shallow Wells at the National Groundwater Monitoring Stations

Gyoo-Bum Kim^{1*} · Byoung-Woo Yum²

¹National Groundwater Information Management and Service Center, KWATER

(Michigan Water Science Center, U.S. Geological Survey)

²Groundwater and Geothermal Resources Division, KIGAM (Headquarters, U.S. Geological Survey)

ABSTRACT

The principal component analysis was performed to identify the general characteristics of groundwater level changes from 202 deep and 112 shallow wells monitoring data, respectively, which came from the National Groundwater Monitoring Stations operated by KWATER with time spans of 156 continuous weeks from 2003 to 2005. Eight principal components, which accounted for 80% of the variability of the original time series, were extracted for water levels of shallow and deep monitoring wells. As a result of cluster analysis using the loading value of three principal components for shallow wells, shallow monitoring wells were divided into 3 groups which were characterized with a response time to rainfall (Group 1: 4.6 days, Group 2: 24.1 days, Group 3: 1.4 days), average long-term trend of water level (Group 1: 2.05×10^{-4} m/day, Group 2: -7.85×10^{-4} m/day, Group 3: -3.51×10^{-5} m/day) and water level difference (Group 1 < Group 2 < Group 3). Additionally, they showed significant differences according to a distance to the nearest stream from well (Group 3 < Group 2 < Group 1), topographic slope of well site (Group 3: plain region, Group 1: mountainous region) and groundwater recharge rate (Group 3 < Group 2 < Group 1) with a p-value of 0.05.

Key Word: National Groundwater Monitoring Stations, groundwater levels, principal component analysis, cluster analysis

요 약 문

현재 운영중인 국가지하수관측소의 지하수위 변동 특성을 파악하고자, 2003년부터 2005년까지의 156주 동안의 202개 암반관측정과 112개 총적관측정을 대상으로 주성분분석을 실시하였다. 암반 및 총적관측정의 지하수위에 대하여 80% 정도 설명 가능한 8개 주성분을 각각 추출하였으며 이중 총적관측정에 대해서는 주성분 인자적재값을 이용하여 군집분석을 실시한 결과 강우에 대한 지하수위의 반응(군집 1: 4.6일, 군집 2: 24.1일, 군집 3: 1.4일), 수위 변동 추세(군집 1: 2.05×10^{-4} m/day, 군집 2: -7.85×10^{-4} m/day, 군집 3: -3.51×10^{-5} m/day), 수위 변동 폭(군집 1 < 군집 2 < 군집 3) 등에 의하여 설명되는 3개의 군집으로 분류되었으며, 각 군집은 유의수준 0.05에서 인근 하천과의 거리(군집 3 < 군집 2 < 군집 1), 지하수 함양율(군집 3 < 군집 2 < 군집 1) 및 지형 경사 특성(군집 3이 평야지대, 군집 1은 급경사 지역) 등에 차이를 보이는 것으로 나타났다.

주제어 : 국가지하수관측소, 지하수 수위, 주성분 분석, 군집 분석

*Corresponding author : gbkim@kwater.or.kr

원고접수일 : 2007. 6. 29 게재승인일 : 2007. 8. 9

질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지

1. 서 론

일반적으로 지하수 관측망의 구축은 체계적인 지하수 관리에 요구되는 최소한의 정보를 취득하기 위한 수단이다. 관측을 통하여 ① 지하수자원의 최적 개발, ② 지하수 오염, 염수침입 및 지하수 과다 채수와 같은 지하수 피해의 통제, ③ 오염된 지하수 또는 수위 강하 등이 생태계에 미치는 피해와 같은 환경에 대한 보호 등을 수행할 수 있게 된다.

현재 우리나라에는 320개소의 국가지하수관측소로부터 일 4회 지하수위, 수온 및 전기전도도 자료가 자동으로 측정 수집되고 있다. 국가지하수관측소는 1995년부터 설치되기 시작하여 2005년에 설치 완료하였고, 관측된 자료는 일평균 값으로 산정되어 지하수관측연보에 수록 발간되고 있으며 국가지하수정보센터(www.gims.go.kr)에서 자료를 받을 수 있다. 국가지하수관측소에는 기본적으로 약 70 m 심도를 갖는 암반관측정과 30 m 미만의 총적관측정 등 2개의 관측정으로 구성되어 있으며, 총적층 분포가 미약한 지역은 암반관측정이 설치 운영되고 있다. 대부분의 지하수관측소가 수년 이상의 관측 자료를 보유하고 있어 장기 특성 변화에 대한 분석이 필요하며, 이를 활용한 지하수 관리체계의 재 정립이 요구되는 시점이다.

지하수위 시계열 자료는 관측 항목에 미치는 영향인자에 따라 몇 가지 그룹으로 분류할 수가 있다. 즉, 지하수위 시계열 자료는 주변의 자연적 환경요인 및 인위적 환경요인에 의하여 특징적인 변동 양상을 보일 수 있으며 유사한 변동은 그룹으로 묶을 수 있다. 기본적으로 지하수 시계열 패턴은 주변의 지질, 지형 및 수리지질적 인자 등에 의하여 결정이 되며, 여기에 인위적인 양수나 주입 등이 추가적인 인자로 작용을 한다. 이와 같이, 시계열 패턴의 분류를 위하여 본 연구에서는 주성분 분석을 통한 1 차적인 인자를 도출하였으며, 이들 인자들을 이용하여 총적 관측정 지하수위 시계열 자료에 대한 군집분석을 실시하여 해당 군집을 도출하고 각 군집의 특성 평가를 실시하였다. 이와 같이, 주성분 분석 또는 군집분석을 통한 지하수 시계열 인자 추출은 여러 연구자들에 의하여 이루어진 바 있다. Winter et al.(2000)은 미국내 지하수 관측정의 지하수위 자료에 대한 분류에 활용하였으며, Evans et al.(1996), Ravichandran et al.(1996) 및 Suk and Lee (1999) 등은 수질자료의 분류에 활용한 바 있다. 한편, 국내 지하수 수위 관측 자료를 활용한 사례로서는, Moon et al.(2004)이 66개 지하수 관측소 자료를 활용하여 수위 유형을 분류하고 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량을 산정한 바 있다. 또한, 이명재 외(2004)는 국가 지하

수 관측정의 지하수위 시계열 자료를 대상으로 강우와의 관계 및 시각적 특성에 따라 분류 한 후 대표적인 9개 관측정을 대상으로 ARIMA(p,d,f) 모형을 이용하여 변동 특성을 파악하고 예측을 실시한 바 있다.

본 연구의 목적은, 국가 지하수 관측정의 설치가 완료된 현 시점에서 관측정별 지하수 시계열 변동 특성에 따른 군집을 분류하고 특성을 파악함으로써 군집별 일반화된 특징을 도출하여 향후 추가 연구에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 자료

본 연구를 위하여 최대한 많은 지점의 관측자료를 확보하기 위하여 2003년부터 2005년까지 3년간의 관측 자료를 보유한 암반관측정 202개소, 총적관측정 112개소를 연구 자료로 활용하였다 (건설교통부·한국수자원공사, 2004a; 건설교통부·한국수자원공사, 2005; 건설교통부·한국수자원공사, 2006). 본 기간 동안에는 극심한 가뭄이나 홍수가 예년에 비하여 적었던 기간이며 기상 조건이 상대적으로 균질한 기간으로서 시계열 자료의 특성 분석에 유리할 것으로 판단하였다. 국가지하수정보센터에서 운영 중인 국가지하수관측망관리시스템(www.gims.go.kr/monitor)에 구축된 각 관측정별 일평균 지하수위 자료를 토대로 3년간 주평균 자료(총 156회)를 산정하여 연구에 활용하였다. 일평균 또는 일 4회 측정 자료를 사용할 경우 일부 관측정에서는 주변의 인위적인 요인에 의하여 발생한 이상 변동이 주성분 분석시 영향을 미칠 수 있기 때문에 주평균을 구하여 이상 변동 요인을 1차 완화시켰으며, 결국 자료에 대해서는 선형보간법을 적용하여 자료를 보완하였다.

연구대상 자료의 개략적인 특성 파악을 위하여 지하수위 변동을 검토한 결과, 암반관측정의 경우 지하수위의 변동 폭은 약 20 m 이하로서 대부분 5 m 이하이며 총적 관측정은 보다 변동 폭이 적은 약 10 m 이하의 범위로써 대부분이 4 m 이하를 나타낸다(Fig. 1). 또한, 고도가 낮을수록 지하수위 변동이 심한 것으로 나타났다. 관측지점의 표고와 평균 지하수위의 관계를 보면, Pearson 상관계수가 암반관측정은 0.996, 총적관측정은 0.999로서 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

3. 주성분 분석

지하수 관측정의 시계열 특성을 분류하기 위하여 자료

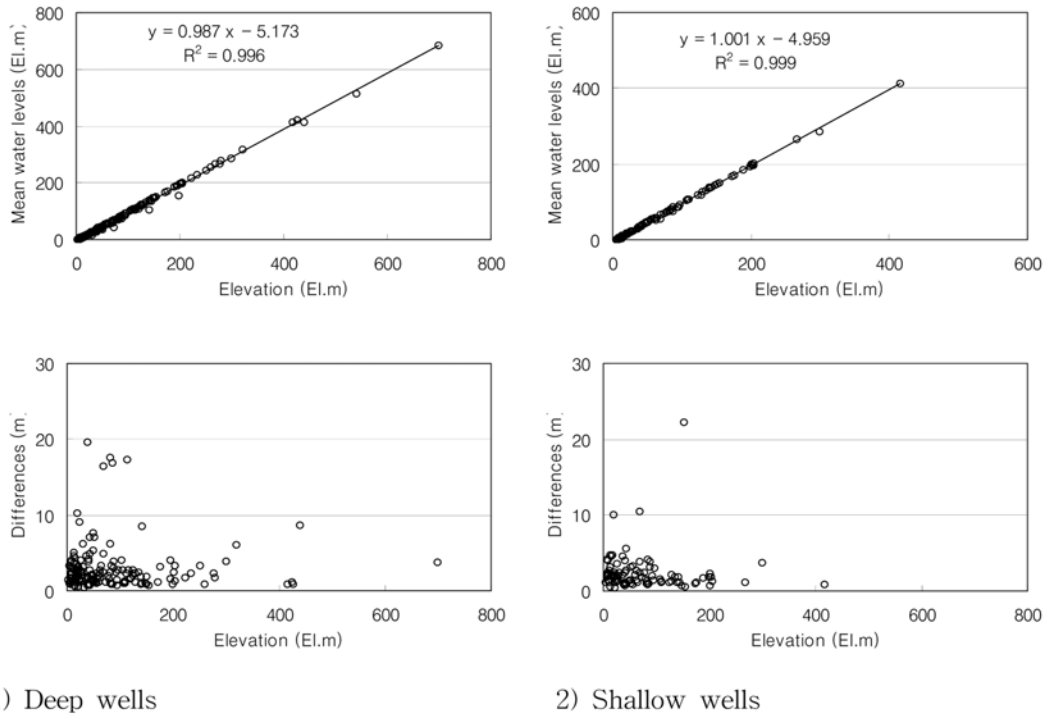


Fig. 1. Relationships between water levels and surface elevation at monitoring sites.

의 축소 작업을 선행하였다. 지하수 관측 시계열 자료는 대용량의 연속형 자료로서, 자료의 축소를 위하여 SPSS를 활용한 주성분 분석(Principal component analysis)을 실시하고 그 결과를 이용하여 군집분석을 실시하였다. 주성분 분석은 변수들의 상관행렬 또는 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 스펙트럴 분해(Spectral decomposition)를 이용하여 주성분이라는 새로운 변수를 생성하는 방법이다. 즉, 분석 대상 변수가 많은 경우 변수들 간의 상호 관련성을 이용하여 변수 속에 내재된 인자(Factor)를 찾아내고 이를 통하여 전체 자료의 특성을 설명하는 통계적 방법이다 (박성현 외, 1999). 주성분 분석의 일차적 목적은 원시 데이터의 손실을 최소화할 수 있도록 주성분이라는 원시변수들의 선형조합을 찾아내는 것이다.

p 개의 변수 x_1, x_2, \dots, x_p 의 표준화된 변수를 z_1, z_2, \dots, z_p 라 할 때 주성분 모형은 변수 z_i 들이 소수의 관측되지 않은 인자(공통인자라고 함) F_1, F_2, \dots, F_m ($m \leq p$)들의 선형 결합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} z_1 &= l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ z_2 &= l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ &\vdots \\ z_p &= l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{aligned}$$

여기에서, ε_j 는 변수 z_i 에 기여하는 유일인자(Specific factor)이며, l_{ij} 는 j 번째 인자가 i 번째 변수에 얼마나 기여하는 지를 나타내는 인자적재(Factor loading)이다.

한편, 변수 z_i 의 분산은,

$$Var(z_i) = h_i^2 + \psi_i, \quad h_i^2 = l_{i1}^2 + \dots + l_{im}^2$$

로서, h_i^2 는 변수 z_i 의 분산 가운데 공통인자 F_1, F_2, \dots, F_m 들이 기여하는 정도를 의미하는 공통인자 분산이며, ψ_i 는 변수 z_i 의 분산에만 기여하는 유일분산이다.

상기 식 z_1, z_2, \dots, z_p 의 상관행렬(R), 인자행렬($L = (l_{ij})$), 대각행렬(대각선이 ψ_i 로 구성된 행렬 Ψ)의 다음 관계를 만족하는 인자를 추출함으로써 주성분을 결정하게 된다.

$$R = LL' + \Psi$$

이 식을 만족하는 F_k 에서 분산의 크기에 따라 주성분(F_1, F_2, \dots, F_m)을 결정한다. 본 연구에서의 주성분분석 과정은 인자의 갯수를 결정하는데 분산의 설명력을 사용하였고, 회귀분석법에 의한 인자점수 계산을 수행하였다.

암반관측정을 대상으로 주성분 분석을 실시한 결과, 고유값 2 이상은 11개의 성분으로 나타났으며, 이 중에서 전

Table 1. Percentage of total variance of groundwater levels at principal component analysis

1) Deep wells			
Principal component	Total	% of variance	cumulative % of variance
1	91.372	45.234	45.234
2	21.802	10.793	56.026
3	19.097	9.454	65.480
4	8.171	4.045	69.525
5	7.338	3.632	73.158
6	5.516	2.731	75.889
7	4.715	2.334	78.223
8	3.738	1.850	80.073
2) Shallow wells			
Principal component	Total	% of variance	cumulative % of variance
1	53.035	47.353	47.353
2	12.137	10.836	58.189
3	9.210	8.223	66.412
4	5.017	4.479	70.892
5	3.391	3.027	73.919
6	2.621	2.340	76.259
7	2.292	2.046	78.306
8	2.175	1.942	80.247

체의 80% 이상을 설명해주는 주성분을 선택한다면 8개로 설명이 가능한 것으로 나타났다 (Table 1). 전체 분산의 45.2%를 성분 1이 설명하고 분산의 10.8%를 성분 2, 9.5%를 성분 3이 설명하고 있으며, 나머지는 5% 미만의 설명력을 갖고 있다. 총적관측정의 경우에는, 총 8개의 주성분으로 전체의 80% 이상이 설명가능한 것으로 나타났으며, 이 중에서 성분 1이 전체 분산의 47.3%, 성분 2가 10.8%, 성분 3이 8.2% 정도의 설명력을 갖고 있다.

이상에서 도출된 각 주성분의 그래프 특성을 파악하기 위하여 가장 대표적인 주성분 4개를 대상으로 시계열도를 작성하였으며(Fig. 2), 각 주성분의 시각적인 시계열 특성을 기술하면 다음과 같다(Table 2).

암반 관측정의 주성분 1의 그래프 특성은 호우기와 갈수기의 지하수위의 계절적 반응이 뚜렷하며 일 시차간 지하수위 변동 폭(평균 0.26 m)이 커서 Peak 형태를 잘 보인다. 또한, 지하수위 강하는 지수 함수적으로 이루어지고 있고 3차례 호우기 동안 지하수위가 약간 낮아지나, 시계열 모형 분석에 의하면 ARIMA(1,0,0) 모델로 설명되어 통계상의 추세는 나타나지 않으며 현재의 수위는 이전 시점의 수위에 의하여 대부분 결정되는 모형을 보인다. 또한, 타 주성분에 비하여 갈수기와 홍수기의 수위 변동 폭

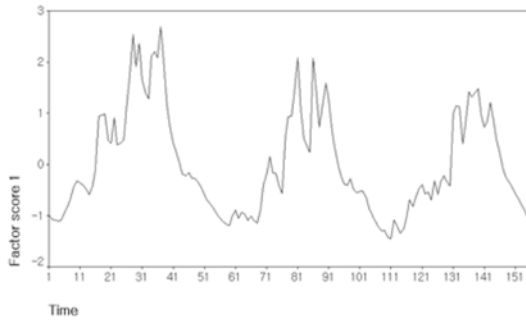
이 큰 것이 특징이다. 주성분 2는 호우기와 갈수기의 지하수위의 계절적 반응이 뚜렷하며, 주성분 1에 비하여 지하수위 상승시 Peak 형태가 줄어들었으며 완만한 형태를 보이고 있다. 또한, 지하수위 강하시에는 지수함수적 형태를 보이지 않고 불룩한 형태를 나타내며 3차례 호우기만을 비교하면 장기적인 지하수위 변화는 거의 없으나 추세를 반영하는 차분 모델인 ARIMA(1,1,0)로 설명되듯이 미약한 상승현상을 보인다. 주성분 3의 경우에도 마찬가지로 ARIMA(1,1,0)의 차분 모델로서 지하수위 강하가 뚜렷이 나타나고 있는 것이 특징이다. 이 경우 호우기와 갈수기 모두 지하수위 강하가 발생하고 있으며, 주성분 1에 비하여 일 시차간 지하수위 변동폭이 줄어들어(평균 0.10 m) Peak 형태가 완만하게 나타난다. 또한, 갈수기와 홍수기의 수위 변동 폭이 주성분 1 및 2에 비하여 적은 것이 특징이다. 주성분 4 및 기타 주성분의 그래프 특성은 계절에 따른 지하수위 변동 패턴이 뚜렷하지 않는 것이 특징이나 지하수위는 Peak 형태를 비교적 잘 보이고 있다. 이와 같은 불규칙 변동은 주변에서의 인위적인 양수, 하천 및 저수지 수위에 의한 영향, 주변 지역의 굴착 등 다양한 원인에 의하여 나타난다.

총적 관측정의 경우, 주성분 1의 그래프 모양은 암반의 주성분 1과 유사한 형태로서 주기성을 강하게 나타내며 일 시차간 지하수위 변동 폭(평균 0.28 m)이 커서 뾰족한 Peak 형태를 잘 보여준다. 또한, 호우기간 동안에는 전반적인 지하수위 강하가 나타나나 ARIMA(1,0,0) 모델로서 통계적으로는 수위 추세가 없으며, 타 주성분에 비하여 계절간 지하수위의 변동 폭이 큰 특징을 보인다. 주성분 2는 주성분 1에 비하여 지하수위 Peak 형태가 완만해졌으며 전체 기간을 통하여 지하수위 강하가 약하게 나타나 ARIMA(1,1,0) 모델로서 통계적 추세 특징을 보인다. 주성분 3의 시계열 특징은 계절적인 변동이 약해 졌으며 ARIMA(1,1,0) 모델로 설명되듯이 뚜렷한 지하수위 추세(상승) 현상이 나타나고 지하수위의 변동 폭(일 시차간 수위차 : 평균 0.14 m)이 상대적으로 작다. 기타 주성분 4, 5, 6, 7 및 8은 계절적인 변동성이 약한 불규칙 변동 특성을 보이며 지하수위는 Peak 형태를 보여 준다.

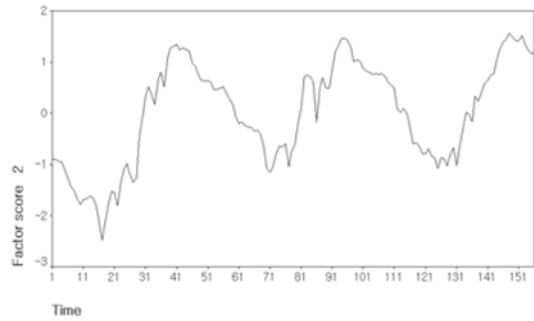
한편, 암반 및 총적관측정 지하수위 시계열 자료의 주기적 특성을 보면 주성분 1, 2 및 3은 공히 52주 간격의 뚜렷한 주기성을 보여 1년 단위의 변동 특성이 잘 나타나고 있고 22주~25주(반년 단위) 사이의 약한 주기성도 나타나고 있으며, 주기의 강도는 주성분 1이 가장 강하고 하부 주성분으로 가면서 줄어드는 특성을 볼 수 있다. 한편, 주성분 4에서는 주기성이 줄어들어 18주, 25주 및

1) Deep wells

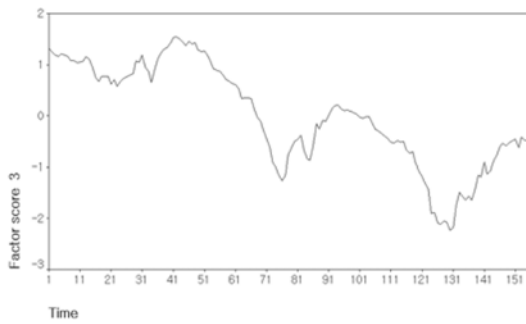
① PC 1



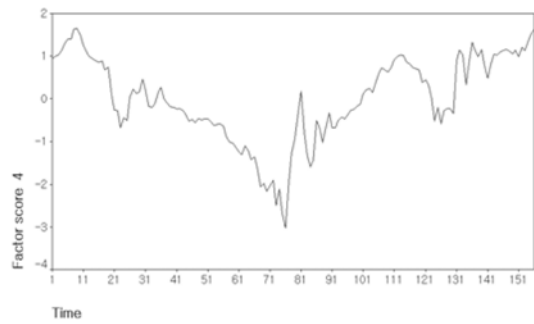
② PC 2



③ PC 3

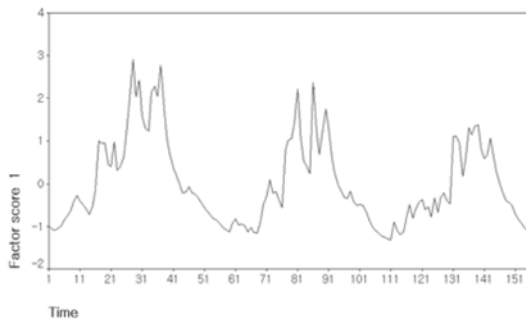


④ PC 4

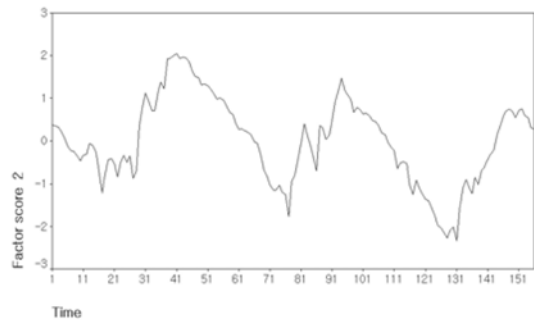


2) Shallow wells

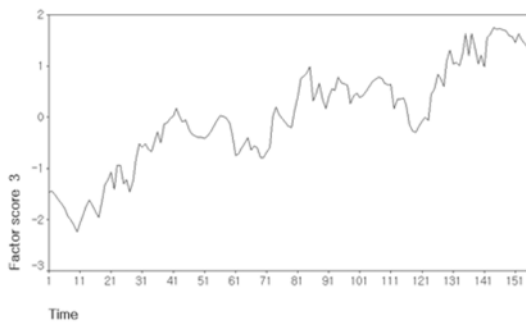
① PC 1



② PC 2



③ PC 3



④ PC 4

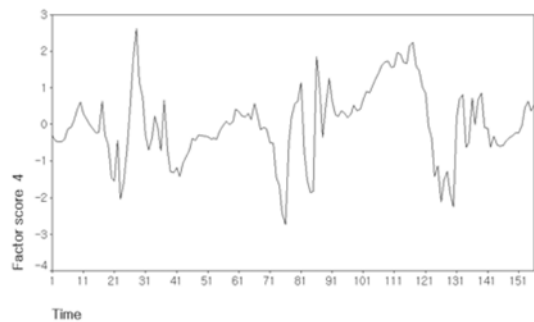


Fig. 2. Time series of four principal components for deep and shallow monitoring wells.

Table 2. Principal components and their descriptions for the water levels of deep and shallow monitoring wells

1) Deep wells		
Factors	Graphic features	Statistical features
PC1	<ul style="list-style-type: none"> • Sharp peak shapes • Strong seasonal variation • Downward trend along the top-lines during rainy seasons • No trend along the baselines during drought seasons • Wide range of water level fluctuation 	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA(1,0,0) model • Periodicity : 52 week • Daily difference of water levels : Average: 0.26m, St.dev.: 0.28
PC2	<ul style="list-style-type: none"> • Round peak shapes • Strong seasonal variation • Upward trend along the baselines during drought seasons • No trend along the top-lines during rainy seasons 	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA(1,1,0) model • Periodicity : 52 week • Daily difference of water levels : Average: 0.16m, St.dev.: 0.16
PC3	<ul style="list-style-type: none"> • Round peak shapes • Moderate seasonal variation • Downward trend during whole seasons 	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA(1,1,0) model • Periodicity : 52 week • Daily difference of water levels : Average: 0.10m, St.dev.: 0.09
PC4, (PC5,C6, PC7,PC8)	<ul style="list-style-type: none"> • Sharp peak shapes • Weak seasonal variation and irregular patterns 	<ul style="list-style-type: none"> • Periodicity(F4) : 18, 25 and 52 weeks • Daily difference of water levels(F4) : Average: 0.19m, St.dev.: 0.21
2) Shallow wells		
Factors	Graphic features	Statistical features
PC1	<ul style="list-style-type: none"> • Sharp peak shapes • Downward trend along the top-lines during rainy seasons • No trend along the baselines during drought seasons • Similar patterns to F1 of deeps wells • Wide range of water level fluctuation 	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA(1,0,0) model • Periodicity : 52 week • Daily difference of water levels : Average: 0.28m, St.dev.: 0.32
PC2	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate peak shapes • Weak downward trend during whole seasons • No trend along the top-lines during rainy seasons 	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA(1,1,0) model • Periodicity : 52 week • Daily difference of water levels : Average: 0.21m, St.dev.: 0.19
PC3	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate peak shapes • Weak seasonal variation • Upward trend during whole seasons 	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA(1,1,0) model • Periodicity : 52 week • Daily difference of water levels : Average: 0.14m, St.dev.: 0.11
PC4, (PC5,C6, PC7,PC8)	<ul style="list-style-type: none"> • Sharp peak shapes • Weak seasonal variation and irregular patterns 	<ul style="list-style-type: none"> • Periodicity(F4) : 18, 25 and 52 weeks • Daily difference of water levels(F4) : Average: 0.43m, St.dev.: 0.55

52주의 주기성이 미약하게 보이나 뚜렷하지 않아 불규칙한 특성을 보인다(Fig. 3).

이상 암반관측정과 총적관측정의 대표적인 3개의 주성분은 상호 유사한 그래픽 특성을 보이는데(주성분 1과 1, 주성분 2와 3, 주성분 3과 2), 이는 암반관측정의 설치 심도가 약 70 m로 비교적 얕아 상부 총적층 지하수와 풍화대 및 단열을 통하여 연결되어 있음을 의미하거나 일부 암반관측정의 시공시 상부 총적층의 차단이 완벽하지 않음에 기인할 수 있다. 따라서, 암반관측정과 총적관측정의 지하수위 변동간의 관계 규명 및 암반관측정 수위 변동에 대한 군집 분류는 현장에서의 수리 시험, 검층 등 정밀조사가 필요한 관계로 본 연구에서는 다루지 않았으며, 일반적으로 자유면 대수층의 특성을 갖는 총적관측정을 대상으로 주성분을 활용한 군집 분류를 실시하고 특성을 파악하였다.

을 파악하였다.

4. 군집 분석

총적 관측정에 대한 각 8개 주성분 중에서 계절 변동, Peak 특성, 수위변동 폭 및 추세성 등에 의하여 특성화 되어 있는 3개의 주성분(1, 2 및 3)의 인자 적재값을 이용하여 군집 분석을 실시하였다. 9개 관측정(강진칠량, 경주천북, 괴산중평, 속초노학, 양양손양, 영동양강, 창녕성산, 화천상서 및 안동길안)은 불규칙한 변동 특성을 보이는 주성분들에 의하여 대표되는 경우로서 주변의 인위적인 양수, 굴착, 지형변화, 저수지 수위에 의한 영향 등이 예상되는 곳이며, 이들 관측정을 군집 분류 대상에서 제외함으로써 군집의 특성도를 증가 시켰다.

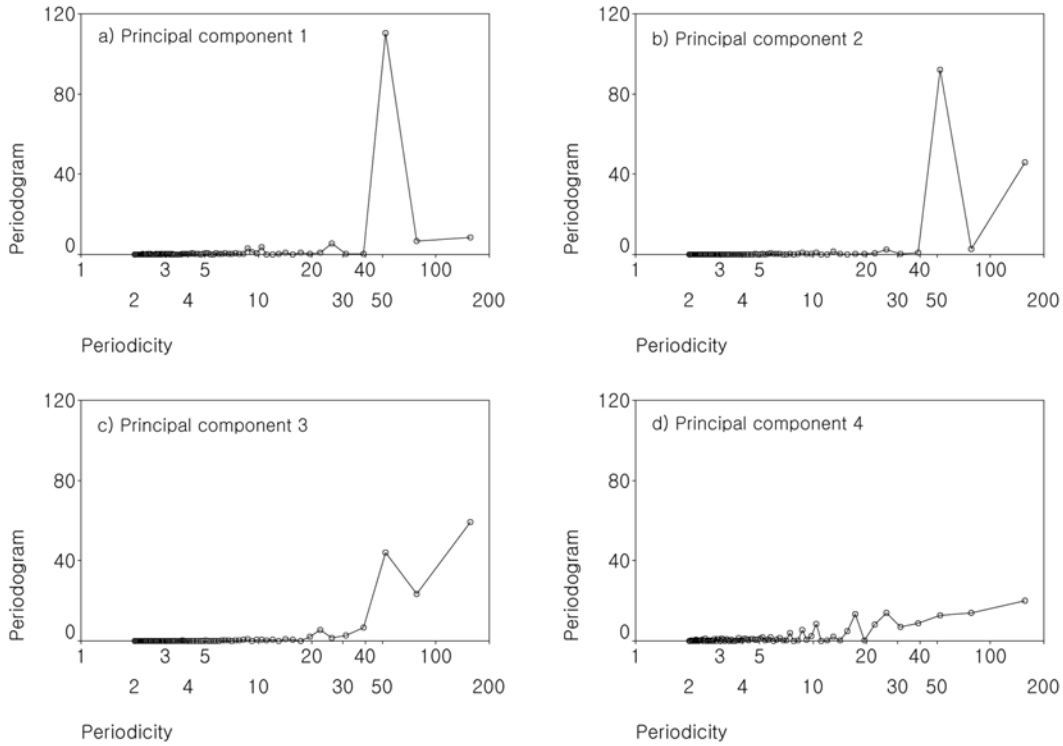


Fig. 3. Periodogram for water level time series of shallow monitoring well.

군집분석(Cluster analysis)은 N 개의 개체를 대상으로 p 개의 변수를 측정하였을 때 관측한 p 개의 변수들을 이용하여 N 개 개체들 사이의 유사성과 비유사성의 정도를 측정하여 개체들을 가까운 순서대로 군집화하는 통계적 방법이다. 본 연구에서는 군집간에 관측지점 특성의 상호 비교를 위하여 개체가 각각 타군집에 속하도록 하는 K-평균 군집방법(K-means cluster analysis)을 적용하였으며, 주성분분석의 각 인자적재값을 K-평균 군집방법을 위한 표준화 변수로 변경하여 사용하였다. K-평균 군집방법은 개체를 대상으로 K개의 군집으로 구분한 후 각 변수의 중심점을 계산하고 이 중심점과 개체간의 거리를 반복적으로 계산하여 최단거리를 찾아내는 방법으로서, K-평균 군집방법에서 사용되는 두 벡터간의 거리 측정은 다음 식의 유클리드 거리(Euclid distance)를 사용하였다.

$$ED = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_{i1} - x_{i2})^2}$$

군집의 갯수에 대한 결정은 관측지점간의 상호 비교 분석을 위하여 각 군집의 평균이 동일하다는 가정을 검정하는 F-검정법을 이용하였으며, 0.05 유의수준을 만족시키는 최소 군집의 갯수를 선택한 결과, Table 3에서 보는 바와 같이 103개 측정관측점에 대하여 3개의 군집으로 분류 가

Table 3. Results of K-means cluster analysis for water levels of shallow monitoring wells

1) Centers of each cluster

Factors	Cluster		
	1	2	3
St. factor 1	-1.70989	-0.96270	0.42360
St. factor 2	1.05276	0.46818	-0.23401
St. factor 3	1.54078	-1.27139	0.07855

2) ANOVA for the homogeneity within clusters

Factors	Cluster		Error		F	sig.
	Mean square	df	Mean square	df		
St. factor 1	29.584	2	0.445	103	66.486	0.000
St. factor 2	9.568	2	0.834	103	11.477	0.000
St. factor 3	25.853	2	0.517	103	49.967	0.000

능 하였으며 분류된 관측점 현황은 Table 4와 같다.

Fig. 4는 각 군집을 3개의 주성분을 축으로 하여 산점도로 표현한 것으로서 3개의 그룹으로 분류되며, 군집 1의 경우에는 주성분 3(인자적재값 평균 0.682)에 의하여 설명되나 강한 편은 아니며, 군집 2는 주성분 2(0.687)에

Table 4. Classification of the groups for shallow groundwater monitoring wells

Group	Group 1	Group 2	Group 3
No. of wells	9	10	84
Monitoring wells	KJM-5133-0943-20002 DGM-3235-5302-20001 SHM-4710-2112-20062 ASM-2240-0428-20103 USM-2909-5814-20024 JSM-4008-2325-20191 CWM-3036-3142-20006 CWM-2158-3612-20143 CJM-5120-0427-20007	GRM-5311-4441-20065 NJM-4720-5742-20148 DHM-0545-2839-20020 MYM-4558-2839-20049 BCM-5006-2750-20135 SCM-2544-0554-20151 YCM-2530-3813-20012 USM-0433-3648-20057 JJM-0436-4940-20034 PTM-0514-5946-20019	GPM-3050-4952-20003, GJM-4229-4121-20121 GJM-3853-4557-20047, GCM-5534-4313-20095 KSM-5021-4727-20040, KJM-0639-4926-20171 KJM-0257-4506-20041, GRM-1702-4325-20088 GCM-4103-2329-20032, GSM-1958-1621-20173 GSM-1219-1738-20036, KMM-5205-2918-20101 GMM-2023-0752-20043, GWM-4307-1006-20089 GSM-3051-0549-20174, GSM-2403-0939-20072 KPM-4240-3753-20016, NJM-4402-0206-20037 NWM-2413-2459-20009, DJM-2423-2655-20055 MKM-0024-3529-20090, MKM-0840-4429-20126 BEM-4814-2352-20158, BEM-4346-2849-20022 BHM-5413-5115-20044, BYM-5508-1718-20008 SJM-0537-1722-20045, SJM-1416-5608-20091 SCM-0900-2153-20145, SCM-1644-5439-20084 SCM-3039-5603-20011, ASM-5401-4508-20076 ASM-5755-4657-20144, ADM-4251-3319-20092 YPM-3101-2709-20136, YPM-4520-2412-20137 YKM-1808-3613-20160, YJM-3709-4743-20154 YSM-3956-4210-20077, YSM-4942-4022-20030 YSM-4831-4052-20184, OCM-4405-1625-20023 WJM-0927-5218-20119, YIM-1256-1407-20017 USM-1226-3425-20056, USM-1738-2724-20058 WJM-4901-1809-20021, USM-3601-0227-20112 URM-1609-2808-20096, URM-1810-1858-20187 UJM-0324-4355-20004, ICM-2728-1539-20018 ISM-0858-2745-20188, JSM-4854-1439-20189 JSM-4543-1633-20039, JSM-2338-3449-20082 JSM-3057-3819-20146, JHM-5324-4108-20125 JEM-5337-4035-20147, JEM-5825-3657-20035 JCM-1459-1007-20025, JJM-0738-1238-20015 JHM-4225-0836-20050, CAM-1209-5229-20031 CAM-1755-4340-20193, CDM-4510-3800-20167 CSM-0215-2737-20046, CJM-2832-3923-20070 CCM-4430-5407-20005, CJM-5754-0123-20071 CGM-3228-0459-20194, PHM-3435-0136-20195 PHM-1857-5957-20013, HDM-4436-0406-20051 HDM-4047-0823-20197, HAM-3141-1601-20168 HYM-3954-2336-20169, HPM-2954-0835-20085 HCM-1704-3300-20134, HCM-0859-3527-20052 HCM-5232-4110-20157, HSM-5716-0054-20087 HSM-0157-5140-20198, HCM-4742-0304-20199

Remark) See the monitoring well names at the web site (<http://www.gims.go.kr/monitor>)

의하여 설명 가능하고, 군집 3은 주성분 1(0.725)에 의한 설명력이 큼을 알 수 있다. 인자적재값에서 보듯이 군집 3이 군집특성을 가장 잘 보이며, 전체 관측정의 82%가 해당되어 국내 총적층 지하수위 변동의 가장 일반적인 형태라 할 수 있겠다.

각 군집의 경계에 접치는 일부 관측정의 특성을 살펴보면, 주성분 1과 2의 그림에서 군집 2에 속하는 순천황전

(SCM-2544-0554-20151) 및 울산상북(USM-0433-3648-20057)은 군집 3과 겹쳐 있는데 이는 수위 변동이 주성분 1에 의하여 우세하게 지배를 받으나 아울러 불규칙 변동성인 주성분 5(순천황전: 인자적재값 0.354) 및 주성분 8(울산상북: 0.249)의 영향을 부분적으로 받음을 보여준다 (여기에서 관측정 코드명은 지명 영문 약자와 좌표 및 일련번호로 되어 있으며 이하 지명 영문약자와 일련번호로

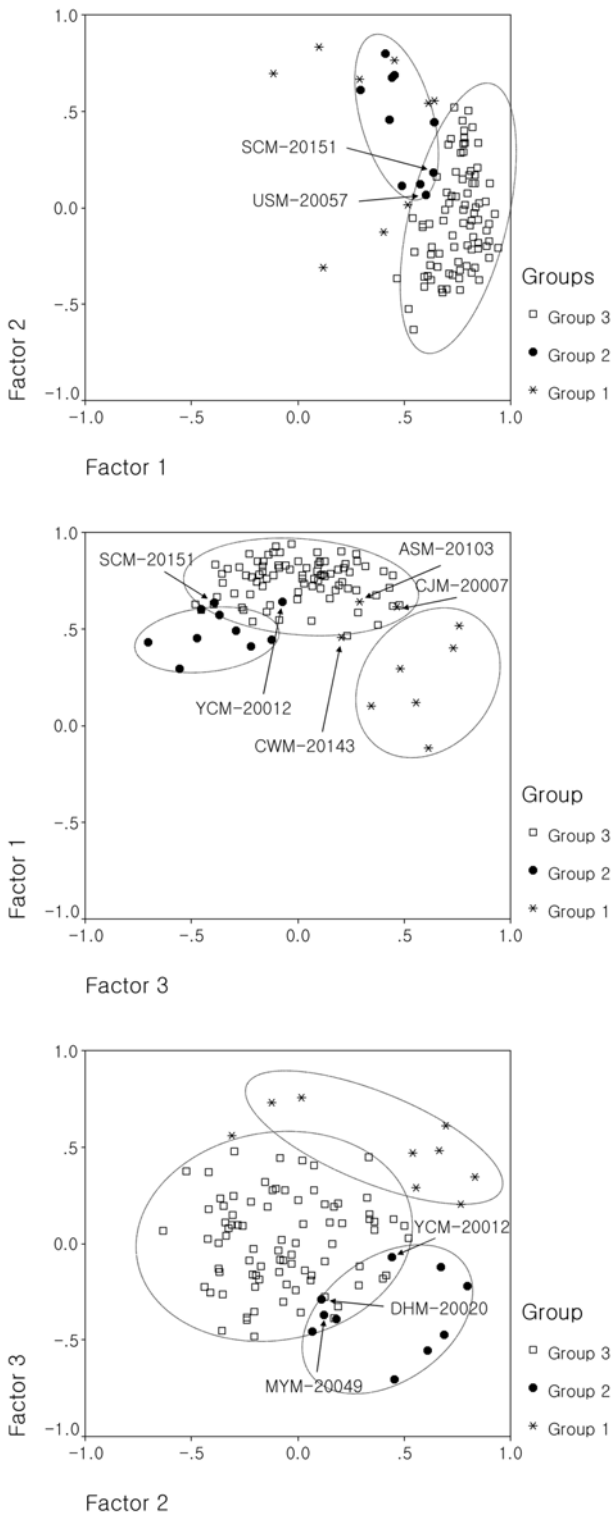


Fig. 4. Scatter plots for the clusters using three principal components.

약술함). 주성분 1과 3의 그림에서도 유사한 현상이 나타나는데, 군집 2의 관측정 예천예천(YCM-20012)은 군집

3과 겹쳐 있으며 이는 주성분 2(0.442)에 의해서 설명이 되나 주성분 1의 성격도 갖고 있는 경우이다. 또한, 군집 1의 관측정 안성삼죽(ASM-20103), 충주가금(CJM-20007) 및 청원강내(CWM-20143)의 경우에도 주성분 3(안성삼죽: 0.290, 충주가금: 0.467, 청원강내: 0.204)의 영향을 받고 있으나 주성분 1과 2에 의해서도 영향을 받는 경우에 해당된다. 주성분 2와 3의 그림에서도 군집 2의 동해귀운(DHM-20020) 및 밀양가곡(MYM-20049)은 군집 3과 겹쳐 있는데 동해귀운 관측정의 경우에는 불규칙 특성인 주성분 6(0.318) 및 8(0.399)에 의하여, 밀양가곡 관측정의 경우에는 주성분 7(0.243)에 의하여 추가적인 영향을 받기 때문으로 보인다.

이상에서 보듯이 현재 운영중인 국내 총적층 지하수 관측정은 주성분 1, 2 및 3에 의하여 지하수위 변동 패턴이 군집화될 수 있으며, 경계 부분에 위치한 일부 관측정의 경우는 보다 유의하여 해석할 필요성이 있다.

Fig. 5는 각 군집의 중심에 가까운 3개의 대표 관측정에 대한 시계열도를 나타낸 것으로서, 군집 1은 시흥군자(SHM-20062, 중심까지 거리:1.004), 충주가금(CJM-20007, 1.445), 청원강내(CWM-20143, 1.510), 군집 2는 동해귀운(DHM-20020, 0.814), 밀양가곡(MYM-20049, 1.080), 니주봉황(NJM-20148, 1.240), 군집 3은 하동하동(HDM-20051, 0.125), 금산복수(GSM-20072, 0.299), 함천함천(HCM-20052, 0.309)를 수록한 것이다. 그림에서 보듯이, 각 군집간에는 추세특성, Peak 특성, 계절 변동성 및 수위변동폭 등에 의하여 차이가 있음을 도식적으로 알 수 있다.

5. 군집 특성 분석

5.1. 강우에 대한 지하수 반응

군집 3의 경우 교차상관분석을 이용하여 강우(기상청 및 건설교통부 우량관측소 자료 활용)에 대한 지하수위 Peak 반응 시간을 분석한 결과, 평균 1.4일(평균 교차상관 계수 0.393)로서 군집 1(4.6일, 0.266) 및 군집 2(24.1일, 0.249)에 비하여 빠른 것으로 나타났으며 이는 강우에 대한 Peak 반응이 군집 분류에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 한편, 이와 같은 결과는 강우에 대한 지하수위 반응이 신속히 나타나는 군집 3이 타 군집에 대하여 지하수위 변동법(Water table fluctuation method)을 활용한 지하수 함양량 산정이 가능함을 의미한다 (Healy and Cook, 2002). 즉, 지하수위 변동법은 자유면 대수층에서 강우가 즉각적으로 지하수위에 도달하여 지하수위에 반영되는 것

을 전제로 하고 있어 군집 3의 경우에 제한적으로 사용될 필요가 있다. 마찬가지로, 강우에 대한 지하수 상승량

($S_y = \frac{P}{W_r}$)을 활용하는 비산출을 산정방법의 적용 시에도

강우의 지하수 반응 Peak가 신속히 잘 나타나는 군집 3

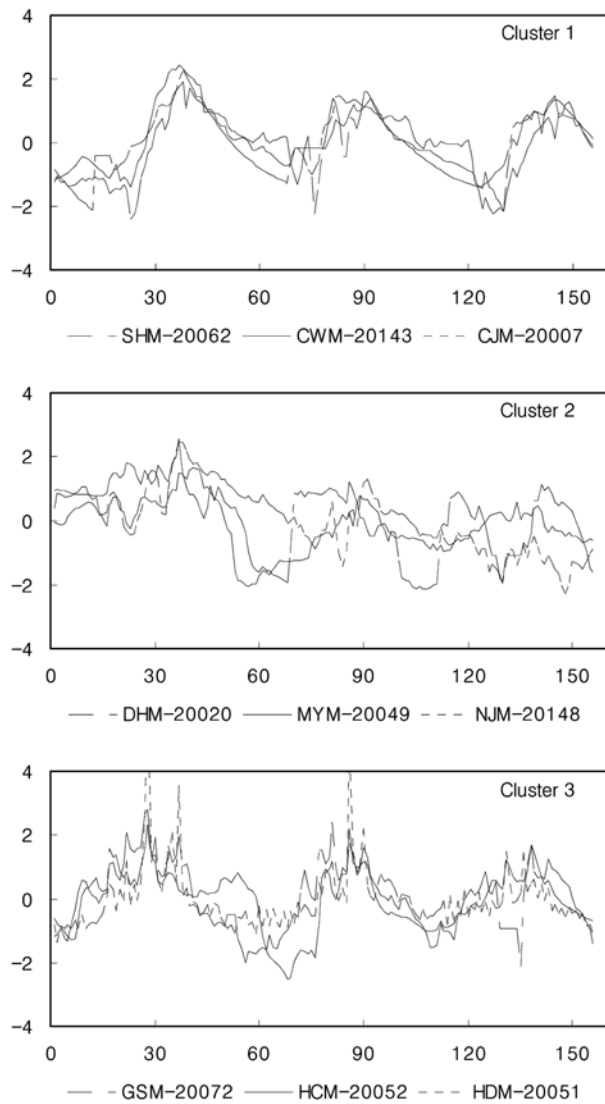


Fig. 5. Hydrograph of three representative wells for each cluster of shallow wells.

에 대하여 제한적으로 사용 가능할 것이다 (Rossenberry and Winter, 1997; Armstrong and Narayan, 1998).

5.2. 지형 특성 비교

자유면 대수층의 지하수 유동이 지형 요인에 의하여 지배를 받는 점을 고려하여 관측지점의 지형 특성과 군집의 관계를 비교해 보았다. 현장 특성 자료는 관측망의 점검 정비 업무 과정에서 수집된 경사특성, 주변하천특성 및 지표피복 등으로서 그룹화 하여 사용하였으며(Table 5), 비모수적 검정 방법인 Kruskal-Wallis 검정법을 적용하였다.

Table 6에서 보는 바와 같이, 총적관측정의 각 군집은 인근하천까지의 거리(0.05 유의수준) 및 지형 경사(0.05 유의수준)에 따라 차이가 있는 것으로 분석되어 이들 지형 인자가 군집 분류에 기여하였음을 알 수 있다. 인근하천까지의 거리를 보면 군집 1은 하천에서 멀리 떨어져 있고 군집 3이 가까운 곳에 주로 분포함을 알 수 있으며, 지형 경사는 군집 1이 경사 지역에 군집 3이 평야지대에 주로 분포함을 알 수 있다. 특히, 군집 3을 주로 설명하는 주성분 1이 타 주성분과 달리 갈수기의 최저 지하수위가 연도에 따라 거의 변화가 없는 것은 하천이 인접하여 있고 갈수기 하천 수위의 무변동 및 평야 지대의 지형적 특성에 기인한 것으로 추정되며, 군집 1과 2는 군집 3에 비하여 수위의 상하 변동폭이 적은 데 이는 경사를 통한 배출이 영향을 미치는 것으로 추정된다.

5.3. 지하수 함양율과 군집

본 연구를 통하여 수행된 군집에 대한 의미로서 군집별 지하수 함양율의 차이를 검토해 보았다. 본 연구에서 사용된 지하수 함양율은 2003년 국가지하수관측소의 갈수기 지하수위 강하 곡선 자료로부터 지하수위 강하 대표곡선을 작도하여 산정한 관측 지점의 점 함양율 자료로서, 한국수자원공사에서 개발 운영중인 “국가지하수관측망관리 시스템”의 자료 분석 모듈인 proMOD 프로그램을 사용하여 자동 산정하였으며, (김규범 외, 2004; 건설교통부·한국수자원공사, 2004b) 평균 약 13.6%, 표준편차 4.5의 지하수 함양율 분포를 갖는다.

Table 5. Classification of the geology and topography at groundwater monitoring sites

Classification	1	2	3	4	5
Topographic slope	Mountainous/Steep	Hillside	Low slope	Plain	-
Land use	Rural area	Urban area	-	-	-
Width of stream	> 50 m	10~ 50 m	5~ 10 m	< 5 m	-
Distance to stream	< 50 m	50~ 100 m	100~ 500 m	500 m~ 1 km	> 1 km

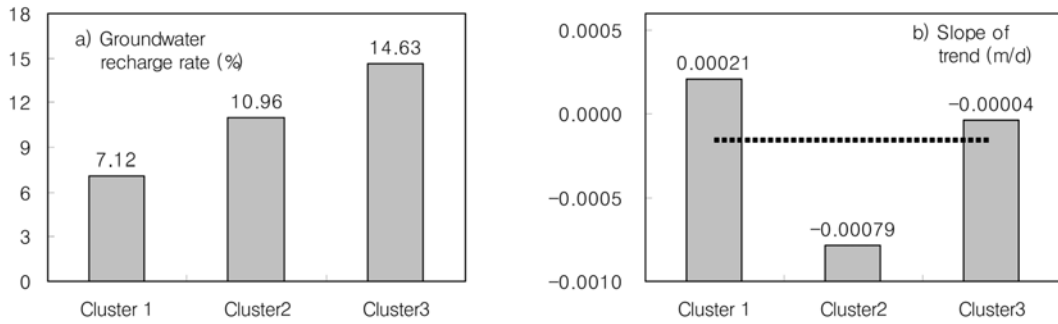


Fig. 6. Comparison of each cluster according to groundwater recharge rate and long-term trend.

Table 6. Result of Kruskal-Wallis test for water levels of shallow groundwater monitoring wells

1) Test statistics				
Contents	Topographic slope	Land use	Stream width	Distance to stream
Chi-square	6.384	2.275	1.850	6.493
df	2	2	2	2
Sig.	0.041*	0.321	0.397	0.039*

2) Average ranks			
Factors	Cluster	No. of wells	Mean ranks
Slope	1	9	34.94
	2	10	42.00
	3	84	55.02
	Total	103	
Land use	1	8	40.69
	2	10	35.50
	3	65	43.16
	Total	83	
Stream width	1	7	55.00
	2	9	57.83
	3	80	46.88
	Total	96	
Stream distance	1	9	73.06
	2	10	59.20
	3	84	48.89
	Total	103	

각 군집간 지하수 함양율의 차이를 검토하기 위하여 분산분석을 실시한 결과, 각 군집별 분산이 동일하며 0.05 유의수준하에서 지하수 함양율에 차이가 있는 것으로 나타났다. 군집 1은 평균 7.1%, 군집 2는 11.0% 및 군집 3은 14.6%를 나타내었다(Fig. 6a). 이는 지하수위 강하곡 선법에서 지하수위 변동 폭(최대 수위와 최소 수위의 차이)과 대표 수위강하 직선의 기울기가 함양율 산정 인자

로 작용하기 때문으로서 군집 3의 경우 Fig. 2의 주성분 1 시계열도에서 보듯이 변동 폭이 가장 크고 기울기가 크므로 함양율이 높게 산정되며 다음으로 군집 2 및 군집 1의 순서로 작아진다.

5.4. 추세 특성과 군집

각 관측정의 관측시점부터 2005년까지의 수위 추세 선형방정식의 기울기를 대상으로 군집별 분산분석을 실시한 결과, 각 군집별 분산은 일정하지 않은 것으로 나타나 다중비교를 실시하였으며 그 결과 군집 1과 3은 뚜렷한 차이를 보이지 않으나, 군집 1과 2, 군집 2와 3 및 군집 2와 3 사이에는 유의수준 0.05하에서 차이가 있는 것으로 나타났다(Fig. 6b). 군집 1은 평균 2.05×10^{-4} m/day, 군집 2는 -7.85×10^{-4} m/day 및 군집 3은 -3.51×10^{-5} m/day의 기울기를 보이며 지하수위의 추세 특성이 군집 분류에 영향을 미친 것으로 분석된다. 또한, 이와 같은 결과는 군집 1은 주성분 3(증가 추세), 군집 2와 3은 주성분 2와 1(거의 무변동 또는 약한 감소 추세)에 의하여 대표되는 군집임을 설명해 준다(Fig. 2 참조).

5.5. 기타 인자 비교

상기 인자 외에 수리적 특성(수리전도도, 투수량계수), 지형(표고), 시설 제원(심도), 지하수위 깊이 및 해당 유역 등을 대상으로 군집별 차이 분석을 실시하였으나 뚜렷한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

6. 결론 및 건의

국가지하수관측망의 지하수 수위 시계열 자료를 활용하여 시계열 변동 특성을 평가한 결과, 호우기와 갈수기의 영향으로 계절변동을 잘 보이며 강우 후 급격한 지하수위 상승과 하강이 일반적으로 나타나고 있다. 암반관측정과 충적관측정 공히, 전체의 약 80% 관측정이 3개의 규칙적

인 시계열 변동 특성을 보이는 주성분과 5개의 불규칙적 변동을 보이는 주성분으로 설명이 가능하며, 규칙적 변동 주성분은 계절 변동성, 지하수위의 Peak 형태, 지하수위의 추세 특성, 수위변동 폭 등에 의하여 설명된다. 특히 총적관측정을 대상으로 3개의 규칙적 변동 주성분의 인자 적재값을 이용하여 군집분석을 실시한 결과 3개의 군집으로 분류 가능하였으며 각 군집간에는 강우와 지하수위 반응의 교차상관관계, 지형 특성, 지하수위 추세 특성, 지하수 점 함양률 등에 차이를 보이는 것으로 나타났다.

그러나, 본 연구에서는 각 관측정별 시계열 변동 원인 규명에 대한 현장 정밀 조사(주변 양수, 저수지 수위 변동, 인위적 굴착 등)가 미흡한 관계로 개별 관측정의 특성은 정리되지 못하였으므로 향후 각 관측정에 대한 정밀 조사를 실시하여 각 관측정에 대한 수리적, 지형적, 지질적 대표성 등이 부여되길 바라며 그 결과를 이용한다면 본 분류 특성이 보다 구체화되고 실용적이 될 것으로 본다.

본 연구에서 도출된 국내 총적층 지하수 수위 시계열 자료의 분류 결과는, 지하수 함양률 및 비산출율 산정시 분석 대상 관측정 선정에 활용되거나 지하수위 지속 강하 지역에 대한 추가 조사 및 원인 규명, 낮은 지하수 함양율을 보이는 지역에 대한 지하수 개발 관리 대책 수립 등 추가 조사, 연구 및 정책 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문이 보다 개선될 수 있도록 좋은 의견을 주신 심사위원님들께 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부·한국수자원공사, 2004a, 지하수 관측연보 2004, 한국수자원공사, 대전, p. 869.
 건설교통부·한국수자원공사, 2004b, 국가지하수관측망 관리시스템 보고서, 한국수자원공사, 대전, p. 411.
 건설교통부·한국수자원공사, 2005, 지하수 관측연보 2005, 한국수자원공사, 대전, p. 955.

건설교통부·한국수자원공사, 2006, 지하수 관측연보 2006, 한국수자원공사, 대전, p. 1024.

김규범, 이명재, 김정우, 이진용, 이강근, 2004, 수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가, 지질공학, **14**(3), 313-323.

박성현, 조신섭, 김성수, 1999, 통계자료분석을 위한 한글 SPSS, SPSS 아카데미, 서울, p. 471.

이명재, 김규범, 손영철, 이진용, 이강근, 2004, 국가 지하수관측소 수위자료에 대한 시계열 분석 연구, 지질학회지, **40**(3), 305-329.

Armstrong, D. and Narayan, K., 1998, Using groundwater responses to infer recharge, CSIRO Publ., Collingwood, Australia, p. 20.

Evans, C.D., Davies, T.D., Wigington Jr. P.J., Tranter, M., and Kretser, W.A., 1996, Use of factor analysis to investigate processes controlling the chemical composition of four streams in the Adirondack Mountains, New York, *J. Hydrology*, **185**, 297-316.

Healy, R.W. and Cook, P.G., 2002, Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeology J.*, **10**, 91-109.

Moon, S.K., Woo, N.C. and Lee, K.S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge, *J. Hydrology*, **292**, 198-209.

Ravichandran, S., Ramanibai, R., and Pundarikanthan, N.V., 1996, Ecoregions for describing water quality patterns in Tamiraparani basin, South India, *J. Hydrology*, **178**, 257-276.

Risser, D.W., Gburek, W.J. and Folmer, G.J., 2005, Comparison of methods for estimating ground water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5038, p. 37.

Rosenberry, D.O. and Winter, T.C., 1997, Dynamics of water table fluctuations in an upland between two prairie-pothole wetlands in north Dakota, *J. Hydrology*, **191**, 266-289.

Suk, H. and Lee, K.K., 1999, Characteristics of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: Clustering into ground water zones, *Ground Water*, **37**, 358-366.

Winter, T.C., Mallory, S.E., Allen, T.R., and Rosenberry, D.O., 2000, The use of principal component analysis for interpreting ground-water hydrographs, *Ground Water*, **38**, 234-246.