

## 용천수 유출량 클러스터링 해석을 이용한 제주도 지하수 순환 해석

### Clustering Analysis with Spring Discharge Data and Evaluation of Groundwater System in Jeju Island

김태희<sup>1</sup>, 문덕철<sup>3</sup>, 박원배<sup>2</sup>, 박기화<sup>1</sup>, 고기원<sup>3</sup>

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

2. 제주발전연구원

3. 제주광역수자원본부

e-mail : katzura@kigam.re.kr

#### 요 약 문

Time series of spring discharge data in Jeju island can provide abundant information on the spatial groundwater system. In this study, the classification based on time series of spring discharge was performed with clustering analysis: discharge rate and EC. Peak discharges are mainly observed in august or september. However, double peaks and late peaks of discharge are also observed at a plenty of springs. Based on results of clustering analysis, it can be deduced that GH model is not appropriate for the conceptual model of Groundwater system in Jeju island. EC distributions in dry season are also support the conclusion.

**key word** : spring, time series, clustering analysis, discharge rate, EC

#### 1. 개요

지금까지 제주도 지역에서의 용천수 조사는 전반적인 지하수의 순환에 대한 검토를 목적으로 한다기 보다 “용천수” 분포 현황 파악에 목적을 두는 경향이 강하다. 이는 제주도 내 분포하는 용천수에 대한 전반적인 현황 파악이 비교적 근래(제주도, 1999년)에서야 이루어진 현실과 밀접히 관련이 된다. 현재까지의 용천수에 대한 조사는 대부분 용천수의 분포 현황 파악이라는 측면이 강하다 (제주도, 1999; 제주도, 2002; 제주도와 한국수자원공사, 2003). 물론 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 용천수의 분포 현황이 비교적 최근에 들어서야 이루어졌다는 사실과 밀접히 관련이 있지만, 이에 대한 체계적인 접근 방법이 부재하다는 사실과도 관련된다. 본 연구의 주요 목적은 지금까지 조사된 용천수를 중심으로 주변지역의 지하수 분포 특성을 합리적으로 분류할 수 있는 방안을 제시하고, 이를 통해 제주도 지하수 유동의 광역적 특성을 검토하는 데 있다.

#### 2. 조사 대상 및 방법

광역적 시스템에 대한 정보를 유추하기 위해서는 시간적 변화 패턴에 대한 상관성을 중심으로 검토

하는 것이 보다 의미있는 결과를 제시할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 2003년 제주도와 한국수자원공사에 의해 수행된 용천수 122개소에 대한 조사 자료(2002년 7월 ~ 2003년 6월, 월 1회)와 금번 연구를 통해 조사된 자료(기존 122개소-신규48개소 등 총 170개소, 2004년 3월 및 6월, 9월 및 12월 조사자료는 추후 포함할 예정임)에 대해 용천수의 유출량, 온도, 전기전도도(EC) 각각의 시계열 자료를 이용하여 clustering을 통한 분류를 시도하였다. 다만, 이번 연구를 위해 추가된 48개의 용천수는 clustering 해석을 수행하기에는 그 자료의 양이 부족하여 금번 해석에서는 제외하였다. 또, pH의 경우 주목할 만한 특성을 보여주지 않아 금번 해석에서는 제외하였다. clustering(hierarchical)을 통한 1차 분류 결과, 용천수의 온도와 유출량은 비슷한 분류 패턴을 보여, 최종적으로는 유출량과 온도 자료를 함께 고려하여 clustering을 수행하였다. 이는 함양지(중산간 혹은 고산지대) 해안에 이르기까지의 광역적 지하수 유동 시스템과 직접 관련이 있는 것으로 보인다. 하지만, 전기전도도의 경우는 다른 형태로 분류되어 이는 별도로 해석하고자 하였다.

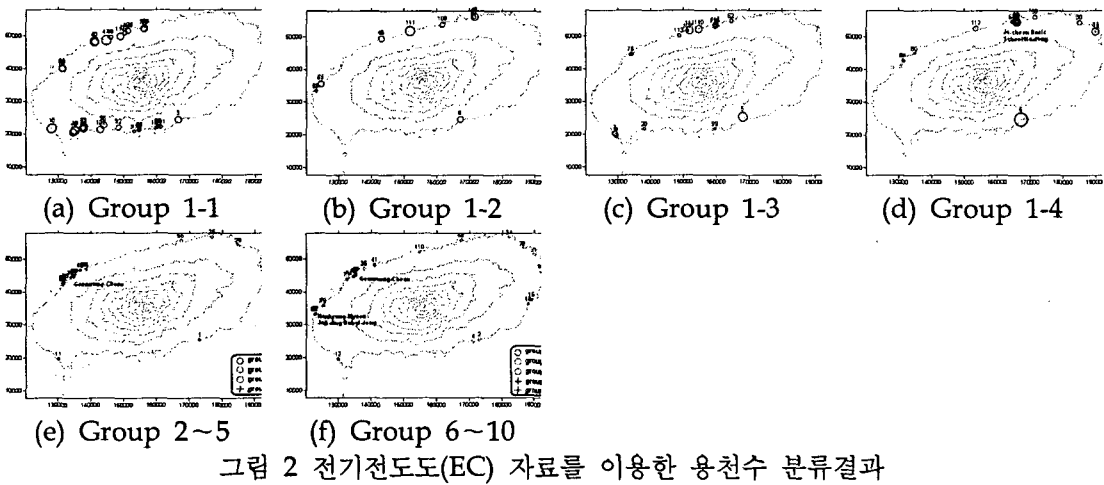
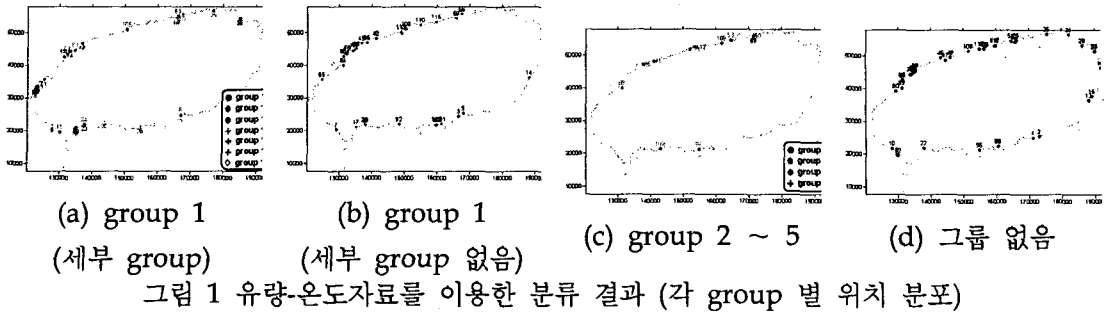
### 3. 용천수의 분류 (Clustering Analysis)

#### ① 유량 변화에 따른 분류

우선 group 1의 가장 큰 특징은 한번의 최대값을 기록한 이후 경향적으로 유출량이 감소하는 경향을 보인다는 점이다. 하지만, 1번 group은 최대 유출량이 기록된 시기와 이후 유출량의 감소 패턴에 따라 다시 7개의 세부 group으로 분류하였다. 각 세부 그룹의 특성을 살펴보면, 1-1과 1-2그룹은 최대 강수가 기록된 7월 직후에 유출량을 측정된 2002년 8월초에 최대 유출량을 보인 후 2003년 4월까지 지속적으로 유출량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 다만, group 1-2의 경우 2003년 3월초 측정된 유출량이 일시 증가하는 경향을 보이거나, 2003년 3월 1일, 2일, 3일 제주도 내 기상관측소(제주, 서귀포, 고산 관측소)에서 각각 13~26, 1~3.5, 7~27.5 mm/day 강우량이 관측되었고, group 1-2에 속하는 용천수의 경우 3월 1~3일에 측정되었다는 점을 고려한다면, 두 그룹의 세부 분류는 큰 의미는 없다. 하지만, group 1-3과 1-5는 최대 유출량이 10월과 11월에 각각 관측되고 이 후 점진적으로 감소한다는 면에서 앞서 2개의 세부 그룹과는 분명한 차별성을 보인다. 조사가 이루어진 2002년 10월 초와 11월 초에는 제주도내 3개 기상관측소에서 주목할 만한 강수가 기록되지 않았다. 그럼에도 불구하고, 용천수의 최대 유출량이 각각 10월과 11월에 기록되었다는 것은 해당 용천수의 유출량은 강수에 대해 비교적 긴 반응 시간을 가지고 있음을 의미한다. 즉, 이러한 용천수를 통해 유출되는 지하수는 비교적 높은 연령을 가지고 있을 개연성이 존재한다. 그 외 group 1-4, 1-6, 1-7은 최소 2회 이상의 유출량 peak를 가지고 있다. 특히 1-6은 9월과 1월 2차례, 1-7은 8월과 12월 2차례에 걸쳐 유출량 peak를 보여 주어 해당 용천수는 최소한 2개 이상의 서로 다른 지하수 유동 경로에 의해 영향을 받고 있음을 시사한다. (1-6과 1-7에 해당하는 용천수의 유출량이 측정 당시 강수의 영향을 받았을 가능성은 배제한다. 왜냐하면, 12월에 peak를 보여주는 1-7의 경우 12월 3일 13~15 mm의 강우가 기록되기는 하였으나, 강수와 관련이 없는 11월 유량에서도 증가 경향을 보여 주고 있어 이를 일정한 경향성으로 해석하였다. 또 2003년 1월의 경우 1월 3 ~ 5일에 걸쳐 약간의 강수가 기록되고 있으나, 유출량 관측일은 이전인 1월 2일로 이와는 관련이 없다.)

하지만, group 2, 4, 5의 경우는 뚜렷한 2중 peak의 경향을 보여준다. group 1의 경우와 명확히 다른 점은 이 그룹에 해당하는 용천수의 경우 여름 혹은 9월 초의 유출량과 비교할 때 겨울철(12월 혹은 1월)의 유출량이 거의 비슷하거나 혹은 더욱 많다는 차이점을 보인다(group 2와 4는 9월과 1월, group 5는 9월과 2월에 최대 유출량을 보인다.). 이러한 경향은 group 1-6의 경우와 같이 해당 용천수는 최소한 서로 다른 2개의 지하수 유동 경로에 영향을 받고 있음을 의미한다. 하지만, 1-6 group의

경우와 다른 점은 travel time이 긴 유동 경로의 영향이 오히려 우세할 수 있다는 사실이다.



## ② 전기전도도에 따른 분류

전기전도도(EC)의 시계열 자료를 이용한 용천수의 분류는 그 상관성의 상대적 거리에 따라 크게 10개의 group으로 구분하였으며, 가장 많은 용천수가 포함된 1 group의 경우 전기전도도의 최대값에 따라 다시 네 개의 세부 group으로 구분하였다. 통상적으로 제주도 내 분포하는 담지하수의 전기전도도가 100mS/cm 내외의 값을 보여준다는 점을 감안하면, 실제 500mS/cm 이상의 전기전도도 값을 보여주는 것은 해수의 영향을 받고 있다고 보는 것이 타당할 것이다.(심각한 오염 현상이 없다는 전제를 가질 경우) 하지만, 지하수의 담염수 경계부에서는 확산(diffusion)에 의한 영향에 의해 전기전도도가 높게 관측될 수 있다는 점을 감안하여, 1,000mS/cm 이상의 용천수가 해수의 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 간주하였으나, 이에 관한 직접적인 분류 근거는 존재하지 않는다. 다만, 제주도의 경우 해수 전기전도도의 3.5%인 1,750mS/cm ~ 17,500mS/cm(35%) 사이의 지하수를 저염 지하수로 분류하고, 17,500mS/cm 이상의 전기전도도를 보이는 경우 해수에 의한 직접적 영향으로 분류하고 있다 (제주도 2002). 물론 이의 분류에 관한 다양한 견해들이 존재하나 어느 의견이 보다 타당하다고 볼 것인지는 논의하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 clustering의 결과에 따른 상대 거리만을 이용하여 분류를 시도하였다(group 1 세부 분류시는 제외).

각 group 별 전기전도도 분포 특성을 살펴 보면, group 1에 해당하는 용천수는 해수에 의한 직접적인 영향은 거의 받지 않는 것으로 추정된다. 물론 group 1-3과 1-4에 해당하는 용천수의 최대 전기전도도는 1,000mS/cm, 최대 18,000mS/cm의 값을 보여주는 하나, 이는 일시적인 반응 양상이며, 대개의 경우 일반적인 전기전도도는 500mS/cm 이하의 값을 보여준다. group 1-3과 1-4에 해당하는 용천수의 최대 전기전도도 값이 기록된 시기는 2002년 12월, 2003년 1월, 2004년 3월 등으로 우기가 아

년 갈수기에 해당하는 시기이다. 이러한 반응 양상은 기존의 보고와 일치하는 경향을 보여준다고 할 수 있다(2002, 제주도; 2003 제주도와 한국수자원공사). 하지만 보다 세부적으로 살펴보면 갈수기의 높은 전기전도도는 경향적으로 그렇다는 것일 뿐이지, 실제 전기전도도의 분포는 매우 복잡한 양상을 보여 주고 있다. group 1과 비교할 때, 여타의 group에 해당하는 용천수는 전반적으로 높은 전기전도도(500mS/cm 이상)을 보여 주며, 그 최대값도 모든 경우에 1,300mS/cm 이상의 값을 보여 주고 있다. 최대 전기전도도 값은 group 2에서 group 10으로 갈수록 경향적으로 커지는 양상을 보여 주며, group 9와 group 10에서는 최대 30,000mS/cm 이상의 전기전도도를 보여 주기도 한다.

이렇게 놓고 본다면, group 1-3과 group 1-4에 속하는 용천수가 분포하는 지역은 일시적으로 해수의 영향에 받고 있으며, group 2 ~ 10에 속하는 용천수가 분포하는 지역은 상시적으로 해수의 영향을 받고 있는 것으로 보는 것이 타당할 것이다.

#### 4. 결론

앞서의 항에서 제주도 용천수 유출량 및 전기전도도 분포 패턴을 통해 기존의 제주도 지하수 관리 모델인 기저지하수-준기저지하수-상위지하수 분류 개념이 적용될 수 없는 경우에 대해 검토해 보았다. 이러한 현상들을 GH 모형으로 설명할 수 없는 가장 근본적인 원인은 본 모델에서는 해수의 내륙 침투 양상이 연속적 렌즈형 양상을 가진다는데 있다. GH 모형을 이용한 해안 주변 지하수의 담염수 순환 모형에서 두가지 한계를 살펴보면, ① 앞서 언급한 바와 같이 다공질 매질에서 적용되는 해수의 연속적 침투 모형이 가지는 한계이다. ② 해수의 영향권 내 부존하는 지하수 시스템에 대한 고려만으로는 역시 앞서 검토한 현상들을 설명할 수 없다.

이에 대한 대안으로 제시할 수 있는 것은 제주도 해안 지역에서의 해수침투 양상은 서로 다른 유동 경로를 갖는 해수의 유입은 불연속적으로 일어나야 한다는 것이다. 이와 관련된 조사 결과가 2002년 제주도에서 조사한 『제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(II)』에서도 이미 보고된 바 있다(제주도, 2002). 하지만, 당시 조사 결과에 대한 해석에서는 조천연구정(W-08), 태흥연구정(W-47), 수산2호공(W-33) 등에서 관측된 전기전도도의 수직적 분포 양상과 관련하여 하부의 전기전도도 감소 현상에 관해서는 간단히 서술만 할 뿐 특별한 해석을 하지 않고 있다. 이러한 경우 연속적인 GH 모델이 아니라, 지하수의 유동 경로가 다른 여러 층을 통해 불연속적으로 해수의 내륙 침투가 일어난다고 할 경우 설명이 가능해 진다(Bear et. al. 1999).

#### 5. 참고문헌

- 제주도, 제주의 물, 용천수, 1999
- 제주도, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(II), 2002
- 제주도와 한국수자원공사, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III), 2003
- Attila Kovács, Pierre Perrochet, László Király and Pierre-Yves Jeannin, A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis, 2004, Journal of Hydrology, In press
- Jacob Bear, Alexander H.-D. Cheng, Shaul Sorek, Driss Ouzar, and Ismael Herrera, Seawater Intrusion in Coastal Aquifer - Concepts, Method and Practices, 1999