

국가 지하수 관측망 자료를 이용한 충적층 지하수 함양률의 공간적 변동성 연구

문상기 · 우남칠 · 한원식
연세대 지구시스템과학과
e-mail : skmun@ysgeo.yonsei.ac.kr

요 약 문

This study is objected to assess the recharges of phreatic aquifers in the south Korea. The water level data of the national ground-water monitoring network were analysed by PCA(Principal Component Analysis), and classified to 8 types. The recharge were estimated by 'water-level change method' on basis of the classified types and compared with the previous methods(hydrograph separation methods) on basis of 4 river basins. The recharge were various type by type and site by site. But the recharge estimated by this study were consistent with that of the other studies.

1. 서 론

지하수관리의 효율화를 기하기 위해서는 우선적으로 지하수함양량을 정량화해야 한다. 지하수 함양률은 지질, 토양, 지형, 식생, 기후 등 수많은 수리지질학적 인자들에 의해서 결정된다. 그러므로 같은 충적층일지라도 여러 요인들에 의해서 다른 양상의 수위변동곡선이 만들어질 뿐만 아니라 그 함양률도 상당한 차이를 보이는 것이 일반적이다. 따라서 지질 매체의 비균질성과 이방성을 무시한 채 지하수 함양률을 일률적으로 제시하게 되면 곳에 따라 지하수의 적정 개발 가능량을 초과시키는 결과를 초래하여 수위감소 및 지하수 고갈 그리고 지반 침하 등의 각종 지하수 장애를 야기시키게 된다. 그러므로 지질매체의 비균질성과 이방성을 고려하여 지하수 함양률의 공간적인 변동성을 파악하는 것은 지하수 장애를 피하고 합리적인 지하수 개발 및 보전을 위한 필수적인 단계라고 할 수 있다. 국내 많은 연구자들은 연간 지하수 개발가능량 또는 지하수 함양량을 추정하기 위하여 주로, 물수지 방법, 기저유출분리 방법, 지하수위 감수 곡선법, 동위원소를 이용한 방법 등을 사용하였다. 본 연구에서는 국가 지하수 관측망 자료를 이용하여 지하수위 변화로부터 전국적인 지하수 함양률을 산정하고 기존의 기저유출분리 방법에 의한 유역별 지하수 함양률과 비교 검토하였다. 이 방법의 장점은 방법상의 단순함과 비포화대에서 물의 이동에 대한 정확한 관측자료가 없어도 함양률을 산정할 수 있다는 점이다.

2. 연구 방법 및 결과

(1) 지하수위 자료 분류

주성분 분석을 이용하여 전국 66개소의 충적층 관측정에서 측정한 지하수위 자료를 유사한 변동 유형별로 구분하였다. 사용된 자료는 1999년 1월1일부터 12월31일까지 측정한 지하수위 관측 자료이다. 주성분 분석을 통하여 유사한 수위변동특성을 보이는 지점들은 군집화되고, 그 특성별 수위변동곡선은 각각의 수위변동들을 대표하는 '유형(Component)'이 된다. 자세한 방법은 문상기와 우남칠(2001a)에 설명되어 있다. 이 방법을 적용한 결과, 66개소의 지하수위 자료로부터 8 개의 주성분이 추출되었고(Table 1), 이 경우 성분 1 이 설명할 수 있는 양은 51.127 % 이고 성분 2 는 15.425 % 이다. 성분 1~8 이 설명할 수 있는 양은 전체의 87.975 % 이다.

Table 1. Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues		
	Total	% of Variance	Cumulative %
1	33.744	51.127	51.127
2	10.108	15.425	66.552
3	4.638	7.028	73.580
4	2.935	4.448	78.027
5	2.365	3.583	81.610
6	1.782	2.700	84.311
7	1.377	2.086	86.396
8	1.042	1.578	87.975

Extraction Method: Principal Component Analysis.

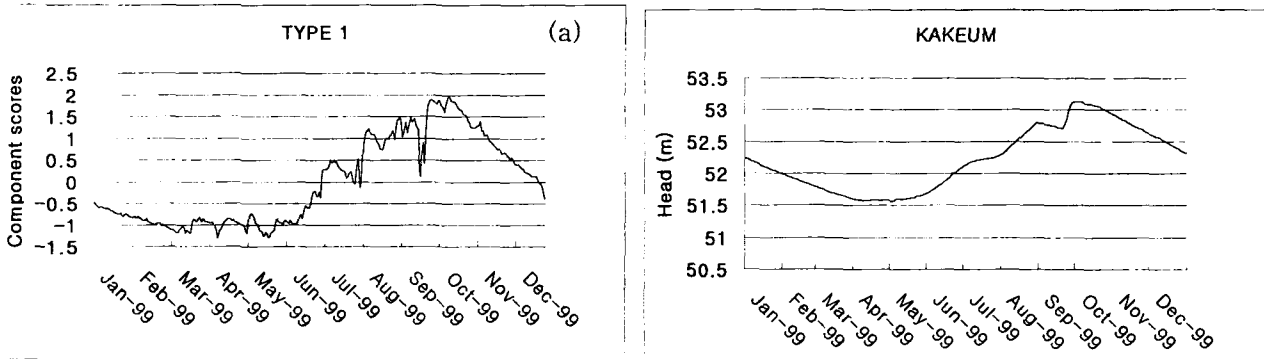
Table 2. Rotated Component Matrix

	Component							
	1	2	3	4	5	6	7	8
KAKEUM	0.957	0.0329	-0.202	-0.0642	0.0306	-0.135	-0.0528	-0.0478
BEOMSEO	0.183	0.828	-0.039	0.236	0.116	0.283	0.0935	-0.0639
BONGSOO	0.290	0.287	0.797	0.322	0.0650	-0.00587	-0.0464	0.000240
KAKOK	0.244	0.312	0.220	0.664	0.215	-0.0214	0.181	0.0207
SHINKOK	0.238	0.336	0.251	0.0189	0.789	0.137	0.133	0.0430
HAPCHUN	-0.649	0.226	-0.107	0.165	0.223	0.449	0.247	0.140
BOEUN	0.100	0.385	0.300	0.151	0.189	0.173	0.690	-0.0393
EUHEUNG	0.0807	0.513	0.232	0.403	0.201	0.331	0.0139	0.515
...

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

Table 2 는 회전된 성분 행렬(Rotated Component Matrix) 이다. 여기서 사용한 회전방법은 Varimax 방법이며 9 번의 반복계산 끝에 주성분 회전이 수렴되었다. 이것은 회전한 후 지하수위 변동 곡선 유형을 8 개로 분류하고 이 분류된 유형과 각 변수(지점)간의 상관관계를 나타낸 것이다. 이와 같은 결과로부터 66개 지점의 총적층 지하수위가 각각 어떤 유형에 가장 큰 부하량이 걸렸는지를 파악하므로써 유형별로 분류하였다. 이와 같이 파악된 유형들이 대표하는 지하수위 변동 곡선은 Figure 1 과 같다. 행렬의 값 즉, PCL이 1에 가까울수록 두 그래프의 양상이 비슷하게 나타나고 1에서 멀어져 0으로 갈수록 그 양상이 달라짐을 확인할 수 있다.



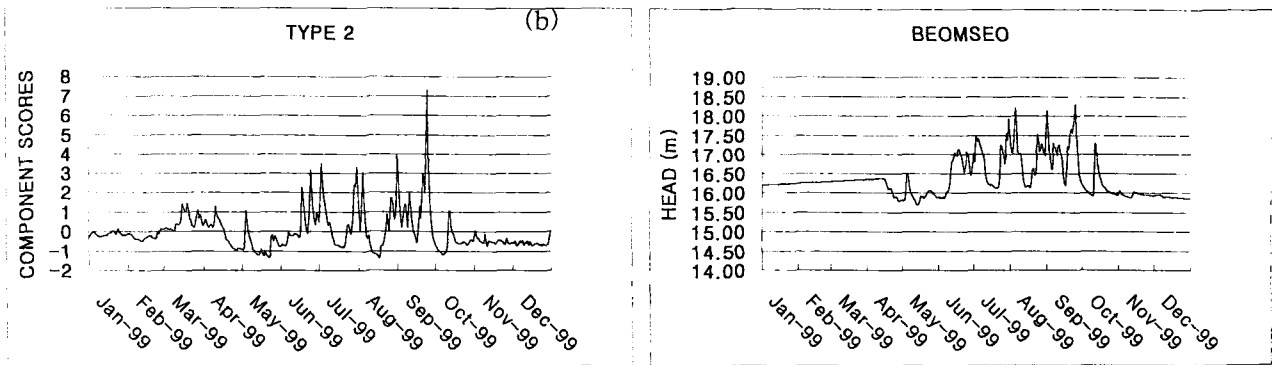


Figure 1. Component scores and ground-water hydrograph pairs for (a) TYPE 1 - KAKEUM, and (b) TYPE 2 - BEOMSEO.

(2) 지하수위 특성별 함양률 추정

유사한 지하수위 변동 특성을 보이는 지점들에 대해서 지하수 함양률을 추정하였다. 본 연구에서 사용한 함양률(α) 추정식은 다음과 같다(문상기와 우남철, 2001b).

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\sum P} \times S_y$$

여기서, Δh : 지하수위 변동치, $\sum P$: 일정 기간 누적강수량, S_y : 비산출률

Δh 와 $\sum P$ 상호간의 상관관계는 교차상관관계분석을 통하여 규명한다. 이 방법을 적용하기 위해서는 지하수위 관측 지점과 가까운 곳의 강수량 자료와 지하수 비산출률 자료가 필요하다. 강수량 자료는 한국 기상청(2000)에서 제공하는 기상기상관측지점(Surface synoptic stations)의 자료를 이용하였다. 이 자료는 하루 동안 내린 강수량을 합한 일합계값으로서 측정 오차를 보정한 자료이다. 비산출률 자료는 '전국 층적층 지하수 조사'(한국수자원공사, 1996)의 결과를 사용하였다. 한국수자원공사(1996)는 전국의 4대 유역권의 층적층에서 총 29개의 시추지점으로부터 양수시험을 통하여 저류계수를 측정하였다. 본 연구에서는 자유면 대수층의 비산출률 범위를 0.01 ~ 0.3 (Freeze and Cherry, 1979) 으로 가정하여서 이 범위를 벗어나는 값들(10^{-4} 이하)은 제외시켰으며, 최종적으로 사용된 값은 다음 Table 3 과 같다.

Table 3. Specific yields of alluvial aquifers of South Korea

River Basin	The number of tested sites	Specific Yield(S_y)		
		Minimum	Maximum	Arithmetic Mean
Han River	4(3)	0.00470	0.171	0.0627
Nakdong River	6(3)	0.00540	0.0255	0.0134
Keum River	3(3)	0.0316	0.0913	0.0596
Youngsan River	3(1)	0.00420	0.00420	0.00420
Seomjin River	3(1)	0.00480	0.00480	0.00480
Western coast	2(2)	0.00610	0.0158	0.0110
Sum	21(13)			

※ () : the number of data used.

Table 3 에서의 저류계수는 양수에 의하여 배출된 지하수의 양과 그 배출의 결과로 생긴 지하수면의 저하에 따라 일어난 감소된 체적과의 비로서 자유면대수층에서는 유효 공극률 즉, 비산출률과 대등한 의

미를 갖는다. 본 연구에서는 측정된 비산출률들에 대하여 대유역별로 평균값을 사용하여 적용하였다.

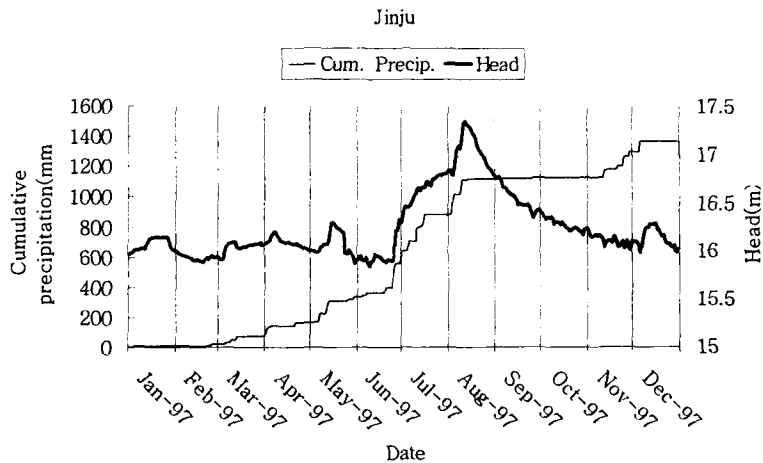


Figure 2. Ground water level change curve and cumulative precipitation (from Moon and Woo, 2001b).

Figure 2 와 같은 그림으로부터 누적강수량과 그 강수량에 의한 지하수위 반등치를 찾아내고 그 비율과 비산출률의 곱으로서 함양률을 계산한다. 이 방법을 각 유형별로 분류된 지하수위곡선에 대하여 적용한 결과는 다음 Table 4 와 같다.

Table 4. The range and mean of recharge ratio(%) in different types of catchments

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6	Type 7	Type 8
catchments(66)*	24	13	9	7	9	2	1	1
Min.	0.36	0.66	0.48	2.21	5.21	1.86	8.51	3.25
Max.	33.0	4.07	47.9	14.1	34.1	10.4	8.51	3.25
Arithmetic Mean	6.27	8.91	9.21	5.75	15.3	6.15	8.51	3.25
Geometric Mean	3.3	3.0	3.7	5.0	12.7	4.4	8.51	3.25

* : the number of sites contributing to the type.

각 유형에서 계산된 함양률의 범위가 크기는 100배에서 작게는 5배의 최소, 최대치의 차이를 보이고 있다. 이는 유사한 수위변동을 보이는 유형이라 하더라도 함양률이 국지적으로 변화될 수 있음을 의미한다.

Table 5 와 Figure 3 은 우리나라의 5 대강 유역에 대한 함양률 추정 연구에 대해서 비교한 것이다. 이동률과 윤용남(1996) 및 박창근(1996a) 의 결과는 유사한 경향성을 보이고 있다. 이는 두 방법이 유사한 자료(일유출수문곡선)를 이용하여서 같은 방법론(기저유출분리법)에 의거하여 결과를 산출하였기 때문이다. 후자의 연구가 전자의 연구보다 값이 더 크게 나타난 이유는 후자가 우리나라의 지하수 감수기간 뿐만 아니라 함양기간까지 추가하여 함양률을 추정하였기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 본 연구는 주로 함양기간(7, 8월)에 발생하는 함양률을 추정하였다. 이 기간을 최대 함양기간으로 가정할 때 추정된 함양률은 최대 함양률이 된다. 따라서 지하수 개발량을 평가할 때 이 함양률을 이용할 경우 최대 개발 가능량을 산출하게 된다. 본 연구는 앞의 두 연구와는 다른 방법(지하수위곡선법)을 적용한 바 편차가 있는 것으로 나타났다. 함양률이 비교적 크게 나타나는 한강과 금강 유역에서는 다른 연구 결과와

비슷한 결과를 나타냈고, 함양률이 비교적 적게 나타나는 낙동강과 영산강 유역에서는 다른 연구 결과보다 적게 나타났다. 이처럼 낙동강과 영산강 유역에서 함양률이 적게 나타난 이유는 본 연구에서 적용된 비산출률이 매우 적게 나타났기 때문이다(Table 3).

본 연구에서는 지하수위 변동이 유사하게 나타나는 요인들의 원인에 대해서 누적강수량만을 고려하였으나 차후로 그 외의 수리지질학적인 변수들에 대한 고려가 필요하다. 한편, 본 연구에서의 함양률 산정은 지점별로 이루어졌으므로 전국적인 함양률 산정을 위해서는 유형별 목적변수인 함양률에 대한 각 수리지질학적 변수들의 기여도를 규명해야 한다. 즉, 점자료를 이용하여 계산한 함양량을 총적층 전체 면적에 적용하기 위해서는 여러 수리지질인자들의 기여도를 결정해야만 한다. 현재 본 연구자들은 수리지질학적 인자들의 함양률에 대한 기여도를 결정하고 이와 같은 기여도에 근거하여 지리정보시스템(GIS)을 통해서 전국적인 함양률을 산정하는 연구를 진행 중이다.

Table 5. Comparison of the results between the existing studies and this study

River Basin	Lee and Yoon (1996)		Park (1996)		This study		
	Coefficient of rainfall recharge ¹⁾ (%)		Coefficient of rainfall recharge(%)		Recharge ratio(%)		
	Range	Average	Range	Average	Range	Arithmetic Mean	Geometric Mean
Han River	6.4~8.6	7.9	9.8~15.1	12.0	1.3~34.1	15.6	10.4
Nakdong River	5.2~9.2	6.9	n/a	10.2	0.6~13.3	4.3	3.3
Keum River	7.6~12.0	9.6	n/a	12.2	6.8~17.3	13.2	11.5
Youngsan & Seomjin River	3.4~6.6	5.1	n/a	7.7	0.4~7.8	2.9	1.9

1) coefficient of rainfall recharge = $\frac{\text{annual mean of groundwater recharge}}{\text{annual mean of rainfall}}$

2) n/a : not available

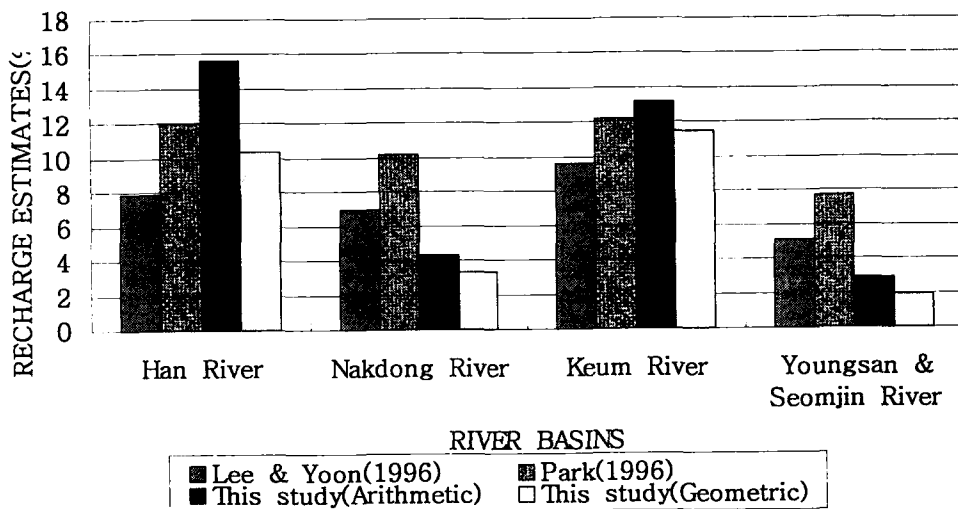


Figure 3. Graphs of the comparison between recharge estimates in South Korea

3. 결론

지하수위 변동 곡선법을 이용하여 국가 지하수 관측망 자료에 의해 충적층 자유면 대수층 지하수의 함양률을 평가하였다. 한강과 금강 유역에서 각각 15.6 %, 13.2 %(산술평균), 10.4%, 11.5%(기하평균)의 함양률을 보였고, 낙동강 및 영산강과 섬진강 유역에서는 각각 4.3 %, 2.9 %(산술평균), 3.3%, 1.9%(기하평균)의 함양률을 보였다. 함양률은 유형별 혹은 유역별로도 다양하게 나타났다. 즉, 같은 유역 일지라도 혹은 같은 유형의 수위변동양상을 보이나 할지라도 함양률은 반드시 같게 나타나지 않았다. 따라서 지질학적으로 같은 충적층 지대라 할지라도 그 지역의 고유한 함양률에 따라 다른 지하수 관리 체계를 적용해야 한다. 본 연구에서 사용된 자료는 국가 지하수 관측망이 설치된 66 개 지점의 지하수위 자료이다. 국가 지하수 관측망 자료는 전국적인 지하수 함양률 산정 특히, 지하수 함양률의 공간적인 변동성 연구에 경제적으로 활용될 수 있었다.

4. 참고문헌

- 문상기, 우남철, 2001a, 통계분석을 이용한 지하수위 변동 특성 분류, 한국지하수토양환경학회 2001년 추계학술대회, 한국지하수토양환경학회, p. 155-159.
- 문상기, 우남철, 2001b, 누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양률 추정 기법, 지하수토양환경, 6(1), p. 33-43.
- 박창근, 1996, 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 2. 5대강 유역에의 적용, 지하수환경, 3(1), p. 21-26.
- 이동률, 윤용남, 1996, 우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석, 대한토목학회논문집, 16(Ⅱ-4), p. 321-334.
- 한국기상청, 2000, 기후자료 중 월별 일값, <http://www.kma.go.kr/>
- 한국수자원공사, 1996, 전국 충적층 지하수 조사 보고서.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, p. 61, New Jersey, Prentice-Hall.