

미계측 지역 지하수 함양률 추정을 위한 통계적 접근

Statistical Approach to Groundwater Recharge Rate Estimation for Non-Measured Areas of Water Levels

김 규 범[†] · 김 기 영¹⁾

Kim, Gyoobum · Kim, Kiyoung

ABSTRACT : 320 national groundwater monitoring stations have been constructed since 1995 and groundwater levels are measured automatically 4 times a day at each well. It has a difficulty to estimate an average recharge rate of watershed using the recharge rate of the monitoring site because of the lack of its representative on converting a point recharge rate into a spatial one. In this study, the relations between site characteristics (topography, hydraulics, geology, facilities, etc.) and recharge rates of 223 monitoring sites, which were selected using cluster analysis, were analyzed using statistical methods, and finally, regression models were constructed for a recharge rate estimation of non-measured areas. The independent variables for these simple regression models, 1) width of adjacent stream, 2) distance to the nearest stream, 3) topographic slope, and 4) rock type, are proposed using analysis of variance. These models have lots of advantages such as an easy data collection from topographic and geologic maps, a few input variables, and also simplicity in use. Suitability analysis from the comparison between estimation values and original ones at monitoring sites shows that these models are useful for a groundwater recharge estimation.

Keywords : Groundwater recharge rate, Regression model, Cluster analysis

요 지 : 우리나라에는 1995년부터 전국에 지하수 관측소를 설치하여 2005년에 320개소를 완료하였으며, 일 4회 지하수위 자료가 자동 측정되고 있다. 지하수 수위 강하곡선법으로 산정한 관측 지점에서의 지하수 함양률 자료의 평균값을 유역 평균 함양률로 사용하는 것은 대표성이 결여되어 있기 때문에 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 지하수위 미계측 지역을 대상으로 지하수 함양률을 추정할 수 있도록 223개 관측 지점의 특성 인자와 지하수 함양률과의 관계를 통계적 기법을 활용하여 분석하고 이를 토대로 회귀모형을 구축하였다. 본 연구에서는 군집분석을 통하여 분석대상 관측점을 선정하고, 분산분석을 통하여 지하수 함양률 추정에 필요한 4가지 인자(대상 지점 인근하천의 규모, 하천까지 거리, 지형 경사도, 암석 성인)를 추출하였으며, 이들 인자에 대한 각 관측 지점의 특성 자료를 수집하여 회귀 모형에 적합시킨 결과 미계측 지역의 지하수 함양률 추정이 가능한 것으로 평가되었다.

주요어 : 지하수 함양률, 회귀 모형, 군집분석

1. 서 론

지하수 함양률을 산정하는 방법으로는 1) 수문학적인 해석방법, 2) 비포화 해석방법 및 3) 포화대 지하수 해석방법 등이 있으나(Scanlon 등, 2002), 국내 실정에 적합한 함양률 산정 기법을 개발하는 것이 용이하지 않다. 즉, 최적의 지하수 함양률 산정 기법의 개발을 위해서는 입력 인자의 국내 취득 가능성 및 신뢰성 높은 입력 자료의 취득 가능성 등을 고려하여야 보다 적용성 높은 기법이 개발될 수 있다. 지하수 함양률이란 여러 방향으로 지하의 대수층에 도달하는 물의 양의 비율로 정의되며, 지하수 함양률이란 일반적으로 물의 하향 움직임으로서 지하수에 도달하는 양을 말한다. 광역적인 지하수 함양이란 넓은 지역에서 균

일하게 발생하는 강수나 관개에서 유래된 함양을 말하며, 지역적인 함양이란 하천, 호수, 저지대와 같은 지표면 하강 지형으로부터 집중되는 함양을 의미한다.

우리나라는 1990년대 이후 지하수 함양률에 대한 지속적인 연구가 이루어져 왔다. 그동안 수행된 함양률 산정 방법은 지표수의 수문곡선을 이용한 기저유출분리법, 물수지 분석법, SCS-CN법, 온도에 의한 방법, 염소이온농도에 의한 방법, 지하수위 변동법 및 지하수위 강하곡선법 등이 주를 이루고 있다.

물수지분석법은 증발산량 산정 방법에 의하여 지하수 함양이 크게 영향을 받기 때문에 연구자의 주관에 따라 오차를 발생할 수 있으므로, 타 방법과 함께 비교 사용하는 것이 바람직하며, 국내 연구사례로는 한국수자원공사(1993a, 1993b, 1994) 등이 있다.

† 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소 책임연구원(E-mail : gbkim@kwater.or.kr)

1) 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 지반구조연구소 책임연구원

기저유출분리법은 하천유출에서 기저유출 부분과 직접 유출 부분을 분리하는 방법으로서 기저유출감수곡선법과 곡선접합법이 해당되며(Rorabough, 1963), 본 방법을 적용한 국내 사례로는 이동률(1995), 건설교통부·한국수자원공사(1995, 1996) 등 다수가 있다. 본 방법은 대규모 댐 하류의 유량이 댐 운영에 의하여 영향을 받기 때문에 수문곡선으로부터 분리된 기저유출량에 대한 신뢰성에 한계를 보이는 문제점이 있다.

기타 방법의 적용 사례로서, SCS-CN 방법은 최병수안중기(1998) 및 박재성 등(1999), 온도에 의한 방법은 구민호 등(2001), 염소이온농도에 의한 방법은 제주도·한국수자원공사(2003), 지하수위 변동법은 건설교통부·한국수자원공사(1999), 구민호 등(2002) 및 지하수위 강하곡선법은 건설교통부(2002), 김규범 등(2004) 등이 있다.

그동안 국내에서 수행된 지하수 함양율 산정 방법은 대부분 외국에서 개발된 기법으로서 국내의 다양한 기상 수문조건, 지질조건, 지형조건 및 지표피복 특성 등이 충분히 반영되지 못하는 한계점을 갖고 있다. 현재 우리나라에는 1995년부터 구축 운영중인 전국 320개 지하수 관측소의 총 478개 관측정으로부터 일 4회 지하수위가 관측되고 있으며, 이들 자료를 활용한 지하수 함양율 추정 기법들이 시도되어 왔다. 그러나, 지하수위 관측 자료를 활용하여 추정하는 지하수 함양율은 관측 지점 인근에 국한되기 때문에 각종 개발 및 관리 정책에 사용하기 위해서는 미 계측지역, 즉 광역 지역에 대한 지하수 함양량 산정이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 국가 지하수 관측정에서의 지하수 함양율과 관측 지점 특성 인자들의 상관성을 통계적 기법을 활용하여 규명하고 미계측 지역에서의 지하수 함양율 추정 모델을 개발함으로써 지하수 함양량 산정을 위한 기초 연구를 수행하였다.

Table 1. Characteristic factors at groundwater monitoring sites

Watersheds	T (m ² /day)
Small watersheds	logT
Key of selection	B (Hydraulic head loss)
Max. water level (m)	logB
Min. water level (m)	C (Well head loss)
Max-Min difference (m)	logC
Distance to stream	Well diameter (mm)
Width of stream	Well depth (m)
Topographic slope	Sw (=h ₀ -h _t)
Land use type	Q (m ³ /day)
Natural water level	Sc (=Q/S _w)
K (cm/sec)	Log (S _c)
K (m/day)	Name of bedrock
log (k)	Rock types (Igneous, Metamorphic, Sedimentary)

2. 연구 자료 및 방법

지하수 관측 지점의 함양율에 대한 정확한 추정은 지하수 관리에 대단히 중요한 영향을 끼친다. 그러나 인접 지역임에도 불구하고 지질특성, 지형특성 등 제반 인자에 의하여 지하수 함양률이 차이가 나타나며, 유사한 특성을 갖고 있음에도 지하수 함양율의 계산 결과가 서로 다른 특성에 대한 어떤 의미 있는 해석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 또한, 현재 소유역으로 설정된 지역 안에 있는 관측 지점에서 산정된 지하수 함양율이 그 소유역을 대표할 수 있는지에 대한 근거도 정립하는 것이 필요하다. 따라서 주어진 자료를 바탕으로 함양율의 변동을 설명할 수 있는 지를 검토하면서 의미 있는 설명변수로 구성된 적절한 모형을 찾고 관측지점별, 소유역별 함양율 추정의 방법론과 대표성의 문제를 본 연구를 통하여 검토 하였다.

본 연구에 사용된 자료는 전국에 설치된 264개 국가 지하수 관측정의 2002년도 수위 변동 자료로서, 각 관측지점별 지하수 함양율은 지하수 수위 강하곡선법을 적용하여 proMOD 프로그램(건설교통부·한국수자원공사, 2003)을 구동하여 산정하였다($\delta=0.05$ 적용). 전체 관측정에서의 지하수 함양율 산정 결과, 평균 함양율은 강우량의 약 12.97%, 표준편차 0.05를 보이며 전체 관측정중 약 84%가 지하수 함양율이 12~25%의 범위에 분포한다.

또한, 각 지점의 함양율과 영향인자를 추출하기 위하여 관측지점의 특성 자료를 파악하여 분석에 활용하였으며, 관측소 시공 단계의 현장 조사자료 등을 활용하여 총 28종의 특성 인자를 선정하였다(Table 1).

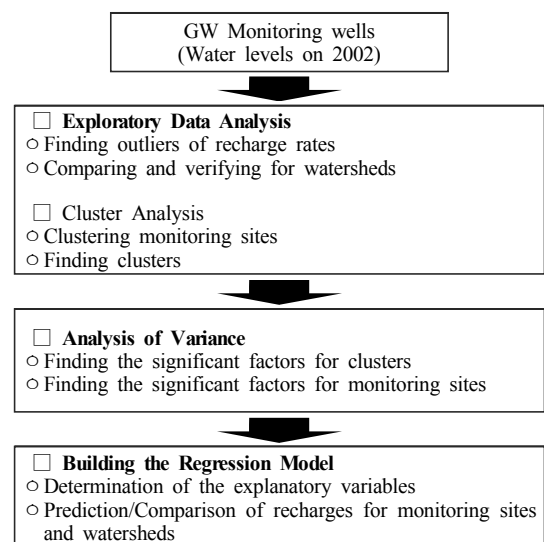


Fig. 1. Schematic diagram for data processing and model development

Fig. 1은 본 연구 수행 과정을 나타낸 것으로서, 각 관측 정별로 산정된 지하수 함양율을 토대로 탐색적 자료 분석 및 군집 분석 과정을 거쳐 분석 대상 자료를 추출한 후 분산분석을 통하여 군집별 특성과 관측지점의 특성을 파악하고 최종적으로 회귀 모형을 적합하여 미계측 지역의 지하수 함양율 추정 모형 개발을 시도하였다.

3. 자료 탐색 및 특성 분석

3.1 탐색적 자료 분석

탐색적 데이터 분석과정(Exploratory Data Analysis; EDA)을 통하여 관측정별 지하수 함양율 데이터에 오류가 있는지 혹은 매우 특이한 값을 보이는지를 개략적으로 판단함으로써 데이터의 활용성을 파악하였다. 지하수 함양율 분포에는 이상값은 분포하지 않았으나(Fig. 2), 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 이상 지하수위 관측 데이터를 제거하였다. 이를 위하여 강우에 대한 반응이 거의 없어 피크를 보이지 않는 수위 변동 유형(Type B-3)을 보이는 21개 관측 지점의 자료를 제외하고 243개 관측정의 지하수

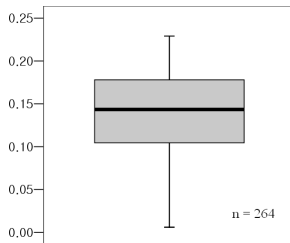


Fig. 2. Box plot of groundwater recharge rate

Table 2. Minimum and maximum means of recharge rates for each groups

Classification	Minimum Mean (N)	Maximum Mean (N)
With 4 groups	0.042 (25)	0.179 (83)
With 5 groups	0.035 (18)	0.184 (62)
With 6 groups	0.037 (18)	0.221 (2)
With 7 groups	0.013 (4)	0.185 (58)

Table 3. ANOVA table of recharge rates for clusters

Clusters	N	Average	S.D.	F	p-value	Multiple comparison
1	61	0.12172	0.011359	981.396	0.000	Different for each group
2	36	0.07694	0.012005			
3	60	0.18947	0.006248			
4	67	0.15654	0.010086			
5	2	0.22100	0.002828			
6	18	0.03667	0.015427			
Total	244	0.13587	0.047820			

함양율 자료를 분석 대상으로 선택하였다(김규범, 2004; 건설교통부·한국수자원공사, 2005).

3.2 군집 분석법

각 관측지점의 지하수 함양율 자료에 대하여 개별적으로는 이상치 판별이 잘 되지 않았기 때문에 통계적 군집분석 방법을 적용시켜 이상치를 제거하였다(Table 2).

군집 그룹의 크기를 4개, 5개, 7개로 분류한 경우는 군집내에서 평균 지하수 함양율이 가장 큰 그룹의 평균 함양율이 약 0.18로 비슷하지만, 군집의 크기가 6개인 경우에는 평균 함양율이 가장 큰 그룹이 약 0.221이며 관측지점의 개수는 2개에 불과하며 이상 지점으로 고려된다. 또한 최소평균을 살펴보면 그룹의 크기를 4개, 5개, 6개로 군집 분석 한 경우의 최소 평균 함양율이 약 0.04로서 비슷하나, 7개 그룹으로 군집분석 한 경우의 최소 평균 함양율은 약 0.013이며 관측지점의 수는 4개로 이상한 지점으로 고려된다. 즉 군집 그룹을 6으로 분류하여 군집분석 한 경우의 최대 평균 함양율을 갖는 군과 7개로 군집 분석 한 경우의 최소평균 함양율을 갖는 군이 중요한 의미를 갖는다고 판단되며, 본 연구에서는 데이터의 손실을 최소화하고자 군집그룹을 6으로 나눈 군집을 선택하였다. 따라서, 군집 그룹의 크기가 6인 그룹을 대상으로 이상치로 고려될 수 있는 최대 집단에 속한 2개 지점과 최소 집단에 속한 18개 지점을 제외시키고 총 223개의 지점에서 수집된 자료를 분석 대상으로 최종 선정하였다.

3.3 분산 분석

이상 추출된 자료를 대상으로 각 집단간의 평균에 차이가 있는지를 분석하였으며, 사후 검정 기법으로는 유의성 판단에 용이한 Duncan 방법을 사용하였다. Table 3은 6개 군집에 대한 분산분석표로서 유의수준 0.01에서 군집 간에 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다.

3.4 소유역별 대표성 검토

소유역별 지하수 함양율에 차이가 있다면 해당 소유역의 제반 특성 인자를 비교 검토함으로써 미계측 지역에 대한 지하수 함양을 추정할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 소유역별 평균 지하수 함양율이 대표성을 갖는지 파악하기 위하여 소유역별 지하수 함양율의 평균, 표준편차 및 변동계수(변동계수=표준편차/평균)를 산정한 결과, 변동계수가 0.5 이상(표준편차가 평균의 50% 이상)인 유역이 전체의 약 18% 정도를 차지하여 평균은 대표성이 없는 것으로 판단하였다.

3.5 군집과 지리적 위치의 상관성 검토

상기에서 제시된 6개 군집에 최대, 최소 지하수 함양율을 갖는 2개 집단을 제외한 4개 집단을 대상으로 좌표에 대한 분산분석을 실시한 결과 좌표에 따른 평균 지하수 함양율은 차이를 보이지 않았다.

3.6 군집별 특성 탐색

분석 대상 4개의 군집을 대상으로 지형의 경사도, 암석성인, Pumping type, 지표피복특성, 암반/층적 등에 따른 평균 지하수 함양율의 차이가 있는지 분산분석과 T-test를 통해 살펴본 결과 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 군집1과 군집2에서 인근하천까지 거리에 따른 평균 지하수 함양율에는 차이를 보였다(Table 4).

그러나 기타 변수(Table 1 참조)에서는 평균 지하수 함양율에 유의한 차이를 보이지 않기 때문에, 최종적으로 군집 내 그룹간의 특성 차이를 찾기 보다는 전체 지하수 함양율 자료에서 분산분석과 T-test를 실시하여 유의한 변수

를 찾아보았다.

4. 모형 개발

기본적인 선형회귀모형은 연속적인 변수들 간의 설명 모형이기 때문에 질적변수(Nominal variable)인 경우는 의사변수(Dummy variable)로 변환하여 포함시켜야 한다. 또한 고려하는 변수를 모두 모형에 포함시키는 것이 일반화(Generalization)과정에서 오히려 부정적인 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 유의미한 설명력을 갖는 변수만을 추출하기 위하여 단계적 변수선택(Stepwise variable) 기법을 함께 적용하였다.

4.1 인근하천까지 거리

현장 답사 및 지형도 검토 결과 인근하천까지의 거리를 5 단계로 구분하였으며, 인근하천거리가 1km이상인 관측지점은 31곳으로 평균 함양율 0.114(표준편차 0.038), 인근하천거리가 500m~1km이상인 관측지점은 19곳으로 평균 함양율 0.138(표준편차 0.051), 인근하천거리가 100~500m이상인 관측지점은 36곳으로 평균 함양율 0.126(표준편차 0.045), 인근하천거리가 50~100m인 관측지점은 20곳으로 평균 함양율 0.154(표준편차 0.033), 인근하천거리가 50m미만인 관측지점은 117곳으로 평균 함양율 0.146(표준편차 0.031)으로 나타났다. 5 단계의 평균 지하수 함양율은 모두 같지 않음을 알 수 있으며(Welch=6.293, p<0.000), 사후검정(Dunnett method) 결과 제 1 집단과 제 4 집단이 차이를 보이고, 제 1 집단과 제 5 집단이 차이를 보였다. 이와 같은 특성은 보편적으로 하천까지 거리가 가까우면 먼 곳보다 평균 지하수 함양율이 높음을 설명한다(Table 5). 그

Table 4. ANOVA table of recharge rates according to "Distance to Stream" for cluster 1 and 2

Content	Code for distance ¹⁾	N	Mean	S.D.	S.E.	F	p-value
Cluster1	1	12	0.118	0.009	0.003	3.548	0.020
	3	12	0.110	0.010	0.003		
	4	4	0.126	0.009	0.004		
	5	32	0.120	0.011	0.002		
	합계	60	0.118	0.011	0.001		
Cluster2	1	11	0.073	0.011	0.003	8.688	0.000
	2	5	0.062	0.004	0.002		
	3	9	0.069	0.008	0.003		
	4	2	0.092	0.001	0.001		
	5	9	0.084	0.006	0.002		
	합계	36	0.074	0.012	0.002		

Remark: 1) Distance to the nearest stream (see Table 5)

리나, 일부 50~100m 구간의 평균 함양율이 50m 미만 구간보다 다소 높게 나온 것은 이 구간의 표본이 20개로서 다소 적은 점과 50m에 근접한 관측점이 다수 포함된 점 등이 요인으로 고려되며 이는 추후 모든 국가 관측소의 운영 및 추가 관측 데이터가 수집, 활용된다면 보완이 가능할 것이다.

4.2 지형의 경사도

현장 답사를 통하여 관측소 주변 약 수 km에 대한 지형의 경사도를 4 단계로 구분하였으며, 지형의 경사도가 급경사지역으로 분류된 관측지점은 15곳으로 평균 함양율 0.137(표준편차 0.038), 지형의 경사도가 완경사로 분류된 관측지점은 47곳으로 평균 함양율 0.139(표준편차 0.041), 지형의 경사도가 구릉지로 분류된 관측지점은 23곳으로 평균 함양율 0.115(표준편차 0.041), 지형의 경사도가 평야로 분류된 관측지점은 138곳으로 평균 함양율 0.142(표준편차 0.036)로 나타났다. 4 단계 지형경사도에 대한 평균 지하수 함양율은 모두 같지 않음을 알 수 있으며(Welch=3.200, $p<0.05$), 사후 검정(Duncan method) 결과 지형 경사도가 구릉지인 경우 다른 경사도로 분류된 지역보다 평균 지하수 함양율이 다소 낮은 것으로 나타났다(Table 6).

4.3 암석성인

암석성인은 변성암, 퇴적암, 화성암 3가지로 구분하였으며, 암석성인이 변성암인 관측지점은 61곳으로 평균 함양율 0.135(표준편차 0.038), 암석성인이 퇴적암인 관측지점은 50곳으로 평균 0.154(표준편차 0.033), 암석성인이 화성암인 관측지점은 113곳으로 평균 0.133(표준편차 0.039)로 나타났다. 암석성인에 따른 평균 지하수 함양율은 모두 같지 않은 것으로 평가되었으며($F=5.698$, $p<0.01$), 사후 검정(Duncan method) 결과 암석성인이 변성암과 화성암인 곳은 평균 지하수 함양율에 차이가 없으나 퇴적암인 곳의 평균 지하수 함양율은 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 7).

4.4 하천규모

하천규모는 하천의 폭을 의미하며, 하천규모가 10m 이상인 관측지점은 148곳으로 평균 함양율 0.143(표준편차 0.036), 하천규모가 5~10m인 관측지점은 36곳으로 평균 함양율 0.133(표준편차 0.133), 하천규모가 5m미만의 도랑인 관측지점은 18곳으로 평균 함양율 0.133(표준편차 0.043), 주변에 하천이 없는 관측지점은 21곳으로 평균 함양율이 0.118 (표준편차 0.041)로 나타났다. 하천규모에

Table 5. ANOVA table of recharge rates according to "Distance to Stream" for all monitoring wells

Distance	Code	N	Mean	S.D.	S.E.	Welch	p-value
>1km	1	31	0.114	0.038	0.007	6.293	0.000
500m~1km	2	19	0.138	0.051	0.012		
100~500m	3	36	0.126	0.045	0.007		
50~100m	4	20	0.154	0.033	0.007		
<50m	5	117	0.146	0.031	0.003		
Total		223	0.138	0.038	0.003		

Table 6. ANOVA table of recharge rates according to "Topographic Slope" for all monitoring wells

Topographic slope	Code	N	Mean	S.D.	S.E.	F	p-value
Steep slope	1	15	0.137	0.038	0.010	3.200	0.024
Gentle slope	2	47	0.139	0.041	0.006		
Low hill	3	23	0.115	0.041	0.009		
Plain	4	138	0.142	0.036	0.003		
Total		223	0.138	0.038	0.003		

Table 7. ANOVA table of recharge rates according to "Three Rock Types" for all monitoring wells

Rocks	Code	N	Mean	S.D.	S.E.	F	p-value
Metamorphic rock	1	61	0.135	0.038	0.005	5.698	0.004
Sedimentary rock	2	50	0.154	0.033	0.005		
Igneous rock	3	113	0.133	0.039	0.004		
Total		224	0.138	0.038	0.003		

Table 8. ANOVA table of recharge rates according to “Width of stream” for all monitoring wells

Width of stream	Code	N	Mean	S.D.	S.E.	F	p-value
>10m	1	148	0.143	0.036	0.003	3.053	0.029
5~10m	2	36	0.133	0.038	0.006		
<5m	3	18	0.133	0.043	0.010		
No stream	4	21	0.118	0.041	0.009		
Total		223	0.138	0.038	0.003		

따른 평균 지하수 함양율은 모두 같지 않으며(F=3.053, p<0.05), 사후 검정(Duncan) 결과 하천규모가 10m이상인 집단과 주변에 하천이 없는 집단 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 8).

4.5 기타 인자에 대한 그룹간 차이 분석

동일한 방법을 적용하여 그룹변수(총 4개의 그룹)간에 K, T, B, C, Q, Sc, Sw의 차이를 살펴보았으나 차이가 없음이 확인되었으며, 기타 Pumping type, 지표피복특성, 암반/층적에 따른 지하수 함양율도 별 차이가 없는 것으로 분석되었다.

따라서, 본 연구에서는 인근하천규모, 하천까지 거리, 지형경사도, 암석성인 등의 4가지 인자가 지하수 함양율에 영향이 있는 것으로 최종 평가 되었으며, 본 4가지 인자를 대상으로 회귀모형을 정립하였다.

4.6 상호작용을 고려한 분산분석

한편, 유의한 것으로 평가된 4가지 인자들의 상호 작용에 의한 영향이 지하수 함양율에 작용할 수 있기 때문에 각 인자들을 모수 요인으로 하여 상호작용에 의한 영향 여부를 파악하였다.

Table 9에서 보는 바와 같이, 인근하천 규모, 암석성인, 지형의 경사도, 하천까지의 거리에서 다음과 같은 상호작용 효과가 있는 것으로 나타났다.

- 인근하천규모 * 암석성인 : F = 3.280 (p < 0.05)
- 인근하천규모 * 지형의 경사도 * 암석성인 : F = 2.371 (p < 0.05)
- 암석성인 * 하천까지 거리 : F = 3.643 (p < 0.01)
- 인근하천규모 * 암석성인 * 하천까지 거리 : F = 4.513 (p < 0.01)
- 지형의경사도 * 암석성인 * 하천까지 거리 : F = 2.693 (p < 0.01)

4.7 회귀 모형 수립

각 관측지점의 지하수 함양율을 예측하기 위해 다음과 같이 모형을 세우고 회귀분석을 실시하였다. 제반 고려 인자들중에서 인근하천규모, 하천까지 거리, 지형경사도, 암석성인 등 4가지 인자는 분산분석 결과 지하수 함양율과 각각 유의성을 갖고 있을 뿐 아니라, 이들 인자들의 상호 작용도 지하수 함양율과 유의성을 보이고 있어 4가지 인자를 회귀분석의 독립변인으로 고려하였다.

Table 9. ANOVA Table for recharge rates considering interactions

Content	Type III SS	d.f.	Mean Square	F	p-value
“Width of Stream” * “Three Rock Types”	0.013	4	0.003	3.280	0.013
“Width of Stream” * “Topographic Slope” * “Three Rock Types”	0.014	6	0.002	2.371	0.032
“Width of Stream” * “Distance to Stream”	0.012	6	0.002	2.063	0.060*
“Three Rock Types” * “Distance to Stream”	0.028	8	0.004	3.643	0.001
“Width of Stream” * “Three Rock Types” * “Distance to Stream”	0.013	3	0.004	4.513	0.005
“Topographic Slope” * “Three Rock Types” * “Distance to Stream”	0.034	13	0.003	2.693	0.002

Table 10. The regression model and variables for the estimation of recharge rate

Method	Variables	Coefficient		Standardized coefficient	t	p-value	F	p-value	R square
		B	S.E.	Beta					
Enter	(Constant)	0.12	0.01		9.03	0.0000	5.10	0.0000	0.21
	Rock type 1 (Metamorphic)	0.01	0.01	0.08	1.28	0.2034			
	Rock type 2 (Sedimentary)	0.02	0.01	0.22	3.28*	0.0012			
	Slope 1(1)	0.01	0.01	0.06	0.83	0.4092			
	Slope 2(2)	0.00	0.01	-0.01	-0.14	0.8902			
	Slope 3(3)	-0.03	0.01	-0.23	-3.65*	0.0003			
	Distance to stream 1(1)	-0.02	0.01	-0.15	-1.88	0.0621			
	Distance to stream 2(2)	-0.02	0.01	-0.14	-2.25*	0.0256			
	Distance to stream 3(3)	-0.03	0.01	-0.22	-3.50*	0.0006			
	Distance to stream 4(4)	0.00	0.01	0.02	0.38	0.7014			
	Width of stream 1(2)	0.03	0.01	0.26	2.02*	0.0447			
	Width of stream 2(3)	0.02	0.01	0.13	1.21	0.2278			
	Width of stream 3(4)	0.02	0.02	0.12	1.30	0.1958			
Step wise	(Constant)	0.14	0.00		36.64	0.0000	10.50	0.0000	0.18
	Slope 3(3)	-0.03	0.01	-0.22	-3.70	0.0003			
	Distance to stream 1(1)	-0.03	0.01	-0.21	-3.48	0.0006			
	Distance to stream 3(3)	-0.03	0.01	-0.21	-3.36	0.0009			
	Rock type 2 (Sedimentary)	0.02	0.01	0.18	2.97	0.0032			
Distance to stream 2(2)	-0.02	0.01	-0.15	-2.41	0.0166				

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_j x_j + \sum \beta_k x_k + \sum \beta_l x_l + \epsilon \quad (1)$$

여기에서, $i = 1, 2$ 로서 암석성인, $j = 1, 2, 3$ 으로서 지형의 경사도, $k = 1, 2, 3, 4$ 로서 인근 하천까지의 거리, $l = 1, 2, 3$ 는 인근 하천의 규모로서, y 는 지하수 함양율, β 는 추정되어야 할 회귀계수, ϵ 는 오차항을 의미한다.

회귀분석은 SPSS 프로그램을 이용하여 수행하였는데(Table 10), 상기에서 고려된 유의한 변수들중에서 실제 회귀식에서 사용될 수 있는 유의한 변수만을 선택하기 위하여 우선 제반 변인을 모두 이용한 입력 방법을 적용하였으며, 이후 새로운 변수가 추가될 때마다 이전 변수의 유의성 검증을 병행하는 방법인 단계선택방법을 적용해 보았다

입력방법을 사용하여 수립한 회귀모형은 R^2 가 0.21로서 비교적 낮으나(여기에서는 지하수 함양율의 분산중에서 약 21%가 본 회귀식에 의하여 설명되었음을 의미함), 회귀식의 확증적 유용성을 나타내는 F-통계량과 검증 결과는 유의한 것으로 나타났다. 이때 독립변인으로 사용된 변인들 중에서 암석성인2(퇴적암과 그 외 것 비교), 경사도 3(지형의 경사도 변수값이 3인 것과 그 외 변수값 비교), 하천까지거리2(하천까지거리의 변수값이 2인 것과 그 외 변수값 비교)와 하천까지거리3, 하천규모1(하천규모의 변수값이 2인 것과 그 외 변수값 비교)이 통계적으로 유의한

변수였다. 이 경우 회귀모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{지하수 함양율} &= 0.12 - 0.02 \times \text{암석성인2} \\ &- 0.03 \times \text{경사도3} \\ &- 0.02 \times \text{하천까지거리2} \\ &- 0.03 \times \text{하천까지거리3} \\ &+ 0.03 \times \text{하천규모1} \end{aligned} \quad (2)$$

단계선택법이 사용된 경우에는, 경사도3, 하천까지거리1, 하천까지거리2, 하천까지거리3, 암석성인2가 포함되며 설명력은 18%이다. 단계적 선택 방법에서 선정된 변수는 하천까지 거리 4가지, 암석성인 2가지(퇴적암과 기타) 및 경사도 2가지(구릉지와 기타) 등으로서 다음 모형식을 수립하였다.

$$\begin{aligned} \text{지하수 함양율} &= 0.14 - 0.03 \times \text{경사도3} \\ &- 0.03 \times \text{하천까지거리1} \\ &- 0.03 \times \text{하천까지거리3} \\ &- 0.02 \times \text{하천까지거리2} \\ &+ 0.02 \times \text{암석성인2} \end{aligned} \quad (3)$$

5. 모형 적합 및 검증

5.1 회귀모형 적합 결과

이상 수립된 모형을 사용하여 각 지점의 지하수 함양율

을 추정하였으며 기존 함양율과 비교하였다(Table 11). 상대 잔차는 “(기존함양율-추정된 함양율)/기존함양율”을 의미한다.

상대잔차가 0.05미만이 되는 지역은 포항연일, 김포김포, 양평개근, 이천육현, 영동심천, 금산복수, 대전태평, 천안북면, 부여부여, 의령복수, 문경농암, 상주공성, 진안마

령, 순천외서, 순천황전, 거제신현, 진해자은, 당진당진, 예산예산, 목포용당, 무안무안으로 개발된 모형에 의해 함양율이 잘 예측되는 지역이라고 할 수 있다. 또한 상대잔차가 1이상인 지역은 모형에 의해 예측이 잘 되지 않는 지역으로서 동해귀운, 춘천우두, 충주가금, 논산상월, 부여옥산, 옥천이원, 창원가덕, 괴산증평, 음성대소, 진주초전, 순천승

Table 11. Comparison between mean and estimated values of recharge rates for monitoring sites and watersheds

Content		Mean recharge rates for monitoring sites					Mean recharge rates for watershed				
		Recharge rates	With enter method		With stepwise method		Recharge rates	With enter method		With stepwise method	
Monitoring wells	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	
E-1	Ulsan Onyang	0.189	0.130	0.310	0.128	0.323	0.189	0.130	0.310	0.128	0.323
E-2	Ulsan Beomseo	0.172	0.106	0.384	0.111	0.354	0.158	0.117	0.257	0.121	0.234
	Ulsan Sangbuk	0.130	0.140	-0.081	0.141	-0.084					
E-3	Kyeongju Geoncheon	0.188	0.137	0.271	0.135	0.280	0.144	0.135	0.062	0.136	0.059
	Kyeongju Cheonbuk	0.096	0.148	-0.542	0.138	-0.439					
	Pohang Kibuk	0.186	0.131	0.298	0.141	0.242					
	Pohang Yeonil	0.129	0.126	0.019	0.128	0.004					
E-6	Kangneung Hongje	0.122	0.164	-0.345	0.161	-0.324	0.097	0.157	-0.622	0.151	-0.563
	Tondhae Guiun	0.072	0.150	-1.094	0.141	-0.972					
E-7	YangYang Sonyang	0.158	0.137	0.135	0.136	0.142	0.158	0.137	0.135	0.136	0.142
H-1	Jeongseon Jeongseon	0.177	0.106	0.398	0.114	0.355	0.177	0.106	0.398	0.114	0.355
H-11	Hwacheon Gandong	0.213	0.124	0.419	0.125	0.412	0.213	0.124	0.419	0.125	0.412
H-12	Chuncheon Woo여	0.038	0.131	-2.436	0.141	-2.710	0.089	0.135	-0.513	0.141	-0.578
	Hwacheon Sangseo	0.192	0.144	0.248	0.141	0.266					
H-13	Hongcheon Hongcheon	0.179	0.144	0.191	0.141	0.210	0.179	0.144	0.191	0.141	0.210
H-14	Gapyeong Gapyeong	0.145	0.126	0.130	0.127	0.123	0.145	0.126	0.130	0.127	0.123
H-16	Kwangmyong Cheolsan	0.182	0.144	0.206	0.141	0.225	0.134	0.121	0.099	0.121	0.097
	Kimpo Kimpo	0.147	0.140	0.044	0.141	0.041					
	Bucheon Okgil	0.065	0.132	-1.033	0.127	-0.950					
	Euijeongbu Singok	0.150	0.077	0.485	0.087	0.422					
H-3	Jecheon Goam	0.084	0.136	-0.626	0.128	-0.532	0.084	0.136	-0.626	0.128	-0.532
mH-5	Yangpyeong Yangdong	0.133	0.108	0.186	0.110	0.175	0.113	0.094	0.163	0.097	0.142
	Wonju Munmak	0.103	0.080	0.216	0.084	0.184					
H-6	Chungju Gageum	0.019	0.100	-4.412	0.098	-4.299	0.042	0.106	-1.533	0.105	-1.504
	Chung Dongryang	0.065	0.111	-0.714	0.111	-0.709					
H-7	Anseong Samjuk	0.080	0.144	-0.817	0.141	-0.773	0.098	0.125	-0.267	0.127	-0.296
	Eumseong Saengkeuk	0.117	0.105	0.106	0.114	0.028					
H-8	Yangpyeong Gaegun	0.126	0.131	-0.044	0.128	-0.019	0.148	0.134	0.093	0.132	0.105
	Yongin Mapyeong	0.177	0.127	0.285	0.128	0.277					
	Icheon Yulhyeon	0.141	0.145	-0.028	0.141	0.000					
K-1	Jansu Jansu	0.182	0.138	0.241	0.141	0.223	0.157	0.142	0.099	0.141	0.104
	Jinan Jeongcheon	0.109	0.149	-0.371	0.141	-0.293					
K-10	Nonsan Sangwol	0.049	0.140	-1.867	0.141	-1.877	0.097	0.138	-0.427	0.141	-0.453
	Buyeo Yanghwa	0.189	0.139	0.262	0.141	0.254					
	Buyeo Oksan	0.053	0.135	-1.551	0.141	-1.660					
K-2	Geumsan Geumsan	0.123	0.080	0.346	0.084	0.320	0.123	0.080	0.346	0.084	0.320
K-3	Yeongdong Simcheon	0.137	0.140	-0.025	0.141	-0.029	0.146	0.134	0.083	0.131	0.097
	Yeongdong Yanggang	0.150	0.130	0.132	0.127	0.155					

Table 11. (Continued)

Content		Mean recharge rates for monitoring sites					Mean recharge rates for watershed				
		Recharge rates	With enter method		With stepwise method		Recharge rates	With enter method		With stepwise method	
Monitoring wells	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	
K-4	Boeun Maro	0.186	0.152	0.181	0.151	0.187	0.158	0.133	0.155	0.131	0.168
	Boeun Boeun	0.148	0.083	0.441	0.081	0.453					
	Okcheon Cheongsung	0.140	0.165	-0.183	0.161	-0.157					
K-5	Okcheon Gunbuk	0.098	0.137	-0.399	0.135	-0.382	0.054	0.143	-1.637	0.143	-1.630
	Okcheon Icheon	0.057	0.137	-1.406	0.135	-1.375					
	Cheongwon Gadeok	0.031	0.149	-3.806	0.150	-3.838					
K-6	Geumsan Boku	0.145	0.139	0.035	0.141	0.024	0.131	0.140	-0.063	0.139	-0.063
	Daejon Munpyeong	0.112	0.142	-0.271	0.138	-0.236					
	Daejon Taepyeong	0.143	0.134	0.063	0.138	0.032					
K-7	Goisan Jeungpyeong	0.069	0.144	-1.100	0.151	-1.208	0.102	0.146	-0.441	0.148	-0.459
	Yeongi Jochiwon	0.136	0.165	-0.214	0.161	-0.187					
	Eumseong Daeso	0.030	0.142	-3.749	0.141	-3.699					
	Cheonan Bukmyeon	0.132	0.134	-0.015	0.138	-0.049					
	Cheonan Susin	0.119	0.138	-0.160	0.141	-0.185					
Cheongju Naeduk	0.139	0.148	-0.067	0.151	-0.088						
K-8	Kongju Banpo	0.186	0.165	0.113	0.161	0.132	0.186	0.165	0.113	0.161	0.132
K-9	Kongju Sinpung	0.171	0.140	0.179	0.141	0.176	0.135	0.145	-0.072	0.143	-0.060
	Buyeo Kyuam	0.072	0.137	-0.905	0.135	-0.881					
	Buyeo Buyeo	0.149	0.151	-0.014	0.148	0.004					
N-1	Bonghwa Myeongho	0.165	0.126	0.236	0.128	0.225	0.165	0.126	0.236	0.128	0.225
N-10	Kyeongsan Namsan	0.181	0.124	0.313	0.125	0.309	0.181	0.124	0.313	0.125	0.309
N-11	Daegu Bisan	0.134	0.169	-0.262	0.161	-0.205	0.134	0.169	-0.262	0.161	-0.205
N-12	Seongju Byeokjin	0.143	0.151	-0.060	0.148	-0.042	0.143	0.151	-0.060	0.148	-0.042
N-13	Koryong Koryong	0.138	0.152	-0.103	0.151	-0.096	0.138	0.152	-0.103	0.151	-0.096
N-14	Keochang Keochang	0.148	0.128	0.133	0.129	0.125	0.148	0.128	0.133	0.129	0.125
N-15	Hapcheon Jeokjung	0.167	0.118	0.293	0.118	0.291	0.158	0.123	0.217	0.124	0.214
	Hapcheon Hapcheon	0.149	0.129	0.132	0.129	0.128					
N-16	Euryong Bongsu	0.137	0.138	-0.010	0.138	-0.009	0.091	0.139	-0.531	0.138	-0.527
	Changnyeong Seongsan	0.044	0.139	-2.155	0.138	-2.141					
N-17	Hamyang Macheon	0.075	0.124	-0.652	0.128	-0.706	0.075	0.124	-0.652	0.128	-0.706
N-18	Euryong Euryong	0.163	0.140	0.136	0.141	0.132	0.109	0.138	-0.267	0.140	-0.281
	Jinju Chojeon	0.056	0.136	-1.445	0.138	-1.490					
N-19	Haman Chilwon	0.178	0.135	0.240	0.141	0.208	0.178	0.135	0.240	0.141	0.208
N-2	Cheongsong Pacheon	0.183	0.148	0.190	0.151	0.171	0.183	0.148	0.190	0.151	0.171
N-20	Kyeongju Sannae	0.172	0.132	0.235	0.141	0.180	0.175	0.142	0.187	0.147	0.160
	Milyang Gagok	0.175	0.148	0.153	0.151	0.136					
	Cheongdo Cheongdo	0.178	0.147	0.174	0.148	0.164					
N-3	Andong Gilan	0.104	0.129	-0.248	0.134	-0.296	0.112	0.131	-0.173	0.136	-0.213
	Andong Taehwa	0.120	0.133	-0.107	0.137	-0.141					
N-4	Yeongju Munjeong	0.149	0.140	0.062	0.137	0.081	0.121	0.138	-0.135	0.137	-0.130
	Yecheon Yecheon	0.094	0.136	-0.450	0.137	-0.465					
N-5	Munbyeong Nongam	0.121	0.117	0.027	0.112	0.067	0.104	0.126	-0.213	0.127	-0.219
	Munbyeong Munbyeong	0.088	0.135	-0.545	0.141	-0.611					
N-6	Sangju Kongsung	0.129	0.129	-0.004	0.127	0.018	0.129	0.129	-0.004	0.127	0.018
N-8	Kunwi Euiheung	0.184	0.129	0.300	0.112	0.389	0.184	0.129	0.300	0.112	0.389

Table 11. (Continued)

Content		Mean recharge rates for monitoring sites					Mean recharge rates for watershed				
		Recharge rates	With enter method		With stepwise method		Recharge rates	With enter method		With stepwise method	
Monitoring wells	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	
N-9	Kumi Wonpyeong	0.125	0.146	-0.172	0.141	-0.132	0.147	0.123	0.163	0.125	0.145
	Chilgok Gasan	0.169	0.099	0.410	0.110	0.349					
S-1	Imsil Imsil	0.188	0.118	0.371	0.118	0.372	0.151	0.118	0.217	0.118	0.219
	Jinan Maryeong	0.114	0.118	-0.038	0.118	-0.035					
S-2	Imsil Deokchi	0.158	0.149	0.054	0.141	0.108	0.158	0.149	0.054	0.141	0.108
S-3	Jasngu Sans대	0.182	0.140	0.226	0.141	0.223	0.182	0.140	0.226	0.141	0.223
S-4	Namwon Dotong	0.109	0.121	-0.120	0.115	-0.059	0.114	0.131	-0.151	0.124	-0.087
	Jangsu Beonam	0.124	0.149	-0.205	0.141	-0.137					
S-5	Posung Kyeombaeck	0.119	0.104	0.129	0.112	0.055	0.134	0.117	0.123	0.119	0.109
	Suncheon Woiseo	0.129	0.127	0.016	0.127	0.014					
	Hwasun Bukmyeon	0.142	0.104	0.270	0.112	0.208					
	Hwasun Iyang	0.151	0.126	0.164	0.118	0.219					
S-7	Goksung Godal	0.178	0.142	0.198	0.141	0.206	0.163	0.135	0.170	0.136	0.165
	Goksung Ipmyeon	0.187	0.115	0.385	0.127	0.322					
	Sunchang Sunchang	0.125	0.149	-0.191	0.141	-0.128					
S-8	Suncheon Hwangjeon	0.128	0.121	0.052	0.124	0.032	0.128	0.121	0.052	0.124	0.032
S-9	Hadong Hadong	0.170	0.149	0.121	0.141	0.171	0.133	0.149	-0.122	0.141	-0.062
	Hadong Hwagae	0.096	0.148	-0.554	0.141	-0.476					
ST-1	Kangjin Seongjeon	0.170	0.114	0.330	0.114	0.329	0.115	0.120	-0.047	0.124	-0.076
	Kangjin Chilryang	0.082	0.118	-0.448	0.111	-0.363					
	Goheung Daeseo	0.088	0.121	-0.380	0.115	-0.306					
	Suncheon Seungju	0.065	0.140	-1.161	0.141	-1.169					
	Suncheong Pungdeok	0.164	0.128	0.218	0.141	0.138					
	Jangheung Jangheung	0.139	0.102	0.267	0.111	0.198					
	Haenam Haenam	0.082	0.121	-0.481	0.115	-0.401					
	Haenaum Hyeonsan	0.040	0.140	-2.498	0.161	-3.037					
ST-1	Suncheon Seungju	0.065	0.140	-1.161	0.141	-1.169	0.115	0.120	-0.047	0.124	-0.076
	Suncheong Pungdeok	0.164	0.128	0.218	0.141	0.138					
	Jangheung Jangheung	0.139	0.102	0.267	0.111	0.198					
	Haenam Haenam	0.082	0.121	-0.481	0.115	-0.401					
	Haenaum Hyeonsan	0.040	0.140	-2.498	0.161	-3.037					
ST-2	Geoje Sinhyeon	0.157	0.140	0.107	0.151	0.034	0.150	0.146	0.025	0.151	-0.012
	Jinhae Jaeun	0.143	0.152	-0.065	0.151	-0.061					
W-1	Siheung Gunja	0.063	0.150	-1.375	0.151	-1.400	0.063	0.150	-1.375	0.151	-1.400
W-3	Cheonan Seonggeo	0.164	0.136	0.170	0.138	0.155	0.131	0.136	-0.040	0.138	-0.059
	Pyeongtaek Tongbok	0.098	0.136	-0.392	0.138	-0.417					
W-4	Tangjin Tangjin	0.112	0.115	-0.023	0.112	-0.004	0.095	0.132	-0.390	0.129	-0.356
	Seosan Seoknam	0.031	0.152	-3.916	0.141	-3.548					
	Seosan Unsan	0.188	0.118	0.371	0.118	0.372					
	Taeon Wonbuk	0.121	0.135	-0.117	0.141	-0.165					
	Taeon Taeon	0.031	0.152	-3.916	0.141	-3.548					
	Hongsung Hongsung	0.086	0.118	-0.375	0.118	-0.372					

Table 11. (Continued)

Content		Mean recharge rates for monitoring sites					Mean recharge rates for watershed				
		Recharge rates	With enter method		With stepwise method		Recharge rates	With enter method		With stepwise method	
Monitoring wells	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	Estimated value		Relative residual	Estimated value	Relative residual	
W-5	Asan Dogo	0.117	0.127	-0.087	0.118	-0.008	0.149	0.128	0.143	0.122	0.183
	Asan Deuksan	0.153	0.121	0.205	0.110	0.281					
	Yesan Yesan	0.142	0.144	-0.021	0.141	0.004					
	Yesan Oga	0.185	0.117	0.364	0.118	0.360					
W-6	Gochang Gosu	0.159	0.134	0.156	0.141	0.113	0.155	0.136	0.123	0.141	0.090
	Mokpo Yongdang	0.147	0.139	0.051	0.141	0.041					
W-7	Wanju Gosan	0.177	0.140	0.206	0.141	0.204	0.141	0.116	0.175	0.118	0.164
	Wanju Yongjin	0.134	0.110	0.176	0.112	0.162					
	Jeonju Mansung	0.131	0.110	0.154	0.112	0.140					
W-8	Kimje Bongnam	0.140	0.097	0.310	0.081	0.420	0.137	0.101	0.264	0.099	0.278
	Jeongeup Sintaein	0.170	0.095	0.440	0.097	0.430					
	Jeongeup Ongdong	0.102	0.108	-0.062	0.110	-0.075					
Y-1	Danyang Danyang	0.122	0.094	0.232	0.112	0.078	0.122	0.094	0.232	0.112	0.078
Y-2	Jangsung Hwangryong	0.134	0.086	0.357	0.087	0.353	0.134	0.086	0.357	0.087	0.353
Y-3	Hwasun Neungju	0.095	0.153	-0.623	0.141	-0.492	0.126	0.138	-0.098	0.131	-0.036
	Hwasun Iyang	0.189	0.108	0.427	0.110	0.420					
Y-4	Kwangju Yudeok	0.092	0.126	-0.368	0.124	-0.347	0.100	0.124	-0.243	0.123	-0.232
	Jangsung Namnyeon	0.108	0.123	-0.136	0.123	-0.135					
Y-5	Naju Samdo	0.140	0.100	0.282	0.098	0.297	0.145	0.108	0.250	0.108	0.255
	Muan Mongtan	0.183	0.089	0.512	0.084	0.543					
	Muan Muan	0.114	0.115	-0.005	0.112	0.013					
	Hampyeong Sinkwang	0.146	0.123	0.154	0.127	0.129					

주, 해남현산, 시흥군자 등이 해당된다.

5.2 소유역별 비교

Fig. 3은 소유역별로 평균 지하수 함양율과 모형에 의하여 추정된 평균 지하수 함양율을 산점도로 나타낸 것이다. 추정된 소유역별 평균 함양율은 기존의 소유역별 평균 함양율에 비해 넓게 퍼져있지 않는 것으로 나타났으며, 소유

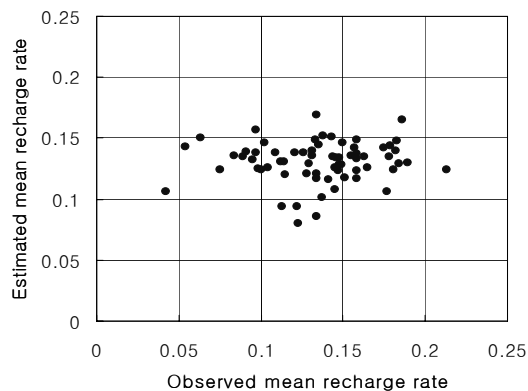


Fig. 3. Scatter plot of observed and estimated mean recharge rates for watersheds

역별 평균 함양율의 표준오차(모평균과 표본평균 사이의 오차를 나타내는 통계량)를 비교한 결과 기존 0.000742에서 0.000425로 줄어든 것으로 나타났다. 이와 같이 표준오차가 줄어들었다는 것은 본 모델에 의한 소유역별 함양율 추정이 유용함을 의미한다.

5.3 소유역별 상대잔차 분석

소유역별 평균 지하수 함양율의 상대잔차를 산점도로 표현해보면 대부분 상대잔차가 -0.5~0.5 사이에 분포하며, -0.5보다 작은 소유역이(E-6, H-3, H-6, K-5, N-16, N-17,

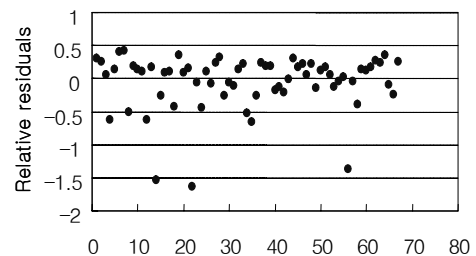


Fig. 4. Plot of relative residuals of estimated mean recharge rates for watersheds

W-1) 7곳이 발견되었다(Fig. 4). 이들의 특징은 소유역내의 관측지점 중 상당히 낮은 함양율을 갖는 지점이 포함되어 있으며, 또한 이들 관측지점에서의 추정된 함양율은 거의 비슷한 값을 갖고 있다는 것이다. 따라서 이들 관측 지점들은 4개의 특성 변수가 유사한 특성을 갖고 있다고 볼 수 있다. 즉, 이들 상대잔차가 크게 나타난 소유역내의 관측 지점중에서 추정된 함양율은 다른 지점과 비슷한데 실제 당초 함양율이 크게 차이가 나는 지점에 대하여는 특성 변수에 대한 재조사 또는 기타 인자에 대한 조사 등을 수행할 필요가 있다고 본다.

5.4 소유역별 대표성 검토

소유역별 추정된 평균 지하수 함양율이 대표성을 갖는지를 파악하기 위하여, 기존의 지하수 함양율로부터 구한 표준편차와 추정된 값으로부터 구한 표준편차를 계산하여 산점도를 작도해 보았다(Fig. 5). 추정된 지하수 함양율에 의하여 계산된 소유역별 표준편차가 2개의 소유역을 제외

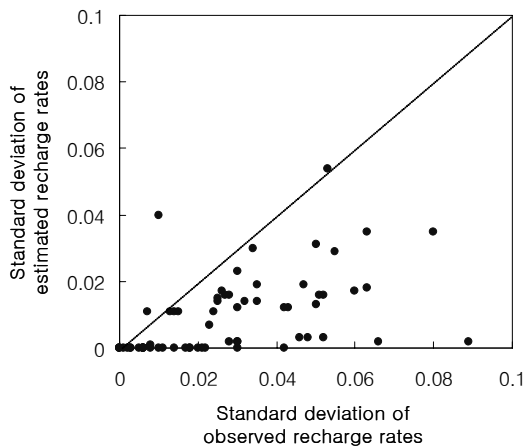


Fig. 5. Scatter Plot of standard deviations of estimated and observed mean recharge rates for watersheds

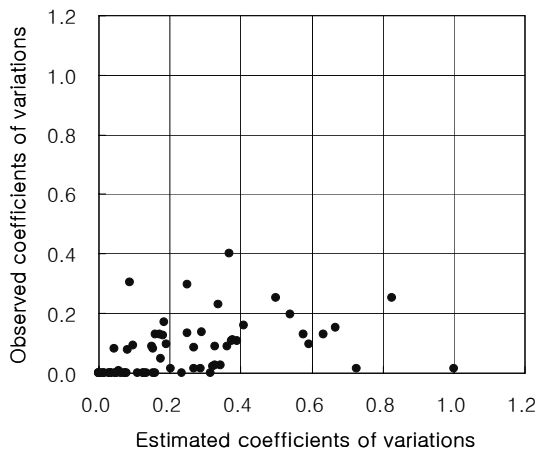


Fig. 6. Scatter plot of coefficients of variations for estimated and observed recharge rates at each watershed

하고는 모두 작아진 것으로 나타났고 2개 유역도 크기는 0.05이하로 나타났다. 이것으로 보아 현재 선택된 4개의 요인인 인근하천까지 거리, 암석의 성인, 인근하천의 규모, 지형의 경사도를 관측지점의 특성 벡터로 본다면 상당히 대표성을 갖는다고 할 수 있다.

한편, 소유역별로 함양률의 변동계수가 0.5이상이 되는 경우에 평균 지하수 함양율은 소유역을 대표하기 어렵다고 고려한 바 있다. 이 경우 변동계수가 0.5이상인 소유역은 기존에 약 18%였으나, 평균 함양율이 최대와 최소인 군집을 제거하게 되면 약 14%로서 4%가량 줄어들었다.

또한 상기에서 구축한 모형을 토대로 추정된 지하수 함양율(입력법 및 단계선택법에 의한 회귀분석)의 변동계수와 기존 함양율의 변동계수를 도시해 보면 Fig. 6에서 보는 바와 같이 0.5이상이 되는 비율이 현저히 낮아 졌음을 알 수 있다. 즉 변동계수가 0.5 이상인 경우가 기존 지하수 함양율에서는 약 14%이나 추정된 지하수 함양율의 경우에는 약 2%(입력법) 및 약 4%(단계선택법)로서 매우 낮은 모형의 구축은 선택된 특성변수의 소유역별 대표성 획득면에서는 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

6. 결론 및 건의

본 연구에서는 기 구축 운영중인 국가지하수 관측소의 지하수위 변동자료로부터 산정된 지하수 함양율을 활용하여 지하수 관측소가 설치되지 않은 미계측 지역에서의 지하수 함양율 추정을 위한 회귀모형을 수립하였다. 지하수 함양율에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 인근하천규모, 하천까지 거리, 지형경사도, 암석성인 등으로 나타났으며, 이들은 지형도 및 지질도를 활용하여 도상에서 직접 추출할 수 있기 때문에 실제 적용성이 용이하다. 아울러, 본 연구에서는 지하수 함양율에 영향을 미치는 4가지 인자의 상호작용까지 고려함으로써 4가지 인자로 단순화 시킴으로 인해 발생할 수 있는 취약성을 보완하고자 하였다. 지하수 관측소의 관측 자료는 지하수 함양율 산정의 기초 자료 역할을 수행하였으며, 320개 관측소의 총 478개 관측정이 장기간 운영되어 보다 많은 관측자료와 특성자료가 축적된다면 본 모형을 더욱 발전시켜 입력 인자가 단순하면서도 적용성이 개선된 모형을 수립할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2002), *지하수관리 기본계획*, 건설교통부, p. 112.
2. 건설교통부·한국수자원공사 (1995), *지하수자원 기본조사(3차)*

- : 지하수 관리조사 보고서, p. 349.
3. 건설교통부·한국수자원공사 (1996), *지하수 관리 기본계획 보고서*, p. 30.
 4. 건설교통부·한국수자원공사 (1999), *지하수위 장기관측 자료를 활용한 함양량 산정기법 연구 보고서*, 건설교통부, 한국수자원공사, 대전, p. 165.
 5. 건설교통부·한국수자원공사 (2003), *국가지하수관측망 관리 시스템 보고서*, 한국수자원공사, p. 411.
 6. 건설교통부·한국수자원공사 (2005), *국가지하수 관측망 운영 관리 최적화 방안 연구 보고서*, 한국수자원공사, p. 266.
 7. 구민호, 김형수 (2001), 지하수 및 토양의 온도관측 자료를 이용한 함양량 산정기법, *한국지하수토양환경학회 추계학술 발표회 논문집*, pp. 83~87.
 8. 구민호, 이대하 (2002), 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, *대한지질학회지*, 38(3), 407~420.
 9. 김규범 (2004), *지하수 관측망 최적 설계 및 시계열 자료 해석*, 서울대학교 박사학위 논문, p. 391.
 10. 김규범, 이명재, 김정우, 이진용, 이강근 (2004), 수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가지하수 관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가, *지질공학*, 14(3), 313~323.
 11. 박재성, 김경호, 전민우, 김지수 (1999), 소유역의 지하수 함양을 추정기법, *지하수환경*, 6(2), 76~86.
 12. 이동률 (1995), *지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량 예측*, 고려대학교 박사학위 논문.
 13. 제주도·한국수자원공사 (2003), *제주도 수문지질 및 지하수 자원 종합조사(3)*, 제주도, p. 425.
 14. 최병수, 안중기 (1998), 지역단위 지하수 자연함양을 산정방법 연구, *지하수환경*, 5(2), 57~65.
 15. 한국수자원공사 (1993a), *지하수자원기본조사 보고서*, 한국수자원공사, p. 342.
 16. 한국수자원공사 (1993b), *제주도 수자원 종합개발계획 보고서*, 제주도, p. 933.
 17. 한국수자원공사 (1994), *지하수자원 기본조사(2차) : 지하수 이용관리방안 수립 및 대체용수원 개발지역 선정조사*, 한국수자원공사, p. 405.
 18. Rorabough, M. L. (1963), Stream-bed percolation in development of water supplies, in *Method of Collecting and Interpreting Groundwater Data*. R. Bentall (ed.), *U.S. Geological Survey Water Supply Paper* 1544-H, Reston, VA; U.S. Geological Survey, 47~62.
 19. Scanlon, B.R., Healy, R.W., and Cook P.G. (2002), Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, *Hydrogeology Journal*, 10, 18~39.

(접수일: 2008. 10. 23 심사일: 2008. 11. 4 심사완료일: 2008. 11. 19)