

지하수위 유형과 유역별 지하수 함양률의 관련성 연구 : 국가 지하수 관측망 자료의 분석

문상기^{1*} · 우남칠¹ · 이광식²

¹연세대 지구시스템과학과 · ²한국기초과학지원연구원

A Study on the Relation between Types and Recharges of Groundwater : Analysis on National Groundwater Monitoring Network Data

Sang-Ki Moon^{1*} · Nam-Chil Woo¹ · Kwang-Sik Lee²

¹Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University · ²Korea Basic Science Institute

ABSTRACT

This study is objected to demonstrate the spatial variability of the ground-water recharge by classifying the types of ground-water hydrographs and assessing the recharge ratio(the ratio of the rise of ground-water level to cumulative precipitation) of each type using the National Ground-water Monitoring network data. A total of 5 types were identified by factor analysis on the ground-water hydrographs nationwide. The recharge ratio of each type were estimated to be 6.5 % (TYPE I), 4.1 % (TYPE II), 9.2 % (TYPE III), 5.8 % (TYPE IV), 15.3 % (TYPE V) in the confidence level of 95.44 % and 6 % variation was estimated site by site even in the same type. The recharges of Han, Nakdong, Keum, Youngsan · Seomjin river basins were estimated as 10.0 %, 6.1 %, 8.3 %, and 6.6 % respectively. These results were consistent with the results of the existing baseflow method.

Key Words : Recharge Ratio, Factor Analysis, Ground-Water Hydrograph, National Ground-water Monitoring Network

* Corresponding author : skmun@ysgeo.yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2002. 8. 9 개재승인일 : 2002. 8. 23

요약문

본 연구의 목적은 국가 지하수 관측망 자료를 활용하여 우리 나라 지하수위 변동 곡선의 유형을 구분하고, 각 유형별 함양률을 평가하여 지하수 함양률의 공간적 변동성을 규명하는 데 있다. 전국 지하수의 수위 변동 곡선을 구분하기 위하여 요인 분석 방법을 사용했으며 그 결과 총 5 개의 유형으로 구분하였다. 유형별 함양률은 95.44 %의 신뢰도 수준에서 6.2 %(유형 I), 4.1 %(유형 II), 9.2 %(유형 III), 5.8 %(유형 IV), 15.3 %(유형 V)로 추정되었으며, 한 유형에서도 관측 지점별로 약 6 %의 변화폭을 보였다.

지하수위 변동 곡선법을 이용하여 유역별로 지하수 함양률을 평가한 결과 한강과 금강 유역에서는 각각 강수량 대비 10.0 %, 8.3 %의 함양률을 보였고, 낙동강 및 영산강·섬진강 유역에서는 각각 6.1 %, 6.6 %의 함양률을 보였으며 기저유출법에 의해서 유역별로 함양률을 추정한 연구의 결과와 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구를 통하여 지하수 함양률이 수위 변동 곡선의 유형별 혹은 유역별로 변동성을 가짐을 규명할 수 있었다.

주제어 : 함양률, 요인분석, 지하수위 변동 곡선, 국가 지하수 관측망

1. 서 론

주변 수리지질학적 환경 조건에 악영향을 초래하지 않는 범위에서 개발되어야 하는 지하수의 적정 개발가능량은 해당유역의 지표수 부존량 및 지하수 개발가능량, 용수수요와 이용양상, 타 유역에서의 용수배분 양상, 지하수 개발의 경제성 등을 종합적으로 고려한 후 지하수 함양량 이하로 결정해야 한다¹⁾. 그러므로 지하수의 적정 개발 가능량을 알기 위해서 필수적으로 함양량을 정량화해야 하는데 이 양은 지하수 함양률과 해당 유역의 강수량의 곱으로서 결정된다.

지하수 함양률은 지질, 토양, 지형, 식생, 기후 등 수많은 수리지질학적 인자들에 의해서 결정된다. 그러므로 같은 충적층 지하수의 지하수위 관측자료일지라도 여러 요인들에 의해서 다른 양상의 수위변동곡선이 만들어질 뿐만 아니라 그 함양률도 상당한 차이를 보이게 된다. 따라서, 만약 지질 매체의 비균질성과 이방성을 무시한 채 지하수 함양률을 일률적으로 제시하게 되면 제시된 함양률보다 물이 적게 함양되는 지역에서는 지하수의 적정 개발 가능량을 초과하여 채수함으로써 결과적으로 수위감소 및 지하수 고갈 그리고 이로 인한 지반 침하 등의 각종 지하수 장애를 야기시킬 수 있다. 그러므로 지질매체의 비균질성과 이방성

을 고려하여 지하수 함양률의 공간적인 변동성을 파악하는 것은 지하수 장애를 피하고 합리적인 지하수 개발 및 보전을 위한 필수적인 단계라고 할 수 있다.

지하수 함양률을 추정하는 방법은 크게 물리적인 방법과 화학적인 방법 그리고 수치적인 방법으로 나뉘어 진다²⁾. 국내 많은 연구자들은 연간 지하수 개발가능량 또는 지하수 함양량을 추정하기 위하여 다양한 방법을 사용하였다. 국내외적으로 많이 이용되는 물수지 방법^{3, 4)}은 사용된 이론이 명확하지만 증발산량 계산이 어렵다는 단점이 있고 기저유출분리 방법^{1, 5)}은 함양기간의 기저유출곡선 선정과 감수곡선의 시점과 종점을 결정함에 있어서 임의성이 존재하지만 지하수위의 자연상태를 잘 반영한다는 장점이 있다. 박창근⁵⁾은 지하수위의 감수 기간뿐만 아니라 함양 기간까지 고려하여 하천 유출 곡선으로부터 기저유출을 분리하는 방법을 우리나라 5대강 유역에 적용하였고 원이정 등⁶⁾은 기존의 강수량 대비 비율 대신 하천 유출량 대비 비율로서 지하수 개발가능량을 산정한 기저유출분리 방법을 낙동강 유역에 적용한 바 있다. 지하수위 감수 곡선법⁷⁾은 지하수위 자료만을 이용하여 지하수위 감수 기간으로부터 지하수위 월강하량과 최대 강하량의 비에 비례하는 지하수 함양률을 추정하는 기법으로서 이 방법은 미지의 지하수 함양률이 통계적으로 강우량의 18 % 내외라고 가정한 결과로써 수식의 변수값을 산

정하였다”는 문제가 있다. 동위원소를 이용한 방법⁸⁾은 강수와 지하수의 유량 및 동위원소 조성을 이용한 혼합방정식을 사용하여 무강우 기간 후 첫 번째 강수에 의한 일시적인 최대 함양률만을 계산하는 방법이고 지하수위 변동곡선 해석법⁹⁾은 일평균 지하수위와 지하수위 변동에 영향을 미치는 누적강수량과의 비율과 비산출률(Specific Yield: S_y)의 곱으로서 함양률을 산정하는 방법으로서 이를 위하여 지하수위 변동값과 강수량에 대한 교차상관관계분석(Cross Correlation)을 실시하였다.

Winter 등¹⁰⁾은 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)을 이용하여 소규모의 호수 수역(Lake-Watershed)에서 나타나는 지하수위 곡선의 유형을 분류한 바 있다. 이러한 분석을 통하여 (1) 지하수의 함양 특성과 (2) 지질학적 특성이 지하수위 변동에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 또한 (3) PCA를 통하여 장기 모니터링을 위한 관정의 수를 줄이므로써 모니터링 프로그램의 비용을 경제적으로 절감할 수 있었다.

본 연구의 목적은 국가 지하수 관측망 자료를 활용하여 우리 나라 지하수위 변동 곡선의 유형을 구분하고, 지하수위 변동곡선 해석법으로 각 유역별 함양률을 평가하여 지하수 함양률의 공간적 변동성을 규명하는 데 있다.

2. 연구 방법

천부 대수층에서의 지하수 함양률을 계산하기 위하여 남한 내륙 지역에 분포하는 국가 지하수 관측망 중 66개 관측소의 천부 대수층 수위 자료¹¹⁾와 한국기상청에서 제공하는 일별 강수량자료¹²⁾를 이용하였다. 수위 자료는 1999년 1월 1일부터 12월 31일까지 관측된 자료이다. 또한 한국수자원공사¹³⁾에서 전국의 4 대 유역권의 충적층에서 총 29개의 시추지점으로부터 양수시험을 통하여 측정한 저류계수를 이용하였다. 지하수 함양률은 문상기와 우남칠¹⁴⁾에서 사용된 지하수위 변동곡선법을 이용하여 평가하였으며, 계산된 함양률을 검

증하기 위하여 기존의 기저유출 분리방법에 의한 유역별 지하수 함양률과 비교, 검토하였다.

전국 66개 지점의 지하수위 곡선을 유형별로 분류하기 위하여 요인분석을 실시하였고 각 유형별 함양률의 범위와 통계값을 파악하여 분류된 지하수위 곡선의 유형별 함양률을 특성화하였다. 지하수위 곡선은 일반적으로 다양한 수리지질학적 변수들의 조합에 의하여 변동한다. 지하수위 곡선에 영향을 미치는 수리지질학적 변수들을 파악하기 위한 연구의 일환으로서 국가 지하수 관측망의 천부 대수층 자료에 대하여 상관계수분석을 실시하였고 각 유형별 수리지질학적 변수들을 특성화하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 천부 대수층 자료에 대한 상관성분석

유역의 종류, 관정의 표고, 연평균지하수위, 비포화 대두께, 모암의 종류, 토양별 두께, 표토층의 종류, 투수량계수, 수리전도도, 수위의 진폭 등 총 10 개 변수에 대해서 상관관계분석(Correlation Coefficient Analysis)을 실시하였다. 관측망 설치시 제공되는 관정의 제원표¹⁵⁾에 따라 유역은 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강으로 구분되었고, 모암의 종류는 화강암, 편마암, 세일, 화산암, 퇴적암(세일 제외), 화성암(화강암 제외)으로 분류되었다. 또 표토층의 종류는 모래층, 실트층, 자갈층, 사력층, 점토층, 전석층이며 각각의 두께를 분석에 이용하였고 토양의 종류는 모래층, 실트층, 점토층, 자갈층, 풍화암층, 사력층, 전석층, 연암층이며 각각의 두께를 분석에 이용하였다.

상관관계분석은 변수의 속성에 관계없이 사용할 수 있는 통계분석 기법으로서 유역의 종류, 모암의 종류와 같은 정성적인 변수도 사용 가능하다¹⁶⁾. 본 연구에서 사용된 66개 case의 경우, 95 % 신뢰도를 보이는 상관계수(r)는 0.204이고, 99.99 % 이상의 신뢰도를 나타내는 r 값은 0.375이다. 99.99% 이상의 신뢰도를 보이는 변수들의 쌍($r > 0.375$)은 r 값의 크기순으로 표고와 연평균지하수위(0.999), 점토층과 점토표토층(0.953), 사력층과 사력표토층(0.893), 실트층

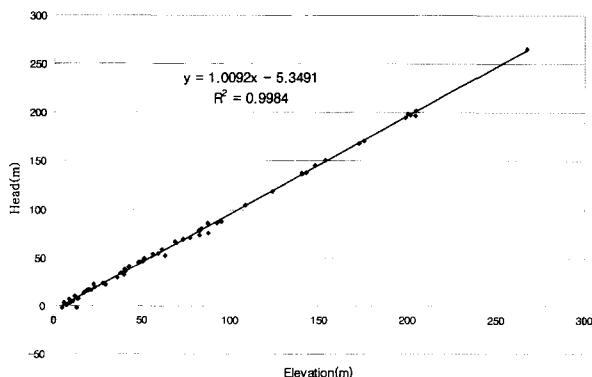


Fig. 1. Correlation between the elevation of sites and annual mean of ground-water level.

과 실트표토층(0.838), 전석층과 전석표토층(0.576), 표토층과 진폭(0.573), 점토층과 진폭(0.532), 낙동강 유역과 세일(0.493), 모래층과 모래표토층(0.491), 자갈층과 자갈표토층(0.486), 진폭과 비포화대두께(0.478), 점토표토층과 비포화대두께(0.454), 점토층과 비포화대두께(0.404)이다.

표고와 연평균지하수위가 매우 높은 상관관계를 보이고 있는데(Fig 1), 이는 고도가 높아질수록 지하수위 또한 높아지는 것을 의미한다. 단순회귀분석을 통하여 나타난 두 변수간의 관계식은 다음과 같다.

$$y = 1.009 \times x - 5.349$$

여기서,

x : 표고(해발고도, m), y : 지하수위(m)

이 관계식의 상관계수(r)은 0.999로서 표고와 지하수위 간에 매우 강한 상관관계를 보이고 r^2 는 0.998로서 회귀식이 사용된 자료의 99.8%를 설명함을 의미한다. x 의 기울기 및 y 절편은 모두 99.9%의 신뢰도를 갖는다. 따라서 이 회귀식을 사용하여 표고에 대한 지하수위를 예측할 수 있다. 이식을 유추하는 데 사용된 관측공 자료들의 표고는 5.374 m ~ 267.172 m의 범위에 있었으며, 이를 관측공에서는 연평균지하수위가 표고보다 약 5.4 m 이하에 존재하고 있음을 알 수 있다. 류성렬¹⁵⁾은 농업기반공사에서 1970년도부터 1998년까지 개발한 전국(제주도 제외) 479 개 관

정의 해발표고와 자연수위와의 단순회귀분석 결과 다음과 같이 높은 상관 관계가 있음을 밝혔다.

$$y = 0.9896 \times x - 5.4859$$

본 연구의 결과와 비교해볼 때 두 경우 모두 관정의 해발표고와 지하수위가 높은 상관관계를 가질 뿐만 아니라, 지하수위가 표고에 대해서 5.349 m ~ 5.486 m 이하에 존재함을 지시하고 있다.

실트층과 실트표토층의 상관관계가 비교적 크게 나타난 것은 실트층이 존재하는 곳이 66개 지점 중 3개 지점(청주내덕, 5 m : 군위의홍, 1 m : 시흥군자, 6 m)으로, 이 때 실트층이 모두 표토층을 이루고 있기 때문이다. 사력층과 사력표토층 역시 2개 지점(천안성거, 8 m : 예산예산, 4 m)에서만 존재하며 표토층을 형성하고 있어 상관성이 크게 나타난다. 점토층과 점토 표토층의 경우 66개소 중 31개소가 점토층을 함유하고 있으며, 그 중 30개소에서 점토층이 표토층을 형성하므로 두 변수의 상관성이 매우 크게 나타났다. 따라서 실트층, 사력층, 점토층은 모두 표토층으로 존재하므로 두께에 상관없이 두 변수의 상관성이 매우 크게 나타났다.

낙동강 유역은 주로 세일을 포함하는 중생대 지층(경상누층군과 대동층군)으로 구성되어 있으나 불국사화강암의 관입에 의해서 낙동강 유역과 세일의 상관성이 낮아진 것으로 해석된다. 비포화대 두께는 점토층, 점토표토층, 수위 진폭과 관련되어 있다. 비포화대 두께는 표고와 연평균 지하수위의 차이로서 계산되었기 때문에 수위의 연최고 변화폭으로서 계산된 진폭과 상관성이 나타난다. 하지만 비포화대 두께에 영향을 미치는 것은 연평균 지하수위이므로 진폭과 비포화대 두께가 비례하지는 않는다.

점토층과 비포화대두께 및 점토표토층과 비포화대두께에도 상관성이 나타났다. 점토층은 언급한 바와 같이 표토층으로서 존재한다. 따라서 점토층이 상부 대수층에 존재하므로써 함양이 저지되어 결과적으로 지하수위면이 하부에 존재되고 따라서 비포화대두께가 두꺼워진다고 해석할 수 있다. 또한 전술한 바와 같이 비포화대는 진폭과 상관성을 보이게 되므로, 결과적으

로 점토총과 진폭 및 점토표토총과 진폭 상호 간에도 상관성이 존재한다. 모래총과 모래표토총, 자갈총과 자갈표토총 및 전석총과 전석표토총이 점토총과 점토표토총과 달리 상관성이 낮게 나타난 이유는 토총이 존재하되 표토총으로 존재하는 비율이 적기 때문이다.

3.2 요인분석(Factor Analysis)을 이용한 지하수 위 변동자료 분류

요인분석은 방대한 양의 자료를 행렬로 나타낸 후 행렬의 조작을 통해서 그 자료의 변동성과 변동의 주요 요인들을 찾아내는 통계적 자료분석 방법이다. 본 연구에서 사용한 요인 추출 방법은 주성분분석(Principal Component Analysis)이다¹⁶⁾. 주성분분석은 각각의 변수에 대한 분산과 공분산을 계산하여 공분산-분산 행렬(Covariance-Variance Matrix)을 만들고, 이 행렬로부터 고유벡터(Eigenvectors)와 고유치(Eigenvalues)를 찾아내어 자료값의 분포를 나타내는 공간상에서 그 벡터에 의한 새로운 좌표축을 찾는다. 이 새로운 좌표축에 대해서 기존의 자료들을 투영시킬 때 이 좌표축에 대해서 가장 많은 양의 자료를 설명할 수 있게 된다. 기존 좌표축의 값이 새로운 좌표축으로 투영된 값을 Principal Component Scores(PCS)라고 부르며, 벡터길이 즉, 고유치가 가장 큰 축이 제 1 주성분이 되고, 길이에 따라 제 2 주성분, 제 3 주성분이 결정되는데, 각각의 벡터는 서로 직교하며 상관성이 없게 되어 독립적인 변수로 작용한다. 원래의 변수값이 각 주성분과 얼마나 상관성이 있는지를 정량화한 것을 Principal Component Loading(PCL)이라고 한다. 이상의 고유벡터 즉, 주성분들과 PCS 및 PCL에 대해서 다수의 변수를 몇 가지 변수로 축소시킬 수 있고 원래의 자료를 그 대표적인 변수값에 속하는 자료들로서 분류할 수 있다.

본 연구에서는 66개소의 천부 대수총 관측정에서 측정한 지하수위 자료를 주성분 분석 기법으로 유사한 변동 유형별로 구분하였다. 요인 분석을 통하여 유사한 수위변동특성을 보이는 지점들은 군집화되고, 그 특성별 수위변동곡선은 각각의 수위변동들을 대표하는 ‘유형(Component)’이 된다. 자료분석을 위해서 통계 소프트웨어는 SPSS 10.0 for Windows¹⁷⁾를 사용하였으며, 요인분석을 하기 전에 하나의 인자가 아니라 여러 인자가 검출될 가능성이 있는지에 대한 분석을 시행하였다. 이 분석에서 사용된 검증통계값은 Bartlett의 sphericity 값으로서 이 값이 통계적으로 의미가 있어야 인자 분석의 의미를 찾을 수 있다. Table 1에서와 같이 SPSS 프로그램을 실행한 결과 sphericity 값은 55869.162, 유의수준은 0.000을 보여 통계적 의미가 있으며, 이는 66개 지점의 지하수위 자료에 대하여 인자 분석을 적용함에 있어 무리가 없음을 나타낸다. 뿐만 아니라 Table 1에서 Kaiser - Meyer - Olkin (KMO)의 값이 1에 가까울수록 인자 분석의 의미가 높아지는데 이 값이 0.8 이상이면 우수한 정도이다¹⁸⁾. 본 연구에서는 0.930 이므로 국가 지하수 관측망 자료의 지하수위에 대하여 인자 분석을 실시해서 자료를 단순화시켜 분류한다 해도 전혀 문제가 없음을 시시한다.

전술한 바와 같이 요인 분석을 통하여 ‘설명된 총분산(Total Variance Explained)’은 Table 2 와 같다.

Table 2에서 ‘Initial Eigenvalues’는 요인 변량의 크기를 나타내는 수치로서 이것이 크면 집단 중에서 차지하고 있는 비중이 상대적으로 높음을 의미한다. ‘% of Variance’는 각 고유값(Eigenvalues)이 설명한 분산의 양으로서 해당 변수의 공분산에서 차지하는 비율이 된다. 따라서 요인으로 분류될 경우 이

Table 1. KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy		0.930
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	55869.162
	Degree of Freedom	2145
	Significance	0.000

Table 2. 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

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Table 3. Rotated component matrix

	Component				
	1	2	3	4	5
KAKEUM	0.957	0.0329	-0.202	-0.0642	0.0306
BEOMSEO	0.183	0.828	-0.039	0.236	0.116
BONGSOO	0.290	0.287	0.797	0.322	0.0650
SUNGSAN	0.128	-0.148	-0.065	-0.892	-0.020
SHINKOK	0.238	0.336	0.251	0.0189	0.789
...

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

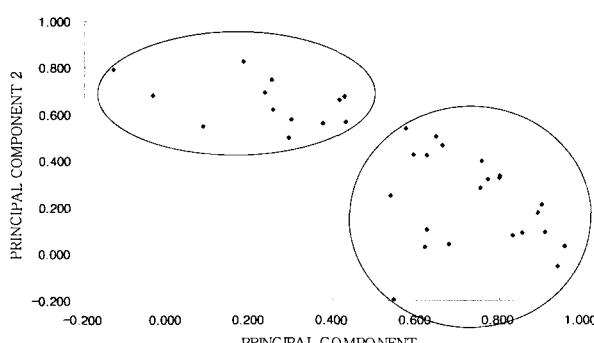


Fig. 2. Scatter plot of component loadings for principal component 1 versus principal component 2 for water levels after Kaiser's Varimax rotation.

값이 높을수록 설명력이 있는 독립적인 요인인 된다. 'Cumulative %' 는 '% of Variance' 의 누적값을 산출한 것이다. 본 연구에서는 요인들이 설명한 분산의 총량인 'Cumulative %' 를 기준으로 요인의 수를

결정하였다¹⁸⁾. 즉, 80 % 이상의 분산을 설명하는 데 이용되는 요인들만을 추출하였다. 따라서 Table 2에서 전체의 81.6 %를 설명할 수 있는 5 개의 요인을 추출하였다.

전체 변수들(지점의 수위변동곡선)을 유사한 특성이 보이는 유형들로 분류하기 위해서 Varimax Rotation 방법을 사용하였다. Fig 2는 회전 후에 5 개의 성분 중 성분 1과 2에 대한 PCL의 분포를 보여준다. Table 3은 판축소별로 분석된 회전된 성분 행렬(Rotated Component Matrix)이다. 행렬 요소의 절대값을 통하여 한 변수가 어느 성분(유형)에 더 큰 영향을 미치는지 파악할 수 있다. 충주가금은 유형 I에 부하량이 크게 걸려 있고, 울산범서는 유형 II에, 의령봉수는 유형 III에, 창녕성산은 유형 IV에, 의정부신곡은 유형 V에 부하량이 각각 크게 걸려 있다. 이와 같은 결과로부터 66개 지점의 천부 대수총 지하수위가 각각 어떤 유형에 큰 부하량이 걸렸는지를 분석

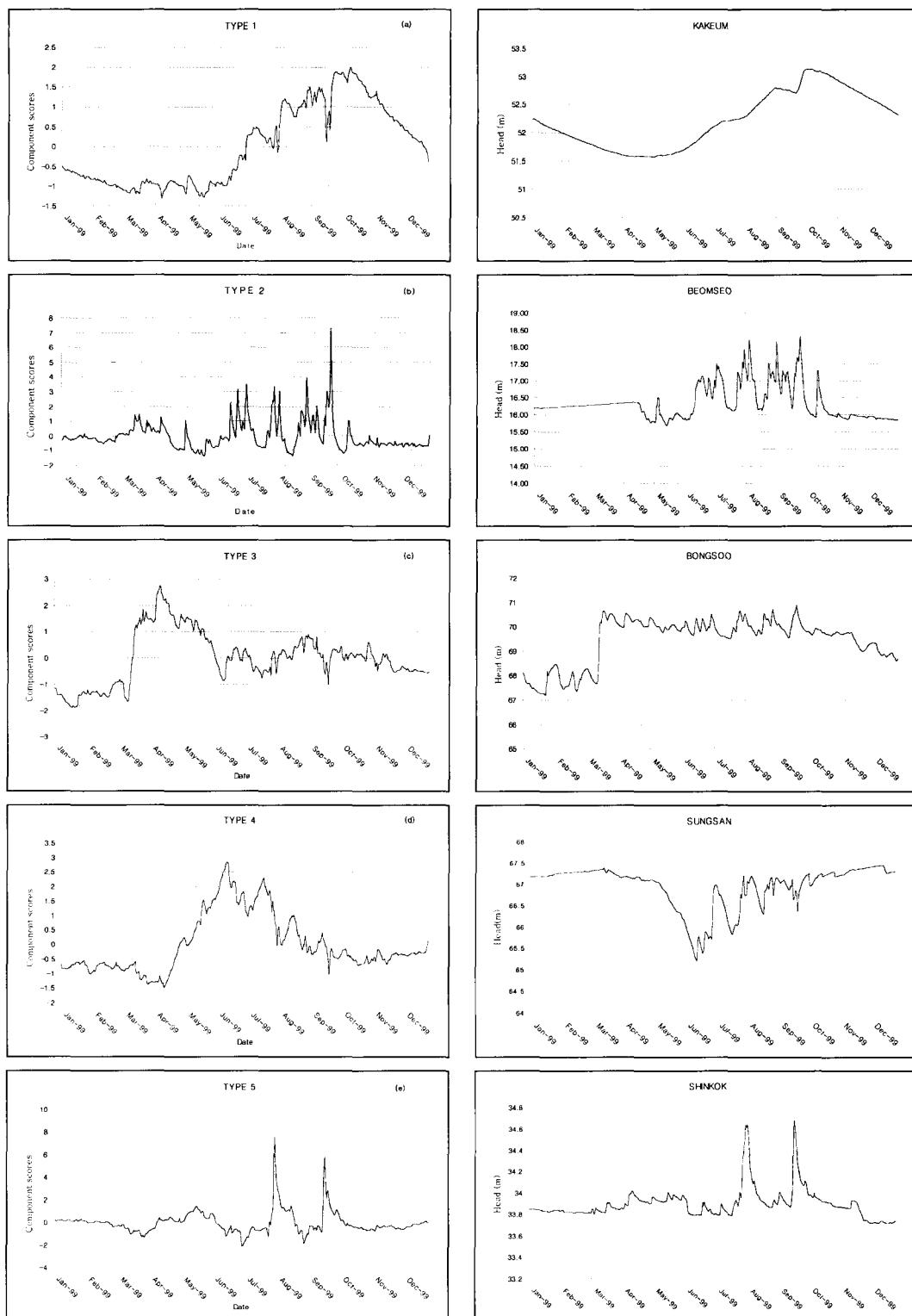


Fig. 3. Component scores and ground-water hydrograph pairs for (a) TYPE I - KAKEUM ; (b) TYPE II - BEOMSEO ; (c) TYPE III - BONGSOO ; (d) TYPE IV - SUNGSAN ; (e) TYPE V - SHINKOK.

Table 4. Factors of water-level fluctuation of different types

Type	Sites	PCL	Elevation	Annual Mean Head	Depth to Water	Geology	Sand	Gravel	Weathered zone	Clay	Lithic Fragments	Basin	Amplitude (unit : m)
I	Kakeum	0.957	63.04	52.23	10.82	Granite	0.97	0	0.03	0	0	Han	1.56
	Dongryang	0.941	82.63	74.03	8.60	Granite	0.46	0	0.06	0.12	0.36	Han	1.57
	Tongbok	0.910	9.63	2.98	6.65	Gneiss	0	0	0.64	0.36	0	Han	0.94
II	Beomseo	0.828	19.52	16.35	3.17	Shale	0	0	0	0.16	0.84	Nakdong	2.63
	Oriyang	0.793	12.34	10.16	2.18	Shale	0.08	0	0	0.92	0	Nakdong	0.94
	Ipnyun	0.747	82.45	77.96	4.48	Gneiss	0	0	0	0.11	0.89	Seomjin	2.59
III	Bongsoo	0.797	73.56	69.45	4.11	Shale	0	0.76	0	0.24	0	Nakdong	3.68
	Poongduk	0.723	6.30	3.30	2.99	Volcanic	1	0	0	0	0	Seomjin	1.33
	Ongdong	0.708	22.92	22.76	0.16	Volcanic	0	0	0	1	0	Youngsan	1.36
IV	Sungsan	-0.892	41.39	37.08	4.31	Sedimentary	0.93	0	0	0	0.07	Nakdong	2.40
	Chunbook	-0.862	68.82	66.95	1.87	Volcanic	0.53	0.20	0	0.27	0	Han	2.24
	Mansung	-0.737	36.32	29.35	6.96	Granite	0	0.14	0	0.43	0.43	Nakdong	2.38
V	Shinkok	0.789	39.00	33.90	5.10	Granite	1	0	0	0	0	Han	0.96
	Yunhyun	0.702	50.37	47.03	3.34	Granite	1	0	0	0	0	Han	2.52
	Hongje	0.664	20.36	16.47	3.89	Granite	0.39	0.36	0	0.26	0	Han	1.51

하여 유형별로 분류하였다. 이와 같이 파악된 유형들이 대표하는 지하수위 변동 곡선은 Fig 3 과 같다.

이 때 Principal Component Scores 그래프에 가까운 정도는 Table 3에서 확인할 수 있다(충주가금:0.957 : 울산범서:0.828 : 의령봉수:0.797 : 창녕성산:-0.892 : 의정부신곡:0.789). 행렬의 값 즉, PCL이 1에 가까울수록 두 그래프의 양상이 비슷하게 나타나고 1에서 멀어져 0으로 갈수록 그 양상이 달라짐을 확인할 수 있다. 또 행렬의 값이 음수인 창녕성산의 경우 부(negative)의 상관관계를 나타내고 있다. 즉, 한 그래프가 증가할 경우 다른 그래프는 감소하고 한 그래프가 감소할 경우 다른 그래프는 증가한다. 이것은 실제 수위 곡선들을 분류할 때 정의 상관관계보다는 부의 상관관계가 더 강한 요인이 존재함을 의미한다. 즉, 요인 4 와 그 양상이 가장 비슷하게 나타나는 지점인 밀양가곡은 PCL 이 0.664 밖에 되지 않지만 창녕성산의 경우 PCL 의 절대값이 0.892로서 상관성이 더 크므로 실제 그래프와 부의 상관성을 갖는 요인이 산출되었다.

분류된 지하수위 변동 곡선에 영향을 미친 수리지질학적 변수들에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

3.3 유형별 수위 변동 특성

지하수위의 변동은 강수량과 관련된 변수들(월평균 강우량, 강우 지속 기간, 강우 세기 등), 대수층에 영향을 미치는 하천수위 변동과 같은 외부 조건과 비포화대 두께, 토층의 깊이 및 구성, 모암의 종류, 표토층의 종류와 같은 내부 조건의 조합에 의해서 나타난다. 본 연구에서는 유형별 수위 변동의 원인을 정성적으로 규명하였다. 각 분류된 지점들 중 각 요인의 특성을 가장 잘 반영하는 지점들(PCL 상위 3 개 지점)을 분석하였다.

3.3.1 유형 I

PCL 상위 3 개의 경우 비포화대 두께가 평균 8.69 m로서 다른 유형들보다 두껍게 분포한다(Table 4). 비포화대 두께가 두꺼울수록 수위곡선은 완만하게 나타나며 보다 계절적이고 장기적인 함양 조건을 반영한

다. 그러나 평택통복은 비포화대 두께가 6.65 m 로 평균 이하로서 수위곡선이 보다 변동적이며 이 특성이 유형 곡선(PCS)에 반영되었다. Winter 등¹⁰은 수위변동곡선의 비교를 쉽게 하기 위해서 y 축을 같은 크기의 scale로 놓고 분석을 하였다. 그러나 요인분석에서는 같은 크기의 Scale로 고정하지 않아도 그 변동 양상에 따라 분류를 실시하며 이러한 특성은 자기 유사성(Self Similarity)을 특징으로 삼는 Fractal의 특성을 반영한다. 평택 통복의 경우 진폭이 위의 두 경우와 달리 0.94 m로 낮게 나타났으나 전체 변동 유형이 비슷하여 PCL 값이 높게 나타났다. 한편, 세 경우 모두 풍화암층이 특징적으로 존재하고 있다. 평택통복의 경우는 위의 두 경우와 달리 모래층이 존재하는 대신 투수성이 낮은 풍화암층과 점토층이 비교적 두껍게 존재한다. 그 결과 토양수의 수직이동이 원활하지 못하여 지하수위의 진폭이 작게 나타난 것으로 사료된다. 유형 I 의 수위변동곡선은 주로 비포화대 두께, 풍화암층 및 점토층과 관련된 함양 특성을 반영한다.

3.3.2 유형 II

비포화대의 두께가 3.28 m로서 유형 I 에 비해서 얇은 결과 수위곡선이 심하게 변동하고 함양에 대해서 빠르게 반응한다(Table 4). 울산범서와 울산온양의 경우도 Fractal 특성을 보이고 있다. 울산온양은 점토층이 특징적으로 두껍게 분포하며 투수성이 좋은 전석층은 존재하지 않는다. 따라서 유형 I 의 평택통복의 경우와 같은 이유에 의하여 진폭이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 사료된다. 유형 2 의 수위변동곡선도 주로 비포화대 두께, 전석층 및 점토층과 관련된 함양 특성을 반영한다.

3.3.3 유형 III

이 유형은 토양층의 구성성분과 상관성을 찾아보기 힘들다(Table 4). 그러나 99년 3월 14일과 15일에 내린 강수(의령봉수, 22.4 mm, 30.5 mm)에 대해서 수위가 급격하게 상승(의령봉수, 1,510 mm)하는 특징을 보인다. 이는 국내 토양의 특성상 겨울철이라 할

지라도 기온의 일변화에 의해서 동결과 해빙을 반복하는 가운데 증가된 토양 수분에 더하여 갑작스럽게 임계강수량을 초과한 강우에 대해 수위가 급격하게 상승한 것으로 사료된다. 이 때 의령봉수의 경우 투수성이 좋은 자갈층이 두껍게(3.12 m) 분포하여 침투율이 양호하고 순천풍덕의 경우도 투수성이 양호한 모래층이 전체 비포화대를 구성하고 있으며 정읍옹동의 경우는 투수성이 불량한 점토층이 비포화대를 구성하나 비포화대의 두께가 0.16 m로서 얇기 때문에 함양에 대해서 빠르게 반응한다. 봄철에 상승한 수위는 여름철까지 유지하다가 가을철부터 감쇄되기 시작한다. 유형Ⅲ의 수위변동곡선은 주로 봄철 강수와 비포화대의 투수성과 관련된 함양 특성을 반영한다.

3.3.4 유형Ⅳ

유형Ⅳ의 유형은 지점들의 수위변동곡선과 정의 상관관계보다 부의 상관관계를 더 크게 보인다(Table 4). 특징적으로 5월 중순부터 지하수위가 급격하게 하강하고 있다. 이것은 그 기간 동안 임계강수량 이하의 강수만이 침투하여 지하수위면에 영향을 미치지 못하였거나 또는 주변 지하수공에서의 양수에 의한 영향일 가능성도 있다. 유형Ⅳ의 수위변동곡선은 임계 강수량 이하로 내린 강수 혹은 주변 지하수공에서의 인위적인 양수로 인해 발생한 수위강하의 특성을 반영한다.

3.3.5 유형Ⅴ

유형Ⅴ의 경우는 모암이 화강암이고 토양층은 모래층이 지배적으로 분포하는 특성을 보이고 있다(Table 4). 특히 두 시점(8월 3일과 9월 20일)의 강수에 의해서 지하수위 변동 곡선의 전체 유형이 결정되었다. 유형Ⅴ의 수위변동곡선은 주로 모암과 토양층 및 우기의 집중 강우와 관련된 함양 특성을 반영한다.

3.4 지하수위 유형별 함양률 추정

전술한 5개의 지하수위 변동 특성을 보이는 지점들에 대해서 다음과 같은 방법으로 지하수 함양률(α)을 추정하였다⁹⁾ :

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

여기서, Δh : 지하수위 반등치, ΣP : 일정 기간 누적강수량, S_y : 비산출률

Δh 와 ΣP 상호간의 상관관계는 교차 상관관계분석을 통하여 규명한다. 이 방법을 적용하기 위해서는 지하수위 관측 지점과 가까운 곳의 강수량 자료와 지하수 비산출률 자료가 필요하다. 강수량 자료는 한국 기상청에서 제공하는 지상 기상관측지점(Surface Synoptic Stations)의 자료를 이용하였다. 이 자료는 하루 동안 내린 강수량을 합한 일합계값으로서 측정 오차를 보정한 자료이다. 비산출률 자료는 '전국 충적

Table 5. Specific yields of alluvial aquifers of South Korea

River Basin	The number of tested sites	Specific Yield(S_y)			
		Minimum	Maximum	Arithmetic Mean	Geometric Mean
Han River	4(3)	0.0047	0.1710	0.0627	0.0215
Nakdong River	6(3)	0.0054	0.0255	0.0134	0.0109
Keum River	3(3)	0.0316	0.0913	0.0596	0.0544
Youngsan River	3(1)	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042
Seomjin River	3(1)	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048
Western coast	2(2)	0.0061	0.0158	0.0110	0.0102
Sum	21(13)				

* (): the number of data used.

Table 6. Range and mean of recharge ratio in different types of catchments

	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
catchments(62)*	24	13	9	7	9
Mean	0.0627	0.0407	0.0921	0.0575	0.1529
Standard Error	0.0153	0.0077	0.0129	0.0146	0.0333
Estimates	0.032 ~ 0.093	0.025 ~ 0.056	0.066 ~ 0.118	0.028 ~ 0.087	0.086 ~ 0.220

* : the number of sites contributing to the type.

(confidence level = 95.44 %)

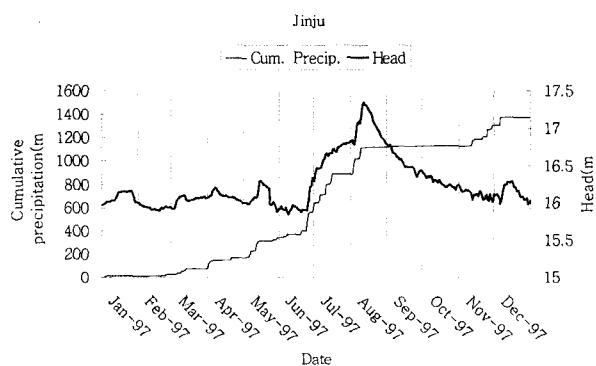


Fig. 4. Changes in ground-water levels and cumulative precipitation⁹⁾.

총 지하수 조사¹³⁾의 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 자유면 대수층의 비산출률 범위를 0.01 ~ 0.3¹⁹⁾으로 가정하여 이 범위를 벗어나는 값들(10^{-4} 이하)은 제외시켰으며(단, 영산강과 섬진강 유역은 자료의 부족으로 각각 0.0042, 0.0048임), 최종적으로 사용된 값은 다음 Table 5와 같다.

본 연구에서는 측정된 비산출률들에 대하여 대유역별로 평균값을 사용하여 적용하였다. 사용된 평균값은 산술평균과 기하평균으로서 기하평균을 사용한 이유는 값의 분포가 최대 1000 배까지 차이가 나므로 평균에 대한 극대값의 효과를 제거하기 위해서였다. 산술평균과 기하평균의 수학적인 특성으로 인해 기하평균값이 산술평균보다 작게 나타났는데 한강유역을 제외하고는 그 차이가 크지 않다. 더구나 통계처리에 사용된 자료의 수가 적으므로 비산출률의 결정에서는 산술평균을 사용하였다.

함양률은 Fig 4 와 같은 그림으로부터 누적강수량

과 그 강수량에 의한 지하수위 반등치를 찾아내고, 그 비율과 비산출률의 곱으로 계산한다. 이 방법을 각 유형별로 분류된 지하수위곡선에 대하여 적용한 결과는 Table 6 과 같다.

3.5 지하수위 유형과 유역별 함양률의 관련성

지하수 함양률은 시간과 공간에 따라서 항상 같은 값을 가지지 않고 변화하는 변동성(Variability)을 가진다. 본 연구에서는 동일 유역에 대하여 같은 값의 S_y 를 사용하였으므로 엄밀한 의미에서는 함양률보다 수위 변동값의 공간적인 변동성을 나타낸다. 따라서 이러한 함양률을 추정하기 위하여 평균값과 표준오차(Standard Error)를 사용하였다. 유형 II 는 95.44 %의 신뢰도 수준에서 함양률이 최소 2.5 %에서 최대 5.6 %를 가지는 것으로 추정된 반면, 유형 V 는 같은 신뢰도 수준에서 최소 8.6 %에서 최대 22.0 %를 가지는 것으로 추정되었다. 대부분의 유형은 약 6 %의 변화폭을 갖는 것으로 추정되었다.

Table 7 과 Fig 5 는 대유역별로 나타나는 지하수위 변동 곡선 유형의 빈도이다. 대부분의 유역에서 유형 I 이 우세하게 나타나고 있는데(단, 낙동강은 유형 II 가 우세) 이것은 주성분 분석에 의하여 유형 I 이 전체 자료의 변동량을 가장 많이 설명하도록 추출되었기 때문이다. 유형 I 을 제외하고 나머지 유형들의 유역별 빈도값을 살펴보면, 비율이 25 % 이상인 우세한 유형은 한강 유역에서 유형 V (한강 : 40.0%), 낙동강 유역에서는 유형 II (37.5%), 영산강 · 섬진강 유역에서는 유형 III (26.7%)이다. Fig 5 를 통해서 유형들의 공간적인 분포를 보면 특히 유형

Table 7. The number of each type in river basins, South Korea

Type River basin \	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Total
Han River	7(46.7)	0(0.0)	1(6.7)	1(6.7)	6(40.0)	15
Nakdong River	7(29.2)	9(37.5)	3(12.5)	4(16.7)	1(4.2)	24
Keum River	4(44.4)	1(11.1)	1(11.1)	1(11.1)	2(22.2)	9
Youngsan · Seomjin River	6(42.9)	3(21.4)	4(28.6)	2(7.1)	0(0.0)	14

() : the ratio of the number to the total of each type in basins, unit : %

IV 가 해안가에 위치하고 있음을 확인할 수 있다(경주 천북, 포항연일, 김포김포, 예산덕산). 따라서 유형 IV 는 조수의 영향을 받았을 가능성이 있다. 또한 유형 V 는 대부분 한강 유역에 분포하는데 금강유역의 해안 쪽에서도 나타난다. 반면, 유형 II 와 유형 IV 는 우리나라 남부 지방인 낙동강 유역과 섬진강·영산강 유역 에 분포하는데 낙동강 유역에서 집중적으로 나타난다.

Table 8 과 Fig 6 은 우리나라의 4 대강 유역에 대한 함양률 추정값을 비교·검토한 것이다. Table 8 에서 강우함양계수(Coefficient of Rainfall Recharge) 는 연평균 강수량(단위 : mm)에 대한 연

평균 함양량(단위 : mm)으로 결국은 비율로서 산출된다. 본 연구에서 사용된 함양률(Recharge Ratio) 또한 누적 강수량(단위 : mm)에 대한 지하수위의 반등치(단위 : mm)로서 두 방법상의 결과값은 같은 단위가 된다.

이동률과 윤용남²⁰⁾ 및 박창근⁵⁾의 결과는 유사한 경향성을 보이고 있다. 이는 두 방법이 유사한 자료(일유 출수분곡선)를 이용하여 같은 방법론(기저유출분리법)에 의거하여 결과를 산출하였기 때문이다. 후자의 연구가 전자의 연구보다 값이 더 크게 나타난 이유는 후자가 우리나라의 지하수 감수기간 뿐만 아니라 함양 기간까지 추가하여 함양률을 추정하였기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 본 연구는 주로 함양기간(7, 8월)에 발생하는 함양률을 추정하였다. 우리나라와 같이 몬순 기후 지대에서 여름철 집중 호우로 인해 강수량 대비 함양비율(함양률)이 가장 높은 이 기간을 최대 함양기간으로

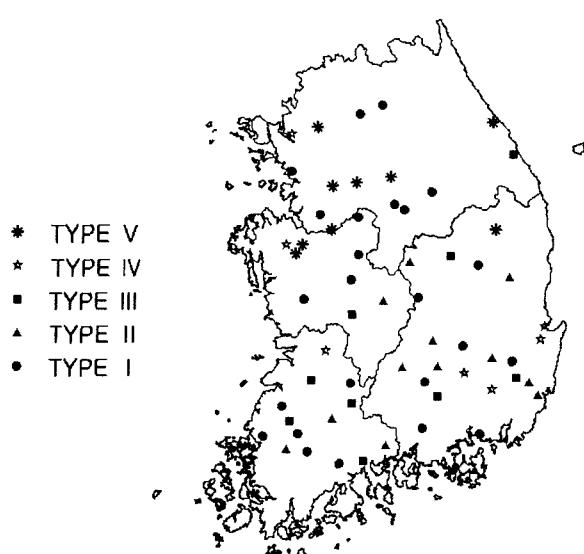


Fig. 5. The spatial distribution of types of ground-water level change curve with respect to river basins.

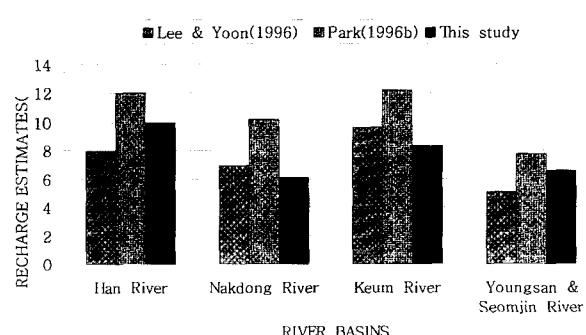


Fig. 6. Comparison of recharge estimates in river basins, South Korea.

Table 8. Comparison of the recharge ratio between the existing studies and this study

River Basin	Lee and Yoon (1996)		Park (1996b)		This study	
	Coefficient of rainfall recharge ¹⁾ (%)		Coefficient of rainfall recharge(%)		Recharge ratio(%)	
	Range	Average	Range	Average	Weighted S.E.	Weighted Average
Han River	6.4~8.6	7.9	9.8~15.1	12.0	0.022	10.0
Nakdong River	5.2~9.2	6.9	n/a	10.2	0.013	6.1
Keum River	7.6~12.0	9.6	n/a	12.2	0.018	8.3
Youngsan & Seomjin River	3.4~6.6	5.1	n/a	7.7	0.013	6.6

1) coefficient of rainfall recharge = $\frac{\text{annual mean of groundwater recharge}}{\text{annual mean of rainfall}}$
 2) n/a : not available

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 적용하였는데 상응하는 결과가 산출되었다. 본 연구를 통해서 각 유역 안에는 다양한 유형의 지하수위 변동이 일어나고 있음이 규명되었는데 이 결과를 이용하여 각 유역별 평균 함양률 및 표준 오차(Standard Error)에 유역별 관측소 개수에 대한 각 유형의 빈도로부터 계산된 가중치를 곱해서 산출된 가중 평균 및 가중 평균 오차는 Table 8과 같다. 그 결과 한강 및 금강 유역에서는 각각 10.0 %, 8.3 %의 함양률이 산출되었고, 낙동강과 영산강·섬진강 유역에서는 각각 6.1 %, 6.6 %의 유사한 함양률이 산출되었다.

4. 결 론

- 1) 요인 분석 방법을 사용해서 전국의 천부 대수층 지하수의 지하수위 변동을 총 5개의 유형으로 분류할 수 있었다. 5 개의 유형이 전체를 설명할 수 있는 비율은 81.6 % 이었다.
- 2) 유형별 수위 변동 특성을 분석한 결과 지하수위 변동은 주로 비포화대 두께, 토양층의 투수성, 강수의 특성과 관련되었다.

- 3) 지하수위 변동 곡선법을 이용하여 국가 지하수 관측망 자료에 의해 천부 대수층 지하수의 함양률을 평가하였다. 한강과 금강 유역에서 각각 10.0 %, 8.3 %의 함양률을 보였고, 낙동강 및 영산강·섬진강 유역에서는 각각 6.1 %, 6.6 %의 함양률을 보였다.
- 4) 함양률은 유형별 혹은 유역별로도 다양하게 나타났다. 즉, 같은 유역일지라도 혹은 같은 유형의 수위변동양상을 보인다 할지라도 함양률은 반드시 같게 나타나지 않았다. 따라서 지질학적으로 같은 충적층 지대라 할지라도 그 지역의 고유한 함양률에 따라 다른 지하수 관리 체계를 적용해야 한다. 보다 정확한 지역적 함양률 평가 시에는 현장 실험에 의한 비산출률 자료의 확보가 중요하다.
- 5) 대유역별로 나타나는 지하수위 변동 곡선의 유형은 다양하게 존재하고 있다. 유형 I을 제외하고 나머지 유형들의 유역별 빈도값을 살펴보면, 비율이 25 % 이상인 우세한 유형은 한강 유역에서는 유형 V (한강 : 40.0%), 낙동강 유역에서는 유형 II (37.5%), 영산강·섬진강 유역에서는 유형 III (28.6%)이다.
- 6) 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 천부 대수총 전체 면적에 적용하기 위해서는 여러 수리지질인자들의 기여도를 결정해야 한다. 이를 위해서는, 누적 강수량 외의 다른 수리지질학적 변수들에 대한 고려가 필요하다. 예를 들어, Kenneth 등²¹⁾은 지하수 함양량을 결정하기 위한 연구에서 토양의 종류, 토지피복, 지표유출, 기후자료 및 최대 토양수분저류계수 등을 이용하여 지하수 함양량의 공간적인 변동성을 제시한 바 있다. 이와 같은 수리지질학적 인자들의 함양률에 대한 기여도 결정 및 이를 기초로 지리정보시스템(GIS)을 활용한 전국적 함양률 산정을 위한 연구가 저자들에게 의해 진행 중에 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-13200-003-3) 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 1) 박창근 “우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념 정립과 기법의 개발”, *지하수환경*, 3(1), pp. 15-20(1996a)
- 2) Sophocleous, M. A. “Combining the Soil Water Balance and Water-Level Fluctuation Methods to Estimate Natural Groundwater Recharge: Practical Aspects”, *Journal of Hydrology*, 124, pp. 229-241(1991)
- 3) 선우중호 “우리나라 지하수 개발의 필요성”, 물 관련 정책토론회, 건설부·한국수자원공사, pp. 99-119(1992)
- 4) 한정상 “지하수개발과 관리대책”, 수자원 개발과 보존대책, 한국수자원공사, pp. 39-103(1995)
- 5) 박창근 “우리나라 지하수 개발가능량 추정: 2. 5대 강 유역에의 적용”, *지하수환경*, 3(1), pp. 21-26(1996b)
- 6) 원이정, 김형수, 한찬 “낙동강 진동 및 왜관 수문 자료를 이용한 기저유출 분리방식 지하수 개발 가능량 산정”, [사]한국지하수토양환경학회 창립총회 및 춘계학술발표회(지하수관련 제도개선방안 특별 세미나), 한국지하수토양환경학회, p. 157(2000)
- 7) 최병수, 안중기 “지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구”, *지하수환경*, 5(2), pp. 57-65(1998)
- 8) 김건영 “지하수 함양 특성 해석을 위한 동위원소 적용”, *한국지하수토양환경학회 2001년 춘계학술대회*, 한국지하수토양환경학회, pp. 149-152(2001)
- 9) 문상기, 우남칠 “누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양률 추정 기법”, *지하수토양환경*, 6(1), pp. 33-43(2001)
- 10) Winter, T.C., Mallory, S.E., Allen, T.R., and Rosenberry, D.O. “The Use of Principal Component Analysis for Interpreting Ground Water Hydrographs”, *GROUND WATER*, 38(2), pp. 234-246(2000)
- 11) 건설교통부, *지하수관측연보*(2000)
- 12) 한국기상청, 기후자료 중 월별 일값, <http://www.kma.go.kr> (2000)
- 13) 한국수자원공사, 전국 충적층 지하수 조사 보고서(1996)
- 14) 허만형, SPSS 10.0 for Windows 통계분석론, 법문사 (2001)
- 15) 류성렬, “GIS를 이용한 무주 지역의 지하수 오염 위험성 평가”, 연세대학교 석사학위논문, pp. 31-33(2000)
- 16) John C. Davis, *Statistics and Data Analysis in Geology* 2nd ed., JOHN WILEY & SONS, pp. 527-579(1986)
- 17) SPSS Inc Headquarters, SPSS for Windows release 10.0.5, 233 S. Wacker Drive, 11th floor, Chicago, Illinois 60606 (1999)
- 18) 허명희, 양경숙, SPSS 다변량자료분석, SPSS 아카데미, p. 35 (2001)
- 19) Freeze, R. A. Cherry, J. A., *GROUNDWATER*, p. 61,

- New Jersey, Prentice-Hall (1979)
- 20) 이동률, 윤용남 “우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석”, 대한토목학회논문집, 16(Ⅱ-4), pp. 321-334 (1996)
- 21) Kenneth R. Bradbury, Weston Dripps, Chip Hankley, Mary P. Anderson, and Kenneth W. Potter, Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates, Wisconsin Geological and Natural History Survey (2000)