

수리지질학적 변수들의 지하수 함양률에 대한 기여도 평가

문상기* · 우남철

연세대학교 지구시스템학과

Contribution of Hydrogeological Factors to Groundwater Recharge Ratio

Sang-Ki Moon and Nam-Chil Woo

Dept. of Earth System Sciences, Yonsei Univ., Seoul, 120-749, Korea

The aim of this study is to evaluate the contributions of each hydrogeological factors to groundwater recharge ratios in order to determine areal estimates of recharges in entire inland area of South Korea. For this purpose, various statistical analyses and overlay techniques of GIS were conducted for entire area and 4 river basins of South Korea. As a result, the spatial distribution of recharge, South Korea were visualized.

Key words : groundwater recharge, GIS, river basins, hydrogeological factors

본 연구의 목적은 국가 지하수 관측망의 장기 지하수위 변화 관측 자료로부터 얻은 함양률 점추정치들로부터 남한 내륙 지역 전체에 대한 함양률의 면적 추정치를 결정하기 위하여 각 수리지질학적 변수들(암상, 관측정의 표고, 비포화대 두께, 토층의 비포화대 두께에 대한 비율, 유효 강수량, 연평균강수량)의 함양률에 대한 기여도를 평가하는 데 있다. 이를 위해서 지하수위 변동 곡선법을 이용하여 계산한 3년 간의 함양률을 종속 변수로 하고, 관측지점들의 수리지질학적 독립변수들을 이용하여 다중회귀 분석 모델링을 실시하였다. 그 결과 전체 지점에 대해서는 유효 강수량과 비포화대 두께가 함양률에 대해서 각각 -0.274, 0.458의 기여도를 보였으며 이 모델의 설명력은 24.9%로 나타났다. 그러나 유역별 함양률과 수리지질학적 변수들로 구성된 다중회귀모델의 설명력이 전체 관측 지점들에 대한 모델의 설명력을 증가하여, 각 유역별로 함양률에 대한 수리지질학적 변수들의 기여도를 정량화하였다. 모델값과 지하수위 변동 곡선법의 함양률에 대한 해석값에 대하여 RMS 오차를 분석하고 97년부터 99년까지의 자료에 대해서 성립된 모델을 사용하여 2000년 수위 자료에 대해서 예측 작업을 실시한 결과 모든 유역에서 10% 이하의 RMS 오차를 보였다. 독립변수들의 정량화된 기여도에 따라 GIS의 도면 중첩 기능을 이용하여 함양률의 공간적인 분포 특성을 가시화하여 규명하였다.

주요어 : 지하수 함양률, 지리정보시스템, 유역, 수리지질학적 변수

1. 서 론

지하수의 함양률을 추정할 때에 많은 불확실성(uncertainty)이 야기된다. 실제로 유역 규모의 물수지(water budget)를 계산할 때 내재되어 있는 불확실성은 대부분 지하수 함양률의 시간적, 공간적 분포를 성공적으로 추정할 수 없는 데서 초래된다. 이러한 함양률의 불확실성을 감소시키기 위해서는 대수층의 거동을 연속적 혹은 주기적으로 폭넓은 영역에 대해서 감시

(monitoring)함으로써 몇 년 이상의 충분한 데이터베이스를 얻어 대표적인 평균치를 구해야 한다(Sophocleous, 1992).

지하수의 함양은 함양 지역(recharge area)이라면 어디서든지 발생하는 수리지질학적 현상이므로 궁극적으로는 2차원적인 면의 형태로 함양률이 존재한다. 그러나 불행하게도 현장에서 함양률을 실측하고자 할 때에는 지점단위로 밖에는 알지 못하므로 다양한 모델링 기법을 통해 면적 형태의 함양률(areal recharge)을 추정해야 한다. 즉, 토양수분이나 지하수의 함양률과 같은 변수들을 현장에서 직접 측정할 때에는 단지 점 측

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

정치 내지 점 추정치로서 제공되기 때문에 이와 같은 물수지 요소들의 점 자료를 면적으로 표현하는 문제가 발생한다. 일반적으로 함양률 측정 지점의 수가 충분할수록 의미가 커지는 지구통계학적 기법(Journel and Huijbregts, 1978; Sophocleous, 1983)과 매질의 불균질성을 균질한 단위로 나눈 도면들을 중첩하여 실제의 불균질한 조건을 구현시키는 GIS(Geoscientific Information System) 기법이 이러한 문제 해결에 사용될 수 있다.

광역적 지하수 함양률 추정에 이용되는 최근의 방법은 현장에서 측정된 자료와 Remote Sensing/GIS와 같은 IT(Information Technology) 기술을 조합한 것이다. 이 방법은 지역적인(Local) 변동성의 복잡한 측면을 고려하지 않고 쉽게 얻을 수 있는 현장 자료를 이용하여 합리적인 함양률 추정치를 산출해낼 수 있다. IT 기술과 현장 수리지질학적 자료를 이용하여 지하수 함양률을 평가한 연구는 크게 네 가지 부류로 나눌 수 있다 :

1) GIS 만을 이용한 연구

Rogowski 등(1996)은 토양의 수분 함량과 전체 밀도(Bulk Density), 수리전도도, 비포화대 두께를 현장에서 직접 측정하여 GIS 내에서 가공된 도면으로 입력한 후 Pixel-by-Pixel 방식의 중첩 기법을 통해 함양률을 예측하였다. Fayer *et al.*(1996)은 토양의 종류와 식생의 종류로 구성된 입력 도면들에 대해 가능한 모든 조합을 구성한 후 각각의 도면에 현장에서 직접 측정한 함양률을 할당하여 전체 함양량을 추정하였다. 전자는 Raster 방식의 자료를 사용한 반면, 후자는 Vector 방식의 자료를 사용한 것이다.

2) GIS와 수리지질학적 모델을 결합하여 이용한 연구

Arnold *et al.*(1999)은 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모델과 기저 유출 분리 방법 및 지하수위 감수 곡선법을 이용하여 지하수의 함양량과 기저유출량을 각각 추정하고 비교하였다. SWAT 모델은 함양량과 기저유출량이 유역 단위로 산출된 반면, 기저 유출 분리법 및 지하수위 감수 곡선법은 지점별로 산출되었다. 그러므로 지점별로 산출된 함양량과 기저유출량에 대해서 Spline 기법으로 광역화(regionalization)한 후 유역별 평균치를 산출하여 모델에서 계산한 값들과 비교, 검토하였다. 이 때 GIS 는 모델에 필요한 변수들의 입력력 Interface 로 이용되었다. Kenneth *et al.*(2000)은 수정된 Thornthwaite-Mather 접근법을 알고리즘으로 구현한 물수지 모델을 개발하였고 GIS 내에서 모델의 입력 변수가 할당되는 격자

망을 발생시켰으며 격자 단위로 함양률을 추정하였다.

3) GIS와 통계적인 방법을 결합하여 이용한 연구

Sophocleous(1992)는 다변량 통계 분석 기법 중의 하나인 다중 회귀 분석(multiple regression analysis) 기법을 이용하여 함양률에 대한 관련 수리지질학적 변수들(연강수량, 평균 최대 토양 수분량, 비포화대 두께, 봄철 강수율)의 기여도를 정량화하고 각 지점에서 변수들의 측정치에 대하여 등고선도(contour map)을 수작업으로 작성한 후 GIS 도면화하여 중첩시키므로써 함양률의 공간적인 분포를 파악하였다.

4) Remote Sensing 기법을 이용한 연구

Gouweleew(2000)는 지하수 함양률을 결정하기 위하여 토양 수분 자료와 Water-Balance Model을 이용하였다. 이 때 토양 수분 자료는 Passive Microwave 원격 탐측 자료로부터 산출되었고 토양 수분 값은 Water-Balance Model 결과의 공간적인 분포를 보정하는 데 이용되었다.

함양률은 다양한 수리지질학적 변수들에 의해서 영향을 받아 결정되는 양으로서 이러한 변수들의 기여도를 정량화하는 문제는 함양률의 공간적 변동성을 파악하고 예측하는데 있어서 매우 중요한 절차이다. 그러나 함양률의 공간적인 분포를 파악하는 연구에 있어 3) 번의 경우를 제외하고 수리지질학적 변수들의 함양률에 대한 기여도에 관한 연구가 미비한 실정이다. 본 연구에서는 3) 번의 연구에서 사용한 강수량과 비포화대 두께 외에도 토양의 종류 및 두께 비율, 지질학적 암상이 지하수 함양률에 대해 미치는 영향을 정량화하고 그것의 가중치에 의한 함양률을 추정하여 공간적인 분포를 규명코자 하였다. 본 연구의 목적은 장기 지하수위 관측에 의하여 측정된 함양률 자료로부터 연평균 함양률을 계산하고 통계적 모델링에 의해 각 유역별로 수리지질학적 변수들이 함양률에 미치는 영향을 정량화하여 함양률의 공간적인 분포를 규명하는데 있다.

2. 연구 방법

모델의 종속 변수에 해당하는 함양률을 구하기 위하여 지하수위 변동 곡선법을 이용하였다(문상기와 우남철, 2000). 사용된 지하수위 자료는 1997년, 1998년, 1999년 자료들로서(건설교통부) 1월 1일부터 12월 31일까지 매일 4회 관측을 통하여 평균된 값들을 한 날의 대표 수위값으로 사용하였고 매해에 대하여 연평균 함양률을 계산한 후 각 지점에 대한 세 개의 함양률을 평균하여 모델의 종속 변수로 사용하였다. 모델의 독

립 변수들은 함양률에 영향을 미치는 수리지질학적 변수들로서 암상, 관측정의 표고, 비포화대 두께, 토층의 비포화대 두께에 대한 비율, 유효 강수량, 연강수량 등이다. 여기서 유효 강수량이라 함은 지하수위 변동 곡선법에서 지하수위의 최대 변동을 유발시키는 누적 강수량을 말한다. 연강수량은 한국기상청 자료(한국기상청)를 이용하였고 나머지 대수층에 대한 정보는 한국수자원공사에서 제공하는 국가 지하수 관측망의 제원 표로부터 얻었다(한국수자원공사). 국가 지하수 관측망 자료 중 천부 대수층에 해당하는 총 66 개의 관정 자료로부터 함양률에 대한 통계적 모델을 구축하기 위하여 다중 회귀 분석 기법을 사용하였다. 구축된 모델의 신뢰성을 검증하기 위해서 3년 동안 지하수위 변동 곡선법을 이용하여 계산된 평균 함양률과 모델에 의해서 계산된 함양률에 대하여 오차 분석(error analysis)을 수행하였다. 또한 모델의 성능을 평가하기 위해서 2000년 자료로부터 지하수위 변동 곡선법에 의한 함양률을 계산하고 모델에 의해 계산된 함양률 간의 오차 분석도 수행하였다.

3. 결 과

3.1. 지하수위 장기 관측에 의한 지하수 함양률 평가

지하수위 변동 곡선법을 이용하여 1997년, 1998년, 1999년의 연평균 지하수 함양률을 추정하였다(Fig. 1).

관측정이 설치되어 운영되기 시작한 시점이 다르므로 매해 지하수위가 측정된 지점의 수가 다르다(97년도 41개소, 98년도 43개소, 99년도 66개소). Fig. 1 으로부터 지하수 함양률은 같은 지점에서일지라도 시간에 따라서 혹은 같은 시간일지라도 지역에 따라서 변동성을 보이고 있음을 알 수 있다. 또 최대 함양률을 보이는 지점은 음성대소, 이천울현, 부여부여 지점으로서 한강과 금강 유역에 존재하고 있으며 영산강과 섬진강 및 낙동강 유역에서는 함양률의 수치가 각각 10% 미만, 20% 미만(경주천북 제외)으로 주로 작게 나오는데 이것은 비포화대의 비산출률(S_y)이 상대적으로 작기 때문이다(영산강·섬진강 유역 : 0.0048, 낙동강 유역 : 0.0134).

3.2. 다중 회귀 모델

지하수위 변동 곡선법에서 추정된 함양률은 점 추정(point estimates)적이다. 따라서 전국적인 함양률 산정을 위해서는 zero 차원 형태의 점 추정치를 2차원 형태의 면적에 대한 추정치로 확장해야 하고(광역화 :

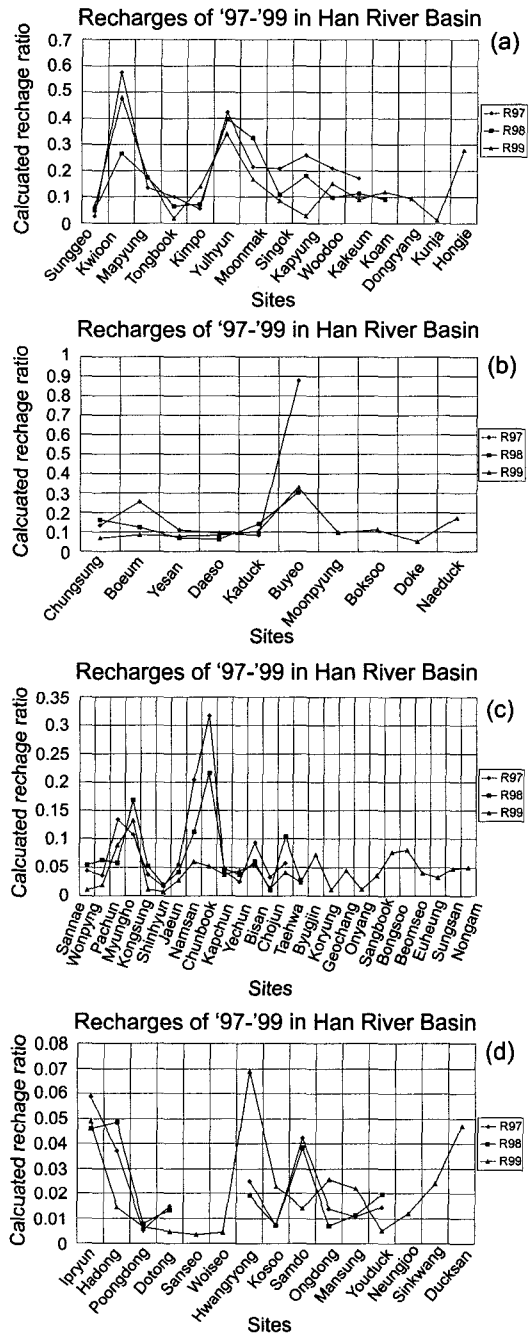


Fig. 1. Recharges of 1997~1999 in 4 river basins, South Korea.

regionalization) 이를 위해서는 함양률에 영향을 미치는 수리지질학적 변수들의 기여도를 규명해야 한다. 즉, 각 변수들의 기여도가 함산됨으로써 함양률이 추정되는 통계적인 모델이 구축되어야 한다. 다중 회귀

분석 방법은 목적 변수인 함양률에 대하여 독립변수들인 각 수리지질학적 변수들의 기여도를 규명할 수 있고 각 변수들로부터 함양률을 추정할 수 있다. 즉, 다중회귀모델은 다양한 수리지질학적 변수들의 영향이 복합적으로 반영된 지하수위 곡선을 각 독립변수들로 분해할 수 있다. 어느 변수가 종속변수에 더 많은 영향을 미치는지에 대해 알기 위하여 기울기, t 값 그리고 베타(B)값을 사용할 수 있다. 그런데 기울기로 영향의 경증을 따질 경우에는 독립변수의 측정 단위가 서로 같아야 한다. 따라서 측정 단위가 서로 다른 독립변수들을 이용할 때에는 t 값 또는 β 값을 사용한다. t 값과 β 값은 다음과 같은 수식을 통해서 구해진다.

$$t \text{ 값} = \frac{\text{기울기}}{\text{기울기의 표준편차}}$$

$$\text{기울기의 표준편차} = \frac{\sqrt{\sum \left(\frac{\text{실제 값}}{\text{예측 값}} \right)^2}}{\sqrt{\sum (X - \text{Mean})^2}}$$

$$b = \beta = \text{기울기} \times \left(\frac{\text{독립변수의 표준편차}}{\text{종속변수의 표준편차}} \right)$$

t 값과 β 값 모두 절대값이 크면 클수록 독립변수가 목적변수에 대한 영향력이 크고 절대값이 작으면 그 영향력이 작다고 할 수 있다. 두 값 모두 기울기의 부호를 따르므로 양수뿐만 아니라 음수까지 나올 수 있다. 즉, 음수인 경우에는 독립변수가 목적변수에 영향을 미치지 목적변수의 수치를 떨어뜨리는 방향으로 미친다는 의미가 된다.

다중 회귀 분석에서도 단순 회귀 분석과 같이 상관계수의 의미와 같은 다중상관계수(R)와 그 계수의 단순한 제곱인 결정계수(R^2 : coefficient of determination)를 보여준다. 단, 단순 회귀 분석에서는 단 하나의 독립변수만을 사용하여 선형에 가까울수록 R이 1에 가까워졌으나 다중 회귀 분석에서는 독립변수가 다수이기 때문에 다수의 독립변수를 하나의 그룹으로 간주하고 종속변수와의 관계를 설명한다. 단순 회귀 분석에서와 마찬가지로 R^2 는 회귀분석에 사용된 전체 케이스를 회귀선이 어느 정도 설명해 줄 수 있는지를 나타내는 수치이다.

다중 회귀 분석 방법은 종속변수와 독립변수들의 관계에 대해서 초점을 맞춘 것으로서 상호 상관성이 높은 독립변수들을 분석에 사용할 수 없다. 왜냐하면 독립변수들 사이에 상관성이 강하면 독립변수들이 종속

변수에 의외의 영향을 미칠 가능성이 높고, 추정되는 회귀 계수의 정확도를 떨어뜨릴 뿐만 아니라 분석의 결과 또한 왜곡할 수 있기 때문이다(허만형, 2000). 따라서 다중 회귀 분석 방법에 사용되는 독립변수들은 통계적으로 상호 독립이어야 한다. 그러나 불행하게도 독립변수들 간에는 종종 상관성이 존재하는데 이것을 다중공선성(multicollinearity)이라고 한다(Sophocleous, 1992). 독립변수들 간에 다중공선성이 존재하는지 여부를 결정해주는 지시자(collinearity diagnostics)로 허용 오차(tolerance)를 사용할 수 있는데 이 값이 일반적으로 0.30 보다 적으면 다중공선성 문제를 제기한다(허만형, 2000).

이 연구에서 다중 회귀 분석을 위해서 사용된 소프트웨어는 SPSS 10.0 for Windows 로 변수처리 방식을 Backward 방식으로 선택했다. 이것은 컴퓨터가 회귀분석을 위한 가설검증을 하고 판단하여 종속변수에 영향을 미치지 않는 변수를 순서적으로 제외시키므로써 최종적으로 종속변수에 영향을 미치는 변수들만으로 모델을 성립시켜 주는 방식이다(허만형, 2000).

3.2.1 전체 함양률 평가

전체 관측 지점들의 수리지질학적 독립변수들과 3년 간의 평균 함양률에 대해서 다중 회귀 모델을 만들었다. Table 1은 Backward 방식으로 선택한 변수들로 구성된 모델의 결정계수 및 가설 검증에 관한 표이다.

1번 모델에서 4번 모델로 갈수록 변수들이 적어지면서 모델의 설명력 또한 떨어지고 있으나, 오차율(유의수준; Sig.)은 1/1000이하로 낮으므로 모델이 성립됨을 알 수 있다.

Table 2는 네 가지 모델에 대한 회귀 계수들과 다중공선성을 평가하는 지시자들(tolerance와 VIF: Variance Inflation Factor) 을 보여주고 있다.

모델 1~3까지는 유의수준(오차율)이 높아서 모델을 신뢰하기 어렵고 오직 4번 모델만이 유의수준 95%에

Table 1. Model Summary^e of the total data.

Model	R	R ²	F	Significance
1	.546 ^a	.298	5.105	.001
2	.542 ^b	.293	6.332	.000
3	.518 ^c	.268	7.562	.000
4	.499 ^d	.249	10.462	.000

^aPredictors: (Constant), rweathd, volcanic, mcp, mdw, granite

^bPredictors: (Constant), rweathd, mcp, mdw, granite

^cPredictors: (Constant), mcp, mdw, granite

^dPredictors: (Constant), mcp, mdw

^eDependent Variable: recharge ratio

Table 2. Coefficients of the regression equations to estimate the recharge ratio of the total area.

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	4.7E-02	.031		1.528	.132		
mcp	-1.1E-04	.000	-.281	-2.540	.14	.952	1.050
mdw	1.5E-02	.004	.400	3.499	.001	.893	1.120
granite	2.9E-02	.023	.148	1.279	.206	.872	1.147
volcanic	-2.6E-02	.040	-.077	-.658	.513	.848	1.180
rweathd	6.03E-02	.041	.163	1.460	.150	.937	1.067
2 (Constant)	3.9E-02	.028		1.386	.171		
mcp	-1.1E-04	.000	-.276	-2.508	.015	.958	1.044
mdw	1.6E-02	.004	.418	3.778	.000	.945	1.058
granite	3.3E-02	.022	.169	1.520	.134	.940	1.064
rweathd	6.1E-02	.041	.165	1.484	.143	.938	1.066
3 (Constant)	4.7E-02	.028		1.705	.093		
mcp	-1.1E-04	.000	-.291	-2.629	.011	.966	1.035
mdw	1.7E-02	.004	.445	4.033	.000	.971	1.030
granite	2.7E-02	.021	.138	1.254	.215	.974	1.027
4 (Constant)	5.5E-02	.027		2.019	.048		
mcp	-1.1E-04	.000	-.274	-2.488	.015	.980	1.021
mdw	1.7E-02	.004	.458	4.154	.000	.980	1.021

서 모두 신뢰할 수 있는 모델로 성립된다. 이 때 다중 공선성을 평가해주는 허용오차는 0.980으로서 0.3 이상이므로 3년 간의 유효 강수량과 평균 비포화대 두께 간에는 모델에 영향을 미칠 만큼 상호 간에 상관성이 크지 않은 것으로 나타났다. 또 VIF 또한 1에 가까울 수록 다중공선성의 문제가 제기되지 않으므로 모델에서는 다중공선성의 문제를 고려하지 않아도 된다 (Sophocleous, 1992). 따라서 성립된 모델에 대해서 두 변수가 설명할 수 있는 설명력은 24.9% (Table 1) 이고 회귀방정식은 다음과 같다.

$$\text{Recharge ratio} = 0.055 - 0.00011 \times \text{mcp} + 0.017$$

map : 지하수위 상승을 유발시키는 3년간의 평균 누적 강수량(mm)

mdw : 3년간의 평균 비포화대 두께(m) (1)

식 (1)에서 함양률과 유효 강수량이 역의 상관관계를 갖는 이유는, 전술하였듯이 지하수위 상승에 기여하는 강수량(mcp)은 누적강수량의 의미이고 결과적으로 함양률을 구하는 수식에서 두 변수가 반비례하는 관계에 있기 때문이다. 즉,

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

에서 함양률 R과 mcp ΣP는 반비례 관계에 놓여 있으므로 위의 회귀방정식에서 mcp는 함양률에 대해 반비례하는 양적 관계를 갖는다. 그리고 강수량이 클 수록 지하수위는 상승하게 되고 따라서 표고와 연평균 지하수위와의 차이로 정의된 비포화대 두께는 작아진다. 그러므로 결과적으로 함양비와 비포화대 두께는 상호 비례하는 관계를 갖는다. Table 2의 β값과 t 값을 각각 비교해 볼 때 비포화대 두께가 강수량(mcp)보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그러나 본 모델은 분석에 사용된 전체 사례를 24.9% 밖에 설명하지 못하므로 모델로 활용하기에는 신뢰성의 문제가 제기된다. 따라서 우리나라 내륙을 4 대강 유역별로 세분하여 함양률 모델링 작업을 실시하므로 신뢰성 있는 모델들을 산출하고자 하였다.

3.2.2. 유역별 함양률 평가

모든 유역에 대해서 오차율이 5% 이내인 회귀 계수들을 가지는 모델을 Backward 방식으로 선택한 결과는 Table 3과 같다.

각 유역별로 구성한 모델들의 결정계수가 최소한 50% 이상으로 나타났고 특히 금강 유역은 97.6%의 설명력을 보일 정도로 전체 자료로 구성한 모델보다 설명력이 훨씬 우월해졌다. 각 유역별 회귀 계수들은 Table 4에 수록되어 있고, 이를 바탕으로 다중 회귀식을 표현하면 Table 5와 같다.

Table 3. Model summary^a of each river basin.

Model	R	R2	F	Significance
Han	.737 ^a	.543	4.353	.030
Keum	.988 ^b	.976	51.364	.000
Nakdong	.871 ^c	.759	16.491	.000
Youngsan · Seomjin	.932 ^d	.869	11.906	.001

^aPredictors: (Constant), rweathd, rsand, mdw^bPredictors: (Constant), rclay, rweathd, gneiss, mcp^cPredictors: (Constant), rclay, mcp, sedim, volcanic^dPredictors: (Constant), granite, rgravel, volcanic, mtp, mcp

*Dependent Variable : recharge ratio

각 수식에서 모래비율, 풍화비율, 점토비율, 자갈비율은 각 지점에서의 비포화대 두께에 대한 그 층의 두께 비율을 의미하고 편마암, 화산암, 퇴적암(세일 제외), 화강암들은 이진(binary) 변수로서 1(유) 혹은 0(무)의 값을 갖는다.

Table 4를 보면 한강 유역에서 각 변수들이 함양률에 미치는 기여도(β)는 비포화대 두께에 대한 풍화대의 두께 비율을 나타내는 풍화비율이 가장 크고 모래 비율, 평균 비포화대 두께 순이다. 금강유역에서는 점토비율, 평균 유효 강수량, 풍화비율, 편마암의 존재 순이고 낙

동강 유역에서는 퇴적암(세일 제외)의 존재, 유효 강수량, 점토비율, 화산암 순이며, 영산강·섬진강 유역에서는 화강암의 존재, 자갈비율, 화산암의 존재, 연평균 강수량, 유효 강수량 순이다. 한강 유역에서는 특징적으로 비포화대의 두께가 함양률에 영향을 미치는 반면, 나머지 유역들에서는 강수량의 영향이 크게 나타났고 모든 유역에서 토층의 두께가 함양률에 영향을 미치고 있다. 금강유역에서는 편마암, 낙동강유역에서는 화산암과 퇴적암(세일 제외), 영산강·섬진강 유역에서는 화산암과 화강암의 존재가 함양률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 그 영향 정도는 함양률을 증가시키는 방향이 될 수도 있고 감소시키는 방향이 될 수도 있다. β 의 절대값과 기울기의 부호로써 이를 판명할 수 있는데, 수식 상 β 값의 기울기는 회귀계수(기울기)의 부호와 같기 때문이다. 금강유역의 모델에서 점토비율이 함양률에 대하여 정의 상관관계를 나타내었다. 이것은 금강 유역에서 부여부여 지점은 해석학적인 함양률이 평균 61%에 해당하는데 그곳의 점토층 또한 15.7m로 함양률과 높은 상관성을 보이고 있기 때문이다.

3.3. 모델의 검증과 예측

본 모델을 검증하기 위하여 모델치와 해석치에 대해

Table 4. Coefficients of the regression equations to estimate the recharge ratios of each river basin.

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
H	(Constant)	.220	0.059		3.706	.003	
	mdw	-3.1E-02	.012	-.607	-2.535	.028	.725
	rsand	.019	.073	.613	2.627	.024	.762
	rweathd	0.266	.085	.724	3.139	.009	.780
K	(Constant)	.284	.030		9.584	.000	
	mcp	-4.2E-04	.000	-.729	-7.156	.001	.458
	gneiss	-.109	.027	-.408	-4.078	.010	.475
	rweathd	.174	.041	.443	4.270	.008	.442
rclay	.372	.030	.924	12.280	.000	.839	1.192
N	(Constant)	9.1E-02	.010		9.221	.000	
	mcp	-7.7E-05	.000	-.465	-4.234	.000	.954
	volcanic	-2.8E-02	.013	-.242	-2.178	.041	.930
	sedim	7.9E-02	.015	.604	5.438	.000	.931
rclay	-4.0E-02	.015	-.296	-2.687	.014	.947	1.056
Y-S	(Constant)	.181	.034		5.307	.000	
	mcp	-2.7E-05	.000	-.553	-4.162	.002	.828
	mtp	-7.5E-05	.000	-.659	-3.784	.004	.481
	granite	-3.0E-02	.006	-1.015	-5.270	.001	.393
	volcanic	-3.0E-02	.006	-.686	-4.657	.001	.672
rgravel	-3.9E-02	.008	-.708	-4.961	.001	.717	1.395

*H : Han river basin, K : Keum river basin, N : Nakdong river basin, Y-S : Youngsan-Seomjin river basin

Table 5. Equations for recharge ratios in river basins, South Korea.

River basins	Equations for Recharge Ratio
Han	$0.220 - 0.031 \times mdw + 0.019 \times rsand + 0.266 \times rweathd$
Keum	$0.284 - 0.00042 \times mcp - 0.109 \times gneiss + 0.174 \times rweathd + 0.372 \times rclay$
Nakdong	$0.091 - 0.000077 \times mcp - 0.028 \times volcanic + 0.079 \times sedim - 0.04 \times rclay$
Youngsan & Seomjin	$0.181 - 0.000027 \times mcp - 0.000075 \times mtp - 0.03 \times granite - 0.03 \times volcanic - 0.039 \times rgravel$

*rsand : ratio of thickness of sand layer to depth to watertable
 rweathd : ratio of thickness of weathered layer to depth to watertable
 rclay : ratio of thickness of clay layer to depth to watertable
 rgravel : ratio of thickness of gravel layer to depth to watertable
 sedim : sedimentary rock
 mtp : Annual Mean Precipitation(mm)
 gneiss, volcanic, granite, sedim : binary parameter (0 or 1)

Table 6. Errors of models in river basins.

Error	Basin	Han	Keum	Nakdong	Youngsan & Seomjin	Total
	# of sites		15	10	26	15
RMSE		0.079338	0.018953	0.020533	0.005393	0.08440446
ME		-6.7E-07	1E-06	-2.7E-19	-6.7E-07	3.0303E-07
MAE		0.010427	0.001831	0.000701	0.000175	0.0015253
RN		0.286585	0.320969	0.212421	0.23207	0.19006589
S		0.082123	0.019978	0.020939	0.005583	0.08505125

RMSE : Root Mean Square Error, ME : Mean Error, MAE : Absolute Mean Error, RN : Normalized Mean, S : Standard Deviation

서 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하였다. 모델치와 정확한 해석학적인 모델식으로 계산한 값이 서로 부합할 때 그 모델은 검증(Verification)되었다고 할 수 있다(한정상과 한 찬, 1999). RMSE를 구하는 수식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Model - Analytic)^2}{n}}$$

Model : 모델에 의해서 예측된 값
 Analytic : 지하수위변동곡선법 수식에 의해서 계산된 값
 n : 자료의 수 (2)

위의 식 (2)를 이용해서 전체 유역 및 각 유역의 모델에 의해서 계산된 모델치와 해석치에 대해서 구한 RMSE 는 Table 6과 같다.

계산에 사용된 해석치는 각 지점에서 3년 동안('97, '98, '99년) 관측한 지하수위 곡선에 대하여 지하수위 변동 곡선법을 적용해서 계산한 함양률들의 평균값이다. 모델치 또한 비포화대두께의 3년간 평균치와 매질의 두께 비율 및 평균 강수량, 평균 유효 강수량, 암

상의 유무 등을 통해 성립된 모델로부터 계산되었다 (Table 7).

RMSE는 전체 10% 미만의 오차율을 가지는 것으로 나타났으며 특히 영산강·섬진강 유역(0.54%), 금강 유역(1.9%), 낙동강 유역(2.1%)은 모델치와 해석치 간에 거의 차이가 없다(Table 8).

한강 유역의 모델은 다른 유역들에 비해서 오차율(7.9%)이 증가하였고 전체 유역의 모델은 이보다 더 증가하여(8.4%) 전체 유역보다는 각 유역별로 수립한 모델들을 이용하는 것이 더 타당하게 나타났다.

1997년부터 1999년까지의 수위 자료에 대해서 검증된 모델을 사용하여 이번에는 2000년 수위 자료에 대해서 예측 작업을 실시했다. 각 유역별로 시기가 달라짐에 따라 변화된 모델의 변수에 따라 예측한 모델치와 지하수위 변동 곡선법을 이용하여 계산한 해석치 사이에 RMSE를 고려하여 모델의 예측 능력을 평가했다(Table 7). 그 결과 모든 유역에서 10% 이하의 RMSE를 보였으며 유역별 평균 함양률 또한 상응하는 값들로 나타났다. 이것은 각 지점별로 나타나는 지하수위 변동 곡선의 유형이 강수량과 함께 해마다 유사함을 의미한다. Table 9는 한강유역의 모델로 2000년

Table 7. Independent variables of the multiple regression model : an example of the Han river basin.

	mdw	rsand	rweathd	mcp	S	R97	R98	R99	av_r	Model	RESIDual
Sungku	3.95	0	0.00	239.8333	0.01095*	0.027375	0.05164	0.066889	0.048635	0.09854	-0.0499
Kwioon	6.56	0	1.00	207.9333	0.0627	0.575566	0.266848	0.478564	0.440326	0.28392	0.15641
Mapyung	2.67	0	0.00	363.7	0.0627	0.135286	0.174252	0.175306	0.161615	0.1379	0.02371
Tongbok	6.78	0	0.64	361.4	0.0627	0.101819	0.066746	0.018712	0.062426	0.18118	-0.11876
Kimpo	5.03	0	0.00	674.6667	0.0627	0.056533	0.072103	0.141245	0.08996	0.06553	0.02443
Yulhyun	3.31	1	0.00	277.8333	0.0627	0.422298	0.395492	0.340797	0.386196	0.30925	-0.07694
Munmak	4.66	0.32081	0.68	329.3667	0.0627	0.214036	0.327029	0.166555	0.235873	0.31843	-0.08256
Sinkok	5.09	1	0.00	533.8667	0.0627	0.208193	0.109115	0.085064	0.134124	0.25456	-0.12043
Kapyung	3.08	0	0.00	532.9333	0.0627	0.259418	0.180941	0.028665	0.156342	0.12551	0.03083
Woodu	6.03	0.331248	0.00	702.7667	0.0627	0.210188	0.099297	0.1529	0.154128	0.09797	0.05616
Takeum	10.76	0.970818	0.03	755.9333	0.0627	0.172341	0.114735	0.089389	0.125488	0.08234	0.04315
Koam	1.65	0	0.00	337.25	0.0627		0.092614	0.121295	0.106955	0.16922	-0.06227
Dongryang	8.60	0.464953	0.42	692.8	0.0627			0.094122	0.094122	0.15549	-0.06136
Kunja	6.72	0.107496	0.00	531.3	0.0627			0.012984	0.012984	0.03383	-0.02085
Hongje	3.89	0.385213	0.00	256.8	0.0627			0.278341	0.278341	0.17385	0.10449

*S corresponding to the western basin, S : Specific yield, R97 : Recharge ratio of the year 1997, R98 : Recharge ratio of the year 1998, R99 : Recharge ratio of the year 1999, av_r : Averaged recharge ratio of the 3 years, RESIDual : Model -av_r

Table 8. RMSE and Mean of prediction of the model for the Year 2000.

Statistics		River basin			
		Han	Keum	Nakdong	Youngsan · Seomjin
RMSE		0.074348	0.09203	0.038262	0.039297
Mean	Model	0.134	0.206	0.073	0.035
	Analytic	0.150	0.237	0.085	0.042

1월 1일부터 12월 31일까지 관측된 지하수위 변동 곡선으로부터 계산한 비포화대 두께(표고-연평균지하수위)가 해마다 변함에 따라 구성매질의 두께 비율 또한 변화였다.

특히, 동해귀운에 대해 모델은 0에 가까운 음수의 함양률을 예측하였는데 이것은 수식에서 모래비율 및 풍화비율이 없고, 평균 비포화대의 두께가 모델을 만들 때의 두께보다 더 커졌기 때문이다. 금강 유역의 아산도고 지점, 낙동강 유역의 진주초전 지점, 영산강·섬진강 유역의 함평신광 지점 모두 동일한 이유에 의해서 음수의 함양률이 산출되었고 이 값들은 모두 0에 가깝다.

3.4. GIS를 이용한 공간적 특성 평가

검증된 다중 회귀 모델식으로부터 각 수리지질학적 변수들의 지하수 함양률에 대한 기여도가 정량화되었다. 그러므로 각 변수들의 공간적인 분포 특성을 파악하고 함양률에 대한 기여도가 정량적으로 부여됨으로써 함양률의 공간적인 분포 특성을 규명할 수 있다. 이를 위해서 복수개 인자들의 공간 분포 특성을 파악

Table 9. Independent variables of multiple regression model : an example of the Han river basin for the Year 2000.

Sites	mdw	rsand	rweathd	Model	Analytic
Kakum	10.90	0.96	0.03	0.074	0.107
Dongryang	8.50	0.47	0.00	0.062	0.127
Tongbok	6.62	0.00	0.64	0.186	0.011
Kunja	6.92	0.13	0.00	0.025	0.020
Koam	1.59	0.00	0.00	0.171	0.173
Woodu	6.61	0.30	0.00	0.073	0.155
Kwioon	7.20	0.00	0.00	-0.003	0.302
Kimpo	5.03	0.00	0.00	0.064	0.119
Sinkok	5.35	1.00	0.00	0.236	0.182
Yulhyun	3.50	1.00	0.00	0.294	0.429
Hongje	3.92	0.38	0.00	0.172	0.215
Kapyung	3.12	0.00	0.00	0.123	0.120
Munmak	4.80	0.31	0.00	0.131	0.181
Mapyung	2.67	0.00	0.00	0.137	0.116

하고 각 인자들이 함양률 평가에 미치는 기여도를 종합적으로 고려할 수 있는 프로그램인 GIS(ESRI, ArcView ver. 3.2)를 사용하였다.

Table 10. Areas of river basins.

River basin	Han	Keum	Nakdong	Youngsan & Seomjin	Total
Area(km ²)	32,971.4	14,308.3	31,711.5	18,618.1	97,609.3

3.4.1. 수행 절차

본 연구에서는 남한 내륙 지역 전체에 대해서 그리고 함양 모델의 신뢰도를 높이기 위하여 5대강 유역별로 함양률을 평가하였다. GIS를 이용하여 함양률의 공간적인 분포 특성을 평가하기 위하여 우선 함양 모델에서 함양률에 기여하는 변수들의 수치 지도들을 같은 좌표체계에 마련하였다. 남한 내륙 전체 지역의 함양률 평가를 위하여 마련된 도면에 대해서 기여도를 부여한 후 산출 계산에 해당하는 중첩(overlay)을 실시하였다. ArcView에서 중첩 기능은 각 도면을 Grid로 변환시킨 후 Map Calculation 및 Map Query 기법에 의하여 수행된다. 함양률 평가의 신뢰도를 높이기 위하여 전체 유역을 한강, 금강, 낙동강, 영산강과 섬진강 유역 등 총 4개의 대유역으로 구분한 후 각 유역에 대해서 산출된 함양률 모델식에 의거하여 동일한 과정을 거쳐 GIS 중첩 과정을 실시하였다. 이 때에는 각 유역별로 도면들을 세분하기 위하여 Map Masking 과정을 거쳤다.

3.4.2. 수치 지도

남한 전체 지역 및 유역 경계 도면은 TM(Transverse Mercator) 좌표체계에 의해서 생성된 도면으로 전체 면적 및 각 유역별 면적은 Table 10과 같으며 수리지질도면과 함께 한국수자원공사로부터 얻어 가공한 후 사용하였다.

전국 수리지질도면은 우리나라의 지질시대, 암석의 종류, 암상, 지형, 공극의 형태 및 세부수리지질특성(투수계수, 투수량계수, 저류계수, 지하수 산출량) 등을 대표적인 설정기준으로 하여서 구분된 도면이다. 이 도면은 우리나라의 암석을 변성암, 석회암, 고기퇴적암, 관입화성암, 비다공질화산암, 신기퇴적암, 다공질화산암 및 미고결퇴적층 등 총 8개의 수문지질단위로 구분하였다(Fig. 2(a)).

본 연구에서 지질이 지하수 함양률에 기여하는 경우는 금강 유역, 낙동강 유역, 영산강·섬진강 유역들이며 각각 편마암, 화산암과 퇴적암, 화강암과 화산암이 함양률에 대해 기여하고 있으며 이 암상들은 Vector 형식의 도면을 Grid 형식의 자료구조로 변환시킨 후 Map Query를 통하여 추출하여 적용하였다.

그 밖에 함양률에 기여하는 변수들인 토양, 비포화대 두께, 유효 강수량 및 연평균 강수량 등은 국가지

하수관측망의 제원표 및 한국기상청의 자료로부터 2차적으로 가공한 후 적용하였다. 모든 경우가 점자료(point data)이므로 이를 광역화(regionalization)하기 위하여 보간법(interpolation)을 사용하였다. 이 때 사용된 보간법은 IDW(Inverse Distance Weighting)으로서 한 지점의 실제값이 거리에 따라 감소하는 지역적인 영향정도를 가지는 것으로 가장한 방법으로서 실제값에서 멀리 떨어져 있는 지점들보다 가까이에 분포하는 격자들에 더 높은 가중치를 부여한다. 본 방법을 사용해서 생성된 격자형 도면들의 격자 크기는 가로 세로 모두 2.23 km에 해당한다.

전체 유역 : 남한 내륙 전체 지역의 함양률에 대한 다중 회귀 모델에서 종속변수인 함양률에 영향을 미치는 독립변수들은 비포화대 두께와 유효 강수량이다. 비포화대 두께는 총 5개의 간격으로 분류하였고 최저 0.094 m에서 최고 15.592 m까지 분포하였다(Fig. 2(b)). 주로 서해안 중 충청남도 지역에서 비포화대 두께가 깊이 존재하고 있는 것으로 나타났으며 충청북도 와 동해안 지역의 강원도 남부 및 경상북도 북부 지역에서 그 다음 크기의 두께를 보이고 있다. 이러한 분포 특성은 전체 함양률의 분포 특성에 그대로 반영되었는데, 이것은 회귀계수의 값이 크게 작용하고 있기 때문이다. 한편, 유효 강수량은 경기 북부 지역과 충청북도와 전라남북도 및 경상남북도의 경계를 따라 남북 방향으로 높은 값의 분포를 보이고 있다(Fig. 2(c)). 이 특성 또한 회귀계수가 함양률의 증가 방향과 역으로 작용하고 있기 때문에 전체 함양률의 분포 특성에 그대로 반영되어 경기 북부 지역 및 전라와 경상 남북도의 경계에서는 함양률의 값이 높게 나타나지 않았다. 남한 내륙 전체 지역의 함양률은 최고 0.277 즉, 강수 대비 27.7%의 값을 나타내고 있으며 최고값은 충청남도 서해안 지역에 분포한다(Fig. 2(d)).

한강 유역 : 한강 유역에서 함양률에 큰 영향을 미치고 있는 변수는 풍화대이다. 풍화대는 동해안 중 한강 유역의 남부 지역에서 가장 높은 값을 보이고 한강 유역의 중하부 지역에서 그 다음의 크기를 갖는다. 이러한 풍화대의 분포 특성이 한강 유역의 함양률 분포 특성에 그대로 반영되었으며, 모래층의 분포 특성 또한 함양률의 분포와 음의 상관성을 가지며 기여하고

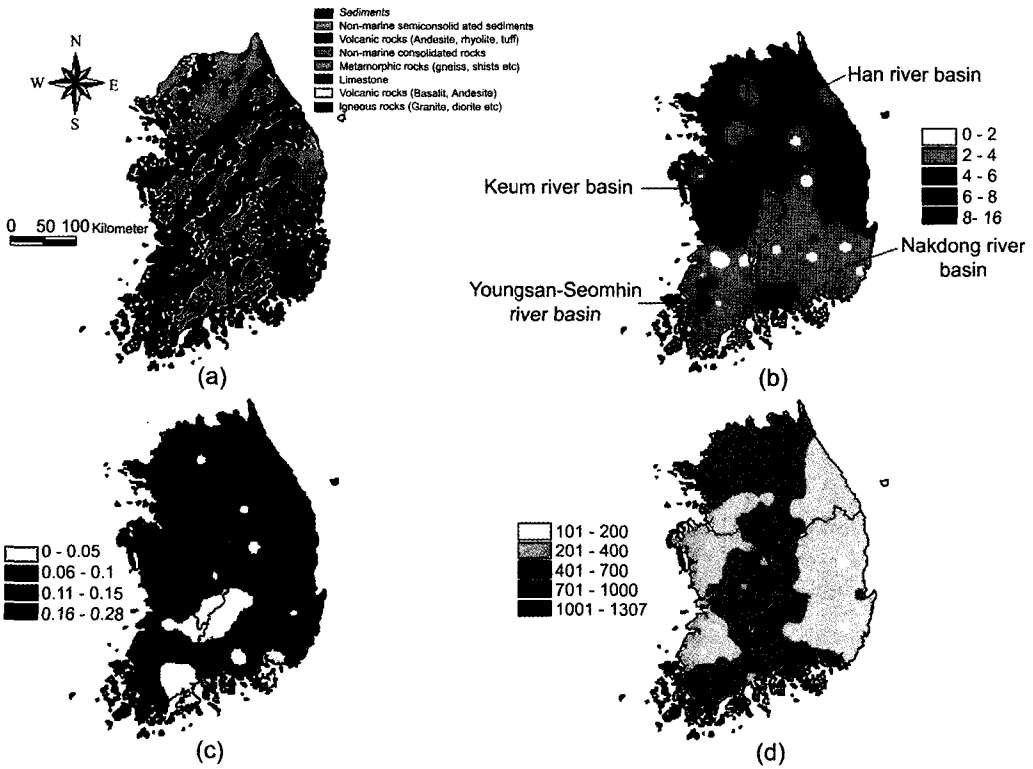


Fig. 2. GIS input/output layers for spatial distribution of recharge, South Korea; (a) hydrogeological map, (b) thickness of vadose zone (unit : m), (c) annual mean of cumulative precipitation contributing to water table rise (unit : mm), (d) recharge distribution of South Korea (unit : %).

있다. 도면은 0.047의 등간격으로 범례가 생성되었고 함양률은 모델수식에 의하여 최고 42.3%까지 보이고 있다.

금강 유역 : 금강 유역에서 함양률에 대하여 비례하는 방향으로 기여하고 있는 변수는 점토층과 풍화대이다. 따라서 점토층이 두껍게 분포하는 서남부 지역은 함양률이 최대 49.2% 까지 보이고 있고, 풍화대가 두껍게 분포하는 동부 지역도 최대 32%의 비율을 보인다. 한편, 함양률의 증가 방향에 대해서 반비례하는 방향의 변수는 편마암과 유효 강수량이다. 따라서 최대 함양률을 보이는 지역을 제외하고 편마암이 분포하는 지역을 따라 함양률의 값이 20.5% 이하로 떨어졌고 유효 강수량이 많은 동남부 지대에서 함양률의 값이 대부분 26.2% 이하의 값으로 분포한다.

낙동강 유역 : 낙동강 유역은 지질의 특성이 함양률의 분포 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 낙동강 유역에서 지하수 함양 모델식에 영향을 미치는 지질 중 퇴적암은 함양률과 정비례하는 특성을 가지고 있는 바 퇴적암 지대에서 주로 10.2%에서

15.6%까지 분포하고 있다. 그러나 지질 중 화산암이 분포하는 곳을 따라 주로 6.6%에서 8.4%의 값으로 분포하는데 이는 수식에서 알 수 있듯이 함양률과 화산암이 반비례하는 관계에 있기 때문이다. 마찬가지로 유효강수량과 점토층의 두께 또한 함양률과 반비례하는 관계를 가지므로 점토층의 두께가 얇은 전라남북도와 경계부분 및 포항, 부산 지역에서 함양률의 값이 2.9% 이하로 낮아졌으며 유효강수량이 많은 유역의 남서부 지역에서 최소값을 보인다. 전체적으로 낙동강 유역의 함양률은 최고 15.6%로서 한강유역 및 금강 유역에 비하여 작다.

영산강 · 섬진강 유역 : 영산강 · 섬진강 유역은 모델 수식 관련 변수들이 함양률의 증가 방향에 대해서 반비례하는 특성을 가지고 있다. 따라서 유효 강수량이 많은 남부 지역의 중앙 지점에서 함양률의 값이 작아지고, 자갈층의 두께가 두꺼운 서부 지역의 중앙 지점에서 함양률의 값이 더 작아졌다. 이 때 음수의 값을 보이는 것은 모델의 한계에 해당한다. 연평균 강수량이 높은 남동부 지역은 다른 변수들보다 함양률에 대해서

기여도가 적기 때문에 강수량이 많았을지라도 함양률을 많이 낮추지 못하였다. 또한 유역의 대각선 방향으로 분포하는 화강암과 해안가를 따라 산재해 있는 화산암에 의하여 함양률은 평균 약 2.4% 만큼 낮추어졌다.

4. 토의 및 결론

1. 3년간의 함양률 분석 결과 지하수 함양률은 같은 지점에서일지라도 시간에 따라서 혹은 같은 시간일지라도 지역에 따라서 변동성을 보이고 있으며 최대 함양률을 보이는 지점은 한강과 금강 유역에 존재하고 있다.

2. 전체 관측 지점들의 수리지질학적 독립변수들과 3년 간의 평균 함양률에 대해서 다중 회귀분석 모델을 구축한 결과 유효 강수량과 평균 비포화대 두께가 각각 함양률에 대해서 -0.274, 0.458의 기여도를 보였다. 비포화대 두께가 깊게 분포하는 금강유역의 서해안 지역에서 강수 대비 최고 27.7%의 함양률을 보였으며 동해안의 강원도 남부와 경상북도 북부 지역이 11.2%에서 14.5%의 작은 함양률을 보였다.

3. 유역별 함양률과 수리지질학적 변수들로 구성된 다중회귀모델의 설명력은 전체 관측 지점들에 대한 모델의 설명력 24.9%를 능가하였다(한강 유역 : 54.3%, 금강 유역 : 97.6%, 낙동강 유역 : 87.1%, 영산강·섬진강 유역 : 86.9%).

4. 한강유역에서 각 변수들이 함양률에 미치는 기여도(β)는 풍화대가 가장 크고, 그 다음이 모래층이며 비포화대 두께는 함양률을 감소시키는 방향으로 기여하고 있다. 금강 유역에서는 점토층, 유효 강수량, 풍화대, 편마암의 존재 순이며 점토층과 풍화대는 함양률을 증가시키는 방향으로, 유효 강수량과 편마암은 감소시키는 방향으로 기여하고 있다. 낙동강 유역에서는 퇴적암의 존재, 유효 강수량, 점토층, 화산암 순이며 퇴적암만 함양률을 증가시키는 방향이고 나머지 변수들은 모두 함양률을 감소시키는 방향으로 기여하고 있다. 영산강·섬진강 유역에서는 화강암의 존재, 자갈층, 화산암의 존재, 연평균 강수량, 유효 강수량 순이며 모두 함양률을 감소시키는 방향으로 기여하고 있다. 동일한 수리지질학적 변수들이 유역에 따라 함양률에 대해서 비례 혹은 반비례의 관계를 가지는 이유는 다른 수리지질학적 변수의 영향이 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

5. 다중 회귀 분석 모델을 이용한 함양률의 모델값과 지하수위변동곡선법을 이용한 함양률의 해석값에 대한 RMS 오차를 분석한 결과 전체 유역 및 각 유역의

모델에 대해서 모두 10% 미만의 오차를 보였으며 전체 유역의 모델보다는 각 유역별로 수립한 모델들의 오차가 더 작게 나타났으므로 더욱 신뢰성이 있는 것으로 평가되었다.

6. 1997년부터 1999년까지의 수위 자료에 대해서 검증된 모델을 사용하여 2000년 수위 자료에 대해서 예측 작업을 실시한 결과 모든 유역에서 10% 이하의 RMS 오차를 보였다.

7. 전체 유역 및 각 유역별 함양률의 분포는 각 수리지질학적 변수들의 기여도에 따라 결정되었다. 전체 유역의 함양률 분포는 중부 지역 및 경상북도 일대에서 약 8% 이상의 값을 보이고 남부 지역에서는 그 이하의 값을 보이며 충청남도 서해안 일대에서 최고 0.277(강수 대비 27.7%)을 보였다. 한강유역에서는 강원도 일대가 경기도보다 높은 함양률(약 5% 이상)을 보였고 금강유역에서는 주로 함양률이 감소하는 방향으로 기여하는 편마암이 존재하는 곳에서 약 15% 이상의 높은 함양률이 분포하였다. 낙동강 유역에서도 지질의 영향이 전체 함양률 분포에 크게 나타난 바 퇴적암이 분포하는 곳을 따라 12% 이상의 함양률이 분포하였고 영산강·섬진강 유역에서는 회귀분석 모델링 결과 함양률에 대해서 감소하는 방향으로 기여하는 수리지질학적 변수들이 존재하는 곳에서 약 2% 이하의 낮은 함양률이 분포하였다.

Fig. 1의 부여부여 지점은 1997년도에 강수량 대비 88%에 육박하는 함양률을 보였는데, 이는 3년 간의 관측기간 중 최대값일 뿐만 아니라 같은 부여지점에서도 약 50%의 차이를 보이는 이상치이다(Fig. 1(b)). 이러한 이상치는 비피압 대수층에서 세립질의 표토층인 경우 비가 와서 지하수 침투할 때 발생하는 ‘Lisse 효과’(Krul and Liefrinck, 1976; Meyboom, 1967; McWhorter, 1971)로서 설명할 수 있다. 즉 이 지점은 비피압 대수층일 뿐만 아니라 비포화대의 구성 매질이 세립의 점토층으로서 두께도 15 m에 이르는 지점으로서 비가 침투될 때 지하수면과 wetting front 사이에 갇혀 있던 공기(entrapped air)의 이동속도가 물의 유동 속도보다 빨라 급격한 수위상승이 유발된 것으로 해석할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-13200-003)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 한정상, 환찬 (1999) 3차원 지하수모델과 응용. 박영사, 서울, 173p.
- 허만형 (2001) SPSS 10.0 for Windows 통계분석론. 법문사.
- Arnold, J.G., Mutiah, R.S., Srinivasan, R. and Allen, P.M. (2000) Regional Estimation of Base Flow and Groundwater Recharge in the Upper Mississippi River Basin. *Journal of Hydrology*, v. 227, p. 21-40.
- De Vries, J.J. and Simmers, I. (2002) Groundwater Recharge: an Overview of Processes and Challenges. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 5-17.
- Fayer, M.J., Gee, G.W., Rockhold, M.L., Freshley, M.D. and Walters, T.B. (1996) Estimating Recharge Rates for a Groundwater Model using a GIS. *Journal of Environmental Quality*, v. 25(3), p. 510-518.
- Gouweleeuw, B.T. (2000) Satellite Passive Microwave Surface Moisture Monitoring, Thesis. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J. (1978) Mining Geostatistics. Academic Press, London, 600p.
- Kenneth, R. Bradbury, Weston, Dripps, Chip Hankley, Mary P. Anderson, and Kenneth W. Potter (2000) Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates. Wisconsin Geological and Natural History Survey
- Krul, W.F. and Lieftrinck, F.A. (1946) Recent Groundwater Investigations in the Netherlands, Monograph on the Progress of Research in Holland, Elsevier, New York, 78p.
- McWhorter, D.B. (1971) Infiltration Affected by Flow of Air. Hydrology Paper 49. Colorado State Univ, Fort Collins, CO, 43p.
- Meyboom, P. (1967) Groundwater Studies in the Assiniboine River Drainage Basin-Part II: Hydrologic Characteristics of Phreatophytic Vegetation in South-Central Saskatchewan. Geological Survey Canadian Bulletin 139, 64p.
- Rogowski, A.S. (1996) GIS Modeling of Recharge on a Watershed. *Journal of Environmental Quality*, v. 25(3), p.463-474.
- Sophocleous, M. (1992) Groundwater Recharge Estimation and Regionalization: the Great Bend Prairie of Central Kansas and its Recharge Statistics. *Journal of Hydrology*, v. 137, p. 113-140.
- Sophocleous, M.A. (1983) Groundwater Observation Network Design for the Kansas Groundwater Management Districts USA. *Journal of Hydrology*, v. 61, p. 371-389.

2002년 9월 26일 원고접수, 2002년 10월 24일 게재승인.