

## 시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정

김남원<sup>1</sup> · 정일문<sup>1\*</sup> · 원유승<sup>2</sup> · 이정우<sup>1</sup> · 이병주<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원, <sup>2</sup>건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터

## The Estimation of Groundwater Recharge with Spatial-Temporal Variability at the Musimcheon Catchment

Nam-Won Kim<sup>1</sup> · Il-Moon Chung<sup>1\*</sup> · Yoo-Seung Won<sup>2</sup> · Jeongwoo Lee<sup>1</sup> · Byung Ju Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2</sup>River Information Center of Han River Flood Control Office, MOCT

### ABSTRACT

The accurate estimation of groundwater recharge is important for the proper management of groundwater systems. The widely used techniques of groundwater recharge estimation include water table fluctuation method, baseflow separation method, and annual water balance method. However, these methods can not represent the temporal-spatial variability of recharge resulting from climatic condition, land use, soil storage and hydrogeological heterogeneity because the methods are all based on the lumped concept and local scale problems. Therefore, the objective of this paper is to present an effective method for estimating groundwater recharge with spatial-temporal variability using the SWAT model which can represent the heterogeneity of the watershed. The SWAT model can simulate daily surface runoff, evapotranspiration, soil storage, recharge, and groundwater flow within the watershed. The model was applied to the Musimcheon watershed located in the upstream of Mihocheon watershed. Hydrological components were determined during the period from 2001 to 2004, and the validity of the results was tested by comparing the estimated runoff with the observed runoff at the outlet of the catchment. The results of temporal and spatial variations of groundwater recharge were presented here. This study suggests that variations in recharge can be significantly affected by subbasin slope as well as land use.

**Key words :** Groundwater recharge, SWAT model, Spatial-temporal variability

### 요 약 문

지하수 함양량을 정확하게 산정하는 것은 지하수계의 적절한 관리를 위해서 매우 중요하다. 국내에서 주로 사용되는 지하수 함양량 추정방법은 지하수위 변동법, 기저유출 분리법, 연단위 물수지 분석법 등이 있다. 그러나, 이들 방법은 집중형 개념을 기반으로 하거나 국지적인 규모로 다루어지기 때문에 기후조건, 토지이용, 토양조건, 수리지질학적 비균질성에 의한 함양량의 시공간적 변동성을 반영할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 유역내의 토양 및 토지이용에 따른 비균질성을 반영할 수 있는 SWAT 모형을 이용하여 시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량을 산정하는 방법을 제시하였다. SWAT 모형은 유역내 일단위 지표면 유출량, 증발산량, 토양저류량, 함양량, 지하수유출량 등의 수문성분을 계산할 수 있는 모형이다. 본 연구에서는 SWAT 모형을 미호천 유역의 최상류인 무심천 유역에 적용하였다. 2001년-2004년까지의 기간동안 지하수 함양량을 포함한 유역의 일단위 수문성분들을 모의하였으며, 유역출구점에서의 실측 일유출자료와 모의 일유출자료의 비교를 통해서 모의결과의 유효성을 검토하였다. 지하수 함양량의 시공간적 변화를 분석한 결과, 지하수 함양량의 변동성은 토지이용도 뿐만 아니라, 유역경사와 같은 지형인자에도 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

**주제어 :** 지하수 함양량, SWAT 모형, 시공간적 변동성

\*Corresponding author : imchung@kict.re.kr

원고접수일 : 2006. 5. 29 게재승인일 : 2006. 8. 1

질의 및 토의 : 2006. 12. 31 까지

## 1. 서 론

지하수 관리에 있어서 대수층의 자연함양량에 대한 지식은 개발가능량을 추정하는 근거가 된다. 얇은 대수층으로의 지하수 함양과 유출특성은 효율적인 지하수자원개발 뿐 아니라 대수층과 연결된 하천으로의 오염위험을 최소화시키기 위한 지하수 관리에도 중요한 요소가 된다. 얇은 대수층으로의 지하수 함양은 매우 복잡한 과정으로, 강우의 빈도, 강도, 지속시간 뿐 아니라 온도, 습도, 풍속과 지하수위 상부에 존재하는 토양 및 암반층의 특성과 깊이, 지표의 지형과 식생분포 및 토지이용과도 관련된다 (Memon, 1995).

국내외에서 적용되는 지하수 함양량 추정방법의 대표적인 방법은 기저유출-감수곡선 분석법(Meyboom, 1961; Barnes, 1939; Fetter, 1994; 박창근, 1996; 이동률, 1995; Rutledge, 1998; Arnold와 Allen, 1999; 이도훈, 2002)에 의한 분석법이다. 이 방법들은 비교적 널리 적용되어 왔으나, 함양-배출의 기본가정이 연 기반(annual base)이므로 1년 단위로 문제를 해결함으로 인해 계절성, 월별 변화 등은 반영되지 못하는 단점이 있다. 또한 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용, 관개와 수리지질학적 비균질성에 의해 현저한 시공간적 변동성을 나타내고 있어(Sharma, 1989), 이와 같은 집중형 개념의 방법은 시공간적 분포상황에 관한 해석에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

지하수 함양량을 추정하는 또 다른 대표적인 방법은 지하수위 변동곡선 해석법(Water-table fluctuation method: WTF)으로 이 방법은 Theis(1937)에 의해 처음 제시됐고 Sophocleous(1991)에 의해 그 장점이 부각됐으며, Winter 등(2000)에 의해 구체적인 적용이 수행됐고, 구민호와 이대하(2002), Moon 등(2004)에 의해 수정 발전되었다. 이 방법은 관측공의 수위 변화에 비산출율을 곱하여 실질적인 지하수 함양량을 계산하는데, 관측공의 변화에만 의존하므로 유역기반의 물수지 관점에서는 제한적으로 적용될 수 밖에 없다. 이 밖에도 침투모델(구민호와 김용제, 2003) 등 지하수 함양량을 추정하는 여러 가지 방법들이 개발되어 왔으나 독특한 특성들을 가지고 있어 유역단위 시공간 특성을 반영한 함양량을 산정하기에는 여러 가지 제한이 있다.

이와 같은 여러 한계를 극복한 연구로서 국내에서는 김성준과 채효석(2000)이 격자기반의 토양수분 추적에 의한 월별 지하수 함양량 추정기법을 보청천 유역의 이평교 유역을 대상으로 적용하였다. 배상근과 이승현(2004)은 SCS-CN방법을 이용하여 토지이용과 토양의 분포특성을

반영한 위천유역내의 지하수 함양량을 추정하였다. Arnold 등(2000)은 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형을 이용하여 미시시피강 유역의 지하수 함양량을 추정하였고, 이를 기저유출 분리법의 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 지하수 함양량의 시공간적인 변동성향을 정량적으로 추정할 수 있는 방안을 제시하는 한편, 우리나라 실제 유역에의 적용성을 검토하여 기존의 여러 방법이 가진 한계를 극복하고자 하였다. 이를 위해 수문성분 해석 이론이 잘 정립된 SWAT모형(Arnold 등, 1993)을 이용하여 무심천 유역을 대상으로 지하수 함양량의 시공간적 변화를 고찰하였다.

## 2. SWAT 모형을 이용한 지하수 함양량 산정 방법

SWAT모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Arnold 등(1993)에 의해 개발된 것으로 토지이용변화에 따른 물 순환 변화를 해석할 수 있는 준 분포형 유출모형이다. 이 모형은 SCS-CN 방법을 이용한 직접유출량 산정, Penman-Monteith식을 이용한 증발산량 계산, 다양한 토지이용도와 토양층의 특성을 반영한 토양수분량과 지하수 함양량을 계산할 수 있으며, 함양량의 지체와 기저유출의 감수를 고려한 지하수 유출을 해석할 수 있다.

준 분포형 유출모형인 SWAT 모형에서 유역은 유역의 규모, 유량관측지점 또는 사용자의 요구에 따라 여러 소유역으로 분할되고, 소유역은 다시 동일한 수문응답특성을 갖는 여러 개의 HRU(Hydrologic Response Unit)로 구성된다. 따라서 지표면, 지표하, 지하수의 수문성분은 개개의 HRU에 대해 각각의 수문성분량을 산정한 다음 소유역에 대하여 지체된 후 합산된다. 이렇게 합산된 각 수문성분량이 소유역의 주수로에 유입된다고 가정하여 상류 소유역에서 하류 소유역으로 하도추적이 이루어진다. SWAT 모형의 수문순환 개념도는 Fig. 1과 같으며 Fig. 2는 물의 이동에 관한 전반적인 경로를 나타낸 것이다.

지하수 함양은 강수에 의해 침투된 물이 토양층을 거쳐 얇은 대수층으로 유입되는 것으로 정의되며 기저유출성분으로 배출될 때 까지 시간적 지체가 나타나며 일부는 증발에 의해 소모되기도 한다. 특히 지하수 함양에 있어서는 침투(percolation)나 우회흐름(bypass flow)에 의해 토양층의 가장 낮은 깊이를 통과하는 물은 얇은 대수층으로 함양되기 전에 비포화대(vadose zone)으로 유입되어 흐르

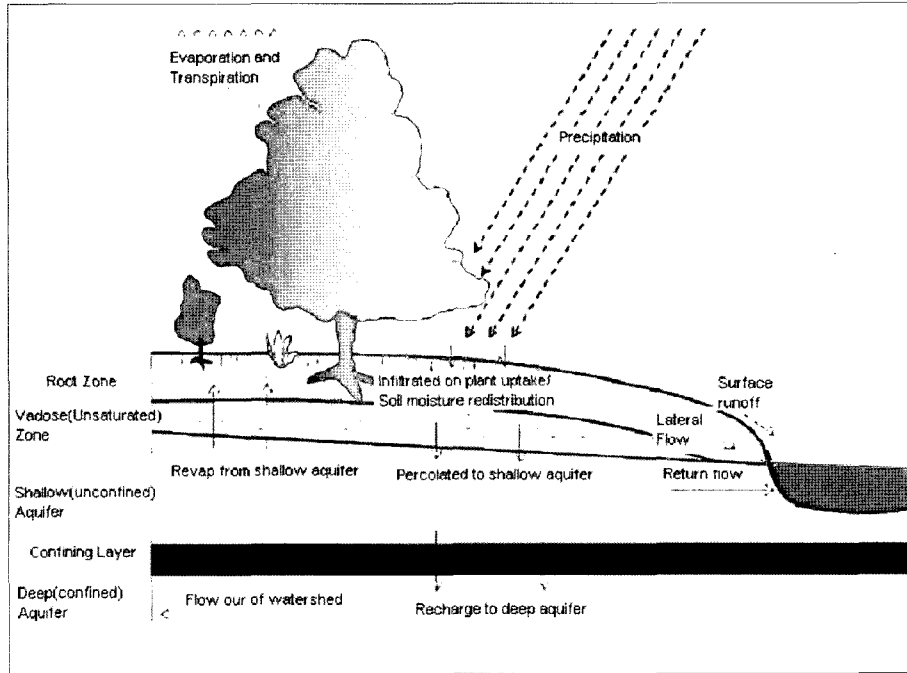


Fig. 1. Schematic representation of hydrological cycle (Neitsch et al., 2001).

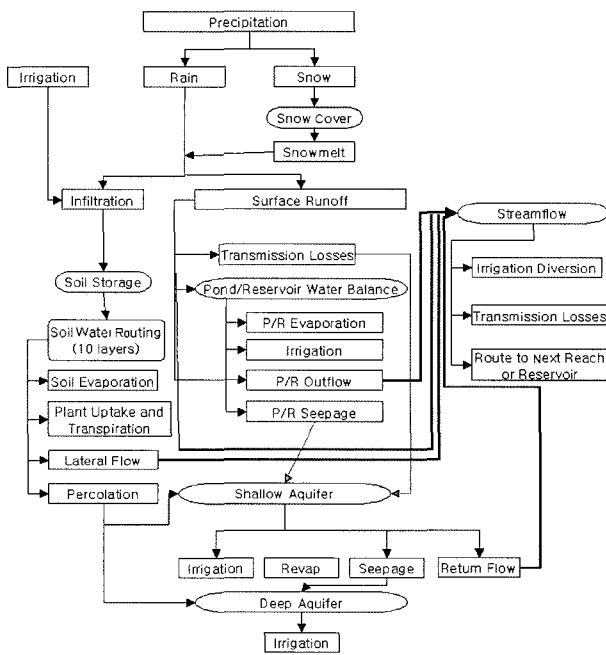


Fig. 2. Schematic flow chart of pathways available for water movement in SWAT (Neitsch et al., 2001).

계 된다. 침투는 각 토양층별로 계산되는데 함수량이 포장용수량(field capacity)을 초과하는 경우에 일어난다. 토양층에서 침투하는 물의 양은 다음과 같이 계산된다.

$$SW_{ly} > FC_{ly} \text{ 이면, } SW_{ly, excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad (1)$$

$$SW_{ly} \leq FC_{ly} \text{ 이면, } SW_{ly, excess} = 0 \quad (2)$$

여기서  $SW_{ly, excess}$ 는 주어진 날에 토양층에서 배수되는 물의 체적(mm H<sub>2</sub>O),  $SW_{ly}$ 는 토양층의 함수량(mm H<sub>2</sub>O),  $FC_{ly}$ 는 포장용수량(mm H<sub>2</sub>O)이다.

한 토양층에서 아래 토양층으로 이동하는 물의 양은 저류추적방법(Storage routing methodology)에 의해 구해지며 다음 식으로 표현된다.

$$w_{perc,ly} = SW_{ly, excess} \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]\right) \quad (3)$$

여기서  $w_{perc,ly}$ 는 주어진 날에 다음 토양층으로 침투하는 물의 양(mm H<sub>2</sub>O)이며,  $\Delta t$ 는 시간단계길이(hr),  $TT_{perc}$ 는 침투의 유하시간(hr)이다.

토양층내 물이 존재하는 시간과 얇은 대수층으로 흘러가는 시간사이의 지체시간(lag time)은 지하수면의 깊이와 비포화대, 지하수 지대 지질구조의 수리특성에 따라 좌우된다. 토양층에 물이 존재한 후 대수층의 함양까지의 지체시간을 설명하기 위해 SWAT에서는 Venetis(1962)에 의해 제안되고, Sangrey 등(1984)에 의해 사용된, 강수/지하수 반응모형내의 지수형 감쇠 가중함수(exponential decay weighting function)를 사용한다. 지체함수는 토양지대에서 대수층까지의 함양이 순간적(1일 이하)으로 일어나지 않는 곳에 잘 적용된다.

주어진 날의 대수층으로의 함양은 다음과 같이 계산된다.

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad (4)$$

여기서,  $w_{rchrg,i}$ : i일의 대수층 함양수량(mm H<sub>2</sub>O),  $\delta_{gw}$ : 지질층 전역에 대한 지체시간 또는 배수시간(days),  $w_{seep}$ : i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 수량(mm H<sub>2</sub>O),  $w_{rchrg,i-1}$ : i-1일의 대수층 함양수량(mm H<sub>2</sub>O)이다. i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 총 수량은 다음과 같이 계산된다.

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crk,btm} \quad (5)$$

여기서,  $w_{seep}$ : i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 수량(mm H<sub>2</sub>O),  $w_{perc,ly=n}$ : i일에 토양층의 가장 낮은 층 n에서 침투되는 수량(mm H<sub>2</sub>O),  $w_{crk,btm}$ : i일에 우회흐름으로 토양층의 하부경계로 흐르는 수량(mm H<sub>2</sub>O)이다. 지체시간( $\delta_{gw}$ )을 직접적으로 측정하는 것은 불가능하며, 서로 다른  $\delta_{gw}$ 를 사용하여 대수층 함양을 모의하거나, 지하수면의 모의 변화값과 실측값을 비교하여 추정할 수 있다. Johnston(1977)은 유역에 대해 서로 다른 지체시간들을 반복적으로 검토하고 통계적으로 평가할 수 있는 프로그램을 개발했다. Sangrey등(1984)은 동일지역내 관측정에서의  $\delta_{gw}$  값이 비슷하기 때문에, 지형학적 지역에 대한 지체시간이 정의되면, 같은 지역내의 인접한 유역에 대해 비슷한 지체시간이 사용될 수 있음을 제시하였다.

### 3. SWAT 모형의 입력자료 구축

#### 3.1. 대상유역 현황

본 모형의 평가를 위해 미호천 유역 중 최상류부에 위치한 독립유역인 무심천 유역의 청주수위관측소 상류부 유역을 적용대상유역으로 선정하였다. 소유역 구분은 주하도를 따라 크게 3개로 구분하였다. 모의기간은 2001년 1월 1일부터 2004년 12월 31일까지 4년간으로 정하였다. 대상지역에 대한 소유역 현황은 Fig. 3과 같고 각 소유역에 대한 유역특성인자는 Table 1과 같다.

Table 1. Catchment characteristics

Subcatchment	Area (km <sup>2</sup> )	Main stream length (km)	Main stream slope (m/m)	Catchment slope (m/m)	Average elevation (m)
1	45.99	5.87	0.002	0.068	99
2	82.89	11.54	0.006	0.083	139
3	43.65	7.21	0.016	0.141	256

#### 3.2. 수문자료 구축

SWAT 모형을 모의하기 위해서는 강우량을 비롯하여 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등의 기상자료가 요구된다. 강우자료는 무심천 유역 근방에 위치한 건설교통부 관할 청주강우관측소의 자료를, 기상자료로는 청주기상대 자료를 이용하였다. 일반적으로 수문모형 모의시 모형의 보정 및 검증, 결과에 대한 평가를 위해 유량자료가 필요하며, 대상유역 출구부에 위치한 청주 수위관측소의 실측 유량자료를 모형의 적정성 검토에 활용하였다.

#### 3.3. 지형자료 구축

SWAT 모형은 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 유역내 토지이용 상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에서 구축한 DEM, 토지이용도, 토양도는 다음과 같다.

##### 3.3.1. 수치표고모델(DEM)

DEM은 일반적으로 격자 형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고 값이 입력되어 있다. DEM은 수치지도를 이용하여 구축할 수 있으며, 현대에 들어와서 인공위성영

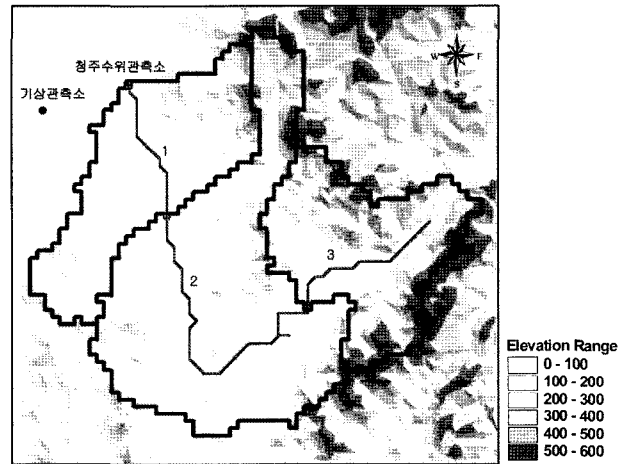


Fig. 3. The Musimcheon catchment partitioned into 3 subcatchments.

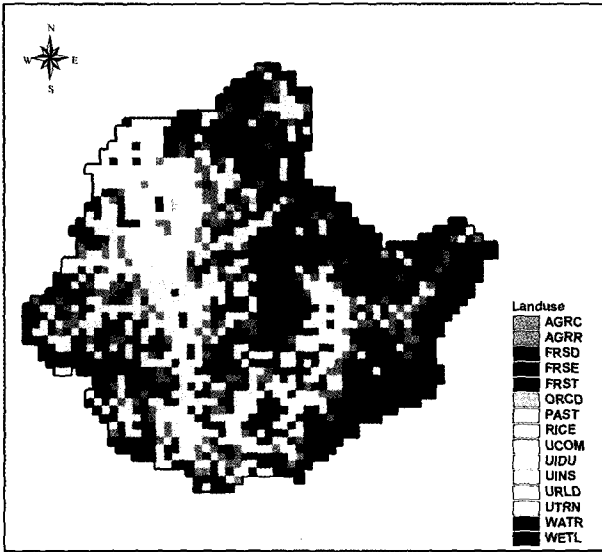


Fig. 4. Land use of the Musimcheon catchment

상의 활용도가 높아지면서 위성영상을 활용하여 구축할 수도 있다. 본 연구에서는 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30 m 공간해상도를 가지는 DEM을 300 m 공간해상도로 가공하여 사용하였다.

3.3.2. 토지이용도

환경부에서는 대분류(1 : 50,000), 중분류(1 : 25,000), 세분류(1 : 5,000)의 해상도에 해당하는 토지이용도를 제공하고 있으며, 본 연구는 이 중 모의시 다양한 토지이용상태를 반영할 수 있도록 중분류 토지이용도를 사용하였다. Fig. 4는 수집한 토지이용도를 DEM의 공간해상도인 300

m로 가공한 것을 나타낸 것이다. 산림지역이 약 54% 이내로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 논과 밭을 포함한 농경지가 약 32%, 도시지역이 약 13% 정도인 것으로 나타났다. 각 토지이용항목에 대한 면적은 Table 2와 같으며, 소유역별 주요 토지이용현황은 Table 3에 나타내었다.

3.3.3. 토양도

토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1 : 25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다. Fig. 5는 정밀토양도를 앞서 토지이용도와 같이 DEM과 동일한 공간해상도로 가공한 것으로서, 대상 유역 내에는 54개의 토양통이 분포한다. 소유역별 주요 토양통의 종류와 성분비는 Table 4에 나타내었다.

3.3.4. HRU 분포도

SWAT에서 HRU는 수문응답의 기본단위로 지표면 유출량, 침투량, 토양수분량, 침투량, 함양량, 지하수 유출량 등 수문요소들에 대해 물수지 계산을 수행한다. 그런데 SWAT모형 자체의 HRU별 지하수 함양량은 소유역내의 대표 함양량으로서만 의미를 가지며 공간적인 정보를 가지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 HRU의 공간적 특성을 격자에 대응시키는 HRU-CELL 변환기법(김남원 등, 2004)을 독자적으로 개발하여 활용하였다. 이를 위해 토지이용도(Fig. 4)와 토양도(Fig. 5)를 중첩시켜 생성된 HRU 공간분포도(Fig. 6)를 구현함으로써 HRU별 지하수 함양량을 공간분포시킬 수 있었다.

Table 2. Land use classification

Land use	Description	Area (km <sup>2</sup> )	Raitio (%)
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	32.5	1.74
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	254.4	13.59
FRSD	Forest-Deciduous	332.6	17.77
FRSE	Forest-Evergreen	331.5	17.71
FRST	Forest-Mixed	256.7	13.71
ORCD	Orchard	13.7	0.73
PAST	Pasture	39.0	2.09
RICE	Rice	418.1	22.34
UCOM	Commercial	7.2	0.39
UIDU	Industrial	24.6	1.31
UINS	Institutional	16.8	0.90
URLD	Residential-Low Density	73.3	3.91
UTRN	Transportation	22.5	1.20
WATR	Water	33.6	1.80
WETL	Wetlands-Mixed	15.3	0.82

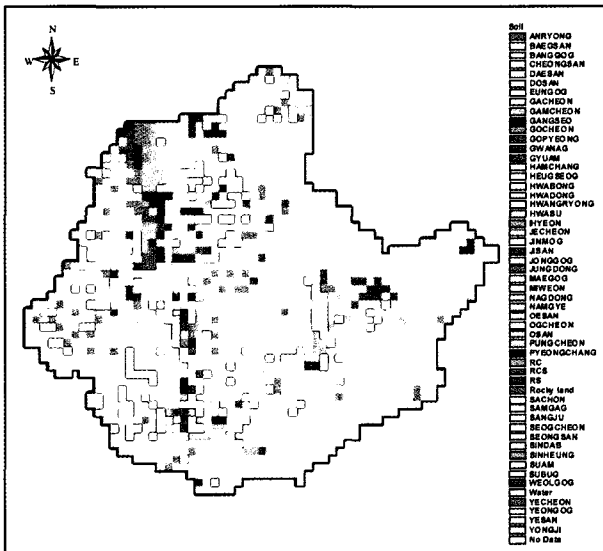
**Table 3.** Land use and catchment areas

Subcatchment	Land uses					Area (km <sup>2</sup> )
	Urban (%)	Agriculture (%)	Forest (%)	Other (%)		
1	32.49	24.85	37.18	5.48		45.99
2	6.29	38.76	50.05	4.90		82.89
3	4.12	16.08	77.95	1.86		43.65
Total	12.73	29.32	53.68	4.29		172.53

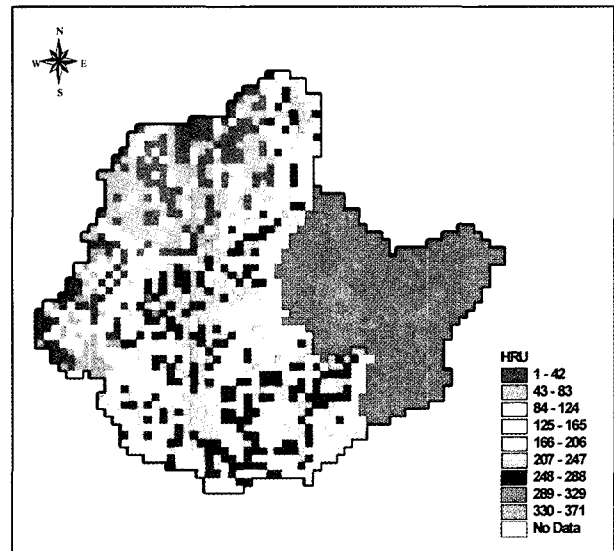
**Table 4.** Soil group classification and composition ratio

Unit : %

Subcatchment	Soil group					
	SAMGAG	DAESAN	OSAN	SANGJU	SACHEON	Others
1	34.83	0.00	8.22	10.57	9.59	36.79
2	23.89	0.00	14.44	7.82	0.11	53.74
3	6.80	52.58	1.24	3.51	1.44	34.43



**Fig. 5.** Detailed soil classification of the Musimcheon catchment.



**Fig. 6.** Spatially distributed HRU of the Musimcheon catchment.

#### 4. 모형의 적용결과 및 고찰

##### 4.1. 물수지 분석

청주수위 관측소 지점의 연별 물수지 계산 결과를 Table 5에 제시하였다. 강수 대비 함양량의 비인 함양율은 17.2%-25.7%까지 변화하는 것으로 나타났으며, 평균 값은 21.1%로 분석되었다. 물수지 계산 결과에서 볼 수 있듯이 지하수 함양량은 강수량에 크게 의존하고 있으며, 2002년과 2003년과 같이 강수량 증가율에 비해 함양량 증가율이 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이는 강수량의 연간 총량뿐만 아니라 강우의 시간적인 분포 또한 함양량에 영

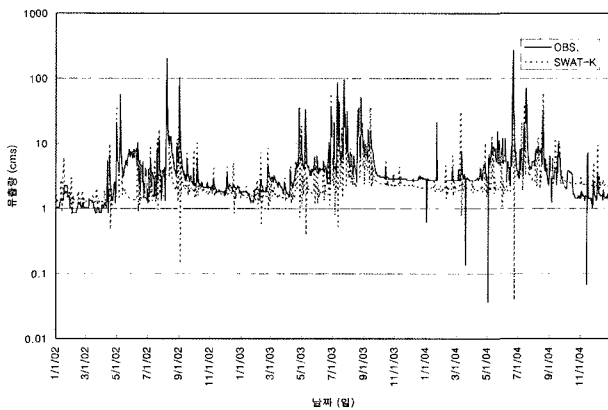
향을 미칠 수 있음을 의미한다. 따라서 강수량, 토양수분량 등 함양에 영향을 미칠 수 있는 인자들의 시간적인 변동성을 고려하여야만 보다 실제적인 지하수 함양량이 산정될 수 있을 것으로 판단된다.

##### 4.2. 유출량의 평가

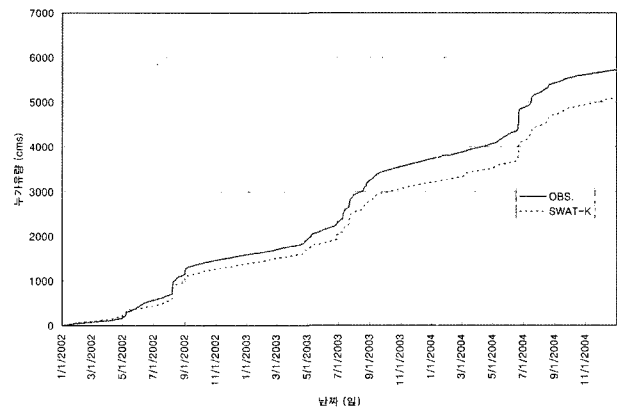
4.1절과 같이 SWAT 모형에 의해 계산된 물수지의 적정성을 평가하기 위해서 청주수위관측소 지점에서의 일유출량을 비교하였다. 이에 따라 2001년-2004년을 모의기간으로 설정하였으며, 2001년은 모형의 워밍업기간으로 정하였다. 모형의 구동을 수행하여 얻은 2002년-2004년의

**Table 5.** Estimated annual hydrological components during 2002-2004

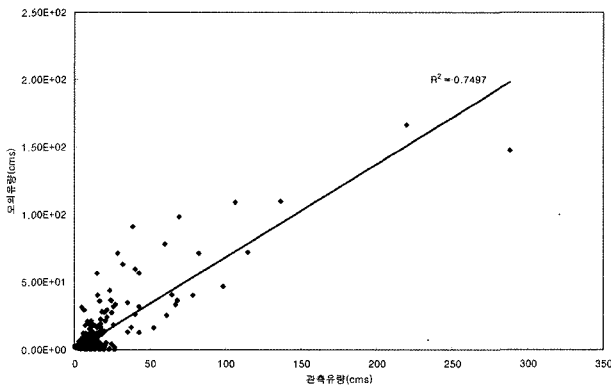
Year	Precipitation (mm)	Runoff (mm)	Evapotranspiration(mm)	Recharge (mm)	Recharge rate (%)
2002	1281.7	712.1	573.7	220.1	17.2
2003	1581.7	922.9	550.5	406.4	25.7
2004	1505.8	965.6	537.1	345.1	22.9
Average	1305.6	763.8	520.4	275.7	21.1



**Fig. 7.** Observed and estimated runoff for the Musimcheon catchment during 2002-2004.



**Fig. 9.** Observed and estimated cumulative runoff for the Musimcheon catchment during 2002-2004.



**Fig. 8.** Coefficient of determination between observed and estimated runoff for the Musimcheon catchment during 2002-2004.

유출량 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 모의기간의 일부 구간을 제외하면 전반적으로 관측값과의 적합이 잘 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 모형의 효율성을 평가할 수 있는 모의치와 관측치의 상관성을 Fig. 8에 나타냈으며 결정계수는 0.75 정도로서 모형에 의해 계산된 물수지 결과가 적절한 것으로 보인다.

총 유출량의 경향과 기온기 등이 잘 적합되면 유역 전반에 걸친 질량보존이 잘 성립되는 지를 살펴보아야 하며 이때 확인해야 하는 것이 Fig. 9에 나타낸 누가유량이다. 그림의 누가유량 곡선을 살펴보면 3년간 약 700 m<sup>3</sup>/sec

의 누적된 차이를 보이고 있다. 이유는 실측유량의 경우 대청댐으로부터 농번기에 무심천으로 공급되는 농업용수가 더해진 것 때문이며 이 양은 3년간 약 750 m<sup>3</sup>/sec인 것으로 확인되었다. 따라서 누가유량 역시 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 판단된다.

**4.3. 지하수 함양량의 시공간적 분포**

Fig. 10은 2003년 4월부터 11월까지의 월 지하수 함양량의 변화를 나타낸 것이다. 지하수 함양량의 공간적 분포를 명확하게 드러내고 있으며, 계절별로도 함양량 편차가 두드러지게 나는 것을 확인할 수 있다. 공간적으로는 무심천 상류부 급경사 산지부에서 함양이 적게 나타났고, 하류로 갈수록 함양량이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 경사가 급해서 대수층으로의 함양보다는 중간유출이 지배적이기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 함양량의 시공간적 변동성을 활용하면 기존의 지하수 함양량 평가 방식을 크게 개선할 것으로 기대된다.

지하수 함양량의 시공간적 변동성을 정량화하기 위해서 Table 6-Table 8과 같이 소유역별 지하수함양량의 평균과 표준편차를 계산하였다. Table 6은 일단위로 계산된 지하수 함양량 시계열 자료를 이용하여 소유역별, 년도별로 평균과 표준편차를 구한 것이다. 연도별로 시간적 편차가 상이한 것을 알 수 있으며, 특히 소유역 1과 소유역 2는

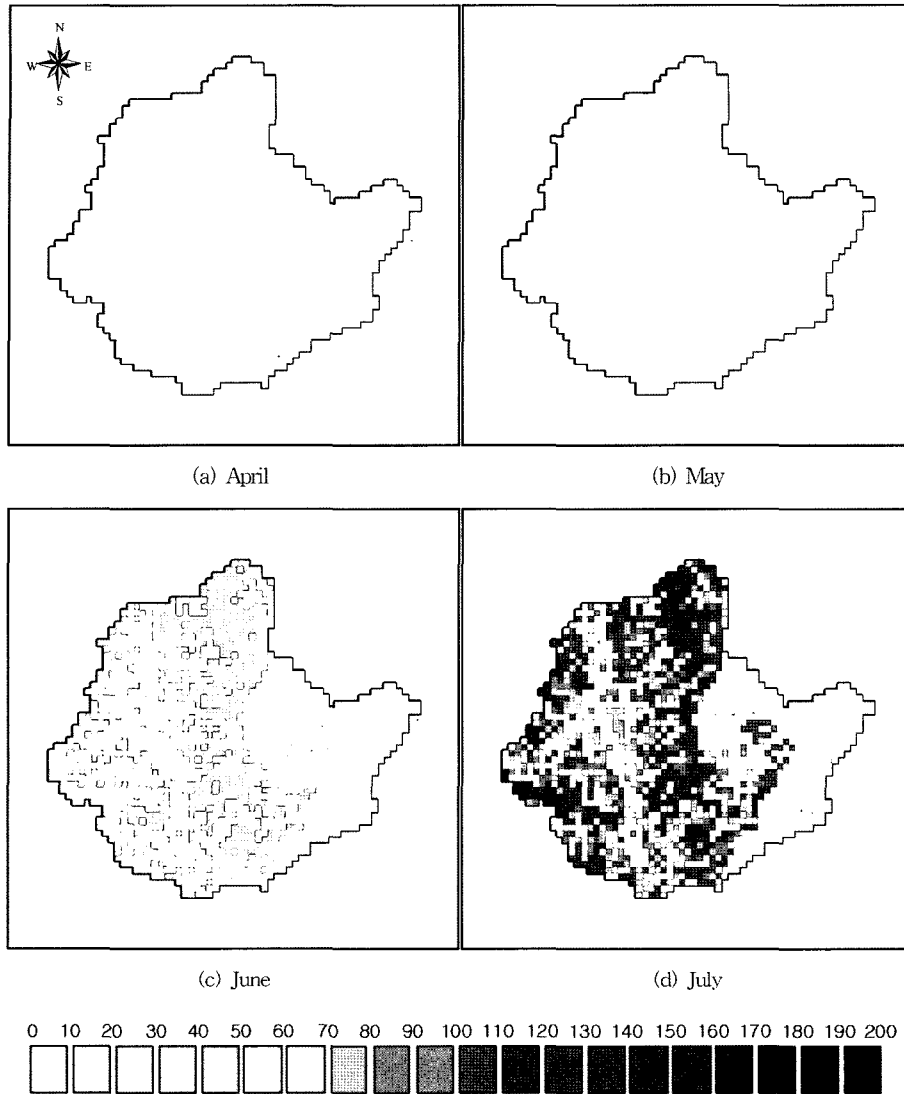


Fig. 10. Estimated monthly recharge rate for the Musimcheon catchment during Apr.-Nov. in 2003.

Table 6. Basic statistics for the time series data of daily recharge rate

				Unit : mm/day
Year	Subcatchment 1	Subcatchment 2	Subcatchment 3	Note
2001	0.45 / 0.63	0.44 / 0.62	0.08 / 0.13	average / standard deviation
2002	0.73 / 0.84	0.72 / 0.83	0.18 / 0.25	
2003	1.31 / 1.37	1.32 / 1.38	0.49 / 0.57	
2004	1.13 / 1.27	1.12 / 1.25	0.37 / 0.47	

Table 3과 같이 토지이용 분포가 유사하여 함양량의 시간적인 변동성이 거의 비슷하지만, 소유역 3은 토지이용과 토양통 분포가 타 소유역과 다른 특성을 갖고 있어 시간적인 변동성이 타 소유역과 상이한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 지하수 함양량이 공간적으로 큰 편차를 보이고 있는데, 소유역별로 어느 정도의 공

간적인 변동성이 있는 지를 분석하였다. Table 7은 각 소유역내 HRU별 연평균 함양량의 평균과 표준편차를 계산하여 나타낸 것이다. 소유역 1과 소유역 2는 앞서 언급한 대로 토지이용과 토양도가 유사하고, 또한 유역경사가 각각 6.8%, 8.3%로 유역특성도 서로 유사하여 함양량의 공간적 변동 양상이 매우 비슷하다. 반면에 소유역 3은 타



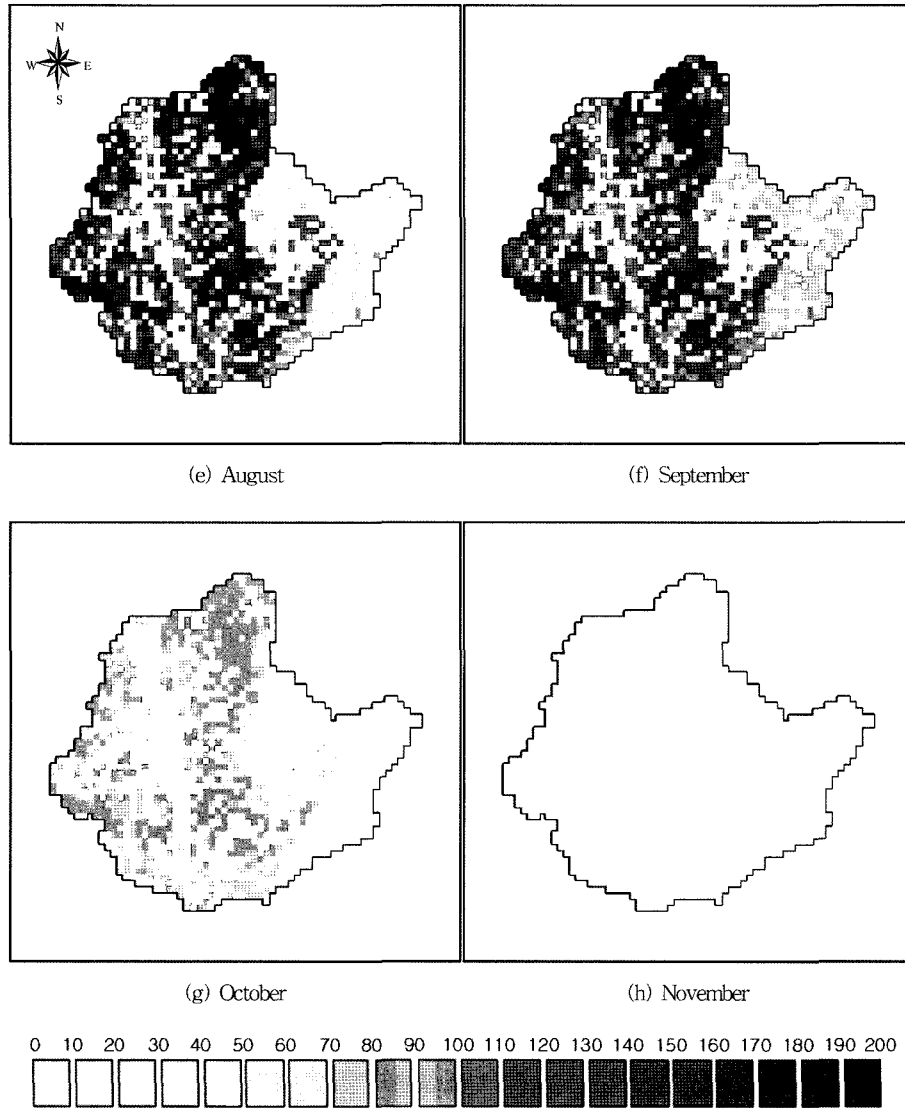


Fig. 10. Estimated monthly recharge for studied catchment during Apr.- Nov. in 2003.

Table 7. Basic statistics of estimated spatially distributed annual recharge rate

Unit : mm/year

Year	Subcatchment 1	Subcatchment 2	Subcatchment 3	Note
2001	95 / 109	109 / 108	28 / 54	average / standard deviation
2002	169 / 169	191 / 166	54 / 83	
2003	331 / 270	364 / 264	130 / 145	
2004	279 / 240	307 / 236	104 / 123	

소유역에 비해서 표준편차가 상대적으로 작아 공간적 변동성이 작은 유역으로 분석되었는데, 이는 소유역 3이 대부분 산지로 구성되어 있고 Table 4와 같이 DAESAN 토양통이 지배적으로 분포되어 있어 수문응답의 이질성이 타 소유역에 비해 작은데서 기인한다. 특히, DAESAN

토양통은 점토와 실트 성분의 구성비가 각각 27%, 55%로서 유역 평균치인 14%, 36% 보다 크게 상회하여 토양의 보수능이 다른 토양통에 비해 크다. 따라서 연직으로의 침투량이 작게 발생하는 것으로 판단된다. Table 8과 같이 월간 함양량에 대해서도 동일한 양상을 보이고 있다.

**Table 8.** Basic statistics of estimated spatially distributed monthly recharge rate

					Unit : mm/month
Year	Month	Subcatchment 1	Subcatchment 2	Subcatchment 3	Note
2001	3	1.26 / 3.47	1.53 / 3.56	0.69 / 1.91	
	4	0.45 / 1.25	0.59 / 1.39	0.27 / 0.76	
	7	19.82 / 26.79	22.79 / 26.71	5.05 / 13.08	
	8	39.89 / 42.25	45.11 / 41.46	12.09 / 21.08	
2002	3	1.06 / 1.28	1.23 / 1.37	0.29 / 0.67	
	4	0.91 / 1.36	1.13 / 1.74	0.29 / 0.95	
	7	5.55 / 7.74	6.81 / 8.56	1.84 / 4.39	
	8	42.51 / 43.64	47.85 / 42.97	13.38 / 21.78	
2003	3	3.52 / 4.46	4.07 / 4.42	1.02 / 2.09	average / standard deviation
	4	8.63 / 8.78	9.71 / 8.49	2.63 / 4.06	
	7	52.93 / 50.23	59.35 / 50.00	19.02 / 26.18	
	8	73.95 / 61.60	81.61 / 60.54	29.50 / 33.59	
2004	3	4.93 / 6.69	5.75 / 6.88	2.26 / 3.49	
	4	3.10 / 4.33	3.66 / 4.46	1.48 / 2.30	
	7	73.31 / 62.44	80.03 / 62.19	27.00 / 32.92	
	8	64.88 / 53.74	70.93 / 53.27	25.09 / 28.78	

이와 같이 본 연구에서 제시한 SWAT 모형을 이용한 지하수 함양량 산정방법은 수문응답의 이질성 및 함양량의 시간적인 변화의 추이도 살펴볼 수 있어 하나의 유역에 대해 동일한 함양량을 가지는 기존의 지하수 함양량 산정방법의 단점을 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구는 SWAT 모형을 이용한 무심천 유역의 지하수 함양량 산정에 관한 것으로 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 지하수 함양량은 한 지역 내에서 시·공간적으로 현저한 변화를 나타내므로 기존의 집중형, 개념적 모형으로는 정확한 산정이 어려우므로 분포형 개념으로 접근하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

(2) 무심천 유역에 대해 모형을 구동한 바 지역적으로 계절적으로 함양량의 편차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 공간적으로는 상류부 급경사지대에서 함양이 적게 나타났고, 하류로 갈수록 함양량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 상류지역 토양층에 실트, 점토 성분이 많고 경사가 급해서 대수층으로의 함양보다는 중간유출이 지배적이기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 시간적으로는 우기에 함양량이 크게 나타남으로써 기존의 연 함양량만을 제시하기 보다는 시간적 변화를 정

량화하기 위한 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 2단계 연구사업(과제번호 2-2-2)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원이 위탁시행한 2005년도 건설기술기반구축사업(05기반구축 A03-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 구민호, 김용제, 2003, 침투 모형을 이용한 국내의 기후 환경에서 발생하는 지하수 함양 특성 분석, 지질학회지, **39**(2), 249-261.
- 구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, 지질학회지, **38**(3), 407-420.
- 김남원, 정일문, 원유승, 2004, 완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (I) 모형의 개발, 한국수자원학회 논문집, **37**(6), 499-507.
- 김성준, 채효석, 2000, 격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수 함양량 추정기법 개발, 한국수자원학회 논문집, **33**(1), 61-72.
- 박창근, 1996, 우리나라 지하수 개발가능량 추정 : 1. 개념정립과 기법의 개발, 지하수환경, **3**(1), 15-20.
- 배상근, 이승현, 2004, 소유역의 강수에 의한 지하수 함양량 산정, 한국수자원학회 논문집, **37**(5), 397-406.

- 이동률, 1995, 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량 예측, 박사학위 논문, 고려대학교.
- 이도훈, 2002, 지하수 순환을 고려한 장기유출 특성 해석, 지표수 수문성분 해석 기술개발 1차년도 연구보고서, 수자원의 지속적 확보기술개발사업 2-2-1과제, p. 89-95.
- Andres, G. and Egger, R., 1985, A new tritium interface method for determining the recharge rate of deep groundwater in the Bavarian Molasse basin, *J. Hydrol.*, **82**, 27-38.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G., 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model, *J. Hydrol.*, **142**, 47-69.
- Arnold, J.G. and Allen, P.M., 1999, Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records, *J. Amer. Water Res. Assoc.*, **35**(2), 411-424.
- 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, *J. Hydrol.*, **227**, 21-40.
- Barnes, B.S., 1939, The structure of discharge recession curves, *Transac. Amer. Geophys. Union* **20**, 721-725.
- Fetter, C.W., 1994, *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall.
- Horton, R.E., 1939, Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity, *Transac. Amer. Geophys. Union*, **20**, 693-711.
- Johnston, K.H., 1977, A predictive method for groundwater levels, Master's Thesis, Cornell University, Ithaca, N. Y.
- Memon, B.A., 1995, Quantitative analysis of springs, *Environ. Geol.*, **26**, 111-120.
- Meyboom, P., 1961, Estimating groundwater recharge from stream hydrology, *J. Geophys. Res.*, **66**(4), 1203-1214.
- Moon, S.K., Woo, N. C., and Lee, K. S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-level fluctuation to estimate groundwater recharge, *J. Hydrol.*, **292**, 198-209.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R., 2001, Soil and Water Assessment Tool; The theoretical documentation (version 2000), U. S. Agricultural Research Service.
- Rutledge, A.T., 1998, Computer programs for describing the recession of groundwater recharge and for estimating mean groundwater recharge and discharge from stream records-Update, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 98-4148, p. 44.
- Sangrey, D.A., Harrop-Williams, K.O., and Klaiber, J.A., 1984, Predicting groundwater response to precipitation, *ASCE, J. Geotech. Eng.*, **11**(7), 957-975.
- Saxton, K.E, Rawls, W.J., Romberger, J.S, and Papendick, R.I. 1986, Estimating generalized soil-water characteristics from texture, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **50**(4), 1031-1036.
- Sharma, M.L., 1989, *Groundwater Recharge*, Balkema, Brookfield, VT, p. 323.
- Solomon, D.K., Schief, S.L., Poreda, R.J., and Clarke, W.B., 1993, A validation of  $3\text{H}/3\text{He}$  method for determining groundwater recharge, *Water Resources Res.*, **29**(9), 2951-2962.
- Sophocleous, M.A., 1991, Combining the soil water balance and water level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge : practical aspects, *J. Hydrol.*, **124**, 229-241.
- Theis, C.W., 1937, Amount of groundwater recharge in the southern high plains, *Transac. Amer. Geophys. Union*, **18**, 564.
- Venetsis, C., 1962, A study of recession of unconfined aquifers, *Bull. Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, **14**(4), 119-125.
- Winter, T.C., Mallory, S.E., Allen, T.R., and Rosenberry, D.O., 2000, The use of principal component analysis for interpreting groundwater hydrographs, *Ground Water*, **38**(2), 234-246.