

시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정 방안

Method of Estimating Groundwater Recharge with Spatial-Temporal Variability

김 남 원* / 정 일 문** / 원 유 승***

Kim, Nam Won / Chung, Il Moon / Won, Yoo Seung

Abstract

In Korea, the methods of estimating groundwater recharge can be categorized into two groups. One is baseflow separation method by means of groundwater recession curve, the other is water level fluctuation method by using the data from groundwater monitoring wells. Baseflow separation method is based on annual recharge and lumped concept, and water-table fluctuation method is largely dependent on monitoring wells rather than water budget in watershed. However, groundwater recharge rate shows the spatial-temporal variability due to climatic condition, land use and hydrogeological heterogeneity, these methods have various limits to deal with these characteristics. For this purpose, the method of estimating daily recharge rate with spatial variability based on distributed rainfall-runoff model is suggested in this study. Instead of representative recharge rate of large watershed, the subdivided recharge rate with heterogeneous characteristics can be computed in daily base. The estimated daily recharge rate is an advanced quantity reflecting the heterogeneity of hydrogeology, climatic condition, land use as well as physical behaviour of water in soil layers. Therefore, the newly suggested method could be expected to enhance existing methods.

keywords : Groundwater recharge, rainfall-runoff model, spatial-temporal variability

요 지

현재 우리나라에서 주로 사용되는 지하수 함양량 추정방법은 지하수 감수곡선에 의한 기저유출분리법과 관측공의 자료를 이용한 지하수위 변동법으로 대별된다. 기저유출분리법은 연단위기반의 집중형 개념의 접근법을 사용하며, 지하수위변동곡선해석법은 유역단위의 물수지 개념보다는 국지적인 지하수 관측정의 변화에 주로 의존하고 있다. 한편 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용, 관개와 수리지질학적 비균질성에 의해 현저한 시공간적 변동성을 나타내고 있어서 위의 두 가지 방법으로는 이같은 특성을 고려하는데 여러 가지 한계를 보인다. 이에 본 연구에서는 준분포형 강우-유출모형인 SWAT모형을 이용하여 공간적변동성을 고려한 일단위 함양량 산정기법을 제시하였다. 이 방법을 이용하면 기존의 유역 대표 함양량 대신 각 소유역의 비균질한 특성을 반영한 함양량의 분포를 산정할 수 있

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(e-mail: nwkim@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원
Senior Researcher, KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(e-mail: imchung@kict.re.kr)

*** 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 하천예보팀장
Researcher, River Information Center of Han River Flood Control Office, MOCT, Seoul, 137-049, Korea
(e-mail: yswon@moct.go.kr)

다. 산정된 일단위 함양량은 기후조건 토지이용 및 수리지질학적 비균질성과 토양층에서의 지체등 물리적인 거동까지 반영된 것이어서 기존의 간접적 추정방식에 의한 연단위 함양량을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 지하수 함양, 강우-유출모형, 시공간적 변동성

1. 서론

최근 도시 쓰레기와 해안대수층에서의 염수침입 등으로 가용한 지하수자원이 줄어들어 따라 적절한 관리방안이 요구되고 있으며, 지표수와 지하수를 연계한 총체적인 접근방식에 많은 연구자들의 관심이 모아지고 있다. 이상적인 지하수 개발 및 관리의 목적은 가능한 지하수량을 최대로 개발하되 유역내의 정해진 조건에 대해서 법적, 사회적, 정치적 제약조건과 수질, 개발 및 운영비용등을 고려하여 현재 혹은 미래의 지하수 문제(고갈, 수질악화, 지반침하)를 야기시키지 않도록 하는 것이다. 대부분의 지하수 문제는 바람직하지 못한 결과를 간과하고 물수요만을 충족시키다가 발생한 부작용으로 볼 수 있기 때문이다.

한편, 지하수 관리에 있어서 대수층의 자연함양량에 대한 지식은 개발 가능량을 추정하는 근거가 된다. 얕은 대수층으로의 지하수 함양과 유출특성은 효율적인 지하수자원개발 뿐 아니라 대수층과 연결된 하천으로의 오염위험을 최소화시키기 위한 지하수 관리에도 중요한 요소가 된다. 얕은 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, 1993; 박창근, 1996; 이동률, 1995; Rutledge, 1998; Arnold와 Allen, 1999; 이도훈, 2002)에 의한 물수지 분석법이다. 이 방법은 비교적 널리 적용되어 왔으나, 이 방법은 함양-배출의 기본가정이 연 기반(annual base)이므로 1년 단위로 문제를 해결함으로써 인해 계절성, 월별 변화등은 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, Moon 등(2004)에 의해 수정 발전됐다. 이 방법은 관측공의 수위 변화에 비산출율을 곱하여 실질적인 지하수 함양량을 계산하는데, 관측공의 변화에만 의존하므로 유역기반의 물수지 관점에서는 제한적으로 적용될 수 밖에 없다.

이 밖에도 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 제시하여 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 SWAT모형을 이용하여 미시시외강 유역의 지하수 함양량을 추정하였고, 이를 기저유출 분리법의 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 지하수 함양량의 시공간적인 변동성을 정량적으로 추정할 수 있는 방안과 우리나라 실제 유역에의 적용성을 검토하여 기존의 여러 방법이 가진 한계를 극복하고자 하였다. 이를 위해 강우-유출 모형은 수문성분 해석 이론이 잘 정립된 SWAT모형(Arnold 등, 1993)을 선택하였고, 한강유역내 경안천 유역을 대상으로 각 소유역 및 HRU (Hydrologic Response Unit)별로 지하수 함양량의 변화를 고찰하였다. 더욱이 기존에 전통적으로 사용되어 온 지하수 감수곡선 분석법과 SWAT모형에 의해 산정된 함양량을 정량적으로 비교함으로써 시공간적 변동성을 고려한 함양량의 타당성을 입증하였다.

2. 대표적인 지하수 함양량 산정방법 비교

2.1 지하수 감수곡선에 의한 해석적 방법

하천유역과 지하수 유역이 일치하는 경우 하천유량의 기저유출 감수곡선(recession curve)에 의한 함양량의

산정은 매우 유용한 방법이다. 우리나라에서는 이동률 (1995)이 Barnes (1939)의 정의에 의한 지하수 감수곡선의 분석으로 지하수 함양량 추정과 지하수 물수지 분석, 유역별 지하수 함양량의 평가등을 제시한 바 있다. 또한 박창근(1996)은 기존의 지하수 함양량 추정기법들의 비교분석을 통해 물리적 의미를 지닌 단순한 방법으로 지하수 개발 가능량을 산정하는 방법을 제시하였다.

Meyboom (1961)에 의해 제안된 기법을 통해 이 기법의 절차와 계산방법을 살펴보면 다음과 같다. 이 기법은 최소 2년 이상의 연속적인 하천수문곡선을 이용한다. 기저유량-감수 방정식인 (1)은 Q_0 가 시간에 대해 대수적으로 감소함을 나타낸다.

$$Q = Q_0 e^{-at} \quad (1)$$

여기서 Q : 감수가 시작된 후 임의의 시각 t 에서의 유량 [L^3/T]

Q_0 : 감수시점에서의 유량 [L^3/T]

a : 유역에서의 감수 상수 [$1/T$]

t : 감수가 시작된 이후의 시간 [T]

따라서, 반대수지상에 시간-유량을 그려보면 기저유량 감수곡선은 직선으로 나타나게 된다. 잠재적인 총 지하수 유출량은 지하수 감수기간동안 방출되었을 지하수의 용적이다. 그 값은 다음 식으로 표현된다.

$$V_{tp} = \frac{Q_0 t_1}{2.3} \quad (2)$$

여기서 V_{tp} : 총 잠재 지하수 유출량의 용적 [L^3]

Q_0 : 감수시점에서의 기저유량 [L^3/T]

t_1 : 기저유량이 Q_0 에서 $0.1Q_0$ 에 도달하기까지 걸리는 시간 [T]

감수가 시작된 후 t 시간이 지난 다음의 잠재적인 기저유출 용적 V_t 는 다음 식에 의해서 구해진다.

$$V_t = \frac{V_{tp}}{10^{(t/t_1)}} = \frac{(Q_0 t_1)/2.3}{10^{(t/t_1)}} \quad (3)$$

자연함양량은 다음 해의 감수시점에서의 V_{tp} 로부터 전 해의 중점에서의 V_t 를 뺀 값과 같다. 이 기법은 유역내에서 소모적인 지하수 사용이 없다고 가정한 자연유량의 가정이 전제되므로 유역내에서 지하수의 양수 혹은 증발산을 고려할 경우 감수곡선에 의해 결정된 양

에 그 양들을 더해 주어야만 한다.

Rutledge (1998)는 일 유출량 자료로부터 지하수 함양량 및 기저유출량을 산정하는 감수곡선 이동기법을 개발하였는데, 이 방법은 수문곡선의 첨두 후의 임계시간에서의 총 잠재 지하수 유출량은 지하수 함양량의 1/2과 거의 같다는 사실과 중첩의 원리를 적용하여 다음 식에 의해 지하수 함양량을 산정한다(Rutledge와 Daniel, 1994).

$$R = \frac{2(Q_2 - Q_1)t_1}{2.3026} \quad (4)$$

식(4)에서 R 는 지하수 함양량, Q_2 는 첨두 후 수문곡선의 감수부를 임계시간까지 연장하여 얻은 유량, Q_1 은 첨두 전 수문곡선의 감수부를 임계시간까지 연장하여 얻은 유량을 의미한다. 분수계와 하천사이의 평균거리인 임계시간(T_c)은 $T_c = 0.2144t_1$ 으로 표현된다. 그림 1은 지하수 감수곡선 이동법을 이용한 지하수 함양량 산정과정의 예를 나타낸다.

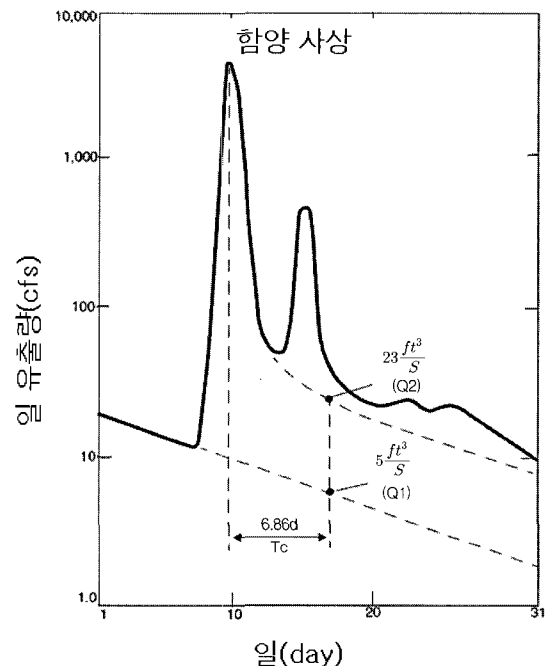


그림 1. 지하수 감수곡선 이동법을 이용한 지하수 함양량 산정에

Arnold와 Allen (1999)은 디지털 필터에 의해 산정된 기저유출량 및 감수곡선 이동법에 의해 추정된 지하수 함양량을 물수지에 의해 산정된 값과 비교하여 평가하였다. 이도훈(2002)은 운문댐 등 5개 분석지점에 적용하여 함양량을 산정한 결과 Arnold와 Allen(1999)의 방법

이 Rutledge(1998)방법보다 지하수 함양량을 과다하게 산정하는 것을 확인하였으며 대수층으로 유입되는 지하수 함양량이 대수층으로부터 유출되는 기저유출량보다 많다는 것을 지적했다.

2.2 지하수위 변동곡선 해석법

지하수위 변동곡선 해석법은 일평균 지하수위와 지하수위 변동에 영향을 미치는 누적강수량과의 비율과 비산출률(specific yield; Sy)의 곱으로서 함양률을 산정하는 방법으로 이를 위해 지하수위 변동값과 강수량에 관한 교차상관분석을 실시한다. 또한 Winter 등(2000)은 주성분 분석(principal component analysis)을 이용하여 소규모의 호수 수역에서 나타나는 지하수위 곡선의 유형을 분류하여 지하수의 함양특성을 지질특성과 결부시켜 분석했다. Moon 등(2004)은 Winter 등(2000)이 제안한 지하수위 곡선의 유형과 유역별 지하수 함양률과의 관련성을 우리나라 국가 지하수 관측망 자료를 이용하여 분석하였다.

2.3 물수지법

물수지법은 다음 식(5)로 표현되는데 변수들 중 강수, 하천유량, 물이동량, 저수지 증발량은 직접적으로 구해지는 것들이며, 지하수 유입, 유출, 저류변화는 대수층의 수리학적 특성과 관측된 수두자료로부터 계산된다. 증발산(evapotranspiration)은 수면으로부터의 증발과 식물로부터의 증산을 합한 것으로, 수분이 기체상태로 대기로 환원되는 모든 것을 포함한다.

$$\text{지하수 함양} = (\text{강수} + \text{지표수유입} + \text{기타유입수} + \text{지하수유입}) - (\text{증발산량} + \text{저수지증발} + \text{지표수유출} + \text{기타유출수} + \text{지하수유출}) \pm \text{지표수저류변화}$$

(5)

식(5)는 지하수 함양을 구함에 있어 강수뿐만 아니라 손실하천(losing stream), 관개용수, 무복공수로(unlined canal)등을 고려한 개념이며 증발산이 결정되지 못하면 그 유용성이 제한된다는 단점이 있다. 또한 각 항목중에서 데이터의 신뢰도가 떨어질 경우 정확도에 문제가 있다. 한편, 국내 실무에서는 Tank모형과 같은 집중형 모형을 사용하여 함양량을 추정하는 방식이 널리 사용되고 있다.

2.4 기타 방법

동위원소를 이용한 방법은 물분자처럼 거동하는 물

의 동위원소를 이용함으로써 물순환과정에서의 물의 거동을 파악하여 함양량을 추정하는 방법으로 지표면으로부터 지하수면까지의 토양수를 채취하여 분석하는 방법과 대수층 중의 지하수를 채수하여 농도분석을 통해 지하수 함양량을 구하는 방법으로 대별된다. Andres와 Egger (1985)는 대수층중의 트리튬 농도분포 특성을 이용하여 함양량을 산정했고, Solomon 등(1993)은 저투수성 함양역 부근의 대수층 지하수를 취수하여 트리튬과 헬륨의 농도분포로부터 지하수 함양량을 추정했다. 이 밖에 침투실험을 이용한 방법(Horton, 1939) 등도 사용되고 있다.

2.5 토의

지금까지 검토한 방법 중 기저유출 분석법을 이용한 함양량 산정은 기저유출 분리에 임의성이 있으며 연단위의 집중형 개념으로 접근하므로 세분화된 소유역의 함양량 분포를 결정하기 어렵다는 한계가 있다. 또한 지하수위 변동곡선 해석법은 관측공의 수위 변화에 비산출율을 곱하여 실질적인 지하수 함양량을 계산하는데, 관측공의 변화에만 의존하므로 유역기반의 물수지 관점에서는 제한적으로 적용될 수밖에 없다. 집중형 수문모형을 이용한 물수지법은 유역전체를 하나의 모의요소로 고려하는 집중형 개념을 이용하고 있어 유역의 공간분포 수문특성과 각 수문성분의 정확한 물리적 요소를 고려하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 준분포형 모형인 SWAT을 분석의 도구로 활용하였으며, 각 수문응답단위별 일단위별로 계산된 함양량 산정 결과의 타당성을 검토하기 위해 지하수 감수곡선에 의한 해석적 방법과 비교하였다.

3. SWAT모형을 이용한 시공간적인 함양량의 결정

토지이용변화에 따른 물 순환 변화를 해석할 수 있는 준 분포형 유출모형 SWAT (Arnold 등, 1993)은 SCS-CN 방법을 이용한 직접유출량 산정, Penman-Monteith식을 이용한 증발산량 계산, 다양한 토지이용도, 지하 토양층의 특성을 고려한 지하수 함양 및 지하수 유출을 해석할 수 있다.

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 물

은 얇은 대수층으로 함양되기 전에 비포화대(vadose zone)으로 유입되어 흐르게 된다. 침투는 각 토양층별로 계산되는데 함수량이 포장용수량(field capacity)을 초과하는 경우에 일어난다. 토양층에서 침투하는 물의 양은 다음과 같이 계산된다.

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (6)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (7)$$

여기서 $SW_{ly,excess}$ 는 주어진 날에 토양층에서 배수되는 물의 체적(mmH_2O), SW_{ly} 는 토양층의 함수량(mmH_2O), FC_{ly} 는 포장용수량(mmH_2O)이다.

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

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]\right) \quad (8)$$

여기서 $w_{perc,ly}$ 는 주어진 날에 다음 토양층으로 침투하는 물의 양(mmH_2O)이며, Δt 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, Sangrey등(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.

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad (9)$$

여기서 $w_{rchrg,i}$: i일의 대수층 함양수량(mmH_2O), δ_{gw} :지질층 전역에 대한 지체시간 또는 배수시간(days), w_{seep} : i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 수량(mmH_2O), $w_{rchrg,i-1}$: i-1일의 대수층 함양수량

(mmH_2O)이다. i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 총 수량은 다음과 같이 계산된다.

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crk,btm} \quad (10)$$

여기서 w_{seep} : i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 수량(mmH_2O), $w_{perc,ly=n}$: i일에 토양층의 가장 낮은 층 n에서 침투되는 수량(mmH_2O), $w_{crk,btm}$: i일에 우회흐름으로 토양층의 하부경계로 흐르는 수량(mmH_2O)이다.

지체시간(δ_{gw})을 직접적으로 측정하는 것은 불가능하며, 서로 다른 δ_{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 δ_{gw} 값이 비슷하기 때문에, 지형학적 지역에 대한 지체시간이 정의되면, 같은 지역내의 인접한 유역에 대해 비슷한 지체시간이 사용될 수 있음을 제시하였다.

4. 지하수 함양량의 시공간적 변동성 분석

본 연구의 분석 대상유역은 경안천유역 중 경안수위 관측소를 기준으로 한 259.2 km^2 이며, 유역면적, 하천 길이, 평균경사, 평균폭 등을 표 1에 제시하였고, 소유역 분할현황과 주요하천을 그림 2에 나타내었다. 표 1에 제시된 바와 같이 소유역별 면적은 대략 7~60 km^2 , 하천길이는 5~20 km, 평균경사는 0.017~0.067 m/m, 평균 폭은 4~15 mm/km 이다.

1980년부터 2000년까지 5년 단위의 토지이용도를 살펴보면, 1980-1985년까지 1.2% 정도가 도시지역으로 분류되는데 반해, 그림 3과 같이 1990년부터 2000년까지 4.11%, 8.12%, 10.10%까지 점차적으로 도시지역이 증가하였다. 또한 잔디(grass)와 나지(bair soil)는 증가하는 반면 산림(forest), 논(paddy), 밭(upland crop)은 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 5년마다 달라지는 토지이용도를 모두 고려한 장기적인 토지이용변화와 식생의 변화에 따른 유출량 변동 해석은 본 논문의 주제인 SWAT모형을 이용한 지하수 함양량의 시공간적 변동성 분석의 범위를 넘는 것으로 판단하여 본 논문에서는 1990년도의 토지이용도와 관련된 기간인 1990년부터 1994년까지의 5년간의 함양량을 분석하는 것으로 연구의 범위를 설정했다.

1:25000의 정밀도양도로부터 경안천 유역의 토양통은

표 1. 소유역 특성

소유역	구 간	면 적 (km ²)	길 이 (km)	경 사 (m/m)	폭 (mm/km)
1	직리천	16.91	8.226	0.043	7.038
2	직리천-오산천	29.38	10.322	0.050	9.833
3	오산천	47.44	15.194	0.017	13.070
4	오산천-대대천	59.29	19.446	0.026	14.941
5	대대천-양지천	6.96	5.484	0.067	4.132
6	대대천	20.01	8.295	0.039	7.789
7	대대천-상류	38.74	12.809	0.025	11.575
8	양지천	22.62	12.264	0.029	8.380
9	직리천-경안수위표	17.68	10.167	0.030	7.229

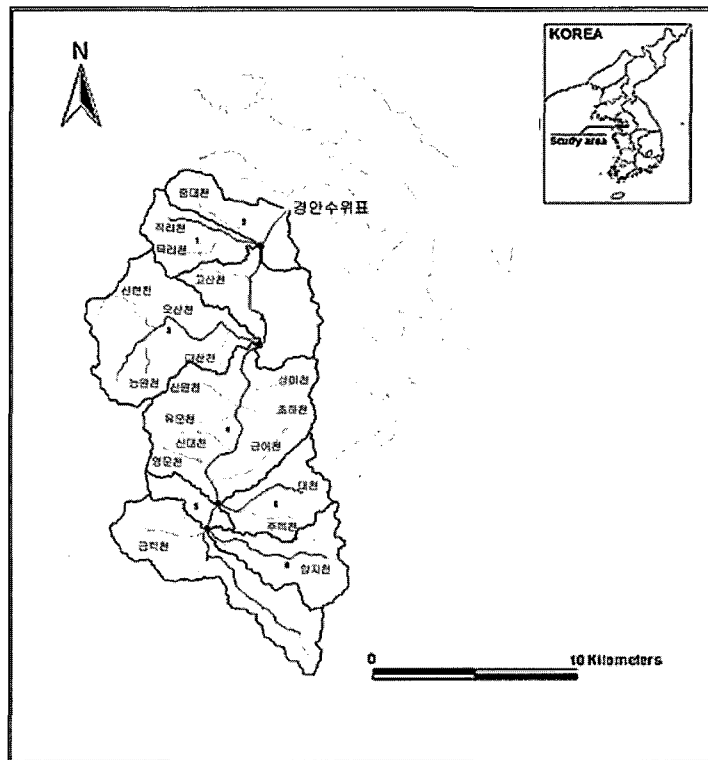


그림 2. 소유역 구분

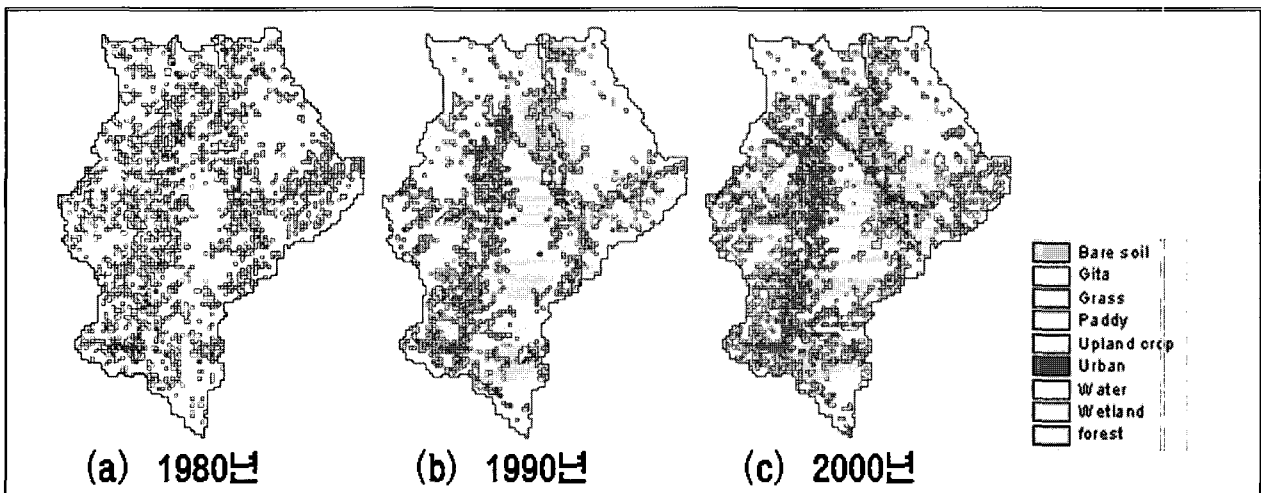


그림 3. 유역내의 토지이용도

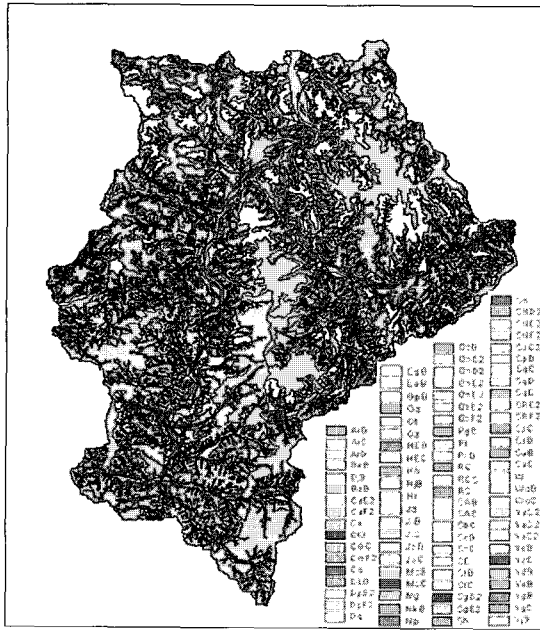


그림 4. 유역내의 정밀토양도

총 92개였으며, 이 중 경안수위관측소를 중심으로한 38개 토양통을 실제 분석에 이용했고 이를 그림 4에 나타냈다. 토양층에 연결되어 있는 DB는 농업과학기술원에서 제시한 농업토양 정보 시스템(<http://asis.rda.go.kr>)의 토양 구성비등의 자료를 사용하였으며 토양구성비로부터 함수량과 포장용수량 등을 산정하기 위해 Saxton 등 (1986)이 제안한 일반화된 토양-물의 특성치 추정방법(<http://www.bsyse.wsu.edu/saxton>)을 사용했다.

본 연구에서는 기존의 연단위 함양량을 그 이하의 시간단위로 계산하고 공간적으로도 소유역 및 HRU단위로 분포시킴으로써 보다 현실적인 함양을 계산하는

것을 목표로 하므로 연단위 함양량을 계산할 필요는 없으나 지하수감수곡선법에 의한 연단위 함양량과의 비교는 이와같이 물리학적 기반을 가진 모형의 함양량값의 타당성을 평가하는데 필요하다. 따라서 본 연구에서는 1990년도의 토지이용도와 관련된 1990년~1994년의 5년간의 연단위 함양량을 산정코저 했으나 유감스럽게도 1992년과 1994년의 수위관측자료가 매우 불량하고 1993년도 역시 결측치가 많아 2년간의 자료만을 활용할 수밖에 없었다.

그림 5는 1990년부터 1991년까지 2년간의 경안 수위표 관측 유출량 자료를 이용하여 유역의 출구점에서 관측유량과 계산유량을 나타낸 것으로서 분포형 모형의 기본 입력자료를 이용한 모의를 수행했으며 별도의 검정(calibration)은 수행하지 않았다. 그림 6에서 보는 것처럼 관측값과 모의값의 결정계수는 0.79로 나타났다. 관측값과 모의치는 홍수기의 침투부분에서 다소 차이를 나타내었으나 이는 장기유출의 측면에서는 수용할 만한 차이라고 생각되며 전체적인 상관성은 양호한 것으로 판단된다.

유역의 출구점에서 모형과 실제 관측값과의 적합이 양호하다면, 이때 각 소유역별 함양량의 계산 근거가 타당성을 가질 것이다. 이와같은 전체유역의 함양량의 타당성을 검토하기 위해 지하수 감수곡선 이동법(Rutledge, 1998)을 이용한 결과와 비교하였으며, 이를 표 2에 나타냈다. 전체유역에 대한 함양량의 차이는 5%정도로 SWAT에 의해 산정된 함양량은 적절한 것으로 판단된다. 특히, 특별한 검정과정을 생략한 상태에서 기저유출-감수곡선 해석법을 이용한 연 함양량의 값과 큰 차이를 보이지 않는다는 것은 모형의 신뢰성을 반영한 결과로서 Arnold 등(2000)의 결과와도 일관성을 보이고 있다.

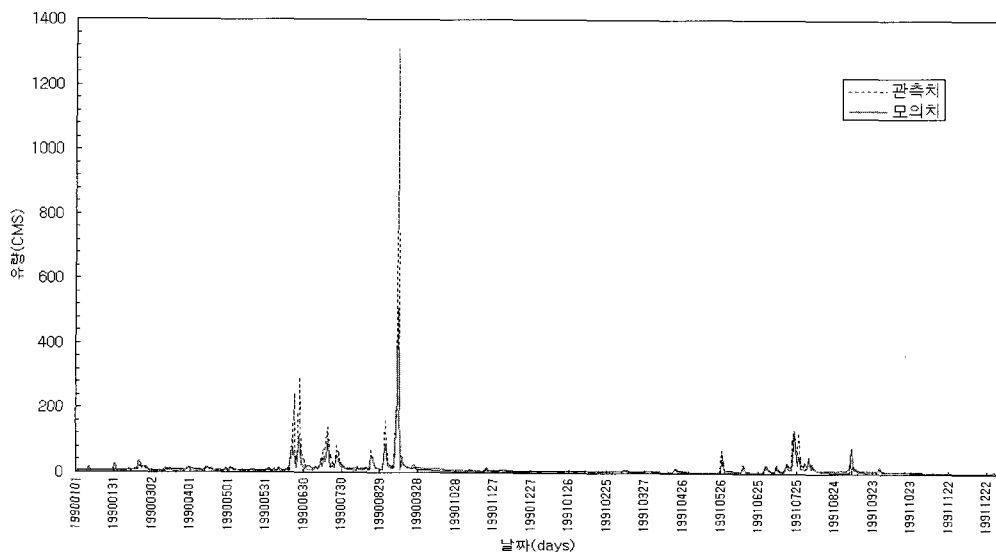


그림 5. 경안수위표 지점의 관측값과 모의값(1990년-1991년)

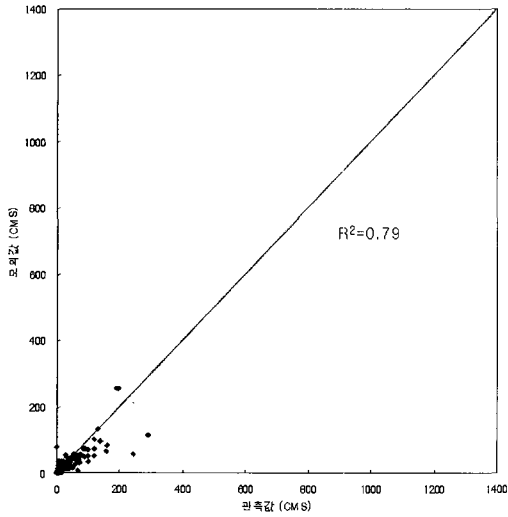


그림 6. 관측값과 모의값의 상관도

다음은 소유역별 함양량의 공간적 분포를 살펴보기 위해 9개 소유역에 대한 1990년도의 소유역별 지하수 함양량을 산정한 것으로 이를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에 나타난 것처럼 소유역별로 함양량의 차이가 생기는데, 그 이유는 HRU에 따른 토양특성과 토지 이용특성등에 따른 것이다. 예를 들면, 4번 소유역의 경우 29개의 HRU로 구분되며 HRU별로 그 함양특성이 다르게 나타남을 알 수 있었다(그림 8).

또한 경안천 유역을 대상으로 1990-1991(2년)에 대하여 SWAT에 의한 일별 지하수 함양를 산정하여 월별로 나타낸 결과는 그림 9와 같다. 이와 같은 일 함양량의 산정은 간접적인 방법의 연함양를 산정값에 비해 기후조건, 토지이용, 수리지질학적 비균질성 뿐 아니라, 토양층에서의 지체등 물리적인 거동까지 반영한 결과여서 주목할 만하며 더욱이 일단위로 계산됨으로써 기존

표 2. 경안수위표 유역에 대한 연도별 지하수 함양량

년도	SWAT(mm)	지하수감수곡선법(mm)	상대오차(%)
1990	650	685	5.0
1991	344	327	4.9

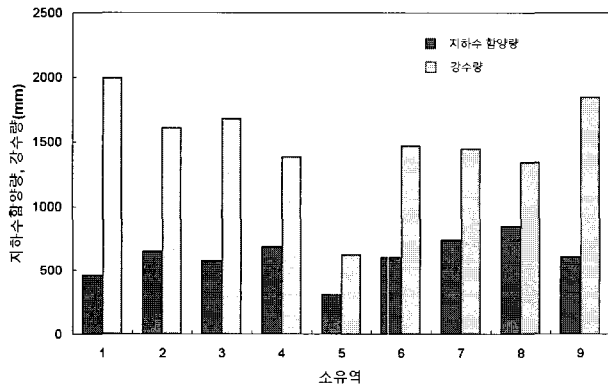


그림 7. 소유역별 지하수 함양량(1990년)

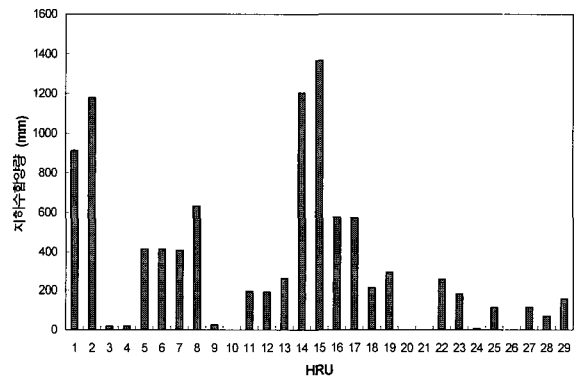


그림 8. 4번 소유역의 HRU별 함양량 분포

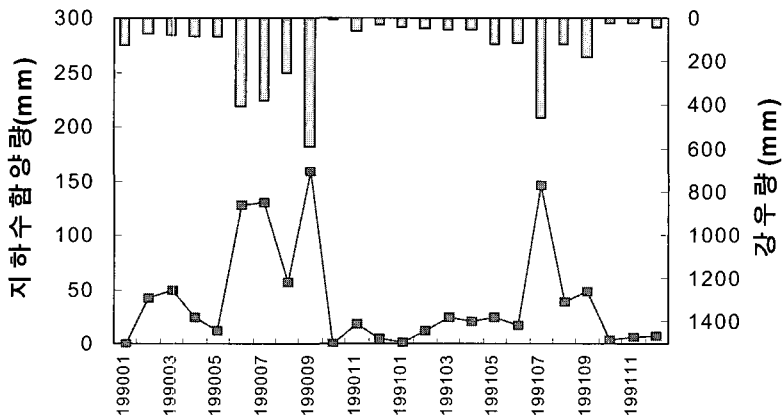


그림 9. 2년간의 월별 지하수 함양량(mm)

의 간접적인 방법에 의한 연합양률에 비해 상당히 개선된 결과치라고 판단되며 이를 활용할 경우 기존 물수지 분석의 정확도를 크게 제고시킬 것으로 기대된다.

6. 결 론

지역의 지하수 관리 계획에서 소유역 단위의 지하수 이용계획은 매우 중요하며 이때 가장 중요한 자료는 소유역별 지하수 함양량이다. 그러나 기존의 지하수 함양량은 대유역의 출구점에서 관측된 유량자료를 이용하여 지하수 감수곡선을 해석적으로 산정해 낸 결과에 의존해 왔다. 그러나 이러한 함양량값은 연 기반으로 계산된 것이어서 그 이하의 계절적, 월별 특성을 해석할 수 없으며 소유역별 비균질 특성을 반영할 수 없는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 분포형 강우-유출모형인 SWAT모형을 이용하여 소유역별 함양량을 계산하였으며, 계산된 비함양량과 유역면적과의 관계를 파악할 수 있었다. 이같이 산정된 함양량은 토양층에서의 지체동 물리적인 거동을 반영한 보다 현실적인 값으로써 세분화된 소유역에도 적용이 가능하며 자료가 부족한 유역에서 함양량 및 배출량의 계산이 가능해짐으로써 미계측 유역의 지하수 개발량 산정에 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 2단계 연구비(과제번호 2-2-2) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김성준, 채효석 (2000). "격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수 함양량 추정기법 개발." **한국수자원학회 논문집**, 제33권 제1호, pp. 61-72.

박창근 (1996). "우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념정립과 기법의 개발." **지하수환경**, 제3권 제1호, pp. 15-20.

배상근, 이승현 (2004). "소유역의 강수에 의한 지하수 함양량 산정." **한국수자원학회 논문집**, 제37권 제5호, pp. 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, pp. 89-95.

Andres, G. and R. Egger (1985). "A new tritium interface method for determining the recharge rate of deep groundwater in the Bavarian Molasse basin." *Journal of Hydrology*, Vol 82. pp.27-38.

Arnold, J. G., P. M. Allen, and G. Bernhardt. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol 142. pp.47-69.

Arnold, J. G. and P. M. Allen (1999). "Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 411-424.

Arnold, J. G., R. S. Muttiah, R. Srinivasan, and P. M. Allen(2000). "Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 227, pp.21-40.

Barnes, B. S. (1939). "The structure of discharge recession curves." *Transactions of the American Geophysical Union* 20, pp. 721-725.

Fetter, C. W. (1994). *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall.

Horton, R. E. (1939). "Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity." *Transactions of the American Geophysical Union* 20, pp. 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." *Environmental Geology*, Vol. 26, 111-120.

Meyboom, P. (1961). "Estimating groundwater recharge from stream hydrology." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 4, pp. 1203-1214.

Moon, S. K., Nam C. Woo, and Kwang S. Lee (2004). "Statistical analysis of hydrographs and water-level fluctuation to estimate groundwater recharge." *Journal of Hydrology* Vol. 292, pp. 198-209.

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., K. O. Harrop-Williams, and J. A. Klaiber (1984). "Predicting groundwater response to precipitation." *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 11 No. 7, pp. 957-975.
- Saxton, K. E, W.J. Rawls, J.S. Romberger, and R. I. Papendick (1986). "Estimating generalized soil-water characteristics from texture." *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, Vol. 50, No. 4, pp.1031-1036.
- Sharma, M.L. (1989). *Groundwater Recharge*, Balkema, Brookfield, VT, p. 323.
- Solomon, D. K., S.L. Schief, R. J. Poreda and W. B. Clarke (1993). "A validation of $3\text{H}/3\text{He}$ method for determining groundwater recharge." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 9, pp. 2951-2962.
- Sophocleous, M. A. (1991). "Combining the soil water balance and water level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge : practical aspects." *Journal of Hydrology* Vol. 124, pp. 229-241.
- Theis, C. W. (1937). "Amount of groundwater recharge in the southern high plains." *Transactions of the American Geophysical Union* 18, p. 564.
- Venetis, C. (1962). "A study of recession of unconfined aquifers." *Bulletins of International Association of Hydrological Science*, Vol. 14, No. 4, pp. 119-125.
- Winter, T. C., S. E. Mallory, T. R. Allen, and D. O. Rosenberry (2000). "The use of principal component analysis for interpreting groundwater hydrographs." *Ground Water*, Vol. 38, No. 2, pp. 234-246.

(논문번호:05-25/접수:2005.2.7/심사완료:2005.05.27)