

시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 산정방안

Estimation of Groundwater Recharge with Spatial-Temporal Variability

김남원* · 정일문** · 원유승***

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

Abstract

In recent years, many studies for exact estimation of groundwater recharge has been performed. They can be categorized into three groups : analytical method by means of groundwater recession curve, water budget analysis based on watershed, and the method using groundwater model. Since groundwater recharge rate shows the spatial-temporal variability due to hydrogeological heterogeneity, existing studies have various limits to deal with these characteristics. The method of estimating daily recharge rate with spatial-temporal variation based on rainfall-runoff model is suggested in this study for this purpose. This method is expected to enhance existing indirect method by means of reflecting climatic conditions, land use and hydrogeological heterogeneity.

Key words : Groundwater recharge, rainfall-runoff model, spatial-temporal variability

요 지

현재 전 세계적으로 지하수 함양량의 정확한 추정을 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 접근방식에 따라 지하수 감수곡선에 의한 해석적 방법, 한 유역을 기반으로 한 물수지법, 그리고 지하수 모델링에 의한 방법으로 크게 구분된다. 한편 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용, 관개와 수리지질학적 비균질성에 의해 현저한 시공간적 변동성을 나타내고 있다. 그러나 기존의 방법들은 이와같은 시공간적 분포상황에 관한 해석에 있어서는 여러 가지 한계를 보이고 있다.

이에 본 연구에서는 시공간적 변동성을 고려한 강우-유출모형 기반의 일단위 함양량 산정기법을 제시하였다. 각 소유역의 비균질한 특성을 반영한 함양량의 분포를 일단위로 산정하였으며, 토양층에서의 지체등 물리적인 거동을 반영함으로써 기존의 간접적 추정방식을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 지하수 함양, 강우-유출모형, 시공간적 변동성

* 정회원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 수석연구원 · E-mail: nwkim@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 선임연구원 · E-mail: imchung@kict.re.kr

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 연구원 · E-mail: yswon@kict.re.kr

1. 서 론

지하수 관리에 있어서 대수층의 자연함양량에 대한 지식은 개발가능량을 추정하는 근거가 된다. 얕은 대수층으로의 지하수 함양과 유출특성은 효율적인 지하수자원개발 뿐아니라 대수층과 연결된 하천으로의 오염 위험을 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). 대수층으로 함양되는 체적은 대수층으로부터 배제되어도 지속가능성이 유지된다고 보는 안전채수량 개념은 이미 미국에서 시행착오를 거쳐 그 개념에 변화가 일어났다. 다시 말해서 대수층의 지속가능한 산출량은 함양량보다 훨씬 적은 양이어야 한다는 것을 인식하게 됐다. 또한 좀 더 광범위한 지속가능성 측면에서 적절한 수질과 수량을 가진 물은 하천과 샘, 습지 그리고 지하수 의존형 생태계를 유지하는데 필수조건이므로 이러한 환경을 예측하고 생태학적인 문제를 정량적으로 평가하는 연구가 시급하다. 구체적으로 핵심적인 제어변수들(함양량, 수문순환성분)의 시공간적 변동성과 불확실성 때문에 지속가능성의 평가는 지속적인 모니터링과 분석, 우선순위 등을 포함한 동적이고 반복적인 과정으로 이해되어야 한다. 이를 위해서는 지표수와 지하수의 물순환을 유역단위에서 파악할 수 있는 해석기술을 통해 다각적인 지표수-지하수의 연계운영 시나리오가 제시돼야 할 것이다.

현재 전 세계적으로 지하수 함양량의 정확한 추정을 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 접근방식에 따라 지하수 감수곡선에 의한 해석적 방법, 한 유역을 기반으로 한 물수지법, 그리고 지하수 모델링에 의한 방법으로 크게 구분된다. 한편 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용, 관개와 수리지질학적 비균질성에 의해 현저한 시공간적 변동성을 나타내고 있다 (Sharma,1989). 그러나 기존의 방법들은 이와같은 시공간적 분포상황에 관한 해석에 있어서는 여러 가지 한계를 보이고 있다.

본 연구에서는 이를 개선하기 위한 방법으로 강우-유출모형을 기반으로 한 소유역 단위의 일단위 지하수 함양량 산정기법을 제시하고자 한다.

2. 기존의 지하수 함양량 산정 방식

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. 이 기법은 Meyboom(1961)에 의해 제안된 것으로 유역내에서 소모적인 지하수 사용이 없다고 가정한 자연유량의 가정이 전제되므로 유역내에서 지하수의 양수 혹은 증발산을 고려할 경우 감수곡선에 의해 결정된 양에 그 양들을 더해줘야만 한다.

기저유출분리법을 이용한 함양량 산정의 단점은 기저유출 분리에 임의성이 있으며, 유역전체에 대해 집중형(lumped)개념으로 접근하므로 함양량의 공간분포를 결정하기 어렵다는 한계가 있다.

2.2 물수지법

함양역(recharge area)에서의 물수지는 지하수 함양을 결정하는 유용한 수단이 된다. 물수지법에 사용되는 많은 변수들 중 강수, 하천유량, 물이동량, 저수지 증발량은 직접적으로 구해지는 것들이다. 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 포

합한다. 증발산량을 추정하는 방법으로는 측정에 의한 방법, 이론적 방법, 기후 인자와의 상관관계에 의한 방법 등이 있다. 이중 널리 이용되는 기후 인자와의 상관관계에 의한 방법은 주로 경험공식에 의하여 식물의 소비수량을 계산하는 방법으로 Blaney-Criddle법, Thornthwaite법, Penman법 등이 있다(건설교통부, 1999). 이러한 항목들을 이용하면 미개발대수층의 함양역에서의 자연함양량을 구할 수 있다(Fetter, 1994).

$$\begin{aligned} \text{지하수 함양} = & (\text{강수} + \text{지표수유입} + \text{기타 유입수} + \text{지하수 유입}) - (\text{증발산량} + \text{저수지증발} \\ & + \text{지표수유출} + \text{기타유출수} + \text{지하수 유출}) \pm \text{지표수 저류변화} \end{aligned} \quad (1)$$

윗 식은 지하수 함양을 구함에 있어 강수뿐만 아니라 손실하천(losing stream), 관개용수, 무복공 수로(unlined canal)등을 고려한 개념이며 증발산이 결정되지 못하면 그 유용성이 제한된다는 단점이 있다. 또한 각 항목을 산정함에 있어 물리화학적 기반보다는 데이터 자체에 의존하는 경향이 있어 실제 활용성이 떨어지는 단점이 있다.

3. 장기 유출모형을 이용한 지하수 함양량의 결정

본 연구에서는 함양량의 시공간적 분포를 산정하기 위해 준분포형 장기 유출모형인 SWAT모형을 선정했다. SWAT모형은 공간적인 매개변수화를 수행하는 개념적 모형으로 주된 모형성분은 기후, 수문, 토양온도, 식물생장, 영양원과 살충제 그리고 토지관리부분으로 구성돼 있다(Arnold et al., 1998).

SWAT 모형으로 SCS-CN 방법을 이용한 직접유출량 산정, Penman-Monteith식을 이용한 증발산량 계산, 다양한 토지이용도, 지하 토양층의 특성을 고려하며 자체 지하수 성분 해석 모듈을 가지고 있어 대수층으로의 함양과 하천-대수층 상호작용을 모의한다. SWAT 모형은 국지적인 수문응답단위(hydrologic response unit, HRU)의 물수지에 의해 수문성분을 계산하며 저장체적(storage volume)은 크게 네 가지-용설, 토양통, 얇은 대수층, 깊은 대수층-로 구성된다. 본 연구에서 HRU는 고유한 토지이용과 토양통의 결합으로 정의하며 토양통은 여러 층으로 구분한다.

지하수 함양은 강수에 의해 침투된 물이 토양층을 거쳐 얇은 대수층으로 유입되는 것으로 정의되며 기저 유출성분으로 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 흐르게 된다. 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.

4. 모형의 적용

본 연구의 분석 대상유역은 경안천유역 중 경안수위관측소를 기준으로 한 259.2 km²이며, 9개의 소유역별 면적은 대략 7~60 km², 하천길이는 5~20 km, 평균경사는 0.017~ 0.067 m/m, 평균 폭은 4~15 mm/km 이다(그림 1).

1980년부터 2000년까지 5년 단위의 토지이용도를 살펴보면, 1980~1985년까지 1.2% 정도가 도시지역으로 분류된데 반해, 1990년부터 2000년까지 4.11%, 8.12% 10.10%까지 점차적으로 도시지역이 증가하였다. 또한 Grass와 Bair Soil은 증가하는 반면 Forest, Paddy, Upland Crop는 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 1:25000의 정밀토양도로부터 경안천 유역의 토양통은 총 92개였으며, 이중 경안수위관측소를 중심으로한 38개 토양통을 실제 분석에 이용했다(김남원과 원유승, 2003). 경안천 유역을 대상으로 1995년 토지이용도와

1990-2001(12년)에 대하여 SWAT에 의한 일별 지하수 함양률 산정결과를 그림 2에 나타내었다. 또한 소유역별 함양량의 시간적 분포를 살펴보기 위해 9개의 소유역별 함양량을 각각 산정하였으며, 4번 소유역의 연도별 함양량 추이를 그림 3에 나타냈다. 소유역별 함양량의 공간적 분포를 살펴보기 위해 9개 소유역에 대한 1994년도의 소유역별 지하수 함양량을 그림 4에 나타냈다. 그림 4에 나타낸 것처럼 소유역별로 함양량의 차이가 나타났는데, 그 이유는 HRU에 따른 토양특성과 토지이용특성에 따른 것이다. 예를 들면, 4번 소유역의 경우 29개의 HRU로 구분되며 HRU별로 그 함양특성이 다르게 나타남을 알 수 있었다(그림 5).

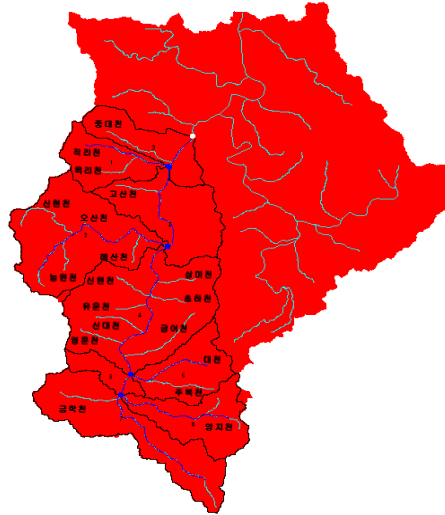


그림 1. 소유역 구분

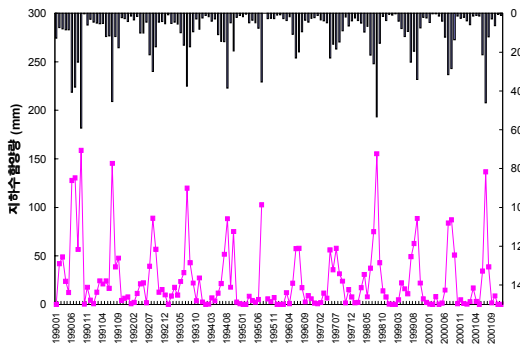


그림 2. 12년간의 일단위 지하수 함양량(mm)

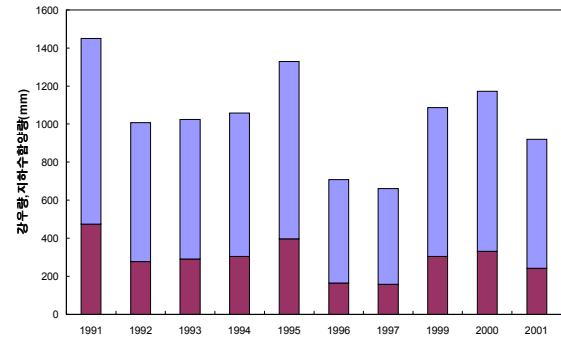


그림 3. 4번 소유역의 연도별 지하수 함양량

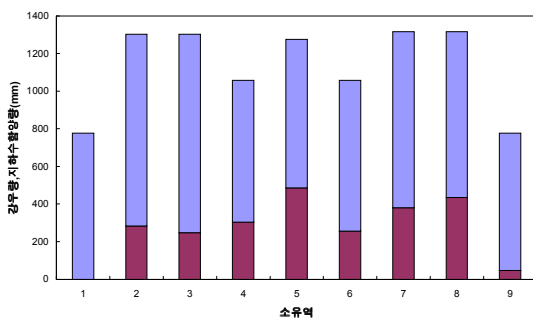


그림 4. 소유역별 함양량(mm)

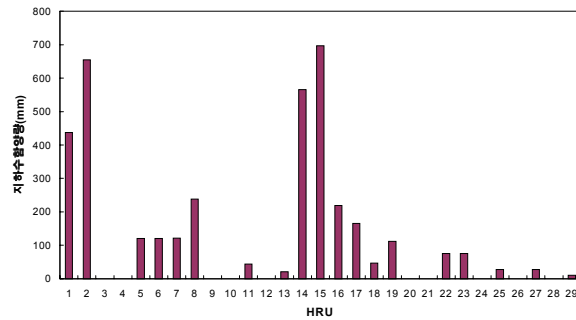


그림 5 4번 소유역에 대한 HRU별 함양량(mm)

그림 5. 4번 소유역에 대한 1994년도의 HRU별 함양량(mm)

5. 결론

지하수 함양량은 기후조건, 토지이용, 관개와 수리지질학적 비균질성에 의해 현저한 시공간적 변동성을

나타내고 있다. 그러나 기존의 방법들은 이와같은 시공간적 분포상황에 관한 해석에 있어서는 여러 가지 한계를 보이고 있다. 지하수 함양량을 산정하는 기존방법은 유역출구에서의 유량자료를 이용한 기저유출분리방법과 물수지방법에 의한 것으로 두 방법 모두 유역의 특성을 균질하게 보는 집중형 방식과 시간단위에 있어서도 여러 가지 제한이 있었다. 이에 본 연구에서는 시공간적 변동성을 고려한 강우-유출모형 기반의 일단위 함양량 산정기법을 제시하였다. 이 방법은 각 소유역의 비균질한 특성을 반영한 함양량의 분포를 일단위로 산정할 수 있으며, 토양층에서의 지체등 물리적인 거동을 반영함으로써 기존의 간접적 추정방식을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1.건설교통부(1999) 지하수 영향조사·심사요령
- 2.김남원, 원유승(2003), 유역의 도시화에 따른 수문학적 영향 평가, 2003년도 대한토목학회 학술발표회 개요집.
- 3.박창근 (1996) 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1.개념정립과 기법의 개발. 지하수환경 제3권 제1호, pp. 15-20
- 4.이동률(1995) 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량 예측, 고려대학교 박사학위 논문.
- 5.Arnold, J. G., R. S. Muttiah, R. Srinivasan, P. M. Allen(2000) Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin, J. of Hydrology 227,21-40.
- 6.Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment. Part I. Model development. J. Am. Water Resour. Assoc. 34, 73-89.
- 7.Barnes, B. S. (1939) The structure of discharge recession curves. Trans. Am. Geophys. Union, 20, pp. 721-725.
- 8.Fetter, C. W. (1994) Applied Hydrogeology, Prentice Hall.
- 9.Johnston, K. H.(1977) A predictive method for groundwater levels. Master's Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- 10.Memon, B. A. (1995) Quantitative analysis of springs. Environ. Geol. 26, 111-120.
- 11.Meyboom, P. (1961) Estimating groundwater recharge from stream hydrology. Journal of Geophysical Research, Vol 66, No. 4, pp.1203-1214
- 12.Sangrey, D. A., K. O. Harrop-Williams, and J. A. Klaiber (1984) Predicting groundwater response to precipitation. ASCE J. Geotech.Eng. 11(7) : 957-975
- 13.Sharma, M.L., 1989. Groundwater Recharge, Balkema, Brookfield, VT, p. 323.
- 14.Venetis, C.(1969) A study of recession of unconfined aquifers. Bull .Int. Assoc. Sci. Hydrol. 14(4):119-125.