

유역물수지와 지하수위변동을 고려한 지하수 함양량의 추정

Estimation of Groundwater Recharge Considering Water Balance and Groundwater Head Variation in Watershed

정일문*, 김남원**, 이정우***, 원유승****
Il Moon Chung, Nam Won Kim, Jeongwoo Lee, Yoo Seung Won

요 지

지하수 함양량을 산정하기 위해서 유역물수지 모형 또는 지하수위 변동곡선법등이 활용되어 왔으며, 각각의 장단점에 대한 많은 논의가 있었다. 지역내의 지하수 관리계획을 위해서는 유역물수지 모형이 적합한 반면, 실제(actual) 함양량의 정확성 문제가 있으며, 지하수위 변동곡선법은 실제 지하수의 증감을 통해 실제 함양변화를 잘 표현하는 반면, 그 영향권이 관측공에 의해 제한된다는 단점이 있다. 이와 같은 두 방법의 장점을 살리고 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 유역유출모의와 지하수위 변동을 동시에 고려하여 지하수 함양량을 추정하는 방안을 제시하였다. 수문학적 과정으로 함양을 분석하기 위해 준분포형 수문모형인 SWAT과 완전분포형 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW의 결합모형을 이용한 유역단위 유출해석을 수행한다. 실제로 하천변에 위치한 관측공에서의 지하수위는 하천유출시계열과 유사한 양상을 보이며, 상류 경사지에 위치한 관측공의 지하수위는 토양수의 지체와 감수현상을 나타내므로 이같이 시간적으로 상이한 지체 양상을 반영하기 위해 모형내의 비포화대를 통과하는 함양의 거동을 기존의 단일 저수지 모형에서 다단 저수지 모형으로 개선하고 지체함수와 관련된 매개변수를 보정함으로써 모의 함양 시계열과 관측 지하수위 시계열간의 상관성 분석을 수행할 수 있다. 아울러 모의 및 관측 지하수위 분포의 비교를 통해 공간적인 지하수 분포에 대한 검증을 수행함으로써 함양량 산정 절차가 완성된다. 이같은 일련의 절차는 기존의 유역물수지 모형과 지하수위 변동법을 동시에 고려한 새로운 방식의 지하수 함양량 산정기법으로 제시할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 유역수문모형, 지하수위 변동, SWAT-MODFLOW결합모형, 함양량

1. 서 론

대수층내에서 지하수의 함양과 배출이 균형을 이루고 있을 때 지하수는 재생자원으로 간주되지만, 양수량이 함양량보다 많아지면 지하수의 고갈이 일어나고 대수층은 더 이상 지속가능할 수 없다. 이와 같은 지하수 고갈은 부적절한 지하수 관리를 통해 야기되는 현상으로서 대수층의 저류량 감소, 지하수위의 저하, 해안에서의 염수침입, 지반 침하, 수질의 저하 및 대수층과 연결된 습지나 지표수 등 다른 수체와 연결된 환경문제 등 여러 가지 부정적인 영향을 일으킨다. 사회 경제적인 측면에서도 지하수 고갈로 인한 농업생산성 감소, 가용수량의 감소, 우물심도 조정을 통한 경제적 손실등이 더불어 발생한다.

본 연구에서는 기존의 지하수 관리문제를 지표수-지하수를 통합하는 관점에서 파악하고자 하며 이를 위한 선결조건인 정확한 함양량의 추정을 위해 유역물수지와 지하수위 변동을 동시에 고려한 접근방안을 제시하고자 한다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 · E-mail : imchung@kict.re.kr
** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 · E-mail : jw2961@kict.re.kr
**** 정회원 · 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사 · E-mail : yswon@kict.re.kr

2. 기존의 지하수 함양량 산정방법들

국내의 경우, 지하수위의 감수기간뿐만 아니라 함양기간까지 고려하여 하천 유출수분곡선으로부터 기저유출을 분리하는 방법(박창근, 1996)을 이용하여 5대강 유역의 지하수 함양량을 추정하였다. 기저유출분리법은 비교적 널리 적용되어 왔으나, 댐과 같은 하천구조물에 의해 유량이 조절되지 않은 자료를 이용해야하는 제약성이 있으며, 유량측정자료의 신뢰성이 높아야 한다.

물수지 분석법(선우중호, 1992; 강장신, 1997)에 의한 함양량 산정은 증발산량을 계산할 때 사용자의 주관적인 경향이 강해서 이로 인한 오차가 클 가능성이 존재하는 단점이 있다. 따라서 예비 평가 단계에서 개략적인 함양량을 추정하는 방법으로 이용되거나 다른 방법과 함께 사용되는 것이 바람직 한 것으로 알려져 있다. 또한, 물수지 분석법은 장기간에 걸친 평균적 수문평형상태를 가정하기 때문에 중간 과정에서의 동적인 수문순환의 변화를 고려하지 못하는 결점이 있다.

지하수위 변동법 역시 함양을 추정하는 대표적인 방법으로 국내에서는 구민호와 이대하(2002)가 관측공의 지하수위 변동과 관극률과의 관계를 통해 함양량을 추정하는 연구를 수행했고, 문상기 등(2002), Moon 등(2004)이 국가 지하수 관측망 자료를 활용하여 우리나라 지하수위변동곡선의 유형을 구분하고, 각 유형별 함양률을 평가하여 지하수 함양률의 공간적 변동성을 규명하였다. 지하수위 변동법의 가장 큰 장점은 관측 자료의 수집이 용이하다는 점이며, 최근에 자동수위 계측기의 개발, 보급으로 장기적인 지하수위 변동 자료를 획득할 수 있게 되었고 국가 지하수 관측망 구축에 따른 관측 자료가 점차 양질화되어 가고 있다는 점이다. 그러나, 이 방법은 관측공의 변화에만 의존하므로 유역기반의 물수지 관점에서는 제한적으로 적용될 수 밖에 없다.

SCS-CN법은 미계측 유역의 유출량 추정에 이용되는 유출량 공식을 이용하여 침투량을 산정하고, 각 강우사상별 침투량을 지하수 함양량으로 보아 장기간의 침투량을 누계하여 같은 기간의 강우량과 비교하여 지하수 함양율을 산정하는 방법이다. 이 방법은 최병수와 안종기(1998), 배상근과 이승현(2004) 등에 의해서 토지이용과 토양의 분포특성을 반영한 소유역의 지하수 함양량 추정기법으로 이용되었다. 그러나, 엄밀한 의미에서 침투량은 함양량과는 다른 개념의 물리량이고, 침투량이 곧 지하수 함양량이라는 가정으로 인해 함양량이 과다 추정될 우려가 있다.

이상과 같은 방법들은 각기 독특한 특성과 장점을 가지고 있으나, 집중형 개념을 기반으로 하거나 국지적인 규모로 다뤄지기 때문에 기후 조건, 토지이용 조건, 토양 조건, 수리지질학적 비균질성 등에 의한 함양량의 시공간적인 변동 특성을 반영하기에는 어려움이 있다.

Arnold 등(2000)은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동을 예측하기 위해서 개발된 유역모델인 SWAT(Soil Water Assessment Tool)을 이용하여 미시시피강 유역의 지하수 함양량을 추정하고 이를 기저유출 분리법의 결과와 비교하였다. SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 물리적 이론에 근거한 유역단위의 준 분포형 장기유출모형으로, 기후, 토양 및 토지이용 조건에 따른 유역의 비균질성을 반영할 수 있어 지하수 함양량의 시공간적 변동 특성을 모의할 수 있다. 최근 들어 Sun과 Cornish(2005)는 호주 Liverpool Plains 유역에 SWAT 모형을 적용하여 지하수 함양량을 추정하였으며, 함양량의 시간적 변동성은 토지이용인자의 변화보다는 기상학적 인자에 더 큰 영향을 받는다고 분석하였다. 국내에서는 김남원 등(2005, 2006a)이 기존의 유역 대표 함양량 대신 각 소유역의 비균질한 특성을 반영한 함양량의 시공간적 분포를 산정하였는데, 산정된 일 단위 함양량은 기후조건, 토지이용 및 수리지질학적 비균질성과 토양층에서의 지체 등과 같은 물리적인 거동까지 반영된 것이어서 기존의 간접적 추정방식에 의한 연단위 함양률 산정 방법을 크게 개선할 수 있을 것으로 전망하였다.

3. 지표수 유출과 지하수위 변동을 동시에 고려한 추정기법

본 연구에서는 김남원 등(2004a,b)이 개발한 지표수-지하수 통합 유출모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 이용하여 지표수 수문학적 프로세스인 함양을 계산하고 이를 다시 대수층의 특성인 지하수위 변동과 연계시켜 산정하는 방안을 제시하고자 한다.

지하수 함양은 강수에 의해 침투된 물이 토양층을 거쳐 얕은 대수층으로 유입되는 것으로 정의되며 기저 유출성분으로 배출될 때 까지 시간적 지체가 나타나며 일부는 중발에 의해 소모되기도 한다. SWAT 모형에서 지하수 함양의 경우 침루(percolation)나 우회흐름(bypass flow)에 의해 토양층의 가장 낮은 깊이를 통과하는 물은 얕은 대수층으로 함양되기 전에 비포화대(vadose zone)으로 유입되어 흐르게 된다. 침루는 각 토양층별로 계산되는데 함수량이 포장용수량(field capacity)을 초과하는 경우에 일어난다.

토양층내 물이 존재하는 시간과 얕은 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(Neitsch 등, 2001).

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

여기서, $w_{rchrq,i}$: i일의 대수층 함양수량(mm), δ_{gw} : 지질층 전역에 대한 지체시간 또는 배수시간(days), w_{seep} : i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 수량(mm), $w_{rchrq,i-1}$: i-1일의 대수층 함양수량(mm)이다. i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 총 수량은 다음과 같다.

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crk,btm} \quad (2)$$

여기서, w_{seep} : i일에 토양층 바닥으로 빠져나가는 수량(mm), $w_{perc,ly=n}$: i일에 토양층의 가장 낮은 층 n에서 침루되는 수량(mm), $w_{crk,btm}$: i일에 우회흐름으로 토양층의 하부경계로 흐르는 수량(mm)이다. 여기서 비포화대를 통과하는 함양의 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. 기존의 SWAT 모형내에는 이같은 비포화대의 거동을 지체함수로서 표현할 때 단일 저수지로 간주하였으나, 본 연구에서는 이같은 단일 저수지 개념을 다단 저수지 개념(그림 1)으로 변환시킨 후 지체 매개변수값의 변화를 통해 실제 대수층의 지하수위 변화와의 상관성을 검토하여 최적의 지체변수를 결정하는 방안을 제시하였다.

한편, SWAT-MODFLOW는 SWAT모형의 하부구조인 지하수 모듈의 집중형 특성을 분포형 모형인 MODFLOW로 대체함으로써, SWAT의 HRU특성에 해당하는 셀의 함양량을 분포형 셀로 입력함으로써 대수층의 물수지를 보다 정확하게 계산할 수 있도록 모형을 개선한 것이다. 그림 2는 SWAT-MODFLOW결합모형과 다단 저수지 모듈을 이용한 함양량 산정 절차이다.

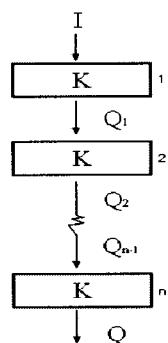


그림 1. 직렬 다단 저수지 모형

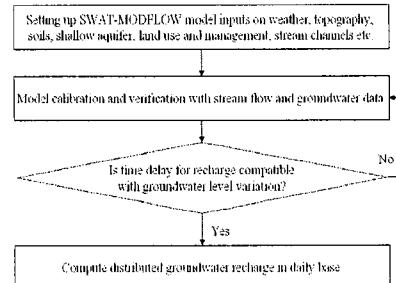


그림 2. 본 연구의 함양량 산정 절차

먼저 SWAT-MODFLOW를 위한 자료가 수집되고 모델링을 위한 세팅이 이루어진다. 이 자료는 크게 기상, 지형, 토양, 천부대수층, 토지이용과 관리 등을 포함하며 하도 정보도 포함된다. 모형의 초기구동(warm up period) 검정과 검증을 거친다. 이때 개선된 다단 저수지 모형을 이용하여 지체 변수(time delay parameter)를 변화시켜 가면서 지하수위변동에 맞게 함양의 최적 시계열을 찾아낼 수 있다.

4. 결과분석

본 연구에서 제시하는 최적 지하수 함양량 산정기법을 시험적용하기 위해 안성천 유역의 두 개의 소유역을 선정하였다. 이 두 소유역에는 신뢰성 높은 지하수위 시계열 자료인 국가지하수관측망이 설치된 지역이다. 본 연구에서 제시된 기법을 안성천 공도수위표 상류유역에 대해 적용하였다. 총 유역면적은 373.23 km^2 이며, 총 34개의 소유역으로 분할하였다(그림 3). 그림 2의 해석과정중 통합유출모의에 관해서는 기존 연구(김남원 등, 2006b)의 절차를 따라 해석하며, 본 논문에서는 지표수 유출해석과 지하수 모델링 과정은 생략하고, 두 개의 소유역, 다시 말해서 국가 지하수 관측망이 포함된 소유역에 대하여 시변성 지하수 함양량과 지하수위와의 관계를 본 연구에서 제시한 함양의 다단 저수지 모형을 적용한 결과를 중심으로 살펴보도록 한다. 그림 3은 신모산 관측소가 포함된 소유역에서의 지하수 함양량과 신모산 국가지하수관측망의 시계열을 나타낸 것이다. 직렬 다단 저수지 개념을 적용하기 위해서는 지체시간(δ_{gw}) 변수를 다양하게 변화시켜 가면서 지하수위 시계열 자료와 가장 상관성이 높은 경우의 지체변수를 최적값으로 선택해야 한다. 그림에서 보는 바와 같이 신모산 지점의 경우는 $\exp[-1/\delta_{gw}]$ 값이 0.97일 때 상관계수는 0.95로 가장 높게 나타났다. 그럼에서 보는 바와 같이 실선으로 나타난 지하수 함양의 첨두치는 점선으로 나타난 지하수위의 첨두치와 발생시간이 매우 근접하고 있음을 볼 수 있다. 그림 4는 같은 방법을 삼죽 관측소가 포함된 소유역에 적용하였을 때 얻어진 지하수 함양량과 삼죽 국가지하수관측망의 시계열을 나타낸 것이다. 이 경우는 무차원화 시킨 지체함수가 0.95일 때 상관계수는 0.84로 가장 높게 나타났다. 이같이 함양의 지체를 나타내는 특성은 관측공별로 매우 상이하게 나타났으며, 특히 관측공이 하천에서 가까울 때와 상대적으로 내륙에 위치하는 경우 지체양상은 매우 다르게 나타남으로써 이 매개변수는 소유역의 함양특성을 나타내는 주요인자임을 확인할 수 있었다.

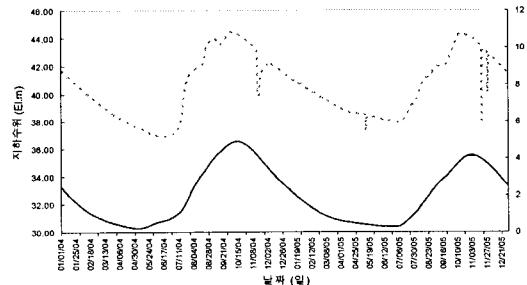


그림 3. 신모산 관측소 유역에서의 함양과 지하수위의 관계

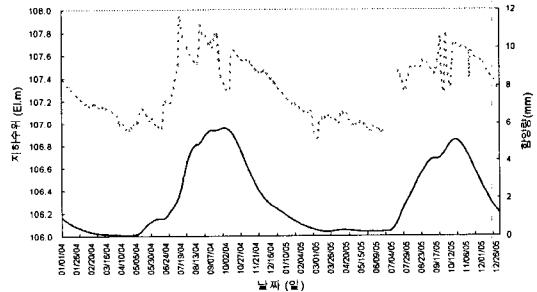


그림 4. 삼죽 관측소 유역에서의 함양과 지하수위의 관계

5. 결 론

지하수 함양을 수문학적 과정으로 분석함에 있어서 중요한 요소는 함양량의 시변(time dependent)특성이 라고 할 수 있으나 지금까지 우리나라에서는 이와 같은 요소를 중요하게 다루기 보다는 지하수 함양량을 산정할 때 연평균값 혹은 유역대표값으로 결정해 왔다. 그러나 효율적인 지하수 관리를 위해서는 대수층으로의 입력 인자인 계절별, 월별 지하수 함양특성을 고려하여 효과적인 관리전략을 수립하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서 제시하는 방법은 복잡한 유역 물수지 해석과 지하수위 변동곡선법의 장점을 동시에 살릴 수 있는 방법으로, 물수지 해석은 통합 지표수-지하수 모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 사용하고, 국가지하수 관측망 시계열 자료를 활용하여 함양과 지하수위의 변동과의 관계를 최적화 한다. SWAT의 함양량 산정에 사용되는 단일 저수지 모형을 다단 저수지 모형으로 개선한 결과, 지체함수의 변동을 통해 지하수 시계열에 부합하는 함양량의 시계열을 구할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 절차는 우리나라 국가지하수 관측망 자료와 그에 속한 소유역에 적용이 가능하며 자료에 신뢰성이 따라 산정된 함양량의 신뢰성이 높아질 것으로, 국가 지하수 관측망의 활용도는 더욱 확대될 것으로 판단되며, 보다 다양한 유역에 적용함으로써 일반화 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 2단계 연구사업(과제번호 2-2-2)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원이 위탁시행한 2005년도 건설기술기반구축사업(05기반구축A03-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 장장신 (1997). 지하수 수량의 평가, 지하수 자원의 개발보전관리심포지엄, 한국자원공학회, pp. 127-184.
- 구민호, 이대하 (2002). 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, 지질학회지, 제38권 제3호, pp.407-420.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (I) 모형의 개발, 한국수자원학회 논문집, 제37권 제6호, pp.499~507.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (II) 모형의 평가, 한국수자원학회논문집, 2004. 6.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2005) 시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정방안, 한국수자원학회논문집, 제 38 권 제 7호, pp. 517-526.4.
- 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주 (2006a). 시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정, 한국지하수토양환경학회지, 제11권, 제5호, pp.9-19.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2006b). 완전연동형 SWAT- MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의, 대한토목학회 논문집, 제26권, 제5B호, pp.481-488.
- 문상기, 우남칠, 한원식 (2002). 국가 지하수 관측망 자료를 이용한 충적층 지하수 함양률의 공간적 변동성 연구, 2002년 (사)한국지하수토양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, pp. 237-242
- 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.
- 선우중호 (1992). 우리나라 지하수 개발의 필요성, 물관련 정책토론회, 건설부-한국수자원공사, pp. 99-119.
- 최병수, 안중기 (1998). 지역단위 지하수 자연함양률 산정방법 연구, 대한 지하수환경학회, 5권 2호, pp. 57-65.
- 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.
- 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.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2001). Soil and Water Assessment Tool Version 2000, Theoretical Documentation, Agricultural Research Service. Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. 458p.
- Nian-Feng, L. Jie, T., and Feng-Xiang, H. (2001). Eco-environmental problems and effective utilization of water resources in the Kashi plain, western Terim basin, China. Hydrogeology Journal, 9, 202-207
- 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
- Sophocleous, M. A. (2000). From safe yield to sustainable development of water resources—the Kansas experience, Journal of Hydrology, vol. 235, no. 1-2, pp. 27-43.
- Sun, H. and P. S. Cornish (2005). Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT, Hydrological Processes, 19, pp. 795-807.
- Venetis, C. (1962). "A study of recession of unconfined aquifers." Bulletins of International Association of Hydrological Science, Vol. 14, No. 4, pp.119-125.