

유역 유출과정과 지하수위 변동을 고려한 분포형 지하수 함양량 산정방안

정일문* · 김남원 · 이정우
한국건설기술연구원 수문연구실

Estimation of Groundwater Recharge by Considering Runoff Process and Groundwater Level Variation in Watershed

Il-Moon Chung* · Nam Won Kim · Jeongwoo Lee
Hydrology Research Division, Korea Institute of Construction Technology

ABSTRACT

In Korea, there have been various methods of estimating groundwater recharge which generally can be subdivided into three types: baseflow separation method by means of groundwater recession curve, water budget analysis based on lumped conceptual model in watershed, and water table fluctuation method (WTF) by using the data from groundwater monitoring wells. However, groundwater recharge rate shows the spatial-temporal variability due to climatic condition, land use and hydrogeological heterogeneity, so these methods have various limits to deal with these characteristics. To overcome these limitations, we present a new method of estimating recharge based on water balance components from the SWAT-MODFLOW which is an integrated surface-ground water model. Groundwater levels in the interest area close to the stream have dynamics similar to stream flow, whereas levels further upslope respond to precipitation with a delay. As these behaviours are related to the physical process of recharge, it is needed to account for the time delay in aquifer recharge once the water exits the soil profile to represent these features. In SWAT, a single linear reservoir storage module with an exponential decay weighting function is used to compute the recharge from soil to aquifer on a given day. However, this module has some limitations expressing recharge variation when the delay time is too long and transient recharge trend does not match to the groundwater table time series, the multi-reservoir storage routing module which represents more realistic time delay through vadose zone is newly suggested in this study. In this module, the parameter related to the delay time should be optimized by checking the correlation between simulated recharge and observed groundwater levels. The final step of this procedure is to compare simulated groundwater table with observed one as well as to compare simulated watershed runoff with observed one. This method is applied to Mihocheon watershed in Korea for the purpose of testing the procedure of proper estimation of spatio-temporal groundwater recharge distribution. As the newly suggested method of estimating recharge has the advantages of effectiveness of watershed model as well as the accuracy of WTF method, the estimated daily recharge rate would be an advanced quantity reflecting the heterogeneity of hydrogeology, climatic condition, land use as well as physical behaviour of water in soil layers and aquifers.

Key words : Watershed runoff process, Groundwater level variation, SWAT-MODFLOW, Recharge, Delay time, Multi-reservoir module

요 약 문

우리나라에서 대표적으로 사용되어 온 지하수 함양량 산정방법은 지하수 감수곡선에 의한 기저유출분리법, 유역내의 집중형 개념모형에 의한 물수지 분석, 그리고 지하수위 변동곡선법으로 대별된다. 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용 그리고 수문지질학적 불균질성에 따르는 시공간적인 변동성을 나타내므로 전술한 방법들은 이같은 특성을 다루

*Corresponding author : imchung@kict.re.kr
원고접수일 : 2007. 5. 21 게재승인일 : 2007. 10. 16
질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지
*본 논문은 2007년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

기에는 많은 제약을 가진다. 이 같은 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 통합 지표수-지하수 모형인 SWAT-MODFLOW로부터 얻어진 물수지 성분을 기초로 한 새로운 함양량 추정방법을 제시하고자 한다. 하천변에 위치한 지하수위는 하천흐름과 유사한 동적변화를 나타내는 반면 보다 상류부에 위치한 지하수위는 강수에 대하여 일정한 지체현상을 나타낸다. 이와 같은 지하수위 변동의 특징은 함양의 물리적 특성과 관련되므로 이 같은 현상을 설명하기 위해서는 토양층을 통과한 물이 대수층 함양에 도달하는데 걸리는 시간적 지체를 설명하는 것이 필요하다. SWAT 모형에서는 주어진 날에 대해 물이 토양층을 통과하여 대수층으로 함양되는 과정을 설명하기 위해 지수형태의 감쇠가중함수를 가진 단일 저수지 저류 모듈을 사용한다. 그런데 이 모듈은 지체시간이 긴 경우나 추정된 함양의 시계열이 지하수위 시계열과 잘 맞지 않는 제한 사항을 가지므로, 본 연구에서는 비포화대를 통과하는 시간 지체를 보다 현실적으로 반영할 수 있는 다단 저수지 저류 추적 모듈을 개발하여 SWAT모형에 탑재하였으며, 이 모듈내의 시간 지체와 관련된 매개변수는 관측지하수위와 모의 함양량의 상관관계를 검토함으로써 최적화가 이루어지도록 하였다. 본 연구방법의 최종 단계는 모의 지하수위와 관측 지하수위, 그리고 관측 유역유출량과 모의 유출량을 검증함으로써 종결된다. 새롭게 제안된 방법을 우리나라 미호천 유역에 적용하여 지하수 함양량의 시공간적 분포를 추정하였는데 제시된 방법이 유역 모형의 효율성과 지하수위 변동법의 정확성이라는 장점을 모두 가진 방법이어서 추정된 일 함양량은 수리지질학적 불균질성, 기후조건, 토지이용과 토양층과 대수층의 거동까지 반영한 매우 개선된 값으로 판단된다.

주제어 : 유역 유출과정, 지하수위 변동, SWAT-MODFLOW 결합모형, 함양량, 지체시간, 다단 저수지 모듈

1. 서 론

우리나라에서 대표적으로 사용되어 온 지하수 함양량 산정방법은 지하수 감수곡선에 의한 기저유출분리법, 유역내의 집중형 개념모형에 의한 물수지 분석, 그리고 지하수위 변동곡선법으로 대별된다. 기저유출분리법은 기본적으로 연합양량 기반의 집중형 개념이므로 지하수 계획과 관리를 위해서는 효과적으로 사용되기 어렵다. 집중형 개념 모형은 집중형 모형내의 공간적인 구조에서 기인한 오차로 인해 실제 상황을 반영하기 어려우며 유역내의 강수량, 식생, 토양, 지질 또는 지형 등의 변화를 설명할 수 없고 모든 매개변수는 그 영역내에서 상수로서 가정된다. 단점이 있다(Beven, 1989). 한편, 지하수위 변동곡선법은 유역내의 물수지 보다는 관측공에 더 영향을 받으며 그 정확성은 지하수위 변동에 관한 정보와 대표성에 좌우된다(Beekman and Xu, 2003). 그러나 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용 그리고 수문지질학적 불균질성에 따르는 시공간적인 변동성을 나타내므로 전술한 방법들이 이 같은 특성을 다루기에는 많은 제약을 가진다. 이 같은 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 지표수-지하수 통합 유출모의를 통해 얻어진 물수지 성분을 기초로 한 새로운 함양량 추정방법을 제시하고자 한다. 이를 위해서 먼저 기존에 사용되어 온 지하수 함양량 산정기법들의 특징과 제한사항을 살펴보고 본 연구에서 제시하는 기법의 타당성을 시험적용을 통해 입증하려고 한다. 본 연구에서 사용된 SWAT-K(한국건설기술연구원, 2006)모형은 준분포형 장기유출모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형(Arnold 등, 1993)을 우리나라 실정에 맞게 토양

DB, 지하수 모듈, 하도 추적 모듈, 관개용수 처리방법 등을 개선한 모형으로 특히 지표수-지하수의 완전연동을 위해 개발된 SWAT-MODFLOW(김남원 등, 2004a, b)가 사용되었다. 또한 토양층에서 비포화대를 통과하는 함양량의 시간적 지체를 고려하는 다단 저수지 모듈을 새롭게 추가하였으며, 이 방법을 우리나라 미호천 유역에 적용하여 적정 지하수 함양량의 시공간적 분포를 추정하는 절차를 제시하였다.

2. 지하수 함양량 산정방법별 특징과 제한사항

기저유출분리법은 유출수문곡선으로부터 직접유출과 기저유출을 분리하여 지하수 함양률을 추정하는 전통적인 기법으로 기저유출 감수곡선법(Meyboom, 1961; 이동률 1995; 박창근, 1996; Rutledge, 1998)이 많이 사용된다. 기저유출분리법은 비교적 널리 적용되어 왔으나, 댐과 같은 하천구조물에 의해 유량이 조절되지 않은 자료를 이용해야 하는 제약성이 있으며, 유량측정자료의 신뢰성이 높아야 한다. 한편 이 방법은 기저유출분리의 임의성으로 인한 문제도 가지고 있다. 또한, 함양배출의 기본가정이 연기반(annual base)이므로 1년 단위로 문제를 해결함으로써 인해 계절성, 월별 변화 등은 반영되지 못하는 단점이 있다.

물수지 분석법에 의한 함양량 추정 방법은 유역내 강수량과 직접유출, 증발산량, 지하수 함양량 간에 수문평형이 유지된다는 물수지 평형식에 기초한 방법이다. 국내에서는 비교적 단순한 물수지 방법을 이용하여 지하수 개발가능량을 추정한 연구(강장신, 1997)를 통해 개략적인 우리나라 지하수 함양량이 산정되었으나, 활용성은 그다지 높

지 않다. 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 공극률과의 관계를 통해 함양량을 추정하는 연구를 수행했고, 문상기 등(2002), Moon 등(2004)이 국가 지하수 관측망 자료를 활용하여 우리나라 지하수위 변동곡선의 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 안중기(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 불균질성 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 미시시공간 유역의 지하수 함양량을 추정하고 이를 기저유출 분리법의 결과와 비교하였다. SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 물리적 이론에 근거한 유역 단위의 준 분포형 장기유출모형으로, 기후, 토양 및 토지이용 조건에 따른 유역의 불균질성을 반영할 수 있어 지하수 함양량의 시공간적 변동 특성을 모의할 수 있다.

국내에서는 김남원 등(2005, 2006a)이 분포형 유출모형인 SWAT을 이용하여 기존의 유역 대표 함양량 대신 각 소유역의 불균질한 특성을 반영한 함양량의 시공간적 분포를 산정하였는데, 산정된 일 단위 함양량은 기후조건, 토지이용 및 수리지질학적 불균질성과 토양층에서의 지체 등과 같은 물리적인 거동까지 반영된 것이어서 기존의 간접적 추정방식에 의한 연 단위 함양률 산정 방법을 크게 개선할 수 있을 것으로 전망하였다.

하지만 아직까지 국내에서는 지표수 유출량과 지하수 유동을 동시에 고려하여 지하수 함양량을 산정한 경우는 없었으며, 이때 지하수위의 변동과 함양과의 상관관계를 나타낸 연구도 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서 제시한 함양량 산정기법은 기존의 유역 물수지 모형에 입각한 함양량 산정법과 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정법의 장점을 동시에 반영할 수 있게 되어 지하수 함양량의 시공간적 분포와 함께 그 정확도 역시 크게 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 지표수 유출과 지하수위변동을 동시에 고려한 함양량 추정기법

본 연구에서는 SWAT-K내의 지표수-지하수 통합 유출 모형인 SWAT-MODFLOW 모형(김남원 등, 2004a, b; 김남원 등, 2006b)을 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 얇은 대수층으로 유입되는 것으로 정의되며 기저유출성분으로 배출될 때 까지 시간적 지체가 나타나며 일부는 증발에 의해 소모되기도 한다. SWAT 모형에서 지하수 함양의 경우 침투(percolation)나 우회흐름(bypass flow)에 의해 토양층의 가장 낮은 깊이를 통과하는 물은 얇은 대수층으로 함양되기 전에 비포화대(vadose zone)로 유입되어 흐르게 된다. 침투는 각 토양층별로 계산되는데 함수량이 포장용수량(field capacity)을 초과하는 경우에 일어난다. 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 기중함수(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; 김남원 등, 2006a).

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

여기서, $w_{rchrg, i}$ 는 i 일의 대수층 함양수량(mm), δ_{gw} 는 지질층 전역에 대한 지체시간 또는 배수시간(days), w_{seep} 는 i 일에 토양층 바닥으로부터 빠져나가는 수량(mm), $w_{rchrg, i-1}$ 는 $i-1$ 일의 대수층 함양수량(mm)이다. i 일에 토양층 바닥으로부터 빠져나가는 총 수량은 다음과 같다.

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

여기서, w_{seep} 는 i 일에 토양층 바닥으로부터 빠져나가는 수량(mm), $w_{perc, ly=n}$ 는 i 일에 토양층의 가장 낮은 층 n 에서 침투되는 수량(mm), $w_{crk, btm}$ 는 i 일에 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 SWAT모형내에는 이 같은 비포화대의 거동을 지체함수로서 표현할 때 단일 저수지(single reservoir)로 간주하였으나, 본 연구에서는 이 같은 단일 저수지 개념을 다단 저수지 저류 추적(multi-reservoir storage routing) 개념(Fig. 1)으로 변환시킨 후 지체 매개변수값의 변화를 통해 실제 대수층의 지하수위 변화와의 상관성을 검토하여 최적의 지체변수를 결정하는 방안을 제시하였다. Fig. 1에서 I 는 토양층 바닥을 통해 빠져나가는 침투량, K 는 지체시간 δ_{gw} , Q_n 은 함양량을 의미한다.

한편, SWAT-MODFLOW는 SWAT모형의 하부구조인 지하수 모듈의 집중형 특성을 분포형 모형인 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988)로 대체함으로써, SWAT의 HRU(Hydrologic Response Unit) 특성에 해당하는 셀의 함양량을 분포형 셀로 입력함으로써 대수층의 물수지를 보다 정확하게 계산할 수 있도록 모형을 개선한 것이다. Fig. 2는 SWAT-MODFLOW결합모형과 다단 저수지 모듈을 이용한 함양량 산정 절차를 나타낸 흐름도이다.

먼저 SWAT-MODFLOW를 위한 자료가 수집되고 모델링을 위한 입력자료 구축이 이루어진다. 이 자료는 크게 기상, 지형, 토양, 토지이용과 관리, 대수층 구조 등을 포함하며 하도 정보도 포함된다. 모형의 초기구동을 거친 후,

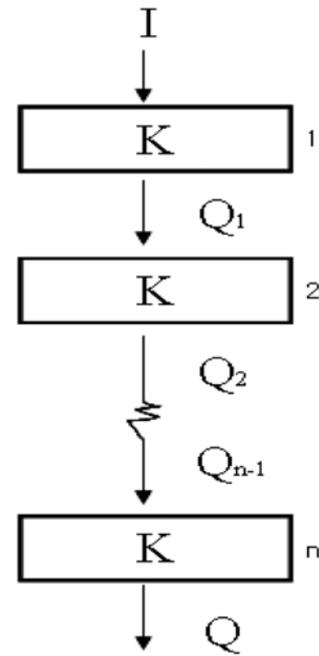


Fig. 1. Multi-Reservoir Model.

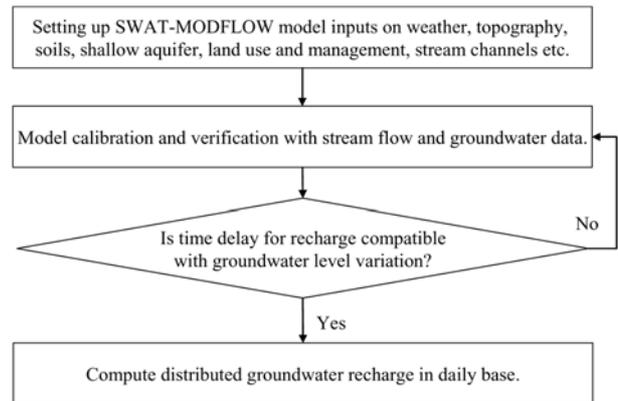


Fig. 2. Flowchart for Recharge Estimation.

검정과정에서 개선된 다단 저수지 모형을 이용하여 지체변수(time delay parameter)를 변화시켜 가면서 실제 지하수위 시계열에 맞게 함양의 최적 시계열을 찾아낼 수 있다. 함양의 매개변수가 결정되면 결합모형이 다시 구동되고 최종적으로 지표수 유출량과 지하수위 분포를 관측치와 비교하여 검증함으로써 절차가 종결된다.

4. 미호천 유역에 대한 함양량 산정 기법의 적용

4.1. 대상유역 현황

본 연구에서는 대상유역인 미호천 유역(유역면적 1,868

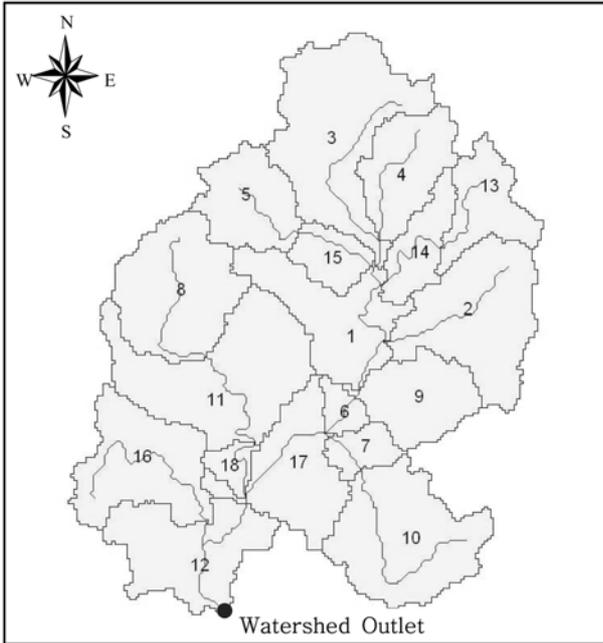


Fig. 3. Subbasins of Mihocheon Watershed (KICT, 2007).

km²)을 18개의 소유역으로 구분하였다. 소유역 경계 및 하천망도는 Fig. 3에 나타내었다.

4.2. SWAT-K 모형의 입력자료

4.2.1. 기상 및 수문자료

SWAT-K를 구동하기 위해서는 기상자료(강우량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등) 및 수문자료를 구축해야 한다. 본 과업에서는 대상유역내에 위치한 청주기상대의 자료를 이용하여 기상자료를 구축하였다. 기상관측이 개시된 최근 16년간(1990년~2005년)의 연평균 일사량은 13.39 MJ/m², 연평균 기온은 12.9°C, 연평균 상대습도는 66.2%, 연평균 풍속은 1.9 m/s로 나타났다. 대상유역에 영향을 미치는 강우관측소는 오류, 진천, 증평, 병천, 청주, 부강, 미원관측소가 해당되는 것으로 조사되었다. SWAT-K모형은 소유역에서 가장 가까운 관측소의 우량자료를 활용하여 소유역 유출모의를 수행하게 된다. 각 관측소 현황은 Fig. 4에 나타내었다.

또한 유출모형의 보정과 검증, 모의 결과에 대한 평가를 위해 하천유량자료 및 지하수위 관측자료가 필요하다. 대상유역에는 Fig. 5와 같이 6개의 수위관측소(청주, 북일, 옥산, 합강, 석화, 부강)가 있으며 10개의 국가 지하수 관측소(가덕, 강내, 북일, 내덕, 대소, 진천, 증평, 조치원, 북면, 수신)가 있다.



Fig. 4. Rainfall Gauging stations.



Fig. 5. Surface and Groundwater Gauging stations.

4.2.2. 공간특성자료

SWAT-K모형은 유역의 형상을 나타내는 수치표고모형(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 유역내 토지이용 상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필

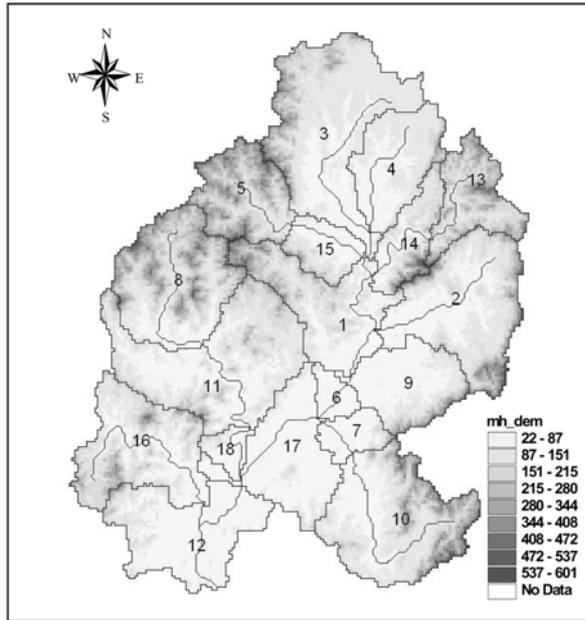


Fig. 6. DEM of Mihocheon Watershed (KICT, 2007).

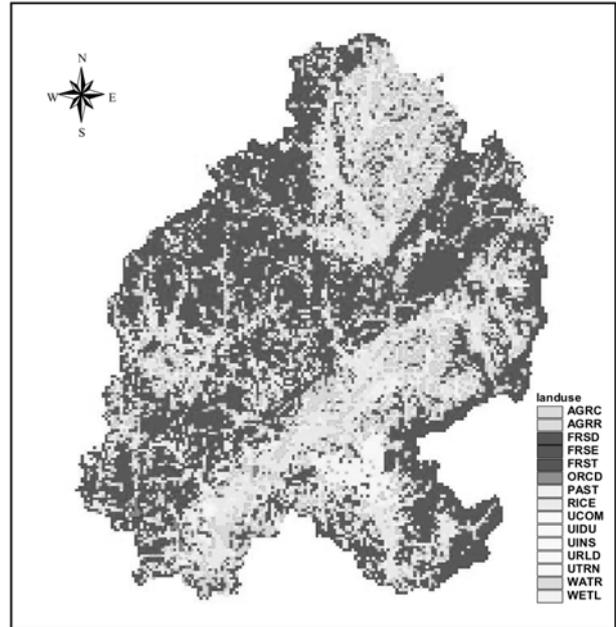


Fig. 7. Land Use Map of Watershed (KICT, 2007).

요로 한다. 본 연구에서 구축한 DEM, 토지이용도, 토양도는 다음과 같으며 세부적인 내용은 한국건설기술연구원(2007) 보고서에 수록되었다.

DEM은 일반적으로 격자 형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고 값이 입력되어 있다. DEM은 수치지도를 이용하여 구축할 수 있으며, 현대에 들어와서 인공위성영상의 활용도가 높아지면서 위성영상을 활용하여 구축할 수도 있다. 본 연구에서는 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30 m 공간해상도를 가지는 DEM을 300 m 공간해상도로 가공하여 사용하였으며, 대상유역에 대한 DEM은 Fig. 6과 같다.

환경부에서는 대분류(1 : 50,000), 중분류(1 : 25,000), 세분류(1 : 5,000)의 해상도에 해당하는 토지피복도를 제공하고 있으며, 본 연구는 이 중 모의시 다양한 토지이용상태를 반영할 수 있도록 중분류 토지피복도를 사용하였다. Fig. 7은 미호천 유역의 토지피복도를 DEM의 공간해상도인 300 m로 가공한 것을 나타낸 것이다. 산림지역이 약 50% 이내로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 논과 밭을 포함한 농경지가 약 40% 정도인 것으로 나타났다. 각 토지이용항목에 대한 면적은 Table 1과 같다.

토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1 : 25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다. Fig. 8은 미호천 유역에 대한 정밀토양도를 앞서 토지이용도와 같이 DEM과 동일한 공간해상도로 가공한 것으로서, 96개의 토양통으로 구성되었다.

Table 1. Land Use Area of Mihocheon Watershed (KICT, 2006)

Land cover classification	Explanation	Area (km ²)	Ratio (%)
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	31.3	1.68
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	260.0	13.92
FRSD	Forest-Deciduous	330.1	17.67
FRSE	Forest-Evergreen	334.3	17.89
FRST	Forest-Mixed	254.5	13.62
ORCD	Orchard	13.2	0.71
PAST	Pasture	37.1	1.98
RICE	Rice	409.7	21.93
UCOM	Commercial	7.3	0.39
UIDU	Industrial	22.1	1.18
UINS	Institutional	17.4	0.93
URLD	Residential-Low Density	76.8	4.11
UTRN	Transportation	23.6	1.26
WATR	Water	35.3	1.89
WETL	Wetlands-Mixed	15.6	0.84

4.3. MODFLOW 모형의 입력자료

4.3.1. 수리지질특성 및 공간적 설정

대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 2개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층으로, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층 및 암반층의 공간적인 분포는 해당 유역내 포함되는 국가지하수 관측망 10개소 및 지자체

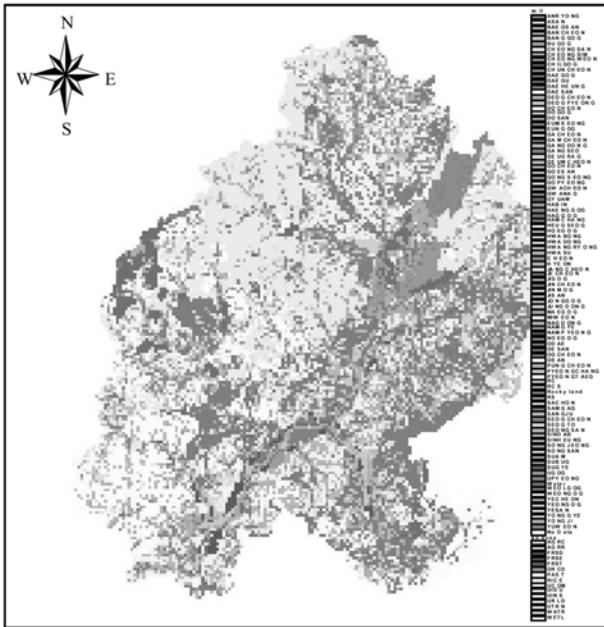


Fig. 8. Soil Map of Mihocheon Watershed (KICT, 2007).

자체 시추조사 자료, 양수시험시 굴착 깊이 등을 이용하여 각 층의 바다고를 크리깅(Kriging) 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 굴착 깊이까지의 충적층 및 암반층의 바다고는 지층 구성별 심도로부터 산정할 수 있으나, 굴착심도 이상의 암반의 분포심도는 명확하지 않은 상황 이므로 그 두께 및 각종 수리지질인자들의 값은 가정에 의존하였다.

모델 영역은 가로 48,900 m, 세로 60,300 m로 면적 2,949 km²이고, 지하수 분수령이 유역의 경계와 같다고 가정하였으므로 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려하여 1,868 km²이다. 모델 격자는 163행, 201열, 3 층으로 구성되며 수평방향 격자 한 개의 크기는 300 m × 300 m이다. 각 층의 수문지질단위로서 제 1층은 충적층, 제 2층과 제 3층은 암반층으로 구분하였다. 앞서 기술한 대로 제 1층과 제 2층의 저면 고도는 시추주상도 자료를 이용하여 크리깅을 수행하여 격자별로 저면 고도를 생성하였으며, 최하부층인 제 3층의 저면 고도는 임의적인 해발고도를 수평으로 설정하였다. 크리깅 결과를 토대로 상위대수층(제1층)의 두께는 5 m~36 m로, 하위대수층(제 2층)의 두께는 32 m~65 m로 결정하였으며, 지반고로부터 각층의 두께를 감하여 각층의 저면고도를 생성하여 모형의 입력자료로 활용하였다.

모델링을 위한 대수층의 수리전도도로서 제 1층의 수리전도도는 국가지하수관측망 7개소에서 제시한 값과 양수시험을 통하여 얻은 11개소의 측정값을 이용하여 크리

깅을 통해 수리전도도 분포도를 작성하여 모델의 입력자료로 이용하였고, 제 2층의 수리전도도는 국가지하수관측망 10개소, 양수시험공 39개소 측정값을 역시 크리깅을 통해 격자별 수리전도도 값을 보간하여 생성하였다. 제 3층의 경우 수리전도도에 관한 자료가 없으므로 심도가 깊은 것을 고려하여 제 2층의 평균 수리전도도 이하의 값을 부여하였다. 모델에 입력한 각 층의 수리전도도는 충적층에 대해서는 주로 0.1~5 m/일이었으나 한 두 지점에서 최대 31 m/일인 관측공도 있었고, 암반층에 대해서는 주로 0.004~0.5 m/일 정도이나 최대 2.2 m/일인 관측공도 있었다. 또한, 수리전도도 입력시 이방성에 관한 자료는 전무하므로 수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였다. 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다.

4.3.2. 경계조건

유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무흐름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수경계로 설정하였다. 따라서 활성셀은 유역의 형상과 동일한 것으로 가정하였다. 모델 대상지역의 지하수 공급원은 지표에서의 지하수 함양과 대상지역 내에 포함되어 있는 하천이다. 지하수 함양은 모사영역 내에서 수직 방향의 모든 최상위 활성 셀에 함양이 일어나도록 함양률 경계조건을 부여하였다. 즉, 임의 셀이 건조 셀이 되면 그 하부에 있는 지층으로 함양이 일어나도록 함양패키지에서 해당 옵션을 주었다. 함양량 값은 SWAT 으로부터 일 단위로 모의 되어 MODFLOW의 지하수 활성셀에 자동으로 입력되게 하였다. 하천경계는 미호천 분류를 비롯하여 구암천, 노송천, 무심천, 문주천, 백곡천, 병천천, 보강천, 봉암천, 석남천, 석화천, 성산천, 성암천, 연기천, 월하천, 장량천, 조천, 초평천, 칠장천, 한천 등 미호천의 제1지류에 대해 적용하였다. 하천경계는 지하수 유출입이 일어나는 하천셀로 지정하였다. 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

4.4. 기법의 적용결과 및 고찰

4.4.1. 함양과 지하수위와의 상관관계

지표수와 지하수 함양의 정확한 추정을 위해 본 연구에서 새롭게 제시한 다단 저수지 저류 추적 모듈의 매개변수인 지체시간 변수에 대한 검정을 수행하였다. 이 변수

를 변화시키면서 함양량의 시계열과 지하수위의 시계열의 상관관계가 최대로 될 때의 매개변수를 최적값으로 선정하였다. 이를 위해 유역내 5개소의 국가 지하수 관측망 자료를 사용하였다. 이는 토양층을 빠져 나온 물이 천부 대수층에 도달하여 실질적으로 함양에 기여하는데 걸리는 시간을 결정하는 것이어서 함양량의 공간적 변동성과 함

계 시변성을 정확하게 평가할 수 있는 방법이라고 판단된다. 5개 관측소에 대해 상관계수가 최적 매개변수를 적용하였을 때 각 함양의 시계열과 지하수위의 시계열을 비교한 결과는 Fig. 9~Fig. 13와 같다. 이와 같은 그림은 함양이 지하수위에 실질적으로 기여했는지의 여부를 명확하게 나타내는 결과이다.

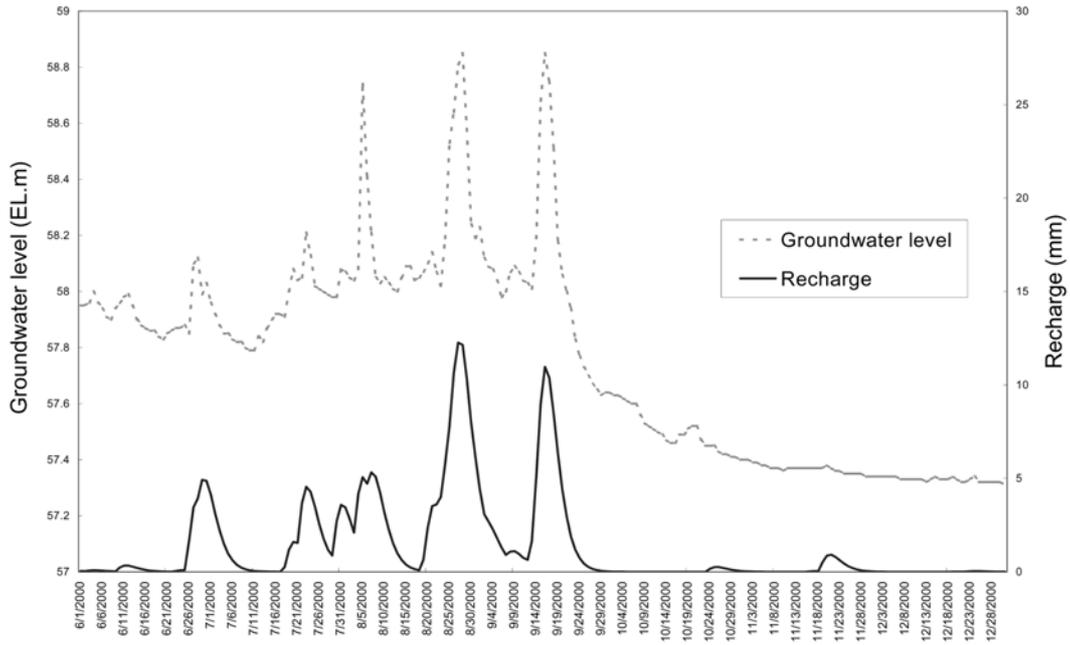


Fig. 9. Comparison of simulated recharge and observed groundwater level with the optimal delay parameter (Jincheon Observation Well).

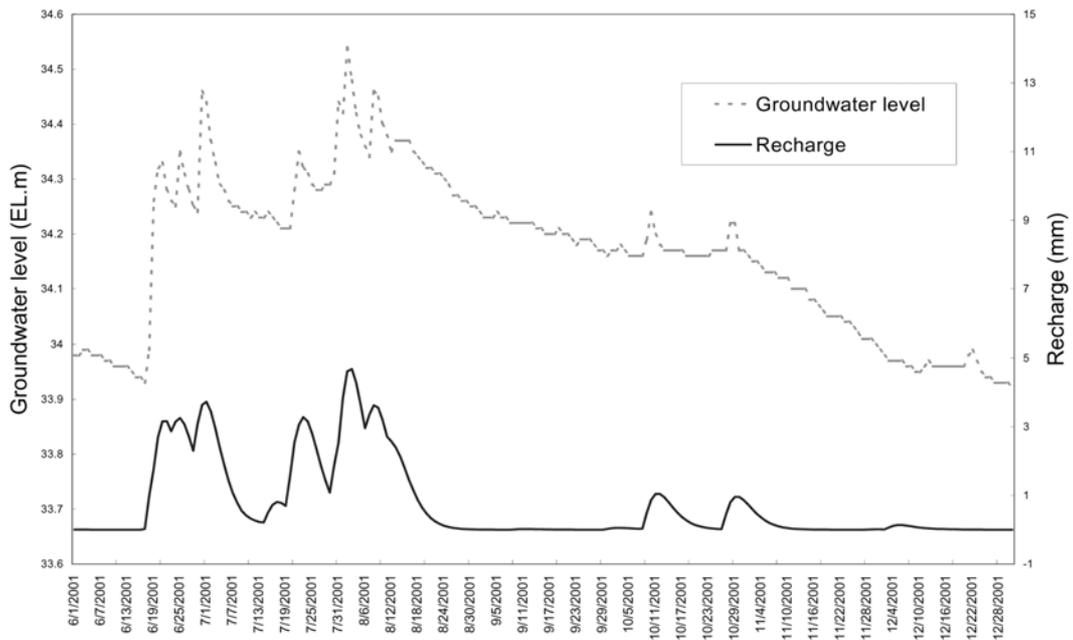


Fig. 10. Comparison of simulated recharge and observed groundwater level with the optimal delay parameter (Naeduk Observation Well).

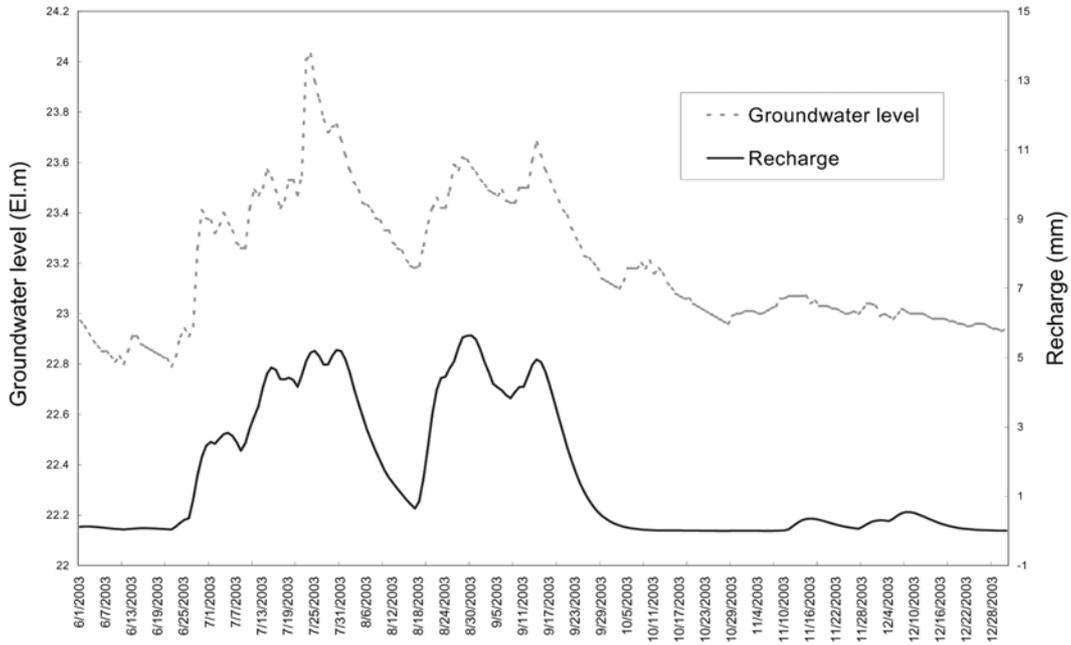


Fig. 11. Comparison of simulated recharge and observed groundwater level with the optimal delay parameter (Jochiwon Observation Well).

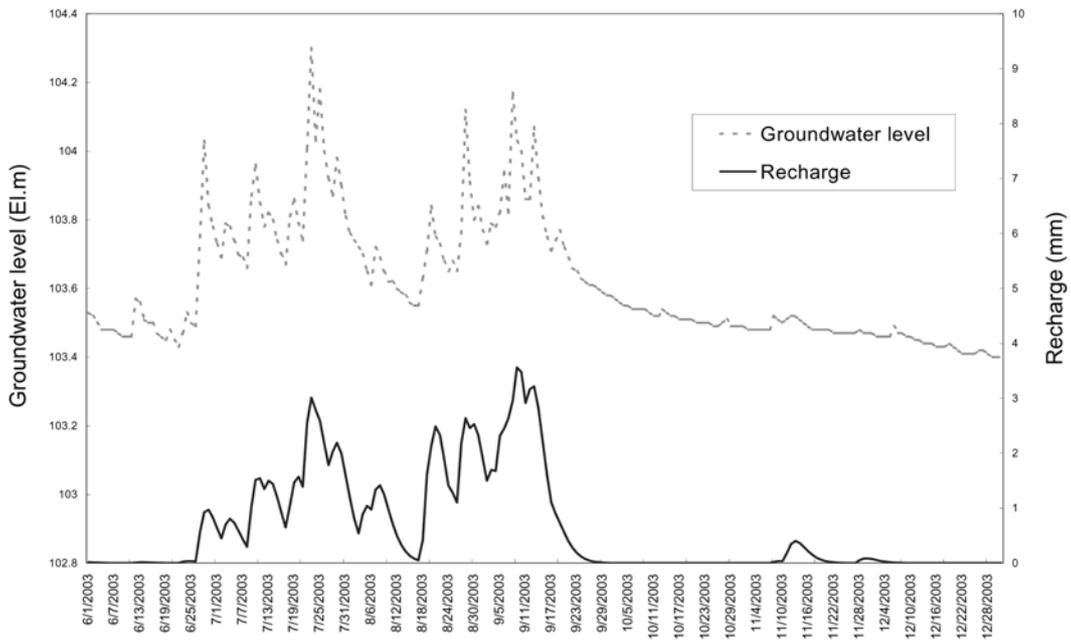


Fig. 12. Comparison of simulated recharge and observed groundwater level with the optimal delay parameter (Bukmyon Observation Well).

4.4.2. 지하수 모형의 결과

본 과업에서 사용한 SWAT-MODFLOW모형은 지하수위와 하천수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입량이 결정되므로, 모의 지하수위는 하천 유출량에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 모의 지하수위의 타당성이 검토

되어야 하며 이에 따라 본 과업에서는 MODFLOW의 대수층 매개변수 자료를 변화시켜가면서 모의 결과를 관측치와 근접하게 조정하는 모델 보정을 수행하였다. 지하수 흐름계를 결정하는 주요 수리 특성인자료로서 대수층의 수리전도도 및 저류계수, 하천 바닥 퇴적층의 전도계수, 대

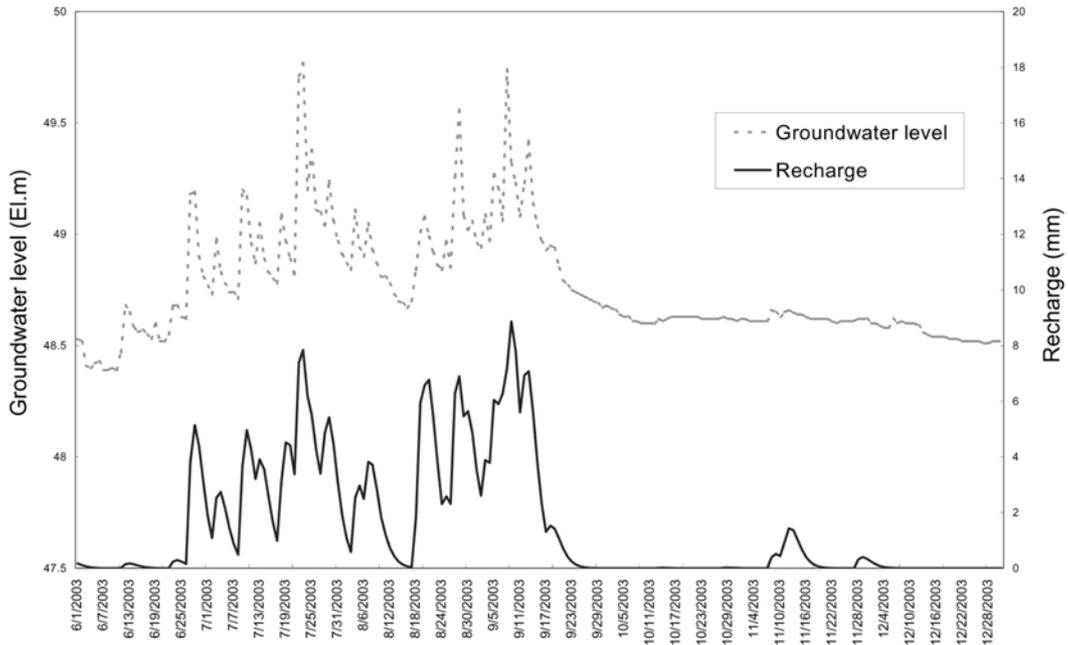


Fig. 13. Comparison of simulated recharge and observed groundwater level with the optimal delay parameter (Susin Observation Well).

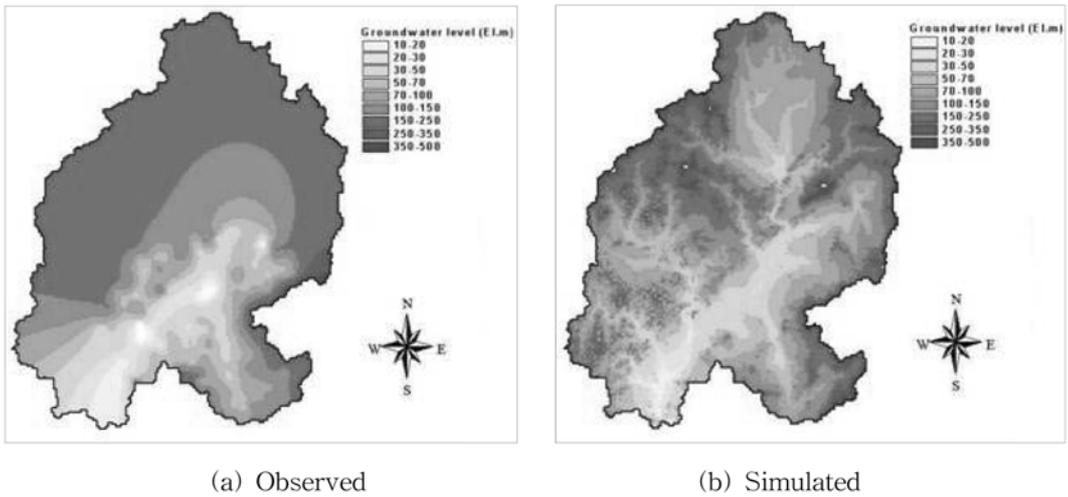


Fig. 14. Comparison of simulated and observed groundwater levels (July, 2005).

수층 두께, 경계조건 등이 있다. 이 중에서 시추자료와 양수시험 등을 통하여 얻은 대수층 두께, 수리전도도는 가급적 변화시키지 않고, 자료가 없는 하천 바다 퇴적층의 전도계수와 대수층의 저류계수 값을 변화시켜가면서 모델 보정을 수행하였다. 모델 보정의 기준은 청원, 청주지역에 포함된 국가지하수 관측망 5개소의 지하수위 관측자료와 청원청주 지하수 기초조사(건설교통부 등, 2006)에서 수행한 제1차 장기관측자료(2005년 7월 4일~7월 8일) 중 모델 보정을 위하여 미호천 유역에 포함되는 총 196 개

소 관측 자료를 이용하였으며, 관측지점은 유역 중하류부에 집중되어 있다. Fig. 14은 관측된 지하수위와 보정된 모델의 모의 결과를 나타내는 등수위선도를 비교한 것이다. 모의 지하수위가 실제 지하수위의 공간적인 분포양상을 잘 구현하고 있는 것으로 판단된다. 관측지하수위와 모델지하수위 간에 결정계수(R^2)는 0.93, Nash-Sutcliffe 모형 효율성 계수(ME)는 0.89로 양호하게 적합된 것으로 판단된다.

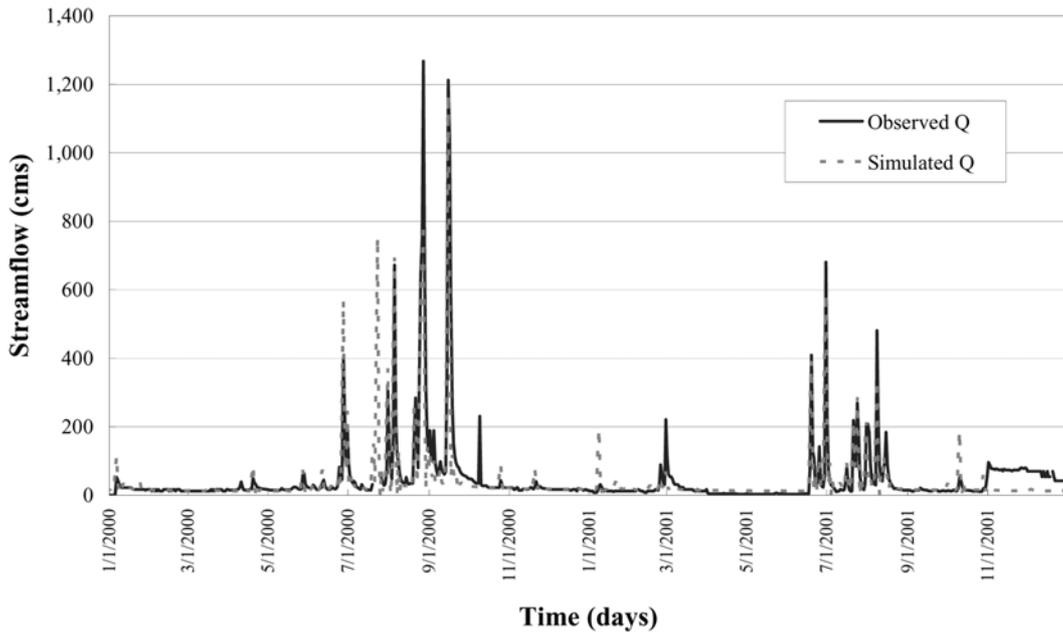


Fig. 15. Calibration of Streamflow at Seokhwa Gauging Point (2000~2001) (KICT, 2007).

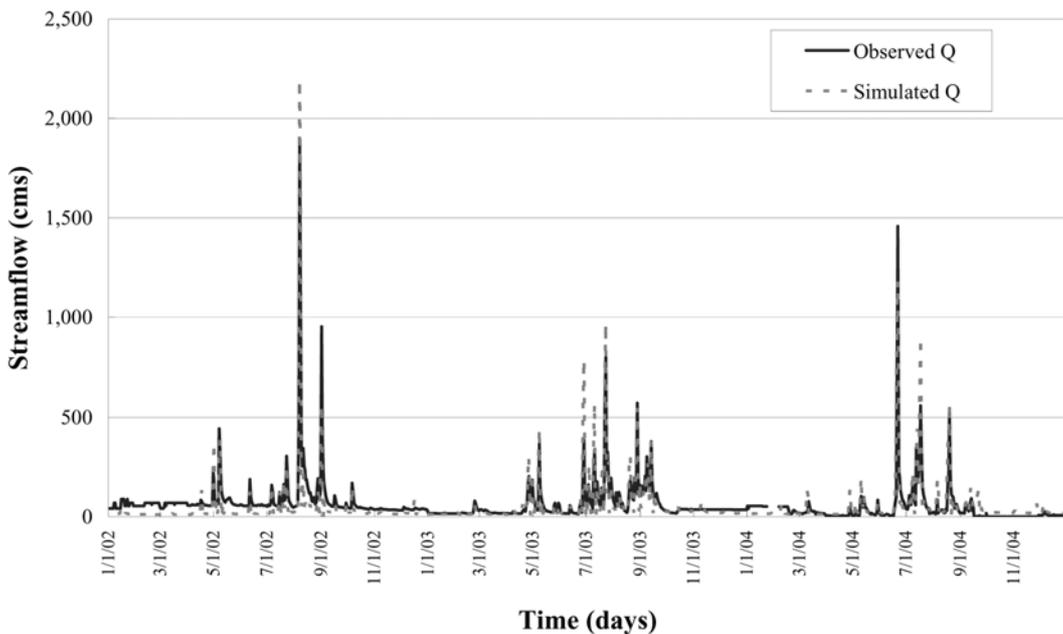


Fig. 16. Verification of Streamflow at Seokhwa Gauging Point (2002~2004) (KICT, 2007).

4.4.3. 유역 유출 모의 결과의 검정 및 검증

본 방법의 최종 절차는 유역 유출의 검정과 검증이라고 할 수 있으며, 이를 위해 총 6년간(1999년~2004년)모의가 수행되었다. 1999년을 초기 구동기간(warm up period)으로 보고 2000년~2001년을 검정기간, 2002년부터 2004년을 검증기간으로 설정했다. 지표수 유출의 주요 매개변수

로는 유출곡선지수, 가용수분보유량, 토양증발보상계수, 하상수리전도도가 포함된다. Fig. 15와 Fig. 16은 각각 석화 관측소에서의 검정과 검증 결과를 보여주고 있으며, 결정계수가 각각 0.75, 0.81로 전반적으로 모형의 효율성은 양호한 것으로 나타났다.

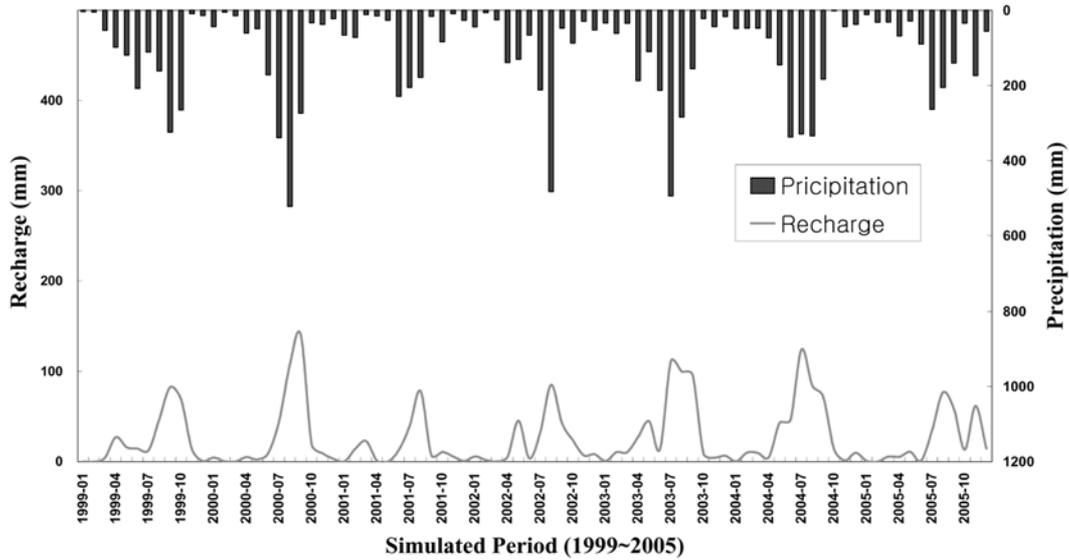


Fig. 17. Simulated Monthly Recharge for Subbasin 16 (KICT, 2007).

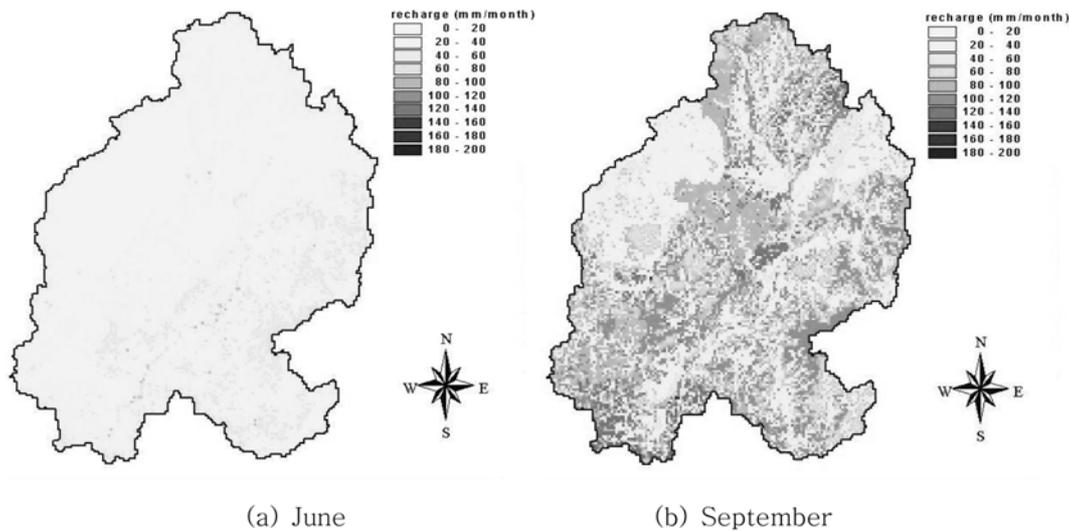


Fig. 18. Simulated Yearly Averaged Recharge on June and September.

4.4.4. 모의 결과 분석

모의 결과의 적합을 바탕으로 시공간적 함양량을 산정하였다. Fig. 17는 미호천 유역내 소유역 16번의 지하수 함양량의 일단위 시계열을 월별로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 기존의 연단위 함양량에서 찾아볼 수 없는 월별, 계절별 함양 특성이 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.

또한, 1999년부터 2004년까지 6년간의 월평균 함양량의 분포를 계산하여 Fig. 18에 나타냈으며, 지역적으로 매우 불균질한 분포를 잘 표현하는 것을 확인할 수 있었다. 월별 모의 함양량의 범위는 20 mm에서 180 mm까지 변

동하는 것으로 계산되었으며, 지형화적인 요인 혹은 토양의 조건에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 소유역내에 산지가 있는 경우는 상대적으로 저조한 함양량을 보이고 있는데, 이는 소유역의 경사에 따른 영향으로 파악된다. 서쪽 지역에서는 토양수의 많은 부분이 측방유출량(lateral flow)으로 소비되고 있는데 이로 인해 함양은 상대적으로 줄어드는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

함양은 지표수 유출의 한 과정으로서 강수로부터 침투

를 거쳐 중간유출로 일부 손실된 양이 토양층을 통과하여 대수층 상부에 도달한다. 따라서 함양을 정확히 산정하려면 지표수 유출과정과 지하수 유동을 함께 해석하는 지표수-지하수 통합모형의 활용이 필요하다. 본 연구에서는 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 지하수 함양량을 산정하는 새로운 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 비포화대를 통과하는 시간 지체를 보다 현실적으로 반영할 수 있는 다단 저수지 저류 추적 모듈을 개발하여 SWAT모형에 탑재하였으며, 이 모듈내의 시간 지체와 관련된 매개변수는 관측지하수위와 모의 함양량의 상관관계를 검토함으로써 최적화가 이루어지도록 하였다. 마지막으로 계산된 지하수위와 관측지하수위를 비교하는 한편, 유역 유출량의 관측값과 계산값을 검증함으로써 질차를 마치도록 하였다. 이 같은 방법론에 입각하여 추정된 일단위 지하수 함양량은 수리지질, 기후조건, 토지이용의 불균질성 뿐 아니라 토양층내와 대수층에서 물의 물리적인 거동까지 반영된 개선된 값이어서, 기존 방법에 의해 산정된 함양량을 크게 개선한 결과라고 판단된다.

사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원이 위탁시행한 2005년도 건설교통R&D정책인프라사업(05기반구축 A03-01)과 과학기술부 프론티어 연구사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업(과제번호 2-2-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

강장신, 1997, 지하수 수량의 평가, 지하수 자원의 개발보전관리 심포지엄, 한국자원공학회, p. 127-184.

건설교통부, 한국수자원공사, 대한광업진흥공사, 2006, 청원정주 지역 지하수 기초조사 보고서.

구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, 지질학회지, **38**(3), 407-420.

김남원, 정일문, 원유승, 2004a, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (I)모형의 개발, 한국수자원학회 논문집, **37**(6), 499-507.

김남원, 정일문, 원유승, 2004b, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (II)모형의 평가, 한국수자원학회 논문집, **37**(6), 509-515.

김남원, 정일문, 원유승, 2005, 시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정방안, 한국수자원학회 논문집, **38**(7), 517-526.

김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주, 2006a, 시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정, 한국지하수토양환경학회지, **11**(5), 9-19.

김남원, 정일문, 원유승, 2006b, 완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의, 대한토목학회 논문집, **26**(5B), 481-488.

문상기, 우남철, 한원식, 2002, 국가 지하수 관측망 자료를 이용한 충적층 지하수 함양률의 공간적 변동성 연구, 2002년 (사)한국지하수토양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, p. 237-242.

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.

최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양률 산정방법 연구, 지하수환경, **5**(2), 57-65.

한국건설기술연구원, 2007, 지표수 수문성분 해석시스템 개발 - 2단계 최종보고서, 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업 (2-2-2).

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

Arnold, J.G., Muttiah, 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*, **227**, 21-40.

Beekman, H.E. and Xu, Y., 2003, *Review of ground water recharge estimation in arid and semiarid Southern Africa*. Council for Scientific and Industrial Research (South Africa) and University of the Western Cape Report.

Beven, K.J., 1989, Changing Ideas in Hydrology-The Case of Physically Based Models, *Journal of Hydrology*, **105**, 157-172.

McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model*, USGS Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, p. 528.

Meyboom, P., 1961, Estimating groundwater recharge from stream hydrology, *Journal of Geophysical Research*, **66**(4), 1203-1214.

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

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R., 2001, *Soil and Water Assessment Tool Version 2000*, Theoretical Documentation, Agricultural Research Service, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas, p. 458.

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, Jour-*

nal of Geotechnical Engineering, **11**(7), 957-975.

Venetis, C., 1962, A study of recession of unconfined aquifers, *Bulletins of International Association of Hydrological Science*, **14**(4), 119-125.