

## 지표수-지하수 통합모형을 이용한 무심천 유역의 지하수 개발가능량 산정

정일문\* · 이정우 · 김남원

한국건설기술연구원 수자원연구소

### Estimating Exploitable Groundwater Amount in Musimcheon Watershed by Using an Integrated Surface Water-Groundwater Model

Il-Moon Chung\*, Jeongwoo Lee and Nam-Won Kim

Water Resources Research Div. Korea Institute of Construction Technology

In Korea, groundwater management has been conducted based on the estimation of annual average of groundwater recharge. Since groundwater recharge and surface water-groundwater interactions show spatiotemporal variation, continuous monitoring and dynamic analysis must be carried out to evaluate the sustainability of groundwater resources. In this study, SWAT-MODFLOW, an integrated surface water-groundwater model was used to analyze surface-groundwater interactions for various groundwater pumping scenarios in Musimcheon watershed. When current usage is applied, the baseflow reduction is about 16%, and annual averaged storage reduction is about 27 mm for whole watershed. As a holistic approach to groundwater sustainability considers the hydrological, ecological, socioeconomic, technological aspects of groundwater utilization, the exploitable groundwater should be determined by physical analysis as well as social compromise in a community.

**Key words** : exploitable groundwater, SWAT-MODFLOW, baseflow, storage

우리나라의 지하수관리는 연간 지하수 함양량을 기반으로 수행되어 왔으나 지하수 함양량과 지표수-지하수 상호작용은 시공간적으로 변동하는 양이므로 지속적인 모니터링과 동적인 분석을 통해 지하수자원의 지속가능성이 평가되어야 할 것이다. 본 연구에서는 무심천 유역을 대상으로 지표수-지하수 통합해석 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 다양한 지하수 양수 시나리오(무양수 및 현 이용량의 1~3배)에 대한 수문성분 해석을 수행하였다. 현 이용량으로 양수하는 경우가 비교적 지속가능한 개발량으로 판단되었는데 이때 연간 기저유출량은 16%, 대수층 저류량은 27 mm 감소하는 것으로 나타났다. 지하수의 지속가능성을 평가하기 위해서는 지하수 이용에 따른 수문학적, 생태학적, 사회경제적, 기술적 영향을 평가하는 총체적 접근법이 도입되어야 하며 이를 위해서는 물리적인 분석과 함께 지역사회의 합의 또한 중요한 의사결정 방식이라고 판단되었다.

**주요어** : 지하수 개발가능량, SWAT-MODFLOW, 기저유출, 저류량

### 1. 서 론

지하수의 안전 채수량(safe yield)은 대수층의 지하수를 고갈시키지 않는 범위 내에서 양수할 수 있는 양(Lee, 1915)으로 정의되었으며, 그 후 지하수 개발의 경제성(Meinzer, 1923), 수질 보전(Conkling, 1946), 법적 권리 및 환경문제(Banks, 1953) 등의 개념이 추

가되어 왔다. 이러한 사항들을 종합해 볼 때 지하수의 안전 채수량은 자연 상태의 지하수량과 수질에 영향을 주지 않으면서 대수층으로부터 경제적, 합법적으로 채수를 할 수 있는 양으로 정의될 수 있으며 또한 안전 채수량의 정의를 지표수와 지하수가 상호 연관된 종합적인 수문시스템의 개념으로 인식하게 되었다(Fetter, 1994). 미국에서는 과잉개발로부터 지하수를 보호하기

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

위해 ‘안전채수량’ 개념을 바탕으로 한 규제와 법률을 집행해 왔다. 안전채수량은 통상 연간 지하수 양수량과 연간 함양량간의 장기적인 균형의 달성과 유지라는 측면에서 정의된다(Sophocleous, 1997, 1998). 따라서 안전채수량 개념은 물사용자로 하여금 강수와 지표수 침윤(surface-water seepage)같은 자연적인 함양을 통해 보충되는 지하수량만큼을 양수할 수 있도록 허용했다. 그러나 자연적인 혹은 평형조건하에서 대수층으로의 함양은 장기적인 관점에서는 하천, 샘 혹은 습지로 방출되는 수량과 같다. 결과적으로 양수량이 함양량과 같다고 하면, 하천, 습지 그리고 샘은 언젠가는 마르게 되며, 과잉양수가 진행되면 대수층마저 고갈된다는 것을 의미한다.

우리나라 지하수 관리 기본계획(MOCT, 2007) 및 지하수 기초조사 등의 지하수 관련 계획 수립 시 필수 조건인 지하수 개발가능량은 통상 10년 빈도 갈수시의 지하수 연함양량을 적용하고 있으나 이 경우, 소유역 전체에 대해 매우 개략적인 연평균 개발가능량 값을 제시하고 있기 때문에 실제 공간적으로 매우 상이하게 분포하는 지하수 양수량의 지역별 현황이나 개발가능량의 월별, 계절적인 변화는 고려할 수 없다는 한계를 가진다. 또한 더욱이 시·군·구 지역지하수 관리계획은 국가 지하수 관리 기본계획의 결과를 토대로 수립되나 이 경우 최소 단위 소유역의 대표값에 해당하는 시·군·구의 특성과는 상이하여 계획값을 적용하기에는 많은 어려움이 있다(Chung and Kim, 2011). 유역단위를 기반으로 시공간적으로 분포된 지하수 양수의 영향과 지표수 유출량을 동시에 고려한 지하수 개발 가능량의 산정기법을 도출하여 합리적인 지하수 개발 가능량을 일관성 있고 타당성 있게 산출함으로써 각

종 지하수 기초조사와 기본계획에 활용토록 하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 위해 분포형 지표수-지하수 통합모의 모형을 이용하여 분포형 함양량을 산정하는 동시에 기존의 양수량 자료를 이용한 대수층의 양수량 분포를 고려함으로써 실질적이며 지속가능한 유역별 개발가능량산정 기법을 제시하고자 한다(Chung *et al.* 2010a).

한편, MOCT and KICTTEP(2007)에 따르면, 지표수와 지하수를 연계하여 해석할 수 있는 지표수-지하수 통합모형은 집중형, 준분포형, 완전분포형 모형으로 크게 3가지로 분류할 수 있으며, 대표적인 모형으로는 MIKE SHE, SWAT, SWATMOD, ISGW 모형 등이 있다. DHI(Danish Hydraulic Institute, 1999)에서 개발한 MIKE SHE 모형은 격자기반의 완전분포형 지표수 및 지하수 모형에 기초하여 물 순환과정을 물리적으로 해석하고 있다. MIKE SHE의 적용사례로서, Kjelds and Storm(2001)은 MIKE SHE, MIKE 11, MIKE BASIN 등의 모형을 연계한 지표수와 지하수 통합모형의 적용사례들을 제시하였다. 하천-대수층의 상호작용을 포함한 포괄적인 지표수-지하수 모델링 연구는 Ramireddygar *et al.*(2000)에 의해 수행되었는데, 이들은 캔사스 중서부 유역인 Wet Walnut 셋강유역을 대상유역으로 유역내 구조물 설치와 관개용수 사용이 하천유출과 지하수위 변동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 지표수 유출모형 POTYLDL과 지하수 모형 MODFLOW를 결합시켜 분석하였으며, Wet Walnut 셋강 유역의 연속 유출모의와 지하수 모의를 수행하였다. Sophocleous *et al.*(1999)은 분포된 수리지질 매개변수를 가진 대수층과 변화하는 양수량을 모의할 수 있는 통합지표수/지하수 모형인 SWATMOD

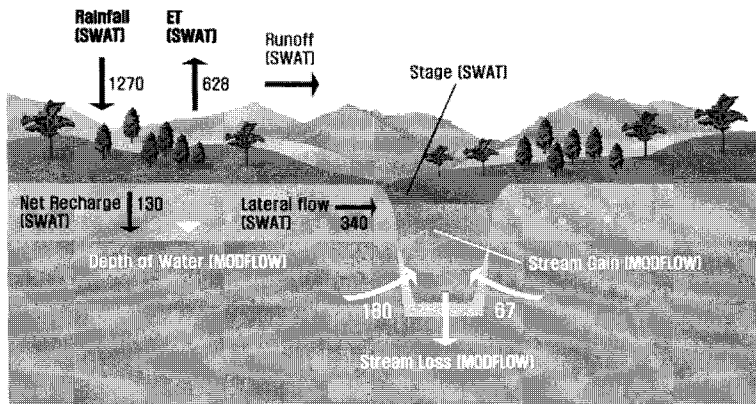


Fig. 1. Integrated surface water-groundwater model SWAT-MODFLOW (Kim *et al.*, 2008).

를 개발하였다. SWATMOD 모형은 미 농무성에서 개발한 SWAT(Arnold *et al.*, 1993) 모형과 지하수 해석에 많이 적용되고 있는 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988) 모형이 통합된 것으로, SWAT 모형으로부터 산정된 토양층의 함양량 및 지표수 손실량이 MODFLOW 지하수해석모형의 함양량 조건으로 설정된다. 한편 MODFLOW 모형으로부터 산정된 지하수 유출량과 SWAT 모형으로부터 산정된 지표 및 중간유출량이 합해져서 총 유출량이 산정된다. 따라서 SWATMOD 모형은 3차원 지하수 유동방정식을 해석하므로 지하수 성분 해석이 SWAT 모형보다 훨씬 복잡하지만, 복잡한 지층 구조, 경계조건, 다양한 수리특성 등에 대한 고려가 가능하며 지하수위의 공간적 분포를 파악할 수 있게 된다. SWAT-MODFLOW (Kim *et al.*, 2008)는 SWATMOD의 단점을 개선한 세계 최초의 완전연동형 지표수-지하수 통합모형으로 토지이용과 토양특성, 기상 특성 등을 반영하여 강수로부터 지표유출량, 측방유출, 지하수 유출성분을 계산하고, 토양수분, 지하수 함양, 증발산 등의 성분을 산정할 수 있다(Fig. 1). Chung *et al.*(2010)은 SWAT-MODFLOW를 이용하여 미호천 유역의 분포형 지하수 함양량을 산정한 바 있다. 또한 대수층에서 지하수 양수량을 고려한 물수지 변화해석이 가능하도록 모형이 구성되었다(KICT, 2007). 본 연구에서는 한국형 장기유출해석 모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 방법을 이용한 최적개발가능량 산정 기법을 검토하였다.

## 2. 지속가능한 지하수 개발가능량 산정 기법

최적의 지하수 개발가능량이란 지역의 지하수 이용

량을 충족하는 동시에 유역내의 수문학적 부작용을 최소화할 수 있는 지속가능성을 담보해야만 한다. 이를 위해서는 지하수 이용에 따른 기저유출의 변화를 고려할 수 있는 지표수-지하수의 통합 해석 모형이 도입되어야 한다. 유역단위 지하수 개발가능량 산정시 첫째 개선사항은 유역물수지와 지하수위 변동을 동시에 고려한 지하수 함양량 산정기법(Fig. 2)을 통해 시공간적으로 매우 비균질하게 변동하는 지하수 함양량을 정확하게 산정하는 것이다.

Fig. 2에 제시한 방법은 SWAT-MODFLOW모형을 기반으로 수문성분을 계산하는 과정에서 하천유출량의 계산값과 관측값을 검토정하여 유출성분을 추정하는 동시에 강수로부터 침투를 거쳐 포화대수층에 도달하는 함양량 계산시 이를 관측지하수위값과 비교하여 검토정을 시도하는 방법이다(Chung *et al.*, 2010b). 이 기법을 이용하여 지역별 지하수 함양량의 시공간적 분포를 계산할 수 있다.

함양량은 지하대수층을 저수지로 볼 경우 유입량에 해당한다. 현재 우리나라의 지하수 개발가능량은 10년 빈도 갈수시의 함양량으로 규정하고 있어 이는 유입량 기준, 즉 안전채수량의 개념이 적용되고 있다. 하지만 이러한 기준을 적용하면 실제 공간적으로 매우 상이하게 분포하는 지하수 양수량의 지역별 현황이나 개발가능량의 월별, 계절적인 변화는 고려할 수 없다는 한계를 가진다. 따라서 대단위 지하수 양수 분포에 따른 지하수위의 변동과 하천유출량의 변화를 동시에 고려하는 방법(Fig. 3)이 도입되어야 할 것이다. Fig. 3에 제시한 방법은 실질적인 지표수-지하수 통합해석을 통해서만이 가능한 방법으로 지표수-지하수 통합해석 모형을 동원하여 실제 지하수 양수를 계산하고 이에 따른

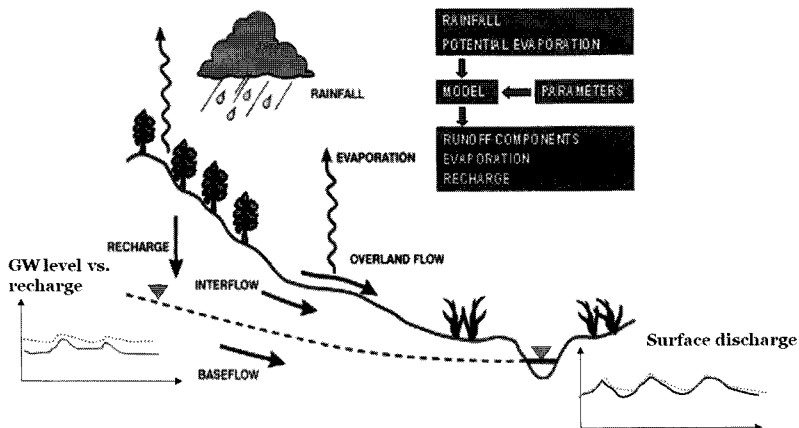


Fig. 2. Method of estimating recharge by using surface discharge and groundwater level variation (Chung and Kim, 2011).

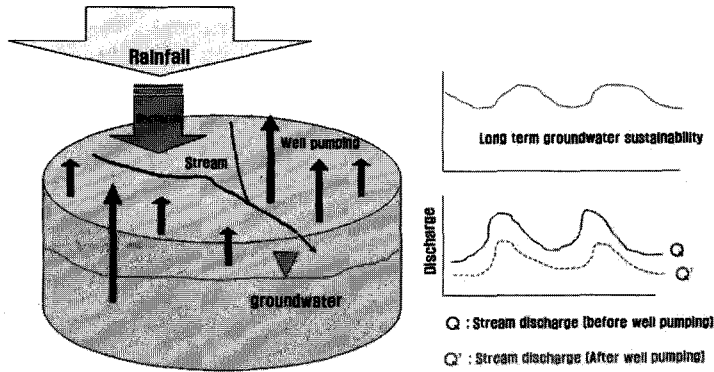


Fig. 3. Concept of exploitable groundwater estimation by using combined watershed model.

대수층의 평균 수위저하량, 하천으로 흘러가는 지하수 유출량(기저유출량)의 감소량 등을 산정할 수 있다.

Fig. 4는 지금까지 설명한 SWAT-MODFLOW 통합 수문해석 모형을 활용한 적정 개발가능량 산정 흐름도이다. 그림에서와 같이 대상 유역이 확정되면 토양도, 토지이용도와 수문자료, 수문지질자료 등을 확보하여 모델링의 기본 셋업을 구성한다. 이어 지표수-지하수 통합해석을 이용한 지표수 유출량과 지하수위의 검보정을 수행한다. 공간분포된 함양량을 구하고 연 추정량을 구한다. 양수정의 실제 배치를 통해 현재 이용량을 양수하고 이때 유역 전체의 저류량 변화를 계산한다. 계산된 함양량보다 개발가능량이 크면 양수량을 줄여서 재계산을 수행한다. 최종 적정개발량은 유역의 허

용가능한 저류량 감소범위 내에서 지역사회의 의견을 합의하여 도출할 수 있다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1. 유역 통합 수문 모델링

대수층 저류량의 장기적인 변화를 고려한 적정 개발가능량 산정 기법을 Kim *et al.* (2008)에 의해 통합 수문모델링을 수행한 바 있는 무심천 유역에 적용하였다. 무심천 유역은 Fig. 5와 같이 동고서저형으로 유역면적이 약 179 km<sup>2</sup>, 유로연장이 약 35 km이며, 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW의 구동을 위해서 전체 유역을 34개의 소유역으로 구분하였다. 지표

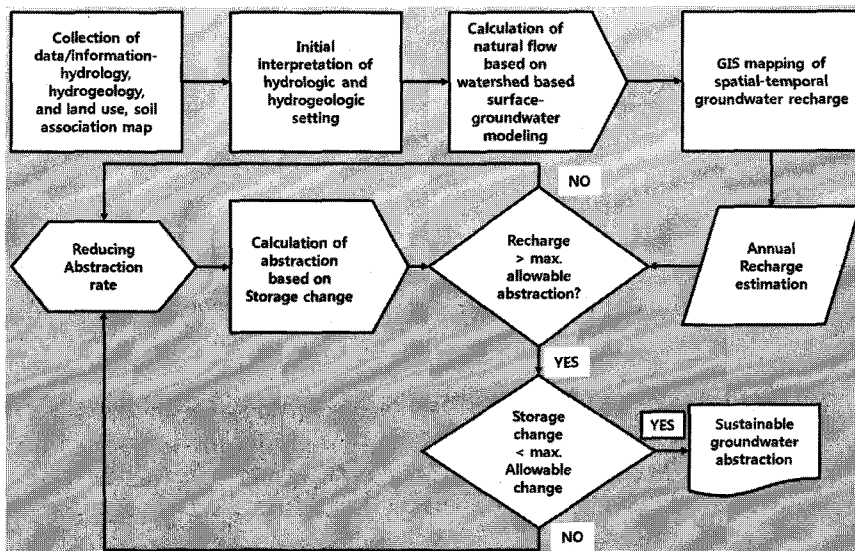


Fig. 4. Flow chart for estimating exploitable groundwater by using the integrated hydrologic analysis.

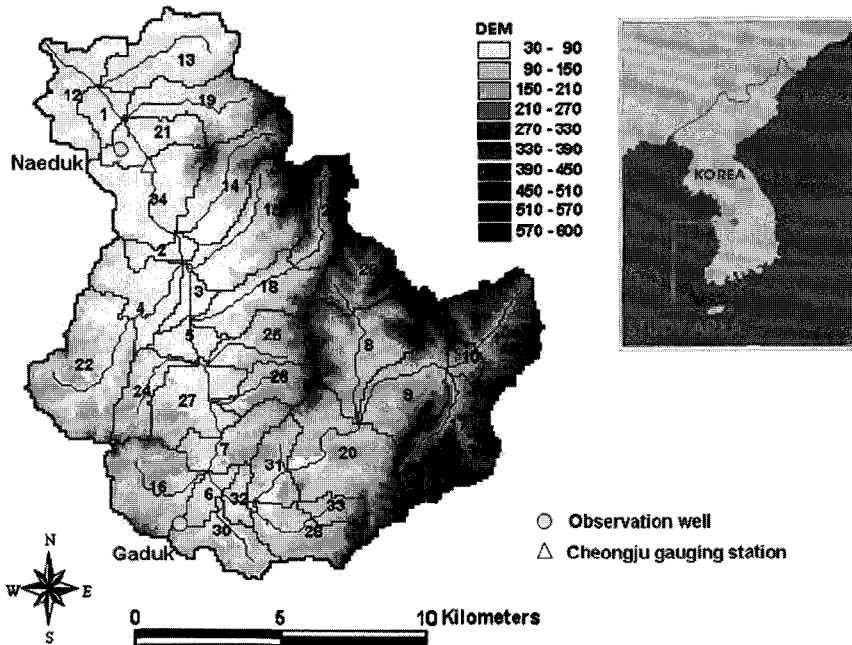


Fig. 5. DEM, subbasins, stream networks, measuring stations (Kim *et al.*, 2008).

수 및 지하수 관측소의 위치도를 Fig. 5에 도시하였다.

모형의 입력자료인 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대 습도 등의 기상자료는 무심천 유역 내에 위치한 청주 기상대의 자료를 이용하였고, 수문자료로서 하천유출량 자료는 청주수위표의 자료를 이용하였다. 토지이용도와 토양통 자료를 활용하여 HRU분포도를 작성하며 이에 대한 세부 내용은 기발표된 연구(Kim *et al.*, 2008)를 참고할 수 있다.

지하수 유동해석을 위하여 격자크기를 100 m로 하여 223행, 214열, 3층의 모델 격자를 구성하였다. 대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 2개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면 대수층으로 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층 및 암반층의 공간적인 분포는 해당 유역내 포함되는 국가지하수 관측공, 지자체 지하수 관측공, 해당 지역 내 시추 및 착정 조사자료 등을 이용하여 각층의 바닥고를 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 크리깅 결과를 토대로 상위대수층(제1층)의 두께는 5 m~18 m로, 하위대수층(제2층)의 두께는 48 m~145 m로, 최하위대수층(3층)은 2층 하부부터 El.-100 m까지로 정하였으며, 지반고로부터 각 층의 두께를 감하여 각층의 저면고도를 생성하여 모형의 입력자료로 활용하였다. 굴착 깊이까지의 충적층 및 암반층의 바닥고는 지층 구성별 침도

로부터 산정할 수 있으나, 굴착심도 이상의 암반의 분포심도는 명확하지 않은 상황이므로 그 두께 및 각종 수리지질인자들의 값은 가정에 의존하였으며 모델을 수행하는 과정에서 이들을 보정의 인자로 사용하였다. 모델링을 위한 대수층의 수리전도도로서 제 1층의 수리전도도는 국가지하수관측망 2개소에서 제시한 값과 양수시험을 통하여 얻은 10개소의 측정값을 이용하여 크리깅을 통해 수리전도도 분포도를 작성하여 모형의 입력자료로 이용하였고, 제 2층의 수리전도도는 국가지하수관측망 2개소, 양수시험공 20개소 측정값을 역시 크리깅을 통해 격자별 수리전도도 값을 보간 생성하였다. 제 3층의 경우 수리전도도에 관한 자료가 없으므로 심도가 깊은 것을 고려하여 제 2층의 평균 수리전도도와 같거나 그 이하의 값을 부여하였다. 모델에 입력한 각 층의 수리전도도는 충적층에 대해서는 1.3~39 m/day을, 암반층에 대해서는 0.01~2.2 m/day이다. 또한, 수리전도도 입력시 이방성에 관한 자료는 전무하므로 수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였다. 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다(MOCT and KICTEP, 2007).

경계조건으로 유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무효름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수경계로 설정하였다. 지하수 함양이 모사영역 내에서 수직 방향의 모든

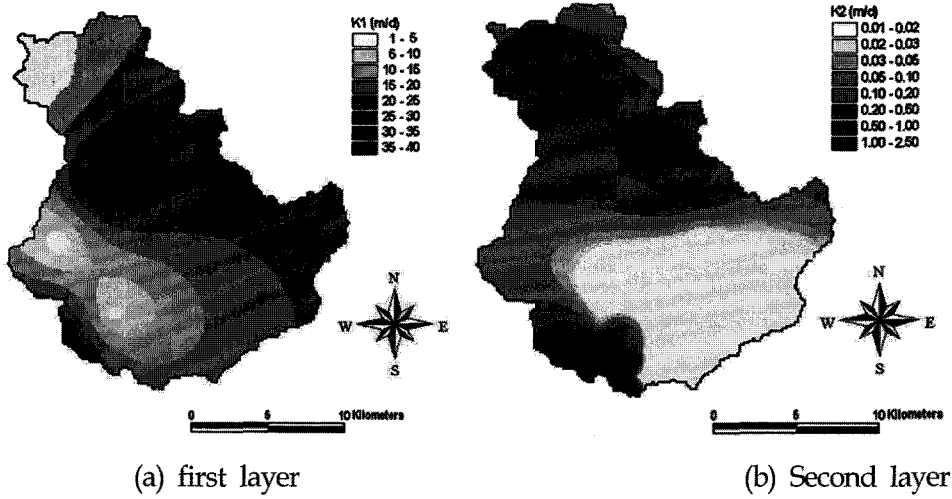


Fig. 6. Spatial distribution of hydraulic conductivity(MOCT and KICTTEP, 2007).

최상위 활성 셀에 함양이 일어나도록 함양플럭스 경계 조건을 부여하였다. 함양량 값은 SWAT으로부터 일 단위로 모의 되어 MODFLOW의 지하수 활성셀에 자동으로 입력되게 하였다. 하천경계는 지하수 유출입이 일어나는 무심천 본류와 제 1지류를 하천셀로 지정하였다. 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다. 또한 무심천 유역의 실제 존재하는 우물을 셀별로 균집화하여 Fig. 7 과 같이 총 2,176개 관정의 양수를 고려하였다. 이때

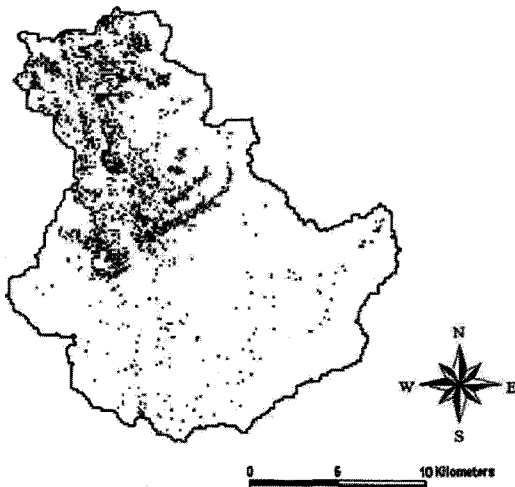


Fig. 7. Spatial distribution of pumping wells in Musimcheon basin (MOCT and KICTTEP, 2007).

각 양수정은 총적관정과 암반관정으로 분류하여 각 layer별로 배치하였다.

모의 결과의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 8과 같이 청주수위관측소에서의 관측유량과 일단위 모의유량을 비교하였다. 모의유량은 실측유량의 경향을 잘 반영하고 있으며, 특히 갈수기 기저유량 시계열을 잘 묘사하고 있는 것으로 나타났다. 실측치와 모의치간의 결정계수가 약 0.75로서 모의치가 양호한 것으로 판단된다.

또한 기 수행된 모델링에서 관측지하수위와 모의지하수위의 분포도를 비교한 결과는 Fig. 9에 나타난 것처럼 전반적인 지하수위의 고저분포의 경향이 유사하게 나타나고 있으며, 결정계수는 약 0.95로 높게 나타나 모의치가 실제 지하수위의 분포양상을 양호하게 구현하고 있음을 알 수 있다. 내덕 국가지하수 관측소와의 계산지하수위 비교 역시 양호하게 일치하는 것으로 나타났다(MOCT and KICTTEP, 2007).

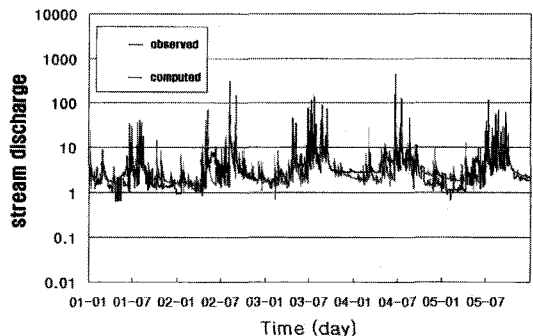


Fig. 8. Observed and computed stream discharge at Cheongju gauging station (MOCT and KICTTEP, 2007).

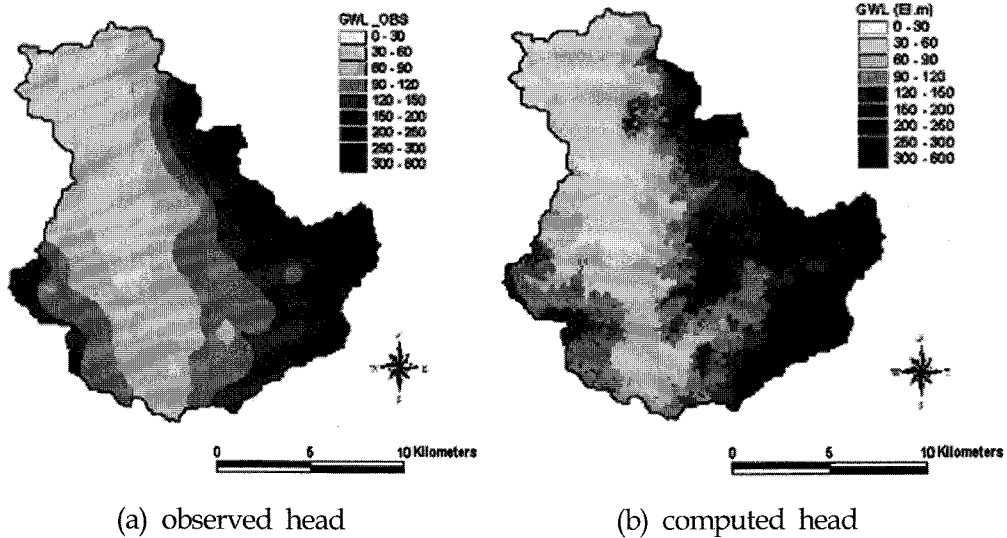


Fig. 9. Observed and computed groundwater head distribution in Musimcheon basin (MOCT and KICTTEP, 2007).

### 3.2. 지하수 저류량 변화를 고려한 적정 개발가능량 산정

무심천 유역에 대하여 양수 시나리오별 지하수계의 저류량의 변화와 하천유출량 변화를 모의하였다. 양수 시나리오는 양수를 하지 않은 경우, 현재 유역내에 설치되어 사용 중인 우물의 현 이용량( $Q_0$ )을 양수하는 경우, 그리고 현 이용량의 2배( $2Q_0$ ) 및 3배( $3Q_0$ )를 양수하는 경우로 총 4가지 경우를 설정하여 모의를 수행하였다.

#### 3.2.1. 무양수 모의

Fig. 10은 유역내 양수를 하지 않았을 경우 즉, 지하수 양수에 의한 인위적인 요인이 없는 자연상태의 유역에 대한 연평균(1999-2008) 모의 결과로서 대수층

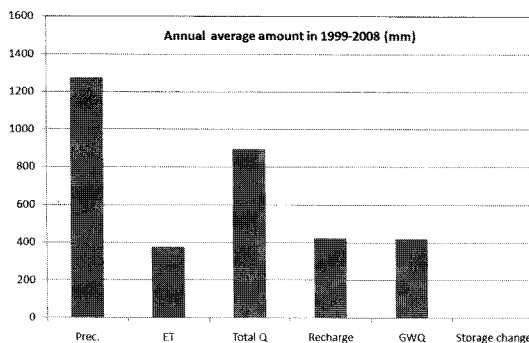


Fig. 10. Annual averaged hydrologic components and storage change ( $Q=0$ ).

저류 변화량(storage change)을 강수량(precipitation), 증발산량(evapotranspiration), 총유출량(total discharge), 지하수함양량(groundwater recharge), 지하수유출량(groundwater discharge) 등의 수문성분량과 함께 나타낸 것이다. 연간 강수량은 2001년 최소 784 mm부터 2003년 1,581 mm로 그 변동폭이 컸으며 모의 기간 10년 동안 연평균 강수량은 1,277 mm 였다. 모의 기간 10년간 저류량 변화는 평균 2 mm로 거의 변화가 없이 지하수함양량(연평균 422 mm)이 모두 지하수 유출(연평균 420 mm)되는 동적 평형상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2.2. 현 이용량 양수 모의

Fig. 11은 무심천 유역의 지하수 이용량에 해당하는 값인  $Q_0$  (약 100 mm)를 양수하였을 경우 연평균(1999-2008) 모의 결과를 나타낸 것이다. 10년 동안 대수층 저류 변화량은 평균 약 27 mm로서 무양수에 비해 약간의 저류량이 감소하였으나 그 변화는 매우 미미한 것으로 나타났다. 지하수 유출량은 10년 평균 351 mm로서 무양수일 때 420 mm 보다 69 mm만큼(약 16%) 감소했다. 이는 양수로 인해서 지하수위가 감소하여 하천으로 배출되는 지하수량이 감소한 데서 기인한다. 실제로 지하수 양수량의 일부는 다시 하천으로 회귀되어 하천수량 증가에 기여하나 본 분석에서는 보수적인 결과를 도출하기 위해서 하천으로의 회귀수 영향을 고려하지 않았다. 하천유출 총량 측면에서는 회귀수로 인

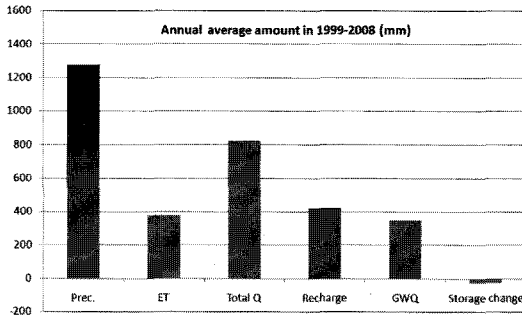


Fig. 11. Annual averaged hydrologic components and storage change (Q=2Q<sub>0</sub>).

해 다소 증가할 수 있으나 지하수 유출 즉, 하천유출 중 기저유출 성분은 회귀수 유무와 상관없이 양수로 인해 줄어든다.

3.2.3. 현 이용량의 2배 양수 모의

Fig. 12는 현재 무심천 유역의 현 이용량의 2배(2Q<sub>0</sub>)를 양수하였을 경우 연평균 수문성분량(1999~2008)을 나타낸 것이다. 현 이용량의 2배는 무심천 유역 함양량의 약 50%에 해당하는 규모이다. 10년 평균 대수층 저류량은 약 65 mm 감소하였고, 지하수 유출량은 평균 283 mm로서 무양수일 때 420 mm 보다는 137 mm, 현 이용량일 때 351 mm 보다는 68 mm 만큼 감소하였다. 앞선 현 이용량 양수 모의와는 달리 연 평균 약 65 mm의 저류량이 지속적으로 감소하여 함양과 배출의 균형이 깨지고 있다. 즉, 현 이용량의 2배 양수인 경우 양수를 하지 않았을 경우에 비해 기저유출 감소율은 약 32%인 것으로 나타났다.

3.2.4. 현 이용량의 3배 양수 모의

Fig. 13은 현재 무심천 유역의 현 이용량의 3배(3Q<sub>0</sub>)

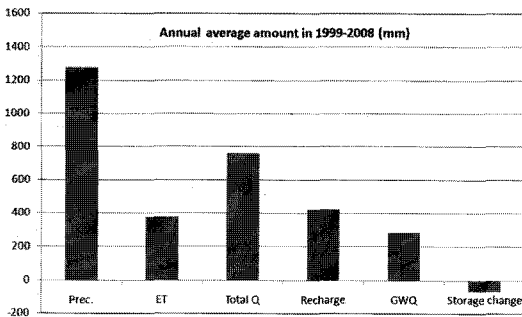


Fig. 12. Annual averaged hydrologic components and storage change (Q=2Q<sub>0</sub>).

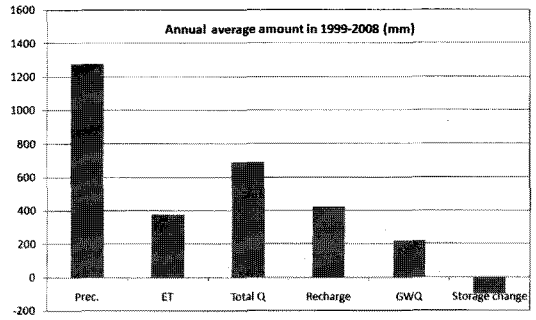


Fig. 13. Annual averaged hydrologic components and storage change (Q=3Q<sub>0</sub>).

를 양수하였을 경우 연평균 수문성분량(1999~2008)을 나타낸 것이다. 현 이용량의 3배는 무심천 유역 함양량의 약 50%에 해당하는 값이다. 10년 평균 대수층 저류량은 약 106 mm 감소하였고, 지하수 유출량은 평균 297 mm로서 무양수일 때 420 mm 보다는 123 mm, 현 이용량일 때 355 mm 보다는 58 mm 만큼 감소하였다. 연 평균 약 106 mm의 저류량이 지속적으로 감소하여 함양과 배출의 균형이 깨지고 있다. 현 이용량의 3배를 양수하였을 경우 양수를 하지 않았을 경우에 비해 기저유출량이 약 48% 감소하는 것으로 나타났다.

3.2.5. 시나리오별 모의 결과의 종합 분석

Fig. 14는 무심천 유역의 양수량에 따른 대수층 저류 변화를 살펴본 것으로 현 이용량(함양량 대비 약 24%) 및 현 이용량의 2배(함양량 대비 약 48%)와 3배(함양량 대비 72%)일 때의 양수량에 따른 누적 저류량의 감소량을 제시한 것이다. 연평균 함양량이 420 mm 라고 볼 때 함양의 72%인 300 mm의 지하수를 10년간 채수하였을 때는 총 980 mm (연평균 98 mm)의 저류량 감소가 예상되며, 함양의 48%인 200 mm로

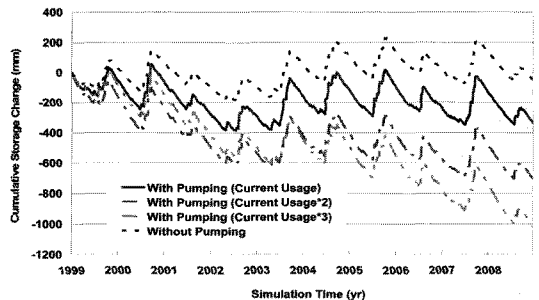


Fig. 14. Storage change according to the well pumping.



채수시에는 총 650 mm(연평균 65 mm)의 유역 저류량 감소가 예측된다. 현재 고시된 무심천 유역의 개발가능량 134.5 mm는 현 이용량과 현 이용량의 2배 사이에 해당 되는 값으로 누적 저류량의 감소 추세로 볼 때 현재 개발가능량을 매년 양수할 경우 지하수위의 지속적인 감소를 유발할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 무심천 유역의 양수량에 따른 연평균 지하수 유출량과 대수층 저류 변화량을 나타낸 것으로 양수량이 증가함에 따라 지하수 유출량과 대수층 저류량의 감소를 확인할 수 있으며, 특히 현 이용량  $Q_0$ (약 100 mm/year) 일 때 대수층 저류량의 변화가 거의 없기 때문에 이 양수량을 대수층의 장기적인 지하수위 저하를 일으키지 않는 적정 개발가능량으로 간주할 수 있다.

Fig. 16은 지하수 양수량에 따른 연간 지하수 유출 감소량과 대수층 저류량의 감소량을 도시한 것이다. 그림에서 가로축은 지하수 양수량은 함양량으로 나누어서 무차원으로 나타내었다. 지하수 양수량이 커질수록 지하수 유출량과 대수층 저류량이 선형적으로 감소하고 있다. 특히 양수량이 함양량의 약 70%인 경우를 전후로 지하수 유출과 대수층 저류량의 변화 기울기가

상이하게 나타나고 있다. 무차원 양수량이 0.7 보다 커졌을 경우에는 대수층의 저류량이 급격하게 감소하고 있다. 특이한 점은 저류량의 급격한 감소에 비해 지하수 유출량 감소율은 매우 완만해진 것이다. 이는 하천 인근의 지하수위 저하는 둔감해진 반면에 고지대에서 하천 인근 저지대로의 지하수 유동이 증가하여 고지대의 지하수위 저하가 커져서 저류량의 감소를 가져온 것을 의미한다. 따라서 이보다 많은 지하수 양수를 하였을 경우에는 고지대를 포함한 유역 전반에 걸쳐 지하수위의 심각한 감소를 유발할 수 있다. 무차원 양수량 비가 0.7 이하의 경우에서 대수층 저류량 감소량, 지하수 유출량 감소량, 그리고 기타 지역 사회적 여건을 복합적으로 고려해서 개발가능량을 설정하는 것이 바람직하다.

### 5. 결 론

우리나라 지하수 관리는 강수로부터의 지하수 함양을 기반으로 수행되고 있으나, 지하수 관리의 핵심적인 요소인 함양량, 지표수-지하수 교환량 등은 시공간적으로 변동하므로 지하수자원의 지속가능성을 평가하기 위해서는 지속적인 모니터링과 분석, 우선순위 등을 포함한 동적인 과정으로 평가되어야 한다. 다시 말해서, 지표수와 지하수의 물순환을 유역단위에서 파악할 수 있는 해석기술을 통해 지표수-지하수의 다각적인 연계운영 시나리오가 제시되어야 할 것이다.

한편, 지하수의 개발가능량은 인위적인 영향요사이므로 그 결정과정에 있어서 지역사회의 요구와의 부합성을 평가하는 의견수렴 과정이 도입되어야 할 것이다. 이러한 과정에서 지표수-지하수의 통합분석기법이 활용되어야 하며 시나리오별로 어떤 영향이 발생하는지를 명확하게 제시할 수 있어야 할 것이다. 다시 말해서 지하수 개발이 필요한 지역에서 하천으로의 유량 감소와 대수층의 저류량 감소는 필연적으로 동반되므로 가급적 영향을 최소화 하는 방법이 강구해야 할 것이다. 이를 위해서는 다양한 시나리오 분석을 통해 어떤 경우 그 피해가 가장 적은 지를 살펴보고, 지역사회의 지하수 이용 필요 또한 충족시킬 수 있는 방법을 살펴보아야 한다. 예를 들면 무심천 유역의 경우는 현재의 이용량으로 양수하였을 때, 하천으로의 기저유출은 양수전과 비교할 때 16%감소하며(Fig. 11), 대수층의 평균 저류량 변화(평균 지하수위 변화)는 연간 27 mm정도로 나타나 비교적 양수에 따른 영향이 수용될 만한 범위를 보여주었다. 이와같은 저류량 변화는 개

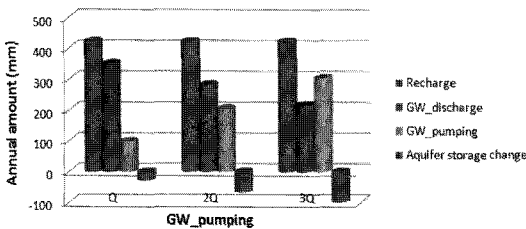


Fig. 15. Annual amount of groundwater hydrologic components.

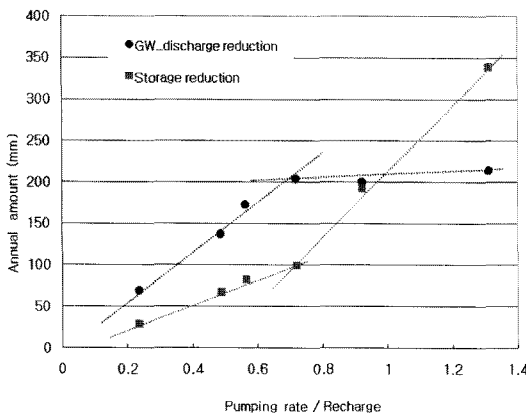


Fig. 16. Storage and groundwater discharge reduction due to well pumping.

발에 의해 필연적으로 발생하는 결과이므로 최종 결정 시에는 지역사회의 의견을 반영하는 것이 바람직하며 이와 같은 방식으로 지역별로 최적의 지하수 개발가능량이 합리적으로 결정될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부에서 지원하는 수탁연구사업 “유역단위 최적 지하수 개발가능량 산정 기법 연구”의 결과로서 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Arnold, J.G., Allen, P.M. and Bernhardt, G. (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, v.142, p.47-69.
- Banks, H.O. (1953) Utilization of underground storage reservoirs. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, v.118, p.220-234.
- Chung, I.M. and Kim, N.W. (2011) Method of advancing groundwater management in Korea. *Magazine of Korea Water Resources Association*, v.44, n.2, p.10-14.
- Chung, I.M., Kim, N.W., Lee, J. Kim, J.T. and Sophocleous, M. (2010a) Assessment of exploitable groundwater by use of integrated surface-groundwater hydrologic model. *Book of Abstracts, IAHR International Groundwater Symposium*, p.71.
- Chung, I.M., Kim, N.W., Lee, J. and Sophocleous, M. (2010b) Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea. *Hydrogeology Journal*, Volume 18, Issue 5, p.1253-1264.
- Conkling, H. (1946) Utilization of groundwater storage in stream system development. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, v.3, p.275-305.
- Danish Hydraulic Institute (1999) MIKE SHE Water Movement User Manual.
- Fetter, C.W. (1994) *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall.
- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S. and Arnold, J.G. (2008) Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *J. of Hydrology*, v.356, p.1-16.
- Kjelds, J. and Storm B. (2001) Integrated water resources modeling, water use, and water quality simulation, *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress, ASCE*.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT). (2007). *Development of Analysing System for Surface Water Hydrological Components*. 384p.
- Lee, C.H. (1915) The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 78: 148-151
- McDonald, M.G. and Harbaugh A.W. (1988) "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model", *U.S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1*, p.528.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) and Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning (KICT-TEP). (2007) *Development of optimal recharge estimation method suitable for domestic regional characteristics*, 363p.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2007) *Report on the Basic Groundwater Management and Planning*, 153p.
- Ramireddygar, S.R., Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., and Perkins, S.P. (2000) Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on streamflow and groundwater: the case of Wet Walnut Creek Watershed, Kansas, USA, *Journal of Hydrology*, v.236, p.223-246.
- Sophocleous, M.A. (1997) Managing water resources system - Why "safe yield" is not sustainable: *Ground Water*, v.35, n.4, p.561.
- Sophocleous, M.A. (1998) On the elusive concept of safe yield and the response of interconnected stream-aquifer systems to development; in, *Perspectives on Sustainable Development of Water Resources in Kansas*, M. A .Sophocleous, ed.: Kansas Geological Survey, Bulletin 239, p.6 -85.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygar, S.R. and Perkins, S.P. (1999) *Integrated Numerical Modeling for Basinwide Water Management - The Case of the Rattlesnake Creek Basin in South-central Kansas*: *Journal of Hydrology*, v.214, n.1-4, p.179-196.