

ORIGINAL ARTICLE

## 통합수문모형을 이용한 제주 한천유역의 지하수 변동 특성 모의

김남원 · 나한나 · 정일문\*

한국건설기술연구원 수자원연구실

### Simulation of Groundwater Variation Characteristics of Hancheon Watershed in Jeju Island using Integrated Hydrologic Modeling

Nam-Won Kim, Hanna Na, Il-Moon Chung\*

Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

#### Abstract

To investigate groundwater variation characteristics in the Hancheon watershed, Jeju Island, an integrated hydrologic component analysis was carried out. For this purpose, SWAT-MODFLOW which is an integrated surface-groundwater model was applied to the watershed for continuous watershed hydrologic analysis as well as groundwater modeling. First, ephemeral stream characteristics of Hancheon watershed can be clearly simulated which is unlikely to be shown by a general watershed hydrologic model. Second, the temporally varied groundwater recharge can be properly obtained from SWAT and then spatially distributed groundwater recharge can be made by MODFLOW. Finally, the groundwater level variation was simulated with distributed groundwater pumping data. Since accurate recharge as well as abstraction can be reflected into the groundwater modeling, more realistic hydrologic component analysis and groundwater modeling could be possible.

**Key words** : Integrated hydrologic analysis, SWAT-MODFLOW, Recharge, Pumping

#### 1. 서론

우리나라 최대의 다우지역 중 한 곳인 제주도는 급한 경사와 짧은 유로 연장 등의 하천 특성과 높은 투수성의 지질학적 특성으로 인해 집중호우 시 짧은 기간 동안 유출이 발생하고 평상 시 도내 대부분의 하천은 건천의 상태로 유지되고 있다. 이와 같은 하천 특성은 내륙과 상이하기 때문에 내륙에 적용되고 있는 전통적인 물수지 분석 기술로는 제주도의 독특한 수문특성 규명에 한계가 있다. Choe 등(2011)은 지하수위 변동법을 이용하여 지하수 함양률을 추정하였으며,

Won(2004)은 장기적인 수문 및 수리지질 자료를 토대로 제주도 지하수의 부존 형태, 대수층의 수리적 특성 및 물수지를 평가하였다. 또한 Jeju Special Self-Governing Province와 K-water(2003)에서는 제주지역의 수자원평가를 위해 제주도 수문지질 및 지하수 자원 종합조사를 실시한 바 있다. 이에 의하면 제주지역의 유출률은 강수대비 21%로 내륙에 비해 매우 낮은 특성을 보이며 지하수 함양량은 강수대비 54%로서 역시 내륙과는 상이하게 높은 지하수 함양률을 나타내고 있다.

한편 제주 지역 수자원관리의 핵심요소인 지하수

Received 5 November, 2012; Revised 7 February, 2013;

Accepted 20 March, 2013

\*Corresponding author : Il-Moon Chung, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do 411-712, Korea  
Phone: +82-31-910-0334  
E-mail: imchung@kict.re.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

함양량을 산정하기 위해서는 하천의 유출특성을 포함한 증발산, 토지이용, 토양의 특성 등 지표수 수문성분에 대한 해석이 필수적이다. 지하수 함양은 수문순환의 복잡한 과정으로, 강우 빈도, 강도, 지속시간 뿐 아니라 온도, 습도, 풍속과 지하수위 상부에 존재하는 토양 및 암반층의 특성과 깊이, 지표의 지형과 식생분포 및 토지이용과도 관련되므로 전체적인 물순환의 틀 속에서 검토되어야 한다(De Vries와 Simmers, 2002). 따라서 일반적인 유역수문 모형을 제주 유역에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 이러한 수문학적 특수성에 기반하여 Kim 등(2009)은 제주 표선유역에 지표수-지하수 통합 수문해석 모형인 SWAT-MODFLOW모형(Kim 등, 2008)을 시험 적용한 바 있다.

본 연구지역인 한천 유역 내에는 홍수 피해 저감용 저류지와 인공함양정이 설치되어 있어 인공함양에 따른 지하수위 변동 및 대수층의 물수지 변화가 예측되는 지역이므로(Oh, 2010) 지하수대를 분리하여 분석하는 방법보다는 지표수와 지하수를 연계하여 분석하는 것이 필요할 것으로 판단되며, 따라서 본 연구에서는 제주 유역 중 한천유역을 대상으로 SWAT-MODFLOW를 적용, 정확한 지하수 함양특성과 양수정 분포특성을 감안한 지표수-지하수 통합 수문해석의 가능성과 지하수 변동 특성을 파악하고자 한다.

## 2. 연구자료 및 방법

### 2.1. SWAT-MODFLOW 모형의 개요

본 연구에서는 제주형 물순환 해석에 필요한 강우로부터 지표유출, 증발산, 토지이용, 토양의 침투특성, 기저유출, 지하수 유동 등에 이르는 종합적인 물순환 해석을 하기 위하여 완전연동형 지표수-지하수 통합 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하였다. SWAT-MODFLOW 모형은 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988)를 SWAT(Arnold 등, 1998)내의 호출프로그램으로 결합한 완전연동형 모형으로서 SWAT에서 HRU(Hydrologic response units)별로 발생하는 지하수 함양량을 MODFLOW의 입력자료로 이용하여 지하수 흐름을 산정하고 MODFLOW의 River 패키지를 이용, 지표수-지하수의 교환량을 계산한다. 이 모형은 유역규모별로 다양한 시험적용이 수

행된 바 있으며 지표수-지하수 연계모형으로의 타당성이 입증된 바 있다(Kim 등, 2008; Chung 등, 2010).

### 2.2. 모형의 적용

제주도에는 지방2급 하천과 소하천을 포함해 총 143개의 하천이 분포하고 있으며, 일부하천(외도천, 옹포천, 창고천, 중문천, 강정천, 연의천, 예래천, 동홍천, 막근천)을 제외하면 모두 건천이다(Jeju Development Institute, 2009). 본 연구에서는 이러한 건천 중 약 60mm 이상의 강우 시 지표유출이 발생하며 홍수 저감 저류지 설치로 하천유출량 모니터링을 정기적으로 하고 있는 한천유역에 대하여 제주형 지표수-지하수 통합 수문해석 모형을 적용하였다.

한천은 한라산 해발 1,950 m 고지에서 발원하여 용담동 해안으로 유입되는 하천으로 유로연장 19.82 km이고 유역면적은 34.57 km<sup>2</sup>이며, 유역의 형상은 지류가 거의 없는 수지상에 가까운 하천형태를 보이고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2001). 본 연구에서는 한천을 중심으로 표준유역 경계까지 확장하여 모델영역을 설정하였으며, 15개의 소유역으로 구분하였다.

강수자료는 한라산 부근의 미계측 강수자료를 보완하기 위한 선행연구(Kim 등, 2012) 결과를 활용하였는데 이는 다중회귀선형 모형으로 미계측 강수자료를 생성, PRISM기법을 적용하여 공간분포시킨 결과이다.

SWAT모형은 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델(digital elevation model; DEM), 유역 내 토지이용 상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에서 구축한 DEM, 토지이용도, 토양도는 Fig. 1과 같다.

제주도는 화산분출에 의해 형성된 화산섬으로 클링커와 같은 고투수성 층과 저투수성 현무암과 같은 수문지질 요소가 교대되는 다층구조를 형성하고 있으나, 각 층 구조를 모델링에 반영하는 것은 불가능하므로 1개의 자유면대수층으로 가정하였다. 모델영역은 86.21 km<sup>2</sup>이고, 모델 격자는 100 m×100 m 크기로 180행 91열로 구성되었다. 대수층의 상부는 지표면으로, 하부는 임의적인 해발고도를 수평으로 설정하였

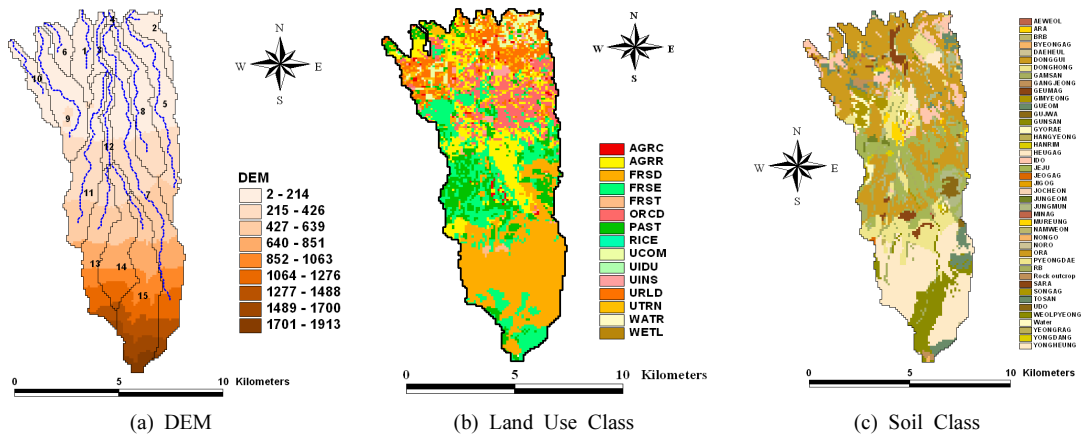


Fig. 1. Maps of (a) DEM, (b) land use, and (c) soil classes of the study area.

다. 모형에 입력한 수리전도도는 선행 연구자료(Oh, 2010)를 토대로 초기치를 구성한 후 모형의 보정을 통해 공간분포된 수리전도도를 추정하였으며, 그 범위는 고도별로 0.03 ~ 245.7 m/day로 적용하였다(Fig. 2). 또한 수리전도도 입력 시 이방성에 관한 자료는 전 무하므로 수리전도도는 수평방향으로 등방성인 것으로 가정하였다. 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평 수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다.

경계조건은 유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무흐름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수 경계(no-flow boundary)로 설정하였으며, 해안선은 일정수두경계(constant head boundary)로 설정하고 그 수위는 해수면 수위와 일치시켰다. 또한 지하수 유출입이 일어나는 한천을 중심으로 병문천, 독사천, 산지천, 토천, 흘천 등 지방2급 하천들을 모두 하천경계로 입력하였으며, 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

한편 한천유역에는 제주도 전체적으로 분포한 4,514개의 관정 중 496개의 관정이 분포하고 있으며(Fig. 3), 이는 모형에서 양수정으로 설정하여 조사연보 자료를 통해 추정된 공당 사용량만큼 양수하도록 입력하였다.

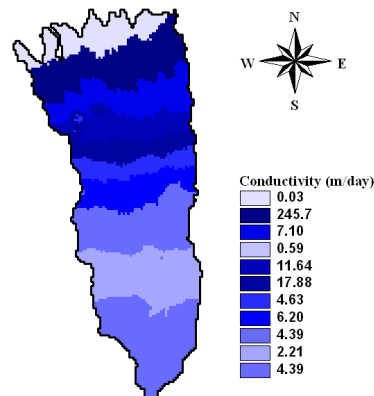


Fig. 2. Distribution of hydraulic conductivity of Hancheon watershed.

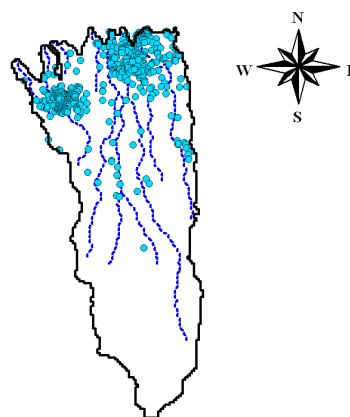


Fig. 3. The location of pumping wells.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지표수 유출분석

한천유역의 하천유출량의 검증을 위해 사용된 관측자료는 “한천1” 관측소에서 관측된 수위·유속자료를 이용하여 수위-유량관계곡선식을 통하여 유출량을 산정하였다(Jeju Development Institute, 2009; 2010). 제주도의 유출특성은 내륙의 유출특성과 상이하여 제주 유출특성에 부합하는 개선된 유출모의 기법으로 2008년부터 2010년까지의 기간에 대하여 매개변수를 조절해 가며 보정을 수행한 결과 관측유량과 모의유량의 결정계수가 0.56으로 비교적 양호하게 적합되었음을 확인하였다(Fig. 4, Fig. 5).

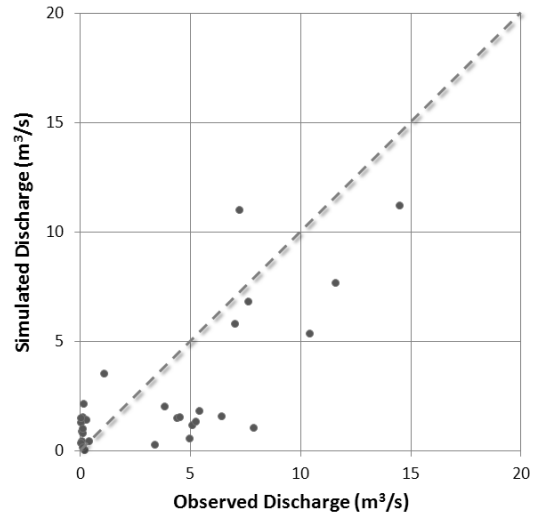


Fig. 5. Comparison between observed and simulated stream flow.

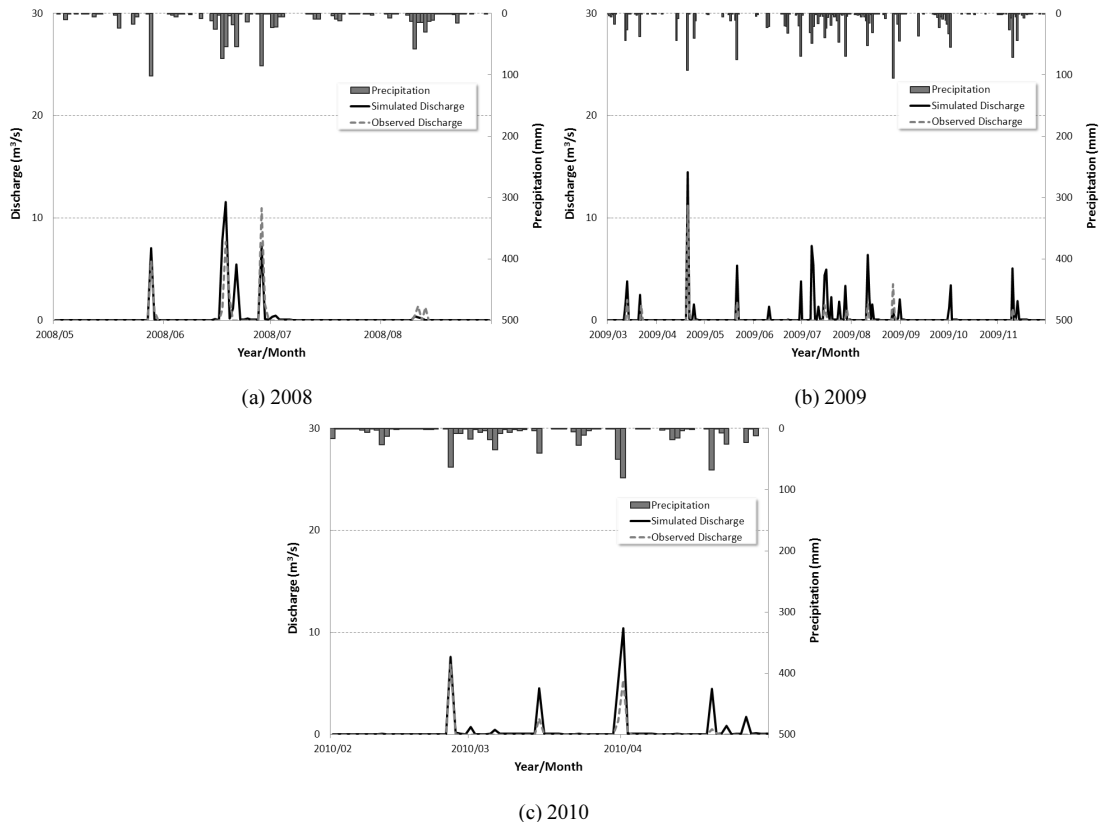


Fig. 4. Observed and simulated stream flow (2008-2010).

3.2. 지하수 함양 분석

지표수와 연계한 지하수 함양의 정확한 추정을 위해 함양의 지체시간 변수( $\delta_{gw}$ )에 대한 검정을 수행하였다. 장기 관측치를 보유하고 있는 JD용담2와 JW공항 관측지점에 대해 계산된 함양량의 시계열과 지하수위의 시계열을 결정계수 0.63으로 최적화시켰다(Fig. 6). 이는 함양이 지하수위에 실질적으로 기여했는지의 여부를 나타내는 결과로, 시간적 변동성과 함께 공간적 변동성을 동시에 고려할 수 있다. 월별 공간분포의 변동성을 확인하기 위해 월평균 함양량의 공간분포를 Fig. 7에 나타냈다. 월 함양량의 경우 최대 약 595mm 범위 내에서 유역의 강수량, 토지이용 및 토양특성, 경사 등에 따라 매우 비균질하게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 지하수 유동 분석

제주도에서 개발된 관정 중 제주수자원본부에서 124개의 관정을 관리하고 있으며 이 관정에서 지하수위를 관측하고 있다. 본 연구지역인 한천유역에는 124개 중 13개 지점이 포함되어 있으며 그 자료(2010년 10월)을 이용하여 정규 크리깅 기법에 의해 지하수위 공간분포도를 작성하였다(Fig. 8). 한천유역은 -40 ~ 340 m의 수위분포를 보이고 있으며, 전반적인 지하수위의 고저분포의 경향이 유사하게 나타나고 있으며, 결정계수는 0.82로 높게 나타나 모의치가 실제 지하수위의 분포양상을 양호하게 구현하고 있음을 알 수 있다(Fig. 9). 그러나 한천유역에는 370 m 이상의 고지대에 지하수위를 관측하는 관정이 존재하지 않기 때문에 관측지하수위 분포도는 고지대의 오차를 포함하고 있을 것으로 판단된다. Fig. 10은 지하수위 관측

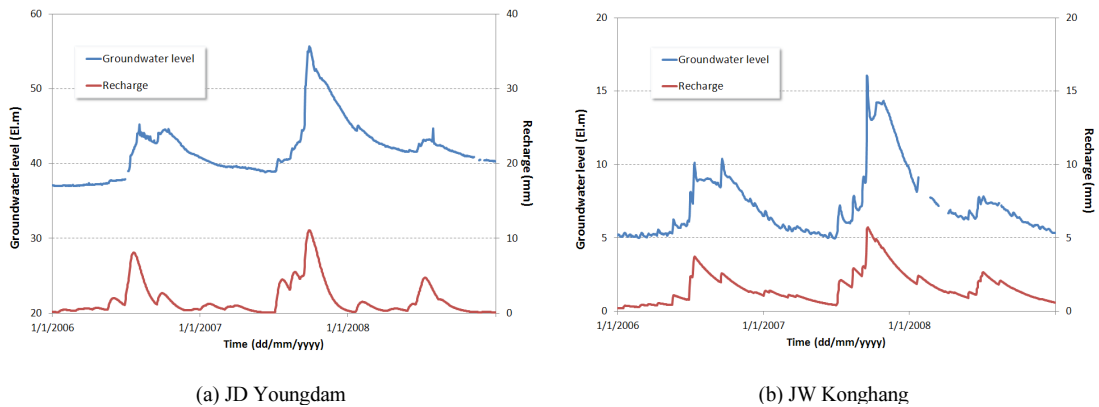


Fig. 6. Simulated recharge rates and observed groundwater level.

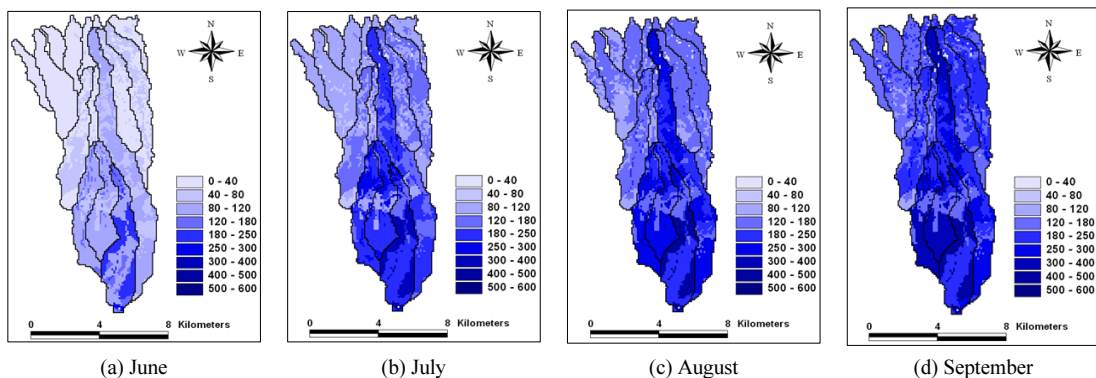
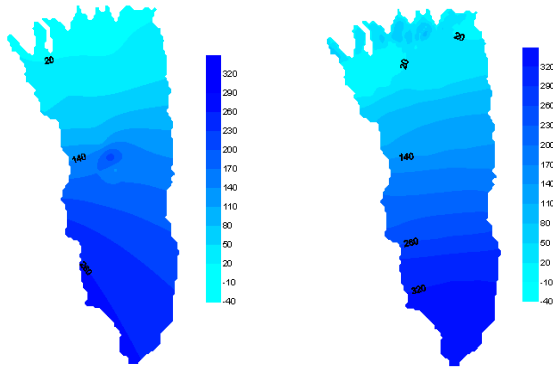
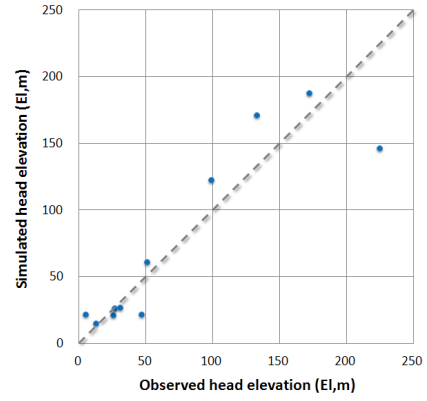


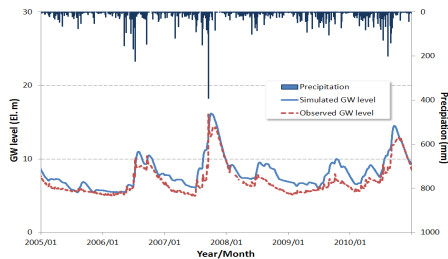
Fig. 7. Distribution of monthly average groundwater recharge rates.



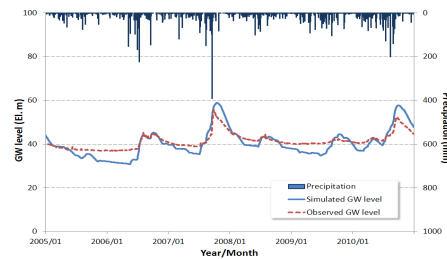
(a) observed groundwater level (b) simulated groundwater level  
**Fig. 8.** Distribution of groundwater level.



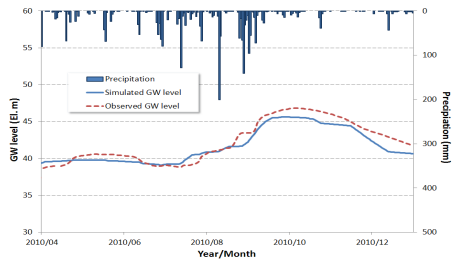
**Fig. 9.** Comparison between observed and simulated groundwater levels.



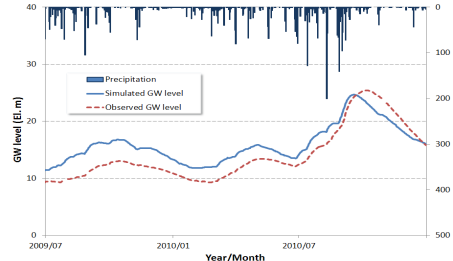
(a) JW Konghang ( $R^2=0.89$ )



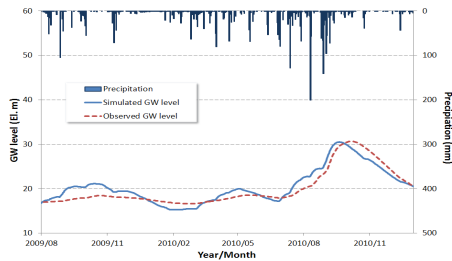
(b) JD Youngdam2 ( $R^2=0.82$ )



(c) JW Yeondong ( $R^2=0.94$ )



(d) JM Ido2 ( $R^2=0.89$ )



(e) JD Ganderak ( $R^2=0.86$ )

**Fig. 10.** Observed and simulated groundwater level time series.

지점인 JW공항, JD용담, JW연동, JM이도2, JD간드락의 지하수위 시계열자료와 모의 지하수 시계열 자료를 비교 도시한 것으로 결정계수가 0.86 ~ 0.94로 모의치가 관측치의 양상을 상당히 양호하게 모사하고 있음을 알 수 있다(Fig. 11).

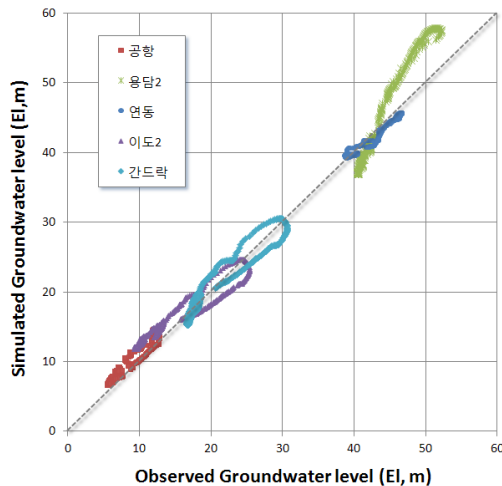


Fig. 11. Comparison between observed and simulated groundwater level.

#### 4. 결론

본 연구에서는 제주 수문특성을 고려한 강우로부터 지표유출, 증발산, 토양의 침투특성, 기저유출에 이르는 수문성분과 지하수 유동을 연속적으로 모의하는 통합모형을 한천 유역을 대상으로 적용하였다. 통합수문해석의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 우기에만 유출이 발생하는 한천유역의 간헐하천 유출 특성을 정확히 모의할 수 있었으며 이를 통해 기존방식의 유출률 산정방식을 개선할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 2) 지표수 수문모형으로부터 토양층을 통해 침투되는 지하수 함양량의 시변적 특성을 반영할 수 있었으며, 이를 지하수 모형과 연계하여 함양량의 공간분포를 도시할 수 있었다.
- 3) 정확한 지하수 함양량의 입력 및 양수량의 공간분포를 고려하여 지하수위 공간분포도 뿐만 아니라 지하수위 변화의 시계열 등을 재현한 결과 상당히 양

호한 결과를 도출하였으므로 통합수문해석의 타당성을 증명하였다.

하지만 유역경계를 나눌 때 유역간의 연계성 문제, 모델의 주요 수문 경계들을 모델에서 개념화할 때 수반되는 불확실성, 제주도의 공간변동 특성을 반영한 증발산량 및 용설 추정, 상시하천과 간헐하천의 특성구분에 따른 정밀 유출해석 등 추가로 고려해야 할 사항들이 있어 보다 타당성 있는 수문성분량을 산정하는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., 1998, Large area hydrological modelling and assessment Part I: model development. *J. Am. Water Resour. As.*, 34(1), 73-89.

Choi, H. M., Lee, J. Y., Ha, K. C., Kim, G. P., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju island, *J. Eng. Geol.*, 21(4), 337-348.

Chung, I. M., Kim, N. W., Lee, J., Sophocleous, M. A., 2010, Assessing distributed groundwater recharge rate by using integrated surface-groundwater modeling: Application to Mihocheon watershed, Korea: *Hydrogeol. J.*, 18(5), 1253-1264.

DeVries, J. J., Simmers, I., 2002, Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J.*, 10, 5-17.

Jeju special self-governing province, 2001, Report on basic plan for river maintenance, 17-19.

Jeju development institute, 2009, The hydrologic and water quality characteristics analysis for the streamwater application in Jeju island, 2009-11, 34-38.

Jeju development institute, 2010, The hydrologic and water quality characteristics analysis for the streamwater application in Han cheon, Hwabuk cheon, Hyorye cheon, 2010-3, 13-32.

- Jeju special self-governing province, K-water, 2003, general survey of hydrogeology and groundwater resource(Ⅲ), 175p.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., Arnold, J. G., 2008, "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *J. Hydrol.*, 356(1-16).
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S. Y., Lee, J. W., Yang, S. K., 2009, Integrated surface-groundwater analysis in Jeju island, *J. Environ. Sci.*, 18(9), 1017-1026
- Kim, N. W., Um, M. J., Chung, I. M., Heo, J. H., 2012, Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju island, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 45(9), 875-885
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, 6(A1), 586.
- Oh, S. H., 2010, Modeling the artificial recharge in reservoir of Hanchun drainage area, Jeju island in Korea, Master Thesis, Kongju National Univ., 16-27.
- Won, J. H., 2004, Hydrogeologic investigation and hydrologic budget of groundwater resources on Jeju island, Korea, Doctoral Thesis, Seoul National Univ., 208.