

지표수-지하수 통합모형을 이용한 무심천 유역의 수문과정 해석

Analysis of Hydrological Processes for Musim River Basin by Using Integrated Surface water and Groundwater Model

김 남 원* / 정 일 문** / 이 정 우*** / 원 유 승****

Kim, Nam Won / Chung, Il Moon / Lee, Jeongwoo / Won, Yoo Seung

Abstract

Integrated modelling of surface water and groundwater has become important to satisfy the growing demands for sustainable water resources and improved water quality. In this study, the integrated model of the semi-distributed watershed model, SWAT and the fully-distributed groundwater flow model, MODFLOW is applied to Musim river basin for the purpose of investigating its applicability to reproduce watershed-scale hydrological processes. This objective is accomplished by first demonstrating good agreement between the simulated discharge hydrographs with the measured hydrographs for the period of 2001-2004 while simultaneously calibrating the calculated groundwater level distribution to observation wells. Next, the integrated model is used to evaluate the effect of different temporal precipitation averages on hydrodynamic processes of streamflow, percolation, recharge and groundwater discharge. Moreover, comprehensive simulations are performed to present the relationships between monthly precipitation and each hydrological component, and to analyze the temporal-spatial variability of recharge. The results show that the components are highly interrelated, and that the heterogeneity of watershed characteristics such as subbasin slope, land use, soil type causes a significant spatial variation of recharge. Overall it is concluded that the model is capable of reproducing the temporally and spatially varied surface and subsurface hydrological processes at the watershed scale.

keywords : Integrated modelling, SWAT, MODFLOW, Hydrological processes

요 지

지표수와 지하수의 통합모델링은 지속가능한 수자원과 수질개선에 대한 점증하는 요구를 만족시키기 위해 점차 중요성을 더해가고 있다. 본 연구에서는 준분포형 유역유출모형인 SWAT과 완전분포형 지하수 모형인 MODFLOW의 통합모형을 무심천 유역에 적용하여 유역단위의 수문과정을 재생하였다. 모의결과 2001-2004년의 관측수문곡선과 모의유량수문곡선간의 적합이 잘 나타나는 한편 계산된 지하수위 분포와 관측지하수위와의 보정결과도 양호하게 나타났다. 통합모형은 서로 다른 기간의 강수평균이 하천유출, 침투, 함양, 지하수 유출의 동적과정에 미치는 영향을

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원

Research Fellow, Dept. of Water Resources Research, KICT, Ilsangu, Goyang 411-712, Korea
(e-mail: nwkim@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 (Corresponding author)

Senior researcher, Dept. of Water Resources Research, KICT, Ilsangu, Goyang 411-712, Korea
(e-mail: imchung@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원

Senior researcher, Dept. of Water Resources Research, KICT, Ilsangu, Goyang 411-712, Korea

**** 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사

Researcher, River Information Center of Han River Flood Control Office, MOCT, Seoul 137-049, Korea

평가하는데도 활용되었다. 나아가, 월별강수와 각 수문성분간의 관계를 살펴보고 함양량의 시공간적 변동성을 분석하기 위한 종합적인 모의를 수행한 결과, 수문성분 상호간에 높은 상관성을 보이며 소유역경사, 토지이용, 토양종류 같은 유역특성의 비균질성이 함양량의 공간변화에 주요 원인인 것으로 확인됐다. 통합모형은 시공간적으로 변동하는 유역단위의 지표수와 지표하 수문과정을 전반적으로 잘 표현하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 통합모델링, SWAT, MODFLOW, 수문과정

1. 서론

수자원 이용에 따른 수리권 문제, 지하수 함양량과 적정 지하수 개발량 산정 문제, 하천 유지유량 결정 문제, 하천 건전화 문제 등과 같이 수자원 이용과 관련된 여러 가지 현안에 대한 명확한 해답을 찾는 노력이 다각적으로 진행되어 오고 있다. 이러한 문제 해결의 일환으로 지표수와 지하수의 통합관리라는 측면이 국내의 적으로 부각되고 있다. 우리나라 지하수관리의 기본 방향은 지속가능한 수자원으로서 지하수의 확보, 청정수 자원으로서 대물림을 위한 지하수종합관리체계 구축이라는 목표를 지향하며, 그 중에서 지표수와 연계하여 지역의 특성과 환경에 적합한 사업의 추진을 우선 전략으로 삼고 있을 정도로 지표수와 지하수를 별개가 아닌 통합관리 되어야 할 하나의 수자원으로의 인식이 강조되고 있다(건설교통부, 2002). 이러한 통합관리를 위해 우선적인 것은 지표수와 지하수 유출을 통합적으로 모의·해석할 수 있는 장기유출모형의 구축이 필수적이라 하겠다.

기존에 국외에서 개발된 지표수와 지하수를 해석할 수 있는 대표적인 분포형 장기유출모형으로는 미국에서 개발된 SWAT(Arnold, 1993, 1995), ISGW (SDI, 1997), 덴마크에서 개발된 MIKE SHE (DHI, 1999), 일본에서 개발된 WEP (Kinouchi와 Jia, 1999) 등이 있다. 이러한 모형들은 수문성분을 산정하는 방식에 있어서 차이가 있고, 각각의 특성 및 장단점을 가지고 있다. 이 중에서 SWAT은 공개모형이어서 접근성이 우수하여 코드의 수정이 가능하며, 완전분포형이 아닌 준분포형 수문모형으로서 복잡한 대유역에 적용 가능한 이점이 있다. 다만, SWAT의 지하수해석모듈은 일종의 수조모델로 집중형 모델에 가깝고, 지하수의 수평흐름에 의한 동적인 거동을 반영할 수 없어 양수에 의한 지하수리시스템의 변화 등을 모의하는데 어려움이 있는 단점이 있다. 이러한 SWAT이 가지는 단점을 극복하고자 김남원 등(2004a,b)은 SWAT에 범용적인 지하수 해석모델인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)의 결합을 시도하였고, 경안천 유역에 대한 시험적용을 수행한

바 있다(김남원 등, 2006). 본 연구에서는 이 결합모형을 이용하여 무심천 유역의 지표수와 지표하 수문과정을 해석함으로써 모형의 적용성 및 활용가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 토지이용 및 토양조건, 기후조건 등을 고려한 일단위 수문성분을 모의하고, 지하수 함양량, 지하수유출량 등의 수문성분의 시공간적 분포 특성을 제시함으로써 모형의 광범위한 적용성을 입증하고자 하였다.

2. SWAT-MODFLOW 결합모형

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형(Arnold 등, 1993)은 미국 농무성에서 개발된 것으로 다양한 토양, 토지이용 등을 반영하여 물순환이나, 토사 및 화학물질 이동을 해석할 수 있는 준분포형 장기유출모형이다. 이 모형에서는 유역을 여러 개의 소유역으로 분할하고, 또 다시 소유역을 동일한 수문응답특성을 가지며 토지이용도와 토양도를 중첩시켜 만들어진 다수의 HRU (Hydrologic Response Unit)로 분할하여, 개개의 HRU에 대해 지표면, 지표하, 지하수 등 각각의 수문성분을 산정하게 된다. SWAT에서는 식물의 뿌리깊이까지의 영역인 토양수대, 비포화대, 포화대로 구분하여 다음 Eq. (1)과 같이 토양수를 기준으로 표현된 물수지식을 기본 개념으로 사용하고 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서 SW_t 는 시간 t 일의 토양수분량, SW_0 는 초기토양수분량, R_{day} 는 일강수량을 나타내고 있으며, Q_{surf} 는 지표면 유출량, E_a 는 증발산량, w_{seep} 는 토양층의 특성을 반영한 침투량, Q_{gw} 는 하천으로의 회귀수이다. 지표면 유출량을 산정하기 위해서 SCS-CN, Green-Ampt 방법이 사용되고 있으며, 증발산량은 Penman-Monteith 식 등의 다양한 경험공식이 사용된다. 침투량은 저류추적식(storage routing equation), 중간유출량은 운동학적

저류모델(kinematic storage model), 하도추적은 변동저류법, Muskingum 추적법 등이 사용되고 있다. 침투량과 함양량의 관계는 지수형 가중함수(exponential weighting function)로 표현하고 있으며, 지하수 유출량은 HRU별 얇은 대수층을 제어체적으로 하여 저류방정식의 해석해로부터 얻어진 지하수유출량과 함양량간의 관계식을 이용한다. 그러나, 앞서 언급한대로 SWAT의 지하수해석모듈은 HRU간에 상호간 연결성이 없어 지하수의 수평흐름에 의한 동적인 거동을 반영할 수 없어 양수에 의한 지하수리시스템의 변화 등을 모의하는데 어려움이 있는 단점이 있다. MODFLOW는 다공질포화매체내 지하수 흐름을 모사하는 지하수유동모델로 범용적으로 이용되어 오고 있으나, 주요입력변수로 대수층의 상부경계조건으로 부여되는 함양량 결정에 어려움이 있다. 일반적으로 강수량에 유역의 함양계수를 곱하여 균등한 함양률을 적용하여 지하수 모의를 수행하고 있는 게 현실이다.

SWAT-MODFLOW 모형(김남원, 2004 a, b)은 각각의 모형이 가지는 장점은 그대로 유지하면서 단점을 상호 보완한 유역단위의 지표수-지하수 통합모형이다. Fig. 1은 모형의 수문순환 개념도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 SWAT의 지하수 해석부분을 MODFLOW가 담당하고 있다.

통합모형은 MODFLOW가 SWAT내에서 호출되는 형식으로 결합되었으며, 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT으로부터 추출하여 MODFLOW에 자동적으로

입력시켜 지하수 흐름을 모의하고, 하천과 대수층간의 수위차에 비례하는 순 유출입량으로부터 지하수유출량을 계산하여 다시 SWAT으로 전달함으로써 두 모형간의 연계가 매시간단계별로 이루어지게 된다(김남원, 2004 a, b). 또한 대수층내 우물의 함양과 배출, 지하수의 증발산으로 인한 손실 등도 상호 연동되도록 결합하였다. SWAT으로부터 HRU별로 계산된 함양량을 MODFLOW의 셀값에 분배시키기 위해서 HRU-GRID 변환 틀을 만들어 활용하였다. MODFLOW의 RIVER PACKAGE를 이용하여 하천셀별로 하천-대수층간의 순 유출입량을 계산후 합산하여 SWAT의 하도로 유입되도록 구성하였다. 양수모의는 MODFLOW의 WELL PACKAGE를 이용하였는데, MODFLOW의 함양 또는 배출량을 SWAT에서 받고, SWAT의 Water Transfer 라는 물 이동 명령에 의해 하천, 다른 HRU, 다른 소유역, 유역외 등의 원하는 목적지로 전이되도록 구성되었다(한국건설기술연구원, 2006).

3. 무심천 유역에 대한 SWAT-MODFLOW 통합모형의 적용

SWAT-MODFLOW 통합모형을 미호천 최상류부에 위치한 무심천 유역에 대해 2001년부터 2004년까지 4년간의 시험적용을 수행하였다. 유역형상은 Fig. 2와 같이 동고서저형이고, 유역면적은 약 179 km², 유로연장은 약 35km이며, 대상유역을 Fig. 3과 같이 34개의 소유역으로 구분하였다.

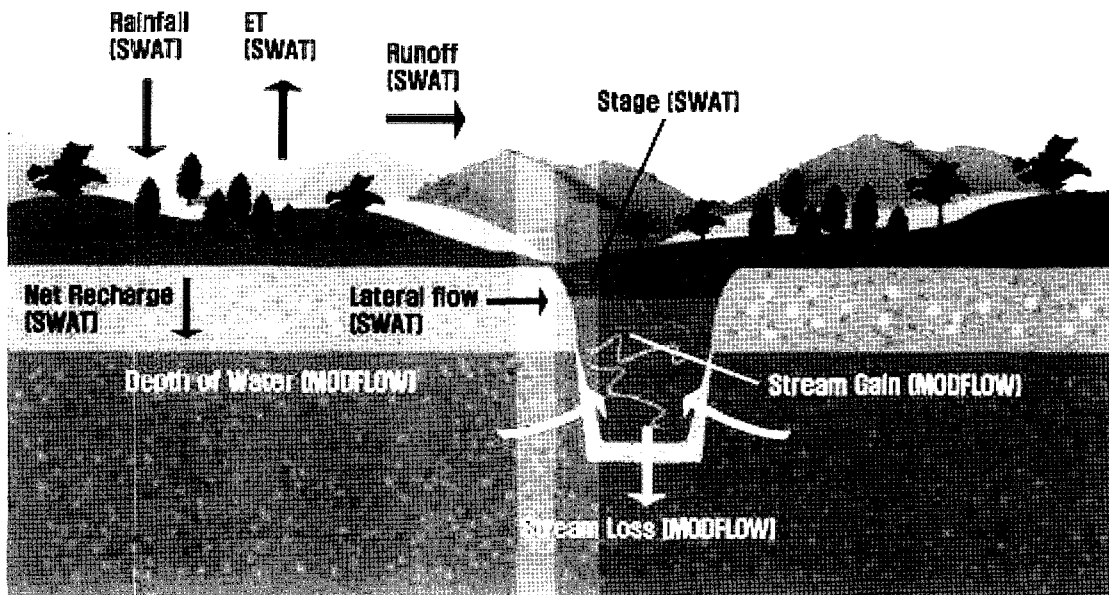


Fig. 1. Diagram for interaction of water hydrological components in SWAT-MODFLOW

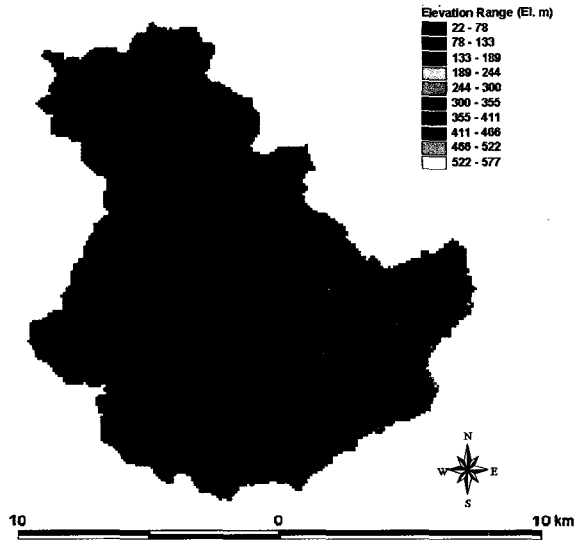


Fig. 2. DEM of the Mushimcheon watershed

입력자료로서 기온, 풍속, 일사량, 강수량 등의 기상 자료는 청주기상대 자료를 이용하였고, 수치지도를 이용하여 100m×100m의 DEM을 구축하였으며, 1:25,000의 토지이용도와 토지피복도를 이용하였다. 토양의 물성치는 농업과학기술원과, 농업토양정보시스템 등의 자료를 이용하였다. 지하수 유동해석을 위해서 격자크기를 100m로 하여 223×214개의 셀을 생성하였고, 경계조건으로 상부에 함양플릭스, 하천셀에 시간중속수두, 유역외는 무흐름 조건을 부여하였으며, SWAT으로부터 모의된 일별 함양량과 하천수위를 자동 입력하였다. 대상 지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 2개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층으로 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링

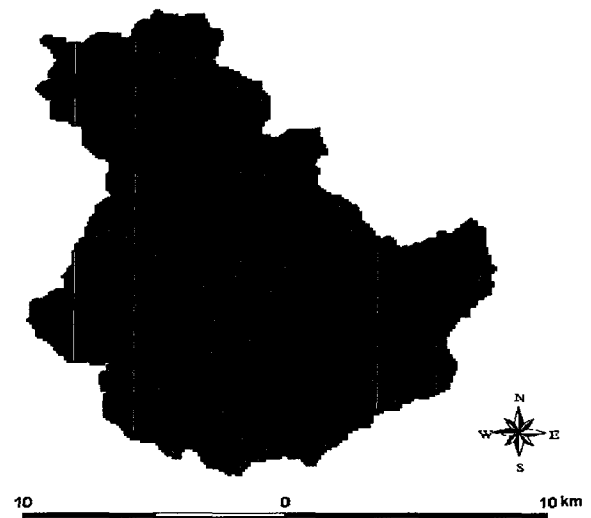


Fig. 3. Subbasins of the Mushimcheon watershed

을 실시하였다. 충적층 및 암반층의 공간적인 분포는 해당 유역내 포함되는 국가지하수 관측공, 지자체 지하수 관측공, 해당 지역내 시추 및 착정 조사자료 등을 이용하여 각층의 바닥고를 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 굴착 깊이까지의 충적층 및 암반층의 바닥고는 지층 구성별 심도로부터 산정할 수 있으나, 굴착심도 이상의 암반의 분포심도는 명확하지 않은 상황이므로 그 두께 및 각종 수리지질인자들의 값은 대부분 가정에 의존하였으며 모델을 수행하는 과정에서 이들을 보정의 인자로 사용하였다.

Fig. 4는 사용한 토지이용도로서 15개의 토지이용현황으로 구분되었고, 산지가 51%, 농경지가 31%, 도시화 지역이 15%로 분포되어 있다. Table 1에 토지이용별

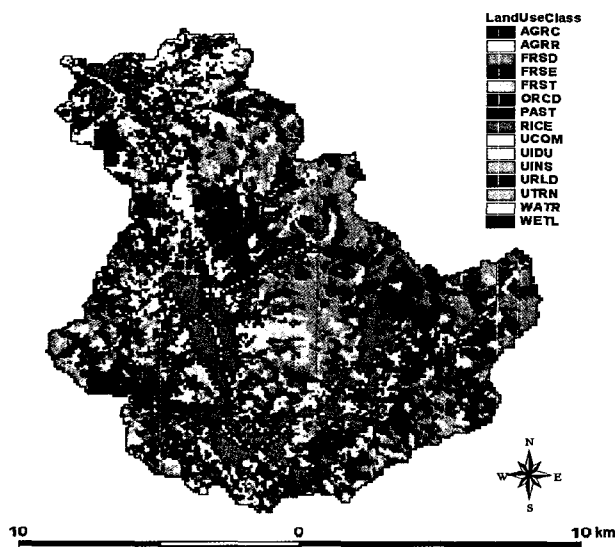


Fig. 4. Land use map of the Mushimcheon watershed

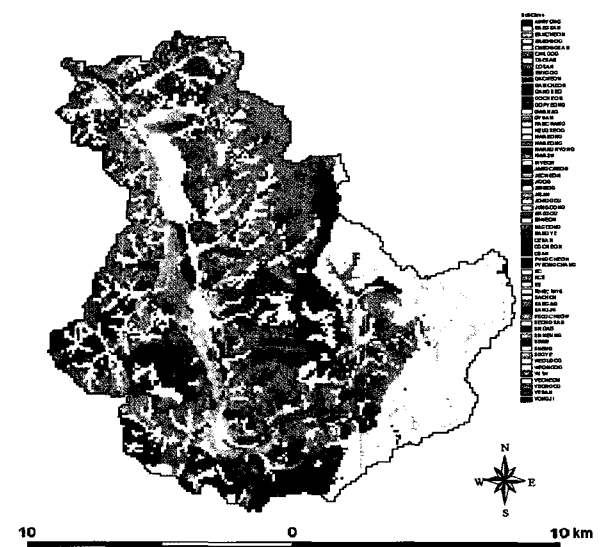


Fig. 5. Soil map of the Mushimcheon watershed

Table 1. Land use of the Mushimcheon watershed

Classification	Land use	Area (km ²)	Fraction (%)
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	4.7	2.4
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	18.4	9.3
RICE	Rice	38.2	19.3
FRSD	Forest-Deciduous	38.8	19.6
FRSE	Forest-Evergreen	46.6	23.5
FRST	Forest-Mixed	12.7	6.4
ORCD	Orchard	0.4	0.4
PAST	Pasture	3.9	2.0
UCOM	Commercial	3.5	1.8
UIDU	Industrial	1.4	0.7
UINS	Institutional	3.3	1.7
URLD	Residential-Low Density	17.8	8.9
UTRN	Transportation	4.5	2.2
WATR	Water	1.8	0.9
WETL	Wetlands-Mixed	1.8	0.9

면적을 기록하였다. Fig. 5는 정밀토양도로서 60개의 토양통으로 구분되었다. 토지이용도와 토양도를 중첩시켜 HRU 분포도를 작성하고, 개개의 HRU별로 각각의 수문성분량이 계산된 후 소유역에 대하여 지체, 합산된다. 이렇게 합산된 각 수문성분량이 소유역의 주수로에 유입되어 하도추적이 이루어진다.

모의 결과의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 6과 같이 청주수위관측소에서의 관측유량과 일단위 모의유량을 비교하였다. 모의유량은 실측유량의 경향을 잘 반영하고 있으며, 특히 갈수기 완만한 기저유량 시계열을 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다. 실측치와 모의치간

의 결정계수가 약 0.75로서 모의치가 양호한 것으로 판단된다.

강수의 시간적 분포에 따른 하천유출량, 지하수 유출량 등의 수문성분들의 응답 변화를 모의하였다. 즉, 모의 결과치가 입력치의 패턴에 따라 어떤 반응을 나타내는지 살펴보았다. Fig. 7은 2003년도 모의된 하천유출량으로서, 그림에서 검정색은 일강수량, 회색은 월평균 강수량, 점선은 연평균 강수량을 나타낸 것이고, 아래 선들은 각각 일강수량, 월평균 강수량, 연평균 강수량에 대한 모의 하천유출량으로서 강수의 패턴이 그대로 잘 반영되는 것으로 모의되었다.

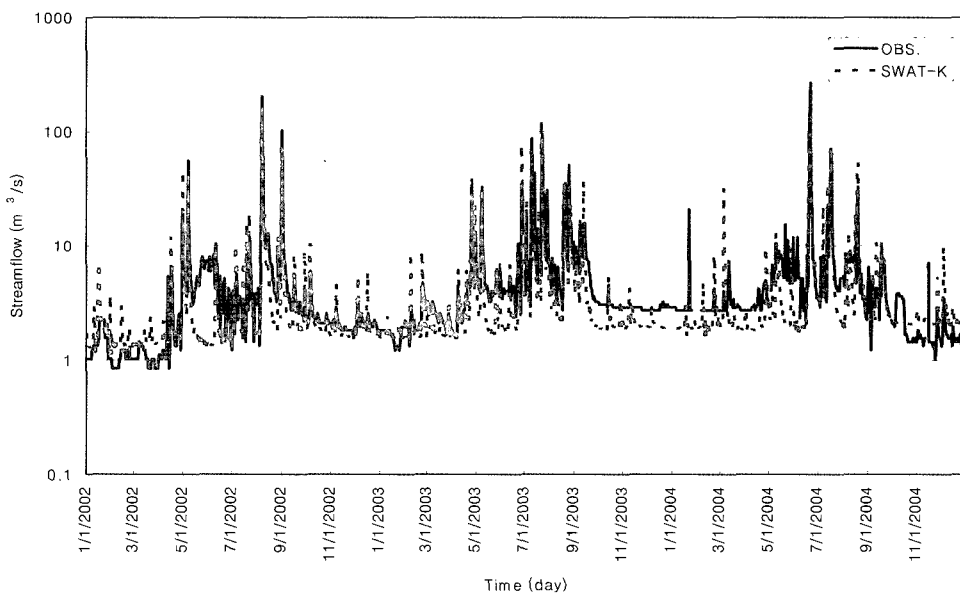


Fig. 6. Comparison of simulated streamflow with observed streamflow at Cheongju gaging point (2002-2004)

Fig. 8은 동일한 조건에서 침투량의 시계열을 나타낸 것으로 이 역시 강수의 패턴을 잘 따르고 있는 것을 알 수 있다. 주목할 점은 일 및 연평균강수에 대해서 침투가 발생하지만, 월평균 강수에 대해서는 침투가 발생하지 않는 기간이 존재하며, 선행강수의 영향으로 침투량이 크게 산정되는 기간도 발생하는 것으로 나타났다. 이는 강수의 시간적인 분포, 즉 집중해서 내리느냐 분산되어서 내리느냐에 따라 토양수의 시간적 분포양상이 상이하여 결과적으로 침투량에 차이를 나타내게 됨을 의미한다.

Fig. 9는 함양량의 시계열로서 강수의 시간분포에 따라 함양량의 크기, 함양 피크의 발생시기 및 크기, 그리

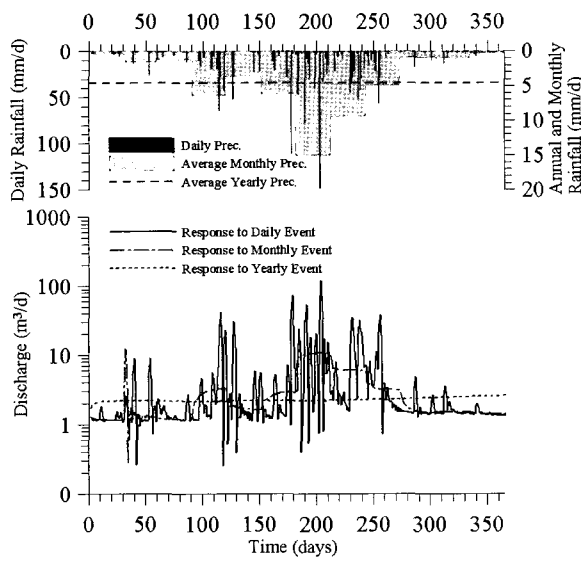


Fig. 7. Simulated streamflow with temporal variation of precipitation (2003)

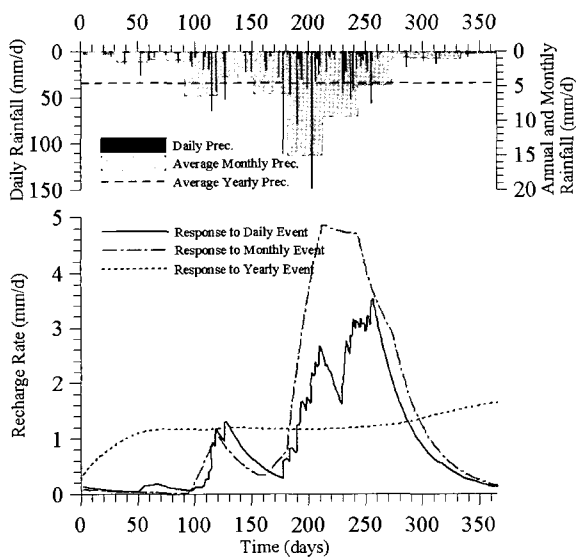


Fig. 9. Simulated recharge with temporal variation of precipitation (2003)

고 함양피크의 개수가 달라지고 있다. 침투량의 시계열과 비교해볼 때 함양과정의 지체현상을 분명하게 확인할 수 있다.

Fig. 10은 지하수 유출량의 시계열로서 일 강우량 및 월평균 강수량에 대한 지하수 유출의 감수, 함양의 증가로 인한 지하수위의 상승, 다시 완만한 감수 양상을 보이고 있으며, 특히 180일에서 210일 경에 일 강수에 대해서 하천에서 대수층으로의 물 유입의 발생으로 침예한 부분이 나타나고 있다. 지표수나 지하수모형만으로는 해결되지 않는 하천-대수층간의 경계유량을 고려한 유출해석이 가능해 짐으로써 지하수 유출량을 포함한 유역내 총 유출량의 신뢰성이 증대될 것으로 기대된다.

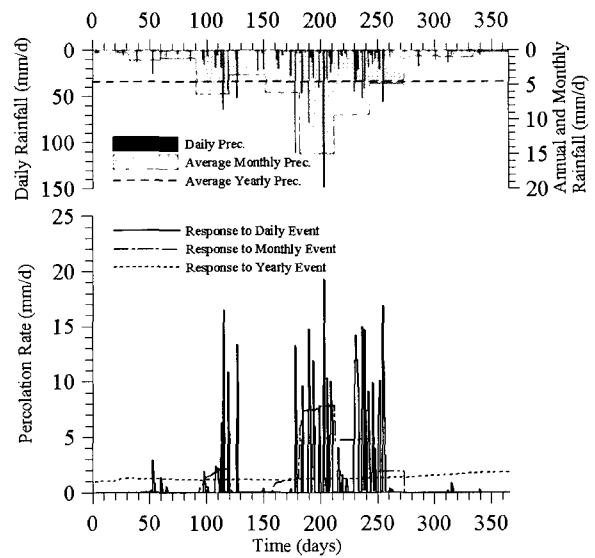


Fig. 8. Simulated percolation rate with temporal variation of precipitation (2003)

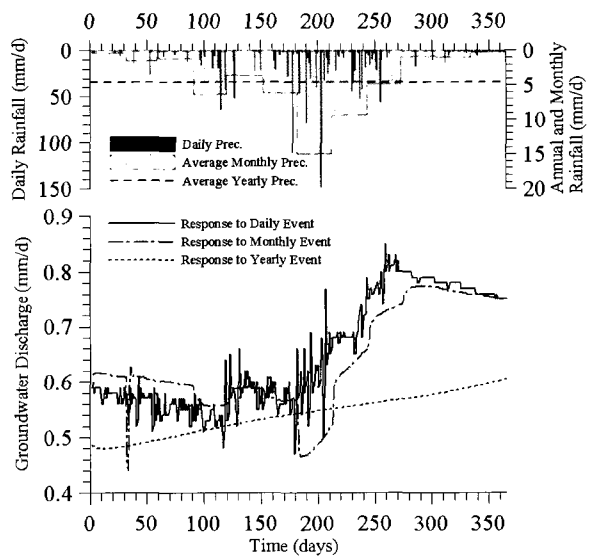


Fig. 10. Simulated groundwater discharge with temporal variation of precipitation (2003)

Fig. 11은 2003년 9월의 모의된 함양량의 공간적인 분포를 나타낸 것으로 좌측은 일 강수에 대해 우측은 연평균 강수에 대한 결과로서, 토지이용과 토양조건에 의한 공간적인 이질성이 그대로 반영되고 있으며, 공간적으로 작게는 월간 10mm, 크게는 월간 150mm를 초과하는 함양이 발생하고 있다. 강수의 시간적 분포에 따라 함양의 공간적인 분포양상 역시 확연하게 다르게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 12는 소유역별로 토양, 토지이용조건이 균질인 경우와 비균질인 경우에 대한 모의 함양량을 비교한 것이다. 역시 두 모의치 간에 전혀 다른 양상을 보이고 있

다. 본 통합모형은 균질인 경우와 같이 집중형(lumped) 개념의 모의 역시 가능하다.

Fig. 13은 월간 강수량 대비 월간 하천 유출량을 도시한 것으로 강수량 대비 약 70%의 유출률을 보이고 있다. Fig. 14는 월간 강수량 대비 월간 지표면 유출량을 도시한 것으로 강수량의 약 50%가 지표면 유출이 발생하였고, 지표면 유출이 발생하지 않는 한계강수량이 월간 약 30mm 정도로 분석되었다. 월간 강수량 대비 증발산량(Fig. 15)을 보면 단일의 선형관계가 나타나고 있지 않으며, 일사량, 일조시간의 증가로 더 많은 양의 증발산이 일어나고 있으나 (A), 장마철과 같이 강우량이 많

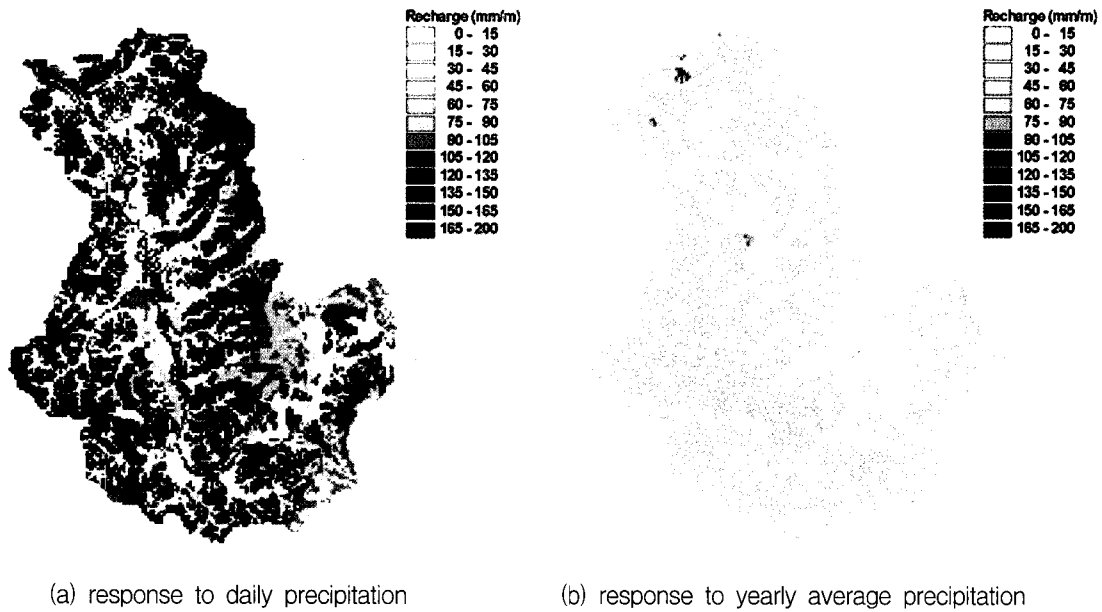


Fig. 11. Spatial distribution of recharge with temporal variation of precipitation (Sep. 2003)

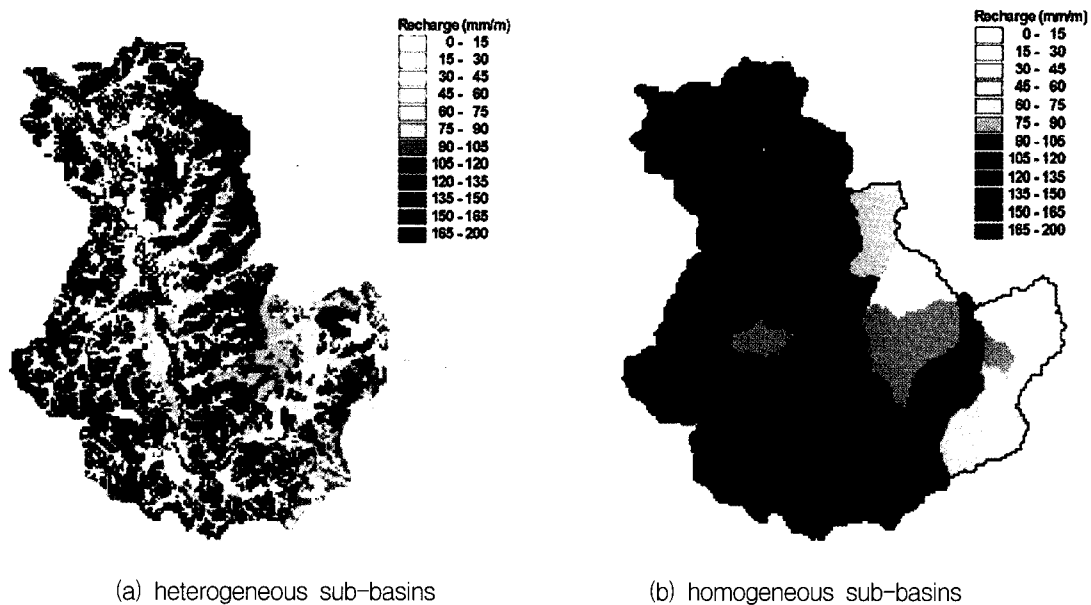


Fig. 12. Spatial distribution of recharge with spatial variation of land use and soil conditions

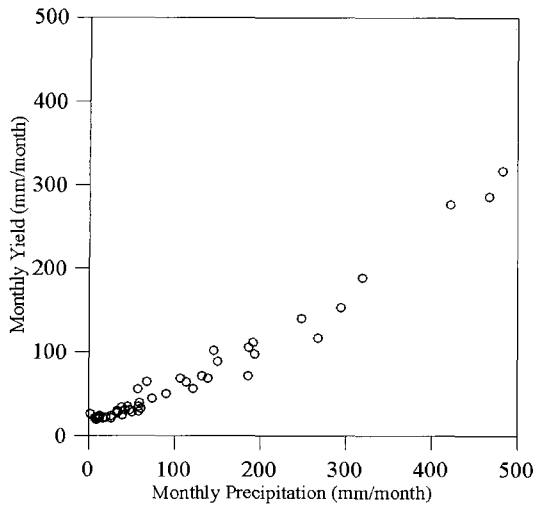


Fig. 13. Monthly streamflow as a function of monthly precipitation

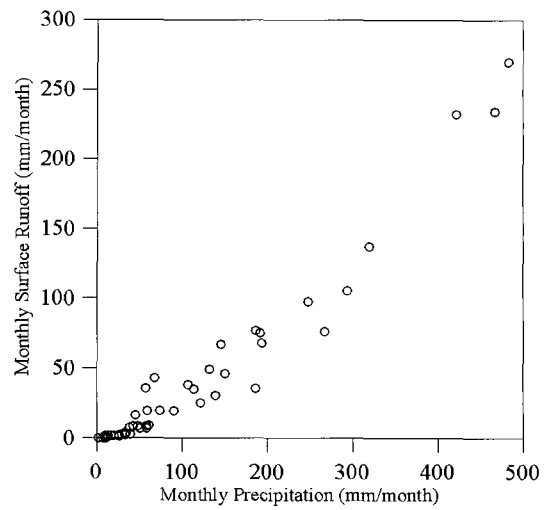


Fig. 14. Monthly surface runoff as a function of monthly precipitation

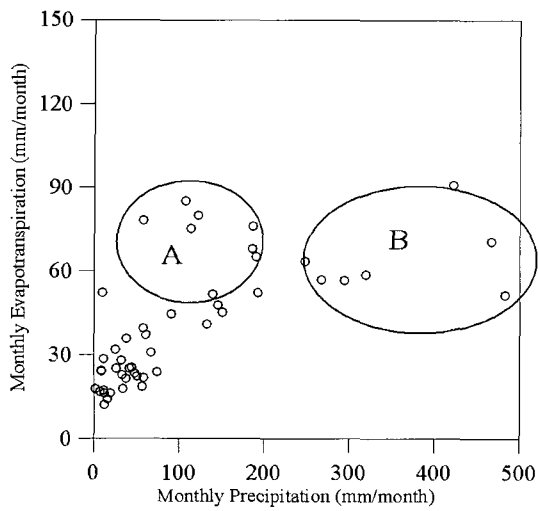


Fig. 15. Monthly evapotranspiration as a function of monthly precipitation

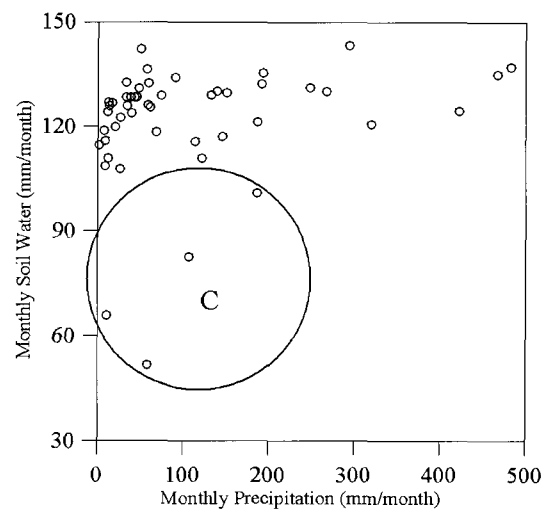


Fig. 16. Monthly soil water as a function of monthly precipitation

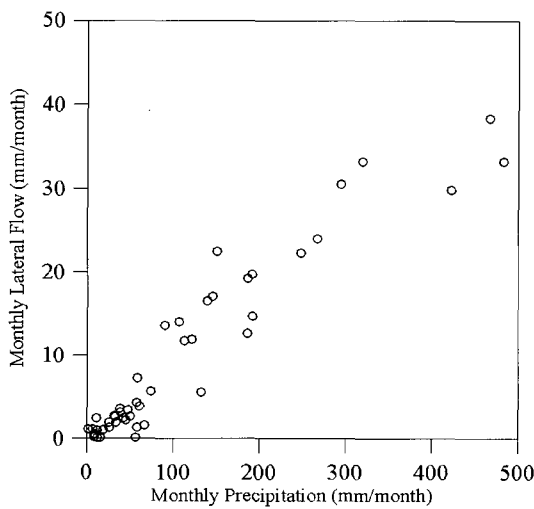


Fig. 17. Monthly lateral flow as a function of monthly precipitation

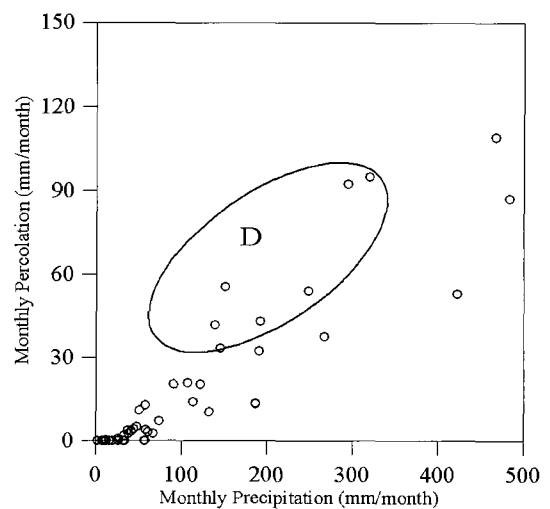


Fig. 18. Monthly percolation as a function of monthly precipitation

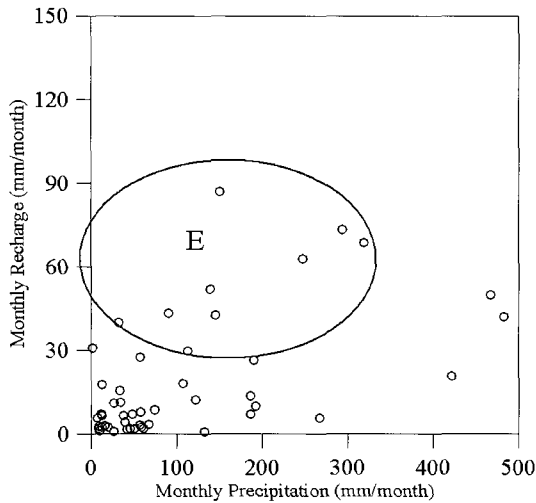


Fig. 19. Monthly recharge as a function of monthly precipitation

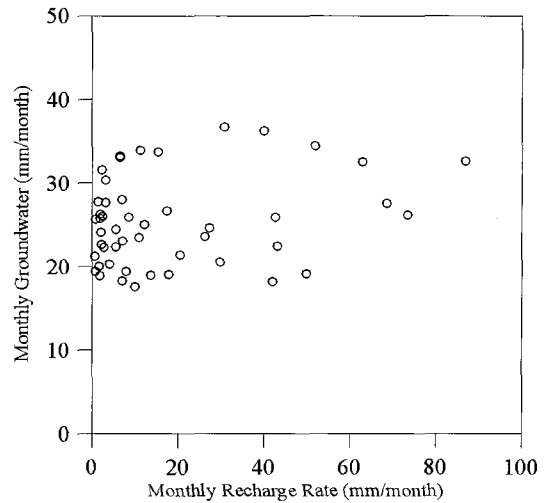


Fig. 20. Monthly groundwater discharge as a function of monthly recharge

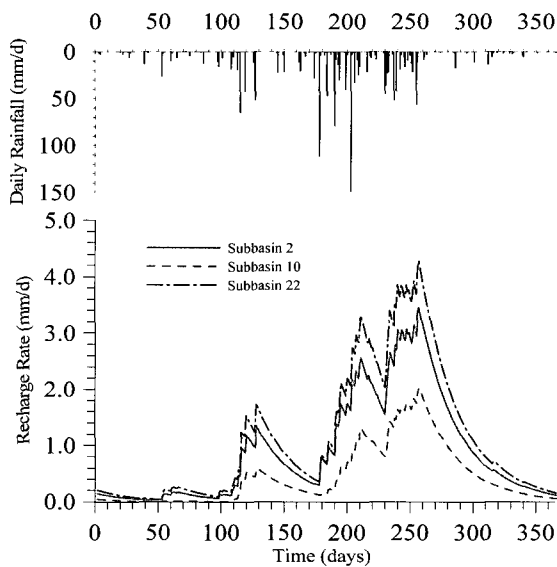


Fig. 21. Time-series of simulated recharge (subbasins : No.2, No.10, No.22)

은 우기에는 강수가 증가하더라도 일사량의 감소로 증발산량의 증가가 거의 일어나고 있지 않고(B) 있다. 월간 강수량 대비 토양수량(Fig. 16)은 5, 6월과 같이 강수량에 비해 일사량이나 일조시간이 큰 경우에는 증발산량의 증가로 낮은 값을 보이는 경우가 발생(C)하였다. 강수의 약 8% 정도가 토양층을 통해 측방유출의 형태로 하천으로 회귀되는 것으로 모의되었으며(Fig. 17), 강수의 약 20% 정도가 연직 아래로 침투되는 것으로 모의되었다(Fig. 18). 선행강수가 많거나 충분한 강수가 비교적 장기간에 걸쳐서 내린 경우(D)에는 다소 크게 산정되었다. 즉, 침투량은 강수의 규모뿐만 아니라, 시간적인 분포에 민감한 것으로 분석되었

다. Fig. 19와 같이 강수량 대비 함양량도 약간의 증가 양상을 보이고 있으나, 동일 강수량 규모에 대해서도 편차가 큰 것을 볼 수 있다. 함양이 큰 경우(E)는 이전 달의 영향이 나타나는 것이며 함양의 지체를 나타내는 것이다. 함양량 대비 지하수 유출량(Fig. 20)은 완만한 증가 양상을 보이고 있으며, 동일 함양량에 비해 지하수 유출이 많은 것은 2003년과 2004년과 같이 연간 함양량이 타 년도에 비해 커서 지속적인 함양량의 증가로 지하수위가 올라간 상태가 반영되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 21은 2번, 10번, 22번 소유역에 대한 함양량의 시계열로서 시간적으로뿐만 아니라 지역적으로도 함양의 크기가 상이한 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 22와 같이 2003년 7월, 8월, 9월, 10월 함양량의 시공간적 변화를 확인할 수 있다. 우측 지역과 같이 산지가 많은 곳임에도 불구하고, 함양량이 상대적으로 작은데, 이는 지형경사가 급하여 토양수대를 통한 중간유출 성분이 타 지역에 비해서 크고, 수문학적 토양군이 Type C로 분류되어 지표면 유출이 크게 발생하는 곳이며, 또한 이 지역은 거의 대부분이 토양수 보수능이 비교적 큰 “대산”이란 토양층으로 구성되어 결과적으로 연직으로의 침투량이 작아진데서 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 선행연구(김남원 등, 2006)에서도 이미 밝힌 바 있다.

Fig. 23은 소유역별 연간 모의 함양량으로서 소유역간 연간 100mm가 넘는 편차가 발생하고 있으며, 10번, 11번, 17번, 29번 소유역에서 상대적으로 작은 함양이 일어나고 있어 유역특성의 비균질성과 함양량의 관계를 확인할 수 있었다.

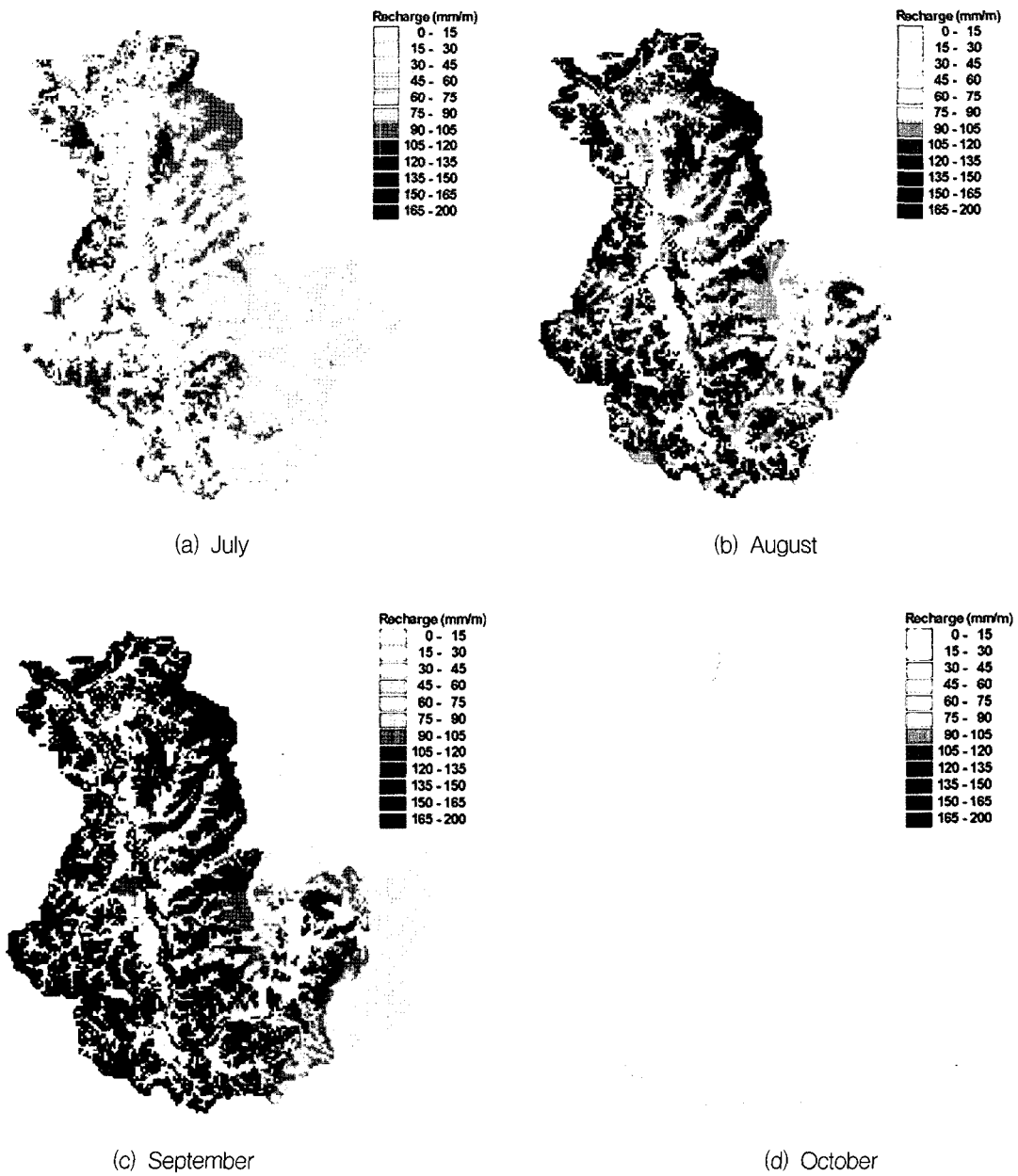


Fig. 22. Temporal-spatial distribution of simulated recharge (2003)

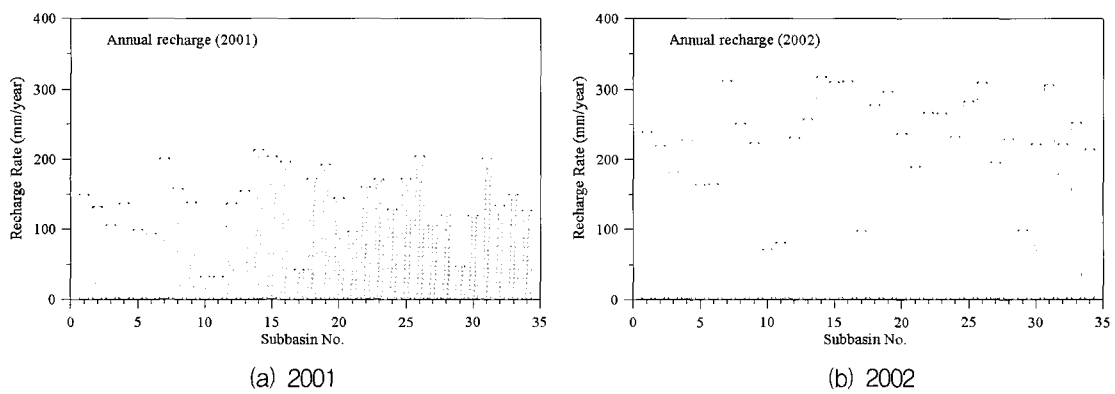
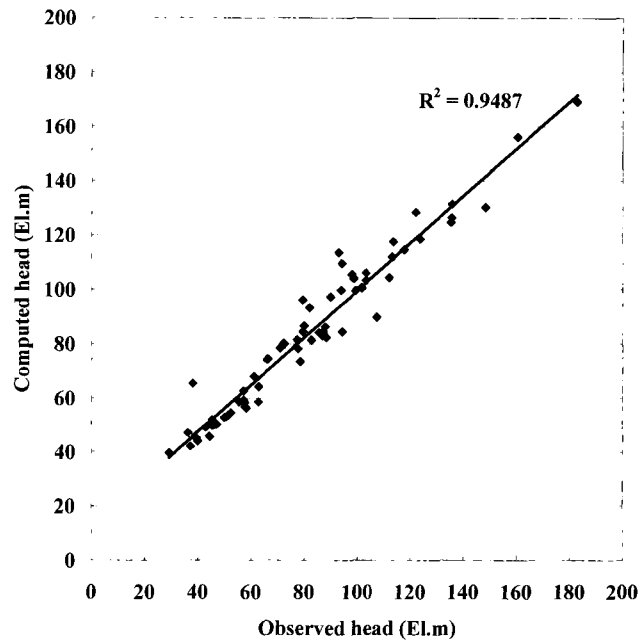
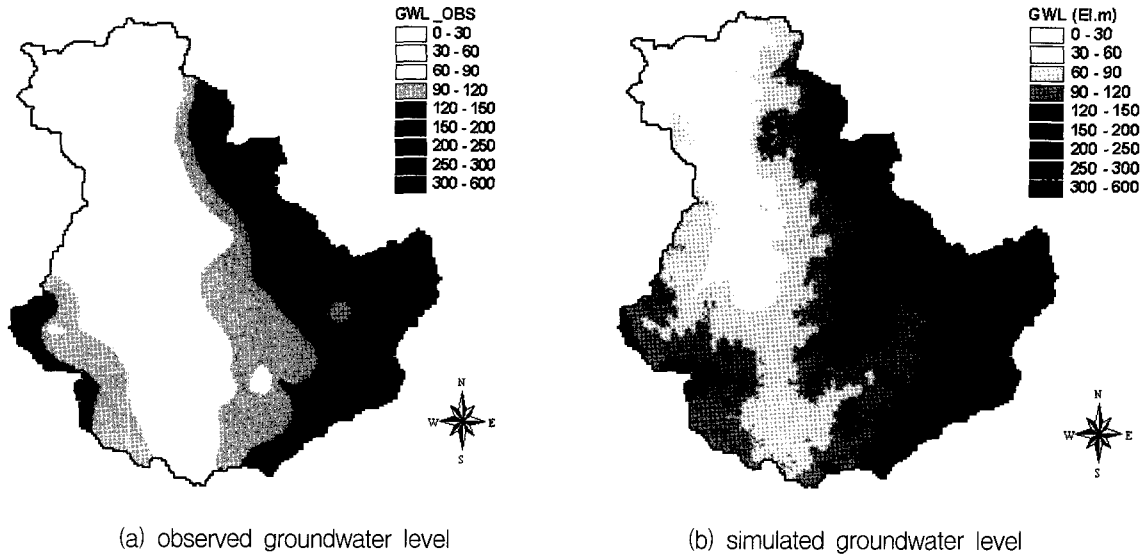


Fig. 23. Simulated annual recharge for subbasins



(c) coefficient of determination
Fig. 24. Comparison of observed and simulated groundwater levels (July 2005)

Fig. 24는 관측지하수위와 모의지하수위의 분포도를 비교한 것이다. Fig. 24(a)에 나타난 관측지하수위의 공간적인 분포도는 청원·청주 지하수 기초조사 보고서 (건설교통부 등, 2006)에서 수행한 제 1차 장기관측자료 (2005년 7월 4일 - 7월 8일)를 이용하여 크리깅 기법에 의해 공간 분포시켰다. 실제 관측 지하수위는 약 El. 300m 이내에서 계측되었으며, 그림에서 지하수위의 공간적인 편차를 보다 명확하게 나타내기 위해서 범례에서 지하수위 간격을 불균등하게 설정하였다. Fig. 24에서 보이는 바와 같이 전반적인 지하수위의 고저분포의

경향은 유사하게 나타나고 있으며, 결정계수는 약 0.95로 높게 나타나 모의치가 실제 지하수위의 분포양상을 양호하게 구현하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 무심천 유역의 수문과정해석에 적용한 것으로 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강수의 시간적 분포에 따른 수문성분량의 응답 변

화 특성, 강수대비 각 수문성분량의 관계, 함양량과 지하수위의 시공간적인 분포 특성 등을 제시하였다.

- 2) 토지이용 및 토양조건의 이질성으로 인하여 월간 함양량은 지역적으로 작게는 10mm/월에서 크게는 150mm/월로 공간적인 편차가 크게 발생한 것으로 모의되었으며, 함양량은 수문조건 뿐만 아니라 지형인자에도 지배되는 것을 확인하였다.
- 3) 청주수위관측소 지점에서의 관측유량과 모의유량을 비교한 결과, 실측치와 모의치간의 결정계수가 약 0.75로서 모형의 적합도가 양호한 것으로 평가되었고, 특히 갈수기 완만한 기저유출량 시계열을 잘 모사할 수 있었다.
- 4) 관측지하수위와 모의지하수위의 비교를 수행한 결과, 전반적인 지하수위의 고저분포의 경향은 유사하게 나타나고 있으며, 결정계수는 약 0.95로 높게 계산되어 모의치가 실제 지하수위의 분포양상을 양호하게 구현하였다.

결론적으로 SWAT-MODFLOW 통합모형의 활용을 통해서 하천-대수층간의 경계유량을 고려한 유출해석이 가능해짐으로써 모의 유출량의 신뢰성이 증대될 것으로 판단되며, 하천유출량, 지하수 함양량 등 유역의 분포형 수문성분량과 지하수위의 지역적, 계절적 특징을 파악할 수 있어 우리나라 수자원계획 및 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 2단계 연구사업(과제번호 2-2-2)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

건설교통부 (2002), 지하수 관리 기본계획.
 건설교통부, 한국수자원공사, 대한광업진흥공사 (2006), 청원·청주지역 지하수 기초조사 보고서.
 김남원, 정일문, 원유승 (2006). 완전연동형 SWAT-

MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출 모의, **대한토목학회 논문집**, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.

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 적용, **한국수자원학회 논문집**, 제37권 제6호, pp. 509-515.
 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주 (2006). 시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정, **지하수도양환경학회 논문집**, 제11권 제5호, pp. 9-19.
 한국건설기술연구원 (2006). **지표수 수문성분 해석시스템 개발 - 2단계 2차년도 연구보고서**, 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*. Vol. 142. pp.47-69.
 Arnold, J. G., Williams, J. R., and Maidment, D. R. (1995). “Continuous-time water and sediment-routing model for large basin.” *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 121. No. 2, pp. 171-183.
 Danish Hydraulic Institute (1999). *MIKE SHE Water Movement User Manual*.
 Kinouchi, T. and Jia, Y. (2003) WEP Model의 개발과 적용. **한국수자원학회지**, 제36권, 제5호, pp.48-58
 McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model*. Techniques of Water Resources Investigations Report, U.S. Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 528 p.
 SDI Environmental Service, Inc. (1997). *Water Resource Evaluation and Integrated Hydrologic Model of the Central Northern Tampa Bay Region*, Final Report ISGW/CNTB Model SDE Project No. WCF-690, Prepared for West Coast Regional Water Supply Authority, Clearwater Florida.
 (논문번호:07-07/접수:2007.01.25/심사완료:2007.05.07)