韓國水資源學會論文集
第42卷 第1號・2009年 1月
pp. 21～31

DOI: 10.3741/JKWRA.2009.42.1.21

유역단위 지표수-지하수 상호작용의 시공간적 변동분석

Analysis on the Spatial-temporal Variation of Surface-groundwater Interaction on the Watershed Basis

김 남 원* / 유 상 연** / 정 일 문*** / 이 정 우****

Kim, Nam Won / Yoo, Sang Yeon / Chung, Il Moon / Lee, Jeong Woo

Abstract

The characteristics, intensity and direction of groundwater - surface water interactions are controlled by groundwater head gradients, hydraulic conductivity and by the riverbed geometry. As a result of the spatial heterogeneity of these factors and the subsequent variability of the impact of these interaction processes, the water balance is also characterized by highly variable spatial patterns and temporal dynamics. However, spatially detailed studies concerning the spatio-temporal variability of the extent and intensity of surface-groundwater interactions have been limited to the investigation of cross-sections or small stream reaches. Thus, the extensive study on the watershed based interaction between surface water and groundwater is to be analyzed. In this study, the intensity and the spatial extent of interactions along the stream were found by using integrated SWAT-MODFLOW model. This integrated modeling approach was applied to Anyangcheon watershed in Korea. The effluent stream characteristics were found in the watershed, namely, baseflow was annually discharged except heavy rainy periods. The intensity and the spatial extent of surface-groundwater interactions in different sub-watersheds were found on a daily basis. The influential extent of surface-groundwater interaction become larger as the watershed elevations are lower.

keywords : Surface-groundwater interactions, SWAT-MODFLOW, Spatial-temporal variability, Intensity and spatial extent of interactions

요 지

지표수-지하수 상호작용의 특성과 강도 및 방향은 지하수두, 수리전도도와 하상지형에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 요소들은 공간적으로 매우 불균질하여 결과적으로 상호작용은 유역 전체 물수지에도 영향을 준다. 그러나 지표수-지하수 상호작용의 시공간적인 범위나 강도에 관한 조사 및 연구는 매우 제한적이며 대개 작은 하천 구간의 단면해석으로만 치우쳐 유역기반의 지표수-지하수 상호작용에 대한 포괄적인 연구가 필요한 시점이다. 본 연구에서는 완전연동형 지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW를 안양천 유역에 적용하여 하천과 대수층의 상호작용의

* 한국건설기술연구원 수문연구실 책임연구원
Researcher fellow, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea
** 한국건설기술연구원 수문연구실 연구원
Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea
*** 교신저자, 한국건설기술연구원 수문연구실 선임연구원
Corresponding Author, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea
(e-mail: imchung@kict.re.kr)
**** 한국건설기술연구원 수문연구실 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea

범위와 강도를 분석하였다. 분석결과 안양천 유역은 강수집중 기간을 제외하면, 연중 기저유출의 공급으로 인해 이득하천의 특성을 잘 나타내는 것으로 나타났으며, 지표수-지하수 상호작용의 영향범위는 표고가 낮은 하류로 갈수록 점점 커지는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 지표수-지하수 상호작용, SWAT-MODFLOW, 시공간적 변동성, 상호작용의 강도와 공간범위

1. 서 론

유역에서 지하수는 갈수기에 하천으로 흐르는 지표수의 주요 공급원이 되고 홍수기에는 지표수가 지하수로 함양되어 지하수위에 영향을 끼치는 등 지표수와 지하수는 따로 분리하여 생각할 수 없는 상호 연결성을 가진다(Winter, 1999). 따라서 지표수와 지하수 어느 한쪽이 오염되거나 개발이 될 경우 상호간에 영향을 주며 이는 수자원의 관리측면에서 매우 중요하다(하규철 등, 2006).

최근 미국, 독일, 스위스 등을 중심으로 지표수-지하수 연계 해석에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 지표수와 지하수의 상호작용은 포화된 하상 하부와 인접한 하도내에 혼합대(hyporheic zone)를 창출하는데 그 안에서의 거동을 분석하는 연구가 진행되어 왔다. 혼합대는 하천과 지하수 의존형 생태계에 영향을 주며 하천변 식생의 성장에도 관여를 한다(Fisher *et al.*, 1998). 이와 같이 하천 생태계에 영향을 주는 지하수의 역할은 대부분 하천으로 유입되는 지하수량에 지배된다. 따라서 하천의 수문학적, 화학적 변화의 기준은 강수시 토양층으로 침투되어 하천변으로 이동하는 지하수 흐름에 따라 결정된다. 홍수기에 하천의 유출이 크게 증가될 때에도 강수로 인해 토양과 지반층으로 유입된 지하수는 하천과의 상호작용을 통해 흐름에 영향을 준다(Buttle, 1994).

수문학적 측면에서는 강수량이 적은 기간 동안 지하수로부터 기저유출이 생기고, 많은 하천에서 이러한 지하수의 유출이 연간 유출의 대부분을 차지한다. 반대로, 강수량이 많은 경우에는, 지표유출과 중간유출이 점차 증가하여 하천 수위가 상승되어 하천수가 제방을 통해 침투된다(Matthess, 1983). 한편 혼합대의 유동 특성뿐만 아니라 오염문제에 대한 관심이 높아져 혼합대와 지표수 및 지하수 수질 변화와의 관련성을 분석하는 연구도 수행되고 있다(Rassam and Knight, 2007).

또한 Krause *et al.*(2007)은 하천수와 지하수 수두는 시·공간적으로 복잡하게 변화하며 하천의 기하학적인 특성에 의존하는 전도계수의 경우도 공간적인 다양성이 존재한다고 하였고 이런 다양성은 하천변의 수문생태학적 측면에서 매우 중요한 역할을 한다고 하였다.

이길성 등(2006a)은 안양천 지역에 SWAT을 적용하여 유황곡선을 도출하고 이를 바탕으로 갈수량과 필요수량의 비교를 통해 하천유지유량을 산정하였다. 각 소하천에서의 지하수 취수가 하천수 감소에 영향을 미치고 실제 하천수량이 하천정비기본계획에서 제시된 하천유지유량보다 매우 적어 지류하천의 하천유지유량 산정의 문제점을 제시하였다. 또한 이길성 등(2006b)은 안양천 중상류 지역에 대한 물수지 분석을 통해 안양천 지역 건천화의 현황과 이를 방지하기 위한 지속가능한 수자원 계획등을 수립하여 안양천 지역의 물순환 개선의 효과를 분석하였다.

본 연구에서는 안양시를 통과하는 대표적인 도시하천인 안양천 중상류 유역을 대상으로 완전연동형 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW을 사용하여 지하수 유출입량을 평가하였다. 이는 기존에 사용된 Darcy의 법칙, 침윤계를 이용한 직접측정법, 추적자법 등의 방법(Corbett *et al.*, 2000)등과는 차별화된 방법으로 유역내의 시공간적으로 변화하는 교환량에 대해 매우 실질적인 정량적 접근법을 적용한 것이다.

2. 연구 방법

본 연구에서 사용한 SWAT-K모형은 미 농무성에서 개발한 준 분포형 장기유출모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형(Arnold *et al.,* 1993)을 우리나라 실정에 맞도록 개선한 모형이다. 그 중에서 본 연구에서 사용된 SWAT-MODFLOW 모형은 MODFLOW를 SWAT내의 호출프로그램으로 결합한 완전연동형 모형으로서 SWAT에서 HRU(Hydrologic response units)별로 발생하는 지하수 함양량을 MODFLOW의 입력자료로 이용하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 지하수 흐름을 산정하고 MODFLOW의 River 패키지를 이용, 지표수-지하수의 교환량을 계산하는 지표수-지하수 통합해석 모형이다(김남원 등, 2004a and 2004b). SWAT-MODFLOW모형은 유역규모에 따라 다양한 시험적용을 수행하였으며 지표수-지하수 연계모형으로의 타당성이 입증된 바 있다(김남원 등, 2006; Kim *et al.,* 2008).

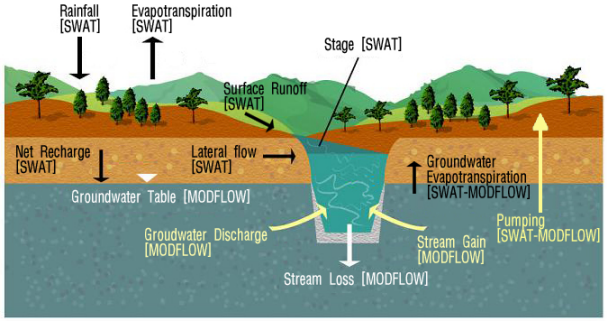


Fig. 1. Concept of River-Groundwater Interaction (Kim *et al.*, 2008)

3. 대상 유역 현황

대상 유역은 안양천의 중상류 유역으로 Fig. 2와 같이 시흥대교를 유역 출구점으로 하고 서울의 남서쪽에 위치하고 동경 126° 52′ ~127° 03′, 북위 37° 19′ ~ 37° 27′이다. 대상유역은 안양시를 포함하고 안양시 북쪽 끝에는 관악산(冠岳山:629 m), 동쪽 끝에는 청계산(淸溪山:618 m), 남서쪽 끝에는 수리산(修理山:475 m) 등이 있어 중앙은 낮고 평탄하며(EL. 31 m) 유역 외곽이 산지로 둘러싸인(EL. 250 m) 평균표고 EL. 93 m의 타원형 분지 지형을 이룬다.

한강의 제1지류인 안양천은 한강의 지류 가운데 중랑천 다음으로 큰 하천이며 안양천 유역 내에 있는 하천들은 국가하천과 지방 2급 하천들이다. 대상 유역은 본류인 안양천을 비롯하여 왕곡, 오전, 산본, 당정, 학의, 청계사, 갈현, 수암, 삼성, 삼막, 삼봉천등 총 11개의 지방 2급 하천이 흐르고 유역면적 140.72 km^2, 주 하도연장은 56 km인 지역이다. 대상 유역 내에는 안양과 남면 강우관측소가 유역 외에는 낙생 강우관측소가 위치하며 유역에 영향을 미치는 기상관측은 서울과 수원 관측소의 자료를 이용하였다. 또한 지표수 관측을 위한 안양, 시흥 수위관측소와 지하수 관측을 위한 군포당정, 안양비산 지하수 관측소가 유역내에 위치하고 있다(신문주, 2006). 각 관측소에 대한 정보는 다음 Table 1과 같다.

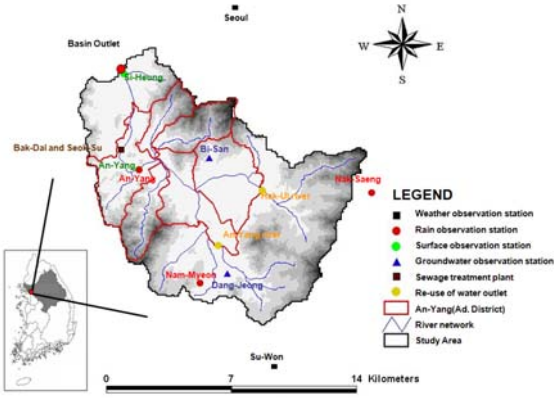


Fig. 2. Description of the Study Watershed (Anyang river)

대상 유역에 영향을 미치는 기상자료로는 서울과 수원기상관측소의 자료를 이용하였다. 최근 5개년(2002~2006년)의 기상자료를 보면 연평균 강우량의 경우 서울은 1,587.5 mm 수원은 1,349.1 mm, 연평균 기온은 서울 12.8℃, 수원 12.3℃이고 연 최대풍속은 서울 11.7 m/sec, 수원 15.3 m/sec로 나타났다. 연 증발량은 서울 1,099.8 mm, 수원 1,080.5 mm로 각각 나타났으며 월별 증발량은 5월과 6월에 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 연평균상대습도는 서울 61.9%, 수원 63.2 %로 각각 나타났으며 월별상대습도는 7월 달이 가장 높은 것으로 나타났다.

Table 1. Information of Observation Station

Observation station		Location		Elevation (m)	Competent authority
		Latitude	Longitude		
Weather	Seoul	36-38-11.0	127-26-34.2	57.4	KMA
	Su-Won	37-16-09.7	126-59-14.2	33.6	KMA
Rainfall	An-Yang	37-24-06.8	126-54-19.7	27.0	MLTM
	Nam-Myeon	37-20-41.2	126-56-39.3	40.0	MLTM
	Nak-Saeng	37-23-25.3	127-03-09.3	40.0	MLTM
Water Table	Si-Heung	37-26-58.0	126-53-49.0	16.2	MLTM
	An-yang	37-24-06.8	126-54-19.7	27.0	MLTM
Groundwater	Bi-San	37-24-29.0	126-56-59.0	49.7	MLTM
	Dang-Jeung	37-20-59.0	126-57-41.0	47.7	MLTM

주) KMA: Korea Meteorological Administration(기상청)
MLTM: Ministry of Land, Transport and Maritime affairs(국토해양부)

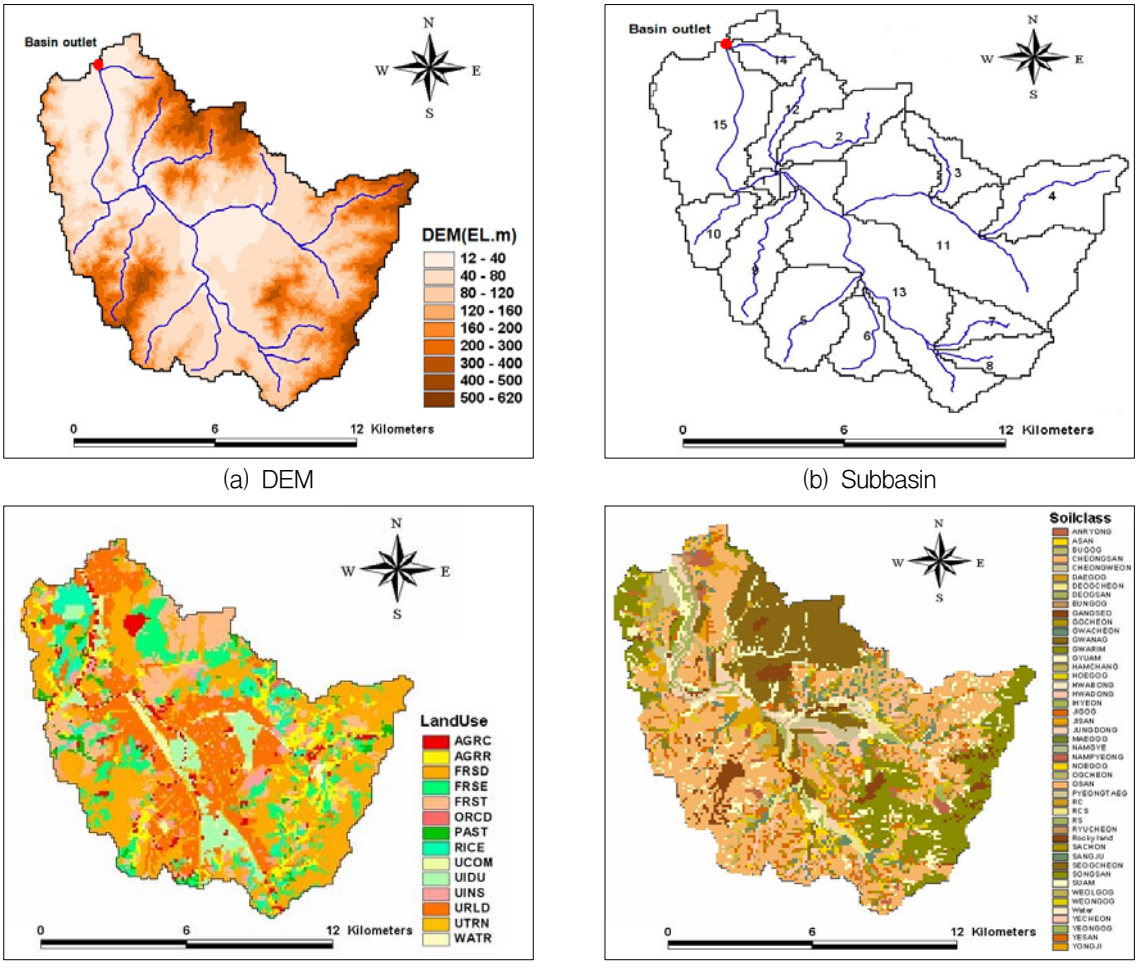
대상 유역은 도심 지역으로 일정한 하수 방류수의 양이 발생한다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 박달 및 석수 하수처리장에서 하수를 방류하고 있고 학의천 인덕원 초등학교 앞과 안양천 장례예식장 앞에서는 하수 재이용수가 방류되고 있다. 박달 하수처리장은 1995년 준공되어 하수를 처리하고 있으며 석수 하수처리장은 2003년에 준공되어 하수처리기능을 수행하고 있다. 본 연구에서는 2003년부터 2006년까지의 하수 방류량(연평균 약 360,000 ㎥/day)과 하수 재이용수량(연평균 약 32,000 ㎥/day)을 고려하였다.

3.1 SWAT의 입력자료

SWAT 모형의 기본 입력자료인 수치주제도에는 DEM, 토지피복도, 토양도 등이 요구된다. 대상유역의 격자크기와 소유역 분할 개수는 유출량에 큰 영향을 미치지 않는다는 연구결과(Chaplot, 2005)에 따라 대상유역의 DEM은 1:25,000수치지도에서 추출한 100 m 격자크기로 리샘플링하여 구축하였으며, 대상유역은 모두 15개의 소유역으로 구분하였다(Figs. 3(a) and 3(b)). 토지피복도는 환경부에서 제공하는 토지피복 중분류를 사용하였으며, 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도를 이용하여 토양통으로 분류하여 구축하였다(Figs. 3(c) and 3(d)).

안양천 중상류 유역의 토지이용도를 분석해보면 산림지역(활엽수, 침엽수, 혼합림)이 50% 도심지역이 20%, 농경지가 10%를 차지하고 있다. 토양도의 경우 주로 구릉지와 산악지에 많이 분포하고 있는 오산통이 20%, 암반층의 발달이 잘되어 있는 관악통이 10%, 편마암계통의 송산통이 10%를 차지하고 있다. 전체적으로 비교적 투수성이 양호한 오산통이 분포하며 유역 북쪽의 관악산 지역의 관악통과 동쪽 청계산 지역의 송산통이 대표적인 토양통으로 분포하고 있다.

구축된 토지피복도나 정밀토양도의 경우 공간적인 분포만을 나타내고 있으며, 분류항목별 속성값을 정의해 주어야 한다. 토지피복도의 경우, SWAT내의 crop.dbf를 이용하여 토지피복 속성값을 정의하였다.



(a) DEM (b) Subbasin

(c) Landuse (d) Soil class

Fig. 3. SWAT Input Data

토양도의 경우, 농업과학기술원에서 제공하고 있는 각 토양통별 토양층 개수, 층별 깊이, 자갈, 모래, 실트, 점토 비율 등을 이용하였다. 토양의 수문학적 그룹은 정정화 등(1995)의 결과를 이용하였다. 이러한 방법으로 구축된 usersoil.dbf를 이용하여, 토양통별 속성값을 정의하였다.

3.2 SWAT-MODFLOW의 입력자료

지하수 모델링은 지하수 해석 모델인 MODFLOW를 SWAT과 완전 연동시킨 SWAT-MODFLOW를 이용하여 일단위로 모의하였다. SWAT-MODFLOW는 지하수 흐름 모의를 위해 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT에서 추출하여 MODFLOW로 입력하고, 하천과 대수층간의 수위차에 비례하는 순 유출입량으로부터 지하수유출량을 계산하여 다시 SWAT으로 전달함으로써 두 모형간의 연계가 매시간단계별로 이루어지게 된다.

대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 2개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 설정하였다. 충적층 및 암반층의 공간적인 분포는 해당 유역내 포함되는 국가지하수 관측망 2개소 및 안양지역 지하수 기초조사 보고서(2008)의 지하수 시추조사 자료, 양수시험시 굴착깊이 등을 이용하여 각 층의 바닥고를 지구통계학적 방법인 Linear model을 이용한 Kriging 기법을 이용하여 유역 전체의 지하수위의 분포를 나타내었다. 또한 각 지층의 수리 특성인자들 역시 기초조사 보고서의 내용을 토대로 공간분포값을 입력자료로 활용하였다.

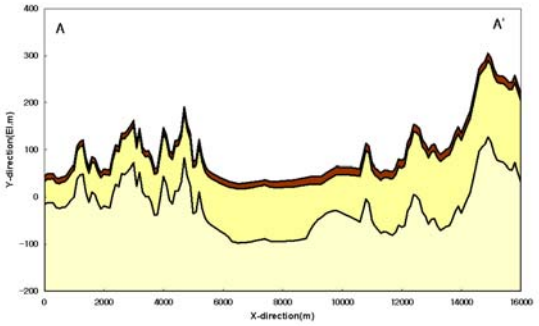
모델 영역은 가로 16,100 m, 세로 15,500 m로 면적 249.55 km^2이고, 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려한 140.72 km^2, 모델 격자는 155행, 161열, 3층으로 구성되며 수평방향 격자 한 개의 크기는 100 m × 100 m이다(Fig. 4(b)). 또한 지하수 분수령이 유역의 경계와 같다고 가정하여 유역 경계는 No-flow Boundary로 설정하였다(Fig. 4(a)). 하천셀은 MODFLOW의 River패키지를 이용, 시간종속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

4. 모형의 적용

4.1 연구 방법

SWAT-MODFLOW를 이용하여 모의된 하천 유출량, 지하수위의 보정 및 검증 과정을 통하여 모델링 결과의 타당성을 입증하였다. 모델을 이용한 총 유출량의 보정 및 검증 결과는 다음과 같다. 2003년~2004년의 기간을 보정기간으로 활용하였으며 관측자료가 없는 1-3월과 11-12월의 갈수 기간은 보정과정에서 제외하였다.

a) River cell
(Head dependent boundary condition)



b) Cross section along A-A´

Layer	Hyd. Con. (m/day)	Average Thickness(m)	Aquifer
1layer	0.5-1.0	13.5	Unconfined
2layer	0.01-0.17	106.0	Confined
3layer	0.001	177.4	Confined

c) Hydrogeologic parameter

Fig. 4. SWAT-MODFLOW Input Data

모형의 효율성을 나타내기 위해 결정계수(R^2)과 모형 효율성 계수인 Nash-Sutcliffe model efficiency(ME)를 사용하여 결과를 검증하였다. 결정계수는 0.0 ~1.0 범위의 값을 가지며, 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한다. 또한 모형 효율성 계수는 무작위 오차를 평가하는 결정계수와 달리 오차의 정도를 나타내기 위해 사용하였다. 모형의 효율을 평가하기 위해서 사용한 결정계수(R^2)와 모형 효율성계수(ME)는 다음 Eq. (1)과 같이 계산 한다.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Q_o(i) Q_p(i) - \overline{Q_o}\,\overline{Q_p}}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_o(i))^2 - (\overline{Q_o})^2\right)\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_p(i))^2 - (\overline{Q_p})^2\right)} \right]^2$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_o(i) - Q_p(i))^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_o(i) - \overline{Q_o})^2} \quad (1)$$

$Q_o(i)$는 관측값, $Q_p(i)$는 모의값, $\overline{Q_o}$는 관측값의 평균, $\overline{Q_p}$는 모의값의 평균이다. 보정과정에서 사용된 매개변수는 지표수와 관련하여 CN_2, SOL_AWC, ESCO등이 사용되었고 지하수와 관련해서는 GW_DELAY 변수와 저류계수 S, 하천 바닥 퇴적층의 전도계수 C_{riv}와 관련된 K/M값을 모델보정에 사용하였다(Table 2).

지표수-지하수 교환량은 보통 두가지 경우로 계산된다. 하나는 지하수의 수두 h가 하천 바닥 R_{bot} 보다 높은 경우이고(Eq. (2)) 다른 하나는 하천 바닥 보다 낮은 경우이다(Eq. (3)).

$$Q_{riv} = C_{riv}(h_{riv} - h) \quad \text{for } h > R_{bot} \quad (2)$$

$$Q_{riv} = C_{riv}(h_{riv} - R_{bot}) \quad \text{for h} < R_{bot} \quad (3)$$

$$Q_{riv} = K_{riv} \times \mathrm{L}(W_{riv}/M_{riv}) \quad (4)$$

Q_{riv}는 교환량, C_{riv}는 하천-대수층간 전도계수(Eq. (4)), h_{riv}는 하천수의 수두, h는 지하수 수두, R_{bot}는 강바닥의 저면표고, K_{riv} 하천바닥층의 투수계수, L 하천 길이, W_{riv} 하천 폭, M_{riv} 혼합대 두께이다. 따라서 교환량은 하천수와 지하수의 수두차이와 전도계수 C_{riv}에 의해 결정된다.

4.2 모형의 검보정 결과

유역내 물수지를 고려한 유출량 보정을 위해 출구점의 총 유출량의 값을 비교하였다. 유역 출구점인 시흥대교에 위치한 시흥수위관측소의 관측값과 모의값을 비교한 결과 결정계수(R^2)는 0.70정도로 적합했고 모형 효율성계수(ME)는 0.69로 비교적 양호하였다. 또한 2005년에 하천 유출량에 대한 모형의 검증을 하였고 그 결과 결정계수(R^2)는 0.74, 모형 효율성계수(ME)는 0.68로 나타났다(Figs. 5(a) and 5(b)).

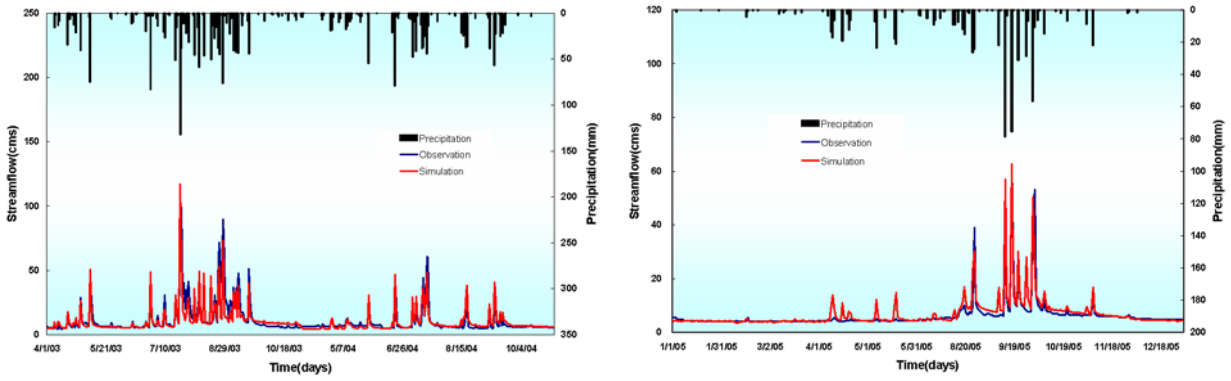
앞서 설명한 바와 같이 안양천 중상류지역은 하천건천화 방지를 위해 하수 재이용수와 하수처리 방류수가 방류되고 있어 갈수기에 유량은 비교적 잘 맞지만 홍수기 유량의 경우 모의값이 다소 낮게 나타났다.

지하수 흐름계를 결정하는 주요 수리 특성인자로서 대수층의 수리전도도 및 저류계수, 하천 바닥 퇴적층의 전도계수, 대수층 두께, 경계조건 등이 있다. 이 중에서 시추자료와 양수시험 등을 통하여 얻은 대수층 두께, 수리전도도는 가급적 변화시키지 않고, Table 2에 나타난 바와 같이 함양지체시간 GW_DELAY, 저류계수 S와 전도계수비인 K/M값을 변화시키면서 지하수위 보정을 실시하였다.

모델 보정의 기준은 안양지역에 포함된 국가지하수 관측망 2개소의 지하수위 관측자료와 안양천 지역의 52개 지하수위 관측지점의 관측자료를 이용하였다(안양시, 2008, Fig. 6(a)). 대상 유역의 지하수위 보정 결과

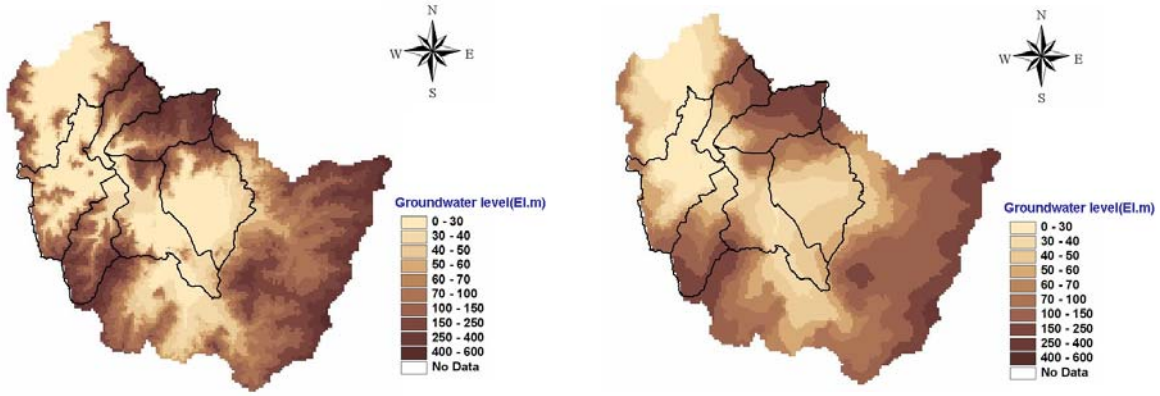
Table 2. Parameter Value for Simulation of SWAT-MODFLOW

Parameter	Definition	Median	Range	Calibrated value
CN2	SCS curve number	Default	-8%~+8%	+8%
SOL_AWC	Availably water capacity	Default	-0.05~+0.05	+0.03
ESCO	Soil evaporation coefficient	0.5	0.01~1	1
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge	31	None	10
S	Storage	None	None	0.01, 0.001, 0.001 (each layer)
K/M	Conductance ratio	None	None	0.005



(a) Result of Calibration in the Year of 2003 and 2004 (b) Result of Verification in the Year of 2005

Fig. 5. Result of SWAT-K Simulation



(a) Result of Observation (b) Result of Simulation

Fig. 6. Equi-Potential Head Line of Groundwater

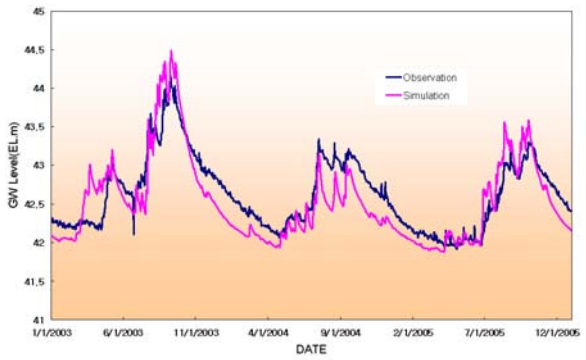


Fig. 7. Comparison between of the Simulated and the Predicted Groundwater Level on the Dang-Jung Observation Station in the Year of 2003 and 2005

을 보면 지하수위 분포(Fig. 6(b))와 실측 지하수위의 상관계수(Correlation, R)는 0.93으로 지하수위의 공간적인 분포 양상이 매우 비슷하였다. 또한 Fig. 7에서는 유역 내에 위치한 군포당정 국가지하수관측소의 관측지하수위와 모델지하수위간에 관계를 다음에 나타내었다. 관측지하수위의 경우 EL. 41.92 m ~ 44.16 m으로 2.24 m의 수위변동이 나타났고 모의지하수위의 경우 EL. 41.88 m ~ 44.49 m으로 2.61 m의 수위변동이 나타났다. 결정계수(R^2)는 0.76, Nash-Sutcdliffe 모형 효율성계수(ME)는 0.64로 비교적 양호한 결과를 보였다.

5. 지표수-지하수 상호작용 분석

지표수-지하수 교환량의 시·공간적인 변화를 살펴봄으로써 교환량의 특성을 살펴보았다. SWAT-MODFLOW의 지표수-지하수 교환량을 산정하는 기작은 MODFLOW의 river package 개념에 근간하고 있다(McDonald and Harbaugh, 1998). River package는 대상 하천셀의 하천수위와 지하수위의 수두차에 의해 교환량을 결정하며 여기엔 하천의 물리적인 인자들이 영향을 끼친다.

5.1 지표수-지하수 교환량의 시간적 변화

SWAT-MODFLOW는 SWAT에서 계산된 하천 연장과 MODFLOW에서 설정한 하천 격자의 수를 매칭시켜 각 하천셀에서 지표수가 지하수에 기여한 양과 지하수가 지표수의 기여한 양을 합하여 표현할 수 있다. Fig. 8은 유역 전체 하천의 일별 지표수-지하수 교환량

의 합을 나타낸 것이다. (+)의 값을 가지는 경우 지표수가 지하수로 유입되는 즉, 지하수 함양이 발생하는 경우이고 (-)는 지하수가 지표수로 유입되는 경우이다.

Fig. 8에서 큰 그림은 2003년~2006년의 강우와 교환량의 관계를 나타낸 것이고 작은 그림은 2003년 6월에서 10월까지의 값을 확대한 것이다. 그래프를 살펴보면 2003년 7월 22일에 185 mm의 강우가 발생하였고 이로 인해 다음날인 7월 23일에 1.87 m^3/s의 하천수가 지하수로 유입된 반면 다음날인 7월 24일에는 0.23 m^3/s의 지하수가 하천으로 유입되었다. 즉, 강우가 발생하여 하천수위가 상승하여 지하수위보다 높아지면 하천으로부터 대수층으로 물교환이 발생하고(그래프의 상승) 이에 따라 상승한 지하수위는 다시 하천으로 유출이 발생하는 특성(그래프의 하강)이 일단위로 잘 표현되고 있다. 그런데 그림에서 볼 수 있듯이 교환량이 0인 기준선을 중심으로 플럭스는 전반적으로 음(-)의 값을 나타내고 있다. 이는 대상 하천의 하천수위가 대부분 지하수위보다 낮게 형성되어 대수층으로부터 하천으로 물공급이 되는 이득하천이기 때문이다.

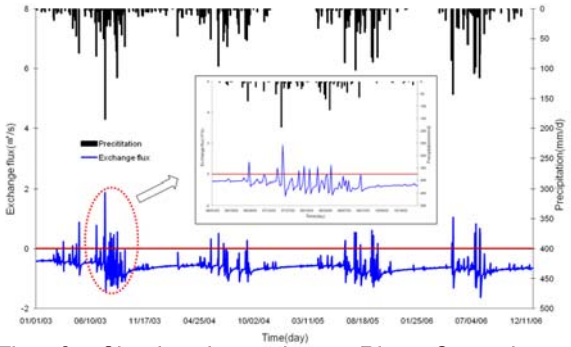


Fig. 8. Simulated result to River-Groundwater Exchange Flux on the Basin River Cells in the Year of 2003 and 2006

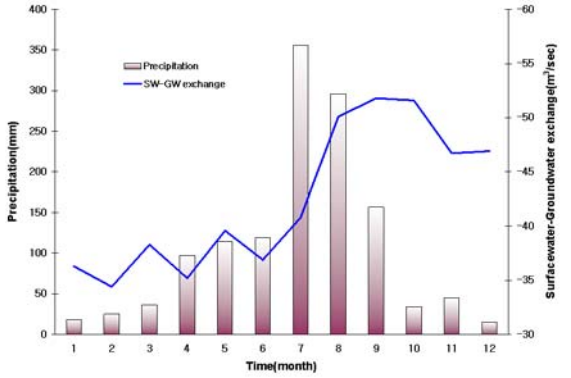


Fig. 9. Changes of the Exchange Flux for Monthly Average Precipitation

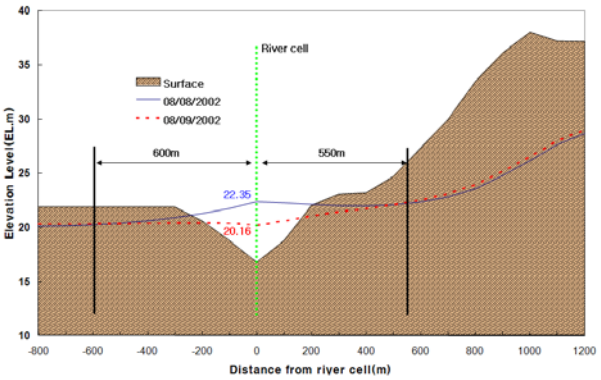
Fig. 9는 교환량을 월별로 합산한 것으로 대부분 음의 값인 교환량을 합산한 결과이며 9-10월에 최대인 것으로 나타났다. 이처럼 대수층에서 하천으로의 유출량이 강수에 비해 지체를 보이는 이유는 강수에 의해 함양이 이루어질 때 대수층으로 유입되어 하천으로 흘러나오기까지는 일정기간 지체가 발생하기 때문으로 판단된다(정일문 등, 2007). Fig. 7의 지하수위 시계열에서 최대 실측 지하수위 발생시기와 Fig. 9의 최대 교환량 발생 시기가 일치하는 것은 이같은 사실을 뒷받침한다.

5.2 지표수-지하수 교환량의 공간적 변화

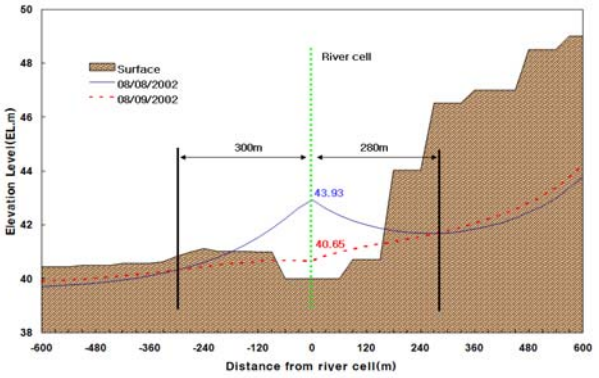
지표수와 지하수의 교환이 이루어지는 공간적인 범위는 항상 일정하진 않지만 동일 유역내에서도 위치에 따라 변화가 다양하다고 알려져 있다(Krause *et al.*, 2007). 따라서 본 연구에서는 지표수-지하수 교환의 시간적인 변화 뿐 아니라 공간적인 변동성을 파악하기 위해 대상 유역의 상·하류 하천 수직단면의 지하수위 변화를 살펴봄으로서 지표수와 지하수가 서로 교환되는 범위를 알아보았다. 하천 주변의 지하수위는 강우에 민감하므로 모의 기간 중 가장 강우가 많이 발생한 때를 기점으로 지하수위의 변화를 파악하였다. 2002년 8월 4일~8월 6일까지 3일동안 총 308 mm의 강우가 발생하였고 지하수위의 변동이 가장 심한 날은 8월 8일~8월 9일인 것으로 나타났다.

Fig. 10(a)는 유역의 하류인 15번 소유역의 하천 단면이다. 실선은 8월 8일의 지하수위를 점선은 8월 9일의 지하수위를 나타내고 있다. 이전 날의 강우로 인해 하천 주변에서 지속적으로 상승하던 지하수위는 8월 9일을 기점으로 급격히 하강하였다. 이 때의 지하수위 변동 범위는 약 1,150 m, 지하수위차는 최대 2.19 m였다. 또한 Fig. 10(b)는 유역의 상류인 13번 소유역으로 동일한 날에 측정된 지하수위의 변동 범위는 약 580 m, 최대 3.28 m의 수위차를 나타냈다. 연구대상 유역의 경우 하류에서 상류로 올라 갈수록 지하수위가 변동하는 폭은 하류에서 더 크게 나타난 반면 최대 수위차의 경우 상류에서 더 크게 나타났다. 이처럼 상, 하류의 영향범위와 수위차가 다른 것은 하천의 폭이나 길이와 같은 물리적인 형상과 하천과 대수층간의 지형 경사가 유역에 따라 다르기 때문이다. 따라서 상류의 경우 하천수위의 변동는 심하지만 급경사로 인해 지하수위에 미치는 영향은 하류에 비해 적은 것으로 나타났다. 반면 하류의 경우 하천수위의 변동는 적었지만 하천과 대수층의 경사가 완만하여 지하수위에 미치는 영향이 상류보다 더 넓게 퍼지는 것으로 확인되었다.

다음으로 소유역별 교환량을 평가하여 유역의 위치에 따른 교환량의 변화를 살펴보았다. 각 소유역에 해



(a) Downstream



(b) Upstream

Fig. 10. Changes of Groundwater Level on the Transverse Profile in Basins

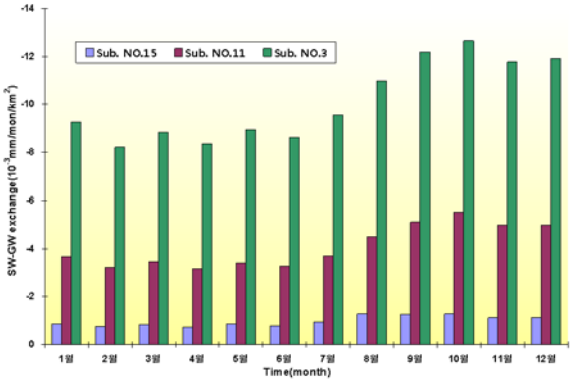


Fig. 11. Comparison of Monthly Average Exchange Flux for Subbasins

당하는 하천의 길이나 폭과 같은 물리적인 특성과 하천 수위와 지하수위의 변동이 각각 달라서 교환량의 단순 비교는 큰 의미가 없다. 따라서 실질적으로 동일한 하천의 길이나 폭을 가질 경우 공간적인 위치에 따라 교환량이 어떤 차이를 갖는지 알아보기 위해 유역의 상·중·하류의 대표 소유역의 단위면적당 교환량의 값을 비교해 보았다. Fig. 11은 유역의 상·중·하류인 3·11·15번 소유역 하천의 단위면적당 교환량의 값을 비교한 것이다. 그림에서 보면 각 소유역의 교환량 변화는 Fig. 9에 나타낸 전체 유역의 교환량 변화와 비슷하지만 각 소유역 간에 교환량은 큰 차이를 보인다. 하류인 15번 소유역의 경우 월별로 0.7~1.3×$10^{-3}$$m^3$/mon/$km^2$의 범위를 갖는 반면 상류인 3번 소유역의 경우 8.2~12.6×$10^{-3}$$m^3$/mon/$km^2$의 값을 나타내어 약 10배 정도의 차이를 보였다. 이는 상류로 갈수록 지표수와 지하수의 수위차가 상대적으로 심하고 상류지역의 지하수위의 변동이 하류보다 큰 것에 기인한다.

교환량은 각 소유역에 따라 시·공간적인 차이를 보이고 강우에 따른 하천유량이나 함양량과 같은 수문성분에 영향을 받는다. Table 3은 전체적인 수문순환과정에

Table 3. Comparison between Water Yield and Exchange Flux for Subbasins

SUB	Area (km^2)	Total amount (10^3m^3/year)	Water yield (10^3m^3/year)	Water yield rate(%)	Exchange flux (10^3m^3/year)	Exchange flux rate (%)
1	0.92	1,182	617	52.2	299	25.4
2	7.84	10,081	6,870	68.2	2,142	21.3
3	4.64	6,128	3,578	58.4	833	13.6
4	10.19	13,459	7,690	57.1	2,853	21.2
5	9.88	13,201	8,079	61.2	797	6.0
6	5.33	7,121	4,374	61.4	392	5.5
7	4.2	5,611	3,205	57.1	1,341	23.9
8	4.06	5,424	3,140	57.9	1,381	25.5
9	7.99	10,274	6,339	61.7	1,070	10.4
10	4.97	6,390	3,683	57.6	643	10.1
11	28.37	37,473	20,845	55.6	1,467	3.9
12	6.04	7,766	5,093	65.6	1,413	18.2
13	22.78	30,438	1,8335	60.2	2,562	8.4
14	3.45	4,436	2,707	61.0	678	15.3
15	20.06	25,794	15,097	58.5	2,848	11.0
sum	140.72	184,785	109,659	59.3	20,724	11.2

주) water yield(총유출량)= surq(지표유출)+latq(중간유출)+gwq(지하유출)-tloss(손실)

서 교환량이 차지하는 비율을 나타낸 것이다. 수자원총량 대비 하천유출량은 약 60%정도이고 교환량은 평균 11%정도를 차지하고 있다. 또한 각 소유역별로 하천유출량의 변동에 비해 교환량의 경우는 3.9~25.5%까지 편차가 심한 것을 볼 수 있다. 이는 각 소유역별로 하천형상과 같은 유역의 물리적인 성질이 다르고 하천수위와 지하수위의 변동 양상이 다르기 때문이다.

6. 결 론

지표수와 지하수의 상호작용의 시공간적 변화를 살펴보기 위하여 연구대상유역인 안양천 유역에 SWAT-MODFLOW를 적용하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 지하수의 교환량의 분석 결과 연구대상지역은 지하수가 하천수로 유입되는 이득하천의 형태를 나타내고 있으며 강수가 집중되는 시기에만 하천수가 지하수로 유입되는 것을 알 수 있었다.

2) 유역의 하천에서 발생한 월평균 교환량은 월평균 강수량이 가장 많은 7월이 아닌 9월에 발생한 51.79 m^3/sec였다. 유역에 월평균 강수량의 편차보다 교환량의 월별 편차가 적은 것은 기저유출의 영향과 지표수가 지하수로 유입되는 과정에서 발생하는 함양의 시간 지체의 영향 때문으로 판단된다.

3) 유역의 상, 중, 하류에서의 교환량을 살펴본 결과 유역의 하류로 갈수록(표고가 낮아질수록) 지표수-지하수 교환량의 영향 범위가 더 넓어지고 변동폭은 작아지는 경향을 나타냈다. 소유역별 교환량 변화를 정량적으로 살펴보기 위해 하류에서 상류로 연결된 15-11-3번 소유역의 단위면적당 교환량을 비교해 본 결과 15번 소유역은 0.7~1.3× 10^{-3} m^3/mon/km^2의 범위를 갖는 반면 상류인 3번 소유역의 경우 8.2~12.6×10^{-3} m^3/mon/km^2의 값을 나타내어 약 10배 정도의 차이를 보였다.

4) 소유역별 수문성분을 비교한 결과 수자원량 대비 교환량의 경우 약 3.9~25.5%로 소유역별 차이를 나타냈다. 전체 대상유역의 평균 교환량 비율은 11.2%로 하천유출량 59.3%의 약 1/5 수준이었다. 또한 소유역별 하천유출량의 변화에 비해 교환량의 변화가 심하게 나타났는데 이는 소유역별로 물리적인 특성이 다르고 하천수위와 지하수위의 변동폭이 크게 다르기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 지표수-지하수 교환량이 계절적에 따른 시간적인 변동 뿐 아니라 유역의 공간적인 변동성에 좌우된다는 것을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원21의 지속적 확보기술개발사업단의 단계 연구사업(과제번호 2-3-2)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김남원, 정일문, 원유승 (2004a). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (Ⅰ) 모형의 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.

김남원, 정일문, 원유승 (2004b). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (Ⅱ) 모형의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 509-515.

김남원, 정일문, 원유승 (2006). “완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.

신문주 (2006). SWAT모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안. 석사학위논문, 서울대학교.

안양시, 대한광업진흥공사 (2008). 안양지역 지하수 기초조사 보고서 부록 Ⅱ: 자료편.

이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006a). “SWAT 모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지유량 산정방안.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8, pp.703-716.

이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006b). “도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp.947-960.

정일문, 김남원, 이정우 (2007). “유역 유출과정과 지하수위 변동을 고려한 분포형 지하수 함양량 산정방안.” **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제12권, 제5호, pp. 19-32.

정정화, 장승표, 김호일, 정연태, 허기술, 박호 (1995). “유출율 추정을 위한 토양 수문군의 분류.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제37권, 제6호, pp. 12-33.

하규철, 고경석, 고동찬, 염병우, 이강근 (2006). “시계열 분석을 이용한 하천수위에 따른 다심도 관정의 지하수위 변동해석.” **자원환경지질학회 논문집**, 자

원환경지질학회, 제39권, 제3호, pp. 269-284.

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

Buttle, J.M. (1994). "Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins." *Progress in physical geography*, Vol. 18, No. 1 p. 16

Chaplot, V. (2005). "Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO_3-N loads predictions." *Journal of Hydrology*, Vol. 312, Issues 1-4, pp. 207-222.

Corbett, D. Reide, Dillon, K., and Burnett, W. (2000). "Tracing Groundwater Flow on a Barrier Island in the North-east Gulf of Mexico." *Estuarine, coastal and shelf science*, Vol. 51, No. 2, pp. 227-242.

Fisher, S.G., Grimm, N.B., and Marti, E. (1998). "Material Spiraling in Stream Corridors: A Telescoping Ecosystem Model." Ecosystems, Vol. 1, No. 1, pp. 19-34.

Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.

Krause, S., Bronstert, A., and Zehe, E. (2007). "Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain - Implications for the river discharge dynamics and riparian water balance." *Journal of hydrology*, Vol. 347, No. 3/4, pp. 404-417.

Matthess, G. (1983). "Natural processes controlling the behaviour of contaminants in groundwater." *GeoJournal*, Vol. 7, No. 5, pp. 435-443.

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

Rassam, D.W., and Knight, J.H. (2007). "Ground-water head responses due to random stream stage fluctuations using basis splines." *Water resources research*, Vol. 43, No. 6, pp. W06501.

Winter, T.C. (1999). "Relation of stream, lakes, and wetlands to groundwater flow systems." *Journal of Hydrology*, Vol. 7, pp. 28-45.

(논문번호:08-103/접수:2008.10.20/심사완료:2008.11.28)