

# 안성천 상류유역 하천유량에 미치는 농업용 저수지와 지하수 이용 영향 분석

이정우\* · 김남원\*\* · 정일문\*\*\* · 이정은\*\*\*\*

Lee, Jeongwoo\* · Kim, Nam Won\*\* · Chung, Il-Moon\*\*\* · Lee, Jeong Eun\*\*\*\*

## Effects of Irrigation Reservoirs and Groundwater Withdrawals on Streamflow for the Anseongcheon Upper Watershed

### ABSTRACT

Streamflow responses to irrigation reservoirs and groundwater withdrawals were simulated using the integrated surface-water and groundwater model, SWAT-MODFLOW for the upstream watershed of the Gongdo station located in the Anseong stream. The simulated results indicated that the irrigation water supply from the Gosam and the Geumkwang reservoirs has caused the decrease of 31.2%, 82.5% in drought flows below the reservoirs, respectively, against the natural flow condition. While, at the outlet of the study watershed, the effects of the irrigation reservoirs were insignificant due to the delayed return flows with the decrease of 5.7% in drought flow. Both of the irrigation reservoirs and groundwater withdrawals have reduced the drought flows by 19.2% at the Gongdo station.

**Key words** : Irrigation reservoir, Groundwater withdrawal, SWAT-MODFLOW, Return flow

### 초록

본 연구에서는 안성천 공도수위관측소 상류유역에 대해 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 적용하여 농업용 저수지 관개 및 지하수 이용에 따른 하천유출량 변화를 모의하였다. 유역내에 위치한 고삼 및 금광 저수지 직하류부에서는 관개용수 공급으로 인하여 갈수량이 자연 유량 조건에 비해 각각 약 31.2%, 82.5% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 반면에 유역 출구부에서는 회귀수 영향으로 농업용 저수지 영향이 작게 나타나 5.7% 정도의 갈수량이 감소하였으며, 지하수 양수 영향과의 복합적 영향으로 약 19.2% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다.

**검색어** : 농업용 저수지, 지하수 이용, SWAT-MODFLOW, 회귀수

\* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 수석연구원, 공학박사  
(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · ljw2961@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 선임연구위원, 공학박사  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · nwkim@kict.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 연구위원, 공학박사  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · imchung@kict.re.kr)

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 수석연구원  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jeus22@kict.re.kr)

Received April 30, 2015/ revised May 12, 2015/ accepted May 30, 2015

## 1. 서론

수자원 계획 및 관리를 위해서는 하천유량 자료의 장기적인 변동 특성에 대한 고찰이 필수적이다. 하천유량 자료는 강수량과 같은 자연적인 요인뿐만 아니라 댐이나 저수지와 같은 저류시설, 하천수 취수, 지하수 채수 등 용수공급을 위한 인위적 요인의 영향으로 그 변동 특성이 더욱 복잡하고 다양하게 나타난다. 이러한 인위적 요인들은 상호 영향을 주며, 특히 농업용 저수지 관개 및 지하수 이용으로 인한 하천유량의 감소는 하천수 사용 장애를 유발할 수도 있어 이에 대한 영향 평가가 이루어져야 한다.

Park et al.(2005)은 농촌 소하천 상류에 위치한 농업용 저수지로 인해 수문순환 과정이 인위적으로 단절되어 하천이 건천화되어가고 있음을 지적하였다. Oh and Kim(2007)은 농촌지역 수문자료 축적을 위한 시험지구인 경기 이동 시험지구를 대상으로 저수지의 용수공급 운영에 따른 하천의 유출 특성을 관측하여 농업용 저수지가 하천에 미치는 영향을 분석하였다. Choi et al.(2009)은 농업용 저수지 영향으로 건천화 현상이 발생하고 있어 유지용수 확보를 위해 저수지 시설규모의 확장이 필요함을 주장하였다. Song et al.(2010)은 형산강 유역내 위치한 저수지의 하천유출에 미치는 영향을 평가하기 위해서 저수지 유역면적 고려 유무에 따른 경주2, 모야, 안강 수위관측소 지점의 유출률을 비교하였다. Lee and Kim(2013)은 농업용 저수지가 위치한 봉현천과 석지천 유역을 대상으로 하천유량, 식생피복, 수질에 대한 현장조사를 통해 건천화된 하천의 시공간적 특성을 분석하였으며, 또한 Kim and Kim (2014)도 동일한 유역에 대해 수문, 수질 모니터링을 실시하고 건천화 현상으로 인해 하천유지용수의 부족뿐만 아니라 하천생태계 유지에도 어려움을 초래할 수 있음을 강조하였다.

농업용 저수지의 영향을 모델링을 통해 분석한 연구로서 Park et al.(2007)은 SLURP 모형(Kite, 2007)을 안성천 공도수위 관측소 지점 상류유역에 적용하여 유역내 위치한 고삼 및 금광 농업용 저수지 고려 유무에 따른 하천유출 거동을 분석하였다. Kim et al.(2009)은 SLURP 모형을 안성천 유역 전체에 적용하여 기흥, 이동, 고삼, 금광 농업용 저수지의 저류 효과에 따른 하류 지역에 대한 영향성을 검토하고, 모형 내 저수지 반영 여부에 따른 유출량 차이를 비교·분석하였다. Kim et al.(2008)은 경기 이동저수지 상류유역에 SWAT 모형(Arnold et al., 2003)을 적용하여 하천유출량에 미치는 저수량과 관개기 용수공급의 영향을 평가하였다. Lee et al.(2008)은 안성천 공도수위표 상류유역에 대해 SWAT 모형을 적용하여 유역내 고삼 및 금광 농업용 저수지 고려 유무에 따른 하천유출 거동을 분석하였다. 특히 이 연구에서는 저수지의 내용적 곡선, 저수량 등을 이용하여 저수지 일 방류량을 계산하도록

SWAT내 저수지 관련 모듈을 개선하였다.

한편, 지하수 이용에 따른 하천유량 변화를 분석한 연구로서 Lee et al.(2006)은 안성천 상류유역에 SWAT 모형을 적용하여 지하수 취수량과 건기 하천유출감소량간의 관계를 제시하였고, Lee(2008)는 갑천 유역에 대해 TANK-GS 모형(Lee et al., 2010)을 적용하여 지하수 양수 시나리오에 따른 기저유출량 및 대수층에서 하천으로의 유동량의 변화를 평가하였다. Chung et al.(2011)은 SWAT 모형에 지하수 수치해석모형 MODFLOW 모형(McDonald and Harbaugh, 1988)을 완전연동형으로 결합한 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW(Kim et al., 2008)를 무심천 유역에 적용하여 지하수 양수 시나리오에 따른 대수층 저류량 및 하천유량의 변화를 분석하였다. Kim et al.(2011)은 쌍천 지하댐의 효율성 평가를 위해 이 모형으로 지표수-지하수 통합해석을 수행하여 지하댐으로 인한 지하수위 상승효과 및 하천유량 개선 효과를 보여주었다. Kim et al.(2012)와 Lee et al.(2013)은 신둔천 유역에 SWAT-MODFLOW를 적용하여 각각 하천유량에 미치는 지하수 양수정의 군집적인 영향과 개별적인 영향을 분석하였다.

최근 들어 지하수 이용, 토지이용변화, 하천수 취수, 하수처리, 저수지 운영 등의 인위적 요인들이 하천유량에 미치는 영향을 종합적으로 비교한 연구(MLTMA, 2010; Kim et al., 2013)도 수행되었다. MLTMA(2010)에서는 갑천, 남천, 경안천, 왕숙천 유역에 대해서 SWMM 모형의 지하수 해석 부분이 개선된 SWMM-GE 모형을 적용하여 인위적 요인 각각에 대해 하천 건천화에 미치는 기여특성을 비교 분석하였다. Kim et al.(2013)은 창미천 지류인 죽산천 유역에 대해 저수지 및 양수 모듈이 개선된 SWAT-MODFLOW 모형을 적용하여 농업용 저수지 및 지하수 양수의 개별적, 복합적 영향을 분석하였으며, 특히 이 연구에서는 저수지로부터 관개용수의 일부가 침투, 함양되고 다시 하천으로 지체되어 유출되는 회귀수 영향을 고려하였다.

이상과 같이 농업용 저수지 운영 및 지하수 양수에 따른 하천유량 변동 특성을 분석한 다양한 연구가 있었으며, 소규모 농촌 유역에 대해 농업용 저수지 및 지하수 이용의 복합적 영향을 다룬 Kim et al.(2013)의 연구를 제외하고는 대부분의 연구가 인위적 요인 각각의 개별적인 영향을 분석하는데 초점을 두고 수행되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 중소규모 유역에 대해 하천유량에 미치는 농업용 저수지 및 지하수 이용의 복합적인 영향을 평가하고자 하였으며, 이를 위해서 안성천 공도수위관측소 상류유역을 시험유역으로 선정하고 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 적용하여 지하수 이용 및 농업용 저수지 관개에 따른 하천유량 및 유량 변동 특성을 고찰하였다.

**2. 재료 및 방법**

**2.1 대상 유역**

본 연구에서는 안성천 유역 중 공도수위표 상류유역을 연구 대상 유역으로 선정하여 농업용 저수지 및 지하수 이용이 하천유량에 미치는 영향을 분석하였다. 대상 유역의 면적은 373.23 km<sup>2</sup>로서 안성천 전체의 약 23%를 차지하고 있으며, 유로연장은 15.32 km, 유역의 평균경사는 16.1%, 그리고 유역의 고도는 Fig. 1과 같이 해발 10 m부터 해발 561 m까지 분포하고 있다. 모형의 구동을 위해서 총 35개 소유역으로 분할하였으며, Fig. 1에 표기된 바와 같이 소유역 29번, 33번, 34번 출구에 각각 고삼, 금광, 마둔 저수지가 위치해 있어 안성천 및 그 지류인 한천, 조령천 등의 하천유량은 농번기 관개에 영향을 크게 받고 있다. 따라서 지하수 이용 영향 평가시 저수지 영향을 함께 고려한 정교한 유출 분석이 필요하다.

**2.2 모형의 입력자료 구축**

모형의 공간정보 입력자료 구축을 위해서 유역의 형상을 나타내는 DEM, 유역내 토지이용상황을 나타내는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터 등이 필요하다. Fig. 2와 같이 환경부에서 제공하고 있는 중분류(1:25,000)의 토지피복도, Fig. 3과 같이 국립농업과학원에서 제공하고 있는 정밀토양도를 사용하였다. 대상 유역은 산림지역이 약 47%로 가장 많이 분포하고 있으며 논과 밭을 포함한 농경지가 약 30% 차지하고 있다. 토양은 청산 토양통이 23.6%로 가장 많이 차지하고 있으며,

그 다음으로 예산 14.7%, 삼각 10.7%, 사천 9.7%, 상주 5.3% 등의 순으로 토양통이 분포해 있다.

기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등의 기상자료는 대상유역 주변에 위치한 수원, 이천, 천안기상대의 자료를 이용하였다. 최근 10년간 수원의 연평균 일사량은 14.1 MJ/m<sup>2</sup>, 연평균 기온은 12.8°C, 연평

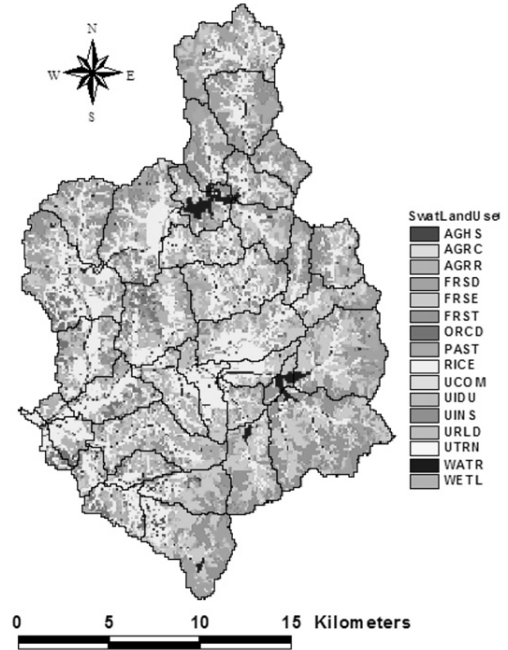


Fig. 2. Landuse Map for Study Watershed

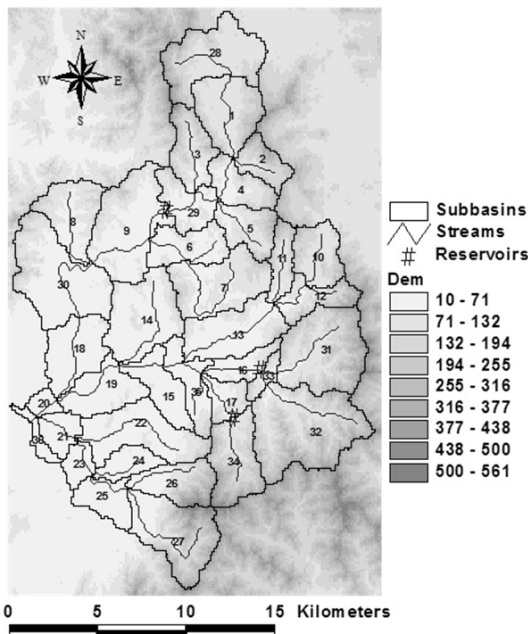


Fig. 1. Subbasin Delineation and DEM for Study Watershed

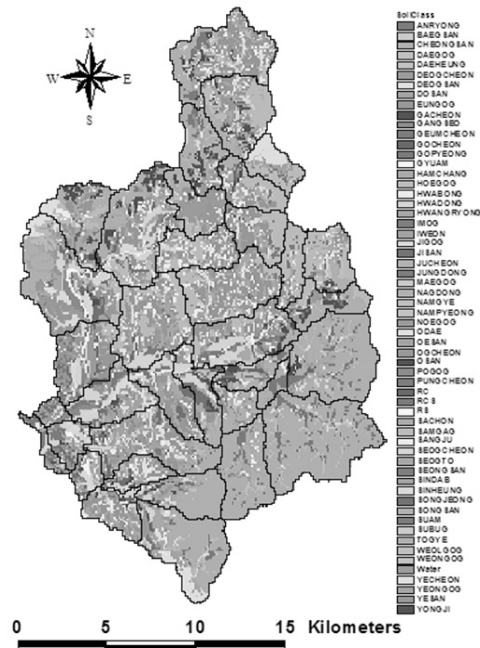


Fig. 3. Soil Type Map for Study Watershed

균 상대습도는 66.5%, 연평균 풍속은 1.9 m/s이며, 이천의 연평균 일사량은 14.1 MJ/m<sup>2</sup>, 연평균 기온은 12.0°C, 연평균 상대습도는 68.0%, 연평균 풍속은 1.3 m/s이고, 천안의 연평균 일사량은 14.9 MJ/m<sup>2</sup>, 연평균 기온은 12.3°C, 연평균 상대습도는 69.3%, 연평균 풍속은 1.8 m/s로 나타났다. 강수량 자료는 국토교통부의 원삼, 안성, 서운, 삼죽, 양성 관측소 자료를 이용하였으며, 모의 기간 동안 면적평균강수량은 1280.4 mm이다.

연구 대상유역내에 고삼, 금광, 마둔 농업용 저수지의 관측 저수량을 입력하였고, 이 값과 유입량 모의치로부터 방류량이 계산되도록 모형을 수정하였다. 추정된 방류량은 관개기에는 홍수기 저수지가 만수되고 일정 강우규모가 발생하였을 경우만 제외하고는 관개수로로 우회하는 양으로 처리하였고, 비관개기에는 저수율이 만수율에 도달했을 경우만 하천으로 방류되게 하였다. 특히 관개수로로 우회된 용수량은 수혜 지구내 논 피복 강수량에 더해지게 하고, 침투, 증발산, 함양 등의 수문순환과정을 거쳐 하천으로 회귀되도록 처리하였다.

안성천 유역내의 지하수 이용량은 안성시와 용인시 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정 중 모의 대상유역내에 위치한 관정만을 발취하고, 지하수 이용량 산정 요령(MLIT, 2013)에서 제시된 원단위 산정법을 이용하여 각 관정의 일 이용량을 추정하여 모형에 입력하였다. 지하수 이용량 중 농업용은 대수층에서 지표면으로의 물이동을 고려할 수 있도록 모형을 개선(Kim et al. 2012)하여 양수량의 회귀 효과를 반영하였다. 지하수 관정 위치는 MODFLOW의 기본 연산단위인 셀과 SWAT의 기본 연산단위인 HRU를 연결하였고, 각각의 지하수 관정으로부터 양수된 물은 셀에서 source 항으로 배출되고 다시 HRU의 지표면으로 보내지도록 처리하였다.

대상 유역의 대수층은 1개의 충적층 및 1개의 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층으로, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층의 공간적인 분포는 한국농촌공사 시추조사 자료, 안성지역 지하수 기초조사 자료 등을 이용하여 충적층 바닥고를 크리깅 기법을 이용하여 격자별로 저면 고도 값을 생성하였다. 최하부층인 제 2층의 저면 고도는 임의적인 해발고도를 수평으로 설정하고, 그 고도는 검보정에 의해 결정하였다. 모델 영역은 가로 21,000 m, 세로 33,100 m로 하고, 지하수 분수령이 유역의 경계와 같다고 가정하였으므로 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려하여 376.2 km<sup>2</sup>이다. 모델 격자는 210행, 331열, 2층으로 구성되며 격자의 크기는 DEM 격자 크기와 동일하게 100 m × 100 m로 하였다.

모델링을 위한 대수층의 수리전도도와 저류계수는 안성지역 지하수 기초조사 자료, 농촌공사 보유자료, 본 연구에서 수행한 대수성 시험 자료를 이용하여 공간분포시켰다. 제1층의 수리전도도

는 56개의 측정값을 이용하여 크리깅을 통해 공간분포시켜 모델의 입력자료로 이용하였고 저류계수는 측정값이 존재하지 않아 0.1로 입력하였다. 제2층의 수리전도도와 저류계수는 각각 37개와 42개소의 측정값을 역시 크리깅을 통해 격자별 값을 보간하여 생성하였다. 모델에 입력한 수리전도도값은 충적층에 대해서는 1~500 m/d, 암반층에 대해서는 0.01~10.0 m/d이다. 또한, 수리전도도 입력시 이방성에 관한 자료는 전무하므로 수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였고, 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다.

유역경계를 기준으로 바깥쪽은 흐름이 없는 것으로 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 활성셀에 함양이 일어나도록 함양률 경계조건을 부여하였다. 즉, 임의 셀이 건조셀이 되면 그 하부에 있는 지층으로 함양이 일어나도록 함양패키지에서 해당 옵션을 주었다. 함양률 값은 SWAT으로부터 일 단위로 모의되어 MODFLOW의 지하수 활성셀에 자동으로 입력되게 하였다. 하천경계는 안성천 본류 및 지류에 적용하였다. 하천경계는 지하수 유출입이 일어나는 하천셀로 지정하였다. 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입률이 결정되도록 하였다.

### 2.3 모형의 검보정

안성천 상류유역의 출구점인 공도 수위관측소 지점의 2007년부터 2013년까지의 일 유출량 자료를 기준으로 모형의 검보정을 수행하였다. 일 유출수문곡선에 대하여 모의치와 관측치의 적합이 잘 이루어질 때까지 수동 검보정을 실시하였다.

SWAT-MODFLOW 모형에서 SWAT의 주요 검보정 변수로서 토지피복 및 토양조건에 따라 입력된 AMC-II일 때의 유출곡선 지수 CN2, 중간유출과 관계된 경사장 SLSOIL, 지하수유출과 관련된 함양지체변수 GWDELAY, 증발산량과 관련된 토양증발 보상계수 ESCO, 식생증산보상계수 EPCO, 하도추적과 관련된 Manning의 조도계수 CH\_N 등이다. 수문곡선에서 침투부 형상을 잘 적합시키기 위해서 CN2 값을 모형에서 제공하는 디폴트 값에 비해 10%만큼 증가시켰고, 지표면유출의 지체 등 수문곡선의 형태를 매끄럽게 보정하기 위해서 SURLAG값을 모형에서 제공하는 값에 비해 줄였다. 중간유출량과 증발산량을 키우기 위해 각각 SLSOIL값을 줄이고 EPCO값을 증가시켰으며, 강우에 대한 함양 반응을 비교적 짧게 하기 위해서 GWDELAY 값을 줄였다. 하도추적과 관련된 변수인 CH\_N는 자연 하천에 가깝고 수치적 안정성

Table 1. Parameter Calibration

Parameter	Explanation	Calibrated value
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	1.1 times the default value
SURLAG	surface runoff lag time	1/4 times the default value
SLSOIL	slope length for lateral subsurface flow	1/3 times the default value
EPCO	plant uptake compensation factor	0.9
ESCO	soil evaporation compensation factor	1.0
GWDELAY	delay of groundwater recharge	0.16
CH_N	Manning's n value	0.042

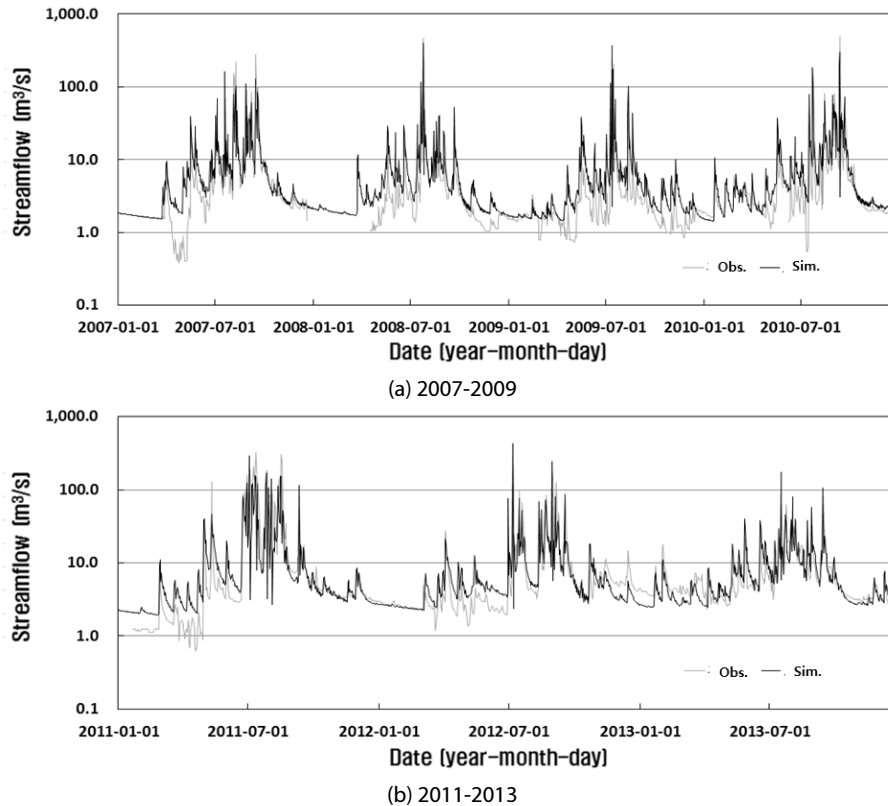


Fig. 4. Comparison of Observed and Simulated Streamflows at Gongdo Stage

측면을 고려하여 모형의 기본값 보다 3배 큰 값을 사용하였다. Table 1에 모형의 주요 매개변수의 검보정 결과값을 정리하였다.

SWAT-MODFLOW 모형에서 MODFLOW와 관련된 입력 변수는 현장측정 및 문헌조사 값을 최대한 활용하였고, 측정되지 않은 변수 값은 수문곡선의 감수부 형태를 잘 묘사할 때까지 반복 모의를 수행하여 보정하였다. 하천바닥층의 수리전도성 값은 현지 시험 결과를 반영하였고 측정값이 없는 하도구간은 현지 시험이 수행된 하도구간의 값과 유사하게 입력하였다.

유출모의 결과, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 모의치가 관측치 양상을 잘 따라가는 것을 확인할 수 있으며, 두 값간의 결정계수( $R^2$ )

값이 약 0.7로 산정되어 모형의 검보정이 양호하게 수행된 것으로 판단된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 지하수 양수 및 저수지 영향 모의

안정천 공도 수위표 상류 유역은 고삼, 금광 등 농업용 저수지가 위치해 있어 하천유량이 저수지의 영향을 크게 받고 있다. 따라서 지하수 양수의 영향뿐만 아니라 농업용 저수지의 영향을 함께 분석하였다.

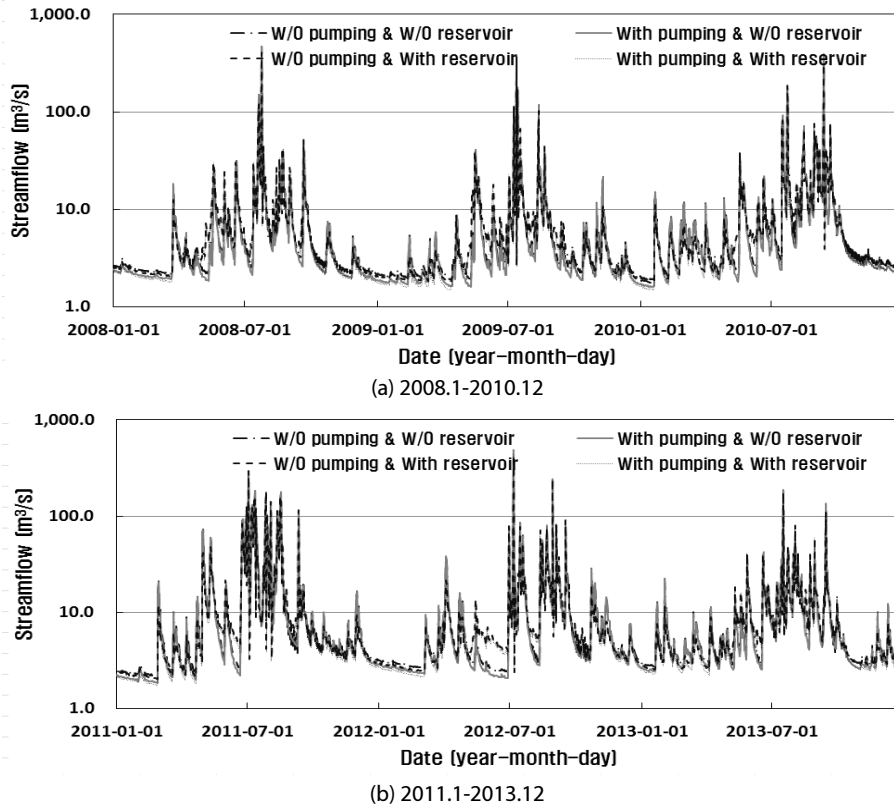


Fig. 5. Simulated Streamflows According to Groundwater Pumping or Reservoir Operation at the Outlet of Study Watershed

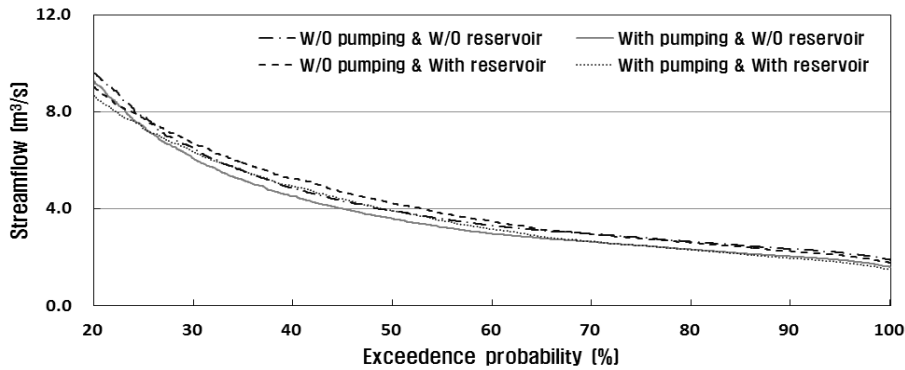


Fig. 6. Simulated Flow Duration Curves According to Groundwater Pumping or Reservoir Operation at the Outlet of Study Watershed

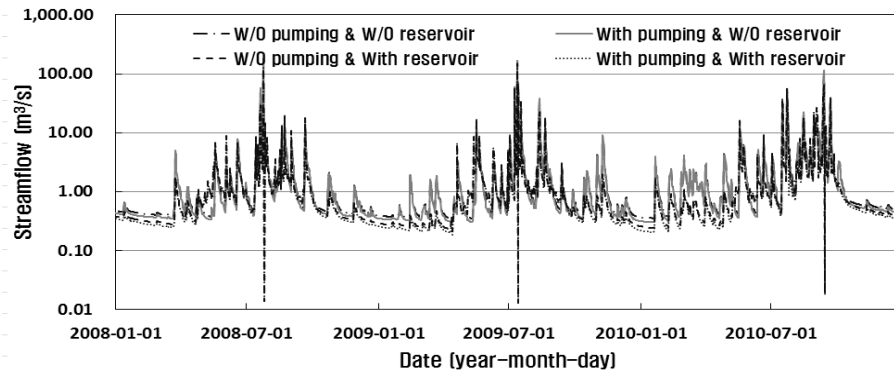
Fig. 5 and 6은 각각 안성천 상류유역 출구인 공도 수위표 지점에서의 모의한 하천유량과 하천유황을 나타낸 것이다. 그림에서 일점 쇄선은 자연 상태의 하천유량을, 실선은 지하수 양수만 고려한 경우, 긴 점선은 저수지만 고려한 경우, 짧은 점선은 지하수 양수와 저수지 모두를 고려한 경우인 현재 상태의 하천유량 모의 결과를 나타내고 있다. 자연 상태에 비해 지하수 양수로 인해 갈수기 하천유출량의 감소현상이 분명하게 나타나고 있으며, 반면 농업용 저수지로 인한 하천유출량의 변화는 작게 발생하고 있음을 알

수 있다. 저수지 영향이 작게 나타나는 이유는 관개 후 침투, 함양된 물이 지연되어 하천으로 회귀되는 수량에 기인한다.

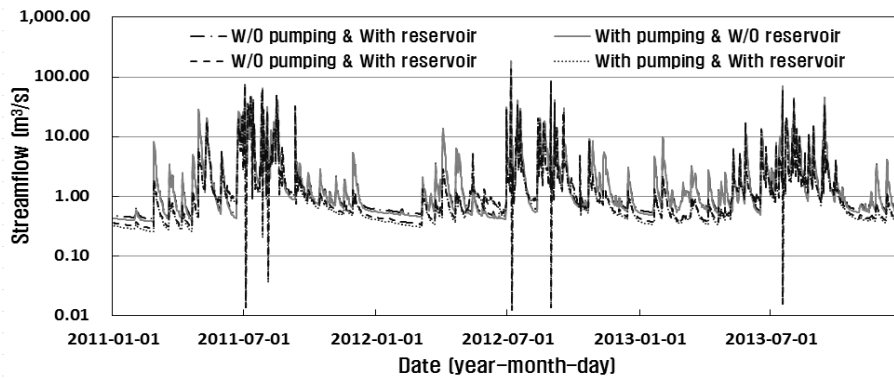
지하수 양수 및 농업용 저수지 유무에 따른 유황의 변화를 확인할 수 있으며, 저수기, 갈수기에는 자연상태, 저수지만 있는 경우, 양수만 있는 경우, 저수지와 양수 모두 있는 경우 순으로 하천유량의 규모가 형성되고 있다. 평수기에는 저수지로 인해 하천유량이 증가한 것으로 나타났는데, 이는 관개 후 재 충전에 따른 하천으로의 회귀수 증가의 영향인 것으로 판단된다.

Table 2. Simulated Standard Flows at the Outlet of Study Watershed (unit: m<sup>3</sup>/s)

Classification	Abundant flow (95days)	Normal flow (185days)	Low flow (275days)	Drought flow (355days)
W/O pumping & W/O reservoir	7.50	3.93	2.71	2.10
With pumping & W/O reservoir	7.05(▼ 6.0%)	3.58(▼ 8.7%)	2.39(▼ 11.6%)	1.80(▼ 14.3%)
W/O pumping & With reservoir	7.47(▼ 0.4%)	4.22(△ 7.5%)	2.68(▼ 1.1%)	1.98(▼ 5.7%)
With pumping & With reservoir	7.10(▼ 5.4%)	3.92(▼ 0.2%)	2.38(▼ 12.0%)	1.70(▼ 19.2%)



(a) 2008.1-2010.12



(b) 2011.1-2013.12

Fig. 7. Simulated Streamflows According to Groundwater Pumping or Reservoir Operation Below Gosam Reservoir (At the Outlet of Subbasin 9)

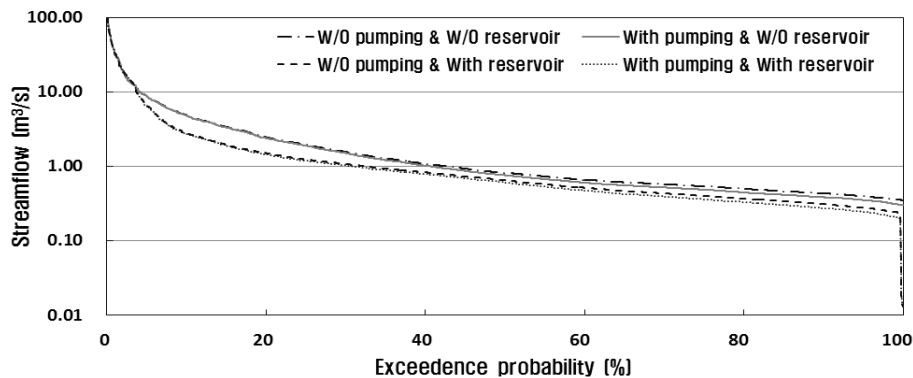


Fig. 8. Simulated Flow Duration Curves According to Groundwater Pumping or Reservoir Operation Below Gosam Reservoir (At the Outlet of Subbasin 9)

4개의 시나리오별 모의 유행곡선으로부터 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량을 발췌하여 Table 2에 정리하였다. 표에서 4개의 기준유량값은 Fig. 6에서 각각 초과확률 약 26%, 50%, 78%, 97% 일 때의 하천유량값을 판독한 결과이며, 팔호 안의 값은 자연 상태에 비해 지하수 양수 및 저수지로 인해 감소된 하천유량의 비율을 나타낸 것이다. Table 2에 제시된 바와 같이 풍수량에서 갈수량으로 갈수록 감소율이 증가하였고 지하수 양수에 의한 영향이 농업용 저수지 영향에 비해 다소 큰 것으로 분석되었다. 특히 갈수량은 저수지 및 지하수 양수가 없는 자연유출량인 경우에 비해 양수로 인해 약 14.3%, 저수지로 인해 약 5.7%, 양수 및 저수지로 인해 약 19.2% 만큼 비교적 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 7 and 8은 안성천의 제1지류인 한천 상류부에 위치한

고삼 저수지 직하류부(소유역 9번 유입부)에서의 모의 하천유출량과 하천유황을 나타낸 것으로 농업용 저수지에 의한 영향으로 하천유량 감소가 크게 발생하고 있다. Fig. 7에서 홍수기 급격하게 유량이 떨어지는 부분이 나타나고 있는데 이는 모형에서 저수지 방류가 일어나지 않는 강수량 최소임계값을 설정하였기 때문이다. Fig. 5 and 7을 비교해보면, 하천유량은 저수지 직하류부에서 저수지 영향이 크게 작용하고 있는 것을 알 수 있다. Table 3에 나타낸 바와 같이 갈수량은 자연 상태일 때 0.38 m<sup>3</sup>/s이었으나, 저수지로 인해 0.26 m<sup>3</sup>/s, 양수로 인해, 0.34 m<sup>3</sup>/s, 저수지 및 양수로 인해 0.23 m<sup>3</sup>/s로 감소하였으며, 갈수량 감소율을 비율로 환산하면 지하수 양수로 인해 약 11.2%, 저수지 관개로 인해 약 31.2%, 지하수 양수 및 저수지 관개로 인해 약 39.9%이다.

Table 3. Simulated Standard Flows at the Outlet of Subbasin 9 (unit: m<sup>3</sup>/s)

Classification	Abundant flow (95days)	Normal flow (185days)	Low flow (275days)	Drought flow (355days)
W/O pumping & W/O reservoir	1.87	0.82	0.52	0.38
With pumping & W/O reservoir	1.82(▼2.9%)	0.76(▼6.9%)	0.47(▼10.2%)	0.34(▼11.2%)
W/O pumping & With reservoir	1.21(▼35.3%)	0.65(▼20.5%)	0.38(▼26.5%)	0.26(▼31.2%)
With pumping & With reservoir	1.16(▼37.8%)	0.61(▼25.1%)	0.34(▼33.8%)	0.23(▼39.9%)

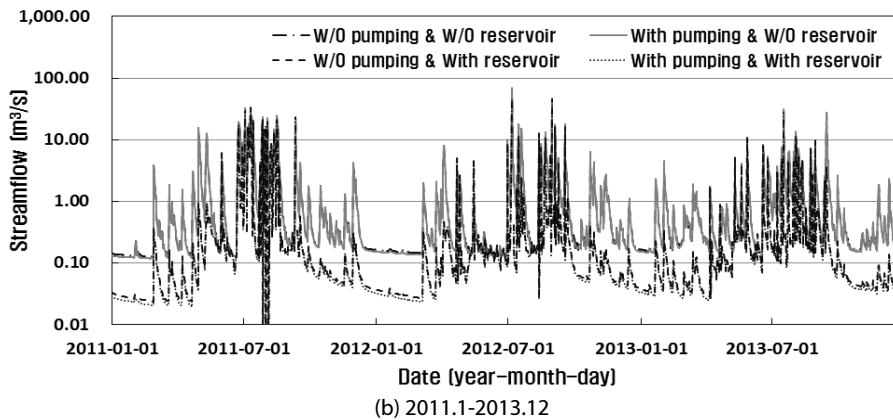
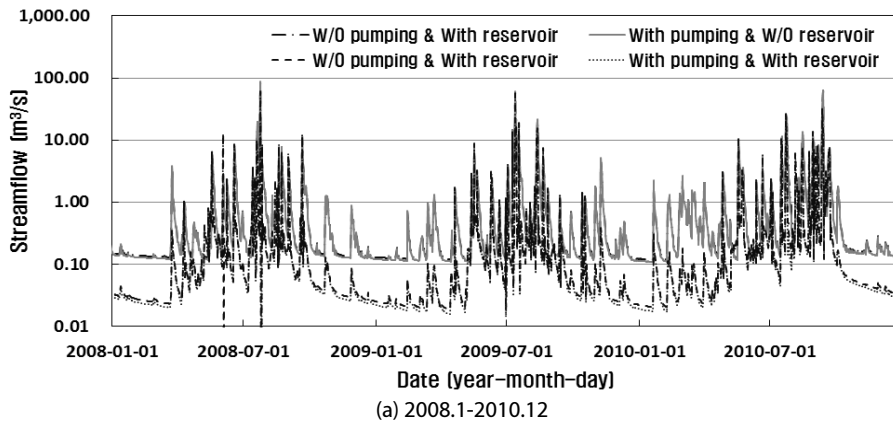


Fig. 9. Simulated Streamflows According to Groundwater Pumping or Reservoir Operation Below Geumkwang Reservoir (At the Outlet of Subbasin 16)



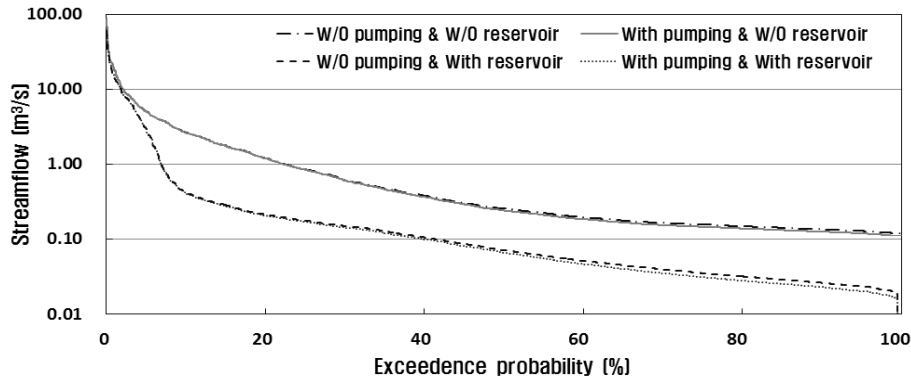


Fig. 10. Simulated Flow Duration Curves According to Groundwater Pumping or Reservoir Operation Below Gosam Reservoir (At the Outlet of Subbasin 16)

Table 4. Simulated Standard Flows at the Outlet of Subbasin 16 (unit: m³/s)

Classification	Abundant flow (95days)	Normal flow (185days)	Low flow (275days)	Drought flow (355days)
W/O pumping & W/O reservoir	0.815	0.257	0.152	0.126
With pumping & W/O reservoir	0.800(▼ 1.8%)	0.244(▼ 4.9%)	0.143(▼ 6.4%)	0.117(▼ 7.2%)
W/O pumping & With reservoir	0.172(▼ 78.8%)	0.072(▼ 71.9%)	0.033(▼ 78.1%)	0.022(▼ 82.5%)
With pumping & With reservoir	0.166(▼ 79.6%)	0.067(▼ 74.0%)	0.029(▼ 80.7%)	0.019(▼ 84.9%)

Fig. 9 and 10은 안성천 제1지류인 조령천 상류부에 위치한 금광 농업용 저수지 직하류부(소유역 16번 입구)에서의 모의 하천 유출량과 하천유황을 나타낸 것으로 Fig. 7과 마찬가지로 농업용 저수지에 의한 영향이 지배적으로 발생하고 있다. Table 4에 나타낸 바와 같이 갈수량은 저수지만 고려했을 때 0.022 m³/s, 양수만 고려했을 때 0.117 m³/s, 저수지 및 양수 모두 고려했을 때 0.019 m³/s로서 자연 상태의 0.126 m³/s에 비해 7~85% 만큼 줄어든 것으로 나타났다. 갈수량 감소율은 지하수 양수로 인해 약 7.2%, 저수지 관개로 인해 약 82.5%, 지하수 양수 및 저수지 관개로 인해 약 84.9%로 산정되었다. 금광 저수지의 저류용량 및 집수면적이 고삼 저수지에 비해 작지만 저수지 영향으로 인한 하천유량 감소는 더 크게 발생하였는데 이는 금광 저수지의 저수율이 상대적으로 더 낮게 유지된데서 기인한다. 즉, 하천으로의 직접 방류보다 관개수로를 통한 용수 공급이 많이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 안성천 공도수위관측소 상류유역을 분석 대상유역으로 선정하고 농업용 저수지 관개 및 지하수 이용에 따른 하천유량 변화를 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW로 모의, 분석하였다. 농업용 저수지는 유역내에 위치한 고삼 및 금광 저수지

의 농업용수 관개로 인한 상하류 하천유량의 단절 영향을 고려하고, 지하수 이용은 지하체의 허가 및 신고 관정의 이용량을 고려하였다. 유역내 전체 지하수 관정들의 이용량과 고삼 및 금광 저수지의 관개용수 공급량 추정치를 모형에 입력하여 하천유량을 모의하고 유역 출구점에서의 관측 유량과의 비교를 통한 모형의 검토정 과정을 거쳐 현재 물이용 체계에 적합한 모형을 구축하였다. 이를 이용하여 저수지 관개 및 지하수 양수 고려 유무에 따른 하천유량을 모의한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 안성천 상류유역 출구인 공도 수위표 지점에서는 회귀수의 영향으로 농업용 저수지 영향이 작고 상대적으로 지하수 양수에 의한 영향이 큰 것으로 모의되었다. 하천의 갈수량은 인위적 교란 요인이 없는 자연유량의 경우에 비해 지하수 양수로 인해 약 14.3%, 저수지 관개로 인해 약 5.7%, 지하수 양수 및 저수지 관개로 인해 약 19.2% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다.
- (2) 고삼 저수지 직하류부에서는 저수지 관개용수 공급으로 인해 하천유량이 단절된 영향이 매우 크게 작용하고 있으며, 갈수량은 자연유량에 비해 지하수 양수로 인해 약 11.2%, 저수지 관개로 인해 약 31.2%, 지하수 양수 및 저수지 관개로 인해 약 39.9% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다.
- (3) 금광 저수지 직하류부에서도 저수지 관개에 의한 영향이 지배적으로 발생하고 있으며, 갈수량은 자연유량에 비해 지하수

양수로 인해 약 7.2%, 저수지 관개로 인해 약 82.5%, 지하수 양수 및 저수지 관개로 인해 약 84.9% 만큼 감소하여 저수지 영향이 절대적으로 작용하는 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 한강홍수통제소“하천변 지하수 이용에 따른 영향권 설정 방안 연구”과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Arnold, J. G., Allen, P. M. and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Choi, N. W., Choi, H., No, H. W. and Jee, H. K. (2009). “A study on the irrigation reservoir to prevent drying stream.” *Journal of Korea Water Resources Association Conference*, pp. 390-394 (in Korean).
- Chung, I.-M., Kim, N. W., Na, H., Lee, J., Yoo, S., Kim, J. and Yang, S. (2011). “Integrated surface-groundwater analysis for the pyoseon region, Jeju Island in Korea.” *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 27, No. 6, pp. 875-886.
- Kim, B. K., Kim, B. S. and Kwon, H. H. (2009). “Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 29, No. 1B, pp. 11-22 (in Korean).
- Kim, D. H. and Kim, S. M. (2014). “Analysis of water quality spatial characteristics for depleted downstream of agricultural reservoir.” *Journal of Agriculture & Life Science*, Vol. 48, No. 6, pp. 387-398 (in Korean).
- Kim, D. J., Park, K. W. and Jo, J. H. (2008) “Analysis of characteristics for irrigation reservoir using SWAT model.” *Journal of Korea Water Resources Association Conference*, pp. 810-817 (in Korean).
- 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.
- Kim, N. W., Lee, J. Chung, I. M. and Lee, M. H. (2013). “Combined effects of groundwater abstraction and irrigation reservoir on streamflow.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 7, pp. 719-733 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, J., Chung, I. M. and Sung, G. Y. (2012). “Analysis of effects of groundwater abstraction on streamflow for Sinduncheon watershed.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 1259-1273 (in Korean).
- Kim, N. W., Na, H. and Chung, I. M. (2011). “Integrated surface-groundwater hydrologic analysis for evaluating effectiveness of groundwater dam in Ssangcheon watershed.” *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 44, No. 6, pp. 525-532 (in Korean).
- Kite, G. W. (2007). *Manual for the SLURP hydrological model Version 12.7*.
- Lee, J., Kim, N. W. and Chung, I. M. (2013). “Assessment of streamflow depletion due to groundwater pumping from a well.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 11, pp. 1079-1088 (in Korean).
- Lee, K. S., Chung, E. S. and Shin, M. J. (2006). “Effects of changes of climate, groundwater withdrawal, and landuse on total flow during dry period.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 11, pp. 923-934 (in Korean).
- Lee, W. S. (2008). *Estimation of sustainable groundwater yield considering stream-aquifer interactions*, Ph.D. thesis. Department of Civil Engineering, Seoul National University.
- Lee, W. S., Chung, E. S., Kim, S. U. and Lee, K. S. (2010). “Development of TANK\_GS model to consider the interaction between surface water and groundwater.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 10, pp. 893-909 (in Korean).
- Lee, Y. E. and Kim, S. M. (2013). “Temporal and spatial analysis of hydrology and water quality in small rural streams for stream depletion investigation.” *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 6, pp. 177-186 (in Korean).
- Lee, Y. J., Park, M. J., Park, K. W. and Kim, S. J. (2008). “Analysis of hydrologic behavior including agricultural reservoir operation using SWAT model.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 11, No. 1, pp. 20-30 (in Korean).
- 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, p. 528.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MLIT) (2013). *Guideline for estimation of groundwater use rate* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010). *Study on assessment of drying stream and improvement method*, pp. 5-47-5-111 (in Korean).
- Oh, S. T. and Kim, J. T. (2007). “A time rivers outflow interpreting according to an agriculture reservoir operation.” *Journal of Korea Water Resources Association Conference*, pp. 174-177 (in Korean).
- Park, K. W., Yoon, Y. J. and Ju, U. J. (2005). “Analysis of drying stream characteristics in the rural area.” *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, pp. 68-73 (in Korean).
- Park, M. J., Park, G. A. and Kim, S. J. (2007). “Analysis of hydrologic behavior of SLURP model including agricultural reservoir operation.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 5B, pp. 515-523 (in Korean).
- Song, I. R. Jung, C. Y., Min, G. H. and Jung, S. W. (2010). “A study on runoff characteristics by a reservoir in hyungsan river basin.” *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, pp. 1312-1316 (in Korean).