북하천 중상류 유역의 자연유량 산정

Estimation of Natural Streamflow for the Bokhacheon Middle-upper Watershed

김 남 원* / 이 정 우** / 이 정 은***

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo / Lee, Jeong Eun

Abstract

The objectives of this study are to construct the natural streamflow in the Bokhacheon middle-upper watershed using the SWAT-K model and to assess the impacts of groundwater withdrawals, water intake, treated sewage water release on streamflow. The simulated natural streamflow from 2006 to 2013 showed the minimum discharge of $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, the annual average discharge of $26.2 \text{ m}^3/\text{s}$, the drought flow of $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ at the outlet of the study area. The simulated results indicated that the groundwater pumping has induced the decrease of 34% in drought flow against the natural condition and the net water release has caused the increase of 15%, while the combined effects of the groundwater pumping and the net water release have induced the decrease of 19%. It was found out from the simulated natural streamflow data that the specific discharges of the abundant flow, normal flow, low flow, drought flow in the upper-middle channels of the Bokha-cheon watershed have a tendency to increase as the drainage area increases, but the specific discharges showed almost constant values at any downstream point with drainage area more than about 180 km^2 .

Keywords : SWAT-K, natural flow, groundwater pumping, water intake, treated sewage water release

요 지

본 연구에서는 북하천 중상류 유역에 대해 준분포형 유역수문모형 SWAT-K를 적용하여 자연유량을 산정하고, 하천유량 변화를 야기하는 지하수 양수량, 하천수 취수량, 하수처리수 방류량 등의 인위적인 요인으로 인한 영향을 평가하였다. 2006년부터 2013년까지의 자연상태의 하천유량을 모의한 결과 최저유량은 $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균유량은 $26.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 갈수량은 약 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 지하수 이용, 하천수 취수, 하수처리수 방류 등 각각의 인위적 요인에 의한 하천유량의 상대적 변화를 분석한 결과, 갈수량은 지하수 양수로 인해 자연상태에 비해 약 34% 감소, 하수처리수 방류와 하천수 취수의 복합 영향으로 인해 약 15% 증가, 지하수 양수, 하수처리수 방류와 하천수 취수의 복합 영향으로 약 19% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 북하천 본류를 따라 모의된 자연유량 자료를 이용하여 비유량의 거동 특성을 분석한 결과, 중상류 유역에서는 지배면적이 증가할수록 비풍수량, 비평수량, 비저수량, 비갈수량 등의 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 하류부로 내려오면서 지배면적이 약 180 km^2 이상에서부터는 면적과 상관없이 거의 일정한 비유량 값을 나타내는 것으로

* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구위원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr, Tel: 031-910-0529)

Corresponding Author, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구위원 (e-mail: jeus22@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

분석되었다.

핵심용어 : SWAT-K, 자연유량, 지하수 양수, 하천수 취수, 하수처리수 방류

1. 서 론

자연상태의 장기간 하천유량자료는 하천수 사용 허가, 유지유량 설정, 환경유량 설정 등 각종 용수의 기준유량을 산정하는데 활용되는 매우 중요한 수문자료이다(Kim et al., 2006; Kim et al., 2007). 그러나 장기간 연속적인 하천유량 관측자료를 확보할 수 있는 지점이 한정적이고, 관측자료가 있다하더라도 하천유량 관측자료는 댐, 저수지, 도수로, 하천수 취수, 하수처리수 방류, 지하수 양수 등 여러 인위적 요인에 의해 교란되어 유출의 자연적 경향이나 변동 특성을 파악하는데 한계가 있다. 따라서 장기유출모의를 통해 간접적으로 장기간의 연속적인 자연유량을 산정하여 실무에 활용되고 있다.

자연유량 산정에 관한 국내 연구로서 Lee et al. (1994)는 강수 및 증발 자료를 이용한 Thomas 월 유출 모형을 이용하여 각종 용수이용에 따른 유출손실을 고려하여 금강 하구호 유입지점의 자연유출량을 산정하고 상류의 대청댐으로 인한 홍수기 및 비홍수기의 유출량 변화를 분석하였다. Ryu et al. (2006)은 RRFS 모형을 금강수계에 적용하여 주요지점인 대청댐 및 공주지점을 대상으로 모의결과와 실측결과와의 적합과정을 거친 후 모형에서 생·공·농업용수량, 댐취수량 및 댐방류량 등 인위적인 요소를 배제함으로써 자연상태에서의 유출량인 자연유량을 산정하였다. 우리나라의 수자원관리 및 계획의 근간이 되는 수자원장기종합계획(2006~2020) (CTM and KWRC, 2006)에서는 4대 권역의 각 중권역별 기준지점을 선정하고, 각 지점별로 개념적 집중형 유출모형 TANK를 이용하여 이수계획 수립을 위한 장기간의 자연유출량을 산정하였다. Kim et al. (2008) 등은 물리적 준분포형 유역수문모형인 SWAT-K를 이용하여 한강유역의 자연유출량을 산정하고 충주댐과 소양강댐에 의한 팔당댐 하류 목표지점에서의 공급가능 유하량을 분석하였다. Kim and Shin (2011)은 영산강 유역에 대해서 SWAT-K 모형으로 유역 내에 댐이 없는 상태를 가상으로 모의하여 유역의 자연유량을 산정하고, 이를 댐이 있는 현재 상태의 유출량과 비교하여 농업전용 댐 운영이 유역 유출 변화에 미치는 영향을 분석하였다. Kim and Kim (2012)은 TANK 모형과 SWAT 모형을 이용하여 한강수계 팔당댐 상류의 자연유출량을 산

정·비교하였고, 특히 SWAT 모형은 댐 방류량과 인위적인 용수수요가 없는 상태의 자연유출량을 추정하고 댐개발 진후에 따른 유량변동을 평가하는데 있어 높은 신뢰성을 보장할 수 있을 것으로 기대하였다. Kim et al. (2012)은 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 신둔천 유역에 적용하여 현 상태 및 자연상태의 하천유량을 모의하고, 지하수 양수에 의한 하천유량의 변화를 고찰하였다. Kim et al. (2013) 또한 SWAT-MODFLOW 모형을 죽산천 유역에 적용하여 농업용 저수지와 지하수 양수의 영향을 배제한 자연유량을 산정하였으며, 두 인위적 요인이 하천유량에 미치는 개별 및 복합 영향을 분석하였다.

이상과 같이 국내에서는 TANK, RRFS, SWAT 및 SWAT-K 등의 장기유출모형을 이용하여 자연유량을 산정하는 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 일부 지하수 영향을 고려한 연구가 있었지만 대부분의 연구가 대규모 유역에 대해 댐 영향을 배제한 자연유량 산정에 관한 연구에 집중되었고, 지하수 이용, 하천수 취수, 하수처리 방류수 등 댐 이외의 다른 인위적 요인의 복합 영향을 배제한 자연유량 산정에 관한 연구는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 하천수 취수 및 지하수 이용이 장기간 이루어져 왔고 유역내에 대규모 하수처리장이 위치해 있는 북한천 유역에 대해 SWAT-K 모형을 이용하여 자연유량을 산정하였다. 또한 자연유량을 기준으로 지하수 이용, 하천수 취수, 하수처리수 방류 등 각각의 인위적 요인에 의한 하천유량의 상대적 변화를 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 적용 모형

미국 농무성에서 개발된 SWAT (Arnold et al., 1993; Neitsch et al., 2005)은 토양 및 토지이용 관리 조건의 변화에 따른 물, 유사, 오염원, 농업화학물질 등의 장기간 부하량을 예측하는 유역수문모형이다. 이 모형으로 모의할 수 있는 주요 성분요소는 수문, 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질, 살충제, 농업관리 등이다. 이 중 수문성분 모의는 HRU (Hydrologic Response Unit)를 수문응답의 기본단위로 하여 강수차단, 지표유출 및 침투, 증발

및 증산, 중간유출 및 침투, 함양, 지하수유출 순으로 이루어진다. 강수차단량은 엽면적지수의 함수로 결정되고, 지표유출량은 토양수분량에 따라 유출곡선지수값(CN)을 계산하는 수정 NRCS 유출곡선지수법 또는 Green-Ampt 방식에 의해 산정된다. 잠재증발산량은 Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Hargreaves 방식 등에 계산되고, 여기에 토양수분 부족량을 고려하여 실제증발산량이 산정된다. 토양층을 통해 하천으로 유출되는 중간유출량은 토양층의 포화수리전도도, 경사장 및 경사 등의 함수인 운동학적 저류모델(kinematic storage model)로 계산되며, 이와 동시에 연직하향으로의 침투량이 저류추적법(storage routing method)으로 계산된다. 지하수 함양량은 토양대 아래 비포화대를 선형저수지로 간주하여 금일 침투량과 작일 함양량의 가중합으로 계산되며, 지하수 유출량 또한 포화대를 선형저수지로 간주하여 금일 함양량과 작일배출량의 가중합으로 계산된다. 그리고 지표유출량, 중간유출량, 지하수 유출량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 하도추적 과정을 거쳐 하천유출량이 산정된다(Neitsch et al., 2005).

SWAT-K 모형은 미국에서 개발된 SWAT 모형을 모태로 하여 국내 유역 특성에 적합하도록 수문, 수질 성분 계산 알고리즘의 개선, 국내 토양 D/B의 탑재, MODFLOW 및 SWMM 등 다른 모형과의 결합(Kim et al., 2004; Kim et al., 2008; Kim et al., 2011) 등을 통해 SWAT을 개선한 통합모형이다. 이 모형은 인위적, 자연적인 물순환 구조 변화와 지표수-지하수 통합해석, 산림지역, 농업지역, 도시지역에서의 물순환 해석 방법이 개선되어 유출해석의 정확성은 물론 유사 및 비점오염물질의 모의 신뢰성을 제고시킨 유역수문모형이라 할 수 있다.

2.2 모형의 개선

Kim et al. (2012)와 Kim et al. (2013)의 연구에서 지하수 이용 영향의 고려 유무에 따른 하천유량 변동 특성을 다루었으나, 준분포형 수문모형 SWAT과 분포형 지하수 유동모형 MODFLOW가 결합된 지표수-지하수 통합모형을 적용함에 따라 입력자료 구축 및 연산과정에 있어서 장시간 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 준분포형 수문모형 SWAT 또는 SWAT-K만으로 지하수 양수 영향을 고려할 수 있도록 모형을 수정하였다.

SWAT 및 SWAT-K 모형에서는 지하수 대수층을 얇은 대수층과 깊은 대수층으로 구분하고 있으며, 얇은 대수층으로부터 하천으로의 지하수 유출량은 시간적 지체 및 감쇠를 고려하여 Eq. (1)과 같이 작일 지하수 유출량과

금일 지하수 함양량의 가중합으로 계산된다.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrg} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (1)$$

여기서, $Q_{gw,i}$ 는 i일에 주하천으로 유입되는 지하수 유출량(mm/day), $Q_{gw,i-1}$ 는 i-1일에 주하천으로 유입되는 지하수 유출량(mm/day), α_{gw} 는 기저유출의 감수상수, Δt 는 시간간격, w_{rchrg} 는 i일의 대수층으로의 지하수함양량(mm/day)이다. Eq. (1)은 저류량(S)과 유출량(O)간 선형의 관계인 $S=KO$ 를 저류량의 시간적 변화는 유입량(I)과 유출량(O)의 차와 같다는 연속방정식 $dS/dt=I-O$ 에 대입하여 얻은 O 에 관한 1차 상미분방정식의 해이며, 이 때 저류상수 K 가 기저유출의 감수상수의 α_{gw} 의 역수, 유입량 I 가 지하수 함양량 w_{rchrg} , 유출량 O 가 지하수 유출량 Q_{gw} 가 된다.

본 연구에서는 지하수 양수량 Q_{pump} 으로 인한 지하수 유출 감소 효과를 고려하기 위해서 Eq. (1)에서 지하수 함양량 w_{rchrg} 를 Eq. (2)와 같이 표현되는 순 지하수 함양량 w'_{rchrg} 으로 대체하고, 모형에서 지하수 함양 및 지하수 유출을 계산하는 서브루틴 gwmod.f를 수정하였다.

$$w'_{rchrg} = w_{rchrg} - Q_{pump} \quad (2)$$

또한, 본 연구에서는 Kim et al. (2012)에서 제안한 방법처럼 실제 지하수 관정의 좌표와 모형의 기본연산단위인 HRU의 공간적 위치를 서로 연결하였으며, 충적층 관정은 모형에서 얇은 대수층과 암반층 관정은 모형에서 깊은 대수층과 연결하였다. 지하수 용도가 농업용 관정인 경우 배출된 양수량이 해당 HRU의 피복 강수량에 더해져 일부가 토양으로 침투 및 증발산, 함양 및 유출 등 수문순환 과정을 거쳐 하천으로 회귀되도록 하였고, 생공용 관정인 경우는 양수량에 회귀율을 곱하여 하천으로 직접 배출되거나 유역외로 보내지도록 모형을 수정하였다.

2.3 자연유량 산정 방법

소유역 분할, 기상자료, 토지이용 및 토양자료, 물이용자료(지하수 양수량, 하천수 취수량), 하수처리수 방류량 등의 자료를 모형에 입력하고, 홍천수위관측소 지점의 관측유출량과 모의유출량이 적합할 때까지 모형의 매개변수를 조정하여 모형을 반복 구동하였다. 모형의 검보정을 완료한 후에 하천유량의 교란을 야기시키는 지하수 양수량, 하천수 취수량, 하수처리수 방류량 자료를 모형에서 제거한 후에 하천유량을 다시 모의하여 이를 자연유량으

로 간주하였다.

3. 모형의 적용

3.1 연구 대상 유역

북하천은 경기도 용인시 양지면에 위치한 도고봉(El. 440 m)에서 발원하여 이천시를 관류하면서 한강 좌안측으로 유입되는 하천이다(Gyeonggi Provincial Government, 2006). 본 연구에서는 북하천 출구인 한강과의 합류점으로부터 상류쪽으로 약 4.98 km에 위치한 홍천수위관측소를 유역 출구로 하는 북하천 중상류 유역을 연구의 대상유역으로 설정하였다. 대상유역의 면적은 약 294.4 km²로서 북하천 전체 유역면적의 약 95%를 차지하고 있다.

3.2 모형의 입력자료 구축

3.2.1 수치주제도 및 소유역 분할

홍천수위관측소 상류유역에 대해 SWAT-K 모형의 구축을 위한 입력자료를 구축하였다. 수치표고모델(Digital Elevation Model; 이하 DEM)은 수치지도로부터 30m 격자의 크기로 가공하여 이용하였다. 북하천 유역의 DEM과 소유역 분할현황, 그리고 하천망은 Fig. 2와 같다. 그림에서 우상단의 소유역 23번 출구부가 본 연구대상유역의 유출구이며, 총 26개의 소유역으로 분할하였다.

토지이용도는 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도(중분류)를 적용하였고, 토양도의 경우 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도(토양통 분류)를 이용하였다. Fig. 2(b)는 유역의 토지이용도를 나타낸 것으로 유역의 토지이용현황은 크게 산림지역과 농경지

임을 알 수 있다. 토양도의 경우 Fig. 2(c)와 같이 삼각 토양통이 가장 큰 비중을 차지하였으며, 모두 54개의 토양통이 분포하고 있다.

3.2.2 수문기상자료

수문기상자료는 2005년부터 2013년까지 구축하고 이중 2005년은 모형의 워밍업 기간으로 활용하고 2006년부터 2013년까지의 자료는 분석을 위한 입력 자료로 활용하였다. 북하천 유역에 영향을 미치는 강우관측지점은 상풍, 여주, 이천, 남곡, 태평, 설성, 삼죽 강우관측소 및 이천기상대로 모두 8지점이며, 이를 바탕으로 티센망을 구축하여 소유역별 평균강우량을 산정하여 모형에 입력하였다. 최고/최저 기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 기상자료는 이천기상대 자료를 수집하여 모형에 입력하였다.

3.2.3 물이용 자료

북하천 중상류 유역에 대한 지하수 이용량은 지자체 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정의 일 이용량 자료를 수집하여 모형에 입력하였고, 일이용량 자료가 누락된 경우는 취수계획량 자료로 대신하였다. 홍천수위관측소 상류쪽 북하천 유역내에 진리정수장과 진로(주) 취수장 두 개의 하천취수장이 있고, 이천, 단월, 오천, 내촌, 도립2, 덕평, 지석, 현방, 대관, 장동, 매곡1A, 매곡2, 작촌, 경사1, 장암, 도립1, 송말1, 송말2, 송말3, 해월, 장동2, 매곡1B, 고백1, 고백2, 경사2, 관리, 회역, 동산, 울현, 신원2, 군량, 석산, 우곡, 조읍, 도지 등 총 35개의 하수처리방류장이 위치해 있다. 따라서 모형 구축시 취수장으로부터 하천수취수량을 하천유량에서 감해지도록 처리하였고, 하수처리장으로부터의 하수처리수방류량은 하천유량에 더해지도록 처리하였다.

3.3 모형의 보정

연구대상유역의 출구부인 홍천 수위관측소 지점의 일유량자료를 기준으로 모형의 매개변수 보정을 실시하였다. 관측 자료의 신뢰도를 평가하기 위해서 Fig. 3과 같이 2006년 이후의 수위와 유량을 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 2006년부터 2008년까지의 수위 및 유량자료는 저수부분에서 크기의 변화 없이 일정하게 유지되는 기간이 상당부분 존재하는 등 자료의 신뢰도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 일차적으로 2006년부터 2008년까지를 보정 기간에서 제외하였다. 2009년 이후 관측자료의 적정성을 평가하기 위해서 Fig. 4와 같이 수위와 유량 자료를 일대일 대응시켜 도시하였다. Fig. 4(a)는 2009년 1

Fig. 1. Study Watershed

Fig. 2. GIS Maps for Bokha-cheon Middle-upper Watershed

월부터 2013년 6월까지의 수위-유량 자료를 나타낸 것으로 저수부분에서의 수위-유량 관계가 일관되지 않고 크게 두 가지 형태로 갈라져 나타나고 있다. 이는 해당년도별로 적용한 수위-유량 관계 곡선식들이 저수부분에서 서로 일관성을 확보하지 못하고 있는 것을 의미한다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에서 2009년과 2010년 자료를 제외하고 수위-유량 관계를 도식한 것으로 곡선형태가 매끄럽게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4(b)와 같이 수위-유량 관계의 일관성이 유지된 2011년 이후의 자료를 모형의 보정 기간으로 설정하였다.

선행논문 Kim et al. (2012)에서는 복하천 홍천수위관

측소 지점의 모의유량과 관측유량을 적합시키기 위해서 유역지체와 관련된 매개변수 SURLAG, 유역평균경사 SLOPE, 경사장 SLSOIL, 증산보상계수 EPCO, 함양지체 변수 GWDELAY, 하도추적과 관련된 매개변수인 CHLN (Manning's n value) 등의 변수를 보정하였다. 본 연구에서도 모형의 보정을 위해서 Kim et al. (2012)이 사용한 것과 동일한 매개변수값을 사용하였으나, 최근 2011년 이후의 관측유량 자료 및 저유량부의 곡선 양상을 보다 더 잘 일치시키기 위해서 CN2 (AMC-II runoff curve number)를 기본 디폴트 값에 비해 10%만큼 줄이고, 수문곡선의 침투부 형태와 관련된 변수인 시간가중유출곡선지수 가중치 ALPHA (Kim et al., 2008)를 0.2, 기저유출 감수상

수ALPHA_ BF (baseflow recession constant)를 0.005를 사용하였다. Table 1은 보정 변수값을 정리하여 나타낸 것이다.

Fig. 5는 일 유출수문곡선의 관측치와 모의치를 비교

한 것으로 전체적인 유출경향으로 볼 때 모의치가 관측치에 잘 적합하고 있음을 시각적으로 확인할 수 있다. 보정 결과의 적합성을 판단하기 위한 통계값으로 결정계수 (Determination Coefficient, R^2)을 계산한 결과 0.845로 모

(a) Stream water level

(b) Stream discharge

Fig. 3. Observed Stream Water Level and Discharge at the Heungcheon Gauging Station

(a) from 2009 to 2013

(b) from 2011 to 2013

Fig. 4. Stage-discharge Relationship at the Heungcheon Gauging Station

의 결과가 매우 양호한 것으로 나타났다.

3.4 자연유량 산정

현재의 물이용 조건을 모두 고려한 상태에서 모형의 보정을 완료한 후에 다시 이 상태에서 지하수 양수량, 하천수 취수량, 하수처리수 방류량 자료를 모두 제거하고 동일 매개변수를 적용하여 2006년부터 2013년까지의 자연상태의 하천유량을 모의하였다. Fig. 6은 자연유량 모의치를 나타낸 것으로 모의기간동안 최저유량은 $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 최고유량

은 $589.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균유량은 $26.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 그리고 갈수량은 약 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다.

3.5 인위적 요인 영향 평가

지하수 양수, 하천수 취수, 하수처리수 방류가 하천유량에 미치는 영향 정도를 비교하기 위해서 각각의 경우를 고려하여 유역출구에서의 하천유량을 모의하고 여기에 초과확률을 부여하여 Fig. 7과 같이 유황곡선을 작성하였다.

Table 1. Calibrated Model Parameters

Parameter	Definition	Calibrated value
CN2	AMC-II runoff curve number	0.9 times the default value
ALPHA	Temporal weighing coefficient	0.2
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0.5
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	0.7 times the default value
EPCO	Plant uptake compensation factor	1.0
GWDELAY	Delay of groundwater recharge	0.033
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0.005
CH_N	Manning's n value	0.030

Fig. 5. Comparison of the Observed and Simulated Streamflows During the Calibration Period at the Heungcheon Gauging Station

Fig. 6. Simulated Natural Streamflow from 2006 to 2013

Fig. 7에서 긴 점선은 물이용 및 방류체계를 모두 고려한 현재상태(current), 실선은 하천유량 교란이 없는 자연상태(natural), 짧은 점선은 지하수 이용만을 고려했을 때(with pumping), 일점쇄선은 하수처리수 방류와 하천수 취수만을 고려했을 때(with net release)의 모의 유황곡선을 나타내고 있다. 하천수취수량이 상대적으로 매우 작기 때문에 하수처리수 방류 및 하천수 취수 각각의 경우의 결과를 도시하지 않고 하수처리수방류량에서 하천수취수량을 감한 순 하수처리수 방류량(net release)의 경우에 대한 모의 결과를 도시하였다. 유황곡선에서 확인할 수 있듯이 자연유량에 비해 지하수 양수로 인한 하천유량의 감소가 분명하게 나타나고 있고, 변화 정도는 작지만 하수처리수 방류로 인한 하천유량의 증가 현상 또한 나타나고 있다. 현재상태의 하천유량은 지하수 양수와 하수처리수 방류의 복합 영향으로 자연유량과 큰 차이가 나타나지 않았다.

Table 2는 Fig. 7에서 초과확률 약 0.27%, 26%, 50%, 78%, 97%일 때의 하천유량값을 판독하여 각각 1년 빈도 홍수량(1일), 풍수량(95일), 평수량(185일), 저수량(275일), 갈수량(355일) 값을 구한 것이다. 표에서 괄호 안의 값은 자연 상태에 비해 순 하수처리수 방류 및 지하수 양수로 인해 증감된 하천유량의 비율을 나타낸 것으로 풍수량에

서 갈수량으로 갈수록 증감률이 커지고 있음을 알 수 있다. 특히 갈수량은 자연유출량인 경우에 비해 지하수 양수로 인해 약 34% 만큼 큰 폭으로 감소하였고, 순 하수처리수 방류량의 하천으로의 회귀 영향으로 약 15% 증가, 지하수 양수 및 순 하수처리수 방류수의 복합 영향으로 현재상태는 자연상태에 비해 약 19% 만큼 감소하는 것으로 나타났다. 한편 1년 빈도홍수량은 조건에 따라 거의 변화가 없어 물이용 체계로 인한 인위적인 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

3.6 자연유량의 비유량 분석

복하천 분류를 따라 모의된 자연유량 자료를 토대로 비유량의 거동 특성을 분석하였다. Fig. 2(a)에서 소유역 23, 4, 5, 10, 22, 14, 18, 17, 12번 출구점 각각에서의 모의유량 자료로부터 1년빈도 홍수량, 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량을 산정하고 이를 각 소유역 출구점에서의 지배면적으로 나누어 비유량을 계산하여 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8(a)은 비풍수량, 비평수량, 비저수량, 비갈수량과 지배면적간의 관계를 나타낸 것으로 면적이 증가할수록 비유량이 증가하다가 약 180 km² 이상에서부터는 면적과 상관없이 거의 일정한 값을 나타내는 경향을 보이고 있다. 또한 비갈수량에서 비풍수량으로 유량규모가 커질수록

Table 2. Standard Flows (unit : m³/sec)

Scenarios	1-year flood (1 day)	Abundant flow (95 days)	Normal flow (185 days)	Low flow (275 days)	Drought Flow (355 days)
W/O Pumping & W/O Net Release	312.0	7.06	4.43	3.08	2.04
With Pumping & W/O Net Release	312.0 (-0.0%)	6.24 (-12%)	3.63 (-18%)	2.32 (-25%)	1.35 (-34%)
W/O Pumping & With Net Release	313.0 (+0.3%)	7.40 (+5%)	4.79 (+8%)	3.43 (+11%)	2.34 (+15%)
With Pumping & With Net Release	312.0 (-0.0%)	6.60 (-7%)	3.99 (-10%)	2.67 (-13%)	1.66 (-19%)

Fig. 7. Comparison of Flow Duration Curves according to Water Use Conditions

증가 경향이 둔감해지는 특징을 나타내고 있다. 반면에 1년 빈도 비홍수량은 Fig. 8(b)와 같이 하도 및 유역의 저류효과로 인해 하류로 내려갈수록 즉 지배면적이 증가할수록 감소하는 경향이 분명하게 나타나고 있다.

Fig. 8과 같이 나타난 비유량과 배수면적간의 관계를 Eq. (3)과 같이 거듭제곱 형태로 회귀분석한 결과와, Fig. 8(a)에서 면적이 약 180 km²보다 큰 경우의 일정한 비유

량값 c 를 Table 3에 정리하였다.

$$Q/A = q = a A^b \quad (3)$$

여기서, Q 는 일유량(m³/sec), A 는 지배면적(km²), q 는 비유량(m³/sec/km²), 그리고 a 와 b 는 회귀계수이다. 상기와 같이 풍수량 이하의 비유량은 어느 유역규모에서는 증가하는 경향을 보이는 등 비유량이 유역면적과 큰 상관성

(a) Standard flows

(b) 1-year flood

Fig. 8. Relationship between Specific Discharge and Drainage Area

Table 3. Regression Coefficients

Area (km ²)	Coefficient	1-year flood (1 day)	Abundant flow (95 days)	Normal flow (185 days)	Low flow (275 days)	Drought Flow (355 days)
< 180	a	1.989	0.010	0.004	0.002	0.0008
	b	-0.110	0.142	0.264	0.335	0.444
> 180	a	1.989	-	-	-	-
	b	-0.110	-	-	-	-
	c	-	0.021	0.014	0.010	0.007

을 가지는 것으로 분석되었는데, 이러한 원인을 파악하기 위해서 복하천 본류의 소유역 분할점에서의 면적평균 연평균 수문성분량을 산정하였다. Fig. 9(a)는 유역면적에 따른 강수량(precipitation), 증발산량(evapotranspiration), 침투량(percolation) 각각의 면적평균값을 나타낸 것이고, Fig. 9(b)는 유역면적에 따른 지표면유출량(surface flow), 중간유출량(lateral flow), 지하수유출량(groundwater flow) 등 각 유출성분들의 면적평균값을 나타낸 것이다. 면적평균 강수량은 지배면적이 증가할수록 약간의 증가 양상을 보이고 있고, 이로 인한 토양수분 증가의 영향으로 증발산량 또한 지배면적이 클수록 증가하는 양상을 보이고 있다. 침투량은 강수량 변화폭에 비해 큰 편차를 보이고 있고 특히 면적이 작은 범위에서는 증가율이 더 크게 나타나고 있다. 이러한 침투량의 변화는 토양층 특성의 영향도 있겠지만 보다 주된 원인은 하류로 내려올수록 평균경사가 줄어 Fig. 9(b)와 같이 토양층으로부터 하천으로의

수평흐름성분인 중간유출량이 작아지고 상대적으로 지하수계로 이동하는 연직하향으로의 물이동 성분이 증가한데서 기인한 것으로 보인다. 이처럼 연구대상유역의 중상류 지역은 면적이 증가할수록 면적평균 침투량 및 지하수유출량의 증가폭이 크기 때문에 풍수량 이하의 비유량이 유역면적이 커질수록 증가하는 양상이 발생한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 복하천 유역을 대상으로 유역수문모형 SWAT-K를 이용하여 자연유량을 산정하였다. 이를 위해서 하천유량 변화를 야기하는 지하수 양수량, 하천수 취수량, 하수처리수 방류량 등의 물이용 및 방류 조건을 고려한 현 상태의 유출량을 모의하고 다시 이러한 인위적 조건을 제거한 상태에서의 자연유량을 모의하였다. 특히

(a) Standard flows

(b) 1-year flood

Fig. 9. Hydrological Components

선형 저수지 시스템으로 간주하고 있는 모형내 지하수 해석 모듈을 개선하여 지하수 양수 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 2006년부터 2013년까지의 자연상태의 하천유량을 모의한 결과 최저유량은 $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 최고유량은 $589.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균유량은 $26.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 그리고 갈수량은 약 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 또한 모의된 자연유량을 기준으로 지하수 이용, 하천수 취수, 하수처리수 방류 등 각각의 인위적 요인에 의한 하천유량의 상대적 변화를 분석한 결과, 갈수량은 자연상태에 비해 지하수 양수로 인해 약 34% 만큼 큰 폭으로 감소하였고, 하수처리수 방류와 하천수 취수의 복합 영향으로 인해 약 15% 증가, 지하수 양수, 하수처리수 방류, 하천수 취수의 복합 영향으로 약 19% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 1년 빈도홍수량은 지하수 이용, 하수처리수 방류, 하천수 취수 조건 등 물이용 체계로 인한 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었다.

복하천 본류를 따라 모의된 자연유량 자료를 이용하여 비유량의 거동 특성을 분석한 결과, 중상류 유역에서는 지배면적이 증가할수록 비풍수량, 비평수량, 비저수량, 비갈수량 등의 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 하류부로 내려오면서 지배면적이 약 180 km^2 이상에서부터는 면적과 상관없이 거의 일정한 비유량 값을 나타내었다. 1년 빈도 비홍수량은 하도 및 유역의 저류효과로 인해 지배면적이 증가할수록 감소하는 경향이 분명하게 발생하였다. 풍수량 이하의 비유량이 지배면적이 약 180 km^2 이내에서는 증가하는 양상을 보이는 원인을 파악하기 위해서 복하천 본류의 소유역 분할점에서의 면적평균 수문성분량을 산정하여 지배면적간의 관계를 분석하였으며, 그 결과 유출수문곡선의 저수부분에 지배적인 요소인 지하수유출성분의 면적평균값이 중상류 지역에서는 면적이 증가할수록 커지는데서 저수부분의 비유량이 증가한 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 한강홍수통제소 “하천변 지하수 이용에 따른 영향권 설정 방안 연구” 과제 및 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

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.
- Construction and Transportation Ministry and Korea Water Resources Corporation (2006). *Comprehensive water resources plan (2006–2020)*.
- Gyeonggi Provincial Government (2006). *General planning on Bokha stream maintenance*, pp. 1–27.
- Kim, C.G., and Kim, N.W. (2012). “Comparison of natural flow estimates for the Han River basin using TANK and SWAT models.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 3, pp. 301–316.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Won, Y.S. (2004). “The development of fully coupled SWAT–MODFLOW model (I): Model development.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 11, pp. 499–507.
- 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, B.J., and Lee, J. (2007). “Analysis of the characteristics of low-flow behavior based on spatial simulate flows.” *Korea Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 27, No. 4B, pp. 431–440.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M., and Kim, C.H. (2012). “Analysis of groundwater–stream interaction according to groundwater abstraction near Vinyl house area.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 1259–1273.
- 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.
- Kim, N.W., Lee, J.E., and Won, Y.S. (2006). “Estimation of natural flow in Han river basin.” *2006 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 799–803.
- Kim, N.W., and Shin, A.H. (2011). “Analysis of runoff change in Yeong San River watershed on the dam operation.” *2011 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, p. 400.
- Kim, N.W., Won, Y.S., Lee, J., Lee, J.E., and Jeong, J.H. (2011). “Hydrologic impacts of urban imperviousness

- in White Rock Creek watershed.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, No. 4, pp. 1759–1771.
- Kim, Y.G., Choi, G.W., Ham, M.S., and Kim, N.W. (2008). “The analysis of potential discharge by dam in Han River basin at dry Season.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 11, pp. 1143–1152.
- Lee, J.H., Kim, Y.I., Hwang, M.H., and Jung, J.S. (1994). “A study on the monthly river-inflow evaluation of the Keumgang estuary reservoir.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 27, No. 3, pp. 83–93.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, and Han River Flood Control Office (2011). *Assessment of streamflow depletion according to groundwater withdrawals near stream*, p. 126.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). *Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Version 2005*. Temple Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- Ruy, G.S., Hwang, M.H., and Koh, I.H. (2006). “Estimation of naturalized streamflow using RRFS model.” *2006 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1777–1781.

논문번호: 13-076	접수: 2013.09.26
수정일자: 2013.10.29	심사완료: 2013.10.29