

## 지하수 양수량과 하천수 감소량간 상관관계식 개발

### Development of Relational Formula between Groundwater Pumping Rate and Streamflow Depletion

김 남 원\* / 이 정 우\*\* / 이 정 은\*\*\* / 원 유 승\*\*\*\*

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo / Lee, Jung Eun / Won, You Seung

#### Abstract

The objective of this study is to develop the relational formula to estimate the streamflow depletion due to groundwater pumping near stream, which has been statistically derived by using the simulated data. The integrated surface water and groundwater model, SWAT-MODFLOW was applied to the Sinduncheon and Juksancheon watersheds to obtain the streamflow depletion data under various pumping conditions. Through the multiple regression analyses for the simulated streamflow depletion data, the relational formula between the streamflow depletion rate and various factors such as pumping rate, distance between well and stream, hydraulic properties in/near stream, amount of rainfall was obtained. The derived relational formula is easy to apply for assessing the effects of groundwater pumping on near stream, and is expected to be a tool for estimate the streamflow contribution to the pumped water.

**Keywords** : near stream, groundwater pumping, streamflow depletion, SWAT-MODFLOW, multiple regression analysis

#### 요 지

본 연구에서는 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 예측할 수 있는 상관관계식을 지표수-지하수 통합모의 결과를 이용하여 유도하였다. 신둔천과 죽산천 두 개의 시험유역에 대해 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 적용하여 다양한 양수조건에 따른 하천수 감소량 자료를 모의 생성하였으며, 생성된 자료를 바탕으로 다중회귀분석을 실시하여 지하수 양수량, 하천과 양수정 이격거리, 대수층 및 하천바닥의 수리특성, 강수량 등의 함수인 하천수 감소량 산정 식을 유도, 제시하였다. 개발된 상관관계식은 하천인근 지하수 양수에 따른 하천수 영향을 평가하는데 간편하게 적용될 수 있으며, 지하수 양수량 중 하천수에 해당하는 부분인 하천수 기여도를 산정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 하천인근, 지하수 양수, 하천수 감소량, SWAT-MODFLOW, 다중회귀분석

\* 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

\*\*\*\* 영산강홍수통제소 예보통제과장 (e-mail: yswon@korea.kr)

Yeongsan River Flood Control Office, 35 Yeonhwa-3ga, Seogu, Gwangju 502-811, Korea

## 1. 서론

하천변 농경지 경작 및 공업용수 등의 이용을 위한 지하수의 과다한 취수는 하천 건천화 또는 하천수량 감소의 주요 원인으로 인식되고 있다. 이에 따라 하천인근에서의 지하수개발·이용을 허가할 때에는 지하수 양수로 인한 하천에 미치는 영향을 사전에 검토하도록 법제화되어 있다. 지하수법 제7조의 2에 따르면, 하천구역으로부터 대통령령이 정하는 범위 안에서 지하수를 개발·이용할 경우 지하수영향조사서를 첨부하여 국토해양부장관과 미리 협의해야하고, 국토해양부장관은 하천인근에서의 지하수개발·이용이 하천의 수량에 영향을 미친다고 인정되는 경우에는 취수량·취수기간의 제한 및 취수금지 등을 요청할 수 있게 되어 있다. 그러나 실무적으로 지하수 이용이 하천수량에 미치는 영향을 정량적으로 검토할 수 있는 방법이 미흡하여 하천변 지하수 영향 검토업무 및 지하수 허가 절차상 어려움을 겪고 있다. 실제로 하천변 지하수 영향조사 실무에서는 주로 경험식에 의한 방법으로 양수 영향반경을 산정하고 이 반경 내에 하천이 위치하는지를 검토하여 하천 영향 여부를 정성적으로 판단하고 있다. 따라서 양수에 따른 하천수 감소량을 정량적으로 평가할 수 있는 실무편의의 방법이 필요하다.

지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정하기 위한 가장 이상적인 방법은 양수에 따른 하천수량 변화를 직접 계측(e.g., Environment Canterbury, 2000; Hunt et al., 2001; Nyholm et al., 2001, 2003; 김남원 등, 2012)하는 것이지만, 실제 현장 여건상 이 방법을 적용하기에는 비용이나 시간적인 면에서 현실적으로 매우 어렵다. 최근에는 컴퓨터 기술의 발전과 함께 수치해석 모델링을 통한 지하수 양수 영향을 분석한 연구(e.g., Sophocleous et al., 1995; Nyholm et al., 2003; 국토해양부, 2010; 김형수와 정재훈, 2009)가 주를 이루고 있으나, 수리지질자료 등 입력자료 구축의 어려움과 모델링 및 분석을 위해 전문가의 숙련된 기술이 필요하다. 따라서 적용상 간편한 장점 때문에 해석적인 방법으로 양수 영향을 예측하는 연구가 진행되어 왔다. 지하수 양수로 인한 하천수 감소량 산정에 관한 최초의 해석해가 하천바닥층이 대수층 바닥을 완전 관통한 조건에 대해 Theis (1941)에 의해 유도된 이래로 현재까지 다양한 형태의 해석해가 개발되어 오고 있다. Hantush (1965)는 하천의 바닥이 준투수층(semipervious)인 경우에 대해 해석해를 유도하였고, Hunt (1999)는 부분 관통 준투수층에 대한 해석해를 유도하여 현재 미국 지질조사소(USGS)에서 소프트웨어화하여 범용적으로 사용되고

있다. 이후 Hunt (2003, 2009)는 반피압대수층에 대한 식을 유도하였다. Butler et al. (2001, 2007)은 Hunt (1999)의 해석해처럼 하천 바닥이 대수층을 부분 관통하고 준투수성인 경우에 유한 하폭인 경우에 대해서도 해석해를 유도하였다. Singh (2000)은 하천수량 감소량을 시간에 대한 변화량뿐만 아니라 양수기간 동안 하천수의 총변화체적 형태로도 제시하였고, Singh (2005)은 비정상(unsteady) 양수로 인한 하천수량 감소량을 산정하는 해석적인 방법을 제시하였다. 이 외에도 다양한 조건에 대한 해석해들이 개발되어오고 있다.

상기의 해석해들은 적용상 간편하고 시간에 대한 함수로 나타내어졌기 때문에 양수 시간 경과에 따른 하천수 감소의 양상을 파악하는데 유용하다. 그러나 Hunt (1999)의 해석해처럼 시간이 장기간 경과함에 따라 지하수 양수량에 대한 하천수 감소량의 비가 1에 접근하여 장기간의 양수 영향 평가시에는 하천수 감소가 과다하게 예측될 우려가 있다. 또한 강우량 등 수문학적 영향이 고려되지 않아 지하수 함양에 의한 대수층의 회복 등의 영향을 고려할 수 없는 단점이 있어 장기간 영향을 거시적으로 파악하는데는 한계가 있다. 따라서 양수에 따른 하천수 영향을 예측, 평가하는데 있어서 대수층 및 하천의 수리특성과 수문학적 특성을 고려할 수 있고 해석적인 방법처럼 적용상 간편하여 실무에서 의사 결정도 빠르게 할 수 있는 상관관계식 형태의 경험식이 필요하다.

본 연구에서는 본 연구에서는 지하수 양수에 따른 하천수량 변화를 예측할 수 있는 간편 상관관계식을 제시하고자 하였다. 이를 위해서 신둔천과 죽산천 두 개의 시험유역에 대해 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 적용하여 다양한 시나리오별로 양수정 설치에 따른 하천수량 변화량을 모의하였고, 모의 결과를 이용하여 하천수 감소량과 이에 영향을 미칠 수 있는 인자들간에 다중회귀분석을 수행하여 양수에 따른 하천수 감소량 예측용 상관관계식을 유도, 제시하였다.

## 2. 지표수-지하수 통합모델링

### 2.1 대상유역

지하수 양수량과 하천수량 변화량간의 관계를 분석하기 위해서 하천 인근에서 지하수 이용이 많은 복하천 지류인 신둔천과 청미천 지류인 죽산천 유역을 연구대상유역으로 선정하였다. 신둔천 유역은 유역면적이 53.45 km<sup>2</sup>로서 복하천 유역의 전체 면적의 약 1/6을 차지하고 있으며, 유로연장은 12.59 km, 유역평균경사는 20.2%이다. 유

역내 토지피복상태는 논, 밭 등 농경지 23.17 km<sup>2</sup> (43.3%)가 상당 부분 차지하고 있으며(경기도, 2006), 하천 인근 지역에서 비닐하우스 시설이 많이 분포하여 지하수 이용량이 많다. 죽산천 유역은 유역면적이 54.20 km<sup>2</sup>로서 청미천 유역의 전체 면적의 약 8.7%를 차지하고 있으며 유로 연장은 15.32 km, 유역평균경사는 16.1% 이다. 죽산천 유역 역시 농경지가 21.86 km<sup>2</sup> (39.75%)로 상당부분 차지하고 있으며(경기도, 2003), 농업용수는 저수지와 지하수에 의존하고 있다. 또한 유역 내에 덕산, 용월, 장원 등 산업단지가 위치해 있어 공업용수 이용을 위해 지하수 이용량이 많은 지역도 존재한다.

## 2.2 SWAT-MODFLOW 모형

하천유량, 지하수위 등을 모의하기 위해서 지표수 지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 이용하였다. 이 모형은 토양과 토지이용 관리 조건의 변화에 따른 대규모 복잡한 유역에서 물, 유사, 농업화학물질의 장기간 부하량을 예측할 수 있는 준분포형 유역수문모형인 SWAT (Arnold et al., 1993)에 지하수 해석 기능을 강화하고자 3차원 지하수유동 해석모형 MODFLOW가 완전연동형으로 결합된 모형이다(김남원 등, 2004; Kim et al., 2008). SWAT 모형은 수리지질특성 및 인위적인 지하수 이용의 공간분포를 정밀하게 구현하는데 한계가 있으며, MODFLOW는 지하수 흐름 해석을 제외한 나머지 물 순환성분에 대한 해석방법이 포함되어 있지 않아 주요 입력자료인 지하수 함양량 및 하천수위의 결정에 어려움이 많다. 따라서 두 모형간의 단점을 보완하기 위해서 결합된 모형이 SWAT-MODFLOW 모형이다. 이 모형에서는 MODFLOW가 SWAT내에서 호출되는 형식으로 결합되었으며, 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT모형으로부터 추출하여 MODFLOW모형의 함양 패키지 통해 자동 입력되고, 하천과 대수층의 상호작용을 모의하기 위해 SWAT의 하도 추적 서브루틴과 MODFLOW의 하천 패키지가 연동된다. 또한 SWAT의 증발산 계산 서브루틴과 MODFLOW의 증발산 패키지, 그리고 SWAT의 물이동 계산 서브루틴과 MODFLOW의 우물 패키지 및 배수 패키지와의 서로 연결되어 있다. 이 모형으로 모의할 수 있는 주요 성분요소는 수문, 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질 등이며, 연속도의 구조를 가지기 때문에 장기간 거시적인 수문학적 거동 해석이 가능하고 하천과 대수층간 상호유동 해석이 가능하며, 저수지, 하천수 취수, 하수처리수 방류, 지하수 양수 등 인위적 요소의 공간적 영향 해석 가능하며 상류지역의 변화가 하류지역에 미치는 영향 분석 가능

한 장점이 있다.

## 2.3 모형의 입력자료 구축

모형 구동을 위해서 1:5,000 NGIS (National Geographic Information System) 수치지도를 이용하여 해상도 30 × 30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 구축하였고, 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도(2009년)를 적용하였고, 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀 토양도(2006년)를 이용하였다. 기상청 이천 관측소의 온도, 습도, 풍속, 일조시간 등의 기상 자료, 국토부 이천 강수량 자료 등은 1995년부터 2011년까지 구축하고 이 중 1995년부터 2005년까지의 자료는 통합모형의 워밍업 기간으로 활용하고 2006년부터 2011년까지의 자료는 분석을 위한 입력 자료로 활용하였다. 지하수 이용량 자료는 이천시와 안성시의 2011년 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정의 일 이용량 자료를 수집하여 모형에 입력하였으며, 농어촌 공사의 용면, 덕산, 장계, 용설 등의 농업용 저수지의 저수율 자료를 모형에 입력하였다. 지하수계 모사를 위해서 유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무흐름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수경계로 설정하였다. 지하수 함양은 모사영역 내에서 수직 방향의 모든 최상위 활성 셀에 함양이 일어나도록 함양률 경계조건을 부여하고, 함양량 값은 SWAT 으로부터 일 단위로 모의되어 MODFLOW의 지하수 활성셀에 자동으로 입력되게 하였다. 하천경계는 신둔천과 죽산천 본류 및 지류에 대해 지하수 유출입이 일어나는 하천셀로 지정하여 시간중속수두 경계조건을 부여하였으며 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다. 수리지질 특성은 농어촌 공사 시추자료 및 수리지질자료와 실제 일부 지역에 대하여 현지 대수성 시험을 수행한 결과를 모델의 입력자료에 반영하였다. 특히 지하수 이용량 중 농업용은 대수층에서 지표면으로의 물이동을 고려할 수 있도록 모형을 개선하여 양수량의 회귀 효과를 반영하였다.

## 2.4 모형의 검보정

모형의 구축, 보정 및 검증에 대해서는 김남원 등 (2012)과 하천변 지하수 이용에 따른 영향 평가 보고서(국토해양부 한강홍수통제소, 2011)에 자세하게 기술되어 있어 여기서는 핵심적인 것만 기술하였다. 신둔천 유역 출구에는 관측유량이 존재하지 않아 신둔천 유역을 포함하는 복하천 유역에 대해 검보정이 완료된 SWAT 모형으로 모의한

신둔천 출구에서의 일 유출량(김남원 등, 2012)을 관측치로 간주하고 이와 적합할 때까지 SWAT-MODFLOW 모형의 매개변수 보정 및 검증을 수행하였다. 또한 이천 지하수 기초조사(국토해양부와 한국수자원공사, 2011)에서 측정 한 지하수위 관측자료를 이용하여 공간분포시킨 등수위도와의 적합과정을 통해서 지하수 관련 매개변수의 검보정을 수행하였다. 죽산천 유역의 경우는 안성 지하수 기초조사(건설교통부 등, 2007)에서 측정한 죽산천 하류부(용설천 합류부)에서의 평상시 저유량자료와 유역내 지하수위자료의 등수위도를 기준으로 SWAT- MODFLOW 모형의 검보정을 수행하였다. 주요 검보정 매개변수를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 신둔천 유역 출구에서의 SWAT과 SWAT-MODFLOW에 의한 모의유출량을 비교하여 도시한 것으로 두 모의값이 매우 잘 적합하는 것을 알 수 있으며, 통계 값으로 결정계수(Determination Coefficient,  $R^2$ )와 Nash and Sutcliffe의 모형 효율성계수(NSE) 모두 0.9를 초과 하였다. 한편 신둔천 유역 중류부에 2010년 11월부터 2011년 5월까지 갈수기 관측유출량 자료(국토해양부 한강홍수통제소, 2011)가 존재하여 이 값과 유출량 모의치가 서로 잘 적합( $R^2$  0.8 초과)하는지도 확인하였다(Fig.

2).

Fig. 3은 신둔천 유역에 대한 관측 및 모의 지하수위로 부터 얻어진 등수위도를 비교한 것이다. 모의 지하수위가 실제 지하수위의 공간적인 분포양상을 잘 구현하고 있다. El.180 m 이내의 관측지하수위와 모의지하수위 간에 결정 계수( $R^2$ )는 약 0.9로 양호하게 적합된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 죽산천 유역에 대한 관측과 모의유출량을 비교하여 도시한 것으로 평상시 저유량 모의치가 관측치를 잘 따라가는 것을 도시적으로 확인할 수 있다.

Fig. 5는 죽산천 유역에 대한 관측 및 모의 지하수위로 부터 얻어진 등수위도를 비교한 것으로 모의 지하수위가 실제 지하수위의 공간적인 분포양상을 잘 구현하고 있다. El.160 m 이내의 관측지하수위와 모의지하수위 간에 결정 계수( $R^2$ )가 약 0.86으로 양호하게 적합되었다.

### 3. 지하수 양수량과 하천수 감소량간 상관관계식 개발을 위한 시나리오 모의

#### 3.1 분석 시나리오 설정

지하수 이용량과 하천수 감소량간 상관관계를 유도하기 위해서 연구 대상 유역내 임의 위치에 가상의 지하수

Table 1. Calibrated Major Model Parameters

Watershed	Parameter	Definition	Calibrated value
Sinduncheon (Bokhacheon)	SURLAG	Soil evaporation compensation coefficient	0.5
	SLOPE	average basin slope	default value (2.0 times the default value)
	SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	default value (0.7 times the default value)
	EPCO	Plant uptake compensation factor	1.0
	GWDELAY	Delay of groundwater recharge	0.033
	CH_N	Manning's n value	0.030
	K'	Hydraulic conductivity of streambed	4.8 m/day
	M	Streambed thickness	2 m
Juksancheon	B2	Bottom elevation of second layer	-200 El.m
	CN2	AMC-II runoff curve number	10% increase
	ALPHA	temporal CN weight	0.5
	SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	2.0 times the default value
	GWDELAY	Delay of groundwater recharge	0.033
	CH_N	Manning's n value	0.030
	S1	Storage coefficient of the first layer	0.100
	K'	Hydraulic conductivity of streambed	1.2 m/day
M	Streambed thickness	2 m	
B2	Bottom elevation of the second layer	-100 El.m	

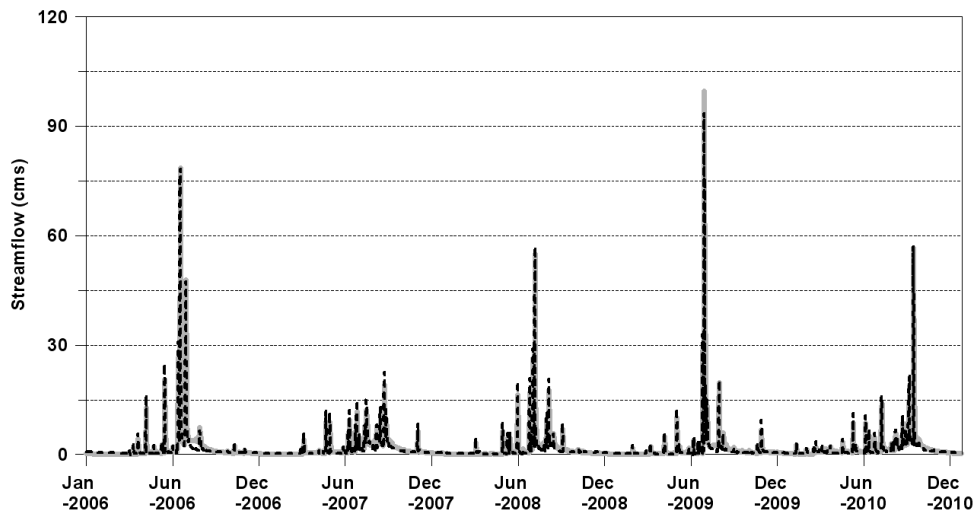


Fig. 1. Comparison of the Simulated Streamflows by SWAT (solid line) and by SWAT-MODFLOW (dashed line) for Sinduncheon Watershed

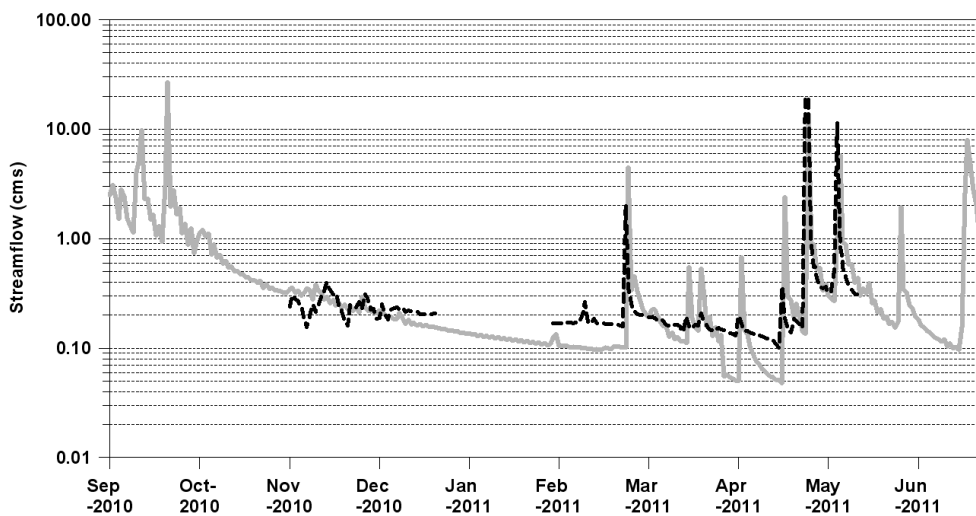


Fig. 2. Comparison of the Observed (dashed line) and Simulated (solid line) Streamflows for Sinduncheon Watershed

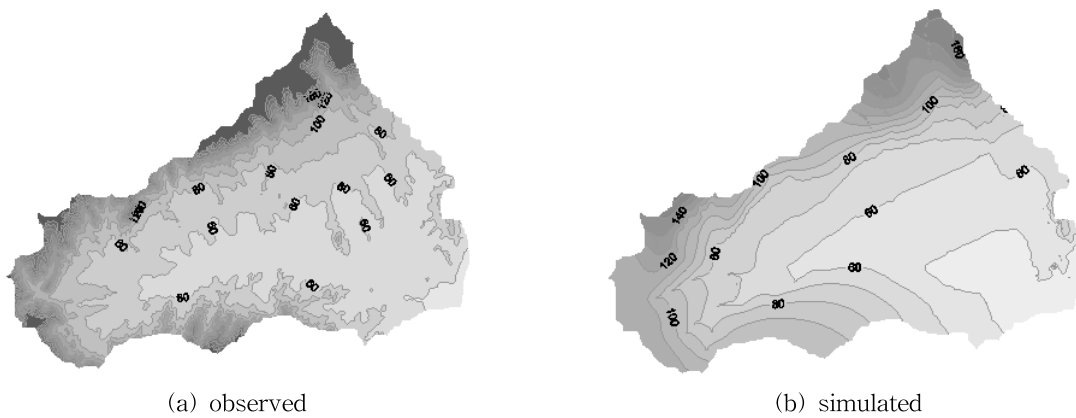


Fig. 3. Comparison of the observed and simulated groundwater levels for Sinduncheon watershed

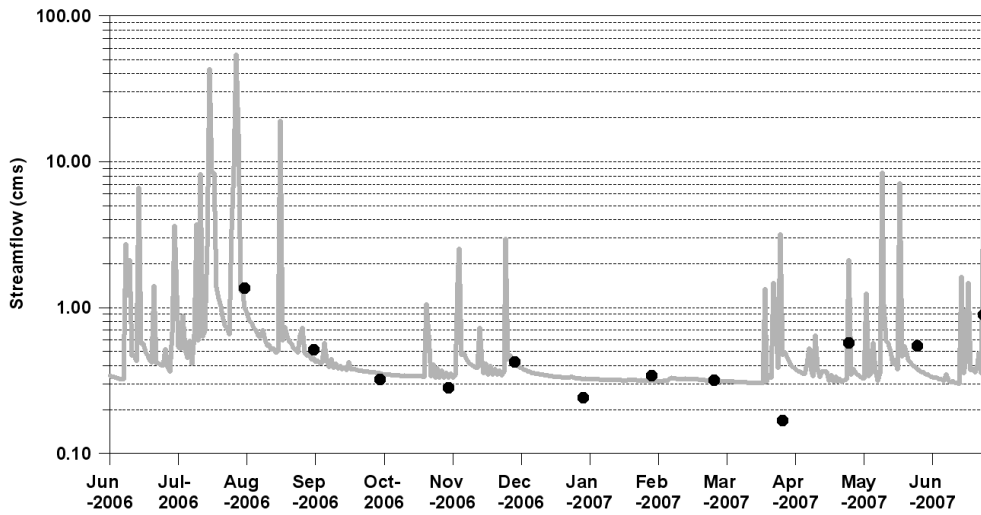


Fig. 4. Comparison of the Observed and Simulated Streamflows for Juksancheon Watershed

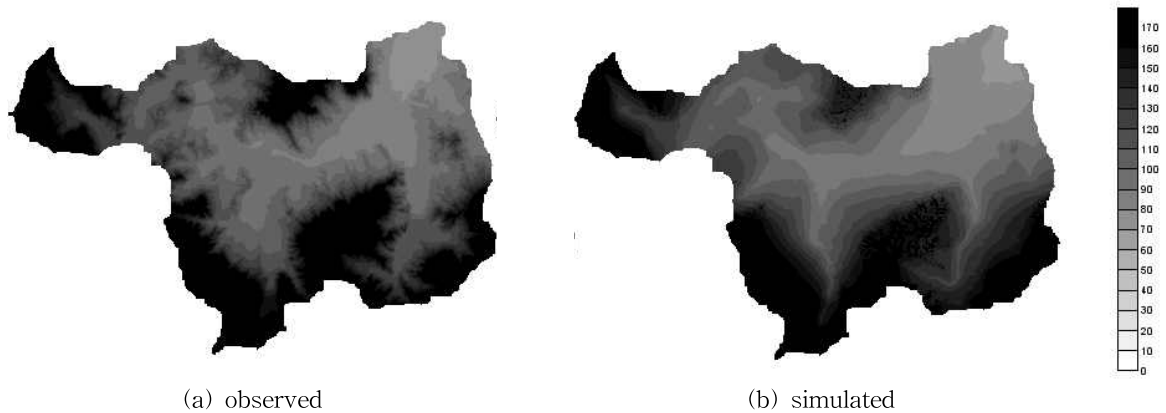


Fig. 5. Comparison of the Observed and Simulated Groundwater Levels for Juksancheon Watershed

관정을 위치시키고 양수 전 후 조건에 따른 하천유출량을 각각 모의하여 그 차이를 양수로 인한 하천수 감소량으로 간주하였다. 유역 내에서 관개기 지하수 이용량이 많은 벼 농사 농경지역을 우선적으로 선별하였고, 이 중 충적층의 투수량계수 값이 서로 상이하도록 신둔천 유역에서 3개소 (Fig. 6(a)), 죽산천 유역에서 5개소(Fig. 6(b))와 같이 총 8개 지역을 지하수 관정 설치 지역으로 최종 선정하였다. 관정 설치 지역의 투수량 계수는  $1.0 \sim 4.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{d}$ , 저류계수는 0.02~0.1, 하천바닥퇴적층의 수리전도성은 8~34 m/d이다.

지하수 관정 설치 지역별로 가상의 관정 설치 위치를 하천에서부터 90 m 간격으로 5개 조건, 지하수 양수량은  $100 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $200 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $300 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 3가지 조건, 지하수 용도는 생공용과 농업용 2가지 조건으로 총  $200 (=8 \times 5 \times 3 \times 2)$  가지의 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오별로 6년치의 일(日)단위 모의결과를 순(旬)단위 시계열 자

료로 정리하여 통계 분석을 위한 기본 자료로 활용하였다. 본 모의에서 선정한 토지피복은 농경지이지만 농업용과 생공용 지하수 양수 효과 두 가지 모두를 분석하기 위해서 관개기에만 양수하여 농업용수로 활용하는 경우와 연중 일정량을 양수하여 생공용수로 활용하는 두 가지 경우로 구분하여 모델링을 수행하였다. 지하수 용도가 농업용인 경우는 양수량의 일부가 다시 지하 대수층으로 충전되어 인접하천으로 회귀되는 효과를 반영하였다. 이를 위하여 모형 내에서 지하수 관정 위치와 SWAT 모형의 연산 기본단위인 HRU를 연결하여 각 지하수 관정으로 부터 양수된 물을 해당 HRU의 피복 강수에 더해지도록 하였고 다시 수문순환 과정을 거쳐 하천으로 일부 회귀 되도록 처리하였다. 반면에 생공용인 경우에는 양수량이 해당 소유역내에서 전량 소모 또는 유역 외로 방류되도록 모형화하여 인접 하천으로 회귀되지 않도록 억제 처리하였다.

### 3.2 농업용 지하수 양수량과 하천수 감소량 관계

#### 3.2.1 거리에 따른 하천수 변화량

지하수 양수로 인한 하천수 감소량의 시간적 변화를 시나리오별로 모의하였고, 본 논문에는 신둔천 유역에 대한 결과를 중심으로 일부 모의 결과를 제시하였다.

Fig. 7은 신둔천 유역내 소유역 8번(Fig. 6의 P1 지역)에 하천으로부터 90m 간격으로 설치한 농업용 지하수 관정에서 관개기(4~9월)에 하루 200 m<sup>3</sup>/day 만큼 양수했을 때 거리에 따른 하천수 감소량을 나타낸 것이다. 횡축의 시간간격은 10일이며, 종축의 하천수 감소량 dq (m<sup>3</sup>/day)는 일단위 모의결과를 10일(순) 간격으로 평균하여 나타낸 것으로 부호가 양(+)인 경우가 양수 후에 하천수가 감소한 것을 의미한다. 따라서 횡축에서 1은 1월 1일부터 10 일간을 의미하며 세로 격자선 한 칸은 90일로 한 분기를 나타내고 있다. Fig. 7을 보면 하천수 감소량은 모의기간

동안 약 -120에서 200 m<sup>3</sup>/day 사이에서 변동하고 있으며 거리가 증가할수록 양수로 인한 하천수 감소량이 줄어들고 있다. 양수가 시작되는 4월부터 지하수위 저하에 따른 지하수 유출 감소로 하천수 감소량이 증가하고 있으며 양수가 종료되어 10월부터 지하수위가 점차 회복하면서 하천수 감소량이 줄어들어 4분기 중에 하천수 감소량이 거의 0인 값을 보이고 있다. 하천수 감소량이 0이라는 것은 양수 중단과 우기를 거쳐 하천면에서 지하수위가 완전 회복한 것을 의미한다. 3분기 초에는 지하수 양수가 일어났음에도 불구하고 하천수 감소량이 음의 값을 나타내고 있어 하천수가 양수 전에 비해 증가하는 특이한 현상을 보이고 있다. 이는 농업용 관정인 경우 지속적인 지하수 양수로 인한 배출수가 다시 토양속으로 재 침투되어 토양수가 포장용수량을 넘어설 정도로 포화상태에 이르면 침투 및 중간유출 형태의 지표하 유출이 발생하여 지하수 충전과 하천 유출의 증가를 야기한 것이며, 우기에는 강우로

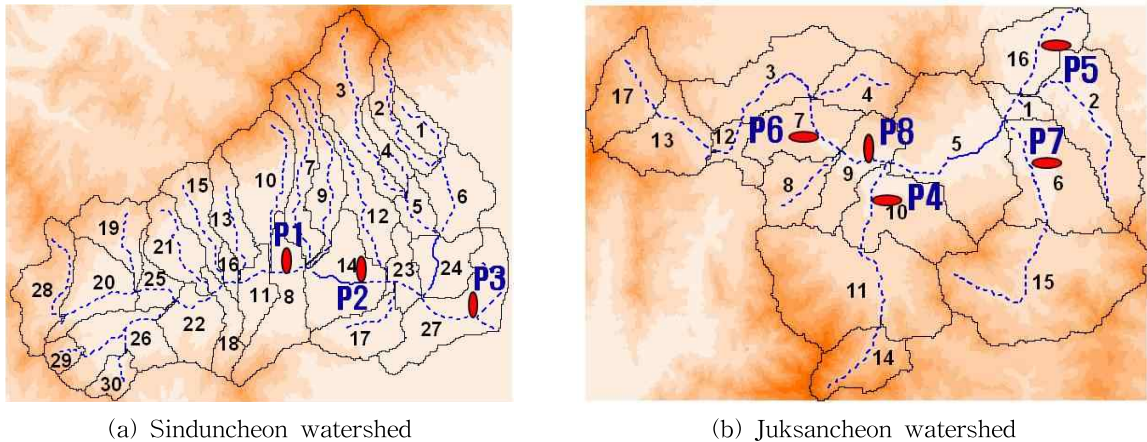


Fig. 6. Location of Arbitrary Pumping Wells Near Stream

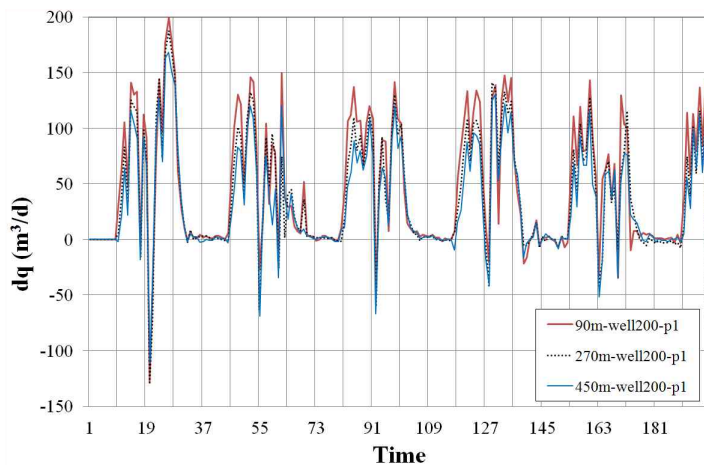


Fig. 7. Streamflow Depletion for Stream-well Distance (P1 area, agricultural water supply)

인한 침투량 증가 및 지표유출량 증가에 의한 효과까지 더해져서 하천유출량이 양수전에 비해 증가한데서 기인한다. 단, 우기라 하더라도 양수로 인한 지하수위 저하에 의한 지하수 유출 감소가 배출 지하수의 재 침투의 의한 지표 및 지표하 유출 증가보다 큰 경우에는 하천유량이 양수전에 비해 줄어든다. 하천수 감소량이 급격히 줄어들어 아래로 침투한 부분이 나타나는 기간 중 양의 값을 가지는 기간이 이에 해당된다.

모의된 순 단위 하천수 감소량 시계열 자료를 크기순으로 정렬하고 초과확률을 부여하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림은 하천에서 연중 어떤 크기의 하천유량이 초과할 확률을 도시한 유허곡선의 개념을 하천수 감소량에 적용하여 본 연구에서 새롭게 제시한 것이다. 즉, 일년 동안 어떤 크기의 하천수 감소량을 초과할 확률을 나타낸 것으로, 예를 들어 관정-하천이격거리가 450m일 때의 결과인 맨 아래 곡선을 보면 하천수 감소량이 100

m<sup>3</sup>/day을 초과할 확률이 10%로서 1년 365일 중 약 36일 동안은 이 보다 큰 하천수 감소량이 지하수 양수로 인해 발생한다는 것이다. 이격거리에 따른 하천수 감소량이 증가하고 있으나, 하천수 감소량이 0일 때의 확률 값은 거의 차이가 나지 않고 있다. 하천수 감소가 일어날 확률은 약 54%로서 기간을 환산하면 약 183일이다. 즉, 1년 중 약 6개월 정도는 하천수 감소가 일어나고 있다. 하천수 증가가 일어날 확률은 초과확률 약 90%를 넘는 부분인 약 10%로서 1년 중 약 36일 즉, 한 달 약간 넘는 기간 동안은 하천에 지하수 양수 후 재 충전으로 인해 하천수 증가효과를 가져오고 있다. 나머지 5개월 남짓 기간동안은 지하수 양수가 하천에 영향을 미치지 않고 있음을 나타낸다.

### 3.2.2 양수량에 따른 하천수 변화량

Fig. 9는 신둔천 유역내 소유역 8번(Fig. 6의 P1 지역)에 하천으로부터 270m 이격된 거리에 설치한 관정에서

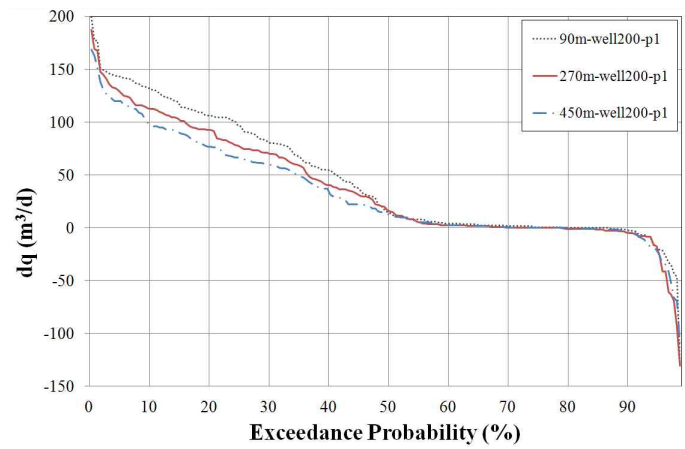


Fig. 8. Streamflow Depletion Duration Curve for Stream-well Distance (P1 area, agricultural water supply)

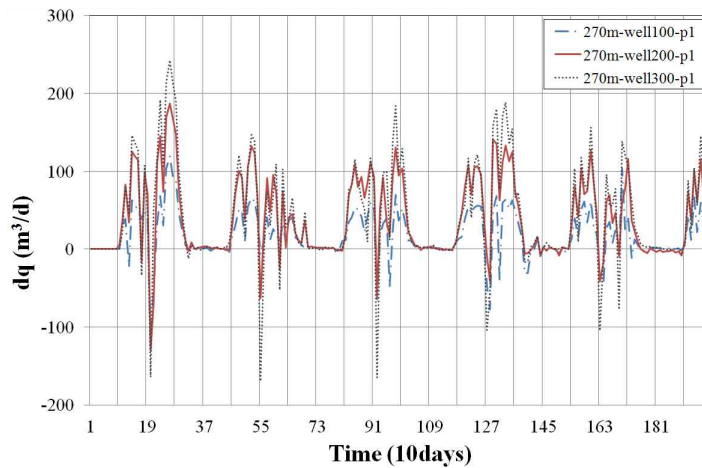


Fig. 9. Streamflow Depletion for Pumping Rates (P1 area, agricultural water supply)



관개기(4~9월)에 하루 100, 200, 300 m<sup>3</sup>/day 만큼 양수했을 때의 하천수량 감소량을 나타낸 것이다. 모의기간동안 양수량이 커질수록 하천수 감소량이 증가하고 있으며, 또한 하천수 증가량 또한 양수량이 커질수록 커지고 있다. 즉, 하천수 변화의 폭이 양수의 크기가 클수록 크다. 거리에 따른 하천수 변화량(Fig. 2)보다 양수량에 따른 하천수 변화(Fig. 4)가 더 민감하게 반응하고 있다. 이는 하천 영향을 최소화하기 위해서는 거리뿐만 아니라 하천인근에서는 지하수 이용량의 양적 관리가 필요함을 의미한다. 거리에 따른 하천수 변화 결과와 마찬가지로 큰 비가 내려 강우의 영향이 나타날 때를 제외하고는 양수가 시작되는 2, 3분기는 하천수 감소량이 증가하고 있으며, 4분기에 들어서면서 하천수 감소량이 줄어들어 1분기에는 하천에 미치는 영향이 거의 없다.

Fig. 10은 양수량에 따른 하천수 감소량의 초과확률을

나타낸 것이다. 하천수 감소량의 크기는 양수량이 100 m<sup>3</sup>/day에서 300 m<sup>3</sup>/day로 3배 증가하였을 때 하천수 감소량은 연간 2배 이상 증가하여 양수량에 민감하게 반응하고 있다. 양수량이 2배, 3배로 증가하였더라도 하천수 감소량은 증가하는 하되 선형적으로 비례하여 증가하지는 않고 증가 정도가 둔해지고 있다.

### 3.3 생공용 지하수 양수량과 하천수 변화량 관계

#### 3.3.1 거리에 따른 하천수 변화량

지하수 용도가 생활공업용인 경우에 대하여 지하수 양수로 인한 하천수 감소량의 시간적 변화를 모의하였다. Fig. 11은 신둔천 유역내 소유역 14번(Fig. 6의 P2 지역)에 하천으로부터 90 m 간격으로 설치한 관정(단, 첫 번째 관정 이격거리 120 m)에서 연 중 하루 200 m<sup>3</sup>/day 만큼

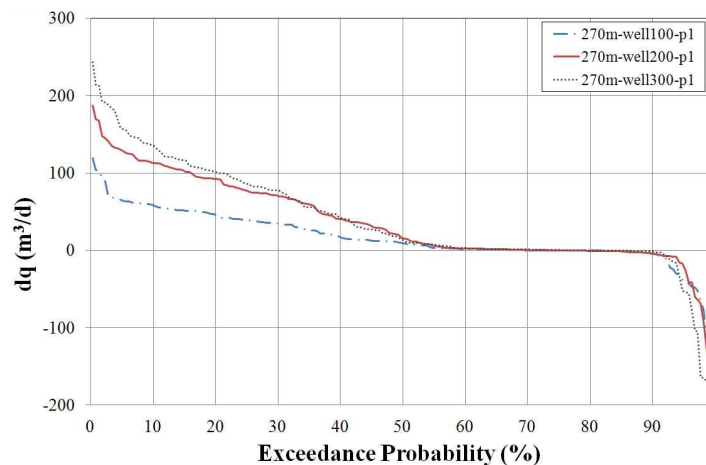


Fig. 10. Streamflow Depletion Duration Curves for Pumping Rates (P1 area, agricultural water supply)

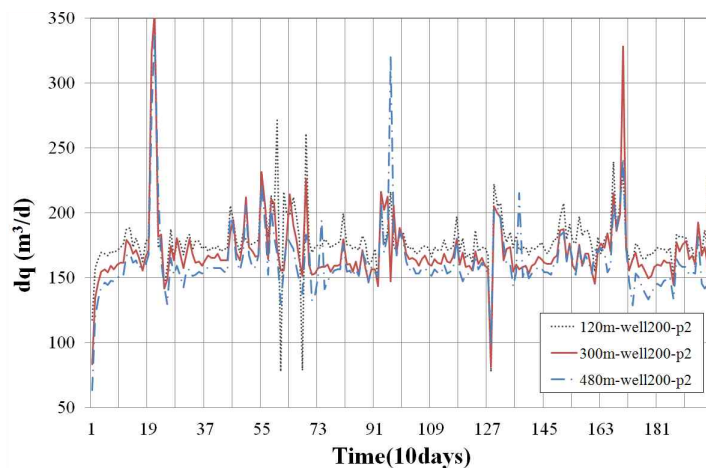


Fig. 11. Streamflow Depletion for Stream-well Distance (P2 area, living or industrial water supply)

양수했을 때 거리에 따른 하천수량 감소량을 나타낸 것으로 모의기간 동안 최소 약 80에서 최대 360 m<sup>3</sup>/day 사이에서 변하고 있으며 거리가 증가할수록 양수로 인한 하천수 감소량이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 모의 기간 초기에 양수 개시로 인해 하천수 감소량이 급격하게 발생하다가 지하수위가 빠른 속도로 안정화가 되면서 하천수 감소량이 장기적으로 큰 변화 없이 일정 범위 내에서 유지되고 있다. 생공용수인 관계로 중단 없이 연중 양수가 일어나고 있기 때문에 무양수 상태까지 지하수위가 회복하지 못하고 있다. 전반적으로는 큰 강우시 하천수 감소량이 증가하는 경향을 나타내어 농업용수 이용의 경우 강우로 인해 하천수 감소량이 감소하는 것과는 반대의 양상을 보였다.

Fig. 12는 거리에 따른 하천수 감소량의 초과확률을 나타낸 것으로 연중 한 달 정도를 제외하고는 150에서 200

m<sup>3</sup>/day 사이의 비교적 일정한 하천수 감소량을 보이고 있다. 거리에 따라 20% 이내의 편차를 보여 거리에 따른 하천수 감소 영향은 큰 차이를 보이고 있지는 않으며, 거리가 증가할수록 하천수 감소량은 비교적 선형적으로 감소하고 있다.

### 3.3.2 양수량에 따른 하천수 변화량

Fig. 13은 신둔천 유역내 소유역 14번(Fig. 6의 P2 지역)에 하천으로부터 120m 이격된 거리에 설치한 관정에서 연중 하루에 100, 200, 300 m<sup>3</sup>/day 만큼 양수했을 때의 하천수 감소량을 나타낸 것이다. 모의기간동안 양수량이 커질수록 하천수 감소량이 증가하고 있으며 양수량별 편차가 비슷하여 양수량에 따라 하천수 감소가 거의 선형적으로 변하고 있음을 알 수 있다. 농업용수의 경우와 마찬가지로 거리 보다는 양수량 변화에 하천수가 더 민감하게

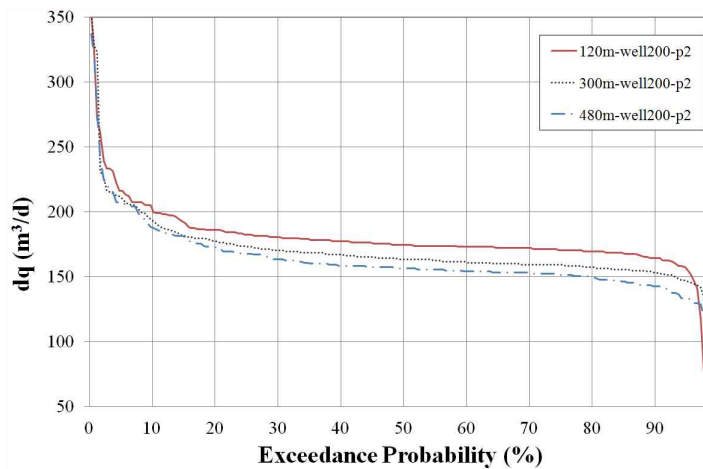


Fig. 12. Streamflow Depletion Duration Curves for Stream-well Distance (P1 area, living or industrial water supply)

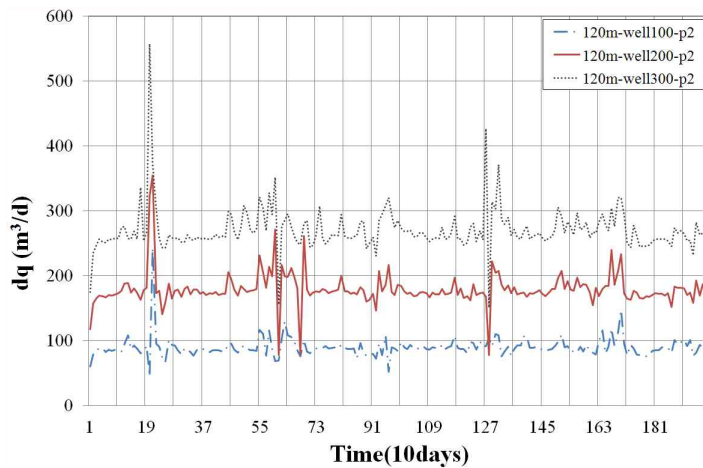


Fig. 13. Streamflow Depletion for Pumping Rates (P2 area, living or industrial water supply)

변하고 있다.

Fig. 14는 양수량에 따른 하천수 감소량의 초과확률로서 거리에 비해 양수량 크기에 따라 하천수 감소량에 큰 차이를 보이고 있다. 하천수 감소량의 크기는 양수량이 100에서 300 m<sup>3</sup>/day으로 3배 증가하였을 때 하천수 감소량은 연간 약 3배 증가하여 양수량 증가에 따라 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이는 농업용수 이용의 경우 강우로 인해 지하수위의 부분 회복 기간이 있어 양수량과 하천수 감소량의 비선형적 변화가 두드러지지만, 생공용수 이용의 경우는 상대적으로 비선형성이 작은 것으로 분석되었다.

### 3.4 지하수 용도별 하천유량 감소량 비교

Fig. 15는 신둔천 유역내 소유역 13번(Fig. 6의 P3 지역)에 하천으로부터 180m 이격된 거리에 설치한 관정에

서 200, 300 m<sup>3</sup>/day 만큼 양수했을 때의 하천수 감소량을 농업용수의 경우와 생공용수의 경우를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 실선인 경우가 농업용수일 때의 결과이고, 점선은 생공용수일 때의 결과로서 양상이 크게 다른 것을 확인할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 농업용수의 경우 양수로 배출된 지하수의 재침투와 관개기에만 양수를 하였기 때문에 생공용수의 경우보다 하천수 감소량이 훨씬 작게 산정된 것을 알 수 있다. 하천수 감소량의 최대치는 생공용수의 경우가 농업용수의 경우보다 2배 이상 크며, 연간 하천수 감소량의 총량을 비교해보면 5배 이상 차이가 나는 등 생공용수의 경우가 하천에 미치는 영향이 더욱 지배적인 것으로 분석되었다. 따라서 지하수 용도별로 하천에 미치는 정도가 다르며 지하수 이용량과 하천수량 감소량간의 경험적인 상관관계식을 도출하기 위해서는 용도별로 구분되어 유도되어야 한다.

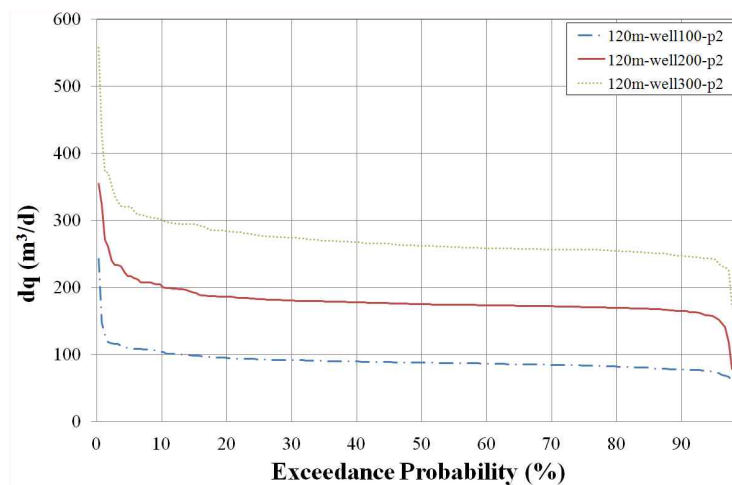


Fig. 14. Streamflow Depletion Duration Curves for Pumping Rates (P2 area, living or industrial water supply)

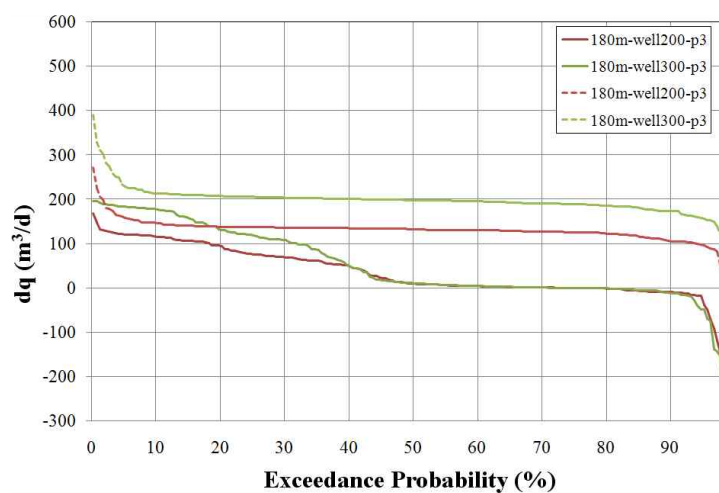


Fig. 15. Streamflow Depletion Duration Curves for Pumping Rates and Use Type (P3 area)

## 4. 지하수 양수량과 하천수 변화량간 상관관계식 유도

### 4.1 목적변량 및 설명변량 선정

지하수 이용에 따른 하천수 감소는 하천-관정 이격거리 뿐만 아니라 양수량 크기, 수리지질특성, 강우량, 유역면적 등 여러 요인들의 복합적인 결과이다. 따라서 하천수 감소량을 목적변량(종속변수)로 하고 이에 영향을 미치는 여러 설명변량(독립변수)을 선정하여 다중회귀분석을 실시하였다. 강우량을 고려한 이유는 시나리오 분석 결과에서 나타났듯이 농업용수 혹은 생공용수 등 지하수 용도에 따라 강우량이 하천수 감소에 미치는 영향이 다른 양상을 보이기 때문이며 또한 유역의 수문특성을 반영하기 위한 대표 변수로 고려하였기 때문이다.

지하수 이용 영향이 하천수 감소에 가장 영향을 미치는 시기는 농번기가 시작되어 지하수 및 하천수 이용량이 많은 4월부터 우기 전인 6월까지이다. 따라서 시나리오별 모의 자료 중 홍수기 이전인 4~6월 동안의 3개월 평균 하천수 감소량 모의치를 상관 회귀식 개발의 기초자료로 활용하였다. 이 때 양수후 지하수 유동계가 동적평형상태에 도달할 때까지 모형 초기화 기간과 일부 양수량 조건에 대해서 모의 지하수위가 지속적인 양수로 인해 첫 번째 층의 바닥고보다 낮아져 건조셀(dry cell)이 되는 기간 등의 결과 값은 분석 대상에서 제외하였다.

### 4.2 회귀식 형태 결정

목적변량인 하천수감소량( $\Delta Q$ )과 설명변량인 지하수 이용량( $Q_w$ ), 하천-관정 이격거리( $l$ ), 대수층의 투수량계수( $T$ ), 저류계수( $S$ ), 하천바닥퇴적층전도성( $\lambda$ ), 강우량( $R$ ), 유역면적( $A$ )과의 다중회귀모형을 Eq. (1)과 같은 형태로 구성하였다.

$$\Delta Q = b_0 Q_w^{b_1} l^{b_2} T^{b_3} S^{b_4} \lambda^{b_5} R^{b_6} A^{b_7} \quad (1)$$

다중회귀분석을 위해 Eq. (1)의 양변에 자연로그를 취하여 다음 Eq. (2)와 같이 선형적 형태로 나타낼 수 있다.

$$\ln \Delta Q = \ln b_0 + b_1 \ln Q_w + b_2 \ln l + b_3 \ln T + b_4 \ln S + b_5 \ln \lambda + b_6 \ln R + b_7 \ln A \quad (2)$$

자연로그항을 순서대로  $Y$  및  $X_1 \sim X_7$ 로 치환하면 Eq. (3)과 같다.

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_7 X_7 \quad (3)$$

### 4.3 다중공선성 검토

다중회귀분석의 전제조건으로 여러 독립변수들간에 서로 높은 상관관계가 있는 다중공선성(multicollinearity)이 없어야 한다. 다중공선성이란 다중회귀분석에 채택된 독립변수들간에 높은 상관관계를 보이면 이들은 서로 같은 영향을 종속변수에 준다는 뜻으로 다중공선성이 나타나면 회귀분석결과 결정계수는 커지나 독립변수들의 회귀계수는 의미가 없어진다. 따라서 선정한 설명변량간 상관관계분석을 실시하여 Tables 2 and 3에 나타내었다. 모형 안정화 기간, 동적 평형상태 등을 고려하였기 때문에 농업용 및 생공용 지하수 별로 총 분석 데이터 개수가 다소 차이가 있어 상관계수값에 약간의 차이를 보이고 있다. 다중공선성이 있는지 여부를 검토한 결과 하천바닥퇴적층 수리전도성  $\lambda$ 와 유역면적  $A$ 과 관계된  $X_5$ 와  $X_7$ 간 상관계수가 두 용도 모두 0.9를 초과하여 다중공선성이 나타났다. 이는 하천바닥퇴적층 수리전도도  $\lambda$ 는 하폭과 하천바닥의 수리전도도 등의 함수로 하폭이 넓을수록 그 값이 큰데, 일반적으로 유역면적이 클수록 하폭이 넓기 때문에 유역면적과 하천바닥퇴적층간 상관성이 크게 나

Table 2. Correlation Matrix (agricultural water)

	$X_1 (Q_w)$	$X_2 (l)$	$X_3 (T)$	$X_4 (S)$	$X_5 (\lambda)$	$X_6 (R)$	$X_7 (A)$
$X_1 (Q_w)$	1	0.0326	0.0552	0.0207	0.0320	0.0051	0.0531
$X_2 (l)$	0.0326	1	0.1411	-0.1759	0.1229	-0.0031	0.1502
$X_3 (T)$	0.0552	0.1411	1	-0.0146	0.3035	0.0039	0.4704
$X_4 (S)$	0.0207	-0.1759	-0.0146	1	-0.4328	-0.0066	-0.3440
$X_5 (\lambda)$	0.0320	0.1229	0.3035	-0.4328	1	0.0050	0.9457
$X_6 (R)$	0.0051	-0.0031	0.0039	-0.0066	0.0050	1	0.0044
$X_7 (A)$	0.0531	0.1502	0.4704	-0.3440	0.9457	0.0044	1

타난 것이다. 따라서 다중공선성을 없애기 위해서 두 설명변수 중 하나를 제거하여 회귀분석에 이용하였다.

#### 4.4 회귀분석 결과

##### 4.4.1 회귀계수 계산

다중공선성 검토결과 유역면적(A)과 하천바닥퇴적층진도성( $\lambda$ ) 간 상관성이 크게 나타났으므로 Eq. (1)에서 유역면적(A)을 설명변량에서 제거하고 다중회귀분석을 실시하였다. Table 4는 지하수 용도별로 계산된 편회귀계수를 나타낸 것이다. 양수량, 투수량계수, 하천퇴적층수리진도성의 편회귀계수값인  $b_1, b_3, b_5$ 는 목적변량인 하천수감소량과 양의 상관관계를 나타내고 있고, 하천-관정이격

거리의 편회귀계수값인  $b_2$ 는 하천수감소량과 음의 상관관계를 나타내고 있으며, 강우량의 편회귀계수  $b_6$ 는 농업용수인 경우에는 음의 상관관계를 생공용수인 경우에는 양의 상관관계를 나타내고 있다.

##### 4.4.2 회귀분석 결과의 유효성 평가

Fig. 16과 같이 실제값과 예측치를 1:1로 도시하였고, 회귀식의 유효성을 평가하기 위해서 즉 종속변수의 예측치가 얼마나 잘 맞는지를 평가하기 위한 지표로 추정된 결정계수와 표준오차를 계산하였다.

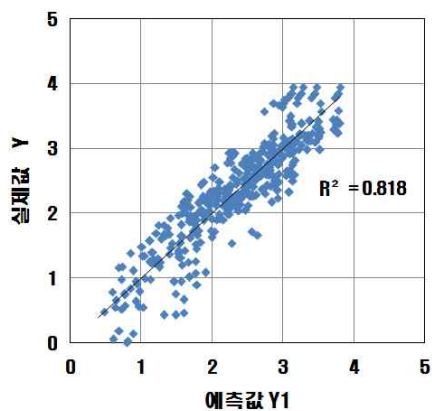
Table 5에 나타낸 바와 같이 결정계수(deterministic coefficient) 및 자유도조정된 결정계수(adjusted deterministic coefficient) 농업용수인 경우 0.81을 초과하고 생

Table 3. Correlation Matrix (living or industrial water)

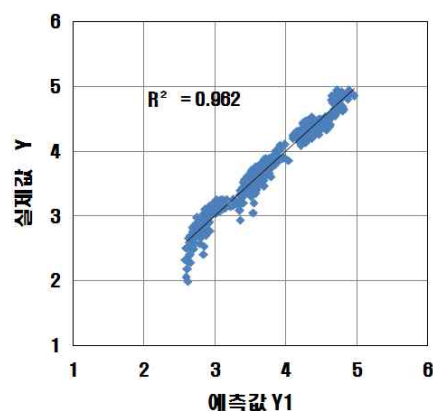
	$X_1 (Q_w)$	$X_2 (l)$	$X_3 (T)$	$X_4 (S)$	$X_5 (\lambda)$	$X_6 (R)$	$X_7 (A)$
$X_1 (Q_w)$	1	0.0639	0.1754	-0.1430	0.2038	-0.0162	0.2206
$X_2 (l)$	0.0639	1	-0.0028	-0.0463	0.0104	-0.0025	-0.0246
$X_3 (T)$	0.1754	-0.0028	1	-0.0330	0.3176	-0.0291	0.4690
$X_4 (S)$	-0.1430	-0.0463	-0.0330	1	-0.4389	0.0836	-0.3470
$X_5 (\lambda)$	0.2038	0.0104	0.3176	-0.4389	1	-0.0534	0.9304
$X_6 (R)$	-0.0162	-0.0025	-0.0291	0.0836	-0.0534	1	-0.0488
$X_7 (A)$	0.2206	-0.0246	0.4690	-0.3470	0.9304	-0.0488	1

Table 4. Computed Regression Coefficients

Regression coefficient	$a$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
Agricultural water	-1.085	0.916	-0.575	0.092	-0.719	0.502	-0.350
Living or industrial water	-3.287	1.009	-0.165	0.038	-0.493	0.222	0.101



(a) Agricultural use



(b) Living or industrial use

Fig. 16. Comparison of Real and Estimated Values

공용수는 0.96을 초과하여 높은 적합도를 가지고 있다고 판단할 수 있다. 회귀식의 유효성을 평가하기 위한 또 하나의 지표는 추정값의 잔차의 표준편차인 표준오차(standard error)이다. 잔차란 실제값과 회귀식에 의한 예측치와의 차로써 이 잔차가 전체적으로 작은 회귀식일수록 유효한 회귀식이라 할 수 있다. 표준 오차가 농업용수인 경우 약 0.37, 생공용수인 경우 약 0.13으로 작은 값을 보이고 있어 회귀식의 유효성이 높다고 판정할 수 있다.

#### 4.4.3 다중회귀분석의 검증

다중회귀분석의 통계적 유의성을 검증하기 위해서 분산 분석을 통해 모형 전체의 유의성을 검증하는 F-검증과, 회귀계수를 검증하는 t-검증을 수행하였다. 다중회귀식이 표

본자료를 잘 설명하고 있다면, 설명된 변동은 설명 안 된 변동에 비하여 상대적으로 크다. F값은 바로 설명된 변동과 설명 안 된 변동의 비율을 나타내는데, Table 6과 같이 286.6(농업용수 경우), 1475.2(생공용수 경우)로 큰 값으로 계산되었다. 제1자유도가 6이고, 제2자유도가 389(410), 유의수준이 0.05일 때의 기준이 되는 F값은 약 2.1이므로 본 회귀모형이 통계적으로 유의미하다고 할 수 있다.

또한 종속변수와 독립변수 하나하나가 서로 선형관계를 맺고 있는지를 판단하기 위해서 t 통계량(=편회귀계수/편회귀계수의 표준오차)과 유의확률 p를 계산하여 편회귀계수들의 유의성을 검증하였다. t값이 큰 변수일수록 목적변량을 설명하는데 있어서 공헌도가 높은 것으로 판단할 수 있다. Table 7에 나타난 바와 같이 양수량에 대한

Table 5. Statistic of Regression Analysis

Statistic	Agricultural water	Living or industrial water
Multiple correlation coefficient	0.905	0.981
Deterministic coefficient	0.818	0.963
Adjusted deterministic coefficient	0.815	0.962
Standard error	0.373	0.130
No. of data	389	410

Table 6. Results of Variance Analysis (agricultural water)

Use type		Degree of freedom	Square sum	Root mean square	F ratio
Agricultural water	Regression	6	238.9	39.8	286.6
	Residual	382	53.1	0.140	
	Sum	388	292.1		
Living or industrial water	Regression	6	174.5	29.1	1725.2
	Residual	403	6.8	0.016	
	Sum	409	181.3		

Table 7. t-statistic (agricultural water)

Symbol	Agricultural water				Living or industrial water			
	Coefficient	Standard error	t-statistic	p-value	Coefficient	Standard error	t-statistic	p-value
$a$	-1.085	0.470	-2.307	0.02157	-3.287	0.158	-20.711	2.03E-65
$b_1$	0.916	0.043	21.214	1.47E-66	1.009	0.014	69.300	5.2E-226
$b_2$	-0.575	0.034	-16.705	2.01E-47	-0.165	0.011	-13.974	1.83E-36
$b_3$	0.092	0.007	12.321	1.33E-29	0.038	0.002	14.866	3.62E-40
$b_4$	-0.719	0.037	-19.362	1.09E-58	-0.493	0.012	-39.834	8.1E-142
$b_5$	0.502	0.044	11.217	1.95E-25	0.216	0.015	14.113	4.9E-37
$b_6$	-0.350	0.064	-5.461	8.52E-08	0.101	0.021	4.777	2.49E-06

편회귀계수의 t값이 가장 커서 목적변량 하천수감소량을 예측하는데 가장 공헌도가 큰 것으로 나타났다. 또한 유의확률 p값을 보면 유의수준 0.05보다 크게 작아 계산된 편회귀계수들은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

#### 4.5 하천수 감소량 예측을 위한 다중회귀식

자연로그항으로 치환된 변수를 다시 역치환하여 하천수감소량과 양수량 등의 설명변량으로 표현되는 회귀식을 Eqs. (4) and (5)와 같이 나타내었다. 유도된 회귀식은 양수정의 위치 및 대수층 특성뿐만 아니라, 하폭, 하천바닥수리전도도 등 하천의 특성과 강우량과 같은 수문학적 특성을 반영할 수 있는 장점이 있다.

$$\Delta Q = 0.338 Q_w^{0.916} l^{-0.575} T^{0.092} S^{-0.719} \lambda^{0.502} R^{-0.350} \quad (4)$$

: 농업용 지하수

$$\Delta Q = 0.037 Q_w^{1.009} l^{-0.165} T^{0.038} S^{-0.493} \lambda^{0.222} R^{0.101} \quad (5)$$

: 생공용 지하수

### 5. 결 론

본 연구에서는 하천변 지하수 이용 영향 검토 업무에 간편하게 활용할 수 있는 양수량-하천수감소량간 상관관계식을 개발하였다. 상관관계식은 신둔천과 죽산천 유역을 대상으로 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW로 모의 생성된 자료를 이용하여 통계적으로 유도되었다.

상관관계식 유도에 앞서 가상의 지하수 양수정 설치 조건별로 하천수감소량을 모의한 결과 하천-양수정 이격거리 보다 양수량에 의한 영향이 더 크게 작용하였으며, 생공용 지하수 이용인 경우는 연중 변화가 일정한 패턴을 보였으나 농업용 지하수 이용인 경우에는 관개기 하천수감소 및 비관개기 회복 등 분기별 변화가 분명하게 나타나는 등 지하수 용도에 따라 하천수감소량의 시간적 변화 양상이 상이함을 확인하였다. 특히 순단위 하천수감소량에 초과확률을 부여하여 용도별 하천수 감소의 크기와 발생기간을 분석한 결과, 농업용 지하수 양수인 경우는 배출 지하수의 재 침투에 의한 회귀영향을 고려하였기 때문에 생공용 지하수 양수에 비해 하천수 감소가 기간이나 양적인 측면에서 수배 이상 작게 산정되었다. 따라서 상관관계식은 용도별로 구분하여 회귀분석을 통해 유도하였다.

지하수 양수가 하천수 감소에 가장 영향을 미치는 시기는 농번기가 시작되는 4월부터 우기 전인 6월까지이므로 시나리오별 모의자료 중 2/4분기의 3개월 평균 하천수 감

소량 모의치를 상관관계식 유도를 위한 회귀분석의 기초 자료로 활용하였다. 농업용과 생공용 두 가지 경우에 대해 하천수감소량을 종속변수로 하고 이에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자들인 양수량, 하천과 양수정 이격거리, 하천인근 대수층 및 하천바닥의 수리전도특성, 강우량 등을 독립변수로 하는 다중회귀식을 유효성 평가, 통계적 검증 과정을 거쳐 유도, 제시하였다. 개발된 지하수양수량-하천수감소량 상관 경험식은 대수층 및 하천의 수리특성과 수문학적 특성을 고려할 수 있는 장점이 있으며, 적용상 간편하여 하천인근 지하수 양수에 따른 하천수 영향을 예측, 평가하는데 활용될 수 있을 것이다. 특히, 본 관계식으로부터 지하수 양수량 중 하천수에 해당하는 부분인 하천수 기여도를 산정할 수 있어 하천수 사용과 지하수 이용간의 중첩 경계를 개략적으로 구분하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 관개기 벼농사 지역 양수에 대한 모의 분석을 수행하였으나, 밭농사 지역의 연중 지하수 양수와 하천수감소량간의 분석, 지하수 양수와 하천수 감소간의 시간적 지체를 고려한 상관식 개발 등이 필요할 것이다. 또한 지하수 관정에 인접한 하천에 미치는 영향을 우선적으로 평가하기 위해서 생공용수용 지하수 양수량은 유역 외로 물을 이동시켜 대상 유역내에서 전량 소모되는 경우를 모의 분석하였으나 하류 하천으로의 회귀를 고려할 경우에 대한 추가적인 분석이 필요할 것이다. 다양한 유역 규모와 수리지질조건 등 분석 자료의 확충을 통해 지속적으로 상관관계식의 개선이 필요하며, 현장 계측값과의 비교를 통한 검증 과정을 거치는 등 개발 상관식의 신뢰도를 높여야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 한강홍수통제소 “하천변 지하수 이용에 따른 영향 평가” 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.
- Butler, J.J. Jr., Zhan, X., and Zlotnik, V.A. (2007). “Pumping-Induced Drawdown and Stream Depletion in a Leaky Aquifer System.” *Ground Water*, Vol. 45, No. 2, pp. 178-186.

- Butler, J.J. Jr., Zlotnik, V.A., and Tsou, M.-S. (2001). "Drawdown and Stream Depletion Produced by Pumping in the Vicinity of a Partially Penetrating Stream." *Ground Water*, Vol. 39, No. 5, pp. 651-659.
- Construction and Transportation Ministry, Korea Water Resources Corporation, and Korea Rural Community (2007). *Basic groundwater investigation for Anseong province*.
- Environment Canterbury (2000). *Guidelines for the assessment of groundwater abstraction effects on stream flow*.
- Gyeonggi Provincial Government (2006). *General planning on Bokha stream maintenance*.
- Gyeonggi Provincial Government (2006). General planning on Bokha stream maintenance.
- Hantush, M.S. (1965). "Wells near streams with semi-pervious beds." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 7012, pp. 2829-2838.
- Hunt, B. (1999). "Unsteady stream depletion from ground water pumping." *Ground Water*, Vol. 371, pp. 98-102.
- Hunt, B. (2003). "Unsteady stream depletion when pumping from semiconfined aquifer." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 13-19.
- Hunt, B. (2009). "Stream depletion in a two-layer leaky aquifer system." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 895-903.
- Hunt, B., Weir, J., and Clausen, B. (2001). "A stream depletion field experiment." *Ground Water*, Vol. 39, No. 2, pp. 283-289.
- Kim, H.S., and Jeong, J.H. (2009). "Numerical analysis of horizontal collector well in riverbank filtration." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10.
- 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, 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.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010a). *Study on estimation of optimal groundwater development rates*, pp. 140-242.
- 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.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, and Korea Water Resources Corporation (2011). *Basic groundwater investigation for Icheon province*.
- Nyholm, T., Christensen, S., and Rasmussen, K.R. (2001). "Flow depletion in a small stream caused by groundwater abstraction from wells." *Ground Water*, Vol. 40, No. 4, pp. 425-437.
- Nyholm, T., Rasmussen, K.R., and Christensen, S. (2003). "Estimation of stream flow depletion and uncertainty from discharge measurements in a small alluvial stream." *Journal of Hydrology*, Vol. 274, pp. 129-144.
- Singh, S.K. (2000). "Rate and volume of stream depletion due to pumping." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 336-338.
- Singh, S.K. (2005). "Rate and volume of stream flow depletion due to unsteady pumping." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 6, pp. 539-545.
- Sophocleous, M., Koussis, A., Martin, J.L., and Perkins, S.P. (1995). "Evaluation of simplified stream-aquifer depletion models for water rights administration." *Ground Water*, Vol. 33, No. 4, pp. 579-588.
- Theis, C.V. (1941). "The effect of a well on the flow of a nearby stream." *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 22, No. 3, pp. 734-738.

논문번호: 12-069	접수: 2012.06.26
수정일자: 2012.07.23/08.21	심사완료: 2012.08.21