

## 기후, 지하수 취수 및 토지이용 변화의 건기 총유출량에 대한 영향

Effects of Changes of Climate, Groundwater Withdrawal,  
and Landuse on Total Flow During Dry Period

이길성\* / 정은성\*\* / 신문주\*\*\*

Lee, Kil Seong / Chung, Eun-Sung / Shin, Mun-Ju

### Abstract

In this study, the effects of variability in climate, groundwater withdrawal, and landuse on dry-weather streamflows were investigated by input sensitivity analysis using SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Since only dry-period precipitation and daily average solar radiation among climate variables have high correlation coefficients to total flow (TF), sensitivity analyses of those were conducted. Furthermore, an equation was derived from simulation results for 30 years by multiple regression analysis. It may be used to estimate effects of various climatic variations (precipitation during the dry period, precipitation during the previous wet period, solar radiation, and maximum temperature). If daily average maximum temperatures increase, TFs during the dry period will decrease. Sensitivities of groundwater withdrawal and landuse were also conducted. Similarly, groundwater withdrawals strongly affect streamflow during the dry period. However, landuse changes (increasing urbanization) within the forested watershed do not appear to significantly affect TF during the dry period. Finally, a combined equation was derived that describes the relationship between the total runoff during the dry period and the climate, groundwater withdrawal and urban area proportion. The proposed equation will be useful to predict the water availability during the dry period in the future since it is dependent upon changes of temperature, precipitation, solar radiation, urban area ratio, and groundwater withdrawal.

**keywords** : climate change, groundwater withdrawal, landuse, total flow during dry period, input sensitivity analysis, SWAT

### 요 지

본 연구는 SWAT 모형을 이용하여 기상, 지하수 취수량, 토지이용 변화에 대한 건기 총유출량의 민감도를 제시하였으며 더 나아가 건기의 총 유출량을 추정하기 위해 건기 총강우량, 전 우기 총강우량, 평균 일 최대온도, 일평균 태양복사량과 같은 기상 변수들과 지하수 취수량 및 도시면적 비율을 이용하여 회귀식을 도출하였다. 도출된 식을

\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수  
Professor, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

\*\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료  
PhD Candidate, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: cool77@snu.ac.kr)

\*\*\* (주)동부엔지니어링 수자원부 사원  
Dept. of Water Resources, Dong-bu Corporation, Seoul 154-17, Korea (e-mail: bluebear77@hanmail.net)

이용하여 기후변화에 대한 건기 총유출량 변화를 살펴보기 위하여 온도와 강우량의 변화에 대한 건기 총유출량의 변화율을 제시하였는데 기후변화로 인해 온도가 상승할 경우 건기의 총 유출량은 감소하는 것으로 나타났다. 지하수 취수량은 총 유출량과 관계가 높는데 반해 토지이용 변화는 산간유역인 대상유역의 경우 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안된 식은 기저유출에 영향을 크게 미치는 강우와 기온 및 태양복사량을 포함하는 기상상태, 지하수 취수량, 도시면적 비율을 변수로 갖는 식이므로 기후변화를 비롯한 유역의 다양한 수문학적 변화에 대해 대상유역의 미래 건기의 수자원 확보량을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

**핵심용어** : 기후변화, 지하수 취수, 토지이용, 건기 총 유출량, 민감도 분석, SWAT

## 1. 서론

국내외 도시 유역은 급격한 도시화에 따른 불투수 면적과 지하수 이용 증가로 인한 기저유출의 감소, 상류 저수지의 농업용수를 위한 방류량 감소, 합류식 하수관거로 인한 우수회귀 손실 등으로 일부 하천에는 갈수기 하천유량이 현저히 감소하고 있다(이길성 등, 2006). 특히 최근에는 가뭄이 장기간 지속되고 연평균 기온이 상승하는 등 기상 이변까지 빈번하게 발생하여 건기의 하천수가 더더욱 줄어들고 있는 실정이다. 심명필(2003)은 국내 지방2급 이상 하천을 대상으로 건천 여부를 조사한 결과 3,773개 중 543개, 약 14.4%가 건기에 하천이 매말라 있음을 보였다. 만약 건기의 비 강우시 하천에 충분한 유량이 유지되지 않는다면 하천 및 인근 유역에서 생태학적, 환경적으로 심각한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 건기(10월-5월)의 총 유출량에 대한 예측은 효과적인 유역관리를 위해 매우 중요하다.

기저유출이 대부분인 건기의 유출량은 주로 지하수 위와 관계가 깊는데 지하수위는 일반적으로 강우와 온도를 포함한 기상, 지하수 취수, 토지이용 등에 영향을 받는다.

기상자료에 대한 유출량의 민감도 분석은 기후변화(climate change)에 대한 연구와 밀접하게 관련되어 있다. Chiew et al.(1995)은 호주유역에서 온도와 강우량이 유출량과 토양수분량(soil moisture)에 어떻게 영향을 미치는지에 대해 모의하였다. Singh and Bengtsson(2004)은 3개의 온도 시나리오( $T +1^{\circ}\text{C}$ ,  $T +2^{\circ}\text{C}$ ,  $T +3^{\circ}\text{C}$ )와 4개의 강우 시나리오( $P - 10\%$ ,  $P - 5\%$ ,  $P +5\%$ ,  $P +10\%$ )를 모의하여 기후자료에 대한 수문학적 민감도(hydrological sensitivity)를 조사하였으며, Albek et al.(2004)은 HSPF(Hydrological Simulation Model-FORTRAN; Bicknell et al., 2001) 모형을 이용하여 기후변화로 인한  $3^{\circ}\text{C}$ 의 연평균 기온상승이 21%의 총 유출량을 감소시킨다고 제시하였다. 이외에도 그동안 유출과 기후변화에 대한 관계나 수문학적 민감도를 규명하

는 많은 연구가 있었다(McCabe and Ayers, 1989; Lettenmaier and Gan, 1990; Nash and Gleick, 1991; Arnell, 1992; Burn, 1994; Duell, 1994).

지하수의 취수와 유출량의 관계를 모의한 지하수 관리 모형들은 그 동안 여러 차례 적용된 바가 있다(Male and Mueller, 1992; Reichard, 1995). Barlow et al.(2003)은 지하수 취수와 유출량의 직접적인 관련성(trade-offs)을 평가하기 위해 선형최적기법과 수치모의 모형을 결합한 결합관리(conjunctive management) 모형을 개발하여 월최소 유지유량에 대한 연도별 수문학적 변화에 대해 접근하였으며 지하수 취수를 적절히 관리할 경우 여름에 약 35%만큼 하천 건천율을 감소시킬 수 있음을 밝혔다. Ahlfeld(2004)는 지표수와 대수층 모의 모형과 최적화 방법을 결합한 지하수 모의모형을 이용하여 취수량과 하천수사이의 함수적 관계를 도출하였다. Chuanji et al.(2004)은 신경망 이론(artificial neural network)과 시계열(time series) 분석 결과를 비교하여 강우와 지하수 취수량을 고려한 용설 유출량의 변화를 예측하였다.

일반적으로 도시화는 유역내 불투수 면적 비율을 증가시켜 지표면 유출량은 증가시키고 침투량은 감소시켜 기저유출이 대부분을 이루는 건기의 비강우시 유출량을 감소시킨다. 국내의 경우 이승종 등(2005)은 WEP(Water and Energy transfer Processes) 모형을 도립천 유역에 구축하여 과거(1975년)와 현재(2000년)의 토지 이용도를 이용하여 불투수면의 증가가 유출특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이길성 등(2005)은 PCSWMM 모형을 학의천 유역에 구축하여 1975년, 2000년, 2016년의 토지이용에 대해 모의하였다. 국외의 경우 Brown(1988)은 우수 유출량과 불투수 지역의 넓이는 비례 관계가 있음을 보였으며 Kang et al.(1998)은 모의모형을 통해 증가하는 도시화로 인해 침투유량은 증가하고 침투시간은 더 빨라짐을 보였다. Brun and Band(2000)는 HSPF 모형을 이용하여 기저유량, 총 유출량과 불투수 면적과의 관계를 설명하는 관계식을 도출하였다.

Chung et al.(2005)은 PCSWMM(PC Storm Water Management Model, James et al., 2003) 모형과 PLOAD(Pollutant LOADings; Edwards and Miller, 2001) 모형을 이용하여 토지이용의 변화로 인한 유출수의 수량과 비점오염 부하량의 변화를 제시하였다.

지금까지 이러한 기후의 변화, 지하수 취수량의 변화, 토지이용의 변화가 유출량에 각각 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구는 많이 있었음에도 불구하고 동시에 연구하여 서로에 대한 영향을 평가한 사례는 거의 없었다. Schade and Shuster(2005)가 토지이용 변화와 기후 변화가 유출량에 미치는 영향을 함께 모의하였다. 본 연구에서는 국내외에서 다양한 대상유역에 대해 적용성을 인정받은(Arnold et al., 1999; Santhi et al., 2001; 김철겸과 김남원, 2004; 강문성과 박승우, 2003; Kim et al., 2003) SWAT(Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 2002) 모형을 이용하여 건기의 총 유출량에 대한 기후변화, 지하수 취수량의 변화, 토지이용의 변화의 민감도 분석을 수행하였으며 모의 결과를 이용하여 미래의 건기 총 유출량을 예측하기 위한 식을 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 통해 도출하였다.

## 2. 대상유역

대상유역은 웃우물교를 출구점으로 하며 Fig. 1과 같

이 왕곡, 오전천 및 안양천의 발원지를 포함하는 안양천의 최상류 유역으로 유역면적은 13.42 km<sup>2</sup>이다. Tripathi et al.(2005)은 유역분할이 SWAT 모의시 결과에 상당한 영향을 미치므로 주의해야 한다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 하천망, 지형자료, 우수관을 고려하여 대상유역을 5개의 소유역으로 구분하였다. 대상유역은 경기도 의왕시에 포함되며 2004년 기준으로 약 41,000명이 거주하고 있고, 2000년 기준으로 68.4%의 산림지역, 17.1%의 도시지역, 13.3%의 농업지역으로 이루어져 있으며, Fig. 2와 같이 1975년에 비해 25년간 14.1% 도시화가 이루어 졌다. 대상유역의 지하수 취수량은 2000년 기준으로 약 70.1 - 84.5 mm/년(한국수자원공사, 2000)으로 전체 연평균 강우량의 7.5%에 해당되며 안양천 전체 평균인 26.2 mm/년과 비교하면 매우 높아 과도한 지하수 취수로 인해 건기 지하수위가 매우 떨어져 있다. 유역의 경사는 약 1/60 - 1/30로 안양천 유역 전체 평균에 비해 비교적 높으며 토양은 56.9%의 모래(sand)와 26.3%의 실트(silt), 16.7%의 점토(clay)으로 구성되어 있다. 현재 대상유역의 출구점인 웃우물교에는 21세기 프론티어 기술개발 사업단이 Fig. 1과 같은 실시간 초음파 수위계를 이용하여 2004년 5월부터 15분 단위로 수위를 측정하여 웹(<http://anyang.river.or.kr>)으로 제공하고 있다.

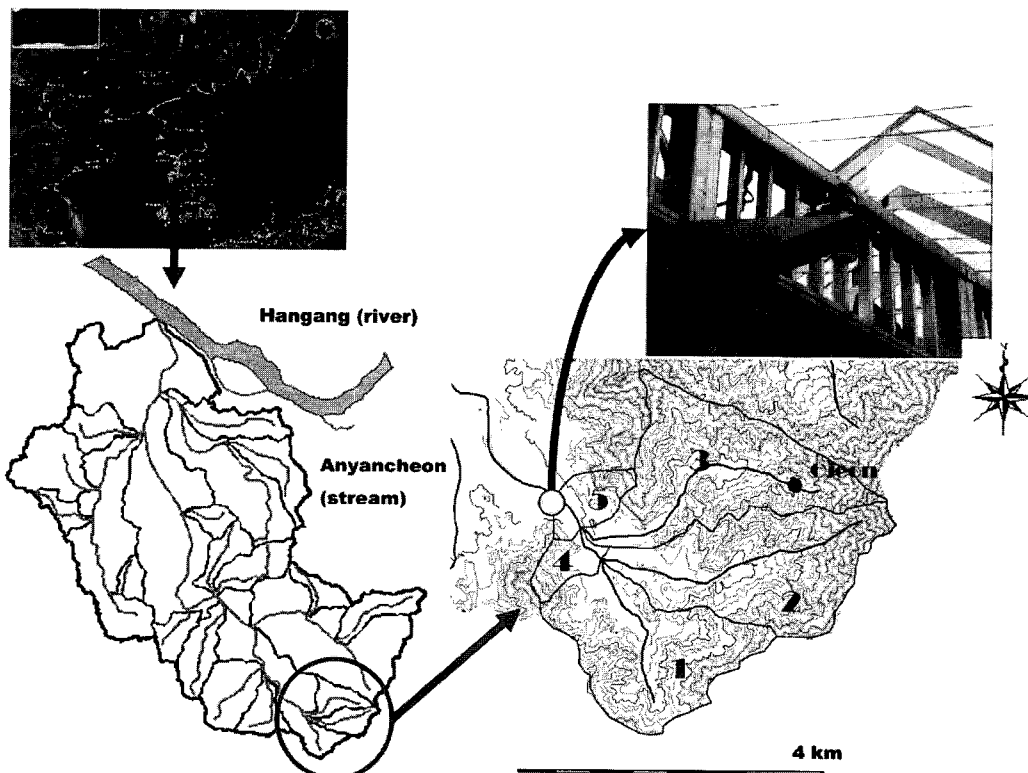


Fig. 1. Description of Study Area

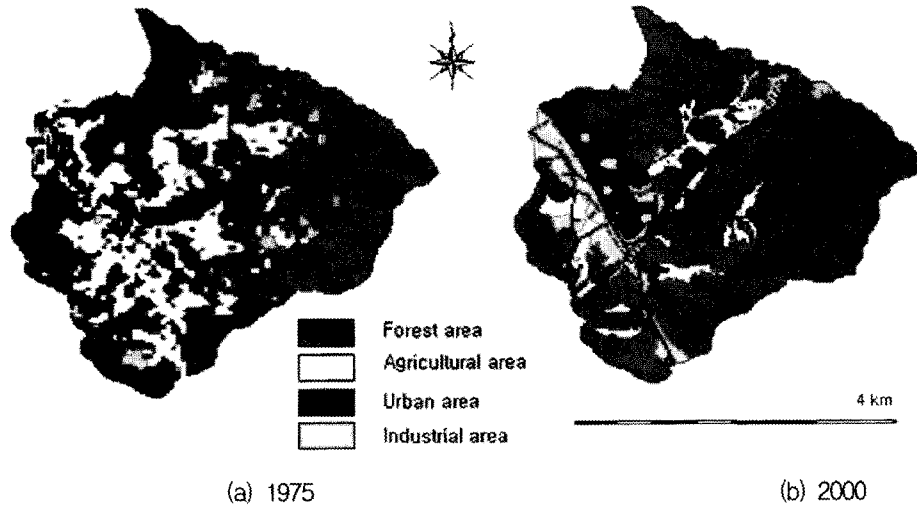


Fig. 2. Landuse Changes of the Study Area

### 3. 연구방법

#### 3.1 SWAT

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다 (Arnold et al., 2002; Arnold and Fohrer, 2005).

SWAT 모형에는 크게 기상, 수문, 영양 물질, 침식, 식생, 관리, 하도 추적, 수체의 8가지 부 모형으로 이루어져 있다. 입력자료는 GIS(Geographic Information System)를 통해 자동으로 구성되는 유역 전체의 물리적인 유역자료와 토양자료, 작물자료가 있고 수동 입력을 통해 작성되는 기상, 하도추적, 농업관리, 지하수 등의 자료, GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다. 여기서 HRU란 수문반응단위로 SWAT 모형 계산의 기본단위이다. 전체적인 토양도와 토지이용도를 구축한 후 DEM(Digital Elevation Model) 구축 시 분할한 격자(cell) 크기에 맞추어 토양도와 토지이용도를 분할한다. 격자 안에는 각각 지형자료와 토지이용자료 및 토양자료가 입력되는데 이러한 각각의 격자를 HRU라고 한다.

#### 3.2 검보정

유출량을 예측하기 위한 강우유출 모형의 정확성은

매개변수의 정확한 보정에 달려있다. 매개변수 중 물리학적 매개변수는 유역의 특성에 따라 결정되므로 보정의 대상이 되지 않지만 수문학적 매개변수는 작물(crop), 유역(basin), 화학(chemical), 지하수, 하도 등으로 구성되어 전부 보정의 대상이 되므로 민감도 분석을 수행해야 한다. 본 연구는 수량에 관련된 연구이므로 수질 관련 매개변수는 제외하였다. 민감도 분석 결과 Fig. 3과 같이 침투유량과 총 유출량 측면에서 모두 SOL\_AWC(available water capacity of the soil layer; mm/mm), GW\_DELAY(groundwater delay time; days), CN2(initial SCS runoff curve number for moisture condition II)가 민감하므로 보정에 사용하였다.

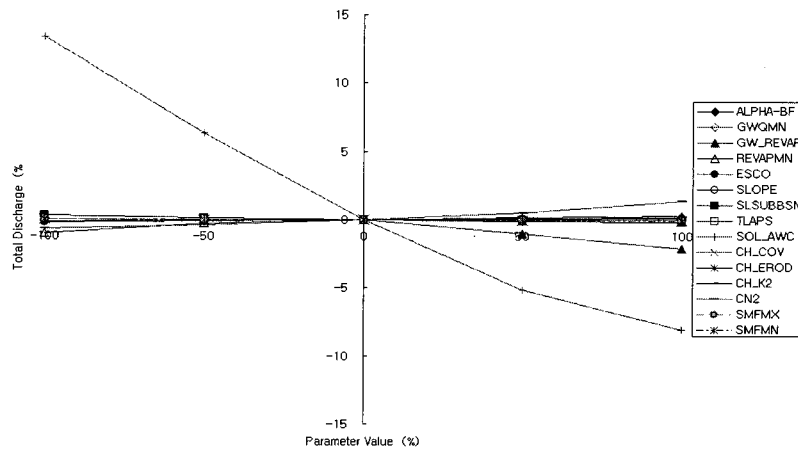
매개변수 추정은 수동 방식과 자동방식으로 나눌 수 있는데 수정보정의 경우 핵심적인 매개변수들을 만족할 만한 정확도가 나올때 까지 시행착오법에 의해 변화시키는 것이다. 본 연구에서는 수정방식을 사용하였으며 보정을 위한 목적함수는 다음과 같이 모형의 효율성(model efficiency; Nash and Sutcliffe, 1970)을 사용하였다.

$$\max R^2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (1)$$

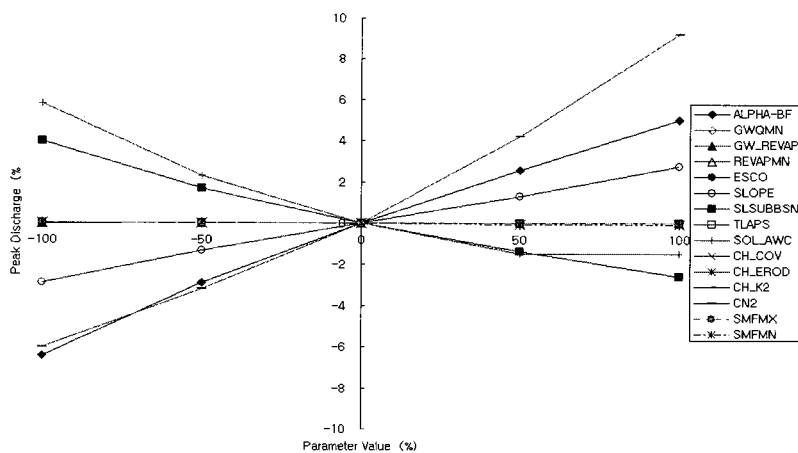
$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n (M_{ob} - O_{ob})^2 \quad (2)$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - O_{ob})^2 \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 자료의 개수,  $Q_{ob}$ 는 관측값,  $M_{ob}$ 는 관측값의 평균,  $Q_{sim}$ 는 모의값이다.  $F_0^2$ 는 관측값의 초기편차를 나타내며,  $F^2$ 는 관측값과 모의값의 불일치를 나타



(a) Total Flow



(b) Peak Flow

Fig. 3. Results of Parameter Sensitivity Analysis

내는 지수이다. 즉  $R^2$ 가 1로 갈수록 모형의 효율성이 높아지는 것을 의미한다. 모형 효율계수값은 모의결과값과 관측값이 일치하면 1.0 을 갖는다. 만약 모형효율 계수값이 0 과 1.0 사이에 있으면 모의결과값을 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 나타내며, 0 보다 작으면 모형의 모의결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다. 이외에도 RMSE(Root Mean Squared Error)와 RMAE(Root Mean Absolute Error)를 제시하여 오차의 정도를 나타냈다.

### 3.3 민감도 분석

민감도  $S_c$ 는 다음 Eq. (4)와 같이 입력함수  $I$ 의 변화에 대한 출력함수  $O$ 의 변화이다(McCuen, 2003). 즉 본 연구에서는  $O$ 는 건기의 총 유출량이며,  $I$ 는 기상자료, 지하수 취수량, 토지이용에 해당된다.

$$S_c = \frac{\partial O}{\partial I} = \frac{\Delta O}{\Delta I} \quad (4)$$

## 4. 모형 구성

### 4.1 입력자료

기상청에서 제공하는 기상자료 중 서울 및 수원기상대의 1973년 5월 1일부터 2004년 12월 31일까지의 일강우, 일 최고·최저기온, 일 평균상대습도, 일 수평면 일사량, 일 평균풍속, 일 평균이슬점 온도자료를 사용하여 기상입력자료를 구축하였고 건설교통부 국토지리정보원에서 발행한 안양천 유역의 1999년도 1/25,000 수치지형도와 ArcView GIS Tool을 이용하여 DEM을 구축하였으며 농촌진흥청 농업과학기술원에서 발행한 2002년도 1/25,000의 수치정밀토양도와 농업토양정보시스템 (<http://asis.rda.go.kr/>)의 자료 및 수리특성계산기(Hydraulic Properties Calculator; <http://wilkes.edu/~boram/soilwatr.htm>)를 이용하여 토양입력자료를 구축하였다. 국토지리정보원에서 발행한 1999년도 1/25,000의 수치토지이용 현황도, Landsat TM (Thematic Mapper), Landsat ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus)에 의한 1975년, 1980년, 1985

년, 1990년, 1995년, 2000년 토지이용 현황도를 ArcView GIS Tool을 이용하여 토지이용 입력자료를 구축하였다. DEM, 토양입력자료와 토지이용 입력자료의 격자 크기는 조효섭 등(2003)이 제안한 바와 같이 25 - 50 m 사이인 30 m × 30 m 로 설정하였다. 1999년 수치지형도와 2002년 수치 정밀토양도 및 1999년 수치 토지이용 현황도는 모두 2000년도의 수치지형도, 수치정밀 토양도, 수치토지이용 현황도와 동일하다고 가정하여 SWAT 모형의 입력자료 구축시 사용하였다.

#### 4.2 검보정

매개변수 보정에 사용한 관측자료의 기간은 2004년 11월 1일부터 2004년 12월 31일까지이고 매개변수 검증에 사용한 관측자료의 기간은 2005년 1월 1일부터 2005년 3월 31일까지이다. 매개변수 보정 전후와 검증결과는 Table 1과 같고 모의값과 실측값을 비교하면 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 매개변수 검증결과 RMSE는 0.008 CMS, RMAE는 0.364, 모형효율계수는 0.84이다.

### 5. 결 과

#### 5.1 기상

##### 5.1.1 민감도 분석

강우를 포함한 기상자료는 유출량에 가장 많이 영향을 미치기 때문에 건기 총 유출량도 기상자료에 가장

많이 영향을 받는다고 할 수 있다. 기상청에서 제공하는 기상자료는 일 강우량, 일평균 태양복사량, 일최대/최소 온도, 일평균 습도, 일평균 풍속 등이 있으며 본 연구에서는 이를 모두 이용하였다. 2000년의 토지이용도와 지하수 취수량을 사용하여 1973년 5월부터 2004년 12월까지 모의하였으며, 1973과 1974년 자료는 모형의 안정화를 위해 사용되었고 나머지 30년 동안의 자료를 이용하여 분석하였다.

전 우기 총강우량, 건기 총강우량, 평균 태양 복사량, 일평균 최고온도, 평균 상대습도, 일평균풍속과 건기 총 유출량 간의 상관계수(correlation coefficient)를 산정한 결과는 Table 2와 같다. 건기 총 유출량과 상관관계가 높은 인자는 일평균 태양복사량과 건기 총 강우량으로 두 인자에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 결과는 Figs. 6, 7과 같다. 또 건기 총 유출량과 각각의 인자와의 관계를 설명하는 회귀식을 도출하면 다음 Eqs. (5), (6)과 같다.

$$y = 46.05 \exp(0.003x_1) \quad (R^2: 0.601) \quad (5)$$

$$y = 118.29 \exp(-0.012x_2) \quad (R^2: 0.519) \quad (6)$$

여기서,  $y$ 는 건기 총 유출량(mm)이고,  $x_1$ 은 건기 총 강우량(mm)이고  $x_2$ 는 일평균 태양복사량(MJ/m<sup>2</sup>/day)이다.

Table 1. Results of Calibration and Verification

Category	Before calibration	After calibration	Verification
RMSE (CMS)	0.021	0.018	0.008
RMAE	0.220	0.198	0.364
Efficiency	0.53	0.63	0.84

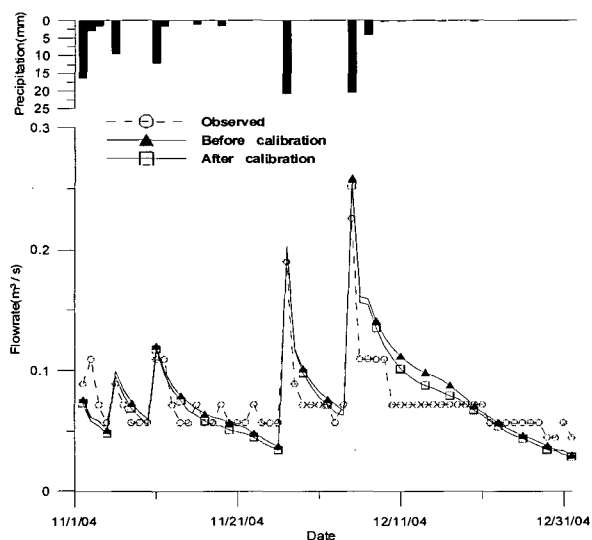


Fig. 4. Comparison of Pre-calibrated, Calibrated and Measured Values for Daily Streamflow

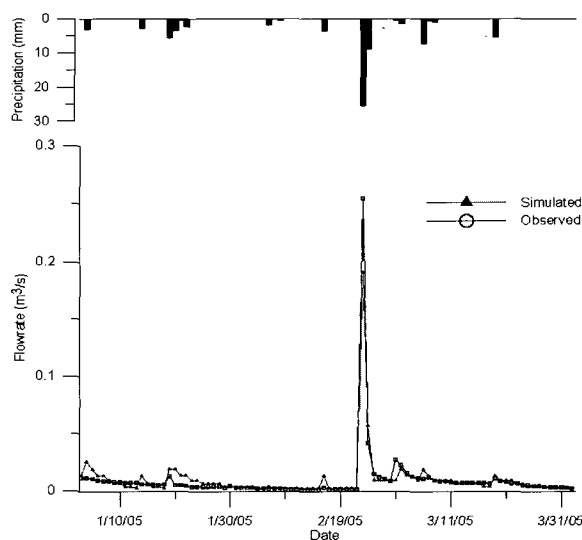


Fig. 5. Result of Verification

Table 2. Correlation Coefficient Between Dry-weather Total Flow and Climate Variables

Climate variable	Correlation coefficient
Precipitation during the previous wet period	0.0618
Daily maximum temperature	-0.0742
Relative humidity	0.1363
Daily average wind speed	0.0107
Daily average solar radiation	-0.4188
Precipitation during the dry period	0.6570

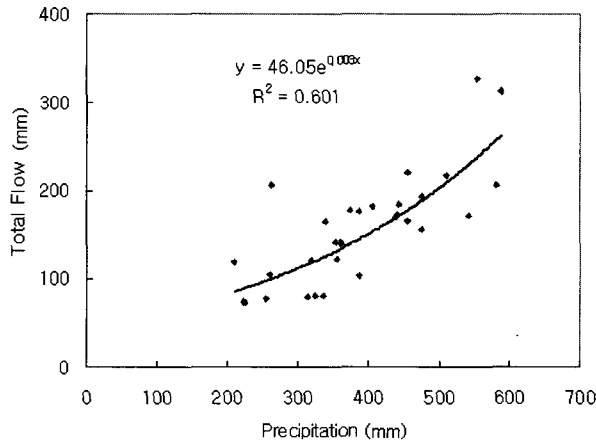


Fig. 6. Sensitivity to the Precipitation During the Dry Period

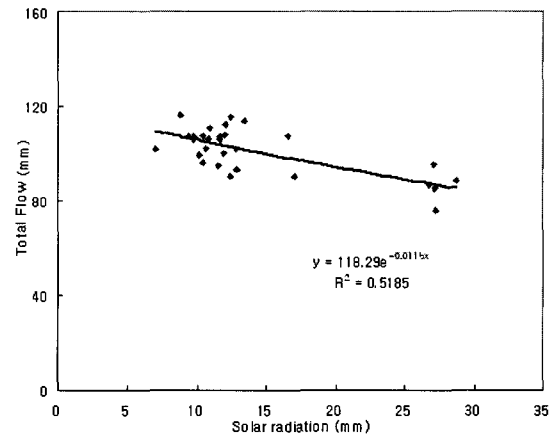


Fig. 7. Sensitivity to the Daily Average Solar Radiation

민감도 분석 수행시 다른 기상인자 및 유역상태 조건은 모두 2000년 자료로 사용하였으며 대상 기상인자는 32년간(1973-2004년)의 자료를 이용하여 수행하였다.

### 5.1.2 건기 총유출량 산정

보다 일반적인 건기 총 유출량을 산정하기 위한 회귀식을 도출하기 위해 필요한 중요 기상인자들을 알아보기 위해 Direct Search on  $t$  방법 (Daniel and Wood, 1980)을 사용하여 표준 총 잔차 제곱합인  $C_p$  값 (Mallows, 1973)을 비교한 결과 건기의 총 강우량, 전 우기의 강우량, 일평균 복사량, 평균 일최대 온도가 다음 Eq. (7)과 같이 선정되었다. 따라서 5.1.1의 30년간 모의 결과를 이용하여 다중회귀분석을 수행하여 산정한 건기 총 유출량 추정식은 다음과 같다.

$$y = 1957 + 3.930x_1 - 0.1669x_1x_3 + 0.0136x_4x_3 + 468.9\ln(x_2x_3x_4) - 538.3\ln(x_1x_2x_4) \quad (7)$$

$(R^2 : 0.766)$

여기서,  $x_3$ 는 평균 일 최대온도( $^{\circ}\text{C}$ ),  $x_4$ 는 전 우기 총 강우량 (mm)이다. Eq. (7)을 이용하여 예측한 총 유출량값과 모의값을 비교한 결과는 Fig. 8과 같다.

이 식은 향후 예상되는 기후변화가 건기 총 유출량

에 어떠한 영향을 미치는지에 활용될 수 있다. Lal et al.(1992)은 예상되는 기후변화 시나리오를 해양-대기 결합 기후모형(European Community Hamburg Model (ECHAM) +Large-Scale Geostrophic ocean model (LSG))을 사용하여 아시아의 몬순 지역에 대해 제시하였다. Singh and Kumar(1997)의 연구에도 이 모의 결과를 이용하였는데 시나리오는 3개( $T +1^{\circ}\text{C}$ ,  $T +2^{\circ}\text{C}$ ,  $T +3^{\circ}\text{C}$ )의 온도시나리오와 4개( $P -10\%$ ,  $P -5\%$ ,  $P +5\%$ ,

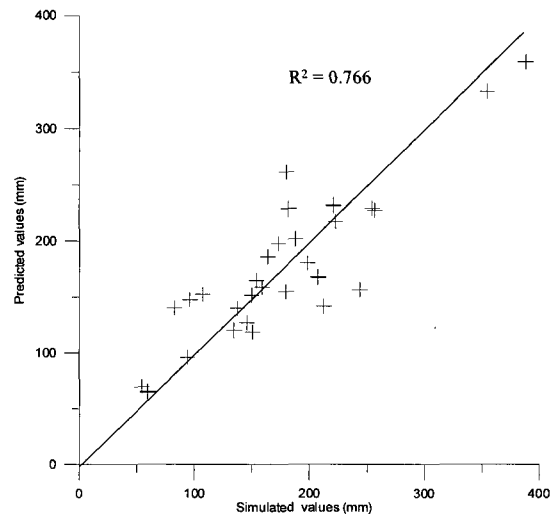


Fig. 8. Comparison Between the Simulated and the Predicted Values (Eq. (7))

P +10%)의 강우 시나리오 사용하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 Table 3과 같이 강우량을 건기와 전 우기로 나누었고, 태양복사량에 대한 시나리오를 추가하는 등 더 많은 경우에 대해 결과를 도출하였다. 건기 유출량에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 최고온도로 만약 온실효과로 인한 기후변화로 인해 온도가 1°C 상승하였을 경우 7.7%, 2°C 상승하였을 경우 17.1%, 3°C 상승할 경우에는 건기 총 유출량이 약 27.9%가 감소하는 것으로 나타났다. 최고 온도 다음으로 건기 총 유출량에 크게 영향을 미치는 요소는 건기 총 강우량, 태양복사량, 전 우기 강우량의 순으로 나타났다.

온실효과로 인한 기후변화는 대기중의 열평형을 변화시켜 온도와 강우량을 변화시키므로(IPCC, 1992), Table 4와 같이 동시에 변화하는 경우에 대한 결과도 도출하였다. 온도로 인한 총 유출량의 감소폭이 더 크므로 기온이 3°C 올랐을 경우 건기 총강우량이 15% 증

가하였을 지라도 건기 총 유출량은 23.2% 감소함을 알 수 있다. Table 4로부터 건기 총강우의 증가로 인한 건기 총 유출량의 증가는 높은 온도에서보다는 낮은 온도에서 더 크게 작용하며 온도가 증가할수록 감소하는 총 유출량의 값이 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 높은 온도에서는 증발과 증발산(evapotranspiration)으로 인한 손실량이 늘어나기 때문이다.

## 5.2 지하수 취수

기상과 토지이용 자료는 모두 2000년으로 고정하고 지하수 취수량을 변화시켜 총 유출량에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 대상구역의 경우 “지하수조사연보(한국수자원공사, 2000, 2004)”에 따르면 2000년에 약 4,300 m<sup>3</sup>/일 정도 사용했으며 2004년에는 약 2,400 m<sup>3</sup>/일 정도 사용했으므로 민감도 분석은 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 m<sup>3</sup>/일에 대해 수행하였고 결과는 Fig. 9와 같다.

Table 3. Changes of Total Flow During the Dry Period for Various Climatic Scenarios

Precipitation during the previous wet period							
Scenarios	30% ↑	20% ↑	10% ↑	Average	10% ↓	20% ↓	30% ↓
Value (mm)	1009.6	965.7	921.8	877.9	834.0	790.1	746.2
TF (mm)	188.2	184.3	180.4	176.8	173.3	170.0	166.9
Ratio	6.49%	4.25%	2.08%	0.00%	-1.98%	-3.85%	-5.60%
Maximum temperature							
Scenarios	1 °C ↓	0.5 °C ↓	Average	0.5 °C ↑	1 °C ↑	2 °C ↑	3 °C ↑
Value (°C)	10.80	11.30	11.8	12.30	12.80	13.80	14.80
TF (mm)	187.0	182.4	176.8	170.3	163.1	146.5	127.4
Ratio	5.80%	3.17%	0.00%	-3.65%	-7.74%	-17.13%	-27.93%
Solar radiation							
Scenarios	15% ↓	10% ↓	5% ↓	Average	5% ↑	10% ↑	15% ↑
Value (MJ/m <sup>2</sup> /day)	12.12	12.83	13.54	14.3	14.97	15.68	16.39
TF (mm)	188.0	184.1	180.3	176.8	173.4	170.2	167.1
Ratio	6.38%	4.14%	2.01%	0.00%	-1.92%	-3.74%	-5.49%
Precipitation during the dry period							
Scenarios	30% ↑	20% ↑	10% ↑	Average	10% ↓	20% ↓	30% ↓
Value (mm)	440.4	421.3	402.1	383	363.8	344.7	325.5
TF	214.2	200.6	188.1	176.8	166.8	158.4	151.6
Ratio	21.18%	13.47%	6.39%	0.00%	-5.63%	-10.41%	-14.25%

Table 4. Effect of Variation in Daily Maximum Temperature and Precipitation during the Dry Period on Total Flow During the Dry Period With Respect to No Change Scenario

Scenarios		Maximum temperature			
		0.5°C ↑	1°C ↑	2°C ↑	3°C ↑
Precipitation during the dry period	15% ↑	14.82%	8.01%	-6.80%	-23.02%
	10% ↑	8.01%	2.11%	-10.89%	-25.31%
	5% ↑	1.84%	-3.16%	-14.36%	-26.97%
	-	-3.65%	-7.74%	-17.13%	-27.93%
	5% ↓	-8.37%	-11.56%	-19.14%	-28.14%
	10% ↓	-12.25%	-14.54%	-20.31%	-27.49%
	15% ↓	-15.19%	-16.57%	-20.54%	-25.91%



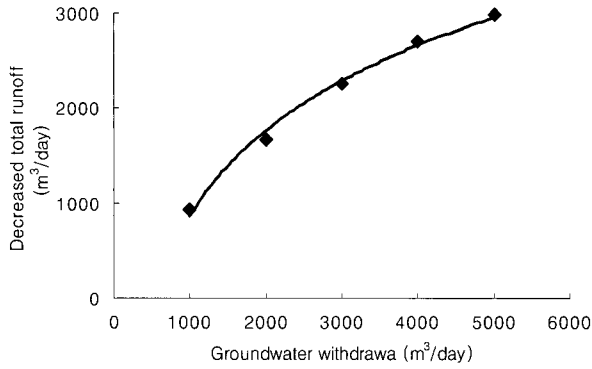


Fig. 9. Sensitivity of the Groundwater Withdrawal

처음 1,000 m³/일을 취수할 경우 유출량은 928 m³/일만큼 감소하며 그 다음 1,000 m³/일에는 741 m³/일만큼 감소하며 점차 감소하는 형태를 보인다. 지하수 취수량이 증가할수록 건기 총 유출량은 감소하며 감소폭은 지하수 취수량이 증가할수록 둔화된다. 따라서 지하수 취수량에 대한 건기 총 유출량 변화에 대한 회귀식의 형태는 로그형식이 가장 적절하며 이를 이용하여 지하수 취수량에 대한 유출감소량을 산정하기 위한 식을 도출하면 Eq. (8)과 같다.

$$y' = y - 23.51 \ln(x_5) + 146.74 \quad (R^2 : 0.994) \quad (8)$$

여기서  $x_5 (\geq 1,000)$ 는 일평균 지하수 취수량(m³/일)이며 모두 얕은 대수층(shallow aquifer)으로부터 이루어진다고 가정하였다. 따라서 SWAT 모형의 입력변수 중 "WSHAL"을 이용하였다.

### 5.3 토지이용

#### 5.3.1 민감도 분석

토지이용에 대한 민감도 분석을 수행하기 위해 30년간의 기상자료, 지하수 취수량은 2000년 자료를 이용하고 토지이용 자료만 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000년으로 변화시키면서 모의를 수행하였다. 1975년과 2000년을 비교한 결과는 Fig. 10 및 Table 5와 같다. 1975년에서 2000년이 되는 사이 도시지역 비율은 3%에서 17.1%로 14.1% 증가하였으며 건기 총 유출량은 184

mm에서 177.5 mm로 6.5 mm 감소하였다. 이는 건기 총강우량의 1.7%이고 건기 총 유출량의 3.6%에 해당하는 양이다. 이길성 등(2005)의 연구에서는 학의천 유역에 대해 도시화 면적 비율이 2.5%에서 22.8% 변하는 사이 2002년 강우에 대해 건기 유출량이 83.2 mm 감소하는 것에 비해 낮은 감소율을 보였는데 그 이유는 대상유역은 68.4%가 산간지역으로 학의천(1/410-1/140)에 비해 경사가 매우 급하므로(1/60-1/30) 도시화 이전부터 상대적으로 기저유출보다는 지표면 유출이 많이 발생하였기 때문으로 추정된다.

#### 5.3.2 건기 총유출량 산정

도시지역의 면적비율까지 고려하여 보다 일반적인 미래 건기 총 유출량을 산정하기 위한 추정식을 도출하기 위해 30년간의 기상자료와 6개의 토지이용자료를 이용하여 모의하였고 그 결과는 다음 Eq. (9)와 같다.

$$y = 2949 + 1.185x_1 - 4.035x_3 + 0.3396x_4 + 0.4225x_6 - 228.8 \ln(x_1 x_2 x_4) \quad (R^2 : 0.708) \quad (9)$$

여기서,  $x_6$ 는 도시지역의 비율(%)이다. Eq. (9)를 이용한 예측 총 유출량 값과 모의 값을 비교하면 Fig. 11과 같다. Eq. (9)는 Eq. (7)에 비해  $R^2$ 는 작지만 토지이용의 변화까지 감안하여 건기 총 유출량을 산정할 수 있으므로 활용도가 더 높다. 만약 도시지역 비율이 30%까지 증가한다면 총 유출량은 5.5 mm, 즉 강우량의 1.4%, 총 유출량의 3.1%가 감소한다

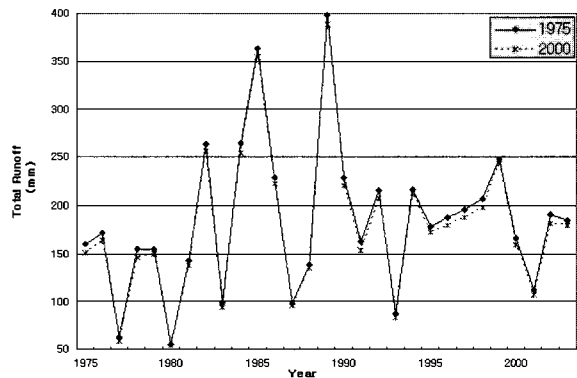


Fig. 10. Simulated Results to Landuses in the Year of 1975 and 2000

Table 5. Comparison of Simulated Results to Landuses in the Year of 1975 and 2000

Landuse	1975	2000	Difference
Urban area ratio	3.0%	17.1%	14.1%
Average total flow	184.0 mm	177.5 mm	6.5 mm

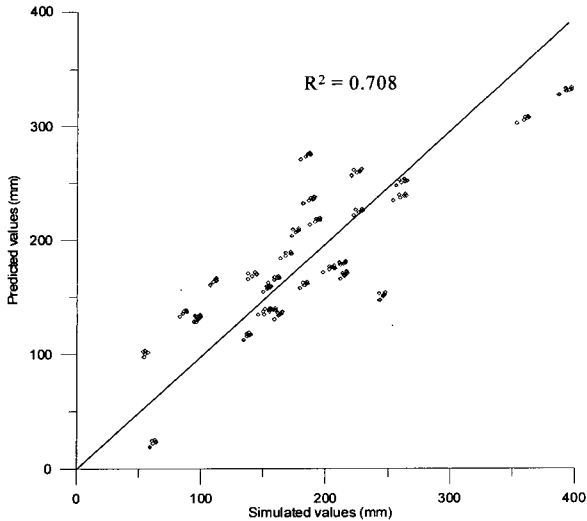


Fig. 11. Comparison Between the Simulated and the Predicted Values (Eq. (9))

#### 5.4 통합식 추정

이상의 기상자료, 지하수 취수, 토지이용에 대한 결과를 종합하여 Eqs. (7)~(9)를 조합하면 건기의 총 유출량을 추정할 수 있는 식을 다음 Eq. (10)과 같이 도출할 수 있다.

$$y = 3096 + 1.185x_1 - 4.035x_3 + 0.3396x_4 - 23.51\ln(x_5) - 0.4225x_6 - 228.8\ln(x_1x_2x_4) \quad (10)$$

Eq. (10)은 유역을 시스템 관점에서 해석될 수 있다. 건기의 총 유출량( $y$ )은 출력값, 건기의 총 강우량( $x_1$ )은 입력값(+), 일평균 태양복사량( $x_2$ )와 평균 일 최고온도( $x_3$ )는 대기로의 손실량(-), 전 우기 총 강우량( $x_4$ )은 초기상태(+), 지하수 취수량( $x_5$ )은 유역 외부로의 손실량(-), 도시지역 비율( $x_6$ )은 시스템 특성(-)에 해당된다.

### 6. 결 론

본 연구는 SWAT 모형을 이용하여 입력자료인 기상과 유역에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 각각에 대한 건기 총 유출량을 산정할 수 있는 식을 도출하였다. 기상자료에는 기상청에서 제공하는 강우량(건기 총 강우량, 전 우기 총 강우량), 평균 최고온도, 일평균 태양복사량, 일평균 상대습도, 일평균 풍속이 있으며 유역자료에는 지하수 취수량과 토지이용이 포함된다.

기상자료의 경우 건기 총강우량이 총 유출량과 가장 상관관계가 높으며 그 다음은 일평균 태양복사량이고 나머지는 낮은 상관계수를 보였다. 상관관계가 높은 두

개의 기상인자에 대해 민감도 분석을 수행하였으며 총 유출량과의 관계를 나타내는 식도 도출하였다. 더 나아가 2000년도의 토지이용과 지하수 취수량을 이용하여 30년간 모의한 결과를 이용하여 기상인자 값을 이용하여 총 유출량을 추정할 수 있는 회귀식을 도출하였다, Eq. (7)은 기후변화의 효과를 예측하는데 활용될 수 있는데 기온이 약 3℃ 상승하였을 경우 건기의 총 유출량은 27.9% 감소하는 것으로 나타났다. 이 식은 온도 이외에도 건기 총 강우량, 전 우기 총 강우량, 일평균 태양복사량을 변수로 포함하고 있으므로 기후의 다양한 변화로 인한 건기 총 유출량의 변화를 예측하는데 유용하게 이용될 수 있다. 특히 기후변화는 온도와 강우의 변화에 영향을 미치므로 동시에 변하는 것도 모의할 수 있다.

지하수 취수량에 대한 민감도 분석은 취수량이 증가할수록 점차 감소하는 형태를 보인다. 따라서 로그 형태의 회귀식을 도출하였다.

토지이용에 대한 민감도 분석의 경우 30년간의 기상자료와 2000년도의 지하수 취수량을 이용하여 총 6개(1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000년)의 실제 토지이용에 대해 분석을 수행하였다. 2000년의 경우 1975년 토지이용에 비해 도시지역 비율은 3.0%에서 17.1%로 증가하였고 총 유출량은 약 6.5 mm 감소함을 보였다. 이 양은 강우량의 1.7%이며 건기 총 유출량의 3.6%에 해당된다. 상대적으로 낮은 감소율을 보였는데 그 이유는 대상유역은 68.4%가 산간지역으로 경사가 매우 급하므로(1/60-1/30) 도시화 이전부터 상대적으로 기저유출보다는 지표면 유출이 많이 발생하였을 것으로 추정되기 때문이다. 결국 대상유역의 경우에는 건기의 하천수를 확보하기 위해서는 토지이용을 규제하는 것보다 지하수 취수를 억제하는 것이 훨씬 효과적이다.

이러한 세 가지 연구 결과로부터 제안된 Eq. (10)은 기저유출에 영향을 크게 미치는 강우와 기온을 포함하는 기상상태, 지하수 취수량, 토지이용 현황을 변수로 갖는 식이므로 미래 건기의 수자원 현황을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있어 그 효용가치가 크다고 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-2)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원과 Safe and Sustainable Infrastructure Research (SIR)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- 강문성, 박승우 (2003). "비점오염모델을 이용한 오염 총량모의시스템의 개발 및 적용." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 117-128.
- 김철검, 김남원 (2004). "산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 737-744.
- 심명필 (2003). **지속가능한 하천수 개발**. 인하대학교, 과학기술부.
- 이길성, 정은성, 김영오 (2006). "도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근방법." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 151-167.
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005). "PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수의 공급(2)모형의 적용." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 431-436.
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성 (2005). "WEP 모형을 이용한 도립천 유역 물순환 모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 449-460.
- 조효섭, 정관수, 김재한 (2003). "GIUH적용을 위한 DEM 격자크기 및 Threshold Area의 민감도 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 799-810.
- 한국수자원공사 (2000). **지하수조사연보**. 건설교통부.
- 한국수자원공사 (2004). **지하수조사연보**. 건설교통부.
- Ahlfeld, D.P. (2004). "Nonlinear response of streamflow to groundwater withdrawal for a hydrologic streamflow model." *Advances in Water Resources*, Vol. 27, pp. 349-360.
- Albek, M., Ogutveren, U.B., and Albek, E. (2004). "Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF." *Journal of Hydrology*, Vol. 285, pp. 260-271.
- Arnell, N.W. (1992). "Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment." *Journal of Hydrology*, Vol. 132, pp. 321-342.
- Arnold, J.G., and Fohrer, N. (2005). "SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Allen, P.M., and Walker, C. (1999). "Continental scale simulation of the hydrologic balance." *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 5, pp. 1037-1052.
- Arnold, J.G., Neitsch, S.L., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Ver. 2000*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report TR-191.
- Barlow, P.M., Ahlfeld, D.P., and Dickerman, D.C. (2003). "Conjunctive-management models for sustained yield of stream-aquifer systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 1, pp. 35-48.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobs, T.H., and Donigian, A.S. (2001). *Hydrological Simulation Program-FORTRAN User's Manual for Version 12*. AQUA TERRA Consultants, Mountain View, California.
- Brown, R.G. (1988). "Effect of precipitation and land use on storm runoff." *Water Resources Bulletin*, Vol. 24, pp. 421-425.
- Brun, S.E., and Band, L.E., (2000). "Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed." *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 24, pp. 5-22.
- Burn, D.H. (1994). "Hydrologic effects of climate change in west-central Canada." *Journal of Hydrology*, Vol. 160, pp. 53-70.
- Chiew, F.H.S., Whetton, P.H., McMahon, T.A., and Pittock, A.B. (1995). "Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments." *Journal of Hydrology*, Vol. 167, pp. 121-147.
- Chuanji, C.X., Zhongming, H., and Zhonggui, W. (2004). "Simulation methods of spring discharge variations in Karst area." *Proceedings of the 2nd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference*. Singapore, Singapore, Vol. II, pp. 68-75.
- Chung, E.S., Lee, K.S., and Park, S.B. (2005). "Runoff characteristics due to the changes of landuse in the Hakuicheon watershed." *12th World Water Congress*, New Delhi, India, CD.
- Daniel, C., and Wood, F.S. (1980). *Fitting*

- Equations to Data*. 2nd Ed., Wiley, New York, NY.
- Duell, L.F.W. (1994). "The sensitivity of northern Sierra Nevada streamflow to climate change." *Water Resources Bulletin*, Vol. 30, pp. 841-859.
- Edwards, C., and Miller, M. (2001). *PLOAD Version 3.0 User's Manual*. USEPA.
- IPCC (1992). *Climate change 1992 The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* (edited by Houghten, J.T., Callander, B.A., and Varney, S.K.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- James, W., Huber, W., Dickinson, R., Pitt, R., Roesner, L., and Aldrich, J. (2003). *User's Guide to PCSWMM*. USEPA.
- Kang, S., Park, J.I., Singh, V. (1998). "Effect of urbanization on runoff characteristics of On-Cheon Stream watershed in Pusan, Korea." *Hydrological Processes*, Vol. 25, pp. 351-363.
- Kim, C., Kim H., Jang, C., and Kim, N. (2003). "Runoff estimation from two mid-size watersheds using SWAT model." *Water Engineering Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 193-202.
- Lal, M., Cubasch, U., and Santer, B.D. (1992). "Potential changes in monsoon climate associated with global warming as inferred from coupled ocean-atmosphere general circulation model." *CAS/JSC Working Group Report*. No. 17, WMO/TD 467, World Meteorological Organization, Geneva.
- Lettenmaier, D.P., and Gan (1990). "Hydrologic sensitivities of the Sacramento-San Joaquin river basin, California, to global warming." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 69-86.
- Male, J.W., and Mueller, F.A. (1992). "Model for prescribing groundwater use permits." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118, No. 5, pp. 543-561.
- Mallows, C.L. (1973). "Some comments on  $C_p$ " *Technometrics*, Vol. 28, pp. 313-319.
- McCabe, G.J. Jr, and Ayers, M. (1989). "Hydrologic effect of climate change in the Delaware river basin, Colorado." *Journal of Hydrology*, Vol. 157, pp. 157-176.
- McCuen, R.H. (2003). *Modeling Hydrologic Change: Statistical Methods*. Lewis Publisher.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part 1-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Nash, L.L., and Gleick, P.H. (1991). "Sensitivity of streamflow in the Colorado basin to climatic changes." *Journal of Hydrology*, Vol. 125, pp. 221-241.
- Reichard, E.G. (1995). "Groundwater-surface water management with stochastic surface water supplies: A simulation optimization approach." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 11, pp. 2845-2865.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan, R., and Hauck, L.M. (2001). "Validation of the SWAT model on a large river basin with point and non point sources." *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, pp. 1169-1188.
- Schade, T.G., and Shuster, W.D. (2005). "Paired watershed study of landuse and climate change impact on small streams." *Environmental Water Resources Institute 2005*, ASCE, Anchorage, Alaska.
- Singh, P., and Bengtsson, L. (2004). "Hydrological sensitivity of a large Himalayan basin to climate change." *Hydrological Processes*, Vol 18, pp. 2363-2385.
- Singh, P., and Kumar, N. (1997). "Impact of climate change on the hydrological response of a snow and glacier melt runoff dominated Himalayan river." *Journal of Hydrology*, Vol. 193, pp. 316-350.
- Tripathi, M.P., Raghuwanshi, N.S., and Rao, G.P. (2005). "Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components." *Hydrological Processes*, Vol 20, pp. 1137-1156.
- (논문번호:06-24/접수:2006.02.02/심사완료:2006.10.24)