

**지표수-지하수 상호호흡을 고려한 TANK\_GS 모형의 개발****Development of TANK\_GS Model to Consider the Interaction between Surface Water and Groundwater**

이 우 석\* / 정 은 성\*\* / 김 상 욱\*\*\* / 이 길 성\*\*\*\*

Lee, Woo Seok / Chung, Eun-Sung / Kim, Sang-Ug / Lee, Kil Seong

**Abstract**

The purpose of this study is to consider the interaction between surface water and groundwater in basin scale by developing TANK\_GS model. The soil moisture structure of tank model with 3 tanks is improved to simulate the appropriate stream-aquifer interactions. Maximum likelihood method is applied to calibrate parameters with variance functions to deal with heteroscedasticity of residuals. The parameters of improved TANK\_GS model and variance function are simultaneously estimated by Simulated Annealing method, a global optimization technique. The results of TANK-GE are compared to those of the SWMM-GE model which had been developed to consider the stream-aquifer interactions. The new TANK\_GS model and SWMM-GE model are applied to Gapcheon basin, which belongs to Geum River basin. TANK\_GS model showed better model performance compared to the original TANK model and characterized the relationship of stream-aquifer interactions as satisfactorily as the SWMM-GE model. The sustainable groundwater yield can be estimated for the regional water resources planning using the TANK\_GS model.

**Keywords** : stream-aquifer interactions, Gapcheon, SWMM-GE, TANK\_GS

**요 지**

지하수의 지속가능개발량을 산정하기 위해서는 유역 내에서 지하수 개발에 따라 시공간적으로 끊임없이 변화하는 하천과 대수층의 상호호흡을 포함한 물 순환계의 유동을 모의하여야 한다. 유역 단위의 지하수 함양 및 하천-대수층 상호호흡 특성을 모의하기 위한 강우-유출모형으로 탱크모형과 SWMM 모형을 선정하였다. 토양저류구조 표준3단 탱크모형을 하천과 대수층의 상호호흡을 모의할 수 있도록 개선하였다. 오차의 비등분산성을 고려하기 위한 분산함수를 가진 최우도추정법을 적용하고, 전역 최적화 기법인 Simulated Annealing 방법을 적용하여 탱크모형과 분산함수의 매개변수를 동시에 추정하였다. 하천-대수층 상호호흡을 개선한 SWMM-GE 모형은 도시하천에 적용되어 검증을 받은 바 있다. 금강의 지류인 갑천 유역에 하천-대수층 상호호흡을 개선한 탱크모형(TANK\_GS)을 적용한 결과 개선 전 보다 모형성능평가가 더 나았으며, SWMM-GE 모형과 동일하게 지하수 함양 및 하천-대수층 상호호흡 현상을 잘 모의하고 있었다. 향후 권역 수자원 계획 등에 활용이 용이한 탱크모형(TANK\_GS)을 이용하여 지하수의 지속가능 개발량 산정이 가능하다.

**핵심용어** : 하천-대수층 상호호흡, 갑천, SWMM-GE, TANK\_GS

\* 한국수자원공사, 공학박사 (e-mail: leews@kwater.or.kr)

Professor, Ph.D., Korea Water Resources Corporation, K-water Academy

\*\* 교신저자, 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수, 공학박사, (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Assistant Professor, Ph.D., Seoul National University of Science & Technology, College of Civil Engineering

\*\*\* 국회입법조사처 입법조사관, 공학박사 (e-mail: sukim@assembly.go.kr)

Legislative Researcher, Ph.D., National Assembly Research Service, Land, Transport and Maritime Affairs Team

\*\*\*\* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수, 공학박사 (e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

Professor, Ph.D., Seoul National University, Department of Civil & Environmental Engineering

## 1. 서 론

지하수를 개발하게 되면 유역의 물순환 체계가 변동하게 된다. 일반적으로 지하수 개발량이 증가하면 기저유출(baseflow)이 감소하게 되어 하천유황(streamflow regime)이 변화하게 된다. 이로 인해 하천의 갈수기 유량이 줄어들어 하천의 정상적인 기능과 환경을 유지하기 위한 하천 유지유량(instream flow, river maintenance flow)의 확보가 어려워 질 수 있으며, 심지어 하천의 건천화를 일으킬 수 있다. 따라서 지하수의 개발이 지하수계 뿐만 아니라 지표수-지하수 상호작용에 따른 유역 물 순환계 전반에 미치는 영향을 분석하여야 한다.

지표수-지하수 연계는 수학적으로 해석하거나 지표수-지하수 통합모형을 사용하여 모의할 수 있다. Maddock (1972)은 지하수 방정식에 선형시스템이론을 적용하여 양수량과 같은 외부요인의 크기에 따라 독립적인 단위 계수의 집합으로 지하수계의 반응을 표시하였다. Maddock and Lacher (1991)는 지하수 양수가 지표수에 미치는 영향을 파악하기 위해 MODFLOW에 기반을 둔 MODRSP 모형을 개발하여 정상상태(steady state)와 천이상상태(transient state)의 반응함수(response function)를 생성하였다. 지하수-지표수계의 반응함수는 선형이라 가정되어 중첩되는 여러 사건에 대해 적용 가능하도록 가정되었다.

지표수와 지하수를 물리적으로 연계하여 해석할 수 있는 지표수-지하수 연계모형은 대표적으로 MIKE SHE, SWATMOD 모형 등이 있다. DHI (Danish Hydraulic Institute)에서 개발한 MIKE SHE 모형은 격자기반의 완전분포형 지표수 및 지하수 모형에 기초하여 지표류, 하도 추적, 증발산, 비포화흐름과 지하수 흐름을 해석할 수 있다. 비포화 흐름은 1차원 Richards 방정식을 해석하며, 지하수 흐름은 3차원 Boussinesq 방정식에 의해 해석을 하고 있다. Kjelds and Storm (2001)은 MIKE SHE와 MIKE 11을 연계한 지표수-지하수 통합모형을 적용하여 다양한 유역 관리대안을 수립하는데 활용하였다. Sophocleous et al. (1997)에 의해 개발된 통합지표수/지하수 모형인 SWATMOD 모형은 SWAT 모형과 지하수 해석에 많이 적용되고 있는 MODFLOW 모형이 통합된 것이다. SWAT 모형으로부터 산정된 함양량이 MODFLOW 모형의 함양량 입력조건으로 설정되며, MODFLOW 모형으로부터 지하수 유출량을 산정한다. SWATMOD 모형의 장점은 수리지질학적 특성을 고려한 지하수 유동해석이 가능하다는 점이지만, 복잡한 지질 및 수리특성에 대한 조사가 필요하다는 단점이 있어 권역 단위의 수자원계획 등에 적용하기에는 어려운 측면이 있다. 그 외 미국 SDI Environmental Service에 의해 개발된 ISGW (Integrated

Surface and Groundwater Model) 모형, 미국의 Hydro GeoLogic 회사(www.hgl.com)에 의해 개발된 MOD-HMS 통합모형, Yu and Schwartz (1998)에 의해 개발된 물리적 분포형 BSHM (Basin-Scale Hydrological Model), 미국 South Florida Water Management District (1999)에 의해 개발된 SFWMM (South Florida Water Management Model), Lal et al. (1998)이 개발한 2차원 지표수 및 지하수 유출모형 HSE (Hydrologic Simulation Engine) 등이 있다.

국내에서는 유동훈 등 (2001)은 지표수-지하수 연계 모형 SIRG를 개발하여 단기유출 해석에 적용하였다. SIRG 통합모형에서 하천흐름과 지하수의 연계는 하천수위와 지하수위의 관계에 기초하여 경계조건을 해석하였고, 경우에 의한 침투는 토양수분 저류량에 기초한 개념적 침투 모형을 적용하였다. 강원도 양양 남대천 유역에 SIRG 모형을 적용하여 3일간의 강우기간 동안 5개 관측지점에서 관측한 하천유량 값과 SIRG 연계모형의 유량 계산 값을 비교하여, 관측값과 계산값이 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다. 윤성용과 김상준 (2005)은 지하수와 지표수가 유역내에 존재하는 총체적인 수자원량의 일부라는 인식에 바탕을 두고 장기유출모형과 지하수 유동모형에 기초하여 정교한 지하수 개발가능량 산출방식을 시도하였다. 장기유출모형으로 TOPMODEL을 적용하였으며, 지하수 흐름 및 개발가능량 산출을 위한 모의 기법으로 GFDS (Groundwater Flow and Development Simulation) 프로그램을 개발하여 보청천 상류 삼성유역에 적용한 바 있다. 김남원 등 (2004a; b)은 준 분포형 지표수 유출모형인 SWAT 모형과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW 모형을 결합하였다. MODFLOW가 SWAT내에 포함되는 형식으로 결합된 것이 특징이며, SWAT와 MODFLOW 모형을 연결시키기 위하여 DEM기반의 격자변환기법(grid conversion tool)을 사용하여 모형간의 연계가 시간 단계별로 이루어지는 완전 연동형 모형을 구축하였다.

지하수는 지표수와 직접 또는 간접적으로 연결되어 있어 서로 영향을 주나, 우리나라에서는 아직까지 지표수와 지하수의 상호 기여도, 지하수 양수가 지표수에 미치는 영향 등 관련 조사 연구가 미흡하다. 지하수 관리기본계획 (건설교통부와 한국수자원공사, 2007)에서 지하수자원의 고갈 방지, 가뭄시 안전한 양수 등을 위해 설정된 안전율은 단지 10년 빈도 함양량으로 산정되어 그 근거가 부족하다고 말할 수 있다. 지하수의 함양과 유출특성은 연도별 계절별로 다르기 때문에, 지하수 양수로 인한 지하수의 공급장애 등을 모의하여 안전율에 대한 근거를 제시할 필요가 있다.

최근에는 지표수-지하수 통합모형을 적용하여 강수의

침투, 침투 과정과 지하수 흐름 및 하천-대수층 상호흐름 과정을 연계하여 모의하는 연구가 진행 중이다. 그러나 정확한 수치모의를 위해서는 다양한 실측자료가 필요하므로, 대구역 또는 우리나라 전역에 이러한 지표수-지하수 통합모형을 적용하기에는 현실적으로 불가능하다. 권역 단위의 수자원 계획에 지표수-지하수 연계를 적용하기 위해서는 물리적인 지표수-지하수 통합모형의 성과를 강우-유출모형에 접목시킬 수 있는 방법을 개발하여야 한다.

강우-유출모형에 하천-대수층 상호흐름을 고려할 경우 지표수와 지하수 모의시간의 규모(scale)를 일치시켜야 한다. 강우-유출모형은 시 단위에서 연 단위까지의 모의면 충분하지만, 지하수의 거동은 일 단위에서 수백 년 단위까지 모의가 필요한 경우가 있다. 따라서 강우-유출모형은 사상모형(event model) 보다는 연속모형(continuous model)을 선정할 필요가 있다. 또한, 지표수-지하수 연계는 단기간의 모의 보다는 장기간의 모의가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 하천-대수층 상호흐름을 고려할 수 있도록 탱크모형을 개선하여 개발하고 이를 검증하기 위해 최근 개발된 SWMM-GE 모형과 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 탱크모형의 선정

Sugawara (1972)는 유역의 유출 기작에 대응하는 탱크를 설정하여 강우-유출현상을 모의하였다. 탱크모형은 지하수 유출을 모의하는 탱크가 하나인 표준3단 탱크와 비피압지하수 유출과 피압지하수 유출을 구분하는 표준4단 탱크모형이 주로 사용되고 있다.

표준4단 탱크모형을 적용할 경우 지하수 대수층을 비피압 대수층과 피압대수층으로 분리하여 모의하여야 하므로 이에 대한 물리적인 의미를 부여하기 위해서는 지하 대수층에 대한 상세한 기초자료가 필요하다. 특히 대수층의 면적, 두께 및 지질특성 등을 조사하여 이를 모형에 적용하여야 한다. 우리나라에서 대부분의 유역은 이에 대한 충분한 조사가 이루어지지 않아 표준4단 탱크모형을 적용하기는 쉽지 않다.

더욱이 지하수 양수를 고려한 탱크모형을 적용하기 위해서는 비피압대수층과 피압대수층에서의 이용량 또는 개발량을 구분하여야 한다. 그러나 우리나라의 지하수 이용량 구분은 비피압대수층 및 피압대수층 이용량, 충전층 및 암반지하수 이용량으로 구분되어 있지 않다(건설교통부와 한국수자원공사, 2007). 그래서 수자원장기종합계획(건설교통부, 2006)에서는 심도 및 관경 크기에 따라 천층지하수와 심층지하수로 구분하였다. 심도 50m 이상 및

관경 200mm 이상의 지하수 이용량을 심층지하수로 분류하였는데 이를 하천수와 연계되지 않은 암반지하수로 간주하였다. 그러나 이러한 분류는 실제의 물리적인 기초자료에 근거하지 않은 분류이므로 이를 모형에 그대로 적용하기는 정확성이 떨어진다.

SWAT 모형에서도 지하수의 기저유출은 얇은 대수층(shallow aquifer)에서만 일어난다고 가정하고 있다. 지하수는 얇은 대수층과 깊은 대수층(deep aquifer)으로 나뉘며, 얇은 대수층은 지표면에서 대수층으로 침투된 유량으로 유역의 하천으로 회귀수(return flow)를 공급하고, 깊은 대수층의 유출량은 유역 밖으로 흘러간다고 가정하고 있다. 또한, 비교대상이 되는 SWMM 모형도 지하수를 구분하고 있지 않고 있다.

본 연구에서는 지하수 이용량이 하천수에 미치는 영향을 모의하여야 하는데, 상술한 바와 같이 대수층에 대한 조사가 미흡하고, 지하수 이용량을 비피압과 피압대수층 이용량으로 구분하기가 어려워 표준3단 탱크모형을 기본 모형으로 선정하였다.

### 2.2 하천-대수층 상호흐름을 고려한 탱크모형의 개선

#### 2.2.1 선형저수지 이론의 개선

대부분의 강우-유출모형(탱크모형, PRMS, SWAT 등)에서 기저유출은 지하수의 저류량에 비례하여 발생한다는 선형저수지 이론에 의해 모의된다. 즉, 기저유출의 원천인 지하수 저수지의 시스템은 선형저수지로 간주된다. 하지만 본 연구에서는 다음 Eq. (1)과 같이 지하수에서 하천으로의 흐름,  $Q_r(t)$ 는 지하수위까지의 대수층 저류량( $S_{gw}(t)_h$ )과 하천수위까지의 대수층 저류량( $S_{gw}(t)_{z_r}$ )의 차이에 비례하여 발생한다고 가정하였다.

$$Q_r(t) = \alpha S_{gw}(t)_{h-z_r} = \alpha(S_{gw}(t)_h - S_{gw}(t)_{z_r}) \quad (1)$$

여기서, 대수층의 수위  $h$ 와 하천수위  $z_r$ 은 동일한 표고의 기준선에서부터 산정해야 한다.

하천수위 이상의 대수층의 저류량은 다음 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{gw}(t)_h - S_{gw}(t)_{z_r} = A_a(h(t) - z_r(t)) \times S \quad (2)$$

여기서,  $A_a$ 는 대수층의 면적,  $S$ 는 대수층의 저류계수로 단위면적당 대수층 수위가 낮아짐에 따라 배출되는 지하수량을 의미한다.

Eqs. (1) and (2)로부터 대수층-하천간 상호흐름은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_r(t) = \alpha \times S \times A_a \times (h(t) - z_r(t)) \quad (3)$$

여기서,  $Q_r$ 은 대수층-하천 흐름량이고,  $\alpha$ 는 대수층 유출 계수 (aquifer discharge coefficient)이며, 비피압대수층에서 저류계수,  $S$ 는 비산출률  $S_y$  (specific yield)와 같으며 이는 개념상 대수층의 유효공극률,  $n_e$ 이다. 대수층의 공극률 대신 유효공극률을 적용하는 이유는 지하수 공극 내의 물이 배출되더라도 수막이 부착력에 의해 공극 내에 남아있는 양을 제외하여야 하기 때문이다.

피압대수층에서는 수위가 낮아지면 공극 내 물의 압력이 줄어들어 물은 팽창한다. 또한 물의 압력이 감소되는 만큼 대수층의 응력은 증가되어 전체 용적 또는 공극 체적은 감소하게 된다. 따라서 피압대수층에서 물의 팽창과 용적의 감소로 인해 저류되는 관계는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$S = S_s \times m = \rho_w g_r (\beta_p + n\beta_w) m \quad (4)$$

여기서,  $m$ 은 대수층의 두께,  $S_s$ 는 비저류계수 (specific storage coefficient)로서  $L^{-1}$ 의 차원을 가지며,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $g_r$ 는 중력가속도,  $\beta_p$ 는 공극의 수직방향 압축률,  $n$ 은 공극률,  $\beta_w$ 는 물의 압축률이다.

우리나라의 경우 일반적으로 지하수에서 하천으로 물이 이동하는 이득하천 또는 기저유출이 지배하는 유역으로 볼 수 있다. 다만, 갈수기 뒤의 홍수 도래 시 지하수위가 낮고 하천수위가 높은 일시적인 현상이 일어날 수 있으며 이 경우 하천에서 지하수로의 물 흐름이 발생할 가능성이 높다. 또한 하나의 큰 유역을 여러 개의 소유역으로 구분할 경우 지역 특성에 따라 하천에서 지하수로 함양되는 소유역이 발생할 수 있다. Eq. (4)를 적용하면 Fig. 1과 같이 하천수위를 고려한 기저유출량을 산정할 수 있으며 하천에서 지하수로 흐르는 함양량까지 모의할 수 있게 되어 강우-유출모형을 개선할 수 있다.

### 2.2.2 탱크모형의 구성

기존 탱크모형의 구조는 Fig. 2의 왼쪽 부분과 같으며 3단 탱크의 저류고와 유출고 관계는 Eqs. (5) and (6)과

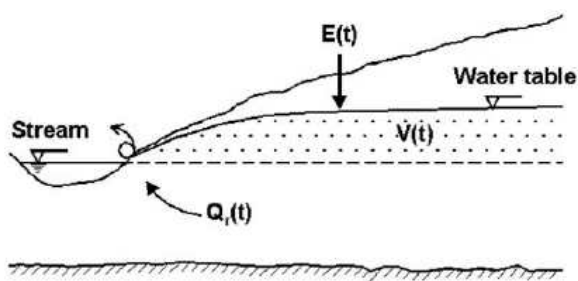


Fig. 1. Concept of Linear Reservoir Theory Improvement for Stream-aquifer Interaction Simulation

같다.

$$X_C(t) = X_C(t-1) - Q(t-1) - I_C(t-1) + I_B(t) \quad (5)$$

$$Q_C(t) = C_1(X_C(t) - HC) \quad (6)$$

여기서,  $X_C(t)$ 는 제3단 탱크의  $t$  기간의 저류고,  $Q_C$ 는 제3단 탱크의 유출공에 대한 유출고,  $I_C$ 는 제3단 탱크의 하단공에 대한 침투고로 지하수의 손실량을 나타내며,  $C_1$ 은 제3단 탱크의 유출공계수이고,  $HC$ 는 제3단 탱크의 유출공의 위치이다.

본 연구에서는 지하수와 지표수의 상호흐름을 고려하여 Fig. 2와 같이 탱크모형을 개선하였다. 토양층에서 물이 존재한 후 토양층의 가장 낮은 깊이를 통과하는 물은 대수층으로 흘러 들어간다. 지하수면 위의 토양의 통기대 (aeration zone)에 있는 물이 대수층으로 함양되는 과정에 걸리는 시간이 모의 시간간격 보다 더 많이 소요될 경우 침투함양 지체시간을 고려하여야 한다. 침투함양 지체시간을 직접적으로 측정하는 것은 불가능하지만, 지체시간을 변화시킨 지하수면의 모의 값과 실측값을 비교하여 추정할 수 있다. 침투함양 지체시간을 고려하기 위해 SWAT 모형에서 사용하는 지수감소 가중함수를 적용한다. 침투함양 지체시간을 고려한 지하수 함양량은 Eq. (7)로 나타낼 수 있다. 또한 지하수 양수량은 탱크의 저류고를 감소시키므로 이를 고려하기 위한 새로운 항을 추가하여 Eq. (8)로 개선하였다.

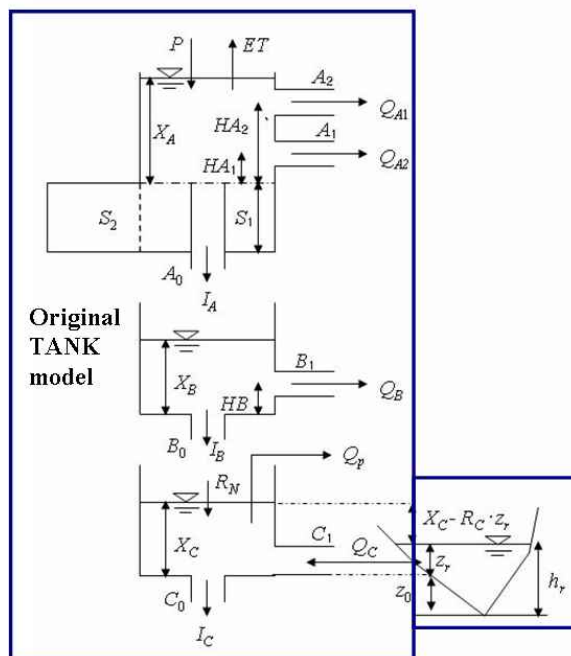


Fig. 2. Concept of Tank\_GS Model

$$R_N(t) = (1 - e^{-1/\delta_{gw}}) \times I_B(t) + e^{-1/\delta_{gw}} \times R_N(t-1) \quad (7)$$

$$X_C(t) = X_C(t-1) - Q_C(t-1) - I_C(t-1) + R_N(t) - Q_p(t) \quad (8)$$

여기서,  $R_N(t)$ 는  $t$ 기간의 대수층 침투 함양고이고,  $\delta_{gw}$ 는 지질층 전역에 대한 침투함양 지체시간이며  $Q_p(t)$ 는  $t$ 기간의 대수층 양수량이다.

하천-대수층 흐름을 모의하기 위해서는 탱크모형의 저류고와 하천수위에 대한 물리적인 의미를 모형에 적절히 반영하여야 한다. 먼저 탱크모형의 저류고는 탱크내의 전체 저류량을 유역면적으로 나눈 값인데 비해, 대수층의 지하수위는 물리적인 압력수두로 탱크의 저류고보다는 큰 값을 가지게 된다. 탱크모형과 지하대수층의 저류량이 같으므로 유역 전체적으로 다음 Eqs. (9) and (10)이 성립된다.

$$X_C \times A_b = h \times A_a \times n \quad (9)$$

$$h = \frac{A_b}{A_a \times n} X_C \quad (10)$$

여기서,  $A_b$ 는 유역 면적,  $h$ 는 대수층 저류고  $A_a$ 는 대수층의 면적,  $n$ 은 대수층의 공극률 (porosity)이다.

따라서 하천-대수층 상호흐름을 고려한 유출식은 Eq. (3)과 같은 선형저수지 이론을 응용하여 다음 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_r(t) &= \alpha \times S \times A_a \times (h(t) - z_r(t)) \\ &= \alpha (A_a S h(t) - A_a S z_r(t)) \\ &= \alpha \left( A_b \frac{S}{n} X_C(t) - A_a S z_r(t) \right) \\ &= \alpha A_b \frac{S}{n} \left( X_C(t) - \frac{A_a}{A_b} n z_r(t) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $z_r$ 은 지하수 수위의 기준에 따른 하천수위이다.

위 식에서 전체 유역면적으로 양변을 나누어 하천-대수층 흐름을 나타내는 식을 다음 Eq. (12)와 같이 개선하였다.

$$\begin{aligned} Q_C(t) &= \alpha \frac{S}{n} \left( X_C(t) - \frac{A_a}{A_b} n z_r(t) \right) \\ &= C_1 (X_C(t) - R_C z_r(t)) \\ &= C_1 (X_C(t) - R_C (h_r(t) - z_0)) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $R_C$ 는 하천수위를 탱크모형의 지하수 저류고에 대응하도록 하는 하천수위 환산계수이다.

Eq. (12)에서 제3단 탱크의 유출공 계수는 대수층 유출 계수에 저류계수와 공극률의 비율을 곱한 값으로 표현되

며, 저류계수 값이 공극률과 비슷하다면 Eq. (13)과 같이 대수층의 유출계수와 근사하다고 가정할 수 있다.

$$C_1 = \alpha \frac{S}{n} \approx \alpha = \frac{1}{k} = -\ln K_c \quad (13)$$

하천수위 환산계수  $R_C$ 는 대수층의 면적비율에 공극률을 곱하여 산정할 수 있지만 ( $R_C = (A_a/A_b)n$ ), 지하수 기초조사가 수행되어 있지 않을 경우 모형에서 추정해야 한다.  $R_C$ 는 0과 1사이의 값을 가진다.

하천수위는 모의된 하천 유량에서 유역 출구지점의 수위-유량 관계식의 역함수를 적용하여 계산할 수 있다. 모의된 유량은 지표면 유출과 중간유출만 고려하였다.

$$Q_{stream}(t) = \frac{A_b}{86.4} \times (Q_{A1}(t) + Q_{A2}(t) + Q_B(t)) \quad (14)$$

$$h_r(t) = f^{-1}(Q_{stream}(t)) \quad (15)$$

여기서,  $Q_{stream}$ 은 제1단 및 제2단 탱크의 유출고를 합한 하천유량 (m<sup>3</sup>/s)이며,  $f^{-1}(Q_{stream})$ 는 수위-유량곡선식의 역함수를 의미한다.

### 2.3 SWMM-GE

이상호와 이정민 (2007)은 하천-대수층의 상호작용에 관하여 최근까지 진보된 연구 결과를 적용하여 GROUND 부프로그램의 한계를 개선하였다. Rushton (2003)이 제안한 식을 적용하여 지하수의 하천 유입량을 양수 (+)로 제한하는 SWMM의 GROUND 부프로그램 한계를 극복하였다. 이로써 GROUND 부프로그램은 대수층에서 하천으로 흐르는 유량뿐만 아니라 하천에서 대수층으로 빠져 나가는 유량도 표현하게 된다. 기존의 GROUND 부프로그램 변수를 사용하고 하천-대수층간의 물 이동 유량을 표현하면 다음 Eq. (16)과 같다.

$$GWFLW = \begin{cases} RC(D1 - TA), & D1 > z_b \\ RC(z_b - TA), & D1 < z_b \end{cases} \quad (16)$$

여기서,  $D1$ 은 하천 아래의 지하수 수위로 하상 (河床) 수직선상의 평균값을 취하며,  $TA$ 은 지하수 수위의 기준에 따른 하천 수위이며,  $RC$ 는 하천 계수이고,  $z_b$ 는 하상 퇴사 바닥의 높이이다.

### 3. 대상유역

본 연구에서는 기초자료가 많고, 지하수 이용이 많아 지하수의 적정가능개발량 산정 적용이 용이한 도시 하천인 갑천 유역을 연구대상으로 선정하였다. 갑천 유역은

한반도의 중서부와 서해안 일부 지역을 포함하는 금강권역 12개의 중권역 중에서 대전 3대하천(갑천, 유등천, 대전천)을 포함하며, 유역면적이 649 km<sup>2</sup>이고 장방형의 형상(형상계수: 0.41)을 하고 있다. 평균 지형표고는 175.65 m이며 최대 표고는 866.18 m이다. 행정구역은 대전광역시, 금산군, 논산시가 속해있다. 갑천은 유로연장이 73.7 km인 금강의 제1지류로서 유등천, 대전천 및 29개의 지방 2급 하천으로 구성되어 있다.

## 4. 모형의 구축

### 4.1 입력자료

본 연구에서는 강우관측소 자료로 장기 유출분석 및 유역의 평형 상태를 고려할 수 있도록 관측년도가 충분하고, 시간단위자료를 가지고 있는 대전기상청과 금산기상청의 자료를 활용하였다. 기상관측소를 중심으로 갑천 유역에 티센망을 작성한 후, 갑천 유역에 대하여 면적 강우량으로 산정한 결과 대전 기상청이 전체 유역의 81.7%, 금산 기상청이 18.3%를 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대전기상청의 강우자료와 금산 기상청의 강우 자료를 입수하여 면적 대비 강우량으로 환산하였다. 증발량자료의 경우 금산 지점은 증발량 측정을 수행하고 있지 않아, 대전 기상청 자료만을 활용하였다. 월별 증발접시 계수는 0.7을 사용하였다. 갑천 유역내 수위관측소(신대, 용촌, 복수, 가수원, 유성, 인동, 회덕)의 수위-유량관계 곡선식을 이용하여 갑천 유역의 수위관측자료로부터 지점별 관측 유량값을 산정하였다. 기상, 유량 관측소의 위치는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

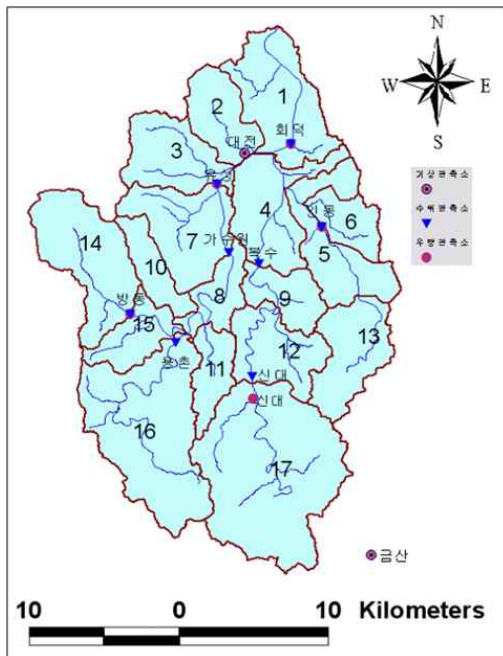


Fig. 3. Map of the Study Watershed

환경부의 상수도 통계자료에 의하면 대청댐에서 지방상수도를 통해 대전광역시에 공급되는 배분량은 1,050,000 m<sup>3</sup>/일이며 실제로 연간 공급된 양은 535,631 m<sup>3</sup>/일이다. 또한 갑천 하류에 위치한 대전하수종말처리장에서 처리되는 양은 평균 665,603 m<sup>3</sup>/일이며, 하수종말처리장이 회덕 수위관측소 하류에 위치함에 따라 이 양은 회덕의 유량관측값에서 제외된다. 수자원장기종합계획(건설교통부, 2006)에 의하면 갑천 유역에서 이용되는 물이용량은 생활용수 206.62백만 m<sup>3</sup>/년, 공업용수 36.54백만 m<sup>3</sup>/년, 농업용수 54.59백만 m<sup>3</sup>/년이다. 따라서 외부도수, 차집관거에 의한 하수처리, 물사용량에 따른 소모량 등이 복합적으로 유역의 물수지에 영향을 미치고 있다. 그러나 외부에서 공급되는 양과 하수처리장으로 가는 양 등이 큰 차이가 나지 않으므로 이를 정교하게 물수지에 고려하기 보다는 강우-유출모형의 오차범위에 있다고 가정하였다.

### 4.2 탱크모형의 적용

모형의 매개변수 추정을 위해서 예열기간이 필요하므로 예열기간은 1999년, 보정기간은 2000년부터 2003년까지 4개년을 설정하였으며, 모형의 검증기간은 2004년부터 2005년까지 2개년을 선정하였다. 예열기간인 1999년의 지하수 이용량은 2000년의 이용량과 동일하다고 가정하였다.

탱크모형을 적용할 경우 갑천 유역을 여러 개의 소유역으로 구분하지 않고 하나의 유역으로 모의하였다. 강우량은 티센망을 구축하여 대전 및 금산 관측소의 자료를 사용하였다. 증발산량, 지하수 이용량은 모두 유역면적 평균값을 사용하였다. 유출량은 유역의 말단에 위치한 회덕 지점의 관측유량을 기준으로 하였다. 모의 시간간격은 1일 단위로 10일 단위를 적용하여 시간간격에 따른 변화도 살펴보았다.

#### 4.2.1 매개변수의 범위 설정

최적화 기법으로 추정되어야 할 탱크모형의 매개변수는 Table 1과 같이 총 19개이다. 즉 탱크의 유출공 계수 4개, 침투공계수 3개, 토양수분 저류구조의 최대저류량 2개 및 교환계수 2개, 유출공 위치 4개, 침투함양 지체시간 1개, 하천수위 변환계수 1개 및 하천-지하수 보정수위 1개이다. 또한 오차 분산함수의 매개변수는 1개가 된다. 만약, 하천-대수층 상호흐름을 개선하기 전의 탱크모형(TANK\_O)의 매개변수는 하천수위 변환계수( $R_c$ ) 및 하천-지하수 보정수위( $z_0$ )가 필요가 없어지므로 전체적으로 17개가 된다.

매개변수 추정 시 관측값과 모의값의 오차는 상대적인 비중으로 전체 오차의 합에 기여하게 된다. 이러한 오차 분산의 특성을 나타내기 위해  $\gamma$ 값을 도입하였다.  $\gamma$ 값이 크면 클수록 동일한 유량에서 오차의 분산이 커져, 매개

변수 추정에 영향을 미치는 가중치는 감소하게 된다. 따라서  $\gamma$  값이 클수록 고유량의 오차보다 저유량의 오차를 줄이는 방향으로 매개변수 추정이 이루어진다. 본 연구에서는 비등분산성을 고려한 매개변수 추정을 위해 최우도 추정법 (maximum likelihood estimation)을 이용하였다.  $\gamma$ 를 포함하는 오차에 대한 최우도함수,  $L_{ML}$ 은 Eq. (17)과 같다. 분산함수로부터 최우도함수를 유도하는 과정은 Lee et al. (2010)에 제시된 방법을 응용하였다.

$$\ln L_{ML}(\beta, \gamma) = -N \log[\hat{\sigma}_c(\beta, \gamma)] - \sum_{i=1}^N \log[g(\mu_i(\beta), \gamma)] \quad (17)$$

여기서,  $\beta$ 는 탱크모형의 매개변수 벡터,  $N$ 은 자료의 개수,  $\gamma$ 는 멱함수의 지수,  $\sigma_c$ 는 상수값으로 표현될 수 있는 일정 표준편차,  $g$ 는 비등분산성을 표현할 수 있는 분산함수,  $\mu_i$ 는 반응변수의 추정치에 대한 평균이다.

하천-대수층 상호흐름을 개선한 후의 탱크모형 (TANK\_GS)의 매개변수는 유출공의 높이 (HC)가 하나 감소하여 전체적으로 18개가 된다. 이러한 매개변수들은 추정하기 위해서는 하한치와 상한치의 범위를 설정해 줄 필요가 있다. 대부분의 매개변수 범위는 수자원장기종합계획 (건설교통부, 2006)에서 추정된 결과를 비교하여 Table 1과 같이 설정하였다.

유출공 계수는 감수상수의 역수가 되므로, Nathan and McMahan (1990)이 제시한 감수상수의 범위를 고려하여 범위를 설정하였다. 즉, 지하수 유출을 지배하는  $C_1$ 은 0.005~0.073, 직접유출을 지배하는  $A_1$ 은 0.2~1.0, 중간유출을 지배하는  $B_1$ 은 0.06~0.4의 범위를 설정하였다. 또한 지하수 손실을 지배하는  $C_0$ 는 0.01~0.00001의 범위를 두었다.

유출공의 높이 범위는 탱크모형을 모의하면서 각 탱크의 저류량의 변동폭을 고려하여 설정하였다. 탱크의 유출공 높이는 물리적 의미를 고려하여  $z_0$ 와  $R_C$ 의 범위를 고려하여 상한치를 설정하였다.

하천수위 환산계수는 다음과 같이 물리적인 의미를 고려하였다. 하천수위 환산계수는 개념상 유역대비 대수층의 면적비율에 공극률을 곱한 값과 같다. 층적층 비율은 유역면적의 5%이지만, 암반대수층 면적의 불확실성 등을 고려하여 하천수위 환산계수  $R_C$ 의 범위는 0.001~0.1로 설정하였다.

대전지역 지하수 기초조사 보고서 (건설교통부 등, 2004)에 의하면 대전 문평의 암반지하수 및 층적층지하수에서 지하수위와 강수량과의 최대 교차상관계수는 강우 발생 후 각각 7일과 8일이 경과한 후에 0.15, 0.28의 최대값을 보이고 있다. 한편 대전태평의 암반지하수에서는 교차상관계수가 2일 후 0.37의 최대값을 보이고 있다. 층적층지하수 수위가 암반지하수보다 강수량에 더욱 민감한 것으

로 보인다. 따라서 침투함양 지체시간  $\delta_{gw}$ 은 0~10 일의 범위를 설정하였다.

#### 4.2.2 매개변수 추정결과

탱크모형의 매개변수는 Simulated Annealing 방법 (Kirkpatrick et al., 1983)을 사용하여 동시에 추정되었다. Simulated Annealing 방법은 전역 최적해를 찾기 위해 쓰이는 Monte Carlo 방법의 일종으로 지역최적해로 수렴할 가능성이 있을 때, 그 상태에서 더 열등한 해도 선택할 수 있게 함으로써 지역 최적해를 벗어날 수 있도록 하는 최적화 기법이다. 본 연구에서는 SIMANN (SIMulated ANNealing)이라는 프로그램을 사용하였는데 매개변수가 상한값과 하한값을 가질 때 적용가능한 프로그램으로 전역 최적화 문제에 효과적인 것으로 연구된 바 있다 (Goffe, 1996).

Simulated Annealing 방법을 이용하여 추정된 결과 TANK\_O 모형과 TANK\_GS 모형 모두 일정한 경향을 가지며 큰 차이 없는 것으로 나타났다. 유출공계수, 침투공계수, 토양수분 관련 계수 등이 모두 비슷하게 추정되

Table 1. Range of TANK\_O and TANK\_GS Parameters

Name of parameter	Lower limit	Upper limit	Simulation model
$A_2$	0	0.5	Both
$A_1$	0.2	1.0	Both
$A_0$	0	0.5	Both
$B_1$	0.06	0.4	Both
$B_0$	0	0.5	Both
$C_1$	0.005	0.073	Both
$C_0$	0.00001	0.01	Both
$HA_2$	0	100	Both
$HA_1$	0	100	Both
$HB$	0	100	Both
$HC$	0	50	TANK_O
$K_1$	0	100	Both
$K_2$	0	100	Both
$S_2$	10	500	Both
$S_1$	10	500	Both
$\delta_{gw}$	0	10	Both
$R_C$	0.001	0.1	TANK_GS
$z_0$	-1500	1500	TANK_GS
$\gamma$	0	1.5	Both



있음을 Table 2로부터 확인할 수 있다.

지하수의 유출을 지배하는  $C_1$  값은 TANK\_O 모형이 TANK\_GS 모형보다 더 큰 값을 보여주고 있어 기저유출량이 상대적으로 많으리라 예상된다. 제3단 탱크 침투공계수  $C_0$ 은 TANK\_GS 모형이 더 크게 추정되어, 지하수 손실량이 상대적으로 많으리라 예상된다. 지하수의 침투 함양 지체시간의 경우 TANK\_O 모형은 4일, TANK\_GS 모형은 6~7일로 나타나 함양 지체시간을 모형에서 고려함이 필요함을 알 수 있다. 지금까지의 탱크모형은 유역이 클 경우에도 지하수 침투함양 지체시간을 별도로 고려하지 않았다.

TANK\_GS 모형에서 지표수위와 지하수의 환산 비율을 나타내는  $R_c$ 는 0.0675로 추정되었다.  $R_c$ 는 물리적으로 대수층의 유역대비 면적비와 공극률을 곱한 값을 의미한다. 이 값이 크게 되면 하천수위가 지표수-지하수 상호 흐름에 미치는 영향이 크게 된다.

수위표 기준의 하천수위를 지하수위의 기준으로 보정하기 위한  $z_0$ 는 약 940~1,145 mm로 추정되었다. 이는 물리적으로 하천 수위의 기준이 지하수위의 기준 보다 약 1,000 mm만큼 낮다는 것을 의미한다. 따라서 수위표 기준에서의 하천 수위가 약 1 m 이상 높아진 상태에서 지하수위와 비교하여 수위차에 의한 하천-대수층의 상호흐름이 일어나는 것으로 모의되었다.

오차 분산의 특성을 나타내는  $\gamma$  값은 TANK\_O 모형은 1.13, TANK\_GS 모형은 1일단위에서 0.97, 10일 단위에서 1.33으로 각각 추정되었다.  $\gamma$  값이 크면 클수록 동일한 유량에서 오차의 분산이 커져, 매개변수 추정에 영향을 미치는 가중치는 감소하게 된다. 따라서  $\gamma$  값이 클수록 고유량의 오차보다 저유량의 오차를 줄이는 방향으로 매개변수 보정이 이루어진다. TANK\_O 모형의  $\gamma$  값이 TANK\_GS 모형보다 더 크게 추정되었으므로, TANK\_O 모형은 TANK\_GS 모형보다 저유량의 오차를 줄이기 위해 매개변수를 추정하였음을 알 수 있다.

모의 간격을 변화시켜 1일과 10일 단위에 대해 매개변수를 추정하였다. 10일 단위로 하천유량을 모의할 때, 하천유량의 변동이 작아지게 된다. 이러한 경우  $\gamma$  값은 더 크게 되어, 1일 단위 모형보다는 고유량에 더 가중치를 두게 된다. 10일 단위로 모의할 경우, 침투함양 지체시간은 약 6일 정도로 10일 이하이므로 침투함양 지체시간을 고려할 필요는 없으리라 분석되었다. 또한 각 탱크의 유출공계수와 침투공계수가 1일 단위 보다는 대부분 커졌는데, 이는 10일 단위로 모의할 경우 시간간격에서 유출량과 하단탱크로의 이동량이 더 많아져 하기 때문으로 분석되었다.

초기 저류량 추정결과도 비슷하게 나타났으며 제3단 탱크의 지하수 저류량은 TANK\_O 모형이 TANK\_GS 모

형(1일 단위) 보다 더 크게 추정되었다.

### 4.3 SWMM-GE 구축

탱크모형과 같이 SWMM-GE 모형의 예열기간은 1999년, 보정기간은 2000년부터 2003년까지 4개년을 설정하였으며, 모형의 검증기간은 2004년부터 2005년까지 2개년을 선정하였다. 갑천 유역을 Fig. 3과 같이 17개의 소유역으로 구분하였으며, 지하수 사용량, 지하수 관련 매개변수 등을 사용하여 갑천 유역의 장기 유출 특성을 SWMM-GE를 통하여 분석하였다.

#### 4.3.1 장기 유출 연속모의에 필요한 입력자료 구축

SWMM은 배수유역의 구조를 4가지 기상층, 유역층, 지하수층, 연결층으로 구분하여 유출을 모의한다. 이와 같은 유출모의를 위한 SWMM의 입력자료는 크게 세 가지로 분류되며, 이들은 수문기상 자료군, 매개변수 자료군, 입/출력 제어 자료군이다.

수문기상 자료군은 강우, 강설 및 증발산과 관련된 자료들이며, 매개변수 자료군은 물리적 매개변수 (physical parameters)와 수문학적 매개변수 (hydrological parameters)로 구분할 수 있다. 물리적 매개변수들로서는 소유역 관련 매개변수, 지하수 표고 관련 매개변수와 배수체계 관련 매개변수 등이며 이들의 대부분은 지도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있는 매개변수들이다. 수문학적 매개변수들로서는 Manning 계수 관련 매개변수, 저지저류량 관련 매개변수, 침투관련 매개변수, 지하수 흐름관련 매개변수 등이다. 입/출력 제어 자료군은 프로그램의 수행과 결과의 출력형태를 결정하는 자료들로서 사용자의 목적에 따라 결정되는 자료들이다.

본 연구에서는 강우사상에 대한 갑천 배수유역의 장기 유출분석에 목표를 두고 있다. 이에 SWMM의 유출해석 블록 중 강우사상에 대해 배수유역에서의 유출현상과 수질변화를 중심으로 모의하는 RUNOFF 블록을 중심으로 프로그램을 수행하였으며, RUNOFF 블록 중에서도 용설, 수질, 침식에 대한 고려는 생략하였다.

#### 4.3.2 SWMM-GE 모형의 매개변수 추정

SWMM-GE의 물리학적 입력 자료들은 관련 자료들의 수집 및 분석을 통하여 입력하였으며, 수문학적 매개변수들은 1차적으로 문헌자료를 이용하고, 갑천 유역의 지점별 유량 관측값과 SWMM 결과값을 비교, 분석하여 매개변수들을 추정하였다.

지하수 흐름에 영향을 주는 침투관련 매개변수는 Horton 식과 Green-Ampt 식으로 이루어져 있다. 본 연구에서는



Green-Ampt 식을 사용하였으며, 각 매개변수값은 James et al. (2003)을 참조하여 범위를 정하고, 실제 프로그램을 수행하면서 관측값과의 비교를 통하여 매개변수를 추정하였다.

SWMM 매개변수 자료군 중 지하수 흐름과 직접적인 관련이 있는 매개변수들의 입력라인을 H2, H3, H4 라인이라 한다. 크게 물리학적 매개변수와 수문학적 매개변수로 나뉘어진다 (Table 3). 물리학적 매개변수인 지하수 표고관련 매개변수 (H2 라인)는 소유역들의 특성을 이용하여 그 값들을 결정하였다. 수문학적 매개변수인 지하수 흐름관련 매개변수 (H3 라인), 소유역 토양수분관련 매개변수 (H4)는 1차적으로 문헌 자료를 이용한 후 관측값과의 비교 분석을 통하여 매개변수를 추정하였다.

## 5. 결과 비교

하천-대수층 상호흐름을 개선하기 전후의 탱크모형과, 하천-대수층 상호흐름을 개선한 SWMM 모형의 총 유출 및 기저유출 양상, 정량화된 평가지표, 함양량 및 기저유출량 등 3가지로 비교하였다.

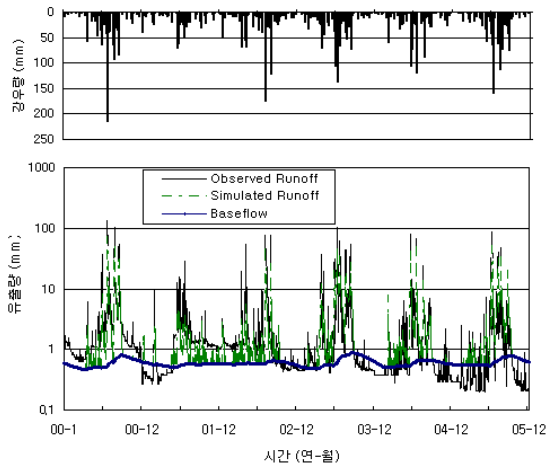
### 5.1 양상 비교

강우유출 모형의 모의결과를 관측값과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(c)의 SWMM-GE 모형에서 제시된 회덕 지점의 기저유출량은 각 소유역의 지하수 유출량을 합하여 산정한 값이다.

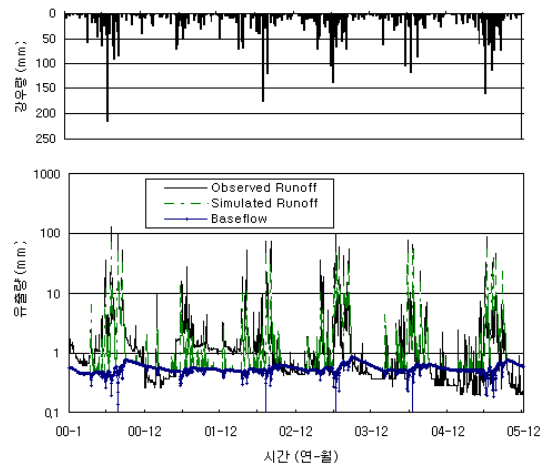
세 가지 모형 모두 총 유출의 경우 강우에 민감하게 반

Table 2. Selected Values of Parameters

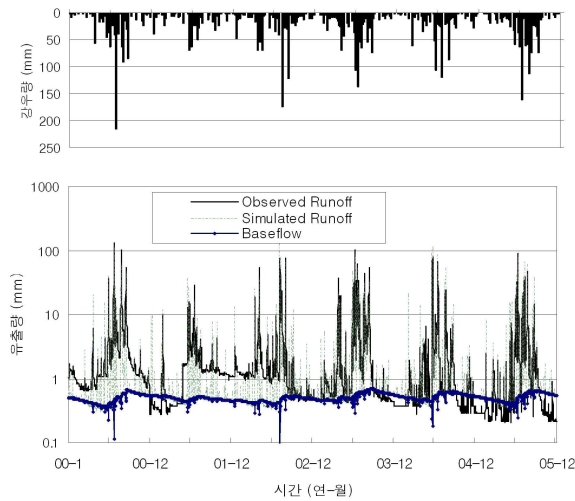
Classification		TANK_O	TANK_GS	
			1 day	10 days
Parameters	$A_2$	0.01472	0.09504	0.0828
	$A_1$	0.33041	0.25993	0.25076
	$A_0$	0.18593	0.1667	0.39702
	$B_1$	0.21818	0.23242	0.36726
	$B_0$	0.0306	0.03899	0.29919
	$C_1$	0.00655	0.00618	0.01106
	$C_0$	0.00003	0.00015	0.00009
	$HA_2$	56.109	44.954	13.02
	$HA_1$	60.267	54.06	99.589
	$HB$	23.48	18.069	2.91
	$HC$	17.536	-	-
	$K_1$	0.245	0.581	0.642
	$K_2$	41.306	38.125	46.356
	$S_2$	471.364	499.33	340.78
	$S_1$	12.121	10.352	12.592
	$R_C$	-	0.0675	0.0127
	$\delta_{gw}$	4.09	7.22	6.0
	$z_0$	-	940.839	1144.709
$\gamma$	1.1307	0.9744	1.331	
Initial storage	$XS(1)$	385.92	422.03	211.69
	$XA(1)$	15.18	10.52	20.16
	$XB(1)$	16.83	11.06	2.46
	$XC(1)$	109.03	75.91	401.28



(a) Result of TANK\_O Model



(b) Result of TANK\_GS Model



(c) Result of SWMM-GE

Fig. 4. Comparison of Results of TANK\_O, TANK\_GS, and SWMM-GE

응하여 증가 또는 감소하고 있다. 또한, 기저 유출의 경우 강우변화에 대하여 총 유출에 비하여 서서히 반응하여 변하는 것을 볼 수 있으므로, 일반적인 수문현상을 잘 반영하고 있다고 할 수 있다. TANK\_GS 모형과 SWMM-GE 모형이 TANK\_O 보다 저유량에서 변동이 더 많았다.

Fig. 4에서 보여지듯이 하천-대수층 상호흐름을 개선한 TANK\_GS 모형과 SWMM-GE 모형의 경우, 강우가 많은 날 부분적으로 기저유출량 값이 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 가뭄이 지속되어 지하수위가 저하되었을 때, 하천 수위가 급격히 증가할 때 발생하였다. 이 경우, 지하수위와 하천수위의 수두차가 작아져 지하 대수층에서 하천으로의 유입량이 평소보다 감소하였기 때문으로 판단된다. 유출의 양상으로 보아 TANK\_GS 모형 및 SWMM-GE 모형에서 하천-대수층 상호흐름 개선의 효과가 반영되었음을 알 수 있다.

## 5.2 모형 성능 평가

모형의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 5가지 지표를 사용하였다. 사용한 평가지표는 RMSE (Root Mean Square Error), PEE (Proportional Error of Estimate), ROV (Ratio of Volume), PBIAS (Percent BIAS), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)이다. 또한 탱크모형의 개선 전후의 성능을 평가하기 위해 AIC (Akaike Information Criterion; Akaike, 1974)와 BIC (Bayesian Information Criterion; Schwartz, 1979)를 산정하였다.

RMSE 지표는 Eq. (18)과 같이 오차 제곱의 합의 평균값으로 산정되며, 일반적으로 모형의 매개변수 추정 시에 가장 많이 사용된다. 그러나 RMSE는 오차의 비등분산성을 고려하지 않고 오차의 절대값만 평가하고 있어, 이를 보완하기 위해 PEE 지표를 사용한다. PEE 지표는 Eq. (19)

Table 3. Groundwater Parameters of SWMM (H2~H4) (James et al., 2003)

Division	Data groups	Variables	Description
Physical parameters	H2	<i>BELEV</i>	Elevation of bottom of water table aquifer
		<i>GRELEV</i>	Elevation of ground surface
		<i>STG</i>	Elevation of initial water table stage
		<i>BC</i>	Elevation of channel bottom
		<i>TW</i>	Elevation of water in channel
Hydrological parameters	H3	<i>A1</i>	Groundwater flow coefficient
		<i>B1</i>	Groundwater flow exponent
		<i>A2</i>	Coefficient for channel water influence
		<i>B2</i>	Exponent for channel water influence
		<i>A3</i>	Coefficient for the cross product between groundwater flow and channel water
		<i>POR</i>	Porosity (%)
		<i>WP</i>	Wilting point (%)
		<i>FC</i>	Field capacity (%)
		<i>HKSAT</i>	Saturated hydraulic conductivity
		<i>THI</i>	Initial upper zone moisture
	H4	<i>HCO</i>	Hydraulic conductivity vs. moisture content curve - fitting parameter
		<i>PCO</i>	Average slope of tension vs. soil - fitting parameter
		<i>CET</i>	Maximum evaporation rate assigned to the upper xone
		<i>DP</i>	Coefficient for unquantified losses
		<i>DET</i>	Maximum depth over lower zone

와 같이 상대오차 절대값의 평균으로 산정되므로 오차의 비등분산성을 고려한 지표라고 볼 수 있다. 관측값과 모의값이 같을 경우 RMSE와 PEE의 값은 영(0)이다.

NSE 지표는 잔차의 Nash-Sutcliffe 통계량으로 주어지며, Eq. (20)과 같이 관측값의 표본분산에 대한 오차의 상대적인 크기를 나타내며, 1에 가까울수록 관측값과 모의값의 오차가 적은 것이다. ROV는 Eq. (21)과 같이 관측유량과 모의유량의 체적비를 나타내며, 유역의 물수지 결과를 평가하는데 필요하며, 최적값은 1이다. PBIAS 지표는 Eq. (22)와 같이 평균편차의 비율로 산정되며, 모형 수행의 편차를 측정하는데 사용된다. PBIAS 지표의 최적값은 영(0)으로 unbiased를 나타내며, 양의 값은 과도추정을, 음의 값은 과소 추정을 나타낸다.

$$SE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sqrt{(Q_t^- - Q_t^{obs})^2} \quad (18)$$

$$PEE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{Q_t^- - Q_t^{obs}}{Q_t^-} \right| \quad (19)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_{mean}^{obs})^2} \quad (20)$$

$$ROV = \frac{\sum_{t=1}^N Q_t^{sim}}{\sum_{t=1}^N Q_t^{obs}} \quad (21)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{sim} - Q_t^{obs})}{\sum_{t=1}^N Q_t^{obs}} \quad (22)$$

여기서,  $Q_t^{obs}$ 와  $Q_t^{sim}$ 은 각각  $t$  기간의 관측유량과 모의유

Table 4. Performance Comparison of TANK\_O, TANK\_GS and SWMM-GE

Evaluation index	Calibration			Evaluation index	Verification		
	TANK_O	TANK_GS	SWMM-GE		TANK_O	TANK_GS	SWMM-GE
RMSE	4.723	4.481	3.654	RMSE	2.932	2.654	3.453
PEE	0.950	1.064	1.741	PEE	0.673	0.773	1.275
NSE	0.651	0.686	0.791	NSE	0.808	0.843	0.734
PBIAS	-0.287	-0.291	-0.214	PBIAS	0.055	0.052	0.212
ROV	0.713	0.709	0.786	ROV	1.055	1.052	1.212
AIC	-183.5	79.8					
BIC	-93.6	174.9					

량이며,  $Q_{mean}^{obs}$  는 관측유량의 평균값이다.

매개변수의 개수에 따른 모형의 결과를 객관적으로 평가하기 위한 지표로 AIC와 BIC를 이용하였다. AIC와 BIC는 각각 Eqs. (23) and (24)로 나타낼 수 있으며, 값이 작을수록 정확한 모형으로 판단될 수 있으나 일반적으로 AIC보다 BIC가 모형의 선택 시 더욱 중요한 기준으로 사용된다.

$$AIC = -2\ln L_{ML}(\beta, \theta) + 2p_k \quad (23)$$

$$BIC = -2\ln L_{ML}(\beta, \theta) + \log(N)p_k \quad (24)$$

여기서,  $p_k$ 는 모형에서 추정하여야 할 매개변수의 숫자이다.

탱크모형 및 SWMM 모형의 보정 및 검증에 대한 성능 평가를 Table 4에 나타내었다. 하천-대수층 상호흐름을 개선하기 전후의 탱크모형의 결과를 비교하였다. RMSE 지표는 보정 및 검증 단계 모두 TANK\_GS 모형이 TANK\_O 모형보다 더 나은 결과를 보여 주었다. PEE 지표는 보정 단계와 검증단계 모두 TANK\_O 모형이 TANK\_GS 모형보다 더 나은 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 TANK\_O 모형에서 추정된  $\gamma$  값이 TANK\_GS 모형의 값 보다 크므로, TANK\_O 모형에서 상대적으로 저유량의 오차를 더 감소시키려고 하였기 때문에 분석된다. NSE 지표는 보정 및 검증단계에서 TANK\_GS 모형이 양호하였다. PBIAS 지표와 ROV 지표는 보정 및 검증단계에서 엇갈리게 나타났다. 5개의 성능지표를 비교한 결과, TANK\_GS 모형이 RMSE, NSE 지표의 개선효과가 뚜렷하여 더 좋은 결과를 보여주고 있다고 말할 수 있다. 매개변수의 숫자를 고려하여 모형의 성능을 평가하는 지표인 AIC 및 BIC 지표는 모두 TANK\_O 모형이 더 우수한 것으로 나타났지만, Eqs. (23) and (24)에서 보듯이 AIC 및 BIC 지표는  $\gamma$  값에 영향을 받으므로 일률적

으로 비교하기는 어렵다.

이러한 모형성능 평가결과 지표수-지하수 상호흐름을 고려한 모형의 개선이 더 나은 성능을 보여주었다고 결론을 내릴 수 있다. 하천-대수층 상호흐름을 개선한 TANK\_GS 모형의 경우 수위-유량곡선의 정확도 등에 많은 영향을 받고 있어, 모형의 성능개선을 위해서는 유량관측의 정밀도가 더 향상되어야 할 것으로 판단된다.

탱크모형 (TANK\_GS)과 SWMM-GE 모형의 결과를 비교하였다. RMSE는 보정단계에서는 SWMM-GE 모형이 탱크모형보다 더 우수하였지만 PEE 지표는 탱크모형 (TANK\_GS)이 더 우수하였다. 이는 탱크모형에서는 분산함수를 사용하여 기저유량의 오차를 줄이도록 모의되었기 때문에 분석된다. RMSE와 PEE 지표는 검증단계에서는 모두 TANK\_GS 모형이 더 우수한 것으로 나타났다. NSE 및 PBIAS 지표는 보정단계에서는 SWMM-GE 모형이, 검증 단계에서는 TANK\_GS 모형이 더 양호하였다. ROV 지표는 보정 단계에서는 SWMM-GE 모형이, 검증 단계에서는 TANK\_GS이 더 나은 결과를 보였다. 전체적으로 SWMM-GE 모형은 보정 단계에서 약간 더 나은 성능을 나타내었지만, TANK\_GS 모형은 검증 단계에서 상당히 더 나은 결과를 보여주고 있다. 이는 TANK\_GS 모형이 보정 단계에서 비등분산성을 고려하고 전역최적화 기법을 사용하는 등 더욱 정밀하게 모의하였기 때문에 분석된다. 또한 SWMM-GE 모형은 7개 지점에서 관측유량과 모의유량을 일치시키도록 모의한다. 이를 위해 필요한 소유역별 물리적인 인자의 산정이나 관측유량에 오차가 있을 수 있다. 반면에 TANK\_GS 모형의 물리적인 인자는 많지 않고, 7개 지점이 아닌 회석 지점의 유출량만 모의하므로, TANK\_GS 모형의 결과가 더 좋게 나온 것으로 분석된다.

TANK\_GS 모형에서 모의 시간간격을 1일 단위와 10일 단위로 적용한 결과를 Table 5에 나타내었다. RMSE

Table 5. Performance Comparison of TANK\_GS Model by Simulation Periods

Evaluation index	Calibration		Evaluation index	Verification	
	1 day	10 days		1 day	10 days
RMSE	18.836	24.833	RMSE	9.886	15.397
PEE	0.903	0.727	PEE	0.473	0.487
NSE	0.882	0.794	NSE	0.942	0.860
PBIAS	-0.291	-0.300	PBIAS	0.052	0.054
ROV	0.709	0.700	ROV	1.052	1.054

Table 6. Comparison of Baseflow Ratios of Gapcheon Basin Obtained from Various Analyses

Classification		Ratio of baseflow (%)
MOCT and KOWACO (2007)		12.12
MOCT et al. (2004)	Baseflow method	13.7
	SCS-CN method	12.8
	Recession curve method	13.9
TANK_O model		15.1
TANK_GS model		13.8
SWMM-GE model		12.6
RORA model model		13.2

지표는 보정 및 검증 단계 모두 1일 단위 모형이 훨씬 양호한 결과를 보여주었다. PEE 지표는 보정단계에서는 10일 단위 모형이 나왔지만, 검증단계에서는 1일 단위 모형이 더 나왔다. NSE, PBIAS, ROV 지표는 모두 1일 단위 모형이 더 나은 결과를 보여주었다. 결론적으로 1일 단위 모형이 10일 단위 모형보다 전체적으로 더 양호한 성능을 보여주어, 물리적으로 강우-유출 현상을 잘 모의하고 있다고 말할 수 있다.

### 5.3 함양량 및 기저유출량 비교

갑천 유역에 대한 기저유출률에 대해서 본 연구 이전의 결과들과 본 연구에서 제시된 결과를 Table 6에 정리하였다.

‘지하수관리기본계획’ (건설교통부와 한국수자원공사, 2007)에 의하면 금강권역 전체의 함양률은 12.1%로 산정되었다. ‘대전지역 지하수기초조사’ (건설교통부 등, 2004)에 의하면 대전지역의 갈수기 유출량 분석에 의한 기저유출률은 13.7%, SCS-CN 분석에 의한 지하수 함양률은 12.8%, 지하수위 강하곡선 분석에 의한 지하수 함양률은

13.9%로 각각 나타났다.

기저유출은 강수뿐만 아니라 유역밖에서 유입되는 양과 사용된 지하수의 하천 유입 등에 의해 영향을 받는다. 만약, 기저유출량에서 함양량을 추정하려면 기저유출량에 지하수 이용량과 지하손실량 등을 더해줘야 산정 가능하다. 대부분의 문헌에서는 이러한 요소들을 고려하지 않고 기저유출량을 지하수 함양량으로 간주하는 오류를 범하고 있다.

본 연구에서는 여러 가지 기저유출량과 탱크모형 및 SWMM 모형의 결과를 비교하였다. 감수곡선 이동법을 이용하여 유출수문곡선으로부터 지하수 함양량을 산정하는 RORA 모형을 이용하여 실측자료로부터 기저유출률을 산정한 결과 약 15%를 얻었다. RORA 모형 적용 과정에서 감수지표  $K_c$ 은 350일로 추정되었는데, 매개변수 추정결과로 Eq. 7에 의해 계산한 감수지표 값인 370일과 비슷하였다. SWMM-GE 모형의 기저유출률은 12.6%로 나타났다.

TANK\_O 모형의 기저유출량은 강우량의 15%로 RORA 모형과 비슷한 수치를 나타내었다. 하천-대수층 상호흐름을 개선한 탱크모형 (TANK\_GS)의 기저유출률은 13.8%로 나타나, TANK\_O 모형보다는 약간 더 작게 나타났다.

지하수의 기저유출량과 함양량을 정확하게 추정하는 것은 지하수의 물수지 분석을 위해 매우 중요하다. 하천-대수층 상호흐름을 개선한 탱크모형의 기저유출률은 SWMM-GE 모형의 결과와 비슷한 수치를 보이고 기존의 연구결과와도 일치하고 있어, TANK\_O 모형보다 약간 더 좋은 결과를 보인다고 말할 수 있다.

TANK\_GS 모형의 결과에 의하면 갑천 유역의 지하수 함양률은 강우량의 약 19%로 추정되었다. 하천으로의 함양률은 없으며, 전체가 침투 함양량이다. 앞으로의 지하수 계획에서는 기저유출량과 함양량을 구분하여 제시함이 필요하다. 지하수 손실량, 저류량 변화 등이 지하수 양수량에 비해 그리 크지 않다면, 기저유출량에 지하수 이용량을 더한 값을 함양량으로 간주하여도 큰 오차는 발생하

Table 7. Monthly Baseflow Comparison of Gapcheon Basin

Month	Precipitation (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Baseflow (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )				Ratio of baseflow (%)			
		RORA	SWMM	TANK_O	TANK_GS	RORA	SWMM	TANK_O	TANK_GS
1	22.70	12.89	10.04	11.49	11.05	56.8	44.2	50.6	48.7
2	23.10	7.12	8.86	9.89	9.59	30.8	38.3	42.8	41.5
3	25.02	8.19	9.45	10.60	10.21	32.7	37.8	42.4	40.8
4	62.50	7.53	8.64	10.27	9.57	12.0	13.8	16.4	15.3
5	54.42	6.29	8.91	10.94	10.20	11.6	16.4	20.1	18.8
6	138.63	10.69	8.18	10.57	9.36	7.7	5.9	7.6	6.7
7	237.41	17.14	9.53	11.85	9.37	7.2	4.0	5.0	3.9
8	219.44	37.64	10.77	13.24	10.68	17.2	4.9	6.0	4.9
9	99.25	2.53	11.34	13.84	12.02	2.5	11.4	13.9	12.1
10	25.90	13.57	11.66	14.20	13.67	52.4	45.0	54.8	52.8
11	18.80	7.39	10.69	12.88	12.50	39.3	56.9	68.6	66.5
12	17.38	10.91	10.59	12.42	12.04	62.8	60.9	71.4	69.3
Total	944.54	141.88	118.65	142.19	130.27	15.0	12.6	15.1	13.8

지 않는다.

계절에 따른 기저유출의 양상을 Table 7에 나타내어 비교하였다. RORA 모형의 경우 계절별 변동이 가장 심하였으며, 그 다음에 SWMM-GE 모형, TANK\_GS 모형의 순이었다. 특히 RORA 모형은 강수량이 많은 8월의 기저유출량이 큰 폭으로 증가하였지만, 강우-유출모형인 SWMM-GE 모형과 TANK\_GS 모형에서는 다른 월과 약간 더 증가하여 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 점은 수문곡선에서 기저유출을 분리하는데 있어서, 중간유출이 어느 정도 포함되어 있기 때문으로 분석된다. 건설교통부와 한국건설교통기술평가원(2007)의 연구에서도 감수곡선 해석법으로 산정한 함양량은 토양층으로 침투한 양의 개념으로 이해하여야 한다고 기술하고 있어, 본 연구결과와 어느 정도 일치하고 있다. 강우-유출모형의 경우 강수량이 많은 8월 보다는 9, 10, 11월의 기저유출량이 더 많게 산정되며, 이는 지하수의 유출특성이 반영된 결과라고 볼 수 있다.

갑천 유역의 연간 기저유출량 변화를 Table 8에 나타내었다. 다우년과 소우년 모두 기저유출량이 큰 변동이 보이지 않아, 지하저수지의 역할을 대수층이 수행한 것으로 분석되었다.

#### 5.4 비교결과 종합 분석

총유출 및 기저유출의 양상으로 보아 TANK\_GS 모형 및 SWMM-GE 모형에서 지표수-지하수 상호흐름의 효

과가 충분히 반영되었다고 결론을 내릴 수 있다. 강우와 기저유출의 변동을 살펴볼 때 TANK\_GS 모형과 SWMM-GE 모형이 모두 지하수 함양 및 하천-대수층 상호흐름을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 즉 지하수위가 낮을 때 비가 오게 되면 기저유출량이 감소하거나 하천수가 지하수로 함양하는 물리적인 과정을 어느 정도 모의할 수 있었다. 기존의 TANK\_O 모형은 지표수의 수위에 관계없이 지하수위만으로 기저유출을 발생시키기 때문에 이러한 과정을 충분히 모의할 수 없었다.

지표수-지하수 상호흐름을 개선한 TANK\_GS 모형의 평가지표가 개선 전의 TANK\_O 모형보다 더 나은 성능을 보여주고 있어 TANK\_GS 모형이 TANK\_O 모형보다 더 물리적으로 개선되었다고 결론을 내릴 수 있다. 그러나, SWMM-GE 모형의 성능평가는 TANK\_GS 모형보다 더 좋지 않은 결과를 보여주는데 이를 위해 필요한 소유역별 물리적인 인자의 산정이나 관측유량에 오차가 있어 누적될 수 있다. 반면에 TANK\_GS 모형의 물리적인 인자는 많지 않고, 7개 지점이 아닌 회덕 지점의 유출량만 모의하므로, TANK\_GS 모형의 결과가 더 좋게 나온 것으로 분석된다.

SWMM-GE 모형의 지표수-지하수 상호흐름은 이론적으로 TANK\_GS 모형보다 더 정교하다. 즉 SWMM-GE 모형에서는 상류의 유역에서부터 하천유량이 계산되어 이를 하류의 지하수위와 유량과 비교하여 지표수-지하수 상호흐름을 결정하는 반면, TANK\_GS 모형에서는 하나

**Table 8. Annual Baseflow Comparison of Gapcheon Basin**

Year	Prec. ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Baseflow ( $10^6 \text{ m}^3$ )				Ratio of baseflow (%)			
		RORA	SWMM	TANK_O	TANK_GS	RORA	SWMM	TANK_O	TANK_GS
2000	1076	142.6	114.5	140.4	126.7	13.3	10.6	17.0	12.4
2001	544	134.3	115.6	133.1	125.4	24.7	21.3	32.9	25.4
2002	896	130.1	108.1	140.2	125.4	14.5	12.1	18.7	15.2
2003	1137	158.9	126.7	152.1	141.9	14.0	11.1	15.3	12.2
2004	972	145.7	125.4	139.0	129.6	15.0	12.9	20.3	13.6
2005	1042	139.6	121.6	148.4	132.5	13.4	11.7	17.5	13.3
Ave.	945	141.9	118.7	142.2	130.3	15.0	12.6	15.1	13.8

**Table 9. Water Balance of Gapcheon Basin Using TANK\_GS Model (unit:  $10^6 \text{ m}^3$ )**

Year	Precipitation (mm)	Evapo-transpiration ( $ET$ )	Percolation ( $R_N$ )	Ground water recharge ( $Q_P$ )	Base flow ( $Q_{bf}$ )	Ground water loss ( $Q_l$ )	Storage ( $S_{gw}^E$ )	Stream flow $Q_{stream}$	Overland flow ( $Q_{over}$ )	Inter flow ( $Q_{inter}$ )
1999	944.4	481.7	174.6	41.3	130.1	2.4	49.7	406.3	90.2	186.0
2000	1075.5	437.7	173.8	41.4	126.7	2.7	52.8	589.6	216.1	246.8
2001	543.8	339.8	158.9	41.1	125.4	2.4	42.7	218.5	14.7	78.3
2002	896.2	446.3	175.2	42.6	125.4	2.4	47.5	363.2	91.1	146.8
2003	1137.2	369.5	200.2	49.4	141.9	3.1	53.6	708.3	180.3	386.1
2004	972.1	448.6	173.3	49.7	129.6	2.4	45.0	489.5	158.5	201.3
2005	1041.4	430.3	183.7	42.9	132.5	2.9	50.4	545.0	151.3	261.2
Ave.	944.4 (100.0%)	422.0 (44.7%)	177.1 (18.8%)	44.0 (4.7%)	130.2 (13.8%)	2.6 (0.3%)	48.8 (5.2%)	474.4 (50.2%)	128.9 (13.6%)	215.2 (22.8%)

의 유역단위로 하천유량을 고려하여야 하므로 직접유출량을 하천유량으로 간주하여 지하수위와 비교하게 되므로 SWMM-GE 모형보다는 물리적인 의미가 약간 떨어진다.

기저유출률을 비교한 결과로는 TANK\_O 모형, TANK\_GS 모형, SWMM-GE 모형이 모두 기존의 조사결과 범위에 속하여, 양호한 결과를 보여주었다. 기저유출의 월별 변동과 연도별 변동을 살펴본 결과 지하 대수층은 저수지의 역할을 수행하고 있는 것으로 나타났다.

비록 SWMM-GE 모형도 지표수-지하수 상호흐름을 잘 모의하고 있지만, 국가 수자원계획의 활용성 등을 고려하여 개념적인 TANK\_GS 모형의 적용 가능성을 더 제고시키는 것이 필요하다. 따라서 TANK\_GS 모형을 이용하여 지하수의 지속가능개발량 산정을 위한 이후의 연구를 수행하였다. TANK\_GS 모형의 매개변수를 물리적인 의미를 갖도록 추정하기 위해서는 지하수의 함양과 유출에 대한 기초조사에 근거할 필요가 있다.

탱크모형에서 연평균 하천유출량은 474.4백만  $\text{m}^3$ 에 달하였으며, 이는 강우량의 50.2%에 해당된다. 지표면 유출은 128.9백만  $\text{m}^3$ , 중간유출은 215.2백만  $\text{m}^3$ , 지하수 유출은 130.2백만  $\text{m}^3$ 으로 각각 하천유출량의 27.2%, 45.4%, 27.4%를 차지하고 있다 (Table 9).

## 6. 결 론

유역 단위의 지하수 함양 및 유출 특성을 분석하고 하천-대수층 상호흐름을 모의하기 위해 탱크모형과 SWMM-GE 모형을 선정하였다. 국가 수자원 계획에 많이 적용된, 토양저류구조 표준3단 탱크모형을 하천수위와 지하수위를 동시에 고려하여 하천과 지하수의 상호흐름을 모의할 수 있도록 개선하였다. 오차의 비등분산성을 고려하고 최우도추정법을 사용하여 탱크모형의 매개변수를 추정하였으며, 최적화 기법으로 Simulated Annealing 방법을 적용



하였다. 지표수-지하수 상호흐름을 개선한 분포형 수문모형인 SWMM-GE 모형은 도시하천에 적용되어 검증을 받은 바 있다.

금강의 지류인 갑천 유역에 지표수-지하수 상호흐름을 개선하기 전의 TANK\_O 모형, 지표수-지하수 상호흐름을 개선한 TANK\_GS 모형 및 SWMM-GE 모형을 적용하여 비교하였다. 강우와 기저유출의 변동을 살펴볼 때 TANK\_GS 모형과 SWMM-GE 모형이 TANK\_O 모형에 비해 지하수 함양 및 지표수-지하수 상호흐름을 잘 모의하고 있음을 알 수 있었다.

지하수 기저유출률 크기는 TANK\_O 모형, TANK\_GS 모형, SWMM-GE 모형의 순으로 나타났지만, 과거 조사 자료 및 RORA 모형에 의한 기저유출 자료와 비교할 때 모두 합리적인 범위에 속하였다. 지하수의 기저유출량과 함양량은 구분하여 제시할 필요가 있다. 오차, 상대오차, 편차, 체적비, NSE, AIC, BIC 등의 모형성능평가에서 TANK\_GS 모형은 TANK\_O 모형보다 더 나은 결과를 보여주어 TANK\_GS 모형이 TANK\_O 모형보다 더 물리적으로 개선되었다고 결론을 내릴 수 있었다.

SWMM-GE 모형은 TANK\_GS 모형보다 물리적인 분포형 모형으로 정밀한 유역유출 모의에 적합하지만, 소유역 단위의 물리적인 인자 산정 및 관측유량 등의 오차가 누적될 수 있어 모형 성능평가는 TANK\_GS 모형이 더 낮게 나왔다. 향후 국가 수자원계획 등에 활용하기 위해서 개념적인 TANK\_GS 모형이 더 나은 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 TANK 모형은 전역최적화 방법을 이용하여 매개변수를 추정하는데 반해 SWMM-GE 모형은 시산법을 이용하였으므로 상대적으로 SWMM-GE의 성능이 저평가 될 수 있다. 따라서 전역최적화 기법을 이용하여 SWMM-GE 모형의 매개변수 추정할 경우 두 모형의 정확한 비교가 이루어 질 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(50%)과 2010년도 정도(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2010-0010609) 지원(50%)을 받아 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

건설교통부 (2006). **수자원장기종합계획**.  
 건설교통부, 한국건설교통기술평가원 (2007). **우리나라**

**지역특성에 맞는 최적지하수함양량산정기법개발**. 건설교통 R&D 정책인프라사업 최종보고서.  
 건설교통부, 한국수자원공사 (2007). **지하수관리기본계획보고서**.  
 건설교통부, 한국수자원공사, 한국지질자원연구원 (2004). **대전지역지하수기초조사보고서**.  
 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). “완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (I): 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.  
 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). “완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (II): 모형의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 509-515.  
 유동훈, 오윤창, 박창근 (2001). “지표수-지하수의 연계 수치모형.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제4-B호, pp. 327-334.  
 윤성용, 김상준 (2005). “유역 물순환을 고려한 지하수 개발가능량 산출-지하수 유동모형의 개발과 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제1B호, pp. 1-6.  
 이상호, 이정민 (2007). “지하수 양수 모의를 위한 SWMM의 수정.” **수질보전한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제5호, pp. 628-635.  
 Akaike, H. (1974). “A new look at the statistical model identification.” *IEEE Transactions on Automatic Control* Ac-19, pp. 716-723.  
 Goffe, W.L. (1996). “SIMANN: A global optimization algorithm using simulated annealing.” *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, Vol. 1, No. 3, pp. 169-176.  
 James, W., Huber, W.C., Dickinson, R.E., and James, W.R.C. (2003). *Users Guide to SWMM*. CHI.  
 Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P. (1983). “Optimization by simulated annealing.” *Science*, Vol. 220, pp. 671-680.  
 Kjelds, J., and Storm, B. (2001). “Integrated water resources modeling, water use, and water quality simulation.” *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*, ASCE.  
 Lal, A.M.W., Belnap, M., and Van Zee, R. (1998). “Simulation of overland and groundwater flow in the Everglades Natinoal Park.” *Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference in Memphis*, Tennessee, Vol. 1, *American Society of*

- Civil Engineers*, pp. 610-615.
- Lee, E.S., Lee, K.S., Kim, S.U., and Chung, E.S. (2010). "The development of rating curve considering variance function using pseudo-likelihood estimation method." *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 2, pp. 321-348.
- Maddock, T. III (1972). "Algebraic technological functions from a simulation model." *Water Resources Research*, Vol. 8, pp. 129-134.
- Maddock, T. III., and Lacher, L.J. (1991). *MODRSP, a Program to Calculate Drawdown, Velocity, Storage, and Capture Response Functions for Multi-aquifer Systems*. Dept. of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, AZ.
- Nathan, R.J., and McMahon, T.A. (1990). "Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 7, pp. 1465-1473.
- Rushton, K.R. (2003). *Groundwater Hydrology Conceptual and Computational Models*. Wiley, p. 115.
- Schwartz, G. (1979). "Estimating the dimension of a model." *Annals of Statistics*, Vol. 6, pp. 461-464.
- Sophocleous, M.S., Perkins, S.P., Stadnyk, N.G., and Kaushal, R.S. (1997). *Lower Republican Stream-Aquifer Project Final Report*. Kansas Geological Survey Open File Report 97-8, 1930 Constant Avenue, University of Kansas, Lawrence, KS 66047-3726.
- South Florida Water Management District (1999). *A Primer to the South Florida Water Management Model (Version 3.5)*. Hydrologic Systems Modeling Division, Planning Department, South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.
- Sugawara, M. (1972). *A Method for Runoff Analysis*. Kyoritsu Shuppan Press, Tokyo. (in Japanese)
- Yu, Z., and Schwartz, F.W. (1998). "Application of an integrated basin-scale hydrologic model to simulate surface-water and ground-water interactions." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 2, pp. 409-425.

논문번호: 10-016	접수: 2010.02.18
수정일자: 2010.09.13/10.04	심사완료: 2010.10.04