

SWAT 모델을 이용한 갑천 유역 물수지 분석 및 도시화 영향 평가

Development of water cycle analysis systems and evaluation of Urbanization for the Gap river basin using SWAT

김정곤*, 손경호**, 노준우***, 장창래****, 고익환*****

Jeongkon Kim, Kyongho Son, Junwoo Noh, Chang-Lae Jang, Ich Hwan Ko

요 지

본 연구의 목적은 하천 복원과 관리에 필수적인 하천의 특성 분석 및 물순환 분석시스템 구축에 있다. 연구 대상지역으로 최근 하천의 생태 기능 회복을 위해 도심생태하천조성 사업이 추진되고 있는 대전 3대 하천유역을 선정하였다. 대전 3대 하천 유역의 물수지와 도시화에 따른 영향을 파악하기 위하여 SWAT을 이용한 물순환 분석시스템을 구축하였다. 모형적용 결과, 유출량과 지하수 수위 변화 등 대전 3대 하천 유역의 특성을 관측치에 가깝게 모의할 수 있었다. 모델의 검보정 실시결과에서 나타난 모델의 계산 값들의 관측된 유출량뿐 아니라 기저유출량 및 지하수 수위와의 높은 상관관계는 본 연구에서 구축한 모델의 구조나 변수의 유효성에 많은 신뢰도를 제공한다고 판단된다.

SWAT을 이용하여 대전 3대 하천 유역의 물수지 분석 및 도시화에 따른 영향을 평가하였다. 물수지 분석결과에 의하면, 전체적으로 총 유출량 중 지하수 유출량이 47%정도, 중간 유출량이 31% 그리고 지표유출량이 22%이다. 각 소유역의별 유출 성분 분석결과는 각 소유역의 토지 이용도, 토양 그리고 지형적 특징에 따른 유출 특성을 확인하였다. 도시화 영향 분석 결과 전체적으로 1975년에서 2000년까지 갑천 유역의 약 5%가량의 도시화는 총 유출량의 변화에 있어서는 현저한 차이를 보이지 않았으나, 각 유출 성분의 경우에는 많은 영향이 있는 것으로 나타났다. 특히 지표유출량은 45% 가량의 증가를 보였고, 전체 유역의 지하수함양량이 5%정도 감소한 반면, 도시화가 31%정도 진행된 소유역의 경우에는 17%정도의 현저한 감소를 나타냈다. 본 연구에서 수행한 물수지 분석 및 도시화 영향분석 결과는 향후 대전 3대 하천의 생태하천복원을 위한 물순환 정상화 대책마련 및 하천의 유량확보방안 마련에 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

핵심용어: 도시하천복원, 물 순환, 기저 유출량, 지하수량, SWAT

1.서론

도시화에 따른 수문현상 및 물순환 체계의 변화에 의하여 도시 하천 유역에 많은 문제점이 야기되고 있다. 그 예로는 도시개발에 의해 하천 유량의 변화, 지하수위의 저하 등을 들 수 있으며, 그로 인해 도시 지역은 도시형 수해 발생, 갈수기의 급수 안전도 저하, 평시 하천유량의 감소로 인한 공공수역의 수질 악화, 지하수 오염 등 여러 가지 문제에 직면하고 있다(김현준 외, 2004). 그리고 도시하천의 개발 또는 복원에 있어 하천

***** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 공학박사E-mail : jkkm@kowaco.or.kr

***** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 연구원 공학석사E-mail : kkyong77@hotmail.com

***** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 공학박사E-mail : jnoh@kowaco.or.kr

***** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 공학박사E-mail : cljang@kowaco.or.kr

***** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 소장 공학박사E-mail : ihko@kowaco.or.kr

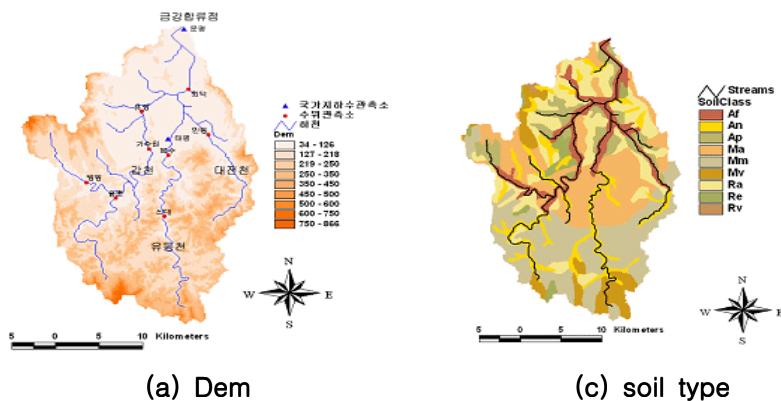
의 주변경관과 오락적 기능을 지나치게 강조하기 보다는 기본적으로 고려되어야 하는 하천 고유의 특성 분석과 이에 따른 물 순환분석의 중요성에 대한 인식이 높아지고 있다. 김현준 외(2004)는 청계천유역에 대하여 SWAT 및 WEP을 이용하여 물순환 분석을 실시하였고, 이승중(2005)는 WEP모형을 이용하여 도립촌 유역의 물순환을 모의하고, 과거(1975년)과 현재(2000년) 토지 이용도를 이용한 모의를 통해서 도시화에 따른 불투수층의 증가가 유출 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

본 연구의 대상지역인 대전 3대 하천이 위치한 갑천 유역은 도시화가 상당히 진행 되고 있으나, 아직까지 이 변화에 따른 유출 특성이 파악되지 못하고 있다. 그러므로 본 연구에서 다양한 토양 이용을 고려 할 수 있으며, 유역 규모의 장기 유출 모의가 가능한 SWAT모형(Neitsch, et al., 2000)을 이용하여 연구대상 하천인 대전 3대 하천의 물 순환 분석시스템을 구축하였다. 그리고 현지까지 구축된 모델의 경우 대부분 유역 출구 점에서 측정된 유출량을 이용한 모델의 검증만을 시도하여, 그 모델의 유효성에 의문을 제기된다. 수문모델의 경우 많은 변수를 가지기에 다변수 모델 검증이 요구되는 실정이다. 예를 들면 다른 형태의 데이터를 이용한 방법(지하수, 소유역내의 유출량, 동의원소), 다중 통계적 기법이용이 있다. 본 연구에서는 baseflow 분리를 통한 유출성분 분리와 관측된 지하수위를 이용하여 모델 검증을 시도하였다..

2. 갑천유역의 물순환 분석시스템 구축

2.1 대상유역 현황

갑천은 유역면적이 648.3km², 유로연장이 73.7km로서 형상계수가 약 0.119인 비교적 장방형 형상을 하고 있으며 대전광역시 시가지 중심부를 관류하는 큰 두 지류(유등천, 대전천)로 구성된 대체로 수지형 특성을 갖고 있다. Fig. 1에는 갑천의 유역현황을 나타내었다. 갑천 유역은 Ma와 Mm토양이 전체 유역의 45% 가량을 차지하며, 하천 수계를 따라 Af와 An 토양이 분포하고 산악지역은 대부분 Mm으로 구성되어 있다. 갑천 유역은1975년에 약 5%정도인 도시화율이 2000년에는 10% 가량까지 증가된 상태이다. 각 소유별로 도시화 정도를 살펴보면, 갑천과 정부 대전청사가 위치하고 있는 유등천의 합류지역의 22번 소유역이 31%의 높은 증가율을 보였고, 일반적으로 유역 하류 지역에 도시화 증가율이 높고, 상류지역은 도시화 증가율이 5%미만의 낮은 값을 보이고 있다.



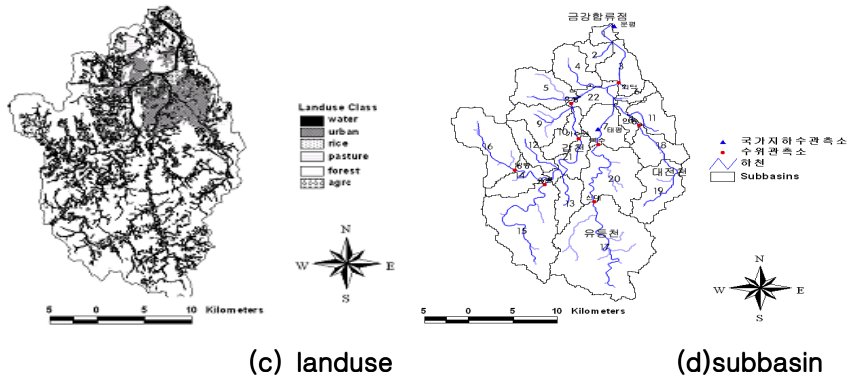


Fig. 1. catchment characteristics

2.2 모델의 보정 및 검증

모델 보정 및 검증은 세 기간으로 나눌 수 있는데, 1999년을 warming-up 기간으로 하였고, 2000~2003년을 보정기간으로, 그리고 2004년을 검증기간으로 설정하였다. 모델의 예측 유효성을 평가하기 위해 그래픽을 통한 결과분석 외에 통계적 방법으로써 아래의 Nash-Sutcliffe식(Nash와 Sutcliffe, 1970)을 이용하였다.

$$E = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{pred})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

여기서 Q_{obs} 는 관찰된 유량의 값, Q_{pred} 은 모델 유량 예측값, $\overline{Q_{obs}}$ 은 평균 관측 값 이다.

월별 및 일별 유출량에 대한 모델 예측 효율을 Table 1에 요약하였다. 전반적으로 높은 예측효율 값을 보이고 일별 모델 예측 효율성 값은 상대적으로 낮은 효율을 보이고 있다.

Table 1. efficiency of monthly and daily model prediction

| 관측지점 | 기간 | 월별 예측효율(E) | 기간 | 일별효율(E) |
|------|---------------|------------|------|---------|
| 회덕 | 2000~2003 | 0.926 | 2003 | 0.578 |
| 유성 | 2001(5월)~2003 | 0.614 | 2003 | 0.310 |
| 인동 | 2001(5월)~2003 | 0.780 | 2003 | 0.464 |
| 신대 | 2001(5월)~2003 | 0.906 | 2003 | 0.542 |

모델의 검증 결과로써 Fig. 2a의 회덕지점의 유출량을 이용결과 일별 유출량의 경우 관찰된 유출량을 전체적으로 잘 모의함을 알 수 있고 모델 예측 효율 값도 보정기간보다 더 높은 0.583을 나타내었다. 유역의 특성 분석 방법의 하나로 baseflow filter(Arnold 외, 2000)를 이용하여 주요 수위 측정지점인 회덕, 유성, 인동 지점의 기저 유출량을 산정한 결과와 각 관측점에서의 연간 총 기저유출 값을 일별 기저 유출량을 합산하여 계산하였다(Fig. 2b). 전반적으로 5~10% 정도의 차이를 보이고 있지만, 모델 예측 값들과 Automatic base flow separation 프로그램에 의해 산정된 기저유출량이 비교적 잘 일치하고 있다. 마지막으로 모델의 검증을 위해 유역 내에서 측정된 지하수 수위 값을 이용하였다.. Fig. 1d에 문평 지점에서 관찰된 지하수 수위 값과 그에 해당하는 1번 소유역에서 계산된 최저, 평균, 및 최고 지하수 수위를 나타내었다. Fig. 2c에서 보는바와 같이, 모델에서 계산된 값은 몇 구간을 제외하고는 전체적으로 관측된 지하수 수위의 변동 추이를 잘 나타내고 있다. 관측 및 예측 지하수 수위 변동의 추이와 반응시간에 대해 유효성(R^2)을 평가하였다. 2002년 7월 29일부터 8월 18일까지 기기 오작동으로 데이터에 문제가 있어 자료의 기간을 2002년 1월~2002년 6월까지와 2003년 1월~2004년까지로 구분하였다. 예측된 평균 지하수 수위와 관찰된 지하수 수위의 R^2 계산 결과 2002년 1월~2002년 6월까지의 0.79 그리고 2003년~2004년까지는 0.77로 상당히 좋은 값을 얻을 수 있었다.

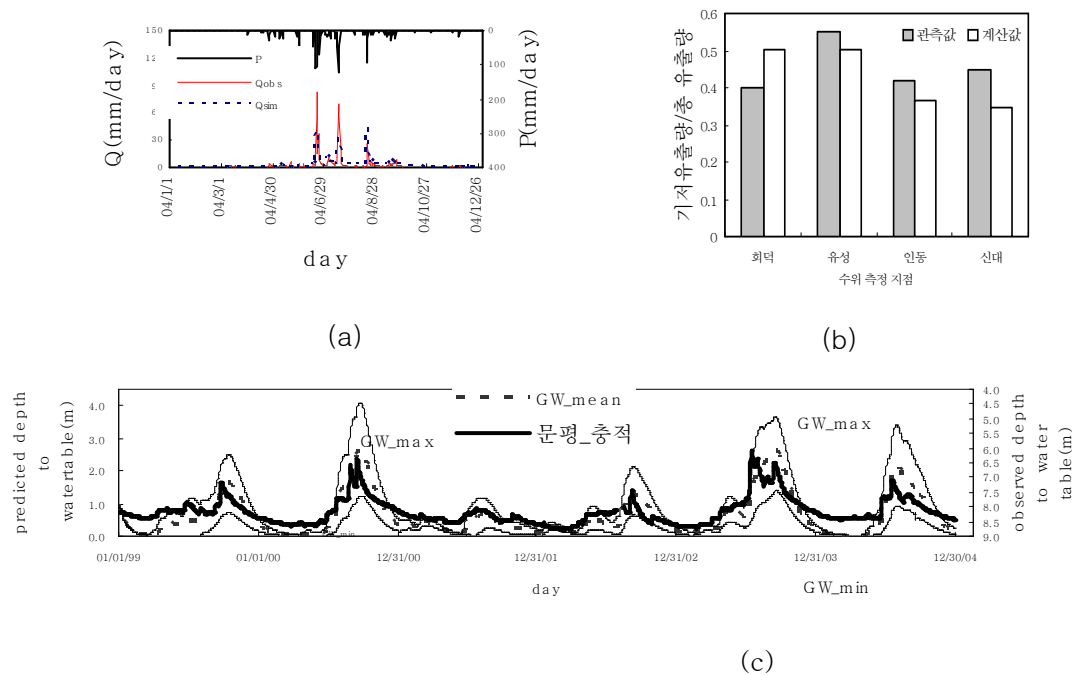


Fig. 2 Result of model validation:
 (a) discharge, (b) baseflow, and (c) groundwater level.

3. 물수지 분석 및 도시화 영향 평가

갑천 유역에 구축된 물순환 시스템을 이용하여 2001년부터 2003년 기간의 유역 연평균 물수지 분석 결과 3년간 총 유출량 중 지하수 유출량이 47%, 중간 유출량이 31% 그리고 지표유출량이 22%로 김현준 등(2005)이 SWAT 모형을 이용하여 청계천 유역에 대해 물수지를 분석한 결과인 총 유출량 중 지표수량이 86%, 측면수량이 1%, 그리고 지하수 유출량이 13%를 차지하는 것과는 다른 결과를 보였다. 이는 도시화 정도가 갑천 유역의 경우 10%인 반면 청계천 유역은 76%를 차지하기 때문일 것이다. 그리고 측면 수량의 차이가 크게 나타나는 것은 갑천유역의 특징이 평균 고도가 상대적으로 높은 산악지역이기 때문이다.

도시화 영향 평가 결과 갈수년(2001)의 경우 도시화로 인하여 총 유출량(1.24%)과 침투 유량(4.5%) 및 성수기 유출량(1.7%)은 증가하고, 비성수기 유출량(3.8%)은 감소하였다. 평수년(2002)의 경우에는 2001년과 같은 양상을 보이고 있으나, 침투 유량과 성수기 유량은 더 큰 값으로 증가하고 비성수기 유출량과 총 유출량의 증감량은 더 작게 나타났다. 그리고 도시화에 따른 불투수층 증가가 유출 성분에 미치는 영향을 분석하였다(Fig.3). 먼저 지표수량(SURQ)의 경우 갈수년(2001년)에 가장 높은 비율인 45% 가량의 증가치를 보이고, 평수년, 풍수년으로 갈수록 34%, 31%로써 그 값은 줄어 들었다(Fig. 3의 보조 y축). 측면 유출량(LATQ)은 이와 반대로 갈수년에 2% 감소하고 평수년과 풍수년에는 각각 3%와 4% 가량 감소하였다. 지하수 유출량(GWQ)은 평균 5%정도의 감소율로 풍수년에 최대 감소율인 6%를 나타냈다. 이에 비해 증발산량(ET)은 갈수년(2001년)과 평수년(2002년)에는 도시화로 인해서 감소했는데 풍수년(2003년)에는 증가하였다. 이 까닭은 증발 가능한 토양수분량과 그 해의 잠재 증발산량의 차이에 의한 결과로 보인다. 결론적으로 도시화로 인한 토지 피복의 변화는 유출성분 중 지표수량에 가장 큰 영향을 끼친 것으로 나타났다.

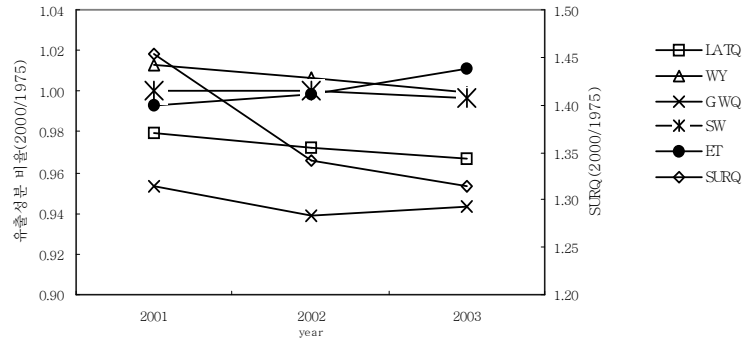


Fig. 3 effects of urbanization on flow characteristics

4. 결론

본 연구에서는 하천 복원 사업의 목적을 위한 기초 작업으로서 갑천유역에 대하여 SWAT 모델을 구축하여 보정을 실시하고 유출검정을 수행하였다. 모델의 보정 결과 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었으나, 예측한 바와 같이 계산 시간 간격이 작아질수록 낮은 보정 효율을 보이고 있다. 회덕지점의 2004년의 유출량 자료를 활용한 검증결과 보정 단계보다 더 높은 효율 값을 나타내었다. 기저유출량을 비교한 검증결과에서는 각 수위 관측지점에서 연 총 기저유출 값의 차이가 5~10% 정도의 정확성을 보였다. 마지막으로 유역 내에서 관측된 지하수 수위 값과 모델에 의한 계산 값을 비교시 몇 구간을 제외하고는 전체적으로 관측된 지하수 수위의 시간적 변동추이와 변동 폭을 잘 나타내었다. 그러므로 본 연구에서 구축한 모델의 구조나 변수의 유효성에 많은 신뢰도를 제공한다고 판단된다.

연도별 물수지 분석결과에 의하면, 전체적으로 총 유출량 중 지하수 유출량이 47%정도, 중간 유출량이 31% 그리고 지표유출량이 22%이다. 도시화 영향 분석 결과 전체적으로 갑천 유역의 5%가량의 도시화는 총 유출량의 변화에 있어서는 현저한 차이를 보이지 않았다. 그러나 각 유출 성분의 경우에는 많은 영향이 있는 것으로 나타났다. 특히 지표유출량은 45% 가량의 증가를 보였고, 전체 유역의 지하수함양량이 5%정도 감소한 반면, 도시화가 31%정도 진행된 소유역의 경우에는 17%정도의 현저한 감소를 나타냈다. 본 연구에서 수행한 물수지 및 도시화 영향분석 결과는 향후 대천 3대 하천의 생태하천복원을 위한 물순환 정상화 대책마련 및 하천의 기저유량과 유량확보방안 마련에 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김현준, 장철희, 노성진, 김동필, 정일문, 홍일표, (2004) "청계천 유역의 수문 모니터링 및 물순환 해석," 청계천 유역 물순환 해석 국제 심포지엄, 한국건설기술연구원.
2. 이승중, 김영오, 이상호, 이길성(2005), "WEP 모형을 이용한 도림천 유역 물순환 모의," 한국수자원학회 논문집, Vol. 38, No. 6, pp. 449~460
3. Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.(1970), "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles," Journal of Hydrology, Vol. 10(3), pp. 282-290.
4. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., and King, K. W. (2002a), "Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000."
5. Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., Allen, P.M.(2000), Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. Journal of Hydrology, 227, 21-40.