

SWAT 모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지유량 산정방안

Determination of Instreamflow Requirement for Upstream Urban Watershed Using SWAT Model

이길성* / 정은성** / 신문주*** / 김영오****

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

Abstract

The flow duration curves in the present and the ideal hydrologic cycle were derived using SWAT model. The present situation is the landuse and the groundwater withdrawal in the year of 2000 and the ideal situation is the landuse of 1975 and no groundwater withdrawal. These results were compared with the previous instream flow requirements which are the larger flow between the average drought flow and environmental control flow. As a result, the present and ideal drought flows of Ojeoncheon, Hakuicheon, Samseongcheon, and Sammakcheon, were the same and the drought flows of Samseongcheon and Sammakcheon were even zero since the baseflow is very little due to the small and mountainous watersheds. The previous instream flow requirement for the riverine function is also larger than the low flow of the ideal hydrologic cycle. The present method to set the instream flow requirement is not proper for the small mountainous watershed since it can be usually overestimated and drive the artificial measures to secure the streamflow. Therefore, another method should be developed such as the low flow and the average flow between the drought flow and the low flow of the ideal hydrologic cycle using the proper hydrologic simulation model such as SWAT which can consider the landuse.

keywords : Mountainous Watershed, Flow Duration Curve, Instreamflow Requirement, SWAT, Landuse, Groundwater Withdrawal

요 지

본 연구에서는 안양천 증상류 유역에 대해 SWAT 모형을 이용하여 현재(2000년)의 토지이용 및 지하수 취수량(2000년)을 토대로 유허곡선을 도출하고 개발이전의 토지이용(1975년)과 지하수 취수가 전혀 없는 이상적인 상태에서 유허곡선을 도출하여 비교분석하였다. 또한 기존의 갈수량과 항목별 필요유량을 비교하여 큰 값으로 하천유지유

- * 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)
- *** 동부엔지니어링 수자원부 사원
Dongbu Engineering Corporation, Dept. of Water Resources, Seoul 154-17, Korea
(e-mail: bluebear77@hanmail.net)
- **** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 조교수
Assistant professor, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

량을 설정한 것과 본 연구에서 수행한 유황들을 비교하였다. 그 결과 오전, 삼성, 삼막, 수암천의 경우, 현재의 상태와 이상적인 상태의 갈수량이 전혀 변화하지 않음을 보였으며 삼성, 삼막천은 두 경우, 모두 갈수량이 0임을 확인할 수 있었다. 이는 대상유역의 유역면적이 작은 지방2급 하천일 뿐만 아니라 경사가 급한 산간지역이 대부분을 이루어서 개발 전에도 기저유출이 많지 않았기 때문이다. 또한 학의, 삼성천, 기아대교 상류유역과 같이 하천유지유량을 항목별 필요유량으로 산정한 경우는 모든 유역에서 이상적인 상황의 저수량보다 큰 값을 보였다. 따라서 지방2급 하천과 같이 유역면적이 작거나 산지하천의 경우에도 일률적으로 갈수량이나 항목별 필요유량을 비교하여 큰 값으로 하천유지유량을 설정하기보다는 SWAT과 같은 토지이용을 고려하는 수문모의모형을 이용하여 대상유역에 대해 자연적인 상황에서의 갈수량 또는 저수량 등 다른 적절한 방안을 사용하는 것이 바람직하다.

핵심용어 : 산지유역, 유황곡선, 하천유지유량, SWAT, 토지이용, 지하수 취수

1. 서 론

국내의 도시 유역은 급격한 도시화로 인해 불투수 지역이 증가하여 기저유출량이 급격히 감소하였다. 또한 지하수 이용까지 전보다 대규모로 이루어지고 있고, 상류 농업용 저수지는 그 목적을 잃어 특별한 운영목적도 없이 방치되고 있으며, 합류식 하수관거는 지천으로 흘러들어야 할 우수가 하수처리장으로 이송시키는 등, 일부도시 하천은 갈수기 하천유량이 현저히 감소할 수밖에 없는 상황을 맞이하고 있다. 최근에는 가뭄이 장기간 지속되고 기온이 상승하는 등 기상 이변까지 빈번하게 발생하여 건기의 하천수가 더더욱 줄어들고 있는 실정이다(이길성, 정은성, 김영오, 2006). 심평필(2003)은 전국의 지방2급 이상 하천을 대상으로 건천여부를 조사한 결과 3,773개 중 543개, 약 14.4%가 건기에 하천이 메말라 있음을 보였으며 이기영(2005)은 경기도내 2급하천 71개를 선별하여 조사한 결과 건천화된 하천의 수가 조사대상의 74.6%인 53개나 있음을 제시하였다. 만약 건기의 무 강우시 하천에 충분한 유량이 유지되지 않는다면 하천 및 인근 유역에서 생태, 환경적인 측면에서 심각한 문제가 발생할 수 있다. 그 예로서 도시하천인 안양천의 경우 최근 20~30년간 도시화가 급격히 이루어지고 인구가 급속히 증가함으로 인해 유역의 물순환이 많이 왜곡되었다. 특히 지천의 건천화가 심각하여 이를 해결하기 위해 다양한 측면에서 연구가 진행되었다(이삼희, 2001; 이기영, 2003; 이길성, 2004; 이길성 등, 2005; 이승종 등, 2005; 이길성, 정은성, 김영오, 2006; 이정민 등, 2006a; 이정민 등, 2006b). 안양시의 경우 하수처리장의 처리수를 고도로 처리한 후 상류로 이송하여 유지용수로 활용하거나 신규 저수지를 건설하는 등 건기시 하천수를 확보하기 위한 다양한 대안들이 설치되어 운영되고 있으며 최근에는 다른 지자체에서도 다양한 시설들이 계획되고 있다. 이러한 경우 시설물의

설치에 앞서 반드시 하천의 목표유량을 설정해야 하는데 대부분 하천유지유량(instreamflow requirement) 또는 하천관리유량의 개념이 사용되고 있다. 여기서 하천관리유량은 하천관리를 위해 설정하는 유량으로서 하천유지유량과 물수지 분석에 의해 각종 취수 및 용수를 만족하게 하는 이수유량과의 합을 의미하며 전체적으로 볼 때 하천의 자연 및 인위적 기능뿐만 아니라 하천수 이용 기능을 충족시킬 수 있도록 하천 대표지점에서 흘러야 할 유량이다(김규호 등, 1996). 본 연구에서는 도시지역의 중·소하천의 건천화에 초점을 맞추고 있으므로 각종 취수 및 용수를 제외한 하천유지유량에 대해서 연구를 수행하였다.

하천유지유량은 하천에 흘러야 할 최소유량으로 정의된다. 하천유지유량은 갈수량을 기준으로 선정하되, 하천 수질 보전, 하천 생태계 보호, 하천 경관 보전, 염수 침입 방지, 하구막힘 방지, 하천시설물 및 취수원 보호, 지하수위 유지를 위한 필요유량을 감안하여 산정한다. 여기서 갈수량은 과거 자연상태의 하천에서 갈수기에 흘렀던 유량으로서 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량을 말하며 기준갈수량, 평균갈수량을 산정한 후 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성을 고려하여 결정한다(한국수자원학회, 2005). 기본적으로 하천유지유량은 현재상태와 비교하여 앞으로 하천의 수리·수문과 환경 조건 등이 크게 변하지 않는 이상 변경될 수 없는 유량이지만 하천에 따라 새롭게 자연적 기능을 강화하거나 수요에 의해 인위적 기능이 증감될 경우에는 이에 맞추어 변경될 수 있다(오규창 등, 1991; 김규호 등, 1996). 우리나라에서는 하천법 제20조에서 건설교통부 장관으로 하여금 기준지점을 정해 하천유지유량을 설정하여 고시하도록 명시하고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 10대 하천 및 10대 하천의 제1지류(주로 국가하천) 정도의 중·대하천을 주요대상으로 한다(김규호 등, 1996). 따라서 지방2급 하천과 같은 중·소

하천들에 대한 연구는 현재 미흡한 실정이며, 측정된 유량자료가 없어 대부분이 인근 주요수위표를 이용한 비유량법을 사용하여 산정한 갈수량을 하천유지유량으로 채택하고 있다.

하지만 중소하천에 기존의 방법을 사용하여 하천유지유량을 산정할 경우, 현실적으로 달성하기 어려운 값을 제시할 수 있다. 인간의 활동이 거의 개입되지 않은 자연적인 물순환을 이상적인 상태라고 가정하면 기존의 평균갈수량이나 목적별 필요유량으로 유지유량을 산정하는 방법으로 산정된 값은 이상적인 상태의 유량과 거리가 먼 값을 갖는 경우가 빈번히 발생하기 때문이다. 유역의 수자원 사용현황, 토지이용현황, 경사도, 토양의 특성, 기상현황, 지하수 취수 등 자연적이고 인위적인 다양한 요소가 물순환에 개입되므로 통계적으로 산정된 값이나 항목별 필요유량은 모든 경우에 현실적인 목표 값을 갖는다고 보기 어렵다. 즉 기존 방법에 의해 산정된 유지유량이 이상적인 값보다 클 경우에는 자연적인 물순환을 유도하기 위한 침투증진시설보다는 하수처리수를 재이용하는 시설이나 저수지 및 빗물저장시설 등과 같이 물순환을 인위적으로 변경시키는 수단을 유도하게 된다. 특히 중소 산지하천의 경우에는 실제 갈수량이 항목별 필요유량에 비해 매우 작으므로 항목별 필요유량이 하천유지유량으로 설정되면 이를 달성하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 하천유지유량을 설정하기 위해 자연적이면서 이상적인 물순환이 유지되었을 경우 유역의 물순환이 어떻게 되며 이를 이용하여 중·소하천의 하천유지유량은 어떻게 산정해야 하는지에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 연구내용

과거 물순환이 어떻게 되었는지에 대한 연구는 그동안 수문학자들에 의해 많이 수행되었으며 토지이용의 변화로 인한 물순환의 변화에 대해서는 많은 유역에 대해 다양한 모형이 사용되어 분석되었다(Brown, 1988; Kang et al., 1998; Brun and Band, 2000; Chung et al., 2005; Schade and Shuster, 2005). 또 물고기 서식지, 수질, 경관 등을 고려하여 하천유지유량을 산정하려는 연구도 여러 차례 수행되었다 (박성천 등, 1998; 우효섭 등, 1998; 김규호 등, 2000; 홍형순 등, 2003; 강정훈 등, 2004; 성영두 등, 2005). 하지만 현재의 물순환을 토대로 지하수 취수량을 고려하여 이상적인 유역현황을 가정하고 이를 모의하여 유지유량으로 설정한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 현재의 토지이용 및 지

하수 취수량을 토대로 현재의 유황곡선(flow duration curve)을 도출하고 개발이전의 자연적인 과거의 토지이용과 지하수 취수가 전혀 없는 이상적인 상황을 가정한 상태의 유황곡선을 비교하였다.

대상유역을 11개 지방2급 하천의 하천망과 DEM 자료를 토대로 중유역으로 구분하고 각각의 중유역에 대해 현재의 토지이용 및 건설교통부에서 제공하는 지하수 취수량 자료를 토대로 SWAT을 이용하여 현재의 유황곡선을 도출하였다. 또한 개발이전인 1975년 토지이용과 지하수 취수가 전혀 없는 이상적인 상황을 가정한 상태의 유황곡선을 도출하여 비교분석하였다. 더 나아가 기존의 하천정비 기본계획 및 이삼희(2001)에서 제시한 갈수량과 항목별 필요유량을 비교하여 산정한 하천유지유량과 모의한 결과를 비교하였다. 대상유역의 경우 당정, 산본, 수암천은 전구간 또는 일부 구간이 복개되어 있으며 세 하천 모두 하수가 하도로 유입되어 건기시 하류에서 전량 차집하여 인양하수처리장으로 이송하는 인위적인 물순환 체계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 정상적인 하천이라고 가정하여 모의하였다.

2.2 하천유지유량 산정방법

2.2.1 기존의 산정방법

김규호 등(1996)은 하천유지유량 및 하천 관리유량의 결정 절차를 다음과 같이 제시하였다.

- (1) 하천환경 및 하천특성의 파악
 - 하천유황, 하천의 각종 유출입량, 하도상황, 자연환경과 사회환경 등
- (2) 하천의 하도구분 및 대표지점의 설정
 - 하도구분: 하천 이용과 기능 검토 시 해당 하천의 하천환경 특성을 바탕으로 복수 구간으로 설정하고 각 구간별로 갖는 특성을 검토.
 - 대표지점: 기준지점과 보조기준지점으로 나뉘며, 기준지점은 해당 하천의 이수 또는 저수관리를 적정하게 실시하기 위한 기준이 되는 지점을 설정함. 보조기준지점은 기준지점에서 하천관리유량을 검토할 경우에 기준지점을 보완하기 위한 지점이며 필요에 따라 복수로 설정할 수 있음.
- (3) 갈수량 및 항목별 필요유량의 검토 및 설정
 - 필요유량: 하천수질, 생태계(어류), 하천경관, 수상이용, 기타(염수침입방지, 하구막힘 방지, 하천관리시설 보호, 지하수위의 유지)
 - 이수유량 검토

- (4) 구간별 하천유지유량의 설정
- 각 항목별로 대표지점 또는 하도구간에서 선정된 조사지점의 필요유량과 갈수량을 비교하여 하천유지유량 결정
- (5) 대표지점 또는 구간에서 하천관리유량의 검토 및 설정
- 각 하천 하도구간 및 대표지점의 하천관리유량은 하천유지유량과 하천 지류유입량, 하천 이수류량 등을 바탕으로 하천을 따라 하류에서 상류 방향으로 종단적으로 조합하여 설정

이외에도 최근에는 자연 및 생태에 대한 관심이 고조되면서 PHABSIM(Physical HABitat SIMulation system) 등을 이용한 물고기의 서식처 확보를 고려한 유지유량 산정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(김규호 등, 2000; 강정훈 등, 2004; 성영두 등, 2005).

2.2.2 본 연구에서 제안한 방법

항목별 필요유량으로 설정된 하천유지유량이 이상적인 물순환에서의 갈수량이나 저수량보다 작을 경우에는 자연적인 물순환의 회복을 꾀하는 대안 즉 침투증진시설, 지하수 취수 금지 등의 방안으로도 달성할 수 있다. 하지만 이상적인 물순환에서 갈수량보다 큰 항목별 필요유량으로 하천유지유량이 설정될 경우에는 물순환을 인위적으로 조정하는 하수처리수 재이용, 신규 저수지 개발, 상수도 이용 등 적극적인 대안을 유도하므로 유역의 물순환 관점에서 자연스럽지 않다. 특히 본 연구의 대상인 도시하천의 상류유역의 경우에는 경관, 생태 등을 위한 필요수량이 유역의 현재상황에 비해 상대적으로 더 많이 설정되어 더더욱 자연스러운 방안으로는 달성할 수 없다. 따라서 지방2급 하천과 같이 유역면적이 작은 하천의 경우 일률적으로 갈수량이나 항목별 필요유량을 비교하여 큰 값으로 산정하기보다는 이상적인 상황에서의 갈수량 또는 저수량 등으로 산정하여 자연적인 물순환을 유도할 수 있는 하천유지유량을 설정하는 것이 적절하다. 즉 일반적으로 대하천에 적용되는 하천유지유량 산정방법을 도시하천 상류 소하천에도 적용할 경우 지나치게 달성하기 어려운 값을 제시하는 경우가 많으므로 이상적인 물순환의 유향곡선에서 갈수량, 저수량, 갈수량과 저수량 사이의 유량 값의 평균 등을 제시하는 것이 바람직하다. 하지만 생태학적, 경관학적으로 중요한 지천의 경우에는 항목별 필요유량이 반드시 필요한 경우가 있으므로 예외적인 경우에만 항목별 필요유량과 제안한 유량과 비교하여 큰 값으로 설정하는 방안을 제시할 수 있다. 즉 모든 도시하천의 지천

에 주운 용수나 물고기 서식처를 확보할 수 있는 수량 등을 공급할 필요는 없기 때문이다.

2.3 SWAT 모형

2.3.1 모형의 개요

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. 다양한 연구(이길성, 정은성, 신문주, 2006; 신문주, 2006; 신현석과 강두기, 2006)에서 다양한 국내유역에 대한 SWAT의 적용성을 인정받았으므로 이를 사용하였다.

2.3.2 모형의 구축

SWAT 모형의 수치표고모형을 구축하기 위해 건설교통부 국토지리정보원에서 발행한 안양천 유역의 1999년도 1/25,000 수치지형도와 ArcView GIS Tool을 이용하였다. 수치지형도는 국토지리정보원의 국가기본 지리정보계획에 의하여 제작되었으며 본 연구에서는 안양천 유역을 모두 포함하는 1999년도 축척 1/25,000의 수치지형도를 사용하였다.

DEM의 격자크기를 결정하기 위해 다음과 같은 연구를 참고하였다. Chaubey et al. (2005)은 DEM의 해상도에 따른 SWAT 모형 결과의 불확실성에 대하여 연

구한 결과 격자크기를 30 m × 30 m에서 100 m × 100 m, 150 m × 150 m, 200 m × 200 m, 300 m × 300 m, 500 m × 500 m, 1000 m × 1000 m 로 점점 증가시킬수록 모의결과의 상대오차도 점점 증가함을 확인하였고, 조효섭 등 (2003)은 수문모형에 적용을 위한 DEM 격자크기에 대해 연구한 결과 격자크기는 25 m × 25 m ~ 50 m × 50 m 가 가장 적합함을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 모의시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 격자크기를 30 m × 30 m로 하여 DEM을 구축하였다.

김경탁 (2003)은 수치개략도양도와 수치정밀도양도의 사용에 대해 연구한 결과 현장측정에 의해 정밀하게 제작되었고 미 농무성의 토양분류기준을 기초로 제작되었으며 실제 사용시 모의결과가 실측치에 유사한 수치정밀도 토양도를 사용할 것을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 SWAT 모형에 사용될 토양입력자료를 구축하기 위해 농촌진흥청 농업과학기술원에서 발행한 2002년도 1/25,000의 수치정밀도양도와 농업 토양정보 시스템 (<http://asis.rda.go.kr>)의 자료 및 수리특성연산기 (hydraulic properties calculator; <http://wilkes.edu/~boram/soilwatr.htm>)를 이용하였고 토양입력자료의 격자크기는 DEM의 격자크기와 동일하게 30 m × 30 m 로 하였다.

토지이용은 국토지리정보원에서 발행한 1999년도 1/25,000의 수치토지이용현황도와 ArcView GIS Tool 을 이용하여 토지이용 입력자료를 구축하였으며 격자크기는 DEM의 격자크기와 동일하게 하였다.

2.2.3 검 · 보정

모형의 매개변수 민감도 분석은 이길성, 정은성, 신문주(2006)의 결과를 사용하였는데 보정이 필요한 매개변수로는 침투유량과 총 유출량 측면에서 모두 민감한 SOL_AWC(available water capacity of the soil layer), GW_DELAY(groundwater delay time), CN2(initial SCS runoff curve number for moisture condition II)가 선택되었다. 매개변수 보정은 GW_ DELAY의 1부터 31까지의 값에 SOL_AWC와 CN2의 25가지 경우에 대해 수행하여 가장 높은 모형효율지수 (Coefficient of Efficiency; Nash and Sutcliffe, 1970)를 갖는 매개변수를 추정하였다. 여기서 사용된 25가지 경우는 각각의 매개변수 허용변화범위에 대해 0%, 25%, 50%, 75%, 100%에 해당되는 값을 조합하였다.

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

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

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

여기서, n 은 자료의 개수, $Q_{ob,i}$ 는 관측시점 i 의 관측값, M_{ob} 는 관측값의 평균, $Q_{sim,i}$ 는 관측시점 i 의 모의값이다. 각각의 대상유역(중상류, 왕곡/오전천, 학의천, 수암천, 삼성/삼막천, 삼봉천)에 대한 상세한 검 · 보정 결과는 신문주 (2006)에 수록되어 있다. 여기서 당정, 산본, 수암천의 경우 매개변수를 보정하기 위한 자료가 존재하지 않기 때문에 인근 유역의 매개변수를 사용하였다. 즉 당정, 산본천 유역은 왕곡, 오전천 유역을 포함하는 최상류유역의 매개변수를, 수암천 유역은 삼봉천 유역의 매개변수를 사용하였다.

3. 대상유역

대상유역은 Fig. 1과 같이 기아대교를 유역 출구점으로 한 안양천 중상류 유역이며 서울의 남서쪽에 위치하고 좌표는 동경 126° 52' ~ 127° 03', 북위 37° 19' ~ 37° 27' 이다. 대상유역은 왕곡, 오전, 산본, 당정, 학의, 청계사, 갈현, 수암, 삼성, 삼막, 삼봉천 등 총 11개의 지방2급 하천(Table 1) 및 오전, 백운, 삼성 등 3개의 저수지(Table 2)와 각각 일최대 300,000 m³를 처리하는 박달, 석수 하수처리장을 포함하고 있다. 본류의 유로연장은 17.91 km이고 유역면적은 127.13 km²에 이르며 경기도 의왕, 안양, 군포, 과천시 등이 포함되며 2003년 기준으로 약 98만명이 거주하고 있다. 2000년 기준으로 산림이 약 51.6%(침엽수림 18.3%, 혼합수림 33.3%)이며 도시지역이 38.3%, 농업지역이 7.5%로 구성되어 있으며 Fig. 2와 같이 도시지역 비율이 1975년에 7.8%에서 2000년에는 38.3%로 30.5%가 증가하였다. 대상유역의 지하수 취수량(한국수자원공사, 2001)은 2000년 기준으로 31.4 mm/년(=연 총사용량/유역면적)이며 중유역에 따라 Table 1과 같은데 특히 상류인 왕곡, 오전천 유역 약 70.1 - 84.5 mm/년으로 전체 연평균 강우량의 7.5%에 해당되며 학의, 갈현천 유역은 44.8 - 69.6 mm/년으로 안양천 전체 평균인 26.2 mm/년과 비교하면 매우 높아 전기에 지하수위가 매우 떨어져 있다. 유역의 경사는 Table 1과 같이 학의천, 당정천을 제외하고는 대부분 약 1/100보다 크므로 비교적 가파르다. 유역의 토양은 Fig. 3과 같으며 관악통(GnE2, 10.3%), 송산통

(SND3, 11.0%), 오산통(OnD3, 20.0%), 청산통(CaE3, 10.1%)이 많은 비율을 차지하고 있다. 이중 청산통을 제외하고는 모두 모래(sand)의 구성성분이 50% 이상으로 유역 전체로 보면 진흙(clay)이 18.6%, 점토(silt)가 33.4%, 모래가 48.0%로 구성되어 있다. 현재 대상유역에는 출구점인 기아대교와 상류지역인 옷우물교, 삼막

천의 삼막3교, 당천천의 금정교, 수암천 하류에 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단 중 안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발 과제가 실시간 초음파 수위계를 설치하고 2004년 5월부터(기아대교는 2005년 1월부터) 15분 단위로 수위를 측정하여 웹(<http://anyang.river.or.kr>)으로 제공하고 있다.

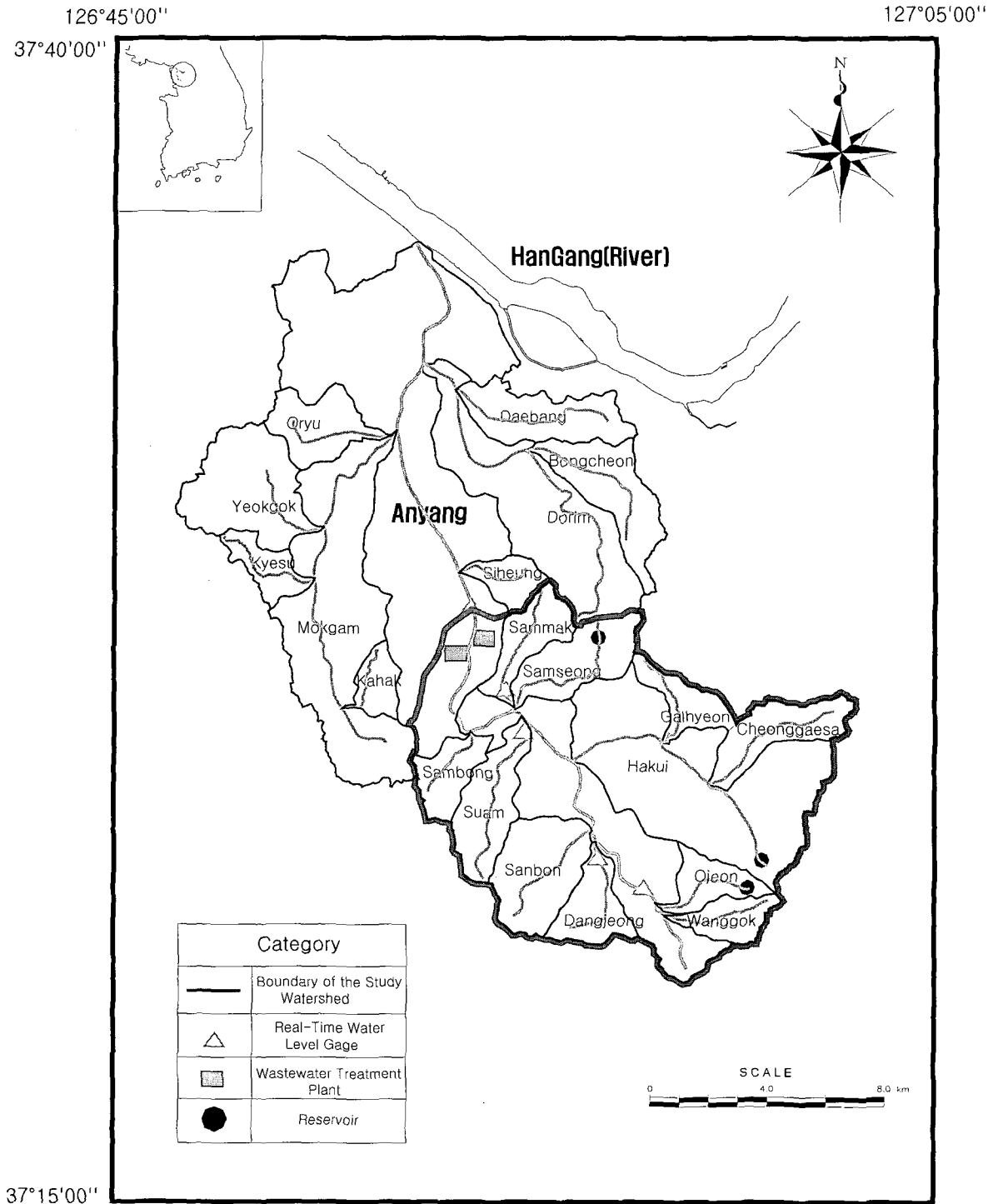
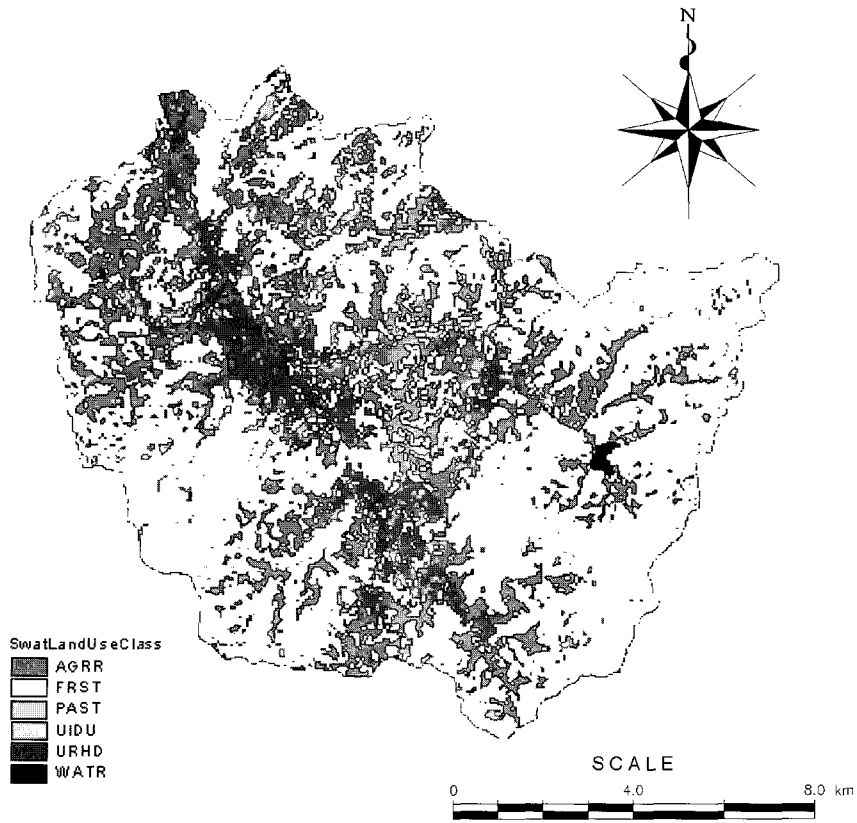
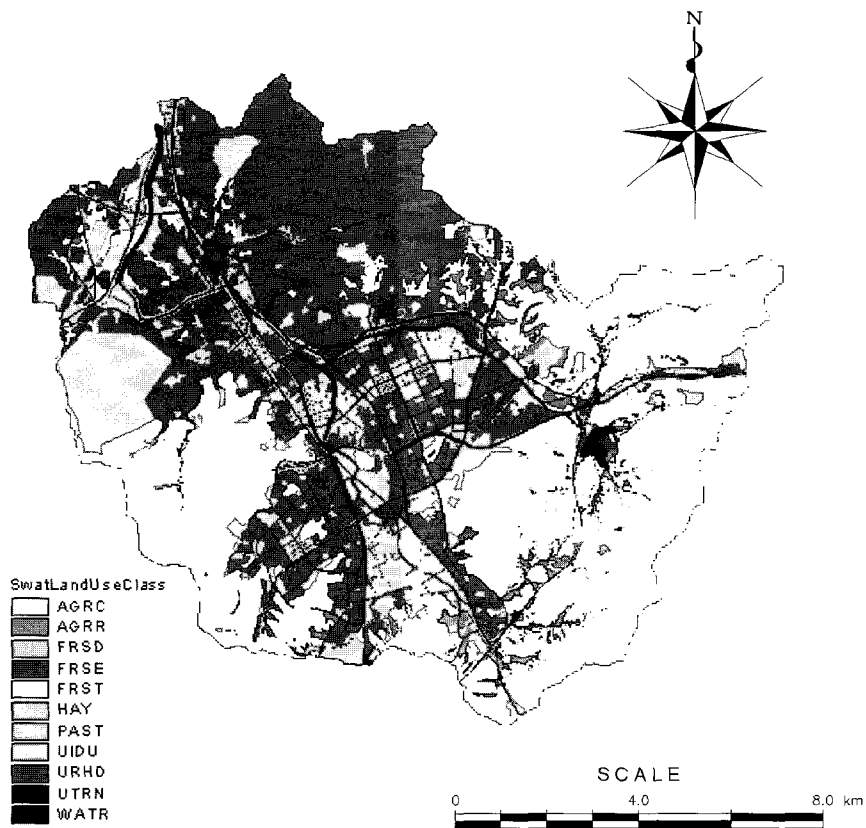


Fig. 1. Description of the Study Watershed



(a) 1975



(b) 2000

Fig. 2. Landuse Changes of the Study Watershed

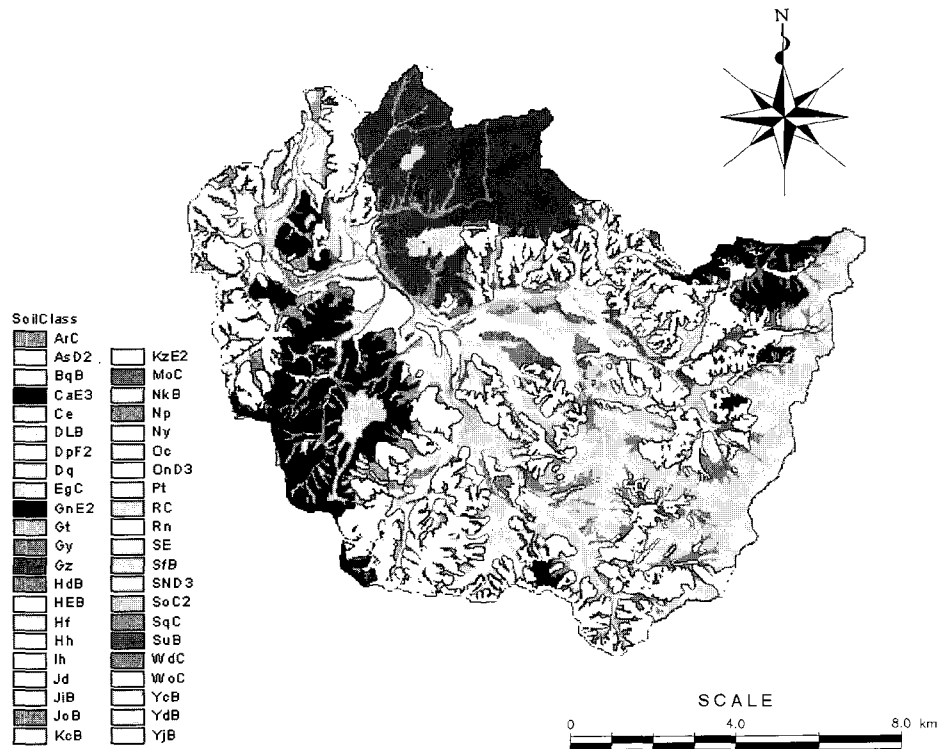


Fig. 3. Soil Map of the Study Watershed

Table 1. Characteristics of the Subwatersheds

Name of Sub-Watershed	Water-shed Area (km ²)	Length of Stream (km)	Slope	Elevation (EL. m)	Landuse (2000) (%)			Soil Constituent (2000) (%)			Ground-water Withdrawal (2000) (mm/year)
					Urban	Forest	Agri-cultural	Clay	Silt	Sand	
Study Watershed	127.13	17.91	1/250	120	38.3	51.6	7.5	18.6	33.4	48.0	31.4
Wanggok	3.78	3.82	1/50~1/60	180	7.0	81.5	9.4	16.8	25.2	58.0	84.5
Ojeon	4.26	2.85	1/30~1/60	163	7.7	77.5	11.4	16.0	25.6	58.4	70.1
Dangjeong	5.35	4.02	1/270 1/140~1/180	70	57.1	27.7	11.2	18.0	32.4	49.6	16.2
Sanbon	10.29	4.32	1/160	135	40.3	48.5	9.2	17.6	32.1	50.3	2.8
Hakui	44.58	9.26	1/410 1/140~1/160	127	22.8	57.5	15.7	16.5	32.9	50.6	44.8
Cheonggyesa	6.88	5.41	1/30~1/70	207	3.5	81.7	10.9	-	-	-	3.9
Galhyeon	4.12	3.73	1-80~1/90	109	11.0	54.0	29.2	-	-	-	69.6
Suam	8.07	6.49	1/90~1/40	169	18.9	72.6	6.3	18.8	46.2	35.0	1.9
Samseong	13.17	5.74	1/120 1/20~1/50	203	7.9	83.2	5.1	11.8	34.2	54.0	4.4
Sammak	5.39	4.63	1/120 1/10~1/50	184	12.8	71.2	8.2	13.3	34.3	52.4	1.0
Sambong	4.59	2.76	1/60~1/100	97	11.5	68.9	11.5	18.7	37.1	44.2	18.0

Table 2. Information of Reservoirs

Name of Reservoir	Subwatershed	Location	Capacity (m ³)
Ojeon	Ojeon	East 127°00'10" North 37°21'13"	57,000
Baekun	Hakui	East 127°00'10" North 37°22'43"	1,628,000
Samseong	Samseong	East 126°56'56" North 37°25'08"	30,000

4. 연구결과

4.1 물순환 파악

현재의 물순환 현황을 파악하기 위해 SWAT 모형을 이용하여 각각의 유역에 대해 2000년의 토지이용 현황, 지하수 취수량(한국수자원공사, 2000) 등을 이용하여 2000년부터 2004년까지 5년 동안의 기상자료에 대해 모의를 수행하였다. 또한 이상적인 물순환을 파악하기 위해 SWAT 모형을 이용하여 1975년의 토지이용 현황과 지하수 취수가 전혀 없다고 가정한 이상적인 물순환 상황에 대해서도 2000년부터 2004년까지 5년 동안의 기상 자료를 이용하여 모의를 수행하였다. 각각의 모의 결과는 Fig. 4와 같으며 5년간의 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량과 갈수량과 저수량사이의 유량의 평균값을 각각 평균한 결과는 Table 3과 같다.

오전, 삼성, 삼막천 유역의 경우 갈수량은 현재 상황과 이상적인 상황에서 전혀 변화가 없음을 보였으며 특히 삼성, 삼막천의 경우에는 두 경우 모두 갈수량이 0

임을 확인할 수 있었다. 심지어 수암천의 경우에는 이상적인 경우의 갈수량이 현재의 갈수량보다 작은 값을 보였다. 이는 대상유역의 면적이 작은 산간지역으로 경사가 급하여 기저유출이 상대적으로 적고 증발산이 많이 일어나기 때문이다. 하지만 산본, 학의, 기아대교 상류유역의 경우에는 이상적인 상황의 갈수량이 현재 갈수량보다 약간 크게 나타났으며 왕곡, 당정, 삼봉천의 경우에는 150%이상 크게 나타났다. 특히 삼봉천의 경우에는 갈수량은 약 8배 정도 이상적인 상황에서 더 크게 나타나는데 이는 도시화와 지하수 취수가 하천수 감소에 결정적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4.2 다른 결과와 비교

이상의 모의 결과를 각 중유역 별로 비교하면 Table 3과 같다. 이삼희(2003; 학의, 삼성, 수암천 하류, 기아대교)와 의왕시(1995), 군포시(1994), 안양시(2004)의 하천 정비기본계획(왕곡, 오전, 당정, 산본, 삼봉천 하류)에서 설정된 하천유지유량보다 매우 작은 값을 보였으며 심지어 이상적인 상황의 저수량보다도 훨씬 못 미치는

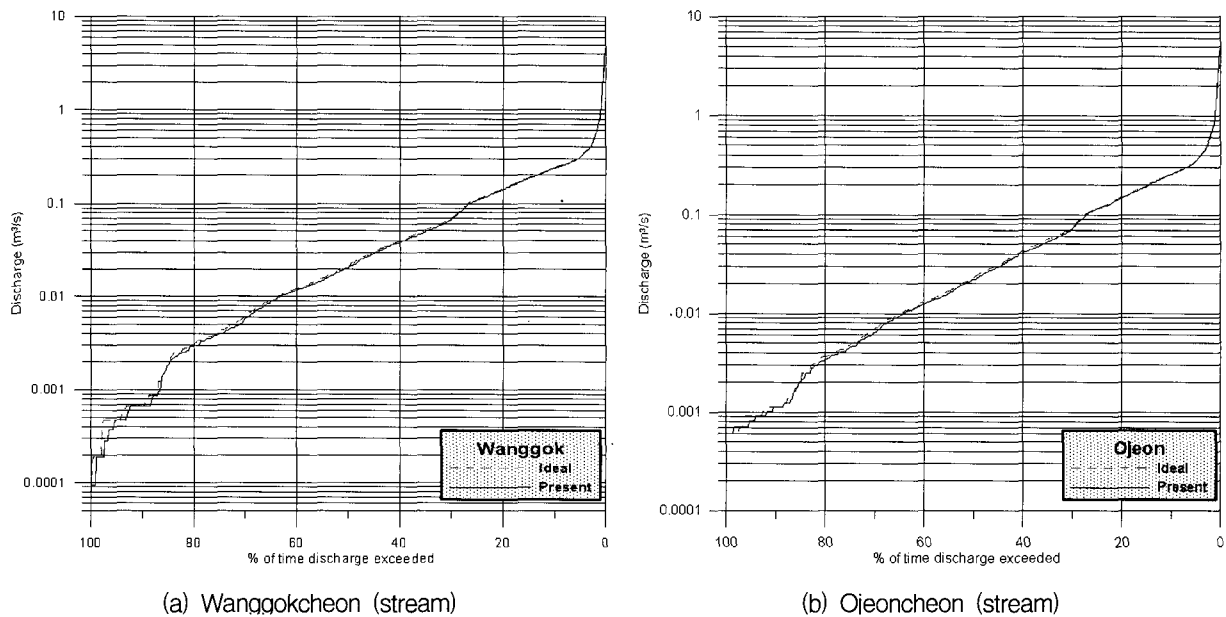
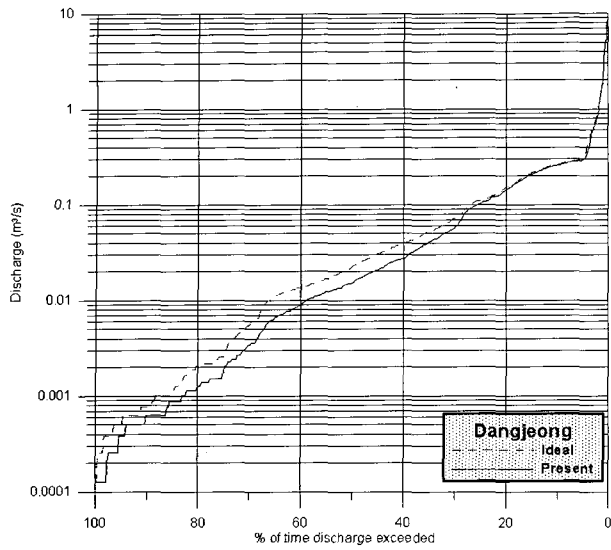
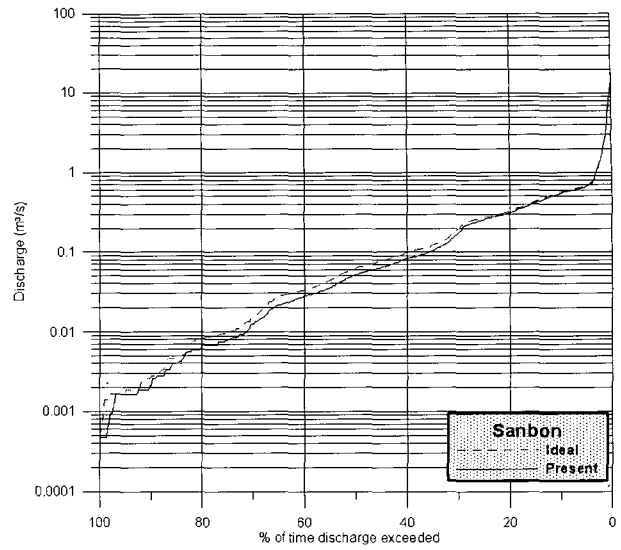


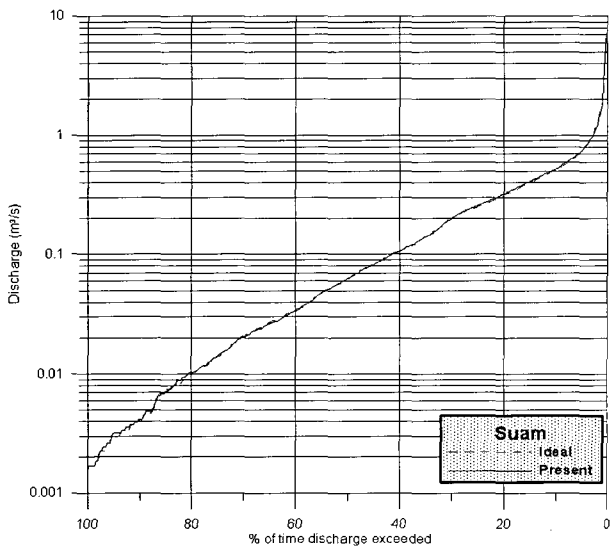
Fig. 4. Comparison of Flow Duration Curves of Present and Ideal Situations(continued)



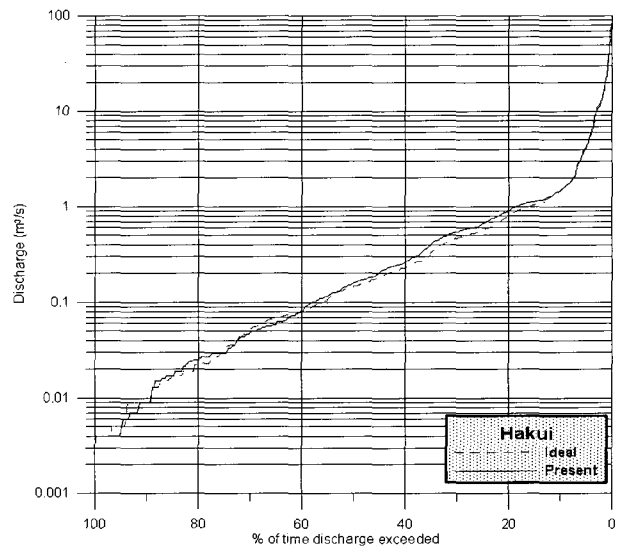
(c) Dangeongcheon (stream)



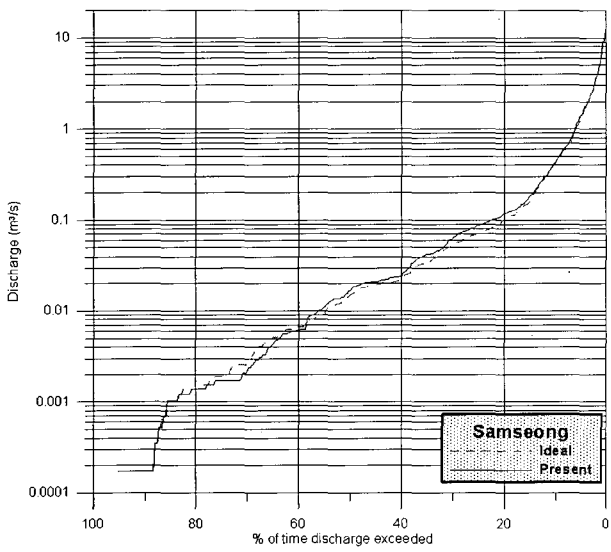
(d) Sanboncheon (stream)



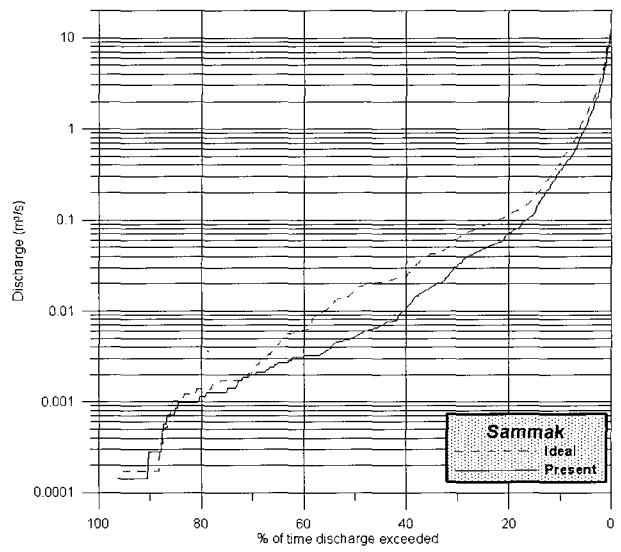
(f) Suamcheon (stream)



(e) Hakuicheon (stream)

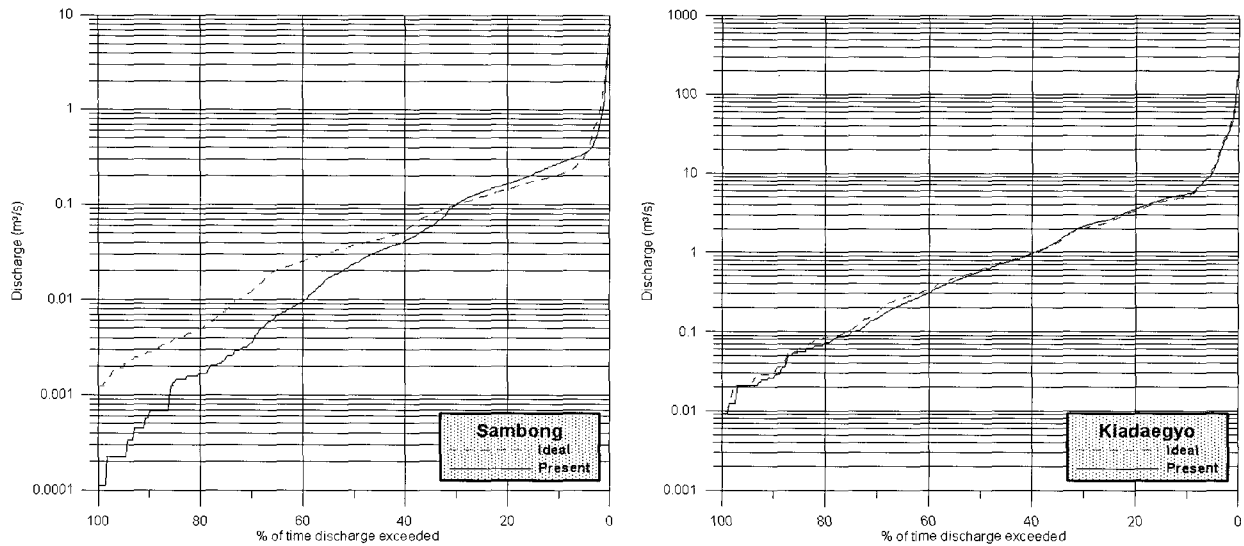


(g) Samseongcheon (stream)



(h) Sammakcheon (stream)

Fig. 4. Comparison of Flow Duration Curves of Present and Ideal Situations(continued)



(i) Sambongcheon (stream)

(ii) Kiadaegyo

Fig. 4. Comparison of Flow Duration Curves in the Present and Ideal Situations

Table 3. Comparison Between Previous Instream Flows and Simulation Results (Unit: CMS)

Name of Stream	Scenario	Previous Instream Flows	Simulation Results				
			Drought Flow (Q_{355})	Low Flow (Q_{275})	Median Flow (Q_{185})	High Flow (Q_{95})	$\frac{1}{81} \sum_{i=275}^{355} Q_i$
Wanggok	Ideal	0.008590	0.000472	0.004153	0.020951	0.107021	0.001841
	Present	(Drought flow)	0.000283	0.003964	0.020196	0.104190	0.001730
Ojeon	Ideal	0.009450	0.000709	0.004790	0.022894	0.111948	0.002267
	Present	(Drought flow)	0.000709	0.004477	0.021534	0.108181	0.002117
Dangjeong	Ideal	0.012900	0.000381	0.002541	0.021470	0.107858	0.001289
	Present	(Drought flow)	0.000254	0.001652	0.014991	0.097949	0.000856
Sanbon	Ideal	0.025800	0.001647	0.009883	0.060946	0.262138	0.005011
	Present	(Drought flow)	0.001412	0.007765	0.050828	0.243784	0.004079
Hakui	Ideal	0.112000	0.005013	0.031178	0.143893	0.541411	0.015238
	Present	(Environmental flow)	0.004006	0.029166	0.151944	0.622927	0.016456
Samseong	Ideal	0.090000	0.000000	0.001898	0.014182	0.068028	0.000801
	Present	(Environmental flow)	0.000000	0.001726	0.015492	0.082556	0.000761
Sammak	Ideal	0.011000	0.000000	0.001280	0.005118	0.045493	0.000660
	Present	(Drought flow)	0.000000	0.001137	0.004834	0.050611	0.000535
Suam	Ideal	0.018000	0.002253	0.014083	0.060462	0.241473	0.006899
	Present	(Environmental flow)	0.002441	0.013707	0.060838	0.245604	0.006952
Sambong	Ideal	0.010000	0.001804	0.007443	0.036538	0.117282	0.003875
	Present	(Drought flow)	0.000226	0.002368	0.023005	0.128446	0.001089
Kiadaegyo	Ideal	0.348000	0.021160	0.106517	0.579450	2.325790	0.055588
	Present	(Environmental flow)	0.015273	0.094743	0.552130	2.518163	0.050258

값이 설정되었다. 따라서 기존의 방법으로 지방2급 하천과 같이 유역면적이 크지 않은 하천에 대해 하천유지유량을 설정하는 것은 현실적으로 달성하기 어려운 값을 제시할 수 있다.

4.3 본 연구에서 제안한 방법 검토

Fig. 4로부터 왕곡, 당정, 수암, 삼봉천, 기아대교 지점을 제외한 대상유역의 유향곡선들은 Q_{365} 부터 갈수량까지는 이상적인 상황과 현재의 상황에서의 유향이 비슷한 값을 보였으나 갈수량에서 저수량까지 변화하는 사이에는 이상적인 상황이 점차 더 많은 유출량 값을 보였다. 즉 오전천의 경우 이상적인 상황과 현재의 상황 모두 Q_{365} 가 0.000709 CMS였지만 Q_{363} 에서 처음으로 차이를 보이기 시작하여(이상적인 상황의 경우가 0.000814 CMS이고 현재의 상황은 0.000709 CMS) 이후부터는 점차 유량의 차이를 보이게 된다. 따라서 갈수량을 하천유지유량 설정의 기준으로 사용하는 것은 대상유역과 같이 현재의 상황과 같은 값을 보일 수 있으므로 바람직하지 않다.

따라서 Table 3과 같이 이상적인 상황의 갈수량이나, 저수량, 갈수량과 저수량사이 유량의 평균 등으로 하천유지유량을 산정한다면 비교적 자연적인 물순환을 유도하는 시설만으로 달성 가능한 목표를 수립할 수 있을 것이다. 하지만 생태학적으로 중요한 하천인 학의천과 기아대교 지점의 경우에는 현재 버들치, 참개 등의 생물이 서식하므로(이기영, 2006) 이를 위한 필요유량을 하천유지유량으로 산정하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

기존의 하천유지유량은 일반적으로 평균갈수량 또는 기준갈수량과 항목별 필요유량 중 큰 값으로 산정하는데 10대하천 및 10대하천의 제1지류에만 적용성이 인정되었다. 하지만 중소 산지하천의 경우에는 적절한 산정방법이 없으므로 현재 대부분 같은 방법이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 경우 발생할 수 있는 문제점에 대해서 제시하였다.

안양천 중상류 유역에 대해 SWAT을 이용하여 현재의 상황과 이상적인 상황의 유향곡선을 도출하여 비교하였다. 이상적인 상황은 1975년의 토지이용과 지하수 취수가 없다고 가정하였다. 그 결과 오전, 삼성, 삼막, 수암천의 경우 갈수량이 두 경우 모두 같은 값을 가지므로 지방2급 하천으로 산지지역이 대부분인 하천의 경우에는 자연적인 상황의 갈수량을 유지유량의 지표로 사용하는 것은 적절하지 않다. 또한 항목별 필

요유량으로 산정된 값의 경우(학의, 삼성천, 기아대교 상류)에는 상대적으로 이상적인 상황의 저수량보다도 큰 값을 제시할 수 있으며 이 경우에는 침투증진시설과 같은 유역의 자연적인 물순환을 유도하기 위한 방안으로는 달성하기 어렵다. 따라서 이상적인 물순환을 유도하기보다는 인위적으로 하천유량만 확보하는 방안이 계획될 수밖에 없다. 이러한 산정방식은 유역의 자연스런 물순환보다는 지나치게 과대산정된 하천유지유량을 위해 인공적인 시설물의 설치를 촉구하게 한다. 따라서 지방2급 하천과 같이 유역면적이 작고 건기의 기저유출이 거의 없는 도시하천 상류 소유역의 경우(왕곡, 오전, 삼막, 삼봉천) 하천유지유량을 설정하는 현재의 방법은 적절하지 않으며 수문모의모형을 이용하여 이상적인 상황에서의 갈수량, 저수량 또는 갈수량과 저수량 사이의 값의 평균으로 산정하는 등의 방법이 고안하는 것이 바람직하다. 하지만 학의천과 기아대교지점과 같이 생태학적, 경관학적으로 중요한 지천의 경우에는 항목별 필요유량이 반드시 필요한 경우가 있으므로 예외적인 경우에만 항목별 필요유량과 제안한 유량과 비교하여 큰 값으로 설정하는 방안을 제시할 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 강정훈, 이은태, 이주현, 이도훈 (2004). "어류의 서식조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 915-927.
- 군포시 (1994). **안양천수계 하천정비 기본계획보고서**.
- 김경탁 (2003). "정밀토양도를 이용한 CN 산정에 대한 제안." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 45-53.
- 김규호, 이진원, 홍일표, 유효섭 (1996). "하천유지유량 결정 방법의 개발 및 적용: 1. 산정방법." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제4호, pp. 161-176.
- 김규호, 조원철, 전병호 (2000). "수량·수질 모의치를 이용한 어류 서식조건 유지에 필요한 적정유량 산

- 정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 3-14.
- 박성천, 강성후, 이관수 (1998). “수질보전을 위한 영산강의 하천유지유량 결정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제2-1호, pp. 1-11.
- 성영두, 박봉진, 주기재, 정관수 (2005). “하천의 어류서식환경을 고려한 생태학적 추천유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp. 545-554.
- 신문주 (2006). **SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안**. 서울대학교 석사학위논문.
- 신현석, 강두기 (2006). “SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 227-240.
- 심명필 (2003). **지속가능한 하천수 개발**. 인하대학교, 과학기술부.
- 안양시 (2004). **삼봉천 하천정비 기본계획**.
- 오규창, 정상만, 박상진, 유영석 (1991). “한강에서의 하천유지유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제24권, 제1호, pp. 119-128.
- 유효섭, 이진원, 김규호 (1998). “물고기 서식처를 고려한 하천유지유량 결정방법의 개발: 금강 본류에서의 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제2-4호, pp. 339-350.
- 의왕시 (1995). **안양천수계 하천정비 기본계획보고서**.
- 이기영 (2003). **안양천 살리기 종합대책**. 경기개발연구원, 경기도.
- 이기영 (2005). **효율적인 하천 유지관리 방안**. 경기개발연구원.
- 이기영 (2006). **2005년 안양천 모니터링**. 경기개발연구원, 안양시청.
- 이길성 (2004). **안양천 유역의 물순환 건전화 기술적용**. 서울대학교, 과학기술부
- 이길성, 정은성, 김영오 (2006). “도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근방법.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 151-167.
- 이길성, 정은성, 신문주 (2006). “기후, 지하수 취수 및 토지이용의 변화의 건기 총유출량에 대한 영향.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회 (제출).
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005). “PCSWMM을 이용한 건전화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안 II 모형의 적용” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 437-441.
- 이삼희 (2001). **안양천 살리기 종합계획**. 한국건설기술연구원, 안양시.
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성 (2005). “WEP 모형을 이용한 도립천 유역 물순환 모의.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 449-460.
- 이정민, 이상호, 이길성 (2006a). “물 환경 건전화를 위한 도시하천의 물 순환 모의(I) 안양천 유역.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제2호, pp. 349-357.
- 이정민, 이상호, 이길성 (2006b). “투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성 포장의 효과분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 109-119.
- 조효섭, 정관수, 김재한 (2003). “GIUH적용을 위한 DEM 격자크기 및 Threshold Area의 민감도 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 799-810.
- 한국수자원공사 (2000). **지하수 조사연보**. 건설교통부.
- 한국수자원학회 (2005). **하천설계기준·해설**. 건설교통부.
- 홍형순, 이주현, 정상만 (2003). “하천의 경관 유지수량의 결정.” **한국조경학회논문집**, 한국조경학회, 제30권, 제6호, pp. 17-25.
- 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., 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.
- Brown, R.G. (1988). “Effect of precipitation and land use on storm runoff.” *Water Resources Bulletin*, AWRA, 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.
- Chaubey, I., Cotter, A.S., Costello, T.A., and Soerens, T.S. (2005). “Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty.” *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 621-628.
- 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*, IWRA, New Delhi, India.
- Kang, S., Park, J.I., and Singh, V. (1998). "Effect of urbanization on runoff characteristics of On-Cheon Stream watershed in Pusan, Korea." *Hydrological Processes*, Vol. 25, pp. 351-363.
- 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, No. 3, pp. 282-290.
- 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.
- (논문번호:06-33/접수:2006.02.23/심사완료:2006.07.20)