

## HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 및 BOD 부하량 분석

### Analysis of Hydrologic Cycle and BOD Loads Using HSPF in the Anyancheon Watershed

이길성\* / 정은성\*\* / 이준석\*\*\* / 홍원표\*\*\*\*

Lee, Kil Seong / Chung, Eun-Sung / Lee, Joon-Seok / Hong, Won-Pyo

#### Abstract

The hydrologic cycle and BOD pollutant loads of all sub-watersheds were analyzed using HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran). At first, sensitivity analyses to water quantity (peak discharge and total volume) and quality (BOD peak concentrations and total loads) were conducted and some critical parameters were selected. For more precise simulation, the study watershed was divided into four parts according to the landuse characteristics and used climate data and so calibrated and verified respectively. It was found that as the urban area ratio increases in the downstream direction, baseflow decreases (11.1 % → 5.0 %) and the ratio of direct runoff volume (42.5 % → 56.9 %), BOD concentration (3.3 mg/L → 15.0 mg/L) and unit loads (55.4 kg/ha/year → 354.5 kg/ha/year) increase.

**keywords** : Anyancheon, HSPF, Sensitivity analysis, Hydrologic cycle, BOD

#### 요 지

본 연구에서는 안양천 유역에 대해 HSPF 모형을 구축하고 중유역과 전체유역의 물순환 현황 및 BOD 부하량을 정량적으로 파악하였다. 모형을 구축하기 위해 HSPF 모형의 수량 및 BOD 농도에 대한 민감도 분석을 수행하여 매개변수를 선택하였다. 또한 다양한 특성을 갖고 있는 안양천 유역을 토지이용, 경사도 및 사용한 기상자료 등에 따라 4개 지역으로 구분하여 검·보정을 실시하여 정확도를 향상시켰다. 물순환 모의 결과 하류로 갈수록 도시화 비율이 높으며 이로 인해 기저유출량은 11.1 % → 5.0 %로 줄어들고 직접유출량은 42.5 % → 56.9 %로, BOD 농도는 3.3 mg/L → 15.0 mg/L로, 단위면적당 원단위는 55.4 kg/ha/year → 354.5 kg/ha/year로 늘어났다.

**핵심용어** : 안양천, HSPF, 민감도 분석, 물순환, BOD

\* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Seoul, 151-744, Korea  
(e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

\*\* 서울대학교 공학연구소 박사후 연구원

Post Doctor Researcher, Engineering Research Institute, Seoul National Univ., Seoul, 151-742, Korea  
(e-mail: cool77@snu.ac.kr)

\*\*\* 한국수자원공사 사원

Korea Water Resources Corporation, Daejeon, 306-711, Korea (e-mail: jsl78@hanmail.net)

\*\*\*\* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석사과정

MS Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Seoul, 151-744, Korea  
(e-mail: wonpyo79@hotmail.com)

## 1. 서 론

국내·외의 도시 유역은 급격한 도시화에 따른 불투수 지역과 지하수 이용 증가로 인한 기저유출(base-flow)의 감소, 상류 저수지의 농업용수를 위한 방류량 감소, 합류식 하수관거로 인한 우수회귀 손실 등으로 일부 하천에는 갈수기 하천유량이 현저히 감소하고 있다. 만약 건기의 무 강우시 하천에 필요한 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 왜곡되었다. 특히 안양천의 경우 지천의 건천화 및 수질오염문제가 심각하여 이를 해결하기 위해 다양한 측면에서 접근하는 연구가 있었다(이삼희, 2001; 심명필, 2003; 이기영, 2003, 2005; 노성진 등, 2006; 이길성 등, 2006a, b, c).

본 연구에서는 안양천 유역의 왜곡된 물순환을 건전화시키기 위한 기초연구로 연속유출 모의모형인 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran; Bicknell et al., 2001) 모형을 사용하여 유역의 물 및 오염물질 순환을 정량적으로 파악하였다. 안양천 유역의 물 및 오염물질 순환을 파악하기 위한 연구동향은 다음과 같다.

이길성 등(2005)과 이상호와 이정민(2006), 이정민 등(2006)은 PCSWMM(Storm Water Management Model) 모형을 이용하여 안양천의 지류인 학의천 유역과 도림천 유역, 안양천 유역에 각각 적용하여 물순환을 분석하였으며, 이승종 등(2005)과 노성진 등(2005)은 WEP(Water and Energy transfer Processes) 모형을 이용하여 안양천의 지류인 도림천 유역과, 청계천 유역에 적용하여 물순환을 분석하였으며 Lee and Chung(2007)은 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 안양천 최상류 유역에 대해 기상자료, 토지이용, 지하수 취수에 대한 건기 총유출량의 변화를 모의하는 등 대부분 수문모형을 사용하여 유역의 정량적인 물순환을 파악하기 위해 시도하였다. 수질 측면에서는 정은성 등(2006)은 SWAT 모형의 유출량 결과와 실측자료를 바탕으로 산정한 유량가중평균 농도(Event Mean Concentration, EMC)를 이용하여 안양천 중상류 유역에 대한 수량과 수질 특성을 제시하였다.

다른 유역에 대한 연구로는 방기웅 등(1997)은 ILLUDAS-POLL 모형을, Mostaghini et al.(1997)은 AGNPS(AGricultural Non-Point pollution model) 모형을, Tsihrintzis and Hamid.(1998)와 Burian et al.(2001)

은 SWMM 모형을 이용하여 유역의 비점오염 발생량을 포함하는 오염부하량 특성을, 노성진 등(2005)이 청계천 유역에 대해 WEP 모형을 이용하여 분석한 바 있다.

HSPF 모형을 사용한 연구로는 박남희 등(2002)이 황룡강 유역을 대상으로 장기유출 분석을 실시하여 HSPF 모형의 적용성을 검토하였으며, 박민지 등(2005)은 경안천 유역의 토지이용변화에 따른 유출 변화 분석을 실시하였는데 1980년, 1990년, 2000년 토지이용에 대한 모의 결과 유출량은 도시화와 산림의 감소에 영향을 받아 전체적으로 증가하는 경향을 보이는 반면, 비홍수기 유출량은 기저유출 감소로 인하여 감소하는 결과를 제시하였다. 국외 연구로는 Brun and Band(2000)가 미국 메릴랜드 Gwynns Falls 유역의 과거 및 현재 토지이용변화에 따른 유출 특성을 모의하였으며, 이를 바탕으로 유출비와 기저유출을 각각 토양포화도비 및 불투수층비의 함수로 나타내었다. Albek et al.(2003)은 터키 Seydi Suyu 유역에 기후변화에 따른 온도 상승 및 식물 변화에 따른 유출량을 모의하였는데 연 평균 기온이 3 °C 상승에 따라 21 %의 유출량 감소를 보였으며, 현재의 식물 분포와 비교하여 유역 전체에 깊은 뿌리 식물(deep rooted vegetation)이 존재할 경우 37 %의 유출량 감소를 나타냈고, 깊은 뿌리 식물이 전혀 존재하지 않는 경우에는 40 %의 유출량이 증가함을 보였다. Johnson et al.(2003)은 침투초과(infiltration-excess)에 의한 지표면 유출을 모의하는 HSPF 모형과 토양포화(saturation-excess)에 따른 지표면 유출을 모의하는 SMR(Soil Moisture Routing)의 유출량 모의 값이 거의 같은 정확성을 나타냄을 보였다. 그러나 각각의 모형구조 특성상 HSPF 모형은 겨울 유출량에서, SMR은 여름 유출량에서 좀 더 정확한 결과 값을 보였다. Hayashi et al.(2004)은 HSPF 모형을 이용하여 중국 Changjian River 유역의 유출량과 유사 부하량을 모의하였는데  $R^2$ (Nash-Sutcliffe coefficient) 값이 5일 평균 유출량에 대해서는 0.95, 5일 평균 부유물질(SS) 농도에 대해서는 0.31 ~ 0.65를 나타내어 Changjian River 유역에서 HSPF 모형의 적용성을 확인한 바 있다.

도시지역의 물순환을 정량적으로 파악하기 위한 연구는 실측법이나 다양한 수문모형을 사용하여 시도된 사례는 많으나 하나의 수문모형을 이용하여 도시유역에 대해 수량과 수질 측면에서 정량적으로 제시한 사례는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 HSPF 모형을 이용하여 도시하천인 안양천 유역에 대해 중유역별로 물순환 및 BOD(Biochemical Oxygen Demand) 부하량을 정량적으로 모의하고 특징을 제시하였다.

## 2. HSPF

### 2.1 개요

HSPF 모형은 유역에서 발생하는 유출수의 양과 질을 모의하기 위해 설계된 종합적(comprehensive), 개념적(conceptual), 연속적(continuous) 유역 모의 모형으로 1966년 개발된 스탠포드 유역 모형(stanford watershed model)에 기원을 두고 있다. 현재의 HSPF 모형은 1980년 미국 환경청에서 개발한 것으로 기존의 HSP(Hydrocomp Simulation Programming), ARM(Agricultural Runoff Management), NPS(NonPoint Source), SERATRA(Sediment and RAdionuclides TRAnsport) 모형들에서 수행되는 다양한 모의 모듈(module)을 새롭게 수정하여 보완한 프로그램이다.

### 2.2 구성

HSPF 모형의 구조는 Fig. 1과 같다. Run Interpreter는 입력자료인 UCI(Users Control Input)를 읽고 해석하여 프로그램의 실행순서를 결정하며, Operations Supervisor는 Run Interpreter에 의해 제공되는 정보를 바탕으로 Operating Module을 실행한다. Operating Module은 유출과 오염부하량 등을 실제로 모의하는 Application Module과 이를 구동하기 위해 지원되는 Utility Module로 구성되어 있다. Service Subprograms는 시계열자료의 입출력을 담당한다. TSGET(Get Time Series)와 TSPUT(Put Time Series)는 오직 시계열자료의 처리와 저장에 연관된 모듈로서 TSGET는

모형에 필요한 기상자료를 불러들여 실행한 결과를 사용자가 지정한 시간간격으로 TSPUT에 입력하는 역할을 하고 있다.

HSPF 모형의 유출, 수질 모의 등 핵심부분은 Application Module로, 투수지형(pervious land)에 대한 PERLND 모듈, 불투수지형(impervious land)에 대한 IMPLND 모듈, 하천이나 호소구간에 대한 RCHRES 모듈로 구성된다. 각각의 모듈은 다시 수량, 수질, 토사 유출 등을 모의하기 위한 항목별로 구성되어 있다.

### 2.3 HSPF 모형의 입력 및 출력

HSPF 모형의 수량·수질 해석을 위한 기본 입력자료로는 기상자료(강수량, 온도, 풍속, 증발량, 일사량, 이슬점 온도, 운량), 수치표고자료(Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도가 필요하다. 이중 기상자료는 입출력 시스템 도구인 WDMUtil을 사용하며, DEM과 토지이용도는 BASINS(Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources; US EPA, 2001)와 ArcView를 이용하여 모형에 구축된다.

HSPF 모형은 투수지역(pervious land), 불투수지역(impervious land), 하천 및 저수지에서 발생하는 차단, 토양 수분, 지표면 유출, 중간 유출, 기저 유출, 적설심, 함수비, 용설, 증발, 증발산, 지하수 함양, 용존 산소, BOD, 온도, 농약, 대장균, 유사 추적, 하도 추적, 저수지 추적, pH, 암모니아, 유기 질소, 인산염, 유기 인, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤 등을 모의할 수 있으며, 모의되는 계산 시간 간격은 1분부터 1일까지 가능하다.

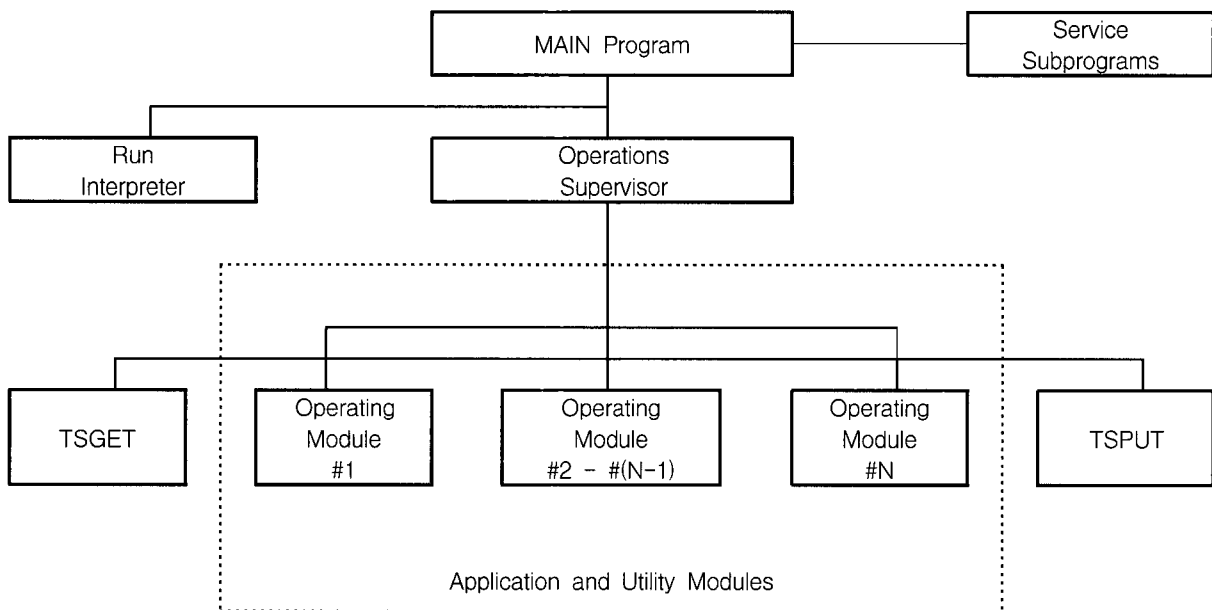


Fig. 1. Overview of HSPF (Bicknell et al., 2001)

HSPF 모형은 일반적으로 토지이용 변화, 저수지 운영, 점오염 및 비점오염원 처리 대안 등을 평가하기 위해 사용되고 있다(Bicknell et al., 2001).

### 3. 대상유역

본 연구의 대상유역은 Fig. 2와 같이 안양천 유역이다. 안양천은 국가하천이며 한강의 제1지류로서 경기도 의왕시 지지대고개에서 발원하여 북류하면서 경기도와 서울시를 경유하고 한강에 유입되는 대표적인 도시하천이다. 유역의 위치는 서울의 남서쪽으로 동경 126° 47' ~ 127° 04', 북위 37° 18' ~ 37° 33'이며 유역 면적은 287.15 km<sup>2</sup>이고 서울시의 7개구(강서구, 양천구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구)와 경기도 7개시(과천시, 의왕시, 군포시, 안양시, 광명시, 시흥시, 부천시)에 걸쳐있다. 또한, 11개의 지방2급하천 제1지류와 9개의 지방2급하천 제2지류가 포함되어 있으며, 하천망과 DEM을 고려하여 Fig. 2와 같이 12개의 중유역으로 구분된다. 안양천 유역의 연도별 Landsat 영상을 이용하여 토지이용현황을 분석한 결과, 1975년 유역 면

적 287.15 km<sup>2</sup> 중 녹지 145.34 km<sup>2</sup>로 50.61 %, 도시지역 47.69 km<sup>2</sup>로 16.61 %, 농업지 88.71 km<sup>2</sup>로 30.89 %, 기타 5.36 km<sup>2</sup>로 1.89 %를 차지하던 비율이 2000년 유역 면적 287.15 km<sup>2</sup> 중 녹지 119.69 km<sup>2</sup>로 41.68 %, 도시지역 124.25 km<sup>2</sup>로 43.27 %, 농업지 37.37 km<sup>2</sup>로 13.01 %, 기타 5.84 km<sup>2</sup>로 2.04 %로 각각 변화되었다. 즉, 1975년 16.61 %에 불과했던 도시지역이 2000년에는 유역 전체면적의 절반가까이 차지하는 전형적인 도시하천으로 변모했음을 알 수 있다(이길성 등, 2006a).

### 4. 모형의 구축

#### 4.1 입력자료 구축

HSPF 모형의 구동을 위하여 필요한 입력자료는 기상자료, DEM, 토지이용도가 있으며 이 요소들을 다음과 같이 HSPF 모형에 구축하였다.

기상자료는 안양천 유역에 인접한 수원기상대와 서울기상대 자료를 이용하였으며 이 중 강수량은 안양천 유역 종합치수계획(현대 Eng., 2005)에서 작성된 Thiessen 망의 면적비를 사용하여 강수량의 공간적 분

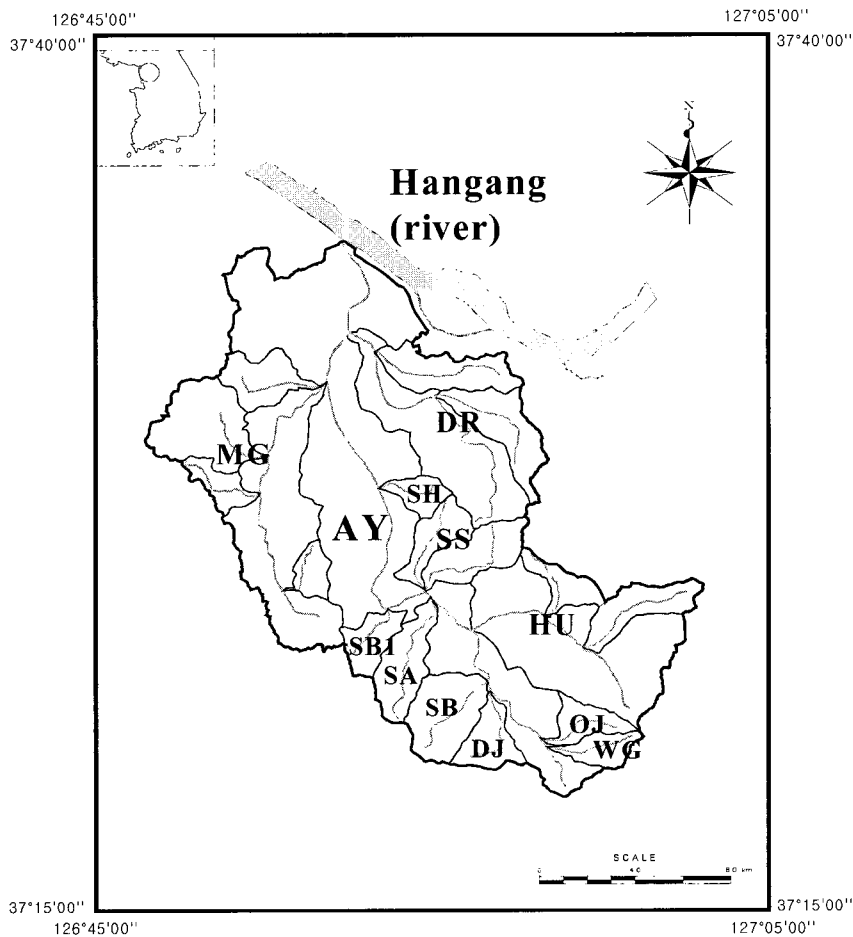


Fig. 2. Sub-watersheds Map of the Anyangcheon

포를 고려하였다. 수원기상대와 서울기상대에서 수집한 1993년부터 2005년까지의 시간별 강수량, 증발량, 기온, 풍속, 일사량, 이슬점 온도, 운량 자료를 HSPF 모형의 입력과 출력을 위해 개발된 WDMUtil을 이용하여 모형에 구축하였다.

DEM을 HSPF 모형에 구축하기 위해 건설교통부 국토지리정보원에서 가장 최근에 발행한 1999년도 1/25,000 수치지형도와 ArcView GIS Tool을 이용하였다. DEM의 격자크기는 Chaubey et al.(2005)과 조효섭 등(2003)의 연구결과를 토대로 모의시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 30 m × 30 m를 선택하였다.

또한 토지이용도를 구축하기 위하여 국토지리정보원에서 가장 최근에 발행한 1999년도 1/25,000 수치토지이용현황도와 ArcView GIS Tool을 이용하였다.

## 4.2 민감도 분석

HSPF 모형의 구축을 위해 2005년 기상자료를 사용하여 안양천 출구점(양화교)을 기준으로 매개변수의 민감도 분석을 수행하였다. 수문 매개변수는 총유출량(total flow)과 첨두유량(peak flow)을, 수질 매개변수는 BOD 총부하량(total load)과 첨두농도(peak concentration)에 대하여 각각 실시하였다.

### 4.2.1 수량

HSPF 모형의 수문학적 매개변수 중 AQUA TERRA(2004)에서 수량 보정 시 중요한 매개변수로 제안하는 7개 매개변수, LZSN(lower zone nominal storage, mm), INFILT(index to the infiltration capacity of the soil, mm/hr), AGWRC(basic groundwater recession rate, 1/day), UZSN(upper zone nominal storage, mm), INTFW(interflow inflow parameter), IRC(interflow recession parameter, 1/day), LZETP(lower zone ET parameter)를 대상으로 초기값(Bicknell et al., 2001)에서  $\pm 25\% \sim \pm 100\%$  증감을 통한 첨두유량과 총유출량의 변화를 관측하였다(Fig. 3). 민감도 분석 결과, 총유출량에서는 UZSN, LZSN, INFILT, AGWRC, IRC, INTFW, LZETP 순으로 첨두유량에서는 INFILT, LZSN, UZSN, INTFW, AGWRC, IRC, LZETP 순으로 큰 변화를 나타내었다. 본 연구에서는 이 중 유출에 1% 이상 영향을 주는 LZSN, UZSN, INFILT, INTFW, IRC, AGWRC 를 모형의 보정에 사용할 매개변수로 선정하였다.

### 4.2.2 수질(BOD)

HSPF 모형에서 BOD는 RCHRES 모듈의 OXRX

(Primary DO and BOD Balances)에서 모의되고 있다. AQUA TERRA(2004)에서 BOD 보정 시 주요한 매개변수로 제안하는 OX-GENPARM과 OX-REAPARM의 매개변수를 대상으로 초기값(Bicknell et al., 2001)에서  $\pm 25\% \sim \pm 100\%$  증감을 통한 총부하량과 첨두농도 변화를 관측하였다(Fig. 3). 총부하량에서는 KODSET(rate of BOD setting, m/hr), KBOD20(unit BOD decay rate 20 degrees C, 1/hr), TCBOD (temperature correction coefficient for BOD decay), TCGINV (temperature correction coefficient for surface gas invasion), SUPSAT(allowable dissolved oxygen supersaturation), REAK(empirical constant for equation used to calculate the reaeration coefficient, 1/hr), EXPRED(exponent to depth used in calculation of the reaeration coefficient), EXPREV(exponent to velocity used in calculation of the reaeration coefficient) 순으로 첨두농도에서는 KODSET, KBOD20, TCBOD, TCGINV, SUPSAT, REAK, EXPRED, EXPREV 순으로 큰 변화를 나타내었다. 본 연구에서는 이 중 총부하량과 첨두농도에 1% 이상 영향을 주는 KODSET, TCBOD, KBOD20을 모형의 보정에 사용할 매개변수로 선정하였다.

## 4.3 검 · 보정

### 4.3.1 방법

Singh(1997)은 모형을 이용하여 유역의 수문 상황을 모의할 경우 결과값은 유역 분할의 공간성 및 시간성에 영향을 받으며 유역 분할은 기상자료, 토양, 토지이용, 하천 특성, 물리적 특성(침투, 경사 등) 등이 분할 기준으로 고려된다고 제시하였다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 대상유역을 기상자료와 물리적 특성을 고려하여 크게 상류 유역(Region I), 중류 유역(Region II), 목감천 유역(Region III), 도림천 유역(Region IV)으로 나누어 각각 보정 및 검증 실시하였는데 분류 기준은 다음과 같다. 첫째 물리적 특성 중 경사를 고려하여 Region I(0.162)과 Region II(0.1)를 분류하였다. 둘째 기상자료 사용처를 고려하여 Region II(수원 기상대)와 Region III(수원 및 서울 기상대) 및 Region IV(서울 기상대)로 분류하였다. 셋째 하천의 특성 중 하천의 복개 상황을 고려하여 Region III(자연하천)과 Region IV(복개 하천)로 분류하였다.

모형의 보정 방법은 수량의 경우 민감도 분석 결과 선정된 매개변수 중 총유출량은 LZSN, UZSN을, 첨두유량은 INTFW, IRC를, 기저유량은 INFILT, AGWRC를 각각 사용하여 Eqs. 1~3과 같이 가장 큰 모형효율

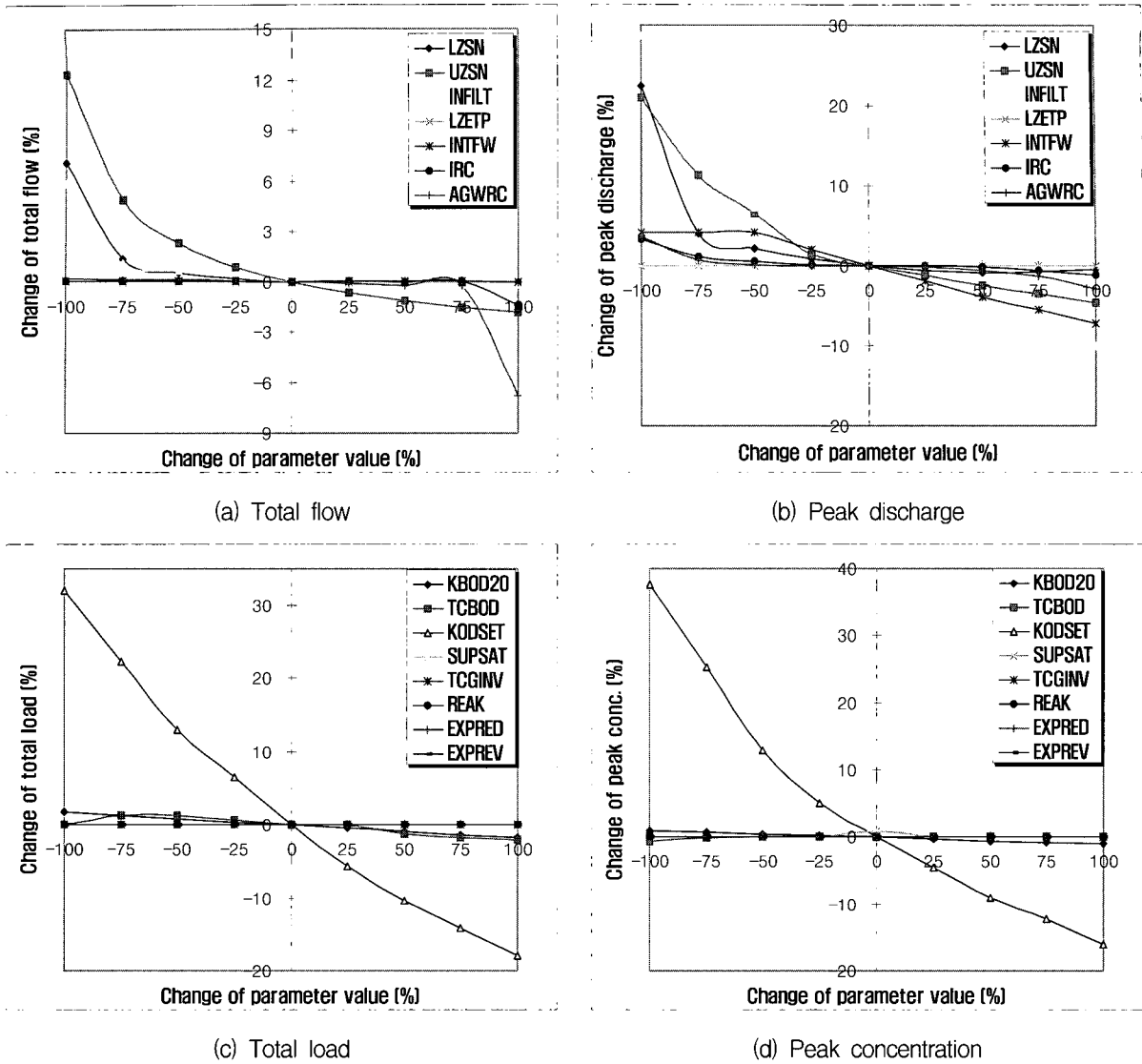


Fig. 3. Results of Sensitivity Analysis

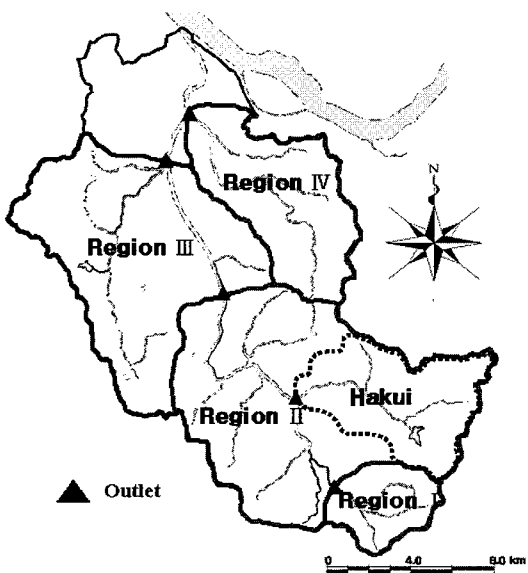


Fig. 4. Watershed Division Map for Calibration and Verification

계수(Nash and Sutcliffe, 1970)를 갖는 매개변수의 조합을 선택하였다.

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

X

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

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

여기에서, X는 사용한 매개변수들의 집합이며,  $Q_{ob,i}$ 는  $i$ 번째 관측값,  $M_{ob}$ 는 관측값의 평균,  $Q_{sm,i}$ 는  $i$ 번째 모의값,  $n$ 은 자료의 수이다. Eq. 1의  $R^2$  값이 모의 결과값과 관측값이 일치하면 1이며,  $R^2$  값이 0과 1 사이에

있으면 모의 결과값을 사용하는 것이 관측값의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며,  $R^2$  값이 0보다 작으면 모형의 모의 결과가 나쁘거나 관측값의 일관성이 없음을 의미한다. Eq. 2에서  $F_0^2$ 는 관측값의 초기 변화(initial variation)을 나타내며, Eq. 3에서  $F^2$ 는 관측값과 모의값의 불일치 지수(index of disagreement)를 나타낸다.

BOD 보정은 시료채취 기술, 분석 방법 등의 수질자료 불확실성 등을 고려하여 오차의 정도를 나타내는 RMSE를 목적함수로 하였다. 따라서 본 연구에서는 민감도 분석 결과 선정된 KODSET, TCBOD, KBOD20을 사용하여 가장 작은 RMSE(Eq. 4)를 갖는 매개변수의 조합을 선택하였다.

$$\min \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{Q_{sm,i} - Q_{ob,i}\}^2} \quad (4)$$

### 4.3.2 적용 결과

#### (1) 상류 유역 (Region I)

상류 유역에는 왕곡천(WG)과 오전천(OJ)이 포함되어 있으며, 오전천 상류(동경: 127° 00' 10", 북위: 37° 21' 13")에는 57,000 m<sup>3</sup>의 저수량을 갖는 오전 저수지가 하류로 소량(2005년 3월 17일 실측 결과 0.0005 cms) 방류하고 있다.

상류 유역은 유역의 출구점(우우물교)에서 실시간 관측되었던 2004년 11월 1일부터 11월 30일, 2004년 12월 1일부터 12월 31일까지의 수위(<http://anyang.river.or.kr/>)와 수위-유량 곡선(신문주, 2006)을 사용하여 수문 보정 및 검증 실시하였다(Fig. 5(a) and (b)). 또한 2005년 5월 1일부터 12월 31일까지 측정된 10개의 BOD 농도값과 2006년 6월 1일부터 7월 31일까지 측정된 5개의 BOD 농도값을 사용하여 보정 및 검증 실시하였다(Fig. 6(a) and (b)).

#### (2) 중류 유역 (Region II)

중류 유역에는 학의천(HU), 당정천(DJ), 산본천(SB), 수암천(SA), 삼봉천(SB1), 삼성천(SS)이 포함되어 있다. 학의천에는 학의천 상류(동경: 127° 00' 10", 북위: 37° 22' 43")에 저수량 1,628,000 m<sup>3</sup> 규모의 백운저수지가 있으며, 인덕원역에서 방류되는 지하철 용출수(비홍수기 평균: 1,680 m<sup>3</sup>/day, 홍수기 평균: 3,120 m<sup>3</sup>/day) 및 안양하수처리장 재이용수(평균: 21,000 m<sup>3</sup>/day)가 학의천의 하천유지용수 및 건천화 방지로 활용되고 있다. 삼성천에는 삼성천 상류(동경: 126° 56' 56", 북위:

37° 25' 05")에 위치한 저수량 30,000 m<sup>3</sup> 규모의 삼성 저수지가 5월에 0.01 cms, 10월과 11월에 0.02 cms를 하류로 방류하고 있다.

중류 유역은 중류 유역의 출구점(기아대교)에서 2005년 4월 25일부터 2005년 12월 31일까지 관측된 17개의 유량값을 사용하여 수문 보정을 실시한 후, 중류 유역에 포함되는 학의천 유역의 출구점(비산교)을 통해 2004년 10월 1일부터 2005년 7월 25일까지 관측된 13개의 유량값을 사용하여 수문 검증을 실시하였다(Fig. 5(c) and (d)). 또한 기아대교에서 2005년 5월 1일부터 2005년 12월 31일까지 측정된 10개의 BOD 농도값을 사용하여 BOD 보정을 실시한 후, 비산교에서 2005년 5월 1일부터 2005년 12월 31일까지 측정된 9개의 BOD 농도값을 사용하여 BOD 검증을 실시하였다(Fig. 6(c) and (d)).

#### (3) 목감천 유역 (Region III)

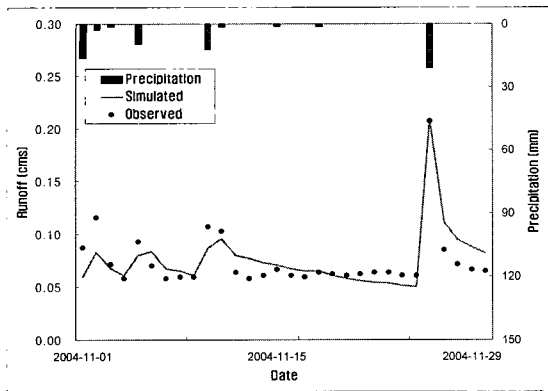
목감천 유역(MG)은 계수천, 가학천, 오류천, 역곡천이 포함되어 있다. 계수천 상류(동경: 126° 49' 36", 북위: 37° 27' 5")에는 367,000 m<sup>3</sup> 규모의 과림 저수지가 있는데 강우 시 자연 월류 방식으로 하류로 유량을 흘러보내고 있다. 역곡천은 2006년 9월 20일에 준공된 역곡 하수처리장에서 일평균 23,000 m<sup>3</sup>의 하수처리수를 역곡천 상류에서 방류하고 있다.

목감천 유역은 출구점(북위: 37° 24', 동경: 126° 52')에서 2006년 3월 1일부터 7월 31일까지 관측된 11개의 유량값을 사용하여 수문 보정을 실시한 후 2005년 5월 25일부터 2006년 2월 28일까지 관측된 10개의 유량값을 사용하여 수문 검증을 실시하였다(Fig. 5(e) and (f)). 또한 2006년 1월 1일부터 7월 31일까지 측정된 9개의 BOD 농도값을 사용하여 BOD 보정을 실시한 후, 2005년 5월 1일부터 2005년 12월 31일까지 측정된 7개의 BOD 농도값을 사용하여 BOD 검증을 실시하였다(Fig. 6(e) and (f)).

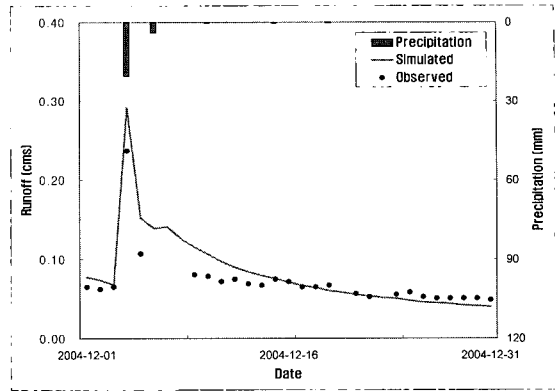
#### (4) 도립천 유역 (Region IV)

도립천(DR) 유역은 봉천천, 대방천이 포함되어 있다. 도립천, 봉천천, 대방천은 2006년 현재 부분 및 전면 복개된 하천으로 햇빛 및 바람이 차단되어 하천의 자정능력감소로 하천 생태계가 매우 악화되었으며, 복개로 인해 발생하는 통수 단면적 감소는 홍수 시 하천 범람의 원인이 되고 있다.

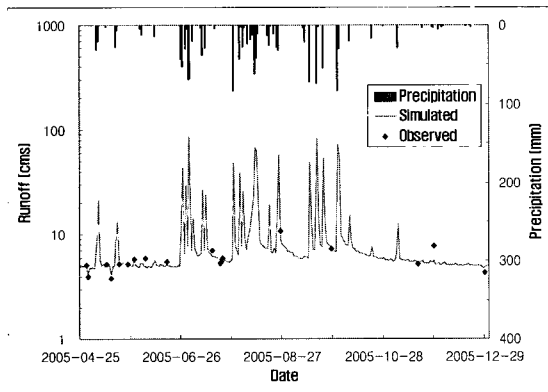
도립천 유역의 유량자료는 1983년 삼안기술공사 보고서에 수록되어 있는 강우 시 유량자료와 2004년 및 2006년 비강우 시 측정된 2개의 자료가 전부이다. 따라서 본 연구에서는 이상호와 이정민(2006)이 삼안기술



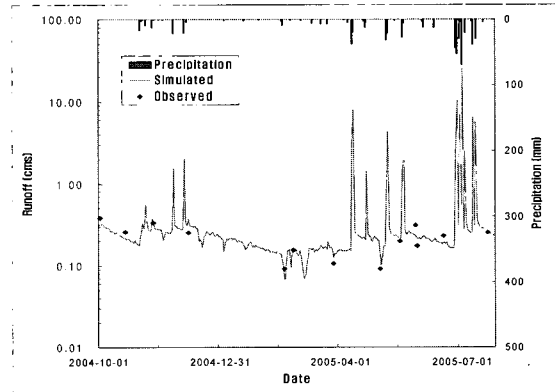
(a) Calibration of Region I



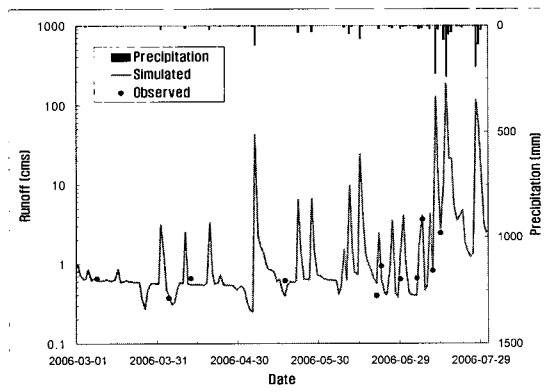
(b) Verification of Region I



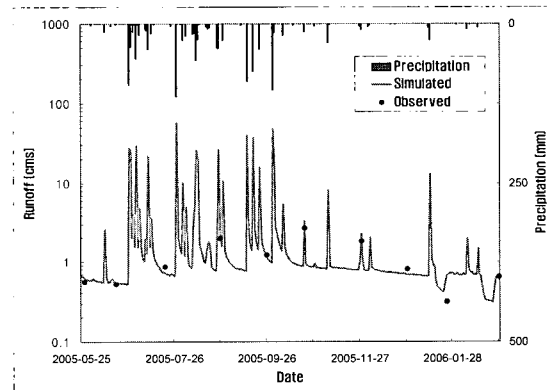
(c) Calibration of Region II



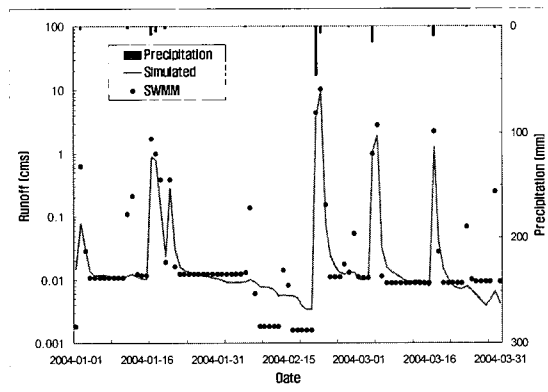
(d) Verification of Region II



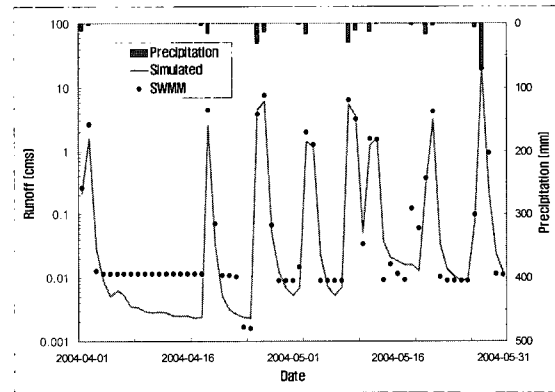
(e) Calibration of Region III



(f) Verification of Region III



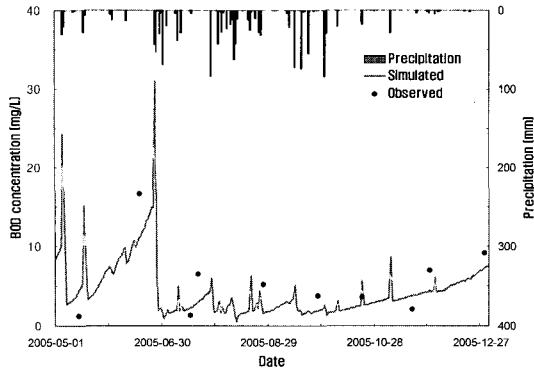
(g) Calibration of Region IV



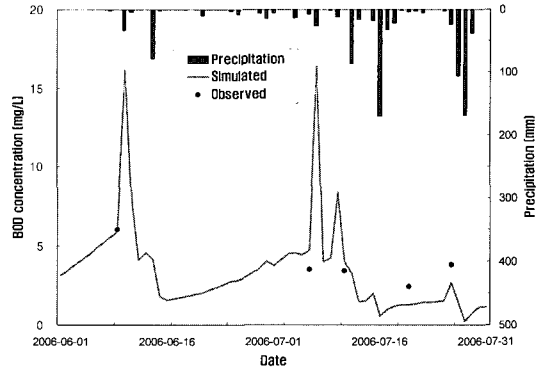
(h) Verification of Region IV

Fig. 5. Results of Calibrations and Verifications for Runoff

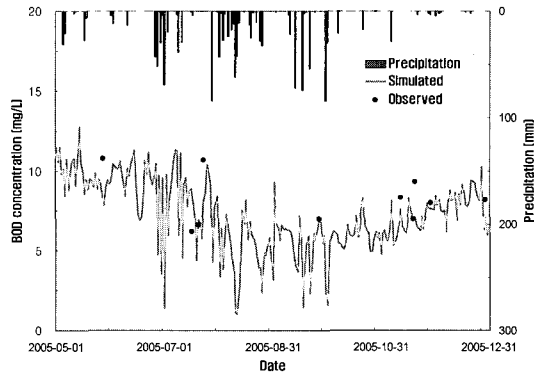




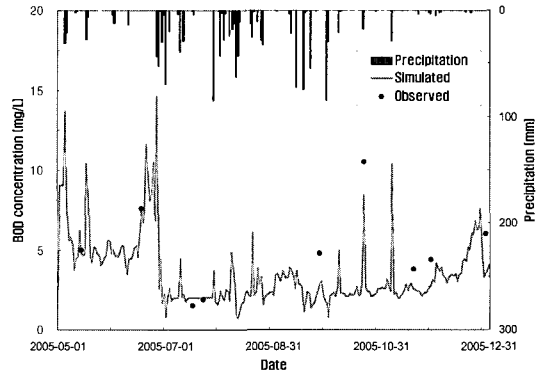
(a) Calibration of Region I



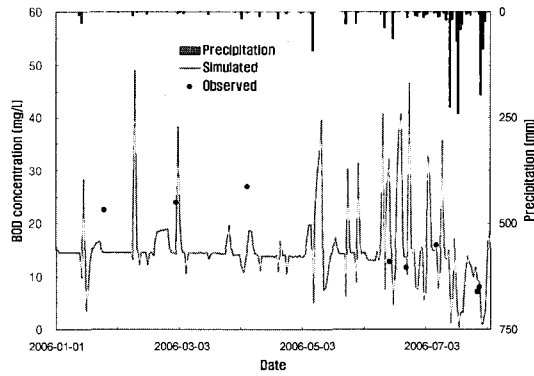
(b) Verification of Region I



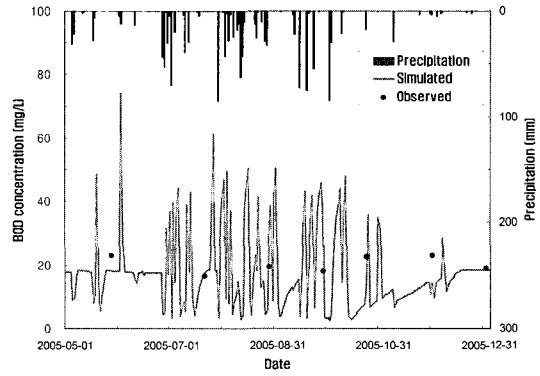
(c) Calibration of Region II



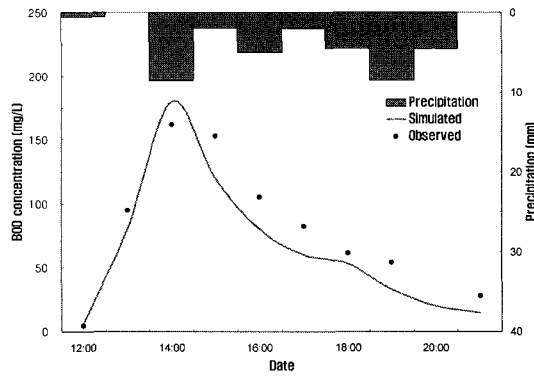
(d) Verification of Region II



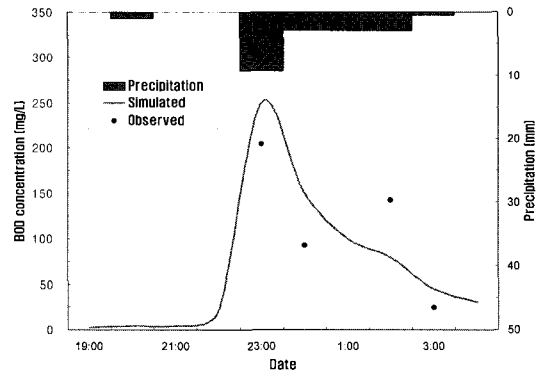
(e) Calibration of Region III



(f) Verification of Region III



(g) Calibration of Region IV



(h) Verification of Region IV

Fig. 6. Results of Calibrations and Verifications for BOD Concentration

공사 보고서에 수록되어있는 유량자료를 사용하여 도립천에 구축한 SWMM의 결과값을 관측값으로 가정하여 수량에 대한 보정 및 검증 실시하였다. 보정은 2004년 1월 1일부터 3월 31일까지의 결과값을, 검증은 2004년 4월 1일부터 2004년 5월 31일까지의 결과값을 각각 이용하였다(Fig. 5(g) and (h)). 또한 도립천 유역 출구점(도림교)에서 2006년 6월 10일 12:00시부터 21:00시까지 측정된 9개의 BOD 농도값을 사용하여 BOD 보정을 실시한 후, 2006년 6월 29일 23:00시부터 6월 30일 03:00시까지 측정된 4개의 BOD 농도값을 사용하여 BOD 검증을 실시하였다(Fig. 6(g) and (h)).

Region I ~ IV에서 실시한 수량과 BOD 농도에 대한 보정 및 검증결과의 통계적 수치들을 Table 1에 각각 나타내었으며, 수량과 BOD 농도의 매개변수 초기값과 보정을 통해 결정된 매개변수 값을 Table 2에 나타내었다. 수문의 검증 결과 모형효율계수가 0.69 이상을 보이고 있어 HSPF 모형이 안양천 유역에 적용가능하다고 판단된다. 하지만 4개 유역의 자료의 수가 수량 및 수질 측면에서 대부분 부족하며 특히 Region IV의 경우 수량자료는 SWMM의 모의값을 사용하였으므로 전반적으로 결과값을 이해하는 데에는 신중할 필요가 있다. 따라서 향후 많은 자료를 확보하여 보다 정교하게 구축하는 작업이 필요하다.

## 5. 현황 파악

### 5.1 물순환

보정과 검증을 마친 모형을 사용하여 안양천 유역의

과거 물순환 모의를 수행하였다. 1996년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 10년 동안 일(日)단위 연속유출 모의를 실시하여 상류(출구점: 옷우물표)·중류(출구점: 기아대교)·하류(출구점: 고척교) 및 안양천 제1지류 유역에 대한 각 요소별 10년 평균값을 산출하였다(Table 3, Fig. 7). HSPF 모형의 물순환 모의도는 Fig. 8과 같으며 물수지 방정식은 Eqs. 5~8과 같다.

$$\text{Prec.} = \text{total ET} + \text{direct runoff} + \text{base runoff} + \text{deep percolation} + \Delta s \quad (5)$$

$$\text{Total ET} = \text{interception evaporation} + \text{upper zone ET} + \text{lower zone ET} + \text{groundwater ET} \quad (6)$$

$$\text{Direct Runoff} = \text{surface outflow} + \text{interflow outflow} \quad (7)$$

$$\Delta s = \text{interception storage} + \text{surface detention storage} + \text{interflow storage} + \text{upper zone storage} + \text{lower zone storage} + \text{groundwater storage} \quad (8)$$

물순환 모의결과 하류 유역의 10년 평균 강수량이 1419.5 mm로 상류 유역의 1331.7 mm, 중류 유역의 1355.6 mm 보다 각각 87.8 mm, 63.9 mm 많은 강수량을 보이고 있으며 강수량 대비 직접유출량 비율은 상류 유역 42.5 %, 중류 유역 44.0 %, 하류 유역 56.9 %, 침투량 비율은 상류 유역 22.3 %, 중류 유역 15.0 %, 하류

Table 1. Calibration and Verification Results

Category		Model Efficiency	RMSE	RMAE	
Quantity	Region I	Calibration	0.76	0.01 cms	0.15
		Verification	0.71	0.02 cms	0.19
	Region II	Calibration	0.82	0.66 cms	1.25
		Verification	0.69	0.05 cms	2.28
	Region III	Calibration	0.94	0.24 cms	0.17
		Verification	0.83	0.30 cms	0.19
	Region IV	Calibration	0.97	0.20 cms	0.22
		Verification	0.98	0.43 cms	0.18
BOD Concentration	Region I	Calibration	-	2.95 mg/L	0.48
		Verification	-	0.94 mg/L	0.22
	Region II	Calibration	-	1.66 mg/L	0.15
		Verification	-	1.46 mg/L	0.22
	Region III	Calibration	-	9.25 mg/L	0.43
		Verification	-	9.89 mg/L	0.39
	Region IV	Calibration	-	19.44 mg/L	0.21
		Verification	-	49.23 mg/L	0.40

Table 2. Initial and Calibrated Values of Parameters

Classification of Parameter		Parameter	Initial Value	Calibrated Value
Hydrology Parameters	PERLND	LSUR (ft)	150	-
		SLSUR (ft/ft)	0.15106	-
		FOREST	0, 1	-
		LZSN (in)	4 ~ 6.5	2 ~ 4.5
		INFILT (in/hr)	0.16	0.005 ~ 0.06
		KVARY (1/in)	0	-
		AGWRC	0.98	0.97 ~ 0.99
		PETMAX (deg. F)	40	-
		PETMIN (deg. F)	35	-
		INFEXP	2	-
		INFILD	2	-
		DEEPPFR	0.1	-
		BASETP	0.02	-
		AGWETP	0	-
		CEPSC (in)	0.1	-
		UZSN (in)	1.128	0.12 ~ 0.42
		NSUR	0.2	-
		INTFW	0.75	0.5 ~ 3
		IRC	0.5	0.4 ~ 0.85
	LZETP	0.1	-	
	IMPLND	RETSC (in)	0.1	-
		LSUR (ft)	150	-
		SLSUR (ft/ft)	0.15106	-
RCHES	LEN (mi)	0.22 ~ 1.78	-	
	DELTH (ft)	19 ~ 198	-	
	STCOR (ft)	3.2	-	
	KS	0.5	-	
	DB50 (in)	0.001	-	
BOD Concentration	OX-GENPARM	KBOD20 (1/hr)	0.004	0.0001 ~ 0.03
		TCBOD	1.047	0.02 ~ 2.5
		KODSET (ft/hr)	0.027	0.0004 ~ 0.09
	OX-BENPARM	SUPSAT	1.15	-
		BENOD (mg/m <sup>2</sup> .hr)	50	-
		TCBEN	1.074	-
		EXPOD	1.22	-
		BRBOD(1) (mg/m <sup>2</sup> .hr)	0.001	-
		BRBOD(2) (mg/m <sup>2</sup> .hr)	0.001	-
	OX-REAPARM	EXPREL	2.82	-
		TCGINV	1.024	-
		REAK (1/hr)	0.2	-
		EXPRED	- 1.673	-
	OX-INIT	EXPREV	0.969	-
		DOX (mg/L)	12.8	-
BOD (mg/L)		3.5	-	
	SATDO (mg/L)	13.5	-	

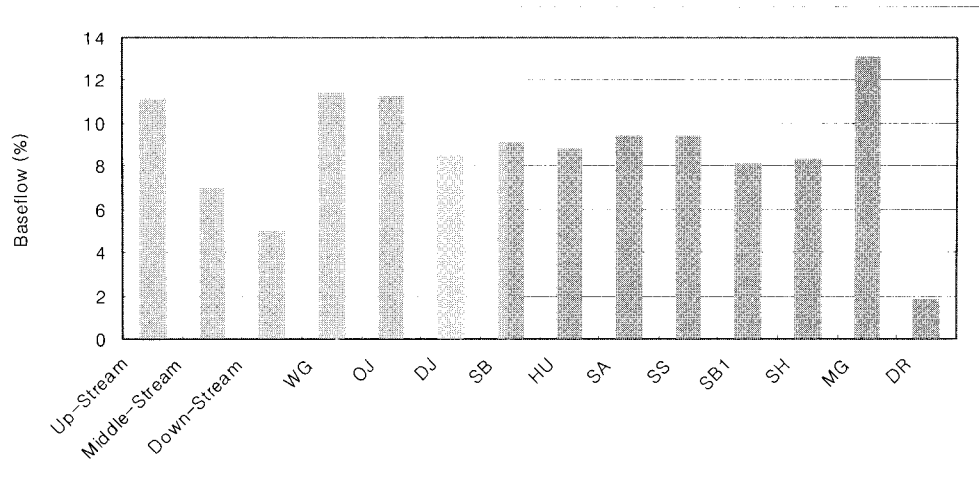
유역 14.3 %, 기저유출량 비율은 상류 유역 11.1 %, 중류 유역 7.0 %, 하류 유역 5.0 %를 나타내고 있다. 이하의 저류량 변화에서는 수문 매개변수 추정시 상부층 저류용량(UZSN)과 하부층 저류용량(LZSN)이 높은 값으로 추정된 Region III(하류), Region I(상류), Region

II(중류) 순으로 큰 저류량 변화를 보이고 있다.

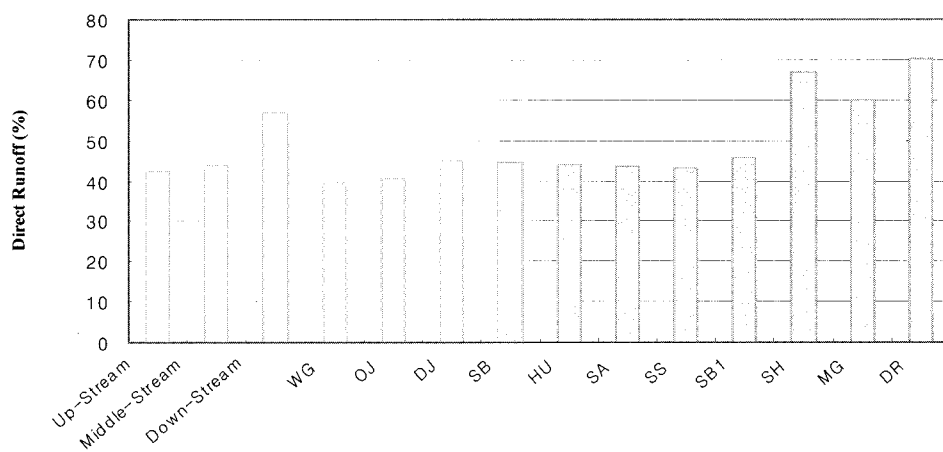
안양천 제1지류 유역의 물순환 모의결과에서는 안양천 하류에 속하는 도림천, 시흥천, 목감천 유역에서 강수량 대비 60 % 이상의 직접유출량 비율을 나타내고 있으며, 특히 모든 하천이 부분 및 전면 복개되어 유역

Table 3. Simulation Results of Hydrologic Cycle and BOD Load for 10 Years (1996~2005)

Component		Watershed	Up-stream	Middle-stream	Down-stream	WG	OJ	DJ	SB
Water Quantity	Precipitation (mm)		1331.7 (100 %)	1355.6 (100 %)	1419.5 (100 %)	1331.7 (100 %)	1331.7 (100 %)	1331.7 (100 %)	1331.7 (100 %)
	Total ET (mm)		636.8 (48.6 %)	648.6 (47.8 %)	566.6 (39.9 %)	629.6 (48.1 %)	632.3 (48.3 %)	642.2 (49.0 %)	632.3 (48.2 %)
	Infiltration (mm)		291.2 (22.3 %)	203.5 (15.0 %)	203.0 (14.3 %)	296.2 (22.7 %)	294.4 (22.6 %)	255.7 (19.6 %)	264.5 (20.3 %)
	Direct runoff (mm)		574.8 (42.5 %)	596.9 (44.0 %)	807.8 (56.9 %)	532.9 (39.4 %)	547.8 (40.5 %)	611.2 (45.2 %)	601.3 (44.5 %)
	Baseflow (mm)		149.0 (11.1 %)	94.5 (7.0 %)	71.0 (5.0 %)	152.7 (11.4 %)	151.3 (11.3 %)	114.4 (8.5 %)	122.3 (9.1 %)
	Deep percolation (mm)		54.9 (4.1 %)	32.7 (2.4 %)	80.6 (5.7 %)	56.2 (4.2 %)	55.7 (4.2 %)	36.9 (2.8 %)	37.4 (2.8 %)
	Change in storage (mm)		-83.7 (-6.4 %)	-17.1 (-1.3 %)	-106.5 (-7.5 %)	-39.7 (-3.1 %)	-55.4 (-4.3 %)	-73.0 (-5.4 %)	-61.5 (-4.6 %)
Water Quality	Average concentration (mg/L)		3.3	9.0	15.0	11.6	13.3	35.4	10.8
	Total daily load (kg/day)		203.8	10,892.2	21,851.7	64.5	68.9	92.5	112.8
	Unit load (kg/ha/year)		55.4	312.72	354.5	62.3	59.0	63.3	40.0
Component		Watershed	HU	SA	SS	SB1	SH	MG	DR
Water Quantity	Precipitation (mm)		1340.8 (100 %)	1331.7 (100 %)	1528.9 (100 %)	1331.7 (100 %)	1,537.9 (100 %)	1463.8 (100 %)	1,537.9 (100 %)
	Total ET (mm)		630.4 (47.0 %)	612.3 (46.7 %)	705.5 (46.1 %)	660.1 (50.4 %)	413.3 (27.8 %)	485.9 (32.8 %)	415.4 (27.9 %)
	Infiltration (mm)		265.3 (19.8 %)	267.2 (20.5 %)	312.4 (20.4 %)	253.5 (19.4 %)	260.5 (17.8 %)	310.3 (20.9 %)	137.9 (9.4 %)
	Direct runoff (mm)		595.5 (44.0 %)	587.1 (43.5 %)	659.6 (43.1 %)	621.2 (45.8 %)	1,042.8 (66.9 %)	886.7 (60.0 %)	1094.4 (70.3 %)
	Baseflow (mm)		118.6 (8.8 %)	126.6 (9.4 %)	143.5 (9.4 %)	109.1 (8.1 %)	127.8 (8.3 %)	195.3 (13.1 %)	27.9 (1.8 %)
	Deep Percolation (mm)		35.1 (2.6 %)	35.5 (2.6 %)	41.1 (2.7 %)	40.4 (3.0 %)	40.6 (2.7 %)	23.4 (1.6 %)	26.3 (1.7 %)
	Change in storage (mm)		-33.9 (-2.5 %)	-29.7 (-2.3 %)	-20.8 (-1.4 %)	-99.1 (-7.3 %)	-86.5 (-5.6 %)	-109.8 (-7.4 %)	-26.1 (-1.7 %)
Water Quality	Average concentration (mg/L)		5.4	1.1	1.0	13.0	1.7	18.0	2.2
	Total daily load (kg/day)		594.0	68.4	109.3	63.2	49.7	4559.0	292.8
	Unit load (kg/ha/year)		48.7	30.9	30.3	42.3	55.6	296.8	25.7



(a) Baseflow



(b) Direct runoff

Fig. 7 Comparisons of Baseflow and Direct Runoff Ratios of 12 Sub-watersheds

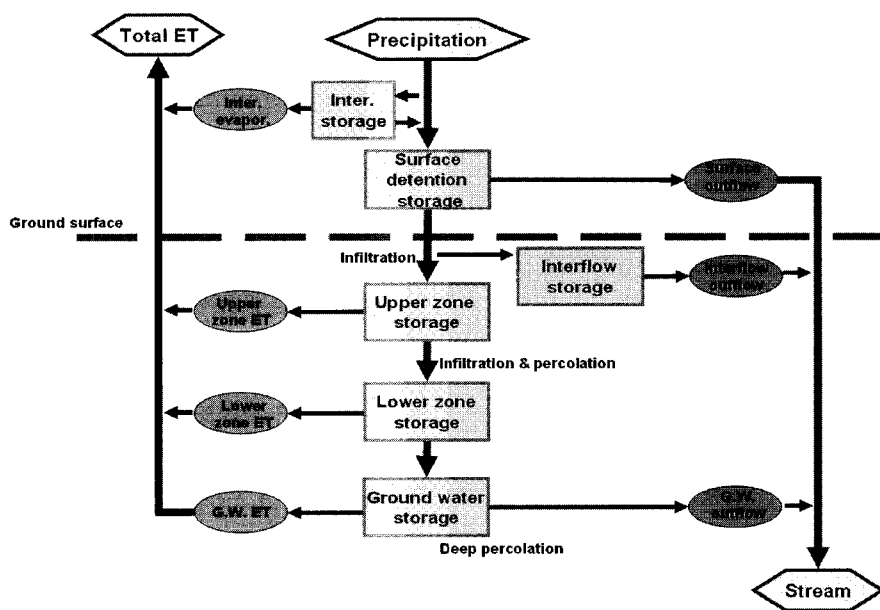
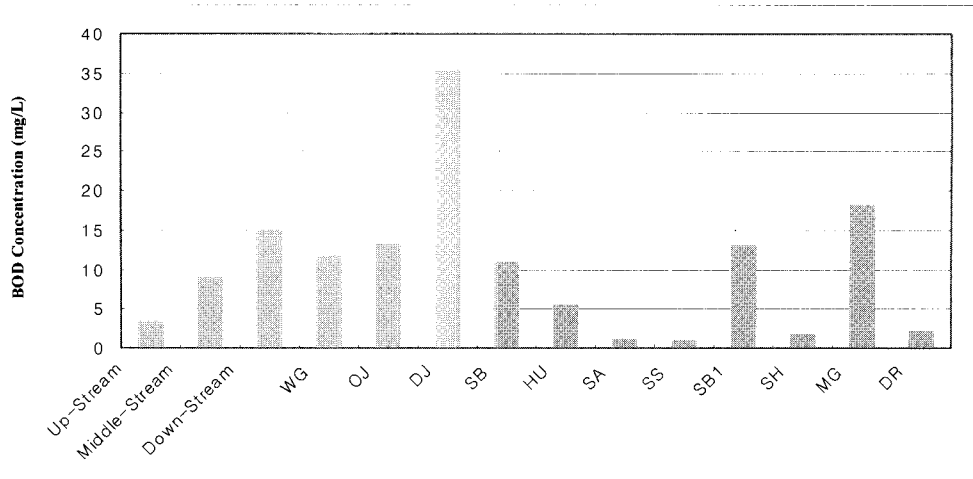
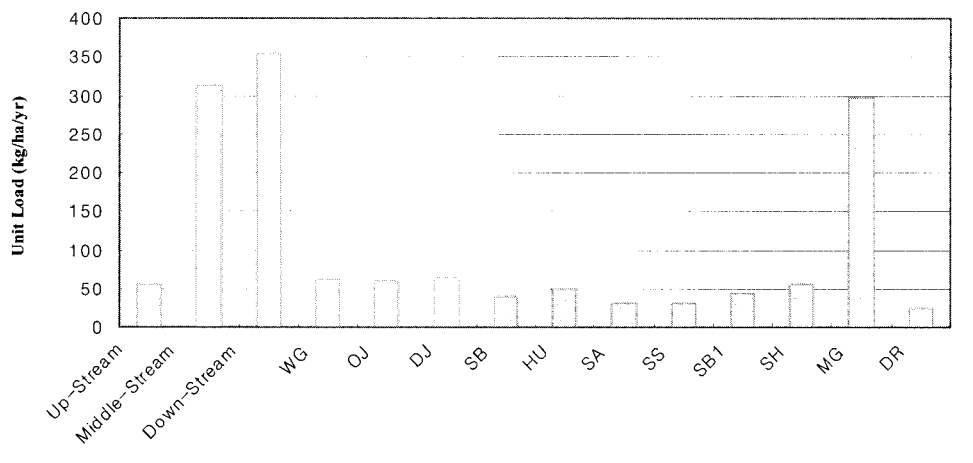


Fig. 8. Hydrologic Cycle Diagram of HSPF (Bkicknell et al., 2001)



(a) BOD concentration



(b) Unit loads

Fig. 9. Comparisons of BOD Concentration and Unit loads of 12 Sub-watersheds

전체의 62.8 %가 도시 지역에 속하는 도림천 유역의 경우 직접유출량 비율이 70.3 %, 기저유출량 비율이 15 %를 보였다. 이 비율은 전체 유역의 7 %만이 불투수지형인 왕곡천의 직접유출량 비율 39.4 %, 기저유출량 비율 11.4 %에 비해 직접유출량 비율은 30.9 %가 높고, 기저유출은 9.9 % 낮은 결과를 보이므로 도시화로 인해 물순환이 심각하게 왜곡되어있음을 알 수 있다.

## 5.2 오염물질

보정 및 검증을 마친 HSPF 모형을 이용하여 BOD 농도 및 부하량을 모의한 결과를 평균농도, 총부하량, 단위면적당 1년 동안 발생하는 원단위를 나타내면 Table 3과 같고 그래프로 제시하면 Fig. 9와 같다. 일반적으로 BOD 농도와 단위면적당 연부하량은 하류로 갈수록 크게 나타남을 알 수 있다. 하류의 도시화로 인한 비점오염원의 유입량의 증가와 합류식 하수관거로 인한 월류수의 유입 등이 원인으로 작용하기 때문이다. 특히

중류 기아대교 상류에 위치한 안양하수처리장과 목감천에 2006년 9월에 준공한 역곡하수처리장으로 인해 오염 부하량이 많이 증가했음을 알 수 있다. 유출수의 농도는 전 유역이 합류식 하수관거 지역인 당정천(35.4 mg/L)이 가장 높게 나타났으며 역곡천 상류 분구, 시흥 과림 분구 등과 같은 하수 미처리 지역이 많아서 평균적으로 유출수의 농도가 높은 목감천 유역(18.0 mg/L)이 다음으로 높게 나타났다. 도시지역 비율이 10 %이내인 삼성천 유역(1.0 mg/L)과 상류가 산간지역인 수암천 유역(1.1 mg/L)이 가장 낮게 나타났다. 도림천과 시흥천의 경우 높은 도시화 비율에 비하여 유출수가 낮은 농도를 보였는데 이는 강우시의 월류수가 포함된 유출량의 측정이 이루어지지 않아서 검·보정이 정확하게 이루어지지 않은 결과이므로 본 결과분석에서는 제외하였다.

일총부하량은 유출량과 농도의 곱으로 산정된 값으로 유역으로부터 하천으로 흘러들어가는 일평균총량이다. 하수처리장이 있는 목감천(2,559.0 kg/day)이 가장

높은 값을 보였으며 유역면적이 넓은 학의천(594.0 kg/day), 산본천(112.8 kg/day)과 삼성천(109.3 kg/day), 당정천(92.5 kg/day)이 높은 값을 보였다. 반면 유역면적이 작은 왕곡천, 오진천, 수암천, 삼봉천 등이 작은 값을 보였다. 이러한 결과는 향후 제정될 오염총량제를 위한 계획 수립에 활용될 수 있다.

단위 면적당 발생하는 연부하량은 목감천을 제외하고는 대부분 30 ~ 64 kg/ha/year에 분포하였다. 유출수의 농도와 같은 경향을 보이는데 삼성천과 수암천이 가장 낮은 값을 보였으며 당정천(63.3 kg/ha/year)이 가장 높은 값을 보였다. 특히 왕곡천과 오진천, 삼봉천은 도시화 비율이 각각 7.0 %, 7.7 %, 11.5 %에 불과한 상류 유역임에도 불구하고 비교적 높은 오염물질 농도와 원단위를 보였다. 따라서 이를 제어할 수 있는 적절한 대안이 요구된다. 또 도시화 비율이 높고 전 유역이 합류식 하수관거인 당정천은 높은 농도와 원단위를 보이므로 하수도 정비는 물론 고도처리가 가능한 소규모 하수처리장과 같은 근본적인 대책이 반드시 요구된다. 목감천은 일최대 50,000 m<sup>3</sup> 처리규모의 하수처리장이 있음에도 불구하고 아직도 미처리된 하수가 지속적으로 유입되고 있는 실정으로 인해 농도와 부하량, 원단위에서 모두 높은 값을 보였다. 따라서 지속적인 하수관거 정비를 위한 투자가 필요하다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 최근 30년 동안 급격한 도시화가 이루어진 안양천 유역에서 발생하고 있는 왜곡된 물순환을 정량적으로 파악하기 위해 HSPF 모형을 이용하여 모의하였다. 먼저 HSPF 모형의 매개변수에 대해 민감도 분석을 수행하여 수량(침투유량, 총유출량)과 BOD 부하량(총부하량, 침투유량)에 민감한 매개변수(수량: LZSN, UZSN, INFILT, INTFW, IRC, AGWRC; 수질: KODSET, TCBOD, KBOD20)들을 선정 후 이를 조정하여 보정과 검증을 수행하고 과거 10년(1996년 ~ 2005년) 간의 연속유출모의를 실시하였다. 특히 다양한 특성을 가지고 있는 안양천 유역을 물리학적 특성(경사도)과 사용한 기상자료에 따라 4개의 지역으로 구분하여 매개변수를 산정하고 검정을 수행하여 모형의 정확도를 향상시켰다. 이렇게 구축된 모형을 이용하여 안양천 유역의 중유역별로 물순환과 BOD 농도와 일평균 부하량, 연발생 원단위를 정량적으로 제시하였으며 중유역별 특성을 분석하여 제시하였다. 모의 결과 하류로 갈수록 도시화 비율이 높으며 이로 인해 기저유출량은 11.1 % → 5.1 %로 감소하고 직접유출량은 42.5 % →

56.9 %로, BOD 농도는 3.3 mg/L → 15.0 mg/L로, 일총부하량 203.8 kg/day → 10,892.2 kg/day로, 단위면적당 발생하는 원단위는 55.4 kg/ha/year → 354.5 kg/ha/year로 증가하였다.

이러한 연구는 향후 물순환 건전화에 위한 수자원 계획을 수립하는데 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(70%)과 Safe and Sustainable Infrastructure Research의 연구비 지원(30%)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- 노성진, 김현준, 장철희 (2005). "청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제8호, pp. 645-653.
- 박남희, 김철 (2002). "황룡강 유역의 장기유출분석을 위한 HSPF 모형 연구." **2002년 한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)**, 한국수자원학회, pp. 170-175.
- 박민지, 권형중, 김성준 (2005). "HSPF 모형을 이용한 토지피복변화에 따른 유출 변화 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 495-504.
- 방기웅, 이준호, 유명진 (1997). "도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구." **한국수질보전학회지**, 제13권, 제1호, pp. 79-99.
- 신문주 (2006). SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안. 석사학위논문, 서울대학교.
- 심명필 (2003). **지속가능한 하천수 개발**. 인하대학교, 과학기술부.
- 이기영 (2003). **안양천 살리기 종합대책**. 경기개발연구원, 경기도.
- 이기영 (2005). **효율적인 하천 유지관리 방안**. 경기개발연구원.
- 이길성, 정은성, 김영오 (2006a). "도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근방법." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 161-178.
- 이길성, 정은성, 김영오, 조탁근 (2006b). "도시유역의 건전화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 1. 방법론." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제

- 39권, 제11호, pp. 935-946.
- 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006c). "도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 947-960.
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005). "PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안 II 모형의 적용." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 437-441.
- 이삼희 (2001). **안양천 살리기 종합계획**. 한국건설기술연구원, 안양시.
- 이상호, 이정민 (2006). "물 환경 건천화를 위한 도시하천의 물 순환 모의 (II)." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제5호, pp. 815-823.
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성 (2005). "WEP 모형을 이용한 도림천 유역 물순환 모의." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 449-460.
- 이정민, 이상호, 이길성 (2006). "물 환경 건천화를 위한 도시하천의 물 순환 모의 (I) 안양천 유역." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제2호, pp. 349-357.
- 정은성, 이길성, 신문주 (2006). "SWAT 모형과 EMC 산정결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질 특성." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제4호, pp. 649-657.
- 조효섭, 정관수, 김재한 (2003). "GIUH 적용을 위한 DEM 격자크기 및 Threshold Area의 민감도 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 799-810.
- 현대 Eng. (2005). **안양천 유역종합 치수계획**. 서울국토지방관리청.
- Albek, M., Ogutveren, U.B., and Albek, E. (2003). "Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed(Turkey) with HSPF." *Journal of Hydrology*, Vol. 285, pp. 260-271.
- AQUA TERRA (2004). *BASIN/HSPF Training Handbook*. U.S. EPA.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobes, T.H., and Donigian, A.S. Jr. (2001). *Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- Brun, S.E., and Band, L.E. (2000). "Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed." *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 24, pp. 5-22.
- Burian, S.J., Streit, G.E., and Brown, M.J. (2001). "Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of Nitrogen compounds." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 16, pp. 467-479.
- 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, No. 3, pp. 621-628.
- Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, M., and Bao-Hua, X. (2004). "HSPF simulation of runoff and sediment loads in the Upper Changjiang River Basin, China." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 130, No. 7, pp. 801-815.
- Johnson, M.S., Coon, W.F., Mehta, V.K., Steenhuis, T.S., Brooks, E.S., and Boll, J. (2003). "Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: A comparison of HSPF and SMR." *Journal of Hydrology*, Vol. 284, pp. 57-76.
- Lee, K.S., and Chung, E.S. (2007). "Hydrological effects of climate change, groundwater withdrawal, and land use in a small Korean watershed." *Hydrological Processes*, Vol. 21 (In press).
- Mostaghini, S., Park, S.W., Cook, R.A., and Wang, S.Y. (1997). "Assessment of management alternative on a small agricultural watershed." *Water Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 1867-1878.
- 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.
- Singh, V.P. (1997). *Kinematic Wave Modelling in Water Resources*. John Wiley & Sons.
- Tshihrintizis, V.A., and Hamid, R. (1998). "Runoff quality prediction of small urban catchments using SWMM." *Hydrological Processes*, Vol. 12, No. 2, pp. 311-329.
- U.S. EPA (2001). *Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*.

(논문번호:07-08/접수:2007.01.25/심사완료:2007.07.26)