

## SWAT 모형과 EMC 산정결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질 특성

정은성<sup>†</sup> · 이길성 · 신문주\*

서울대학교 지구환경시스템공학부

\*(주)동부엔지니어링 수자원부

## Characteristics of Water Quantity and Quality of the Anyangcheon using SWAT Model and Calculation Result of EMC

Chung, Eun-Sung<sup>†</sup> · Lee, Kil Seong · Shin, Mun-Joo\*

Department of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

\*Department of Water Resources, Dongbu Engineering Corporation

(Received 23 February 2006, Accepted 22 June 2006)

### Abstract

Characteristics of water quantity and quality of the Anyangcheon were analyzed through many field measurements and the distributed hydrologic simulation model, Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Event mean concentrations (EMCs) and baseflow mean concentrations were calculated from the data and the daily runoff were simulated by SWAT. The runoff was divided into the direct runoff and the baseflow. Using those values and quantity and quality data of release from the wastewater treatment plant (WWPT), unit loads of BOD, COD, SS, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, and Dis-P were derived. EMCs of BOD and SS were even higher than the baseflow mean concentrations. The total runoff from October to April (7 months) of 2004 was just 13.5%, since the rainfall usually is concentrated in summer season. Furthermore BOD and SS were loaded during the event by 50.9% and 70.9%, respectively and over three quarters of total COD, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, and Dis-P were flowed into the Anyangcheon during the remaining period. Therefore, the efficiency of WWPT for COD, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, and Dis-P should be intensified from Oct. to Apr. and the runoff quality management of BOD and SS should be planned during the summer season.

**keywords** : Anyangcheon, Event mean concentration (EMC), Soil and water assessment tool (SWAT), Unit loads, Wastewater plant treatment (WWPT)

### 1. 서론

대부분의 도시유역은 이중배수(dual drainage) 시스템으로 하천의 물은 자연적인 하천 시스템을 통한 유출수(runoff)와 인위적인 하수도 시스템을 통한 하수 또는 하수처리수로 구성되어 있다. 일반적으로 전자에는 비점오염물질(non-point source pollutant)이 후자에는 점오염물질(point source pollutant)이 포함된다. 점원 오염물질은 대부분 하수처리장의 방류수 및 미차집 하수 등으로 구성되며 배출특성은 시간별로는 차이가 있으나 평균적으로 일간 배출량 변화는 강우시나 비강우시에 큰 변동이 없다. 반면 비점오염물질은 산림, 토지, 도시지역, 건설지, 농경지, 도로, 지붕의 대기오염 강하물 등 공간적으로 분포하고 있으므로 강우시 빗물과 함께 유출되기 때문에 일간, 계절간 배출량 변화가 크며 예측과 정량화가 어렵다. 국내의 경우 수질개선을 위해 많은 투자와 노력에도 불구하고 더 이상의 획기적인 개선이 이루어지

지 않는 이유의 하나는 점오염원의 관리가 이미 어느 정도 이루어졌으나 비점오염원에 대한 관리가 거의 이루어지지 않고 있기 때문이다. 국내에서 진행된 비점오염에 관한 연구에 의하면 전체오염 중 비점오염이 차지하고 있는 비중은 약 20~50% 정도로 추정하고 있으나 관리부실에서 오는 유사 비점오염원을 고려할 때 더욱 큰 비중을 차지하고 있을 것으로 추정되고 있다(권, 1998).

이러한 비점오염의 관리를 위한 하천수의 특성에 대한 연구는 주로 실측을 통한 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)와 원단위(unit load)를 산정하거나 유출 모의모형을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 실측을 통한 연구는 크게 하수처리장이나 저수지 등을 포함하는 특정 대상 유역과 도시, 농촌, 산지, 혼합 지역 등 특성화된 토지이용 지역에 대해 비점오염 부하특성을 제시하는 연구로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 문 등(1999), 이 등(2001a)은 저수지, 최 등(1999)이 서울시 지역, 배 등(2001)이 승기 하수처리장이 포함된 유역과 남동저수지 유역에 대해, 김 등(2002a)는 경안천 유역에 대해 제시한 연구 등이 있었으며, 후자의 경우는 이(1991)가 농촌지역에 대해, 차 등(1999)과

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
cool77@snu.ac.kr

이 등(2001b)이 토지이용별로 측정하였으며, 유 등(2000)이 새만금 지역의 도시, 농촌지역에 대해, 김 등(2002b)는 농촌지역에 대해, 배 등(2002)는 단독주택지역, 공동주택지역, 상업지역에 대해, 김 등(2003)은 농지 및 임야지역에 혼합되어 있는 지역에 대해, 신 등(2004)은 도시지역의 고밀도 아파트지역, 단독주택지역, 상업지역, 공업지역 자동차도로, 주차장에 대해, 여 등(2005)은 도시지역, 농촌/임야 혼합지역, 임야지역에 대해 연구한 바가 있다. 국외의 연구로는 Collins (1991), Freedman 등(1980), Hartigan 등(1983)이 도시화 지역과 비도시화 지역을 구분하여 제시하였으며, Corbett 등(1997)은 산림유역과 도시유역에 대해, Wu 등(1998)과 Characklis 등(1997)는 측정자료를 이용한 것 등이 있다. 모의모형을 이용한 경우는 방 등(1997)은 ILLUDAS-POLL, Mostaghini 등(1997)은 AGNPS, Tsihrintzis 등(1998), Burian 등(2001)이 SWMM을 이용한 연구 등이 있다.

도시하천인 안양천의 경우 최근 20~30년간 도시화가 급격히 이루어지고 인구가 급속히 증가함으로 인해 유역의 물 및 오염물질 순환이 많이 왜곡되었다. 이를 해결하기

위해 이수, 치수, 수질 등 다양한 측면에서 접근하려는 연구가 많이 수행되었다(임, 2001; 이, 2003, 2004; 이 등, 2004, 2005a, 2005b, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d). 특히 정 등(2003)은 산지소하천과 도시하천의 오염물질의 유출특성을 파악하기 위해 설마천과 안양천에서 여러 강우사상에 대해 현장측정을 수행하여 EMCs를 산정하여 비교한 바 있다. 하지만 안양천 유역의 오염물질에 대한 특성을 실측자료와 정밀한 수량모의와 함께 수질측정 결과를 이용하여 분석이 이루어진 경우는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 전형적인 도시하천인 안양천에 대해 유출수, 하수처리장 방류수를 포함하는 하천수의 특성을 강우시와 비강우시의 실측자료를 토대로 산정된 EMC와 대상유역에 구축된 수문모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 제시하였다.

## 2. 대상유역

대상유역은 Fig. 1과 같이 기아대교를 유역 출구점으로

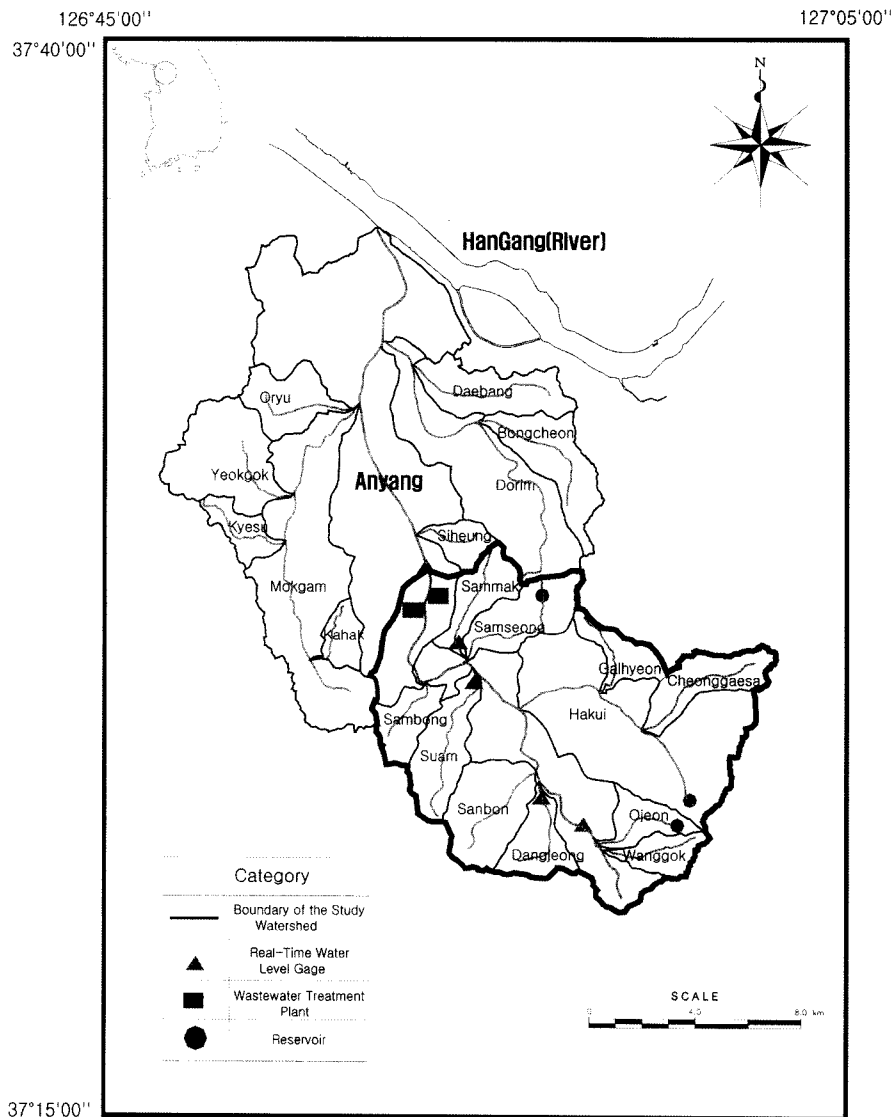


Fig. 1. Description of the study watershed.

한 안양천 증상류 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 및 오전(57,000 m<sup>3</sup>), 백운(1,600,000 m<sup>3</sup>), 삼성(40,000 m<sup>3</sup>) 등 3개의 저수지와 각각 일최대 300,000 m<sup>3</sup>를 처리하는 박달, 석수 하수처리장을 포함하고 있다. 본류의 유로연장은 17.91 km이고 유역면적은 127.13 km<sup>2</sup>에 이르며 경기도의 왕, 안양, 군포, 과천시 등이 포함되며 2003년 기준으로 약 98만명이 거주하고 있다. 대상유역의 토지이용은 2000년 기준으로 Table 1과 같으며 산림이 약 51.6%(침엽수림 18.3%, 혼합수림 33.3%)이며 도시지역이 38.3%, 농업지역이 7.5%로 구성되어 있다. 도시지역 비율이 1975년에 7.8%에서 2000년에는 38.3%로 25년동안 무려 30.5%가 증가하였다. 대상유역의 지하수 취수량은 2000년 기준으로 31.4 mm/년(=연 총사용량/유역면적)이며 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 건기에 지하수위가 매우 떨어져 있다. 유역의 경사는 Table 1과 같이 학의천, 당정천을 제외하고는 대부분 약 1/100보다 크므로 비교적 가파르다. 유역의 토양은 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 윗물교, 삼막천의 삼막3교, 당정천의 금정교, 수암천 하류에 수자원

의 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. 대상유역에 대한 상세한 정보는 이(2004)에 수록되어 있다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 연구내용

본 연구는 크게 세 가지로 구성되는데, 강우로 인한 유출수의 평균농도인 EMC의 산정, SWAT 모형을 이용한 물순환 파악, 산정된 EMC와 수량분석 결과를 활용한 원단위의 산정이다.

EMC를 산정하기 위해 우선 비강우시인 2005년 11월 2일 오후 5시부터 2005년 11월 3일 오후 5시까지 1시간 단위로 측정된 수량 및 수질자료와 하수처리장의 방류실적을 이용하여 비강우시 유출량의 평균농도를 산정하였다. 또 강우시인 2005년 7월 3일에 발생한 총강우량이 20 mm인 강우에 대해 수량과 수질을 측정 후 비강우시의 값을 제외하여 강우로 인한 유출수의 평균농도, 즉 EMC를 산정하였다. 수량 특성은 분포형 수문모형인 SWAT 모형을 구축하여 2004년의 일유출량을 도출하였다.

원단위를 산정하기 위해서는 강우로 인한 유출수의 원단위와 비강우시 기저유출수의 원단위 및 하수처리장으로부터의 하천으로 유입되는 원단위를 산정하여 모두 더한 값으로 하였다. 강우로 인한 원단위는 SWAT 모형의 일 유출량 자료를 이용하여 강우로 인해 증가된 유출량을 모두

Table 1. Characteristics of the study watershed

Name of sub-watershed	Watershed area (km <sup>2</sup> )	Length of stream (km)	Slope	Elevation (EL. m)	Landuse (2000) (%)			Soil constituent (2000) (%)			Ground-water withdrawal (2000) (mm/year)
					Urban	Forest	Agricultural	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	6.96	81.51	9.43	16.8	25.2	58.0	84.5
Ojeon	4.26	2.85	1/30~1/60	163	7.65	77.48	11.38	16.0	25.6	58.4	70.1
Dangjeong	5.35	4.02	1/270 1/140~1/180	70	57.09	27.73	11.21	18.0	32.4	49.6	16.2
Sanbon	10.29	4.32	1/160	135	40.34	48.49	9.15	17.6	32.1	50.3	2.8
Hakui	44.58	9.26	1/410 1/140~1/160	127	22.82	57.47	15.7	16.5	32.9	50.6	44.8
Cheonggyesa	6.88	5.41	1/30~1/70	207	3.45	81.73	10.86	-	-	-	3.9
Galhyeon	4.12	3.73	1-80~1/90	109	10.95	53.99	29.19	-	-	-	69.6
Suam	8.07	6.49	1/90~1/40	169	18.90	72.61	6.29	18.8	46.2	35.0	1.9
Samseong	13.17	5.74	1/120 1/20~1/50	203	7.88	83.21	5.12	11.8	34.2	54.0	4.4
Sammak	5.39	4.63	1/120 1/10~1/50	184	12.76	71.17	8.16	13.3	34.3	52.4	1
Sambong	4.59	2.76	1/60~1/100	97	11.52	68.91	11.48	18.7	37.1	44.2	18

산정한 후 EMC와 곱하여 산정하였다. 또 나머지 기저유출수의 원단위는 기저유출수의 평균농도에 SWAT을 통해 모의된 유량을 곱하여 산정하였다.

### 3.2. SWAT

#### 3.2.1 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역모형으로 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, 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 유역 경계에 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. 많은 연구(이 등, 2006b; 신, 2006; 신 등, 2006)에서 다양한 국내유역에 대한 SWAT의 적용성을 인정받았으므로 이를 사용하였다.

#### 3.2.2 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 등(2005)은 DEM의 해상도에 따른 SWAT 모형 결과의 불확실성에 대하여 연구한 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 상대 오차도 점점 증가함을 확인하였고, 조 등(2003)은 수문모형에 적용을 위한 DEM 격자크기에 대해 연구한 결과 격자크기는 25 m × 25 m ~ 50 m × 50 m가 가장 적합함을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 모의시간의 효율성

과 모의결과의 정확성을 고려하여 격자크기를 30 m × 30 m로 하여 DEM을 구축하였다.

김(2003)은 수치개략토양도와 수치정밀토양도의 사용에 대해 연구한 결과 현장측정에 의해 정밀하게 제작되었고 미 농무성의 토양분류기준을 기초로 제작되었으며 실제 사용시 모의결과가 실측치에 유사한 수치정밀 토양도를 사용할 것을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 SWAT 모형에 사용될 토양입력자료를 구축하기 위해 농촌진흥청 농업과학기술원에서 발행한 2002년도 1/25,000의 수치정밀토양도와 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 m로 하였다.

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

이 밖에 지하수 취수량(한국수자원공사, 2001)과 2000-2004년의 수원기상청의 기상자료(강수량, 최고온도, 최저온도, 태양복사량, 풍속)에 대해 오전, 백운, 삼성저수지를 고려하여 구축하였다.

#### 3.2.3 검 · 보정

모형의 매개변수 민감도 분석은 이 등(2006b)의 결과를 사용하였는데 보정이 필요한 매개변수로는 침투유량과 총 유출량 측면에서 모두 민감한 SOL\_AWC(available water capacity of the soil layer), GW\_DELAY(groundwater deley 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 et al., 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 관측시간  $i$ 에서의 관측값,  $M_{ob}$ 는 관측값의 평균,  $Q_{sim,i}$ 는 관측시간  $i$ 에서의 모의값이다.

각각의 대상유역(중상류, 왕곡/오전천, 학의천, 수암천, 삼봉천, 삼성/삼막천, 삼봉천)에 대한 상세한 검 · 보정 결과는

신(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.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. EMC 산정

비점오염물질의 유출은 유출수량의 변화에 따라 매우 큰 농도 변화를 보인다. 그러므로 특정유역에서 강우사상에 의해 발생하는 비점오염물질의 평균농도를 나타내기 위해서는 다음 식 (4)와 같은 EMC를 사용한다(Sansalone et al., 1997).

$$EMC = \frac{\text{Pollutant mass}}{\text{Runoff volume}} = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \quad (\text{mg/L}) \quad (4)$$

여기서,  $Q_i$ 는 관측시간  $i$ 에서의 유출량( $\text{m}^3/\text{s}$ )이고,  $C_i$ 는 오염물질 농도( $\text{mg/L}$ )이다. EMC는 일반적으로 산출평균농도보다 높게 나타나는데 이는 강우 발생초기의 농도가 매우 높게 나타나는 초기세척효과(first flush effect) 때문이다(Sansalone et al., 2004).

대상유역의 출구점인 기아대교의 하천수는 Fig. 2와 같이 유역에서 흘러나오는 유출수와 안양 하수처리장에서 흘러나오는 방류수로 구성되므로 유출곡선은 Fig. 3과 같다. 비강우시의 하천수에는 안양 하수처리장의 방류수와 기저유출수가 포함되고 강우시에는 안양 하수처리장의 방류수와 기저유출수에 강우로 인한 직접유출수까지 포함된다. 따라서 EMC를 산정하기 위해서는 건기의 하천수의 유량과 오염물질의 평균농도와 강우시의 유량과 오염물질의 평균 농도를 측정하여 강우로 인해 증가된 오염물질의 총량에 총 유출량을 나누어야 한다. 강우시의 수질측정 결과는 Fig. 4와 Table 2와 같고 2005년 11월 2일과 3일에 측정된 시간당 출구점의 유량과 수질을 측정된 결과는 Fig. 5이다.

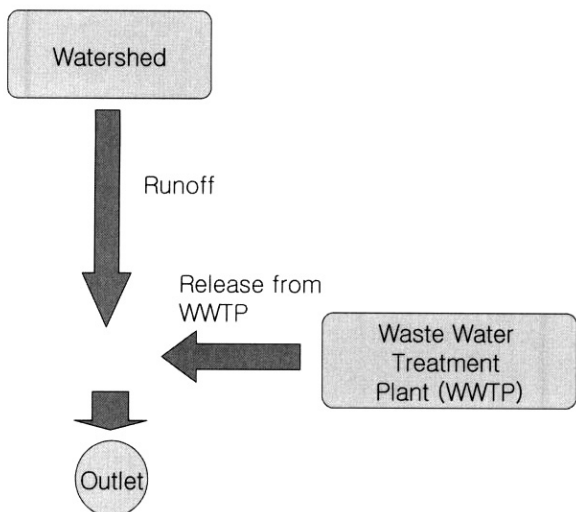


Fig. 2. Drainage system of the watershed.

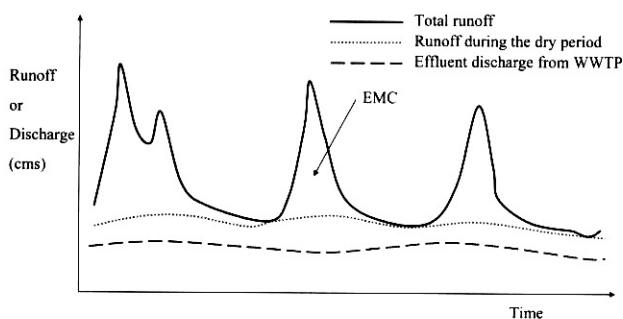
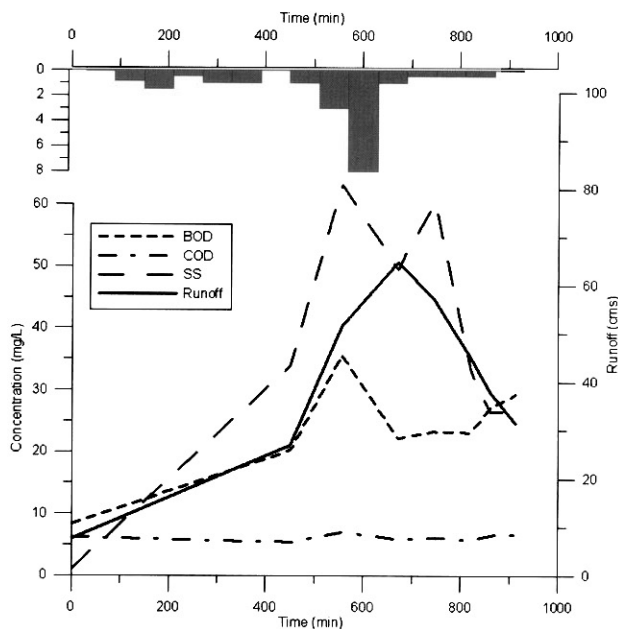
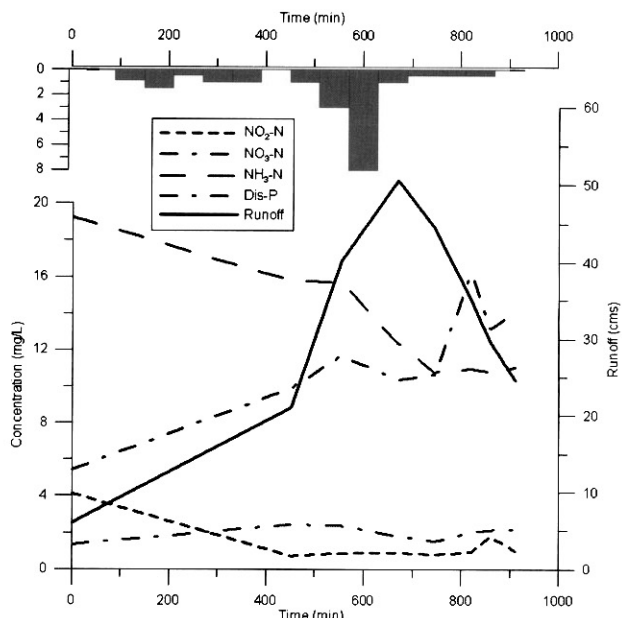


Fig. 3. Concept of EMC.



(a) BOD, COD, and SS

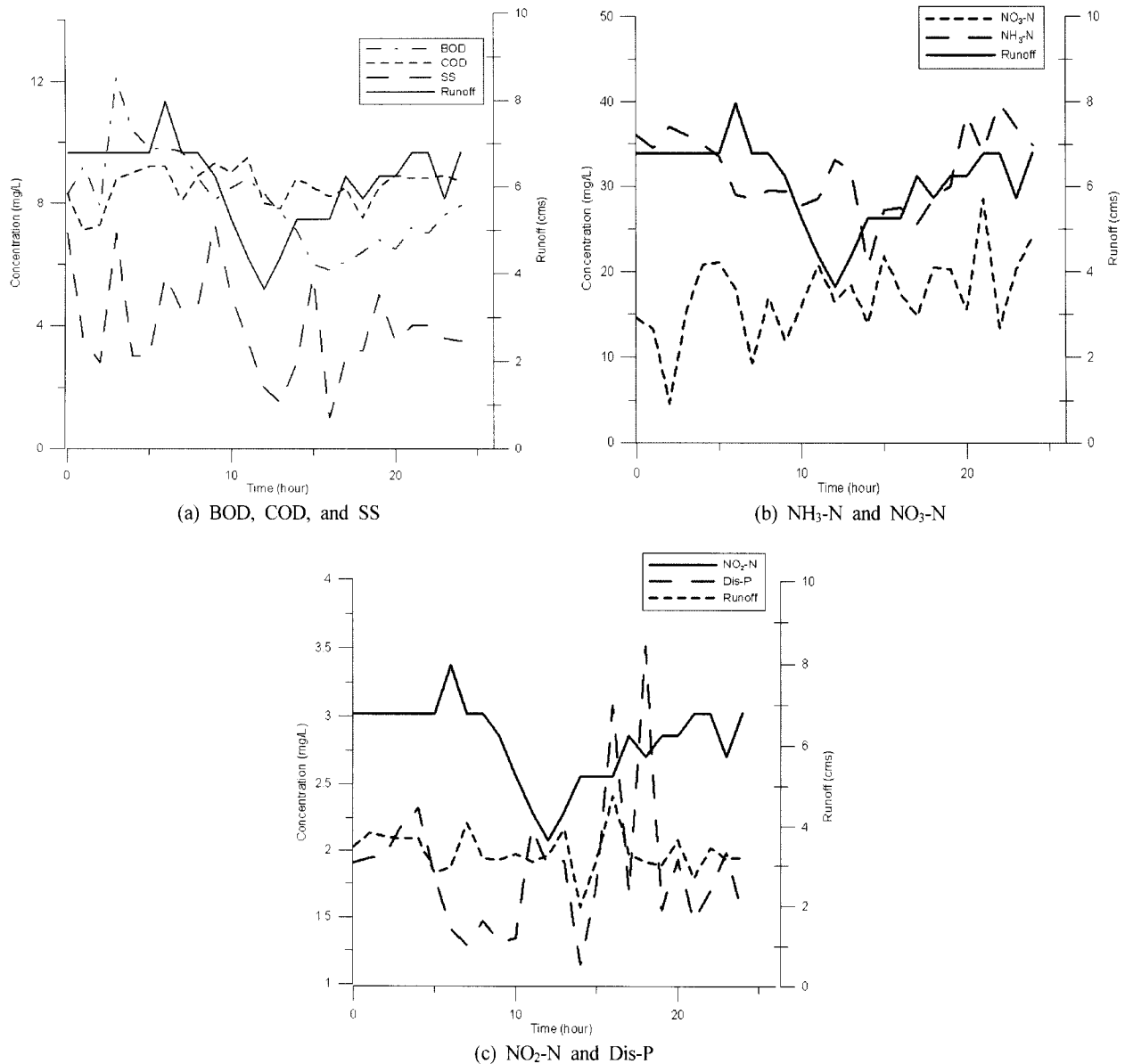


(b) NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N and Dis-P

Fig. 4. Hydrograph and pollutographs during the rainfall at the Kiadaegyo (bridge).

**Table 2.** Water quality data during the rainfall

Time (min)	Discharge (cms)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	DO (mg/L)	SS (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	Dis-P (mg/L)	
10:00	0	6.019	10.70	8.00	9.30	1.40	4.12	5.43	19.25	1.35
12:30	150	21.058	25.9	6.94	5.60	43.30	0.73	9.90	15.78	2.44
14:15	255	40.364	45.5	9.00	4.20	80.80	0.87	11.66	15.69	2.37
16:10	370	50.607	28.4	7.58	3.90	63.30	0.92	10.34	12.36	1.82
17:25	445	44.564	29.8	7.86	3.50	77.50	0.79	10.64	10.78	1.52
18:40	520	35.101	29.6	7.38	3.90	42.50	0.96	16.19	10.95	2.01
19:20	560	29.572	34.8	8.40	4.10	33.80	1.76	13.17	10.77	2.14
20:10	610	24.724	37.3	8.56	4.20	34.00	1.04	13.99	11.04	2.16
10:00	1440	7.062	6.20	5.60	7.60	5.00	6.25	6.81	22.41	4.24



**Fig. 5.** Hydrographs and pollutographs during no rainfall at the Kiadaegyo (bridge).

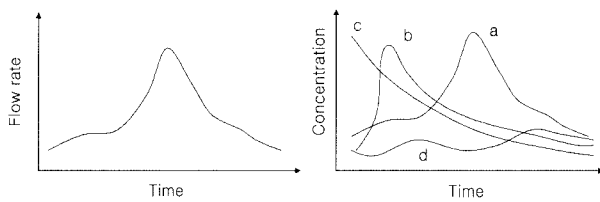
EMC는 이상과 같은 실측자료를 이용하여 Table 3과 같이 산정하였다. 오염물질 별 EMC는 BOD는 34.17 mg/L, COD는 7.20 mg/L, DO는 3.95 mg/L, SS는 55.00 mg/L, NO<sub>2</sub>-N은 2.27 mg/L, NO<sub>3</sub>-N은 2.24 mg/L, NH<sub>3</sub>-N은 14.16 mg/L, Dis-P는 2.06 mg/L이다. 이는 비강우시 하천수의 농

도보다 BOD는 425%, SS는 1,500% NO<sub>2</sub>-N은 123% 증가 하였으며 COD, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, Dis-P는 희석효과로 인해 감소함을 보였다.

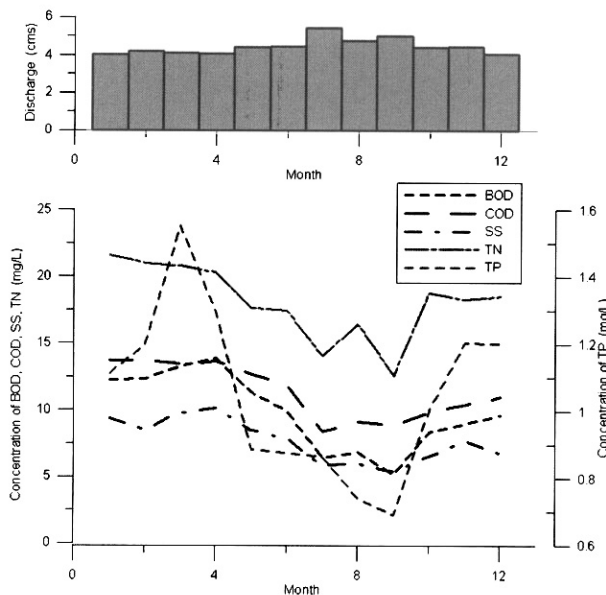
오염물질의 농도곡선(pollutograph)는 일반적으로 Fig. 6과 같은 형상을 나타낸다. a 형태는 농도분포 곡선이 정확히

**Table 3.** Results of EMC calculation

	Total loads		Net total loads (kg) ③=①-②	EMC (mg/L) ④=③/total volume	Pollutant concentration during the dry period (mg/L) ⑤	Ratio (%) ⑥=④/⑤
	In the rainfall (kg) ①	In no rainfall (kg) ②				
BOD	59,397.8	5,056.5	54,341.2	34.17	8.07	423
COD	16,800.0	5,352.2	1,1447.8	7.20	8.54	84
DO	11,716.0	5,427.4	6,288.6	3.95	8.66	219
SS	89,773.3	2,310.3	87,463.0	55.00	3.69	1,491
NO <sub>2</sub> -N	4,766.5	1,159.1	3,607.4	2.27	1.85	123
NO <sub>3</sub> -N	23,467.4	19,886.9	3,580.5	2.25	31.75	7
NH <sub>3</sub> -N	33,241.9	10,719.0	22,523.0	14.16	17.11	83
Dis-P	5,358.4	2,098.0	3,260.3	2.05	3.45	61



**Fig. 6.** Types of the observed pollutograph.



**Fig. 7.** Quantity and quality of discharge from the Anyang wastewater treatment plant.

수문곡선의 형태를 반영하는 오염물질 농도곡선이며, b 형태는 수문곡선과 형태는 같으나 초기강우효과로 인해 첨두값이 수문곡선보다 선행하여 진행되며, c 형태는 평상시 기저유량의 농도보다 유출수의 농도가 낮아 강우 유출의 개시와 함께 희석작용으로 인하여 감소하는 성향을 보이며 d 형태는 유량에 상관없이 유출시간동안 불규칙하게 유출된다. 안양천의 경우 a 형태를 갖는 오염물질은 NO<sub>3</sub>-N이며 b 형태를 갖는 오염물질은 BOD, SS이며 c 형태를 갖는 오염물질은 DO, NO<sub>2</sub>-N NH<sub>3</sub>-N, TN이며, d 형태를 갖는 오염물질은 COD, Dis-P이다.

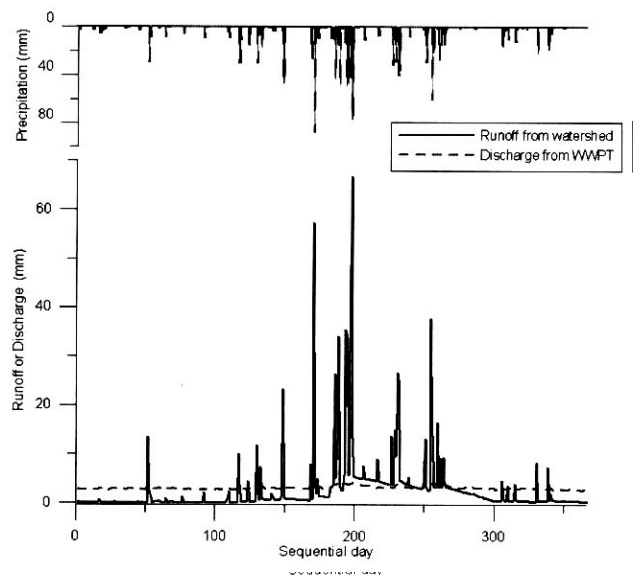
11월 2, 3일의 비강우시 하천수의 농도로부터 Fig. 7과

같이 안양 하수처리장의 방류실적(BOD, COD, SS, NH<sub>3</sub>-N 만 존재함)을 차감하여 기저유출수의 평균농도를 산정하면 BOD는 7.63 mg/L, COD는 7.07 mg/L, SS는 1.82 mg/L, NH<sub>3</sub>-N는 16.03 mg/L이다. 즉 EMC는 기저유출수의 농도에 비해 BOD는 4.5배, SS는 30배나 높게 나타났으며 안양 하수처리장의 방류수 역시 기저유출수에 비해 BOD는 129%, COD는 161%, SS는 423%, NH<sub>3</sub>-N은 113% 높은 농도를 보였다.

**4.2. 물순환 모의**

수량의 특성을 파악하기 위해 대상유역에 대해 SWAT을 이용하여 모의한 2004년의 일별 유출량 모의 결과 및 하수처리장(Wastewater Treatment Plant, WWTP) 방류실적은 Fig. 8과 같다.

강우량이 1271.4 mm인 2004년의 경우 전체 유출량은 701.5 mm로 유출율이 55.2%이고 이중 강우로 인한 직접 유출량은 399.2 mm, 즉 전체유출량의 56.9%이고 기저유출량은 302.47 mm, 즉 43.1%이다. 이를 하수처리수 방류실적과 비교하면 방류수량은 연평균 4.46 cms이며 단위면적당 1107.6 mm에 해당된다. 즉 기아대교의 2004년 1년동안



**Fig. 8.** Simulation results of daily flow in the year of 2004.

흘러간 총 하천수의 38.8%가 강우로 인한 자연적인 시스템으로부터의 양이며 61.2%가 하수처리장으로부터 흘러들어온 인위적인 시스템으로부터의 양에 해당된다.

자연적인 유출량을 월별로 보면 7월에 34.8%, 8월에 19.2%, 9월에 16.8%를 분포하여 여름 홍수기 세달 동안 70.8%의 유출량 집중도를 보인다. 더구나 5, 6월에 15.7%가 유출됨을 감안할 때 10월부터 4월까지 약 7개월 동안은 전체 유출량의 13.5%, 즉 단위면적당 94.9 mm만 유출되고 있어 유역의 대부분 지역에서 유출수가 매우 부족함을 알 수 있다. 같은 기간에 하수처리장 방류수는 611.3 mm, 즉 건기 유출수의 86.6%나 되므로 건기의 하천 수량과 수질에 하수처리장이 절대적인 영향을 미침을 알 수 있다.

### 4.3. 원단위 산정

일유출량 자료와 EMC 및 건기의 하천수 농도를 이용하여 산정한 대상유역의 원단위는 Table 4와 같다. 여기서 안양 하수처리장의 방류실적 자료에는 NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, Dis-P가 포함되어 있지 않으므로 하수처리장 방류수와 기저유출수가 포함된 비강우시 하천수의 평균수질을 이용하여 두 경우를 함께 산정하였다. 그 결과 BOD는 269.24 kg/ha, COD는 176.12 kg/ha, SS는 311.45 kg/ha, NO<sub>2</sub>-N는 35.15 kg/ha, NO<sub>3</sub>-N는 455.84 kg/ha, NH<sub>3</sub>-N는 305.34 kg/ha, Dis-P는 55.37 kg/ha이다. 이 중 BOD는 50.9%가 강우시, 40.53%가 하수처리장으로부터 발생하며, SS는 강우시 70.9%, COD는 하수처리장으로부터 71.6%, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N,

**Table 4.** Unit loads calculation for the Anyancheon

Category		BOD	COD	SS	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>3</sub> -N	Dis-P
Concentration (mg/L)	EMC	34.33	7.19	55.32	2.27	2.06	14.14	2.04
	Baseflow	7.63	7.07	1.82	1.85	31.75	16.03	3.35
	Release from WWPT	9.85	11.38	7.69			18.10	
Total loads of 2004 (kg)	EMC	1,746,990	365,828	2,814,799	115,549	105,067	719,652	103,893
	Baseflow	294,051	272,512	70,065	332,543	5,705,278	617,881	601,899
	Release from WWPT	1,390,873	1,606,585	1,085,002			2,554,523	
Unit loads (kg/ha)	EMC	137.06	28.70	220.83	9.07	8.24	56.46	8.15
	Baseflow	23.07	21.38	5.50	26.09	447.59	48.47	47.22
	Release from WWPT	109.12	126.04	85.12			200.41	
	Total	269.24	176.12	311.45	35.15	455.84	305.34	55.37
Proportion	EMC	51%	16%	71%	26%	2%	18%	15%
	Baseflow	9%	12%	2%	74%	98%	16%	85%
	Release from WWPT	40%	72%	27%			66%	

**Table 5.** Comparison with other research results

Source		BOD (kg/ha/yr)	COD (kg/ha/yr)	SS (kg/ha/yr)	TN (kg/ha/yr)	TP (kg/ha/yr)
Lee (1995)	Wood land	3.51	-	329.94	2.29	0.33
	Cultivated	4.62	-	416.45	3.44	0.53
	Paddy land	27.69	-	4503.96	18.13	10.89
	Urban	430.9	-	402.8	114.96	4097.3
Kim et al. (2002)	Urban	19.1	200	2923.5	37.1	17.7
	Agricultural	7.6	26.8	1066.5	7.7	4.8
	Mountainous	2.2	43.6	798.5	26.4	10.5
Choi et al. (2002)	High density residential	61.9	161.6	604.2	33.1	3.2
	Residential	106.1	455.3	384.0	59.2	2.8
	Commercial	100.4	719.9	653.1	119.8	4.8
	Industrial	150.1	746.1	823.2	89.5	4.8
	Roads	153.2	858.7	1605.0	95.9	6.1
	Parking lots	63.4	579.4	274.0	40.9	1.1
This study	Urban 14.2% Industrial 17.2% Forest 51.6% Agricultural 7.5%	269.24	176.12	311.45	NO <sub>2</sub> -N 35.15 NO <sub>3</sub> -N 455.84 NH <sub>3</sub> -N 305.34	Dis-P 55.37



NH<sub>3</sub>-N, Dis-P는 75%이상 하수처리장의 방류수가 대부분을 이룬다. 따라서 BOD와 SS를 제외한 대부분의 오염물질은 하수처리장 방류수로부터 발생하므로 하수처리장의 효율을 개선하는 것이 필요하다. 본 연구의 결과를 다른 연구결과와 비교하면 Table 5와 같다.

## 5. 결론

본 연구는 전형적인 도시하천인 안양천 증류 기아대교 지점을 기준으로 수량 및 수질 특성을 실측을 통해 산정된 EMC와 분포형 수문모형인 SWAT을 이용하여 파악하였다. 또 하수처리장의 방류실적 자료를 이용하여 기저유출수의 평균농도도 산정하였다. 더 나아가 안양천의 수량 특성을 파악하기 위해 SWAT 모형을 토대로 일유출 자료를 도출하였으며 강우로 인한 직접유출량 증가량과 기저유출량을 산정하였다. 그 결과 수량적인 측면에서는 하수처리수 방류수가 전체 하천수량의 61.2%에 해당되며 강우가 적은 10월부터 4월까지의 전체 하천수의 86.6%에 이름을 알 수 있었다. 이렇게 산정된 값을 EMC와 기저유출수의 농도와 곱한 후 하수처리장의 방류실적을 합하여 연간 하천에 부하되는 원단위를 산정하였다. 그 결과 BOD는 50.9%, SS는 70.9%가 강우시 직접유출로 인해 발생하며 COD, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, Dis-P는 75%이상 비강우시 하수처리장의 방류수에서 발생함을 알 수 있었다.

따라서 대상유역의 경우 강우가 적게 발생하는 10월부터 4월사이의 하천수질을 개선하기 위해서는 COD, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, Dis-P에 대한 하수처리장의 처리효율을 향상시키는 것이 필요하며 7월부터 9월 사이에는 BOD, SS에 대한 강우유출수의 처리가 반드시 필요하다.

## 사 사

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.

## 참고문헌

- 권순국, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, *대한환경공학회지*, **20**(11), pp. 1497-1510 (1998).
- 김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현, 우리나라 농지-임야유역으로부터의 당유출수 EMC 부하 분석 및 추정, *대한환경공학회지*, **25**(6), pp. 760-770 (2003).
- 김경탁, 정밀토양도를 이용한 CN 산정에 대한 제안, *한국수자원학회지*, **36**(4), pp. 45-53 (2003).
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진, 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원유출특성 및 원단위 조사, *대한환경공학회지*, **24**(11), pp. 2019-2027 (2002a).
- 김영철, 이재수, 강우시 유역특성에 따른 유출 오염물질 농도곡선의 형상, *대한환경공학회지*, **24**(4), pp. 633-645 (2002b).
- 문종필, 김태철, 안병기, 방동저수지 유역의 토지이용에 따른 비점오염 부하발생 원단위 산정, *충남대학교 농업과학연구*, pp. 61-69 (1999).
- 방기용, 이준호, 유명진, 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, *한국수질보전학회지*, **13**(1), pp. 79-99 (1997).
- 배윤선, 양경수, 박철휘, 유명진, 최종수, 국내 주택단지의 오수발생 원단위 특성에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **24**(9), pp. 1651-1661 (2002).
- 배재호, 서형준, 김종윤, 승기천 유역의 강우 및 무강우시 오염물 유출특성, *대한환경공학회지*, **23**(3), pp. 461-472 (2001).
- 신문주, SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안, *서울대학교 석사학위논문*, pp. 1-141 (2006).
- 신창민, 최지용, 박철휘, 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성, *대한환경공학회지*, **26**(7), pp. 729-735 (2004).
- 신현석, 강두기, SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구, *한국수자원학회 논문집*, **39**(3), pp. 227-240 (2006).
- 여중현, 김건하, 도시, 농촌 및 임야유역으로부터 배출되는 비점원 오염부하의 특성비교, *한국물환경학회지*, **21**(2), pp. 184-189 (2005).
- 유명진, 홍대벽, 조용균, 권은미, 구윤희, 새만금 유역의 강우시 오염물질 유출특성, *대한환경공학회지*, **22**(9), pp. 1609-1616 (2000).
- 이기영, 안양천 살리기 종합대책, 경기개발연구원, 경기도 (2003).
- 이길성, 안양천 유역의 물순환 건전화 기술적용, 서울대학교, 과학기술부 (2004).
- 이길성, 정은성, 김영오, 도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근방법, *한국수자원학회논문집*, **39**(2), pp. 151-167 (2006a).
- 이길성, 정은성, 신문주, 기후, 지하수 취수 및 토지이용의 변화의 건기 총유출량에 대한 영향, *한국수자원학회논문집* (제출) (2006b).
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민, PCSWMM을 이용한 건전화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안 II 모형의 적용, *대한토목학회논문집*, **25**(6B), pp. 437-441 (2005a).
- 이삼희, 안양천 살리기 종합계획, 한국건설기술연구원, 안양시 (2001).
- 이수길, 농천지역에서의 비점원 오염물질이 하천수질에 미치는 여항에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문 (1991).
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성, WEP 모형을 이용한 도립천 유역 물순환 모의, *한국수자원학회논문집*, **38**(6), pp. 449-460 (2005b).
- 이운영, 이흥규, 황의준, 안양천 유역의 치수특성 및 구조적 홍수방어 대책, *한국수자원학회지*, **37**(5), pp. 66-75 (2004).
- 이재수, 김영철, 소규모 농업용 저수지 유역으로부터 비점원 오염물질 유출특성 및 오염물질 제거를 위한 체류지용량분석, *대한토목학회논문집*, **21**(5B), pp. 575-588 (2001a).
- 이정민, 이상호, 이길성, 물 환경 건전화를 위한 도시하천의 물 순환 모의(I) 안양천 유역, *한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 349-357 (2006c).
- 이정민, 이상호, 이길성, 투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성포장의 효과분석, *한국수자원학회논문집*, **39**(2), pp. 109-119 (2006d).

- 이현동, 안재환, 김운지, 배철호, 토지이용별 강우시 비점오염 물질의 유출특성, *한국물환경학회지*, **17**(2), pp. 147-156 (2001b).
- 이흥근, 수역 수질관리를 위한 수질예측 모형과 의사결정 지원시스템 개발에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원, 환경부, pp. 27-308 (1995).
- 임현만, 『안양천 살리기』 안양천 상류의 학의천을 중심으로, *한국수자원학회지*, **34**(6), pp. 65-74 (2001).
- 정규연, 이동률, 정성원, 설마천과 안양천에서의 강우사상에 따른 오염물질 유출특성, *한국수자원학회 2003년 학술발표회*, pp. 125-128 (2003).
- 조효섭, 정관수, 김재한, GIUH 적용을 위한 DEM 격자크기 및 Threshold Area의 민감도 분석, *한국수자원학회논문집*, **36**(5), pp. 799-810 (2003).
- 차진명, 신성의, 차규석, 영산강 수계의 비점오염원에 관한 연구 I: 토지이용 및 강우를 중심으로, *환경영향평가*, **8**(1), pp. 41-49 (1999).
- 최지용, 신은성, 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안, *한국환경정책·평가연구원* (2002).
- 최지용, 신은성, 이동훈, 서울 도시지역의 비점오염원 유출 특성에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **15**(3), pp. 315-323 (1999).
- 한국수자원공사, *지하수조사연보*, 건설교통부 (2001).
- Arnold, J. G. and Fohrer, N., SWAT 2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modeling, *Hydrological Processes*, **19**(3), pp. 563-572 (2005).
- Arnold, J. G., Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., Williams, J. R. and King, K. W., *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Ver. 2000*, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report TR-191 (2002).
- Burian, S. J., Streit, G. E. and Brown, M. J., Modeling the Atmospheric Deposition and Stormwater Washoff of Nitrogen Compounds, *Environmental Modeling & Software*, **16**, pp. 467-479 (2001).
- Characklis, G. W. and Wiesner, M. R., Particles, Metals and Water Quality in Runoff from Large Urban Watershed, *J. Environ. Eng.*, **123**(8), pp. 753-759 (1997).
- Chaubey, I., Cotter, A. S., Costello, T. A. and Soerens, T. S., Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty, *Hydrological Processes*, **19**, pp. 621-628 (2005).
- Collins, P. G., Urban Storm Runoff Quality in Southeast Michigan, *Journal of Environmental Engineering Division, ASCE*, **106**(1), pp. 131-145 (1980).
- Corbett, C. W., Porter, D. E. and Edwards, D., Nonpoint Source Runoff Modeling a Comparison of a Forested Watershed and an Urban Watershed on the South Carolina Coast, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **213**, pp. 134-139 (1997).
- Freedman, P. L., Quasebarth, T. F. and Southerland, E., Modeling Storm Overflow Impacts on Eutrophic Lake, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, **106**(2), pp. 254-264 (1980).
- Hartigan, J. P., Pendergast, J. F. and Canale, R. P., Calibration of NPS Model Loading Factor., *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, **109**(6), pp. 467-481 (1983).
- Mostaghini, S., Park, S. W., Cook, R. A. and Wang, S. Y., Assessment of Management Alternative on a Small Agricultural Watershed, *Water Research*, **31**(8), pp. 1867-1878 (1997).
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., River Flow Forecasting through Conceptual Models, part I-A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290 (1970).
- Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G., Partition and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water, *J. Environ. Eng. ASCE*, **123**, pp. 134-143 (1997).
- Sansalone, J. J. and Cristina, C. M., First Flush Concepts for Suspended and Dissolved Solids in Small Impervious Watershed, *J. Environ. Eng.*, **130**(11), pp. 1301-1314 (2004).
- Tshihrintzisz, V. A. and Hamid, R., Runoff Quality Prediction of Small Urban Catchments Using SWMM, *Hydrological Processes*, **12**(2), pp. 311-329 (1998).
- Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, W. L. and Evett, J. B., Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff, *J. Environ. Eng.*, **124**(7), pp. 584-592 (1998).