

# HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 및 BOD 부하량 분석

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

정은성\*, 이길성\*\*, 이준석\*\*\*

Eun-Sung Chung, Kil Seong Lee, Joon-Seok Lee

### 요    지

본 연구에서는 안양천 유역의 물순환 진전화를 위한 계획수립의 첫 번째 단계로 HSPF 모형을 구축하고 종유역별 물순환 현황 및 BOD 부하량을 정량적으로 파악하였다. 모형을 구축하기 위해 HSPF 모형의 수량 및 BOD에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 다양한 속성을 갖고 있는 안양천 유역을 토지이용, 경사도 및 사용한 기상자료 등의 특성에 따라 총 4개 지역으로 구분하여 검·보정을 실시하였다. 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 → 15.0mg/L로, 단위면적당 원단위는 55.4 kg/ha/year → 354.5 kg/ha/year로 증가하였다.

핵심용어: 안양천, HSPF, 물순환, BOD

### 1. 서 론

도시지역의 물순환을 정량적으로 파악하기 위한 연구는 실측법이나 다양한 수문모형을 사용하여 시도된 사례는 많으나 하나의 수문모형을 이용하여 도시유역에 대해 수량과 수질 측면에서 일관성있게 제시한 사례는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 HSPF(Bicknell et al., 2001) 모형을 이용하여 도시하천인 안양천 유역에 대해 종유역 별로 물순환 및 BOD(Biochemical Oxygen Demand) 부하량을 정량적으로 모의하고 특징을 제시하였다.

### 2. 대상유역

본 연구의 대상하천은 안양천으로 국가하천이며 한강의 제1지류로서 경기도 의왕시 백운산자락에서 발원하여 북류하면서 경기도와 서울시를 경유하고 한강에 유입되는 대표적인 도시하천이다. 유역의 위치는 서울의 남서쪽으로 동경 126° 47' ~ 127° 04', 북위 37° 18' ~ 37° 33'이며 유역면적은 287.15 km<sup>2</sup>이며 서울시의 7개구(강서구, 양천구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구)와 경기도 7개시(파주시, 의왕시, 군포시, 안양시, 광명시, 시흥시, 부천시)에 걸쳐있다. 또한, 11개의 제1지류와 9개의 제2지류가 안양천 유역에 포함되고 있다. 안양천 유역의 연도별 Landsat 영상을 이용하여 토지이용현황을 분석한 결과 1975년 유역 면적 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 변화되었음을 나타내고 있어, 1975년 16.61%에 불과했던 도시지역이 2000년에는 유역 전체면적의 절반을 차지하는 전형적인 도시하천으로 변모해 가고 있음을 알 수 있다(이길성 등, 2006).

\* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사수료 E-mail: cool77@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 E-mail: kilselee@snu.ac.kr

\*\*\* 한국수자원공사 E-mail: js178@hanmail.net

### 3. 모형의 구축

#### (1) 모형의 구축

HSPF 모형의 구축하기 위해 필요한 입력자료는 기상자료, 수치표고모형(DEM), 토지이용도가 있으며 이 요소들을 다음과 같이 모형에 구축하였다. 기상자료는 안양천 유역에 인접한 수원기상대와 서울기상대 자료를 이용하였으며 이 중 강수량은 공간적 분포를 고려하기 위하여 안양천 유역 종합치수계획(현대 Eng., 2005)에서 작성된 Thiessen 망의 면적비를 사용하였다. 수원기상대와 서울기상대에서 수집한 1993년부터 2005년까지의 시간별 강수량, 증발량, 기온, 풍속, 일사량, 이슬점 온도, 운량 자료를 HSPF 모형의 입력과 출력을 위해 개발된 WDMUtil을 이용하여 구축하였다. 수치표고모형은 건설교통부 국토지리정보원에서 가장 최근에 발행한 1999년도 1/25,000 수치지형도와 ArcView GIS Tool을 이용하여 구축하였다. DEM의 격자크기는 모의시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 30 m × 30 m를 선택하였다(Chaubey et al., 2005). 토지이용도는 국토지리정보원에서 가장 최근에 발행한 1999년도 1/25,000 수치토지이용현황도와 ArcView GIS Tool을 이용하여 구축하였다.

#### (2) 민감도 분석

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.

HSPF 모형의 수문학적 매개변수 중 AQUA TERRA (2004)에서 수문 보정 시 주요한 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 ± 25% ~ ± 100% 증감을 통한 첨두유량과 총유출량의 변화를 관측하였다. 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, AGWRC를 모형의 보정에 사용할 매개변수로 선정하였다.

HSPF 모형에서 BOD는 RCHRES 모듈의 OXRX(Primary DO and BOD Balances) 항목에서 모의되고 있으며 AQUA TERRA(2004)에서 BOD 보정 시 주요한 매개변수로 제안하는 OX-GENPARM과 OX-REAPARM의 매개변수를 대상으로 초기값(Bicknell et al., 2001)에서 ± 25% ~ ± 100% 증감을 통한 총부하량과 첨두농도 변화를 관측하였다. 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, KBOD20 을 모형의 보정에 사용할 매개변수로 선정하였다.

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. 따라서 본 연구에서는 대상유역을 기상자료와 물리적 특성(경사도)을 고려하여 크게 상류 유역(Region I), 중류 유역(Region II), 목감천 유역(Region III), 도림천 유역(Region IV)으로 나누어 각각 보정 및 검증을 실시하였으며 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. 민감도 분석 결과와 Region I ~ IV에 대한 상세한 검·보정 결과는 이준석(2007)에 제시되어 있다.

## 4. 모의 결과

### 4.1 물순환

보정과 겸증을 마친 모형을 사용하여 안양천 유역의 과거 물순환 모의를 수행하였다. 1996년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 10년 동안 일(日)단위 연속유출모의를 실시하여 상류(출구점: 웃우물표)-중류(출구점: 기아대교)-하류(출구점: 고척교) 및 안양천 제1지류 유역에 대한 각 요소별 10년 평균값을 산출하였다(Table 1).

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 유역 14.3%, 기저유출량 비율은 상류 유역 11.1%, 중류 유역 7.0%, 하류 유역 5.0%를 나타내고 있다. 토양의 저류량 변화에서는 수문 매개변수 보정 시상부층 저류용량(UZSN)과 하부층 저류용량(LZSN)이 높은 값으로 보정된 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(direct runoff) 비율을 나타내고 있으며, 특히 모든 하천이 부분 및 전면 복개되어 유역 전체의 62%가 불투수 지형에 속하는 도림천 유역의 경우 직접유출량 비율이 70.3%, 기저유출량(baseflow) 비율이 1.5%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 도시화인해 물순환 왜곡되었음을 알 수 있다.

### 4.2 오염물질

보정 및 겸증을 마친 모형을 이용하여 BOD 농도 및 부하량을 모의한 결과를 분석하여 평균농도, 총부하량, 단위면적당 1년동안 발생하는 원단위로 나타내면 Table 1과 같다. 일반적으로 농도와 원단위는 하류로 갈수록 크게 나타남을 알 수 있다. 하류의 도시화로 인한 비점오염원의 유입량의 증가와 합류식 하수관거로 인한 월류수의 유입 등이 원인으로 작용함을 예상할 수 있다. 특히 중류 기아대교 상류에 위치한 안양하수처리장과 목감천에 2006년 9월에 준공한 역곡하수처리장으로 인해 오염부하량이 많이 증가했음을 알 수 있다. 유출수의 농도는 전 유역이 합류식 하수관거 지역인 당정천(35.4 mg/L)이 가장 높게 나타났으며 하수 미처리 지역이 많아 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 낮은 농도를 보였는데 이는 강우시의 월류수가 포함된 유출량의 측정값이 반영되지 않고 수립된 결과이므로 추가적인 자료 측정 및 검보정이 필요하다. 일총부하량(total daily load)은 유출량과 농도의 곱으로 산정된 값으로 유역에서 흘러들어가는 일평균총량이다. 하수처리장이 있는 목감천(2559.0 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, 오전천, 수암천, 삼봉천 등이 작은 값을 보였다. 이 값은 오염총량제를 위한 계획 수립에 활용될 수 있다. 단위 면적당 발생하는 연부하량은 목감천을 제외하고는 대부분 30 ~ 64 kg/ha/year에 분포하였고 유출수의 농도와 같은 경향을 보이는데 삼성천과 수암천이 가장 낮은 값을 보였으며 당정천(63.3 kg/ha/year)이 가장 높은 값을 보였다. 특히 왕곡천과 오전천, 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 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.

Table 1. Simulation Results of Hydrologic Cycle and BOD Load for 10 Years (1996 ~ 2005)

Watershed Component		Up-stream	Middle-stream	Down-stream	WG	OJ	DJ	SB	HU	SA	SS	SB1	SH	MG	DR
Water Quantity	Precipi-tation (mm, %)	1331.7 (100%)	1355.6 (100%)	1419.5 (100%)	1331.7 (100%)	1331.7 (100%)	1331.7 (100%)	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, %)	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%)	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, %)	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%)	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, %)	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%)	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%)	1,094.4 (70.3%)
	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%)	118.6 (8.8%)	126.6 (9.4%)	143.5 (9.4%)	109.1 (8.91%)	127.8 (8.3%)	195.3 (13.1%)	27.9 (1.8%)
	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%)	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, %)	-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%)	-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)	3.3	9.0	15.0	11.6	13.3	35.4	10.8	5.4	1.1	1.0	13.0	1.7	18.0	2.2
	Total Daily Load (kg/day)	203.8	10,892.2	21,851.7	64.5	68.9	92.5	112.8	594.0	68.4	109.3	63.2	49.7	4559.0	292.8
	Unit Load (kg/ha/year)	55.4	312.72	354.5	62.3	59.0	63.3	40.0	48.7	30.9	30.3	42.3	55.6	296.8	25.7

## 5. 결 론

본 연구에서는 최근 30년 동안 급격한 도시화가 이루어진 안양천 유역에서 발생하고 있는 왜곡된 물순환을 정량적으로 파악하기 위해 HSPF 모형을 이용하여 모의하였다. 먼저 HSPP 모형의 매개변수에 대해 민감도 분석을 수행하여 수량(침수유량, 총유출량)과 BOD 부하량(총부하량, 침수유량)에 민감한 매개변수들을 선정한 후 이를 조정하여 보정과 검증을 수행한 후 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 산정하였으며 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%, 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 건전화를 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 지원과 Safe and Sustainable Infrastructure Research의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006). “도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 947-960.
2. 이준석 (2007). HSPF를 이용한 안양천 유역의 건천화 방지 대안의 효과분석. 석사학위논문, 서울대학교.
3. 현대 Eng. (2005). *안양천 유역종합 치수계획*. 서울국토지방관리청.
4. AQUA TERRA (2004). *BASIN/HSPF Training Handbook*. U.S. EPA.
5. Singh, V.P. (1997). *Kinematic Wave Modelling in Water Resources*.
6. 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.
7. 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.