

합류식 하수관거 월류수 유입 기간 동안에 나타나는 청계천 수질 변화 모델 연구

이혜숙 · 박석순[†]

이화여자대학교 공과대학 환경학과

(2005년 8월 4일 접수, 2005년 12월 29일 채택)

A Water Quality Modeling Study of Chunggye Stream during Combined Sewer Overflow Period

Yi, Hye-Suk · Park, Seok-Soon[†]

Department of Environment Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT : A water quality modeling study was performed for Chunggye stream during combined sewer overflow(CSO) period, utilizing the diagnostic system for water management in small watershed, CREEK-1(Cyber River for Environment and Economy in Korea). This system integrated geographic information system, data base, landscape ecological model(FRAGSTATS), watershed model(SWMM), water quality model(WASP5), and computer graphic. In this study, the watershed model and water quality model were extensively utilized so as to simulate water qualities and flow in Chunggye stream during wet periods. The Chunggye stream watershed was divided into 18 sub-basins in the watershed model and the stream reach into 11 segments in the water quality model. The watershed model was validated against field measurements of BOD, TN, TP, and flow at the downstream location, where the model results showed a reasonable agreement with the field measurements at all parameters. From this study, it was shown that the stream water quality would change along with elapsed time from rainfall start as well as rainfall intensity. The model results indicated that the water quality would significantly upgrade due to the first flush and high sewage ratio of CSO at the beginning of rainfall event, but become degraded along with the runoff increase due to dilution effect.

Key Words : Chunggye Stream, Storm Water, CSO, CREEK-1, SWMM, WASP5

요약 : 소수계 물관리 진단시스템, CREEK-1을 이용하여 합류식 하수관거 월류수 발생시 청계천에서 나타나는 수질변화에 관한 모델 연구를 수행하였다. CREEK-1은 지리정보시스템, 데이터베이스, 경관생태모델(FRAGSTATS), 유역모델(SWMM), 수질모델(WASP5), 그리고 컴퓨터 그래픽으로 구성되어있다. 본 연구에서는 강우시 청계천의 수질변화를 시뮬레이션하기 위해 유역모델과 수질모델이 주로 사용되었다. 유역모델에서 청계천 전체 유역이 18개의 소유역으로, 수질모델에서 대상 하천 구간은 11개의 구획으로 나누어져 모델이 구성되었다. 유역모델은 강우시 현장에서 관측된 BOD, 총질소, 총인 그리고 유량 자료로 타당성이 검토되었으며, 그 결과 모든 항목에서 모델 예측값은 관측값과 비교적 적절한 일치율을 보였다. 연구 결과는 하천의 수질이 강우량과 강우 시작 후 경과 시간에 따라 변화가 일어나고 있음을 보여주었다. 강우 초기에는 유역의 초기 세척수와 CSO에서 차지하는 하수 비율이 높기 때문에 수질이 크게 악화되었으나 유출 수량이 증가함에 따라 희석효과에 의해 수질이 개선되는 것으로 나타났다.

주제어 : 청계천, 강우 유출수, 합류식 하수관거 월류수, CREEK-1, SWMM, WASP5

1. 서론

합류식 하수관거로 이루어진 도시는 강우시 우수의 유입으로 수량이 크게 증가하기 때문에 일반적으로 유입 하수량이 처리장의 용량을 초과하게 된다. 이 때, 하수처리장은 용량이 초과된 유입 하수를 간이 처리하여 하천에 방류한다. 뿐만 아니라 강우 강도에 따라서 관거로 유입되는 수량이 차집 용량을 초과하는 경우도 발생하며 초과량은 하수처리장에 도달하기 전에 하천으로 흘러들어가게 된다. 합류식 하수관거 월류수(CSO: Combined Sewer Overflow)라 불리는 이 초과 수량은 도시 지면에서 유출된 비점오염물질과 희석된

하수를 포함하고 있기 때문에 하천의 수질 악화에 중요한 영향을 미친다.^{1~3)}

지난 몇 년간 복원이 진행되어온 청계천은 하천변을 따라 합류식 하수관거가 위치하고 있고 강우시 차집 용량 이상의 CSO는 하천으로 유입되었다. 이 CSO는 복원 후에도 하천으로 유입될 수밖에 없다. 특히 청계천 유역은 70% 이상이 아스팔트와 콘크리트로 된 불투수면으로 이루어져 있으며 유역 경사가 심하기 때문에 강우시 급격히 유량이 불어난다.^{4,5)} 복원 후 청계천의 수질을 효과적으로 관리하기 위해서는 CSO에 의한 수질변화를 사전에 예측하고 적절한 대책을 강구하는 것이 바람직하다.

본 연구는 소수계 물관리 진단시스템(CREEK-1)을 이용하여 청계천 유역에서 강우시 발생하는 우수 유출수가 합류식 하수관거를 통해 하천으로 유입될 때 청계천에서 나타나는 수질 변화를 예측하였다. CREEK-1에 포함된 수량 및 수질

[†] Corresponding author
E-mail: ssp@ewha.ac.kr
Tel: 02-3277-3546

Fax: 02-3277-3275

모델은 관측된 자료를 이용하여 보정 및 검증하였으며, 이를 이용하여 청계천 유역과 하천의 특성을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

청계천은 서울의 서북쪽에 위치한 북악산에서 발원하여 한강의 제 1지천인 중랑천으로 유입되며 주요 지천으로는 성북천, 정릉천이 있다(Fig. 1). 유역 전체 면적은 50.96 km², 유로연장은 10.9 km이다. 유역 총면적 중에서 주거지가 28.4 km², 임야 10.5 km², 상업지 10.0 km², 아파트 1.7 km², 그리고 운동장이 0.3 km²를 차지하고 있어 주거·상업지의 면적 비율이 75.4%로 전형적인 도시 유역이다.⁴⁾ 청계천 유역에서 발생하는 하수는 합류식 하수관거로 차집되어 전량 하수처리장으로 이동되어 건기에는 하천으로 유입되지 않는다. 그러나 강우시에는 우수 유출수가 하수관거로 흘러들어가 차집 용량을 초과하게 되고 월류수가 발생하여 청계천의 수질이 악화된다.

2.2. 적용 모델

본 연구에 사용된 소수계 물관리 진단시스템 CREEK-1 (Cyber River for Environment and Economy in Korea)은 지리정보시스템, 데이터베이스, 유역모델, 하천수질모델, 경관생태모델 및 컴퓨터그래픽 등의 결합으로 개발되었다.⁶⁾ 본 시스템은 지리정보시스템의 기능을 구현하는 부분, 모델링 부분, 시나리오 부분으로 나누어져 있으며, 시스템의 핵심 요소인 모델링 부분은 크게 경관생태학적인 해석과 정보를 추출할 수 있는 경관생태모델인 FRAGSTATS, 강우사상과 하천 및 유역정보에 의한 수문 결과를 모의할 수 있는 유역모델인 SWMM, 시간에 따른 하천의 수질변화를 모의할 수 있는 수질모델인 WASP5로 구성되어 있다. 그리고 시나리오 부분은 토지이용변화에 의한 수문 및 수질 변화 모의,

Table 1. Geological information of sub-watershed in the Chunggye Stream area

Stream	Code		Width (m)	Area (ha)	Impervious ratio(%)
	Sub-basin				
Chunggye	Upstream	CG1	4465.7	567.5	21.26
		CG2	455.3	493.9	14.35
		CG3	538.0	436.6	39.35
		CG4	578.1	353.0	34.66
		CG5	486.7	582.1	23.83
		CG6	288.5	236.5	38.56
		CG7	378.5	248.9	25.21
	Downstream	CG8	718.1	1932.0	49.06
		CG9	262.2	483.8	41.49
		CG10	578.2	424.5	40.80
		CG11	806.9	722.1	44.44
		CG12	655.3	391.7	47.46
		CG13	1139.6	56.7	48.64
		CG14	5456.0	607.5	44.10
Jungrung	Upstream	JR1	14012.9	2460.8	26.28
	Downstream	JR2	6709.3	1118.9	37.76
Seongbuk		SB1	5677.7	1959.3	29.03
Wolgok		WG1	9081.2	963.0	36.99

단일 및 연속 강우에 의한 하천의 유량 변화 모의, 저수지와 같은 수리시설물에 의한 하천의 수문 변화 모의가 가능하도록 구성되어 있으며 현재 상태와 예측 결과를 시각적으로 비교하여 나타낼 수 있다. CREEK-1에 내제된 유역모델, 수문 모델, 수질모델은 Fig. 2와 Table 2에 제시한 바와 같이 통합, 연계되어 있다.^{5,6)}

경관생태모델인 FRAGSTATS은 공간 분석 프로그램으로 공간 내 토지조각들의 정보를 정량적인 수치로 제공하여 분석할 수 있다. 주어진 경관에 대하여 단위 규모인 조각(patch), 각 조각에 대하여 모음(class), 전체 경관(landscape)으로 3가지 수준으로 구분하여 관련 지수를 계산하게 된다. 관련지수는 공간의 면적, 형태, 둘레길이 등에 의해 계산되며 3가지 규모에 따라 산정되는 지수가 결정된다.⁶⁾

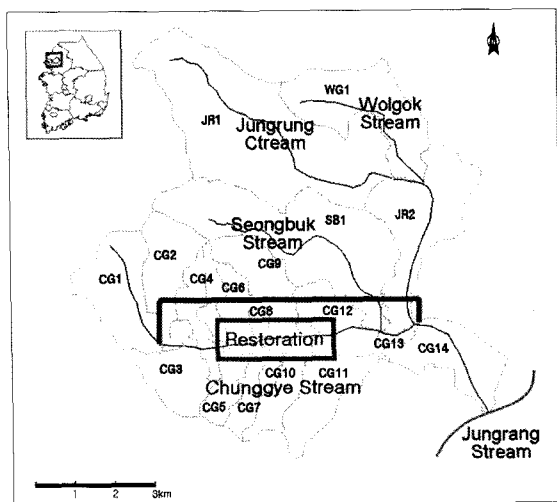


Fig. 1. Location of the study area and sub-watershed divisions.

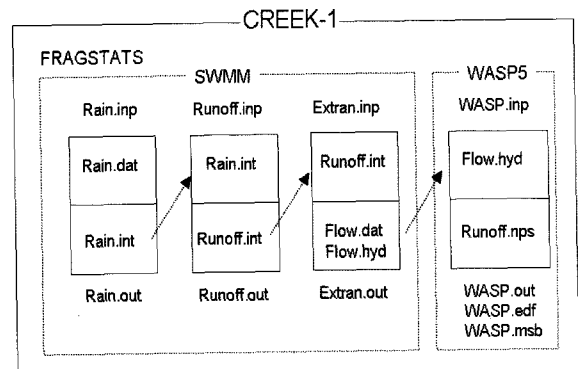


Fig. 2. The model linkage of CREEK-1.

Table 2. File name definition of CREEK-1

	Item	Definition
dat	Rain.dat	Precipitation data
	Flow.dat	Flow result data
inp	Rain.inp	Precipitation information input file
	Runoff.inp	Watershed information input file
	Extran.inp	Stream information input file
	Wasp.inp	Water quality input file
int	Rain.int	Interface file for RUNOFF
	Runoff.int	Interface file for EXTRAN
out	Rain.out	Output file of RAIN
	Runoff.out	Output file of RUNOFF
	Extran.out	Output file of EXTRAN
hyd	Flow.hyd	Interface file of flow result for WASP
nps	Runoff.nps	Nonpoint input file for WASP
edf	Wasp.edf	Water quality result of WASP
msb	Wasp.msb	Mass balance result of WASP

유역모델인 SWMM은 1971년 미국 EPA에 의해 도시유역의 하천유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발되어 세계적으로 널리 사용되고 있다. 4개의 실행 블럭과 5개의 보조 블럭으로 구성되어 있으며 강우 유출수의 지표 및 지하에서의 흐름, 하도 및 관망에서의 유출량과 저류량 산정 등을 모의할 수 있다. CREEK-1은 SWMM 모델의 9개 블럭 중에서 강우 분석을 위한 RAIN, 유출수량 및 수질을 모의하는 RUNOFF, 유출 수량 결과와 배수량을 고려하여 하천 유량을 모의하는 EXTRAN 블럭으로 구성되어 있다. 강우시 발생하는 유출수량은 연속방정식을 사용하여 모의할 수 있으며 유출수질은 오염물질의 추적, 세정 관련식을 선택하여 모의할 수 있다.^{7,8)} 이 때, 유출수질은 강우시작 이전까지 오염물질이 지표면에 축적되고 강우시 세정되는 과정을 고려하여 계산되므로 선행 비강우기간, 토지이용 및 강우강도 등 다양한 요소를 고려하여 적합한 식을 결정해야 한다.

WASP모델은 1981년 EPA의 DiToro 등에 의하여 개발되었으며 수차례의 적용과 보완을 거쳐, 1991년 수체 내 독성물질 거동까지 분석 가능한 WASP5로 발전되었다. WASP5 모델은 하천, 호소, 하구 등을 포함한 수체의 시간에 따른 수리, 수질변화를 모의할 수 있는 동적 모델로서 연중변화는 물론 짧은 시간 간격의 수질 변화를 모의할 수 있다. DO, BOD, TN, TP 등의 부영양화 관련 항목뿐만 아니라 독성물질의 이동 등 총 13개 항목의 수질 모의가 가능하다. WASP5는 기능에 따라 DYNHYD, TOXI, EUTRO 3개의 모듈로 구성되어 있으며 각각 독립적으로 사용될 수 있다. DYNHYD는 수체 내 수리현상을, TOXI는 독성물질을, 그리고 EUTRO는 수체내 DO, BOD 등 8개의 수질 항목을 모의할 수 있는 모듈이다.⁹⁾ CREEK-1에서는 SWMM의 유출수량 및 유출수질 결과가 EUTRO와 연계하여 적용 가능하도록 구성되어 있어 강우시 유역에서 발생하는 비점오염원 및 점오염원에 의한 하천 수질 변화를 모의할 수 있다.⁶⁾

2.3. 현장 조사 및 분석

하수와 강우 유출수는 강우시 관거를 통해 이동하다가 차집 용량을 초과하는 시점부터 토구에서 월류되어 하천으로 유입된다. 유역모델의 유출수량 보정을 위하여 월류수가 발생하는 2003년 7월 22일에 총 강우량 173.5 mm의 강우사상과 8월 24일에 총 강우량 177.0 mm의 강우사상을 대상으로 유량을 조사하였다. 유량 조사 지점은 중랑천으로 유입 전의 청계천 하류 수위 측정 지점으로 시간별 수위 변화를 조사한 후, 2002년에 산정된 수위-유량 곡선식을 이용하여 유량을 산정하였다. 그리고, 월류수질 보정을 위하여 2003년 4월 29일에 39.0 mm/day 강우사상에서 유량 측정지점의 토구에서 하천으로 배출되는 월류수의 수질을 이용하였다. 강우 발생 시점부터 피크시점을 포함하여 30분 간격으로 수질 측정이 이루어졌으며 모델 적용을 위하여 BOD, TN, TP 수질 항목을 이용하였다. 본 연구에서는 2003년 7월 22일과 8월 24일 유량 결과를 이용하여 유출수량 보정 및 검증용, 2003년 4월 29일 월류수의 수질측정 결과를 이용하여 유출수질 보정을 수행하였다.

2.4. 유역모델 구성 및 적용

CREEK-1에 내재된 SWMM을 적용하여 강우시 유역에서 발생하는 유출수량 및 수질을 모의하였다. 모델을 적용하기 위하여 대상유역을 특성에 따라 소유역으로 구분하고, 각 소유역의 지형정보, 하천정보 및 유출관련식의 계수값 등이 요구된다.⁸⁾ 대상 유역을 배수 특성에 따라 Fig. 1에 제시한 바와 같이 청계천 본류 14개(CG1~CG14), 성북천 1개(SB1), 월곡천 1개(WG1), 정릉천 2개(JR1~JR2) 등 총 18개의 소유역으로 구분하였고, DEM(Digital Elevation Model)과 수치지도를 이용하여 유역 특성정보를 추출하였다. 각 소유역의 특성은 Table 1에 제시하였으며 소유역별 명칭은 Fig. 1에서 기술한 소유역 분할 기호이다.

소유역별 불투수면적과 침투능은 토지이용도와 토양도를 이용하여 ArcView 3.2에서 분석하였으며 하천의 경사도 등의 하천정보는 정계천 하천정비기본계획서⁴⁾에서 제시된 값을 이용하였다. 강우 자료는 기상청의 관측 자료를 이용하였다. 차집관거에서 하천으로 오염물질이 배출되는 현상은 강우시 유출수량과 하수량의 합이 관거의 용량을 초과할 때 발생하는 것을 고려하여 적용하였다.

2003년 청계천 유역에서 발생한 강우를 분석하면 7월 22일에 총 강우량 173.5 mm의 강우사상과 8월 24일에 총 강우량 177.0 mm의 강우사상이 최고의 강우사상으로 나타났다. 이는 월류수를 발생시키는 충분한 조건이므로 두 강우를 적용하여 복원 전 유출수량을 모의하여 모델의 보정 및 검증을 수행하였으며 유출수량 보정계수는 주로 유역의 저류량 조도계수 등을 사용하였다. 유출수질 모의는 월류수가 발생하였을 때 수질 측정이 이루어진 시기인 2003년 4월 29일에 39.0 mm/day 강우사상을 대상으로 모델을 적용하였다. 유출수질 보정은 BOD, TN, TP 수질 항목에 대하여 수행하였으며 보정을 위하여 오염물질의 추적 및 세정식 계수 등을 사용하였다.

2.5. 하천 수질모델 적용

강우량이 클 경우 유출수에 의한 희석효과가 크게 나타나 월류수에 의한 하천 수질악화를 적절히 파악할 수 없기 때문에 강우량이 비교적 작은 경우를 선택하여 수질모델을 적용하여 복원 후 월류수에 의한 하천 수질변화를 예측하였다. 대상 유역의 최근 5년간(1998년~2002년) 강우분포를 분석하여 홍수기에 85.7 mm/day(Design Storm I) 강우사상과 갈수해인 2002년에 60.6 mm/day(Design Storm II)의 강우사상을 선택하였다. 같은 조건에서 월류수가 하천 수질 변화에 미치는 영향을 강우량 차이에 의한 비교 분석을 위하여 시간에 따른 강우변화를 동일하게 분포시켜 적용하였다.

대상 하천 구간을 지류와 유지용수 공급지점을 기준으로 총 11개의 구획(segment)으로 구분하였고, 하천의 최상류와 최하류 구획을 경계 지점으로 구성하였다. 필요한 입력자료는 지형, 유량, 기상, 점오염원, 비점오염원자료 등이다.⁹⁾ 지형정보는 하천의 폭, 길이, 깊이 등을 이용하여 입력하였고, 유량은 유역모델의 수문모의 결과를 연계하여 입력하였다. 기상자료는 기상청 자료를 사용하였으며 점오염원은 지점별로 공급되는 유지용수, 강우 유출수 및 하수의 유량과 수질을 고려하여 입력하였다. 이 때, 비강우시 하수는 하천으로 배출되지 않으며 유지용수로 가장 적합한 것으로 결정된 한강원수 및 지하수가 지속적으로 공급된다. 그러나 강우시에는 월류수가 발생하므로 유지용수, 하수 및 강우 유출수에 의해 발생하는 부하량을 산정하여 입력자료를 구성하였다. 비점오염원은 유역모델의 유출수량 및 수질 결과를 연계하여 입력하였다. 이 때, 유역으로부터 배출되는 유출수와 하수의 경우

복원 전과 후에 토지이용도, 생활 및 산업 특성이 크게 변하지 않을 것으로 예상되므로 유출수량 및 수질 보정에 의한 반응계수를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 하지만 청계천은 복원 후 물이 흐르고 바람과 태양 빛이 수면에 접촉하게 되므로 하천 수질모델을 적용할 경우에는 복원 전 하천에서의 수질 반응계수를 사용할 수 없다. 따라서 하천 수질모델에 사용되는 반응 계수는 일반적인 자연 하천에서 사용되는 계수의 범위에서 중간 값을 적용하여 수질을 예측하였으며 적용된 반응계수는 Table 3에 제시하였다.⁹⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 유역모델의 재현성 검토

중랑천으로 유입되기 전의 청계천 하류지점에서 유량과 BOD, TN, TP의 수질 항목에 대하여 유역모델의 재현성을 검토하였다. 사용된 계수는 Huber⁸⁾의 값을 기초로 하여 기존의 연구 결과에서부터 대상 유역의 특성을 반영할 수 있도록 조정하여 결정하였다.^{5,10)} 유량의 모델 예측값과 관측값 비교를 위하여 시간별로 연속적으로 측정된 수위자료와 수위-유량 곡선을 이용하여 산정된 유량을 이용하였으며 보정 및 검증 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 대체적으로 모델 결과가 관측치를 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 첨두 유량에서 오차를 나타내는 것은 개발된 수위-유량 곡선의 적용 가능한 수위 범위를 초과한 경우에는 수위에 의해 계산된 유량이 실제 유량보다 과소평가되기 때문으로 판단된다.

Table 3. Main coefficients for simulations using WASP5

Definition	Unit	General Range	Value*
Nitrification rate at 20°C	day ⁻¹	0.09~0.13	0.11
Half-saturation constant for O ₂ limitation on nitrification	mgO ₂ /L	2.0	2.0
Denitrification rate at 20°C	day ⁻¹	0.09	0.09
Half-sat. constant for O ₂ limitation on denitrification	mgO ₂ /L	0.1	0.1
Maximum phytoplankton growth rate	day ⁻¹	2.0	2.0
Half-sat. constant for N limitation to phytoplankton growth	mgN/L	0.025	0.025
Half-sat. constant for P limitation to phytoplankton growth	mgP/L	0.001	0.001
Phytoplankton respiration rate	day ⁻¹	0.125	0.125
Non predatory phytoplankton death rate	day ⁻¹	0.02	0.02
P to C ratio in phytoplankton	mgP/mg	0.025	0.025
N to C ratio in phytoplankton	mgN/mg	0.25	0.25
CBOD deoxygenation rate at 20°C	day ⁻¹	0.16~0.21	0.19
O to C ratio in phytoplankton	mgO ₂ /mg	2.6667	3.0
Mineralization rate of DON	day ⁻¹	0.075	0.075
Mineralization rate of DOP	day ⁻¹	0.22	0.22

* Values are given in Ambrose.⁹⁾

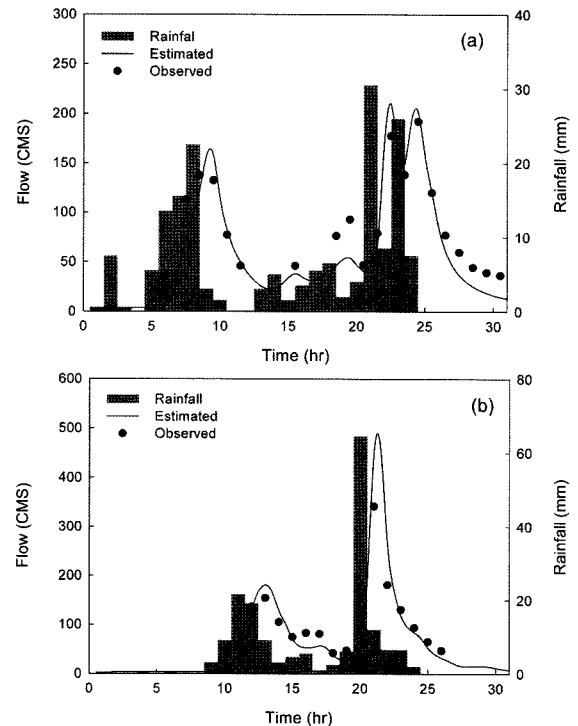


Fig. 3. Calibration and Verification results of hourly flow simulation: (a) Calibration result(2003. 7. 22), (b) Verification result(2003. 8. 24).

유출수질의 경우도 마찬가지로 대체적으로 모델 결과와 관측치가 적절하게 일치하는 것을 알 수 있었다. 일부 시간에서 모델 결과의 오차가 발생하는 경우는 실제 차집관거에서 유출수와 하수가 시간에 따라 혼합되는 비율을 정확하게 파악하기 어렵기 때문이다. 차집관거로 유입되는 유출수량과 하수량은 시간에 따라 변화하며 월류수 중의 유출수와 하수의 혼합비율도 시간에 따라 차이가 날 수 있다. 그러나, 실제로 시간에 따라 혼합되는 비율을 파악하기 어렵기 때문에 완전 혼합되어 월류되는 것으로 가정하여 모델을 적용함으로써 일부 시간에서 오차를 발생하게 되었다. 수질 보정이 수행된 2003년 4월 29일에 39.0 mm/day 강우사상에서 월류수질은 시간별 강우량에 의해 감소 및 증가현상을 나타내고 있으며, 그 현상은 BOD의 경우에 뚜렷한 것을 알 수 있었다(Fig. 4). 반면에 TN과 TP의 경우는 수질 변화가 강우시 완만하게 지속적으로 감소한 후 강우 소멸시기에는 다시 높아지는 것으로 나타났다.

3.2. 월류수 변화 분석

강우시 발생하는 월류량은 강우강도 및 패턴에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 침투 유량은 강우 피크가 나타난 후 2~3시간 이내로 발생하였으며 강우량 차이에 비해 큰 강우강도가 발생한 강우에서 침투 유량이 현저하게 큰 것으로 나타났으며 발생시점도 빠른 것을 알 수 있었다(Fig. 3). 두 강우에 의한 모델의 유량 결과를 보면, 2003년 7월 22일에 총 강우량 173.5 mm의 강우사상의 경우에는 최소 3.2

m³/s에서 최대 209.5 m³/s의 범위를 나타내는 것으로 예측되었으며 2003년 8월 24일에 총 강우량 177.0 mm의 강우사상의 경우에는 최소 2.1 m³/s에서 최대 456.4 m³/s의 범위를 나타내는 것으로 예측되었다. 총 강우량 차이가 3.5 mm인 것에 비해 유량 최대값 차이가 2배 이상 나는 것은 시간에 따른 강우분포가 다르고 선행강우 발생시기와 강우 피크치의 차이 때문으로 판단된다. 선행강우 발생 이후에 강우 피크가 나타나는 시점은 총 강우량 173.5 mm의 강우사상에서는 14시간, 총 강우량 177.0 mm의 강우사상에서는 9시간 이후였다. 이 때, 후자의 경우에 강우량이 오후 8시경에 집중적으로 발생한 것을 알 수 있었으며 이는 선행강우 후 짧은 시간 내에 발생한 강우시 유출량이 빠른 시간 내로 증가한 것으로 판단된다.

유출수질 보정을 위해 2003년 4월 29일에 39.0 mm/day 강우사상을 적용하여 복원 전 하천으로 유입되는 월류수의 수질 변화를 모의하고 결과를 분석하였다. BOD의 경우 초기 월류수질은 유출수 및 하수 수질값이 높기 때문에 80 mg/L 이상을 나타내다가 오전 11시부터 오후 1시까지 2시간 동안에는 50~80 mg/L의 범위로 감소되었다. 이후, 유출수량의 증가로 인해 하수의 비율이 감소하면서 50 mg/L 이하의 값을 나타내었다. TN과 TP의 경우에는 각각 약 20 mg/L, 3 mg/L의 초기 월류수가 발생하였으며 12시까지 지속적으로 감소하여 각각 7 mg/L, 0.6 mg/L의 값을 나타낸 후에 다시 증가하는 것으로 나타났다. 강우 초기에는 세척효과에 의해 유역에 누적되어 있는 오염물질이 함께 유입된다.^{11~13)} 또한,

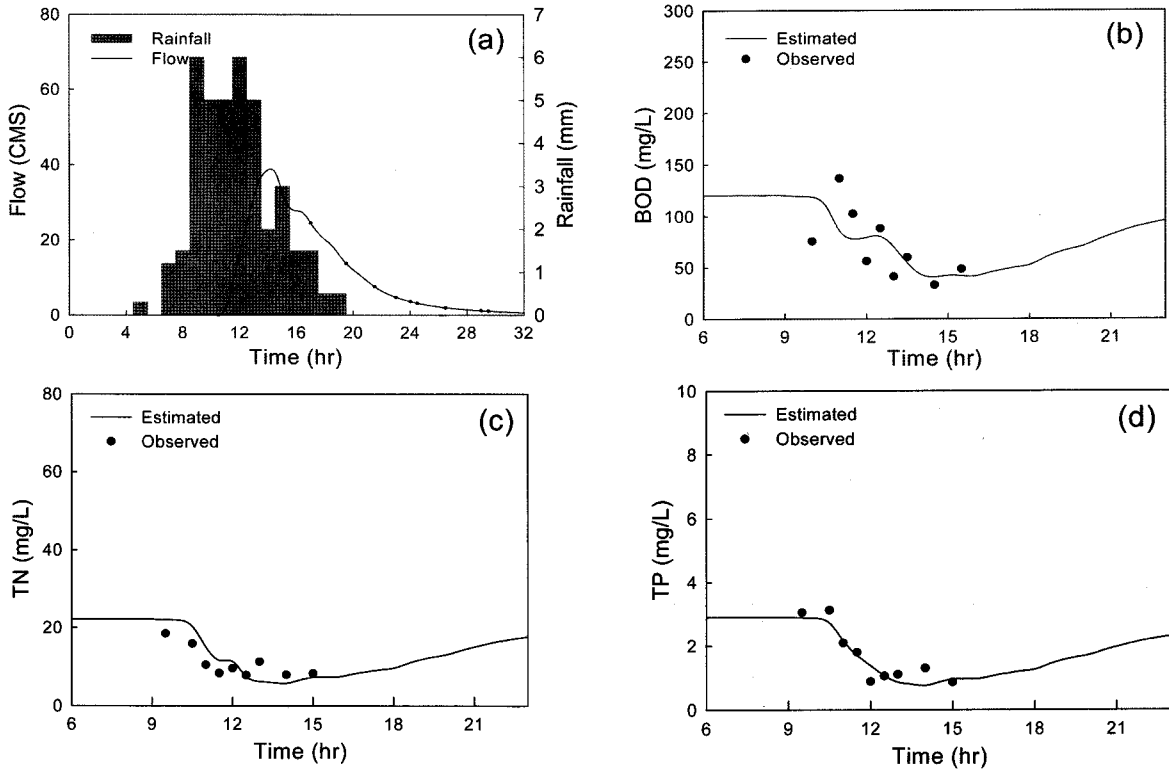


Fig. 4. Prediction flow and observed rainfall and results of water quality simulation: (a) Prediction flow and observed(2003. 4. 29), (b) Result of BOD simulation, (c) Result of TN simulation, (d) Result of TP simulation.

월류수 중에 고농도의 하수 비율이 상대적으로 높기 때문에 월류되는 양은 적지만 농도가 큰 월류수가 하천으로 유입될 수 있으므로 초기 월류수의 수질이 높게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 강우가 지속되면 강우 초기에 비해 유역에서 발생하는 오염물질의 유입이 감소하게 되며 유출수의 증가로 인한 희석효과로 수질이 개선되었다. 강우 소멸시기에는 월류수 중의 하수 비율이 증가하기 때문에 수질이 다시 악화되는 것으로 나타났다.

월류수질은 시간에 따른 강우량 변화 패턴에 의해 감소 및 증가현상을 나타내고 있으며 그 현상은 BOD의 경우에 뚜렷하게 나타났다(Fig. 4). 반면에 TN과 TP의 경우는 수질이 완만하게 변화하는 것으로 나타났다. 특히, TP의 경우에는 강우시 지속적으로 감소하여 0.8 mg/L의 값을 나타냈으며 강우 소멸시기에는 하수의 비율이 높아지기 때문에 수질농도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, TN과 TP는 각각 10 mg/L, 1 mg/L 이하로 감소된 반면에 BOD의 경우에는 최소 30 mg/L에서 최대 120 mg/L까지 증가하는 것을 볼 때, 월류수로 인해 하천의 BOD 악화가 클 것으로 판단된다.

3.3. 하천 수질 변화

월류수에 의한 하천 복원 후 수질 예측 결과를 보면, BOD의 경우 월류가 발생하는 시점부터 급격하게 농도가 증가하여 85.7 mm/day(design storm I) 강우사상과 60.6 mm/day

(design storm II) 강우사상에서 모두 최대 30 mg/L 이상의 값을 나타내었다. 이 때, 하수의 BOD 농도는 유출수질에 비해 월등히 큰 값을 나타낸다. 그러므로 월류 발생시 목표수질인 3 mg/L를 크게 상회하여 두 강우시 각각 최대 32 mg/L, 38 mg/L까지 악화되었다. 반면에 TN과 TP의 경우는 고농도의 월류수가 유입되지만 시간에 따라 농도가 개선되어 각각 10 mg/L, 1 mg/L 이하의 값을 나타내었다. TN의 경우는 월류되기 이전에는 1 mg/L의 값을 나타내다가 월류발생 시점부터 85.7 mm/day(design storm I) 강우사상에서는 최대 6 mg/L, 60.6 mm/day(design storm II) 강우사상에는 최대 8 mg/L까지 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5). TP의 경우는 월류발생 이전에는 두 강우 모두 0.1 mg/L 이하의 값을 나타내다가 오염부하량이 유입되면서 각각 최대 0.8 mg/L (design storm I), 1.0 mg/L(design storm II)까지 증가하는 것으로 나타났다.

강우량 차이에 의한 수질 변화를 분석한 결과, 강우량이 작은 60.6 mm/day(design storm II)의 강우사상에서는 강우량이 큰 85.7 mm/day(design storm I) 강우사상보다 BOD가 최대 159%, TN이 최대 158%, TP가 최대 153%까지 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 유출수에 의한 희석효과로 강우강도가 큰 경우에는 하천으로 유입되는 월류수에서 하수가 차지하는 비율이 작기 때문이다. 이 때, 강우 초기의 수질 악화시점에 차이가 나타났으며 강우가 지속됨에 따라 수질변

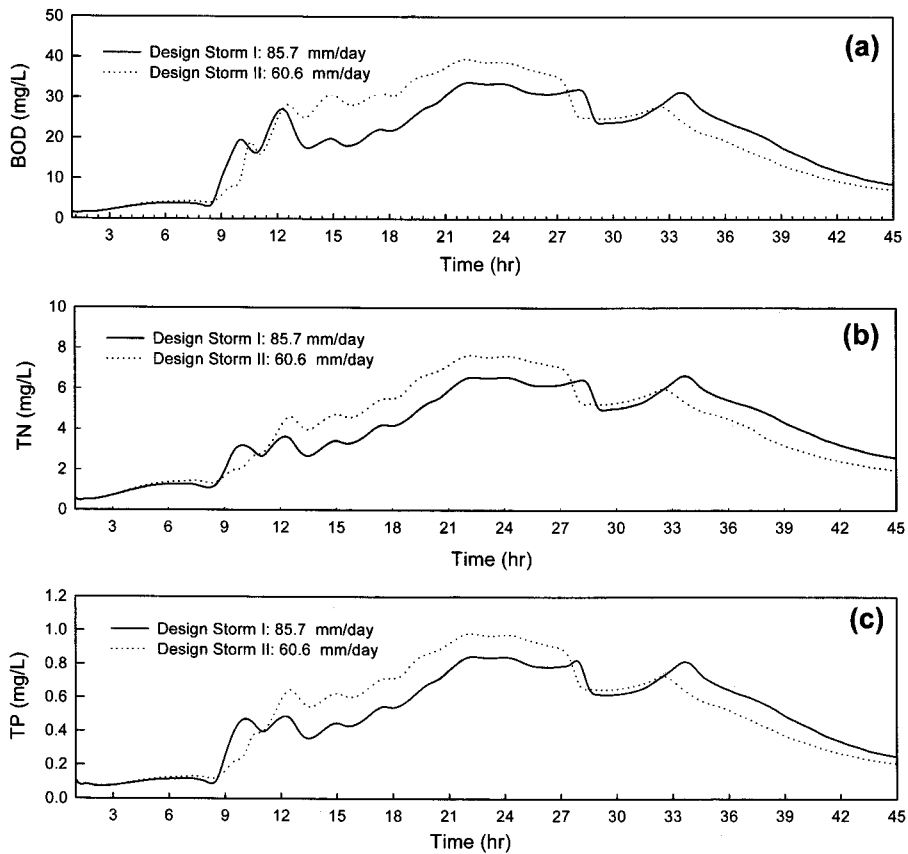


Fig. 5. Results of water quality simulation with respect to Design Storm I and II: (a) Result of predicted BOD simulation, (b) Result of predicted TN simulation, (c) Result of predicted TP simulation.

화 패턴은 강우량에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다(Fig. 5). 강우량이 큰 경우(design storm I: 85.7 mm/day)에는 월류 발생이 빠르기 때문에 수질 악화가 빨리 나타나게 되며 강우가 지속되면서 월류수 중에 하수보다 상대적으로 수질이 양호한 유출수의 비율이 크기 때문에 강우량이 작은 경우(design storm II)보다 하천 수질이 개선된 것으로 판단된다.

수질의 시간별 변화를 보면, 여러 시점에서 침투 유량이 나타나는 것을 알 수 있었다. 강우시 발생하는 유출수는 각 소유역의 불투수면적 비율 등의 특성 차이가 나며, 유출수가 관거로 차집되는 시간에 차이가 있을 수 있다. 또한 월류수에 의한 하천 수질 예측이 하천의 하류 지점에서 예측된 결과로, 강우시 상류에서 발생하는 월류수가 하류 하천 수질에 미치는 영향이 시간에 따라 차이를 나타내기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 CREEK-1에 내재된 유역모델과 수질모델을 적용하여 청계천 복원 전 유역 월류수의 특성을 파악하고 모델의 적용성을 검토하였으며 복원 후 강우시 하천으로 유입되는 월류수에 의한 하천 수질 변화를 예측하여 강우량 차이에 의한 영향을 비교, 분석하였다. 유역모델 모의 결과, 유량 결과가 대체적으로 관측치를 잘 모의하는 것으로 나타났으며 결과에서 오차를 나타내는 것은 각 소유역별 시간에 따른 하수량 변화 경향을 자세하게 고려하기 어렵고, 강우시 유출수와 하수가 시간에 따른 실제 혼합되는 비율의 정확한 파악이 어렵기 때문으로 판단된다. 강우시 월류수 발생시점과 월류량은 강우강도와 패턴에 의해 결정되어 강도가 클수록 침투 유량이 나타나는 시기가 빨라지는 것을 알 수 있었다. 또한, 선행강우가 나타난 후에 발생하는 강우시 월류가 발생하는 시점이 빨라지는 것으로 나타났다. 유출수질 결과도 대체적으로 관측치를 잘 모의하는 것으로 나타났으며 TN과 TP 보다는 BOD 문제가 큰 것으로 나타났다. 시간에 따른 수질 변화를 분석해 볼 때, 강우 초기의 월류수에 의한 수질 악화 뿐만 아니라 강우 소멸기에도 월류수 중에 하수의 비율이 커지기 때문에 월류 발생 말기에 대한 대처도 필요할 것으로 분석되었다. 또한, 강우 피크시기에는 강우 유출수에 의한 희석효과에 의해 농도는 감소하지만 유입부하량은 증가하므로 이를 충분히 반영할 수 있는 차집관거 운영 계획이 필요할 것으로 사료된다. 월류수 발생으로 인한 하천 수질 변화는 총 강우량 25.1 mm의 차이의 두 강우에서 강우량이 작은 경우에 BOD, TN, TP 모두 150% 이상 높은 농도의 수질이 나타났으며 이는 유출수에 의한 희석효과의 영향으로 판단

된다. 시간별 수질변화 결과에서 여러 시점에서 침투값이 나타났으며 이는 하류지점에서 하천 수질이 예측되어 강우시 각 소유역에서 발생하는 월류수의 영향이 하류지점에 미치는 시간 차이와 각 소유역별 발생하는 유출수 특성의 차이 때문이다.

참고문헌

1. 이두진, 신용배, 윤현식, 선상윤, 광수동, “분류식 우수유출 오염부하 비교를 통한 CSOs 저감목표 설정 기초연구,” 대한환경공학회지, **25**(11), 1420~1428(2003).
2. Duchesne, S., Mailhot, A., Dequidt, E., and Villeneuve, J. P., “Mathematical modeling of sewers under surcharge for real time control of combined sewer overflows,” *Urban Water*, **3**(4), 241~252(2001).
3. 이종각, 방기웅, 이준호, “합류식하수관의 오염물질 유출 특성에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **18**(10), 1147~1160(1996).
4. 서울시, 정릉천 등 5개 하천정비 기본계획 보고서(2001).
5. 이혜숙, 복원 청계천 수질 예측 모델 연구, 이화여자대학교 환경학과 석사학위 논문(2004).
6. 박석순, 강호정, 경관생태학적 원리를 이용한 소수계 물 관리 진단 시스템 개발, 이화여자대학교, 21세기 프론티어 수자원의 지속적 확보기술 개발사업 최종보고서(2003).
7. 윤춘경, 전지홍, 함종화, “SWMM과 회귀분석법에 의한 유역의 오염부하량 산정비교,” 한국물환경학회지, **17**(2), 157~168(2001).
8. Huber, W. C., EPA Storm Water Management Model, SWMM User's Manual v4.0(1991).
9. Ambrose, R. B., WASP5, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory User's Manual and Programmer's Guide, USEPA(1993).
10. 강유선, 박석순, “도시개발에 따른 수환경 변화 예측을 위한 소수계 유역·하천 통합 모델 연구,” 환경영향평가학회지, **13**(4), 153~164(2004).
11. 조주연, 정호진, “합류식 하수관거의 월류수(CSOs) 관리 방안 고찰,” 환경과학논집, **7**(1), 253~263(2002).
12. Gupta, K. and Saul, A., “Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows?,” *Water Research*, **30**(5), 1244~1252(1996).
13. Tsihrintzis, V. A. and Hamid, R., “Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM,” *Hydrological Processes*, **12**(1), 311~329(1998).