

도시유역에서의 유출 및 수질해석 모형

Urban Runoff and Water Quality Models

이 종 태*

Lee, Jong Tae

Abstract

The characteristics of storm and water quality are investigated based on the measuring data of the test river, the Hongje. The water quality of the test river is generally good comparing to other urban rivers in Seoul, because of the interception of sewer flow. But this system makes the river dry up for 3-4 months in winter. On the other hand, in rainy period the storm from the combined sewer system causes rapid increasing pollutants loads. In order to simulate the urban storm and water quality of the test basin, the models such as SWMM, ILLUDAS, STORM, HEC-1 were applied and the results are compared in its applicability and accuracy aspects. All models discussed here have shown good results and it seems that SWMM is the most effective model in simulating both quantity and quality. Also, regression relations between the water quantity and quality were derived and their applicabilities were discussed. This regression model is a simple effective tool for estimating the pollutant loads in the rainy period, but if the amount of discharge is bigger than measuring range of raw data, the accuracy becomes poor. This model could be supplemented by expanding the range of collecting data and introducing the river characteristics. The HEC-1 would be another effective model to simulate storm runoff of a river basin including urban area.

Keywords: runoff model, quality model, urban river, SWMM, STORM, HEC-1, ILLUDAS

요 지

도시하천의 유출 및 수질특성을 홍제천 시험유역에서의 관측자료에 의하여 분석하였다. 시험유역의 수질은 건기시 차집 관료에 의한 하수의 차단으로 비교적 양호한 수질을 보이는 반면, 이로 인하여 동기의 약 3-4개월동안에는 건천화의 현상을 보였다. 한편, 우기시에는 합류식 하수계통으로부터의 급격한 비점원 오염부하량의 증대를 보였다. 도시유출 및 수질을 해석하는 모형, SWMM, ILLUDAS, STORM, HEC-1 등을 적용하고 그 결과를 비교분석하였다. 또한, 시험유역에 대한 유출·수질상관식을 도출하고 그 적용성을 검토하였다. 검토 모형들은 전반적으로 양호한 적용성을 보였으며, 유출과 수질해석의 양면에서 SWMM이 검토모형중에서 가장 우수한 것으로 판단된다. 또한, 실측자료에 근거한 유출·수질상관 모형을 도출하였으며 우기시의 오타부하량의 과사산정에 효과적인 것으로 판단되었으나, 유량이 관측 자료의 범위를 벗어나면 그 정확도가 크게 떨어졌다. 이 모형은 대상 유역의 관측자료 확충으로 보완되어 나가야 할 것이다. 한편 현재 실무에서 널리 사용되는 HEC-1도 도시유역에서 경제적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유출모형, 수질모형, 도시하천, SWMM, STORM, HEC-1, ILLUDAS

* 경기대학교 건설공학부 교수

Prof., School of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi 442-760, Korea

1. 서 론

도시 지역의 홍수로 인한 침수의 범위와 기간은 비교적 소규모이지만 이로 인한 재산손실과 다수의 이재민, 교통차단, 단수, 단전 등으로 국가, 사회에 주는 피해의 파급규모는 매우 크다. 이는 이미 '87년, '90년의 집중호우로 인한 서울시 망원동, 성내, 풍납동 등의 침수피해와 '96년 문산, 파주, 연천 등의 홍수피해에서 체험한 바 있다.

인구집중 및 산업화로 인하여 도시지역은 자연하천 유역과는 상이한 유출특성을 갖게 된다. 도시화의 영향으로 기후의 변화, 기저유출의 변화, 수질의 악화, 그리고 침투능 및 증발산량의 감소 등이 예상되며, 특히 불투수층의 증가 및 우배수관의 설치로 인한 침투홍수량의 증가와 홍수도달시간의 감소는 도시유역의 홍수피해액을 가중시키는 요인이 되고 있다. 도시유역에서의 배수체계의 개선을 위해서는 합리적인 배수로망의 구성, 우수지를 비롯한 각종 저류시설의 확보, 배수펌프장 기능의 강화와 각종 하천시설물의 지속적인 관리 및 호우시의 적절한 대응이 필요하다.

또한, 도시지역에서 방출되는 각종 오염물질들은 도시하천 및 하류하천의 수질환경 및 생태계에 악영향을 주며 취수원을 오염시킴으로서 용수공급에 차질을 초래하기도 한다. 도시유역에서의 오염부하량의 정확한 산정은 이러한 문제의 해결을 위하여 선행되어야 할 또 하나의 연구과제이다. 우리나라의 경우 하수의 차집, 처리에는 상당한 연구 및 투자가 집중되고 있으나, 유역 전반에 걸친 도시 수문 및 환경수리학적 접근 수단은 충분히 활용되고 있지 못한 실정이다.

본 연구에서는 서울의 대표적인 도시하천중의 하나인 홍제천 유역을 시험유역으로 선정하여 '96년부터 '98년 현재까지 우량, 유량관측과 수질측정을 실시하여 도시하천의 유출특성을 분석하여 오고 있으며, 이를 바탕으로 도시지역을 갖는 하천유역에서의 유출 해석 모형들의 적용성을 비교 검토하였다. 또한 강우기간에 하천으로 직접 유입되는 오염부하량을 산정하기 위하여 강우사상별 유출·수질모형들을 적용하고 그 결과를 실측치와 비교·검토함으로써 도시 수문환경의 정량적 해석을 위한 기초자료를 마련하였다.

2. 도시유역에서의 유출 및 수질 모형

유출량의 산정을 위하여 비교적 그 적용성이 양호한 확정론적 모형들로서 경제적으로 사용할 수 있는

SWMM, ILLUDAS, STORM, HEC-1 등을 검토하였으며, 수질오염 부하량의 적절한 평가를 위하여 수질 및 부하량을 산정하는 모형인 SWMM, STORM 및 유출·수질상관모형 등을 시험 배수구역에 적용하고 그 결과와 문제점들을 검토하였다.

이들 모형의 대부분은 국내에 이미 소개되어 활용되어 오고 있으나 우리나라 도시 하천의 실측자료에 근거한 구체적인 적용성의 비교 평가는 아직 충분하지 못한 실정이다. 각 모형들에 대하여 간단히 요약하여 기술하면 다음과 같다.

2.1 SWMM 모형

EPA의 SWMM은 도시유역에서의 유출 및 수질 해석모형이다. 이 모형은 1969~1971년에 Metcalf & Eddy사, University of Florida, 그리고 WRE (Water Resources Engineers)사 등의 세 연구 그룹에 의하여 개발되었다. 1971년의 초판은 기본 알고리즘을 이해하는데는 도움이 되겠으나 version 4.0 (Huber와 Dickinson, 1988)의 등장으로 폐기되었다. 초기 모형은 주로 CSO(Combined Sewer Overflows)에서의 수질문제를 해석하는데 중점을 두었으나, 점차 도시유역의 비점원 오염해석과 합류 및 분류하수관로에서의 수문, 수리해석에도 적용되기 시작하였다.

이 모형은 우수관로의 설계, 장래 배수계획의 검토, 수질문제, 수리 및 흐름추적 등의 공학적 문제를 해석하는데 기여하고 있다. 다양한 형태의 단순 및 복합강우와 각종 오염 부하량 산정 및 비도시 소유역에 대한 해석도 가능하다.

본 모형은 RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN, STORAGE/TREATMENT 등 4개의 블록과 STATISTIC, GRAPH, COMBINE, RAIN, TEMP 등의 자료 입출력 관련 블록으로 구성되어 있다. RUNOFF에서는 강우로부터의 지표유출 및 수질을 해석할 수 있다. 한편, TRANSPORT에서는 운동학적 방법으로 건기 및 우기시의 관로의 흐름과 수질을 해석한다.

본 모형에 관한 기본적인 적용 및 연구는 김정환(1993), 신현식(1993), 이종태 등(1996) 등에 의하여 국내에 그 내용과 적용방법을 소개한 바 있다. 본 연구에서는 SWMM에서 RUNOFF와 TRANSPORT를 이용하여 유출 및 수질을 해석하였다. 즉, 이 두 블록을 합성하여 해석함으로써 유량, 지표면에서의 오염물

축적(bulid-up)과 쓸림(washoff), 오염물질의 농도 및 오탁부하량 등을 계산할 수 있다.

2.2 ILLUDAS모형

이 모형은 Michael과 John(1974)에 의해 개발되었다. RRL모형이 포장지역으로의 유출만을 고려하는 것과 달리 ILLUDAS는 녹지에서의 유출을 추가시킨 모형이다. 이 모형에서는 배수구역을 여러 개의 소유역으로 나누고 그 배수구역에서의 포장 및 비포장지역에 대한 유출 등을 분석함으로써 각 소유역에서의 포장 및 비포장지역의 지표면 유출수문곡선을 얻게된다. 이 수문곡선들은 유역 출구지점에 이르는 하류방향으로 RRL방법과 유사하게 합성, 추적된다. 강우를 동시간 간격으로 나누어 그 증분을 분할된 소유역에 적용한 후 그 증분만큼의 유출이 소유역 출구점까지 도달하는데 걸리는 시간을 산정한다. 각 지점에서의 우배수관 크기를 결정할 수 있으며 설계의 한부분으로서 저류지도 포함시킬 수 있다.

녹지에서의 유입수문곡선을 유도하는 과정은 포장지역과 비슷하나, 등유달시간의 산정에서 Izzard(1946)의 식이 사용되며 유달시간으로부터 등유달선이 그려진다. 한편, 간접 포장지역에 떨어지는 강우는 비포장 지역으로부터 균등하게 유출이 발생한다고 가정하였다. 이 모형에 관한 상세한 내용과 적용에는 서울특별시(1988)의 '87 수해백서에 의하여 국내에 널리 소개된 바 있다.

2.3 STORM 모형

1973년 HEC에 의하여 개발된 이 모형은 샌프란시스코 시의 합류식 하수도(CSO)의 오염부하량 저감설계를 위하여 비롯되었다. 최초 버전은 HEC과의 계약으로 1973년 1월에 WRE에 의해서 완성되었다. 프로그램의 일부는 이에 앞서 EPA와 샌프란시스코 시의 도움으로 WRE에 의해 개발되었었다.

HEC은 입출력 형식을 수정하여 STORM의 이용방법을 표준화하였고, 이 프로그램을 수정한 많은 프로그램들을 개발하였다. 근간의 버전에서는 건기시의 흐름도 해석할 수 있도록 하였다(DODSON, 1991). 본 모형은 CSO를 위한 처리와 저류용량 결정에 널리 사용되고 있다.

STORM은 단순 유출계수를 사용하며 시간별 강우 입력자료로 부터 유효우량의 깊이를 산정하기 위해 SCS법과 단위도법을 사용한다. 관가에서의 흐름추적과정은 없으며 유출량은 일정 하수 처리장과 저류지로 분

류되며 저류용량을 넘는 유량은 결국 CSO에 부하된다.

유출량은 계수법, SCS 법, 및 합성법 중의 한 방법으로 계산한다. 계수법에서는 유역의 투수부분과 불투수부분에 대한 유출계수들이 사용되며, 단일 합성유출계수를 얻을 수 있도록 유역에서의 총 면적에 대한 불투수면적비에 의해 각각의 가중치를 주었다.

STORM은 연속 모의모형이므로 각각의 토지이용에 대한 초기 곡선번호들이 필요하며, 건기시 토양수분 저류 가능량, 초기손실, 침투 등의 자료에 근거한 기목으로 각 호우발생 초기의 토양수분 저류가능량을 계산한다.

합성법은 투수 유역에서는 SCS법을 사용하고 불투수 유역에서는 계수법을 사용한다. 강우시의 수질은 지수 쓸림방정식(exponential washoff equation)에 의해서 계산된다. 이 방정식은 대상유역에서 오염물의 질량과 각 시간 동안에 쓸려 나간 오염물질의 질량, 유출률, 그리고 오염물 쓸림율을 지배하는 지수들로 표현된다.

STORM 모형은 도시 유역과 비도시 유역의 유출량과 수질을 분석한다. 모형은 이들 임의의 보존성 오염성분의 오탁부하량을 능률적으로 산정하도록 구성되어 있다. 분석결과는 쓸림, 월류량, 수질에 대한 통계학적인 결과치와 각각의 사상들에 대한 오염도곡선으로 나타난다. 프로그램에서는 여섯가지 기본 수질변수들(TSS, BOD, TN, PO₄, 총 대장균수)의 부하량과 농도가 계산되며 지표면 침식이 계산된다. 이 모형을 이용하여 호우유출(storm water runoff) 및 지표면 침식에 대한 유출량과 수질을 조절하기 위한 저류, 배수 시설들의 크기를 설계할 수 있다.

또한 이 모형은 호우와 관련된 요소들간의 상호작용을 고려하였다. 즉, 강우/용설, 유출, 건천후시 유출, 오염물 축적과 쓸림, 지표면 침식, 처리율, 그리고 저류용량 등이다. STORM은 우기와 건기시 유출(가정용, 상업용, 산업용, 및 관침투)량과 수질을 예측하며 시간별 강우기록의 분석, 연평균 유출, 각 오염물 등에 대한 연평균 쓸림, 저류지로 부터의 연평균 월류량 등의 통계치들을 산정한다.

이 모형을 이홍근(1995)은 이전 중리천(유역면적 8.67 km²)에 적용하고 실측치와의 비교를 실시한 바 있다.

2.4 HEC-1 모형

이 모형은 1967년 HEC(Hydrologic Engineering

Center)에서 Leo R. Beard에 의해 개발되기 시작하여 1968년 10월에 최초로 소개되었다. 이 모형은 유역과 하도에서의 유출해석, 댐의 안전도와 파괴분석, 홍수피해 분석 및 홍수조절시스템 설계 등에 적용될 수 있다.

HEC-1 모형에서 채택하고 있는 유출해석 방법은 크게 단위도 방법과 운동파방법의 2가지로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 지표면 유출과정에 비교적 충실한 운동파방법을 사용하였다(HEC, 1981).

유역의 유출과정은 지표면유출, 집수수료, 및 주수로 등의 3 가지 요소로 구분하여 유출계통을 구성되며, 지표유출과정은 4가지 매개변수로 표현된다. 즉, 유역의 지표면 흐름의 길이, 경사, 유역조도계수, 및 소유역 면적의 백분율(%) 등이다.

한편, 운동파 해석에 의해 산정되는 하도의 흐름해석을 위해서는 하도길이, 경사, 형상, 조도계수, 폭 또는 직경 및 측면경사 등이 사용된다.

2.5 유출·수질 상관모형

하천에서 실측한 유량과 각 수질오염성분 자료들 간의 상관성을 산정하는 통계모형의 개발이 가능하다. 즉, 이 모형은 강우사상에 대한 유출 및 오염부하량 자료로부터 동일시간에서의 유량과 오염농도 또는 부하량을 함께 도시하며, 회귀분석을 통하여 적절한 상관관계식을 유도함으로써 결정된다.

3. 시험유역의 유량, 수질측정과 특성 분석

3.1 홍제천 시험 배수유역

홍제천은 서울시의 북서쪽에 위치하고 있으며 남서류하여 한강으로 유입하고 있는 준용하천으로서 지표로는 불광천이 있다. 홍제천의 유역면적은 약 16.8 km² 이고, 유로연장은 약 9.46 km 이다(표 1). 이 유역은 서대문, 은평구로 구성되어 있으며 '97년 12월말 현재 약 1,047,283명의 인구가 거주하고 있다. 홍제천 하구의 우측에는 난지도가 있으며, 상류 약 250 m 지점에는 성산대교가 위치하고 있다. 유역의 평균표고는 약 105.70 m 이다. 상류부의 하상경사는 급경사를 이루고

표 1. 대상 유역의 토지이용 현황

하천	구분	주거지	임야	초지	기타	총면적
홍제천	면적 (km ²)	11.76	3.36	0.000	1.68	16.8
	구성비율(%)	70.0	20.0	0.0	10	100

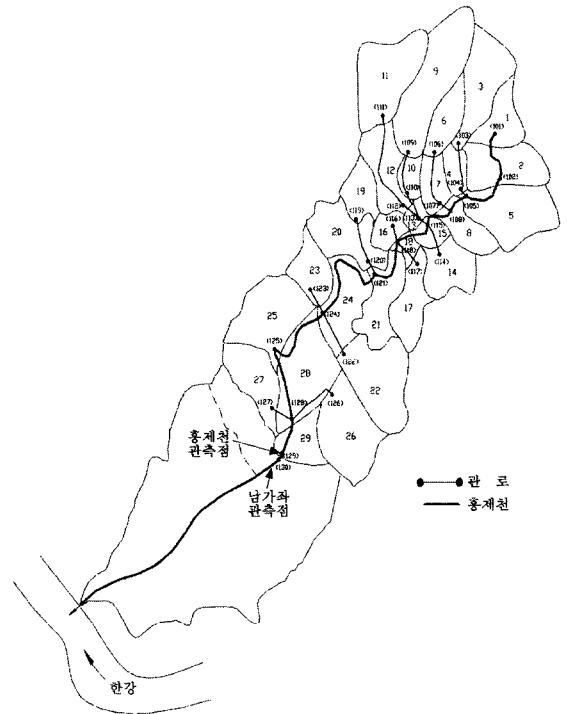


그림 1. 시험 유역의 소유역분할 및 유량·수질 관측점 위치

있으며 하류부는 평탄한 편이다. 최상류부에는 북한산 국립공원이 위치하며 남장대(EL. 715.7 m)가 홍제천 수계의 최원 시점이다. 상류부의 하상은 대부분 암반이 노출되어 있으며 중,하류부는 분류하수관로시설과 더불어 하상정비가 되어 있다(서울특별시, 1988).

배수관로 시스템자료는 관할구청 하수과의 관망자료와 1/3,000 지도를 가지고 조사하였다. 시험유역은 서대문구청 앞을 하류단으로 한 상류 전 유역을 검토범위로 하였으며 '96년부터 현재까지 경기대 수공학연구소에서 유출 및 수질을 지속적으로 측정하여 오고 있다. 유역은 그림 1과 같이 29개의 소유역으로 구성되어 각 소유역과 관로, 하천에 절점 번호를 부여하였다.

3.2 유량측정 및 유출특성

3.2.1 유량측정

시험유역내의 기존 수문관측시설로서는 서대문구청의 디지털 우량계와 인근에 위치한 기상청 자기우량계가 있다. 그러나, 서대문구청 디지털우량계는 우량기록이 시간단위로 기록됨으로 10분단위까지의 해석을 수행하

는 도시하천의 수문해석에는 어려움이 있었다. 이를 보완하기 위하여 본 연구실에서는 서대문구청 하수와 옥상에 자기유량계를 추가로 설치하였다.

하천수위와 유량은 시험구역의 출구점인 서대문구청 앞 홍연2교 직하류의 폭 29.1 m의 웨어에서 비강우시에는 수위와 유속을 측정하여 산정하였고, 강우시에는 부표와 수위-유량 관계곡선을 활용하였다. 또한 같은 지점에서 수질을 측정 또는 시료를 채취하였다. 비강우시는 매주 또는 격주 목요일 13:00경에 측정하였고, 강우시는 강우 시작부터 강우종료 후 수위가 평수위에 이를 때까지 10분, 30분, 또는 1시간 간격 등으로 측정하였다. 또한 유출량의 24시간변화를 관측하기 위해서 계절별로 1회씩 1시간 간격으로 24회 연속측정도 실시하고 있다.

3.2.2 유출특성

홍제천의 '96년 6월~'98년 2월간의 비강우시 유량의 변동 폭은 0.0~0.6 cms(평균 약 0.16 cms)이며 8월과 11월 전후 사이에 유량변화가 심했다(그림 2). 한편 12월에서 2월간의 농절기에는 유량이 거의 흐르지 않는 건천화 경향이 관찰되었다.

비강우시 홍제천의 24시간 유량변동양상은 계절과 측정시기를 전후한 강우유무에 따라 다르겠으나 대체로 0.089~0.3 cms(평균 0.12 cms)였다. 시간대별로는 오전 11시와 오후 4시 전후에 다소 큰 유량이 관측되었다. 시험구역 출구에서의 3개년간 월별 평균유량은

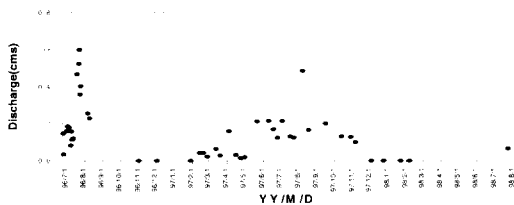


그림 2 홍제천의 유황곡선('96.6~'98.7)

표 2와 같다. 한편, '96년 8월 13일, '97년 5월 7일, 5월 12일, 6월 25일 및 9월 2일 등의 5개 강우사상에 대하여 실측한 자료로부터 분석한 시험구역에서의 홍수 평균도달시간은 약 한시간 반 내외로 추정되었다.

또한, 실측 수위와 유량자료로부터 수위와 유량관계곡선을 유도하였다(표 3, 그림 3). 강우기간의 수위와 유량과는 높은 상관성(상관계수: 0.982)을 보인 반면, 평상시(비강우시)에는 상관성이 우기시에 비해 다소 약했다(상관계수: 0.825). 이는 비강우시에는 유량이 미소하기 때문에 광폭웨어에서의 유속과 수심측정에서 그 정확도가 결여될 수 있기 때문으로 판단된다.

3.3 수질측정 및 특성

3.3.1 수질측정

시험배수구역의 출구에서 시료를 채취하여 각 수질 항목에 대하여 분석하였다. 즉, '96년 6월부터 비강우 기간에는 정기 측정을 실시하여오고 있으며, 강우기간에는 연속측정을 실시하였다. 수질분석은 환경오염공정 시험법이나 표준시험법에 준하였다. 현장에서 실측이 가능한 항목들은 현장에서 측정하였으며, 나머지 항목은 시료를 즉시 실험실로 운반하여 분석하였다.

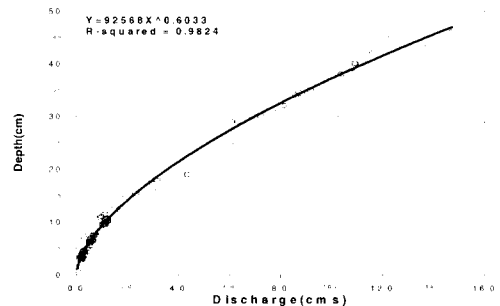


그림 3 홍제천 수위-유량관계곡선(강우시)

표 2. 홍제천 월별 평균 기저유출량(cms)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
유 량	0.00	0.04	0.05	0.07	0.12	0.13	0.21	0.28	0.20	0.13	0.10	0.00

표 3. 홍제천 수위-유량 관계곡선식

구 분	강우시	평상시
유량 - 수위	$Flow = 9.2568 \times H^{0.6033}$	$Flow = 8.5833 \times H + 0.9192$

주) Flow; 유량(cms), H; 수위(m)

표 4. 홍제천 건기시 월별 농도, 부하량

수질성분		월											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
농도	BOD ₅	7.8	16.0	16.1	9.3	15.0	15.6	11.1	12.4	19.5	11.0	9.0	4.0
	COD	42.5	17.5	30.0	25.0	30.0	41.7	47.1	15.5	6.5	70.0	30.0	70.0
	SS	8.9	15.6	2.7	7.6	2.9	7.9	6.8	12.1	2.5	6.2	4.0	16.1
	TN	12.7	10.4	7.7	6.6	6.2	9.2	8.3	23.6	22.6	18.5	12.0	6.4
	PO ₄	1.6	1.5	1.5	1.4	1.2	1.8	1.6	1.6	1.9	1.5	1.7	1.7
	DO	5.0	6.9	5.8	12	8.6	5.3	6.7	5.9	7.9	8.0	8.3	6.2
	PH	7.6	8.9	7.4	9.6	9.0	8.8	8.0	7.7	8.6	9.1	8.9	7.5
부하량	BOD ₅	*	73.6	95.3	82.1	223.6	261.8	303.4	454.9	505.4	185.3	116.6	*
	COD	*	80.5	178.1	220.0	447.1	699.0	1291.0	569.5	168.5	1179.4	388.8	*
	SS	*	71.8	16.0	67.1	42.5	132.9	186.1	443.8	64.8	104.5	51.2	*
	TN	*	47.8	45.4	58.1	91.8	153.6	227.5	867.8	585.8	311.9	155.7	*
	PO ₄	*	7.0	8.9	11.9	18.3	29.5	44.4	58.1	48.0	24.9	21.4	*

주) 농도: mg/l, 부하량: kg, *: 건천화(유량없음)

3.3.2 수질특성

홍제천의 '96년 6월~'97년 11월간의 실측자료 분석 결과 평상시에는 BOD₅ 1~20 mg/l, COD 6.5~120 mg/l, SS 0.1~43.7 mg/l, TN 1.62~24.5 mg/l 및 PO₄ 1.2~2.05 mg/l 등으로서 각 수질농도는 측정 지점을 전후한 강우의 유무, 강우량 및 발생시기에 따라 큰 영향을 받았다. 전반적으로 수질은 하수의 차집으로 인하여 안정된 양상을 보여주고 있으나, 하수차집은 건기시에 건천화의 경향을 촉진하는 부작용을 보여주었다. 한편, 오염물 총부하량면에서는 우기인 여름철이 높게 나타났는데, 이는 우기시의 유량증가 때문인 것으로 판단된다. 표 4는 건기시의 농도와 부하량의 월 평균치를 나타낸 것이다. 표에서 12월의 부하량은 기저 유량이 없었으므로 산정이 불가능하였다.

홍제천의 비강우시 수질측정결과를 하천수질환경기준과 비교하면 BOD₅는 공업용수 3급 기준에 못 미치는 것으로 나타났고, SS는 비교적 양호한 것으로 나타났다. PH는 봄과 가을에 기준치 보다 높게 나타났다. DO는 상수원2급 기준치에 상응하게 나타났다. 한편, TN과 PO₄ 측정치를 호소기준과의 직접비교는 곤란하였다. 전반적으로 본 시험구역의 비강우시 수질은 다른 한강의 다른 주요지천(시정개발연구원, 1994)보다는 비교적 수질상태가 양호한 것으로 나타났다.

한편, '96년 8월 13일, '97년 5월 7일, 5월 12일, 6월 25일, 및 9월 2일 강우시의 실측자료들로 분석한

홍제천의 수질특성은 BOD₅ 2.7~79 mg/l(평균 44.4), COD 20~918 mg/l(평균 204.6), SS 2.5~3421 mg/l(평균 645.9), TN 1.98~22.57 mg/l(평균 9.35), PO₄ 0.36~12 mg/l(평균 1.7)였다. 이를 최대농도면에서 평상시와 비교했을 때 SS 약 73배, BOD₅ 약 4배, COD 약 5배로서 강우시에는 하천수질기준치를 월등히 초과하는 오염물이 한강으로 집중적으로 배출됨을 알 수 있다(김도형, 1998). 따라서 저류지 설치 등의 강우시의 오탐부하량 저감 대책 마련이 필요하다. 한편 건기인 12월에는 홍제천의 기저유량을 건천화로 거의 없게되며 따라서 오탐부하량의 산정은 곤란하였다.

4. 모형의 적용 및 결과분석

4.1 유출모형

본 연구에서 선정된 유출모형(SWMM, ILLUDAS, STORM, HEC-1)들을 비교 검토하기 위하여 시험배수구역에서의 실측강우('96년 8월13일, '97년 5월7일, 5월12일, 6월25일, 9월2일)들에 대하여 모형들을 적용하였다. 이에 앞서 각 해당 모형이 실측 유출량에 가장 근사한 모의결과를 보여주는 적정 매개변수의 추정이 선행되었다. 즉, 실측치와 모의치간의 상대오차를 최소로 하는 매개변수들을 최적으로 결정하였다. 이에 관한 구체적인 추적과정 및 민감도분석은 강태호와 이종태(1998)이 수행한 절차를 따랐으며, '96년 8월 13일, 5월 7일 및 5월 12일 강우를 대상으로 각각 최적매개변

표 5. 유출 모의결과 비교 ('97년 5월12일)

항 목	실측치	SWMM	STORM	ILLUDAS	HEC-1
V	1.30E+5	1.35E+5	1.49E+5	6.32E+4	9.98E+4
Q_p	10.90	11.44	12.56	10.75	10.00
t_o	7.75	8.40	9.00	7.67	8.33

주) V: 유출용적 (m^3), Q_p : 첨두유량 (cms), t_o : 첨두발생시간 (hrs)

수의 결정하고 그 결과를 다시 종합한 최적치를 도출하였다. 그러나 적용성에 관한 검증은 모형에 개발단계에서부터 오랜동안의 검증을 거쳤으므로 생략하고, 홍제천 유역에서의 각 모형에 의한 적용 결과치와 실측치와의 비교를 중점적으로 검토하였다.

한편, 본 시험유역에서의 자료에 의해 개발된 유출-수질 상관모형에 대하여서는 별도로 검토하였다.

4.2 유출모형의 적용

홍제천 유역에서 관측된 여러 강우사상에 대하여 모형들을 적용하고 그 결과들을 유출용적, 첨두유량 및 발생시간 등에 대하여 실측치와 비교 검토하였으며, 그 결과들을 예시하면 다음과 같다.

(1) '97년 5월 12일 강우

'97년 5월12일 강우는 강우기간의 후반까지 약한 강우가 지속되다가 강우후반부에 강우가 집중되는 후방 분포형이다. 이 강우에 대하여 각 모형들을 적용하고 계산 결과를 비교하였다. 유출용적면에서는 SWMM이 실측치와 비교적 잘 일치하였고, STORM과 HEC-1도 비교적 양호했다. 그러나, ILLUDAS는 작게 모의되었다. 한편, 첨두유량면에서는 SWMM, ILLUDAS, HEC1 등이 비교적 실측치와 잘 일치하였다. 첨두발생 시간면에서는 ILLUDAS를 제외한 각 모형들은 실측치와 다소의 편차를 보였으며 특히 STORM은 타 모형에 비해 큰 편차를 보였다. 모의 결과는 표 5 및 그림 4와 같다.

(2) '97년 6월 25일 강우

'97년 6월25일 강우는 강우기간의 중반부와 후반부에 각각 피크를 보이는 연속 강우의 형태이다. 유출용적면에서 SWMM, ILLUDAS 등에 의한 계산치는 실측치와 비교적 유사했고 STORM은 과대, HEC-1은 과소 산출되었다. 첨두유량면에서는 SWMM, STORM 등이 비교적 양호했고 ILLUDAS, HEC1 등은 작게 산출되었다. 첨두 발생시간면에서는 STORM을 제외한 모든 모형들은 비교적 잘 일치하였

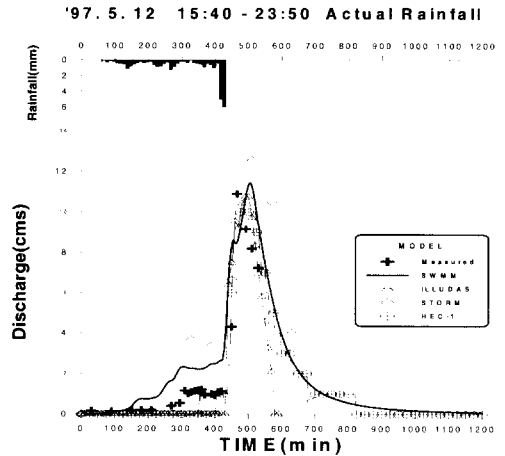


그림 4. 유출 모의결과 비교('97년 5월 12일)

다. 모의치를 실측치와 비교한 결과는 표 6 및 그림 5와 같다.

(3) '97년 9월 2일 강우

'97년 9월 2일 강우는 강우기간의 중후반부에 집중되는 강우형태이다. 모의결과 유출용적면에서는 SWMM, ILLUDAS 등은 실측치와 비교할 때 비교적 좋은 결과를 보여 주었으며, STORM은 과대, HEC-1은 과소 산출되었다. 첨두유량면에서는 모든 모형들이 대체로 양호했다. 첨두발생시간면에서는 ILLUDAS와 HEC-1 등은 다소 빨랐으며, STORM은 느리게 산정되었다. 모의치를 실측치에 비교한 결과는 표 7 및 그림 6과 같다.

이상의 검토결과에 의하면 전반적으로 4개의 유출모형들은 실제 강우로 인한 유출을 비교적 잘 모의하는 것으로 판단되었다. 단, STORM의 경우는 유역의 도달시간이 최소 2시간이 넘는 유역에 적용한다면 본 연구에서의 결과보다 더욱 좋은 결과를 기대할 수 있을 것으로 본다.

한편, 상류의 자연지역과 중하류의 도시지역이 복합적으로 구성된 홍제천 유역의 경우에는 HEC-1도 상

표 6. 유출 모의결과 비교 ('97년 6월 25일)

항 목	실측치	SWMM	STORM	ILLUDAS	HEC-1
V	6.51E+4	7.84E+4	1.07E+5	5.83E+4	3.61E+4
Q_p	10.13	8.97	11.03	7.60	7.00
t_o	4.12	3.92	5.00	4.20	3.84

주) V : 유출용적 (m^3), Q_p : 첨두유량 (cms), t_o : 첨두발생시간 (hrs)

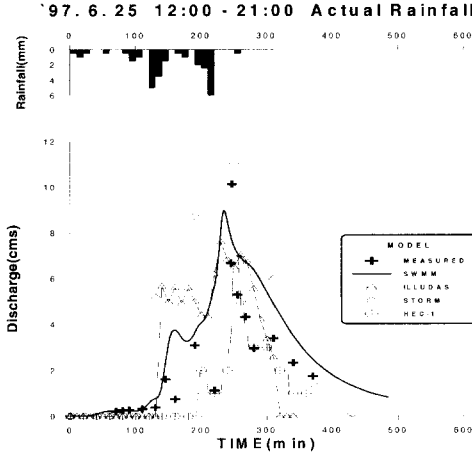


그림 5. 유출 모의결과 비교('97년 6월 25일)

당한 적용성을 보여주었다. 그러나 유출 용적 면에 있어서는 SWMM을 제외한 각 모형들은 실측치와의 상당한 편차를 보였다. 이는 최적 매개 변수의 결정이 주로 첨두유량과 발생시간에 주안점을 둔 결과이기도 하며 유출용적과, 첨두유량 및 발생시간을 동시에 발생하는 최적 매개변수의 결정과 적정 CN값, 침투능 산정 등에 대하여서는 앞으로의 지속적인 보완 연구가 필요하다.

전반적으로는 도시유출에 관련한 이론적으로 가장 정교한 SWMM에 의한 모의 결과가 전반적으로 결과치에 잘 접근하는 경향을 보여주었으나, 비교적 입력자료가 단순한 타 모형의 적용도 요구되는 정밀도가 크지 않다면 그 적용에 큰 무리가 없다고 판단된다.

4.3 수질 해석모형

유출·수질해석모형인 SWMM과 STORM의 수질 해석에 관한 특성을 비교 검토하기 위하여 시험유역에서의 5개 실측강우와 유량 및 수질자료를 바탕으로 연구를 수행하였다. 이 경우에도 강우 유출분석에서의 마찬가지로 각 수질영향인자들이 결과치에 미치는 민감도를 분석하기 위해서 실측 농도 및 부하량 등에 근사하는 최적 매개변수의 추정이 선행되었다. 결정된 매개변수를 사용한 모형의 적용성을 실측 강우사상에 대하여 적용 분석하였다.

한편, 수질측정은 유역출구에서 강우강도에 따라 현장에서 수온, DO, 전도도 등을 측정하였고, SS,

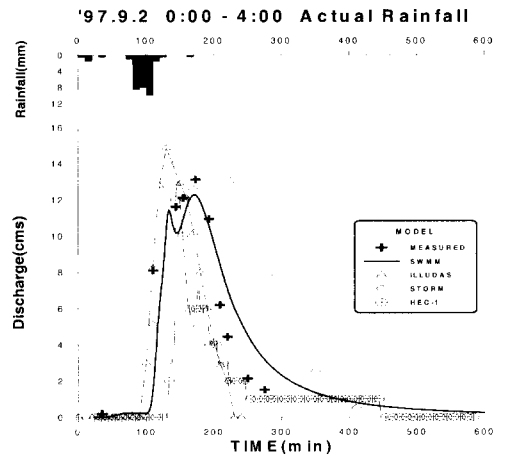


그림 6. 유출 모의결과 비교('97년 9월 2일)

표 7. 유출 모의결과 비교 ('97년 9월 2일)

항 목	실측치	SWMM	STORM	ILLUDAS	HEC-1
V	8.35E+4	9.91E+4	1.40E+5	6.66E+4	4.76E+4
Q_p	13.13	12.27	13.16	14.86	13.00
t_o	2.88	2.85	4.00	2.17	2.43

주) V : 유출용적 (m^3), Q_p : 첨두유량 (cms), t_o : 첨두발생시간 (hrs)

BOD₅, COD, TN, PO₄-P 등은 환경오염공정시험법에 의거하여 측정하였다. 한편 지역의 오염물 축적량을 파악하기 위해, 본 연구에서는 1997년 3월부터 1998년 현재까지 시험유역의 인근에 위치한 경기대학교 교정(서울)의 도로인접 위치에 정사각형(1 m×1 m)의 구역을 설정하여 건기일수 1일~13일간의 먼지를 측정하였으며, 평균 최대 오염물 축적량은 약 1 g/m²/일 이었다. 이 값은 서울시 대기 관측소의 평균값과 거의 일치하는 값이다. 먼지 축적의 일별 분포도는 그림 7과 같으며, SWMM 및 STORM의 수질 매개변수 결정시 입력자료로 활용하였다. 매개변수들은 시행착오법에 의한 최적치를 결정과정에 의하여 결정하

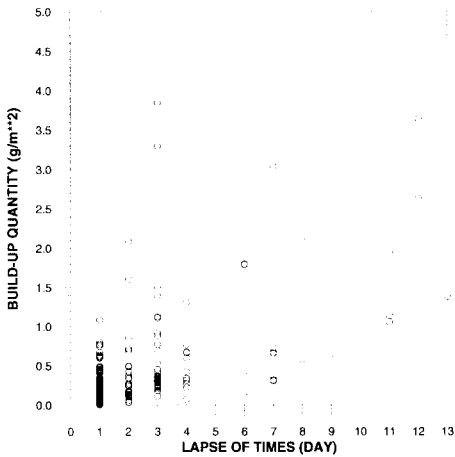


그림 7. 건기일수와 먼지 축적량

였다.

SWMM과 STORM을 실측 강우사상에 대하여 각각 적용하고 그 계산결과를 비교하였다. 이 때 선행 무강우 일수는 관측기록에 근거한 산정치를 각 강우사상에 적용하였다. 각 강우사상별 적용결과를 기술하면 다음과 같다.

(1) '97년 5월 12일 강우

이 강우의 경우 침투농도면에서는 대부분의 수질성분량이 실측치와 비교적 일치하였다. 한편, 총부하량면에서는 COD, TN, PO₄ 성분에 대한 부하량은 대체로 실측치와 일치 했으나 BOD₅, SS는 작게 산출되었다. 침투시각면에서는 대부분의 수질성분이 비교적 실측치와 근사하였다. 그러나, 시간분포면에서는 상당한 편차를 보였으며 특히 TN의 경우에는 실측치와 뚜렷한 차이를 보였다. 두 모형에 의한 모의결과를 실측치와 비교한 결과는 표 8 및 그림 8과 같다.

(2) '97년 6월 25일 강우

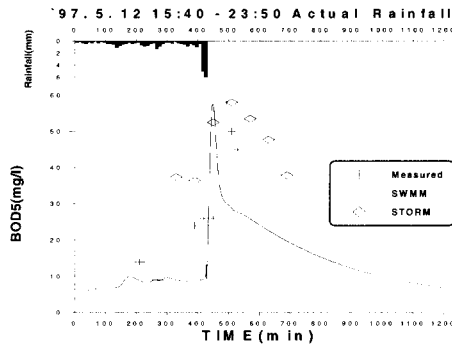
이 강우에 대한 두 모형의 적용결과 침투농도면에서는 대부분의 수질성분량들이 잘 일치하였다. 그러나 총부하량면에서는 모든 수질성분에 대해서 모의치가 실측치에 비해서 과소하게 산출되는 경향을 보였다. 한편, 침투발생 시간면에서는 대부분의 계산치가 실측치 보다 후반부에 나타나는 경향을 보였다. 모의결과는 표 9 및 그림 9로 나타내었다. 시간에 따른 수질분포형은 실측치와 다소의 편차를 보였으며 특히 STORM은 상당한 차이를 나타내었다.

(3) '97년 9월 2일 강우

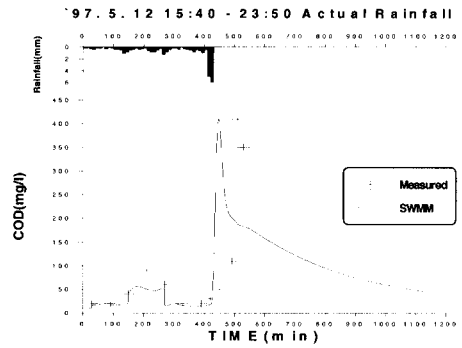
표 8. 수질 모의결과 비교 ('97년 5월 12일)

수질항목	구 분	실측치	SWMM	STORM
BOD ₅	총부하량	6.59E+3	3.14E+3	3.03E+3
	침투농도	58.0	57.6	58.0
	발생시간	8.20	7.47	9.00
COD	총부하량	2.97E+4	2.08E+4	
	침투농도	410.0	409.4	-
	발생시간	8.50	7.45	-
SS	총부하량	1.39E+5	6.72E+4	6.90E+4
	침투농도	1389.0	1388.0	1387.1
	발생시간	8.20	7.43	9.00
TN	총부하량	5.75E+2	4.77E+2	4.85E+2
	침투농도	9.3	9.4	9.4
	발생시간	4.50	7.45	9.00
PO ₄	총부하량	1.25E+2	9.74E+1	5.40E+1
	침투농도	1.1	1.1	1.1
	발생시간	8.50	7.52	9.00

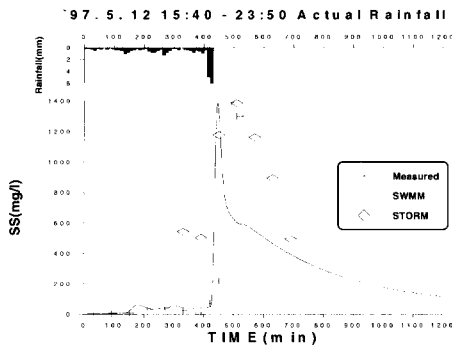
주) 침투농도: mg/l, 발생시간: hrs, 총부하량: kg



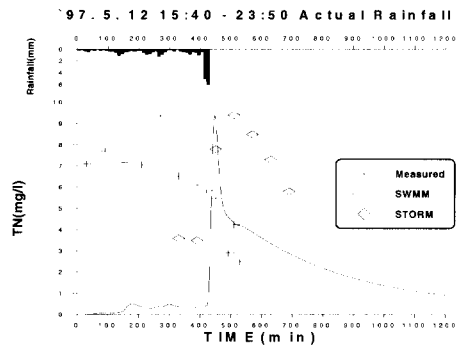
(a) BOD₅



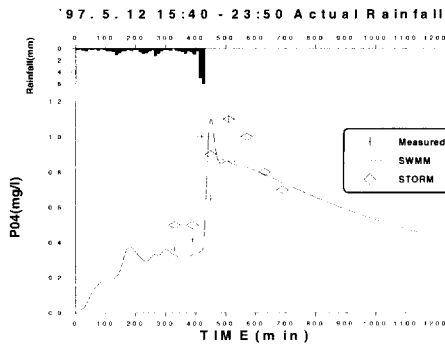
(b) COD



(c) SS



(d) TN



(e) TP

그림 8. 수질 모의결과 비교('97년 5월 12일)

이 강우의 경우에서도 두 모형의 계산치는 침투농도 면에서 대부분의 수질성분에 대해서 비교적 잘 일치하였다. 한편, 총부하량면에서는 SS와 PO₄ 성분에 대해서 다소 많게 산출되었고 그외의 성분은 대체로 양호하게 산출되었다. 침투 발생시간면에서는 BOD₅와 COD성분이 대체로 일치하였고 나머지 성분은 실측치보다 다소 전반부에 발생하였다. 이 경우에서도 앞에서

와 마찬가지로 수질의 시간분포형면에서는 상당한 편차를 보였다. 모의결과는 표 10 및 그림 10으로 나타내었다.

이상의 강우사상들에 대하여 두 모형을 적용한 결과의 공통점은 각 수질성분의 침투농도와 총부하량 및 발생시간면에서는 실측치와 상당한 접근을 보여 주었으나, 시간별 각 수질성분의 분포형태는 상당한 격차를

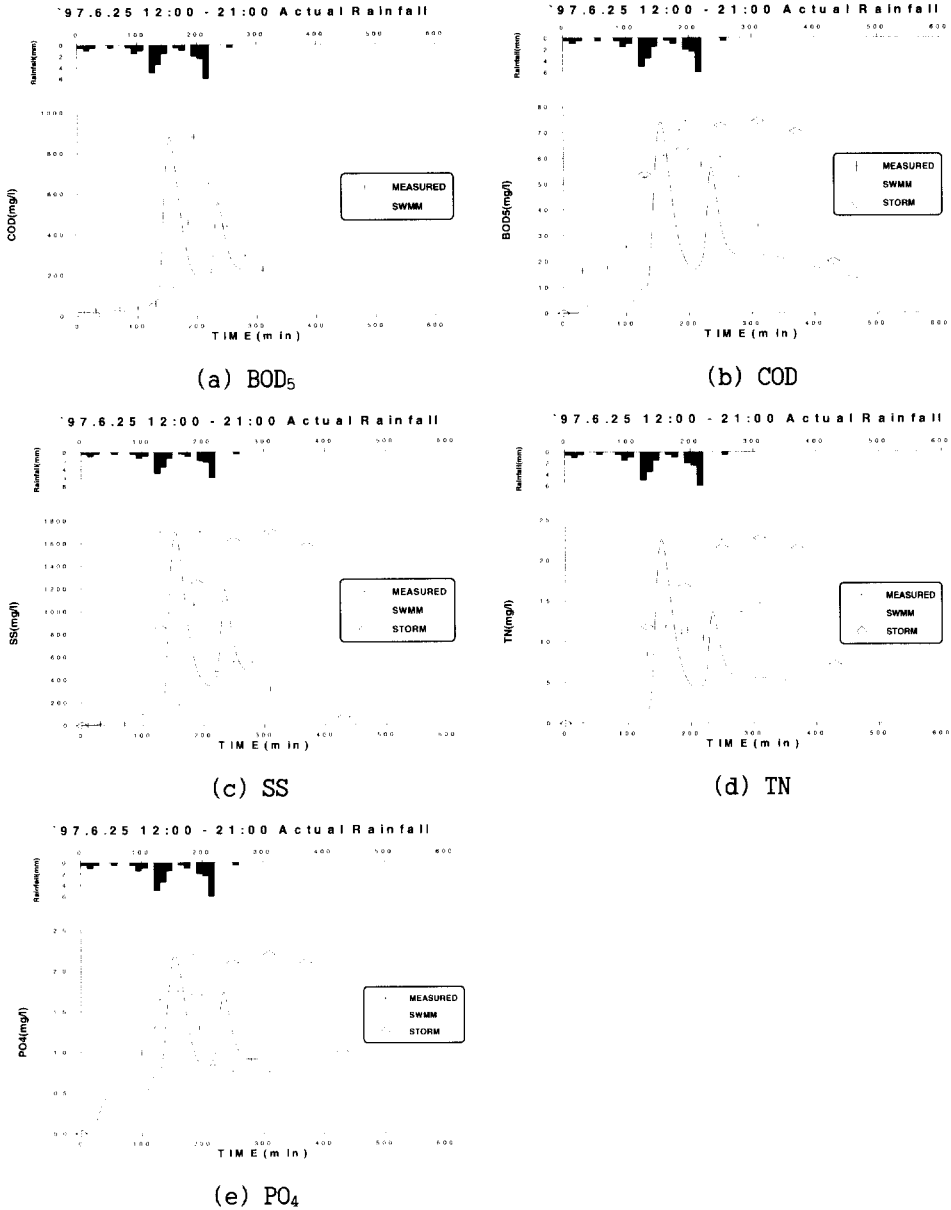


그림 9. 수질 모의결과 비교('97년 6월 25일 강우)

보여주고 있다는 점이며 이를 개선하기 위한 추가 연구가 필요하다.

4.4 유출·수질 상관모형

4.4.1 유출·수질 상관식 결정

홍제천유역에서 조사한 유출량과 각 수질농도간의

상관성을 강우시와 평상(비강우)시로 각각 구분하여 연구 검토하였다.

먼저 상관분석은 상관성을 높이면서 결과치에 객관성을 부여하여 유역면적이 다른 비슷한 성격의 타유역에도 적용 가능하도록 단위유역면적당의 유량과 부하량인, 비유량과 비부하량 간의 상관분석을 실시하였다. 비유량과 비오탁부하량 상관식은 식 (1)의 지수함수형

표 9. 수질 모의결과 비교 ('97년 6월 25일)

수질항목	구 분	실측치	SWMM	STORM
BOD ₅	총부하량	6.63E+3	2.23E+3	3.15E+3
	침투농도	74.5	74.2	74.4
	발생시간	3.25	2.59	6.00
COD	총부하량	4.60E+4	2.26E+4	-
	침투농도	880.0	878.0	-
	발생시간	3.25	2.57	-
SS	총부하량	8.74E+4	4.68E+4	6.95E+4
	침투농도	1701.3	1702.0	1702.6
	발생시간	2.17	2.57	6.00
TN	총부하량	1.41E+3	5.67E+2	9.24E+2
	침투농도	22.6	22.6	22.7
	발생시간	3.17	2.57	6.00
PO ₄	총부하량	1.55E+2	8.35E+1	9.20E+1
	침투농도	2.20	2.20	2.20
	발생시간	4.17	2.59	6.00

표 10. 수질 모의결과 비교 ('97년 9월 2일)

수질항목	구 분	실측치	SWMM	STORM
BOD ₅	총부하량	3.71E+3	4.20E+3	4.99E+3
	침투농도	75.5	74.2	75.6
	발생시간	2.58	2.15	3.00
COD	총부하량	3.34E+4	4.27E+4	-
	침투농도	918.0	917.0	-
	발생시간	2.58	1.98	-
SS	총부하량	2.51E+4	5.08E+4	5.47E+4
	침투농도	885.0	891.0	885.7
	발생시간	3.08	2.16	3.00
TN	총부하량	8.86E+2	1.02E+3	1.41E+3
	침투농도	22.3	22.3	22.3
	발생시간	3.08	1.96	3.00
PO ₄	총부하량	6.26E+1	1.06E+2	1.04E+2
	침투농도	1.6	1.6	1.6
	발생시간	3.08	2.21	3.00

을 선택하였다. 이러한 표현은 Jewell(1980), 신현석(1993) 등에 의해 제안 검토된 대표적인 형식 중의 하나이다. 회귀분석에 의해 시험유역에서 산정한 우기시의 비유량과 비오탁부하량간의 상관식은 표 11과 같다.

$$C = \alpha q^\beta \quad (1)$$

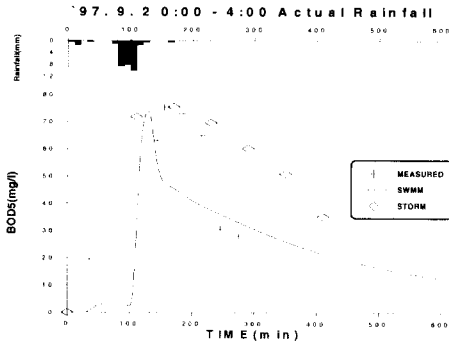
여기서 q 는 비유량(mm/hr), C 는 비오탁부하율(mg/sec/ha), α 와 β 는 회귀상수이다.

유량과 수질 상관성분석 결과 강우시에는 비교적 높은 상관도를 나타냈으나, 비강우시에는 상관성이 낮았다. 이는 비강우시의 수질농도가 이전 강우직후부터의 비강우일수와 상류에서의 하천정비, 수영장 등의 점원오염

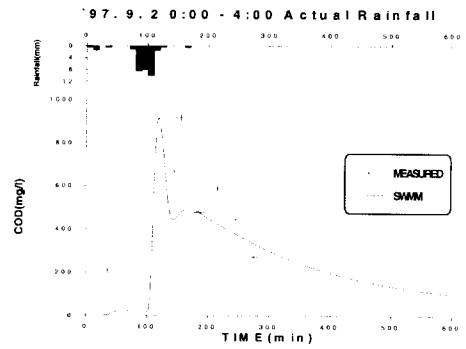
표 11. 평상시(비강우시) 유량-수질의 상관계수 R²

	q	SS	BOD ₅	COD	TN	PO ₄
q	1.0	0.297	0.495	0.552	0.226	0.596
COD	0.552	-	0.110	1.0	-	-

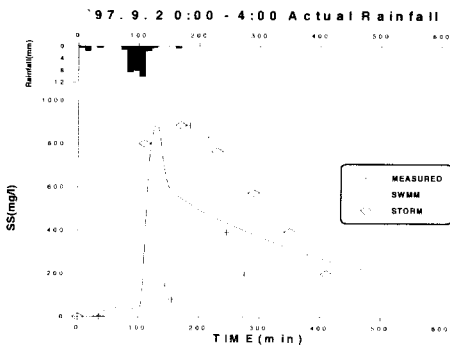
물 배출시설의 방류 등에 의한 영향 때문으로 판단된다. 표 11은 비강우시의 유량과 각 수질성분간의 상관계수를 나타낸 것이다. 이들 결과에서 알 수 있는 바와 같이 비유량과 BOD, COD 및 PO₄ 및 BOD₅와 COD의 비부하량간에는 약한 상관성을 제외하고는 비유량과 나머지 각 수질성분간의 상관성을 본 관측기간



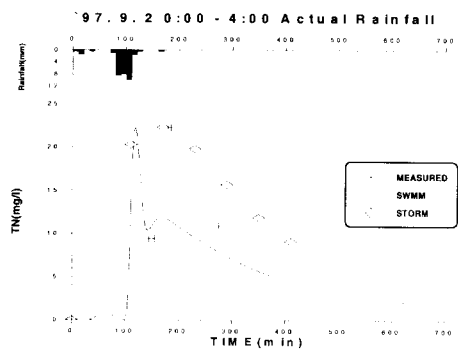
(a) BOD₅



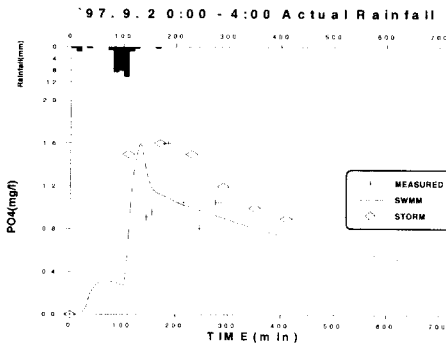
(b) COD



(c) SS



(d) TN



(e) PO₄

그림 10. 수질 모의결과 비교('97년 9월 2일 경우)

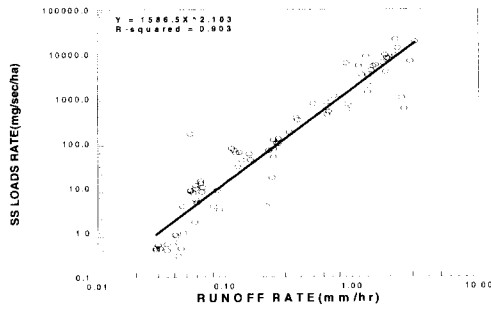
의 자료로서는 찾지 못하였으며 앞으로의 지속적인 검토가 요망된다.

한편, 우기시의 상관성 분석결과는 표 12 및 그림 11에서와 같이 전반적으로 강한 상관성이 있음을 알 수 있었다. 이는 평상시(비강우시) 수질은 예측이 어려운 다양한 요인들에 영향을 받는 것과는 달리, 강우기간의 수질은 강우가 비오염원 공급의 뚜렷한 일차적인

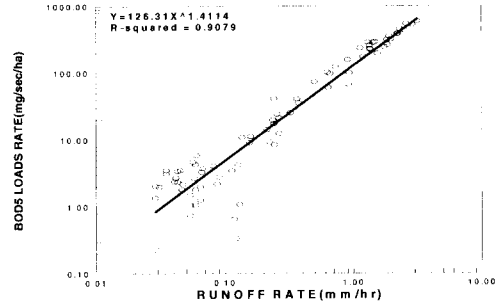
요인으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

4.4.2 상관모형의 적용

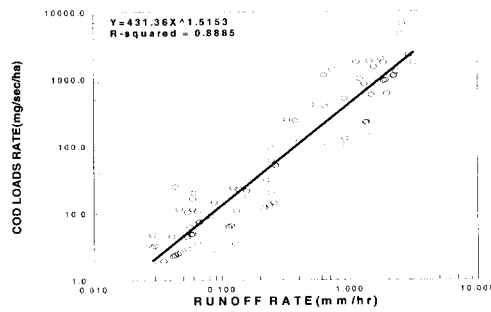
비유량과 비오탁부하량의 상관식(표 13)은 실측유량과 수질성분 자료에 의한 것으로서 대부분이 약 15 cms의 유량에서 측정된 자료에 의하여 유도된 것으로서, 이 범위내의 비교적 작은 강우의 경우에는 상관



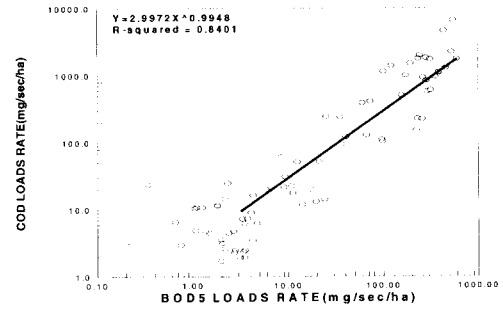
(a) q-SS



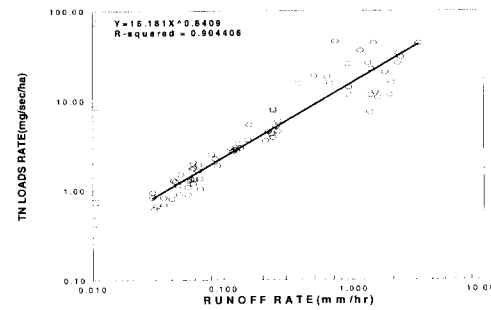
(b) q-BOD₅



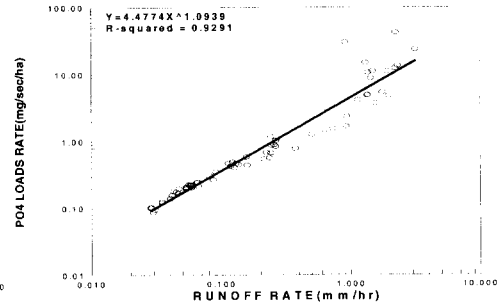
(c) q-COD



(d) BOD₅-COD



(e) q-TN



(f) q-PO₄

그림 11. 우기시 상관관계곡선

표 12. 강우시 유량과 수질의 상관계수 R²

	q	SS	BOD ₅	COD	TN	PO ₄
q	1.0	0.903	0.908	0.889	0.904	0.929
COD	0.889	-	0.840	1.000	-	-

식들이 실측치와 잘 일치하였지만 그 이상의 유량에서는 외삽의 영향으로 실측치와 다소의 편차가 발생할 것으로 짐작된다. 즉, 다음의 그림 12는 비교적 유량이 작은 '97년 5월 12일 강우에 대한 것으로 실측 농도와

표 13. 비유량-비오탁부하량 회귀곡선식(우기)

구 분	상 관 식
q-SS	$C = 1586.50 q^{2.103}$
q-BOD ₅	$C = 126.31 q^{1.4114}$
q-COD	$C = 431.36 q^{1.5153}$
BOD ₅ -COD	$C = 3.00 C1^{0.9948}$
q-TN	$C = 16.18 q^{0.8409}$
q-PO ₄	$C = 4.48 q^{1.0939}$

주) C1 (COD 비부하량) : mg/sec/ha

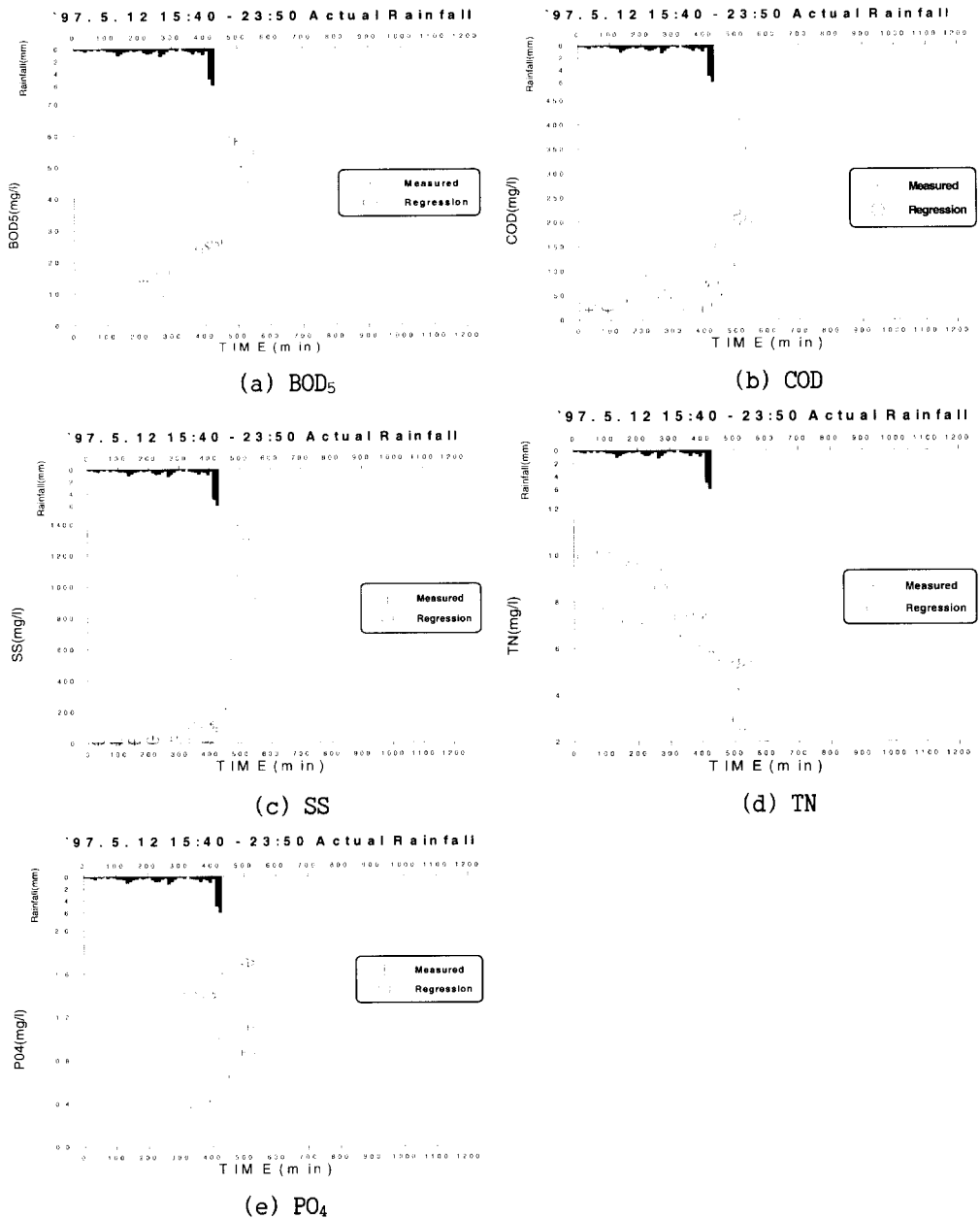
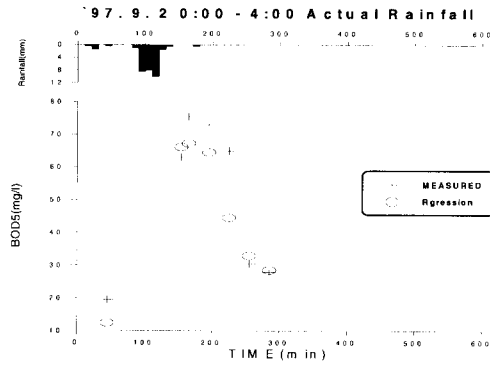


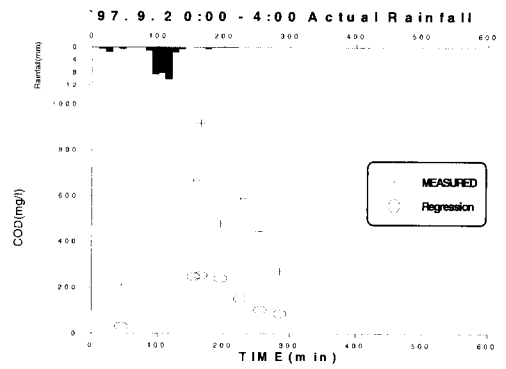
그림 12. 상관모형과 실측치의 비교('97년 5월 12일)

비교적 일치함을 보여주고 있다. 반면에 침투유량이 실측유량의 최대 경계치에 가까운 '97년 9월 2일 강우의 경우에는 앞의 경우보다 큰 편차를 보여주었다(그림 13). 이러한 한계를 극복하기 위해서는 앞으로의 추가적인 자료의 수집과 분석이 요구된다. 한편 동일한 유

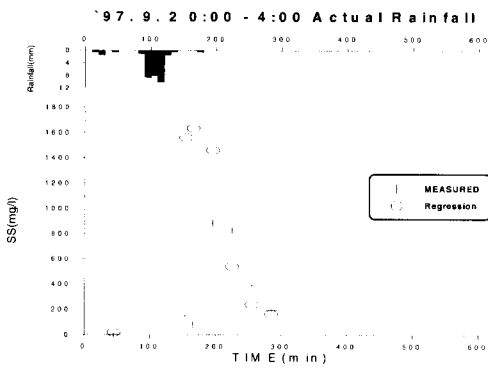
량에 대해서도 유량의 상승기와 하강기의 여부에 따라 수질성분과의 상관성에는 큰 차이가 예상되므로 이에 관한 검토도 아울러 필요하다.



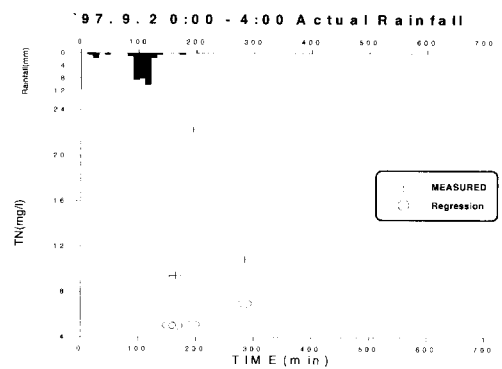
(a) BOD₅



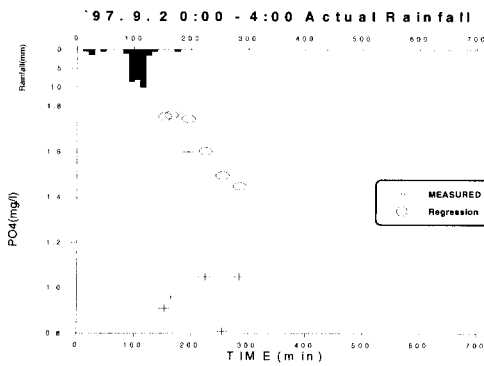
(b) COD



(c) SS



(d) TN



(e) PO₄

그림 13. 상관모형과 실측치의 비교('97년 9월 2일)

5. 요약 및 결론

이 논문은 도시유역에서 홍수피해와 비점원오염물에 의한 도시하천오염의 문제를 해결하기 위한 기초연구로서 서울의 대표적인 도시하천중의 하나인 홍제천을 시험유역으로 하여 유량과 수질을 측정하였으며, 이를 근

거로 유출 및 수질모형들의 적용성을 비교 검토하였다. 본 연구에서 검토된 유출모형들로는 SWMM, STORM, ILLUDAS, HEC-1과 유출-수질모형인 SWMM, STORM, 및 상관모형 등이었다.

(1) 시험유역 출구에서의 강우시의 최대농도는 평상시와 비교해서 SS 73.4배, BOD₅ 4배, COD 5.3배

및 PO_4 6배 등으로서 우기시에 오탉부하량이 급증함을 보여주었다.

(2) SWMM, STORM, ILLUDAS, HEC 1 등의 모형에 의해 산정한 침투유량, 유출용적, 침투발생시간 등을 실측치와 비교 분석하였으며 침투유량에서는 전반적으로 양호한 결과치를 보였으나 STORM은 다소의 차이를 발견할 수 있었고, 유출용적면에서는 STORM, HEC-1모형이 타 모형에 비해 정확도가 다소 떨어졌다.

(3) SWMM, STORM모형으로 산정한 침투농도, 발생시간, 총부하량 등을 실측치와 비교분석해 본 결과 침투농도면에서는 두 모형이 양호하였으나 총부하량면에서는 강우사상별, 수질성분별로 상당한 차이가 있었다. 한편, 침투발생시간면에서는 STORM의 경우에는 최소 산정 시간간격의 제약으로 정밀한 결과를 기대하기가 곤란하였다. 그러나, 시험구역보다 더 큰 구역에서는 그 적용성이 개선될 것으로 판단된다.

(4) 도시구역에 HEC-1을 적용해 본 결과 SWMM, ILLUDAS에는 미흡하지만 비교적 그 적용성이 양호한 것으로 분석되었으며, 이 모형이 실무에 널리 사용되고 있는 점을 감안하면 자연구역과 도시구역이 복합된 구역에서는 매우 경제적인 모형중의 하나로 판단된다.

(5) 강우시의 비유량과 비부하량간의 상관성을 분석해 본 결과 유량과 SS, BOD_5 , TN 및 PO_4 간에는 상관계수가 약 0.90~0.93으로 높은 상관성을 보였고, 유량-COD, BOD_5 -COD간에는 약 0.84~0.89로 비교적 높은 상관성을 보여, 유도된 상관식으로부터 유량 변화에 따른 수질성분의 예측이 가능하였다. 그러나, 외삽구간의 유량에 대한 수질 예측결과는 상당한 오차를 보였다. 이러한 문제는 보다 큰 유량에 대한 수질관측자료로 보완된 상관식의 개발로 극복되어질 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 '96년 한국학술진흥재단 교수해외과제 연구지원으로 이루어진 것으로서 자료조사 및 수질분석을 도와 준 경기대학교 수공학연구소실 여러분과 당국의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

강태호, 이종태 (1998). "도시구역에서의 최적 유출,

수질 매개변수의 결정과 특성연구." '98 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 171-176.

김도형 (1998). 홍제천유역에서의 유출 및 수질특성에 관한 연구. 경기대학교 석사학위논문.

김정환 (1993). 도시구역에서의 강우-유출해석을 위한 SWMM 모형의 연구. 경기대학교 석사학위논문.

서울특별시 (1988). '87 수해백서. 한국수문학회, pp. 573-662.

서울특별시 (1988). 홍제천 및 불광천 기본정비계획 보고서.

시정개발연구원 (1994). 한강수질관리 효율화 방안연구. 시정개발연구원, pp. 19-117.

신현석 (1993). 도시소유역에서의 유출과 비점원오염물 배출간의 상관관계에 관한 연구. 고려대학교 석사학위 논문.

이종태, 강태호, 김정환 (1996). "도시구역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM 모형." 제4회 수공학학술회 교재, 한국수자원학회, pp. 97-204.

이흥근 (1995). 수질정보 종합관리 시스템개발(유역수질관리를 위한 수질예측모형과 의사결정 지원 시스템 개발에 관한 연구). 서울대학교 보건대학원, 환경부.

DODSON (1991). *ProStorm: User's manual and program reference.*

HEC (1981). *HEC-1 flood hydrograph package: User's manual*, Hydrologic Engineering Center.

Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1988). *Stormwater management model ver. 4, Part A: User's manual*, E.P.A.

Izzard, C.F. (1946). "Hydrology of runoff from developed surface." *Proc. Highway Res Board*, Vol. 26. pp. 129-146.

Jewell, T.K. (1980). *Urban stormwater pollutant loadings*, University of Massachusetts Ph.D. Thesis, pp. 166-167.

Michael L.T. and John B.S. (1974). *The Illudas drainage area simulator, ILLUDAS*, State Water Survey Division.

(논문번호:98-047/접수:1998.07.31/심사완료:1998.10.27)