

도시유역의 유출 · 수질해석을 위한 ILLUDAS-NPS 모형

ILLUDAS-NPS Model for Runoff and Water Quality Analysis in Urban Drainage

김 태 화* / 이 종 태**

Kim, Tae-Hwa / Lee, Jong-Tae

Abstract

An ILLUDAS-NPS model was developed which is able to compute pollutant loadings and the concentrations of water quality constituents. This model is based on the existing ILLUDAS model, and added for use in the water quality analysis process during dry and rainy periods. For dry period, the specifications of coefficients for discharge and water quality were used. During rainfall, we used the daily pollutant accumulation method and the washoff equation for computing water quality each time. According to the results of verification, the ILLUDAS-NPS model provides generally similar outputs with the measured data on total loadings, peak concentration and time of peak concentration for three rainfall events in the Hong-je Basin. In comparison with the SWMM and STORM models, it was shown that there is little difference between ILLUDAS-NPS and SWMM.

keywords : Urban Drainage, Water Quality, NPS, ILLUDAS, ILLUDAS-NPS, SWMM, STORM

요 지

ILLUDAS-NPS 모형은 초기강우에 의한 수질항목별 오염부하량 및 농도계산을 위하여 개발하였다. 이 모형은 국내의 도시지역 유출해석에 주로 사용되는 ILLUDAS 모형에 건기 및 우기시의 수질해석 과정들을 추가한 것으로써 건기시의 경우 유량 및 수질 계산은 계수지정법을 사용하였으며, 우기시의 경우 유량 계산은 기존 ILLUDAS 모형의 알고리즘, 수질 계산은 일일 오염물 축적법과 쓸림방정식을 적용하여 계산시간별 오염물질 부하량 및 농도를 계산하였다. 모형의 검정을 위하여 홍제천 유역의 3개 강우사상을 대상으로 검토한 결과 총부하량, 침투농도, 침투농도 발생시간 등에서 전반적으로 실측치와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 이 모형에 의한 계산결과를 SWMM, STORM 등의 기존 도시유출 · 수질 모형들의 결과와 비교 검토하였는바, SWMM 모형과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 도시유역, 비점오염, 수질, NPS, ILLUDAS, ILLUDAS-NPS, SWMM, STORM

1. 서 론

비점오염원은 발생경로가 불명확하며 간헐적으로 하천에 유입하기 때문에 해석에 어려움이 많다. 비점오염

물질은 토양, 토지이용상황 및 선행건기일수 등에 따라 초기 강우시 하천수질에 영향을 미치게 되며 특히, 강우조건에 따라 도시하천에 부하되는 양상은 다양하다. 비점오염원의 발생과정과 부하량 산정의 어려움을 극

* 경기대학교 토목공학과 박사수료

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Seoul 120-702, Korea (e-mail: cowth@kyonggi.ac.kr)

** 경기대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Seoul 120-702, Korea (e-mail: jtlee@kyonggi.ac.kr)

복하기 위하여 비점오염 해석을 위한 다양한 모형개발 연구가 국내외에서 이루어져 왔다.

국외의 경우 Han과 Delleur(1979) 등이 기존의 ILLUDAS 모형을 이용하여 연속모의 및 수질해석이 가능하도록 DRAINQUAL 모형을 개발하였는바 STORM 모형내의 수질해석 서브루틴인 DIRT를 추가하여 BOD₅와 SS 항목의 결과치들이 기존의 STORM 모형보다 정확한 수질예측이 가능함을 증명하였다. Noel과 Terstriep(1982) 등은 지표유출 및 강우손실에 대한 공간적 변화를 고려하고, 운동과 해석에 의한 지표유출의 도달시간을 계산에 반영한 Q-ILLUDAS 모형을 개발하였다. 이를 통하여 수문곡선의 모양, 첨두부분 등이 실측치와 유사하게 나타남을 확인하였다. 또한, Terstriep과 Lee(1989) 등은 ILLUDAS 모형에 GIS 인터페이스를 결합하여 유량 및 수질을 모의할 수 있는 AUTO_QI 모형을 개발하였다. 이 모형에서는 수질계산 모듈에서 오염물질의 선형축적(Linear Accumulation) 및 지수쓸림 방정식(Exponential Washoff Equations)을 이용하였으며 쓸림감쇠계수 및 기본 개념 등은 기존의 SWMM 모형과 동일하다고 가정하였다. 또한, 사용자가 적용지역의 특징을 고려할 수 있도록 하였으며 강우 사상별로 총 오염물질 부하량(Total Washoff Loads)을 유출체적으로 나누어 유량가중 평균농도(EMC, Event Mean Concentration)를 결정할 수 있도록 하였다.

국내에서는 방기웅 등(1997) 등이 도시지역의 오염물질 유출부하량 원단위를 산정하기 위하여 합류식 하수관 월류수의 수질을 예측할 수 있는 ILLUDAS-POLL 모델을 구성하여 보정 및 검증을 실시하였다. 이 모형에서 유출오염부하량은 단위면적당 단위강우량당의 오염물질유출량의 원단위를 산정한 후 소유역별 면적, 강우강도, 인구밀도 그리고 노면의 청소주기를 고려하여 산정하였다. 또한 초기 세척효과(First Flushing Effect)와 회석효과 등을 기

본식에 반영하였다.

본 연구에서는 도시유역의 유출 및 수질을 동시에 모의하기 위하여 국내에서 도시 배수구역의 유출해석에 널리 사용되고 있는 ILLUDAS 모형에 수질해석 모듈을 추가시킨 ILLUDAS-NPS 모형을 개발하였으며, 실제유역에 적용한 결과를 SWMM 및 STORM 모형들과 비교·검토하였다. 본 모형에서는 소유역의 토지이용 및 수질항목별 오염물질 계산 및 추적과정을 통한 배수계통 주요지점별 수질계산이 가능토록 하였다. 또한, 모형내 입력 강우자료의 시간간격 변화에 따른 수질모의가 가능하도록 구성하였다.

이상의 기존연구들을 강우사상, 오염물질 축적방법, 수질 항목 등을 중심으로 Table 1과 같이 비교하였으며 각 모형별 주요 특징들은 Table 2와 같다.

즉, 강우사상의 경우 Q-ILLUDAS, AUTO_QI 모형에서는 연속강우, DRAINQUAL, ILLUDAS-POLL, ILLUDAS-NPS 모형에서는 단기사상을 적용하여 수질 해석을 하였다.

오염물질 축적방법의 경우 DRAINQUAL 모형에서는 연석의 길이당 오염물질 축적량 계산 및 청소일수 등을 고려하였고, Q-ILLUDAS 모형의 경우 소유역별로 유사한 입경(총 5가지)을 고려하여 오염물질 축적량을 산정하였다. AUTO_QI 모형의 경우 시간의 경과에 따라 오염물질이 선형적으로 축적한다고 가정하였으며, ILLUDAS-POLL 모형에서는 인구밀도 및 청소인자를 고려한 오염물질 원단위법을 이용하였다. 금희 연구(ILLUDAS-NPS)에서는 토지이용 및 수질항목별 오염물질과 건기일수 등을 고려하여 축적량을 계산하였다.

수질해석 항목의 경우 DRAINQUAL 모형에서는 SS, BOD₅, ILLUDAS-NPS 모형에서는 SS, BOD₅, TN, TP 항목들의 모의가 가능하다. 한편, Q-ILLUDAS, AUTO_QI, ILLUDAS-POLL 모형들에서는 Iron, Lead, n-Hexane 항목 등을 수질계산에 적용하였다.

Table 1. 기존 연구 모형들과의 비교

모형	DRAINQUAL (1979)	Q-ILLUDAS (1982)	AUTO_QI (1989)	ILLUDAS-POLL (1997)	ILLUDAS-NPS (금희, 2005)
강우 사상	단기	연속	연속	단기	단기
오염물질 축적방법	Dust and Dirt	Surface Load Accumulation	Linear Accumulation	Pollutant Runoff Unit Load	Daily Pollutant Accumulation, Specification of the Coefficients
수질해석 항목	SS, BOD ₅	TSS, TDS, Phosphorus, K-Nitrogen, Iron, Lead	TSS, Phosphorus, Lead	SS, BOD ₅ , COD, TN, TP, n-Hexane	SS, BOD ₅ , TN, TP

Table 2. 모형들의 주요 특징

모형	주요 특징
DRAINQUAL	· 수질계산 시간간격을 기존 1시간에서 5분단위로 변환함으로써 STORM 모형에 의한 수질해석 결과치보다 관측치와 유사한 결과를 제시
Q-ILLUDAS	· 소유역별로 유사의 입경(총 5가지)을 고려하여 오염물질 축적량을 산정하였으며 오염 농도곡선의 모양 및 침투부분 등이 실측치와 유사
AUTO_QI	· Q-ILLUDAS 모형을 GIS 인터페이스와 결합하여 윈도우화 시킴으로 사용자 위주의 편리한 기능을 추가 적용
ILLUDAS-POLL	· 오염물 원단위 방법을 이용하여 축적량을 계산하였으며 구역의 규모 및 불투수/투수층 비율에 따른 수질변화 특성 분석
ILLUDAS-NPS (금회)	· 소유역별로 토지이용 및 수질항목에 따른 오염물질 축적량을 산정하고 수질 계산시간 간격을 변환하여 실측치와 유사한 결과를 제시 · 배수계통 주요지점별 유출 및 수질곡선 계산 가능 · 기존 SWMM 모형 보다 입력자료가 간단함에도 비교적 해석 결과 양호

2. ILLUDAS-NPS 모형

2.1 모형의 구성

도시구역의 초기강우 발생시 비점오염 물질의 부하로 인한 하천의 유출 및 수질 해석을 위한 ILLUDAS-NPS 모형은 기존의 유출해석 모형인 ILLUDAS에 수질모의를 위한 부분을 추가한 모형이다.

이 모형에서는 수질모의를 위하여 토지이용 상태를 주택지역, 고층 주택지역, 상·공업지역 및 공원녹지·농지지역 등의 4가지로 구분하였으며, 일일 오염물 축적법(Daily Pollutant Accumulation Method)을 이용하여 오염물질(SS, BOD₅ 등)별 일일 오염물질 축적량을

입력한 후 토지이용면적, 불투수면적, 건기일수 등을 고려하여 강우이전까지의 축적량을 산정하고 쓸림방정식(Washoff Equation)을 적용하여 계산시간별 오염물질 쓸림량을 계산한다. 건기시의 수질은 사용자가 선택사항으로 계산할 수 있게 하였는바 건기시의 경우 유량 및 수질 계산은 계수지정법(Specification of the Coefficients)을 이용하였으며 토지이용별 유량계수, 토지이용 및 수질항목별 오염물질 계수, 시간에 따른 유량비 및 부하율 등을 반영하였다.

이 모형은 단일 강우사상의 조건에서 중·소규모 도시구역의 비점오염을 해석하기 위하여 개발되었으며 주요 계산과정은 Fig. 1과 같다.

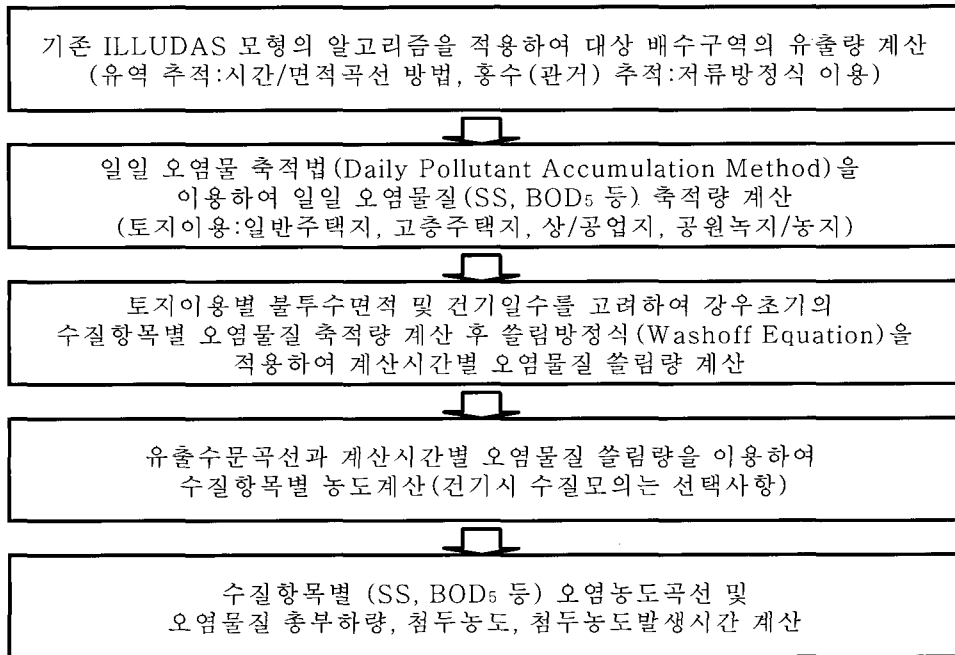


Fig. 1. ILLUDAS-NPS 모형

2.2 모형의 기본식

2.2.1 건기시 유량 및 수질

초기강우로 인한 수질모의를 위하여 오염물질을 산정하여 해당 시간의 유출유량으로 나누어 계산하게 된다. 건기시 유량은 각각의 토지이용별 유량계수를 고려하여 다음 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$Q = \sum(C_i \times NA_i) \quad (1)$$

여기서, Q는 토지이용별 총 유량(m³/day), C_i는 토지이용별 유량계수(m³/day/명(ha)), NA_i는 토지이용별 인구(명) 또는 면적(ha), 아래첨자 i는 토지이용을 나타낸다.

건기시 토지이용 및 수질항목별 오염물질계산 과정은 유량 계산 과정과 유사하며, 토지이용 및 수질항목별로 계수값을 입력하게 된다. 이때, 일반주택지역, 고층주택지역의 경우에는 인구수, 상·공업지역, 공원녹지·농지의 경우에는 면적을 적용하여 수질항목 및 일별 총 오염물질을 계산한다. 즉,

$$P_j = \sum(B_{i,j} \times NA_i) \quad (2)$$

여기서, P_j는 수질항목별 총 오염물질(kg/day), B_{i,j}는 토지이용 및 수질항목별 오염물질계수(kg/day/명(ha)), NA_i는 토지이용별 인구(명) 또는 면적(ha), 아래첨자 j는 수질항목을 나타낸다.

Eqs. (1) and (2)로부터 계산된 건기시 총 유량과 수질항목별 총 오염물질량을 이용하여 계산된 일 평균 농도는 Eq. (3)과 같다.

$$C_j = \frac{P_j}{Q} \quad (3)$$

한편, 건기시의 유량 및 오염물질들의 유량비 및 부하율을 요일 및 시간별로 고려하기 위하여는 다음 Eqs (4) and (5)와 같이 시간별로 세분화하여 건기시 최종적인 계산시간 및 수질항목별 농도 C_{j,n}가 Eq. (6)과 같이 계산된다.

$$Q_n = Q \times q_w \times q_n \quad (4)$$

여기서, Q_n은 건기시 유량(유량비 고려, l/s), q_w는 일평균 유량에 대한 일주일 중 해당하는 요일의 유량비(무차원), q_n은 일평균 유량에 대한 24시간 중 해당하는 시간의 유량비(무차원)를 나타낸다.

$$P_{j,n} = \frac{P_j \times p_n}{24} \quad (5)$$

여기서, P_{j,n}은 건기시 수질항목별 오염물질 양(부하율 고려, kg/hr), p_n은 수질항목별로 해당하는 24시간 부하율(무차원), 아래첨자 n은 24시간 중 해당하는 시간대(hr)를 나타낸다.

$$C_{j,n} = \frac{P_{j,n}}{Q_n} \quad (6)$$

2.2.2 우기시 유량 및 수질

우기시의 유출량 계산은 기존 ILLUDAS 모형에 의한 결과치를 이용하였다. 즉, ILLUDAS 모형에서는 불투수지역, 투수지역 및 간접연결 불투수지역 등에서 시간-면적곡선을 이용하여 유출량을 계산하며 이 결과를 이용하여 관거 유입부의 입력자료로 사용된다. 또한 지류방정식을 이용하여 관거내의 흐름추적을 실시함으로써 최종 유출부에서의 유출수문곡선을 작성하게 된다.

토지이용 및 수질항목별 오염물질계산을 위하여 일일 오염물 축적법을 사용하였다. 즉, 토지이용 및 수질항목별로 오염물질 축적량을 입력하여 일일 오염물질 발생량 P_{ij}를 계산하며, 소유역별 토지이용 면적비 및 건기일수를 고려하여 강우시점에서의 최종 오염물질 축적량을 계산한다.

$$P_j = \sum(P_{i,j} \times A_p \times A_s \times D_n) \quad (7)$$

여기서, P_j는 수질항목별 강우초기의 오염물질 축적량(kg), A_p는 소유역 면적 중 해당 토지이용 면적비, A_s는 소유역의 총 유역면적(ha), D_n은 건기일수(day)를 나타낸다.

축적된 오염물질들이 유출강도에 의하여 계산시간별로 흘러나가는 양을 계산하기 위하여 쓸림방정식을 사용하였다. 이때, 오염물질의 부유성과 침강성을 고려하였으며 관측치와의 보정을 위한 경험식으로써 유출강도를 고려하여 계산하였다(HEC, 1977). 또한 BOD₅ 항목의 경우에는 부유성 물질의 10%, 침강성 물질의 2%가 쓸림량 계산에 영향을 준다고 가정하였다(Metcalf and Eddy, 1971).

$$M_{SS} = \alpha_{SS} P_{SS} (1 - e^{-KR_t}) \quad (8)$$

$$M_{SET} = \alpha_{SET} P_{SET} (1 - e^{-KR_t}) \quad (9)$$

$$M_{BOD_5} = P_{BOD_5} (1 - e^{-KR_t}) + 0.10M_{SS} + 0.02M_{SET} \quad (10)$$

여기서, $M_{SS, SET, BOD5}$ 는 수질항목별 오염물질 슬러플량(kg), $\alpha_{SS, SET}$ 는 부유성 물질 및 침강성 물질의 기여계수, $P_{SS, SET, BOD5}$ 는 수질항목별 강우초기의 최종 오염물질 축적량(kg), K 는 슬러플감쇠계수(mm^{-1}), R_t 는 유출강도($mm/\Delta t$)를 나타낸다.

이상의 Eqs. (8)~(10)에 의한 오염물질 부하량과 유출량으로부터 수질항목 및 시간별 농도 $C_{j,t}$ 가 계산된다.

$$C_{j,t} = \frac{M_{j,t}}{Q} \quad (11)$$

이때, 관거를 통한 도달시간은 매우 짧으므로 관거내에서 오염물의 감쇠는 무시하였다.

3. 모형 적용

3.1 대상 유역 및 적용강우

홍제천은 서울시의 서북측에 위치하며 한강하류부의 우안측에 위치하고 있다. 관측점이 있는 서대문구청 지

점(홍연 2교)의 상류 유역면적은 약 $16.8km^2$ 으로서 홍제천 전체면적의 약 36.4%, 서울시 전체면적의 약 2.7%를 차지하고 있다. 전반적인 유역 특성은 Table 3과 같으며 유역의 상류부는 급경사를 이루고 있고 하류부는 평탄한 편이며 유로연장은 약 9.46km으로 조사되었다. 유출분석을 위하여 전 유역을 총 29개의 소유역들로 Fig. 2와 같이 구분하였다.

토지이용은 주거지 30.6%, 상업·공업지 2%, 임야 66.1%, 기타 1.3%로 구성되어있다. 우량관측은 서대문구청의 디지털 우량계와 경기대(서대문)에서 설치한 자기우량계를 동시에 사용하였다. 수위, 유량, 시료채취 등은 시험유역의 출구점인 홍연 2교 직하류의 웨어(폭 29.1m)에서 측정하였으며 건기시 24시간 유량 및 수질 실험도 병행하였다(이종태, 1998).

수질 시료의 분석은 공정시험법에 따라 분석하였으며 DO, pH, 수온 등은 현장 측정을 실시하였고, BOD₅, SS 등은 실내실험을 통하여 분석하였다. 본 모형의 검증을 위하여 선택한 3개의 강우조건은 Table 4와 같다.

Table 3. 홍제천 유역 특성

유역	면적 (km^2)	유로 연장 (km)	하상 경사	형상 계수 (A/L^2)
홍제천	16.8	9.46	1/132 (하류부) 1/31 (중·상류부)	0.19

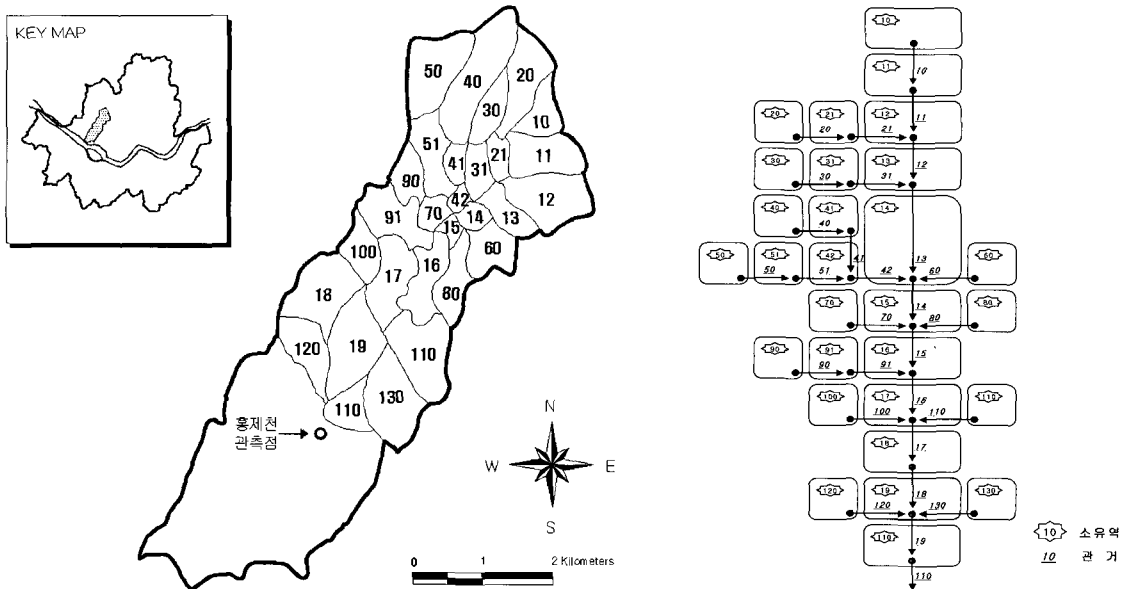


Fig. 2. 홍제천 배수구역 및 관망 모식도

Table 4. 적용 강우조건

사상	일시	선행 건기일수(일)	총 강우량(mm)	특징
E-1	1997 5. 12 15:40~23:50	4	43.7	강우후반부에 강우가 집중되는 후방분포형
E-2	1997 6. 25 12:00~21:00	19	28.9	중반부와 후반부에 강우가 집중되는 연속형
E-3	1997 9. 2 0:00~4:00	10	32.5	중후반에 강우가 집중되는 강우형태

3.2 주요 매개변수 결정

본 연구에서는 ILLUDAS-NPS 모형의 유출 및 수질 매개변수 보정을 위하여 시행착오법을 이용하였으며 실측치와 모의치의 상대오차를 최소화하는 최적 매개변수를 채택하여 검정을 위한 입력자료를 구성하였다.

초기강우시의 토지이용 및 수질항목별 오염물질 축적량은 기존 관측자료가 없기 때문에 실측치로부터 계산된 오염물질 부하량을 감안하여 시산법으로 보정하였다. 또한, 슬림계수 등의 매개변수의 입력치들도 동일한 과정을 통하여 보정을 실시하였다.

3.3 모형의 적용 및 비교

본 모형에 의한 계산결과와 관측된 강우 및 수질분석 자료들과의 유출용적, 첨두유량, 총부하량, 첨두농도, 발생시간 등을 비교함으로써 모형의 적용성을 검토하였다.

첫 번째 강우사상(E-1)의 경우 전반적인 유출수문곡선의 형태는 모든 모형들에서 비슷하였으며 첨두유량의 경우 ILLUDAS-NPS 및 SWMM 모형이 STORM 모형보다 실측치와 유사한 결과를 나타내고 있다. 유출

및 수질해석에 의한 주요 결과들은 Table 5 및 Fig. 3과 같다.

BOD₅, SS의 경우 총부하량은 ILLUDAS-NPS, SWMM, STORM 모형들 간의 결과가 유사하였으나 실측치와는 편차가 큼을 알 수 있었다. 첨두농도의 경우 ILLUDAS-NPS 및 SWMM 모형에 의한 결과치가 실측치와 유사하였다. STORM 모형의 경우 첨두농도는 비슷하였으나 발생시간이 상대적으로 길게 나타났다. ILLUDAS-NPS 및 SWMM 모형의 결과치에서 첨두유량의 발생시간보다 오염물질 항목별 첨두농도가 빠르게 발생되었으며, 이는 첨두유량의 발생시간 이전의 초기유출시 고농도의 오염물질이 다량 함유되어 부하되는 특성을 반영한 결과이다.

두 번째 강우사상(E-2)의 경우 ILLUDAS-NPS 모형에 의한 계산결과 BOD₅ 및 SS의 첨두치는 실측치와 근사하였으나 총 유출용적 및 부하량에서는 타 강우의 경우와는 달리 실측치와 상당한 편차를 보였는바 이는 실측치의 결측구간 보간 등에서 발생할 수 있는 오류의 영향으로 추정된다.

유출 및 수질해석에 의한 주요 결과들은 Table 6 및 Fig. 4와 같다.

Table 5. 유출 및 수질해석 결과의 비교 (E-1)

구분	항목	실측치	SWMM	STORM	ILLUDAS-NPS	
유출	유출용적(m ³)	1.30E+5	1.35E+5	1.49E+5	1.73E+5	
	첨두유량(CMS)	10.90	11.44	12.56	11.93	
	발생시간(hr)	7.75	8.40	9.00	8.33	
수질	BOD ₅	총부하량(kg)	6,590	3,140	3,030	3,319
		첨두농도(mg/l)	58	58	58	58
		발생시간(hr)	8.20	7.47	9.00	7.17
	SS	총부하량(kg)	139,000	67,200	69,000	79,562
		첨두농도(mg/l)	1,389	1,388	1,387	1,389
		발생시간(hr)	8.20	7.43	9.00	7.17

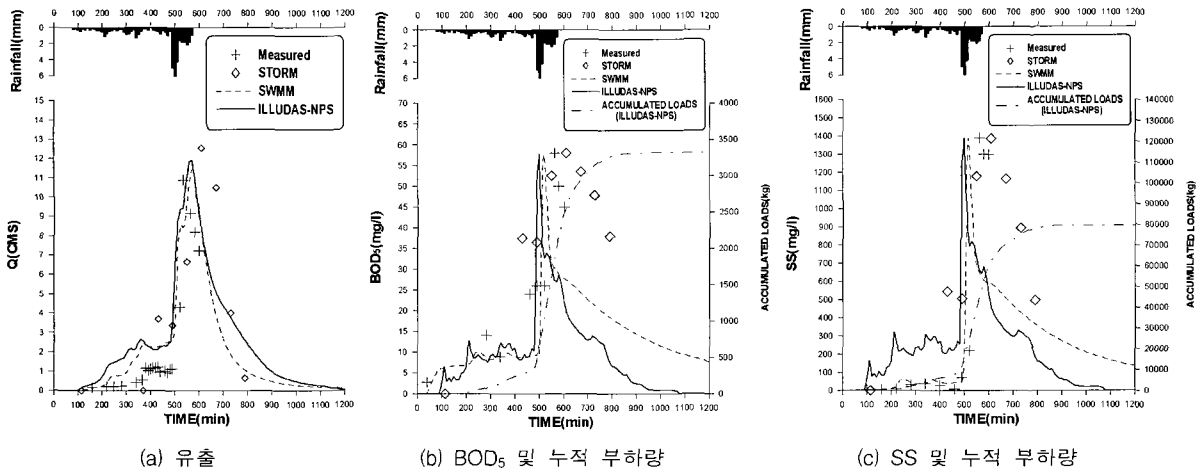


Fig. 3. 유출 및 오염농도곡선의 비교 (E-1)

Table 6. 유출 및 수질해석 결과의 비교 (E-2)

구분	항목	실측치	SWMM	STORM	ILLUDAS-NPS	
유출	유출용적(m ³)	6.51E+4	7.84E+4	1.07E+5	7.82E+4	
	첨두유량(CMS)	10.13	8.97	11.03	8.30	
	발생시간(hr)	4.12	3.92	5.00	3.66	
수질	BOD ₅	총부하량(kg)	6,630	2,230	3,150	2,797
		첨두농도(mg/l)	75	74	74	75
		발생시간(hr)	3.25	2.59	6.00	2.50
	SS	총부하량(kg)	87,400	46,800	69,500	62,504
		첨두농도(mg/l)	1,701	1,702	1,703	1,701
		발생시간(hr)	2.17	2.57	6.00	2.50

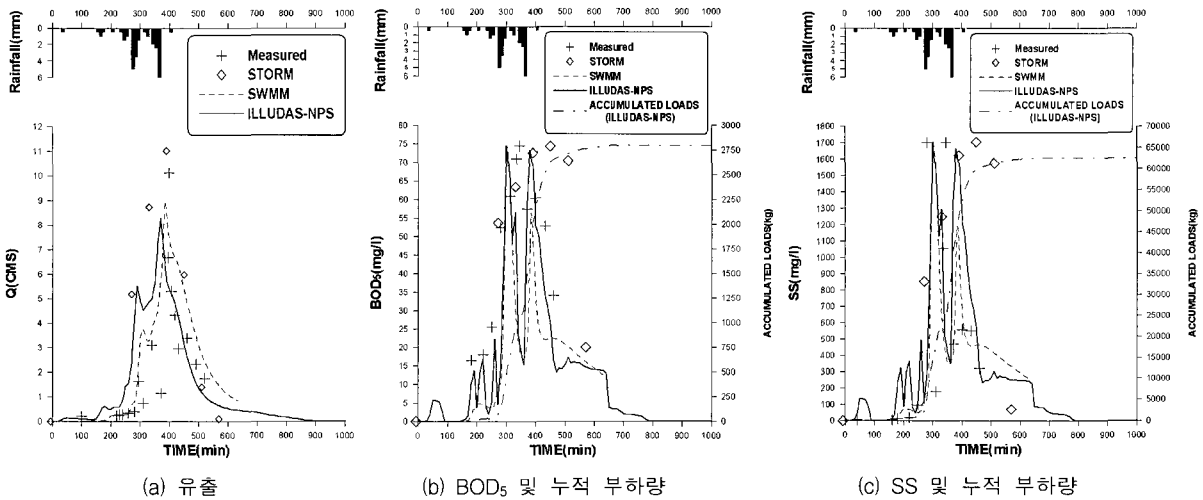


Fig. 4. 유출 및 오염농도곡선의 비교 (E-2)

BOD₅ 항목에서는 총부하량의 경우 ILLUDAS-NPS와 SWMM 모형에 의한 결과치가 매우 유사하게 나타났으나 실측치와는 비교적 큰 편차를 보였다. 첨두농도에서는 모든 모형에서 실측치와 유사하게 모의되었으며 발생시간의 경우 ILLUDAS-NPS, SWMM, STORM 모형 순으로 나타났다. SS 항목에서는 총부하량의 경우 STORM 모형의 결과가 실측치와 가장 비슷하였으나 발생시간의 경우 과대하게 산정되었다.

한편, STORM 모형의 경우에는 유출 및 오염도 곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 실측치와 많이 차이가 나타남을 알 수 있었으며, 이는 STORM 모형내의 최소 계산시간 간격이 1시간으로 고정되어 있기 때문에 유역의 규모가 작은 경우에 발생하는 문제점으로 판단된다.

세 번째 강우사상(E-3)의 경우 ILLUDAS-NPS 모형에 의한 유출용적, 첨두유량의 계산치는 실측치와 매우 유사하였고, ILLUDAS-NPS 모형에 의한 유출수문곡선의 감수부는 실측치와 매우 유사한 양상을 보여주고 있다. 그러나, 첨두발생시간의 경우에는 SWMM 모형이

실측치와의 편차가 가장 적게 나타났다. STORM 모형의 경우에는 유출용적 및 첨두발생시간의 값들이 실측치와의 편차가 과대함을 보여주었다. 유출 및 수질해석에 의한 주요 결과들은 Table 7 및 Fig. 5와 같다.

BOD₅ 항목에서는 첨두농도의 결과치 중 ILLUDAS-NPS 모형에 의한 결과치가 실측치와 비교적 유사하게 나타났으며 총부하량의 경우 관측치와 다소 편차를 보였다. 또한 발생시간의 경우 ILLUDAS-NPS모형에 의한 결과치가 SWMM, STORM 모형들보다 관측치에 유사함을 보였다.

SS 항목에서는 총부하량의 경우 ILLUDAS-NPS 모형에 의한 결과치가 가장 근접하게 나타났으며 첨두농도의 경우에도 실측치와 일치함을 알 수 있었다.

이상의 결과들을 종합하여 보면 유출용적, 첨두유량, 총부하량, 첨두농도, 발생시간 등의 항목들에서 ILLUDAS-NPS 및 SWMM 모형들의 모의치가 실측치와 비교적 유사한 경향을 나타냈으며, STORM 모형에 의한 모의치와는 큰 편차가 나타남을 알 수 있었다.

Table 7. 유출 및 수질해석 결과의 비교 (E-3)

구분	항목	실측치	SWMM	STORM	ILLUDAS-NPS	
유출	유출용적(m ³)	8.35E+4	9.91E+4	1.40E+5	8.35E+4	
	첨두유량(CMS)	13.13	12.27	13.16	13.11	
	발생시간(hr)	2.88	2.85	4.00	2.33	
수질	BOD ₅	총부하량(kg)	3,710	4,230	4,990	2,802
		첨두농도(mg/l)	76	74	76	76
		발생시간(hr)	2.58	2.15	3.00	2.67
	SS	총부하량(kg)	25,100	50,800	54,700	31,083
		첨두농도(mg/l)	885	891	886	885
		발생시간(hr)	3.08	2.16	3.00	2.67

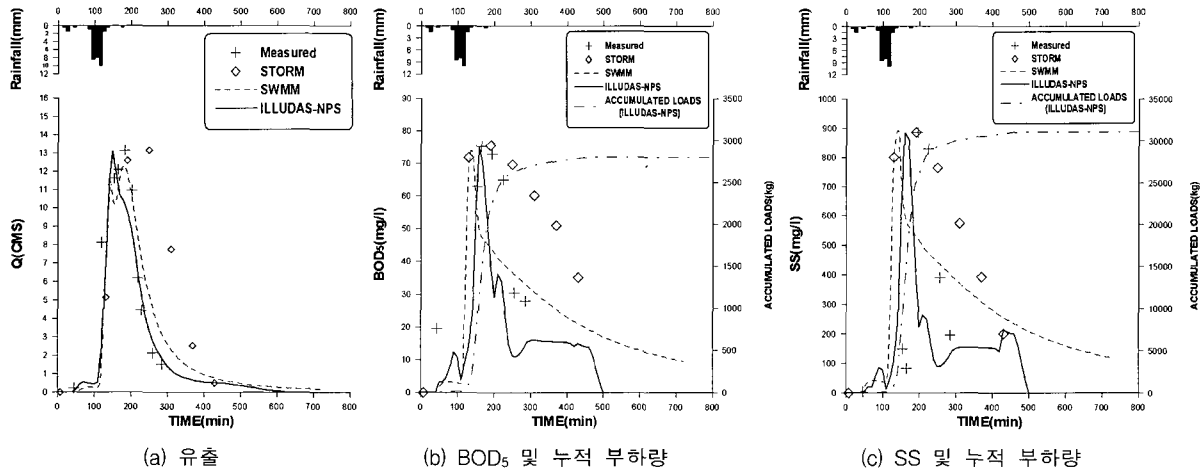


Fig. 5. 유출 및 오염농도곡선의 비교 (E-3)

4. 비교 고찰

4.1 유출특성과 오염부하량

비점오염원 발생의 주요원인은 토지이용 및 강우특성의 변화 등에 기인하므로 강우로 인한 유출량과 오염부하량과의 특성 파악은 중요하다. 본 연구에서는 유출특성에 따른 오염부하량을 표현하기 위하여 누적오염부하량비를 이용하였다. 이 방법은 강우기간 중 계산시간 동안의 유량 $Q(t)$ 에 대한 누적유량 $\sum Q(t)$ 비인 $Q(t)/\sum Q(t)$ 를 가로축으로 하고, 오염부하량 $P(t)$ 에 대한 누적오염부하량 $\sum P(t)$ 비인 $P(t)/\sum P(t)$ 를 세로축에 도시

하여 기울기가 1보다 크면 오염물질 부하가 강한 것이며, 기울기가 1보다 작은 경우는 그 반대를 의미한다.

총 3회에 걸친 강우사상의 해석결과를 이용하여 Fig. 6과 같이 도시한 결과 초기유출이 일어나는 시점으로부터 오염물질 부하현상이 급격히 높아지다가 다시 후반부로 갈수록 감소하는 경향성이 나타났다. 강우 사상별로 살펴보면 Event-1, 3의 경우 초반부에 다량의 오염물질이 유출됨을 알 수 있다. 특히, Event-2의 경우 중·후반부에 기울기가 1보다 크게 나타났으며, 이는 오염물질 부하량이 강우분포에 크게 영향을 받고 있음을 의미한다.

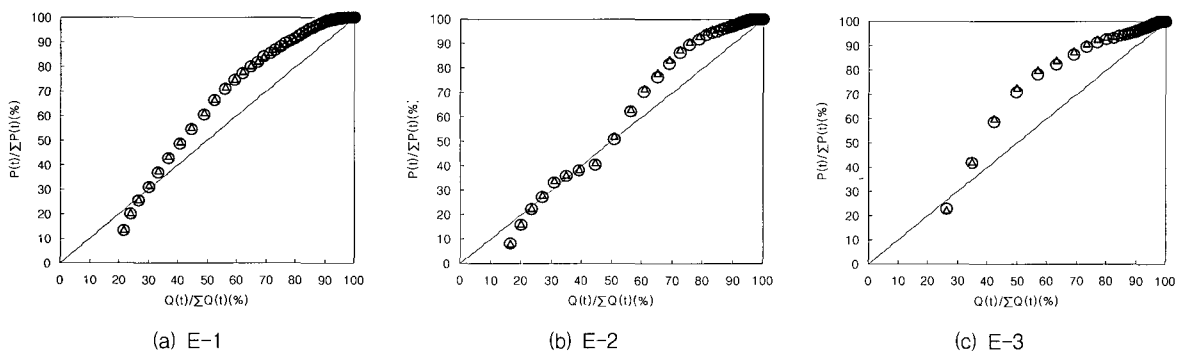


Fig. 6. 유출특성에 따른 오염부하량의 변화 (△:SS, ○:BOD₅)

Table 8. 도시지역의 비점오염 원단위 비교 (kg/ha/year)

구 분	연 구 자	SS (평균)	BOD ₅ (평균)
국 내	금 회 (2005)	675~4,321 (1,903)	32~180 (91)
	이종태 (2002)	482~1,236 (719)	245~590 (372)
	최지용 (2002)	274~1,605	61.9~153.2
	최의소 (1991)	854.1	270.1
	임봉수 (1984)	831.1	319.7
국 외	國松 (1992)	770.2	150.7
	和田安彦 (1983)	686~1,916	84~339
	Wanielista (1981)	460	50
	Sonzogni (1980)	620~2,299 (1,460)	-
	Cermola (1979)	730~4,792 (1,701)	54.8~84.0 (76.7)
	Whipple (1976)	-	29.2~51.1 (40.2)

4.2 비점오염 원단위 산정

비점오염 원단위는 단위시간당 단위토지면적에서 배출되는 비점오염물질량을 의미하며 주요 산정방법은 경험식 및 실측법으로 구분된다. 실측법은 3가지로 나뉘어지며 첫째, 지표면에서 오염물질 총량을 실측한 후 축적을 및 분해율을 적용하는 방법, 둘째, 특정지역을 통과하는 하천 상·하류 수질의 차이를 환산하거나 강우 전·후의 부하량 차이를 환산하여 대상지역의 비점오염물질 배출원단위를 산정하는 방법, 셋째, 토지이용별 강우시 배출물질을 직접 채취하여 농도를 측정하는 방법으로써 측정횟수가 충분하면 상기 방법들 중 가장 신빙성이 높은 방법이다.

본 연구에서는 두 번째 강우 전·후의 부하량 차이를 환산하는 방법을 이용하여 ILLUDAS-NPS 모형에 의한 계산치와 실측치를 보정 및 검증한 후 계산치에 의한 총 부하량을 이용하여 홍제천 유역의 원단위를 산정하는 과정을 검토하였다.

기존 도시지역에서의 비점오염원 원단위 결과치와의 비교는 Table 8과 같으며 SS 항목의 경우 최대치가 다소 높게 계산되었다. 이는 홍제천 유역의 상류부에 분포하는 가파른 산지의 영향으로 인하여 강우발생시 다량의 유사가 포함되었으며 건기시에는 하천의 건천화가 심하여 다량의 부유물질들이 축적되었기 때문에 기존 연구치보다 최대치가 상회하는 것으로 판단된다. BOD₅ 항목의 경우에는 기존 연구결과보다 다소 낮게 계산되었는데 이는 홍제천 유역의 도시화 및 산업화의 정도가 중랑천(이종태, 2002)의 경우보다 낮음으로 인하여 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 홍제천의 경우 강우초기의 하수는 하수관거로의 차집이 비교적 양호하여 수질관측 지점에서의 BOD₅ 항목에 영향을 미치는 유기물질들의 유입이 감소한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 도시유역의 초기강우 기간에 배수계통으로 부하되는 유량 및 수질을 해석하기 위한 ILLUDAS-NPS 모형을 개발하였다. 본 모형을 이용하여 홍제천 유역에서의 실측치와의 검증 및 기존의 유출·수질해석 모형인 SWMM, STORM과 비교 검토를 실시하였다. 또한, 개발된 모형에 의해 산정된 총 오염물질 발생량을 이용하여 비점오염 원단위의 산정을 검토하였다.

- (1) 본 모형에서는 건기시의 오염물질의 축적 및 초기강우로 인한 쓸림현상을 통하여 총부하량, 침투농도, 발생시간 등을 모의할 수 있도록 기존 ILLUDAS 모형의 유출해석 알고리즘에 수질해석 부분을 추가하였다.
- (2) 모형별 유출 및 수질해석 결과를 비교하기 위하여 유출용적, 침투유량, 총부하량, 침투농도, 발생시간 등의 항목별로 분석한 결과 전반적으로 ILLUDAS-NPS 및 SWMM 모형들이 비교적 일치하는 결과를 나타내었으며, 배수구역을 단일 유역으로 보아 유출 및 수질을 해석하는 STORM 모형에 의한 계산치와는 큰 차이를 보였다. 또한, ILLUDAS-NPS 모형의 적용시 강우사상의 규모가 작은 경우(약 5mm 이하)에는 유출분석의 부정확성으로 인하여 수질해석시 양호한 결과치를 얻기 힘든 단점이 있다.
- (3) 강우사상별 총오염물질 발생량을 이용하여 비점오염 원단위를 산정하는 과정에 대하여 검토하였으며 유출특성에 따른 오염부하량의 유출 특성분석 결과 강우초기의 오염물질 부하현상이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.
- (4) 비점오염원 발생현상의 간헐성, 선행건기일수, 강

우특성 등을 주요 경험적 매개변수들에 적절히 반영하기 위해서는 도시유역을 대상으로 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과물로서 관계당국에 감사드립니다.

참고 문헌

- 방기웅, 이준호, 유명진 (1997). “도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구”, **한국수질보전학회지**, 한국수질보전학회, Vol. 13, No. 1, pp. 79-99.
- 이종태 (1998). “도시유역에서의 유출 및 수질해석 모형”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 31, No. 6, pp. 709-725.
- 임봉수, 이병현, 최의소 (1984). “도시와 농촌에서의 비점원 오염물 배출양상에 관한 연구”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, Vol. 4, No. 2, pp. 46-53.
- 최의소 (1991). “영양염류 산정에 관한 연구”, 한국환경과학연구소.
- 최지용, 신창민 (2002). “비점오염원 저감을 위한 우수 유출수 관리방안”, 한국환경정책평가연구원, pp. 53-82.
- 서울특별시 (2002). **중랑천 비점오염원 관리대책 및 생태지도 제작**, pp. 42-250.
- 환경부 (1995). **비점오염원 조사연구사업 보고서**, pp. 93-169.
- 國松孝男 (1992). **河川汚染のモデル解析**, 技報堂出版.
- 和田安彦 (1983). **非特定汚染源負荷とその降雨時流出モデル**, 水資源研究センタ.
- Cermola, J.A., El-Baroudi, H.M., Sachdev, D.R. and Decarli, S. (1979). “SWMM Application to Combined Sewerage in New Haven”, *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 106, No. 6, pp. 1035-1048.
- Han, J. and Delleur, J.W. (1979). “Development of an Extension of Illudas Model for Continuous Simulation of Urban Runoff Quantity and Discrete Simulation of Runoff Quality”, Purdue University Water Resources Research Center, Technical Report No. 109, pp. 64-85.
- Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1988). “Stormwater Management Model Ver. 4, Part A : User’s Manual”, E.P.A, pp. 59-282.
- Metcalf and Eddy (1971). “Stormwater Management Model”, University of Florida, Gainesville, and Water Resources Engineers, Inc.
- Noel, D.C. and Terstriep, M.L. (1982). “Q-ILLUDAS : A Continuous Urban Runoff/Washoff Model”, International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control, University of Kentucky, Lexington, K.Y.
- Novotny, V. and Chesters, G. (1981). “Handbook of Nonpoint Pollution, Sources, and Management”, N.Y., pp. 312-345.
- Sonzogni, W.C., Chesters, G., Coote, D.R. and Robinson, J.B. (1980). “Pollution from Land Runoff”, Environmental Science and Technology, Vol. 14.
- Terstriep, M.L. and Lee, M.T. (1989). “AUTO_QI : An Urban Runoff Quality/Quantity Model with a GIS Interface”, Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1977). “Urban Storm Water Runoff: STORM User’s Manual” Hydrologic Engineering Center, Davis, C.A., pp. 1-48.
- Wanielista, M.P. (1981). “Nonpoint Source Effects”, Florida Technological University, Orlando, Florida.
- Whipple, W. (1976). “Characterization of Urban Runoff”, Water Research Institute, Rutgers University.

(논문번호:05-116/접수:2005.08.17/심사완료:2005.09.20)