

〈論 文〉

# SWMM 模型을 利用한 都市 流域의 流出 및 NPS 汚染物 排出 模擬

## A Simulation of the Runoff and the NPS Pollutants Discharge using SWMM Model

申 鉉 釋\*, 尹 龍 男\*\*  
SHIN, Hyun Suk and YOON, Yong Nam

**Abstract**□ This study was conducted for two purposes. The first was the selection of the proper model for the urban runoff, and NPS(non-point source) loads and the second was the adjustment of the selected model through the calibration and the verification of the observed data on an urban drainage basin.

The selected model for this study was the Storm Water Management Model(SWMM) developed and maintained by the US Environmental Protection Agency(EPA). In particular, the Runoff Block for the surface discharge and the Transport Block for the flow routing was used. The study basin is Youngdu basin, which is a typical developed urban drainage basin. The four rainfall events for the runoff and the two for the four NPS pollutants(SS, BOD, COD and TN) were used for the calibration and the estimation of the model parameters.

This study performed the calibration with regard to the peak discharge, the time to peak discharge, the volume and the relative error for three items. It was shown that SWMM can successfully be used for the prediction of the runoff and the NPS pollutants discharge.

The result of this study can be used as the basis for the analysis of the correlation between the runoff and the NPS pollutants discharge, and the analysis of the mass balance with the monthly and annual NPS loads in an urban drainage basin.

**要 指** : 本 研究의 目的은 都市流域에 적합한 流量 및 水質 模型을 選擇하고 그 模型을 임의의 對象流域에 適用하여 그 適合性을 判定하는 데 있다. 本 研究를 위하여 선택된 模型은EPA의 SWMM 模型으로, 이 模型은 都市流域의 流量 및 水質, 특히 NPS(non-point source) 汚染物의 排出의 模擬에 適合한 模型이며, 실제 적용에 있어서는 地表面流出을 위해서는 Runoff Block을, 管渠 追跡을 위해서는 Transport Block을 사용하였다.

本 研究의 適用 對象流域은 전형적인 도시구역인 서울시 동대문구 용두유수지 구역이며, 이 지역을 위한 기존의 4개의 連續流量 測定值과 2개의 連續水質 測定值를 가지고 模擬를 수행하였다. 流量 및 水質, 특히 NPS 負荷量의 檢定을 尖頭值, 尖頭時間, 流出 및 排出 容積과 그들의 相對誤差에 대하여 수행하였으며, 그 결과, SWMM 模型은 流出 및 NPS 汚染物 排出모두를 모의하는 데 적합한 模型임이 밝혀졌다.

本 研究의 結果는 차후 都市流域의 流出과 NPS 汚染物 排出 間의 相關關係의 分析 및 그를 통한 流域의 汚染物의 年, 月 負荷量의 算定을 통한 物質收支計算 方法의 研究에 바탕이될 수 있을 것이다.

### 1. 序 論

都市化로 인하여 都市流域에서의 流出 및 汚染物

排出의 樣相은 크게 변화 하였으며, 특히 최근들어 그 生成원을 정확히 알 수 없는 NPS(non-point source) 汚染物量은 都市 管渠 및 河川의 汚染에 크게 影響을 미치고 있는 것으로 알려져 있다.

\* 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

그러나 NPS 汚染物의 排出은 降雨을 통한 流出過程과 상당히 밀접함에도 불구하고, 아직 流出과 汚染物 排出을 連繫한 精確한 分析이 이루어 지고 있지 않으며, 이 둘을 함께 模擬할수 있는 既存 模型의 解析 또한 소원하다. 그러므로 본 연구에서는 상세하게 流域 및 管渠資料를 蒐集하고, 이를 통한 精確한 流出分析을 수행하며, 이 流出分析을 근거로한 汚染物, 특히 NPS 負荷量의 解析을 수행하였다.

都市流域의 流出 現象 및 汚染物의 排出 樣相은 非都市流域과는 判異하므로 流域 特性에 부합하는 適合한 模型의 選擇은 중요하다. 기존에는 도시구역의 流量 模擬를 위하여 BRRL, KPRRL(Korea Practice RRL) 및 최근 ILLUDAS 등의 模型들이 사용되고 있으나, 이들은 나름대로의 限界를 가지고 있으며, 특히 流量과 밀접한 NPS 汚染 解析 등의 水質 模擬를 同時에 수행할 수는 없다.

本 研究에서는 수많은 미국에서의 적용을 통하여 都市流域의 流出 및 汚染物 排出 現象을 精確적으로 模擬하는 것으로 알려진 EPA(the US Environmental Protection Agency)의 SWMM (Storm Water Management Model)을 전형적인 도시구역인 서울시 동대문구 용두유수지 유역에 적용하여 보았다. 특히, SWMM모형 내의 여러 Block중에서 地表面流出 및 流域 汚染物 蓄積 (buildup) 및 쓸림(washoff)을 위해서는 Runoff Block을, 管渠에서의 流量 追跡 및 汚染物 傳達은 Transprot Block을 사용하여 모의 하였다.

本 研究에서는 다음과 같이 3단계로 나누어 분석하였다. 첫째는 대상 유역의 實測된 連續적인 流量 및 水質 資料의 蒐集 및 整理이며, 둘째는 流量의 模型檢定을 통한 SWMM 模型의 流量 模擬의 適用性 파악이고, 셋째는 負荷量을 이용한 NPS 汚染物量들의 模型檢證을 통한 SWMM 模型의 水質 模擬의 適用性 判斷이다.

## 2. SWMM 模型에서의 都市 流域의 流出量 및 NPS 負荷量의 算定

### 2.1 流出量의 算定

本 研究에서는 流出의 模擬를 두 부분으로 나누

어 模擬하였다. 기존의 SWMM의 여러 BLOCK중에서 地表面流出을 위해서는 RUNOFF BLOCK을 사용하였으며, 管흐름의 解析을 위해서는 TRANSPORT BLOCK을 사용하였다. SWMM에서의 水文成分 過程 中 地表面流出과 管渠 追跡의 計算 方法은 다음과 같다.

#### 2.1.1 地表面 流出

地表面 流出을 위한 小流域은 地面貯溜가 없는 不透水域(A1)과 地面貯溜가 있는 不透水域(A3), 그리고 透水水域(A2)으로 나누어진다.

地表面 流出量은 流域을 非線形 貯水池(non-linear reservoir)로 가정하여 連續方程式과 Manning公式에 의해 계산되는 데, 이때 각 소유역의 소면적의 連續 方程式은

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i - Q \quad (2-1)$$

이고, 이때 V는 소면적상의 흐름체적, A는 면적, d는 수심, i는 유효우량이고, Q는 유출율(cfs)이다. 다시 流出率을 Manning公式으로 나타내면,

$$Q = W \frac{1.486}{n} (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (2-2)$$

이며, 이때 W는 소유역의 폭, n은 조도계수,  $d_p$ 는 지면저류損失深이고 S는 소유역 경사이다.

식 2-1와 2-2 를 결합하면,

$$\frac{dd}{dt} = i - WCON \cdot (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (2-3)$$

$$WCON = \frac{1.486W}{A \cdot n} \quad (2-4)$$

식 2-3는 非線形 微分方程式이며, 이로부터 수심 d를 구하기 위한 有限次分方程式은,

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i - WCON \left[ d^1 + \frac{1}{2} (d_2 - d_1) - d_p \right]^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (2-5)$$

이 되며, 이때 첨자 1은 전시간, 2는 현재시간을

의미한다. 이 방정식은 Newton-Raphson 시행착오법을 사용하여 연속적으로 수심  $d_2$ 를 결정하여 流出量을 연속적으로 계산해 나간다. 여기서 不透水域과 透水域에서는 따로 WCON 상수에 의해 유출량이 계산된다.

2.1.2 管渠 追跡

管흐름의 解析은 Modified Non-linear Kinematic Wave法을 사용한다. 이때 管路傾斜  $S_0$ 는 摩擦傾斜  $S_f$ 와 같고 관거 흐름은 각 시간간격 사이에서 定常流라는 가정 하에 連續方程式과 Manning公式이 사용된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{2-6}$$

$$Q = \frac{k}{n} S_0^{1/2} A R^{2/3} \tag{2-7}$$

여기서,  $x$ 는 관로길이,  $A$ 는 관단면적,  $R$ 은 동수반경,  $S_0$ 는 관경사,  $n$ 은 Manning조도계수이고  $k$ 는 SI단위로는 1.0, 영국단위로는 1.486이다. 연속방정식을  $x-t$ 평면의 4점음해차분형태 (Four-Point Implicit Finite Difference Scheme)로 표시하면

$$\frac{(1-W_t)(A_D - A_B) + (A_C - A_B)}{\Delta t} + \frac{(1-W_x)(Q_B - Q_A) + W_x(Q_C - Q_D)}{L} = 0 \tag{2-8}$$

와 같으며,  $Q$ 는 流出量,  $A$ 는 管斷面積,  $L$ 은 관 길이이고  $W_t$ 는 하루단에서의 時間加重因子,  $W_x$ 는 각 시간 끝에서의 空間加重因子이며, 첨자  $A, B, C, D$ 는 유한격자의 4개 格點을 표시한다.

실제로 식 2-8은 滿管흐름 面積( $A_f$ )과 流出量( $Q_f$ )에 의해 일반화된다. 흐름을 定常等流로 가정하여 Manning공식을 사용하면 관에서의  $Q/Q_f$ 와  $A/A_f$ 간의 相關曲線을 맺을 수 있다. 다음 Manning공식을 대체한 이 無次元 流出量-面積 曲線 ( $Q/Q_f - A/A_f$  curve)과 식 2-8을 사용하면 초기경계조건과 상류경계조건만으로 4點陰解差分形態를 이용하여 해를 구할 수 있다. 그러나, 해를 위하여

하류경계조건은 사용되지 않으므로 下流背水效果 (downstream backwater effect)를 고려하지는 못한다. 그러나 정확한 해를 얻기 위하여 간편법이 사용되었다. 이 방법은 비록  $Q/Q_f - A/A_f$  曲線이 정상등류상태에서 설정되었으나  $Q_f$ 값을 구할때 摩擦傾斜  $S_f$ 를 사용하여 Manning공식을 푸는 것이다. 이때 摩擦傾斜  $S_f$ 는 St. Venant 방정식에서 局部加速度(local acceleration)항을 제거한 Quasi-Steady Dynamic Wave공식을 4點陰解差分形態인

$$S_f = S_0 - \frac{h_A - h_D}{L} - \frac{V_A^2 - V_D^2}{2gL} \tag{2-9}$$

를 사용하여 부분적으로 下流背水效果를 고려해 준다.

2.2 NPS 汚染物 排出量의 算定

降雨時 流域에서의 汚染物 排出은 두가지 自然現象으로 이루어진다. 먼저 강우가 시작되기 이전 건조기 때의 汚染物의 蓄積(build-up)과 강우 개시 이후의 降雨의 力學的인 作用으로 인한 쓸림(wash-off)이며, 이 과정은 SWMM모형의 Run-off Block을 통하여 수행된다. 이렇게 유역에서 흘러 내려온 汚染物은 雨水渠 또는 合流渠에서 下流로 移送되는 데, 이 과정은 Transport Block에 의해서 수행된다.

2.2.1 汚染物의 蓄積

도시에서의 汚染物의 蓄積은 상당히 복잡한 자연 현상으로서 晴天期間, 道路清掃頻度, 土地利用, 降雨 등 여러 요인에 따라 그 변화가 심하므로 한가지 공식으로 정의하기는 곤란하다. 그러나 대표적으로 아래 3가지 공식으로 蓄積 樣相을 公式化할 수 있다.

A. Power-Linear  
 $PSHED = QFACT(3) \cdot t^{QFACT(2)} \tag{2-10}$   
 $PSHED < QFACT(1)$

B. Exponential  
 $PSHED = QFACT(1) \cdot (1 - e^{-QFACT(2)t}) \tag{2-11}$

C. Michaelis-Menton

$$PSHED = \frac{QFACT(1) \cdot t}{QFACT(3) + t} \quad (2-12)$$

여기서 PSHED는 汚染物量(lb, kg), t는 時間(hr), QFACT(1)은 汚染物 限界量(lb, kg), QFACT(2)은 指數이고 QFACT(3)는 係數이다.

2.2.2 汚染物의 쓸림(Wash-Off)

蓄積된 汚染物의 쓸림은 降雨로 인한 小流域 地 表로부터의 汚染物의 浸蝕(erosion) 또는 溶解(solution)의 과정이다. 이 쓸림율은 時間에 따라 감소하는 指數函數關係를 가짐이 Sartor 와 Boyd (1972)에 의해 밝혀졌다.

$$POFF(t) = PSHED_0 (1 - e^{-kt}) \quad (2-13)$$

이때 POFF는 各시간에서의 오염물질의 累加 쓸림量(mg)이고, PSHED<sub>0</sub>는 위에서 계산한 강우시 작시점의 汚染物 蓄積量(mg)이다. 그러므로 地表에 남은 殘餘汚染物量(mg)은

$$PSHED(t) = PSHED_0 - POFF(t) \quad (2-14)$$

$$PSHED(t) = PSHED_0 e^{-kt} \quad (2-15)$$

이 된다. 이때 k 값은 係數로서 입자크기와 流出率의 函數로 나타낼 수 있으며, 粒子크기에는 反比例하고, 流出率에는 比例한다. 이때 식 2-13을 시간에 대해 미분하여 쓸림율(mg/sec)을 표시하면,

$$-POFFX(t) = \frac{d POFF(t)}{dt} = -k \cdot PSHED(t) \quad (2-16)$$

이고, k 값은 流出率에 비례한다는 가정하에

$$k = RCOEF \cdot r \quad (2-17)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 RCOEF(in<sup>-1</sup>)는 쓸림계수이고 r은 유역 流出率(mm/hr)이다. 그러나 식 2-16과 2-17을 사용하여 濃度を 계산해 보면,

$$C = \frac{1}{Q} \frac{d}{dt} [POFF(t)] = CONST \times \frac{RCOEF \cdot r \cdot PSHED(t)}{A \cdot r} \quad (2-18)$$

로서, 이때 C는 濃度(mg/l), Q는 流出量(cms), A는 流域面積(ha)이다. 식 2-18에서는 流出率 r이 제거되고 PSHED(t)는 항상 감소하므로 流出量의 時間的인 分布와 무관하게 항상 濃도가 減少함을 알 수 있다. 그러나 실제로 강우로 인한 汚染物의 濃도는 호우 중간에 最高値를 나타내므로 위의 공식의 사용은 실제와 다르게 항상 감소하는 것으로 모의한다.

이러한 문제는 流出率에 WASHPO指數를 고려하여 各 시간마다의 쓸림량을 계산하여 해결되었다. (Boston District, Corps of Engineers : 1974) 즉, 쓸림율은

$$-POFFX(t) = \frac{d POFF(t)}{dt} = -RCOEFX \cdot r(t)^{WASHPO} \times PSHED(t) \quad (2-19)$$

이고, 이때 POFFX(t)는 시간 t서의 쓸림율(mg/sec), PSHED(t)는 殘餘汚染物量(mg), RCOEFX는 쓸림係數((mm/hr)<sup>-WASHPO</sup> sec<sup>-1</sup>)로서 RCOEF/3600를 사용한다.

식 2-19를 濃도로 표시하기 위해 流量 Q로 나누면,

$$C(t + \Delta t) = \frac{CONST \cdot RCOEFX}{A} \times r(t + \Delta t)^{WASHPO-1} \cdot PSHED(t + \Delta t) \quad (2-20)$$

로 되어, 이때 流出率 r은 WASHPO-1에 비례하므로, r이 커지면 PSHED(t)가 감소해도 濃도는 증가할 수 있다.

마지막으로, 殘餘汚染物量(mg)의 계산은 식 2-15에 流出率 r의 平均値를 사용한 k값을 대입하여 풀면,

$$PSHED(t + \Delta t) = PSHED(t)$$

$$\cdot \text{EXP}[-\text{RCOE}F \left( \frac{r(t)^{\text{WASHPO}} + r(t+\Delta t)^{\text{WASHPO}}}{2} \right) \Delta t] \quad (2-21)$$

로서, 각 시간간격의 끝에서 계산되어진다.

2.2.3 管渠를 통한 汚染物의 追跡

管渠를 통한 汚染物의 追跡(routing)은 관내에서의 連續攪拌탱크反應槽(continuous stirred tank reactor; CSTR)에 의한 完全混合(complete mixing)을 통해 일어난다. 完全混合을 위한 支配 微分方程式은

$$\frac{d}{dt}(VC) = V \frac{dC}{dt} + C \frac{dV}{dt} = Q_i C_i - QC - KCV + L \quad (2-22)$$

이고, 이때 C는 混合體積內 排出濃度 (mg/l), V는 體積(ft<sup>3</sup>), Q는 流出流量(cfs), Q<sub>i</sub>는 流入流量(cfs), C<sub>i</sub>는 混合體積內 流入濃度 (mg/l), K는 一次減衰係數(decay coefficient)이고 L은 혼합체적 내의 既存 汚染物量(mass/time)이다.

식 2-22에 경계조건 C(0)=C(t)을 대입하고 V, Q, Q<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>, L, (dV/dt)가 상수라면 이 식은 一次常微分方程式이 된다. 그러므로 식 2-22의 濃

度解를 시간함수로 표시하면,

$$C(t+\Delta t) = \left[ \frac{Q_i C_i + L}{\text{DENOM}} \right] (1 - e^{-\text{DENOM} \Delta t}) + C(t) \cdot e^{-\text{DENOM} \Delta t} \quad (2-23)$$

$$\text{DENOM} = \frac{Q}{V} + K \left( \frac{1}{V} \right) \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (2-24)$$

으로 [ 각시간 끝에서의 濃度 = ①가중되는 流入 濃度 + ②전시간으로부터 減衰되는 濃度 ]임을 나타내어 준다.

一次減衰係數 K는 추적중의 오염물의 감쇄를 고려해 주지만, 우수거를 통한 到達時間은 상당히 짧으므로 減衰 現象은 보통 무시된다. 위의 完全混合의 積分解는 농도 현상을 인위적으로 분산하는 경향은 있으나 Scour와 沈澱 계산 뿐만 아니라 Man-hole에서의 負荷量도 계산할 수 있는 방법이다.

3. 對象流域 및 管渠 資料의 蒐集

本 研究에서의 對象流域은 서울시 동대문구 청계

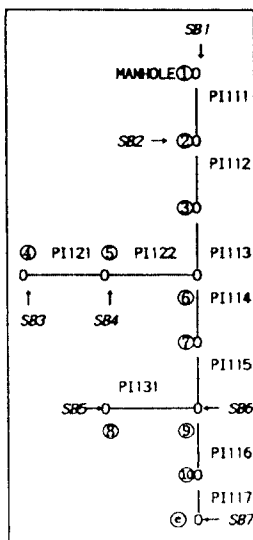


그림 3-1 용두 유수지 유역의 관망모식도

소유역 관 거 번호	상류 맨홀 번호	하류 맨홀 번호	유역 면적 (ha)	불투수 비율 (%)	유역경사(%)		관 길이 (m)	관 경사 (%)	관단면(m)	
					불투	투수			폭	높이
SB1		①	4.73	73.6	0.975	3.840				
PI111	①	②					167.0	0.725	1.0	1.0
SB2		②	6.55	53.3	0.300	0.540				
PI112	②	③					85.2	0.188	1.5	1.2
PI113	③	⑥					191.5	0.204	1.5	1.2
SB3		④	6.10	60.8	0.397	0.470				
PI121	④	⑤					67.5	0.281	1.5	1.0
SB4		⑤	5.71	87.3	0.352	0.124				
PI122	⑤	⑥					91.5	0.251	1.5	1.0
PI114	⑥	⑦					155.0	0.303	1.5	1.2
PI115	⑦	⑨					80.0	0.300	1.5	1.2
SB5		⑧	10.97	69.5	0.952	1.040				
PI131	⑧	⑨					152.0	0.329	1.2	1.2
SB6		⑨	7.04	86.8	0.314	0.342				
PI116	⑨	⑩					166.0	0.446	2.0	1.5
PI117	⑩	㉔					66.2	0.181	2.5	2.0
SB7		㉔	2.37	83.1	0.370	0.350				

표 3-1 용두유역의 유역 및 관거특성 자료

배수구역의 제기배수분구내 용두유수지 유역으로서 典型的인 都市流域이다. 이 유역은 동쪽으로 정능천, 서쪽으로 성북천, 남쪽으로 청계천과 접하고 있는, 流域面積 43.47ha의 유역으로 대략 주거지가 55%, 상가가 25%이고 도로 점유율이 20%가량이다. 용두 유수지 유역의 管網 模式圖는 그림 3-1과 같고, 流域 特性 및 管渠의 세원은 표 3-1과 같다.

4. 流量 및 水質에 대한 模型 檢證

기존의 實測資料를 가지고 SWMM모형의 檢定을 流量과 水質에 대하여 각각 수행하였다. 實測 流量은 高麗大學校 水文學研究室(윤, 진, 이, 1992)의 '90~'91년의 4개의 降雨事象을 사용하였으며, 實測 水質 濃度 資料는 高麗大學校 環境研究室에서 '91년에 실측한 PS 排出濃度 및 NPS 排出濃度 資料(최, 1991)를 사용하였다.

4.1 流量 模型의 檢定 및 檢證

4.1.1 實測 降雨事象 및 檢定 項目

流量의 檢定을 위한 降雨事象은 동대문구청의 自記雨量計에 의한 자료를 10分 間격으로 직접 읽어 사용하였으며 표 4-1 에 流量의 檢定 및 檢證에 사용된 降雨事象을 정리하였다.

표 4-1 유량 검정 대상 강우사상

강우사상	강우날짜	총강우량 (mm)	지속시간 (min)
사상 1.	'90. 7. 18	106.5	300
사상 2.	'90. 7. 19	44.5	170
사상 3.	'90. 7. 20	22.5	90
사상 4.	'90. 7. 25	88.5	490

檢定項目으로는 流出現象을 가장 잘 묘사하는 尖頭流量, 尖頭時間, 流出容積에 대해서 각각 實測値와 檢定値를 비교하고, (模擬値-實測値)/實測値로 相對誤差를 구하였다.

4.1.2 檢定 結果

각각의 사상에 대한 검증의 결과를 비교하기 위해 본 연구과 동일한 강우사상에 대해 적용되었던 (윤, 진, 이, 1992) BRRL(British Road Research Laboratory Method)모형 및 ILLUDAS(The Illinois Urban Drainage Area Simulator) 모형에 의한 결과를 함께 수록하였다. 사상 1과 2의 實測値와 模擬値를 비교한 水文曲線은 그림 4-1과 같으며, 표 4-2에서는 각 사상의 模擬 尖頭値, 尖頭時間, 流出容積 및 實測値와의 相對誤差를 나타냈다.

검정 결과, 尖頭値는 SWMM이 가장 잘 모의하였으며, 다음 BRRL, ILLUDAS 순으로 나타났다.

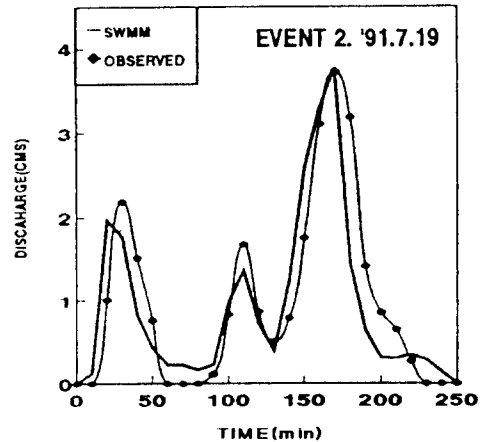
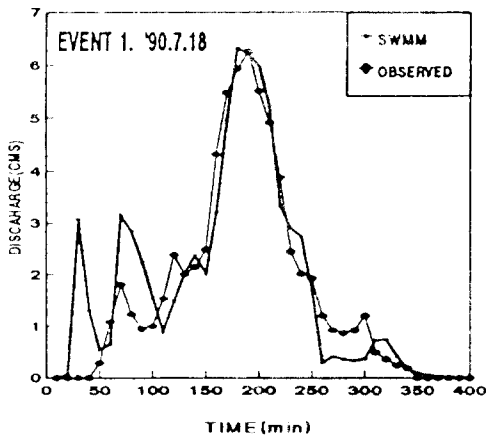


그림 4 1 유량의 실측치와 검정치의 수문곡선 비교(사상 1.과 사상 2.)

표 4-2 침투유량, 침투시간, 유출용적 및 상대오차 (ILLUDAS, BRRL과 비교)

비교	사상	사상 1		사상 2		사상 3		사상 4
		1	2	1	2	1	2	
침투치	실측치	6.260	2.190	3.730	2.330	2.190	3.790	
	BRRL	6.770	—	3.89	2.330	—	3.93	
	ILLUDAS	7.10	—	4.05	2.260	—	4.78	
	SWMM	6.310	1.975	3.773	2.310	2.071	4.483	평균
상대오차	BRRL	0.075	0.146	0.041	0.009	0.112	0.042	0.0709
	ILLUDAS	0.118	0.068	0.079	-0.031	0.005	0.248	0.0812
	SWMM	0.0079	-0.1089	0.0014	-0.0086	-0.0858	0.1545	
침투시간	실측치	190	30	170	30	80	300	
	SWMM	180	20	170	40	80	290	
상대오차		-0.0556	-0.500	0.000	0.250	0.000	-0.0344	-0.0578
유출용적	실측치	91.14	34.87		18.10		65.07	
	BRRL	75.30	30.05		14.40		62.00	
	ILLUDAS	94.50	36.40		16.30		76.00	
	SWMM	98.02	32.74		19.48		69.02	평균
상대오차	BRRL	-0.2103	-0.1603		-0.2569		-0.0495	-0.1693
	ILLUDAS	0.0356	0.0420		-0.1104		0.1438	0.0278
	SWMM	0.0701	-0.0650		0.0708		0.0572	0.0333

\* 침투치: CMS, \* 침투시간: min, \* 유출용적: mm

그러나 ILLUDAS와 BRRL 모형도 비교적 정확하게 모의함을 알 수 있어 尖頭流量을 목적으로 할 경우에는 세모형 모두 적절히 사용될 수 있다고 본다. 流出容積은 ILLUDAS, SWMM, BRRL 순으로 모의를 수행하였으며, BRRL 모형은 透水域의 流出을 고려하지 못하므로 음의 상대오차를 보였고 실측치 보다 상당히 적은 流出率을 나타냈다. 그러나 ILLUDAS와 SWMM은 비교적 유사하고 정확하게 유출용적을 모의하였다. 결과적으로 尖頭值 및 流出率 모두, SWMM 모형은 좋은 適用性을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

4.2 非点源(NPS) 汚染物量의 模型 檢定

4.2.1 實測 水質 資料의 整理

汚染物量의 模型檢定을 위한 流量資料는 앞에서 검증한 SWMM 모형에 實測降雨量을 대입하여 얻었다. 또한 實測水質資料는 최(1991)의 용두유수지 유역의 '91년 2개 降雨事象에 대한 連續 濃度測定 資料를 사용하였다. 두개의 檢定 降雨事象은 표 4-3과 같다.

표 4-3 NPS부하량 檢定 대상 강우사상

강우사상	강우날짜	총강우량 (mm)	지속기간 (min)	청천일수 (일)	검정
사상 1	'91. 4. 13	17.5	660	11	CASE 1.
사상 2	'91. 4. 16	27.5	780	2	CASE 2.

非点源 汚染의 解析은 濃度보다는 負荷率(load rate)을 가지고 수행하는 것이 일반적이다 (Wanielista,1976). 그러나 위의 水質 資料는 合流 渠에서 測定된 濃度이며, 基底流出에 의한 家庭 및 商業地로부터의 点源 汚染負荷率을 포함하고 있다. 그러므로 基底負荷率인 点源 汚染負荷率을 그림 4-2의 개념으로 제거해 주어야 실제의 非点源 汚染 負荷率을 얻을 수 있다. 즉 계산 절차는

$$PSL = PSC \times PSF \quad (4-1)$$

$$TF(t) = NPSF(t) + PSF \quad (4-2)$$

$$TSL(t) = CONC(t) \times TF(t) \quad (4-3)$$

$$NPSL(t) = TSL(t) - PSL \quad (4-4)$$

로서, 먼저 PSC는 点源平均汚染物濃度(mg/l)이고 PSF는 点源平均流出量(CMS)으로 이 둘을

곱하여 PSL, 즉 点源平均汚染物負荷率(g/sec)를 구한다. 다음 NPSF는 시간의 함수인 강우에 의한 流出量으로서 SWMM에 의한 模擬量이고, 여기에 PSF를 더하여 總流出量 TF를 얻는다. 이 總流出量 TF에 CONC, 즉 합류거에서의 測定濃度를 곱하면 總汚染物負荷率 TSL이 된다. 마지막으로 그림 4-2와 같이 總汚染負荷率에서 点源汚染物負荷率 PSL을 제하면 순수한 非点源汚染物負荷率 NPSL을 얻을 수 있다. 이때 사용된 PSF와 PSC는 비강우시 측정된 값을 평균하여 표 4-4에 나타냈으며, 두 實測 降雨事象을 위의 절차에 대입하여 각 시간에서의 非点源汚染物負荷率을 계산하여, 檢定을 위한 實測負荷率曲線을 얻었다.

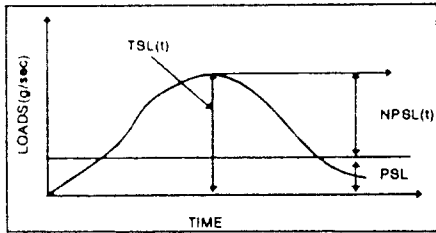


그림 4-2 비점원오염부하량 산정

표 4-4 비강우시 기저유출량 및 점원오염물부하율

항 목	PSC & PSL				PSF
	SS	COD	BOD	TN	기저유량
배출농도(mg/l)	127	133	91	17	279m <sup>3</sup> /h
부하율(g/sec)	9.9	10.3	7.1	1.3	0.078cms

4.2.2 檢定 方法

앞에서 언급하였듯이 非点源 汚染物에 의한 오염은 강우전의 汚染物 蓄積量(buildup)에 가장 민감하며, 강우전의 蓄積量은 강우전의 晴天期間에 가장 민감하다. 이 효과를 분석하기 위해 사상 1과 사상 2의 容積比를 流量과 각 汚染物에 대해 정리하면 표 4-5와 같다.

표 4-5 사상 1과 사상 2의 용적비

용적비	유출용적비	SS비	COD비	BOD비	TN비
사상2/사상1	1.99	0.77	1.17	1.84	1.07

여기서 流出量은 사상 2가 사상 1의 두배 가량이 되나 모든 汚染物에서 그 比率은 流出容積比에

미치지 못한다. 특히 SS와 TN값에서 그 효과는 더욱 심하게 나타나며, COD값에서도 비교적 初期 排出效果가 잘 나타나고 있다. 그러므로 두 사상을 同質 現象으로 고려하는 것은 타당하지 않으며, 본 연구에서는 두 사상을 각각 별개의 檢定基準으로 선택하여 검정을 시행하였다. 사상 1은 先行晴天期間이 긴 경우에 해당하며(CASE 1), 사상 2는 先行晴天期間이 짧은 경우를 대표할 수 있다고 보았다(CASE 2). 또한 檢定을 위한 汚染物은 實測資料가 있는 SS, COD, BOD, 및 TN을 사용하였으며 검정은 유량에서와 마찬가지로 尖頭負荷率, 尖頭時間, 總負荷容積과 각각의 相對誤差를 비교하였다.

4.2.3 檢定 結果

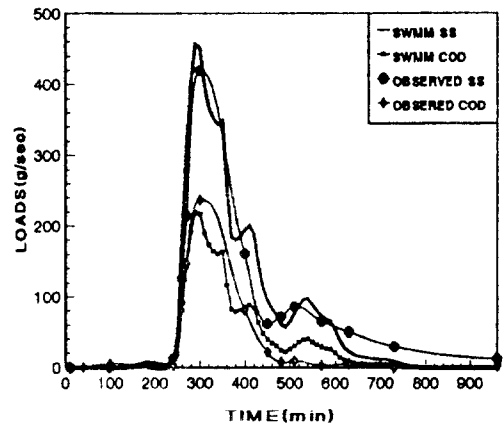
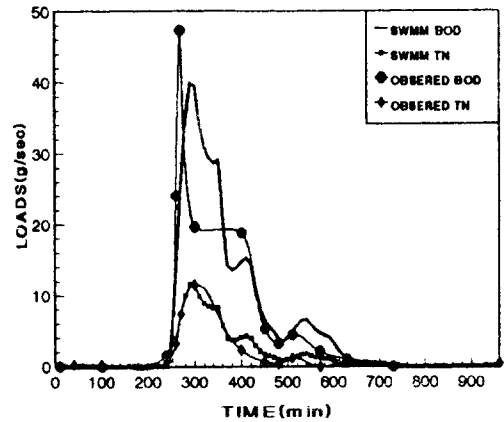


그림 4-3 CASE 1의 실측치와 검정치의 부하율곡선



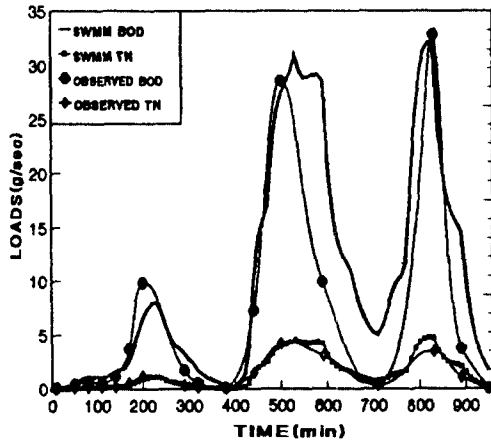
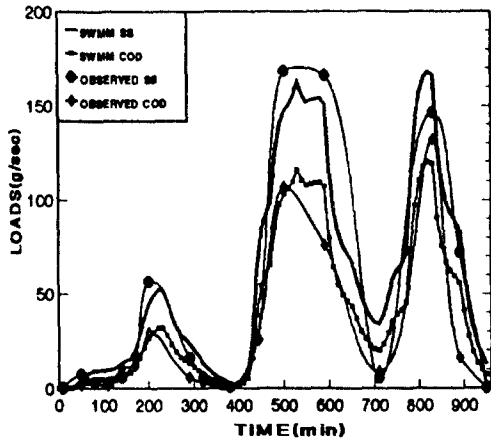


그림 4-4 CASE 2.의 실측치와 검정치의 부하율곡선

각 CASE의 NPS 汚染物의 檢定 結果는 표 4-6과 같으며, CASE 1.의 경우에는 각 汚染物의 尖頭負荷率의 平均 相對誤差가 -0.047이고, 負荷容積의 平均 相對誤差가 0.044이었으며, CASE2.의 경우에는 각 汚染物의 尖頭負荷率의 平均相對誤差가 -0.005이고, 負荷容積의 平均 相對誤差는 0.058로서 두 경우 모두 尖頭負荷率은 다소 작게 모의하고 負荷容積은 다소 크게 모의함을 알 수 있으나 SWMM에 의한 수질의 모의는 대체로 우수한 것으로 평가되었다.

그림 4-3에는 CASE 1., 그림 4-4에는 CASE 2.의 實測 負荷率曲線과 模擬 負荷率曲線을 도시하였다.

표 4-6 NPS 汚染物 부하율 검정 결과 (CASE 1.)

		SS	BOD	COD	TN	평 균
첨 두 부하율	실측	420.2	47.2	237.4	11.66	
	SWMM	456.2	39.8	219.2	11.60	
상대오차		0.079	-0.186	-0.083	0.003	-0.047
첨 두 시간	실측	300	300	300	300	
	SWMM	290	280	290	290	
상대오차		-0.034	-0.071	-0.034	-0.034	-0.043
부 하 용 적	실측	4155	290	1741	83.6	
	SWMM	4095	317	1823	88.9	
상대오차		-0.015	0.086	0.045	0.060	0.044

(CASE 2.)

		SS		BOD		COD		TN		평 균
		1	2	1	2	1	2	1	2	
첨 두 부하율	실측	168.5	146.1	32.6	37.5	106.8	131.9	4.8	4.0	
	SWMM	162.7	167.9	30.9	32.1	115.8	119.9	4.6	4.8	
상대오차		-0.035	0.130	-0.055	-0.168	0.077	-0.099	-0.052	0.164	-0.005
첨 두 시간	실측	510	840	510	840	510	840	510	840	
	SWMM	540	830	540	830	540	830	540	830	
상대오차		0.056	-0.012	0.056	-0.012	0.056	-0.012	0.056	-0.012	0.022
부 하 용 적	실측	3204		535		2038		89.7		
	SWMM	3407		592		2269		87.3		
상대오차		0.060		0.096		0.102		-0.028		0.058

\* 첨두 부하율: g/sec, 첨두 시간: min, 총 부하량: kg

### 5. 結 論

本 研究의 目的은 EPA의 SWMM 模型의 流出 및 水質 模擬 方法을 考察하고, 그 適用性을 파악하여 기존의 미비한 도시유역에서의 流出 資料와 더불어 水質 資料의 擴充 方案을 提示하는 데 있다.

本 研究에서는 '서울시 동대문구 청계배수구역의 제기배수분구내 용두유수지유역'에 적용하여 보았다. 이 流域은 商街, 住宅 과 道路의 占有率이 95% 以上인 극도로 발달된 流域面積 43.47ha의 都市小流域이다. 이때 사용된 流出 資料는 '90년과 '91년의 4개 降雨事象, 水質資料는 '91년의 2개 降雨事象에 대한 SS, BOD, COD 및 TN의 連續 測定 濃度 資料를 사용하였으며, 검정을 통해 SWMM의 實流域 適用性을 검토하였다.

SWMM 模型을 통한 模擬를 위하여 사용된 프로그램내의 BLOCK들은, 地表面 流出流量 및 流

出負荷量の 模擬를 위한 RUNOFF BLOCK과, 유역내 管渠를 통한 流出流量 및 流出負荷率의 模擬를 위하여는 TRANSPORT BLOCK이었다. 實測資料를 사용한 SWMM 模型의 檢定 結果는, 流量의 경우에는, 模擬値와 實測値의 相對誤差는 尖頭値가  $-0.0066$ , 流出容積이  $0.0333$ 으로 BRRL 模型과 ILLUDAS 模型의 모의 결과와 비교해볼 때, 流出의 模擬를 잘 수행하고 있다고 볼 수 있었으며, 負荷率의 경우에는, CASE 1.에서 4개 오염물 대상에 대한 尖頭負荷率의 平均相對誤差가  $-0.047$ , 負荷容積의 平均相對誤差가  $0.044$ 이었고, CASE 2.에서는 尖頭負荷率의 平均相對誤差가  $-0.005$ , 負荷容積의 平均相對誤差가  $0.058$ 로서 水質의 模擬도 잘 수행함을 알 수 있었다. 그러므로 都市小流域의 流量 및 水質의 分析을 위해서는 SWMM 模型은 추천할만 하다.

本 研究의 結果를 가지고 차후 流量-汚染物量資料의 擴充을 통하여, 流出 및 NPS 汚染物 排出間의 相關關係 分析 및 都市流域의 汚染物 物質收支의 計算을 위한 年, 月 NPS 負荷量의 算定 方法을 研究할 수 있을 것이며, 이는 차후 연구 과제로 돌린다.

### 參 考 文 獻

1. 윤용남(1989), "공업 수문학", 청문각
2. 윤용남, 전병호, 이종태(1992), "도시홍수 재해방지를 위한 내수처리 시스템 분석 및 설계기법의 개발", 한국과학재단
3. 최의소(1991), "영양염류 원단위 산정에 관한 연구", 한국환경연구협의회
4. 전병호(1989), "도시 유출 분석 및 모형화 연구", 한국 건설기술 연구원
5. 김건하(1992), "비점원 오염물질의 배출 양상에 관한 연구", 고려 대학교 석사 학위 논문
6. Bruwer, C.A.(1981), "Water Quality Interactions of Three Successive Urban Storms", Second Int.Conf. on Urban Storm Drainage,Urbana, Illinois USA
7. Hall, H.J.(1984), "Urban Hydrology", Elsevier Applied Science Publishers Inc
8. Huber, W.C. and Dickinson, R.E.(1988), "Storm Water Management Model:User's Manual (Ver. 4)", Environmental Research Laboratory
9. Huber, W.C. and Heaney, J.P.(1981), "The USEPA Storm Water Management Model, SWMM :A Ten Year Perspective", Second Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Urbana, Illinois, USA
10. Kibler, D.F., et.al(1982), "Urban Stormwater Hydrology", American Geophysical Union
11. Kidd, C.H.R.(1978), "Rainfall-Runoff Processes Over Urban Surfaces", Proceedings International Workshop held at the Institute of Hydrology, Wallingford,UK
12. Loehr, R.C.(1974), "Characteristics and Comparative Magnitude of Non-point Sources", J. Water Poll. Control Fed. (WPCF), 46(8); pp 1849-1871
13. Maalel,K. and Huber, W.C.(1984), "SWMM Calibration using Continuous and Multiple Event Simulation", Third Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Chalmers University, Goteborg, Sweden
14. Rimer, A.E, et. al(1978), "Characterization and Impact of Stormwater Runoff from Various Land Cover Types", J. Water poll. Control Fed. (WPCF).50(2);pp 252-264
15. Roesner, L.A.(1981), "Improved Dynamic Flow Routing Model for Storm Drainage Systems", Second Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Urbana, Illinois USA
16. Sartor,J.D.and Boyd,G.B.(1972), "Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminations" EPA-r2-72-081,Environmental Protection Agency
17. Terstriep,M.L. and Stall,J.B.(1974), "The Illinois Urban Drainage Simulator, ILLUDAS", Illinois State Water Survey,Bull.58
18. Walesh, S.G(1989), "Urban Surface Water Management", A Wiley Interscience Publication
19. Wanielista, M.P.(1976), "Nonpoint Source effect on Water Quality", Florida Technological University, Orlando. Fla

20. Weibel, S.R., et. al(1964), "Urban Land Runoff as a Factor in Stream Pollution", J. Water poll. Control Fed.(WPCF), 36; pp 914-924
21. Yen, B.C.(1978), "Storm Sewer System Design", Water Resources Center of the Univ. of Illinois,Urbana
22. Yen, B.C.(1981), "Some Measures for Evaluation and Comparison of Simulation Models", Second Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Urbana, Illinois USA