

## [연구논문]

초기 강우로 인한 중랑천 유역에서의  
비점오염부하량 산정에 관한 연구Calculation of Nonpoint Source Loads from the Initial Rainfall  
in the Jungrang Stream Area

김 갑 수\* · 이 종 태\*\* · 박 영 민\*\*\*

## 목 차

- |                        |         |
|------------------------|---------|
| I. 서론                  | 원단위 산정  |
| II. 비점오염원의 현황, 오염부하량 및 | III. 결론 |

## ABSTRACT

Kap-Soo Kim · Jong-Tae Lee · Young-min Park

In general, nonpoint source(NPS) is composed of traffic pollutants, sediments adsorbed pesticides and nutrients. It is discharged from irrigation containing microorganisms, dissolved nutrients and excess waste crops. It is known that the management of NPS is more difficult than that of point sources due to intermittent occurrence, dispersion of discharge area, diversity types and loads of sources. This research focuses on estimation of NPS loads to the rainfall in the Jungrang stream area for the year of 2001, especially, within the initial period of stormwater. And also NPS loads were calculated based on analysing pollutants and discharge during the period of rainfall. The investigation was performed for the effects on the value of the units of NPS loads by the rainfall, intensity and preceding dry days. As the results, peak values of BOD, COD and SS were about 502 mg/L, 179~904 mg/L and 326~756 mg/L, respectively. However, those of the normal influent concentration to the third treatment system in the Jungrang STP were in the range of 85~140 mg/L, 39~719 mg/L, 54~113 mg/L, respectively. The units of NPS loads were calculated as follows; BOD 372, COD 713, SS 719, T-N 86 and T-P 23 kg/ha/yr, respectively. These results were in the previous researches on the calculation of unit NPS loads. The influenced factors to the unit of NPS loads were the rainfall intensity, the preceding dry days and the mean rainfall intensity in the order. According to the result from the regression analysis, for the accumulated amount of rainfall was revealed the highest value as 0.97.

**키워드(Key Words):** 비점오염원(nonpoint source(NPS)), 초기강우기간(initial period of stormwater), 비점오염원단위(unit of NPS loads), 선행무강우일수(preceding dry days), 평균강우강도(mean rainfall intensity)

\* 서울시정개발연구원 도시환경연구부 선임연구위원

\*\* 경기대학교 토목환경공학부 교수

\*\*\* (주)도화종합기술공사

## I. 서론

비점오염원부하라 함은 오염물질이 특정한 지점(특정오염원)으로부터가 아닌, 불특정지점에서 분포하여 강수에 의해 운반 배수계통으로 유출되는 것으로 정의할 수 있다.

도시지역 비점오염원으로서 큰 역할을 하는 것은 가로상에 쌓인 각종 퇴적물이며, 이들 퇴적물은 유기성 부유오니, 수생 동식물 사체, 기름, 중금속, 각종 도시폐기물, silt, 모래, 자갈 등으로 이루어져 있다.

중랑천의 경우 제내지나 논, 밭 등의 용지와 관련된 비점오염원으로서 농약과 영양물을 흡착한 퇴적물, 용존영양염과 박테리아 등 미생물을 함유한 관개배수, 농작물의 잉여잔재물 등이 있으며 비점오염원은 유출의 간헐성, 배출지점의 확산, 오염원 종류 및 부하의 다양성 때문에 점오염원보다 관리하기가 어려운 것으로 알려져 있다.

효율적인 수질관리를 위해서는 점오염뿐만 아니라 비점오염원을 적정관리하지 않고서는 수계환경의 개선 및 수질환경기준을 달성하기가 매우

어려운 실정이므로, 비점오염원의 중요성을 인식하여, 그 관리 및 처리방안을 모색해야 한다.

비점오염원은 기후, 지형, 일시, 수문조건에 따라 배출양상이 다양하므로 정확한 원단위의 산정을 위해서는 장기간(최소 5년 이상)에 걸친 연간 연속 측정에 의한 실측자료를 바탕으로 하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구에서는 강수시 비점오염원이 집중적으로 배출되는 점을 고려하여 일년의 기간에 국한되어 중랑천유역 하구에서의 오염도와 유출량을 강우기간에 실측하는 방법으로 원단위를 산정하였고, 강수량, 강우강도 및 선행무강우일수 등이 비점오염 부하량에 미치는 영향을 검토하였다.

## II. 비점오염원의 현황, 오염부하량 및 원단위 산정

### 1. 비점오염원에 대한 외국 현황 및 합류식 하수도시스템의 월류수 대책

<표 1>은 미국에서 강우시 분류식 하수거, 합

<표 1> 강우시 오염물 농도

Pollutants	Storm water overflow concentration			
	Separate Drainage Areas <sup>a)</sup>		Combined Areas <sup>b)</sup>	
	Mean <sup>c)</sup>	Standard Deviation	Mean <sup>c)</sup>	Standard Deviation
BOD(mg/L)	27	25	108	36
COD(mg/L)	205	118	284	110
SS(mg/L)	608	616	372	275
대장균군(MPN/100mL)	$3 \times 10^9$	-	$6 \times 10^9$	-
T-N(mg/L)	2.3	1.4	9	6
T-P(mg/L)	0.5	0.4	2.8	2.9

a: Summary of 20 cities, storm sewers, and unsewered areas

b: Summary of 25 cities, Combined sewer areas

c: Geometric mean

류식 하수거의 수질을 비교한 것으로 분류식 하수관거에서의 우수관거의 수질은 BOD에 있어서는 하수처리장의 2차 처리후의 수질과 비슷한 27mg/L이나 SS는 608mg/L이다. 또한, 합류식 하수거의 유출수는 분류식 하수관거에서의 우수거의 경우보다 BOD가 4배가량 높으나 SS는 약 절반가량인 372mg/L이다. 강우시 분류식하수 관거의 우수거로부터 유출수는 SS와, 합류식인 경우는 BOD와 SS가 전부 처리되어야 효과적으로 수질보전이 이루어질 수 있다는 것을 나타내주고 있으며 실제로 미국 각 지역에서는 우수가 처리되고 있다.

일본에서의 4대 호소(湖沼)에 있어서의 발생오염 부하비율은 <표 2>와 같다.

<표 2> 일본 4대 호소의 수질오염 부하 비율

(단위: %)

	COD <sub>Mn</sub>				
	시가지	산림등	생활계	산업계	축산 양식
카스미가우라	15	28	34	3	20
테가누마	16	8	70.9	0.1	5
스와코	17	56	18	7	2
비와코	9	44	25	18	4
	T-N				
	시가지	산림등	생활계	산업계	축산 양식
카스미가우라	6	34	35	5	20
테가누마	11	12	63.9	13	0.1
스와코	12	57	19	9	3
비와코	6	55	19	15	5
	T-P				
	시가지	산림등	생활계	산업계	축산 양식
카스미가우라	6	16	46	8	24
테가누마	6	5	67.6	20.9	0.5
스와코	14.1	41.4	25.3	11.1	8.1
비와코	5	28	35	27	5

테가누마 호수는 생활계의 비율이 높지만, 전체적으로 보면 시가지 및 산림 등으로부터 발생되

는 비점오염원이 COD 24~73%, T-N 33~69%, T-P 11~55.5% 정도로서 상당히 높은 것을 알 수 있으며 이는 환경기준의 달성 및 수환경의 개선을 위해서는 비점오염원의 오염부하를 삭감시키는 것이 매우 필요하다는 것을 알 수 있다.

비점오염원 부하의 수계로의 유출과정을 나타내면 <그림 1>과 같다.

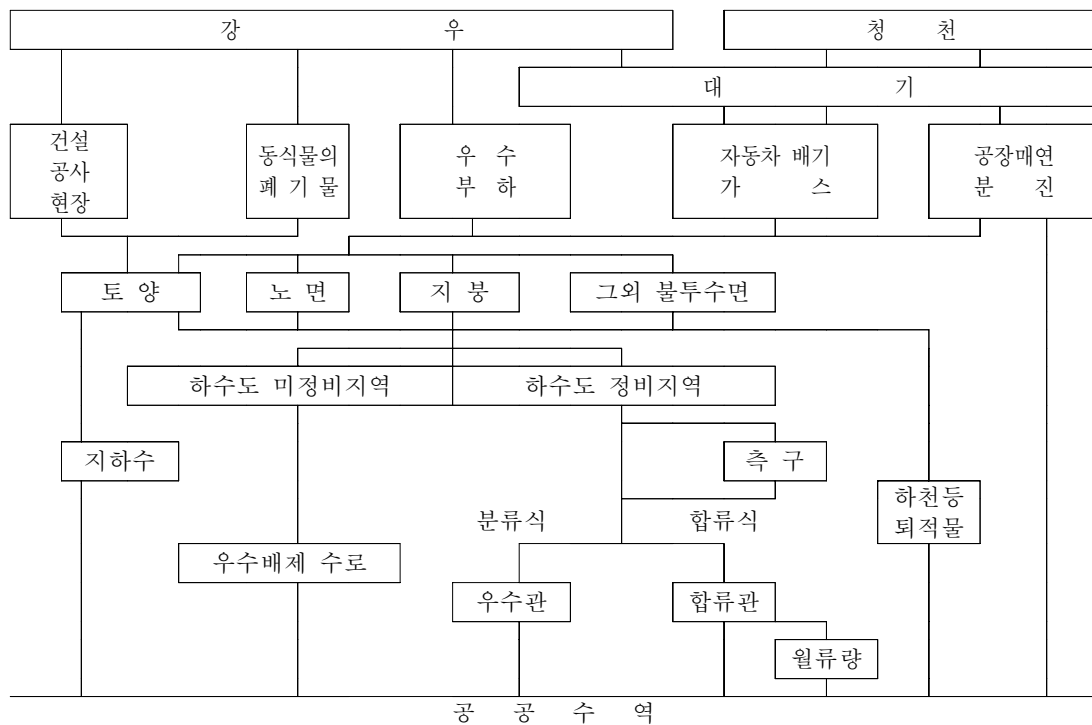
도시부에서의 유출경로를 중심으로 살펴보면, 도시지역에서의 비점오염원에는 오염배출원과 그것이 유하과정에서 퇴적한 것의 두 가지로 볼 수 있다.

유출과정에서의 오염배출원에는 도시배수로의 유입점인 도로측구와 우수받이, 도시하수로, 합류식하수도관, 분류식하수도 우수관 및 우수배제수 등이 있으며, 이러한 것으로부터의 부하는 강우시의 우수유출과 함께 공공수역으로 유출되고 있다.

<표 3>에서 나타낸 것처럼 합류식하수도의 월류수대책을 수립하기 위하여 중랑하수처리사업소로 유입되는 중랑천 유역의 생활하수 수질현황 추이를 24시간 관찰하고자 하였으며 이를 위해 평상시 중랑하수처리사업소 제3처리장 유입펌프동에서 수질오염 8개 항목을 대상으로 24시간 수질측정을 수행하였고, 1개월에 1회 이상 측정을 원칙으로 하였다.

초기강우에 의한 중랑하수처리사업소 및 중랑천 본류의 오염부하량을 산정하고, 하수처리장 방류수에 의한 중랑천 하구의 오염물 거동을 파악하고자 하였다.

측정 장소로는 중랑하수처리사업소 제3처리장 유입펌프동, 군자교, 장안교 지점이며, 초기강우가 발생시 30분 간격 혹은 매시간별로 측정하는 것을 원칙으로 하였다.



&lt;그림 1&gt; 비점오염원 부하의 수역으로의 흐름 과정

&lt;표 3&gt; 2001년 현장조사 현황

횟수	일시	측정장소	측정항목	강우량(mm)
1	2001. 4.20	중랑하수처리장	DO, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	-
2	2001. 5. 7	중랑하수처리장, 군자교, 장안교	DO, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	5.4
3	2001. 5.15	중랑하수처리장, 장안교	DO, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , 유량측정	0.7
4	2001. 5.20	중랑천 하구~부용천 합류부	DO, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	-
5	2001. 5.22	중랑하수처리장, 장안교, 제6낙차공	DO, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	7.9
6	2001. 6.10	중랑천 하구~서울시 경계	DO, BOD, SS, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	-
7	2001. 6.18	중랑하수처리장, 군자교, 장안교	DO, BOD, SS, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	42.5
8	2001. 7.10	군자교, 창동교, 창동교부근 우수토실	DO, BOD, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	15.8
9	2001. 7.14	중랑하수처리장, 군자교	DO, BOD, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	38.0
10	2001. 7.30	월계1교	DO, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	69.6
11	2001. 9.30	중랑하수처리장, 군자교, 장안교	DO, BOD, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	5.4
12	2001.10. 9	중랑하수처리장, 군자교, 장안교	DO, BOD, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	38.0
13	2001.10.27	월계1교	횡단면 측량 및 유량측정	-
14	2001.11. 1	중랑하수처리장	BOD, COD, SS, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	7.0
15	2001.11. 5	중랑하수처리장, 군자교	DO, BOD, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	3.0
16	2001.12.12	중랑하수처리장, 군자교	DO, BOD, SS, COD, 수온, pH, 전도도, 탁도, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	5.5

중랑천하구부터 중랑천 상류부인 부용천 합류 부까지 공간적인 수질상황을 파악하고, 하천으로 유입되는 오염물질을 조사하였다.

## 2. 비점오염원 유출 및 해석모형

### 1) SWMM 모형의 기본 방정식 및 Runoff 블록

SWMM은 도시유역내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

Runoff 블록에서 지표면유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 Kinematic wave 근사법인 비선형저류방정식으로, Runoff 블록은 각 소유역에서의 수심과 유량을 결정하기 위해 다음의 <식 1, 2>의 연속방정식과 Manning방정식을 사용한다. 즉,

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i - Q \dots \dots \dots \text{<식 1>}$$

V: 소유역 물의 체적(=A · d), d: 수심(m),

t: 시간(sec), A: 수표면 면적(m<sup>2</sup>), Q: 유출량(CMS)

Runoff 블록에서 지표면유출은 유역면적을 광 폭으로 보아 수리반경이 수심과 같다는 가정아래 Manning 방정식을 사용하여 계산하면 <식 2>와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \dots \dots \dots \text{<식 2>}$$

W: 유역의 폭(m), n: Manning의 조도계수,  
dp: 지면저류 깊이(m), S: 소유역 경사(m/m)

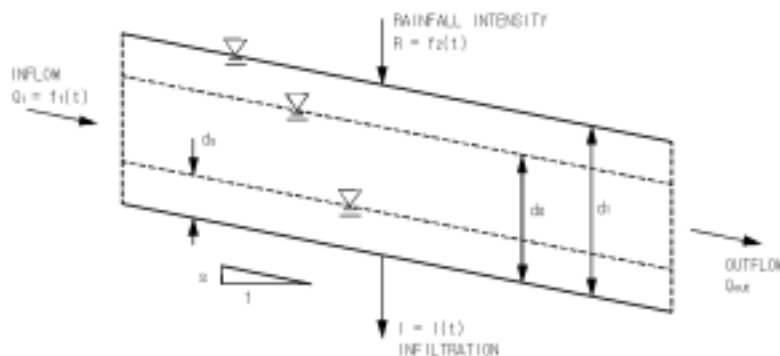
미지값  $d_p$ 을 계산하기 위해 <식 1>, <식 2>를 비선형 미분방정식에 대입하고 정리하면 비선형저류방정식은 <식 3>과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Ad}{dt} &= i - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \dots \text{<식 3>} \\ &= i + WCON \cdot (d - d_p)^{5/3} \end{aligned}$$

여기서,  $WCON : -\frac{W \cdot S^{1/2}}{A \cdot n}$

WCON은 유역폭, 경사, 조도계수 등을 하나로 합한 것인데, 유역의 특성에 따라 변화하는 유역 특성인자이기 때문에 유출계산시 등가의 변화가 유역 특성인자로 조절될 수 있다.

Runoff 블록에서의 관로유출은 <그림 3>과 같



<그림 2> Runoff 블록에서의 지표면 유출

으며 비선형 저류방정식으로 계산된다. 각 연산구간에서 변수들을 적분하여 모형개발 초기에는 수정 Euler방법을 사용하였으나, 후에 보다 안정된 해를 얻기 위해 Newton-Raphson방법으로 대체되었다.

Manning식이 각 적분 연산시간구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동은 준 정상(Quasi-steady) 상태로 근사된다. 관로유출에서 사용되는 연속방정식과 Manning식은 <식 4> 및 <식 5>와 같다.

$$\text{저류량: } \frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_t + Q_w + Q_{GW} - Q \quad \cdots \text{<식 4>}$$

$$\text{유출량: } \frac{1}{n} S^{1/2} R^{2/3} A \quad \cdots \text{<식 5>}$$

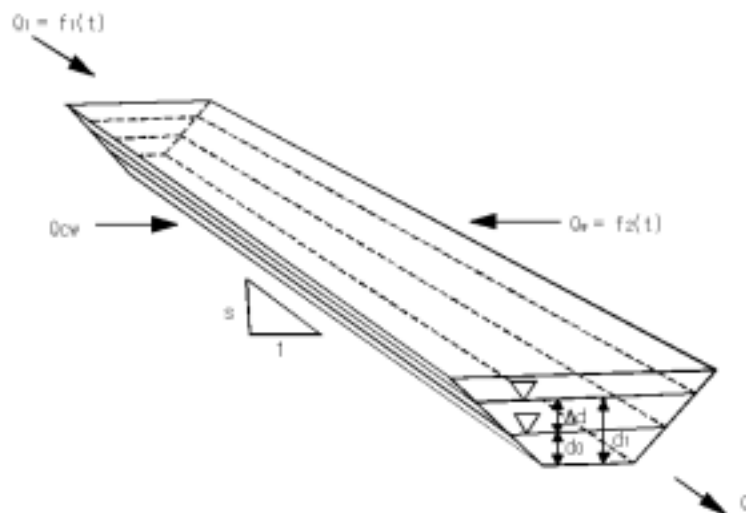
강우시 배수구역으로부터의 오염물 배출은 강우 이전까지의 오염물의 축적(build up)과 강우개시 이후의 지표면에 대한 강우의 충격작용과 지표류의 소류력에 의한 오염물질의 쓸림(washoff)

에 의하여 이루어진다.

오염물의 축적은 물리·화학·생물학적 작용에 의해 복합적으로 이루어지며, 오염물 축적에 영향을 주는 요소로서는 선행무강우기간, 토지이용도, 도로청소 빈도 등과 강우, 바람 등의 국지 기상현상 등 여러 가지가 있겠으나, 이를 모두 고려하는 방정식의 구성은 현실적으로 매우 어려우므로 오염물 축적량은 단순화된 몇 가지 유형으로 구분될 수 있다.

SWMM에서는 소유역 지표면상의 오염물의 축적이 선형 또는 비선형 누적비로 산정되며, 축적의 형태는 ① Power Linear, ② Exponential, ③ Michaelis-Menten식 중 하나를 선택하여 사용할 수 있다.

한편, 오염물의 이송은 강우로 인하여 무강우기간에 축적된 오염물이 지표면으로부터 침식 또는 용해되어 운반되는 과정이며 일반적으로 이송량은 시간에 대하여 <식 6>과 같은 지수함수 관계를 갖는다.



<그림 3> Runoff 블록에서의 관로유출

$$P_w(t) = P_o(1 - e^{-W \cdot t}) \dots\dots\dots <식 6>$$

여기서,  $P_w(t)$ : 시간  $t$ 에서의 오염물 쓸림 누가량  
 $P_o$ : 초기 오염물 축적량 ( $= p_c$ )  
 $W$ : 쓸림계수

또한, 임의 시간  $t$ 에서 이송 후의 잔류 오염물량  $p(t)$ 는  $P_o - P_w(t)$ 이므로 <식 7>과 같이 표현된다.

$$p(t) = P_o e^{-Wt} \dots\dots\dots <식 7>$$

여기서,  $p(t)$ : 시간  $t$ 에서의 지표면 잔류 오염물량  
 $P_o$ : 초기 오염물 축적량

결국, 시간에 따른 이송량의 변화율을 나타내면 <식 8>과 같다.

$$\frac{dp}{dt} = -W \cdot p(t) \dots\dots\dots <식 8>$$

위의 식은 이송률이 잔류 오염물질에 비례함을 나타내고 있다. 한편, 오염물질들은 지표면에서의 소류력에 의하여 운반되며 이로 인한 오염부하량은 유출강도 즉, 유출률(Runoff rate : mm/hr)의 함수로 산정된다. 쓸림계수  $W$ 가 유출률의 멱수에 비례한다고 가정하면 쓸림계수는 <식 9>와 같이 표현 가능하다.

$$W = k \cdot r^s \dots\dots\dots <식 9>$$

여기서,  $k$ : 이송 계수  $r$ : 유출률  $s$ : 이송지수

위의 쓸림계수와 관련된 매개변수로는 해당 유역의 청소간격일이 필요하며, 여기서는 7일 간격의 청소기간을 적용하였으며 각 시간 단계에서의

오염특성은 오염농도와 부하량으로 표현된다. 이를 산정하기 위해서는 각 시간대에서의 오탁부하량을 먼저 산정하고 이를 유출량으로 나눔으로써 오염농도를 결정한다. 즉,

$$C = \frac{1}{Q} \frac{dp}{dt} = \frac{k \cdot r^{s-1} \cdot p(t)}{A_s} \dots\dots <식 10>$$

여기서,  $C$ : 오염농도(mg/ℓ),  $Q$ : 지표 유출량( $r \cdot A_s$ )

또한, 미지 시간대의 잔류 오염물량은 유출률  $r$ 의 시간평균치와 이송계수  $k$ 로부터 <식 11>과 같이 산정된다.

$$p(t + \Delta t) = p(t) \cdot e^{C_t} \dots\dots\dots <식 11>$$

$$\text{여기서, } C_t = k \cdot \frac{[r(t)^s + r(t + \Delta t)^s]}{2} \cdot \Delta t$$

## 2) Transport 블록

지표면유출은 Runoff 블록에서 연산된 결과를 기본자료로 사용하며 강우 및 건기시 하수시스템 내에서 유량과 오염물질을 추적하고, 하수시스템으로의 침투를 계산하며 Transport 블록은 다음의 Manning식과 연속방정식으로 구성된다.

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} \dots\dots\dots <식 12>$$

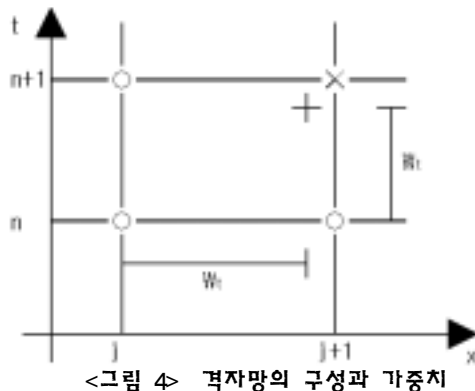
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots <식 13>$$

여기서,  $s_o$ : 관로의 경사이며, 마찰경사 Sf와 같다고 가정,  
 각 시간간격에서 흐름은 정상류로 간주,  
 $x$ : 관로의 길이,  $A$ : 흐름 단면적,  $R$ : 동수반경,  
 $n$ : Manning의 조도계수,  $Q$ : 유량,  $t$ : 시간,  
 $g$ : 중력가속도

연속방정식은 kinematic wave식의 형태이며 차분화하여 표현되며 <그림 4>는 연속방정식에

서의 격자망 구성과 시간적분 과정을 나타낸 것이다.

우수관거에서의 오염물질의 이동에 관한 1차원 이송-확산방정식(advective - dispersion equation)은 일반적으로 <식 14>와 같이 표현되며 이 식은 SWMM의 Transport블록에서 우수거에서의 오염물질의 이동과 확산을 계산하는 기본 개념의 식으로 활용되고 있다.



$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \epsilon \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC$$

..... <식 14>

여기서, C: 오염물질의 농도, U: 평균유속,  
A: 흐름단면적,  $\epsilon$ : 종확산계수, K: 감쇠계수

### 3) 유출·수질 상관모형

오염성분에 대해 실측한 유량-오염성분들간의 자료를 이용하여 상관 분석을 수행하여 유출-수질간의 관계성을 산정하는 통계모형의 활용이 가능하며 이 방법은 강우사상에 대한 유출수문곡선 및 오염도곡선상의, 동일 시간에서의 유량과 오염부하량을 함께 도시하여 유량의 증감에 따른 각 오염부하량의 변화 성향을 분석하고 회귀분석을

통한 가장 적절한 상관관계곡선을 유도한다.

<표 4>에서 C(t), Q(t)와 L(t)는 각 시간에서의 농도(mg/L), 유량(CMS)과 부하율(g/sec)이며,  $\Sigma L$ 은 각 사상별 누적부하량(kg),  $\Sigma Q$ 는 누적유출량(m<sup>3</sup>)을 나타내었다. 각 방법에 대한 회귀분석의 결과로서 회귀상수 a, b값 및 상관계수( $R^2$ )값을 구하여 그 적정성 여부를 판단할 수 있다.

<표 4> 유량-오염물간의 회귀식의 유형

방 법	회귀식의 형태
· 유량-농도 선형 상관관계 (M1)	$C(t) = a + b \cdot Q(t)$ (mg/L) (CMS)
· 유량-농도 비선형 상관관계 (M2)	$C(t) = a \cdot [Q(t)]^b$ (mg/L) (CMS)
· 유량-부하율 선형 상관관계 (M3)	$L(t) = a + b \cdot Q(t)$ (mg/sec) (CMS)
· 비유량-비부하율 비선형 상관관계 (M4)	$\left[ \frac{L(t)}{A} \right] = a \cdot \left[ \frac{Q(t)}{A} \right]^b$ (mg/sec/ha) (mm/hr)

### 3. 강우사상별 오염부하량의 산정

중량천 유역은 기타 도시하천과는 달리 유역 하류부에 이 지역의 생활하수를 처리하는 중량하수처리사업소가 위치하고 있어, 초기강우에 따른 오염부하량을 산정하기 위해서는 중량천 하류부에서의 유량변화 및 수질농도변화뿐만 아니라 차집관거를 통하여 초기강우가 유입하는 중량하수처리사업소 유입동에서의 유량변화 및 수질농도를 병행하여 측정하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 <표 5>와 같이 중량하수처리장으로 우수가 전량 유입되는 강우사상인 강우1, 강우2의 경우와 차집관거의 소통능력을 초과하여 중량천으로 월류가 발생한 강우3, 강우4 및 강우5의 경우로 각각 구분하여 유출량 및 오

염부하량을 산정하였으며 이를 바탕으로 유역의 비점오염부하량 원단위 산정, 합류식 관거와 하천의 유량 및 오염부하량 분담평가, 토지이용이 비점오염부하량에 미치는 영향 등을 각각 고찰하였다.

어떤 강우사상에 대해서 특정유역으로부터의 오염물질 유출특성은 침투농도, 산술평균농도, 침투 오염물질 부하량, 평균 오염물질 부하량 또는 총유출 부하량 등으로 나타낼 수 있다.

그러나 대부분의 경우 강우시 발생하는 총부하량이 개개의 농도 또는 침투 부하량보다 중요하다. 그 이유는 유출사상이 비교적 짧고, 강우 유출수가 유입되는 수체에서는 어느 정도의 혼합현상이 수반되므로 강우로 인한 유출수내 개개의 농도변화보다는 결국 총부하량의 반응이기 때문이다.

이와 같은 이유로 강우사상에 대한 평균농도 또는 유량가중 평균농도(EMC, event mean concentration)는 비점오염원의 유출을 평가하기 위한 가장 적절한 인자로 인식되고 있으며, 가장 널리 이용되고 있다.(EPA, 1983).

따라서, 중량하수처리장과 군자교 지점에서의 평상시 기저유량을 고려한 유량가중 평균농도(EMC)를 산정하기 위하여 <식 15>를 사용하

였다.

$$EMC = \frac{\text{총유출량 중 총오염물질중량}}{\text{총유출량}} \dots \text{<식 15>}$$

$$= \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} = \frac{Q_D C_D + Q_R C_R}{Q_D + Q_R}$$

여기서, QD: 평시 기저 유량(CMS),  
CD: 평시 오염 농도(mg/L),  
QR: 강우에 의한 직접유출량(CMS),  
CR: 강우에 의한 오염 농도(mg/L)

<식 15>에서 강우에 의한 오염농도량은 <식 16>으로 표현될 수 있다.

$$\therefore C_R = \frac{Q_e C_e - Q_D C_D}{Q_R} \dots \text{<식 16>}$$

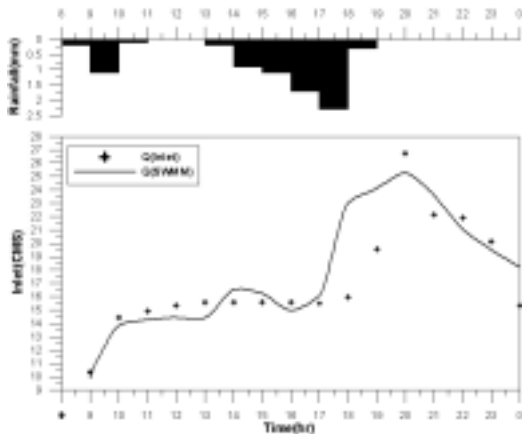
여기서, Qe: 관측시간 t에서의 총유입량,  
Ce: 총유입시 오염 농도(mg/L)

#### 1) 강우 1(2001. 5. 22)의 관측과 유출 · 수질모의 분석

강우 1은 2001. 5. 22 발생한 강우사상으로서 16시간 동안 약 7.9mm의 강우량을 기록하였으며, 이 때 강우강도는 약 2.3mm/hr이었다. <그림 5>는 강우에 의한 실제 유입량을 SWMM에 의한 산정치와 비교한 결과로서 비교적 근사한 경향을 보였다.

<표 5> 산정지점에 따른 강우사상의 구분

구분	강우사상	발생일시	강우량(mm)	강우강도(mm/hr)	지속시간(hrs)	선행무강우일수(days)	합류식관거 월류유무	산정지점
1	강우1	2001. 5.22	7.9	2.3	16	2.29	무	중량하수처리장
2	강우2	2001. 9.30	5.4	1.1	16	1.00	무	
3	강우3	2001. 6.17	18.1	4.0	12	3.58	유	중량하수처리장 + 군자교
4	강우4	2001. 7.14	21.7	12.8	11	2.22	유	
5	강우5	2001.10. 9	38.0	8.0	17	5.00	유	



<그림 5> 유입량 곡선 및 SWMM 모형의  
계산결과(2001. 5. 22)

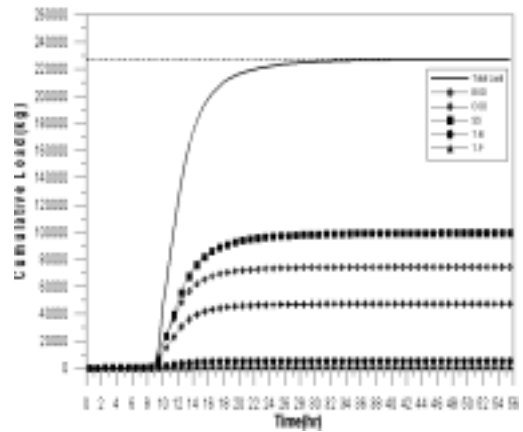
<그림 6>은 실측된 강우에 의한 유출농도 CR(COD, SS)과 수치모형에 의한 계산 농도를 비교한 것으로서 SS는 유사한 경향을 보였으나 COD는 다소 상이한 경향을 보였다.

당일 제3유입동에서 측정된 침투유입량은 저녁 20시경의 약 26.72 CMS였으며, COD의 침투농도는 최대 시간강우 2.3mm가 발생한 1시간 뒤인 19시경에 나타났다.

SS의 침투농도는 이보다 1시간이 경과된 20시경에 발생하였으며, 이 때 제3유입동으로의 유입

량 또한 최대치를 기록하였다.

<그림 7>은 강우 1 사상에 의한 각 수질항목 및 총누가오염부하곡선으로, 총오염부하량은 약 227톤으로서 각 항목별로 산정된 오염부하량은 <표 6>과 같다.

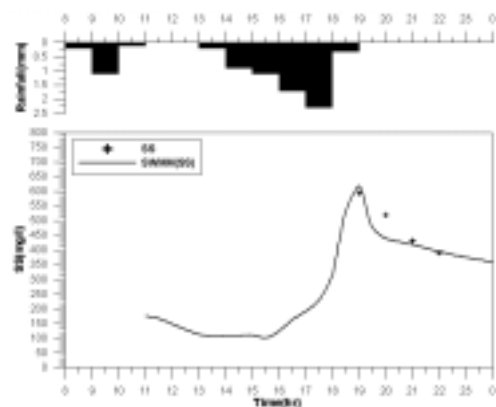
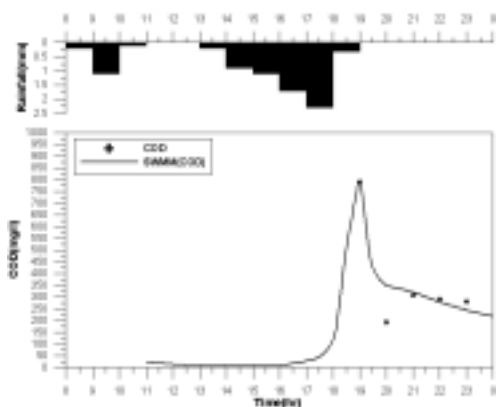


<그림 7> 강우 1(2001. 5. 22)에 의한  
오염부하곡선

<표 6> 강우 1(2001. 5. 22) 오염부하량 산정 결과

(단위: kg)

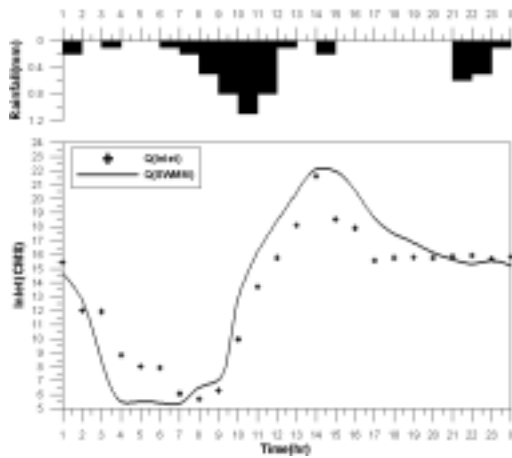
	계	BOD	COD	SS	T-N	T-P
부하량	227,172	47,400	74,400	99,288	5,210	874



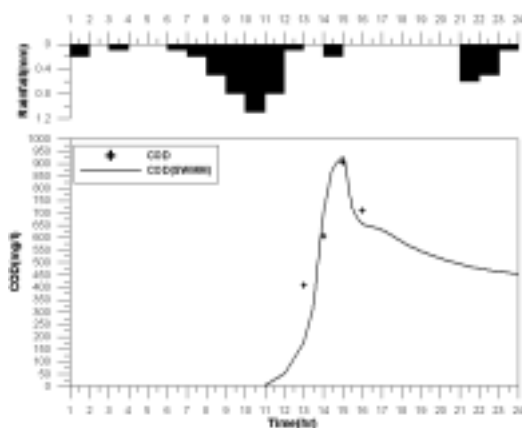
<그림 6> 실측치와 계산치(COD,SS)와의 비교(2001. 5. 22)

## 2) 강우 2(2001. 9. 30)의 관측과 유출·수질모의 분석

강우 2는 2001. 9. 30 발생한 강우사상으로서 16시간동안 약 5.4mm의 강우량을 기록하였으며, 이때 강우강도는 약 1.1mm/hr였으며 강우에 의한 실제유출량과 SWMM 모형에 의한 산정결과치를 비교하였으며 실측치와 산정치와는 비교적 근사한 결과를 보였다(<그림 8>).



<그림 8> 유입량 곡선 및 SWMM 모형의 계산 결과(2001. 9. 30)



당일 제3유입동에서 수질실험은 오전 11시부터 저녁 5시까지 7시간동안 실시하였다. <그림 9>는 관측치에 의한 오염도(COD, SS)와 SWMM에 의한 계산 농도를 비교한 것으로서 근사한 경향을 보였다.

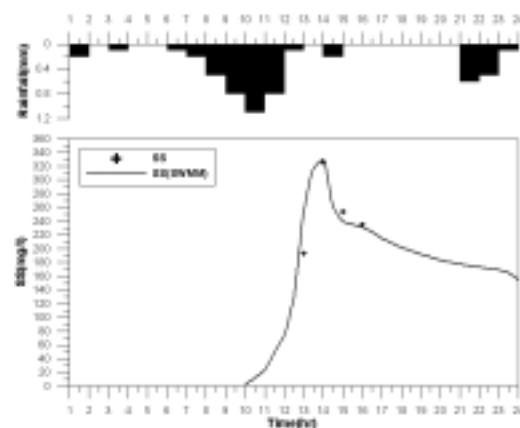
당일 제3유입동의 침투유입량은 오후 14시경에 약 21.61CMS였으며, 침투농도(COD, SS)는 최대 시간강우가 발생한 오전 11시경과 근사한 시각에 발생하였다.

<그림 10>은 강우 2 사상시의 각 수질항목별 누가량 및 총누가오염부하곡선량을 나타낸 것이며, <표 7>과 같이 총오염부하량은 약 157톤으로서 강우 1 사상의 약 70% 수준으로 평가되었다.

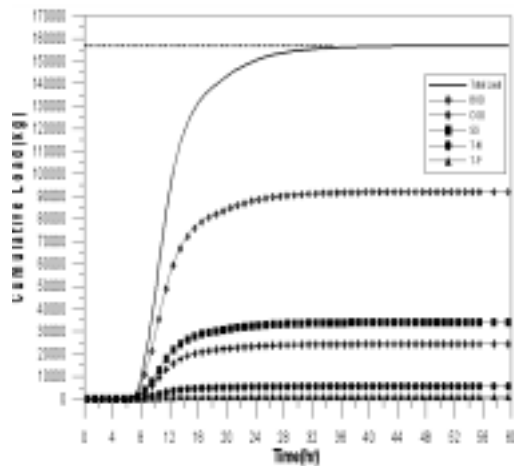
이는 선행무강우일수가 1일에 불과해 지표면에 쌓여 있던 많은 오염물질들이 선행 강우기간에 상당량이 하천으로 이미 배출되었기 때문인 것으로 판단된다.

<표 7> 강우 2(2001. 9. 30) 오염부하량 산정 결과 (단위: kg)

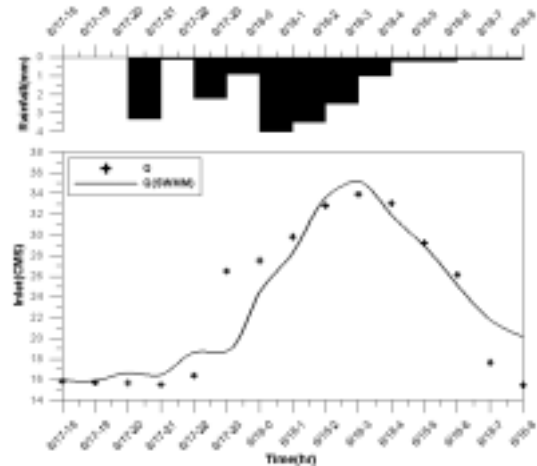
	계	BOD	COD	SS	T-N	T-P
부하량	156,768	24,300	91,900	33,997	5,570	981



<그림 9> 실측치와 계산치(COD, SS)와의 비교(2001. 9. 30)



<그림 10> 강우 2(2001. 9. 30)에 의한  
오염부하곡선



<그림 11> 유입량 곡선 및 SWMM 모형의 계산  
결과(2001. 6. 17)

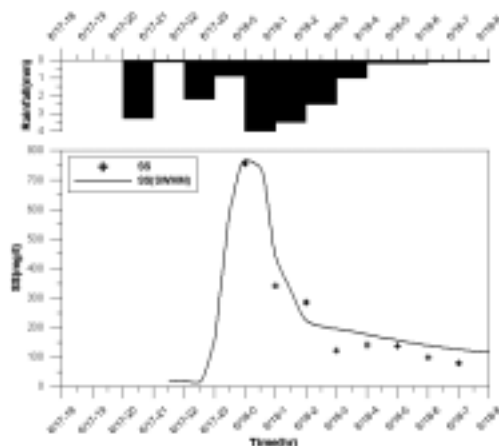
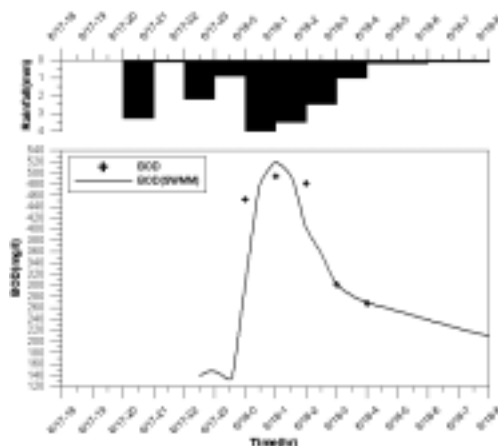
### 3) 강우 3(2001. 6. 17)의 관측과 유출 · 수질모의 분석

강우 3은 2001. 6. 17~18까지 발생한 강우사상으로서 12시간동안 약 18.1mm의 강우량을 기록하였으며, 이 때 강우강도는 약 4.0mm/hr였다.

강우에 의한 직접유출량을 SWMM에 의한 산정결과치를 비교하였으며 근사한 결과를 보였다(<그림 11>).

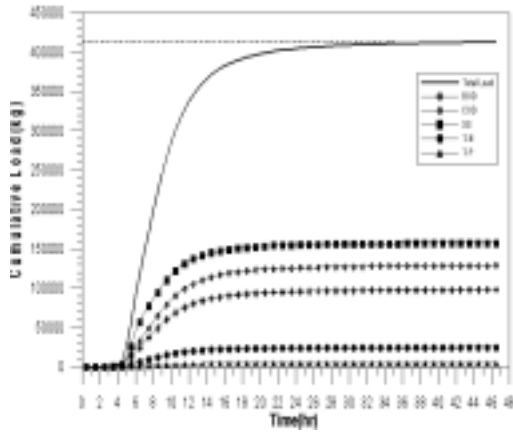
당일 제3유입동에서의 수질실험은 18일 0시부터 21시까지 21시간 동안 실시하였으며 <그림 12>는 관측치에 의한 오염도(BOD, SS)와 SWMM에 의한 계산 농도를 비교한 것으로서 BOD, SS 모두 실측치와 산정치가 비슷한 경향을 보였다.

<그림 13>은 강우 3 사상시의 각 수질항목별 누가량 및 총누가오염부하량을 나타낸 것으로서



<그림 12> 실측치와 계산치(BOD, SS)와의 비교(2001. 6. 17)

총 오염부하량은 약 413톤으로서 산정된 각 항목별 오염부하량은 <표 8>과 같다.



<그림 13> 강우 3(2001. 6. 17)에 의한 오염부하곡선

<표 8> 강우 3(2001. 6. 17) 오염부하량 산정 결과  
(단위: kg)

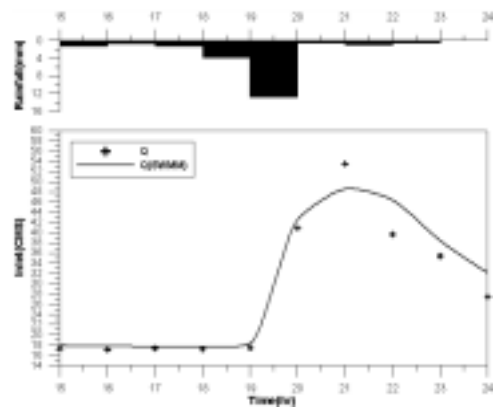
	계	BOD	COD	SS	T-N	T-P
부하량	413,179	97,900	129,000	157,000	24,500	4,779

#### 4) 강우 4(2001. 7. 14)의 관측과 유출 · 수질모의 분석

강우 4는 2001. 7. 14 15시부터 23시까지 모의

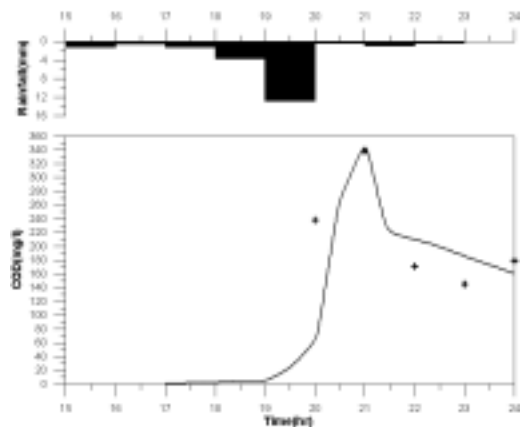
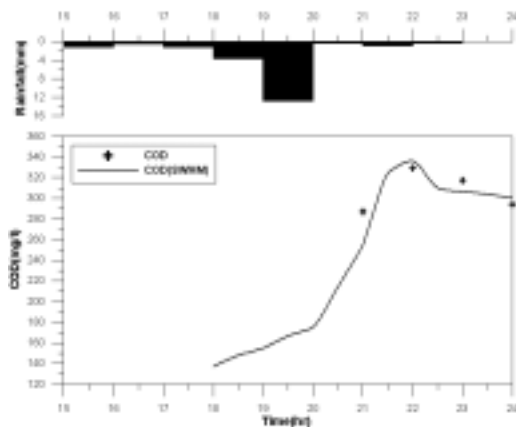
한 강우사상으로서 11시간동안 약 21.0mm의 강우량을 기록하였으며, 이 때 강우강도는 약 12.8mm/hr였다.

강우에 의한 직접유출량을 SWMM에 의한 산정결과치를 비교하였으며 실측치와 산정치와는 비교적 근사한 결과를 보였다(<그림 14>).



<그림 14> 유출 곡선 및 SWMM 모형의 계산 결과  
(2001. 7. 14)

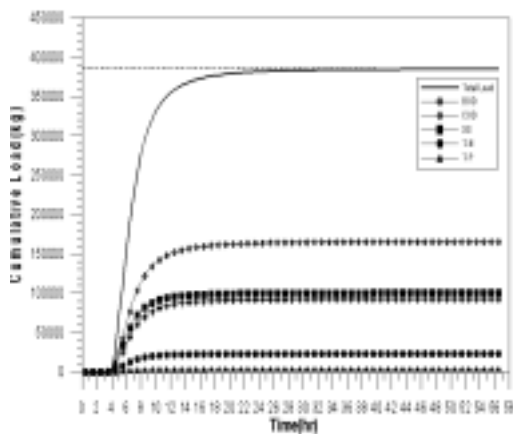
당일 제3유입동 및 군자교 지점에서의 수질 실험은 17일 18시부터 익일 02시까지 8시간 동안 실시하였으며 <그림 15>는 관측치에 의한



<그림 15> 실측치와 계산치(COD, SS)와의 비교(2001. 7. 14)

오염도(COD, SS)와 SWMM에 의한 계산치를 비교한 것으로서 COD, SS 모두 근사한 결과를 보였다.

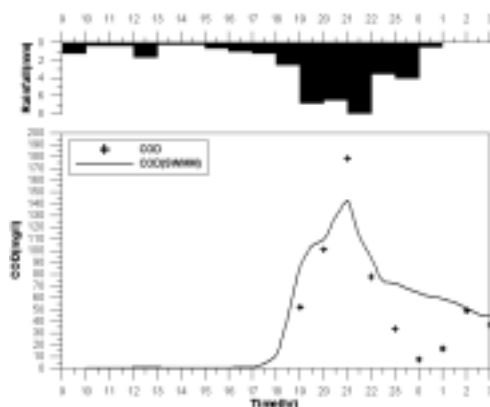
<그림 16>은 강우 4 사상시의 각 수질항목별 누가량 및 총누가오염부하량을 나타낸 것으로서, 총오염부하량은 약 385톤으로서 각 항목별로 산정된 오염부하량은 <표 9>와 같다.



<그림 16> 강우 4(2001. 7. 14)에 의한 오염부하곡선

<표 9> 강우 4(2001. 7. 14) 오염부하량 산정 결과  
(단위: kg)

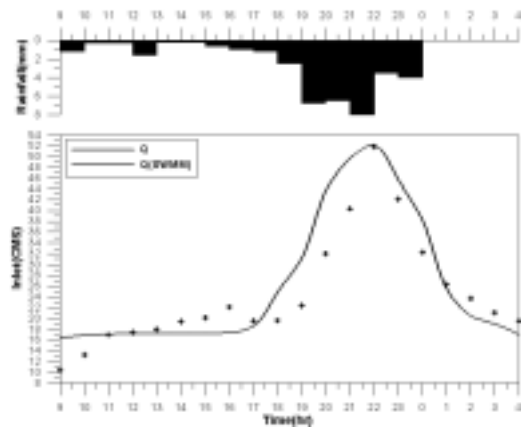
	계	BOD	COD	SS	T-N	T-P
부하량	384,695	92,479	165,134	100,287	23,021	3,774



## 5) 강우 5(2001. 10. 9)의 관측과 유출 · 수질모의 분석

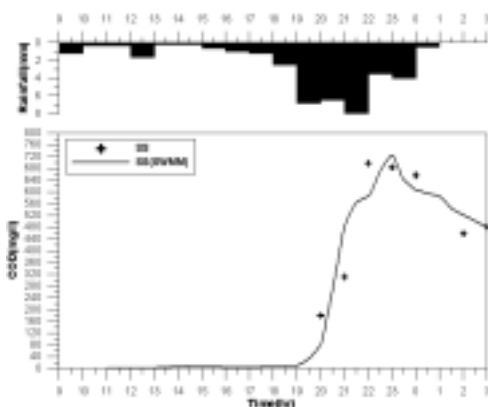
강우 5는 2001. 10. 9 오전 9시부터 발생한 강우 사상으로서 약 17시간동안 38.0mm의 강우량을 기록하였으며, 이 때 강우강도는 약 8.0mm/hr였다.

강우에 의한 직접유출량을 SWMM에 의한 산정결과치를 비교하였으며 실측치와 산정치는 비교적 근사한 결과를 보였다(<그림 17>).



<그림 17> 2001. 10. 9 유출 곡선 및 SWMM 모형의 계산 결과

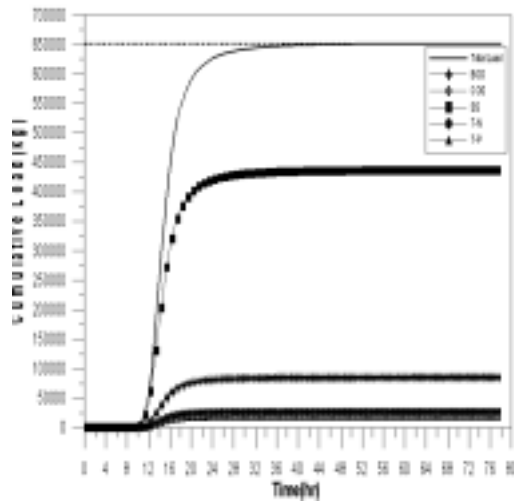
당일 제3유입동 및 군자교 지점에서의 수질실험은 9일 10시부터 익일 03시까지 15시간 동안



<그림 18> 실측치와 계산치(COD, SS)와의 비교(2001. 10. 9)

실시하였으며 <그림 18>은 관측치에 의한 오염도(BOD, SS)와 SWMM에 의한 계산 농도를 비교한 것으로서 COD, SS 모두 근사한 결과를 보였다.

<그림 19>는 강우 5 사상시의 각 수질항목별 누가량 및 총누가오염부하량을 나타낸 것으로서, 총 오염부하량은 약 652톤으로서 각 항목별로 산정한 오염부하량은 <표 10>과 같다.



<그림 19> 강우 5(2001. 10. 9)에 의한 오염부하곡선

<표 10> 강우 5(2001. 10. 9) 오염부하량 산정 결과

(단위: kg)

	계	BOD	COD	SS	T-N	T-P
부하량	651,773	86,374	83,297	436,188	26,800	19,114

#### 4. 중랑천 유역의 비점오염원 원단위 산정

비점오염원은 기후, 지형, 일시, 수문조건에 따라 배출양상이 다양하므로 정확한 원단위의 산정을 위해서는 장기간(최소한 5년 이상)에 걸친 연간 연속 측정에 의한 실측자료를 바탕으로 해야 한다.

그러나 본 연구에서는 수문조건에 따른 배출양상을 고려하여 본 과업기간에 국한하여 유역 하단에서의 오염도와 유출량을 실측하는 방법으로 원단위를 산정하였다.

<표 11>은 도시지역에서의 점오염원과 비점오염원의 농도를 비교한 자료로서 SS, BOD 등의 비점오염물질 농도는 강우조건에 따라 미처리 점오염원물질의 농도보다 매우 높게 나타남을 알 수 있다.

<표 11> 도시하수와 비점오염원의 농도비교

오염원 하수형태	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)	Lead (mg/L)	Total Coliforms (MPN/100mL)
도시우수 유출수	3~11,000	10~250	0.2~1.7	3~10	0.03~3.1	$10^3 \sim 10^8$
합류식 관거 월류수	100~1,100	60~200	1~11	3~24	0.4	$10^5 \sim 10^7$
경공업 지역 유출수	45~375	8~12	-	0.2~1.1	0.02~1.1	10
도시 미처리하수	235	160	10	35	-	$10^7 \sim 10^9$
도시 하수처리수	20	20	10	30	-	$10^4 \sim 10^6$

자료: Ellis, J.B.(1986)

&lt;표 12&gt; 각국의 도시지역에서의 비점오염원 유출농도(mg/L)

오염물질 \ 지역	USSR, Sweden, and England	미국의 8개 도시	일본 5회 조사	우리나라 4대지역
BOD	36~285	1~7,700	5.5~114.0	2.4~130.2
TOC	-	1~150	-	-
SS	18~3,100	5~3,100	7.4~63.7	5.3~124.1
COD	-	2~11,300	10.0~386.0	25.3~400.7
Total Solids	30~14,511	200~14,600	-	-
NH <sub>3</sub> -N	-	0.1~2.5	-	-
NO <sub>3</sub> -N	-	0.01~1.5	-	-
T-P	-	0.1~125	0.1~4.5	0.07~3.4
T-N	-	-	2.0~30.2	0.7~18.2

자료: 비점오염원 조사연구사업 보고서(환경부, 1995)

도시지역에서 우수유출수의 수질에 대해 각국의 자료를 비교한 결과 <표 12>와 같이 도시지역에서의 비점오염원 유출은 선행무강우일수, 토지이용상황, 도시의 특성 및 거리청소상황에 따라 오염물의 유출농도에는 큰 차이가 있다.

<표 13>은 강우 사상별로 산정된 총누가오염부하량(kg)을 강우기간의 유량(CMS)과 오염농도(mg/L)를 누적시킨 것으로서 합류식차집관거의 월류 유무, 누가강우량, 강우강도, 선행무강우일수, 유효강우량에 따라 그 크기에 차이가 나타남을 알 수 있다.

비점오염원단위를 간단히 정의하면 단위시간당 단위토지면적에서 배출되는 비점오염물질량을 말

하며, 단위는 일반적으로 비점오염부하량(kg 또는 ton)/면적(ha 또는 km<sup>2</sup>)/시간(day 또는 year)으로 나타낸다.

현재 사용되고 있는 원단위산정법으로는 경험식 등을 이용한 계산법과 유역에서 유량과 오염부하량을 실측해서 산정하는 실측법이 있으며 실측법은 조사방법에 따라 크게 3가지로 구분할 수 있다.

첫 번째는 지표면에서 오염물질 총량을 실측한 후 축적률 및 분해율을 적용하는 방법으로 주로 도시지역에서 비점오염원 원단위를 산정하는 데 이용된다.

두 번째 방법은 강우시 특정지역을 통과하는

&lt;표 13&gt; 강우사상별 총누가오염부하량의 비교

강우 사상	누가강우량 (mm)	강우강도 (mm/hr)	선행무강우일수 (일)	BOD (kg)	COD (kg)	SS (kg)	T-N (kg)	T-P (kg)	계 (kg)
강우 1	7.9	2.3	2.29	47,400	74,400	99,288	5,210	874	227,172
강우 2	5.4	1.1	1.00	24,300	91,900	33,997	5,570	981	156,768
강우 3	18.1	4.0	3.58	97,900	129,000	157,000	24,500	4,779	413,179
강우 4	21.7	12.8	2.22	92,479	165,134	100,287	23,021	3,774	384,695
강우 5	38.0	8.0	5.00	86,374	83,297	436,188	26,800	19,114	651,773

하천 상·하류 수질의 차이를 환산하거나 강우전 후의 부하량 차이를 환산하여 당해 유역에서의 비점오염물질 배출원단위를 산정하는 방법이다.

세 번째 방법은 토지이용별 강우시 배출물질을 직접 채취하여 농도를 측정하는 방법으로서 측정 횟수가 충분하면 원단위산정에서 가장 신빙성이 있는 방법이다.

본 연구에서 실시한 방법은 앞서 언급한 두 번째 방법에 속한다고 볼 수 있으나 계산치를 실측치와 보정한 후 모의치에 의한 누적부하량을 산

정한 점에서는 차이가 있다.

<표 14>는 앞에서 산정된 각 수질항목별 총누가오염부하량을 원단위(kg/ha/day)로 산정한 결과이다.

연구에서의 산정결과와 선행 연구된 도시지역에서의 비점오염원 원단위 산정 결과를 비교하여 보면 <표 15>와 같으며 선행무강우일수, 강우량, 강우강도, 강우지속시간, 토지이용현황, 도시의 특성 및 거리청소현황을 반영해 조사지별로 다소 차이가 있으나 본 연구의 결과는 선행연구 결과의 범위에 속하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 누가강우량, 평균강우강도, 선행 무강우일수 및 유효강우량 등과 항목별 단위부하량의 상관성을 분석하였으며, 이 때 비점오염부하량 예측식은 최지용(비점오염원 조사연구사업 보고서, 1995)의 연구에서 사용한 바 있는 <식 17>을 채택하였으며 이를 위한 기초 자료는 다음의 <표 16>과 같다.

<표 14> 강우사상별 비점오염원 원단위 산정 결과

(단위: kg/ha/day)

강우사상	BOD	COD	SS	T-N	T-P
강우 1	0.80	1.26	1.68	0.09	0.01
강우 2	0.94	3.57	1.32	0.22	0.04
강우 3	1.06	1.40	1.70	0.27	0.05
강우 4	1.62	2.89	1.75	0.40	0.07
강우 5	0.67	0.65	3.39	0.21	0.15
평 균	1.02	1.95	1.97	0.24	0.06

<표 15> 도시지역에서의 비점오염원 원단위

(단위: kg/ha/년)

연구자	SS	BOD	COD	T-P	T-N
본 연구(평균)	482~1,236 (719)	245~590 (372)	236~1,302 (713)	5~54 (23)	32~147 (86)
임봉수(1984)	831.1	319.7	690.6	-	-
최의소 외(1991)	854.1	270.1	1226.4	31.0	157.0
최지용(1995)	929.0	313.6	388.7	7.66	49.98
Whipple et al.(1976)	-	40.2 (29.2~51.1)	201~310	3.3 (1.1~5.5)	8.03 (6.9~9.1)
Cemola et al.(1979)	1701 (730~4792.5)	76.7 (54.8~84.0)	-	1.83 (1.1~5.1)	8.4 (3.29~17.9)
Sonzogni et al.(1980)	1460 (620~2299.9)	-	-	0.88 (0.40~1.31)	6.17 (5.0~7.3)
Wanielista et al.(1981)	460	50	-	2.01	8.4
和田安彦(1983)	686~1916	84~339	113~259	1.5~2.6	1.1~41.0
國松(1992)	770.2	150.7	222.7	5.62	45.3

&lt;표 16&gt; 비점오염부하량 예측식 산정을 위한 기초자료

강우 사상	단위면적당 오염부하량(kg/km <sup>2</sup> )					누가강우량 (mm)	평균강우강도 (mm/hr)	선행무강우일수 (days)	유효강우량 (cm)
	BOD	COD	SS	T-N	T-P				
강우 1	184	289	385	20	3	7.9	0.494	2.29	0.096
강우 2	94	357	132	22	4	5.4	0.216	1.00	0.068
강우 3	380	501	609	95	19	18.1	2.011	3.58	0.302
강우 4	359	641	389	89	15	21.7	2.170	2.22	0.394
강우 5	335	323	1,693	104	74	38.0	2.235	5.00	0.615

$$P = A + B(X_1) + C(X_2) + D(X_3) + E(X_4)$$

..... &lt;식 17&gt;

여기서, P: 비점오염원단위부하량(kg/km<sup>2</sup>)

X1: 누가강우량(mm)

X2: 평균강우강도(mm/hr)

X3: 무강우일수(days)

X4: 유효강우량(cm)

총단위부하량을 종속변수로 하고 누가강우량, 평균강우강도, 선행무강우일수, 유효강우량을 각각 독립변수로 하여 선형 회귀분석을 실시하였는 바, 누가강우량, 유효강우량, 평균강우강도 등은 강한 상관관계, 선행무강우일수는 뚜렷한 양적 상관관계가 나타났다(<표 17>).

각 독립변수들을 동시에 모두 포함하는 다중 상관 분석에서는 만족할 만한 결과식을 도출하는 데는 미흡하였는 바 이에 관해서는 추가적인 자료의 보완과 연구가 요망된다.

<표 17> 총단위부하량과 항목별 회귀식과 결정계수(R<sup>2</sup>)

항목	회귀식	결정계수 (R <sup>2</sup> )
누가강우량 (mm)	$Y = 127.79X - 217.95$	0.97
유효강우량 (cm)	$Y = 7296.50X - 42.14$	0.96
평균강우강도 (mm/hr)	$Y = 1350.90X + 185.09$	0.63
선행무강우일수 (days)	$Y = 902.06X - 431.67$	0.67

### III. 결론

비점오염원은 기후, 지형, 일시, 수문조건에 따라 배출양상이 다양하므로 정확한 원단위의 산정을 위해서는 장기간(최소 5년 이상)에 걸친 연간 연속 측정에 의한 실측자료를 바탕으로 하는 것이 바람직하다.

그러나 본 연구에서는 강우시 비점오염원이 집중적으로 배출되는 점을 고려하여 일년의 기간에 국한되어 중랑천유역 하구에서의 오염도와 유출량을 강우기간에 실측하는 방법으로 원단위를 산정하였고, 강우량, 강우강도 및 선행무강우일수 등이 비점오염 부하량에 미치는 영향을 검토하였다.

본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 중랑천 유역에서 초기 강우시의 비점오염량은 강우조건에 따라 차이가 있으나 BOD 약 502mg/ℓ, COD 약 179~904mg/ℓ, SS 약 326~756mg/ℓ의 첨두농도를 보여 평상시 제3처리장 생활하수의 BOD 약 85~140mg/ℓ, COD 약 39~73mg/ℓ, SS 약 54~113mg/ℓ를 크게 초과하였다.

(2) 중랑천 유역에서의 비점오염원 원단위를 산정한 결과 BOD 약 372, COD 약 713, SS 약 719, T-N 약 86 및 T-P 약 23kg/ha/year으로서

국내·외 도시지역에서의 비점오염원 원단위를 산정하는 선행연구 결과의 범위에 속하였다.

환경부, 1999, 「'98 하수도 통계」

(3) 초기강우기간동안 비점오염량에 영향을 주는 인자로서는 강우량, 선행무강우일수, 평균강우강도 등으로 산정되었으며, 중랑천 유역에서의 비점오염원의 단위부하량을 추정하는 상관식을 추정한 결과 누가강우량의 경우  $R^2$ 값이 0.97로서 비점오염부하량과 가장 큰 상관성을 보였다.

## 참고문헌

- 김갑수 등, 1997, 「서울시 하수도관리 실태 및 개선방안」, 서울시정연구, 제4권, 제2호, pp. 28~56
- 김갑수, 1997, 「서울시 하수도의 21세기 비전」, 서울시정포럼, Vol.5, No.7(통권 43), pp. 39~48
- 김인섭, 1998, 「하수도시설의 유지관리」, 환경공무원교육원 교재, 하수도반, pp. 21~47
- 대한상하수도학회 하수도연구회, 1997, 「하수도와 하수관거」
- 시승일, 1995, 「서울시 하수도 현황과 향후대책」, 1월호 pp. 116~124
- 염병대, 1997, 「배수설비정비를 위한 제언」, 토목, Vol.45, No.8, pp. 102~109
- 이종태, 1993, 「도시유역의 유출해석을 위한 SWMM 모형」, 대한토목학회 학술발표회 개요집(2), pp. 213~216
- 이종태, 1994, 「국내도시유역에 대한 SWMM의 적용성 분석」, 제36회 수공학 연구발표회, 한국수문학회, pp. 325~330
- 이종태, 1996, 「도시소유역에서의 강우에 의한 오탁부하량 산정」, '96 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 481~487
- 이종태, 1998, 「도시유역에서의 최적 유출·수질개변수 결정과 특성 연구」, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 171~176
- 「하수관거정비 및 검사 실태 조사 보고」, 환경부 하수도과 내부자료
- 한국환경과학협의회, 1994, 「주방 오물분쇄기(디스포자)가 수질오염에 미치는 영향에 관한 연구」