

강우시 산업단지에서의 오염물질 유출특성

방기웅 · 이준호* · 최종수**

대전산업대학교 환경공학과

*청주과학대학 환경공학과

**한국토지공사 토지연구원

(1999년 9월 8일 접수, 1999년 11월 12일 채택)

Characterization of Stormwater Pollutants Runoff in Industrial Complex

Ki-Woong Bang · Jun-Ho Lee* · Jong-Soo Choi**

Department of Environmental Engineering, Taejon National University of Technology

**Department of Environmental Engineering, Chongju National College of Science and Technology*

***Land Research Institute, Korea Land Corporation*

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the characteristics of pollutants overflow on storm events and the first flush analysis in industrial complex. Eight sub-basins in the Chongju industrial complex were selected for sampling and study with different characteristics during the period from June 1997 to August 1998. Water quality parameters of stormwater runoff such as BOD₅, COD, SS, TKN, NO₃-N, PO₄-P, TP, n-Hexane extracts, Cr, Cu, Pb, and Fe were analyzed. During the storm events, measured concentration ranges of BOD₅, COD, SS, NO₃-N, TKN, PO₄-P, TP, n-Hexane extracts, Cr, Cu, Pb and Fe were 2~324 mg/L, 5~810 mg/L, 1~1,110 mg/L, 0.01~10.89 mg/L, 0.1~59.8 mg/L, 0.08~7.02 mg/L, 0.1~7.8 mg/L, 0.1~1,723.6 mg/L, 0.001~0.363 mg/L, 0.001~0.488 mg/L, 0.001~1.28 mg/L, and 0.26~18.91 mg/L, respectively in the industrial complex watersheds. And a quantitative of first flush has been presented. First flush occurs more frequently as the ratio of impervious area increases.

Key Words : Industrial Complex, Stormwater Runoff, Pollutant Runoff, First Flush

요 약 문

본 연구의 목적은 산업단지 유역에서 강우시 유출수를 조사하여 수질변동과 초기유출 특성 등 오염물질 유출특성을 파악함에 있다. 조사대상유역은 청주산업단지내 유역특성이 상이한 8개 소유역을 선정하여 1997년 6월부터 1998년 8월까지 조사하였다. 분석항목은 EOD₅, COD, SS, NO₃-N, TKN, PO₄-P, TP, n-Hexane 추출물질, 그리고 Cr, Cu, Pb, Fe 등 중금속이다. 강우시 산업단지에서 발생하는 유출수의 농도범위는 BOD₅, COD, SS, NO₃-N, TKN, PO₄-P, TP, n-Hexane 추출물질, Cr, Cu, Pb, Fe 에 대해 각각 2~324 mg/L, 5~810 mg/L, 1~1.110 mg/L, 0.01~10.89 mg/L, 0.1~59.8 mg/L, 0.08~7.02 mg/L, 0.1~7.8 mg/L, 0.1~1.723.6 mg/L, 0.001~0.363 mg/L, 0.001~0.488 mg/L, 0.001~1.28 mg/L, 그리고 0.26~18.91 mg/L로 분석되었다. 또한, 초기유출현상에 대하여 수량화하였으며, 불투수층면적 비율이 증가할수록 초기유출현상의 발생빈도가 증가하는 것으로 분석되었다.

주제어 : 산업단지, 강우유출수, 오염물질 유출, 초기유출

1. 서 론

도시하수나 공장폐수와 같은 점오염원은 대부분 차집되어 처리된 후 방류되지만, 강우유출수와 같은 비점오염원은 발생량 및 배출 특성파악이 어렵고 그 발생도 불규칙하여 오염원 관리가 어려운 실정이다.^{1,2)} 강우유출수는 하·폐수와는 달리 발생이 매우 불규칙적이며, 많은 종류의 오염물을 함유하고 있을 뿐만 아니라 발생량의 규모가 매우 크다. 또한, 시간에 따른 부하량 변동 폭이 크며, 강우초기에 오염물질 농도가 매우 높다.^{3,4)} 특히, 산업단지에서의 강우유출의 경우 산업활동으로 인한 유해물질의 함유 가능성이 높아 인근 수계에 미치는 영향이 크므로 이에 대한 적합한 대책 마련이 필요하다.⁷⁾ 산업단지유역의 강우유출수에 대한 오염대책을 수립하기 위해서는 우선 강우시 유출되는 초기 유출수의 수질 특성의 파악이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 산업단지 유역을 대상으로 강우시 분류식 우수관거를 통해 배출되는 유출수를 조사함으로써 수질변동과 초기유출 특성 등 오염물질의 유출특성을 파악하고자 한다.

2. 조사방법

2.1. 대상유역특성

산업단지에서 강우시 유출오염부하량을 조사하기 위해서는 가능한 생산제품이 동일하거나 유사한 공장들이 밀집된 지역을 선정하고, 한 지점으로 유출수가 집수되는 지점이어야 한다. 또한, 유량측정과 시료채수를 동시에 할 수 있어야 하고, 접근이 용이한 지점이 있어야 한다.⁴⁾ 본 연구의 조사대상지역은 구획정리가 비교적 양호한 청주산업단지내로 선정하였고 업종별로 유역을 구분하였다. 1:1,200 우수관망도를 이용한 도상작업과 현장조사를 통해 우수관거의 오염여부를 확인 후 조사대상이 되는 소유역을 선정하였다. 그러나 업종별로는 블록화가 되어 있지 않아 각 조사지점이 단일업종을 갖도록 선정하기가 곤란하였다. 조사대상으로 선정된 소유역은 공단전체의 유입·유출지점과 기계·금속공장, 음식료품공장, 섬유공장 등이다. 조사지점은 업종별 유출특성을 고려하기 위해 각 단위 업종별로 소유역을 정하고 해당 소유역내 맨홀이나 토구지점에서 조사를 하였다. 선정된 8개의 조사지점은 Fig. 1과 같으며, 각 소유역별 면적, 생산제품, 토지이용, 불투수층면적비, 유역경사, 하수관거의 길이 및 경사 등의 특성을 Table 1에 정리하였다.

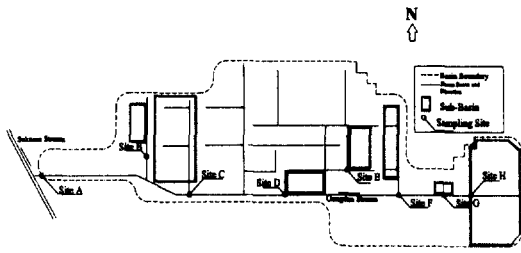


Fig. 1. Location of studied basin, sub-basins and sampling sites.

2.2. 조사기간 및 강우특성

현장조사는 1997년 6월부터 유속 및 수위측정, 단면측량, 시료채취 및 수질분석을 시작하여 1998년 8월까지 강우시에 유량 및 수질을 조사하였다. 강우발생시 조사지점별로 동시에 현장조사를 실시하였다. 1997년은 강우시 Site A, Site C, Site F, Site G를 대상으로 각각 3회 조사를, 1998년에는 강우시 Site A, Site B, Site D, Site E, Site H에 대해 각각 3회 조사를 실시하였다. 또한, 공단천의 기저오염 부하산정을 위해 1998년 건기시에 공단천 상하류 지점인 Site A와 Site H를 대상으로 2시간 간격으로 24시간 유량측정 및 시료를 채수하여 분석하였다. 강우량 자료는 청주산업단지내에 소재하고 있는 기상청의 자기우량기록지를 이용하였다. Table 2는 강우시와 건기시 년도별 조사회수와 조사일시, 강우량, 강우지속시간, 유출계수, 침투유출량, 선행건기일수 및 시료수를 나타낸 것이다.

2.3. 유량산정 및 수질분석

2.3.1. 유량산정

강우시 유량변화가 클 경우 1분~5분 간격으로 유량을 측정하였다. 조사지점별로는 Site A, Site H의 경우 수위별 단면과 유속을 측정하여 유량을 산정하였고, Site C, Site F, Site G의 경우는 원형토구로 관말단에서 수위와 유속을 측정하여 유량을 산정하였다. Site B, Site D, Site E의 경우는 직사각형 맨홀로 유입되기 직전 원형우수관 말단의 수위와 유속을 측정하여 유량을 산정하였다. 조사지점별 수위와 유량의 관계는 회귀식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$Q = 10^{\alpha} \cdot H^{\beta} \tag{1}$$

여기서, Q는 유량(m³/sec)이고, H는 수위(cm)이며 α, β 는 계수이다. 조사지점별 수위-유량관계식에 대한 회귀식, 상관계수(R²) 및 자료수(N) 등의 결과를 Table 3에 정리하였다.

2.3.2. 수질분석

공단천 하류와 상류지점인 Site A, Site H에서는 건기시에도 일정량의 하수와 하천수가 혼합되어 흐르고 있으므로 기저오염정도를 파악할 필요가 있다. 그러나, 이외의 조사지점은 강우시에만 유출이 발생하므로 기저오염은 없는 상태이다. 시료는 토구지

Table 1. Characteristics of industrial complex basins

Basin characteristics	Sub-basin site							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Drainage area (ha)	190.00	5.42	15.2	6.24	7.94	7.40	1.50	27.00
Manufacturing material	Entire	Metal	Metalloid, Electronic	Fabric	Foods	Metalloid, Foods	Electronic	Metal, Foods, Commercial
Percent of impervious area	65	90	57	74	70	55	35	70
Land slope (%)	1.1	1.0	0.9	0.8	0.2	1.5	3.5	0.8
Storm sewer length (m)	3,000	525	950	425	575	1,750	200	2,400
Storm sewer slope (%)	0.5	2.1	1.8	1.5	0.5	2.5	2.0	1.0

Table 2. Hydrologic description of industrial complex stormwater runoff sampled

Site	Dry/ Wet	Date	Rainfall (mm)	Duration (hrs)	Runoff (mm)	Runoff coefficient	Peak flowrate (m ³ /min)	Days since last storm	No of samples
A	Wet	97/06/30	11.2	2.9	1.60	0.55	563.0	5	16
		97/07/11	10.9	3.5	1.89	0.54	165.1	6	25
		97/11/12	20.0	8.6	5.68	0.66	1,564.8	19	28
		98/07/10	22.7	3.5	1.93	0.55	2,095.1	8	30
		98/07/21	2.4	1.6	0.98	0.61	495.0	2	21
		98/08/23	5.4	4.8	2.78	0.58	379.5	5	35
	Dry	98/07/07	-	24.0	-	-	159.9	29	12
B	Wet	98/07/10	22.7	3.5	2.81	0.97	42.1	8	30
		98/07/21	2.4	1.6	3.08	0.88	8.9	2	35
		98/08/23	5.4	4.8	8.08	0.94	62.9	5	36
C	Wet	97/06/30	11.2	2.9	1.86	0.53	46.6	5	11
		97/07/11	10.9	3.5	0.75	0.47	13.5	6	30
		97/11/12	20.0	8.6	2.59	0.54	44.4	19	26
D	Wet	98/07/10	22.7	3.5	2.38	0.82	32.7	8	20
		98/07/21	2.4	1.6	2.21	0.63	4.7	2	27
		98/08/23	5.4	4.8	5.25	0.54	68.2	5	30
E	Wet	98/07/10	22.7	3.5	1.97	0.68	354.3	8	30
		98/07/21	2.4	1.6	2.03	0.58	85.0	2	20
		98/08/23	5.4	4.8	5.25	0.61	189.4	5	35
F	Wet	97/06/30	11.2	2.9	2.07	0.59	12.9	5	22
		97/07/11	10.9	3.5	0.66	0.41	2.5	6	33
		97/11/12	20.0	8.6	1.87	0.39	13.9	19	39
G	Wet	97/06/30	11.2	2.9	1.37	0.39	6.8	5	20
		97/07/11	10.9	3.5	0.43	0.27	1.0	6	32
		97/11/12	20.0	8.6	0.91	0.19	4.4	19	37
H	Wet	98/07/10	22.7	3.5	1.94	0.67	852.3	8	33
		98/07/21	2.4	1.6	2.24	0.64	450.5	2	32
		98/08/23	5.4	4.8	5.25	0.61	95.1	5	35
	Dry	98/07/07	-	24.0	-	-	8.1	29	12

Table 3. Regression equation between runoff depth and flowrate (unit: Q (m³/sec), H (cm))

Site	Regression equation	No. of data	Correlation coefficient, R ²
A	$Q = 10^{-2.213} H^{1.922}$	14	0.95
B	$Q = 10^{-2.187} H^{1.833}$	65	0.99
C	$Q = 10^{-1.620} H^{1.109}$	31	0.93
D	$Q = 10^{-1.821} H^{1.495}$	35	0.99
E	$Q = 10^{-2.152} H^{1.704}$	29	0.99
F	$Q = 10^{-2.792} H^{2.260}$	53	0.98
G	$Q = 10^{-3.010} H^{2.287}$	23	0.99
H	$Q = 10^{-2.344} H^{1.895}$	26	0.99

점에서 1.5L 폴리에틸렌용기와 n-Hexane 추출물질(HEM) 분석용으로 시료는 입구가 넓은 140mL 유리병에 채수하였다. 채수빈도는 강우초기 유량변동이 심할 때는 5분~10분, 그 이후는 30분 간격으로 건기시 유량 수준으로 감소할 때까지 채수하였다. 채수한 시료의 분석항목은 BOD₅, COD, SS, NO₃-N, TKN, PO₄-P, TP, n-Hexane 추출물질 그리고, Cr, Cu, Pb, Fe 등이다. 각 항목별 분석방법으로 BOD₅는 배양전후의 DO를 용존산소측정기를 이용하여 측정하였고, COD는 중크롬산칼륨산화법에 의한 적정법, SS는 Whatman GF/C여지에 여과하여 건조전·후의 무게차이에 의하여 정량하였다. TKN은 킬달 분해, 증류후 0.01N H₂SO₄로 적정하는 방법으로, NO₃-N, PO₄-P는 각각 여과한 시료를 Brucine법과 Ascorbic acid법에 의해 발색후

흡광광도계(HACH DR4000)를 사용하여 정량하였다. TP는 여과하지 않은 시료를 황산과 과황산칼륨을 첨가한 후, 가열판에서 백연이 발생할 때 까지 분해시켜 발색하였다.⁶⁾ HEM은 유리병에 시료 전량을 사용하여 Hexane을 첨가하여 추출한 후 무게차이를 이용하여 정량하였다. 중금속시료는 Microwave 전처리장치(CEM 1200)를 이용, U.S. EPA 표준전처리방법을 적용하여 전처리후 원자흡광광도계(Perkin Elmer AAS300)를 이용하여 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조사유역별 유출수 수질변화

강우시 단시간에 많은 유량과 함께 발생하는 유출수 수질은 일반적으로 유량에 비례하여 농도가 증가한다.⁵⁾ 강우시 유출수 수질에 영향을 미치는 요인으로는 강우량, 강우강도, 선행건기일수, 유역경사, 유역내 불투수층면적, 노면청소빈도, 관로 퇴적물 제거빈도 등 많은 요인들에 의해 영향을 받는다.^{9,10)} 일반적으로 강우에 의한 침투유량 발생시점은 수질농도 침투값의 발생시점과 일치하지 않는다. 이같은 현상은 초기유출(first flush) 효과로서 강우초기에 노면과 관로내 축적된 오염물질들이 대부분 유출되기 때문이다.^{4,12,13)} Table 4는 조사지점별 강우시와 건기시의 수질농도에 대한 평균, 범위, 표준편차를 나타낸 것이다. Fig. 2는 전체 조사자료 중에서 1997년 7월 11일과 1998년 7월 21일의 강우시에 대한 유량, BOD₅, COD, SS, HEM의 농도변화를 나타낸 것이다.

Site A는 산업단지에서 발생한 유출수가 집수되어 혼합되면서 월류되는 지점으로 건기에 비교하여 강우시 유량은 평균 4배 많고, BOD₅, COD, SS, TKN, TP, HEM, Fe 등의 평균농도는 각각 96.7, 249.8, 219.7, 12.8, 3.7, 248.9, 6.4 mg/L으로 다른 조사지점보다 대체적으로 높은 농도를 나타내었다. 수질항목중 HEM의 평균농도와 표준편차가 가장 크게 나타나고 있어 다른 항목에 비해 변동이 심한 것으로 조사되었다. Fe과 Pb의 경우는 건기시 평균농도가 0.631mg/L, 0.206mg/L로서 강우시에

는 각각 6.365mg/L, 0.025mg/L로 건기시에 비해 약 10배의 차이를 나타내어 강우에 의한 유출량이 큰 것으로 조사되었다. Fig. 2 (a), (b)에서 도시한 바와 같이 침투유량의 발생시점이 침투농도의 발생시점보다 선행하고 있음을 알 수 있고, 동일한 시점에서 수질항목들의 침투농도가 발생하고 있으며, 강우초기에 급격히 증가하다가 이후에는 완만히 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Site B는 철강제품조립공장, 기계조립공장이 소재한 곳으로 유역면적이 작고 우수관로의 경사가 2.1%로 다소 급해 유달시간이 짧은 지점이다. BOD₅, COD, SS, TKN, TP, HEM, Fe 등의 평균농도는 각각 52.4, 99.4, 61.3, 3.7, 2.2, 71.8, 2.835 mg/L로 조사되어, Site A에 비교하여 농도는 1/2 정도의 범위를 나타내었다. HEM의 경우 최대값이 648.5mg/L로서, 98년 7월 10일에 조사된 농도이며, Table 4에는 제시하지 않은 98년 8월 22일 조사시에도 HEM의 농도가 414.3 mg/L로 높게 나타났다. 시료채수시에 유출수에 강한 기름냄새를 동반한 것으로 보아 강우시 본 Site에서는 일시적으로 폐유가 다량 배출되고 있는 것으로 판단되었다. 침투유량과 침투농도의 발생시점은 Fig. 2 (c)에서와 같이 동일하게 나타났다.

Site C는 전기제품공장과 건축세라믹 자재를 생산하는 공장이 위치한 곳이다. 조사 당시 세라믹 공장은 조업을 중단한 상태였다. BOD₅, COD, SS, TKN, TP, HEM 등의 평균농도는 각각 47.4, 176.2, 87.1, 3.7, 4.1, 132.0 mg/L로 COD, HEM농도는 다소 높았으나 타 수질항목은 Site B의 수준이었다. Fig. 2 (d)에서와 같이 수질성분들의 침투농도 시점이 침투유량발생시점 이전에 발생하고, 있음을 보여주었다.

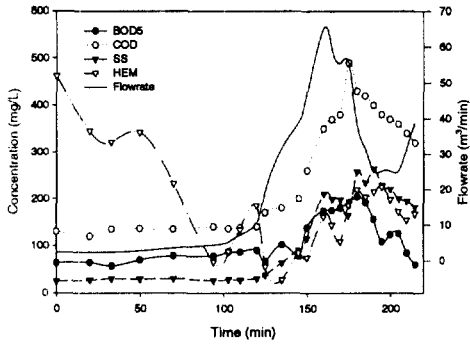
Site D는 섬유제품공장이 소재한 곳으로 다른 모든 조사지점중 가장 낮은 수질농도를 나타내었다. Fig. 2 (e)에서와 같이 침투농도의 발생시점은 침투유량 발생시점 이전에 발생하는 것으로 조사되었다.

Site E는 커피관련 음료를 생산하는 공장이 있는 곳으로 유역면적과 우수관로경사가 가장 완만한 지점이다. BOD₅, COD, SS, TKN, TP, HEM, Fe 등의 평균농도는 각각 32.5, 51.1, 52.6, 2.4, 1.0, 72.4, 2.541 mg/L로 Site D와 함께 낮은 수질농도를 나타내었다. Fig. 2 (f)에 도시한 바와 같이 침투

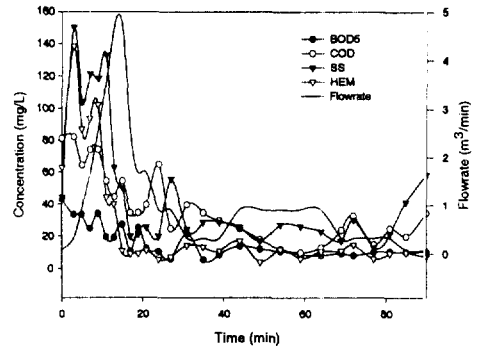
Table 4. Summary of flowrate and water quality for each sub-basin

Site	Item	Constituents												
		Flowrate (m ³ /min)	BOD ₅ (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	TKN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	TP (mg/L)	HEM (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)
A	Avg.	356.04	96.7	249.8	219.7	12.8	1.17	2.14	3.7	248.9	0.032	0.206	0.060	6.365
	Min.	5.34	12.0	26.7	3.0	2.2	0.04	0.24	0.8	4.3	0.001	0.004	0.001	0.483
	Max.	2,095.10	234.3	570.0	806.0	33.4	3.57	3.89	7.3	1,224.0	0.114	1.280	0.278	16.220
	Std.	207.31	16.4	35.8	65.0	2.4	0.14	0.29	0.3	79.4	0.005	0.066	0.013	0.519
A (dry)	Avg.	85.39	69.7	125.6	37.6	35.7	0.83	2.65	3.5	58.1	0.015	0.025	0.014	0.631
	Min.	66.93	51.3	85.7	23.0	31.2	0.07	2.30	2.6	36.4	0.001	0.003	0.011	0.383
	Max.	105.42	89.1	159.9	126.0	43.1	4.66	3.06	4.8	116.8	0.035	0.053	0.019	1.028
	Std.	9.63	10.9	24.5	27.1	3.3	1.19	0.21	0.5	19.9	0.010	0.018	0.002	0.153
B	Avg.	17.32	52.4	99.4	61.3	3.7	0.86	1.49	2.2	71.8	0.077	0.172	0.037	2.835
	Min.	0.04	10.6	5.9	1.4	0.3	0.01	0.09	0.5	0.1	0.010	0.004	0.001	0.223
	Max.	62.85	157.0	621.4	223.0	21.6	2.13	5.72	7.4	648.5	0.234	0.431	0.431	11.880
	Std.	7.67	13.6	45.5	18.6	1.5	0.10	0.34	0.3	58.8	0.019	0.020	0.032	0.864
C	Avg.	14.90	47.4	176.2	87.1	3.7	1.99	2.19	4.1	132.0	0.110	0.076	0.047	no data
	Min.	0.67	6.0	20.0	5.0	1.1	0.08	0.13	1.5	2.6	0.031	0.004	0.014	
	Max.	46.59	222.0	590.0	352.0	11.2	3.75	6.70	9.2	429.2	0.231	0.247	0.097	
	Std.	4.78	30.8	46.0	27.9	0.5	0.11	0.81	0.6	35.4	0.008	0.015	0.001	
D	Avg.	9.58	34.1	44.7	85.9	5.6	1.91	1.34	1.9	35.0	0.043	0.055	0.014	2.741
	Min.	0.06	2.7	9.9	5.0	0.1	0.24	0.08	0.2	0.1	0.002	0.002	0.001	0.316
	Max.	68.20	76.9	156.8	761.0	59.8	5.72	5.69	7.8	325.2	0.312	0.288	0.096	13.440
	Std.	7.87	2.9	7.6	52.3	5.8	0.55	0.49	0.5	13.9	0.022	0.021	0.006	1.011
E	Avg.	65.16	32.5	51.1	52.6	2.4	1.18	0.36	1.0	72.4	0.099	0.047	0.027	2.541
	Min.	0.05	2.0	5.0	1.0	0.1	0.12	0.05	0.2	2.7	0.003	0.001	0.001	0.262
	Max.	354.29	80.7	230.0	444.3	9.7	5.64	1.29	3.1	1,723.6	0.363	0.190	0.488	13.260
	Std.	32.22	3.8	13.4	29.1	0.6	0.40	0.07	0.2	156.4	0.045	0.022	0.049	0.540
F	Avg.	3.77	73.2	207.3	74.7	5.4	1.07	2.07	3.9	92.4	0.108	0.250	0.098	no data
	Min.	0.10	6.0	10.0	3.0	0.4	0.01	0.09	0.1	1.0	0.020	0.087	0.002	
	Max.	13.89	324.0	810.0	438.3	47.2	5.43	7.02	10.1	451.7	0.232	0.494	0.342	
	Std.	1.54	23.7	63.7	45.0	4.4	0.46	0.79	0.4	38.2	0.006	0.010	0.028	
G	Avg.	0.79	37.5	121.4	152.7	2.5	1.19	0.73	1.2	100.1	0.149	0.242	0.037	no data
	Min.	0.01	6.0	20.0	28.0	0.4	0.01	0.10	0.2	1.7	0.002	0.004	0.001	
	Max.	6.82	120.0	400.0	409.0	7.1	3.50	4.45	4.9	825.8	0.400	0.891	0.107	
	Std.	0.68	5.5	24.5	10.1	0.4	0.27	0.37	0.3	43.7	0.025	0.043	0.009	
H	Avg.	104.86	99.4	255.7	307.5	12.9	1.45	1.86	3.2	332.3	0.025	0.190	0.041	6.787
	Min.	3.76	19.6	48.6	2.5	2.8	0.03	0.58	1.4	31.1	0.002	0.019	0.000	0.705
	Max.	852.34	201.3	730.0	1,110.0	27.5	10.86	3.58	5.0	1,382.2	0.176	0.452	0.175	18.910
	Std.	93.97	2.3	16.9	62.8	0.8	1.12	0.16	0.2	86.6	0.017	0.005	0.027	0.622
H (dry)	Avg.	64.45	101.1	190.7	43.3	42.3	0.63	3.00	3.6	111.3	0.011	0.024	0.024	0.728
	Min.	0.59	34.7	116.5	11.0	33.5	0.14	2.17	3.2	50.0	0.002	0.001	0.012	0.450
	Max.	8.10	190.3	427.2	76.0	58.1	1.69	3.79	4.2	194.6	0.031	0.060	0.047	1.247
	Std.	2.27	45.8	86.1	21.8	7.4	0.48	0.42	0.3	42.4	0.008	0.017	0.008	0.203

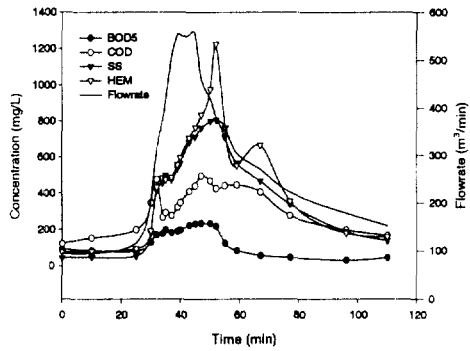
Note) Avg. : Average, Min. : Minimum, Max. : Maximum, Std. : Standard deviation, (dry) : Dry weather sampling



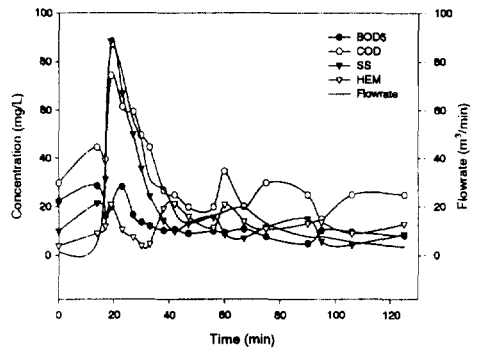
(a) Site A, 97/7/11



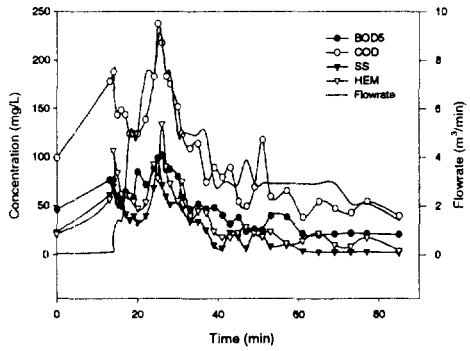
(e) Site D, 98/7/21



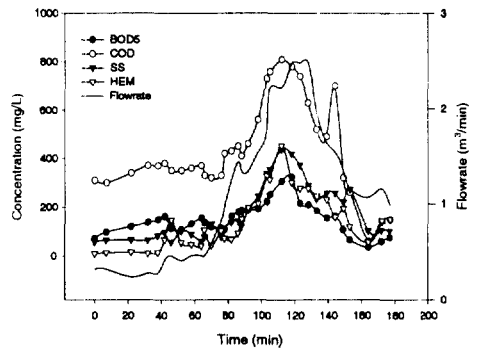
(b) Site A, 98/7/21



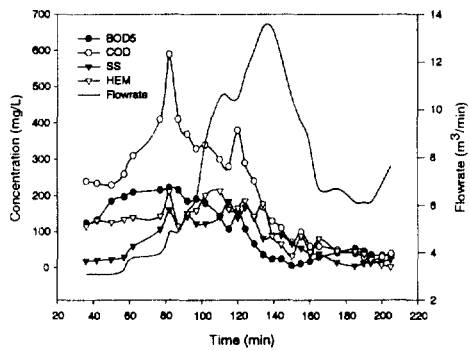
(f) Site E, 98/7/21



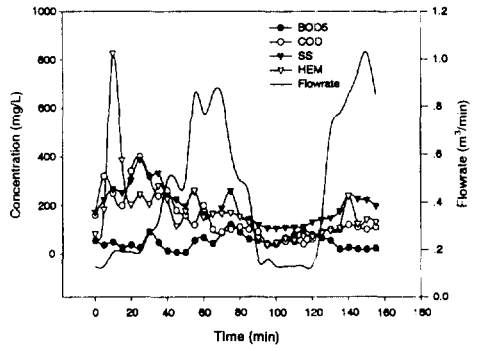
(c) Site B, 98/7/21



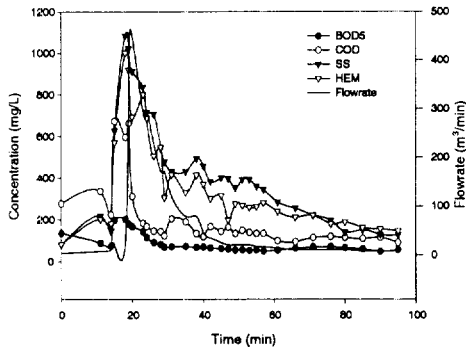
(g) Site F, 97/7/11



(d) Site C, 97/7/11



(h) Site G, 97/7/11



(i) Site H, 9/8/21

Fig. 2. Variations of flowrate and pollutant concentration.

농도와 침투유량의 발생시점은 동일한 시점에 발생하는 것으로 조사되었다.

Site F는 비철금속 생산공장과 음료수, 식품공장이 위치한 곳으로, 수질항목중 COD가 다소 높은 편으로 나타났다.

Site G는 본 조사지점중 가장 작은 유역으로 전자제품 생산공장이 위치하며, 유역중 도로면적이 차지하는 비율이 큰 지점이다. SS, Pb의 평균농도가 각각 152.7, 0.242mg/L로 다소 높게 조사되었다. Fig. 2 (h)에서와 같이 침투유량의 발생시점보다 상당한 시점 이전에 침투농도가 발생하고 있음을 보여주고 있으며, 이는 강우 개시후 강우 유출보다 오염물질 유출이 빨리 발생되고 있는 것으로 해석된다.

Site H는 산업단지의 상류지점으로 급속, 식품, 소규모의 주거지역이 있는 유역으로 건기시에 비교하여 강우시 유량은 평균 23.6배로 유량의 변화가 크게 나타났다. BOD₅, COD, SS, TKN, TP, HEM, Fe 등의 평균농도는 각각 99.4, 255.7, 307.5, 12.9, 3.2, 332.3, 6.787 mg/L로 Site A와 비교하여 유사한 농도 수준을 나타내었다. Fig. 2(i)에서와 같이 침투유량의 발생시점보다 침투농도의 발생시점이 약간 선행하는 특성을 나타내고 있다.

대체적으로 유역면적이 작고, 불투수층면적비가 큰 유역의 경우 침투농도의 발생시점이 침투유량 발생시점 이전에 발생함을 나타내었다. 또한, 강우시 산업단지 유출수 수질은 단지 전체의 혼합지점인 Site A에서의 수질변화를 주거지역 합류식하수관 월류수 수질농도변화와 비교할 때 변화특성이 유사한 경향을 나타내었고, 기타 단위공장별 유출수의

농도는 주거지역 유출수 수질의 1/2 수준의 농도를 나타내었다.¹⁵⁾

3.2. 초기유출특성

강우초기에 유출수 농도는 급격히 증가한 후 서서히 감소하는 특성을 나타내는데 이러한 현상을 초기유출현상이라고 한다. 강우에 의한 초기유출 특성의 발생 유·무를 판단할 수 있는 방법을 다음과 같은 과정으로 해석하였다. 즉, 강우기간중 이산시간 동안의 유량 $Q(t)$ 에 대한 누적유량 $\Sigma Q(t)$ 비인 $Q(t)/\Sigma Q(t)$ 를 x축으로 하고, 이산시간 동안의 오염부하량 $L(t)$ 에 대한 누적오염부하량 $\Sigma L(t)$ 비인 $L(t)/\Sigma L(t)$ 를 y축에 도시하여 식(2)에서와 같이 도시된 그래프의 기울기가 1보다 큰 경우인 오염부하량비가 유량증가비보다 클 경우는 초기세척효과가 발생한 것을 의미하고, 식(3)과 같이 그 반대의 경우 발생하지 않은 것으로 해석하였다.^{1,10,12)}

$$\frac{L(t)/\Sigma L(t)}{Q(t)/\Sigma Q(t)} > 1 \quad : \text{Flushing} \quad (2)$$

$$\frac{L(t)/\Sigma L(t)}{Q(t)/\Sigma Q(t)} \leq 1 \quad : \text{No flushing} \quad (3)$$

초기유출현상 발생 유·무는 강우초기에 발생하는 고농도 유출수에 대한 저류조나 처리시설 등 처리 대안을 고려할 경우에 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 강우지속시간 동안 용존성 물질들은 그 기울기가 1에 접근하는 경향을 나타내며, 입자성 물질로 존재하는 물질들은 주로 강우와 함께 유출되므로 1보다 크거나, 작은 기울기를 보인다. 장기간 동안 도시 지표면과 하수관로에 축적되어 있던 오염물질이 강우로 인해 함께 유출되는 세척효과는 강우강도가 약할 경우와, 강우사상이 빈번하게 발생할 때, 그리고 큰 유역면적에서는 그 특성이 잘 나타나지 않는 것으로 알려져 있다.^{1,5,13)}

Table 5는 누적유량비를 1로 환산하여 조사일시별 누적오염부하량비와 조사지점별 평균값을 나타낸 것이다.

누적유량비에 대한 누적오염부하량비의 누적곡선이 강우량 및 유역면적에 따라 다소 차이가 있겠으나 대체로 누적오염부하량비가 1보다 큰 항목들은

Table 5. Cumulative curve ratio for flowrate and pollutant load

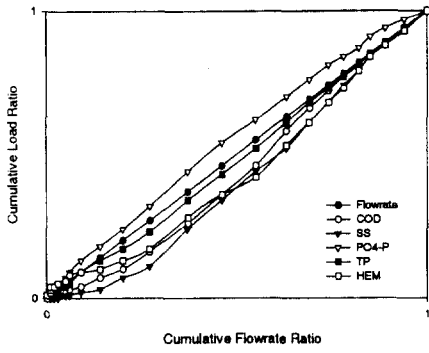
Site	Date	Cumulative Curve Ratio												
		Flowrate	BOD ₅	COD	SS	TKN	NO ₃ -N	PO ₄ -P	TP	HEM	Cr	Pb	Cu	Fe
A	97/06/30	1.00	0.99	1.11	1.06	1.01	1.00	1.25	1.07	1.12	1.04	0.98	0.99	-
	97/07/11	1.00	0.99	0.91	0.86	1.02	1.09	1.10	0.97	0.93	0.95	1.13	0.89	-
	97/11/12	1.00	1.03	1.00	1.00	1.05	1.02	0.94	1.02	1.06	1.04	1.00	1.12	-
	98/07/10	1.00	1.08	1.27	1.04	1.23	1.01	1.17	1.16	1.26	1.14	1.15	1.18	1.14
	98/07/21	1.00	1.05	0.97	0.95	1.05	1.05	1.09	1.02	0.93	0.88	1.30	0.94	0.87
	98/08/22	1.00	0.90	0.86	0.86	0.99	0.97	1.02	0.97	0.85	-	0.98	1.79	0.88
	Average	1.00	1.01	1.02	0.96	1.06	1.02	1.09	1.04	1.02	1.01	1.09	1.15	0.96
B	98/07/10	1.00	1.19	1.30	1.29	1.26	0.96	1.19	1.21	1.32	1.13	1.14	0.98	1.24
	98/07/21	1.00	1.14	1.14	1.20	1.10	0.93	0.98	1.20	1.17	0.89	0.99	1.02	1.05
	98/08/22	1.00	1.01	1.06	1.05	1.10	1.02	1.01	1.05	1.12	-	-	1.08	1.05
	Average	1.00	1.11	1.17	1.18	1.15	0.97	1.06	1.15	1.20	1.01	1.07	1.03	1.11
C	97/06/30	1.00	1.39	1.04	0.95	0.98	1.01	1.36	1.05	0.96	0.92	1.10	0.94	-
	97/07/11	1.00	1.33	1.29	1.15	1.15	0.91	1.38	1.16	1.21	0.97	0.93	1.07	-
	97/11/12	1.00	1.08	1.07	1.06	1.09	0.99	0.96	1.00	1.01	1.02	1.05	1.05	-
	Average	1.00	1.27	1.13	1.06	1.08	0.97	1.23	1.07	1.06	0.97	1.03	1.02	-
D	98/07/10	1.00	1.15	1.15	1.39	1.25	0.83	1.07	1.11	0.99	0.92	1.23	1.30	1.33
	98/07/21	1.00	1.10	1.11	1.14	1.14	0.98	1.09	1.08	1.19	1.06	1.17	1.08	1.07
	98/08/22	1.00	1.00	1.03	1.05	1.03	0.98	0.99	1.02	1.07	-	-	1.07	1.05
	Average	1.00	1.08	1.10	1.20	1.14	0.93	1.05	1.07	1.09	0.99	1.20	1.15	1.15
E	98/07/10	1.00	1.11	1.20	1.31	1.10	1.16	1.07	1.13	1.22	0.96	1.17	1.26	1.28
	98/07/21	1.00	1.08	1.09	1.15	1.10	1.06	1.13	1.12	0.99	1.06	1.14	1.21	1.17
	98/08/22	1.00	1.00	1.08	1.12	1.12	1.03	1.18	1.14	1.08	-	-	1.03	1.07
	Average	1.00	1.06	1.12	1.19	1.11	1.08	1.13	1.13	1.10	1.01	1.16	1.17	1.17
F	97/06/30	1.00	0.97	1.00	1.08	1.17	1.16	1.00	1.07	0.97	1.00	1.01	1.04	-
	97/07/11	1.00	1.01	0.99	0.89	1.35	1.83	1.24	0.98	0.88	0.84	0.94	0.97	-
	97/11/12	1.00	1.06	0.95	1.15	0.98	0.93	0.98	0.96	1.13	1.03	0.96	1.00	-
	Average	1.00	1.01	0.98	1.04	1.17	1.31	1.07	1.00	1.00	0.96	0.97	1.00	-
G	97/06/30	1.00	0.99	1.10	1.02	1.01	1.02	0.99	1.07	1.20	1.06	0.99	1.06	-
	97/07/11	1.00	1.12	1.21	1.05	1.21	1.19	1.14	1.12	1.17	0.87	1.10	0.82	-
	97/11/12	1.00	1.05	1.04	1.06	1.08	0.98	1.04	1.04	1.08	1.03	1.05	1.03	-
	Average	1.00	1.05	1.12	1.05	1.10	1.07	1.06	1.08	1.15	0.99	1.05	0.97	-
H	98/07/10	1.00	1.21	1.22	1.18	1.16	0.83	1.10	1.08	1.26	0.86	1.12	1.19	1.15
	98/07/21	1.00	1.07	1.08	1.06	1.06	1.01	1.02	1.01	1.06	1.06	0.97	1.11	1.04
	98/08/22	1.00	1.28	1.16	0.79	1.08	1.03	1.10	1.11	0.80	-	0.95	1.16	0.72
	Average	1.00	1.18	1.15	1.01	1.10	0.96	1.07	1.07	1.04	0.96	1.01	1.16	0.97

SS, BOD₅, COD, TKN, TP, Fe 들로서 입자성 물질이나 입자성 물질과 함께 거동하는 물질로 조사되었다. 또한 누적오염부하량이 1 보다 작은 항목은 NO₃-N으로서 토양에 흡착되지 않는 대표적인 용존성 물질이다.

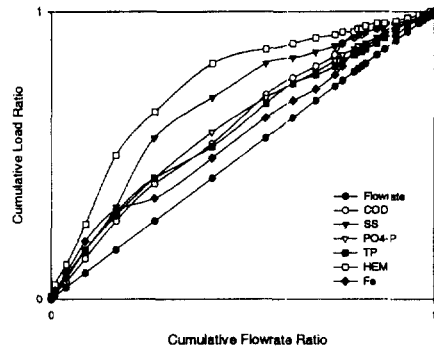
한편, PO₄-P, HEM은 대체로 초기유출부하가 작고 강우가 지속됨에 따라 오염부하가 급증하는 S자형의 유출특성을 보였으며, 강우량이 20mm 이상의

비교적 큰 강우에서는 SS, Fe가 S자형의 특성을 나타내는 경향을 보였다. 이와 같이 PO₄-P나 HEM이 용존성 물질로 분류되나 강우 유출시에는 입자성 물질과 용존성 물질의 중간적인 유출특성을 나타내는 것은 PO₄-P나 HEM이 토양입자와 결합되어 있다가 강우시 SS와 같이 거동하되 강우에 의한 유출이 입자성에 비해 낮은 것으로 해석된다.

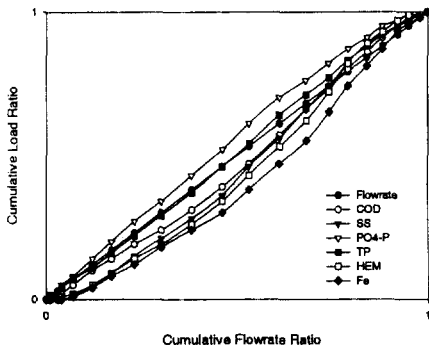
중금속 중에서 Cr의 경우 주로 용존성 물질, Fe는



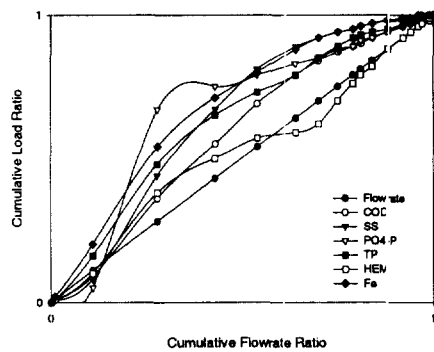
(a) Site A, 97/7/11



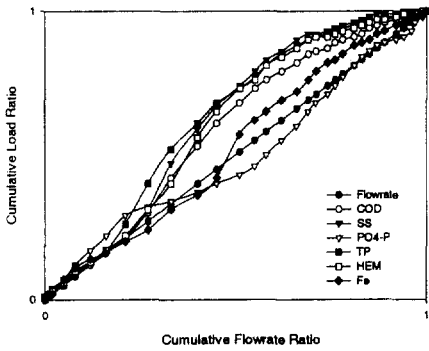
(e) Site D, 98/7/21



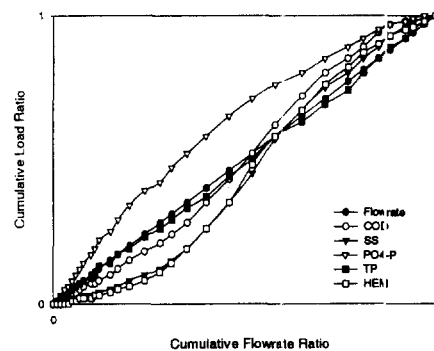
(b) Site A, 98/7/21



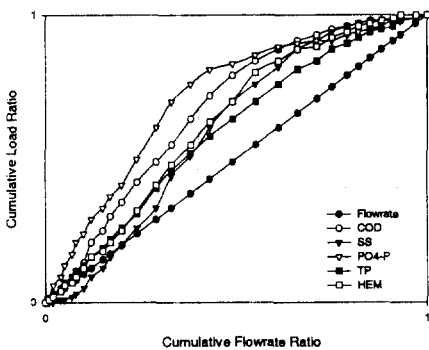
(f) Site E, 987/7/21



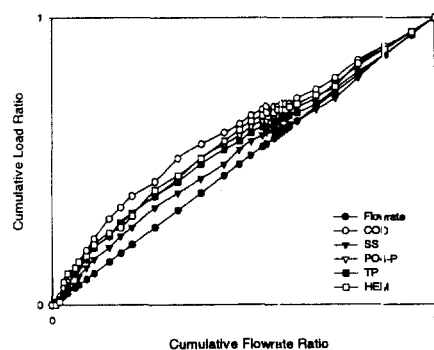
(c) Site B, 98/7/21



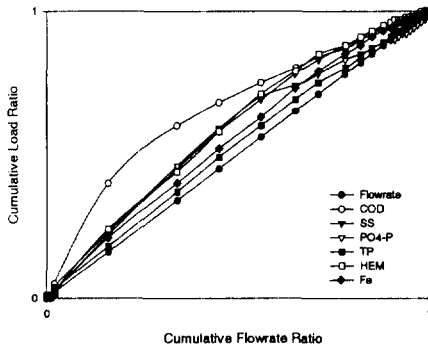
(g) Site F, 97/7/11



(d) Site C, 97/7/11



(h) Site G, 97/7/11



(i) Site H, 98/7/21

Fig. 3. Variation of incremental cumulative flowrate ratio and cumulative load ratio.

입자성 물질과 유사하게 거동하고 있으며, Cu, Pb의 거동은 불규칙하나 대체로 입자성 물질과 유사한 거동을 하는 빈도가 높다. 강우량이 20mm 이상인 97년 7월 11일, 11월 12일, 98년 7월 10일의 경우를 보면, NO₃-N, Cr 성분들을 제외하고는 대체로 초기유출이 발생한 것을 알 수 있다. Site F의 NO₃-N의 경우 누적오염부하량비가 1.83으로 큰 값을 나타내는데, 이는 강우시 공장에서 다량의 NO₃-N이 함유된 물질이 임의로 배출된데 기인하는 것으로 해석된다.

강우시 초기유출특성을 비교적 잘 반영하는 것으로 알려진 SS를 기준으로 할 때, 유역면적이 10ha를 초과하는 Site A, Site C, Site H의 경우 지점별 평균 누적오염부하량비가 각각 0.96, 1.06, 1.01로 산정되었으나 유역면적이 10ha 이하인 Site B, Site D, Site E, Site F, Site G의 경우는 각각 1.18, 1.20, 1.19, 1.04, 1.05로 대체로 유역면적이 작을수록 입자성 물질의 초기유출이 강하게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, Table 1에서와 같이 불투수층 표면이 70%를 초과하는 Site B, Site D, Site E, Site H 지점에서 초기유출이 강하게 발생하였다.

Fig. 3은 조사일시 중에서 초기유출특성을 잘 나타내는 COD, SS, PO₄-P, TP, HEM 성분들에 대하여 1997년 7월 11일 (일강우량 10.9mm, 강우지속시간 3.5hr)과 1998년 7월 21일 (일강우량 2.4mm, 강우지속시간 1.58hr)의 강우시에 누적유량

비와 누적오염부하량비를 도식하였다. Fig. 3에 의하면 조사일시에 Site A 및 Site F를 제외하고는 대체로 조사지점에서 초기유출이 발생한 것으로 해석된다. Fig. 3(a)는 강우량이 10mm를 초과한 경우인데 PO₄-P 성분만이 미약한 초기유출이 발생한 것으로 나타났으며, (d), (g)에서는 전항목이 초기유출특성을 나타내는데, (h)의 경우가 다소 미약한 것으로 나타났다. Fig. 3(b) 또한 PO₄-P 성분만이 미약한 초기유출이 발생한 것으로 나타났으며, (c), (e), (f), (i)에서는 전항목이 강한 초기유출이 발생함을 알 수 있다.

강우유출특성은 유역면적, 토지이용, 불투수층면적, 유역경사, 관로경사, 강우량, 강우지속시간, 강우강도, 선행건기일수 등 많은 인자들과 복잡하게 관련을 갖고 있으므로 일반적으로 초기유출의 발생 유무를 함수식으로 표현하기란 매우 어렵다. 그러나 여러 인자 중에서 강우강도와 유역면적, 불투수층면적 등에 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

조사된 자료를 분석한 결과 유출물질을 입자성 물질과 용존성 물질로 구분하여 유출 특성을 해석할 경우 입자성 물질, 용존성 물질 모두는 유역면적이 작고, 강우강도와 불투수층면적 비율이 증가할수록 초기유출특성이 강하게 나타나는 경향이 있었다. 또한 SS와 같은 입자성 물질의 경우가 용존성 물질보다 유량 증가에 대하여 기울기의 변화가 아주 크거나, 경우에 따라서는 초기에 급하고, 후반부에 둔화되는 S자 형태로 변화하는 것으로 조사되었다. 그러나 NO₃-N과 같은 용존성 물질은 기울기가 1보다 작으며, S자 변화 특성을 전혀 나타내지 않은 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구는 산업단지 유역에서 강우시 배출되는 유출수를 조사하여 수질변동과 초기유출 특성 등을 파악하였다. 수질분석 결과, 강우시 산업단지에서 발생하는 유출수의 농도범위와 평균치는 BOD₅, COD, SS, NO₃-N, TKN, PO₄-P, TP, n-Hexane 추출물질, Cr, Cu, Pb, Fe에 대해 각각 2~324 (59) mg/L, 5~810 (139) mg/L, 1~1,110 (130) mg/L,

0.01~10.89 (1.35) mg/L, 0.1~59.8 (6.1) mg/L, 0.08~7.02 (1.52) mg/L, 0.1~7.8 (2.65) mg/L, 0.1~1,723.6 (135.6) mg/L, 0.001~0.363 (0.080) mg/L, 0.001~0.488 (0.045) mg/L, 0.001~1.28 (0.155) mg/L, 및 0.26~18.91 (2.66) mg/L으로 분석되었다. 또한, 유역면적이 작고, 불투수층면적비가 큰 유역의 경우 침투농도의 발생시점이 침투유량발생시점 이전에 발생함을 나타내었다.

누적유량비에 대한 누적오염부하량비의 누적곡선을 도식한 결과, 대체로 누적오염부하량비가 1보다 큰 항목들은 SS, BOD₅, COD, TKN, TP, Fe 들로서 입자성 물질이나 입자성 물질과 함께 거동하는 물질로 조사되었다. 용존성 물질로 분류되는 PO₄-P와 n-Hexane 추출물질들은 토양입자에 흡착되어 있다가 강우시 입자성 물질인 SS와 유사하게 거동하며 침투유출 발생시점은 입자성 물질에 비해 늦는 것으로 해석된다. 누적오염부하량비가 1보다 작은 항목은 NO₃-N으로서 토양에 흡착되지 않는 대표적인 용존성 물질로 분석되었다. 중금속 중에서는 Cr의 경우는 주로 용존성 물질과, Fe는 입자성 물질과 유사하게 거동하고 있으나 Cu, Pb의 거동은 불규칙하나 대체로 입자성 물질과 유사한 거동을 하는 빈도가 높았다. 강우시 초기유출특성을 비교적 잘 반영하는 것으로 알려진 SS를 기준으로 판단할 때 대체로 유역면적이 작을수록 입자성 물질의 초기유출이 강하게 발생하는 것을 알 수 있었다. 조사된 자료를 분석한 결과 유출물질을 입자성 물질과 용존성 물질로 구분하여 유출 특성을 해석할 경우 입자성 물질, 용존성 물질 모두 유역면적이 작고, 강우강도와 불투수층면적 비율이 증가할수록 초기유출특성이 강하게 나타나는 경향이 있었다.

참 고 문 헌

1. Bedient, P. B., Harned, D. A. and Characklis, W. G., "Stormwater analysis and prediction in Houston," *J. Envir. Eng., ASCE*, **104**(EE6), 1087~1100(1978).
2. Hunter, J. V., Sabatino, T., Gomperts, R., MacKenzie, M. J., "Contribution of urban runoff to hydrocarbon pollution," *J. WPCF*, **51**(8), 2129~2038(1979).
3. Bedient, P. B., Lambert, J. L. and Springer, N. K., "Stormwater pollution load-runoff relationship," *J. WPCF*, **52**(9), 2396~2404(1980).
4. 社団法人 日本下水道協會, 合流式下水道越流水對策と暫定指針, pp. 1~95(1982).
5. 海老瀬 潛一, "汚染物質の降雨時流出特性と流出負荷量," *水質汚濁研究*, **8**(8), 31~33(1985).
6. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., Washington, D.C.(1992).
7. Dodson, R. D., Storm Water Pollution Control: Industry and Construction NPDES Compliance, McGraw-Hill, Inc., pp. 53~69(1995).
8. Characklis, G. W. and Wiesner, M. R., "Particles, metals, and water quality in runoff from large urban watershed," *J. Envir. Eng., ASCE*, **123**(8), 753~759(1997).
9. Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G., "Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water," *J. Envir. Eng., ASCE*, **123**(2), 134~143(1997).
10. Charbeneau, R. J. and Barrett, M. E., "Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads," *Wat. Envir. Res.*, **70**(7), 1295~1302(1998).
11. Larsen, T., Broch, K. and Anderson, M. R., "First flush effects in an urban catchment area in Aalborg," *Wat. Sci. Tech.*, **37**(1), 251~257(1998).
12. Sansalone, J. J., Koran, J. M., Smithson, J. A. and Buchberger, S. G., "Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events," *J. Envir. Eng., ASCE*, **124**(5), 427~440(1998).
13. Barrett, M. E., Irish, L. B., Malina, J. F. and Charbeneau, R. J., "Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area," *J. Envir. Eng., ASCE*, **124**(2), 131~137

- (1998).
14. Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, W. L. and Evett, J. B., "Characterization and pollutant loading estimating for highway runoff," *J. Envir. Eng., ASCE*, **124**(7), 584~592(1998).
 15. Lee, J. H., Bang, K. W., "Characterization of urban stormwater runoff," *Water Research* (accepted paper)(2000).