

산업단지 비점오염원의 유출특성(I): C산업단지의 초기강우에 따른 유출수 분석을 중심으로

우제석^{a,b}, 신현곤[†]

The Runoff Characteristics of Non-point
Pollution Sources in Industrial Complex(I):
Focusing on the analysis of runoff water
according to the initial rainfall of the C Industrial Complex

Jae-Suk Woo^{a,b}, Hyun-Gon Shin[†]

(Received: Feb. 24, 2022 / Revised: Mar. 12, 2022 / Accepted: Mar. 17, 2022)

ABSTRACT: In this study, rainfall water outlet water quality monitoring was performed on the C industrial complex to evaluate the characteristics of non-point pollutant runoff from the industrial complex during rainfall and to use it as basic data for calculating the load and unit of non-point pollutant. As a result of the IETD analysis, it was selected as a representative rainfall event for simulating non-point pollutants when the rainfall duration was about 21 hours and the rainfall was 26.44mm. Also as a result of monitoring the flow and water quality survey, the first rainfall was 12.2 mm, the rainfall duration was 12 hr, the number of preceding dry days was 3 days, the second rainfall was 22.1 mm, the rainfall duration was 12 hr, and the number of preceding dry days was 7 days.

Keywords: Industrial complex, non-point source, runoff water, runoff characteristics

초 록: 본 연구는 강우시 산업단지에서 발생하는 비점오염원 유출 특성을 평가하여 비점오염원 부하량 및 원단위 산정을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 C 산업단지에 대하여 강우유출수 수질모니터링을 수행하였다. IETD 분석결과, 강우지속시간 약 21시간, 강우량 26.44mm인 27시간일 때 비점오염원 모의를 위한 대표 강우 사상으로 선정되었으며, 유량 및 수질조사 모니터링 결과, 1차 강우시 강수량 12.2mm, 강우지속시간 12hr, 선행 건기일 수 3일이었으며, 2차 강우시 강수량 22.1mm, 강우지속시간 12hr, 선행 건기일 수는 7일이었다.

주제어: 산업단지, 비점오염원, 유출수, 유출특성

^a (주)범한엔지니어링종합건축사사무소 전무(Managing Director, Beomhan Engineering & Architects Co, Ltd.)

^b 신한대학교 대학원 도시기반부동산학과 박사과정(Ph.D. Student, Department of Civil, Urban and Real Estate Development, Shinhan University)

^c 신한대학교 에너지환경공학과 교수(Professor, Department of Energy & Environmental Engineering, Shinhan University)

† Corresponding author(e-mail: cospea@hanmail.net)

1. 서론

급격한 도시화, 산업화 과정을 거치면서 점오염원 및 불투수층 증가의 폭이 급격하게 증가함에 따라, 정부에서는 점오염원 및 불투수층 증가에 따른 다양한 오염원관리 정책들을 추진하였다. 그간 점오염원의 정책은 꾸준히 추진하였으나, 불투수층의 증가에 따른 비점오염원에 대한 정책은 미흡하였다.^{1,2)} 이를 해결하고자 2000년 초반부터 정부에서는 관계부처 합동으로 제1차 비점오염원관리 종합대책을 추진하여 제2차 비점오염원 종합대책, 비점오염원 종합대책 수립 법제화 및 물순환 목표 수립 의무화의 비점오염원관리 정책을 추진하였다.^{3,4)} 2020년 기준 대권역별 오염원별 기여율은 BOD기준 점오염원 32.3%, 비점오염원 67.7%이며, T-P기준 점오염원 27.9%, 비점오염원 72.1%로 비점오염원의 배출부하량의 비율이 높게 나타났고, 비점오염원 배출비율에서 축산계의 비율이 BOD 및 T-P비율이 54.7%, 49.2%로 높게 나타나고 있으나⁵⁾ 이는 가축분뇨시설에 대한 시설 확충 및 관련 규제를 강화한다면 감소할 수 있으나 축산시설업계가 영세하여 정부 지원책이 필요한 실정이다. 또한 생활계, 산업계 및 토지계의 비율이 BOD 및 T-P에서 각각 45.3%, 50.3%로 절반 이상을 차지하므로 이에 따른 정부정책이 필요하다. 축산계의 경우 2018년 기준 가축분뇨 발생량이 많은 가축은 한우 및 젓소의 발생량이 35.22%, 돼지의 발생량이 53.41%, 닭·오리의 발생량이 10.3%가 발생하므로 발생농가 및 발생량에 따른 처리계획이 필요하고 이는 비점오염원이 아닌 점오염원의 접근이 필요하다.⁶⁾ 생활계, 산업계 및 토지계에서 발생하는 점오염원은 하수관로(합류식 또는 분류식관로)를 통하여 처리시설을 통하여 처리되지만 비점오염원(CSOs, SSOs, 초기우수)은 하천 및 호소수에 직접적으로 유입되어 수생태환경에 직접적인 영향을 주고 있다. 본 연구에서는 여러 지역 중 C 산업단지의 강우유출수 수질모니터링을 수행하여, 정부정책의 비점오염원 부하량 및 원단위 산정을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 비점오염원의 유출특성연구를 진행하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구목적 및 대상

본 연구는 도시지역 중 산업단지의 초기강우에 따른 유출수를 분석하여 비점오염물질 오염부하량 및 용량과 같은 유출 특성을 규명하고자 하였으며, 더 나아가 향후 비점오염원의 원단위 산정 연구 및 비점오염원 저감 대책 수립에 참고할 수 있는 유용한 기초자료로 제공하고자 C 산업단지를 대상으로 하였다.

2.2. 조사내용

- 1) 대상지역 강우분석 및 IETD(Inter Event Time Definition) 분석
- 2) 유량 및 수질조사 모니터링
- 3) 초기강우에 따른 유출수 분석

2.3. 조사 방법 및 이론

2.3.1. 강우분석 및 IETD(Inter Event Time Definition) 분석

강우 사상은 기상청 관할 기상관측소 중 강우기록 관측년도, 시간 강우자료 보유여부 및 설치대상지와 위치상 인접 여부 등을 종합적으로 고려하여 인근 기상관측소인 C 기상관측소의 최근 10년(2010년 1월 1일~2019년 12월 31일)간 강우 자료인 시간 강우량을 이용하여 분석하였다.

(1) 강우 사상 분리

초기유출(First flush)로 인하여 배출된 비점오염원의 총 발생량을 확률적, 통계적으로 분석하기 위해서는 일반적인 강우에서 표준강우 사상에 대한 1회 평균 강우량, 강우강도, 강우 지속 시간 등의 통계특성을 IETD(Inter Event Time Definition)의 개념⁷⁾을 통해 Fig. 1과 같이 연속강우를 표준강우 사상으로 분리한다.

(2) 변동계수 분석

변동계수(Cv)분석은 강우가 일어나지 않은 시간 표준편차를 평균값으로 나누어 평균과 표준편차가 같아지는 시점, 나눈 값이 1이 되는 시점에서의 IETD를 결정하게 된다. 강우시계열의 강우가 일어나지 않은

시간들의 확률 밀도는 지수분포를 따르게 된다.⁸⁾ 각각의 강우가 일어나지 않은 시간들의 표본 평균과 표준편차가 같아지는 시점의 독립 강우 사상, 즉 변동계수가 1에 근접한 독립 강우 사상의 IETD를 사상 분리 무강우 최대기간으로 결정하며 다음의 (2-1), (2-2), (2-3) 식과 같이 나타낸다.

(3) 강우 발생 개수 분석

각 강우 사상을 시간별로 분리하여 그 평균 강우 사상의 개수를 분석하여 IETD를 결정하는 방법으로 최소강우 깊이(0.1mm이상)와 각각의 시간별 IETD에 의해 분리된 강우 사상의 수는 IETD가 증가하게 될수록 변동계수(Cv)는 일정한 숫자로 수렴하게 되는 시점을 강우시 계열의 적정 IETD로 결정한다.

$$\text{사상평균} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i x_i \tag{2-1}$$

$$\text{표준편차(SD)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \times f_i}{N}} \tag{2-2}$$

$$\text{변동계수 (Cv)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \times f_i}{N}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i x_i} \tag{2-3}$$

2.3.2. 실증 모니터링

(1) 적용 지점 선정

본 연구에서는 산업단지에서 발생하는 비점오염 물질의 유출특성을 파악하기 위하여 C 산업단지를 모니터링 하였으며, 비점오염원의 유출 및 농도산정을 위해 산업단지 내 하수관망에 대한 검토를 통하여 우수가 모이는 지점을 선정하여 조사하였다. 산업단지 내 발생된 비점오염물질은 단지계획을 통한 우수관로를 통하여 인근 하천 및 바다로 유출되고 있는 것으로 나타났다.

이와같이 분류식으로 정비되어 있어 비점오염물질에 대한 원활한 측정이 가능하며 비점오염물질에 대한 높은 신뢰도의 농도분석이 가능할 것으로 판단되어 모니터링 위치를 Fig. 2와 같이 선정하였다. 강우 시 비점오염물질은 각각 인근 남천을 통하여 연

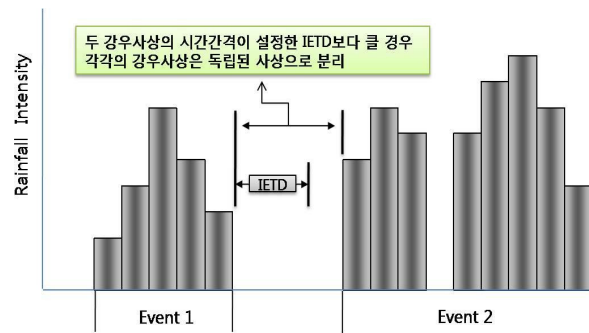
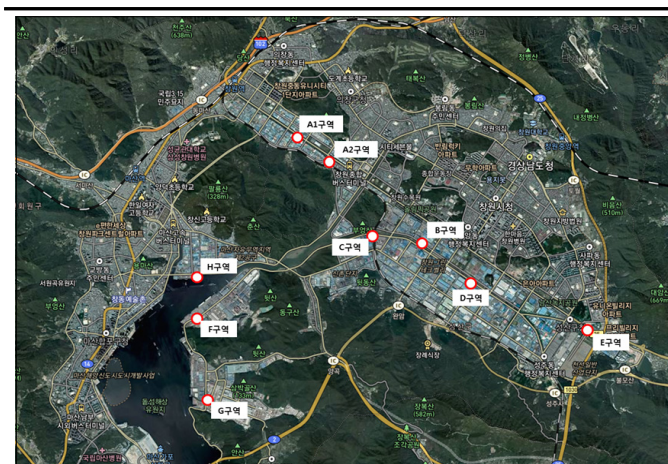


Fig. 1. Separation of rainfall event characteristics based on IETD.



A1: Near Yeongdong Tech, Rainwater outfall
A2: Near Hwashin Chemical, Rainwater outfall
B: Near the downstream of Yeondeokgyo Bridge, Rainwater outfall
C: Near Yeongheung Steel., Rainwater outfall
D: Near Jeongdong Intersection, waterway box
E: Near Namsan Bridge 1, waterway box
F: Near the back gate of Sampyo Comment Changwon Office, Rainwater outfall
G: Near the entrance of POSCO Steel Distribution Base, Under the bridge
H: Near Masanhang Pier 3, Rainwater outfall

Fig. 2. Monitoring location and survey point area.

안 오염 총량제 지역인 마산만으로 유입되며 하천과 바다의 오염을 가중시키고 있다.

(2) 유량 및 수질 조사

유량 측정 시 유량계의 현장 데이터의 안정성을 확인한 후 채수 하였으며, 강우시 1회 10채수 조사하였다. 측정내용에 관한 구체적인 사항은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

① 유량계

유량 측정 시 유량계는 유속 및 수심을 이용하여 측정하는 유량계(모델명:FP111)를 사용하였다.

② 측정원리 및 사양

유량계의 측정원리는 Turbo-Prop 형태의 프로펠러 센서가 회전함에 따라 전기적 신호가 발생되고 신호를 실시간으로 측정하여 디지털 디스플레이로 사용자가 판독이 가능한 시스템이다. 유속측정은 전자식으로, 측정범위는 0.1~0.6m/s, 수심측정은 측정기를 이용한 실측, 측정범위는 1.1~1.8m이다.

③ 수질조사 및 분석방법

수질조사는 수질 조사는 유량 측정 기간 중 총 9개 지점을 지점당 강우 시 2회 채수를 시행하였으며 수질 조사항목으로는 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P 5개

의 수질 항목을 분석하였다. 시료 채취는 5mm 이상의 강우시 시행하며 Grab Sampling을 원칙으로 하고, 1L의 샘플을 채취하고 채취된 시료는 수질 오염공정시험법에 따라 보존하며, 보존기간(8시간) 이내에 모든 분석을 완료하도록 하고, 현장에서 채취된 샘플은 현장에서부터 실험실 까지 운반을 위해 Ice box에서 4℃로 유지하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우분석 및 IETD 분석 결과

3.1.1. 강우사상 분리

초기유출(First flush)로 인한 유출된 비점오염원의 배출량을 확률적, 통계적으로 정확하게 분석하기 위해서는 일반적인 강우 사상으로부터 표준강우 사상의 평균 강우량, 평균 강우 지속 시간, 평균 강우강도 등의 대한 1회 통계 특성을 파악해야 하므로 IETD의 개념을 통해 연속강우를 표준강우 사상으로 분리하는 것이 가장 중요한 과정이다. C산업단지의 기상자료는 Fig. 3에 나타내었으며 일반적인 데이터의 장기간 강우량의 기록 및 그래프는 강우의 분포가 불규칙적으로 이루어지고 있어 각각의 일반적인 강우 사상으로 분리하기 위해서는 각 강우의 시작과 끝을 구별할 수 있는 기준이 필요하다.

Table 1. Overview of the Survey

Item	Overview
Survey subject	• Rainwater outfall, 9 point area, Sampling water 10 times.
Water quality survey	• Rainfall time 2 times/point area
Research plan	• For rainfall event with rainfall of 5 mm or more • No of samples collected : right before rainflow, 5 min., 10 min., 15 min., 30 min., 60 min.(5 times), Total 10 times • Water quality measurement items: BOD, COD _{Mn} , SS, T-N, T-P

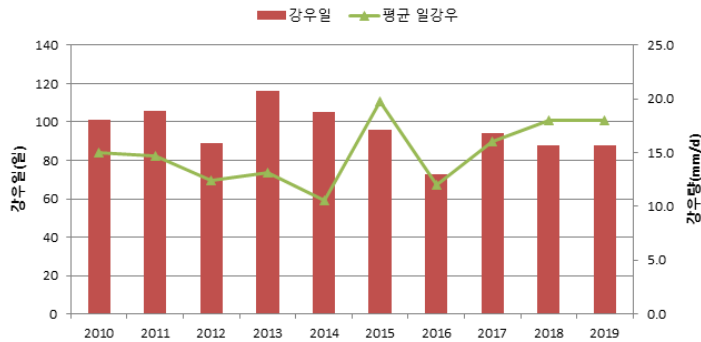
Table 2. The Date of the Investigation

Item	Date	Rainfall(mm)	Duration of rainfall (hr)	No of days before the dry day(day)
Event 1 (The 1st round of rainfall)	2021. 01. 26	12.2	12	3
Event 2 (The 2nd round of rainfall)	2021. 03. 12	22.1	15	7

3.1.2. IETD 분석결과

IETD 시간별 발생 사상 강우와 변동계수는 Table 3 과 Fig. 4에 나타낸바와 같으며 IETD가 27시간일 때,

변동계수가 0.999로 1에 가장 가깝게 분석되어 Table 4에 보는바와 같이 해당 강우 이벤트 (지속시간 약 21 시간, 강우량 26.44mm)를 비점오염원 모의를 위한 대표 강우 사상으로 선정하였다.



Year	Total rainfall (mm)	Rainy days (day)	Avg. rainfall (mm/d)
2010	1,514.0	101	15.0
2011	1,559.4	106	14.7
2012	1,110.0	89	12.5
2013	1,525.8	116	13.2
2014	1,110.7	105	10.6
2015	1,893.0	96	19.7
2016	879.3	73	12.0
2017	1,507.3	94	16.0
2018	1,587.0	88	18.0
2019	1,587.0	88	18.0
Avg.	1,427.4	95.6	15.0

Fig. 3. Annual rainfall in C-Weather station.

Table 3. Rainfall Event of Occurrence with Time by IETD

(2010~2019 years)

IETD	Rainfall event (no)	Avg. rainfall (mm)	Avg. duration (hr)	Avg. rainfall intensity (mm/hr)	Inter Event Time		
					Avg.	standard deviation	coefficient of variation
1	1872	8.48	3.14	2.29	48.60	100.07	2.059
2	1141	13.91	6.43	1.54	77.84	119.38	1.534
3	1057	15.01	7.18	1.55	83.72	122.13	1.459
4	999	15.88	7.83	1.51	88.29	124.11	1.406
5	903	17.57	9.19	1.51	97.05	127.46	1.313
6	871	18.22	9.75	1.50	100.36	128.59	1.281
7	848	18.71	10.20	1.50	102.87	129.41	1.258
8	804	19.73	11.20	1.51	108.01	130.99	1.213
9	790	20.08	11.56	1.50	109.75	131.49	1.198
10	775	20.47	11.97	1.47	111.67	132.03	1.182
11	756	20.99	12.55	1.47	114.18	132.72	1.162
12	746	21.27	12.88	1.47	115.53	133.09	1.152
13	730	21.73	13.45	1.45	117.76	133.68	1.135
14	713	22.25	14.10	1.45	120.22	134.31	1.117
15	702	22.60	14.56	1.43	121.85	134.72	1.106
16	695	22.83	14.86	1.43	122.91	134.99	1.098
17	681	23.30	15.52	1.43	125.07	135.52	1.084
18	672	23.61	15.97	1.41	126.49	135.87	1.074
19	663	23.93	16.44	1.40	127.94	136.22	1.065

Table 3. Continued

IETD	Rainfall event (no)	Avg. rainfall (mm)	Avg. duration (hr)	Avg. rainfall intensity (mm/hr)	Inter Event Time		
					Avg.	standard deviation	coefficient of variation
20	647	24.52	17.34	1.41	130.59	136.84	1.048
21	641	24.75	17.70	1.40	131.61	137.08	1.042
22	632	25.10	18.27	1.36	133.16	137.44	1.032
23	626	25.35	18.66	1.37	134.20	137.68	1.026
24	621	25.55	19.01	1.34	135.12	137.86	1.020
25	616	25.76	19.37	1.33	135.97	138.09	1.016
26	607	26.14	20.04	1.33	137.59	138.47	1.006
27	600	26.44	20.59	1.31	138.87	138.77	0.999
28	597	26.58	20.83	1.32	139.42	138.90	0.996

Table 4. IETD Calculation Result

Criteria for separating rainfall	Number of rainfall event	Avg. rainfall	Avg. duration	Number of occurrences per year
27 hr	600	26.44 mm	≒ 21hr	55 times

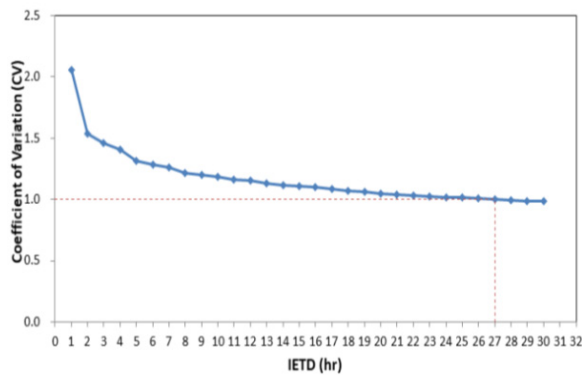


Fig. 4. Variation coefficient graph in C-Weather station.

3.2. 유량 및 수질 조사 모니터링 결과

Table 2의 Event 1 및 Event 2의 C 산업단지 수질 조사는 우수토구 9개 지점에 대한 10회 채수를 수행 하였으며 강우량이 5mm이상의 강우 사상을 대상으로 BOD COD_{Mn}, SS, T-N, T-P, 5개 항목을 측정하였다. Event 1(강우 1차) 조사 결과는 강수량 12.2mm, 강우지속기간 12hr, 선행 건기일 수 3일이었으며, Event 2(강우 2차) 조사는 강수량 22.1mm, 강우지속기간 12hr, 선행 건기일 수는 7일 이었다. Event 1, 2의 유량 조사 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6의 그래프로 나타냈다.

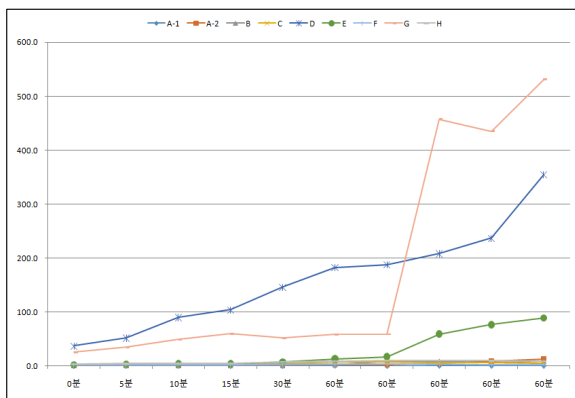


Fig. 5. Result of the flow survey at event 1.

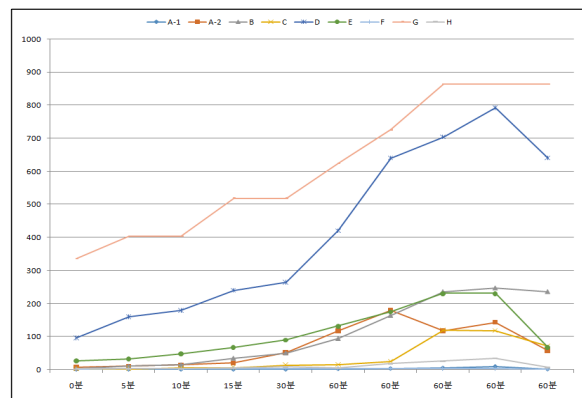


Fig. 6. Result of the flow survey at event 2.

유량 조사 초기 우수토구에 기저 유량이 유출되고 있어 시작 유량이 있으며, 우수토구 조사지점의 배수지역의 넓이에 따라 유량의 변동이 D, H구역은 급격한 변동이 있으며 나머지 A, B, C, E, F, G구역은 일반적인 유량 증가 현상을 보이고 있다. 강우유출에 따라 비점오염원의 유출이 변동되며, 표면 세척으로 인한 비점오염원의 유출은 강우유출이 많을수록 강하게 나타났다. 산업단지는 일반적으로 단지계획을 통하여 평지 수준의 지형을 만들어 도로 및 우수관로 계

획을 하기 때문에 자연 형성된 주거지역의 시간에 따른 오염 유출농도와 차이가 발생할 가능성이 높은 것이라 판단된다.

수질 조사 결과는 Table 5, Table 6 및 Fig. 7, Fig. 8에 요약되어 있으며, Event 1 강우보다 Event 2 강우가 2배가량 많아 회석현상에 의한 오염물질농도 저하가 나타난 것으로 보이고, 시간이 지남에 따라 유출 오염물질의 양이 늘어났다.

Table 5. Water Quality Monitoring Survey Results at Event 1

(unit: mg/L)

Event	Point	Total rainfall (mm)	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P
1	A-1	12.2	9.9	16.4	48.7	4.840	0.359
	A-2		45.0	45.0	44.7	10.050	0.814
	B		12.5	13.9	12.5	6.840	0.494
	C		2.7	7.0	29.7	3.650	0.178
	D		12.8	22.0	20.1	3.820	0.124
	E		4.3	9.2	12.9	3.020	0.311
	F		3.6	12.0	202.5	2.550	0.222
	G		1.3	3.0	1.6	3.300	0.079
	H		7.1	12.3	32.7	3.810	0.430
Average			11.0	15.7	45.0	4.653	0.334
Max			45.0	45.0	202.5	10.050	0.814
Min			1.3	3.0	1.6	2.550	0.079

Table 6. Water Quality Monitoring Survey Results at Event 2

(unit: mg/L)

Event	Point	Total rainfall (mm)	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P
2	A-1	22.1	2.8	7.5	4.0	1.680	0.029
	A-2		15.6	20.4	24.0	3.060	1.077
	B		2.6	6.5	15.1	3.280	0.165
	C		2.8	5.4	14.4	2.920	0.146
	D		0.5	3.3	5.2	1.940	0.018
	E		0.7	4.4	8.2	2.940	0.399
	F		2.0	5.1	144.8	3.960	0.064
	G		1.1	3.0	5.3	5.020	0.094
	H		10.0	14.5	27.6	5.311	0.265
Average			4.2	7.8	27.6	3.346	0.251
Max			15.6	20.4	144.8	5.311	1.077
Min			0.5	3.0	4.0	1.680	0.018



Fig. 7. Water quality survey result at Event 1.

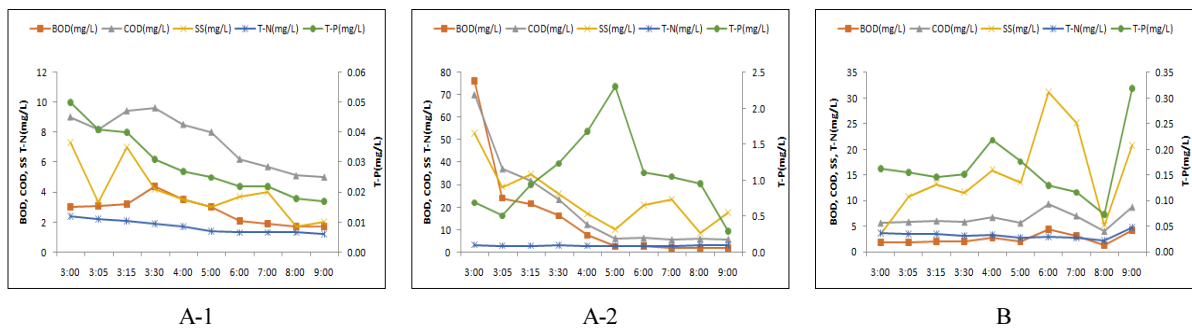


Fig. 8. Water quality survey result at Event 2.

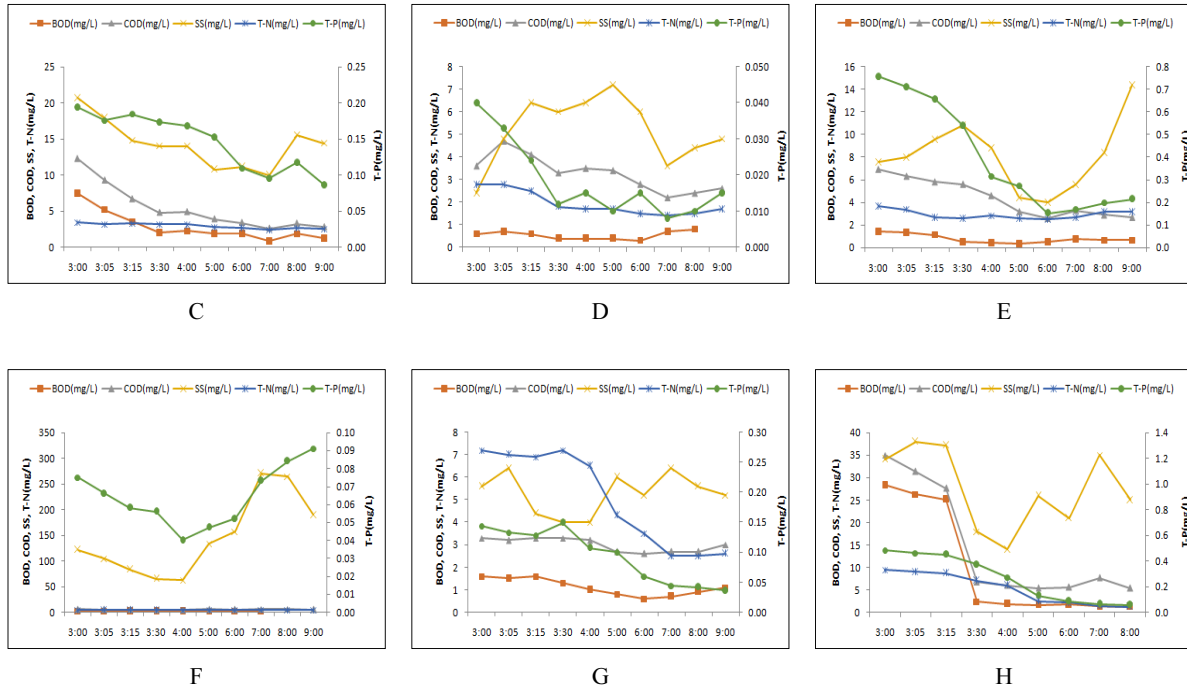


Fig. 8. Continued.

4. 결론

본 연구는 초기강우시 산업단지에서 발생하는 비점오염원 유출 특성을 평가하여 비점오염원 부하량 및 원단위 산정을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 C 산업단지에 대하여 강우유출수 수질모니터링을 수행하여 초기강우에 따른 유출수 분석에 따른 비점오염원의 유출특성에 대한 결론은 아래와 같다.

- 1) C 산업단지의 IETD분석결과, 변동계수가 0.999로 1에 가장 가깝게 분석된 강우지속시간 약 21시간, 강우량 26.44mm인 27시간일 때를 비점오염원 모의를 위한 대표 강우 사상으로 선정하였다.
- 2) 유량 및 수질조사 모니터링 결과, 1차 강우시인 Event 1 조사 결과는 강수량 12.2mm, 강우지속기간 12hr, 선행 건기일 수 3일이었으며, 2차 강우시인 Event 2 조사 결과는 강수량 22.1mm, 강우지속시간 12hr, 선행 건기일 수는 7일이었다.
- 3) 유량 조사 초기 우수토구에 기저 유량이 유출되고 있어 시작 유량이 있으며, 우수토구 조사 지점의 배수지역의 넓이에 따라 유량의 변동이

D, H구역은 급격한 변동이 있으며 나머지 A, B, C, E, F, G구역은 일반적인 유량 증가 현상을 보이고 있다.

- 4) 강우유출에 따라 비점오염원의 유출이 변동되며, 표면 세척으로 인한 비점오염원의 유출은 강우유출이 많을수록 강하게 나타났다. 산업단지는 일반적으로 단지계획을 통하여 평지 수준의 지형을 만들어 도로 및 우수관로 계획을 하기에 자연 형성된 주거지역의 시간에 따른 오염 유출농도와 차이가 발생할 가능성이 높으리라 판단된다.
- 5) 수질 조사 결과는 Event 1 강우보다 Event 2 강우가 2배가량 많아 희석현상에 의한 오염물질 농도 저하가 나타난 것으로 보이고, 시간이 지남에 따라 유출오염물질의 양이 늘어났다.

References

1. Ministry of Environment, “The 1st comprehensive measures for non-point pollution source management”.

- (2004).
2. Ministry of Environment, "The 2nd comprehensive measures for non-point pollution source management". (2012).
3. Ministry of Environment, "Legalization of the establishment of comprehensive measures for non-point pollutants". (2016).
4. Ministry of Environment, "Non-point pollution management policy that makes it mandatory to establish water circulation goals". (2018).
5. Ministry of Environment, "Sewage statistics". (2020).
6. Kang, M. S., et al., Rural non-point source management plan in accordance with the 3rd comprehensive measures for non-point source management, KSAE (The Korean Society of Agricultural Engineers) Conference, pp, 361~361, (2020).
7. Kim, S. D. and Cho D. J., "Outflow capture curve for non-point source management", Journal of Korean Society on Water Quality, 23(6), pp. 829~836, (2007).
8. Restrepo, P. and Eagleson, P., "Identification of independent rainstorms", Journal of Hydrology, 55. pp. 303~319. (1982).