

산업단지 비점오염원의 유출특성(II): C산업단지의 강우사상별 유출특성을 중심으로

우제석^{a,b}, 신현곤^{c†}

The Runoff Characteristics of Non-point Pollution Sources in Industrial Complex(II): Focusing on the Outflow Characteristics of the C Industrial Complex by Rainfall Event

Jae-Suk Woo^{a,b}, Hyun-Gon Shin^{c†}

(Received: Feb. 26, 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 calculating EMC according to the outflow amount by rainfall event, the 1st rainfall showed EMCs ranges of BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, and T-P of 1.32~48.76, 3.32~43.75, 2.89~199.43, 2.76~8.93, 0.08~0.68, and the 2nd rainfall was 0.5~2.9, 2.71~7.13, 2.82~174.94, 1.33~4.03, 0.01~1.28 mg/L, respectively. As a result of calculating the ratio of cumulative outflow and cumulative pollution load, most of the pollution load was less than the rainfall outflow, but over time, the initial washing phenomenon occurred as the ratio of cumulative rainfall outflow and cumulative pollution load increased to more than 1.

Keywords: Non-point source, Runoff characteristics, Event mean concentration, Initial washing phenomenon

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. 강우 사상별 유출량에 따른 EMC 산정 결과, 1차 강우시 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 EMCs 범위는 각각 1.32~48.76, 3.32~43.75, 2.89~199.43, 2.76~8.93, 0.08~0.68 mg/L로 나타났으며, 2차 강우시는 각각 0.5~2.9, 2.71~7.13, 2.82~174.94, 1.33~4.03, 0.01~1.28 mg/L로 나타났다. 누적 유출량과 누적 오염부하량 비율 산정 결과, 강우 초기 유출량이 적은 시간에는 대부분 오염부하량이 강우 유출량보다 적지만 시간이 지남에 따라 강우 누적 유출량과 누적 오염부하량의 비가 1보다 커지면서 초기세척 현상이 일어났다.

주제어: 비점오염원, 유출특성, EMC, 초기세척현상

^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

우리나라의 하천 수질은 1980년 환경청 설립 이후 「4대강 물관리종합대책 (1998~2005)」, 「물관리종합대책(2006)」, 「제1차 물환경관리 기본계획(2006~2015)」 등에 따른 환경적인 시설에 대한 다양한 투자를 통해 급속도로 개선되었다.^{1,2)} 그러나 수중으로 방류되는 난분해성 유기물질 종류 및 농도는 지속적으로 증가하는 추세이며, 일부 상수원의 수질은 I등급에도 미치지 못하고 있으며, 가축분뇨 및 농업으로 인하여 발생되는 비점오염 관리는 아직까지도 미흡한 상황이다.³⁾ 이에 비해 생활 수준이 향상됨에 따라 물환경에 대한 관심이 증대되었으며, 깨끗한 수자원에 대한 국민적 요구는 날로 증가되고 있는 상황이다.⁴⁾ 한편, 제3차 강우유출 비점오염원 관리대책 기간(2021~2025)중 T-P 배출부하량 5% 저감이 목표이며, 직접 효과로 424개의 간이하수처리장 건설하는 효과가 있으며 1조7,800억원의 비용을 절감할 수 있으며, 간접효과로는 생태계 건강성 회복, 녹조 예방, 경관개선 및 도시 침수 대응 등이 가능하며 12,900명의 고용 창출 효과가 발생하는 것으로 연구되었다.⁵⁾ 본 연구에서는 C산업단지의 강우유출수 수질모니터링을 수행하여, 해당 지역적 특성에 따른 강우유출수의 비점오염원 오염부하량, 강우사상별 유량기중평균농도 및 누적 유출량과 누적 오염부하량에 따른 초기세척현상 등을 분석하여 정부정책의 비점오염원 부하량 및 원단위 산정을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 연구를 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 산정연구 및 비점오염원 저감 대책 수립에 참고할 수 있는 유용한 기초자료로 제공하고자 C 산업단지를 대상으로 하였다. 측정내용에 관한 구체적인 사항은 Table 1과 Table 2에 나타낸바와 같다.

2.2. 조사내용

- 1) 강우사상별 EMC(Event Mean Concentration) 산정에 따른 유출 특성 확인
- 2) 누적유출량 누적 오염부하량의 비율을 통한 초기세척현상 확인

2.3. 조사 방법 및 이론

강우 사상은 기상청 관할 기상관측소 중 강우기록 관측년도, 시간 강우자료 보유여부 및 설치대상지와 위치상 인접 여부 등을 종합적으로 고려하여 인근 기

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

상관측소인 C 기상관측소의 최근 10년(2010년 1월 1일~2019년 12월 31일)간 강우 자료(시간 강우량)를 이용하여 분석하였다. 상세한 측정지점은 본 연구(1)⁶⁾에 표기한 바와 같다.

2.3.1. 강우 사상별 EMC(Event Mean Concentration) 산정

지역별 강우시 유출수 유출특성을 파악하기 위해서는 오염부하량과 유량을 고려한 개념을 평가하여 정확성을 기하여야 한다. 강우 사상에 따른 오염부하량과 유량을 고려한 평균 농도를 산정하는 방법으로는 강우 시 발행한 총오염량을 총 유출량으로 나눈 유량 가중평균값으로 산정하며 이를 유량가중평균 농도(EMC)라 하며 다음의 식(2-1)과 같이 나타낸다.⁷⁾

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int C(t)Q(t)dt}{\int Q(t)dt} = \frac{\sum C(t)Q(t)\Delta t}{\sum Q(t)\Delta t} \quad (2-1)$$

여기서, EMC: 유량 가중평균 농도[mg/l],
 M: 강우기간 중 유출된 오염물질의 총량[g]
 V: 총 유출량[m³], C(t): 이산시간(discretetime)동안의 오염물질[mg/l]
 Q(t): 이산시간동안의 유량[m³/hr], Δt: 이산시간간격[hr]

2.3.2. 누적 유출량과 누적 오염부하량의 비율 산정

불투수율이 높은 곳은 강우 발생 시 유출계수가 커서 많은 강우 유출수가 인근 수계로 유출된다. 강우 초기 매우 많고 높은 농도의 유출수가 발생되며 강수 시간이 지속될수록 농도가 저감하는 경향이 있다. 이러한 현상을 초기세척 현상이라고 부르며 비점오염원 관리방안 수립 시 저류시설 용량 및 관로계획 등에 중요한 요소로 작용한다. 초기우수(First-flush)의 정의는 강우 초기에 높은 농도의 오염물질이 관측되는 것과 관계가 있으며, 초기우수는 강우강도와 강우지속시간 등과 같은 강우특성, 강우 전 건조일수, 지역 여건에 따른 유출계수, 기존에 설치되어 있

는 우수관로 경사에 따라 다르게 나타난다.

또한, 초기우수 산정량은 오염물질을 처리하고자 하는 최적관리 방안 계획 시 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다. 강우초기 강우 유출수에 오염물질 농도가 높아졌다가 강수 시간에 따라 농도가 저하하는 현상에 대해 분석을 하기 위해서는 초기세척현상을 검토하여야 하며, 강우유출수의 누적 유출 부하량과 누적유출 유량부피에 대한 비로 표현하며, 식(2-2), (2-3)에서 보이듯이 유출수에 포함된 오염물질 부하량의 증가비율이 유출유량의 증가비율 보다 클 경우 즉, 기울기가 1 이상에는 초기세척 현상이 강한 것으로 분석되며, 그 반대의 경우인 기울기가 1 미만에는 초기세척 현상이 약한 것으로 볼 수 있다.⁸⁾

$$\left[\frac{P_i}{\sum P_i} / \frac{Q_i}{\sum Q_i} \right] > 1: \text{강한세척현상 (2-2),}$$

$$\left[\frac{P_i}{\sum P_i} / \frac{Q_i}{\sum Q_i} \right] < 1: \text{약한세척현상 (2-3)}$$

여기서, P: 오염 물질량[mg/l], Q: 강우 유출량[m³]

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우 사상별 EMC (Event Mean Concentration) 산정

지역별, 위치별 산정된 EMC는 비점오염물질의 부하량 산정, 초기세척현상 및 비점오염물질 저감계획에서 중요하게 작용한다.

본 연구 조사대상 지역의 EMC는 Table 3 및 Table 4에 자세히 나타내었다. Event 1 및 Event 2 강우시 유역면적의 차이로 유출량의 차이가 발생하지만 Event 1의 유출량에 따른 오염물질은 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 EMCs 범위는 각각 1.32~48.76, 3.32~43.75, 2.89~199.43, 2.76~8.93, 0.08~0.68로 나타났으며, Event 2의 유출량에 따른 오염물질은 각각 0.5~2.9, 2.71~7.13, 2.82~174.94, 1.33~4.03, 0.01~1.28 mg/L로 나타났다.

각각 날짜별로 강우량의 차이(Total runoff: 10.1m³)가 발생하여 지역적인 많은 강우와 오염물질의 혼합이 발생 되어 오염물질의 발생량도 차이가 발생하

Table 3. Survey Target Area EMC at Event 1

(unit: mg/L)

Event	Area	Total rainfall (mm)	Total runoff (m ³)	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P
1	A-1	12.2	247.90	11.88	17.00	86.87	4.22	0.35
	A-2		3,002.83	48.76	43.75	56.45	8.93	0.68
	B		3,297.69	12.75	14.46	10.86	5.81	0.39
	C		4,428.86	2.78	7.11	35.82	3.80	0.24
	D		138,139.78	11.77	18.69	20.99	3.31	0.12
	E		23,926.55	3.53	8.76	10.22	2.76	0.26
	F		2,364.22	3.93	12.40	199.43	2.77	0.23
	G		152,412.71	1.32	3.32	2.89	3.42	0.08
	H		6,375.35	6.87	12.09	32.78	3.50	0.31
	Average		37,132.88	11.51	15.29	50.70	4.28	0.30
Max	152,412.71	48.76	43.75	199.43	8.93	0.68		
Min	247.90	1.32	3.32	2.89	2.76	0.08		

Table 4. Survey Target Area EMC at Event 2

(unit: mg/L)

Event	Area	Total rainfall (mm)	Total runoff (m ³)	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P
2	A-1	22.1	2,421.79	2.04	5.89	2.82	1.33	0.02
	A-2		62,147.52	2.90	6.77	16.33	3.05	1.28
	B		94,726.37	2.84	6.64	18.47	2.96	0.14
	C		32,734.37	1.41	3.11	12.81	2.56	0.11
	D		357,350.40	0.50	2.71	5.14	1.57	0.01
	E		95,104.80	0.55	3.24	6.60	2.80	0.22
	F		2,564.35	1.98	5.24	174.94	4.03	0.06
	G		528,871.68	0.87	2.81	5.48	3.69	0.07
	H		9,728.64	2.37	7.13	27.09	2.67	0.13
	Average		131,738.88	1.72	4.84	29.96	2.74	0.23
Max	528,871.68	2.90	7.13	174.94	4.03	1.28		
Min	2,421.79	0.50	2.71	2.82	1.33	0.01		

였다고 판단되며, 산업단지의 여러 유역면적을 대상으로 모니터링한 결과로 강우시 주로 발생 되는 오염물질은 SS가 타 오염원의 적게는 3배, 많게는 170배, 차이가 났으며, BOD, COD_{Mn} 등은 강우강도와 산업단지 내 유역면적, 우수관로의 구배, 선행 무강우일수 등의 영향으로 20배 정도의 차이가 발생하는 것으로 판단되며 지속적인 모니터링 수행이 필요하다 판단된다.

3.2. 누적 유출량과 누적 오염부하량 비율을 통한 초기세척 현상

강우가 시작하고 시간이 지남에 따라 강우 유출량 증가와 지표면의 오염물질이 강우와 함께 유출되어 유출농도가 증가한다.⁹⁾ 강우에 따른 오염부하량의 유출 특성을 파악하기 위해서 강우 누적 유출량과 오염물질 누적 오염부하량의 비를 이용하였다.

Fig. 1과 Fig. 2를 고찰하여보면 유출수에 포함된

오염물질 누적 오염부하량의 증가 비율이 강우 누적 유출량의 증가 비율보다 클 경우 즉, 기울기가 1이상에는 초기세척(First-flush) 현상이 일어나며, 그 반대

의 경우인 기울기가 1미만에는 초기세척 현상이 약한 것으로 볼 수 있다.

강우 초기 유출량이 적은 시간에는 대부분 오염부

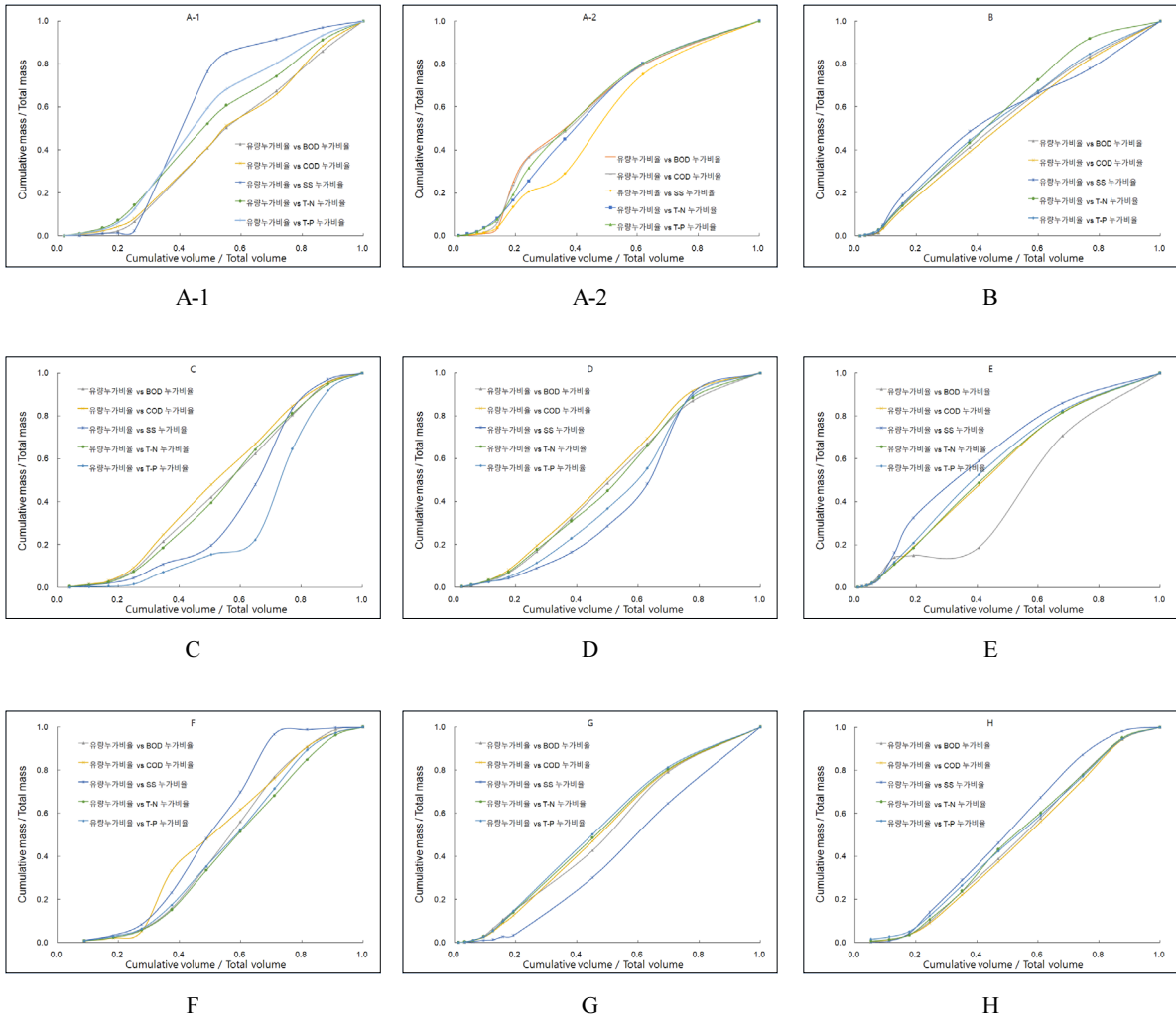


Fig. 1. The ratio of cumulative runoff to cumulative load at event 1.

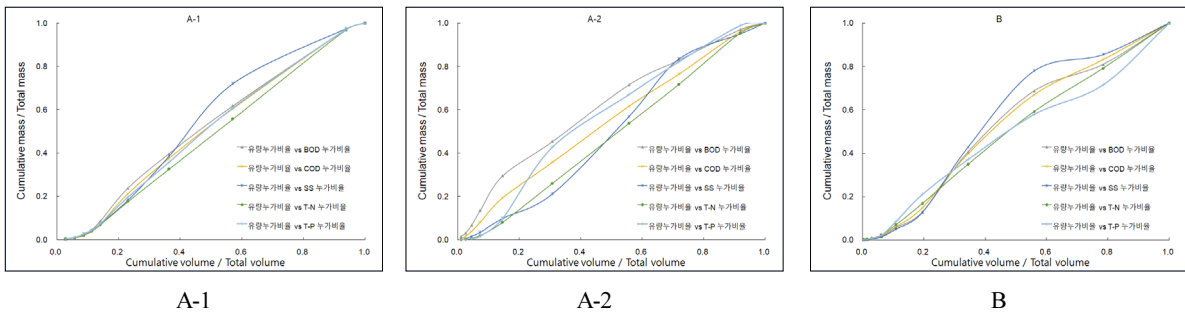


Fig. 2. The ratio of cumulative runoff to cumulative load at event 2.

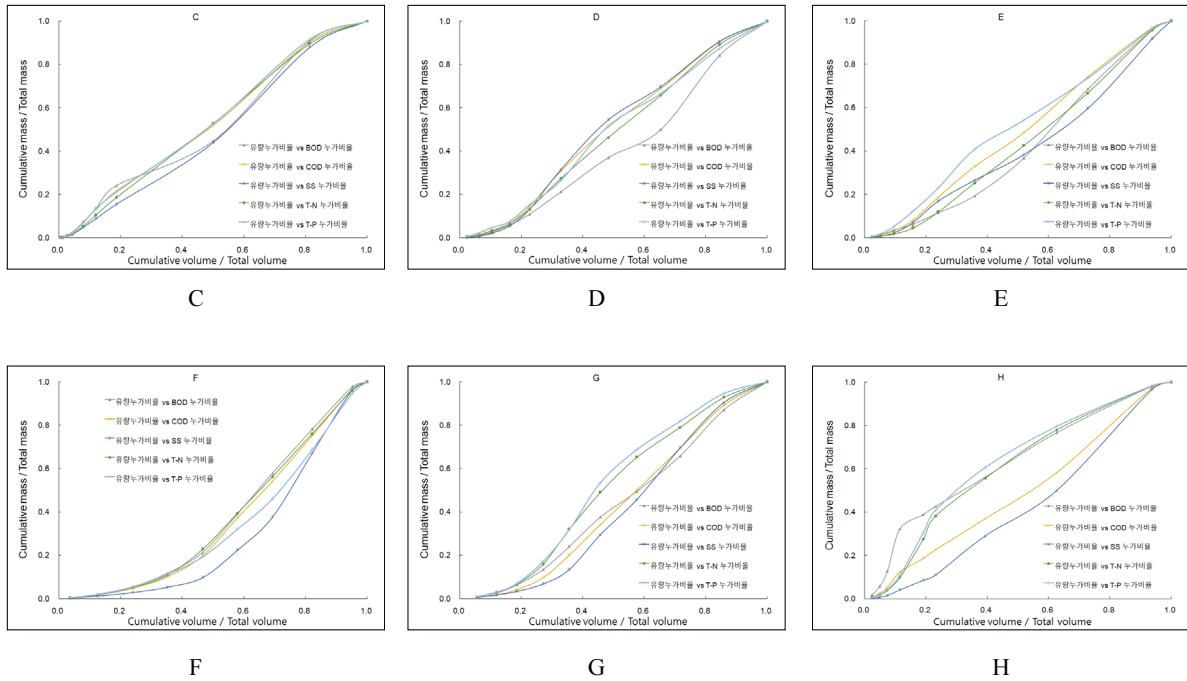


Fig. 2. Continued.

하량이 강우 유출량보다 적지만 시간이 지남에 따라 강우 누적 유출량과 누적 오염부하량의 비가 1보다 커지면서 초기세척 현상이 일어났다. 이는 산업단지 조성을 평탄지형으로 만들고 이에 우수관로 계획을 하므로 유출지점에서의 강우 도달시간이 오래 걸리고 유속이 느려지는 산업단지의 특성이 있기 때문이라 판단된다. 배수구역이 큰 지역(A-2, B, C, D, E, G)과 작은 지역(A-1, F, H)이 강우에 따라 약간 차이가 발생하지만, 초기보다는 강우 시간이 흐름에 따라 초기세척 현상이 일어나지만, 일반 자연 형성 주택지역보다는 약하게 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구는 강우시 산업단지에서 발생하는 비점오염원 유출 특성을 평가하여 비점오염원 부하량 및 원단위 산정을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 C 산업단지에 대하여 강우유출수 수질모니터링을 수행한 후, 강우사상에 따른 오염부하량과 유량을 고려한 평균농도를 산정하고 누적유출량과 누적 오염부하량

의 비율을 분석하여 C 산업단지 강우유출수에 따른 비점오염원의 유출특성에 대한 결론은 아래와 같다.

- 1) 강우유출수에 따른 누적 유출량과 누적 오염 부하량비는 배수구역 크기에 따라 초기세척현상의 발생 시기가 다르게 나타났으며, 배수구역이 크고 우수관로의 경사가 완만할수록 강우초기보다는 시간이 흐름에 따라 초기세척 현상이 강하게 일어났다.
- 2) 본 연구에서는 산업단지라는 특정지역에 대한 비점오염원의 유출특성을 분석하여 타 지역 초기우수 유출에 따른 비점오염원 유출특성 분석과 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 모든 지역이 동일한 유출이 발생하지 않으며, 동일한 비점오염원의 농도를 가지고 있지 않다. 이에 비점오염원의 저감효과를 높이기 위해서는 각 지역에 맞는 유출특성을 분석하여 저감시설을 설치하여야 한다.
- 3) 현재 비점오염저감저류시설 설계용량 산정시 강우유출수 5mm를 일괄적용하고 있다. 이는 비점오염원의 저감효과를 저하시키는 요인으로

작용한다고 판단되며, 각 지역의 유출특성에 따른 용량산정을 통하여 설계용량 산정이 필요하다고 판단된다.

- 4) 각 지역의 특성은 배수구역에 대한 규모, 불투수 면적, 토지이용 형태 및 우수관로의 경사에 따른 도달시간 등을 검토하여 저감효율 목표치 설정을 하고 지역특성을 적용한 설계용량 강우 유출수 기준을 정하는 것이 필요하다고 판단되며, 향후 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다고 판단된다.

References

1. Ministry of Environment, "Comprehensive measures for the management of four major rivers". (1998~2005)
2. Ministry of Environment, "Comprehensive measures for water management". (2006).
3. Ministry of Environment, "The 1st basic plan for water environment management". (2006).
4. Ministry of Environment, "The 2nd basic plan for water environment management". (2016).
5. Jointly with related ministries, "The 3rd (2021-2025) comprehensive measures for the management of non-point pollutants for the rainfall runoff", p. 38, (2020).
6. Woo, J. S. and Shin. H. G., "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-", J of KORRA, 30(1), pp. 25~32. (2022).
7. Kwon, H. G., et al., "A study on the calculation of EMSc, a non-point pollutant source in a transportation area, using the rainfall runoff model", Journal of Wetlands Research, 17(2), pp. 193~202. (2015).
8. Lee, J. H., "A study on the initial excellent treatment plan to reduce the load of non-point pollution sources", Master's thesis, University of Seoul, pp. 8~9. (2006).
9. Choi, Y. Y., Jung, S. Y. and Choi, J. W., "Analysis of the characteristics of non-point pollutants in the initial rainfall outflow according to land use", J of KESS (The Korean Environmental Sciences Society), 20(3), pp. 417~426. (2011).