

비점오염저감시설 오염물질 배출특성 조사

황수연*, 김오목, 나리, 이연희, 김현주, 성지홍, 권문주
인천보건환경연구원 산업폐수과

A Study on the Discharge Characteristics of Pollutants from Non-Point Pollutant Control Facility

Su-Yeon Hwang*, O-Mok Kim, Ri Na, Yeon-Hee Lee, Hyun-Ju Kim, Ji-Hong Seong, Mun-Ju Kwon

Division of Industrial Wastewater, Incheon Metropolitan City Institute of
Public Health and Environment

Abstract

This study was conducted water analysis and flow monitoring at the inflow and outflow of non-point pollutant control facilities during rainfall accidents in Incheon to understand the effect of non-point pollution control facilities. The pollutant removal efficiency of the non-point pollutant control facilities was evaluated using the Event Mean Concentration(EMC), and the First Flush Phenomena was confirmed. As a result, the reduction efficiency of the non-point pollutant control facilities showed a large deviation depending on the maintenance and precipitation of the non-point pollutant control facilities, but the maximum efficiency was 93.4 % for SS, 92.9 % for TN, 92.0 % for TOC, 89.2 % for Mn, 84.5 % for Fe, 84.1 % for Zn and 69.1 % for Cu. In addition, it was confirmed that the First Flush Phenomena occurred when rainfall was introduced. The purpose of this study is to efficiently manage non-point pollution control facilities to help reduce non-point pollutants discharged to the water system.

요 약

본 연구는 비점오염저감시설의 효과를 파악하고자 강우사상 시 인천지역 비점오염저감시설의 유입과 유출부에서 수질 시료 채수 및 유량 모니터링을 실시하였다. 유량가중평균농도(EMC)를 이용하여 저감시설의 오염물질 제거효율을 평가하고, First Flush 현상을 확인하였다. 그 결과 비점오염저감시설의 저감효율은 시설의 유지관리와 강수량에 따라 큰 편차를 보였으며, 최고 효율은 SS 93.4 %, TN 92.9 %, TOC 92.0 %, Mn 89.2 %, Fe 84.5 %, Zn 84.1 %, Cu 69.1 %의 수치를 보였다. 또한 강우 유입 시 First Flush 현상이 발생함을 확인하였다. 본 연구 결과를 활용하여 비점오염저감시설을 효율적으로 관리하여 수계로 배출되는 비점오염물질의 감소에 도움이 되고자 한다.

Key words : Non-Point Pollutant Control Facility, EMC, First Flush Phenomena

I. 서론

1.1. 연구 목적

우리나라는 최근 들어 하수처리장 등의 환경기초시설이 확충되면서 점오염원의 관리가 강화되었고, 이에 따라 수계로 배출되는 총오염부하량은 지속적으로 감소하고 있으나, 토지이용 고도화에 따른 불투수면의 확대 등 비점오염부하량은 계속해서 증가하는 추세이며 기후변화에 따른 강우 강도 증가로 지표면에 축적된 고농도의 비점오염물질이 하천으로 유출, 수질오염을 가중하고 있다.

비점오염물질은 일정한 배출구를 갖고 있지 않으며 넓은 지역으로 분산되어 있어 오염원 흐름의 분산성과 지역의 방대성으로 집수하기 어렵다. 또한 도시화가 진행됨에 따라 자동차 증가와 더불어 도로·교량이 증가하면서 그로 인한 도로·교량 표면에 쌓이게 된다. 이들 오염물질은 갈수기가 끝나고 강우가 발생하게 되면 씻김 현상으로 인해 그대로 하천으로 유입되어 수질을 오염시키는 주요 원인이 된다. 비점오염원은 주로 비가 올 때 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로 농지에 살포된 비료나 농약, 토양 침전물, 축사 유출물, 교통오염 물질, 도시지역의 먼지와 쓰레기, 자연동·식물의 잔여물, 지표면에 떨어진 대기오염물질 등을 말한다(Novotny et al, 1994).

환경부에서는 효율적인 비점오염원 관리를 위하여 2004년부터 현재까지 3단계에 걸쳐 비점오염원 관리 종합대책을 수행하고 있으며, 2008년부터 비점오염저감 국고보조사업을 추진하여 비점오염저감시설 설치를 통한 수질개선 및 수생태계 건강성 확보를 위한 노력을 시행하고 있다(최혜선, 2020). 그러나 아직은 비점오염저감시설의 효과를 파악할 정확한 자료가 부족한 실정이다. 본 연구는 인천시 관내 비점오염원 저감시설의 실측 시료를 채취하여 그 효율성을 분석하고, 최적의 비점오염 저

감시설 도입을 위한 자료를 제공하고자 한다.

1.2. 비점오염원

1.2.1. 비점오염원의 정의

물환경보전법 제2조 제2호에 의하면 비점오염원이란 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정장소에서 불특정하게 수질오염 물질을 배출하는 배출원을 말한다. 비점오염원은 건기에 다양한 토지표면에 축적된 오염물질(유기물, 영양염류, 중금속, 입자상 물질, 각종 유해 화학물질 등)이 강우 유출수와 함께 유출되어 수질 및 토양오염을 일으키는 배출원을 지칭한다.

1.2.2. 비점오염물질의 종류

비점오염물질은 비점오염원으로부터 배출되는 수질오염물질(물환경보전법 시행규칙 별표2)로서 유출경로와 수질오염물질의 유사 범주를 고려하여 다음의 8가지 종류로 분류하였다(Table 1).

토사(Sediment)에는 영양물질, 금속, 탄화수소 등을 비롯한 다른 오염물질이 흡착되어 같이 이동하게 된다. 토사는 강우 유출수의 많은 부분을 차지하는 오염물질로서 수생 생물의 광합성, 호흡, 성장, 생식에 장애를 일으켜 치명적인 영향을 미친다.

영양물질(Nutrients)인 질소·인과 같은 물질은 비료로 사용되는데, 종종 빗물에 의해 유출되어 조류의 성장을 촉진함으로써 하천·호소의 수질을 악화시킨다. 주택이나 골프장의 잔디밭이나 농경지, 도시노면 및 하수도에서 유출되어 하천으로 유입된다.

박테리아와 바이러스(Bacteria & Viruses)는 동물의 배설물과 하수도에서 월류된 배출수에서 많이 검출되며 미국에서는 강우 유출수에 포함된 고농도의 박테리아와 바이러스로 인하여 하천·호소가 오염되어 폐쇄의 원인이 된다.

기름과 그리스(Oil & Grease)는 적은 양으로도 수생 생물에 치명적일 수 있으며, 누출이

Table 1. Varieties of Non-Point Sources

	Varieties of Non-Point Sources
1	Sediment
2	Nutrients
3	Bacteria & Viruses
4	Oils and Grease
5	Metals
6	Organics
7	Pesticides
8	Gross Pollutants

나 차량전복 등 사고, 차량 세척, 폐기물의 무단 투기 과정에서 오염이 발생할 수 있다.

금속(Metals)은 납, 아연, 카드뮴, 구리, 니켈 등으로서, 도시지역 강우 유출수에서 흔히 검출된다. 금속 물질은 수생태계에 치명적이며 생물농축이 일어나고 마시는 물 오염의 가능성이 있으므로 특별한 관리가 요구된다.

유기물질(Organics)은 밭, 논, 산림, 주거지역 등 광범위한 장소에서 유출되며, 특히 합류식 관거에서는 하수관거 바닥에 침전되어 있던 유기물질이 강우 시 일시에 배출되기도 한다. 공업지역에서는 접착제, 세척제, 용제 등의 인공적인 유기 화합물이 광범위하게 사용되고, 부적절하게 저장되며 폐기되는 과정에서 발생하기도 한다.

제초제, 살충제, 항곰팡이제와 같은 농약(Pesticides)은 플랑크톤과 같은 수생 생물에 축적되어 먹이사슬을 통해 생물농축을 일으켜 어류와 조류에게는 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

협잡물(Gross Pollutants)에는 건축공사장 및 사업장 등에서 발생하는 쓰레기, 잔재물, 부유물 등에서 중금속, 살충제, 박테리아 등이 포함될 수 있다. 낙엽이나 잔디를 깎은 잔재물, 동물의 배설물, 버려진 쓰레기 등은 박테리아, 바이러스 등을 하천·호소로 운반하는 매개체가 되며 용존산소를 감소시켜 어류폐사의 원인이 되기도 한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 비점오염저감시설


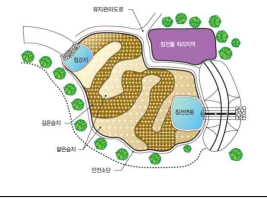
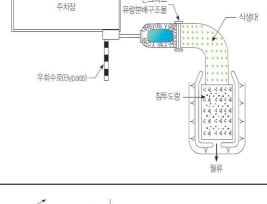
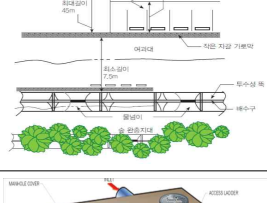
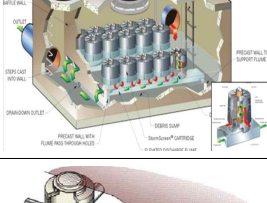
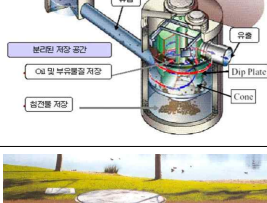
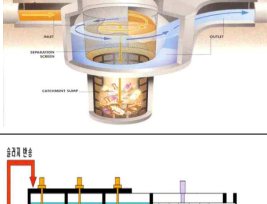
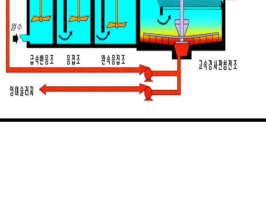
물환경보전법 제2조 제13호에 의하면 비점오염저감시설은 수질오염방지시설 중 비점오염원으로부터 배출되는 수질오염물질을 제거하거나 감소하게 하는 시설을 말한다.

비점오염저감시설을 물환경보전법 시행규칙 별표 6에서 정하고 있으며, 자연형 시설과 장치형 시설로 구분된다. 자연형 시설은 저류시설, 인공습지, 침투시설, 식생형 시설 등이며, 장치형 시설은 여과형 시설, 소용돌이형 시설, 스크린형 시설 응집·침전 처리형 시설, 생물학적 처리형 시설 등이다(Table 2)(환경부, 2016).

2.1.1. 자연형 시설(Natural Facility) 특징

- ① 저류시설(Storage Facility): 강우 유출수를 저류하여 침전 등에 의하여 비점오염물질을 줄이는 시설로 저류지·연못 등을 포함한다.
- ② 인공습지(Artificial Wetland): 침전, 여과, 흡착, 미생물 분해, 식생 식물에 의한 정화 등 자연 상태의 습지가 보유하고 있는 정화 능력을 인위적으로 향상하게 시켜 비점오염물질을 줄이는 시설을 말한다.
- ③ 침투시설(Penetration Facility): 강우유출수를 지하로 침투시켜 토양의 여과·흡착 작용에 따라 비점오염물질을 줄이는 시설로써 유공포장, 침투조, 침투저류지, 침투도랑 등을 포함한다.
- ④ 식생형 시설(Vegetation-forming Facility): 토양의 여과·흡착 및 식물의 흡착 작용으로 비점오염물질을 줄임과 동시에 동·식물 서식공간을 제공하면서 녹지 경관으로 기능하는 시설로서 식생여과대와 식생수로 등을 포함한다.

Table 2. Non-Point Pollutant Control Facilities.

Sortation		Conceptual Diagram
Natural Facility	Storage Facility	
	Artificial Wetland	
	Penetration Facility	
	Vegetation-forming Facility	
Device Type Facility	Filtration Type Facility	
	Eddy Facility	
	Screen Type Facility	
	Cohesion and Sedimentation Facility	

2.1.2. 장치형시설(Device Type Facility) 특징

- ① 여과형 시설(Filtration Type Facility): 강우 유출수를 집수조 등에서 모은 후 모래·토양 등의 여과재를 통하여 걸러 비점오염물질을 줄이는 시설을 말한다.
- ② 소용돌이형(Eddy Facility) 시설: 중앙회전로의 움직임으로 와류가 형성되어 기름·그리스(Grease) 등 부유성 물질은 상부로 부상시키고, 침전할 수 있는 토사, 협잡물은 하부로 침전·분리해 비점오염물질을 줄이는 시설을 말한다.
- ③ 스크린형 시설(Screen Type Facility): 망의 여과·분리 작용으로 비교적 큰 부유물이나 쓰레기 등을 제거하는 시설로서 주로 전처리에 사용하는 시설을 말한다.
- ④ 응집·침전 처리형 시설(Cohesion and Sedimentation Facility): 응집제를 사용하여 비점오염물질을 응집한 후, 침강시설에서 고형물을 침전·분리하는 방법으로 부유물질을 제거하는 시설을 말한다.
- ⑤ 생물학적 처리형 시설: 전처리시설에서 토사 및 협잡물 등을 제거한 후 미생물에 의하여 콜로이드성, 용존성 유기물질을 제거하는 시설을 말한다.

2.2. 연구대상 선정

본 연구에서는 조사대상을 선정하기 위해 인천 관내 비점오염저감시설 36개 지점을 검토하였다. 자연형 시설 중 저류시설 2개 지점, 침투시설 2개 지점과 장치형 시설 중 여과형 시설 25개 지점, 소용돌이형 시설 7개 지점에 대해서 검토하였고 최종 2개 지점을 선정하였다.

대상 선정에서 제외된 지점들은 시료 채취가 불가능한 상태였다. 예를 들면 시설이 지하에 매설되어있거나, 우수배수관과 합류되어 비점오염저감시설만의 효율을 평가할 수 없게 설계된 시설이 있는가 하면, 하천으로 바로 방류되어 유출수를 별도로 채수할 수 없는 시설

등이 있다. 관계 법령에 따르면 비점오염저감 시설 설치 후 모니터링은 분기별로 유입수 및 유출수의 이상 유무를 맨눈으로 검사하고, 연간 1회 이상 유입수 및 유출수의 수질을 분석하도록 되어있으므로 현장에서 채수가 불가능한 시설은 별도의 조치가 필요한 것으로 판단된다. 또한 「비점오염저감시설의 관리·운영기준(제76조 제2항 관련)」에 따라 저감시설의 기능이 정상적으로 유지될 수 있도록 시설 내부의 슬러지 및 협잡물 등은 제거하고, 침투 시설은 토양의 틈새가 막히지 않고 시설 내에 침전물을 주기적으로 제거하는 등의 관리가 수행되어야 하나 거의 이루어지지 않고 있는 것으로 보였다.

최종적으로 선정한 지점은 장치형 시설 중 여과형 시설 2개 지점(A, B)이다. 36개 지점 중



Fig. 1. Point-A and the Surrounding Landscape.

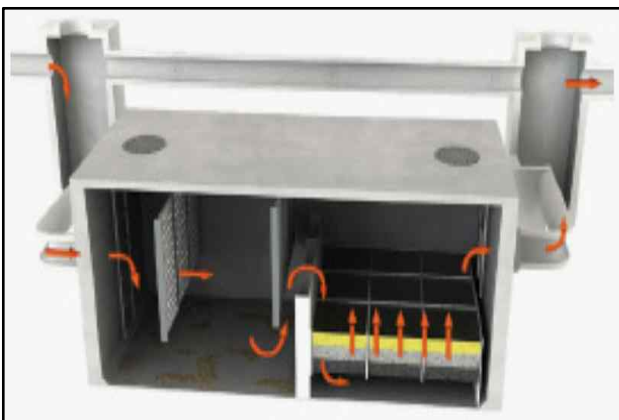


Fig. 2. Processing of R-RCS during Filtration.



Pre-treatment Tank Sludge Dredging



Filter Tank Sludge Dredging



Replace Filter

Fig. 3. Processing of R-RCS during Maintenance.

실질적으로 시료 채수가 가능했던 지점은 3개 지점였으나, 이 중 2개 지점은 같은 시설이므로 최종적으로는 시설 종류가 다른 2개 지점을 선정하게 되었다.

A 지점(Fig. 1)은 2010년 설치한 시설로서, 왕복 6차선, 교량 길이 1.6 km에 해당하는 교량에서 유입되는 우수배관을 통해 차집되는 비점오염저감시설로서 주변에 수도권매립지 및 산업단지 등이 있어 차량의 유동량이 많은 곳이다.

A 지점에 설치된 비점오염저감시설(Fig. 2)은 R-RCS (Road Run-off Pollution Control System)은 입자상여재(제올라이트, 활성탄)를 사용하여 여재의 세척 및 교체 등의 유지관리가 수월하고 멀티필터카트리지 방식으로 다양한 오염물질을 동시에 제거할 수 있다. 이 시설의 처리공정(Fig. 3)은 침전조 내에 오염수가 유입되면 상하류 여과방식으로 여과되어 멀티필터카트리지를



Fig. 4. Point-B and the Surrounding Landscape.

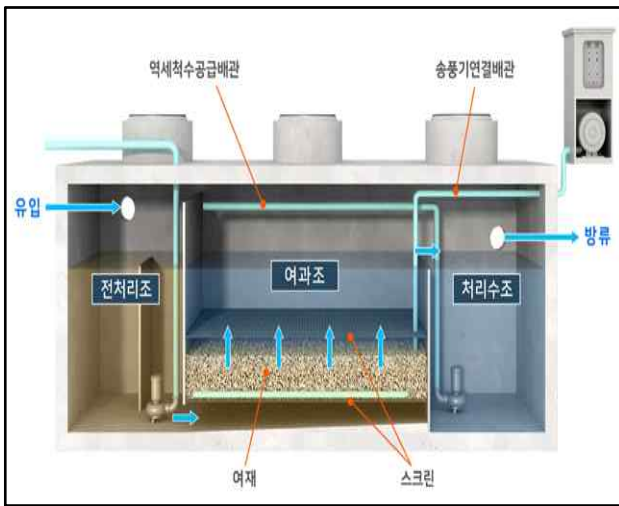
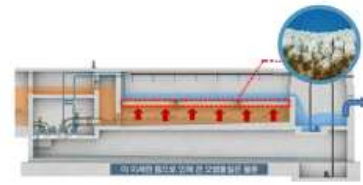


Fig. 5. Filtration Type Facility with Reverse Cleaning Facility.

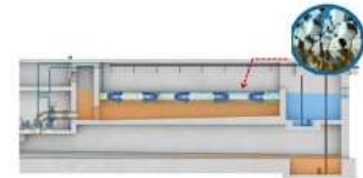
통과하여 여과한 후 처리수가 방류된다. 유지관리는 강우 종료 후 수행하는데 순서는 전처리조의 슬러지 및 정체수를 준설하고 필터카트리지를 분리한 후에 여과조의 슬러지 및 정체수를 준설하고 필터를 교체한다.

B 지점(Fig. 4)은 2015년에 설치한 시설로, 왕복 4차선, 교량 길이 0.06 km에 해당하는 교량에서 유입되는 우수배관을 통해 차집되는 비점오염저감시설로서 시설 부근의 산업단지로 이동하는 차량의 왕래가 잦은 곳이다.

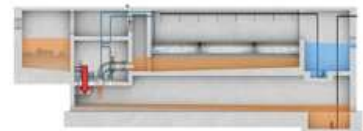
B 지점에 설치된 비점오염저감시설(Fig. 5)은 ECHO BIO-10으로 세라믹 여재를 사용한 역세척 시설을 갖춘 여과형 시설이다.



Filtration Process



Primary Backwash



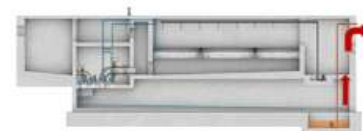
Transfer of Backwash Wastewater



Supply of Treated Water and Secondary Backwash



Transfer of Stagnant Water and Backwash Wastewater



External Connection Treatment of Reverse Washing Wastewater

Fig. 6. Backwash Main Process.

(Fig. 6)은 역세척 시설을 갖춘 여과형 시설의 모식도이다. 초기 우수 유입 때 이를 여과하고 처리하기 위해 설계된 시스템으로 역세척 때에는 강우 종료 후 1차 역세척(공기세척 또는 공기 + 물 세척)을 한 후 2차 역세척(물세척)을 하여 주기적으로 비점오염저감시설 내부를 관리한다.

A 지점과 B 지점에서 각각 4회(6월 15일, 6월 23일, 8월 30일, 11월 28일), 3회(6월 23일, 8월 30일, 11월 28일)에 걸쳐 시료채취를 하였다. 자연형 시설 중 침투시설의 시료채취를 시도하였으나, 지점 주변의 쓰레기 등의 청소와 시설 주변의 제초 작업 미실행으로 유입구 주변에 토사 등의 제거가 되지 않아서 채수할 수 없는 상태였다. 유지관리가 잘 되고 있으면 채수가 가능한 지점이라 효율평가를 하지 못하는 점이 아쉬웠다.

2.3. 시료 분석

강우 시 모니터링은 선행건기 일수 3일 이상을 고려하여 수행하였으며, 도시지역이므로 10 mm 이상 시 모니터링을 진행하였다. 시설의 유입과 유출부에서 수질 및 유량 모니터링을 진행하였으며, 시료 채취 및 보관, 분석 방법은 「환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조에 따라 수질오염공정시험기준(국립환경과학원 고시 제2022-12호)에 준하였다.

강우 초기(강우 시작 ~ 1시간)에는 유출 직전, 5분 후, 10분 후, 15분 후, 30분 후, 60분 후 총 6회 채수하고, 강우 중기(종료 시까지)는 1시간 간격으로 시료를 채수하였다(환경부, 2016).

조사항목은 총 44항목을 진행하였다(Table 3).

일반항목은 수소이온농도, 전기전도도, 노르말핵산추출물질, 부유물질, 총유기탄소, 탁도 항목을 분석하였다.

이온류는 총질소, 총인, 페놀류, 불소화합물, 시안, 염소이온, 황산이온을 분석하였다.

금속류는 구리, 납, 니켈, 망간, 바륨, 비소,
Table 3. Survey Category

Common	pH, Conductivity, n-H, SS, TOC, Turbidity
Ions	TN, TP, Phenols, F, CN, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻
Metals	Cu, Pb, Ni, Mn, Ba, As, Se, Hg, Zn, Sb, Sn, Fe, Cd, Cr
VOCs	1,4-Dioxane, Vinyl Chloride, Acrylonitrile, Bromoform, 1,1-Dichloroethylene, Dichloromethane, Chloroform, 1,2-Dichloroethane, Benzene, Carbon Tetrachloride, Trichloroethylene, Toluene, Tetrachloroethylene, Xylene, Formaldehyde, Naphthalene, Styrene

셀레늄, 수은, 아연, 주석, 철, 카드뮴, 크롬을 분석하였다.

휘발성유기화합물은 1,4-다이옥산, 염화비닐, 아크로니트릴, 브로모포름, 1,1-다이클로로에틸렌, 다이클로로메탄, 클로로폼, 1,2-다이클로로에탄, 벤젠, 사염화탄소, 트리클로로에틸렌, 톨루엔, 테트라클로로에틸렌, 자일렌, 폼알데하이드, 나프탈렌, 스타이렌 항목을 분석하였다.

2.4. 저감시설 효율 평가 방법

비점오염저감시설의 오염물질 제거효율은 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 이용하여 평가하였다. 유량가중평균농도는 비점오염원의 연구에 있어서 전체적인 오염부하량 및 오염부하원단위를 산정하는데 가장 기본적이며 중요한 인자이다. 강우사상 시 오염원의 농도와 유량은 수시로 변화하지만, 이를 농도 관점이 아닌 부하량 관점에서 EMC로 나타낼 수 있으며, 이는 수역에서 강우 유출수의 특성을 나타낼 수 있는 적절한 방법이라고 할 수 있다(Sansalone et al, 1997).

$$EMC(mg/L) = \frac{\text{Discharged Mass during Event}}{\text{Discharged Volume}}$$

$$= \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^t Q_{TRu}(t) dt}$$

where,

$C(t)$ = Pollutant Concentration

$Q_{TRu}(t)$ = Runoff Flow Rate Discharged Time, t

Formula. 1. EMC Calculation Formula.

이것은 강우사상 시 배출되는 오염물질의 총 질량에 배출되는 강우 유출수의 총부피로 나누어 계산할 수 있으며, (Formula. 1)으로 EMC를 산정할 수 있다.

강우 유출수는 강우사상에 따라 유출 유량 및 농도의 변화가 민감하게 나타나기 때문에 강우 초기 빈번하게 채수된 강우 유출수의 오염물질 농도와 측정된 유량이 함께 고려되어야 한다. 유량가중평균농도는 위의 식(Formula. 1)에서 보여주고 있는 바와 같이 강우 시 대상 유역에서 발생한 오염물질의 총량을 강우 유출수의 양으로 나눈 값으로 정의된다.

유량가중평균농도는 강우사상(event)에 따른 유출물이 고려된 유출 오염물질의 평균 농도로 매우 중요한 연구항목이다.

강우사상에 따른 농도 산정 시에는 채수된 수질시료의 분석 결과를 단순평균하면 안 되며 유량이 반영된 유량가중평균농도를 사용하여야 한다. 이는 비점오염원이 점오염원과 비교할 때 갖는 매우 다른 특징 중의 하나이며, 유량가중평균농도가 잘못 산정된 경우는 수십 배 이상의 부하량 차이가 발생할 수 있다. 유량가중평균농도는 전체 강우 지속시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산하며, 비점오염 연구에서의 평균 농도 산정 시 중요하게 이용

되고 있다(최남선, 2012).

2.5. 배출 특성에 대한 평가 방법

초기 강우는 비점오염물질을 처리하고자 하는 최적관리방안 선정 시 중요한 인자로, 초기유출현상(First Flush Phenomena)이란, 일반적으로 강우 초기에 강우 후반보다 오염물질의 농도나 부하량이 더 많이 유출되는 것을 의미한다. 즉 어떠한 오염물질이 일정한 농도로 유출되는 경우, 그것은 누적 유출 유량에 비례하는 오염물질 발생 부하를 표현할 수 있으며, 이때 둘의 관계는 45°의 경사를 갖게 된다. 반면 강우 초기에 높은 오염물질 농도로 유출될 경우, 기울기가 1 이상의 양상이 보이게 되며, 이것을 흔히 First Flush Phenomena가 나타났다고 한다. First Flush Phenomena는 (Formula. 2)를 이용하여 확인할 수 있다(Lee, 2000). 이번 연구에서는 기본수질 항목(TOC, SS, 중금속 등)에 대한 First Flush Phenomena를 살펴보았다.

$$\frac{P_i}{P_t} / \frac{Q_i}{Q_t} > 1 : \text{First Flush}$$

$$\frac{P_i}{P_t} / \frac{Q_i}{Q_t} \leq 1 : \text{No First Flush}$$

where,

$$\frac{P_i}{P_t} : \text{Normalized Cumulative Pollutant Mass Ratio}$$

$$\frac{Q_i}{Q_t} : \text{Normalized Cumulative Pollutant Volume Ratio}$$

Formula. 2. First Flush Phenomena Calculation Formula.

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 강우사상 및 수질특성

모니터링 결과 강우사상의 선행건기일수 (Antecedent dry days, ADD)는 7 ~ 46 일, 누적 강수량(total rainfall)은 20.1 ~ 92.3 mm, 강우 지속시간(rainfall duration)은 16 ~ 23 hr, 평균 강우 강도(average rainfall intensity)는 0.89 ~ 5.77 mm/hr의 범위로 나타났다(Table. 4). 모니터링 결과 A 지점과 B 지점의 수질검사 결과는 (Table. 5)과 같다. A 지점의 경우 6월 15일부터 11월 28일까지 4회에 걸쳐 시료를 채취하였고, B 지점의 경우 6월 23일부터 11월 28일까지 3회에 걸쳐 시료를 채취하였다. A 지점이 B 지점보다 유입수의 농도가 57.0 ~ 87.0 % 높은 수치가 나타나는데 이는 주변 산단과 매립지 등과 같은 오염원이 B 지점에 비해서 더 많고 교량의 폭과 길이가 넓고 길어서 오염원의 유입이 더 많았을 것으로 예상된다.

3.2. EMC를 이용한 저감효율 평가

비점오염원에 대한 유량가중평균농도를 구하여 비점오염저감시설의 저감효율을 산정한 결과는 다음과 같다(Table 6, 7)(Fig. 8, 9).

A 지점의 경우는 E-1, E-2, E-3의 결과를 살펴보면 입자성 물질, 중금속 등 거의 모든 항목에서 저감 효율이 거의 없는 것으로 보인

다. E-1의 효율 평가 결과는 SS의 유입수, 유출수의 EMC 값이 233.2 mg/L, 228.2 mg/L, TOC의 유입수, 유출수의 EMC 값이 28.2 mg/L, 26.4 mg/L로 유입수와 유출수의 수질 차이가 거의 없다. E-2의 결과는 대부분 항목이 유입수보다 유출수의 EMC 농도가 더 높다. 이는 비점오염저감시설의 주기적 관리가 미흡하여 여과조가 오염원에 의해 막히게 되어 강우 유입수가 정화되지 못하고 유출부로 바로 방류되어 오히려 오염원을 퇴적하는 역할을 하게 되므로 유입수보다 유출수의 오염원의 농도가 더 높아지게 된 것으로 판단된다. 특히 E-2는 강수량이 92.3 mm를 기록하며 시간 당 높은 강우 강도를 보였다. 이는 오히려 유출부에 침전물을 부상시키는 역할을 하게 되어 비점오염저감시설의 유입수보다 유출수가 고농도의 수치가 나타나는 원인이 된 것으로 판단된다.

(Fig. 7)은 7월 27일에 실시한 비점오염저감시설의 준설 및 세척 과정을 보여주는 사진이다. 준설 전에는 여과조에 슬러지, 토사 등의 오염원이 쌓여있어 여과조의 형태를 알아볼 수가 없는 상태 였으나, 준설 및 여과조 세척 후에는 분리막, 여과조 등의 구조를 파악할 수 있는 상태이다. 여과조 세척 후 실시한 조사의 결과는 E-3의 EMC 효율은 SS 33.5 %, TOC 35.9 %로 입자성 물질에 대한 높은 효율

Table 4. Table for Monitoring Events.

No. of Event	Event Date	ADD (Days)	Total Rainfall (mm)	Rainfall Duration(hr)	Average Rainfall intensity (mm/hr)
E-1	2022/06/15	45	19.7	22	0.89
E-2	2022/06/23	7	92.3	16	5.77
E-3	2022/08/30	10	34.1	19	1.79
E-4	2022/11/28	15	20.1	23	0.87

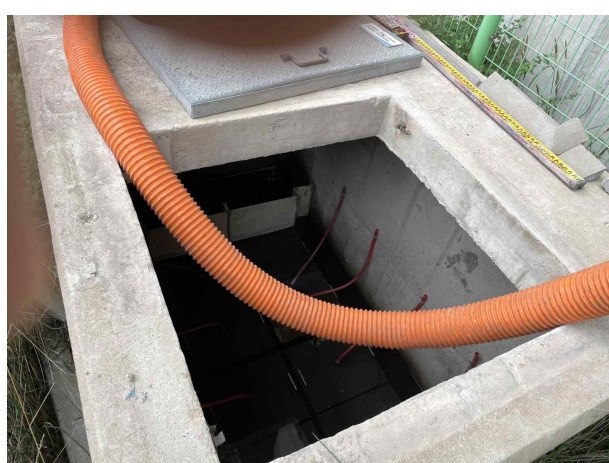
Table 5. Table for Monitoring Events.

Area		pH	EC (μ S/cm)	Turbidity	n-H (mg/L)	SS (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Cl- (mg/L)
Point-A Inflow	Max.	8.7	962	250	30.2	830	87.1	10.5	2.3	182
	Min.	7.0	56	1.5	1.9	71	1.7	0.1	ND	5.3
	Avg.	7.7	341	64.3	6.6	257	27.5	3.1	0.2	51.3
Point-A Outflow	Max.	8.5	718	209	4.6	318	35.8	13.7	1.3	119.0
	Min.	7.3	65	0.1	0.8	31.3	6.1	0.1	ND	5.3
	Avg.	7.7	260	34.3	2.8	146.6	19.2	4.5	0.2	35.9
Area		SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/l)	Ni (mg/L)	Mn (mg/L)	Ba (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	Cr (mg/L)
Point-A Inflow	Max.	68.0	0.196	0.094	0.051	0.862	0.591	1.162	45.048	0.097
	Min.	2.1	0.026	0.014	0.007	0.108	0.065	0.195	5.032	0.016
	Avg.	22.1	0.072	0.033	0.018	0.293	0.204	0.431	14.432	0.037
Point-A Outflow	Max.	50.8	0.107	0.039	0.030	0.348	0.289	0.576	18.808	0.052
	Min.	2.8	0.023	0.004	0.006	0.111	0.078	0.099	2.083	0.004
	Avg.	15.8	0.052	0.022	0.012	0.210	0.150	0.306	9.518	0.029
Area		pH	EC (μ S/cm)	Turbidity	n-H (mg/L)	SS (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Cl- (mg/L)
Point-B Inflow	Max.	7.9	280	103	3.8	298	26.3	4.3	0.1	34.4
	Min.	7.2	60	1.2	1.0	3.6	4.9	0.1	ND	2.1
	Avg.	7.5	129	17.7	2.4	47.2	11.7	1.7	ND	12.2
Point-B Outflow	Max.	7.7	229	31.1	3.5	48.5	14.9	3.0	0.1	55.3
	Min.	7.2	70	1.2	ND	2.3	0.7	ND	ND	0.4
	Avg.	7.5	100	7.8	1.6	10.0	5.9	0.7	0.03	5.2
Area		SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/l)	Ni (mg/L)	Mn (mg/L)	Ba (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	Cr (mg/L)
Point-B Inflow	Max.	18.3	0.211	0.027	0.016	0.226	0.162	0.459	12.881	0.032
	Min.	3.7	0.002	ND	ND	0.005	0.016	0.037	0.138	ND
	Avg.	7.9	0.061	ND	ND	0.050	0.044	0.139	2.459	0.006
Point-B Outflow	Max.	15.2	0.232	0.005	0.003	0.068	0.041	0.096	2.859	0.005
	Min.	2.6	ND	ND	ND	0.005	0.01	0.012	0.085	ND
	Avg.	5.2	0.040	ND	ND	0.015	0.016	0.033	0.758	ND

※ Items other than the table are not detected or below the quantitative limit.

Table 6. Evaluation of the Reduction Efficiency of Point-A.

No. of Event		SS (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)
E-1	Inflow EMC(mg/L)	233.2	28.2	0.882	14.548	0.073	0.413	0.270
	Outflow EMC(mg/L)	228.2	26.4	0.552	45.687	0.070	0.425	0.292
	Reduction efficiency(%)	2.1	6.4	37.4	-	4.1	-	-
E-2	Inflow EMC(mg/L)	114.8	7.3	1.426	7.388	0.040	0.319	0.152
	Outflow EMC(mg/L)	176.9	14.8	5.893	9.249	0.042	0.375	0.178
	Reduction efficiency(%)	-	-	-	-	-	-	-
E-3	Inflow EMC(mg/L)	141.4	11.7	0.564	8.685	0.056	0.568	0.169
	Outflow EMC(mg/L)	94.0	7.5	0.251	7.493	0.046	0.251	0.153
	Reduction efficiency(%)	33.5	35.9	55.5	13.7	17.9	55.8	9.5
E-4	Inflow EMC(mg/L)	298.9	39.7	7.371	15.259	0.058	0.419	0.383
	Outflow EMC(mg/L)	46.7	18.7	9.701	2.368	0.034	0.128	0.165
	Reduction efficiency(%)	84.4	52.9	-	84.5	41.4	69.5	56.9



Before



After

Fig. 7. Dredging and Cleaning of Filter.

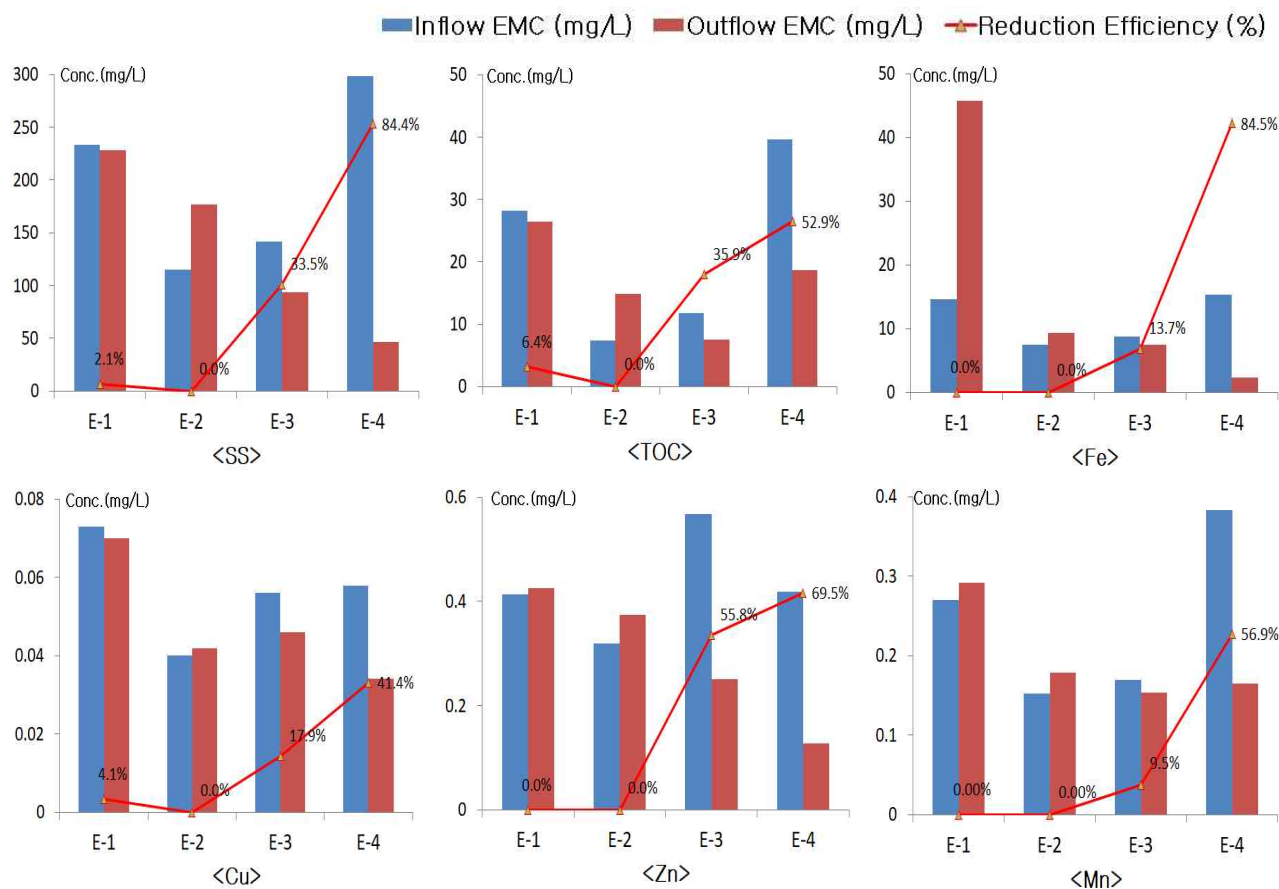


Fig. 8. Evaluation of the Ron Efficiency of Point-A.

Table 7. Evaluation of the Reduction Efficiency of Point-B.

No. of Event		SS (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)
E-2	Inflow EMC(mg/L)	75.0	9.3	2.160	3.413	0.123	0.164	0.067
	Outflow EMC(mg/L)	24.7	10.3	1.608	1.118	0.126	0.055	0.032
	Reduction efficiency(%)	67.1	-	25.6	67.2	-	66.5	52.2
E-3	Inflow EMC(mg/L)	9.2	7.9	0.224	0.703	0.009	0.056	0.014
	Outflow EMC(mg/L)	3.4	5.9	0.113	0.216	0.005	0.014	0.009
	Reduction efficiency(%)	63.0	25.3	49.6	69.3	44.4	75.0	35.7
E-4	Inflow EMC(mg/L)	77.3	10.0	1.803	4.277	0.055	0.245	0.083
	Outflow EMC(mg/L)	5.1	0.8	0.128	1.004	0.017	0.039	0.009
	Reduction efficiency(%)	93.4	92.0	92.9	76.5	69.1	84.1	89.2

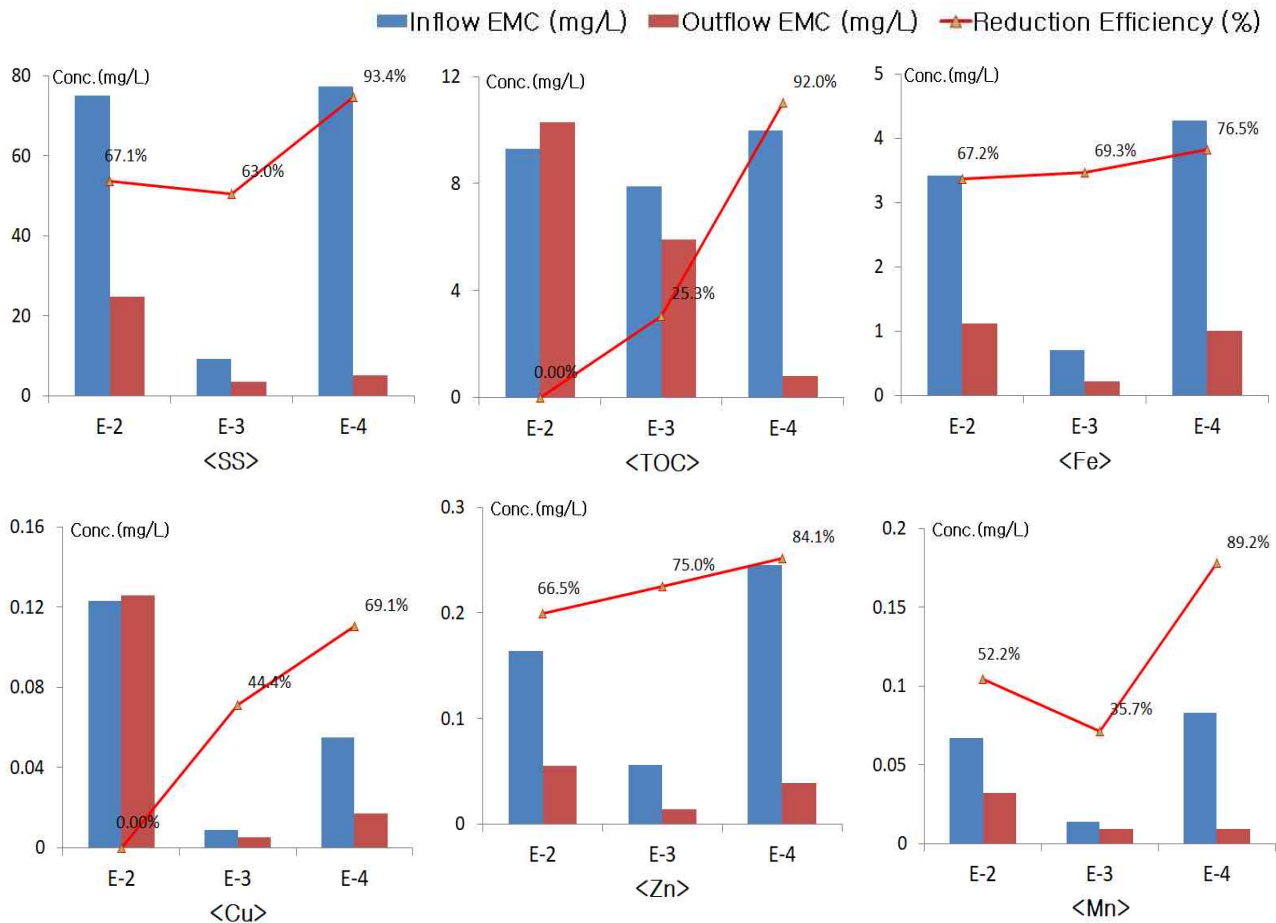


Fig. 9. Evaluation of the Reduction Efficiency of Point-B.

을 확인 할 수 있다. 중금속의 경우 9.2 ~ 55.8 %의 효율이 나타났다.

E-4의 EMC 효율은 SS 84.4 %, TOC 52.9 %로 입자성 물질에 대한 높은 효율을 확인할 수 있다. 중금속의 경우 41.4 ~ 84.5 %의 효율이 나타났다.

역세척 시설인 B 지점은 3회(E-2, E-3, E-4)에 걸쳐 조사를 진행하였다. 강수량이 92.3 mm이었던 E-2의 EMC 효율은 SS 67.1 %, TN 25.6 %, Fe 67.2 %, Zn 66.5 %, Mn 52.2 %를 나타냈다. 이는 효율이 거의 없던 A 지점과 비교가 되는 현상으로 세척 여부의 중요성을 인지할 수 있는 부분이다.

E-3(강수량 34.1 mm)의 EMC 효율은 SS 63.0 %, TOC 25.3 %, TN 49.6 %, Fe 69.3 %, Cu

44.4 %, Zn 75.0 %, Mn 35.7 %로 나타났다.

E-4(강수량 20.1 mm)의 EMC 효율은 SS 93.4 %, TOC 92.0 %, TN 92.9 %, Fe 76.5 %, Cu 69.1 %, Zn 84.1 %, Mn 89.2 %로 나타났다. 이는 강우에 의한 차이로 보이는데 강수량이 92.3 mm이었던 E-2가 전반적으로 가장 EMC 효율이 낮은 것으로 보이고 강수량이 20.1 mm이었던 E-4의 효율이 69.1 % ~ 93.4 %를 보였다. 연간 인천의 연강수량이 1207.4 mm (평년값 1991 ~ 2020, 기상청)이다. 연강수량 대비 강수량이 많았던 E-2의 EMC 효율이 낮은 점으로 판단할 때, 장마철이나 강수량이 많을 때는 비점오염저감시설로 들어오는 유입수가 overflow 되어 처리되지 않고 유출수에 차집될 것으로 판단된다.

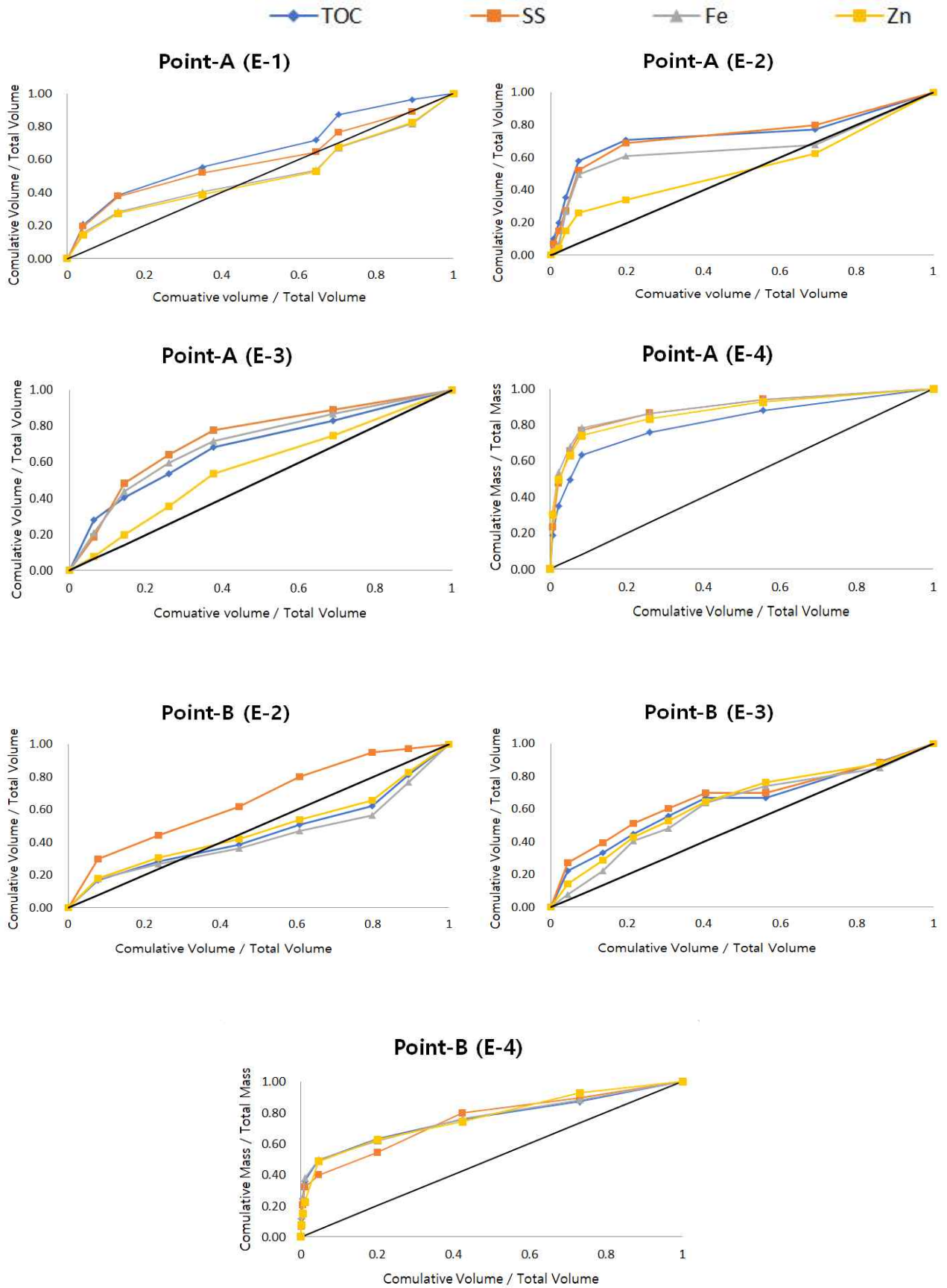


Fig. 10. First Flush Phenomena of Point-A and Point-B.

3.3. 배출 특성에 대한 평가

비점오염물질이 강우에 의한 유출 시 유출 초반에 고농도를 나타내는 것을 First Flush 현상이라고 한다. 이는 각 강우사상별 유출 유량과 오염물질을 부하 단위로 환산하고, 이를 다시 상대 누적 유출 유량과 부하량 단위로 환산하여 초기 유출 정도를 점검하는 것이다. (Fig. 10)에서 각 그림 내 대각선은 일종의 First Flush 검량선이다. 일정한 부하량으로 유출이 진행되었을 경우 데이터 표식이 대각선과 같은 기울기로 나타나지만, 유출 초반에 많은 양의 오염물질이 유출될 경우는 대각선 위로, 유출 후반에 많은 양의 오염물질이 유출될 경우는 대각선 아래로 데이터 표식이 나타나게 된다(박상우, 2007).

(Fig. 10)을 살펴보면 SS, TOC인 입자상 물질과 대표 중금속(Fe, Zn)의 다수 표식이 검출선 위로 나타나 높은 초기 유출률은 나타내고 있으며, 특히 A 지점과 B 지점의 E-4일 때 그래프는 First Flush 현상을 매우 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이는 도로 노면에 쌓인 오염물 대부분이 강우 초기에 유출됨을 의미한다. 또한 초기 유출수의 입자상 물질과 중금속의 유입 농도가 높은 점을 감안하면 초기 유출수의 오염도가 매우 심각하며, 이러한 초기 유출수가 하천이나 호소 등으로 직접 유입할 시 생태환경에 상당한 오염을 초래할 것으로 예측된다.

IV. 결론

이번 조사는 인천지역 비점오염저감시설 중 2개 지점에서 강우 시 4회에 걸쳐 유입과 유출부에서 수질(SS, TOC, TN, 중금속 등 44개 항목) 시료 채수 및 유량 모니터링을 진행하였다.

이를 통해 유량가중평균농도를 산정하여 시설의 효율을 평가하고 배출특성에 관한 연구를 진행하였다.

1. 실질적으로 시료를 채수할 수 있는 적합한 환경의 비점오염저감시설이 많지 않아 연구사업을 수행하는 데 어려움이 있었다. 지하에 매설되어있어 시료를 채취하기 위험한 시설, 유출부가 하천이나 호소와 직접 연결된 시설, 오수와 합류되어 비점오염저감시설만의 효율을 판단할 수 없는 시설 등의 시설들은 법에서 제시하는 정기적 관리를 할 수 없으므로 이 부분에 대한 개선 및 변경이 필요한 것으로 보인다.
2. 비점오염저감시설은 환경부, 지방자치단체에서 비점오염저감사업의 하나로 2008년부터 설치를 시작하여 시설의 수는 증가하고 있으나 관리 주체가 시설에 따라 상이하여 체계적인 관리가 이루어지고 있지 않다. 또한 운영시설의 다수가 여과형 시설로 여재 교체 등 유지관리에 큰 비용과 인력이 필요하나 예산과 인력 등의 문제로 관리가 잘 이루어지고 있지 않아 지속적 관리를 위한 장기적이고 체계적인 계획이 필요하다.
3. 유량가중평균농도를 통한 비점오염저감시설의 저감효율은 시설의 유지관리와 강수량에 따라 큰 편차를 나타내었다. 유입수보다 유출수의 농도가 더 높아 효율 산정이 불가능한 경우부터 최고 효율이 SS 93.4 %, TN 92.9 %, TOC 92.0 %, Mn 89.2 %, Fe 84.5 %, Zn 84.1 %, Cu 69.1 %까지 나타났다. 이는 비점오염저감시설을 최적화된 조건을 잘 유지하면 비점오염원의 하천, 호소 등으로의 유입을 줄이는데 큰 역할을 할 수 있음을 의미한다.
4. 이번 조사사업을 통해 비점오염물질의 강우 유출 시에 First Flush 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 강우 발생 시 도로 노면 등에 쌓인 오염물 대부분이 강우 초기에 유출되는 것을 의미한다. 이들 초

기 유출수의 오염도는 매우 높은 농도이므로 비점오염저감시설을 통하여 고농도의 유출수가 하천이나 호소 등으로 방류되는 것을 방지해야 하고 따라서 저감시설의 설치와 유지, 관리의 필요성을 다시 한번 확인할 수 근거가 된다.

비점오염원은 원인행위자의 구분이 불명확한 경우가 많고 그 대상은 한정하기가 어려워 그 관리와 책임의 주체가 공공기관이 되어 통합적인 관리가 추진해야 한다. 그와 관련한 비점오염원의 관리를 위한 대책 중에 하나로 비점오염저감시설을 설치하고 운영하고 있다. 비점오염저감시설은 지속적인 관리를 통해 오염물을 제거효율을 높일 수 있다. 최적화된 조건에서의 비점오염저감시설 관리를 통하여 물순환 구조 개선, 침수예방, 경관 개선 등의 다양한 효과를 거두고 도심 환경문제 완화, 발생원별 최적관리를 통한 수생태계 건강성 회복과 깨끗하고 안전한 물관리 체계가 구축될 것 기대한다.

본 연구는 환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축사업의 지원을 통한 연구사업으로 실시되었다.

V. 참고문헌

1. Lee, Bang(2000), Characterization of Urban Stormwater Runof, Water Research, 34(6), 1773-1780.
2. Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G. (1997), Characterization of Solid and Metal element Distributions in Urban Highway Stormwater, Wat. Sci. & Tec. 36, 155-160.
3. Vladimir Novotny(1994), Integrated water quality management, Water Science and Technology, 33, 4-5.
4. 박상우, 오재일, 최명화, 서정우(2007), 도로 노면 유출수의 비점오염원 배출특성(1), 상하수도학회지, 225-233.
5. 박상우, 오재일, 최명화, 김종화, 하재원 (2007), 도로 노면 유출수의 비점오염원 배출특성(2), 상하수도학회지, 235-242.
6. 최남선(2012), 준도시 소유역의 비점원 오염 유출특성 및 부하량 산정에 관한 연구, 강원대학교.
7. 최혜선, 전민수, 김이형(2020), 비점오염저감 시설 설치사업의 효과평가, 2020 한국수자원학회 학술발표회, 206.
8. 환경부(2016), 비점오염저감시설의 설치 및 관리운영 매뉴얼.
9. 환경부(2020), 제3차(2021~2025) 강우 유출 비점오염원관리 종합대책.