초기 강우에 의한 도시 유역 비점오염 부하의 유입 저감을 위한 침강 처리 시설 적용 타당성 분석

Effectiveness of Settling Treatment System to Reduce Urban Nonpoint Source Pollutant Load by First Flush

김재영 · 서동일[†] · 이동은

Jaeyoung Kim · Dongil Seo[†] · Tongeun Lee

충남대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received December 13, 2016; Revised February 30, 2017; Accepted March 3, 2017)

Abstract : The effectiveness of the first flush treatment system using settling process was evaluated to reduce urban nonpoint source pollutant loads to surface water during storm events. A pilot scale system was constructed and tested in the field and surface runoff samples were collected automatically according to pre-defined conditions. Nine rainfall events were tested and average removal efficiencies of TSS (Total Suspended Solid), TP (Total Phosphorus) and TN (Total Nitrogen) were evaluated as 87.4%, 75.3%, and 43.6%, respectively. Concentration and removal efficiency of pollutants were found to be affected by an amount of rainfall and rainfall intensities of the respective events. This seemed to be caused by the greater particulate fractions of first flushed samples than the samples collected in later time periods during the same rainfall events. The study showed that it is possible to remove a significant portion of the nonpoint source pollutant loads in initial rainfall runoff by using a simple settling process for TSS and TP without requiring additional power or chemicals.

Key Words : Stormwater Runoff, First Flush, Nonpoint Source Pollutant, Settling, Urban Basin

요약 : 강우 초기 표면 유출에 의해 지표수로 전달되는 비점오염물질을 저감하기 위하여 고안된 초기우수처리 장치의 효율을 분석하였다. 장치는 파일럿 규모로서 실험실 수준의 분석 결과에 근거하여 설계되었다. 강우시 사전에 설정된 조건들에 따라 실험 장치로 채수를 실시하였으며, 24시간 동안 정치하여 침강에 의해 오염물질을 제거한 상등수의 수질을 측정하여 효과를 분석하였다. 총 9번의 강우에 대하여 평균적인 제거 효율은 총고형물질(Total Suspended Solid, TSS), 총인(Total Phosphorus, TP) 그리고 총질소(Total Nitrogen, TN)에 대하여 각각 87.4%, 75.3% 및 43.6%로 나타났다. 초기 강우 유출수 오염물질의 농도는 강우량과 강우강도가 증가함에 따라 증가되는 것으로 분석되었다. 이는 강우 초기 각 오염물질의 고형물질의 비율이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 초기 강우시 발생하는 유출수에 의한 오염부하의 상당부분을 단순한 침강만으로 효과적으로 제거할 수 있다는 것을 검증하고자 하였으며, 특히 추가의 동력이나 화학물질의 투입 없이도 고형물질 비율이 높은 TSS와 TP의 제거 효율이 우수한 것으로 나타났다.

주제어 : 강우유출수, 초기세척, 비점오염물질, 침강, 도시유역

1. 서론

사람들의 활동이나 자동차의 주행 등에 의해 도시 표면에 축적되는 폐기물 중에는 토사나 중금속, 유기 물질 및 기름 등 인체에 유해하거나 난분해성 물질들이 포함되어 있다. 강우에 의해 씻겨나간 오염물질들은 분류식 하수관거 시스템에서 우수거를 통해 하천에 직접 유출되고, 합류식 관거의 경우 하수처리장에서 처리하지 못하는 부분은 하천으로 직접 방류되어 수질을 오염시키거나 하천 바닥에 퇴적되어 지속적인 오염의 원인이 되기도 한다.¹⁾ 우리나라의 하수처리장 및 하수관거의 보급률은 2014년을 기준으로 각각 92.5% 및 77.8%로 보고되며, 과거에 비하여 개선된 반면 강우 등 비점오염원에 의한 오염물질 배출 비율이 점진적으로 증가하는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 정부 합동 연구진은 국내 대부분의 지역에서 비점오염원에 의해 배출되는 수질오염 부하량은 전체의 약 70%

정도에 이른다고 보고한 바 있다.³⁾ 특히 강우 초기에 발생하는 초기세척효과(first flush effect)는 단시간에 많은 양의 오염물질을 포함하여 방류되기 때문에 강우에 의한 오염부하의 상당 부분을 차지할 수도 있는 것으로 보고된 바 있다.⁴⁾ 강우시 발생하는 비점오염물질을 적절하게 대응하여 처리하지 않는 경우 우리나라 소하천은 물론 중규모 및 4대강 그리고 해양까지 오염시킬 수 있으며, 수계의 부영양화는 물론 독성물질과 난분해성 물질에 의한 오염 현상에도 가장 중요한 원인으로 분석된다.⁵⁾ 그렇지만 비점오염물질의 배출특성은 시기와 장소에 따라 다양한 조건에서 변하며 진단 및 대책을 위한 자료가 충분하지 않으므로 효율적인 관리에 많은 어려움이 있는 것으로 분석된다.⁶⁻⁹⁾ 반면, 비점오염부하의 영향을 파악하고 이에 대한 대책을 제시하기 위한 다양한 연구가 시도되어 왔다. Lee 등¹⁰⁾은 Vortex Screen 장치를 이용하여 강우유출수 내 미세입자 처리 특성에 대한 관찰 결과를 보고하였다. Jung

[†] Corresponding author E-mail: seodi@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6679 Fax: 042-822-5610

등¹¹⁾은 우리나라 오염총량 관리를 위해 유수지의 크기에 대한 연구를 통해 비점오염 물질을 제어하는 안을 제시한 바가 있다. Kang and Baek¹²⁾은 비점오염부하를 저감하는 시설 중 자연형 시설의 유형별 식생현황을 조사하여 연구한 바가 있다. 한편, Kang and Lee¹³⁾는 SWMM을 이용하여 자연형 비점오염 저감시설의 모의 방법을 제시하기도 하였다. 환경부에서는 비점오염 저감시설의 설계 시 필요한 인자와 적절한 관리 방법 등을 제시하고자 비점오염 저감시설의 설치 및 관리 운영을 위한 설명서¹⁴⁾를 발간한 바가 있다. 국내외에서 다수의 연구가 수행되고 방법 및 시설들이 개발되어 왔지만 처리시설의 설치 및 유지 관리 비용 등의 문제로 아직까지 비점오염부하에 대한 체계적인 관리가 효과적으로 이루어진다고 보기는 어렵다.¹⁵⁾

본 논문에서는 강우시 도시유역에서 하천으로 전달되는 오염물질 부하량을 저감하고자 초기우수 처리시설을 개발하고 실험실 수준의 실험을 거쳐¹⁶⁻¹⁹⁾ 현장 적용가능성을 검증하기 위하여 파일럿 규모로 수행된 결과를 보고하고 있다. 또한, 본 연구진들은 초기우수 처리시설을 제어하고 관리하기 위한 시스템²⁰⁾을 제안한 바 있다. 본 연구의 결과는 도시 유역에서 강우에 의한 비점오염물질을 제어하는 데 있어서 설치 및 유지관리 양면에 효율적인 방법론을 제시함으로써 지표수 수질관리에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1. 연구대상지역

대전광역시 관평동에 위치한 관평천은 금강으로 유입되는 갑천 하류의 지천으로서 유로연장 5.54 km에 유역면적은 10.85 km²의 소규모 도시 하천이다. 관평천의 유역은 2005 년경 개발되어 주거, 상업지역, 연구시설 및 산업시설로 구성된 하류와 오랫동안 그린벨트 지역으로서 아직 개발이 적극적으로 이루어지지 않은 상류지역으로 구분된다. 본 연구에서는 관평천 유역 중 주거 및 상업 지역이 주로 형성되어 있는 소유역 안의 분류식으로 이루어진 우수거 말단에서 연구를 수행하였다.

2.2. 초기우수처리 시설

Fig. 1은 본 연구에서 제안된 초기우수처리 시설(FiRM, First Flush Management System)의 개념도 및 현장 실험을 위해 설치된 실험 장치를 보여 주고 있다. 강우 발생시 초기우수를 처리하기 위한 이 시설은 입구에 조대형 고형물질 유입 제어를 위한 전처리 시설, 침전조 역할을 하는 호퍼와 관 그리고 여과조 역할을 하는 다단 섬유 필터 시스템으로 이루어져 있다. 이 시설은 하천의 둔치 지하 또는 유수지의 바닥 등에 설치할 수 있으며, 전체의 수량은 수위차를 이용하여 중력에 의해 이동하므로 동력이 소요되지 않는다. 또한, 침강이라는 자연의 자정작용을 이용함에 따라 오염물질을 제어하는 데에 약품이 소요되지 않는 장점이 있다. 현장 실험을 위한 초기우수 처리시설의 크기는 파일럿 규모로 제작되었으며 침전조 역할을 하는 호퍼 3개와(L 0.3 m, W 0.3 m, H 0.5 m) 4개의 관(L 1 m, W 0.15 m, H 0.15 m)으로 구성되어 있다. 마지막 단의 여과조의 경우 3개의 필터시스템(L 0.3 m, W 0.3 m, H 0.35 m)으로 이루어져 있다. 이 시설에 대한 실험실 수준의 연구 결과는 Seo and Kim¹⁶⁾에 의해 자세하게 보고된 바 있다. 또한, 본 연구와 관련하여 여과 시설의 기본적인 개념 및 효율은 Koo 등²⁰⁾에 의해 보고된 바 있으며 본 연구에서는 침강장치에만 국한하여 기술하고자 한다. 한편 도시 표면에 도달한 빗물은 지하로 스며드는 비율이 감소하기 때문에 지하수위 또한 감소하여 하천의 유지 유량이 작아지는 부작용이 발생하고 있다. 침강시설에 의해 처리된 도시 강우 유출수는 처리 즉시 방류될 수 있지만 하천의 건천화를 대비해 처리된 유출수를 위한 둔치 지하의 저류조로 활용할 수 있으며 하천의 상황이나 후속되는 강우의 조건에 따라 하천으로 방류될 수 있다. Fig. 2는 초기우수처리 시설을 운영 관리 하는 강우유출수 종합관리시스템(ISTORMS)의 흐름도와 사용자 편의시스템(Graphic User Interface)의 화면 중의 하나를 예시로 보여주고 있으며, 현장이나 실내에서 이를 통해 사용자가 직접 혹은 자동으로 시설을 운영할 수 있다.

2.3. 실험 방법

Fig. 1과 같이 현장에 설치된 침강장치의 성능 검증을 위

Fig. 1. (a) Conceptual design of first flush management system(FiRM) (b) Pilot scale treatment system installed inside stormwater monitoring system.

Fig. 2. (a) Flow of the ISTORMS (integrated stormwater runoff management system) and (b) a Screen capture of a graphic user interface of ISTORMS.

Table 1. Characteristics of rainfall events before collecting samples

Date	Total Rainfall (mm)	Duration (hr)	Average Rainfall Intensity (mm/hr)	Dry Days (day)
2015. 03. 18.	10.2	6.83	1.49	4.83
2015. 08. 25.	2.2	0.83	2.64	0.07
2015. 10. 01.	3.6	1.17	3.09	19.31
2015. 11. 07.	2.4	0.75	3.20	12.00
2016. 03. 04.	3.4	0.58	5.83	0.77
2016. 07. 16.	14.4	0.17	86.40	3.71
2016. 08. 26.	3.6	0.75	4.80	2.42
2016. 09. 27.	3.4	1.92	1.77	8.87
2016. 10. 07.	2.4	3.75	0.64	2.22

해 본 현장에서 시료를 채취하여 성능분석을 실시하였다. 실험 대상 조건은 기존의 관찰 결과^{16,22)}와 Han and Seo²³⁾가 제시한 “강우시 발생하는 강우유출수 및 관평천의 수질농도는 초기에 급격히 상승하다 4~6시간 이내에 안정적인 수준으로 감소한다.”는 결과를 바탕으로 강우 초기에 5분 동안 20 m³ 이상 유출되는 경우를 의미 있는 유출로 설정하였다. 유출된 강우유출수를 저장하기 위한 파일럿 규모의 초기우수처리 시설 침강장치의 용량은 약 230 L이며 정량 펌프로 가득 채우는 데에는 약 3.5분가량 소요되었다. 채취된 유출수는 Seo 등¹⁹⁾이 제시한 “강우시 발생하는 강우유출수의 오염물질은 24시간 이내에 침강을 통하여 제거된다.”는 연구결과를 바탕으로 24시간 동안 침강을 수행하였다. 침강이 완료된 강우 유출수의 상등수를 채수하여 TSS, TN과 TP 농도를 각각 분석하여 오염물질 제거 효율을 분석하였다. 본 실험은 2015년에 4회, 2016년 5회 등 총 9회에 걸쳐 수행되었으며 후반부 5회의 강우에 대해서는 시간별 유입 유량과 수질에 대한 실측이 병행되었다. 시료 채취 당시 해당 강우 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

2.4. 강우 유출 수질 분석

초기우수처리시설의 설계 인자 및 운영 조건 등을 수립하

기 위해 각 강우사상에 따른 강우유출수의 유량 및 비점오염물질 농도를 측정하고 다음과 같은 세 가지의 분석 방법을 사용하였다. 일반적인 강우유출수가 지표수에 미치는 영향을 산정하기 위해 유량가중평균농도(event mean concentration, EMC), 초기유출부하량 비(mass first flush ratio, MFF) 그리고 비점오염원 비(cumulative pollutant load ratio, CPLR)를 사용하였다.

2.4.1. 유량가중평균농도(event mean concentration, EMC)

일반적인 강우유출수가 지표수에 미치는 영향을 산정하기 위해 식 (1)과 같은 유량가중평균농도인 EMC(Event Mean Concentration)²⁵⁻²⁸⁾를 사용하는 경우가 가장 일반적이다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} C(t) \cdot Q(t)}{\sum_{t=0}^{t=T} Q(t)} \quad (1)$$

C(t) = t시간에서의 오염물질의 유출농도(mg/L)

Q(t) = t시간에서의 유출량(m³/s)

2.4.2. 초기세척질량비(mass first flush ratio, MFF)

Park 등²⁹⁾은 초기 t시간까지 유출되는 유량에 대한 오염 물질의 질량비를 분석하여 초기유출량의 20%에서 40%가량의 총 부하량이 유출되는 것으로 보고한 바 있다.

$$MFF = \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q(t) dt}{\frac{M}{\int_0^t Q(t) dt}} \quad (2)$$

M = 유출된 총 오염부하량(g)

V = 유출된 총 유출유량(m³)

C(t) = t시간에서의 오염물질의 유출농도(mg/L)

Q(t) = t시간에서의 유출량(m³/s)

2.4.3. 누적오염부하량비(cumulative pollutant load ratio, CPLR)

Bertrand-Krajewski 등³⁰⁾과 Deletic³¹⁾이 도시 지역에서 빗물에 의한 초기세척효과를 분석하기 위해 다음의 식과 같은 누적 오염부하량 비를 이용한 바 있으며 우리나라에서는 조재현과 서형준³²⁾이 강원도 영랑호로 유입되는 오염부하량의 특성을 파악하기 위해서 사용된 바 있다. 누적 오염부하량 비는 어느 강우 사상에서 총오염부하량에 대한 특정 시간까지 오염부하량의 비로서 무차원의 지표이다.

$$CPLR(\%) = \frac{\int_0^{t_1} C(t) \cdot Q(t) dt}{\int_0^T C(t) \cdot Q(t) dt} \times 100 \quad (3)$$

C(t) = t시간에서의 오염물질의 유출농도(mg/L)

Q(t) = t시간에서의 유출량(m³/s)

3. 결과분석

3.1. 강우유출 특성 분석

Fig. 3은 앞서 보고한 9가지의 강우 사상 중 연속 샘플링이 수행된 5개의 강우 사상을 시간에 따라 실측된 유출유량과 TSS, TN 및 TP의 농도를 나타낸 것이다. 강우 사상에 따라 다소 차이가 나타나지만, 기존에 보고된 바와 같이^{16,22,23)} 유출강우 전반적으로 모두 초기에 수질농도가 모두 높게 나타나고 시간이 지날수록 감소하는 경향이 나타났다.

3.2. 유량가중평균농도(EMC) 산정 결과

5가지 강우 사상에 대한 EMC 분석 결과는 평균적으로 TSS는 27.6 mg/L, TN 1.88 mg/L 그리고 TP 0.271 mg/L로 도출되었다. Table 2의 EMC를 비교해 볼 때, 총 강우량, 강우 지속기간 및 강우 강도가 증가함에 따라 수질 농도는 감소하는 경향으로 나타났다.

3.3. 초기세척질량비(MFF) 산정 결과

Table 3의 결과는 각 강우 사상의 최고 유량이 0.5~1.67 m³/s의 범위로 분석되었으며, 이때 발생한 총 유량은 전체의 26.5~51.5%로 도출되었다. 각 강우 사상에서 최고 유량이 나타나는 시점을 기준으로 보았을 때, 초기세척 비율과 오염물질 부하량은 평균적으로 TSS 1.2, 50.9%, TN 1.1, 46.9% 그리고 TP 1.0, 42.5%로 나타났다. 특히 2016. 09. 27.과 2016. 10. 07.의 두 날짜의 강우 사상은 초기 강우유출수에 가장 많은 오염물질 부하량을 포함하는 것으로 나타났으며, 침투 유량이 발생할 때 다른 강우 사상보다 유출된 유량의 비율이 더 큰 것이 특징이다.

Table 2. EMC for stormwater events

	Total rainfall (mm)	Storm duration (hr)	Average rainfall intensity (mm/hr)	TSS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
2015. 10. 01.	44.0	11.4	3.86	12.86	2.00	0.239
2016. 03. 04.	5.6	1.7	3.29	54.35	2.42	0.650
2016. 08. 26.	27.2	3.6	7.56	22.54	2.65	0.138
2016. 09. 27.	25.6	6.7	3.82	30.44	1.27	0.188
2016. 10. 07.	51.4	17.3	2.97	17.78	1.07	0.140

Table 3. MFFn for stormwater events

	2015. 10. 01.	2016. 03. 04.	2016. 08. 26.	2016. 09. 27.	2016. 10. 07.
Peak flow (m ³ /s)	1.64	0.50	1.67	1.22	0.89
n : Peak (%)	26.5	41.4	41.1	47.8	51.5
MFF _{Peak}	TSS	1.3	0.9	1.2	1.4
	TN	1.3	0.9	1.0	1.2
	TP	1.4	0.4	0.9	1.1
Mass (%)	TSS	34.6	36.0	49.7	64.0
	TN	34.8	36.3	41.6	59.0
	TP	35.8	17.5	36.3	65.8

Fig. 3. Precipitation, hydrographs and concentration graphs of TSS, TN and TP during rainfall events in the study site.

Fig. 4. Cumulative pollutant load ratio of stormwater events of this study.

3.4. 누적오염부하량비(CPLR) 산정 결과

Fig. 4에 나타난 바와 같이 본 연구에서 검토된 대부분의 강우 사상에서 TSS, TN 및 TP 오염물질의 도달률은 유사한 경향을 나타낸다. 강우유출수의 오염물질 부하율이 50%가 되는 시점은 (a)~(c)는 최고유량 발생 이후에 (d)~(e)는 최고 유량 발생 이전에 나타나는 것으로 관찰되었다.

3.5. 초기우수 처리시설 오염물질 제거 능력 평가

초기우수 처리시설 침강장치의 오염물질 제거 효과는 Table 4에 나타난 바와 같다. 침강으로 제거되는 오염물질 제거율은 TSS 75.0~96.0%, TN 0.0~85.2%와 TP 29.4~92.5%의 범위로 나타났으며 평균 제거율과 표준편차는 각각 TSS 87.4%, 6.0%, TN 43.6%, 22.9%와 그리고 TP 57.3%, 20.1%로 산

정되었다. Table 5는 두 가지 강우 사상에 대한 강우유출수의 여과 전, 후의 농도를 나타낸 것이다. 여과로 인해 제거되는 양은 TN의 경우 평균적으로 24.2%, 22.8%이며, TP의 경우 46.8%, 57.9%로 나타났다. 이는 TP의 양은 TN보다 입자성 물질이 많아 침강으로 제거할 수 있는 양이 많은 것을 나타내며, 상대적으로 용존성 물질이 많은 TN의 경우 침강으로 제거하기 어려운 것을 보여준다. 이에 따라 초기 우수 처리시설 오염물질 제거 효과는 TSS의 경우 가장 높은 제거율이 나타났으며, 입자성 물질에 흡착되는 특성이 있는 인의 경우도 비교적 높은 제거율이 나타났다. 그러나 TN의 경우 입자성 물질에 흡착이 잘 되지 않고 용존성 비율이 높은 이유에서 제거율이 상대적으로 낮은 편으로 나타났다.¹⁶⁾ 한편, 0.17시간 동안 14.4 mm의 강우가 발생하여 강우 강도가 86.4 mm/hr로

Table 4. Removal of TSS, TN and TP in the first flush management system

Date		Initial (mg/L)	After 24 hours (mg/L)	Removal (%)
2015. 03. 18.	TSS	255.0	23.5	90.8
	TN	18.30	5.60	69.4
	TP	1.880	0.620	67.1
2015. 08. 25.	TSS	85.3	4.0	95.3
	TN	2.12	1.22	42.4
	TP	0.323	0.044	86.2
2015. 10. 01.	TSS	74.7	10.6	85.8
	TN	2.54	1.75	31.1
	TP	0.240	0.140	41.7
2015. 11. 07	TSS	53.6	8.8	83.6
	TN	2.22	1.20	45.9
	TP	0.319	0.178	44.2
2016. 03. 04.	TSS	122.0	30.5	75.0
	TN	0.27	0.15	44.4
	TP	2.110	1.490	29.4
2016. 07. 16.	TSS	236.0	9.5	96.0
	TN	14.20	2.10	85.2
	TP	2.050	0.153	92.5
2016. 08. 26.	TSS	59.8	8.5	85.7
	TN	3.49	3.49	0.0
	TP	0.135	0.071	47.7
2016. 09. 27.	TSS	59.6	7.1	88.2
	TN	2.47	1.33	46.3
	TP	0.412	0.155	62.3
2016. 10. 07	TSS	57.5	7.7	86.6
	TN	2.19	1.58	27.8
	TP	0.272	0.151	44.3

Table 5. TN and TP concentrations of stormwater samples before and after the filtration with 1.2 μ m filter

	2015. 10. 01.		2015. 11. 07.	
	TN	TP	TN	TP
Before filtration (mg/L)	2.73	0.225	1.99	0.302
After filtration (mg/L)	1.94	0.108	1.43	0.119
Difference (mg/L)	0.79	0.117	0.55	0.183
Difference (%)	24.17	46.80	22.79	57.86

Table 6. Correlation coefficients of TSS, TN and TP concentrations against rainfall characteristics

	Initial concentrations			Concentrations After 24 Hours			24 hour removal		
	TSS	TN	TP	TSS	TN	TP	TSS	TN	TP
Total rainfall	0.87	0.94	0.43	0.00	0.06	0.01	0.91	0.96	0.91
Duration	0.25	0.12	0.20	0.07	0.00	0.04	0.22	0.13	0.20
Average rainfall intensity	0.89	0.95	0.44	0.00	0.04	0.01	0.94	0.98	0.93
Dry days	0.07	0.01	0.12	0.03	0.00	0.08	0.06	0.01	0.07

나타난 2016년 7월 16일 자료의 경우 TN 제거율은 85.2%를 기록하였으며, 이는 당일 기록적인 강우 및 강우 강도에 따라 TN을 포함한 입자성 물질들이 다량 유입된 것에 기인하는 것으로 추정된다. 또한, 2015년 3월 15일 채취된 시료의 경우에도 침강에 의한 TN의 제거율로서는 비교적 큰 편인 69.4%의 제거율이 기록된 바 있다. 이날에는 6.83시간 동안 10.2 mm의 강우가 발생하여 1.47 mm/hr의 강우강도를 기록하였다. 위 두 경우는 강우량이 10 mm를 상회하는 것이 공통점으로 관찰된다. 해당 연구지역에서 10 mm 이상의 다량의 강우가 발생하지 않는 한 침강 시설에 의한 TN의 제거율은 50% 이하로서 여타의 오염물질에 비하여 비교적 낮게 나타나는 것으로 관찰된다.

3.6. 강우 특성에 따른 강우유출수 오염물질 농도 분석

도시 비점오염물질의 강우에 따른 오염물질의 제거 특성을 파악하기 위해 강우 특성과 각 오염물질 상태에 따른 상관관계 분석을 수행하였다. Table 6에 나타난 바와 같이 초기 유입수의 TSS와 TN 농도의 경우 모든 강우 사상에서 총 강우량과 평균 강우 강도와 높은 상관관계를 나타냈으나 TP는 다소 작은 상관관계를 보였다. 반면 오염물질의 제거 효율은 모든 항목에서 강우 강도와 매우 높은 상관성을 나타내고 있다. 이는 초기 강우유출수가 침강에 의해서 제거될 수 있는 입자성 고형물질을 포함한 비중이, 강우 강도가 높은 경우에 상대적으로 높게 나타난다는 것을 의미한다. 또한 “강우유출수의 입도분포 중, 입자의 크기가 가장 크게 나타나는 강우 초기에 입자성 오염물질의 비율이 가장 높다”라는 이전 연구¹⁶⁾에서 제시한 결과와 일치하며, 이는 침강에 의한 오염물질 저감의 효율이 강우 초기에 가장 효과적이라는 것을 시사한다.

4. 결론

본 연구는 강우시 발생하는 비점오염물질을 제어하기 위하여 본 연구진이 개발한 초기우수 처리장치의 공정 중 침강을 이용하여 오염물질을 처리하는 장치를 성능 검증하기 위해 수행하였다. 대전의 관평천의 분류식 유역의 우수저말단에서 강우유출수를 채수하여 수질 분석을 수행하였다. 분석 항목은 TSS, TN 및 TP이며 총 9회 수행되었다.

1) 5가지 강우 사상의 유출특성, EMC, MFF 및 CPLR 분석을 통하여 적은 양의 강우에도 높은 농도의 비점오염물

질이 강우유출수와 함께 유출되는 것이 확인되었다. 또한, 유출 시작 후 2~3시간 후면 강우유출수가 최대로 나타나며, 비점오염물질 부하 또한 50% 이상이 되는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 처리 용량의 한계가 있는 시설에서 단시간 내에 가장 많은 오염물질 부하를 저감하기 위해선, 유출 시작 후 최소 2시간 동안 강우유출수를 처리하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

2) 초기 강우유출수에 포함된 오염물질의 농도는 강우량과 강우 강도에 따라 좌우되는 것으로 나타났다. TSS의 경우 강우량과 강우 강도에 따라 0.87과 0.89, TN의 경우 0.94와 0.95로 상관관계가 나타났다. TP의 경우 위의 두 항목보다 낮은 0.43과 0.44로 나타났다.

3) 본 연구에서 제안하는 시스템을 이용하여 채수된 강우유출수를 24시간 침강시킨 후 검증한 오염물질 저감 효율은 평균 TSS 87.4%, TN 43.6%와 TP 57.3%로 산정되었다.

4) 강우시 본 시설에 의한 초기 강우유출수의 입자성 오염물질 제거 효율은 TSS의 경우 강우량과 강우 강도에 0.91과 0.94, TN의 경우 0.96과 0.98 그리고 TP의 경우 0.91과 0.93으로서 모두 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 결과 2)와 더불어 강우량과 강우 강도가 많거나 클수록 많은 양의 비점오염물질들을 침강으로 인해 효과적으로 제거할 수 있음을 나타낸다.

5) 본 연구의 결과는 인위적인 동력이나 화학 약품을 사용하지 않고 간단한 침강을 통해 강우유출수의 오염물질을 효과적으로 제거 될 수 있다는 것을 나타내고 있다. 이 결과에 따라 초기우수 처리시설이 활용도가 낮은 하천 둔치 지하에 설치된다면 강우유출수의 오염물질 저감에 충분한 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

References

- Brusseau, M. L., McColl, C. M., Famisan, G. and Artiola, J. F., "Chemical Contaminants," Chapter 10, Environmental and Pollution Science, 2nd ed., I. L. Pepper, C. P. Gerba and M. L. Brusseau, eds., Elsevier Inc., Burlington, MA, pp. 132~143(2006).
- Ministry of Environment Korea, "Sewerage Statistics," www.hasudoinfo.or.kr, (2014).
- Collaboration Team of Relevant Government Ministries of Korea, "Master Plan of Non-point Source Pollution Management, The Second Phase (2012~2020)," (2012).
- Deletic, A. B. and Mahsimovic, C. T., "Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved area," *J. Water Environ. Eng.*, **214**(9), 869~879(1998).
- Seo, D., "Necessity of Small Stream Management for River Management of Korea," *Magazine Korean Water Resour. Assoc.*, **42**(5), 18~22(2009).
- Candela, A., Freni, G., Mannina, G. and Viviani, G., "Quantification of diffuse and concentrated pollutant loads at the watershed-scale: an Italian case study," *Water Sci. Technol.*, **59**(11), 2125~2135(2009).
- Wang, J. L. and Yang, Y. S., "An approach to catchment-scale groundwater nitrate risk assessment from diffuse agricultural sources: a case study in the Upper Bann, Northern Ireland," *Hydrol. Proc.*, **22**(21), 4274~4286(2008).
- Yang, Y. S. and Wang, L., "A review of modelling tools for implementation of the EU Water Framework Directive in handling diffuse water pollution," *Water Resour. Manage.*, **24**(9), 1819~1843(2010).
- USEPA, "National management measure to control nonpoint source pollution from forestry," EPA-841-B-05-001, EPA, Office of Water, Washington, DC, (2005).
- Lee, J. H., Jung, Y. H. and Bang, K. W., "Performance Evaluation of Vortex Screen for Treatment of Fine Particles in Storm Runoff," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(4), 256~262 (2009).
- Jung, Y. J., Lee, E. J., Lee, S. Y., Lim, K. H. and Kim, L. H., "Determination of Detention Basin Size for NPS Control in TMDL Area," *J. Korean Wetlands Soc.*, **9**(2), 1~8(2007).
- Kang, H. K. and Baek, S. J., "The Research Study on Each Type Vegetation of Natural-type Reduction Equipment of the Non-point Pollutants Control Facility," *J. Korean Soc. Environ. Ecol.*, **2013**(1), 99-100(2013).
- Kang, T. U. and Lee, S. J., "A Simulation Method for Reduction Facilities of Natural Type for Non-point Pollution by the SWMM," *J. Korean Soc. Hazard. Mitigation*, **16**(2), 123~131(2016).
- Ministry of Environment of Korea, "Installation and Operation Manual of Nonpoint Pollution Reduction Facility," Research Reports(2014).
- Southeast Michigan Council of Governments (SEMCOG), "Low impact development manual for Michigan: A design guide for implementors and reviewers," <http://library.semco.org/InmagicGenie/DocumentFolder/LIDManualWeb.pdf>, (2010).
- Seo, D. and Kim, J. Y., "Reduction of Pollutant Concentrations in Urban Stormwater Runoff by Settling," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(4), 210~218(2016).
- Seo, D., Koo, Y., Kim, J., Kim, B., Park, J. and Lee, E., "Design Technique of First Flush Treatment System Using Waterside Land," Korea Water Resources Association Conference, Daejeon, Korea (2015).
- Seo, D., Kim J. Y. and Lee, D., "Development of Treatment System of First Flush Effect for Urban Area using Underground Settling and Filtration System," IWA World Water Congress & Exhibition 2016, Brisbane, Australia, (2016).

19. Seo, D., Kim, J. Y., Koo, Y. M. and Lee, D., "Removal of Suspended Solid and Associated Contaminants from Urban First Flush Runoff during Rainfall Events by Settling," IWA Specialist Conference-Particle Separation, Oslo, Norway, (2016).
20. Koo, Y. M., Kim, J. Y., Kim, B. R. and Seo, D., "Development of Suspended Solid Removal Method from Stormwater Runoff Using Fabric Filter System," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(3), 165~174(2015).
21. Yin, Z., Lee, E. H., Koo, Y. M. and Seo, D., "Development of integrated management system of stormwater retention and treatment in waterside land for urban stream environment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(2), 126~135(2015).
22. Seo, D. and Fang, T. H., "Application of Automatic Stormwater Monitoring System and SWMM Model for Estimation of Urban Pollutant Loading During Storm Events," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(6), 373~381(2012).
23. Han, Y. H. and Seo, D., "Application of LID Methods for Sustainable Management of Small Urban Stream Using SWMM," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 691~697(2014).
24. Seo, D., Koo, Y. M., Kim, J. Y., Lee, D. and Lee, E. H., "Development of Integrated Management System (ISTORMS) for Efficient Operation of First Flush Treatment System for Urban Rivers," IWA World Water Congress & Exhibition 2016, Brisbane, Australia, (2016).
25. Kim, L., Ko, S., Lee, B. and Kim, S., "Estimation of Pollutant EMCs and Loadings in Highway Runoff," *J. Korean Soc. Civil. Eng.*, **26**(2B), 225~231(2006).
26. Hathaway, J. M., Tucker, R. S., Spooner, J. M. and Hunt, W. F., "A Traditional Analysis of the First Flush Effect for Nutrients in Stormwater Runoff from Two Small Urban Catchments," *Water Air Soil Pollut.*, **223**, 5903~5915(2012).
27. Mercado, J. M., Germimo, F. K., Choi, J., Song, Y. and Kim, L., "Characteristics of stormwater runoff from urbanized areas," *J. Wetlands Res.*, **14**(2), 159~168(2012).
28. Rhee, H., Y., C. G., Lee, S., Choi, J. and Son, Y., "Analysis of Nonpoint Source Pollution Runoff from Urban Land Uses in South Korea," *Environ. Eng. Res.*, **17**(1), 47~56(2012).
29. Park, I., Kim, H., Chae, S. and Ha, S., "Probability mass first flush evaluation for combined sewer discharges," *J. Environ. Sci.*, **22**(6), 915~922(2010).
30. Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo G. and Saget A., "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharge and the first flush phenomenon," *Water Res.*, **32**(8), 2341~2356(1998).
31. Deletic, A., "The first flush of urban surface runoff," *Water Res.*, **32**(8), 2462~2470(1998).
32. Cho, J. and Seo, H., "An Analysis on the First Flush Phenomenon by Stormwater Runoff in Eutrophic Lake Watershed," *J. Environ. Impact Assessment*, **16**(5), 341~350(2007).