침강에 의한 도시 강우 유출수 오염물질 저감 특성 분석

Reduction of Pollutant Concentrations in Urban Stormwater Runoff by Settling

서동일[†] · 김재영

Dongil Seo[†] · Jaeyoung Kim

충남대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received March 15, 2016; Revised April 6, 2016; Accepted April 12, 2016)

Abstract : The pollutant removal efficiencies of stormwater runoff by settling were analyzed using field samples collected in 4 different raining events in a test bed installed in the Gwanpyung-Cheon stream in Daejeon. A 1.8 m high with 30 cm diameter cylindrical settling device was used for the settling test by measuring concentration of TSS, TP and TN for time and height. The pollutants removal rate was relatively high in the first 4 hours while 24 hours seem to be necessary to reach steady state in pollutant concentrations. However, there were no considerable differences in concentrations for height at a given time. This indicates most of particulate pollutant in the test seems to show independent settling with no interference to each other. Much part of particle sizes were distributed in the range of 10~100 μm . Average particulate fractions of TP and TN were estimated as 52.4% and 23.5%, respectively. This results explain why TN is difficult to remove by simple settling. This study indicates that a simple settling can provide effective method to remove significant amount of TSS and TP effectively and this can be used to protect urban river water quality.

Key Words : First Flush, Stormwater Runoff, Settling Column Test, Nonpoint Source Pollutant, Water Quality Management

요약 : 대전의 관평천에 설치된 1.8 m 높이의 침강 실험장치를 이용하여 총 4회에 걸쳐 강우 유출수를 채취하여 오염물질 제거 효율 및 특성을 측정하였다. 오염물질 농도는 초기 4시간 동안 급격하게 감소하였으며 약 24시간 후 일정한 수준을 나타내는 경향을 보였다. 침전 실험 장치 내에서는 높이 별 농도가 크게 다르지 않은 것으로 관찰되었으며 이는 침전장치 내에서 대부분의 고형물질은 서로 방해하지 않고 독립적으로 침전하기 때문인 것으로 분석된다. 강우 유출수를 대상으로 분석한 입도는 10~100 μm 의 범위로 나타났다. 강우 유출수에서 TP의 경우 입자성 물질이 평균 52.4%, TN의 경우 23.5%의 비율로 나타났으며 TN의 경우 침강에 의해 효율적으로 제거되기 어렵다는 것을 확인하여 주고 있다. 본 연구의 결과는 초기 강우 유출수에 포함되어 있는 TSS와 TP와 같은 오염물질이 단순한 침강에 의해 효과적으로 제거될 수 있다는 것을 나타내고 있으며 하천수질을 보호하는데 적극적으로 활용될 수 있음을 시사한다.

주제어 : 초기 강우, 유출수, 침강실험, 비점오염물질, 하천수질관리

1. 서론

도시유역에서는 주민 등의 생활과 활동에 필요한 도로와 건물들의 증가로 인해 표면에 도달한 빗물이 자연적으로 토양으로 스며들지 못하여 빠른 속도로 하천으로 이동하면서 도시표면에 축적된 오염물질 또한 이동시키면서 도시 하천의 건전성에 많은 문제점을 야기하고 있다.¹⁾ 경우에 따라서는 유역 내 빗물의 이동 경로 및 배수 속도가 변화함에 따라 침수 등의 재해를 유발할 수 있으며 장기적으로는 지하수위의 저하 등의 문제, 그에 따른 하천 건전화 문제 그리고 하천 생태계의 파괴 등이 발생할 수 있다.²⁾ 도시 유역에서 빗물로 인한 침수피해를 감소하기 위해 설치하는 우수관거는 유역에서 발생한 침식에 의한 토사 또는 고형 폐기물 등의 오염물질의 하천 유출을 오히려 쉽게 만드는 결과를 초래하여 오염물질의 유달율을 증가시키는 역할을 하기도 한다.³⁾ 강우 초기에 유역 표면을 청소하듯 발생하는 표면세척효과(First Flush Effect)는 하천에 도달하는 오염 부하의 상당 부분을 차지한다.⁴⁾ 이렇게 유입된 오염물질들은 소하천에서 중규모 하천으로 흘러가고 점차로 더욱 큰 규모의 하천으로

이동하여 결국 4대강의 수질 문제를 유발하는 원인을 제공할 수 있다. 따라서 대하천의 수질을 합리적으로 관리하기 위해선 유입하천의 수질관리가 중요하며 가장 근본적으로는 소하천이 포함되어 있는 소유역의 관리가 중요하다.⁵⁾ Lee and Seo⁶⁾는 대전 갑천의 경우 유기물의 오염부하중 비점오염원의 비중이 50% 전후로 진단하고 이에 대한 적극적 관리가 필요하다는 것을 보고한 바 있다. 우리나라에서도 지표수질에 대한 비점오염부하의 영향을 파악하고 그 제어 대책에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있다. Yun and Ham⁷⁾은 연안지역 저수지의 수질 관리를 위해 인공습지형 우수지의 영향을 평가하였다. Jung 등⁸⁾은 우리나라 오염총량 관리를 위해 비점오염을 제어하는데 필요한 우수지의 크기에 대한 연구를 진행한 바 있으며 Kang 등⁹⁾은 여과형 비점오염제어 시설의 효과에 대해 보고한 바 있다. 또한 Koo¹⁰⁾ 등은 투수성 포장이 비점오염부하를 저감시키는 효과에 대해 분석하고 보고한 바 있다. 우리나라 환경부에서는 비점오염물질의 관리를 위해 ‘수질 및 수생태계 보전에 관한 법률’을 제정하여 비점오염을 유발시키거나 관리해야 할 필요성이 있는 지역에는 비점오염저감시설의 설치를 의무화 함에 따라 우

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

리나라에서도 다양한 비점오염저감시설의 운영 및 효과에 대한 검토가 보고된 바 있다.^{11,12)} 그러나 미국 등에서도 다양한 비점오염저감시설들에 대한 연구가 수행되고 적용되었지만¹³⁾ 이 시설들이 설치 면적과 유지관리 비용 및 인력을 필요로 하는 특성을 나타내어 재정상태가 상대적으로 열악한 소도시에서는 시설 운영에 어려움을 겪고 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁴⁾ 따라서 하천에 유입되는 비점오염원에 의한 부하량을 효과적으로 제어하기 위한 실제로 시행 가능한 합리적인 방법이 개발되는 것이 바람직하며 특히 우리나라의 현실에 적절한 것이 매우 중요하다. 본 연구는 본 연구진이 개발하고 있는 자연형 수질정화처리장치^{15,16)}의 침전조를 설계 및 운영하는 데 있어서 침강에 의한 오염물질 제거효과를 분석하기 위해 수행되었다. 본 논문에서는 자동 모니터링 및 채수 장치를 활용하여 강우시 시료를 채취하고 침강장치를 이용한 총부유 물질(Total Suspended Solid, TSS) 제거효율 및 이에 따른 총질소(Total Nitrogen, TN)와 총인(Total Phosphorus, P) 농도의 저감 효과를 산정하기 위해 수행되었다. 본 연구의 결과는 도시지역의 강우에 의한 오염물질 하천 유입을 제어하기 위한 시설을 설계 및 운영함에 있어 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험방법

2.1. 연구대상지역

대전시의 관평천은 대전시의 대덕테크노밸리를 관류하는 유로연장 5.45 km, 유역면적 10.85 km²의 소규모의 하천으로서 대전을 통과하여 금강으로 유입되는 갑천으로 유입되고 있다. 관평동 일대는 2005년 경 조성된 주거 및 상업지역에 해당하며 지역에 대한 자세한 설명은 Seo and Fang의 논문¹⁷⁾에 수록된 바와 같다. 본 연구진은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 2009년부터 관평동의 수변공원에 설치된 유수지 입구 우수거에 빗물 자동 모니터링 시스템을 설치하여 운영해 오고 있으며 추가적인 실험이 가능하도록 2015년 하절기에 위 모니터링 시스템을 전면 확대 개편한 바 있다.¹⁶⁻¹⁸⁾

2.2. 침강실험 방법

일반적으로 침강을 이용하여 오염물질을 제거하기 위해서는 고형물질의 침강 속도를 측정하는 것이 우선적으로 필요

하다. 수중에서 물보다 무거운 고형물질은 입자의 침강 속도는 뉴턴의 법칙에 따른 중력과 물의 점성에 의한 저항력의 관계를 이용하여 유도할 수 있으며 Stokes는 Reynolds number가 1 보다 작은 층류(laminar flow)의 고형물질의 침강속도를 나타내기 위해서 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.^{19,20)}

$$v_p = \frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^2}{18\mu} \quad (1)$$

v_p = 고형입자의 침강속도(m/sec)

d_p = 입자의 입경(m)

ρ_p = 입자의 밀도(kg/m³)

ρ_w = 물의 밀도(kg/m³)

g = 중력가속도(9.81 m/sec²)

μ = 동점성계수(dynamic viscosity) (Ns/m²)

Crites and Tchobanoglous²¹⁾는 입자의 비중과 입경 그리고 침강속도의 관계를 그림으로 제시한 바 있으며 10~100 mm의 입경을 가지면서 비중이 1.05인 공모양 입자의 침강속도는 0.005~0.5 mm/sec의 범위에 있는 것으로 보고한 바 있다.

일반적인 침전조 설계에 있어서 다음과 같이 계산되는 한계침강속도(critical settling velocity, v_c) 이상의 입자는 모두 제거할 수 있다고 본다. 한계침강속도는 월류율(overflow rate)이라고도 지칭되며 식 (2)에 나타난 바와 같이 침강장치의 수심과 체류시간을 나눈 값과 같다.

$$v_c = Q/A = H/\tau \quad (2)$$

Q = 처리 유량(m³/sec)

A = 침전지 표면적(m²)

H = 침전지 수심(m)

τ = 침전지의 체류시간(sec)

독립형 침전에 의한 입자의 제거 분율(F)는 다음의 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.²⁰⁾

$$F = (1 - X_c) + \int_0^{X_c} \frac{v_p}{v_c} dx \quad (3)$$

Fig. 1. Interior and exterior of the stormwater monitoring station of this study.

여기서

$1-X_c$ = 한계침강속도(v_c) 보다 큰 침강속도 v_p 의 분율
(fraction of particles with velocity v_p greater than v_c)

$\int_0^{x_c} \frac{v_p}{v_c} dx$ = 한계침강속도 보다 작은 입자의 분율
(fraction of particles removed with v_p less than v_c)

한편 일반적으로 입자의 개수를 산정하는 것은 별도의 실험을 실시하기에는 어려움이 있으므로 침강에 의해 제거되는 점착성(flocculent)물질의 분율(R)을 산정하는 데에 사용하는 식 (4)를 이용할 수 있다.²⁰⁾

$$R(\%) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta h_i}{H} \right) \left(\frac{R_i + R_{i+1}}{2} \right) = 1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta h_i}{H} \right) \left(\frac{TSS_i + TSS_{i+1}}{2TSS_o} \right) \quad (4)$$

R_i = i 번째 수층의 입자 제거율(%)

TSS_i = i 번째 수층의 TSS 농도(mg/L)

TSS_o = 초기 TSS 농도(mg/L)

Δh_i = i 번째 수층의 두께(m)

H = 전체 수심(m)

n = 실험시 채수된 수층의 개수

2.3. Settling Column Test(침강 실험)

침전 실험을 수행하기 위해서 Fig. 2와 같은 실험 장치를 제작하였다. 침전 실험 장치의 총 높이는 180 cm이며 직경은 30 cm이다. 높이에 따라 15 cm 간격으로 총 12곳에서 채수가 가능하도록 하였으며 본 연구의 1, 2차 실험에서는

Fig. 2. Conceptual diagram and a picture of the settling column used in this study.

하단에서부터 30 cm 간격으로 6개의 포트를 사용하였고, 3, 4차 실험에서는 45 cm 간격으로 4개의 포트를 사용하였다. 실험을 시작하기 전에 Fig. 2에 나타난 바와 같은 긴 막대로 연결된 교반기를 사용하여 시료를 고르게 혼합한 후 혼합을 멈추고 각 포트에서 시간에 따라 동시에 시료를 채수하였다. 1차 실험은 약 18시간 동안 진행하였으며, 2~4차 실험에서는 장기적인 농도 변화를 파악하기 위해 채수 간격을 점진적으로 증가하여 약 45시간 동안 진행하였다.

2.4. 강우시 실험 시료의 채취 및 실험

2015년 7월부터 11월 사이 강우량 10 mm 이상인 경우의 강우에 대해 총 4회 실험이 수행되었다. 각 경우의 강우시

Fig. 3. The flow rates of stormwater outlet during rainfall events and sample collection periods (shown as three consecutive arrows in respective figure).

Table 1. Characteristics of rainfall events for this study

Date	Total rainfall	Dura- tion	Average rain- fall intensity	Sample collection period
2015, 07. 22.	18.4 mm	2.67 hr	6.90 mm / hr	Sample 1. (Start time expressed in Fig. 3)
2015, 08. 25.	27.4 mm	12.67 hr	2.16 mm / hr	Sample 2. (Taken 1 hour after the first sample)
2015, 10. 01.	43.8 mm	11.50 hr	3.81 mm / hr	Sample 3. (Taken 2 hours after the first sample)
2015, 11. 07.	12.0 mm	3.08 hr	3.90 mm / hr	

시료는 강우시 연구 대상 지역의 우수관거 유출구에서 정량 펌프를 사용하여 1시간 간격으로 3회 채수되었으며 총 12

회 실험이 수행되었다. 실험장치를 채우는 데에는 약 30분 가량이 소요되었다. 시료 채취가 이루어졌던 시기의 강우 특성 및 채수시간에 대한 자세한 정보는 Fig. 3과 Table 1에 정리된 바와 같다.

3. 결과분석

3.1. TSS 농도 변화

Fig. 4와 5는 Column Settling Test 수행 중 4가지 강우 사상에 대해 침강실험장치의 수직 방향으로 장치한 시료채취구에서 시간별로 채취한 TSS 농도와 시간에 따른 평균 TSS 농도 제거율을 나타내고 있다. Fig. 4와 5에 나타난 바와 같

Fig. 4. Changes of TSS concentrations in settling columns.

Fig. 5. Average removal rates of TSS concentrations in settling columns.

Fig. 6. TSS removal rates in settling column for different heights and time.

이 침전 시작 후 최초 4시간 정도 내에서 오염물질 농도는 급격하게 감소하고 있으며, 일정 시간 후에는 일정수준으로 감소하는 경향을 보인다.

여기서 특기할 만한 것은 4회의 실험 중에서 시간별로 채취한 오염물질의 농도 특성이 서로 다르다는 것이다. 즉 7월, 10월 및 11월에 채취한 시료는 최초로 채취한 시료의 오염물질 농도가 가장 높은 반면, Table 1에 나타나 바와 같이 장시간 동안 강우가 지속되어 순간 및 평균 강우 강도가 작은 편인 8월의 경우에는 두 번째 채취한 시료의 오염물질 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. Fig. 4에서 관찰되는 공통적인 특징 중의 하나는 동일한 실험장치 내에서 높이가 다른 시료 채취구에서 같은 시간에 채수한 샘플들간의 TSS 농도차이가 거의 없다는 것이다. 이는 각 실험장치 내부에서 높이에 관계없이 TSS의 침강속도가 거의 비슷하며 따라서 농도가 거의 유사한 것으로 추정된다.

Fig. 6은 각 경우에 채취된 시료 중 가장 높은 농도를 나타내는 침강실험 장치 내에서(두 번째 시료인 (b)의 경우를 제외하고 모두 첫 번째 실험장치) 높이별 TSS 제거율이 큰

차이가 없다는 것을 재차 확인해 주고 있다. 따라서 침강장치에 오염물질 제거 효율은 실험에 사용한 1.8 m의 범위에서는 높이에 큰 상관성이 없는 것으로 나타났으며 시간에 따라 제거 효율이 증가하는 특성을 보여 주고 있다.

Koo 등¹⁵⁾은 연구 대상지역에서 측정한 강우 유출수의 고형물 입자크기가 약 1~100 μm 범위에 분포한다고 보고한 바가 있다. 본 연구에서 측정한 입경분포는 Fig. 7에 나타난 바와 같으며 이전 연구와 유사하여 입경은 10~100 μm 범위가 주종을 이루는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 8은 입도 분포 자료와 식 (1)과 (2)를 이용하여 산정한 이론적인 TSS 제거율과 실험에 의한 TSS 제거율(박스 내부에 표시)을 나타낸다. 이 계산을 위해서 침전지의 수심은 1.5 m로 가정하였으며 동점성계수(kinematic viscosity)는 Crites and Tchobanoglous²¹⁾가 사용한 바 있는 $1.014 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 사용하였다. 이론적인 값과 실측치를 일치시키기 위해 첫 번째 시료를 위해서는 입자의 비중을 1.007을 나머지 두 가지 시료에 대해서는 1.1로 보정하여 사용하였다. 이는 첫 번째 시료에 유기물의 비중이 상대적으로 크다는

Fig. 7. Particle size distribution for samples taken on 2015. 11. 07.

Fig. 8. Theoretical and observed (in Boxes) TSS removal rates.

Fig. 9. Suspended solids concentration versus modified settling time.

것을 시사한다. 참고로 비중이 1.05인 경우 25 μm 의 입자의 침강 속도는 6 cm/hr로서 1.5 m 구간을 이동하는 데에는 약 24시간 정도가 소요되는 것으로 계산되었다.

강우 유출수 부유물질의 침전 특성을 알아보기 위해 Fig. 4의 실험 결과를 재구성하여 Fig. 9와 같이 나타냈다. 이는 Kim²²⁾이 입자들로 인해 내부가 보이지 않는 실험장치 속에서 부유물질들의 침전 유형을 파악하기 위해 제시한 도해법으로, 수면에서부터 채수구 위치까지의 침전속도의 역수 즉, 단위 깊이를 이동하기 위해 필요한 시간을 부유물질의 농도에 대해 표현한 것이다. 본 실험에서 횡축은 각 채수구에서 채수한 시료의 채수 간격 시간을 Fig. 2에 나타난 바와 같이 수면에서부터 채수구까지의 깊이로 나눈 값을 나타내며 종축은 해당 시기에 측정된 농도를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용된 시료 내부에는 단위 깊이를 짧은 시간 내에 도달하는 부유물질의 농도가 대부분을 차지하며 이는 강우 유출수의 부유물질은 독립침강이 주종을 이루며 침전 중 서로 간섭하는 현상이 거의 없다는 것을 의미한다.

3.2. TN과 TP 농도 변화

Fig. 10과 11은 Fig. 4의 TSS 실험 시 동시에 측정된 침강 실험 장치내부의 TN과 TP의 농도 변화를 각각 나타낸다. TN과 TP의 농도는 정도의 차이는 있으나 TSS 농도 변화와 유사하게 시간에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 2에 나타난 바와 같이 TP는 TN에 비하여 TSS와 상대적으로 높은 상관 계수를 나타내고 있다. 이는 TP가 TN에 비하여 고형성분에 흡착되어 이동하는 비율이 많기 때문인 것으로 추정된다. 이와 같은 가정을 확인하기 위해 본 연구의 시료를 대상으로 TP 및 TN 중 고형성분과 용존성분의 비율을 분석하기 위해 강우시 채취한 시료와 1.2 μm 유리 섬유 필터를 이용하여 얻은 여액에 대해 각각 TN과 TP를 재차 분석하였다.

Table 3은 두 가지의 강우 사상에 대해 여과 전, 후의 TN과 TP의 농도가 유출수 채취 시간이 경과함에 따라 감소하며 또한 고형물질의 비율도 감소하는 것을 나타내고 있다. 이는 강우 초기에 발생한 강우 유출수에서 입자성 물질의 비율이 높다는 것을 의미한다. TP의 경우 입자성 물질이 각

Fig. 10. Removal of TN concentrations in settling columns.

Fig. 11. Removal of TP concentrations in settling columns.

Table 2. The correlation coefficients of TP and TN concentrations against TSS concentrations in the respective samples

	TP			TN		
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 1	Sample 2	Sample 3
2015. 07. 22.	0.993	0.985	0.916	0.689	0.742	0.336
2015. 08. 25.	0.984	0.990	0.968	0.914	0.973	0.450
2015. 10. 01.	0.568	0.035	0.308	0.983	0.139	0.008
2015. 11. 07.	0.921	0.933	0.957	0.881	0.711	0.813

각 평균 46.8%, 57.9%이고, TN의 경우 각각 24.2%, 22.8%로 나타났다. 특히, TN의 경우 초기 강우 유출수에 입자성 물질의 비율이 높고 이후 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 초기 강우 유출수의 TN은 입자의 크기가 상대적으로 큰 초기 강우시에만 침강으로 제거가 가능하다는 것을 알 수 있다.

Table 3. TN and TP concentrations of stormwater samples before and after the filtration of with 1.2 μ m filter

		2015. 10. 01.			2015. 11. 07.		
		First Sample	1 hr Later	2 hrs Later	First Sample	1 hr Later	2 hrs Later
TN	Before Filtration (mg/L)	2,38~4,20	1,82~2,10	1,70~1,90	1,66~3,10	1,24~1,50	0,87~1,36
	After Filtration (mg/L)	1,63~2,50	1,50~1,73	1,49~1,75	1,51~1,84	1,09~1,27	0,70~1,23
	Difference (mg/L)	0,38~1,70	0,24~0,51	0,12~0,39	0,14~1,26	0,08~0,28	0,06~0,17
	Difference (%)	14,5~40,5	13,0~24,4	7,1~20,6	8,7~40,6	5,8~18,5	5,3~19,8
TP	Before Filtration (mg/L)	0,22~0,39	0,12~0,16	0,11~0,15	0,22~0,47	0,13~0,25	0,14~0,19
	After Filtration (mg/L)	0,08~0,15	0,08~0,09	0,08~0,10	0,12~0,16	0,09~0,10	0,09~0,11
	Difference (mg/L)	0,09~0,23	0,04~0,07	0,03~0,04	0,10~0,31	0,05~0,15	0,05~0,09
	Difference (%)	39,3~66,1	34,6~47,1	27,3~33,1	46,2~65,9	35,2~60,0	34,9~47,7

4. 결론

본 연구에서는 강우에 의한 비점오염물질 제어하는 장치를 개발하는 데 있어서 단순한 침강을 통해 제거 가능한 TSS, TN과 TP의 비율 및 제거 특성을 분석하였다. 대전의 관평천의 분류식 유역의 우수거 말단에서 강우시 유출수를 채수하여 실시하였다. 매 강우시 시료는 1시간 간격으로 3회 채수되었으며 1.8 m 높이의 침전 실험 장치를 이용하여 시간 및 높이에 따른 TSS, TP, TN 농도를 측정하였다.

1) 실험 장치내의 TSS, TP 및 TN을 포함한 오염 물질 농도는 침강 실험 시작 약 4시간까지 급격히 감소하였다가 이후 일정해 지는 것으로 나타났다. 강우의 특성에 따라 채취된 시료별로 오염물질의 최고 농도 발생시간이 약간씩 차이가 있었으나 4번의 실험 중 3번의 경우 최초로 채취된 시료의 오염물질 농도가 가장 높은 경향을 나타내었다.

2) 침전 실험 장치 내에서는 높이 별 농도가 크게 다르지 않은 것이 관찰되었으며 이는 침전장치 내에서 대부분의 고형물질은 서로 방해하지 않고 독립적으로 침전하기 때문인 것으로 분석된다. 이러한 관찰 결과는 실제 침전 장치의 설계 시 높이 또는 수심이 오염물질 제거 효과에 미치는 영향이 크지 않다는 것을 의미한다고 볼 수도 있다.

3) 침전장치 내에서 부유물질의 침전 유형을 파악하기 위해 도해법을 사용하여 분석하였을 경우에도 침전 속도가 큰 농도가 대부분을 차지하며 이는 침전을 간접하는 요소가 없는 것으로 여겨지며 따라서 독립적으로 침전하는 현상이 주로 나타나는 것을 재차 확인해 주는 결과이다.

4) 4번째 강우 유출수를 대상으로 분석한 입도는 10~100 μm 의 범위로 나타났다. 비중이 1.05이고 동점성계수(kinematic viscosity)가 $1.014 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 인 경우 Stokes의 법칙에 의하여 산정한 침강속도는 6 cm/hr 이다. 이러한 입자가 1.5 m의 침전 장치에서 완벽히 제거되는 데에는 24시간 가량이 소요된다. 실제로 침강 실험에서 24시간 정도에는 침강에 의해 제거 가능한 물질의 제거가 종료된 것으로 관찰되며 따라서 현장의 침전시설을 설치할 경우 적정 체류시간은 최소 24시간 이상이 되는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4) 강우 유출수내에서 TP의 경우 입자성 물질이 평균 52.4%, TN의 경우 23.5%의 비율로 나타났다. 입자성 비율은 시간이 흐를수록 감소되는 경향을 나타내었으며 TN의 경우 침강에 의해 효율적으로 제거되기 어렵다는 것을 확인하여 주고 있다.

5) 본 연구의 결과는 간단한 침전에 의해 TSS, TP 및 TN을 포함하는 강우 유출수의 오염물질이 효과적으로 제거될 수 있다는 것을 나타내고 있다. 향후 침전장치에서 축적되는 슬러지의 양적 질적 특성 및 제거 방법에 대해 후속 연구가 진행될 필요가 있다. 본 연구는 우수지 부지를 확보하지 못하는 지역에 대해 둔치의 지하에 설치하는 것을 제안하고 있으나 우수지를 이용하여 설치할 경우에도 충분히 효과를 나타낼 수 있을 것으로 추정된다.

Acknowledgement

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

KSEE

References

1. 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).
2. Han, Y. H. and Seo, D., "Application of LID Methods for Sustainable Management of Small Urban Stream Using SW-MM," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 691~697(2014).
3. Liu, D., Sansalone, J. J. and Cartledge, F. K., "Comparison of sorptive filter media for treatment of metals in runoff," *J. Water Environ. Eng.*, **131**(8), 1178~1186(2005).
4. Deletic, A. B. and Mahsimovic, C. T., "Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved area," *J. Water Environ. Eng.*, **124**(9), 869~879(1998).
5. Seo, D., "Necessity of Small Stream Management for River Management of Korea," *Magazine Korean Water Resour. Assoc.*, **42**(5), 18~22(2009).
6. Lee, G. and Seo, D., "Analysis on Trends and Major Impact Factors of Water Quality Dynamics in the Gab-Cheon River, Daejeon, Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(9), 517~525(2015).
7. Yun, C. K. and Ham, J. H., "Prediction of Water Quality improvement for Estuarine Reservoir using Wetland-Detention Pond System," *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **42**(5), 94~102(2000).
8. 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).
9. Kang, H. M., Choi, J. Y., Kim, L. H. and Bae, W. K., "Treatment Efficiency of Non-Point Source Pollutants Using Modified Filtration System," *J. Korean Wetlands Soc.*, **13**(2), 161~69(2011).
10. Koo, Y. M., Kim, Y. D. and Park, J. H., "Analysis of Non-point Pollution Source Reduction by Permeable Pavement," *J. Korean Water Resour. Assoc.*, **47**(1), 49~62(2014).
11. Yi, S. J. and Kim, Y. I., "Improvement on Management of Non-point Source Pollution for Reasonable Implementation of TMDL - Focusing on Selection of Non-point Source Pollution Management Region and Management of Non-point Source Pollutant," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 719~723(2014).
12. Ministry of Environment (MEV), "Install and Management manual of Nonpoint Pollution Reduction Facility," Research Reports(2014).

13. Knight, R. L., "Ancillary benefits and potential problems with the use of wetlands for nonpoint source pollution control (In Olson, R. K. eds., "Created and natural wetlands for controlling nonpoint source pollution")," Boca Raton : Smoley, C. K., pp. 131~150(1993).
14. 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>> (Jan. 10, 2010).
15. 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).
16. 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).
17. 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).
18. 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).
19. Gregory, R. and Zabel, T. F., Water Quality and Treatment 4th Ed., Chapter 7 Sedimentation and Flotation, American Water Works Association, Denver, CO, pp. 371~391(1991).
20. Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, H. D., Wastewater Engineering Treatment and Reuse, 4th Ed., Metcalf & Eddy, McGraw Hill, pp. 363~372(2004).
21. Crites, R. and Tchobanoglous, G., Small and Decentralized Wastewater Management Systems, WCB Mc-Graw Hill, pp. 269~279(1998).
22. Kim, B., Chu, T. and Ruane, R., "Settling of Coal Ashes," *J. Environ. Eng.*, **109**(1), 157~173(1983).