

도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량 산정방법 연구

이태환 · 조홍래 · 정의상 · 구분경[†] · 박배경* · 김용석*

하이드로코어
*국립환경과학원

A Study on Estimating Diffuse Pollution Loads Removal by Road Vacuum Cleaning

Taehwan Lee · Hong-Lae Cho · Euisang Jeong · Bhon K. Koo[†] · Baekyung Park* · Yongseok Kim*

HydroCore Ltd.

*National Institute of Environmental Research

(Received 2 September 2016, Revised 25 January 2017, Accepted 20 February 2017)

Abstract

The purpose of this study is to identify potential methodologies to reasonably estimate the effectiveness of road vacuum cleaning in terms of pollution loads reduction. In this context, this study proposes two empirical equations to estimate the amount of diffuse pollution loads removed by road vacuum cleaning. The proposed equations estimate the removed amount of pollution loads respectively taking into consideration of: a) the distance of road vacuum cleaning; and b) the amount of road-deposited sediment(RDS). All of the parameters in these equations were evaluated based on results of field monitoring and laboratory analyses, except for the RDS generation rate. The results of this study suggest that pollutant removal efficiency is 46.3% for BOD₅ and 56.4% for TP; discharge ratios for particulate and dissolved BOD₅ are 35.0% and 21.2%, respectively; discharge ratios for particulate and dissolved TP are 35.0% and 19.4%, respectively. Average concentrations of pollutants in RDS are BOD₅ 977.3 mg/kg and TP 317.6 mg/kg. Some results of a case study imply that both equations can be potentially useful if the adopted parameters are reasonably evaluated. In particular, the RDS generation rate should be evaluated based on monitoring data collected from various road conditions.

Key words : Diffuse pollution loads, Road deposited sediment(RDS), Road vacuum cleaning efficiency, Wash-off rates of RDS

1. Introduction

도로는 도시지역에서 가장 넓은 면적을 차지하는 불투수 지표면이다. 현재 우리나라 도로의 대부분은 포장되어 있으며 서울시 등 주요도시에서는 거의 100% 수준에 도달하였다(MLTMA, 2012). 차량의 통행, 인간의 활동, 도로주변의 자연환경 등에서 발생하는 도로의 다양한 비점오염물질이 관망 또는 하천 직유입을 통해 수계로 유입되면 수질오염의 주요 원인 중 하나로 작용할 수 있다(Ball et al., 1998; Goonetilleke et al., 2005).

이러한 도로 비점오염부하는 우수관망을 통한 배출경로가 비교적 명확하기 때문에 오염부하 관리 측면에서 보면 발생원 관리(source control)에 따른 오염부하 저감효과를 구체적으로 기대할 수 있다는 특징이 있다. 도로 비점

오염부하를 저감하기 위해서는 첫째, 도로청소와 같이 도로 표면에 축적된 오염물질을 제거함으로써 강우 시 유출될 수 있는 오염부하량을 원천적으로 감소시키거나, 둘째, 도로표면에서 발생하는 강우유출수를 적절한 저감시설(Best Management Practices, BMPs)을 통해 처리함으로써 유출되는 오염부하량을 감소하는 방법을 적용해야 한다. 이 중 두 번째 접근방법은 도시 지역에서 적정용량의 저감시설을 설치하기 위한 위치를 선정하는 것이 현실적으로 어려운 경우가 많을 뿐 아니라, 우리나라와 같이 집중호우가 잦은 경우에는 짧은 시간에 대량의 유출수를 처리해야하기 때문에 저감시설의 처리효율에 한계가 있다. 반면, 첫 번째 접근방법은 주기적인 도로청소를 통해 도로표면에 축적된 오염물질을 제거하는 근본적 방법이며, 운영 빈도나 시기에 따라 오염부하 저감효과를 조절할 수 있는 유연성도 있어 전 세계의 많은 도시에서 채택하고 있다.

최근 국내의 수질오염총량관리제 적용지역에서는 도로청소를 비점오염부하 삭감방안으로서 인정해달라는 요구가 증대되고 있으며(Lee and Han, 2012), 이에 따라 수질오염총량관리계획 수립 및 이행평가 시 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량 평가방법이 시급히 정립될 필요가 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
bkkoo@hydrocore.co.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그러나, 이러한 요구에도 불구하고 현재까지 도로청소에 대한 선행 연구 중 수질오염총량관리제 관점에서 접근한 연구는 매우 부족한 형편이다. 도로청소에 대한 기존 선행 연구로는 서울시 도로청소 매뉴얼 작성을 위한 진공청소와 물청소에 대한 연구(Yoo, 2006), 도로청소에 의한 미세먼지 제거 효과 분석(NIER, 2006), 고속도로를 대상으로 한 도로청소의 오염물질 저감효과 분석(Kang et al., 2011), 도로청소 오염물질 저감효과에 대한 정량적인 평가 및 제도 확산방안 연구(MOE, 2012a) 등이 있으나, 대부분 도로청소 효과분석이나 청소방법에 대한 것으로서 수질오염총량관리제 적용방안을 구체적으로 제시하는 연구는 없는 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 도로청소에 의한 비점오염 저감효과 및 강우에 의한 노면퇴적물(Road Deposited Sediment, RDS)의 유출특성을 분석하고 이를 바탕으로 수질오염총량관리제 적용방안을 구체적으로 제시하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1. 연구지역

도로 비점오염물질의 축적량은 도로의 특성(불투수율, 노면의 재질), 환경조건(토지이용, 인구밀도, 교통량, 도로청소유무), 기후조건(선행무강우일수, 온도, 풍속) 등의 요인에 의해 결정된다(Brown et al., 2011; Egodawatta and Goonetilleke, 2006). 본 연구에서는 수도권 지역에서 노면청소차(필터미장착 진공청소차)를 이용하여 도로청소를 실시하고 있는 도로를 대상으로, 교통량과 도로변 화단 유무를 고려하여 연구지점을 선정하였다. 최근 5년간(2008 - 2012)의 도로유형(고속국도, 일반국도, 국가지정지방도, 지방도)별 일평균 교통량 자료를 이용하여 도로 교통량을 3개 등급으로 구분하였으며, 도로변 화단의 유무에 따라 노면퇴적물의 조성이 다를 것으로 판단하여 화단이 있는 곳과 없는 곳을 구분하였다. 이 중 교통량 등급과 시료채취 안전성 및 접근성을 감안하여 A지점(서울시 오류동 경인로, 교통량 83,980 대/일), B지점(경기도 안산시 화랑로, 교통량 21,460 대/일),

Table 2. Classification of the 18 RDS repository sites

Area	RDS Repository Sites
Ultra-urban	Mapo, Seoul; Seocho, Seoul; Guro, Seoul; Suji, Yongin; Gimpo; Anyang; Bupyeong, Incheon; Dong, Incheon; Gyeyang, Incheon
Sub-urban or Rural	Chungju; Yangpyeong; Cheoin, Yongin; Eumseong; Yeosu; Wonju; Yicheon; Gapyeong; Hwaseong

C지점(경기도 김포시 양곡2로, 교통량 13,745 대/일) 등 3개 지점을 선정한 후 각 지점별로 도로변 화단 유무를 구분하여 총 6개 지점을 선정하였다(Table 1).

한편, 도로청소차에 의해 도로표면에서 제거되는 노면퇴적물의 특성을 이해하기 위해 조사지역을 대도시 지역과 중소도시-농촌 지역으로 구분하고, 각 지역별로 9개소의 적치장을 선별, 총 18개소의 적치장을 선정하였다(Table 2).

2.2. 시료 채취방법

2.2.1. 노면퇴적물 시료

노면퇴적물 시료는 6개의 도로유형별로 2개씩의 지점을 선정, 총 12개 지점에서 다음과 같은 방법으로 채취하였다. 도로연석에 접한 10개의 1 m × 1 m 격자 내에서 2개의 1 m × 0.2 m 시료채취노면을 선정하고(시료채취노면은 노면퇴적물이 노면에 고루 분포하며 서로 0.1 m 이상 이격되어야 함)(Fig. 1), 도로청소 및 강우 전후에 각 시료채취노면에서 방형구 및 진공청소기를 사용하여 시료채취한 후 10개의 시료를 혼합하여 복합시료를 생성하였다. 이처럼 10개의 시

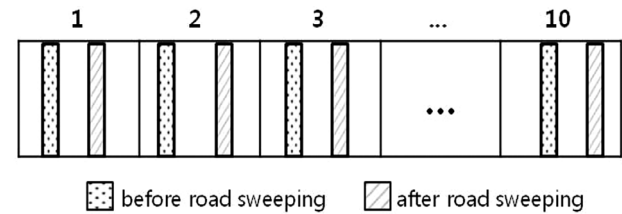


Fig. 1. RDS(road deposited sediment) samples were taken by using a vacuum cleaner before and after vacuum cleaning and rainfall events.

Table 1. Classification of the 6 study sites according to traffic volume and existence of curb-side flower bed

Curb-side Flower Bed	Traffic Volume (cars/day)		
	High 83,980 (30,800 ~ 274,200)	Middle 21,460 (15,400 ~ 30,700)	Low 13,745 (0 ~ 15,300)
Yes	A1	B1	C1
No	A0	B0	C0

Table 3. Characteristics of the rainfall events at the study sites

Study Sites	Rainfall Event 1 (2013/08/22-23)			Rainfall Event 2 (2013/08/28-29)			Rainfall Event 3 (2013/10/07-08)		
	Antecedent Dry Days	Total Rainfall (mm)	Maximum Intensity (mm/hr)	Antecedent Dry Days	Total Rainfall (mm)	Maximum Intensity (mm/hr)	Antecedent Dry Days	Total Rainfall (mm)	Maximum Intensity (mm/hr)
A1, A0	12	50.0	36.0	5	19.0	14.5	8	2.5	2.0
B1, B0	10	41.5	18.0	5	13.5	12.0	8	6.5	2.0
C1, C0	16	44.5	62.0	5	31.5	10.0	9	4.5	2.0

료를 각각의 방형구에서 채취하여 혼합한 이유는 노면퇴적물의 공간분포가 균일하지 않기 때문에 시료의 대표성을 높이기 위한 것이다.

총 12개 지점에서 1회의 도로청소와 3회의 강우사상에 대해 시료를 채취하였다. 강우사상의 경우, 강우량 2.5 - 50.0 mm, 선행무강우일수 5 - 16일이었다(Table 3).

2.2.2. 수거퇴적물 시료

총 18개 적치장에서의 수거퇴적물 시료 채취는 폐기물 공정시험방법(MOE, 2011)의 시료 채취방법에 의거하여 수행하였다.

2.3. 시료 분석 방법

노면퇴적물 시료와 수거퇴적물 시료의 함수율, 입도, TOC, TP 농도는 수질오염공정시험법 퇴적물편(MOE, 2012b)에 제시된 방법을 적용하여 분석하였다. 각 퇴적물 시료는 중량 및 함수율 분석 후 입경에 따라 2개 그룹으로 분류하였다. 이는 입경의 크기에 따라 청소효율이 달라질 수 있으며(Sartor and Boyd, 1972), 입경에 따라 오염물질 농도 등 특성이 다를 수 있기 때문이다(Li et al., 2015). 입경 63μm을 기준으로 모래-자갈 그룹과 미사-점토그룹으로 분류하여 각 그룹의 TOC, TP 농도를 분석하였다.

한편, 퇴적물 시료의 BOD₅ 농도는 표준시험법으로 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 퇴적물의 Sediment oxygen demand(SOD)가 유기물농도와 관련이 깊다는 점과(Yee et al., 2011) 하천수의 DO농도 감소에 큰 영향을 준다는 점에서(Todd et al., 2009) 착안하여 퇴적물 시료를 증류수에 혼합한 진탕용액의 BOD₅를 측정하여 퇴적물의 BOD₅ 값을 추정하였다. 진탕시간은 선행실험을 통해 적정진탕시간을 선정하였다.

2.4. 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량 산정식

수질오염총량관리 대상물질인 BOD와 TP에 대해 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량 산정식을 제시하였다. 산정식은 지자체별로 기록 및 보관하고 있는 도로청소 운영관련 자료를 토대로 산정되는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 도로청소 차량의 청소효율이 정확하게 산정된다면 도로청소차량이 청소한 면적으로 삭감량 산정이 가능할 것이며 청소면적은 도로청소 거리로부터 유추가 가능할 것으로 판단된다. 또한 도로청소차량이 수거한 수거퇴적물 양으로부터 삭감량 산정이 가능할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량을 산정하는 방법으로 1) 도로청소차의 청소거리에 따른 산정식과 2) 도소청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 산정식을 수립하여 비점오염부하 삭감량을 산정하고 그 결과를 수질오염총량관리 관점에서 검토하였다.

2.4.1. 도로청소차의 청소거리에 따른 비점오염부하 삭감량 산정식

도로 단위거리당 오염물질 발생부하량이 일정하다는 가정

아래 도로청소차의 청소효율을 인정하고 청소거리에 따라 오염물질 삭감부하량을 산정하는 방법이다. 도로청소차의 청소거리에 따른 삭감부하량을 산정하기 위해 단위거리당 오염물질 발생부하량, 도로청소차의 청소거리, 도로청소차의 청소효율, 강우에 의한 오염물질의 유출률 등을 고려한다. 청소거리에 따른 BOD 및 TP 삭감부하량은 각각 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 산정한다.

$$RD_{BOD} = L_{BOD} \epsilon_{BOD} (\gamma_{sedBOD} \lambda_{BOD} + \gamma_{liqBOD}) D \eta \quad (1)$$

$$RD_{TP} = L_{TP} \epsilon_{TP} (\gamma_{sedTP} \lambda_{TP} + \gamma_{liqTP}) D \eta \quad (2)$$

여기서, RD = 도로청소차의 청소거리에 따른 오염물질 삭감부하량(kg/year), L = 단위거리당 오염물질 발생부하량(kg/km·day), ε = 도로청소차의 오염물질 청소효율, γ_{sed} = 입자성 오염물질의 잠재강우유출률, γ_{liq} = 용존성 오염물질의 잠재강우유출률, λ = 오염물질의 수체 내 용출률, D = 도로청소차의 1일 평균 청소거리(km), η = 연간 청소일수(day/year)이다. 도로청소차의 오염물질 청소효율(ε)은 도로청소 전후의 입도별 노면퇴적물 중량 및 오염물질 농도 차이를 이용하여 산정하며, 잠재강우유출률(γ_{sed}, γ_{liq})은 강우전후의 입도별 노면퇴적물 중량 및 오염물질 농도 차이를 이용하여 산정한다. 오염물질의 수체 내 용출률(λ)은 입자성 오염물질의 물리화학적 특성과 수체의 환경특성에 따라 달라질 것이지만, 본 연구에서는 입자성 오염물질이 수체에 유입하면 1년 이내에 모두 수체로 용출되는 것으로 가정하여 용출률 1.0을 적용하였다.

2.4.2. 수거퇴적물 증량에 따른 비점오염부하 삭감량 산정식

도로청소차에 의해 노면에서 실제로 제거된 오염부하량만을 삭감부하량으로 인정하는 방법이다. 도로청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량을 산정하기 위해 수거퇴적물의 증량, 오염물질 농도, 강우에 의한 오염물질의 유출률 및 적치장 배수체계 유지관리 수준 등을 고려한다. 수거퇴적물 증량에 따른 BOD 및 TP 삭감부하량은 각각 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 산정한다.

$$RW_{BOD} = C_{BOD} (\gamma_{sedBOD} \lambda_{BOD} + \gamma_{liqBOD}) \varphi W \times \frac{1}{10^6} \quad (3)$$

$$RW_{TP} = C_{TP} (\gamma_{sedTP} \lambda_{TP} + \gamma_{liqTP}) \varphi W \times \frac{1}{10^6} \quad (4)$$

여기서, RW = 도로청소차 수거퇴적물 증량에 따른 오염물질 삭감부하량(kg/year), C = 수거퇴적물의 오염물질 농도(mg/kg), γ_{sed} = 입자성 오염물질의 잠재강우유출률, γ_{liq} = 용존성 오염물질의 잠재강우유출률, λ = 오염물질의 수체 내 용출률, φ = 적치장 배수체계 유지관리계수, W = 수거퇴적물의 증량(kg/year)이다. 잠재강우유출률(γ_{sed}, γ_{liq})과 용출률(λ)은 상기 2.4.1절에서와 동일하게 산정하며, 적치

장 배수체계 유지관리계수(φ)는 적치장의 수거퇴적물이 배수체계를 통해 수계로 유출되는 경우를 고려하기 위한 것으로서 1.0 이하의 양수이다.

3. Results and Discussion

3.1. 도로청소 효율

도로청소 전후에 채취된 노면퇴적물 시료의 중량과 오염부하를 화단 유무 및 교통량 등급을 기준으로 구분하여 도로청소 효율을 산정하였다. 채취된 시료는 입경 크기별로 분류하여 각각 청소전·후 무게차이에 의하여 효율을 산정하였으며, 여기에서 음수나 검출한계 이하 농도 등 값을 제시할 수 없는 지점은 제외하고 평균치를 산정하여 청소 효율로 제시하였다. 두 가지 입경에 대한 평균치를 산정할 때는 중량 가중평균 및 부하량 가중평균을 적용하였다. 교통량 등급이나 화단 유무에 따른 도로청소 효율은 일부 시료에서 다소 차이가 보이기는 하지만 뚜렷한 경향성이 있다고 보기는 어려울 것으로 판단된다. 그러나, 입도에 따라서는 도로청소 효율의 경향성이 비교적 뚜렷한데, 중량 기준 도로청소 효율은 세립질 35.6%, 조립질 46.9%, 중량가중평균 46.3%로서, 세립질 입자에 비해 조립질 입자의 도로청소 효율이 다소 높은 것으로 나타났다(Table 4). TOC에 대한 도로청소 효율은 세립질 46.7%, 조립질 50.8%, 부하량가중평균 50.4%이며, TP에 대한 도로청소 효율은 세립질 41.2%, 조립질 57.0%, 부하량가중평균 56.4%로서 중량 기준의 도로청소 효율보다는 다소 높은 것으로 나타났다(Table 4). 이러한 결과는 외국에서 노면퇴적물에 대한 도로청소 효율이 평균 50%(Sartor and Boyd, 1972) 내지 70%(Michael et al., 1985)로 보고된 것과 비교가능한 수준인 것으로 사료된다.

한편, 오염총량관리 대상물질인 BOD₅ 오염부하는 입자성 물질로부터 직접 측정하는 것이 불가능하므로 그에 대한 도로청소 효율을 어떻게 산정할 것인가 하는 문제가 있다. 본 연구에서는 18개 노면퇴적물 시료에 대해 노면퇴적물 입자의 TOC 농도와, 노면퇴적물을 증류수에 넣고 5시간 진탕시킨 용액의 BOD₅ 농도 사이의 상관관계를 분석하였으나, 상관성이 매우 낮아($R^2=0.0997$) TOC-BOD₅ 상관성은 적용하기 어려운 것으로 판단하였다. 이에 BOD₅에 대한 도로청소효율은 노면퇴적물 시료의 중량기준 청소효율

평균치인 46.3%를 적용하고, TP의 도로청소효율은 TP부하량가중평균치인 56.4%를 적용할 것을 제안한다. 산정된 BOD₅와 TP의 도로청소 효율은 본 연구의 한정된 시료에서 산출해낸 값으로 추후 추가적인 실험에 의한 데이터 보완이 필요하며, BOD₅의 경우 퇴적물에서의 실험방법이 정립되어있지 않기 때문에 추가 연구를 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 잠재강우유출률

3개의 강우사상을 대상으로 강우 전후에 채취된 노면퇴적물 시료의 중량과 오염부하를 화단 유무 및 교통량 등급을 기준으로 구분하여 잠재강우유출률을 산정하였다. 채취된 시료는 입경별로 구분하여 각각 강우 전·후 무게차이에 의하여 효율을 산정하였으며, 여기에서 음수나 검출한계 이하 농도 등 값을 제시할 수 없는 지점은 제외하고 계산하였다. 두 가지 입경에 대한 평균치를 산정할 때는 중량 가중평균 및 부하량 가중평균을 적용하였다. 각각 산정된 3개 강우사상의 강우유출률의 평균을 산정하여 잠재강우유출률로 제시하였으며, 평균치를 산정할 때 강우사상별로 음수나 검출한계이하에 해당되지 않는 유효한 데이터의 개수에 가중치를 두어 산정하였다. 교통량 등급이나 화단 유무에 따른 잠재강우유출률은 일부 시료에서 다소 차이가 보이기는 하지만 뚜렷한 경향성은 나타나지 않았다. 그러나 청소효율과 유사하게 잠재강우유출률도 입도에 따라서는 경향성이 비교적 뚜렷한데, 중량 기준 잠재강우유출률은 세립질 65.2%, 조립질 32.9%, 중량가중평균 35.0%로서, 조립질 입자에 비해 세립질 입자의 잠재강우유출률이 2배가량 높은 것으로 나타났다(Table 5). 한편, TOC에 대한 잠재강우유출률은 세립질 66.7%, 조립질 51.9%, 부하량가중평균 56.2%이며, TP에 대한 잠재강우유출률은 세립질 61.2%, 조립질 51.9%, 부하량가중평균 54.4%로서 중량 기준의 잠재강우유출률 보다는 입도 그룹간의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다(Table 5). 중량을 기준으로 보면, 조립질 입자에 비해 가벼운 세립질 입자가 강우에 의해 쉽게 유출되기 때문에 세립질 입자의 잠재강우유출률이 높다. 그러나 오염부하를 기준으로 보면, 중량으로 인해 잘 유출되지 않는 조립질 입자라 하더라도 그 표면에 흡착되어 있던 오염부하가 용탈되어 빗물과 함께 유출되기 때문에 입도에 따른 잠재강우유출률의 차이는 크지 않은 것으로 해석된다.

Table 4. Mean removal efficiency of road vacuum cleaning in terms of RDS weight and pollution loads for different road conditions (unit: %)

Classification		Weight			TOC			TP		
		Fine	Coarse	Avg. ¹⁾	Fine	Coarse	Avg. ²⁾	Fine	Coarse	Avg. ²⁾
Curb-side Flower Bed	Yes	33.5	52.5	51.8	56.8	45.4	48.3	35.6	57.4	56.7
	No	37.7	41.4	40.9	40.0	54.4	51.7	55.1	56.0	55.8
Traffic Volume	High	32.6	37.6	37.0	37.5	48.6	46.9	47.0	40.3	41.0
	Middle	6.3	58.6	57.0	-	-	-	39.6	78.9	77.6
	Low	54.7	55.1	55.1	60.5	54.2	55.5	35.9	66.3	64.8
Average		35.6	46.9	46.3	46.7	50.8	50.4	41.2	57.0	56.4

N.B. 1) weight-weighted averages; 2) pollution load-weighted averages

Table 5. Mean potential wash-off rates of RDS weight and pollution loads for different road conditions (unit: %)

Classification		Weight			TOC			TP		
		Fine	Coarse	Avg. ¹⁾	Fine	Coarse	Avg. ²⁾	Fine	Coarse	Avg. ²⁾
Curb-side Flower Bed	Yes	63.0	31.9	33.8	60.4	44.2	48.7	64.5	52.5	55.5
	No	67.5	33.9	36.2	73.7	60.3	64.4	57.1	51.1	53.1
Traffic Volume	High	61.1	34.0	35.6	63.5	53.0	56.4	70.4	50.3	54.5
	Middle	73.4	35.8	38.6	68.8	52.8	58.6	68.4	56.0	59.5
	Low	61.7	28.6	30.6	66.9	49.4	52.4	49.4	49.7	50.4
Average		65.2	32.9	35.0	66.7	51.9	56.2	61.2	51.9	54.4

N.B. 1) arithmetic mean of weighted averages; 2) arithmetic mean of pollution load-weighted averages

삭감부하량 산정 시, 입자성 BOD₅에 대한 잠재강우유출률은 노면퇴적물 시료의 중량 기준 잠재강우유출률 평균치인 35.0%를 적용하고, 용존성 BOD₅에 대한 잠재강우유출률은 TOC의 용존성 잠재강우유출률 평균치(오염부하 기준 잠재강우유출률 평균치에서 중량 기준 잠재강우유출률 평균치를 차감한 수치)인 21.2%를 적용할 것을 제안한다. 한편, 입자성 TP에 대한 잠재강우유출률은 BOD₅의 경우와 동일하게 중량 기준 잠재강우유출률 평균치인 35.0%를 적용하고, 용존성 TP에 대한 잠재강우유출률은 TP의 용존성 잠재강우유출률 평균치인 19.4%를 적용할 것을 제안한다. 산정된 BOD₅와 TP의 잠재강우유출률은 본 연구의 한정된 시료에서 산출해낸 값으로 추후 추가적인 실험에 의한 데이터 보완이 필요하며, BOD₅측정 및 잠재강우유출률 산정을 위해 적용한 방법은 삭감부하량 산정을 위한 초기 연구 결과로서 추가적인 연구를 통해 보완을 해야 할 것으로 판단된다.

3.3. 수거퇴적물의 물리화학적 특성

대도시와 중소도시-농촌 수거퇴적물 사이에 특별한 차이점은 없는 것으로 조사되었다. 수거퇴적물의 함수율은 4.9~34.0%의 범위로서 평균 15.9%이며, 입도별 중량비는 미사-점토가 평균 5.0%, 모래-자갈이 평균 95.0%를 차지하는 것으로 조사되었다. 수거퇴적물 중의 TOC 농도는 미사-점토 평균 26,637 mg/kg, 모래-자갈 평균 16,584 mg/kg이고, TP 농도는 미사-점토 평균 739.7 mg/kg, 모래-자갈 평균 295.4 mg/kg로서 미사-점토가 모래-자갈에 비해서 1.6~2.5 배가량 높은 농도를 갖는 것으로 분석되었다(Table 6). 수거퇴적물의 중량에 따른 비점오염부하 삭감량 산정 시 수거퇴적물의 TP 농도는 317.6 mg/kg을 적용하는 것을 제안한다.

한편, 수거퇴적물 중의 BOD₅ 농도를 측정하기 위해 채취된 수거퇴적물 시료 중 2개를 임의로 선정하여 각각 0.5시간, 1시간, 2시간, 5시간, 10시간 동안 진탕 후 진탕용액의 BOD₅ 농도를 측정하였으며, 사용된 수거퇴적물 시료의 양과 진탕용액의 부피를 고려하여 입자성 농도로 환산하였다. 두 개의 시료는 모두 진탕시간에 따라 BOD₅ 농도가 증가하다가 5시간 이후에는 안정되는 모습을 보였다(Fig. 2). 따라서 수거퇴적물의 BOD₅ 농도 측정을 위한 진탕시간은 5시간이 적절할 것으로 판단된다.

Table 6. Characteristics of RDS collected in this study (mean values in parentheses)

Classification	Silt-Clay	Sand-Gravel	Weighted average
Weight proportions (%)	1.0 - 12.1 (5.0)	87.9 - 99.1 (95.0)	-
TOC (mg/kg)	3,600 - 74,100 (26,637)	1,500 - 69,800 (16,584)	17,086
TP (mg/kg)	84.9 - 1907.4 (739.7)	50.2 - 844.9 (295.4)	317.6
Water content (%)	4.9 - 34.0 (15.9)		-

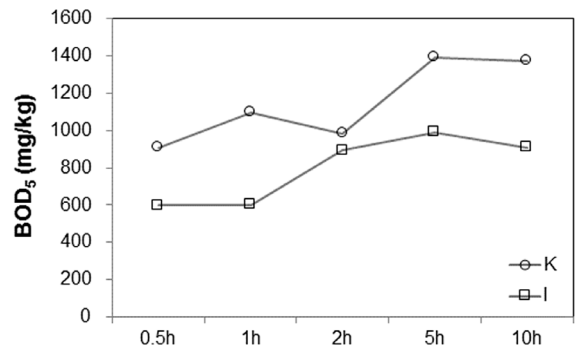


Fig. 2. Relations between stirring hours and BOD₅ concentrations of the two RDS samples in water

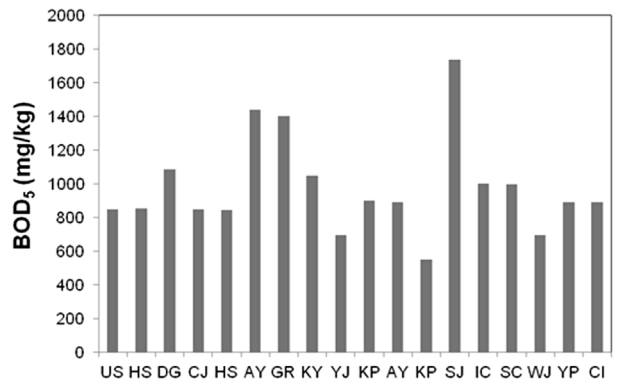


Fig. 3. BOD₅ concentrations of the RDS in water, measured after five hours of stirring

전체 수거퇴적물 시료 중 대표 시료 18개를 선별하여 각각 5시간 동안 진탕시킨 용출용액의 BOD₅ 농도를 측정한다

바, 그로부터 환산한 입자성 BOD₅ 농도는 평균 977.3 mg/kg 이었으며 전체는 551.6~1733.5 mg/kg의 범위를 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 3). 이에 삭감부하량 산정 시 수거퇴적물의 BOD₅ 농도는 977.3 mg/kg을 적용할 것을 제안한다.

3.4. 사례연구

본 연구에서 제안하는 두 가지 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량 산정식의 적용성을 검토하기 위해 국내 수도권에 소재하는 7개 지자체의 연간 도로청소차 청소거리 및 수거퇴적물 발생량 자료를 이용하여 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량을 산정하였다(Table 7). 연구 대상인 7개 지자체의 청소거리는 19,652~75,607 km/year (평균 43,106 km/year), 수거퇴적물 발생량은 560~2,482 ton/year (평균 1,182 ton/year)인 것으로 조사되었다. 도로의 발생부하량 원단위는 토지계 비점오염원 원단위 개정안 중 도로를 포함하고 있는 대지값을 준용하였다. 또한 연구 대상 도로의 평균 차로수와 평균 차로 폭을 고려하고, 도로 양측의 청소차 청소지역에 90%의 부하량이 집중된다는 가정 아래 도로 단위거리당 발생부하량을 산정하였다. 청소거리에 따른 연간 삭감부하량은 BOD₅ 768~3,387 kg/year (평균 2,047 kg/year), TP 32~142 kg/year (평균 86 kg/year)로 산정되었고, 수거퇴적물의 증량에 따른 연간 삭감부하량은 BOD₅ 308~1,363 kg/year (평균 649 kg/year), TP 97~429 kg/year (평균 204 kg/year)로 산정되었다. 청소거리에 따른 삭감부하량이 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량에 비해 평균적으로 BOD₅는 3.6배 높게 산정되었으며, TP는 절반정도 수준인 0.47배로 산정되었다. 이는 완전히 다른 방식에 의해 산정된 수치들임을 감안하면 비교가능한 수준인 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 분석결과는, 각각의 삭감부하량 산정 방법에 크고 작은 불확실성이 내재하는데다가 적은 수의 시료 분석에 의한 결과로 추가적인 연구를 통해 이러한 점들을 보완한다면 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량을 보다 현실에 가까운 수준으로 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

4. Conclusion

도로청소에 의한 비점오염물질 저감효과를 정량화하는 방안으로 도로청소차의 청소거리에 따른 방법과 도로청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 방법을 제시하였다. 도로청소

차의 청소거리에 따른 삭감부하량은 단위거리당 오염물질 발생부하량, 도로청소차의 청소거리, 도로청소차의 청소효율, 강우에 의한 오염물질의 유출률 등을 고려하여 산정하고, 도로청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량은 수거퇴적물의 증량, 오염물질 농도, 강우에 의한 오염물질의 유출률 및 적치장 배수체계 유지관리 수준 등을 고려하여 산정한다. 두 가지 산정방식에 고려되는 요소들 중 청소효율 및 강우에 의한 오염물질의 유출률, 오염물질의 농도를 산정하기 위해 시료채취 및 분석을 수행하였다. 도로청소차 청소거리에 따른 삭감부하량 산정 시 BOD₅ 청소효율은 도로청소 전/후 노면퇴적물 시료 증량 저감률 평균치인 46.3%를 적용할 것을 제안한다. 또한 TP 청소효율은 도로청소 전/후 노면퇴적물 시료 TP 부하량 저감률의 평균치인 56.4%를 적용할 것을 제안한다. 도로청소차의 청소거리 혹은 도로청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량 산정 시 입자성 BOD₅ 유출률은 강우 전/후 노면퇴적물 시료 증량 저감률 평균치인 35.0%를 적용하고 용존성 BOD₅ 유출률은 TOC의 용존성 유출률을 준용하여 TOC 부하량 유출률에서 시료무게 유출률을 뺀 21.2%를 적용하는 것을 제안한다. 또한 삭감부하량 산정 시 입자성 TP 유출률은 강우 전/후 노면퇴적물 시료 증량 저감률 평균치인 35.0%를 적용하고 용존성 TP 유출률은 TP 부하량 유출률에서 시료무게 유출률을 뺀 19.4%를 적용하는 것을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 도로청소 효율 및 잠재강우유출률은 도로청소에 의한 삭감부하량 산정을 위한 기초연구단계에서 산정된 결과로서 추가적인 연구를 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다. 도로청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량 산정 시 수거퇴적물의 BOD₅ 농도는 18개 수거퇴적물 BOD₅ 농도의 평균치인 977.3 mg/kg를 적용하는 것을 제안한다. 도로청소차의 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량 산정 시 수거퇴적물의 TP 농도는 미사-점토, 모래-자갈 TP농도의 증량가중평균치인 317.6 mg/kg를 적용하는 것을 제안한다. 본 연구에서 제안한 두가지 비점오염부하 삭감량 산정방법을 이용하여 국내 7개 지자체의 연간 청소거리 및 수거퇴적물 발생량 자료에 적용해본 결과 청소거리에 따른 삭감부하량이 수거퇴적물 증량에 따른 삭감부하량에 비해 평균적으로 BOD₅는 3.6배 높게 산정되었으며, TP는 0.47배로 산정되었다. 산정 방법 간 완전히 일치하는 결과는 아니지만 방법의 차이 및 각 방법이 지닌 불확실성 그리고 1년

Table 7. Estimations of annual pollution loads removed by road vacuum cleaning at 7 local governments in Korea

Local governments	Annual road vacuum cleaning (km/year)	Annual RDS collected (ton/year)	Estimations by vacuum cleaning distance		Estimations by amount of RDS collected	
			BOD ₅ (kg/year)	TP (kg/year)	BOD ₅ (kg/year)	TP (kg/year)
BP	37,843	651	2,103	88	357	112
KP	75,607	2,482	3,387	142	1,363	429
MP	36,395	1,528	1,512	63	839	264
WJ	19,652	682	768	32	375	118
D	23,558	560	1,301	54	308	97
KY	37,085	778	2,048	86	427	134
AY	71,605	1,591	3,207	134	874	275
Average	43,106	1,182	2,047	86	649	204

동안 수거된 많은 양을 산정하여 비교했음을 감안하면 두 식은 삭감량 산정방법론으로서 가치가 있으며, 추가적인 연구를 통한 보완이 이루어지면 도로청소에 의한 비점오염부하 삭감량을 보다 현실에 가까운 수준으로 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국립환경과학원 연구용역사업 “도로청소를 통한 비점오염 저감효과 및 총량제 적용방안 연구”의 일부로 수행되었습니다.

References

- Ball, J. E., Jenks, R., and Aubourg, D. (1998). An Assessment of the Availability of Pollutant Concentrations on Road Surfaces, *The Science of the Total Environment*, 209, 243-254.
- Brown, S., Susfalk, R., Fellers, D., and Fitzgerald, B. (2011). *Effectiveness of Street Sweeping in Incline Village, NV*, Nevada Tahoe Conservation District, Incline Village, NV, 50.
- Egodawatta, P. and Goonetilleke, A. (2006). Characteristics of Pollution Build-Up on Residential Road Surfaces, Piasecki, M., Wang, S. S. Y., Holz, K. P., Kawahara, M., Gonzalez, A., and Beran, B. (eds), *Proceedings of the 7th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE 2006)*, 10-13 September, Philadelphia, USA: College of Engineering, Drexel University, 1-10.
- Goonetilleke, S. A., Thomas, E., Ginn, S., and Gilbert, D. (2005). Understanding the Role of Land Use in Urban Stormwater Quality Management, *Journal of Environmental Management*, 74(1), 31-42.
- Kang, H., Kang, H., and Shin, C. (2011). *The Examination of Best Management Practice to Control Non-Point Source Pollution*, EXTRT-2011-21-534.9607, The Korea Expressway Corporation Research Institute, 162-248. [Korean Literature]
- Lee, K. Y. and Han, S. H. (2012). *A Study on the Treatment of Non-Point Source Pollutants in Gyeonggi-Do*, Policy Research 2012-21, Gyeonggi Research Institute, 49-50. [Korean Literature]
- Li, H., Shi, A., and Zhang, X. (2015). Particle Size Distribution and Characteristics of Heavy Metals in Road-Deposited Sediments from Beijing Olympic Park, *Journal of Environmental Sciences* 32(1), 228-237.
- Michael, D., Roop, J., Shui-Chow, Y., and Ronald, P. (1985). *Performance Evaluation of an Improved Street Sweeper*, EPA/600/S7-85/008, US-EPA, North Carolina, Project Summary, 3.
- Ministry of Environment (MOE). (2011). *Standard Methods for the Measurement of Solid Waste*, NO. 2011-160, Ministry of Environment, 23-26. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2012a). *Feasibility Study of Urban Diffuse Pollution Management by Road Vacuum Cleaning*, Ministry of Environment, 83-131. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2012b). *Standard Methods for the Measurement of Water and Wastewater*, 2011-103, ES 04851.1, ES 04853.1, ES 04861.1, ES 04863.1, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2012). *Statistical Yearbook of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs* (Director for Information Management), (2), Minister of Land, Transport and Maritime Affairs, 194. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2006). *Development of Methods to Estimate Fugitive Dust Discharges and to Measure Real-Time Fugitive Dust in Roads*, National Institute of Environmental Research, 151-188. [Korean Literature]
- Sartor, J. D. and Boyd, G. B. (1972). *Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants*, EPA-R2-72-081, US-EPA, Washington D.C., 117.
- Todd, M. J., Vellidis, G., Lowrance, R. R., and Pringle, C. M. (2009). High Sediment Oxygen Demand within an Instream Swamp in Southern Georgia : Implications for Low Dissolved Oxygen Levels in Coastal Blackwater Setreams, *Journal of the American Water Resources Association*, 45(6), 1493-1507.
- Yee, L. T., Pusin, H. N. M. F., Lee, N., and Miod, M. C. (2011). Sediment Oxygen Demand of the Santubong River and Their Contributing Factors, *International Journal of Applied Science and Technology*, 1(6), 162-168.
- Yoo, K. Y. (2006). *Effectiveness of Road Cleaning and Its Implementation Methods in Seoul*, Si Jeong Yeon 2006-R-23, Seoul Development Institute, 45-74. [Korean Literature]