

Effect of Road Sweeping on the Abatement of Runoff Pollution Loads from in the Highway

고속도로 노면 청소에 따른 강우시 유출오염부하 저감 효과 분석

Heeman Kang¹ · Doojin Lee^{2*} · Hunsik Yoon³

강희만¹ · 이두진^{2*} · 윤현식³

1 도로교통기술원 · 2 K-water 연구원 · 3 한국환경공단 수계관리처

Abstract : In this study, to evaluate the abatement of runoff pollution loads by the road sweeping(cleaning), various investigations are implemented at the sample area of the highway. As the results of evaluating the removal efficiency of pollutants along road cleaning, TSS showed about 78 % of the removal efficiency and COD showed 49 % of removal efficiency through the operation of cleaning vehicle of vacuum suction method. In case of TN and TP, they showed the relatively-lower removal efficiency by 30 ~ 35 %. TSS removal efficiency along the number of cleaning appeared about 60 % in case of one time of cleaning and the additional removal effect did not appear though the number of cleaning increased to two times. With running speed of cleaning vehicle, TSS removal ratio is lessened from 60 % to 20 % when cleaning vehicle speed up to 20 km/hr from 6 km/hr. It seems that the reasons why the removal efficiencies are inversely proportional to its speed are related to the lower vacuum efficiencies and the disturbed particles on the road.

In the pollutant build-up analysis, it is showed that it takes more time to the critical pollutant build-up in the shoulder than the center of the road. It is also showed that the proper cleaning cycle is recommended as 4 ~ 6 dry weather days without rainfall events.

Key words : road sweeping(cleaning), runoff pollution load, cleaning vehicle

주제어: 도로청소, 강우유출오염부하, 도로청소차량

1. 서론

일반적으로 도시지역의 비점오염물질 저감 방안은 크게 예방적인 오염원 관리(Source control)와 처리시설을 통한 유출오염부하 관리(Structure and Non-Structure control)로 구분할 수 있으며, 도로의 경우 주요한 오염원 관리는 정기

적인 도로청소를 통하여 이루어지고 유출수 관리 는 유출 유량이나 수질을 조절하는 저감시설을 통하여 이루어진다(NCHRP, 2006).

미국 EPA(1999)는 강우시 방류수역으로 배출되는 비점오염물질을 저감시키기 위하여 도로나 주차장과 같이 유출계수가 높은 불투수지역에서는 주기적인 거리 청소를 통한 노면 축적 오염물질의 제거를 통하여 상당량의 비점오염부하를 저감시킬 수 있는 것으로 추천하고 있다.

일반적인 도로청소 방식에는 공기주입식(re-

* Received 23 May 2012, revised 4 December 2012, accepted 7 December 2012.

* Corresponding author: Tel.: 042-870-7320, Fax: 042-870-7549, E-mail: djlee@kwater.or.kr

generative air sweeper), 기계식(mechanical broom sweeper)과 흡입식(vacuum sweeper) 등이 있으며, 최근에는 고효율의 진공 흡입방식이 개발됨에 따라 미세입자들의 제거효율을 높일 수 있어 흡입식이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다(Kang et al., 2009). 반면에 기계식에 비하여 큰 입자나 젖은 초목류 등의 제거효율이 낮고 운전속도가 느린 단점이 있다(Schilling, 2005; Curtis, 2002).

일부 선행 연구에서는 도로 청소를 통한 오염물질 제거효율이 그다지 높지는 않은 것으로 보고되었는데(Sartor and Boyd, 1972; USEPA, 1983; Sartor and Gaboury, 1984; Smith, 2002), 이는 과거 인력이나 차량을 통한 청소시 큰 입경의 입자에 대한 제거효율은 높은 반면, 미세 입자에 대한 처리 효율이 상대적으로 낮았기 때문이다(Cowherd et al., 1998). 특히 미세입자는 단위무게 당 표면적이 넓어 오염물질의 흡착면적이 크기 때문에 실제 오염부하 저감량은 미세입자의 제거효율에 따라 크게 좌우될 수 있다.

도로청소의 효과는 청소빈도, 청소설비운전 속도, 청소방식, 운전자의 숙련도, 초기축적오염부하 및 입경 등에 의해 영향을 받기 때문에(Sutherland and Jelen, 1997; USEPA, 1999; Curtis, 2002), 도로청소가 효과적인 강우유출 오염부하 저감 대책으로 고려되고 있음에도 불구하고, 도로청소를 통하여 강우유출수 수질이 개선되는 직접적인 증거는 많지 않은 것으로 보고되었다(Kang et al., 2009).

본 연구에서는 국내 고속도로를 대상으로 시행되고 있는 도로청소를 통한 강우유출 오염부하 저감효과를 평가하기 위하여 청소시 수거되는 입자 물질의 크기 및 분포를 분석하여 도로청

소를 통한 제거 가능성을 검토하였고 Pilot 규모의 실험구간과 실제 중앙내륙고속도로를 대상으로 고속도로 청소를 통한 비점오염물질의 저감효과를 검증하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 도로 청소 수거물의 입자 크기 및 분포 분석

도로 청소를 통하여 제거되는 입자성 오염물질의 특성을 조사하기 위하여 고속도로 주요구간에 설치된 도로청소폐기물 집하장 5곳을 선정하여 도로청소 수거물 시료를 확보하였다. 집하장내 시료는 청소차에서 청소 수거물의 하역이 이뤄지는 시점에 맞춰 채취가 이뤄졌으며 총 세 개의 시료를 채취하였다. 또한 도로 청소차량 수거물에서 채취된 시료와 강우시 실제로 발생하는 입자성 오염물질과의 비교를 위하여 경부고속도로 기흥휴게소 부근에 설치된 비점저감시설의 침전조내에 퇴적물을 대상으로 시료를 채취하였다.

채취한 시료를 대상으로 입도분석 실험(KS F2302, KS F2309)을 수행하였으며, 체 분석은 표준 망 체 4.75, 2.0, 0.84, 0.42, 0.25, 0.105, 0.075, 0.038 mm 이용하여 분리하였다.

2.2 도로 청소 효율 평가

도로청소차량에 의한 청소 전·후 효율평가는 중부내륙 고속도로 일부구간을 차단한 후 진행하였다.

차단구간내 일정구간을 테이프로 분할한 후 청소차를 이용하여 청소를 실시한 구역과 청소하지 않은 구간을 구분하였다. 청소는 갓길과 중앙분리대에 대하여 수행되었다. 도로 청소 후 실험조건별로 청소기를 활용하여 잔류된 입자물질

Table 1. Characteristics of study site

Site	Antecedent dry period	Paving material	Road width(one way)	Cleaning Area
J-B Highway (You-Ju Branch)	6 day	Concrete	7.2 m	7.7 km × 11.3 m

을 수거한 후 무게를 비교하였으며, 일정지역에 대해서는 살수차를 동원하여 인공강우를 살포 후 유출수를 채취하여 수질을 비교하였다. Fig. 2에 시험절차를 나타내었다.

청소효과 평가를 위한 실험조건은 청소차량 속도변화, 청소횟수, TSS부하량 변화, 입자크기 변화 등이었으며, 마지막으로 15 mm(강우강도 45 mm/hr)의 인공강우를 20분간 살포한 후 유출수를 채취하여 유량가중 평균수질(Event Mean Concentration, EMC)을 분석하였다. 실험조건은 Table 2와 같다.

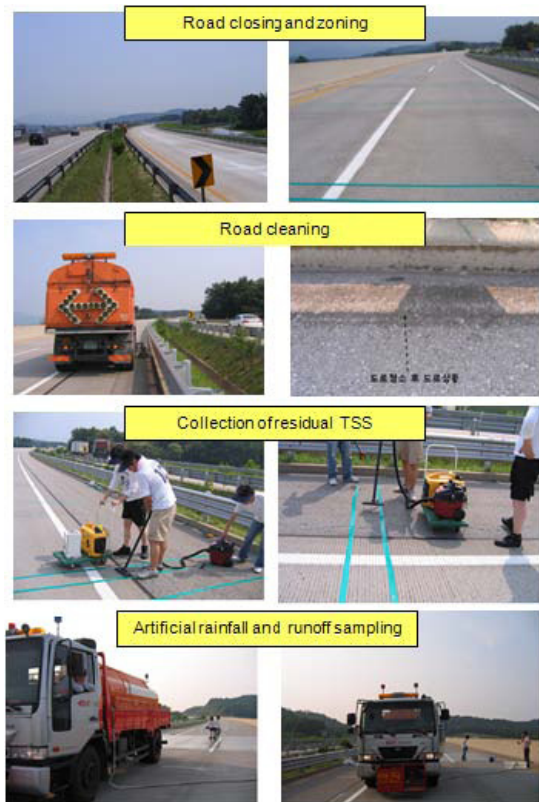


Fig. 1. Processing of experiment to evaluate road cleaning

청소차 속도에 따른 도로 노면 TSS제거 효율을 평가하고자 가로 50 m 세로 11.3 m의 두 지역을 선정하였고, 첫 번째 지역은 4 ~ 10 km/hr의 속도로 두 번째 지역은 20 km/hr 내외의 속도로 청소차를 이용하여 청소를 수행한 후 각 속도별로 청소된 지역의 노면에 남은 TSS를 수거하여 청소차 속도별 제거효율을 산정하였다.

청소 횟수에 따른 도로 내 TSS제거 효율 평가는 가로 10 m 세로 11.3 m 두 지역을 선정하여 청소를 1회 실시한 지역과 청소를 2회 실시한 지역의 노면에 남은 TSS를 수거하여 제거효율을 비교하였다.

TSS 입경에 따른 청소차 효율을 평가하기 위하여 가로 1.5 m, 세로 6 m 두 지역을 선정한 후 입도를 알고 있는 TSS를 면적당 각각 5 g/m² 정도가 되도록 시험 도로에 균질하게 뿌렸다. 이후 청소차를 이용하여 본 시험 지역을 청소한 이후 진공청소기를 이용하여 각 지역별로 남아 있는 TSS를 수거하여 TSS 입경별 청소차 효율을 평가하였다.

청소 유무에 따른 EMC 저감량을 평가하기 위하여 가로 10 m, 세로 11.3 m 두 지역을 대상으로 청소시행 혹은 미시행 이후 각각의 지역에 살수차를 이용하여 총 15 mm의 인공강우를 살포하였으며, 강우유출수 내 TSS농도를 시간에 따라 측정하였다.

2.3 도로 청소주기 결정을 위한 오염물 축적 (Build Up) 평가

효과적으로 도로청소를 수행하기 위해서는 노면에 쌓이는 오염부하의 축적속도와 해당지역의 무강우기간을 고려하여 청소주기를 설정하는 것

Table 2. Condition of experiment to evaluate road cleaning effects

Velocity of cleaning vehicle		Number of cleaning		Initial particle load			Particle size		Condition of road surface		Control site
6 km/hr	20 km/hr	1 st	2 nd	1.25 g/m ²	2.50 g/m ²	1.25 g/m ²	Fine 5.0 g/m ²	Coarse 5.0 g/m ²	Cleaning	No cleaning	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L

이 중요하다.

본 연구에서 청소주기를 결정하기 위하여 먼저 지표면에 축적되는 오염물의 축척도(Build up) 시험을 수행하였다. 대상도로의 형태는 Fig. 2와 같다. 도로면과 측구면(갓길면) 각각의 TSS 입자의 거동이 다르기 때문에 본 실험을 도로면과 측구면으로 구분하여 실시하였다. 도로면의 경우 1 m × 1 m 의 면적을 진공청소기를 이용하여 청소하였고, 측구면의 경우 1 m × 60 cm를 청소하였다. 가로 1.6 m, 세로 20 m 구역을 진공청소기를 이용하여 사전 청소한 후 이 구역을 20 등분 했다. 그 후 날마다 1 m² 씩 진공청소기로 먼지를 수거한 후 무게를 측정하였다.

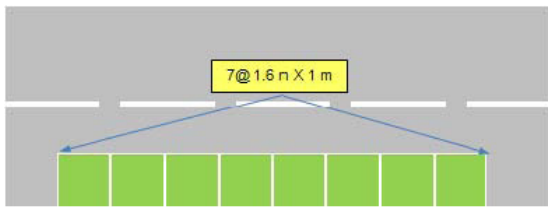


Fig. 2. Schematics for build up test of sediments on road surface

3. 결과 및 고찰

3.1 입도 분포 분석 결과

입도분포 시험은 청소를 통하여 수거된 시료와 강우유출시 발생한 시료를 대상으로 체가름 시험을 통해 분석하였다.

균등계수(Cu) 및 곡률계수(Cg)는 입자 지름 분포의 넓이와 형상을 수치적으로 나타낸 지수이며 이들 값에 의하여 입도 분포의 상태를 알 수 있다. 균등 계수는 입자 지름 누적 곡선의 기울기를 나타내는 것으로 Cu ≃ 1일 때에는 D₆₀과 D₁₀과의 범위가 좁아 입자지름 누적 곡선이 거의 직립함을 나타내며, Cu가 커짐에 따라 입자 지름 분포가 넓은 것을 나타낸다. 일반적으로 Cu가 4 이하의 흙은 ‘입도 분포가 나쁘다’고 말하고, 10 이상인 흙은 ‘입도 분포가 좋다’고 말할 수 있다. 곡률계수는 균등계수로 평가할 수 없는

경우에 사용하며, 입도 분포가 계단상인 경우에 이것을 정량적으로 나타내는 것으로 C_g = 1 ~ 3은 ‘입도 분포가 좋다’는 것을 의미한다. 입도분석 결과를 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 근거하여 흙을 구분하였다. 이 방법은 공학이나 지질학분야에서 흙을 입자의 크기와 입도분포, 소성 등의 기준으로 분류하는 체계이다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{식1})$$

$$C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (\text{식2})$$

여기서 D₆₀ : 60 % 통과율 입경

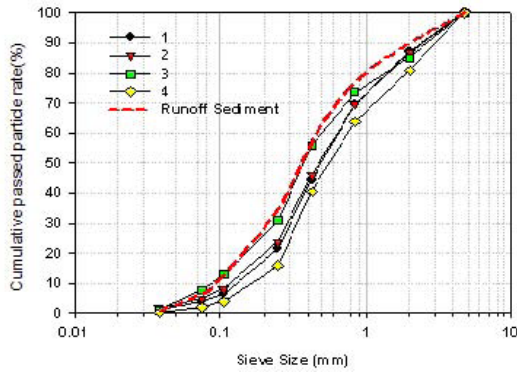
D₁₀ : 10 % 통과율입경

D₃₀ : 30 % 통과율 입경

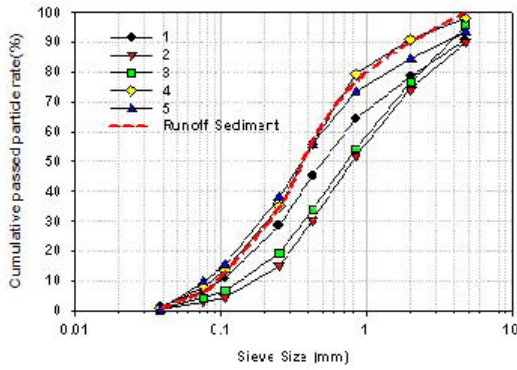
청소수거 시료와 강우유출 시료의 입경분포를 Fig. 3에 나타내었다. 수원지사의 청소수거 시료 5개에 대한 입도분석결과 50 % 입경은 평균 0.5653 mm (표준편차 0.2175 mm)로 계산되었다. #200 (0.075 mm)체 통과율은 평균 6.33 % 정도로 실트질의 분율이 매우 낮은 것으로 나

Table 3. Unified soil classification system

	First letter		Second letter	
	Symbol	Definition	Symbol	Definition
Coarse grained soils more than 50 % retained on No.200 (0.075 mm)	G	Gravel	W	Well-graded
			P	Poor-graded
	S	Sand	M	Silt
			C	Clay
Fine grained soils more than 50 % passes No.200 sieve	M	Mo	L	Low-plasticity
	C	Caly		
	O	Organic clay	H	High-plasticity
Highly organic soil	Pt	Peat		-



(a) Kyung-Boo Highway(Suwoon)



(b) Young-Dong Highway(Kunpo)

Fig. 3. Particle size distribution of collected sample by cleaning and runoff

타났다. 군포지사에서 채취한 청소과정에서 수거된 시료 4개의 경우도 수원지사와 유사하게 50%에 해당하는 입경이 평균 0.5092 mm (표준편차 0.0849 mm), 0.075 mm 체 통과율은 평균 4.61%로 나타났다. 기흥휴게소 지점에 설치된 강우유출 오염저감시설의 침전조에 퇴적된 시료를 두 지역의 청소수거 시료와 비교한 결과 입경의 범위는 비슷하였으나, 상대적으로 입경 분포가 작은 것으로 나타났다.

Fig. 4는 경부고속도로 기흥분기점에서 조사된 강우유출수 및 청소수거 시료 내에 존재하는 입자의 입경별 누적분포를 비교한 것으로 실제 도로유출수 내 무게비 50%의 입자들은 0.04 mm 이하의 미세입자들인 반면 청소수거 시료의 50% 입자들은 0.34 mm 이하의 입자들의 분포에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 보다 상

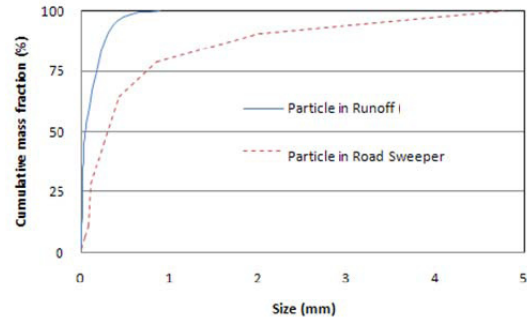
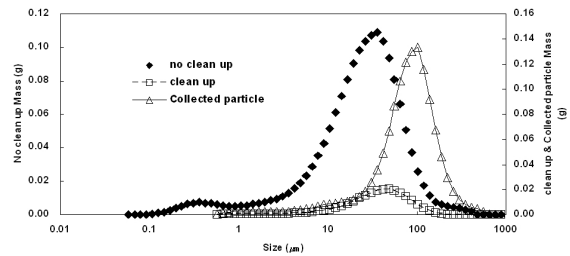
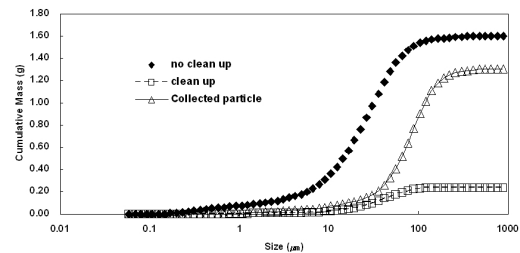


Fig. 4. Comparison of Cumulative particle size fraction between cleaning and runoff sample



(a) Particle size distribution



(b) Cumulative mass of particle size distribution

Fig. 5. Comparison of Particle size and cumulative mass distribution between road cleaning and non-cleaning

세한 분석을 위하여 일반 도로를 대상으로 청소 유무에 따라 인공강우를 살포한 후 수거된 강우 유출수 내 입자와 청소 시 수거된 입자에 대하여 입도분석기기를 이용하여 분석하였다(Fig. 5).

Fig. 5(a)의 결과와 같이 청소 전후로 입자량 자체는 물론이고 입도분포 곡선의 경향에 큰 차이를 나타내었다. 또한 청소 전 입자 크기와 청소를 통해 포획된 입자 크기를 비교했을 때 Fig. 5(b)와 같이 청소를 통해 포획된 입자의 곡선이 우측으로 더 치우쳐 있으며, 평균입경이 0.078 mm로 청소전 입자의 평균 입경인 0.024 mm에

비해 더 큰 것으로 나타났다. 이는 청소를 통해 제거되지 않은 큰 입자가 지표면에 남아 있기 때문으로 해석되며, 그림에서와 같이 흡입식 청소의 경우 대체로 약 0.03 mm(30 μm) 이상의 입자제거 효율이 높게 나타났으며, 10 μm 이하 입자는 청소 이후에도 상당량 잔존하는 것으로 나타났다.

3.2 청소차량 효율 평가 결과

Fig. 6은 청소횟수에 따른 TSS제거효율을 나타낸 것으로 청소차를 이용하여 고속도로 갓길 및 중앙분리대를 1회 청소하는 경우 TSS 제거 효율은 60 % 정도로 나타났으며, 청소 횟수를 2회로 증가하여도 TSS 제거효율의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 초기 청소차 운영 시 제거되지 않은 도로 내 TSS는 추가적인 청소차 운영을 통해서도 제거되지 않는 것을 의미하며 Fitz et al.(2000)도 대부분의 도로청소 시 초기 청소 때 수집효율이 97 %에 이르며 반복적인 청소가 효율적이지 않다고 보고된 내용과 일치한다.

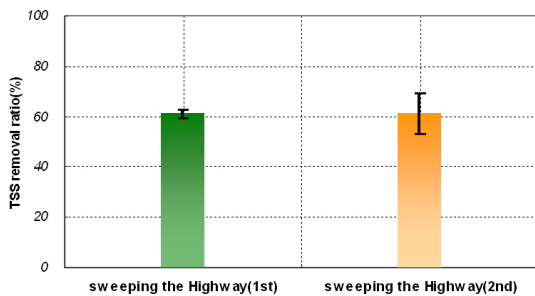


Fig. 6. TSS removal efficiency according to number of cleaning.

Fig. 7은 도로 청소차량의 주행속도에 따른 TSS 제거효율을 나타낸 것으로 청소차 운전속도를 기존 6 km/hr에서 20 km/hr로 증가시킬 경우 TSS 제거효율은 60 %에서 4 %로 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 진공흡입 방식의 경우 차량 주행속도가 일정 속도 이상 되는 경우 충분한 흡입효율을 보이지 못하고 또한 차량 속도증가에 의하여 표면 축적오염물의 교란 등

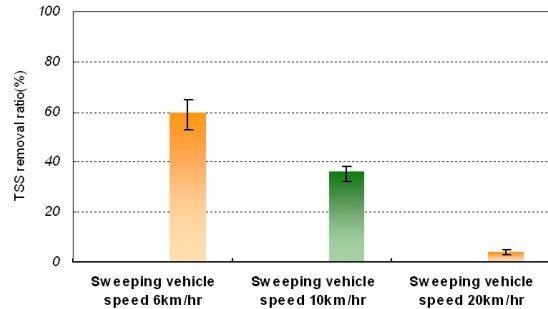


Fig. 7. TSS removal efficiency according to velocity of road cleaning vehicle.

이 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 도로청소 유무에 따른 인공강우 유입 및 유출수의 유량과 농도를 비교한 것으로 실제 강우 시와 유사하게 초기강우 현상이 나타났으며, 유출은 25분간 이루어졌다.

강우유출수의 오염물질 농도는 강우패턴에 따라 시간에 따른 변동성이 크기 때문에 단일 강우 사상의 대표 오염농도로 유량가중평균농도(Event mean concentration, EMC)를 활용한다.

Table 4는 인공강우 유출수에 대한 수질항목별 EMC를 나타낸 것으로 TSS는 78 %정도의 제거효율을 보였으며, COD는 49 %의 제거효율을 나타내었다. 그러나 TN과 TP의 경우 30 ~ 35 % 정도의 낮은 제거효율을 보였다. 중금속의 경

Table 4. EMC removal efficiency by road cleaning

Item	Event date		Removal efficiency(%)
	Before road cleaning	After road cleaning	
TSS (mg/L)	53.1	11.8	78
BOD (mg/L)	16.8	11.4	32
COD (mg/L)	37.7	19.2	49
TN (mg/L)	0.8	0.5	31
TP (mg/L)	0.50	0.32	35
Cr (mg/L)	0.034	0.014	59
Fe (mg/L)	8,114	1,858	77
As (mg/L)	0,011	0,003	69
Cu (mg/L)	0,152	0,105	31
Cd (mg/L)	N.D.	N.D.	-
Pb (mg/L)	N.D.	N.D.	-
Zn (mg/L)	0,727	0,688	5

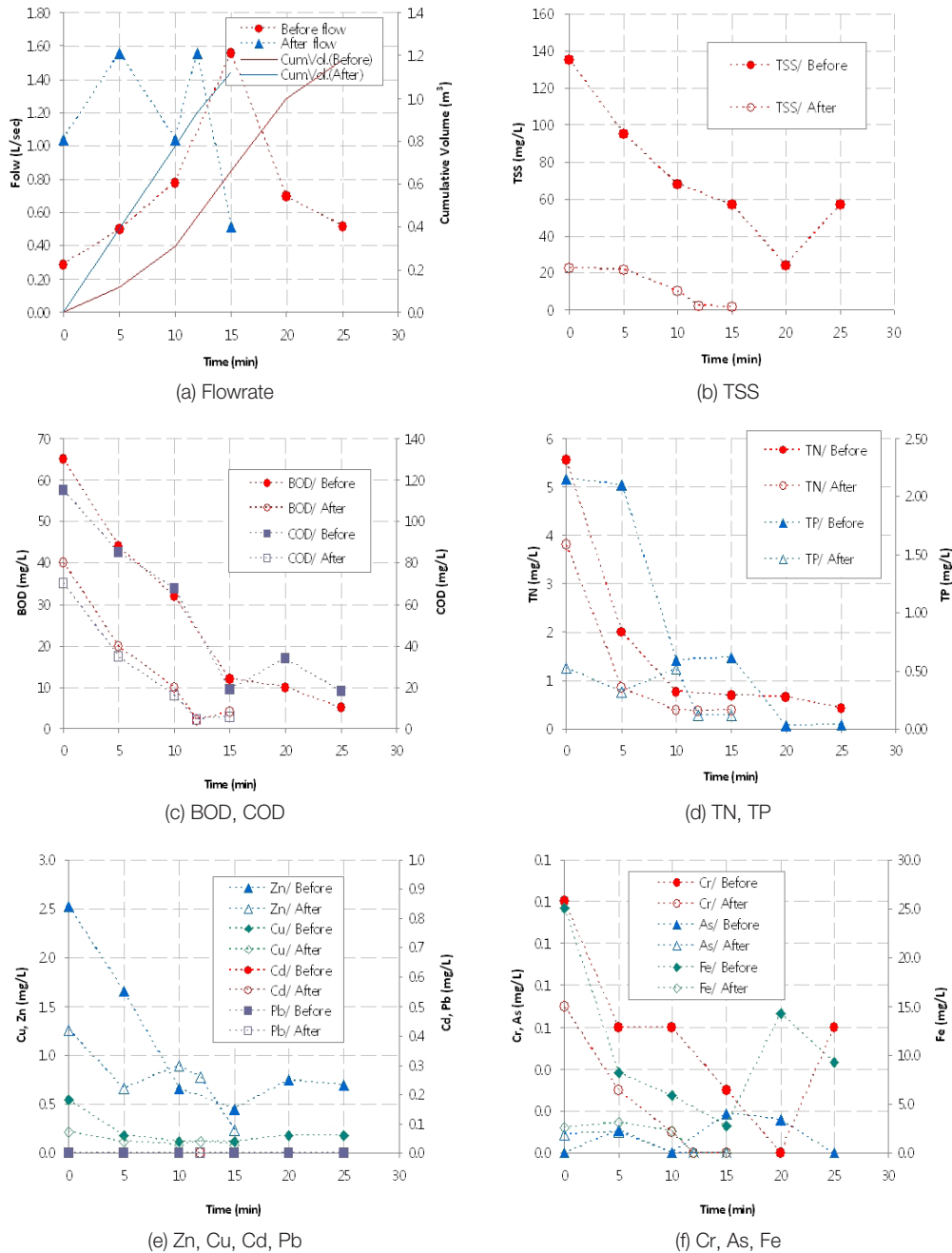


Fig. 8. Comparison of contaminant concentration between before and after road cleaning

우 Cr, Fe, As는 60 % 정도의 비교적 높은 제거율을 나타낸 반면 Cu, Zn은 30 % 이하로 나타났고 Cd와 Pb는 청소 유무와 관계없이 인공강우에 의한 유출수에서는 검출되지 않았다.

이는 입도 분석 및 진공청소기 효율 평가에서

와 같이 청소시 미세입자의 대기 중 교란 및 이동과 물살포로 인한 도로표면과의 부착에 의해 진공흡입방식은 미세입자의 제거에 한계가 있기 때문인 것으로 판단되며, 향후 장기적인 모니터링 및 입도분석이 필요한 것으로 사료된다.

3.3 청소주기 도출을 위한 축적량(Build Up) 평가

Fig. 9는 도로 청소유무에 따른 오염물질의 축적 경향에 대한 일반적인 예를 나타낸 것으로 오염 입자는 시간이 경과됨에 따라 초기에는 비례적으로 축적되지만 어느 임계점이 지나게 되면 도로 위 차량 운행 혹은 기상조건에 따라 입자성 오염물질이 분산 혹은 재분배에 의해 도로 인근 지역으로 이동한다. (Cowherd et al., 1984; Kang et al., 2009). 따라서 도로 위에 존재하는 입자들이 분산 혹은 재분배되기 전에 도로청소를 수행하여야 도로청소 효율을 극대화 할 수 있으며, 도로 인근지역의 오염도 최소화 할 수 있다.

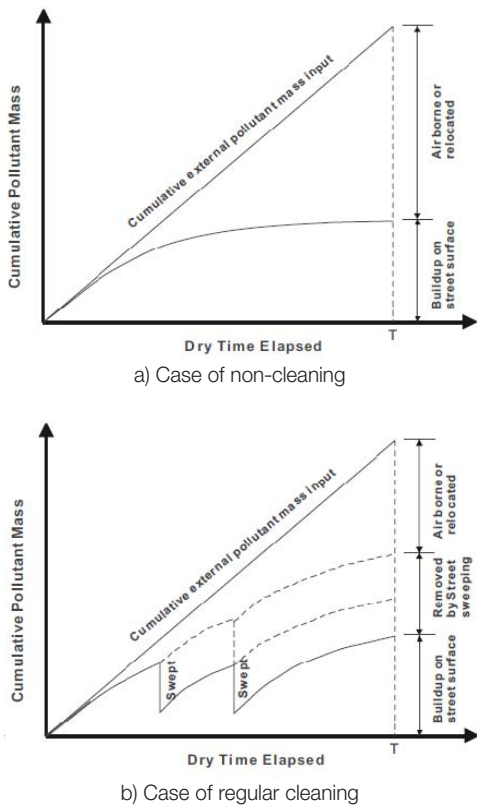


Fig. 9. Comparison of cumulative pollution mass on road between non-cleaning and regular cleaning

Fig. 10은 청소주기 산정 예를 나타낸 것으로 오염물 축적과 세척 결과를 구축한 이후 Sartor et al.(1974)이 제안한 식을 이용하여 도로청소 주기를 검토하였다.

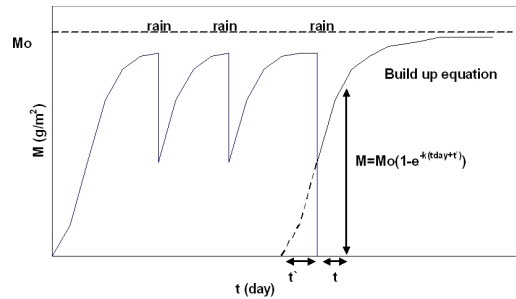


Fig. 10. Calculation of road cleaning cycle(Deletic et al., 1997)

$$M = M_0(1 - e^{-kt}) \quad (\text{식 3})$$

여기서,

M = the amount of sediments after sweeping

M₀ = the initial amount of sediments

K = dimensionless empirical constants dependent on sweeper characteristics

Fig. 11은 도로 노면의 입자물질 축적 실험이 정상적으로 이루어져 도로 노면의 TSS 축적량이 평형에 도달한 결과를 나타낸 것으로 도로 노면 및 갓길 모두에서 건기일수 7일 정도에 평형에 도달하는 것으로 나타났다. 평형상태의 축적량(M₀)은 도로면이 19.3 g/m²이었으며, 갓길은 28.3 g/m²으로 산정되어 노면의 축적량에 비하여 갓길의 축적량이 전반적으로 높은 것으로 나타났다는데 이는 차량 주행으로 인하여 입자성 오염물질이 갓길로 이동되어 더 많이 축적되었기 때문으로 판단된다.

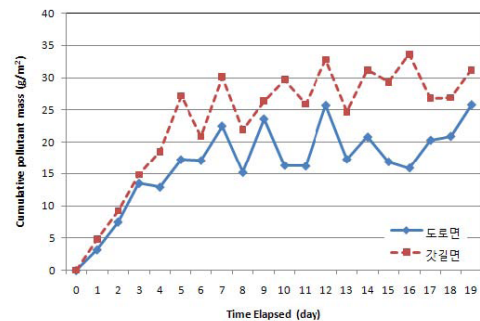


Fig. 11. Cumulative pollutant mass on road according to dry weather period

도로면 및 갓길면의 축적량 실험을 통하여 얻어진 값에 대한 회귀분석 결과 평형상태의 축적량(M_0)는 갓길면의 경우 30.3 g/m^2 , 도로면은 19.8 g/m^2 으로 도출되었으며 축적속도(k)는 각각 도로면은 0.33 day^{-1} , 갓길은 0.253 day^{-1} 으로 산정되었다.

Fig. 13, 14는 실제 도로 노면에 축적되는 입자의 양과 이상적으로 노면에 축적되는 입자의 양을 나타낸 것으로 평형상태를 초과하는 입자의 경우에는 기상조건 및 차량운행에 의해 재분배 혹은 비산되는 것으로 사료된다. 또한 도로청소의 적정주기는 축적량이 한계에 이르는 지점인 4 ~ 6일 사이가 적합한 것으로 판단된다.

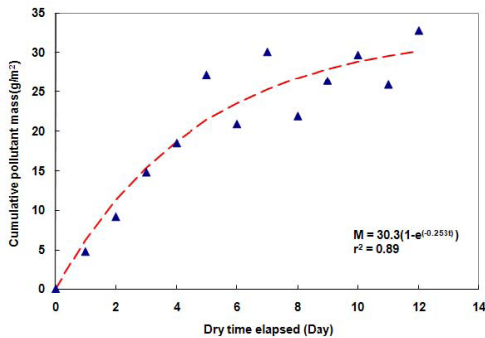
4. 결론

본 연구에서는 국내 고속도로를 대상으로 시행되고 있는 도로청소를 통한 강우유출 오염부

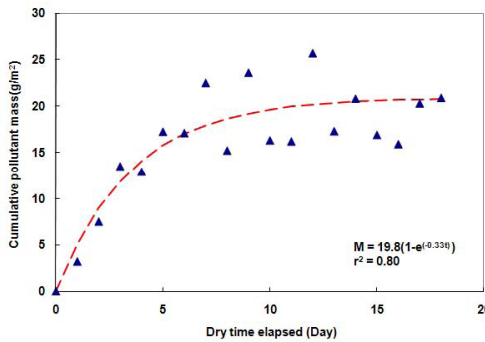
하 저감효과를 평가하기 위하여 청소시 수거 입자의 특성분석, 청소차량 운행 방식, 오염물 축적률을 고려한 청소주기 산정 등을 수행하였다.

도로청소 수거시료와 강우유출시료를 대상으로 입경분포를 분석한 결과, 청소수거시료의 50 % 누적통과입경은 약 $0.34 \sim 0.56 \text{ mm}$ 으나, 강우유출수에 포함된 입자의 50 % 누적통과입경은 0.04 mm 이하로 나타나 강우유출 입자가 상대적으로 미립자였으며, 도로 청소(흡입식) 전, 후의 강우유출수내 입경을 비교한 결과, 청소전에 비해 청소 이후의 평균입경이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 제거되지 않은 큰 입자가 지표면에 남아있기 때문으로 해석되었다..

도로청소에 따른 오염물 제거효율 평가 결과 TSS는 78 %정도의 제거효율을 보였으며, COD는 49 %의 제거효율을 나타내었다. TN과 TP의 경우 30 ~ 35 % 정도의 상대적으로 낮은 제거효율을 보였다.

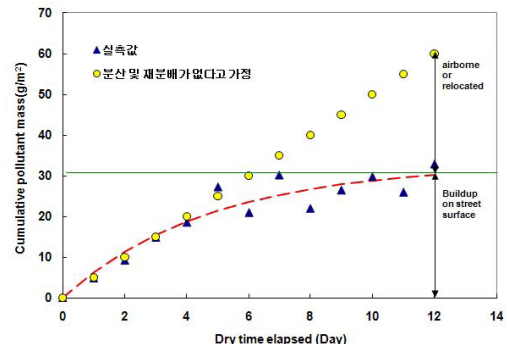


a) Shoulder of the road

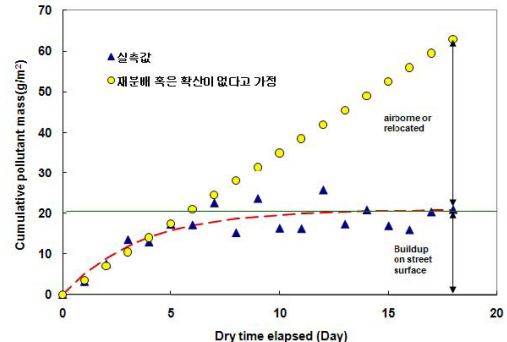


b) Road surface

Fig. 12. Calculation of k value to derive road cleaning cycle



a) Shoulder of the road



b) Road surface

Fig. 13. Calculation of road cleaning cycle

청소횟수에 따른 TSS 제거효율은 1회 청소시 60 % 정도로 나타났으며, 청소 횟수를 2회로 증가하여도 TSS 제거량이 증가하지 않았는데 이는 초기 청소차 운영 시 제거되지 않은 TSS는 동일한 흡입방식의 청소차 운영을 통해서도 추가적으로 제거되지 않음을 알 수 있었다.

청소차량의 주행속도에 따른 TSS 제거효율의 경우 청소차 운전속도를 기존 6 km/hr에서 20 km/hr로 증가하는 경우시 TSS 제거효율이 60 %에서 4 %로 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 진공흡입 방식의 경우 차량 주행속도가 일정 속도 이상 되는 경우 흡입률 저하 및 차량 속도 증가에 의한 노면 입자 교란 등이 영향을 미치는 것으로 사료된다.

도로내 오염물의 축적률 분석을 통한 청소주기 산정에서는 갓길이 도로에 비해서 오염물의 한계축적에 이르는 시간이 길게 나타났으며, 선행건기일 기준으로 4 ~ 6일 사이에 청소를 시행하는 것이 적절할 것으로 판단되었다.

참고문헌

Cowherd, C. Jr., Muleski, G., Garman, G., (1998) Particulate Matter from Roadways, Final Report prepared by Midwest Research Institute for Colorado Department of Transportation, Denver, CO.

Cowherd, C., Jr., and Englehart, P. J. (1984) Paved road particulate emissions, EPA-600/7-84-077, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Curtis, M. C. (2002) *Street sweeping for pollutant removal*, Department of Environmental Protection, Watershed Management Division, Rockville, Montgomery County, Md.

Curtis, M. C. (2002) *Street sweeping for pollutant removal*, Department of Environmental Protection, Watershed Management Division, Rockville, Montgomery County, Md.

Deletic A., C. Maksimovic and M. Ivetic, (1997). Modelling of Storm wash-off of Suspended Solids from Impervious Areas, *J. of Hydraulic Research (IAHR)*, 35(1), pp.99-117.

Fitz, D. R., and Bumiller, K. (2000) Determination of PM10 emission rates from street sweepers, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 502, pp.181~187.

Kang, J.H, Debats, S.R., and Stenstrom, M.K, (2009) Storm-Water Management Using Street Sweeping, *ASCE J. Environ. Eng.*, 135, pp. 479-489.

National Cooperative Highway Research Program (2006) Evaluation of Best Management Practices for Highway Runoff Control, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.

Sartor, J. D., and Boyd, G. B. (1972) Water pollution, aspects of street surface contaminants, *EPA-R2-72-081*, USEPA, Washington, D.C.

Sartor, J. D., and Gaboury, D. R. (1984) Street sweeping as a water pollution control measure: Lessons learned over the past ten years *Sci. Total Environ.*, 33, pp.171~183.

Schilling, J. G. (2005) Street sweeping, *Rep. No. 1, State of the Practice Prepared for Ramsey-Washington Metro Watershed District North St. Paul, Minn.*, <http://www.rwmwd.org>.

Smith, K. P. (2002) Effectiveness of three best management practices for highway-runoff quality along the Southwest Expressway, Boston, Massachusetts, *Water-Resources Investigations Rep. No. 02-4059*

Sutherland, R. C., and Jelen, S. L. (1997) Contrary to conventional wisdom, street sweeping can be an effective BMP, *Advances in modeling the management of stormwater impacts*, 5, Computational Hydraulics International, Cuelph, Ont., Canada, pp.179~190

United States Environmental Protection Agency USEPA. (1983) Results of the nationwide urban runoff program, *Vol I-Final Rep. No. WH-554*, Washington, D.C.

United States Environmental Protection Agency USEPA. (1999) Storm water management fact sheet-Dust control, *EPA 832-F-99-003*, Washington, D.C.