

## 도로청소 수거퇴적물의 특성과 비점오염물질 저감효과

### Characteristics of Collected Sediments from Road Sweeping and Reduction in the Nonpoint Source Pollutants Loading

정 권 Jeong, Kwon  
강 희 만 Kang, Hee-Man  
고 석 오 Ko, Seok-Oh

경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (E-mail : jeonghyun@khu.ac.kr)  
한국도로공사 도로교통기술연구원 (E-mail : heeman@freeway.co.kr)  
정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : soko@khu.ac.kr)

#### ABSTRACT

The stormwater runoff from road or expressway is known as one of important nonpoint pollution sources. To reduce the pollutants discharge from road or expressway, many best management practices(BMPs) have been applied and planned. Among the BMPs, road sweeping can be effective way to prevent pollutant washoff to environment. This study is performed to evaluate the characteristics of particles collected from the road by sweeping car. Size distribution and pollutant concentration of particles were analyzed. Based on the pollutant concentration and the specification of road such as length, width, and unit for pollutant generation, total amount of pollutant to be removed by road sweeping was estimated. Most of sediments collected by road sweeping was classified into sandy soil and fraction of fine grained soil was low. Although the concentrations of pollutants such as heavy metals in road sediments did not exceed the soil contamination criteria, washout of pollutants during sweeping work by spraying water might cause leaching of pollutants contained in sediments and thus resulted in low pollutant concentrations. Reduced amounts of pollutant by road sweeping showed 31.4% TSS reduction for ○○ region and 7.7% TSS for △△ region. Other pollutants showed low reduction rate, because of their leaching by water spraying. Results from this study indicate that detailed and well-planned investigation for the road sweeping is necessary for the accurate estimation of pollutant reduction from road or expressway.

#### KEYWORDS

non-point source, road, expressway, road sweeping, heavy metal, pollutant loading

#### 요지

도로에서의 강우유출수 내 포함된 오염물은 주요한 비점오염원으로 간주되고 있으며 비점오염물질 저감을 위하여 많은 대책이 적용되고 있다. 도로청소에 의한 방법 또한 오염물의 강우유출에 의한 배출량을 감소시킬 수 있는 대책 중의 하나로 인식되는 추세에 있다. 본 연구에서는 도로청소 시 수거된 토사입자들의 특성을 파악하고 퇴적토사에 함유된 오염물질의 농도를 분석하였다. 분석결과를 바탕으로 하여 도로 구간별로 도로청소에 의하여 저감할 수 있는 오염물의 양을 평가하였다. 도로청소를 통하여 수거된 퇴적토사는 모래질로 분석되었으며 세립토 비중은 낮은 결과를 보였다. 퇴적토사 내 오염물의 양은 토양환경기준을 초과하지 않았으나 청소작업 시 물을 살수함으로써 토사에 포함된 오염물이 세척되어 침출수로 미리 배출되는 것에 기인한다고 판단된다. 두 도로구역에 대하여 오염물 농도, 발생 퇴적토사량, 오염물 원단위를 적용하여 저감할 수 있는 오염물 양을 평가한 결과, ○○지역에 대하여 TSS 31.4% 및 △△지역에서는 TSS 7.7%의 TSS 저감량이 도출되었다. 중금속과 같은 타 오염물의 경우 훨씬 낮은 저감량이 평가되었으나 이는 물의 살수로 인하여 퇴적토사 내 오염물이 침출수로 배출된 것에 기인한다고 판단된다. 보다 정확하게 도로청소에 의하여 저감할 수 있는 오염물의 양을 산정하기 위하여 보다 자세하고 체계적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 핵심용어

비점오염원, 도로 및 고속도로, 도로청소, 중금속, 평균부하량

## 1. 서론

도로 표면은 강우유출수 오염원이기도 하며, 동시에 도로로부터 유래된 오염물의 이동 통로이기도 하다. 그러므로 도로청소는 도로유출수 및 도시로부터 유래된 오염물질을 조절 및 제거하는데 최적 방안 중(Best Management Practice, BMP) 하나로 제안되고 있다(EPA, 1994). 1970년대 초부터 도로유출수 내 비점오염물을 제거하기 위한 방법으로 도로청소에 대해서 연구되기 시작하였으며 최적조건 하에서 30%의 오염물 제거효율을 나타내고 있으며, 일반적인 조건에서는 10~30%의 오염물 제거 효과를 나타낸다. 도로 내 존재하는 납과 같은 중금속은 도로청소를 통하여 50% 이상 제거 가능하며, 특수한 조건에서는 그 이상의 효과를 나타낼 수 있다(Tobin and Brinkman, 2002; Kang et al., 2009). 미국 EPA는 포장지역의 입자성 물질을 청소하는 방법으로, 주기적인 거리 쓸기, 물을 이용한 미세 오염물질 제거 등과 같은 방법들을 제안하고 있다. 이와 같은 입자성 물질의 청소는 도로와 주차장 표면으로부터 유출되는 퇴적물질, 파편과 기타 오염물질 등 도시지역의 배수구에 잠재적으로 영향을 줄 수 있는 오염물질들을 저감시키기 위한 것이라 할 수 있다(Bannerman, 1999; German and Svensson, 2002). 일부 모니터링 결과에 의하면 거리 청소는 오염물질 부하에 대한 저감효율이 매우 높지는 않다고 보고되어져 왔으며, 굵은 입경의 입자들에 대한 효율은 높으나, 미세 입자에 대한 처리 효율은 낮은 것으로 평가되고 있다. 그러나 최근 거리청소기술을 개량하여 강우유출수의 오염물질 중 많은 부분을 포함하고 있는 미세입자들을 제거하는 기술의 향상으로 인해 오염물질 제거 효율이 높아졌다. 최근에는 많은 청소 기기들이 도로의 오염물질들을 제거함으로써 강우 시 수계내로 유입되는 오염물질의 부하를 줄일 수 있게 되었다. 미세입자들을 제거하는 능력을 향상시키기 위해서는 오염물질들의 대부분을 제거할 수 있도록 효과적으로 거리 청소를 계속 유지하여야 하며 연구를 통해 오염물질 제거와 도로면의 특성에 맞는 적절한 청소 프로그램 및 최적의 청소 주기의 설정이 요구되고 있다. 결과적으로 도로청소 방법은 일반적인 도로유출수 내 비점오염물 저감을 위해 사용하는 것도 가능하며 특정 오염물을 효과적으로 제어하기 위한 방법으로 사용할 때 도로청소 효율은 더 증가될 것으로 판단된다.

기존 연구에 의하면, 전통적인 기계식 빗자루와 습식 진공청소차는 비점오염물질을 5~30% 정도 저감시키며, 영양염류를 0~15% 정도 저감시키는 반면, 건식 진공청소차는 비점오염물질의 35~80%와 영양염류의 15~40%를 저감시키는 것으로 보고되고 있다(Calabro, 2010). 최근의 연구결과에 의하면, 주거지역에 건식 진공청소차를 이용할 경우 청소빈도에 의하여 차이가 있겠지만 연간 퇴적된 입자상 오염물

질(sediment)의 50~88%를 제거하는 것으로 나타났다(Calabro, 2010). 그리고 1주일에 한번 진공 청소를 하는 것은 고속도로의 부유성 퇴적물을 줄이는데 효과적이라는 연구결과가 있으며 퇴적물 제거 효율은 기계식 빗자루는 20~31%, 진공식 청소는 60~92%의 제거효율을 보였으며, 진공식 청소가 기계식 빗자루 방식보다 작은 입자에 대해서 1.5~5배가 높은 제거 효율을 보였다. Chang 등(2005)은 대기중의 총부유성입자를 제어하기 위해, 도로 청소와 체척의 효과에 대해 연구하였다. 이 연구에서 개선된 공기충전식 진공청소기와 세척기가 사용되었으며, 청소에 의해 방출되는 오염물질의 30% 정도를 제거할 수 있다고 하였으며, 교통량 및 풍속의 효과에 대해서도 살펴보았다. 기계적인 거리청소는 250 $\mu$ m 이하의 입자에 대해서는 효과적이지 않다고 하였다(Calabro, 2010). 따라서 강우 유출수에 의한 오염을 저감하기 위한 도로청소 방법의 효과는 특히 미세 입자와 연관된 중금속 물질의 제거에 대해서 저감 효과가 낮을 수 있음을 보여주는 것이다. 현재 국내에 도입된 진공흡입식 노면 청소 차량의 필터 크기와 흡입 세기에 대한 정보 부족은 미세먼지의 제거에 오히려 역효과를 줄 수도 있을 것이다. 이러한 제한사항들은 청소차량의 개선을 통해 극복할 수 있을 것이다.

비점오염물질의 저감을 위한 청소 프로그램을 계획, 운영하기 위하여 청소방법, 청소 빈도 등과 같은 인자에 대한 평가가 필요하며 도로의 퇴적물에 대한 조사가 선행되어야 한다. 또한, 침전물의 부하뿐만 아니라, 입도분포는 도시 강우유출수 관리계획에 지대한 역할을 하므로 즉, 큰 입자는 상대적으로 모니터링과 제거효과가 높으나 미세한 입자는 오염물을 흡착에 의하여 많이 포함하고 있으며 도시 강우유출수에 의해 더 먼거리를 이동할 수 있다. 따라서 도로 청소 계획 시에 이러한 사항들은 충분히 검토되어야 한다. 본 연구는 도로 청소로부터 수거되는 입자성 물질의 특성 평가 및 도로청소를 통한 강우유출수 내 비점오염물 제거효율을 제시함으로써 비점오염물질의 최적관리를 위한 도로청소 프로그램 구축에 중요 인자를 제공하기 위하여 수행되었다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시료채취 및 중금속 분석

본 연구에서는 도로청소시 수거되는 입자상 물질의 입자크기 분포를 평가하였으며, 그리고 중금속 추출법을 사용하여 입자상 물질에 흡착된 중금속의 흡착량을 평가하였다. 이를 위하여 도로에서 청소차를 이용하여 청소를 실시한 후 집하장에 하역한 퇴적토사를 수집하여 특성 평가를 실시하였다. ○○도로 구간의 첫 번째 시료의 채취는 도로 청소폐기물 집하장에서 5곳의 위치를 선정하여 시료를 채취하였다. 두 번

제 시료들은 △△ 도로구간의 도로 청소폐기물 집하장에서 5 곳의 위치를 선정하여 시료를 채취하였다. 집하장에서의 채취 위치별로 시료번호를 매겨 실험을 수행하였는데 1(안쪽), 2(중간아래), 3(중간), 4(바깥아래), 5(가장바깥)로 구분하여 실험을 진행하였다. 세 번째 시료 채취는 □□지점에서 청소차에서 폐토사 하역이 이뤄지는 시점에 맞춰 채취가 이뤄졌으며 총 세 개의 시료를 채취하였다. 본 연구에서의 분석결과로부터 기존에 제시되어 있는 고속도로에서의 오염물질 원단위와 비교하여 도로청소에 의한 저감량을 예측하였다.

## 2.2. 입도 분석

각 지점에서 채취한 시료의 입도 분포 분석을 위해 한국공업규격 (KS F 2302, KS F 2309)에 의해 규정된 입도 분석방법에 따랐으며, 체 분석은 표준망 체 4.75, 2.0, 0.84, 0.42, 0.25, 0.105, 0.075, 0.038mm를 이용하여 분리하였다. 또한 청소차에 의하여 수거된 도로 퇴적물과 강우시 도로 유출수에 의하여 이동하여 도로배수구에 침전된 퇴적 입자들과의 입도비교를 위하여 ○○도로구간 인근의 도로배수구 침강지에서 시료를 채취하여 입도분석하였다.

## 2.3. 전량분석법에 의한 중금속 추출

각각의 채취지점에서 채취한 토양시료를 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘되게 해체놓고 풍건시킨 다음, 나무망치로 분쇄하여 비소, 카드뮴, 납, 구리, 6가 크롬 등의 중금속 가용성 함량 분석대상 물질은 눈금간격 2mm의 표준체 (10mesh), 니켈, 아연 등 중금속 전함량 분석대상물질은 눈금간격 0.15mm(100mesh)시료를 각각 균등량(약 200g)씩 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 사용했다.

## 3. 연구결과

### 3.1. 도로내 입자상 물질에 의한 중금속 용출 가능성 평가

#### 3.1.1. 입도 분포 분석 결과

입도분포 시험은 시료의 일정량을 체가름시험을 통해 분석하였고, 입도분석 결과로부터 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)으로 흙을 구분하였다. ○○지점에서 채취한 샘플의 입도분석 결과를 표 1과 그림 1에 나타내었다. 분석 결과로부터 시료는 모두 모래질로 확인되었으며, 50% 입경은 5개 시료 평균 0.5653mm(표준편차 0.2175mm)로 계산되었다. #200(0.075 mm)체 통과율은 6.6, 2.94, 4.24, 8.17, 9.68%로 평균 6.33% 정도가 실트질 입경을 가지는 것으로 평가되어 실트질 이하의 입경 분율은 미미한 것으로 나타났다. 그림 1에 각 미미지점 샘플의 입

경에 따른 통과율을 비교하여 제시하였으며, ○○지점에 설치된 강우유출수 배수로 하단의 침강조에 퇴적된 샘플의 입경에 따른 통과율 또한 제시하였다. 이 그래프로부터 ○○지역에서 청소에 의하여 수거된 토사입자들의 입경이 강우유출수에 의하여 이동되어 침강조에 퇴적된 입자들에 비하여 입경이 크게 분포되어 있음을 알 수 있다. 즉, 청소에 의한 토사입자의 제거는 아주 작은 입자에 있어서는 낮은 효율을 보임을 간접적으로 보여주고 있다. 중금속과 같은 오염물은 미세입자에 더 많이 흡착되어 존재함을 감안할 때 청소에 의하여 작은 입자까지 제거할 수 있는 장치 또는 청소방법의 개발이 필요함을 나타내고 있다.

표 1. ○○지역 도로청소 수거퇴적물의 입도분석 결과

○○ 지역 청소수거토사	1(안쪽)	2(중간아래)	3(중간)	4(바깥아래)	5(가장바깥)
유효입경	0.0985	0.1674	0.1348	0.0895	0.0775
60% 통과율의 입경	0.7274	1.1221	1.0439	0.4715	0.4948
30% 통과율의 입경	0.2645	0.4387	0.3889	0.2130	0.1934
균등계수(Cu)	7.3847	6.7031	7.7441	5.2682	6.3845
곡률계수(Cg)	0.9764	1.0246	1.0748	1.0751	0.9754
분류	SP	SW	SW	SP	SP

단위 : mm(균등계수와 곡률계수는 단위 없음)

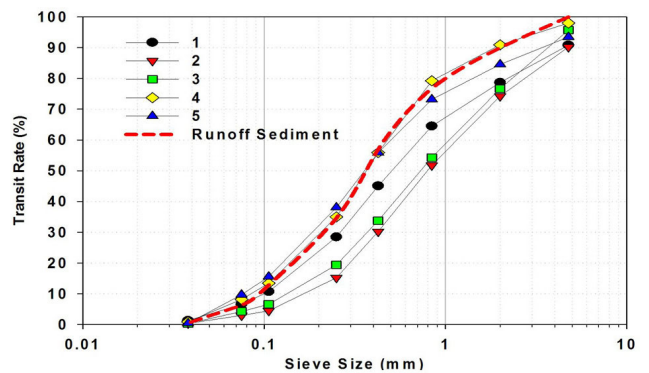


그림 1. Size distribution of sediments collected from the road sweeping(○region)

△△지역에서 채취한 샘플의 입도분석 결과를 표 2와 그림 2에 나타내었다. 분석 결과로부터 시료는 마찬가지로 모두 모래질로 확인되었으며, 50% 입경은 4개 시료 평균 0.5092mm(표준편차 0.0849mm)로 계산되었다. 실트질 이하의 입경 분율은 미미한 것으로 나타났다. #200(0.075 mm)체 통과율은 3.81, 4.89, 7.75, 1.97%로 평균 4.61% 정도가 실트질 입경을 가지는 것으로 평가되었다. 이것은 ○○지역 시료에 비해 미세입자 비율이 낮은 분포를 보이고 있다. ○○지역 강우유출수에 의하여 이동된 침강조 퇴적입자

에 비해서는 큰 입경분포를 보이고 있어 청소에 의한 미세입자의 제거가 낮은 효율을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 2. △△지역 도로청소 수거퇴적물의 입도분석 결과

△△ 지역 청소수거 토사	1(좌측표면)	2(좌측심부)	3(중간)	4(우측)
유효입경	0.1348	0.1195	0.0895	0.1557
60% 통과율의 입경	0.6606	0.6449	0.5448	0.7819
30% 통과율의 입경	0.3057	0.2844	0.2235	0.3532
50% 통과율의 입경	0.5192	0.4948	0.4081	0.6146
균등계수(Cu)	4.9006	5.3967	6.0872	5.0218
곡률계수(Cg)	1.0495	1.0495	1.0245	1.0247
분류	SP	SP	SW	SP

단위 : mm(균등계수와 곡률계수는 단위 없음)

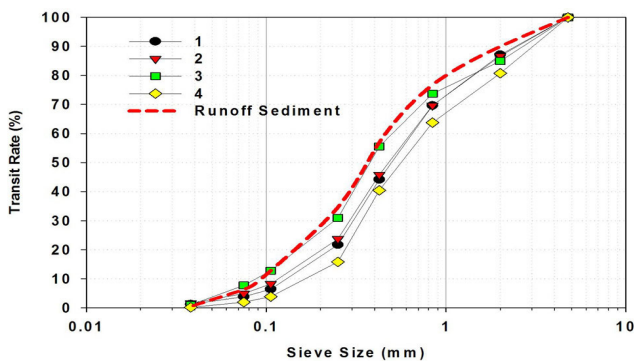


그림 2. Size distribution of sediments collected from the road sweeping(△△region)

### 3.1.2. 전량분석법 결과

전량분석법은 위에서 언급한 위치별 시료 중에서 ○○지역 시료에 대해서 1(안쪽), 3(중간), 5(가장 바깥)로 구분하여 실험을 진행하여 오염정도를 분석하였다. 전량분석법은 환경부가 제정한 토양오염우려기준의 2지역과 비교하여 중금속 항목에 대해서만 결과를 분석하였다. 모든 위치에서 Cr 항목을 제외하고는 2지역에 해당하는 우려기준을 초과하지 않았다.

표 3. 전량분석 결과(○○지역)

	1 (안쪽)		3 (중간)		5 (가장 바깥)	
	평균 (mg/kg)	표준편차	평균 (mg/kg)	표준편차	평균 (mg/kg)	표준편차
Cd	3.49	2.82	1.72	1.99	3.93	3.44
Cr	8.45	6.97	22.18	17.05	8.36	6.72
Cu	62.51	45.24	25.26	17.28	41.10	24.88
Ni	2.96	3.27	3.62	2.70	2.89	2.52
Pb	15.24	6.27	53.04	48.87	6.88	7.40
Zn	82.20	107.77	82.68	95.06	49.38	55.61
Fe	2889.00	1024.08	2189.00	366.69	3099.00	184.62

### 3.1.3. COD, TN, TP 분석 결과

도로 청소 실시에 의한 오염물질 저감 효과를 판단하기 위하여 △△지역으로부터 채취한 시료에 대해서 COD, TN, TP 분석을 실시하였다. 분석결과를 표 4에 나타내었다. 유기물질이나 영양물질의 농도는 그다지 높지 않음을 알 수 있으며 이는 비점오염원으로서의 도로에서는 유기성분보다는 중금속과 같은 물질에 대하여 대책을 세워야 함을 나타내고 있다. 청소를 통하여 도로표면 상부에서의 퇴적입자를 수거 시물을 살포하는 경우가 있으며 청소 후 퇴적토사를 각 집하장에 적치하는 경우 분진의 발생을 최소화 하기 위하여 적치장에서는 물을 살수하여 보관하고 있다. 이 때, 원래 퇴적물에 포함된 오염물이 침출되어 퇴적물에서의 오염도가 희석되는 효과를 보여줄 수 있으며 오염물을 함유한 침출수가 새로운 오염원으로 작용할 수 있다. 따라서 퇴적물 분석과 함께 적치장에서의 침출수를 수집하여 오염물을 분석하였으며 결과를 표 5에 나타내었다. 침출수 분석결과로부터 상당히 많은 양의 COD, TN, TP 가 검출되었다. 도로 청소시에 사용하는 물에 의해 오염물질 중 많은 부분이 용출되었을 가능성이 있으며, 침출수 분석으로부터 상당한 양의 오염물질이 이미 용출된 것을 알 수 있었다. 즉, 적치장에서 시료를 채취하여 오염도를 분석하는 방법을 적용함으로써 원래 도로상에 존재하는 퇴적토사의 오염도를 왜곡하는 결과를 보여줄 수 있다는 문제점이 있다. 따라서 정확한 청소 퇴적토사의 오염도 분석을 위하여 적치장에 하역하기 이전에 청소차량으로부터 직접 시료를 채취하여 분석할 필요가 있다.

표 4. COD, TN, TP 분석 결과(△△지역)

항 목	시료구분				평 균
	1 (좌측표면)	2 (좌측 중심부)	3 (중간)	4 (우측)	
강열감량(%)	4.16	4.10	2.53	3.89	3.67
COD(mg/g)	27.75	37.25	28.25	66.25	39.88
TN(mg/kg)	1450	1825	800	1275	1338
TP(mg/kg)	373.6	422.6	204.8	237.4	309.6

표 5. COD, TN, TP 분석 결과(△△지역 적치장 침출수)

	COD(mg/g)	TN(mg/kg)	TP(mg/kg)
5(침출수)	17167(±289)	457(±28.9)	97.0(±1.73)

### 3.2. 비점오염 발생량 대비 도로청소에 대한 저감효과

○○지역 및 △△지역에서 채취한 시료의 분석과, 각 도로 구간별 총거리 및 청소퇴적물 발생량 자료로부터 도로 청소에 의한 비점오염물질 저감량을 산정하였다. 저감량 산정을 위해 2007년부터 2008년에 걸쳐 연구한 '고속도로 비점오염원 오염원단위 조사연구(환경부, 2008)를 참고하여 고속

도로에 해당하는 오염물질 원단위와 비교하여 그 결과를 나타내었다. 각 구간에 해당하는 수집구간에 대한 개요를 표 6에 제시하였다.

표 6. 수집구간 및 발생량 개요

	○○지역	△△지역
관리구간	55.6km(왕복 111.2km)	51.6km(왕복 103.2km)
연결로(진출입로 및 램프)	50km	50km
포장조성(관리구간만 해당) (아스팔트/콘크리트)	52.4km/3.2km	20.1km/31.5km
청소퇴적물 발생량	652ton/년	152ton/년
청소주기	주1회	주1회
면적계산(회당 청소면적) (1차로 3.6m에 대해)	[(관리구간×2)+연결로] ×차로폭=0.58032km <sup>2</sup>	[(관리구간×2)+연결로] ×차로폭=0.5512km <sup>2</sup>

### 3.2.1. 적용된 원단위 산정법

국립환경과학원에서는 비점오염부하량 평가기법 연구에서 비점오염부하량 평가방법을 제안하고 있는데, 원단위 산정 시 일부 강우계급에 대한 조사 자료의 부족으로 인하여 통계적 처리하는데 어려움이 있어, 현행 총량관리기술지침의 원단위는 '10년 말 개정(안)이 마련되기까지 계속 사용할 필요가 있다고 기술하고 있다. 따라서 본 연구에서는 세부토지이용별 충분한 강우계급별 자료가 확보되어 새로운 원단위 산정 방법이 적용되기 이전에 국립환경과학원에서 제안하고 있는 원단위산정방법을 검토하였다. 국립환경과학원에서 제안하고 있는 방법은 토지피복분류별 발생원단위는 토지피복분류  $z$ 의 대표농도(mg/L)와 대표유출율( $R_z$ )로부터 원단위를 산정하는 것으로 그 방법은 다음과 같다

$$\text{원단위 } z = \text{대표년강우량} \times EMC_z \times R_z / 365 \quad (1)$$

여기서, 대표년강우량은 30년 평균 월강우량의 합(mm),  $EMC_z$ 는 토지피복분류  $z$ 의 대표농도(mg/L),  $R_z$ 는 토지피복분류  $z$ 의 대표유출률, 원단위  $z$ 는 토지피복분류  $z$ 의 발생원단위(kg/km<sup>2</sup>/일)이다. 대표유출율( $R_z$ )는 강우량과 유출량 자료를 이용하여, 다음의 절차에 따라 산정한다. 먼저, 강우계급  $x$ 의 유출률( $R_x$ ) 산정 시에는 측정된 강우유출수의 유량자료로부터 다음의 식으로부터 산정한다.

$$R_x = \frac{\text{총유출량}}{\text{총강우량}} = \frac{\sum_{i=0}^{T_Q} (Q_i \times t_i) / A}{\sum_{j=0}^{T_P} P_j / 1000} \quad (2)$$

여기서,  $Q_i$ 는 관측시간  $i$ 에서의 유출량(m<sup>3</sup>/sec),  $t_i$ 는 관

측시간  $i-1$ 에서  $i$ 까지의 시간(sec),  $A$ 는 집수구역 면적(m<sup>2</sup>),  $P_j$ 는 관측시간  $j-1$ 에서  $j$ 까지의 강우량(mm),  $T_Q$  및  $T_P$ 는 각각 총 유출지속시간 및 총 강우지속시간,  $R_x$ 는 강우사상 중 측정된 강우계급  $x$ 의 유출률을 나타낸다. 강우계급별 유출율( $R_y$ )는 산정된  $R_x$ 로부터 다음의 식으로부터 산정한다.

$$R_y = \frac{\sum_{k=1}^N (R_{xk})}{N} \quad (3)$$

여기서,  $R_{xk}$ 는 강우사상중 강우계급  $x$ 의  $k$ 번째 측정된 유출율,  $R_y$ 는 측정된 강우계급  $x$ 의 평균유출율이다. 토지피복분류  $z$ 의 대표유출률( $R_z$ )은 산정된  $R_y$ 를 이용하여 다음의 식으로부터 산정한다.

$$R_z = \frac{\sum (R_y \times f_x)}{\sum f_x} \quad (4)$$

여기서,  $R_y$ 는 강우계급  $x$ 의 평균유출율(mg/L),  $f_x$ 는 강우계급  $x$ 의 발생빈도,  $R_z$ 는 토지피복분류  $z$ 의 대표유출률이다.

### 3.2.2. 적용된 원단위

도로 지역의 각 세부토지이용별 원단위가 산정된 표를 표 7에 제시하였으며, 본 연구에서는 도로에 해당하는 원단위를 적용하였다.

표 7. 고속도로 원단위 종합

세부토지 이용	항 목	평균 EMCs	평균대표 강우량	유출율 (Rz)	원단위 (kg/km <sup>2</sup> ·day)
도 로	TSS(mg/L)	79.52	1331.2	0.65	188.5
	BOD(mg/L)	18.38			43.6
	COD(mg/L)	27.03			64.1
	DOC(mg/L)	11.54			27.4
	TN(mg/L)	3.72			8.81
	TP(mg/L)	0.59			1.40
	Total Cu(μg/L)	166.89			0.40
	Total Pb(μg/L)	458.42			1.09
	Total Zn(μg/L)	291.48			0.69

### 3.2.3. 원단위 비교 결과

고속도로 노면 청소에 의해 수거되는 퇴적물 발생량으로부터 노면청소에 의해 저감될 수 있는 퇴적물량 및 오염물질 저감효과를 산정하기 위해 위에 언급한 원단위를 적용하였다.

○○지역 및 △△지역의 관리 노선(×2) 및 연결로와 청소

차량의 유효 청소 넓이를 갓길 및 중앙분리대를 고려하여 3.6m로 고려하였을 때, 전구간의 유효 청소 면적은 각각 0.5803km<sup>2</sup>과 0.5515km<sup>2</sup>이다. 전 구간을 청소하는데 주1회 정도의 청소가 수행되는 것으로 조사되었기에 연간 청소면적은 ○○지역이 30.18km<sup>2</sup>, △△지역이 28.66km<sup>2</sup>의 유효 청소 면적을 가지는 것으로 계산되었다.

산정된 청소면적과 도로 청소에 의한 연간 수거량을 대상으로 TSS 및 오염물질 저감효율을 산정하였다. ○○지역 및 △△지역의 관리노선 및 연결로를 고려하면 두 지점 모두 유사한 청소 영역을 가지는 것으로 예상할 수 있지만, 연간 퇴적물 수거량에서 큰 차이를 보인다. ○○지역의 퇴적물 발생량이 △△지역에 비해 약 4배 정도 많은 것을 알 수 있다. 또한 수거된 퇴적물은 도로의 노면 청소뿐만 아니라, 측구 및 배수로의 퇴적물질 준설 등에 의한 퇴적물 발생량을 포함하기 때문에 도로의 노면 청소에만 국한된 발생량을 산정하는데 문제점이 있을 수 있다. 또한 각 지역에서 수거되는 퇴적물의 기원이 명확하게 기재되어 있지 않기 때문에 더욱 도로면 청소에 의한 저감량을 산정하는 것은 어려운 실정이다. 각 지역에서 수거한 퇴적물질 모두가 도로면 위로부터 발생하였다고 가정할 때의 결과를 표 8, 9에 제시하였다.

표 8. 각 지역별 도로 청소 영역 넓이 산정 및 도로 청소 수거량 및 수거비율

	○○ 지역	△△ 지역
관리구간 (왕복)(km)	111.2	103.2
연결로(km)	50.0	50.0
청소유효폭(m)	3.6	3.6
1cycle 청소면적	0.58032	0.55152
년간청소면적(52cycle)	30.17664	28.67904
년간퇴적물수거량(ton/year)	652.0	152.0
년간면적당수거량(kg/km <sup>2</sup> ·year)	21606	5300
적용원단위(kg/km <sup>2</sup> ·year)	68802.5	68802.5
원단위 대비 수거비율(TSS) (%)	31.40	7.70

표 9. 각 지역별 도로 청소에 의한 오염물질 저감량

항목	원단위 (kg/km <sup>2</sup> ·day)	적용 원단위 환산 (kg/km <sup>2</sup> ·day)	평균농도 (mg/kg)	○○ 지역 (2009년)		△△ 지역 (2009년)	
				오염물질 저감량 (kg/km <sup>2</sup> ·year)	저감 비율 (%)	오염물질 저감량 (kg/km <sup>2</sup> ·year)	저감 비율 (%)
COD	64.1	23397	39880.0	861.7	3.68	211.4	0.90
TN	8.81	3216	1338.0	28.91	0.90	7.09	0.22
TP	1.4	511	309.6	6.689	1.31	1.641	0.32
Total Cu	0.4	146	42.96	0.928	0.64	0.228	0.16
Total Pb	1.09	398	25.05	0.541	0.14	0.133	0.03
Total Zn	0.69	252	71.42	1.543	0.61	0.379	0.15

TSS 저감량은 원단위에 대비하여 ○○지역이 31.4%, ○○지역 및 △△지역이 7.7%로 산정되었으나, 다른 오염물질 저감량은 TSS 저감량에 비해 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 침출수 분석결과에서 언급하였듯이, 도로청소가 이루어지는 동안에 물을 살수하고 있으며 적치장에서도 과량의 물이 존재하므로 물에 의해 쉽게 용출되는 오염물질들이 퇴적물로부터 용출되어 나갔을 가능성이 높다. 또한 강우 유출수 배수로 침강시설에서 채취한 퇴적물 시료와, 청소 퇴적물 시료의 입경을 비교하였을 때, 청소 퇴적물 시료의 입도 분포가 침강시설 퇴적물 시료의 입도 분포에 비해 미세입자의 분포 비율이 낮기 때문에 이러한 결과를 보여줄 수 있을 것으로 판단된다. 왜냐하면 작은 입경의 퇴적물 시료가 더 많은 오염물질 흡착능을 보이기 때문이다.

도로 청소에 기인한 비점오염물질 저감량을 산정하는 데에는 여러 가지 제한 요소가 존재한다. 예를 들어, 청소차량의 오염물질 흡입능력과 미세 입경시료의 제거효율, 청소차량의 운전속도, 운전자의 숙련도, 청소차량의 유효 청소 범위 및 청소 방법 등에 따라 큰 차이를 보이게 될 것이다. 일반적인 청소차량의 청소는 노면 전체를 청소하는 것이 아니라, 청소차량에 의해 교통흐름이 크게 방해될 수 있기 때문에 대부분 갓길에 국한되며, 비정기적으로 중앙분리대 부근의 청소가 수행된다. 또한 태풍 및 집중호우로 인해 사면으로부터 유입되는 토사 또한 청소 시에 동시에 수거될 수 있기 때문에 노면 청소에 의한 비점오염물질 저감량을 산정하는 데에는 여러 가지 제한 사항이 존재한다. 따라서 보다 세밀하고 체계적인 시료 채취 프로그램의 계획 및 수행에 의하여 보다 정확한 도로청소에 의한 비점오염 저감효과를 산정하는 것이 필요하다.

#### 4. 결론

1. 입도분석 결과 청소차량에 의해 수집된 청소 퇴적물의 물리적 특성은 대부분이 모래질로 분석되었으며, 실트질 이하의 입경을 가진 폐기물의 함량은 높지 않았다. 또한 강우유출수 배수로 하단에 설치된 침강조에 퇴적된 시료의 입경에 따른 통과율과 비교해서 청소 퇴적물 시료의 입경 분포가 크게 평가되었다. 따라서 청소차량에 의한 입자 제거 효율은 250 $\mu$ m 이하의 입경의 수집에는 그 효과가 작을 수 있다고 예측할 수 있었다.
2. 청소 퇴적물 시료에 대한 중금속 전량분석 실험결과로부터 폐기물의 중금속 함량을 알 수 있었으며, 토양오염우려기준(2지역 기준)과 비교하였을 때 크롬함량을 제외하고는 우려기준을 초과하지 않았다.
3. 청소 퇴적물 시료에 대해 중금속의 이동가능성을 평가하기 위해 용출실험법을 적용하여 평가하였다. 수집된 시료

는 채취 당시에 이미 습윤 상태에 있었으며, 노면 청소 시에도 적정량의 물을 사용하여 수집하기 때문에 이동성을 크게 띠는 중금속들은 이미 용출되었을 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 중금속의 존재형태별 분석에서 쉽게 탈착될 수 있는 영역의 오염물질 함량이 높지 않은 것과 일치하며, 청소 퇴적물 집하장에서 채취한 침출수의 오염도는 상당한 것으로 분석되었다.

4. ○○지역 및 △△지역에서 채취한 시료 분석과, 지역별 관리 구간 연장 및 청소퇴적물 발생량 자료로부터 도로 청소에 의한 비점오염물질 저감량을 산정하였다. TSS 저감량은 ○○지역이 31.4%, △△지역이 7.7%로 산정되었으나, 중금속과 같은 오염물질 저감량은 TSS 저감량에 비해 낮았다. 이는 청소 시에 물을 함께 사용하기 때문에 물에 의해서도 쉽게 용출되는 오염물질들이 퇴적물로부터 용출되어 나갔을 가능성이 높다.

**감사의 글**

이 연구는 2007년도 경희대학교 연구비지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다 (KHU-20070232).

**참고 문헌**

환경부, *고속도로 비점오염원 오염원단위 조사연구*, 2008

U.S. EPA (1994), *Nonpoint sources pollution control program*, U.S. EPA, Report 841-F-94-005, USA .

Tobin, G. A. and Brinkmann R. (2002) "The effectiveness of street sweepers in removing pollutants from road surfaces in Florida, *J. of Environ. Sci. and Health, Pat A*, A37(9), pp. 1687~1700.

Kang, J.-H.; Debats, S.R. and Stenstrom, M.K. (2009) "Storm-water management using street sweeping", *J. of Environmental Engineering*, 135(7), pp. 479~489.

Bannerman, R. (2003), *Nationwide Urban Runoff Project*, Milwaukee, Wisconsin.

German, J. and Svesson, G. (2002) "Metal content and particle size distribution of street sediments and street sweeping waste", *Water Science and Technology*, 46(6-7), pp. 191~198.

CalabrÚ, P.S. (2010) "Impact of mechanical street cleaning and rainfall events on the quantity and heavy metals load of street sediments" *Environ. Technol.*, 31(11), pp. 1255~1262.

Chang, G. J. Parrish K. and Souer, C (1990), *The First Flush of Runoff and Its Effect on Control Structure Design*, *Environ. Resource Mgt. Div. Dept. of Environ. and Conservation Services*. Austin, TX. 1990

접 수 일 : 2011. 4. 5  
 심 사 일 : 2011. 4. 6  
 심사완료일 : 2011. 4. 18