

서울 도로청소의 환경오염물질 제거 효과 검토

나 유 미* · 유 기 영** · 김 익 수***

The Environmental Pollutants Removal Effectiveness of Street Cleaning in Seoul

Yu-Mee Na* · Kee-Young Yoo** · Ik-Soo Kim***

요약 : 진공청소, 물청소 등으로 강화된 서울의 도로청소가 도시의 품위유지 이외에 대기중의 먼지 저감, 강우시 수계 오염부하 저감 등의 부차적인 효과를 발휘하는지, 어느 정도인지를 평가하기 위해 진공청소 부산물 및 물청소 유출수의 입도분포와 수질오염성분을 측정하였다. 강남구를 대표로 선정하여 실험해본 결과, 진공청소 부산물 중 토사의 0.5%는 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지였다. 물청소 유출수의 총고형물량은 $2\text{g}/\ell$ 이었으며, 이중 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지는 1.55%인 $31\text{mg}/\ell$ 이었다. 또한 진공청소 부산물에는 4.4%의 유기물과 함께 납($6.65\text{mg}/\text{kg}$), 아연($639\text{mg}/\text{kg}$), 질소($8.9\sim 9.2\text{mg}/\text{kg}$), 인($0.3\sim 0.4\text{mg}/\text{g}$) 등이 다량 함유되었다. 이를 토대로 산출된 2005년의 도로청소에서 제거된 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지의 양은 106톤이었고, 차량에서 배출하는 $10\mu\text{m}$ 이하 먼지량의 0.56%에 해당되는 것으로 추정되었다. 또한 도로청소는 평상시에 노면의 환경오염물질을 제거함에 의해 강우시 하수처리장 또는 하천으로 갑자기 유입되는 부하량을 줄이는 역할을 하는데, COD를 기준으로 볼 때 서울시 4개 하수처리장 강우시 추가유입량의 19%에 이르렀다. 진공청소와 물청소의 구역을 확대하고 청소회수를 늘리면 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지와 수질오염물질의 제거량도 늘어나는 것으로 예상되었다. 향후 보다 정확한 평가를 위해 시료채취지점의 확대와 계절적인 조사가 요구된다.

주제어 : 물청소, 진공청소, $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지, 강우시 도로유출 오염물질

ABSTRACT : It is narrowly known that street cleaning, basically aiming to keep urban decorum, does take effects such as removing runoff pollutants and washing dust from the road surface. In this study, such subsidiary effects were evaluated by analyzing pollutant contents and particle size distribution of both dust collected by vacuum sweeper and road runoff after street washing. Results of lab test of Gangnam-Gu's sample show that a bit friction of soil, 0.5%, collected by vacuum sweeper is dust less than $10\mu\text{m}$, and the portion of same size of dust in the runoff following street washing is $31\text{mg}/\ell$, 1.55% of total solid($2\text{g}/\ell$). Runoff from washing also contained various environmental pollutants such as lead($6.65\text{mg}/\text{kg}$), zinc($639\text{mg}/\text{kg}$), nitrogen($8.9\sim 9.2\text{mg}/\text{kg}$), phosphorus($0.3\sim 0.4\text{mg}/\text{g}$). This paper estimates that typical street cleaning service in 2005, consisted of washing once a day and vacuum-sweeping 1.5 times a day, removed dust less than $10\mu\text{m}$ by 0.56% of total amounts accumulated by vehicles on road surface in Seoul

* 서울시정개발연구원 도시환경부 초빙부연구위원(Visiting Associate Research Fellow, Development of Urban Environment, Seoul Development Institute), envumi@sdi.re.kr.

** 서울시정개발연구원 도시환경부 연구위원(Research Fellow, Development of Urban Environment, Seoul Development Institute)

*** 서울보건환경연구원 수질부 연구원(Researcher, Water Quality Division, Research Institute of Public Health and Environment)

and also 19% of additional pollution loading compared to COD taking place in 4 sewer treatment plants when it rains. These cleaning methods is expected to remove more dust and runoff pollutant when the city of Seoul intensifies street cleaning service. More comprehensive effectiveness analysis of street cleaning will be achieved by expanding survey points and considering seasonal differences.

Key Words : washing, vacuum sweeping, road dust less than $10\mu\text{m}$, runoff pollutants

I. 서 론

도시에서 도로는 차량과 사람의 이동통로, 사람들의 교제의 장소, 도시간 연결통로, 수목의 서식 공간 등의 역할을 하며, 그러한 역할은 필연적으로 쓰레기 발생을 초래한다. 바로 도로청소가 현대 도시생활에서 기본적인 도시정부의 서비스 중 하나로 자리 잡고 있는 이유이며, 기본목적은 도시지역을 깨끗하고 위생적인 상태로 유지하는 것이다(Albani and Newman, 2004). 미국 Redwood City가 도로청소의 목적을 ① 빗물과 함께 유출되어 수로와 인근 연안을 오염시키는 도로 위의 오염물질량을 줄이고, ② 낙엽, 암석 부스러기, 찌꺼기 등이 하수배제계통을 막는 것을 방지하며, ③ 시내 도로를 깨끗하고 보기 좋은 모습으로 만드는 것¹⁾이라고 정의하듯이 실제 도시들은 품위유지보다 훨씬 실용적이고 구체적인 목적 하에서 도로청소를 실시하고 있다.

1980년대까지만 하여도 서울의 도로청소는 빗자루를 들고 수화차를 끌던 환경미화원이 전담하였다. 환경미화원의 역할을 대신할 청소차량이 나타나기 시작한 것은 1990년대 중반부터이며, 그 차량은 기본적으로 브러시와 진공흡입장치를 장착하고 있다. 2000년대에는 또 다른 형태의 청소

장비가 등장하였는데 바로 물청소차량이다. 이 차량은 청소용수를 실고 이동하면서 차량 전면이나 측면에 설치된 노즐로부터 물을 뿜어 도로위의 토사 및 먼지 등을 빗물받이로 씻어내는 역할을 한다. 근래들어 도로청소에 대한 기대가 더 확대되고 있는데, 진공방식으로 먼지를 흡입하고 물을 뿌려 먼지를 씻어내는 과정에서 대기 중으로 비산할 수 있는 작은 먼지들도 함께 제거되기 때문이다. 외국에서는 그러한 효과를 확인하기 위해 많은 연구들이 진행되었다. 그러나 도로청소가 먼지를 제거하는 효과는 분명히 있지만 인체에 부정적인 영향을 미친다는 직경 $10\mu\text{m}$ 이하 입자의 제거효과에 대해서는 연구자들의 의견이 양분되고 있다. 한편 도로청소는 도로축적물을 차량으로 제거하거나 빗물받이로 평상시에 유출시켜 비가 올 때 일시에 수계로 유출되는 오염물질의 양을 줄이는 역할을 할 것으로 기대된다. 그러나 그러한 측면에서의 평가는 이루어지지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 서울시에서 실시하고 있는 도로청소의 오염물질 제거효과를 청소실적을 토대로 평가하고자 한다. 구체적으로 도로에 쌓여 있다가 대기중으로 비산될 가능성이 있는 도로먼지와 강우시 비점오염원으로 작용하는 환경오염물질의 제거효과에 대해 분석한다. 이를 위해 진

1) www.redwoodcity.org/publicworks 참조

공청소에 의해 제거되는 흡입물이나 물청소에 의해 유출되는 노면유출수와 같은 청소부산물의 성분을 조사한다. 또한 지금까지 수행된 도로청소의 효과분석 사례 및 청소규모의 파악을 위한 2005년의 청소실적 등을 취합한다. 각 자치구의 청소실적은 도로청소에 의해 제거되는 오염물질의 양을 계산하고 도로청소를 강화하였을 때 제거되는 환경오염물질의 양을 예측하는데 활용된다.

이 연구의 결과는 도로청소의 범위, 빈도, 그에 수반되는 청소조직 및 장비의 확보 여부 등을 결정함에 있어 기초자료의 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 기대한다.

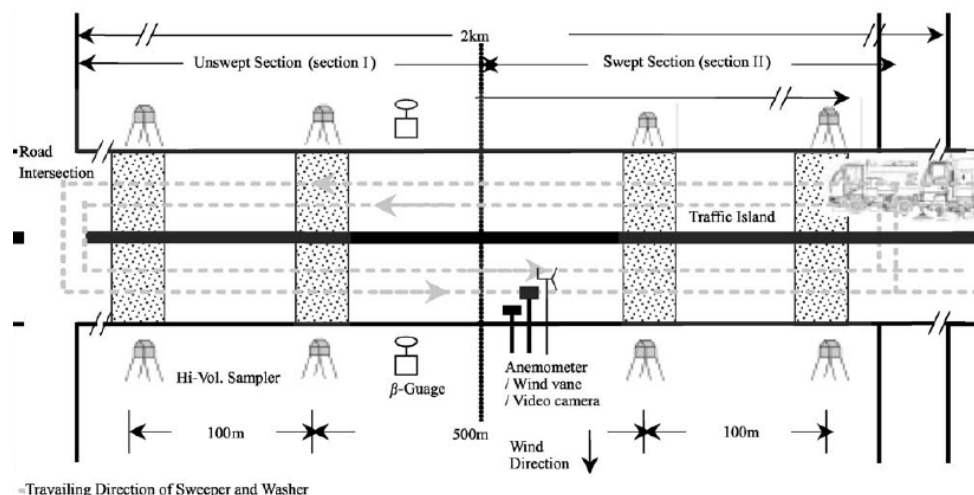
II. 도로청소 효과평가 방법

1. 도로청소 효과평가 사례

도로청소의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 많은 연구들이 수행되었다. 포장된 도로위에 쌓여있는 먼지는 주행하는 자동차에 의해 교란되어 대

기 중으로 부상하고 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지(PM10) 농도를 증가시킬 수 있다. 도로에서 발생하는 비산먼지를 저감하기 위한 대책으로 각 국에서는 주로 진공차량 및 살수차량 등을 이용하여 도로변(주로 도로 갓길)에 쌓여있는 먼지(또는 토사)를 제거하고 있다. Cowherd and Kinsey(1986)은 강력한 도로청소프로그램을 실시하면 포장도로의 PM10의 배출량을 약 33~37%까지 저감할 수 있다고 하였다. 그러나 다른 연구들에 따르면 도로청소는 큰 입자들을 제거하는데 효과적일 수 있으나 PM10의 저감효과는 크지 않다고 지적하고 있다(Vaze and Chiew, 2002; Etyemezian et al., 2003). 이러한 연구사례들을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

타이완 정부에서는 도로청소를 통해 비산먼지를 줄이고자 하였고, 관련하여 풍속, 교통량, 노면 먼지량에 따른 도로청소효과를 연구하였다. <그림 1>은 도로청소순서와 실험에 사용한 대기시료채취 장치의 위치로서 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지의 농도 변화를 파악하고자 8대의 시료채취기가 사용되었



<그림 1> 대기 시료채취 위치와 장치구성도

다. 이 연구에 따르면 도로청소는 분명히 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지의 제거 효과가 있으나 그 효과가 3~4시간 내에서만 나타난다고 한다. 진공청소와 물청소를 연달아 시행할 경우 청소효과는 교통량과 풍속과는 상관성이 낮았으나 노면 먼지량과는 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 노면의 먼지량이 많이 제거될수록 비산되는 먼지의 양이 적다는 것을 보여준다.

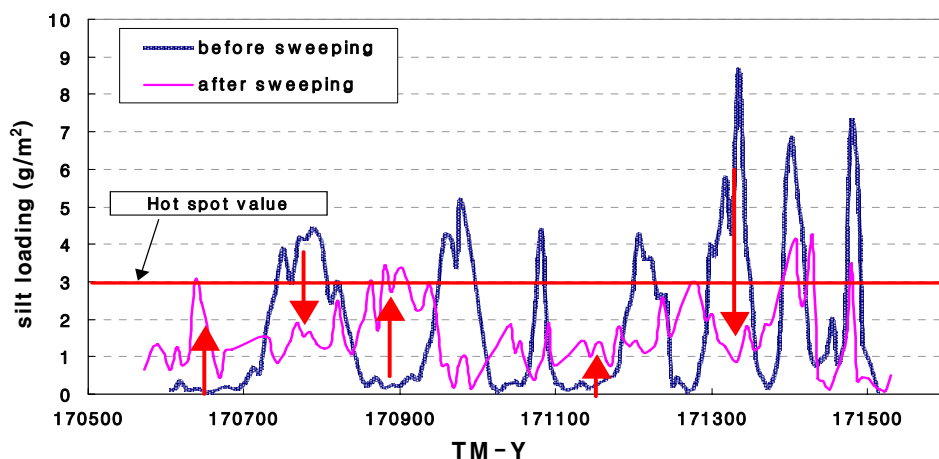
Record and Bradway(1978)는 물청소가 총부유고형물(TSP)의 제거에 미치는 영향을 알아보려고 Pennsylvania주의 Philadelphia를 대상으로 연구를 하였다. 청소방법으로 10블럭의 모든 도로에 오전 7시부터 오후 6시 30분까지 3일 연속 강력하게 물청소를 실시하였다. 그리고 대기 중의 TSP 농도를 청소 전, 청소 중, 청소 후로 나누어 hi-vol sampler를 이용하여 측정하였다. 그 결과 물청소 직후 대기 중의 TSP농도가 증가하였고 TSP농도는 청소여부보다 그 당시의 교통량과 더 큰 연관이 있다고 함으로써 도로청소와 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지의 저감효과를 확인하지 못했다. 또한 물청소 후 배수되지 않고 남아 있는 물이 증발되면 먼지는 그대로 남아 다시 교통흐름에 의해 비

산되었다고 한다.

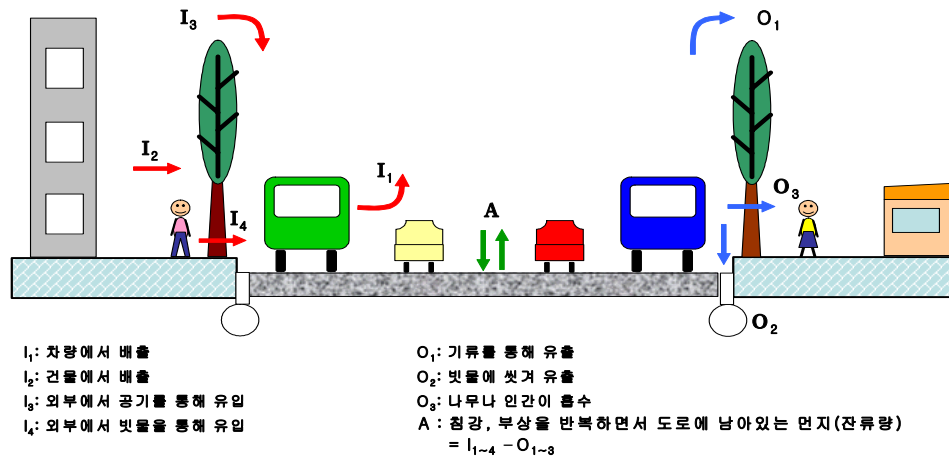
Hewitt(1981)는 Maine주 Bangor시의 진공청소가 TSP제거에 미치는 영향을 알아보았다. 1980~1981년은 진공청소를 실시하지 않고 1982~1983년에는 진공청소를 실시하였다. 2년 동안 hi-vol sampler로 매일 측정한 TSP 자료로 진공청소 효과를 계산하였는데, 진공청소는 대기중의 TSP를 약 20%정도 저감시키는 것으로 나타났다. 그러나 TSP 농도에 많은 영향을 미치는 4년간의 기후적 차이나 건설 활동과 같은 여타 요인의 영향은 분석에서 고려하지 못했다고 한다.

Roffman(1981)은 도로청소가 미국 Steel's Allegheny County 제철소의 비산먼지 저감에 미치는 영향을 조사하였다. 실험에 앞서 노면의 먼지량과 노출 프로파일을 통해 효과를 분석하였다. 도로에서 진공청소를 매일 실시할 경우 80~85%, 먼지가 많지 않을 경우 일주일에 두 번 진공청소를 하면 60~70%, 먼지가 매우 많을 경우 하루에 두 번 진공청소를 실시하면 40~50%의 먼지가 제거되었다고 한다.

우리나라의 인하대 연구팀은 인천시의 일부 도로를 대상으로 직접 개발한 이동측정차량을 이용



〈그림 2〉 진공청소차량의 도로 청소 전·후의 silt loading 변화



〈그림 3〉 차도에의 오염물질의 유입, 유출, 축적 모식도

하여 진공청소차량을 이용한 도로청소 전·후의 silt loading 변화를 평가하였다(환경부, 2005). 측정은 인천 남구에 위치한 왕복 8차선도로인 인주로의 4차선에서 2005년 4월 23일에 진행되었다. 이동측정차량을 이용하여 진공흡입차량으로 도로변 청소를 진행한 후에 측정한 silt loading 값이 평균 $1.79\text{g}/\text{m}^2$ 에서 $1.49\text{g}/\text{m}^2$ 으로, 즉 청소 차량의 운행에 의해 도로의 silt loading 값이 16.9 % 정도 저감되었다. 〈그림 2〉는 도로청소 전·후의 silt loading 값의 변화를 구체적으로 살펴보기 위해, 측정된 TM-좌표를 이용하여 위치에 따른 silt loading 값의 변화를 도시한 것이다. 청소전에는 도로 위치별로 silt loading 값의 차이가 크게 나타났는데, 청소 후에는 이러한 차이가 완화되어 먼지가 많았던 지점은 감소하고 적었던 지역은 증가하면서 전반적으로 먼지 분포가 균일화되었다.

2. 도로에서 오염물질의 거동 가정 및 측정항목

도로청소의 효과를 분석하기 위해 도로에서 오염물질이 유입되고 유출되는 과정을 〈그림 3〉과 같이 가정하였다. 즉, 도로의 오염물질은 차량이

나 건물에서 배출되거나 빗물이나 기류를 타고 침적하는 형태로 유입되고, 다시 기류, 빗물에 의해 유출되거나 인간, 초목에 흡수되는 형태로 유출되며, 나머지는 차도위에 축적된다(잔류량). 잔류량을 인위적으로 줄이는 방법을 도로청소와 연계하면 진공청소는 기류유출을 강화시킨 것으로, 물청소는 빗물유출을 강화시킨 것으로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 진공청소과정에서 제거된 토사와 물청소과정에서 빗물받이로 유출되는 청소수의 고형물량 및 입도분포 그리고 환경오염성분을 분석하였다.

진공청소를 통하여 제거된 토사의 시료는 서울시 강남구의 도로청소차량 적환장에서 채취하였다. 현재 강남구에서는 4대의 진공청소차량이 도로청소를 담당하며 이들은 1일 1회 정도 청소부산물을 비우고 비워진 부산물은 적환장에 적치 후에 일정량이 모이면 매립지로 반출되기 때문에 채취한 시료는 강남구 도로청소 부산물의 특성을 충분히 반영하게 된다. 물청소를 할 때 빗물받이로 유출되는 청소수는 강남구 압구정로와 종로구 세종로에서 채취하였다. 이 지역에서 청소수 시료를 채취한 것은 이들 지역이 서울에서도 1일 1회 이

상 비교적 많은 회수로 물청소를 실시하고 서울 또는 지역의 중심도로이기 때문에 매일 누락됨이 없이 물청소가 이루어지기 때문이다. 청소수의 시료는 빗물받이에 입구가 넓은 샘플병을 설치하고 자연스럽게 흘러들도록 하여 채취하였다.

진공청소 부산물의 입도분석에는 체분석과 기계분석이 활용되었다. 체분석은 건조시킨 진공청소 부산물 입자분포의 개략적 분석에 활용하였다. 그렇지만 체분석은 $300\mu\text{m}$ 미만의 입자들을 측정하기에 적합하지 않기 때문에 대기에서 미세먼지에 해당하는 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자분포를 파악하기 위해 Mastersizer Micro($0.3\text{--}300\mu\text{m}$ 측정범위)라는 수중의 입자를 측정하는 입도측정장치를 사용하였다. 측정에 사용된 시료는 체분석에서 분리된 직경 $300\mu\text{m}$ 의 입자들이며, 수화현상에 의해 입자들의 직경이 확대되지 않도록 증류수에 순간 분산시켜 바로 측정하였다. 물청소 유출수의 입도분포도 Mastersizer Micro로 측정하였다. 진공청소 부산물의 발생량은 각 자치구로부터 확보하여 본 연구에서 분석한 입도분포자료에 따라 크기별 양을 중량으로 파악할 수 있다. 그러나 물청소로 제거되는 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자의 양은 유추할 수 있는 간접적인 자료가 없어 각 자치구의 물사용량과 유출수의 총고형물(Total Solids)농도 측정값으로부터 물청소로 제거된 입자의 양을 계산하였다.

수질오염의 측면에서 도로청소는 도시 비점오염원의 15~25%를 줄일 수 있다는 보고가 있다(최룡, 2003). 미국의 서부에서는 도로에 물청소를 실시하면 노면 위의 오염물질이 노면에 침적되어 있다가 비가 오면 일시에 수계로 유출되기 때문에 물청소보다는 진공청소를 바람직한 도로청소방법으로 권장하고 있다(CSQA, 2003). 결국 도로청소가 강우시 수계오염을 저감하는 역할을 한다는 의미이기 때문에, 진공청소 부산물과 물청소



〈그림 4〉진공청소차량에 의해 수거된 부산물



〈그림 5〉물청소에 의해 빗물받이로 유입하는 유출수

유출수의 수질오염성분(COD, 총질소, 총인, 아연, 납 등)도 분석하였다. 물청소 유출수의 수질은 수질공정시험방법에 의하여 측정하였다. 진공청소 부산물의 유기물 함량은 강열감량법으로, 아연과

납의 함량은 토양공정시험방법으로 측정하였다. 또한 진공청소 부산물의 총질소와 총인의 함량은 부산물 시료를 추출액(질소:KCl, 인:Ascorbic Acid+Sulfuric-Molybdate-Tartrate)에서 추출한 뒤 그 추출액의 질소와 인을 분석하는 방법으로 측정하였다(Jones, 1999). <그림 4>는 진공청소차량에 의해 수거된 토사와 쓰레기와 같은 부산물을, <그림 5>는 물청소에 의해 빗물받이로 유입되는 유출수를 보여주고 있다.

III. 서울의 도로청소 실태

1. 진공청소

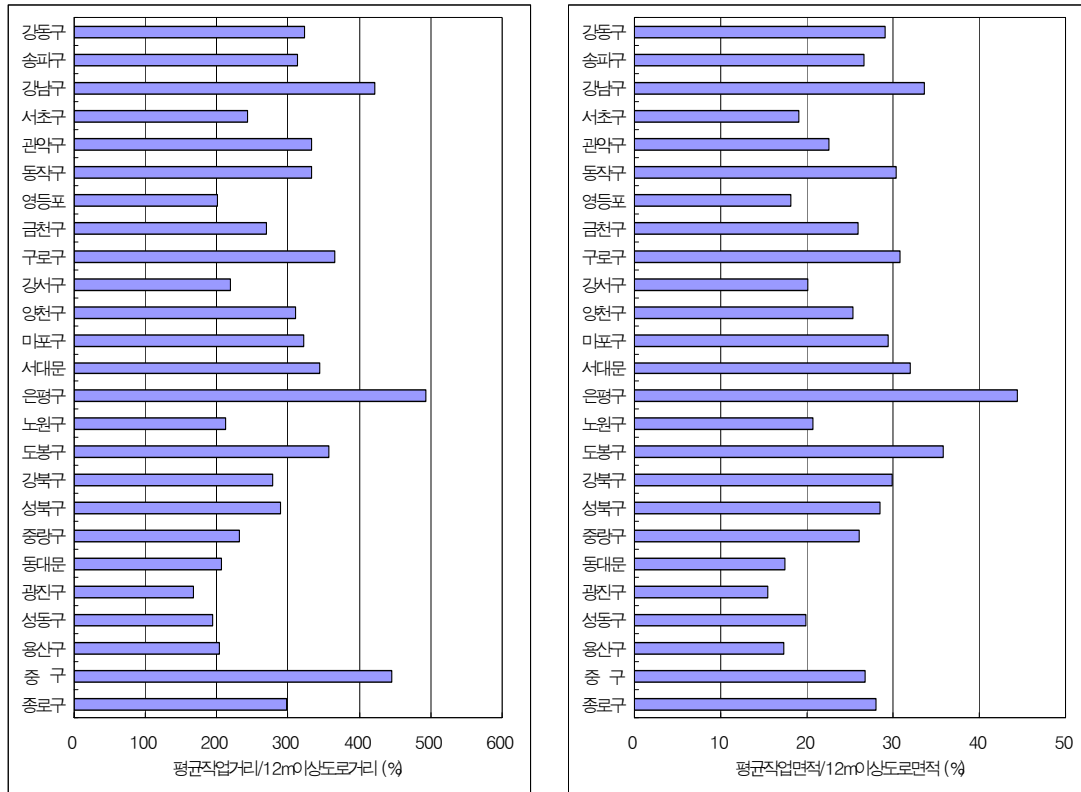
진공청소를 수행하는 차량은 8톤과 1톤 차량이 주 모델이며 8톤 차량은 <그림 6>과 같이 차량 측면 하부에 설치된 원형 브러시와 차량 중앙 하부를 가로지르는 긴 브러시를 이용하여 도로위의 토사를 제거하며, 1톤 차량은 차량 앞쪽에 설치된 고정식 브러시 2개와 움직일 수 있는 원형 브러시 1개로 도로 위의 토사를 청소한다. 어느 모델이든 물을 소량 살수하여 먼지 발생을 줄이는 기능을 갖추고 있다.

각 구의 2005년도 진공청소차량의 운행 자료를 이용하여 1일 작업연장을 산출하였다. <그림 7>의 좌측 그림은 각 자치구의 청소대상도로의 연장을 기준으로 한 1일 청소연장의 비를 보여주고 있다. 서울시 평균 295%이며 광진구를 제외한 다른 구들의 1일 청소연장은 총연장을 기준으로 200% 이상을 보이고 있다. 200%라는 작업연장은 중요한 의미를 갖는다. 청소대상의 도로를 1일 2회 청소하였다는 것인데, 이는 도로 양측의 측구 길이와 같이 때문이다. 즉, 토사와 쓰레기가 집적되기 쉬운



<그림 6> 진공청소차량에 부착된 브러시

측구측은 매일 1회 정도 진공청소차량을 이용하여 청소하고 있다는 사실을 간접적으로 보여주고 있다. 측구 측만 청소한다는 사실은 청소대상도로의 면적과 1일 청소 면적에서도 잘 나타난다. <그림 7>의 우측그림은 청소대상도로의 총면적으로 기준으로 1일에 청소하는 면적의 비를 정리한 것이다. 차량마다 폭은 다르지만 실제 자치구들이 보유하고 있는 청소장비의 현황을 고려하여 1.5m 또는 2.3m를 적용하였다. 결과는 서울시 평균 26%이며, 모든 자치구에서 50%미만의 청소 실적을 보여준다. 하루의 청소면적이 전체 도로면적의 절반에도 미치지 못하고 있는 것이다. 그나마 도로면적의 25% 이상을 매일 청소하는 곳은 중구, 성북구, 도봉구, 서대문, 구로구, 강남구, 강동구 등이다.



〈그림 7〉 각 자치구의 1일 진공청소 작업량

2. 물청소

물청소 차량은 12톤, 8톤, 3톤 규모의 차량이 있다. 12톤과 8톤 차량은 폭 12m이상 도로의 청소에 투입되고 3톤 규모의 차량은 이면도로 청소에 활용되고 있다. 물청소 차량은 기능에 따라 일반살수차, 진공흡입 물청소차, 브러시장착 물청소차 등으로 세분된다. 처음 도입된 물청소 차량은 〈그림 8〉 좌단과 같이 물을 고압으로 살수하여 도로를 씻어내는 방식이며, 이러한 형태를 일반살수차라 부르고 있다. 그러나 이 형태의 차량에는 두 가지 단점이 있다. 첫째, 살수된 도로위의 물이 다른 차량 바퀴에 의해 튀김으로서 차량 운전자들로부터 빈번하게 불만이 제기된다. 도로 물청소 때문

에 추가로 세차를 해야 한다는 것이다. 둘째, 살수된 물의 양이 충분하지 못할 경우 제거되지 못한 먼지가 다시 대기 중으로 비산하여 효과가 반감될 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 진공흡입 물청소차와 브러시장착 물청소차가 개발되었고, 일부 자치구에서 그 성능을 평가하고 있다. 진공흡입식 물청소차량의 청소방법은 차량의 전면에서 살수한 도로위의 물을 차량 중단에 설치된 진공흡입구를 통해 회수하는 방식이다. 회수된 물은 차량에 설치된 저장탱크에 저류된다. 일반물청소차량과 달리 살수된 물을 빗물받이로 흘러가도록 유도하지 않아도 됨으로 상대적으로 낮은 압력으로 물청소가 가능한 장점도 있다. 그러나 살수된 물을 회수하는 면적을 차량의 폭 이상으로 확대할



〈일반살수차량〉



〈살수차량에 설치된 브러시〉

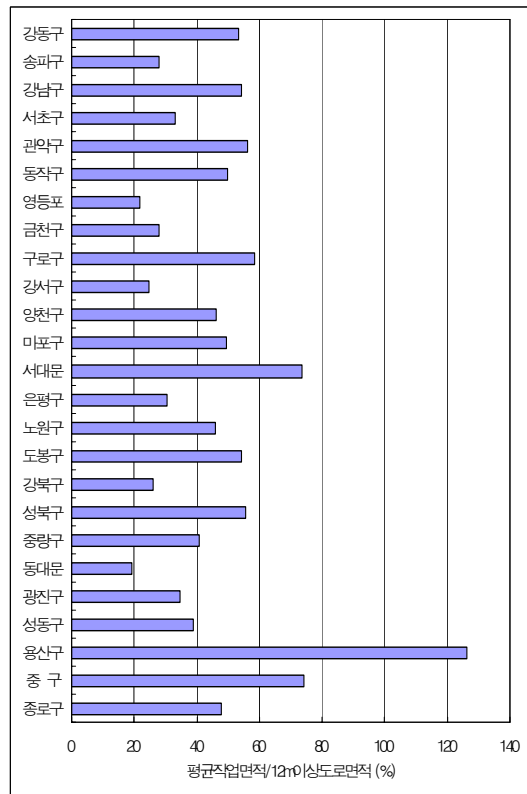
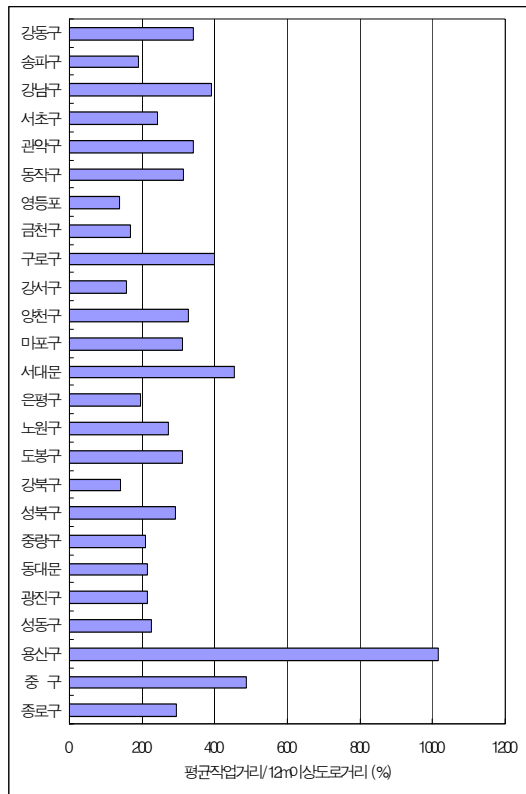
〈그림 8〉 물청소차량의 모습

수 없어 살수한 물의 전량을 회수하지는 못하며, 흡입된 물을 저장하는 저장용기가 필요해서 청소용수를 적재할 수 있는 공간이 축소되는 현상은 단점으로 지적된다. 이를 보완하기 위해 청소 후 흡입된 물을 차체에서 필터를 통해 정수하고 다시 살수할 수 있는 장치를 고안중이며 필터와 노즐 부분에서 발생하는 고장을 줄이는 것이 과제로 남아 있다. 또한 물을 흡입하는 탱크용량이 크지 않아서 흡입탱크가 다 차고 나면 더 이상 흡입을 못하는 경우도 발생하고 있다. 브러시장착 물청소차량은 일반물청소차량의 후단에 브러시를 장착한 것이다. 브러시는 차량의 전면에서 살수된 물을 빗물받이 쪽으로 쓸어내는 역할과 찌든 때를 제거하는 역할을 한다. 특히 비가 올 때는 브러시만 작동시켜도 도로면의 묵은 때를 쉽게 제거할 수 있다. 〈그림 8〉의 우단이 브러시장착 차량의 모습이다.

2005년도 물청소차량의 운행 실적을 이용하여 물청소차량의 1일 작업연장을 각 구별로 산출하였다. 청소대상도로의 총연장기준 1일 작업연장의 비는 〈그림 9〉의 좌단과 같이 서울시 평균 306%이고, 200%미만인 곳은 강북구, 은평구, 강서구, 금천구, 영등포구, 송파구 등이다. 200%미만이라는 숫자는

해당자치구들이 청소대상도로의 양 측구를 매일 청소하지 못함을 의미한다. 용산구가 1,000%를 초과하는 것은 이면도로의 청소 소형물청소차량 8대를 투입하고 있기 때문이다. 〈그림 9〉의 우단은 청소대상도로의 총면적 대비 일평균 작업면적의 비이다. 물청소차량의 살수가능 폭은 소형 물청소차량의 경우 3m, 이 보다 큰 차량들은 4m 정도이다. 총면적 기준의 평균 작업면적은 48%이고, 1일 50%이상을 청소하는 곳은 중구, 용산구, 성북구, 도봉구, 서대문구, 구로구, 관악구, 강남구, 강동구 등이다. 이들 자치구는 2일에 1회 이상 모든 도로의 면을 물청소하거나 청소대상도로의 절반 정도를 매일 물청소한다고 볼 수 있다. 반면 동대문구는 20%정도의 수준인데, 청소대상도로를 주 1회 정도의 빈도로 물청소 한다는 계산이 가능하다.

더 많은 면적을 매일 청소하는 것이 중요하지만 물청소의 경우 충분한 양의 물을 뿌려주는 것도 중요하다. 도로에 많은 물을 살수하면 도로면 위의 수용성 또는 부유성 입자가 물과 함께 도로 측구방향으로 이동하여 빗물받이로 유출되어 도로위에 퇴적된 입자들이 제거될 것이기 때문이다. 이러한 효과는 비가 온 후에 도로면이 깨끗해지고



〈그림 9〉 1일 물청소 작업량

많은 비가 온 후에는 대기도 맑아지는 것에서 확인할 수 있다. 그러나 많은 물을 살수하려면 충분한 양의 청소용수가 확보되어야 하고, 확보된다 하여도 청소구역으로부터 용수공급원이 멀리 있다면 물의 운반에 많은 시간이 소요되어 차량 당 물청소 면적이 그만큼 감소하게 된다. 〈그림 10〉의 좌단은 단위작업거리당 청소용수 살수량, 〈그림 10〉의 우단은 작업면적당 살수량이다. 물청소 차량들은 도로 위를 이동하면서 물을 살수하게 되는데 1km의 청소에 대략 0.5톤에서 최고 1.5톤의 물을 살수하고 있다. 한편 작업면적당 살수량에서는 1km당 120~370톤의 물을 살수하는 등 최고 3배의 차이를 보이고 있다. 도로에 살수되는 물은 도로의 노면 저류량 이상일 때 도로의 경사를 따라 흘러서 하수도로 유입될 것이다. 김석구 외

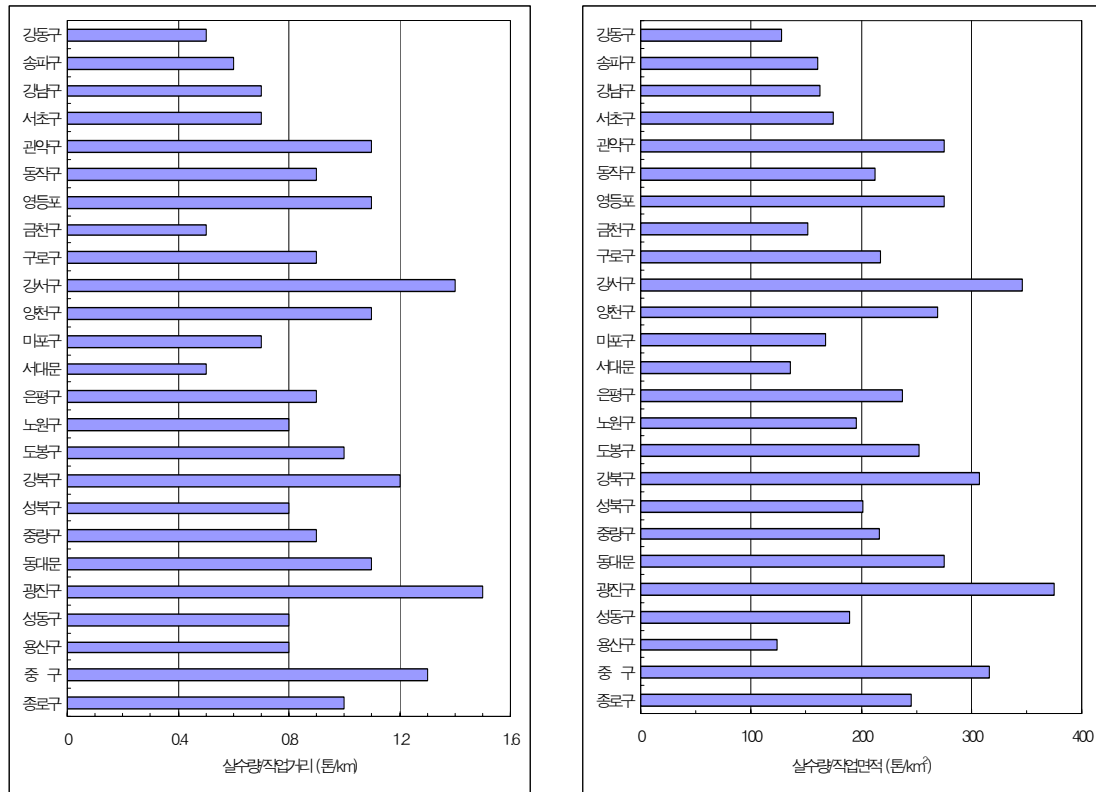
(2006)의 연구 결과를 면밀하게 분석해보면 청소 면적 1km당 120m²이상의 물을 살수할 때 빗물이 도로에서 하수도로 유출되는 것으로 보인다. 따라서 물청소에 의해 도로에 쌓인 먼지를 제거하려면 노면 저류량인 120m²/km보다 많은 양의 물이 살수되어야 하며, 〈그림 10〉 우단에서 광진구와 강서구가 약 3배를 살수하고 있다.

IV. 도로청소 효과

1. 도로청소 부산물의 성분분석 결과

1) 진공청소 부산물의 성분

진공청소차량이 흡입한 부산물을 육안으로 확인하면 페트병과 나뭇가지와 같은 큰 쓰레기에서부



〈그림 10〉 물청소에 사용한 청소용수량

터 매우 미세한 입자에 이르기까지 다양한 크기의 도로 퇴적물들이 진공청소차량에 의해 제거되었음을 보여준다. 진공청소 차량이 도로에서 작업을 할 때는 브러시와 노면이 마찰하면서 발생하는 먼지를 줄이고자 브러시 바로 위에서 물을 뿌리기 때문에 제거된 쓰레기에는 수분을 많이 포함하고 있다.

진공청소 부산물 중 포장재와 같이 인위적으로 버려진 쓰레기를 제외하고 중량으로 대부분을 차지하는 토사성분을 채취하여 성분분석에 사용하였다. 큰 쓰레기를 제외시킨 것은 수질오염이든, 대기오염이든 주로 작은 입자의 쓰레기에 의해 유발된다고 선행 연구들이 밝혔기 때문이다. 분석결

과는 〈표 1〉과 같이 유기물 함량 4.4%, 아연 639 mg/kg 등 이었고, 용출시험에서는 질소 8.9~9.2mg/kg, 인 0.3~0.4mg/g의 농도를 보였다.¹⁾

〈표 1〉의 결과는 서울시 강남구 도로청소 잔재

〈표 1〉 진공청소 부산물 중 토사의 성분분석결과

항 목		농 도
토양 분석	수분 함량	13.0%
	유기물 함량(강열감량)	4.4%
	Pb	6.65mg/kg
	Zn	639.4mg/kg
용출분석	질소	8.9~9.2mg/kg
	인	0.3~0.4mg/g

1) 서울특별시 보건환경연구원에 의뢰하여 분석한 것임.

물로서 1회 측정이라는 한계가 있다. 그렇지만 강남구 도로청소 부산물의 대부분이 한곳의 적환장에서 모아지고 시료를 그곳에서 채취하였기 때문에 적어도 강남구에서 발생하는 도로청소부산물의 특성은 충분히 반영하고 있다고 판단된다.

2) 진공청소 부산물의 입도

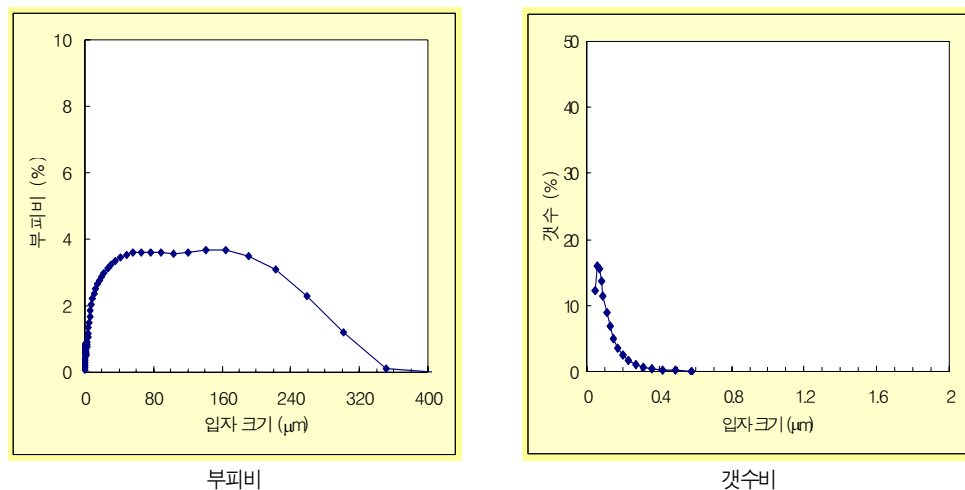
진공청소차량에 흡입된 토사에 존재하는 입도 분포를 확인하고자 채취시료에 대해 체분석을 실시하였다. <표 2>는 그 결과이며, 1mm이상(중량기준 35.7%)과 600 μ m이하(중량기준 49.1%)의 입자가 대부분을 차지하고 있다. 이 중 대기 중의 10 μ m 이하의 도로먼지와 같은 크기에 해당하는 입자를 파악하고자 체로 분리된 토사 중 300 μ m미만의 분리물의 입도를 입도측정장치로 측정하였다.

<그림 11> 좌단은 300 μ m미만 입자들의 입경별 부피비이다. 그림에 따를 경우 40~200 μ m 범위의 입자들이 대부분을 차지하고 있다. 한편 곡선의 하단을 적분하면 10 μ m이하의 도로먼지에 해당하

<표 2> 진공청소차량에 흡입된 토사의 입도 분포(체분석)

구분	1mm 이상	850 μ m~1mm	600 μ m~850 μ m	300 μ m~600 μ m	300 μ m미만
중량비	35.7	5.5	9.7	25.4	23.7

는 10 μ m 이하 입자들의 부피비를 산출할 수 있는데, 300 μ m미만의 입자 중 2.1%가 직경 10 μ m이하이다. 입자크기에 따라 오염물질의 성분과 비중이 다를 수 있으나 그러한 가능성을 무시하면 부피비가 곧 무게비가 됨으로 전체 토사 중 직경 10 μ m의 무게를 쉽게 산정할 수 있다. 즉, <표 2>에서 300 μ m미만 입자들의 무게가 23.7%이고, 그 중 2.1%가 10 μ m이하에 해당함으로 전체 토사 중 직경 10 μ m이하 입자들이 차지하는 무게비는 0.5%²⁾이다. <그림 11>의 우단은 300 μ m미만 입자들을 개수비로 나타낸 것인데, 거의 대부분이 직경 10 μ m이하의 도로먼지임을 알 수 있다. 직경 100 μ m인 입자가 동일한 무게를 유지하면서 직경 10 μ m인 입자로 분쇄되면 1,000개, 1 μ m인 입자로 분쇄되면 1백만 개의 입자로 만들어진다. 그러한 측면에서 무게비



<그림 11> 진공청소 부산물 중 300 μ m이하 토사의 입도분포

2) $23.7\% \times 2.1\% = 0.5\%$

0.5%는 결코 무시할 수준이 아님을 알 수 있다.

3) 물청소 유출수의 성분

물청소과정에서 도로에 살수된 물은 일반살수 차량의 경우 빗물받이로 바로 흘러들고, 진공흡입 물청소차량의 경우 차량으로 흡입된 후에 빗물받이로 투입된다. 이 때 발생하는 청소수로 사용되는 원수와 살수 후의 도로 유출수를 채취하여 수질을 분석한 결과를 <표 3>에 정리했다.

<표 3> 물청소 유출수의 성분분석 결과(단위: mg/L)

구분	일반물청소차량(강남구)		진공흡입물청소차량(종로구)	
	원수(개발지하수)	유출수	원수(지하철용출수)	유출수
COD	0.5	55.2	2.5	208.7
총질소	0.97	3.968	4.214	15.696
총인	불검출	0.662	0.062	0.749
아연	0.036	0.081	0.007	0.645
납	불검출	불검출	불검출	불검출

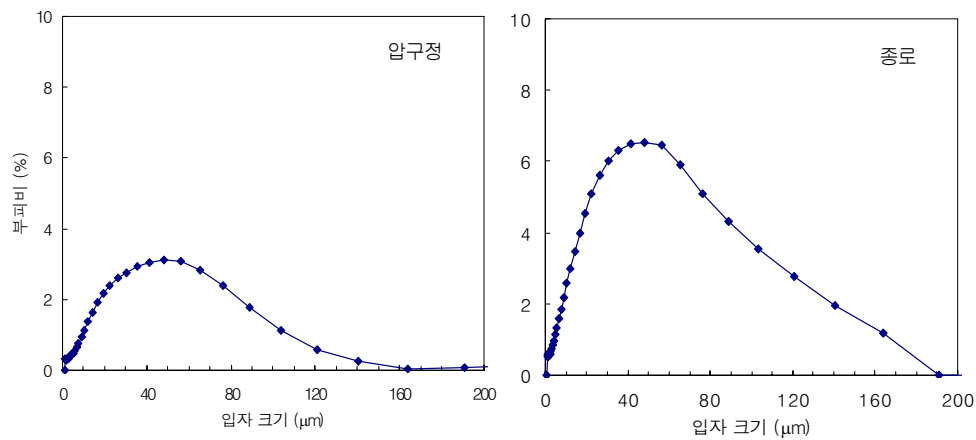
진공흡입물청소차량의 시료가 일반물청소차량의 시료보다 높은 오염도를 보였는데 두 가지 이유에 기인하는 것 같다. 첫째, 일반물청소차량은 물을 빗물받이로 많이 유출시켜야 청소효과가 발휘되지만 진공흡입물청소차량은 살수된 물을 다시 회수하기 때문에 같은 오염물을 처리하는데 물 양이 상대적으로 적게 소요된다. 즉, 회석이 적게 된다. 둘째, 일반물청소차량의 시료채취지역은 1일 2회 물청소를 실시하고 진공흡입물청소차량지역은 1일 1회 물청소를 하고 있어서 일반 물청소지역의 노면이 상대적으로 깨끗하게 유지될 가능성이 높다. <표 3>의 수질에서 또 다른 특징은 유출수에서 아연함량이 급증한다는 점이다. 구분상 등(1998)의 연구에서 타이어 마모, 브레이크 라이닝

마로, 윤활유 등의 사용에 의해 고속도로 주변 토양의 아연농도가 높았다고 하는데, 높은 아연 함량은 도로청소 유출수에서 나타나는 자연스러운 특징이고, 또한 자동차에서 배출된 오염물질들이 물청소에 의해 제거된다는 것을 분명하게 보여주는 분석결과로 보여진다.

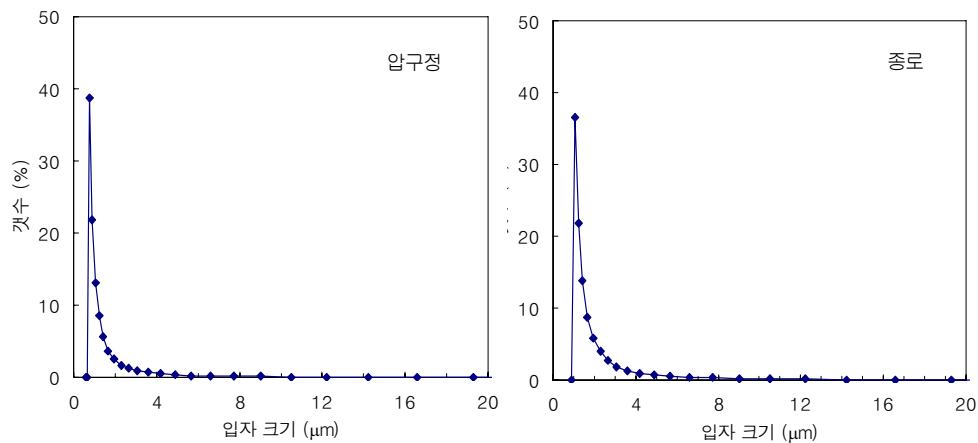
<표 3>의 유출수 성분은 여름철의 결과로 계절에 따라 달라질 수 있다. 그렇지만 시료채취지점들이 1일 1회이상 물청소를 하는 구역들이기 때문에 선행강우일수와 같은 도로위의 먼지를 씻어주는 그래서 물청소효과를 높이거나 낮추는 그러한 현상은 적어도 많이 배제된 결과라고 판단된다. 한편 도로물청소에 사용되는 지하수의 수질을 보면 유기물과 인의 경우 상수원수 2급 정도의 수질에 해당되나 질소는 강남구의 경우 공업용수 1급, 종로구의 경우 공업용수 3급에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 도로의 물청소에 사용되는 물은 직접 시민이 접할 가능성이 있으므로 용수의 수질 기준 마련도 중요하다고 판단된다.

4) 물청소 유출수의 입도

도로물청소에 의해 제거되는 입자의 크기는 정확히 측정하기 어렵다. 특히 미세한 입자는 용존성이 30%정도 차지한다고 하니 물속에 있는 입자를 측정할 때는 그 만큼의 입자수가 측정되지 않을 수도 있다. 또한 미세한 입자가 물을 흡수하여 크기가 커지는 현상(일명 swelling 현상)이 발생할 때는 실제 크기보다 과대평가될 수도 있다. 이러한 제한 요건이 있으나 물청소에 의해 제거되는 입자의 크기를 확인하기 위하여 살수된 물이 빗물받이로 유출될 때의 물속의 입도분포를 분석하였다. 우선 물청소에 사용되는 원수의 입도분포를 분석하였는데 측정기기의 측정범위 내에 해당하는 입자는 거의 없는 것으로 나타났다.



〈그림 12〉 물청소 유출수의 입도분포(부피비)



〈그림 13〉 물청소 후 유출수의 입자 분포(갯수비)

〈그림 12〉는 도로물청소에 의해 빗물받이로 유출되는 미세입자들의 직경별 분포를 부피비로 보여주고 있다. 압구정에서 채취한 시료이든 종로에서 채취한 시료이든 물청소에 의해 제거되는 입자의 크기는 직경 $200\mu\text{m}$ 이하이며, 직경 $40\sim 60\mu\text{m}$ 입자들이 가장 많은 부피를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 1mm 이상(중량기준 35.7%)과 $600\mu\text{m}$ 이하(중량기준 49.1%)의 입자가 대부분을 차지하는 진공청소 부산물중의 토사와는 확연히 다른 특성이며, 도로청소에서 진공청소와 물청소의 역할을 보여주는 결과이기도 하다.

〈그림 13〉은 물청소에 의해 제거되는 입자들의 갯수비를 보여주고 있는데, 유효하게 인정받는 크기는 직경 $20\mu\text{m}$ 이하이고 가장 많은 입자의 크기는 $1\sim 2\mu\text{m}$ 이다. 한편 〈그림 12〉에서 $10\mu\text{m}$ 이하 입자의 부피비를 산출한 결과, 전체 입자 중 1.55%이고, 살수 후에 빗물받이로 유입되는 유출수의 총고형물(TS) 양을 별도로 측정하였더니 $2\text{g}/\ell$ 였다. 이를 바탕으로 빗물받이로 유입되는 청소수의 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자량을 산출하면 $31\text{mg}/\ell$ 가 된다³⁾.

지금까지의 분석을 통하여 다음과 같은 중요한 결과들을 도출할 수 있다. 첫째, 진공청소는 눈으

로 식별되는 토사는 물론이고 대기 중의 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지와 같은 크기에 해당되는 작은 입자도 함께 제거하고 특히 청소과정에서의 먼지 비산을 막기 위한 적당량의 물 살포에 의해 그 효과가 더 크게 나타나는 것 같다. 둘째, 충분한 양의 물을 살수할 때 발생하는 유출수는 미세입자의 세류효과가 있으며 부피면에서는 $200\mu\text{m}$ 이하, 크기면에서는 $20\mu\text{m}$ 이하의 입자를 주로 제거한다. 셋째, 도로물청소는 세류 가능한 작은 입경의 입자들을 제거하고 진공청소는 모든 크기의 쓰레기와 토사를 제거하는 등 양 방식의 청소특성이 분명하게 다르며, 이들을 조합함에 의해 도로청소를 효과적으로 수행할 수 있다.

2. 도로청소의 효과

1) 먼지 제거 효과

진공청소와 물청소 모두 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자, 즉 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지의 크기에 해당하는 먼지들의 제거효과가 있음을 이미 확인하였고, 도로청소의 방법에 따라 서울에서 어느 정도의 그러한 입자가 제거되는가를 정량적으로 평가할 수 있도록 기초자료도 확보하였다.

우선 2005년의 도로청소에서 제거량을 평가하였다. 2005년에 각 자치구는 1일 1회 정도의 빈도로 도로물청소를 하였으며, 여기에 1,280,665톤의 물을 사용하였다. 이 물량에 빗물받이로 유출수 $10\mu\text{m}$ 이하 고형물농도 $31\text{mg}/\ell$ 를 곱하면 연간 39.7톤이 제거된 것으로 계산된다.⁴⁾ 한편 각 자치구들

은 1일 1.5회 정도의 빈도로 측구를 진공차량을 이용하여 청소하였고, 여기에서 수거된 토사량은 13,268톤이었다. 토사의 0.5%에 해당하는 양이 직경 $10\mu\text{m}$ 이하라는 분석결과는 이미 제시했다. 결국 진공청소에 의해 2005년에 제거된 미세한 입자의 먼지는 66.3톤이라는 결과가 쉽게 산출된다.⁵⁾

김운수(2004)는 2002년을 기준으로 한 서울의 대기 중 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지의 출처분석에서 도로에 침적되어 있다가 재비산되는 양(이하 도로재비산량)이 연간 18,836톤, 차량의 연료연소와 타이어의 마모에 의해 생성되는 양(이하 차량생성량)이 연간 7,154톤이라고 하였다. 결국 2005년에 수행된 진공청소와 물청소에 의해 제거된 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지는 106톤이며, 이는 김운수가 제시한 도로재비산량의 0.56%, 차량생성량의 1.48%에 해당된다. 그리고 2005년의 청소방식에서는 진공청소에 의한 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지가 물청소에 의한 제거량보다 많다는 점도 특기할만하다.

다음으로는 청소를 강화할 때의 효과를 분석하였다. 물청소의 경우 2005년의 1일 측구 1회에서 도로전면 2회로 강화하였다. 이 경우 2005년보다 10배 이상 늘어난 406톤이 제거되는 것으로 나타났다. 진공청소도 2005년 1일 측구 1.5회에서 1일 측구 3회 또는 1주 전면 3회로 강화하면 2005년 진공청소보다 2배 늘어난 130톤이 제거될 것으로 예측되었다. 결국 청소를 강화하면 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지 제거량도 늘어남을 그리고 이렇게 청소가 강화되면 도로재비산량 기준 2.85%, 차량생성량 기준 7.5% 제거효과가 있음을 보였다. 이상의 분

3) $2\text{g}/\ell \times 1.55\% = 31\text{mg}/\ell$

4) 물속의 고체량은 채취된 물을 건조시켜 용존성인 부분까지 모두 고체화하여 측정한 것으로 평균 $2\text{g}/\ell$ 이었으며, 입자분석을 통해 그 중 1.55%가 $10\mu\text{m}$ 이하로 나타나 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지농도는 $31\text{mg}/\ell$ 임. 2005년에 서울시에서 사용한 물의 양은 1,280,665톤이며, 따라서 이 물에 의해 제거되는 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지량은 39.7톤/년으로 계산됨.

5) 2005년 진공청소에 의해 제거되는 토사의 양이 13,268톤이고 입자분석을 통해 이 중 0.5%가 $10\mu\text{m}$ 이하로 나타나 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지농도량은 66.3톤/년임.

6) 김운수(2004)의 연구결과, 2002년 기준 산출량임.

〈표 4〉 도로청소에 의해 제거되는 10 μ m이하의 도로먼지

구 분	청소 방법	10 μ m이하 도로먼지 제거량 (톤/년)	공기 중 10 μ m이하의 도로먼지량과의 비교(%)	
			도로 재비산량 기준 (18,836톤/년) ⁶⁾	차량생성량 기준 (7,154톤/년) ⁴⁾
2005년 도로청소 수준	물청소 (1일 측구 1회)	39.7	0.21	0.55
	진공청소 (1일 측구 1.5회)	66.3	0.35	0.93
	합계	106.0	0.56	1.48
2005년보다 도로청소 강화	물청소 (1일 전면2회)	405.9	2.15	5.67
	진공청소 (1주 전면3회)	130.3	0.69	1.82
	합계	536.2	2.85	7.5

석결과는 〈표 4〉에 정리하였다.

각 자치구에서 운행하고 있는 청소차량은 대부분 5톤이 넘는 대형 경유 차량이다. 진공청소와 물청소가 모두 10 μ m이하의 도로먼지 제거에 효과가 있다고 하였지만 반대로 청소장비들이 청소를 통해 제거하는 양보다 더 많은 10 μ m이하의 도로먼지를 대기중으로 방출할 수 있다. 만약 이러한 상황이 발생한다면 도로청소의 10 μ m이하의 도로먼지 제거효과는 전혀 무의미해지기 때문에 이를 확인하기 위해 청소차량이 만들어내는 10 μ m이하의 도로먼지량을 산출해보았다. 국립환경과학원(2005)에서 이동오염원 대기오염물질 배출량을 산정하기 위하여 각 배출원별로 배출계수 산정식을 제시한 것에 의하면 경유를 연료로 하는 대형화물차의 경우(1998~2001년식) 다음과 같은 식을 적용하게 된다.

$$Y = 2.282 \times V^{-0.4494}$$

여기서 Y는 배출계수로 단위는 g/km이고, V는 속도(km/h)이다.

청소차량은 운행하면서 노면을 청소하기 때문에 적정 운행속도가 있으며 그 속도를 10km/h⁷⁾로 본다면 Y는 0.811g에 해당한다. 하루에 30km를 운행한다고 하면 24g의 10 μ m이하의 도로먼지를 배출한다고 할 수 있다. 서울시 중구의 경우 2005년 3월에 진공청소차량 한대가 하루에 수거하는 노면 토사량은 253kg이었다. 이 토사의 0.5%를 10 μ m이하의 도로먼지라고 하면 1,265g의 10 μ m이하의 도로먼지를 제거하게 된다. 결국 진공청소차량은 1.9개의 10 μ m이하의 도로먼지를 생성하면서 100개의 10 μ m이하의 도로먼지를 제거함으로 또 다른 오염원으로 작용하지는 않음을 알 수 있다.

2) 수질오염 억제 효과

도로청소 중 진공청소는 노면의 퇴적물을 제거함으로서 강우시 퇴적물이 수계로 유출되는 것을 원천적으로 막고, 물청소는 퇴적물을 평소에 하수도로 유출시켜 공공하수도시설에서 처리되게 함에 의해 강우시 집중 유출을 억제한다고 이미 기술하였다. 그리고 진공청소에 의해 제거된 토사의

7) 물청소, 진공청소 모두 10km/h의 주행속도가 적정함.

성분과 빗물받이로 유입되는 유출수의 수질도 이미 제시하였다. 이러한 자료와 2005년 각 자치구들의 청소실적을 토대로 COD, T-N, T-P의 제거량을 평가하였다. COD의 경우 물청소에 의해서는 연간 71톤, 진공청소에 의해서는 423톤이 제거되는 것으로 나타났다. 한편 2005년 서울시 4개 물재생센터(하수처리장)에 청천시⁸⁾보다 강우시⁹⁾에 추가 유입되는 양(이하 추가유입량¹⁰⁾)은 COD 2,633.5톤, T-N 1,053.3톤, T-P 115.2톤이라고 한다. 이 양과 2005년의 도로청소에 의해 제거된 빗물오염저감량을 비교하면 COD의 경우 물청소에 의해 2.7%, 진공청소에 의해 16.1%인 것으로 나타났다. 그리고 물청소를 1일에 도로전면에 대해 2회로, 진공청소를 1주 도로전면 3회로 강화하면 COD의 제거량이 각각 10배, 2배 증가하고, 추가유입량과 비교하면 각각 27.4%, 31.3%, 두 가지 청소방법이 병행되면 58.7%에 이르는 것으로 나타

났다. 이상의 결과와 함께 T-N, T-P에 대한 분석결과를 <표 5>에 정리하였다.

도로청소에 의해 도시 비점오염원의 15~30%를 줄일 수 있다는 주장(최룡, 2003)이 있었지만 본 연구에서도 빗물부하저감 또는 비점오염원에 의한 수질부하의 저감에 기여함을 확인할 수 있었고, 도로청소가 강화되면 오염물질의 제거량이 더 많아진다는 점도 계산을 통해 유추할 수 있었다.

V. 결론

본 연구는 진공청소, 물청소 등으로 확대되고 서울의 도로청소가 도시의 품위유지 이외에 대기 중의 먼지 저감, 강우시 수계 오염부하가 저감 등의 부차적인 효과가 있는지, 어느 정도 기여하는지를 평가하기 위해 수행되었다. 이를 위해 진공청소 부산물 및 물청소 유출수의 입도분포 및 수

<표 5> 도로청소에 의한 빗물오염 저감량

구 분		수질오염물질 제거량(톤/연)			4개 물재생센터 추가유입량 기준 제거량(%)		
		COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P
2005년 청소수준	물청소	70.7	8.1	0.8	2.7	0.77	0.69
	진공청소	422.7	0.12	4.64	16.1	0.01	4.03
	합계	493.4	8.22	5.44	18.7	0.78	4.72
2005년보다 도로청소 강화	물청소 (1일 전면2회)	722.8	66.5	11.1	27.4	6.31	9.64
	진공청소 (1주 전면3회)	823.7	0.24	9.12	31.3	0.02	7.92
	합계	1,546.5	66.74	20.22	58.7	6.33	17.56

8) 비가 오지 않은 날(강우시를 제외한 날)

9) 비가 온 날과 그 다음날

10) 서울시의 하수관거는 대부분 합류식 관거로 강우시 도로에 내린 빗물과 함께 도로에 있던 오염물질이 하수관거로 유입되어 청천시보다 높은 오염농도의 하수가 하수처리장으로 유입됨. 따라서 강우시 하수처리장의 추가유입부하량은 강우시 유입부하량에서 청천시 유입부하량을 제외하여 계산됨. 2005년 추가부하량은 강우가 있었던 100일에 대해 계산하였음. COD의 경우 강우시 평균유입부하량 371.4톤/일에서 청천시 평균유입부하량 345.1톤/일을 제외한 값을 100배하면 2,633.5톤/년이었음. 같은 방법으로 T-N 추가부하량은 1,053.3톤/년(강우시 167.8톤/일-청천시 157.3톤/일), T-P 추가부하량은 115.2톤/년(강우시 16.4톤/일-15.3톤/일)으로 산정됨.

질오염성분을 측정하였다. 그리고 각 자치구의 2005년 도로청소실태도 분석하였다. 본 연구에서 발견한 주요 연구결과는 다음과 같다.

1) 진공청소 부산물과 물청소 유출수에는 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지 및 수질오염성분이 함유되어 있었다. 진공청소 부산물중 토사의 0.5%는 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지였다. 물청소 유출수의 총고형물량은 $2\text{g}/\ell$ 이었으며, 이중 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지는 1.55%인 $31\text{mg}/\ell$ 이었다. 또한 진공청소 부산물에는 4.4%의 유기물과 함께 납($6.65\text{mg}/\text{kg}$), 아연($639\text{mg}/\text{kg}$), 질소($8.9\sim 9.2\text{mg}/\text{kg}$), 인($0.3\sim 0.4\text{mg}/\text{g}$)등도 다량 함유되었다. 물청소 유출수는 COD $55.2\sim 208.7\text{mg}/\ell$, 질소 $4.0\sim 15.7\text{mg}/\ell$, 인 $0.6\sim 0.7\text{mg}/\ell$, 아연 $0.08\sim 0.65\text{mg}/\ell$ 의 함량을 보였고 원수보다 크게 증가하였다.

2) 높은 아연함량은 도로청소가 도로에 쌓인 먼지 및 여타의 오염물질 제거에 기여한다는 것이고, 특히 진공청소 부산물의 넓은 입도분포와 물청소 유출수의 $200\mu\text{m}$ 이하의 입도분포는 진공청소와 물청소의 역할이 분명하게 다름을 보여 주었다. 이는 진공청소와 물청소를 적절하게 조합한 도로청소방법의 정립을 요구한다 하겠다.

3) 2005년에 각자치구들은 진공청소의 경우 청소대상 도로연장을 기준으로 평균 295%, 면적을 기준으로 평균 26%를 매일 청소하였다. 물청소는 도로연장을 기준으로 평균 306%, 면적 기준으로 평균 48%였다. 결국 어느 청소방식이든 도로의 양쪽 측구를 1일 1.5회 정도 청소(중요지역의 도로 측구는 1회 이상 청소)하였고 도로전면을 청소하는 수준에는 미치지 못했다. 또한 자치구에 따라 청소강도와 물청소를 할 때의 살수량도 많은 차이를 보였다.

4) 2005년의 도로청소에서 제거된 $10\mu\text{m}$ 이하 도로먼지의 양은 106톤으로 김운수등이 제시한 2002년의 서울시 미세먼지 중 차량에서 배출된 미세먼지량의 0.56%에 해당되었다. 또한 도로청소는 평상시에 도로오염물을 제거하여 강우시 하수처리장 또는 하천으로 갑자기 유입되는 부하량을 줄이는 역할을 하는데, COD를 기준으로 볼 때 2005년의 경우 서울시 4개 하수처리장 강우시 추가유입량의 19%에 이르는 것으로 평가되었다.

5) 진공청소와 물청소의 구역을 확대하고 청소회수를 늘리면 $10\mu\text{m}$ 이하의 도로먼지와 수질오염물질의 제거량이 늘어나는 것으로 평가되었다. 그러나 도로청소효과의 기초가 되는 도로먼지와 환경오염물질의 함량에 관한 자료가 일부 지점 및 시기에만 한정되어 있다는 한계점이 있어 본 연구의 결과는 서울시 도로청소의 효과를 개략적으로 검토한 것이라 할 수 있다. 따라서 본 연구의 한계와 단점을 보완한 정확한 평가가 후속연구를 통하여 이루어지기를 기대한다.

참고문헌

- 구본상·정익재·천재현·이의상·조옥상, 1998, "고속도로 주변토양의 중금속 오염도 분석에 관한 연구", 「응용화학」, 제2권, 제2호, 765~769.
- 국립환경과학원, 2005, 「이동오염원 대기오염물질 배출량 산정방법 편람」.
- 김석구·김영임·강성원·윤상린·김소정, 2006, "강우에 의한 도로 비점오염원 유출 특성", 「대한환경공학회지」, 제28권, 제1호, 104~110.
- 김운수, 2004, 「서울시 미세먼지 배출량 조사·분석 및 관리방안 연구」, 서울시정개발연구원.
- 유기영, 2006, 「도로청소 효과분석 및 청소방법 정립」, 서울시정개발연구원.
- 최룡, 2003, 「우리나라 비점오염원의 발생현황과 관리방안」,

- 한국과학기술정보연구원.
- 환경부, 2005, 「대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염 배출량 산정 연구」.
- Albani, L. and Newman, D., 2004, *Street Cleanig Handbok*, ISWA(ITALIA).
- Cowherd, C. Jr. and Kinsey, J. S., 1986, *Identification, assessment, and control of fugitive particulate emissions*, EPA/600/8-86/023, U.S. EPA.
- California Stormwater Quality Association(CSQA), 2003, *California Stormwater BMP Handbook*.
- Etymezian, V., Kuhn, H., Gillies, J., Chow, J., Hendrickson, K., McGown, M., and Pitchford, M., 2003, *Vehicle-based road dust emission measurement - Part III : Effect of speed, traffic volume, location, and season on PM10 road dust emissions in the Treasure Vally*, ID, Atmospheric Environment, this issue, doi:10.1016/S1352-2310(03)00530-2.
- Hewitt, T. R., 1981, *The Effectiveness of street sweeping for reducing particulate matter background concentrations*, Sirrine Environmental Consultants, Inc., Research Triangle Park, NC.
- Jones, Jr. J. B., 1999, *Soil Analysis Handbook of Reference Methods*, Soil and Plant Analysis Council Inc.
- Record, F. A. and Bradway, R. M., 1978, *Philadelphia Particulate Study*, Contract No. 68-02-2345, For U.S. Environmental Protection Agency, Region III, Air Program Branch, Philadelphia, PA.
- Roffman, A., 1981, *A study of controlling fugitive dust emissions from non-traditional source of the United States Steel Corporation Facilities in Allegheny County*, Pennsylvania, Report prepared for United States Steel Corporation, Pittsburgh, PA.
- Vaze, J. and Chiew, S., 2002, "Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface", *Urban Water*, 4: 379~389.
- <http://www.redwoodcity.org/publicworks>, (Redwood City, Street Cleaning Services).
- <http://www.cityoflondon.gov.uk>, (The City of London, Street Cleansing).

원 고 접 수 일 : 2007년 7월 16일
1차심사완료일 : 2007년 8월 7일
최종원고채택일 : 2007년 8월 23일

