

미세먼지 저감 위한 도로청소 개선방안

최유진 김영은

A Study on Road Cleaning to Reduce Resuspension of Road Dust



서울연구원
The Seoul Institute

**미세먼지 저감 위한
도로청소 개선방안**

연구책임

최유진 서울연구원 안전환경연구실 연구위원

연구진

김영은 서울연구원 안전환경연구실 연구원

연구지원

서울시 기후환경본부 생활환경과

생활환경팀: 이노성, 김미란, 심재만, 김보영

클린도로운영팀: 김효형, 조강혁, 이환우

서울시 보건환경연구원

기후대기팀: 이만호, 이승구, 심미희

대기측정관리팀: 유승성, 노승근, 김경진, 박창호

입자연구팀: 정종흡, 김지성, 정숙녀, 강미혜

수질화학팀: 한규문, 홍주희, 최예덕, 하현주

토양폐기물팀: 조석주, 배일상, 이제승, 오달영, 신규진, 신승희

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

요약

서울시, 도로청소차 성능평가제도 도입하고 각종 요인 고려해 도로등급·청소빈도 설정

도로비산먼지, 비연소성으로 서울시 미세먼지 배출량의 큰 비중 차지

도로비산먼지는 일정한 배출구 없이 대기로 배출되는 비연소성(non-exhaust) 도로먼지이다. 도로에서 발생하는 비산먼지는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로표면 마모와 같이 도로를 주행하는 차량에 의해 직접 배출되는 비산먼지와 도로표면에 쌓여 있던 도로먼지가 자동차의 주행이나 바람에 의해 대기 중으로 비산되는 재비산먼지로 구분할 수 있다. 도로에 쌓여 재비산될 수 있는 도로재비산먼지의 발생원은 주변 공사장 및 화단 등에서 유입된 토사, 제설제, 대기 중 다양한 기원의 입자상 물질(차량 연소물질, 타이어/브레이크 마모먼지, 황사 등)의 침적 등으로 다양하다.

배출계수와 활동도를 사용해 산정되는 배출원별 대기오염물질 배출량은 불확실성이 존재한다. 특히 특정한 배출구가 없는 비산먼지의 배출량 추정은 불확실 정도가 상대적으로 더욱 크다. 최근 공개된 2015년 기준 국가대기오염물질 배출량자료에 따르면, 도로재비산먼지가 전체 서울시 PM10 배출량의 24%를 차지해 도로이동오염원과 비도로이동오염원 등 연소성 이동오염원 배출비율인 13%보다 크다. 서울시 PM2.5 배출원별 배출비중에서 도로재비산먼지의 비중은 21%로, 도로/비도로 이동오염원의 비중인 42%보다 작다. 하지만 21%의 배출비중은 여전히 무시할 수 없는 수치이다. 다만, 앞서 언급한 바와 같이 비산먼지 배출량이 다른 연료연소 배출량보다 불확실 정도가 크다는 점을 염두에 두고, 도로비산먼지 배출량과 배출비중 해석에 주의할 필요는 있다.

고농도 미세먼지에 시민 노출 최소화 위해 도로비산먼지 관리 필요

전기차 등 친환경차 도입 확대, 지동차 연소 오염물질의 기준 강화 등으로 자동차 연소성 미세

먼지 배출량은 꾸준히 감소하고, 상대적으로 관심과 관리가 미흡한 비연소성 미세먼지 배출 비중은 증가할 것으로 전망된다. 유럽의 한 연구에서 2020년에는 차량에 의한 PM10 배출량의 90% 정도가 비연소성 배출일 것으로 추정된 바도 있다. 더욱이 도로비산먼지는 Al, K, Ca 등 지각물질뿐 아니라 자동차 배출가스, 타이어 및 브레이크 마모에서 발생하는 Cd, Pb, Cr 등 유해한 인위적 성분을 포함하고 있다.

서울시는 평상시뿐 아니라 고농도 발생 시에도 미세먼지 저감 대책으로 도로청소를 도입하고 있고, 물을 사용하지 않는 분진흡입청소방식을 확대할 계획이다. 특히, 고농도 미세먼지 발생 시 대중교통 이용을 권장하기 위해서는 경유차 등 차량연소 배출 저감뿐 아니라 도로청소 등으로 도로재비산먼지 발생을 줄여, 시민들이 보행 중에 고농도 미세먼지에 노출되는 것을 최소화하는 것도 필요하다.

도로청소, 지역 도로먼지 특성 등 고려해 건식·습식방식 적절히 설계

도로청소가 대기 중으로 비산될 수 있는 잠재적 미세먼지 배출원을 사전에 제거한다는 의미에서 장기적으로 미세먼지 저감에 효과가 있다는 사실에 전반적으로 의문을 제기하지 않는다. 그러나 도로청소의 단기적(수시간~수일) 효과에 대해서는 청소방식(청소시간 및 빈도, 청소차량의 종류 및 특성, 청소차량 주행속도 등), 지역의 특성(교통량, 공사장과 같은 주변 여건 등), 기상특성(강우, 습도, 온도 등)에 따라서 다른 결과가 나올 수 있어 단정하기 어렵다. 특히, 물을 사용하지 않는 건식 청소방식이 단기적으로 대기 중 PM10 농도를 오히려 상승시킬 수 있다는 조사 결과도 보고된 바 있다. 다만, 건식 도로청소가 물청소와 결합하면 대기 중 미세먼지가 저감되는 효과가 항상 관측되는 것으로 조사되었다.

도로의 잠재적 미세먼지 배출원을 저감한다는 장기적 관점에서는 도로 위의 입자를 제거하는 건식 청소가 필요하며, 단기적으로 미세먼지 저감 효과를 얻기 위해서는 도로 위 입자의 이동성을 억제하는 데 효과적인 물청소 방식이 필요하다. 따라서 건식과 습식 청소 방식을 지역의 도로먼지 특성, 기후·기상 특성을 고려해 적절하게 설계하는 것이 비용효과적인 도로재비산먼지 관리로 판단된다.

북미·유럽, 미세먼지 저감 효과 높이기 도로청소장비 인증제 도입

도로청소의 미세먼지 저감에 중요한 요인 중 하나가 청소장비이다. 청소장비에 따라 3배 이상 까지 효과에서 차이가 날 수 있다는 보고도 있다. 유럽, 북미 지역에서는 청소장비의 PM10 인증제도를 도입해 미세먼지 제거에 보다 효과적인 청소장비가 사용되도록 유도하고 있다.

미국 캘리포니아는 1997년에 최초로 도로청소장비의 PM10 제거효율을 위한 인증절차를 마련했다. 2004년 7월에는 54개의 도로청소차 성능을 인정해 웹사이트에 공개하고, 관할 지자체는 성능이 인정된 청소차를 구입하고 있다. 캐나다 토론토시는 2008년에 도로청소기술을 평가하는 표준 프로토콜을 개발했다. 구체적으로 도로먼지 중 PM10 및 PM2.5의 제거효율, 청소 중에 대기로 재배출되는 미세먼지 수준, 겨울철을 포함한 연중 장비 운영 능력, 토론토의 다양한 청소 환경에서의 운영 가능성 등을 평가하는 내용이 프로토콜에 포함되어 있다. 유럽도 2013년 도로청소차 인증 테스트(EUnited Test) 절차를 개발하고 2015년 유럽 표준 절차로 채택했다.

도로폭·교통량 외 여러 요인 감안해 도로등급 매기고 청소빈도 결정

유럽과 미국의 여러 도시들은 도로청소의 효율을 높이기 위해 도로에 등급을 매기고, 각 등급에 따라 청소주기와 방법을 다르게 적용하고 있다. 도로폭, 교통량, 유동인구, 상업지역의 규모, 교통유발시설의 유무, 단위면적당 폐기물 발생량, 토지이용, 주거밀도 등의 요인 중 일부를 고려해 도시의 도로등급을 설정한다.

영국은 교통량, 상업지역의 규모, 단위면적당 폐기물 발생량, 주거밀도를 기준으로 3개의 도로등급으로, 이탈리아는 유동인구, 상업지역의 규모, 교통유발시설 유무, 토지이용을 기준으로 4개의 도로등급으로 구분한다. 미국의 마운틴뷰(Mountain View)시는 토지이용 특성, 인구집중도, 교통량 등을 고려해 청소등급을 매긴다. 벨기에 브뤼셀(Brussels)시는 도로유형을 교통량과 토지이용 특성에 따라 8등급으로 구분하고, 각 등급마다 청소 횟수를 차등 적용하고 있다. 예를 들면, 주거단지과 대규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로를 최고 등급인 A등급으로 설정하고 매주 12~13회 도로청소를 실시한다. 반면, 비주거지에 위치한 고속도로는 주 3회의 청소 빈도로 관리한다.

도로청소차 성능평가제도 도입하고 도로변 화단 설치기준 보완 필요

도로청소장비별로 미세먼지 저감효과의 차이가 큰 것으로 조사되고 있다. 유럽, 북미 지역은 청소장비의 PM10 인증제도를 도입해 미세먼지 제거에 보다 효과적인 청소장비 사용을 유도하고 있다. 서울시를 포함한 국내 여러 도시에서 도로비산먼지 관리 대책으로 분진흡입청소차의 확대 도입을 계획하고 있으나, 분진흡입청소차의 성능을 평가하는 국내의 제도와 체계는 없는 상황이다. 중장기적으로는 유럽, 북미 지역처럼 수년에 걸친 연구를 통해 도로청소장비 인증제도와 체계를 구축하는 것이 필요하다. 다만, 단기적으로 국내 분진흡입청소차의 성능에 대한 가이드라인 마련이 필요하다. 국내에서 사용되고 있는 분진흡입청소차의 성능은 도로접촉면에서 청소차 흡입력과 도로면과의 접촉시간에 따라 차이가 날 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 정부는 도로접촉면에서의 청소차 흡입력(흡입유속, 흡입압력 등) 등에 대한 최소 기준을 포함하는 가이드라인을 제공해 도로먼지 제거에 보다 효과적인 장비가 도입되도록 해야 할 것이다.

체계적인 도로청소도 중요하나, 토사와 먼지가 도로로 유입되어 축적되지 않도록 사전에 방지하는 것도 중요하다. 도시시설물 중 측구는 우수의 원활한 배수를 위해 도로에서 가장 낮은 곳에 위치하고 있어, 도로면과 인도에서 발생하는 토사와 먼지가 가장 많이 축적된다. 기존에 설치된 측구는 콘크리트 구조물로, 동절기에 사용되는 염화칼슘으로 인한 부식 등으로 표면이 거칠고 요철이 많아 쉽게 토사와 먼지가 축적되고, 도로청소장비를 사용해도 완벽한 청소가 쉽지 않다. 따라서 청소효과를 높이기 위해 도로측구 표면을 매끄럽게 유지하는 설치 및 관리 기준을 마련할 필요가 있다. 또한, 도로면에 물고임이 발생하지 않고 유수가 원활하게 빗물받이로 배수되도록 측구경사를 조정하거나 경사기준을 강화하는 등의 검토도 필요하다.

도로변 화단의 토사 유출도 도로먼지의 주요 배출원 중 하나로 지목되고 있다. 이에 오목형 화단 설치 등의 기준을 마련해 기존 화단과 향후 설치될 화단 관리도 필요하다.

대형공사장 인접도로·공사후 이동경로에 사업자 도로청소 의무제 도입

도로재비산먼지 측정자료 분석 등에서 대형공사장 주변 도로의 재비산먼지 농도가 전반적으로 높아 대형공사장이 도로먼지에 미치는 영향이 적지 않음을 확인했다. 공사규모가 클수록 비산

먼지 발생원, 투입장비 및 출입 공사차량이 많아지기 때문으로 추정된다. 따라서 특히 대형공사장의 경우, 오염발생 원인자인 사업자가 기존 공사현장 내부에 대한 살수 중심의 비산먼지관리를 넘어 인접도로까지 관리영역을 확대해야 한다. 또한 살수 중심의 관리는 원천적인 먼지제거가 될 수 없으므로, 분진흡입청소를 물청소와 병행해 공사장 인접 도로비산먼지를 관리해야 한다. 다만, 도로면이 흙먼지로 심하게 오염된 경우에는 분진흡입청소차와 물청소차 운영으로 도로면지관리에 한계가 있을 수 있다. 따라서 필요시 노면청소차와 물청소차를 병행·운영하여 대량의 입자를 제거하고, 이후 도로면의 오염정도를 살펴 분진흡입청소와 물청소를 병행해 도로비산먼지를 관리할 필요도 있다.

분진흡입청소차량의 필터교체 비용, 청소용수 비용 등을 고려하면 일반도로보다 재비산먼지 농도가 높을 가능성이 큰 대형공사장 주변의 도로는 원인자가 관리하는 것이 바람직한 방향이다. 즉, 환경영향평가 대상이 되는 대형공사장은 자체적으로 도로비산먼지 청소차량(분진흡입차와 고압살수차)을 구입 또는 임차해 공사현장 인접도로와 공사차량의 주요 이동경로 일부의 도로청소를 의무화하는 제도 도입을 제안한다. 관할 자치구는 이동식 도로재비산먼지 측정장량을 이용한 조사와 사업자의 도로청소 이행일지 점검 등으로 대형공사장의 도로비산먼지 관리 이행여부를 감독하는 것도 필요하다. 이렇게 도로청소 관리 방향을 설정하면 자치구는 보유한 청소장비를 보다 효율적으로 관할 지역의 도로비산먼지 관리에 활용할 수 있을 것이다.

도로청소 가용장비 효율적 배치·운용으로 도로비산먼지 저감 극대화

서울시 전체 도로를 똑같은 빈도로 청소하기에는 청소장비, 인력 등이 부족한 바, 가용 장비를 최대한 효율적으로 배치·운용해 도로비산먼지 저감 효과를 극대화해야 한다. 현재는 작업빈도를 교통량 또는 차선 기준으로만 차등화하고 있다. 도로청소의 주요 목적이 도로비산먼지를 줄여 미세먼지로부터 시민의 건강을 보호하는 것이라면, 해외 도시처럼 교통량(또는 차선)뿐 아니라 유동인구, 토지이용, 주거밀도와 초등학교/유치원 등 건강민감계층 이용시설 인접정도를 고려해 도로의 등급을 매기고 도로청소 빈도를 차등 적용할 필요가 있다. [표 1]은 해외사례를 참고해 제안한 도로등급(안)이고, [표 2]는 도로등급별 청소 우선순위 설정에 건강민감계층 시설 인접도, 도로먼지의 배출이 많은 공사장 인접도를 고려해 제안한 기준(안)이다.

결빙조건에 따른 청소방식과 청소시간, 청소주기 등 일상적 도로청소 운영 방안을 [표 3], [표

4)와 같이 제안한다.

[표 1] 가용장비와 인력의 효율적 활용을 위한 도로등급(안)

| 도로등급 | 토지이용 및 교통량에 따른 도로 구분(안) |
|------|----------------------------|
| 1등급 | 주거지역과 대규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로 |
| 2등급 | 주거지역과 소규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로 |
| 3등급 | 주거지역, 상업지역, 준공업지역이 혼재하는 도로 |
| 4등급 | 주거지역 내 도로 |

[표 2] 도로등급별 우선순위 설정 기준(안)

| 우선 순위 | 민감계층이용시설 인접도 | 공사장 인접도 |
|-------|--------------|---------|
| 1순위 | ● | ● |
| 2순위 | ● | |
| 3순위 | | ● |
| 4순위 | | |

[표 3] 기온(결빙 조건)에 따른 도로청소 방식

- 5°C 이상의 기상 조건: ‘분진흡입청소 + 물청소’ 병행 운영
 - 물과 진공흡입청소차가 결합된 도로청소가 미세먼지 저감에 효과적인 것으로 조사되고 있는 바, 동절기를 제외한 계절에는 현재처럼 ‘진공흡입청소 후 물청소’ 방식이 적절
 - 단, 공사장 출입구, 도로측구 등 오염이 심한 도로는 노면청소와 물청소를 일차적으로 시행한 후, 분진흡입청소와 물청소를 시행
 - 수분이 증발되어 도로먼지의 이동성이 원상태로 돌아가는 시간도 기상에 따라 다르므로, 도로먼지의 수분함유 정도를 관찰해 물청소의 주기 설정
- 5°C 이하 결빙이 우려되는 기상 조건: 분진흡입방식 중심으로 운영
 - 물 사용이 어려운 동절기에 분진흡입청소 방식 중심으로 도로청소 운영

[표 4] 그 외 사항

- 청소시간
 - 특히 분진흡입청소는 상대적으로 도로먼지가 안정화되어 있고 노출 인구가 적은 아침 교통 첨두시간 전인 새벽 5~6시에 운영
- 청소주기
 - 자치구의 가용 장비 및 인력에 따라 도로청소구역 등급과 우선순위 기준을 적용해 주기 설정 (1등급: 1~2회/일, 2등급 1+2순위: 1회/2일, 2등급 3+4순위: 1회/3일 ...)
- 청소영역
 - 전체 도로 퇴적물의 60~90% 이상이 도로연석에서 1m 이내에 존재하는 것으로 조사되는 바, 연석 1m 이내(가장 우측 차선)를 중점적으로 청소
- 도로청소의 구체적 지침 마련(청소차 운영현황 및 수거물 계량값 기록관리, 청소차 유지관리, 안전 등)
- 도로청소 운전자 대상의 교육훈련 제공
- 청소차 운영실적 점검·평가 및 환류로 도로청소 운영 개선

고농도 미세먼지 발생 시 대응초점은 도로표면 먼지의 이동성 억제

단기적으로 발생하는 고농도 미세먼지 사례에서는 도로먼지가 비산되어 대기 중의 농도를 최대한 가중시키지 않도록 하는 것이 중요하다. 이에 도로표면 먼지의 이동성을 낮추기 위한 물청소로 도로표면의 수분을 유지하는 것이 필요하다. 즉, 고농도 미세먼지 발생 시에는 물청소 방식을 중심으로 하되, 도로표면의 수분상태를 파악해 물청소의 빈도를 평상시보다 확대하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 결빙이 우려되는 기온 조건에서는 물청소가 불가능하다. 그렇다고 도로먼지가 차량운행으로 비산되어 도로주변의 대기 중 농도가 상승하도록 방치할 수는 없다. 따라서 차량 운행 증가로 재비산되는 도로먼지를 최소화하기 위해, 대기가 안정되고 차량이 적어 도로표면에 쌓인 먼지가 많을 것으로 예상되는 첨두 시간 이전인 새벽 시간 중심으로 분진흡입청소차를 운영해야 할 것이다.

더불어 도로비산먼지가 크게 문제되는 북유럽 도시에서는 CMA 등 먼지역제제(물청소처럼 도로먼지의 이동성 억제 기능)를 고농도 시 도로비산먼지 저감대책으로 활용하고 있고, 그 효과도 연구를 통해 확인한 바 있다. 하지만 전문가들은 먼지역제제 중 일부는 수질 및 토양오염, 부식, 건조 시 비산되어 미세먼지 배출원으로 작용 등 2차적인 부작용을 발생시킬 가능성을 우려하기도 한다. 이에 서울시가 먼지역제제를 고농도 미세먼지 발생 시 비상수단으로 도입을 고려할 경우, 이러한 우려에 대한 사전검토는 반드시 필요하다.



목차

| | |
|----------------------------|----|
| 01 연구개요 | 2 |
| 1_연구배경 및 목적 | 2 |
| 2_연구내용 및 체계 | 6 |
| 02 도로재비산먼지 발생과 관리 현황 | 10 |
| 1_도로재비산먼지 발생 현황 및 특성 | 10 |
| 2_도로청소 관리 매뉴얼 | 32 |
| 3_서울시 도로청소 현황 | 44 |
| 03 해외 도시의 도로재비산먼지 관리 사례 | 50 |
| 1_도로재비산먼지 관리 실태 | 50 |
| 2_도로청소장비 인증제 도입 | 64 |
| 04 도로청소의 미세먼지 저감효과 분석 선행연구 | 70 |
| 1_도로청소효과 분석방법 | 70 |
| 2_국내 조사연구 사례 | 75 |
| 3_해외 조사연구 사례 | 83 |
| 05 분진흡입청소차의 미세먼지 저감효과 분석 | 90 |
| 1_미세먼지 저감효과 실험 및 결과 | 90 |
| 2_그 외 실험 및 결과 | 99 |

| | |
|------------------------|-----|
| 06 도로재비산먼지 저감을 위한 정책방안 | 104 |
| 1_도로재비산먼지 관리 방안 | 104 |
| 2_법제도의 개선 방향 | 109 |
| 참고문헌 | 115 |
| Abstract | 118 |



표

| | |
|---|----|
| [표 2-1] 서울시 도로별 재비산먼지 측정결과 | 11 |
| [표 2-2] 서울시 강서구 도로별 도로재비산먼지 측정 | 12 |
| [표 2-3] 서울시 강서구 봄철(3~5월) 도로재비산먼지 농도 | 15 |
| [표 2-4] 서울시 강서구 여름철(6~8월) 도로재비산먼지 농도 | 17 |
| [표 2-5] 서울시 강서구 가을철(9~11월) 도로재비산먼지 농도 | 19 |
| [표 2-6] 서울시 강서구 겨울철(12월) 도로재비산먼지 농도 | 21 |
| [표 2-7] 서울시 강서구 계절별 도로재비산먼지 농도 | 22 |
| [표 2-8] 보건환경연구원의 이동식 도로재비산먼지 측정차량 조사 결과 | 24 |
| [표 2-9] 한국환경공단과 보건환경연구원의 도로별 평균 재비산먼지 농도 비교 | 25 |
| [표 2-10] 2017년도 서울시 강서구 계절별 공사현황 | 26 |
| [표 2-11] 도로 퇴적물 축적 실험 기간 및 장소 | 28 |
| [표 2-12] 도로 퇴적물 축적속도 | 29 |
| [표 2-13] 서울시 silt loading 값 측정 | 31 |
| [표 2-14] 건식 및 습식청소 구분 | 33 |
| [표 2-15] 청소차 종류별, 입도별 노면퇴적물 제거효율 | 34 |
| [표 2-16] 청소차의 종류별 청소효율 분석 | 35 |
| [표 2-17] 국내 도로청소차량 구분 및 특징 | 36 |
| [표 2-18] 일일 교통량에 따른 도로청소구간 등급 설정 | 38 |
| [표 2-19] 토지이용형태에 따른 도로청소방법 | 39 |
| [표 2-20] 황사예보 시 도로청소 | 41 |

| | |
|---|----|
| [표 2-21] (초)미세먼지 주의보 예비단계 및 발령단계 시 도로청소 | 42 |
| [표 2-22] (초)미세먼지 위기관리 및 경보 발령단계 시 도로청소 | 43 |
| [표 2-23] 도로청소차량 구분 | 43 |
| [표 2-24] 서울시 도로현황 | 44 |
| [표 2-25] 서울시 도로청소장비 현황(2017년) | 46 |
| [표 2-26] 서울시 도로청소 운영실적(2017년) | 46 |
| [표 2-27] 서울시 도로청소 작업체계 | 47 |
| [표 2-28] 서울시 도로청소 작업기준 | 47 |
| [표 3-1] 유럽 주요 도시의 도로등급 기준 | 55 |
| [표 3-2] 브뤼셀(Brussels)시의 도로유형에 따른 청소 횟수 | 55 |
| [표 3-3] 북유럽 도로먼지배출 저감을 위한 대책 | 63 |
| [표 3-4] 기계식 도로청소 결과 | 66 |
| [표 3-5] 공기재생식 도로청소 결과 | 66 |
| [표 3-6] EUnited와 VDI 테스트 절차의 비교 | 67 |
| [표 4-1] 도로청소의 비점오염 저감효과 평가방법 | 70 |
| [표 4-2] 국내 대기오염 측면의 도로청소효과 연구 사례 | 75 |
| [표 4-3] 도로청소 전·후 노면축적량 모니터링 기간 및 방법 | 77 |
| [표 4-4] 청소 전·후 TS(총도로먼지) 노면축적량 비교 | 77 |
| [표 4-5] 청소에 의한 도로 퇴적물 제거율 | 78 |
| [표 4-6] 서울시 도로 대상 도로청소 실험 | 78 |
| [표 4-7] 양천구(Test Road 1) 도로청소 전·후 도로구간별 평균 silt loading 측정 결과 | 79 |
| [표 4-8] 양천구(Test Road 2) 도로청소 전·후 도로구간별 평균 silt loading(sL) 측정 결과 | 80 |
| [표 4-9] 도로청소 전·후 도로구간별 sL(silt loading) 변화 및 저감효과 | 81 |
| [표 4-10] 국내 대기오염 측면의 도로청소효과 연구 사례 | 81 |
| [표 4-11] 청소차 수거퇴적물 모니터링 방법 | 82 |

| | |
|---|-----|
| [표 4-12] 도로청소차 수거 2차 분진의 체분석 결과 | 83 |
| [표 4-13] 진공흡입식 청소차의 여름과 겨울의 청소효율 비교 | 86 |
| [표 4-14] 진공흡입식 청소차와 일반살수차의 도로 비점오염물질 저감효율 | 86 |
| [표 5-1] 도로청소수거물 입경분포 검사(2017년 예비조사 1차) | 92 |
| [표 5-2] 도로청소수거물 입경분포 검사(2017년 예비조사 2차) | 93 |
| [표 5-3] 관악구 도로청소수거물 수거 실험 개요 | 94 |
| [표 5-4] 관악구 도로청소수거물 분석 결과 | 96 |
| [표 5-5] 2018년 9월 8일 관악구 남부순환로 교통 및 대기 중 미세먼지 농도 조사 결과 | 97 |
| [표 6-1] 가용장비와 인력의 효율적 활용을 위한 도로등급(안) | 105 |
| [표 6-2] 도로등급별 우선순위 설정 기준(안) | 105 |



그림

| | |
|--|----|
| [그림 1-1] 서울시 PM10, PM2.5 배출원별 배출비중(2015년) | 3 |
| [그림 1-2] 네덜란드(A)와 EU15+지역(B)의 자동차 연소성 PM10 연간 배출량과 자동차 비연소성(마모) 연간 배출량의 변화 | 4 |
| [그림 1-3] 일반적 도로비산먼지의 관리 방식 분류 | 5 |
| [그림 1-4] 연구의 체계 | 7 |
| [그림 2-1] 서울시 강서구 현황 | 13 |
| [그림 2-2] 강서구 용도지역 현황과 도로재비산먼지 측정 17개 도로 | 13 |
| [그림 2-3] 봄철(3월~5월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도 | 14 |
| [그림 2-4] 2017년도 봄철(3월~5월) 강서구 공사 현황(건수) | 16 |
| [그림 2-5] 여름철(6월~8월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도 | 16 |
| [그림 2-6] 2017년도 여름철(6월~8월) 강서구 공사 현황(건수) | 17 |
| [그림 2-7] 가을철(9월~11월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도 | 18 |
| [그림 2-8] 2017년도 가을철(9월~11월) 강서구 공사 현황(건수) | 19 |
| [그림 2-9] 겨울철(12월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도 | 20 |
| [그림 2-10] 2017년도 겨울철(12월) 강서구 공사 현황(건수) | 21 |
| [그림 2-11] 서울시 강서구 계절별 재비산먼지 농도 측정 | 23 |
| [그림 2-12] 도로 퇴적물 이동 및 추적 | 27 |
| [그림 2-13] 도로청소 실험 대상(경기도 용인시 기흥구) | 28 |
| [그림 2-14] 진공청소차의 종류 | 34 |
| [그림 2-15] 국내 도로청소방식의 예시 | 37 |
| [그림 2-16] 도로청소차량 편대 운영방법(편도 3차로 이상 도로) | 40 |

| | |
|---|-----|
| [그림 2-17] 도로분진흡입청소차량의 구조 | 45 |
| [그림 3-1] 고압살수도로청소 후 PM10 도로먼지 배출량 저감효과 | 51 |
| [그림 3-2] 스톡홀름시 정책도입과 PM10 초과일수 및 농도의 변화 | 56 |
| [그림 3-3] 도시 도로구조와 청소구간 | 57 |
| [그림 3-4] 미국 도시의 도로청소구역 등급 예시 | 58 |
| [그림 3-5] 미국 주요 도시의 도로청소 프로그램 | 58 |
| [그림 4-1] 미국 EPA AP-42 방법의 진공청소기 이용 도로먼지의 포집 예시 | 71 |
| [그림 4-2] SCAMPER 전면과 후면의 모습 | 72 |
| [그림 4-3] TRAKER 기술 | 73 |
| [그림 4-4] TRAKER II의 기능 다이어그램 | 73 |
| [그림 4-5] 국내 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 이미지 | 74 |
| [그림 4-6] 이동먼지측정시스템과 재비산 방법의 도로청소 전·후의 silt loading의 변화 비교 | 76 |
| [그림 4-7] 노면청소차와 분진흡입청소차의 수거퇴적물 시료 채취 | 82 |
| [그림 4-8] 슈투트가르트시의 도로청소 효과평가 예시 | 85 |
| [그림 5-1] 분진흡입청소차의 1차 토사(침강실)와 2차 분진(분진실) 수거 및 입도분석 과정 | 91 |
| [그림 5-2] 분진흡입청소차에서 수거한 1차 토사와 2차 분진 | 91 |
| [그림 5-3] 관악구 실험 대상 도로 | 95 |
| [그림 5-4] 관악구 도로청소수거물 분석 결과 정리 | 96 |
| [그림 5-5] 2018년 9월 8일 관악구 남부순환로의 도로재비산먼지 PM10 농도 청소 전·후 비교 | 98 |
| [그림 5-6] 미국 EPA AP-42 방식에 따른 미사부하량 조사 실험 현장(관악구 남부순환로) | 100 |
| [그림 6-1] 배수 및 표면 처리된 도로측구 예시 | 113 |
| [그림 6-2] 오목형 화단 설치 예시 | 114 |

01

연구개요

1_연구배경 및 목적

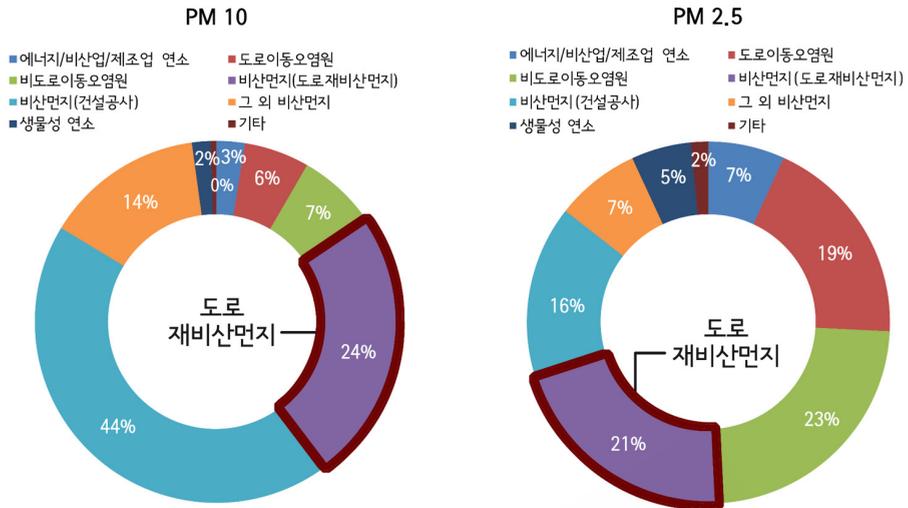
2_연구내용 및 체계

01 | 연구개요

1_연구배경 및 목적

도로비산먼지는 일정한 배출구 없이 대기로 배출되는 비연소성(non-exhaust) 도로먼지이다. 도로에서 발생하는 비산먼지는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로표면 마모와 같이 도로를 주행하는 차량에 의해 직접 배출되는 비산먼지와 도로표면에 쌓여 있던 도로먼지가 자동차의 주행이나 바람에 의해 대기 중으로 비산(飛散)되는 재비산먼지로 구분할 수 있다. 도로에 쌓여 재비산(再飛散)될 수 있는 도로재비산먼지의 발생원은 주변 공사장 및 화단 등에서 유입된 토사, 제설제, 대기 중 다양한 기원의 입자상 물질(차량 연소물질, 타이어/브레이크 마모먼지, 황사 등)의 침적 등으로 다양하다(이명훈 외, 2012; 한세현, 2012).

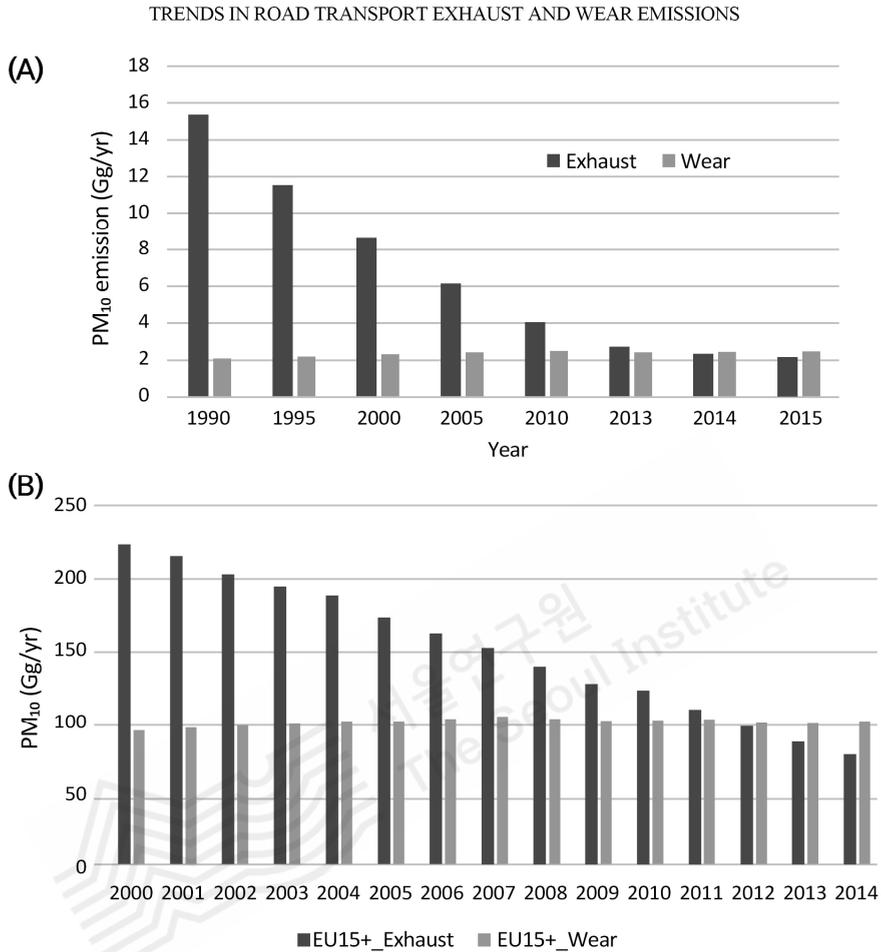
배출계수와 활동도를 사용해 산정되는 배출원별 대기오염물질 배출량은 불확실성이 존재한다. 특히 특정한 배출구가 없는 비산먼지의 배출량 추정은 불확실 정도가 상대적으로 더욱 크다. [그림 1-1]은 최근 공개된 2015년 기준 국가대기오염물질 배출량자료에서 추출한 서울시 PM10과 PM2.5의 배출원별 배출비중이다. PM10의 경우, 도로재비산먼지가 전체 서울시 배출량의 24%를 차지해 도로이동오염원과 비도로이동오염원 등 연소성 이동오염원 배출비율인 13%보다 크다. EU Emission Inventory Guidebook(EEA, 2003)에 따르면, 타이어마모 입자에는 미세입자(PM2.5)가 조대(粗大)입자(PM10-PM2.5)보다 높은 비율로 존재하고, 브레이크 마모에는 조대입자가 미세입자보다 좀 더 많이 존재한다. 도로재비산먼지에는 조대입자의 비율이 미세입자보다 훨씬 큰 것으로 알려져 있다(한세현, 2012). 서울시 PM2.5 배출원별 배출비중에서 도로재비산먼지의 비중은 21%로 도로/비도로 이동오염원의 비중인 42%보다 작다. 하지만 21%의 배출비중은 여전히 무시할 수 없는 수치이다. 다만, 앞서 언급한 바와 같이 비산먼지 배출량이 다른 연료연소 배출량보다 불확실 정도가 크다는 점을 염두에 두고 도로비산먼지 배출량과 배출비중 해석에 주의할 필요는 있다.



자료: 국립환경과학원, 2018, 2015년 국가대기오염물질 배출량

[그림 1-1] 서울시 PM10, PM2.5 배출원별 배출비중(2015년)

차량 운행에 의한 연소성 및 비연소성(마모) PM10 배출량의 변화를 조사한 최근 유럽지역의 결과도 비연소성 PM10 배출량이 연소성 PM10 배출량보다 큰 것으로 나타났다. [그림 1-2]는 네덜란드와 EU15+(노르웨이/스위스)의 자동차 연소성 PM10 연간 배출량과 자동차 비연소성(마모) 연간 배출량의 변화이다. 네덜란드와 EU15+ 각각의 최근 2년간 자동차마모 배출량이 자동차연소 배출량을 초과한 것을 알 수 있다. 이와 같은 변화는 자동차 연소성 배출에 대한 강화된 기준 및 기술 개발로 배출량이 감소하면서 상대적으로 관리가 미흡한 비연소성 PM10 배출 비중이 증가해 나타난 현상으로 설명되고 있다 (Amato et al., 2018). 또한 2020년에는 차량에 의한 이동오염원 PM10 배출량의 90% 정도가 비연소성 배출일 것으로 추정되고 있다(AIRUSE, 2017).



자료: F. Amato, 2018, Non-Exhaust emissions, Academic Press

[그림 1-2] 네덜란드(A)와 EU15+지역(B)의 자동차 연소성 PM10 연간 배출량과 자동차 비연소성(마모) 연간 배출량의 변화

더욱이 도로비산먼지는 Al, K, Ca 등 지각물질뿐 아니라 자동차 배출가스, 타이어 및 브레이크 마모에서 발생하는 Cd, Pb, Cr 등 유해한 인위적 성분을 포함하고 있다(환경부 한국환경공단, 2015, 도로재비산먼지 관리 업무 편람). 한세현(2012)은 금속입자를 상대적으로 많이 포함하고 있는 도로비산먼지가 건강 위해성과 관련 있다는 국내외 역학 및 독성 연구사례들을 언급하며, 연소 먼지뿐 아니라 도로먼지와 같은 비연소 먼지 관리가 도시지역의 대기질 관리에 필요하다고 강조한 바 있다.

도로비산먼지 배출에 영향을 미치는 요인은 다양하다. 교통량, 차량속도, 대형차량의 비율, 도로표면/타이어/브레이크 재질뿐 아니라 온도, 습도, 바람, 강우 등 기상조건도 도로비산먼지 배출에 영향을 미친다. 일반적으로 도로비산먼지 관리는 배출을 사전에 예방하는 기술적, 비기술적 방법과 이미 배출된 도로비산먼지를 제거하여 재비산먼지를 줄이는 사후 관리로 나눌 수 있다([그림 1-3] 참조). 특히 도로청소(물청소, 진공청소 등)는 도로재비산먼지 저감을 위한 사후 관리방법으로 국내외에서 많이 활용되고 있다. 서울시도 도로재비산먼지를 줄이기 위해 물청소, 진공청소를 시행하고 있다. 특히 서울시는 미세먼지 농도가 높고 도로 결빙 등의 문제가 있는 겨울철 도로재비산먼지 관리를 위해 물을 사용하지 않는 분진흡입청소차량을 지속적으로 확보해 연중 도로청소에 활용하고 있다.

| 사전 배출원 관리(기술적) | 사전 배출원 관리(비기술적) | 사후 관리(재비산 저감) |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - 저마모 타이어 - 저마모 도로포장 - 저마모 브레이크 | <ul style="list-style-type: none"> - 교통량 및 교통속도 제한 - 대형차량 유입 제한 - 주변 공사장, 화단 등 토사 유입 관리 | <ul style="list-style-type: none"> - 도로청소(물청소, 분진흡입청소 등) - 먼지역제제(CMA 등) 살포 등 |

[그림 1-3] 일반적 도로비산먼지의 관리 방식 분류

하지만 도로청소의 대기 중 PM10, PM2.5 농도 저감효과에 대해서는 논란이 있다. 도로청소가 대기 중으로 비산될 수 있는 잠재적 미세먼지 배출원을 사전에 제거한다는 의미에서 장기적으로 미세먼지 저감에 효과가 있음에는 전반적으로 의문을 제기하지 않는다. 그러나 도로청소의 단기적(수시간~수일) 효과에 대해서는 청소방식(청소시간 및 빈도, 청소차량의 종류 및 특성, 청소차량 주행속도 등), 지역의 특성(교통량, 공사장과 같은 주변여건 등), 기상특성(강우, 습도, 온도 등)에 따라 서로 다른 결과가 나올 수 있어 단정하기 어렵다는 의견이다. 특히, 물을 사용하지 않는 진공청소방식이 단기적으로 대기 중 PM10 농도를 오히려 상승시킬 수 있다는 조사 결과도 보고된 바 있다(AIRUSE, 2017).

서울시는 평상시뿐 아니라 고농도 발생 시에도 미세먼지 저감 대책으로 도로청소를 도입하고 있고, 물을 사용하지 않는 분진흡입청소방식을 확대할 계획이다. 특히, 고농도 미세먼지 발생 시 대중교통 이용을 권장하기 위해서는 경유차 등 차량연소 배출 저감뿐 아니라 도로청소 등으로 도로재비산먼지 발생을 줄여 시민들이 보행 중에 고농도 미세먼지에

노출되는 것을 최소화하는 것도 필요하다.

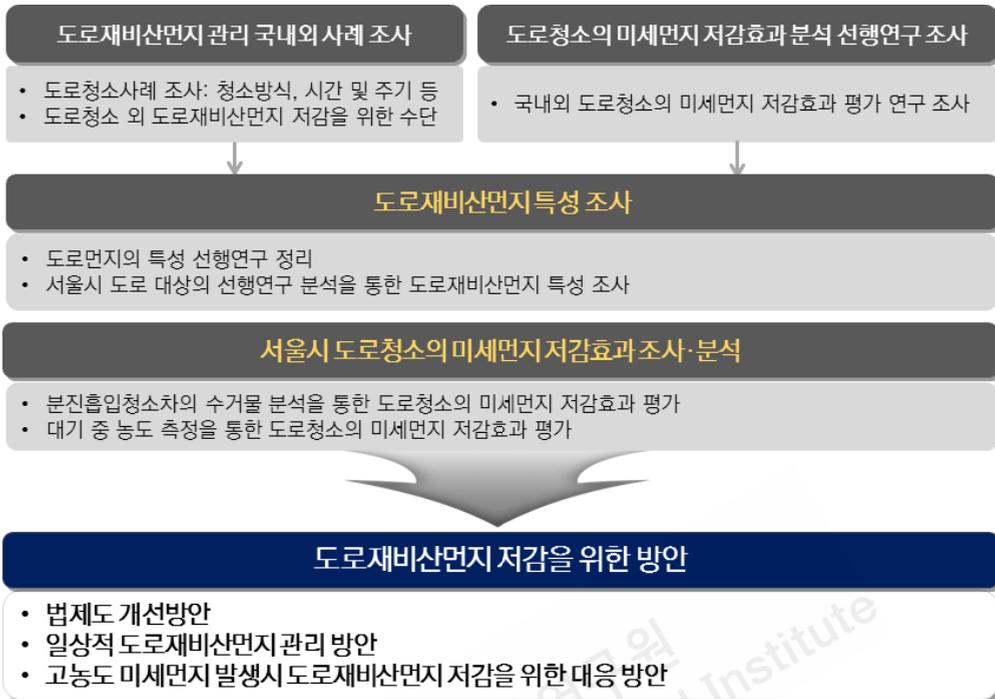
이 연구에서는 서울시 외 국내 여러 도시에서도 도입 확대를 계획하고 있는 분진흡입청소 방법의 효과를 평가하고, 평상시 및 고농도 미세먼지 발생 시에 대응할 수 있는 도로재비산먼지의 효율적 관리 방안을 모색하고자 한다.

2_연구내용 및 체계

[그림 1-4]는 연구의 주요 내용과 체계이다. 국내외에서 도로재비산먼지 저감을 위해 도입하고 있는 도로청소와 그 외 방법들을 함께 조사했다. 또한 서울시 도로재비산먼지 특성 등을 선행연구 자료를 분석해 도출했다.

통제가 어려운 다양한 요인 때문에 도로청소의 대기 중 미세먼지 저감효과를 평가하는 것은 쉽지 않다고 알려져 있다. 최근 국내외에서 도로청소의 미세먼지 저감효과를 평가한 사례들을 조사·정리해서 도로청소 미세먼지 저감효과 분석 실험에 참고했다. 제반여건을 고려해 이 연구에서 수행 가능한 도로청소 미세먼지 효과분석 실험을 설계하고 효과를 조사했다.

마지막으로 국내외 도로재비산먼지 저감 사례조사, 서울시 도로 대상의 도로청소 효과 분석 결과 등을 토대로 법제도의 개선 방향과 서울시 도로재비산먼지 저감 방안을 평상시와 고농도 미세먼지 발생 시로 구분해 제시했다.



[그림 1-4] 연구의 체계

02

도로재비산먼지 발생과 관리 현황

- 1_도로재비산먼지 발생 현황 및 특성
- 2_도로청소 관리 매뉴얼
- 3_서울시 도로청소 현황

02 도로재비산먼지 발생과 관리 현황

1_도로재비산먼지 발생 현황 및 특성

1) 서울 도로재비산먼지 발생 현황

(1) 주요 도로의 도로재비산먼지 현황

한국환경공단에서는 2017년 3월~12월 서울시, 인천시, 경기도의 주요 간선 도로를 대상으로 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 이용해 도로별 재비산먼지¹⁾를 측정하고 도로먼지 지도를 제작한 바 있다.

서울시의 경우 대부분 일반도로를 대상으로 하였으며, 일부 대규모 공사장 주변 도로를 측정했다. [표 2-1]은 서울시 도로재비산먼지 측정결과이다. 특히 강서구는 3월부터 12월 까지 도로별로 측정횟수가 59회로 집중 조사가 이루어졌으며, 다른 자치구는 5월~12월 사이 도로별로 6~8회 정도 조사되었다. 평균 재비산먼지 농도는 강서구가 $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고, 이어 은평구 $55\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강동구 $53\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광진구가 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다.

¹⁾ 측정방식 및 목적 등이 달라 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 이용해 측정한 재비산먼지 PM10 농도는 일반적인 대기측정망에서 측정된 PM10 농도로 볼 수 없음.

[표 2-1] 서울시 도로별 재비산먼지 측정결과

| 구 | 측정기간 | 도로별 측정횟수(회) | 도로수 (개) | 총 측정거리 (km) | 평균 재비산먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------|-------------------|----------------|------------|----------------|--|
| 강남구 | '17.05.30 ~ 11.14 | 8 | 20 | 352 | 13 |
| 강동구 | '17.06.08 ~ 11.16 | 8 | 11 | 253 | 53 |
| 강북구 | '17.06.05 ~ 11.15 | 7 | 11 | 156 | 14 |
| 강서구 | '17.03.07 ~ 12.06 | 59 | 17 | 2,465 | 58 |
| 관악구 | '17.05.30 ~ 12.04 | 7 | 15 | 272 | 29 |
| 광진구 | '17.06.19 ~ 12.12 | 8 | 10 | 211 | 35 |
| 구로구 | '17.05.26 ~ 11.08 | 7 | 18 | 256 | 22 |
| 금천구 | '17.06.12 ~ 11.28 | 7 | 20 | 152 | 31 |
| 노원구 | '17.05.22 ~ 11.17 | 8 | 13 | 339 | 25 |
| 도봉구 | '17.05.31 ~ 12.11 | 7 | 12 | 161 | 26 |
| 동대문구 | '17.05.19 ~ 12.06 | 7 | 19 | 287 | 13 |
| 동작구 | '17.06.12 ~ 11.28 | 7 | 9 | 138 | 15 |
| 마포구 | '17.04.25 ~ 12.08 | 8 | 15 | 278 | 19 |
| 서대문구 | '17.04.25 ~ 11.15 | 8 | 12 | 148 | 17 |
| 서초구 | '17.05.19 ~ 12.12 | 6 | 21 | 341 | 21 |
| 성동구 | '17.06.19 ~ 12.12 | 6 | 10 | 166 | 27 |
| 성북구 | '17.06.05 ~ 12.05 | 7 | 17 | 225 | 14 |
| 송파구 | '17.05.22 ~ 11.08 | 7 | 24 | 362 | 30 |
| 양천구 | '17.05.22 ~ 11.09 | 7 | 26 | 296 | 21 |
| 영등포구 | '17.06.09 ~ 11.02 | 8 | 30 | 394 | 13 |
| 용산구 | '17.06.15 ~ 11.17 | 7 | 11 | 191 | 13 |
| 은평구 | '17.05.26 ~ 11.29 | 7 | 12 | 253 | 55 |
| 종로구 | '17.06.08 ~ 11.16 | 8 | 17 | 224 | 11 |
| 중구 | '17.06.15 ~ 12.08 | 7 | 11 | 123 | 10 |
| 중랑구 | '17.05.29 ~ 12.01 | 8 | 14 | 273 | 18 |

자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과

이 중 측정횟수가 가장 많았던 강서구의 조사 결과를 중심으로 계절별 특성, 공간적 분포를 살펴보았다. 강서구 17개 도로 각각에 대해 2017년 3월 7일부터 12월 6일까지 총 58~59회의 도로재비산먼지 농도가 측정되었다([표 2-2] 참조).

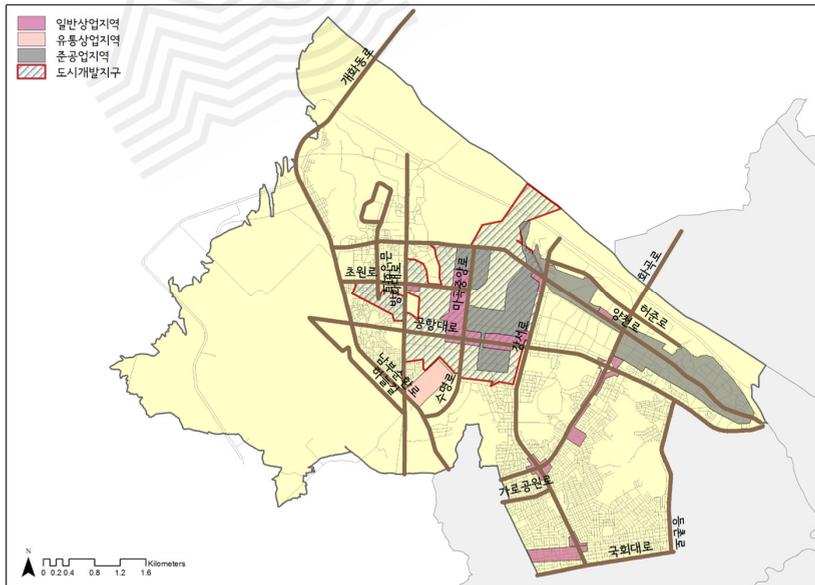
[표 2-2] 서울시 강서구 도로별 도로재비산먼지 측정

| 번호 | 도로명 | 측정기간 | 측정횟수(회) |
|----|--------|-------------------|---------|
| 1 | 마곡중앙로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 2 | 마곡중앙5로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 59 |
| 3 | 양천로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 4 | 가로공원로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 5 | 공항대로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 6 | 금녕화로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 59 |
| 7 | 초원로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 8 | 방화대로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 59 |
| 9 | 허준로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 10 | 강서로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 11 | 남부순환로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 12 | 개화동로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 13 | 국회대로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 14 | 등촌로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 15 | 화곡로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 57 |
| 16 | 수명로 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |
| 17 | 하늘길 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 |

자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과



[그림 2-1] 서울시 강서구 현황

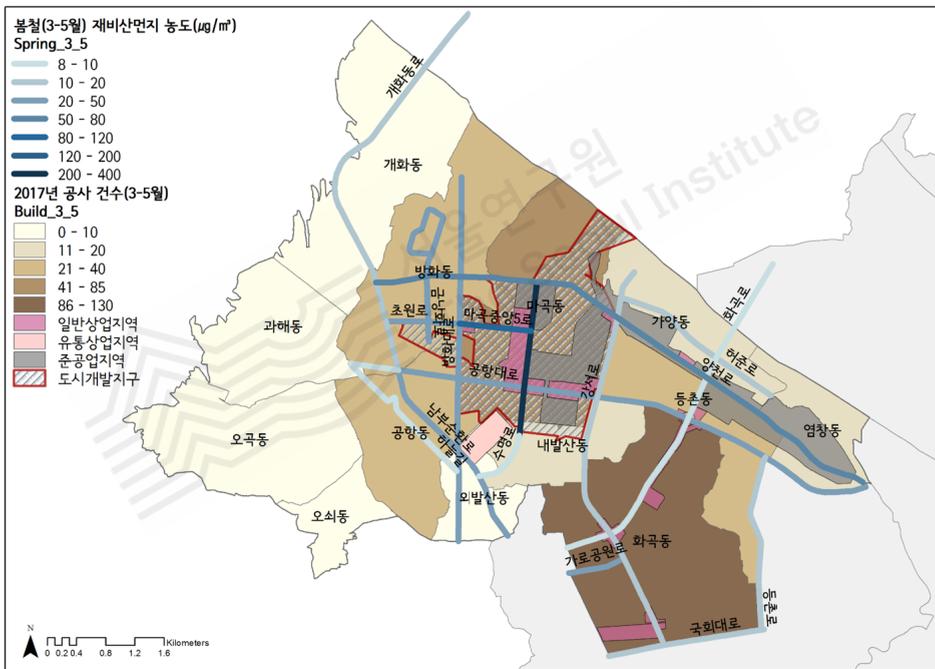


[그림 2-2] 강서구 용도지역 현황과 도로재배산면지 측정 17개 도로

강서구에는 도시개발사업이 진행되고 있고 김포공항이 위치해 있다. 강서구의 양천로, 공항대로, 방화대로, 강서로 부근으로 마곡도시개발구역과 방화뉴타운이 위치해 대규모 개발공사로 인한 영향이 있을 것으로 추정된다. 또한 김포공항이 강서구 서쪽에 위치해 김포공항까지 연결되는 개화동로와 공항대로, 하늘길의 교통량이 많을 것으로 예상된다.

강서구의 용도지역 특성을 보면, 동과 서를 연결해주는 양천로 주변과 마곡도시개발지구 에 준공업지역이 다수 위치해 있다. 도시개발지구 밖의 준공업지역은 양천로 주변에 위치해 있다. 일반상업지역은 화곡로와 강서로 주변에 주로 위치한다.

① 강서구 봄(3월~5월) 도로재비산먼지 측정 결과



[그림 2-3] 봄철(3월~5월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도

강서구 봄철 도로재비산먼지 측정 결과에서는 도시개발지구(마곡도시개발구역 및 방화뉴타운)를 중심으로 도로재비산먼지 농도가 높았다. 특히, 마곡도시개발구역에 위치한 마곡중앙로의 농도가 210.2ug/m³, 마곡중앙5는 89.6ug/m³로 다른 도로에 비해 크게 높았다. 양천로는 65.7ug/m³로 비교적 높았는데, 이는 공사차량의 이동 또는 준공업지역의 화물

차 등 중대형차량의 영향일 것으로 추정된다.

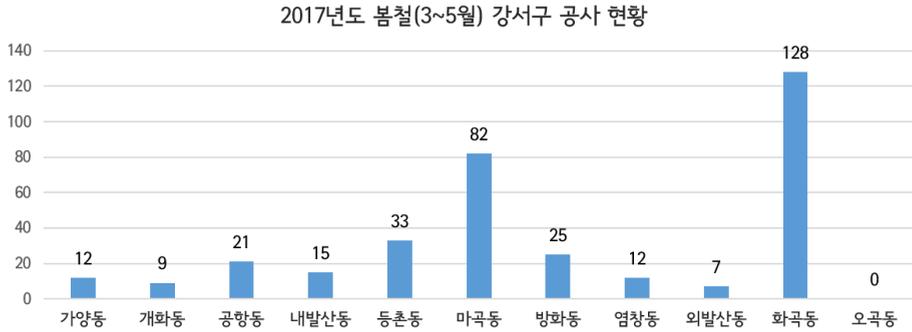
2017년도 봄철 강서구 공사현황에서는 화곡동이 총 128건으로 가장 많고, 마곡동이 82건으로 그다음으로 많았다. 화곡동에서는 작은 필지단위의 공사건수가 주를 이뤘고, 마곡동에서는 대규모 도시개발에 따른 큰 필지단위의 공사건수가 많았다. 공사건수는 화곡동이 많았으나, 대형공사는 마곡동이 많아 이의 영향으로 마곡중앙로와 마곡중앙5로에 재비산먼지가 높았을 가능성이 크다.

[표 2-3] 서울시 강서구 봄철(3~5월) 도로재비산먼지 농도

| 번호 | 도로명 | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | |
|----|--------|--|-------|--------------|--------------|
| | | 3월 | 4월 | 5월 | 봄철(3~5월) |
| 1 | 마곡중앙로 | 290.4 | 136.7 | 351.8(203.4) | 247.3(210.2) |
| 2 | 마곡중앙5로 | 139.2(103.2) | 58.2 | 107.5 | 97.3(89.6) |
| 3 | 양천로 | 104.8 | 33.4 | 69.8 | 65.7 |
| 4 | 가로공원로 | 38.0 | 30.4 | 19.7 | 29.5 |
| 5 | 공항대로 | 95.95(47.7) | 34.4 | 31.2 | 51.9(37.8) |
| 6 | 금양화로 | 67.4 | 26.3 | 18.6 | 36.4 |
| 7 | 초원로 | 120.6(34.9) | 28.0 | 23.9 | 54.6(28.9) |
| 8 | 방화대로 | 70.5 | 29.3 | 18.4 | 38.4 |
| 9 | 허준로 | 26.9 | 9.6 | 11.0 | 15.2 |
| 10 | 강서로 | 24.6 | 12.6 | 14.9 | 16.9 |
| 11 | 남부순환로 | 44.0(32.2) | 15.3 | 13.3 | 23.3(20.3) |
| 12 | 개화동로 | 43.0(14.25) | 5.4 | 13.6 | 19.1(11.1) |
| 13 | 국회대로 | 36.1(17.6) | 18.3 | 9.3 | 20.9(15.1) |
| 14 | 등촌로 | 16.1 | 9.5 | 8.8 | 11.3 |
| 15 | 화곡로 | 12.5 | 6.3 | 8.7 | 8.9 |
| 16 | 수명로 | 22.1(11.0) | 6.9 | 10.0 | 12.4(9.3) |
| 17 | 하늘길 | 16.7(8.7) | 4.7 | 10.6 | 10.0(8.0) |

() : 1표준편차를 넘는 평균 농도의 값은 제외하고 산정함.

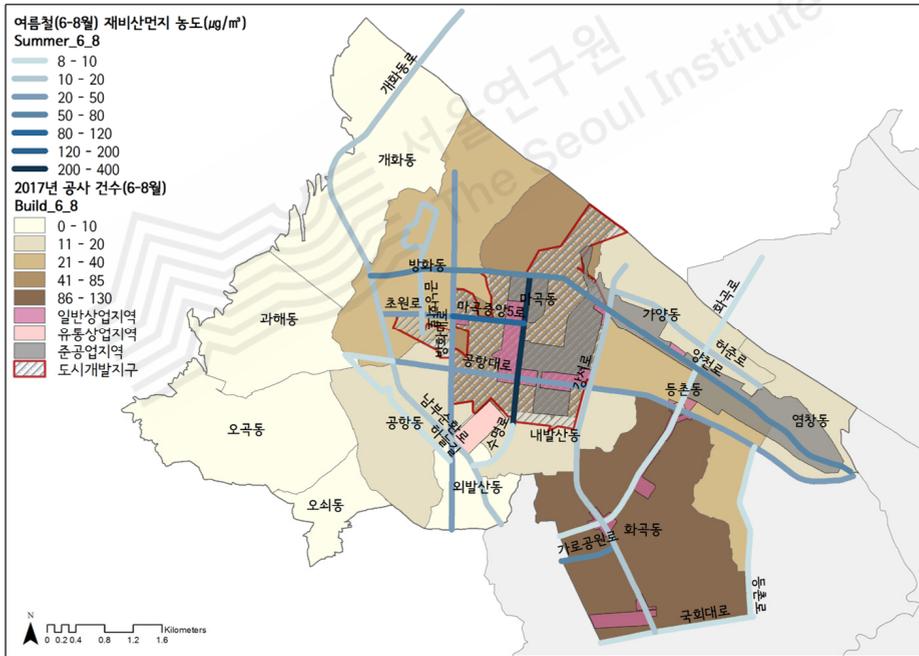
자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과



자료: 강서구청, 2017년 기준 착공현황 데이터 정리

[그림 2-4] 2017년도 봄철(3월~5월) 강서구 공사 현황(건수)

② 강서구 여름(6월~8월) 도로재비산먼지 측정 결과



[그림 2-5] 여름철(6월~8월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도

강서구 여름철 도로재비산먼지 측정결과도 봄철과 유사하다. 도시개발지구(마곡도시개발 구역 및 방화뉴타운)를 중심으로 농도가 높았다.

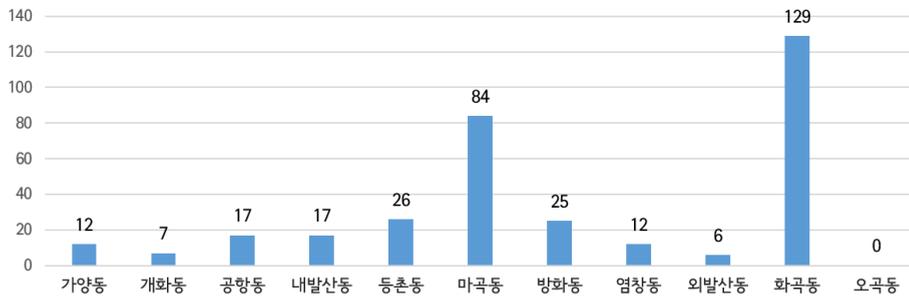
[표 2-4] 서울시 강서구 여름철(6~8월) 도로재비산먼지 농도

| 번호 | 도로명 | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | |
|----|--------|--|-------------|-------------|-------------|
| | | 6월 | 7월 | 8월 | 여름철(6~8월) |
| 1 | 마곡중앙로 | 312.2 | 167.2 | 112.3 | 224.0 |
| 2 | 마곡중앙5로 | 119.9 | 93.0 | 145.5 | 119.6 |
| 3 | 양천로 | 78.0 | 47.4 | 95.2 | 74.4 |
| 4 | 가로공원로 | 43.9 | 394.4(47.4) | 320.9(96.4) | 197.7(62.6) |
| 5 | 공항대로 | 49.3 | 29.2 | 20.1 | 36.1 |
| 6 | 금강화로 | 25.6 | 16.4 | 9.6 | 18.8 |
| 7 | 초원로 | 32.4 | 28.9 | 18.9 | 27.8 |
| 8 | 방화대로 | 25.7 | 16.9 | 23.2 | 22.7 |
| 9 | 허준로 | 12.8 | 13.9 | 9.7 | 12.2 |
| 10 | 강서로 | 17.8 | 22.3 | 15.0 | 18.0 |
| 11 | 남부순환로 | 7.7 | 17.3 | 19.8 | 13.2 |
| 12 | 개화동로 | 8.5 | 15.5 | 12.4 | 11.4 |
| 13 | 국회대로 | 6.2 | 11.0 | 8.4 | 7.9 |
| 14 | 등촌로 | 11.5 | 12.7 | 5.4 | 10.0 |
| 15 | 화곡로 | 6.4 | 13.5 | 13.8 | 10.0 |
| 16 | 수명로 | 6.0 | 11.0 | 16.3 | 10.0 |
| 17 | 하늘길 | 4.4 | 15.0 | 10.6 | 8.4 |

() : 1표준편차를 넘는 평균 농도의 값은 제외하고 산정함.

자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과

2017년도 여름철(6~8월) 강서구 공사 현황



자료: 강서구청, 2017년 기준 착공현황 데이터 정리

[그림 2-6] 2017년도 여름철(6월~8월) 강서구 공사 현황(건수)

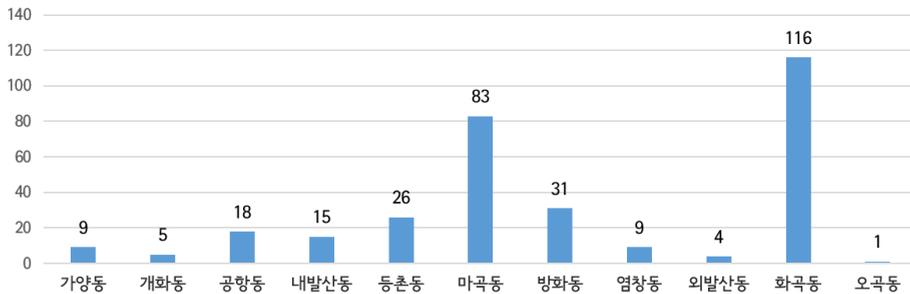
[표 2-5] 서울시 강서구 가을철(9~11월) 도로재비산먼지 농도

| 번호 | 도로명 | 재비산먼지 평균농도(μg/m³) | | | |
|----|--------|-------------------|-------------|--------------|--------------|
| | | 9월 | 10월 | 11월 | 가을철(9~11월) |
| 1 | 마곡중앙로 | 207.2(125.7) | 142.8 | 406.0(244.8) | 261.5(171.1) |
| 2 | 마곡중앙5로 | 119.5 | 143.3(87.4) | 145.5 | 137.4(117.5) |
| 3 | 양천로 | 124.8 | 116.1 | 186.7(104.4) | 145.5(115.1) |
| 4 | 가로공원로 | 20.8 | 19.4 | 56.6 | 34.0 |
| 5 | 공항대로 | 43.1 | 59.0 | 143.9(60.6) | 86.8(54.2) |
| 6 | 금남화로 | 11.9 | 15.5 | 92.0(48.6) | 43.6(25.3) |
| 7 | 초원로 | 36.6 | 25.9 | 120.4(86.6) | 65.0(49.7) |
| 8 | 방화대로 | 15.7 | 54.6(30.5) | 65.5 | 47.6(37.2) |
| 9 | 허준로 | 9.0 | 25.4 | 42.2 | 27.1 |
| 10 | 강서로 | 27.6 | 26.4 | 47.4 | 34.8 |
| 11 | 남부순환로 | 12.3 | 29.7(24.0) | 56.5(27.2) | 34.9(21.2) |
| 12 | 개화동로 | 13.4 | 18.4 | 52.5(19.7) | 29.9(17.2) |
| 13 | 국회대로 | 8.5 | 27.2 | 30.3(25.0) | 23.0(20.2) |
| 14 | 등촌로 | 13.9 | 13.4 | 37.1 | 22.6 |
| 15 | 화곡로 | 12.4 | 19.2 | 39.0(35.1) | 24.8(22.2) |
| 16 | 수명로 | 19.7(10.1) | 13.7 | 19.6(17.4) | 21.5(13.7) |
| 17 | 하늘길 | 6.0 | 12.4 | 35.9(23.0) | 19.5(13.8) |

() : 1표준편차를 넘는 평균 농도의 값은 제외하고 산정함.

자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과

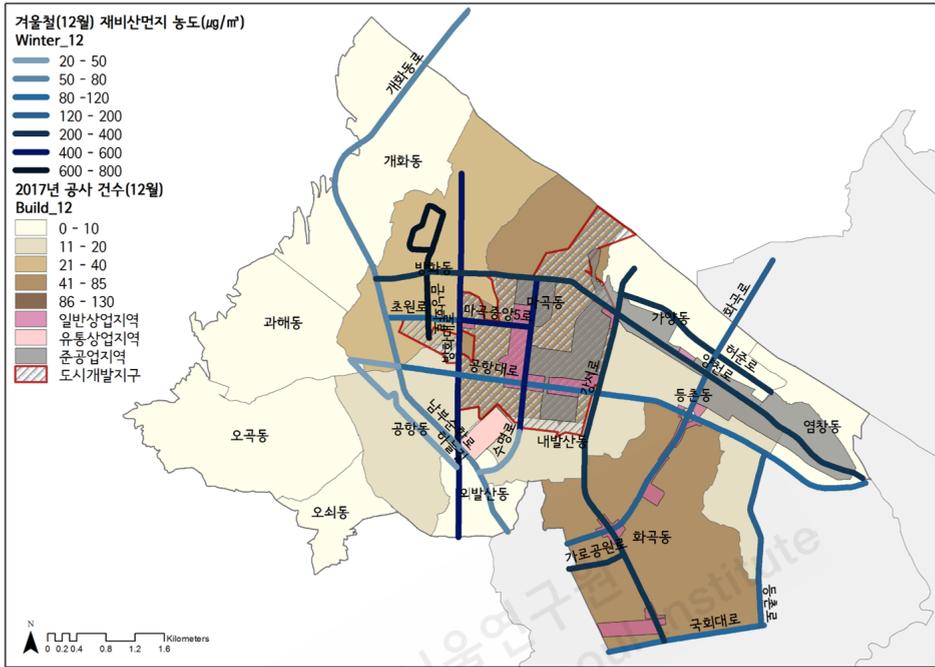
2017년도 가을철(9~11월) 강서구 공사 현황



자료: 강서구청, 2017년 기준 착공현황 데이터 정리

[그림 2-8] 2017년도 가을철(9월~11월) 강서구 공사 현황(건수)

④ 강서구 겨울(12월) 도로재비산먼지 측정 결과



[그림 2-9] 겨울철(12월) 강서구 도로별 재비산먼지 농도

강서구 겨울철 도로재비산먼지 측정조사가 다른 계절에 비해 12월 2회 수준으로 적어 겨울철 평균적 경향으로 보기에 어려울 수 있음을 미리 밝힌다. 12월 측정값은 다른 계절에 비해 높았다. 특히, 마곡도시개발구역에 위치한 마곡중앙로는 재비산먼지 농도가 $236.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 마곡중앙5로는 $163.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 12월 재비산먼지 농도가 전반적으로 다른 계절에 비해 높게 나타나는 것이 겨울철 낮은 온도와 건조한 기상 조건 때문일 수도 있으나 이는 추가적인 조사가 필요한 부분이다. 겨울철 공사현황(건수)은 다른 계절에 비해 적었다.

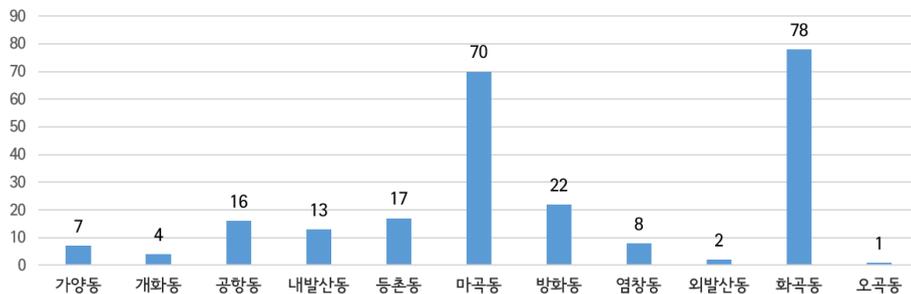
[표 2-6] 서울시 강서구 겨울철(12월) 도로재비산먼지 농도

| 번호 | 도로명 | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | |
|----|--------|--|--------|--------------|
| | | 12월 4일 | 12월 6일 | 겨울철(12월) |
| 1 | 마곡중앙로 | 236.4 | 730.6 | 483.5(236.4) |
| 2 | 마곡중앙5로 | 163.2 | 797.6 | 480.4(163.2) |
| 3 | 양천로 | 124.1 | 629.2 | 376.7(124.1) |
| 4 | 가로공원로 | 47.9 | 393.3 | 220.6(47.9) |
| 5 | 공항대로 | 119.2 | 49.7 | 84.5 |
| 6 | 금강화로 | 116.1 | 1168.6 | 642.4(116.1) |
| 7 | 초원로 | 127.0 | 38.0 | 82.5(38.0) |
| 8 | 방화대로 | 118.3 | 731.9 | 425.1(118.3) |
| 9 | 허준로 | 163.4 | 516.7 | 340.0(0.0) |
| 10 | 강서로 | 40.7 | 455.3 | 248.0(40.7) |
| 11 | 남부순환로 | 86.8 | 71.7 | 79.3(0.0) |
| 12 | 개화동로 | 67.9 | 73.8 | 70.9(0.0) |
| 13 | 국회대로 | 27.6 | 177.7 | 102.7(27.6) |
| 14 | 등촌로 | 30.6 | 293.0 | 161.8(30.6) |
| 15 | 화곡로 | 27.2 | 246.0 | 136.6(27.2) |
| 16 | 수명로 | 31.1 | 41.6 | 36.4(31.1) |
| 17 | 하늘길 | 34.1 | 51.7 | 42.9(34.1) |

() : 1표준편차를 넘는 평균 농도의 값은 제외하고 산정함.

자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과

2017년도 겨울철(12월) 강서구 공사 현황



자료: 강서구청, 2017년 기준 착공현황 데이터 정리

[그림 2-10] 2017년도 겨울철(12월) 강서구 공사 현황(건수)

⑤ 계절별 경향

계절별 재비산먼지 농도를 정리하면 [표 2-7]과 같다. 계절별 경향을 살펴보면, 겨울철에 재비산먼지 농도가 가장 높고 가을, 봄, 여름 순으로 나타났다(단, 겨울철 측정횟수가 2회로 제한적임을 고려해 해석 필요). 겨울철은 상대적으로 건조하여 비산먼지 부유 가능성이 높고, 낮은 온도로 물청소가 어려워 다른 계절에 비해 도로에 쌓인 먼지가 많을 가능성도 크다.

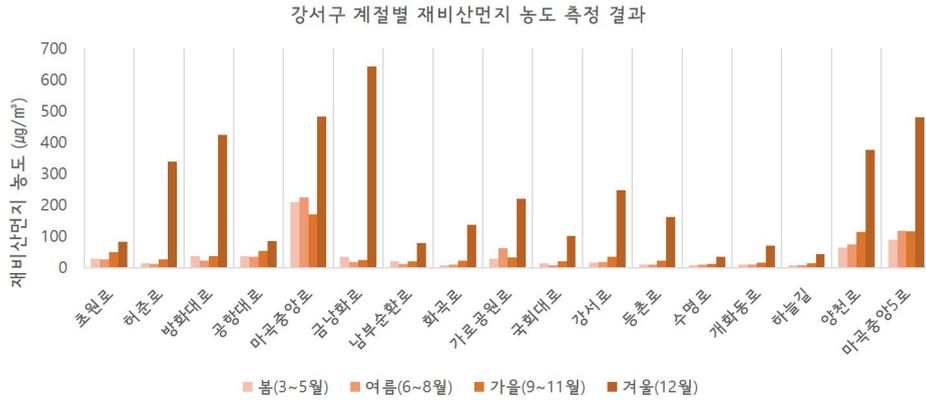
[표 2-7] 서울시 강서구 계절별 도로재비산먼지 농도

| 번호 | 도로명 | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | |
|----|--------|--|-------------|--------------|--------------|
| | | 봄철(3~5월) | 여름철(6~8월) | 가을철(9~11월) | 겨울철(12월)* |
| 1 | 마곡중앙로 | 247.3(210.2) | 224.0(-) | 261.5(171.1) | 483.5(236.4) |
| 2 | 마곡중앙5로 | 97.3(89.6) | 119.6(-) | 137.4(117.5) | 480.4(163.2) |
| 3 | 양천로 | 65.7(-) | 74.4(-) | 145.5(115.1) | 376.7(124.1) |
| 4 | 가로공원로 | 29.5(-) | 197.7(62.6) | 34.0(-) | 220.6(47.9) |
| 5 | 공항대로 | 51.9(37.8) | 36.1(-) | 86.8(54.2) | 84.5(-) |
| 6 | 금남화로 | 36.4(-) | 18.8(-) | 43.6(25.3) | 642.4(116.1) |
| 7 | 초원로 | 54.6(28.9) | 27.8(-) | 65.0(49.7) | 82.5(38.0) |
| 8 | 방화대로 | 38.4(-) | 22.7(-) | 47.6(37.2) | 425.1(118.3) |
| 9 | 허준로 | 15.2(-) | 12.2(-) | 27.1(-) | 340.0(-) |
| 10 | 강서로 | 16.9(-) | 18.0(-) | 34.8(-) | 248.0(40.7) |
| 11 | 남부순환로 | 23.3(20.3) | 13.2(-) | 34.9(21.2) | 79.3(-) |
| 12 | 개화동로 | 19.1(11.1) | 11.4(-) | 29.9(17.2) | 70.9(-) |
| 13 | 국회대로 | 20.9(15.1) | 7.9(-) | 23.0(20.2) | 102.7(27.6) |
| 14 | 등촌로 | 11.3(-) | 10.0(-) | 22.6(-) | 161.8(30.6) |
| 15 | 화곡로 | 8.9(-) | 10.0(-) | 24.8(22.2) | 136.6(27.2) |
| 16 | 수명로 | 12.4(9.3) | 10.0(-) | 21.5(13.7) | 36.4(31.1) |
| 17 | 하늘길 | 10.0(8.0) | 8.4(-) | 19.5(13.8) | 42.9(34.1) |

(-): 1표준편차를 넘는 평균 농도의 값은 제외하고 산정함.

* : 겨울철의 경우, 12월 데이터가 전부이므로 12월 데이터로 평균값을 계산

자료: 한국환경공단, 2018, 2017년 도로먼지지도 제작결과



[그림 2-11] 서울시 강서구 계절별 재비산먼지 농도 측정

(2) 비산먼지 발생원 주변 도로재비산먼지 현황

서울시 보건환경연구원에서는 2017년 1월~12월 주로 공사장 등 비산먼지 발생원 주변의 자치구별 일부 도로의 재비산먼지농도를 측정하는 바 있다. 용산구, 종로구, 중구를 제외한 자치구들은 평균 10회 정도 측정이 진행되었으며, 평균 재비산먼지 농도는 구로구 $223.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강서구 $214.9\mu\text{g}/\text{m}^3$, 영등포구 $128.9\mu\text{g}/\text{m}^3$, 은평구 $126.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 높았다.

[표 2-8] 보건환경연구원의 이동식 도로재비산먼지 측정차량 조사 결과

| 구 | 측정기간 | 측정횟수(회) | 도로수(개) | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------|-------------------|---------|--------|---|
| 강남구 | '17.03.03 ~ 12.04 | 10 | 5 | 48.8 |
| 강동구 | '17.01.25 ~ 12.04 | 12 | 4 | 78.0 |
| 강북구 | '17.03.07 ~ 12.06 | 10 | 2 | 39.3 |
| 강서구 | '17.01.10 ~ 12.11 | 12 | 9 | 214.9 |
| 구로구 | '17.01.19 ~ 12.20 | 12 | 3 | 223.5 |
| 금천구 | '17.01.19 ~ 12.20 | 12 | 2 | 80.2 |
| 동대문구 | '17.03.07 ~ 12.06 | 10 | 2 | 27.7 |
| 동작구 | '17.03.08 ~ 12.13 | 10 | 4 | 55.9 |
| 마포구 | '17.03.09 ~ 12.12 | 10 | 2 | 70.7 |
| 서대문구 | '17.03.09 ~ 12.12 | 10 | 4 | 85.5 |
| 서초구 | '17.01.09 ~ 12.14 | 12 | 4 | 93.7 |
| 성동구 | '17.04.19 ~ 12.14 | 10 | 7 | 56.0 |
| 성북구 | '17.03.07 ~ 12.06 | 10 | 4 | 30.2 |
| 송파구 | '17.01.25 ~ 12.04 | 12 | 2 | 117.0 |
| 영등포구 | '17.01.09 ~ 12.13 | 8 | 3 | 128.9 |
| 용산구 | '17.01.05 ~ 02.03 | 2 | 2 | 3.6 |
| 은평구 | '17.01.09 ~ 12.12 | 12 | 6 | 126.6 |
| 종로구 | '17.01.05 ~ 02.03 | 2 | 2 | 14.1 |
| 중구 | '17.01.05 ~ 02.03 | 2 | 3 | 21.2 |

자료: 서울시 내부자료

(3) 소결

측정시기, 빈도, 대상 도로 등 조사 조건이 달라 직접적인 비교는 어려우나 전반적으로 일반도로를 조사한 환경공단 측정결과보다 공사장 주변 도로 대상의 보건환경연구원 측정결과가 높은 것을 확인할 수 있다(용산구, 중구, 종로구 대상 보건환경연구원의 측정 조사 횟수 2회임을 고려). 이는 공사장이 도로비산먼지의 주요 발생원이 될 수 있음을 의미한다. 공사장의 비산먼지가 인접도로까지 확산되고, 공사장 출입 대형 공사차량 운행으로 타이어/브레이크 마모 등의 배출 증가, 공사차량에 묻거나 실린 흙먼지가 운행 중 유출 등의 과정이 있었을 것으로 보인다.

[표 2-9] 한국환경공단과 보건환경연구원의 도로별 평균 재비산먼지 농도 비교

| 구분 | 한국환경공단(일반도로 위주) | | 보건환경연구원(공사장 주변) | |
|------|-------------------|---|-------------------|---|
| | 측정 기간 | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 측정 기간 | 재비산먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| 강남구 | '17.05.30 ~ 11.14 | 13 | '17.03.03 ~ 12.04 | 48.8 |
| 강동구 | '17.06.08 ~ 11.16 | 53 | '17.01.25 ~ 12.04 | 78.0 |
| 강북구 | '17.06.05 ~ 11.15 | 14 | '17.03.07 ~ 12.06 | 39.3 |
| 강서구 | '17.03.07 ~ 12.06 | 58 | '17.01.10 ~ 12.11 | 214.9 |
| 관악구 | '17.05.30 ~ 12.04 | 29 | - | - |
| 광진구 | '17.06.19 ~ 12.12 | 35 | - | - |
| 구로구 | '17.05.26 ~ 11.08 | 22 | '17.01.19 ~ 12.20 | 223.5 |
| 금천구 | '17.06.12 ~ 11.28 | 31 | '17.01.19 ~ 12.20 | 80.2 |
| 노원구 | '17.05.22 ~ 11.17 | 25 | - | - |
| 도봉구 | '17.05.31 ~ 12.11 | 26 | - | - |
| 동대문구 | '17.05.19 ~ 12.06 | 13 | '17.03.07 ~ 12.06 | 27.7 |
| 동작구 | '17.06.12 ~ 11.28 | 15 | '17.03.08 ~ 12.13 | 55.9 |
| 마포구 | '17.04.25 ~ 12.08 | 19 | '17.03.09 ~ 12.12 | 70.7 |
| 서대문구 | '17.04.25 ~ 11.15 | 17 | '17.03.09 ~ 12.12 | 85.5 |
| 서초구 | '17.05.19 ~ 12.12 | 21 | '17.01.09 ~ 12.14 | 93.7 |
| 성동구 | '17.06.19 ~ 12.12 | 27 | '17.04.19 ~ 12.14 | 56.0 |
| 성북구 | '17.06.05 ~ 12.05 | 14 | '17.03.07 ~ 12.06 | 30.2 |
| 송파구 | '17.05.22 ~ 11.08 | 30 | '17.01.25 ~ 12.04 | 117.0 |
| 양천구 | '17.05.22 ~ 11.09 | 21 | - | - |
| 영등포구 | '17.06.09 ~ 11.02 | 13 | '17.01.09 ~ 12.13 | 128.9 |
| 용산구 | '17.06.15 ~ 11.17 | 13 | '17.01.05 ~ 02.03 | 3.6 |
| 은평구 | '17.05.26 ~ 11.29 | 55 | '17.01.09 ~ 12.12 | 126.6 |
| 종로구 | '17.06.08 ~ 11.16 | 11 | '17.01.05 ~ 02.03 | 14.1 |
| 중구 | '17.06.15 ~ 12.08 | 10 | '17.01.05 ~ 02.03 | 21.2 |
| 중랑구 | '17.05.29 ~ 12.01 | 18 | - | - |

측정횟수가 많았던 환경공단의 강서구 자료를 분석한 결과도 공사장 영향이 도로재비산 먼지 농도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 계절별로 강서구 공사장의 영향을 분석한 결과, 도시개발지구(마곡도시개발구역, 방화뉴타운) 주변 도로의 농도가 상대적으로 높아 대형공사장의 영향을 확인했다. 게다가 강서구의 공사현황 분석에서 화곡동이 마곡동에 비해 공사 건수는 많았으나, 오염도에서는 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다(표

2-10] 참조). 이는 공사규모가 클수록 비산먼지 발생원, 투입장비 및 입출입 공사차량이 많아지기 때문으로 보인다. 따라서 특히 대형공사장의 경우, 오염발생 원인자인 사업자가 기존 공사현장 내부에 대한 살수 중심의 비산먼지 관리를 넘어 인접도로까지 관리영역을 확대해야 할 것으로 보인다. Jeff et al.(2012)은 도로교통의 타이어/브레이크 마모에서 발생하는 PM10의 독성 영향범위가 도로로부터 50~100m 정도라는 모델링 결과를 제시한 바 있다. 또한, 2018년 9월 환경부는 병원, 학교 등 취약계층 생활 시설 50m 안에서 시행되는 공사는 규모와 관계없이 해당 지자체 조례로 신고대상에 포함시켜 비산먼지 관리를 강화하겠다는 계획을 밝힌 바 있다(환경부 보도자료, 2018.9.13). 향후 추가적인 연구조사가 필요하나, 최소 공사경계 50m 이상의 도로를 공사사업자가 관리할 대상 도로로 규정하는 것도 고려할 필요가 있다.

[표 2-10] 2017년도 서울시 강서구 계절별 공사현황

(단위: 건)

| 구분 | 봄철(3~5월) | 여름철(6~8월) | 가을철(9~11월) | 겨울철(12월) |
|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 가양동 | 12 | 12 | 9 | 7 |
| 개화동 | 9 | 7 | 5 | 4 |
| 공향동 | 21 | 17 | 18 | 16 |
| 내발산동 | 15 | 17 | 15 | 13 |
| 등촌동 | 33 | 26 | 26 | 17 |
| 마곡동 | 82 | 84 | 83 | 70 |
| 방화동 | 25 | 25 | 31 | 22 |
| 염창동 | 12 | 12 | 9 | 8 |
| 외발산동 | 7 | 6 | 4 | 2 |
| 화곡동 | 128 | 129 | 116 | 78 |
| 오곡동 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 계 | 344 | 335 | 317 | 238 |

자료: 강서구청, 2017년 기준 착공현황 데이터 정리

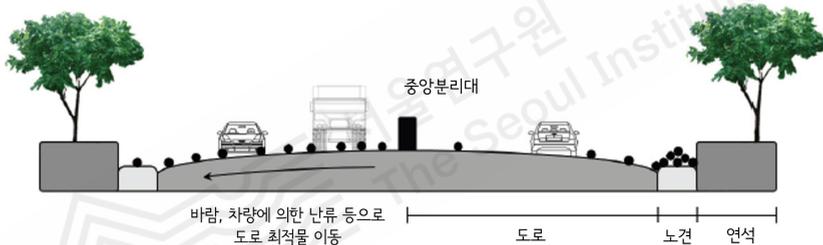
분진흡입청소차량의 필터교체 비용, 청소용수 비용 등을 고려하면 일반도로보다 재비산먼지 농도가 높을 가능성이 큰 대형공사장 주변 도로는 원인자가 관리하는 것이 바람직한 방향이다. 즉, 대형공사장은 자체적으로 도로비산먼지 청소차량(분진흡입차와 고압살수차)을 구입 또는 임차해 공사현장 인접도로와 공사차량의 주요 이동경로 일부에 대한 도

로청소를 담당하는 방향으로 제도 개선이 필요하다. 관할 자치구는 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 이용한 조사 등으로 대형공사장의 도로비산먼지 관리 이행여부를 감독하는 것도 필요하다. 이렇게 도로청소 관리 방향을 설정하면 자치구는 보유한 청소장비를 보다 효율적으로 관할 지역의 도로비산먼지 관리에 활용할 수 있을 것이다.

2) 도로먼지의 특성

(1) 도로먼지의 축적

강희만(2014) 등은 도로 퇴적물의 축적 특성을 조사한 바 있다. 연구내용의 일부를 발췌 정리해 참고자료로 활용하고자 한다.



자료: 강희만, 2014, 도로청소를 통한 비점오염 식감량 산정기준 연구, 한국도로공사 도로교통연구원

[그림 2-12] 도로 퇴적물 이동 및 축적

주로 차량 운행에 따른 난류, 바람 때문에 도로 퇴적물은 도로연석 방향으로 이동하며, 도로 발생 퇴적물의 대부분이 연석에서 1m 이내에 모여 있는 것으로 알려져 있다. Horwath & Bannerman(2009)의 조사 결과에서는 연석에서 1m 이내에 전체 도로 퇴적물의 60-70%가 존재한다고 했다. Deletic & Orr(2005)는 전체 도로 퇴적물의 90% 이상이 연석에서 1m 이내에 존재하는 연구결과를 보여주었다.

또한, 차량운동, 바람, 강우 및 인간의 활동 등이 도로 퇴적물의 축적량, 축적속도에 영향을 미친다. 일반적으로 도로 퇴적물은 모두 제거된 후 수일 이내에 최고 축적량에 도달하는 것으로 알려져 있다. 일부 선행연구를 정리하면 다음과 같다.

강희만(2014)은 건기일수에 따른 도로 퇴적물 축적량을 파악하기 위해 용인시 기흥구에 위치한 지방도로의 일부 구간에서 도로 퇴적물을 채취해 조사했다.

현장의 도로 퇴적물은 주로 갓길 말단의 연석과의 경계, 갓길-도로 경계에 축적되고, 갓길 내에서는 갓길의 흙 내부에 많이 축적되는 것으로 관찰되었다. 초기화 2일 후에도 도로 퇴적물은 주로 갓길 말단과 연석과의 경계, 갓길-도로경계의 흙에 많이 쌓였다.



자료: 강희만, 2014, 도로청소를 통한 비점오염 식감량 산정기준 연구, 한국도로공사 도로교통연구원

[그림 2-13] 도로청소 실험 대상(경기도 용인시 기흥구)

[표 2-11] 도로 퇴적물 축적 실험 기간 및 장소

| 구분 | 1차 | 2차 | 3차 |
|----|-----------------|-----------------|-------------------|
| 기간 | 5월 9일~5월 20일 | 9월 26일~10월 5일 | 10월 2일~10월 28일 |
| 장소 | 경기도 용인시 기흥구 서천로 | 경기도 용인시 기흥구 서천로 | 경기도 용인시 기흥구 경희대학교 |

자료: 강희만, 2014, 도로청소를 통한 비점오염 식감량 산정기준 연구, 한국도로공사 도로교통연구원

1차 실험에서 도로 퇴적물 축적량은 꾸준히 증가해, 건기일수 4일에는 58.37g/m²에 달했

다. 4일 이후 강우에 의해 $27.53\text{g}/\text{m}^2$ 로 감소했다가 이후 다시 증가해 7.5일에는 $78.37\text{g}/\text{m}^2$ 까지 증가했다. 이후 강우에 의해 $41.13\text{g}/\text{m}^2$ 로 감소했으며, 유사한 양으로 유지되었다. 2차 실험에는 건기일수 2.5일에 $35.37\text{g}/\text{m}^2$ 에 도달했으며, 이후 6.5일까지 $23.52\sim 37.00\text{g}/\text{m}^2$ 을 나타냈다. 3차 실험에서는 건기일수 5일에 $27.2\text{g}/\text{m}^2$ 에 도달했으며, 이후 12일까지 $20.90\sim 32.80\text{g}/\text{m}^2$ 을 나타냈다.

이와 같은 결과로부터 도로 퇴적물 축적량은 건기일수 3~7일에 평균값에 도달하는 것으로 추정해, 3~7일의 도로 청소주기를 제안했다.

도로 퇴적물 축적속도는 초기에 가장 높았으며, 이후 감소했다. 1차 실험에서 처음 1일의 축적속도는 $27.4\text{kg}/\text{km}/\text{day}$, 이후 2-4일에는 $14.59\sim 21.17\text{kg}/\text{km}/\text{day}$ 이었고, 5일 이후에는 강우 직후인 6.5일(12.06)을 제외하고 $3.43\sim 8.91\text{kg}/\text{km}/\text{day}$ 의 축적속도를 나타냈다. 2차 실험에서는 0.5일에 $32.40\text{kg}/\text{km}/\text{day}$, 1.5일에 $13.65\text{kg}/\text{km}/\text{day}$, 2.5일에 $14.15\text{kg}/\text{km}/\text{day}$, 6~12일에는 $2.36\sim 3.48\text{kg}/\text{km}/\text{day}$ 이었다. 이는 도로 퇴적물이 바람이나 차량에 의한 난류로 도로 밖으로 이동했기 때문으로 추정되었다.

[표 2-12] 도로 퇴적물 축적속도

(단위: $\text{kg}/\text{km}/\text{day}$)

| 축적속도 | 1차 | 2차 | 3차 |
|------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| 평균 | 10.381 | 12.163 | 3.826 |
| 표준편차 | 7.967 | 9.690 | 1.063 |
| 최고 | 27.400 (12.5일 중 1일) | 32.400 (6.5일 중 1일) | 5.440 (12일 중 1일) |
| 최소 | 3.430 (12.5일 중 12.5일) | 4.908 (6.5일 중 6.5일) | 2.355 (12일 중 11일) |

자료: 강희만, 2014, 도로청소를 통한 비점오염 식감량 산정기준 연구, 한국도로공사 도로교통연구원

2012년에 수행된 환경부의 청소주기에 따른 시나리오 분석 결과에서는 TS(총도로먼지)의 노면축적량과 강우유출량의 저감비율이 청소주기가 짧아질수록 증가했다. 청소주기가 10일 이상인 경우, 도로면에서의 배출부하량 저감률이 90% 이하로 나타나 청소효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 청소주기가 10일보다 길어지면 도로청소에 의한 TS의 제거효과보다 노면축적과 강우유출효과가 더 지배적이기 때문으로 추정되었다. 청소주기에 따

른 입도별 저감비율을 보면, 청소주기가 짧아질수록 조대입자의 청소효율이 미세입자보다 더 빠르게 증가했다. 청소주기에 따른 TS 강우유출량 저감비율에서는 청소주기가 15일에서 2일로 줄면 평균 저감비율이 점토 1.0%, 미사 1.3%, 모래 3.6%, 자갈 4.4% 증가한 반면, 청소주기가 2일에서 1일로 짧아지면 저감비율이 점토 13.3%, 미사 15.0%, 모래 16.0%, 자갈 15.2%로 증가했다. 따라서 미세입자에 대한 청소효율을 높이기 위해서는 짧은 주기로 청소하는 것이 중요하다고 보았다.

(2) 그 외 특성

정용원(2007b)은 도로 퇴적물 중 미세입자에 속하는 silt양이 교통량이 많은 도로가 적고, 교통량이 적은 도로가 많은 경향이 있다고 언급했다. 그 이유로 교통량이 많은 도로는 차량 주행으로 재비산되어 공기 중으로 배출되기 때문이고, 반대로 교통량이 적은 도로는 재비산되는 양이 적기 때문으로 설명한 바 있다. 또한 교통량의 관계와 유사하게 도로의 왕복차선 수가 많은 도로에서 silt의 양이 적어진다고 보았다.

2006년 한세현이 서울과 인천의 일부도로를 대상으로 도로의 silt loading²⁾을 조사한 바 있다. 조사 결과, 전반적으로 서울의 silt loading 값이 인천에 비해 변동 폭이 작고, 지역 별로 비슷한 수준이었다. 서울의 지역별 silt loading 값은 공업(구로) > 상업(영등포) > 주거(목동) > 기타(상암) 지역 순으로 조사되었다. 뚜렷하지는 않으나 봄 > 겨울 > 가을 > 여름 순으로 silt loading 값이 높았다. 또한, 중앙선 쪽 차선보다 인도 쪽 차선으로 갈수록 silt loading 값이 커지는 조사 결과도 제시했다.

²⁾ 단위면적당 쌓여 있는 기하학적 직경 75 μ m 이하인 먼지(silt)의 질량(g/m²)으로, 도로먼지가 대기 중으로 비산되는 척도로 활용(정용원, 2007b, 인천지역 미세먼지의 주요 발생원 파악 및 도로 청소에 따른 미세먼지 저감방안)

[표 2-13] 서울시 silt loading 값 측정

| 구분 | 지역 | 여름 (05) | 가을 (04) | 겨울 (04-05) | 봄 (05) | 평균 (n=13) | S.D. |
|--------------|---------|------------|------------|---------------|-----------|--------------|-------|
| 산업지역 | 구로디지털단지 | 0.069 | 0.084 | 0.109 | 0.123 | 0.098 | 0.029 |
| 상업지역 | 영등포 | 0.085 | 0.078 | 0.086 | 0.130 | 0.094 | 0.039 |
| 주거지역 | 목동 | 0.066 | 0.101 | 0.084 | 0.095 | 0.089 | 0.035 |
| 그 외 지역 | 상암동 | 0.033 | 0.021 | 0.042 | 0.040 | 0.034 | 0.021 |
| 다리 (대교) | 가양대교 | 0.013 | 0.019 | 0.019 | 0.018 | 0.018 | 0.007 |
| | 양화대교 | 0.009 | 0.015 | 0.011 | 0.025 | 0.015 | 0.007 |
| 도로 (간선도로) | 시흥대교 | 0.085 | 0.056 | 0.076 | 0.076 | 0.071 | 0.023 |
| | 서부간선도로 | 0.007 | 0.052 | 0.013 | 0.016 | 0.025 | 0.035 |
| | 강서로 | 0.077 | 0.099 | 0.082 | 0.095 | 0.089 | 0.035 |
| 서울 시험 루트 | | 0.066 | 0.073 | 0.077 | 0.096 | 0.078 | 0.023 |

자료: 한세현, 2006, 이동먼지측정시스템을 이용한 포장도로 silt loading의 시간적, 공간적 변화특성에 관한 실시간 측정연구, 석사학위논문

한세현(2012)은 2006~2008년 3년 동안 서울, 인천 등 수도권 도시지역 도로를 대상으로 silt loading을 조사한 바 있다. 조사 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 교통량이 적고 화물차 통행이 많은 공업 및 공사지역 도로의 silt loading은 높고 시간에 따른 변화폭이 크나 교통량이 많고 먼지유입원이 적은 주거지역 및 간선도로의 silt loading은 상대적으로 낮으면서 일정한 경향을 보임.
- 기온상승, 공사착공 등으로 먼지유입원이 많은 봄철에 전반적으로 silt loading이 높고, 강우의 영향을 받는 여름철의 silt loading이 낮은 경향을 보임.
- 측정도로의 특성에 따라 차이는 있으나 도로의 silt 중 PM10분율(부피%)은 2.5~4.6%로 평균 3.6%로 조사됨.
- 교통량 증가(또는 차선수 증가)에 따라 포장도로의 silt loading은 감소 경향, 이는 많은 통행차량에 의한 재비산속도 증가로 도로먼지의 고갈효과 영향으로 추정됨.
- 동일도로에서 차량속도가 증가하면 도로재비산먼지 배출이 증가하며, 도로재비산먼지의 PM2.5/PM10의 비는 0.10~0.40의 범위로 평균적으로 0.20으로 조사됨.

더불어, 정용원 외(2008)가 동일도로의 가로화단 유무에 따른 silt loading을 조사한 결과, 화단이 있는 도로의 값이 1.4~2.1배 정도 높은 것으로 조사된 바 있다. 즉, 적절하게 관리되지 않은 화단은 도로비산먼지의 잠재적 원인이 될 수 있음을 시사한다.

2_도로청소 관리 매뉴얼

1) 도로청소방법

전통적인 도로청소의 주요 목적은 청결과 위생 등 도시 미관 개선이다. 이에 대부분의 도로청소장비나 운영방식 등은 대기 중 미세먼지를 줄이기 위해 설계된 것이 아니어서 일부 도로청소장비와 방식은 지역의 미세먼지 농도를 단기적으로 증가시키는 결과를 보여주기도 했다.

기계장비를 사용하는 도로청소방식을 크게 분류하면 건식과 습식청소로 분류할 수 있다 ([표 2-14] 참조). 앞서 지적한 바와 같이 도로청소 기술은 과거 몇십 년 동안 큰 변화가 없었다. 단지 최근에 도로청소차에 포집된 미세먼지가 재배출되는 것을 방지하기 위한 백

필터 장착과 청소차의 연료연소과정에서 미세먼지 배출을 저감하기 위한 DPF 부착, CNG 청소차량의 도입 등이 있었다(Amato et al., 2018).

[표 2-14] 건식 및 습식청소 구분

| 구분 | | 청소방법 | | |
|----------|------|----------------------|-----------|--------------|
| 청소장비 | 건식청소 | 기계식청소차 | | |
| | | 진공흡입식 청소차 (진공청소차) | 공기재생식 | |
| | | | 공기배출식 | 필터장착(분진흡입차) |
| | | | | 필터미장착(노면청소차) |
| | 습식청소 | 물청소차 | 고압살수차 | |
| | | | 브러시장착 살수차 | |
| | | | 진공흡입식 살수차 | |
| 고정식 살수장치 | | | | |

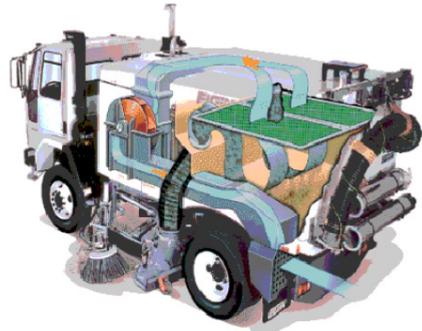
자료: 서울시, 2016, 서울시(초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

건식청소 중 진공흡입식 청소차는 공기재생식과 공기배출식으로 구분된다. 공기재생식(Air-regenerative Sweeper)은 차량 내부가 폐쇄형 공기순환시스템으로 이루어져 있으며, 연속여과시스템을 가진 고압 진공이 오염물질을 제거하고 공기를 재순환하는 방식이다. 공기배출식은 차량의 측면에 위치한 흡입구를 통해 오염물질을 흡입해 적재하고, 흡입한 공기는 다시 밖으로 배출한다. 공기배출식은 필터장착 여부에 따라 노면청소차와 분진흡입차로 구분하며, 필터를 장착하면 미세입자를 제거하는 데 유리하지만, 흡입압력 증가로 에너지가 많이 소모되는 단점이 있다(환경부, 2012).

일반적으로 진공흡입식 청소차가 기계식 청소차보다 효율이 높고, 입자크기가 클수록 청소차의 효율이 증가한다.



(a) 공기순환식



(b) 공기배출식

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구

[그림 2-14] 진공청소차의 종류

[표 2-15] 청소차 종류별, 입도별 노면퇴적물 제거효율

(단위: %)

| 입자크기(μm) | | <63 | 63-125 | 125-250 | 250-2000 | >2000 | 총계 |
|-----------------------|------|-----|--------|---------|----------|-------|----|
| 기계식 청소차 | 실험a1 | 13 | 9 | 9 | 40 | 38 | 31 |
| | 실험a2 | 13 | 10 | 11 | 18 | 31 | 20 |
| 진공흡입식 청소차 | 실험b1 | 39 | 31 | 38 | 62 | 86 | 60 |
| | 실험b2 | 81 | 93 | 75 | 93 | 94 | 92 |

자료: Breault et al., 2005; 환경부, 2013, 도로청소를 통한 비점오염 저감효과 및 총량제 적용방안 연구

[표 2-16] 청소차의 종류별 청소효율 분석

| 청소차의 모델명 | 청소차의 종류 | 청소 전(g) | 청소 후(g) | 총 제거효율(%) | 미세입자(<63 μ m) 제거효율(%) |
|--------------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------------------------|
| Waterless Eagle(FW) | 기계식 | 3,405 | 288.3 | 91.5 | 78.1 |
| Waterless Eagle(FW) with water | 기계식 | 3,405 | 646.0 | 81.0 | 68.2 |
| Crosswind(NX) | 공기재생식 | 3,405 | 85.6 | 97.5 | 90.8 |
| Crosswind | 공기재생식 | 3,405 | 121.1 | 96.4 | 89.4 |
| Whirlwind(MV) | 진공흡입식 | 3,405 | 221.1 | 93.5 | 93.5 |
| 평균 | | 3,405 | 272.4 | 92.0 | 84.0 |

자료: Geles, 2005; 환경부, 2013, 도로청소를 통한 비점오염 저감효과 및 총량제 적용방안 연구

습식청소법은 물을 분사해 오염물질을 제거하는 방식으로, 물청소차를 이용한 방법과 고정식 살수장치를 이용한 방법으로 나뉜다. 습식청소법은 입경 60 μ m 이하의 실트 또는 점토질 입자에 수분을 공급해 도로에 잡아두는 효과가 있다. 고압살수로 우수관을 통해 먼지가 제거되지 않는 이상 노면이 건조되면 다시 먼지가 비산하는 단점이 있다. 또한, 오물이 우수관으로 유입되어 2차 오염이 발생할 수도 있다. 더불어 동절기에 사용이 불가능하고, 살수과정에서 물 튀김으로 차량운전자와 보행자로부터 민원이 제기되기도 한다(서울시, 2016).

국내에서 주로 사용되는 도로청소방식은 [표 2-17]과 같다.

[표 2-17] 국내 도로청소차량 구분 및 특징

| 구분 | | 청소방법 |
|-------------------------------|------------------|---|
| 건식 또는 건습식 (진공청소: 공기배출식) | 필터미장착 (노면청소차) | <ul style="list-style-type: none"> · 물을 분사하며 브러시를 회전시킨 후 진공상태를 이용해 먼지를 흡입하는 방식으로 많은 양의 조대입자 제거에 유리 · 경계석이 없는 도로에 적용 곤란, 브러시로 인한 재비산 방지를 위해 물을 분사하므로 동절기 운행 제한 · 필터가 없어 공기배출구로 미세먼지 재배출 |
| | 필터장착 (분진흡입차) | <ul style="list-style-type: none"> · 진공상태를 이용해 먼지를 흡입하는 방식으로 필터가 부착되어 있어 작은 미세먼지 제거에 효과적, 건식방식으로 동절기 사용 가능 · 부피가 큰 쓰레기 제거의 어려움, 주기적으로 필터의 세척과 교체 필요 · 흡입구 파손 우려로 연석과 가까운 곳 운행 기피 · 브러시가 없어 도로에 흡착된 오염물질 제거 곤란 |
| 습식 | 고압살수 청소차 | <ul style="list-style-type: none"> · 물 분사장치를 통해 고압으로 도로의 토사와 먼지 등을 빗물받이로 유출시키는 방식으로 실트 또는 점토 등 작은 입자 제거에 효과적 · 동절기 운행 제한적 및 고압살수로 도로훼손 야기 · 용수 확보 및 충수에 따른 청소거리, 작업시간 등 제약 · 청소 후 물고임 시 먼지 제거효과 미미 |
| | 고정식 살수장치 | <ul style="list-style-type: none"> · 도로먼지 제거 및 도시열섬 완화를 위한 목적으로 도입 · 도로 중앙의 노즐을 통해 물을 분사해 빗물받이로 배출 |

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼



노면청소차량(필터 미장착)

분진흡입청소차량(필터 장착)

※ 청소차량별 원리와 특징, 성능은 청소차량 제작사별로 차이가 있음



고압살수차량

고정식 살수장치

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼

[그림 2-15] 국내 도로청소방식의 예시

2) 도로청소매뉴얼

2016년 한국환경공단은 지자체별 여건을 고려해 연간 도로청소계획을 수립하는 데 있어, 보다 효과적인 계획이 수립될 수 있도록 도로청소매뉴얼을 제작한 바 있다. 지자체별로 대상 도로 대비 청소차량 보유수가 적다 보니 가용 자원을 활용해 보다 효율적으로 도로청소가 이루어질 수 있도록 도로청소구간 선정기준, 도로청소시간, 도로청소방법, 청소차량 운영 및 관리 방안 등을 제공하고 있다.

(1) 도로청소구간 및 도로청소시간 설정

도로청소의 효과를 제고하기 위해서 도로오염도에 따라 등급을 나누어 도로청소주기를 설정하도록 권고하고 있다. 도로오염도는 통행량, 도로폭, 유동인구, 사업지역규모, 면오염원, 토지이용, 주거밀도 등을 고려해 선정할 수 있다. 일일 교통량으로 도로등급과 청소주기를 예시로 제시하고 있다.

[표 2-18] 일일 교통량에 따른 도로청소구간 등급 설정

| 도로등급 | 교통량(대/일) | 청소주기 |
|------|----------------|------|
| 1등급 | ≥ 25,000 | 1일 |
| 2등급 | 5,600 ~ 25,000 | 2일 |
| 3등급 | 1,600 ~ 5,600 | 2일 |
| 4등급 | ≤ 1,600 | 2일 |

자료 : 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구; 한국환경공단, 2016, 도로청소매뉴얼

도로청소시간은 차량 통행량이 많은 출퇴근 시간인 오전 7:30~9:30, 오후 15:30~20:00는 가급적 피하고, 청소차량의 작업일수는 주 3~4회 운영으로 제안하고 있다.

- 도로 물청소(습식)는 3월부터 11월까지, 동절기에는 별도 계획을 수립
- 노면청소차량 운행은 3월부터 11월까지 실시하되 동절기에도 장비의 결빙 우려가 없는 기상여건(낮 기온이 영상 5°C 이상 2일간 지속될 경우)에서 작업 실시
- 분진흡입청소차량은 연중 지속적인 작업 실시

- 미세먼지 경보 및 기상 예보에 따라 강화된 도로청소방안을 시행

(2) 청소방법

도로청소방법을 상시운영과 특별운영 2가지로 제안하고 있다. 상시운영의 경우, 전 도로에 도로청소등급을 적용하고 주기와 횟수를 사전 계획해 시행한다. 효과적인 도로청소를 위해 [표 2-19]와 같이 토지이용형태에 따라 편대운영방안을 제시하고 있다.

[표 2-19] 토지이용형태에 따른 도로청소방법

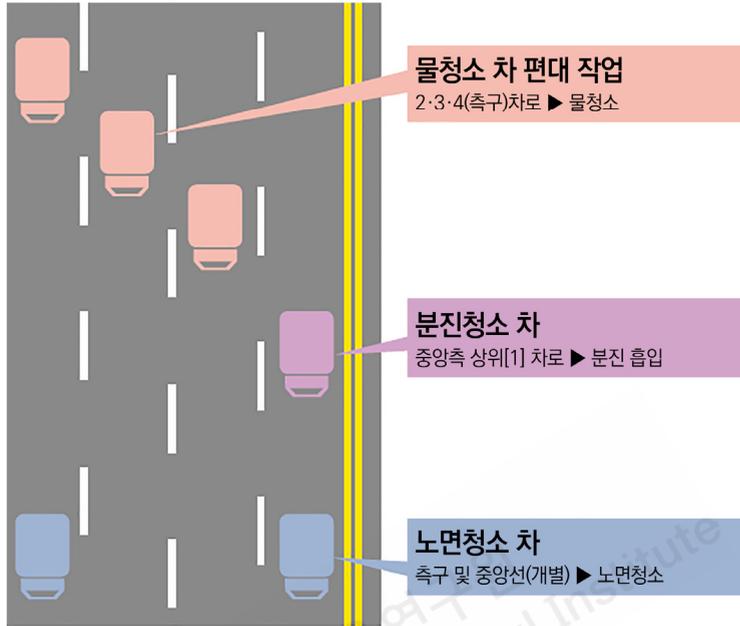
| 구분 | 적합한 청소방법 |
|------------|-------------------------------|
| 도심 및 상업지역 | 분진흡입청소/고압살수차를 이용한 개별청소 및 편대운영 |
| 산업단지 및 공사장 | 노면청소차/고압살수차를 이용한 개별청소 및 편대운영 |
| 나대지 및 농촌지역 | 노면청소차를 이용한 개별청소 |

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼

① 편대운영방안

| 편도 3차로 이상 도로 |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 노면청소차와 분진흡입청소차는 도로의 중앙분리대 측구와 오른쪽 측구에서 작업 실시 • 고압살수차, 분진흡입청소차, 노면청소차량이 동시 병행작업을 할 경우에는 노면청소차(끝 측구차로), 분진흡입청소차(상위차로), 고압살수차(중간차로) 순으로 작업 실시 • 노면청소와 물청소의 조합으로 실시하는 경우 노면청소차량이 선행하고 고압살수차량이 뒤따르는 대형을 유지하는 형태로 작업 실시 • 분진흡입청소차와 고압살수차가 병행작업을 하는 경우에는 분진흡입청소차는 선두에서 중앙선측 차로로, 고압살수차는 분진흡입청소차로 이후 차로부터 작업을 실시 • 고압살수차로 대형유지 작업을 할 경우에는 작업 차량 간의 거리는 선행 작업차량에서 살수된 용수가 흡수, 건조, 소멸되기 전 후행차량에서 측구 측으로 배수시킬 수 있는 거리를 유지하되 주변 주행차량의 교통흐름 방해를 최소화 • 고압살수차와 분진흡입청소차가 동시에 병행작업을 실시하는 경우 작업 대열은 분진흡입청소차가 상위차선에서 선행하고 고압살수차가 하위차로에서 후행하는 형식으로 시행 |

물청소, 분진청소, 노면청소 차의 체계적인 작업 위치



자료 : 서울정책아카이브 홈페이지

[그림 2-16] 도로청소차량 편대 운영방법(편도 3차로 이상 도로)

| 편도 2차로 도로 |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • 노면청소차량 또는 분진흡입청소차를 이용해 청소 시 중앙분리대쪽 측구와 도로 끝 측구 작업을 1일 1회 실시 • 고압살수차량을 이용하여 청소 시 전면을 대상으로 물청소를 실시하며, 청소차량의 대수와 성능 기준에 따라 1주 1~2회 작업을 실시 • 청소차량의 편대 운영 시 선행 차량으로 노면청소차 및 분진흡입청소차가 1차로 작업을 실시하고, 후행 운행은 2차로에 물청소를 실시 • 고압살수차, 분진흡입청소차, 노면청소차량이 편대작업을 실시할 때 지자체의 여건에 따라 작업순서 변경이 가능하지만, 노면청소차를 먼저 시행하고 다음으로 고압 살수차량 작업을 실시 |

| 편도 1차로 도로 및 이면도로 등 |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 노면청소차 및 분진흡입청소차를 운행할 경우 1대로 한 개의 차로씩 번갈아가며 작업을 실시 • 인구밀집지역의 경우 이면도로 전용청소차(소형청소차)를 이용하여 도로측구 작업을 실시 • 고압살수차량 운행 시에는 살수된 용수가 보도로 튀길 수 있으므로 살수압력 또는 차량 속도를 조절하고, 너무 약한 압력으로 살수 시에는 측구의 미세먼지가 배수되지 않을 수 있으므로 적당량의 압력으로 살수 • 작업차량은 도로여건을 고려하여 7.5톤 미만의 차량을 투입하되, 골목길 등의 도로가 협소한 경우에는 5톤 이하의 소형차량을 투입해 작업의 효율성 향상 |

② 특별운영방안

특별운영 방법은 강우, 폭염, 황사예보, (초)미세먼지 경보 등 기상상황, 대규모 지역 행사 등 특별한 상황에 대한 내용으로 황사와 미세먼지 고농도 상황에 대한 내용만 추려 정리했다.

[표 2-20] 황사예보 시 도로청소

| 구분 | 도로청소 실시 |
|--------|--|
| 황사 주의보 | 주의보 단계: 시간 평균 $400\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이상, 2시간 이상 지속될 때 <ul style="list-style-type: none"> • 오전부터 황사가 시작될 때 <ul style="list-style-type: none"> - 전일 야간작업 축소 운행(1/2) - 오전, 오후 시간대는 도로측구 위주의 물청소 실시 - 22:00부터 가용 고압살수차량 전량 투입 물청소 실시 • 오후부터 황사가 시작될 때 <ul style="list-style-type: none"> - 22:00부터 전량 도로 물청소 투입 - 다음날 오전 가용차량 이용 도로측구 물청소 실시 • 황사가 1일 이상 지속될 때 <ul style="list-style-type: none"> - 평시와 동일한 22:00부터 야간시간 물청소 실시 - 다음날 도로측구 물청소 연장 근무 |
| 황사 경보 | 경보 단계: 시간 평균 $800\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이상, 2시간 이상 지속될 때 <ul style="list-style-type: none"> • 22:00부터 전 차량 도로물청소 • 주간시간은 해제 시까지 물청소 |

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼 재구성

[표 2-21] (초)미세먼지 주의보 예비단계 및 발령단계 시 도로청소

| 구분 | 도로청소 실시 | | | | | | |
|-----------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|
| 주의보 예비 단계 | <ul style="list-style-type: none"> • 도로청소차는 평상시대로 청소작업 지속유지 • 운전원은 비상대기 조치하고 차량 대기상태 유지 • 각 차량별 매뉴얼에 따라 청소차 사전점검 및 청소용수 충수 등 사전점검을 필요하고 청소작업 준비 | | | | | | |
| 주의보 발령 단계 | <ul style="list-style-type: none"> • 수도권 기상청 및 시설공단에서 각각 미세먼지 예경보센터 주의보 발령 시 즉시 도로 분진·물 청소 실시 • 청소차량 유형별 작업구간: 평시 대비 30~50% 확대 | | | | | | |
| | 구분 | 고압살수차 | | | | 분진흡입 청소차 | 노면 청소차 |
| | 평상시 | 3톤 미만 | 5-6톤 | 8-10톤 | 12톤 이상 | 30-40km/일 | 30-40km/일 |
| 주의 발령 시 | 25-35km/일 | 25-35km/일 | 35-45km/일 | 40-50km/일 | 50-60km/일 | 15-20km/일 또는 30-40km/일 | |
| 주의보 발령 단계 | <ul style="list-style-type: none"> • 운전원 등: 도로청소 확대 자체계획 수립시행 <ul style="list-style-type: none"> - 분진흡입청소차: 노면청소차 운전원 재배치 및 2교대 - 고압살수차: 50% 확대 배치(연장근무) 노면차 가동은 최대한 줄이고, 분진흡입청소차 및 고압살수차 가동에 집중 • 기존매뉴얼에 따라 청소차 사전점검을 필한 후 청소작업 개시 • 작업방법 및 요령(지자체기관별 여건에 따라 시간대 조정) <ul style="list-style-type: none"> - 1회/일, 야간시간대(23:00-7:00) → 2회/일, 주간시간대(10:00-17:00) 추가 - 분진흡입청소차 <ul style="list-style-type: none"> · 1일 2교대로 운전원을 배치하여 100km 이상 작업 · 주행 작업속도(5-10km)를 준수하여 미세먼지 집진에 집중 · 물청소와 병행작업 시: 도로 중앙부분 분진흡입 청소 후 물청소 작업 · 분진흡입청소차 개별 작업 시: 전면흡입구를 사용하여 노면분진흡입 위주 작업 - 고압살수차 <ul style="list-style-type: none"> · 운전원 재배치 및 기존 운전원 50% 이상 연장근무 실시 · 주행 작업속도(10-20km)를 준수하여 미세먼지 청소에 집중 · 청소한 물이 확실히 하수구로 들어가게 해, 잔류수가 남지 않게 할 것 · 청소작업 빈도를 늘리고 거리도 50% 확대할 것 - 노면청소차 <ul style="list-style-type: none"> · 미세분진 집진기능이 없는 기존 노면청소차는 가능한 한 운행자제 또는 정지 · 운전원은 분진차 및 고압살수차 재배치 | | | | | | |

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼 재구성

[표 2-22] (초)미세먼지 위기관리 및 경보 발령단계 시 도로청소

| 구분 | 도로청소 실시 |
|----------------|---|
| 위기관리 및 경보 발령단계 | <ul style="list-style-type: none"> • 경보발령 단계 및 주의보 발령 48시간 이상 지속으로 위기관리 단계 시 가능한 모든 차량을 동원하고 청소대상을 확대하여 분진 및 물청소 실시 • 경기 남부/북부, 지자체 및 시설공단 및 소방재난본부에서 각각 미세먼지 예경보센터 경보발령에 따라 자동조치 • 기존 차도 위주에서 주택가 골목, 이면도로, 공원, 광장 등으로 청소대상 확대 • 물청소 실시방법 <ul style="list-style-type: none"> - 기존 도로청소차 <ul style="list-style-type: none"> · 2차로 이상 기존 도로청소 주의보 단계 시 청소유지 · 평시 대비 50% 확대 청소 실시 - 구별/동별 행정차량 <ul style="list-style-type: none"> · 골목길 이면도로 등 대형 청소차 진입이 곤란한 지역 · 주민 행사 시 또는 다중이용시설 등 시민 집중지역 물청소 · 살수 호스 및 살수바 등을 지역여건에 맞게 사용 - 소방차 동원 <ul style="list-style-type: none"> · 공원, 광장 등 대규모 시민 집중지역 물청소 · 각 소방서별 지자체 청소과와 협의하여 지역 및 시간 선정 · 화재진압 호스를 사용 |

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼 재구성

(3) 도로청소차량 운영 및 관리 방법

청소차량의 일일 작업량에 따른 작업거리는 차종별, 차량규격별로 [표 2-23]과 같이 분류된다.

[표 2-23] 도로청소차량 구분

| 구분 | 고압살수차 | | | | 분진흡입 청소차 | 노면청소차 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 3톤 미만 | 5~6톤 | 8~10톤 | 12톤 이상 | | |
| 작업 거리 | 15~25km/일 | 20~30km/일 | 25~35km/일 | 30~40km/일 | 30~40km/일 | 30~40km/일 |

자료: 한국환경공단, 2016, 도로청소 매뉴얼

도로청소차량의 작업속도는 차량 제작사의 권장사양을 준용하되 가능한 10km/hr 이하의 속도를 제안하고 있다.

고압살수차의 청소용수원으로는 지하철 용출수, 하수처리수, 개발 지하수, 소화용수, 중수도 등이 있으며, 하수처리수(도시 재이용수 기준)와 중수도(세차·청소용수)를 청소용수로 사용할 때의 수질기준은 pH, BOD, 탁도 등 기준에 맞게 사용하도록 권고하고 있다.

노면청소차와 분진흡입청소 등 청소차량의 장비관리를 위한 정비이력카드를 유지해 제때에 부품 등이 교체되어 효과가 유지될 수 있도록 해야 한다.

청소계획은 홈페이지, 도로전광판, 앱 등을 통해 사전에 충분히 알려 주차문제를 관리하고, 도로청소차량 운전자 등 담당자 교육도 연 1~2회 시행하도록 제시하고 있다.

3_서울시 도로청소 현황

1) 도로청소 일반 현황

서울시는 전체 면적 605km² 중 14.2%인 86km²가 도로이며, 총연장은 8,240km이다. 이 중 도로폭 40m 이상의 광로가 전체의 2.9%, 25~40m 대로가 9.0%, 12~25m 중로가 11.0%, 12m 이하의 소로가 77.2%를 차지한다. 서울시 도로청소 대상은 편도 2차선으로, 왕복 4차로 이상이 해당된다.

[표 2-24] 서울시 도로현황

(단위: m)

| 구분 | 계 | 1차로 | 2차로 | 4차로 | 6차로 | 8차로 | 10차로 이상 |
|----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 계 | 8,240,571 (100.00%) | 3,258,406 (39.54%) | 3,319,831 (40.29%) | 686,629 (8.33%) | 530,213 (6.43%) | 293,814 (3.57%) | 151,678 (1.84%) |
| 광로 (40m 이상) | 236,142 (2.87%) | | | | | 84,464 (1.02%) | 151,678 (1.84%) |
| 대로 (25~40m) | 739,563 (8.97%) | | | | 530,213 (6.43%) | 209,350 (2.54%) | |
| 중로 (12~25m) | 906,172 (11.00%) | | 219,543 (2.66%) | 686,629 (8.33%) | | | |
| 소로 (12m 미만) | 6,358,694 (77.16%) | 3,258,406 (39.54%) | 3,100,288 (37.62%) | | | | |

자료: 서울시 내부자료

서울시의 도로청소는 자치구가 담당하며 다양한 청소장비를 활용하고 있다. 청소장비는 노면청소차, 분진흡입청소차, 물청소차로 구분되며 각각의 장비는 도로의 상태와 용도에 따라 선별적으로 투입된다. 노면청소차는 철재로 만들어진 브러시를 회전시켜 도로 측구의 토사, 쓰레기, 낙엽을 주로 수거한다. 분진흡입청소차는 강력한 흡입력으로 도로면과 측구에 있는 미사와 토사를 포함한 쓰레기를 수거하고, 물청소차는 강한 수압을 이용해 도로면과 측구의 미사와 토사를 하수도로 보낸다. 다만 앞서 언급한 바와 같이 물청소장비를 미세먼지 고농도 발생이 잦은 동절기에 운영하지 못하는 한계가 있다.

서울시는 2007년부터 대기환경개선과 도로청결을 위해 추진하던 도로물청소 방법을 분진흡입청소 방법으로 전환하고 있다. 2018년에는 분진흡입차량을 약 30대 추가 확보 예정이다. 서울시가 추가 확보할 분진흡입청소차는 백필터를 갖춘 장비로, 입경 0.3~32 μ m 먼지 98% 제거효율을 가진 것으로 알려져 있다.

2017년 기준 서울시는 도로물청소차량 173대, 분진흡입청소차량 92대를 보유하고 있다. 도로청소인력으로 운전원 200명, 미화원 2명 등이 투입되고 있어, 운영 청소장비에 비해 운전원 수가 부족한 상태이다. 재정여건이 충분하지 않은 자치구를 위해 청소차량 구매비용, 성능개선비용, 용수비용 및 필터 교체비용 등은 서울시가 지원하나, 유류비와 인건비는 지원하지 않는다.



자료: 서울시 내부자료

[그림 2-17] 도로분진흡입청소차량의 구조

[표 2-25] 서울시 도로청소장비 현황(2017년)

| | 장비(대) | | | | | 확보 인원(인) | | | |
|------------|-------|-------|------|-------|--------|----------|-----|-----|----|
| | 계 | 3톤 미만 | 5~6톤 | 8~10톤 | 12톤 이상 | 계 | 운전원 | 미화원 | 용역 |
| 계 | 265 | 46 | 46 | 107 | 66 | 215 | 200 | 2 | 13 |
| 도로 물청소 | 173 | 41 | 46 | 20 | 66 | 123 | 113 | 2 | 8 |
| 분진흡입 청소 | 92 | 5 | - | 87 | - | 92 | 87 | - | 5 |

자료: 서울시 내부자료

2017년 기준 도로청소 운영실적은 다음과 같다.

[표 2-26] 서울시 도로청소 운영실적(2017년)

| 총 작업 거리 | 물청소(km) | 분진흡입청소(km) | | |
|-------------|--------------|------------|------------|------------|
| | | 소계 | 4~10월(하절기) | 11~3월(동절기) |
| 1,233,686km | 3.15.~11.15. | | | |
| | 386,991 | 846,695 | 576,921 | 269,774 |

자료: 서울시 내부자료

2) 도로청소 작업 체계와 기준

서울시는 도로 미세먼지 발생량 저감을 위한 도로청소 작업체계 및 기준을 가지고 있다. 분진흡입청소차량의 경우, 연중 주야간 지속적으로 50km/일대 기준으로 청소작업을 실시한다. 분진흡입청소차량의 주행속도는 10km/hr 내외로 하되, 도로사정에 따라 탄력적으로 운영한다.

도로물청소는 매년 3월~11월 오후 11시부터 오전 7시까지 작업하며, 시민들의 출퇴근에 지장이 없도록 교통여건을 감안한다. 또한 도로결빙이 우려되면 물청소 작업을 실시하지 않는다. 도로물청소는 차량의 성능에 따라 충분한 용수를 살수해 측구 배출이 가능하도록 하고, 물 튀김이 발생하지 않도록 노즐 각도 및 차량속도를 조절해 운행하며, 쓰레기 및 지장물을 제거한 후 실시한다.

[표 2-27] 서울시 도로청소 작업체계

| 구분 | | 작업체계 및 기준 |
|--------|--------------------------|---|
| 도로먼지청소 | 추진기간 | <ul style="list-style-type: none"> • 물청소: 03.15.~11.15.(9개월) • 분진흡입청소: 연중 실시 |
| | 작업시간 | <ul style="list-style-type: none"> • 물청소: 전면(23:00~07:00), 측구(주간시간대) • 분진흡입청소: 작업시간 제한 없이 실시 |
| | 작업빈도 | <ul style="list-style-type: none"> • 자동차 전용도로: 매일 • 주요간선도로(왕복 6차로 이상): 매일 • 일반도로(왕복 2~4차로): 1회/2일 • 기타 골목길 등: 1회/주 |
| | 차량별 작업 목표 (km/day) | <ul style="list-style-type: none"> • 물청소장비: 평균 30km/day/대 <ul style="list-style-type: none"> - 3톤 이하: 20km/day - 5~6톤: 25km/day - 8~10톤: 35km/day - 12톤 이상: 40km/day • 분진흡입청소장비: 평균 50km/day/대 |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

동절기에는 영상 5°C 이상 지속 시 측구 위주로 물청소 작업을 실시하고, 분진흡입청소는 연중 지속적(단, 강수, 강설 등 습기로 먼지흡입이 어려운 경우 제외)으로 실시한다.

[표 2-28] 서울시 도로청소 작업기준

| 구분 | 물청소 | 분진흡입청소 |
|----------|---|--|
| 추진 기간 | <ul style="list-style-type: none"> • 2015.03.15.~2015.11.15.(9개월) | <ul style="list-style-type: none"> • 연중 지속(1월~12월) |
| 작업 기준 | <ul style="list-style-type: none"> • 작업개시 기준 온도 영상 5°C 이상 지속 시 - 건조시간을 감안해 10:00~14:00 사이 탄력 적 운영 | <ul style="list-style-type: none"> • 기온에 제한 없이 작업(강수, 강설 등 습 기로 먼지 흡입이 어려운 경우 제외) |
| 추진 방법 | <ul style="list-style-type: none"> • 측구 위주로 작업 • 후방브러시 사용 잔류수 제거 • 배관 및 펌프 등 장비 동파예방 | |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

03

해외 도시의 도로재비산먼지 관리 사례

- 1_도로재비산먼지 관리 실태
- 2_도로청소장비 인증제 도입

03 해외 도시의 도로재비산먼지 관리 사례

1_도로재비산먼지 관리 실태

1) 핀란드 헬싱키

눈이 많이 오는 북유럽 도시들은 온도가 올라가고 습도가 낮아지기 시작하는 봄철(3~5월: 서울의 1월 중순~4월 초의 온도 수준), 겨울철 차량의 미끄럼 방지를 위해 사용했던 studded tire와 traction sanding 등으로 도로비산먼지가 문제가 된다. 2011년~2014년에 걸쳐 EU LIFE+프로젝트인 REDUST(호흡성 도로먼지 PM10 저감을 위한 겨울철 최적 관리 방법) 프로젝트가 핀란드 도시를 대상으로 진행된 바 있어, 결과 중에서 서울시에 시사하는 내용을 추렸다.

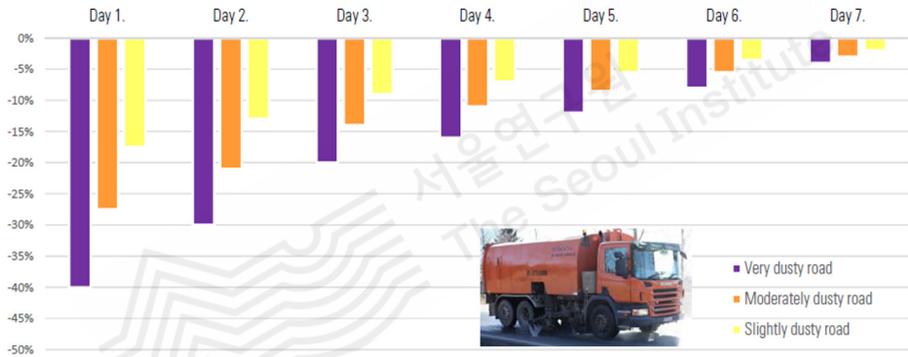
(1) 도로청소

일반적으로 북유럽의 도시들은 기온이 영상으로 올라 도로에 눈과 빙판이 없으면 도로청소를 시작한다. REDUST 프로젝트에서는 전통적인 진공도로청소(물 사용), 진공청소+물청소, 고압살수청소의 세 가지 방식으로 도로청소의 효과를 조사했다. 그 결과, 전통적인 진공도로청소는 효과가 없었고, 진공청소+물청소, 고압살수청소에서 도로의 PM10 배출량이 감소되는 것으로 조사되었다. 고압살수청소의 도로 PM10 배출저감 효과는 도로먼지가 많은 조건의 도로에서 효과가 컸는데, 그 효과는 일주일 평균 20%로 조사되었다.

프로젝트의 결과로 PM10 도로먼지 저감을 위한 도로청소 모범방안(Best practice)을 다음과 같이 제시했다.

- PM10 도로먼지 배출을 효과적으로 줄이고 최상의 청소 결과를 얻기 위해 고압살수차 사용 권장
- 전통적인 진공청소장비(소량의 물 사용)와 고압물청소가 함께 사용될 때 PM10 도로먼지 배출저감 가능
- 청소작업은 도로먼지가 많이 쌓여 있는 봄철에 일찍 시작
- 비용 절감과 먼지 저감의 효율을 극대화하기 위해서 도심처럼 도로먼지가 많은 장소를 우선 시행

자료: City of Helsinki Environment Centre, 2014



자료: City of Helsinki Environment Centre, 2014, REDUST(EU Life+ project)

[그림 3-1] 고압살수도로청소 후 PM10 도로먼지 배출량 저감효과

(2) 먼지억제제 살포: 고농도 발생에 대한 비상대책으로 활용

헬싱키는 도시의 도로먼지를 줄이기 위해 도로청소와 같은 장기 조치 외에 대기질이 갑자기 악화되었을 때 도로먼지 완화를 위해 헬싱키 도시권역의 시들이 참여하는 합동 비상계획을 가지고 있다.

도로먼지 농도가 높아지면 환경서비스국은 염화칼슘(CaCl_2) 용액을 도로에 살포하도록 요청할 수 있다. 염화칼슘 용액은 오랫동안 도로먼지를 축적하게 유지시켜 도로먼지의 비산을 억제한다. 염화칼슘 용액은 영하의 온도에서도 사용할 수 있고, 최근 몇 년 동안 매년 봄 도로먼지 비산 억제를 위해 사용되었다(<https://www.hel.fi/>).

REDUST 프로젝트는 염화칼슘 살포가 도로먼지 배출 저감에 상당한 효과가 있음이 명확하다고 결론지었다. 일반적으로 살포 첫날 대상 지역의 도로먼지 배출량은 40% 감소했고, 2~3일 동안 효과가 있는 것으로 관찰되었다(2일 평균 30% 도로먼지 배출저감 효과). 다만, 습도, 온도 등 기상 조건이 도로먼지 배출 감소 비율과 효과 지속 기간에 영향을 미친다. 상대습도가 높은 경우(80% 이상) 염화칼슘이 공기 중 수분을 흡수해 먼지 비산을 억제하기에 가장 좋고, 40~50%에서는 염화칼슘의 도로먼지 결합 가능성이 상당히 약화된다. 따라서 도로재비산먼지 억제 효과를 보기 위해서는 상대습도가 비교적 높은 밤이나 러시아워 전 이른 아침에 염화칼슘 용액을 살포하는 것이 가장 효율적이라고 권고하고 있다. 봄철 건조 기간이 길어지면 염화칼슘 사용이 비효율적일 수 있으므로 1~2일 간격으로 반복해야한다고 제안하고 있다.

프로젝트의 결과로 PM10 도로먼지 저감을 위한 염화칼슘 사용에 대한 모범방안(Best practice)을 다음과 같이 제시했다.

- 염화칼슘(10weight%) 용액 처리는 포장도로에서 발생하는 도로먼지배출을 효과적으로 방지하고, 상대습도가 높을 때(70% 이상) 가장 효율적: 교통혼잡 전인 아침 일찍 시행 (햇볕이 잘 드는 매우 건조한 한낮에는 비효율적)
- 부작용을 최소화하고 효과를 얻기 위해 연석, 도로 가장자리 및 차선 사이에 살포하는 것을 권장, 단 최악의 도로먼지 발생일에는 전체 차선에 살포도 고려
- 염화칼슘은 금속 및 콘크리트를 부식할 수 있고 식물과 지하수 침전물에 피해를 줄 수 있으므로, 적용 전 지역의 환경 요소를 고려할 필요 있음
- 환경적으로 보다 안전한 것으로 조사된 포름산칼륨(KCOOH)을 지하수 침전 등이 우려되는 지역에 적용
- 교통안전을 고려해 차량 미끄럼 문제가 예상되는 구간은 적은 양을 적용하거나 작업에서 제외하고, 광범위한 살포가 필요한 구역에서는 적절한 교통 표지 또는 속도 제한을 고려

자료: City of Helsinki Environment Centre, 2014

2) 캐나다 British Columbia주

캐나다 서부해안지역에 위치한 British Columbia 지역 주민들에게 건강 관련 서비스를 제공하는 Northern Health 기관은 최근 특히 봄철, 지역의 대기질에 큰 영향을 미치는 도로먼지 관리를 제안한 바 있다. 2017년 1월부터 5월 사이에 도로먼지 주의보가 20일 정도 발령되기도 했다. 겨울동안 쌓여있던 도로먼지가 건조되면서 비산되어 대기 중 PM10, PM2.5 농도를 높인다. 여기에는 건강에 해로운 배기가스, 타이어/브레이크 마모 등으로 인한 중금속과 유기화합물이 포함되어 있다(<http://prrd.bc.ca>).

- 우선 또는 민감 지역(보건시설, 주거시설, 학교, 운동장, 교통량이 많은 지역 등)에 집중적으로 도로청소 시행
- 효과적인 도로청소 방법 적용(필터 사용, 물세척 등)
- 대기오염 농도가 높은 날에는 도로, 주차장 및 보도 청소 자제
- 기상조건에 따라 도로청소 실시: 따뜻하고 건조하거나 비람이 많이 부는 등 공기 중 먼지 비산을 야기하는 조건에서는 도로청소 삼가

자료: <http://prrd.bc.ca>

3) 벨기에 브뤼셀, 스웨덴 스톡홀름 외

유럽의 주요 도시에서는 도로청소의 효율을 높이기 위해 도로에 등급을 매기고, 각 등급에 따라 청소주기와 방법을 다르게 적용하고 있다. 도로폭, 교통량, 유동인구, 상업지역의 규모, 교통유발시설의 유무, 단위면적당 폐기물 발생량, 토지이용, 주거밀도 등의 요인 중 일부를 고려해 도시의 도로등급을 설정한다.

벨기에에는 교통량과 주거밀도를 기준으로 8개의 도로등급, 영국은 교통량, 상업지역의 규모, 단위면적당 폐기물 발생량, 주거밀도를 기준으로 3개의 도로등급, 이탈리아는 유동인구, 상업지역의 규모, 교통유발시설 유무, 토지이용을 기준으로 4개의 도로등급으로 구분하다.

[표 3-1] 유럽 주요 도시의 도로등급 기준

| 등급기준 | 벨기에 | 영국 | 이탈리아 |
|---------------|-----|----|------|
| 도로 폭 | | | |
| 교통량 | • | • | |
| 유동인구 | | | • |
| 상업지역의 규모 | | • | • |
| 교통유발시설 유무 | | | • |
| 단위면적당 폐기물 발생량 | | • | |
| 토지이용 | | | • |
| 주거밀도 | • | • | |
| 등급수 | 8 | 3 | 4 |

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구

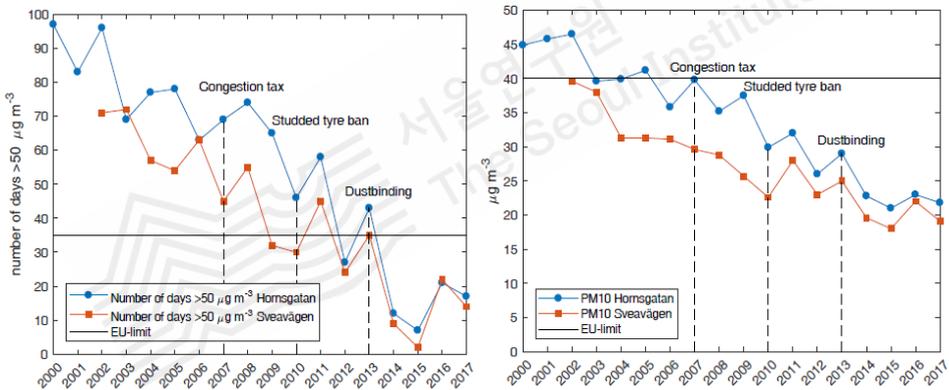
벨기에 브뤼셀(Brussels)시는 도로유형을 교통량과 토지이용 특성에 따라 8등급으로 구분하고, 각 등급마다 청소 횟수를 차등 적용하고 있다([표 3-2] 참조). Brussels시는 도로 등급 설정, 도로의 청결수준 분석, 이행목표 설정 등을 위해 19개 지자체에 평가위원회를 설치해 운영하고 있으며, “Hello Cleanness”라는 핫라인을 통해 시민들의 불만을 접수하고 도로청소 정책에 반영하기도 한다(환경부, 2012).

[표 3-2] 브뤼셀(Brussels)시의 도로유형에 따른 청소 횟수

| 도로등급 | 도로특성 | 청소 횟수(주) |
|------|----------------------------|------------------|
| A등급 | 주거단지와 대규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로 | A1: 13회, A2: 12회 |
| B등급 | 주거단지와 소규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로 | B1: 6회, B2: 5회 |
| C등급 | 주거단지 내 도로 | 3회 |
| D등급 | 단독주택지역 내 도로 | 2회 |
| E등급 | 독립된 단독주택이 있는 외곽도로 | 1회 |
| F등급 | 사람의 이동이 많은 공업지역 내 도로 | 2회 |
| G등급 | 사람의 이동이 적은 공업지역 내 도로 | 2회 |
| H등급 | 고속도로(비거주지) | 3회 |

자료: Benzidi, 2003, Pro-Active city cleaning: practice and experiments from Brussels, Cleaner cities Cleaner Environment

스웨덴 스톡홀름시는 PM10의 주요 원인 중 하나로 특히 겨울철 Studded-tire 사용으로 인한 도로먼지와 브레이크/타이어 입자를 꼽고 있다. Studded-tire 사용금지, 먼지역제 제 CMA(Calcium Magnesium Acetate) 사용, 집중 도로청소, 속도규제 정책이 이러한 PM10 배출원의 성공적 관리를 이끌었다고 평가되고 있다. 먼지역제제 사용은 2011년에 도로먼지의 재비산을 제어하기 위해 처음 도입되었다. CMA는 교통량이 적은 밤에 도시도로에 도포된다. 2013년부터 스톡홀름시의 35개 도로에 10월~4월 사이 40회 이상 도포되고 있다. 먼지역제제는 일평균 PM10 농도를 20~40% 정도 저감한다. 도포 당일 그 효과가 가장 크고 다음날에는 크게 낮아지나 여전히 효과가 있는 것으로 조사되고 있다. 2014년부터는 35개 도로에 진공청소가 실시되고 있다. 시는 일평균 PM10 농도 저감에 대한 진공청소의 효과는 명확하지 않으나, 장기적 관점에서 효과가 있다고 보고 있다(Max Elmgren et al., 2018).



(a) 도로별 일평균 PM10 농도 기준 초과 일수 (b) 도로별 연평균 PM10 농도의 변화

자료: Max Elmgren et al., 2018, Successfully mitigating PM10 in Stockholm city, NOSA Symposium

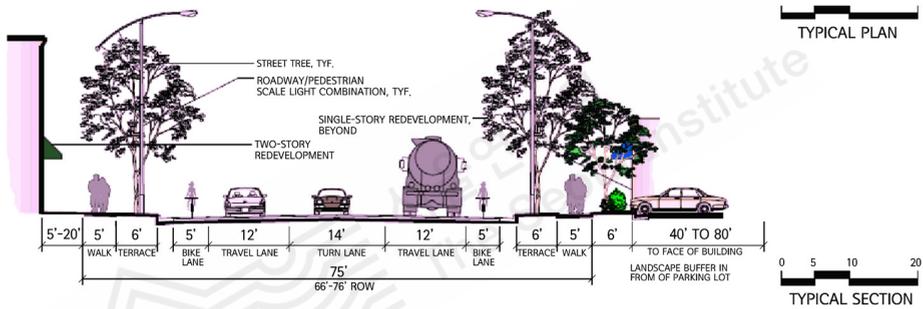
[그림 3-2] 스톡홀름시 정책도입과 PM10 초과일수 및 농도의 변화

4) 미국

미국은 도로청소를 대기오염 관리보다는 강우유출수 관리 목적으로 적극 활용하고 있다. 도시의 특성에 맞는 도로청소 프로그램을 계획하고 도로청소 차량의 운행 스케줄, 이동경로 등을 홈페이지에 공개하는 지방정부들이 많다.

2008년 미네소타주가 발간한 도로청소 모범방안은 도로청소의 목적을 수질, 대기질, 미관, 안전, 도로보수 클린업으로 나누고, 대기질 관리측면에서는 고효율필터가 장착된 도로청소장비(진공, 공기재생, 그 외 신기술)가 대기질을 개선할 수 있다고 보았다(Minnesota LRRB, 2008). 또한 청소차 운전자 대상의 교육훈련을 강조하고 있다. 청소차 작동(체크리스트 포함), 유지관리, 안전 관련 내용뿐 아니라 도로청소의 목적도 중요한 교육내용으로 담고 있다.

[그림 3-3]과 같은 도로구조가 일반적인 도시에서는 도로의 가장자리(자전거 도로(5ft 섹션) 및 연석 라인(1~1.5ft))이 주요 청소 대상이며, 일반도로 전체 차선은 계절별 1~2회 정도 청소하는 것으로 정리하고 있다.



자료: Minnesota LRRB, 2008

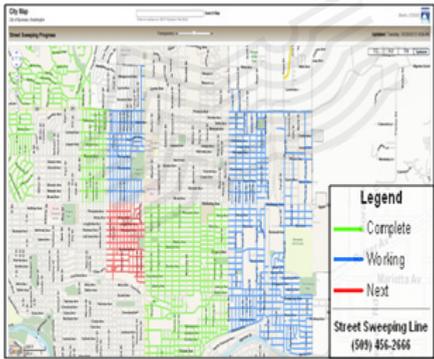
[그림 3-3] 도시 도로구조와 청소구간

미국의 마운틴뷰(Mountain View)시는 토지이용 특성, 인구집중도, 교통량 등을 고려해 청소대상구역을 등급화했다(환경부, 2012).



자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구

[그림 3-4] 미국 도시의 도로청소구역 등급 예시



(a) City of Spokane, Washington



(b) City of San Francisco, CA

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구

[그림 3-5] 미국 주요 도시의 도로청소 프로그램

또한 청소구역과 청소시간을 홈페이지에 사전 공지할 뿐 아니라 GPS기능과 스마트폰 어플리케이션을 이용해 시민들이 쉽게 청소현황을 파악할 수 있도록 돕는다. 스포칸

(Spokane)시는 청소차량마다 GPS를 부착해 실시간으로 청소현황을 파악하고, Google Map과 연동해 각 도로마다 청소완료지역, 청소진행지역, 청소예정지역을 검색할 수 있는 기능을 제공하고 있다(그림 3-5] (a)). 샌프란시스코(San Francisco)시를 비롯한 버클리(Berkeley), 샌디에이고(San Diego), 시카고(Chicago), 피닉스(Phoenix)도 Google Map과 GPS 기능을 이용해 웹과 스마트폰 어플리케이션으로 도로별 도로청소 현황정보(청소시간, 청소차량의 위치)를 실시간으로 제공한다.

미국 캘리포니아주 정부가 강우유출수 관리 목적으로 제안하는 도로청소 팁은 아래와 같다(California Stormwater Quality Association, 2003).

- 소속 지방정부는 도로청소 계획을 수립해 정기적으로 도로청소를 시행하되, 최소 월 1회 이상 청소한다.
- 습식청소(물을 이용한 청소)는 피하고, 가능한 한 건식청소를 수행한다.
- 가능하면 강우 시에는 도로청소를 피하고, 무강우 시에 실시한다.
- 도로청소 횟수는 교통량, 토지이용, 현장의 축적량, 쓰레기 양, 대략적인 물 흐름 등의 요인들을 고려해 결정한다(예: 교통량이 많은 지역이나 공업지역과 같이 오염원이 많은 지역, 특별한 이벤트나 낙엽, 침식과다로 인해 오염 증가가 우려되는 지역, 집중강우가 시작되기 전에는 청소횟수 확대).
- 청소장비는 최상의 조건을 유지하고, 필요하면 대체용품을 사전에 구매하고, 오래된 청소장비는 신기술 장비로 교체한다.
- 청소효율을 극대화할 수 있는 최적의 속도로 청소차량을 운행한다.
- 청소효율을 높이기 위해 다음 내용을 고려한다.
 - 청소기간에 대상지역의 주차제한을 위한 주차정책을 수립한다.
 - 청소대상지역에 임시 또는 상시로 도로청소 알림판을 설치한다.
 - 도로청소계획을 지역주민들에게 효과적으로 알릴 수 있는 방법을 개발한다.

자료: California Stormwater Quality Association, 2003

5) 기타

(1) 먼지역제제 사용

대부분 습도가 어느 정도 있는 북부 및 중부 유럽 도시들에서 먼지역제제 사용이 대기 중 PM10 농도를 줄이는 데 효과가 있는지가 테스트되었다. 테스트 결과, 도로먼지 부하가 높은 북유럽 및 중부 유럽 도시의 고농도 PM10 발생을 완화하고 일평균 농도를 줄이는 데에 먼지역제제 살포가 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 먼지역제제를 넓은 지역에 적용하는 경우 더욱 효과적이며, 10g/m²의 먼지역제제 살포가 포장도로에 적절하며, 비포장도로 및 건설현장에서는 100~200g/m²가 효과적인 것으로 조사되었다. 먼지역제제 살포 효과는 며칠은 지속되는데, 지속시간은 교통 흐름, 기상 조건 및 노면 특성에 따라 다를 수 있다.

먼지역제제로는 CMA와 포름산칼륨이 금속 부식성이 적고 지하수에서 생분해되므로 염화물(CaCl₂ 및 MgCl₂)보다 환경친화적인 것으로 보고 있다. 일반적으로 MgCl₂, CaCl₂, CMA, 포름산칼륨이 북유럽과 중부 유럽에서 도로먼지 저감을 위해 사용되고 있다. 하지만, 햇빛이 강하고 건조한 지중해 지역에서 먼지역제제의 PM 농도 저감 효과는 작을 수 있다는 지적도 있다(AIRUSE, 2016, Report 14).

EU의 CMA+ 프로젝트(2013)에서는 겨울철 포장도로먼지의 비산으로 인한 PM10 배출을 줄이기 위해 CMA 사용 지침을 아래와 같이 내놓았다.

1. CMA를 도로에 살포하면 일반적으로 건조한 도로표면이 젖게 되어 차량의 미끄럼이 발생할 수 있으므로 대상도로에 대한 그립 테스트 수행 필요
2. CMA 살포 전, 충분한 기간 동안 도로 구간이나 구역에 표시하여 사전 홍보
3. CMA 적용의 적정 조건: 강수 예측이 없으며 상대습도가 80% 이하이고 PM농도 증가 추세로 고농도가 예상되는 경우
4. CMA 적용은 전문가 팀(대기질, 기상, 유지 관리)에서 결정
5. 1회 CMA 적용 용량은 교통안전 등을 고려해 10g/m² 이하 사용

6. 교차로, 횡단보도, 로터리 및 다리뿐 아니라 미끄럼 저항이 감소되는 도로 구간은 CMA 적용에서 제외(안전 고려)
7. 도로구간별 CMA 적용 횟수
 - 한 차선의 하루 통행량 15,000대 이상: 하루에 두 번
 - 한 차선의 하루 통행량 7,500대 이상: 하루에 한 번
 - 한 차선의 하루 통행량 5,000대 미만: 격일
 - 한 차선의 하루 통행량 2,500대 미만: 3일에 한 번
 - 한 차선의 하루 통행량 1,000대 미만: 적용하지 않음
8. 가능하면, 아침 침투 교통시간(오전 7시) 전에 먼지역제제 살포
9. 외부 온도가 -10°C 보다 낮으면 결빙우려가 있으므로 살포 금지
10. 기상 조건이 허용되면 즉시 도로 구간을 가능한 한 자주 청소하고 세척(PM 배출이 적고 -5°C 까지 작동하는 도로청소장비 및 고압세척차량 사용)
11. CMA를 최적으로 사용하려면 한 번은 전체 도로에 살포하고, 다른 한 번은 바퀴 트랙 중심
으로 살포
12. 사용한 CMA의 양을 기록해 보관하고, 평균 CMA 적용 비율을 계산해 목표 적용 비율과
비교 평가
13. 도로관리 직원 및 청소장비 운전자에게 훈련 제공
14. 실험실 테스트 결과에 따르면, CMA와 포름산칼륨의 50:50 혼합물은 먼지역제제로 더욱
효율적이며, CMA 용액을 사용할 때보다 오래 지속되는 것으로 추정되나, 추가 현장 시험
필요
15. CMA + 프로젝트 조사 결과, 꾸준히 사용될 경우 도로 가장자리 주변의 미세먼지 감소효과
는 일평균 대비 최대 30%, 연평균 대비 10% 정도로 추정

(2) 도로청소프로그램을 위한 조언

다음은 미국의 도로청소산업이 제안하는 환경 친화적이고 경제적인 도로청소프로그램을 위한 조언이다(<https://www.worldsweeper.com>; Nelson City Council, 2011).

1. 도로청소장비의 적절한 유지관리 및 제조업체 권장 사항에 따른 부품의 정기적 교체
2. 고효율의 최신 장비가 기계적 도로청소장비보다 30~50% 정도 도로먼지 제거에 효과적
3. 교통량이 많고 도로먼지가 많이 쌓이는 도로 연석 주변을 우선적으로 청소: 도로먼지의 80~90%가 도로연석 300mm 이내에 있을 것으로 추정
4. 3~7mile/hr(5~11km/hr)의 속도로 도로청소장비 운영
5. 도로청소 구간의 주차 제한을 사전에 시민들에게 교육 및 홍보
6. 모든 도로청소장비에 GPS 모니터링 장치를 설치하고 모니터링
7. 기존 도로청소장비의 성능 테스트 시행

자료: <https://www.worldsweeper.com>

[표 3-3]은 북유럽에서 적용하고 있는 도로먼지 배출 저감 대책의 효율을 평가한 내용이다.

[표 3-3] 북유럽 도로먼지배출 저감을 위한 대책

| 대책 | 적용 사례 | 효율 평가 등 |
|--|---|---|
| Studded-tire 사용 규제 (도로 마모 PM10 저감) | 노르웨이 일부 도시: 요금 또는 세금 부과 스웨덴 일부 도시: 사용 금지 모든 북유럽: 해당 계절에 사용 제한 | +++ |
| 먼지비산억제제 (비산 저감) | 여러 북유럽 도시에서 다양한 종류의 먼지억제제 사용 | +++ 상대습도에 따라 단기적(수시간) 효과 |
| 차량 속도 규제 (도로 마모와 비산 저감) | 스톡홀름의 일부 도로에 적용 | ++ |
| 도로청소 (도로·모래 마모와 비산 저감) | 건식진공청소(스톡홀름), 스쿠르버 청소(헬싱키) 등 도시별로 다양한 방법 채택 | - ~ ++ 사용하는 방법에 따라 단기적으로 PM10이 증가하거나 감소하는 등 다양 |
| 모래 및 제설제 적정 살포/감소 (마모와 비산 저감) | | + ~ ++ |
| 저마모 도로 포장 | | + ~ +++ |
| 교통수요관리 (교통량 저감으로 마모와 비산 저감) | 도시별로 다양한 교통수요관리 정책 적용 | + ~ +++ |

※ 정성적 효과 평가 척도 : + 덜 효과적이거나, 연구로 확인되지 않음 ~ +++ 매우 효과적이고, 연구로 확인

자료: Nordic Council of Ministers, 2017, Road dust and PM10 in the Nordic countries

2_도로청소장비 인증제 도입

도로청소의 미세먼지 저감에 중요한 요인 중 하나가 청소장비이다. 청소장비에 따라 3배 이상까지 효과에서 차이가 날 수 있다는 보고도 있다(Amato et al., 2018). 유럽, 북미 지역에서는 청소장비의 PM10 인증제도를 도입해 미세먼지 제거에 보다 효과적인 청소장비가 사용되도록 유도하고 있어 그 내용을 정리했다. 다만, Calvillo et al.(2015)이 지적했듯이 실제 도로의 다양한 조건을 고려해 도로청소차의 미세먼지 제거효과를 평가하는 표준화 프로토콜은 없다. 하지만, 제어된 환경에서라도 도로청소장비의 성능을 평가해 보다 효율적인 장비가 사용될 수 있도록 제도를 마련하는 것이 중요하다.

1) 미국 캘리포니아

미국 캘리포니아(SCAQMD, South Coast Air Quality Management District)는 1997년에 최초로 도로청소장비의 PM10 제거효율을 위한 인증절차를 마련했다. 청소차량의 인증 테스트는 인공터널에서 도로청소차에 의해 제거된 양과 청소차에 의해 재비산되거나 청소차에서 배출된 양으로 결정된다. 시험장소(test track)에 인위적으로 뿌려진 시험물질이 80% 이상 제거되고, 장비 운전 시 재비산되거나 차량에서 배출되는 PM10 입자가 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 미만일 경우, 해당 청소차가 PM10에 효과적인 청소차로 승인된다(Rule 1186). SCAQMD는 2004년 7월에 54개의 도로청소차 성능을 인정해 웹사이트에 공개하고, 관할 지자체는 성능이 인정된 청소차를 구입하고 있다(서울시, 2016). Rule 1186의 본래 목적이 도로청소장비의 PM10 제거성능이었으나 시험절차에 실질적으로 제거되는 입자의 크기 측정이 없는 것, 시험재료 물질 중 크기 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 입자의 비율이 3% 수준이라 것이 원래 목적을 위한 시험절차로 보기 어렵다는 지적도 있다(Calvillo et al., 2015).

2) 캐나다 토론토

토론토시는 2003년에 'Clean Roads to Clean Air Program(CRCA)'을 시작했다. 다수의 대기질 연구와 시험 등을 통해, 2008년에 도로청소기술을 평가하는 표준 프로토콜 2

가지를 개발했다. 구체적으로 도로먼지 중 PM10 및 PM2.5의 제거효율, 청소 중에 대기 로 재배출되는 미세먼지 수준, 겨울철을 포함한 연중 장비 운영 능력, 토론토의 다양한 청소 환경에서의 운영 가능성 등을 평가하는 내용이 프로토콜에 포함된다. 미국 캘리포니아의 Rule 1186이 물사용에 의존한 청소장비 인증제도로 결빙이 우려되는 토론토의 기후에는 적절치 않은 문제가 있어, 토론토시는 물을 사용하지 않는 도로청소장비에 대한 프로토콜을 도출했다.

- PM10 and PM2.5 Street Sweeper Efficiency Test Protocol
- Operational On-Street Test Protocol

통제된 환경에서 실시한 초기 시험결과에서는 최상급의 도로청소장비가 도로변 미세먼지 농도를 최소 21% 정도 줄일 수 있는 것으로 조사되었다. 2014년에 시행된 시험에서는 최소 27%까지 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 2014년 시험은 한 도로에서 3주간 진행되었는데, 고정된 측정지점에서 한 주에 48시간 연속으로 PM10과 PM2.5 농도가 3초마다 측정되었다. 이때 측정은 1.5m, 3m, 4.5m의 세 개의 다른 높이에서 이뤄졌다. 기계식 청소장비와 공기재생식 도로청소장비에 대한 시험을 위해 대기 중 미세먼지 농도 자료가 청소 전, 청소 중, 청소 후에 수집되었고, 청소장비의 도로먼지 제거효율을 보기 위해 silt loading 자료도 청소 전·후에 조사되었다. [표 3-4]와 [표 3-5]는 기계식 장비와 공기재생식 장비의 시험결과로, 공기재생식 장비가 silt loading뿐 아니라 대기 중 미세먼지 농도 저감에도 효과적인 것으로 평가되었다.

[표 3-4] 기계식 도로청소 결과

| 구분 | 도로청소 전 | 도로청소 후 | 도로청소 후 변화율 |
|---------------------------------|--------|--------|------------|
| Silt loading 제거효율(kg) | 3,121 | 2,312 | -26% |
| PM10 최대 농도(mg/m ³) | 0,259 | 0,228 | -12% |
| PM2.5 최대 농도(mg/m ³) | 0,210 | 0,230 | 10% |
| PM10 평균 농도(mg/m ³) | 0,021 | 0,013 | -38% |
| PM2.5 평균 농도(mg/m ³) | 0,020 | 0,013 | -35% |

자료: City of Toronto, 2015, Street sweeper evaluation results and operational considerations

[표 3-5] 공기재생식 도로청소 결과

| 구분 | 도로청소 전 | 도로청소 후 | 도로청소 후 변화율 |
|---------------------------------|--------|--------|------------|
| Silt loading 제거효율(kg) | 10,345 | 3,552 | -66% |
| PM10 최대 농도(mg/m ³) | 0,319 | 0,156 | -51% |
| PM2.5 최대 농도(mg/m ³) | 0,331 | 0,177 | -47% |
| PM10 평균 농도(mg/m ³) | 0,028 | 0,018 | -36% |
| PM2.5 평균 농도(mg/m ³) | 0,026 | 0,016 | -39% |

자료: City of Toronto, 2015, Street sweeper evaluation results and operational considerations

토론토의 미세먼지 제거효과 인증절차도 인위적으로 조작된 제한된 환경에서의 실험으로 실제 도로여건이 고려되지 않았다는 지적도 있다(Calvillo et al., 2015)

3) 유럽의 인증제

2007년 브뤼셀에 기반을 둔 EUnited Municipal Equipment는 PM10 도로청소차 인증 계획에 착수했다. 테스트는 미국 캘리포니아 Rule 1186 테스트와 동일한 시료를 사용해 야외에서 PM10을 측정하였으나 테스트 결과의 재현성 문제가 제기되었다. 2012년 토론토 테스트 절차를 개발한 캐나다 조직 PAMI와 공동으로 새로운 테스트를 개발해, 2013년부터 PM2.5를 포함한 유럽의 도로청소차 인증 테스트를 유럽에서 시행했다.

EUnited 테스트는 날씨 효과를 배제하기 위해 통제된 환경에서 진행된다. 청소차는 한정된 테스트 트랙에서 실제 작업 조건으로 4번 실행되며, 한정된 시험 물질을 청소하는 동안 공기 중의 농도와 제거 효율이 측정된다. 이 테스트는 물 사용을 허용한다. 2015년에 이 테스트 절차가 유럽의 표준으로 채택되었다.

■ 독일의 도로청소차 테스트 절차

독일 연방 환경청(Umweltbundesamt-UBA)은 표준화된 조건에서 도로청소차의 미세먼지 제거효과를 평가하는 방법을 개발해 2014년에 VDI 테스트 절차로 발간했다. 이는 건식, 습식, 건습식이 결합된 진공청소장비에 적용된다. EUnited와 VDI 테스트 절차의 주요 차이점은 [표 3-6]과 같다.

[표 3-6] EUnited와 VDI 테스트 절차의 비교

| 구분 | EUnited | Draft VDI |
|----------|---|--|
| 시운전 | 1회 시운전 3회 물을 포함한 완전한 작동 | 1회 비작동 3회 시운전 - 60cm 넓이 3회 시운전 - 180cm 넓이 물 사용 없음 |
| 미터법 측정 | PM2.5 PM10 | PM1 PM2.5 PM10 |
| 측정 | 2회 테스트 홀의 공기측정 | 1회 테스트 홀의 공기측정 4회 차량에서 측정 |
| 기계장비 | 명시됨 | 명시됨 |
| 시험물질 | 15% 자갈(2-8mm) 65% 모래(<2mm) 20% 탄산칼슘 (수분 함량이 지정되지 않음) | 95% 씻은 모래(<2mm) 5% 돌로미트 |
| 트랙 표면 검사 | 아스팔트 (다공성이 정의되지 않음) | 지정 콘크리트 표면 |
| 참고 장비 | 사용되지 않음 | 지정됨 |
| 청소속도 | 4km/h | 4km/h |
| 단위 | $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{kg}$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |

자료: Geddes, 2011; AIRUSE, 2016, REVIEW OF IMPACT OF STREET CLEANING ON PM10 AND PM2.5 CONCENTRATIONS IN NORTHERN AND CENTRAL EUROPE

04

도로청소의 미세먼지 저감효과 분석 선행연구

- 1_ 도로청소효과 분석방법
- 2_ 국내 조사연구 사례
- 3_ 해외 조사연구 사례

04 도로청소의 미세먼지 저감효과 분석 선행연구

1_도로청소효과 분석방법

도로청소의 오염물질 저감효과는 주로 대기오염관리 측면과 수질오염관리 측면으로 구분해 평가된다. 대기오염 측면에서는 재비산 미세먼지 저감량에, 수질오염 측면에서는 수계 또는 우수관거 등으로 유입되는 오염물질 부하량의 저감량에 초점을 둔다(환경부, 2012; 정용원 외, 2007). [표 4-1]은 일반적인 도로청소 비점오염 저감효과 평가방법을 대기오염과 수질오염 측면으로 나눠 정리한 것이다.

국내에서 진행된 대기오염 측면 효과 분석에 대한 평가방법은 재래식 방법(진공청소기 이용)과 이동식 재비산먼지 측정차량을 이용한 방식이 주를 이룬다. 도로청소의 효과는 상대적으로 다양한 외부요인의 영향으로 재현성 확보가 어려운 대기 중 미세먼지 농도조사보다는 청소 전·후의 도로 silt loading 조사로 평가하는 사례가 대부분이다.

[표 4-1] 도로청소의 비점오염 저감효과 평가방법

| 청소목적 | 대상물질 | 평가방법 | 평가규모 |
|------------|---|--------------------|-----------------|
| 대기오염 관리 | 도로 비산먼지 (먼지, silt loading 등) | 재래식(진공청소기를 이용한) 방법 | Point-Scale |
| | | 도로재비산먼지 측정 방법 | Point-Scale |
| | | 이동식 재비산먼지 측정차량 이용 | Local-Scale |
| 수질오염 관리 | 도로 비점오염물질 (TSS, COD, TN, TP, 중금속 등) | 재래식(진공청소기를 이용한) 방법 | Point-Scale |
| | | 인공강우에 의한 유출수 분석 | Point-Scale |
| | | 수거퇴적물 분석 | Local-Scale |
| | | 유역모델을 이용한 방법 | Catchment-Scale |

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질 관리 타당성 조사 연구

1) 재래식(진공청소기를 이용한) 방법

미국 EPA의 AP-42 Method(이하 “AP-42기법”)에 의한 도로먼지 측정기법은 측정구역의 도로먼지를 진공청소기(bag filter 장착)로 포집해 silt loading을 추정하는 방식이다.

측정구역을 진공청소기로 포집한 도로먼지 시료는 건조 후, 체질(sieving)을 거쳐 최종적으로 200mesh(75 μ m)의 체를 통과한 silt의 무게를 측정구역의 시료채취 면적으로 나누어 silt loading이 계산된다.



자료: 홍지혜, 2015, 포장도로 조건에서 발생하는 도로먼지 평가기법에 관한 연구

[그림 4-1] 미국 EPA AP-42 방법의 진공청소기 이용 도로먼지의 포집 예시

2) 이동식 재비산먼지 측정차량 이용 방법

미국 EPA의 재래식 방식으로 많은 도로의 silt loading 값을 구하기 위해서는 많은 인력과 시간이 필요하고, 교통을 차단해야 하는 문제가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 개발된 방법이 이동식 재비산먼지 측정차량 방식이다. 이동식 재비산먼지 측정차량 방법은 차량 전면의 먼지농도와 차량 앞바퀴 후면에서 재비산되는 먼지농도의 차이(Δ Dust)를 실시간 측정하고, 상관관계식을 적용해 silt loading 값을 산정한다. 다만, 사전에 재래식 방법에 의한 silt loading과 이동식 재비산먼지 측정차량의 재비산먼지 농도와의 상관관계식이 도출되어야 한다.

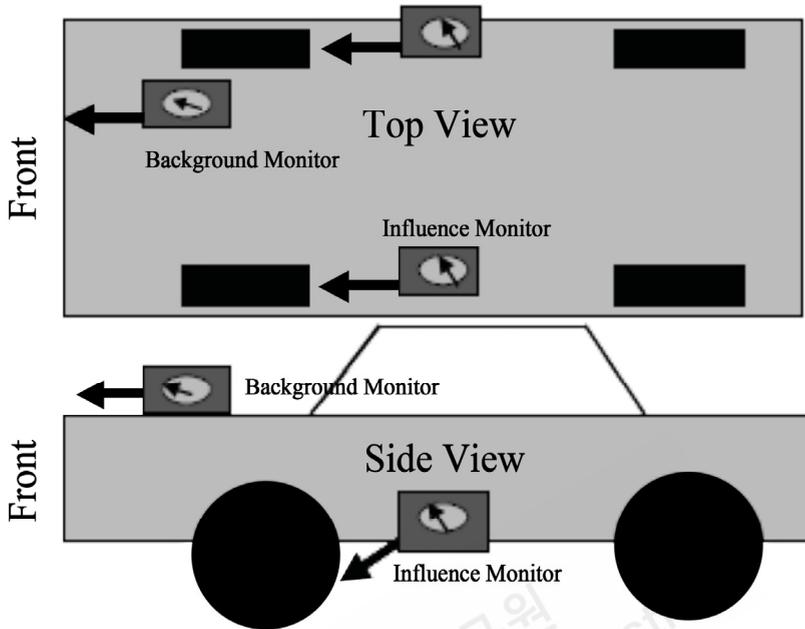
2000년대 초에 미국의 DRI(Desert Research Institute)와 캘리포니아 대학(University of California in Riverside)에서 이동식 재비산먼지 측정차량을 각각 개발했다. System of Continuous Aerosol Monitoring Particle Emission from Roadways(SCAMPER)는 미국 캘리포니아 대학에서 개발한 기술이다. 차량 전면에 설치된 다수의 먼지농도측정기가 차량 전면의 먼지플럭스를 측정하고, 차량 후면에 일정 거리를 두고 장착한 소형 트레일러 위에 설치한 sampling tower에서 높이별 먼지농도를 측정한다. 측정된 농도를 차량의 주행으로 인해 발생한 wake의 먼지 flux로 환산하고, 두 flux의 차이와 차량의 전면 면적을 곱해 운행 중인 차량의 비산먼지 배출계수를 실시간으로 측정한다(한세현, 2006).



자료: 홍지혜, 2015, 포장도로 조건에서 발생하는 도로먼지 평가기법에 관한 연구

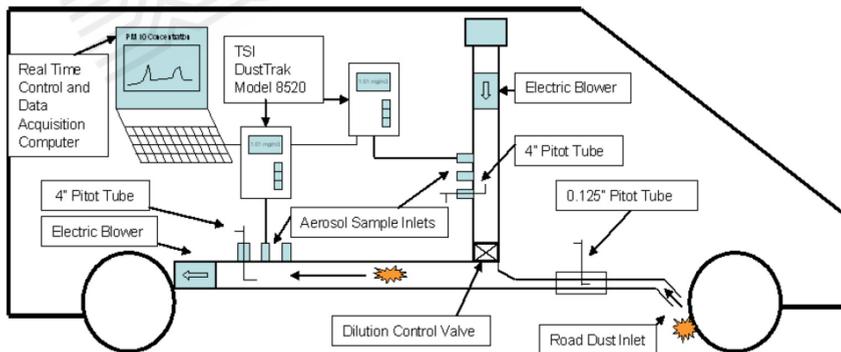
[그림 4-2] SCAMPER 전면과 후면의 모습

TRAKER는 미국 DRI에서 개발한 기술로, 배경먼지농도 측정을 위한 유입구 한 개와 도로 먼지농도 측정을 위한 유입구 두 개(차량 앞의 타이어 근처)가 설치되어 있다. 차량 내에 탑재된 DustTrak으로 배경먼지농도와 도로먼지농도가 측정된다. TRAKER는 TRAKER I 과 이를 변형한 TRAKER II가 있다.



자료: 홍지혜, 2015, 포장도로 조건에서 발생하는 도로먼지 평가기법에 관한 연구

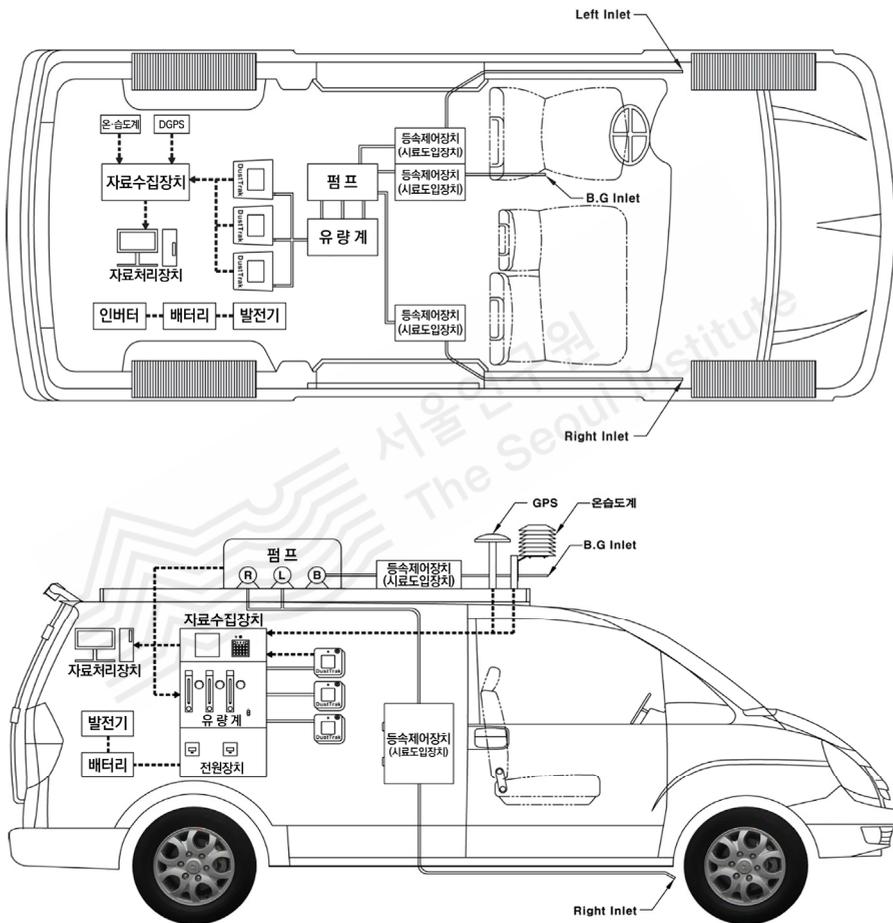
[그림 4-3] TRAKER 기술



자료: 홍지혜, 2015, 포장도로 조건에서 발생하는 도로먼지 평가기법에 관한 연구

[그림 4-4] TRAKER II의 기능 다이어그램

국내에는 인하대, 한국환경공단, 서울시 보건환경연구원 등이 TRAKER II를 변형한 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 보유·운영하고 있다. 차량의 좌측과 우측, 지붕에 3대의 PM10농도측정기(DustTrack)가 설치되어 있다. 등속흡입으로 도로먼지를 포집하고, 1초 간격으로 측정데이터의 위치를 지도에 표시하기 위한 GPS 데이터관리시스템도 연계되어 있다.



자료: 홍지례, 2015, 포장도로 조건에서 발생하는 도로먼지 평가기법에 관한 연구

[그림 4-5] 국내 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 이미지

2_국내 조사연구 사례

대기오염 측면의 도로청소효과를 측정·조사한 국내연구는 많지 않다. 대기오염 측면의 도로청소효과 평가에 주로 사용되는 방법 외에도 수질오염 측면의 도로청소효과에 주로 활용되는 수거퇴적물 조사방법을 적용한 선행연구들을 수집해 이 연구에 참고했다.

1) 재래식 방식과 이동식 도로재비산먼지 측정방법을 활용한 사례

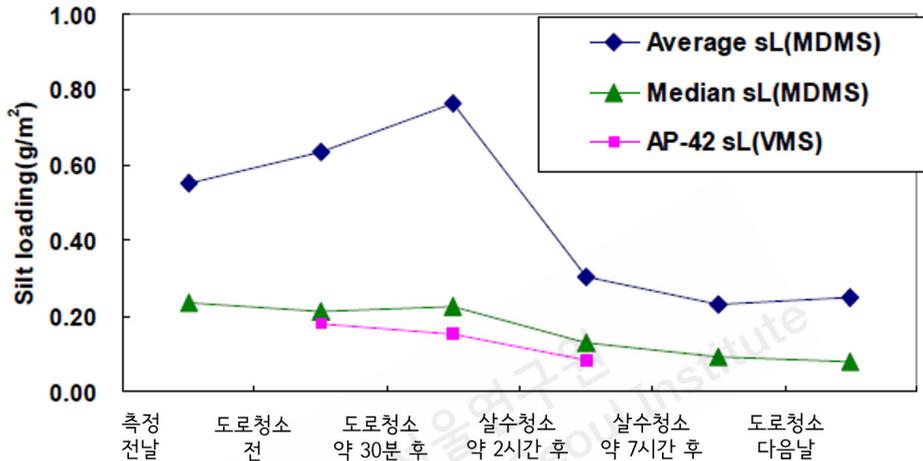
[표 4-2]는 국내 도시지역을 대상으로 대기오염 측면에서 도로청소의 효과를 연구한 사례이다.

[표 4-2] 국내 대기오염 측면의 도로청소효과 연구 사례

| 대상지역 | 청소방법 | 효과평가방법 | 자료 | 연도 |
|------|------------------|--------------|-------|-------|
| 인천시 | 노면청소·고압살수 | 이동식 측정차량·재래식 | 정용원 외 | 2007a |
| 인천시 | 노면청소·고압살수 | 이동식 측정차량·재래식 | 정용원 외 | 2007b |
| 서울시 | 노면청소·분진흡입청소·고압살수 | 재래식 | 환경부 | 2012 |
| 기흥시 | 노면청소 | 재래식 | 강희만 | 2014 |
| 서울시 | 분진흡입청소 | 이동식 측정차량 | 서울시 | 2016 |

(1) 정용원 외(2007a), 인천시 도로 대상의 재래식과 이동식 재비산먼지 측정차량 적용 재래식 방식이 한정된 구간에서만 측구와 노면의 먼지 측정이 가능한 반면, 이동식 재비산먼지 측정차량 방식은 넓은 범위의 도로를 측정하나 측구(노면보다 퇴적물이 상대적으로 큰 영역)는 측정하지 못하는 등 방식별 특성이 있어 일치된 결과를 얻기는 어렵다. 이 조사에서는 도로청소의 먼지제거효율은 silt loading 값이 높고 입자크기가 클수록 증가했다. 이는 입자크기가 작을수록 도로특성(교통량, 노면상태 등), 노면퇴적물의 특성(입경분포, 수분함량 등), 기상특성 및 청소차 운영 등의 영향을 많이 받기 때문이다. 결론적으로 노면청소만 하는 경우 silt loading의 감소효과가 16~68%로 차이가 큰 반면, 노면청소 후 고압살수청소를 병행한 경우 53~60%로 보다 안정적인 먼지제거효율을 보여주었다. [그림 4-6]처럼 이동식 재비산먼지 측정차량을 이용한 방법에서 노면청소 이후 일시적으로

silt loading이 증가하다 낮아지는데, 이는 브러시 회전으로 먼지가 재비산되고 큰 입자들이 보다 많이 제거되면서 미세한 입자들의 이동성이 증가했기 때문으로 설명하고 있다. 또한, 고압살수 후 silt loading값이 크게 낮아지는 것은 먼지입자들이 배수구로 많이 끌려 제거되는 것 외에 습기에 의해 먼지의 비산력이 잠시 억제되어 나타날 수 있는 현상으로도 보았다(정용원 외, 2007b).



※ MDMS: 이동먼지측정시스템, VSM: 재래식 silt 채취 방법

자료: 정용원 외, 2007a, 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산 먼지 실시간 측정방법 개발, 국립환경과학원

[그림 4-6] 이동먼지측정시스템과 재래식 방법의 도로청소 전·후의 silt loading의 변화 비교

(2) 환경부(2012), 서울시 일부 도로 대상의 재래식 방법 적용

환경부 연구에서는 노면청소차(필터 미장착 진공청소차), 분진흡입청소차(필터 장착 진공청소차), 고압살수청소차로 구분해 조사했다. 조사 결과, 이전 연구와 유사하게 먼지입자가 클수록 도로청소의 효율이 높았다. silt에 해당하는 미세입자인 점토/미사는 노면청소차 사용 전보다 청소 후에 증가했는데, 이는 청소차의 브러시 작용에 따른 초대입자의 분쇄와 노면에 강하게 흡착된 미세입자의 분리 또는 실험상의 오차로 추정했다. 필터장착 분진흡입청소차의 경우, 일부 결과는 미세입자 제거효율이 노면청소차보다 낮은 경우도 있었다. 원인 중 하나로, 흡입구 파손을 우려해 운전자가 오염물질이 대부분 축적되어 있는 도로연석에 밀착해 청소하지 않는 운행습관 때문으로 추정했다.

[표 4-3] 도로청소 전·후 노면축적량 모니터링 기간 및 방법

| 구분 | 필터미장착 진공청소차 | | 필터장착 진공청소차 | 물청소차 |
|------|---|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | 중형 | 대형 | | |
| 측정횟수 | 4회 | 2회 | 2회 | 2회 |
| 측정지점 | 시흥대로(금천구) 신림로(관악구) 증산로(은평구) 남산순환로(용산구) | 노들길 (서울시설공단) 남부순환로 (서울시설공단) | 시흥대로 (금천구) 올림픽대로 (서울시설공단) | 시흥대로 (금천구) 신림로 (관악구) |
| 측정기간 | 2012.6.26~6.27, 2012.9.17~9.27 | | | |

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질 관리 타당성조사연구

[표 4-4] 청소 전·후 TS(총도로먼지) 노면축적량 비교

| 구분 | | | 진공청소차 | | | | | | 일반살수차 | | |
|--|-----------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| | | | 필터미장착 | | | | 필터장착 | | | | |
| | | | 중형 | | 대형 | | | | | | |
| | | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | | | ⑦ |
| TS 노면 축적량 (g/m ²) | 총량 | 청소 전 | 25.0 | 47.8 | 14.4 | 10.1 | 7.4 | 100.9 | 14.7 | 12.7 | 16.5 |
| | | 청소 후 | 12.7 | 16.5 | 5.7 | 1.6 | 3.9 | 17.8 | 3.7 | 6.3 | 8.8 |
| | 점토/ 미사 | 청소 전 | 4.2 | 3.5 | 1.4 | 1.5 | 1.3 | 15.8 | 1.4 | 1.2 | 6.7 |
| | | 청소 후 | 1.2 | 6.7 | 1.4 | 0.1 | 0.7 | 4.2 | 0.9 | 0.3 | 0.7 |
| | 모래/ 자갈 | 청소 전 | 20.8 | 44.4 | 13.0 | 8.7 | 6.1 | 85.1 | 13.3 | 11.5 | 9.8 |
| | | 청소 후 | 11.5 | 9.8 | 4.3 | 1.5 | 3.1 | 13.6 | 2.8 | 6.0 | 8.1 |
| 청소 효율 (%) | 총량 | | 49.3 | 65.5 | 60.1 | 84.7 | 48.1 | 82.4 | 75.1 | 50.4 | 46.8 |
| | 점토/미사 | | 72.1 | -94.2 | -5.7 | 95.5 | 42.9 | 73.3 | 37.9 | 73.5 | 89.2 |
| | 모래/자갈 | | 44.7 | 78.0 | 67.0 | 82.8 | 49.2 | 84.0 | 79.0 | 48.0 | 17.6 |

① 시흥대로(금천구, A사), ② 신림로(관악구, B사), ③ 증산로(은평구, C사), ④ 남산순환로(용산구, D사),
⑤ 노들길(서울시설관리공단, A사), ⑥ 남부순환로(서울시설관리공단, A사),
⑦ 올림픽대로(서울시설관리공단, F사), ⑧ 시흥대로(금천구, G사), ⑨ 신림로(관악구, G사)

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질 관리 타당성조사연구

(3) 강희만(2014), 기흥시 도로 대상의 재래식 방법 적용

조사 결과, 도로청소에 의한 도로 퇴적물 제거율은 Coarse(>2mm), Sand(63 μ m-2mm) 및 Silt, Clay(<63 μ m) 크기의 입자가 각각 60%, 47%, 26%로 나타나 크기가 클수록 제거율이 증가했다.

[표 4-5] 청소에 의한 도로 퇴적물 제거율

(단위: %)

| 구분 | 총계 | Coarse(<2mm) | Sand(63 μ m-2mm) | Silt, Clay(<63 μ m) |
|------|--------|--------------|----------------------|-------------------------|
| 평균 | 47.239 | 60.541 | 47.088 | 25.757 |
| 표준편차 | 10.962 | 22.642 | 11.059 | 37.573 |
| 최고 | 66.329 | 88.794 | 66.625 | 63.373 |
| 최소 | 25.006 | 17.368 | 23.734 | -101.694 |

자료: 강희만, 2014, 도로청소를 통한 비점오염 식감량 산정기준 연구, 한국도로공사 도로교통연구원

(4) 서울시(2016), 양천구와 강동구 도로대상의 이동식 재비산먼지 측정방법 적용

[표 4-6] 서울시 도로 대상 도로청소 실험

| 구분 | Test Road 1 | Test Road 2 | Test Road 3 |
|-------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| 해당 지자체 | 양천구 | 양천구 | 강동구 |
| 구간 선정 | 양천구청을 경유하는 목동서로, 목동동로에 해당하는 구간 | 양천구에서 관리하는 안양천로 구간 | 천호대로 (왕복 6~8차로) 구간 |
| 구간 길이 | 약 3.8km의 4차로(일방통행) | 약 4.5km의 왕복 6차로 | 약 2.8km 왕복 6~8차로 |
| 분진흡입 청소차 운행 | 목동서로-연결로-목동동로-연결로 | 신목동역을 기점으로 오금교에서 유턴하여 기점까지 왕복 | 생태공원 앞 교차로 구간을 기점으로 천호역에서 유턴하여 왕복하는 구간 |
| | 측구중심으로 주로 2차로의 중앙차로를 대상으로 운행 | 2차로를 대상으로 운행 | 먼지차량이 일상적으로 운행되는 2차로를 대상으로 운행 |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

① 양천구(Test Road 1) 도로청소효과 분석결과

측정 위치에 따라 도로먼지 청소 전·후의 silt loading 값은 다르나, 전체적으로 도로먼지 청소 후 silt loading 값이 감소하는 경향을 보였다. 도로청소 30분 전·후를 비교하면, 목동서로는 평균 silt loading 값이 약 13% 감소했고 목동동로는 약 40% 감소했다. 그러나 청소 3시간 후에는 약 2~3배 증가를 보였는데, 이는 차량통행으로 도로먼지 분포의 변화, 도로청소가 진행된 오전 시간대보다 오후 시간대에 도로먼지가 좀 더 건조해지면서 재비산이 증가해 나타난 현상으로 추정했다.

[표 4-7] 양천구(Test Road 1) 도로청소 전·후 도로구간별 평균 silt loading 측정 결과

| 구분 | silt loading(g/m ²) 평균값 | | | | 도로청소 시행 | |
|------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|---------|---------|
| | 목동서로 | 목동동로 | 연결로1 | 연결로2 | 시간 | 도로청소 운행 |
| Test 1 (*16.02.15 15:50~) | 0.018 | 0.019 | 0.021 | 0.023 | 2일 전 | 1회 운행 |
| Test 2 (*16.02.17 09:30~) | 0.025 | 0.045 | 0.473 | 0.194 | 30분 전 | 2회 운행 |
| Test 3 (*16.02.17 10:30~) | 0.022 | 0.027 | 0.535 | 0.351 | 30분 후 | 2회 운행 |
| Test 4 (*16.02.17 13:30~) | 0.066 | 0.110 | 0.435 | 0.108 | 3시간 후 | 2회 운행 |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

② 양천구(Test Road 2) 도로청소효과 분석결과

측정 기점인 신목동역 주변의 hot spot을 제외하면, 대부분 0.03g/m² 이하의 낮은 silt loading 분포를 보였다. 2016년 5월 26일 측정결과와 비교하면, silt loading 저감률의 전체 평균은 약 35%였으나 일부구간은 청소 후 도로먼지 분포가 증가하기도 했다. 2016년 6월 8일 측정결과에서는 전체 평균 silt loading 저감률은 약 58%였다.

[표 4-8] 양천구(Test Road 2) 도로청소 전·후 도로구간별 평균 silt loading(sL) 측정 결과

| 도로구역 | sL(g/m ²) 전 | sL(g/m ²) 후 | 저감률 (%) | 도로구역 | sL(g/m ²) 전 | sL(g/m ²) 후 | 저감률 (%) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|------------|
| Route1 | 0.157 | 0.052 | 66.9% | Route1' | 0.016 | 0.008 | 53.5% |
| Route2 | 0.035 | 0.032 | 7.9% | Route2' | 0.011 | 0.007 | 37.9% |
| Route3 | 0.024 | 0.031 | -29.6% | Route3' | 0.016 | 0.011 | 30.4% |
| Route4 | 0.027 | 0.024 | 10.5% | Route4' | 0.040 | 0.006 | 84.6% |
| Route5 | 0.027 | 0.036 | -33.5% | Route5' | 0.012 | 0.009 | 29.9% |
| 평균값 (16/05/26) | 0.054 | 0.035 | 34.8% | 평균값 (16/06/08) | 0.019 | 0.008 | 57.8% |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

③ 강동구(Test Road 3) 도로청소효과 분석결과

강동구 천호대로 구간의 도로청소 전·후의 평균 silt loading 저감률은 약 70%로, 특히 hot spot 구간의 감소율이 컸다.

④ 종합정리

2016년 서울시 도로청소 전·후의 silt loading 저감률 조사 결과는 [표 4-9]와 같다. Test Road 1(양천구) 구간의 전체 평균 silt loading 저감률은 약 30.2%, Test Road 2(양천구) 구간은 약 40.8%, 청소 전부터 silt loading 값이 상대적으로 높았던 Test Road 3(강서구) 구간은 약 60.3%로 가장 높았다. 전반적으로 도로의 silt loading 값이 0.05g/m² 이상의 구간에서는 도로청소의 효과가 약 50% 이상으로 나타나며, 도로먼지 농도가 높은 곳일수록 도로청소의 저감효과가 높았다.

[표 4-9] 도로청소 전·후 도로구간별 sL(silt loading) 변화 및 저감효과

| 구분 | 도로청소 전 sL(g/m ²) | 도로청소 후 sL(g/m ²) | 저감률(%) |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Test R1(양천구) 전체평균 | 0.035 | 0.025 | 30.2%(8.9~51.3%) |
| Test R2(양천구) 전체평균 | 0.037 | 0.022 | 40.8%(-33.5~84.6%) |
| Test R3(강동구) 전체평균 | 0.049 | 0.019 | 60.3%(28.4~69.0%) |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

2) 수거퇴적물 조사방법 이용 사례

[표 4-10]은 수거퇴적물 조사방법을 적용해 도로청소효과를 연구한 국내사례이다.

[표 4-10] 국내 대기오염 측면의 도로청소효과 연구 사례

| 대상지역 | 청소방법 | 자료 | 연도 |
|----------|-------------|-----|------|
| 수도권 | 노면청소·분진흡입청소 | 환경부 | 2012 |
| 전국 7개 도시 | 노면청소 | 강희만 | 2014 |
| 서울시 | 분진흡입청소 | 서울시 | 2016 |

(1) 환경부(2012), 수도권 일부 도시의 수거퇴적물 분석

청소차 유형을 3개로 구분해 수거퇴적물 분석을 수행했다. 청소차 수거퇴적물의 TS(총먼지) 입도조성비를 분석한 결과, 모래 성분의 평균 입도조성비가 86.1%로 노면 축적량의 그것과 매우 유사했다. 이는 진공청소차가 노면에 축적된 TS를 흡입할 때 입자크기에 따라 선별적 청소효율을 보이지 않기 때문으로 설명했다. 청소차 유형별 분석결과에서 분진 흡입청소가 수거한 TS에서 점토·미사의 비율이 평균 42.2%(15.1%~69.3%)로 나타났다. 이는 필터장착 진공청소차가 필터미장착 진공청소차보다 미세입자 제거에 효과적임을 보여주는 것이다.

[표 4-11] 청소차 수거퇴적물 모니터링 방법

| 구분 | 노면청소차(필터미장착 진공청소차) | | 분진흡입청소차 (필터장착 진공청소차) |
|------|---|---------------------|--|
| | 중형 | 대형 | |
| 측정횟수 | 4회 | 1회 | 2회 |
| 측정지점 | 한국도로공사 시흥지사 적치장(고속도로) 시흥시 적치장(국도) 화성시 적치장(지방도) 서울시 금천구 적치장(기타도로) | 서울시설관리공단 서부지부(기타도로) | 서울시 금천구 적치장(기타도로) 서울시설관리공단 서부지부(기타도로) |
| 측정기간 | 2012/9/24~10/9 | | |

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질 관리 타당성조사연구



(a) 필터미장착 진공청소차 수거퇴적물



(b) 필터장착 진공청소차 수거퇴적물

자료: 환경부, 2012, 도로청소를 통한 비점오염물질 관리 타당성조사연구

[그림 4-7] 노면청소차와 분진흡입청소차의 수거퇴적물 시료 채취

(2) 강희만(2014), 한국도로공사 7개 지사(수원, 군포, 화성, 공주, 광주, 전주, 천안)의 도로청소 퇴적물 분석

전체 무게 중 $63\mu\text{m}\sim 2\text{mm}$ (모래) 크기의 입자가 차지하는 비중은 80%이고, $63\mu\text{m}$ 이하(실트)는 평균 2.447%로 낮았다.

(3) 서울시(2016), 양천구/강동구 분진흡입차량 수거물 분석

서울시가 운영하는 일체형 분진흡입청소차는 포집된 수거물 중 큰 먼지를 침강하는 1차 포집실과 보다 작은 먼지입자를 포집하는 2차 포집실로 나뉜다. 2차 포집실의 수거물을 건조시킨 후 수분함량을 측정하고 체분석과 입도분석을 진행했다. 체분석 결과, 양천구 도로먼지청소차 수거 2차 포집물 중 silt의 함량은 27.3%, 강동구는 40.1%로 나타났다. 이 중 입자크기가 2mm 이하인 수거물만 가지고 입도분석한 결과, 평균적 도로청소차의 2차 포집물(<2mm 이하) 중 PM10 분율은 15% 수준, PM2.5 분율은 3% 수준으로 조사되었다.

[표 4-12] 도로청소차 수거 2차 분진의 체분석 결과

| 미세먼지 크기 (μm) | | <75 (silt) | 75- 125 | 125- 250 | 250- 500 | 500- 1,000 | 1,000- 2,000 | >2,000 | 계 | 수분 함량 |
|------------------------------|-----|---------------|------------|-------------|-------------|---------------|-----------------|--------|-----|----------|
| 분율 (%) | 양천구 | 27.3 | 12.3 | 23.8 | 21.9 | 11.3 | 1.2 | 2.4 | 100 | 1.8 |
| | 강동구 | 40.1 | 13.4 | 20.5 | 17.9 | 6.6 | 0.9 | 0.5 | 100 | 1.6 |

자료: 서울시, 2016, 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

3_해외 조사연구 사례

미세먼지 저감에 영향을 줄 수 있는 도로청소 관련 요인은 도로의 상태(도로먼지의 양, 도로표면 상태), 청소장비의 상태(도로표면 미세먼지 제거효율, 입자의 재배출 방지 효율), 청소운영 방식(청소주기, 청소도로의 비율 등)이다. 도로의 상태는 화단, 공사장 등 도로주변의 미세먼지 유입원의 존재여부와 온도, 습도, 강우와 같은 날씨와도 연관되므로 도로청소의 미세먼지 저감효과 평가는 쉽지 않다. 도로 상태와 청소장비의 상태 등을 조건으로 미세먼지 저감효과를 조사한 연구가 일부 있을 뿐, 관련 요인을 모두 담아 조사한 연구는 드물다(AIRUSE, 2016, Report 15).

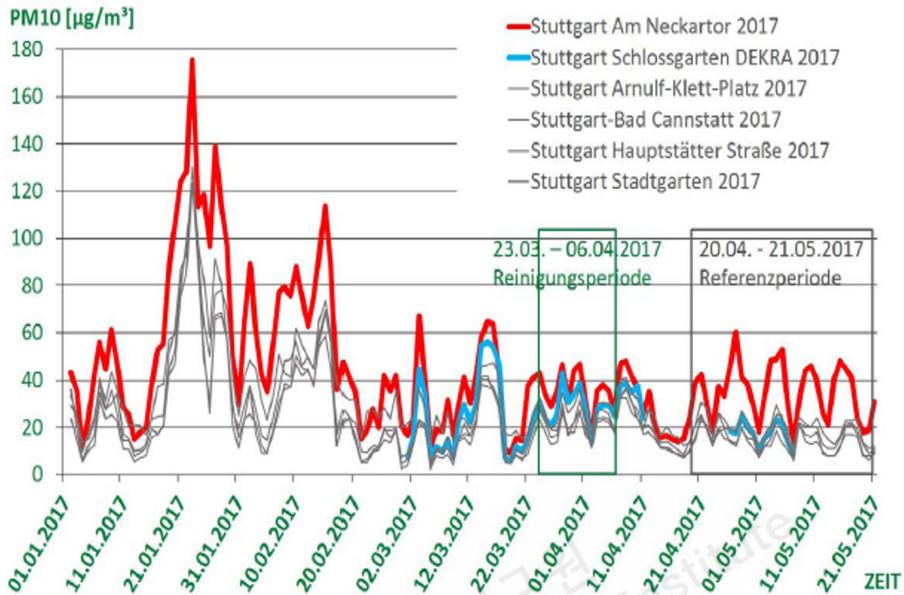
상대적으로 건조한 기후로 PM2.5 기준 미달성지역인 미국 애리조나주가 조사한 자료에서는 도로청소만의 도로먼지배출량 저감효과는 16~50%, 물청소는 30~70%, 도로청소+물

청소는 35~90%가 될 수 있다고 정리했다. 또한 도로청소장비에 따라 효과에서 많은 차이가 발생할 수 있음도 지적하고 있다(Arizona Department of Transportation, 2013).

Amato et al.(2010)은 도로청소 저감효과에 관한 15개의 연구결과를 리뷰한 바 있다. 도로청소차의 종류, 도로먼지의 크기, 효과평가방법 등에 따라 저감효과에 차이가 있으며, 일반적으로 건식 도로청소방식은 PM10보다 크기가 큰 입자 제거에는 효과가 있으나 크기가 작은 PM10 등 미세먼지의 단기간 저감에는 효과가 없다고 결론지었다. 그러나 지속적인 타이어의 마찰로 큰 입자들이 PM10 이하의 호흡성 입자로 분쇄될 수 있음을 고려하면 장기적 관점에서 건식 도로청소는 PM10의 잠재 배출원을 제거하는 면에서 긍정적 효과가 있다고 주장한다. 다만, 건식 도로청소가 물청소와 결합하면 대기 중 미세먼지가 저감되는 효과가 항상 관측되었으며, 미세먼지 저감효율이 24~30%에 달하는 것으로 조사되었다. 하지만, PM10의 저감효과는 2~3시간 동안만 지속된다고 보았다(AIRUSE, 2016, Report 15). 이는 도로 위에 살포된 물이 도로먼지의 이동성을 낮춰 발생하는 효과로, 스페인과 같이 건조한 지역에서는 물청소가 도로먼지의 이동성을 90% 이상 줄이고 독일 같은 환경에서는 60~80%로 보고 있어, 물청소의 효과가 기후적 요인에 따라 다를 수 있다. 살포되는 물의 양이나 방식에 따라서도 효과가 다른데, 1L/m² 이상의 비율로 물을 살포할 것을 권고하고 있다. 수분이 증발되어 도로먼지의 이동성이 원상태로 돌아가는 시간도 기후에 따라 달라 스페인은 24시간, 네덜란드는 72시간 정도인 것으로 조사되었다(Amato et al., 2018). 따라서 도로표면의 수분함유 정도를 관찰해 물청소의 주기를 설정하는 것이 중요하다 할 수 있다.

독일 뒤셀도르프시가 2회/주 주기로 물청소를 시행한 경우 대기 중 미세먼지 저감효과는 일평균 PM10 농도로 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 스페인 마드리드의 한 달 동안의 연구에서도 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내 저감효과가 관측되었다. 바르셀로나 도심에서 건식청소 후 물청소를 한 경우, 일평균 PM10 농도가 3.7~4.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮아진 것으로 조사된 바도 있다. 도로청소의 최대 효과는 새벽 5~6시에 물청소가 시행되었을 때 아침 교통 첨두시간대인 7~9시에 나타나는 것으로 추정되었다(Amato et al., 2018).

Tageswerte PM10 2017 - Feinstaub



자료: <https://www.stuttgart.de/img/mdb/item/631570/126874.pdf>

[그림 4-8] 슈투트가르트시의 도로청소 효과평가 예시

가장 최근인 2017년 3월 1일~4월 6일 동안 대기오염문제를 겪고 있는 독일 슈투트가르트시는 교통량이 많은 네카토어 인근 도로에서 고압살수와 진공흡입 청소, 인도 구역에서 기계식 청소를 일요일부터 금요일까지 밤 22시부터 오전 5시까지 총 27회 집중적으로 시행했다. 시험 결과, 도로청소가 도로먼지 제거에 긍정적 효과가 있다고 밝혔으나 PM10, PM2.5의 저감효과를 보기 위해서는 저온의 풍속이 낮은 겨울철 시험이 필요하다고 보고, 2017년 11월부터 2018년 2월까지 재실험을 진행해 결과를 정리할 것이라고 밝혔다. 통제된 환경이 아닌 실제 도로에서의 결과 재현의 어려움을 인정하며, 그나마 풍속이 낮아 기상적 여건이 유사했던 4월 20일~5월 21일 네카토어의 PM10농도와 비교해 도로청소가 도로 인근 미세먼지 저감에 효과가 있는 것으로 추정할 바 있다.

Brown(2011)의 연구에서는 도로청소 전후 노면 퇴적물의 양으로 도로청소효과를 겨울·여름, 건기·우기로 나누어 조사한 바 있다. 겨울에는 도로먼지가 많아 단위면적당 저감량

이 높고, 여름에는 강우로 미세입자를 포함한 도로먼지가 유출되어 저감량은 적지만 저감률은 높았다. 또한, 건기·우기 실험 결과 초기 도로먼지 축적이 많은 건기에는 진공흡입청소를 물청소에 앞서 실시하는 것이 유리하지만, 우기에는 물청소만 하는 것이 오히려 효과적인 것으로 나타났다(환경부, 2013).

[표 4-13] 진공흡입식 청소차의 여름과 겨울의 청소효율 비교

| 구분 | 저감률(%) | | 단위면적당 저감량(g/m ²) | | 총 저감량(kg) | |
|----|--------|-------|------------------------------|-------|-----------|-------|
| | 총계 | <16um | 총계 | <16um | 총계 | <16um |
| 겨울 | 77 | 45 | 61 | 3.10 | 3735 | 192 |
| 여름 | 52 | 62 | 19 | 0.78 | 139 | 5.9 |

자료: Brown et al., 2011; 환경부, 2013, 도로청소를 통한 비점오염 저감효과 및 총량제 적용방안 연구

[표 4-14] 진공흡입식 청소차와 일반살수차의 도로 비점오염물질 저감효율

| 측정시기 | 측정지점 | 조건 | 노면 측정량(g/m ²) | | 저감효율(%) | |
|----------------|------|--------|---------------------------|-------|---------|-------|
| | | | 총계 | <16um | 총계 | <16um |
| 3월 22일 (건기) | 지점 1 | 초기조건 | 288 | 17 | - | - |
| | | 진공청소 후 | 23 | 5.8 | 92.0 | 65.9 |
| | | 물청소 후 | 8.7 | 0.96 | 97.0 | 94.4 |
| | 지점 2 | 초기조건 | 186 | 11 | - | - |
| | | 물청소 후 | 106 | 5.7 | 43.0 | 48.2 |
| | | 진공청소 후 | 25 | 2.9 | 86.6 | 73.6 |
| 6월 1일 (우기) | 지점 1 | 초기조건 | 75 | 5.8 | | |
| | | 물청소 후 | 22 | 1.1 | 70.7 | 81.0 |
| | | 진공청소 후 | - | - | - | - |
| | 지점 2 | 초기조건 | 18 | 2.1 | - | - |
| | | 진공청소 후 | 14 | 2.2 | 22.2 | -4.8 |
| | | 물청소 후 | 7 | 0.63 | 61.1 | 70.0 |

자료: Brown et al., 2011; 환경부, 2013, 도로청소를 통한 비점오염 저감효과 및 총량제 적용방안 연구

이와 같은 연구결과를 보면, 도로의 잠재적 미세먼지 배출원을 저감한다는 장기적 관점에서 도로 위의 입자를 제거하는 건식청소가 필요하며, 단기적으로 미세먼지 저감 효과를 얻기 위해서는 도로 위 입자의 이동성을 억제하는 데 효과적인 물청소 방식이 필요하다. 따라서 건식과 습식 청소 방식을 지역의 도로먼지 특성, 기후·기상 특성을 고려해 적절하게 설계하는 것이 비용효과적인 도로재비산먼지 관리로 판단된다.



05

분진흡입청소차의 미세먼지 저감효과 분석

- 1_미세먼지 저감효과 실험 및 결과
- 2_그 외 실험 및 결과

05. 분진흡입청소차의 미세먼지 저감효과 분석

이 연구에서는 서울시 및 국내 도시지역에서 확대 보급을 계획 중인 분진흡입청소차를 대상으로 미세먼지 저감효과를 분석하고자 하였다. 이를 위해 4장에서 언급한 저감효과 평가방법 중 이번 연구에서 진행이 가능한 수거물 분석 조사, 이동식 재비산먼지 측정차량을 이용한 청소 전·후의 재비산먼지 농도 조사, 도로변 대기 중 실시간 측정장비를 이용한 청소 전·후의 대기 중 미세먼지 농도 조사 방법을 이용했다. 모든 실험조사는 서울시 생활환경과가 자치구의 협조를 받아 진행했으며, 주요 분석(시료 분석, 농도 측정)은 서울시보건환경원에서 진행하였음을 밝힌다.

1_미세먼지 저감효과 실험 및 결과

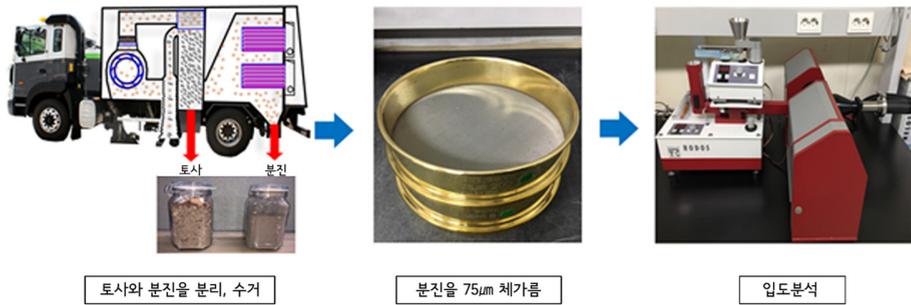
1) 분진흡입청소차의 수거물 분석

(1) 예비조사 결과

도로청소수거물 중 분진의 입도분포를 조사하는 간접적 방법으로 청소효과를 분석했다. 본 실험에 앞서 2017년 4월과 6월 2회에 걸쳐 11개 자치구 분진흡입청소차량 23대가 수거한 청소수거물을 수집해 입도를 분석한 바 있다.

각 자치구의 청소계획에 따라 분진흡입청소를 실시하고 수집된 청소수거물을 계량했다. 분진흡입청소차는 쓰레기 및 조대입자를 적재하는 1차 침강실과 상대적으로 입자가 작은 분진류를 적재하는 2차 분진실로 구분해 분진을 수거한다([그림 5-1] 참조). 자치구별 분진청소차에서 수거한 청소잔재물(1차 토사와 2차 분진)의 무게와 청소작업거리를 기록했다. 수거물은 서울시보건환경연구원에서 이화학 검사 및 1차 전처리 후 KS A ISO 13320이 적용된 레이저 입도분석기를 활용해 입도분포³⁾를 분석했다. 조사 결과는 [표 5-1], [표 5-2]와 같다.

³⁾ 건국대학교 Tech 공동기원에서 분석



[그림 5-1] 분진흡입청소차의 1차 토사(침강실)와 2차 분진(분진실) 수거 및 입도분석 과정



[그림 5-2] 분진흡입청소차에서 수거한 1차 토사와 2차 분진

[표 5-1] 도로청소수거물 입경분포 검사(2017년 예비조사 1차)

| 시료명 | 시료 채취일 | 작업 거리 (km) | 총 수거량 (kg) | 1차 토사 (kg) | 2차 분진 (kg) | 입경분포(%)** | | 수거량(g/km) | |
|-----|--------|------------|------------|------------|------------|-----------|------|-----------|--------|
| | | | | | | PM2.5 | PM10 | PM2.5 | PM10 |
| 1 | 4.11 | 71 | 34.3 | 25 | 9.3 | 1.57 | 7.44 | 2.06 | 9.75 |
| 2 | 4.12 | 60 | 17.5 | 9 | 8.5 | 0.69 | 3.28 | 0.98 | 4.65 |
| 3 | 4.03 | 58 | 1.53 | 1.4 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 4.04 | 62 | 1.64 | 1.5 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 4.07 | 68.5 | 40 | 40 | 0 | 1.05 | 4.98 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 4.10 | 64.8 | 65 | 30 | 35 | 1.16 | 5.50 | 6.27 | 29.71 |
| 7 | 4.21 | 50 | 25 | 10 | 15 | 1.11 | 5.29 | 3.33 | 15.87 |
| 8* | 5.02 | - | - | - | - | 1.79 | 8.51 | - | - |
| 9* | 4.12 | - | - | - | - | 1.76 | 8.38 | - | - |
| 10 | 4.12 | 47 | 550 | 190 | 360 | 1.76 | 8.35 | 134.81 | 639.57 |
| 평균값 | - | - | - | - | - | 1.10 | 5.20 | 18.40 | 87.40 |
| 중위수 | - | - | - | - | - | 1.10 | 5.40 | 1.50 | 7.20 |

* 자치구 주행 및 계량기록이 없음; ** 2차 분진에서의 입경별 비중

[표 5-2] 도로청소수거물 입경분포 검사(2017년 예비조사 2차)

| 시료명 | 시료 채취일 | 작업거리 (km) | 총수거량 (kg) | 1차 토사 (kg) | 2차 분진 (kg) | 입경분포(%) | |
|-----|--------|-----------|-----------|------------|------------|---------|-------|
| | | | | | | PM2.5 | PM10 |
| 1 | 6.12 | 60 | 4.5 | 1.5 | 3 | 0.27 | 1.29 |
| 2 | 6.12 | 58.3 | 58.2 | 42.4 | 15.8 | 0.75 | 3.58 |
| 3 | 6.12 | 60 | 92 | 57 | 35 | 0.17 | 0.8 |
| 4 | 6.12 | 60 | 22 | 15 | 7 | 1.7 | 8.08 |
| 5 | 6.12 | 30 | 118 | 100 | 18 | 0.12 | 0.59 |
| 6 | 6.12 | 31 | 79 | 70 | 9 | 0.1 | 0.49 |
| 7 | 6.22 | 53 | 30.4 | 30 | 0.4 | 0.10 | 0.48 |
| 8 | 6.12 | 51.5 | 9.9 | 9 | 0.9 | 0.12 | 0.57 |
| 9 | 6.19 | 50 | 63.5 | 55 | 8.5 | 1.45 | 6.87 |
| 10 | 6.12 | 51.8 | 10 | 9 | 1 | 2.33 | 11.06 |
| 11 | 6.19 | 51 | .5 | 17 | 3.5 | 2.27 | 10.77 |
| 12 | 6.13 | 50 | 9.5 | 8 | 1.5 | 1.21 | 5.73 |
| 13 | 6.12 | 162 | 47 | 17 | 30 | 3.07 | 14.6 |
| 평균값 | - | 59.12 | 43.42 | 33.14 | 10.28 | 1.05 | 4.99 |
| 중위수 | - | 51.80 | 30.40 | 17.00 | 7.00 | 0.75 | 3.58 |

2017년 2차례의 예비조사 결과로부터 청소수거물의 시료별 미세먼지 수거 비율이 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 차이 발생 이유를 조사하기 위해 2018년 3월 청소수거물의 직접 계량과 청소차 운전자 면담을 진행했다. 분진흡입청소차 운전자와의 면담으로부터 청소수거물의 미세먼지 비율에 차이가 크게 발생하는 원인을 다음과 같이 추정했다.

- 대형공사장 인접 여부에 의한 차이: 대형공사장 주변도로의 청소수거량이 많음
- 분진흡입청소차량 성능의 차이
- 분진흡입청소차 주행속도의 차이: 청소속도 10km/hr가 15km/hr보다 수거량이 50% 많음
- 평상시 청소방식의 차이: 물청소와 분진흡입청소를 병행한 도로의 수거량이 적고, 물청소를 하지 않고 분진흡입청소를 실시하는 도로는 1차 토사류보다 2차 분진류 수거량이 많음
- 도로청소구역의 차이: 인도와 접한 도로 측구에서 수거되는 양이 도로면의 평균 수거량보다 6.6배 많음

즉, 청소주기 및 물청소 병행 등 도로의 청결도, 청소장비의 성능과 운행속도에 따라 청소수거물의 미세먼지 수거량이 영향을 받는 것으로 판단된다. 차량 통행량이 많으나 관리대상 도로면적 대비 분진청소와 물청소 횟수가 많았던 종로구는 운행거리별 분진수거물량이 적었고, 장비운영실적과 물청소빈도가 낮은 자치구는 분진수거량이 많았다.

(2) 관악구 분진흡입청소차 수거량 조사 결과

예비조사 결과를 토대로 분진흡입청소차 중 흡입력 정보가 있는 분진흡입청소차량(8.5톤)을 활용해 본 실험을 진행했다. 예비조사에서 도출한 결과를 반영해 도로청소도 10km/hr 등속운행으로 진행했다.

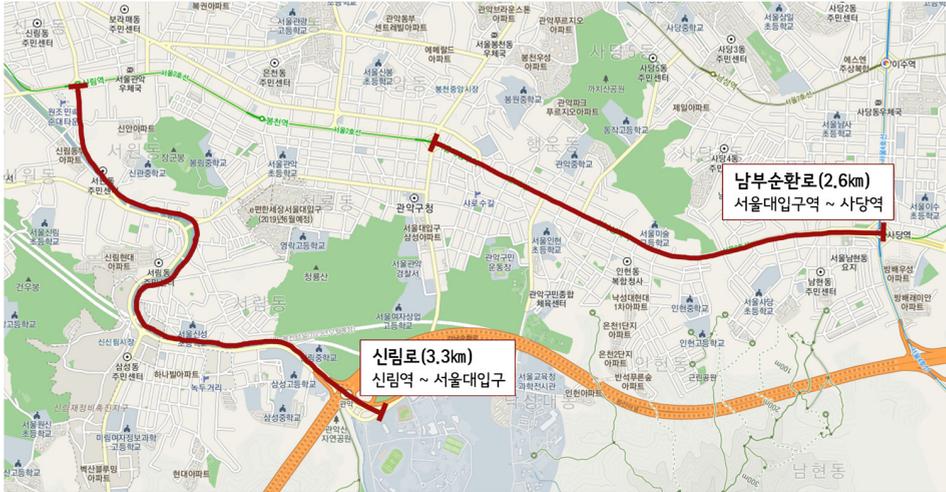
대상도로는 도로먼지 공급원인 녹지대, 중앙분리대, 공사장이 있는 관악구의 2개 도로를 선정했다. 이번 연구에서는 미국 EPA 측정방법을 반영해 수거물 중 75 μ m 이하 입자(silt 또는 미사)를 분리해 입도분석으로 silt함량(silt loading)을 산출하고 silt 내의 PM10, PM2.5 분율을 조사했다.

[표 5-3] 관악구 도로청소수거물 수거 실험 개요

| 구분 | 세부 내용 | 비고 |
|---------|---|-----------------|
| 실험기간 | <ul style="list-style-type: none"> 2018.5.29 ~ 6.18(대상도로별 8회 분진 수거) | 시료분석은 8.1 완료 |
| 조사방법 | <ul style="list-style-type: none"> 분진흡입청소차(8.5톤 2대)를 활용 도로청소 후 분진량(2차 분진)과 미세먼지(PM2.5, PM10) 부피비 분석 | |
| 대상 도로 | <ul style="list-style-type: none"> 남부순환로(5차로, 2.6km) : 녹지대(도로변, 중앙분리대)를 포함한 도로 신림로(2~4차로, 3.3km) : 대형공사장(경전철, 재개발)을 포함한 도로 | |
| 도로 청소방법 | <ul style="list-style-type: none"> 대상도로 전체를 청소속도 10km/hr로 운행 | 권장속도 15km/hr 이하 |
| 분진 검사방법 | <ul style="list-style-type: none"> 흡입된 청소수거물 중 1차 칩강실에서 토사 및 협잡물이 분리된 이후 2차 분진류만을 수거해 검사 | |
| 검사항목 | <ul style="list-style-type: none"> silt loading(75μm 이하 입자의 무게)⁴⁾ PM2.5와 PM10 입경별 부피 분포(%)⁵⁾ | |

4) 검사방법 : EPA AP-42, C1, C2(대기오염공정시험은 미국 EPA 방법을 활용함) silt loading을 조사 후 모델식 적용

5) 검사기기 : 레이저입도분석기 HELOS(H1534)&RODOS KS A ISO 13320 적용기기



[그림 5-3] 관악구 실험 대상 도로

분석결과는 [표 5-4]와 같다. 2016년 서울시 양천구, 강동구 도로 대상 연구와 비교하면, 이 연구에서는 도로 분진수거물 중 미사함량이 45%였고 2016년 연구에서는 27~40% 수준이었다. 미사량 중 PM10, PM2.5 분율도 이 연구에서는 각각 23%, 7%였고, 2016년 연구에서는 각각 15%, 3%였다. 이러한 차이는 대상 도로의 특성이 달라 나타날 수 있는 결과로 보인다.

관악구 대상 실험의 분진흡입청소차 667km 운행 결과로 제거된 silt(미사)량은 139kg이고, 이에 따라 청소차 운행거리당 제거량은 PM10 51.4g/km, PM2.5 14.5g/km로 추정된다. 연간 청소차 운행거리 1,135,700km를 고려하면 연간 도로청소 효과는 PM10 58.4톤으로, 이는 2015년 CAPSS 배출량 기준 서울시 전체 PM10 배출량의 0.6%, 도로이동 오염원 배출량의 11%에 해당되는 양이다. PM2.5는 연간 16.5톤 제거로, 서울시 전체 PM2.5 배출량의 0.6%, 이동오염원 배출량의 3% 수준이다. 단, 실제 도로청소효과는 PM10 이상의 큰 입자를 사전에 제거해 잠재적 미세먼지를 제거한다는 측면으로 보면 더 클 수 있다.

[표 5-4] 관악구 도로청소수거물 분석 결과

| 운행지점 | 운행일자 | 운행거리 (km) | 미사량: silt(kg) | 먼지입자 구성 비율(%) | | 운행거리당 먼지 발생원 제거량(g/km) | |
|-------|-------|-----------|---------------|---------------|----------|------------------------|-----------|
| | | | | PM10 | PM2.5 | PM10 | PM2.5 |
| 남부순환로 | 05.29 | 35 | 8 | 25.4 | 6.9 | 58.1 | 15.8* |
| | 05.31 | 38 | 14 | 24.4 | 6.6 | 89.9 | 24.3 |
| | 06.05 | 46 | 11 | 25.1 | 6.8 | 60 | 16.3 |
| | 06.07 | 33 | 6 | 24.9 | 6.4 | 45.3 | 11.3 |
| | 06.08 | 50 | 7 | 22.9 | 6.1 | 32.1 | 8.5 |
| | 06.11 | 45 | 9 | 22.6 | 5.8 | 45.2 | 11.6 |
| | 06.18 | 50 | 8 | 25.4 | 7.0 | 40.6 | 11.2 |
| 신림로 | 05.29 | 31 | 13 | 24.9 | 7.5 | 104.4 | 31.5 |
| | 05.31 | 39 | 11 | 22.5 | 6.7 | 63.5 | 18.9 |
| | 06.04 | 52 | 11 | 24.9 | 7.2 | 52.7 | 15.2 |
| | 06.05 | 58 | 6 | 21.1 | 6.5 | 21.8 | 6.7 |
| | 06.07 | 56 | 10 | 26.7 | 7.8 | 47.7 | 13.9 |
| | 06.08 | 59 | 14 | 20.8 | 6.2 | 49.4 | 14.7 |
| | 06.12 | 16 | 3 | 16.3 | 5.0 | 30.6 | 9.4 |
| | 06.18 | 59 | 8 | 21.4 | 6.4 | 29.0 | 8.7 |
| 계/평균 | - | 667 (합계) | 139 (합계) | 23.3 (평균) | 6.6 (평균) | 51.4 (평균) | 14.5 (평균) |



[그림 5-4] 관악구 도로청소수거물 분석 결과 정리

2) 대기 중 농도 측정을 통한 효과 조사

(1) 도로청소 전·후 도로변 대기 중 미세먼지 농도 변화(베타선측정법)

도로청소에 따른 미세먼지 농도 변화를 확인하기 위하여 2018년 9월 8일 오전 7시에서 오후 1시까지 관악구 남부순환로 서울대입구역에서 사당역 구간을 대상으로 대기오염도, 미국 EPA AP-42를 적용한 미사부하량, 도로재비산먼지 측정 실험을 진행했다.

이 구간에 위치한 상시 교통량측정소에서 해당 기간의 교통량 및 통행속도 자료를 수집하고, 사당방향 차로에 접해 있는 관악장애인복지관 주차장에 이동식 대기오염측정(베타선 측정법 적용) 차량을 배치해 동일시간의 대기 중 미세먼지 농도를 측정했다. 조사시간대 별 미세먼지 농도와 교통량 통행속도⁶⁾는 [표 5-5]와 같다. PM10은 도로청소차가 통과한 오전 9시 이후 농도가 낮아진 것으로 나타났다. PM2.5는 도로청소 후 10시 측정자료에 문제가 발생해 효과를 판단하기 어렵고, PM10 농도와 달리 도로청소 전 시간대보다 도로청소 후 시간대의 농도가 높았다. 도로비산먼지에는 PM2.5보다 입자가 큰 PM10 비율이 높아 도로청소효과가 PM10에서 보다 분명하게 드러나고, PM2.5는 도로비산먼지보다는 차량의 연료연소 등의 배출영향이 상대적으로 커서 도로청소의 영향이 나타나지 않을 수도 있다. 하지만 이는 한 차례의 실험결과이므로 향후 명확한 결과 도출을 위해서는 추가적인 실험이 진행될 필요는 있다.

[표 5-5] 2018년 9월 8일 관악구 남부순환로 교통 및 대기 중 미세먼지 농도 조사 결과

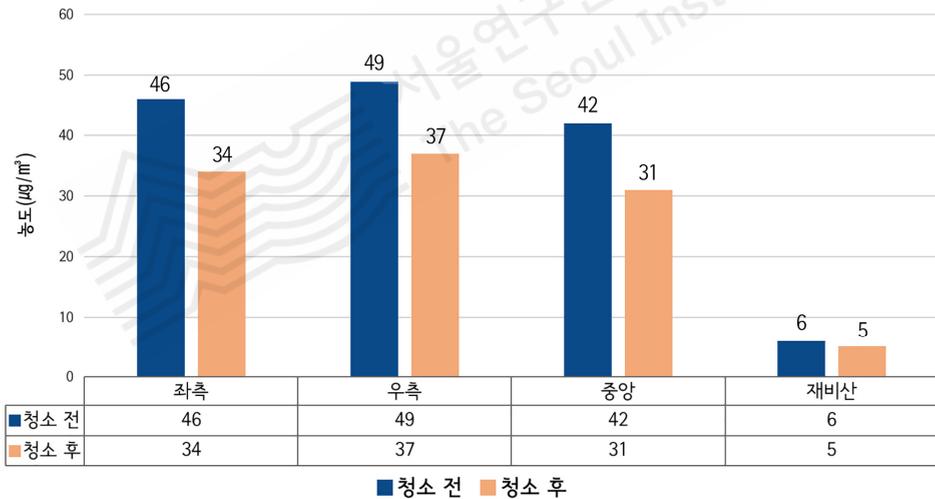
| 구분 | | 6시 | 7시 | 8시 | 9시 | 10시 | 11시 | 12시 | 13시 |
|-----------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | 28 | 33 | 30 | 29 | 20 | 24 | (E) | 21 |
| PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | 13 | 18 | 11 | 10 | (E) | 22 | 26 | 14 |
| 교통량 (대/시간) | 서울대입구 → 사당 | 2,040 | 2,143 | 2,542 | 2,734 | 2,548 | 2,715 | 2,734 | 2,803 |
| | 서울대입구 ← 사당 | 1,405 | 1,610 | 2,042 | 2,348 | 2,291 | 2,430 | 2,418 | 2,456 |
| | 계 | 3,445 | 3,753 | 4,584 | 5,082 | 4,839 | 5,145 | 5,152 | 5,259 |
| 통행속도 (km/시간) | 서울대입구 → 사당 | 35.98 | 36.38 | 28.37 | 25.48 | 21.60 | 19.90 | 23.36 | 24.51 |
| | 서울대입구 ← 사당 | 32.24 | 32.38 | 28.93 | 25.48 | 20.03 | 20.93 | 21.56 | 20.60 |

6) 교통량과 통행속도는 서울시 교통정보 시스템(<http://topis.seoul.go.kr>)에서 확인

(2) 도로청소 전·후의 도로재비산먼지 농도 변화(광산란법)

도로청소에 따른 재비산먼지 농도의 변화를 조사하기 위해 분진흡입청소차로 도로를 청소한 전·후에 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 운행해 재비산먼지 농도를 측정했다. 이동식 도로재비산먼지 측정차량은 광산란방식으로 재비산된 미세먼지농도를 측정한다.

도로청소 전 서울대입구역부터 사당역 구간에서 미사부하량이 높은 것으로 알려진 인도측 4차로를 시속 50km, 40km, 30km, 20km⁷⁾로 반복해 측정했으며, 나머지 1~3차로는 목표 속도 시속 30km로 측정했으나 교차로와 차량정체로 계획한 주행속도를 유지할 수 없었다. 도로청소 전에 전체 차로에 대한 도로재비산먼지 측정 후 즉시 분진흡입청소차량을 이용해 먼지가 많은 인도측 차로부터 시속 10km를 유지하면서 도로 전체를 청소했다. 청소 후에는 전체 차로를 대상으로 목표주행속도 30km를 유지해 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 운영하고자 하였으나, 교통신호와 정체로 평균 주행속도는 21km이었다.



[그림 5-5] 2018년 9월 8일 관악구 남부순환로의 도로재비산먼지 PM10 농도 청소 전·후 비교

청소 전·후의 도로재비산먼지 농도를 측정한 결과는 [그림 5-5]와 같다. 도로재비산먼지 PM10 농도가 청소 후 1μg/m³가 감소한 것으로 나타났다. 오른쪽 바퀴 후단에서 측정된

7) 대기오염공정시험법에는 시속 30km~60km로 규정되어 있음(평소 통행속도가 낮아 측정속도를 낮춤)

PM10의 농도가 왼쪽보다 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았고, 도로면에서 1.5m 높이의 중앙부 측정기의 농도는 $5.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮았다.

2_그 외 실험 및 결과

1) 도로 미사부하량(silt loading) 산출을 위한 실험

일반적으로 도로재비산먼지의 배출량이나 도로청소의 효과는 다양한 외부변수로 통제가 어려운 대기 중 농도를 조사하기보다는 도로표면의 미사부하량(silt loading)을 조사해 평가한다. 전통적인 도로의 미사부하량 조사는 미국 EPA AP-42 방식을 따른다. 미국 EPA AP-42 방식은 자동차의 통행을 차단하고 portable 진공청소기를 이용해 입자크기 $75\mu\text{m}$ 이하의 입자량을 조사하는 방식이다. 하지만 도로의 길이가 길고 차량 통행이 많은 대도시에서 전통적 방식의 측정은 한계가 있고, 도로 중 일부를 선택해 분석하기 때문에 오차도 높은 것으로 알려져 있다.

미국 EPA AP-42 측정법의 한계를 보완하기 위한 방법으로 이동식 도로재비산먼지 측정법이 대안으로 제시되었다. 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 이용한 재비산먼지 PM10 농도와 도로 미사부하량 측정조사의 상관관계식을 정립한 후, 재비산먼지 농도측정과 상관관계식만으로 미사부하량을 산출할 수 있는 방법이다. 미국 EPA는 이동식 측정법을 활용 가능한 방법의 하나로 소개하고 있고, 국내에서는 2016년부터 대기오염공정시험법에 도입했다. 다만 서울시와 한국환경공단에서 운영하는 이동식 도로재비산먼지 측정차량은 미사 부하량 산정에 필요한 상관관계식이 정립되지 못하고 있어 미사 부하량 산출, 도로재비산먼지 배출량 산정에 활용되지 못하고 있다.

서울시는 이번 연구에서 도로청소 전·후의 재비산먼지 농도 변화 측정과 보유하고 있는 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 상관관계식 도출을 위해 남부순환로 중 일부 구간을 교통통제한 후 미국 EPA AP-42를 적용해 모두 6곳에서 미사 부하량을 측정했다. portable 진공청소기로 미사부하량 조사를 위해 필터무게를 제외한 수거량이 200g 이상 되도록 시료채취를 했다. 하지만 필터를 건조한 후 체가름을 위해 시료를 분리하는 과정

에서 미사범위의 작은 입자들이 필터에 부착되어 충분한 시료량 확보와 정확한 계측이 어려웠다. 도로청소효과 조사를 위한 후속연구에서는 EPA AP-42를 적용한 시료채취의 경우 필터에 부착되어 탈거되지 않은 청소수거물의 무게를 고려해 미사가 많은 인도측 차로는 100m² 이상, 전차로는 300m² 이상을 시료채취 대상으로 선정할 필요가 있다. 향후, 미사부하량과 도로재비산먼지 배출량 산정을 보다 효과적으로 진행하고 도로비산먼지를 체계적으로 관리하기 위해서는 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 활용이 중요하다. 이를 위해 서울시보건환경연구원, 환경공단 등에서 운영하는 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 상관관계식 도출 조사가 추진되고 꾸준히 보완될 필요가 있다.



[그림 5-6] 미국 EPA AP-42 방식에 따른 미사부하량 조사 실험 현장(관악구 남부순환로)

2) 분진흡입청소차 성능 조사를 위한 실험

서울시와 업계는 2009년 도로분진흡입청소차 개발에 착수해 신기술이 반영된 장비를 개발하였고, 서울시는 2010년 1월 시범 도입했다. 분진흡입청소차 제작업체는 자동차 제작사에서 차대를 공급받아 자치구의 요구 사양에 적합한 성능을 탑재한 장비를 출시하며, 연간 수요가 적어 개별 주문제작 시스템에 의존하고 있다. 자치구는 조달물품으로 등록된 분진흡입청소장비를 선택해 구매하고, 기존에 운영하고 있는 차량 도입조건과 유사한 절차를 따른다. 성능기준이 대부분 자동차 성능에 초점이 맞추어져 있고, 도로청소 및 분진흡입 성능은 조달청에서 신기술로 인정받은 것을 고려해 청소효과에 대한 별도의 규격을

제시하지 않고 제작사의 기능설명에 의존하고 있다. 일부 제작사는 자체적으로 공인검사 기관에서 일정한 규격의 모래입자를 살포하고 흡입력을 실험하고 있다.

이번 연구에서는 토론토의 연구사례를 토대로 도로청소차의 미세먼지 흡입능력을 실험하면서 향후 성능평가에 활용 가능한 방안을 모색하고자 시도했다. 미세먼지 흡입능력 평가를 위해 외국의 연구사례와 같이 생산과정에서 품질관리를 받고 있는 시멘트를 활용해 흡입성을 평가했다. 시멘트는 국내에서 판매되고 있는 제품 중에 입도분도가 20 μ m 이하인 S사의 마이크로 시멘트와 도로에서 수거된 분진류를 사용해 분진흡입청소차의 흡입 성능평가를 실시했다.

자동차 통행이 없는 월드컵공원내 관리도로 100m 구간으로 실험도로를 선정했다. 이 도로는 2002년 공원 조성 당시 시공된 공원 관리용 도로로서, 차량통행이 없었으나 도로가 노후되고 아스콘이 침식되어 골재가 부분적으로 노출되어 있고, 도로면 일부에 균열이 있는 상태였다. 검사 전 분진흡입청소차로 전 구간을 2회 청소한 후 폭 2m 길이 30m에 시멘트 20kg을 비료살포기를 이용해 도로면에 고르게 살포했다. 이후 청소속도 10km/hr로 청소한 후 남은 시멘트를 진공청소기로 회수해 계량했다. 그러나 도로면의 요철부에 남은 시멘트를 흡입하는 데 한계가 있어 실험을 중단했다. 토론토의 실험은 밀폐된 공간에서 실시되었으나, 금번 실험은 야외에서 실시해 도로면에 일부 수분이 남아 있었을 것으로 추정된다. 또한 실험재료로 사용한 시멘트는 미세 시멘트로, 응집력이 높아 도로표면에서 정상적으로 시료를 흡입할 수 없었다. 본 실험에 사용된 시멘트는 대리점에서 구입한 것으로, 일정기간 상온에서 노출된 상태로 보관되었고, 응집력이 높은 것은 포함된 수분의 영향으로 판단된다. 향후 실험은 공장에서 출고된 미세 시멘트로 수분함량을 측정하고 후 사용하고, 가능하면 밀폐된 공간에서 측정하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

정부는 보조금 지급 사업의 경우 대상 장비 등에 대한 성능기준을 도입하는 것이 일반적이나, 분진흡입청소차는 공식적인 표준화된 기준이 없는 상황이다. 현장 분진흡입장비 운전자와 면담으로 장비별 성능 차이가 있는 것이 확인된 바, 분진흡입청소차의 표준 성능기준을 도입해 적절한 장비가 보급 및 운영되도록 유도할 필요가 있다. 국내에서 운용 중인 분진흡입차량의 성능은 도로접촉면에서 청소차 흡입구의 흡입력과 도로 접촉시간에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 캐나다, 유럽처럼 체계적인 도로청소차 인증제도를 단기적으로

마련하기는 어려울 것이다. 이에 흡입구의 흡입력은 흡입유속, 압력 등에 따라 달라지므로 단기적으로 정부는 분진흡입청소차 흡입력 중심의 성능을 파악할 수 있는 가이드라인을 마련할 필요가 있다. 단, 서울시를 포함한 국내 여러 지자체에서 분진흡입청소차 확대 도입을 계획하고 있는 바, 장기적으로는 해외 사례처럼 도로청소차 인증제도와 체계를 구축해야 할 것이다.



06

도로재비산먼지 저감을 위한 정책방안

- 1_ 도로재비산먼지 관리 방안
- 2_ 법제도의 개선 방향

06 도로재비산먼지 저감을 위한 정책방안

1_도로재비산먼지 관리 방안

1) 일상적 도로재비산먼지 관리를 위한 제안

(1) 도로청소장비별 특성을 고려한 장비 운영

기존에 활용되었던 노면청소차와 물청소차의 장점을 반영해 개발된 분진흡입장비는 사계절 일반도로청소에 적합하다. 강력한 흡입력으로 도로면에 남아 있는 토사와 먼지를 흡입하면서 도로청결은 물론 도로재비산먼지 발생원을 사전에 제거해 대기오염부하를 줄일 수 있다. 다만 흡입된 토사나 분진류를 여과해 배출하는 기능이 원활하게 유지되기 위해서는 운전자가 제작사가 제시하는 청소속도 이하로 운영해야 한다.

가장 오랫동안 운영되어 왔던 노면청소장비는 솔질과 동시에 살수를 병행하는 시스템으로 흡입된 먼지가 다시 대기 중으로 비산되어 청소효과와는 별개로 대기오염원으로 작용할 우려가 있다. 그럼에도 공사장 출입구 인근도로나 도로측구와 같이 오염이 심한 도로에 쌓인 다량의 먼지나 도로면에 강하게 부착되어 있는 토사류를 강력한 솔질로 제거하는데에는 유용하게 활용될 수 있다. 이처럼 분진흡입차량으로 처리가 어려운 오염된 지역에서는 일차적으로 노면청소차를 활용할 필요는 있다.

물청소장비는 청소속도에 제한이 있는 분진흡입장비보다 고속으로 운행이 가능해 상대적으로 짧은 시간에 많은 도로에 적용이 가능하고, 폭염 시 도로면의 온도를 낮추는 역할도 중요하다. 또한, 소형차를 활용할 경우 편도 1차로와 같은 이면도로에도 적용이 가능한 장점이 있다. 다만, 수도물을 용수로 사용하는 점, 중수도 사용에 따른 악취 민원 발생, 수질오염에 대한 우려가 있다. 물청소 전 분진흡입이나 노면청소로 도로먼지를 일차적으로 제거한다면 수질오염에 대한 우려와 도로청소에 사용되는 물량을 다소나마 줄일 수 있어 앞서 제기된 문제를 완화할 수는 있을 것이다.

(2) 도로청소구역 등급 설정

서울시 전체 도로를 똑같은 빈도로 청소하기에는 청소장비, 인력 등이 부족한 바, 가용장비를 최대한 효율적으로 배치·운영해 도로비산먼지 저감 효과를 극대화해야한다. 현재는 작업빈도를 교통량 또는 차선 기준으로만 차등화하고 있다. 도로청소의 주요 목적이 도로비산먼지를 줄여 미세먼지로부터 시민의 건강을 보호하는 것이라면, 해외 도시처럼 교통량(또는 차선)뿐 아니라 유동인구, 토지이용, 주거밀도와 초등학교/유치원 등 건강민감계층 이용시설 인접정도를 고려해 도로의 등급을 매기고 도로청소 빈도를 차등 적용할 필요가 있다. [표 6-1]은 해외사례를 참고해 제안한 도로등급(안)이고, [표 6-2]는 도로등급별 청소 우선순위 설정에 건강민감계층시설 인접도, 도로먼지의 배출이 많은 공사장 인접도를 고려해 제안한 기준(안)이다.

[표 6-1] 가용장비와 인력의 효율적 활용을 위한 도로등급(안)

| 도로등급 | 토지이용 및 교통량에 따른 도로 구분(안) |
|------|----------------------------|
| 1등급 | 주거지역과 대규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로 |
| 2등급 | 주거지역과 소규모 상업지역이 혼재하는 혼잡 도로 |
| 3등급 | 주거지역, 상업지역, 준공업지역이 혼재하는 도로 |
| 4등급 | 주거지역 내 도로 |

[표 6-2] 도로등급별 우선순위 설정 기준(안)

| 우선 순위 | 민감계층이용시설 인접도 | 공사장 인접도 |
|-------|--------------|---------|
| 1순위 | ● | ● |
| 2순위 | ● | |
| 3순위 | | ● |
| 4순위 | | |

(3) 기온(결빙 조건)에 따른 도로청소방식

수질의 비점오염원 관리뿐 아니라 도로의 잠재적 미세먼지 배출원을 사전에 저감하는 대

기질 관리의 장기적 측면에서 도로먼지를 제거하는 건식청소가 필요하다. 단, 단기적으로 미세먼지 저감효과를 얻기 위해서는 도로 위 먼지의 이동성 억제에 효과적인 물청소 방식도 필요하다. 따라서 건식과 습식청소 방식을 지역의 도로먼지 특성, 기후·기상적 특성을 고려해 적절하게 설계하는 것이 비용효과적일 수 있다. 이에 결빙으로 물사용이 어려운 기상조건 상황별로 다음과 같이 도로청소방식을 제안한다.

- 5°C 이상의 기상 조건: ‘분진흡입청소 + 물청소’ 병행 운영
 - 물과 진공흡입청소차가 결합된 도로청소의 결과가 미세먼지 저감에 효과적인 것으로 조사되고 있는 바, 동절기를 제외한 계절에는 현재처럼 ‘진공흡입청소 후 물청소’ 방식이 적절
 - 단, 공사장 출입구, 도로측구 등 오염이 심한 도로는 노면청소와 물청소를 일차적으로 시행한 후, 분진흡입청소와 물청소를 시행
 - 수분이 증발되어 도로먼지의 이동성이 원상태로 돌아가는 시간도 기상에 따라 다르므로, 도로먼지의 수분함유 정도를 관찰해 물청소의 주기 설정
- 5°C 이하 결빙이 우려되는 기상 조건: 분진흡입방식 중심으로 운영
 - 물 사용이 어려운 동절기에 분진흡입청소 방식 중심으로 도로청소 운영

(4) 청소시간, 주기 및 영역

분진흡입청소는 청소과정에서 도로먼지를 부유시켜 주변 미세먼지 농도를 단기적으로 상승시킬 가능성도 있다. 이에 특히 분진흡입청소는 상대적으로 노출인구가 적고 도로먼지가 안정화되어 있어 청소수거량이 상대적으로 많을 것으로 예상되는 교통침투 시간 전에 시행될 필요가 있다. 또한, 높은 비율의 도로먼지가 도로연석 1m 이내에 축적되는 것으로 알려진 바, 가장 우측차선을 중점적으로 청소한다. 청소주기는 앞서 제시한 도로등급별로 자치구의 가용 장비와 인력 상황을 판단해 주기를 설정해야 할 것이다.

- 청소시간
 - 특히 분진흡입청소는 상대적으로 도로먼지가 안정화되어 있고 노출 인구가 적은 아침 교통첨두 시간 전인 새벽 5~6시에 운영
- 청소주기
 - 자치구의 가용 장비 및 인력에 따라 도로청소구역 등급과 우선순위 기준을 적용해 주기 설정(1등급: 1~2회/일, 2등급 1+2순위: 1회/2일, 2등급 3+4순위: 1회/3일 ...)
- 청소영역
 - 전체 도로 퇴적물의 60~90% 이상이 도로연석에서 1m 이내에 존재하는 것으로 조사되는 바, 연석 1m 이내(가장 우측 차선)를 중점적으로 청소

(5) 도로청소 지침, 운전자 교육, 도로청소운영 평가 체계 마련

도로청소가 본래의 목적에 맞게 운영될 수 있도록 도로청소차 운전자 대상의 교육훈련과 현장에서 활용할 수 있는 지침을 제공해야 한다. 또한, 도로청소운영현황 기록관리 자료를 점검하고 평가해 도로청소 운영 방식의 문제점을 보완하고 개선해야 한다.

- 도로청소 구체적 지침 마련(청소차 운영현황 및 수거물 계량값 기록관리, 청소차 유지관리, 안전 등)
- 도로청소 운전자 대상의 교육훈련 제공
- 청소차 운영실적 점검·평가 및 환류로 도로청소 운영 개선

2) 고농도 미세먼지 발생 시 도로재비산먼지 저감을 위한 대응방안 제안

단기적으로 발생하는 고농도 미세먼지 사례에서는 도로먼지가 비산되어 대기 중의 농도를 최대한 가중시키지 않도록 하는 것이 중요하다. 이에 도로표면 먼지의 이동성을 낮추기 위한 물청소로 도로표면의 수분을 유지하는 것이 필요하다. 즉, 고농도 미세먼지 발생 시에는 물청소 방식을 중심으로 하되 도로표면의 수분상태를 파악해 물청소의 빈도를 평상시보다 확대하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 결빙이 우려되는 기온 조건에

서는 물청소가 불가능하다. 그렇다고 도로먼지가 차량운행으로 비산되어 도로주변의 대기 중 농도가 상승하도록 방치할 수는 없다. 따라서 차량 운행 증가로 재비산되는 도로먼지를 최소화하기 위해, 대기가 안정되고 차량이 적어 도로표면에 쌓인 먼지가 많을 것으로 예상되는 침투 시간 이전인 새벽 시간 중심으로 분진흡입청소차를 운영하는 것을 제안한다.

- 5°C 이상의 기상 조건: 물청소 중심으로 확대 운영
 - 도로 표면의 상태(수분 함유)에 따라 물청소 빈도를 조정하고 평상시보다 확대
- 5°C 이하 결빙이 우려되는 기상 조건: 새벽시간에 분진흡입청소 시행
 - 차량 운행 증가로 재비산되는 도로먼지를 최소화하기 위해, 대기가 안정되고 차량이 적어 도로표면에 쌓인 먼지가 많을 것으로 예상되는 교통침투 시간 이전인 새벽 시간 중심으로 진행
 - 도로먼지역제제 적용 가능성 검토
 - 도로먼지량이 특히 많은 북유럽 도시에서 CMA 등 먼지역제제(물청소처럼 도로먼지의 이동성 억제 기능)를 고농도 시 도로비산먼지 저감대책으로 활용
 - 서울에서는 특히, 도로먼지배출이 많은 도심지역(대형 공사장주변 혼잡도로 등)에 적용 가능성을 검토
 - 단, 먼지역제제 종류가 다양하며 일부 물질은 2차적 환경문제(수질 및 토양오염, 부식, 건조 시 비산되어 미세먼지 배출원으로 작용 가능성 등)에 대한 우려가 있는 바, 사전 검토 필요

더불어 도로비산먼지가 크게 문제되는 북유럽 도시에서는 CMA 등 먼지역제제(물청소처럼 도로먼지의 이동성 억제 기능)를 고농도 시 도로비산먼지 저감대책으로 활용하고 있고, 그 효과도 연구를 통해 확인한 바 있다. 하지만 전문가들은 먼지역제제 중 일부는 수질 및 토양오염, 부식, 건조 시 비산되어 미세먼지 배출원으로 작용 등 2차적인 부작용을 발생시킬 가능성을 우려했다. 이에 서울시가 먼지역제제를 고농도 미세먼지 발생 시 비상수단으로 도입을 고려할 경우, 이러한 우려에 대한 사전검토는 반드시 필요하다. 먼지역제제의 종류가 다양하고 일부는 친환경성을 표명하는 경우도 있으므로 비용 등을 포함해

검토가 필요하다. 다음은 북유럽에서 제안하고 있는 먼지역제제 사용 지침을 국내 여건을 반영해 수정한 사용지침의 예시이다.

1. 먼지역제제를 도로에 살포하면 일반적으로 건조한 도로 표면이 젖게 되어 차량의 미끄럼이 발생할 수 있으므로, 대상도로에 대한 그립 테스트 수행 필요
2. 살포 전, 충분한 기간 동안 도로 구간이나 구역에 표시하여 사전 홍보
3. 먼지역제제 적용의 적정 조건: 강수 예측이 없으며 상대습도가 80% 이하이고 PM농도 증가 추세로 고농도가 예상되는 경우
4. 일회 먼지역제제(CMA의 경우) 적용 용량은 교통안전 등을 고려해 10g/m² 이하 사용
5. 교차로, 횡단보도, 로터리 및 다리뿐 아니라 미끄럼 저항이 감소되는 도로 구간은 적용에서 제외(안전 고려)
6. 가능하면, 아침 침투 교통시간(오전 7시) 전에 먼지역제제 살포
7. 외부 온도가 -10°C보다 낮으면 결빙 우려가 있으므로 살포 금지
8. 기상 조건이 허용되면 즉시 도로 구간을 가능한 한 자주 청소하고 세척
9. 먼지역제제를 최적으로 사용하려면 한 번은 전체 도로에 살포하고, 다른 한 번은 바퀴 트랙 중심으로 살포
10. 사용한 먼지역제제의 양을 기록해 보관하고, 평균 적용 비율을 계산해 목표 적용 비율과 비교 평가

2_법제도의 개선 방향

1) 도로청소차의 성능평가제도 마련

도로청소장비별로 미세먼지 저감효과에 차이가 큰 것으로 조사되고 있다. 유럽, 북미 지역은 청소장비의 PM10 인증제도를 도입해 미세먼지 제거에 보다 효과적인 청소장비 사용

을 유도하고 있다. 서울시를 포함한 국내 여러 도시에서 도로비산먼지 관리 대책으로 분진흡입청소차의 확대도입을 계획하고 있으나 분진흡입청소차의 성능을 평가하는 국내의 제도와 체계는 없는 상황이다. 중·장기적으로는 유럽, 북미 지역처럼 수년에 걸친 연구를 통해 도로청소장비 인증제도와 체계를 구축하는 것이 필요하다. 다만, 단기적으로 국내 분진흡입청소차의 성능에 대한 가이드라인 마련은 필요하다. 국내에서 사용되고 있는 분진흡입청소차의 성능은 도로접촉면에서 청소차 흡입력과 도로면과의 접촉시간에 따라 차이가 날 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 정부는 도로접촉면에서의 청소차의 흡입력(흡입유속, 흡입압력 등) 등에 대한 최소 기준을 포함하는 가이드라인을 제공해 도로먼지 제거에 보다 효과적인 장비가 도입되도록 해야 할 것이다.

예를 들면 분진흡입청소차의 흡입력 측정은 청소차의 흡입구를 청소상태로 유지한 상태에서 후드와 닥트의 정압과 동압을 측정할 수 있도록, 측면에 피토우관 삽입을 위한 측정구를 만들거나 후드에 측정구가 있는 접촉장치를 부착하면 가능할 수 있다.

기존 분진흡입청소차의 흡입구는 폭이 5cm 내외로 좁아 도로면과 접촉시간이 짧으며, 운행속도가 권장기준보다 높게 되면 흡입력이 낮아질 우려가 있다. 흡입구에 도로면과 평행하게 유도날개를 설치해 폭을 넓힐 경우 접촉시간을 증가시킬 수 있으므로, 기존에 보급된 분진흡입청소차에 도로접촉면과 평행하게 3~5cm의 날개를 부착하면 청소차 운행속도를 2배로 증가시킬 수 있다. 이렇게 되면 장비의 운영효율이 높아져 추가로 필요한 청소차량과 운전원 수도 줄이는 효과를 볼 수 있다.

이와 같이 단기적으로도 기존 분진흡입청소차의 성능을 평가하고 보다 효과적으로 운영할 수 있는 방법들이 있다. 도시지역의 도로 미세먼지 저감 목적으로 분진흡입청소차를 운영하기 위해서는 도로면지의 입경분포를 토대로 가장 적합하고 유지관리가 용이한 분진흡입청소차의 설비규격(미세먼지의 입경, 여과효율, 처리유량 등)이 제시되어야 할 것이다.

2) 대형공사장 인접도로의 사업자 도로청소 의무화제도 도입

도로재비산먼지 측정자료 분석 등에서 대형공사장 주변 도로의 재비산먼지 농도가 전반적으로 높아 대형공사장이 도로먼지에 미치는 영향이 적지 않음을 확인했다. 공사규모가

클수록 비산먼지 발생원, 투입장비 및 출입 공사차량이 많아지기 때문에 추정된다. 따라서 특히 대형공사장의 경우, 오염발생 원인자인 사업자가 기존 공사현장 내부에 대한 살수 중심의 비산먼지관리를 넘어 인접도로까지 관리영역을 확대해야 한다. 또한 살수 중심의 관리는 원천적인 먼지제거가 될 수 없으므로 분진흡입청소를 물청소와 병행해 공사장 인접 도로비산먼지를 관리해야 한다. 다만, 도로면이 흙먼지로 심하게 오염된 경우에는 분진흡입청소차와 물청소차 운영으로 도로면지관리에 한계가 있을 수 있다. 따라서 필요시 노면청소차와 물청소차를 병행·운영하여 대량의 입자를 제거하고, 이후 도로면의 오염정도를 살펴 분진흡입청소와 물청소를 병행해 도로비산먼지를 관리할 필요도 있다.

분진흡입청소차량의 필터교체 비용, 청소용수 비용 등을 고려하면 일반도로보다 재비산먼지 농도가 높을 가능성이 큰 대형공사장 주변의 도로는 원인자가 관리하는 것이 바람직한 방향이다. 즉, 환경영향평가 대상이 되는 대형공사장은 자체적으로 도로비산먼지 청소차량(분진흡입차와 고압살수차)을 구입 또는 임차해 공사현장 인접도로와 공사차량의 주요 이동경로 일부의 도로청소를 의무화하는 제도도입을 제안한다. 관할 자치구는 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 이용한 조사와 사업자의 도로청소 이행일지 점검 등으로 대형공사장의 도로비산먼지 관리 이행여부를 감독하는 것도 필요하다. 이렇게 도로청소 관리 방향을 설정하면 자치구는 보유한 청소장비를 보다 효율적으로 관할 지역의 도로비산먼지 관리에 활용할 수 있을 것이다.

Jeff et al.(2012)은 도로교통의 타이어/브레이크 마모에서 발생하는 PM10의 독성 영향 범위를 도로로부터 50~100m라는 모델링 결과를 제시한 바 있다. 또한, 2018년 9월 환경부는 병원, 학교 등 취약계층 생활 시설 50m 안에서 시행되는 공사는 규모와 관계없이 해당 지자체 조례로 신고대상에 포함시켜 비산먼지 관리를 강화하겠다는 계획을 밝힌 바도 있다(환경부 보도자료, 2018.9.13). 향후 추가적인 연구조사가 필요하나, 최소 공사경계 50m 이상의 도로와 공사차량의 주요 이동경로 상의 도로를 대형공사 사업자의 관리 대상 도로로 규정하는 것을 제안한다.

3) 도로 silt loading 조사 및 활용 체계 구축(이동식 도로재비산먼지 측정법)

일반적으로 다양한 외부변수로 통제가 어렵기 때문에 대기 중 농도조사 방법보다는 도로 표면의 미사부하량(silt loading) 조사방법으로 도로재비산먼지의 배출량이나 도로청소의 효과를 평가한다. 차량 통행이 많은 대도시에서 미사부하량 조사로 제안되는 방법이 이동식 도로재비산먼지 측정법이다. 이 방법은 이동식 도로재비산먼지 측정차량을 이용해 재비산먼지(PM10) 농도와 도로 미사부하량 측정조사의 상관관계식을 정립한 후, 재비산먼지 농도측정과 상관관계식만으로 미사부하량을 산출할 수 있는 방법이다. 하지만 서울시와 한국환경공단에서 운영하는 이동식 도로재비산먼지 측정차량에 대한 상관관계식이 정립되지 못해 미사부하량 산출, 도로재비산먼지 배출량 산정 등에 활용되지 못하고 있다.

도로비산먼지를 체계적으로 관리하기 위해서는 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 활용이 중요하다. 이를 위해 서울시보건환경연구원, 환경공단 등에서 운영하는 이동식 도로재비산먼지 측정차량의 상관관계식 도출 조사가 추진되고 꾸준히 보완될 필요가 있다. 이에 각 기관이 보유한 ‘이동식 도로재비산먼지 측정차’의 주기적인 등가성 평가와 silt loading 산정식 산출을 위한 체계를 구축해야 한다. 이후 각 기관이 ‘이동식 도로재비산먼지 측정차’로 조사한 silt loading 자료를 데이터베이스화해 도로비산먼지의 체계적 관리를 위해 공동 활용해야 할 것이다. 즉, 데이터베이스를 활용해 silt loading의 계절 변화, 고농도와 정상시의 silt loading의 차이, 교통수요정책/도로청소 등 정책 시행에 따른 silt loading의 변화 등을 분석해 도로비산먼지 관리 방식을 개선해 나가야 할 것이다.

더불어 기존 도로재비산먼지 측정차량이 중앙차로 중심으로 운영되어 도로재비산먼지의 오염도를 대표하기에는 한계가 있었음을 고려해, 오염도가 높은 인도측 차로와 그 이외의 차로에 대한 측정도 진행하여 도로를 대표할 수 있는 미사부하량 산출식이 도출되어야 한다.

4) 도로측구 및 도로변 화단 설치 기준 보완

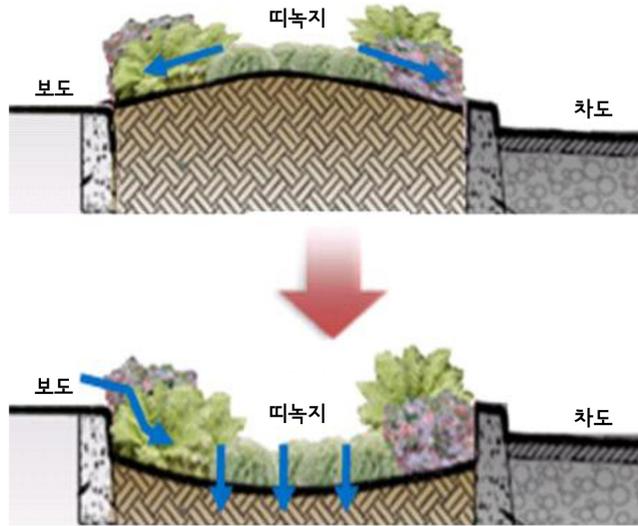
남부순환로를 대상으로 차선별 도로청소 시 가장 많은 토사류와 분진류가 수거된 도로시 설물은 도로측구이다. 폭 40cm인 도로측구에서 수거된 양이 8차로 전체 도로면보다 5배

이상 많았다. 체계적인 도로청소도 중요하나 토사와 먼지가 도로로 유입되어 축적되지 않도록 사전에 방지하는 것도 중요하다. 도로시설물 중 측구는 우수의 원활한 배수를 위해 도로에서 가장 낮은 곳에 위치하고 있어 도로면과 인도에서 발생하는 토사와 먼지가 가장 많이 축적된다. 기존에 설치된 측구는 콘크리트 구조물로 동절기에 사용되는 염화칼슘으로 인한 부식 등으로 표면이 거칠고 요철이 많아 쉽게 토사와 먼지가 축적되고, 도로 청소장비를 사용해도 완벽한 청소가 쉽지 않다. 따라서 청소효과를 높이기 위해서는 도로 측구 표면을 매끄럽게 유지하는 설치 및 관리 기준을 마련할 필요가 있다. 또한, 도로면에 물고임이 발생하지 않고 유수가 원활하게 빗물받이로 배수되도록 측구경사를 조정하거나 경사기준을 강화하는 등의 검토도 필요하다.



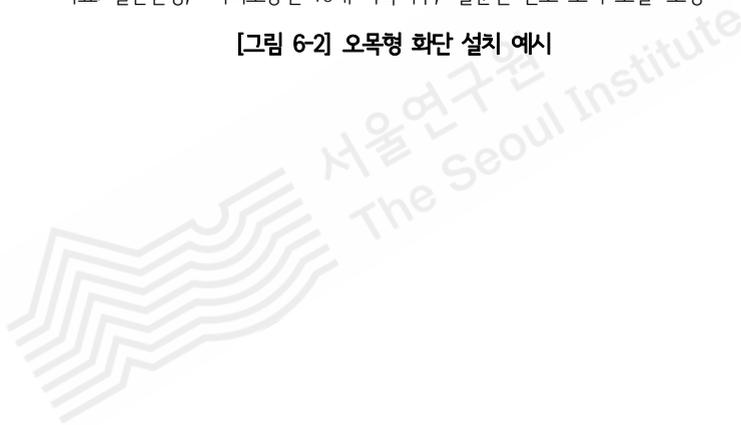
[그림 6-1] 배수 및 표면 처리된 도로측구 예시

도로변 화단의 토사 유출도 도로먼지의 주요 배출원 중 하나로 지목되고 있다. 이에 오목형 화단 설치 등의 기준을 마련해 기존 화단과 향후 설치될 화단을 관리할 필요가 있다.



자료: 일간환경, "여의도공원 16배 마곡지구, '물순환 선도 도시 모델' 조성"

[그림 6-2] 오목형 화단 설치 예시



참고문헌

- 강희만, 2014, 「도로청소를 통한 비점오염 삭감량 산정기준 연구」, 한국도로공사 도로교통연구원.
- 국립환경과학원, 2018, 「2015년 국가대기오염물질 배출량」.
- 서울시, 2016, 「서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구」.
- 유기영, 2006, 「도로청소 효과분석 및 청소방법 정립」, 서울시정개발연구원.
- 이명훈 외, 2012, 「도로 재비산먼지 이동측정차량을 이용한 도로재비산먼지 측정과 도로먼지 미량원소 분석」, 한국입자 에어로졸학회지, 제8권 제2호, pp.47~54.
- 임승빈, 2014, 「미세먼지 저감을 위한 도로청소방법별 효과분석 연구」, 석사학위논문.
- 정용원 외, 2007, 「비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산먼지 실시간 측정방법 개발 I」, 국립환경과학원.
- 정용원 외, 2007, 「인천지역 미세먼지의 주요 발생원 파악 및 도로 청소에 따른 미세먼지 저감방안」, 인천지역환경 기술개발센터.
- 정용원 외, 2008, 「비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산먼지 실시간 측정방법 개발 II」, 국립환경과학원
- 한국환경공단, 2016, 「도로청소 매뉴얼」.
- 한국환경공단, 2018, 「2017년 도로먼지지도 제작결과」.
- 한세현, 2006, 「이동먼지측정시스템을 이용한 포장도로 silt loading의 시간적, 공간적 변화특성에 관한 실시간 측정연구」, 석사학위논문.
- 한세현, 2012, 「도시지역에서 포장도로 재비산먼지의 배출 및 화학적 특성에 관한 연구」, 인하대학교 박사학위 논문.
- 홍지혜, 2015, 「포장도로 조건에서 발생하는 도로먼지 평가기법에 관한 연구」, 석사학위논문.
- 환경부, 2012, 「도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구」.
- 환경부, 2013, 「도로청소를 통한 비점오염 저감효과 및 총량제 적용방안 연구」.
- 환경부-한국환경공단, 2015, 「도로재비산먼지 관리 업무 편람」.
- 일간환경 기사, 2014.04.17., 「여의도공원 16배 마곡지구, ‘물순환 선도 도시 모델’ 조성”
- 환경부 보도자료, 2018.9.13., 「대기환경보전법 하위법령 입법예고...날림먼지 관리 강화”

AIRUSE, 2016, THE EFFICACY OF DUST SUPPRESSANTS TO CONTROL ROAD DUST RE-SUSPENSION IN NORTHERN AND CENTRAL EUROPE, REPORT 14.

AIRUSE, 2016, REVIEW OF IMPACT OF STREET CLEANING ON PM10 AND PM2.5 CONCENTRATIONS IN NORTHERN AND CENTRAL EUROPE, REPORT 15.

AIRUSE, 2017, Guidebook: Measures to improve urban air quality.

Amato et al., 2010, A comprehensive assessment of PM emissions from paved roads: Real-world Emission Factors and intense street cleaning trials, *Science of the Total Environment*, 408, 4309-4318.

Amato et al., 2014, Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions, *Journal of Hazardous Materials*, 275, 31-36.

Amato et al., 2018, *Non-Exhaust emissions*, Academic Press.

Arizona Department of Transportation, 2013, DRAFT CMAQ GUIDELINES AND PROCEDURES: PM2.5 Nonattainment Areas.

Benzidi, 2003, Pro-Active city cleaning: practice and experiments from Brussels, *Cleaner cities Cleaner Environment*.

Breault, R. F., Smith, K. P., and Sorenson, J. R., 2005, Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, and removal efficiencies by mechanical-and vacuum-type sweepers.

Brown, S., Susfalk, R., Fellers, D., and Fitzgerald, B., 2011, Effectiveness of street sweeping in Incline Village, NV, Nevada Tahoe Conservation District.

California Stormwater Quality Association, 2003.

Calvillo et al., 2015, Street Dust: Implications for Stormwater and Air Quality, and Environmental Management Through Street Sweeping, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 233, p71~128.

City of Helsinki Environment Centre, 2014, REDUST(EU Life+ project).

City of Toronto, 2008, PM10 and PM2.5 Street Sweeper Efficiency Test Protocol.

City of Toronto, 2015, Street sweeper evaluation results and operational considerations.

Deletic, A and Orr, D. W., 2005, Pollution buildup on road surfaces. *Journal of Environmental Engineering*, 131, 49-59.

EEA, 2003, *Emission Inventory Guidebook*.

Geddes V., 2011., Particulate matter and fine dusts situation in Europe, presentation to Eventopro, 26 and 27th May 2011, Lago di Garda.

Geles, B., 2005, Reducing storm-water pollution through effective street sweeping: street sweeper pickup performance test results for Elgin sweeper, ELGIN.

Horwath J. A. and Bannerman, R. T., 2009, Pollutant Loading to Stormwater Runoff from Highways: Impact of a Highway Sweeping Program Phase II, Madison, Wisconsin Final Report No. 0092-04-04.

Jeff et al., 2012, Modeling Exposures to the Oxidative Potential of PM10, Environmental Science & Technology, 46, 7612–7620.

Max Elmgren et al., 2018, Successfully mitigating PM10 in Stockholm city, NOSA Symposium.

Minnesota LRRB, 2008, Resource for Implementing a Street Sweeping Best Practice.

Nelson City Council, 2011, Street sweeping: an effective non-structural Best Management Practice(BMP) for improving stormwater quality in Nelson.

New Bedford, Massachusetts, 2003-04. Scientific Investigations Rep. No. 2005-5184, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Va.

Nordic Council of Ministers, 2017, Road dust and PM10 in the Nordic countries.

<http://prrd.bc.ca/board/agendas/2018/2018-13-984629621/pages/documents/15-b-CA-02NHairquality.pdf>

<https://www.hel.fi>

<https://www.stuttgart.de/img/mdb/item/631570/126874.pdf>

<https://www.worldsweeper.com>

Abstract

A Study on Road Cleaning to Reduce Resuspension of Road Dust

Yu-Jin Choi · Young-Eun Kim · Hye-Jin Lee

The increased occurrence of high PM(particulate matter) episodes in Seoul metropolitan area is a major concern to the general public. The major sources of PM in urban include the emissions from vehicle exhaust, combustions of fossil fuel for heating buildings, and fugitive dust such as road dust, construction dust and tire/brake wears. According to the national air pollutant emission inventory for Year 2015, the PM10 emission from road dust makes up 24% of total PM10 emissions in Seoul. That is the second-largest emission source in Seoul behind construction dust, and is 11% higher than on-and off-road vehicle emissions. Even though the road dust emission inventory is known to be highly uncertain, road dust is a crucial source that should be controlled because road dust particles may pose significant health risks for the population living near intense traffic locations.

In general, road dust management can be divided into two categories; preventive methods that prevent road dust emissions in advance, and post-management which reduce resuspension of road dust already deposited on the road. The purpose of this study was to investigate the effective post-management methods to reduce resuspension of road dust.

In this study, we evaluated the effectiveness of the road cleaning method currently in use by the Seoul Metropolitan Government, and effective management methods for reducing resuspension of road dust were suggested.

Contents

01 Introduction

- 1_Background and Purpose of the Study
- 2_Main Contents and Research Flow

02 Domestic and Overseas Management of Resuspension of Road Dust

- 1_Road Cleaning Methods
- 2_Overseas Cases
- 3_Domestic Cases

03 Precedent Study on the Evaluation of Road Cleaning Effect

- 1_Evaluation Method of Road Cleaning Effect
- 2_Domestic Research Cases

04 Investigation on the Resuspension Characteristics of Road Dust

- 1_Characteristics of Road Rust
- 2_Resuspension Characteristics of Road Dust in Seoul

05 Analysis of Road Cleaning Effect in Seoul

- 1_Analysis of Dust Collected by Vacuum Cleaner with Bag-filter
- 2_Analysis of PM10 Concentration in the Air Before and After Road Cleaning
- 3_Other Experimental Investigations

06 Suggestions and Final Remarks

1_Suggestions for Improving Related Law and System

2_Suggestions for Reducing Resuspension of Road Dust



서울연 2018-PR-29

미세먼지 저감 위한
도로청소 개선방안

발행인 _ 서왕진

발행일 _ 2018년 12월 31일

발행처 _ 서울연구원

ISBN 979-11-5700-362-4 93330 8,000원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

본 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.