

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 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.

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.

