

# Global Report

## 남부유럽지역의 도로먼지 저감기술 가이드

1. 개요
2. 도로청소
3. 도로물청소(수세척)
4. 먼지비산억제제
5. 결론

## 1. 개요

도로먼지는 포장된 도로면에 쌓인 입자혼합물이며, 차량에 의해 발생하는 난기류 또는 바람에 의해 다시 대기 중으로 재 유입되기 쉽다. 비포장도로의 경우에는 도로의 재료 자체가 먼지가 된다.

도로먼지의 대기 중 방출은 도심과 산업지역 대기의 입자상 오염물질의 농도를 상당량 증가시키는 것으로 알려져 있으며, 이는 대기질 기준(2008/50/EC)을 초과하는 원인이 된다.

또한 차량의 브레이크나 타이어의 마모, 자동차의 배기가스 및 도로먼지가 쌓여있는 곳에서부터 발생하는 고농도의 중금속과 유기화합물은 건강에 악영향을 준다.

자동차의 배기가스는 상향된 규제의 엄격한 적용으로 점차 감소하고 있기 때문에, 상대적으로 먼지의 재 비산이나 마모(브레이크, 타이어, 도로포장 등)로 인한 방출의 중요성이 점차 증대되고 있다. 이러한 방출은 비배기오염원(non-exhaust sources)으로 알려져 있으며, 2020년 까지 도로교통으로 인한 방출량의 90%를 차지하는 것으로 예측되었다(Rexeis and Hausberger, 2009).

AIRUSE 프로젝트 결과, 남유럽의 5개 도시(포르토, 바르셀로나, 밀란, 플로렌스, 아테네)의 비배기오염원이 PM10과 PM2.5의 농도를 연간 각각 8~11%(1.8~2.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) , 1~9%(0.2~2.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 가량 증가시킨 것으로 나타났다.



사진 1. 유럽 도로비산먼지

(차량배기가스방출은 1990년 이후로 감소한 반면, 도로먼지방출은 줄어들지 않았다.)

도로먼지방출에 영향을 끼치는 요인에는 여러 가지가 있다. 이러한 요인들로는 차량운행속도, 교통량 및 구성요인, 도로포장재 등과 더불어 온도나 습도, 강우, 바람의 상태와 같은 기상학적 조건 또한 포함된다.

예를 들어 스칸디나비아 반도의 국가들은, PM10에 차지하는 도로먼지의 비중이 높으며, 이는 겨울과 봄 사이의 시기에 뿌려지는 도로위의 모래와 스토티드가 장착된 겨울용 타이어의 사용으로 기인한다. 중부 유럽은 일반적으로 도로먼지의 비중이 낮은 것으로 나타나는데, 이는 습한 기후와 더불어 스토티드가 장착된 타이어의 사용을 금지하기 때문이다. 남부 유럽지역은 낮은 강수량으로 인해 도로면이 씻겨나가거나 젖어있는 경우가 드물어 도로먼지의 대기로의 방출이 용이하다. 게다가 낮은 식물재배면적과 도심 작업 그리고 사하라사막의 먼지창궐이 도로 먼지량을 증가시켜서 결국 먼지발생량이 증가된다.

이러한 기후 및 교통조건의 차이로 인해 도로먼지의 발생을 감소시키기 위한 적절한 조치들은 지역별로 차이가 날 수밖에 없다. 이러한 조치들은 예방적 또는 저감을 위한 방법이 될 수 있다. 예방적인 전략은 우선 비포장구역 접근로의 포장, 트럭운반물에 대한 덮개씌움 및 교통량 제한조치 등으로 입자상 오염물질의 축적방지를 가장 우선적인 목표로 한다. 또한 저감 조치들은 이미 침적된 도로 입자들을 제거하거나 한군데로 집결시키는 방법이다.



사진 2. 먼지비산억제제의 차량을 이용한 도로살포  
(예방적조치들은 먼지입자의 축적을 막고, 저감조치들은 입자의 이동성을 감소시킨다.)

이 기술가이드는 문헌조사와 AIRUSE LIFE+ 프로젝트에서 수행한 특정 지역의 현장테스트로 얻어진 경험에 기초한 남부유럽지역에서의 도로먼지방출을 저감시키는 적절한 조치에 대한 정보를 기술한다.

## 2. 도로청소

도로청소의 주된 목적은 길거리의 잡동사니, 어질러진 쓰레기와 먼지를 제거함으로써 도시환경의 외관을 미적으로 증진시키는데 있다. 이러한 청소주기는 많은 편차를 보이는데, 주요도로와 자동차 전용도로는 대단히 드물게 청소가 수행되고 있다. 역사적으로 도로청소장비나 장비 가동절차 모두 대기 중의 PM10의 농도를 줄이는 것은 거의 고려하지 않고 설계되었다. 비록 몇몇 연구에서 대기질에 대한 긍정적인 효과에 대한 가능성을 평가한 적이 있긴 하다. 이러한 연구의 주된 카테고리는 크게 2가지로 나뉘는데 하나는 각기 다른 청소차량의 개별 방출에 대한 평가이고 또 다른 하나는 도로청소 장비들의 공기 질(대기중의 PM농도)에 대한 효과를 분석한 것이다.

유럽에는 3가지 종류의 도로청소장비가 있다. 지난 수십 년 동안 상대적으로 청소기술은 발전되지 않았다. 이와 반대로, 집진된 먼지로부터 PM10의 방출을 조절하기 위한 용도의 백필터(bag filters)와 배기가스의 방출을 조절하기 위한 디젤차량의 입자필터는 최근에 이미 시장에 도입이 되었다(Wiemann, 2013; Chow et al, 1990).

- **기계적방식** : 전통적 방식의 도로 청소차량이나, 현재 유럽에서 이 장비를 생산하는 업체는 Swedish company Brood사 한 곳이다. 이 장비는 도로 위의 먼지입자를 컨베이어 벨트로 올린 후 이들을 채집 호퍼로 보낸다. 일반적으로 이러한 형태의 장비들은 나뭇가지, 낙엽, 쓰레기 및 많은 양의 먼지 등의 제거에 대단히 유용하지만 진공 장비에 비해 보다 많은 양의 PM10 먼지를 대기 중에 발생시킨다.
- **진공방식**: 주로 도로상의 잡동사니와 먼지를 통형태의 빗자루를 사용하여 흠날리게 한 뒤 진공노즐로 직접 빨아들여 호퍼로 보내는 방식이다. 이 호퍼는 보통 중력으로 가라앉히는 방식으로 포집하는 챔버로 구성이 된다. 이 챔버를 지나간 공기는 바로 대기 중으로 백필터나 집진기 또는 재순환을 위한 집진노즐을 통해 배출된다. (그림1.)
- **재생-공기 진공방식**: 직접적으로 배기가스의 전부 또는 일부를 흡기구 한쪽 끝단으로 고속으로 다시 돌려보내거나 픽업헤드(pick up head) 뒤에 있는 노즐로 즉시 보내는 방식이다. 강한(blast) 배기공기가 포장면에 특정각도로 분사되어 먼지를 떨어낸다. 이 공기와 함께 포집된 이물질들은 픽업헤드를 지나서 집진노즐로 이송되는데, 이곳에서 이물질들을 수거(collection)호퍼로 이동시킨다. 이때, 재순환되지 않은 배기공기의 일부는 대기 중으로 방출되기 전에 개별적으로 세팅된 챔버로 배출(vent)된다. 이러한 형태의 도로청소장비는 유럽에서는 흔하지는 않지만 MFH사에서 유일하게 이러한 방식의 모델을 생산하고 있다.

청소차량의 운행 시 차량주변의 국부적인 PM10의 농도는 일부 증가한다는 증거가 있다. 진공청소장비 운용 시 물을 분사하면 먼지의 재비산을 줄 일수 있다. 각기 다른 도로청소장비의 효과에 대한 비교는 각각의 도로정소장비가 PM10 발생에 100단위 정도의 차이로 영향을 달리 줄 수도 있음을 알려준다. 특허기술인 GORE 필터시스템을 적용한 Dulevo 5000(그림 2.)제품이 가장 성능이 좋았으며, 2000시간 이상 가동시 0.34kg 이하의 PM10을 방출하는 것으로 예측되었다 (Geddes, 2011).

스웨덴의 DISAB 그룹은 최근에 DISA-CLEAN 130 장비를 새롭게 출시했다. 스웨덴 uppsala시 주변을 테스트한 결과 PM10 저감 효과가 확인되었으며, 이 장비는 루츠(roots)진공펌프, 도로표면에 적용하도록 특별히 개발된 노즐, 특수필터기술을 활용한다. 전체 청소과정에서 비질(brush)이 진공에서 이뤄지기 때문에 완전 먼지제거 성능이 확보되었다.(DISAB Group, 2013). 영국회사인 Johnson Sweepers는 호퍼 내에서 사이클론 효과를 발생시키고, 먼지와 폐기물들이 대기로 흩어지기 전에 호퍼 내에서 그물망을 이용하여 가장 효율적으로 필터링 되도록 하는 청소시스템을 개발했다. 이 디자인은 모든 johnston V Range 청소장비의 기본기능으로 채택되어있다. Range 시리즈는 미국 캘리포니아 주의 PM10 테스트 인증을 획득한 최초의 유럽 메이커 청소기이다. 도로청소장비와 관련해서는 다수의 PM10인증과 테스트가 존재하며( ISO규정은 없음) 모두 청소장비의 작동 시 도로먼지의 부하를 줄이고, 먼지의 재비산과 배기구에서의 방출량을 최소화하는 성능에 초점을 두고 있다.

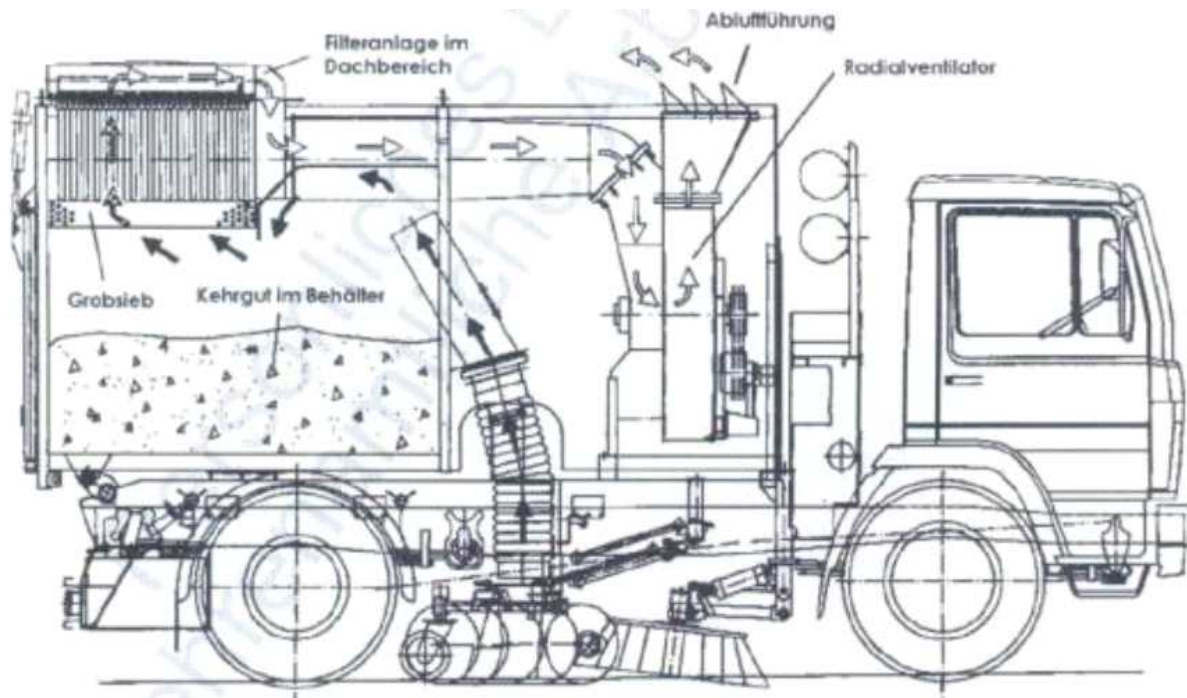


그림 1. 진공청소차의 예 (VDL 2012)

또 하나 반드시 잡고 넘어가야 할 점은 실제현장에서의 작동과 테스트조건에서의 가동은 많이 다를 수 있다는 것이고, 다양한 범위의 청소장비로 좀 더 체계적인 서비스테스트가 수행되어야 한다. 도로 청소 장비로부터 방출되는 PM10을 관리하기 위해서 사이클론, 백필터, 전기집진방식 등 다양한 기술이 적용되었다. 이때 장비로 부터의 총 방출량은 모터, 배기구, 재비산량 등을 포함한다.

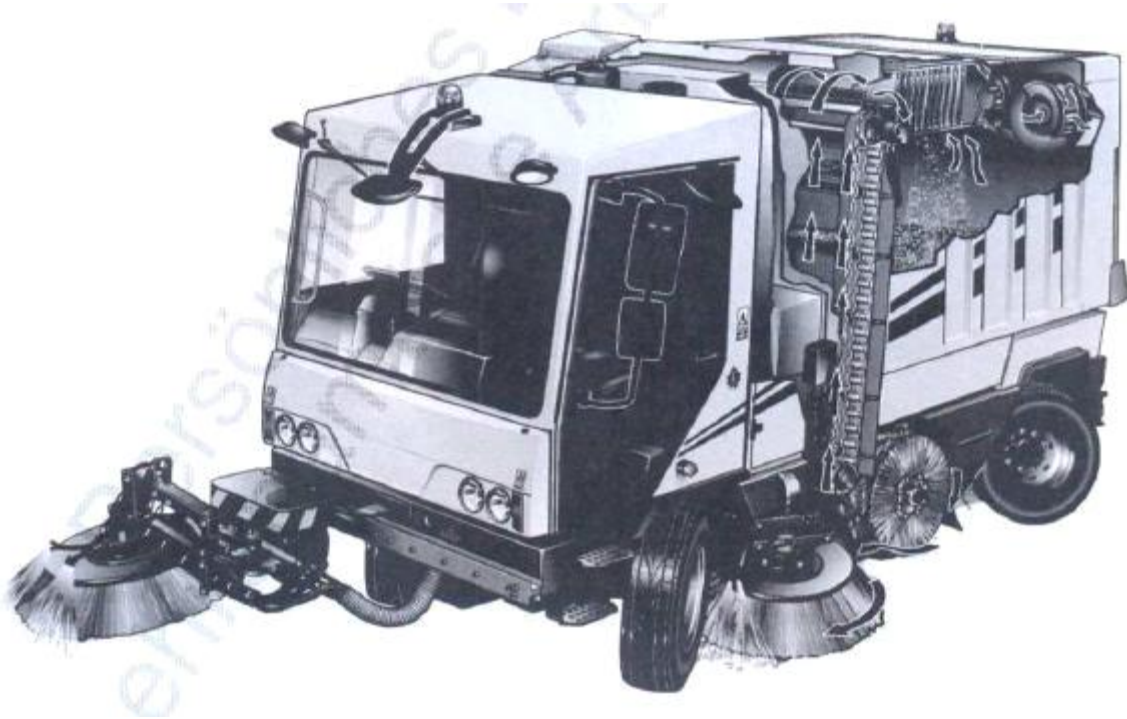


그림 2. Dulevo 5000 evolution 도로청소차량의 모식도 (VDL 2011)

도로청소에 따른 주변공기내 PM10의 저감을 측정하는 것은 더욱 어려운 일이다. 아래와 같은 여러 가지 요인들이 PM10 농도의 저감을 측정하는데 영향을 주기 때문이다.

1. 도로먼지부하량
2. 도로포장면에서 PM10을 제거하는 장비효율
3. 입자오염물질을 채집하는 장비의 성능
4. 도로표면상태
5. 청소하는 대상 도로의 길이와 크기
6. 청소주기
7. PM(먼지발생)의 다른 발생원

이러한 이유로 청소에 따른 공기질 개선의 효과를 평가하는 것은 특정 장소에서 일정기간동안 청소행위를 수행한 결과와 같은 지역 및 시간동안 일체의 청소행위도 수행되지 않는 조건에서 행하여야 한다. 따라서, 본 연구의 기존 문헌연구 결과에서는 청소행위가 공기질 개선에 즉각적인 효과를 나타낸다는 어떠한 증거도 없음을 보여준다. 미국, 스웨덴, 노르웨이, 독일에서 수행된 기존연구에서는 여러 청소절차를 수행 후에 오히려 PM10의 증가 또는 농도의 변화가 없음을 보여줬다. 여러 연구에서 단기적 측면에서 도로청소를 통한 공기질 개선에 대한 결정적인 결과는 나타나지 않았다. 하지만 이러한 결과가 도로 청소행위가 장기적으로 공기질 개선에 효과가 없다는 의미는 아니다.

### 3. 도로 물청소(물 세척)

도로먼지의 방출은 먼지자체의 중력과 먼지입자 표면들을 서로 응집시키는 점착력을 극복하기 위한 에너지를 필요로 한다. 일반적으로 이러한 에너지는 바람이나 난기류 등 이동차량에 의해 발생하는 요인에 기인한다. 먼지방출에 영향을 미치는 요소로는 표면마찰, 중력, 더 큰 입자가 되려 하는 입자간 점착력 등을 포함한다. 먼지방출은 이러한 요인들을 더 강하게 함으로서 감소시킬 수 있는데, 예를 들면 물을 뿌리거나, 습기를 유지시킬 만한 결합제나 물질 등을 이용함으로써 감소시킬 수 있다.



그림 3. 물 세척장비가 부착된 청소차량

물 세척은 비가 올 때와 유사하게 도로표면이 침적된 부하먼지의 이동성을 감소시킬 수 있는데, 결국 먼지의 재비산을 효과적으로 감소시킬 수 있는 잠재적인 방안이다. 물이 침적된 입자에 달라붙을 때, 먼지입자의 질량과 표면장력을 증가시켜서 결론적으로 재비산이나 이동의 가능성을 낮추는 역할을 하며, 특히나 젖은 입자의 응집은 응집체 형성을 통해 물이 증발한 후에도 유지가 된다. 하지만 10마이크론 이하의 미세입자들은 물 세척으로 하수구까지 이동이 잘 되지 않는 것으로 보인다. 이러한 물 세척은 스페인의 경우 도로먼지 이동성을 90% 이상, 독일의 경우 60~80%까지 감소시키는 것으로 나타났다 (Amato et al., 2009; Ang et al., 2005). 이러한 물 세척은 도로청소장비에 부착(그림 3.)되거나 호스를 이용해 수작업(그림 4.)으로 할 수 있다. 지하수나 비음용수가 도로 물청소 목적에 적합하다. 필요한 물의 양은 도로의 더러움 정도(먼지부하량)에 따라 다르다. 비록 소수의 연구에서만 발표되었지만, 1L/m<sup>2</sup> 정도의 수량이 필요한 것으로 보고되었다. 도로 물청소 후 먼지방출이 다시 발생하는데 걸리는 시간은 스페인의 경우 대략 24시간 후에, 네덜란드는 72시간 이후에 99% 정도로 이르는 것으로 보고되었는데 (Amato et al., 2012), 이는 물을 뿌릴 때의 습윤 효과가 오염물질의 수세척보다 좀 더 중요한 요인임을 알려준다. 물의 증발이 도로먼지방출량의 회복을 결정하는 주된 요인인 것이다. 이러한 결과를 볼 때, 도로먼지의 물 세척 행위는 대략 오전 5~6경의 이른 아침에 행해져야 하고, 이는 최대 먼지방출량을 보이는 오전 7시에서 9시 사이의 먼지 방출량을 줄이는 목적이다.

이상적으로는, 물청소는 도로먼지방출이 급격히 증가할 때는 언제라도 수행되어야 한다. 이는 도로의 수분 정도와 밀접히 관련이 있다. 청소 빈도수는 아래사항을 고려하여 결정되어야 한다.

- 지역적 활용가능자원
- 비 예보. 비가 내리는 중 또는 비가 오고난후 24시간 동안은 물청소가 필요 없음
- 간헐적인 먼지의 유입 (사하라 사막 또는 지역적 점오염원)



그림 4. 물호스 수작업으로 청소하는 예시

이러한 물청소의 효과는 포장 및 비포장도로에서 대해 확인되었다. 포장도로의 경우 도로 먼지량이 많을수록 물청소의 효과는 증대되었다. 도심지 환경에서의 도로먼지방출량은 상당히 다른 양상을 보인다. 바르셀로나의 경우, 지역별로 2~23mg/m<sup>2</sup> 정도로 상당히 먼지발생량이 달랐으며, 이는 도로의 특성(포장, 차량의 구성, 비 포장면 또는 공사지역의 인접정도)이 지역적 방출량에 주로 영향을 주기 때문이다. 그러나 교통량 또한 (먼지방출총량/일)을 결정하는데 주된 요인으로 작용한다. 따라서, 모든 도로를 활용자원의 부족 등의 이유로 청소하기가 불가능하다면, 청소대상 도로의 적절한 선택이 비용대비 효과를 최대화하기 위해 고려되어야 한다. 결론적으로 도로청소는 아래와 같은 주된 요소들을 고려하여 효과적으로 수행되어야 한다.

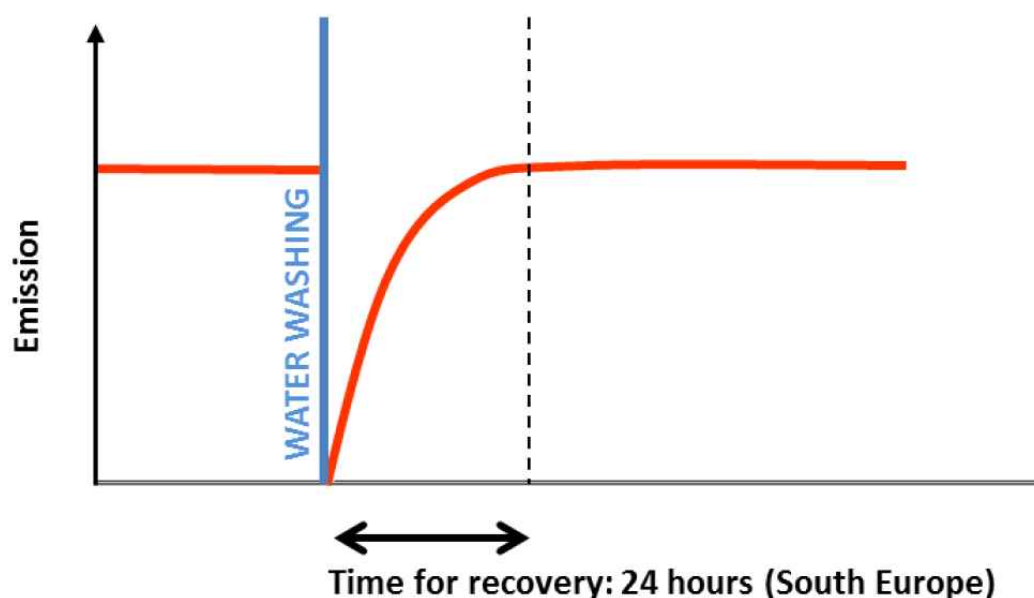


그림 5. PM10방출에 대한 도로물청소의 효과 및 지속에 대한 개략그래프

#### 1. 기상조건

2. 도로먼지 부하량
3. 청소주기
4. 도로표면상태
5. 청소된 도로의 길이와 크기
6. 먼지발생의 다른 오염원들

결론적으로, 이러한 청소가 대기질의 향상에 항상 (+)요인으로 작용하지는 않는다. 베를린과 브레멘에서는 PM10농도의 차이가 그다지 없는 것으로 나타났으며, 도로청소 후 이어진 물청소의 효과는 롬바르디 지역환경청 수행으로 2002년 겨울, 밀란 도심부의 1km<sup>2</sup> 정도 면적을 10일 동안 조사되었는데, 이 조사 결과 PM10농도의 실질적인 감소효과는 없는 것으로 나타났다(ARPA, 2003). 이와 다르게, Düsseldorf에서는 PM10 농도가 일평균 2 µg/m<sup>3</sup> 정도 감소되었다고 보고되었는데, 교통량이 많은 도로에서 1주일에 2번 물청소가 시행되었다. 스톡홀름에서는 도로 물청소가 고속도로의 차로 옆 길가에서 양호한 기상 상태의 낮에만 수행되었다. 21일중 8일 동안 세척 후 PM10의 농도감소가 확인되었다. 오전시간에만 국한할 경우 평균값이 6%정도 감소되었다. 50 µg/m<sup>3</sup> 농도를 초과하는 12개의 측정소에서 2군데 도로 물청소 지역은 미세먼지 농도를 초과하지 않는 것으로 기록되었다. 네덜란드(Nijmegen)에서는 도로포장, 기상학, 입자의 용해도 등과 같은 지역적 조건에 따라 효과는 비록 다를 수 있지만 가시적인 효과가 있는 것으로 보고되었다. 마드리드에서는 1달여간의 캠페인 기간에는 도로 물청소가 진행된 낮 동안 도로먼지 발생원으로 부터의 발생비중은 대략 2 µg/m<sup>3</sup> 줄어든 것으로 보고되었다. 이는 아무런 조치가 취해지지 않은 도로면에서 낮 동안 발생하는 도로먼지 발생량의 15%가량을 감소시키는 효과와 상응하는 수준이다. 야간에 도로 물청소 후에는, PM10의 감소가 아침시간 동안에도 확인되었으며, 단 같은 연구에서 주변 PM2.5의 감소에는 영향이 없는 것으로 확인되었다.

2005년, 캐나다 해밀턴 시에서 상대적으로 자주(frequently) 기계적 진공청소 방식과 물청소를 병행했을 때 공기질의 개선효과가 나타난 것으로 보고되었다. 도로 인접부에서 바람 부는 방향의 PM10농도의 감소가 2~3 µg/m<sup>3</sup> 가량으로 측정되었다. 하지만, 넓은 지역에서의 의미 있는 효과는 발견되지 않았다. 더욱이 진공이나 기계적 청소 방식을 단독으로 적용 시 PM10은 감소되지 않았다. 산업영역에서 환경 PM10 농도는 도로 쓸기/물청소를 포함하는 종합 패키지형 방식을 도입함으로써 감소되었다. 바르셀로나 시 중심부에서는 비질과 동반된 진공청소 후에 물 세척을 진행하는 청소절차의 효과에 대한 테스트를 진행하였다. 이러한 방식은 2008년 봄에 특정 한 달 안에 8일 밤 동안 진행되었는데, 세척후 24시간(그림 5)의 일일 평균 PM10의 농도가 건조한 나머지 날들 대비 3.7~4.9 가량(노견 농도의 7~10%에 해당)의 감소효과가 있는 것으로 나타났다. AIRUSE 프로젝트에서 또한 각각의 도로(포장, 비포장)에 대한 테스트가 수행되었다. 산업지역에서의 관심사항은 도로먼지 부하량이 높은 것이 PM방출량이 높은 것과 연관이 있는지에 대한 것이다. 포장도로는 스페인 L'Alcora시의 도자기 산업클러스터 내에 존재하며 왕복2차선으로 되어있고, 300m 길이를 따라 산업공장건물에 의해 도로 양면이 연속적으로 둘러싸여 있다. 도로먼지 부하량은 20~40mg/m<sup>2</sup>으로 일반적인 유럽도시의 1~6mg/m<sup>2</sup> 보다 훨씬 높은 수준이다. 이렇게 먼지 부하량이 높기 때문에, 도로세척은 집중적으로 수행된다. 아침 7시부터 12시 30분까지, 노면에 쌓여있는 먼지들을 먼저 파낸 후, 물 세척 차량을 이용해 도로를 청소하였다. 27리터/m<sup>2</sup> 정도의 물이 사용되었으며 청소 수행 당일에는 평균 PM10 농도가 18.5% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 감소는 오래 지속되지 못하였으며, 청소 후에는 2.2% 감소하는 수준으로 돌아갔다. PM10의 감소는 주로 오전 7시에서 11시 사이에 일어났고, 이것은 세척작업직후 5시간 후에 효과가 있다는 것을 의미한다. 비록 지속시간이 짧지만, 이러한 감소는 일평균 PM10 농도를 18.5% 정도 낮추는데 있어 충분한 역할을 하는 것으로 볼 수 있다.

이렇듯 AIRUSE 프로젝트에서는 아래와 같은 질문을 해결하기 위해 실험을 수행하였다.

- 물 세척 효과가 사라지는데 얼마나 시간이 걸릴까?
- 만약에 물대신 먼지억제화학용품을 쓴다면 물 세척 효과가 증대될까?

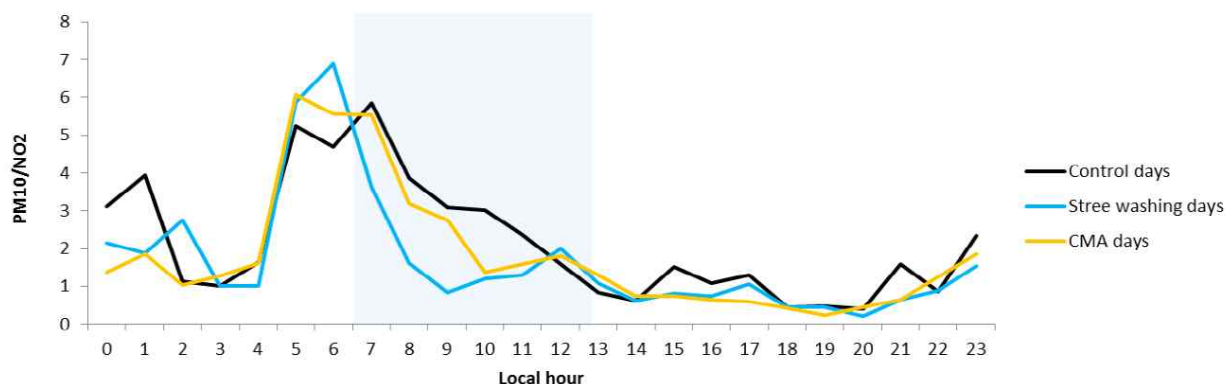


그림 6. 도로 물청소 CMA 스프레이 적용 시 산업포장도로에서의 PM10 감소

1번 질문에 대한 답은 간단하지 않다. 왜냐면 기상학적 조건(입사태양광, 환경온도, 습도, 바람속도 등)에 크게 영향을 받기 때문이다. 그러나, 2번째 질문에 대한 대답은 1번과 마찬가지로 꽤 복잡하기는 하지만 유사한 기상조건하에서 두 가지 저감방식을 비교하면 해결이 가능하다. 그러므로 첫째, 일정량의 물을 지정된 길이의 비포장도로에 적용하고, 이후에는 적용지역에는 더 이상 물을 적용하지 않는다. 이는 도로먼지방출이 현격히 증가하는데 걸리는 시간을 확인하기 위함이다. 적용면적은 125m 길이에 9m 폭이었다. 대략 4000리터의 물이 사용되었는데 이 정도의 양은 대략 3.5리터/m<sup>2</sup>의 양이고, 전면적에 걸쳐 충분히 균일하게 물을 도포할 수 있는 양이며, 이는 일반적으로 회사에서 사용되는 양의 2배이다. 이 결과 물을 도포한 후 1시간 가량은 PM10의 발생량이 90%까지 효과적으로 저감되는 것을 확인하였다. 그럼에도 불구하고 이 시간은 여러 다른 요인에 의해 영향을 받으며, 이는 직접적으로 물의 증발율에 따른다.

#### 4. 먼지억제제

먼지억제제는 광물산업에서, 특히 몇몇 국가에서는 오랫동안 먼지비산을 억제하기 위해 비포장도로에 사용되어왔다. 1990년대 이래로, 노르웨이에서는 포장도로에도 사용이 되었으며, 터널과 일반도로위에도 적용되었다. 이 약품은 최근에 들어서야 도로먼지방출을 저감하는데 효과에 대해 몇몇 유럽도시에서 광범위하게 조사가 이뤄졌으며, 일반적으로 유럽의 일간 PM10 기준치인 50 µg/m<sup>3</sup>의 먼지농도가 연간 35회 이상 초과되지 않아야 하는 기준(Directive 2008/50/EC)을 맞추기 위한 패키지형태의 여러 방법들 중 하나로 활용이 되었다.

이러한 비산억제제를 사용하기 위해서는 환경PM10의 농도를 저감시키는 본래의 기능 뿐 만 아니라 약품자체의 잠재적인 환경영향에 고려가 이뤄져야 한다. 이러한 영향에는 식물이나 인간의 건강에 대한 피해, 토양과 지표수의 오염을 포함한다. 이외의 잠재적인 영향은 도로마찰력의 감소, 고속도로의 인프라(infrastructure)인 교량과 도로면의 부식 등을 포함한다.

비산억제제는 도로면에 분사형태로 뿌려지는데, 이때 입자들이 엉겨 붙게 도와주어 바람, 타이어가동, 차량에 의한 발생하는 바람 등에 의해 비산되는 것을 막아준다. 또한, 동결 온도를 낮춰주는 효과도 있다. 노르딕 국가에서 행해진 연구에서는 효과적인 먼지비산억제를 위해서는 광범위한 면적에 반복적인 약품 적용이 필요하다. 일반적으로 이들의 효율성 테스트는 상대적으로 짧은 거리로 진행이 되었는데, 각기 다른 여러 종류의 억제제들이 전 세계적으로 테스트되었으나, 유럽지역에서는 오직 2가지 종류에만 집중하여 테스트를 진행하였다. 첫 번째는 표면장력을 줄일 수 있는 억제제로 수분이 좀 더 입자들을 효과적으로 젖게 만들어 표층에 묻혀지게 하는 역할. 두 번째는 상대습도가 50%를 초과할 때 물을 흡수하는 염분(즉, 흡수성 화합물)으로 염화마гне슘(MgCl<sub>2</sub>), 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>), 칼슘마гне슘아세테이트

(CMA), 포름산칼륨(potassium formate, KF)이 있다. 스칸디나비아 지역과 알파인 지역을 고려했을 때 나타난 차이점은 억제제의 효과는 처리된 부분과 처리되지 않은 부분의 배분 비율(share)이 수용점(receptor point)에 큰 영향을 준다는 것이다. 태양열 조사(radiation)와 도로의 수분 또한 억제제의 효율을 결정하는데 있어 중요한 요인이다. 이러한 이유로 억제제의 효과에 대한 평가는 지중해 지역의 산업지대와 같이 도로 먼지부하가 겨울용 스타드 타이어(stubbed tire)와 제설용 모래에 비견할 만큼 좀 더 열악한 상황을 고려하여 종합적으로 이뤄져야 한다.



사진 3. CMA용액 포장면 테스트(CMA용액이 다량 사용될 경우, 포장면과 타이어의 마찰력을 저하시키는 효과가 나타나며 이에 따른 안전조치가 뒤따라야 한다)

도로 먼지부하가 지중해지역에서 CMA의 효과를 결정하는데 중대한 요인인지 구별해내기 위해 2가지 추가적인 도로(포장, 비포장)에 대해 연구를 수행하였다. 포장된 산업도로에서 ( $10\ \mu\text{m}$ 이하 입자)  $40\ \text{mg}/\text{m}^2$ 의 먼지농도가 CMA의 효과를 테스트하기 위해 고농도 오염 상황의 시나리오를 설정한 뒤 시험을 수행하였다. 여기서 PM10의 농도는 지역도로먼지가 대부분을 차지했다. 스프레이 방식으로 오전 7시에  $12\ \text{l}/\text{min}$ 의 양으로 분무하였고, 1시간동안 지속하여 총량  $60\ \text{g}/\text{m}^2$ 의 CMA를 250m 길이 도로 전체에 도포하였다. 정규 표준화된 PM10 농도와 비교할 때 결과치는 평균일일 먼지량은 CMA스프레이 후 8.3% 가량 감소된 것으로 보고되었다. 대부분의 감소는 오전7부터 점심때까지 아침시간에 발생되었다. 그러므로 CMA의 효과는 물 세척만 이뤄진 경우보다 좀 더 좋은 결과(대략 18.5% 감소, 그림 6)를 보여주었다. 같은 평가가 광물질 먼지농도에 대해 한 번 더 수행되었는데, 이결과는 CMA 적용시 24.2% 이르는 감소치를 보여주었고, 결과적으로 물 세척보다 좋은 결과(대략 36% 감소)를 보여주었다.

비포장 도로에 대해서는 현재 활용되고 있는 급수조절시스템 (물탱크트럭으로 물주기)에 CMA를 첨가하는 형태로 실험이 진행되었다. 이때 우선 표면을 4000리터가량의 물로 적신 후, CMA는 120kg가량 사용이 되었고  $100\ \text{g}/\text{m}^2$  농도로 도포되었다. 이른 아침에 시행되었고, 태양조사, 지표온도, 풍속 등은 다른 실험들(그림 7)보다 낮은 조건에서 수행되었다. 그럼에도 불구하고 PM방출은 오히려 증가하였는데, 이는 전체 도포된 물의 양이 적었기 때문이었다. 따라서 전체 물의 양이 적은 상태에서 CMA를 추가 도포하는 것은 어떠한 효과도 보여주지 못했다.

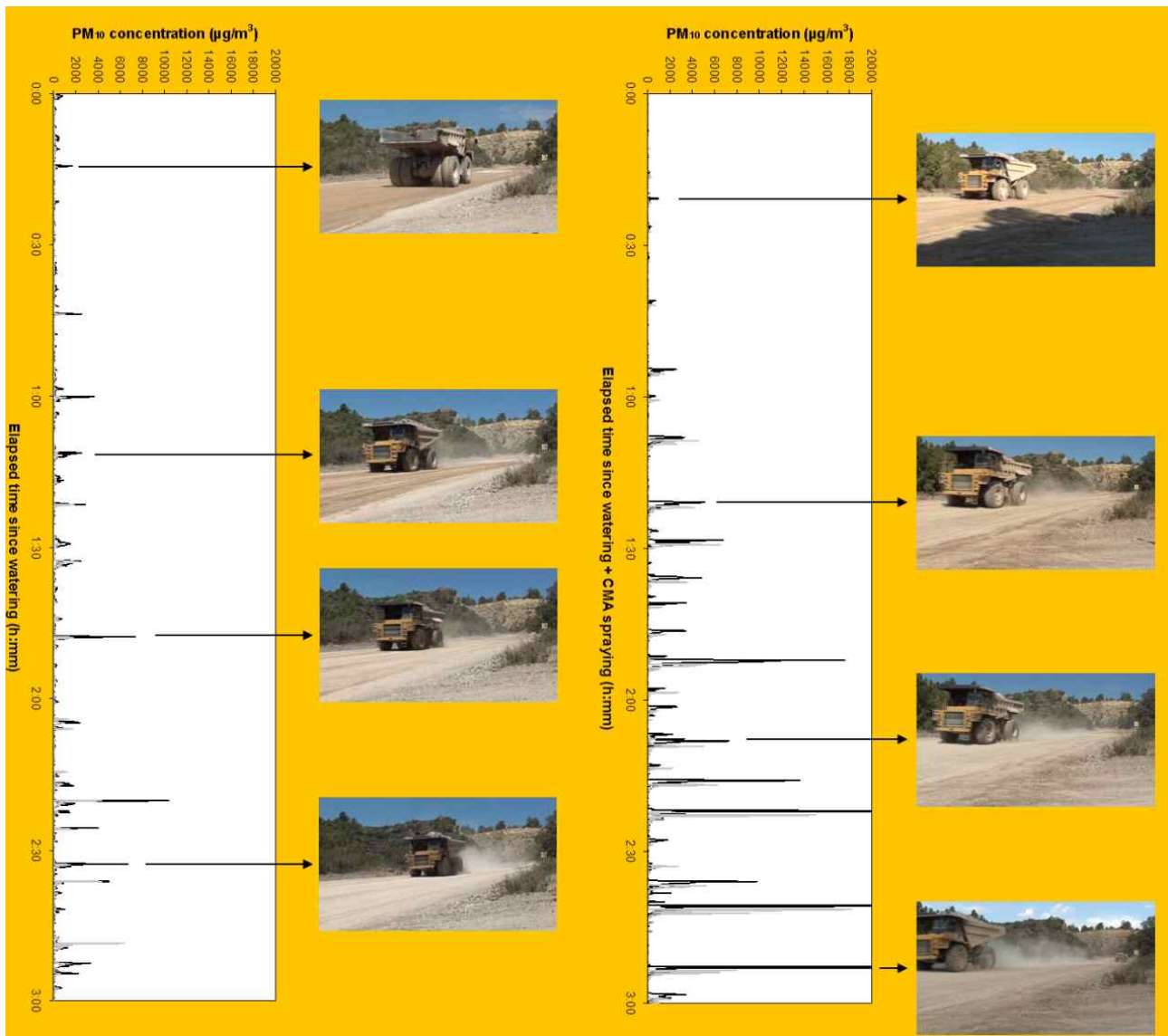


그림 7. 비포장도로에서 실험된 PM10 시간별 농도(µg/m³) 와 각기 물살포(왼쪽), CMA 적용(오른쪽) 도중 각각의 이벤트 발생 시 찍은 스냅샷

## 6. 결론

도로청소는 일반적으로 측정시의 불확실성을 고려했을 경우, 단기간에는 효과가 없는 것으로 나타났다. 하지만 이것이 장기적으로 봤을 때 청소가 아무런 효과가 없다는 것을 의미하지는 않는다. 이는 기본적으로 도로표면의 먼지를 제거하기 때문이다. 도로면의 진공청소가 오히려 PM10 방출량을 증가시킨다는 몇몇 증거도 있다. 이를 해결하기 위해, 청소장비 업체에서는 필터백(filter bag)을 활용하여 청소장비에서 배출되는 공기로 부터의 PM10 방출을 저감시키려고 하고 있다. 시범(prototype) 도로청소장비의 기초실험결과는 새로운 장비가 기본적인 도로면에서의 PM10의 농도를 저감시키는 능력과 환경농도를 저감하는 데는 개선효과가 있을 수 있음을 보여준다. 도로먼지 제거장비의 PM10 인증시스템은 유럽무역기구(European trade organization)가 운영하는데, 최고의 청소장비를 이보다 성능적으로 덜 우수한 장비로부터 구별해낼 수는 없는 것으로 보인다. 독일의 테스트방식이 오히려 이러한 면에서는 더 우수해 보인다.

더 나아가, 실제 현장환경과 보다 넓은 면적에 대한 청소장비의 시험은 PM10 방출과 환경농도에 대한

이해의 폭을 넓히고, PM10 일일기준치 초과량을 제거하는데 활용가능한지 여부를 파악하는데 필수적이다. 대부분의 연구에서 도로물청소가 환경농도를 저감시키는 데에는 더욱 효과적이라는 결과를 보여준다. 이는 물이 도로면의 먼지를 제거한다라기 보다는 PM10이 공기중으로 방출되는 것을 줄여주기 때문인 것으로 보인다. 도로 물청소의 효과를 보여주는 대부분의 증거들은 더 건조한 기후(스페인, 겨울용타이어와 트래킹 모래를 활용하는 핀란드 또는 산업시설 오염원 근처도로, 건설현장 등)로 인해 도로먼지 부하량이 특히 높은 지역에서 나타났다.

많은 북, 중유럽의 도시들은 먼지 비산억제제의 도로면으로의 적용시 PM10 환경농도 저감 효과에 대한 실험을 진행했는데 모든 연구가 상대적으로 습도가 높은 기후의 지역(스웨덴, 노르웨이, 핀란드, 네덜란드, UK, 독일, 오스트리아, 북이탈리아)에서 수행되었다는 점을 주목할 필요가 있다. 2014년 3월 이전에는 어떠한 연구도 지중해 지역에서는 가능하지 않았다. 도로먼지 부하량이 높은 북, 중유럽에서는 억제제의 사용이 일일 평균 PM10의 농도 및 50 µg/m<sup>3</sup> 농도를 초과하는 일 수를 저감하는데 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이 지역에서 EU 기준치(50 µg/m<sup>3</sup> 이상 농도가 연간 35일 이하)를 만족하는데 중요한 역할을 한 것으로 나타났다. 문헌연구결과를 근거로 할 때, 북, 중유럽에서 먼지억제제는 도로먼지 부하량이 높고 도로면지가 일평균 PM10농도에서 차지하는 비중이 아주 높을 경우에 한하여 효과적이라고 결론지을 수 있다. 특히 겨울용 스테드 타이어와 제설제의 사용이 높은 국가들에서는 봄철 눈이 녹을 때 PM10의 농도가 증가하는데, 이러한 지역에서의 비산억제제의 사용이, 특히 비포장도로에서 PM10방출가능성의 저감시킨다는 측면에서 더욱 효과적이다. 결국 최선의 결과를 얻기 위해서는 먼지비산억제제의 활용이 넓은 지역에 적용되어야 할 것이다.

남유럽의 경우, 태양조사량이 높고 겨울용 타이어나 도로위의 모래 등이 없기 때문에, AIRUSE 프로젝트의 결과 도로 물청소가 비산억제제의 사용보다 포장, 비포장 도로, 산업용 비포장, 산업용 포장도로 등 종류에 상관없이 먼지제거에 있어 더욱 효과적인 방식인 것으로 나타났다.

**<원문제목>** Technical guide to reduce road dust emissions in southern europe

**<원문출처>** AIRUSE LIFE11/ENV/ES/584, Report 28, 12/2016