

포장도로 재비산먼지 배출량산정법의 현황

정용원 · 한세현 · 원경호 · 장기원 · 홍지형*

인하대학교 환경공학과 · *국립환경과학원 대기총량과

Present Status of Emission Estimation Methods of Resuspended Dusts from Paved Roads

Yong-Won Jung · Sehyun Han · Kyung-Ho Won · Ki-Won Jang · Ji-Hyung Hong*

Department of Environmental Engineering, Inha University

*Environmental Cap Research Dept., National Institute of Environmental Research

1. 서론

서울과 인천 등 수도권 지역을 대상으로 한 미세먼지배출량 산정에 관한 최근의 연구결과들은 실형 계산에 사용된 비산먼지배출량 산정식의 불확도가 상당히 크다는 점을 감안 하더라도 비산먼지에 의한 미세먼지배출량이 예상보다 여전히 큰 것으로 나타나고 있다. 특히 비산먼지들 중에서도 포장도로에 쌓인 먼지들이 차량의 운행으로 인해 재비산(resuspension)되는 이른바 “도로재비산먼지”의 배출량이 건설활동, 타이어마모, 비포장도로에서의 발생되는 비산먼지 등을 모두 포함한 전체 비산먼지 배출량의 약 60% 이상을 차지하여 산정이 가능한 비산먼지 중에서 가장 큰 기여도를 보이고 있는 것으로 나타나고 있다.^{1~3)} 참고로 도로재비산먼지의 비산먼지배출량에서의 기여도 결과는 국내에서 집계된 자료가 거의 없어 현재로서는 산정이 불가능한 비포장주차장, 노천 불법소각, 나대지 등에서 발생되는 비산먼지들이 전혀 고려되지 않은 결과로 이러한 것들이 전부 고려되면 전체 비산먼지발생량에 대한 도로재비산먼지의 기여도는 다소 낮아질 수 있을 것으로 판단된다.

한편 최근 수용모델(receptor model)을 이용하여 추정된 대기 중 미세먼지 농도에 대한 각 미세먼지 오염원들의 기여도 연구결과⁴⁾에 의하면 토양기원 비산먼지의 기여도가 서울 전 농동의 경우 봄철에 대략 36% 정도인 것으로 보고되고 있는데, 이러한 결과는 수도권 미세먼지의 효과적인 관리를 위해서는 비산먼지의 관리가 대형사업장이나 자동차에 의해 배출되는 미세먼지의 관리 못지않게 중요하다는 것을 시사해 준다. 향후 해당 연구에 사용된 수용모델의 정확도는 보다 명백한 대표성을 가질 수 있도록 보다 많은 지점에서 얻어진 측정 자료들을 사용하여 검증·보완될 것으로 기대되나, 비산먼지가 수도권의 미세먼지농도에 큰 기여를 하고 있다는 결론에는 큰 변화가 없을 것으로 판단된다. 따라서 수도권

미세먼지의 효과적인 관리를 위해서는 비산먼지 중에서 가장 많은 배출량을 차지하는 것으로 평가되는 도로재비산먼지배출량을 보다 정확하고 비용효과적으로 산정할 수 있는 방법론이 정립되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 도로재비산먼지의 배출량 산정법에 관한 국내·외 연구동향을 간략하게 소개하고자 한다.

2. 포장도로 재비산먼지 배출계수 산정 방법론

포장도로에는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 건설현장 등을 포함한 주변의 비산먼지 오염원으로부터의 비산먼지의 유입, 토양의 유입, 이송 중인 트럭 적재함에서의 분체상 적재물의 흘림으로 인한 먼지의 유입 등 다양한 배출원에서의 먼지의 유입이 일어나 이것들이 도로 위에 쌓이게 되는데, 차량의 통행으로 인해 상당량의 먼지가 재비산되어 대기 중으로 배출되는 일련의 과정을 반복하게 된다.⁵⁾ 또한 차량의 통행으로 인해 차량의 타이어와 브레이크의 마모로 인한 먼지와 도로표면의 마모에 의한 먼지도 상당부분 도로에 침적되는데, 이들 먼지의 성분에는 Zn, Cu, 석면 등의 중금속 및 유해물질도 포함되어 있으므로 도로재비산먼지가 최소화 되도록 해당지체가 도로에 쌓인 먼지를 비용 효과적으로 청소하고 관리하여야 한다.

한편 도로 위에 쌓인 먼지의 비산잠재력을 나타내는 척도를 통상 “silt loading”이라고 정의하는데, silt loading은 채취된 먼지 중에서 기하학적 직경이 75 μm 이하인 먼지의 무게(g)를 채취면적(m^2)으로 나눈 값, 다시 말해 단위면적당 75 μm 이하인 먼지의 무게(g)로 정의한다.⁶⁾ 따라서 silt loading 값이 크다는 의미는 도로에 차량의 운행으로 비산될 수 있는 작은 크기의 먼지가 많이 퇴적되어 있다는 의미이다.

2.1. 포장도로 비산먼지 배출계수 산정식

차량의 운행으로 포장도로에서 발생되는 비산먼지의 배출계수는 주행거리(VKT; vehicle kilometer traveled) 당 비산먼

E-mail: jungyw@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7805

Fax: 032-874-7508

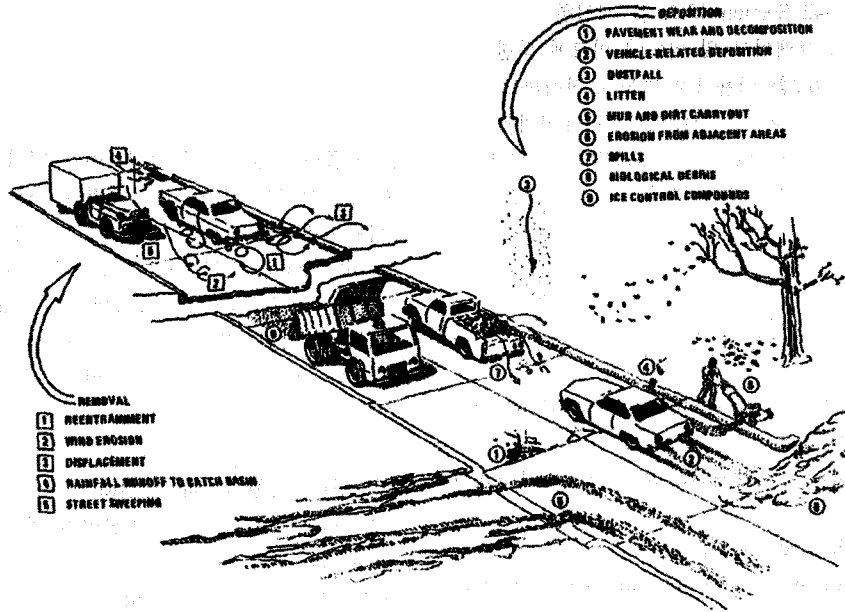


Fig. 1. Deposition and removal processes of fugitive dust on paved road.

지의 배출량(g)의 형태로 나타내는데, 통상 미국 EPA AP-42의 배출계수 산정식³⁾을 사용하여 계산된다. AP-42의 산정식은 Fig. 2⁶⁾와 같이 도로의 양쪽에 다수의 먼지농도측정기를 수평방향과 수직방향에 걸쳐 평면 형태로 적당한 지점에 배열하여 도로의 방향과 수직으로 불어오는 바람에서의 먼지농도 flux를 측정하고, 이를 풍상 측과 풍하 측의 먼지농도 flux 차이로 환산하여 이로부터 도로에서 발생하는 비산먼지의 배출량을 추정하는 방법인 소위 “upwind-downwind method”를 사용하여 개발된 것이다. Upwind-downwind method의 기본 아이디어는 차량 집단(fleet)이 측정도로를 통과할 때의 풍상·풍하 측의 먼지농도 flux 차이만큼 도로에서 비산된 먼지가 풍하 측으로 유입되어 발생된 것으로 가정한 다음, 확산모델링(dispersion modeling)을 이용하여 도로에서의 비산량을 역산하는 방식으로 도로재비산먼지의 배출계수를 산정하는 방법

이다. 또한 이 같은 방식으로 산정한 배출계수를 상관관계식으로 만들기 위해 통과하는 차량의 평균중량(tons)과 silt loading 값을 변수로 하여 회귀분석을 거쳐 만든 식이 1980년대 미국 MRI(Midwest Research Institute)에서 개발한 EPA AP-42의 최초 산정식이다.

한편 EPA의 최초 산정식의 문제점은 차량운행에 의해 재비산된 먼지뿐만 아니라 자동차 배기가스 중의 먼지, 타이어나 브레이크의 마모에 의한 먼지도 포함되어 있다는 점인데, 이로 인해 포장도로에서 재비산되는 먼지의 배출량을 과대평가하고 있다는 지적이 있어 왔다. 이는 1980년대에는 도로재비산먼지와 자동차의 배기가스 중의 먼지, 타이어마모, 브레이크 마모를 구분하여 산정할 수 있는 방법론이 개발되지 않았기 때문인 것으로 판단되는데, 2003년 12월 EPA는 이러한 문제점을 보완하고 도로재비산먼지의 배출량만을 별

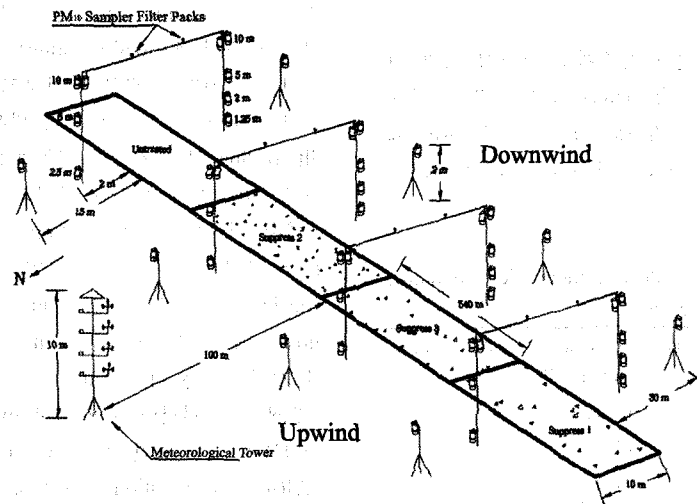


Fig. 2. Upwind-downwind method.

도로 산정하기 위해 AP-42 Section 13.2.1을 개정한 바 있다. EPA는 차량의 배기가스, 브레이크 및 타이어 마모에 의한 먼지 배출량은 EPA Mobile 6.2를 이용하여 별도로 산정하고, 이를 기존 AP-42 산정식에서 빼주는 형태로 식을 개정하였다.

개정된 미국 EPA AP-42 Section 13.2.1(2003)의 도로재비 산먼지 배출계수 산정식은 다음과 같다.⁷⁾

$$E = k \times \left(\frac{sL}{2}\right)^{0.65} \times \left(\frac{W}{3}\right)^{1.5} - C \quad (1)$$

여기에서,

E = particulate emission factor(having units matching the units of k) (g/VKT)

k = base emission factor for particle size range and units of interest(g/VKT)

sL = road surface silt loading(g/m²)

W = average weight of the vehicles traveling the road(tons)

C = emission factor for 1980's vehicle fleet exhaust, brake wear and tire wear(g/VKT)

한편 위의 식은 건조한 날(dry paved road)에 적용할 수 있으며, 강우가 있는 경우에는 강우에 의한 저감효과를 고려하여 이를 보정한다. k는 입자크기 별 배출계수 산정을 위한 보정계수이며 Table 1⁷⁾은 실험으로 구한 입자 크기에 따른 보정계수(k)를 나타낸다.

Table 1. Particle size multipliers(k) for paved road equation

Size range	Multiplier(k)		
	g/VKT ^a	g/VMT ^b	lb/VMT
PM _{2.5}	1.1	1.8	0.0040
PM ₁₀	4.6	7.3	0.016
PM ₁₅	5.5	9.0	0.020
PM ₃₀	24	38	0.082

^ag/VKT : grams per vehicle kilometer traveled

^bg/VMT : grams per vehicle mile traveled

식 (1)에서 C는 도로재비산먼지 배출계수 산정식 개발 시에 고려한 1980년대의 자동차 집단(fleet)의 배기가스, 브레이크 및 타이어 마모에 의한 먼지 배출계수로 EPA Mobile 6.2 model을 사용하여 산정되는데, 산출된 C 값은 Table 2⁷⁾에 제시한 바와 같다.

Table 2. Emission factor for 1980's vehicle fleet exhaust, brake wear, and tire wear

Particle size range	C, Emission factor for exhaust, brake wear, and tire wear(g/VKT)
PM _{2.5}	0.1005
PM ₁₀	0.1317
PM ₁₅	0.1317
PM ₃₀	0.1317

참고로 식 (1)은 PM₁₀의 경우 65개의 실험 데이터를 회귀분석하여 얻어졌고, 산정식을 만들기 위한 실험은 광범위한 도로조건을 포함하기 위해 비교적 도로표면의 먼지가 적은 일반 포장도로들과 먼지가 많이 쌓인 산업단지의 포장도로들 중의 특정도로를 선정하여 수행되었다. 또한 실험은 교통 흐름이 원활하여 거의 일정한 속도로 차량이 주행할 수 있는 평탄한 도로에서 수행되었다. 따라서 식 (1)의 정확도는 silt loading 0.03~400 g/m², 평균차량무게 2.0~42 tons, 평균차량속도 16~88 km/hr와 같은 배출계수 개발 당시의 조건이 적용된다면, PM₁₀의 경우 A의 quality rating을 가지며, PM_{2.5}의 경우에는 B의 quality rating을 가지는 것으로 평가되고 있다.

2.2. 도로 표면의 silt loading

식 (1)에 의하면 도로재비산먼지 배출량은 도로 표면 위의 silt loading과 도로를 주행하는 평균 차량 증량에 따라 결정되며, 전술한 바와 같이 silt loading은 채취한 시료 중에 기하학적 직경이 75 μm 이하인 먼지(silt)의 도로 단위면적 당 무게를 말하는데, 이는 차량운행으로 인한 도로면지의 재비산 가능 잠재력을 의미한다.

Silt loading은 도로재비산먼지의 배출량에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나이다. 일반적으로 silt loading은 교통특성(속도, 교통량, 대형차량 분율), 도로특성(곡률, 차선 수, 노면유무), 토지이용도(농업지역, 도시지역, 신설 주거지역)와 지역적·계절적 인자(강설, 결빙, 풍식) 등의 제한 조건에 따라 변화한다. 결국 이 같은 silt loading의 변화 특성을 충분히 모니터링 하기 위해서는 원본적으로 해당 지역에서 시간적·공간적으로 해상도가 높은 silt loading 자료가 확보되어야 하고, 또한 이와 동등한 수준의 해상도를 가지는 교통량 정보가 확보되어야 이를 통해 해당 지역의 도로재비산먼지의 배출량 추정이 보다 정확하게 이루어질 수 있다.

이 같은 이유로 미국 EPA는 해당 도로의 silt loading 값의 측정을 적극적으로 권장하고 있으나, 사정 상 측정값의 확보가 불가능하여 불가피하게 EPA가 추천하는 silt loading의 추천값(default value)을 사용할 시에는 산정된 배출계수의 정확도의 질(quality rating)의 등급은 두 단계 정도 낮은 값이 산정된다는 것을 명시하고 있다. 따라서 도로재비산먼지의 배출량 산정 시에 보다 많은 지점에서 해당 지역도로의 silt loading 값을 가능한 정확하게 측정하는 것이 보다 정확한 도로재비산먼지 배출량 산정의 관건이 된다.

한편 기존의 AP-42 section 13.2.1(1993)⁸⁾에서는 silt loading의 추천값을 대상 도로의 일평균통행량(ADT; Average Daily Traffic)과 도로의 표면상태(normal conditions, worst-case conditions)에 따라 0.1~3.0 g/m²의 범위로 제시하였는데, 2003년 개정판에는 이를 Table 3⁷⁾으로 대체하였다.

Table 3에 나타난 바와 같이 미국 EPA AP-42 section 13.2.1(2003)는 도로 표면의 silt loading이 통행량에 따라 정상적인 조건(normal condition)에서는 0.03(0.015)~0.6 g/m²의 범위의 값을 제시하였고, 겨울철 결빙 구간의 도로에 모래와 같은 미

Table 3. Ubiquitous silt loading default values with hot spot contributions from anti-skid abrasives(g/m²)

ADT category (vehicles/day)	<500	500- 5,000	5,000 -10,000	>10,000
Ubiquitous baseline(g/m ²)	0.6	0.2	0.06	0.03 (0.015 limited access)
Ubiquitous winter baseline multiplier during months with frozen precipitation	× 4	× 3	× 2	× 1
Initial peak additive contribution from application of antiskid abrasive(g/m ²)	2.0	2.0	2.0	2.0
Days to return to baseline conditions (assume linear decay)	7.0	3.0	1.0	0.5

끄림방지용 물질을 뿌리는 경우와 같은 최악의 경우(worst condition)에는 교통량에 따라 기본 추천값에 1~4배 정도 곱할 것을 제시하고 있다. 또한 미끄럼방지용 물질의 살포로 인한 도로의 silt loading에 대한 최초 기여를 약 2.0 g/m² 정도로 제시하고 있다.

2.3. 도로를 통행하는 차량의 평균 무게(W)

식 (1)을 적용하여 포장도로의 비산먼지 배출계수를 산정하는데 있어 또 하나의 중요한 인자는 도로를 통행하는 차량의 평균 무게(W)이며, 이는 대상 도로의 통행량과 그 구성비의 조사를 통해서 구할 수 있다. 예를 들면, 대상 도로의 통행차량 중 2톤 트럭이 구성비로 99%의 비율을 차지하고 나머지 1%를 20톤 트럭이 차지한다면 이때 대상도로 통행 차량의 평균무게는 2.2톤이 된다. 즉, 식 (1)은 개개의 통행차량에 의한 비산먼지 배출계수를 산출하기 위한 식이 아니라 특정 도로 구간을 통행하는 전체 차량에 의한 하나의 대표적인 배출계수를 산정하는 실험식이다. 참고로 미국 CARB (California Air Resources Board)의 경우 MRI(Midwest Research Institute)에서 조사한 차량의 평균 무게인 2.4톤을 적용하고 있다.^{9,10)}

참고로 우리나라는 현재까지 식 (1)에서 C를 고려하지 않은 식을 이용하여 도로재비산먼지의 배출량을 산정하고 있으며, 해당 지역의 차량 집단의 평균무게가 아닌 차종별 주행 거리에 차종 별 무게를 사용하여 차종별로 도로재비산먼지 배출량을 산출하여 전체 차종에 의한 도로재비산먼지 배출량으로 합산하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 교통정보에 관한 데이터베이스를 그대로 사용하기에는 편리한 장점이 있으나 도로 구간 별로 차량의 구성비가 판이하게 다른 경우 배출량에 큰 오차를 초래할 가능성이 클 것으로 사료된다. 그 이유는 식 (1)의 산정식에서 배출계수가 silt loading 값보다 오히려 차량의 평균중량의 1.5승에 비례할 정도로 차량의 중량에 더욱 민감하기 때문이다.

3. Silt loading의 측정

3.1. 재래식방법

통상적으로 포장도로의 silt loading 측정은 미국 ASTM-C-136 method에 준하여 수행되며, 상세한 시료 채취 및 분석 방법은 EPA AP-42 Appendix C.1, C.2에 수록되어 있다.⁷⁾ 이에 따르면 포장도로 표면의 시료를 채취하는 방법(이하 재래식 방법)에는 빗자루를 사용하는 broom swept method와 진공청소기를 사용하는 vacuum swept method가 있다. Silt loading 값은 채취한 시료를 vibratory shaker를 사용하여 표준망체로 분류한 다음, 200 mesh(<75 μm) screen을 통과한 silt (<75 μm)의 무게를 측정 후 이를 시료 채취 면적으로 나누면 얻어진다.

3.2. 이동먼지측정시스템을 이용한 silt loading의 측정

차량이 통행 중인 도로에서 재래식 방법을 사용하여 silt loading을 측정한다는 것은 시간적·공간적으로 제약이 매우 크며, 사실상 불가피하게 도로 일부 구간의 교통을 차단해야 하고, 또한 이로 인해 시료 채취 중인 연구원들의 교통사고 위험도 커지게 된다. 따라서 측정의 빈도도 현실적으로 제한될 수밖에 없어 측정된 데이터의 신뢰도가 문제가 될 소지가 크다. 더욱이 통행량이 많고 자동차의 운행속도가 빠른 고속도로나 도심 한가운데에서 진공청소기를 사용한 vacuum swept method를 수행한다는 것은 현실적으로 거의 불가능하다.

최근 미국의 DRI(Desert Research Institute)에서는 진술한 재래식 silt loading 측정법의 문제점을 획기적으로 개선할 수 있는 방법으로 차량을 이용한 TRAKER(Testing Re-entrained Aerosol Kinetic Emissions from Roads) method를 2001년에 개발한 바 있다.¹¹⁾ 한편 국내에서도 수도권 주요 도로에 재래식 silt loading 측정법을 적용하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 이에 대한 대안으로 미국 DRI의 TRAKER method를 벤치마킹한 국내형 이동먼지측정시스템을 2004년에 세계에서 두 번째로 개발한 바 있고, 현재는 이를 이용하여 수도권 일부 지역의 주요 도로의 silt loading을 시범적으로 측정하고 있는 상황이다.^{12,13)}

실시간 이동먼지측정시스템의 원리는 다음과 같다. 즉, 먼지농도측정기 한 대는 Fig. 3과 같이 차량의 후드전면에 설치한 시료채취관을 통해서 차량 전면에서 유입되는 배경먼지

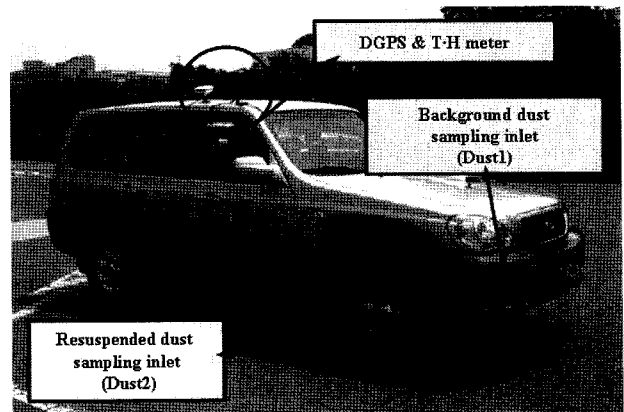


Fig. 3. Mobile dust monitoring system.

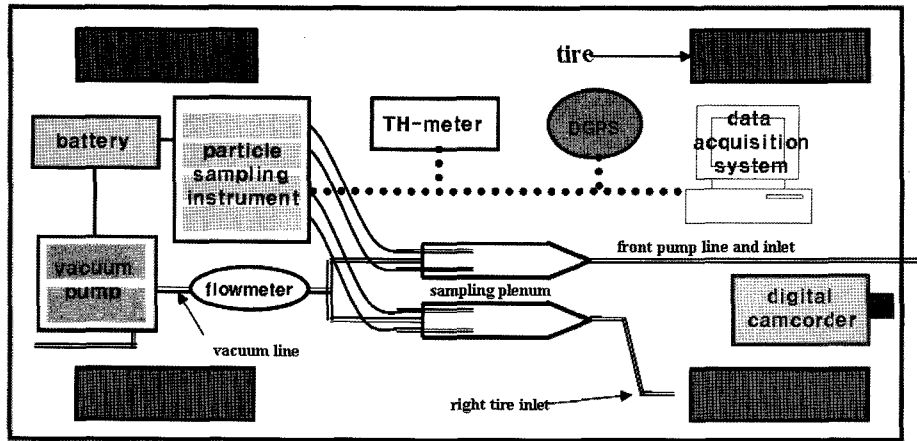


Fig. 4. Schematic of mobile dust monitoring system.

농도(background PM₁₀ concentration, Dust1)를 측정하고, 다른 한 대는 실험차량의 앞 타이어 바로 뒤에 설치한 시료채취관을 통해서 유입되는 도로재비산먼지의 농도(resuspended PM₁₀ concentration, Dust2)를 측정한다. 두 대의 먼지농도측정기에서 동일 시간에 측정된 먼지농도의 차이(ΔDust)는 차량의 속도가 빠를수록 도로에 쌓인 먼지가 많을수록 더욱 커지게 되며, 이러한 정성적인 경향을 이론적 근거로 이동먼지측정시스템을 이용하여 ΔDust를 측정하고 차량의 속도를 알면 해당지점의 silt loading을 구할 수 있는 기본 원리가 나온다.

보다 구체적으로 말하자면, 먼지농도차(ΔDust)는 차량의 주행속도, 도로표면의 silt loading에 크게 좌우되며, silt의 특성, 도로의 특성(아스팔트·콘크리트, 도로의 표면 상태 등), 온도, 습도 등에도 다소 관계가 있을 것으로 예상할 수 있다. 즉, 먼지농도 차(ΔDust)는 다음의 식 (2)와 같이 silt loading과 차량의 주행속도(vehicle speed)의 독립함수들의 곱의 형태로 가정한다.

$$\Delta Dust = C \cdot f(\text{silt loading}) \cdot g(\text{vehicle speed}) \quad (2)$$

여기에서 C는 silt의 특성 및 도로의 특성 등에 의해 좌우되는 상수로 가정된다. 참고로 미국 DRI의 이동측정시스템이 국내에 그대로 적용될 수 없는 이유는 국내의 silt 및 도로 특성이 미국과는 다르기 때문이며 이 같은 이유로 식 (2)의 상관관계식은 국내 포장도로에서 직접 구해야 한다.

부연하여 설명하자면 이동측정시스템을 주행하여 해당 지점에서 먼지농도 차(ΔDust)와 차량의 속도를 측정하고 식 (2)와 같은 상관관계식을 이용하면 역으로 포장도로의 silt loading 값을 추정할 수 있다는 것이 이동먼지측정시스템의 기본 원리이다.

이동먼지측정시스템은 Fig. 4에 개략적으로 도시한 바와 같이 크게 시료채취시스템(dust sampling system)과 데이터처리시스템(data acquisition system)으로 구성되어 있으며, 측정 시 온·습도 정보를 제공하기 위한 온·습도계와 차량의 위치정보 및 속도 정보를 제공하는 GPS가 탑재된다.

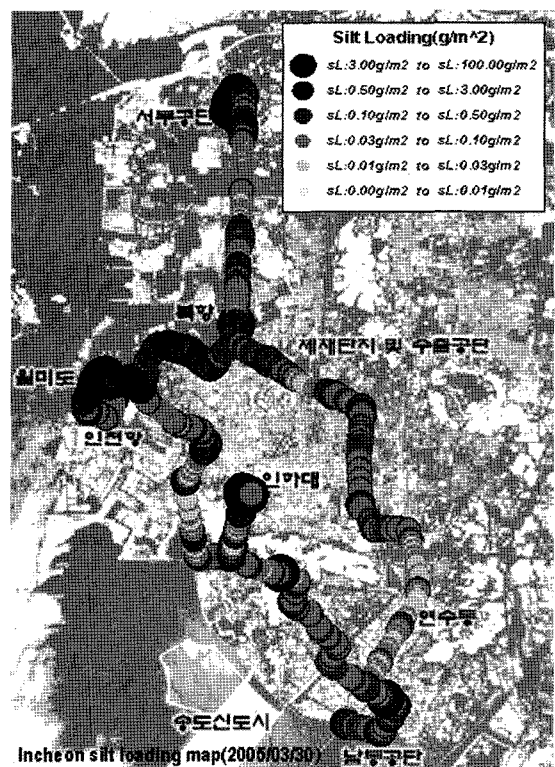


Fig. 5. Example of silt loading map(Incheon; March, 2005).

참고로 Fig. 5는 2005년 봄에 인천지역의 특정도로에서 실시간으로 측정된 silt loading 값을 지도상에 도시한 것인데, silt loading이 높은 지역과 낮은 지역을 일목요연하게 잘 보여 주고 있다. 따라서 이러한 형태의 silt loading map을 해당 지자체에서 도로청소관리에 이용한다면 먼지가 많은 지역을 집중적으로 청소할 수 있는 등 비용효과적인 청소행정체계 수립에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 도로 재비산먼지 배출계수의 실시간 측정에 관한 최근의 시도 사례

EPA AP-42의 포장도로 재비산먼지 배출계수 산정식에 대

한 보완으로서 이동측정시스템에 관한 연구가 미국의 DRI와 University of California at Riverside에서 최근에 수행되고 있다. 한편 이러한 연구들의 궁극적인 목적은 이동측정시스템을 이용하여 도로재비산먼지 배출계수(g/VKT)를 실시간으로 직접 구하고자 함에 있는데, 연구의 동기는 AP-42의 산정식이 차량속도에 의한 배출계수의 변화를 명시적으로 나타내지 못하고 있다는 점에 기인한다. 참고로 AP-42의 산정식은 배출계수에 대한 차량속도에 의한 효과가 내재적(implicit)으로 포함되어 있는데, 이는 엄밀히 말해 정상상태에서 특정도로의 silt loading은 차량의 속도에 좌우되기 때문이다. 즉, 차량속도가 빠른 도로구간에서는 차량의 빠른 속도로 인해 먼지비산량이 증가되어 결과적으로 silt loading 값이 작아지게 된다.

먼저 DRI의 TRAKER 방법은 Kuhns 등¹¹⁾에 의해 당초 silt loading을 측정하기 위한 목적으로 개발된 기술인데, 최근에는 이를 업그레이드하여 silt loading 대신에 포장도로에서 'emission potential'을 직접 측정하는 연구도 병행하여 수행하고 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾ Emission potential의 단위는 $[g/VKT]/[m/s]$ 로 그 물리적 의미는 단위 차량속도와 주행거리(km) 당 차량으로 인해 발생하는 도로에서의 먼지배출량을 의미하며, emission potential에 차량의 주행속도를 곱하면 배출계수가 구해진다. 즉, 배출계수 산정에 차량속도의 효과가 추가된 형태이다.

Emission potential을 측정하기 위해서는 silt loading 측정과 마찬가지로 먼지농도차이와 emission potential과의 상관관계식을 만들어야 하는데, DRI에서는 TRAKER 방법과 upwind-downwind 방법을 비교한 실험을 통해 emission potential을 계산할 수 있는 상관관계식을 만들고 있다. 그러나 현재로서는 emission potential의 경우 비교적 실험이 용이한 비포장도로에서 적용되는 상관관계식만 존재하고, 상대적으로 먼지발생량이 적은 포장도로에서의 상관관계식은 부정확하다. 요약하면, 이 방법의 장점은 측정지점의 emission potential에 차량의 속도를 곱하면 해당차량의 emission factor를 손쉽게 구할 수 있다는 점이다. 그러나 단점으로는 차량 무게에 따라 포장도로에서 발생하는 비산먼지의 emission potential이 달라질 수 있다는 점이고 또한 타이어마모 및 브레이크마모, 차량의 배기가스가 포함되어 있다는 점이 큰 단점이다.

한편, University of California at Riverside의 Fitz 등^{17,18)}은 DRI의 연구와 거의 같은 시기인 2001년부터 차량을 이용하여 포장도로에서 발생하는 도로재비산먼지 배출계수를 실시간으로 측정하는 기술인 SCAMPER(System of Continuous Aerosol Monitoring of Particulate Emissions from Roadways)를 CARB(California Air Resources Board)의 지원 하에 개발하고 있다. 이 방법의 주된 아이디어는 이동측정시스템에 직접 upwind-downwind method를 적용하는 것으로 요약하여 말할 수 있다. 즉, 이동먼지측정시스템의 풍상(upwind)에 해당되는 차량 전면의 먼지농도측정기를 설치하여 전면의 먼지농도 flux를 측정하고, 풍하(downwind) 측에 해당되는 차량의 후면에는 일정 거리를 두고 장착한 소형 trailer 위에 소형

sampling tower를 설치하여 풍하 측의 먼지농도 flux를 측정 한 후, 측정된 두 flux의 차이에 차량의 전면 면적을 곱하게 되면 이로부터 운행 중인 차량의 비산먼지 배출계수를 실시간으로 산정할 수 있다는 것이 주요 아이디어이다. 한편 이 방법의 장점은 차량에 의해 발생한 먼지가 넓게 확산되기 전에 차량의 전면과 후면의 먼지 flux를 측정하면, 주행 중의 자동차 주위의 유체의 흐름에 관한 모델링을 필수적으로 요구하는 먼지확산모델을 사용하지 않고도 단순히 mass balance만으로 배출계수를 구할 수 있다는 점이라고 Fitz 등¹⁷⁾은 주장하고 있다. 특히 이 방법은 특정도로에서 특정 차량이 특정 속도로 주행할 경우 EPA 산정식에 의존하지 않고도 배출계수를 실시간으로 직접 구할 수 있는 장점이 있을 것으로 판단된다. 그러나 실험에 사용한 차량과 차종이 다르거나 주행속도가 달라질 경우에는 배출계수 또한 달라질 것으로 사료된다.

종합하면, 이들 두 방법의 공통인 특징으로는 2000년대의 보다 첨단 기술의 사용으로 1980년대에 개발된 AP-42의 산정식 대신에 보다 신뢰성 있고 해상도가 높은 배출계수를 구하고자 하는데 궁극적인 목적이 있는 것으로 평가된다. 현재 미국 Las Vegas 시에서는 두 방법을 병행하여 특정도로에서의 먼지 배출계수를 구하는 연구를 수행 중인데, 궁극적인 목적은 두 방법을 상호 비교하여 보다 합리적인 배출계수 산정 방안을 도출하기 위한 것으로 사료된다. 그러나 아직까지는 미국에서도 EPA AP-42 모델이 도로재비산먼지배출량 산정에 공식적으로 사용되고 있으며, 국내 대기오염물질 배출량을 산정하는 CAPSS(Clean Air Policy Support System)에서도 현재 EPA AP-42 모델을 도로재비산먼지 배출계수 산정에 공식적으로 사용하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 도로재비산먼지의 배출량 산정법에 관한 연구동향을 개략적으로 소개하였다. 전술한 바와 같이 EPA AP-42의 배출량산정식은 비교적 불확도가 큰 것으로 알려져 있지만 지금까지 미국과 국내에서는 AP-42의 도로재비산먼지 산정식을 공식적으로 배출량산정에 이용하고 있다. 이동먼지측정시스템은 비용효과적인 도로재비산먼지의 배출량산정뿐만 아니라 Fig. 5에 제시한 바와 같이 재래식방법으로는 현실적으로 불가능한 silt loading의 지역별 비교를 가능하게 함으로써 향후 해당 지역의 청소효과의 평가 및 효율적인 청소계획의 수립에도 일조를 할 것으로 기대된다. 향후 미국에서의 사례와 같이 silt loading 측정과 실시간 배출계수 측정의 장·단점을 분석하여 국내의 상황에 적합하게 이동먼지측정시스템의 개선도 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. 국립환경연구원, 미세먼지 배출계수 개발 및 inventory 작성과 배출량 산정연구(2002).
2. 김운수, 서울시 미세먼지 배출량 조사·분석 및 관리방안 연구, 서울시정개발연구원(2004).
3. 김현구, 정용원, 홍지형, “전국 시도별 비산먼지 배출량 산정(2002년도),” 한국대기환경학회지, **20**(2), 263~276 (2004).
4. 국립환경과학원, 대도시 대기질 관리방안 조사연구-미세먼지 생성과정 규명과 저감대책수립, 최종보고서(2005).
5. U.S. Environmental Protection Agency, Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, Fifth edition, Volume I: Stationary point and area sources, Research Triangle Park, NC(1995).
6. Watson, J. G. and Chow, J. C., Reconciling urban fugitive dust emission inventory and ambient source contribution estimates : Summary of current knowledge and needed research, DRI Document No. 6110. 4F, Desert Research Institute, Reno, NV.(2000).
7. U.S. Environmental Protection Agency, Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, Fifth edition, Volume I: Stationary point and area sources, Section 13.2.1 Paved roads(2003).
8. U.S. Environmental Protection Agency, Emission factor documentation for AP-42, Section 13.2.1 Paved roads. EPA Contract No. 68-D0-0123, Work Assignment No. 44, MRI Project No. 9712-44(1993).
9. U.S. California Air Resources Board Home page, <http://www.arb.ca.gov/ei/areasrc/onehtm/one7-9.htm>(1997).
10. Muleski, Greg. Improvement of Specific Emission Factors (BACM Project No. 1), Final Report. Midwest Research Institute(1996).
11. Kuhns, H., Etyemezian, V., Landwehr, D., MacDougall, C., Pitchford, M., Green, M., “Testing Re-entrained Aerosol Kinetic Emissions from Roads(TRAKER) : a new approach to infer silt loading on roadways,” *Atmos. Environ.*, **35**(16), 2815~2825(2001).
12. 환경부, 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구, 최종보고서, 국립환경과학원(2005).
13. 국립환경과학원, CAPSS 비산먼지 배출량 신뢰도 향상을 위한 배출계수 보완, 최종보고서(2006).
14. Etyemezian, V., Kuhn, H., Gillies, J., Green, M., Pitchford, M., Watson, C., “Vehicle-based road dust emission measurement - Part I : Methods and calibration,” *Atmos. Environ.*, **37**(4), 4559~4571(2003).
15. Kuhns, H., Etyemezian, V., Gillies, J., Green, M., Hendrickson, K., McGown, M., Pitchford, M., “Vehicle-based road dust emission measurement - Part II: effect of precipitation, wintertime road sanding, and street sweepers on inferred PM₁₀ emission potentials from paved and unpaved roads,” *Atmos. Environ.*, **37**(4), 4573~4582(2003).
16. Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Chow, J., Hendrickson, K., McGown, M., Pitchford, M., “Vehicle-based road dust emission measurement - Part III: effect of speed, traffic volume, location, and season on PM₁₀ road dust emissions in the Treasure Valley, ID,” *Atmos. Environ.*, **37**(32), 4583~4593(2003).
17. Fitz, D., Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors from paved roads in california, final report contract No. 98-723(2001).
18. Fitz, D., Bumiller, K., “Measurement of PM₁₀ Emission Rates from Roadways in Las Vegas, Nevada Using a SCAMPER Mobile Platform with Real-Time Sensors,” 14th International Emission Inventory Conference: Transforming Emission Inventories - Meeting Future Challenges Today, EPA, Las Vegas, NV(2005).