한국대기환경학회지 제 23 권 제 5 호
J. KOSAE Vol. 23, No. 5 (2007) pp. 596~611
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

포장도로 재비산먼지 배출계수 산정을 위한 silt loading의 실시간 측정시스템 개발과 적용

Development and Application of Real-time Measurement System of Silt Loading for Estimating the Emission Factor of Resuspended Dust from Paved Road

한세현 · 원경호 · 장기원 · 손영민 · 김정숙 · 홍지형[1] · 정용원*
인하대학교 환경공학과, [1]국립환경과학원 대기총량과

(2007년 7월 5일 접수, 2007년 9월 10일 채택)

Sehyun Han, Kyung-Ho Won, Ki-Won Jang, Young-Min Son, Jeong-Suk Kim, Ji-Hyung Hong[1] and Yong-Won Jung*
Department of Environmental Engineering, Inha University
[1]Environmental Cap Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received 5 July 2007, accepted 10 September 2007)

Abstract

Resuspended dust from paved roads in Seoul and Incheon metropolitan areas is regarded as one of the major PM_{10} sources in these areas, according to the recent emission estimates using the emission factors compiled in AP-42. It is well known that the AP-42 model for estimating PM_{10} emissions from paved roads requires information on silt loadings of particular paved roads. The conventional AP-42 method (vacuum swept method) for road silt sampling, however, is expensive, time consuming, and dangerous. These drawbacks led us to develop a Mobile Dust Monitoring System (MDMS) capable of doing real time measurements of silt loading of paved roads, thereby we could get higher resolution silt loading data both in terms of time and space without too much human efforts and danger.

In this study, for the real-time measurement of silt loading of paved roads, the principle used in the TRAKER method of U.S. Desert Research Institute was employed and the entire sampling systems including data acquisition system were designed for theses purpose and mounted on a SUV. The correlation between the silt loading measured by vacuum swept method and the speed corrected ΔDust was derived for the vehicle-based silt loading measurements, and then the variations of silt loading on paved roads were surveyed using the MDMS in test routes of Seoul and Incheon.

From the results of real-time measurements, temporal and spatial variations of silt loading data together with the

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-860-7508, E-mail : jungyw@inha.ac.kr

existence of hot spots were observed for paved roads in Seoul and Incheon. The result of this study will be employed to estimate fugitive dust emissions from paved roads.

Key words : Fugitive dust, Emission factor, PM_{10}, Resuspended dust, Silt loading

1. 서 론

인구와 산업, 교통이 밀집해 있는 서울과 인천 등의 수도권지역에서는 자동차가 대기 중 미세먼지(PM_{10})의 주요 발생원으로 알려져 있으며 이를 저감하기 위한 관리대책이 수립·시행되고 있다(환경부, 2005a). 자동차에 의해 발생되는 미세먼지는 크게 자동차연료의 연소과정에서 생성되는 미세먼지(주로 $PM_{2.5}$)와 도로표면에 쌓여 있던 미세한 퇴적물 또는 먼지가 자동차의 운행으로 비산되어 발생하는 '도로재비산먼지'(resuspended road dust)로 구분할 수 있다. 이 외에 자동차 운행으로 타이어 및 브레이크, 도로표면이 마모되는 과정에서 미세먼지가 발생된다(Abu-Allaban *et al.*, 2003; EPA, 1993).

최근 서울시와 인천시를 대상으로 한 미세먼지 배출량 산정에 관한 연구들은 포장도로에서 재비산되는 미세먼지가 비산먼지의 형태로 발생하는 미세먼지(PM_{10})의 약 60% 이상으로 가장 크게 기여하고 있는 것으로 추정하고 있다(정용원 등, 2006; 환경부, 2005b; 김운수, 2004; 김현구 등, 2004). 또한 PMF (Positive Matrix Factorization) 수용모델(receptor model)을 이용한 대기 중 미세먼지 농도에 대한 각 오염원들의 기여도 연구결과에 의하면 미세먼지(PM_{10})에 대한 도로먼지를 포함한 토양관련 오염원의 기여도가 서울 전농동의 경우 약 36%, 인천 용현동의 경우 약 27% 정도로 높은 수준을 보이는 것으로 추정하고 있다(국립환경과학원, 2006a). 한편 미국의 경우 대표적인 대기환경기준(NAAQS: National Ambient Air Quality Standard) 미달성 지역들(non-attainment areas)의 배출량 산정결과 및 수용모델을 이용한 연구들에서 포장도로 및 비포장도로의 재비산먼지가 도시지역의 일차 미세먼지(primary PM_{10})에 가장 크게 기여하는 것으로 보고하고 있다(Watson and Chow, 2000; Gaffney *et al.*, 1995; Chow *et al.*, 1992). 이러한 연구결과들은 비산먼지 배출량 산정식의 불확도(uncertainty)가 상당히 크고, 수용모델결과와 차이가 있다는 점을 감안하더라도 수도권지역의 미세먼지 관리를 위해서는 사업장 및 자동차에서 배출되는 미세먼지뿐만 아니라 비산먼지 관리 또한 중요하다는 것을 시사한다(정용원 등, 2006).

차량의 운행으로 포장도로에서 발생되는 비산먼지(이하 포장도로 재비산먼지)의 배출계수는 미국 EPA AP-42의 경험식(식(1) 참고)을 사용하여 계산되는데, 도로표면 위의 silt loading (sL)과 도로를 주행하는 차량들의 평균 무게(W)에 따라 결정된다(EPA, 2006). 포장도로의 silt loading (g/m^2)은 해당 도로의 단위 면적당 쌓여 있는 기하학적 직경 75 μm 이하의 silt의 무게를 말하며, 이는 차량운행으로 인한 도로먼지의 재비산 가능 잠재력을 의미한다. 포장도로의 silt loading 측정은 EPA AP-42 Appendix C.1, C.2에 제시되어 있는 방법(이하 재래식 방법)에 의해 이루어지는데, 진공청소기(vacuum swept method)나 빗자루(bloom swept method)를 이용하여 포장도로 표면에 쌓여 있는 먼지시료를 채취하고, 체분석(sieve analysis)을 통해 silt (< 75 μm)의 무게를 측정한 후, 이를 시료를 채취한 도로 면적으로 나누어 silt loading을 계산한다(EPA, 1995). Silt loading은 교통특성(차량속도, 교통량 등), 도로특성(곡률, 차로수, 노변유무), 토지이용도, 지역 및 계절적 요인 등의 제반조건에 따라 변화하는 경향이 있는데, 이 같은 silt loading의 변화특성을 고려한 시간적·공간적 해상도가 높은 silt loading 값이 확보되어야 배출계수의 정확도가 향상된다(정용원 등, 2006; EPA, 2006). 그러나 EPA AP-42의 재래식 방법을 이용한 silt loading 측정법은 시간적·공간적으로 제약이 매우 크며, 도로교통을 차단해야 하고 많은 비용과 인력이 소요되는 등의 단점이 있어, 국내에 이를 적용하기에는 어려움이 크다(Langston *et al.*, 2007; 환경부, 2005b; Kuhns *et al.*, 2001; Fitz, 2001).

최근 미국 내에서는 AP-42의 포장도로 재비산먼지 배출계수 산정식이 높은 불확도를 지닌다는 문제

제기(Venkatram, 2000)가 있어왔으며, 이를 수정 · 보완하거나 배출계수의 측정방법을 개선하려는 연구들이 진행되고 있다(정용원 등, 2006). EPA에서는 배출계수의 정확도를 향상시키는 위해 AP-42의 산정식을 일부 수정하였으며(EPA, 2006), 미국의 DRI (Desert Research Institute)와 캘리포니아 대학(University of California in Riverside)에서는 GPS (Global Positioning System) 기술과 차량을 이용하여 실시간으로 도로재비산먼지의 배출계수를 측정하기 위한 연구들을 수행해오고 있다(Fitz and Bumiller, 2005; Etyemezian *et al.*, 2003a, b; Fitz, 2001). 이러한 실시간 배출계수 측정기술들은 도로에서 재비산되는 미세먼지를 차량(또는 트레일러)에 탑재한 실시간 먼지농도 계측기기로 측정하여 배출계수를 구하는 방법으로 AP-42의 산정식을 사용하지 않고 시간적 · 공간적 해상도가 향상된 배출계수를 손쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있다. Langston *et al.* (2007)은 차량을 이용한 실시간 배출계수 측정방법들과 AP-42의 재래식 silt loading 측정방법의 상호 비교연구를 진행한 바 있다. 한편 국내에서도 포장도로 비산먼지 배출계수를 산정하기 위해 재래식 silt loading 측정방법의 대안으로 미국 DRI의 TRAKER (Testing Re-entrained Aerosol Kinetic Emissions from Roads) 방법론(Kuhns *et al.*, 2001)을 벤치마킹한 국내형 이동먼지측정시스템을 개발하여, 수도권 지역의 주요 도로의 silt loading을 시범적으로 측정하고 있다(국립환경과학원, 2006b; 환경부, 2005b).

이에 본 연구에서는 포장도로의 silt loading을 실시간으로 측정하기 위한 이동먼지측정시스템의 개발과정을 소개하고, 이를 적용한 silt loading 측정사례를 중심으로 살펴보았다. 측정은 서울시와 인천시의 일부 포장도로를 대상으로 하였으며, 지역 및 계절에 따른 silt loading의 변동 특성을 중점적으로 분석하고 미국의 배출량 산정연구들에서 제시한 silt loading 값과 비교 · 검토하였다.

2. 포장도로 비산먼지 배출계수 산정식

포장도로에서 발생되는 비산먼지 배출량은 미국 EPA AP-42 배출계수(E)에 활동도인 VKT (vehicle kilometer traveled)를 곱하여 계산된다. 최근 개정된 AP-42의 포장도로 재비산먼지 배출계수 산정식은 다음과 같다(EPA, 2006).

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

여기서, E (g/VKT)는 포장도로 재비산먼지의 배출계수, k는 입자보정계수(PM_{10}의 경우 4.6 g/VKT), sL (g/m^2)은 도로표면에 쌓여 있는 silt loading, W (short-tons)는 도로를 통행하는 차량의 평균 무게이다. 그리고 C (g/VKT)는 도로재비산먼지 배출계수 산정식을 개발할 당시인 1980년대 자동차 집단(fleet)의 배기가스, 브레이크 및 타이어마모에 의한 먼지 배출계수로 EPA Mobile 6.2 모델을 사용하여 계산되며, PM_{10}의 경우 0.1317 g/VKT를 적용한다. 한편 위의 식은 건조한 날(dry paved road)에 적용할 수 있으며, 강우가 있는 경우에는 강우에 의한 저감효과를 고려하여 이를 보정한다.

3. 실험방법

3.1 이동먼지측정시스템의 원리 및 구성

3.1.1 측정원리

이동먼지측정시스템의 원리는 광산란(light scattering) 방식의 두 대의 먼지농도측정기(DustTrak #8520, TSI Inc.)를 사용하여 차량의 주행으로 앞 타이어 후면에서 재비산되는 먼지농도를 실시간 측정하고, 차량속도와의 관계식을 적용하여 측정도로의 silt loading 값을 구하는 것이다. 즉, 먼지농도 측정기

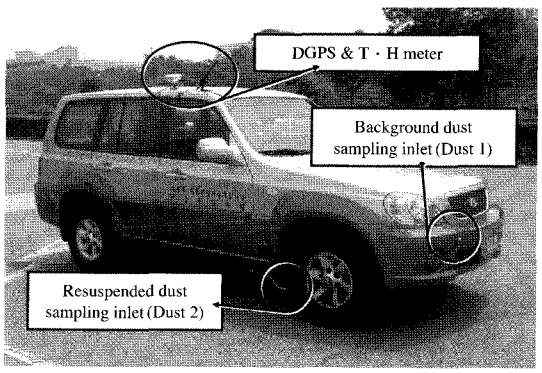


Fig. 1. Mobile Dust Monitoring System (MDMS) for real-time silt loading measurement.

한 대는 그림 1과 같이 차량의 앞 범퍼에 설치한 시료채취관(sampling inlet)을 통해서 차량 전면에서 유입되는 배경먼지농도(Background PM_{10} concentration, Dust1)를 측정하고, 다른 한 대는 실험차량의 앞 타이어 바로 뒤에 설치한 시료채취관을 통해서 유입되는 도로재비산먼지의 농도(resuspended PM_{10} concentration, Dust2)를 측정한다. 이때 두 대의 먼지농도측정기에서 측정된 먼지농도의 차이(ΔDust)가 차량의 주행으로 타이어 뒤에서 재비산되는 먼지농도를 나타내게 된다. 이러한 ΔDust는 측정차량의 속도가 빠를수록, 도로에 쌓인 먼지량(silt loading)이 많을수록 증가하는 경향을 나타내는데, 다음의 식 (2)와 같이 silt loading과 차량의 주행속도(vehicle speed)의 독립함수의 곱의 형태로 가정할 수 있다.

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

여기서 C는 silt 및 도로의 특성 등에 의해 좌우되는 상수로 가정된다. 결국 식(2)와 같은 형태의 상관관계식을 도출하고, 특정도로에서 ΔDust와 차량속도를 측정하면 역으로 포장도로의 *silt loading* 값을 추정할 수 있다는 것이 이동먼지측정시스템의 기본원리이다(정용원, 2006).

3.1.2 측정시스템의 구성

측정차량(그림 1)은 자동변속 2WD 현대 테라칸(Terracan EX250, 2002)으로 공차중량은 약 2,000 kg, 타이어 규격은 P255/70 R15이며, 실험 시 타이어의 공기압은 약 35 psi 수준을 유지한다. 이동먼지측정시스템은 그림 2에 개략적으로 도시한 바와 같이 시료채취시스템(dust sampling system)과 데이터처리시스템(data acquisition system)으로 구성되어 있으며, 측정시 온·습도 정보를 제공하기 위한 온·습도계(T · H meter #8722, TSI Inc.)와 차량의 위치정보(TM 좌표 등) 및 속도 정보를 제공하는 DGPS (Differential Global Positioning System: Stellar 2000 DGPS)가 탑재된다.

이동먼지측정시스템에 탑재된 시료채취시스템은 크게 측정장비와 측정지원장비로 분류할 수 있다. 측정 장비로는 실시간 측정이 가능한 광산란 방식의 먼지농도측정기인 TSI사의 DustTrak 2대와 먼지의 입경분포를 측정하는 Grimm사의 Potable Aerosol Spectrometer (model #1.108, 이하 PAS) 1대를 사용하며, 필요시 측정기기를 추가 장착할 수 있도록 구성하였다. DustTrak은 흡입유량이 1.7 L/min으로 0.001 ~ 100 mg/m^{3}의 범위의 먼지농도를 최소 1초 간격으로 측정이 가능하며, 본 연구에서는 PM_{10} 농도를 측정하기 위해 10 μm SSI (Size-Selective Inlet)을 사용하였다. PAS의 흡입유량은 1.2 L/min으로 0.3 ~ 20 μm 크기의 입자를 15채널로 측정하여 최소 6초 간격으로 먼지의 입경별 수 농도를 측정한다.

측정차량에는 앞서 언급한 바와 같이 배경먼지와 타이어 뒤에서 재비산되는 먼지를 흡입하기 위한 2개의 시료채취관이 있는데, 그림 1과 같이 하나는 차량의 앞 범퍼의 오른쪽에 위치해 있으며 다른 하나는 차량의 오른쪽 앞 타이어 후면에 위치해 있다. 참고로 Etyemezian *et al.* (2003a)은 초기 TRAKER

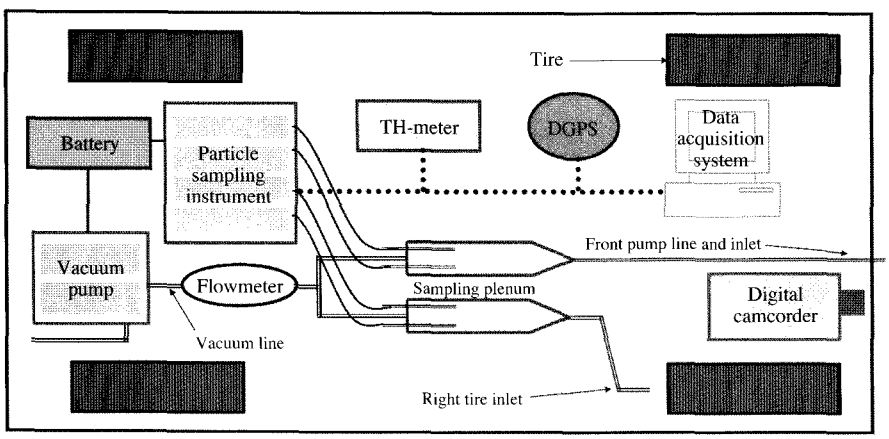


Fig. 2. Schematic of real-time silt loading measurement system (MDMS).

(Kuhns *et al.*, 2001)의 측정차량을 카고밴(cargo van)으로 교체하고, 시스템 등을 개선하여 양쪽 앞 타이어 후면에서 재비산먼지 농도를 측정하여 평균값을 적용하였는데, 본 연구에서 사용한 실험차량의 구조적 제약 등으로 초기 TRAKER와 유사한 방식으로 오른쪽 앞 타이어 후면에서만 먼지농도를 측정하였다.

시료채취관으로 유입된 먼지 시료는 먼지 혼합을 위한 plenum으로 유입되고, 여기에 연결된 DustTrak과 PAS에 의해 먼지농도가 측정되도록 시스템을 구성하였다. Plenum에는 각각 2개의 시료채취구(sampling port)가 설치되어 있으며, 동일한 길이의 신축성 있는 타이곤 튜브로 각각의 측정 장비와 연결된다. Plenum의 전체 길이는 600 mm, mixing volume의 내부직경은 60 mm이며, 시료채취구의 길이는 250 mm, 내부직경은 6.35 mm이다. 시료채취시스템은 차량 전면과 타이어 후면의 유체가 plenum으로 6.3 m/s의 속도로 유입되어, 내부유속이 0.7 m/s가 되는 지점에서 각각의 먼지농도측정기가 비교적 등속흡입에 가까운 조건으로 시료를 채취할 수 있도록 설계되었다. 이러한 유입속도를 유지하기 위해 진공펌프(model 1023-101Q-G608X, Gast Inc.)의 유량은 119 L/min으로 설정하였다.

이 외에 측정지원장비로 전원공급을 위한 대용량 배터리와 인버터, 시료채취를 위한 진공펌프와 유량계(model RMB, Dwyer Inc.)가 차량 내부에 장착되어 있으며, 측정도로 및 교통상황 등을 파악하기 위해 디지털 캠코더(model VM-D790, Samsung Electronics Co.)를 차량 내부에 설치하였다. 진공펌프의 최대 흡입유량은 10 CFM (283 L/min)이며, 2개의 plenum에 연결되어 각각 119 L/min으로 먼지시료를 흡입할 수 있다.

이동먼지측정시스템의 데이터처리시스템(data acquisition system, 이하 DAS)은 측정장비들로부터 데이터를 수신받아 저장하는 기능을 한다. 모든 측정장비들은 차량에 탑재된 노트북 컴퓨터에 RS-232 cable로 각각 연결되어 있어 실시간 측정데이터가 DAS 프로그램으로 전송된다. DAS 프로그램으로 전송된 모든 측정데이터는 같은 시간에 기록 · 저장되도록 DGPS로부터 수신된 KST (Korea Standard Time)에 따라 동기화(synchronization) 된다. DAS 프로그램은 위성사진 등의 선택된 측정지점의 지도에 측정차량의 이동경로 및 실시간 측정데이터(먼지농도, 온 · 습도, 위치 및 속도 정보 등)를 디스플레이하면서, 최소 1초 간격으로 측정데이터를 데이터베이스 형식으로 저장할 수 있다. 또한 PAS로 측정한 먼지의 입경별 수 및 질량농도를 실시간으로 디스플레이하면서 최소 6초 간격으로 저장할 수 있다.

3. 2 실시간 silt loading 측정을 위한 상관관계식 도출 실험

이동먼지측정시스템을 이용한 실시간 silt loading 측정을 위해서 식(2)의 세 가지 변수들의 상관관계를 파악하여, 이동차량에 의해 실시간 측정된 재비산먼지농도(ΔDust)와 차량속도를 이용하여 역으로 silt loading을 추정할 수 있는 상관관계식을 도출하기 위한 실험을 수행하였다. Kuhns *et al.* (2001)은 미국 라스베가스의 포장도로에서 TRAKER 시스템과 silt loading의 상관관계식을 도출하기 위한 실험을 수행한 바 있다. 그러나 국내의 경우 미국과 도로조건, 도로먼지의 특성 및 측정시스템의 성능 등이 다를 수 있기 때문에 국내의 포장도로 조건에 적합한 상관관계식을 도출하는 과정이 필수적이다.

상관관계식을 도출하기 위한 실험과정은 다음과 같다. 먼저 측정 대상도로를 선정한 후, 이동먼지측정시스템을 이용한 속도테스트를 수행하여 속도별 ΔDust를 측정한다. 다음으로 동일 도로에서 이동먼지측정시스템을 이용한 측정 후 12시간 이내에 재래식 silt loading 측정방법(vacuum swept method)을 이용하여 대상도로의 silt loading을 측정한다.

3. 2. 1 측정도로의 선정 및 측정일

상관관계식 도출 실험을 위해 도로표면의 먼지부하(silt loading)가 비교적 높고, 측정차량이 속도를 변화시키면서 주행하기 용이한 인천지역의 포장도로들을 선정하였는데, 주 실험도로로는 인천의 남동공단 내의 왕복 4차선 도로를 선정하였다. 한편 지역(또는 도로) 별로 먼지특성의 차이가 있을 것으로 예상할 수 있는데, 특정지역의 도로만이 아닌 국내 포장도로에 일반적으로 적용시킬 수 있는 상관관계식을 도출하기 위해 남동공단 이외의 다른 도로를 추가 선정하여 실험을 수행하였다. 추가 실험은 공업지역(서부공단, 제재단지, 월미도 1지역), 주거지역(연수동), 상업지역(월미도 2지역) 내의 포장도로에서

수행되었다.

상관관계식 도출을 위한 실험은 2003년 12월부터 2004년 3월까지 수행되었으며, 2004년 8월과 2005년 3월에 일부도로에서 상관관계식 보완실험을 수행하였다. 측정일로 비교적 맑고, 습도가 높지 않은 날(평균습도가 약 70% 이하인 경우)을 선택하였으며, 강수(precipitation)가 있을 경우 최소 2일 후 도로가 완전히 건조한 상태에서 측정하는 것을 원칙으로 하였다.

3.2.2 차량 속도에 따른 ΔDust 측정

차량 속도에 따른 ΔDust는 이동먼지측정시스템을 이용하여 측정도로 구간(약 1 km 이상)을 30 km, 40 km, 50 km, 60 km의 4단계 속도로 주행하면서 측정하였다. 실험은 각 속도별로 동일한 도로구간을 측정할 수 있도록 출발점과 도착점을 표시하고 해당 구간을 정속주행하면서 각 속도별 ΔDust를 반복 측정하였으며, 측정결과는 산술평균을 적용하였다. 한편 다른 차량의 영향 등을 최소화하기 위해 차량통행이 거의 없는 시간에 도로를 통제한 후 실험을 수행하였다.

3.2.3 재래식 방법에 의한 silt loading 측정

재래식 방법에 의한 silt loading은 미국 EPA AP-42의 APPENDIX C.1, C.2에 준하여 측정도로의 주행차선(active lane)을 대상으로 휴대용 진공청소기(TENNANT 3050)를 사용하여 도로먼지를 포집한 후 체 분석(sieve analysis)하여 측정하였다. 진공청소기 필터는 1.0 μm 이상의 먼지를 99%까지 포집할 수 있는 bag filter(Enviro-Filter^{TM}, CNC)를 사용하였다. 포집된 도로먼지는 105~110°C의 온도에서 약 6시간 동안 건조시킨 뒤 수분함량을 측정하고, 건조된 시료는 체진탕기(vibratory shaker)와 4개의 표준망체(체눈의 크기 850 μm, 250 μm, 125 μm, 75 μm)를 사용하여 10분 간격으로 4회에 걸쳐 체질하여 입경별로 분류하였다. 다음으로 200 mesh (< 75 μm) screen을 통과한 silt의 무게를 측정한 후 이를 시료를 채취한 도로면적으로 나누어 silt loading (g/m^2)을 계산하였다.

3.3 이동먼지측정시스템을 이용한 포장도로의 silt loading 측정

이동먼지측정시스템은 포장도로에서 차량의 운행으로 재비산되는 미세먼지의 배출계수를 산정하고, 도로 먼지오염도의 지표가 되는 silt loading을 실시간으로 광범위한 지역에 걸쳐 측정하기 위해 개발된 장비이다(환경부, 2005b). 본 연구에서는 silt loading 측정시스템의 필수조건인 상관관계식을 도출한 이후 서울과 인천의 포장도로에 이를 적용하여 silt loading을 측정하였으며, 시범적으로 지역/도로 및 계절에 따른 silt loading 값의 변화를 살펴보았다.

이동먼지측정시스템을 이용한 silt loading 측정절차는 다음과 같다. 먼저 서울과 인천의 측정도로를 선정한 후 측정차량을 운행하면서 측정도로의 ΔDust와 차량속도 등을 측정한다. 다음으로 데이터 처리기준에 따라 유효데이터를 선별하고, 상관관계식을 적용하여 silt loading 값을 계산한다. 이상의 과정을 통해 계산된 silt loading과 측정위치에 대한 정보(TM좌표 등)를 이용하여 도로먼지지도(silt loading map)를 작성하거나 도로분류에 따라 평균 silt loading 값을 계산하게 된다.

3.3.1 측정도로의 선정 및 측정기간

본 연구에서는 서울시와 인천시의 포장도로를 대상으로 이동먼지측정시스템을 이용한 silt loading 측정을 수행하였으며, 공업·상업·주거 지역 등을 경유하는 측정도로를 선정하였다. 인천시 측정도로는 인하대를 출발하여 월미도, 북항, 서부공단, 제재단지, 주안동, 남동공단, 연수동을 거쳐 다시 인하대로 돌아오는 약 70 km의 도로구간을 선정하였다. 서울시의 측정도로는 목동에 위치한 홍익병원에서 출발하여 양화대교, 상암동, 영등포, 서울디지털단지, 서부간선도로 등을 경유하는 약 40 km의 도로구간을 선정하였다. 측정시간은 인천의 경우 약 3시간, 서울의 경우 약 2시간 이상이 소요되었다.

Silt loading 측정은 2004년 6월부터 2005년 9월까지 수행되었으며, 계절별로 2~4회 측정하였다. 측정일은 강수(precipitation)가 있어 도로표면이 젖어 있는 기간을 피해 비교적 맑은 날씨를 보인 날을 선정하여 측정하였다. 참고로 인천의 경우 2004년 여름 측정 당시 전원공급장치의 이상으로 측정이 중단되어, 2005년 여름에 추가 측정한 결과를 사용하였다.

3.3.2 도로분류 및 측정데이터의 처리

미국의 Kuhns *et al.* (2001)과 Fitz (2001)는 교통량 등을 기준으로 도로를 분류하여 포장도로 silt load-

Table 1. Classification of road segments for silt loading measurements in Incheon and Seoul.

City	Type	Roadway location (*roadway names*)
Seoul	Industrial	Seoul digital industrial complex (*Doksanyeok-gil, Beonseong-gil, etc.*)
	Commercial	Yeongdeungpo (*Yeongdeungpo-ro, Yangpyeong-ro, Kyeongin-ro, etc.*)
	Residential	Mokdong-Deungchondong (*Deungchon-ro, Gonghang-ro*) Sangamdong (*Gayang-ro, Worldcup-ro*)
	Bridge	Gayang large bridge Yangwha large bridge
	Arterial	*Seobu arterial* *Siheungdae-ro* *Gangseo-ro*
Incheon	Industrial	Seobu industrial complex Namdong industrial complex (*Namdong-ro, Aam-ro, Hogupo-gil, etc.*) Wolmido-North harbor (*Wolmido-gil, Jungbong-ro*)
	Commercial	Juandong (*Kyungwon-ro*)
	Residential	Yeonsudong (*Cheongneung-ro, Biryu-gil, Michuhol-gil*)
	Arterial	*Jungbong-ro* *Namdong-ro* *Aam-ro*

ing 및 배출계수를 측정한 바 있지만, 미국의 도로분류를 국내에 동일하게 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 측정시스템을 적용한 초기 단계의 측정 결과로 silt loading의 시간적 · 공간적 분포를 파악하기 위해 측정결과를 지역 및 도로에 따라 분류하였으며, 이를 표 1에 나타내었다. 향후 국내 배출량 산정체계에 적합하도록 silt loading 측정결과를 체계적으로 분류하여 분석하는 기준이 보완될 필요가 있다.

한편 이동먼지측정시스템을 이용한 측정과정에서 최소 1초 간격으로 수 백~수 만 개의 데이터가 데이터베이스 형태로 저장되는데, 측정 시에 주변 차량의 영향(배기가스 등) 등을 받은 데이터가 도입될 수 있다. 또한 측정차량이 일정속도 이상으로 주행하는 과정에서 재비산먼지가 발생되므로 속도, 주변 차량의 영향 등을 고려하여 유효 데이터를 선별하기 위

Table 2. Data selection criteria used in this study.

Parameter	Criterion	Description
Vehicle speed	20~70 km/h (for expressway, 20~80 km/h)	To exclude the effect of vehicle stop and relative slow/high speed traffic and to minimize disturbances due to ambient winds
ΔDust	≥ 0.0 mg/m^3	To exclude the effect of nearby vehicles (exhaust, resuspended dust, etc.)
Silt loading	≤ 3.0 g/m^2	'Hot spot' data (≥ 3.0 g/m^2) is corrected 3.0 g/m^2 (To minimize the effect of 'hot spot' data to mean value)

한 데이터 처리기준이 필요하다. 본 연구에서는 표 2와 같은 처리기준을 적용하여 시범적으로 데이터처리를 수행하였으며, 각 도로구간의 평균값을 대표값으로 하였다. 그러나 향후에는 Etyemezian *et al.* (2006)에서 제시된 바와 같은 차량의 가속과 감속 등을 고려한 데이터처리기준을 국내 측정시스템에 적합하게 보완하여 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고로 본 연구에서는 상관관계식 도출에 적용된 재래식 silt loading 값의 범위(0.08~4.70 g/m^2)를 고려하여, EPA (1995)에서 제시한 일일교통량이 5,000대 이하인 도로(Low ADT roads)의 'worst-case condition'에 해당하는 silt loading 값(3.0 g/m^2)을 기준으로 이 이상인 측정데이터를 'hot spot' 데이터로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실시간 silt loading 측정을 위한 상관관계식 도출

4.1.1 차량속도에 따른 ΔDust의 변화와 상관관계식

본 연구에서는 이동먼지측정시스템을 이용한 실시간 silt loading 측정을 위해 재래식 방법에 의해 측정한 silt loading과 차량시스템으로 측정한 도로 재비산먼지 농도(ΔDust), 차량속도와의 상관관계식을 도출하였다. 상관관계식 도출을 위해 총 20회의 실험(차량의 속도에 따른 ΔDust 측정과 재래식 방법을 이용한 silt loading 측정)을 수행하였으며, 지역별로는

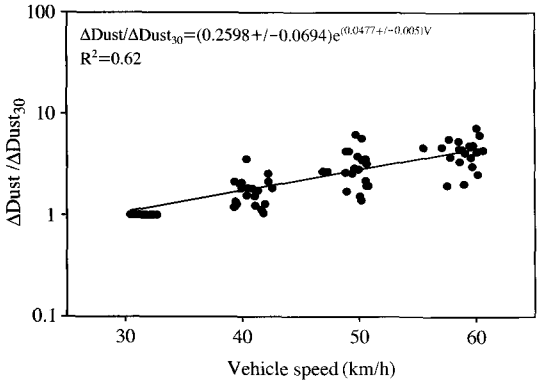


Fig. 3. Correlation between ΔDust/Dust$_{30}$ and vehicle speeds.

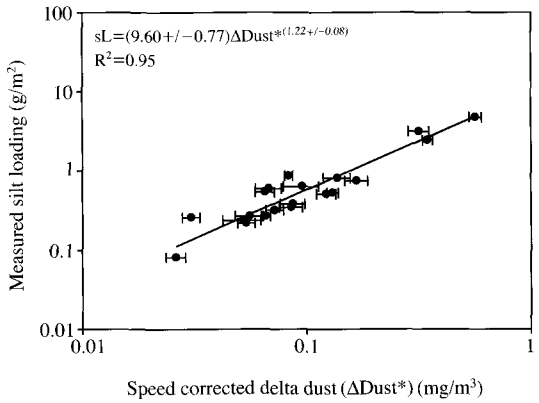


Fig. 4. Correlation between measured silt loading values (vacuum swept method) and speed corrected ΔDust (MDMS).

공업지역인 남동공단 내 도로에서 14회, 서부공단 2회, 제재단지 1회 측정하였고, 주거지역인 연수동의 실험도로에서 1회, 월미도의 공업지역(1지역)과 상업지역(2지역)에서 2회 측정하였다. 상관관계식은 실험 이후 다음과 같은 3단계 과정을 통해 도출하였다.

· 1단계

측정된 차량속도와 ΔDust와의 상관성을 확인한 후, ΔDust 값을 동일 실험의 최소속도에서의 측정값인 ΔDust$_{30}$ (차량속도가 약 30 km/h일 때의 ΔDust 값)으로 나누어 데이터를 정규화(normalization)하고, 측정 속도와의 회귀분석을 통해 속도만의 함수형태인 ΔDust/ΔDust$_{30}$ 식을 구한다.

· 2단계

ΔDust 농도에서 속도함수를 분리하기 위해 1단계에서 도출된 속도 함수(ΔDust/ΔDust$_{30}$)로 나누어, silt loading 만의 함수인 ΔDust* (속도가 보정된 ΔDust) 식을 구한다.

· 3단계

최종적으로 재래식 방법에 의해 측정된 silt loading 값과 ΔDust* 값을 회귀분석하여 상관관계식을 도출한다.

그림 3은 차량속도와 ΔDust/ΔDust$_{30}$의 상관관계를 나타낸 그래프(semi-log scatter plot)이며, 이를 회귀분석하여 1단계의 지수증가함수 형태의 속도만의 함수를 구하였다. 다음으로 1단계에서 구한 속도만의 함수의 역수를 ΔDust 값에 곱하면 결국 silt loading 만의 함수로 표현되는 ΔDust*를 구할 수 있으며 다음의 식(3)으로 표현된다.

$$\Delta Dust^* = \Delta Dust \cdot e^{-0.0477 \cdot V} \quad (3)$$

여기서, ΔDust*는 속도를 보정한 ΔDust 값, ΔDust는 도로 재비산먼지 농도(mg/m^3), V는 측정차량의 속도(km/h)이다.

위의 식(3)에서 구한 ΔDust* 값과 재래식방법으로 측정한 silt loading 값의 관계를 멱함수(power function)를 적용하여 회귀분석한 결과는 그림 4와 같으며, 식(4)와 같은 상관관계식을 구하였다. 도출된 상관관계식의 결정계수(R^2)는 0.95로 비교적 높은 상관성을 보였으며, p-value 값은 0.001 이하로 나타났다.

$$sL\,(\text{silt loading}) = 9.6 \cdot \Delta Dust^{*1.22} \quad (4)$$

4. 2 이동먼지측정시스템을 이용한 silt loading 측정결과

4. 2. 1 측정데이터의 처리 및 분석

이동먼지측정시스템으로 이용한 실시간 측정결과는 표 2와 같은 데이터처리기준에 의한 유효데이터 선별과정을 거친 다음, 상관관계식이 적용되어 silt loading 값으로 계산된다. 표 3은 2005년 3월에 서울시와 인천시 포장도로에서 측정된 데이터를 처리한 예를 보여준다. 측정 데이터의 저장간격(data logging interval)은 1초이며, 표 2의 3가지 데이터처리기준을 적용했을 때 서울과 인천의 측정결과에서 각각 44%,

Table 3. Example of data analysis measured by MDMS.

Site (date)		Seoul (2005. 3. 29)	Incheon (2005. 3. 30)
Data logging interval (second)		1	1
Number of total dataset		6398 (100%)	7984 (100%)
Number of dataset	Vehicle speed less than 20 km/h	3371(52.7%)	3451 (43.2%)
	Vehicle speed 70 km/h and over	8 (0.13%)	1 (0.01%)
	ΔDust zero and under	199 (3.1%)	168 (2.1%)
	Hot spot data ($\geq$3.0 g/m^3)	6 (0.1%)	43 (0.5%)
	Available data by criteria	**2814 (44.0%)**	**4321 (54.1%)**
Average hot spot value (g/m^2)		4.2	8.4
Average silt loading value by criteria (g/m^2)		**0.095**	**0.175**
Average temperature (°C) (average relative humidity)		9.2 (23.5%)	7.2 (45.5%)

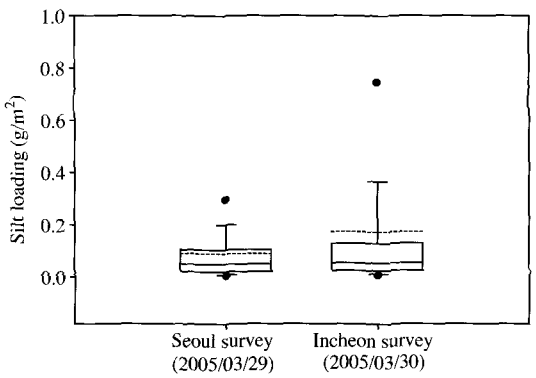


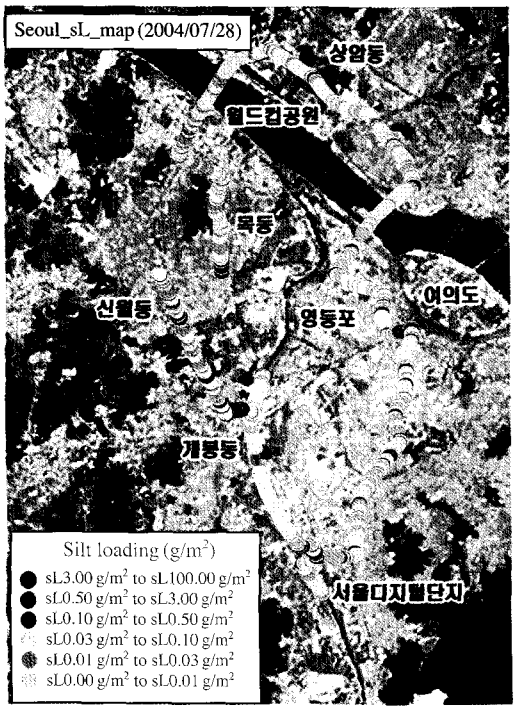
Fig. 5. Box plot of 1-second silt loading values measured by MDMS in test routes of Seoul and Incheon (10, 25, 50, 75, 90 percentile box plot, dotted line: mean, dark circles: 5 and 95 percentile).

54%의 유효 데이터를 얻었다. 측정차량의 속도가 20 km/h 미만인 데이터의 약 70% 이상은 속도가 0 km/h인 정지상태일 때의 측정데이터이다. 데이터의 처리결과, 서울과 인천의 전체 측정구간의 평균 silt loading 값은 각각 0.095 g/m^2, 0.175 g/m^{2}으로 계산된다. 참고로 서울과 인천의 유효데이터로 처리된 1초 측정데이터의 상자그림을 그림 5에 나타내었다. 인천의 경우 서울의 측정결과보다 silt loading 분포가 넓으며, 평균값이 우심지역(hot spot)에서 측정된 'hot spot' 데이터의 영향을 크게 받은 것으로 분석된다.

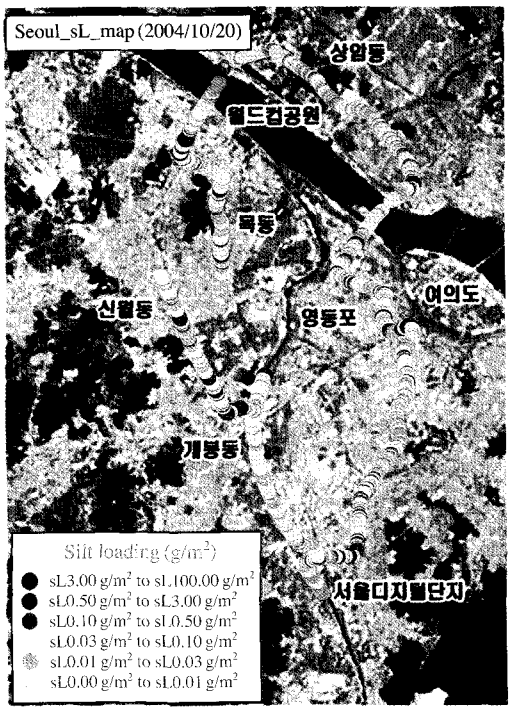
서울과 인천의 전체 측정일의 데이터를 분석한 결과, 총 측정데이터 중 유효 데이터는 약 35~55%를 차지하고 있으며, 상대적으로 교통체증이 심한 서울의 경우 유효데이터의 비율이 인천에 비해 다소 낮은 것으로 분석되었다. 한편 3.0 g/m^2 이상인 'hot spot' 데이터의 경우 서울은 0.0~0.25%, 인천은 0.07~0.81%의 비율을 보였으며, 평균값을 계산할 경우에는 이를 데이터처리기준에 의해 3.0 g/m^{2}으로 보정하였다.

4.2.2 서울시와 인천시의 지역 및 계절에 따른 silt loading 변화

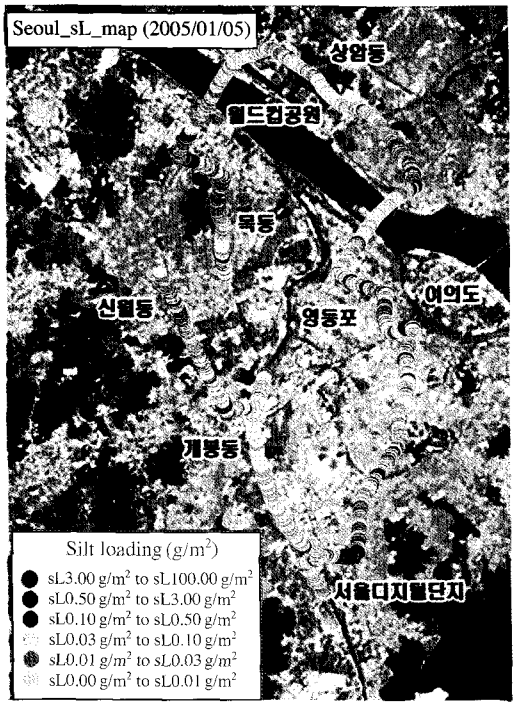
이동먼지측정시스템의 측정결과를 이용하면 도로먼지오염지도(silt loading map)를 작성하여 silt loading이 높은 지역과 낮은 지역을 일목요연하게 파악할 수 있다. 그림 6과 7은 계절별로 대표적인 서울시와 인천시 포장도로의 실시간 silt loading 측정결과를 인공위성지도에 도시한 도로먼지오염지도를 보여준다. 이동먼지측정시스템을 이용하여 재래식 방법으로는 파악할 수 없었던 공간적 해상도가 높은 silt loading 값을 비교적 짧은 시간에 측정할 수 있었으며, 도로먼지오염지도를 통해 도로가 깨끗한 지역과 먼지우심지역을 손쉽게 파악할 수 있었다. 인천의 경우 공업지역인 서부공단, 월미도(1지역), 남동공단의 포장도로 등에서 silt loading 값이 높은 'hot spot' 데이터가 파악되었다. 서울의 경우 도로공사가 진행되었던 가양대교 진입로, 디지털단지 조성을 위한 건설공사가 진행되었던 서울디지털단지, 영등포 교차로 등에서 상대적으로 높은 silt loading 값을 보였다. 또한 도로먼지오염지도를 계절별로 살펴보면, 봄과 겨울에 비교적 높은 silt loading 분포를 보이고 여름에는 상대적으로 낮은 silt loading 분포를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 도시별로는 서울에 비해 인천의 도로먼지오염도가 높은 것으로 파악된다.



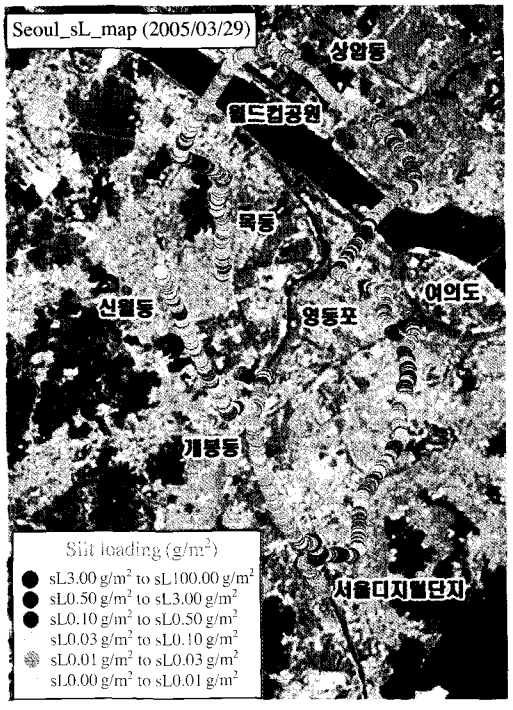
(a) Summer (2004/07/28)



(b) Fall (2004/10/20)

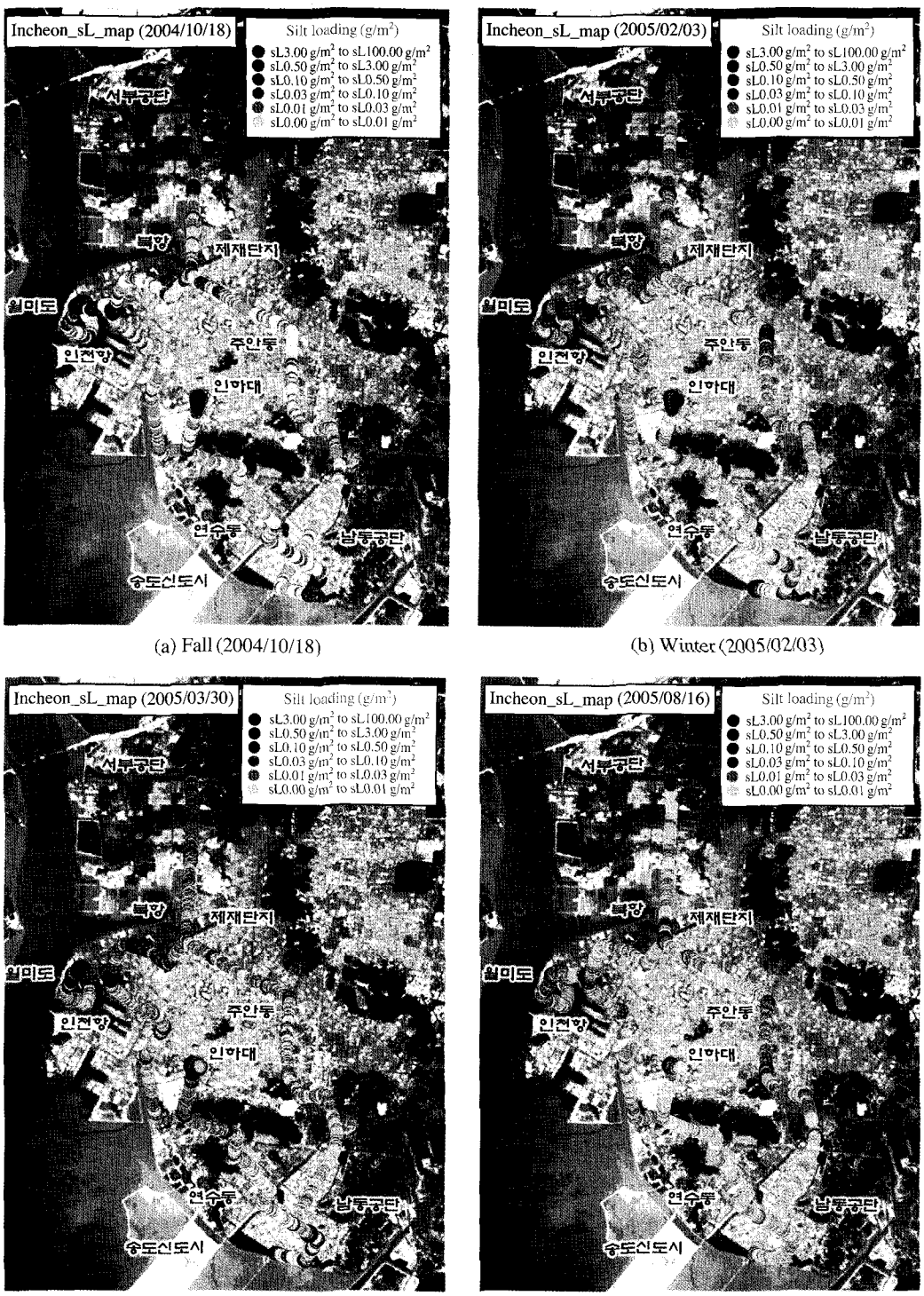


(c) Winter (2005/01/05)



(d) Spring (2005/03/29)

Fig. 6. Silt loading maps of test route in Seoul.



(a) Fall (2004/10/18)

(b) Winter (2005/02/03)

(c) Spring (2005/03/30)

(d) Summer (2005/08/16)

Fig. 7. Silt loading maps of test route in Incheon.

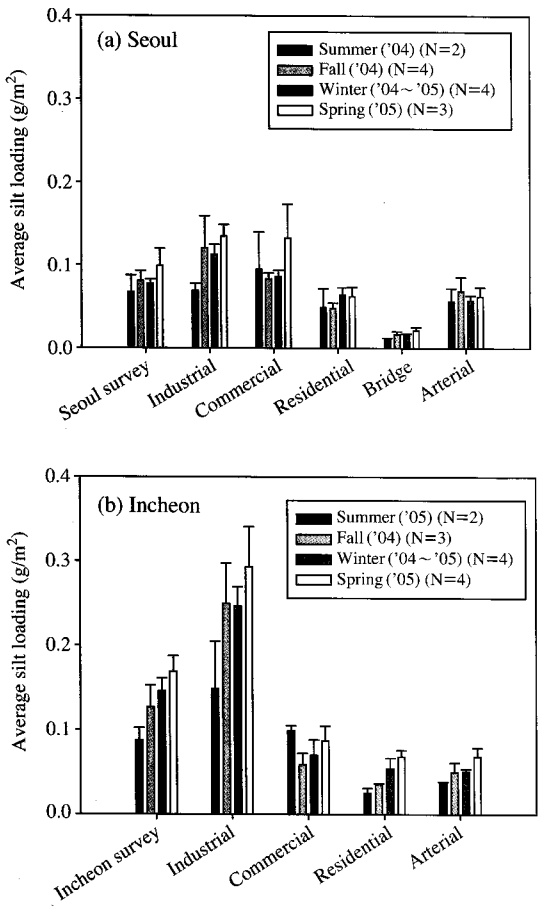


Fig. 8. Spatial and seasonal variations of average silt loading values in Seoul and Incheon (error bars : standard error).

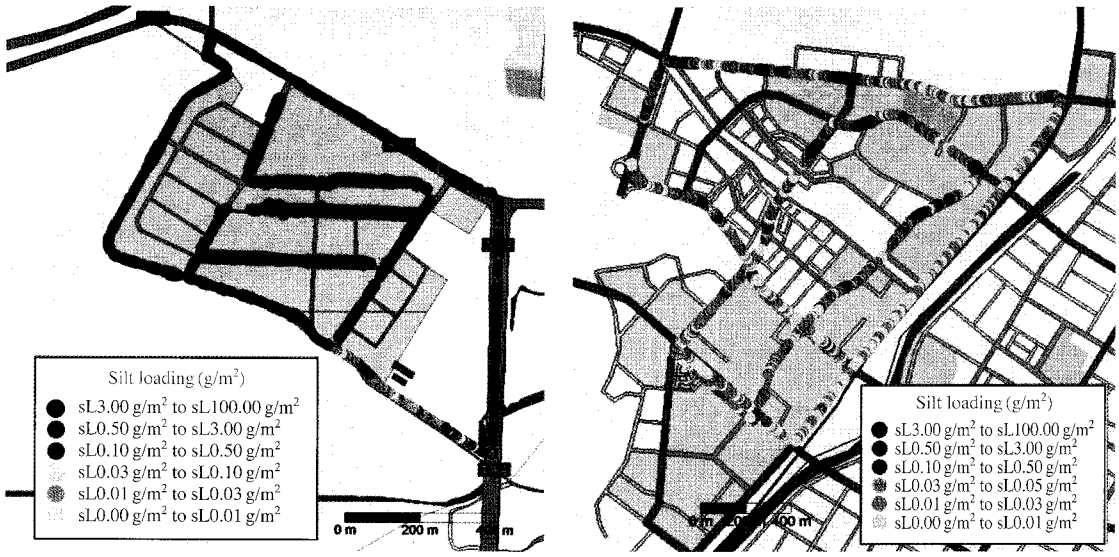
그림 8은 서울시와 인천시 측정결과를 TM 좌표를 이용하여 지역 및 도로특성에 따라 구분하여 평균 silt loading 값을 계절별로 비교한 그래프이다. 서울시 측정결과, 지역 및 도로별 평균 silt loading 값은 공업>상업>간선도로>주거>교량 순으로 나타났으며, 계절별로는 봄>가을>겨울>여름 순으로 나타났다. 인천시의 지역 및 도로별 평균 silt loading 값은 공업>상업>주거>간선도로 순으로 측정되었고, 계절별로는 봄>겨울>가을>여름 순으로 측정되었다. 인천의 경우 서울 측정결과에 비해 계절변동이 비교적 뚜렷한 것으로 나타났으며, 지역 및 도로분류에 따라 도로먼지의 분포가 큰 차이가 있는 것으로 측정되었다. 특히 인천 공업지역 도로의 평균 silt loading은 주거지역에 비해 약 5배 정도 높은 것으로 측정되었으며, 측정일에 따른 변동도 큰 것으로 나타났다. 전체 측정일(N=13)의 인천시 측정구간의 평균 silt loading은 $0.140 \pm 0.042\ g/m^2$으로, 서울의 평균 silt loading인 $0.082 \pm 0.024\ g/m^2$에 비해 약 1.7배 높은 것으로 측정되어, 먼지배출원인 산업시설과 화물차 통행량 등이 많은 인천의 도로먼지오염도가 서울에 비해 상대적으로 높은 것으로 파악되었다. 참고로 표 4에 본 연구에서 적용한 도로분류에 따른 평균 silt loading 값을 정리하였다.

한편 이동먼지측정시스템을 이용하면 비교적 규모가 작은 특정지역의 도로나 재래식방법으로는 측정이 어려웠던 고속도로 등의 silt loading 값과 분포를 세밀하게 파악할 수 있다. 그림 9는 이러한 지역규모(local-scale)의 silt loading 측정결과의 예를 보여준

Table 4. Summary of silt loading measurements by roadway classification of this study using MDMS.

City	Type	Summer	Fall	Winter	Spring	Total measurements (N=13)		
						Mean±SD	Range	CV(%)
Seoul	Seoul survey	0.068±0.029 (2)[a]	0.081±0.024 (4)	0.078±0.011 (4)	0.099±0.036 (3)	0.082±0.024	0.047~0.137	29.3
	Industrial	0.069±0.013 (2)	0.120±0.078 (4)	0.113±0.025 (4)	0.135±0.024 (3)	0.114±0.047	0.059~0.234	41.2
	Commercial	0.095±0.064 (2)	0.083±0.014 (4)	0.086±0.015 (4)	0.132±0.071 (3)	0.097±0.041	0.050~0.198	42.3
	Residential	0.049±0.032 (2)	0.048±0.013 (4)	0.064±0.018 (4)	0.062±0.020 (3)	0.056±0.018	0.026~0.089	32.1
	Arterial	0.056±0.023 (2)	0.069±0.034 (4)	0.057±0.013 (4)	0.062±0.019 (3)	0.062±0.021	0.040~0.117	33.9
	Bridge	0.011±0.002 (2)	0.017±0.007 (4)	0.015±0.004 (4)	0.022±0.007 (3)	0.016±0.006	0.009~0.029	37.5
Incheon	Incheon survey	0.088±0.021 (2)	0.127±0.045 (3)	0.146±0.030 (4)	0.169±0.038 (4)	0.140±0.042	0.073~0.215	29.9
	Industrial	0.149±0.080 (2)	0.250±0.083 (3)	0.247±0.046 (4)	0.293±0.095 (4)	0.247±0.082	0.092~0.398	33.4
	Commercial	0.099±0.008 (2)	0.059±0.023 (3)	0.070±0.037 (4)	0.087±0.034 (4)	0.077±0.031	0.035~0.136	39.7
	Residential	0.025±0.008 (2)	0.036±0.002 (3)	0.054±0.025 (4)	0.068±0.015 (4)	0.050±0.022	0.020~0.085	44.5
	Arterial	0.036±0.003 (2)	0.050±0.019 (3)	0.051±0.006 (4)	0.068±0.021 (4)	0.054±0.018	0.031~0.094	32.6

[a]mean±standard deviation (N) *SD : Standard Deviation, CV : Coefficient Variation



(a) Seobu industrial complex (industrial) (b) Yeonsudong (residential)

Fig. 9. Local-scale silt loading maps of industrial and residential areas in Incheon.

Table 5. Summary of silt loading measurements of local-scale survey using MDMS.

City	Type	Roadway location or name	Season	Date (yy/mm/dd)	Average silt loading (g/m²)
Seoul	Industrial	Seoul digital industrial complex	Spring	05/04/16	0.175
	Commercial	Youido	Fall	04/09/28	0.022
		Gangnam	Spring	05/04/16	0.052
	Residential	Mokdong	Spring	05/04/15	0.067
	Major arterial	Olympic large road	Fall	04/09/28	0.012
		Gangbyun north road	Fall	04/09/28	0.019
		Nambu beltway	Fall	04/09/28	0.024
		Siheungdae-ro	Spring	05/04/16	0.060
Incheon	Industrial	Seobu industrial complex	Spring	05/03/16	1.305 (3.621)[a]
		Namdong industrial complex	Spring	05/03/14	0.261
	Landfill	Sudokwon landfill entrance road	Spring	05/03/16	1.742 (3.888)[a]
	Residential	Yeonsudong	Spring	05/03/19	0.038
-	Expressway	1st/2nd Seoul-Incheon expressway	04/09/09 ~ 05/04/15 (N=5)		0.014

[a]Values in parentheses represent no-correction values of 'hot spot' data.

다. 그림 9(a)는 인천의 주요 공업지역인 서부공단 내 포장도로의 먼지분포를 나타낸 것으로 주거지역인 연수구의 측정결과(그림 9(b) 참조)와 비교할 때 매우 높은 silt loading 분포를 보이고 있다. 이와 같이 지역규모의 도로를 대상으로 한 측정결과와 고속도로, 간선도로 등에서 측정한 평균 silt loading 값을 표 5에 정리하였다. 측정결과 중 토사 및 쓰레기 운송 차량들의 통행이 빈번한 수도권매립지 진입도로가 가장 높은 silt loading 값을 나타냈으며, 교통량이 많고 차량속도가 빠른 고속도로 및 주요 간선도로에서

Table 6. Comparison of default values and measurements of silt loading (g/m^2) based on ADT (vehicles/day) or roadway type.

Source	Type (ADT)	Local (<500)	Collector (500~10,000)	(<5,000)	(>5,000)	Minor arterial	Major arterial (>10,000)	Freeway (>10,000)
United states	NEI default (EPA, 2001)	1.0	←	0.2	0.04	–	→	→
	AP-42 default (EPA, 2006)	0.6	←	0.2	0.06	–	→	0.03 (0.015 limited access)
	CARB default (CARB, 1997)	0.320 1.6 (rural)	0.035	→	→	–	0.035	0.02
	MRI (1996)	0.58	0.24	–	–	0.07	0.04	0.04
	TRAKER (Kuhns *et al.*, 2001)	5.1	1.6	–	–	1.8	0.73	0.31
Korea	This study[a]	*0.181 (industrial), 0.087 (commercial), 0.053 (residential)*					0.058	0.014

[a]Average silt loading values of Seoul and Incheon measurements (Table 4).
*ADT (Average daily traffic), NEI (National Emissions Inventory), CARB (California Air Resources Board), MRI (Midwest Research Institute)

$0.012 \sim 0.060\ g/m^2$의 낮은 silt loading 값이 측정되었다. 고속도로 등의 측정결과는 미국 CARB (California Air Resources Board, 1997)의 고속도로(freeway)에 대한 추천값(default)인 $0.02\ g/m^2$와 유사하다.

표 6은 본 연구에서 이동먼지측정시스템을 이용하여 서울과 인천의 포장도로 등에서 측정한 silt loading 측정결과를 미국의 배출량 산정기관 등에서 제시한 silt loading 추천값 및 측정값과 비교한 것이다. 본 연구의 공업·상업·주거 지역 측정값은 일부 공업지역의 도로구간을 제외하고 평균일일교통량 (ADT)이 약 5,000대/일 이상의 포장도로에 대한 측정값으로 미국의 라스베가스에서 측정한 MRI (1996)의 silt loading 값과 유사한 수준을 보이고 있다. Kuhns *et al.* (2001)은 TRAKER를 이용한 평균 silt loading 측정결과가 MRI (1996)의 측정결과에 비해 약 8배 이상 높게 측정되었으며, 중앙값(median silt loading)의 경우 Dames and Moore (1999)의 silt loading 측정값과 잘 일치하고 있다고 언급하고 있다.

현재 국내의 국가 대기오염물질 배출량을 산정하는 CAPSS (국립환경과학원, 2005)에서는 포장도로 재비산먼지 배출계수 산정을 위해 미국 EPA AP-42 모델을 이용하고 있는데, 보다 신뢰성 있는 배출량을 산정하기 위해 국내 실정에 적합한 silt loading 값을 배출계수에 적용하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 포장도로 재비산먼지 배출계수의 주요 산정인자인 silt loading을 측정하기 위해 미국 DRI의 TRAKER 방법을 적용하여 실시간 이동먼지측정시스템을 개발하였으며, 서울시와 인천시 등의 포장도로에서 이를 적용하여 silt loading의 시간적·공간적 분포특성을 살펴보았다. 이러한 실시간 silt loading 측정시스템의 기반이 되는 차량속도, ΔDust와 silt loading의 상관관계식은 인천의 포장도로에서 20번의 실험을 통해 회귀분석하여 도출하였으며, 비교적 높은 결정계수를 보였다.

서울시와 인천시 포장도로에서 이동먼지측정시스템을 이용한 silt loading 측정결과를 살펴보면 포장도로의 먼지분포는 계절 및 지역(또는 도로)에 따라 변화하는 것으로 파악되는데 계절적으로 봄철에 가장 높고, 강우량이 많은 여름철에 가장 낮은 수준을 보였다. 지역적으로는 인천시 측정도로의 silt loading 분포가 서울에 비해 약 1.7배 높은 수준을 보였으며, 특히 인천의 공업지역·매립지 등에서 높은 silt loading 값이 측정되었다. 한편 교통량이 많고 차량속도가 빠른 고속도로 및 주요 간선도로의 silt loading 값은 상대적으로 매우 낮은 것으로 측정되었다. 이러한 측정결과들을 통해 도로의 silt loading 값은 차량

속도, 교통량 등의 도로특성과 주변 먼지배출원, 강우 등의 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이동먼지측정시스템을 이용하면 도로먼지오염지도(silt loading map)를 작성할 수 있는데, 이를 통해 silt loading 값의 공간적인 분포를 확인할 수 있으며 도로먼지가 많이 침적해 있는 먼지우심도로(hot spot roads)를 손쉽게 파악할 수 있다.

따라서 본 연구의 이동먼지측정시스템을 활용하면 도로 silt loading 값의 시간적 · 공간적 해상도를 크게 증가시킬 수 있어 포장도로 재비산먼지 배출계수의 신뢰도를 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 사료되며, 측정결과인 도로먼지의 분포에 대한 정보는 해당 지역의 도로먼지 관리정책의 수립 및 평가에 일조할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업인 "대기 inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구"와 국립환경과학원의 "비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로비산먼지 실시간 측정방법 개발(I)"과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원(2005) 이동오염원 대기오염물질 배출량 산정 편람, 국립환경과학원 대기총량과.

국립환경과학원(2006a) 대도시 대기질 관리방안 조사연구-미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립, 최종보고서, 한국대기환경학회.

국립환경과학원(2006b) CAPSS 비산먼지 배출량 신뢰도 향상을 위한 배출계수 보완, 최종보고서.

김운수(2004) 서울시 미세먼지 배출량 조사 · 분석 및 관리방안 연구, 서울시정개발연구원.

김현구, 정용원, 홍지형(2004) 전국 시도별 비산먼지 배출량 산정(2002년도), 한국대기환경학회지, 20(2), 263-276.

정용원, 한세현, 원경호, 장기원, 홍지형(2006) 포장도로 재비산먼지 배출량산정법의 현황, 대한환경공학회지, 28(11), 1126-1132.

환경부(2005a) 수도권 대기환경관리 기본계획.

환경부(2005b) 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구, 최종보고서.

Abu-Allaban, M., J.A. Gillies, A.W. Gertler, R. Clayton, and D. Proffitt (2003) Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles, Atmospheric Environment, 37(37), 5283-5293.

California Air Resources Board (1997) Entrained paved road dust. (available at http://www.arb.ca.gov/ei/areasrc/fullpdf/full7-9.pdf)

Chow, J.C., J.G. Watson, D.H. Lowenthal, P.A. Solomon, K. Magliano, S. Ziman, and L.W. Richards (1992) PM_{10} source apportionment in California's San Joaquin Valley, Atmospheric Environment, 26A(18), 3335-3354.

Dames and Moore (1999) Silt loading measurements for Clark County paved roads. Final report for Clark County Regional Transportation Commission, 7115 Amigo Street, Suite 110, Las Vegas, NV, 89119, USA.

EPA (1993) Emission factor documentation for AP-42: Section 13.2.1 Paved roads, U.S. Environmental Protection Agency, Contract No. 68-DO-0123, MRI Project No. 9712-9744.

EPA (1995) Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary point and area sources, Prepared by U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.

EPA (2001) Procedures document for National Emission Inventory, Criteria air pollutants 1985~1999, March 2001, EPA-454/R-01-006. (available at http://www. epa.gov/ttn/chief/trends/procedures/ neiproc_99.pdf)

EPA (2006) AP-42 Emissions Factors. Miscellaneous Sources, Section 13.2.1. Paved Roads. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA. (available at http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0201.pdf)

Etyemezian, V., H. Kuhn, J. Gillies, M. Green, M. Pitchford, and C. Watson (2003a) Vehicle-based road dust emission measurement-Part I: Methods and calibration, Atmospheric Environment, 37(32), 4559-4571.

Etyemezian, V., H. Kuhns, J. Gillies, J. Chow, K. Hendrickson, M. McGown, and M. Pitchford (2003b) Vehicle-based road dust emission measurement-Part III: effect of speed, traffic volume, location, and season on PM_{10} road dust emissions in the Treasure Valley, ID, Atmospheric Environment, 37(32),

4583-4593.

Etyemezian, V., H. Kuhns, and G. Nikolich (2006) Precision and repeatability of the TRAKER vehicle-based paved road dust emission measurement, Atmospheric Environment, 40(16), 2953-2958.

Fitz, D. (2001) Measurements of PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission factors from paved roads in california, Final report, Contract No. 98-723, California Air Resources Board.

Fitz, D. and K. Bumiller (2005) Measurement of PM_{10} emission rates from roadways in Las vegas, Nevada using a SCAMPER mobile platform with real-time sensors, 14th International Emission Inventory Conference, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV, USA.

Gaffney, P., R. Bode, and L. Murchison (1995) PM_{10} emission inventory improvement program for California, California Air Resources Board, USA.

Kuhns, H., V. Etyemezian, D. Landwehr, C. MacDougall, M. Pitchford, and M. Green (2001) Testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads (TRAKER): a new approach to infer silt loading on roadways, Atmospheric Environment, 35(16), 2815-2825.

Langston, R., R.S. Merle Jr, D. Hart, V. Etyemezian, H. Kuhns, J. Giles, D. Fitz, K. Bumiller, and D. James (2007) The preferred alternative method for measuring paved road dust emissions for emissions inventories: "Mobile technologies vs. the traditional AP-42 methodology", 16th Annual International Emission Inventory Conference, U.S. Environmental Protection Agency, Raleigh, NC, May 15-17, 2007, USA. (available at http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei16/session11/langston.pdf)

Midwest Research Institute (1996) Improvement of specific emission factors. Final report for Clark County Department of Comprehensive Planning, prepared by Midwest Research Institute, 425 Volker Boulevard Kansas City, MO, 64110, USA.

Venkatram, A. (2000) A critique of empirical emission factor models: a case study of the AP-42 model for estimating PM_{10} emissions from paved roads, Atmospheric Environment, 34(1), 1-11.

Watson, J.G. and J.C. Chow (2000) 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, USA.