

전국 시도별 비산먼지 배출량 산정 (2001년도)

Estimation of Fugitive Dust Emission by Administrative Districts

김 현 구* · 정 용 원¹⁾ · 홍 지 형²⁾

포항산업과학연구원 환경에너지연구센터

¹⁾인하대학교 환경토목공학과, ²⁾국립환경연구원 대기연구부

(2003년 12월 2일 접수, 2004년 3월 4일 채택)

H.G. Kim*, Y.W. Jung¹⁾ and J.H. Hong²⁾

Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-330, Korea

¹⁾Inha University, Dept. of Environmental Engineering, Incheon 253 Korea

²⁾National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170 Korea

(Received 2 December 2003, accepted 4 March 2004)

Abstract

According to the annual emission estimates of U.S.A., fugitive dust, the particulate matter entrained in the ambient air which is caused from man-made or natural activities such as movement of soil, vehicles, equipments and windblown dust, contributes 90% of PM10 emission. In spite of an importance of fugitive dust emission in PM10 estimation, it is excluded in the national emission inventory of Korea so far. In this paper, an emission inventory of fugitive dust for each region and in major cities throughout the country, which is the first time in Korea these values have been compiled, is presented. Sources of fugitive dust emission have been classified into paved/unpaved roads, construction operations, agricultural operations, and natural sources. The emission factors of the existing fugitive dust emission were reassessed in a way that significantly improved the reliability of the estimated result. The Korea's first national emission inventory of fugitive dust by administrative districts proposed in this paper would provide scientific reference data for establishing an reduction strategy of PM10 and preparing effective control measures, and would contribute to academic achievement in the atmospheric environments field and the establishment of CAPSS (Clean Air Policy Support System).

Key words : Emission factor, Emission inventory, Fugitive dust

1. 서 론

대기환경보전법에 따르면 비산먼지 (fugitive dust)

는 “일정한 배출구없이 대기 중에 직접 배출되는 먼지”로 정의되며, 그림 1의 먼지 배출원에 따른 입경별 구성비율의 비교 그래프 (Houck *et al.*, 1989)에서 볼 수 있듯이 연소과정에서 배출되는 먼지는 대부분 입경 10 μm 이하의 미세입자인 반면 건설공사 배출 먼지나 도로 또는 토양먼지와 같이 비교적 큰 입경

* Corresponding author

Tel : +82-(0)54-279-6615, E-mail : hyungoo@rist.re.kr

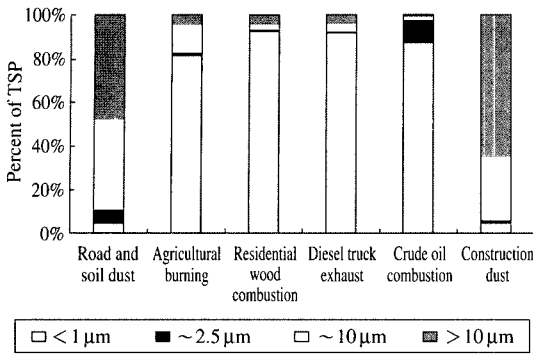


Fig. 1. Size distributions of several particulate source emissions.

의 토양입자가 분쇄되면서 발생하는 비산먼지는 입경분포 중 입경 10 μm 이상의 조대입자와 그 이하인 미세입자가 절반씩을 차지하는 비율을 보인다.

비산먼지와 관련된 환경문제로는 먼지돔효과(dust dome effect), 가시악화, 진폐증 등의 호흡기 질환 유발과 실비의 열화 등이 있으나 비산먼지의 절반이 인체에 직접적인 위해성을 미치는 미세먼지(PM10) 입에 주목할 필요가 있다. 수도권 대기환경 개선대책의 일환으로 수행된 대기오염물질의 관리 우선순위 산정연구에 의하면 대기오염물질별 이론적 사망자수(연간 인구집단 위해도)는 미세먼지가 가장 높게 나타나 미세먼지 관리의 필요성과 절실함을 입증해 주고 있다(김예신 등, 2003). 연돌에서 배출되는 미세먼지는 물리적인 배출높이에 의해 확산범위가 넓은 반면 비산먼지는 지면배출인 관계로 확산범위가 수직방향으로는 수m 이내, 수평방향으로는 수백m 이내로 제한적이기는 하지만(Watson and Chow, 2000) 도로인근 지역의 미세먼지 농도상승에 직접적인 원인을 제공한다. 이에 환경부에서는 미세먼지와 더불어 대기 중 미세입자 농도에 큰 영향을 미치는 비산먼지에 대하여 배출허용기준을 강화하고(부지계계선 24시간 측정평균값이 1.0 mg/m³ 이하에서 0.5 mg/m³ 이하; 1999년 1월) 봄철 비산먼지발생사업장 특별점검 등의 행정단속을 실시하여 적극적인 저감을 유도하고 있다. 또한 환경부 훈령 제500호 「비산먼지 저감대책 추진에 관한 업무처리 규정(2001. 9. 4)」에 의하면 건설업, 시멘트·석탄·토사 등의 운송업, 저탄시설의 설치가 필요한 사업, 고철 또는 곡물하역

업, 비금속물질 채취·제조·가공업, 시멘트·석회·프라스터 및 시멘트 관련 제품제조 및 가공업 등 10개 비산먼지 발생사업(대기환경보전법 제38조)은 환경부장관 또는 시·도지사에게 신고하고, 비산먼지 발생억제를 위한 시설을 설치하거나 필요한 조치를 하여야 하도록 규제하고 있다(대기환경보전법시행규칙 제62조).

2003년 12월 제정된 환경부의 「수도권 대기환경 개선 특별법」에는 수도권 대기질을 2012년까지 OECD 선진국 수준으로 향상시키기 위하여 사업장 및 차량배출 대기오염물질을 지역 환경용량 이내로 유지하도록 지역배출허용총량관리제도의 도입과 같은 대기오염물질의 총량적 환경관리법안이 포함되어 있다. 그런데 대기오염현상을 규명하고 합리적인 관리방안을 수립하기 위해서는 대기오염물질의 발생장소, 발생량을 정확하게 파악하여야 하며, 배출원별 시간대에 따른 배출량의 공간적 분포를 정량적으로 추정할 수 있는 대기배출목록(emission inventory)이 구축되어야만 비로소 배출량 저감을 위한 구체적인 전략수립이 가능하다(홍지형, 2003). 이러한 배경하에 현재 국립환경연구원에서는 환경부 차세대 핵심 과제로 「대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구(2001. 8~2005. 7)」를 진행 중에 있으며, 비산먼지를 포함한 국가 대기배출목록을 기반으로 하는 대기보전 정책수립 지원시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System)을 완성함으로써 국가의 대기환경 정책결정의 근간을 제공하게 될 것으로 기대된다(석광설 등, 2002).

비산먼지는 자연적인 배출원이 대부분이며 노천에서의 작업조건 및 기상조건 등에 따라 불규칙하게 발생하기 때문에 정확한 배출량 산출이 매우 어려워 우리나라의 경우에는 환경부와 국립환경연구원에서 매년 발행하는 대기오염물질배출량(1994~1999)에 연소공정으로 배출구를 통하여 배출되는 먼지 배출량만을 산출하여 이를 관리지표로 활용하여 왔다. 반면 표 1에 제시된 미국의 미세먼지 국가배출목록(U.S. EPA, 2000, 2001)에는 비산먼지에 해당하는 자연오염원-풍식, 기타오염원 중 농림업 그리고 기타 산업오염원 중 광업 오염원이 포함되어 있으며, 총 먼지 배출량 중 비산먼지의 비율은 PM10의 경우 89%, PM2.5의 경우 66%를 차지하는 주배출원인 것으로 분석되었다. 따라서 미세먼지 배출목록을 구축

Table 1. U.S. national emissions for 1997.

Category	(unit: 1,000 ton/year)	
	PM10	PM2.5
NATURAL SOURCES—WIND EROSION	5,315.8	797.4
FUGITIVE DUST	19,429.5	3,460.5
MISCELLANEOUS SOURCES	5,724.0	1,813.7
FUEL COMBUSTION	1,101.0	846.9
ON-ROAD VEHICLES	261.0	207.0
NON-RPAD ENGINES & VEHICLES	465.8	409.3
METALS PROCESSING	219.9	139.2
PETROLEUM & CHEMICAL INDUSTRIES	117.9	64.9
STORAGE & TRANSPORT	113.6	44.1
OTHER INDUSTRIAL PROCESSES	529.9	250.7
WASTE DISPOSAL & RECYCLING	295.7	254.4
GRAND TOTAL	33,574.1	8,288.1

함에 있어서 비산먼지를 제외하게 되면 실제적인 현황파악을 통한 효과적인 관리대책 수립시 상당한 오차가 발생할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 환경부 차세대 핵심과제인「대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정 연구(2001. 8~2005. 7)」의 일환으로 수행된 「도시·산단에서의 비산먼지 발생량 산정에 관한 기초연구(서병철 등, 2002)」와 포스코 연구과제 중 일부로 수행된 「전국 지역별 비산먼지 발생량 산정에 관한 연구(김현구 등, 2003)」의 결과를 종합하여 전국적인 비산먼지 발생현황에 대한 기초자료를 제공함으로써 대기배출목록 구축을 위한 연구에 일조하고자 한다. 아울러 본 연구를 기반으로 체계적이며 지속적으로 비산먼지 배출량 산출법을 확립하고 산출결과의 정확도 및 신뢰도를 향상시키는 연구를 진행함으로써 국가의 대기관리 정책결정을 위한 대기보전 정책수립 지원시스템의 신뢰도 및 기능성이 제고될 것으로 기대된다.

2. 비산먼지 배출량 산출

본 연구에서는 비산먼지 발생량을 산출하기 위하여 미국 환경보호청(U.S. EPA: Environmental Protection Agency)의 OAQPS(Office of Air Quality Planning and Standards)에서 개발한 배출계수 정의서인 AP-42(U.S. EPA, 1995)의 보완판(U.S. EPA,

2002)과 호주의 국가배출목록 중 비산먼지 배출량 산정 지침서(NPI; National Pollutant Inventory, 1999, 2001), 미국 캘리포니아주의 배출목록 조례 지침서(California ARB: Air Research Board, 1997), 환경부의 배출량 산정방법론 정의서(환경부, 2000), 그밖에 비산먼지 배출량 산출과 관련된 국내외 학술자료(이내현과 김윤신, 2002; 김인수와 장영기, 2002; 경기개발연구원, 2002; Shao, 2000; 정태섭, 1996)와 비산먼지 배출량 산출방법에 대한 해설서(Watson and Chow, 2000), 지침서(Countess Environmental, 2001) 등의 관련자료를 검토·분석함으로써 비산먼지 배출량 산출법을 종합적이며 체계적으로 확립하였다.

일반적으로 배출량은 활동도(activity)에 개별 오염원의 배출계수(emission factor)와 인위적/자연적 저감계수(reduction factor)를 적용하여 다음과 같이 산출한다.

$$\text{Emission} = \text{Activity} \times \text{Emission Factor} \times \text{Reduction Factor} \text{ [ton/year]}$$

위와 같은 산출방법에는 사용된 통계자료의 부정확성에 의한 무작위적 오차(random error)와 산출방법론의 오류와 같은 체계적인 불확실성(systematic uncertainty)이 내포되며, 특히 비산먼지는 기상학적, 물리적, 화학적 변동요인에 의해 추가적인 불확실성이 포함되므로 현재까지 비산먼지에 대한 국가배출량 산정을 시도한 적이 없는 우리나라의 경우에는 비산먼지 배출량 산출시 이러한 오차 및 불확실성이 더욱 클 것으로 판단된다. 따라서 본 연구결과에서 제시하는 전국 시도별 비산먼지 발생량 산출결과를 근간으로 보다 정확한 발생량 산출을 위한 지속적인 노력과 개선이 필요할 것으로 사료된다.

2.1 포장도로 비산먼지

포장도로(paved road)를 주행하는 차량에 의해 발생하는 비산먼지는 차량 배기가스처럼 직접적으로 대기 중으로 배출되거나 도로표면에 산재한 먼지가 차량의 움직임에 의하여 재비산하여 발생하게 된다. 도로에는 비산된 먼지가 침전되는 등 여러 가지 경로로 먼지가 보충되는데 그림 2는 도로 상에서 먼지의 순환경로를 보여주고 있다. 즉, 비산먼지는 타이어와 도로 표면의 마모, 차량 배기가스 배출, 강하분진, 쓰레기, 진흙과 먼지의 유입, 인근지역으로부터의 토

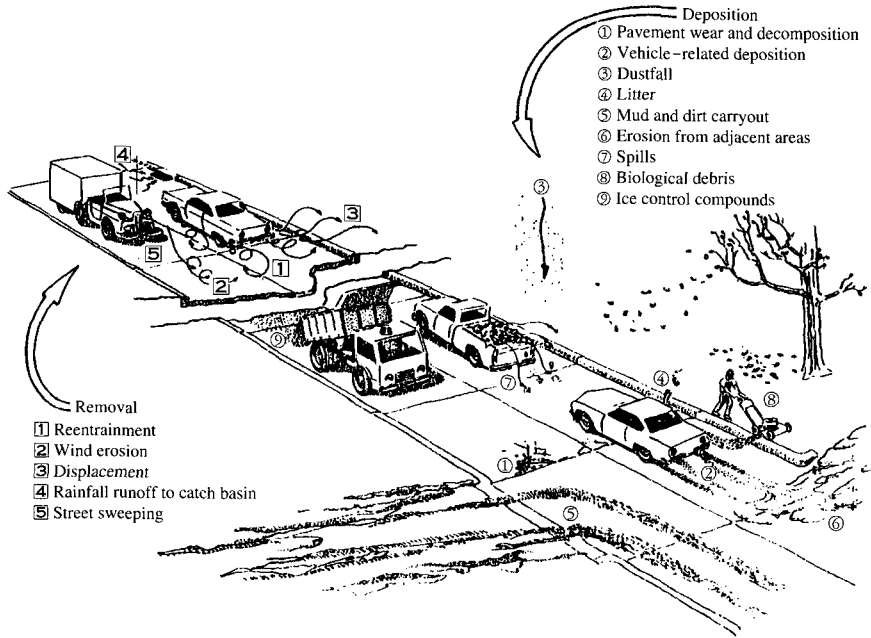


Fig. 2. Deposition and removal processes of fugitive dust on paved road.

사유입, 차량 적재물의 누출, 식물파편 유입, 제설제 등을 통하여 침적(deposition)되며 도로로의 재유입, 풍식, 도로 외부로의 이탈, 강우로 인한 배수, 도로청소 등에 의해 제거(removal)된다.

포장도로에서의 비산먼지 활동도는 차종별 연간 총 차량주행거리(VKT: Vehicle Kilometers Traveled)로, 건설교통 통계연보(건설교통부, 2001) 등의 교통 통계 자료를 이용하였다. 연간 총 주행거리를 산출하는 방법은 차량등록대수를 이용하는 방법과 도로별 차량통행량으로부터 산출하는 두 가지 방법이 있다. 각각의 경우를 식으로 표현하면,

$$\text{Activity} = \text{차종별 등록대수} \times \text{일일 주행거리} \times \text{연간 주행일수} \text{ [VKT/year]}$$

$$\text{Activity} = \text{도로별 통행량} \times \text{도로길이} \text{ [VKT]}$$

참고로 차종별 일일 주행거리와 연간 주행일수(300 days/year)는 국립환경연구소의 통계자료를 이용하였으며, 도로별 통행량과 도로길이는 도로교통량 통계연보(건설교통부, 2001)를 이용하였다.

포장도로에서의 비산먼지 배출계수는 AP-42 Sec-

tion 13.2.1에 따르면 아래 실험식으로 산출할 수 있다.

$$E = k(sL/2)^{0.65} (W/3)^{1.5} \text{ [g/VKT]}$$

여기서

k = particle size multiplier (24 for TSP, 4.6 for PM10) [g/VKT]

sL = road surface silt loading (0.04 for 5,000 vehicles/day; ARB Section 7.9) [g/m²]

W = average weight of the vehicle traveling the road [ton]

비산먼지 배출계수(emission factor, E)를 산출함에 있어서 중요한 사항은 통행차량 평균무게(W)는 도로를 통행하는 모든 차량의 평균적인 무게라는 것이다. 예를 들어 어떤 도로를 통행하는 차량의 99%가 2톤의 승용차이고 1%만이 20톤의 트럭이라고 하면 통행차량 평균무게는 2.2톤이 된다. 즉, 위의 식은 개개의 통행차량에 의한 비산먼지 배출계수를 산출하기 위한 식이 아니라 특정 도로구간을 통행하는 전체 차량에 의한 하나의 대표적인 배출계수를 산출하

는 실험식이며, 따라서 비산활동의 산출함에 있어서 차량등록대수를 이용할 경우, 동일 도로를 통행하는 다수의 차량활동이 중복되어 배출계수가 과대평가될 우려가 크다. 참고로 두 가지 비산활동에 의해 산출된 결과를 보면 전자에 의한 배출계수가 후자보다 약 5% 과대평가되었으나 이는 통계자료의 오차범위에 포함되는 정도의 차이로 두 방법 간의 오차는 무시할만한 수준으로 평가된다.

포장도로 비산먼지와 관련된 저감계수 (reduction factor, R)는 일일 강우량 0.254 mm (0.01in) 이상인 강우에 의한 제거효과로서 AP-42 Section 13.2.1의 2002년 수정판에 따르면 다음의 식으로 표현할 수 있다. 참고로 저감계수 식에서 0.25의 분율은 강우가 24시간 계속되지 않음으로 인한 요인과 포장도로의 빠른 건조율을 반영한 것이다. 한편 기상통계연감(기상청, 2001)에 따르면 전국적인 연간 강우일수는 65일이다.

$$R = (1 - 0.25 \times \text{Precipitation Days}/365)$$

먼지가 대기 중으로 부유(suspension)함으로써 발생하는 비산먼지의 발생량과 발생율은 먼지의 입경 분포, 표면부하(surface loading), 표면조건, 풍속, 대기와 표면의 수분함유량 그리고 먼지 부유에 관여된 활동(activity)에 의해 결정된다. 흔히 부유분진의 척도로서 표면먼지(surface dust) 중 미사분율(silt fraction)을 언급하게 되는데, 미사(微砂)는 일반적으로 기하학적(geometric) 직경 75 μm 이하의 먼지로 이는 공기역학적(aerodynamic) 직경 120 μm 에 해당한다. 일반적으로 미사부하(silt loading)는 교통특성(속도, ADT, 대형차량 분율), 도로특성(곡률, 차선수, 노면유무), 토지이용도(농업지역, 도시지역, 신설 주거지역)와 지역적/계절적 인자(강설, 결빙, 풍식) 등에 의해 변화하며 일반적인 경향성이 있다고 보기 힘든 특성이 있다. 따라서 해당 도로에서 측정된 미사부하를 적용하는 것이 이상적으로 가장 정확하지만(원경호 등, 2002), 미국 국가배출목록에서는 도로의 종류와 일평균 통행량(ADT: Average Daily Traffic)에 따른 미사부하(silt loading)를 다음과 같이 제시하고 있다. 즉, 지방도로는 0.10 g/m^2 , 통행량 5,000대/일 이하의 도로는 0.20 g/m^2 , 그 이상의 통행량일 경우에는 0.04 g/m^2 . 건설교통부의 도로교통량 통계에 따르면 우리나라 대부분 도로의 평균 통행량은 5,000대/일을 초과

하므로 미사부하로 0.04 g/m^2 를 적용하였다(Watson and Chow, 2000). 참고로 ARB에서는 MRI (Midwest Research Institute; Muleski, 1996)에서 미사부하를 도로형태에 따라 Freeway, Major, Collector, Local, Local Rural로 구분하여 측정된 값인 0.020, 0.035, 0.035, 0.032, 1.6 g/m^2 의 사용을 제시하고 있으며, 차량의 평균무게도 MRI에서 조사한 2.4 ton을 적용하였다.

한편 환경부의 대기보전 정책수립 지원시스템 중 배출량 산정방법론 정의서(정보통신부, 2000)에 따르면 차량운행에 의한 포장도로 비산먼지 이외에도 타이어 마모에 의한 비산먼지를 정의하고 있으나 미국 환경보호청의 배출계수 정의서인 AP-42에 따르면 앞에서 제시한 배출량 산출식은 차량엔진에서의 연료연소에 의한 배기가스 중 먼지배출과 타이어 마모를 포함한 일체의 차량운행에 의한 포장도로 비산먼지를 포함하고 있음에 유의하여야 한다. 독일의 실험결과에 의하면 포장도로 비산먼지 중 차량배출과 그 이외의 비산먼지 발생량은 50:50의 비율을 보이는 것으로 보고되었으나 미국 환경보전청에서는 AP-42의 배출계수를 제안함에 있어 각각을 분리하지 않기로 결정하였으므로 배출계수 적용시 사용자가 이 점을 유의하여야 할 것이다.

그림 3의 전국 시도별 포장도로 비산먼지 배출량을 보면, 포장도로 비산먼지 발생량은 활동도인 VKT와 비례하고 있음을 알 수 있으며, 지역별로는 서울특별시와 경기도에서 전체 포장도로 비산먼지의 25%가 발생함을 알 수 있다. 수도권 지역의 면적은 전국토의 12%에 불과하지만 인구와 차량의 46%가 밀집된 관계로 적정 대기환경용량을 2~3배 초과하고 있어 대기질 개선대책의 시행이 시급한 실정이다. 참고로 포장도로 비산먼지의 경우 TSP와 PM10의 비율은 1:0.46으로 그림 1에 제시한 바와 같이 미세먼지(PM10)가 차지하는 분율은 약 절반이다. 한편 그림 3에는 차종별 등록대수 및 도로별 통행량에 의해 산출된 VKT와 이를 이용하여 산정된 포장도로 비산먼지 배출량을 비교하였다. 참고로 차량등록대수는 차종별 VKT를 적용하여 총합하고 차량무게는 시도별로 차종별 하중평균값을 적용함으로써 AP-42의 산출법과 유사한 계산을 시도하였다. 두 가지 상이한 통계자료에 의해 산출된 결과를 보면 울산광역시를 제외한 대도시에서는 차량등록대수 대비 도로별 통행량에 의한 VKT가 작게 산출되었기 때문에

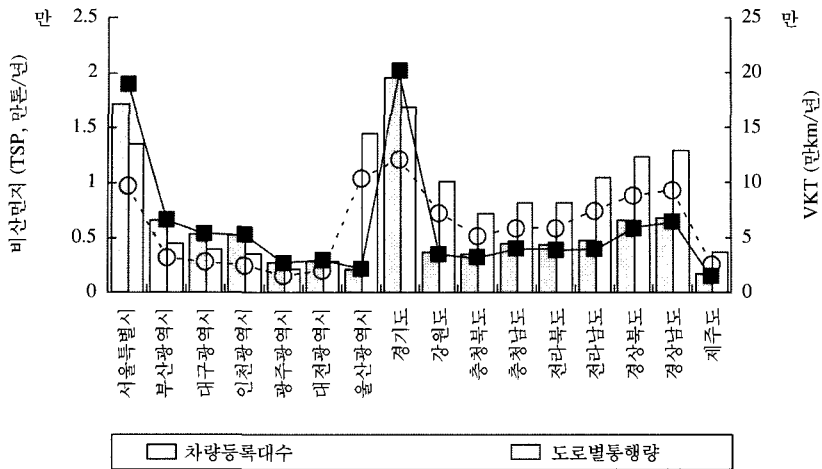


Fig. 3. Fugitive dust emission from paved roads by administrative districts. (Bars: fugitive dust emissions, Symbols: VKTs)

Table 2. Fugitive dust emission from paved roads by administrative districts.

구분	차량등록대수(대)	도로연장(km)	주행거리(천km/일)	PM10(톤/년)	TSP(톤/년)
전국	12,914,115	70,146	879,834	44,382	96,483
서울특별시	2,550,441	7,921	97,122	7,852	17,069
부산광역시	862,699	2,563	32,038	3,066	6,665
대구광역시	731,776	2,082	27,961	2,452	5,331
인천광역시	696,907	1,873	25,210	2,368	5,147
광주광역시	362,995	1,199	15,139	1,251	2,720
대전광역시	417,382	1,460	20,272	1,315	2,858
울산광역시	315,927	8,439	104,024	947	2,058
경기도	2,735,798	9,626	120,978	8,937	19,428
강원도	449,731	5,647	72,380	1,676	3,644
충청북도	422,129	4,201	51,517	1,589	3,455
충청남도	527,522	4,715	58,544	2,038	4,430
전라북도	509,148	4,545	58,365	1,977	4,297
전라남도	498,292	6,169	74,929	2,145	4,662
경상북도	799,941	7,318	88,221	3,000	6,522
경상남도	858,060	7,183	92,651	3,102	6,743
제주도	175,367	2,216	25,774	762	1,655

미산먼지 발생량도 작게 산정되었으나 경기도를 제외한 대부분의 도에서는 반대의 경향을 보이고 있다. 이러한 차이의 원인 중 한가지는 차종별 VKT가 시도별로 차이가 있기 때문인 것으로 추정되지만 정확한 원인의 파악은 과학적인 측정 및 분석에 의한 통계자료의 검증이 선결되어야 할 것으로 사료된다.

2.2 비포장도로 미산먼지

차량이 비포장도로(unpaved road)를 주행할 때 도로 표면에 가해지는 바퀴의 힘에 의해 표면 상에 존재하던 물질이 파쇄되고 바퀴의 회전력과 차량 통행에 의해 생성되는 난류기류에 의해 미산하게 된다. 차량의 뒤에 유도되는 난류성 후류(turbulent wake)는 차량이 도로를 통과한 후에도 상당시간 이러한 효과를 지속시키게 된다.

비포장도로에서의 미산먼지 발생활동은 포장도로의 경우와 동일하며, 포장도로에서의 미산먼지 배출계수는 ARB Section 7.10에서 제시하는 다음의 실험값을 이용하였다. 참고로 AP-42에서는 미사함량, 차량속도, 차량무게, 수분함량 등의 함수로 표현되는 비포장도로 배출계수식을 산업도로와 일반도로를 구분하여 제시하고 있지만 비포장도로에 대한 여러가지 통계자료가 미비되어 있어 오차요인이 많은 관계로 본 연구에서는 간편하게 적용할 수 있는 ARB의 단일 배출계수를 채택하였다.

$$E = 2.27 \text{ [lbs/VMT]} \text{ for PM10}$$

TSP 배출계수는 PM10 배출계수에 비례계수 1.64를 적용하였으며 다음과 같이 정의되는 경우에 의한 일반적인 저감계수를 적용하였다. 그런데 현재로서는 건설교통부에서 보유하고 있는 비포장도로의 차량통행량 조사자료가 전무하기 때문에 본 연구에서는

미국 캘리포니아에서 조사된 비포장도로 차량통행량 통계수치인 10대/일을 적용하였다. 참고로 저감계수로는 강우에 의한 자연적 저감요인을 적용하였다.

$$R = (1 - \text{Precipitation Days}/365)$$

표 3의 지역별 비포장도로 비산먼지 배출량 산출 결과를 보면, 특별시, 광역시의 비산먼지 발생량에 비하여 상대적으로 도로포장율이 낮은 각 도(道)의 발생량이 월등함을 확인할 수 있다. 특히 산지가 많아 도로포장율이 낮은 강원도와 경상북도의 비포장도로 연장이 가장 길기 때문에 비산먼지 발생량도 가장 많은 것으로 산출되었다. 포장도로 비산먼지와 비교하여 볼 때 특별시와 광역시의 비산먼지 발생량은 전적으로 포장도로에 기인하며 각 도의 경우 포장도로와 비포장도로 비산먼지 발생량은 비슷한 수준인 것으로 분석된다.

2.3 건설공사 비산먼지

일반적으로 건축공사와 도로공사가 가장 비산먼지가 많이 발생하는 건설공사 (heavy construction operation)이며, 공사의 성격 및 시간별 기상조건 등에 따라 비산먼지 발생량은 매우 큰 폭으로 변하게 된다.

건설공사에서의 비산먼지 발생활동은 공사면적과 공사기간이 된다. 통계자료는 도시과에서 제공하는

건축허가 연면적을 사용하였으며 평균 공사기간은 150일 (5개월)로 가정하였다. 그리고 건설공사 비산먼지와 관련된 저감계수는 공사기간 중 일일 강우량 0.254 mm 이상인 평균 강우일인 25일을 적용하였다.

$$\text{Activity} = \text{공사면적} \times \text{공사기간} [\text{acre-month}]$$

건설공사에 의한 비산먼지 배출계수는 미국 캘리포니아주 ARB에서 수정한 배출계수를 이용하였다. 참고로 ARB는 MRI에서 실험적으로 산출한 건설공사 배출계수를 채택하였으며, 이는 지축을 흔드는 정도의 중장비를 이용한 대규모 공사에 적합한 AP-42 배출계수의 29% 정도에 해당되는 작은 값이다. 따라서 기존에 AP-42를 이용하여 산출된 건설공사 비산먼지는 상대적으로 과대예측 되었을 가능성이 높은 것으로 판단된다.

$$E = 0.17 \text{ for TSP, } 0.11 \text{ for PM}_{10} [\text{ton/acre-month}]$$

표 4에 제시된 전국 시도별 건설공사 비산먼지 배출량을 보면, 지역별로는 서울특별시와 경기도의 수도권에서 건설공사가 많았기 때문에 비산먼지 발생량도 가장 높게 산출되었다. 그러나 통계연도 2001년에는 IMF 이후의 건설경기 침체에 따른 건설활동의 감소요인이 있었음을 감안할 필요가 있다고 판단된다.

Table 3. Fugitive dust emission from unpaved roads by administrative districts.

구 분	비포장도로연장 (km)			PM10 (톤/년)	TSP (톤/년)
	국도(특별시도)	지방도	시군도		
전 국	149	2,246	11,087	21,313	34,953
서울특별시	12			19	32
부산광역시	41		17	90	148
대구광역시			31	48	79
인천광역시	3		155	250	410
광주광역시				0	0
대전광역시	9			13	22
울산광역시		375	783	1,827	2,996
경기도		284	512	1,256	2,059
강원도	46	268	1,988	3,633	5,958
충청북도		163	1,177	2,113	3,465
충청남도		272	943	1,917	3,144
전라북도	1	274	1,170	2,281	3,742
전라남도	31	198	1,369	2,521	4,134
경상북도	0	425	1,863	3,612	5,924
경상남도	7	361	1,517	2,975	4,880
제주도		1	318	503	825

Table 4. Fugitive dust emission from construction operations by administrative districts.

구 분	동 수	연면적 (천m ²)	PM10 (톤/년)	TSP (톤/년)
전 국	145,959	97,717	10,883	16,331
서울특별시	17,281	15,755	1,755	2,633
부산광역시	6,446	5,781	644	966
대구광역시	7,192	6,084	678	1,017
인천광역시	9,167	5,909	658	988
광주광역시	3,223	2,426	270	405
대전광역시	5,123	3,364	375	562
울산광역시	4,233	2,396	267	400
경기도	30,011	26,383	2,938	4,409
강원도	7,046	2,488	277	416
충청북도	6,837	3,211	358	537
충청남도	7,243	3,936	438	658
전라북도	5,959	2,921	325	488
전라남도	6,173	2,162	241	361
경상북도	11,840	5,481	610	916
경상남도	14,289	8,149	908	1,362
제주도	3,896	1,270	141	212

2. 4 농업활동 비산먼지

농업활동(agricultural activity)에서의 비산먼지 발생활동은 경지면적에서 이루어지는 경운작업과 수확작업으로 구분된다. 통계자료로는 경지면적통계(농림부, 2001)를 사용하였으며 경운작업에서는 경지면적 중 수경식 경작지인 논 면적은 제외하고 밭 면적만을 고려하였다. 한편 농경지 통행차량에 의한 비산먼지도 농업활동으로 포함시켰다.

$$\text{Activity} = \text{경지면적 [ha]}$$

농업활동 중 경운작업에 의한 비산먼지 배출계수는 AP-42 Section 7.4의 실험식을 이용하였다.

$$E = 5.38 k \cdot s^{0.6} [\text{ton/ha-pass}]$$

여기서

k = particle size multiplier (0.33 for TSP, 0.148 for PM10) [ton/ha-pass]

s = percent soil silt content (18%)

환경부 측정자료(1993)에 의하면 표면토양의 미사분율은 18%이므로 배출계수는 PM10의 경우 30.475 ton/ha-pass이다. 참고로 경지면적 당 경운작업은 1회로 가정하였다.

농업활동 중 수확작업에 의한 비산먼지 배출계수는 각각 수확기계, 적하기계 및 운송기계에 의한 배출계수를 합산하여 산출된 것으로 AP-42 Section 9.3.2를 참조하였다. 현재 우리나라는 재배작물별 비산먼지 배출계수가 개발되어 있지 않은 관계로 미국의 주요 재배작물인 밀(wheat)과 수수(sorghum)를 각각 쌀과 밭 작물로 가정하여 배출계수를 적용하였다. 따라서 본 결과에는 상이한 재배작물과 경작방식에 의한 오차요인이 포함되었음을 감안하여야 할 것이다.

$$E = 292 \text{ for wheat, } 1392 \text{ for sorghum [g/km}^2 \text{] for PM10}$$

농업활동 중 농경지의 차량통행에 의한 비산먼지 배출계수는 비포장도로 비산먼지 배출계수와 동일하며, 다만 경작지에서의 주행거리는 ARB Section 7.11에서 제시된 4.37 VMT/Acre로 가정하였다(VMT: Vehicle Miles Traveled). 한편 미국의 경작지와 우리나라의 경작지는 경작활동의 성격이 상이하므로 이

를 고려하여 농지면적 중 논면적에서만 차량통행이 가능하며 주행거리도 미국 경우의 절반 수준인 것으로 가정하였으며, 차량통행 비산먼지의 경우에는 경우에 의한 저감계수를 적용하였다.

표 5의 전국 시도별 농업활동 비산먼지 배출량 산출결과에서 지역별 농업활동 비산먼지 발생량을 살펴보면, 도시인 특별시와 광역시의 발생량은 미미한 반면 시외지역 농업활동에 의해 대부분의 비산먼지가 발생함을 확인할 수 있다. 한편 농업활동별 비산먼지 배출구성비를 도시한 그림 4를 보면, 수확활동에서의 발생량이 전체의 절반을 차지하며 농경지의 차량통행, 경운작업과 농작물 이송작업에 의한 발생

Table 5. Fugitive dust emission from construction operations by administrative districts.

연 별	논면적 (ha)	밭면적 (ha)	PM10 (톤/년)	TSP (톤/년)
전 국	1,146,082	730,060	8,544	15,938
서울특별시	745	1,309	9	19
부산광역시	6,694	3,061	44	81
대구광역시	6,702	4,951	53	100
인천광역시	17,926	6,668	112	202
광주광역시	10,366	3,636	64	114
대전광역시	3,352	2,934	29	55
울산광역시	9,615	4,669	65	119
경기도	126,908	81,853	951	1,775
강원도	50,098	66,838	531	1,048
충청북도	64,484	69,031	607	1,178
충청남도	187,268	67,814	1,163	2,087
전라북도	163,536	52,786	987	1,758
전라남도	221,455	108,806	1,505	2,755
경상북도	158,191	137,000	1,343	2,564
경상남도	118,548	59,933	813	1,492
제주도	194	58,771	267	592

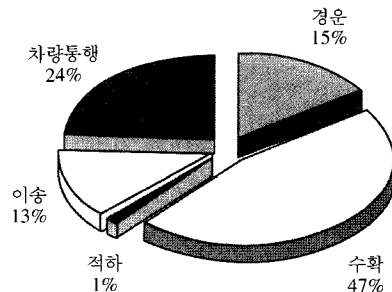


Fig. 4. Fraction of fugitive dust emissions from agricultural operations.

량이 그 다음임을 알 수 있다.

2.5 자연발생 비산먼지

경작지, 목초지, 나대지, 해안의 모래사장 그리고 비포장도로와 같이 대기에 노출된 토양 표면에서는 바람에 의한 풍식(wind erosion)으로 비산먼지가 발생하게 된다. 풍식에 의한 자연발생 비산먼지 배출계수를 산출하기 위하여 미국 농림부에서는 풍식방정식(WEQ: wind erosion equation)을 이용한 예측모델인 RWEQ(Revised Wind Erosion Equation: Donald *et al.*, 1996) 등을 추천하고 있다.

자연발생 비산먼지 발생활동은 풍식 노출면적이 되며, 통계자료 상에서 수집 가능한 풍식 노출면적은 경지면적과 산불, 무허가벌채, 산림훼손에 의한 산림 피해 면적 그리고 비포장도로의 면적 등이다. 따라서 자연발생 비산먼지는 통계자료 상에서 확인 가능한 발생원에 의한 발생량 만이 산출가능하며 현재의 통계자료 만으로는 미확인 발생원에 의한 기여율은 정확하게 확인하기 힘들다.

Activity = 풍식 노출면적 [ha]

풍식에 의한 자연발생 비산먼지 배출계수는 풍식 방정식(WEQ)을 이용하였다.

$E = A \cdot I \cdot K \cdot C \cdot L \cdot V$ [ton/ha]

여기서

A = particle size multiplier (0.038 for TSP, 0.025 for PM10) [ton/ha]

I = soil erodibility [ton/ha]

K = surface roughness factor

C = Vclimatic factor = $0.504 U^3/PE^2$

L = unsheltered field width factor

V = vegetable cover factor

PE = Thonthwaite's Precipitation-Evaporation index
 $= \sum_{i=1}^{12} 115 [P_i / (T_i - 10)]^{10/9}$

토양부식도(I)는 토양입자의 입경분포, 토양의 구성형태 등에 의해 변화하며 표면거칠기계수(K)는 산 등성이, 밭고랑, 흙덩어리와 같은 거칠기요소에 의한 바람의 감속효과를 고려하기 위한 계수이며 비포장도로의 경우에는 이러한 거칠기요소가 없는 평지이므로 $K=1$ 이 된다. 기후계수(C)는 풍식에 영향을 미치는 풍속, 토양의 수분함유량과 같은 기후요소를 영향도를 고려하기 위한 계수이며 기상자료를 통계적으로 분석하여 산출된다. 즉, 기후계수 산출식에서 U [m/s]는 대상지역의 연평균 풍속이며 PE 는 월평균 강수량 P_i [inch]와 월평균 기온 T_i [°F]을 이용하여 산출되는 무차원 값이다. 비보호 영역의 너비계수(L)는 주풍향의 영향을 고려하기 위한 계수로 비포장도로의 경우 주풍향이 도로의 길이방향과 일치하게 되면 영향을 미치는 영역의 폭은 도로의 폭에 한정되지만 길이방향으로는 도로의 길이만큼 확장된다. 일반적으로 비보호 영역의 너비계수는 0.29~0.34의

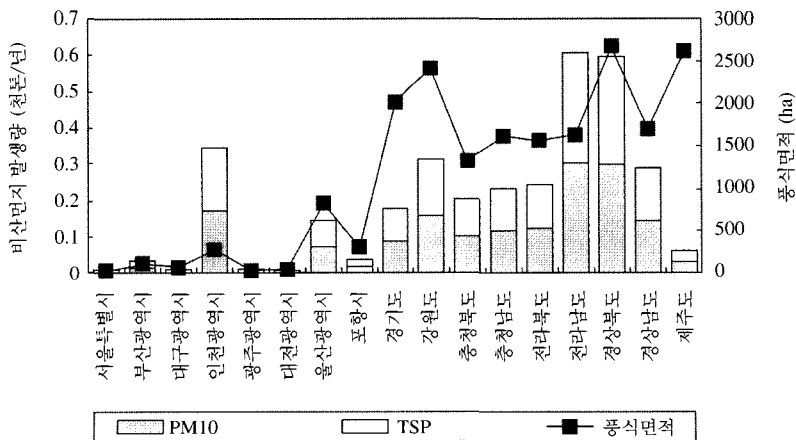


Fig. 5. Fugitive dust emission from natural sources by administrative districts.

Table 6. Fugitive dust emission from natural sources by administrative districts.

연 별	목초지 (ha)	산림 피해 (ha)	해수 육장 (ha)	야적장 (ha)	비포장 도로 (ha)	PM10 (톤/년) = TSP*0.5
전 국	8735	713	379	310	8,103	1,557
서울특별시	18	3	0	2	7	4
부산광역시	28	5	31	8	34	16
대구광역시	42	3	0	0	18	4
인천광역시	52	11	0	109	95	171
광주광역시	17	12	0	1	0	4
대전광역시	24	13	0	0	5	2
울산광역시	84	46	0	0	695	71
경기도	1436	50	50	4	477	87
강원도	907	95	29	0	1,381	156
충청북도	419	95	0	0	803	101
충청남도	845	38	0	0	729	115
전라북도	579	57	59	0	867	121
전라남도	486	74	1	106	959	302
경상북도	883	177	165	78	1,373	297
경상남도	528	33	0	1	1,131	143
제주도	2385	1	42	0	191	29

범위의 값을 갖는다. 식생차폐계수(V)는 식생에 의해 풍식이 방지되는 영향을 고려하는 계수이며 비포장도로의 경우 식생이 자라나지 못하므로 V=1이 된다. 그리고 자연발생 비산먼지와 관련된 저감계수로는 강우에 의한 저감계수를 적용하였다.

표 6의 통계자료에 의하면 풍식 노출면적은 경작지 >> 목초지 = 비포장도로 >> 산림피해 > 해수육장 = 야적장 순으로 나타났으나 각 노출면적에서의 비산먼지 배출계수가 상이하기 때문에 비산먼지 발생량은 비포장도로 >> 야적장 > 해수육장 = 경작지 순으로 산출되었다. 참고로 경작지 노출면적은 표 5의 논과 밭 면적을 합산하였다. 따라서 그림 5와 같이 비포장도로와 경작지가 많은 각 도(道)의 비산먼지 발생량이 상대적으로 특별시 및 광역시와 비교하여 높게 나타나고 있으나, 인천광역시의 경우에는 인천부두의 야적장 비산먼지 발생량에 의해 전라남도, 경상북도에 이어 세 번째로 높은 수치를 보이고 있다.

한편 자연발생 비산먼지의 배출구성비를 도시한 그림 6을 보면, 비포장도로 비산먼지가 전체의 절반을 차지하며 그 다음으로 야적장, 경작지 비산먼지임을 알 수 있다. 그러나 본 자료는 전술한 바와 같이 통계자료화 되지 않은 풍식 노출면적은 고려되지 않았다.

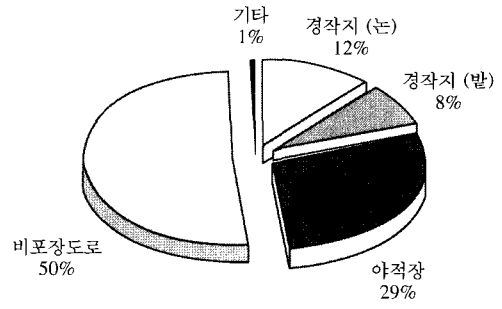


Fig. 6. Fraction of fugitive dust emissions from natural sources.

Table 7. Fugitive dust emissions by administrative districts. (단위: 톤/년)

구 분	건설 활동	농업 활동	포장 도로	비포장	자연 발생	비산 먼지	총먼지*
전 국	16,331	15,938	122,083	34,953	3,114	192,418	439,815
서울특별시	2,633	19	13,476	32	7	16,167	9,936
부산광역시	966	81	4,446	148	33	5,673	12,541
대구광역시	1,017	100	3,880	79	7	5,084	5,818
인천광역시	988	202	3,498	410	342	5,439	7,287
광주광역시	405	114	2,101	0	7	2,628	1,996
대전광역시	562	55	2,813	22	3	3,455	2,179
울산광역시	400	119	14,434	2,996	142	18,091	13,843
포항시	84	128	973	308	244	1,738	4,745
경기도	4,409	1,775	16,786	2,059	174	25,204	22,394
강원도	416	1,048	10,043	5,958	312	17,776	53,842
충청북도	537	1,178	7,148	3,465	203	12,531	14,715
충청남도	658	2,087	8,123	3,144	229	14,241	96,938
전라북도	488	1,758	8,098	3,742	243	14,329	7,086
전라남도	361	2,755	10,397	4,134	604	18,252	63,299
경상북도	916	2,564	12,241	5,924	594	22,239	55,445
경상남도	1,362	1,492	12,856	4,880	286	20,875	71,037
제주도	212	592	3,576	825	58	5,264	1,457

* 총먼지 배출량: 환경통계연감(환경부, 2002)

2. 6 시도별 비산먼지 발생현황

전국 시도별 포장도로, 비포장도로, 건설공사, 농업 활동 및 자연발생 비산먼지 발생량 산출결과를 표 7에 종합하였으며, 전국 및 주요 도시의 비산먼지 발생활동별 구성비율을 그림 7에 도시하였다.

표 7을 보면 행정구역별 비산먼지 발생량은 경기도 > 경상북도 > 경상남도 > 전라남도 > 울산광역시 > 강원도 > 서울특별시 순으로 나타나고 있어 수도권에서의 배출량이 압도적임을 알 수 있다. 그림 7에서 전국의 비산먼지 배출분포를 살펴보면, 포장도로

(56%) > 비포장도로 (22%) > 건설공사 (11%) > 농업활동 (9%) > 자연발생 (2%)의 순으로 도로에서 발생하는 비산먼지가 80%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 반면 그림 8에 제시한 미국의 비산먼지 배출분포를 보면 비포장도로 (41%) > 자연발생 (18%) > 농업활동 (15%) > 건설공사 (13%) > 포장도로 (8.4%)로 시멘트 생산업과 채석업, 광산업과 같은 산업활동에 의한 배출비중은 매우 미미한 수준이며 비포장도로, 포장도로, 건설활동과 풍식에 의한 배출이 80% 이상을 차지하고 있다. 특히 비포장도로 발생 비산먼지의 배

출비율이 40%를 상회하고 있어 미국의 비산먼지의 주요 관리대상은 비포장도로 비산먼지인 것으로 분석된다.

한편 서울특별시의 비산먼지 배출분포를 살펴보면 포장도로 (78%) > 건설공사 (22%)로 나타났으며 인천광역시는 포장도로 (57%) > 건설공사 (24%) > 비포장도로 (9%) > 자연발생 (6%)의 구성비율을, 부산광역시는 포장도로 (71%) > 건설공사 (23%) > 비포장도로 (3%)의 구성비율을 보이고 있으며, 이러한 구성비율의 차이는 도시의 특성 및 토지이용도와 밀접한 관

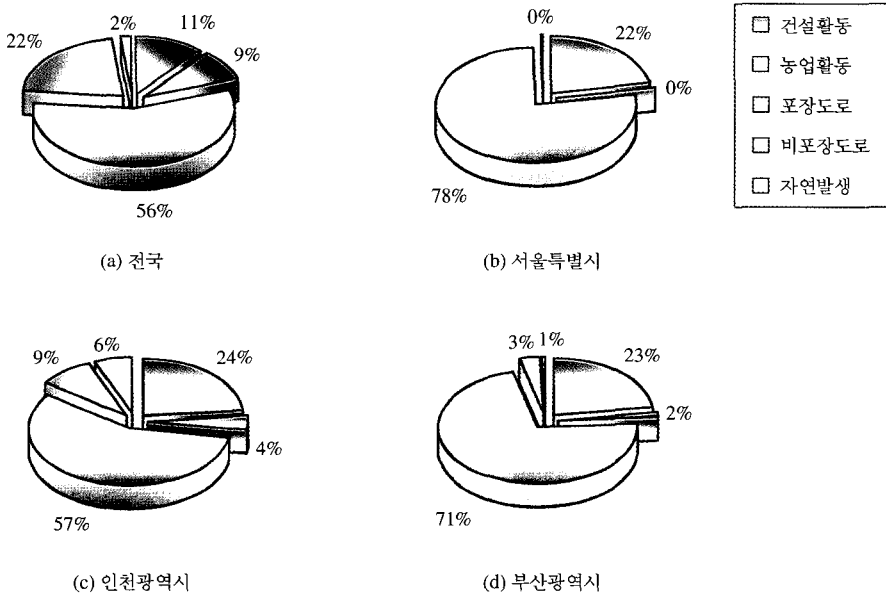


Fig. 7. Fractions of fugitive dust by sources for several major cities (PM10).

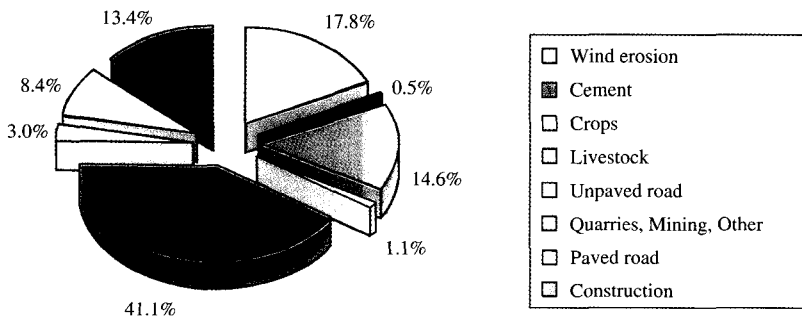


Fig. 8. Fraction of PM10 fugitive emissions in USA.

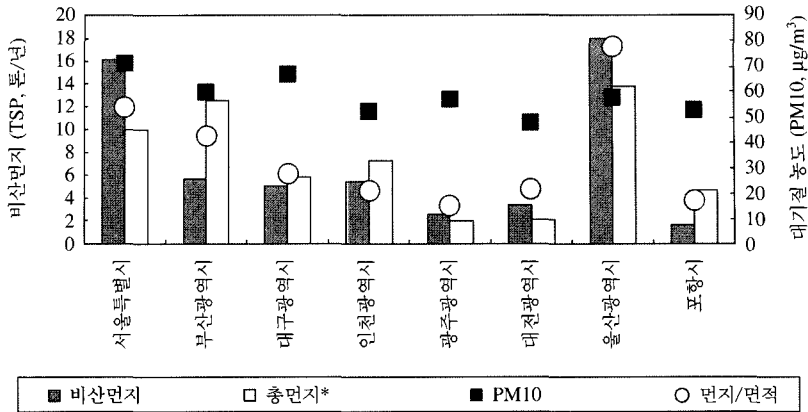


Fig. 9. Fractions of fugitive dust by sources for several major cities (PM10).

련을 가지는 것으로 분석된다. 즉, 서울특별시의 경우 도로포장율이 매우 높으며 도시화 비율이 높기 때문에 농경지가 없는 관계로 비산먼지 발생원은 포장도로 및 건설활동으로 국한된다. 참고로 인천광역시의 자연발생 비산먼지 배출량이 6%로 높게 산출된 것은 인천부두의 야적장에서의 발생량을 포함하였기 때문이다.

전국 주요도시의 비산먼지 발생량(TSP)과 총먼지 배출량의 비교를 그림 9에 도시하였다. 산업도시인 부산광역시, 포항시의 먼지 배출형태는 비산먼지보다 산업활동에 의한 총먼지 배출량이 많은 것으로 산출되었으나 울산광역시는 도로발생 비산먼지가 차지하는 비중이 매우 크게 나타났다. 포항시의 먼지 배출량은 비산먼지의 경우 광주광역시보다 작은 것으로 나타났지만 총먼지를 합한 전체 먼지배출량은 광주광역시보다 큰 것으로 산출되었다. 한편 그림 9에 연평균 미세먼지 대기질 농도를 같이 도시하였는데 서울특별시가 70 µg/m³을 초과하는 높은 수치를 보이고 있으며 상대적으로 낮은 수준인 인천광역시나 대전광역시의 50 µg/m³도 국외 대도시의 평균농도와 비교하면 매우 높은 수치로 우리나라의 전국적인 먼지농도가 위험한 수준임을 확인할 수 있다. 한편 실제적인 생활면적에서의 먼지 발생현황을 정량적으로 비교하기 위하여 비산먼지와 총먼지의 배출량을 합한 먼지발생량을 행정구역 면적 중 산림면적을 제외한 생활권면적으로 나눈 수치를 비교하여 보았다. 단위 생활권 면적당 먼지배출량을 주요 도시별로 비교

하여 보면, 포항시는 광주광역시보다 약간 높은 수준인 반면 울산광역시와 서울특별시는 매우 높은 수준으로 이들 도시가 대기환경용량을 초과하고 있음을 간접적으로 시사하고 있다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 전국 시도별 비산먼지 배출목록을 구축하였다. 포장/비포장도로, 건설공사, 농업활동, 자연발생 비산먼지를 구분하고 기존의 비산먼지 배출계수의 재평가를 수행하여 산출결과와 신뢰도를 향상시켰다. 본 배출목록은 대기보전 정책수립 지원 시스템 (CAPSS) 구축을 위한 대기배출목록 개발에 직접적으로 활용될 수 있으며 지속적인 보완과 갱신을 통하여 「수도권 대기환경개선 특별법」 중 미세먼지 저감대책 수립을 위한 과학적인 기초자료 및 판단자료로 활용될 것으로 기대된다.

비산먼지 발생량은 활동도에 직접적으로 비례하므로 산정결과의 정확도를 향상시키기 위해서는 비산먼지 발생활동도를 정확하게 반영하는 통계자료의 확보가 중요한 것으로 분석되었다. 즉, 포장/비포장도로는 차량주행거리 (VKT)에, 건설공사는 건설공사 면적에, 농업활동은 경작면적 그리고 자연발생 비산먼지는 노출면적 통계자료의 정확도에 의해 산정결과의 신뢰도가 결정된다.

국가 대기관리 정책시스템의 장기적인 운영을 위

해서는 비산먼지 배출목록의 정확도의 향상이 필요하며 이를 위해서는 국내 상황에 적합한 비산먼지 배출계수의 도출이 요청된다. 특히 전국 비산먼지 총 발생량의 60%에 육박하며 생활환경과 밀접한 연관성을 갖는 포장도로 비산먼지의 정확한 발생량 산출을 위해서는 국내 도로상태 및 차량통행 상황을 반영하는 배출계수의 산정과 발생활동을 정확하게 반영할 수 있는 통계자료의 확보가 절실하게 필요하다고 사료된다. 현재 「대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구(국립환경연구원)」의 일부로 수행중인 이동차량을 이용한 포장도로에서의 Silt loading 측정에 관한 연구(원경호 등, 2002)와 일평균교통량(ADT)이 포장도로의 Silt loading에 미치는 영향(장기원 등, 2003) 등의 연구를 통하여 우선적으로 국내 포장도로의 비산먼지 발생량 산정을 위한 배출계수가 개발 중이지만 장기적으로는 건설공사 및 자연발생 비산먼지의 현황 파악 및 배출량 산출을 위한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 포스코의 현업과제로 포항산업과학연구원에서 수행한 연구와 환경부 차세대 핵심개발사업으로 인하대학교 환경공학과에서 수행한 연구결과를 종합한 것으로 각각의 연구지원 기관에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

경기개발연구원 (2002) 경기도 대기오염물질 배출목록시스템 구축방안, 연구보고서 2002-03, 201.
 김예신, 박화성, 이용진, 임영욱, 심동천 (2003) 서울 지역에서 인체 위해도에 입각한 대기오염물질의 관리 우선순위 선정에 관한 연구, 대기환경학회지, 19(2), 205-216.
 김인수, 장영기 (2002) MECHANICAL과 Fugitive Dust Model을 이용한 비포장도로에서의 비산먼지 발생량 산정 및 주변영향 평가, 한국환경영향평가 학술논문집, 9(4), 257-269.
 김현구, 김민균, 한석천, 윤황영 (2003) 전국 지역별 비산먼지 발생량 산정에 관한 연구, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 311-312.

서병철, 전기준, 홍지형, 정용원 (2001) 도시·산단 지역에서의 비산먼지 발생량 산정에 관한 기초연구, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 385-386.
 석광설, 이석조, 홍지형, 차준석, 김정태, 장세경, 김인희 (2002) 대기오염물질 배출원조사의 현황과 추진방향, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 55-56.
 원경호, 전기준, 안정언, 홍지형, 정용원 (2002) 도시/산단지역 포장도로에서의 Silt loading에 관한 실험적 연구, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 255-256.
 원경호, 전기준, 서병철, 안정언, 홍지형, 정용원 (2002) 이동차량을 이용한 포장도로에서의 Silt loading 측정에 관한 연구, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 312-313.
 이내현, 김윤신 (2002) 대규모 공사시 비산먼지 산정 및 확산분석에 관한 연구, 한국환경영향평가 학술논문집, 9(3), 249-255.
 장기원, 원경호, 허화영, 전기준, 홍지형, 정용원 (2003) 일평균교통량(ADT)이 포장도로의 Silt loading에 미치는 영향, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 247-248.
 정태섭 (1996) 비산먼지의 대기 중 전송과정의 모델화에 관한 연구, 한국환경공학회지, 18(10), 1171-1182.
 환경부 (2000) 대기보전 정책수립 지원시스템-배출량 산정 방법론 정의를, 정보통신부.
 홍지형 (2003) 대기오염 배출원 Inventory 구축사업의 현황, 대기오염 Emission Inventory 구축 및 활용에 관한 Workshop, 한국대기환경학회·국립환경연구원, 5-28.
 California Air Research Board (1997) Introduction to the Emission Inventory Procedural Manual Volume III, Methods for Assessing Area Source Emissions in California, Section 7 Miscellaneous Processes Methodologies, Technical Support Division.
 Countess Environmental (2001) Methodology for Estimating Fugitive Windblown and Mechanically Re-suspended Road Dust Emissions Applicable for Regional Scale Air Quality Modeling, Western Governor's Association, Final Report for WGA Contract No. 30203-9.
 Donald, W.F., S. Ali, J.D. Bilbro, H.M. Schomberg, J.E. Stout, and T.M. Zobeck (1996) Revised Wind Erosion Equation, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, Big Spring, Texas.
 Houck, J.E., J.C. Chow, and M.S. Ahuja (1989) The Chemical and Size Characterization of Particulate Material Originating from Geological Sources in California,

- Receptor Models in Air Resources Management, Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA, 322-333.
- Muleski, G. (1996) Improvement of Specific Factors (BACM Project No. 1), Final Report, Midwest Research Institute.
- National Pollutant Inventory (1999) Emission Estimation Technique Manual for Fugitive Emissions, Dept. of Environment and Heritage, Australia.
- National Pollutant Inventory (2001) Emission Estimation Technique Manual for Mining Version 2.3, Dept. of Environment and Heritage, Australia.
- Shao, Y. (2000) Physics and Modelling of Wind Erosion, Academic and Oceanographic Sciences Library, Vol. 23, Kluwer Academic Publishers.
- U.S. Environmental Protection Agency (1995) Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Research Triangle Park, NC, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000) National Air Pollutant Emission Trends, 1900-1998, EPA-454/R-00-002, Research Triangle Park, NC, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (2001) Procedures Document for National Emission Inventory, Criteria Air Pollutants 1985-1999, EPA-454/R-01-006, Research Triangle Park, NC, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (2002) Supplements to the Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Research Triangle Park, NC, USA.
- Watson, J.G. and J.C. Chow (2000) Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research, DRI Document No. 6110.4F, Desert Research Institute, USA.