

도로 중 미세먼지 재비산 억제를 위한 기초연구

유은철[†] · 도우곤 · 조정구
대기보전과

Study for the Control of Re-suspended Dust from Paved Road

Eun-Chul Yoo[†], Woo-Gon Dou and Jeong-Goo Cho

Air Preservation Division

Abstract

In order to investigate the effects of re-suspended dust from road, it was conducted that understanding the distribution of particle diameter and estimating emission amount of dust with EPA AP-42 in pave road. To find a reduction method of re-suspended dust, we used microscale meterological model, Envi-met. The results were as follows ;

1. In Chungjang-Ro, coarse particle($> 2.5 \mu\text{m}$) is 82.3% at center of road and 51.0% at road side. In Jungang-Ro, coarse particle($< 2.5 \mu\text{m}$) is 62.7%. On the other hand, fine particle($< 2.5 \mu\text{m}$) is 17.7% at center of road and 49.0% at road side in Chungjang-Ro and 37.3% in Jungang-Ro. It is caused by vehicle speed and type.

2. The mass median aerodynamic diameter(MMAD) of re-suspended dust particle is $2.13 \mu\text{m}$ at center of road, $0.95 \mu\text{m}$ at road side in Chungjang-Ro and $0.44 \mu\text{m}$ in Jungang-Ro. It is less than median respiratory diameter, $4.0 \mu\text{m}$ defined by ACGIH.

3. The emission coefficient is 0.644 g/VKT in Chungjang-Ro and 0.464 g/VKT in Jungang-Ro. The difference comes from difference of heavy vehicle traffics.

4. The result of microscale meterological model, Envi-met show that road side vegetation reduce the concentrations of dust by $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/m}^3$.

Key words : re-suspended dust, size distribution, CFD, silt loading

서 론

먼지는 대기오염물질 중 인체위해성이 높고 스모그, 시정장애 등에 영향을 미치는 중요한 오염물질로서 차량으로부터 배출되는 미세먼지, 질소화합물 등은 사람의 건강을 위협하며 호흡기질환, 심장질환 등으로 인한 사회적 비용 증가를 초래하며¹⁾ 입경이 작은 미세입자 일수록 입자상 물질농도에 의한 초과 사망자수는 더 통계적으로 유의한 증가율을 나타낸다^{2),3)}. 최근 연구결과^{4),5)}에 따르면 포장도로에서 재비산되는 미세먼지가 비산 먼지의 형태로 발생하는 미세먼지(PM10)의 약 60% 이상으로 기여하고 있는 것으로 추정하였다. 과거 10년간 부산지역 대기 오염은 오존, 미세먼지에 의한 대기환경기준 초과가 많은 경향을 보였으며 지역 내부에서 발생한 먼지와 황사, 외부로부터 유

입된 먼지에 의한 영향과 해안지역의 해염입자에 의한 영향 등으로 미세먼지의 오염수준이 개선되지 못하고 있으며 이로 인한 시정장애, 시민의 체감오염도 악화 및 건강피해 가능성이 제기되고 있다⁶⁾. 부산지역 배출원별 오염물질 배출량은 총 $44,814 \text{ ton/y}$ 이며 이 중에서 비산먼지로 인한 배출량이 83.3%로 가장 많은 부분을 차지하며 비산먼지에 의한 대기오염물질 별 배출 기여율은 총 비산먼지중 도로 재비산 먼지가 77.7%, 공사장 먼지 12.5%, 타이어 마모 9.8%로 산정되어 자동차에 의한 도로 재비산먼지가 가장 큰 배출원으로 조사되었다. 본 연구는 부산지역 먼지발생량 중 상당 부분을 차지하는 도로 재비산 먼지가 미세먼지 오염에 큰 영향을 주는 것으로 조사된 연구결과를 기초로 하여 부산지역 차량통행량이 많은 주요 간선도로에서 차량운행으로 발생하는 재비산 먼지의 입경별 먼지농도

[†]Corresponding author. E-mail : yooagfe@korea.kr
Tel : +82-51-888-6816, Fax : +82-51-888-6817

및 구조 등을 특성을 조사하였으며 전산 유체역학적 해석을 통해 도로변 재비산 먼지를 억제할 수 있는 방법을 모의하였다.

재료 및 방법

조사지점

도로 재비산먼지 발생과 그 특성을 파악함에 있어 부산지역 전체 도로에 대해서는 많은 시간과 인력이 소요되므로 우선적으로 부산지역 주요 간선도로들 중에서 대형차량의 운행이 많아 화물차량 혼재율이 높은 충장로 중앙부두 지점과 평상시에 교통량이 많고 남북으로 도심을 가로지르는 중앙로 송공삼거리 지점을 조사대상으로 선정하였다. 2008년 부산지역 차량교통량조사 결과⁷⁾에 따르면, 충장로 조사지점의 1일 평균(06:00~20:00시간) 차량통행량은 78,138대이며, 화물차량 혼재율 13.8%로 다른 도로에 비해 다소 높은 편이며, 중앙로 송공삼거리 지점의 1일 평균(06:00~20:00시간) 차량통행량은 92,535대, 화물차량 혼재율은 약 10% 정도로 부산지역의 상습적인 교통정체지점에 속한다. 본 연구에서는 도로에서 자동차 운행으로 발생하는 재비산 먼지 조사를 위해 샘플링 지점은 Fig. 1과 같다.



Fig. 1. Sampling sites.

재비산 먼지의 입경분포 및 특성조사

도로 재비산먼지의 입경분포를 알기 위해 8단계 층돌판으로 구성된 Cascade impactor(Model 298, Andersen Sampler Inc., U.S.A)와 유량제어기능을 갖춘 샘플링 펌프를 사용하였다. 8단 먼지분리채취기는 impactor 유속이 0단계부터 7단계로 갈수록, 상단에서 하단으로 감에 따라 높게 되도록 설계되어 있으며 하단으로 갈수록 점점 작은 입자가 관성충돌에 의해 포집된다. 먼지입자를 포집하기 위해 사용된 여지는 직경 81mm, pore size 0.45 μ m 유리섬유필터(glass fiber filter; TISCH

Environmental, Inc.)를 사용하였으며 채취유량은 28.3l /min으로 최소 2시간이상 시료를 채취하였다. 시료채취 전후에는 cascade impactor의 각 단계 층돌판을 깨끗하게 세척후 조립하여 시료 채취시 오차를 줄이도록 하였다. 여지는 시료포집 전후 3일간 항온, 항습상태에서 건조하여 전자저울(sartorius, BT224S)로 칭량하여 여과 전후의 중량차로 먼지가 단계의 층돌판에서 분리, 채취되는 먼지입자의 유효한계직경(Effective cut-off diameter)은 cascade impactor 제조사의 자료를 사용하였다. 도로 재비산 먼지 측정을 위해 도로 중앙선 및 도로변 지면 1m 높이에 8단 먼지분리채취기(Eight stage Non-viable cascade Impactor)를 설치하여 샘플링을 하였으며 시료채취시, 차량통행, 기상조건 등은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 먼지입자들의 입경분포와 구조를 파악하기 위해 부산지역 주요 간선도로의 조사지점 및 영역(Fig. 1)에서 8단 먼지분리채취기(Eight stage Non-viable cascade Impactor, 28.3LPM)를 사용하였으며 채취한 시료는 전자현미경(SEM-EDX, 미국, Jeol사model JSM-6701F)을 이용하여 입경별 먼지형상, 성분 등 특성을 조사하였다.

재비산 먼지제어를 위한 모의(simulation)

Envi-met 모델은 도시지역에 있어서 지면, 건물, 식생 그리고 대기의 상호작용에 관한 미세규모 모델로서 뚜렷한 미세규모 기상의 패턴을 만들낼 수 있으며 건물의 벽면체 뿐 만 아니라 숲과 같은 부드러운 모형도 모사할 수 있다는 장점이 있다. Envi-met 모델구성은 대기모델, 식생모델, 토양모델 그리고 지면과 건축물에 관한 부분으로 구성되며 이러한 모델특성으로 공간적으로 넓은 영역보다 좁은 영역에서의 상세한 기상정보를 도출할 수 있는 기능을 가지고 있으며 미기상에 영향을 미칠수 있는 공기의 평균 흐름, 난류과정, 복사과정 등을 구체적으로 고려하여 계산할 수 있으며 토양모델은 지면으로부터 2 m 깊이 까지 14개 층으로 구성되어 있다. 또한 식생 모델에서는 열과 수증기의 난류 흐름, 기공저항 앞의 에너지 평형식, 식생/토양 물수지 등에 대한 계산뿐 만 아니라 지표면과 건축물에 대해서도 이들에 관계된 복사속, 난류속, 열속 등이 자세하게 고려되어진다.

모델링 입력자료로서 지형정보는 부산광역시 다차원 도시 공간 정보 서비스(이하 다차원 도시정보)를 이용하였다. 다차원 도시정보에서 제공되는 위성사진을 바탕으로 각 격자점의 피복 상태를 지정하였으며, 다차원 도시정보에서 제공되는 도로주변 건물의 위치와 높이를 파악하여 모델링영역 안에 지정하였다. 전 도로표면에서 PM10이 배출되도록 하였으며, 도로주변으로 식생이 있는 경우와 없는 경우를 모델링하여 PM10의 저감효과에 대하여 계산을 수행하였다.

모델링 초기조건(Table 2)은 시료채취를 수행한 해당일 오전 6시의 부산지방 기상청 자료(부두로 10/20, 중앙로 10/21)를 사용하였으며 풍향의 경우 주도로에 수평하게 입력하였다.

Table 1. Conditions of sampling sites

	Jungang-Ro	Chungjang-Ro
Vehicle speed(km/h)	26	25
Temperature(°C)	12.4	14.1
wind speed(m/s)	3.4	4.1
R.H.(%)	48	37

Table 2. Initial condition of modeling

Condition	Chungjang-Ro	Jungang-Ro
Wind speed(m/s)	3.9	4.6
Wind direction(°)	18.4	26.6
Temperature(°C)	12.7	14.4
Relative humidity(%)	51	36.9

결과 및 고찰

도로변 재비산 먼지 발생량 추정

일반적으로 차량의 운행으로 포장도로에서 발생하는 비산 먼지(이하 포장도로 재비산먼지)의 배출계수는 미국 EPA AP-42의 경험식(1)을 사용하여 계산되는데, 도로표면 위의 silt loading (sL)과 도로를 주행하는 차량들의 평균 무게(W)에 따라 결정된다. AP-42의 포장도로 재비산먼지 배출계수 산정식은 다음과 같다(EPA, 2006).

$$E = k \times (sL)^{0.65} \times (w/3)^{1.5} - c \quad (1)$$

여기서, E(g/VKT)는 포장도로 재비산먼지의 배출계수, k는 입자보정계수(PM10의 경우 4.6 g/VKT), sL(g/m²)은 도로표면에 쌓여있는 silt loading, W는 도로를 통행하는 차량의 평균 무게(tons)이다. 그리고 C (g/VKT)는 도로재비산먼지 배출계수 산정식을 개발할 당시인 1980년대 자동차 집단(fleet)의 배기 가스, 브레이크 및 타이어나마모에 의한 먼지 배출계수로 PM10의 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. 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, 도로 교통을 차단해야 하고 많은 비용과 인력이 소요되는 등의 단점이 있어, 국내에 이를 적용하기에는 어려움이 크다^{(8),(9),(10)}. 본 연구에서는 도로 재비산 먼지발생량을 직접적으로 구하기보다 기존 연구를 바탕으로 조사지점에 대한 silt loading 값을 산출

하여 비교하였다. 재비산먼지 배출계수를 구하는 식(1)에서 silt loading 값은 대상 도로의 일평균 통행량(ADT; Average Daily Traffic)과 도로의 표면상태(normal conditions, worst-case conditions)에 따라 2003년 개정된 Table 3을 적용하여 계산했다.

겨울철 결빙구간의 도로에 모래와 같은 미끄럼방지용 물질을 뿌리는 경우와 같은 최악의 경우에는 교통량에 따라 기본 추천 값에 1~4배 정도 곱하며 또한, 미끄럼방지용 물질 살포로 인한 도로의 silt loading에 대해 최초 기여값을 약 2.0 g/m² 정도로 제시하고 있다. 본 연구에서는 Table 4에서 제시하는 도로 표면의 silt loading이 통행량에 따라 정상적인 조건에서는 0.03(0.015) ~ 0.6 g/m²의 범위의 값을 채택하였으며 식 (1)에 의한 포장도로의 비산먼지 배출계수 산정에 있어서 중요한 인자중의 하나로 통행하는 차량의 평균무게는 대상 도로의 통행량과 구성비는 Table 4와 같으며 이는 부산지역 2008년 교통통계 자료를 이용하여 구하였다.

대상 도로별 차종별 통행량을 살펴보면, 총 통행량은 중앙로 송공삼거리에서 92,535대로 총장로 영주고가도로 지점에서 78,138대보다 많았으며 구성비는 승용차 경우는 총장로 75.8%, 중앙로 73.0%로 가장 높은 비율을 차지하며 대형화물차 및 컨테이너 비율은 총장로 6.7%, 중앙로 0.6%로 총장로에서 대형차량의 통행이 많음을 보여준다. 식 (1)을 적용한 대상 도로별 비산먼지 배출계수를 산출하기 위해, 차종별 무게는 버스 15톤, 승용차 1.5톤, 승합차 2톤, 소형트럭 2톤, 대형트럭 20톤 그리고 컨테이너화물차는 25톤으로 적용하였다. 대상 도로별 통행차량의 전체 차량무게는 총장로 245,932톤, 중앙로 243,337톤이었으며 총장로, 중앙로의 평균무게는 각각 3.1톤, 2.6톤으로 계산되었다. 식 (1)을 적용한 대상 도로별 비산먼지 배출계수를 산출해보면, 총장로 0.644 g/VKT, 중앙로 0.464 g/VKT로 대형 차량의 통행량이 많은 총장로에서 비산먼지 배출계수가 높게 나타났다.

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

Table 4. Average Daily Traffic at study sites

road	Total	Bus	passenger car	van	small truck	large truck	container
weight(ton)		15	1.5	2	2	20	25
Chungjang-Ro	78,138	548	59,262	4,425	8,667	1,653	3,583
%	100	0.7	75.8	5.7	11.1	2.1	4.6
Jungang-Ro	92,535	6,190	67,560	9,311	8,875	446	153
%		6.7	73.0	10.1	9.6	0.5	0.2

도로변 재비산 먼지 특성

포장도로에서 발생하는 비산먼지(이하 포장도로 재비산먼지)의 입경분포와 구조 등 특성을 파악하기 위해 조사지점에서 차량운행에 따른 먼지농도를 실측한 결과는 Table 5와 같다.

대상 도로별 재비산먼지의 입경별 특성을 살펴보면, 통상 입경이 2.5 μ m 이상인 입자들을 조대입자라 하는데 이는 기계적, 물리적인 과정에서 발생하는 1차 오염물질로서 총장로에서 먼지입경이 2.5 μ m 이상인 먼지가 중앙지점에서 82.1%, 도로변에서 51.0%를 차지하였으나 반면에, 중앙로 측정지점에서는 62.7%를 차지하는 것으로 나타나 대형차량의 운행이 많고 차량 통행량이 많은 도로에서 조대입자의 발생이 많은 것을 보여준다. 반면에, 작은 먼지 (지름이 2.5 μ m 이하인 먼지, 극미세먼지 또는 미세입자라고 함)는 대부분 화학반응에 의해 생성되어 배출되거나, 대기에서 광화학반응에 의해 생성되는데 작은 먼지는 1차 오염물질과 2차 오염물질 (대기에서 화학적 변환작용에 의해 생성되는 물질)이 섞여 있다. 총장로에서 먼지입경이 2.5 μ m 이하인 먼지가 중앙지점에서 17.7%, 도로변에서 49.0%를 차지하였으나 반면에, 중앙로 측정지점에서는 37.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 조사지점에서 차량속도,

차량의 구성비 등의 차이에 따른 것으로 인체 유해성 등 보건학적 측면에서는 작은 먼지의 발생이 많은 도로변에 대해 재비산먼지의 관리가 더 필요할 것으로 보인다.

조사지점에서 채취된 먼지의 공기역학적 질량중위입경을 구하기 위해 각 단계별로 채취된 먼지의 중량을 cascade impactor 제조사에서 제시한 시료채취효율 및 내부손실을 보정하기 위한 효율로 나누어 보정 먼지중량을 구하였다. 각 단계별 보정 먼지중량을 전체 보정먼지중량으로 나누어 단계별 중량비율(%)을 산출하였으며 각 단계별 유효한계직경(ECD)에 대수를 취해 y축으로 하고, 각 단계별 포집된 먼지중량을 x축에 누적 확률로 하는 대수확률 그래프를 Fig. 2에 도식하였다.

Fig. 2에서 재비산먼지 입자의 공기역학적 질량중위입경(MMAD)을 살펴보면, 대형차량의 운행이 많은 총장로 중앙지점(Fig. 2 (a))에서는 2.13 μ m, 도로변(Fig. 2 (b))에서는 0.95 μ m 이었으며 중앙로 송공삼거리(Fig. 2 (c))에서는 MMAD가 0.44 μ m로 나타났으며 이는 ACGIH에서 정의한 호흡성먼지의 중위입경(50% cut-off size)인 4.0 μ m보다 작은 것으로 앞에서 기술된 먼지입경에 따른 질량분율에 대한 내용과도 일치한다. 총장로에서 조사지점별 질량중위입경의 차이는 중앙지점이

도로변보다 대형차량의 운행이 많으며 중앙에 위치하여 차량들이 왕복운행으로 인한 바람이 강하여 도로에 쌓인 입경 큰 먼지들이 더 많이 재비산되는 것으로 보이며 상대적으로 도로변에서는 차량통행에 따른 바람발생이 상대적으로 작아 질량중위입경이 작은 것으로 판단된다. 반면에 차량운행의 구성비가 다소 상이한 충장로와 중앙로에서 질량중위입경을 비교하면 중앙로가 0.44 μm 로 더 작았으며 이는 재비산되는 먼지의 발생특성이 도로별로 상이함에 따른 1차 오염물질과 자동차 배출가스가 대기에서 화학적 변환작용에 의해 생성되는 물질의 영향이 반영된 것으로 보인다.

재비산먼지 입자들의 구조적인 형상을 알아보기 위해 8단 먼지분리채취기(Eight stage Non-viable cascade Impactor)를 이용하여 대형차량의 통행량이 많은 충장로 중앙지점(Fig. 3 (a))과 대조지역으로 연구원(Fig. 3 (b))에서 각각 채취한 시료 중 3 stage ~ 7stage까지 전자현미경으로 분석하였다. 각 단계별 먼지 입자의 형상을 살펴보면, 충장로 중앙지점(Fig. 3

(a))에서는 대조지점보다 입자수가 다소 많고 입자들의 모양이 미세한 양상을 보였다. 특히 입자크기가 1.1 μm 이하인 stage 6, 7에서는 차량통행량이 많은 충장로(Fig. 3 (a))에서는 입자들이 대조지점에 비해 더욱 미세하여 여지에 쌓여있는 것을 확인할 수 있다. 이는 도로변 지역에서 발생하는 먼지입자들의 크기가 작고 주로 유기화합물의 불완전 연소에 의해서 발생하는 연료의 연소 과정에서 PAHs 등 유해물질이 발생¹¹⁾한다는 보고와 연료 사용량이 많은 도심 지역에서 농도가 더 높고, 도심 지역에서 PAHs의 주요 배출원은 자동차, 그 중에서도 경유 자동차로 보고¹²⁾, 경유 자동차에서 나노입자가 배출되는 것으로 알려짐에 따라 인체 건강 측면에서 자동차 인접 대기오염에 대한 연구¹³⁾ 및 입경이 작은 미세입자 일수록 입자상 물질 농도에 의한 초과사망자수는 더 통계적으로 유의하게 큰 증가율을 나타낸다²⁾³⁾는 연구결과들을 고려해 볼 때, 도로 재비산먼지가 인체 유해성에 중요한 영향인자임을 간과할 수 없다.

Table 5. Mass fraction of each stage in cascade impactor

stage	ECD* (μm)	Mean particulate mass fraction(%)		
		A**	A-1***	B†
0	> 10.0	2.2	18.0	3.5
1	9.0	22.4	3.0	13.9
2	5.8	3.7	15.0	17.4
3	4.7	3.0	3.0	20.9
4	3.3	50.8	12.0	7.0
5	2.1	5.2	12.0	7.8
6	1.1	3.7	15.0	10.5
7	0.7	4.3	10.5	7.9
Back-up	<0.4	4.5	11.5	11.1
Total		100.0	100.0	100.0

* Effective cut-off diameter ** Chungjang-Ro center *** Chungjang-Ro side † Jungang-Ro site

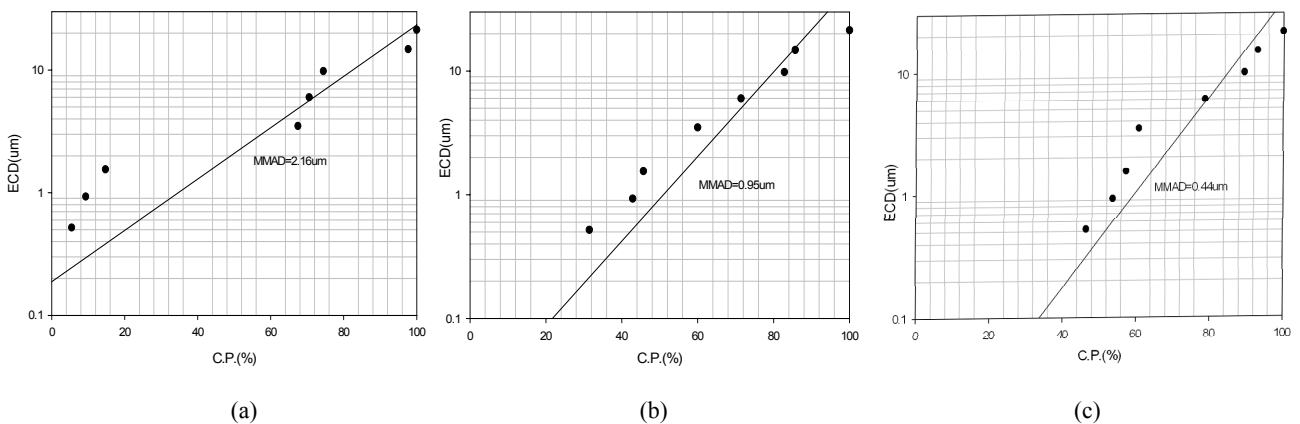


Fig. 2. MMAD of dust at each sampling sites ; (a) Chungjang-Ro center, (b) Chungjang-Ro side, (c) Jungang-Ro.

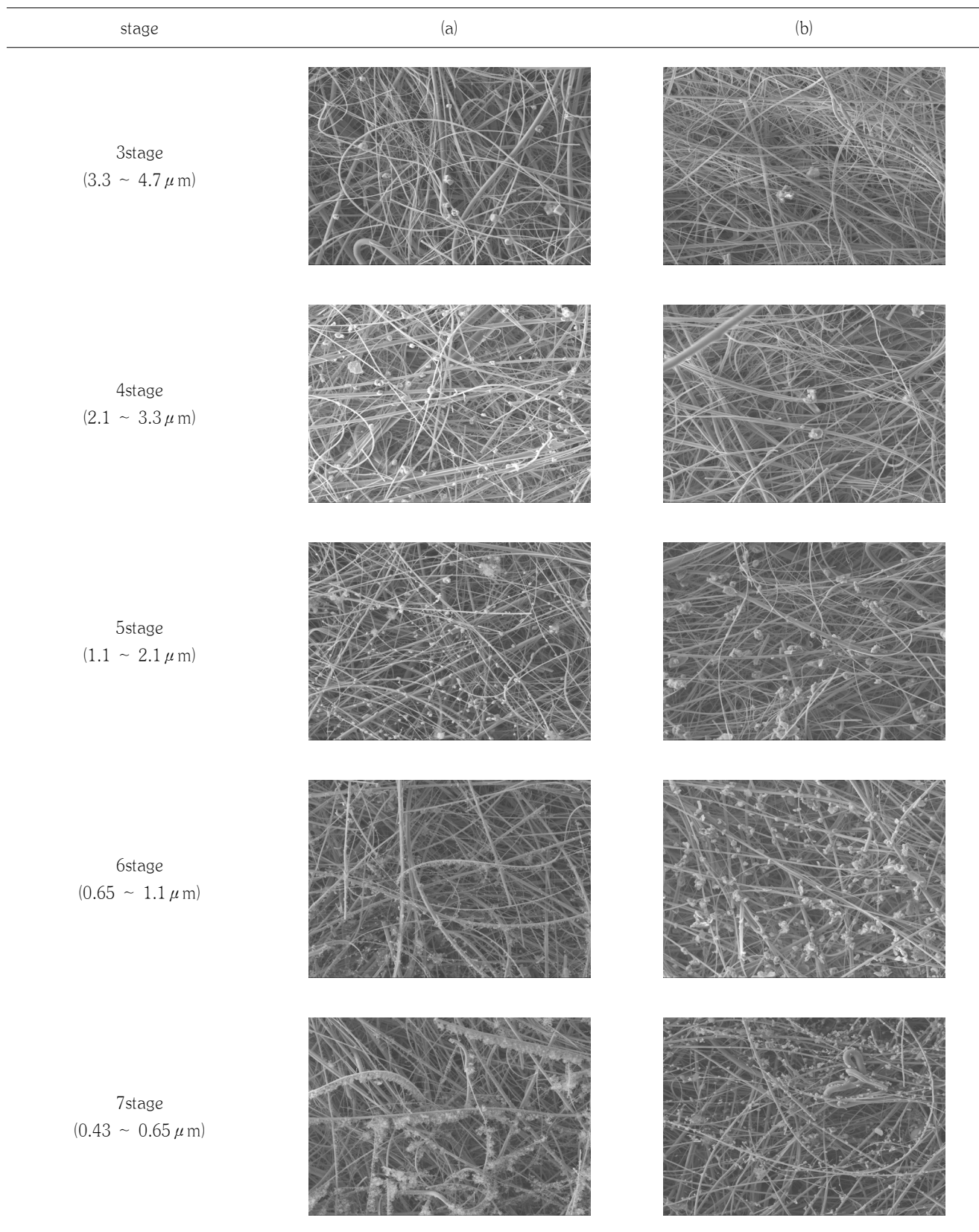


Fig. 3. Electron microscope photographs of resuspended dust ; (a) Chungjang-Ro, (b) Background.

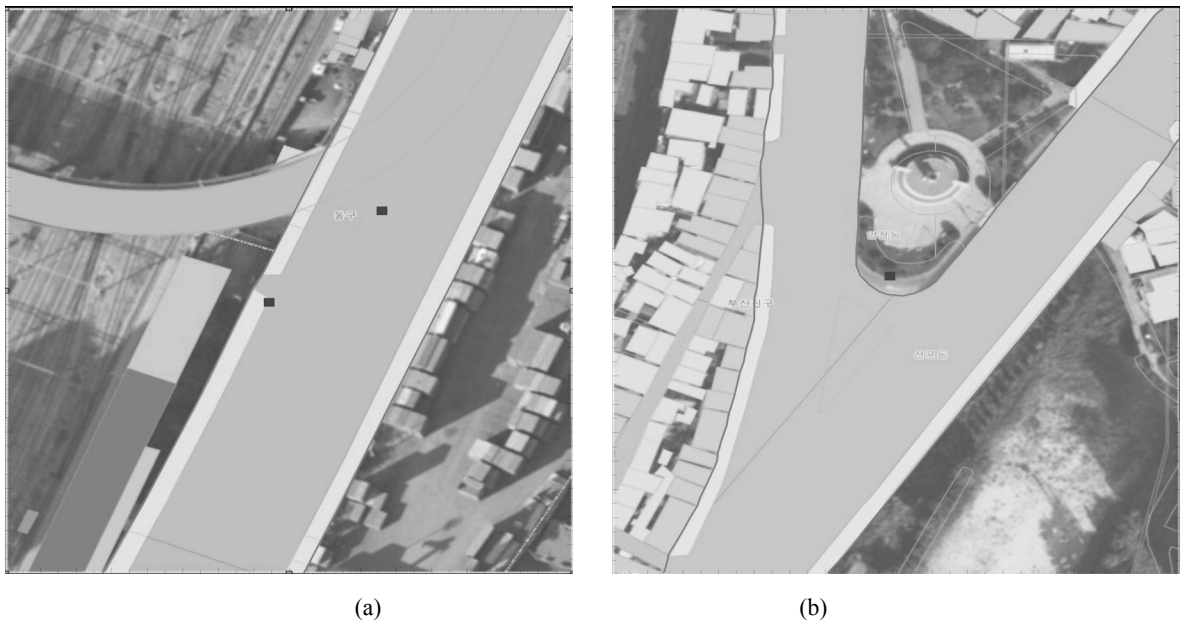


Fig. 4. Simulation area and sites(■); (a) Chungjang-Ro, (b) Jungang-Ro

Table 6. Structure of modeling domain

Dynamics		Non-hydrostatic	
Spatial structure		34 grids × 40 grids × 10 layers	
Resolution	horizontal vertical	5 m 2 m, telescoping 10%	
Modeling interval		0600LST~1200LST	

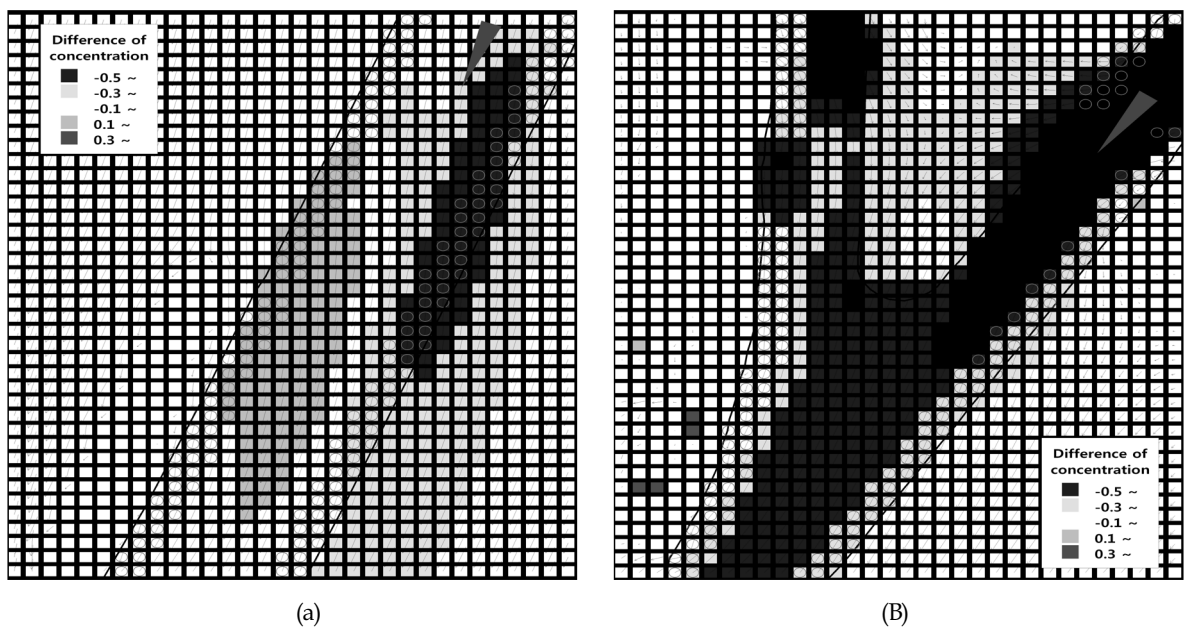


Fig. 5. Results of simulation using Envi-met model; (a) Chungjang-Ro (b) Jungang-Ro

도로변 재비산 먼지의 전산유체학적 해석

도로변 재비산먼지의 거동을 파악하기 위해 Envi-met 미기상 모델(ver 3.1)을 적용하였으며 모델링 대상지역은 시료채취 지점을 중심으로 Fig. 4와 같이 160 m × 200 m의 도메인(Table 6)을 설정하고 전산 유체역학 해석을 시도하였다.

모델링 수행조건으로 전체 도로표면에서 PM10(300 $\mu\text{g}/\text{m}^2$)이 배출되도록 하였으며, 도로주변으로 식생이 있는 경우와 없는 경우를 모델링하여 PM10의 저감효과에 대하여 계산을 수행하였으며 Envi-met 미기상 모델(ver 3.1)을 적용하여 모델링한 결과는 Fig. 5와 같다. 대상지역은 시료채취 지점을 중심으로 식생지역(○)이 있을 경우와 없을 경우의 PM10농도(mg/m^3) 차이에 따른 공간적 분포를 살펴보면, 충장로 지역(Fig. 5(a))에서는 도로 가장자리에서는 먼지농도가 식생이 없는 경우에 비해 나무 등 식생을 할 경우 0.1 ~ 0.5 mg/m^3 정도 감소하는 반면에 도로내부의 일부 구간에서 0.1 mg/m^3 정도가 증가하는 것으로 나타났다. 중앙로 송공삼거리(Fig. 5(b))에서는 도로변에 식생을 할 경우 도로내부 및 가장자리 모든 지역에서 먼지농도가 0.1 ~ 0.5 mg/m^3 정도 감소하는 결과를 보였다. 따라서 도로에서 차량운동 등으로 인해 발생하는 재비산먼지를 억제하기 위한 방법 중 한 방법으로 도로변에 나무 등을 심어 가꾸면 도로 재비산 먼지를 효과적으로 저감할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구는 부산지역에서 도로 재비산먼지의 억제를 위한 기초연구로서 도로에서 발생하는 먼지의 입경분포 및 형상에 관한 특성을 파악하고 차량의 운행으로 포장도로에서 발생하는 재비산먼지의 배출계수를 미국 EPA 경형식을 활용하여 산출하였다. 그리고 도로변 재비산먼지의 억제를 위한 방법을 모색하기 위해 Envi-met 미기상 모델(ver 3.1)을 적용하여 전산유체역학적인 해석을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상 도로별 재비산먼지의 입경별 특성을 살펴보면, 입경이 2.5 μm 이상인 초대입자는 충장로에서 중앙지점 82.3%, 도로변 51.0%를 차지하였으며 중앙로에서는 62.7%를 보여 대형차량의 운행이 많고 차량 통행량이 많은 도로에서 초대입자의 발생이 많은 것을 보여준다. 반면에, 입경이 2.5 μm 이하인 미세먼지는 충장로에서 중앙지점 17.7%, 도로변 49.0%를 차지하였으며 중앙로 측정지점에서는 37.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 조사지점에서 차량속도, 차량의 구성비 등의 차이에 따른 것으로 인체 유해성 등 보건학적 측면에서는 작은 먼지의 발생이 많은 도로변에 대해 재비산먼지의 관리가 더 필요할 것으로 보인다.

2. 재비산먼지 입자의 공기역학적 질량중위입경(MMAD)을 살펴보면, 대형차량의 운행이 많은 충장로 중앙지점에서 2.13 μm , 도로변에서 0.95 μm 이었으며 중앙로에서는 0.44 μm

로 나타났으며 이는 ACGIH에서 정의한 호흡성먼지의 중위입경(50% cut-off size)인 4.0 μm 보다 작은 것으로 나타났다.

3. 대상 도로별 비산먼지 배출계수는 충장로 0.374 g/VKT, 중앙로 0.255 g/VKT로 나타났으며 대형차량의 통행량이 많은 충장로에서 비산먼지 배출계수가 높게 나타났다.

4. 재비산먼지 입자들의 구조적인 형상은 충장로 중앙지점에서는 대조지점보다 입자수가 다소 많고 입자들의 모양이 미세한 양상을 보였으며 특히, 입자크기가 1.1 μm 이하인 입자들이 차량통행량이 많은 충장로에서 대조지점에 비해 더욱 미세하여 여지에 쌓여있는 것을 확인할 수 있다. 이는 도로변 지역에서 불완전 연소에 의해서 발생하는 연료의 연소과정에서 유해물질의 발생, 경유 자동차에서 나노입자 배출 등으로 인체 건강 측면에서 도로 재비산먼지가 중요한 영향인자임을 보여 준다.

5. 도로의 재비산먼지를 억제하기 위한 한 방안으로 도로 주변지역에 나무 등 식생이 없을 경우와 식생이 있을 경우를 구분하여 도로변 재비산먼지의 거동을 Envi-met 미기상 모델을 적용하여 모델링한 결과, 도로변에 나무 등 식생을 할 경우 0.1 ~ 0.5 mg/m^2 정도 먼지를 저감시킬 수 있는 결과를 보였다.

본 연구수행 결과를 토대로 도로변 대기오염 저감 및 보행자 건강보호, 지하철역 실내 공기질 개선을 위해 다음과 같이 제언한다.

1. 자동차 배출가스의 직접적인 흡입 및 노출에 의한 피해를 줄이고 대기오염물질의 저감 및 차단을 위해 간선도로와 보행도로(인도) 사이에 사철나무 등과 같은 식물을 심어 도심 綠化를 통한 녹색도시 구현방안을 제언한다.

2. 시민들이 이용하는 지하철역에서의 실내 공기질은 외부 도로변 공기유입에 의한 영향이 절대적이며 실내 공기질 개선을 위한 방안으로 공기흡입구 주변 및 지하철역 출입구에 나무를 식재하여 도로변 차량 배출가스의 직접적인 흡입 방지, 대기오염물질을 제거시키는 방지시설 기능과 지하철역 출입구는 도로변에 노출되어 있어 지하철의 출발 및 도착시 후드역할을 하여 오염물질이 지하역사로 흡입되어 실내 공기질을 악화시킨다. 따라서 도로변 출입구쪽에서 차량배출가스 등 오염물질을 차단, 저감하고 유입되는 오염공기 흐름을 변경하여 지하철역 실내 공기질 개선에 기여할 수 있을 것이다.

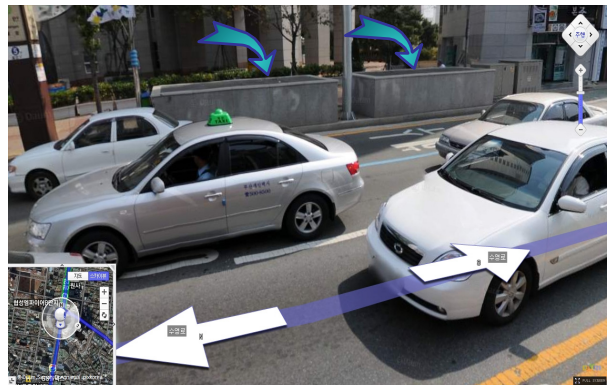
3. 기존 정류장이 도로쪽으로 향하고 있어 버스정류장에서 차량을 기다리는 동안 운행차량의 배출가스, 바람 등으로 인한 건강상 피해 및 불쾌감을 줄이기 위한 방안으로 대기오염에 강한 나무의 식재 또는 출입방향을 도로 반대편으로 개선하는 것이 요구된다.



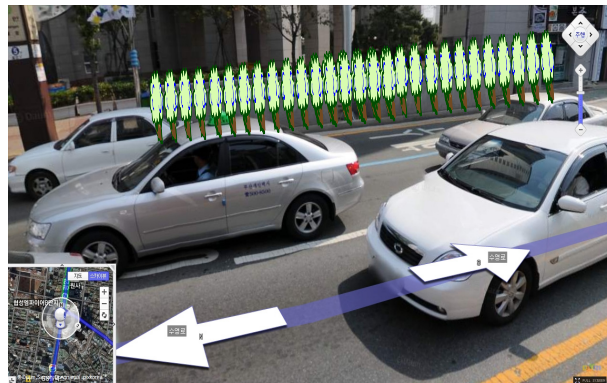
[지하철역 출입구, 전]



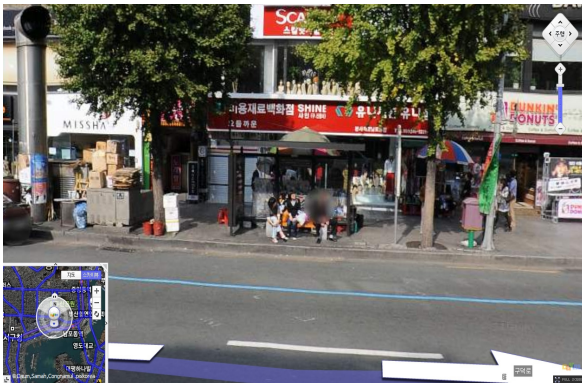
[지하철역 출입구 개선방안]



[지하철역 공기흡입구, 전]



[지하철역 공기흡입구 개선방안]



참 고 문 헌

1. 건강을 위한 교통규제, 유럽의 환경지구 사례와 시사점, 국토정책, 국토연구원 (2008).
2. Klemm, R.J., R.M. Mason Jr., C.M. Heilig, L.M. Neas, and D.W. Dockery "Is daily mortality associated specifically with fine particles? Data reconstruction and replication of analyses" , J. Air Waste Manag. Assoc., 50, pp.11215~1222(2000).
3. Lighty, J.S., J.M. Veranth, and A.F. Sarofim "Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health" , J. Air Waste Manag. Assoc., 50, pp.1565~1618(2000).
4. 정용원, 한세현, 원경호, 장기원, 홍지형, 포장도로 재비산 먼지 배출량 산정방법의 현황, *대한환경공학회*, pp.1126~1132(2006).
5. 환경부 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구, 최종보고서(2005).
6. 부산광역시 미세먼지 저감관리방안 연구 (2008).
7. 부산광역시, 2008년도 부산광역시 교통조사(I) 차량교통량 조사결과(2009).
8. 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, USA, (available at <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei16/session11/langston.pdf>)(2007).

9. Kuhns, H., V. Etyemezian, D. Landwehr, C. acDougall, M. Pitchford, and M. Green "Testing re~entrained aerosol kinetic emissions from roads (TRAKER): a new approach to infer silt loading on roadways" , Atmospheric Environment, 35(16), pp.2815~2825(2001) .
10. Fitz, D. "Measurements of PM10 and PM2.5 emission factors from paved roads in california" , Final report, Contract No. pp.98~723, California Air Resources Board(2001).
11. UNEP, United Nations Environment Programme "Regionally based assessment of persistent toxic substances, Central and North East Asia regionally report" , Global Environment Facility, URR (<http://www.chem.unep.ch/pts/regreports/C&NE%Asia%20full%20report.pdf>) (2002).
12. Zielinska, B., J. Sagebiel, W.P. Arnott, C.F. Rogers, K.E. Kelly, D.A. Wagner, J.S. Lighty, A.F. Sarofim, and G. Palmer, "Phase and size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in diesel and gasoline vehicle emissions" , Environmental Science and Technology, 38, pp.2557~2567 (2004).
13. Kittelson, D.B. Engines and nanoparticles: A review, Journal of Aerosol Science, 29, pp.575~588(1998).