

토양 분진발생장치의 개발과 평가

이지연 · 이기영[†]

서울대학교 보건대학원 환경보건학과
(2010. 7. 20. 접수/2010. 9. 1. 수정/2010. 10. 13. 채택)

Development and Evaluation of a Dust Generator Using Soil Samples

Jiyeon Lee · Kiyoung Lee[†]

Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health and
Institute of Health and Environment, Seoul National University

(Received July 20, 2010/Revised September 1, 2010/Accepted October 13, 2010)

ABSTRACT

Exposure to fugitive dust can contribute to several respiratory health problems, and proper sampling of fugitive dust is necessary to assess exposure. However, field sampling of soil dust encounters problems from spatial and temporal differences in soil properties, field operations, and meteorological conditions. To minimize these problems, we designed a dust generator that simulates dust generation from soil. The dust generator consisted of a rotating chamber where soil samples were loaded and tumbled, and a settling chamber, where airborne soil dust samples were collected. As standard operating conditions, we decided on 2 g soil mass, 10 min sampling time, and 20 rpm rotating speed, with a flow rate of 30 l/min, based on three common soil textures of loam, sandy loam and silt loam. To evaluate optimal operating conditions, we used mixtures of Joomoonjin silica sand and clay. Although the average PM₁₀ concentration of Joomoonjin silica sand was low, dust concentrations were increased by an increased content of clay. The dust concentrations were consistent across repeated experiments, and showed similar concentration profiles during the sampling time with mixtures of clay and sand (coefficient of variation was 13.6 ± 7.1%). The results demonstrated that these standard operating conditions were suitable for the dust generator, which can be used to investigate variations in soil properties that affect dust production and potential potency of fugitive dust exposure.

Keywords: dust generator, soil texture, fugitive dust

I. 서 론

비산먼지(fugitive dust)는 일정한 배출구 없이 대기 중으로 직접 배출되는 먼지로 자연적으로 발생 또는 연소, 비포장도로에서의 운행, 농작업과 같은 인위적 활동으로 생성된다. 미국 워싱턴(Washington)주에서 수행된 연구에 따르면 비산먼지의 대부분은 풍화작용에 의한 것으로 나타났고,¹⁾ 미국 캘리포니아(California)주에서 수행된 연구에서는 특히 건조한 여름과 가을철에 토양이 산 와킨 계곡(San Joaquin Valley)의 연간

미세먼지(PM₁₀) 생성의 약 60%를 기여하는 것으로 나타났다.²⁾ 또한, 건조한 토양에서 땅을 갈고 경작하는 작업은 높은 농도의 호흡성 분진을 발생시킨다고 한다.³⁾

비산먼지에 수용체가 노출될 경우 노출되는 입자의 크기에 따라 그 영향이 다른데, 일반적으로 입자의 크기가 작을수록 폐포까지 침투하여 건강상 영향을 미친다. 많은 연구들에서 입자상 물질이 기관지나 폐에 쌓여 호흡기질환^{4,6)} 또는 심혈관계 질환,^{7,8)} 천식증상의 악화,⁹⁾ 폐암^{10,11)}과 같은 건강영향과 유의한 상관관계가 있음을 보고하고 있다. 또한, 입자상 물질의 크기뿐만 아니라 그 성분에 의해서도 수용체가 영향을 받으므로 비산먼지를 발생시킬 수 있는 오염원의 특성을 파악하는 것도 매우 중요하다.

공기 중 입자상 물질의 노출에 관한 연구 중 실제

[†]Corresponding author : Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health and Institute of Health and Environment, Seoul National University
Tel: 82-2-880-2735, Fax: 82-2-745-9104
E-mail : cleanair@snu.ac.kr

환경에서 토양 또는 퇴적물로부터 발생하는 비산먼지를 측정하는 것은 기후조건, 수분함량, 표면의 거칠기 등과 같은 요소들로 인해 많은 어려움이 있다.¹²⁾ 따라서 제어된 조건하에서 공기 중으로 먼지를 발생시키고 포집, 측정하는 기기를 개발하는 연구들이 진행되어져 왔다. 제어된 조건 하에서 토양과 같은 고형시료로부터 비산먼지를 발생시키는 방법들은 다양한데 그 중에서도 유동화(fluidization), 중력침강(gravitation), 기계적 분산/교반(mechanical dispersion/agitation) 메커니즘들을 적용한 분진발생장치(dust generator)가 사용되고 있다.

유동화(fluidization)를 이용한 분진발생장치는 챔버 내 위치한 분진발생원에 공기흐름을 직접적으로 주입하여 먼지를 유동화시키고, 유동화된 먼지를 분진발생원으로부터 공기중으로 재부유 시키는 방법이다. 다른 두 가지 메커니즘이 운동학적 또는 기계적 에너지를 분진발생원에 적용시켜 먼지를 발생시키는 것과 달리, 유동화를 이용한 메커니즘은 유입되는 공기흐름의 에너지가 분진발생원의 먼지 입자들에게 전달되어 먼지가 발생하게 된다. 그렇기 때문에 유동화 장치는 부유챔버(suspension chamber)라고 불리기도 한다.

중력침강(gravitation)을 이용한 메커니즘은 분진발생 물질을 일정 공간 내에 낙하시킴으로써 중력을 이용하여 먼지를 발생시키는 방법이다. 이 때 부유된 입자는 기류를 통해 챔버 밖으로 이동하고 회석과정을 거쳐 샘플러에 포집된다.¹³⁾

기계적 분산/교반(mechanical dispersion/agitation) 메커니즘은 일반적으로 회전하는 실린더나 튜브를 이용하여 분진발생 물질을 회전체 내부에서 반복적으로 낙하시켜 먼지를 발생시키는 방법으로, 발생된 먼지는 회전체 내부에 흐르는 기류를 통해 샘플러에 포집된다. 회전체를 이용한 방법은 먼지 발생에 영향을 주는 샘플량, 회전속도, 유량, 회전시간, 습도를 쉽게 조절

할 수 있다는 장점 때문에 여러 분야에서 널리 사용되고 있다.¹⁴⁾

본 연구에서는 기계적 분산/교반(mechanical dispersion/agitation) 메커니즘에 기초하여 토양 또는 퇴적물과 같은 고형환경시료에서 비산될 수 있는 먼지를 발생시키는 기기를 개발하고자 하였다. 그리고 개발된 기기를 효과적으로 이용할 수 있는 최적운전조건을 확인하기 위하여 우리나라에 분포하는 세 가지 토성의 토양을 이용하여 최적운전조건(유량, 토양 샘플량, 샘플링 시간, 회전속도)을 확인하였다. 마지막으로 물리적 특성을 아는 표준사와 점토를 이용하여 앞에서 선정된 최적운전 조건을 평가하였다.

II. 연구방법

1. 분진발생장치(Dust generator) 개발

본 연구에서 개발된 분진발생장치는 기존에 개발된 대형 분진발생장치를 기초로 제작되었다.¹⁵⁾ 작동 메커니즘은 기계적 분산/교반(mechanical dispersion/agitation)으로 회전 시 생성되는 에너지를 고형시료에 가해 고형시료로부터 먼지를 비산시키는 원리이다. 기존 연구에서 개발된 분진발생장치(Southard-Lee laboratory dust generator)는 드럼통을 사용하여 그 크기가 큰 것에 반해, 본 연구에서는 크기를 작게 만들어 적은양의 샘플을 사용하고 이동이 용이하도록 하였다. 또한, 펌프를 이용하여 기존의 분진발생장치에 비해 유량조절이 더 쉽도록 하였고, 집진챔버 내부에 판막이를 설치하여 큰 입자를 제어하고자 하였다.

개발된 분진발생장치는 Fig. 1과 같은 구조로 크게 회전챔버(rotating chamber)와 집진챔버(settling chamber)로 구성된다. 회전챔버는 지름 21 cm, 길이 30 cm 원통형의 스테인리스 스틸로 제작되었고, 바퀴 2개가 한 축에 연결되어 총 4개의 바퀴 위에 놓여 있다. 회전챔

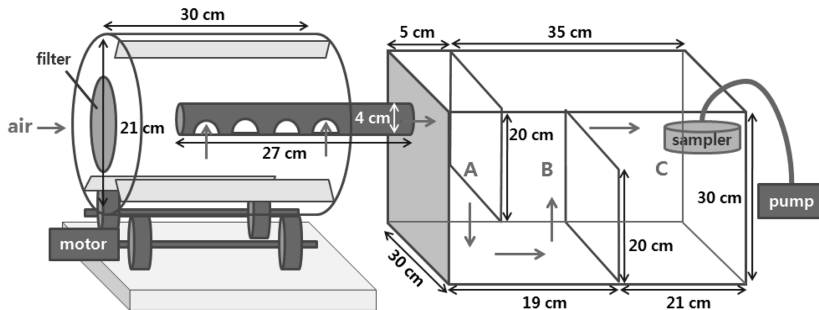


Fig. 1. Schematic diagram of dust generator.

버의 한쪽 옆면은 지름 15 cm의 원형으로 개방되어 있고, 여기에 필터(Whatman No.2 filter paper)를 장착하여 먼지 없는 깨끗한 공기가 회전챔버 내로 유입되도록 하였다. 회전챔버는 바퀴와 연결된 모터(SPG geared motor, model S9KC30BH, SPG Co., Ltd., Korea)에 의해 회전하고, 회전속도 조절장치로 회전속도를 제어한다. 회전챔버 내에는 길이 30 cm, 높이 2 cm의 3개의 날개가 회전챔버 벽면을 따라 평행으로 부착되어 있다. 중앙에는 회전챔버와 집진챔버를 연결하는 지름 4 cm, 길이 27 cm의 고정된 관이 있으며, 관의 한 옆면은 막혀있고 집진챔버와 연결되는 옆면은 뚫려 있다. 고정관은 아래 방향으로 지름 2 cm의 4개의 구멍이 뚫려 있어 회전챔버에서 비산되는 먼지가 이 구멍들을 통하여 집진챔버로 이동하게 된다.

집진챔버는 폭 30 cm, 높이 30 cm, 너비 40 cm의 육각형의 아크릴로 제작하였다. 집진챔버 유입구로부터 5 cm 떨어진 곳에는 너비 30 cm, 높이 20 cm의 첫 번째 판을 두어 회전챔버와 고정관을 거쳐 들어온 공기 중 관성력이 큰 입자를 제거하고자 하였다. B 구역의 가로 길이는 14 cm로 윗방향의 유속은 공기역학적 지름이 20 μm 인 입자의 침강속도(V_{TS})의 추정치인 1.2 cm/s가 되도록 설정하여 비교적 큰 크기의 입자를 제어하고자 하였다. B 구역과 C 구역을 나누는 두 번째 판은 첫 번째 판과 그 크기가 같고 바닥면에 부착되어 있다. 집진챔버 내 공기흐름의 마지막 부분(C 구역)에는 샘플러가 위치하고, 샘플러는 집진챔버 밖의 펌프와 연결되어 시료를 포집하게 된다.

2. 최적운전조건 선정 및 평가

1) 최적운전조건 선정

개발된 분진발생장치에 토양환경 시료를 넣고 먼지를 발생시키기 위해서는 분진발생장치의 적절한 운전조건(유량, 샘플링 시간, 샘플의 수분함량, 샘플량, 회전속도 등)을 알아야 한다. 본 연구에서 분진발생장치 내 주요 공기흐름은 High Flow Vacuum Pump(SK C Inc., Gast Model 1532)를 이용하여 30 l/min의 유량이 회전 챔버로 유입되게 하였다. 그 다음 발생하는 먼지를 측정하여 샘플링 시간(10, 15, 20 min), 토양 샘플량(1, 2, 3 g), 회전속도(12, 20, 30 rpm) 순으로 가장 적절한 운전조건을 정해나갔다. 각각의 조건은 예비실험을 통해 적절한 수준에서 3개의 조건을 정하였다. 최종 선정 기준은 먼지 발생이 충분히 그리고 지속적으로 이뤄지고, 필터에 포집되는 먼지의 양이 지나치게 적거나 많지 않고, 각 토성에서 공통된 경향을 보이는 조건인가에 근거하였다.

실험에 사용된 토양샘플은 우리나라에 가장 많이 분포하는 상위 세 가지 토성의 토양을 이용하였다. 우리나라에 가장 많이 분포하는 토성은 양토(Loam, 44%), 사양토(Sandy loam, 34%), 미사질양토(Silt loam, 18%) 순으로,¹⁵⁾ 토양샘플은 토양지도에 근거하여 2009년 8월 충청남도 홍성군 구항면 내현리에서 채취하였다. 본 연구에서는 토양 또는 퇴적물과 같은 고형시료에서 노출될 수 있는 최대 비산먼지량을 고려하였기 때문에 실험에 사용된 토양샘플은 실험 전 오븐에서 105°C, 24시간 동안 구워 수분함량을 제어하고, 2 mm 체에 거른 후 사용하였다.

2) 최적운전조건 평가

선정된 분진발생장치의 최적운전조건은 주문진표준사(Joomoonjin Silica Sand Co., Ltd., 강릉, 한국)와 점토를 이용하여 운전 시 발생하는 먼지수준을 통해 평가하였다. 표준사와 점토는 실험 전 105°C에서 24시간 동안 오븐에 굵고 2 mm 체에 거른 후, 2:8, 5:5, 8:2의 부피비로 혼합하여 사용하였다. 최적운전조건에 평가는 먼지 발생이 충분히 그리고 지속적으로 이뤄지는가, 표준사와 점토의 혼합비에 따른 먼지발생 특성이 있는가, 반복실험에서 재현성을 보이는가에 따라 평가하였다. 재현성은 먼지 발생추이와 변동계수(coefficient of variation)를 통해 살펴보았다.

3. 시료채취 방법

최적운전조건 선정에는 portable aerosol spectrometer (Model 1.108, Grimm, Germany)가 사용되었고, 6초 간격으로 먼지들의(Total Suspended Particulates; TSP, PM₁₀) 질량농도를 측정하였다. 최적운전조건의 평가에는 Portable aerosol spectrometer로 TSP 농도를, Personal Environmental Monitor(PEM) Model 200 (MSP Corporation, Shoreview, MN)과 SKC Universal pump(SK C Inc.)를 이용하여 유량 4 l/min로 PM₁₀의 질량농도를 측정하였다. 샘플러에는 지름 37 mm의 PVC 필터(SK C Inc., 5.0 μm pore size)가 사용되었고, 1 μg 의 민감도를 갖는 마이크로발란스(Cahn C-35, Paramount, CA)를 이용하여 필터 무게를 측정하였다. 실험은 예상 운전조건들의 조합에 따라 각기 3번 반복하여 수행하였고, 매 실험마다 분진발생장치 내 먼지를 제거하였다.

본 연구에서 PM₁₀ 농도에 대한 위 두 가지 샘플러는 높은 상관관계를 보였고, Portable aerosol spectrometer가 PEM에 비해 약 2.1배 높은 농도를 보였다(Spearman correlation coefficient=0.76, p<0.01). 또한

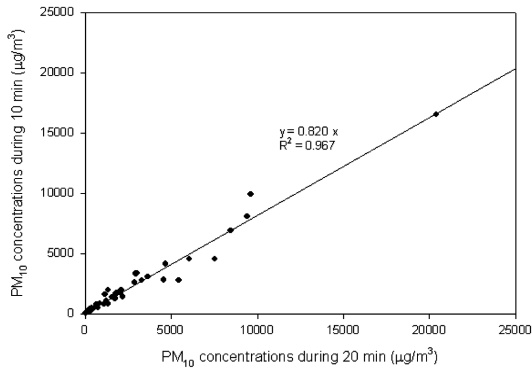


Fig. 2. The relationship of PM₁₀ concentrations by sampling time.

11번의 field blank 필터의 상대표준편차는 0.07%이었고, 펌프 유량의 상대표준편차는 0.006%이었다.

III. 결 과

1. 최적운전조건 선정

1) 샘플링시간

Fig. 2는 각 토성별 토양의 양(1, 2, 3 g), 회전속도(12, 20, 30 rpm)에 따라 20 min 동안 Portable aerosol spectrometer를 이용하여 실시간으로 측정된 PM₁₀ 농도 자료를 10 min으로 잘라 그 평균값들 간의 상관정도를 나타낸 그래프이다. 샘플링시간이 20 min에서 10 min으로 짧아질 경우 PM₁₀ 평균농도는 약 18% 감소하였고 평균 PM₁₀ 값들의 상관정도는 높은 것으로 나타났다. 이를 보아 먼지는 샘플링 초반에 크게 발생하고 샘플링 시작 후 10~20 min 동안 먼지 발생에 큰 감소가 없는 것으로 보인다. 따라서 시료를 분석하기에 적합할 만큼의 먼지가 발생된다면 10 min의 샘플링 시간은 적합하다.

2) 토양 샘플량

Table 1은 회전속도 20 rpm, 10 min의 샘플링 시간 동안 토양 샘플량의 변화에 따른 TSP(total suspended particulates)와 PM₁₀ 농도를 나타낸 결과이다. 표에서 나타난 것과 같이 모든 토성의 토양에서 토양의 양이 증가할수록 발생하는 먼지도 증가하고, 토성에 따라서는 사양토, 양토, 미사질양토의 순으로 먼지가 많이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 토양 샘플량이 1g으로 적을 경우 필터에 포집되는 먼지의 양이 적어 무게를 측정하는데 적합하지 않을 수 있고, 토양 샘플량이 많을 경우에는 먼지가 많이 발생되어 필터에 먼지가 과

Table 1. PM concentrations by different soil masses, with rotating speed of 20 rpm and sampling time of 10 min

Soil mass (g)	Soil texture	PM ₁₀ concentrations (µg/m ³) (Mean ± SD)	TSP concentrations (µg/m ³) (Mean ± SD)
1	Loam	65 ± 38	89 ± 23
	Sandy loam	205 ± 156	224 ± 179
	Silt loam	41 ± 6	73 ± 17
2	Loam	444 ± 135	477 ± 151
	Sandy loam	689 ± 87	731 ± 93
	Silt loam	255 ± 41	274 ± 44
3	Loam	2,578 ± 452	2,835 ± 589
	Sandy loam	3,954 ± 1,951	4,274 ± 2,055
	Silt loam	1,641 ± 775	1,774 ± 823

Table 2. PM concentrations by rotating speeds, with soil sample of 2 g and sampling time of 10 min

Rotating speed (rpm)	Soil texture	PM ₁₀ concentrations (µg/m ³) (Mean ± SD)	TSP concentrations (µg/m ³) (Mean ± SD)
12	Loam	390 ± 70	423 ± 83
	Sandy loam	388 ± 50	407 ± 50
	Silt loam	153 ± 12	161 ± 11
20	Loam	444 ± 135	477 ± 151
	Sandy loam	689 ± 87	731 ± 93
	Silt loam	255 ± 41	274 ± 44
30	Loam	160 ± 19	171 ± 24
	Sandy loam	387 ± 73	414 ± 77
	Silt loam	102 ± 3	112 ± 4

부하 되거나 기기에 잔류하여 다음 실험에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 분진발생장치 운전시 2g의 토양 샘플량이 가장 적합한 것으로 보인다.

3) 회전속도

Table 2는 토양 샘플량 2 g, 10 min의 측정시간 동안의 회전속도의 회전속도 변화(12, 20, 30 rpm)에 따른 평균 먼지발생량을 나타내고 있다. 평균적으로 20 rpm의 회전속도에서 세 가지 토성의 토양 모두 먼지가 가장 많이 발생하는 경향을 보이고, 30 rpm의 회전속도일 때 오히려 먼지 발생량이 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 토성에 따른 먼지 발생량은 사양토에서 가장 높았고, 양토, 미사질양토 순으로 타나났다.

Fig. 3에서는 토양 2 g, 10 min의 샘플링 시간동안

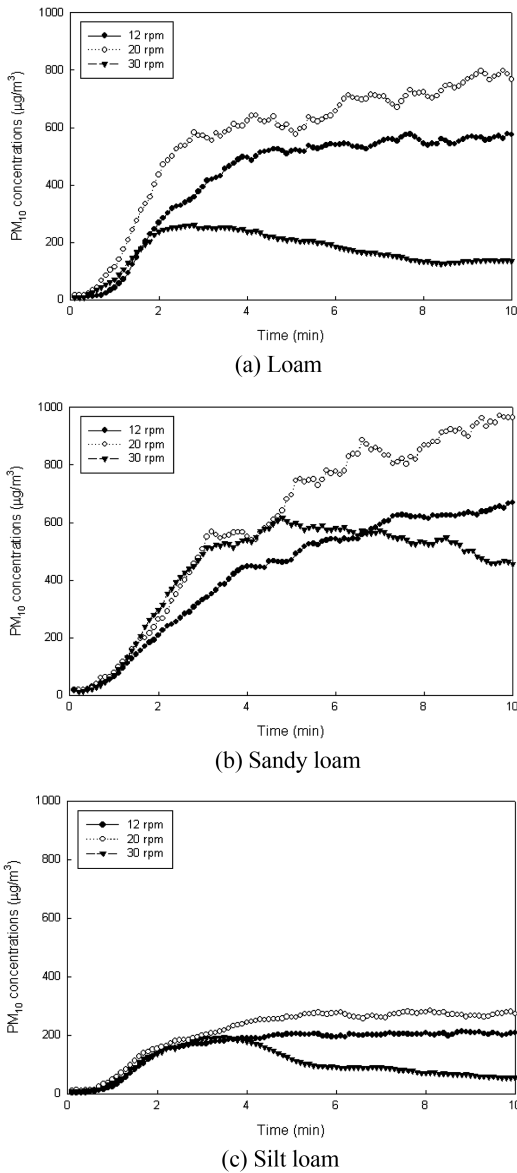


Fig. 3. Realtime PM₁₀ concentrations by different rotating speeds, with soil sample of 2 g.

시간에 따른 PM₁₀ 농도 변화를 보여주고 있다. (a)는 양토의 결과로 12 rpm, 20 rpm의 회전속도에서 PM₁₀ 농도는 분진발생장치 운전 경과 약 4 min까지 급격히 증가하다가 약 4 min 후부터는 증가 속도가 크게 감소하여 농도가 거의 일정하거나 또는 서서히 증가하는 추세를 보였다. 30 rpm의 회전속도에서는 약 3 min 이후부터 PM₁₀ 농도가 감소하는 경향을 보였다. (b)는 사양토의 운전결과로 사양토 역시 초반에는 각 회전속도별

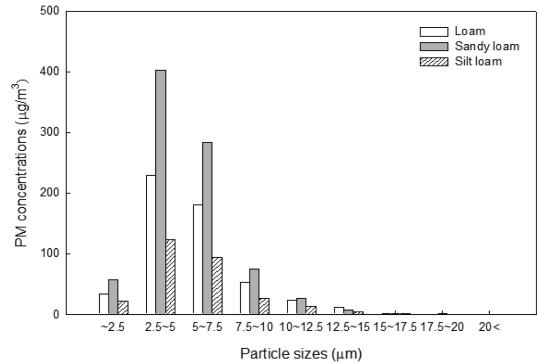


Fig. 4. Particle size distribution by soil types with standard operating condition.

PM₁₀ 발생 수준이 비슷하게 증가하는 양상을 보인다. 12 rpm, 20 rpm의 회전속도에서 PM₁₀ 농도는 계속적으로 증가하였으며, 30 rpm에서는 증가하다 감소하는 추세를 보였다. (c)는 미사질양토의 운전결과로 다른 두 가지 토성에 비해 먼지발생량이 가장 적었다. 미사질양토 역시 초반에 비슷한 PM₁₀ 발생 수준을 보이며, 20 rpm, 12 rpm, 30 rpm 순으로 농도가 높았다.

회전속도 변화에 따른 먼지발생량 결과를 종합하여 볼 때 먼지 발생이 충분히 그리고 지속적으로 이뤄지지 않는 30 rpm은 분진발생장치 운전조건으로 적합하지 않다. 각 토성에서 비산될 수 있는 먼지를 지속적으로 그리고 충분히 발생시키는 20 rpm이 분진발생장치의 가장 적합한 회전속도로 고려된다.

4) 최적운전조건 선정

앞에서 분진발생장치의 유량이 30 l/min일 때, 샘플링 시간, 토양 샘플량, 회전속도 변화에 따른 먼지발생 수준 및 패턴을 살펴보았다. 분진발생장치의 최적운전조건은 먼지 발생이 충분히 그리고 지속적으로 이뤄지고, 필터에 포집되는 먼지의 양이 지나치게 적거나 많지 않고, 각 토성에서 공통된 경향을 보이는 조건인가에 근거하여 정하였다. 그 결과 샘플량 2g, 회전속도 20 rpm, 샘플링시간 10 min이 30 l/min의 유량을 갖는 분진발생장치에 있어 가장 적합한 운전조건으로 선정되었다.

선정된 운전조건에서 각 토성별 입자 크기에 따른 농도분포를 보면 Fig. 4와 같다. 측정된 입자들은 모두 20 µm 보다 작은 크기로, 전체 농도의 약 94%를 10 µm 이하의 크기를 갖는 입자들이 차지하며, 2.5 µm 보다 작은 크기의 입자들은 약 7%를 차지하여 상대적으로 적은 농도수준을 보였다. 세 토성의 토양 모두

Table 3. PM concentrations by mixtures of Joomoonjin silica sand and clay with standard operating condition

Sand : Clay	PM ₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Mean \pm SD)	TSP concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Mean \pm SD)
	PEM	Portable aerosol spectrometer
8 : 2	749 \pm 155	687 \pm 156
5 : 5	1,344 \pm 122	2,329 \pm 158
2 : 8	3,947 \pm 245	7,280 \pm 1,100

2.5~7.5 μm 크기의 입자들이 가장 많이 분포하였고, 비슷한 농도 분포를 나타냈다.

2. 최적운전조건 평가

표준사와 점토를 이용하여 최적운전조건을 평가한 결과는 Table 3과 같다. 먼지발생 정도는 점토 함유비율이 클수록 높게 나타났으며, 표준사와 점토의 혼합비율이 2:8일 때 가장 높은 농도를 보였다. 분진발생장치에 표준사만 넣고 운전시, Portable aerosol spectrometer로 측정된 평균 PM₁₀ 농도는 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 표준사 보다 점토가 먼지 발생에 큰 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었다. 또한 각 혼합도에서 세 번의 반복실험을 실시하여 재현성(repeatability)을 살펴본 결과 평균 변동계수는 13.6 \pm 7.1%으로 비슷한 농도수준과 먼지발생 패턴이라는 일정한 결과를 관찰할 수 있었다. 평가실험 실험을 통해 운전시간 동안 지속적인 먼지발생을 관찰할 수 있었고, 점토의 비율이 클수록 먼지 발생량이 컸으며, 반복실험을 통해 일정한 결과를 얻을 수 있음을 확인했다. 따라서 선정된 최적운전조건은 분진발생장치를 운전하는데 적합한 것으로 판단된다.

IV. 고 찰

토양 등 고형시료를 이용하여 실험실 내 일정 조건하에서 먼지의 발생, 포집, 측정을 연구하는 것은 특정 지역이나 오염원에서 방출될 수 있는 입자상 물질의 물리적 또는 화학적 특성을 파악하고, 이러한 입자들이 공기중으로 비산시 인체에 끼치는 건강상 영향, 먼지발생정도 등을 가늠하는 방법으로써 이용될 수 있다. 또한 오염원 근처의 현장에서 먼지발생을 측정하는 연구들이 갖는 환경조건(기후조건, 수분함량, 표면의 거칠기 등)의 변화에 따른 비산먼지의 농도 변화와 같은 문제점을 보완할 수 있다는데도 의의가 있다. 따라서 본 연구에서처럼 운동역학적 에너지를 토양 또는 퇴적물과 같은 고형시료에 가해 먼지를 비산시키는 분진발생

장치의 개발이 필요하다.

기존에 제작된 Southard-Lee laboratory dust generator는 blower가 부착된 회전챔버와 집진챔버로 구성되어 있으며, 300 g의 토양, 약 900 LPM의 유량, 3분의 샘플링 시간, 16 rpm의 회전속도로 운전된다.¹⁵⁾ Southard-Lee 분진발생장치와 같은 원리를 적용한 Lubbock dust generation, sampling and analysis systems(LDGASS)은 실제 환경조건에서 토양이나 퇴적물의 풍식을 모사하고자 제작되었다. Lubbock 시스템은 크게 분진발생장치, 먼지 운반/측정, 먼지/에어로졸 집진 챔버로 구성되고, 400 g의 샘플, 13.3 rpm의 회전속도, 400 LPM의 유량으로 운전된다.¹⁾ 이렇게 기존에 개발된 분진장치와 비교했을 때, 본 연구의 분진발생장치는 많은 양의 샘플을 필요로 하지 않고, 이동과 유량 조절이 상대적으로 쉽고, 집진챔버 내부에 설치된 판막이를 통해 20 μm 보다 큰 입자를 제어한 것이 특징이다.

분진발생장치를 운전하는 최적의 조건을 알아본 결과 샘플량 2 g, 회전속도 20 rpm, 샘플링시간 10 min이 30 l/min의 유량을 갖는 분진발생장치의 최적운전조건으로 나타났다. 운전 조건중 회전챔버의 회전 속도에서 30 rpm보다 20 rpm에서 토양입자 발생량이 최대로 나오는 것으로 결과가 나왔다. 일반적으로 회전속도가 빨라지면 분진 발생량이 증가할 것으로 예측할 수 있는데 결과는 이와 다르게 나왔다. 그러나 이런 일반적인 생각은 일부 회전속도 범위에서만 적용될 것이다. 회전속도가 일정 수준 이상 빨라질 경우 토양시료가 밑으로 떨어지지 않고 챔버 안쪽에 붙어있는 날개에 걸려서 같이 회전하기 때문에 분진발생이 되지 않는 것으로 사료된다.

먼지발생량은 토성에 큰 영향 받는데 다양한 토성분포와 분진발생 정도를 살펴본 연구들도 많이 있다. 한 연구에서는 미사와 점토의 함량이 높을수록, 모래의 함량이 낮을수록 높은 PM₁₀ 발생 경향을 보였고,¹⁷⁾ 이와는 반대로 모래, 미사, 점토가 많이 포함된 토양 순으로 높은 PM₁₀ 발생 경향을 보이는 결과도 있었다.¹⁸⁾ 우즈베키스탄에서 수행된 연구에서는 미세한 입자들 간의 (<71 μm) 결합 비율이 클수록 높은 수준의 PM₁₀이 발생한다고 설명하고 있다.¹²⁾ 본 연구에서는 사양토, 양토, 미사질양토의 순으로 높은 먼지 발생 수준을 보였다. 사양토의 경우 입자가 큰 모래가 다른 토성에 비해 많이 함유되어 있었는데, 이 입자들 간 충돌이 생기면서 부서져 상대적으로 더 많은 먼지가 발생된 것으로 보인다. 미사질양토의 경우 다른 두 토성에 비해 상대적으로 작은 크기의 입자들이 많아 먼지가 적게 발생

된 것으로 보인다.

본 연구에서는 수분 조건을 제어함으로써 수분이 없는 토양시료에서 비산될 수 있는 먼지의 비산성을 직접 비교하고자 하였다. 그러나 실제 환경에서는 기후조건 등의 요인으로 인해 토양이 어느 정도의 수분을 보유하고 있고, 수분함량이 증가할수록 발생하는 먼지의 농도가 줄어든다고 보고되고 있다.³⁾ 따라서 본 연구결과는 토양시료에서 비산될 수 있는 정도(releasability)를 직접 비교하는데 이용할 수 있으나, 같은 토양시료에 대해 실제 환경에서의 먼지발생정도보다 과대평가할 가능성이 있어 실제 환경샘플에 바로 적용할 수 없다는 제한점이 있다. 그러나 이는 수분함량을 분진발생장치 운전조건에 포함시킴으로써 추가적인 연구를 통해 보완할 수 있다. 또한 본 연구에서는 토양지도에 기초하여 우리나라에 많이 분포하는 상위 세 가지 토성의 토양을 사용하였다. 그러나 토양시료 채취 후 토성시험을 실시하지 않아 토양을 구성하는 미사, 점토, 모래의 정확한 구성분포를 파악하지는 못하였다. 이번 연구에서 토양시료의 밀도와 입도의 분석을 실시하지 않은 것은 연구의 제한점으로 고려된다. 그러나 토양 시료의 다양한 토성이나 밀도나 입도에 따른 분진 발생의 영향은 이번 연구에서 정해진 운전조건에 따라 추가적으로 실시되어야 할 연구과제일 것이다. 토성에 관한 조사가 추가적으로 수행된다면 먼지발생 정도와 토양구성 입자들 간의 특성을 파악하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

위와 같은 제한점에도 불구하고 개발된 분진발생장치는 토양 또는 퇴적물 같은 고형시료로부터 일정한 조건하에서 먼지를 발생시켜 상대적인 먼지량을 비교할 수 있다는데 의의가 있다. 특히 고형시료 내 석면과 같은 유해물질이 함유되어 있는 경우 유해물질의 비산 정도를 평가하는데 본 연구의 분진발생장치가 사용될 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 개발된 분진발생장치는 기존에 개발된 분진발생장치를 응용하여 기계적 분산/교반 메커니즘을 적용하여 제작되었다. 분진발생장치는 크게 회전챔버와 집진챔버로 구성되며, 모터에 의해 회전챔버가 회전하며 생성되는 에너지가 토양에 가해져 먼지를 발생시키고 이를 집진챔버에서 포집하는 구조로 되어 있다. 우리나라에 많이 분포하는 상위 세 가지 토성(양토, 사양토, 미사질양토)을 가지고 분진발생장치를 운전하는 최적의 조건을 알아본 결과 샘플량 2g, 회전속도

20rpm, 샘플링시간 10min이 30 //min의 유량을 갖는 분진발생장치의 최적운전조건으로 나타났다. 선정된 최적운전조건을 평가를 위하여 표준사와 점토를 혼합하여 실험한 결과 점토의 함유량이 많을수록 높은 먼지 발생 경향을 관찰할 수 있었다. 본 연구의 분진발생장치는 정해진 일정 조건하에서 먼지를 발생시키기 때문에 각 고형시료의 상대적 먼지 발생량을 평가하는데 사용될 수 있고, 입자상물질에의 노출을 평가하는데 있어 보다 객관적이고 정량적인 정보를 제공할 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업 지원으로 수행되었습니다. (과제번호: 2009-0068625) 연구에 도움 주신 김서진과 염지선께도 감사드립니다.

참고문헌

- Gill, T. E., Zobeck, T. M., Stout, J. E. and Gregory, J. M. : Fugitive dust generation in the laboratory. Wind Erosion International Symposium-Workshop Proceedings, USDA-ARS Wind Erosion Research Unit, Kansas State University, Manhattan, KS. <http://www.weru.ksu.edu/symposium/proceedings/gill.pdf>, 1999.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Solomon, P. A., Magliano, K. L., Ziman, S. D. and Richards, L. W. : PM₁₀ source apportionment in California San-Joaquin Valley. *Atmospheric Environment*, **26**, 3335-3354, 1992.
- Clausnitzer, H. and Singer, M. J. : Respirable-dust production from agricultural operations in the Sacramento Valley, California. *Journal of Environmental Quality*, **25**, 877-884, 1996.
- Goodman, P. G., Dockery, D. W. and Clancy, L. : Cause-specific mortality and the extended effects of particulate pollution and temperature exposure. *Environmental Health Perspectives*, **112**, 179-185, 2004.
- Zanobetti, A., Schwartz, J., Samoli, E., Gryparis, A., Touloumi, G., Peacock, J., Anderson, R. H., Le Tertre, A., Bobros, J., Celko, M., Goren, A., Forsberg, B., Michelozzi, P., Rabczenko, D., Hoyos, S.P., Wichmann, H. E. and Katsouyanni, K. : The temporal pattern of respiratory and heart disease mortality in response to air pollution. *Environmental Health Perspectives*, **111**, 1188-1193, 2003.
- Kim, D. S., Yu, S. D., Cha, J. H., Ahn, S. C. and Cha, J. S. : A study on the acute effects of fine particles on pulmonary function of schoolchildren in Beijing, China. *Korean Journal of Environmental Health*, **30**, 140-148, 2004.

7. Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D. and Godleski, J. J. : Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution - Epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, **109**, 71-77, 2004.
8. Schwartz, J. : Air-pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, Alabama. *American Journal of Epidemiology*, **139**, 589-598, 1994.
9. Whittemore, A. S. and Korn, E. L. : Asthma and air-pollution in the Los-Angeles area. *American Journal of Public Health*, **70**, 687-696, 1980.
10. Abbey, D. E., Nishino, N., McDonnell, W. F., Burchette, R. J., Knutsen, S. F., Beeson, W. L. and Yang, J. X. : Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **159**, 373-382, 1999.
11. Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X. P., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G. and Speizer, F. E. : An association between air-pollution and mortality in 6 United-States cities. *New England Journal of Medicine*, **329**, 1753-1759, 1993.
12. Singer, A., Zobeck, T., Poberezsky, L. and Argaman, E. : The PM₁₀ and PM_{2.5} dust generation potential of soils/sediments in the Southern Aral Sea Basin, Uzbekistan. *Journal of Arid Environments*, **54**, 705-728, 2003.
13. Heitbrink, W. A., Baron, P. A. and Willeke, K. : An investigation of dust generation by free falling powders. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **53**, 617-624, 1992.
14. Breum, N. O. : The rotating drum dustiness tester: Variability in dustiness in relation to sample mass, testing time, and surface adhesion. *Annals of Occupational Hygiene*, **43**, 557-566, 1999.
15. Domingo-Neumann, R., Southard, R. J. and Lee, K. : Laboratory system for dust generation from soils. *Journal of Environmental Quality*, **39**, 1254-1261, 2010.
16. National Academy of Agricultural Science : Soil Statistics <http://asis.rda.go.kr>.
17. Carvacho, O. F., Ashbaugh, L. L., Brown, M. S. and Flocchini, R. G. : Measurement of PM_{2.5} emission potential from soil using the UC Davis resuspension test chamber. *Geomorphology*, **59**, 75-80, 2004.
18. Funk, R., Reuter, H.I., Hoffmann, C., Engel, W. and Otti, D. : Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, **33**, 1851-1863, 2008.