



낙하 충격에 의한 풍화토의 비산먼지 발생 특성 분석

Analysis of dust emission characteristic by drop impact on decomposed granite soil

민슬기* · 손영환**,† · 박재성* · 노수각* · 봉태호*

Min, Seul-Gi · Son, Young-Hwan · Park, Jae-Sung · Noh, Soo-Kack · Bong, Tae-Ho

ABSTRACT

Dust is mostly caused by human activity. The effect of natural factors on dust emission were studied in many research, but the little effort in researching artificial factors of dust emission. The object of study is to analysis dust emission characteristic by drop impact. Particle matter 10 μ m (PM₁₀) was measured by drop impact on paved soil with changing drop height, weight and drop size. Increasing drop height cause more PM₁₀ emission. Increasing drop weight cause more PM₁₀ emission but had limit weight for increasing dust emission. Because the exceed kinetic energy of drop weight penetrate the soil surface. The limit perimeter was exist that separating PM₁₀ emission aspect. Under limit perimeter, PM₁₀ emission was increasing while perimeter was increasing, but over limit perimeter showed the opposite aspect. Regression equations for estimating PM₁₀ with kinetic energy and perimeter were made under limit perimeter and over limit perimeter. The R² of those equations were 0.784, 0.743. The error has occurred between measured PM₁₀ and calculated PM₁₀ in the equation under limit perimeter. But using equation of case for over limit perimeter, PM₁₀ can be estimated with kinetic energy and drop perimeter.

Keywords: Decomposed granite soil; Drop impact; Dust emission; Particle matter 10 μ m; Regression equation

1. 서 론

대기오염은 그 영향의 지속성이 높고 피해를 입을 수 있는 인구가 가장 광범위한 오염이다. 이 중 미세먼지는 여러 대기오염 물질 중 인체 위해성이 가장 높은 물질 중 하나로 (Kim, 2006), 이는 인체뿐만 아니라 농작물 및 가축에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (Hwang et al., 2008; Bitog et al., 2009). 이로 인한 질병 발생률의 증가는 이미 많은 연구에 의해 밝혀진 바 있다 (Jung, 2013). 이러한 위험성 때문에 최근 미세먼지에 대한 관심이 전 세계적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 미세먼지에 대한 규제 기준이 전 세계적으로 제정되고 있다. 우리나라의 경우 1993년 10 μ m보다 작은 입경의 미세먼지인 PM₁₀ (Particle Matter 10 μ m)에 대한 연간 환경 기준을 제정하였고, 수도권 대기환경 개선에 대한 특별법 제정을 통해 2015년

부터 2024년까지 PM₁₀의 규제를 연평균 30 μ m로 강화하고, 2.5 μ m보다 작은 입경인 초미세먼지 PM_{2.5} (Particle Matter 2.5 μ m)에 대한 규제를 신설할 예정이다. 해외의 경우 미국에서는 현재 PM₁₀에 대한 기준은 24시간 평균 150 μ m이며, PM_{2.5}는 기준은 연 평균 15 μ m, 24시간 평균 35 μ m로 규정되어 있다. EU의 경우 PM₁₀은 연평균 40 μ m, 24시간 평균 50 μ m이며 PM_{2.5}는 연 평균 25 μ m 기준이 제정되어 있다. 비산먼지에 대한 위해성에 대한 연구가 진행되면서, 대기 중 미세먼지 농도에 대한 규제는 전 세계적으로 강화되고 있는 추세이다 (Park and Jo, 2013).

미세먼지는 황사나 산불, 화산폭발, 풍식 등 자연적인 발생원에 의해 발생되기도 하지만 대부분은 건설공사나 야적 원료 입자의 비산, 운동장에서의 활동 등 인위적인 활동의 부산물에 의해 발생한다 (Choi et al., 2006). 비산먼지 발생에 영향을 주는 요인 중 자연적인 영향에 의한 토양의 침식 및 먼지 발생에 대한 연구는 많이 진행되었다. 일반적으로 풍식을 받아 먼지가 비산되는 토양의 입경은 0.84 mm 이하이며, (Lyles, 1988), 풍속이 낮은 경우 작은 입자들이, 풍속이 높은 경우 큰 입자들이 주로 풍식을 받고 (Liu et al., 1998), 토양 표층의 함수비가 4~4.9 % 이상일 경우 풍식이 발생하지 않으며, 이하일 경우 풍식으로 인해 토양 입자가 비산한다고 알려져 있다 (Zobeck,

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수

† Corresponding author Tel.: +81-2-880-4585

Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

2014년 4월 23일 투고

2014년 4월 30일 심사완료

2014년 5월 8일 게재확정

1991). 또한 이동식 소형 풍동을 이용, 토양 표면의 거칠기와 풍속, 표층의 함수비, 입경 자료 등을 통해 풍식 방정식 계수를 산정, 시뮬레이션을 통해 풍식량을 예측하는 연구가 진행되었으며 (Hong et al., 2014), 토양 표층 입경과 풍식된 입자의 입도 간의 상관성 분석을 통해 풍식된 입자의 최대, 최소입경을 추정하는 연구가 진행되었다 (Kim et al., 2013).

비산먼지 발생에 있어 인간의 활동 등 인위적인 영향에 의한 연구는 비포장도로에서 차량의 이동으로 인한 먼지 발생에 대한 연구가 많이 진행되었다. 차량 이동 속도와 PM₁₀, PM_{2.5} 사이의 관계 및 먼지의 구성 원소들을 파악한 연구가 진행되었으며 (Williams et al., 2008), 차량에 의해 발생한 먼지와 자연 발생한 먼지의 입경을 비교한 연구도 진행되었다 (Pinnick et al., 1985). 또한 차량의 무게와 속도, 주행 거리를 통해 먼지 배출 계수를 산정한 연구가 진행되기도 하였다 (Gillies et al., 2004). 이 연구들은 비포장도로에서 차량의 운행에 의한 비산먼지 발생량을 대상으로 하였으며 토양에 가해지는 충격으로 인한 비산먼지 발생량의 정량적인 분석을 수행하지는 않았다.

비포장도로나, 운동장에서의 활동, 기반시설 공사 현장 등은 토양이 겉으로 드러나 있어 바람 및 기타 요인에 의해 비산먼지가 많이 발생할 가능성이 있는 지역이다. 이 장소들은 사람의 활동에 의한 인위적 충격으로 비산먼지가 발생하는 장소로 자연적인 영향보다는 인공적인 영향에 의한 비산먼지 발생량이 더 클 것이라 판단된다. 그러나 이러한 외부 충격에 의한 먼지 발생 특성에 대한 분석 및 연구는 아직 부족한 상황이다. 따라서 본 연구는 인위적인 영향으로 인한 비산먼지 발생 특징을 파악하기 위해 낙하 충격에 의한 운동에너지 및 낙하 추의 크기와 비산먼지 발생량과의 관계 분석을 실시하였다. 이를 통해 물리적인 충격에 의한 토양의 비산먼지 발생 특성을 분석하고 운동에너지와 낙하 추의 크기를 통한 먼지 발생량 추정을 위한 회귀식을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시험 재료

본 연구에 사용된 재료는 서울시 안암동 지역에서 채취한 풍화토로, 국토해양부 승인 조경설계기준 (The Korean Institute of Landscape Architecture, 2013) 에 따라 4.75 mm체 통과 시료를 사용하였다. 재료의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 통일

Table 1 Physical properties of soil

G _s	Passing sieve 0.075 mm (%)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cg	LL	PL	USCS
2.64	10.10	0.075	0.44	1.60	21.28	1.62	N.P	N.P	SW-SM

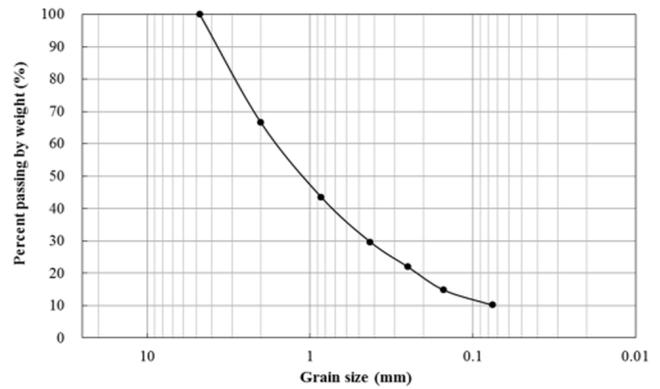


Fig. 1 The particle size distribution curve of soil

분류법 상으로 SW-SM으로 분류되었으며, 입도 분포 곡선은 Fig. 1과 같다.

2. 시험 방법

비산먼지 발생량 측정에는 GRIMM사의 Portable aerosol spectrometer (Model 1.109) 를 사용하였다 (Fig. 2). 이 장비는 0.25~32 μm 입경의 먼지 농도 및 개수를 31가지의 채널을 통해 측정 할 수 있으며, PM₁₀, PM_{2.5} 등 환경 기준에 따른 먼지 발생량 측정도 가능하다.

바람 등 외부 조건에 의한 비산먼지 발생 영향을 최소화하기 위해 실내에서 실험을 진행하였다. 토양 조건을 실내에서 재현하기 위해 100×100 cm 규격의 나무판을 제작하였으며, 함수비 0%인 노건조 상태의 풍화토를 4 cm 두께로 포설하였다 (Fig. 3). 포설된 풍화토의 밀도는 1.44 g/cm³ 이다.

낙하 충격을 가하기 위해 풍화토를 포설한 나무 판에 추를 일정한 주기로 낙하시키는 방법을 사용하였다. 비산먼지 측정기의 위치는 바닥에서 25 cm 지점, 나무판의 중심에서 50 cm 떨어진 지점에서 측정하였으며, 10초에 1회 반복하여 추를 낙하시켰다. 비산먼지 측정 시간은 3분으로, 추 낙하시 시료의 다짐으로 인한 영향을 감소시키기 위해 추를 이동시키면서 낙하하였다. 낙하 위치는 비산먼지 측정 지점에서 20~80 cm 지점을 9등분한 지점들이며, 추를 직선으로 왕복 이동시키면서 총 18회 낙하시켜 비산먼지 발생량을 측정하였다. 시험의 모식도는 Fig. 4와 같다.

비산 먼지 발생량에 영향을 미치는 여러 물리적 조건을 고려하기 위해 낙하 추의 높이, 낙하 추의 무게, 낙하 추의 크기를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 추의 낙하 높이와 비산먼지 발생량의 상관관계를 파악하기 위하여 0.25, 0.5, 0.75, 1 m 높이에서 추를 낙하시키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다. 이 때 3, 5, 7 kg의 추를 사용하였으며 낙하추의 크기는 15×15 cm로



Fig. 2 Portable aerosol spectrometer

고정하였다. 낙하 추의 무게 변화에 따른 비산먼지 발생량에 대한 영향을 파악하기 위하여 1, 3, 5, 7, 9, 11 kg 무게의 추를 적용하였다. 이 때, 낙하 높이는 1m, 낙하 추 크기는 15×15 cm로 고정시켰다. 낙하 추의 크기변화에 따른 비산먼지 발생량을 파악하기 위해 3, 5, 7 kg의 추를 이용하였으며, 5×5 cm, 7.5×7.5 cm, 10×10 cm, 12.5×12.5 cm, 15×15 cm, 17.5×17.5 cm, 20×20 cm, 20×30 cm, 20×40 cm, 20×50 cm 크기의 낙하 판을 통해 크기 변화에 따른 비산먼지 발생량의 영향을 파악하였다. 낙하 추의 크기를 변화시키기 위해 도르래에 나무로 제작한 낙하 판을 고정시켜 낙하시켰다 (Fig. 5, 6, 7). 각각의 case들은 Fig. 8에 정리하였다.

비산먼지 발생량은 10 μm보다 입경이 작은 미세먼지의 농도인 PM₁₀을 기준으로 측정하였으며, 추의 반복 낙하에 의해 먼지 발생량이 중첩되어 측정됨에 따라 3분 동안 측정된 먼지 발생량의 최대값을 사용하였다.



Fig. 3 Wooden board and paved soil



Fig. 5 Weight

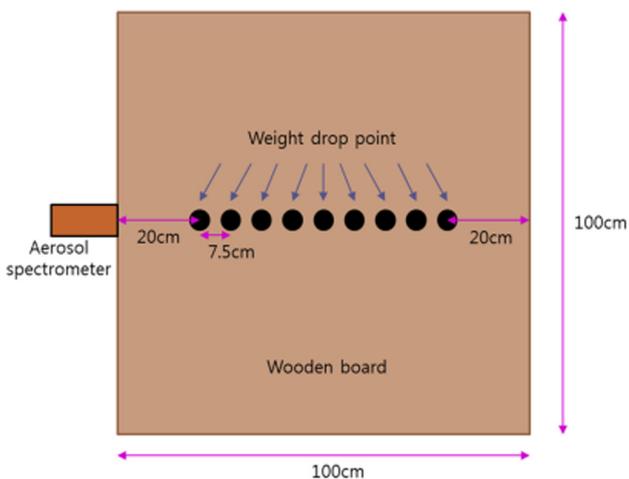


Fig. 4 Schematic diagram of soil dust emission test

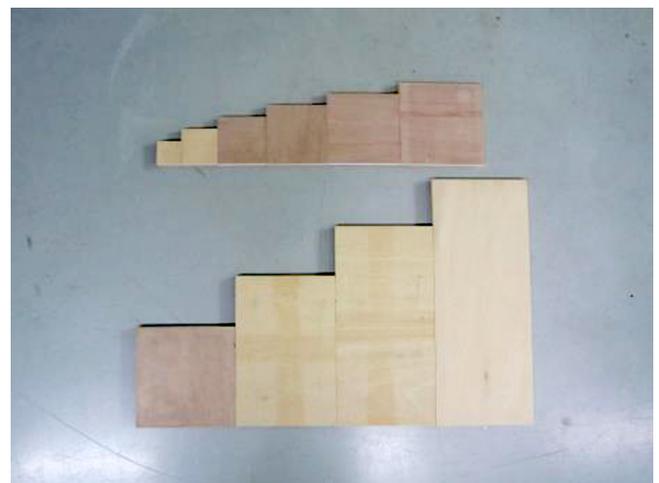


Fig. 6 Wooden plate for weight fixed



Fig. 7 Pulley for drop test

Effect of drop height	Effect of drop weight	Effect of drop size
Invariant condition Drop weight size (cm) • 15×15	Invariant condition Drop weight size (cm) • 15×15	Invariant condition Drop height (m) • 1.0
Changing condition Drop weight (kg) • 3, 5, 7	Changing condition Drop height (m) • 1.0	Changing condition Drop weight (kg) • 3, 5, 7
Changing condition Drop height (m) • 0.25, 0.5, 0.75, 1.0	Changing condition Drop weight (kg) • 1, 3, 5, 7, 9, 11	Changing condition Drop weight size (cm) • 5×5, 7.5×7.5 10×10, 12.5×12.5 15×15, 17.5×17.5 20×20, 20×30 20×40, 20×50

Fig. 8 Cases of soil dust emission test

III. 결과 및 고찰

1. 낙하 높이에 따른 영향

낙하 높이 변화에 따른 PM₁₀ 발생량 측정 결과는 Fig. 9와 같다.

3, 5, 7 kg의 경우 모두 낙하 높이가 증가함에 따라 PM₁₀ 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 같은 높이에서의 경우 무게가 증가할수록 비산먼지 발생량도 증가 하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

낙하하는 추에 의해 발생하는 운동에너지가 토양 표면에 충격을 가하면 포설되어 있던 토양 표면 입자에 운동 에너지가 전달되어 대기 중으로 비산하게 된다. 낙하 무게 및 낙하 높이가 증가하게 되면 운동 에너지가 증가하게 되며, 이에 따라 토양 입자에 전달되는 에너지가 증가하면서 비산먼지 발생량이 증가한 것으로 판단된다.

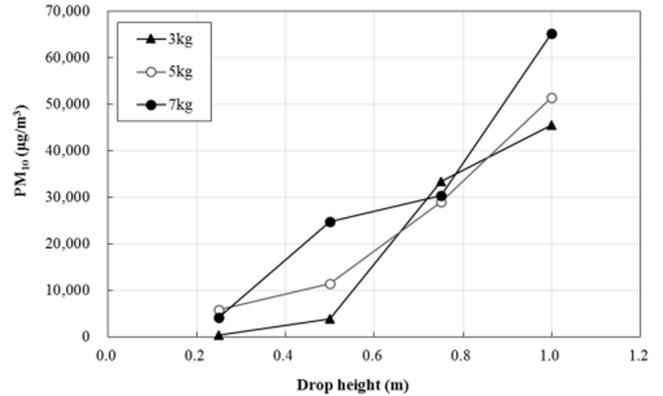


Fig. 9 Relationship between PM₁₀ and drop height

2. 낙하 무게에 따른 영향

낙하 무게 변화에 따른 비산먼지 발생량 측정 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

추 무게 7 kg까지는 운동에너지가 증가하여 PM₁₀ 발생량도 증가하는 것으로 나타났으나, 7 kg 이후에는 추의 무게가 증가함에도 불구하고 비산먼지 발생량이 증가하지 않았다.

낙하 추 무게의 증가에 따라 일정 무게 까지는 운동에너지의 증가에 따라 토양 표면에 가해지는 충격이 증가하여 비산먼지 발생량이 증가하게 된다. 하지만 낙하 무게 증가로 인해 추의 운동에너지가 토양 표면의 강도 이상으로 증가하게 되면 토양 표면에 가해지는 과도한 충격으로 인해 토양 표면이 관입되는 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 운동에너지가 증가하더라도 비산 먼지의 발생량은 증가하지 않는 것으로 판단된다.

3. 낙하 둘레에 따른 영향

낙하 둘레에 따른 비산먼지 발생량 측정 결과는 Fig. 11과 같다.

7 kg 추의 경우, 낙하 추 둘레가 증가하면서 비산먼지 발생량도 증가하는 경향을 보였으나 낙하 추의 둘레가 100 cm 이상으로 증가할 경우, 낙하 추 둘레의 증가에도 비산먼지 발생량이 증가하지 않았다. 이러한 경향은 3 kg, 5 kg에서도 관찰할 수 있었다. 5 kg의 경우 70 cm에서 비산먼지 발생량이 최대가 되며, 3kg의 경우 40 cm에서 비산먼지 발생량이 최대가 되는 것으로 나타났다. 그 이후에는 낙하 추 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량은 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이로 미루어 볼 때, 각 무게 별로 낙하 추 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량이 증가하는 양상을 보이는 한계둘레가 존재 하는 것으로 나타났다. 비산먼지의 발생량은 낙하 추의 무게, 낙하 높이 등 운동에너지뿐만 아니라 낙하 추의 둘레의 영향을 받는 것으로 나타났다.

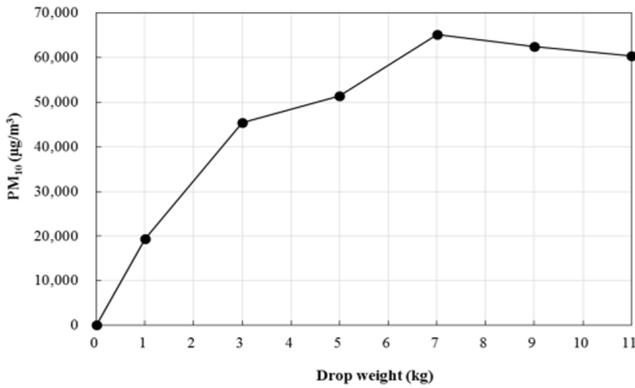


Fig. 10 Relationship between PM₁₀ and drop weight

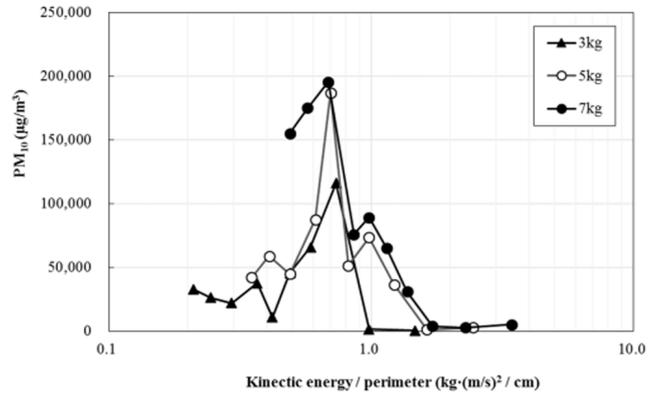


Fig. 12 Relationship between PM₁₀ and kinetic energy per perimeter

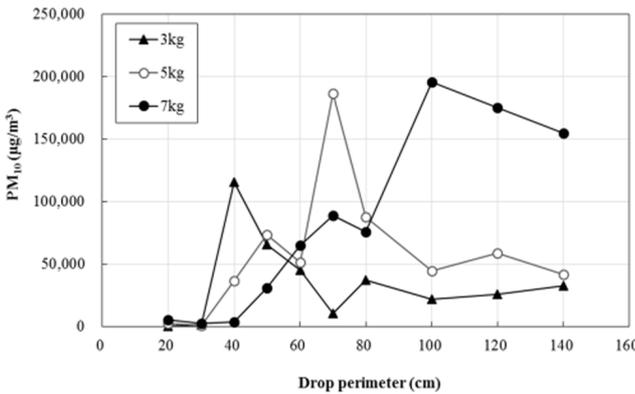


Fig. 11 Relationship between PM₁₀ and drop perimeter

Table 2 Coefficient a, b, c and R² of equation for kinetic energy and perimeter

Cases	a	b	c	R ²
Under limit perimeter	1.2629	0.0751	0.9196	0.784
Over limit perimeter	2.3667	-0.0082	2.9184	0.743

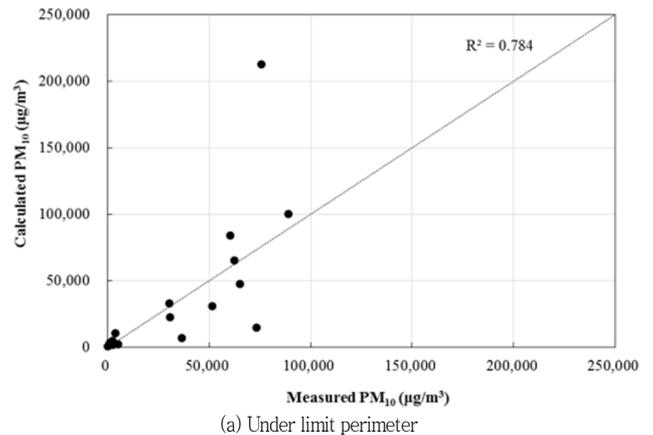
4. 운동에너지와 낙하 둘레에 따른 먼지 발생량 추정

운동에너지와 낙하 추 둘레 비율 및 비산먼지 발생량과의 그래프는 Fig. 12와 같다.

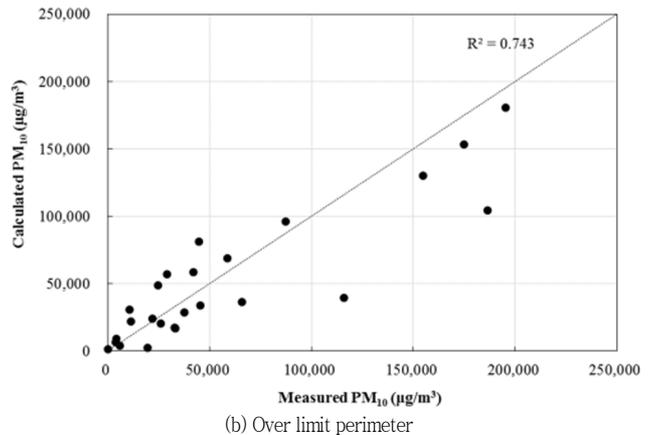
3 kg의 경우 운동에너지와 낙하 추 둘레 비율이 $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$ 까지 운동에너지/둘레비율이 증가함에 따라 비산먼지 발생량도 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 5kg의 경우 $0.700 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$ 까지, 7kg의 경우 $0.686 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$ 까지 비산먼지 발생량이 증가하는 것으로 나타났으며, 한계 에너지/둘레비율이 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$ 정도로 비슷한 값을 나타냈다.

운동에너지 증가에 따라 단위둘레당 운동에너지가 증가하면서 일정 한계 비율까지는 운동에너지 증가에 따라 비산먼지 발생량이 증가하는 경향을 보인다. 하지만 둘레당 운동에너지가 한계 이상으로 증가하게 되면 토양 표면이 관입되는 현상이 발생하게 되어 토양 표면의 입자 반발에 의한 비산 먼지 발생량이 감소하는 것으로 판단된다.

한계둘레 미만인 경우와 이상인 경우 다른 비산먼지 발생 양상을 보이므로 운동에너지, 둘레간의 비산먼지 발생량 추정 회귀식을 구분하여 작성하였다. 일반식은 식 (1) 과 같다



(a) Under limit perimeter



(b) Over limit perimeter

Fig. 13 Relationship between the measured and calculated PM₁₀ about kinetic energy and perimeter

$$PM_{10} = Energy^a \times e^{(b \times Perimeter + c)} \quad (1)$$

이 식에서 상수 a, b, c값과 R² 값은 Table 2와 같다

회귀식 작성 결과 한계둘레 미만일 경우 회귀식의 R² 값이 0.784, 한계둘레 이상일 경우 회귀식의 R² 값이 0.743으로 나타나 상대적으로 높은 R² 값을 보였다. 회귀식으로 계산된 PM₁₀ 값과 측정된 PM₁₀ 값의 상관관계는 Fig. 13과 같다.

한계둘레 미만일 경우 R² 값이 상대적으로 큰 편이나 측정값과 계산값 간의 오차가 있는 것으로 나타났다. 한계둘레 이상일 경우 계산값과 측정값이 y = x 그래프에 근접하여 상대적으로 작은 오차로 먼지 발생량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 토양에 가해지는 낙하 충격에 의한 정량적인 비산먼지 발생 특성을 파악하기 위해 풍화토를 포설한 판에 추를 반복 낙하시키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다. 비산먼지 발생에 영향을 미치는 물리적인 조건을 고려하기 위해 낙하 높이, 낙하 무게, 낙하 추 크기를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이를 통해 운동에너지, 낙하 추 크기에 따른 비산먼지 발생 특성을 분석하고 운동에너지와 낙하 둘레에 따른 비산먼지 발생량 추정 회귀식을 제안하였다.

낙하 높이가 증가함에 따라 PM₁₀ 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 같은 높이에서의 경우 일정 무게까지는 무게가 증가할수록 비산먼지 발생량도 증가 하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 일정 무게 이상에서는 무게 증가로 인한 운동에너지 증가에도 불구하고 비산먼지 발생량이 증가하지 않았다. 이는 운동에너지가 토양 표면의 강도 이상으로 증가하게 되면 운동에너지에 의해 토양 표면이 관입되는 현상이 발생하게 되기 때문이라고 판단된다.

운동에너지와 추 둘레 변화와 비산먼지 발생량과의 경향은 한계둘레까지는 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량이 증가하는 양상을 보이지만 그 이후로는 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량이 감소하는 경향을 나타냈다. 운동에너지/낙하둘레 비율의 경우, 3kg일 때 0.735 kg·(m/s)²/cm 까지, 5 kg일 때 0.700 kg·(m/s)²/cm 까지, 7 kg일 때 0.686 kg·(m/s)²/cm 까지 비산먼지 발생량이 증가하는 것으로 나타났으며, 운동에너지/낙하둘레 비율이 0.7 kg·(m/s)²/cm 정도로 비슷한 값을 나타냈다. 운동에너지 증가에 따라 단위둘레당 운동에너지가 증가하면서 비산먼지 발생량이 증가하는 경향이 나타나지만, 단위둘레당 운동에너지가 한계 이상으로 증가하게 되면 토양 표면이 관입되는 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 토양 표면의 입자 반발에 의한 비산 먼지 발생량이 감소하는 것으로 판단된다.

한계둘레를 기준으로 한계둘레 미만일 경우 회귀식의 R² 값은 0.784, 한계둘레 이상일 경우 회귀식의 R² 값은 0.743으로 나타나 상대적으로 높은 경향성을 보였다. 한계둘레 이상일 경우 계산값과 측정값이 상대적으로 적은 오차로 먼지 발생량을 예측할 수 있는 것으로 나타나 운동에너지와 낙하 둘레를 통해 비산먼지 발생량을 추정할 수 있을 것이라 판단된다.

이 연구는 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A1010633)

REFERENCES

1. Bitog, J. P., I. B. Lee, M. H. Shin, S. W. Hong, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. I. Yoo, K. S. Kwon, Y. H. Kim and J. W. Han, 2009. Numerical Simulation of an Array of Fences in Saemangeum Reclaimed Land. *Atmospheric Environment* 43(2009): 4612-4621.
2. Choi, W. J., K. C. Cho, E. Y. Lee, H. Y. Na, S. K. Lee and K. J. Oh, 2006. Estimation of Fugitive Dust Emission and Impact Assessment in Constructing the New Port by Reclamation of Sea Sand, *Environmental Impact Assessment*, 15(4): 237-247 (in Korean).
3. Gillies, J., V. Etyemezian, H. Kuhns, D. Nikolic and D. Gillette, 2005, Effect of Vehicle Characteristics on Unpaved Road Dust Emissions, *Atmospheric Environment*, 39: 2341-2347
4. Hong, S. W., I. B. Lee, I. H. Seo, K. S. Kwon, T. W. Kim and Y. H. Son, 2014. Measurement and Prediction of Soil Erosion in Dry Field using Portable Wind Tunnel. *Biosystems Engineering*, 118: 68-83.
5. Hwang, H. S., I. B. Lee, M. H. Shin, S. W. Hong, I. H. Seo, J. I. Ryu and S. K. Lee, 2008, Monitoring of the Fugitive and Suspended Dust Dispersion at the Reclaimed Land and Neighboring Farms : Monitoring in Gunsan, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 50(4): 39-50.
6. Jung, A. R, 2013. Effect of PM10 on mortality: Systematic review and Meta-analysis, M. S. diss., Seoul, Korea: Yonsei University (in Korean).
7. Kim, T. W., Y. H. Son, S. G. Min, I. B. Lee, S. W. Hong and M. Y. Kim., 2013. Experimental Investigation on

- Particle Size of Soils Erodible by Wind using Portable Wind Erosion Tunnel, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(6): 127-133 (in Korean).
8. Kim, Y. P., 2006. Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5): 535-553 (in Korean).
 9. Liu, L., J. Wang, X. Li, Y. Liu, W. Ta and H. Peng, 1998. Determination of Erodible Particles on Cultivated Soils by Wind Tunnel Simulation. *Chinese Science Bulletin*, 43(19): 1646-1651.
 10. Lyles, L., 1988. Basic Wind Erosion Process. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22-23: 91-101
 11. Park, H. W. and Y. M. Jo, 2013. Regulation Standard of Fine Particles and Control Techniques of Emission Sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4): 486-503 (in Korean).
 12. Pinnick, R., G. Fernandez, B. Hinds, C. Bruce, R. Schaefer and J. Pendleton, 1985, Dust Generated by Vehicular Traffic on Unpaved Roadways Sizes and Infrared Extinction, *Aerosol Science and Technology*, 4(1): 99-121
 13. The Korean Institute of Landscape Architecture, 2013. Landscape Design Standard, 105, Seoul, Korea.
 14. Williams, D. M., Shukla, and J. Ross, 2008. Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road, *Atmospheric Environment*, 42: 3899-3905
 15. Zobeck. T. M., 1991. Soil Properties Affecting Wind Erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(2): 112-118.