



소형 풍동을 이용한 토양의 풍식 가능 입경 분석

Experimental Investigation on Particle Size of Soils Erodible by Wind using Portable Wind Erosion Tunnel

김태완* · 손영환**† · 민슬기* · 이인복*** · 홍세운**** · 김민영*****

Kim, Tae-Wan · Son, Young-Hwan · Min, Seul-Gi · Lee, In-Bok · Hong, Se-Woon · Kim, Min Young

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate maximum and minimum grain size which eroded by wind according to soil and wind conditions, such as top soil water content, roughness, land slope, wind velocity and proportion of grain size under 0.84mm. For performing this study, portable wind erosion tunnel was designed and utilized during field test, which facilitated measuring actual wind erosions under artificially controlled wind conditions. In the result, maximum, minimum grain size had strong negative correlation with roughness while weak positive correlation with wind velocity. Also, Slope which means the effect of gravity also influence grain size erodible by winds. Based on these results, regression equations were suggested for predicting maximum and minimum grain sizes by using multiple linear regression analysis from SPSS 20.0. The equation for maximum grain size erodible by winds showed a good agreement with the observed data with $R^2=0.896$. Other equation for minimum grain size had $R^2=0.777$.

Keywords: Portable wind erosion tunnel; Soil erosion; Grain size; Wind erosion

1. 서 론

지구 온난화에 따른 기온의 상승 및 기상변화 등 이상기후에 의한 지표면의 건조화가 진행되는 곳이 많으며 과거 100년간 한국의 기온은 1.7 °C 상승했으며 세계적으로는 0.74 °C가 상승했다 (Buschiazzo and Zobeck, 2008). 또한 지구 온난화는 건조 지역의 사막화를 야기하며 풍식을 일으키는 원인 중 하나이다. 풍식은 밭 등의 표토를 침식시키며 표토의 영양분 또한 감소시킨다. 국내에서는 평창 산간 지역에 2~3년 간 1헥타르 당 1,770톤의 입자가 바람의 영향으로 이동하며 (Park, 2006) 이 입자들은 분산되어 건강상의 문제를 야기하거나 작물 등에 악영향을 끼치게 된다 (Bitog et al., 2009).

일반적으로 풍식을 받는 입자는 0.84 mm 이하이며 그 이상에서는 풍식에 큰 영향을 받지 않는다 (Lyles, 1988). 또한, 풍속에 따라 주로 풍식을 받는 입경의 크기가 달라지며 풍속이 낮은 경우 작은 입경의 입자들이 풍식을 받으며 풍속이 높은 경우 큰 입경의 입자들이 주로 풍식을 받는다 (Lui et al., 1998).

표층의 함수비 역시 풍식에 영향을 주는 인자다. 지표에 일정량의 수분이 존재하면 풍식이 거의 일어나지 않으며 4~4.9%의 함수비 이하일 경우 풍식이 잘 일어나게 된다 (Zobeck, 1991). 또한, 표토의 모관흡수력이 일정 이상이면 풍식이 잘 일어나지 않는 것으로 알려져 있다 (Bolte et al., 2001). 이외에도 표면 거칠기에 따라 풍식 발생량이 차이가 나타난다는 연구결과가 있으며 풍식 받은 입자가 움직여 근처의 입자에 영향을 주며 이 때 거칠기에 따라 그 영향 정도도 역시 다르다 (Zobeck, 1991).

이와 같이 풍식 발생량에 영향을 주는 요인은 표층 함수비, 표면 거칠기, 표층부 입도분포, 풍속 등이며 이를 바탕으로 풍식 발생량을 추정할 수 있는 WEPS (Wind erosion prediction system) 식을 적용할 수 있다 (Webb and McGowan, 2009).

한편, 풍식 발생 후 나타나는 미세먼지의 입경에 따라 미세먼지 관리대책 등은 다르게 세워진다. 입경이 2.5 μm 이하인 경우 집진기를 사용하며 입경이 큰 경우 필터를 사용해 비산먼지를 제어한다. 그러나 풍식을 받은 입자의 입경은 WEPS 식으로 통해 파악할 수 없기 때문에 입경의 특성을 파악 및 추정하는 것은 미세먼지 저감 등에 기여하는 기초자료가 될 수 있다.

* 서울대학교 조경·지역시스템공학부 대학원
 ** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수, 서울대학교 농업생명과학연구원
 *** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 부교수, 서울대학교 농업생명과학연구원
 **** Division M3-BIORES: Measure, Model & Manage Bioresponses. KU LEUVEN
 ***** 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 재해예방공학과
 † Corresponding author Tel.: +81-2-880-4585
 Fax: +81-2-873-2087
 E-mail: syh86@snu.ac.kr

2013년 11월 1일 투고
 2013년 11월 4일 심사완료
 2013년 11월 8일 게재확정

이를 위해 본 연구에서는 현장 풍동 실험을 통해 표면 함수비, 표면 거칠기, 경사도, 표층부 입도분포, 풍속 등 5가지 요인과 풍식되는 입자의 입경과의 상관성 분석을 통하여 풍식 받은 입자의 최대·최소입경을 추정하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지

본 연구에서 실시된 현장 풍동 실험은 강원도 평창군 대관령면에 위치한 고령지 농업연구센터 (Highland agriculture research center)의 실험용 포장에서 수행되었다. 본 대상지는 태백산맥의 동쪽 끝 고도 770 m에 위치하고 있다.

2. 풍동 실험

가. 소형 풍동 장비

본 연구에서 사용된 소형풍동의 모식도는 Fig. 1과 같다. 기본 구조는 풍속을 생성할 수 있는 대형 팬과 외부 풍속에 대한 영향을 최소화하기 위한 풍동 벽면으로 이루어져 있다. 풍동의 벽면의 재질은 두께 5 mm의 아크릴로 제작하였으며 프레임은 알루미늄을 사용하였다. 또한 알루미늄 호일로 된 직경 7 mm 허니콤을 끼워 풍동 안에서의 풍속, 풍향이 일정하게 유지되도록 하였으며 구동 팬의 경우 정격출력 2마력의 모터와 함께 직경 50 인치 팬을 사용하였다.

풍식된 입자를 포집하기 위하여 배기구 쪽에 철망 (Deposition net)을 설치하여 풍속을 감속시켜 입자들이 알루미늄 호일에 떨어지게 하였다. 풍식 발생량은 호일의 무게와 함께 측정되며 기존 호일 무게와의 차이를 통해 알아낸다. 또한, 배기구 바닥에 나무판 (T-board)을 설치하여 입자가 굴러서 호일로 들어오는 것을 방지하였다.

풍동의 각 부분은 전부 분리가 가능하도록 설계가 되어 있으며 이동 시 분리해서 움직일 수 있게 되어 있다.

나. 풍동 실험

풍동 실험 풍속은 단계별로 6, 7.5, 9.5 m/s 세 단계를 설정하

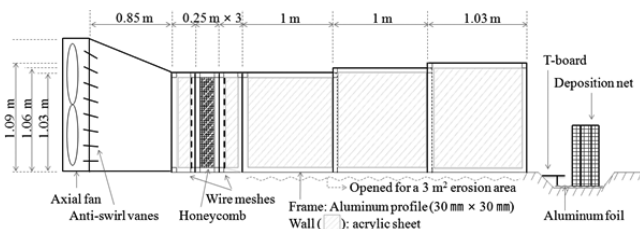


Fig. 1 Schematic view of the portable wind erosion tunnel (Hong et al., 2012)

Table 1 Case of wind erosion tunnel test

	Wind velocity (m/s)	Slope (°)	Location
Case 1	6	0	Tilted field
	7.5		
	9.5		
Case 2	6	0	Road nearby field
	7.5		
	9.5		
Case 3	6	20	Artificially prepared slope land
	7.5		
	9.5		
Case 4	6	-20	Artificially prepared slope land
	7.5		
	9.5		



Fig. 2 Portable wind erosion tunnel test and land with a slope of 20° on test site

였으며 팬 모터의 출력 및 현장 평균 풍속을 고려하여 선정되었다. 실험 시간은 풍식이 일어날 수 있는 충분한 시간인 10분을 기준 (Fister and Ries, 2009) 으로 하였으며 같은 실험대상지에서 각 단계별로 10분 씩 진행하였다. 또한 실험 장소의 표면은 고랑이 없는 평평한 곳을 선정하였으며 중력의 영향을 고려하기 위해 경사도 0, 20, -20°의 장소를 선정하였다. 실험 장소의 조건 및 특징은 Table 1에 나타내었으며 4개의 Case로 분류하였다.

Case 1은 경사도가 0°이며 간지 (Tilting) 한 시간 이내의 밭이다. 기존의 밭은 풍식을 많이 받아 풍식을 받을 잠재적 입자가 거의 없기 때문에 아직 풍식이 일어나지 않은 곳을 선택하였다. Case 2는 Case 1의 밭 근처의 농경 도로이며 이는 Case 1에 비해 거칠기가 거의 없는 곳을 선정하였다. Case 3, 4는 침식 실험용 인공포장 밭이며 경사지에서 실험하기 위해 선정된 곳이다. 상향으로 바람이 부는 경우를 20°, 하향으로 바람이 부는 경우를 -20°로 선정하였다.

다. 표층 함수비 측정

표층 함수비는 알코올을 이용한 간이 함수비 측정 방법 (Bouyoucos, 1931)을 사용하였으며 이는 풍식을 받을 당시의 함수비를 측정해야 하기 때문이다. 알코올을 시료에 붓고 이를 태우면 열에 의해 시료의 수분이 전부 증발하게 되며 최종적으

로는 건조된 시료만 남게 된다. 이후 전후 질량차를 측정하여 함수비를 측정하게 된다.

라. 표면 거칠기 측정

표면 거칠기의 경우, Saleh (1993)가 제안한 체인 방법 (Chain method)를 이용하였으며 거칠기를 구하는 방법은 식 (1)과 같다. 체인 길이와 체인의 시작점과 끝점과의 거리의 비를 통해 거칠기를 표현하였으며 이 값이 크면 굴곡이 심한 것이고 이 값이 작으면 거의 평평하다.

$$C_r = (1 - \frac{L_2}{L_1}) \times 100 \quad (1)$$

여기서, C_r : 표면 거칠기

L_1 : 체인 길이

L_2 : 체인 시작점부터 끝점까지의 수평거리

마. 표층부 입도 분포 측정

표층부 입도 분포 측정을 위해 체거름 (KS F2302, 2002) 시험을 통해 표면 입단의 입경 0.84 mm 이하 비율을 측정하였다. 건조 방법을 이용하였으며 표면의 입경을 그대로 반영하기 위해 입단을 부수지 않고 체거름 시험을 실시하였다.

바. 입도분석

풍식 받은 입자의 입경 분석을 위해 레이저입도 분석기인 Malvern 사의 Mastersizer 2000을 사용하였다. 본 장비는 레이저 회절 (Laser Diffraction)을 이용하여 큰 입자의 경우 레이저의 산란 각도가 작으며 작은 입자의 경우 레이저의 산란 각도

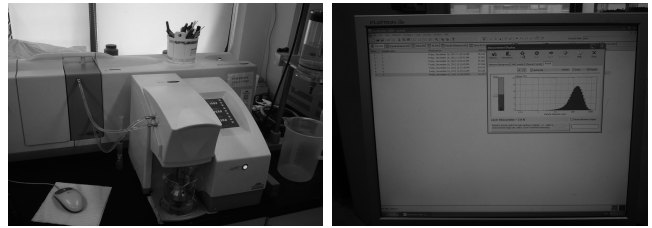


Fig. 3 Mastersizer 2000 from Malvern for analyzing fine grain size

가 큰 원리를 이용하였다. 즉, 입자 크기에 따른 레이저의 산란 강도 및 방향성을 측정하여 입자의 입경을 파악하게 된다. 본 장비를 통해 입경의 분포를 알 수 있으며 풍식 받은 입자의 최대, 최소 입경을 파악할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 각 Case 별 풍식 특성

현장 풍동실험, 인자측정 및 입도분석을 통해 얻는 결과는 다음과 같다.

Case 1의 경우 현장조건에 따른 반응입경의 최대·최소값이 상대적으로 작게 측정됐는데 이는 갈린 밭의 표면 함수비가 높고 거칠기가 크기 때문인 것으로 판단된다. 표면 함수비가 높으면 물 분자와 흙 입자의 인력에 의해 풍식에 저항하는 정도가 커지며 거칠기가 증가하는 경우 바람 에너지의 영향을 덜 받기 때문에 (Zobeck, 1991) 움직이는 입경이 작은 것으로 보인다.

Case 2의 경우 Case 1에 비해 최대·최소 입경이 큰 것으로 확인할 수 있다. 우선 표면 함수비가 상대적으로 작으며 표면 거칠기는 절반에 가깝기 때문에 풍식이 더 잘 일어난 것으로 판단

Table 2 Results of each case of wind erosion tunnel test

	Wind velocity (m/s)	Slope (°)	Proportion of under 0.84 mm (%)	Topsoil water content (%)	Roughness (%)	Minimum grain size (μm)	Maximum grain size (μm)
Case 1	6	0	30.54	7.91	7.50	25.23	243.28
	7.5					29.39	298.53
	9.5					25.06	371.43
Case 2	6	0	23.72	6.92	3.20	57.05	1161.32
	7.5					63.57	1240.26
	9.5					52.23	1095.52
Case 3	6	20	32.25	4.1	7.67	41.77	378.27
	7.5					47.63	615.92
	9.5					44.34	590.99
Case 4	6	-20	32.25	4.74	4.74	37.99	685.12
	7.5					57.51	1247.07
	9.5					71.39	1254.98

된다. 또한, 농경 도로이기 때문에 상대적으로 잘 다져져 있으며 표면에는 구속력이 없는 입자들이 많이 분포하고 있다. 이 때문에 Case 1과 비교 시 같은 풍속 하에서 더 큰 입경이 검출되는 것으로 보인다.

Case 3, 4의 경우 동일 풍속에서 상향 경사인 Case 3에서 검출된 최대입경이 2배 정도 작은 것을 볼 수 있으며 이는 표면 거칠기의 영향인 것으로 판단된다. 경사도가 크면 큰 입경의 입자는 멀리 이동하지 못하기 때문에 검출 장소까지 도달하지 못하게 된다. 또한, Case 1과 Case 3의 표면 거칠기는 거의 비슷하지만 경사는 Case 3가 더 크다. 그러나 검출된 입경은 Case 3가 더 크며 이는 표면 함수비의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

풍속이 증가하는 경우 일반적으로 풍식 받는 입자의 입경이 커지지만 Case 1을 제외하고 나머지 Case에서는 7.5 m/s와 9.5 m/s의 입경이 큰 차이를 보이지 않았다. 같은 장소에서 실험을 하였기 때문에 7.5 m/s에서 풍식을 받은 입자는 9.5 m/s에서는 검출이 되지 않으며 이 때문에 오히려 최대 입경이 줄어드는 경우도 나타났다. 이는 특정 입경이 이동하는데 필요한 최소한의 풍속이 존재하는 것을 의미하며 같은 입경이라도 결합형태, 입자위치 등에 따라 다른 임계풍속을 가지는 것으로 판단된다.

최소입경의 경우 미세먼지 기준인 10 μm 이하로 나타난 입경이 없었다. 이는 입자 포집장치가 바닥에 있고 풍속 저감 효과에 의해 입자가 떨어지는 것을 원리로 하고 있는데 저감된 풍속에서도 날아갈 수 있는 입자의 경우는 측정이 불가능하기 때문이다.

따라서 저감 장치를 통과하는 입자의 경우 에어로졸 스펙트로미터 (Aerosol spectrometer)를 이용하여 입경을 확인해야 할 것으로 판단된다. 또한, 부유의 경계가 되는 것은 수십 μm에서 100 μm 정도이며 (Zobeck, 1991) 최소입경은 이 범위 내에 들어오는 것을 확인할 수 있다.

2. 풍식 인자와 입경과의 상관성 분석

풍식 인자와 입경과의 상관성 분석을 위해 통계 프로그램 SPSS 20.0을 사용하였으며 주어진 자료가 서열척도가 아니기 때문에 Pearson 상관 분석을 통해 상관성을 확인하였다.

그 결과 최대, 최소 입경과 거칠기와의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났으며 최대 입경의 경우 유의확률이 0.000으로 강한 음의 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 최소 입경의 경우 유의확률이 0.011로 최대 입경의 경우보다 유의성이 떨어지지만 0.05 이내의 유의미한 관계를 가지며 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 풍속의 경우 유의성이 낮게 나타났는데 이는 앞서 서술한 바와 같이 7.5 m/s에서 풍식을 받는 최대 입경이 이미 나타나 9.5 m/s에서는 더 큰 입경이 검출되지 않았기

Table 3 Correlation between maximum grain size and each wind erosion factor

	Wind velocity	Topsoil water content	Roughness	Slope	Proportion of under 0.84 mm
Correlation coefficient	0.208	-0.219	-0.878**	-0.485	-0.480
Significance probability	0.516	0.495	0.000	0.110	0.114

** Highly significant at p<0.05

Table 4 Correlation between minimum grain size and each wind erosion factor

	Wind velocity	Topsoil water content	Roughness	Slope	Proportion of under 0.84 mm
Correlation coefficient	0.205	-0.422	-0.701*	-0.272	-0.321
Significance probability	0.522	0.172	0.011	0.393	0.309

* Highly significant at p<0.05

때문이다. 표층 함수비의 경우 약한 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 경사도 및 0.84 mm 이하 입경 함유율의 경우는 큰 상관성이 없는 것으로 나타났다. 하지만 경사도는 Case 3, 4의 경우만 본다면 중력의 영향 때문에 입경에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 표면 거칠기, 경사도, 0.84 mm 이하 입경 함유율의 경우 최대 입경과의 상관성이 상대적으로 높았으며 표층 함수비의 경우 최소 입경과의 상관성이 상대적으로 높았다. 이는 풍식 받는 입자의 입경이 큰 경우 표면에 작용하는 바람 에너지, 중력의 영향, 잠재적 풍식입자의 비율 등에 영향을 받으며 입경이 작은 경우 물과의 결합력 등에 영향을 더 받는 것으로 판단된다.

3. 입경 추정

위의 상관성 분석을 바탕으로 각 인자들을 통해 풍식의 영향을 받은 입자의 입경을 추정할 수 있는 회귀식을 제시하였다. 상관성 분석과 마찬가지로 SPSS 20.0의 회귀분석을 사용하였으며 입력 방법을 사용하여 모든 인자를 고려하였으나 거칠기의 경우 공선성이 큰 것으로 나타나 제외되었다.

$$G_{max} = 4351.4 + 56.4 V_{wind} - 179.2w - 14.3\theta - 100.2P \quad (2)$$

여기서, G_{max} : 풍식받은 입자의 최대입경 (μm)

V_{wind} : 풍속 (m/s)

w : 표면 함수비 (%)

θ : 경사도 (°)

P : 입경 0.84 mm 이하의 입자 비율 (%)

Table 5 Regression model for assuming maximum grain size of eroded particle

		Significance probability	Entered/Removed
Variables	Wind velocity	0.130	Entered
	Topsoil water content	0.001	Entered
	Roughness	-	Removed
	Slope	0.004	Entered
	Proportion of under 0.84 mm	0.000	Entered
Regression Coefficient	Wind velocity	56.489	
	Topsoil water content	- 179.278	
	Roughness	-	
	Slope	- 14.381	
	Proportion of under 0.84 mm	- 100.264	
	Constant	4351.485	

* ANOVA Significance probability: 0.001

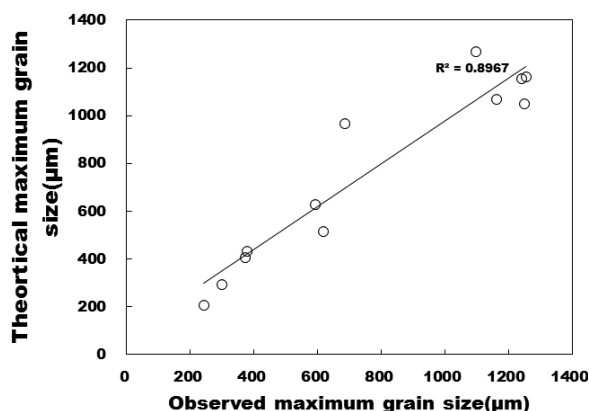


Fig. 4 Relation between observed and theoretical maximum grain size

Table 6 Comparison of maximum grain size in observed and theoretical

	Wind velocity (m/s)	Observed Maximum grain size (μm)	Theoretical Maximum grain size (μm)
Case 1	6	243.28	210.27
	7.5	298.53	295.00
	9.5	371.43	407.98
Case 2	6	1161.32	1071.55
	7.5	1240.26	1156.29
	9.5	1095.52	1269.26
Case 3	6	378.27	434.25
	7.5	615.92	518.98
	9.5	590.99	631.96
Case 4	6	685.12	968.25
	7.5	1247.07	1052.98
	9.5	1254.98	1165.96

Table 7 Regression model for assuming minimum grain size of eroded particle

		Significance probability	Entered/Removed
Variables	Wind velocity	0.287	Entered
	Topsoil water content	0.004	Entered
	Roughness	-	Removed
	Slope	0.120	Entered
	Proportion of under 0.84 mm	0.006	Entered
Regression Coefficient	Wind velocity	2.060	
	Topsoil water content	- 7.945	
	Roughness	-	
	Slope	- 0.322	
	Proportion of under 0.84 mm	- 3.400	
	Constant	177.455	

* ANOVA Significance probability: 0.019

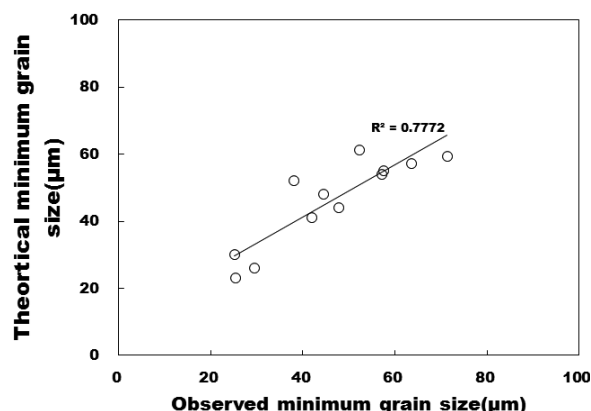


Fig. 5 Relation between observed and theoretical minimum grain size

Table 8 Comparison of minimum grain size in observed and theoretical

	Wind velocity (m/s)	Observed Minimum grain size (μm)	Theoretical Minimum grain size (μm)
Case 1	6	25.23	23.13
	7.5	29.39	26.22
	9.5	25.06	30.34
Case 2	6	57.05	54.19
	7.5	63.57	57.28
	9.5	52.23	61.40
Case 3	6	41.77	41.15
	7.5	47.63	44.24
	9.5	44.34	48.36
Case 4	6	37.99	52.20
	7.5	57.51	55.29
	9.5	71.39	59.41

Case 4의 가장 작은 풍속의 경우를 제외하면 전부 100 μm 이내의 오차를 보여주고 있으며 회귀식의 R^2 값은 약 0.89로 비교적 높은 상관성을 가지는 것으로 검토되었다. 이를 통해 풍식을 받을만한 지점 표면의 물리적 특성 및 풍속을 통해 풍식에 영향을 받는 입자의 입경을 개략적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

$$G_{\min} = 177.4 + 2.0 V_{\text{wind}} - 7.9w - 0.3\theta - 3.4P \quad (3)$$

여기서, G_{\max} : 풍식받은 입자의 최소입경 (μm)

V_{wind} : 풍속 (m/s)

w : 표면 함수비 (%)

θ : 경사도 ($^\circ$)

P : 입경 0.84 mm 이하의 입자 비율 (%)

최소입경 회귀식의 경우 최대입경의 모델에 비해 분산분석의 유의확률이 높고, R^2 값이 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 최소입경은 최대입경보다 선정된 풍식 요인의 영향을 덜 받는 것으로 볼 수 있으며 앞선 상관성 분석에서도 거칠기와 강한 음의 상관관계를 나타내는 최대입경에 비해 그 상관성이 낮음을 확인할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 소형 풍동을 이용해 고령지 농업연구소의 시험밭에서 풍식 요인인 표층 함수비, 표면 거칠기, 경사도, 표층부 0.84 mm 이하 입자 비율, 풍속과 풍식 받은 입자의 최대·최소 입경과의 상관성 분석 및 입경을 추정할 수 있는 회귀식을 제시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

풍식을 받은 입자의 최소입경은 미세먼지 기준인 10 μm 이상인 것으로 나타났으며 이는 검출기의 성능과 관련 있는 것으로 판단된다. 또한, 최대입경은 약 1200 μm 으로 나타났다. 또한, 풍식을 받은 입자의 입경은 표면 거칠기와 강한 음의 상관관계를 가지며 이는 표면 거칠기에 의해 바람 에너지가 입자의 풍식 정도를 결정하기 때문인 것으로 판단된다.

Case 1은 풍속의 증가에 따라 입자의 최대입경이 증가하였으나 나머지 Case에서는 7.5 m/s 이상의 풍속에서 최대입경이 거의 비슷하거나 오히려 줄어들었다. 이는 특정 입경이 움직이는데 필요한 임계 풍속이 있는 것을 의미하며 같은 입경이라도 결합형태, 위치 등에 따라 임계 풍속이 다른 것으로 나타났다.

풍식 받은 입자의 입경은 중력의 영향을 받으며 Case 3의 상향 경사의 경우 큰 입자의 이동거리는 짧기 때문에 검출 장소까지 도달하지 못한 것으로 판단된다. 또한, 표층 함수비는 표면

거칠기 다음으로 입경에 영향을 주는 요소로 나타났으나 상관분석에서 유의미한 상관성을 나타내지는 못하였다. 또한, 풍식의 유효 입경인 0.84 mm 미만 입자의 함유율 역시 큰 상관성을 나타내지는 않았다.

풍식 받은 입자의 입경이 큰 경우 상대적으로 표면 거칠기, 표층부 0.84 mm 미만 입자의 함유율, 경사도에 영향을 받는 반면 입경이 작은 경우 표층 함수비의 영향을 더 받는 것으로 판단된다.

마지막으로 표층 함수비, 표면 거칠기, 경사도, 풍속, 표층부 0.84 mm 미만 입자의 함유율을 통해 최대·최소 입경의 추정이 가능한 회귀식을 제시하였다. 표면 거칠기는 공선성이 커 회귀분석에서 제외되었으며 최대 입경 추정 모델의 R^2 값은 0.896, 최소 입경 추정 모델의 R^2 값은 0.777로 상당히 유의미한 상관성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ 90809 8042013)의 지원에 의해 이루어진 것임.

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. Bouyoucos, G., 1931. The alcohol method for determining moisture content of soils. *Soil Science* 32(3): 173-180.
3. Buschiazzo, D. E. and T. M. Zobeck, 2008. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas. *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (12): 1839-1850.
4. Fister, W. and J. B. Ries, 2009. Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel. *Journal of Arid Environments* 73(2009): 996-1004.
5. Hong, S. W., I. B. Lee, I. H. Seo, K. S. Kwon, T. W. Kim and Y. H. Son, 2012. Measurement and Prediction of Soil Erosion in Dry Field using Portable Wind Erosion Tunnel. *Biosystems Engineering* (in Print).
6. Park, H. K., 2006. Environmental damages and control measures by highland agriculture – study on system

- improvement. Ph.D. thesis, Chuncheon, Korea: Kangwon National University (in Korean).
7. Saleh, A., 1993. Soil roughness measurement: Chain method. *Journal of Soil and Water Conservation* 48(6): 527-529.
 8. Webb, N. P., and H. A. McGowan, 2009. Approaches to modeling land erodibility by wind. *Progress in Physical Geography* 2009: 1-27.
 9. Zobeck, T. M., 1991. Soil properties affecting wind erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 46(2): 112-118.
 10. Lianyou, L., 1998. Determination of erodible particles on cultivated soils by wind tunnel simulation. *Chinese Science Bulletin* 43(19): 1646-1651.
 11. Bolte, K., P. Hartmann, and H. Fleige, 2011. Determination of critical soil water content and matric potential for wind erosion. *Journal of Soils Sediments* 11: 209-220.
 12. Lyles, L., 1988. Basic wind erosion process. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 22-23: 91-101.