

방풍펜스가 후방에 놓인 야적모래입자의 비산에 미치는 영향에 관한 연구

박기철* · 이상준**
(2000년 1월 5일 접수)

Shelter Effect of Porous Fences on the Saltation of Sand Particles in an Atmospheric Boundary Layer

Ki-Chul Park and Sang-Joon Lee

Key Words: Wind Erosion(풍식), Porous Fence(다공성 펜스), Atmospheric Boundary Layer(대기경계층), Sand Pile(모래파일), Threshold Velocity(임계속도)

Abstract

Effects of porous wind fences on the wind erosion of particles from a triangular sand pile were investigated experimentally. The porous fence and sand pile were installed in a simulated atmospheric boundary layer. The mean velocity and turbulent intensity profiles measured at the sand pile location were well fitted to the atmospheric boundary layer over the open terrain. Flow visualization was carried out to investigate the motion of windblown sand particles qualitatively. In addition, the threshold velocity were measured using a light sensitive video camera with varying the particle size, fence porosity ϵ , and the height of sand pile. As a result, various types of particle motion were observed according to the fence porosity. The porous wind fence having porosity $\epsilon=30\%$ was revealed to have the maximum threshold velocity, indicating good shelter effect for abating windblown dust particles. With increasing the sand particle diameter, the threshold velocity was also increased. When the height of sand pile is lower than the fence height, threshold velocity is enhanced.

1. 서론

바람에 의해 날리는 야적 입자의 거동에 관한 연구는 공학적인 필요에 의해 많이 이루어져 왔다. 예를 들어 캐나다나 북유럽 처럼 눈이 많이 내리는 지역에서는 눈에 의한 피해를 줄이기 위하여 스노우드리프트(snowdrift) 및 적설에 대한 연구가 수행되어 왔다. 또한 사막지대의 모래 입자들이 비산되는 과정에 대한 연구도 수행되었으며, 이밖에 바람에 날린 먼지입자들에 의한 농작물피해를 줄이기 위한 연구 등도 진행되어 오고

있다. 최근 들어서는 탄광, 화력발전소, 제철소 등에 야적한 원료입자들이 바람에 의해 비산하여 인근 주거지역에 환경보존문제를 야기시키기도 한다. 이와같은 입자비산에 의한 대기오염문제를 해석하고, 비산 억제대책을 강구하는 것은 풍공학적인 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 대기경계층내에 놓인 야적모래입자의 비산거동을 조사하고, 전방에 놓인 방풍펜스가 이들 모래입자의 비산에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

Bagnold⁽¹⁾는 리비아 사막의 모래 움직임을 관찰함으로써 도약비산하는 모래입자들의 거동 및 입자비산의 메커니즘을 처음으로 연구하였다. 입자비산과 관련한 대부분의 기존 연구에서는 회류수조나 풍동을 이용하여 비산현상을 실험적으로 모사하였다. 예를들어 Finney⁽²⁾는 풍동 모사실험을 통해 바람에 의한 스노우 드리프트(snow drift)현

* 포항공과대학교 대학원 환경공학부
** 회원, 포항공과대학교 기계공학과(환경공학부)
E-mail:sjlee@postech.ac.kr
Tel:054-279-2169 Fax:054-279-3199

상 및 입자거동을 연구하였고, Zingg⁽³⁾는 침전입자들의 도약비산거동에 관한 풍동실험을 수행하였다. 그리고 Isyumov⁽⁴⁾는 회류수조를 이용하여 입자비산연구를 수행하였으며, Kind^(5,6)는 입자비산에 관한 모델링 방법과 모래와 눈입자들의 비산과정을 정리하였다.

입자의 비산거동은 크게 도약비산(saltation), 부유비산(suspension), 구름비산(creep)의 3가지 현상으로 나눌 수 있다. 도약비산은 입자비산 메커니즘 중에서 가장 중요한 위치를 차지하는 유동현상으로, 바람에 의해 입자가 공기 중에 계속 떠있기에는 무거워 공기중으로 입사 후 바로 지표면으로 떨어져버리는 경우를 말한다. 이것은 입자의 도약이나 튀는 운동으로 대표되며 일반적으로 직경 100~1000 μm 의 입자들에 대해서 주로 일어난다. 부유비산은 입자의 크기가 바람의 속도 변동성분에 영향을 받을 정도로 작아서 입자 거동이 난류확산에 의해서 정의되어지는 움직임을 나타낸다. 따라서 부유비산을 난류확산 이라고 부르기도 한다. 이 현상은 주로 직경 100 μm 이하의 입자에 대해서 일어나며, 일단 부유비산된 입자들은 공기 중에 계속 떠 있다가 비나 눈 등에 의해 다시 지표면으로 떨어지거나 수 킬로미터 떨어진 곳까지 바람에 날려가기도 한다. 구름비산은 입자들이 바닥표면에 붙은채로 이동하는 현상을 나타내는데, 보통 직경이 1000 μm 이상인 큰 입자가 바람에 들리지 못하고 표면을 따라 구르는 현상을 말한다.

한편 다공성 방풍펜스와 관련한 연구들로 Borges and Viegas⁽⁷⁾는 방풍펜스 후류의 속도와 선단응력을 측정함으로써 비산억제장치의 효율성을 검토하였다. Perera⁽⁸⁾도 방풍펜스의 구멍모양과 다공도를 변화시켜가면서 펜스후류의 속도결손과 레이놀즈선단응력 변화 및 재부착영역의 길이 등을 관찰하였다. 그는 펜스후방의 재순환버블은 다공도가 증가함에 따라 사라지고 다공도가 낮은 펜스로도 차폐효과를 얻을 수 있음을 밝혔다. 또한 Ranga 등⁽⁹⁾은 방풍펜스에 작용하는 항력이 펜스의 높이와 다공도의 영향을 크게 받음을 실험적으로 연구하여 펜스의 효율성을 밝혔다. 박철우 등^(10,11)은 대기경계층내에 삼각프리즘 형태로 축소된 야적원료 모델과 방풍펜스를 설치하고 프리즘표면의 평균압력과 rms압력을 측정함으로써 다공성펜스의 비산억제효과를 실험적으로 밝혔

다. 또한 Lee and Kim^(12,13)은 two-프레임 PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 이용하여 방풍펜스 주위의 순간 속도장을 수백장 측정하여 평균속도 및 난류통계치의 공간분포를 구하였다. 비산에 직접 영향을 주는 물리량인 이들 속도장 및 압력분포 측정을 통해 그들은 다공도 $\epsilon=30\sim40\%$ 의 펜스가 비산억제에 효과적임을 밝혔다.

이처럼 입자비산 및 방풍펜스에 관한 연구는 다양하게 수행되어왔으나, 다공성 방풍펜스가 후방에 놓인 야적입자들의 비산에 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 실정이다. 최근 들어 환경규제강화와 환경에 대한 관심 고조로 인해 미세입자들의 비산분체는 대기오염 관점에서 매우 중요하게 다루어지고 있다. 또한 석탄과 같은 원료를 야적해 놓은 대형야적장에서는 야적해 놓은 원료 입자들이 강한 바람에 의해 멀리까지 날려가게 되어 경제적인 손실뿐만 아니라 인근 주거지역에 환경오염까지 일으키는 등 그 피해가 심각하여 야적입자의 비산현상에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

본 연구에서는 다공성 방풍펜스가 후방에 야적된 모래입자들의 비산에 미치는 효과를 실험적으로 조사하고자 한다. 본 연구결과는 입자비산에 효과적인 방풍펜스 및 비산억제장치의 설계자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 모래입자 비산 실험을 위하여 POSTECH 폐쇄회로형 아음속풍동을 시험부에 연결된 디퓨저 끝부분을 건물 바깥으로 연결하여 송출(blowdown) 방식의 풍동으로 개조하여 수행하였다. 개조된 시험부의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 8m이다. 풍동시험부 바닥면에서 8cm 높이에 날카로운 선단부를 가진 바닥판을 대략 8m가량의 길이로 설치하였다. 그리고 대기경계층을 모의생성시키기 위하여 선단부로부터 약 15cm 떨어진 곳에 와류발생장치를 장착하고 거친 바닥면으로 길이 0.5m정도의 인조잔디를 설치하였다. 본 연구에서는 실제상황을 모사하기 위해서 시험부 입구부분에 와류발생장치 및 거칠기요소를 설치하여 완전발달한 난류경계층을 풍동시험부에 생성시켰다. 그리고 입자비산 실험의 경우 중요

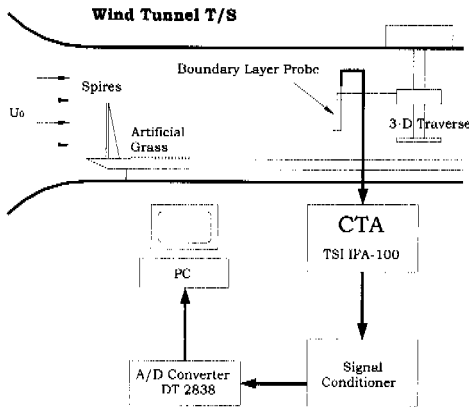
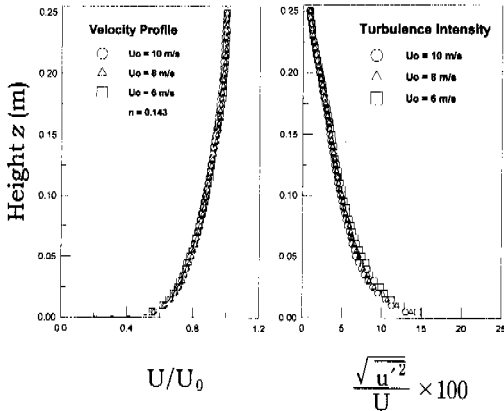


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel test section and measurement system



(a) Mean velocity (b) Turbulence intensity

Fig. 2 Mean streamwise velocity and turbulence intensity profiles measured at x=0

한 변수로 중력에 의한 영향을 나타내는 프루드수(Froude)와 입자와 작동유체간의 밀도비를 고려하게 되는데, Peterka and Petersen⁽¹⁴⁾에 따르면 입자비산착지 모델에서 엄밀한 프루드수의 상사는 필요하지 않다고 밝혔으며, 입자와 작동유체 사이의 밀도비(ρ_p/ρ)가 600이상이면 모사실험과 실제상황사이의 밀도비의 상사성은 고려하지 않아도 된다고 알려져 있다.(Kind⁽⁵⁾) Fig. 1은 풍동시험부와 속도측정시스템을 나타낸 것으로 피토타입관과 열선유속계(TSI IFA 100)를 사용하여 속도를 측정하였다. Fig. 2는 야적 모래파일이 놓일 위치인 시험부 입구의 와류발생장치로부터 4m지점(x=0)에서 측정한 대기경계층의 평균속도와 난류강도분포를 나타낸 것이다. 기준풍속 (U_δ)과

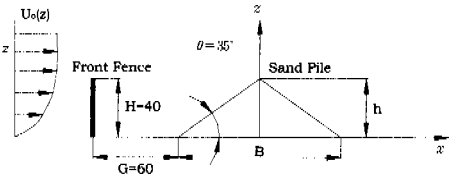


Fig. 3 Experimental set-up and coordinate system (unit: mm)

Table 1 Main characteristics of sand particles used in this study

	Type A	Type B	Type C
density (kg/m^3)	2650	2650	2650
$D_p(\mu\text{m})$	331	270	158
Sample* (μm)	186~474	177~376	102~224
σ / D_p	0.34	0.29	0.31

높이(δ)로 무차원하여 멱급수(power law) 형태로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다. 대기경계층영역내의 유속분포를

$$\frac{U(z)}{U_\delta} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^a \quad (1)$$

여기서 U_δ 는 대기경계층두께 δ 에서의 속도를 나타낸다. 평균속도의 수직방향분포는 멱법칙 형태에서 지수 $a=1/7(=0.143)$ 의 값을 가지며 이것은 평활지역에서의 전형적인 속도분포를 나타낸다. 또한 대기경계층 바닥에서의 난류강도는 약 15%정도이며, 높이가 높아질수록 완만하게 감소하는 분포를 가진다. 모사된 대기경계층의 두께 δ 는 대략 240mm이다. 이때 평균유속에 대한 야적모형의 레이놀즈 수는 약 $Re=18,000\sim 27,600$ 이다.

본 실험에 사용된 야적모래 축소모델은 시험부 입구에 설치된 와류발생장치로부터 4m 후방에 설치하였는데, 그 형상은 평균높이 15m의 실물 야적원료 형상을 기준으로 1/375 척도로 축소시켰으며 $\theta=35^\circ$ 의 경사각을 갖도록 하였다. 본 연구에 사용한 좌표계 및 실험변수들을 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 펜스의 높이와 펜스로부터 야



(a) Type A(Dp=331 μ m)



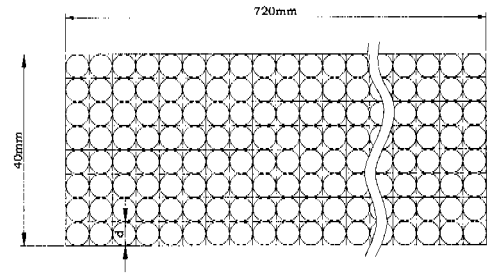
(b) Type B(Dp=270 μ m)



(c) Type C(Dp=158 μ m)

Fig. 4 Photomicrographs of sand particles

적모래까지의 거리는 각각 H=40mm, G=60mm로 고정하였으며, 야적모래의 정전 높이는 h=26mm와 40mm의 2가지를 사용하였는데 이때 밑면의 길이는 각각 B=37mm와 57mm이었다. 입자비산의 모사를 위해서 사용된 모래는 강가와 해변의 모래를 채취 사용하였으며, 대략 2650kg/m³의 밀도를 가지고 있다. 본 연구에서는 다양한 크기의 표준 시험체를 체가름 시험기(sieve shaker)에 설치하여 모래입자들을 크기별로 선별하여 3가지의 서로 다른 직경분포를 가지는 모래입자군으로 나누었다. 이러한 선별과정을 거쳐 얻어진 3가지 모래입자군 Type A, B, C는 각각 거의 단일분포에 가까운 형태를 보여주고 있다. 레이저 입자측정기로 분석한 이들 3가지 모래입자군의 평균직경(D_p)과 표준편차(σ)를 Table 1에 나타내었다. A형, B형, C형의 3가지 모래입자군들의 평균직경은 각각 331 μ m, 270 μ m, 158 μ m이며, 현미경으로 관찰한 입자들의 사진을 Fig.4에 나타내었다. 이 그림을 통해, 본 실험에 사용된 자연상태의 모래는 날카



Porosity ϵ (%)	0	20	30	40	50
Hole diameter d(mm)	0	2.5	3.1	3.6	4.0

Fig. 5 Porous wind fence and fence porosity

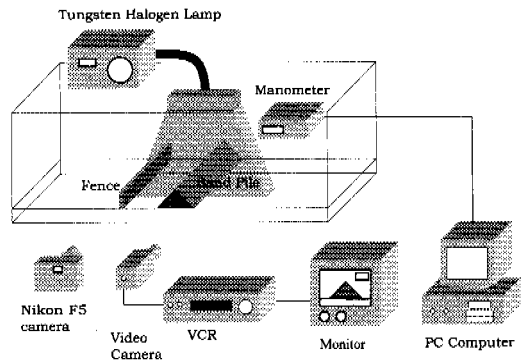


Fig. 6 Schematic diagram of particle motion visualization and threshold velocity measurement system

로운 모서리를 가지고 있음을 알 수 있다.

본 연구에 사용되어진 방풍펜스 모형은 실제 방풍펜스를 기준으로 1/375의 축소시켰으며 그 개략도를 Fig. 5에 나타내었는데, 펜스의 높이와 폭은 각각 40mm와 720mm이며 4mm의 두께를 가지고 있다. 펜스의 다공도(porosity, ϵ)는 일정간격으로 뚫어진 구멍의 직경을 변화시켜 조절하였는데, 완전막힌벽($\epsilon=0$)과 $\epsilon=20, 30, 40, 50\%$ 의 5가지 서로 다른 다공도를 갖는 방풍펜스를 사용하였다.

바람에 의한 모래입자의 비산현상을 정성적으로 관찰하기 위하여 입자거동을 가시화하였다. 조명으로는 백색광램프를 사용하였는데, 입자의 직경에 따라 램프 출력을 적절하게 조절하여 사용하였다.

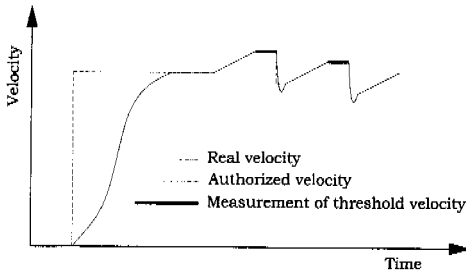


Fig. 7 Typical example of test sequence for measuring threshold velocity⁽¹⁵⁾

Fig. 6은 입자운동 가시화와 임계속도(threshold velocity) 측정에 사용되어진 장치를 나타낸 것이다. 일반적으로 임계속도는, 입자가 처음으로 도약을 시작할때까지 풍동속도를 서서히 증가시키면서 CCD 카메라로 도약현상을 탐지함으로써 측정하게 된다.⁽¹⁵⁾ 입자도약의 전후에서는 풍속을 미세하게 조절하면서 입자도약 순간의 풍동속도를 측정하게 된다. 입자도약이 발생하게 되면 측정결과를 저장한 후, 풍동의 속도를 다시 낮추게 된다. 이러한 과정은 대략 20개이상의 임계속도 데이터를 얻을때까지 반복적으로 수행하였다. 백색조명광으로 비산하는 모래입자들을 비추게 되면 이 빛은 산란(scattering)하게 되고 산란된 입자영상을 후처리과정을 위해 기록하였다. 입자도약을 보다 정확하게 감지하기 위하여 백색조명광의 진원과 비디오 카메라의 빛에 대한 민감도(light sensitivity)를 조절하였다. 입자도약순간 측정된 속도값은 실험후 비디오 카메라에 기록된 화상으로 재확인 하였다. 이것은 입자도약현상과 함께 피토포관으로 측정된 속도값이 동시에 화상에 나타나도록하여 화상 프레임(frame)별로 재확인하였다. 본 연구에서 임계속도 측정의 기본 과정을 Fig. 7에 나타내었는데, 여기서 실선은 풍동내에서의 실제 속도를 의미하며, 점선은 풍동 컨트롤패널을 통해 입력한 속도값을 나타낸다. 임계속도 근처에서 미세하게 풍속을 증가시키며 임계속도를 측정하게 되는데, 입자가 도약하여 하나의 임계속도 측정과정이 끝나면, 풍속을 사전에 정해진 고정된 값으로 감소시킨 후, 이러한 일련의 과정을 통해 연속적으로 반복하게 된다. 그리고 측정 초기에 임계속도보다 낮은 풍속에서 쉽게 도약하는 입자들이 발생하므로, 이로 인한 측정오차를 제거하기 위하여 계측된 임계속도값들을

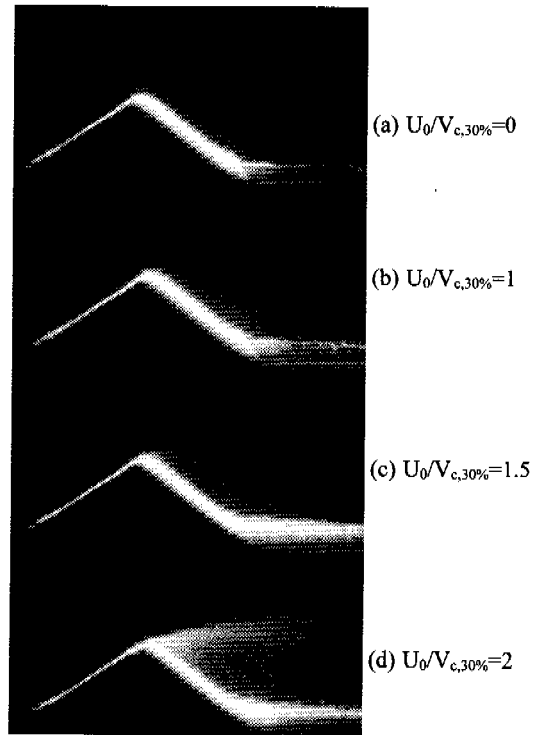


Fig. 8 Visualized motion of sand particles located behind a wind fence of $\epsilon=30\%$ porosity

뒤에서부터 앞쪽으로 누적통계방식을 이용하여 임계속도평균값과 표준편차값을 구하였다. 이때 각각의 임계속도값은 누적평균값의 5%범위를 벗어남이 없을 때까지 값들을 대상으로 하였다. 이러한 방법을 통해 계산하였을 때 대략 15개의 임계속도 데이터들을 구하였으며, 이들을 통계처리하여 평균값 및 표준편차값을 95% 신뢰도로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입자운동 가시화

Fig. 8은 야적모래파일 앞에 다공도가 $\epsilon=30\%$ 인 방풍펜스를 설치하고 속도증가에 따라 나타나는 입자비산현상을 가시화한 결과이다. 입자표면을 지나는 유속이 증가함에 따라 입자가 받는 힘도 커져서 양력과 항력이 부착력보다 커지게 되는 어느 순간 최초의 도약비산(saltation)이 일어난다. 이때, 입자가 도약을 시작하기 직전의 유속을 임계속도(V_c)라고 한다. 다공도가 $\epsilon=\alpha\%$

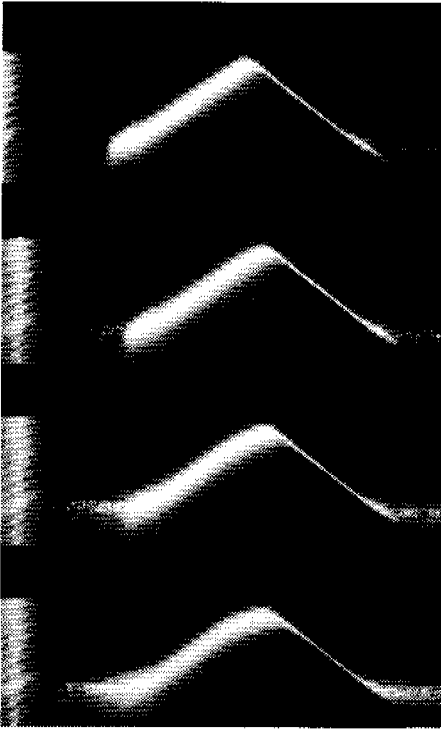


Fig. 9 Visualized particle motions behind a porous fence of $\varepsilon=20\%$ at $U_0=V_{c,30\%}$

인 방풍펜스가 설치되었을 때의 임계속도를 $V_{c,\alpha\%}$ 로 나타내었다. 처음 속도가 0일 때는 입자가 전혀 움직이지 않다가 $V_{c,30\%}$ 부근에서 한 두개의 입자가 야적모래 정점 부분에서 튀어올라 야적모래 후방의 가까운 곳에 떨어지게된다(Fig. 8(b)). 이러한 현상은 아주 간헐적으로 발생하며 이는 접근속도의 변동성분과 연관이 있는 것으로 보인다. 계속해서 속도를 증가시켜 임계속도의 1.5배 ($1.5V_c$)에 이르게 되면, 도약비산현상은 연속적으로 일어나며 도약비산을 일으키는 입자들의 수도 크게 증가한다(Fig. 8(c)). 속도를 보다 증가시켜서 임계속도의 2배($2V_c$)정도의 풍속에 다다르면, 비산되는 야적모래입자는 크게 증가하고, 입자가 후방의 지표면에 떨어진후 재순환유동에 의해 입자가 다시 야적모래과일쪽으로 되돌아오는 역방향 도약비산과 구름비산현상이 나타난다(Fig. 8(d)). 다공도가 $\varepsilon=30\%$ 인 방풍펜스의 경우, 야적모래과일 전방에서는 역방향 구름비산현상이 일어나지 않는다.

야적모래 입자들이 방풍펜스 후방과 야적모래

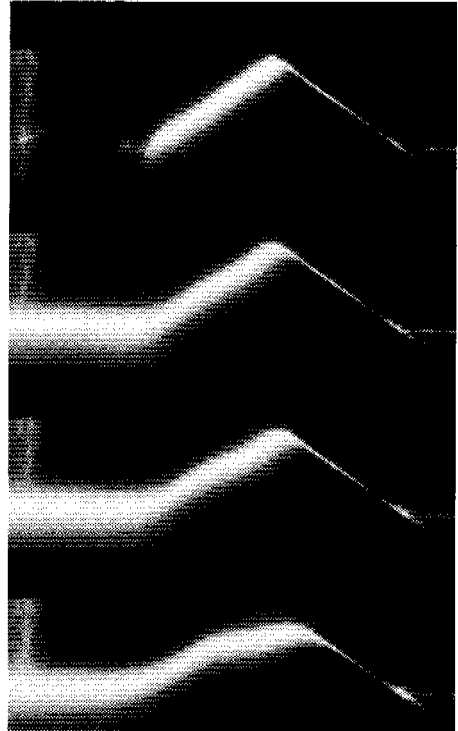


Fig. 10 Visualized particle motions behind a solid fence ($\varepsilon=0\%$) at $U_0=V_{c,30\%}$

전면사이에 형성되는 재순환유동에 의해 전면을 따라 역방향으로 구름비산현상이 발생하는 경우는 임계속도를 이용하여 방풍펜스의 비산억제효과를 비교할수 없기 때문에, 입자거동을 가시화함으로써 확인하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 유속을 $V_{c,30\%}$ 로 고정한 상태에서 다공도 $\varepsilon=20, 30\%$ 의 방풍펜스 후방에 놓인 야적된 모래과일의 형상변화와 비산과정을 가시화한 것이다. 가장 윗쪽 사진은 야적모래입자를 처음 설치하였을때의 야적형상을 나타낸 것이며, 두 번째 사진부터는 풍속을 임계속도까지 높여서, 일정하게 유지한 상태에서 비산과정을 가시화한 것이다.

유속을 $V_{c,30\%}$ 로 유지한 상태에서 다공도가 $\varepsilon=20\%$ 인 방풍펜스 후방의 모래입자 거동을 나타낸 Fig. 9의 경우, 시간이 지남에 따라 야적모래상단에 위치하는 모래입자들이 야적모래의 전면과 후면을 따라 미끄러져 내려가는 현상을 보여주고 있다. 이것은 다공성 펜스 끝단에서 박리된 전단유동이 야적모래 전면 상단에 부딪친 후, 일부가 야적모래의 전면을 따라 내려오면서 모래입자의

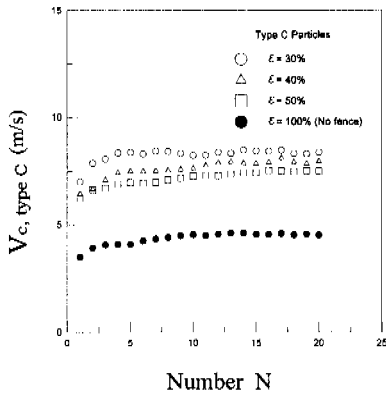


Fig. 11 Effect of fence porosity on the threshold velocity V_c (type C particles)

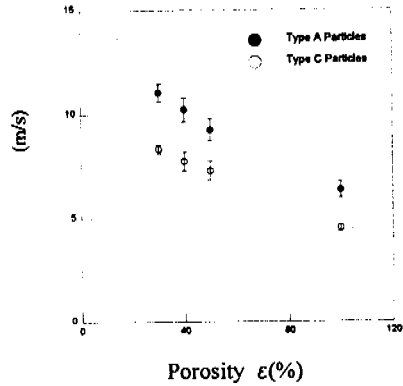


Fig. 12 Time-averaged threshold velocity for type A and C particles

구름비산을 유발하게 되는 것으로 생각되어진다. Fig. 9를 보면 야적모래의 전면 상단부분에서 모래입자의 구름비산현상이 상대적으로 크게 발생하여 초기야적형상이 다소 붕괴되었다. 이것은 펜스 끝단에서 박리된 난류전단유동이 야적된 모래의 상단에 보다 큰 운동량으로 부딪히기 때문인 것으로 보인다. 이러한 유동특성은 삼각프리즘 표면압력을 측정하여 다공성펜스의 방풍효과를 연구한 박철우 등⁽¹⁰⁾에 의해서도 밝혀졌다. 그들은 $\epsilon=20\%$ 다공도를 가진 펜스의 경우 펜스구멍을 관통하는 유동이 상대적으로 작고 펜스 상부로부터 유입되는 유동이 증대되어 전면 상단부근에서 높은 압력 rms값을 가진다고 하였다. 이러한 높은 압력 rms값도 모래입자의 움직임에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되어진다. Fig. 10은 모래파일 앞에 막힌 펜스($\epsilon=0\%$)를 설치한 경우의 입자거동을 가시화한 결과이다. 이 경우는 $\epsilon=20\%$ 다공성 펜스를 설치한 경우에 비해 야적모래파일의 형상붕괴가 현저히 빨리 그리고 크게 발생하고 있다. 이것으로부터 막힌 펜스의 경우 다공도 20% 펜스에 비해 입자구름(creeping)에 의한 입자손실이 큼을 알 수 있다. 이상의 유동가시화 결과로부터 방풍펜스의 다공도가 바람에 의한 모래입자의 비산거동에 크게 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10을 통해 풍속을 $V_{c,30\%}$ 로 유지하였음에도 불구하고 야적원료의 손실이 크게 일어나며, 막힌펜스($\epsilon=0\%$)와 $\epsilon=20\%$ 인 다공성펜스는

다공도가 $\epsilon=30\%$ 인 방풍펜스에 비해 비산억제효과가 현저히 낮음을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 토대로 하여 임계속도측정에서는 $\epsilon=0\%$ 와 $\epsilon=20\%$ 의 다공성펜스는 제외하고 다공도가 $\epsilon=30\%$, 40% , 50% , 그리고 방풍펜스가 없는 경우($\epsilon=100\%$)에 대해서만 임계속도를 측정하여 펜스의 다공도가 야적모래입자의 비산억제에 미치는 효과를 연구하였다.

3.2 비산임계속도

3.2.1 펜스 다공도의 영향

Fig. 11은 다공도(ϵ)가 서로 다른 높이 $H=0.04m$ 의 방풍펜스 후방 $G=0.06m$ 인 지점에 type C 모래입자로 삼각프리즘 형상의 야적파일($h=0.04m$)을 설치하고 야적모래의 비산임계속도를 측정된 결과로 반복실험의 예를 나타낸 것이다. 가로축은 Fig. 7에서 설명한 바와 같이 반복적으로 측정된 횟수 N 을 나타낸다. 여기서 보면 측정횟수 N 이 커짐에 따라 임계속도값이 완만하게 증가하는 것은 유속변화, 야적모래 입자의 위치 등에 따라 쉽게 비산하는 미세입자들이 초기 임계속도측정시 존재하기 때문이다.⁽¹⁵⁾

여기서보면 다공도 ϵ 가 줄어들며 따라 임계속도는 증가하며, $\epsilon=30\%$ 의 다공도펜스는 펜스를 설치하지 않았을 경우에 비해 약 두 배 정도의 임계속도값을 가진다. 이것으로부터 $\epsilon=30\%$ 의 다공성 펜스가 비산억제에 가장 효과적임을 알 수

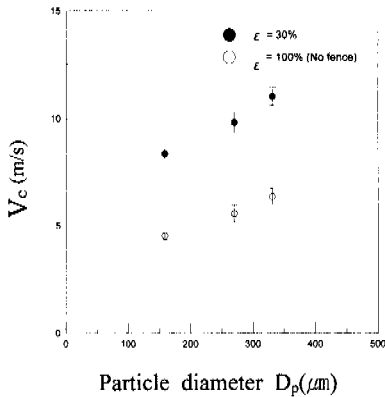


Fig. 13 Effect of particle diameter on the threshold velocity V_c

있다. 이것은 다공도가 작을수록 펜스구멍을 통과하는 유동(bleed flow)의 유량이 줄어들어 야적모래 전면을 따라 가속되는 유동이 상대적으로 약해지기 때문으로 생각되어진다.

Fig. 12는 다공도 변화에 따라 측정한 입자비산 임계속도결과를 95% 신뢰도로 통계처리한 평균값과 편차를 나타낸 것이다. 여기서보면 다공도가 증가할수록 임계속도는 거의 선형적으로 감소하며, 평균직경이 큰 모래입자(A형)가 작은 크기의 모래입자보다 큰 임계속도를 가졌다. 또한 모래입자 크기에 상관없이 다공도가 $\epsilon=30\%$ 인 다공성펜스가 가장 큰 임계속도를 가져 입자비산 방지에 효과적임을 알 수 있다. 또한 여러 가지 다공도를 가진 방풍펜스 후방에 모래입자들이 야적되어 있는 관계로 모래입자의 크기가 펜스 구멍의 크기(다공도)에는 거의 영향을 미치지 않는다. 이 결과로부터 다른 다공도를 갖는 방풍펜스의 입자비산 임계속도를 대략적으로 예측할 수 있다.

작은 다공도를 가지는 펜스($\epsilon=0\%$, 20%)의 경우에는, 유동가시화를 통해서 확인한 바와 같이 다공도 $\epsilon=30\%$ 인 펜스를 설치한 경우의 임계속도($V_{c,30\%}$)에서 재순환유동에 의한 역방향 입자구름현상이 발생하며 대략 5m/s 이하에서부터 입자의 비산움직임이 시작되므로 비산억제에 효과적이지 못하다는 것을 알 수 있다. Perera⁽⁸⁾는 펜스의 다공도가 $\epsilon=30\%$ 이상이 되면 펜스후류의 재순환 버블 생성이 억제되어 진다고 하였는데, 이는 다공도 $\epsilon=30\%$ 의 펜스가 비산억제에 가장 효

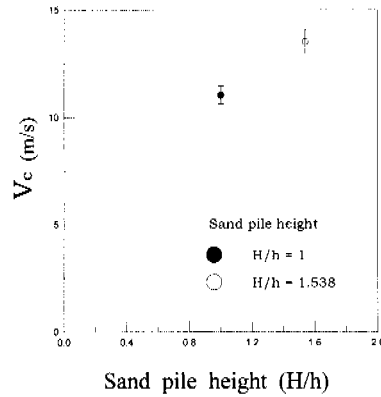


Fig. 14 Effect of sand pile height on the threshold velocity V_c

과적일수 있음을 뒷받침하고 있다.

3.2.2 입자 크기의 영향

Fig. 13은 다공도가 $\epsilon=30\%$ 인 방풍펜스와 펜스가 설치되지 않았을 경우에 대하여 입자크기를 변화시키면서 측정한 임계속도결과를 나타낸 것이다.

여기서 보면 입자의 직경이 클수록 임계속도도 함께 증가함을 알 수 있다. 이는 일반적으로 입자의 크기가 커질수록 무게가 증가하므로 입자를 비산시키기 위해서는 높은 양력값이 요구되어 보다 높은 속도를 필요로 하기 때문이다. Bagnold⁽¹⁾에 따르면 $\rho=2650\text{kg/m}^3$ 의 밀도를 가지는 모래입자의 경우 도약비산에 필요한 임계속도는 직경이 $80\mu\text{m}$ 인 입자가 가장 낮은 값을 가진다고 하였다. 이는 직경 $158\mu\text{m}$ 이상을 다룬 본 실험결과와 일치하고 있다.

3.2.3 야적원료 높이의 영향

본 연구에서는 펜스의 높이를 $H=0.04\text{m}$ 로 고정시킨 상태에서 야적모래과일의 높이를 변화시키면서 입자비산 억제효과를 측정하였다. 이 때 야적모래과일의 높이는 펜스로부터 박리된 전단층 아래에 해당하는 영역인 $H/h=1.47$ 을 기준으로 낮은 값인 $H/h=1$ 과 큰 값인 $H/h=1.538$ 의 2가지 경우를 비교하였다.⁽¹²⁾ Fig. 14는 측정한 임계속도값들을 평균한 임계속도결과를 나타낸 것이다.

여기서보면 펜스와 야적모래의 높이가 같을 때보다 야적모래의 높이가 펜스보다 낮은 경우 대

략 20% 정도 큰 임계속도를 가져 비산억제에 보다 효과적임을 알 수 있다. 이것은 낮은 높이의 야적모래파일이 펜스로부터 박리된 전단유동속에 놓이게 되어 야적모래 주위에 상대적으로 저속의 유동이 형성되기 때문으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 평활지형(open terrain)에 해당하는 대기경계층을 풍동내에 축소 생성시키고, 그 속에 놓여진 삼각프리즘 형태의 2차원 야적모래 파일 전방에 다공성 방풍펜스를 설치하여 방풍펜스의 다공도, 모래입자의 크기, 야적모래의 높이를 변화시키면서 야적모래의 비산거동을 유동가시화와 임계속도측정을 통해 실험적으로 조사하였으며, 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 미세모래입자의 비산은 풍속이 임계속도보다 커질 때 발생하기 시작하며, 풍속이 이 보다 더 크게 증가하면 모래입자의 비산량도 커지며 모래파일 후방에서 재순환유동에 의해 역방향으로의 재비산현상도 발생한다.

(2) 다공도가 낮은 방풍펜스의 경우($\epsilon=0\%$, 20%) 모래파일 전방에 형성된 재순환유동에 기인하여 전면을 따라 역방향 구름비산현상이 나타난다. 다공도가 $\epsilon=30\%$ 보다 큰 방풍펜스의 경우에는 야적모래파일 전방에서는 거의 역방향 구름비산현상이 나타나지 않으며, 모래파일 후방에서 재순환유동을 형성하여 역방향 재도약현상이 발생한다.

(3) 다공도 $\epsilon=30\%$ 의 방풍펜스가 가장 높은 임계속도를 가지며, 이 보다 낮은 다공도의 경우 보다 낮은 유속에서 전방으로의 입자비산이 이루어지므로, 본 연구에서 다룬 펜스중 다공도 $\epsilon=30\%$ 의 방풍펜스가 모래입자의 비산억제에 가장 효과적이었다. 다공도가 $\epsilon=30\%$ 보다 증가하게 되면 임계속도는 거의 선형적으로 감소한다.

(4) 입자크기가 클수록 임계속도가 커지며, 야적모래파일의 높이가 방풍펜스 높이보다 낮은 경우 큰 임계속도를 가져 비산억제에 효과적이었다.

후 기

본 연구는 POSCO 연구과제의 지원에 의하여

이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bagnold, R. A., 1941, "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes," Methuen, London.
- (2) Finney, E.A., 1934, "Snow Control on the Highway," Bulletin, Michigan Engineering Experiment Station(East Lansing), No. 57.
- (3) Zingg, A.W., 1952, "Wind Tunnel Studies of the Movement of Sedimentary Material," *Proc. Fifth Hydraulics Conference*, Univ. of Iowa, Vol. 34, pp. 111~135.
- (4) Isyumov, N., 1971, "An Approach to the Prediction of Snow Loads," Ph.D. Thesis, University of Western Ontario.
- (5) Kind, R.J., 1986, "Snowdrifting: A Review of Modeling Methods," *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 12, pp. 217~228.
- (6) Kind, R.J., 1990, "Mechanics of Aeolian Transport of Snow and Sand," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 36, pp. 855~866.
- (7) Bradley, E.F. and Mulhearn, P.J., 1983, "Development of Velocity and Shear Stress Distribution in the Wake of a Porous Shelter Fence," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 15, pp. 145~156.
- (8) Perera, M.A.E.S., 1981, "Shelter behind Two dimensional Solid and Porous Fences," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 8, pp. 93~104.
- (9) Ranga, R.K.J, Garde, R.J., Singh, S.K. and Singh, N., 1988, "Experimental Study on Characteristics of Flow Past Porous Fences," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 29, pp. 155~163.
- (10) 박철우, 성승학, 이상준, 1996, "다공성 방풍펜스가 대기경계층내에 놓인 삼각프리즘 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, Vol. 20(8), pp. 2670 ~2680.
- (11) 박철우, 이상준, 1997, "다공성 방풍펜스 후방에 놓인 삼각프리즘의 표면압력특성에 관한 풍공학적 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 21(11), pp. 1496~1508.
- (12) Lee, S.J. and Kim, H.B., 1998, "Velocity Field

- Measurements of Flow around a Triangular Prism behind a Porous Fence," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 77&78, pp. 521~530.
- (13) Lee, S.J. and Kim, H.B., 1999, "Laboratory Measurements of Velocity and Turbulence Field behind Porous Fences," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 80, pp. 311~326.
- (14) Peterka, J.A., and Petersen, R.L., 1990, "On the Relaxation of Saltation Length as a Modelling Criteria for Particulate Transport by Wind," *J. of Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 36, pp. 867~876.
- (15) Foucaut, J.M., and Stanislas, M., 1996, "Take-off Threshold Velocity of Solid Particles lying under a Turbulent Boundary Layer," *Experiment in Fluids*, Vol. 20, pp. 377~382.