

# 바람에 의한 야적모래입자의 비산에 관한 실험적 연구

박기철\* · 이상준\*\*

## Experimental Study on Saltation of Sand Particles Located behind Porous Wind Fences

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 fences on the wind erosion of sand particles from a triangular 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. Particle motion was visualized to see the motion of windblown sand particles qualitatively. In addition, the threshold velocity were measured using a light sensitive video camera with varying the fence porosity  $\epsilon$ . 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.

### 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 snowdrift 및 적설에 대한 연구가 수행되어 왔다. 또한 사막지대의 모래 입자들이 비산되는 과정에 대한 연구도 수행되었으며, 이밖에 바람에 날린 먼지입자들에 의한 농작물 피해를 줄이기 위한 연구등도 진행되어 오고 있다. 최근 들어서는 탄광, 화력발전소, 제철소등에 야적한 원료입자들이 바람에 의해 비산하여 인근 주거지역

에 환경보존문제를 야기시키기도 한다. 이와같은 입자비산에 의한 대기오염문제를 해석하고, 비산억제대책을 강구하는 것은 풍공학적 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

Bagnold<sup>(1)</sup>는 리비아 사막의 모래 움직임을 관찰함으로써 도약비산하는 모래입자들의 거동 및 입자비산의 메카니즘을 처음으로 연구하였다. 또한, Zingg<sup>(2)</sup>는 침전입자들의 도약비산거동에 관한 풍동실험을 수행하였고, Isymov<sup>(3)</sup>는 회류수조를 이용하여 입자비산을 연구하기도 하였다.

입자의 비산거동은 크게 도약비산(saltation), 부유비산(suspension), 구름비산(creep)의 3가지 현상으로 나눌 수 있다. 도약비산은 입자비산 메카니즘 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 $\mu$ m의 입자들에 대해서 주로 일어난다.

\* 포항공과대학교 대학원 환경공학부

\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과(환경공학부)

부유비산은 입자의 크기가 바람의 속도변동성분에 영향을 받을 정도로 작아서 입자 거동이 난류확산에 의해서 정의되어지는 움직임을 나타낸다. 따라서 부유비산을 난류확산(turbulent diffusion)이라고 부르기도 한다. 이 현상은 주로 직경 100 $\mu\text{m}$  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 붙은 채로 이동하는 현상을 나타내는데, 보통 직경이 1000 $\mu\text{m}$  이상인 큰 입자가 바람에 들리지 못하고 표면을 따라 구르는(rolling) 현상을 말한다.

한편 다공성 방풍펜스와 관련한 연구들로서 Borges and Viegas<sup>(4)</sup>는 방풍펜스 후류의 속도와 전단응력을 측정함으로써 비산억제효과를 검토하였다. Perera<sup>(5)</sup>도 방풍펜스의 구멍모양과 다공도를 변화시켜가면서 펜스후류의 속도결손과 레이놀즈 전단응력 변화 및 재부착영역의 길이 등을 연구하였다. 또한, 박철우 등<sup>(6)</sup>은 대기경계층내에 삼각프리즘 형태로 축소된 야적원료 모델과 방풍펜스를 설치하고 프리즘표면의 평균압력과 rms압력을 측정함으로써 다공성펜스의 비산억제효과를 실험적으로 밝혔다. Lee and Kim<sup>(7)</sup>은 two-프레임 PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 이용하여 방풍펜스 주위의 속도장을 수백장 측정하여 평균속도 및 난류통계치의 공간분포를 구하였다. 비산에 영향을 주는 물리량인 이들 속도장 및 압력분포 측정을 통해 그들은 다공도  $\epsilon=30\sim 40\%$ 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. 따라서, 본 연구에서는 다공성 방풍펜스가 후방에 야적된 모래입자들의 비산에 어떻게 영향을 미치는지를 실험적으로 조사하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험은 모래입자 비산 실험을 위하여 POSTECH 폐쇄형 아음속풍동을 개방형으로 개조하여 수행하였는데, 개조된 시험부의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 8m이다. 풍동시험부 바

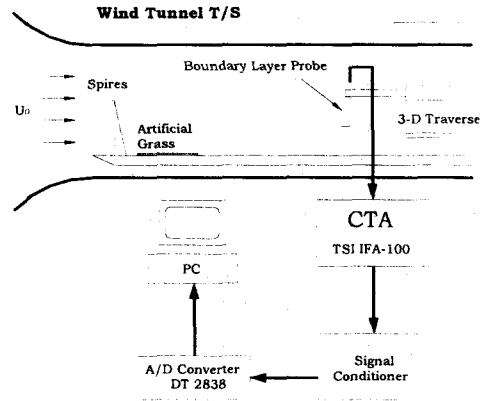


Fig.1 Schematic diagram of wind tunnel test section and measurement system

다면에서 8cm높이에 날카로운 선단부를 가진 바닥판을 8m 길이로 설치하였다. 그리고 대기경계층을 모의생성시키기 위하여 선단부로부터 약 15cm 떨어진 곳에 와류발생장치(vortex generator)를 장착하고, 거친 바닥면(roughness)으로 길이 0.5m 정도의 인조잔디를 설치하였다. Fig.1은 풍동시험부와 속도측정시스템을 나타낸 것으로 피토정압관(pitot-static tube)과 열선유속계(TSI IFA 100)를 사용하여 속도를 측정하였다. 일반적으로 대기경계층내부의 유속분포를 기준풍속( $U_\delta$ )과 높이( $z$ )로 무차원하여 멱급수(power law) 형태로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $U_\delta$ 는 경계층두께(boundary layer thickness)  $\delta$ 에서의 속도를 나타낸다. 본 실험에서는 모래파일이 놓일 위치, 즉 와류발생장치로부터 약 4m지점( $x=0$ )에서 수직으로 측정한 평균속도가 전형적인 평활지역(open terrain)의 대기경계층에 해당하는  $a=1/7$ ( $\approx 0.143$ )의 유속분포를 가지도록 하였고, 이 때 모사된 대기경계층의 두께  $\delta$ 는 대략 240mm이었다. 또한 난류강도는 바닥면에서 약 15%정도이며, 지면으로부터 올라갈수록 완만하게 감소하였다.

본 실험에 사용된 야적모래 형상은 평균높이 15m의 실물 원료야적 형상을 기준으로 1/375 척도로 축소시켰으며,  $\theta=35^\circ$ 의 경사각을 갖도록 하였다. 본 연구에 사용한 좌표계 및 실험변수들을 Fig.2에 나타내었다. 여기서 펜스의 높이, 펜스

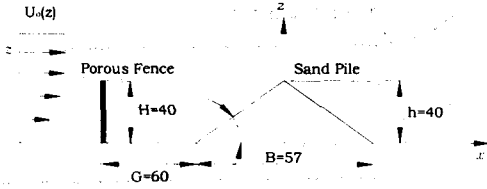


Fig.2 Experimental set-up and coordinate system (unit: mm)

	Type A	Type B
density (kg/m <sup>3</sup> )	2650	2650
D <sub>p</sub> (μm)	331	158
Sample* (μm)	186-474	102-224
σ /D <sub>p</sub>	0.34	0.31

\* Particle distribution between 10% and 90%

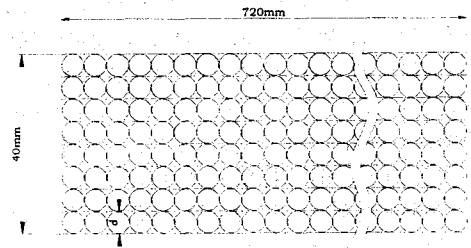
Table.1 Main characteristics of sand particles used in this study

와 야적모래사이의 거리, 그리고 야적모래의 높이는 각각 H=40mm, G=60mm 그리고 h=40mm(B=57mm)로 고정하였다. 본 연구에 사용된 입자는 강가와 해변의 모래를 체를 쳐 사용하였으며, 대략 2650kg/m<sup>3</sup>의 밀도를 가지고 있다. 본 연구에서는 다양한 크기의 표준시험체를 사용하여 2가지 서로 다른 직경분포를 가지는 모래입자를 선별하였다. 이러한 선별과정을 거쳐 얻어진 2가지 모래입자군 Type A, B는 각각 거의 단일분포에 가까운 형태를 보여주고 있으며, 레이저 입자측정기로 분석한 이들 모래입자군의 평균직경(D<sub>p</sub>)과 표준편차(σ)를 Table.1에 나타내었다.

본 연구에 사용되어진 방풍펜스의 개략도를 Fig.3에 나타내었는데, 펜스의 높이와 폭은 각각 40mm와 720mm이며, 4mm의 두께를 가지고 있다. 펜스의 다공도(porosity, ε)는 일정간격으로 뚫어진 구멍의 직경을 변화시켜 조절하였는데, 완전히 막힌벽(ε=0)과 ε=20, 30, 40, 50%의 5가지 서로 다른 다공도를 갖는 방풍펜스를 사용하였다.

바람에 의한 모래입자의 비산현상을 정성적으로 관찰하기 위하여 입자거동을 가시화하였다.

Fig.4은 입자운동 가시화와 임계속도(threshold velocity) 측정에 사용되어진 실험장치를 나타낸 것이다. 일반적으로 임계속도는 입자가 처음으로 도약을 시작할때까지 풍동속도를 서서히 증가시키면서 CCD 카메라로 도약현상을 탐지함으로써



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

Fig.3 Porous wind fence and fence porosity

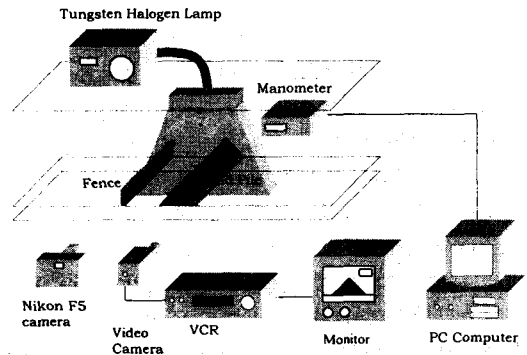


Fig.4 Schematic diagram of particle motion visualization and threshold velocity measurement system

측정하게 된다.<sup>(8)</sup> 입자도약의 전후에서는 풍속을 미세하게 조절하면서 입자도약 순간의 풍동속도를 측정하게 된다. 입자도약이 발생하게 되면 측정결과를 저장한 후, 풍동의 속도를 다시 낮추어, 대략 20개 이상의 입체속도 데이터를 얻을때까지 계속적으로 반복실험을 수행하였다. 백색조명광을 제외한 모든 빛을 제거한 어두운 상태에서 실험을 진행하게 되는데, 얇은 백색조명 sheet에 의해 산란된 입자영상을 후처리과정을 위해 비디오로 기록하게 된다. 입자도약을 보다 정확하게 감지하기 위하여 150W 출력의 백색조명광의 강도(light intensity)와 비디오 카메라의 빛에 대한 민감도(light sensitivity)를 조절하였다. 입자도약 순간 측정된 속도값은 실험후 비디오 카메라에 기록된 화상으로 재확인 하였다. 입자도약현상촬영시 피토포로 측정된 속도값이 화상에 함께 나타나도록 하여 화상 프레임(frame)별로 확인하는 것이 가능하였다. 본 실험에서 입자도약속도 측

정 초기에 쉽게 도약하는 미세입자들에 기인한 측정 오차를 제거하기 위하여, 뒤에서부터의 누적방식을 이용하여 임계속도평균값과 표준편차값을 구하였다. 이때 각각의 임계속도값이 누적방식을 통해 구한 평균값의 5%를 벗어나지 않을 때까지의 경우의 값들을 대상으로하였다. 이러한 방법을 통해 계산하였을 때 대략 15개의 임계속도 데이터를 평균하여 임계속도평균값을 구할 수 있었으며, 표준편차값을 바탕으로 95% 신뢰값을 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입자운동 가시화

Fig.5은 야적모래파일 앞에 다공도가  $\epsilon=30\%$ 인 방풍펜스를 설치하고 속도를 증가시키면서 입자 비산현상을 가시화한 결과이다. 유속이 증가함에 따라 입자가 받는 힘도 커져서 양력과 항력이 부착력(adhesion force)보다 커지게 되는 어느 순간 최초의 도약비산(saltation)이 일어나게 된다. 이때, 입자가 도약을 시작하기 직전의 유속을 임계속도(threshold velocity:  $V_c$ )라고 한다. 속도가 0일때는 입자가 전혀 움직이지 않다가  $V_{c,30\%}$ 부근에서 한 두개의 입자가 야적모래 정점 부분에서 튀어올라 야적모래후방의 가까운 곳에 떨어지게된다(Fig.8-b). 이러한 현상은 아주 간헐적으로 발생하며 이는 접근속도(oncoming velocity)의 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 증가시켜 임계속도의 2배( $2V_c$ )정도의 풍속에 다다르면, 비산되는 야적모래 입자는 크게 증가하고, 입자가 후방의 지표면에 떨어진후 재순환유동에 의해 입자가 다시 야적모래파일쪽으로 되돌아오는 역방향 도약비산과 구름비산현상이 나타난다(Fig.8-d). 다공도가  $\epsilon=30\%$ 인 방풍펜스를 설치한 경우, 모래파일 전면에서는 역방향 구름비산현상이 나타나지 않았다.

야적모래 입자들이 방풍펜스 후방과 야적모래 전면사이에 형성되는 재순환유동에 의해 전면을 따라 역방향으로 구름비산현상이 발생하는 경우에는 임계속도를 이용하여 방풍펜스의 비산억제 효과를 비교할수 없기 때문에, 입자거동을 가시

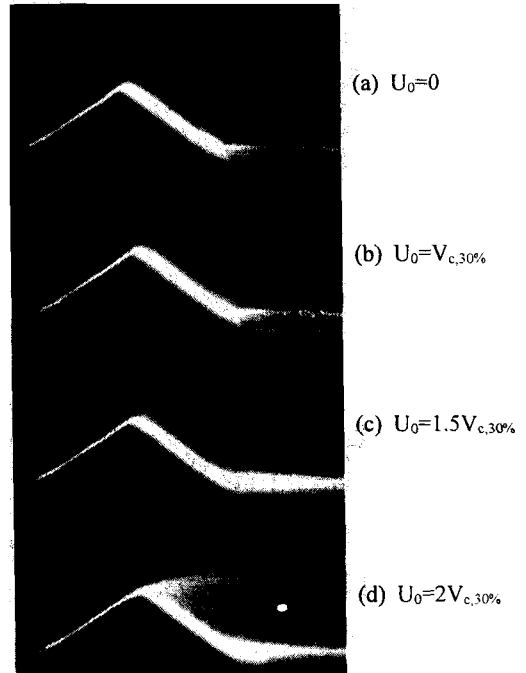


Fig.5 Visualized motion of sand particles located behind a wind fence of  $\epsilon=30\%$  porosity

화함으로써 확인하였다.

유속을  $V_{c,30\%}$ 로 유지한 상태에서 다공도가  $\epsilon=20\%$ 인 방풍펜스 후방의 모래입자 거동을 나타낸 Fig.6을 보면, 시간이 지남에 따라 야적모래상단에 위치한 모래입자들이 야적모래의 전면과 후면을 따라 미끄러져 내려가는 현상을 보여주고 있다. 이것은 다공성 펜스 끝단에서 박리된 전단 유동이 모래파일 전면 상단에 부딪친 후, 일부가 야적모래의 전면을 따라 내려오면서 모래입자의 구름비산을 유발하는 것으로 생각되어진다. Fig.6을 보면 야적모래의 전면 상단부분에서 모래입자의 구름비산현상이 상대적으로 크게 발생하여 초기야적형상이 다소 붕괴되었다. 이것은 방풍펜스 끝단에서 박리된 난류전단유동이 야적모래 상단에 보다 큰 운동량으로 부딪히기 때문인 것으로 보인다. 이러한 유동특성은 삼각프리즘 표면압력을 측정하여 다공성 펜스의 방풍효과를 연구한 박철우 등<sup>(6)</sup>에 의해서도 밝혀졌다. 그들은  $\epsilon=20\%$  다공도를 가진 펜스의 경우, 펜스구멍을 관통하는 유동이 상대적으로 작고 펜스 상부로부터 유입되는 유동이 증대되어 전면 상단부근에서 높



Fig.6 Visualized particle motions behind a porous fence of  $\epsilon=20\%$  at  $U_0=V_{c,30\%}$ .

은 압력 rms값을 가진다고 하였다. 이러한 높은 압력rms값이 모래입자의 거동에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

이와 마찬가지로 solid 펜스( $\epsilon=0\%$ )를 설치하고 유속을  $V_{c,30\%}$ 로 유지한 경우는 펜스와 모래파일 사이에서 발생하는 강한 재순환유동에 의해서  $\epsilon=20\%$  방풍펜스를 설치한 경우에 비해 입자구름(creeping)에 의한 입자손실이 빨리 그리고 크게 발생하였다. 즉, 다공도가  $\epsilon=20\%$  보다 낮은 방풍펜스는 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

Fig.7은 다공도( $\epsilon$ )가 서로 다른 방풍펜스를 높이  $H=0.04m$ 로 설치하고, 펜스 후방으로  $G=0.06m$ 인 지점에 type B입자를 사용하여 같은 높이( $h=$

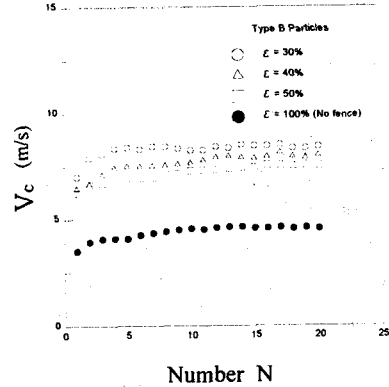


Fig.7 Effect of fence porosity on the threshold velocity  $V_c$  (type B particles)

0.04m)의 삼각프리즘 형상을 가지는 모래파일을 설치하였을때, 모래입자의 비산임계속도를 측정 한 결과이다. 가로축은 반복적으로 측정된 횟수 N을 나타낸다. 이때 측정데이터의 변동값들은 유속변화, 야적된 모래입자의 크기 분산도, 비산되는 입자의 위치등에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup>

여기서 보면 다공도  $\epsilon$ 가 감소함에 따라 임계속도는 증가하며,  $\epsilon=30\%$ 의 다공도펜스는 펜스를 설치하지 않았을 경우에 비해 약 두 배정도 큰 임계속도값을 가진다. 이것으로부터  $\epsilon=30\%$ 의 다공성 펜스가 비산억제에 가장 효과적임을 알 수 있다. 이것은 다공도가 작을수록 펜스구멍을 통과하는 유동(bleed flow)의 유량이 줄어들어 야적 모래 전면을 따라 가속되는 유동이 상대적으로 약해지기 때문으로 생각되어진다.

Fig.8은 다공도 변화에 따라 측정한 입자비산 임계속도결과들을 95% 신뢰도로 통계처리한 평균값과 편차를 나타낸 것이다. 여기서 보면 다공도가 증가할수록 임계속도는 거의 선형적으로 감소하며, 평균직경이 큰 모래입자가 작은 모래입자보다 높은 임계속도를 가짐을 알 수 있다. 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  $5m/s$  이하의 속도에서

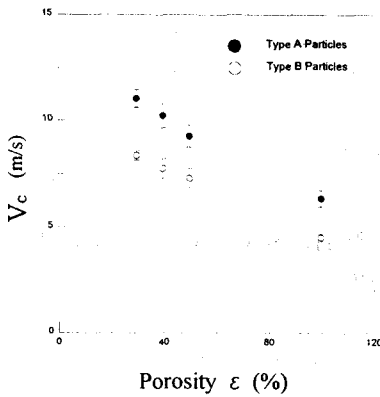


Fig.8 Time-averaged threshold velocity for type A and B particles

입자의 비산음직임이 시작되므로 비산억제에 효과적이지 못하였다. Perera<sup>(5)</sup>는 펜스의 다공도가  $\epsilon=30\%$  이상이 되면 펜스후류의 재순환 버블 생성이 억제되어 진다고 하였는데, 이는 다공도  $\epsilon=30\%$ 의 펜스가 비산억제에 가장 효과적일수 있음을 뒷받침하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 평활지형(open terrain)에 해당하는 대기경계층을 축소 생성시키고, 그 속에 야적 모래파일과 다공성 방풍펜스를 설치하여 방풍펜스의 다공도를 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 역방향 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 구름비산현상이 나타나지 않으나, 모래파일 후방에서 재순환유동을 형성하여 역방향 재도약현상이 발생한다.

(3) 다공도  $\epsilon=30\%$ 의 방풍펜스가 가장 높은 임

계속도를 가져 모래입자의 비산억제에 가장 효과적이었다. 이보다 다공도가 높아지게되면 임계속도는 거의 선형적으로 감소한다.

#### 참고문헌

- (1) Bagnold, R. A., 1941, "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes," Methuen, London.
- (2) 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.
- (3) Isyumov, N., 1971, "An Approach to the Prediction of Snow Loads," Ph.D. Thesis, University of Western Ontario.
- (4) Borges, A.R. and Viegas, D.X., 1988, "Shelter Effects on a Row of Coal Piles to Prevent Wind Erosion," J. Wind. Eng. & Industrial Aero., Vol. 29, pp. 145~154.
- (5) Perera, M.A.E.S., 1981, "Shelter behind Two dimensional Solid and Porous Fences," J. Wind Eng. & Industrial Aero., Vol. 8, pp. 93~104.
- (6) 박철우, 성승학, 이상준, 1996, "다공성 방풍펜스가 대기경계층내에 놓인 삼각프리즘 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, Vol. 20(8), pp. 2670~2680.
- (7) 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.
- (8) 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.