공력 저항 측정기를 이용한 방풍펜스 방진막의 공기 투과 저항력 측정

Measurement of Aerodynamic Properties of Screens for Windbreak Fence using the Apparatus for Testing Screens

김락우* · 이인복*[†] · 홍세운** · 황현섭* · 손영환* · 김태완* · 김민영*** · 송인홍*

Kim, Rack-Woo · Lee, In-Bok · Hong, Se-Woon · Hwang, Hyun-Seob ·

Son, Young-Hwan · Kim, Tae-Wan · Kim, Min-Young · Song, Inhong

ABSTRACT

Recently, damage occurrence by wind erosion has been increasing in society. In times past, such problems only took place in desert area ; however, in recent years, the wind erosion problem is spreading out to agricultural land. Wind erosion in agricultural land can cause loss of loam soils, the disturbance of the photosynthesis of the crop fields and serious economic losses. To overcome the mentioned problems, installation of windbreak fence can be recommended which function as disturbing strong wind and wind erosion. However, there is still no proper guideline to install the windbreak fence and the installation used to rely on the intuition of the workers due to the lack of related studies. Therefore, this study measured the aerodynamic resistance of screens of the windbreak fence using the apparatus for testing screens. The apparatus for testing screens was designed to measure pressure loss around the screen. Measured pressure loss by wall friction compensated for pressure loss to calculate the aerodynamic resistance of screens. The result of pressure loss by regression analysis derived the aerodynamic coefficient of Darcy-Forchheimer equation and power law equation. The aerodynamic resistance was constant regardless of the overlapped shape when the screen was overlapped into several layers. Increasing the number of layers of the screen, internal resistance increased significantly more, and pressure loss caused by the screen also increased linearly when the wind speed was certain conditions, but permeability had no tendency. In the future, the results of this study will be applied to the computational fluid dynamics simulation. The simulation models will be also validated in advance by wind tunnel experiments. It will provide standard of a design for constructing windbreak fence.

Keywords: Aerodynamic resistance; Darcy-Forchheimer equation; power law equation; wind erosion; windbreak fence

1. 서 론

최근 지구온난화에 의한 이상기후로 지표면이 건조화 됨에 따라 강풍에 의한 침식 문제가 지속적으로 발생하고 이에 대한 피해 보상 요구 등과 같은 민원이 증가하고 있다. 국내 서해 해안가 일대는 동절기 강한 북서계절풍의 영향으로 해안에서 내륙을 향해 강한 바람이 불면서 해수욕장으로부터 모래가 유실되고 있다. 풍식에 의해 지표면으로부터 유실된 모래 먼지는 인근 연안

의 주거 지역으로 비산되어 주거 환경 쾌적성에 부정적인 영향을 미치고 있다. 또한 매년 해수욕장의 풍식 피해에 대한 복구비용 문제도 지속적으로 발생하고 있다. 다목적 종합개발을 목적으로 진행된 국내 최대 간척지인 새만금 간척지의 경우 봄철에 상대적으로 강우량이 적고 상대 습도가 낮아 건조한 상태가 지속되고, 최대 풍속이 25~30 m/s 정도로 매우 강하며, 점토 함량이 낮은 사질 또는 미사질 토양이기 때문에 풍식과 비산 먼지 발생이 많다 (Wind Break and Other Measures to Control Soil Dust in the Reclaimed Land, 2004). 특히, 새만금 간척지 지구의 최대 가능 풍식량이 23.57 Mg/ha·년으로 추정된 바 있으며 기존 시화나 영산강II 지구 등과 달리 바람을 막아 줄 산이나 섬이 없고 간척지의 면적이 넓어 인근 해수욕장 및 주거지역으로의 비산 먼지로 인한 영향이 클 것으로 지적된 바 있다 (Hong et al., 2007). 풍식으로 인한 문제는 과거 건조지 혹은 해안가 일대에서 주로 발생하였으나 최근에는 농경지로 그 피해 범위가 확장되고 있는 추세이다. 농경지의 경우 강우로 인한 토양 유실량

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학연구원

** M3-BIORES, Katholieke Universiteit Leuven

*** 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 재해예방공학과

[†] Corresponding author Tel.: +82-2-880-4586

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iblee@snu.ac.kr

2013년 11월 4일 투고

2013년 11월 8일 심사완료

2013년 11월 11일 게재확정

이 전체 토양유실의 대부분을 차지하고 있으나 최근에는 이상기 후, 돌풍 등으로 인한 토양 유실량이 점차 증가되고 있는 추세이다. 농경지에 풍식이 진행될 경우 다량의 양질토가 유실되어 생산기반으로서의 기능을 위협하며 이에 대한 개선책으로 막대한 경제적 지출을 야기시킨다. 뿐만 아니라 비산먼지에 의한 2차 피해로 동물 및 작물의 생산 능력이 저하되고 인근 지역 주민들의 호흡기성 질환, 안구질환 등의 발병률이 증가하고 있다. 모래 침식 및 비산을 방지하기 위한 다양한 대책 방안 중 주로 방풍펜스가 사용되는데 방풍펜스는 방진막을 통과하는 바람의 유속을 감소시켜 모래의 침식을 억제하고 방진막 전후에 퇴적을 유도하여 모래의 비산을 방지하는 역할을 한다 (Dong et al., 2007). 그러나 실제 대부분의 국내 현장에서 가장 많이 사용하는 방풍펜스는 공극 특성 및 저감 효과가 명확하지 않기 때문에 뚜렷한 설치 기준이 없으며 시공자의 직관에 따라 설치되는 경우가 다반사이다. 이로 인해 설치된 방풍펜스는 충분한 방풍 효과를 보이지 못하는 실정이다. 방풍펜스와 관련된 연구로 Raine and Stevenson (1977)은 열선유속계를 이용하여 방풍펜스 후류의 평균속도 및 유동특성에 대한 연구를 수행하였다. Cornelis and Gabriels (2005)은 방진막의 적정 모형을 찾고자 풍동 실험을 하였는데 방진막은 수직, 수평 대를 서로 교차하여 설계하였으며 다공률이 0.2~0.35일 때 풍속 저감 측면에서 가장 적정 모형임을 확인했다. Santiago et al. (2007)은 풍동실험과 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 시뮬레이션을 통해 풍속 저감을 위한 방진막의 적정 모형은 다공률이 0.35일 때라는 결과를 제시하였다. 국내에서는 Lim and Lee (2000)가 방풍펜스 후방의 유동에 대한 수치 해석을 수행하였으며 해당 연구의 결과 값과 풍동 실험의 결과가 일치함을 확인하였다. Kim et al. (2006)은 풍동실험을 통해 형태에 따른 방풍 성능을 비교한 결과 설치거리가 방풍펜스로부터 펜스 높이의 4배~7배일 때 원형 및 수직 방풍펜스는 다공률이 0.4, 수평 방풍펜스 다공률이 0.2에서 풍속 저감 효과가 가장 뛰어나다고 제시한 바 있다. 또한, Bitog et al. (2009)은 풍동 실험과 CFD 시뮬레이션을 통해 방풍펜스의 다공률 및 배열에 따른 방풍효과를 평가하였고 다공률이 0.2일 때 방풍펜스의 높이나 펜스 사이의 거리에 관계없이 최적의 방풍효과를 보임을 확인하였다. 그러나 이와 같은 연구들은 방풍펜스의 풍속 저감 효과를 수치적으로 제시했다는 데에 의의가 있으나 펜스 모형을 임의의 재료로 제작하였으며 방풍펜스의 공극 특성 또한 실제 현장의 방풍 펜스를 고려하지 않은 임의의 다공도로 설정하였다. 즉, 실제 현장에서 가장 많이 사용되는 방풍펜스 방진막의 공극 특성을 연구에 적용하여 방풍효과를 예측한 경우는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 방풍펜스의 모델 설계를 위해 자체적으로 제작한 공력 저항 측정기를 통해 현장에서 가장 많이 사용하

는 방진막의 공력 특성을 분석하고자 한다. 분석은 속도에 따른 스크린의 압력 손실을 표현하는 경험식인 멍법칙에 의한 계산식과 공기 투과성과 내부 저항성을 표현하는 Darcy-Forchheimer 식을 사용하였으며, 방진막의 공력 특성을 겹쳐진 형태 및 설치 겹 수 따라 관계를 도출하였다.

II. 재료 및 방법

1. 공기 투과 저항 측정 원리

가. 기본 방정식

폐쇄된 관 또는 터널 내에서 기류가 스크린을 통과하게 되면 스크린 전, 후로 압력 강하가 발생한다. 압력 강하량은 스크린의 투과성 특성에 따라 그 크기가 달라지며 스크린 전후의 압력 강하량을 측정하면 스크린에 의한 압력손실을 추정할 수 있다.

기본적인 베르누이 방정식으로부터 이러한 에너지의 흐름을 표현하면,

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \int_{x_1}^{x_2} \frac{f}{D} \frac{v_{x_2-x_1}^2}{2g} dx + \frac{S_p}{\rho g} \quad (1)$$

여기서, z 는 위치 수두 (m)이고, p 는 압력 (Pa), v 는 속력 (m/s), ρ 는 공기의 밀도 (kg/m^3)이다. x_1 와 x_2 는 스크린 전후의 위치 (m)이며, D 는 관의 직경 (m)이다. f 는 관 벽면 마찰계수 (dimensionless)이고 S_p 는 스크린에 의한 압력 손실 (Pa)이다. 공력 저항 측정기의 관은 수평 상태이기 때문에 위치 수두가 동일하고 ($z_1 = z_2$), 질량 보존 법칙에 의해 스크린 전, 후의 질량 유량은 동일하므로 유속 또한 동일하다 ($v_1 = v_2$). 따라서 베르누이 방정식을 다음과 같이 단순화된 형태로 정리할 수 있다.

$$S_p = (p_1 - p_2) - \rho g \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right) \quad (2)$$

여기서, L 은 x_2 와 x_1 사이의 거리 (m)이다. 스크린에 의한 압력 손실 외에 추가적인 압력 손실이 발생함을 알 수 있다. 실험 장치는 관으로 되어있고 단면이 확대되거나 축소되지 않기 때문에 압력 손실은 마찰 손실이며 이는 관 벽면 마찰에 의한 압력 손실이다.

나. 벽면 마찰에 의한 압력 손실

스크린에 의한 압력 감소는 스크린 전, 후의 두 지점 1, 2 사이의 전압을 측정한 후 그 차이를 계산하여 구할 수 있다. 단, 관내 유동에서 벽면 마찰에 의한 손실이 발생하므로 이에 대한

고려가 필요하다. 벽면의 마찰에 의한 압력 손실은 두 지점의 거리 L , 관의 직경 D , 평균 유속 v , 마찰계수 f 로 계산할 수 있다. 대부분의 인자들은 쉽게 측정이 가능하지만 마찰계수 f 는 흐름의 성질에 따라 변화하고 쉽게 측정할 수 없는 인자이므로 마찰계수를 산정하는데 어려움이 있다.

마찰계수는 주로 관의 조도에 관계되나 흐름의 유속, 점성계수 및 관의 직경 등에도 관계가 있다. 마찰손실계수는 층류일 때와 난류일 때 그 값이 상이해지는데 난류 흐름일 경우 관의 상당조도에 따라 마찰계수가 크게 변화한다. 상당조도는 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ mm로 매우 작기 때문에 고도의 측정 장비를 사용하지 않는 한 측정이 불가능하다. 이에 따라 마찰계수를 이론식으로부터 계산하여 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 추정하는 것은 상당한 오차를 유발하게 된다. 따라서, 공력 저항 측정기를 통해 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 측정하여 결과에 적용하였다. 벽면 마찰에 의한 압력 손실은 스크린이 없는 상태 ($S_p = 0$)에서 스크린 전후의 압력 차를 측정해야 한다.

$$p_2 - p_1 = \rho g \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right) \quad (3)$$

다. 스크린의 공력 저항

압력강하는 방진막 스크린의 공극구조에 따라 값이 변하는데 여기서 압력강하를 표현할 수 있는 식이 필요하다.

공기에 흐름에 대한 스크린의 저항력은 주로 흐름을 지배하는 방정식에 모멘텀 항을 추가하여 나타낼 수 있다. 경험적인 상수를 도입하여 유속의 거듭제곱으로 간단하게 표현할 수 있는데 이를 멱법칙에 의한 계산식이라 칭한다 (Hong, 2008).

$$\Delta p = -C_0 |v|^{C_1} \quad (4)$$

여기서, C_0 , C_1 는 급수 형태의 방정식에 대한 계수 (dimensionless)이다. 이와 같은 멱법칙에 의한 계산은 형태가 간단하나 경험적인 계수로 표현되기 때문에 이론적으로 다른 식들과 연계하는 데는 한계가 존재한다.

다공성 매체에 의한 모멘텀 공급항을 표현하는 다른 방법으로는 점성 손실과 내부에너지 손실에 대한 두 개의 항으로 표현한 Darcy-Forchheimer 식이 있다 (Whitaker, 1996). Philipp Forchheimer (1901)는 다공막을 관통하는 유체 흐름에 관하여 연구를 하는 중에 유체의 속도가 빨라짐에 따라 관성 효과가 유체 흐름을 지배한다는 것을 발견하였고 이러한 빠른 속도에 의한 관성 효과를 계산하기 위해 Darcy equation을 변형하여 관성 효과를 표현하는 방정식을 제안하였다.

$$\Delta p = -\frac{\mu}{K} v_f - \beta \rho_f v_f^2 \quad (5)$$

여기서, μ 는 점성계수 ($\text{kg/m}^3\text{s}$), ρ 는 매질을 통과하는 유체의 밀도 (kg/m^3), K , β 는 공극구조에 따른 압력강하를 결정하는 상수 (dimensionless)이고, v_f 는 유동의 벽면속도 (m/s)이다. 유동의 벽면속도란 다공성 매체 내부에서의 실제유속이 아닌 다공성 매체를 통과하기 직전의 표면속도를 의미하며 접근속도라고도 한다. 식 (5)을 변형을 시키면

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \quad (6)$$

여기서, α 는 공기 투과성 상수 (dimensionless), C_2 는 내부 저항 인자 상수 (dimensionless)이다.

2. 공력 저항 측정기의 제작

가. 공력 저항 측정기

공력 저항 측정기를 이용한 압력 강하 측정 연구가 다수 진행된 바 있으며, Valela et al. (2005)는 공력 저항 측정기와 풍동 실험, 공기유동학적 시뮬레이션을 통해 산출된 스크린에 의한 압력 손실 값을 서로 비교 분석하였고 공력 저항 측정기로 측정된 스크린에 의한 압력 손실 값이 충분히 신뢰할 수 있으며 효율적임을 이미 증명한 바 있다. 이를 참조하여 스크린에 의한 압력 손실 측정을 위해 스크린 전후의 압력 강하량 및 관 내 풍속을 측정할 수 있는 공력 저항 측정기를 직접 제작하였다.

스크린 전후의 압력을 측정할 때 관 내 단면적이 크면 단면적 내의 압력이 불균일해 질 수 있으므로 터널 단면적의 중심에서 측정된 압력이 단면적 전체를 대표하기에 오차가 발생할 여지가 있다. 따라서 측정 시의 압력 불균일에 의한 오차를 최소화하기 위해 터널의 단면적을 소형으로 제작하여 실험을 진행하였으며 장비 및 부품은 Fig. 2에 나타난 그림과 같다.

실험에 사용된 공력 저항 측정기는 크게 기류의 유속을 제어

Fig. 1 Diagram of the apparatus for testing screens (Valela et al. 2005)

(a) The apparatus for testing screens using this experiment

(b) Wind speed controller of the apparatus for testing screens

(c) Pitot tube of the apparatus for testing screens for measuring the total pressure of the fluid

(d) Screen mount of the apparatus for testing screens for fixing the screens

Fig. 2 The apparatus and the component for testing screens and the component of it for measuring pressure loss

할 수 있는 송풍기 구간과 실험 측정을 위한 시험부 구간으로 나누어진다. 피토관은 총압력과 정압력을 측정할 수 있으며 관 내의 피토관 사이의 거리는 0.18 m이다. 마운트를 통해 스크린을 고정하여 압력강하량을 측정할 수 있다. 송풍기에 사용되는 모터의 모델은 S9D90-90D (SPG Co., Ltd.)로 DC 90 V, Output 90 W이고 2800 rpm이다. 유체가 흐를 관은 재질이 아크릴로 원형으로 제작되었으며 지름이 50 mm이며 벽면의 두께는 5 mm이다. 실험에 사용되는 스크린은 실제 현장에서 방풍펜스에 사용하는 방진막을 적용하였으며 이는 Fig. 3 (a)에 나타난 그

(a) The screen using in practice which mesh size of screen is 3 mm×9 mm

(b) Mounted ring with screen to the mount for measuring pressure loss

Fig. 3 The screen using in this experiment and the screen installed by mount

림과 같다. 이를 Fig. 3 (b)에 나타난 그림과 같이 원형 링에 고정하여 마운트 부분에 연결하고 압력 강하량을 측정하였다.

스크린은 3 mm×9 mm크기의 메쉬로 짜여져 있으며 마운트에 연결된 적색 고무링은 스크린을 고정시킨 링 사이의 침기를 방지하기 위하여 설치하였다.

나. 공력 저항 측정기 내 유속의 균일성 측정

실험에 앞서 시험부 위치에서 단면적에 고르게 5개의 지점에서 풍속을 측정하여 단면 내의 풍속 분포의 균일성을 평가하였다. 소형 공력 저항 측정기의 경우에는 대형 풍동 장치에 비하여 풍환경의 제어가 용이하고 측정이 쉬운 장점이 있지만, 단면이 너무 작아지면 벽면에 의한 마찰로 경계층이 형성되어 풍속의 균일성이 저하될 여지가 있으므로 이에 대한 평가가 필수적으로 요구된다. 단면 내 5개 지점은 상하좌우를 측정점으로 선정하였고

Fig. 4 Cross section of a small wind tunnel

Fig. 5 Measured uniformity of velocity magnitude in the apparatus for testing screens

이는 Fig. 4에서 나타나 있으며 5개 지점의 평균풍속과 표준편차로부터 결과를 분석하였다.

Fig. 5를 보면 공력 저항 측정기에서 5개 지점에서 풍속을 비교한 결과 표준편차/평균풍속 값은 주로 3 % 미만으로 나타났고 풍속이 5 m/s 이하인 경우에는 약 5 % 내외로 다소 감소하는 경향을 보이나 결과에 대한 신뢰성 문제에 있어 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

4. 실험 방법

본 연구를 위한 실험은 공기의 흐름을 측정하는 실험이기 때문에 공기의 특성상 실험실의 환경 조건을 결정하는 과정은 매우 중요한 문제이다. 이는 공기가 기압과 온도에 따라 밀도 및 점성의 변화가 급변하기 때문이다. 본 실험은 1기압 하에서 진행되었으며, 실험 당시 공기의 온도는 대략 절대온도 300 K를 유지하였다. 또한, 밀도는 온도에 따른 공기의 권장 식으로부터 1.177 kg/m^3 으로 결정하였다. 1기압에서의 공기의 점성계수는 점성계수는 $1.92 \text{E-}05 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 이고, 동점성계수는 $15.68 \text{ E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

실험은 먼저 공력 저항 측정기를 통해 스크린이 설치되지 않은 상태에서 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 측정하였다. 측정된 벽면 마찰에 의한 압력 손실 값은 실험 장치가 가지는 고유한 특성치로 모든 실험의 결과에서 감해졌다.

스크린의 공력 저항 값을 구하는 과정은 스크린을 시험부에 장착하여 풍속을 변화시켜가며 압력 강하량을 측정한 후, 결과를 2차 함수 및 거듭제곱 함수로 회귀 분석하고 Darcy-Forchheimer 식과 먹굽수 형태의 방정식에 대입하여 적절한 계수 값을 찾는 방법으로 진행되었다. 실험은 스크린의 겹쳐진 형태와 겹 수에 따

Table 1 Experimental condition of screens for measuring the aerodynamic resistance of screens according to the overlapped shape and the number of layers

Case	Type of screen	Fig
1	1 layer of screen	
2	2 layers of screen (overlapped, min.)	
3	2 layers of screen (overlapped, max.)	
4	3 layers of screen (overlapped, min.)	
5	3 layers of screen (overlapped, max.)	
6	4 layers of screen (overlapped, min.)	
7	5 layers of screen (overlapped, min.)	

른 경향성을 파악하기 위해 스크린의 조건을 설정하였으며 실험을 위한 스크린의 형태는 Table 1에 나타난 그림과 같다.

실제 현장에 설치된 방풍펜스의 경우 스크린을 1겹으로 사용하기도 하나 여러 겹을 사용하기도 한다. 또한, 여러 겹의 스크린을 사용하는 경우 겹쳐지는 형태 역시 다양하다. 두 가지 사항을 모두 고려하여 스크린이 2겹과 3겹 일 때 스크린이 최대한 일치하여 공극이 최소화되는 경우 (overlapped, min.)와 스크린이 서로 가려져서 공극이 최대화되는 경우 (overlapped, max.)를 모의하여 측정하였고, 실험 조건이 동일하도록 공극이 최소화되는 경우로 1겹 ~ 5겹으로 겹쳐 각각의 공력 저항 값을 측정하였다. 방풍펜스는 그 목적이 강풍에 의한 침식 및 비산 문제를 방지하는 것이다. 즉, 방풍펜스의 공력 저항 값은 공기의 유속이 빠른 난류에서 의미를 갖는다. 또한, 벽면 마찰에 의한 압력 손실 및 스크린에 의한 압력 손실은 층류와 난류에서 그 값이 상이하기 때문에 하나의 관계식으로 나타내기 어려움이 따른다. 따라서, 방풍펜스가 강한 유속에 대해 설계된다는 점과 스크린에 의한 압력 손실 값을 관계식으로 도출한다는 점에서 공기의 흐름이 난

류인 상태에서 실험이 진행되었다. 즉, 관 내 난류 상태는 $Re > 3000$ 이기 때문에 1 m/s 이상의 풍속으로부터 약 0.5 m/s 씩 풍속을 증가시켜가며 실험 장치가 유지할 수 있는 최대의 풍속 까지 각각의 압력 강하량을 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 벽면 마찰에 의한 압력 손실 측정

공력 저항 측정기에 스크린이 장착되지 않았을 때의 마운트 앞, 뒤의 전압력과 정압력으로부터 압력을 측정하여 손실되는 압력을 계산하였다.

Fig. 6을 보면 실험 결과, 풍속이 증가함에 따라 압력손실이 2 차 함수의 형태를 보이는 것으로 나타났다. 이론적 배경에 따라 벽면에서의 마찰에 의한 압력 손실 값은 풍속의 제곱에 비례하는데, 측정된 결과에서도 압력 손실 값은 풍속에 대한 2차 함수로 회귀 분석되었기 때문에 이 값을 벽면 마찰에 의한 압력 손실 값으로 선정하였다.

$$p_{loss} = 0.0535v^2 + 0.2587v - 0.4742 \quad (8)$$

결정계수 (R^2) 또한 0.99로 거의 1에 근접하는 값을 가지는 것으로 보아 측정 결과에 대한 신뢰도가 매우 높다고 판단되었다.

2. 스크린의 공력 저항 측정

Table 1의 총 7가지 스크린 조합에 대하여 난류 흐름 (풍속 $> 1 \text{ m/s}$)하에 다양한 풍속 조건에 대하여 압력 강하량을 측정하였다. 이 때 측정된 압력 손실은 스크린에 의한 압력 손실뿐만 아니라 공력 저항 측정기 내 관의 벽면에서의 마찰에 의한 압력 손

Fig. 6 Measured pressure loss by wall friction when screen was mounted on the apparatus for testing screens

실 또한 포함하고 있다. 측정된 압력 강하량에서 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 감하면 스크린에 의한 압력 손실을 산출할 수 있다. 측정된 결과를 산포도에 도시하고 이를 회귀 분석하여 Darcy-Forchheimer 식과 멍법칙에 의한 계산식을 도출하였다.

Fig. 7과 Fig. 8을 보면, 풍속이 증가함에 따라 압력손실이 상대적으로 더 크게 증가함을 알 수 있다. 스크린의 겹 수가 많아

Fig. 7 Measured pressure loss according to the overlapped shape

Table 2 Estimated quadric equation and power law equation of measured pressure by regression analysis according to the overlapped shape

	Quadric equation, R^2	Power law equation, R^2
2 layers (overlapped, min.)	$y = 1.0101v^2 + 1.3432v, 0.9999$	$y = 1.6918v^{1.8387}, 0.9993$
2 layers (overlapped, max.)	$y = 1.1273v^2 + 1.0183v, 0.9999$	$y = 1.6925v^{1.8687}, 0.9995$
3 layers (overlapped, min.)	$y = 1.5914v^2 + 1.9047v, 0.9999$	$y = 2.6946v^{1.8278}, 0.9994$
3 layers (overlapped, max.)	$y = 1.6148v^2 + 2.3184v, 0.9998$	$y = 3.1625v^{1.7752}, 0.9986$

Fig. 8 Measured pressure loss according to the number of layers

Table 3 Estimated quadric equation and power law equation of measured pressure by regression analysis according to the number of layers

	Quadric equation, R^2	Power law equation, R^2
1 layers	$y = 0.5871v^2 + 0.5771v$, 0.9999	$y = 0.8694v^{1.8762}$, 0.9999
2 layers (overlapped, min.)	$y = 1.0101v^2 + 1.3432v$, 0.9999	$y = 1.6918v^{1.8387}$, 0.9993
3 layers (overlapped, min.)	$y = 1.5914v^2 + 1.9047v$, 0.9999	$y = 2.6946v^{1.8278}$, 0.9994
4 layers (overlapped, min.)	$y = 2.3397v^2 + 2.3001v$, 0.9999	$y = 3.7836v^{1.8359}$, 0.9996
5 layers (overlapped, min.)	$y = 3.1981v^2 + 1.3828v$, 0.9998	$y = 4.5310v^{1.8655}$, 0.9991

Table 4 Estimated coefficient of Darcy–Forchheimer equation and power law equation according to the overlapped shape

	Darcy–Forchheimer equation		Power law equation	
	C_2	α	C_0	C_1
2 layers (overlapped, min.)	1.717	1.43E-05	1.692	1.839
2 layers (overlapped, max.)	1.916	1.89E-05	1.693	1.869
3 layers (overlapped, min.)	2.703	1.01E-05	2.695	1.828
3 layers (overlapped, max.)	2.764	8.29E-06	3.163	1.775

Table 5 Estimated coefficient of Darcy–Forchheimer equation and power law equation to the number of layers

	Darcy–Forchheimer equation		Power law equation	
	C_2	α	C_0	C_1
1 layer	0.998	3.33E-05	0.869	1.876
2 layers (overlapped, min.)	1.717	1.43E-05	1.692	1.839
3 layers (overlapped, min.)	2.703	1.01E-05	2.695	1.828
4 layers (overlapped, min.)	3.976	8.35E-06	3.784	1.836
5 layers (overlapped, min.)	5.510	1.39E-05	4.539	1.864

질수록 압력손실 또한 증가한다. 결정계수는 2차 함수와 거듭제곱 함수 모두 0.99로 매우 높게 나타나 측정 결과에 대한 신뢰도가 매우 높다고 판단되며, 전반적으로 2차 함수의 결정계수가 거듭제곱 함수의 결정계수보다 다소 높은 결과를 보였다.

회귀 분석된 2차 함수와 거듭제곱 형태의 함수 결과는 Darcy–Forchheimer 식에 따른 공력 저항 (α , C_2)과 먹급수 형태의 공력 저항 (C_0 , C_1)의 계산에 적용되었다.

(a) C_2 value when the size of screen's void was minimum and maximum

(b) α value when the size of screen's void was minimum and maximum

(c) C_0 value when the size of screen's void was minimum and maximum

(d) C_1 value when the size of screen's void was minimum and maximum

Fig. 9 The aerodynamic coefficient when the size of screen's void was minimum and maximum

3. 스크린의 겹쳐진 형태에 따른 공력 저항

스크린의 공력 저항 결과를 바탕으로 2겹 스크린 및 3겹 스크린의 공극이 최소일 때와 최대일 때 압력 강하량을 비교 분석하였다.

Fig. 9을 보면 2겹 스크린과 3겹 스크린에서 공극이 최소일 때와 최대일 때의 공력 저항 값은 거의 일정한 값을 보이는 경향을 나타냈다. 특히, Fig. 9 (a), (d)를 보면 C_2 값과 C_1 값의 경우 포개진 형태에 관계없이 거의 동일한 값을 갖으며 Fig. 9 (c)의 C_0 값의 경우도 실험상에 발생할 수 있는 오차를 고려한다면 일정하다고 판단할 수 있다. 또한, Fig. 9 (b)의 α 값은 다른 값들과 비교하여 단순 오차율이 공극이 최대일 때의 값을 기준으로 할 경우 2겹일 때는 24.19 %, 3겹일 때는 21.72 %로 오차가 크게 보이지만 α 값이 $2 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-6}$ 사이의 작은 값이기 때문에 실험상의 미세한 오차가 결과에 큰 차이를 야기했다고 볼 수 있다. 이를 감안한다면 공극이 최소 및 최대에서의 α 값은 거의 일정하다고 판단할 수 있다.

공극이 최소일 때와 최대일 때의 스크린에 의한 압력 손실을 측정하였기 때문에 임의로 포개 스크린의 압력 손실은 두 결과 사이에 값이 있다고 판단할 수 있다. 따라서, 여러 겹으로 겹쳐진 스크린은 겹쳐진 형태와 관계없이 공력저항이 일정할 것으로 예상된다.

3. 스크린의 겹 수에 따른 공력 저항

공력 저항 측정 결과를 정리하면 공력 저항 값들을 스크린의 겹 수에 따라 나타낼 수 있다. 여기서 각 공력 저항 값들은 스크린의 겹 수에 따라 경향을 보이고 있는데 이를 그래프를 통해 확인하면 다음과 같다.

Fig. 10 (a)를 보면 C_2 값은 스크린의 겹 수에 따라 값이 증가하며 회귀 분석한 결과, 2차 함수 경향을 보인다. 결정계수는 1로 높게 나타났기 때문에 결과의 신뢰도가 매우 높다고 판단된다. 여기서, C_2 는 내부 저항을 나타내는 인자이므로 스크린의 겹 수가 증가함에 따라 내부 저항이 상대적으로 더 크게 증가한다. 즉, 스크린 겹 수의 증가율보다 공기 흐름에 대한 스크린의 저항성 증가율이 더 큼을 의미한다. Fig. 10 (b)를 보면 α 값은 스크린의 겹 수가 4겹까지는 감소하는 경향을 보이다가 5겹에서 값이 증가한다. α 는 공기 투과성 상수이기 때문에 값이 감소하는 것이 정상이지만 결과 그래프는 기대했던 경향성에 미치지 못했다. 4겹까지의 경향성으로부터 기대했던 값과 135.65 %의 단순 오차율을 보이는데 이러한 결과는 α 값이 $0 \sim 4 \times 10^{-5}$ 의 범위 안에 있는 작은 값이므로 실험상의 작은 오차가 결과에 큰 차이를 주기 때문이다. 즉, α 값의 4겹까지의 경향성을 통해 5겹일

(a) C_2 value according to the number of layers

(b) α value according to the number of layers

(c) C_0 value according to the number of layers

(d) C_1 value according to the number of layers

Fig. 10 The aerodynamic coefficient according to the number of layers

Fig. 11 Comparison of analytical value by Darcy-Forchheimer with measured value by the apparatus for testing screens

때의 α 값을 추정하여 Darcy-Forchheimer 식에 대입한 결과와 5겹일 때 실제 측정된 압력강하량 값은 큰 차이가 존재하지 않으며 이는 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 따라서, α 값의 뚜렷한 경향성을 확인하기 위해서는 보다 정밀한 장비로 측정이 요구된다.

Fig. 10 (c)를 보면 C_0 값은 스크린의 겹 수에 따라 선형적으로 증가하며 선형 회귀 분석을 한 결과, 결정계수는 약 0.99정도로 높게 나타났다. 이에 반해, Fig. 10 (d)의 C_1 값은 스크린의 겹 수와 관계없이 항상 일정한 값을 갖으며, 약 1.8정도의 값을 갖는다. C_0 와 C_1 은 먹법칙에 의한 계산식을 이루기 위한 경험적인 상수로 측정된 결과를 통해 의미를 해석할 수 있다. 경험식 내에 지수인 C_1 은 스크린의 특성치로, 계수인 C_0 는 스크린의 겹 수에 따른 압력 강하율을 나타내는 상수로 추정된다. 즉, 스크린의 겹 수가 증가하면 스크린의 특성치는 일정하게 유지되며 압력 강하율이 선형적으로 증가하기 때문에 일정한 풍속에서 스크린에 의한 압력 손실도 선형적으로 변한다고 예상할 수 있으며 이를 식으로 도출할 수 있다.

$$S_p = (0.9431n - 0.1135)v^{1.849} \quad (7)$$

여기서, n 은 스크린의 겹 수를 의미한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 자체적으로 제작한 공력 저항 측정기를 통해 실제 현장에서 사용하는 방풍펜스 방진막의 공기 투과 저항력을 측정하였다. 측정된 값은 2차 함수와 거듭제곱 함수로 회귀 분석되어 Darcy-Forchheimer 식과 먹법칙에 의한 계산식을 도출하였으며 공력 특성계수를 산출하였다. 관 단면 내 5개의 지점에서 풍속 분포의 균일성을 평가한 결과, 표준편차/평균풍속 값은

주로 3 % 미만으로 나타났고 풍속이 5 m/s 이하인 경우에는 약 5 % 내외의 값을 지나 결과에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

실험은 공력 저항 측정기를 통해 스크린이 설치되지 않은 상태에서 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 측정 후 스크린이 설치되었을 때의 측정된 압력 강하량에서 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 감하여 스크린에 의한 압력 손실을 산정하였다.

스크린의 겹쳐진 형태와 겹 수에 따라 측정된 압력 손실 결과의 경향성을 분석한 결과, 공극이 최소일 때와 최대일 때 공력계수는 일정하기 때문에 여러 겹으로 겹쳐진 스크린은 포개진 형태와 관계없이 공력저항이 일정할 것으로 예상된다. 또한, 스크린의 겹 수가 증가함에 따라 내부 저항이 상대적으로 더 크게 증가하지만 공기투과성은 기대와는 달리 경향성을 찾지 못했다. 이는 공기투과성 지수가 10^{-5} 단위의 작은 값이므로 실험상의 작은 오차가 결과에 큰 차이를 주기 때문이라 판단된다. 마지막으로 일정한 풍속 조건에서 스크린의 겹 수가 증가하면 스크린의 특성치는 일정하게 유지되며 압력 강하율이 선형적으로 증가한다. 이는 먹법칙에 의한 계산식에 적용하면 스크린의 겹 수가 증가함에 따라 일정한 풍속 하에 스크린에 의한 압력손실도 선형적으로 증가함을 의미한다.

본 연구를 통해 산정한 결과는 공기유동학적 시뮬레이션 내 방풍펜스 방진막의 공력 특성인자로 적용된다. 즉, 산정한 공력계수는 모델링 내 방풍펜스를 구현하는데 활용되어 현장의 기상학적 인자 및 비산되는 입자의 특성, 구조물의 배치 상태 등을 통하여 공기유동학적 시뮬레이션을 통해 방풍 효과를 분석할 수 있을 것이다. 또한, 시뮬레이션 결과는 풍동 실험에 의해 검증되고 최종적으로 방진막 설치를 위한 적정 설계를 도출할 수 있다.

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ907097 042013)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(30): 4612-4621 (in Korean).
2. Cornelis, W. M., and D. Gabriels, 2005. Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments* 61(2): 315-332.
3. Dong, Z., W. Luo, G. Qian, and H. Wang, 2007. A

- wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences. *Agricultural and Forest Meteorology* 146(1-2): 82-93.
4. Forchheimer, P., 1901 Wasserbewegung durch Boden, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieur* 45.
5. Hong, S. W., Monitoring of the fugitive dust diffusion in the reclaimed land, 2007. *Journal of The wind Engineering Institute of Korea* 10: 63-69 (in Korean).
6. Kim Y. M., J. G. Jeon, and K. P. You, 2006. Wind Tunnel Experiment about Effect of Protection against Wind according to the Variation Porosity of Wind Fence. *Journal of Architectural Institute of Korea* 22(2): 91-97 (in Korean).
7. Lim, H. C., and S. J. Lee, 2000, A Numerical Study on the Shelter Effect behind a Porous Wind Fence *Journal of The wind Engineering Institute of Korea* 4(1): 74-81 (in Korean).
8. Raine, J. K., D. C. Stevenson, 1977. Wind Protection by Model Fences in a Simulated Atmospheric Boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1.2: 159-180.
9. Rural Research Institute in Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, 2004. Wind Break and Other Measures to Control Soil Dust in the Reclaimed Land. Eco-friendly Study in the Saemangeum Area (in Korean).
10. Santiago, J. L., F. Martín, A. Cuerva, and N. Bezdenejnykh, A. Sanz-Andrés, 2007. *Atmospheric Environment* 41(30): 6406-6420.
11. Valera. D. L., F. D. Molina, A. J. Álvarez, J. A. López, and J. M. Terrés-Micoli, A. Madueño, 2005. Contribution to Characterisation of Insect-Proof Screens: Experimental Measurements in Wind Tunnel and CFD Simulation. *ISHS Acta Horticulturae* 691: 441-448.
12. Whitaker, S., 1996. The Forchheimer Equation: A Theoretical Development. *Transport in Porous Media* 25: 27-61.