

# 이미지 분석을 이용한 비사 이동속도 측정 정확도 평가

## Evaluation of Accuracy of Aeolian Velocity Measurement Using Image Analysis

김영민\* · 류호상\*\* · 윤현덕\*\*\*  
Young-Min Kim\*, Hosahng Rhew\*\* and Hyun-Doug Yoon\*\*\*

**요지** : 바람에 의한 모래이동(비사이동) 연구는 1941년 Bagnold가 사막 조건에서 바람에 의한 모래 이동량 연구를 최초로 수행하며 시작되었다. 비사이동 연구는 사막을 대상으로 주로 수행되었으며, 해안 공학 분야에서는 1980년 이후 Bagnold 공식을 연안에 접목하며 시작되었다. 하지만 해안에 Bagnold 공식을 사용할 경우 비사 이동량을 과대 산정함이 많은 연구에 의해 제시되었다. 현재 간단한 형태부터 다양한 센서를 활용한 비사 포집기가 개발되었고 연구에 활용되고 있다. 하지만 이러한 비사 포집기는 포집기 별로 포집 성능의 차이가 크다는 단점이 있다. 성능의 차이가 크다는 것은 결과의 신뢰성 및 정확성이 낮다는 것을 의미한다. 또한 기존 포집기의 경우 포집된 모래의 양으로만 분석을 수행하며, 비사 이동속도나 농도에 대한 정량적 분석은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이미지 분석 기법을 이용하여 비사의 이동속도 측정 정확도를 평가하고 연구에 활용할 수 있는 방안을 제시한다.

**핵심용어** : 비사 이동, 이미지 분석, 침강속도

**Abstract** : Study on Aeolian transport began in 1941 when Bagnold first conducted a study on aeolian transport in desert conditions. Aeolian transport study was mainly conducted on deserts, and the field of coastal engineering began with the application of Bagnold's equation to the coast after 1980. However, many studies have shown that using the Bagnold equation on the coast overestimates the amount of aeolian transport. Currently, aeolian trap using various sensors ranging from simple forms have been developed and are being used in study. However, these aeolian traps have the disadvantage that there is a large difference in performance for each trap. In addition, in the case of existing traps, analysis is performed only on the amount of sand collected, and quantitative analysis of sand transport velocity or concentration is difficult. Therefore, in this study, we use image analysis techniques to evaluate the accuracy of aeolian transport velocity measurement and suggest a method that can be used in the study.

**Keywords** : aeolian transport, image analysis, settling velocity

### 1. 서 론

바람은 파랑의 생성 및 전파에 중요한 요인이기도 하지만 (Philips, 1962), 연안 사구의 생성과 성장에 결정적인 역할을 한다. 더욱이 최근 발생한 태풍(2020년 제 8호 태풍 바비, 9호 태풍 마이삭, 10호 태풍 하이선 등)의 경우, 기후변화로 인하여 태풍 강도가 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 그로 인하여 연안 침식 및 사구 형성과정에서의 바람에 의한 모래 이동(aeolian transport)의 중요성이 커지고 있다. 그러나 현재 해안 지형 변화 연구는 고파랑에 의한 침식 과정에 대한 연구에 집중되어 있고, 바람에 의한 비사이동에 대한 이해 및 연구는 매우 부족한 상황이다.

비사 이동 연구는 1941년 Bagnold가 건조한 사막 조건을

대상으로 비사량 식을 정립하며 시작되었다. 해안 공학 분야에서는 1980년 이후 Bagnold 공식을 연안에 적용하며 비사 이동 연구가 시작되었다. 하지만 Bagnold 공식을 해안에 적용할 경우 비사 이동량을 과대 산정함이 많은 연구에 의해 제시되었다(Hoonhout and de Vries, 2016; van Rijn and Strysteen, 2020). 해안은 사막과 달리 습도가 높고 식생이 발달해 있으며 모래에 조개 껍데기 등 다양한 물질들이 혼합되어 있다. 사막과 다른 환경 요인들은 모래의 이동을 저감시키는 요인이다. 따라서 모래 이동을 저감시키는 환경 요인들을 고려하지 않은 Bagnold 공식은 해안에 적용할 경우 비사량을 과대 산정하게 된다. 이후 많은 연구자들은 연안 환경 조건에서 비사 이동량 분석을 위해 다양한 비사 포집기와 풍동실험을 활용하여 연구를 수행하고 있다

\*명지대학교 토목환경공학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University)  
\*\*전북대학교 사범대학 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Jeonbuk National University)  
\*\*\*명지대학교 토목환경공학과 교수(Corresponding author: Hyun-Doug Yoon, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, 116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17058, Korea, Tel: +82-31-330-6419, hdyoon@mju.ac.kr)

(Barchyn and Hugenholtz, 2010; Davidson-Arnott and Bauer, 2009).

비사량을 분석하기 위해 다양한 형태의 비사 포집기가 개발되었다. Nickling and McKenna Neuman(1997)은 풍동 실험을 통해 비사 채취율이 약 90%인 썰기 형태의 비사 포집기를 개발하였으며, Bauer and Namikas(1998)은 로드셀이 연결된 기상 우량계를 수정하여 비사량의 시계열 데이터를 얻을 수 있는 T-BASS를 개발하였다. 이 외에도 풍향계가 설치된 비사 포집기 BSNE(Fryrear, 1986), 썰기형태의 POLCA(Pollet, 1995), 마이크 음향 분석을 통해 비사량을 분석하는 saltiphone(van der Linden, 1985), 그리고 디스크형 압전 센서를 이용한 Buzzer Disc(Sherman et al., 2011) 등 다양한 비사 포집기가 개발되어 연구에 활용 중이다. 하지만 기존 비사 포집기의 문제는 포집기별로 포집 성능의 차이가 발생한다는 것이다. Goossens et al.(2000)은 5개의 비사 포집기의 성능을 비교한 결과 풍속에 따라 70~120%까지 포집 성능 차이가 발생할 수 있음을 제시하였다. 이러한 포집 성능의 차이로 인해 결과의 정확성 및 신뢰성 역시 낮아 질 수밖에 없다. 대부분의 포집기는 포집된 비사의 양으로 분석하기 때문에 정량적 연구나 비사 역학 특성 분석에는 제한적이다. 또한 비사 포집기를 설치함에 따라 바람의 흐름, 풍속, 그리고 비사 이동의 궤적 등 영향을 미쳐 교란이 발생하게 된다는 단점이 있다(Goossens and Offer, 2000).

본 연구에서는 바람의 흐름, 비사 이동 궤적 등에 교란을 발생시키지 않는 비접촉식 분석 방법인 이미지 분석 기법 PTV(Particle Tracking Velocimetry)의 비사 이동속도 측정 정확도 검증 연구를 수행하였다. PTV 기법의 비사 이동속도 측정 정확도를 분석하여 향후 비사 이동 연구에 활용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이미지 분석을 통해 비사이동을 분석할 경우 교란되지 않은 비사의 이동속도 및 농도를 측정할 수 있으며, 시·공간 변화에 따른 시계열 데이터를 얻을 수 있다. 단순히 비사 포집기에 포집된 모래의 양으로 비사 이동을 분석하는 것이 아니라 이동속도 및 농도 분석을 통해 질량 플럭스를 산정할 수 있으므로 정량적으로 비사의 역학적 특성을 분석할 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 PTV 개요

이미지를 이용한 속도계는 PTV(Particle Tracking Velocimetry), PIV(Particle Image Velocimetry), LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry) 등이 있다. PIV나 LSPIV의 경우 고정된 공간 위치에서 추적된 입자 그룹의 속도를 측정하는 방식으로 오일러 해석 기반의 프로그램이다(Patalano et al., 2017). 반면에 PTV는 입자의 궤적을 직접적으로 추적하기 때문에 라그랑지안 해석 방법이다. 또한 PTV의 경우 입자의 밀도가 낮거나 불규칙적일 때 PIV보다 더욱 뛰어난 정확도로 이동속도 계산 가능하다(Ohmi and Li, 2000). 모래는 다양한 입경, 밀도 그리고 모양의 물질들이 혼합되어 있다. 비사 이동의 궤적 및 형태는 모래 입자 특성과 밀접한 관련이 있으며 불규칙한 움직임을 보인다. 따라서 PIV나 LSPIV 보다 PTV가 연구에 더욱 적합하다 판단하여, PTV를 이용해 바람에 의해 이동하는 모래 입자를 분석하였다. PTV의 비사 이동속도 측정 정확도 분석에 사용된 프로그램은 PTVlab(Patalano, 2023)을 사용하였다.

Fig. 1은 PTV의 입자 추적 과정을 나타낸다. PTV는 영상으로부터 획득된 여러장의 이미지에서 입자의 위치를 추출한 후 각 입자를 직접적으로 추적함으로써 입자의 변위를 계산한다(Baek and Lee, 1994). PTV는 입자의 궤적을 직접적으로 추적하기 때문에 이미지에서 입자를 감지하는 것부터 시작한다. 입자의 크기, 밝기 등으로 입자와 배경을 구분하고 입자의 pixel 변위를 추적하여 속도를 계산한다. 즉, 영상에서 frame은 시간 변위  $\Delta t$ 가 되며, pixel은 공간 변위  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 가 된다. 공간 변위 계산을 위해 참조점이라고 하는 이미지 상의 실 물리거리 측정이 선행되어야 한다.

Fig. 2는 상호상관법을 통해 2 frame간의 입자를 추적하는 과정을 나타낸다. 우선 상호상관법을 계산하기 위해 RGB 이미지를 회색조(명암) 이미지로 변환한다. MX와 MY는 심문영역(interrogation area)이라고 하는 상호상관법 계산을 위한 범위이다. 심문영역은 사용자가 설정하는 값으로 실험 조건, 입자의 이동 변위 등에 따라 적절한 값을 사용해야 한다. 심문

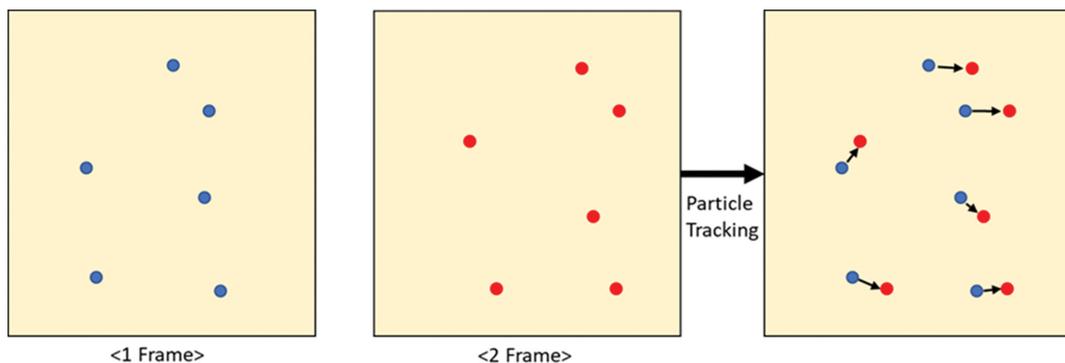


Fig. 1. Particle tracking schematic diagram of PTV technique.

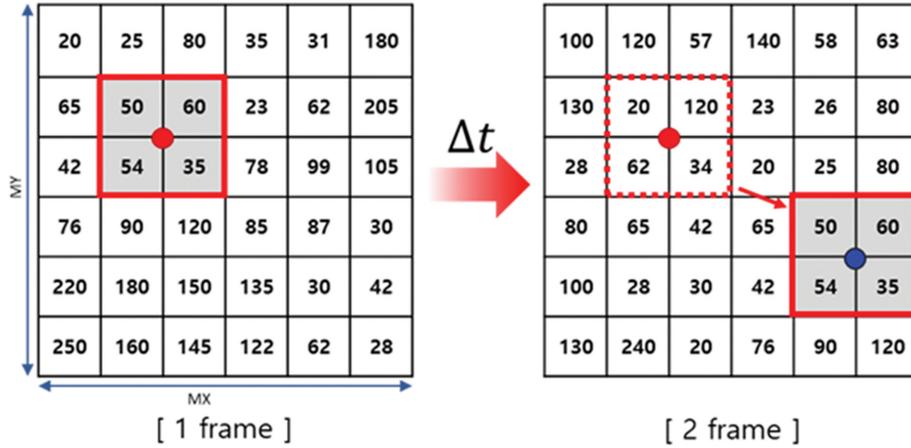


Fig. 2. PTV particle tracking process using cross-correlation method.

영역을 설정하면 해당 영역에서 명암 값을 통해 상호상관계수를 산정하며 가장 높은 상관계수를 가지는 입자의 변위를 계산한다. 입자 추적을 위한 상호상관계수 산정 식은 다음과 같다.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})]}{\left[ \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서,  $i$ 와  $j$ 는 신문영역의 행과 열을 나타내며,  $\bar{\phantom{x}}$ 는 신문영역의 평균 명암 값이다.  $a_{ij}$ 는 첫 번째 이미지의 입자 명암 값,  $b_{ij}$ 는 두 번째 이미지의 입자 명암 값이다. 신문영역에서 입자의 상호상관 계수  $R_{ab}$ 를 계산하여 가장 높은 계수 값을 가지는 입자를 추적하고 이동 변위를 계산하게 된다.

### 2.2 침강속도 실험 방법

모래 정도 크기의 입자가 수 m/s의 빠른 속도로 이동할 때 PTV의 이동속도 측정 정확도를 검증하는 연구를 수행하였다. 이동속도 측정 정확도 실험은 침강속도를 통해 검증 연구를 수행하였다. 비사이동은 바람에 의해 발생하며 creep, saltation, 그리고 suspension의 형태로 주로 수평으로 이동하는 움직임을 가진다(Bagnold, 1941). 하지만 수평 방향으로 움직이는 비사 이동 속도에 대한 구체적인 식이나 데이터는 제시되어 있지 않으며 creep, saltation 그리고 suspension의 이동속도는 모두 다르다. 이러한 이유로 바람에 의해 수평적으로 이동하는 비사의 이동속도를 PTV를 통해 산정한다 하더라도 그 결과의 정확성을 검증하는 것은 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 많은 연구를 통해 예측 정확성이 검증된 침강속도(수직 이동방향)를 통해 측정 정확도 검증 연구를 수행하였다.

Fig. 3은 낙하하는 물체에 작용하는 힘을 나타낸다. 침강속도라고 하는 낙하 속도는 입자의 중력과 부력 그리고 유체에 의한 마찰력의 균형으로 결정된다. 침강속도와 입자 크기 사이의 관계를 설명하기 위한 연구는 1851년 Stokes에 의해 시

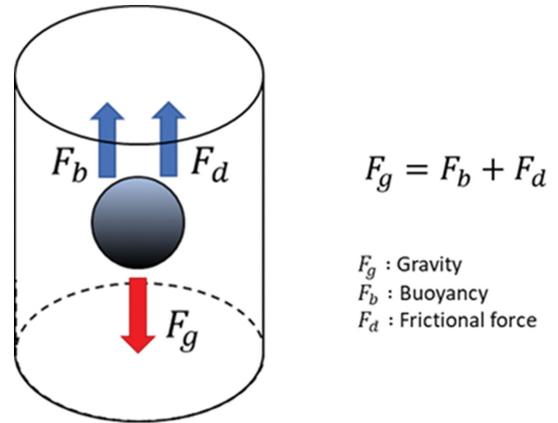


Fig. 3. Force acting on a settling object.

작되었다. Stokes(1851)은 느린 속도로 움직이는 아주 작은 구형 입자를 대상으로 침강속도 식을 제시하였다. Stokes 법칙이라고 불리는 이 식은 다음과 같이 계산된다.

$$w_s = \frac{d^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\mu} \quad (2)$$

여기서,  $\mu$ 는 점성계수,  $d$ 는 입자의 직경,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도,  $\rho_f$ 는 유체의 밀도 그리고  $g$ 는 중력 가속도를 의미한다.

Stokes 법칙의 경우 입자가 매우 작고 느리게 움직이며,  $Re_p$ 의 입자 레이놀즈 수가 낮은 경우 적용할 수 있다. 주로  $Re_p \leq 1$  이하의 범위에서 유효한 침강속도 식이다. 하지만 더 큰 입자는( $1 < Re_p \leq 1000$ 인 천이영역) 점성력 뿐 아니라 난류의 영향도 받는다. Stokes 법칙보다 입자가 더 크거나 난류의 흐름인 경우 Stokes 법칙을 확장한 다음 식으로 계산된다(Farrell and Sherman, 2015).

$$w_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_f)d}{3C_D\rho_f}} \quad (3)$$

여기서  $C_D$ 는 항력계수를 의미한다. 항력계수의 경우  $Re_p$ 와  $C_D$ 의 관계 곡선을 통해 시행착오법(Trial and Error)으로 계

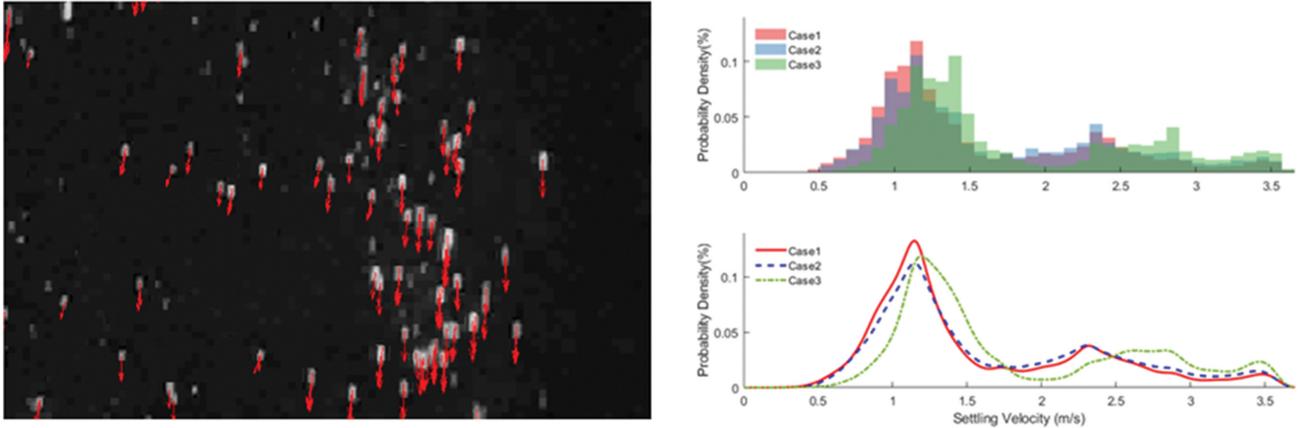


Fig. 4. Results of settling velocity experiment using sand (left : sand particle tracking process of PTV, right : probability distribution of sand settling velocity).

산하거나 경험식을 사용하기도 한다. 계산 결과 모래 입자 크기의(약 0.2~0.8 mm)  $Re_p$ 는  $1 < Re_p \leq 1000$ 인 천이영역 범위에 있다. 따라서 침강속도는 식(3)을 통해 계산되었다.

Fig. 4는 모래의 침강속도를 PTV로 분석한 사전 실험 결과를 나타낸다. PTV를 이용하여  $D_{50} = 0.38$  mm 모래의 침강속도 실험을 수행한 결과 배경과 모래의 입자를 구분하고 이동 변위를 잘 추적하였다. 하지만 모래는 다양한 입경과 형태를 가지고 있어 이론적 침강속도를 계산하기 어렵다. 또한 분급에 따라 침강속도 분포가 다르기 때문에 PTV 기법의 측정 정확도 분석이 어렵다는 문제가 있다. 실험의 불확실성을 고려하여 반복 실험을 수행할 경우 완전히 동일한 입경 분포를 가지는 시료를 채취할 수 없어 PTV의 이동속도 측정 정확도 분석에 활용하기는 적절하지 않은 것으로 판단하였다. 따라서 균질하며 모래와 크기, 밀도가 유사한 유리 입자를 사용하여 PTV 측정 정확도 평가 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 PTV의 침강속도 측정 정확도 분석에 사용한 유리 입자이다. 대부분의 침강속도 식은 구형 입자를 토대로 개발되었기 때문에 거친 모래 입자 대신 구형의 유리 입자를 사용하였다. 유리 입자는 0.4~0.6 mm로 균질한 입경을 가지고



Fig. 5. Glass bead used to analyze the accuracy of PTV settling velocity measurements (diameter : 0.4~0.6 mm,  $\rho = 2.5$  g/cm<sup>3</sup>).

있으며, 평균 직경은 0.5 mm이다. 유리 입자의 밀도  $\rho$ 는 2.5 g/cm<sup>3</sup>로 모래와 유사한 크기, 밀도를 가진 입자이다. 크기와 형태가 균질하여 모래에 비해 더욱 정확한 이론적 침강속도 계산이 가능하다. 따라서 유리 입자를 사용하여 이론적 침강속도와 PTV 측정 결과를 비교하여 PTV의 이동속도 측정 정확도 평가를 수행하였다. 식(3)으로 계산된 유리 입자의 이론적 침강속도는 2.65 m/s이다.

Fig. 6는 침강속도 실험 과정을 나타낸다. 배경과 입자의 확실한 구분을 위해 검은색 배경을 사용하였다. 또한 카메라 상에서 입자의 식별이 용이하도록 laser를 사용하여 laser sheet를 생성하였다. 촬영 frame은 480 fps으로 촬영했으며, 초당 480장의 이미지가 촬영된다. 이때 1 frame 당 시간 간격  $\Delta t$ 는 2.083 ms이다. 이미지 해상도는 1920\*1080으로 촬영되었으며, 실험 전 이미지 상의 각 꼭지점 사이의 실 물리거리를

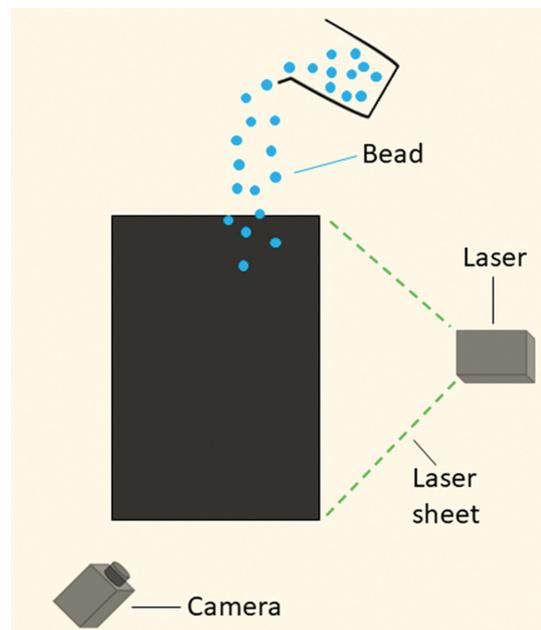


Fig. 6. Schematic diagram of a settling velocity experiment to analyze the measurement accuracy of PTV.

측정하여 참조점으로 사용하였다. 이미지 상의 너비와 높이의 실 물리거리는 약 382\*215 mm의 크기를 갖는다. 실 물리거리를 이용하여 한 픽셀 당 물리거리 변화를 계산하면 1 픽셀 크기는 약 0.199 mm로 계산된다. 따라서 입자가 한 프레임 당 1픽셀을 이동하면 약 0.096 m/s로 속도가 계산된다. 카메라는 최대한 정면에서 촬영하도록 설치하여 전체적인 이미지 왜곡이 거의 발생하지 않도록 하였다. PIV와 PTV는 주로 소규모의 실내 유동실험에 사용되는 방법으로 LSPIV와는 달리 이미지의 왜곡이 거의 발생하지 않아 별도의 이미지 왜곡 보정은 수행되지 않는다(Yoon and Noh, 2003).

침강속도 실험은 바람의 영향이 없는 실내 공간 약 5 m 높이에 유리 입자를 자유 낙하하여 수행되었다. 앞서 2.2절에서 설명한 식(2)-(3)은 입자 가속의 영향이 없고 균형 상태에 도달한 종말속도(Terminal Velocity)를 산정하는 공식이다. 다시 말해, 종말속도까지 도달할 수 있는 충분한 높이에서 실험을 수행할 필요가 있다. Farrell and Sherman(2015)는 모래 입자의 공기 중 침강속도 시뮬레이션 결과 0.5 mm의 크기 입자는 약 2.1 m 높이부터 낙하 속도가 일정한 속도로 수렴하는 종말 침강속도를 가지는 것을 제시하였다. 연구에 사용된 유리 입자는 Farrell and Sherman(2015)의 입자와 직경이 같으며 밀도 역시 모래 입자와 거의 유사하다. 유리 입자의 자유 낙하 높이는 실험실 여건 등을 고려하여 종말속도 도달 높이인 2.1 m 보다 2배 이상 높은 5 m 높이에 자유낙하 실험을 수행하였다. 자유낙하 실험은 총 3번 반복 실험하였으며, 반복실험을 통해 PTV가 같은 조건에서 일정한 측정이 가능한지 분석하였다.

### 3. 분석 결과

#### 3.1 침강속도 실험 방법

Fig. 7은 PTV 이미지 분석을 통한 유리 입자의 침강속도 측정 과정을 나타낸다. 유리 입자 낙하는 최대한 간섭되지 않도록 바람이 없는 실내 공간 5 m 높이에 수직으로 자유 낙하 시켰다. 빨간 화살표는 2 frame 동안 유리 입자를 상호상관법으로 추적 후 속도를 계산한 속도 벡터이다. 그림을 보

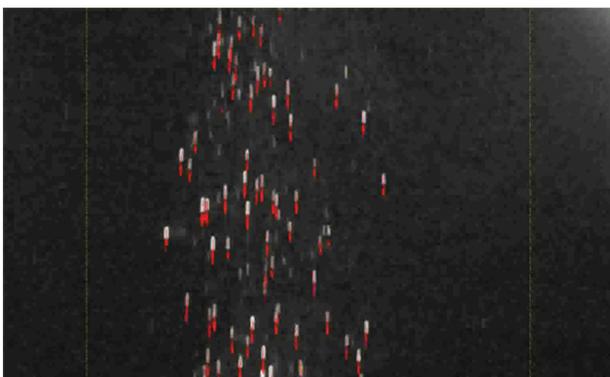


Fig. 7. Glass bead settling velocity analysis process using PTV.

면 대부분의 입자를 구분하고 추적하는 과정을 볼 수 있다. 실험 과정의 불확실성을 고려하여 총 3번 반복하여 결과를 비교하였다.

Fig. 8은 3번 반복한 침강속도 측정 결과를 boxplot 형태로 나타낸 결과이다. 그림에서 파란 box 부분은 1사분위수와 3사분위수의 범위이다. 상위 25~75%의 범위의 데이터를 나타내는 것으로 Inter Quartile Range(IQR)이라고도 불린다. IQR 내부의 빨간선은 50%에 해당하는 중앙값(median)을 의미한다. 이론적 침강속도의 경우 앞서 설명한 바와 같이 2.65 m/s로 계산되었다. PTV 분석 결과 Case 1은 2.98 m/s, Case 2는 3.12 m/s 그리고 Case 3은 3.01 m/s의 평균 침강속도 가지는 것으로 나타났다. 이론값과의 차이는 0.33~0.47 m/s의

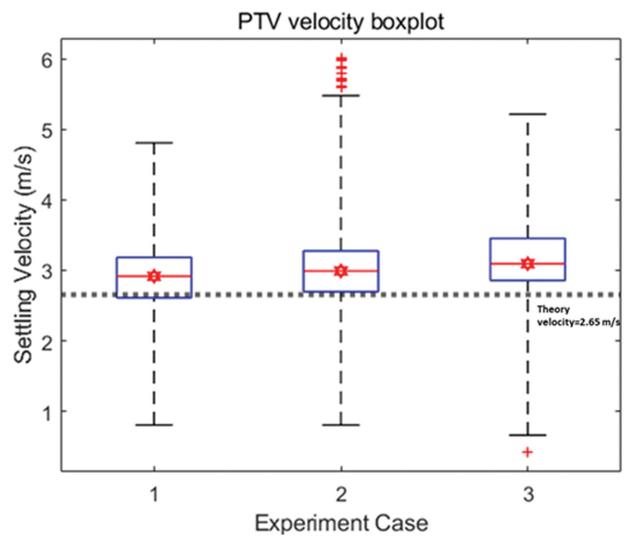


Fig. 8. Settling velocity analysis results using PTV (blue box : 25% to 75% section, black dotted line : 0% to 25% and 75% to 100% section, red line : median value, red cross : outlier value).

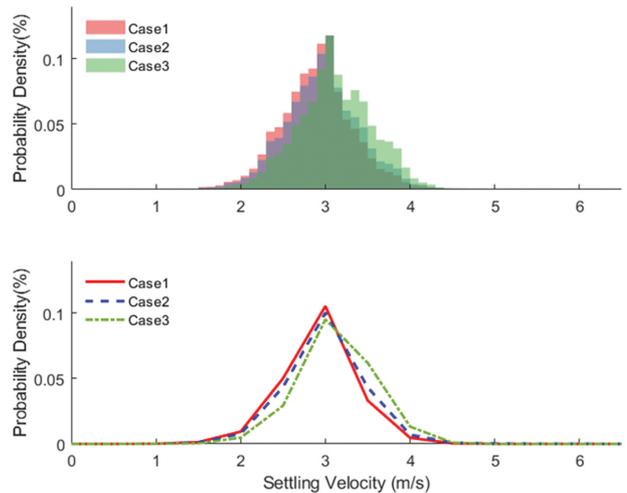


Fig. 9. Histogram and probability distribution of settling velocity measured by PTV (top : glass bead settling velocity histogram, bottom : glass bead settling velocity probability distribution).

**Table 1.** PTV settling velocity results for each case. () refers to the increase rate compared to the theoretical settling velocity.

	Case 1	Case 2	Case 3	Total Mean
Max (m/s)	4.81	5.48	5.22	5.17
Min (m/s)	0.81	0.81	0.67	0.76
Median (m/s)	2.91	2.99	3.10	3.00
Mean (m/s)	2.98 (12.45%)	3.12 (17.74%)	3.01 (13.58%)	3.04 (14.72%)

차이가 나타났다. 3 Case의 실험 모두 거의 유사한 형태의 분포를 보이며, 균질한 유리 입자로 실험했기 때문에 25~75% 구간인 1~3사분위수 구간 모두 좁고 유사한 값의 형태를 보인다.

Fig. 9는 PTV 침강속도 측정 결과를 히스토그램과 확률 분포로 나타낸 것이다. 3 Case 모두 유사한 확률분포와 히스토그램을 가지는 것을 알 수 있다. 3 Case 모두 정규분포의 형태의 확률 분포를 보이며, 중앙값인 약 3 m/s에서 가장 높은 확률 분포를 보였다. Table 1은 3 Case의 결과를 정리한 표이다. 실험별 최대, 최소, 중앙 그리고 평균 값이 제시되어 있다. 평균 부분의 괄호 표시는 이론 침강속도 대비 측정값의 증가율을 나타낸다. Case 1의 평균 값은 2.98 m/s이며 이론 값 대비 12.45%의 차이를 보였다. Case 2와 Case 3는 각각 3.12 m/s, 3.01 m/s의 평균값을 가졌으며 이론값과 17.74%, 13.58%의 차이를 보였다. 전체 평균값과 비교한 경우 3.04 m/s로 이론값과 14.72%의 차이를 보였으며, 약 85%의 정확도를 보이는 것을 알 수 있다. 3번의 반복 실험 결과 모두 유사한 측정 정확도와 확률 분포를 보이는 것으로 보아 PTV는 같은 조건에서 일정한 측정이 가능한 것으로 판단된다.

앞서 2.2절에서 설명한 바와 같이 480 frame으로 촬영한 본 실험 조건의 경우 한 프레임동안 1픽셀을 이동할 경우 계산되는 속도는 0.096 m/s이다. 침강속도의 이론값과 3번 측정한 측정값의 차이는 0.33~0.47 m/s의 차이를 보인다. 즉, 이론값과 측정값의 오차 수준은 입자 추적 시 3~5 픽셀 정도의 오차가 발생한 경우의 오차 수준이다. 1920\*1080개의 픽셀 중 3~5개의 픽셀 오차는 상호상관법을 통해 입자를 추적하고 입자의 변위를 계산할 때 발생 가능한 수준의 오차로 판단된다.

### 3.2 토의 및 향후연구

O'Brien and Neuman(2016)은 EPAS-PTV(Expected Particle Area Search-Particle Tracking Velocimetry)와 레이저 도플러 풍속계(LDA, Laser Doppler Anemometer)로 측정된 모래 입자 이동속도를 비교하여 PTV 측정 정확도를 평가하는 연구를 수행하였다. 그 결과 LDA와의 오차는 풍속에 따라 약 6~30%의 오차를 가질 수 있음을 제시하였다. 현재 PTV를 이용해 모래의 이동속도를 정확하게 측정할 수 있는 방법에 대한 연구는 진행 중에 있으며, 추가적인 연구가 수행될 필요가 있다. 하지만 O'Brien and Neuman(2016)의 실험 결과, 침강속도 이론식의 불확실성 그리고 3번 반복 실험 결과 3

Case 모두 유사한 측정 정확도를 보이는 것을 볼 때 PTV의 85% 정확도는 향후 연구에 활용될 수 있는 수준의 정확도로 판단한다. 수 mm 정도 되는 모래와 유리 입자 크기의 물체를 식별하고 추적하며, 이동속도를 측정할 수 있음을 보였다.

향후 연구에서는 풍동 실험으로 취득한 이미지 데이터를 통해 풍속, 해안 환경 요인에 따른 비사 거동 특성 분석 연구에 활용할 예정이다. 비사의 질량 플럭스 산정을 위해서는 이동속도  $v$ 뿐 아니라 농도  $C$ 도 산출할 수 있어야 한다. 이동속도의 경우 PTV 기법으로 측정하며, 농도는 PTV 실험 시 촬영된 이미지를 토대로 객체 탐지를 통해 특정 공간 영역 안의 모래 입자의 수를 판별하여 농도를 산출하고자 한다. 이미지 분석의 경우 기존 비사 포집기와 달리 비사의 시·공간적 변화를 교란없이 측정이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 포집된 모래 양으로 분석하는 기존의 방식과 달리 이미지 분석 기법은 속도 및 농도의 프로파일 데이터를 시계열로 취득할 수 있어 더욱 정밀한 질량 플럭스를 산출할 수 있을 것으로 기대한다.

Bagnold(1941) 및 기존 비사량 공식은 해안의 환경 요인(습도, 조개껍데기, 식생 등)을 고려하지 않고 사막 조건에서 정립된 식인만큼 해안 환경에 접목할 경우 비사량을 과대 산정한다. 따라서 향후 연구에서는 풍동실험을 통해 해안 환경 요인에 따라 속도 및 농도 프로파일 변화를 이미지 분석으로 관측하고 상관성 분석을 수행할 예정이다. 풍동실험을 통해 각 해안 환경 요인 변화가 비사 질량 플럭스에 미치는 영향에 대해 분석하고, 해안 환경에 적합한 비사 질량 플럭스 산정 기법을 제시하고자 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 이미지 분석 기법인 PTV를 이용하여 비사 이동속도 측정 정확도 평가를 수행하였다. 균질한 형태의 유리 입자를 자유 낙하하여 이론적 침강속도와 PTV 측정 결과를 비교하였다. 자연 해안의 모래와 유사한 크기, 단위 중량을 가지는 균질한 유리 입자로 실험하여 PTV 기법이 입자를 잘 추적하고 이동속도를 계산할 수 있는지 검증하였다. 영상 촬영은 480 fps로 촬영됐으며, 실험의 불확실성을 고려하여 3번의 반복 실험을 수행하였다.  $D_{50} = 0.5 \text{ mm}$ ,  $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$ 인 구형의 균질한 유리 입자의 이론적 침강속도는 2.65 m/s로 계산되었다.

실험 결과 Case 1은 2.98 m/s, Case 2는 3.12 m/s, 그리고

Case 3는 3.01 m/s의 평균 침강속도를 가지는 것으로 나타났다. 또한 균질한 형태의 유리 입자로 실험하여 25~75% 구간인 1사분위수와 3사분위수에서 좁은 형태의 분포를 보였으며 3 Case 모두 유사한 확률 분포를 보였다. 각 Case의 평균값과 이론값을 비교한 결과 Case 1은 12.45%, Case 2는 17.74%, 그리고 Case 3은 13.58%의 차이를 보였다. 전체 평균값은 3.04 m/s로 이론값과 14.72%의 차이를 보이며, 약 85%의 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 침강속도의 이론값과 측정값의 차이는 약 3~5 픽셀 정도의 측정 오차 수준이며, 이는 상호상관법을 통해 입자의 변위를 추적하는 과정에서 발생 가능한 수준의 오차로 판단된다.

PTV 측정 정확도 평가 결과 모래 입자 크기의 입자를 식별하고 추적할 수 있으며, 이동속도 계산을 높은 정확도로 계산 가능함을 보였다. 이미지 분석 기법은 비접촉식 측정 방법으로 교란 없이 위치, 시간 변화에 따른 속도 및 농도 분석이 가능하다. 비사의 양으로 분석하는 것이 아니라 속도, 농도 변화 분석을 통해 질량 플럭스를 산정할 수 있어 정량적으로 비사의 역학적 특성을 분석할 수 있을 것으로 기대한다. 따라서 향후 연구에서는 PTV를 활용한 이미지 분석을 통해 풍속이나 해안 환경 요인에 따른 비사의 역학적 특성 변화 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1A2C1009446).

## References

- Baek, S.J. and Lee, S.J. (1994). Development of the 2-frame particle tracking algorithm using match probability. *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 2, 263-266 (in Korean).
- Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of blown sand and desert dunes*. Methuen, New York.
- Barchyn, T.E. and Hugenholtz, C.H. (2010). Field comparison of four piezoelectric sensors for detecting aeolian sediment transport. *Geomorphology*, 120, 368-371.
- Bauer, B.O. and Namikas, S.L. (1998). Design and field test of a continuously weighing, tipping-bucket assembly for aeolian sand traps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 1171-1183.
- Davidson-Arnott, R.G.D. and Bauer, B.O. (2009). Aeolian sediment transport on a beach : Thresholds, intermittency, and high frequency variability. *Geomorphology*, 105, 117-126.
- Farrell, E.J. and Sherman, D.J. (2015). A new relationship between grain size and fall (settling) velocity in air. *Progress in Physical Geography : Earth and Environment*, 39(3), 361-387.
- Fryrear, D.W. (1986). A field dust sampler. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41(2), 117-120.
- Goossens, D. and Offer, Z. (2000). Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers. *Atmospheric Environment*, 34, 1043-1057.
- Goossens, D., Offer, Z. and London, G. (2000). Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps. *Geomorphology*, 35(3-4), 233-252.
- Hoonhout, B.M. and de Vries, S. (2016). A process-based model for aeolian sediment transport and spatiotemporal varying sediment availability. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 121, 1555-1575.
- Nickling, W.G. and McKenna Neuman, C. (1997). Wind tunnel evaluation of a wedge-shaped aeolian sediment trap. *Geomorphology*, 18(3-4), 333-345.
- O'Brien, P. and Neuman, C.M. (2016). PTV measurement of the spanwise component of aeolian transport in steady state. *Aeolian Research*, 20, 126-138.
- Ohmi, K. and Li, H.Y. (2000). Particle-tracking velocimetry with new algorithms. *Measurement Science and Technology*, 11(6), 603-616.
- Patalano, A. (2023). PTVlab (Particle Tracking Velocimetry-lab). <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41235-ptvlab-particle-tracking-velocimetry-lab>, MATLAB Central File Exchange.
- Patalano, A., Garcia, C.M. and Rodriguez, A. (2017). Rectification of image velocity results(RIVeR):a simple and user-friendly toolbox for large scale water surface particle image velocimetry (PIV) and particle tracking velocimetry (PTV). *Computers and Geosciences*, 109, 323-330.
- Philips, O.M. (1962). Recent developments in the theory of wave generation by wind. *Journal of Geophysical Research*, 67(8), 3135-3141.
- Pollet, I. (1995). *Meten van windsnelheden en zandtransport in een windtunnel*. MSc Thesis, University Gent.
- Sherman, D.I., Li, B., Farrell, E.J., Ellis, J.T., Cox, W.D., Maia, L.P. and Sousa, P.H.G.O. (2011). Measuring aeolian saltation : a comparison of sensors. *Journal of Coastal Research*, 10059, 280-290.
- Stokes, G.G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of Cambridge Philosophical Society, Part II*. 9, 8-106.
- van Rijn, L.C. and Strypsteen, G. (2020). A fully predictive model for aeolian sand transport. *Coastal Engineering*, 156, 103600.
- van der Linden, E.J. (1985). *Winderosie, De ontwikkeling van een sedimentvanger : de Muis*. MSc Thesis, Agricultural University Wageningen.
- Yoon, B.M. and Noh, Y. (2003). Outlines of large scale particle image velocimetry (LSPIV) and its applications. *Journal of The Korean Society of Visualization*, 1(2), 13-16 (in Korean).

Received 13 November, 2023

Revised 12 December, 2023

Accepted 16 December, 2023