

## 타공판에 따른 전기집진기 내의 유동분포

김동욱<sup>1,§</sup>, 정상현<sup>2,§</sup>, 심성훈<sup>2</sup>, 김진태<sup>2</sup>, 이상섭<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 환경공학과  
28644 충북 청주시 서원구 충대로 1  
<sup>2</sup>한국기계연구원 환경기계연구본부  
34103 대전광역시 유성구 가정북로 156

(2019년 2월 28일 접수; 2019년 4월 19일 수정본 접수; 2019년 5월 1일 채택)

## Flow Distribution in an Electrostatic Precipitator with a Perforated Plate

Dong-uk Kim<sup>1,§</sup>, Sang-Hyun Jung<sup>2,§</sup>, Sung-Hoon Shim<sup>2</sup>, Jin Tae Kim<sup>2</sup>, and Sang-Sup Lee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University  
1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28644, Republic of Korea  
<sup>2</sup>Environmental Machinery Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials  
156 Gajeongbuk-Ro Yuseong-Gu Daejeon, 34103, Korea

(Received for review February 28, 2019; Revision received April 19, 2019; Accepted May 1, 2019)

### 요 약

각종 산업시설과 발전시설에서 배출되는 입자상 물질의 문제로 인하여, 입자상 물질의 제거 효율이 뛰어난 전기집진기의 중요성이 증가하고 있다. 전기집진기의 효율은 전기집진기 내부의 유동분포에 매우 큰 영향을 받으므로, 전기집진기 내부의 유동 균일화를 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 유입부, 디퓨저, 본체, 수축부로 구성된 길이 3.5 m, 높이 0.875 m 전기집진기를 제작하였다. 디퓨저에는 3개의 타공판을 설치하였다. 5개의 피토크관을 높이 방향으로 부착하여 전기집진기 단면 55지점의 유속을 측정하였다. 디퓨저에 타공판이 설치되었을 때, 전기집진기 내부의 유동분포는 RMS%를 이용하여 평가하였다. 또한 타공판의 타공률 변화에 따른 유속분포도 분석하였다. 그 결과, 타공판이 전기집진기 내부의 유동분포에 미치는 영향이 매우 큼을 확인하였고, 디퓨저 입구에서부터 40%, 50%, 50% 타공률을 가진 타공판을 설치하였을 때, 가장 균일한 유동분포를 나타내었다.

**주제어 :** 전기집진기, 유속분포, 타공판

**Abstract :** Electrostatic precipitator that shows a good performance for the removal of particulate matter is important for controlling emissions from industrial facilities and power plants. The efficiency of the electrostatic precipitator on the removal of particulate matter is highly affected by the flow pattern inside the electrostatic precipitator. A number of studies have been conducted to obtain uniform flow distribution inside electrostatic precipitators. An electrostatic precipitator (ESP) with a length of 3.5 m and a height of 0.875 m was designed and installed in this study. The ESP included an inlet duct, diffuser, body, and contractor. Three perforated plates were installed in the diffuser of the ESP. Five pitot tubes were installed vertically and used to measure flow distribution in the cross section of the ESP body. Root mean square deviation value (RMS%) was used to examine the flow distribution inside the ESP when the perforated plates were installed in the diffuser. Flow distribution was also investigated in relation to the porosity of the perforated plate. The results showed that the perforated plates improved greatly the flow distribution inside the electrostatic precipitator. In addition, the most uniform flow distribution was found with 40%, 50%, and 50% porous perforated plates located from the inlet of the diffuser.

**Keywords :** Electrostatic precipitator, Velocity distribution, Perforated plate

§ These authors contributed equally.

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: slee@chungbuk.ac.kr; Tel: +82-43-261-2468; Fax: +82-43-264-2465

doi: 10.7464/ksct.2019.25.2.145 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 화력발전소, 소각장, 제조시설에서 배출되는 입자상 물질 처리에 대한 관심이 높아지고 있어, 이를 제어하기 위한 대기오염 방지시설에 대한 관심이 집중되고 있다. 대기오염 방지시설 중 전기집진기는 배기가스 내 입자상 물질의 제거 효율이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있어, 그 수요와 중요성이 갈수록 증가하고 있다[1]. 하지만 전기집진기의 효율은 내부 유동분포와 난류강도, 유속 등의 운전조건에 취약한 단점이 있어, 유동 제어장치가 없는 전기집진기 내의 유동은 발산에 의한 경계층 분리가 발생된다[2]. 이러한 유동의 경계층 분리는 집진 영역에서 회전류와 와류의 형성을 초래하여, 집진기 내에 불균일한 유동분포를 형성하고, 전기집진기의 효율을 저하시킨다[3]. 전기집진기의 효율에 대한 경험식들에서도 유속의 균일한 정도가 전기집진기의 효율에 매우 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다[4, 5].

따라서, 전기집진기 내에 균일한 유동분포를 형성하여 높은 제거 효율을 달성하기 위하여 유동 제어장치를 적용한 연구가 널리 수행되어왔다. Ward-Smith 등은 타공판의 위치와 타공률에 따른 관 내의 유속분포를 분석하였고, 타공률 41%의 타공판이 디퓨저(diffuser)의 입구와 출구 쪽에 위치할 때 가장 균일한 유동분포를 형성함을 확인하였다[6]. Sahin과 Ward-Smith는 실험적 연구를 통해 디퓨저에 설치된 2개의 타공판의 위치와 타공률이 유동패턴에 미치는 영향을 조사하였고, 타공률 50%인 2개의 타공판이 디퓨저의 입구와 출구 쪽에 위치하는 조건에서 유속분포가 가장 균일하다는 것을 확인하였다[7, 8]. Mehta는 디퓨저에 3개의 스크린(screen)을 설치한 조건에서 균일한 유동분포가 형성된다는 사실을 실험적 연구를 통해 보여주었다[9]. Sahin 등은 디퓨저의 발산 각도에 따른 유동분포에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 발산 각도가 45°에서 60°로 증가함에 따라, 디퓨저 출구에서의 속도는 불균일해지며, 압력회복계수가 감소한다는 사실을 입증하였다[10]. Swaninathan과 Mahalakshmi는 디퓨저에서의 유속 분포에 대한 실험적 연구와 시뮬레이션을 수행하였고, 실험과 시뮬레이션 사이의 유속분포에 대한 결과 값의 편차가 5% 미만으로 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 입증한 바 있다[11]. 본 연구는 전기집진기의 성능 예측 프로그램 개발을 위한 기초자료를 확보하기 위하여, 실공정에서 주로 적용되는 바와 같이 디퓨저에 3개의 타공판을 설치한 후, 타공률에 따른 유동특성을 조사하였다. 집진기 단면에 대한 유속을 측정하여, 균일한 유동분포를 위한 최적 조건을 알아보려고 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

본 연구에서는 유동분포 실험을 수행하기 위하여 실험실 규모의 전기집진기 장치를 제작하였다. Table 1은 전기집진기의 기본 사양을 나타내고 있으며, Figure 1과 Figure 2는 전기집진기의 구성을 보여준다. 실험장치는 유입부(inlet duct), 디퓨저(diffuser), 3개의 chamber로 이루어진 본체(body) 및 수축부

Table 1. Dimension of the electrostatic precipitator

|             | Item          | Size | Unit    |
|-------------|---------------|------|---------|
| Inlet Duct  | Height        | 250  | mm      |
|             | Width         | 250  | mm      |
| Diffuser    | Length        | 500  | mm      |
|             | Inlet height  | 250  | mm      |
|             | Inlet width   | 250  | mm      |
|             | Outlet height | 875  | mm      |
|             | Outlet width  | 700  | mm      |
|             | Angle         | 45   | rad (°) |
| Body        | Width         | 700  | mm      |
|             | Length        | 2000 | mm      |
| Contractor  | Length        | 500  | mm      |
|             | Inlet height  | 875  | mm      |
|             | Inlet width   | 700  | mm      |
|             | Outlet height | 250  | mm      |
| Outlet Duct | Outlet width  | 250  | mm      |
|             | Height        | 250  | mm      |
|             | Width         | 250  | mm      |

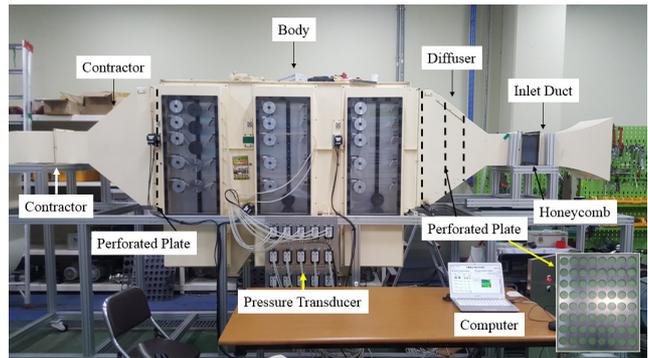


Figure 1. Picture of the lab-scale electrostatic precipitator.

(contractor)로 구성되며, 유입부 내부에 벌집(honeycomb) 형상의 유량 분배기를 설치하여 유동의 균일성을 유지하고자 하였다.

### 2.2. 실험 방법 및 조건

Figure 2는 유속측정부에 대한 실험장치 모식도이다. (a)는 집진영역(body), (b)는 유속측정 위치(S1, S2, S3), (c)는 측정 단면에서의 측정점을 보여준다. Body를 구성하는 3개의 chamber (Zone 1, 2, 3)의 S1, S2, S3 위치에 이송장치를 설치하였다. 이송장치에는 높이 방향(y 방향)으로 5개의 피토관(TPL-D-03-100, KIMO instruments, France)을 부착하였으며, Figure 2의 (c)와 같이 이송장치가 단면의 횡 방향(x 방향)으로 이동하면서 한 측정 단면에 대해 55지점의 유속을 측정하였다.

Figure 3은 실험장치 내부의 사진과 유속측정 방법을 보여주고 있다. 피토관으로부터 측정된 전압과 정압 신호를 압력

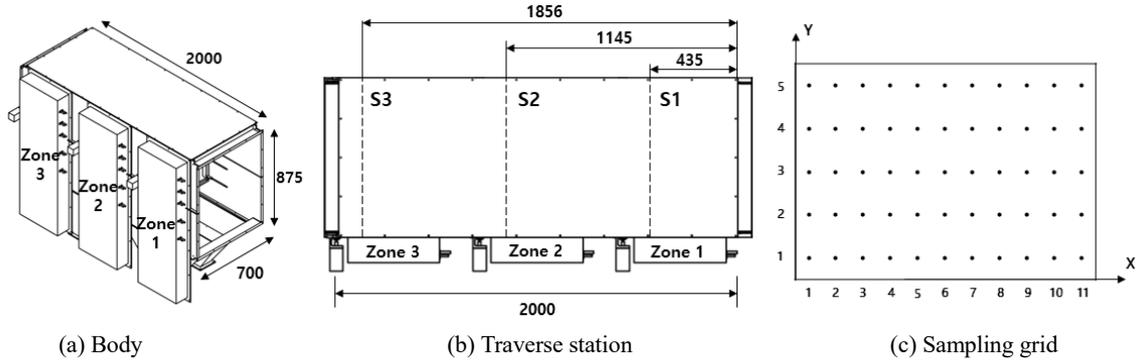


Figure 2. Schematic diagram of the apparatus and size (unit : mm).

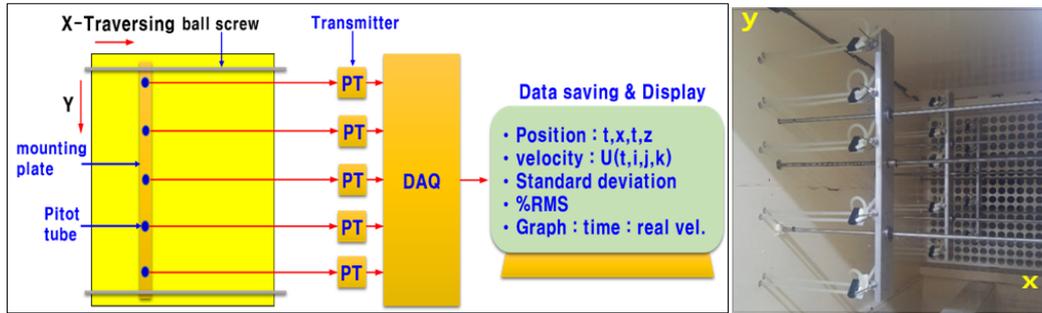


Figure 3. Method of velocity measurements.

변환기(model 264, Setra systems inc., India)로 전달하여 전류 신호로 변환시킨 후, 전류 신호를 컴퓨터로 전송하여 Equation (1)의 차압과 유속의 상관관계(베르누이의 정리)를 통해 각 측정지점에서의 유속을 산정하였다.

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1)$$

여기서  $P_t$ 는 측정지점에서의 전압(total pressure)을 의미하며,  $P_s$ 는 정압(static pressure),  $\rho$ 는 유체의 밀도(density),  $U$ 는 유속(velocity)을 나타낸다. 유속측정은 총 3개 영역(zone 1, 2, 3)에서 수행되었으며, 각 측정지점에서 측정 시간은 30 s로 하여 총 10회 측정하였고, 그 평균값을 해당 지점의 유속 값으로 사용하였다.

본 연구에서는 타공판 조건에 따른 유동분포의 균일성을 평가하기 위해 Equation (2)를 통해 RMS%를 계산하였다.

$$RMS(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{(n-1) \bar{U}^2}} \quad (2)$$

$n$ 은 측정지점 수를 뜻하고,  $U_i$ 는  $i$ 지점에서 측정한 국부 유속 값을 의미하며,  $\bar{U}$ 는 측정 단면에서 유체의 흐름 방향 속도 성분의 산술평균값으로, Equation (3)를 통해 계산하였다.

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (3)$$

RMS%는 유속의 표준편차를 산술평균로 나눈 값이며, 측정지점에서의 유체의 유속과 평균유속도 간의 분산 범위를 의미한다. 이상적인 유동분포는 모든 지점에서의 국부유속 값이 평균유속과 동일하기 때문에 RMS%가 0이다. 따라서, RMS%가 0에 근접할수록 측정 단면에 대한 유속분포가 균일하다는 사실을 알 수 있다. 또한 전기집진기 내 유속에 대한 외부 요인의 영향을 확인하기 위하여 예비실험을 수행하였다. 그 결과 실험실 내부 온도를 21 °C로 유지하고, 팬 가동 5 min 이후에 유속을 측정하면, 유속이 안정화된 상태에서 측정할 수 있음을 확인하였다. Table 2는 유속분포 측정을 위한 실험조건을 보여주고 있다.

Figure 4는 디퓨저 내부에 배치된 타공판(1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> P.P)과 유속측정 위치(S1, S2, S3)를 보여주고 있다. 디퓨저 입구의 위치를 0, 디퓨저 출구의 위치를 1이라 하였을 때,  $x$ 는 디퓨저 입구로부터 유동 방향으로 떨어진 거리를 뜻하고,  $n$ 은 디퓨저 출구의 위치를 의미한다. 3개의 타공판은 디퓨저 내부의  $x/n = 0.47, 0.66, 0.88$ 의 위치에 배치하였다.

Table 2. Summary of experimental conditions

| Item                   | Conditions    |
|------------------------|---------------|
| Chamber diameter (m)   | 0.700 × 0.875 |
| Fan rotation Nb. (rpm) | 1000          |
| Sampling               | 10 times      |
| Temperature (°C)       | 21 °C         |
| System                 | Closed system |

**Table 3.** Conditions of perforated plates located inside the diffuser

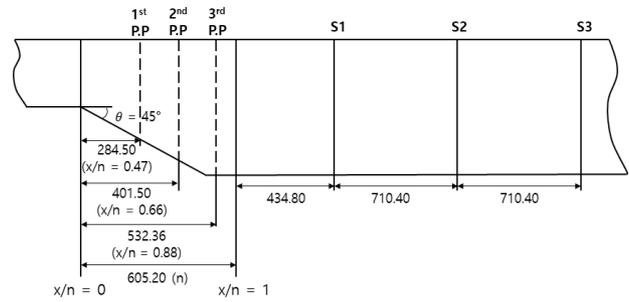
| Test No. | Porosity<br>(1st PP/2nd PP/3rd PP) |
|----------|------------------------------------|
| Test 1   | Without PP                         |
| Test 2   | 50%/50%/50%                        |
| Test 3   | 40%/50%/50%                        |
| Test 4   | 30%/50%/50%                        |
| Test 5   | 50%/40%/50%                        |
| Test 6   | 50%/30%/50%                        |
| Test 7   | 50%/50%/40%                        |
| Test 8   | 50%/50%/30%                        |

Table 3에서 유속측정 실험에 대한 타공판의 타공률 배열 조건을 보여주고 있다. 보통 타공률 30% 미만의 타공판은 과도한 압력강하의 문제점이 있고, 타공률이 50%를 초과하는 타공판은 유량 분배효과가 떨어지는 것으로 알려져 있다. 따라서 Table 3과 같이 30~50%의 타공률 범위 내에서 8가지의 타공판 배열 조건으로 실험하였다. 실험은 타공판을 설치하지 않은 빈 디퓨저 조건에서 먼저 수행하였고, 그 후 디퓨저 내부에 위치하는 3개의 타공판의 타공률 변화에 따른 유속분포 변화를 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 타공판 미설치 조건에서 유속분포

유동 균일화 실험에 앞서, 전기집진기의 디퓨저에 타공판을 설치하지 않은 조건에서 유속분포를 조사하였다. Figure

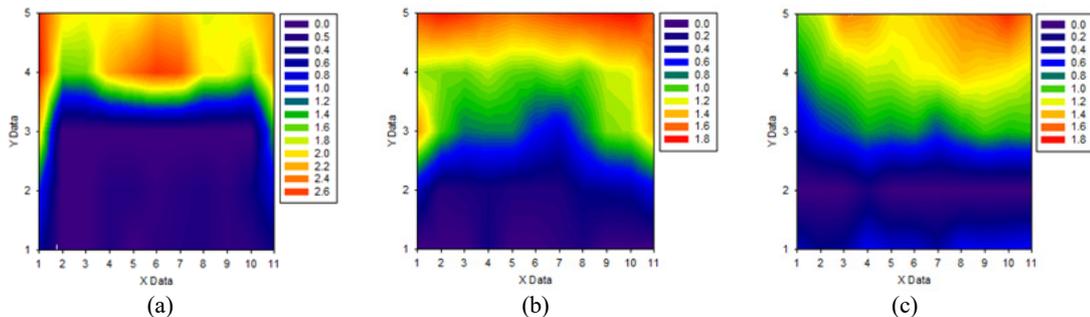


**Figure 4.** Location of perforated plates (1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> P.P) and traverse station (S1, S2, S3) for diffuser (dimension : mm).

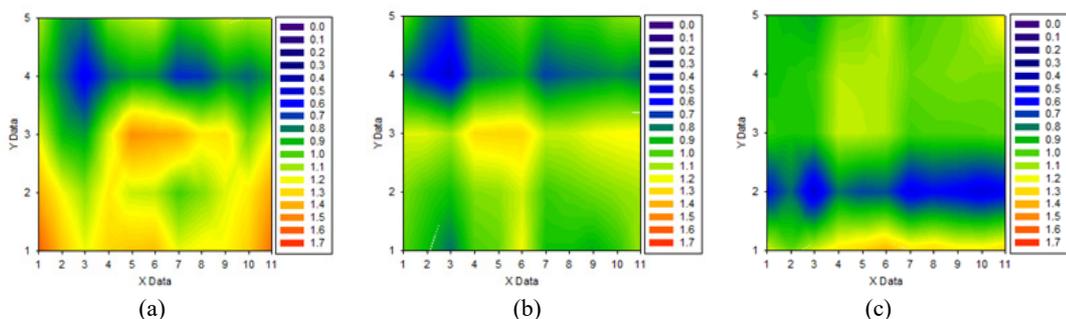
5는 타공판이 없는 조건(Test 1)에서의 유속분포를 측정된 결과이다. Figure 5(a)의 zone 1에서는 유속의 RMS%가 101.5%로 상당히 불균일한 유동을 보였다. 상부 영역에서는 2.0~2.4 m s<sup>-1</sup>의 빠른 유속을 보였고, 하부 영역에서는 0.3 m s<sup>-1</sup> 수준의 정체된 유동장이 형성되었다. Zone 2, 3 단면에서 또한 RMS%가 각각 77.4%, 67.1%로 불균일한 유속분포를 보였으며, zone 1과 마찬가지로 하단에 정체된 유동장이 형성되었다. 따라서 유동 제어장치가 없는 전기집진기의 내부 유동은 디퓨저를 지나면서 유동의 분리가 발생되고, 결과적으로 집진영역 내 넓은 범위에 걸쳐 유동의 정체영역이 형성됨을 확인할 수 있다.

#### 3.2. 타공판 배열에 따른 유속분포

본 연구에서는 타공판과 타공률의 분포가 전기집진기 내 유속분포에 미치는 영향을 확인하기 위해, Table 3에 나타낸 바와 같이 3개의 타공판을 설치하여 유속분포를 측정하였다.



**Figure 5.** Flow distribution without the perforated plate at (a) zone 1, (b) zone 2 and (c) zone 3.



**Figure 6.** Flow distribution with the perforated plate for test 3 at (a) zone 1, (b) zone 2 and (c) zone 3.

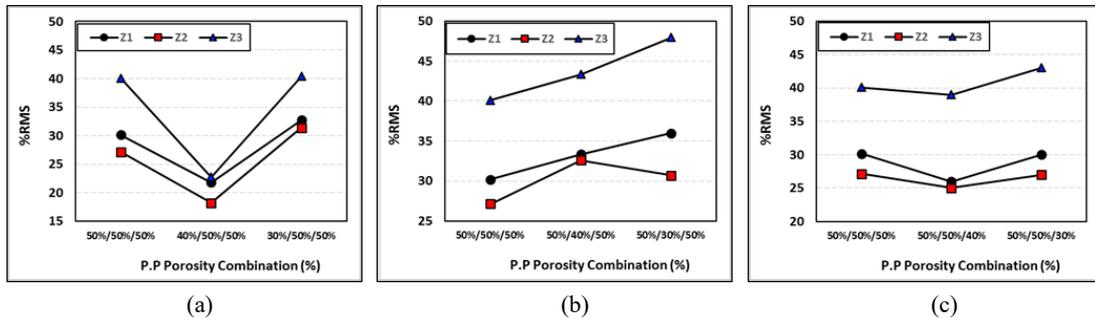


Figure 7. Flow distribution changing the porosity of the perforated plate (a) 1<sup>st</sup> P.P, (b) 2<sup>nd</sup> P.P and (c) 3<sup>rd</sup> P.P.

Table 4. Velocity distribution in the collection chamber of the electrostatic precipitator

| Test No. | %RMS of velocity |        |        |
|----------|------------------|--------|--------|
|          | Zone 1           | Zone 2 | Zone 3 |
| Test 1   | 101.5            | 77.4   | 67.1   |
| Test 2   | 30.2             | 27.1   | 40.1   |
| Test 3   | 21.8             | 18.3   | 22.8   |
| Test 4   | 32.7             | 31.4   | 40.4   |
| Test 5   | 33.3             | 32.6   | 43.3   |
| Test 6   | 36.1             | 32.8   | 47.2   |
| Test 7   | 26.8             | 25.3   | 39.3   |
| Test 8   | 30.5             | 27.1   | 43.2   |

Table 4는 각 조건에서 측정 단면에 대한 유속의 RMS%를 보여주고 있다. 타공판이 설치되지 않은 조건인 test 1과 비교하여 test 2 ~ 8에서의 유속의 균일한 정도(RMS%)가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 test 3에서는 본 연구에서 얻은 실험결과 중에서 가장 균일한 유속분포가 확인되었다.

Figure 6는 가장 균일한 유속분포를 보였던 test 3에서의 유속분포를 보여준다. Figure 6에서는 타공판을 설치하지 않았을 때(Figure 5) 나타난 하단의 정체 유동장이 거의 소멸되었고, 상단의 고속영역 또한 제거되었다. Test 3의 조건에서 zone 1, 2, 3에 대한 유속분포의 %RMS는 각각 21.8%, 18.3%, 22.8%로 test 1의 조건에서 %RMS 대비 약 80% 감소하였다. 이는 test 3의 조건에서 3개 타공판의 유량 분배 효과와 판의 저항이 적절하였음을 보여준다.

### 3.3. 타공률이 유속분포에 미치는 영향

각 영역(zone)에서 타공판의 타공률 변화가 유속분포에 미치는 영향을 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 1번째 타공판( $x/n = 0.47$ )의 타공률을 변경하였을 때에는 유속의 %RMS 변화량이 zone 1에서 17%, zone 2에서 15%, zone 3에서 18%였다. 반면, 2번째 타공판( $x/n = 0.66$ )과 3번째 타공판( $x/n = 0.88$ )의 타공률 변경 시, 유속의 RMS% 변화량이 평균 10%로 상대적으로 작았다. 이는 디퓨저의 입구에 가장 근접한 1번째 타공판( $x/n = 0.47$ )이 전기집진기 내의 유속 분포에 미치는 영향이 가장 큼을 의미한다.

## 4. 결론

3개의 타공판을 집진기 유입부에 위치한 디퓨저에 설치하여, 타공판의 유무와 타공률이 전기집진기의 유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 타공판이 없는 조건에서는 전기집진기 내의 넓은 범위에서 정체된 유동영역이 형성되었으며, RMS%가 101.5%로 유속분포가 매우 불균일하였다. 그러나 디퓨저에 3개의 타공판을 설치하였을 때, 유동의 정체영역과 고속영역이 소멸되었고, 유속분포가 균일해짐을 확인할 수 있었다. 또한 디퓨저 입구로부터 40%, 50%, 50% 타공률을 가진 타공판을 각각 설치하였을 때, 유속의 RMS%가 약 20% 수준으로, 가장 균일한 유속분포가 형성됨을 확인하였다. 그리고 타공판의 타공률이 유속분포에 미치는 영향을 조사한 결과, 디퓨저 입구에 가장 근접한 타공판( $x/n = 0.47$ )의 타공률이 유속분포에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 타공모양이나 타공판 위치 등의 인자에 따른 유동특성 변화를 연구할 수 있으며, 전기집진기의 성능 예측 프로그램 개발을 위한 기초자료로 활용할 수 있다.

## 감사

본 연구는 2019년 한국기계연구원 주요사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Jędrusik, M., Świerczok, A., and Łuszkiewicz, D., "Physical and Numerical Modelling of Gas Flow in Electrostatic Precipitator," *Przegląd Elektrotechniczny*, **93**, 2 (2017).
- Barratt, D., and Kim, T., "A Banked Wide-Angle Diffuser with Application to Electrostatic Precipitators," *Proc. Inst. Mech. Eng. A: J. Power Energy*, **229**, 88-98 (2015).
- Reneau, L. R., Johnston, J., and Kline, S. J., "Performance and Design of Straight, Two-Dimensional Diffusers," *J. Basic Eng.*, **89**, 141-150 (1967).
- IDELCHIK, I., and Aleksandrov, V., "Effect of Nonuniformity of Gas-flow on Efficiency of Electrostatic Precipitators," *Therm. Eng.*, **21**, 85-87 (1974).

5. Jędrusik M., *Elektrofiltry Rozwinięcie wybranych technik podwyższania skuteczności odpylania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (2008).
6. Ward-Smith, A., Lane, D., Reynolds, A., Sahin, B., and Shawe, D., "Flow Regimes in Wide-Angle Screened Diffusers," *Int. J. Mech. Sci.*, **33**, 41-54 (1991).
7. Sahin, B., and Ward-Smith, A., "The Pressure Distribution in and Flow Characteristics of Wide-Angle Diffusers using Perforated Plates for Flow Control with Application to Electrostatic Precipitators," *Int. J. Mech. Sci.*, **35**, 117-127 (1993).
8. Sahin, B., and Ward-Smith, A., "The Use of Perforated Plates to Control the Flow Emerging from a Wide-Angle Diffuser, with Application to Electrostatic Precipitator Design," *Int. J. Heat Fluid Flow*, **8**, 124-131 (1987).
9. Mehta, R., "The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide-Angle Diffusers," *Prog. Aeosp. Sci.*, **18**, 59-120 (1979).
10. Şahin, B., Ward-Smith, A., and Lane, D., "The Pressure Drop and Flow Characteristics of Wide-Angle Screened Diffusers of Large Area Ratio," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **58**, 33-50 (1995).
11. Swaminathan, M., and Mahalakshmi, N., "Numerical Modelling of Flow through Perforated Plates Applied to Electrostatic Precipitator," *J. Appl. Sci.*, **10**, 2426-2432 (2010).