

전기집진기 내부 유동 균일도 평가 기준인 ICAC EP-7과 %RMS 간 상관관계

Relationship between ICAC EP-7 and %RMS, Standards for Gas Flow Uniformity inside Electrostatic Precipitators

신 완 호 · 홍 원 석 · 송 동 근*

한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부

(2009년 12월 9일 접수, 2010년 2월 1일 수정, 2010년 3월 2일 채택)

Wan-Ho Shin, Won-Seok Hong and Dong-Keun Song*

Environmental and Energy System Research Division,

Korea Institute of Machinery and Materials

(Received 9 December 2009, revised 1 February 2010, accepted 2 March 2010)

Abstract

Gas flow uniformity is an important factor to guarantee particle removal performance of electrostatic precipitators (EP), and the gas flow uniformity is evaluated by a fraction of standard deviation to the mean of gas flow distribution (%RMS) or a technical standard, ICAC EP-7, provided by The Institute of Clean Air Companies. In this study, relationship between the ICAC EP-7 and %RMS in evaluation of gas flow uniformity was investigated in terms of flow velocity. The maximum values of %RMS for gas velocity distribution of normal distribution has been obtained, and the maximum values of %RMS with gas velocity distribution satisfying ICAC EP-7 standards were also evaluated. With gas flow distribution obtained from CFD analysis and physical model test of real EP, %RMS values were calculated and it was tested if those gas flow distribution satisfy the criteria specified in ICAC EP-7. The %RMS values satisfying criteria of ICAC have been appeared to have similar values with %RMS values calculated with normal distribution of gas velocities.

Key words : Electrostatic precipitator, Gas flow uniformity, ICAC EP-7, %RMS

1. 서 론

전기집진기는 입자상 오염 물질의 배출 저감을 위해 가장 널리 사용되는 집진설비로서 설치 및 유지

보수의 용이성 및 높은 집진 효율 등의 장점이 있다. (Kim *et al.*, 1994) 전기집진기를 적용하여 높은 집진 효율을 얻기 위해서는 전기집진기 내부 유동의 균일도가 확보되어야 한다. 발전소 등의 현장에 설치된 전기집진기는 연소실 후단의 탈황설비 후단에 위치하며, 환경 제어 설비들 사이는 유로(Duct)로 연결되어 있다. 유로를 통해 전기집진기로 유입되는 유체는

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)42-868-7271, E-mail : dksong@kimm.re.kr

Table 1. Criteria for gas flow uniformity (ICAC EP-7).

Target outlet emissions	Criteria
lower than 100 mg/m ³ (EP-7-L)	a minimum of 85% of the velocities not more than 1.15 times the average velocity a minimum of 99% of the velocities not more than 1.40 times the average velocity
greater than 100 mg/m ³ (EP-7-H)	a minimum of 75% of the velocities not more than 1.15 times the average velocity a minimum of 95% of the velocities not more than 1.40 times the average velocity

확장부(diffuser)를 거쳐 집진실로 공급된다. 상대적으로 작은 단면적의 유로에서 높은 면적비의 집진부로 공급되는 확장부를 거치면서, 벽면 근처에서 유동 박리(separation) 현상이 발생한다. 확장부의 확장각이 증가함에 따라 확장부의 벽면 근처에서는 실속(stall) 영역이 형성되며, 중심부에서는 제트(jet) 유동 영역이 형성된다(Ward-Smith *et al.*, 1991). 전기집진기 내부 유동이 균일하지 않은 경우, 제거 대상 분진의 경로에 따라 분진의 체류시간이 크게 달라지며, 제거 대상 분진의 하전 및 제거 성능이 충분히 확보되지 않는다(Park and Park, 2000; Park *et al.*, 2000).

단독 확산부를 통과한 유동의 균일도가 확보되는 확장각은 약 7도 정도로 알려져 있으나(Sahin and Ward-Smith, 1990), 설치 장소의 제약으로 인해 높은 면적비(큰 확장각)의 확장부가 이용된다. 확산부를 통과한 유동의 균일도를 향상시키기 위해서 일반적으로 다공판(perforated plate) 및 스크린이 사용되고 있으며, 다공판 또는 스크린이 설치된 확산부 후단의 유동 균일도는 다공판 및 스크린의 설치 위치, 설치 개수 및 개공율(opening ratio or porosity)에 영향을 받는다(Noui-Mehidi *et al.*, 2005). 산업설비가 대형화되면서 적용이 필요한 확장부의 면적비는 더욱 증가하는 추세이며, 다공판을 이용한 전기집진기 내부 유동 균일화를 위한 연구가 다양하게 진행되었다(Chong *et al.*, 2008; Kwon *et al.*, 2006; Hyun and Chun, 1997; Sahin *et al.*, 1995; Hong *et al.*, 1994; Sahin and Ward-Smith, 1993; Sahin and Ward-Smith, 1990; Sahin, 1989; Sahin and Ward-Smith, 1987).

이와 같은 전기집진기 내부 유동의 균일도(Gas Flow Uniformity)는 전기집진기 설계 시부터 고려되어, CFD (Computational Fluid Dynamics) 및 축소 모델 실험 등을 통해 엄격하게 검증되어야 하는 항목이다. ICAC(Institute of Clean Air Companies)는 이를 위한 기준(ICAC EP-7)을 마련하여 전기집진기 설계

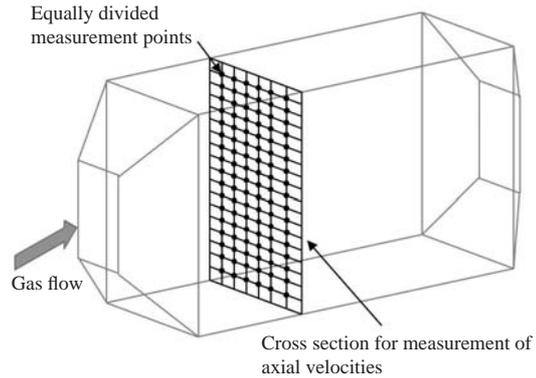


Fig. 1. Cross section of measuring points in a test EP.

시에 유동 균일도 평가 기준으로 적용하고 있으나, 관련 업계에서는 ICAC 기준 외에 유속 분포의 %RMS 값을 기준으로 내부 유동의 균일도를 평가하고 있는 실정이다. 이와 같이 상이한 기준이 적용됨에 따라, 각 기준 간의 상관 관계를 도출하여 하나의 기준으로 검증한 유동 균일도가 다른 기준을 적용하는 경우에도 만족하는 연관성을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 유속 분포 조건에서 ICAC 기준과 업계에서 통용되는 %RMS를 이용하여 유동 균일도를 평가, 비교하고 각 기준 간의 상관관계에 대해 살펴보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 유동 균일도

전기집진기 설치 및 운전애 앞서 전기집진기 내부 유동 분배 및 균일도 확보 여부를 판단하기 위해서 ICAC의 ‘Electrostatic Precipitator Gas Flow Model Studies’ (Technical Standards, EP-7)에 규정된 유동 균

일도 판단 기준은 표 1에 나타냈고, 목표 배출량에 따라 기준을 달리한다(ICAC, 1997). 전기집진기 내부 유속의 균일도는 집진부 단면의 균등 분할된 측정 지점에서 측정된 속도 측정값을 이용하여 산출한다(그림 1).

전기집진기 내부 유동의 또 다른 균일도 기준으로 %RMS 값이 이용된다. %RMS는 다음 식(1)과 같이 정의되며, 평균 속도에 대한 속도 표준 편차의 비로 나타난다.

$$\%RMS = \frac{\sigma}{\bar{U}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, \bar{U} 는 측정 속도 값들의 평균 속도, σ 는 측정 속도 값들의 표준편차를 의미한다.

2.2 유속 분포

전기집진기 내부 집진부 단면에서의 축 방향 속도 분포는 확산부 확장 각도 및 유동 균일화를 위해 설치한 다공판 및 스크린 위치와 개공율에 따라 달라진다. 본 연구에서는 축 방향 속도(v) 분포가 가장 이상적인 정규분포 형태를 갖는 경우에 속도 분포의 분산 변화에 따라 %RMS 값을 산출하여 ICAC 기준을 만족하는 %RMS 값의 범위에 대해 살펴보고, ICAC 기준을 만족하는 속도 분포의 분산을 산출하였다. 이어서 ICAC 기준(표 1)을 만족하는 임의의 속도 분포로부터 %RMS 값을 산출하여 ICAC 유동 균일도 기준과의 연관성에 대해 살펴보았다.

마지막으로 실제 전기집진기 설계 과정에서 수행한 CFD 해석 및 모델 실험 측정에서 얻은 속도 분포를 대상으로 %RMS 값과 ICAC 기준 간 상관관계에 대해 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 속도 분포가 정규 분포를 갖는 경우의 해석

전기집진기 집진부 단면에서의 축 방향 속도 성분(v)의 분포가 정규 분포인 경우, 다음과 같이 표현된다(그림 2).

$$f(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-\bar{U})^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

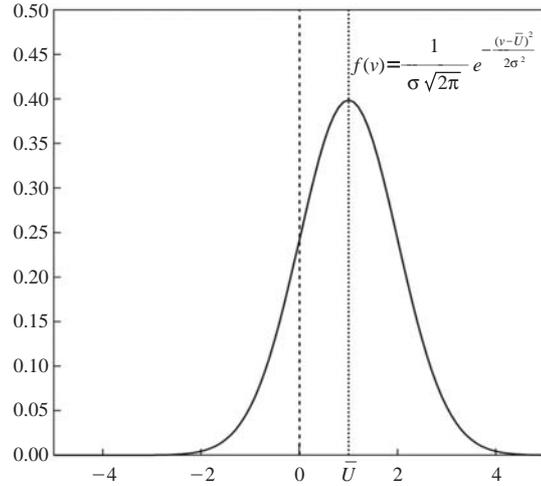


Fig. 2. Normal distribution for gas velocities having a mean \bar{U} and a standard deviation σ .

여기서 $x = (v - \bar{U}) / \sigma$ 로 정의하면, 식(2)는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3)$$

ICAC EP-7에서 규정한 기준인 평균 속도의 1.15배인 유속(v_1)과 1.4배인 유속(v_2)에서의 변환 변수의 값은 다음과 같이 주어진다.

$$x_1 = \frac{(v_1 - \bar{U})}{\sigma} = \frac{(1.15\bar{U} - \bar{U})}{\%RMS \cdot \bar{U}} = \frac{0.15}{\%RMS} \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{(v_2 - \bar{U})}{\sigma} = \frac{(1.40\bar{U} - \bar{U})}{\%RMS \cdot \bar{U}} = \frac{0.40}{\%RMS} \quad (5)$$

변환 변수 x 까지의 누적 값은 다음 적분식을 통해 산출할 수 있다.

$$F(x) = 0.5 + \int_0^x f(x) dx = 0.5 + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (6)$$

표 2는 식(6)을 이용하여 산출한 각 %RMS인 분포에서의 ICAC EP-7 기준과의 비교 결과이다. 전기집진기 집진부 단면에서의 속도 분포가 정규분포 형태인 경우, 표 1에 의해 기준을 만족하기 위해서 %RMS 값이 ICAC EP-7-L은 15% 미만, ICAC EP-7-H는 25% 미만이 되어야 함을 알 수 있다.

식(6)의 역함수를 이용하여 각각의 기준을 만족하

Table 2. Fraction of gas velocities below the specified value in ICAC EP-7 standards.

%RMS	x_1	x_2	$F(x_1)$	$F(x_2)$
35%	3/7	8/7	66.59%	87.35%
30%	1/2	4/3	69.15%	90.88%
25%	3/5	8/5	72.57%	94.52%
20%	3/4	2	77.34%	97.72%
15%	1	8/3	84.13%	99.62%
10%	3/2	4	93.32%	100.0%

는 %RMS 값을 산출하면, ICAC EP-7-L은 14.47%, ICAC EP-7-H는 22.24%로 산출되었다.

3. 2 ICAC 기준의 %RMS 산출

ICAC EP-7 기준에서는 평균 속도의 일정 비율 이내의 속도 성분의 백분율을 집진기 내부 유동의 균일도 판단 척도로 지정했다. ICAC EP-7 기준을 만족하는 조건에 대한 속도 분포의 %RMS 범위를 추정하였다. ICAC 기준을 만족하는 유속이 가질 수 있는 속도 분포는 매우 다양하게 존재할 수 있어, 유동의 균일도가 가장 좋지 않은 경우에 대한 %RMS 값 (%RMS_{max})을 유도하고, 이로부터 %RMS의 범위를 산정하였다.

유동 균일도가 낮은 경우, %RMS 값이 최대값을 갖기 위해서는 속도 성분이 평균값과 가장 많은 차이가 있는 값을 가져야 하며, ICAC 기준을 동시에 만족하는 경우로 제한하면 그림 3의 (a)와 (b), 두 경우를 들 수 있다. 평균값보다 큰 속도 성분의 값들은 ICAC에서 정한 기준 값인 $1.15 \bar{U}$ 와 $1.40 \bar{U}$ 에 해당 비율(각각 35%와 15%)로 존재해야 한다(여기서 가장 외곽의 속도 값도 $1.40 \bar{U}$ 에 존재한다고 가정하였다). 평균값 이하의 속도 성분의 분포는 (a) 절반의 측정 지점에서 하나의 속도 성분 값을 갖는 경우와 (b) 평균값을 중심으로 대칭인 분포를 갖는 경우를 생각할 수 있으며, 각각의 경우 %RMS는 각각 24.03%와 25.38%가 된다. 이때, (a)의 경우, 평균값보다 작은 속도 성분의 값은 $0.775 \bar{U}$ 가 된다.

위의 비교로부터 최대 %RMS 값은 속도 분포가 평균값으로부터 가능한 멀리 분포하는 경우에 해당하며, ICAC 기준의 $1.40 \bar{U}$ 이상의 속도 성분 값에 따라 최대 %RMS 값도 변화한다(그림 3c). 최대 속도 값(v_{max})에 따른 최대 %RMS 값은 식(7)과 같은 관계를 가지며, v_{max} 가 $1.40 \bar{U}$ 에서 $2.0 \bar{U}$ 까지 증가하는

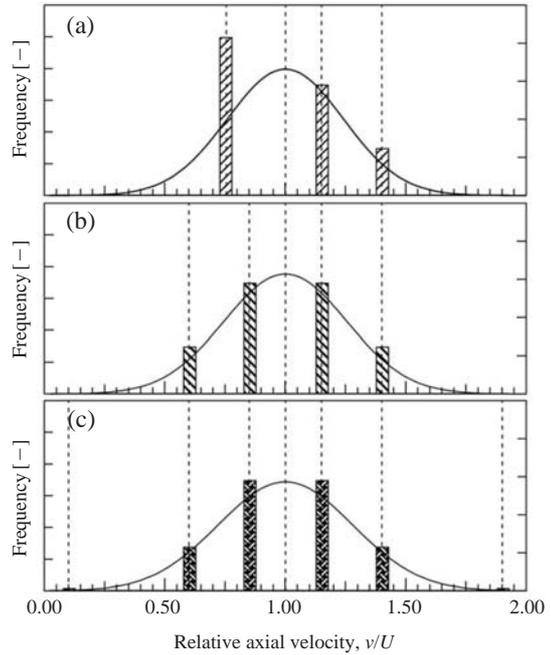


Fig. 3. Axial velocity distribution of sample cases for investigation flow uniformity.

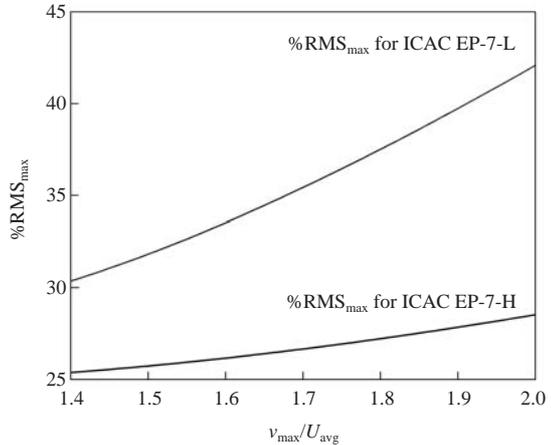


Fig. 4. Change in the maximum %RMS value with increasing the maximum velocity.

구간에서의 최대 %RMS 값 변화는 그림 4와 같다.

$$\%RMS_{min} = \frac{100}{\bar{U}} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{U})^2 \right] / (N-1)}$$

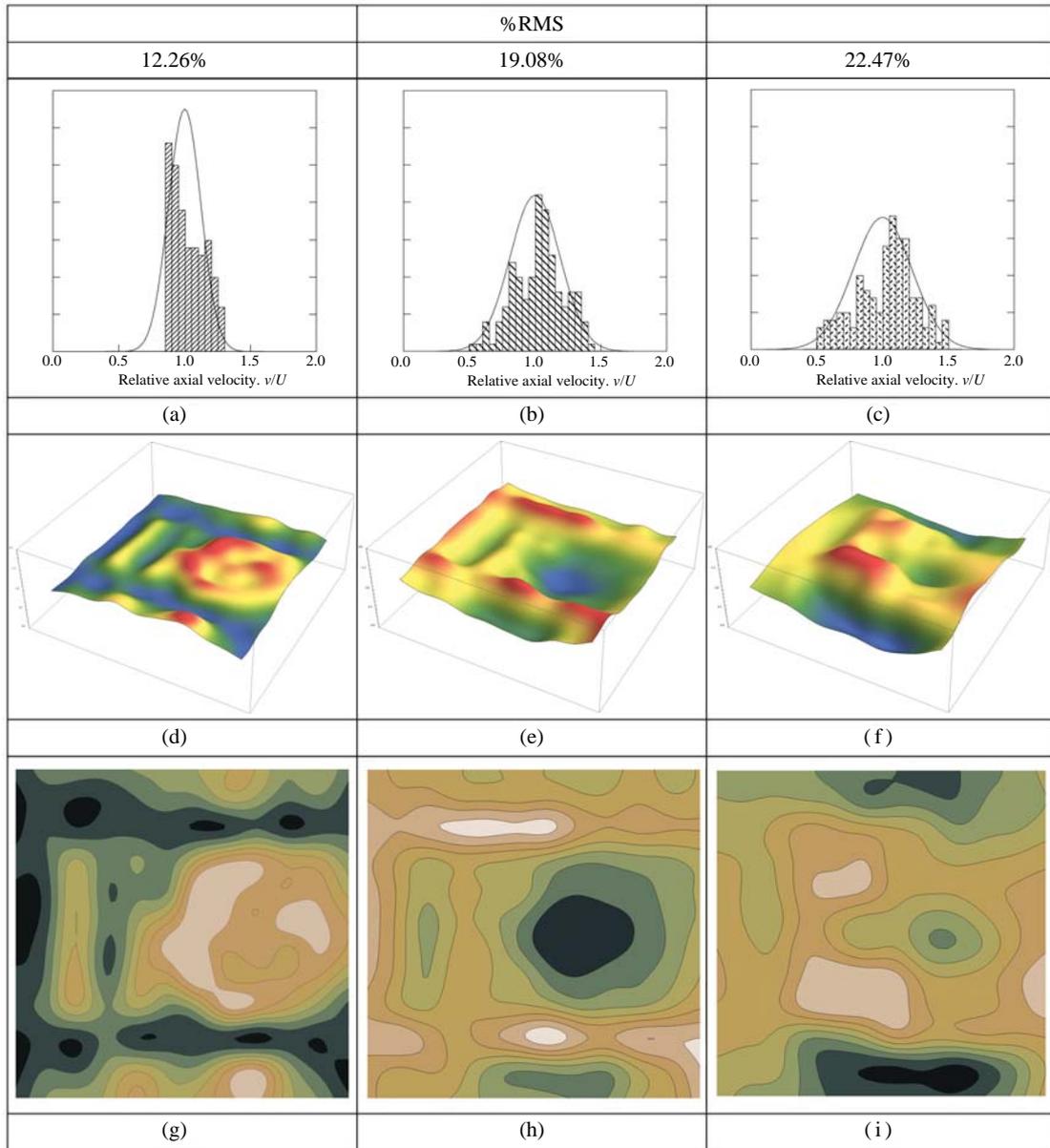


Fig. 5. Axial velocity distribution, three dimensional plot, and contour plots of sample cases obtained from CFD analysis and physical flow model tests.

$$= 100 \sqrt{\frac{N}{N-1} \{a(v_{\max} - 1)^2 + c\}} \quad (7)$$

의 값은 각각 $a_L=0.02$, $c_L=0.0638$ 과 $a_H=0.1$, $c_H=0.0753$ 이다.

여기서 ICAC EP-7-L과 EP-7-H 기준을 만족하는 a, c 최대 속도 성분이 전체 속도 분포에서 크게 벗어 나지 않는 경우, ICAC 조건을 만족하는 조건에서

Table 3. Fraction of points having velocities less than 1.15 \bar{U} and 1.405 \bar{U} , and %RMS values.

Cases	c1	c2	c3
%RMS	12.26%	19.08%	22.47%
$N(< 1.15 \bar{U})/N_{total}$	85.42%	78.47%	75.00%
$N(< 1.40 \bar{U})/N_{total}$	100.0%	100.0%	97.22%

%RMS는 목표배출량에 따라 각각 약 25% 및 30% 이내로 추정할 수 있다. 이는 정규분포로 가정한 속도 분포로부터 ICAC 기준을 만족하는 경우의 %RMS에 비해 높은 값을 보이며, 이는 속도 분포를 정규 분포와는 상이한 특정 속도 값에 치우쳐 분포하는 분포 함수를 가정한 데에 기인한 것이다.

3.3 사례 연구

전기집진기의 집진실 내부 유동의 균일도 평가에 있어, 유속 분포를 정규분포로 가정하는 것은 실제 유속 분포와 차이를 보인다. 이에 실제 전기집진기 설계 및 CFD와 모델 실험 과정에서 얻은 유속 분포의 유동 균일도를 ICAC 기준과 %RMS 산출을 통해 살펴보았다. 전기집진기의 안내판 구조 및 다공판의 개공율에 따른 유동 해석에는 상용 전산해석 프로그램인 FLUENT v6.2를 이용하였다. 전기집진기 모델은 실제 크기의 1/16 크기의 모델을 대상으로 수행하였으며, 실험을 통해 얻은 축방향 속도 분포를 사례 연구에 이용하였다.

사례 연구에 사용한 유속 분포는 %RMS 값이 서로 다른 유속 분포를 선택하여 사용하였으며, 각 경우의 유속 분포와 유속 분포로부터 얻은 표준 편차를 갖는 정규분포와의 비교는 그림 5의 (a)-(c)와 같이 나타난다. 그림 5의 (d)-(i)에 해당 조건에서의 속도 분포를 도시하였다.

각 경우의 %RMS 값과 ICAC 기준 만족 여부는 표 3에 정리할 바와 같다. ICAC EP-7-L 기준을 만족하는 경우는 c1 뿐이었으며, ICAC EP-7-H 기준은 모든 경우에 만족하였다. 이를 유속 분포를 정규분포로 가정하여 ICAC EP-7 기준을 만족하는 %RMS 값 (14.47% for EP-7-L and 22.24% for EP-7-H)과 유사한 범위를 갖는 것을 알 수 있다. 즉 c1의 경우, ICAC EP-7-L 기준을 만족하기 위해 개선된 %RMS 값은 12.26%이 되었으며, c2와 c3의 경우에는 ICAC EP-7-L 기준을 만족하지는 못 했지만 %RMS 값이 각각

19.08%와 22.47%에서 ICAC EP-7-H 기준을 만족하였다.

4. 결 론

전기집진기 내부 유동의 균일도를 판단하는 척도인 ICAC EP-7 기준과 %RMS에 대해, 특정 유속 분포에 대한 유동 균일도 기준 만족 여부를 비교하였다. 유속 분포가 정규 분포를 갖는 경우에 대해 %RMS 값 변화에 따른 ICAC 기준의 만족 여부를 살펴보았으며, ICAC 기준을 만족하는 경우의 최대 %RMS 값을 산출하였다. 또한 실제 전기집진기 유동 균일도 개선을 위한 최적화 과정에서 얻은 유속 분포 및 전기집진기 축소 모델 내부 유동 측정 결과를 이용한 사례 연구를 통해 유동 균일도에 대한 각 기준의 만족 여부를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ICAC 기준을 만족하는 경우, ICAC의 목표 배출량에 따른 상이한 기준(EP-7-L and EP-7-H)에 따라 유속 분포가 가질 수 있는 최대 %RMS 값은 각각 25.38%와 30.36% 이상으로 나타났다.

(2) 유속 분포를 정규 분포로 가정한 경우, ICAC 기준을 만족하는 %RMS 값은 각각 14.47% (EP-7-L)와 22.24% (EP-7-H)로 나타났다.

(3) 실제 유속 분포를 이용한 비교를 통해 ICAC EP-7-L을 만족하기 위한 %RMS 값은 12.26%로 유속 분포를 정규 분포로 가정한 경우 기준으로 얻은 14.47% 이하의 값으로 나타났으며, %RMS 값이 19.08%와 22.47%인 경우 ICAC EP-7-L 기준은 만족하지 못하지만 ICAC EP-7-H 기준은 만족하였다.

(4) 전기집진기 내부 유동의 유속 분포는 정규 분포로 표현할 수 있으며, ICAC 기준에 부합하는 정규 분포의 최대 %RMS 값으로 EP-7-L의 경우 14%, EP-7-H의 경우 22%를 제시할 수 있다.

참 고 문 헌

Chong, T.P., P.F. Joseph, and P.O.A.L. Davies (2008) A parametric study of passive flow control for a short, high area ratio 90 deg curved diffuser, Journal of

- Fluid Engineering, 130, 111104.
- Hong, W.S., Y.J. Kim, H.O. Choi, J.O. Lee, B.G. Ha, B.H. Ham, and K.S. Yu (1994) An experimental study on electrostatic precipitator, Proceeding of the Annual Meeting of KOSAE, 95-102. (in Korean)
- Hyun, K.T. and J.H. Chun (1997) Optimal Design of Wide Angle Diffuser in Electrostatic Precipitator, Proceeding of the KSME Fall Conference B, Paper No. 97F303, 733-738. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.J., W.S. Hong, H.O. Choi, B.H. Ham, C.S. Min, and K.S. Yu (1994) Experimental and Finite Difference Method (FDM) analysis on collection characteristics of electrostatic precipitator, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 10(1), 49-56. (in Korean with English abstract)
- Kwon, H.G., S.H. Park, H.H. Cho, and K.S. Park (2006) Effect of inlet diffuser-angle for flow uniformity of industrial Electrostatic Precipitator, Journal of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 18(4), 328-334. (in Korean with English abstract)
- Noui-Mehidi, M.N., J. Wu, I.D. Šutalo, and C. Grainger (2005) Velocity distribution downstream of an asymmetric wide-angle diffuser, Exp. Thermal and Fluid Science, 29, 649-657.
- Park, S.-H. and C.-Y. Park (2000) Effects of the block distance of collecting plate and particle size on the particle deposition efficiency in the two-stage electrostatic precipitator, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 16(2), 165-177. (in Korean with English abstract)
- Park, S.H., C.Y. Park, and T.K. Kim (2000) Effects of the block arrangement on the collection efficiency in the two-stage electrostatic precipitator with charging Plate, 16(6), 641-652. (in Korean with English abstract)
- Sahin, B. (1989) Pressure losses in an isolated perforated plate and jets emerging from the perforated plate, Int. J. Mech. Sci., 31(1), 51-61.
- Sahin, B. and A.J. Ward-Smith (1987) The use of perforated plates to control the flow emerging from a wide-angle diffuser, with application to electrostatic precipitator design, Heat and Fluid Flow, 8(2), 124-131.
- Sahin, B. and A.J. Ward-Smith (1990) Effect of perforated plates on wide-angle diffuser-exit velocity profiles, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 34, 113-125.
- Sahin, B. and A.J. Ward-Smith (1993) 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(2), 117-127.
- Sahin, B., A.J. Ward-Smith, and D. Lane (1995) The pressure drop and flow characteristics of wide-angle screened diffusers of large area ratio, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 58, 33-50.
- The Institute of Clean Air Companies (1997) Electrostatic Precipitator Gas Flow Model Studies, Publication ICAC EP-7.
- Ward-Smith, A.J., D.L. Lane, A.J. Reynolds, B. Sahin, and D.J. Shawe (1991) Flow regime in wide-angle screen diffusers, Int. J. Mech. Sci., 33(1), 41-54.