

전기집진기 (ESP) 덕트 내부 유동 균일화를 위한 연구

홍준형* · 황민승* · 한중호** · 최용철** · 성정모** · 황원태†

Optimization of Flow Uniformity in an Electrostatic Precipitator (ESP) Duct

Junhyung Hong*, Minseung Hwang*, Joungcho Han**, Woongchul Choi**,
Jeongmo Seong** and Wontae Hwang†

Abstract An electrostatic precipitator (ESP) is an industrial post processing facility for high efficiency dust mitigation. Uniformity of the flow passing through the inlet duct leading into the main chamber is important for efficient reduction of dust. To examine flow uniformity, this study conducted a numerical analysis of the flow within a scale-down ESP inlet duct. Magnetic resonance velocimetry (MRV) results from a prior study were utilized to validate the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) numerical simulations. Both the experimental and computational results displayed a similar recirculation zone shape and normalized velocity profile near the duct outlet for the baseline geometry. To optimize the uniformity of the flow, the number of guide vanes was modified, and the guide vanes were partially extended straight upward. Design evaluation is done based on the outlet velocity distribution and mass flowrate balance between the two outlets. Simulation results indicate that the vane extension is critical for flow optimization in curved ESP ducts.

Key Words : Electrostatic Precipitator (전기집진기), Computational Flow Visualization (전산 유동가시화), Guide Vane (가이드 베인), Flow Uniformity (유동 균일화)

기호설명

u : 유동의 x 성분 속도

v : 유동의 y 성분 속도

w : 유동의 z 성분 속도

v_{mag} : 유동의 3차원 속력

V_{inlet} : 입구의 평균 속력

† Corresponding author:

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Associate Professor
Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University
E-mail: wthwang@snu.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Undergraduate

** Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, MS student

1 서론

전 세계적으로 기후 위기가 다가오면서 환경 보호에 대한 주목도가 늘어나고, 발전 시설의 대기오염 물질 배출 저감의 중요성이 높아지고 있다. 현재 발전소 및 산업체에서 이용하는 전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)는 코로나 방전을 이용해 배출가스 속의 먼지나 미립자를

대전시킨 후 집진판에 응집시켜 제거하는 후처리 장치이다. 이때 전기집진기는 집진영역 직전의 유동 균일성이 높을수록 높은 집진 성능을 갖는다.^(1,2) 전기집진기는 많은 양의 연소가스를 후처리하기 위한 넓은 공간의 집진실이 필요하다. 그래서 각종 시설들 사이의 공간은 상대적으로 협소하다. 이러한 공간 제약으로 인해 90° 곡관부, 디퓨저 (diffuser) 등과 같은 급격한 형상 변화를 가진 구조물들이 사용된다. 이러한 복잡한 형상에서는 역압력 구배로 인한 유동 박리가 형성되어 유동 불균일성이 증대되기 때문에 집진효율을 감소시킬 수 있다. 따라서 불균일한 유동 형성을 방지하기 위해 가이드 베인 (guide vane)과 타공판 (perforated plate)이 전기집진기 내부에 설치되어 있다.

내부 유동 균일화를 위한 여러 선행연구들이 존재한다. Kwon⁽³⁾ 등은 전산유체역학 (computational fluid dynamics, CFD)을 통해 디퓨저의 확장각과 타공판의 설치 위치가 출구 속도분포에 미치는 영향을 분석했다. 디퓨저의 확장각이 클수록 하류가 더 불균일하며, 타공판이 디퓨저 입구 쪽에 가까울수록 벽제트 형태의 유동이 형성되는 것을 확인했다. Noh⁽⁴⁾ 등은 CFD를 이용해 유동 균일도를 기준으로 전기집진기 전단 덕트에 3개 이상의 가이드 베인은 필요하지 않으며, 분기 덕트와 연결된 중심 덕트 하단부 중앙에 설치한 직선형 베인이 높은 개선 효과를 보이는 것을 확인했다.

단순한 입구 형상을 갖는 집진기에 대해 CFD와 실험적 방법을 동시에 사용한 연구들도 진행되었다. Kim⁽⁵⁾ 등은 타공판이 설치된 집진기 모델에 대해 열선유속계 (Hot wire anemometer)와 CFD를 이용해 집진실 내부의 유동 균일성 개선을 목표로 타공판 개수, 배치를 최적화했다. Jędrusik⁽⁶⁾ 등은 입구에 가이드 베인, 디퓨저에 가이드 베인과 타공판을 설치한 집진기 모델에 대해 열선유속계와 CFD로 얻은 결과를 교차 검증했다.

또한 기초적인 곡관부 형상에서도 최적화를 위한 선행연구들이 존재한다. Valsala⁽⁷⁾ 등은 CFD를 이용해 곡관 내부 가이드 베인 개수와 레이놀즈 수의 관계를 압력 관점에서 연구해 레

이놀즈 수 10^6 에서 2개보다 많은 베인은 개선 효과가 적고, 더 높은 레이놀즈 수에서 3개의 베인이 적합하다는 것을 밝혀냈다. Hurtado⁽⁸⁾ 등은 CFD를 이용해 압력 강하 관점에서 곡관의 곡률에 따라 가이드 베인의 최적 개수가 0~4개로 달라지는 것을 알아냈다.

이전 연구들은 ESP 집진판 직전의 디퓨저 영역 및 간단한 단일 곡관 영역에서 발생하는 유동에 대한 연구가 대부분으로, 여러 개의 연속적인 곡관이 존재하는 실제 발전소 ESP 입구덕트의 형상을 모사한 영역에서 발생하는 유동에 대해서는 낮은 관심을 보였다. 또한 CFD만을 이용하여 유동을 분석하거나, 피토 튜브 등의 침습식 point 측정 방식을 사용한 실험적 기법을 통해 CFD결과를 검증했다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 침습적인 실험 기법은 내부 유동에 영향을 줄 수 있기 때문에 정확한 유동 결과를 얻는 것이 어렵다. 따라서 비침습적인 실험기법을 통해 CFD 결과의 정확성을 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 ESP 내부 유동에 대해 비침습식 3차원 유동 측정 방법인 자기공명유속계 (magnetic resonance velocimetry, MRV)를 이용한 기존 실험⁽¹²⁾ 결과를 이용하여 CFD 결과를 검증한 후, CFD를 통한 여러가지 가이드 베인 설계를 비교하며 유동 균일성 향상 개선안을 도출하고자 한다.

2 연구 방법

기존 MRV실험에 사용된 전기집진기 모형 (Fig. 1)은 실제 서부발전 화력발전소에서 사용하는 7, 8 호기의 도면을 참고해 1/120 scale로 제작하였다.⁽¹²⁾ 두개의 ESP chamber로 연결되는 입구 덕트 부분을 Fig. 2에 따로 나타내었다. 유동은 3단의 그리드 판으로 구성된 Flow conditioning 구간을 먼저 지난 후 다수의 가이드 베인이 있는 곡관을 통과하여 두 개의 덕트로 분기된다. 분기관 이후 유동은 각각 곡관 영역을 통과하게 되고 ESP 챔버 내로 유입된다. 실험 모델은 Idelchik⁽¹³⁾을 참고하여 제작했고 자세한 실험 셋업 설명은 Seong⁽¹²⁾ 등에 있다.

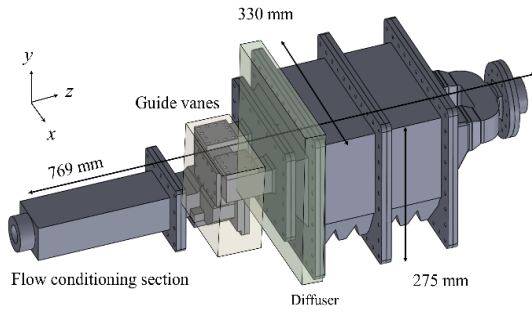


Fig. 1. ESP model geometry.⁽¹²⁾ Reproduced by permission from the Korean Society of Mechanical Engineers.

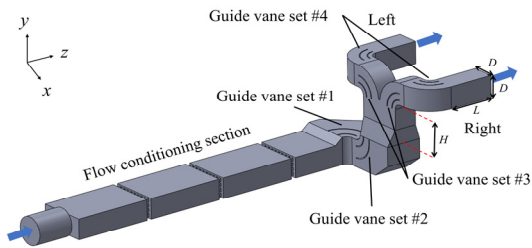


Fig. 2. ESP inlet duct model geometry

실험모델과 동일한 1/120 scale의 모델에 대해 ANSYS Meshing으로 격자를 생성한 뒤 ANSYS FLUENT 2021 R2를 사용해 유동해석을 진행했다. 계산에 필요한 격자 수를 줄이기 위해 Fig. 2에 나타난 입구 덕트 형상을 해석에 사용했다. 실험과 동일하게 원형 튜브로 유동이 유입된다고 가정했고 Flow conditioning 영역에는 세계의 grid가 있으며 fully resolved mesh를 이용하여 유동을 해석했다.

Fig. 3는 입/출구 압력 강하와 주 유동방향 속도의 RMS를 주요 변수로 한 격자 독립성 검증 결과를 나타낸 것이다. 속도 RMS는 유동의 균일도를 나타내는 지표로 자세한 설명은 뒤에서 다시 언급될 예정이다. 이때 Fig. 2에서 Guide vane set #2 후단 끝에서 set #3 전단까지의 중심 덕트 영역에서, $y/H = 0.12$ 인 평면에서 y 방향 속도 성분에 대해 계산했다. 격자 개수 증가에 따른 압력 강하 변화와 중심 덕트 속도 RMS 변화 모두 0.5% 미만으로 크게 줄어든 1920만개의 격자를 선정했다. 작동 유체는 실험과 동일하게 상온(26°C)의

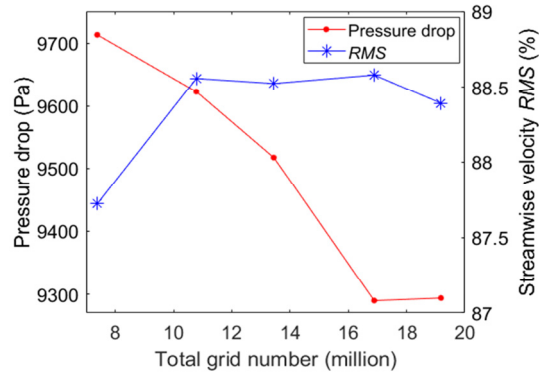


Fig. 3. Grid dependency test result

물을 사용했으며, 경계 조건으로는 1.235 m/s의 velocity inlet (60 LPM, $Re = 45,000$), gage pressure 0 Pa의 pressure outlet을 사용했다. 발전소의 실제 운영시 입구 유동의 레이놀즈 수는 $10^5 - 10^6$ 정도 이나, MRI 장비의 계측속도 한계와 20,000보다 큰 레이놀즈 수에서는 유동 특성이 실제와 비슷하다는 것^(14,15)을 고려해 실험과 CFD에서 동일하게 $Re = 45,000$ 의 조건을 사용했다. 비압축성 유동이므로 Pressure-based solver를 사용했으며, pressure-velocity coupling 알고리즘으로 Coupled, 공간 차분 방식은 second-order upwind를 사용했다. 해석은 정상 상태의 유동에 대해 진행했다.

RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 모델을 복잡한 형상의 ESP 내부 유동 해석에 적용하였다. 본 연구에서는 선행 연구에서 많이 사용한 standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용했다.^(16,17) 해석에 사용된 지배방정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] \quad (2)$$

이 때, \mathbf{U} 는 유동의 속도 벡터를 뜻하며, ρ 는 유체의 밀도, p 는 유체의 정압, μ 는 유체의 점성 계수이다.

유동의 균일도를 나타내는 지표로 산업체에서 많이 사용하는 RMS (Root mean square)를 사용하였고 다음 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$RMS (\%) = \frac{1}{|W|} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - W)^2}{N}} \times 100 \quad (3)$$

이 때, w_i 는 z 방향 속도 성분, N 은 속도 성분의 개수, 그리고 W 는 z 방향 속도 성분의 평균을 의미한다. RMS 는 0보다 큰 값을 가지며 0에 가까울수록 균일한 유동임을 의미한다.

3. 결과 및 토의

3.1 기존 가이드 베인 형상 및 유동 평가

CFD 해석 결과 검증을 위해 기존 형상에 대한 MRV 실험 데이터와 비교했다.⁽¹²⁾ Fig. 4는 Guide vane set #2와 이어지는 중심 덕트 내의 재순환 영역을 보여준다. Fig. 4(a)는 MRV 실험 결과에서 주 유동 방향의 속도가 음수인 지점을 붉은 색으로 나타낸 것으로, 아래쪽 가이드 베

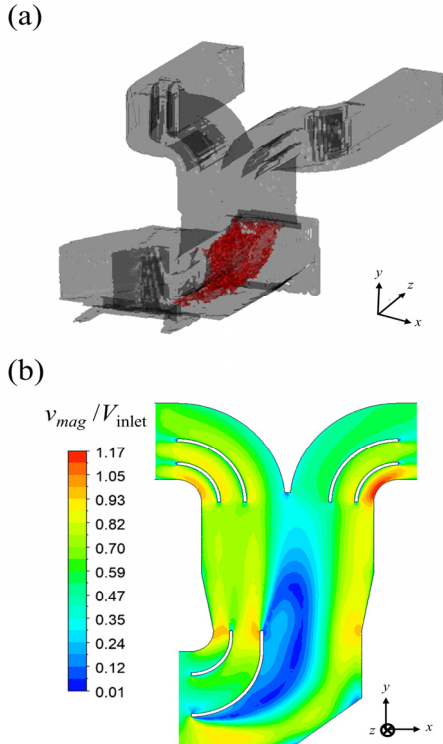


Fig. 4. Visualization of baseline recirculation zone using (a) MRV⁽¹²⁾, and (b) CFD velocity magnitude contour

인의 표면에서 박리가 일어나 중심 덕트 구간에 재순환 영역이 크게 나타났다. 이 때 속도가 0인 벽 부분은 제거했다. Fig. 4(b)는 CFD 해석 결과에서 중심 덕트의 중앙 단면에서 속도의 등고면을 나타낸 것이다. CFD 결과도 MRV 데이터와 유사한 형태로 아래쪽 베인을 따라 재순환 영역이 나타났다.

Fig. 5은 Guide vane set #4와 이어지는 좌/우

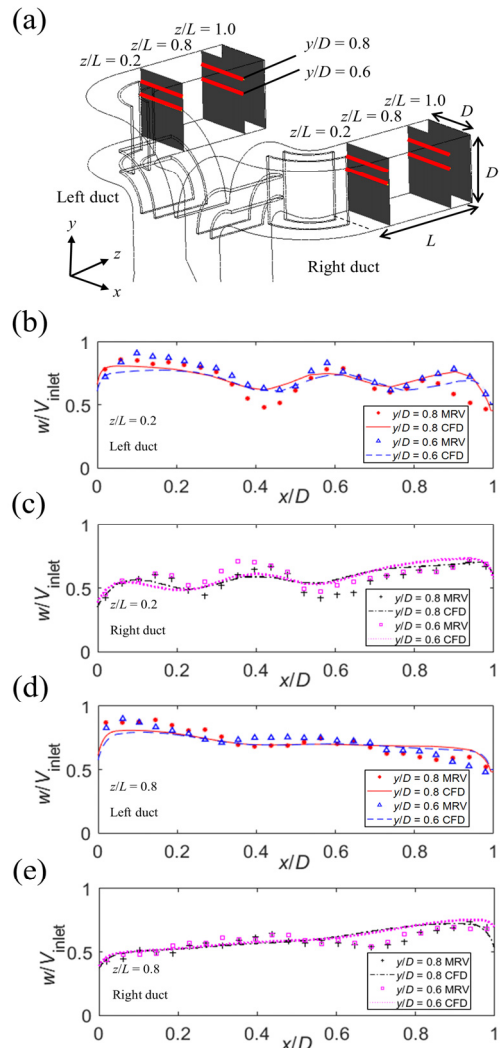


Fig. 5. (a) Schematic of ESP duct with locations of normalized velocity profiles from MRV⁽¹²⁾ and CFD in the (b) left duct $z/L=0.2$ plane, (c) right duct $z/L=0.2$ plane, (d) left duct $z/L=0.8$ plane, and (e) right duct $z/L=0.8$ plane

분기 덕트에서 $z/L = 0.2, 0.8$ 인 평면 내의 $y/D = 0.6, 0.8$ 인 직선에 대해 주 유동 방향 무차원 속도를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 이때 속도는 입구의 평균 유속으로 무차원화하였다. 해당 위치는 Fig. 5(a)에 나타냈다. 이때 L 은 Guide vane set #4의 끝과 덕트 출구 사이의 거리를 의미하며, D 는 덕트의 수직, 수평방향 길이를 의미한다. Fig. 5(b)와 (d)는 왼쪽 덕트, Fig. 5(c)와 (e)는 오른쪽 덕트를 비교한 것이다. $z/L = 0.2$ 인 평면을 나타낸 Fig. 5(b)와 (c)에서는 두 개의 베인을 지난 직후 유동이 베인의 위치에 따라 요동치는 형태의 속도 분포를 확인할 수 있다. $z/L = 0.8$ 인 평면을 나타낸 Fig. 5(d)와 (e)에서는 유동이 흘러가며 mixing의 영향으로 요동치는 정도가 줄어들어 비교적 평탄한 속도 분포가 나타난다. 모든 경우 90° 곡관부에서 꺾인 후 관성의 영향으로 좌/우 분기 덕트 각각 분기된 방향으로 치우친 유동이 관찰된다. MRV 실험과 CFD 해석 결과의 비교를 통해 CFD 해석이 실제 유동을 비교적 잘 모사한다고 판단된다.

좌/우 분기 덕트의 유량 비율을 확인한 결과 MRV는 54 : 46, CFD는 53.1 : 46.9로 기존 형상에서는 유량의 고른 분배가 일어나지 않는 것을 확인했다. 가이드 베인의 디자인 변경을 통해 중심 덕트의 재순환 영역을 줄이고 유량의 분기 비율을 더 균등하게 할 필요가 있다는 것을 파악하였다.

3.2 개선된 가이드 베인 형상 및 유동 평가

한개의 가이드 베인을 덕트 중앙에 배치하고, 쓸림 현상을 막아주는 전/후단 extension을 적용한 Luo⁽¹⁸⁾ 등의 연구와 두개 이상의 베인을 설치했을 때 가장 높은 유동 균일성을 얻은 Liou⁽¹⁹⁾ 등의 연구를 참고하여 전반적인 가이드 베인 개선 형상을 설계했다. 이때, 덕트 공간 상의 한계로 최대 두개의 베인을 사용했다. 중심 덕트의 큰 재순환 영역과 불균등 분기 문제를 해결하기 위해 중심 덕트의 상류에 위치한 Guide vane set #2의 조건을 변경했으며, 출구 유동 균일성 개선을 위해 Guide vane set #3, 4의 조건을 변경했다.

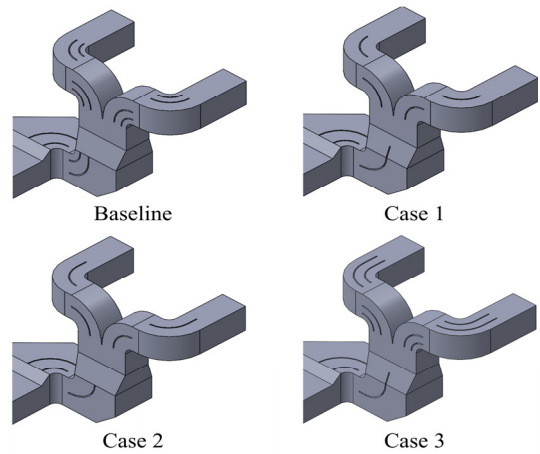


Fig. 6. Geometry of guide vane designs

Table 1. Guide vane designs for flow improvement

Design	Number of vanes (extension)			
	Set #1	Set #2	Set #3	Set # 4
Baseline	2	2	2	2
Case 1	2	1 (10mm)	1	1
Case 2	2	1	1	1 (10mm)
Case 3	2	1 (10mm)	2	2 (10mm)

적용한 개선 조건을 Table 1, 적용된 모습은 Fig. 6에 나타냈다. Case 1, 2에서는 재순환 영역 개선과 유량의 고른 분배를 위해 베인 개수를 한 개로 줄이고, 베인의 시작점과 끝점이 각각 덕트의 단면적을 1:1로 나누는 지점에 위치하도록 설계했다. 추가로 Guide vane set #2, 4의 후단 영역에서 각각 10 mm의 직선 구간을 연장하는 extension을 모델에 적용했다. Case 3는 출구 유동의 높은 균일성을 위해 Guide vane set #3, 4에 두개의 베인을 사용했으며, Guide vane set #2, 4 모두 10 mm extension을 적용했다. 두 베인의 시작점과 끝 점은 덕트의 단면적을 1:1:1로 나누는 지점이 되도록 했다.

Fig. 7은 전체 경우에 대해 중심 덕트 중앙 단면의 2차원 유선을 보여준다. 이때, 속력을 입구 유속으로 무차원화해 사용했다. 개선 형상들에서 공통적으로 Fig. 7(a)의 Baseline보다 재순환 영역의 크기가 대폭 줄어든 것을 확인할 수 있다. 전체 경우에 대해 Guide vane set #2와 #3 사이

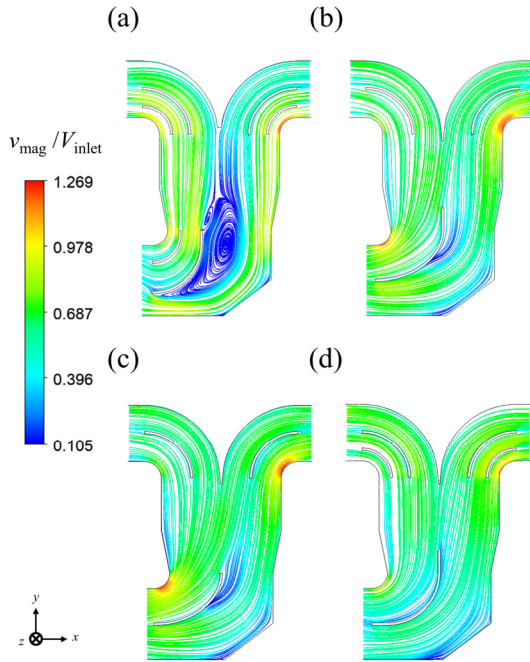


Fig. 7. Main duct streamlines for (a) Baseline, (b) Case 1, (c) Case 2, and (d) Case 3

에서 y 방향 속도가 0보다 작거나 같은 영역의 면적을 구한 뒤 입구 면적으로 무차원화했다. 그 결과 Baseline이 0.475의 값을 가졌고 나머지 개선안들은 값이 거의 0이었다.

또한 각 형상에서 좌/우 분기량을 조사해 보았다. Baseline 구조의 Fig. 7(a)에서는 가이드 베인의 큰 곡률로 인하여 흡입면 시작점부터 강한 역압력구배가 형성되어 유동박리가 바로 일어난다. 그리고 큰 후류가 형성되어 앞서 언급한 바와 같이 좌/우 분기 덕트의 유량 비율이 53.1:46.9로 불균일한 유동 분배가 이루어진다. Case 1의 Fig. 7(b)에서는 덕트 단면적을 1:1로 나누는 곡률이 완만한 가이드 베인 형상으로 인해 역압력구배가 비교적 약하게 형성되어 유동박리가 많이 지연되고 후류의 재순환 영역이 거의 생성되지 않는다. 또한 가이드 베인의 extension으로 인해 유선이 비교적 균등하게 좌/우로 분기되지만 좌측에서 우측으로 향하는 유동의 관성효과 때문에 유동이 오른쪽으로 조금 편중되는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 좌/우 유량 비율이 48.5:51.5로 Case 1에 비해 좌/우가 역전되

었지만 분기량이 다소 개선된 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 Case 2의 Fig. 7(c)에서도 완만한 가이드 베인 형상으로 유동박리가 많이 지연되고 후류의 재순환 영역이 거의 생기지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 extension이 없기 때문에 관성으로 인한 유동의 편류를 막아주지 못해 오른쪽 분기 덕트로 향하는 유동이 더 많다. 그 결과, Case 2에서는 좌/우 유량 비율이 46.9:53.1로 Case 1보다 더 불균등한 유량 분배가 나타났다. 따라서 분기 영역에서 extension이 유동의 관성으로 인한 편류를 막으며 유량의 균등 분기에 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Case 3의 Fig. 7(d)에서는 extension이 있는 완만한 가이드 베인의 흡입면에서 유동박리가 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 Guide vane set #3에 베인이 하나 추가되어서 유동이 상류부터 Guide vane set #2 베인을 따라 강제로 정렬되는 것으로 보여진다. 그 결과 좌/우 유량 비율은 Case 1보다 조금 더 개선되며 48.9:51.1로 가장 균등하게 나타났다. Table 2는 각 형상마다 양쪽 분기 덕트로 나뉘는 유량의 비율을 정리한 것이다. 개선 형상들에서 공통적으로 유동의 관성효과로 인해 오른쪽 덕트의 유량이 조금 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Flow rate comparison

Design	Left duct (%)	Right duct (%)
Baseline	53.1	46.9
Case 1	48.5	51.5
Case 2	46.9	53.1
Case 3	48.9	51.1

Fig. 8은 전체 경우에 대해 양쪽 출구의 주 유동 방향 속도를 입구의 평균 유속으로 무차원화한 등고면을 나타낸 것이다. Baseline의 경우 관성의 영향으로 유동이 한쪽으로 크게 쏠린 것을 확인할 수 있다. Guide vane set #1을 제외한 전체 베인 개수를 1개로 줄인 Case 1, 2에서는 두 영역, Guide vane set #3, 4를 2개로 늘린 Case 3에서는 세 영역에서 국부적으로 조금 높은 유속이 좌/우로 비교적 고르게 분포한다. Case 1에서는

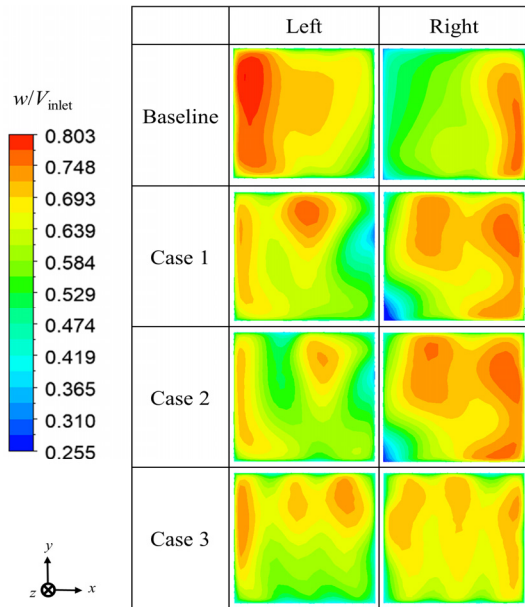


Fig. 8. Normalized velocity contours at left and right outlets

Guide vane set #2의 extension을 통해 정렬된 유동이 곡선 형상의 분기 덕트를 지나 출구 속도의 RMS가 좌측 12.9%, 우측 13.2%로 높게 나타나지만, Case 2는 분기 덕트를 지난 뒤 Guide vane set #4 extension으로 인해 유동이 정렬되어 출구 속도의 RMS가 좌측 10.7%, 우측 9.9%로 상대적으로 낮게 나타난다. Case 3의 경우 분기 덕트 진입 전/후로 유동이 정렬되었으며, 균등한 분기가 이루어져 오른쪽 출구 속도의 RMS가 8.1%로 가장 낮게 나타났다. 좌우 분기와 출구 속도 RMS 모두 Case 3가 가장 낮아 최적의 가이드 베인 개선안으로 나타났다. 각 단면에서 속도의 RMS값을 Table 3에 정리했다.

Table 3. Outlet velocity RMS comparison

Design	Left duct (%)	Right duct (%)
Baseline	10.4	13.7
Case 1	12.9	13.2
Case 2	10.7	9.9
Case 3	10.7	8.1

4. 결론

본 연구는 전기집진기 내부 유동 균일성에 영향을 주는 입구 곡관의 다양한 가이드 베인 설계에 대해 살펴보았다. 선행 MRV 실험과 CFD 해석 결과를 비교하여 기존 가이드 베인 형상은 급격한 형상 변화로 인해 큰 재순환 영역이 형성되어 좌우 분기가 균등하게 되지 않는 것을 확인했다. 추가로, 관성의 영향으로 덕트 출구에서 직진 곡관 영역의 바깥쪽으로 유동이 집중되어 ESP로 유입되는 유동의 균일성이 저하되었다. MRV와 CFD 결과의 재순환 영역 형상과 분기 덕트 단면의 속도 분포 비교를 통해 CFD 해석 검증이 이루어졌다.

검증된 CFD 해석을 바탕으로 case study를 통해 베인을 연장하는 extension이 재순환 영역 제거와 유동 균일성 개선에 중요한 역할을 하는 것을 확인했다. 곡관에 설치된 베인 후단 직진부에 extension을 추가했을 때 베인을 따라 유동이 정렬되어 관성에 의한 쓸림이 줄어드는 효과가 나타났다. 최종적으로 중심 덕트 상류와 분기 덕트 내 베인 두 곳에 extension을 추가하고, 중심 덕트 상류는 베인을 하나로 줄이면서 덕트 단면적이 등분되도록 각 베인 위치를 조정하면 재순환 영역의 크기가 대폭 줄어들면서 유동이 가장 균등하게 분기되고 또한 덕트 출구에서의 균일성을 나타내는 주 유동방향 속도의 RMS가 개선되는 효과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국서부발전의 지원으로 수행되었음 또한 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 서울대학교 실전문제연구단의 지원을 받아 수행되었음.(No. 2021-consignment-05, No. 2022HID8A3037391)

본 연구에서 사용된 Seong et al.⁽¹²⁾의 MRV 데이터는 대한기계학회의 사용 승인을 받았음.

REFERENCES

- 1) Idelchik, I., and Aleksandrov, V., 1974, "Effect of nonuniformity of gas-flow on efficiency of electrostatic precipitators," *Therm. Eng.*, Vol. 21, pp. 85-87.
- 2) Shin, W. H., Hong, W. S., and Song, D. K., 2010, "Relationship between standards for gas flow uniformity inside electrostatic precipitators," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, Vol. 26, pp. 234-240.
- 3) Kwon, H. G., Park, S. H., Cho, H. H., and Park, K. S., 2006, "Effect of inlet diffuser-angle for flow uniformity of industrial electrostatic precipitators," *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, Vol. 18(4), pp. 328-334.
- 4) Noh, K. W., Bae, S. J., Park, S. H., Kang, S. K., and Lee, J. M., 2013, "Design of a guide vane for improving inside flow uniformity of electrostatic precipitator," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 62, pp. 523-528.
- 5) Kim, D. U., 2020, "Flow field optimization in an electrostatic precipitator with perforated plates (Master's dissertation)," Chungbuk National University, Cheongju, Korea.
- 6) Jędrusik, M., Świerczok, A., and Łuszkiewicz, D., 2017, "Physical and numerical modelling of gas flow in electrostatic precipitator," *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 2, pp. 230-233.
- 7) Valsala, R. R., Son, S. W., Suryan, A., and Kim, H. D., 2019, "Study on reduction in pressure losses in pipe bends using guide vanes," *J. Vis.*, Vol. 22(4), pp. 795-807.
- 8) Hurtado, J. P., Villegas, B., Pérez, S., and Acuña, E., 2021, "Optimization study of guide vanes for the intake fan-duct connection using CFD," *Processes*, Vol. 9(9), 1555.
- 9) Kim, D. U., Jung, S. H., Shim, S. H., Kim, J. T., and Lee, S. S., 2019, "Flow distribution in an electrostatic precipitator with a perforated plate," *Clean Technol.*, Vol. 25, pp. 147-152.
- 10) Guo, B., Yu, A., and Guo, J., 2015, "Numerical modelling of ESP for design optimization," *Procedia Eng.*, Vol. 102, pp. 1366-1372.
- 11) Sahin, B., and Ward-Smith, A. J., 1987, "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*, Vol. 8(2), pp. 124~131.
- 12) Seong, J. M., Han, K. H., Park, H. J., Han, J. H. and Hwang, W. T., 2022, "Experimental analysis of the internal flow in an electrostatic precipitator using magnetic resonance velocimetry," *KSME-B*, Vol. 46(12) (to be published in 2022.12).
- 13) Idelchik, I.E., 2008, *Handbook of hydraulic resistance*, Begell House, New York, pp. 575-616.
- 14) Ryu, C. K., Shim, K. B. and Choi, S. M., 1999, "Flow optimization study of selective catalytic reactor by reduced scale model experiments and numerical simulations," *KSME-B*, Vol. 23(4), pp. 548-548
- 15) McTavish, S., Feszty, D. and Nitzsche, F., 2013, "Evaluating Reynolds number effects in small-scale wind turbine experiments," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 120, pp. 81-90
- 16) Swaminathan, M. R. and Mahalakshmi, N. V., 2010, "Numerical modelling of flow through perforated plates applied to electrostatic precipitator," *J. Appl. Sci.*, Vol. 10, pp. 2426-2432
- 17) Ye, X. L., Su, Y. B., Guo, B. Y., and Yu, A. B., 2016, "Multi-scale simulation of the gas flow through electrostatic precipitators," *Appl. Math. Model.*, Vol. 40, pp. 9514-9526.
- 18) Luo, J., and Razinsky, E. H., 2009, "Analysis of turbulent flow in 180 deg turning ducts with and without guide vanes," *ASME. J. Turbomach.*, Vol. 131, pp. 021011.
- 19) Liou, T. M., Lee, H. L., and Liao, C. C., 2001, "Effects of guide-vane number in a three-dimensional 60-deg curved side-dump combustor inlet," *J. Fluids Eng.*, Vol. 123(2), pp. 211-218.