ISSN 1738-8716(Print)
ISSN 2287-8130(Online)
Particle and Aerosol Research
Part. Aerosol Res. Vol. 17, No. 3: September 2021 pp. 71-79
http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.3.071

반응표면법을 활용한 축류형 사이클론 구조 최적화 설계에 관한 연구

조진일[1)] · 윤준호[1)] · 조영광[1)] · 석현호[2)] · 김태성[1),2)*]
[1)]기계공학부, 성균관대학교
[2)]나노과학기술원, 성균관대학교

(투고 2021년 7월 27일, 수정 2021년 9월 9일, 게재확정 2021년 9월 10일)

A Study on Optimum Design of an Axial Cylcone structure using Response Surface Method

Jinill Cho[1)] · Junho Yun[1)] · Yeongkwang Cho[1)] · Hyunho Seok[2)] · Taesung Kim[1),2)*]
1) School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
2) SKKU Advanced Institute of Nano Technology (SAINT), Sungkyunkwan University

(Received 27 July 2021; Revised 9 Sep 2021; Accepted 10 Sep 2021)

Abstract

Ultrafine dust, which is emitted from industrial factories or all kinds of vehicles, threatens the human's respiratory system and our environment. In this regard, separating airborne particles is essential to mitigate the severe problem. In this work, an axial cyclone for the effective technology of eliminating harmful dust is investigated by numerical simulation using Ansys 2020, Fluent R2. In addition, the optimized structure of the cyclone is constructed by means of multi objective optimization based on the response surface method which is a representative method to analyze the effect of design parameter on response variables. Among several design parameters, the modified length of the vortex finder and dust collector is a main point in promoting the performance of the axial cyclone. As a result, the optimized cyclone exhibits remarkable performance when compared to the original model, resulting in pressure drop of 307 Pa and separator efficiency of 98.5%.

Keywords: Axial cyclone, Separator efficiency, pressure drop, Optimization, Response surface method

1. Introduction

급격한 산업 발전과 도시화로 인해 발생하는 대기오염 문제를 해결하기 위해 많은 국가와 연구기관들이 노력을 기울이고 있다. 일반적으로 차량과 산업시설로부터 발생하는 대기오염 물질에는 미세먼지(PM 10), 초미세먼지(PM 2.5) 및 다양한 유해가스(CO_2, 이산화탄소; 질소산화물; O_3, 오존) 등이 있다(Kim et al., 2016; Oh et al., 2016). 이 중에서 미세먼지로 인한 경제적 손실과 국민 보건 등의

*Corresponding author.
Tel : +82-31-290-7466
Email : tkim@skku.edu

문제에 대한 근본적인 해결책은 국가적 차원에서 이루어지고 있다. 미세먼지(Particulate Matter)는 공기 중에 부유하는 고체 또는 액체의 미립자로, 그 크기는 수 마이크로 정도로 매우 미세하다. 이러한 미세먼지는 자연환경 뿐만 아니라 인체에도 악영향을 미쳐 천식, 기관지염 등 호흡기질환 등을 초래한다(Choi and Kyu, 2020). 또한, 고농도 미세먼지에 장기간 노출될 경우 심혈관, 안구 질환 등 각종 질병을 초래하여 사망률 증가 요인이 되고 있다(Dockery et al., 1993; Park et al., 2021). 이에 따라, 현재 위험 물질로 분류되고 있는 미세먼지를 줄이기 위해 필터(Filter), 전기 집진기(Electrostatic precipitation), 스크러버(Scrubbers), 사이클론(Cyclone) 등 다양한 집진 연구와 기술개발이 이루어지고 있다.

사이클론은 다른 집진 기술에 비해 미세입자(PM 2.5) 분리 성능은 떨어지지만, 낮은 유지보수 및 초기 설치 비용, 반영구적 사용, 대용량 처리 등의 많은 이점으로 인해 발전소 및 산업시설 등에서 전처리 장치로 널리 사용되고 있다(Hoffman et al., 2003). 고농도 입자 처리의 필요성과 전처리의 중요성이 높아짐에 따라, 사이클론의 집진효율을 높이기 위한 구조설계에 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 사이클론은 유동 방향과 출구 방향에 따라 접선유입식(Tangential)과 축류유입식(Axial)의 두 종류로 나누어진다. 접선유입식 사이클론은 유입기체가 수직 방향으로 꺾이는 반면, 축류유입식 사이클론은 기체가 한 방향으로만 계속 유동하고, 날개(Vane)에 의한 와류가 발생함으로써 접선유입식 보다 압력손실이 낮다(Tsai et al., 2004). 운용비용 측면에서는 분리효율 뿐만 아니라 압력손실 또한 중요한 요소로 작용된다. 최근에는 축류유입식 사이클론을 더욱 개선하여 일반 형태의 사이클론보다 효율적으로 사용하기 위한 방안이 제시되고 있다. Hsiao et al. (2010)의 연구에서는 여러 개의 축류유입식 사이클론을 낮은 압력에서 하나의 시스템 조합으로 구성하여, 분리 입도(Cut off size) 1.0 μm, 0.5 μm, 0.25 μm, 0.1 μm, 0.04 μm의 각 단계에서 높은 포집효율을 달성하였다. 축류유입식 사이클론은 접선유입식과는 다르게 내부에 설치되는 와류발생기(Swirl generator)가 와류 유동을 유도하여 입자의 운동손실을 가져오기 때문에 분리효율에 직접적인 영향을 미친다. 그리하여, Mao et al. (2019)는 날개의 개수, 각도, 지름에 따라 25개의 모델을 제작하여 직교 실험 계획법(Orthogonal experimental design)을 통해 최적화하였다. 그 결과, 입자 크기 180 μm ~ 250 μm에서 94.85%의 포집율과 870 Pa의 압력손실이 나타났다. 또한, Gopalakrishnan and Arul Prakash K. (2019)는 와류발생기의 길이, 날개 각도, 개수, 선회류 와류기(Vortex finder)와의 거리에 따른 포집율과 압력강하와의 관계를 연구하였다. 이와 같이 와류발생기 또는 단계별 사이클론 개선에 관한 연구는 많이 이루어져 왔지만, 축류유입식 사이클론의 입자분리 효율과 압력손실에 대한 외부 구조(Housing)와의 관계에 대한 연구는 충분하지 않은 상황이다.

본 연구에서는 축류유입식 사이클론의 외부 구조 설계치수(덕트길이, 선회류 와류기 지름과 길이, 입자 포집구 넓이)에 따른 분리 효율과 압력손실과의 관계를 평가하였다. CFD (Computational Fluid Dynamics) 수치해석 기반의 반응표면법(Response Surface Method)을 이용하여 구조 설계요소(parameter) 각각의 영향을 분석하였다. 최종적으로, 낮은 압력강하와 높은 포집효율에 적합한 설계점을 도출하였다.

2. Methodology

2.1 Numerical Models

유체역학적 분석을 위해 유한체적요소법(Finite volume method) 기반 CFD 프로그램인 Ansys 2020, Fluent R2를 사용하였다. 그림 1(a)와 같이 Ansys design modeler 프로그램을 이용하여 사이클론과 유동장을 설계하였다. 시뮬레이션 계산에는 압력-속도 결합 방법(Pressure-velocity coupling method) 기반의 SIMPLEC (Semi-implicit method pressure linked equations consistency) 알고리즘을 사용하였으며, 압력 흐름에 대해서는 PRESTO! (Pressure staggering option)을 이용하여 이산화하였다.

Table 1. The grid independence test

Mesh	Pressure drop	Error
8,214,621	1,011.1	-
4,001,421	1,013.3	0.215
2,014,561	1,072.5	6.068
1,354,621	1.097.8	8.57

그림 1(b)는 사이클론 유동장 설계에서 격자(Mesh)가 일정한 크기의 다면체(polyhedral) 모양으로 생성되었음을 나타낸다. 다면체 격자모양은 기존의 육면체(Hexahedral), 사면체(tetrahedral) 모양 격자인 경우에서의 결과와 비교할 때, 개수 대비 높은 정확성과 경제성을 나타낸다고 보고된 바 있다(Wang et al., 2021). 이번 연구에서 사용된 격자는 격자독립성 검정법(Grid independence test)을 이용하였다. 표 1은 격자 개수에 따른 압력손실과 오차율을 나타낸다. 압력손실 결과 오차율 5% 이내의 높은 신뢰성과 적정 계산 시간 등을 고려하여 약 4,000,000개의 격자로 연구를 수행하였다. 표 2에서는 그림 1(a)에 나타난 각 경계면에 대한 조건을 나열하였다. 기체 유입 속도는 4 m/s, 두 출구에서의 상대 압력은 0 Pa로 설정하였다. 또한, 벽면에서의 유동에 대한 경계조건을 점착조건(no-slip condition)으로 가정하였다.

Table 2. Boundary conditions applied in numerical simulation.

	Boundary Condition	DPM Condition
Inlet	Velocity inlet (4 m/s)	Escape
Outlet-1	Pressure outlet (0 Pa)	Escape
Outlet-2	0 Pa	Trap
Wall	No-slip condition	Reflection

2.2. Turbulent model

축류유입식 사이클론은 비등방성(anisotropic) 난류에서 높은 선회수(swirl number)와 강한 소용돌이도(vorticity) 등의 내부 유동 특성이 있으므로, 레이놀즈 응력 모델(Reynolds stress model, RSM); 또는 큰 에디 모사(Large eddy simulation; LES) 와 같은 난류 모델(Turbulent model) 계산법을 이용할 수 있

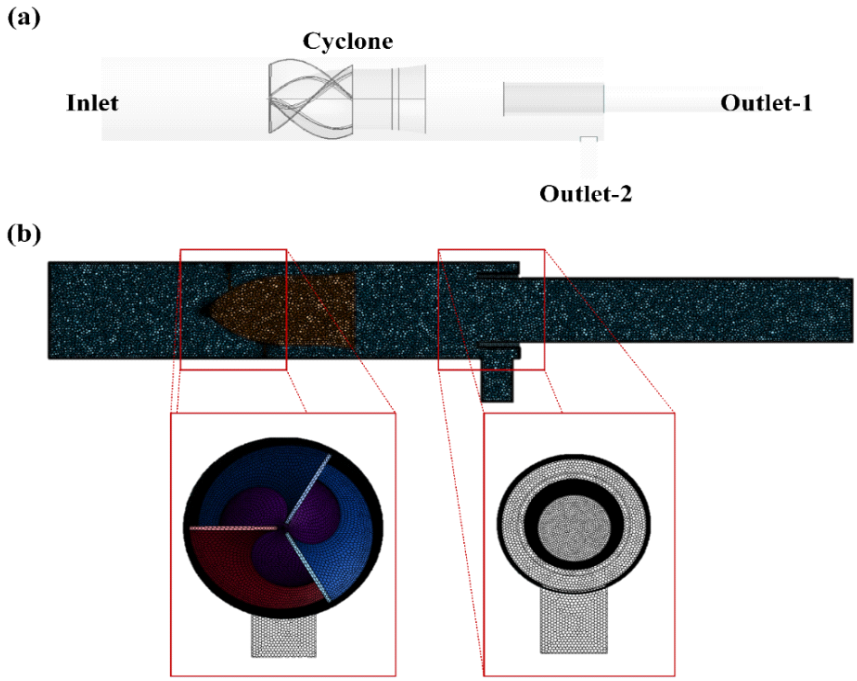

Figure 1. (a) Configuration and (b) grid system of an axial cyclone.

다(Hoekstra et al., 1999). RSM은 비등방성 난류에서의 두 가지 상 유동계산에 어려움이 있지만, LES보다 계산량이 작아 계산 시간이 짧다(Slack et al, 2000). 한편, LES는 큰 압력 구배(Pressure gradient)에 따른 열적 성층화(stratified)를 고려하지 않으므로, 경계층(boundary layer)에서의 예측성은 RSM보다 떨어진다. 따라서, 사이클론 내부 유동 분석에서는 RSM 방정식을 기본으로 하여 수치해석을 하였다.

2.3. Discrete Phase Modeling (DPM)

사이클론의 입자 분리효율과 내부 와류로 인한 입자 궤적을 분석하기 위해 오일러 라그랑주 방정식(Eulerian Lagrange equation) 기반의 이상유동 모델(discrete phase modeling; DPM)을 사용하였다. 뉴턴의 제 2 법칙에 따라 유동장(Fluid field)에 의해 입자가 받는 힘(Force)은 아래의 식(1) 로 나타낼 수 있다(Fluent, 2006).

$$m_p\frac{d\vec{u_p}}{dt}=m_p\frac{\vec{u}-\vec{u_p}}{\tau_r}+m_p\frac{\vec{g}(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+\vec{F} \quad \text{식 (1)}$$

m_p는 입자 질량, $\vec{u}$는 기체 상 속도, $\vec{u_p}$는 입자 속도, ρ는 유체 밀도, ρ_p는 입자 밀도, $\vec{F}$는 추가적인 힘, $m_p\frac{\vec{u}-\vec{u_p}}{\tau_r}$는 항력, τ_r는 입자 완화 시간(Relaxation time)이다. 입자 완화 시간은 아래의 식(2)으로 계산된다.

$$\tau_r=\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}\frac{24}{C_d Re} \quad \text{식 (2)}$$

μ는 유체의 분자 점성도, d_p는 입자 지름, Re는 상대적인 레이놀즈 수이다. 레이놀즈 수는 아래의 식 (3)으로 계산된다.

$$Re=\frac{\rho d_p\left|\vec{u_p}-\vec{u}\right|}{\mu} \quad \text{식 (3)}$$

초기유입 입자속도는 유체 속도와 같은 4 m/s, 입자 밀도 2000 kg/m^{3}으로 설정하여 계산하였다. 유동장에 유입되는 입자 지름은 10 μm 이며, 입자 간의 충돌은 무시하였다. 위의 표 1은 벽과의 탄성충돌(Reflection)과 출구 2번을 포집(Trap)으로 가정했을 때의 경계면 조건(boundary condition)에 따른 입자와 경계면과의 상관관계를 나타내고 있다.

2.4. Evaluating Performance

축류유입식 사이클론 포집 효율은 출구 2번(outlet-2)에서의 포집 입자 개수($N_{Trapped}$)를 유입입자의 총 개수(N_{Inlet})로 나누어 계산하였다. 아래 식 (4)는 효율(η) 계산 식이다.

$$\eta=\frac{N_{Trapped}}{N_{Inlet}}\times 100\,(\%) \quad \text{식 (4)}$$

또한, 압력 강하는 아래 식 (5)를 통해 계산하였는데, 사이클론 유입 전면적 평균 압력(P_{inlet})에서 출구 1번(outlet-1)의 평균 압력(P_{outlet})을 뺀 것과 같다.

$$\triangle P=P_{inlet}-P_{outlet} \quad \text{식 (5)}$$

2.5. Optimization Processing

최적설계점 도출을 위해 반응표면법을 토대로 한 다목적 유전 알고리즘(Multi objective genetic algorithm; MOGA)을 사용하였다. 이 방법은 빠른 수렴성과 높은 검지 능력 등의 장점이 있어서, 적정 모델 설정 등의 최적화 기법으로 다양한 분야에서 사용되고 있다(Lai et al, 2017). 다목적 유전 알고리즘은 유전학적 연산 알고리즘인데, 두 개 이상의 성능들로 이루어지는 목적 함수와 추가 가중치를 곱하여 모두 합한 함수이다(Grebenisan et al. 2017). 이는 다음 식 (6) 과 같이 나타낸다.

$$F(x)=w_1 f_1(x)+w_2 f_2(x)+\cdots \quad \text{식 (6)}$$

$f(x)$는 목적 함수, w는 항상 양수를 가진 가중치(weight)이며 모든 가중치의 합은 1이다.

$$\sum w=1 \quad \text{식 (7)}$$

Table 3. Design of points from Latin hypercube sampling.

No.	Input parameter				Output Parameter	
	P1 [cm]	P2 [cm]	P3 [cm]	P4 [cm]	$\triangle P$	η
0	50	9	10	6	364.819	88.46915
1	40.46875	12.07813	16.953125	7.015625	314.761	86.30384
2	40.78125	14.82813	16.484375	6.265625	243.669	72.07218
3	41.09375	4.859375	19.765625	6.453125	559.269	95.51804
4	41.40625	5.890625	5.703125	6.359375	463.643	96.35623
5	41.71875	7.609375	13.203125	5.234375	472.662	94.76717
6	42.03125	7.953125	15.546875	5.984375	420.41	95.66938
7	42.34375	8.640625	7.109375	7.671875	312.799	94.58091
8	42.65625	13.10938	5.234375	6.171875	178.292	84.3539
9	42.96875	10.70313	18.828125	6.640625	359.497	94.07451
10	43.28125	9.671875	11.796875	5.796875	343.34	90.93714
11	43.59375	13.45313	8.046875	7.203125	232.459	77.90454
12	43.90625	11.73438	8.984375	6.078125	273.899	85.82072
13	44.21875	6.921875	6.640625	5.609375	465.595	94.02794
14	44.53125	8.984375	6.171875	6.734375	313.747	91.71711
15	44.84375	5.546875	16.015625	7.953125	389.217	98.71944
16	45.15625	11.04688	17.421875	7.765625	300.899	93.33527
17	45.46875	4.515625	12.734375	7.296875	450.68	98.88824
18	45.78125	12.42188	13.671875	7.390625	261.334	85.18044
19	46.09375	14.48438	9.921875	7.484375	213.295	72.30501
20	46.40625	10.01563	7.578125	5.328125	316.558	87.81141
21	46.71875	11.39063	10.390625	5.046875	299.996	83.06752
22	47.03125	8.296875	15.078125	5.703125	394.191	94.2142
23	47.34375	7.265625	18.359375	5.890625	441.946	96.08848
24	47.65625	5.203125	10.859375	7.578125	390.106	98.45751
25	47.96875	13.79688	9.453125	6.921875	218.796	80.12224
26	48.28125	9.328125	11.328125	7.109375	303.692	93.35274
27	48.59375	10.35938	17.890625	5.140625	349.311	88.76601
28	48.90625	14.14063	19.296875	5.421875	252.752	73.08498
29	49.21875	12.76563	12.265625	7.859375	234.878	86.36787
30	49.53125	6.234375	14.140625	6.828125	433.715	95.1688
31	49.84375	4.171875	8.515625	5.515625	654.447	98.63213
32	40.15625	6.578125	14.609375	6.546875	430.482	97.81723

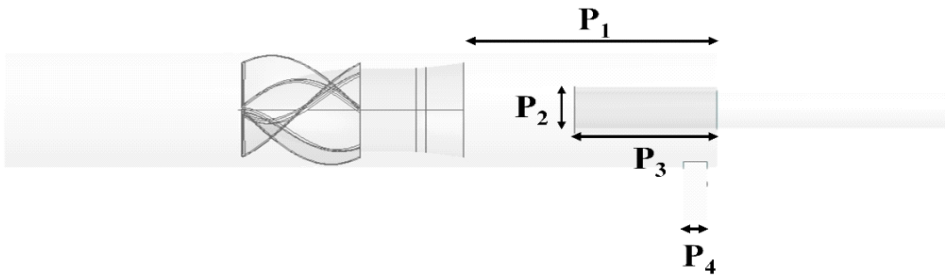

Figure 2. Structural parameter of an axial cylcone cyclone.

우선, 반응표면법을 사용하여 설계변수 각각의 영향을 분석하였다. 그림 2는 축류유입식 사이클론의 외부 구조 설계변수를 나타내고 있는데, P_1은 덕트 길이, P_2는 선회류 와류기, P_3는 선회류 와류기 길이, P_4는 먼지 포집구 넓이이다. 반응표면법을 나타내기 위해 위와 같은 입력요소(Input parameter) 바탕으로 한 충분한 설계점이 필요하다. 표 3과 같이, 중심 합성 계획법(Central composite design, CCD) 기반의 실험계획법인 라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법(Latin Hypercube Sampling) 을 사용하여 총 32개의 설계점을 도출하였다. 분리효율과 압력강하를 출력요소(Output parameter)로 설정하였으며, 선정된 모든 설계점에 대하여 유동 수치해석을 진행하였다. 도출결과를 바탕으로 비선형성(Non-linear)이 강한 크리깅 메타모델(kriging metamodel)을 사용하여 반응표면을 형성하였다.

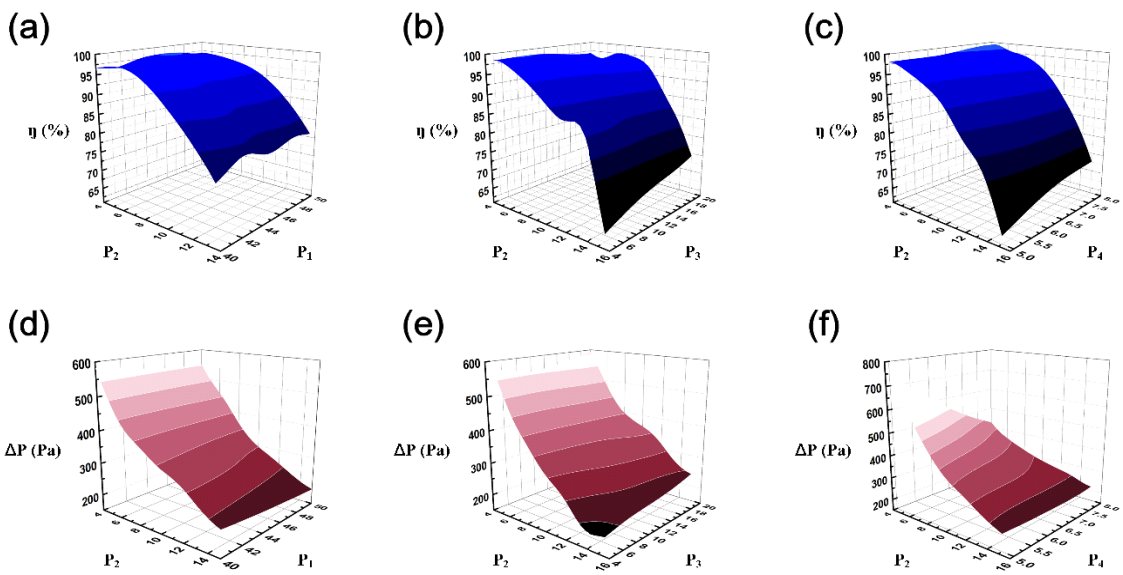

Figure 3. Response surface of separation efficiency and pressure drop as a function of a) and b) P_1 & P_2, b) and e) P_2 & P_3, and c) and f) P_2 & P_4.

3. Results and Discussion

3.1 Response Surface

그 결과, 그림 3과 같이 구조 설계변수에 의한 표면반응에 따른 입자 분리효율과 압력손실을 구하였다. 그림 3 (a-c)는 입자 포집효율을, 그림 3 (d-f)는 압력강하에 대한 반응표면을 보여준다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이, 구조 설계변수 중 P_2 선회류 와류기 지름을 제외한 나머지는 포집율과 압력강하의 설계점 변화에 크게 영향을 주지 않는다 점을 확인하였다. 분리효율과 압력강하에는 선회류 와류기 지름 크기의 변화가 가장 큰 변수임을 알 수 있으며, 지름 크기가 커질수록 분리효율과 압력강하가 낮아진다는 것을 확인하였다. 또한, 그림 3 (a-f)와 다른 그림 (f)에서는 구조 설계변수 P_4의 변화에 따라 압력손실이 낮아진다 점을 확인하였다.

3.2 Optimization Results

본 연구의 목적에 맞게 최적화된 사이클론에서는 높은 분리효율과 낮은 압력강하가 이루어져야 한다. 따라서, 위와 같이 두 출력요소(Output parameter)의 경향성에서 P_2의 영향이 나타나므로, 반응표면법에서는 설계변수 최적점에 대한 절충안이 필요하다. 앞서 설명한 다목적 유전 알고리즘을 통해 아래와 같이 목적함수와 제한조건을 설정하였다. 성능 제한조건를 기존 사이클론 모델의 포집율과 압력손실로 설정하였다. 해당 범위에 속하는 최적 설계점(x)을 구하는 식은 아래와 같다.

Find the solution x

To maximize separator efficiency ; $\eta > 88.47\%$

To minimize pressure drop ; $\triangle P < 364.82\,Pa$

이를 통해, 조건에 부합하는 최적 설계점을 도출하였고, 수치해석을 통해 계산된 변수 값의 상대오차를 평가하였다. 아래 표 4에 나타나듯이, 포집율 상대 오차는 6.8%, 압력강하 상대 오차는 1.3%로 높은 적합성을 보였다. 최종적으로, 도출된 설계점에서 기존 사이클론 모델 보다 57 Pa 더 낮은 압력강하와 14.1% 더 높은 포집율 등의 성능이 나타나고 있다.

Table 4. Comparison of output parameters from (C) calculated and (S) simulated.

	P1	P2	P3	P4	$\triangle P$	η
C	49	8.1	8	7.8	286	97.2
S					307	98.5

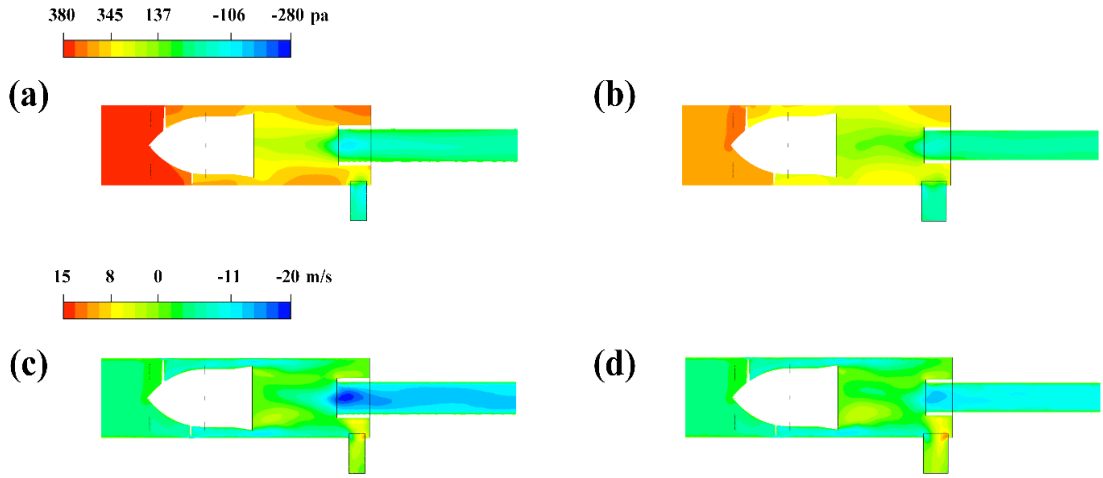

Figure 4. Contour of pressure drop of a) original model and b) optimized model, contour of tangential velocity of c) original model and d) optimized model.

3.3 Simulation Results

그림 4는 최적화된 모델과 기존의 사이클론 내부 유동을 분석하기 위해 y = 0인 평면 위에서의 압력과 접선 속도(Tangential velocity)를 등고선(contour)으로 나타낸 것이다. 그림 4 (a)와 (b)는 압력, (c)와 (d)는 접선 속도 등고선이며, (a)와 (c)는 기존 사이클론 모델을, (b)와 (d)는 최적화된 사이클론을 나타내고 있다. 도출된 설계점과의 비교를 통해, 설계 변수 P_4 입자포집부 넓이가 가장 크게 조정됨을 확인하였다. 출력요소의 경향성에 가장 큰 영향을 주는 변수 P_2의 보정점을 찾은 후, 그 외의 변수들을 조정하였다. 전체적으로 덕트 길이와 선회류 와류기 크기는 감소하였고, 선회류 와류기 길이와 입자 포집구 넓이는 증가하였다. 이에 따라, 사이클론 내부 압력의 변화는 기존 모델보다 크게 감소하였음을 알 수 있다. 입자 포집구로 향하는 입자가 작아진 선회류 와류기와 넓어진 출구를 통해 더욱 잘 빠져나가는 것으로 예상할 수 있다. 또한, 그림 4 (c)와 (d)와 같이, 두 개의 사이클론 내부 접선 속도는 거의 일정하지만, 선회류 와류기에서는 높은 속도차를 나타내고 있다. 이것은 거꾸로 흐르는 기체 와류로 인한 것이고, 길어진 선회류 와류기에 의해 오히려 기체가 불안정하게 빠져나간다는 것을 알 수 있다.

4. Conclusion

크리깅 반응표면법을 통해 각 설계 변수의 포집율과 압력강하에 대한 영향을 분석하였으며, 이를 바탕으로 다목적 유전 알고리즘을 이용하여 최적 설계점을 성공적으로 도출하였다. 그 결과, 실제 시뮬레이션의 낮은 상대오차율로 기존 사이클론 모델보다 더 우수한 성능임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 과제입니다(과제번호: 2016M3A7B49096).

References

Choi, J. K., Choi, I. S., Cho, K. K., and Lee, S. H. (2020). Harmfulness of particulate matter in disease progression, Journal of Life Science, 30(2), 191-201.

Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X.,, Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., ... and Speizer, F. E. (1993). An association between air pollution and mortality in six US cities, New England Journal of Medicine, 329(24), 1753-1759.

Fluent, I. N. C. (2006). FLUENT 6.3 user's guide, Fluent documentation.

Gopalakrishnan, B., and Arul Prakash K. (2019). Numerical analysis of multiphase flow through axial vortex tube cyclone separators, E3S Web of Conferences, EDP Science, 128, 06010.

Grebenişan, G., and Salem, N. (2017). The multi-objective genetic algorithm optimization of a superplastic forming process, using ansys®, In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 126, 03003.

Hoekstra, A. J., Derksen, J. J., and Van Den Akker, H. E. A. (1999). An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, Chemical Engineering Science, 54(13-14), 2055-2065.

Hoffmann, A. C., Stein, L. E., and Bradshaw, P. (2003). Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation, Applied Mechanics Reviews, 56(2), B28-B29.

Hsiao, T. C., Chen, D. R., Li, L., Greenberg, P., and Street, K. W. (2010). Development of a multi-stage axial flow cyclone, Aerosol Science and Technology, 44(4), 253-261.

Lai, G., Liu, J., and Zeng, F. (2017). Application of multi-objective genetic algorithm in ship shafting alignment optimization, In: 2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), IEEE, 2, 275-278.

Mao, Y., Pu, W., Zhang, H., Zhang, Q., Song, Z., Chen, K., and Han, D. (2019). Orthogonal experimental design of an axial flow cyclone separator,

Chemical Engineering and Processing Process Intensification, 144, 107645.

Oh, I., Yoo, W. J., and Yoo, Y. (2019). Impact and interactions of policies for mitigation of air pollutants and greenhouse gas emissions in Korea. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(7), 1161.

Park, J. S., Choi, S., Kim, K., Chang, J., Kim, S. M., Kim, S. R., ..., and Park, S. M. (2021). Association of particulate matter with autoimmune rheumatic diseases among adults in South Korea, Rheumatology, In press.

Slack, M. D., Prasad, R. O., Bakker, A., and Boysan, F. (2000). Advances in cyclone modelling using unstructured grids. Chemical Engineering Research and Design, 8(78), 1098-1104.

Tsai, C. J., Chen, D. R., Chein, H., Chen, S. C., Roth, J. L., Hsu, Y. D., ..., and Biswas, P. (2004). Theoretical and experimental study of an axial flow cyclone for fine particle removal in vacuum conditions, Journal of Aerosol Science, 35(9), 1105-1118.

Wang, W., Cao, Y., and Okaze, T. (2021). Comparison of hexahedral, tetrahedral and polyhedral cells for reproducing the wind field around an isolated building by LES, Building and Environment, 195, 107717.