

초소형 Lapple 사이클론 집진기의 수치적 성능평가

박수민* · 권재성†

Numerical Performance Evaluation of an Ultra-small Lapple Cyclone Separator

Sumin Park* and Jae-Sung Kwon†

Abstract The purpose of this study is to numerically evaluate the collection performance of an ultra-small Lapple cyclone separator for 1~10 μm particles introduced at flow rate of 10 L/min. The numerical evaluation reveals that a static pressure drop occurs more dominantly inside of the cyclone separator than at the inlet and the vortex finder. Also a fluid flow in the cyclone separator is confirmed to have a helical structure heading upward in the center of cyclone separator and downward in the vicinity of wall. The investigation on dust collection efficiency of the Lapple cyclone separator shows that particles of 4~8 μm diameters are collected at very lower efficiency than other sizes. Then, the cut-point diameter of the cyclone separator is 1.48 μm .

Key Words : Ultra-small Lapple Cyclone Separator(초소형 Lapple 사이클론 집진기), Collection Efficiency(집진효율), Grade Efficiency Curve(등급집진효율 곡선), Cut-point Diameter(절단입경)

기호설명

D Body diameter of a Lapple cyclone separator
 D_d Diameter of a dust exit
 D_x Diameter of a vortex finder
H Total height of a Lapple cyclone separator
 H_c Height of the conical section in the cyclone separator

S Length of a vortex finder
a Height of the inlet in the cyclone separator
b Width of the inlet in the cyclone separator
 d_{50} Cut-point diameter
 ΔP Static pressure drop
 Re Reynolds number

1. 서론

사이클론 집진기는 낮은 유지보수 비용과 넓은 작동온도와 같은 장점들 때문에 대규모 공장에서 배출되는, 입자의 직경과 비중이 비교적 큰 미세먼지들을 제거하는데 활발하게 이용되어 왔다. 일반적으로 사이클론 집진기의 구조는 입구, 원통, 원뿔, 그리고 선회류 출구(vortex finder)로 구성된다. 사이클론 집진기 입구로 유입된 미세

† Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Assistant Professor, Corresponding Author
E-mail: jsungkwon@inu.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Graduate Student

먼지를 포함한 유체는 압력과 점성력의 균형 속에서 원통 형태의 내부 벽면을 따르는 선형운동량의 변화로 인해 회전유동을 형성한다. 이 회전유동은 유체 속 미세먼지에 원심력을 가하게 되고, 이에 따라 그 미세먼지들은 사이클론 집진기의 벽면을 향하여 이동한다. 하류방향으로 흘러갈수록 미세먼지는 벽면에 더욱 근접하여 유동하고, 사이클론 집진기의 하부에 도달하였을 때 먼지통으로 집진이 이루어지면서, 정화된 유체가 사이클론 상부에 있는 선회류 출구를 통해 배출된다.

사이클론 집진기는 오직 원심력에 의존하여 입자들을 포집하기 때문에 약 $5\ \mu\text{m}$ 이하의 입자에 대해서는 낮은 집진효율을 보인다⁽¹⁾. 이 문제를 극복하기 위하여 최근까지 사이클론 집진기의 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. Erol et al.⁽²⁾은 0.7 m의 몸통 직경을 가지는 Stairmand 사이클론 집진기의 선회류 출구 직경에 따른 성능평가를 진행하였다. 선회류 출구의 직경이 감소할수록 집진효율과 압력손실은 증가하는 경향이 나타나는 것을 확인하였다. Qian et al.⁽³⁾은 0.2 m의 몸통 직경을 가지는 사이클론 집진기에 대해 입구의 각도에 따른 성능평가를 수행하였다. 입구의 각도가 증가할수록 압력손실은 감소하는 반면 집진효율은 증가하는 경향이 나타났고, 이때 최적의 집진효율은 45도의 각도에서 발생한다는 것을 확인하였다. Bara et al.⁽⁴⁾은 0.29 m의 몸통 직경을 가지는 Stairmand 사이클론 집진기에 대해 원통과 원뿔의 높이에 따른 성능평가를 수행하였다. 원통과 원뿔의 높이가 증가할수록 압력손실은 감소하고, 집진효율은 증가하는 경향이 나타났다. 그로부터 원통과 원뿔의 높이 변화는 각각 압력손실과 집진효율에 지대한 영향을 준다는 것이 확인되었다.

비교적 크기가 큰 사이클론 집진기에 대한 연구와 더불어 작은 크기의 사이클론 집진기에 대해서도 집진 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되었다. Elsayed et al.⁽⁵⁾은 0.031 m의 몸통 직경을 가지는 Stairmand 사이클론 집진기에 대해 입구 높이와 너비에 따른 성능평가를 진행하였다. 입구의 높이와 너비가 증가할수록

압력손실과 집진효율은 감소하는 경향이 나타났다. 이 연구를 통해 입구의 너비변화가 입구의 높이변화보다 집진효율에 더 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었고, 이때 입구 높이에 대한 너비의 최적 비율이 0.5 ~ 0.7인 것이 확인되었다. Kim et al.⁽⁶⁾은 몸통 직경이 0.0219 m의 크기를 가지는 사이클론 집진기에 대해 선회류 출구 직경과 유량의 크기에 따른 성능평가를 진행하였다. 선회류 출구의 직경이 증가함에 따라 집진효율과 압력손실은 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 몸통 직경에 근접할수록 집진효율은 계속 감소하는 반면 압력손실은 증가하는 경향을 확인하였다. 유량의 크기가 증가할수록 선회류 출구의 직경이 증가할 때와는 반대되는 경향이 나타났다.

최근까지 진행되어온 성능을 향상시키기 위한 대부분의 연구들은 규모가 큰 사이클론 집진기에 대해 수행되었다. 그와 더불어 실내공기정화에 대한 관심이 고조됨에 따라 작은 크기의 사이클론 집진기에 대해서도 활발하게 연구가 진행되어왔다. 그러나 소형 사이클론 집진기에 대한 연구사례를 살펴보면, 주로 몸체 직경이 0.02 m 이상인 Stairmand 사이클론 집진기에 초점이 맞추어져 있으며, 그보다 효율이 높다고 평가받는 Lapple 사이클론 집진기에 대한 연구사례는 극히 소수에 불과하다⁽⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 0.01 m의 몸체 직경을 가지는 초소형 Lapple 사이클론 집진기에 대하여 수치해석을 수행한다. 그 수치해석을 통해 사이클론 집진기 내부에서 형성되는 유동 패턴과 압력 분포, 그리고 집진효율이 분석된다. 본 연구의 수치적 결과들은 소형 Lapple 사이클론 집진기의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 공학적 방안을 제공할 것이다.

2. 수치해석방법

2.1 사이클론 집진기 내부 유체유동의 해석

Fig. 1은 수치해석에 사용된 사이클론 집진기의 외형도와 그 내부에 생성한 격자들을 보여준다. 사이클론 집진기 내부에 총 1,376,040개의 정

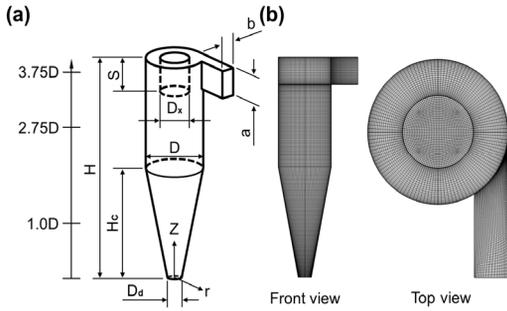


Fig. 1. (a) 3D geometry of a Lapple cyclone separator and (b) meshes generated inside the cyclone separator

Table 1. Geometric dimension of a Lapple cyclone separator

D_s/D	D_d/D	H/D	H_s/D	S/D	a/D	b/D
0.5	0.25	4.0	2.0	0.62	0.5	0.24

릴 격자를 생성하였으며, 해석의 정확도를 높이기 위해 입구와 사이클론 몸체가 만나는 경계면과 벽면 근처에 조밀한 격자를 형성하였다. Table 1은 그 Lapple 사이클론 집진기의 기하학적 비율을 나타낸다.

유체는 상온의 공기이며, 완전 발달 유동의 형태로 입구에서 집진기 내부로 유입되고, 벽면의 접선방향을 따라 회전한 후에 대기압에 노출된 선회류 출구를 통해 배출된다. 이때 사이클론 집진기의 벽면에는 점착 조건을 적용하였다. 사이클론 집진기 내부에서 발생하는 공기유동은 RANS $k-\omega$ 모델을 이용하여 해석하였고, 비압축성이며 등온조건하에서 정상상태로 발생한다고 가정하였다. 입구로 유입되는 유량의 크기는 10 L/min로 설정되었다.

2.2 사이클론 집진기 내부 입자유동의 해석

사이클론 집진기 내부의 입자유동 해석은 앞서 유체유동의 해석으로부터 획득한 3차원 유동장에 기반하여 수행된다. 입자해석 수행은 무작위로 분포된 2000개의 입자들을 사이클론 집진기의 입구로 한 번에 주입하는 것으로부터 시작되며, 모든 입자들이 사이클론 내부의 임의의 위

치 혹은 먼지통과 선회류 출구에 도달하였을 때 종료되는 것으로 설정하였다. 이때 입자들이 입구에서 선회류 출구로 이동하기 위한 시간을 충분히 보장하기 위해 해석시간은 유량의 크기와 사이클론 집진기의 전체 높이를 고려하여 0.5초로 설정하였다. 유체유동의 속도가 매우 낮으므로($Re \ll 1$) 유체 내 입자들은 기본적으로 스토크스 법칙(Stokes' law)을 만족하면서 이동하고, 사이클론 집진기의 벽면과 완전 탄성충돌하는 것으로 가정한다. 이때 입자와 유체, 그리고 입자와 입자 간의 상호작용은 무시한다. 추가적으로 입자들의 브라운 운동(Brownian motion)이 해석과정 간 고려되었다. 해석을 위해 선택된 입자는 구형의 플라이 애쉬(fly ash)이며, 그것의 밀도와 직경은 각각 2900 kg/m^3 과 $1 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ 이다.

3. 결과 및 논의

3.1 사이클론 집진기 내부 압력 분포

Fig. 2는 사이클론 집진기 내부의 정압분포를 나타낸다. 정압은 벽면에서 최대값을 가지면서 사이클론 집진기 몸체의 중심을 향하는 방향, 즉 r 방향으로 점진적으로 감소한다. 사이클론 집진기의 벽면 근처, 그리고 중심부에서 축 방향에 따른 정압의 변화는 서로 반대경향을 보인다. z 가 증가할수록 벽면 근처에서 정압은 증가하는 반면, 중심부에서 정압은 감소한다. 특히 선회류 출구 근방에서 음압영역이 관찰되는데, 이는 사이클론 집진기 내부유동의 강한 회전성에 기인한다.

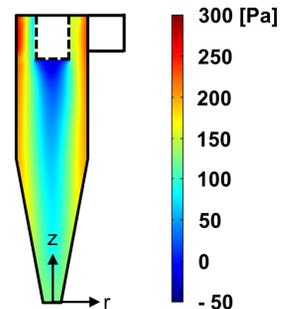


Fig. 2. Distribution of static pressure in the cyclone separator

사이클론 집진기의 압력강하는 입구와 집진기 내부, 그리고 선회류 출구영역에서 발생한다. 그 전체 압력강하의 대부분은 집진기 내부에서 이뤄진다. 이는 Fig. 2에서 관찰되는 집진기 입구와 선회류 출구에서의 평균 정압의 차이를 이용하여 간단하게 산술적으로 확인할 수 있으며, 그 값은 220.4 Pa이다.

3.2 사이클론 집진기 내부 속도장

Fig. 3은 사이클론 집진기 내부에서 발생하는 유체유동의 각 방향 속도장을 나타낸다. Fig. 3(a) 에서 보여진 r 방향 속도성분은 z 방향을 따라 반복적으로 변화하고, 그것은 우측 그림으로부터도 확인된다. 이는 사이클론 집진기 내부의 회전유동이 집진기의 축을 중심으로 나선 모양의 구조를 가지기 때문이다. Fig. 3(b)는 사이클론 집진기 내부의 접선속도 분포를 보여준다. 접

선속도는 사이클론 집진기의 중심부에서 r 방향을 따라 점진적으로 증가하다가, 벽면에서 전과되는 점성효과로 인해 다시 감소하는 변화경향을 보인다. 게다가 사이클론 집진기 내부에서 발생하는 압력손실로 인해, z 가 감소할수록 최대 접선 속도는 감소한다. Fig. 3(c)는 축 방향 속도 성분의 분포를 보여준다. 축 방향 유동은 사이클론 집진기의 벽면 근처와 중심부에서 각각 아래 방향과 위 방향으로 형성된다. 따라서 원심력으로 인해 사이클론 집진기의 벽면으로 이동한 입자들은 축 방향 유동을 따라 집진기 아래의 먼지통으로 이동하고, 정화된 공기는 중심부에 형성된 상부방향 유동을 따라 선회류 출구로 배출된다.

3.3 사이클론 집진기의 집진효율

Fig. 4는 입자의 직경에 따른 사이클론 집진기의 집진효율, 즉 등급집진효율을 나타낸다. 등급 집진효율은 각 입자의 크기에 대하여 입구로 주입된 입자의 개수와 먼지통으로 유입된 입자의 개수의 비율로 계산될 수 있다. 최초 2000개의 입자를 집진기 입구로 주입하여 분석한 결과, 2~3 μm 그리고 9~10 μm 직경의 입자들에 대해서는 집진효율이 100%에 근접한 반면, 4~8 μm 입자들의 집진효율은 상대적으로 낮은 값을 가진다. 그 이유로서 입자들의 최종위치를 나타낸 Fig. 5로부터 알 수 있듯이, 2~3 μm 와 9~10 μm 직경의 입자들은 사이클론 집진기 내부를 통과하여 모두 먼지통으로 유입된다. 하지만 4~8 μm 직경의 입자들은 사이클론 집진기 상부의 원통과 선회류 출구 사이에서 맴돌아 집진이 제대로 이루어지지 않는다. 이러한 입자거동의 차이로 인하여 Fig. 4와 같은 등급집진효율의 변화가 발생하였다. 1 μm 직경의 입자들은 0에 가까운 집진효율을 보이는데, 이는 입자에 작용하는 원심력의 크기가 매우 작기 때문이다.

앞서 입자의 개수 2000개에 대하여 획득된 등급집진효율의 신뢰성을 보장하기 위해 입자의 개수 10000개에 대해서도 동일한 수치해석을 수행하였다. 그 비교 결과는 2000개에 대한 결과와

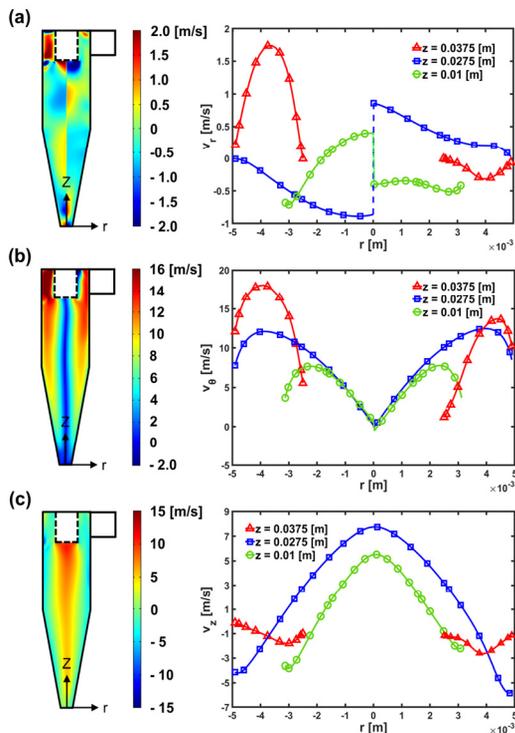


Fig. 3. Distribution of (a) radial, (b) tangential, and (c) axial velocity component in the cyclone separator

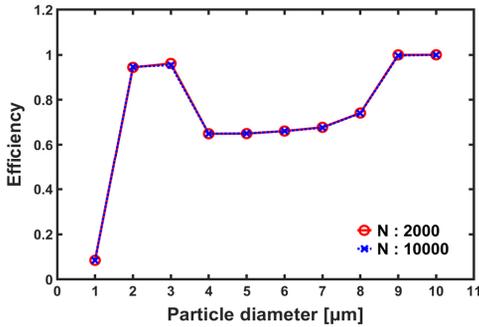


Fig. 4. Grade efficiency curve of the Lapple cyclone separator for the number of particles 2000 and 10000

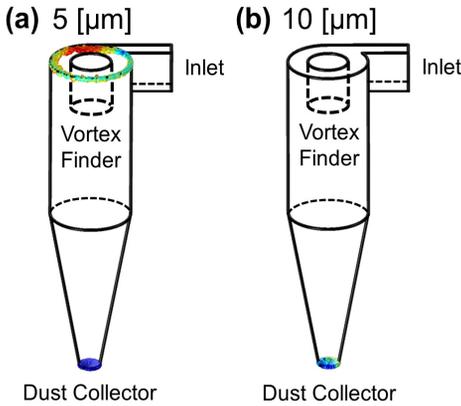


Fig. 5. Distribution of (a) 5 μm diameter- and (b) 10 μm diameter particles filtered and unfiltered by the Lapple cyclone separator

더불어 Fig. 4에 같이 주어졌다. 두 입자개수에 대한 등급집진효율의 변화는 동일하며, 이로부터 주입된 입자의 개수는 집진효율에 영향을 주지 않는다는 것이 수치적으로 확인되었다.

마지막으로 Fig. 4의 결과를 기반으로 본 연구에서는 Lapple 사이클론 집진기의 거시적 집진 성능이 평가되었다. 그 거시적 집진성능은 집진 효율이 50%인 입자의 직경을 나타내는 절단입경(d_{50})을 이용하여 정량적으로 평가되었다⁸⁾. 1차 보간식을 통해 계산한 결과, 본 연구의 수치 해석 대상인 Lapple 사이클론 집진기의 절단입경은 1.48 μm인 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 0.01 m의 몸통 직경을 가지는 초소형 Lapple 사이클론 집진기의 성능을 수치적으로 평가하였다. 수치해석을 통해 사이클론 집진기 내부의 압력 분포, 유동 패턴, 그리고 집진효율이 분석되었다. 사이클론 집진기 내 압력은 유동 방향을 따라 점진적으로 감소하였다. 사이클론 집진기의 입구와 내부, 그리고 선회류 출구에서 각 영역별 압력강하를 조사한 결과, 대부분의 압력강하는 사이클론 집진기 내부에서 발생하였으며, 그 크기는 220.4 Pa이다. 사이클론 집진기에서 유도되는 유체유동은 3차원 나선형 구조를 가졌다. 그 유동구조의 특징으로 인해 반경방향의 속도성분은 수직방향을 따라 반복적으로 변화하였다. 접선속도는 사이클론 집진기의 중심부에서 반경방향을 따라 점진적으로 증가하다가, 벽면에서 전파되는 점성 효과때문에 다시 감소하였다. 그 과정에서 관찰되는 최대 접선속도는 사이클론 집진기 내부에서 발생하는 압력 손실로 인해 유동하류방향을 따라 감소하였다. 축 방향 유동은 사이클론 집진기의 벽면 근처와 중심부에서 각각 아래 방향과 위 방향을 향하였다. 이에 따라 원심력으로 인해 사이클론 집진기의 벽면으로 이동한 입자들은 축 방향 유동을 따라 집진기 아래의 먼지통으로 이동하고, 정화된 공기는 집진기 중심부에 형성된 상부방향 유동을 따라 선회류 출구로 배출되었다. 마지막으로 Lapple 사이클론 집진기의 1~10 μm 직경을 가진 입자들에 대한 집진효율이 조사되었다. 그 결과 4~8 μm 입자들의 집진효율은 다른 입자 크기에 비해 상대적으로 낮았는데, 이는 그 입자들이 집진되지 않고 사이클론 집진기의 원통과 선회류 출구 영역 사이에 정착되었기 때문이다. 각 입자크기에 대한 집진효율을 기반으로 계산된 Lapple 사이클론 집진기의 절단입경은 1.48 μm로 평가되었다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구
임(No.2019R1C1C1008176).

REFERENCE

- 1) Dirgo, J., and Leith, D., 1985, "Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 4(4), pp.401~415.
- 2) Erol, H. I., Turgut, O., and Unal, R., 2019, "Experimental and Numerical Study of Stairmand Cyclone Separators: A Comparison of the Results of Small-scale and Large-scale Cyclones," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp.2341~2354.
- 3) Qian, F., and Wu, Y., 2009, "Effects of the Inlet Section Angle on the Separation Performance of a Cyclone," *Chemical Engineering research and design*, Vol. 87(12), pp.1567~1572.
- 4) Brar, L. S., Sharma, R. P., and Elsayed, K., 2015, "The Effect of the Cyclone Length on the Performance of Stairmand High-efficiency Cyclone," *Powder Technology*, Vol. 286, pp.668~677.
- 5) Elsayed, K., and Laco'r, C., 2011, "The Effect of Cyclone Inlet Dimensions on the Flow Pattern and Performance," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35(4), pp.1952~1968.
- 6) Kim, J. C., and Lee, K. W., 1990, "Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclone," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 12, pp.1003~1015.
- 7) Masoumeh, M., Shuran, L., Qinzhen, Z., Guanle, D., Zhen, L., and Keping, Y., 2019, "Performance Evaluation of a New Micro Gas Cyclone Using Simulation and Experimental Studies to Capture Indoor Fine Particles," *Advanced Powder Technology*, Vol. 30(6), pp.1151~1159.
- 8) Hoffmann, A. C., and Stein, L. E., 2002, *Gas Cyclones and Swirl Tubes*, Springer, New York, pp.45~56.