

# 단방향 사이클론의 유동 특성에 관한 수치해석적 연구

염정기\* · 쟁슈어\* · 신원규†

## Numerical Study on the Flow Characteristics of Uniflow Cyclone

Zheng-Qi Yan\*, Shuo Zhang\*, Weon Gyu Shin†

**Abstract** A uniflow cyclone has simple structure with a single channel in one direction. The one directional particle removal enables the uniflow cyclone to have compact size and low pressure drop. However, it has low collection efficiency compared to conventional cyclones. In this study, the effect of primary geometry on the performance of a uniflow cyclone with swirl vane is numerically investigated for the design of high performance uniflow cyclone. It is found that as the vortex finder diameter is increased, the pressure drop and the collection efficiency are decreased. Also, the same trend is predicted when the vortex finder height is increased. The best collection efficiency is predicted to be obtained when the vortex finder height is equal to the diameter of a cyclone. Reducing the body height by half will increase the pressure drop by 41%. When the body height is decreased, the collection efficiency is first increased and then decreased. The best collection efficiency is obtained when the body height is 4~5 times the cyclone diameter. Overall, the particle collection efficiency is highest when the  $D_v/D$  is equal to 0.3. But, the pressure drop is as high as 1592 Pa. Considering both collection efficiency and pressure drop, the best design is when  $D_v/D$ ,  $H_v/D$ , and  $H_b/D$  are equal to 0.5, 1, and 5, respectively.

**Key Words :** Uniflow Cyclone(단방향 사이클론), Cut-off size(절단 직경), Particle Collection Efficiency(입자 포집 효율), Pressure Drop(압력 손실)

### 1. 서론

미세먼지는 플랜트 및 자동차 배기 등 다양한 원인에 의해 발생되고 있으며 인체 건강에 유해할 수 있다고 알려져 있다. 이러한 미세먼지를 제거하기 위한 장치 중 하나인 사이클론은 저렴

한 비용과 안정적인 성능으로 인하여 광범위하게 사용되고 있다<sup>(1)</sup>.

사이클론의 성능은 입자 포집 효율과 압력손실에 의해 평가되며 일반적으로 입자 포집 효율이 높을수록 압력손실이 커지게 된다. 이전의 연구자들은 사이클론의 내부 구조 변경을 통해 높은 포집 효율과 낮은 압력손실을 갖는 사이클론을 개발해오고 있다<sup>(2)</sup>.

접선식 사이클론은 입구와 출구가 90°를 이루지만, 단방향 사이클론은 입구와 출구의 방향이 0°를 이룬다. 단방향 사이클론은 설치가 간단하

† Department of Mechanical Engineering,  
CNU, Professor  
E-mail: wgshin@cnu.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering,  
CNU, Student

고 운용 비용이 저렴한 장점을 가지고 있다<sup>3)</sup>.

접선식 사이클론과 관련한 연구는 상대적으로 활발하게 이루어졌다. 접선식 사이클론 내부의 형상 중에 몸체 높이, 콘의 크기, 그리고 볼텍스 파인더 직경과 높이가 접선식 사이클론의 성능에 영향을 준다고 알려져 있다. Lakhbir et al.은 접선식 사이클론 몸체 길이를 증가시키면 유동의 난류 강도가 감소하면서 압력 손실이 현저하게 감소하는 결과를 보여주었다. 사이클론 몸체 길이가 사이클론 직경의 5.5배일 때 1.5배인 경우에 비해 압력 손실은 34% 감소하고 포집 효율은 9.5% 향상되었다.<sup>4)</sup> Wu et al.은 접선식 사이클론의 볼텍스 파인더 직경이 사이클론의 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 1.4  $\mu\text{m}$  입자인 경우에 볼텍스 파인더 직경을 0.5D에서 0.4D로 줄이면 입자 포집 효율이 7.63% 증가하는 것을 보여주었다. 하지만 이와 동시에 압력손실은 증가하였다.<sup>5)</sup> Elsayed도 볼텍스 파인더가 접선식 사이클론의 성능에 미치는 영향에 관해 비슷한 결과를 제시하였다.<sup>6)</sup> 볼텍스 파인더 직경뿐만 아니라 높이도 접선 사이클론의 성능에 영향을 줄 수 있다. Hsiao et al.은 접선식 사이클론의 성능을 최대로 할 수 있는 최적의 볼텍스 파인더 높이를 제시하였다.<sup>7)</sup> Kenny는 볼텍스 파인더의 높이가 0.5D 이상으로 증가할수록 입자 포집 효율이 점점 감소하는 것을 보여주었다.<sup>8)</sup>

접선식 사이클론에 비해 베인 구조를 갖는 단방향 사이클론은 근래에 개발되었다. 단방향 사이클론은 기류의 유입 방향과 유출 방향이 동일하다. Pillei et al.은 스윙 베인을 가지고 있는 단방향 사이클론에 대해 스윙 베인의 각도가 15°이고 코어 직경과 사이클론 내경의 비율(스윙 베인의 통로 길이와 입구 직경의 비)이 0.125일 때 절단 직경이 25% 감소하는 것을 보여주었다. 그러나, 다른 주요부 형상이 사이클론 성능에 미치는 연구는 수행되지 않았다.<sup>9)</sup>

현재까지 단방향 사이클론에 관한 연구가 많지 않은 편이다. 본 연구에서는 스윙 베인을 이용하여 수직 방향으로 설치할 수 있는 새로운 형태의 단방향 사이클론을 설계하고 수치 해석을 통해 단방향 사이클론의 성능을 분석하였다.

또한, 단방향 사이클론 바디와 볼텍스 파인더의 크기가 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 단방향 사이클론의 몸체 높이, 볼텍스 파인더의 직경과 높이를 설계 변수로 선정하여 단방향 사이클론의 성능을 최적화하고자 하였다.

## 2. 2 모델링 및 수치 해석

### 2.1 사이클론 설계 및 모델링

본 연구에서는 입구 유량이 500 lpm인 단방향 사이클론을 설계하였다. Fig. 1은 단방향 사이클론의 도식도이다. 단방향 사이클론 직경( $D_i$ )은 72 mm이고 입구 높이는 140 mm, 그리고 볼텍스 파인더 벽두께( $T_v$ )는 1 mm이다. Table 1은 본 연구에서 고려한 각각의 case 별 사이클론의 주요부 치수를 바디 직경에 대한 비율로 보여준다.  $H_b$ 와  $H_v$ 는 각각 단방향 사이클론의 바디 높이와 볼텍스 파인더 높이이다.  $D_i$ 는 사이클론 직경이고  $D_v$ 가 볼텍스 파인더의 직경이다.

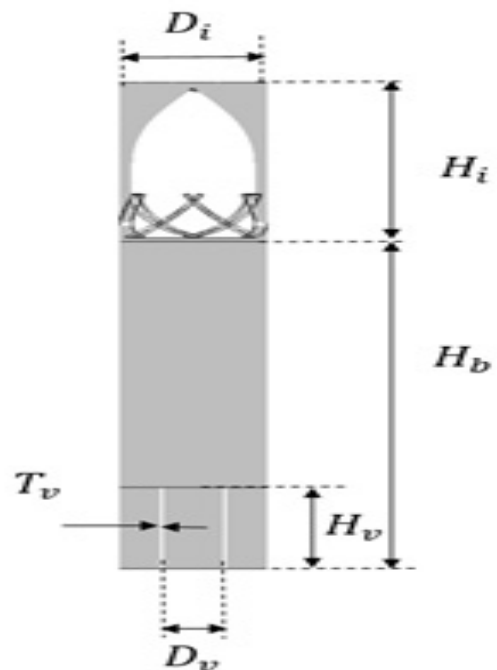


Fig. 1. Schematic diagram of uniflow cyclone

**Table 1.** Geometric dimensions of uniflow cyclone

Case	$D_v/D_i$	$H_v/D_i$	$H_b/D_i$
Case 1	0.3	1	4
Case 2	0.35	1	4
Case 3	0.4	1	4
Case 4	0.45	1	4
Case 5	0.5	1.5	4
Case 6	0.5	2	4
Case 7	0.5	1	4
Case 8	0.5	1	3
Case 9	0.5	1	5
Case 10	0.5	1	6

## 2.2 수치 해석

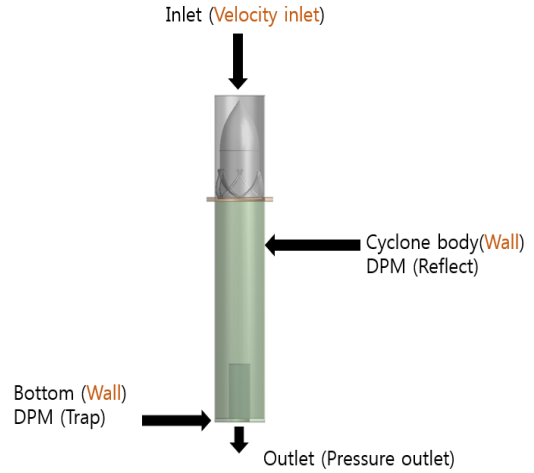
상용소프트웨어인 ANSYS 19.2 solver를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 비압축성유동 정상상태를 가정하였다. 압력항은 PRESTO!로 설정하였다.<sup>(4)</sup> 격자 수렴성을 확인하기 위해 100만 개, 200만 개, 300만 개 격자인 경우에 각각의 case로부터 얻은 압력 손실 결과를 Table 2에 정리하였다. Case 별로 격자 개수에 따른 차이가 7% 이내인 것을 확인하였고, 본 연구에서는 300만 개 격자를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

**Table 2.** Mesh convergence

(단위 : Pa)

Case	300만	200만	100만
Case 1	1592	1636	1588
Case 2	1100	1182	1156
Case 3	940	931	927
Case 4	787	754	765
Case 5	676	642	680
Case 6	700	684	692
Case 7	840	848	854
Case 8	759	750	768
Case 9	591	573	578
Case 10	536	542	540

Fig. 2는 수치해석에 이용된 경계 조건을 보여준다. 사이클론 입구와 출구는 각각 Velocity-inlet과 Pressure outlet으로 설정되었다. 바디 하단에 입자가 포집되기 때문에 바디 아랫면을 포집 조건으로 설정하였다. 입자가 바디 내벽에 충돌 후 튕겨 나오는 것으로 가정하여 바디 내벽을 반사 조건으로 설정하였다.



**Fig. 2.** Boundary conditions

### 2.2.1 지배 방정식

단방향 사이클론에 대해 수치해석을 수행하기 위해 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며 비압축성유동과 정상상태 조건을 가정하였다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\rho u'_i u'_j \quad (3)$$

여기서 아래 첨자  $i, j=1, 2, 3$ 은 직교좌표계의 방향을 나타낸다.  $u, P, \rho, \mu$ 는 각각 유체 속도, 압력, 밀도 및 점성계수이다.  $\tau_{ij}$ 은 Reynold 응력 텐서이고  $u'_i$ 과  $u'_j$ 은 유체의 변동 속도를 표시한다.

난류 모델로는 식 (4)와 같이 Reynolds Stress Model(RSM)을 이용하였다.

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = P_{ij} + D_{ij} - \epsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad (4)$$

여기서  $R_{ij}$ : 레이놀즈 응력,  $P_{ij}$ : 생성률,  $D_{ij}$ : 확산에 의한  $R_{ij}$  수송,  $\epsilon_{ij}$ : 소산율,  $\Pi_{ij}$ : 난류 압력-트레인 상호 작용에 기인한  $R_{ij}$  수송,  $\Omega_{ij}$ : 회전에 기인한  $R_{ij}$  수송.

### 2.2.2 Discrete Phase Model(DPM) 방정식

수치 해석법을 이용하여 입자의 궤도를 계산하기 위해 DPM를 이용하였다. DPM을 이용하면 입자에 작용하는 힘을 고려하여 입자의 운동 궤적을 얻을 수 있다. 항력, 중력, 그리고 부력만을 외력으로 고려한 경우 입자에 작용하는 힘의 균형은 식(5)과 나타난다.

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{C_d Re_p}{24} \frac{(u - u_p)}{\tau} + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (5)$$

여기서  $u_p$ 는 입자 속도,  $u$ 는 기체의 속도,  $C_d$ 는 항력 계수이다.  $\tau$ 는 입자의 체류시간이고 식(6)과 같이 표현된다.  $Re_p$ 는 입자의 레이놀즈수이고 식(7)과 같다.

$$\tau = \frac{c_d \rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (7)$$

여기서  $d_p$ 는 입자 직경,  $\rho_p$ 는 입자 밀도이다.

## 3. 3 결과 및 고찰

### 3.1 사이클론의 유동 특성

Fig. 3은 단방향 사이클론 내부에 형성된 유선을 보여준다. 유체는 스윙 베인을 지나간 후에 회전 유동의 형태를 띠게 되기 때문에 에어로졸 입자에 원심력을 작용할 수 있게 된다. Fig. 3은 유선이 사이클론 내부에서 회전한 후에 출구에 있는 볼텍스 파인더를 통과하기 위해 회전 직경이 줄어드는 것을 보여준다.

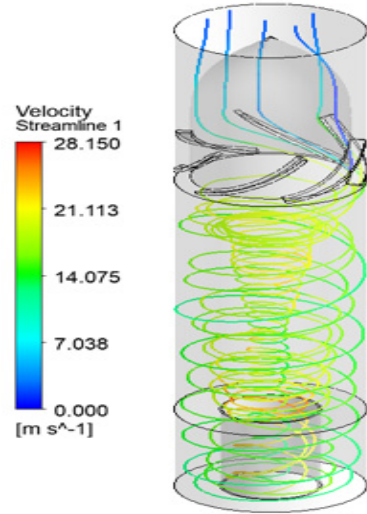


Fig. 3. Velocity streamline

### 3.2 압력 손실

압력손실은 내부 유동의 에너지 손실과 관계되기 때문에 사이클론의 성능을 평가할 때 중요한 요소로서 고려된다. 일반적으로 사이클론의 압력 손실은 사이클론 입구와 출구의 압력 차이를 나타낸다. Table. 2에 있는 case 별로 압력 손실을 계산한 후 볼텍스 파인더와 사이클론 몸체 크기가 압력 손실에 미치는 영향을 검토하였다.

먼저 볼텍스 파인더 직경을 다르게 하면서 압력 손실의 변화를 분석하였다. case 1( $D_v/D=0.3$ )은 압력 손실이 1592 Pa이고, case 5 ( $D_v/D=0.5$ )인 경우는 압력 손실은 676 Pa로 줄어든 것을 알 수 있다. 이를 통해 볼텍스 파인더의 직경이 40%로 증가할 때 압력 손실이 58% 감소한 것을 보여준다. case 5~7의 경우 볼텍스 파인더 높이에 따라 압력 손실이 19.5% 증가하는 것을 보여주었다. 전체적으로 볼텍스 높이보다 볼텍스 파인더 직경이 압력 손실에 주는 영향이 더 크다고 판단된다.

볼텍스 파인더 이외에 사이클론 바디 높이도 압력 손실에 영향을 줄 수 있다. case 8 ( $H_v/D=3$ )일 때 압력 손실은 759 Pa이고  $H_v/D=6$ 인 경우에는 압력 손실이 536 Pa로 감소하였다. 단방향 사이클론의 바디 높이가 증가하는 경우 압력 손실이 감소하는 것을 알 수 있다.

### 3.3 접선 속도

Zhao et al.은 사이클론의 압력 손실이 접선 속도와 큰 관계가 있는 것을 발견하였고 식(8)와 같이 접선식 사이클론의 압력 손실과 접선 속도 사이의 관계식을 제안하였다.[11]

$$\Delta P_{fr} = \frac{(\pi D/a)(\pi DL)f}{1/4\pi(D^2-d_e^2)} \left( \frac{1}{2} \rho V_t^2 \right) \quad (8)$$

여기서  $\Delta P_{fr}$ : 벽면과 마찰로 인해 압력손실,  $a$ : 입구 높이,  $V_t$ : 접선 속도,  $\rho$ : 기체 밀도,  $f$ : 마찰 계수,  $L$ : 사이클론 길이,  $D$ : 사이클론 지름,  $d_e$ : 출구 지름이다. 식(8)은 사이클론의 압력 손실이 접선 속도의 제곱과 정비례한다는 것을 보여준다.

사이클론 내부의 치수를 변화시켰을 때 압력 손실이 변하는 원인을 찾기 위해 접선 속도를 비교하였다. Fig. 4는 사이클론 바닥으로부터 75 mm 높이에서 각각의 case에 대해 반경 위치에 따른 접선 속도 분포를 보여준다.

Fig. 4(a)는 단방향 사이클론의 볼텍스 파인더 직경이 증가하면서 접선 속도가 감소하는 것을 보여준다. Table. 2의 압력 손실 경향과 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b),(c)를 보면 볼텍스 파인더 높이가 클수록 그리고 바디 높이가 작을 수록 접선 속도가 커지는 것을 보여준다. Fig. 4를 통해 사이클론의 내부 형상 치수는 접선 속도에 영향을 주고, 결과적으로 압력손실의 변화를 초래한다는 것을 알 수 있다.

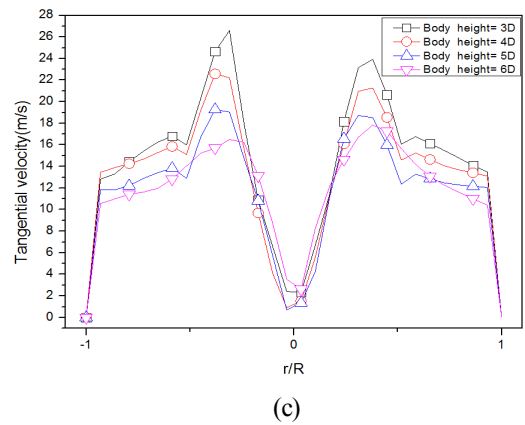
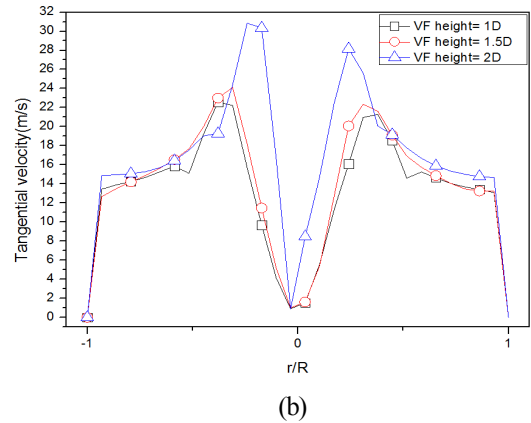
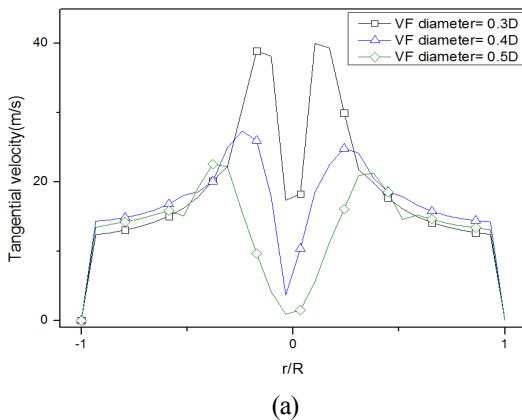


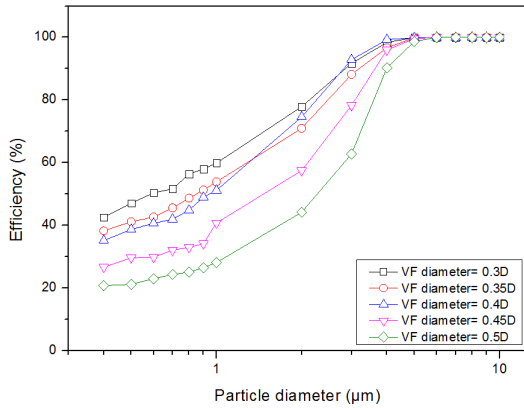
Fig. 4. Tangential velocity at 75 mm from the bottom of the cyclone according to (a) vortex finder diameter, (b) vortex finder height, and (c) body height

### 3.4 포집 효율

식 (9)을 이용하여 사이클론의 입자 포집 효율을 계산하였다.  $\eta$ 은 단방향 사이클론의 입자 포집 효율이고  $n_{trap}$ 와  $n_{track}$ 은 각각 사이클론의 입구에 주입한 입자 개수와 아랫면에 포집된 입자 개수를 나타낸다.

$$\eta = \frac{n_{trap}}{n_{track}} \quad (9)$$

Fig. 5로부터 볼텍스 파인더 직경이 감소했을 때 사이클론의 입자 포집 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. Table 2에 있는 각각의 case에 대한 절단 직경(cut-off size)을 Table 3에 정리하였다.

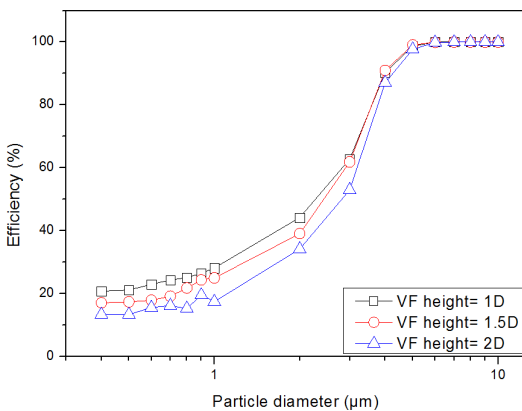


**Fig. 5.** Collection efficiency according to vortex finder diameter

절단 직경은 50% 제거 가능한 입자 크기를 나타낸다. 볼텍스 파인더 직경이 40% 감소할 때 절단 직경이 75% 감소하는 것을 알 수 있다. 볼텍스 파인더 직경이 사이클론의 입자 포집 효율에 크게 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다.

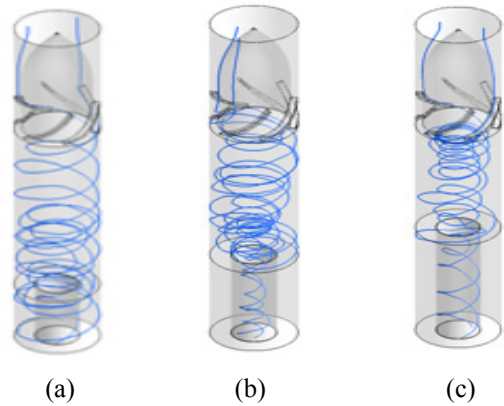
**Table 3.** Cut-off size according to vortex finder diameter.

Case	$D_v/D$	Cut off size( $\mu\text{m}$ )
Case 1	0.3	0.58
Case 2	0.35	0.87
Case 3	0.4	0.95
Case 4	0.45	1.8
Case 5	0.5	2.31



**Fig. 6.** Collection efficiency according to vortex finder height

Fig. 6에서 볼텍스 파인더의 높이가 증가함에 따라 입자 포집 효율이 감소하는 것을 보여준다. 볼텍스 파인더 높이는 증가함에 따라 입자 포집 효율이 감소한 원인을 찾기 위해 Fig. 7과 같이  $0.5 \mu\text{m}$  입자의 경로를 확인하였다. 볼텍스 파인더 높이가 클수록 입자가 바로 출구로 빠져 나가는 것을 볼 수 있다. 따라서, 볼텍스 파인더 높이의 증가는 입자 포집 효율에 부정적인 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다. Wang et al.은 접선식 하이드로 사이클론의 경우에 대해 비슷한 연구결과를 보여주었다.<sup>(12)</sup>



**Fig. 7.** Particle track according to: (a)  $H_v/D=1$  (b)  $H_v/D=1.5$  (c)  $H_v/D=2$ .

Table. 4는 사이클론 바디 높이에 따라서 각각의 case로부터 얻어진 절단 직경이다. 바디 높이가 3D부터 6D까지 증가하는 과정에 절단 직경이 먼저 감소하고 이후에 다시 증가한다. 따라서, 최대 입자 포집 효율에 해당하는 최적의 바디 높이가 존재한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 사이클론 바디 높이의 최적값이 4~5D인 경우 최대 입자 포집 효율을 얻을 수 있다고 판단되었다.

**Table 4.** Cut off size according to body height.

Case	$H_b/D$	Cut off size( $\mu\text{m}$ )
Case 8	3	2.53
Case 5	4	2.31
Case 9	5	2.31
Case 10	6	2.68

#### 4. 결론

수치해석을 통해 단방향 사이클론의 볼텍스 파인더, 바디의 크기가 사이클론의 성능, 즉 압력 손실과 입자 포집 효율에 영향을 미치는 정도를 파악할 수 있었다.

1. 볼텍스 파인더 직경이 감소하면 포집 효율이 증가하는 동시에 압력손실도 증가한다.  $D_v/D=0.3$ 일 때 입자 포집 효율이 가장 좋지만, 압력 손실이  $D_v/D=0.5$ 인 경우보다 58% 크다.

2. 볼텍스 파인더 높이가 증가할수록 입자 포집 효율이 감소하고 압력 손실이 커진다.

3. 사이클론 내부의 접선 속도와 입자 효율 회전 수가 입자 포집 성능에 영향을 줄 수 있다. 단방향 사이클론 바디 높이가 증가하면 접선 속도가 감소하지만 효율 회전수가 많아진 것을 알고 있다. 상반되는 효과로 인해 바디 높이의 최적값이 존재한다. 바디 높이( $H_b$ )가 4~5D일 때 입자 포집 성능이 가장 우수하였다.

전체적으로 압력 손실과 입자 포집 효율을 동시에 고려하면 단방향 사이클론의 볼텍스 파인더 직경, 높이와 바디 높이가 각각 0.5D, 1D, 5D 일 때 최적 성능을 얻을 수 있었다. 본 연구 결과는 단방향 사이클론의 설계에 있어서 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 연구는 충남대학교 연구장려장학금에 의해 지원되었음.

#### REFERENCE

- 1) Hsiao, T. C., Chen, D., Greenberg, P. S., and Street K. W., 2011, "Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones," *Journal of Aerosol Science* Vol. 42, pp.78-86.
- 2) Xiong, Z. Y., Ji, Z. L. and Wu, X. L., 2014, "Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones," *Powder Technology.*, Vol. 253, pp. 644-649.
- 3) Demir, S., Karadeniz, A., and Aksel, M., 2016, "Effect of cylinder and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones," *Powder Technology.*, Vol. 295, pp. 209-217.
- 4) Lakhbir S. B., Sharma R. P., and Khairy E., 2015, "The effect of the cyclone length on the performance of stairmand high-efficiency cyclone," *Powder Technology.*, Vol. 286, pp. 668-677.
- 5) Wu, X. M., and Chen, X. B., 2019, "Effects of vortex finder shapes on the performance of cyclone separators," *AIChE.*
- 6) Elsayed, K., and Lacor, C., 2013, "The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES," *Computers & Fluids*, Vol. 71, pp. 224-239.
- 7) Hsiao, T. C., Huang, S. H., and Hsu, C. W., 2015, "Effects of the geometric configuration on cyclone separator," *Aerosol Science*, Vol. 86, pp. 1-12.
- 8) Kenny, L.C., 1997, "Characterization and modelling of a family of cyclone aerosol preseparators," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 28, pp. 677-688.
- 9) Pillei, M., Kofler, T., Wierschem, A., and Kraxner, M., 2020, "Intensification of uniflow cyclone performance at low loading," *Powder Technology*, Vol. 360, pp.522-533.
- 10) Wu J. P., Zhang Y. H., Wang H. L., 2014, "Numerical study on tangential velocity indicator of free vortex in the cyclone," *Separation and Purification Technology*, Vol. 132, pp. 541-551.
- 11) Zhao, B. T., 2004, "A Theoretical Approach to Pressure Drop across Cyclone Separators," *Chemical Engineering Technology*, Vol. 27, pp. 1105-1108.
- 12) Wang. B. and Yu, A. B., 2008, "Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 135, pp. 33-42.