

소형 집진기용 접선식 및 축류식 사이클론 성능비교

이성원* · 이청민* · 윤정환†

Comparison of Tangential and Axial Flow Cyclones for Small Dust Collectors

Sungwon Lee*, Chungmin Lee* and Jong-Hwan Yoon†

Abstract The tangential and axial cyclones were fabricated using a 3D printer and the total collecting efficiency, cut-diameter, and pressure drop characteristics of the two types of cyclones with the same inlet area were investigated experimentally. The results show that the total collecting efficiency tends to increase as the inlet velocity increases. However, at a 20m/s condition of the tangential cyclone, the collected particles were re-entrained to the ascending vortex flow, resulting in a decrease of the total collecting efficiency. In the axial cyclone, the cross-sectional area is designed to increase at the inlet and the velocity is reduced, so that the re-entrainment effect does not appear in this study. The pressure loss of the tangential cyclone was larger than that of the axial cyclone. The cut-diameter tends to decrease with increasing the inlet velocity in two types of cyclones, except for the 20m/s condition of the tangential cyclone.

Key Words : Small Dust Collector(소형집진기), Tangential Cyclone(접선식사이클론), Axial Cyclone(축류식사이클론), Cut-Diameter(절단입경), Re-entrainment(재비산)

기호설명

- d_p : 입자 직경
- ρ_p : 입자 밀도
- ρ_a : 공기 밀도
- μ_a : 공기 점성계수
- V : 유입속도
- r : 사이클론 내부 반경

C_D : 항력계수

d_{50} : 절단입경

1 서론

최근 미세먼지 발생 및 제거와 관련된 문제가 연중 뉴스에 보도될 정도로 큰 사회문제가 되고 있다. 미세먼지는 우리의 호흡기 뿐 아니라 내분비계 교란과 심지어 암까지 유발한다는 연구결과도 있어, 이에 대한 연구와 관련 제품 개발이 필요한 실정이다. 국민의 건강과 삶의 질을 위협하는 미세먼지의 발생원인은 중국 등 국외에서 유입되는 경우도 있으며, 국내 산업체에서의 발생도 큰 부분을 차지한다.

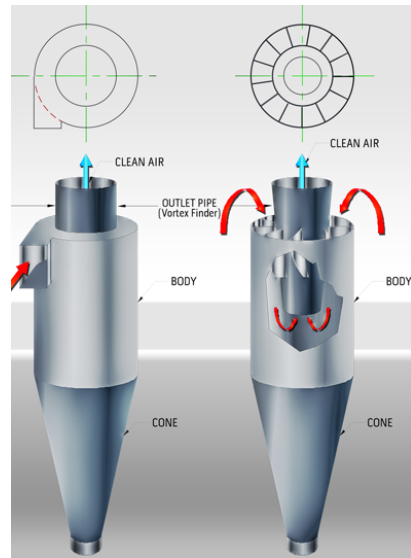
건설현장 또한 비산먼지 발생의 주요 원인 중

† School of Mechanical Engineering,
Daegu University
E-mail: jhyoon@daegu.ac.kr

* School of Mechanical Engineering,
Daegu University

하나이다. 건설현장에서 주로 발생하는 모래나 시멘트 가루 등의 비산먼지는 입자의 크기가 수 마이크로 단위이기 때문에 건설 현장 작업자 및 주변에 미치는 영향을 최소화 하는 방향으로 노력을 기울일 필요가 있다. 건설현장에서 발생하는 비산먼지를 효율적으로 제거하는 방법이 많이 있지만 일정 크기 이상의 입자를 효율적이고 경제적으로 제거할 수 있는 방법은 사이클론을 이용한 비산입자 제거 방법이다. 사이클론은 유입구의 위치를 기준으로 배출구와 수직인 접선식(tangential)과 수평인 축류식(axial)으로 구별할 수 있다(Fig. 1). 일반적으로 접선식이 집진효율은 높으나 압력손실이 크고 축류식은 그 반대라고 알려져 있다.⁽¹⁻³⁾ 압력손실은 집진기 가동 시 소모되는 소비전력과 직접 연관되기 때문에 접선식 사이클론이 소요동력과 입진효율 모두 큰 값을 가지는 것으로 결론내릴 수 있다. 반면 대부분의 산업현장에서는 제작이 쉽고 관련 이론과 실험식이 널리 보급되어 있는 접선식 사이클론이 주로 적용되고 있는 실정이다. 축류식 사이클론은 무엇보다 선회류를 생성하기 위한 날개의 설계의 기술적인 난이도가 높으며, 제작비가 높은 단점이 있기 때문에 관련 연구 및 실제 적용 사례가 부족한 현실이다. 그러나 최근 CFD를 통한 유동현상 분석의 보편화와 3D 프린터의 보급 확대로 인한 제작비 감소로 인해 축류식 사이클론의 설계 및 성능향상에 관한 연구 들이 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.^(4,5)

본 연구는 건설현장에 설치할 수 있는 소형 집진장치의 제작을 위한 기본 연구의 일환으로 기본적인 접선식 사이클론과 축류식 사이클론을 3D프린터를 이용하여 제작하고 소요동력 및 입자 분리 효율을 실험적으로 비교하였다. 이를 통해 건설현장을 포함한 산업현장에서의 국부적인 비산입자 제거를 위한 소형 집진기 개발을 위한 기본 연구 자료를 축적하는 것을 연구 목적으로 한다.



(a) Tangential Cyclone (b) Axial Cyclone
Fig. 1. Comparison of the tangential and axial cyclones⁽⁶⁾

2. 실험장치 및 방법

2.1 사이클론 내부유동 및 집진원리

사이클론 내부유동은 접선식 및 축류식 모두 유사한 특징을 가진다. 일정 유속으로 사이클론 유입구로 유입된 작동유체는 원통 내부에서 외부 선회류를 형성하면서 나선형으로 하강한다. 작동유체와 같이 유입된 입자들은 원심력에 의해 벽 쪽으로 이동하며, 이동하는 동안 충돌로 인한 입자의 응집 등의 현상이 동반되며, 벽에 충돌한 입자들은 운동에너지를 잃고 내벽면을 따라서 중력에 의해 바닥 쪽으로 진행하여 분진함에 집진 된다. 작동유체와 같이 유입된 작은 입자들과 분진함에 집진된 입자들 중의 일부는 사이클론 내부에 형성되는 상향 선회류에 의해서 상승한다. 사이클론의 운전 중에는 사이클론 상부 유출구 원통의 중앙부분은 음압으로 유지되기 때문에 이러한 상승기류가 형성되며 선회류 약화기를 통과하여 배출된다. 사이클론 내부의 입자가 받는 힘은 원심력, 항력, 중력으로 이 힘들의 상대적인 비로 인해 입자의 진로가 결정된다.

원심력(F_C)은 원운동을 하고 있는 물체에 나타나는 관성력으로, 구심력과 크기가 같고 방향은 반대이다. 원의 중심에서 멀어지려는 방향, 즉 바깥 방향으로 작용한다. 입자를 완전한 구형

$$\text{으로 가정하면 } F_C = \frac{\pi d_p^3 (\rho_p - \rho_a) V^2}{6r} \text{ 으로 나타}$$

낼 수 있다. 항력(F_D)은 작동유체에 의해 입

$$\text{자가 운동을 방해하는 힘으로 } F_D = C_D \frac{\pi d_p^2 \rho_a V^2}{8}$$

로 표시된다. 항력계수는 레이놀즈 수의 함수로 표현될 수 있다. 중력(F_g)은 중력가속도와 입자의

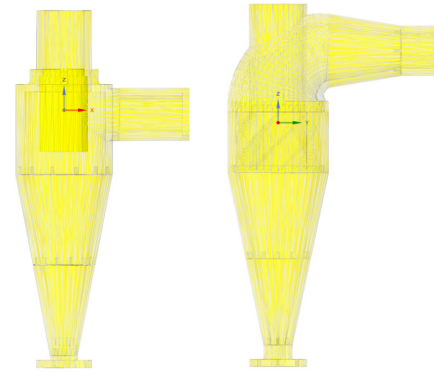
$$\text{질량으로 계산되며, 구형입자에서는 } F_g = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} g$$

로 계산할 수 있다.

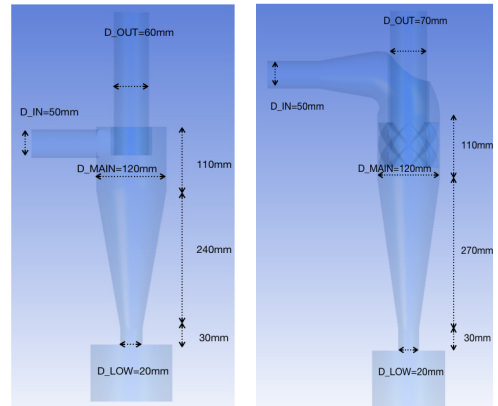
사이클론의 집진 효율은 일반적으로 유입된 입자대비 분리된 입자의 질량비로 간단하게 예측할 수 있지만, 입자직경이 클수록 높은 집진효율을 갖는 특성으로 인해, 50% 등급효율(grade efficiency)을 갖는 입자의 직경을 절단입경(cut-diameter, d_{50})으로 정의하여 널리 사용하고 있다.

2.2 3D 프린터를 이용한 사이클론 제작

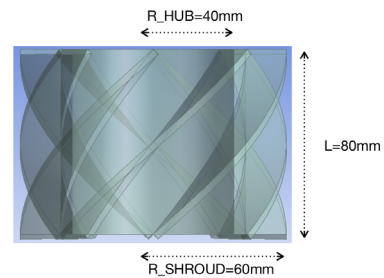
본 연구에 사용된 접선식 및 축류식 사이클론은 FDM 방식의 3D 프린터(Strasys uPrint SE)를 이용하였다. 사용 소재는 ABS Plus이며, 최대 프린팅 크기는 203x152x130 mm, 해상도는 0.254 mm이다. 접선형 사이클론은 Stairmand 표준모델을 기준으로 비율을 조정하여 설계하였으며, 유입구 단면은 조립성을 향상시키기 위하여 원형으로 변경하였다(Fig. 2). 축류식은 축방향으로 유입된 유동을 접선방향으로 유도하기 위한 유도날개(guide vane)의 세밀한 설계가 매우 중요하다. 본 연구에 사용된 축류식 사이클론은 입구 단면적을 포함한 외형을 가능한 접선형과 유사하게 유지하도록 설계하였으며, 8개의 유도날개를 적용하였다. 유도날개의 θ 각은 하단에서 최대 90도가 되도록 선형적으로 증가시켰다(Fig. 3).



(a) Tangential Cyclone (b) Axial Cyclone
Fig. 2. Cad data of the tangential and axial cyclones used in this study



(a) Tangential Cyclone (b) Axial Cyclone



(c) Guide Vane for the Axial Cyclone

Fig. 3. Dimension of two cyclones and the guide vane for the axial cyclone used in this study

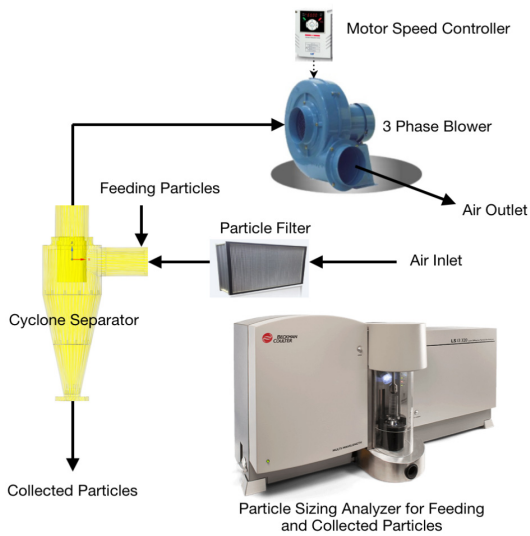


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental apparatus for cyclone efficiency measurement

3D 프린팅된 사이클론의 표면이 매끄럽지 않으며, 이에 따른 마찰력의 증가로 인해 사이클론의 분리 성능을 떨어뜨릴 수 있다. 또한 정전기에 의해 미세입자가 벽면에 흡착되는 현상을 방지하기 위하여 사이클론 내부 벽면을 테프론 스프레이 처리 하였다.

2.3 분리효율 및 압력강하 실험장치 및 방법

입자분리와 압력강하 특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 입자는 PTI사의 R2D1 NOMINAL 0-20 ATD로 0.3~20 μm 까지 입도분포를 가지고 있어 건설현장에서 비산되는 입자를 모사하는데 매우 적합하다. 사이클론 입출구에서의 입도분포는 Beckman Coulter사의 LS-13320를 사용하여 측정하였다. 본 장비는 PIDS(Polarization Intensity Differential Scattering) 기법과 레이저 산란법을 이용하여 0.017~2,000 μm 의 입자를 반복정확도 1% 이하로 측정할 수 있다. 입출구 압력차는 TESTO사의 512, 출구에서의 유속은 Reed사의 LM-81AM를 사용하였다. 압력차의 측정 정확도는 $\pm 0.5\%$, 유속의 측정정확도는 $\pm 3\%$ 이다. 송풍기는 실험유량과 예상되는 압력강하를 고려하여 선정하였으

며, 원활한 유량조절을 위하여 인버터로 쉽게 제어 가능한 3상 모델을 선정하였다. 사용된 LG SV015iG5A-1 인버터는 송풍기의 회전속도를 0.01Hz 단위로 세밀하게 조정할 수 있다. 실험 시 외부 입자의 유입을 차단하기 위하여 실험부 전단에 0.3 μm 기준 99.97%를 거를 수 있는 H13 등급의 HEPA필터를 설치하였다. 입구에서 입자를 균일하게 공급하기 위하여 진동을 이용한 입자 공급 장치 등이 추가로 필요하지만, 본 실험에서는 유동이 충분히 발달한 후, 입구에서 밸브를 이용하여 입자를 주입하였다. 실험과정은 다음과 같다.

- 투입입자의 최초 입도분포를 2개의 이상 측정하고 결과를 평균한다.
- 인버터의 주파수를 변화시켜 송풍기의 출구에서 유속을 측정하여 입구유속 혹은 유량을 설정한다.
- 투입입자의 질량을 사전 측정하고 송풍기의 유속이 정상상태에 도달 한 후 입자를 투입한다.
- 모든 입자가 투입되고 분진함에 입자가 완전히 분리될 때까지 송풍기를 작동한다.
- 분진함을 분리하여 분리된 입자의 질량 및 입도분포를 측정한다.
- 입출구의 압력손실을 측정한다.

3. 결과 및 토의

3.1 접선식 사이클론 실험결과

Fig. 5는 접선식 사이클론에서 측정된 유입속도 변화에 따른 집진입자 입도분포 변화결과이다. 비교를 위하여 실험 전 미리 측정한 입자의 최초 입도분포를 동시에 표시하였다. 입구유속 5m/s 조건에서는 분급된 입도분포는 8 μm 근방에서 최대치를 갖지만 전반적인 분리효율을 낮게 나타냈다. 10 m/s조건에서는 분리되는 입자의 질량이 전반적으로 증가하였으며, 입도분포 최대치가 20 μm 근처에서 발생하였다. 입구유속을 15m/s로 증가시킬 경우 분리되는 입자의 질량이 급격하게 증가하며, 12 μm 근처에서 입자분포의 최대값을 갖는다. 반면, 20 m/s로 입구유속을 증

가시킬 경우 오히려 분리되는 입자의 질량이 다시 감소하고 분리된 입자분포의 최댓값이 다시 14 μm 근처로 증가하는 특성을 보인다. 이러한 현상은 입구유속 증가로 인해 하부에 집진되었던 입자들이 재비산(re-entrainment)하는 현상에 기인한 것으로 보인다.⁽⁷⁻⁸⁾ 15 m/s와 20 m/s 입구유속 조건에서 15~30 μm 구간에서는 입구에 비해 출구에서의 입도 분포가 크게 나타나 분리효율이 100%이상으로 나타나는 구간이 발생한다. 이는 실험 전 측정된 초기 입도 분포의 대표성이 부족하여 발생할 수도 있으나, 빠른 유속 조건에서는 분진함 내부의 입자간의 응집현상에 의한 것으로 예상된다.

Fig. 6는 유입속도 및 입자직경에 따른 접선식 사이클론의 등급효율 변화결과이다. 등급 효율은 사이클론 집진기가 특정 크기의 입자를 분리할 수 있는 능력 혹은 효율은 의미한다. 입구유속이 5 m/s에서는 22% 정도의 낮은 등급효율을 입자 직경에 상관없이 유지하고 있다. 입구유속을 10 m/s와 15 m/s까지 증가시킬 경우 등급효율이 상승하는 결과를 보인다. 반면 입구유속 20 m/s에서는 등급효율이 감소하는 특성을 보인다. 이러한 현상 또한 재비산현상에 기인한 것으로 보인다. 등급효율 측정 결과 본 실험에 사용된 접선식 사이클론에서는 입구유속 20 m/s 이상으로 운전할 경우 분리 효율이 매우 악화 되는 것을 의미한다.

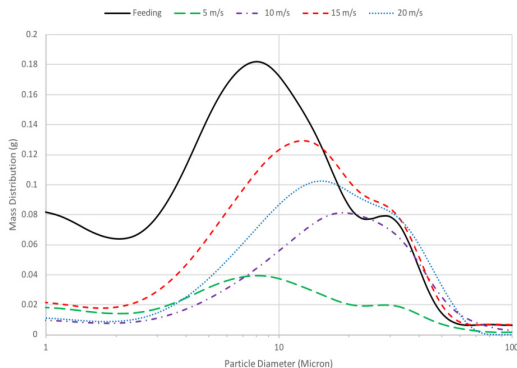


Fig. 5. Collected particle size distribution of the tangential cyclone

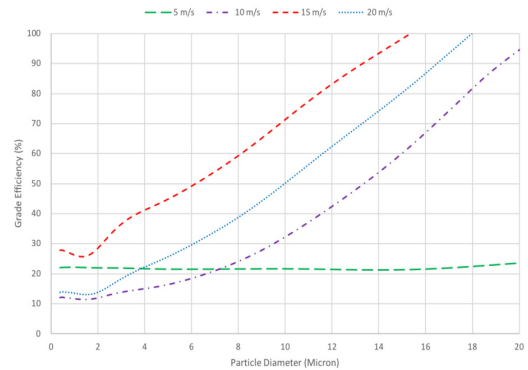


Fig. 6. Grade efficiency variation of the tangential cyclone

3.2 축류식 사이클론 실험결과

Fig. 7은 축류식 사이클론에서 측정된 유입속도 변화에 따른 집진입자 입도분포 결과이다. 상대적으로 접선식에 비해 낮은 입자분포 결과를 보인다. 이는 전체집진효율이 접선식에 비하여 낮다는 것을 의미한다. 입구유속 5 m/s 조건에서는 접선식과 유사하게 8 μm 근방에서 최대치를 갖는다. 입구유속 10 m/s 조건에서는 분리된 입자의 질량분포가 크게 증가하지는 않았으며, 입도분포 최대치가 33 μm 근처에서 발생하였다. 입구유속 15 m/s 조건에서는 분리된 입자의 질량이 눈에 띄게 증가하며, 30 μm 근처에서 입자분포의 최대값을 갖는다. 20 m/s로 입구유속을 증가시킬 경우 질량분포값이 계속 증가하였으며, 최대값은 13 μm 근처에서 발생하였다. 이러한 결과에서 입구유속을 20 m/s까지 증가시킬 경우 축류형 사이클론의 분리효율은 지속적으로 상승하고, 분리된 입자 분포의 최대값을 갖는 입자 직경은 반대로 지속적으로 감소하는 결과를 나타냈다.

Fig. 8은 유입속도 및 입자직경에 따른 축류식 사이클론의 등급효율 변화결과이다. 유속 5m/s에서는 등급효율이 5~15% 정도의 낮은 값을 유지하고 있다. 입구유속 10 m/s 조건에서도 등급효율이 11~15% 정도의 낮은 값을 유지하고 있다. 입구유속 조건 15 m/s에서는 등급효율이 매우 급하게 상승하여 20 μm 에서 최대 76%의 값을

보인다. 입구유속을 20 m/s로 최대 증가시킨 경우에도 등급효율이 상승하여 20 μm 에서 100%의 결과를 보인다.

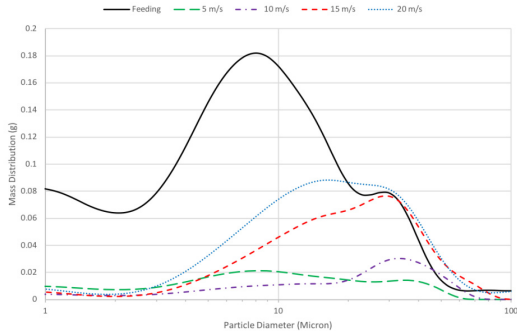


Fig. 7. Collected particle size distribution of the axial cyclone

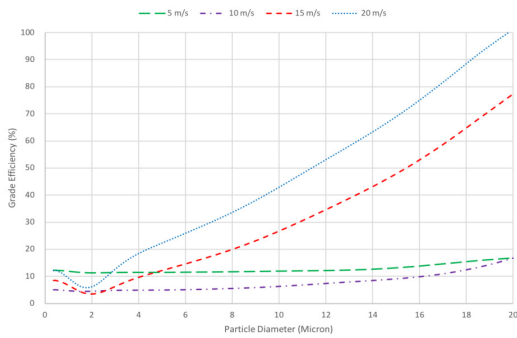


Fig. 8. Grade efficiency variation of the axial cyclone

3.3 접선식 및 축류식 사이클론 성능비교

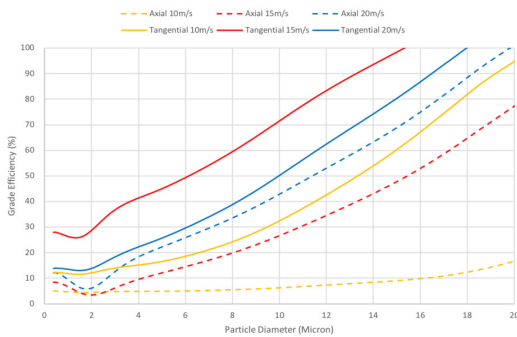


Fig. 9. Grade efficiency comparison of the tangential and axial cyclone

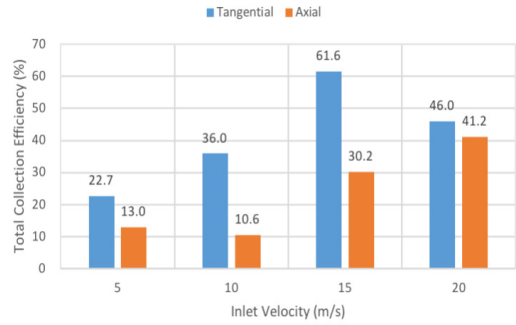


Fig. 10. Total collection efficiency comparison of the tangential and axial cyclone

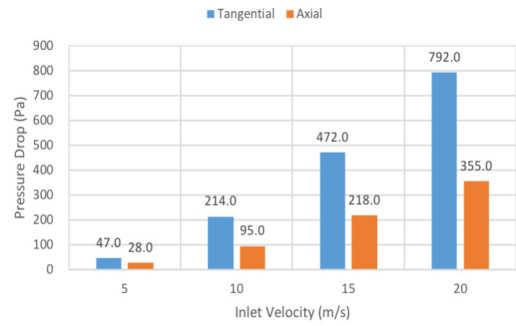


Fig. 11. Pressure drop comparison of the tangential and axial cyclone

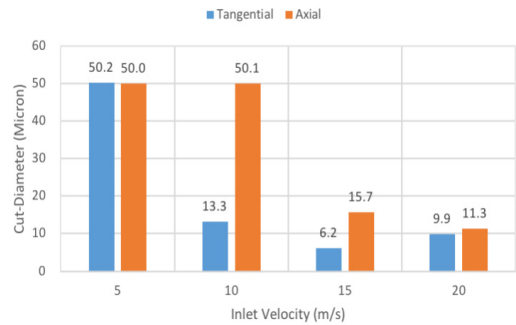


Fig. 12. Cut-diameter comparison of the tangential and axial cyclone

Fig. 9는 입구유속 5~20 m/s 조건에서 접선식과 축류식 사이클론의 등급효율을 비교한 결과이며, 전술한 바와 같이 전체적으로 접선식이 우수한 결과를 보인다.

Fig. 10은 접선식과 축류식 사이클론의 전체분

리효율을 비교한 결과이다. 전체 분리효율은 다 음식과 같이 계산하였다.

$$\text{전체분리효율} = \frac{\text{분진함 분리질량}}{\text{투입 입자질량}} \times 100 \quad (1)$$

입구유속 증가에 따라 전반적으로 전체분리효율이 증가하는 경향을 결과에서 알 수 있다. 모든 속도에서 전체분리효율은 접선식이 높게 나타났으며, 축류식이 유입속도에 따라 지속적으로 분리효율이 증가하는 결과에 비해 접선식에서는 최대 속도인 20 m/s 조건에서 다시 감소하는 결과를 나타낸다. 이는 접선식 사이클론에서 유속이 일정이상 증가함에 따라 집진된 입자가 상승 선회류를 타고 출구로 다시 빠져나가는 재비산 효과의 증대 때문이다. 반면 축류식에서는 유입구에서 가이드베인을 통과하여 하류로 진행되는 과정에서 단면적이 증가하고 유선방향의 유속이 감소하여 재비산 현상이 억제되는 것으로 판단된다. 재비산 현상은 접선식과 축류식 모두에서 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 접선식에서 크게 발생하였다.

Fig. 11은 유입속도에 따른 두 사이클론의 압력강하 특성을 비교한 결과이다. 입자분리효율이 전반적으로 우수한 접선식 사이클론에서 매우 큰 압력강하 결과를 보인다. 이에 비해 축류식 사이클론의 압력강하는 접선식의 약 45% 수준으로 전반적으로 낮은 분리효율을 갖지만 에너지 효율면에서는 오히려 접선식에 비해 유리한 것으로 나타났다. 거의 정형화되어 있는 접선식 사이클론에 비해 가이드베인의 설계에 따라 분리특성과 압력강하 특성을 자유롭게 설계할 수 있는 축류식의 특성상 개선의 여지가 많은 것으로 보인다. 특히 15 m/s에서 분리효율의 최대 특성을 갖는 접선식에 비해 20 m/s까지 증가 특성을 보인 축류식의 분리효율 특성을 고려하면 고효율 고유량 사이클론 분리기의 설계가 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 12는 유입속도에 따른 두 사이클론의 절단입경 특성을 비교한 결과이다. 절단입경은 사이클론의 분리효율을 나타내는 대표적인 값으로

실제 실험을 이용하여 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않은 값이다. 측정 결과 입구유속이 증가할수록 접선식 사이클론은 절단입경이 감소하다가 유입속도 15 m/s 이후에는 재비산 효과로 인해 다시 증가한다. 반면 축류식은 입구유속의 증가에 따라 지속적으로 20 m/s조건까지 절단입경이 감소한다. 최소 절단입경은 접선식의 경우 15 m/s에서 6.2 μm , 축류식에서는 20 m/s 조건에서 11.3 μm 을 나타내었다.

4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 유입속도 5~20 m/s 조건에서 본 연구에서 사용된 접선식 사이클론이 축류식 사이클론에 비해 높은 분리효율을 나타낸다.
- 본 연구에서 사용된 접선식 사이클론은 유입속도 20 m/s 조건에서는 15 m/s 조건에 비해 재비산 효과에 의해 집진효율이 낮아진다.
- 본 연구에서 사용된 축류식 사이클론은 유입속도 20 m/s 까지 집진효율이 입구유속 증가에 따라 계속해서 증가한다.
- 본 연구에서 사용된 접선식 사이클론은 동일한 유입속도에서 축류식 사이클론에 비해 압력손실이 높다.
- 본 연구에서 사용된 접선식 사이클론은 입구유속이 증가할수록 절단입경이 감소하나 유입속도 20 m/s 조건에서 재비산 효과로 인해 다시 증가한다.
- 본 연구에서 사용된 축류식 사이클론은 입구유속이 20 m/s 조건까지 증가할수록 지속적으로 절단입경이 감소한다.
- 3D 프린터를 이용하여 기존의 표준형 사이클론 뿐 아니라 새로운 형상의 사이클론의 지속적인 개발 및 검증이 필요하다.

REFERENCE

- 1) Shapiro, M. and Galperin, V., 2005, "Air Classification of Solid Particles: a Review," Chem. Eng. and Process., Vol. 44, pp. 279~285.
- 2) Malvern Instruments Worldwide, 2012, A Basic Guide to Particle Characterization, Malvern Instruments Limited, Worcestershire, pp. 1~26.
- 3) Cooper, C. D. and Alley, F. C., 2011, Air Pollution Control: A Design Approach, Waveland Press, Long Grove, pp. 135~159.
- 4) Lee, C. and Lee, C., 2011, "Comparisons of Dust Collection Efficiency on the Tangential Entry and Axial-vane Type Cyclone," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 6, pp. 115~121.
- 5) Lee, C. and Lee, C., 2012, "A Numerical Analysis on Prediction of Cut-diameter according to Vane Outflow Angle in the Axial-flow Cyclone," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 111~117.
- 6) <http://www.heumannenviro.com>
- 7) Ogawa, A., 1984, "Re-entrainment of Dusts from the Dust Layer on the Deposited Dusts in the Cyclone Dust Collectors," Particulate Science and technology, Vol. 2, No. 4, pp. 305~314.
- 8) Zuo, Z. and Chen, Q., 2015, "The Structure Optimization Design of Anti Re-entrainment Cone in Cyclone Separator," International Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 491~494.