

전기사이클론 성능특성에 관한 실험적 연구

홍진일*, 한정균**, 오장근**, 김윤제†

*성균관대학교 대학원, **삼성광주전자 청소기팀, †성균관대학교 기계공학부

An Experimental Study on the Performance Characteristics of Electrocyclone

Jin-Il Hong*, Jung-Gyun Han**, Jang-Keun Oh**, Youn-Jea Kim†

ABSTRACT: In order to get the high collection efficiency of the electrocyclone, the effect of inlet and electrode shapes must be well grasped. In this study, performance characteristics of electrocyclone with different inlet and electrode shapes were experimentally investigated and compared as a function of particle size. Experimental results indicated that the helical inlet and tooth electrode have effect on significantly increasing collection efficiency.

Key words: Electrocyclone(전기사이클론), Electric field(전기장), Collection efficiency(집진효율), Pressure drop(압력강하)

기호 설명

- a : 입구 높이, [m]
- b : 입구 폭, [m]
- D : 사이클론 직경, [m]
- S : 보텍스 파인더 직경, [m]
- B : 출구 직경, [m]
- H : 사이클론 높이, [m]
- V : 입구 속도, [m]
- ΔP : 압력강하, [kPa]
- C : 입자개수
- Z : 방전극 길이, [m]

그리스 문자

- ρ : 공기 밀도, [kg/m³]

- η : 집진효율, [%]

하첨자

- e : 보텍스 파인더 출구
- c : 콘
- i : 입구
- o : 출구

1. 서론

사이클론은 유입 가스의 선회운동으로 입자에 원심력을 부여하고, 원심력에 의해 입자를 분리, 포집하는 집진장치로서, 그 역사는 100여년이 넘는다. 사이클론은 구조가 단순하기 때문에 제작이 용이한 장점이 있고, 고온 및 고압에서도 작동이 가능하며, 장치 내에 기계적 구동부가 없기 때문에 운전, 보수가 간단하여 산업계에서 널리 이용되고 있다. 또한 최근에는 사이클론의 소형화로 인해 진공청소기 및 공기청정기에도 적용되고 있는 실정이다.

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7448; fax: +82-31-290-5889

E-mail address: yjkim@skku.edu

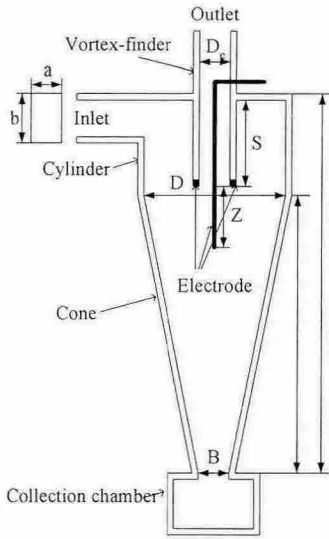
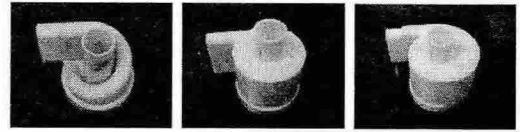


Fig. 1 Schematic diagram of the modeled cyclone.

Table 1 Dimensions and operating conditions of the modeled cyclone

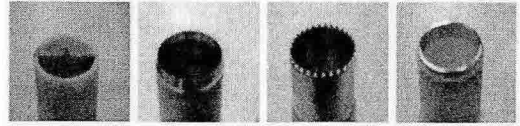
Dimensions and operating condition	Values
Cyclone diameter, D [mm]	68
Outlet diameter, D_c [mm]	35
Inlet width, a [mm]	12
Inlet height, b [mm]	45
Outlet height, S [mm]	80
Cyclone height, H [mm]	160
Cone height, H_c [mm]	80
Dust outlet diameter, B [mm]	21
Wire length, Z [mm]	20
Wire diameter [mm]	0.6
Inlet velocities, V_i [m/s]	10, 15, 20, 25
Applied voltage [kV]	-10
Temperature [K]	290
Wire material	SUS304
Inlet shapes	Helical, Tangential, Involute

기본 설계 및 운전을 통한 많은 변경과 수정은 사이클론의 성능을 향상시켜왔다. 성능을 향상시키는 많은 변수들 중에서 사이클론 크기를 작게 하거나 보텍스-파인더의 지름 및 실린더 길이를 작게하는 것이 있다. 또한, 평행하거나 여러 개의 사이클론을 병렬로 연결한 사이클론이 제작되기



(a) Helical (b) Tangential (c) Involute

Fig. 2 Photograph of various inlet shapes.



(a) Needle (b) Sharp (c) Tooth (d) Ring

Fig. 3 Photograph of various electrode shapes.

도 하였으며, 가스 유동의 일부를 공급부로 재순환하거나 이차 공기유동을 사용하는 사이클론 개발 연구도 수행된 바 있다⁽¹⁾.

사이클론은 입경이 5 μm 이하로 감소될 때 집진효율이 감소되므로, 기존의 사이클론에 전기장을 부가하여 집진효율을 증가시킬 수 있다⁽²⁾.

전기사이클론의 입자 궤도와 입자 포집의 정확한 메커니즘 (mechanism)에 대해서는 많은 연구가 수행되지 않았다. 선행 연구로서 Dietz⁽³⁾는 전기사이클론의 집진효율을 평가하였고, Cheng과 Wang⁽⁴⁾은 보텍스-파인더 중앙에 방전극을 삽입하여 방전극 지름 변화에 따른 전기사이클론의 집진효율을 실험하였다. Shrimpton과 Crane⁽⁵⁾은 입자 크기 및 종류, 인가전압에 따른 소형 전기사이클론 성능을 실험적으로 연구하였다. 이와 같이 정전기력은 사이클론의 집진효율에 영향을 주는 중요한 성능 변수임을 선행 연구 결과를 통해 알 수 있다.

본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 미세입자를 효과적으로 포집하기 위해 인가전압에 따른 입경별 집진효율을 다양한 사이클론 입구 및 방전극 형상에 따라 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치

Fig. 1은 사이클론의 각 부분 치수를 나타내고 있다. 본 연구에서 고찰하고자 하는 사이클론 치수는 Stairmand High Efficiency 모델⁽⁶⁾에서 입구

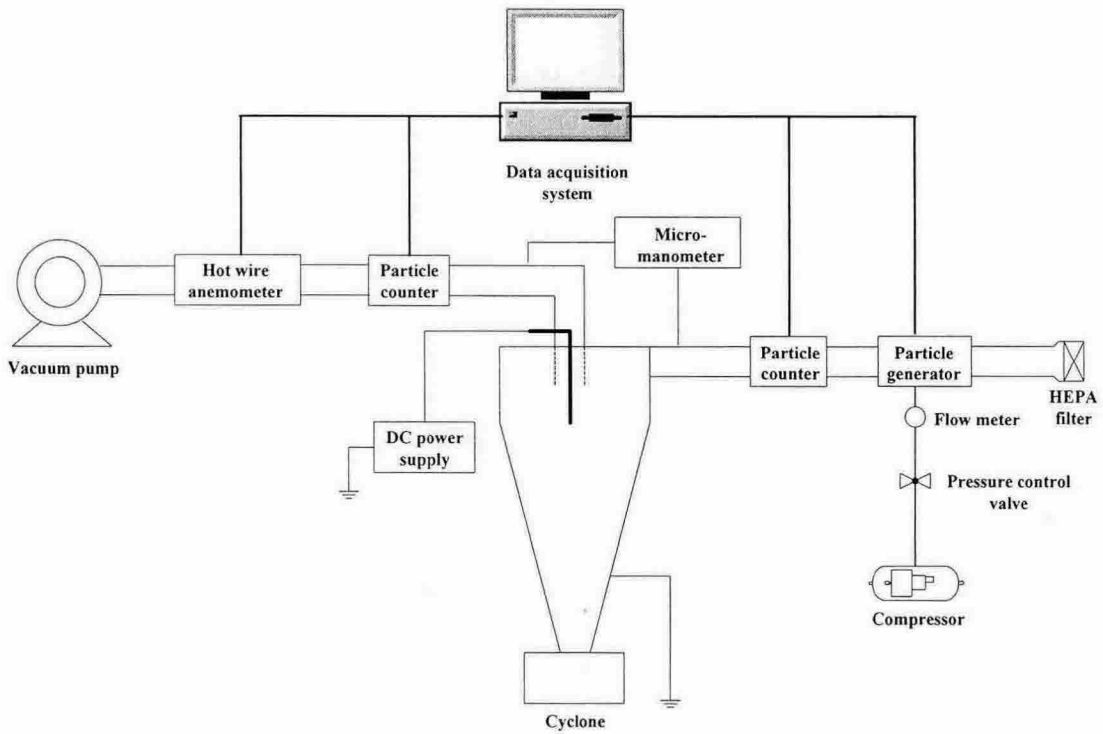


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup.

크기, 보텍스-파인더 지름 및 길이, 콘 길이 등을 변형시킨 것으로 Table 1과 같다. Figs. 2와 3은 사이클론 입구 및 방전극 형상에 따른 전기사이클론의 성능특성을 비교하기 위해 제작된 prototype 사진이다. 특히, Fig. 3은 기존의 방식인 보텍스-파인더 내부에 방전극을 삽입하는 것 대신에 보텍스-파인더 자체를 방전극으로 제작하였다. 사이클론 콘의 재질은 전도성이 높은 알루미늄으로 제작하였다.

2.2 실험장치

사이클론의 성능특성을 파악하기 위한 실험 장치는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 크게 입자 발생 장치, 입자 계수기, 차압 측정 장치, 사이클론 본체, 전원 공급 장치, 유량 조절 장치 및 데이터 처리 장치로 구성되어있다. 유량, 압력 그리고 온도는 측정되는 동시에 자동적으로 컴퓨터에 저장된다. 또한, 오염된 실내 공기가 실험 장치 내로 유입되는 것을 막기 위해 HEPA (High Efficiency Particulate Air) 필터를 덕트 입구에 설치하

였다.

2.1.1 실험용 입자

실험에 사용된 입자는 JIS 11종 test powder 이며 입도분석기 (mastersizer, Malvern Instrument, Hydro 2000mu)로 분석하였다. 측정된 입자의 입경 분포는 약 $0.25 \sim 17.5 \mu\text{m}$ 로 구성되어 있으며, 질량평균지름 (MMD: mass median diameter)은 약 $2.3 \mu\text{m}$ 이고, 입자의 밀도는 $2.9 \sim 3.1 \text{ g/cm}^3$ 이다. 그리고 $2 \mu\text{m}$ 이하의 입자수가 50% 정도로 본 실험에서 사용하기에 적합한 분진으로 판단된다.

2.1.2 입자발생기

실험용 입자를 덕트 내로 동일한 작동 조건으로 투입하기 위하여 Marple 등⁽⁷⁾의 설계에 기초한 유동상형 입자 발생기 (fluidized bed dust generator, KANOMAX, model 3211)를 사용하였다. 입자 발생기의 원리는 DC 모터에 의한 스크류 피더 (screw feeder) 방식으로 분진의 응집을 유동 축에서 분해시키면서 안정된 분산성을 갖는 입자를 발생시킨다. 스크류 (screw)의 속도를 제

어함으로서 공급되는 분진의 양을 조절할 수 있다.

2.1.3 입자계수기

본 실험에서 입자의 집진효율을 측정하기 위하여, 사이클론 입구 부분과 출구 부분에 동일한 입자계수기 (laser particle counter, Pacific Scientific, Hiac/Royco 5230)를 각각 설치하였고, 입자의 탈·부착에 의한 영향을 최소화하기 위하여 실험 수행 20분 후 입자계수기를 작동하였다. 샘플링 시간 (sampling time)이 6초로 설정된 입자 계수기는 8개 채널 (channel)로 들어온 입자를 분석하여 사이클론의 집진효율을 측정한다. 입자계수기는 레이저 빔이 산란된 강도로 입자의 입경별 수를 측정하는 장치로서, 측정 가능한 입자 크기는 0.3~25 μm 이다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 실험실 규모의 실험장치를 제작하여 전기사이클론의 집진 효율 및 압력강하에 관한 실험을 수행하였다. 압력강하는 마이크로마노미터 (micromanometer, Furness Control Limited, FCO12)를 사용하여 사이클론 입·출구 덕트에 설치된 압력 탭 (pressure tap)에서 사이클론 차압을 측정하였다.

사이클론의 입구 형상에 따라 입구속도는 10, 15, 20 그리고 25 m/s로 변화시켰고, 속도 변화는 덕트 하류에 설치된 열선유속계 (hot wire anemometer, TSI Incorporated, IFA-300)로 측정하였다. 실험이 수행되는 실험실의 온도 및 상대습도는 각각 23°C, 50%로 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압력강하

압력강하는 사이클론 입·출구에서 마이크로마노미터를 사용하여 측정하였다. Fig. 5는 입구 속도에 따른 사이클론 압력강하를 나타낸 결과이다. 입구속도가 증가할수록 압력강하는 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 입구형상 변화에 따라 압력강하 차이도 매우 크다. 따라서 입구형상 변화가 압력강하에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

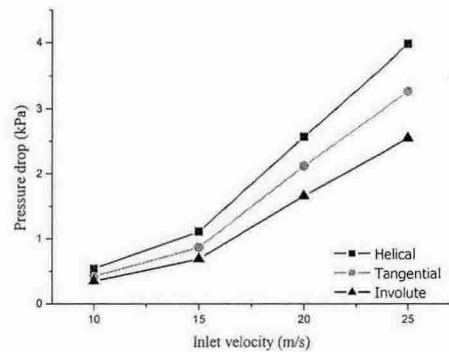


Fig. 5 Pressure drop of each cyclone with various inlet velocities.

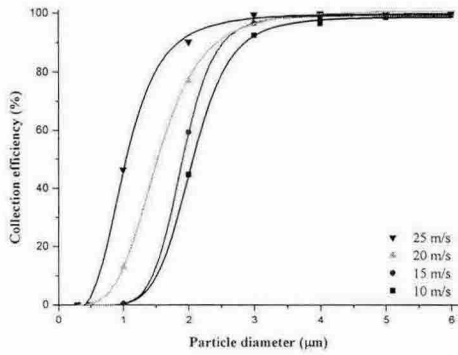
3.2 집진효율

사이클론의 집진효율을 계산하기 위하여 입·출구에 설치된 입자계수기를 사용하여 입자의 개수를 측정하고, 식 (1)에 의해 입경별 집진효율을 계산하였다.

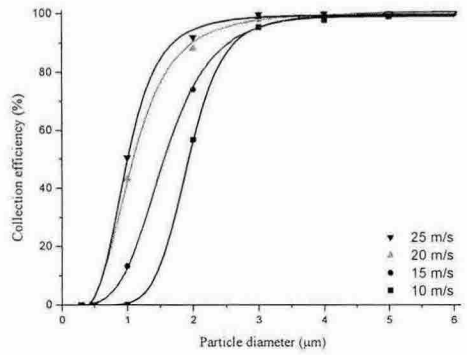
$$\eta = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

여기서 η 는 사이클론의 집진 효율, C 는 입자의 개수이며, 하첨자 i 와 o 는 각각 덕트 입·출구를 의미한다.

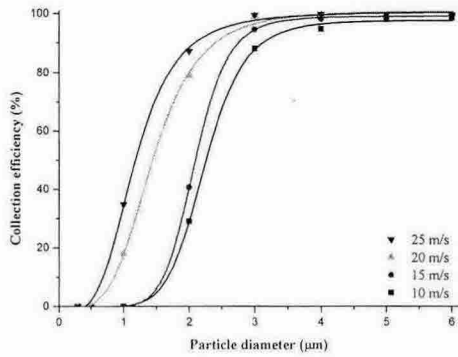
Figs. 6과 7은 입구 속도가 10, 15, 20 그리고 25 m/s에서 입구 형상에 따른 사이클론 및 전기 사이클론의 집진효율을 나타낸 그래프이다. 입구 형상에 관계없이 입구속도가 증가하면 집진효율도 증가함을 알 수 있다. 그리고 각각의 속도에서 나선형 입구의 집진효율이 다른 입구형상보다 높은 것을 알 수 있다. 이것은 축 방향 속도와 접선 방향 속도와 관련이 있다. 축 방향 속도가 크면 사이클론 내부에서 회전하는 입자의 체류 시간이 감소한다. 즉, 축 방향 속도가 지배적인 나선형 입구의 경우 축 방향 속도가 빠르기 때문에 사이클론 내부에서 입자의 체류 시간이 짧아지므로 다른 입구형상보다 효율이 높아짐을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한, Figs. 6과 7의 결과로부터 입경이 3 μm 이상에서의 집진효율을 살펴보면 정전기력의 영향이 매우 미약하고 관성력에 의한 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 하지만, 입경이 3 μm



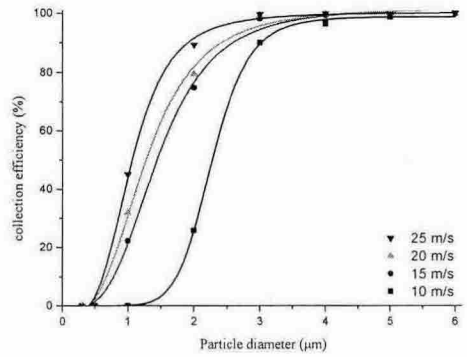
(a) Helical



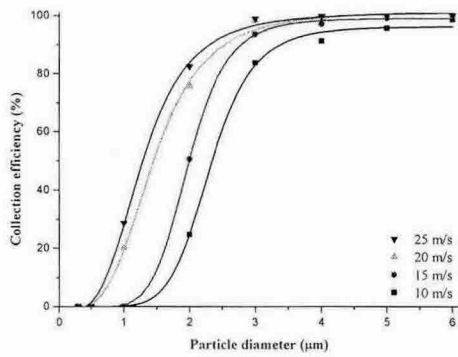
(a) Helical



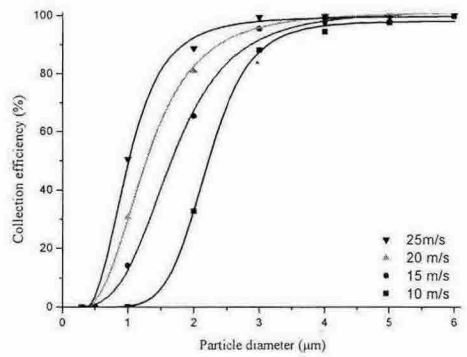
(b) Tangential



(b) Tangential



(c) Involute



(c) Involute

Fig. 6 Collection efficiency of cyclone with various inlet shapes (0 kV).

Fig. 7 Collection efficiency of electrocyclone with various inlet shapes (-10 kV).

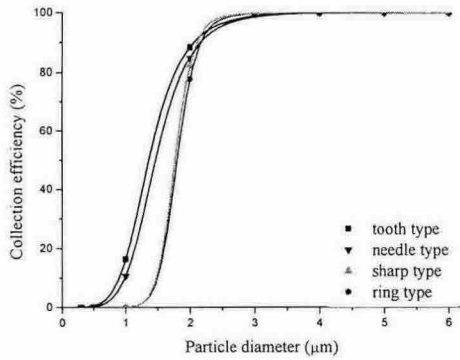


Fig. 8 Collection efficiency of electrocyclone with various electrode shapes (helical inlet, -10 kV).

이하에서는 정전기력의 영향을 받아 집진효율이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8는 입구속도 20 m/s에서 -10 kV의 전압을 인가하였을 경우 방전극 형상에 따른 입경별 집진효율을 비교한 것이다. Tooth형과 needle형을 제외한 다른 형태의 방전극에서는 집진효율 변화가 미미하였다. 즉 코로나 방전 효과가 거의 없음을 알 수 있는데, 이는 방전극의 곡률 반경이 높을수록 코로나 개시전압이 낮아지기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 입구형상에 따른 사이클론 및 전기사이클론의 집진효율을 실험적으로 고찰하였다.

(1) 압력강하 측면에서 세가지 모델 중 나선형 입구형상이 가장 크게 나타났다.

(2) 유량이 증가할수록 사이클론 및 전기사이클론의 집진효율은 증가하였으며, 축 방향 속도가 큰 나선형 입구형상을 가진 사이클론의 효율이 모든 입구속도에서 가장 높았다.

(3) 입경이 3 μm 이상의 입자에 대해서는 관성력이 지배적으로 작용하여 높은 효율을 나타내었

고, 3 μm 이하의 입자는 정전기력의 영향에 의해 입자의 집진효율을 향상시킬 수 있다.

(4) 방전극 곡률 반경이 가장 낮고 코로나 개시전압 점이 많은 tooth형 방전극의 집진효율이 가장 큰 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 2004년도 미래가전연구센터(SFARC) 연구기금 (과제번호 : 2004-0687-920)으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Mycock, J. C., McKenna, J. D. and Theodore, L., 1995, Handbook of air pollution control engineering and technology, LEWIS, Florida, pp. 49-70.
2. Ha, B. K. and Yoa, S. J., 1995, Collection efficiency characteristics of electrocyclone for removal of B/C soot particulates, J. of KSEE, Vol. 17, No. 11, pp. 1161-1169.
3. Dietz, P. W., 1982, Electrically enhanced cyclone separators, Powder Technol., Vol. 31, pp. 221-226.
4. Cheng, M. T. and Wang, J. L., 1999, Design and performance of electrocyclone, Proceeding. First Asia Aerosol Conference, Nagoya, pp. 75-76.
5. Shrimpton, J. S. and Crane, R. I., 2001, Small electrocyclone performance, Chem. Eng. Technol., Vol. 24, No. 9, pp. 951-955.
6. Stairmand, C. J., 1951, The design and performance of cyclone separators, Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 29, pp. 356-383.
7. Marple, V. A., Liu, B. Y. H., and Rubow, K. L., 1978, A dust generator for laboratory use, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 39, pp. 26-32.