

하전방식에 따른 전기싸이클론의 집진특성 Collection Characteristics of Electro-Cyclone with Charging Type

여 석 준

부경대학교 환경공학과

(1999년 2월 16일 접수, 1999년 5월 20일 채택)

Seok-Jun Yoa

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received 16 February 1999; accepted 20 May 1999)

Abstract

The main purpose of this study is to investigate the characteristics of precharge electro-cyclone compared to those of innercharge electro-cyclone, experimentally. Especially, the experiment is executed focusing on the improvement of collection efficiency with the charging types including the experimental parameters such as the discharge electrode shapes, applied voltages and gas inlet velocities.

Results show that the overall collection efficiency of precharge electro-cyclone is increased over 20% than that of the innercharge type for the same discharge electrode (ϕ 4 mm, screw rod) in the inlet velocity of 4 m/s, and applied voltage of 30 kV. Moreover, the pressure drop of precharge type becomes 10% lower than that of the innercharge type for the inlet velocity of 12 m/s owing to the disturbance of inner vortex flow by the discharge electrode equipped in the center region of cyclone body.

Key words : collection efficiency, precharge electro-cyclone, innercharge electro-cyclone, applied voltage, discharge electrode shape

1. 서 론

급격한 산업발전으로 인해 대기오염문제가 매우 심각하게 대두됨에 따라, 정부의 대기오염물질에 대한 배출규제가 강화되고 있어 기존 대기오염방지시설의 교체 및 보완이 절실히 요구되며 새로운 고효율 집진장치의 개발이 필수 불가결하게 되었다. 현재 산업장에 설치되어 있는 싸이클론(cyclone)은 대용량의 가스처리, 입경 10~200 μ m까지의 분진처

리, 낮은 초기설치비, 유지보수 및 조작의 간편성 때문에 널리 사용되고 있으며, 또한 수송된 분체의 회수와 고효율 집진장치(전기집진장치, bag filter 등)의 전처리 용으로 많이 사용되고 있지만, 싸이클론 집진장치는 입경 10 μ m 이하에서는 집진효율이 급격히 감소하기 때문에 미세입자에 대한 집진효율을 개선할 필요가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방안으로 기존의 싸이클론 집진장치에 정전기력을 부가하여 집진효율의 증대를 가져온 전기싸이클론 집진장치의 개발에 관한 연구가 국내 외적으로 활

발히 진행되고 있다.

초기의 연구로는 Petroll과 Langhammer (1962)가 접선유입식 싸이클론 집진장치에 간단한 전극을 사용하여 배출분진의 28%를 감소시킨 바 있으며, Dietz (1981)는 기존의 기하학적 싸이클론 모델 (Leitz와 Licht, 1972)을 유입영역, 외부선회류영역, 내부선회류영역의 세 영역으로 나누고, 내부선회류영역과 외부선회류영역의 입자 flux를 고려하여 정전기력을 포함한 전기싸이클론 집진장치의 집진효율을 계산한 바 있다. 이를 Plucinski *et al.* (1989)은 선회류반전부의 유속분포를 고려하여 전기싸이클론 집진장치의 집진효율을 계산하였으며, 인가전압 8 kV, 유입유속 12 m/s 이하의 영역에서 기존의 싸이클론 집진장치로는 집진이 어려운 0.5~5 μm 입경 범위의 미세입자들에 대한 집진효율이 증가했음을 보였으나, 유입유속 변화에 따른 인가전압을 8 kV에 제한하여 인가전압 변화에 대한 집진효율의 특성을 평가하기에는 어려운 점이 있다. 또한 Daniel *et al.* (1986)은 소각로에서 배출되는 600°C의 고온 배기에 함유된 분진을 집진하기 위한 전기싸이클론 집진장치에 관한 연구를 하여 미세입자들이 정전기력에 의해 집진효율이 상승했음을 보였다. 하병길과 여석준 (1995)은 인가전압이 증가함에 따라 미세입

자들의 집진효율이 상승했음을 보였으며, 싸이클론에 정전기를 인가한 경우 유량 변동에도 불구하고 집진효율의 변동이 적어 매우 안정된 집진효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

하지만 현재까지 연구되어 온 전기싸이클론 집진장치는 정전기력을 유발시키는 방전극이 싸이클론 몸통내에 설치되는 내부하전방식으로서 설치가 용이하지 않고 또한, 집진장치 내부에서 발생된 강한 선회류로 인해 방전극의 떨림 및 이탈 현상 등으로 코로나 방전시 불안정한 전계를 형성할 수 있어 spark 발생의 우려가 높고 구조상 실제 현장에 적용하기 어려운 단점이 있다.

이를 보완하기 위해, 그림 1에서 보는 바와 같이 싸이클론 몸체 전단부에서 하전부를 설치한 예비하전장치는 내부하전방식의 문제점을 해결할 수 있는 이점을 지니고 있어 하전방식에 따른 전기싸이클론의 전압-전류 및 집진효율 등의 실험적 특성을 파악·해석하는 것이 매우 중요한 과제로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 전기싸이클론 성능의 중요 인자인 유입유속, 인가전압 및 방전극 형상 등의 실험변수에 의해 하전방식에 따른 전계 및 집진효율 등의 기본적 특성 파악을 위한 비교·실험을 수행하였다.

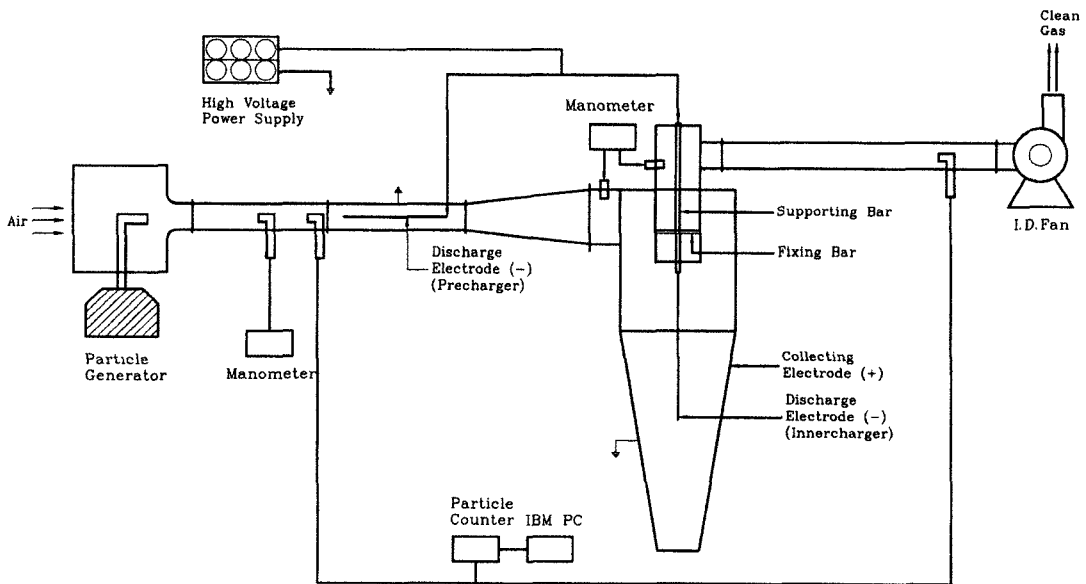


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구는 전기싸이클론 집진장치의 최적설계를 위한 실험으로써 실험장치는 분진공급장치 (particle generator), 싸이클론 집진장치 본체 (cyclone), 입자를 하전시키기 위한 예비하전장치 (precharger) 및 내부하전장치 (innercharger), 하전장치에 고전압을 단계적으로 인가할 수 있는 고전압 공급장치 (high voltage power supply) 그리고 전압-전류, 집진효율 및 압력손실 등을 측정할 수 있는 계측 시스템 및 공기 유동 형성을 위한 흡입 송풍기로 구성되어 있으며, 전체적인 구성도는 그림 1에 나타내었다.

2.1.1 실험용 분진 및 분진발생 공급장치

본 실험에서 사용된 실험용 분진은 태안 화력발전소에서 채취한 fly ash로 싸이클론의 전단부에서 입경별 수 농도 및 질량 농도의 측정이 가능한 입경계수기인 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc.)를 사용하여 입경분포를 측정하였으며 그림 2-a, b에 입경별 수농도 및 질량기준의 농도 분포를 나타내었다. 입경범위는 1~10 μ m의 범위를 나타내며, 평균입경은 2.55 μ m로서, 본 실험의 관심 대상인 미세입자 수가 많은 것을 볼 수 있다.

또한 분진발생 공급장치는 일정량의 분진을 기류중으로 분산, 공급하기 위한 장치로서 장치의 전단부에는 압축 공기를 주입하고 후단부에는 screw feeding 방식으로 분진을 일정량의 압축 공기와 함께 분사시켜 전 후단의 압력구배에 의해 분진 입자가 공급된다. screw의 회전 속도는 전압 조절 장치를 사용하여 조절할 수 있게 하였으며, 분진의 농도 변화는 screw의 회전 속도 조절에 따른 분진의 공급량과 압축 공기의 유량 조절에 의해 조절될 수 있도록 제작되었다.

2.1.2 전기싸이클론 실험장치 본체

전기싸이클론 실험장치의 본체는 Lapple 표준형 접선유입식 싸이클론의 치수비에 맞추어 제작하였으며, 이에 대한 자세한 치수는 표 1에 나타내었다. 본 실험장치의 핵심 부분인 실린더형 예비하전장치는 싸이클론의 전단부인 유입구 덕트에 부착하여 입자를 전기적으로 대전시켜 전체특성, 집진효율 및

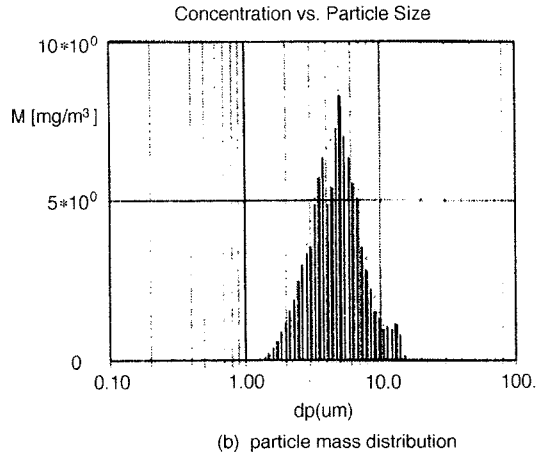
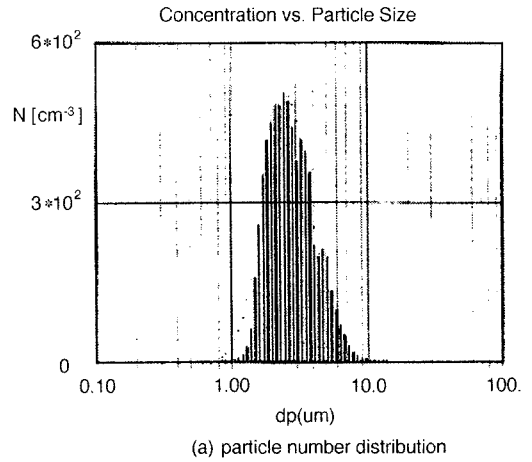


Fig. 2. Size distribution of test dust.

Table 1. Dimension of electro-cyclone.

Item	Dimension (mm)
Body diameter	300
Inlet width	75
Inlet height	150
Body length	600
Cylinder height	600
Outlet diameter	150
Outlet length	187.5
Dust outlet diameter	75

압력손실 특성을 파악하였으며, 비교 실험을 위한 내부방전극은 싸이클론 몸체의 중심부분에 고정시켜 싸이클론 집진장치 내의 전기장 형성과 입자들

하전시킬 수 있도록 하였다.

2.1.3 고전압 공급장치 및 하전장치

고전압 공급장치는 전기싸이클론의 중심에 위치한 내부방전극과 예비하전장치에 고전압을 발생 공급하기 위한 것으로서, 0~100 kV의 전압과 0~10 mA의 전류 범위에서 연속적이고 단계적인 조작이 가능하게 제작되었으며, 실험시 과전압 및 과전류가 흐를 경우 자동차단할 수 있는 보호장치가 내장되어 있다.

그림 1에서 보는 바와 같이 예비하전장치는 싸이클론의 전단부에서 입자를 예비하전시키는 부분으로서, 고전압 공급장치에서 공급되는 고전압이 실린더 단면의 중심에 위치한 코로나 방전극에 인가되면 실린더 내부에 전기장이 형성되어 기류 중의 분진이 하전되며, 그 형태는 직경 100 mm, 길이 600 mm의 실린더형이고, 실린더 단면의 중심에서 축방향으로 스테인레스 스틸 재질의 방전극(직경 1 mm, 길이 500 mm 원형 및 직경 4 mm, 길이 500 mm 나선형)이 설치되어 있다. 또한 덕트내 유속으로 인한 방전극의 흔들림을 막기 위해 방전극 양단을 고정할 수 있는 테프론 재질의 고정대가 있고, 그 곳을 통해서 고전압이 인가되어진다. 내부하전장치는 코로나 방전을 형성하는 방전극을 싸이클론 몸체의 중심에 설치하였으며, 방전극을 지지하기 위하여 방전극의 상부와 하부에 테프론 지지대를 설치하였다. 방전극은 길이 400 mm의 나선 및 사각형을 선택하였으며, 내부 선회류에 의한 흔들림이 적은 직경 4 mm 및 사각 6×6 mm의 황동재질을 사용하였다.

2.2 실험방법

본 실험은 예비하전 및 내부하전방식의 전기싸이클론에서 인가전압, 유입유속 및 방전극 형상 등의 실험적 변수에 따라 전계특성, 집진효율 및 압력손실의 변화특성을 파악하여 각 하전방식에 따른 특성을 비교 분석하는데 그 목적이 있다. 이를 위한 전체적인 실험내용은 예비하전부 및 내부하전부의 전압-전류 특성 비교와 분진 하전 유·무에 따른 집진효율 및 압력손실 비교로 구분되어진다.

전압-전류 특성은 multimeter (Fluke 27)를 사용하여 유입유속 및 분진농도 변화에 따른 인가전압과

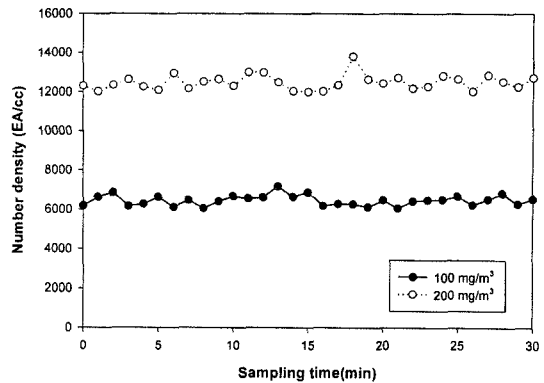


Fig. 3. Number density vs. sampling time ($V_i = 12$ m/s).

코로나 전류의 상관관계를 도출함으로써 구해졌으며, 유입유속은 0, 4, 8, 12, 16 m/s, 분진농도는 0, 100, 200 mg/m³으로 변화되어졌다. 이 때 유입유속은 미세압력 (micromanometer, Furness Controls Ltd. FCO12)를 사용하여 덕트내 유속을 측정함으로써 산출되어졌으며, 유속 측정점 및 분진 채취 지점은 싸이클론의 전 후단에서 대기오염 공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4% 되는 지점을 선정하고, 각 지점에서 측정된 유속 및 분진의 수 농도와 질량 농도를 산술 평균하여 그 평균치를 사용하였다.

전계 형성 유·무에 따른 압력손실 변화 특성을 비교하기 위해서 전기싸이클론 전 후단 50 mm 지점에서 미세압력계 (micromanometer)를 이용하여 정압차에 의해 계산되는 압력손실을 측정하였다. 또한 집진효율 특성을 파악하기 위해 분진의 크기별 수 농도 및 질량 농도의 측정이 가능한 입경계수기인 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc.)를 사용하였으며 앞에서 언급한 각 분진 채취점에서 5분 동안 채취하여 입경별 수 농도 및 질량 농도의 누적치를 측정함으로써 구해졌으며, 그림 3에서 보는 바와 같이 채취점에서의 시간에 따른 분진농도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이 때의 인가전압은 전압-전류 특성 실험의 결과에서 나타나는 안정한 전압 범위 내에서 2단계의 전압을 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전류-전압 특성

전기사이클론으로 유입되는 입자에 정전기력을 유발시킴으로써 집진효율의 향상을 도모할 수 있는 예비하전부 및 내부하전부의 전기장 특성을 파악하기 위해 다양한 실험변수에 따라 인가전압을 변화시키면서 접지극으로 흐르는 전류를 측정하였다. 그림 4는 분진을 함유하지 않은 가스 ($M_p=0\text{ mg/m}^3$)를 전기사이클론에 유입시키며 방전극의 형상에 따른 전류-전압 특성을 비교한 것이다. 전체적으로 살펴보면 인가전압에 따른 전류는 방전극과 접지극의 역할을 담당하는 집진장치 본체와의 거리가 먼 내부하전방식에 비해 예비하전방식의 경우가 높게 나타나고 있으며, 방전극 직경이 가늘수록 접지극으로 흐르는 전류의 양이 더 많음을 볼 수 있다. 이는 Elmourssi와 Castle (1986)과 Cristina *et al.* (1991)에 의해 수행된 방전극과 접지극간의 거리에 따른 전계강도의 수치적 연구에서 방전극에서 접지극의 거리가 멀어질수록 전계강도는 급격하게 감소하는 결과와 잘 부합되며, Watanabe *et al.* (1986)에 의해 수행된 직경 1, 3, 5 mm의 원형 방전극을 사용한 연구에서 방전극 직경이 가늘수록 코로나 방전 전력 ($I_c \times V$)이 높게 나타난다는 것과 유사한 결과이다.

그림 5와 6은 예비하전방식에서 유입유속 및 분진농도에 따른 전류-전압 특성을 비교한 것으로

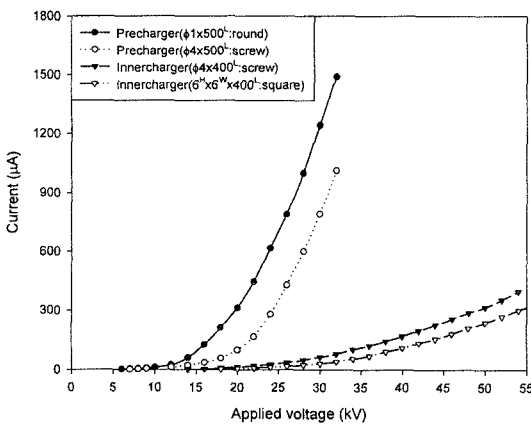


Fig. 4. Current vs. applied voltage with various discharge rods ($M_p = 0\text{ mg/m}^3$, $V_i = 8\text{ m/s}$).

코로나 방전 전력이 가장 높은 직경 1 mm 원형 방전극을 사용하여 도출한 결과이다. 유입유속에 따른 전압-전류 특성은 가스흐름의 유 무에 따라 다소 차이가 있지만 미미한 정도이며, 분진농도의 차이가 크지 않은 조건 (0, 100, 200 mg)에서 농도에 따른 전압-전류 특성의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 유속에 따른 미소한 차이는 Jaworek과 Krupa (1996)에 의해 수행된 유속에 따른 전압-전류의 특성에 관한 실험연구와 비슷한 결과로서 음극 방전극을 사용할 경우, 가스흐름의 속도에 비해 접지극

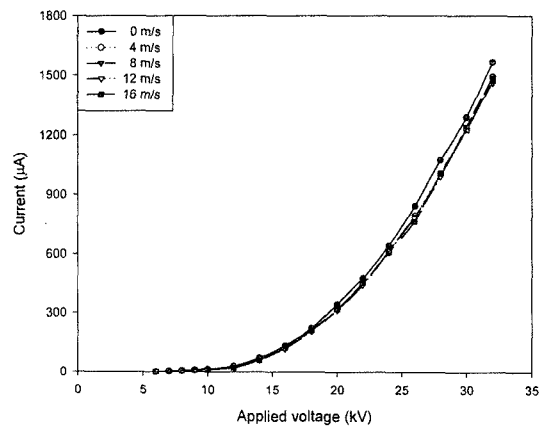


Fig. 5. Current vs. applied voltage with various inlet velocities (precharger, 1 mm round rod, $M_p = 100\text{ mg/m}^3$).

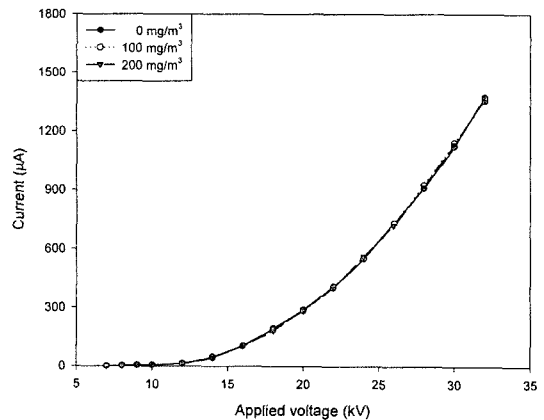


Fig. 6. Current vs. applied voltage with various dust loadings (precharger, 1 mm round rod, $V_i = 8\text{ m/s}$).

으로 흐르는 전자의 이동속도가 매우 빠르기 때문에 접지극으로 흐르는 전류의 방해요소로 큰 작용을 하지 못함을 알 수 있다.

이상의 결과를 살펴보면 직경 100 mm의 실린더형 하전부를 갖는 예비하전방식의 경우, 인가전압이 30 kV 이상이 되면 접지극으로 흐르는 전류의 양이 급격히 증가하여 불꽃방전(spark)의 우려가 있으므로 이로 인해 역전리 및 불꽃방전시 순간적인 전계손실이 발생하여 분진대전에 장애가 될 수 있다. 따라서 예비하전부에서는 코로나 개시전압이 낮으며 방전 전력이 높게 나타난 직경 1 mm 원형과 4 mm 나선형 방전극을 사용하며, 인가전압의 적용범위는 0, 20, 30 kV를 선택한다. 그리고 내부하전부에서는 내부 선회류에 의해 흔들림이 큰 직경 1 mm의 가느다란 원형 방전극은 사용이 어려우므로, 직경이 크며 곡률 반경이 짧은 직경 4 mm의 나선형 방전극을 사용하였으며, 인가전압의 적용범위는 0, 20, 30, 40 kV를 선택한다.

3.2 부분집진효율

전기사이클론의 하전방식에 따른 집진특성을 파악하기 위해, 유입 유속, 인가전압 및 방전극 형상에 따른 입경별 부분집진효율을 측정하였다. 부분집진효율은 입경별 수 농도 및 질량 농도 측정이 가능한 APS를 사용하여 집진장치의 유입·출부에서 5분간 채취하였으며, 다음 식에 의해 산정되었다.

$$\eta_j(\%) = \frac{N_{in,j} - N_{out,j}}{N_{in,j}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, η_j 는 입경별 부분집진효율, $N_{in,j}$ 입경별 유입 입자수, $N_{out,j}$ 는 입경별 유출 입자수를 나타낸다.

3.2.1 예비하전방식 전기사이클론의 집진효율 특성

앞서 설명한 바와 같이 본 실험의 예비하전부는 사이클론 유입부 전단에 직경 100 mm, 길이 600 mm의 실린더형으로 제작되어 있으며 실린더의 중심에서 축 방향으로 직경 1 mm의 원형 및 직경 4 mm의 나선형 방전극에 의해 입자가 대전되는 장치이다. 입경별 집진효율을 해석하기 위해 Stokes' drag의 가정하에 사이클론에서 전기력이 고려된 입자 이동에 대한 이론식(P.W. Dietz, 1981)은 다음과 같다.

$$6\pi\mu\gamma_r u_p = \frac{4\pi\rho_p\gamma_r^3 u_g^2}{3R_c} + qE \quad (2)$$

여기서, γ_r 는 입자 반경, u_p 는 입자의 반경방향속도, u_g 는 가스의 접선유입속도, R_c 는 사이클론 반경, q 는 입자 전하량, E 는 전계강도이다.

위의 식을 사이클론 벽면으로의 반경방향 이동속도에 대해 다시 정리하면,

$$u_p = \frac{2\rho_p\gamma_r^2 u_g^2}{9\mu R_c} + bE \text{로 되며, 여기서 } b = q/6\pi\mu\gamma_r$$

즉, 입자의 이동도(electrical mobility)로 정의된다. 그림 7은 위의 예비하전장치를 사용한 전기사이클론에서 농도 100 mg/m³, 방전극 4 mm 나선형, 유속 4, 8 m/s 및 인가전압 0, 20, 30 kV에 따른 입경별 집진효율을 나타낸다. 그림 7-a는 식 (2)에서 보듯이 전기력 효과가 지배적인 유속 4 m/s인 경우 원심력 효과가 상대적으로 작은 5 μm 이하의 작은 입자에서 전압 인가 전에 비해 인가전압 20, 30 kV인 경우 20, 60% 이상의 높은 집진효율 증가를 보인다. 5 μm 이상으로 입경이 증가하면서 입경별 집진효율은 식 (2)의 우변 첫 번째 항인 원심력의 회복에 의해 0, 20, 30 kV에서 30, 80, 90% 이상으로 증대되지만 0 kV의 효율에 비해 전압인가에 따른 효율 상승치는 감소함을 알 수 있다. 또한 그림에서도 보는 바와 같이 일반 사이클론의 문제점인 작은 입경에서의 매우 낮은 효율(10~30%)을 전기력이 결합되면서 30 kV인 경우 60% 이상의 높은 집진효율로 전환시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7-b, c, d는 (a) 그림과 동일한 조건에서 유입유속을 8, 12, 16 m/s로 변화시켰을 때의 집진효율을 나타낸다. 유입유속이 증가함에 따라 전기력에 비해 원심력 효과가 지배적으로 작용하게 되며, 전압이 인가되지 않은 0 kV인 경우 4 μm 이상의 입경에서 이에 의한 효율 증가치는 4 m/s에 비해 8, 12, 16 m/s에서 20, 40, 60% 이상으로 높게 나타난다. 즉 유속 증가에 의해 절단입경(cut-off diameter)은 4, 8, 12, 16 m/s에서 6, 5.2, 4, 3.2 μm 정도로 감소함을 알 수 있다. 0 kV 및 12, 16 m/s에서 5 μm 이상인 경우 집진효율 80% 이상의 높은 효율을 유지한다. 그리고, 입경 3 μm 이하에서 (-)효율을 나타내고 있는데, 이는 그림 2에서 보듯이 적은 미세입자의 유

입량에 유속 증가에 의한 큰 입자의 파쇄에 의한 미세입자수의 증가와 재비산에 의해 집진효율이 감소하기 때문인 것으로 예측된다.

인가전압 20, 30kV로 전기력이 추가되는 경우에 유입유속의 증가는 전기력 효과를 상대적으로 감소시킨다. 그림에서 보듯이 20, 30kV에서 $V_i=8\text{ m/s}$ 인 경우 4 m/s 인 경우에 비해 동일 입경에 대해 전기력에 의한 집진효율 증가는 감소하게 되며, 12, 16 m/s로 증가하면서 전기력 효과는 매우 작아짐을 볼 수 있다. 이는 집진유입유속의 증가가 전기력에 의한 집진면으로의 반경방향 입자이동 저해와 하전부 내에서의 체류시간 감소(즉, 하전시간의 감소)에 기

인한 것으로 판단된다.

이러한 현상은 큰 입자에 대해 더욱 확연히 나타나며, 4 m/s의 낮은 유속에서도 $7\ \mu\text{m}$ 입자에 대해 인가전압 20 및 30kV에서의 집진효율은 거의 미세한 차이를 보인다. 8, 12, 16 m/s로 커지면서 미세한 효율 차이를 나타내는 입경은 감소하면서 더욱이 16 m/s에서는 $2.6\ \mu\text{m}$ 정도로 작아지며 집진되는 모든 입경범위에서 전기력 효과는 미세하게 나타난다.

3. 2. 2 내부하전방식 전기싸이클론의 집진효율 특성
내부하전방식의 집진효율을 예비하전방식의 집진

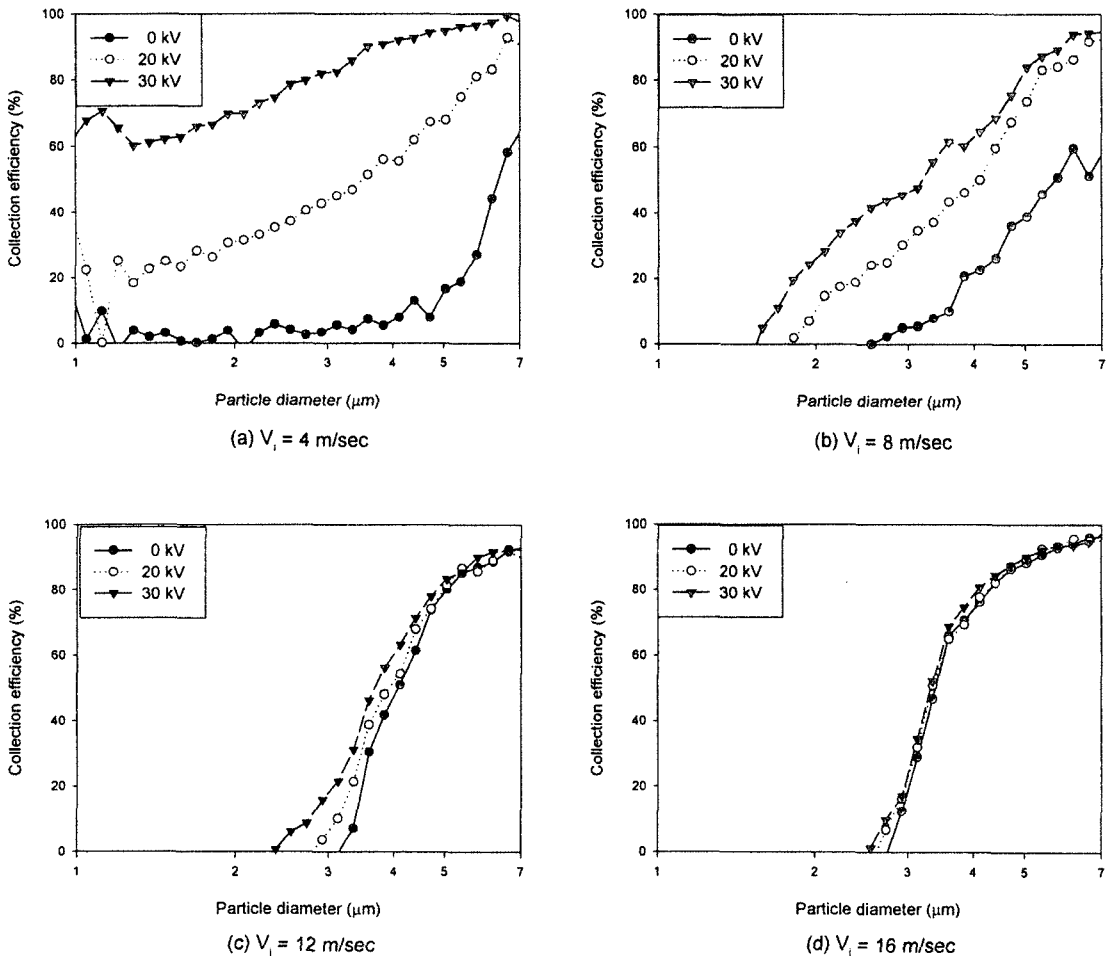


Fig. 7. Collection efficiency vs. particle diameter with various inlet velocities (precharger, 4 mm screw rod, $M_p = 100\ \text{mg/m}^3$).

특성과 비교하기 위해 동일한 농도(100 mg/m³), 유입유속, 인가전압 및 방전극(φ 4 mm, 나선형)의 실험조건에서 해석하였다. 그림 7은 내부하전방식을 이용한 전기싸이클론의 인가전압 및 유입유속의 변화에 따른 집진효율의 결과로서 집진효율에 대한 정전기력의 영향은 유입유속이 증가할수록 낮아지며 관성력에 의한 영향이 높아져 예비하전방식 전기싸이클론의 집진효율 특성과 유사함을 보여주고 있다. 정전기력이 지배적으로 작용하는 유입유속($V_i = 4$ m/s)인 그림 8-a를 살펴보면 전압을 인가하지 않을 경우는 10% 내외의 낮은 집진효율로 예비하전방식의 결과와 비슷하지만, 30 kV의 전압을 인가했을 경우는 35~85% 범위의 집진효율을 나타내어, 그림 7-a의 예비하전방식 30 kV의 효율과 비교하면 평균 20% 이상 감소함을 볼 수 있다. 내부하전방식은 싸이클론 본체의 중심부에 직경 4 mm, 길이 400 mm의 나선형 방전극을 사용하였으며, 그림 4의 전압-전류 특성 그림에서 보듯이 예비하전부의 직경 1 mm, 길이 500 mm의 원형 및 직경 4 mm, 길이 500 mm 나선형 방전극에 비해 동일 전압에서 전류 발생이 매우 낮으며, 코로나 개시 전압은 증가하는 특성을 나타낸다. 이는 방전극에서 접지극의 역할을 하는 집진장치 본체와의 거리가 멀어 집진장치 내에 형성된 전류밀도가 매우 낮음에서 기인된다. 따라서 내부하전방식은 예비하전장치가 설치된 유입구에 비해 입자가 대전될 수 있는 체류시간이 다소 길더라도 싸이클론 본체로 유입된 분진이 전류밀도가 매우 낮은 집진장치의 내벽에 형성된 외부 선회류를 따라 이동함으로써 입자가 대전 될 수 있는 하전량이 감소되어 예비하전방식의 동일 인가전압에 따른 집진효율보다 낮은 것으로 사료된다.

그러나, 유입유속이 비교적 높은 12 m/s, 인가전압 20, 30 kV 인 경우 내부하전방식은 예비하전방식의 집진효율과 비교할 때 예비하전부의 유속증가(입자 하전시간 감소)에 의한 입자 하전량의 감소와 원심력의 증대로 인한 전기력 효과의 감소에 의해 거의 차이가 없는 것으로 나타난다. 이는 입자의 하전량이 전기장 내에서 입자가 체류하는 시간과 밀접한 관계가 있기 때문(Oglesby와 Nichols, 1978)으로 예비하전방식의 경우는 유입된 입자가 예비하전장치에 의해 형성된 전기장을 빠르게 통과하여 입자의 대전에 필요한 최소한의 시간을 가지지 못한

반면, 내부하전방식의 경우는 유속 증가에도 불구하고 입자가 대전될 수 있는 체류시간이 비교적 길기 때문에 낮은 전류밀도에도 불구하고 입자의 대전이 이루어질 수 있는 것으로 추정된다.

따라서, 예비하전방식에서 높은 유속에서도 전기적 효과를 증대시키기 위해 하전부의 길이를 크게 하여 입자 대전시간을 증가시킬 수 있는 반면, 내부하전방식에서는 강한 내부 선회류에 의한 방전극의 흔들림에 의해 전압-전류 특성이 우수한 직경이 가는 방전극의 사용은 불가능하며, 특히 싸이클론 본체 내부에 방전극의 설치·고정 및 유지·관리

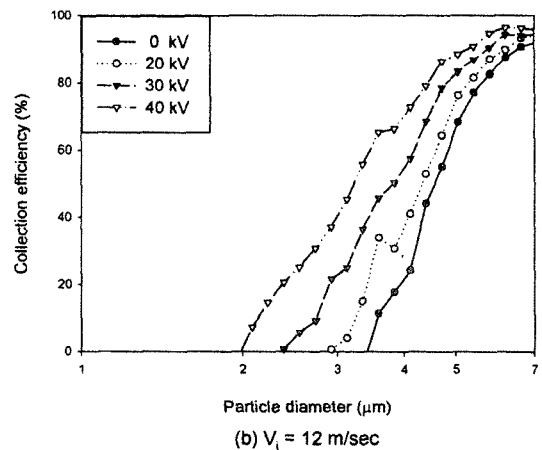
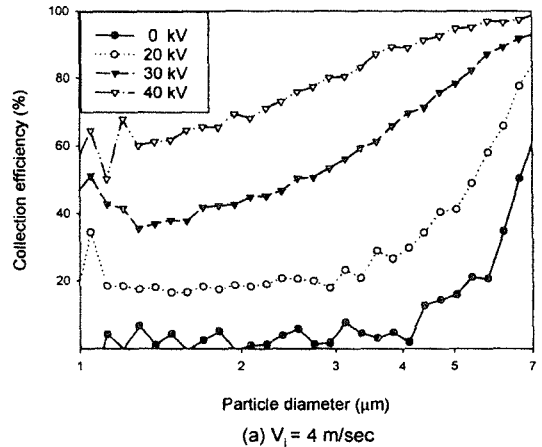


Fig. 8. Collection efficiency vs. particle diameter with various inlet velocities(innercharger, 4 mm screw rod, $M_p = 100$ mg/m³).

면에서 용이하지 않을 것으로 판단된다. 즉, 예비하전부에서 그림 4에서 보는 바와 같이 전압-전류 특성이 ϕ 4 mm, 나선형보다 효과적인 직경이 가는 ϕ 1 mm, 원형 방전극을 사용하였을 경우 예비하전 방식에 의한 집진특성은 더욱 나아질 것으로 평가된다.

3.3 총괄집진효율

인가전압, 유입유속 및 방전극 형상 변화에 따른 예비하전 및 내부하전방식의 총괄집진효율의 경향을 해석하기 위해, 총괄집진효율은 다음과 같은 식에 의해 계산되어진다(단, 입자는 구형으로 가정한다).

$$\eta_t(\%) = \frac{\sum(V_j N_{in,j} - V_j N_{out,j})}{\sum(V_j N_{in,j})} \times 100 \quad (3)$$

여기서, η_t 는 총괄집진효율, V_j 는 입경별 부피, $N_{in,j}$ 는 입경별 유입 입자수, $N_{out,j}$ 는 입경별 유출 입자수를 나타낸다. 그림 9는 농도 100 mg/m³, 직경 4 mm 나선형 방전극에서 유속 및 인가전압에 따른 예비하전 및 내부하전방식의 총괄집진효율을 비교한 것이다. 유입유속 4 m/s에서 전압을 인가하지 않은 경우의 예비하전방식과 내부하전방식의 총괄집진효율이 15.3%와 14.5%로써 각 방식에 따라 비슷하게 나타나지만, 인가 전압 20 kV에서 각각 59.6, 35.8%와 인가전압 30 kV에서 88.1, 67.2%로 0 kV에 비해 인가전압의 증가에 따른 총괄집진효율의 상승이 매우 두드러졌으며, 더욱이 내부하전방식에 비해 예비하전방식의 경우가 20% 이상 높은 효율을 유지함을 알 수 있다. 또한 그림에서 보듯이 내부하전방식에서 인가전압 40 kV의 총괄집진효율이 86.8%로 인가전압 30 kV의 예비하전방식 전기싸이클론의 총괄집진효율과 비슷함을 나타내었으며, 유입유속이 12 m/s로 높아지면 인가전압에 따른 총괄집진효율 상승폭이 다소 둔화되며, 예비하전 및 내부하전방식의 효율차이는 감소되어진다.

그림 10은 예비하전방식에서 방전극 형상(직경 4 mm, 길이 500 mm 나선형 및 직경 1 mm, 길이 500 mm 원형 방전극), 인가전압 및 유입유속에 따른 총괄집진효율을 비교한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 2개의 방전극은 인가전압 및 유속별 집진효율 경향은 유사하지만, 직경 4 mm 나선형 방전극에 비

해 직경 1 mm 원형 방전극의 집진효율이 전기적 효과가 큰 4 m/s와 인가전압 20, 30 kV에서 최소 15% 이상 증가하게 되며, 유속이 증가하면서 그 차이는 작아짐을 알 수 있다. 이는 입자이동을 위한 전기력에 직접 관계되는 전류 형성이 앞서 그림 4에서 설명한 바와 같이, 4 mm 나선형에 비해 1 mm 원형 방전극에서 잘 이루어지며, 20, 30 kV에서 이런 현상은 더욱 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 따라서 전기적 효과를 증대시키기 위해 1 mm 원형 방전극이 매우 효과적임을 알 수 있으나, 싸이클론 본체의 중심

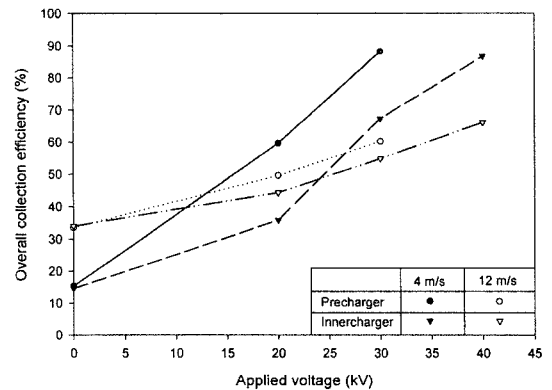


Fig. 9. Overall collection efficiency vs. applied voltage with charger type ($M_p = 100 \text{ mg/m}^3$, ϕ 4 mm screw rod).

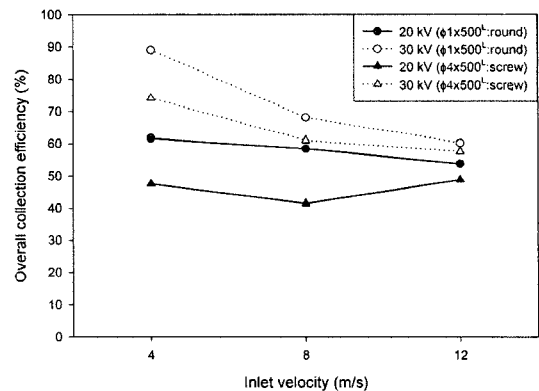


Fig. 10. Overall collection efficiency vs. inlet velocities with discharge electrode shape for pre-charger (ϕ 1 mm round rod, ϕ 4 mm screw rod).

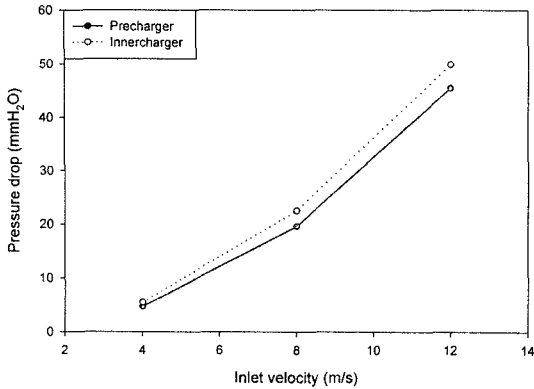


Fig. 11. Pressure drop vs. inlet velocity with charger type.

에 방전극을 설치하는 내부하전방식에서 1 mm 원형의 가는 방전극을 사용한 경우 강한 내부 선회류에 의한 방전극의 흔들림이 발생되어 안정된 전기장을 형성하지 못하는 문제점으로 인해서도 예비하전방식이 매우 효과적임을 알 수 있다.

3.4 압력손실

그림 11은 각 하전방식에 따른 집진장치의 압력손실을 나타낸 결과로서 유입유속이 증가할수록 압력손실이 증가하여 일반 싸이클론의 압력손실 특성과 유사하지만 내부하전방식의 경우가 예비하전방식의 경우보다 압력손실이 다소 높으며, 유속 증가에 따라 압력손실 증가 구배가 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 그림 1에서 볼 수 있듯이 싸이클론의 전단부에 설치되어 간단히 부착 및 교체될 수 있는 예비하전방식에 비해 내부하전방식은 집진장치 중심부에 방전극을 설치하므로 유입유속이 높아질수록 내부선회류를 형성하는 가스의 흐름에 방해가 될 초래하기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

예비하전 및 내부하전방식 전기싸이클론의 유입 유속, 인가전압 및 방전극 형상 등의 실험적 변수에 의한 전계 및 집진특성 해석과 각 하전방식에 따른 특성 비교 분석을 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 동일 방전극(직경 4 mm 나선형)에서 코로나 방전전력 ($I_c \times V$)은 내부하전방식에 비해 예비하전방식의 경우가 매우 높게 나타나며, 4 mm 나선형보다는 1 mm 원형 방전극이 더욱 효과적인 전압-전류 특성을 보인다.

2) 예비하전방식, ϕ 4 mm 나선형 방전극은 유입 유속 4 m/s 및 인가전압 30 kV 인 경우 전체 입경 범위에서 0 kV에 비해 최소 30% 이상의 집진효율 증가를 보이는 반면, 12 m/s 이상으로 높아지면서 전기적 효과는 20% 이하로 둔화된다. 특히 정전기력은 낮은 유속 (8 m/s 이하)에서 미세입자 ($3 \mu\text{m}$ 이하)의 집진효율 상승에 매우 효과적인 것으로 나타났다.

3) 4 m/s, 30 kV 및 4 mm 나선형 방전극에서의 총괄집진효율은 내부하전방식 65%에 비해 예비하전방식은 88% 정도로 높게 나타나며 유속이 증가하면서 집진효율 차이는 약화된다.

4) 예비하전방식에서 ϕ 4 mm, 나선형 방전극에 비해 ϕ 1 mm 원형 방전극의 총괄집진효율은 4, 8 m/s 및 30 kV 인 경우 최소 20% 이상 높게 나타난다.

5) 내부선회류의 장애요소로 작용되는 내부방전극으로 인하여 내부하전방식의 압력손실이 예비하전장치에 비해 다소 높게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 연구지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

기호설명

- M_p : dust concentration (mg/m³)
- V_i : inlet velocity (m/s)
- I_c : corona current (μA)
- V : voltage (kV)
- ϕ : diameter (mm)
- ρ_p : particle density (mg/m³)
- μ : viscosity (kg/m·s)

참 고 문 헌

- 조용수, 여석준(1996) 원통형 전기집진기의 전기유체역학적 해석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(3), 243-254.

- 하병길, 여석준 (1995) B/C 분진제거를 위한 전기싸이클론의 집진효율특성, 대한환경공학회지, 17(11), 1161-1169.
- Cristina, S., G. Dinelli, and M. Feliziani (1991) Numerical computation of corona space charge and V-I characteristic in DC electrostatic precipitators, IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-27(1), 147-153.
- Daniel, F., M. Pourprix, J. Vendil, J.Y. Deysson, and J.N. Dumont (1986) Étude d'un electrocyclone fonctionnant jusqu'à 600°C, La Technique Moderne, 11-17.
- Dietz, P.W. (1981) Electrostatically enhanced cyclone separators, Powder Technology, 31, 221-226.
- Elmoursi, A.A. and P. Castle (1986) The analysis of corona quenching in cylindrical precipitators using charge simulation, IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-22(1).
- Jaworek, A. and A. Krupa (1996) Corona discharge from a multipoint electrode in flowing air, Journal of Electrostatics, 38, 187-197.
- Leith, D. and W. Licht (1972) The collection efficiency of cyclone type particle collectors. A new theoretical approach., AIChE Symposium. Series, 126(68).
- Oglesby, S.Jr. and G.B. Nichols (1978) Electrostatic Precipitation, Marcel Dekkor Inc. 57pp.
- Ohtsuka, K. and M. Shimoda (1986) Mechanism of fabric filtration by electrostatic augmentation, Journal of Electrostatics, 18, 93-102.
- Petroll, J. and K. Langhammer (1962) Vergleichsversuche an zyklonabscheindern, Friberg. Forschungsheft., A220, 175-196.
- Plucinski, J., L. Gradon, and J. Nowwicki (1989) Collection of aerosol particle in a cyclone with an external electric field, Inst. of Chem. Eng., Warsaw Univ. of Tech., Poland, 695-700.
- Watanabe, T., H. Fujinami, T. Takuma, and Y. Sunaga (1986) DC Corona discharge characteristics and ionflow distribution for several types of rods under low pressure, IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-22(3), 547-553.