

PET 코팅된 비금속 집진판을 사용한 2단 전기집진기의 상대습도에 따른 집진효율 연구

이한얼¹⁾ · 이광택¹⁾ · 안소희^{1),2)} · 박예원^{1),2)} · 이건희¹⁾ · 홍기정¹⁾ · 박인용¹⁾ · 김상복¹⁾ · 박대훈¹⁾ · 이예원¹⁾ · 송동근¹⁾ · 김용진¹⁾ · 한방우¹⁾ · 김학준^{1)*}

¹⁾한국기계연구원 지속가능환경연구실

²⁾연세대학교 기계공학과

(투고 2023년 5월 31일, 수정 2023년 8월 26일, 게재확정 2023년 8월 27일)

A Study on collection efficiency of two-stage electrostatic precipitator using PET-coated non-metallic electrode with respect to relative humidity

Haneol Lee¹⁾, Gwangtaek Lee¹⁾, So-Hee An^{1),2)}, Ye Won Park^{1),2)}, Gunhee Lee¹⁾, Kee Jung Hong¹⁾, Inyong Park¹⁾, Sang Bok Kim¹⁾, Daehoon Park¹⁾, Yeawan Lee¹⁾, Dong-Keun Song¹⁾, Yong-Jin Kim¹⁾, Bangwoo Han¹⁾, Hak-Joon Kim^{1)*}

¹⁾Department of Sustainable Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received May 31 2023; Revised August 26 2023; Accepted August 27 2023)

Abstract

This study compared the collection efficiency of a two-stage electrostatic precipitator (ESP) with a lightweight PET film-coated carbon electrode collector plate, depending on the relative humidity of the exhaust gas and the applied voltage to the pre-charger. It was confirmed that the onset voltage at which corona discharge occurs decreases and the discharge current decreases at the same voltage as the relative humidity increases. On the other hand, even though there was almost no change in the diameter of the particles generated depending on the relative humidity, the efficiency was higher at the same voltage as the relative humidity increased. In addition, by applying a two-stage ESP structure, the collection efficiency was higher than that of a single-stage electrostatic precipitator under the same conditions. The ESP using the carbon electrode coated with PET film used in this study is expected to be effective in various aspects such as weight and in the current situation where environmental regulations are rapidly tightening.

Keywords: PElectrostatic precipitator, Relative humidity, Corona discharge, Coal-fired powerplant, non-metallic electrode

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7775

E-mail : diayolk@kimm.re.kr

1. 서론

석탄화력발전소에서는 발전과정에서 전구물질 중 하나인 SO_x 등과 같은 전구물질과 함께 많은 양의 입자상 물질을 배출한다. 국립환경과학원 2021년 자료에 의하면 PM_{2.5} 중 60%가 기체 또는 액체 상태로 배출되는 전구물질이 대기 중에서 화학 반응으로 고체가 되면서 만들어진다. PM_{2.5}는 사람의 호흡기에서 거르기가 어려워 폐 속 깊숙이 침투하여 신체에 심각한 영향을 끼친다(Kampa and Castanas, 2008). 사회적으로 이에 대한 경각심이 증가하면서 배가스에 대한 규제는 갈수록 강화되고 있으며, 2019년에 발표된 정부의 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)에서는 화력발전소에서 발생하는 SO_x나 NO_x를 제거하기 위한 탈황, 탈질 설비와 함께 PM을 제거하기 위한 집진설비에 대한 투자 확대 및 기술 개발을 요구하고 있다.

입자상 물질을 제거하기 위한 집진기술로 세정식, 중력식, 여과집진 등 여러 방식이 있으나 전기집진기(ESP; electrostatic precipitator)는 집진효율이 높고 다량의 배가스를 처리 가능하며 압력손실이 적어 석탄화력발전소에 널리 이용된다. ESP는 코로나 방전을 발생시켜 입자를 하전시키고, 하전된 입자에 강한 전기장을 가하여 정전기력을 이용하여 입자를 제거한다. 일반적으로 ESP에서의 배가스의 온도는 140~170°C에서 운용되며 이 온도에서는 배가스의 주성분인 석탄재의 전기저항값이 크기 때문에 ESP 가동에 있어서 매우 비효율적이다(Kikkawa et al., 2015). 따라서 초기에 ESP의 배가스 온도를 350~400°C로 향상하는 연구가 진행되었고, 배가스의 높은 전기저항성에 대한 문제는 사라질 것으로 예상되었다(Walker, 1975). 하지만 상승된 온도에서 일정 시간 동안 작동한 후, 전자가 배출되는 전극 쪽으로 표류하는 양이온의 생성이 더욱 촉발되어 입자의 하전 및 집진효율을 감소시키는 백 코로나(back-corona) 현상이 발생해 연구가 중단되었다(Bickelhaupt, 1980). 이후, 배가스의 온도를 낮추는 연구가 진행되었으나, 저온 부식의 문제가 발생했다(Vainio et al., 2014). 이 현상은 발전소의 배가스 중 가장 많은 SO₂의 일부가 산화하여 SO₃가 되고 연소가스 속의 수증기와 반응하여 생성된 황산(H₂SO₄)으로

ESP의 전극이 부식되는 현상이다. 따라서 한국의 석탄화력발전소는 부유 입자가 큰 비저항 값을 갖더라도 저온 부식이 발생하지 않는 높은 온도에서 가동되고 있으며, 여전히 정부의 규제를 만족하지 못해, 발전소의 출력제한이나 비상 저감 조치가 시행되면서 발전소 가동에 심각한 차질이 발생하고 있다. 앞으로 그 규제는 미세먼지의 경각심이 증가함에 따라 더욱 강화될 것이므로 배가스의 집진효율 향상을 위한 새로운 개념의 연구가 절실한 상황이다.

저온 영역에서 전기집진기가 운전할 수 있도록 하려면 Inconel 및 Hastelloy 합금과 같은 내식성 금속이 필요하며 이는 설비비용 증가로 이어진다. 내식성 금속을 대신하기 위한 여러 연구가 진행되어 왔으며, Kang et al. (2016)은 폴리프로필렌(PP) 판에 Polyanilin)을 코팅하여 집진 전극용으로 사용하는 연구를 하였다. 본 연구에서는 탄소전극판에 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET; Polyethylene terephthalate)를 코팅하였다. 비정질 탄소의 전기전도성이 (전기 전도도는 약 1×10^3 S/m) 좋아 전극으로 사용하기에 적합할 뿐만 아니라, 밀도가 2 g/cm³으로 스테인리스강의 1/4 수준으로 경량이며 비용이 저렴하다(An et al., 2021). 또한, 본 연구에서는 집진효율 향상을 위해 기존의 발전소용 집진기와 달리 하전 단계와 집진 단계를 분리한 2단 전기집진기 구조를 적용하였다. 기존에 주로 사용되는 1단 전기집진기는 하전과 집진이 같이 일어나기 때문에 전기장의 강도를 높이는 경우 안정성의 문제로 전기장의 강도를 높이는 데 한계가 있다. 반면 2단 전기집진기는 집진 전극 사이에 스파크 방전을 일으킬 수 있는 날카로운 방전 지점이 없으므로 전기장의 세기를 더 높일 수 있는 장점이 있다(An et al., 2021). 또한, 고온의 가스가 저온으로 될 시에 다습한 환경이 조성되므로 하전부의 인가전압에 따른 2단 ESP 장치의 효율 변화를 상대습도(Relative humidity, RH)별로 나타내어 ESP에 대한 RH의 영향을 측정하였다.

2. 실험장치 및 연구방법

그림 1은 실험에 사용한 장치의 개략도를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 2단 전기집진기는 금속전극을 사

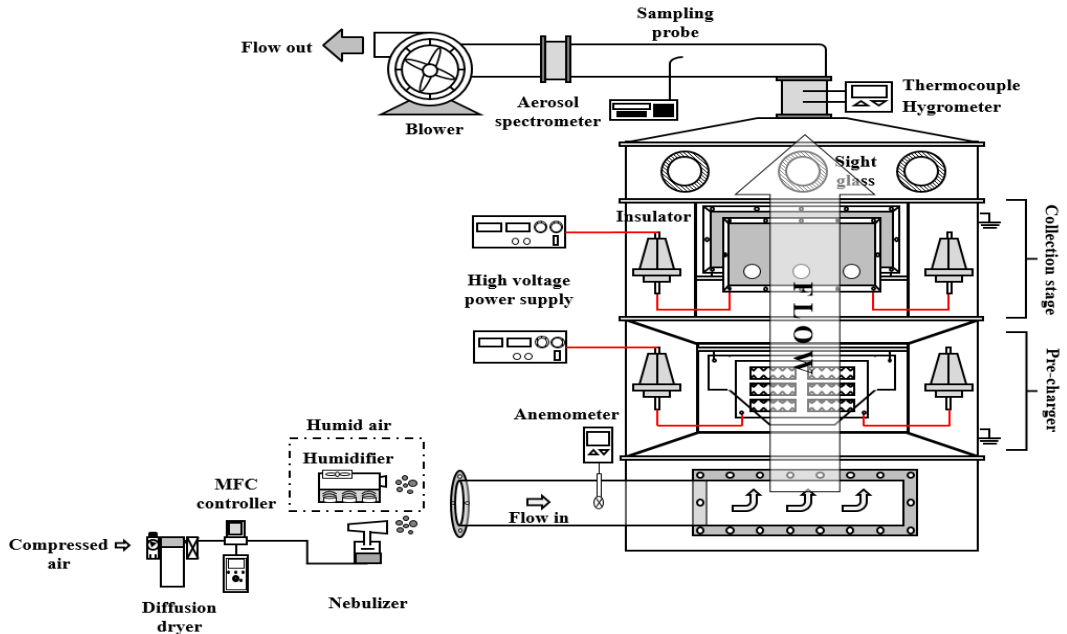


Figure 1. Schematic of the experimental set up in this study.

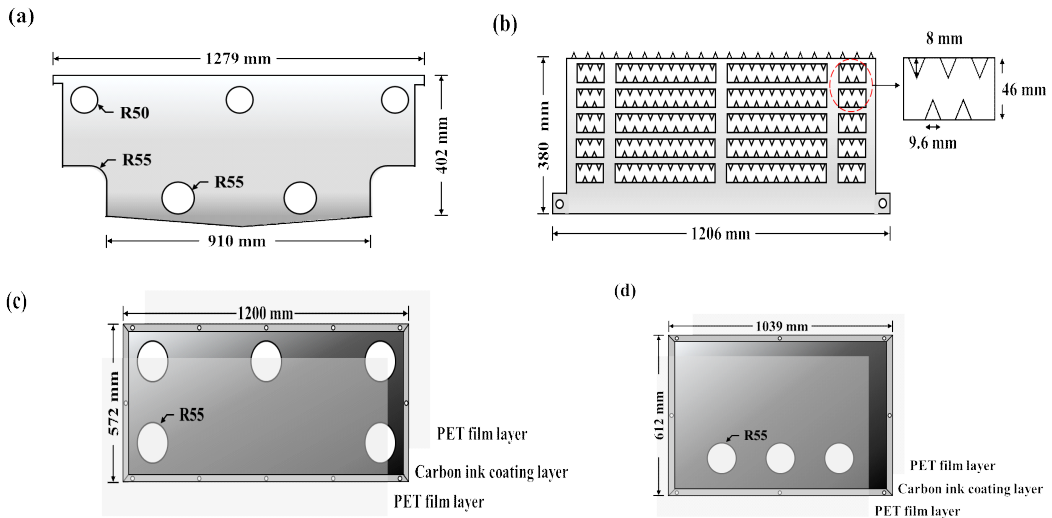


Figure 2. Schematics of metal electrode for the pre-charger and non-metallic electrode for collector. (a) Metal ground electrode of the pre-charger, (b) Metal discharge electrode of the pre-charger (C) Non-metallic ground electrode of the collection stage, (d) Non-metallic high-voltage electrode of the collection stage.

용하는 하전부 (Pre-charger)와 비금속 전극을 사용하는 집진부 (Collection stage)로 이루어져 있다. 하전

부는 그림 2(a)와 같은 접지전극과 그림 2(b)와 같이 생긴 고전압전극이 30 mm 간격으로 배치되어 있다.

설치된 전극의 접지전극 개수는 4개이고 1면의 면적이 0.3580 m²이며, 고전압전극의 개수는 3개이다. 집진부는 그림 2(c)와 같은 집진전극과 그림 2(d)와 같이 생긴 고전압전극이 30 mm 간격으로 배치되어 있으며 0.1 mm 탄소필름 전극의 양면에 PET 필름을 압착하여 코팅하여 제작하였으며 PET 필름 코팅된 전극의 두께는 0.5 mm이다. 집진전극의 1개의 너비는 1,200 mm, 높이는 572 mm으로 집진면적은 0.6471 m²이며, 4개의 집진전극과 3개의 고전압전극이 30 mm 간격으로 배치되어 총 3.88 m²의 집진면적을 갖는다. 그림 2의 전극의 원형으로 뚫린 부분은 전극을 지지하기 위한 지지대가 지나가는 위치를 나타낸다. 또한, 집진전극 1개의 무게는 1.8 kg 으로 PET 필름 코팅된 탄소전극 대신 스테인리스강을 이용하여 같은 면적을 제작했을 때 무게 5.5 kg보다 67.3% 경량화되었으며 PET 필름 코팅에 의한 전기장 세기의 변화는 Lee et al. (2022)의 이전 연구결과를 참고하였을 때 1% 정도 차이가 날 것으로 예상된다.

일반적으로 화력발전소의 전기집진기는 집진된 비산재의 재비산을 방지하기 위해 유속을 1 - 1.5 m/s로 설계한다 (US EPA, 2002). 본 연구의 집진기의 하전부와 집진부 유로의 단면적은 0.46 m²으로 1,500 CMH 유량을 기준으로 할 때 집진기를 통과하는 유속은 약 1 m/s이다. 이는 US EPA의 전기집진기 설계 매뉴얼의 유속에 부합한다.

전기집진기의 하전부와 집진부는 각각 DC 고전압 공급장치를 (C.180 Max -30 kV/10 mA, KSC, Korea) 사용하여 (-)의 고전압을 개별적으로 인가하였다. 또한, 장치 전면에 연결된 지름 250 mm의 원형 덕트 내부의 유속을 덕트 밀면으로부터 3개 지점으로 나누어 16 mm 베인 프로브와 연결된 유속계 (TESTO 480, TESTO SE & CO, Germany)를 통해 유속을 측정하여 평균유속을 계산하고 덕트의 단면적을 곱하여 전기집진기의 처리 유량을 계산하였다. 실험에 사용한 입자는 전기집진기의 정확한 효율을 측정하기 위하여 자연적으로 하전되기 어려운 상대 유전율(ϵ_r)이 2.5인 탭핑유 (ST-501-1, ELE, Korea)를 2개의 공압식 네블라이저를 (8900-7-50, Salter Labs, U.S.) 이용하였다. 공압식 네블라이저는 압축공기의 흐름을 사용하여 탭

핑유를 미세한 액적으로 분무시킨다. 탭핑유는 네블라이저 하단의 챔버에 보관되며 압축공기는 챔버 바닥의 작은 오리피스를 통해 전달된다. 압축공기가 오리피스를 통과할 때 진공이 형성되어 탭핑유를 압축공기 흐름으로 빨아들이고, 탭핑유가 고속의 가스 흐름에 의해 미세한 액적으로 쪼개지게 된다. 네블라이저에 의해 생성되는 액적의 크기는 압축공기의 압력과 오리피스의 크기에 의해 결정된다. 본 연구에서는 HEPA필터로 여과한 압축공기를 질량유량제어기(MFC; Mass flow controller, TN-280, Celerity, Inc. USA)를 통해 2 bar, 16 L/min으로 네블라이저로 공급하였다.

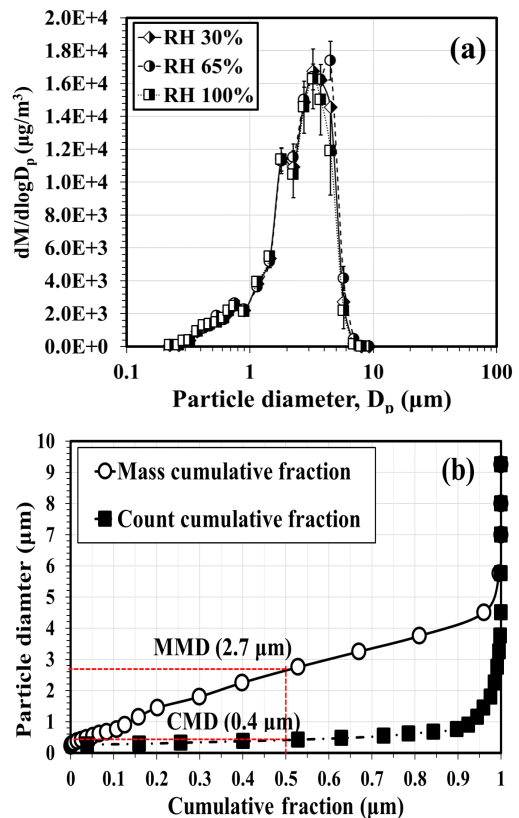


Figure 3. (a) Oil particles mass distribution and (b) cumulative fraction according to particle diameter.

또한, 습도에 따른 전기집진기의 효율 변화를 확인하는 실험에서는 10개의 헤드를 찾는 평판형 초음파진동자를

이용한 가습기(JWD481007-001S 250W, Dongguan, China)를 이용해 수증기를 발생시켜 RH 100%인 환경과 65%인 환경을 조성하여 습도에 따른 소비전력 차이와 ESP 효율 변화를 측정하였다.

그림 3(a)는 습도에 따른 네블라이저를 통해 발생시킨 오일입자의 질량농도를 나타내며, 그림 3(b)는 RH 65%일 때 입자의 누적빈도를 낸다. 개수 누적빈도의 중앙값 (CMD, Count median diameter)은 0.4 μm, 질량 누적빈도의 중앙값 (MMD, Mass median diameter)은 2.7 μm를 나타내었으며, RH 변화에 따라, RH 30%에서 CMD와 MMD는 0.4 μm와 2.6 μm 이었으며, RH 100%에서 CMD와 MMD는 0.4 μm와 2.5 μm로 RH 증가에 따른 발생된 입자의 직경 변화는 거의 없었다.

전기집진기의 가동에 따른 오일입자의 집진효율을 측정하기 위해 전기집진기의 배가스 배출구에 광학입자 계수기(OPC; optical particle counter, 1.109, Grimm GmbH, Germany)를 연결하여 집진기에 전압을 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때 배출되는 오일입자의 질량농도를 각각 10분간 측정 후 평균하였다. 이를 아래의 식(1)에 대입하여 집진효율을 계산하였다(An et al., 2021).

$$\eta(\%) = \left(\frac{C_{off} - C_{on}}{C_{off}} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 η 는 집진효율(%), C_{off} 는 집진기에 전압을 인가하지 않았을 때 배출되는 오일의 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_{on} 은 집진기에 전압을 인가하였을 때 배출되는 오일 입자의 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타낸다.

또한, 비금속 집진부에 전압을 인가하지 않는 경우 비금속 집진부에서는 입자가 집진되지 않으므로 장치의 하전부에서 입자의 하전과 집진이 동시에 일어나는 1단 전기집진기로 취급할 수 있다. 반면 비금속 집진부에 전압을 인가하는 경우 하전부를 통과하면서 하전된 입자가 집진되므로 2단 전기집진기의 전체 효율은 하전부에서 집진되는 효율과 집진부에서 집진되는 효율 모두 고려된다. 2단 전기집진기에서 금속 하전부에서의 집진효율과 전체 집진효율은 입자계수기로부터 측정된 값을 통해 구할 수 있으며, 비금속 집진부의 효율

은 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

$$\eta_t = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \quad (2)$$

식 (2)에서 η_t 는 전체 집진효율(%), η_1 는 하전부의 집진효율(%) 그리고 η_2 는 집진부의 효율을 나타낸다.

일반적으로 ESP의 집진효율은 아래의 식 (3)과 같은 Deutsch-Anderson 방정식을 이용해 통해 추론할 수 있다(Hinds, 1999).

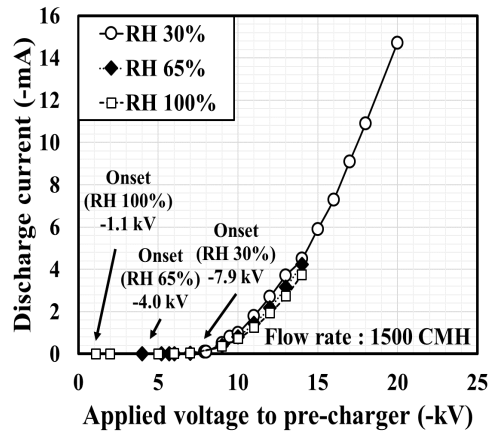


Figure 4. Corona discharge current according to applied voltage of the pre-charger.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-W_m \times A}{Q}\right) \quad (3)$$

여기서 η 는 전기집진기의 집진효율 (%), Q 는 집진부를 통과하는 배가스의 유량 (m^3/sec), A 는 집진면적 (m^2), W_m 은 입자가 집진판으로 이동하는 속도 (m/s)이며 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$W_m(d_p, E_c) = \frac{C_c Q_p E_c}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

식(4)에서 C_c 는 미끄럼 보정계수, Q_p 는 입자의 하전량 (C), E_c 는 전기장의 강도 (V/m), μ 는 기체의 점성계수 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)이며, d_p 는 입자의 직경 (m)을 나타낸다.

입자의 하전량 Q_p 는 Cochet의 대전 모델을 통해 계산하였으며, 계산식은 식 (5)와 같다(Riehle, 1997).

$$Q_p^\infty = \left\{ (1 + 2\lambda/d_p)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2\lambda/d_p} \right) \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E_p \quad (5)$$

여기서 Q_p^∞ 는 입자의 하전량 (C), d_p 는 입자의 직경 (m), λ 는 기체분자의 평균자유행로 (m), ϵ_r 은 탭핑유의 유전율, ϵ_0 은 진공 유전율, E_p 는 하전부 전기장 (V/m)이다. 상대유전율은 본 연구에 사용된 발생 입자의 주성분인 탭핑유의 값을 (2.5) 사용하였다. 또한, 식 (4)의 미끄럼 보정계수 C_c 는 아래의 식 (6)을 이용하여 계산하였다(Hinds, 1999).

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left\{ 1.264 + 0.42 \exp\left(-0.87 \frac{d_p}{2\lambda}\right) \right\} \quad (6)$$

여기서 d_p 는 입자의 직경 (m), λ 는 기체분자의 평균 자유행로 (m) 나타낸다. 공기의 점성과 평균자유행로는 각각 1.85×10^{-5} Pa-s와 6.6×10^{-8} m로 계산하였다. 식 (3)의 Deutsch-Anderson 방정식을 이용해 계산한 효율을 계산한 값과 비교하였다.

3. 실험결과

그림 4는 금속 하전부에 인가되는 전압에 따른 코로나 방전전류에 대한 습도의 영향을 나타낸다. 집진기 내부의 RH는 30%인 경우 하전부의 전압을 -20 kV까지 인가하여도 스파크가 발생하지 않았다. 그러나 RH를 65%, 100%의 경우 집진기 내부의 습도를 조절하기 위해 초음파진동자를 이용한 가습기를 이용하여 발생 시킨 액적을 집진기 내부로 주입하기 때문에 놓기 때문에 시간이 지날수록 하전부에 집진된 액적에 의해 고전압 전극에 수분이 맺혀 -14 kV 이상의 전압을 인가하는 경우 스파크가 발생하여 이후 실험은 하전부 인가전압 -14 kV 이하에서 진행하였다.

그림 4에서 RH가 증가하는 경우 코로나 방전의 개시 전압이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Gallo et al. (1969)의 연구에 의하면 RH가 높을수록 H₂O 입자 모여 클러스터 (H₂O)_n가 형성되고 (H₂O)_n은 H₂O 분자에 비해 이온화 에너지가 낮아 이온화가 잘 일어나므로, 코로나 방전 개시전압이 낮아진다. 한편 RH가 증가할수록 동일한 전압에서 방전 전류값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. Nagato et al. (2006)의 기존 연구에 따르면 공기 중 negative 코로나 방전 시 O₃⁻(H₂O)_n, O₃⁻(H₂O)_n, OH⁻(H₂O)_n, NO₃⁻(H₂O)_n 등 수화된 이온이

형성되는데, 수화된 이온의 질량이 커지므로 이들 이온의 이동도가 감소하여 방전 전류값이 줄어들게 된다. 본 연구에서는 RH= 65%일 때는 하전부 인가전압이 -4 kV일 때 코로나 방전이 개시되고, -6 kV에서 0.004 mA, -10kV에서는 0.81 mA, -14kV에서는 4.23 mA를 나타내었다. 반면, RH= 100%일 때는 인가전압이 -1.1 kV에서 코로나 방전이 개시되고, 인가되는 전압이 증가함에 따라 -14 kV에서는 3.75mA를 나타냈다. 금속 집진판의 전력은 인가전압과 방전전류의 곱으로 표현할 수 있으므로 RH= 65%일 때, 금속 하전부에서의 소비전력은 최대 -14 kV에서 59.22 W이며 RH= 100%일 때는 최대 -14 kV에서 52.5W를 나타내어 습도가 증가함에 따라 방전전류 값이 줄어들며, 최대 6.72 W까지 소비전력이 낮아지는 것을 알 수 있다.

그림 5는 본 연구의 비금속 2단 전기집진기를 1단 전기집진기와 2단 전기집진기로 가동하였을 때 PM_{2.5} 집진 효율을 비교한 그래프이다. 실험 시 가습장치를 통해 별도의 습분을 공급하지 않았으며 이때의 집진기 내부의 RH는 30%, 온도는 21 °C였다. 집진 성능을 비교하기 위해 1단 전기집진기 및 2단 전기집진기의 하전부에는 -15, -17, -20 kV로 전압을 변화시켜 인가하였고 이때 전류는 각각 -5.8, -9.1, -14.7 mA를 나타내었다. 2단 전기집진기로 가동한 경우 추가로 집진부에 -10 kV의 전압을 인가하였다. 유량은 600, 1200, 1800 CMH로 변화시켜 집진 성능을 비교하였으며 이때

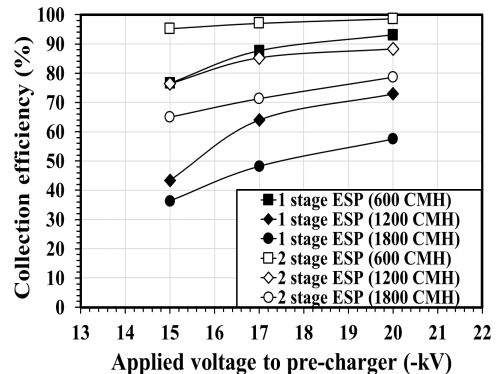


Figure 5. Variation of particle removal efficiency with flow rate and applied voltage to the pre-charger stage (Voltage of collection stage : - 10 kV)

비금속 집진부를 통과하는 유동의 속도는 각각 0.36, 0.73, 1.10 m/s이다. 먼저 유량이 600 CMH인 경우 하전부에 -15 kV를 인가하였을 때 1단 전기집진기로 작동시킨 경우 집진효율 76.7%를 나타내었으며, -20 kV로 인가전압을 높임에 따라 집진효율은 93.1%까지 증가하여 효율은 약 17% 증가하였다. 동일한 유량 조건에서 2단 전기집진기로 가동한 경우 효율은 95.2 ~ 98.7%로 증가하였다. 이때 식 (2)를 통해 계산한 집진부의 집진효율을 80.4%로 계산된다. 2단 전기집진기의 경우 하전부에서 집진에 일어남과 동시에 추가로 집진부에서 집진이 일어나므로 전체적인 집진면적이 증가한다. 따라서 2단 전기집진기가 1단 전기집진기보다 집진효율이 높았다. 유량을 1200 CMH, 1800 CMH로 증가시킨 경우 1단 전기집진기의 최대 효율은 각각 72.9%, 57.5%로 유량이 증가함에 따라 최대 효율이 각각 20.2%, 35.6% 감소하였으며, 2단 전기집진기의 경우 10.3%, 20.1% 감소하여 유량이 증가할수록 집진효율이 감소하였다. 식 (3)을 통해 미루어봤을 때 2단 전기집진기는 하전부에 인가되는 전압이 높아질수록 하전부에서도 일부 하전된 입자가 점진전극에 포집되기 때문에 1단 전기집진기보다 집진면적(A)이 넓어지게 된다. 따라서 동일 조건에서 효율이 더 높을 것으로 예측할 수 있다. 또한, 집진기에 의해 처리되는 유량이 클수록 효율이 감소할 것으로 예측할 수 있으며 그림 5의 결과도 같은 경향을 나타내었다.

그림 6은 하전부 인가전압과 습도에 따른 전기집진기의 PM_{2.5} 집진효율을 나타낸다. 1단 전기집진기와 2단 전기집진기로 가동하였을 때 습도에 따른 집진효율을 비교하기 위해 비금속 집진부에 인가되는 전압은 0, -10 kV로, 집진기를 통과하는 유량은 1500 CMH로 고정하였으며 가습장치를 이용하여 수증기를 공급하여 집진기 내부를 통과하는 유동의 RH는 65%와 100%로 유지되도록 하였으며 RH 30%에서의 조건은 그림 5의 데이터를 이용하여 추정하였다. 2단 전기집진기로 가동하였을 때, 하전부 인가전압이 -8 kV에서는 RH가 65%에서 100%로 증가함에 따라 효율이 25.6%에서 33.3%로 7.7% 증가하였고, -14 kV에서는 68.9%에서 77.2%로 8.3% 증가하여, RH가 65%에서 100%로 증가함에 따라 평균적으로 효율이 8.6% 상승하였다. 그

림 4와 같이 -8 kV에서 -14 kV 범위에서 RH가 65%에서 100%로 증가함에 따라 동일 전압에서 코로나 방전전류가 평균 7.8% 감소하였다. Nouri et al. (2016)의 이전 연구결과에 따르면 RH의 증가할 시 입자 표면의 수분 흡착에 의한 입자 크기 증가하여 입자의 포화대전한계(saturation charge limit) 늘어나 집진효율이 증가할 수 있다고 하나, 그림 5에서 볼 수 있듯이 RH 증가에 따른 발생된 입자의 직경 변화는 거의 없었다. 반면 Son et al. (2016)의 연구결과는 RH가 높은 경우 입자에 부착된 수증기에 의해 입자의 응집력이 증대되어 집진판에 집진된 입자가 재비산을 감소시켜 효율이 증가할 수 있는 것을 보여준다. Fig. 4와 같이 RH가 증가함에 따라 동일 전압에서 코로나 방전전류가 낮아지지만 Fig. 3(a)과 같이 발생된 입자의 직경 변화가 크게 변하지 않았다는 점에서 입자 대전향상보다 재비산 감소에 의한 영향이 더 크게 영향을 미친 것으로 보인다(Nouri et al., 2012; Said et al. 2019).

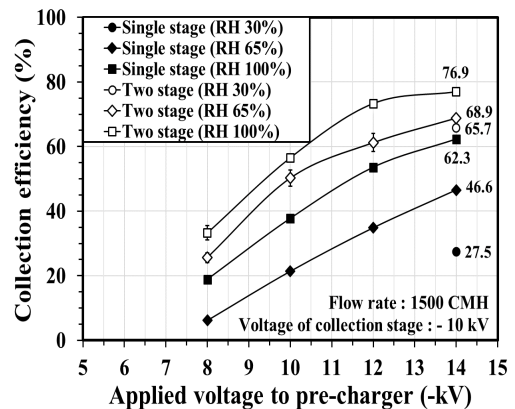


Figure 6. Collection efficiency as a function of humidity and applied voltage.

그림 7은 하전부 인가전압과 RH 변화에 따른 입경별 집진효율을 Deutsch-Anderson 방정식을 이용해 계산한 효율을 계산한 값과 비교한 그래프이다. 그림의 범례에서 Theoretical은 식(3)의 Deutsch-Anderson 방정식을 이용하여 계산한 이론적인 효율을 나타낸다. 그림 6과 마찬가지로, RH가 더 높을수록 집진효율이 더 높게 측정되었다. 1 μm 작은 크기의 입자에서는 하전부에 -10 kV를 인가하였을 때, Deutsch-Anderson

방정식을 통해 계산한 효율이 측정값보다 높게 계산되었는데, 이는 낮은 코로나 방전전류 (-1 mA 이하)로 인해 입자의 하전이 잘 되지 않아서라고 생각된다. 하전부에 -12 kV, -14 kV를 인가하였을 때는, 1 μm 미만의 입자에서 Deutsch 방정식을 이용하여 계산한 값이 측정값보다 낮게 계산되었는데, 이는 1 μm 미만의 입자에 대한 입자 대전 메커니즘이 확산과 전계대전 조합으로 나타내지만, 본 연구에서 사용된 Cochet의 대전 이론은 확산으로 인한 대전 효과가 이전 연구에서 관찰된 것처럼 과소평가되었을 수 있기 때문이라고 생각된다. (Kim et al. 2020).

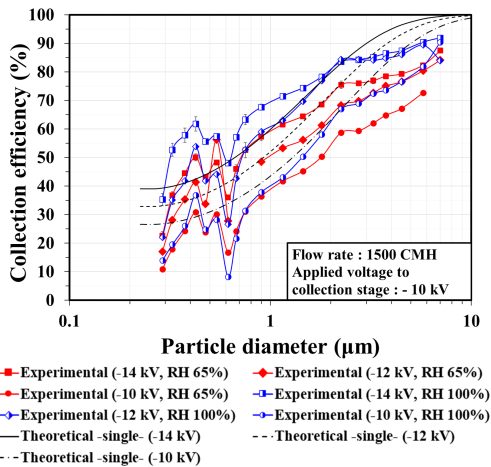


Figure 7. Comparison between the actual and theoretical collection efficiency of the two-stage electrostatic precipitator as a function of particle size for different voltages and relative humidity.

4. 결론

본 연구에서는 배가스의 상대습도 및 하전부의 인가 전압에 따른 경량의 PET 필름 코팅된 탄소전극 집진판을 갖는 2단 전기집진기의 집진효율을 비교해 보았다. 상대습도가 증가함에 따라 코로나 방전이 일어나는 전압이 낮아지고 동일한 전압에서 방전 전류값은 감소하였다. 한편 상대습도 따라 발생된 입자의 직경 변화가 거의 없음에도 불구하고 상대습도가 증가할수록 동일한 전압에서 더 높은 효율을 나타내었다. 이러한 결과로부터 입자의 크기 증가에 따른 하전량 증가보다는 입자에 부착된 수증기가 입자가 집진판에 부착되는 힘을 향상하여 입자의 재비산을 감소시켜 집진기의 효율 증대에 영향을 미치는 것으로 예측된다. 또한, 2단 전기집진기 구조를 적용하여 동일한 조건에서 1단 전기집진기보다 더 높은 집진효율을 얻을 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다. (Grant No. 20181110200170)

References

- An, S. H., Lee, Y., Kim, Y. S., Kim, Y. J., Han B. H. and Kim H. J., (2021). The study on collection efficiency of two-stage electrostatic precipitator using non-metallic electrode for improve corrosion resistance and light weight, *Particle and Aerosol Research*, 17(2), 21-27.
<https://doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.2.021>
- Bickelhaupt, R. E. (1980). An Interpretation of the Deteriorative Performance of Hot-Side Precipitators, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30(8), 882-888.
<https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10465124>
- Gallo, C. F., Germanos, J. E., and Courtney, J. E. (1969). The effect of humidity and temperature variations on the behavior of wire-to-plane coronas, *Applied optics*, 8(101), 111-119.
<https://doi.org/10.1364/AO.8.S1.000111>
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Kampa, M., and Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kang, G., Li, L., Wang, W., and Yu, D. (2016). Study of a polyaniline/polypropylene collecting electrode and its particle removal efficiency, *RSC advances*, 6(79), 75038-75044.
<https://doi.org/10.1039/C6RA13542K>
- Kikkawa, H., Shimohira, W., Nagayasu, T., Kiyosawa, M., Nagai, Y. and Kagawam, S. (2015). Highly-efficient removal of toxic trace elements and particulate matter in flue gas emitted from coal-fired power plants by air quality control system (AQCS), *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 52, 89-96.
- Kim, H. J., Kim, J. S., Han, B., and Kim, Y. J. (2020). Mist removal performance of a novel electrostatic precipitation type mist eliminator, with a narrow gap and high gas velocity, for use in coal-fired power plants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 923-931.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3038134>
- Lee, H., Sung, J. H., Kim, M., Kim, Y. S., Lee, Y., Kim, Y. J., Han, B., .and Kim, H. J. (2022). Development of electrostatic-precipitator-type air conditioner for reduction of fine particulate matter in subway. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(3), 3992-3998.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3160125>
- Nagato, K., Matsui, Y., Miyata, T., and Yamauchi, T. (2006). An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air. *International journal of mass spectrometry*, 248(3), 142-147.
<https://doi.org/10.1016/j.ijms.2005.12.001>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) *Annual Report of Air Quality in Korea 2021*.
- Nouri, H., Zouzou, N., Moreau, E., Dascalescu, L., and Zebboudj, Y. (2012). Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 70(1), 20-24.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.08.011>
- Nouri, H., Zouzou, N., Dascalescu, L., and Zebboudj, Y. (2016). Investigation of

- relative humidity effect on the particles velocity and collection efficiency of laboratory scale electrostatic precipitator, *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 225-232.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.09.001>
- Riehle, C. (1997). Basic and theoretical operation of ESPs, in *Applied electrostatic precipitation*. Springer, Dordrecht, 25-88.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-1553-4_3
- Said, H., Aissou, M., Nouri, H., and Zebboudj, Y. (2019). Analysis of the Current-Voltage Characteristic during the Corona Discharge in Wires-To-Planes Electrostatic Precipitator under Variable Air Humidity. *Acta Physica Polonica, A.*, 135(3),
<https://10.12693/APhysPolA.135.320>
- Son, C., Lee, W., Jung, D., Lee, D., Byon, C., and Kim, W. (2016). Use of an electrostatic precipitator with wet-porous electrode arrays for removal of air pollution at a precision manufacturing facility, *Journal of Aerosol Science*, 100, 118-128.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.07.005>
- US Environmental Protection Agency (US EPA). (2002). *EPA Air Pollution Control Cost Manual-Sixth Edition*.
- Vainio, E., Lauren, T., Demartini, N., Brink, A., and Hupa, M. (2014). Understanding low-temperature corrosion in recovery boilers: Risk of sulphuric acid dew point corrosion. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 4, 14-22.
- Walker A. B. (1975). Hot-side precipitators, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(2), 143-145.
<https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470061>