

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 17, No. 2: June 2021 pp. 21-27

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.2.021>

내부식성과 경량성 향상을 위한 비금속 재질 집진판의 2단 전기집진기 집진효율 연구

안 소 희^{1),2)} · 이 예 완¹⁾ · 김 예 슬^{1),3)} · 김 용 진¹⁾ · 한 방 우^{1),3)} · 김 학 준^{1),3)*}

¹⁾환경시스템연구본부, 한국기계연구원

²⁾메카트로닉스공학부, 한국기술교육대학교

³⁾환경에너지기계공학전공, 과학기술연합대학원대학교(UST)

(2021년 3월 29일 투고, 2021년 5월 28일 수정, 2021년 6월 1일 게재확정)

The study on collection efficiency of two-stage electrostatic precipitator using non-metallic electrode for improve corrosion resistance and light weight

So-Hee An^{1),2)} · Yeawan Lee¹⁾ · Ye-Sle Kim^{1),3)} · Yong-Jin Kim¹⁾ · Bangwoo Han^{1),3)} · Hak-Joon Kim^{1),3)*}

¹⁾Environmental System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon, Republic of Korea

²⁾School of Mechatronics Engineering, KOREATECH, Cheonan, Republic of Korea

³⁾Environmental & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology (UST), Daejeon, Republic of Korea

(Received 29 Mar 2021; Revised 28 May 2021; Accepted 1 June 2021)

Abstract

We developed non-metallic electrodes that can replace metallic electrodes of the electrostatic precipitator(ESP) for the purpose of light weight, corrosion resistance, cost reduction. We manufactured three types of collection electrodes made of stainless steel (M), Carbon ink coating layer-Plastic sheet-Carbon ink coating layer (CPC), and Plastic sheet-Carbon ink coating layer-Plastic sheet (PCP). We studied the collection efficiency of a two-stage ESP using oil mist particles with and without collection stage by changing the flow rate, the material of collection electrode, and the applied voltage of the pre-charger module and the collection module. Here we measured concentrations of particles at diameters of 0.45 μm (CMD; count median diameter) and 3.0 μm (MMD : mass median diameter), as well as PM_{2.5} and PM₁₀. As a result of the experiment, two-stage ESP had 22~25% higher collection efficiency in PM_{2.5} than one-stage ESP at the same applied voltage. The difference in collection efficiency by varying the materials of collection electrodes was less than 5%. The weight of the non-metallic electrode was only one eighth the weight of the metal electrode. CPC electrode had a thickness of 0.27 mm, which was 1.5 times thinner than a thickness of PCP electrode, so when the flow rate increased, the CPC electrodes couldn't be kept at equal intervals due to the fluttering unlike PCP electrodes. In addition, the PCP-CPC collection module of the present experiment followed the theoretical efficiency based on Deutsch equation and Cochet's charging theory.

Keywords: Electrostatic precipitator, carbon-coated electrode, plastic-coated electrode

*Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7775

Email : diayolk@kimm.re.kr

1. Introduction

장기적으로 고농도 미세먼지에 노출될 경우 천식, 폐질환, 심혈관 질환 등 다양한 질환이 유발될 수 있다고 알려져 있다(Kim, 2013). 특히 폐포에 흡착되어 손상을 줄 수 있는 $PM_{2.5}$ 초미세먼지는 각별한 주의가 필요하다(Feng et al., 2016). 2016년 환경부가 조사한 바에 따르면 $PM_{2.5}$ 배출량의 45% 이상이 발전 설비 및 제조업에서 발생하는 것으로 나타났다(National Institute of Environmental Research, 2019). $PM_{2.5}$ 인체 노출을 줄이기 위해 전 세계 환경 규제가 갈수록 엄격해지고 있으며, 발전소와 제조업은 환경비용 증가로 인해 보다 경제적인 환경 설비를 필요로 하고 있다.

발전소 및 산업시설은 일반적으로 백 필터, 사이클론 및 전기집진기 등의 환경 설비를 사용하여 배출 가스의 입자상물질을 감소시킨다. 백 필터는 가스를 직물형 필터에 통과시켜서 먼지를 여과시키고, 사이클론은 관성을 이용하여 직경에 따라 입자를 분리한다. 두 방식 모두 효율을 높이기 위해선 차압이 높아지게 되어, 차압을 극복하기 위한 추가적인 에너지가 요구된다. 특히 $PM_{2.5}$ 의 경우 일반적인 사이클론으로 높은 제거율을 확보할 수 없다.

전기집진기(Wang et al., 2016) 는 코로나 방전을 발생시켜 입자를 하전시키고, 하전된 입자에 강한 전기장을 가하여 정전기력을 이용하여 입자를 제거한다. 전기집진기는 공기 흐름을 방해하지 않고 입자에만 정전기력을 가하기 때문에 기존 백 필터, 사이클론 두 가지 방식에 비해 차압이 매우 낮다(Kyung, 2019). 차압이 낮으면 운전비용을 줄일 수 있기 때문에 다양한 산업분야에 사용된다. 하지만 제거 효율을 높으려면 전압을 올려야 하므로 안전상의 문제가 발생할 수 있다.

전기집진기의 안전성과 효율성을 높이는 효과적인 방법 중 하나는 하전 단계와 집진 단계를 분리하는 것이다. 기존 환경설비에 주로 사용되는 1단 전기집진기는 하전과 집진이 같은 공간에서 일어나기 때문에 방전 전극의 가장자리가 날카로운 안정성의 문제로 전기장의 강도를 높이는데 한계가 있다(Chang et al., 1991). 반면 하전과 집진의 단계를 분리시킨 2단 전기집진기는 집진부에 날카로운

모서리나 방전극이 없기 때문에 스파크로 인한 문제없이 1단 전기집진기보다 전극의 간격을 좁혀 높은 전기장 강도를 확보할 수 있다. 따라서 2단 전기집진기는 동일 조건하에서 1단 전기집진기보다 높은 PM 제거 효율을 달성할 수 있다(Jaworek et al., 2018).

이러한 많은 이점에도 불구하고, 전기집진기는 경제적인 문제로 산업 적용에 어려움을 겪고 있다. 발전소, 반도체 제조공장 등 산업분야에서의 배기가스는 불산, 염산, 황산 등 부식성 가스는 물론 미립자까지 함유하고 있다. 따라서 산업 분야에 전기집진기를 적용하려면 Inconel 및 Hastelloy 합금과 같은 내식성 금속이 필요하고 이는 비용 증가로 이어진다. 내식성 금속을 대신하기 위해 여러 시도가 진행되어왔고, Kang et al. (2016)은 집진 전극용으로 폴리프로필렌(PP) 판에 전도성 폴리아닐린(PANI)을 코팅하는 시도(Kang et al, 2016)를 하였다. 본 연구에서는 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 판에 탄소 잉크 코팅을 하였다(Lee et al., 2020). 비정질 탄소의 전기 전도도는 약 1×10^3 S/m로 일반적인 비금속 PET 필름의 전기 전도도가 1×10^{-20} S/m 수준임을 고려하면 전극으로 사용하기에 적합할 뿐만 아니라, 탄소의 밀도는 스테인리스 강의 25%인 2 g/cm^3 수준이다. 게다가 탄소는 금속보다 가공이 쉽고 비용이 저렴하기 때문에 경제적으로 선호된다. 또한 본 연구에서는 탄소 잉크 위에 내부식성이 높은 PET 필름을 코팅하여 부식, 마모 및 스파크 등의 위험성을 줄였다.

본 연구는 1단 전기집진기와 2단 전기집진기의 집진효율을 비교하고, 2단 전기집진기를 중점으로 내부식성, 경량성, 효율성을 높이기 위해 집진판의 재질에 따른 집진성능을 분석하였다. 집진부에 사용되는 집진판은 스테인리스강(M), 탄소 코팅 플라스틱(CPC, Carbon ink coating layer-Plastic sheet-Carbon ink coating layer), 플라스틱 코팅 탄소(PCP, Plastic sheet-Carbon ink coating layer-Plastic sheet) 등 총 세 가지 종류의 재질을 사용하였다. 각 집진부의 무게를 비교하고, 유속, 인가전압, 집진판의 재료를 바꿔가며 집진 효율을 평가하였다.

2. Experimental setup and method

Fig. 1은 전체적인 실험 세팅을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 330 mm × 330 mm 아크릴 덕트를 사용하였다. 덕트 내부의 유속은 16 mm 배인형 유속계 (TESTO 480, TESTO SE & CO, 독일)로 측정하였고, 실험 유량은 10~20 m³/min으로 제어하였다. 두 개의 네블라이저(8900-7-50, Salter Labs)와 탭핑 유(ST-501, 이레산업)를 이용하여 오일 입자를 발생시켰다. 또한 오일 미스트의 농도를 안정적으로 생성하기 위해 질량유량계(TN-280, Celerity, Inc.)를 사용해 압축 공기를 공급하였고, 오일 미스트를 고르게 분배하기 위해 전기집진기 앞에 아크릴 타공판을 배치하였다. 1단 및 2단 전기집진기 실험을 진행하였으며, 1단 전기집진기는 2단 전기집진기에서 집진부만을 제거하고 하전부만 사용하였다. 실험에서 사용한 하전부와 집진부는 각각 DC 고전압 전원 공급 장치(최대 -30 kV/10 mA, KSC 한국스위칭)를 사용하여 음의 고전압을 개별적으로 인가하였다. 하전부에 사용된 방전 전극과 접지 전극의 형태는 Fig. 1의 검은색 파선안에 나타나 있으며, 번갈아가며 배열하였다. 집진부에 사용된 집진판은 Fig. 1의 빨간색 파선안에 나타나 있으며 같은 형태의 집진판을 접지와 고전압을 번갈아 가며 배열하였다. 방전 전극은 코로나 방전을 용이하게 하기 위해서 가장자리가 뾰족한 평판형으로 제작하였다.

Fig. 2는 왼쪽부터 스테인리스 강(M), 탄소 코팅

플라스틱(CPC, 0.25 mm PET 플라스틱 쉬트 양면에 탄소 잉크 0.01 mm 코팅 층), 플라스틱 코팅 탄소(PCP, 0.25 mm PET 플라스틱 쉬트 단면에 탄소 잉크 0.01 mm 코팅 후 0.15 mm PET 플라스틱 쉬트 코팅) 재질의 집진판의 그림이다. 탄소 코팅 플라스틱(CPC) 집진판은 PET 필름의 양쪽 면을 전도성 탄소 잉크로 코팅하였다. 이 때 탄소 코팅판은 PET 필름에 카본페이스트를 2중으로 도포 및 인쇄하여 육안으로 보았을 때, 굵힘이 없고 매끈하게 마감되어 유동에 의해 탄소 코팅 입자의 탈부착이 없었다. 플라스틱 코팅 탄소(PCP) 집진판은 PET 필름의 한쪽 면에 탄소 잉크를 코팅한 후, PET 필름을 덧 씌웠다. 각 집진판의 폭은 100 mm, 높이는 300 mm이다. 집진부 1개에 12개의 집진판이 10 mm 간격으로 배치되어 집진면적은 약 1.3 m²이다.

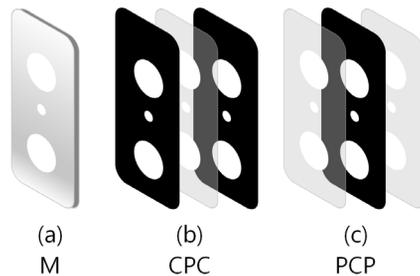


Figure 2. The sketch of each collection electrode (a) stainless steel (M), (b) Carbon ink coating layer–Plastic sheet–Carbon ink coating layer (CPC), (c) Plastic sheet–Carbon ink coating layer–Plastic sheet (PCP)

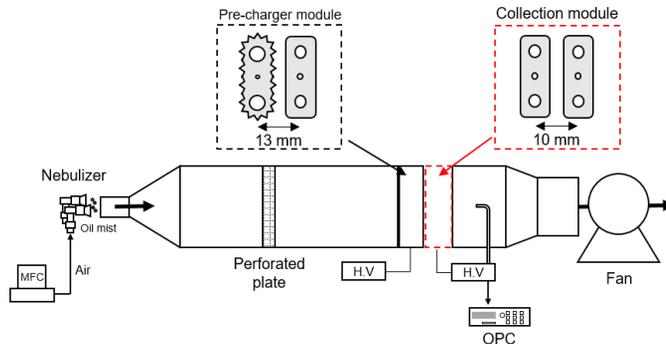


Figure 1. Schematic of the experimental setting of this study

Fig. 3은 하전부의 전기장에 따른 전류 그래프이다. 개시전압은 -2.5 kV이고 전류는 -0.002 mA이다. Fig. 4는 발생시킨 오일 입자의 크기별 개수 분포이다.

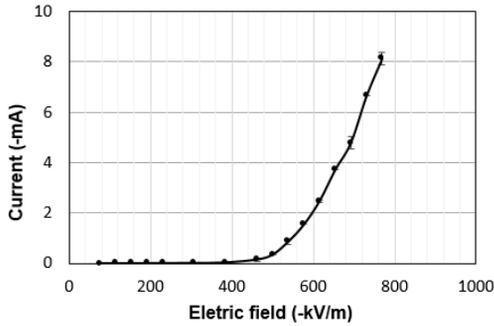


Figure 3. Corona current according to applied electric field of the pre-charger module.

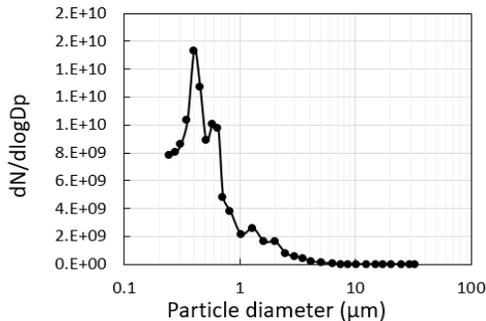


Figure 4. Number concentration of oil mists based on particle diameter.

집진 효율은 전기 집진기 후단에서 광학식 입자 계수기(OPC; Optical Particle Counter, model 1.109, GRIMM)를 이용해 집진기 작동 전후의 입자 개수 농도를 측정해 아래의 식에 대입하여 구하였다.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

η 는 전기집진기의 집진 효율(%), n_1 은 전기집진기 작동 전 입자의 개수 농도 (#/L), n_2 는 전기집진기 작동 후 입자 개수 농도 (#/L)이다. 본 연구에서는 Fig. 5에 나타난 개수 누적 빈도의 중앙값(CMD, Count Median Diameter) 0.45 μm , 질량 누적 빈도의 중앙값(MMD, Mass Median Diameter)

3.0 μm 의 입경 크기에 초점을 맞춰 집진 효율을 평가하였다. 이후 그래프에는 개수 누적 빈도의 중앙값은 CMD, 질량 누적 빈도의 중앙값은 MMD로 표기하였다.

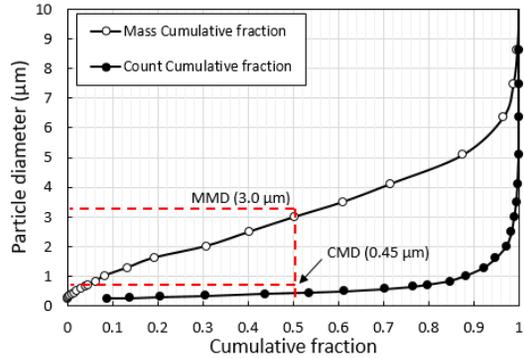


Figure 5. Particle diameter according to cumulative fraction. Mass Median Diameter(MMD) is 3.0 μm , Count Median Diameter(CMD) is 0.45 μm .

3. Experimental results

Fig. 6는 1단 전기집진기와 2단 전기집진기의 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 집진 효율을 비교한 그래프이다. 1단 전기집진기와 2단 전기 집진기의 집진성능을 비교하기 위해서 하전부와 집진부에 -7.8~-10 kV의 전압을 인가하였으며, 유속은 3 m/s로 고정하였다. 동일 하전부 인가전압에서 2단 전기집진기가 1단 전기집진기보다 $\text{PM}_{2.5}$ 제거 효율은 22~25% 높았으며, PM_{10} 제거 효율은 17~24% 더 높았다. 즉 동일한 유속, 인가전압에서 2단 전기집진기가 1단 전기집진기에 비해 집진 성능이 우수한 것을 확인하였다.

실험에서 사용된 스테인리스강(M) 집진판 한 개의 무게는 81.7 g, 플리스틱 코팅 탄소(PCP) 집진판 한 개는 12 g, 탄소 코팅 플라스틱(CPC) 집진판 한 개는 10.6 g이다. 동일한 개수의 집진판을 사용하면 스테인리스강(M)에 비해 무게를 약 8배 경량화 할 수 있다.

Fig. 7에서는 동일한 하전부 인가전압, 유량 조건에서 집진부 전기장에 따른 집진판 재질별 PM_{10} 제거 효율을 측정하였다. M, CPC, PCP 재질 모두 집진부 전기장이 높아지면 집진 효율이 증가하는 추

세를 보였다. 전기장 세기가 약 -0.5 kV/mm부터는 금속 집진판과 비금속 집진판의 효율이 5% 미만으로 거의 비슷하였으며, -0.6 kV/mm 이상에서는 모든 재질의 효율이 90% 이상이었다. CPC 재질과 M 재질의 집진판은 집진효율 차이가 3% 미만이었다.

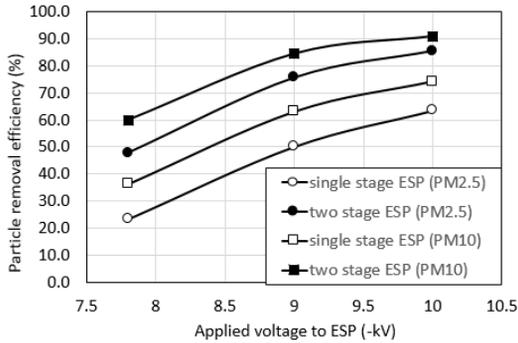


Figure 6. Comparison of particle removal efficiency according to applied voltage of the pre-charger module between single stage ESP and two stage ESP.

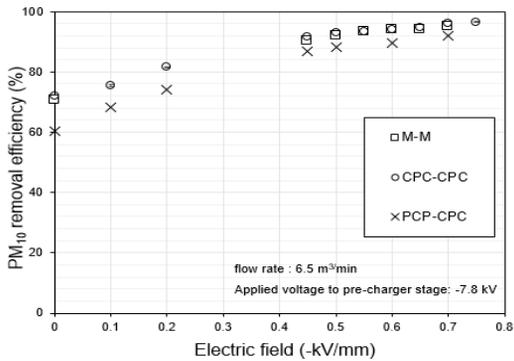


Figure 7. Comparison of the PM₁₀ removal efficiency according to the materials of each collection electrode.

Fig. 8은 비금속 재질의 집진판 집진 효율을 비교한 그래프이다. 앞서 구한 개수 누적 빈도의 중앙값(CMD)에 해당하는 입자 직경 0.45 μm와 질량 누적 빈도의 중앙값(MMD)에 해당하는 입자 직경 3.0 μm의 제거 효율을 측정하였다. 하전부 인가전압은 -7.8 kV, 집진부 인가전압은 -7 kV로 고정하였다. 그래프의 PCP-CPC는 PCP와 CPC 재질의 집진판을 사용한 집진부로 PCP 재질의 집진판에 고

전압을 인가하였고, CPC 재질의 집진판에 접지를 연결하였다. CPC-CPC는 CPC 재질의 집진판을 고전압과 접지를 번갈아가며 연결해 배열한 집진부이다.

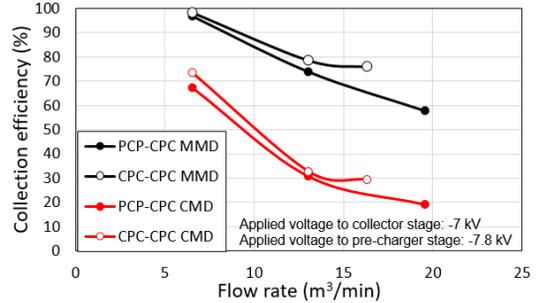


Figure 8. 0.45 μm(CMD) and 3.0 μm(MMD) particle collection efficiency of PCP-CPC collection module and CPC-CPC collection module according to the flow rate.

일반적인 전기집진기의 효율은 아래의 식 (2)-(4)에 의해 계산된다(Hinds, 1999).

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-W_m \times A}{Q}\right) \quad \text{식 (2)}$$

$$W_m = \frac{Q_p \times E_c \times C_c}{3\pi\mu D_p} \quad \text{식 (3)}$$

$$E_c = \frac{V}{m} \quad \text{식 (4)}$$

η 는 전기집진기의 집진 효율 (%), Q 는 유량 (m^3/s), W_m 은 입자가 집진판으로 이동하는 속도 (m/s), A 는 집진 면적 (m^2), Q_p 는 입자의 하전량 (C), E_c 는 집진부의 전기장 세기 (V/m), C_c 는 Cunningham correction factor, μ 는 공기의 점성계수 (Pa·s), D_p 는 입자의 직경 (m), V 는 집진부 인가전압 (V) 이며 m 는 집진부의 고전압 전극과 접지 전극 사이의 간격 (m)이다.

PCP 재질에 집진판에 고전압을 연결하고, CPC 재질의 집진판에 접지를 연결한 PCP-CPC 집진부와 CPC 재질의 집진판으로만 구성된 CPC-CPC 집진부의 유량별 효율을 비교해보았다. PCP 재질의 집진판은 약 0.41 mm, CPC 재질의 집진판은 약 0.27 mm로 CPC 재질의 집진판의 두께가 약 1.5배 얇다. 이로 인해 Fig. 8에서와 같이 유량이 15

m^3/min 이상 일 때 CPC 재질의 집진판이 유동에 의해 흔들리는 현상이 발생하여 집진 효율이 식(2)의 유량과 효율간의 반비례 경향성을 따르지 않고, 일정하게 유지되었다. 이는 고유량 하에서 CPC 집진판의 흔들림 때문이며, Fig. 7에서와 같이 집진부의 전기장 세기가 0.5 kV/mm 이상에서 PCP-CPC 재질의 집진부와 CPC-CPC 재질의 집진부의 집진 효율의 오차가 5% 이내로 거의 발생하지 않은 점을 고려하여, CPC 재질의 경우에도 유량이 증가함에 따라 효율이 감소될 것으로 판단된다. 특히, 유량이 16 m^3/min 이상인 CPC 집진판 실험조건에서는 집진판 흔들림으로 인해 인가전압이 불안정해져 실험이 불가능하였다. 따라서 이후 실험 효율과 이론 효율을 비교할 때 PCP 재질의 집진판에 초점을 맞췄다.

Fig. 9는 집진부 인가전압에 따른 집진 효율을 나타낸 그래프이다. 유량은 6.5 m^3/min 으로 고정하였으며 하전부 인가전압은 -7.8 kV로 고정하여 실험을 진행하였다. 집진부에 -1 kV부터 -7 kV까지 증가시키며 앞 선 실험과 동일한 이유로 직경이 0.45 μm 인 입자(CMD)와 3.0 μm 인 입자(MMD)의 제거효율을 측정하였다. 이론 효율은 식 (3) Cochet's charging theory를 사용하여 하전량을 구하였다 (Riehle, 1997).

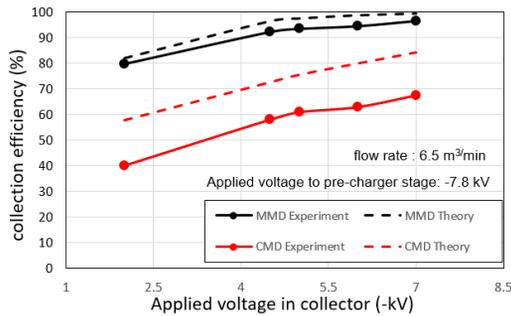


Figure 9. Experimental and theoretical collection efficiency of 0.45 μm (CMD) particle and 3.0 μm (MMD) particles according to the applied voltages of the collection module using PCP and CPC collection electrodes.

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

Q_p^∞ 는 입자의 하전량 (C), D_p 는 입자의 직경

(m), λ 는 평균자유경로 (m), ϵ_r 는 텡핑유리의 유전율 인 2.5, ϵ_0 은 진공 유전율, E_p 는 하전부 전기장 (V/m)이다. 정전기력과 항력의 힘의 평형으로부터 입자가 집진판으로 이동하는 속도 W_m 을 식 (4)와 식 (5)의 결과 값으로 식 (3)에 대입해 계산한 후, (2)에 대입하여 이론 효율을 계산하였다. 입자 직경이 0.45 μm (CMD)인 경우에는 Cochet's charging theory를 이용한 이론 효율과 실험 효율 간에 약 15%정도의 오차가 발생했다. 그 이유는 직경이 0.45 μm (CMD)인 입경은 확산에 의한 하전을 무시할 수 없기 때문이다(Hinds, 1999).

$$n(t) = (D_p k T / 2 e^2) \ln [1 + (\pi D_p c_i e^2 N_i t / 2 k T)] \quad \text{식 (6)}$$

$n(t)$ 는 하전된 입자의 개수, D_p 는 입자의 직경 (m), k 는 볼츠만 상수 ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$), T 는 온도 (K), e 는 전자의 전하량 (C), c_i 는 이온의 평균속도 (m/s), N_i 는 이온의 농도 ($\#/m^3$), t 는 체류 시간 (s)이다.

확산에 의한 하전은 식 (6)에 의해 계산 가능하다. 식 (6)를 활용하기 위해서는 하전부에서 방출되는 이온 농도를 측정하여야 하지만 강한 전기장으로 인해 방출된 이온은 수 ms 이내로 사라지기 때문에 정확한 이온 농도를 알기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 확산에 의한 하전은 별도로 다루지 않았다. 반면 입자 직경이 3.0 μm (MMD)인 경우에는 이론과 실험 효율이 5% 이상 차이가 나지 않았다.

4. Conclusion

본 연구에서는 기존 산업 시설에 적용되어있는 1단 전기집진기보다 안정성과 효율성을 증가시킬 수 있는 2단 전기집진기를 중점적으로 연구하였다. 또한 실제 산업 시설에 적용할 때 경제적 비용을 줄이기 위해 내부식성 금속을 대체 가능한 내부식성이 높은 PET 플라스틱에 탄소 잉크를 코팅 기반으로 한 집진판을 제작하여 집진 성능에 대하여 연구하였다. 스테인리스 강(M), 플라스틱 코팅 탄소(PCP), 탄소 코팅 플라스틱(CPC) 재질로 총 3개의

집진관을 적용한 집진부에 인가전압 변화, 입자 직경, 유량 등을 변화해가며 집진 효율을 측정하였다. 결과적으로, 탄소 코팅의 플라스틱 비금속 집진관은 금속 재질과 비교하여 집진 성능면에서 차이가 없었으며, 무게는 1/8 배에 불과하였다. 그러나 PCP 재질보다 두께가 1.5배 얇은 CPC 재질로만 구성된 집진부를 사용 시 유량이 증가하면 집진관이 유동에 따라 흔들리며 전극 간격이 유지되지 않고 맞닿으면서 스파크가 튀는 문제가 발생하였다. 따라서 안정성을 확보하기 위해 PCP와 CPC로 구성된 집진부를 사용하는 것이 권장된다. 또한 PCP와 CPC로 구성된 집진부를 사용하는 경우에 기존의 전기집진 이론을 따른다는 것을 확인하였다.

본 연구에서 사용된 탄소잉크와 플라스틱을 사용한 집진관을 적용한 전기집진기는 환경 규제가 급속도로 엄격해지는 현 시점에서 무게, 비용, 성능, 안정성 다양한 측면에서 효과적인 것으로 예상된다.

감사의 글

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20181110200170, Core Technology Development of Removal of Acid Gas and Fine Particle for Coal Thermal Power Plant).

References

- 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.
- Kim, D. (2013). Fine dust threatening health, causes and countermeasures, *Issue & Diagnosis*, 121, 1-25.
- Kyung, D. (2019). Principle and Technology Development Trend of Fine Dust Treatment Techniques, Ministry of Land, 34-41.
- Chang, J. S., Lawless, P. A., and Yamamoto, T. (1991). Corona discharge processes, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 19(6), 1152-1166.
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., and Wang, X. (2016). The health effects of ambient PM2.5 and potential mechanisms, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 67-74.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Jaworek, A., Marchewicz, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., and Czech, T. (2018). Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM2.5 particle emission, *Progress in Energy and Combustion Science*, 67, 206-233.
- Lee, Y., Sung, J. H., Han, B., Kim, Y. J., and Kim, H. J. (2020). Particle removal performance of a two stage electrostatic precipitator with carbon based nonmetallic collection plates for oil mist, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1-7.
- National Institute of Environmental Research (2019). Air pollutant emissions 2016, National Fine Dust Information Center, p. 12.
- Riehle, C. (1997). Basic and theoretical operation of ESPs, in *Applied electrostatic precipitation*. Springer, Dordrecht, 25-88.
- Wang, X., Chang, J., Xu, C., Zhang, J., Wang, P., and Ma, C. (2016). Collection and charging characteristics of particles in an electrostatic precipitator with a wet membrane collecting electrode, *Journal of Electrostatics*, 83, 28-34.