



# 정전 대전된 입자의 이온중화기에 의한 대전량 저감에 대한 연구

## Study on the Reduction of Charge in Electrostatically Charged Particles Using a Neutralizer

김덕형<sup>1,2</sup>, 이성빈<sup>1,2</sup>, 김건호<sup>1,2</sup>, 고성현<sup>3</sup>, 박희성<sup>2,#</sup>  
Deokhyeong Kim<sup>1,2</sup>, Sungbin Lee<sup>1,2</sup>, Geonho Kim<sup>1,2</sup>, Seonghyun Ko<sup>3</sup>, and Heesung Park<sup>2,#</sup>

1 국립창원대학교 스마트제조융합협동과정 (Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University)

2 국립창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

3 포스코홀딩스 미래기술연구원 친환경공정엔지니어링연구소 (Eco Process Engineering Research Center, N.EX.T Hub, POSCO HOLDINGS)

# Corresponding Author / E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr, TEL: +82-55-213-5471

ORCID: 0000-0003-4586-7794

KEYWORDS: Electrostatic elimination (정전기 제거), Electrostatic discharge (정전기 방전), Neutralizer (이온중화기), Particle (입자), Corona discharge (코로나 방전)

*This study examines the charge reduction characteristics of charged particles using a neutralizer to prevent accidents from electrostatic discharge and enhance process efficiency. The research measures the number of charges, elimination efficiency, and penetration rate under various voltage polarity conditions with a DC-type bipolar electrostatic eliminator. The results indicate that electrostatic neutralization is most effective under negative high voltage (-HV) conditions, while the mesh penetration rate increases and charge accumulation occurs under positive high voltage (+HV) conditions. Furthermore, partial charge neutralization is observed under both positive and negative high voltage ( $\pm$ HV) conditions due to the sequential emission of positive and negative ions. This study quantifies the mitigation of electrostatic charge using a neutralizer, offering insights for optimizing filtration systems and improving process stability. Future research will refine electrostatic control mechanisms by considering additional parameters such as particle size, material properties, and flow conditions.*

Manuscript received: July 16, 2025 / Revised: August 26, 2025 / Accepted: August 28, 2025

### 1. 서론

입자는 다른 입자, 반응기 벽 및 수송 파이프와의 물리적 접촉을 통해 정전기 전하를 생성할 수 있다는 것은 널리 알려져 있다. 정전기 대전은 입자 간 또는 입자와 표면 간의 상호작용으로 인해 다양한 산업 공정에서 발생하는 현상이다. 이러한 현상은 전기 집진기, 마찰 전기 나노발전기, 사이클론 집진기 및 입자 분리와 같은 응용에서 유용하게 활용되지만 혼합, 공압 수송, 체질, 유동화와 같은 산업 공정에서는 여러 문제를 초래한다. 정전기로 인해 입자가 응집되거나 벽에 부착되는 현상이 발생하며, 이는 공정 효율을 저하시킬 뿐 아니라 경우에 따라 화재 및 폭발 위험으로 이어질 수 있다. 이러한 정전기 방전은 작업자의 안전을 위협하고 심각한 경제적 손실을 초래한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 이온중화기(Neutralizer)를 활용하여 정전기를 제거할 수 있다. 이온중화기는 이온을 생성하여 입자 표면의 전하를 중화시킴으로써 정전기 축적을 방지한다. 이온중화기에 장착되는 정전기 제거 장치는 주로 전압 인가 방식과 방사선 조사 방식의 두 가지 방법으로 작동한다[1,2].

전압 인가 방식은 고전압을 전극에 가해 주변 공기를 이온화하는 방식이다. 고전압 전극은 공기 중에서 코로나 방전을 유도하여 양이온과 음이온을 생성하며, 생성된 이온이 입자 표면의 전하를 중화하여 정전기를 제거하는 방식이다.

방사선 조사 방식은 방사성 동위원소를 사용하여 공기를 직접 이온화 하는 방식이다. 방사선은 공기 분자를 이온화하여 양이온과 음이온을 생성하며, 이를 통해 정전기를 중화한다. 이 방식은 전력 공급이 필요하지 않아 특정 환경에서 유용하지만

방사성 물질의 관리와 규제가 필요하다.

Kodama 등[3]은 사일로에서 정전기 방전으로 인한 분진 폭발을 방지하기 위해 사일로 내부의 적재 파이프 끝에 설치된 노즐형 이온중화기로 구성되며, 이는 절연 금속 노즐 내에 접지된 바늘 전극이 장착된다. 노즐을 통해 코로나 방전을 유도하며, 코로나 방전에 의해 생성된 공기 이온은 사일로에 들어가기 전에 정전하를 중성화하기 위해 파이프로 유입되며, 이를 통해 제거기의 개선이 시도되었고, 실제 크기의 공기압 분말 수송 시설을 사용하여 그 효과를 검토하였다. Zhou 등[4]은 대전된 폴리에틸렌 분말이 저장된 원통형 금속 사일로 내부의 전기장 분포를 연구하였으며, 수학적 모델링과 시뮬레이션을 통해 전기장 강도가 분말 대전량, 분포 등 다양한 조건에 따라 달라지는 것을 확인하였으며, 대전된 분말이 형성하는 전기장을 체계적으로 분석함으로써 사일로 설계와 안전 관리에 필요한 기초 0107 데이터를 제공한다. Jeong 등[5]은 코로나 방전 방식의 정전기 제거 장치에서 발생하는 전극핀의 오염 문제를 해결하기 위해 외부로 돌출된 전극핀을 제거하고, 이온 탱크 내부에 텅스텐 전극선을 사용하여 전극선의 오염을 최소화하며, 정전기 방지 대책에 대한 연구를 수행하였다. Huang 등[6]은 코로나 방전 결합 스크린 전극 집진기를 통해 방전 전극의 불균일한 분포로 인해 발생할 수 있는 전극 두께 문제를 해결하며, 4개의 나란히 놓인 스크린 전극을 장착하여 집진 영역을 확장하고 2차 입자 포집을 용이하게 하여 집진 효율을 향상시키며 다양한 변수가 방전 특성과 집진 효율에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Kim 등[7]은 코로나 방전기의 방전 특성을 이용하여 방전기 방향에 따른 전류 밀도 분포를 조사하기 위해 방전기 방향, 유속 유무를 실험 및 수치 해석적으로 연구하였으며, 유속이 존재할 때 이온이 유동을 따라 이동하는 것을 관찰하였다.

본 연구에서는 안정성을 높이고 비용 효율적일 뿐만 아니라 대규모 산업 공정에서도 적용이 가능하다는 장점이 있는 전압 인가 방식의 이온중화기를 활용하여 입자 표면의 전하를 저감시키는 효과를 평가하고자 한다. 인가 전압과 정전기 제거 효율, 입자 투과율(P) 간의 관계를 규명함으로써 정전기 제거의 근본적인 메커니즘을 분석하고, 이를 기반으로 정전기 방지 기술의 최적화 방안을 제안하고자 한다. 특히 실험 구성상의 차별점은 DC 양극성 이온중화기와 정전기 제거기를 결합하고 전압 극성(HV, +HV, -HV, ±HV)을 독립변수로 제어하여 입자 1개당 전하량과 메쉬 투과율(P)를 동시 정량 평가하였다.

2. 실험

Fig. 1는 정전기 제거 장치의 3차원과 단면을 제공한다. 전극의 직경 2.4 mm, 길이는 100 mm이며, 테프론 스탠드 내부 직경인 2.5 mm에 고정된다. Fig. 2(a)에 표시된 스테인리스 스틸로 제작된 금속 링은 테프론 스탠드의 방전 전극 쪽에 고정되어 있으며, 이는 전극의 코로나 방전을 향상시켰다. Fig. 2(b)는

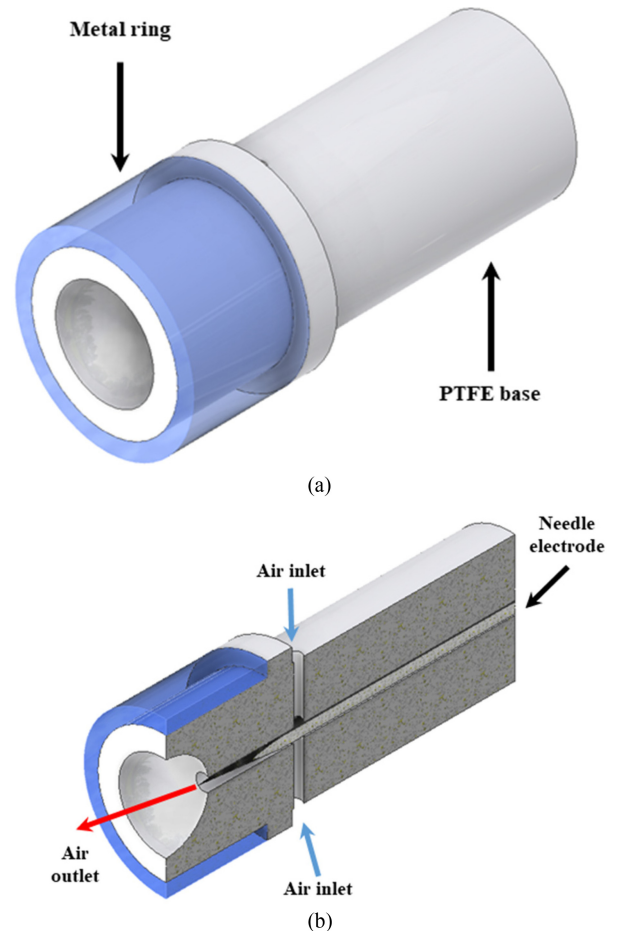


Fig. 1 Three-dimensional view of the neutralizer (a) Geometry and (b) Cross-section.

정전기 제거 장치의 단면도이며, 공기 유동 채널과 전극을 나타낸다. 실험에서 압축 공기는 정전기 제거기의 바깥 쪽에서 공급된 다음 공기가 정전기 제거 장치의 채널을 통과하여 전극 끝 근처의 구멍에서 방출된다.

Fig. 2(a)는 실험 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험 설정은 DC 유형 양극성 이온 중화기, 노즐형 정전기 제거 장치, 두 개의 고전압 전원 공급 장치(KOREA SWETCHING, +10 kV/10 mA, -20 kV/20 mA), 공기 공급 시스템(ASB680 5H-T120W, AIRSSEN KOREA), 전기장 측정 시스템(FMX-004, SIMCO)으로 구성된다. 이온중화기는 직경 0.1 m, 길이 0.4 m의 내부 홀을 갖는 SUS 316L로 제작되었다. 메쉬망과 콜렉터의 입자 무게는 초정밀 저울(AX124, OHAUS Corp.)을 이용하여 측정하였다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 8개의 노즐형 정전기 제거 장치는 홀의 외부 벽에 엇갈린 배열로 장착되었다. 상단 4개 하단 4개의 정전기 제거 장치는 각각 원주 90° 간격으로 배치하였고, 상·하단은 반 간격만큼 위상 오프셋하여 서로 엇갈리게 배치하였다. 상단의 홀에 연결된 4개의 정전기 제거 장치와 하단의 홀에 연결된 4개의 정전기 제거 장치는 각각 양전하 및 음전하 고전압 정원 공급 장치에 연결되었다. Fig. 2(b)는 이온중화기의 내부 단면적을 나타내는 개략도이다. 이온중화기 상단에서 투입되는

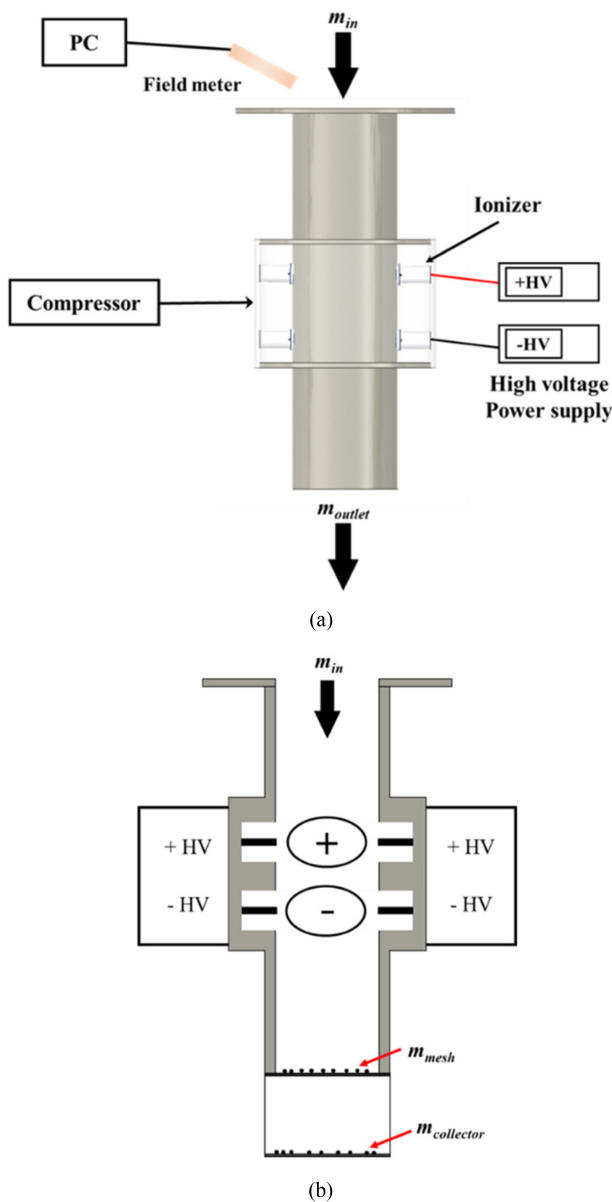


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system (a) Equipment and (b) Electrical mechanism

입자는 중력에 의해 아래로 떨어지며 이온중화기 중간에 위치하는 정전기 제거 장치에 의해 입자의 전하를 중화시키며, 메쉬망 위에 떨어지게 된다. 메쉬망을 통과한 입자는 콜렉터에 수집된다. 메쉬망의 소재는 SUS 316L에 325 mesh이며, 모든 실험에서 동일한 사양의 메쉬망을 사용하였다. 또한, 메쉬망은 접지에 연결하여 부유 전위를 방지하고 전하 측정, 전계 왜곡의 개입을 최소화하였다.

본 실험에서는 3 μm의 양극재 입자를 시험 분말로 사용하였다. 전압 극성의 단독 영향을 식별하기 위해 변수 수를 최소화한 단일 조건인 3 μm으로 설정하였다. 양극재 입자에 실린 순전하의 극성은 일반적으로 양수인데, 이는 금속 벽과 일함수가 낮은 반응기가 양극재 입자와 금속 접촉 중에 전자를 잃기 쉽게

때문이다. 그러나 입자의 전하 극성은 양극성 대전 현상이 존재하기 때문에 불균일하다. 따라서 본 연구는 입자의 초기 전하가 정전기 제거 장치의 정전기 제거에 미치는 영향을 조사하였다. 이 때, 단극성 및 양극성 대전 입자를 모두 고려하였다. 실험을 하기에 앞서 전기장 측정 시스템을 사용하여 입자의 초기 전하를 측정하고, 정밀 저울을 사용하여 입자의 질량을 측정하였다.

실험에 사용할 입자 1.5 g을 트레이에 올려두고 이온중화기 상단 입구 근처에 놓고 5초에 걸쳐 천천히 이온중화기에 투입하였다. 투입하는 위치와 시간은 재현성을 보장하기 위해 동일하게 유지하였다. 입자를 이온중화기에 투입하기 전 실험 조건에 따라 공기 공급 시스템의 유속을 일정하게 하기 위해 설정 후 5분의 안정화 시간을 가지며, 고전압 전원 공급 장치를 설정하였다. 대전된 입자는 이온중화기 내부의 정전기 제거 장치를 통과하는 동안 양전하 또는 음전하에 의해 중성화되었다. 중성화된 입자는 이온중화기 하단부에 설치된 메쉬망에 수집되며, 메쉬를 통과한 입자들은 케이싱 아래에 설치된 콜렉터에 수집되었다. 이렇게 수집된 입자들은 전기장 측정 시스템을 통해 전기장을 측정하였으며, 정밀 저울을 통하여 메쉬 위에 있는 입자 질량, 메쉬를 통과한 입자 질량을 측정하였다. 모든 실험에서 온도는 17°C, 상대 습도는 45로 유지되었다. 또한, 전압 극성의 영향만 평가하기 위해 환경 인자는 전 구간에서 고정하여 환경 변수에 따른 전하 교환 및 코로나 방전 거동의 변동을 배제하고 비교의 일관성 및 측정 재현성을 확보하였다.

식(1)는 전하량을 의미한다.  $\epsilon$ 는 진공 유전율로 전기적 상호작용의 세기를 결정하는 상수이며,  $r$ 는 측정 거리,  $E$ 는 해당 측정 위치에서의 전기장을 나타낸다.

식(2)는 전기장을 측정하는 필드미터가 갖는 유효 면적을 의미한다. 전기장의 영향을 원의 면적으로 가정하며,  $d_f$ 는 측정 거리를 나타낸다.

식(3)은 면적 당위당 존재하는 전하량을 의미한다. 전체 전하량  $\sigma$ 를 필드미터의 측정 면적  $A_f$ 로 나누며, 이는 일정 면적 내에 전하의 분포를 나타낸다.

식(4)는 개별 입자가 차지하는 면적을 의미한다. 입자 하나를 원형으로 가정하였다. 이 때, 사용되는  $d_p$ 는 입자 크기 평가 시 적용되는 측정 거리와 동일한 값으로 가정된다.

식(5)는 한 입자가 갖는 전하량을 의미한다. 단위 면적당 전하 밀도와 입자 면적의 곱으로 계산된다. 이는 입자 내 실제 분포하는 전하의 총량을 나타낸다.

식(6)은 한 입자에 해당하는 전자의 개수를 의미한다. 입자 한 개의 전하량  $q_p$ 를 기본 전하  $e$ 로 나누어 산출한다. 여기서  $e$ 는 전자 한 개가 가지는 기본 전하를 의미한다.

정전기 제거 효율  $\zeta$ 은 식(7)에 의해 계산된다. 정전기 제거 효율을 나타내며,  $q_{p0}$ 는 초기 전하량,  $q_{p1}$ 은 이온중화기에 투입되어 배출된 입자의 전하량을 나타낸다.

식(8)은 입자가 메쉬를 통과한 투과율( $P$ )을 의미하며,  $m_c$ 는 메쉬를 통과하고 콜렉터 위에 수집된 입자 질량을 나타내며,  $m_m$ 는 메쉬 위에 남은 입자 질량을 나타낸다.

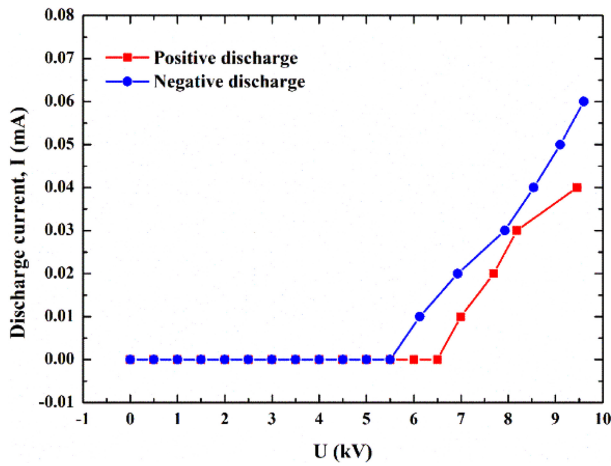


Fig. 3 Discharge current of the electrostatic eliminator under different applied voltage

$$q = 4\pi\epsilon l^2 E \quad (1)$$

$$A_F = \frac{\pi d_F^2}{4} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{q}{A_F} \quad (3)$$

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (4)$$

$$q_p = \sigma \times A_p \quad (5)$$

$$n = \frac{q_p}{e} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{|q_{p1} - q_{p0}|}{q_{p0}} \times 100\% \quad (7)$$

$$P = \frac{m_c}{m_m + m_c} \times 100\% \quad (8)$$

### 3. 결과

Fig. 3은 유량이 4 LPM 일 때, 다양한 전압에서 정전기 제거 장치의 방전 전류를 조사하였다. Fig. 3에서 양전하의 경우, 6 kV보다 작을 때 방전 전류가 0.01 mA보다 낮은 전압 값을 나타내며, 음전하의 경우, 7 kV보다 작을 때 방전 전류가 0.01 mA보다 낮은 전압 값을 나타냈다. 또한, 전류계의 분해능이 0.01 mA이기 때문에 0.01 mA미만의 방전 전류는 인식할 수 없기에 방전 전류는 0.01 mA보다 낮을 때 0 mA로 설정되었다. 코로나 방전은 음전하가 6 kV에서 양전하보다 빠르게 발생하며, 동일한 전압에서 음전하가 양전하보다 높은 방전 전류가 관찰되었다. 또한, 인가 전압이 9.5 kV를 초과하면 불안정해지는 것으로

Table 1 Comparison of voltage-current data according to polarity at the same applied voltage

Case	Voltage [kV]	Current [mA]
1	0	0
2	+9.5	0.06
3	-9.5	0.03
4	+9.5/-9.5	0.02/0.03

Table 2 Comparison of potential difference, electric charge and number of charge data according to voltage polarity

Case	Potential difference [kV]	Electric charge [C]	Number of charges
1	0.26	7.23E-10	1.02E+04
2	0.41	1.14E-09	1.60E+04
3	0.08	2.23E-10	3.13E+03
4	0.14	3.89E-10	5.47E+03

나타내며, 전압의 지속적인 증가와 함께 스파크 방전이 발생하는 것으로 관찰된다. 인가 전압이 9.5 kV를 초과하는 조건에서는 방전 전류가 스파크를 통해 방출되기 때문에 정전기 제거가 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 스파크 방전을 고려하여 인가된 양전압과 음전압 모두 9.5 kV로 설정하였다.

Table 1은 동일한 인가 전압(9.5 kV)에서 전압 극성에 따른 각 실험 케이스별 전압과 방전 전류를 나타낸 것이다. 전압 크기는 장치 안전 범위에서 극성 간 비교가 가능하도록 단일 상한으로 설정하였다. Case 1은 Default를 의미하며, 인가 전압이 없었으므로 전압과 방전 전류 모두 0이 측정된다. Case 2는 +HV를 의미하며, 단극성의 양전압이 인가된 상태에서 인가 전압은 +9.5 kV, 방전 전류는 0.06 mA로 측정되었다. Case 3은 -HV를 의미하며, 단극성의 음전압이 인가된 상태에서 인가 전압은 -9.5 kV, 방전 전류는 0.03 mA로 측정되었다. Case 4는 ±HV를 의미하며, 양극성의 양전압, 음전압이 인가된 상태에서 인가 전압은 +9.5/-9.5 kV, 방전 전류는 0.02/0.03 mA로 측정되었다.

Table 2는 동일한 인가 전압에서 전압 극성에 따른 각 실험 케이스별 전기장(Potential Difference), 전하(Electric Charge), 전자 수(Number of Charges)를 나타낸다. 표에서 볼 수 있듯이, Case 1에서 초기 전위는 0.26 kV, 입자에 축적된 전하량은 7.23E-10 C이며, 입자 한 개의 전자 수는 1.02E+04로 측정되었다. 이는 무인가 상태의 잔류 대전을 의미하며, 전하는 자연 소산과 재결합에 의해 완만히 감소하므로 본 조건에서는 일부 전하가 잔류한다[8]. Case 2의 경우, Case 1과 비교하여 전위, 전하량, 전자 수가 증가하는 경향이 나타난다. 이는 양전압을 인가할 경우, 입자 주변의 양이온 및 전자의 이동이 촉진되면서 입자에 더 많은 양전하가 축적되기 때문이다. 이는 +HV를 인가할 때 전극 주위에서 코로나 방전이 발생하여 양이온이 생성되며 입자 표면에 충돌, 부착되어 입자의 총 전하량이 증가한다[9]. 반면, Case 3에서는 Case 1과 비교하여 전위, 전하량, 전자 수가

감소하는 경향이 나타난다. 이는 음전압 인가될 때, 자유 전자가 전기장에 의해 방출되거나 이동하면서 입자의 양전하가 제거되고, 전체적인 전하 축적이 제한되기 때문이다. -HV를 인가 시, 코로나 방전으로 생성된 저차 및 음이온이 입자 표면으로 이동, 부착되어 기존 양전하를 상쇄함으로써 측정 전하량이 감소한다 [10]. Case 4에서도 Case 1과 비교하여 전위, 전하량, 전자 수가 감소하는 경향이 나타난다. 이는 양극성 전압을 인가할 경우, 전기장의 방향이 순차적으로 변하면서 전하 축적이 제한되기 때문에 단극성 음전압을 인가할 때보다는 전하 감소가 크지 또한, 양극성 전압에서는 입자 표면의 전하 축적이 감소하지만, 단극성 음전압을 인가했을 때처럼 강하게 방출이 발생하지 않는다. ±HV 인가 시, 양이온, 음이온이 순차적으로 공급되어 직전 단계에 축적된 전하가 부분적으로 상쇄되므로 단극성 대비 남은 전하가 적다. 다만 양이온, 음이온의 발생량, 시간 분포의 비대칭으로 완전 중화에 이르지 못해 중간 수준의 잔류 전하가 유지된다[11].

Fig. 4는 식(6)을 사용하여 동일한 인가 전압에서 전압 극성에 따라 한 입자가 가진 전자의 개수 변화를 나타낸 것이다. 입자에 가해진 전압 극성은 Default, +HV, -HV, ±HV이다. 본 연구에서는 입자의 초기 전하 상태를 Default로 정의하였으며, 그 후 +HV를 인가하면 전극에서 발생된 코로나 방전에 의해 생성된 양이온이 입자에 충전되어 입자의 전하량이 57.7 % 증가하는 것이 관찰된다. -HV를 인가하면 전극에서 생성된 음이온이 입자에 충전되었지만, 전하가 상쇄되어 전하량은 69.2 % 감소하는 것이 관찰된다. ±HV를 인가하면 양이온과 음이온이 생성되며 전하량은 46.2 % 감소하는 것이 관찰된다. 이는 순차적으로 작용하는 양이온과 음이온이 입자에 충전되어 전하를 부분적으로 중화하는 과정이 발생했기 때문이다. 이러한 결과는 극성에 따른 이온 생성 및 수송의 비대칭 때문이며, +HV에서는 양이온이 우세하고 반대 부호 이온의 공급 경로가 상대적으로 제한되어 동일 부호 전하의 부착이 누적된다. 반면 ±HV에서는 극성이 순차적으로 인가되며 각 극성 인가 단계마다 반대 부호 이온이 유입되어 축적 전하가 상쇄되지만, 축적 전하에 따른 국소 전계 변화로 인해 완전 중화가 아닌 부분 중화가 관찰된다.

Fig. 5는 식(7)을 사용하여 동일한 전압 조건에서 전압 극성에 따라 정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸 것이다. 입자의 정전기 제거 특성을 조사하기 위해 Default 상태를 기준으로 설정하여 식(2)를 사용하여 정전기 제거 효율을 계산하였다. +HV에서 정전기 제거 효율( $\xi$ )은 0.58이며, 전압 극성 중 가장 낮은 정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸다. 이는 +HV 조건에서 입자가 양전하를 띠 가능성이 크며, 중화보다는 추가적인 전하 축적 가능성이 있다. -HV에서 정전기 제거 효율( $\xi$ )은 0.85이며, 전압 극성 중 가장 높은 정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸다. 이는 -HV 조건에서 음이온이 입자 표면에서 효과적으로 정전기를 중화하여 전압 극성 중에 가장 효과적으로 제거함을 나타낸다. ±HV에서 정전기 제거 효율은 0.69이며, -HV보다는 낮지만, +HV보다 높은

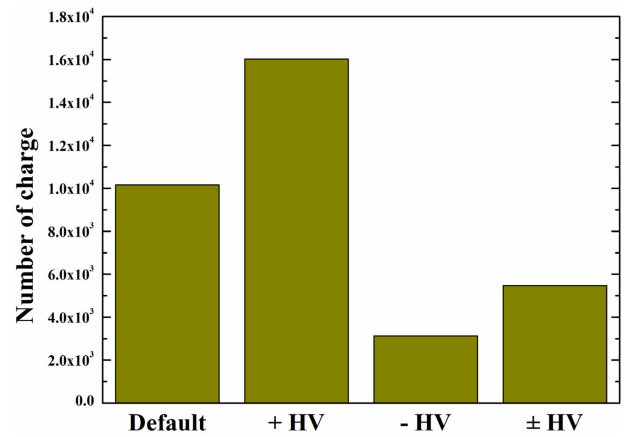


Fig. 4 Number of charge of bipolar discharge for different applied voltage

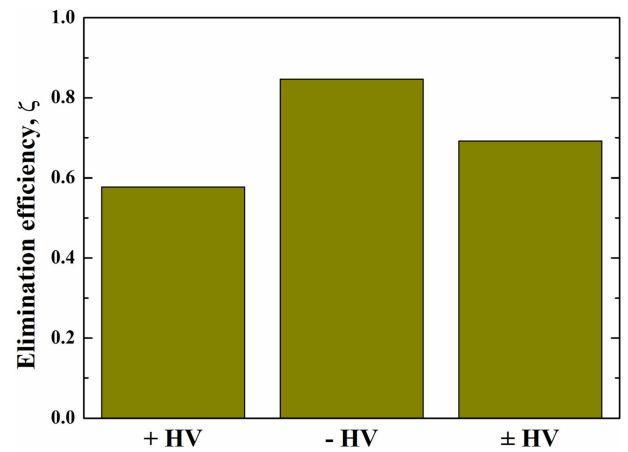


Fig. 5 Elimination efficiency of bipolar discharge for different applied voltage

정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸다. 이는 양이온과 음이온이 순차적으로 작용하여 중화가 진행되었기 때문이다.

Fig. 6은 식(8)을 사용하여 동일한 인가 전압에서 전압 극성에 따른 입자 투과율( $P$ )을 나타낸다. 전압을 인가하지 않은 Default 조건에서는 가장 낮은 3.46%의 투과율을 나타낸다. 이는 입자가 정전기적 영향을 받지 않고 중력만 작용하였을 때의 투과율( $P$ )이다. +HV 조건에서는 5.04%의 투과율( $P$ )이 나타난다. 이는 양이온이 입자에 충전되면서 입자와 필터 사이의 정전기적 반발력이 작용하여 입자가 덜 부착되고 더 많이 통과한다. -HV 조건에서는 5.07%의 투과율( $P$ )이 나타난다. 음이온이 입자에 충전되어 필터와의 정전기적 상호작용으로 이온화된 입자가 필터를 더 잘 통과할 수 있도록 영향을 미친다. ±HV 조건에서는 4.76%의 투과율( $P$ )이 나타난다. 이는 양이온과 음이온이 순차적으로 작용하면서 입자의 표면 전하가 변동하였으며, 입자와 필터의 정전기적 상호작용이 불안정해지면서 일부 입자는 필터에 부착되었지만, Default보다는 높은 투과율( $P$ )을 나타낸다.

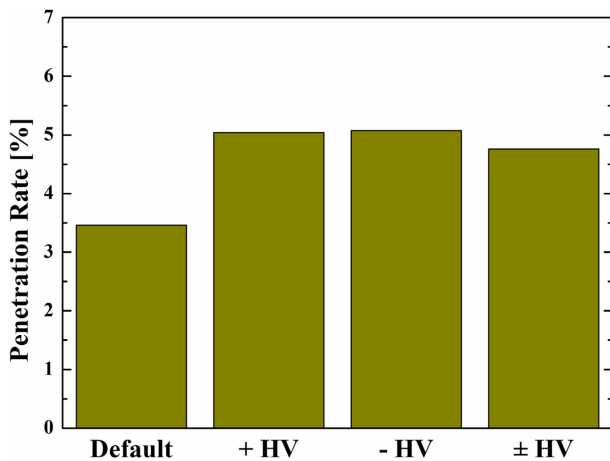


Fig. 6 Penetration rate of bipolar discharge for different applied voltage

#### 4. 결론

본 연구는 전압 인가 방식의 이온증화기를 활용하여 입자 표면의 전하를 저감하는 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 위해 동일한 전압 조건에서 전압 극성에 따른 입자의 전하량 변화, 정전기 제거 효율( $\xi$ ) 및 입자 투과율( $P$ )을 분석하였다. 실험 결과, 전압 극성에 따라 입자의 전

하량이 증가하거나 감소하며, 특정 조건에서 정전기 제거 효과가 최적화됨을 확인하였다. 특히, -HV 조건에서 음이온을 이용한 정전기 제거 효과가 가장 높았으며, 필터 투과율( $P$ ) 또한 증가하는 경향이 나타난다. 반면, +HV 조건에서는 정전기 제거 효율( $\xi$ )이 낮고 전하 축적이 발생할 가능성이 큼을 확인하였다. ±HV 조건에서는 양이온과 음이온이 순차적으로 작용하여 부분적인 전하 중화가 발생하였다.

본 연구 결과는 이온증화기를 사용한 정전기 제거 및 입자의 거동 변화에 대한 정량적 분석을 제공하며, 이를 기반으로 정전기 제거 기술의 최적화 및 필터링 시스템의 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 입자 크기, 재질, 유동 환경 등의 추가적인 변수를 고려하여 보다 정밀한 정전기 제거 메커니즘을 규명할 것이다. 아울러 정전기 제거기 수를 확대하고 전원 mA 설정을 상향하여 이온 플럭스 범위를 확장한 조건에서 정전기 제거 효율( $\xi$ )과 입자 투과율( $P$ )의 분석할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2025-2026년도 국립창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

연구수행에 큰 도움을 주신 포스코홀딩스 미래연구원 친환경 공정엔지니어링연구센터에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Goldman, M., Goldman, A., Sigmond, R., (1985), The corona discharge, its properties and specific uses, *Pure and Applied Chemistry*, 57(9), 1353-1362.
2. Sakata, S., (1990), Contamination-free ionizer for super clean room, *Proceedings of the 3rd International Aerosol Conference*, 817-820.
3. Kodama, T., Suzuki, T., Mogami, T., Watano, S., (2003), A new passive-type electrostatic eliminator used in a powder storage silo, *Powder Technology*, 135, 209-215.
4. Zhou, Q., Hu, J., Liang, C., Chen, X., Liu, D., Ma, J., (2019), Study on electric field distribution in cylindrical metal silo containing charged polyethylene powder, *Powder Technology*, 353, 145-155.
5. Jeong, J.-H., Woo, D. S., (2018), The development of the ionizer using clean room, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 19(1), 603-608.
6. Huang, H., Chen, W., Mi, J., Zhang, Y., Bi, N., Du, S., (2024), Study on the application of atomized corona discharge combined with screen electrode in dust collection, *Journal of Electrostatics*, 130, 103953.
7. Kim, S. H., Park, G. W., Choi, H. Y., Choi, C. Y., Park, S. H., Park, Y. G., Lee, D. G., Ha, M. Y., (2021), Experimental and numerical study on discharge characteristics of carbon brush type-corona discharger, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, 45(12), 681-689.
8. Ao, C. K., Jiang, Y., Zhang, L., Yan, C., Ma, J., Liu, C., Jiang, Y., Zhang, W., Soh, S., (2022), Balancing charge dissipation and generation: Mechanisms and strategies for achieving steady-state charge of contact electrification at interfaces of matter, *Journal of Materials Chemistry A*, 10(37), 19572-19605.
9. Intra, P., Tippayawong, N., (2009), Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review, *Journal of Electrostatics*, 67(4), 605-615.
10. Antoniu, A., Smaili, A., Vacar, I.-V., Plopeanu, M.-C., Dascalescu, L., (2012), Sinusoidal and triangular high-voltage neutralizers for accelerated discharge of nonwoven fibrous dielectrics, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(3), 857-863.
11. Ohsawa, A., (2013), 2-D electrohydrodynamic simulations towards zero offset voltage with corona ionisers, *Journal of Electrostatics*, 71(2), 116-124.

**Deokhyeong Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is optimized design and performance analysis in application area of gas turbine.  
E-mail: ejrgud28@changwon.ac.kr

**Sungbin Lee**

M.S. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is thermal fluid.  
E-mail: 20195070@gs.cwnu.ac.kr

**Geonho Kim**

M.S. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is optimized design and performance analysis in application area of gas turbine.  
E-mail: 20247103@gs.cwnu.ac.kr

**Seonghyun Ko**

Ph. D. in the AI & Robotics Convergence R&D Laboratories, Eco Process Engineering Research Center, POSCO HOLDINGS. His research interest is optimization of manufacturing process for secondary battery materials.  
E-mail: shkoh@posco-inc.com

**Heesung Park**

Professor in the Department of Industrial and Mechanical Engineering, Changwon National University. His research interest is thermos fluidic devices for sustainable energy systems.  
E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr