

코로나 방전 정전선별기 내 PCB 입자의 이동궤도 시뮬레이션

한성수 · 박승수 · 김성민 · *박재구

한양대학교 자원환경공학과

Simulation on the PCB Particle Trajectories in Corona-discharge Electrostatic Separator

Seongsoo Han, Seungsoo Park, Seongmin Kim and *Jaikoo Park

Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

요 약

코로나 방전 정전선별기 내에서 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB) 분쇄 입자의 이동궤도를 전산 모사하였다. 여기서 PCB 입자는 전자부품 분리된 기판을 파쇄한 것으로, 대부분 구리와 FR-4(Flame Retardant Level-4)로 이루어져있다. 우선 입자가 선별기 내 회전전극으로부터 탈착 지점을 계산하였으며, 중력, 원심력, 정전기력의 평형으로부터 유도되었다. 한편 탈착 후 이동궤도는 입자의 운동방정식으로부터 구한 가속도를 시간 적분하여 계산하였다. 시뮬레이션 변수는 입자의 크기, 공급전압의 세기, 회전전극속도 및 유도전극 각도로 하였다. 입자 이동궤도에 미치는 영향은 구리 입자의 경우에는 회전속도가 주요 변수였으나, 반면 FR-4 입자의 경우에는 상기 모든 변수에 영향을 받는 것으로 나타났다.

주제어 : 시뮬레이션, 코로나 방전 정전선별, 인쇄회로기판, 입자 이동궤도

Abstract

The trajectories of PCB(Printed Circuit Board) particles in the corona discharge electrostatic separation was simulated. The PCB particles are prepared by crushing bare board, which disassembled from electronic components, consist mostly of copper and FR-4(Flame Retardant Level-4) Firstly, a model was established for calculating of detachment points of PCB particles from the rotating electrode in separator. The model of detachment points was derived from equilibrium of force such as gravity force, centrifugal force, electrostatic force. The trajectories of particles after detachment was calculated by acceleration derived from time-integrating method of motion equation. In this simulation, particle size, supplied voltage, rotation speed of rotating roll electrode and angle of induction electrode were adopted as variables. While the trajectories of FR-4 particles were affected by all variables, rotation speed of rotating roll electrode was dominant variables affecting trajectories of copper particles.

Key words : Simulation, Corona discharge electrostatic separation, PCB(Printed Circuit Board), Particle Trajectories

· Received : September 30, 2014 · Revised : November 14, 2014 · Accepted : December 8, 2014

*Corresponding Author : Jaikoo Park (E-mail : jkpark@hanyang.ac.kr)

Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, 104-2, Engineering Science and Technology Building, Haengdang 1-dong, Seongdong-gu, Seoul, 133-791 Korea
Tel : +82-2-2220-0416 / Fax : +82-2-2220-4203

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

전기·전자제품의 인쇄회로기판(PCB, Printed Circuit Board)에는 구리(Cu), 주석(Sn) 등의 유기금속과 금(Au), 은(Ag), 팔라듐(Pd)과 같은 귀금속이 포함되어 있다¹⁻²⁾. 금속성분 중 대부분은 구리이며, PCB의 28 wt.%를 차지하고 있다³⁾. 비금속성분은 에폭시레진이 함침된 유리섬유가 여러 겹 쌓여있는 FR-4(Flame retardant level-4)가 대부분이다⁴⁾. 인쇄회로기판(이후 PCB)으로부터 유기금속 회수는 파·분쇄 공정 후 물리적 선별, 제련 공정으로 이루어진다. 구리와 FR-4 선별 연구는 밀도차이를 이용한 비중선별, 전기전도도 차이를 이용한 정전선별이 주목받고 있다¹⁾. 그 중 코로나 방전 정전선별은 2차오염원을 발생하지 않는다는 장점과 높은 회수율로 PCB부터 금속 회수에 가장 적합하다고 보고되었다^{3,5,6)}.

코로나 방전 정전선별에 영향을 주는 변수는 매우 다양하다. 입자 변수로 입도, 밀도, 형상, 유전율 등이 있으며, 선별기에서 제어하는 공정 변수로는 회전전극의 직경, 유도전극과 회전전극 사이 거리, 회전전극의 회전 속도, 공급전극의 세기 등 있다^{8,9)}. 이러한 변수들로부터 코로나 방전 정전선별의 최적조건을 찾으려면 많은 실험이 동반되어야 한다¹⁰⁾.

이처럼 정전선별은 많은 실험을 해야 하는 어려움이 있기 때문에 시뮬레이션을 이용한 결과 예측이 필요하다^{7,9,11,14,16,17)}. 정전선별 시뮬레이션 연구는 선별기 내 정전기장을 설계한 후^{9,11)}, 정전기장 내 입자 이동궤도를 예측하는 순서로 진행된다^{7,14)}. 본 연구에서는 코로나 방전 정전선별기 내에서 PCB 입자의 이동궤도 시뮬레이션을 통해, 전도체 입자와 비전도체 입자가 각각의 변수에 따라 어떠한 영향을 받는지 예측하였다.

2. 시뮬레이션

2.1. 코로나 방전 정전선별기 구성 및 원리

코로나 방전 정전선별기는 접지된 회전전극과 코로나 전극, 유도전극으로 구성되어 있다. Fig. 1은 코로나 방전 정전선별기의 모식도이다.

코로나 전극에 음극의 직류 고전압을 주입하면 주변 공기는 전기적 절연과 파괴를 일으키고, 방전하게 되어 도체의 성질을 지니게 된다. 이 현상을 ‘Ion bombardment’ 라고 하며, 방전된 기체들은 정전기장을 형성시킨다. 선별기에 투입된 입자들은 자연적으로 생성된 정

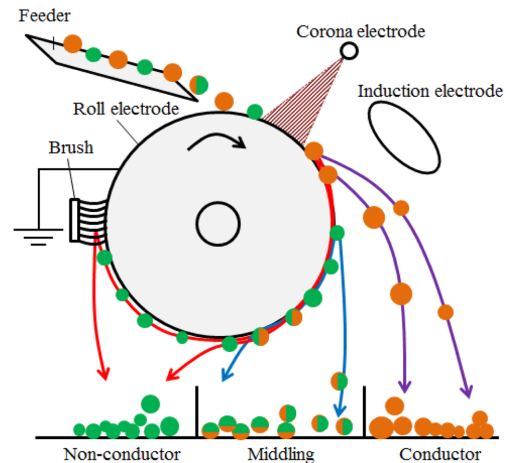


Fig. 1. Schematic diagram of corona electrostatic separator.

전기장을 지나가게 된다. 정전기장을 통과한 입자들은 하전이 일어나지만, 접지된 회전전극으로 인해 전하를 잃게 된다. 금속입자의 경우 전도성이 커서 전하소멸이 빠르게 일어나 회전전극으로부터 궤적을 그리며 떨어지게 되며, 비금속 입자는 전도성이 작아 전하소멸이 천천히 일어나 거울상 힘(Image force)에 의해 회전전극에 부착되어 돌다가 브러시에 의해 드럼에서 떨어지게 된다⁷⁾. 거울상 힘은 하전된 입자가 접지면을 만났을 때 표면에 거울상 위치와 같은 반대부호의 전하가 발생하여 생기는 인력을 말한다.

2.2. 시뮬레이션 순서

Fig. 2는 PCB 입자의 이동궤도 시뮬레이션 순서도이며, 그 순서도에 입력되는 변수를 나타낸 그림이다. 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 MATLAB 2013b 이다.

우선 코로나 정전선별기 내 입자 이동궤도 시뮬레이션을 하기 위해서 코로나 전극과 유도전극으로부터 형성되는 정전기장을 설계하였다. 그 후 정전기장 내 입자에 작용하는 정전기력, 중력, 원심력의 벡터를 합하여 입자가 회전전극에 떨어지는 지점을 계산하였다. 마지막으로 탈착 지점으로부터 입자의 이동속도와 가속도, 항력을 구하여 입자 이동좌표를 예측함으로써 이동궤도를 전산모사하였다.

2.3. 대상 원료

시뮬레이션에 사용된 PCB 입자는 전도체인 구리와 비전도체인 FR-4 입자로 가정하였다. Fig. 3(a)는 부품 분리 후 노트북 컴퓨터의 PCB이며, Fig. 3(b)는 노트

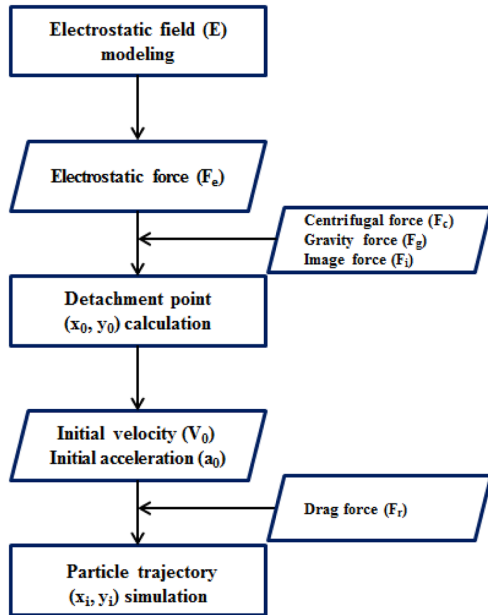


Fig. 2. Flow chart of the simulation for PCB particle trajectories.

북 컴퓨터 PCB의 분쇄산물을 나타낸 사진이다. 이 분쇄산물의 물성을 시뮬레이션 변수에 입력하였다. 입자는 원판형이고, 크기는 +180 -1000 μm 이다.

2.4. 정전기장 설계

코로나 전극으로 인해 하전된 입자들은 정전기장에 영향을 받는다. 유도전극의 형태는 장축의 길이가 단축의 길이보다 약 2배 큰 타원형의 형태이며, 코로나 전극은 실선의 형태로 제조된다. 좌표(x, y)에서의 정전기장 $E(x, y)$ 는 좌표에 작용하는 전압(V)을 발생원으로부터

터 좌표까지의 변위(s)로 나눔으로써 식 (1)과 같이 표현 된다¹¹⁾.

$$E(x, y) = V/s \tag{1}$$

그러나 타원형 그대로 식을 유도할 경우 전압의 발생원이 곡선형이라 유도가 매우 복잡하다. 이를 고려해 유도전극을 긴 막대로 가정하였다. 유도전극의 장축의 길이가 단축의 길이보다 2배 이상 길고, 하전된 입자의 크기보다 유도전극이 매우 크기 때문에 가능하다¹¹⁾. 가정된 코로나 방전 정전선별기의 모식도는 Fig. 4(a)에 나타내었으며, 정전선별기 내 정전기장의 형태는 Fig. 4(b)와 같이 나타났다. Fig. 4에 변수는 회전전극의 반지름(R) 0.1778 m (7 inch), 유도전극 길이(L) 0.11 m, 유도전극 중심과 회전전극 중심 사이의 거리(L) 0.3 m, 유도전극 중심의 각도(α)은 30°, 공급전압(V)은 -30 kV 다.

2.5. 입자 하전

입자의 유전율 및 형태는 하전에 영향을 주는 중요한 요소이다¹²⁾. Fig. 5는 분쇄된 PCB 입자의 형태를 알아보기 위해 촬영한 사진 및 가정한 그림이다. 한양대학교에서 개발한 ‘인쇄회로기판의 금속 단계분리장치(특허출원번호 : 10-2013-0065080)’로부터 분쇄된 PCB 입자의 형태는 원판으로 산출된다. Fig. 5(a)는 실제로 분쇄된 PCB 입자를 화상현미경으로 촬영한 사진으로 PCB 입자 대부분이 원판 형태인 것을 확인할 수 있다. 그러므로 분쇄된 PCB 입자를 직경 D, 높이 h를 가진 원판으로 가정하였다. 이는 Fig. 5(b)에 나타내었다. 입자가 선별기에 투입되면 입자 표면이 회전전극에 달라붙은 형태로 투입되며, 입자의 표면에서 하전이 일어난다¹²⁾. 입자표면 하전은 식 (2)이며, 코로나 정전선별기 내에서

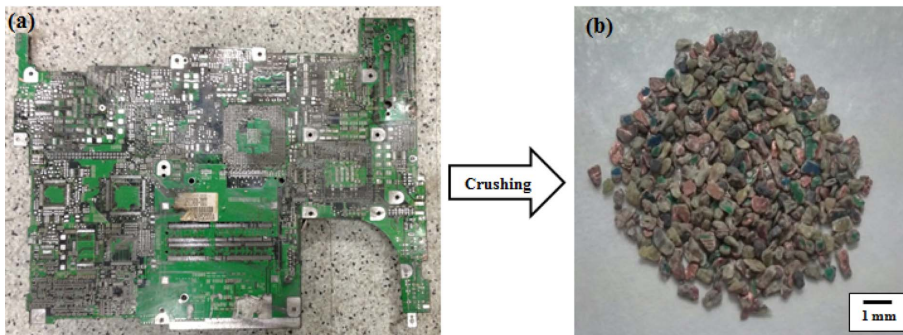


Fig. 3. (a) Laptop PCB after the disassembly process (b) PCB particles after crushing.

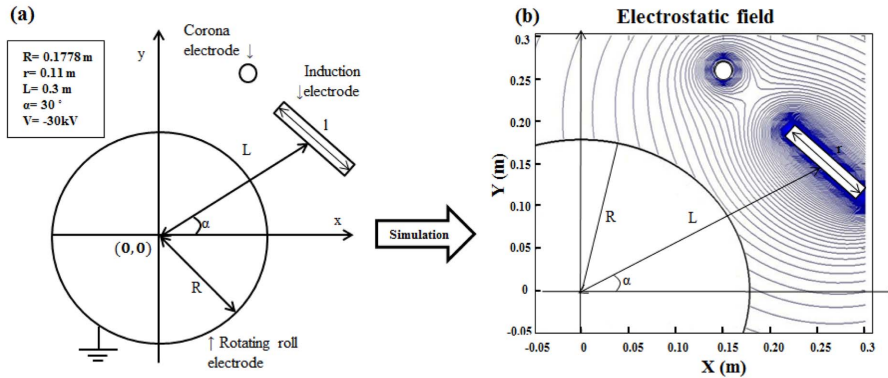


Fig. 4. Schematic representation of (a) Corona-electrostatic separator¹⁴⁾ (b) Electrostatic field in corona-electrostatic separator.

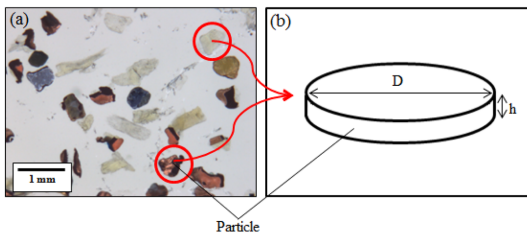


Fig. 5. PCB particle (a) Real particles (b) Hypothetic particle.

원판 입자의 입자하전 식은 (3)으로 표현 가능하다¹²⁾.

$$\sigma = \epsilon_0 E \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{\sigma \pi D^2}{4} = 0.25 \pi \epsilon_0 D^2 E \quad (3)$$

식 (2)에서 σ 는 면전하밀도(C/m^2), ϵ_0 는 진공에서의 유전상수(8.8542×10^{-12}), E 는 정전기장 세기(V/m)을 나타내며, 식 (3)에서 Q_s 는 입자 포화 하전 전하량(C), D 는 입자의 직경(μm)을 각각 나타낸다.

분쇄된 PCB 입자의 직경과 높이의 비를 경험적으로 판단하기 위해 PCB 입자를 5구간으로 체질(Sieving)한 후 각 구간의 입자를 샘플링하여, 화상현미경으로 입자단면을 촬영하였다. Table 1은 각 입도구간 마다 PCB 입자 100개를 추려내어 직경과 높이의 비 측정 후 평균을 낸 값이다. 대체적으로 입도가 작아질수록

D/h 의 비율은 대체로 점점 작아짐을 확인할 수 있으며, D/h 는 4 근처 값으로 나타난다.

입자 D/h 비를 δ 로 놓으면, h 값을 D/δ 로 치환하여 각각의 입도별로 PCB 입자의 질량을 산출하였고, 이를 이용하여 입자의 이동궤도를 예측하였다.

2.6. 입자 탈착 지점

입자가 회전전극으로부터 탈착되는 지점은 입자이동이 시작되는 출발점이기 때문에 입자의 최종 도착지점을 결정하는 중요한 요소이다.

입자 탈착에 작용하는 힘은 중력 F_g , 원심력 F_c , 정전기력 F_e 그리고 거울상 힘 F_i 이다. 이 힘들은 입자의 위치에 따라 방향과 세기가 달라지므로 입자의 위치마다 입자에 작용하는 힘을 x축 성분과 y축 성분으로 나눈 후 그 성분들을 합산하여 입자가 어느 지점에서 떨어지는지 예측해야 한다¹⁴⁻¹⁶⁾. Fig. 6은 PCB 입자의 전도체, 비전도체 입자가 회전전극으로부터 떨어지는 지점을 모사한 그림이다.

입자의 운동에는 입자에 작용하는 힘 외에도 입자간 마찰하전, 입자의 불완전 하전과 같은 많은 요인이 발생한다. 이러한 현상을 모두 표현하기는 어렵기 때문에 입자 탈착 모델링 간에 몇 가지 가정을 하였다.¹⁴⁾ 입자가 전기장을 지날 때 모든 입자는 완벽하게 하전되며, 입자간의 마찰하전은 없고, 습도의 영향 또한 없다고 가정하였다.

전도체입자는 하전 후 전하를 빠르게 잃기 때문에 거

Table 1. Diameter/Height ratio of PCB particles for the different sizes

Particle size (μm)	-1000 + 710	-710 + 500	-500 + 355	-355 + 180	-180
Diameter/Height ratio	4.76	4.12	4.63	3.97	3.47

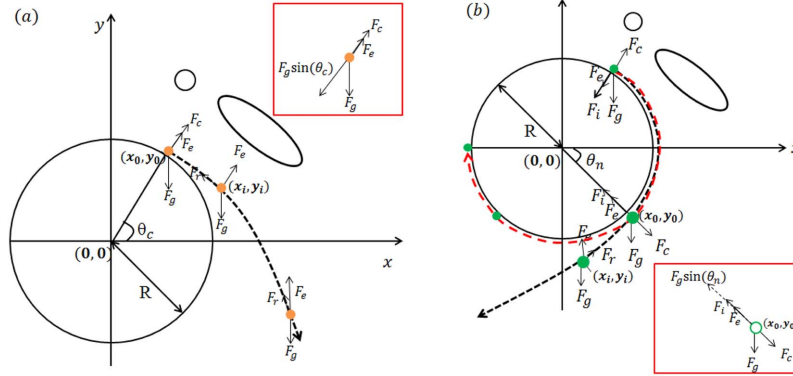


Fig. 6. Geometric configuration for the computation of particle detach point (a) a conductive particle¹⁴⁾ (b) a non-conductive particle¹⁷⁾.

울상 힘은 발생하지 않는다. Fig. 6(a)는 전도체입자가 회전전극으로부터 탈착이 일어나는 점을 나타낸 모식도이다. 전도체입자의 탈착 지점은 중력, 정전기력, 원심력의 벡터 합이 0이 되는 지점이다^{14,15)}. 전도체 입자의 탈착 지점을 (x_0, y_0) 로 놓고 이를 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$F_g \sin(\theta_m) = F_e + F_c \tag{4}$$

식 (4)로부터 각각의 힘의 방정식을 대입하면 (5)처럼 표현 할 수 있다.

$$\pi r^2 h \rho g \cdot \sin(\theta_m) = QE(x_i, y_i) + \pi r^2 h \rho \omega^2$$

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\frac{QE(x_i, y_i) + \pi r^2 h \rho \omega^2}{\pi r^2 h \rho g} \right) \tag{5}$$

식 (5)로부터 나온 탈착 각을 탈착 지점 (x_0, y_0) 으로 표현하면, 전도체 입자의 탈착 지점은 식 (6)으로 표현 된다.

$$x_0 = R \cdot \cos(\theta_m), y_0 = R \cdot \sin \theta_m \tag{6}$$

Fig. 6(b)는 비전도체입자가 회전전극으로부터 탈착이 일어나는 점을 나타낸 것이다. 비전도체 입자는 하전 후 전하를 천천히 잃기 때문에 회전전극 표면과 하전된 입자 사이의 인력인 거울상 힘이 발생한다. 그러므로 전도체 입자와 달리 비전도체 입자의 탈착 지점은 중력, 원심력, 정전기력, 거울상 힘의 벡터 합이 0이 되는 지점이다^{16,17)}. 비전도체 입자의 탈착 지점을 전도체입자

와 마찬가지로 (x_0, y_0) 로 놓으면 이를 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$F_g \sin(\theta_n) + F_e + F_i = F_c \tag{7}$$

식 (7)로부터 각각의 방정식을 대입하면 θ_n 는 (8)처럼 표현된다.

$$\pi r^2 h \rho g \cdot \sin(\theta_n) + QE(x_i, y_i) + Q^2 / (4 \pi \epsilon_0 r^2) = \pi r^2 h \rho \omega^2$$

$$\theta_n = \sin^{-1} \left(\frac{\pi r^2 h \rho \omega^2 - QE(x_i, y_i) - Q^2 / (4 \pi \epsilon_0 r^2)}{\pi r^2 h \rho g} \right) \tag{8}$$

식 (8)로부터 나온 탈착 각 θ_n 을 탈착 지점 (x_0, y_0) 으로 표현하면, 비전도체 입자의 탈착 지점은 식 (9)으로 표현 된다.

$$x_0 = R \cdot \cos(\theta_n), y_0 = R \cdot \sin(\theta_n) \tag{9}$$

입자는 원판으로 가정하였기 때문에 식 (5), (8)에서 입자의 부피를 $\pi r^2 h$ 으로 표현하였다.

2.7. 입자 이동 궤도

입자가 탈착이 일어난 후 입자 이동궤도 영향을 주는 요인은 탈착지점에서의 초기속도 V_0 와 초기 가속도 a_0 , 중력, 정전기력, 항력 F_f 이다. 입자의 이동궤도 또한 탈착 지점과 마찬가지로 입자에 작용하는 힘을 x축 성분과 y축 성분으로 나눈 후 합산하면 표현가능하다¹⁵⁻¹⁷⁾. Fig. 7은 입자의 이동궤도에 영향을 주는 힘을 x축 성분과 y축 성분으로 나누어 표현한 그림이다.

입자를 추출하는 지점을 도착지점 또는 수집점

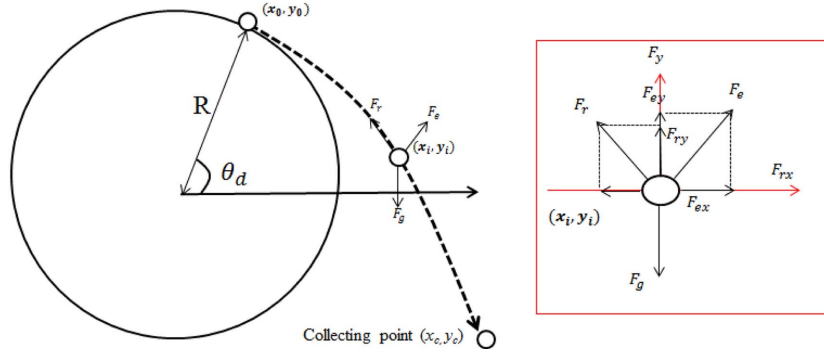


Fig. 7. Geometric configuration for the computation of particle trajectory¹⁴.

(Collecting point)라고 표현한다¹⁸). 즉, 입자의 도착지점의 좌표(x_c, y_c)는 선별 결과의 지표가 된다. 전도체 입자의 도착지점은 회전전극으로부터 x축방향 양의 방향으로 갈수록 선별효율이 증가하며, 비전도체 입자의 경우 회전전극에 오래 부착되어 떨어지지 않거나, 도착지점이 x축의 음의 방향으로 갈수록 선별효율이 증가한다. x축 방향 입자 탈착 지점 좌표인 x_0 는 앞에서 식 (6), (9)에서 유도했으며, 식 (10)으로 다시 언급하였다.

$$x_0 = R \cdot \cos(\theta_d) \tag{10}$$

θ_d 는 입자의 탈착 각이다. x_0 에서 초기속도 V_{x_0} 는 x_0 의 미분하여 얻을 수 있으며 그 값은 식 (11)과 같다.

$$V_{x_0}(x_0, y_0) = \omega R \sin(\theta_d) \tag{11}$$

초기 가속도 a_{x_0} 는 뉴턴의 2법칙으로부터 유도한다. 입자가 탈착한 뒤 x축 방향에 영향을 주는 힘은 항력과 정전기력이므로 x축 방향 항력과 정전기력을 합산 후 질량을 나누어서 식 (12)와 같이 표현 가능하다.

$$F_x = ma_x = F_{rx} + F_{ex}$$

$$a_{x_0} = \frac{F_{rx_0} + F_{ex_0}}{m} = \frac{-6\pi\eta r V_{x_0} + qE_{x_0}(x_0, y_0)}{m} \tag{12}$$

y축 방향의 입자 탈착 지점 좌표 y_0 또한 다시 언급하면 식 (13)으로 표현된다.

$$y_0 = R \cdot \sin(\theta_d) \tag{13}$$

y축 입자 탈착지점의 초기 속도 V_{y_0} 는 V_{x_0} 값과 마

찬가지로 y_0 의 미분을 통해 얻을 수 있으며, 식 (14)처럼 표현된다.

$$V_{y_0} = (x_0, y_0) = \omega R \cos(\theta_d) \tag{14}$$

y축 방향의 초기가속도 또한 x축과 마찬가지로 뉴턴의 2법칙으로부터 유도한다. 그러나 y축 방향은 중력이 작용하므로 이를 고려하여 식 (15)처럼 표현한다. 중력은 다른 힘과 방향이 반대이므로 음의 방향을 나타낸다.

$$F_y = ma_y = F_{ry} + F_{ey} + F_g$$

$$a_{y_0} = \frac{F_{ry} + F_{ey} - F_g}{m} = \frac{-6\pi\eta r V_{y_0} + qE_{y_0}(x_0, y_0)}{m} - g \tag{15}$$

이동 속도 및 좌표는 위 가속도를 시간적분을 통해 구하였다. 시간적분은 차분법을 통해 근사하였다. 시간 t_{k+1} 가 지난 후에 함수 값 $y(t_{k+1})$ 은 이전시간인 t_k 에서의 함수 값 $y(t_k)$ 에 dt 를 곱한 값을 $y(t_k)$ 에 더해 근사하는 방식이며 식 (16)에 표현하였다.

$$y = dy/dt = f'(t) \rightarrow y(t_{k+1}) = y(t_k) + y'(t_k)dt \tag{16}$$

위 방법을 통해 탈착 지점 이후 입자의 x, y 좌표를 구할 수 있다.

x축 이동 좌표 및 y축 이동좌표를 가속도의 시간적분으로 표현하면 식 (17), (18)과 같다.

$$x_{i+1} = x_i + V_x(x_i, y_i)dt + 0.5a_x(x_i, y_i)dt^2 \tag{17}$$

$$y_{i+1} = y_i + V_y(x_i, y_i)dt + 0.5a_y(x_i, y_i)dt^2 \tag{18}$$

마찬가지로 속도 V_x, V_y 를 가속도의 시간적분으로 나타내면 식 (19), (20)과 같이 표현된다.

$$V_x(x_i, y_i) = V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_x(x_{i-1}, y_{i-1})dt \quad (19)$$

$$V_y(x_i, y_i) = V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_y(x_{i-1}, y_{i-1})dt \quad (20)$$

x방향 가속도 a_x 는 초기가속도는 이전 좌표에서의 정전기력과 항력의 값을 질량으로 나누어준 값으로 식 (21)로 표현된다.

$$a_x = \frac{F_{rx} + F_{ex}}{m} = \frac{-6\pi\eta r V_x + qE_x(x_i, y_i)}{m} \quad (21)$$

y방향 가속도 a_y 는 a_x 와 달리 초기 이전 y축 방향의 좌표에서의 정전기력과 항력, 중력의 값을 질량으로 나누어준 값으로 식 (22)과 같다.

$$a_y = \frac{F_{ry} + F_{ey} - F_g}{m} = \frac{-6\pi\eta r V_y + qE_y(x_i, y_i) - g}{m} \quad (22)$$

위 식 (10)~(15), (17)~(22)를 이용하여 PCB 입자의 최종 궤도를 모사하였다.

3. 결과 및 고찰

샘플링구간은 Non-conductor (NC), Middling (M), Conductor (C) 총 3개로 구성되어 있다. 각 구간의 크기를 NC=0.28 m, M=0.20 m, C=0.20 m로 고정시켜 시뮬레이션 하였으며, 도착지점 $y_c = -0.2$ m로 고정시켰다. Fig. 8은 각각의 변수에 따른 PCB 입자의 이동궤도 시뮬레이션 결과이다. 비전도체입자의 이동궤도는 점선으로 전도체 입자의 이동궤도는 실선으로 표현하였다.

3.1. 입자 크기의 영향

Fig. 8(a)은 입자 크기 변화에 따른 PCB 입자의 이동궤도 시뮬레이션 결과이다. 조건은 공급전압 -30 kV, 회전속도 30 rpm, 회전전극으로부터 유도전극의 각도는 30°로 고정하였다.

입자 크기에 대한 PCB 입자의 이동궤도의 시뮬레이

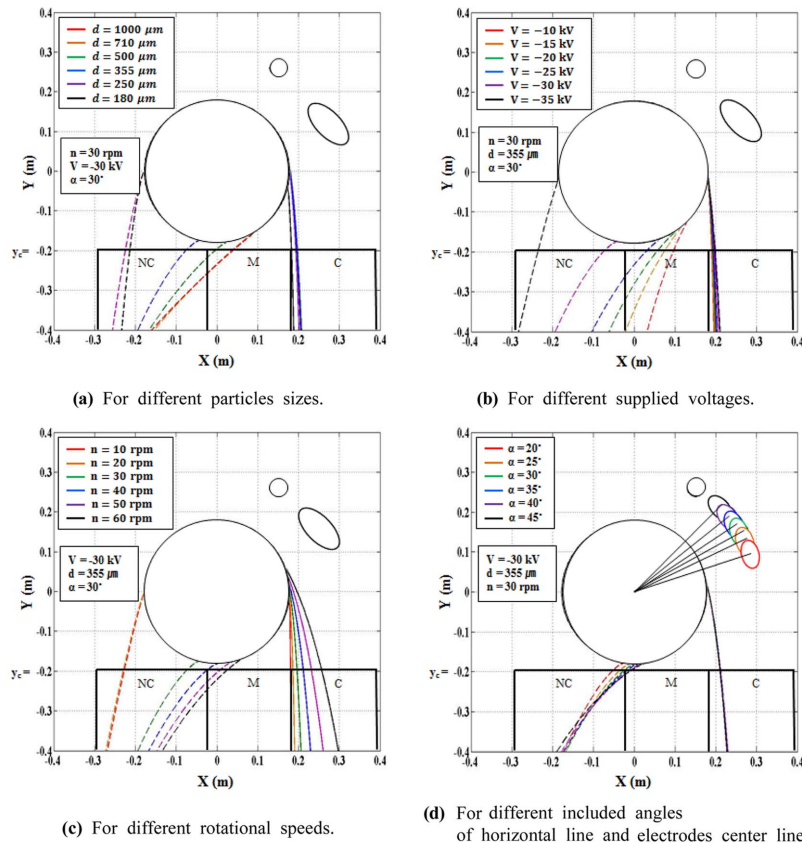


Fig. 8. Diagrams of trajectories of PCB particles for each parameter.

선 결과에서 전도체 입자는 크기가 변해도 이동궤도의 변화가 거의 없다. 그러나 비전도체 입자는 크기가 커질수록 이동궤도가 M구간에 가까워져서 355 μm 이상의 입도에서는 NC구간이 아닌 M구간으로 떨어지는 것으로 나타났다. 한편, 250 μm 이하의 입자는 탈착이 일어나지 않고 브러시까지 도달한다. 전도체 입자는 비전도체 입자 보다 이동궤도의 변화가 없으나 크기가 작아질수록 도착지점이 M구간에 가까워지는 현상이 나타났다. 코로나 방전 정전선별에서 PCB 입자의 크기 변화는 전도체입자보다 비전도체입자가 더 영향을 받으며, 크기가 작을수록 선별효율이 증가하나, 180 μm 이하의 입도에서는 전도체입자가 M구간에 들어가 선별효율이 떨어질 수 있다.

이러한 현상은 Wu (2008)에서 180 μm 이하 입자는 입자에 작용하는 중력, 원심력보다 정전기력이 더 크게 작용하여 정전선별이 용이하게 이루어지지 않는다고 보고되었다.¹⁹⁾ 또한 Chao (2011)에서는 PCB 입자의 단체분리는 보통 600 μm 이하에서 이루어진다고 하였다.²⁰⁾ 따라서 선행연구와 본 시뮬레이션 결과를 종합했을 때, PCB 입자의 크기가 180 ~ 600 μm 구간에서 선별이 적합하다고 판단된다. 다음 시뮬레이션은 180 ~ 600 μm 중간 입도인 355 μm 로 고정하여 진행하였다.

3.2. 공급전압 세기의 영향

Fig. 8(b)는 공급전압의 세기의 변화가 PCB 입자 이동궤도에 미치는 영향을 알아보기로 공급전압의 세기를 -10 kV부터 -35 kV 까지 -5 kV 간격으로 시뮬레이션을 진행한 결과이다. 공급전압세기변화 또한 입자 크기 변화와 마찬가지로 전도체입자보다 비전도체입자가 더 많은 영향을 받는 것을 Fig.8 (b)를 통해 확인할 수 있다. 입자의 크기 변화보다 공급전압의 세기는 약간만 변해도 비전도체 입자의 이동궤도 변화가 크다. 이 현상은 공급전압의 세기가 비전도체의 부착힘인 ‘거울상 힘’에 많은 영향을 주기 때문이다.^{16,17)} Aman (2004)에서 공급전극의 세기가 비전도체 입자에 큰 영향을 준다는 것을 실험적으로 증명하였다.¹⁰⁾

본 연구에서는 통해 PCB입자의 선별 효율을 증가시키기 위해서는 -30 kV 이상의 고전압을 공급해야하는 것으로 나타났다.

3.3. 회전전극 속도의 영향

Fig. 8(c)는 회전전극 속도 변화가 이동궤도에 미치는 영향을 알아보기 위해, 10 rpm에서 60 rpm까지 10 rpm

간격으로 진행한 시뮬레이션 결과이다. 회전전극의 회전속도는 전도체와 비전도체 모두 이동궤도에 큰 영향을 미친다. 회전속도가 빠를수록 전도체입자는 원심력을 더 받아 회전전극으로부터 멀리 달아나 C구간으로 도달하며, 비전도체입자의 경우 회전속도가 빠르면 정전기력과 거울상힘보다 원심력이 크게 되어 오래부착하지 못하고 빠르게 탈착이 일어나 M구간에 떨어질 가능성이 생긴다.²¹⁾ 비전도체입자가 회전전극에 오래 붙어있을 수 있고, 전도체입자가 멀리 날아갈 수 있는 회전속도를 찾아야한다. 본 연구에서는 시뮬레이션 결과의 따라 비전도체입자가 NC구간에 도착지점이 놓이면서 전도체 입자 도착지점이 C구간에 놓이는 20~40 rpm이 선별이 적합한 조건으로 사료되며 30 rpm으로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3.4. 유도전극 각도의 영향

Fig. 8(d)는 회전전극 중심과 유도전극 중심의 사이각을 20°에서 45°까지 5°씩 변화시키며 PCB 입자 이동궤도를 나타낸 것이다. 전도체입자의 이동궤도는 차이가 없으나, 비전도체입자의 경우 이동궤도의 약간의 변화가 관찰되었다. 이는 유도전극위치 변화로 생기는 정전기장의 변화가 전도체입자보다는 정전기력의 예민한 비전도체입자가 더 많은 영향을 받기 때문이라고 사료된다. Aman 등(2004)에서도 유도전극의 위치변경은 전도체입자에는 거의 영향이 없고, 비전도체입자에는 약간의 영향을 주는 것을 실험을 통해 증명하였다.¹⁰⁾ 본 시뮬레이션 결과에 따라 유도전극 중심과 회전전극 중심의 각은 비전도체 이동궤도가 NC구간에 놓이기 시작하는 30° 이하 적합한 것으로 판명되었다.

4. 결론

분쇄된 PCB 입자의 코로나 방전 정전선별 시뮬레이션을 수행한 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 코로나 방전 정전선별 시뮬레이션을 통해 공급전압세기, 회전전극의 회전속도, 유도전극의 위치, 입자 크기 등 다양한 변수를 입력하여 입자 이동궤도를 출력하여, PCB 입자의 이동 궤도를 예측하였다.

2) 시뮬레이션을 통한 정전선별의 적합한 PCB 분쇄물의 입자 크기는 180 ~ 600 μm 이다. 또한 355 μm 의 직경을 가진 PCB 입자는 공급전압 -30 kV 이상, 회전속도 20 ~ 40 rpm 사이, 유도전극의 각도 30° 이하에서

전도체가 C구간, 비전도체가 NC구간에 도착지점이 놓이는 것으로 나타났다.

3) PCB 입자의 입도, 전극의세기, 유도전극의 위치는 전도체 입자에 비해 비전도체입자가 보다 많은 영향을 받으며, 회전속도는 전도체입자, 비전도체입자 모두 영향을 주는 것으로 확인하였다.

4) 추후 습도, 극간의 거리의 영향 등을 고려하여 시뮬레이션 연구를 진행할 예정이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다. (과제번호 : 2013000001833) 이에 감사드립니다.

References

1. Cui Jirang, Forsberg Eric, 2003 : Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, 99(3), pp. 243-263.
2. Veit, H.M, Diehl, T.R., Salamia, A.P., Rodrigues, J.S., Bernardesa, A.M., Tenório, J.A.S., 2005 : Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, *Waste Management*, 25(1), pp. 67-74.
3. Li Jia, Xu Zhenming, Zhou Yaohe, 2007 : Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards, *Journal of Electrostatics*, 65, pp. 233-238.
4. Menad, N., Bjorkman, B., Allain, E.G 1998 : Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap, *Resources Conservation and Recycling*, 24, pp. 65-85.
5. Iuga, A., Neamtu, V., Suarasan, I., Morar, R., Dascalesu, L., 1998 : Optimal high-voltage energization of corona-electrostatic separators. *IEEE Transaction on Industry Application*, 34(2) pp. 286-293.
6. Iuga, A., Dascalesu, L., Morar, R., Csorvassy, I., Neamtu, V., 1989 : Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals, *Journal of Electrostatics*, 23, pp. 235-243.
7. Wu Jiang, Li Jia, Xu Zhnming, 2009 : An improved model for computing the trajectories of conductive particles in roll-type electrostatic separator for recycling metals from WEEE, *Journal of Hazardous Materials*, 167, pp. 489-493.
8. Tennal, K.B, Lindquist, D., Mazumer, M.K, Rajan, R., Guo W., Wu Jiang, 1999 : Efficiency of electrostatic separation of minerals from coal as function of size and charge distributions of coal particles, *IEEE Transaction on Industry Application*, 4, pp. 2137-2142.
9. Li Jia, Lu Hongzhou, Liu Shushu, Xu Zhenming, 2008 : Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field, *Journal of Hazardous Materials*, 153, pp. 269-275.
10. Amen, F., MorarJia, R., Köhnlechner, R., Samuila, A., Dascalescu, L., 2004 : High-Voltage Electrode Position : A Key Factor of Electrostatic Separation Efficiency, *IEEE Transaction on Industry Application*, 40(3) pp. 905-910.
11. Dascalescu, L., Das, S., Kumar, U., 2009 : Numerical simulation of conductive particle behaviour at the surface of a plate electrode affected by a DC corona field, *Journal of Electrostatic*, 67, pp. 167-172.
12. Lu Hongzhou, Li Jia, Jie Guo, Xu Zhenming, 2008 : Movement behavior in electrostatic separation : Recycling of metal materials from waste printed circuit board", *Journal of materials processing technology*, 197, pp. 101-108.
13. Crowley, J.M., 1991 : *Fundamentals of Applied Electrostatics*, Krieger Publishing, Malabar, FL, pp. 19-20.
14. Li Jia, Lu Hongzhou, Xu Zhenming, Zhou Yaohe, 2008 : A model for computing the trajectories of the conducting particles from waste printed circuit boards in corona electrostatic separators, *Journal of Hazardous Materials*, 151, pp. 52-57.
15. Younes, M., Tilmatine, A., Medles, K., Rahli, M., Dascalescu, L., 2007 : Numerical of Conductive Particle Trajectories in Roll-Type Corona-Electrostatic Separators, *IEEE Transaction on Industry Application*, 43(5), pp. 1130-1136.
16. Younes, M., Tilmatine, A., Medles, K., Bendaoud, A., Samuila, A., Dascalescu, L., 2009 : Numerical Modeling of Insulating Particles Trajectories in Roll-type Corona-Electrostatic Separators, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(3), pp. 629-634.
17. Younes, A., Younes, M., Sayah, H., Bilici, M., Samuila, A., Dascalescu, L., 2013 : Effect of spark discharges on the trajectories of insulating particles in roll-type corona-electrostatic separators. Experimental and numerical study, *Journal of Electrostatics*, 71, pp. 84-91.
18. Li Jia, Xu Zhenming, Zhou Yaohe, 2008 : Theoretic model and computer simulation of separating mixture metal particles from waste printed circuit board by electrostatic separator, *Journal of Hazardous Materials*, 153, pp. 1308-1313.
19. Wu Jiang, Li Jia, Jie Guo, Xu Zhenming, 2008 : Electrostatic separation for recovering metals and nonmetals from waste printed circuit board : problems and

improvements, Environ. Sci. Technol., 42, pp. 5272-5276.

20. Chao Guo, Hui Wang, Wei Liang, Jiangang Fu, Xin Yi, 2011 : Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board(PCB), Waste management, 31, pp. 2161-2166.

21. Li Jia, Lu Hongzhou, Xu Zhenming, Zhuo Yaohe, 2008 : Critical rotational speed model of the rotating roll electrode in corona electrostatic separation for recycling waste printed circuit boards, Journal of Hazardous Materials, 154, pp. 331-336.

Nomenclature

- a : Acceleration of the particle (m/s^2)
- D : Diameter of particle (μm)
- E : Electrostatic field (V/m)
- h : Height of particle (μm)
- L : Center distance of roll electrode and induction electrode (m)
- l : Length of induction electrode (m)
- m : mass of the particle (kg)
- n : rotation speed of roll electrode (rpm)
- Q : Quantity of electricity (C)
- R : Radius of the roll electrode (m)
- r : Radius of particle (μm)
- s : Distance between point and induction electrode (m)
- V : Supplied voltage (V)
- α : Included angle of horizontal line and induction electrode center line($^\circ$)
- ϵ_0 : Dielectric constant in vacuum
- ϵ : Dielectric constant
- η : Air drag coefficient (Ns/m^2)
- ρ : Mass density of the particle (g/cm^3)
- w : Angular velocity of roll electrode (rad/s)

한 성 수

- 한양대학교 자원환경공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 석사과정

박 승 수

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
- 한양대학교 자원환경공학과 박사과정

김 성 민

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 석박사 통합과정

박 재 구

- The Univ. of Tokyo 자원공학과 공학석사
- The Univ. of Tokyo 자원공학과 공학박사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 교수