유도형 정전선별에서 ASR 입자의 궤적모사

김범욱 · §박철현

조선대학교 에너지자원공학과

Trajectory Simulation of ASR Particles in Induction Electrostatic Separation

Beom-uk Kim and §Chul-hyun Park

Department of Energy & Resources Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

요 약

폐자동차파쇄잔재물(Automobile Shredder Residue, ASR)은 폐차 재활용시 발생하는 최종 폐기물로써 파분쇄, 공기분급, 자력선별 및 정전선별법과 같은 자원처리 공정을 이용하여 선별할 수 있다. 본 연구에서는 유도형 정전선별기를 이용하여 ASR의 선별효율 향상 및 예측을 위한 전도체(구리) 및 비전도체(유리)의 궤적분석이 수행되었다. 전도체의 궤적분석 결과, 0.5와 0.25 mm 조립자 구리선의 모사궤적은 실제궤적과 거의 일치하였다. 반면 0.06 mm 구리선의 관찰궤적은 (-) 전극으로 편향되었다. 이는 입자특성 및 상대습도에 의한 전하량의 영향 때문으로 판단된다. 비전도체의 경우 절연체 유리의 관찰궤적이 전도성 입자들의 궤적과 유사한 특징을 보이면서 (-) 전극으로 편향되었다. 현미경, SEM & EDS 분석결과 유리표면에서 미립의 철과 전도성 유기물과 같은 이물질 발견되었다. 이와 같이 이물질이 부착된 유리는 ASR 재활용을 위한 정전선별시 비철금속의 선별효율을 저하시키는 것으로 판단된다. 향후 연구에서 유리에 부착된 이물질 제거를 위한 전처리 기술개발 및 개선된 궤적모사 연구가 요구된다.

주제어 : 유도형 정전선별, ASR, 궤적모사

Abstract

Automobile shredder residue (ASR) is the final waste produced when end-of-life vehicles (ELVs) are shredded. ASR can be separated using mineral-processing operations such as comminution, air classification, magnetic separation, and/or electrostatic separation. In this work, trajectory analyses of conductors (copper) and non-conductors (glass) in the ASR have been carried out using induction electrostatic separator for predicting or improving the ASR-separation efficiency. From results of trajectory analysis for conductors, the trajectories of copper wire by observation versus simulation for coarse particles of 0.5 and 0.25 mm showed consistent congruity. The observed 0.06 mm fine-particles trajectory was deflected toward the (-) attractive electrode owing to the charge-density effects due to the particle characteristics and relative humidity. In the case of non-conductors, the actual trajectory of dielectric glass deflected toward the (-) electrode, showing characteristics similar to those of conductive particles. The analyses of stereoscopic microscope and SEM & EDS found heterologous materials (fine ferrous particles and conductive organics) on the glass surface. This demonstrates the glass decreasing separation efficiency for non-ferrous metals during electrostatic separation for the recycling of ASR. Future work will require a pretreatment process for eliminating impurities from the glass and advanced trajectory-simulation processes.

Key words : Induction electrostatic separation, ASR, trajectory simulation

· Received : December 9, 2019 · Revised : December 19, 2019 · Accepted : December 23, 2019

§ Corresponding Author : Chul-Hyun Park (E-mail: chpark@chosun.ac.kr)

Department of Energy Resources Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

©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

폐 자동차의 재활용 시 최종단계에서 발생하는 폐자동차파쇄잔재물(Automobile Shredder Residue, ASR)은 재활용 분야에서 중요한 이슈가 되고 있다. 자동차 산업의 발전에 따라 ASR의 배출량도 지속적으로 증가하고 있으나 대부분 매립에 의해 처리되고 있다¹⁻³⁾. 정책적 측면에서 국내 자원순환법과 유럽의 European Directive 2000/53/EC 등이 전체 폐 자동차의 재활용률을 95% 이상 높이도록 규정하고 있어 환경적 문제의 해결뿐만 아니라 이를 달성할 수 있는 기술 개발이 필요한 실정이다^{4,8)}.

ASR은 파분쇄, 공기분급, 자력선별 및 정전선별법 등의 자원처리 연속공정에 의해 선별될 수 있다. ASR내 비철금속의 경우, 정전선별에 의해 회수될 수 있으나 현재까지 실제 기술적용 및 공정연구는 시도되지 않고 있다. 정전선별법은 전통적인 광물산업뿐 만 아니라 PCB, 폐전선, 플라스틱과 같은 다양한 폐전기·전자장치의 재활용 분야에 널리 활용되고 있다⁹⁻¹²⁾. 정전선별과 관련된 종래의 연구들은 주로 장치 개발, 공정 연구 및 선별조건 실험연구 등이 주를 이루어 왔다.

최근에 Dascalescu 그룹은 입자 거동에 관한 전극형상, 선별기 종류, 전기장세기 및 입자 크기의 영향 연구를 수학적 모델링에 기반으로 하여 수행하고 있으며, 룰타입 코로나방전 정전선별기를 이용한 전도성 입자의 궤적모사가 실제궤적과 유사한 결과를 얻은 바 있다¹³⁻²¹⁾. Vlad 등은 경사판 정전선별기에서 유도전극 표면의 전기장세기를 조절하여 인위적 시료인 폴리아미드(PA) 볼과 쇠구슬의 입자거동을 예측할 수 있는 수학적 모델링 연구를 수행하였다¹⁴⁻¹⁷⁾. Richards 등은 통계프로그램을 이용하여 전극 형상에 따른 폐전선 내의 구립입자(직경 0.8~1.6 mm, 길이 2~5 mm)의 궤적분석을 수행하고 전극의 성능을 평가하였다¹⁴⁻¹⁷⁾. Xu 등은 코로나방전정전선별에서 입자의 형상에 따른 궤적모사를 평가하였고 이의 연구에서 전도체(PCB)의 하전량과 항력에 따른 궤적모델을 개발하였다²⁰⁻²¹⁾.

이와 같이 최근 연구는 PCB, 폐전선 및 플라스틱 폐기물과 인위적인 전도체와 비전도체 시료를 이용하여 코로나방전선별기 장치 유형과 그에 따른 주요 변수별 궤적분석이 주를 이루고 있으나 ASR 시료를 이용한 유도형 정전선별기 타입과 궤적모사에 대한 연구는 시도되지 않고 있다. 본 연구에서는 실험실 규모의 유도형 정전선별 시스템을 이용하여 전기장세기, 입자크기

및 물리적 특성과 같은 주요변수를 평가하고 전도성 및 비전도성 입자의 모사 및 관찰궤적분석을 통해 ASR의 선별 가능성을 예측하고자 하였다.

2. 궤적모사

2.1. 이론

정전선별에서 입자에 작용하는 힘은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 유도전극을 떠난 전도성 입자는 중력(F_g), 정전기력(F_e) 공기저항(F_d)의 상호 작용에 따라 편향 전극을 향해 이동한다. 이때, 입자가 받는 각 힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_e = QE \quad (1)$$

$$F_g = mg \quad (2)$$

$$F_d = 6\pi\eta rV \quad (3)$$

여기서, Q 는 입자의 전하량(Surface charge of the particle), E 는 전기장 세기(Electric field strength)이며, m 은 입자의 질량(Mass of the particle), g 는 중력가속도(Acceleration due to gravity), η 는 공기의 점성계수(Viscosity of air, 1.85×10^{-5} Ns/m), r 은 물체의 반경(Radius), 그리고 V 는 속도(Velocity)이다.

입자의 전하량은 입자 형상에 영향을 받게 되고 입자의 표면에 따라 포화전위(Saturation charge, Q_s)가 결정된다. 원기둥 모양의 입자 포화전위는 다음과 같이 계산할 수 있다^{13,26)}.

$$Q_s = 2\pi r_p l_p \epsilon_0 \epsilon_a \quad (4)$$

이 때 r_p 는 입자 반경(Radius of the particle), l_p 는 입자 길이(Length of the particle), ϵ_0 는 진공상태의 유전율(Permittivity of the vacuum, 8.85×10^{-12} F/m)이고, ϵ_a 는 공기의 상대 유전율(Relative permittivity of the air, 1.00059)이다.

Fig. 1. Forces acting on particles in electrostatic separation.

유도전극에 놓인 입자가 받는 정전기력은 유도전극의 영향을 받아 식 (5)와 같이 감소하게 된다. 그러나 입자와 전극 사이의 거리가 입자 반경의 5배 이상 떨어지게 되면 전극의 영향으로부터 벗어나게 되어 식 (6)과 같이 포화 전하량과 전기장의 곱의 관계로 나타낼 수 있다. 즉 식 (5)는 입자가 유도판에 정전유도될 때 그리고 식 (6)은 유도판의 끝에서 낙하 혹은 편향될 때의 정전기력을 의미한다.

$$F_e = 0.715 Q_s E \quad (5)$$

$$F_e \cong Q_s E \quad (6)$$

2.2. 전기장세기

기존 정전선별 장치의 전기장세기는 주로 롤형 전극(Cylindrical electrode)을 기반으로 모사되었다^{18,22-25}. 본 연구에서는 판형 전극을 롤형 전극과 같은 형상으로 변환하여 전기장 모사 및 궤적 분석을 수행하였다. 롤형 전극의 크기는 각 판형 전극의 마주보는 단면의 길이를 이용하여 다음과 같이 전극 형상을 변환하였다.

$$r_g = l_g / \pi \quad (7)$$

$$r_e = l_e / \pi \quad (8)$$

r_g 는 롤형 유도전극의 반경(Radius of the induction cylindrical electrode)이고, r_e 는 롤형 편향전극의 반경(Radius of the attractive cylindrical electrode)이다. l_g 는 판형 유도전극 단면의 길이(Sectional length of the induction plate electrode)이고, l_e 는 판형 편향전극 단면의 길이(Sectional length of the attractive plate electrode)이다.

롤형 전극 사이의 전기장 모델링 방법은 1983년 Angelov에 의해 제안된 바 있으며, Li등은 이로부터 롤형 정전선별에서 유도전극과 편향전극 사이의 전기장 모델식을 다음과 같이 제안하였다^{22,27}.

$$E_x = U \times \delta \times \left[\frac{j-h_1+x_1}{(j-h_1+x_1)^2+y_1^2} + \frac{j+h_1-x_1}{(j+h_1-x_1)^2+y_1^2} \right] \quad (9)$$

$$E_y = U \times \delta \times \left[\frac{y_1}{(j-h_1+x_1)^2+y_1^2} + \frac{y_1}{(j+h_1-x_1)^2+y_1^2} \right] \quad (10)$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (11)$$

E_x 는 수평 성분의 전기장 세기(Horizontal electronic field strength), E_y 는 수직 성분의 전기장 세기(Vertical

electronic field strength), E 는 방향 성분이 없는 전기장 세기(Scalar value of the electronic field strength), U 는 적용전압의 세기(Applied Voltage)이다.

$$h_1 = \frac{L^2 + r_g^2 - r_e^2}{2L} \quad (12)$$

$$h_2 = \frac{L^2 - r_g^2 + r_e^2}{2L} \quad (13)$$

$$j = \sqrt{h_1^2 - r_g^2} \quad (14)$$

$$\delta = \ln \frac{(h_1 + j - r_g)(h_2 + j - r_e)}{(r_g + j - h_1)(r_e + j - h_2)} \quad (15)$$

$$x_1 = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha) \quad (16)$$

$$y_1 = y \cos(\alpha) - x \sin(\alpha) \quad (17)$$

이 때 L 은 두 전극의 중심축 사이의 거리(Distance between the axes of two electrodes), α 는 두 전극의 중심축을 이은 선과 지표면이 이루는 각도(the angle between line of two axis and horizontal line)이다.

2.3. 궤적계산

본 연구에서 수행한 입자궤적 모사는 다음과 같은 가정에 수행되었다.

- 궤적 분석 시 두 전극을 롤형으로 변환하여 전기장을 모사한다.
- 입자의 형상은 일정한 크기 및 무게의 완벽한 원기둥 혹은 구이다.
- 전도성 입자들은 정전유도판에 투입된 후 곧바로 포화 전위까지 하전된다.
- 포화 전위는 입자 형상에 따라 Félici의 전하량 공식이 적용된다²⁶.
- 각 입자 사이의 간격은 서로 영향을 주지 않을 정도로 떨어져 있다.
- 유도전극에 놓인 입자의 정전기력은 식 (5)가, 그리고 낙하하는 동안은 식 (6)이 적용된다.
- 입자와 입자 혹은 입자와 전극 사이의 마찰대전 효과는 무시한다.
- 식 (1)~(3) 및 (18)로부터 각 방향 성분별 입자에 작용하는 힘은 식 (19)~(20)과 같이 나타낼 수 있으며, 입자의 수직방향과 수평방향 성분의 가속도는 식 (21)~(22)와 같이 구할 수 있다.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{ma_x^2 + ma_y^2} \quad (18)$$

$$F_x = F_e - F_d \quad (19)$$

$$F_y = F_e + F_d - F_g \quad (20)$$

$$a_x = \frac{QE_x - 6\pi\eta r V_x}{m} \quad (21)$$

$$a_y = \frac{QE_y + 6\pi\eta r V_y}{m} - g \quad (22)$$

입자궤적은 입자의 연속된 움직임 즉, 매 순간 이동한 입자의 위치를 누적한 것으로 나타낼 수 있다. 따라서 시간 변화에 따른 입자의 위치는 다음과 같이 구할 수 있다^{20,22}.

$$x_{i+1} = x_i + V_x(x_i, y_i)dt + 0.5a_x(x_i, y_i)dt^2 \quad (23)$$

$$y_{i+1} = y_i + V_y(x_i, y_i)dt + 0.5a_y(x_i, y_i)dt^2 \quad (24)$$

또한, 식 (23)~(24)의 입자속도는 식 (25)~(26)과 같이 ($V(x_i, y_i)$)는 시간 변화에 따른 가속도변화를 누적하여 나타낼 수 있고, 가속도 ($a(x_i, y_i)$)는 식 (21)~(22)로부터 식 (27)~(28)과 같이 구할 수 있다.

$$V_x(x_i, y_i) = V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_x(x_{i-1}, y_{i-1})dt \quad (25)$$

$$V_y(x_i, y_i) = V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_y(x_{i-1}, y_{i-1})dt \quad (26)$$

$$a_x(x_i, y_i) = \frac{QE_x(x_{i-1}, y_{i-1}) - 6\pi\eta r V_x(x_{i-1}, y_{i-1})}{m} \quad (27)$$

$$a_y(x_i, y_i) = \frac{QE_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + 6\pi\eta r V_y(x_{i-1}, y_{i-1})}{m} - g \quad (28)$$

최종적으로 입자의 궤적모사는 먼저 조건 입력, 전극형상변환, 전기장 계산, 식 (23)~(28) 적용 및 궤적도시의 방법으로 수행되었다.

3. 시료 및 실험방법

3.1. 시료

본 연구에 이용된 시료는 포항 (주)경한으로부터 입수한 ASR로 공기분급과 자력선별을 거친 비자성 산물(이하 ASR시료)이다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 시료의 구성을 사진으로 나타낸 것으로써 (a) ASR 시료, (b) 유리 및 (c) 구리선으로 이루어져 있으며, 전도성 물질인 구리가 약 10% 그리고 비전도성 물질인 유리, 플라스틱 및 기타 물질이 약 90%이었다. 여기서, 전도성 입자와 비전도성 입자의 대표물질은 각각 구리와 유리로써 이들을 이용하여 수학적 모델링 및 궤적분석이

Fig. 2. ASR samples used in this study: (A) ASR, (B) Glass, (C) Copper wire.

수행되었다.

3.2. 실험

Fig. 3은 실험실 규모의 유도형 정전선별 시스템의 사진을 나타낸 것이다. 선별과정은 먼저 구리와 유리 입자가 접지된 (+)전극판에 투입되면 양으로 유도된 구리 입자가 두 전극 사이의 전기장을 경유하여 (-)전극판으로 편향되고 유리입자의 경우 정전기적 영향 없이 유도판의 끝에서 자유낙하하게 된다. 따라서 전도성 입자와 비전도성 입자가 분리대에서 선별된다.

(+)전극의 상판은 카본과 고무의 혼합물로 그리고 (-)전극판은 원형메쉬 형태의 알루미늄 재질로 제작되었다. 전원공급장치(KSA-C)는 최대 ± 40 kV의 직류전압공급원이 그리고 상대습도는 제습기(SDH-LX200, Shinil Corp.)를 이용하여 30~40%로 제어되었다. 또한 입자의 궤적은 초고속카메라(Mach-F340)를 이용하여 관찰되었다. 유도형 정전선별에서 전도체와 비전도체의 입

Fig. 3. Lab-scale induction electrostatic separator unit.

Table 1. Conditions and variables of experiment and simulation in particle trajectory

Feed rate (g/min)		50	
Temperature (°C)		29	
Humidity (%)		35 ~ 45	
Initial Speed (m/s)		0.13	
High Voltage (kV)		5, 10, 15, 20	
Distance between Two Electrodes (m)		0.6	
Particle Size	Copper	Diameter (m)	0.00012, 0.0005, 0.001
		Length (m)	0.01
	Glass	Diameter (m)	0.00014

자재적은 2장 궤적모사방법과 Table 1과 같은 변수와 조건들에 따라 모사 및 관찰되었다.

4. 실험결과 및 토의

4.1. 정전기력

정전선별의 궤적모사시 전도체와 비전도체 입자의 궤적에 가장 큰 영향을 미치는 지배적인 힘은 정전기력이며, 전기장세기와 전하량의 곱으로 나타낼 수 있다. Fig. 4는 적용전압과 수평거리의 변화에 따른 전기장세기 변화를 나타낸 것으로써 전압이 증가할수록 최대 전기장 세기도 증가하고 이격거리가 멀어질수록 전기장은 급격히 감소하는 경향을 보였다. Fig. 5는 수평거리의 변화에 따라 전도성 입자에 작용하는 각 힘의 크기를 비교한 것으로써 입자의 중력(F_g)은 수평거리의 변화와 무관하게 가장 크고 일정하고 공기저항(F_d)은 상대적으

Fig. 4. Variation of electric field strength as function of distance at the applied voltages.

로 두 힘에 비해 매우 작아 입자 궤적에 큰 영향을 미치지 않는다. 정전기력(F_e)의 경우, Fig. 4에서 보는 바와 같이 수평거리가 증가할수록 전기장세기가 감소하고 그에 따라 정전기력도 유사한 경향을 보였다. Fig. 6은 수평거리의 변화에 따라 입자에 작용하는 방향 성분별 힘과 합력의 변화를 나타낸 것이다. 수평방향 힘은 주로 정전기력의 영향을 받고 수직방향 힘은 정전기력과 중력의 영향을 받으므로 수평거리가 멀어질수록 수평방향 힘(F_x)은 급속히 감소하게 된다. 반면 수직방향 힘(F_y)은 점차 증가하기 때문에 두 힘 사이의 합력(F_t)은 수직방향 힘에 지배된다. 따라서 유도전극 끝에서 입자

Fig. 5. Magnitude of forces acting on a conductive particle as horizontal distance. (Radius of copper wire (r_p): 0.00025 m, length of copper wire (l_p): 0.01 m, and applied voltage (U): 20 kV). **Fig. 6.** Magnitude of forces (F_x , F_y , F_t) acting on a conductive particle as horizontal distance. (Radius of copper wire (r_p): 0.00025 m, length of copper wire (l_p): 0.01 m, and applied voltage (U): 20 kV).

는 포물선을 그리며 낙하하게 된다.

4.2. 궤적모사

Fig. 7은 구리선과 유리의 궤적모사 결과를 나타낸 것으로써 모사조건은 적용전압(U): 20 kV, 입자의 초기 운동속도(V_0): 0.13 m/s, 전극사이의 거리(L): 0.6 m 이었다. 입자크기가 0.5 mm에서 0.06 mm로 감소할수록 구리선의 이동거리는 증가하였다. 이는 입자의 정전기력(입자의 전하량)이 입자의 표면에 비례함에 따라 구리 입자의 전하량이 증가하여 편향전극 쪽으로 멀리 이동되기 때문이다. 유리의 경우 절연체로써 유도하전 및 잔류전하가 없기 때문에 (-)전극에 편향하지 않고

Fig. 7. Trajectory simulation by particle size for copper wires and glass. (Applied voltage (U): 20 kV initial speed (V_0): 0.13 m/s, distance between two electrodes (L): 0.6 m.)

Fig. 8. Trajectory simulations as applied voltage. (Radius of copper wire (r_p): 0.00025 m, length of copper wire (l_p): 0.01 m, initial speed (V_0): 0.13 m/s, distance between two electrodes (L): 0.6 m.)

자유낙하 하였다. 한편 유리 입자가 작고 초기 속도(V_0)가 빠를수록 입자의 낙하거리가 증가하는데 이는 유리 궤적에 입자크기와 이동속도가 낙하궤적에 영향을 미치기 때문이다. Fig. 8은 적용전압에 따른 궤적모사의 결과를 나타낸 것으로써 모사조건은 입자반경(r_p): 0.00025 m, 입자길이(l_p): 0.01 m, 입자의 초기 운동속도(V_0): 0.13 m/s 및 전극사이의 거리(L): 0.6 m 이었다. 모사결과, 적용전압이 증가할수록 구리선의 수평 이동 거리가 증가하고 낙하궤적이 완만한 경향을 보였다. 이는 10 kV ~ 30 kV까지 전압이 증가함에 따라 전도성 구리에 대한 전기장과 전하량이 증가하여 이들의 정전기력과 이동궤적을 증가시키는 것으로 판단된다.

4.3. 궤적분석

Fig. 9는 Table 1의 조건을 기반으로 하여 구리선과 유리의 실제 이동거리와 모사의 이동거리를 비교하여 나타낸 것으로써 궤적 관찰은 길이(l_p): 0.01 m이고 반경이 각각 0.06, 0.25, 0.5 mm인 구리 입자와 반지름(r_p): 0.78 mm인 유리 입자에 대하여 전압을 변화화하며 궤적을 관찰하였다. 전압 변화에 따른 구리와 유리 입자의 세부 궤적은 각각 Fig. 10과 11에 보다 상세히 모사 및 논의되었다.

Fig. 10은 구리선의 관찰궤적과 모사궤적을 도시하여 나타낸 것이다. 실험조건은 구리선 길이(l_p): 0.01 m, 초기속도(v_0): 0.13 m/s, 상대습도: 35 ~ 40%, 온도: 29°C, 그리고 전극간의 거리(L): 0.6 m이었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 0.5와 0.25 mm의 조합자 구리는 관찰과 모사궤적이 꽤 유사하였다. 이에 반해 0.06 mm의 구리선의 경우 모사궤적에 비해 실험궤적에서 보다 많이 편향되었다. 이는 모사된 롤형 전극과 실제 전극의 차이 때문으로 실험에 의한 실제궤적이 (-)전극 하부 수직부분을 향해 편향되었다. 또한 입자의 질량 대비 하전량은 입자의 비표면적과 비례하므로, 미립자는 조합자에 비해 전기장세기 변화에 민감하게 반응할 수 있다.

Fig. 11은 유리입자의 관찰궤적과 모사궤적을 도시하여 나타낸 것이다. 실험조건은 각각 반지름(r_p): 0.00007 m, 초기속도(v_0): 0.13 m/s, 상대습도: 35 ~ 40%, 온도: 29°C, 그리고 전극간의 거리(L): 0.6 m이었다. 실험결과, 실험을 통한 관찰궤적의 곡선은 모사궤적과 비교하여 적용전압이 5 kV ~ 20 kV까지 증가함에 따라 오른쪽 방향으로 상당량 이동되는데 절연체 유리가 실제 실험 조건에서 수직 전극판을 향해 편향되었다는 것을 의미한다. 유리입자들이 전도성 입자와 유사하게 거동하는

Fig. 9. Particle trajectory by observation vs simulation.

Fig. 10. Comparison of conductive particle trajectory by observation vs simulation. (Applied voltage (U): 20 kV, initial speed (V_0): 0.13 m/s, distance between two electrodes (L): 0.6 m.)

Fig. 11. Comparison of non-conductive particle trajectory by observation vs simulation. (Applied voltage (U): 20 kV, initial speed (V_0): 0.13 m/s, distance between two electrodes (L): 0.6 m.)

것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 전도성 물질의 회수대 안으로 상당량의 유리 입자가 혼입되어 구리산물의 품질을 저하시킬 수 있다.

4.4. 현미경, SEM & EDS 분석

Fig. 12는 현미경과 SEM & EDS 이용하여 유리표면을 조사·분석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12 (a)의

Fig. 12. (a) Stereoscopic microscope of glass from ASR, (b) SEM and EDS of glass from ASR.

현미경분석은 유리표면 위로 이종의 물질들이 부착되어 있는 형태를 보여주고 있으며 Fig. 12 (b)의 SEM & EDS 분석결과에서는 이종의 C, O, 및 Fe 원소들이 발견됨으로써 이들이 전도성 물질임을 확인할 수 있었다. 이와 같은 원인은 ASR의 파분쇄 과정에서 만들어진 미립의 철 입자와 전도성 유기물이 기계적으로 유리입자에 부착되는 것으로 판단된다. 다시 말해 ASR 재활용을 위한 정전선별시 오염된 이들 유리입자가 비철금속의 선별효율을 감소시킨다는 의미한다. 향후 연구에서 유리입자의 표면에서 발견된 불순물을 제거할 수 있는 전처리 연구와 이를 통한 ASR의 선별효율 향상 그리고 보다 체계적인 접근을 통한 궤적모사의 개선을 도모할 예정이다.

5. 결 론

유도형 정전선별장치를 이용하여 ASR의 선별효율 향상을 위한 궤적분석이 수행되었다. 전도성 구리입자와 비전도성 유리입자의 궤적분석결과, 구리의 모사궤적은 실제궤적과 잘 일치되는 경향을 보였으나, 유리의 모사궤적은 일치하지 않았다. 구리입자 크기에 따른 궤적분

석에서 조립자(0.5 ~ 0.25 mm) 구리는 입자크기와 전기장세기에 의존하면서 관찰궤적과 모사궤적이 일치 하였다. 미립자(0.06 mm)의 경우 관찰궤적이 모사궤적보다 편향전극으로 보다 멀리 이동되는데 이는 질량 대비 비표면적의 증가로 전하량이 증가 때문으로 판단된다. 비전도체의 경우 절연체 유리의 관찰궤적이 전도성 입자들의 궤적과 유사한 특징을 보이면서 편향전극 방향으로 보다 더 멀리 이동되었다. 현미경과 SEM & EDS를 이용한 유리의 표면조사 결과, 이종의 C, O, 및 Fe 원소들을 함유한 철 및 전도성 물질이 확인되었다. 이들은 ASR의 파분쇄 과정에서 기계적으로 유리입자에 부착된 것으로 판단되며 정전선별시 비철금속의 선별효율의 감소를 이끌었다. 향후 연구에서는 이들 불순물 제거연구 및 선별효율 향상 연구를 수행할 예정이다.

Nomenclature

- E : Electric field strength (V/m)
- E_x : Horizontal Electric field strength (V/m)
- E_y : Vertical Electric field strength (V/m)
- F_d : Air drag force (N)

F_e : Electric force (N)
 F_g : Gravity force (N)
 F_t : Resultant force (N)
 g : Acceleration due to gravitation (m/s^2)
 L : The distance between two electrodes (m)
 l_e : Length of section of attractive cylindrical electrode (m)
 l_g : Length of section of grounded electrode (m)
 l_p : Length of the particle (m)
 m : Mass of the particle (kg)
 Q : Quantity of electricity (C)
 r_e : Radius of cylindrical attractive cylindrical electrode (m)
 r_g : Radius of cylindrical grounded roll electrode (m)
 r_p : Radius of the particle (m)
 U : Applied high voltage (V)
 V : Velocity of particle (m/s)
 V_0 : Initial velocity of the particle (m/s)

Greek letters

α : Included angle of horizontal line and electrodes shortest line ($^\circ$)
 ϵ_a : Relative dielectric constant of air (1.00059)
 ϵ_0 : Dielectric constant of vacuum (F/m)
 η : Air drag coefficient (Ns/m^2)
 ρ : Mass density of the particle (kg/m^3)

References

- Nourreddine, M., 2007 : Recycling of auto shredder residue. *Journal of Hazardous Materials*, 139, pp.481-490.
- Cossu, R. and Lai, T., 2015 : Automotive shredder residue (asr) management: An overview. *Waste Management*, 45, pp.143-151.
- Baek, S.-H., Jeon, H.-S., Lee, E.-S. et al., 2014 : Present condition of end-of-life vehicles & slf/asr recycling in europe. *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, 23, pp.58-68.
- Passarini, F., Ciacci, L., Santini, A. et al., 2014 : Aluminium flows in vehicles: Enhancing the recovery at end-of-life. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, pp.39-45.
- Santini, A., Passarini, F., Vassura, I. et al., 2012 : Auto shredder residue recycling: Mechanical separation and pyrolysis. *Waste Management*, 32, pp.852-858.
- Miller, L., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S. et al., 2014 : Challenges and alternatives to plastics recycling in the automotive sector. *Materials*, 7, pp.5883-5902.
- Directive, E. U., 2000 : 53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles. *Official Journal of the European Union*, L Series 21, pp.34-42.
- Ministry of environment of korea, Act on Resource Circulation of Electrical and Electronic Equipment and Vehicle, <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=188594&urlMode=engLsInfoR&viewCls=engLsInfoR#0000> December.10.2019
- Inculet, I. I., 1984 : Electrostatic mineral separation. Research Studies Press.
- De Araújo, M. C. P. B., Chaves, A. P., Espinosa, D. C. R., and Tenório, J. A. S. 2008 : Electronic scraps—recovering of valuable materials from parallel wire cables. *Waste management*, 28, pp.2177-2182.
- Dias, P., Schmidt, L., Gomes, L. B. et al., 2018 : Recycling waste crystalline silicon photovoltaic modules by electrostatic separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4, pp.176-186.
- Li, J. and Xu, Z., 2019 : Compound tribo-electrostatic separation for recycling mixed plastic waste *Journal of Hazardous Materials*, 367, pp.43-49.
- Dascalescu, L., Mizuno, A., Tobazeon, R. et al., 1995 : Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31, pp.947-956.
- Vlad, S., Iuga, A., and Dascalescu, L., 2000 : Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33, pp.127.
- Vlad, S., Mihailescu, M., Rafiroiu, D. et al., 2000 : Numerical analysis of the electric field in plate-type electrostatic separators. *Journal of Electrostatics*, 48, pp.217-229.
- Vlad, S., Urs, A., Iuga, A. et al., 2001 : Premises for the numerical computation of conducting particle trajectories in plate-type electrostatic separators. *Journal of Electrostatics*, 51, pp.259-265.
- Vlad, S., Iuga, A., and Dascalescu, L., 2003 : Numerical computation of conducting particle trajectories in plate-type electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry applications*, 39, pp.66-71.
- Caron, A. and Dascalescu, L., 2004 : Numerical modeling of combined corona-electrostatic fields. *Journal of Electrostatics*, 61, pp.43-55.
- Labair, H., Touhami, S., Tilmatine, A. et al., 2017 : Study of charged particles trajectories in free-fall electrostatic separators. *Journal of Electrostatics*, 88, pp.10-14.

20. Richard, G., Salama, A., Medles, K. et al., 2017 : Experimental and numerical study of the electrostatic separation of two types of copper wires from electric cable wastes. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(4), pp.3960-3969.
21. Richard, G., Touhami, S., Zeghloul, T. et al., 2017 : Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator. Waste Management, 60, pp.112-122.
22. Li, J., Lu, H., Xu, Z., et al., 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.
23. Li, J., Xu, Z., and Zhou, Y., 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.
24. Lu, H., Li, J., Guo, J. et al., 2008 : Movement behavior in electrostatic separation: Recycling of metal materials from waste printed circuit board. Journal of materials processing technology, 197, pp.101-108.
25. Wu, J., Li, J., and Xu, Z., 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.
26. N.-J. Félici, 1966 : Forces et charges de petits objets en contact avec une tlectrode affectke d'un champ Clectrique, Revue GCnCrale de L'tlectricitt, pp.1145-1160.
27. Angelov, A., Vereshyagin, I., and Yershov, V., 1983 : Physical basis at electrostatic separation. Moscow Geology Press, Moscow.

김 범 욱

- 2019년 조선대학교 공과대학 에너지 자원공학과 공학사
 - 현재 조선대학교 공과대학 에너지자원공학과 석사과정
-

박 철 현

- 1997년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 - 2000년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 - 2007년 한양대학교 대학원 지구환경 시스템공학과 공학박사
 - 현재 조선대학교 에너지자원공학과 조교수
-