

마찰대전을 이용한 혼합폐플라스틱 분리에 관한 연구

이종호* · 신진혁* · 김두현* · 김장우* · 이재근**

A Study on the Separation of Mixed Waste Plastics by Triboelectrification

Jong-Ho Lee, Jin-Hyuk Shin, Doo-Hyun Kim, Jang-Woo Kim and Jae-Keun Lee

Key Words: 마찰대전, 마찰대전기, 분리장치, 순도, 회수율

Abstract

The purpose of this study is to develop electrostatic separation system for recycling of mixed waste plastics. The electrostatic separation system is designed and investigated the separation efficiency for separating of mixed waste plastics. Electrostatic separation system consisted of a tribocharger, separator (two electrode), collector (5 tray) and controller (positive/negative high voltage power supply). The tribocharger is a fluidized bed using tribo-electrification mechanism between particles and particles.

In experimental results, the tribocharger of the fluidized bed was more effective separation efficiency. It showed the purity of 85~99 % and the recovery of 80~98 % from the powder of mixed plastics such as LDPE, HDPE, PP, PS, PET and PVC. Especially, In the separation experiment of Polyvinylchloride(PVC) which generates hazardous hydrogen chloride gas in case of the combustion, its purity was over 99 % and recovery was over 95 %.

1. 서 론

국내 폐기물의 주종을 이루는 고철, 폐지, 폐플라스틱의 재활용율은 31 %로 선진국에 비해 저조하며, 그 중에서도 폐플라스틱은 국내 폐기물 발생량의 대부분을 차지한다. PE, PP, PVC, PS, PET계통의 국내 폐플라스틱 발생량은 300만톤(96년)으로 해마다 급증(년간 12 %)하고 있으나 수거, 분리, 세척 등의 제반 문제점으로 인해 재활용율은 16 %(96년)정도로 매우 미미한 수준이며 대부분의 폐플라스틱이 매립 또는 소각되고 있으며, 매립지의 한계와 매립 후, 침출수로 인한 심각한 환경오염문제가 야기되고 있다. 또한 PVC 등과 같이 염소를 포함하거나 착색제가 함유된 폐플라스틱을 소각할 경우 유해중금속이나

다이옥신과 같은 유해물이 배출되고 설비의 부식 문제 등 여러 가지 문제점들이 발생하고 있다.

폐플라스틱의 재활용 방법에는 크게 재료재생 방법, 소각 및 열회수, 열분해, 고형화방법 등이 있다. 그 중에서 열가스성수지가 대부분인 국내의 폐플라스틱을 재활용함에 있어 가장 좋은 방법은 본래의 원재료로 재자원화할 수 있는 재료 재생에 의한 재활용인데, 마찰대전 정전분리기술은 물질들의 작용함수 값의 차에 의해 접촉을 통해 발생하는 정전효과를 이용하는 건식분리 기술로 혼합된 플라스틱에서 입자의 표면을 대전시켜 음극과 양극을 띄게 함으로써 순수플라스틱을 분리할 수 있는 방법이다

본 연구에서는 폐플라스틱을 본래의 원재료로 재자원화하기 위해 미세입자로 분쇄된 혼합폐플라스틱을 마찰대전량 차이를 이용하여 재질별로 선별적으로 분리하는 혼합폐플라스틱 재질별 분리장치를 개발하고자 한다.

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부

2. 마찰대전 정전분리

2.1 마찰대전 정전분리와 작용함수

정전분리법은 입자의 표면을 대전시켜 음극과 양극을 띄게 함으로써 입자를 분리하는 방법이다. 입자의 표면을 대전시키는 방법에 따라 코로나 분리방법과 마찰 전기적(Triboelectric) 분리방법으로 나눌 수 있다. 코로나 분리방식은 코로나 전하를 방출하는 끝이 뾰족한 음극선을 통해 방출된 음이온들이 입자의 표면을 대전시켜 대전된 입자를 분리하는 방법이다. 마찰정전기(Triboelectrification)를 응용한 정전분리법은 물질과 절연물과의 접촉을 통해 발생하는 정전효과를 이용하는 것으로 마찰대전기(Tribocharger)를 이용하여 혼합플라스틱 입자 표면을 양극과 음극을 띄게 하여 분류하는 방법이다. 마찰정전(Triboelectrification)의 정도는 입자와 접촉표면의 작용함수(Work Function)에 지배를 받는다.

작용함수 값은 Table 1에서처럼 각 물질마다 다른데 물질의 내부구조는 물론 입자표면에 함유되어 있는 산화물 및 오염정도에 따라 다르게 나타난다.

Table 1 Work Functions

재 질	Work Function(eV)
Acrylic	2.9
Plexiglass	3.5
Nylon	3.6
Copper	4.4
PVC	6.5
PE	7.2

2.2 마찰대전 메카니즘

마찰대전의 현상이 처음 기록된 것은 2500년 전으로 거슬러 올라감에도 불구하고 그 대전 메카니즘은 여전히 규명되지 못하고 있고 특히 비전도체에 대해서는 메카니즘 해석에 많은 어려움을 겪고 있다. 마찰대전의 메카니즘은 아직도 재질에 따른 정확한 대전 메카니즘이 규명되지 못하고 있지만, 일반적으로 입자와 입자 또는 입자와 표면과의 마찰에 기인한 마찰대전 현상은 주로 다음 3가지 메카니즘에 의해 발생한다고 알려

져 있다.

1) 물질전달(Material Transfer)

메탈과 폴리머가 충돌 또는 슬라이딩 할 경우 메탈의 일부는 폴리머로 전달되고 또한 폴리머의 일부는 메탈로 전달된다. 이때 전달된 물질이 전하를 운반한다면 물질전달의 결과로서 전하의 이동이 발생할 것이다.

2) 이온전달(Ion Transfer)

접촉대전은 한 표면에서 다른 표면까지의 이온들의 전달에 기인될 수 있다. 폴리머는 일반적으로 크리스탈 격자의 결함으로 인한 미소 내부 전하를 포함하고 이 내부 전하는 표면에서 이온들에 의해 보충된다. 이들 이온들은 항상 조금씩 이온화된 대기로부터 표면으로 유입된다. 일반적으로 서로 다른 표면들이 주어진 이온에 대해 다른 친화력을 가지고 있으므로 두 개의 표면이 서로 접촉할 때 하나의 표면에서 다른 표면까지 이온들의 전달이 발생할 것이다.

이러한 이온전달에 의한 마찰대전 메카니즘은 같은 물질이 접촉할 경우 서로 다른 부호로 대전되는 결과를 설명할 수 있고 폴리머와 폴리머 사이의 주된 마찰대전 메카니즘으로 간주 될 수 있지만 메탈에 의한 폴리머의 접촉대전에서는 크게 의미가 없다.

3) 전자전달(Electron Transfer)

메탈이 폴리머와 접촉할 경우 전자들은 작용함수값의 차이에 의해 두 물질의 페르미 레벨이 같아지는 방향으로 이동하게 된다. 이때 폴리머와 메탈이 다시 분리되면 전자의 과잉 또는 부족현상이 발생하므로 음 또는 양으로 대전하게 된다. 이때 최종적인 대전의 크기는 접촉하는 동안에 발생하는 전자의 이동과 물질의 분리와 같은 전자의 역흐름에 의한 전자이동의 결과로 발생된다.

2.3 마찰대전기의 종류

정전분리장치에서 입자를 대전시키는 방식으로는 마찰대전방식을 이용하고 있다. 마찰대전은 입자가 가지는 작용함수의 차이를 이용하여 (+)와 (-)로 대전되는 데, 마찰대전을 일으키는 마찰대전기의 종류는 Fig. 1과 같이 여러 종류가 있다. 일반적으로 마찰대전기의 형태에 따라 마찰

대전기의 종류가 정해지는데 Honeycomb Type의 경우는 Honeycomb Type의 구조물을 입자가 지나가면서 충돌에 의해 마찰 대전된다. 사이클론형 마찰대전기는 사이클론 내부의 회전유동에 의해 사이클론 벽과의 마찰에 의해 대전된다. Tube Type의 마찰대전기는 Tube를 Spiral형으로 꼬아서 내부를 이동하는 입자의 마찰을 이용한다. 그 외에도 내부유동을 섞어주는 Mixer Type과 Brush Type 등의 여러 가지 마찰대전기가 있다.

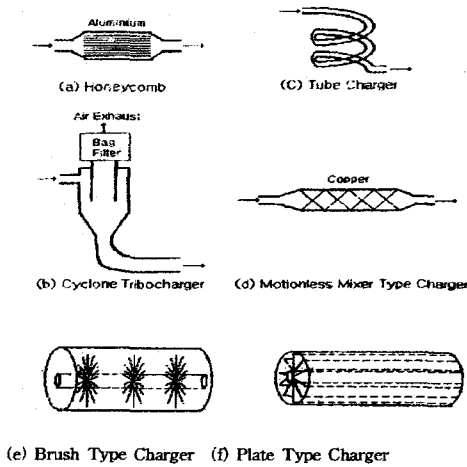


Fig. 1 Types of Tribocharger

2.4 유동층(Fluidized Bed) 마찰대전기

기체-고체의 유동층에서는 고체 입자의 혼합이 상당히 빠르고 유동이 쉬우며 기체와 고체의 두 상간에 물질 전달 속도가 빠르고 조작성이 간단하여 주로 큰 규모의 화학반응기 또는 혼합 건조 등의 물리적인 조업에 많이 이용되고 있지만 근래에는 유동층 내부의 Freeboard 영역에서 입자 상호간의 접촉이 활발하게 일어나는 효과를 이용하여 마찰대전기로서도 제한적으로 이용되고 있다. 이와 같은 조업이 이루어지는 경우에 유동층 내에 여러 크기의 고체입자들이 혼합되어 있는 경우 미세입자는 유동화 상태에서 유동층 밖으로 날아가는데 이런 현상을 유출(Elutriation)이라 한다. 유동층에서의 입자의 유출은 유동층을 이해하는데 매우 중요한 문제이므로 그 현상을 살펴보면 Fig. 2에서처럼 다음의 3가지 영역으로 구분된다.

- 1) Distributor Zone : 무수히 많은 작은 기포들이 존재하는 유동층 바닥에 근접한 지역이다.
- 2) Bubbling Zone : 작은 기포들이 모여 합체 현상이 일어나 큰 기포가 되어서 터지는 층의 표면 위까지의 범위이다.
- 3) Freeboard Zone : 층의 표면 위에서 기포가 터지면서 유동층 표면위로 올라온 미세입자들이 상부로 흐르는 가스 기류에 의해 유출되는데 이때 유동층의 표면 위에서 유출되는데까지의 영역이다.

그리고 freeboard zone에서는 층의 표면 위로 부터 날아가서 유동층 밖으로 유출되는 것도 있고 다시 유동층 내로 떨어지는 것도 있다. 이처럼 유출될 때 유출속도가 일정해질 때의 유동층의 높이를 Transport Disengaging Height(TDH)라 한다. 일반적으로 유동층의 조업시는 TDH 이상의 높이로 하여 조업한다.

유동층에서의 입자들의 마찰대전 메카니즘은 다음과 같이 크게 3가지 경우가 있지만 주로 입자들간의 상호 충돌로 인한 마찰대전 효과가 지배적이다.

- 1) Fig. 2와 같이 Freeboard Zone에서 기포들이 터지면서 기포 주위의 입자들은 활발한 혼합이 발생되어 입자들간의 상호충돌, 마찰효과를 일으키고 이로 인한 ion 및 electron 전달에 기인한 대전 효과.
- 2) 유동층 상부컬럼 벽과 입자간의 마찰로 인한 대전효과.
- 3) 다공판(Distributor)과 입자간의 마찰로 인한 대전효과.

또한 유동층에서는 Fig. 3과 같이 공기유속에 의해 다양한 형태의 유동현상을 관찰할 수 있으며 또한 유동 형태에 따라 입자간의 마찰대전 효과는 각기 달라질 수 있지만 일반적으로Bubbling Fluidization 유동형태에서 가장 좋은 마찰대전 효과를 얻을 수 있다고 알려져 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에서는 혼합폐플라스틱을 분리하기 위하여 유동층(Fluidized Bed, Cu) 정전분리장치를 사용하여 2성분계 혼합플라스틱에 대한 정전분리 실험을 수행하였다.

실험장치는 Fig. 5에 표시된 바와 같이 마찰대전장치(Tribocharger), 집진장치, 그리고 제어장치로 나뉘어져 하나의 시스템을 구성하고 있으며, 마찰대전장치인 유동층 마찰대전기(재질 : Cu)는 정전분리장치의 상부에 위치하여 유동층에서 마찰 대전된 입자들을 하부방향으로 유출시킨다. 또한 고전압이 인가되는 두 개의 알루미늄 전극은 플라스틱 입자의 부착을 방지하기 위하여 경사각을 조절할 수 있으며, 집진장치는 5개의 트레이로 구성되어 분리효율을 극대화 할 수 있도록 제작되었다.

플라스틱 입자들을 대전시키는 유동층 마찰대전기는 Fig. 5에서와 같이, 유동화 공기가 공급되는 하부컬럼, 압력차를 이용하여 공기를 분산시키고 입자를 지지하여 주는 역할을 수행하는 다공판(Distributor), 마찰대전이 이루어지는 상부컬럼 그리고 대전된 입자를 정전분리장치로 공급하기 위한 내부컬럼으로 구성되며, 이때 플라스틱 입자들과의 충돌이 일어나는 각 요소들은 입자들의 마찰대전을 촉진시키기 위해 구리 재질로서 제작된다.

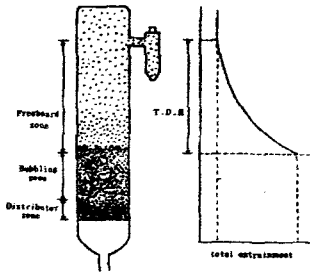


Fig. 2 Entrainment from fluidized bed

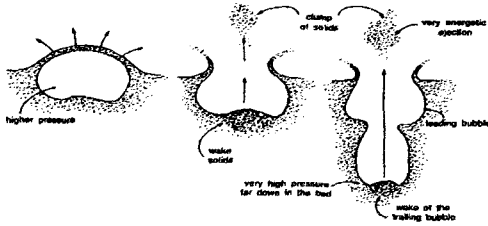


Fig. 3 Mechanism of ejection of solids from a fluidized bed into the freeboard : (a) from the roof of a bursting bubble; (b) from the bubble wake; (c) from the wake of a trailing bubble just as it coalesces with its leading bubble

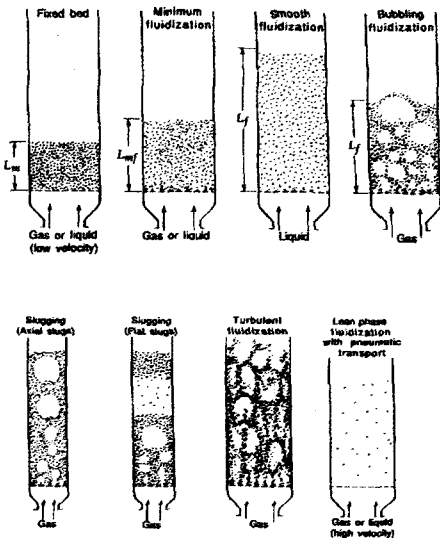


Fig. 4 Various forms of contacting of a batch of solids by fluid

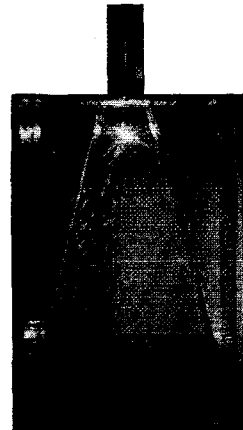


Fig. 5 Photograph of Experimental setup

3.2 실험방법

유동층을 이용한 정전분리 실험에서의 플라스틱 시료는 국내의 폴리머 제작 회사에서 구입한 PE, PET, PP 등의 플라스틱 펠렛(pellet)과 실제로 사용되는 각종 플라스틱 제품들을 사용하였다. 2~3 mm의 크기의 입방형 또는 구형의 펠렛과 페트병, PVC 파이프 등의 산업제품들은 파쇄공정을 통해 0.7~2 mm의 입자로 파쇄된다. 이때, 파쇄입자들은 분리 실험에 사용하기 위해 체분리법(Dry Seiving Method)을 이용하여 입도별로 분리함으로써 본 정전분리 실험에 있어서는 1.4~2 mm의 입자들을 시료로서 사용하였다.

2성분계 혼합플라스틱의 분리실험은 Table #와 같은 실험조건 하에서 수행되었고, 고전압발생장치와 연결된 전극의 경사각도는 0°, 전극간의 간격은 10 cm, 그리고 포집장치는 5개의 트레이를 사용하여 입자들을 포집함으로써 분리실험을 수행하였다.

2성분계 혼합플라스틱의 분리실험 결과는 다음과 같다. 이때 각 입자들의 분리특성을 나타내는 회수율(Yield)과 순도(Extract Content)는 다음과 같이 (1)식과 (2)식으로 표현된다.

$$\text{회수율} = \frac{\text{트레이에 포집된 A시료의 질량}}{\text{공급된 A시료의 질량}} \quad (1)$$

$$\text{순도} = \frac{\text{각 트레이에 포집된 A시료의 질량}}{\text{각 트레이에 포집된 시료의 질량}} \quad (2)$$

Table 2 Operating conditions

입자종류 (pellet)	입도	인가 전압	분사 압력	전극 간격	습도
PET, PVC, LDPE, HDPE, PP, PS	1.4~2 mm	±30 kV	0.3~0.5 MPa	10 cm	43~54 %

4. 결과 및 고찰

유동층에서 정전분리 장치 내부로 공급된 입자들은 전기력의 영향을 받아 각각 (+), (-) 극판으로 휘어져 낙하하고, 대부분의 입자들은 1번과 5번 트레이 즉, 전극에 밀접한 양쪽의 트레이에서 포집되고 있다. 그러므로 1번과 5번 트레이만을 대상으로 하여 혼합플라스틱 입자에 대한 분리효율을 측정하였다.

Table 3의 실험 No. 1~12의 결과로부터 PVC

재질은 다른 재질에 비해 비교적 마찰대전이 활발이 일어남으로서 최고 97%의 회수율과 99%의 순도를 보여주고 있다. PVC에 대응하는 다른 재질에 있어서는 작용함수 값의 차나 재질간의 비중 차에 따라 조금씩 다른 결과들을 보이고 있지만, 회수율에 있어서는 75~95%, 순도에서는 99% 이상의 양호한 분리결과를 보여주고 있다. 반면, 실험 No. 11과 12에서의 LDPE와 PS, HDPE와 PS에 있어서는 다른 2성분 혼합재질의 분리결과와 비교하여 저조한 분리효율을 보여주고 있는데, 이는 이들 재질이 유사한 작용함수 값을 가진다는 사실에 비롯되며, 재질간의 작용함수의 차가 클수록, 그리고 재질간의 비중 차가 작을수록 유동층 내에서 활발한 마찰대전이 발생하여 분리효율이 상승한다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 작용함수 값이 유사한 재질간을 분리 실험에 있어서는 유동층의 재질을 변화시킨다거나, 또는 일정시간 동안의 예비대전을 시키는 등의 특별한 처리를 실시함으로써 분리효율을 증대시킬 수 있으리라 판단된다.

Table 3 Experimental results

	플라스틱 종류	순도 (%)	회수율 (%)	온도 (%)	습도 (°C)
1	PVC	91.88	96.12	16	45
	PET	99.14	75.20		
2	PVC	93.01	95.68	16	54
	HDPE	99.63	83.33		
3	PVC	99.31	91.69	16	54
	PS	99.25	94.67		
4	PVC	98.91	97.32	15	48
	PP	99.72	89.97		
5	PVC	97.31	98.51	13	43
	LDPE	99.88	87.64		
6	PET	94.47	79.87	16	54
	HDPE	97.64	86.80		
7	PET	98.89	90.99	16	54
	PS	99.86	93.42		
8	PET	96.38	92.86	16	54
	PP	99.05	88.40		
9	PET	75.52	82.54	13	43
	LDPE	96.41	61.39		
10	PS	90.24	95.39	16	54
	PP	99.47	77.56		
11	PS	74.56	87.07	13	43
	LDPE	95.75	43.81		
12	HDPE	56.13	83.01	16	54
	PS	43.87	14.27		

5. 결론

본 연구에서는 입자의 표면정전기적 특성인 작용함수차이를 이용하여 혼합폐플라스틱의 재활용을 위하여 그 분리특성을 연구하였다. 마찰대전기로는 유동층 마찰대전기를 이용하였으며 2성분 혼합폐플라스틱의 분리에 있어서 높은 분리효율을 얻었다.

(1) 유동층 마찰대전기를 사용한 2성분 혼합플라스틱 마찰대전 정전분리의 결과 순도는 대부분 90 %였고, 회수율은 61.39 ~ 98.51 %였다.

(2) 마찰대전을 이용한 입자의 분리에 있어서 영향을 미치는 주요인자는 입자의 표면 전기적 특성인 작용함수값의 상대적 차이와 유동층형성에 관계된 입자의 비중임을 알 수 있었다.

(3) 상대적으로 작용함수값이 큰 PVC 재질은 다른 재질에 비해 비교적 마찰대전이 활발이 일어나므로서 회수율은 최고 97%이고, 순도는 최고 99%였다.

(4) 작용함수 값이 유사한 재질간을 분리에 있어서는 유동층의 재질을 변화시킨다든가 또는 일정시간 예비대전을 시키는 등 전처리를 실시함으로써 분리효율을 증대 효과를 가진다.

후기

이 연구는 부산대학교 환경기술산업개발 연구센터와 과학재단의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ahn, Y.C., J.H. Shin, S.G Yoon, J.H. Koo and J.K. Lee(1999), "A Study on the Grinding Characteristics of PET Plastics in the Disk Mill", 1st Cross Straits Symposium on Materials, Energy and Environmental Sciences, Kyushu University, Japan, November 1-2, pp.63-64.
- (2) Anderson, J.M., Parobek, L., Inculet, I.I., (1979), "Electrostatic Separation of Coal Macerals" IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-15, No.3, pp. 291-293

- (3) Mukherjee, A., (1987), "Characterization and Separation of Charged Particles", Ph. D. Dissertation, Chemical Engineering Dep., School of Advanced Studies of the Illinois Institute of Technology., pp. 4.1-4.40.
- (4) 이종일, (1984), "유동층으로부터 미세입자 유출에 관한 연구", 고려대학교 화학공학과 학위논문, pp. 1-20
- (5) 김성찬, 김두현, 오정근, 이재근, (1998), "마찰대전된 혼합입자의 대전량 측정과 제적 분석에 관한 연구", 대한기계학회 1998년도 추계 학술대회 논문집 B, pp. 558-562.
- (6) 도갑수, (1994), "플라스틱 폐기물의 발생현황과 환경영향, 분해성 플라스틱의 포장재료로서의 환경 적하성 평가", (경실련), pp. 28, 1994. 10. 5
- (7) Fasso, L., B. T. Chao and S. L. Soo, (1982), "Measurement of Electrostatic Charges and Concentration of particles in the Freeboard of a Fluidized Bed", Powder Technology, 33 pp. 211-221
- (8) D. Boland, D. Geldart, (1971), "Electrostatic Charging in Gas Fluidized Beds", Powder Technology, 5(1971/72).
- (9) Ban, H., J. L. Schaefer, and J. M. Stencel, (1993), "Size and Velocity Effects on Coal Particle Triboelectrification and Separation Efficiency", Proceedings of the 10th International Pittsburgh Coal Conference, pp.138-143.
- (10) Schaefer, J. L., J. M. Stencel, and H. Ban, (1992), "Non-Intrusive Measurement of Particle Charge Relating to Electrostatic Dry Coal Cleaning", Proc. of Ninth Annual International Pittsburgh Coal Conference. Oct. 12-16, pp.259-264.
- (11) Schaefer, J. L., H. Ban, and J. M. Stencel, (1994), "Triboelectrostatic Dry Coal Cleaning", Pittsburgh Coal Conference, September 12-16, Pittsburgh, PA.
- (12) Beekman, J.M., INculet, I.I., (1981), "Electrostatic Method and Apparatus for Sorting Fluidized Particulate Material", U.S. Patent 4,274,947, Jun. 23.