

2008年 2月

工學碩士學位論文

*ABS*와 *PBT* 혼합 페플라스틱
재질분리를 위한
마찰대전형 정전선별에 관한 연구

朝鮮大學校 産業大學院

資源環境工學科

朴 鐘 千

*ABS*와 *PBT* 혼합 폐플라스틱
재질분리를 위한
마찰대전형 정전선별에 관한 연구

A study on triboelectrostatic separation
for material separation
of ABS and PBT mixing waste plastic

2008年 2月 日

朝鮮大學校 産業大學院

資源環境工學科

朴 鐘 千

*ABS*와 *PBT* 혼합 페플라스틱
재질분리를 위한
마찰대전형 정전선별에 관한 연구

指導教授 韓 五 炯

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2007年 12月 日

朝鮮大學校 産業大學院

資源環境工學科

朴 鐘 千

朴鐘千의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 高 進 碩 印

委 員 朝鮮大學校 教授 朴 天 永 印

委 員 朝鮮大學校 教授 韓 五 炯 印

2007年 11月 日

朝鮮大學校 産業大學院

목 차

목 차	i
LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	v
ABSTRACT	viii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 마찰하전을 이용한 분리기술의 역사	3
제 3 절 국내외 플라스틱 재질분리 현황	4
제 2 장 이론적 배경	7
제 1 절 정전선별	7
1. 코로나 방전형	10
2. 정전유도형	11
3. 마찰하전형	11
제 2 절 마찰하전형 정전선별	13
1. 마찰하전형 정전선별의 원리	13
2. 마찰하전 메커니즘	15
3. 전기장 내에서 입자의 거동	18
4. 플라스틱의 대전서열	25

5. 마찰하전 방식	26
6. 하전 및 분리 효율에 영향을 미치는 인자	30
제 3 장 시료 및 실험방법	31
제 1 절 시료 및 실험장치	31
1. 시료의 특성	31
2. 실험장치	32
제 2 절 실험방법	35
1. 마찰하전 특성 연구	35
2. 재질분리 연구	37
제 4 장 실험결과 및 고찰	39
제 1 절 마찰하전 특성 연구	39
1. Work function 값 도출	39
2. 하전물질 선정 실험	41
3. 체류시간과 단일·혼합시료에 따른 하전량	42
4. 회전속도에 따른 하전량	42
5. 상대습도에 따른 하전량	43
제 2 절 재질분리 연구	43
1. 전압세기의 영향	43
2. 공기속도의 영향	49
3. 분리대 위치의 영향	50

4. 상대습도의 영향	50
5. PBT 제거율과 ABS 회수율과의 관계	51
제 5 장 결론	59
참고문헌	61

LIST OF TABLES

Table 1. Kinds and applications of electrostatic separator.	10
Table 2. Comparison of four published triboelectric series.	26
Table 3. Work function of plastics.	40

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Kinds and principle of electrostatic separations.	8
Fig. 2 Principle and schematic of corona electrostatic separation.	12
Fig. 3 Principle and schematic of induction electrostatic separation.	12
Fig. 4 Principle and schematic of triboelectrostatic separation.	13
Fig. 5 Charging principle of particles by collision.	14
Fig. 6 Schematic representation of triboelectrostatic separation.	14
Fig. 7 Contact charge between two metals.	16
Fig. 8 Contact charge between metal and insulator.	17
Fig. 9 Moving characteristic of charged particles in electric field.	19
Fig. 10 Moving of charged particle in electrode.	20
Fig. 11 Force acting on particle falling in a transverse electric field.	21
Fig. 12 Schematic diagram of particle movement in electric field.	24
Fig. 13 Various tribo chargers of triboelectrostatic separation.	27
Fig. 14 Equipments developed for triboelectrostatic separation.	28
Fig. 15 The charger of a vertical motion developed for work function and tribo series of plastics.	29
Fig. 16 Factors effecting on charging characteristics and separation efficiency on triboelectrostatic separation.	30
Fig. 17 ABS & PBT mixing waste plastic used in this study.	31
Fig. 18 Bench scale triboelectrostatic separator used in this study.	33

Fig. 19 Part details of bench scale triboelectrostatic separator.	34
Fig. 20 A vertical-reciprocation charger set and peripheral measurement.	35
Fig. 21 Flowchart of tribo-charging test by vertical motion charger.	36
Fig. 22 Cutting mill for size reduction of plastic.	36
Fig. 23 Flowchart of material separation test by triboelectrostatic separator.	38
Fig. 24 Deriving method of work function.	40
Fig. 25 Work Function of ABS & PBT used in this study.	44
Fig. 26 Charging property of ABS and PBT as charging materials.	45
Fig. 27 The effect of retention time on charge density of single and mixed plastics..	46
Fig. 28 The effect of rpm on charge density of ABS & PBT	47
Fig. 29 The effect of relative humidity on charge density of ABS & PBT.	48
Fig. 30 The effect of applied potential on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.	52
Fig. 31 The effect of air velocity on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.	53
Fig. 32 The effect of splitter position on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.	54
Fig. 33 The effect of relative humidity on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation..	55
Fig. 34 Result of repeat tests on optimum conditions of triboelectrostatic separation	56

Fig. 35 Relation of PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.	57
Fig. 36 Photo of ABS and PBT plastics separated by triboelectrostatic separation.	58

ABSTRACT

A study on triboelectrostatic separation for material separation of ABS and PBT mixing waste plastic

Park, jong-cheon

Advisor : Prof. Han, Oh-Hyung Ph.D.

Depart. of Resource & Environmental Engineering

Graduate School of Industry, Chosun University

Korea is the world's 4th plastic producing nation next to USA, Japan and Germany due to development of oil industry. Plastic consumption is about 100 kg per person and ranked 8th in the world and 4 million tons of waste plastic occurs annually. Plastic usage is increasing more than 10% every year, because the lack of developing a replacement material with good material characteristic such as high function, hygiene, convenience and economic. Therefore, more than 5 million ton of waste product is predicted to occur in 5 years, but the recycling rate of waste plastic is only 20 ~ 30%, and the rest of 70 ~ 80% is disposed by reclamation and incineration methods. Hence, it is evaluated to have great environmental problems as well as economic problems.

Generally, technologies for waste plastic recycling are energy, chemical and material recycling. However, if a different kind of plastics are mixed, none of the technologies is not effective because the rate of recycling decreases. Therefore, material separation technology of waste plastic is most important in recycling. Specially, there is a need for inexpensive

technology considering the price of plastic.

The triboelectrostatic separation is a method that separates the particles charged by means of particle/particle and particle/charger charging mechanisms, due to its work function or tribo series of materials through electric field. This separation method can improve separation efficiency according to development of charging material and charger. Also, Energy consumption is less, equipment and processing cost are inexpensive.

In this study, we carried out the research on materials separation of ABS and PBT mixing waste plastic by triboelectrostatic separation. ABS and PBT mixing waste plastic is consist of scrap of cars, electric and electronic goods which are destroyed by reclamation and incineration methods. In charging characteristic research, PP material is verified as the optimum charger material for material separation of ABS and PBT mixing waste plastic. Therefore, we carried out the research on materials separation using pipe-line PP charger. Good test results were obtained with the recover ABS material of 92.5% and PBT removal of 100% in optimum test conditions.

***Key words : waste plastic, material separation, work function,
triboelectrostatic separation, charging material***

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

1909년 Baekeland가 페놀과 포르말린을 화합시켜 최초의 합성수지인 페놀수지를 합성한 이후, 플라스틱공업도 석유화학공업의 발전과 함께 눈부시게 발전하여 이제 플라스틱은 우리 생활 속에서 떼어 수 없는 중요한 재료가 되었다. 고분자 물질로 만들어진 플라스틱은 고기능성, 위생성, 편리성 그리고 경제성 등의 우수한 재질 특성을 지니고 있어, 바이오플라스틱, 내연플라스틱, 섬유강화 플라스틱 그리고 점층 플라스틱 등의 다기능 재질이 개발되어 사용량이 매년 크게 증가하고 있다. 특히, 최근에는 플라스틱의 생산과 활용이 그 나라 경제규모를 가늠하는 척도로 인식될 만큼 각종 분야에서 플라스틱이 활발하게 사용되고 있는 것이 주지의 사실이다.^{1,2)}

플라스틱은 철보다 가벼우며 단위 무게 당 강도가 역시 철보다 뛰어나고, 흡습성 또한 종이에 비해 낮아 일부 철과 종이를 대체할 수 있는, 물성이 뛰어난 20세기의 신소재였다. 따라서 1950년대 이후로 플라스틱 산업은 괄목할만한 속도로 성장하여 왔고, 그 융통성과 우수한 기계적 물성 때문에 수많은 응용품이 개발될 수 있었다. 그리고 플라스틱의 경우 제조 공정이 환경 친화적이며, 소비 에너지 측면에서도 플라스틱을 만들거나 사용하는데 소비되는 에너지는 상대적으로 다른 재료에 비하여 적게 필요하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 제반 장점에도 불구하고 시대 변화로 환경을 중요시 하는 현재에는 폐플라스틱의 처리가 문제화 되어 환경측면에서 많은 논쟁거리가 되고 있다.^{3,4)}

우리나라는 석유화학공업의 발달로 미국, 일본, 독일에 이어 세계 4위의 플라스틱 생산국이며, 국민 1인당 사용량도 세계8위 수준으로 국민 1인당 연간 100kg 정도의 플라스틱을 소모하고 있으며, 이로 인하여 연간 400만 톤의 폐플라스틱이 발생하고 있다. 뿐만 아니라 플라스틱을 대체할 수 있는 다기능의 경제성 있는 재질의 개발이 이루어지지 않아 사용량이 매년 10% 이상 증가하고 있는 실정이다. 따라서 5년 내에 500만 톤 이상의 폐플라스틱이 발생할 것으로 예상하고 있다. 그러나 현재 폐플라스틱의 재활용률은 20~30%에 그치고 있어 70~80%를 매립이나 소각에 의해 처리하고 있다. 따라서 환경문제뿐만 아니라 경제적인 손실도 상당한 것으로 평가되고 있다.⁵⁾

소각하여 감용화 하는 것이 가능한 고체 산업폐기물은 소각하여 매립하는 것이 일반적이다. 그러나 폐플라스틱의 소각과 매립은 경제적인 손실뿐만 아니라 환경오염의 거시적인 원인이 되고 있다. 폐플라스틱의 소각에 의한 처리는 일부 열에너지를 이용할 수 있지만 많은 경제적인 손실을 초래하고, 염화수소에 의한 소각로의 부식과 다이옥신 등 각종 유독성 가스를 방출하여 사회적인 문제를 일으킬 수 있다. 또한 폐플라스틱의 매립은 매립 부지의 확보문제뿐만 아니라 유해성분이 용출될 수 있으며, 단위 무게에 비해 부피가 커 보관·운반의 문제 및 매립효율을 저하시키고, 물리화학적으로 안정되어 있는 난분해성이라 매립지의 조기 안정화와 흠속에 반영구적으로 잔존하는 문제 그리고 분해 시 토양오염 및 유해가스를 대기중에 발생하는 등 여러 가지 문제를 야기 시킨다. 따라서 정부에서는 EPR 제도를 2003년 1월부터 시행하고 있으며, 향후 폐플라스틱의 소각과 매립을 법으로 규제할 계획에 있어 플라스틱 산업 및 환경보호를 위해서는 재활용 기술 개발이 시급히 이루어져야 할 것이다.⁶⁾

플라스틱의 경우 다른 물질에 비해 쉽게 분해 및 변질이 이루어지지 않으므로 효율적인 선별기술만 개발된다면 재활용이 가장 용이한 물질중의 하나이다. 이러한 플라스틱을 재활용할 수 있는 기술로는 에너지 재활용, 화학적 재활용 그리고 물질 재활용의 방법이 있으나, 이중 물질 재활용이 가장 효율적인 방법으로 평가받고 있다. 그러나 어느 방법이든 다른 종류의 플라스틱이 혼재되어 있으면 이중간의 물리·화학적 성질과 재질특성이 변화되어 재생이 어렵고, 재생되더라도 제품의 품질이 저하되기 때문에 플라스틱의 재질분리 기술은 재활용에 있어서 가장 중요하며 특히, 플라스틱의 값싼 특성을 고려한 물리적 선별기술이 필수적이다. 혼합 플라스틱을 재질별로 분리할 수 있는 물리적 선별방법은 크게 수선법, 비중선별, 부유선별, 정전선별, color sorting, 열점착 그리고 분광법 등으로 분류된다. 현재 폐플라스틱의 재질분리를 위해 일부 상용화가 되고 있는 기술로는 비중선별과 수선법, 색깔의 차이를 이용한 color sorting 그리고 플라스틱 재질의 특성을 이용한 분광법 등이 있다. 그러나 비중선별법의 경우 PET와 PVC 재질과 같이 비중이 비슷한 재질의 분리는 불가능하며, 수작업은 대량처리 및 경제성이 낮아 효과적이지 못하고, color sorting과 분광법은 플라스틱 재질의 색깔이 동일하거나 유사한 특성을 갖고 있으면 분리가 불가능하며 처리단가가 높은 단점을 가지고 있다.⁷⁻¹⁰⁾

본 연구에 적용한 정전선별법은 하전방식에 따라 전도성 물질과 비전도성 물질을 분리할 수 있는 코로나 방전형과 정전유도형이 있으며, 전도성과 비전도성 그리

고 비전도성과 비전도성 물질을 분리할 수 있는 마찰하전형이 있다. 이 중 마찰하전형 정전선별법은 물질의 일함수 값과 대전서열을 이용한 것으로 입자와 입자간, 입자와 장치 표면간의 마찰·충돌에 의해 반대 극성으로 하전된 물질을 전기적으로 분리하는 선별법이다. 본 선별법의 경우 모든 혼합 폐플라스틱의 재질분리뿐만 아니라 다양한 조합의 물질분리가 가능하며, 하전물질 및 하전장치의 개발에 따라 선별효율을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 앞서 언급한 선별법들에 비해 에너지 소비가 적으며, 장치 및 선별비용이 저렴한 장점이 있다.^{11,12)}

따라서 본 연구에서는 마찰하전형 정전선별법을 적용하여, 자동차 및 전기·전자 제품을 중심으로 사용량이 증가하고 있는 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 재질분리에 적합한 하전장치 개발 및 기초 데이터를 확보하고, 하전효율 및 분리효율을 극대화할 수 있는 최적 선별조건을 규명하고자 하였다.

제 2 절 마찰하전을 이용한 분리기술의 역사

BC 600년 그리스 철학자 탈레스가 호박을 문질러서 전기적인 현상을 발견한 이후로, 2000년 이상이 지난 1600년경에서야 William Gilbert는 ‘De Magneto’라고 불리는 정전기에 관해 다소 과학적인 언급을 하였다. 당시 Gilbert는 많은 수의 물질이 가지고 있는 정전하를 발견하였으며, 그 전하는 그 물질을 문지를 때 인력 또는 척력의 성질을 갖게 된다는 것을 발견하였다. 이와 함께 현재 마찰전기라고 불리는 접촉 및 마찰에 의한 전기의 연구가 시작되었으며, 이후에 Faraday, Franklin, Newton, Holtz, Kelvin, Armstrong 등 많은 과학자에 의해서 정전하의 영향 내에 있는 많은 물질의 성질을 이해하기 위한 주목할 만한 상당수의 연구가 이루어졌다.¹³⁾

그러나 1800년경까지는 정전기를 상업적으로 이용하지 못하다가, 1892년 Thomas A. Edison이 금을 선광하기 위해 정전분리기에 대한 특허를 냈지만, 불행이도 당시에는 산업에 큰 영향을 미치지 못하였다. 최초의 상업적인 정전선광 처리장치는 납과 아연광석을 위한 Huff process로서 1908년에 Plattville에 의해 설치되었으며, 1912년까지 복잡한 아연광석의 분리를 위한 최고의 시설로 이용되었다. 이 공장의 성공으로 전 세계적으로 고체의 정전분리에 많은 응용시설이 뒤따랐으며, 이 공정은 독립적으로 이용되거나 또는 다른 중력을 이용한 공정과 함께 이용되었다.

1912년 부유선별법이 개발되면서 정전선별의 수요가 줄기도 하였지만, 2차 세계 대전 중 군수품 제조에 필요한 티타늄의 이용확대로 해변 모래로부터 티타늄을 분리하기 위해 정전선별법을 이용하였다. 이후에 고전압을 이용한 분리기계의 괄목한 만한 성장을 보여 왔으며, 계속적으로 새로운 분리장치가 선보이기 시작했다.

1965년에는 캐나다의 Wabush Mines에 세계적으로 가장 큰 정전선별 공장이 건설되어 철광의 중력 분리에 보조적으로 사용되었으며, 1년에 6백만 톤 이상을 처리하였다. 이로 인하여 철광선별에 많은 국가들이 정전선별을 이용하였다. 또한 이 공정은 고순도의 철광을 선별함으로써 고순도가 요구되는 철관 생산을 가능하게 하였다.

1972년에는 스웨덴에서 철광으로부터 실리카뿐만 아니라 황철석도 제거하고자 하는 연구가 수행되었으나, 작은 크기의 광물들이 rotor 표면에 부착함으로써 실패하고 결국에는 문을 닫았다.

1950년대 이래로 마찰대전을 이용한 분리가 독일의 소금산업을 대표적으로 하여 가성칼륨 산업에 광범위하게 이용되었다. 이외에도 정전분리의 응용은 현재까지 발전하고 있으며, 철광, 티타늄, 칼륨, 마그네슘, 다이아몬드 등 여러 가지 광물산업에서 이용되고 있다. 또한 지난 20년간 연구자들은 $40\mu\text{m}$ 이하의 미립광물 선별을 위해 정전선별법의 개발을 계속적으로 추진하고 있다.

본 연구에서 적용한 마찰대전 정전선별법은 20년 전 미국의 Kentucky Univ.에서 석탄회로부터 미연탄소분을 제거하기 위한 연구가 시초가 되어, 현재는 기존의 선광법으로 분리가 어려운 혼합물질의 분리와 처리 비용의 절감을 위해 여러 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

제 3 절 국내외 플라스틱 재질분리 현황

혼합 폐플라스틱을 재활용하기 위해서는 먼저 재질분리가 선행되어야 한다. 그러나 우리나라의 경우 혼합 폐플라스틱의 재질분리 기술이 미흡하여 대량 연속처리 공정이 이루어지고 있는 곳이 거의 없는 실정이다.

국내에서 혼합폐플라스틱을 재질분리하기 위한 자동화 공정이 갖추어진 곳은 시화공단내의 (주) 삼양사 PET공장과 (주) 이오니아 이엔티가 산·연 공동 연구로

개발한 근적외선 분광을 이용한 자동화 분리선별시설이 대표적이다. (주) 삼양사의 PET 공장에서는 미국 Frankel Industrial사의 기술을 도입하여 PET와 PVC를 분리하고 있으며, PET를 재활용하기 위한 공정을 갖추고 있다. (주) 이오니아 이엔티의 근적외선 분광을 이용한 자동화 분리선별시설은 벨트 위로 이동하는 폐플라스틱에 근적외선을 쬐인 후 반사광을 검출, 미리 입력된 각 재질별 파장 데이터와 이미지를 비교해 재질을 인식하고, 연속적으로 자동 분리해주는 선별시스템이다. 이 시설에 적용된 기술은 폐플라스틱의 형상, 색상, 첨가제, 두께에 관계없이 재질분리가 가능하다는 장점이 있으며, 세계 최고 수준인 독일의 설비와 비교하여 30% 가량의 초기투자비 절감이 가능하다고 알려져 있다. 그 외의 혼합폐플라스틱의 재질분리는 지자체 플라스틱 종말처리장과 영세한 플라스틱 업체에서 이루어지고 있다. 지자체 플라스틱 종말처리장의 경우 일부 재질을 회수하여 재활용하고 있으나, 선별기술 미흡하여 많은 양이 매립 및 소각에 의해 처리되고 있는 실정이다. 또한 작고 영세한 플라스틱 재활용 업체에서 육안에 의한 수선작업을 거쳐 재활용이 이루어지고 있지만, 선별기술 미흡과 처리용량의 한계로 폐플라스틱의 재활용에 큰 역할을 못하고 있다.

외국의 경우 폐자원 재활용 분야에 있어서 앞선 기술을 보유하고 있다. 플라스틱 재활용 분야도 재질분리 기술을 확립하여 상용화하고 있으며, 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 개발된 기술 중 상용화가 가장 많이 이루어진 분광법은 독일과 미국을 중심으로 이루어지고 있다. 독일의 경우 Bezner사와 BFI Ent. GmbH사 그리고 Duales System사는 플라스틱 각 재질의 근적외선 반사파를 이용한 분광법을 개발하여 상용화를 하고 있다. 선별기의 여러 곳에 분광장치를 설치하고 혼합 폐플라스틱이 각각의 장치를 지나갈 때마다 목적인 재질을 분리하는 방법으로 2m/sec.로 지나가는 시료를 분리할 수 있다. 역시 독일의 Humboldt Wedag사에서는 원심 분리력을 이용하여 분리와 세정을 동시에 하는 Censor라는 시스템을 개발하여 보급하고 있다. 또한 미국의 Magnetic Separation System사에서는 Single Line Bottle Sort라는 시스템으로 각종 폐플라스틱을 재질별, 색상별로 분류하는 기술을 개발하였는데, 이 시스템은 모듈화된 각종 센서에 의해서 최고 7가지의 색깔 및 탁도별로 플라스틱을 구분할 수 있으며, 현재 전 세계에 30여기가 가동 중이다. 이외에도 독일의 TLT 재활용 회사의 비중선별, 일본의 자원총합연구소에서 개발한 비중선별, 호주 ROFIN사의 근적외선 선별시스템(RapidSort) 등 세계 여러 나라에서 혼합 폐플라스틱 재질분리 시스템을 상용화하고 있으며, 보다 완벽한 선별을 위한 연구가

활발히 진행 중에 있다.

그러나 혼합 폐플라스틱의 재질분리 기술에 대하여 국내외 여러 연구소와 회사에서 다양한 선별기술과 첨단 분리시스템을 선보이고 있지만, 아직까지 경제성을 갖춘 완벽한 선별기술의 개발은 미진한 실정이다.¹⁴⁾

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 정전선별

정전선별법은 광물처리에 있어 철광, 티타늄, 칼륨, 금 그리고 다이아몬드와 같은 유용광물의 처리와 석탄 및 석탄회의 선별처리에 이용되어 왔다. 현재는 기존의 선광법으로 분리가 어려운 혼합물질의 분리와 폐자원의 재활용 분야에 확대 적용되고 있다. 정전선별은 주로 하전시키는 입자들의 방식에 의존하므로 선별장치의 고안은 하전 메커니즘 방식에 의존한다. 또한 이 선별법은 높은 전기장의 영향 하에서 하전된 입자들을 인력이나 반발력에 기초하여 분리하는 고전압 선별법(high tension separation)이라고도 한다. 정전선별법은 선별 단계 이전에 입자들이 정전기적으로 하전되어야 하며 이들의 하전은 입자의 전기저항과 전기적 표면구조의 차이로 발생되며, 입자에 대한 작용 힘은 하전입자와 전기장 사이의 상호작용에 기인한다. 정전선별법은 Fig. 1과 같이, 전도성 물질과 비전도성 물질이 혼합된 산물을 분리할 수 있는 정전유도형과 코로나 방전형, 그리고 전도성 물질과 비전도성 물질에 관계없이 혼합된 모든 물질의 분리가 가능한 마찰하전형이 있다. Table 1은 코로나 방전, 정전유도 그리고 마찰하전형 정전선별기의 하전 장치와 분리에 적용된 물질들을 나타낸 것이다. 정전선별기 주요 핵심장치인 하전장치는 정전유도형과 코로나 방전형에서 회전드럼(Rotational Drum)과 진동형 및 벨트형 유도판이 주로 이용되었으며, 특히 재질분리에 있어 하전장치의 영향이 지배적인 마찰하전형의 경우 다양한 종류의 하전장치가 개발되었다. 지금까지 정전선별의 연구는 주로 광물을 대상으로 이루어졌으며, 플라스틱의 연구는 최근에 이루어지고 있다. 플라스틱의 재질분리에 이용할 수 있는 정전선별법은 비전도성 물질들의 분리가 가능한 마찰하전형 정전선별법으로, 이 방법의 장점은 모든 재질의 분리가 가능하고 처리비용이 저렴하며 처리용량이 크다는 것이다. 따라서 개발 즉시 상용화 가능성이 크다는 것이다.¹⁵⁻¹⁷⁾

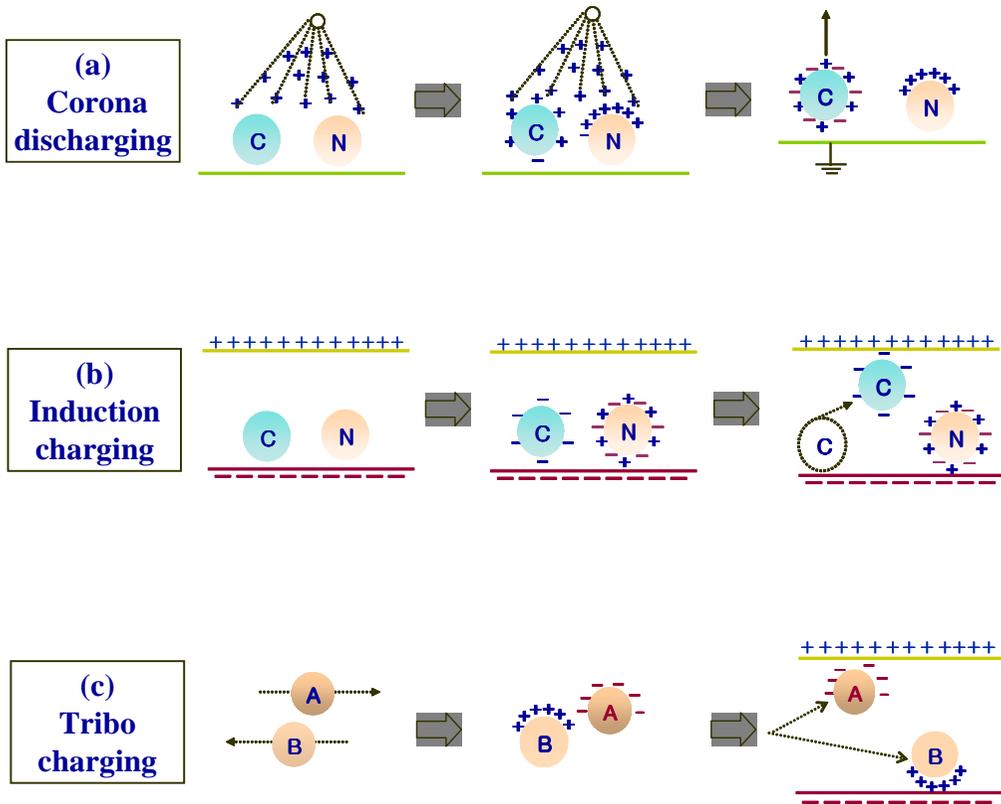


Fig. 1 Kinds and principle of electrostatic separations.

Table 1. Kinds and application of electrostatic separator.

Charging Method	Charging Equipment	Materials
Induction	Rotational Drum	Lunar soil, Aluminum from Dross Feldspars/Quartzs, Boron Minerals Mineral Sand, Fly Ash/Unburned Carbon Cu/Glass Fiber/Resin
	Slide Plate	Rutile/Zircon, Lunar Soil Mineral Sand
	Moving Belt	Onion Seeds, Flower
Corona	Rotational Drum	PET/Aluminum, Rare Metal Rutile/Zircon/Quartzs Tea Leaves/Stalks, Cu/PVC
	Moving Belt	Carrot/Celery Seed
Triboelectricity	Cylindrical Electrode	KCl/NaCl
	Cyclone	Coal, Fly Ash
	Rotating Cone	Coal, Plastics, Fly Ash
	Charging Tube	Coal, Calcite, Feldspar, Quartz
	Fluidized Bed	Coal, Plastics
	Electrostatics Sieve	Coal
	Crusher	Coal
	Rotating Pipe	Plastics
	Vibrating Feeder	Plastics

1. 코로나 방전형

코로나 방전(corona discharging, ion bombardment)에 의한 입자의 하전은 정전선별의 일반적인 하전방식으로서 전도성이 높은 광물과 비전도성 광물을 고전압 시스템을 이용하여 분리하는 것이다. 또한 이 방식은 이온 충돌 방법으로써 다른 하전방식에 비해 가장 높은 입자 하전율을 보인다. Fig. 2는 코로나 방전의 원리와 선별장치의 개략도 나타낸 것으로, 코로나 혹은 이온 bombardment는 공기를 통하여 전자, 이온을 방전시켜 전기를 전도시킨다. 공기나 다른 기체들은 정상적인 조건에서는 이온이나 전자를 가지고 있지 않으며 기체분자들은 훌륭한 절연체이다. 그러나 전극 사이에 높은 강도의 전압을 인가하면 기체는 전기적 절연과괴를 일으키고 이들 기체는 방전하게 되어 도체의 성질을 지니게 된다. 코로나 혹은 이온 bombardment는 전도성과 비전도성 혼합물이 접지된 rotor와 평행한 코로나 발생전극사이로 공급되고 코로나 방전은 가는 실선(fine wire)이나 첨극(needle point)의 전압세기가 상승하여 주변 공기의 절연과괴 강도를 넘어서는 전기장에서 발생한다. 코로나 전극은 보통 텅스텐이 이용되며 연소할 수 있는 광물(석탄 등)의 처리 시 특수 전극이 필요하다.¹⁸⁾

코로나 유형은 이온화 전극의 극성에 따라 코로나 발광(corona glow)과 코로나 방전(corona discharge)형이 있다. 코로나 전극이 (+)전극일 경우 (-)이온이 전극 쪽으로 향한다. 공기분자의 절연과괴는 코로나 발광(corona glow)의 형태로 전극의 밖으로 (+)이온이 제거됨으로서 발생된다. 다른 한편 (-)전극일 경우 전극으로부터 음(-)으로 하전된 산소 이온들이 반발을 일으키면서 (+)이온이 전극을 향해 가속화되고 이때 코로나 방전(corona discharge)이 발생한다. 투입된 입자들은 이온화 전극의 방전장 안으로 접지 전극에 의해 운반되고 이 영역에서 이온 충돌에 의해 하전되며, 모든 입자들은 동일 부호로 하전된다. 이 때 선별의 핵심은 하전된 입자들의 전하 소멸 비율 차이이다. 즉 비전도성 물질이나 절연체는 접지 롤에 천천히 전하를 잃게 되고 따라서 'image force'에 의해 접지 롤의 표면에 부착되어 있게 된다. 반대로 도체는 재빨리 접지 롤이나 전극에 전하를 분배하거나 잃게 되어 원심력, 중력, 항력의 조합에 따라 포물선 운동을 하면서 접지롤로부터 멀리 이동하여 낙한다. 여기서 'image force'는 접지극 표면과 하전된 입자 사이의 인력으로 표현할 수 있다. 이는 하전된 입자로부터 접지극 표면에 거울상 위치와 같은 반대부호의 전하로서 동등하다.

2. 정전유도형

Fig. 3은 정전유도(Conductive induction)에 의한 하전 원리와 선별장치의 개략도 나타낸 것이다. 정전유도에 의한 하전에서 전도성과 비전도성 입자가 고전압 전극이나 비방전 전극 하에서 유도 전극판이나 접지롤에 투입될 때, 고전압의 유도전극에 접촉하는 입자들은 정전기적 유도에 의해 표면전하가 순간적으로 발생할 것이다. 비전도성 입자는 고전압 전극판 표면과의 접촉을 통해서도 동일극성과 표면의 전위를 취하지 않으나 전도성 입자들은 순간적으로 동일 극성과 표면 정전위를 가진다. 전도성 입자들은 고전압 전극판과 반발 동시에 두 전극사이의 전기장 안에서 반대극성의 비방전형 전극의 인력에 의해 표면으로부터 멀리 이동하여 낙하한다. 그러나 절연체 입자들은 반발력이나 인력이 없고 정전기장 내에서 반대전극으로 정전기력이 없기 때문에 중력에 의해 그들이 낙하할 때까지 롤에 부착되어 있다. 따라서 전도체와 비전도체의 분리가 이루어진다. 정전유도에 의해 발생하는 하전량은 입자 형상, 접촉시간 그리고 전기전도도에 영향을 받는다. 일반적으로 정전유도형은 코로나 방전형에 비해 하전효율이 낮고 따라서 분리효율도 낮다고 보고되고 있다.¹⁷⁾

3. 마찰하전형

Fig. 4는 본 연구에서 플라스틱의 재질분리를 위해 채택한 마찰하전형 정전선별법의 원리와 유동층의 선별장치를 나타낸 것이다. Fig. 4에서와 같이 혼합된 물질을 서로 충돌시키거나 제 3의 물질에 충돌시키게 되면 입자의 표면이 각각 positive(+)와 negative(-)로 하전을 띠게 되는데, 이때 하전된 입자를 높은 전류가 흐르는 전기장 내로 통과시키면 전극에 반대로 하전된 입자들이 각각 이동되어 분리가 이루어지게 되는 것이다. Fig. 4의 우측 그림은 유동층 선별장치를 나타낸 것이다. 가스나 기체를 고체입자가 충전된 고정층의 하부로부터 천천히 통과시키면서 유체의 속도를 점차 증가시키면 압력강하도 커지고, 각각의 입자에 생기는 저항도 커지면서 입자가 움직이기 시작하고, 유체속도가 더 커지면 입자가 유체와 같이 거동하여 유체 내에서 뜨게 되며, 이때 층을 이루는 입자들이 완전히 떠 있는 상태를 유동화(Fluidization), 그러한 장치를 유동층이라고 부른다. 유동층은 원래 화학반응기 또는 혼합 건조 등의 물리적인 조업에 많이 이용하여 왔지만, 근래에는 유동층 내부 입자 상호간의 접촉이 활발하게 일어나는 효과를 이용하여 마찰대전기로서도 제한적으로 이용되고 있다.^{14,17,20)}

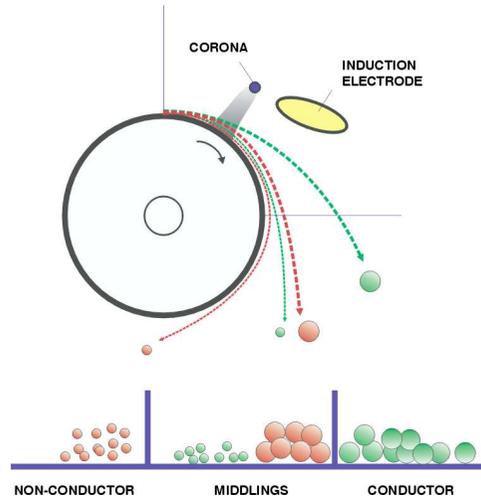


Fig. 2 Principle and schematic of corona electrostatic separation.

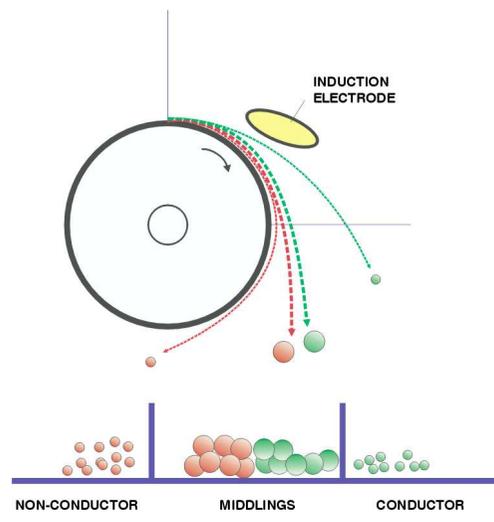


Fig. 3 Principle and schematic of induction electrostatic separation.

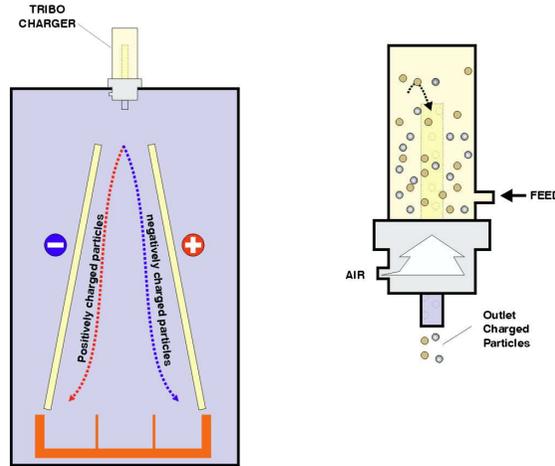


Fig. 4 Principle and schematic of triboelectrostatic separation.

제 2 절 마찰하전형 정전선별

1. 마찰하전형 정전선별의 원리

마찰하전형 정전선별의 원리는 물질의 일함수(work function) 값과 대전서열을 이용한 것으로 입자와 입자간, 입자와 하전장치간의 접촉에 의해서 반대 극성으로 하전된 물질을 정전기적으로 분리하는 것이다. Fig. 5는 입자의 마찰대전 과정을 나타낸 것으로, (a)는 입자와 하전장치 표면과의 접촉에 의한 대전을, (b)의 경우는 입자와 입자의 접촉에 의한 대전현상을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 입자가 서로 다른 입자나 혹은 하전장치 표면에 충돌·마찰하게 되면 일함수 값의 차이에 의해 두 물질의 fermi-level이 같아지는 방향으로 전자의 이동이 있게 된다. 접촉 후 입자가 다시 표면에서 분리되면 전자의 과잉 또는 부족현상이 생기므로 입자는 negative(-) 혹은 positive(+)로 대전하게 된다. 이렇게 서로 반대 극성으로 하전된 혼합 입자들을 Fig. 6에서와 같은 높은 전압이 흐르는 전기장 내로 통과시키면 positive로 하전된 입자는 negative 전극으로 이동하게 되고, 이와 반대로 negative로 하전된 입자는 positive 전극으로 이동되어 분리가 이루어진다.^{19,20-22)}

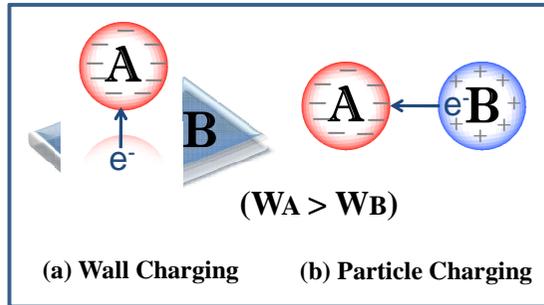


Fig. 5 Charging principle of particles by collision.

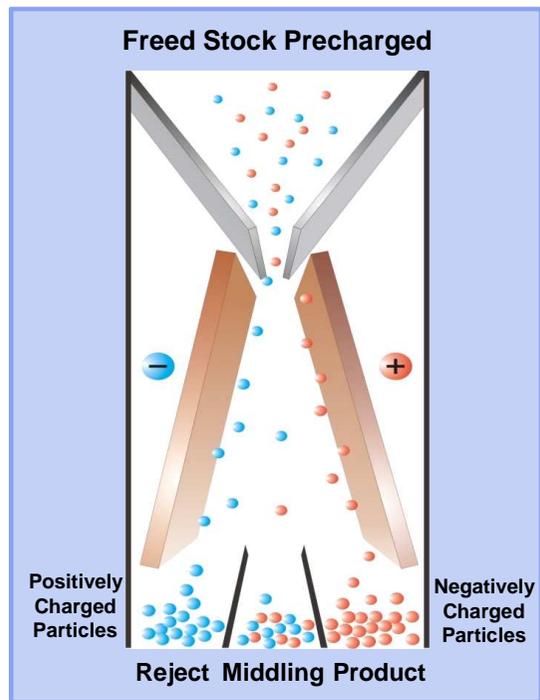


Fig. 6 Schematic representation of triboelectrostatic separation.

2. 마찰하전 메커니즘

마찰하전은 전기적으로 중성인 물질의 입자들이 접촉과 마찰에 의해 전하(전자, 이온)를 잃거나 얻은 과정에서 발생하는 현상이다. 입자표면에서의 전자전달, 이온 전달, 그리고 물질전달에 기인한 마찰대전현상은 주로 마찰하전 장치 내에서 입자와 입자 또는 입자와 표면과의 마찰에 의해 발생되며 마찰하전 방식과 입자표면의 성질에 따라 마찰대전 발생 메커니즘도 달라질 수 있다. 마찰하전 메커니즘에서 전하전달의 일반적 이론은 입자가 서로 다른 입자나 혹은 표면에 충돌·마찰하게 되면 일함수 값의 차이에 의해 두 물질의 fermi-level이 같아지는 방향으로 전자의 이동이 있게 된다. 접촉 후 입자가 다시 표면에서 분리되면 전자의 과잉 또는 부족 현상이 생기므로 입자는 negative(-) 혹은 positive(+)로 대전하게 된다. Harper, Lowell and Rose-Innes는 마찰하전 메커니즘을 전자전달(electron transfer), 이온전달(ion transfer), 전하를 운반하는 물질전달(material transfer)의 세 가지 방식으로 설명하였다. 접촉 또는 마찰하는 물질과 물질사이의 전자의 이동현상이 마찰대전의 주된 메커니즘으로 작용하지만 전자전달, 이온전달, 물질전달의 3가지 방식이 복합적으로 작용함으로써 물질과 물질사이의 마찰대전 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

마찰대전 현상은 대상물질에 따라 크게 금속-금속, 금속-절연체, 절연체-절연체의 3종류로 나뉘며, 마찰 대상물질들에 따라 전하전달의 방식도 달라진다. 금속과 금속 또는 금속과 절연체의 마찰대전 현상은 선행연구자들에 의해 대전 메커니즘이 비교적 상세히 파악되고 있으며, 주로 전자전달에 의해 입자들이 대전되는 것으로 알려져 있다. 절연체와 절연체의 대전 현상에 있어서는 아직도 정확한 대전 메커니즘이 파악되지 않고 있지만 주된 전달 메커니즘은 전자전달과 이온전달에 의한다고 알려져 있다. 특히 이온전달에 의한 마찰대전 메커니즘은 동일입자의 마찰대전 현상을 설명하는데 적용될 수 있다.

금속-금속의 접촉이론은 다른 많은 고체물질들(metal-insulator, insulator-insulator)의 마찰하전 메커니즘을 설명하는 대표적 모델이다. 금속의 접촉하전은 전기장과 산란장의 영향이 없고 금속내의 전자 상들이 이론적으로 단순해야한다. 금속에서 페르미 에너지에 가득 채워지는 전자 상태를 허락하는 밴드가 있다면 Fig. 7에서와 같이 서로 다른 일함수 금속들이 접촉할 때 전하 이동은 페르미 에너지가 높은 금속으로부터 더 낮은 페르미 에너지 쪽으로 전자 이동이 발생한다.

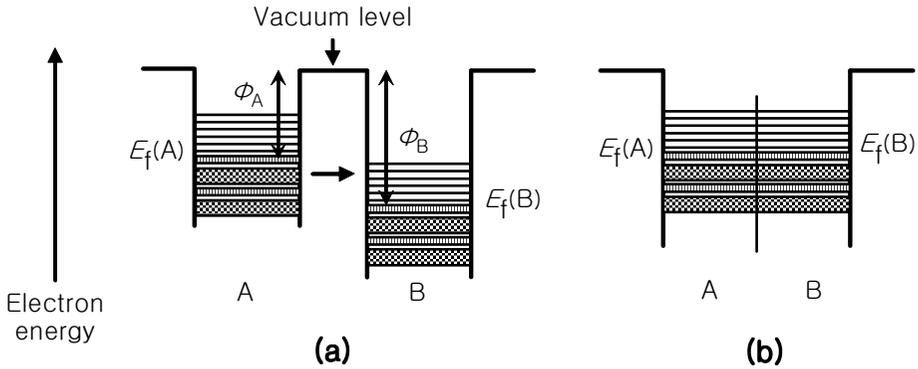


Fig. 7 Contact charge between two metals, A and B: (a) before contact, (b) after contact. (Lowell and Rose-Innes)

이들 전하이동은 A로부터 B로 증가하여 A와 B의 페르미 에너지가 평형이 되었을 때 끝난다. 따라서 식 1)에서와 같이 전하량은 두 금속의 일함수 차에 비례한다.

$$Q \propto (\Phi_B - \Phi_A) \quad 1)$$

금속의 접촉대전 이론은 두 금속 물질이 서로 접촉할 때 전하는 fermi level이 일치될 때까지 그들 state에 전하가 이동된다는 가정에 기초한다. 전기화학적 전위는 두 물질이 열역학적 평형이 될 때까지 두 물질 사이에 전자교환이 일어난다. 그러므로 금속의 표면 전위의 차는 다음과 같다.

$$V_c = (\Phi_B - \Phi_A)/e \quad 2)$$

여기서 V_c 는 접촉전위차(contact potential difference)이며 금속의 접촉전하는 접촉전위차와 그들 사이의 유효한 정전용량의 결과이다. 열역학적 평형을 위해서 전자들이 금속 사이의 장벽을 통과하는 경향을 보이며 전위차는 동등하게 V_c 로 유지된다. 따라서 분리 후 금속의 전하는 다음과 같다.

$$Q = C_0 V_c \quad 3)$$

여기서 C_0 는 정전용량, C_0 의 값은 극히 미미하고 V 즉, 전위로만 표시한다. 연구자들에 의해 실험적으로 확인된 전하이동은 그들의 접촉전위차에 비례한다.

금속-절연물의 마찰하전은 금속이 절연물에 접촉하게 되면 금속의 전자가 절연물의 빈 공간으로 이동하게 되는데 이때 절연물과 금속이 열역학적으로 평형상태에 있다고 가정하고 이온 전달과 전자전달이 두 물질의 페르미 준위를 일치시키는 역할을 한다. Fig. 8에서와 같이 물질의 에너지밴드는 가전자대(valence band), 금지대(forbidden energy band), 전도대(conduction band)로 나누어져 있다. 가전자대는 전자가 꽉 찬 준위이며 금지대는 전자의 궤도가 없거나 들어갈 수 없는 준위로서 가전자대와 전도대의 에너지 차이의 gap이다. 가전자대의 전자가 에너지를 받아 금지대를 뛰어넘어 전도대로 이동한 전자가 자유 전자이며 전기 전도에 기여를 하게 된다.

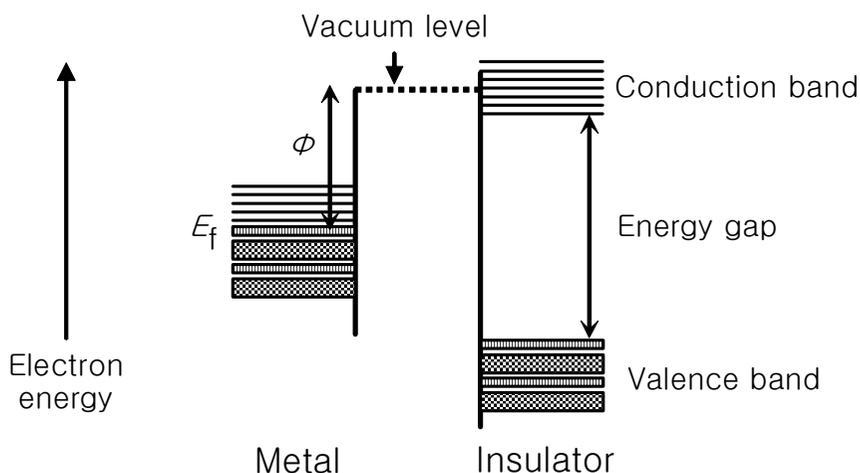


Fig. 8 Contact charge between metal and insulator. (Rose-Innes, A. C.)

금속 도체의 경우 이러한 금지대가 존재하지 않고 가전자대와 전도대만의 에너지 밴드를 이루기 때문에 자유전자의 활동이 크고 전기전도성이 높다. 반도체의 경우 금지대의 크기가 비교적 작아 약간의 에너지만 가해도 전자가 금지대를 뛰어넘어 전도대로 이동하게 된다. 일반적으로 금속과 절연물이 접촉하전 된다는 것은 절

연물 energy gap내부에 electron level이 있거나 표면의 불균일함을 의미한다. 플라스틱과 같은 절연체의 경우는 금지대가 크기 때문에 전자가 전도대로 올라가기 힘들다. 따라서 금지대의 에너지 갭 이상의 에너지를 가해야만 핵 속에 속박된 전자가 전도대로 이동될 것이다. 특히 플라스틱과 같은 고분자물질에 포함된 첨가제 물질과 불순물들이 donor와 acceptor의 역할을 하게 된다. donor는 전도대에 가까운 에너지 준위를 가지며 자유전자를 내보내는 역할을 한다. acceptor는 가전자대에 가까운 에너지준위를 가지며 홀을 만들어 전자들 쉽게 받을 수 있는 역할을 한다.²³⁾

절연물-절연물의 마찰하전은 정확한 대전 메커니즘이 파악되지 않고 있지만 많은 연구자들은 두 절연체의 전하 전달 메커니즘이 금속-절연물과 유사한 전자기동의 결과라고 믿어왔다. Davies는 절연물-절연물의 마찰하전은 두 물질의 페르미 준위와 관계가 있으며 높은 페르미 준위를 가지는 절연체로부터 낮은 페르미 준위의 절연체로 전자기동이 일어난다고 하였다. 최근에 Duke and Fabish는 금속-절연체의 하전 메커니즘과 유사한 모델을 가정하여 금속의 페르미 준위와 절연체 내의 electron states와 금속사이의 전자기동의 결과라고 하였다. 이는 앞서 언급한 절연체내의 energy gap에 acceptor-like와 donor-like states가 존재한다는 가정이 필요하다.^{24,25)}

3. 전기장 내에서 입자의 거동

Fig. 9는 하전장치에 의해 하전된 입자가 전기장 내를 통과할 때 전극으로 이끌리는 과정을 나타낸 것이다. 하전된 입자가 반대부호의 전극으로 이끌리는 힘은 하전량과 전기의 세기에 비례하고 입자의 무게에 반비례한다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 입자의 이동 모멘트는 동일한 하전량을 띄었다 하더라도 굵은 입자는 입자의 중량이 작은 입자보다 크기 때문에 아래쪽으로 더 이동하게 되는 것이다.^{3,26)}

이는 입자가 작을수록 비표면적이 증가되어 입자표면의 하전이 쉬워지고 중량이 감소되어 선별효율이 증가될 것으로 생각할 수 있지만, 입자가 너무 작아지면 하전된 입자간의 전기적 에너지에 의해 붙으려고 하는 특성 때문에 오히려 분리효율이 감소하는 원인이 되기도 한다. 따라서 마찰하전형 정전선별에서 입자의 조절은 선별효율을 높일 수 있는 매우 중요한 실험변수의 하나이다.

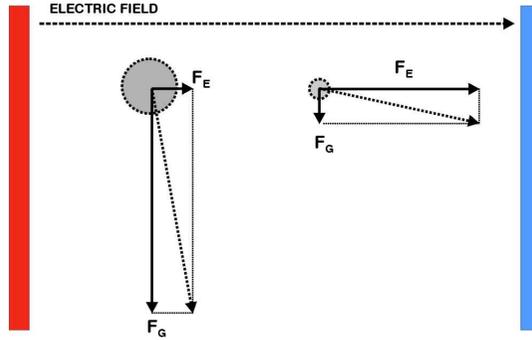


Fig. 9 Moving characteristic of charged particles in electric field.

수직 자유낙하 내에서 입자들의 거동은

$$F_G = mg = \frac{4}{3}\pi\gamma^3\rho g$$

전기장 내에서 하전 q 와 중량 m 을 갖고 있는 입자의 거동

$$F_E = qE$$

입자의 가속도

$$\alpha = \frac{FE}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{3}{4} \frac{qE}{\pi\gamma_{3p}}$$

Fig. 10은 하전된 입자가 전기장 내를 통과할 때 분리되는 즉, 전극으로 이끌리는 에너지 값을 나타낸 것으로, 그림에서 보는바와 같이 전극으로 이끌리는 에너지는 하전량과 전기장의 세기 그리고 전기장의 구배력이 영향을 미치게 된다. 물론 입자의 크기, 상대습도와 온도 등 여러 실험변수들이 있지만 이들이 중요한 실험변수라는 것을 고려할 때 전극 개발 시 전기 구배력을 크게 할 수 있는 장치제작이 필요할 것이다.

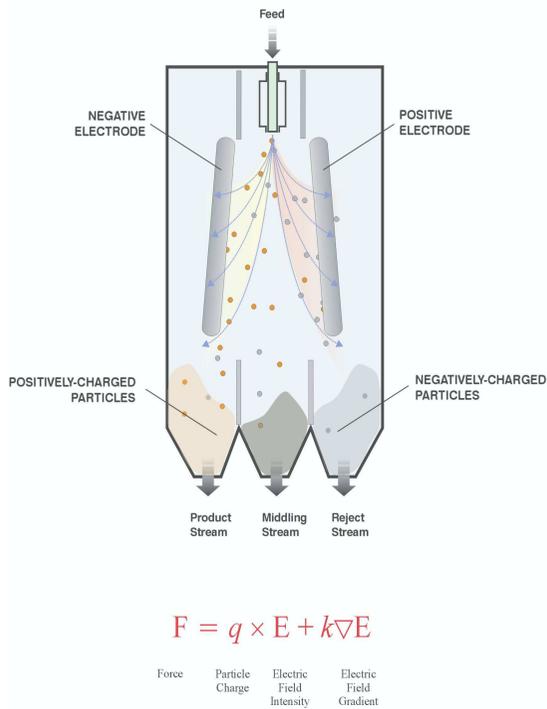


Fig. 10 Moving of charged particle in electrode.

Fig. 11에서와 같이 전류가 흐르는 전기장의 거리 d 와 이들 사이의 전압(V)의 전위차 사이로 중력에 의해 낙하하는 구형 입자의 하전량 Q 과 질량 m 을 고려할 경우, 하전된 입자들은 정전기적 힘 F 가 중력 W 보다 크다면 전극을 향해 편향 될 것이다.

$$F > W \tag{1}$$

입자의 중력 : $W = m \cdot g$ [N] (2)

입자의 정전기력 : $F = Q \cdot E$ [N] (3)

$$Q \cdot E > m \cdot g \tag{4}$$

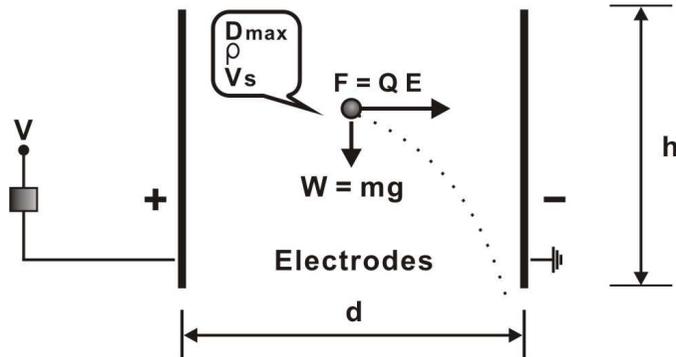


Fig. 11 Force acting on particle falling in a transverse electric field.

일정 전기장의 경우, 전기장의 힘 E 는

$$E = \frac{V}{d} \quad [\text{V/m}] \quad (5)$$

주어진 식에 의해 입자의 하전량을 구하면 다음과 같다

$$Q = 4\epsilon_0\epsilon_r\pi r V_s \quad [\text{C}] \quad (6)$$

표면 전위 V_s 는 비접촉형 정전기 전압측정기에 의해 측정되고, 거리 r 은 플라스틱 입자와 기구 사이의 거리이다. 다른 한편으로 구형입자 질량은

$$m = \rho \cdot \frac{\pi}{6} (D)^3 \quad [\text{kg}] \quad (7)$$

(5),(6),(7)에서 구해진 E, Q, m를 (4)의 관계식으로 다시 표현하면

$$V > \left(\frac{g}{24\epsilon_0\epsilon_r} \right) \left(\frac{\rho D^3 d}{r V_s} \right) \quad [\text{V}] \quad (8)$$

중력가속도 : $g = 9.81[\text{m}/\text{S}^2]$

전체 공기에 대한 유전율 : $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{C}^2/\text{Nm}^2]$

비유전율 혹은 공기 비율 1에 대한 유전율 : $\epsilon_r = 1.0059$

(8)식에서 전극판에 공급된 전압을 구하면

$$V > 4.59 \times 10^{10} \left(\frac{\rho D d}{r V_s} \right) \quad [\text{V}] \quad (9)$$

(9)식을 일반식으로 재 표현하면

$$E > k \cdot 4.59 \times 10^{10} \left(\frac{\rho D \max}{r V_s} \right) \quad [\text{V}] \quad (10)$$

D_{\max} 는 처리된 플라스틱 입자의 최대 크기이며, 상수 k 는 1~1.8로서 크기는 없으며 실험적으로 구해진다. 입자표면은 구형이라는 가정 하에 측정하고 표면전위의 측정시 발생된 오차를 생각해야한다. 전극 E 의 전기장력은 플라스틱 입자 표면전위 V_s 의 마찰력이란 것을 알 수 있다. 입자크기 D_{\max} 와 밀도 ρ . 다시 말하면 전기장의 영향 하에서 플라스틱 입자의 직교절선은 표면전위의 수준, 극성과 입자크기에 의존한다. 플라스틱 입자가 주어진 정전기장력 E 에 의해 정전기적으로 편향되기 위해 얻어야 하는 표면전위 V_s 의 최소 크기는 (10)식에서 구할 수 있다

앞의 식은 비접촉형 정전기 전압측정기를 이용하여 입자의 전하를 표면전위의 크기로 적용한 식이다. 다음에 기술한 유도식은 입자의 전하를 접촉식의 패러데이 케이지로 측정하여 하전량(nC)과 전극 전압의 관계를 나타낸 식이다.

아래 식에 대한 가정은 다음과 같다.

1. 입자는 구형이며, 항력은 무시한다.
2. 입자는 종류마다 한정된 개수이며, 동일한 크기와 동일한 전하를 가진다.
3. 각각의 입자에 대한 최초의 위치는 바닥위로부터 주어진 높이의 안쪽 영역 안의 임의의 위치에 기초한다.
4. 전기적 이미지 힘, 유체의 요동과 입자 충돌은 고려하지 않는다.

Fig. 12는 마찰하전형 정전선별에서 전기장내의 하전입자 운동을 나타낸 것이다. 하전장치에 의해 대전된 하전량 q 와 질량 m 을 가진 입자가 거리 d 인 수직형 전극 판 사이를 통과할 때 하전입자에 대해 수평방향 힘인 정전기력과 수직방향 힘인 중력이 작용하게 된다. 분리메커니즘에 의한 유도식은 뉴턴의 운동 제 2법칙에 의한 합력으로 표현되며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F} = ma = m \frac{d\vec{v}}{dt} = F^e + F^g \quad (1)$$

입자의 속도에 대한 방향성분을 식(2)와 같이 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{V} &= V_x \hat{i} + V_y \hat{j} \quad (2) \\ m \left(\frac{dV_x \hat{i}}{dt} + \frac{dV_y \hat{j}}{dt} \right) &= qE \hat{i} + mg \hat{j} \end{aligned}$$

방향성분 i 와 j 에 관해 변수분리를 하면, 식(3), (4)를 구할 수 있다.

$$\frac{dV_y}{dt} = g \quad (3), \quad \frac{dV_x}{dt} = \frac{qE}{m} \quad (4)$$

식 (3)을 거리와 시간에 대해 중적분하여 정리하면 식(5)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \iint \left(\frac{dV_y}{dt} = g \right) \\ y = y_0 + V_{y0} t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (y_0=0, \quad y=H) \end{aligned}$$

식 (5)에서 수직이동거리(H)에 대한 시간(t)을 구할 수 있다.

$$H = V_{y0} t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (5)$$

식 (4)을 거리와 시간에 대해 중적분하여 정리하면 식(6)을 구할 수 있다.

$$\iint \left(\frac{dV_x}{dt} = \frac{qE}{m} \right) \quad (t: 0 \rightarrow t, V: V_{x0} \rightarrow V_x)$$

$$x = x_0 + V_{x0} t + \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2$$

$$x = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2 \quad \left(E = \frac{V_{\text{volt}}}{d}, m = \frac{\rho\pi D^3}{6} x = \frac{d}{2} \right)$$

따라서 식(6)에서 하전된 입자가 거리 x 만큼 정전기적 편향을 할 수 있는 전극의 전압을 구할 수 있다,

$$V_{(\text{volt})} \geq \frac{\rho\pi D^3 d^2}{6 q t^2} \quad (6)$$

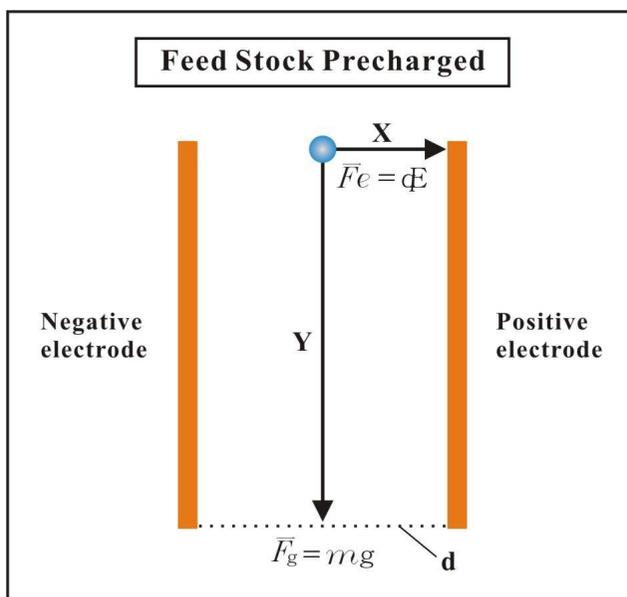


Fig. 12 Schematic diagram of particle movement in electric field.

4. 플라스틱의 대전서열

일함수 값은 각 물질마다 다르고 물질의 내부구조는 물론 입자표면에 함유되어 있는 산화물 및 오염정도 그리고 측정조건에 따라 다르게 나타나므로, 근래에는 각 재질의 상대적인 일함수 값의 정도만을 표시하는 대전서열(Triboelectric Series)을 많이 이용하고 있다. 특히, 대전서열은 플라스틱처럼 일함수를 직접적으로 측정하기 어려운 고분자성 입자들에 있어서 많이 적용되고 있다. 절연체와 유기화합물들은 Nylon과 같이 대부분 양(+)으로 대전되는 경향으로부터 할로겐 플라스틱과 같이 대부분 음(-)으로 대전되는 전하의 경향을 나타낸다. 이러한 접촉전하의 상대적 하전극성의 정도를 나타낸 것을 대전서열이라 한다. 대전서열로부터 음의 경향이 클수록 일함수가 크며, 반대의 경우 일함수가 작다. 예로써, (positive end)PC - PMMA - PA - PE - PS - PET - PP - PVC(negative end)의 대전서열(Brandrup, 1996)에서 PVC와 PET재질의 마찰 시 PVC 재질은 음으로, PET 재질은 양으로 대전된다. 한편 PC와 PMMA의 마찰 시에는 PC는 양으로, PMMA는 음으로 대전되게 된다. 따라서 PC쪽으로 갈수록 양으로의 하전경향이 강하고, PVC 쪽으로 갈수록 음으로의 하전경향이 강하다.

플라스틱의 일함수 값의 정립에 있어 금속의 일함수와 플라스틱(금속-절연체)의 하전량의 관계에 의해 플라스틱의 일함수 값을 산정하고 있다. 산정된 플라스틱의 일함수 값의 서열화가 곧 대전서열로 귀착될 수 있으나, 마찰하전형 정전선별에서 플라스틱의 재질분리시 분리대상 물질들의 조합은 플라스틱들로 이루어져 있다. 따라서 각 플라스틱들(절연체-절연체)간의 대전의 경향을 나타내는 대전서열의 정립 또한 중요한 하전특성 지표로 간주된다.

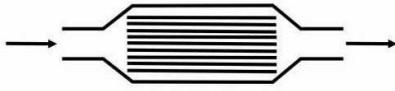
Table 2는 Diaz에 의해 정리된 고분자성 물질들의 대전서열을 나타낸 것으로 4개의 문헌마다 대상범위가 다르며, 플라스틱 물질들로 국한시킬 경우에서 대전서열이 다소간에 차이가 있음을 보여준다. 이는 실험적 재료, 과정 그리고 조건들이 다르고, 대전서열은 정량적이지 않기 때문이다. 따라서 반정량적인 대전서열의 정립은 플라스틱들의 상대적 하전경향의 보다 좋은 지표로 활용될 수 있으며, 접촉하전을 예측할 수 있어 더 유용하게 사용될 수 있다.

Table 2. Comparison of four published triboelectric series.²⁷⁾

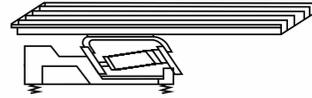
T.Fujita	A. Coehn,	J. Henniker,	C.K. Adams,
↑ Positive charge			
Acrylonitrile- butadiene-styrene	Nylon 6,6	Nylon	Polyamide 11
	Cellulose	Wool	Wool
Polypropylene	Polymethylmethacrylate	Silk	Silk
		Cotton	Cotton
Polycarbonate	Polyacetate	Wood	Polyurethane elastomer
		Hard rubber	Styrene-acrylonitrile
Polyethylene- terephthalate	Polyethyleneterephthalate	Styrene	Polystyrene
	Polyvinylchloride	Polyurethane	Epoxide resin
Polyethylene	Polystyrene	Polyethylene	Natural rubber
		Polypropylene	Polyethylene
Polyvinylchloride	Polyethylene	Polyvinylchloride	Polyvinylchloride(25% DOP)
		Silicon	Polyvinylchloride no plasticizer
Teflon	Polypropylene	Teflon	Polytetrafluoroethylene
↓ Negative charge			

5. 마찰하전 방식

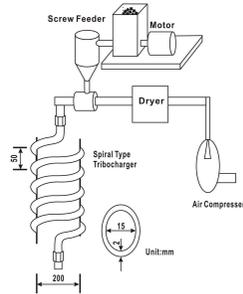
마찰하전형 정전선별법은 하전장치와 선별시스템의 개발에 따라 선별효율을 향상시킬 수 있다. 마찰하전형 정전선별에서 일반적으로 사용되는 하전장치는 Inculet et al.의 rotating cylinder와 fluidized bed, Yanar and Kwetkus의 cyclone, 그리고 Higashiyama et al.의 vibrating feeder가 있으며, 이 밖에 honeycomb, spiral tube charger, agitator 등 있다.^{28, 29)} 이때 선별효율에 가장 크게 영향을 미치는 것은 두 입자간의 표면 하전 값을 높일 수 있는 하전장치의 재질과 하전방식으로 이 기술 개전선별 연구자들은 어느 물질을 선별하든 하전물질 및 장치개발에 연구를 집중



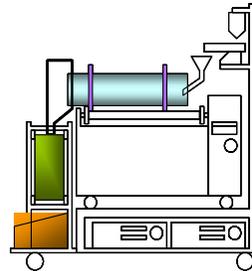
(a) Honey Comb



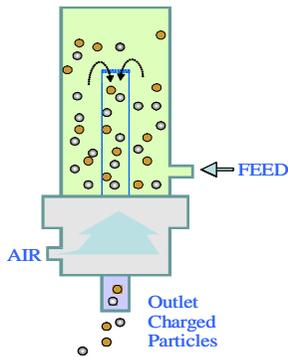
(b) Vibration Feeder



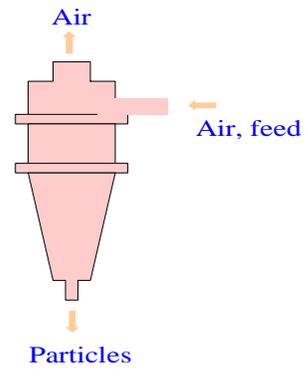
(c) Spiral Tube



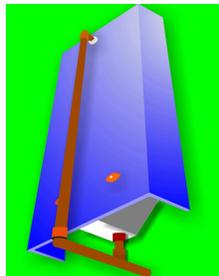
(d) Rotation Cylinder



(e) Fluidized Bed-Column



(f) Tribo Cyclone



(g) Fluidized Bed-Pipe Line



(h) Agitator

Fig. 13 Various tribo chargers of triboelectrostatic separation.

하게 된다. 본 연구에서도 혼합플라스틱의 재질분리 효율을 향상시키기 위해 선별 대상 물질에 적합한 하전물질 및 장치개발 연구를 수행하였다.

Fig. 13은 앞서 언급한 바와 같이 마찰하전형 정전선별에서 일함수 값에 의해 입자들을 선택적으로 하전시킬 수 있는 다양한 하전방식들을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Fig. 13의 하전방식들 중 tribo cyclone과 fluidized bed- pipe line의 하전장치를 제작하여 시료와 하전방식에 따라 하전장치를 달리하면서 하전 및 분리실험을 수행하였다.

마찰하전장치를 이용한 혼합 물질의 분리기술이 개발된 이후에도 선별효율을 높이기 위해 물질의 마찰을 극대화하기 위한 하전장치의 개발이 계속되었다. 대표적인 방식을 소개하자면, 1977년 Fricke는 인(P)과 칼륨(K)을 분리하기 위해 Tube free falling을 고안하였으며, 1983년에는 Masuda 등이 Cyclone 방식을 석탄분리에 응용하여 고안하였다. 1984년에는 Inculet이 Tower separator라는 방식을 이용하였

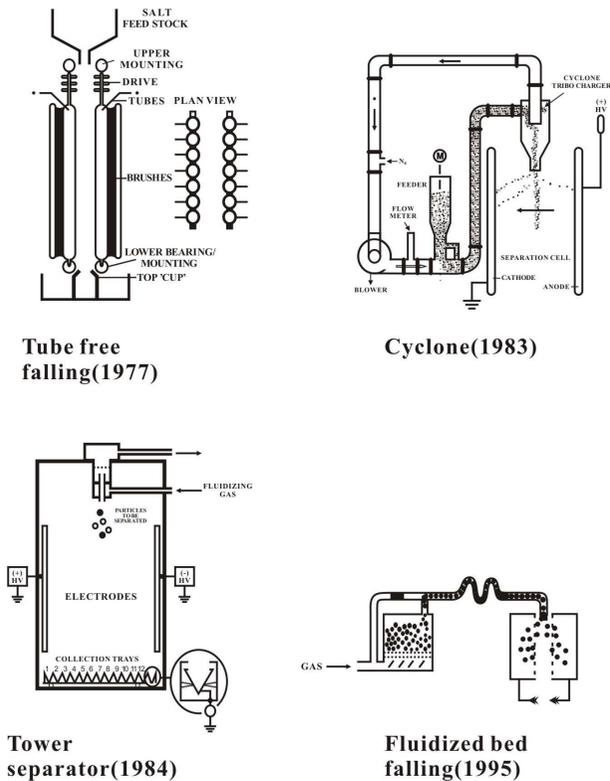


Fig. 14 Equipments developed for triboelectrostatic separation.

으며, 1987년에는 Cross가 Fig. 14의 하전장치를 개발하여 Electrocylojet 이라고 명명하였다. 1995년에는 Haga가 Fluidized bed falling 이라는 이름으로 장치를 고안하였다. 이밖에도 많은 사람에 의해 분리하고자 하는 물질의 특성에 맞추어 마찰을 극대화하기 위한 하전장치의 고안이 계속되고 있다.^{1,3,17,30,31)}

Fig. 15는 본 연구에서 ABS와 PBT의 일함수 값과 대전서열을 정립하기 위하여 개발한 수직왕복형 하전장치이다. 본 연구에서 개발된 새로운 하전방식의 수직 왕복형 하전장치와 하전물질들을 이용하여 ABS와 PBT의 각 재질별 하전량과 하전극성을 faraday법으로 조사하였으며, 이를 토대로 일함수 값을 산정하고 기존의 다양한 플라스틱의 일함수 값과 비교하여 대전서열을 정립하였다. 본 연구를 통해 얻은 기초 자료는 발생원, 조성별에 따른 폐플라스틱 즉, 산지별 폐플라스틱 재질분리에 적합한 하전물질과 하전방식을 선정하고 분리효율을 높이는 데 이용될 수 있을 것이다.

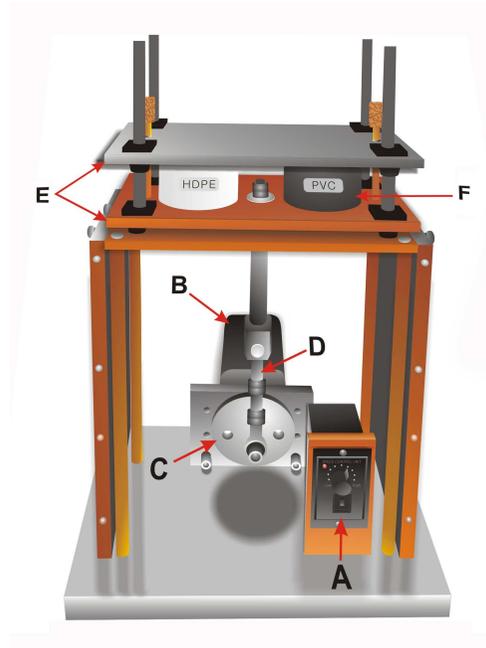


Fig. 15 The charger of a vertical motion developed for work function and tribo series of plastics.

- {A: controller(RPM) B: motor(cont. 50~1700rpm) C: rotation disc.
D: the axis of cam E: a vertical motion plate F: charging bottle}

6. 하전 및 분리 효율에 영향을 미치는 인자

마찰하전형 정전선별법은 대기 중에서 입자간의 충돌 혹은 기계적인 교반에 의해 형성되는 입자표면의 하전량에 의해 선별효율이 크게 좌우되기 때문에, Fig. 16에서와 같이 충돌 혹은 기계적 교반력, 상대습도 및 온도, 입자의 크기, 전기장의 통과속도, 시료의 수분함량 및 온도 등에 의해 영향을 받게 된다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 입자의 표면하전에 미치는 실험인자 모두가 선별효율에 영향을 미치기 때문에, 선별대상 입자의 하전이 매우 중요함을 알 수 있다. 입자의 기계적 교반이나 충돌은 입자표면을 직접 하전시키는 중요한 원인이 되지만, 입자크기, 상대습도 및 온도, 시료 및 실험실의 온도와 시료의 수분함량 등이 하전량을 결정하기 때문에 이들 모두가 충족되어야 최적의 하전량 및 선별효율을 얻을 수 있다.^{1,23,32,33)}

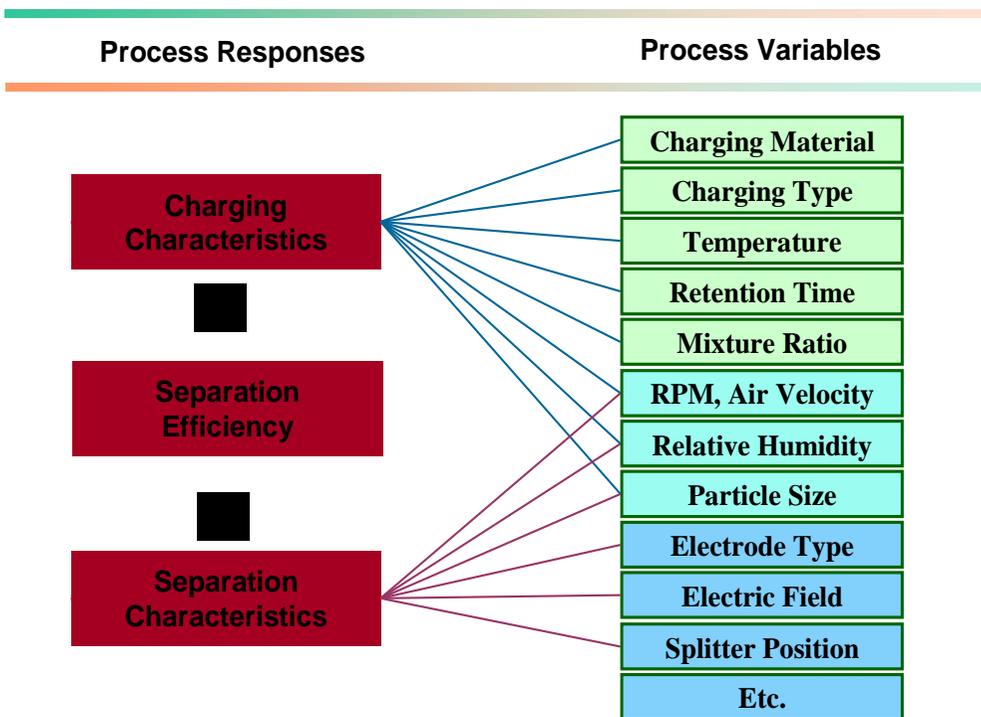


Fig. 16 Factors effecting on charging characteristics and separation efficiency on triboelectrostatic separation.

제 3 장 시료 및 실험방법

제 1 절 시료 및 실험장치

1. 시료의 특성

본 연구에 사용한 시료는 충남 당진의 (주) 그린폴리텍에서 입수한 자동차, 전기·전자제품의 scrap로써, 재질분리가 이루어지지 않아 야적 방치되거나 소각 및 매립 처리되고 있는 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱이다. ABS와 PBT 함량 분석결과 무게비로 각각 98%와 2%로 구성되어 있음을 확인하였다. Fig. 17은 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱을 나타낸 것이다. 또한 일함수 값 도출 및 대전서열 정립을 위하여 사용된 시료는 석유화학 공장에서 제조된 pellet 형태의 원료물질로서, 첨가제와 불순물이 최소로 함유된 순수한 플라스틱을 사용하였다.

ABS와 PBT는 각각 6대 범용 플라스틱과 5대 엔지니어링 플라스틱의 하나로, ABS의 경우 내충격강도, 인장강도, 강성, 내열성, 전기적 성질, 내유성, 내약품성, 내오염성 등이 우수하며, PBT의 경우 내열성, 내약품성, 전기적 특성이 우수할 뿐만 아니라 기계적 성질 및 치수 안전성 등이 뛰어나다. 이러한 특성으로 인하여 자동차 및 전기·전자 제품을 중심으로 사용량이 증가하고 있다.



raw sample



ABS(98%)



PBT(2%)

Fig. 17 ABS & PBT mixing waste plastic used in this study.

2. 실험장치

본 연구에서는 플라스틱의 재질분리에 적합한 마찰하전형 정전선별 장치를 직접 설계, 제작하여 ABS와 PBT 혼합 페플라스틱의 재질분리 연구를 수행하였다. Fig. 18은 본 연구기간에 개발된 bench scale 마찰하전형 정전선별 장치의 나타낸 것으로서, 본체 상단에는 사이클론 하전장치가 설치되어 있고 상단아래 pipe line 하전장치가 설치되어 시료와 실험여건에 따라 하전장치를 교체할 수 있도록 고안되었다. 본체 중앙 하단에는 전극이 그리고 전극 위쪽에는 급광된 시료를 일정한 위치로 전극 내에 들어갈 수 있도록 시료의 유도장치가 있다. 선별장치 본체 앞에는 깔때기 모양의 시료 급광장치가 있고, 급광장치 아래는 공기를 불어넣을 수 있는관이 있어 이 관을 통해 시료가 전기장까지 도달할 수 있게 되는 것이다. 선별장치를 지지하는 frame에 25,000voltage까지 올릴 수 있는 positive(+)와 negative(-) power supply가 설치되어있다.

Fig. 19는 bench scale 마찰하전형 정전선별 장치의 각 단위별 기능을 나타낸 것이다. Fig. 19의 (a)에 나타낸 시료의 급광장치는 작지만 공기의 흐름에 의해 연속적으로 일정하게 급광되도록 고안되어 있다. 플라스틱 시료의 막힘 현상을 방지하기 위해 공기와 만나는 지점을 특수하게 설계하였으며, Fig. 19의 (b)에 나타낸 공기발생 장치인 compressor는 공기 중 수분함량이 하전 및 선별효율에 영향을 미치기 때문에 공기 중 수분을 제거할 수 있는 기능을 갖추도록 하였다. 선별장치 본체 상단에 설치된 cyclone 하전장치는 pipe line과 연결되어 pipe line에서 하전된 입자가 cyclone에서 재차 하전되어 하전량이 배가되도록 하였다.(Fig. 19의 c) 그리고 Fig. 19의 (d)에 나타낸 전극은 선별효율을 높이기 위해 구배력이 큰 스크린 타입의 구리재질을 사용하였으며, 하전된 입자가 전기의 힘에 의해 이끌려 전극에 부딪힌 다음 반대 전극의 collect bin으로 이동하는 것을 방지하기 위해 완충기능을 부여할 수 있는 재질을 전극 외부에 설치하였다. 또한 전극 아래에 splitter를 설치하여 각각의 전극으로 편향된 입자들이 각각의 회수대(Fig. 19의 e)로 이동할 수 있도록 하였다. Fig. 19의 (f)는 앞서 언급한 power supply를 나타낸 것이다.



Fig. 18 Bench scale triboelectrostatic separator used in this study.



(a) feeder



(b) air compressor



(c) charger



(d) electrode



(e) collection bin



(f) power supply

Fig. 19 Part details of bench scale triboelectrostatic separator.

제 2 절 실험방법

1. 마찰하전 특성 연구

Fig. 20의 (a)와 (b)는 플라스틱의 대전서열 및 하전특성 연구를 위해 제작한 수직왕복형 하전장치와 재질별 하전통(PTFE, PVC, Rubber, SS, Cu, PET, PMMA, Al, PU, Nylon etc.)을 나타낸 것이다. 수직 왕복형 하전장치의 경우 하단부의 모터를 통한 회전운동을 cam 축에 의해 상하 왕복운동으로 변환시켜, 상단의 하전통에 투입된 플라스틱 입자를 하전시키도록 고안하였다.

Fig. 21은 하전특성 연구를 위한 실험방법을 나타낸 것으로, 입도 조절된 시료를 다양한 하전통에 투입하고 수직왕복형 하전장치로 마찰·충돌 시킨 후 Fig. 20의 (c)에 나타낸 Faraday cage를 이용하여 하전극성 및 하전량을 측정하였다. 시료제조는 Fig. 22에 나타낸 cutting mill(독일 FRITSCH GmbH사의 pulverisette 19)과 1mm screen을 이용하여 -6/+1mm로 조절하였다.

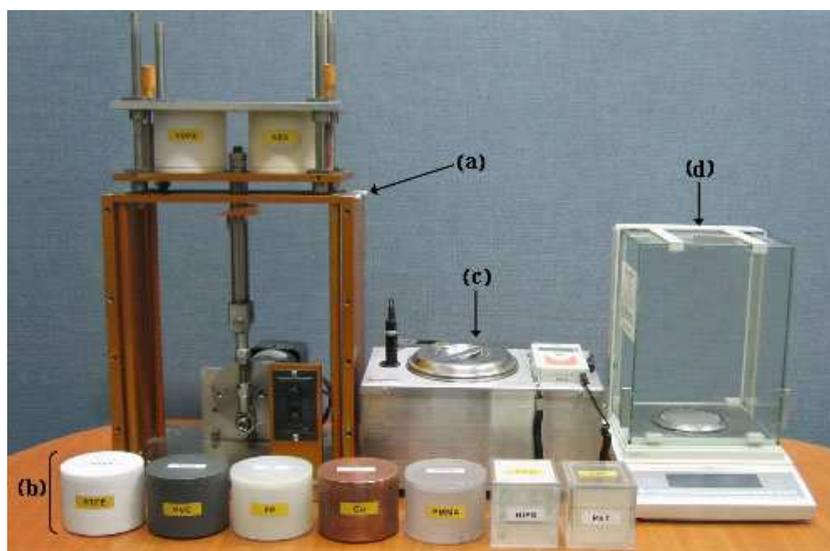


Fig. 20 A vertical-reciprocation charger set and peripheral measurement.
(a-vertical reciprocation charger, b-charging bottles, c-Faraday cage, d-electric balance)

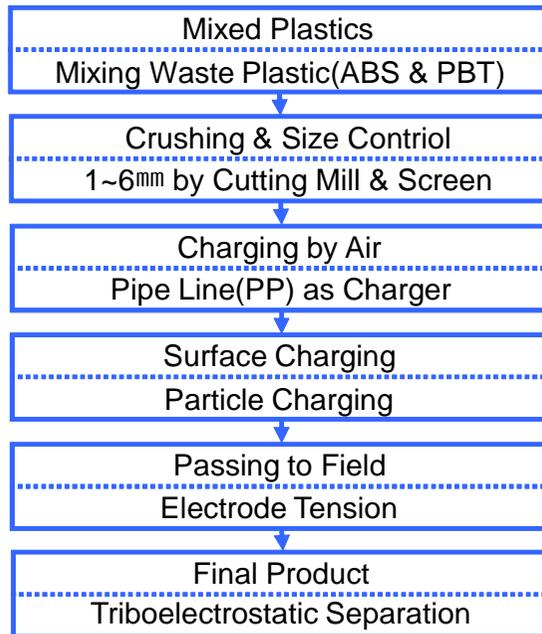


Fig. 21 Flowchart of tribo-charging test by vertical motion charger.

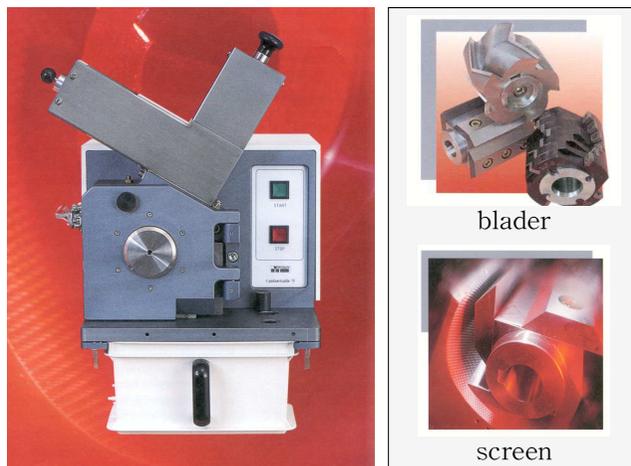


Fig. 22 Cutting mill for size reduction of plastic.

본 연구에서는 문헌 조사를 통해 얻은 몇 가지 금속 하전 물질들 및 플라스틱의 일함수 값과의 관계를 프로그램상의 선형회귀를 통해 ABS와 PBT의 일함수 값을 도출하였다. 또한 하전특성 연구로서 입자와 입자, 입자와 하전장치 표면의 상대적 하전량을 비교하였으며, 하전량과 하전극성에 영향을 미치는 체류시간, RPM, 상대 습도 등에 대한 조건변화 실험을 수행하였다.

플라스틱 재질분리를 위한 하전량 극대화의 관점에서 수직왕복형 하전장치는 유동층의 하전 시스템에 비해 하전효율이 떨어진다. Fig. 15의 수직왕복형 하전장치는 플라스틱의 일함수 값과 대전서열 그리고 하전 입자들에 대한 각 플라스틱 재질별 상대적 하전극성과 하전량을 구현하고, ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 재질분리를 위한 하전물질 선정과 선별예측을 위한 기초 자료를 확보할 목적으로 고안되었다. 따라서 수직왕복형 하전장치에서 대상 플라스틱의 하전극성과 하전량을 조사한 후, 유동층의 연속처리 하전장치인 마찰하전 정전선별 시스템에 적용한다면 높은 하전효율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 재질분리 연구

Fig. 23은 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 재질분리를 위한 마찰하전형 정전선별 공정도를 나타낸 것으로, 시료를 Fig. 22의 cutting mill에 의해 파쇄한 후, 체(1mm)가름에 의해 목적인 크기(-6/+1mm)로 입도조절 하였다. 입도 조절된 시료를 PP 재질의 하전장치를 적용한 마찰하전형 정전선별 장치의 급광부로 일정량씩 투입하였다. 시료의 급광 전에 일정한 양의 공기가 급광부 아래에 위치한 pipe로 주입되어 선별이 이루어지는 전기장 내로 이동시키게 된다. 이때 시료의 표면하전은 급광된 시료가 공기에 의해 pipe line을 통과하면서 입자간의 충돌과 pipe에 rubbing 되면서 이루어지게 되며, pipe의 수직 부분에서 이동방향이 바뀌며 강하게 충돌하여 하전량이 증가하게 된다. 이렇게 하전이 이루어진 입자들이 고전압이 흐르는 전기장 내를 통과하게 되면, 일함수 값이 작아 positive로 하전된 ABS는 negative 전극 쪽으로 이동하게 되고, 반대로 일함수 값이 커 negative로 하전된 PBT는 positive 전극 쪽으로 이동되어 분리가 이루어지게 되는 것이다.

본 연구에서는 전극의 전압세기, 분리대의 위치, 공기의 세기, 습도 등의 실험조건을 변화하면서 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 최적 선별조건 및 분리효율을 확인하였다.

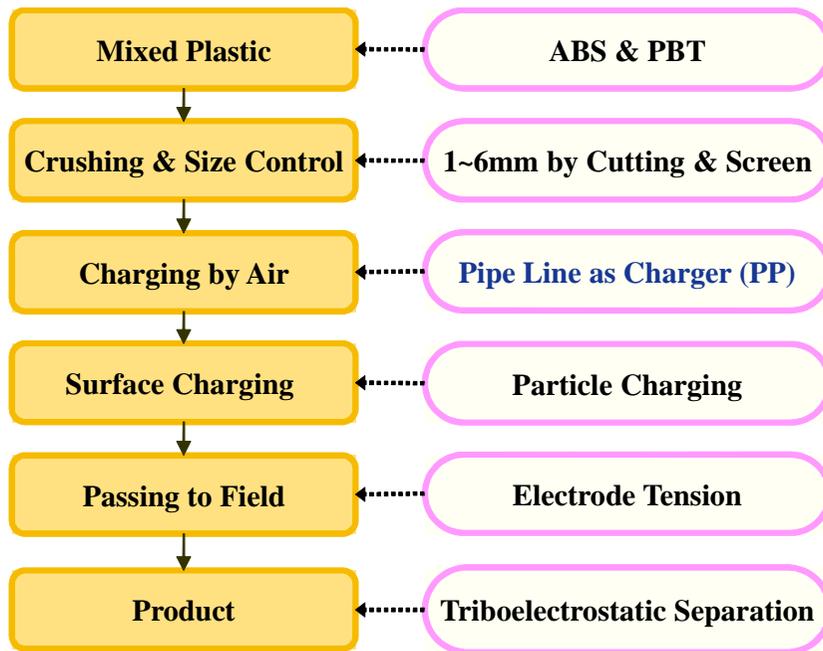


Fig. 23 Flowchart of material separation test by triboelectrostatic separator.

제 4 장 실험결과 및 고찰

제 1 절 마찰하전 특성 연구

1. Work function 값 도출

일함수(work function)는 페르미레벨(전자를 발견할 가능성이 0.5인 준위)로부터 전자를 제거하는데 필요한 최소한의 에너지라고 정의되며, 입자의 하전정도는 입자간 혹은 접촉표면의 일함수 값에 의해 지배를 받는다. 플라스틱과 같은 고분자성 입자들의 일함수 값은 각 물질마다 다르고 물질의 표면상태, 오염수준, 첨가제 등의 영향으로 직접적 방법에 의한 측정이 힘들다고 보고되고 있다. 따라서 많은 연구자들은 금속의 일함수가 플라스틱의 하전량에 영향을 미친다고 가정하고 금속의 일함수와 절연물의 전하량 관계를 이용하여 절연물질의 일함수 값을 도출하였다.

본 연구에서는 ABS와 PBT의 일함수 값을 도출하기 위하여, 시료를 금속재질의 하전통(Cu, Al, SS)과 PTFE 하전통에 투입하여 수직왕복형 하전장치로 마찰하전시킨 후, 일함수 값 차에 의해 서로 다른 극으로 분극된 시료를 Faraday cage를 이용하여 하전량을 측정하였다. 본 연구에 사용된 금속 하전물질들의 일함수 값은 Michaelson과 Inculet가 구한 값으로 Al, Cu 그리고 SS가 각각 4.28(eV), 4.65(eV) 그리고 4.69(eV) 이었으며, 일함수 값이 가장 큰 PTFE는 5.75(eV)였다.^{34,35)}

플라스틱의 일함수 값은 Fig. 24에서와 같이 알려진 물질의 일함수 값과, 이들과 마찰대전을 통해 얻어진 하전량과의 관계를 선형회귀 식으로 구하여 도출할 수 있다. Fig. 25는 알려진 물질의 일함수 값과, 이들과 마찰대전을 통해 얻어진 ABS와 PBT 하전량과의 관계를 직선의 관계로 도시하고 프로그램(SPSS INC.)상의 선형회귀를 통해 얻어진 1차식의 X 절편을 구하여 도출한 것이다. 실험변수인 상대습도와 온도를 각각 30%와 25℃로 유지하고 하전장치내의 체류시간, 하전장치의 RPM 그리고 시료무게를 각각 3min., 250rpm 그리고 10g로 고정시켰으며, 이때 ABS와 PBT의 일함수 값은 4.08(eV)와 5.19(eV)였다.

Table 3은 다양한 플라스틱의 일함수 값과 본 연구에서 규명된 ABS와 PBT의 일함수 값을 나타낸 것이다. Table 3에서 일함수 값이 가장 높은 재질은 H-PVC (5.32eV)이고 가장 낮은 재질은 PMMA(3.72eV)임을 알 수 있다. 플라스틱 재질간

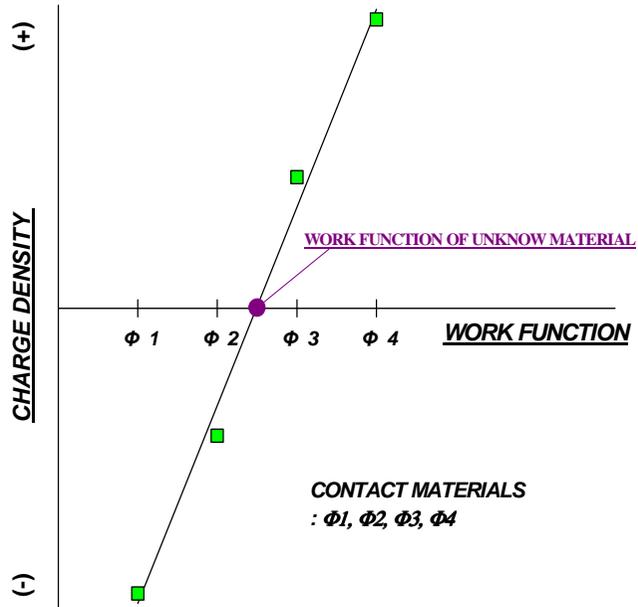


Fig. 24 Deriving method of work function.

Table. 3 Work function of plastics.

Plastics	Work Function(eV)
Hard-PVC	5.32
PBT	5.19
CO-PP	5.04
HDPE	4.77
PET	4.42
HIPS	4.31
ABS	4.08
PMMA	3.72

의 일함수 값 차가 크면 클수록 서로 반대극성의 하전량이 높을 것이며, 일함수 값 차가 작을수록 반대극성의 하전량이 낮아질 것이다. 또한 분리하고자 하는 대상물질들 사이의 일함수 값을 가지는 하전물질을 선택하면 분리효율을 높일 수 있을 것이다. 이와 같이 산정된 플라스틱의 일함수 값은 하전극성과 하전량 및 분리효율을 예측할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 하전물질 선정 실험

본 연구에서는 ABS와 PBT 혼합 페플라스틱의 재질분리를 위하여, 시료를 각각 반대 극성으로 하전시킬 수 있는 하전물질을 선정하기 위한 하전특성 실험을 수행하였다. 서로 다른 일함수 값과 대전서열을 가진 하전통(PTFE, PVC, PP, HDPE, HIPS, PET, RUBBER, PMMA, PU, POM, NYLON)에 ABS와 PBT를 각각 단일 상태로 투입하고 수직왕복형 하전장치로 하전시킨 후, 각 플라스틱의 하전극성과 하전량을 Faraday cage를 이용하여 측정하였다. 실험변수인 상대습도와 온도를 각각 30%와 25℃로, 회전속도와 체류시간을 각각 250rpm과 2분으로 하여 실험을 수행하였다.

Fig. 26은 실험결과를 나타낸 것으로, ABS와 PBT의 경우 일함수 값이 PTFE와 PVC 보다 낮아 모두 positive로, PMMA, PU, POM 그리고 NYLON 보다는 높아 모두 negative로 하전이 이루어지지만, PP, HDPE, HIPS 그리고 Rubber는 ABS와 PBT 사이에 일함수 값이 위치하여 각 물질들을 반대 극성으로 하전시킬 수 있음을 알 수 있다.

ABS와 PBT를 서로 반대 극성으로 하전시킬 수 있는 PP, HDPE, HIPS 그리고 Rubber 중, PP는 ABS의 하전량이 높고 나머지 재질은 PBT의 하전량이 높은 것을 알 수 있다. 앞서 언급하였듯이 본 연구에 사용된 ABS와 PBT의 구성비는 각각 98%와 2% 이다. 따라서 하전장치와의 충돌·마찰이 PBT 보다는 ABS가 잦을 것이며, PP를 제외한 재질의 장치제작 한계로 인하여 PP를 하전물질로 선정하게 되었다. 이때 ABS는 PP 보다 일함수 값이 작아 positive로, PBT는 일함수 값이 커 negative로 하전되어 재질분리가 이루어진다.

3. 체류시간과 단일·혼합시료에 따른 하전량

Fig. 27은 시료의 하전량에 대한 하전통 내에서 입자의 체류시간과 입자와 입자간, 입자와 하전장치간의 마찰하전 특성을 조사한 것으로, PP 재질의 하전통 내에 ABS와 PBT를 각각 단일 상태와 98:2의 혼합 상태로 투입시킨 후, 수직왕복형 하전장치를 이용하여 체류시간을 변화하며 투입된 시료의 하전량을 측정하였다. 실험 변수인 온도와 상대습도를 각각 25℃와 30% 그리고 rpm을 250으로 고정시킨 후 실험을 수행하였으며, 실험결과 체류시간 4분까지는 단일시료와 혼합시료 모두 하전량이 증가되는 것을 알 수 있지만, 이보다 하전시간이 길어지면 하전량의 변화가 거의 없어 임계 하전시간에 도달됨을 알 수 있다.

입자와 입자간 그리고 입자와 하전장치간의 마찰하전 특성은 PBT의 경우 혼합시료와 단일시료의 하전량이 하전시간 2분을 기준으로 각각 33.7nC/g과 23.8nC/g을 나타내어, 혼합시료가 단일시료 보다 9.9nC/g 높을 것을 알 수 있다. 그리고 ABS의 경우도 혼합시료의 하전량이 -22.5nC/g으로 단일시료의 하전량 -16.8nC/g보다 5.7nC/g 높게 나타나, 혼합시료가 단일시료 보다 하전량이 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 혼합시료가 단일시료 보다 하전량이 높게 나타나는 것은, 혼합시료의 경우 하전장치와의 마찰 및 충돌이 이루어지면서 두 시료간의 마찰 및 충돌도 함께 이루어져 하전효율이 증가하기 때문이다.

4. 회전속도에 따른 하전량

Fig. 28은 외부에너지(수직왕복형 하전장치의 회전속도)가 시료의 하전량에 미치는 영향을 관찰한 것이다. PP 재질의 하전통에 ABS와 PBT를 각각 투입하고, 실험변수인 상대습도와 온도 그리고 체류시간을 30%와 25℃ 그리고 2분으로 하여, 하전장치의 회전속도를 50rpm에서 본 장치의 최대 속도인 250rpm까지 변화하며 하전량을 측정하였다.

실험결과, 하전장치의 회전속도가 빨라질수록 ABS와 PBT의 하전량이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 하전장치의 회전속도가 가장 느린 50rpm에서는 ABS와 PBT의 하전량이 각각 -0.6nC/g과 1.6nC/g이지만, 가장 빠른 250rpm에서는 각각 -16.6nC/g과 23.0nC/g으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기계적 운동에 의한 외부에너지가 증가되어 하전통 내벽과 입자의 충돌 횟수와 강도를 증가시켰기 때문이다.

본 장치의 최대 회전속도는 250rpm으로, 이상의 회전속도에서는 실험이 이루어지지 못했으며, 회전속도란 수직왕복형 하전장치 상단 왕복판의 왕복횟수를 의미하며, 하전장치 회전판의 1 cycle은 왕복판의 왕복횟수 1회와 같다.

5. 상대습도에 따른 하전량

Fig. 29는 입자의 하전량에 영향을 미치는 상대습도를 관찰하기 위하여 20%에서 70%까지 변화하며 실험한 결과이다. PP 재질의 하전통에 ABS와 PBT를 각각 투입한 후, 실험변수인 온도와 체류시간 그리고 rpm을 25℃와 2분 그리고 250으로 고정하고 하전량을 측정하였다.

Fig. 29에서 보는 바와 같이 상대습도 40%까지는 하전량에 큰 영향을 미치지 않지만, 이 보다 상대습도가 높아지면 시료의 하전량이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 상대습도가 가장 낮은 20%에서는 ABS와 PBT의 하전량이 각각 -16.9nC/g 과 23.2C/g 이며, 40%에서는 각각 -15.8nC/g 과 21.6nC/g 으로 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 상대습도가 40%를 초과하면 하전량이 크게 감소하여 가장 높은 70%에서는 각각 -0.8nC/g 과 1.7nC/g 이다. 이와 같이 상대습도가 하전량에 영향을 미치는 이유는 상대습도가 높을수록 공기 중의 수분이 마찰하전 시 입자간의 표면분극을 방해하고, 하전된 입자의 전하를 방전시키기 때문이다.³⁶⁾ 따라서 마찰하전형 정선선별의 경우 높은 선별효율을 얻기 위해서는 상대습도를 40% 이하로 유지해야함을 알 수 있다.

제 2 절 재질분리 연구

1. 전압세기의 영향

Fig. 30은 공기속도 10.28m/s, 분리대의 위치 전기장의 중앙(0cm) 그리고 상대습도 30%에서 전극의 전압세기를 5kV에서 25kV까지 변화하며, ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 선별에 미치는 영향을 관찰한 것이다. 실험결과 전압세기가 증가하면 PBT 제거율과 ABS 회수율 모두 증가되는 것을 알 수 있다. 즉, 전압세기가 가장

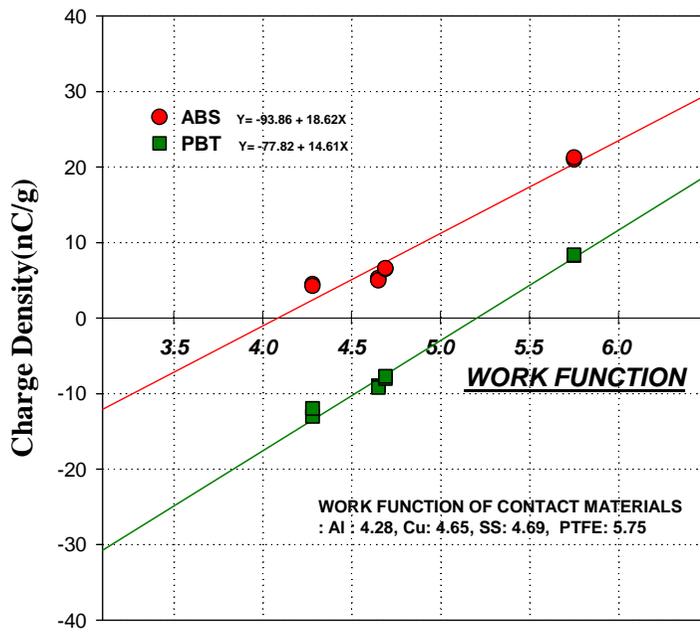


Fig. 25 Work Function of ABS & PBT used in this study.

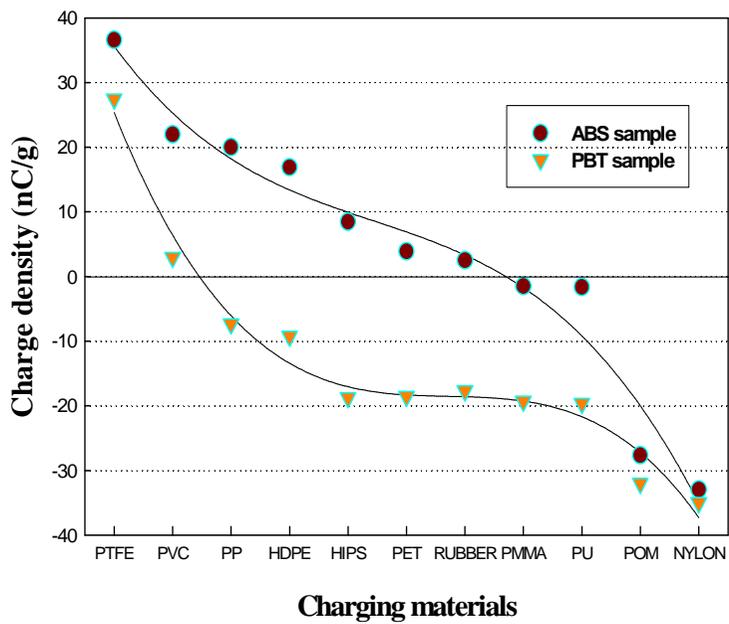


Fig. 26 Charging property of ABS and PBT as charging materials.

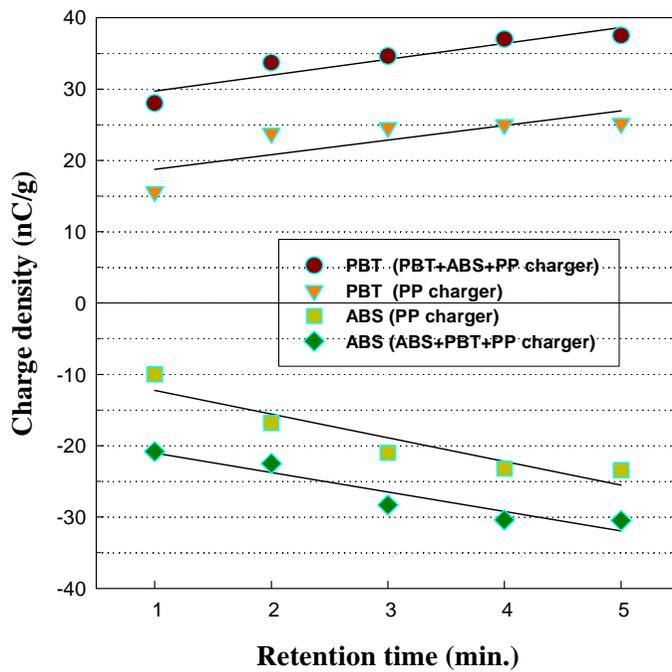


Fig. 27 The effect of retention time on charge density of single and mixed plastics.

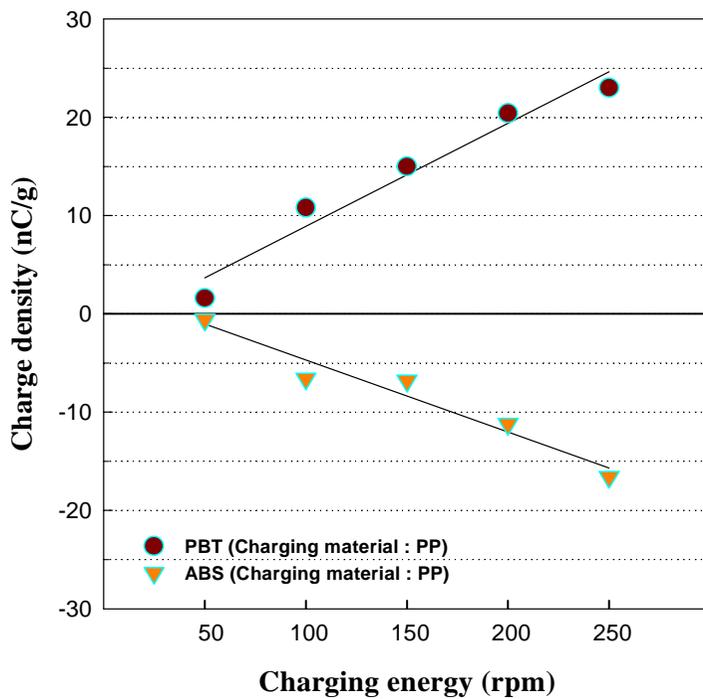


Fig. 28 The effect of rpm on charge density of ABS & PBT.

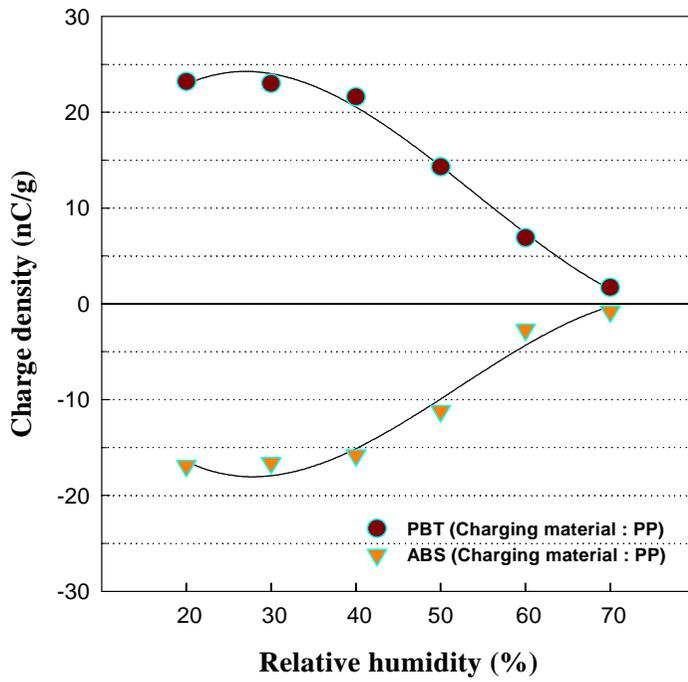


Fig. 29 The effect of relative humidity on charge density of ABS & PBT.

낮은 5kV에서 PBT 제거율과 ABS 회수율이 각각 95.0%와 76.5%로 가장 낮지만, 전압세기가 커질수록 증가하여 본 연구에 사용된 power supply의 최대 전압인 25 kV에서는 각각 100%와 92.5%로 가장 높다.

이와 같이 전극의 전압세기가 선별효율에 영향을 미치는 이유는, 전압세기가 커지면서 매우 약하게 하전된 플라스틱 입자들을 전기적으로 끌어당길 수 있는 에너지가 증가하였기 때문이다. 앞에서 언급하였듯이 ABS와 PBT의 하전량이 nC/g 단위로 매우 낮아 이를 분리하기 위해서는 높은 전기 에너지가 필요하기 때문이다.

2. 공기속도의 영향

Fig. 31은 마찰하전형 정전선별에서 시료를 전기장으로 이송하고 마찰하전을 일으키는 공기속도가 선별효율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 공기속도를 4.15m/s에서 12.45m/s까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험변수인 전압세기 25kV, 상대습도 30% 그리고 분리대의 위치 전기장의 중앙(0cm)에서 공기의 속도 변화가 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 재질분리에 미치는 영향을 확인하였다. 실험결과 공기의 속도 변화에 따라 PBT의 제거율과 ABS의 회수율이 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 공기의 속도가 가장 느린 4.15m/s에서 PBT 제거율과 ABS 회수율이 각각 90.5%와 79.0%로 낮지만, 공기속도가 증가할수록 선별효율이 증가하여 공기속도 10.28m/s에서는 각각 100%와 92.5%로 가장 높다. 그러나 이보다 공기의 속도가 빨라지면 오히려 선별효율이 감소되어, 공기속도 12.45m/s에서 PBT 제거율과 ABS 회수율이 각각 95.0%와 90.5%인 것을 알 수 있다.

이와 같이 공기의 속도 10.28m/s를 기준으로 이보다 낮을 경우 선별효율이 감소하는 이유는, 하전에 필요한 마찰 및 충돌에너지가 부족하기 때문에 입자의 하전량이 낮아 전기장 내에서 효과적으로 분리되지 못했기 때문이다. 그리고 이보다 공기의 속도가 빨라지면 강한 마찰 및 충돌에너지에 의해 입자의 하전은 잘 이루어지나, 전기장 내를 통과하는 입자의 속도가 빨라지기 때문에 선별효율이 감소하는 것이다. 즉, 하전된 입자들을 각각의 전극에서 전기적으로 끌어당기는 에너지보다 유속에 의해 전기장을 통과하는 에너지가 크기 때문이다.

3. 분리대 위치의 영향

일반적으로 시료의 하전량은 입자의 work function 값, 공기속도, 입자크기, 상대습도 그리고 온도 등과 같은 인자들의 영향을 받는다. 이들에 의해 하전된 입자들은 각각의 하전량이 다르기 때문에, 전기장 내에서 분리될 때 전극으로 이동되는 속도와 거리가 다르다. 따라서 전기장 하단에 위치한 분리대의 위치를 이동시켜 선별에 적합한 조건을 얻을 수 있다.

Fig. 32는 분리대의 위치가 선별효율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 전극세기 25kV, 공기세기 1028m/s 그리고 상대습도를 30%로 고정하고, 분리대의 위치를 negative와 positive 전극으로 각각 9cm까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험결과 분리대의 위치가 전기장의 중앙(0cm)에서 negative 전극으로 갈수록 PBT의 제거율은 증가하나 ABS 회수율은 감소하는 것을 알 수 있고, 반대로 분리대의 위치가 positive 전극으로 이동할수록 ABS의 회수율은 증가하나 PBT 제거율이 감소하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 분리대의 위치는 PBT 제거율과 ABS 회수율을 고려할 때 전기장의 중앙(0cm)이 가장 효과적이었으며, 이때 각각 100%와 92.5%인 결과를 얻었다.

이와 같은 이유는 입자 각각의 하전량에 차이가 있어, 분리대의 위치에 따라 ABS와 PBT의 회수 량이 달라지기 때문이다. 즉, 분리대의 위치가 negative 전극으로 이동할수록 positive로 하전된 ABS의 회수 존이 좁아지고 negative로 하전된 PBT의 회수 존이 넓어져 PBT 제거율은 증가하나, 하전효율이 낮은 ABS가 PBT 회수 존으로 이동할 수 있어 ABS 회수율은 감소하는 것이다. 반대로 분리대의 위치가 positive로 이동할수록 PBT의 회수 존이 좁아져 하전효율이 높은 PBT만 회수되기 때문에 PBT 제거율은 감소하나, ABS의 회수 존이 넓어져 ABS 회수율은 증가하는 것이다.

4. 상대습도의 영향

Fig. 33은 실험실의 상대습도가 선별효율에 미치는 영향을 관찰한 것으로 전압의 세기 25kV, 공기속도 10.28m/s 그리고 분리대의 위치 전기장의 중앙(0cm)에서, 실험실의 상대습도를 가습기와 제습기로 20%에서 70%까지 변화하며 ABS와 PBT의 분리특성을 확인하였다. 실험결과 상대습도 40%까지는 PBT 제거율과 ABS 회수

율에 큰 영향을 미치지 않지만, 이보다 상대습도가 증가하면 감소되어 선별효율을 크게 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉, 상대습도가 가장 낮은 20%일 때 PBT 제거율과 ABS 회수율이 각각 100%와 93.0%로 가장 높지만, 상대습도 40%에서도 각각 100%와 92.0%로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 상대습도가 이보다 증가하면 선별효율이 크게 낮아져, 상대습도 70%에서는 각각 67.5%와 55.5%까지 감소되어, 높은 선별효율을 위해서는 상대습도가 40% 이하로 유지되어야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 상대습도 30%를 최적실험 조건으로 분리실험을 수행하였으며, 이때 PBT 제거율과 ABS 회수율이 각각 100%와 92.5%인 결과를 얻었다.

이와 같이 상대습도가 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 재질분리에 영향을 미치는 이유는, 상대습도가 높을수록 공기 중의 수분이 마찰하전 시 입자간의 표면분극을 방해하고, 하전된 입자의 전하를 방전시키기 때문이다.³⁶⁾

5. PBT 제거율과 ABS 회수율의 관계

Fig. 34는 본 연구의 최적실험 조건인 전극세기 25kV, 공기세기 10.28m/s, 분리대의 위치 전기장의 중앙(0cm) 그리고 상대습도 30%에서 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱 재질분리의 재현성을 확인하기 위하여 반복 실험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 34에서 보는 바와 같이 일정한 실험결과를 얻을 수 있어, 재현율이 높은 것을 알 수 있다.

전극세기, 공기세기, 상대습도 등은 최적 조건이 정해져 있으므로, 목적에 부합하는 산물을 얻기 위해 분리대의 위치를 조정할 수 있다. Fig. 35는 최적실험 조건에서 분리대의 위치를 조정하며 얻은 결과를 PBT 제거율과 ABS 회수율과의 관계로 나타낸 것이다. 그래프에서 보는바와 같이 PBT 제거율의 경우 ABS 회수율 92.5%까지는 100%의 결과를 보인다. 그러나 ABS 회수율이 이보다 높아지면 PBT의 제거율이 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉, ABS 회수율이 95.4%일 때 PBT 제거율이 90.5%, 99.0%일 때 61.0%를 나타낸다.

Fig. 36은 본 연구의 최적조건에서 ABS와 PBT 혼합 폐플라스틱의 재질분리 산물을 나타낸 것이다. 최적조건은 위에 언급하였으며, 이때 본 연구의 회수 산물인 ABS를 negative 전극 회수대에서 100% PBT 제거율로 92.5% 회수하였다.

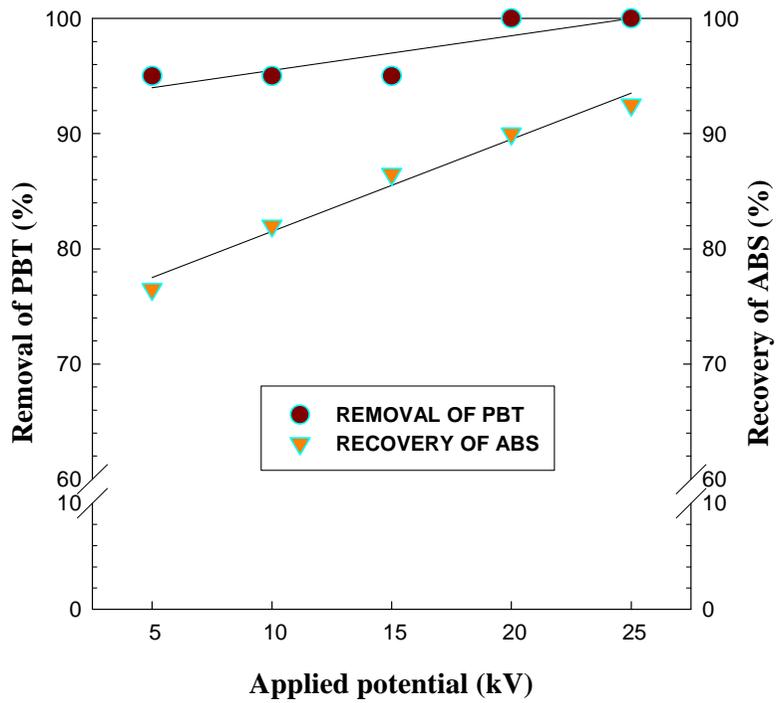


Fig. 30 The effect of applied potential on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.

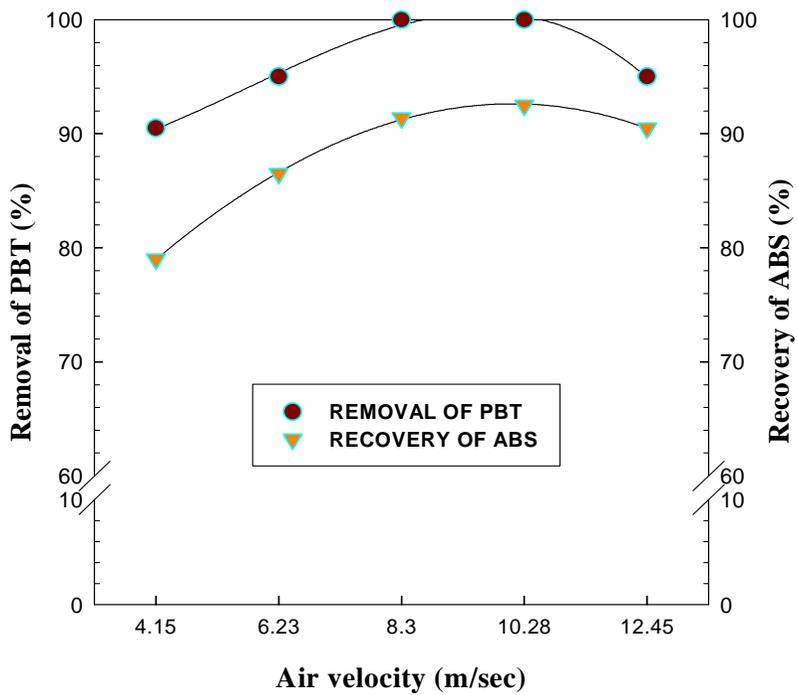


Fig. 31 The effect of air velocity on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.

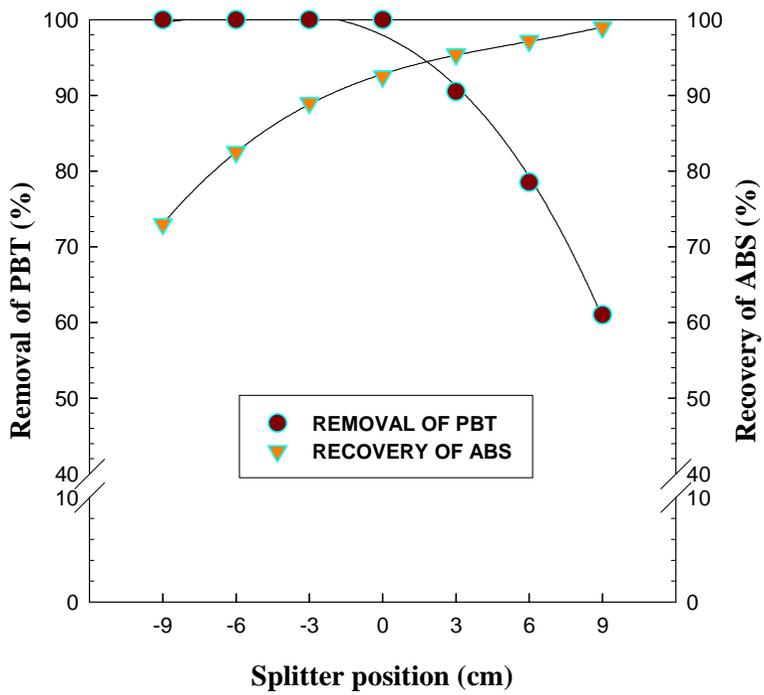


Fig. 32 The effect of splitter position on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.

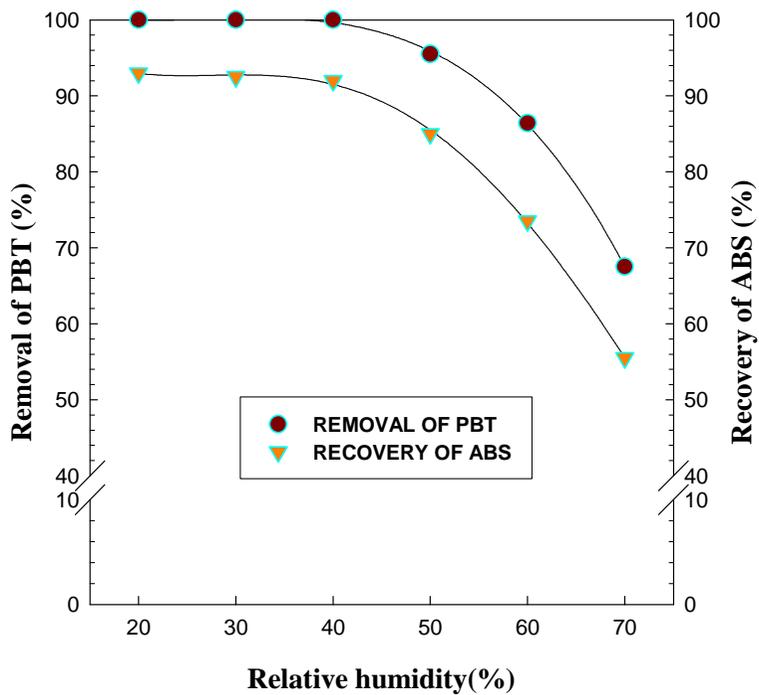


Fig. 33 The effect of relative humidity on PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.

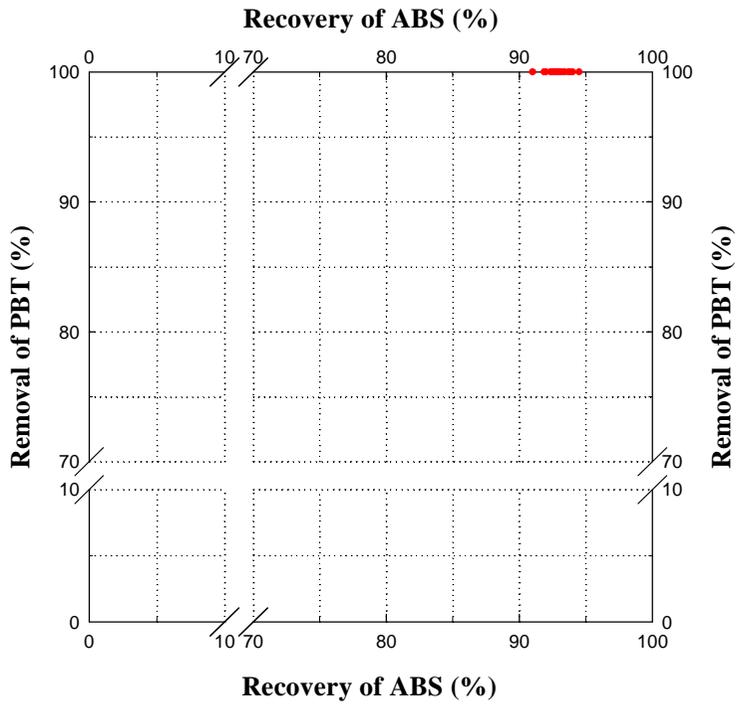


Fig. 34 Result of repeat tests on optimum conditions of triboelectrostatic separation.

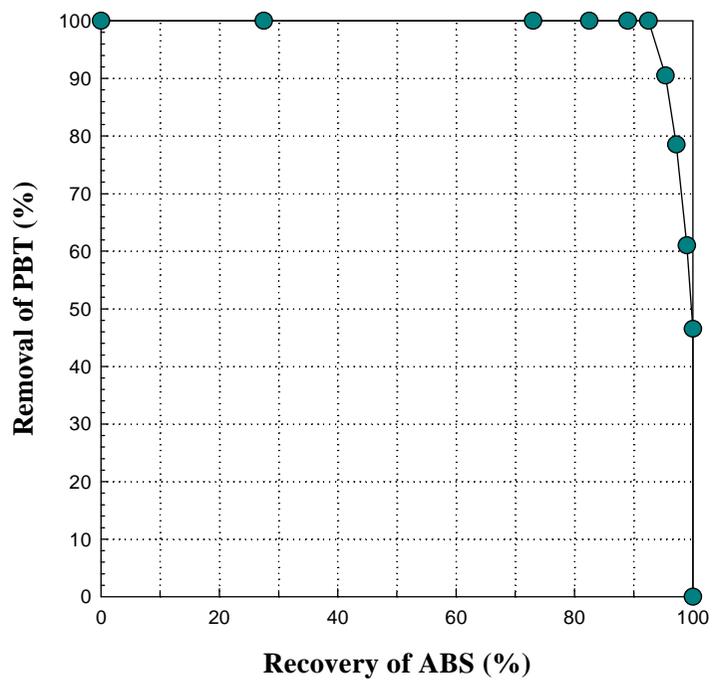


Fig. 35 Relation of PBT removal and ABS recovery in triboelectrostatic separation.

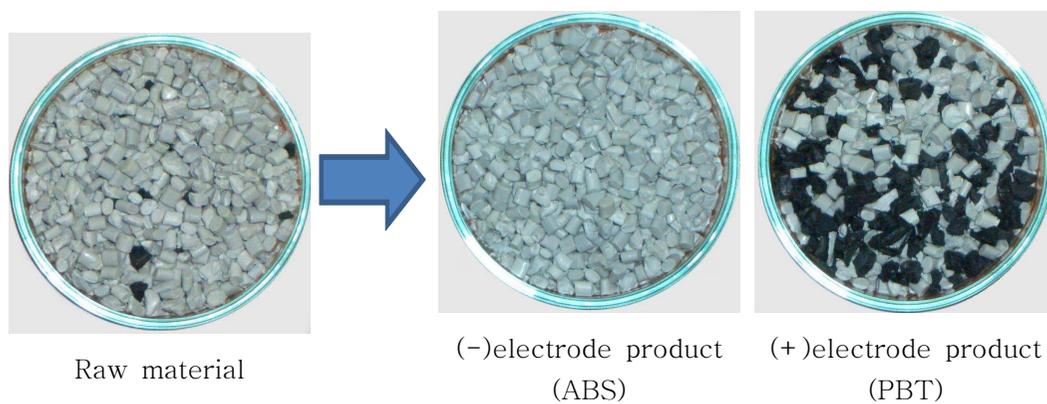


Fig. 36 Photo of ABS and PBT plastics separated by triboelectrostatic separation.

제 5 장 결론

본 연구에서는 마찰하전형 정전선별법을 적용하여, 자동차 및 전기·전자제품의 scrap인 ABS와 PBT 혼합 페플라스틱의 재질분리에 적합한 하전물질 개발(PP pipe line) 및 기초 데이터를 확보하고, 하전효율 및 분리효율을 극대화할 수 있는 최적 선별조건을 규명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al(4.28eV), Cu(4.65eV), SS(4.69eV) 그리고 PTFE(5.75eV)의 일함수 값과, 이들과 마찰대전을 통해 얻어진 ABS와 PBT 하전량과의 관계를 직선의 관계로 도시하고 프로그램(SPSS INC.)상의 1차 선형회귀식(linear regression)을 이용하여, 본 연구에 사용된 ABS와 PBT의 일함수 값을 도출하였으며, 각각 4.08eV와 5.19eV인 결과를 얻었다.
2. ABS와 PBT 혼합 페플라스틱의 효율적인 하전 및 선별을 위한 하전물질 선정 실험 결과, PP, HDPE, HIPS 그리고 Rubber가 ABS와 PBT 사이에 일함수 값이 위치하여 각 물질들을 반대 극성으로 하전시킬 수 있음을 확인하였으며, 시료의 구성비(ABS:PBT=98:2)와 장치제작의 용이함을 이유로 PP를 하전물질로 선정하였다.
3. 입자의 체류시간과 단일시료와 혼합시료의 하전량 차이를 관찰하기 위한 실험결과, 하전통 내에서 체류시간 4분까지는 하전량이 증가하지만, 이보다 길어지면 하전량의 변화가 거의 없어 임계 하전시간에 도달됨을 알 수 있었다. 그리고 혼합시료가 단일시료를 대상으로 측정된 하전량보다 높게 나타나, 입자와 입자간의 충돌 및 마찰에 의해 하전효율이 증가함을 확인하였다.
4. 외부에너지가 입자의 하전량에 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험결과, 하전장치의 회전속도가 증가할수록 외부에너지가 증가되어 하전통 내벽과 입자의 충돌 횟수와 강도를 증가시켜, 입자의 하전량을 증가시키는 것을 확인하였다.

5. 마찰하전 시 실험실의 상대습도가 하전효율에 미치는 영향을 관찰한 결과, 상대 습도 40%를 기준으로 이보다 낮으면 하전량에 큰 영향을 미치지 않지만, 이보다 높으면 입자의 하전량이 크게 감소되는 것을 알 수 있었다. 따라서 효과적인 재질분리를 위해서는 상대습도를 40% 이하로 조절해야 함을 알 수 있었다.
6. 하전된 입자를 반대의 전극으로 끌어당기는 전극의 전압세기 변화에 대한 실험 결과, 전압세기가 클수록 선별효율이 증가하였다. 따라서 본 연구에 사용된 power supply의 최대 전압인 25kV에서 가장 높은 선별효율을 얻을 수 있었다.
7. 공기의 속도 변화가 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험결과, 10.28m/s에서 가장 높은 선별효율을 나타내었다. 이는 공기속도가 하전효율과 입자의 낙하속도를 좌우하기 때문으로, 적절한 속도의 조정이 필요함을 규명하였다.
8. 입자의 하전효율에 따라 전기장 내에서 편향되는 거리가 달라지기 때문에, 최적 실험조건을 확립하기 위해서는 분리대의 위치를 조절해야 될 것이다. 본 연구의 최적 분리대의 위치는 PBT 제거율과 ABS 회수율을 고려할 때 전기장의 중앙(0 cm)임을 확인하였다.
9. 공기 중의 수분은 마찰하전 시 입자간의 표면분극을 방해하고 하전된 입자의 전하를 방전시키기 때문에, 상대습도는 본 선별법에서 중요한 인자 중의 하나이다. 실험결과 40% 이하에서는 선별효율에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였으며, 본 연구에서는 30%로 조절하여 분리실험을 수행하였다.
10. 최적실험 조건(전압의 세기:25kV, 공기의 속도:10.28m/s, 분리대의 위치:중앙, 상대습도:30%)에서 재질분리의 재현성을 확인하기 위하여 반복 실험을 수행한 결과, 일정한 결과를 얻어 재현율이 높은 것을 규명하였다. 이때 PBT 제거율과 ABS 회수율이 각각 100%와 92.5%인 평균 결과를 얻었다. 따라서 본 선별법을 통한 ABS와 PBT 혼합 페플라스틱의 재활용 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. Hoberg H., et al., Material Recycling of Thermoplastics, XX International Mineral Processing Congress, 1997, pp. 415-419.
2. 김혜태, 혼합 폐플라스틱 발생실태 및 재활용기술 현황에 관한 조사연구, 한국자원재생공사, 1996.
3. Dodbiba G., Shibayama A., Miyazaki T., Fujita T., Electrostatic Separation of The Shredded Plastic Mixtures Using a Tribo-Cyclone, Magnetics and Electrical Separation, 2001, Vol. 11, No. 1-2, pp. 63-92.
4. 민병일, 우리나라 혼합 폐플라스틱의 특성 및 처리 방향, 97 폐기물 관리체계 및 재활용 기술에 관한 국제 심포지엄, 1997, pp. 77-98.
5. 전호석, 박철현, 김병곤, 박재구, 생활계 폐플라스틱 재활용을 위한 정전선별 기술개발, 한국자원리사이클링학회지, 2006, Vol. 15, No. 1, pp. 38-36.
6. 전호석, 백상호, 박철현, 김병곤, 해초건조용 폐플라스틱 재활용을 위한 마찰하전형정전선별 기술개발, 한국지구시스템공학회, 2006, Vol 43, No. 6, pp.579-584
7. Ingo Stahl and Peter-M. Beier, Sorting of Plastics Using Electrostatic Separation Process, XX International Mineral Processing Congress, 1997, pp. 395-402.
8. 손영배, 폐플라스틱의 처리와 재활용, (주)일보코리아, 2001.
9. 윤여환, 미국에서의 플라스틱 폐기물 재활용 기술 동향, 자원순환형 사회 구축을 위한 국제 심포지엄, 자원재생공사, 산업폐기물재활용기술개발사업단, 2002, pp. 31-45.
10. 최형기, 혼합플라스틱 전처리 및 건식 분리 선별기술, 제2회재활용 국제 심포지움, 산업폐기물 재활용기술개발사업단, 2002, pp. 65-95.
11. Kelly, E. G., Spottiswood, D. J., The theory of electrostatic separations: A review part I . Fundamentals, Miner. Eng., 1989, Vol. 2, No. 1, pp. 33-46.
12. Lungu, M., Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect, Miner. Eng., 2004, Vol. 17, pp. 69-75.
13. Cross J., Electrostatic: Principles, Problems and Applications, Adam Hilger, Bristol, England, 1987, pp. 239-248

14. 전호석 등, 마찰하전형정전선별법에 의한 혼합 페플라스틱 재질별 분리기술 개발, 과학기술부, 2006.
15. Chang, J. S., Kelly, A. J., Handbook of Electrostatic Processes, Marcel Dekker, Inc. 1995.
16. Chubb, J. N., Measurements of Tribo and Corona Charging Features of Materials for Assessment of Risks from Static Electricity, IEEE-IAS Meeting, Phoenix, AZ., 1999.
17. Manouchehri, H. R., Review of Electrical Separation Methods, Mineral and Metallurgical Processing, 2000, Vol. 17, pp23-36.
18. Knoll, F. S., Lawver, J.E., Raylor, J .B., Electrostatic separation, In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1988, pp. 20.1-20.11.
19. Hughes, J. F., Electrostatic Particle Charging, Research Studies Press Ltd. 1997.
20. Moore, A. D., Electrostatics and it's Applications, John Willey & Sons, 1971.
21. Gaudin, A. M., The Principal of Electrical Processing with Particular Application to Electrostatic Separation, Minerals Sci. Engng, 1971, Vol. 13, pp. 46-57.
22. Inculet, I. I., Bergougnou, M. A., Brown, J. D., Electrostatic Beneficiation of Coal, Physical Cleaning of Coal, Y.A. Liu ed., Marcel Dekker INC, New York, 1982, pp. 87-131.
23. Lowell, J., Rose-Innes, A. C., Contact electrification. Advances In Physics, 1980, Vol. 29, pp. 947-1023.
24. Davies, D. K., Charge generation on solids, Adv. Stat. Electrification, 1970, Vol. 1, pp. 10-21.
25. Duke C. B., Fabish T. J., Contact electrification of polymers: A quantitative model, Journal of Applied Physics, 1978, Vol. 49, pp. 315-321.
26. Dodbiba G., Haruki N., Shibayama A., Miyazaki T., Fujita T., Combination of Sink-Float Separation and Flotation Technique for Purification of Shredded PET-Bottle from PE or PP Flakes, Int. J. Miner. Process. 65, 2002, pp. 11-29.

- 27 Diaz, A.F., Felix-Navarro, R.M., A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties, *J. Electrostat.*, 2004, Vol. 62, pp. 277-290.
28. Yanar D. K., Kwetkus B. A., Electrostatic Separation of Polymer Powders, *Journal of Electrostatics*, 1995, Vol. 35, pp. 257-266.
29. Higashiyama Y., Asano K., Recent Progress in Electrostatic Separation Technology, *Particulate Science and Technology*, 1998, Vol. 16, pp. 77-90.
30. Fujita, T., Kamiya Y., Shimizu N. and Tanaka T., Basic study of polymer particles separation using vibrating feeder and electrostatic high voltage generator, *The third International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, Nov., 1995, pp. 21-24.
31. Gajewski J. B., Charge Measurement of Dust Particles in Motion : Part II, *J. Electrostatics* 15, 1984, pp. 67-79.
32. John Doney et al, The Aerodynamic Behavior of Charged Particles in an Electrostatic Separator, *Proceeding of the 6th international symposium on gas-solid flows*, 1998.
- 33 Mukherjee, A., Characterization and Separation of Charged Particles, Ph.D.Dissertation, Illinois Institute of Technology, Dept. of Chemical Engineering, 1987.
34. Inculet, I. I., Castle, G. S. S., Brown, J. D., Tribo-Electrification System for Electrostatic Separation of Plastics, *IEEE Trans. IAS*, 1994, pp. 1397-1399.
35. Michaelson, H. B., In *CRC Handbook of chemistry and physics*, Boca Raton: CRC Press, 1996, pp. 12-122.
36. Ernő Nemétha, Victoria Albrechtb, Gert Schuberta, Frank Simonb, Polymer Tribo-Electric Charging: Dependence on Thermodynamic Surface Properties and Relative Humidity, *Journal of Electrostatics*, Published by Elsevier Science B. V., 2002.

감사의 글

오늘 결실의 기쁨이 있기까지 여러모로 부족한 저에게 많은 지도, 편달 그리고 격려를 아끼지 않으신 여러분에게 우선 지면으로나마 감사의 말씀을 올리하고자 합니다.

먼저 대학원 생활을 하는 동안 저에게 많은 학문적 조언과 논문을 완성하기까지 아낌없는 도움을 주신 한오형 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 본 논문의 심사를 위하여 바쁘신 시간에도 세심한 검토와 조언을 아끼지 않으신 고진석 교수님과 박천영 교수님께 감사드리며, 학부와 대학원 생활동안 아낌없는 배려와 조언을 해주신 박영석 교수님, 강추원 교수님에게도 학문적 지도, 편달에 감사를 드립니다.

그리고 올해 정년퇴임하신 서동우 교수님, 양해승 교수님의 가르침과 지도에도 깊은 감사를 드리며, 논문이 완성될 때까지 실험과 논문작성을 도와준 한국지질자원연구원에서 연구 중인 백상호군에게 감사의 말을 전합니다.

또한 늘 지도와 사랑으로 저를 감싸주신 주변의 친지와 친구 분들에게도 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 29여년간 늘 저와 함께 동고동락하며 조언과 용기를 북돋아 주었던 아내 임예임과 사랑하는 딸 은선 그리고 아들 진혁에게도 아빠에게 격려를 아끼지 않은 점에 고마움을 표하며 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

저작물 이용 허락서

본인이 저작한 학위논문에 대하여 다음과 같은 방법 및 조건하에 대학교에 저작권을 위임 할 것을 서약합니다.

1. 인터넷 및 온라인 서비스와 아카이빙을 위하여 저작물의 내용을 변경하지 않는 편집상 혹은 포맷상의 변경을 통한 복제를 허락함
2. 저작물의 DB 구축과 인터넷을 포함한 정보통신망에 공개하여 논문 일부 또는 전부의 복제·배포 및 전송을 허락함
3. 저작물에 대한 이용 기간은 3년으로 하고 계약 종료 2개월 이내에 별도의 의사표시가 없는 경우 기간을 계속 연장함
4. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판 허락을 하였을 경우 1개월 이내에 소속 대학에 통보함
5. 배포, 전송된 학위논문은 이용자가 다시 복제 및 전송할 수 없으며 이용자가 연구 목적이 아닌 상업적 용도로 사용하는 것을 금함
6. 소속대학은 학위논문 위임 서약 이후 해당 저작물로 인한 타인의 권리 침해에 관하여 일체의 법적 책임을 지지 않을 것을 확인함
7. 소속대학의 협약기관 및 한국교육학술정보원에 논문 제공을 허락함

동의여부 : 동의(✓) 조건부 동의() 반대()

※ 조건부 동의 및 반대인 경우 사유 및 조건을 기재하여 주시기 바랍니다.

사유 :

조건 :

저작자 성명 : 박종천

주소 : 광주광역시 서구 치평동 쌍용 금호아파트 208동 1601호

(연락처 : 011-9457-4411)

2008년 2월 일

이름 : 박 종 천 (인)

조선대학교 총장 귀하