

생활계 폐플라스틱 재활용을 위한 정전선별 기술개발

전호석, 박철현*, 김병곤, 박재구*

한국지질자원연구원, 한양대학교*

The Development of Electrostatic Separation Technique for Recycling of Life Circles Waste Plastic

Ho-Seok Jeon, Chul-Hyun Park*, Byoung-Gon Kim, Jai-Koo Park*

KIGAM, Hanyang University*

Korea Institute of geoscience and material resources , 30 Gajeong-dong, yuseong-gu,

Daejeon 305-350, KOREA

† Corresponding author Tel:042-868-3582, E-mail: hsjeon@kigam.re.kr

요약

2004년 이후 EPR 제도의 시행과 더불어 폐플라스틱을 함유한 물질의 소각과 매립을 법으로 규제함에 함에 따라 폐플라스틱 재활용의 필요성이 가중되고 있다. 본 연구는 생활계 폐플라스틱 재활용을 위한 정전선별 기술개발로써, 하전물질과 하전장치 개발에 따라 선별효율을 높일 수 있다. 따라서 우리는 대상 플라스틱의 하전효율과 재질분리에 적합한 하전장치와 마찰하전형정전선별기 개발하여 2종 혼합 플라스틱으로부터 PVC를 99% 이상 제거하였으며, PET와 같이 PVC 함량을 규제하는 경우 최적 실험조건에서 PET 회수율 80%로 PVC를 99.99% 까지 제거할 수 있는 기술도 개발하였다. 또한 3종 혼합 플라스틱은 98%이상으로 분리하여 플라스틱의 재활용을 높일 수 있는 재질분리 기술을 확립하였다.

주제어: 정전선별, 폐플라스틱, 재질분리, 재활용

Abstract

The development of material separation technique for waste plastic recycling are the necessary situation according to restrict by law the reclamation and incineration of waste plastic after 2004 year, with enforcement of EPR (Extended Producer Responsibility) system. As the this study is the research on the development of electrostatic separation techniques for recycling of life circles waste plastic, it can improve separation efficiency according to development of charging material and charger. Therefore, we developed the charger and electrostatic separator to increase charging efficiency and material separation per object

plastics, using these equipments, we removed PVC up to 99% from two kinds of mixed plastics. And in case of restricting PVC content such as PET, we developed the separation technique that can remove PVC up to 99.99% from PET with PET recovery about 80%. Also, as we separated over 98% for three kinds of mixed plastics, and then established material separation technique to increase recycling of plastic.

Key words: electrostatic, waste plastic, material separation, recycle

1. 서론

플라스틱은 산업화와 경제성장으로 나무, 금속, 기타물질을 대체하는 매우 우수하고 유용한 물질로서 생활 및 산업 전반에 걸쳐 다양하게 사용되고 있다. 국내 폐플라스틱은 매년 약 400만 톤이 발생되고 있으나 재활용율이 20~30% 정도로 낮아 많은 양이 매립이나 소각에 의해 처리되고 있다. 따라서 정부에서는 2004년 이후 폐플라스틱을 함유한 물질의 소각과 매립을 법으로 규제하고 있으며, EPR 제도의 시행으로 폐플라스틱 재활용의 필요성이 가중되고 있다. 폐플라스틱은 혼합재질의 경우 물질재활용 및 재질특성이 저하되어 반드시 재질분리 기술이 개발이 선행되어야 한다. 특히 PVC 재질의 경우 Cl, DEHP, 왁스 등이 함유되어 있어 제조과정이나 매립시 염화수소, 다이옥신, 중금속, 독성첨가물 등이 유출되어 환경 유해성이 심각한 것으로 알려져 있다. 또한 다량의 첨가물들로 인하여 열분해가 심하게 일어나거나 새로운 화합물이 생성되어 재활용을 어렵게 만들고 설비 장치 등의 부식문제를 야기 시키고 있다.

현재 폐플라스틱 재활용은 대부분 수선에 의해 처리되고 있으나 각 분야별 폐플라스틱 재질분리기술의 연구가 활발히 진행되어 큰 발전을 이루고 있다. 폐플라스틱을 재자원화할 수 있는 물리적 선별법은 정전선별, 건·습식 비중선별, 부유선별, 색선별 그리고 분광법등이 있다. 본 연구는 혼합 폐플라스틱의 모든 재질의 분리가 가능한 정전선별법을 적용하였다. 정전기적 현상은 복사기, 프린터, 정전필터집진시스템, 정전분체도장, 다색칼라 도장에 응용되고 있으며, 유용광물의 처리와 석탄 및 석탄회의 선별처리에 이용되어 왔다¹⁾²⁾. 정전선별법은 하전방식에 따라 전도성물질과 비전도성물질을 분리할 수 있는 코로나 방전형과 정전유도형, 그리고 전도성물질과 비전도성, 전도성물질과 비전도성물질을 분리할 수 있는 마찰하전형이 있다³⁾. 마찰하전형 정전선별법은 물질의 일함수 값 혹은 대전서열을 이용한 것으로 입자와 입자간, 입자와 하전장치의 접촉에 의해서 반대 극성으로 하전된 물질을 정전기적으로 분리하는 선별법이다²⁾⁴⁾. 본 선별법은 부유선별, 비중선별, 색선별, 분광법등의 문제점인 동일비중과 유사 peak값의 재질의 분리가 가능하고 에너지 소비, 건식처리, 장치, 선별비용이 저렴하며 선별효율이 높아 개발 즉시 상용화할 수 있는 장점이 있다⁵⁾⁶⁾

마찰하전정전선별에 대한 문헌적 연구내용을 종합하면 대부분 인위적 혼합물로부터 다양한 플라스틱을 선별할 수 있는 기술적 원리, 마찰하전에 영향을 주는 거시적 요소, 산업적으로 적용될 수 있는 하전장치와 선별시스템 개발에 대한 논의였다⁷⁾⁸⁾⁹⁾. 따라서 하전장치와 선별시스템의 개발

에 따라 선별효율을 향상시킬 수 있다. 마찰하전정전선별에 일반적으로 사용된 하전장치는 Inculet et al.¹⁰⁾의 rotating cylinder와 fluidized bed, Yanar and Kwetkus¹¹⁾의 cyclone, 그리고 Higashiyama et al.¹²⁾의 vibrating feeder가 있으며, 이 밖에 honeycomb, spiral tube charger, agitator 등 있다. 마찰하전공정은 물질의 전기적 특성이외에 충돌 횟수, 접촉시간, 습도, 온도, 재질 혼합 비율, 전처리와 같은 다른 요소들에 의해 영향을 받으며 플라스틱내의 불순물, 첨가제, 표면상태의 영향이 고려되어야 한다¹³⁾. 이렇게 다양한 환경적 요인과 선별조건은 입자들의 하전과 선별효율을 예측하기 어렵기 때문에 마찰하전정전선별법은 체계적 연구시스템과 선별 조작이 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 폐플라스틱 재질분리에 적합한 하전장치를 개발하고, 하전효율 및 분리효율을 극대화할 수 있는 최적 선별시스템을 개발하는데 있다. 따라서 생활계 폐플라스틱 재활용 차원에서 가장 문제가 되는 PVC 제거에 적합한 하전장치를 개발하여 2종 혼합플라스틱으로부터 PVC 제거 실험을 수행하였으며 PVC, COPP, PMMA 의 3종 혼합플라스틱으로부터 PVC 제거 실험도 병행하였다. 3종 혼합플라스틱 재질분리 실험의 경우 대상물질을 선정하여 하전장치에 따라 2단계의 선별과정을 거쳐 전극의 세기, 공기세기, 상대습도, 하전장치의 재질, 분리대 위치 등의 조건 실험을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 마찰하전형정전선별 장치를 이용한 혼합플라스틱의 재질분리 실험결과 2종 혼합 플라스틱으로부터 PVC를 99% 이상 제거할 수 있는 선별기술을 개발하였으며 3종 이상 혼합된 플라스틱은 98%이상 재질분리를 할 수 있는 선별기술을 개발하여 플라스틱의 재활용을 높일 수 있는 재질분리 기술을 확립하였다.

2. 마찰하전형정전선별의 원리

마찰하전정전선별의 원리는 물질의 일함수 값과 대전서열을 이용한 것으로 입자와 입자간, 입자와 하전장치간의 접촉에 의해서 반대 극성으로 하전된 물질을 정전기적으로 분리하는 것이다. Fig. 1은 입자의 마찰대전 과정을 나타낸 것으로, (a)는 입자와 하전장치 표면과의 접촉에 의한 대전, (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 높은 전압이 흐르는 전기장 내로 통과시키면 positive로 하전된 입자는 negative 전극으로 이동하게 되고, 이와 반대로 negative로 하전된 입자는 positive 전극으로 이동되어 분리가 이루어진다⁸⁾⁹⁾. 하전 극성과 크기는 접촉하는 동안에 발생하는 전자의 이동과 물질의 분리와 같은 전자의 역흐름에 의한 전자이동의 결과로 발생된다. 마찰하전정전선별은 입자들의 선택적 하전극성과 하전량 그리고 선별효율을 예측하기 위하여 시료 상태, 전처리, 다양한 환경적 요인인 고려되어야 한다. 특히 앞서 언급하였듯이 하전장치와 선별시스템의 개발에 따라 선별효율을 향상시킬 수 있다. table 1은 대상 플라스틱의 선별에 따른 하전장치와 선별시스템의 특징(single or multistage, any conditioning, free-fall or drum type, charging method, and the materials)을 요약한 것이다.

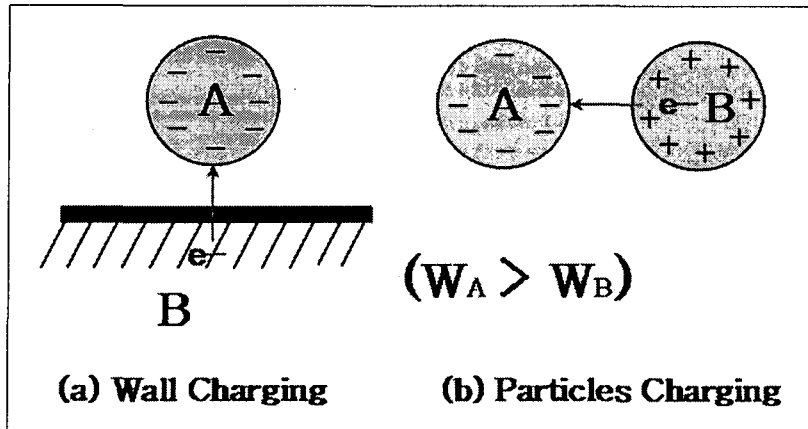


Fig. 1. A charging principle of triboelectrostatic separation

Table1. Summary of literatures on electrostatic separation of plastics.

Author(Year)	M-stage	Cond.	F/D	Charger	Materials
Yanar, Kwetkus 1995.	1 stage	No	F	Copper-lined Cyclone	PVC/PE
Botsch, Kwohnechner 1997.	3 stages 2 stages	No	D	Rotating drum	Car dashboards (ABS-PC/ PVC), bottles (PET/PVC)
Kamptner et al. 1997.	2 stages	Yes	F	Vibratory feeder, Mixing drum, Fluidized bed	Cable (PVC/EPDM/PE,) PVC/PE/PS, PVC/PET
Stahl 1997.	Multiple	Yes	F	Unknown	PP-EPDM/PA, PVDF/acetal, cable (PVC/EPDM/VPE). bottles(PET/PVC)
Inculet 1998	1 stage	No	F	Fluidized bed, Rotating tube	PVC/PET, PP/HDPE
Xiao 1999	Multiple	No	F	Rotating drum	ASR(PP/PE), ESR, refrigerators(ABS/HIPS), Bottles (PC/PVC)

※ M. Stage: multistage; Cond.: conditioning; F/D: free-fall or drum.

3. 시료 및 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 석유화학공장에서 제조된 플라스틱 원료시료와 대전시 재활용 사업장에서 습식 비중선별을 거친 sink 산물의 PET와 PVC 산물이었다. Fig. 2는 마찰하전형 정전선별기와 주변 기기들의 도식적 그림을 나타낸 것으로, 투입대와 하전대 그리고 분리대로 구성되어 있다. 실험방법은 Fig. 3에서와 같이 cutting mill에 의해 시료를 파쇄하여 4~6mm로 입도 조절 후 공기와 함께 하전 장치로 투입하여 마찰, 충돌시킨 후 일함수 값 차에 의해 서로 다른 극으로 분극된 시료를 고전압의 전극판 사이로 자유 낙하시켰다. Positive 전극과 negative 전극으로 편향된 각각의 산물에 대해 faraday cage를 이용하여 하전량을 측정하였다. Fig. 4는 PVC, COPP, PMMA 3종 혼합 플라스틱 재질분리 공정도를 나타낸 것으로 1차 실험에서는 3종 혼합시료를

PVC 하전장치를 이용해 PVC와 COPP, PMMA를 분리하였다. 2차 실험에서는 같은 극성으로 하전된 COPP, PMMA를 ionizer로 방전시켜 PPC재질의 하전장치를 사용하여 분리하였다.

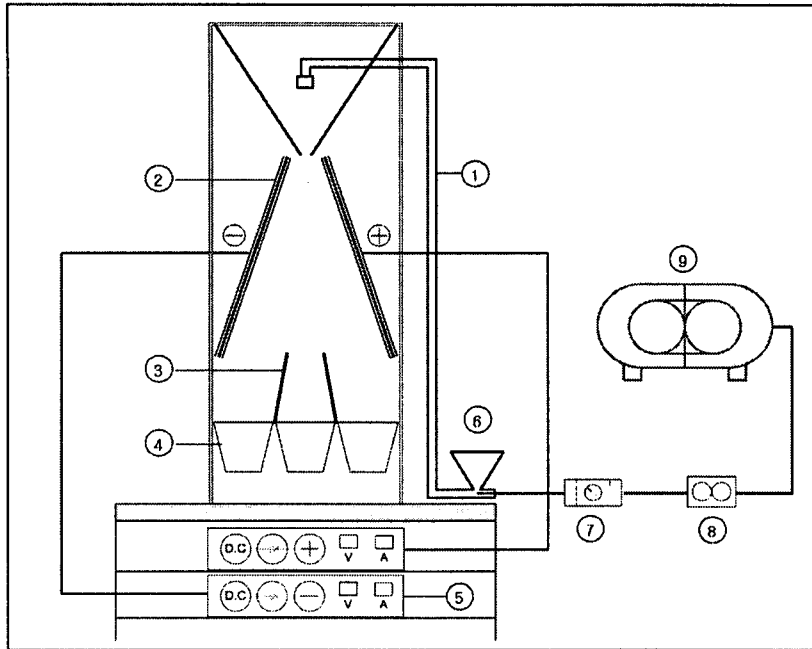


Fig. 2 Schematic diagram of triboelectrostatic separator and a peripheral equipments. (① charger(pipe line-fluidized bed); ② electrodes; ③ splitter; ④ collection bins; ⑤ high-voltage power supply; ⑥ feeder; ⑦ flow meter; ⑧ dryer; ⑨ air conditioner)

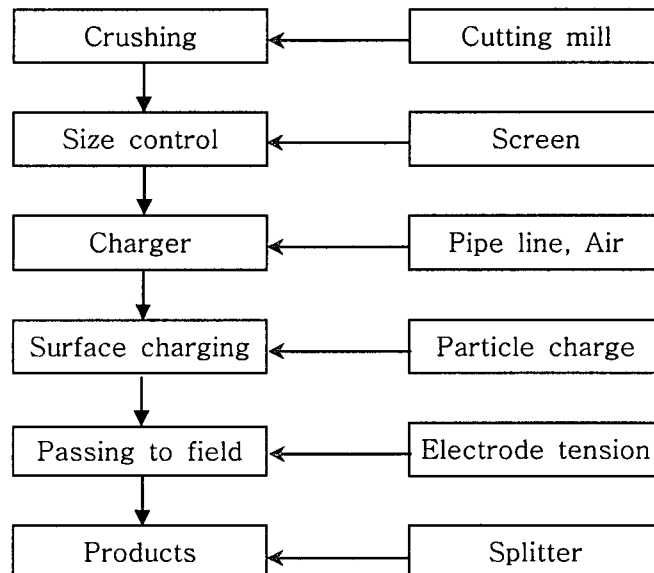


Fig. 3. Flow sheet of triboelectrostatic separation unit

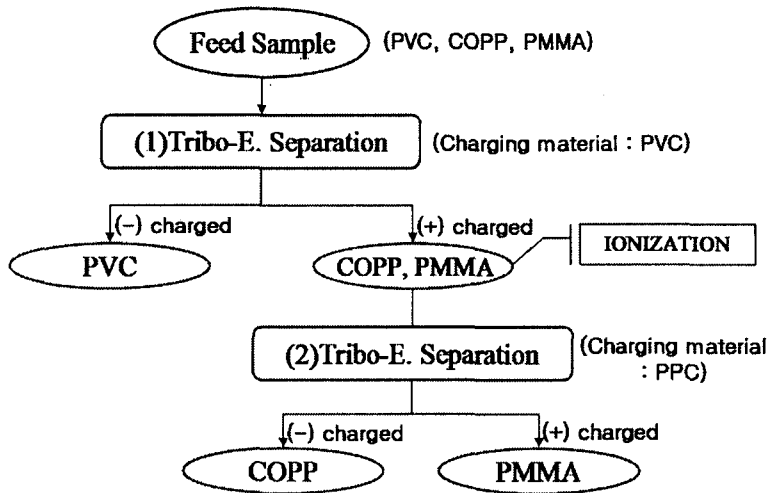


Fig. 4 Flow sheet for three kinds of mixed plastics in triboelectrostatic separation

4. 실험결과

4.1. 2종 혼합 플라스틱으로부터 PVC 제거 실험

입자와 입자간, 입자와 하전장치간의 접촉에 의해서 반대 극성으로 하전된 물질의 표면하전량의 크기에 따라 분리변수 및 분리효율을 예측할 수 있다. 따라서 하전량을 높일 수 있는 하전장치와 시료 혼합상태, 공기량 그리고 상대습도 등의 하전조건에 따른 하전특성을 조사하였다. Fig. 5의 A는 PP 재질의 하전장치를 사용하여, PVC와 ABS를 각각 단일 상태에서 하전 시 킨 것과 1: 1로 혼합하여 하전 시 킨 결과를 공기량의 속도에 따라 나타낸 결과이다. 단일 시료와 혼합된 시료에 대한 하전 특성 실험결과 PVC, ABS 단일시료보다 이들을 1: 1로 혼합한 시료의 하전량이 더 높은 것을 알 수 있는데, 이는 혼합된 시료의 경우 하전장치와의 마찰 및 충돌이 이루어지면서 일함수 값의 차이가 큰 두 시료간의 마찰 및 충돌도 함께 이루어져 하전효율을 높이기 때문이다. 그리고 공기량이 증가할 수록 단일 시료와 혼합시료 모두 입자의 하전량이 10~28(nC/g) 정도 증가하는데, 이는 공기량이 증가할 수록 시료의 이동속도가 빨라져 하전장치와의 마찰 및 충돌과 입자간의 마찰 및 충돌이 많아져 전자의 이동이 활발해졌기 때문이다.

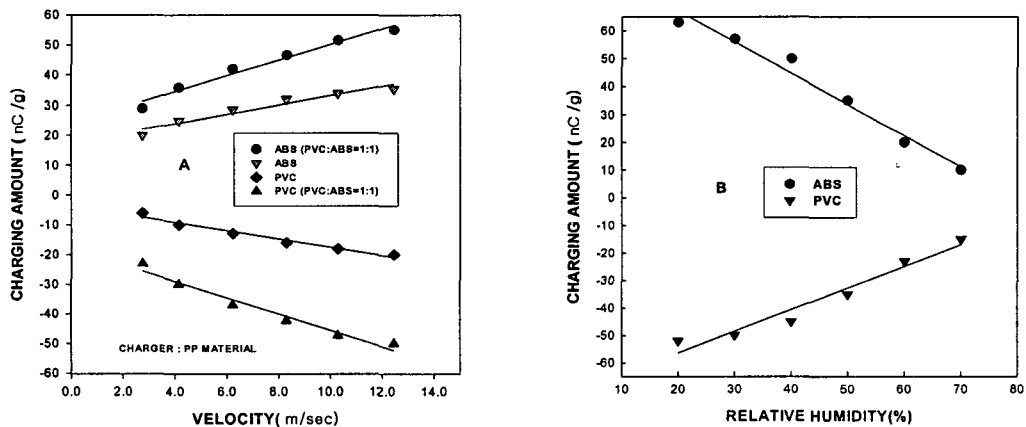


Fig. 5 Effect of velocity and relative humidity on charging amounts of plastics.

Fig. 5의 B는 마찰하전형정전선별법에서 상대습도가 하전효율에 미치는 영향을 관찰한 것으로, 상대습도가 낮을수록 두 시료 모두 하전량이 증가하고 상대습도가 높을수록 하전량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 상대습도가 증가할수록 입자의 하전효율이 감소하는 이유는, 공기 중의 습도가 플라스틱 표면에 부착되어 마찰하전 시 입자간의 표면분극을 방해하고 하전된 입자의 전하를 방전시키기 때문으로 생각된다.

Fig. 6의 A는 하전된 시료가 전기장 내를 통과할때 전극의 전압세기가 ABS와 PVC의 재질분리에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전극의 전압세기가 높을수록 분리효율이 증가하여 20kV 이상이 효과적임을 알 수 있다. 이는 하전장치에 의해 하전된 입자들의 하전량이 nC 단위로 매우 약하기 때문에 이들 입자들을 각각의 전극으로 끌어당길 수 있는 높은 전기에너지가 필요하기 때문이다. 따라서 입자의 하전량을 높이는 기술이 개발된다면 낮은 전압세기에서도 높은 선별효율을 기대할 수 있어, 하전량을 극대화할 수 있는 하전특성이 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 6의 B는 분리대 위치에 따른 ABS와 PVC 재질의 분리결과를 나타낸 것으로, ABS의 품위와 회수율을 고려한 최적 분리대의 위치는 전기장의 가운데(0)에서 negative 전극으로 4cm 이동한 지점임을 알 수 있다. 이는 혼합된 입자의 work function 값, 공기주입속도, 상대습도와 같은 하전특성 인자들에 의해 다른 하전량을 갖기 때문이다. 즉 하전량이 작은 입자들은 하전량이 높은 입자들보다 전극으로 이끌리는 힘이 떨어지기 때문에 분리대 위치를 변화시켜 분리효율을 높일 필요가 있다. 분리대의 위치변화에 대한 실험결과를 분석해보면 분리대의 위치가 positive 전극으로 이동할수록 ABS 회수율은 증가하나 품위가 떨어지고 반대로 negative 전극으로 이동할수록 ABS 회수율은 감소하나 품위가 증가하는데, 이는 PVC 재질은 negative로 하전되고 ABS 재질은 positive로 하전되기 때문에 분리대의 위치에 따라 회수대의 넓이가 결정되기 때문이다. 분리대의 위치가 negative 전극으로 -2cm 이동한 지점이 -4cm 이동한 지점보다 ABS의 품위는 낮으나 회수율이 높아 선별효율이 비슷하나, PVC 재질의 경우 소량만 혼입되어도 재활용이 어렵기 때문에 본 연구에서는 비슷한 선별효율이지만 -4cm 지점을 최적 실험조건으로 하였다.

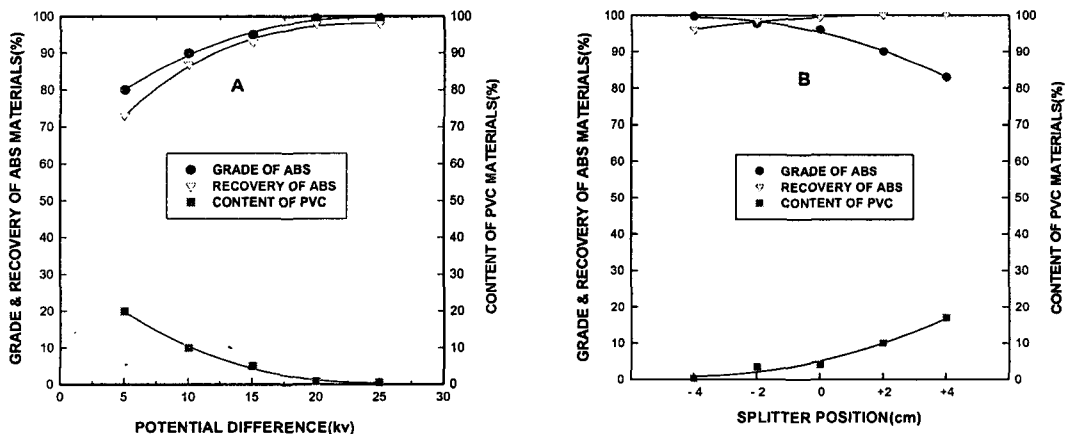


Fig. 6 Effect of potential difference and splitter position on grade and recovery of plastics in tibelectrostatic separation.

4.2. 3종 혼합 플라스틱 선별 실험

본 실험에서는 PVC : COPP : PMMA의 혼합비가 1 : 1 : 1 인 시료를 대상으로 PVC 하전물질 을 사용하여 PVC와 COPP, PMMA를 1차로 분리하였으며, PPC 하전물질을 이용하여 COPP와 PMMA를 2차로 분리하였다. Fig. 7은 하전장치를 통과하여 하전된 입자들을 반대전극으로 편향시켜 선별효율을 높일 수 있는 전극의 전압세기 변화실험 결과를 나타낸 것이다. 먼저 COPP와 PMMA로부터 PVC를 분리하기 위한 1차 선별실험에서 전극의 전압세기를 5kV에서 25kV 까지 변화하여, 이들이 재질분리에 미치는 영향을 관찰하였다. 1차 실험에서도 알 수 있듯이 전압세기가 커질수록 분리효율이 증가하여 20kV 이상이 효과적임을 알 수 있으며, COPP와 PMMA의 재질 분리를 위한 2차 선별실험에서는 전극의 전압세기를 10kV에서 30kV 까지 변화시켜 실험한 결과 전극의 전압세기 25kV 이상이 효과적임을 알 수 있다. 이와 같이 1차 및 2차 실험의 전압세기가 다른 이유는 1차 실험에 비해 2차 실험에서의 입자 하전량이 더 낮게 나타나 상대적으로 더 높은 전극의 전압세기 필요하기 때문이다. 즉 동일 조건에서 1차 실험의 PVC와 COPP, PMMA의 일함수 값 차가 더 커 입자 하전량을 높일 수 있으나 2차 실험의 COPP와 PMMA 일함수 값의 차가 더 적기 때문에 입자 하전량이 더 낮게 나타난 것이다.

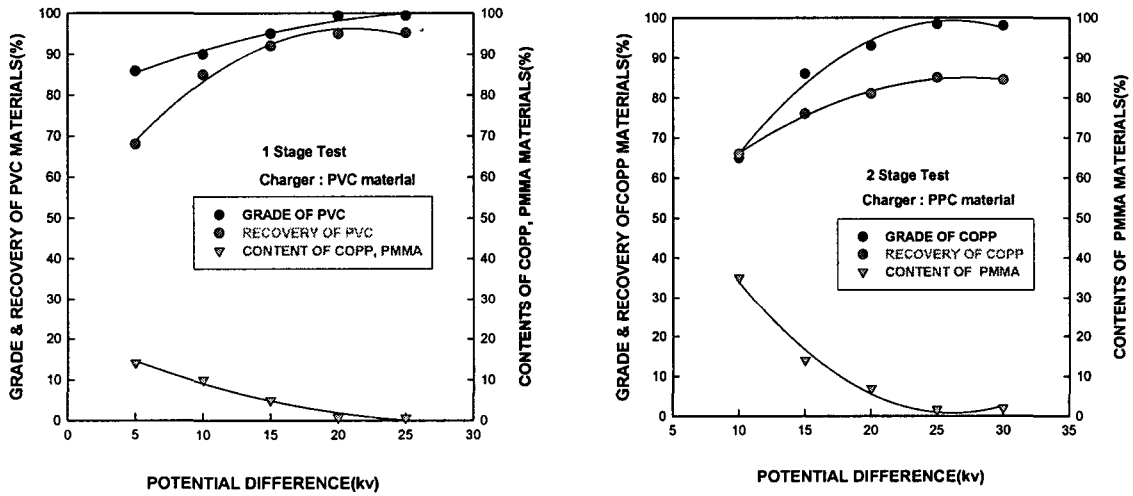


Fig. 7 Effect of potential difference in triboelectrostatic separation for separation of the plastic mixed by three kinds.

Fig. 8는 마찰하전시 입자의 하전량과 시료의 이동 및 낙하속도에 영향을 주는 공기량 변화에 따른 실험결과를 나타낸 것이다. 공기량은 마찰하전정전선별에서 대상 시료의 하전 및 하전된 시료를 전기장으로 이동시키는 주요 변수로써, 공기량이 증가하면 하전장치와 시료간의 마찰 및 충돌회수와 에너지가 증가하여 전자의 이동을 원활히 하여 시료의 하전량을 높이는 원인이 된다. Fig. 8에서 같이 1차 선별실험에서는 공기량 8.3m/s 이상에서 그리고 2차 선별실험에서는 공기량 10.28m/s에서 가장 선별효율이 높은 것을 알 수 있다. 이와 같이 1차 및 2차 선별실험에서 최적 공기량이 다른 이유는 앞서 언급한 바와 같이 1차 실험의 PVC 재질의 경우 대전서열 중 work function 값이

가장 높아 낮은 공기량으로도 입자의 하전효율을 증가시킬 수 있기 때문이다.

Fig. 9는 3종 혼합플라스틱 분리에서 분리대의 위치변화가 선별효율에 미치는 영향을 나타낸 것으로 입자가 전기장 내를 통과하여 각각 분리될 때 입자의 하전 상태와 중력에 의한 낙하속도에 따라 낙하지점이 달라지는데, 이는 혼합된 시료의 일함수 값의 차이와 상대습도 그리고 공기량과 같은 하전특성 인자들에 의해 서로 다른 하전량을 갖기 때문이다. 즉, 하전량이 작은 입자들은 하전량이 큰 입자들보다 전극으로 편향되는 에너지가 낮기 때문에 분리대 위치를 변화시켜 분리효율을 높여야 한다. PVC를 제거하기 위한 1차 선별실험에서는 PVC의 품위와 회수율을 고려하여 최적 분리대의 위치가 전기장의 가운데(0)에서 positive 전극으로 4cm 이동한 지점임을 알 수 있으며, COPP와 PMMA 분리를 위한 2차 실험에서는 1차 실험과 반대인 negative 전극으로 분리대를 2cm 이동한 지점이 가장 선별효율이 높은 것을 알 수 있다.

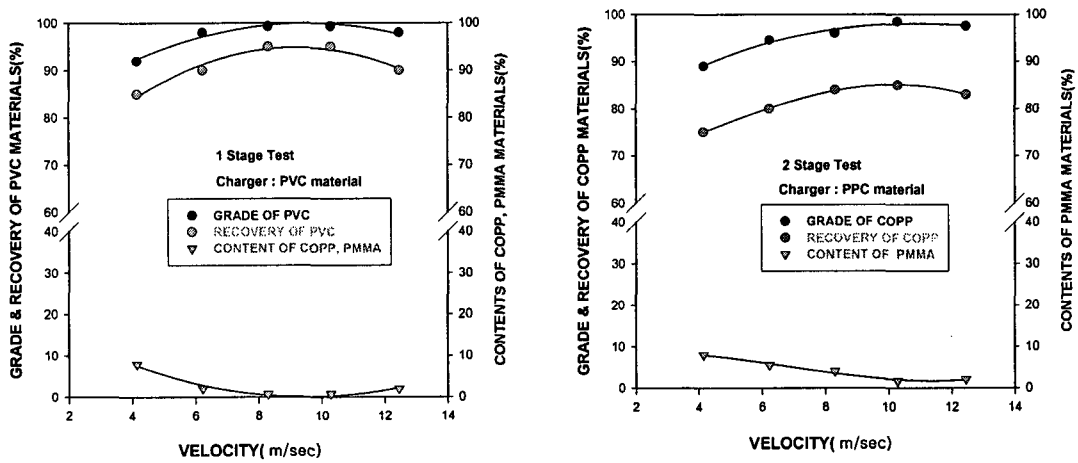


Fig. 8 Effect of air velocity in triboelectrostatic separation for separation of the plastic mixed by three kinds.

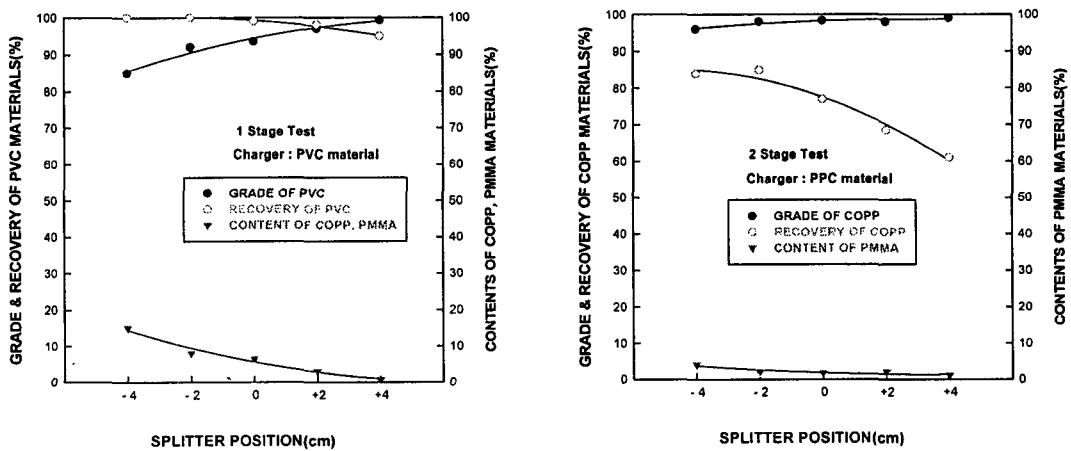


Fig. 9 Effect of splitter position in triboelectrostatic separation for separation of the plastic mixed by three kinds.

5. 결 론

폐플라스틱은 혼합재질의 경우 물질재활용 및 재질특성이 저하되어 반드시 재질분리 기술이 개발이 선행되어야 한다. 특히 PVC 재질의 경우 유해물질이 방출되어 환경문제 뿐 만 아니라 다른 재질의 재생 및 재활용을 어렵게 만든다. 본 연구에서 우리는 하전 효율과 분리효율을 극대화할 수 있는 하전장치와 정전선별장치 및 최적 선별시스템을 개발하여 혼합 폐플라스틱으로부터 PVC 제거 실험 및 각 플라스틱 재질 분리 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하전효율 향상을 위한 하전특성 실험결과, PP 재질의 pipe line(fluidized bed) 하전장치에 의한 하전시 PVC, ABS 각각의 단일 시료보다 혼합시료(PVC : ABS = 1 : 1)의 하전량이 하전장치뿐만 아니라 두 시료간의 마찰충돌로 인해 더 높은 하전 값을 나타내었으며, 공기주입속도 10.28m/s 이상, 상대습도 40% 이하의 조건에서 PVC와 ABS의 하전량을 각각 47nC/g, 51.5nC/g으로 산정할 수 있었다.
2. 하전된 입자를 전기장 내에서 선별하기 위한 PVC와 ABS의 분리특성 실험결과, 최적 실험조건 전극의 전압세기 20kV이상, 분리대 위치 negative 전극쪽으로 4cm 지점에서, ABS 품위와 회수율이 각각 약 99.5%와 98%였으며, 이때 ABS 산물 중의 PVC 함량은 0.5%이하였다.
3. PVC와 COPP, PMMA 3종 혼합 플라스틱 재질분리를 위한 1차 실험결과, 전압세기 20kv, 공기량 8.3m/s 이상, 분리대 위치 positive 전극쪽으로 4cm 지점에서 PVC 품위와 회수율이 각각 약 99.3%와 95%인 결과를 얻었다. 또한 PPC 하전물질을 이용하여 COPP와 PMMA를 2차로 분리한 실험결과, 전압세기 25,000voltage, 공기량 10.283m/s, 분리대 위치 negative 전극으로 2cm 이동한 지점에서 COPP품위와 회수율이 각각 약 98.35%와 85%인 결과를 얻었다.

6. 참고문헌

1. T.X. Li, H. Ban, J.C. Hower, J.M. Stencel, K.Saito, 1999: *Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: A Potential Application in Space Exploration*, Journal of Electrostatics, Vol. 47, pp 133-142.
2. Jean Cross, 1987: *Electrostatics : principles, problems and applications*, Adam Hilger, pp. 17-46, pp. 237-242, pp. 425-433.
3. H.R. Manouchehri, 2000: *Review of Electrical separation methods*, Mineral and Metallurgical Processing, Vol. 17, pp23-36.
4. E. G. Kelly, D. J. Sottiswood, 1988: *The theory of electrostatic separations : a Review, Part. I, Fundamentals*, Minerals Engineering, Vol.2, No.1, pp. 33-46.
5. Jing Wei and Matthew J. Realff, 2003: *Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling*, AIChE Journal, Vol. 49, No. 12, pp. 3139-3149.
6. Dr.Michael B.Biddle, 1999: *Electrosatatic separation, APC Durables recycling workshopIII*, pp.118 -127.

7. G.L. Hearn, J.R. Ballard, 2005: *The use of electrostatic techniques for the identification and sorting of waste packaging material*", Resources, Conservation & Recycling, Vol. 44, pp 91-98.
8. Mihai Lungu, 2004: *Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect*, Minerals Engineering, Vol. 17, PP 69-75.
9. Y. Matsushita, N. Mori, 1999: *Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 127, pp 33-40.
10. Inculet, I.I., Castle, G.S.S, 1994: *Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics*, IEEE Trans. IAS, pp1397-1399.
11. D.K. Yanar, B, A.Kwetkus, 1995: *Electrostatic separation of polymer powders*, Journal of Electrostatics, Vol. 35, PP 257-266.
12. Y. Higashiyama, Y. Ujiie, and K. Asano, 1997: *Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film*, Journal of Electrostatics, Vol. 42, No.1-2, pp.63-68
13. Woodhead, S.R., Armour-Chelu, D.I., 2003: *The influence of humidity, temperature and other variables on the electric charging characteristics of particulate aluminium hydroxide in gas-solid pipelines flows*, Journal of Electrostatics, Vol. 58, No.3-4, pp.171- 183

Acknowledgement (사사)

본 연구는 과학기술부의 21C Frontier 연구개발 사업으로 자원 재활용 기술개발사업단의 지원으로 연구가 수행되었으며, 이에 감사드립니다.