



정전선별에 의한 산지별 혼합플라스틱 재질분리 기술개발

전호석, 백상호, 박철현*, 김병곤
한국지질자원연구원, 한양대학교*

The Development of Material Separation Technique for Recycling of Waste Plastics Mixed by Triboelectrostatic Separation

Ho-Seok Jeon, Sang-Ho Baek, Chul-Hyun Park*, Byoung-Gon Kim
KIGAM, Hanyang University*

1. 서론

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 섬유 플라스틱 등의 다기능 재질이 개발되어 사용량이 매년 크게 증가하고 있다.

우리나라는 석유화학공업의 발달로 미국, 일본, 독일에 이어 세계 플라스틱 소비량의 6%인 약 950만 톤을 생산하고 있으며, 이로 인하여 연간 350만 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 1,100만 톤 이상의 플라스틱을 생산하여 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.

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, 물리·화학적으로 안정되어 있는 난분해성이라 매립지의 조기 안정화와 흙 속에 반영구적으로 잔존하는 문제 그리고 분해 시 토양오염 및 유해가스를 대기 중에 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.

플라스틱은 다른 물질에 비해 쉽게 분해 및 변질이 이루어지지 않아, 효율적인 선별기술만 개발된다면 재활용이 가장 용이한 물질중의 하나이다. 이러한 플라스틱을 재활용할 수 있는 기술로는 에너지 재활용, 화학적 재활용 그리고 물질 재활용의 방법이 있으며, 이중 플라스틱의 값싼 특성을 고려할 때 물질 재활용이 가장 효율적인 방법으로 평가받고 있다. 그러나 어느 방법이든 다른 종류의 플라스틱이 혼재되어 있으면 물성이 크게 저하되기 때문에 플라스틱의 재질분리 기술은 재활용에 있어서 가장 중요하다. 혼합 플라스틱을 재질별로 분리할 수 있는 물리적 선별방법은 크게 수선법, 비중선별, 부유선별, 정전선별, color sorting, 열점착 그리고 분광법 등이 있다.

본 연구에서는 정전선별법 중에서 모든 재질의 분리가 가능한 마찰하전형정전선별법을 적용하여, 중말뚝 heavy group 산물, 폐자동차 tail lamp 그리고 해초건조용 폐플라스틱 등 산지별 혼합 폐플라스틱을 대상으로 재질분리 연구를 수행하였다. 본 연구는 순수한 플라스틱 시료를 사용한 마찰하전형정전선별 실험에서 얻어진 기술을 토대로 진행되었으며, 전극의 세기, 분리대의 위치, 습도 등의 실험조건을 변화하여 최적 분리조건 및 분리효율을 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

마찰하전형정전선별의 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 대전율, (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. 2에서와 같이 높은 전압이 흐르는 전기장 내로 통과시키면 positive로 하전된 입자는 negative 전극으로 이동하게 되고, 이와 반대로 negative로 하전된 입자는 positive 전극으로 이동되어 각각 분리가 이루어지게 되는 것이다.

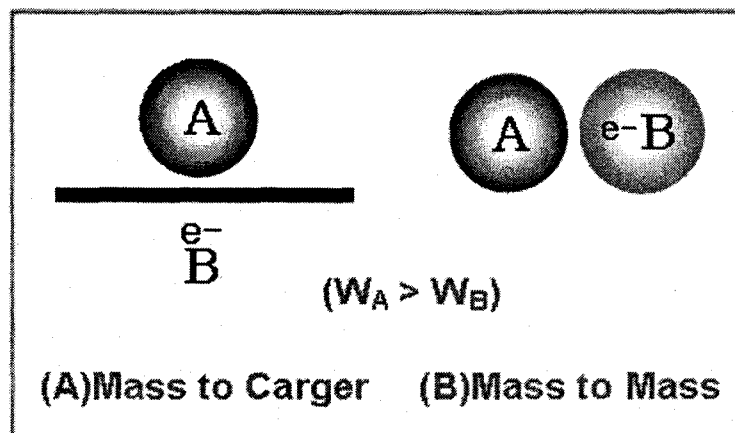


Fig. 1 Charging principle of two particles by collision.

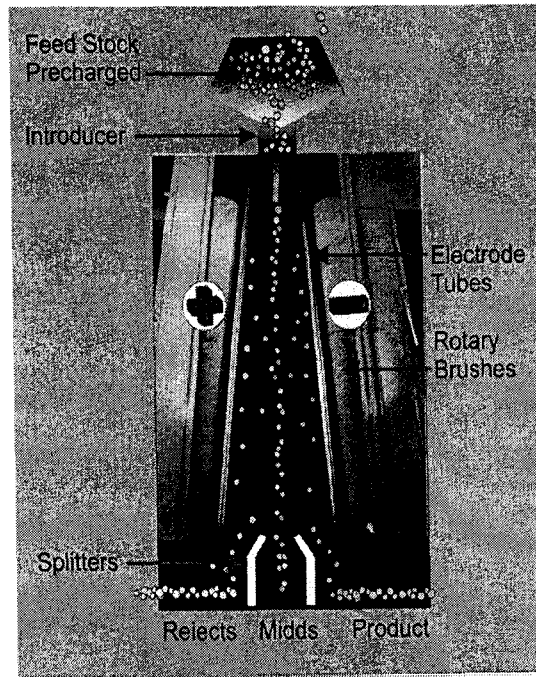


Fig. 2 Schematic representation of triboelectrostatic separation.

3. 시료 및 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 산지별 폐플라스틱으로 종말품 heavy group 폐플라스틱, 폐자동차 tail lamp 그리고 해초건조용 폐플라스틱이다. 먼저 종말품 heavy group 폐플라스틱의 경우 대전광역시 재활용 사업장에서 습식 비중선별에 의해 sink product로 처리된 heavy group 산물로서 대부분 PET와 PVC로 구성되어 있으며, THF 용액으로 분석한 결과 PET와 PVC가 각각 78.5%와 21.5%로 구성되어 있음을 확인하였다. 폐자동차 tail lamp와 해초건조용 폐플라스틱은 (주)에코닉스에서 입수하였으며, 폐자동차 tail lamp의 경우 분석결과 ABS와 PMMA가 각각 55%와 45%로 구성되어 있었으며, 해초건조용은 PE와 ABS 재질이 각각 85%와 10% 그리고 Nylon 재질이 5%로 구성되어 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 다양한 플라스틱의 work function 값을 참고하여 대상 시료를 각각 다른 극으로 하전시킬 수 있는 하전물질 선정에 위한 기초자료로 활용하였다. 또한 하전물질 선정에 위하여 산지별 폐플라스틱의 여러 재질을 cutting mill로 각각 파쇄하여 체에 의해 목적인 크기로 입도조절 하였다. 입도 조절된 산지별 폐플라스틱의 각 재질을 자체 제작한 하전통(PVC, PP, HDPE, PS, PET, Al, ABS, PMMA)에 투입하고 수직왕복형 하전장치로 마찰·충돌시킨 후 faraday cage를 사용하여 하전극성 및 하전량을 측정하였다. 그리고 이를 기초로 하여 산지별 폐플라스틱의 재질분리를 위한 마찰하전형정전선별법의 하전물질을 선정하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 수직왕복형 하전장치와 다양한 하전통을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 본 연구에 사용된 연속처리가 가능한 cyclone 하전장치를 나타낸 것으로, 하전물질 선정실험에서 규명된 산지별 폐플라스틱 즉, 종말품 heavy group 폐플라스틱, 폐자동차

의 tail lamp 그리고 해초건조용 폐플라스틱의 재질분리에 적합한 PP, PMMA 그리고 PS 재질을 cyclone 내부에 탈착할 수 있도록 고안되어 있다. Fig. 5는 산지별 폐플라스틱의 재질분리를 위한 마찰하전형정전선별법의 실험공정을 나타낸 것으로, 산지별 폐플라스틱을 각각 cutting mill에 의해 파쇄하고 체에 의해 목적한 크기로 입도조절 하였다. 입도 조절된 시료는 하전물질 선정실험에서 규명된 PP, PMMA 그리고 PS 재질이 taping된 cyclone 내부에 공기와 함께 투입하여 충돌·마찰시킨 후, 서로 다른 극으로 하전된 입자를 고전압의 전기장으로 이동시켜 분리하였다. 또한 전극의 전압세기, 분리대의 위치, 공기의 세기, 습도 등의 실험조건을 변화하면서 최적 선별조건 및 분리효율을 확인하였다. 그리고 해초건조용 폐플라스틱의 경우 zig-zag 공기분급기를 통하여 사전에 5%의 Nylon 재질을 99.99% 제거하고, PE 재질과 ABS 재질을 대상으로 마찰하전형정전선별 실험을 수행하였다.

Table. 1 Work function of various plastics obtained in this study.

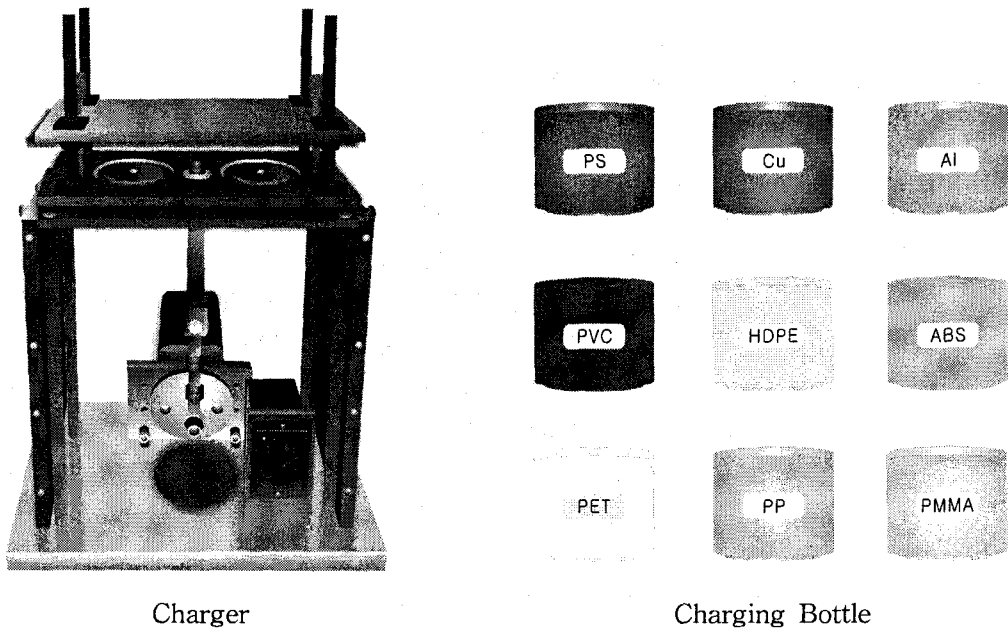
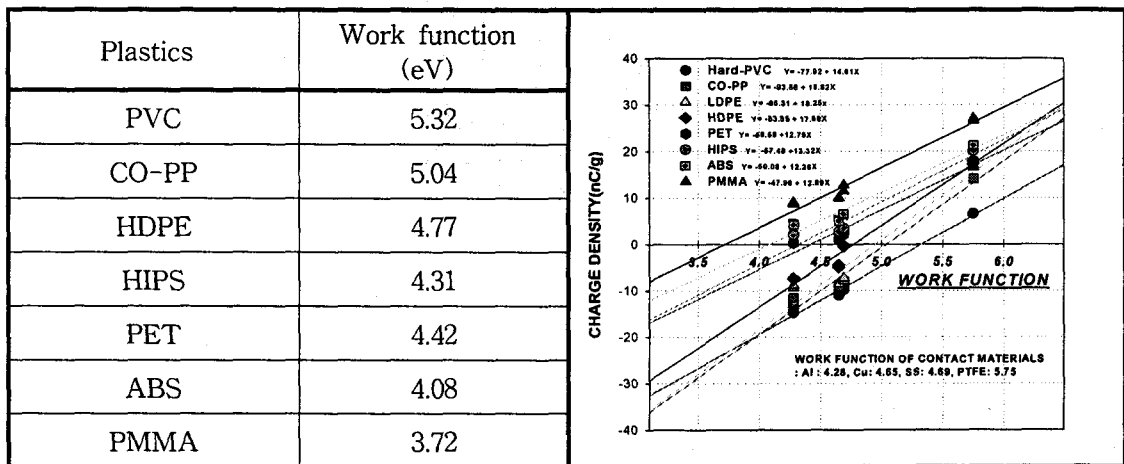


Fig. 3 The charger of a vertical motion & charging bottle used this study.

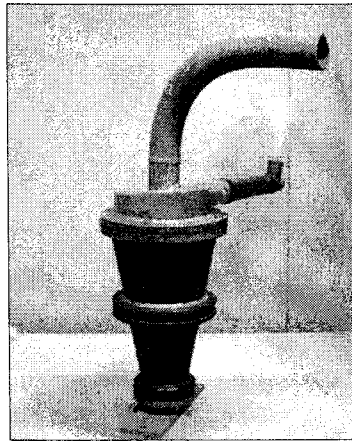


Fig. 4 The tribo-charger of cyclone type used this study.

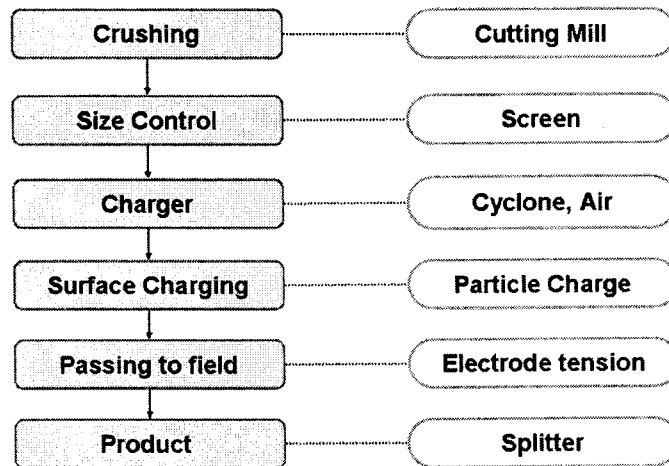


Fig. 5 Flowchart of triboelectrostatic separation used in this study.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 종말품 heavy group 페플라ستيك

Fig. 6은 종말품 heavy group 페플라ستيك 분리에 효과적인 하전물질을 선정하기 위하여 수직왕복형 하전장치와 다양한 재질의 하전물질들을 이용하여 상대습도 40% 이하, 하전장치의 상하 운동속도 300rpm 그리고 하전시간 5분인 실험조건에서 종말품 시료(PET, PVC)에 대한 하전특성 실험결과를 나타낸 것이다. 실험결과 PS, PE, PP 하전물질에서 종말품(PET, PVC)의 하전량이 약 $\pm 20\text{nC/g}$ 을 나타내어, ABS, PET, PVC 하전물질보다 효과적이었다. 이와 같은 이유는 PS, PE, PP 하전물질들이 마찰대전 서열상에서 분리대상 시료인 PET와 PVC의 중간에 위치하고 있어, PET와 PVC 시료간의 마찰·충돌과 함께 이들 중간값의 일함수를 갖는 PS, PE, PP 하전장치와의 마찰·충돌에 의해 전자 이동이 활발하여 서로 반대극성으로 분극 되는 대상 시료의 표면하전량이 증가하였기 때문이다. 즉, 일함수 값

이 작은 물질의 표면에서 큰 물질의 표면으로 전자의 이동이 활발해지기 때문이다. 반면 PET와 PVC 하전물질의 경우 대상 시료와 동일한 일함수 값을 갖기 때문에, 하전장치에 의한 하전보다는 PET와 PVC 시료간의 하전만 이루어져 하전효율이 낮게 나타난 것이다.

Fig. 7은 마찰하전정전선별에서 PET 분리효율에 대한 하전량의 영향을 나타낸 것으로, 전극의 전압세기를 30kV로 고정시키고 하전량의 크기에 따른 PET의 품위와 회수율을 관찰한 것이다. 실험결과 하전량이 증가함에 따라 PET의 품위와 회수율이 함께 증가하였다. 즉, 하전량이 약 3.5nC/g일 때는 PET의 품위와 회수율이 각각 80%와 53%로 낮았으나 하전량이 증가하여 약 35nC/g일 때는 98.5%의 품위와 75%의 회수율을 나타내어, 분리효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 하전량을 극대화할 수 있는 하전장치와 하전기술의 개발이 곧 재질분리 효율을 높일 수 있음을 의미하는 것이다.

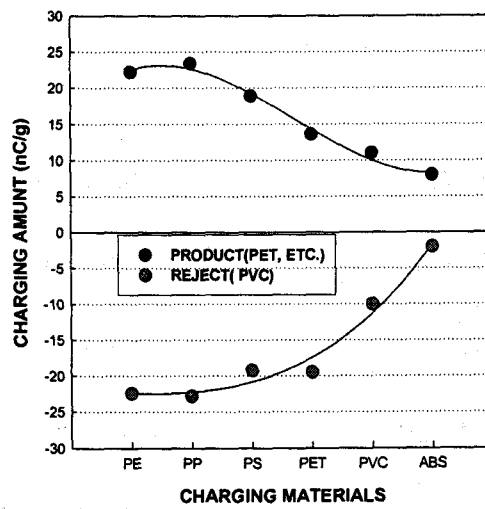


Fig. 6 Charging amount variation of waste plastics as charging materials.

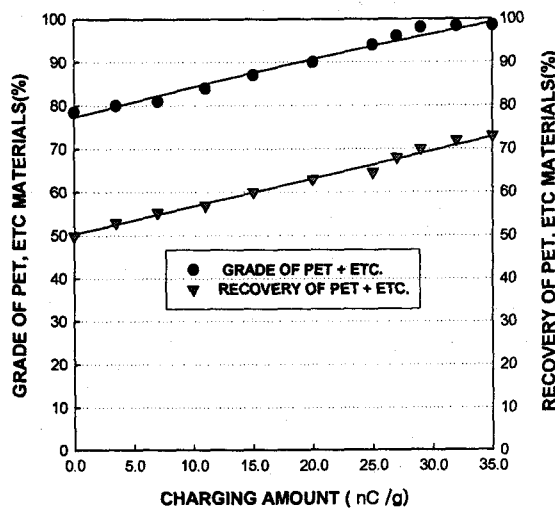


Fig. 7 The effect of charge density on grade and recovery of PET in triboelectrostatic separator.

4-2. 폐자동차 tail lamp

시료에 대한 특성 분석에서 확인 되었듯이, 본 연구에 사용된 폐자동차 tail lamp는 대부분 ABS와 PMMA로 이루어져 있다. 따라서 이들 혼합재질을 각각 다른 극으로 하전시킬 수 있는 하전물질을 선정하기 위해 다양한 하전물질을 이용하여 ABS와 PMMA의 하전특성을 실험하였다. Fig. 8은 폐자동차 tail lamp 분리에 효과적인 하전물질을 선정하기 위하여, 수직왕복형 하전장치와 다양한 재질의 하전물질들을 이용하여 상대습도 40% 이하, 수직왕복속도 300rpm 그리고 하전시간 5분의 조건에서 tail lamp 시료(ABS, PMMA)에 대한 하전특성 실험결과를 나타낸 것이다. 실험결과 하전물질로 PMMA를 사용할 경우 tail lamp의 하전량이 -6.06nC/g 과 1.3nC/g 을 나타내어, tail lamp의 ABS와 PMMA 재질을 같은 positive 극성으로 하전 시킨 다른 물질들보다 효과적임을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 분리대상 시료인 ABS 재질과 PMMA 재질이 마찰대전 서열상에서 낮은 일함수 값을 갖기 때문이다. 즉, PMMA 하전물질에서 ABS 재질의 시료만이 전자를 얻어 negative 하전 값을 가졌을 뿐, 나머지 하전물질에서 tail lamp 시료(ABS, PMMA)는 낮은 일함수 값으로 인하여 모두 전자를 잃어 positive 값을 나타내기 때문이다.

Fig. 9는 하전물질로 PMMA를 사용할 때 PMMA와 ABS 재질 각각에 대한 하전특성을 나타낸 것이다. 먼저 하전물질로 PMMA를 사용하여 ABS와 PMMA 시료를 각각 단일 별로 하전을 시키게 되면 PMMA는 거의 하전이 이루어지지 않고 ABS는 -6nC/g 정도 하전됨을 알 수 있다. 그러나 ABS와 PMMA 시료가 혼합된 상태에서 하전물질로 PMMA 재질을 사용하여 혼합된 시료를 하전시키게 되면, ABS 재질을 -25nC/g 까지 그리고 PMMA는 23nC/g 까지 하전이 이루어지게 되어, 혼합재질이 하전효율이 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 시료 각각을 대상으로 한 하전량 측정실험 결과보다 혼합된 시료의 하전량이 크기 때문에 실제로 혼합시료의 선별효율은 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 혼합된 시료의 경우 하전물질과의 충돌·마찰 이외에 혼합된 입자간의 충돌·마찰이 이루어져 하전효율을 크게 증가시키기 때문이다. 이와 같은 연구결과를 기초로 하여 혼합시료 두 시료간의 하전물질은 두 시료 중간의 일함수 값을 갖는 재질을 선택하거나 혹, 중간 값의 재질이 없을 경우 혼합된 재질의 하나와 동일한 재질의 물질을 선택하면 재질분리가 가능하게 되는 것이다.

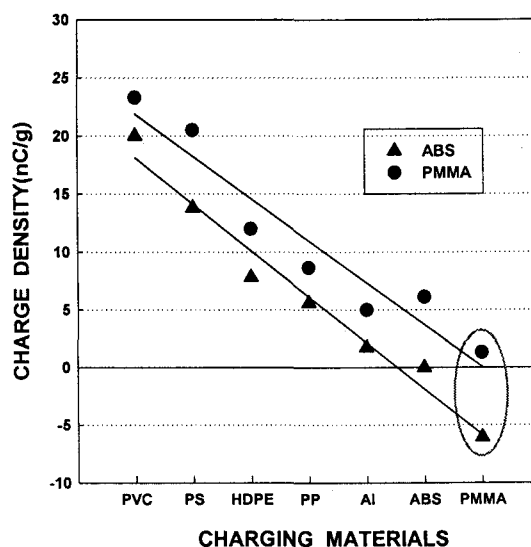


Fig. 8 Charging amount variation of tail lamp as charging materials.

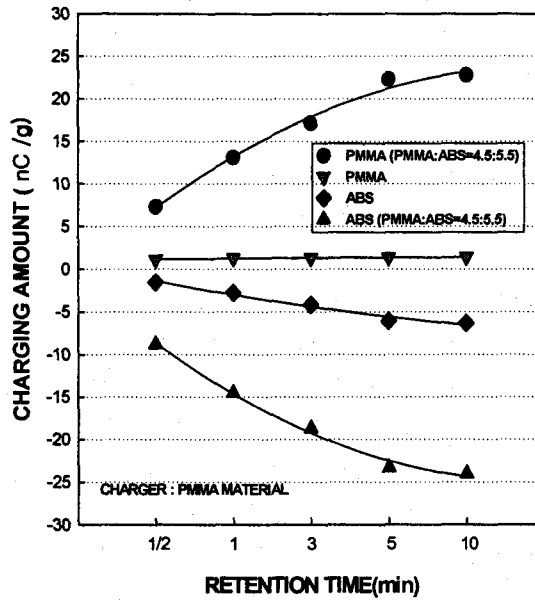


Fig. 9 Charging density on retention time in charging test using PMMA as charging material.

4-3. 해초건조용 폐플라스틱

Fig. 10은 PE와 ABS 재질의 중간 일함수 값을 가지는 PS와 PET 재질을 하전물질로 사용하였을 때, PE와 ABS 두 시료의 하전특성 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 PS 재질을 하전물질로 사용하였을 경우 최적 하전시간에서 PE와 ABS 재질이 각각 -22nC/g 과 24nC/g 의 높은 하전 값을 나타내는 반면, PET 재질을 하전물질로 사용하였을 경우 PE와 ABS 재질 모두 $\pm 5\text{nC/g}$ 이하의 하전 값을 나타내어, PS 재질이 PET 재질 보다 효과적임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 PS 재질을 최적 하전물질로 선정하여 조건변화 실험을 수행하였다.

Fig. 11은 하전물질로 PS 재질을 사용하여 하전된 해초 건조용 폐플라스틱을 재질분리 할 때 전극의 전압세기가 PE 재질의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 전압의 세기를 10kV에서 25kV 까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험결과 전극의 전압세기가 높을수록 PE 품위와 회수율이 증가하여 선별효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 전극의 전압세기 10kV일 경우 분리된 PE 재질의 품위와 회수율이 각각 97.9%와 60.6%로 가장 낮지만, 전압의 세기가 증가하면서 품위와 회수율이 함께 증가되어 전압의 세기가 가장 높은 25kV에서는 PE의 품위와 회수율이 각각 99.2%와 90.7%까지 증가된다. 이와 같이 전극의 전압이 증가하면서 선별효율이 증가하는 이유는 하전된 입자들의 하전량이 20nC/g 정도로 매우 낮아 이를 분리하기 위해서는 높은 전극의 전압세기가 필요하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 PE 재질의 품위와 회수율이 가장 높은 전극의 전압세기 25kV를 최적 실험조건으로 하였으며, 이때 PE 재질의 품위와 회수율은 각각 99.2%와 90.7%인 결과를 얻었다.

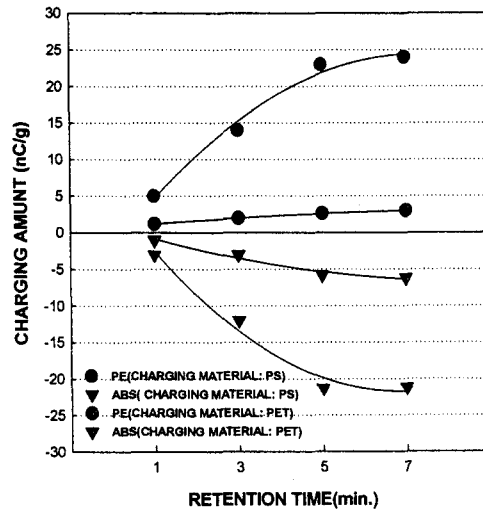


Fig. 10 Charging density on retention time in charging test.

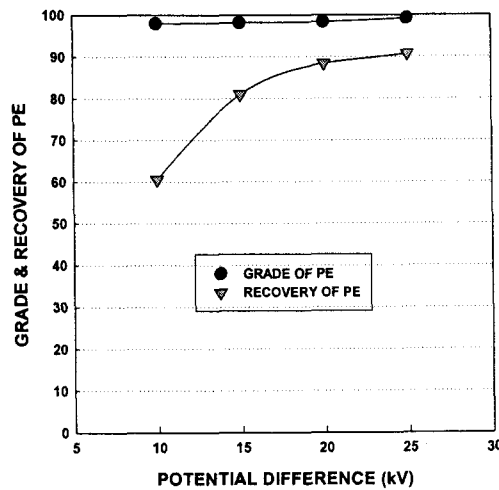


Fig. 11. The effect of potential difference on grade and recovery of PE in triboelectrostatic separation.

5. 결론

마찰대전형정전선별법을 이용하여 산지별 혼합 폐플라스틱의 재활용을 위한 재질분리 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 종말품 heavy group 폐플라스틱을 THF 용액으로 분석한 결과 PET와 PVC가 각각 78.5%와 21.5%로 구성되어 있음을 확인하였다. 폐자동차 tail lamp는 분석결과 ABS와 PMMA가 각각 55%와 45%로 구성되어 있었으며, 해초건조용 폐플라스틱의 경우 PE 재질이 85%, ABS 재질이 10% 그리고 Nylon 재질이 5%로 구성되어 있음을 확인하였다.

2. 수직 왕복형 하전장치를 이용한 종말품 heavy group 폐플라스틱의 하전물질 선정 기초 실험에서 PET와 PVC의 분극과 하전량을 높일 수 있는 PS, PP, PE 하전재질을 개발하였으며, 이때 각각의 하전량은 $\pm 20\text{nC/g}$ 이상이었다.
3. PP cyclone 하전장치를 이용한 종말품 heavy group 폐플라스틱의 분리실험 결과, 최적조건인 전극의 전압세기 30kV, 공기의 세기 2.5kg/cm^2 , splitter position -2cm 그리고 상대습도 40% 이하인 조건에서 PET의 품위와 회수율이 각각 98.5%와 75%인 결과를 얻었다.
4. 재활용을 위한 재질분리 기술이 이루어지지 않아 전량 소각이나 매립에 의해 처리되고 있는 폐자동차 tail lamp의 재질분리를 위한 하전물질 선정 실험결과, PMMA 재질이 가장 우수한 것으로 확인되었다. 또한 단일 재질과 혼합 재질의 하전효율을 비교하기 위한 실험에서 혼합재질의 하전효율이 높아, 입자와 입자 간의 충돌 및 마찰에 의해 하전이 이루어지는 것을 확인하였다.
5. 폐자동차 tail lamp의 재질분리를 위한 마찰하전형정전선별 실험에서, 최적 선별실험 조건인 전극의 전압세기 25kV, 시료이송 및 마찰하전을 유도하는 공기량 2.5kg/cm^2 , splitter position -3cm 그리고 상대습도 40% 이하인 실험조건에서 PMMA의 품위와 회수율이 각각 99.1%와 90.2%인 결과를 얻었다.
6. 해초건조용 폐플라스틱의 재질분리를 위한 실험결과, Nylon 재질은 공기분급으로 99.9% 제거됨을 확인하였다. 또한 PE와 ABS 재질을 분리하기 위한 하전특성 실험에서 PE와 ABS 재질을 각각 -22nC/g 과 24nC/g 까지 하전시킬 수 있는 PS 하전물질을 개발하였다.
7. 마찰하전형정전선별을 이용한 해초건조용 폐플라스틱 재질분리 실험결과, 최적 실험조건인 전극의 전압세기 25kV, 공기의 세기 3kg/cm^2 , splitter position 3cm 그리고 상대습도 40% 이하에서 PE의 품위와 회수율이 각각 99.2%와 90.7%인 결과를 얻어 해초건조용 폐플라스틱의 재활용이 가능한 기술을 개발하였다.