

摩擦荷電型 靜電選別에 의한 高比重 플라스틱 混合物의 材質分離에 관한 研究[†]

‡全好錫 · 白尙昊 · 朴哲賢* · 金炳坤

韓國地質資源研究院, *漢陽大學校

A Study on Material Separation of Heavy Group Plastics by Triboelectrostatic Separation[†]

‡Ho-Seok Jeon, Sang-Ho Baek, Chul-Hyun Park* and Byoung-Gon Kim

KIGAM

*Hanyang University

요 약

본 연구에서는 마찰하전형정전선별법을 적용하여 폐플라스틱 종말품으로부터 회수된 고비중 산물에 대한 재질분리 실험을 수행하였다. 하전장치의 재질선정을 위한 하전특성 연구결과, PP가 고비중 폐플라스틱의 재질분리에 가장 효과적인 하전재질로 확인되어, PP 재질을 이용한 cyclone 하전장치를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 cyclone 하전장치를 이용한 재질분리 실험결과, 최적 실험조건에서 PET의 품위와 회수율이 각각 98.5%와 86.2%인 결과를 얻어, 종말품 heavy group 폐플라스틱의 재활용을 위한 재질분리 기술을 확립하였다.

주제어 : 마찰하전형정전선별, 폐플라스틱 종말품, 고비중 플라스틱, 재질분리, 하전재질.

Abstract

In this study, we carried out the research on triboelectrostatic separation for heavy group plastics (PET, PVC) recovered from wet gravity separation. From the research on charging characteristic for the choice of charging materials, it was found that PP was optimum charging material to make high charging amount with opposite polarity for PET and PVC of heavy group. Therefore, we manufactured a charger of cyclone type using PP material for separation of PET and PVC. At optimum test conditions that used PP cyclone charger developed in this study, we developed a triboelectrostatic separation technique that can separate PET plastic up to grade of 98.5% and recovery of 86.2%. We established new separation technology that could recycle the PET and PVC heavy group plastics recovered from wet gravity separation.

Key words : triboelectrostatic separation, plastic waste, heavy group plastics, material separation, charging material.

1. 서 론

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 고

기능성, 위생성, 편리성 그리고 경제성 등의 우수한 재질 특성을 지니고 있어, 바이오플라스틱, 내연플라스틱, 섬유강화 플라스틱 그리고 섬층 플라스틱 등의 다기능 재질이 개발되어 사용량이 매년 크게 증가하고 있다.^{1, 2)}

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 이루어지

[†] 2006년 12월 28일 접수, 2007년 4월 3일 수리

*E-mail: hsjeon@kigam.re.kr

지 않아 사용량이 매년 10% 이상 증가하고 있는 실정이다. 따라서 5년 내에 1,100만 톤 이상의 플라스틱을 생산하여 연간 약 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.³⁾

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 분해시 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.⁴⁾

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.^{4,8)}

본 연구에서는 정전선별법 중에서 마찰하전형정전선별법을 적용하여 종말품 heavy group 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

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. Fig. 1에서와 같이 입자가 서로 다른 입자나 혹은 하전장치 표면에 충돌·마

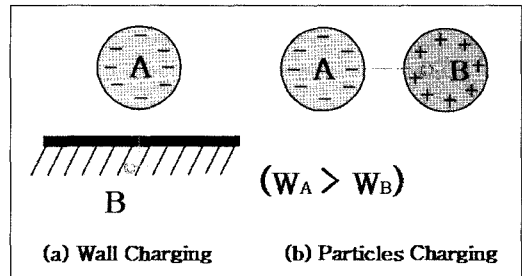


Fig. 1. A charging principle of triboelectrostatic separation.

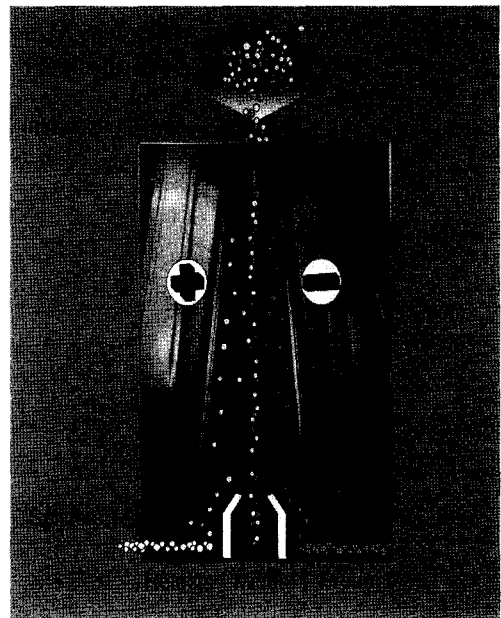


Fig. 2. Schematic representation of triboelectrostatic separation.

찰하게 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.^{9,10)}

3. 시료 및 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 대전광역시 재활용 사업장에서 습식 비중선별을 거친 heavy group 산물로서 대부분 PET와 PVC로 구성되어 있으며, 0.5% 정도의 기타 고비중 물질이 존재함을 확인하였다. 따라서 THF 용액을 사용하여 분석하였으며, 그 결과 PET와 PVC가 각각 78.5%와 21.5%로 구성되어 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 하전물질 선정을 위하여 종말품 heavy group 페플라스틱의 각 재질을 cutting mill로 파쇄하여 체에 의해 4~6 mm로 입도조절 하였다. 입도 조절된 시료는 자체 제작한 하전통(PVC, PP, PE, PS, PET, ABS)에 투입하고 수직왕복형 하전장치로 마찰·충돌시킨 후 faraday cage를 사용하여 하전극성 및 하전량을

측정하였다. 그리고 이를 기초로 하여 종말품 heavy group 페플라스틱의 재질분리를 위한 마찰하전형정전선별법의 하전물질을 선정하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에 사용된 수직왕복형 하전장치와 다양한 재질의 하전통을 나타낸 것이다.

Fig. 5는 분리 효율을 높이고 연속처리를 위해 제작한 cyclone 하전장치를 나타낸 것으로, 하전물질 선정 실험에서 규명된 종말품 heavy group 페플라스틱의 재질분리에 적합한 PP 재질이 cyclone 내부에 taping 되어있다. Cyclone 내부는 유체의 원심력에 의해 입자와 입자간, 입자와 벽과의 마찰력으로 입자가 하전될 수 있

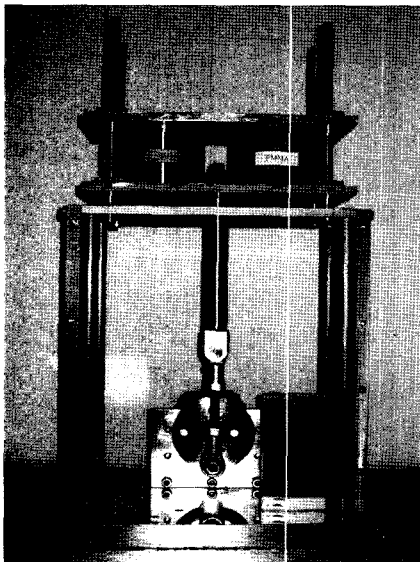


Fig. 3. The charger of a vertical motion.

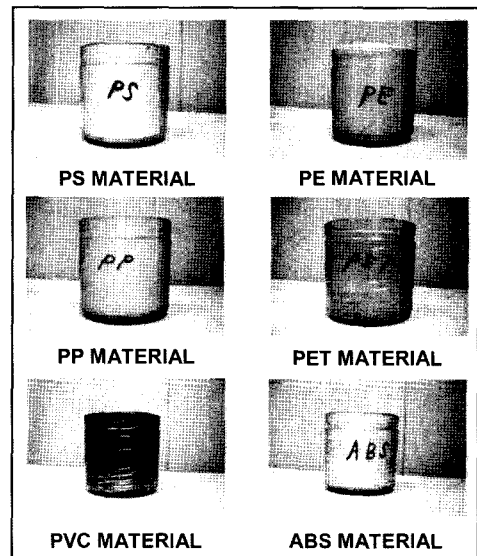


Fig. 4. The charging bottles of various materials.



Fig. 5. The tribo-charger of cyclone type.

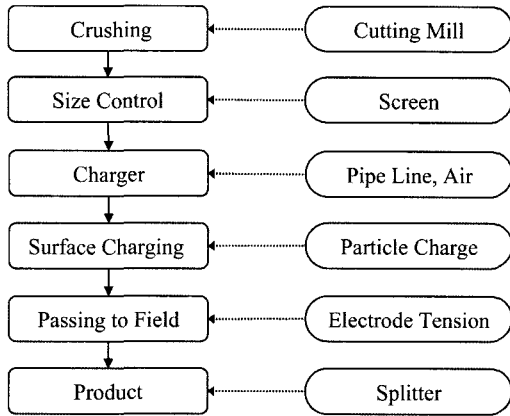


Fig. 6. Flowchart of triboelectrostatic separation.

도록 고안하였다. Fig. 6은 종말품 heavy group 페플라스틱의 재질분리를 위한 마찰하전형정전선별법의 실험공정을 나타낸 것으로, 시료를 cutting mill에 의해 파쇄하고 체에 의해 4~6 mm로 입도조절 하였다. 입도 조절된 시료는 PP 재질이 tapping된 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 선별 조건 및 분리효율을 확인하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 하전특성

Fig. 7은 종말품 heavy group 페플라스틱 분리에 효과적인 하전물질을 선정하기 위하여 수직왕복형 하전장치와 다양한 재질의 하전물질들(PS, PE, PP, PVC, ABS, PET)을 이용하여 상대습도 40% 이하, 하전장치의 상하 운동속도 300 rpm 그리고 하전시간 5분인 실험조건에서 종말품 시료(PET, PVC)에 대한 하전특성 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 6에서와 같이 PS, PE, PP 하전물질에서 종말품(PET, PVC)의 하전량이 약 ± 20 nC/g을 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 중간 값의 일함수를 갖는 PS, PE, PP 하전장치와의 마찰·충돌에 의해 전자 이동이 활발하여 서로 반대극성으로 분극 되는 대상 시료의 표

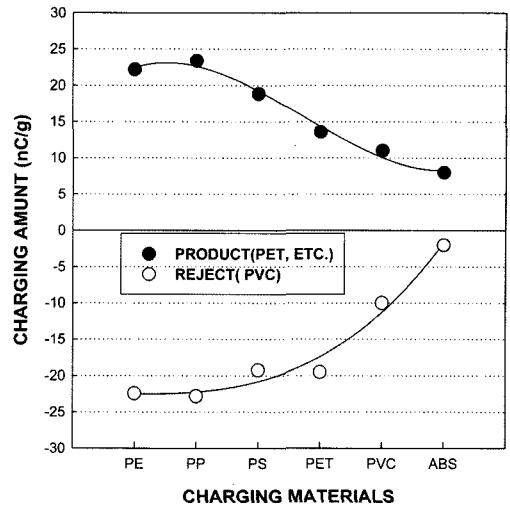


Fig. 7. Charging amount variation of waste plastics as charging materials.

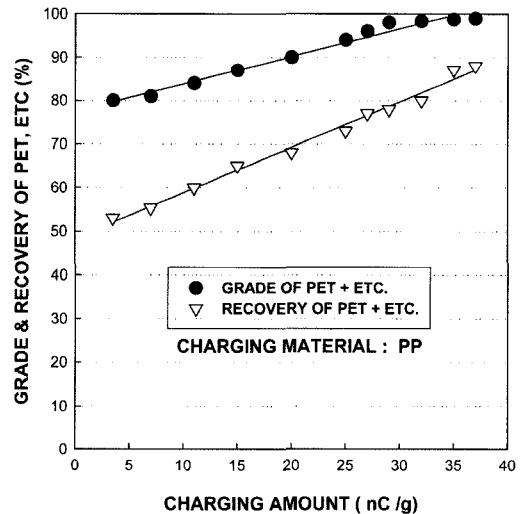


Fig. 8. The effect of charge density on grade and recovery of PET in triboelectrostatic separation.

면하전량이 증가하였기 때문이다. 즉, 일함수 값이 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.¹¹⁾

Fig. 8은 PET 분리효율에 대한 하전량의 영향을 나타낸 것으로, 전극의 전압세기를 30 kV로 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 98.7%의 품위와 87.1%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.

4.2. 분리특성

하전특성 실험에서 규명된 종말품 heavy group 페플라스틱의 재질분리에 적합한 PP 재질을 이용하여 연속 처리가 가능한 cyclone 하전장치를 개발하였으며, 재질분리를 위한 최적 실험조건을 확립하기 위해 다양한 조건변화 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 전극의 전압세기가 PET의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 전극의 전압세기를 5 kV에서 40 kV까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험결과 전극의 전압세기가 높을수록 PET의 품위와 회수율이 증가하여 30 kV 이상 되어야 효과적임을 알 수 있다. 즉, 5 kV에서 각각 85.0%와 64.0%이던 PET의 품위와 회수율이 30 kV에서는 각각 98.5%와 86.2%로 품위는 약 13%, 회수율은 약 22% 증가하였다. 또한 전극의 전압세기가 가장 높은 40 kV에서는 PET의 품위와 회수율이 각각 98.7%와 87.0%로 30 kV와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이와 같이 전극의 전압세기가

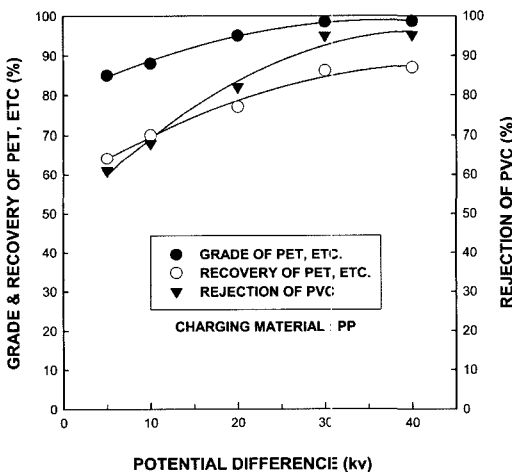


Fig. 9. The effect of potential difference on grade and recovery of PET in triboelectrostatic separation.

증가하면서 선별효율이 증가하는 이유는, 하전된 입자들의 하전량이 매우 작아 이들 입자들을 각각의 전극으로 끌어당기기 위해서는 높은 전기에너지가 필요하기 때문이다. 본 연구의 최적전압은 에너지 효율 및 분리효율을 고려하여 30 kV로 하였다.

Fig. 10은 공기의 세기가 종말품 heavy group 페플라스틱의 재질분리에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 실험결과 공기량이 증가할수록 PET의 품위와 회수율이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 공기의 세기가 가장 적은 4.15 m/s에서 PET의 품위와 회수율이 각각 88.0%와 71.0%로 가장 낮지만, 공기의 세기가 증가할수록 품위와 회수율이 증가하여 공기의 세기 10.28 m/s에서는 PET의 품위와 회수율이 각각 98.5%와 86.2%이었으며, 공기의 세기가 가장 큰 12.45 m/s에서는 각각 98.4%와 88.0%로 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같이 공기의 세기가 증가하면서 선별효율이 증가한 이유는 입자들의 하전효율이 증가하였기 때문이다. 즉, 공기의 세기가 증가하면 시료를 전기장으로 이송하면서 강한 충돌과 마찰에너지를 부여하기 때문에 입자들의 하전량이 증가되기 때문이다. 따라서 본 연구의 최적 공기의 세기는 10.28 m/s임을 알 수 있으며, 이보다 공기의 세기가 증가하면 뚜렷한 선별효율의 증가 없이 공기 에너지의 소비만 증가되는 것을 확인하였다.

하전된 입자들이 전기장을 통과하면서 분리될 때 하전성과 하전효율에 따라 낙하 위치가 다르기 때문에, 높은 선별효율을 얻기 위해서는 splitter position의 조절이 필요하다. Fig. 11은 splitter position을 중앙으로

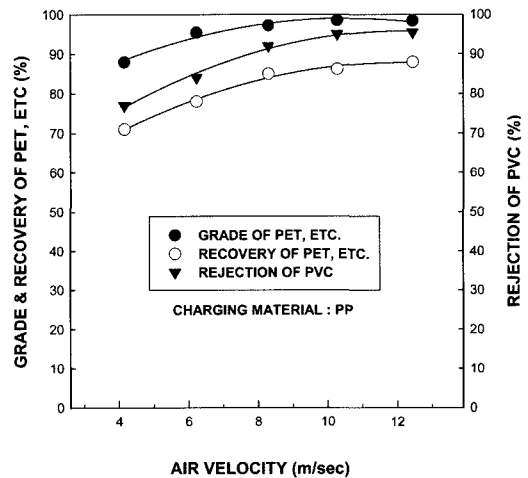


Fig. 10. The effect of air velocity on grade and recovery of PET in triboelectrostatic separation.

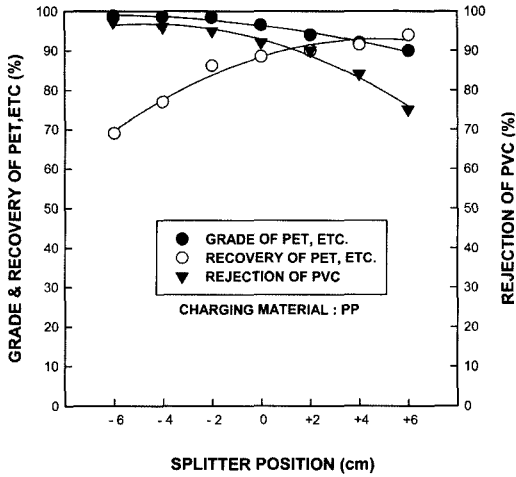


Fig. 11. The effect of splitter position on grade and recovery of PET in triboelectrostatic separation.

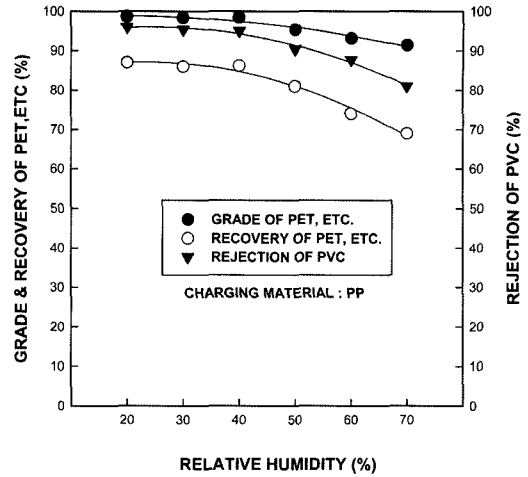


Fig. 12. The effect of relative humidity on grade and recovery of PET in triboelectrostatic separation.

부터 positive electrode와 negative electrode 쪽으로 각각 6cm까지 이동하며 실험한 결과이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 PET의 품위는 splitter position이 중앙으로부터 negative electrode 쪽으로 이동하면 증가하고, positive electrode 쪽으로 이동하면 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 PET의 회수율은 splitter position이 중앙으로부터 negative electrode 쪽으로 이동하면 감소하고, positive electrode 쪽으로 이동하면 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 PET의 경우 하전재질인 PP와 다른 시료인 PVC 보다 work function 값이 작아 positive로 하전을 띄기 때문이다. 또한 splitter position에 따라 PET와 PVC의 회수량이 달라지고, 입자의 하전량이 개개의 입자마다 다르기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 PET의 품위와 회수율을 고려하여 splitter position이 negative electrode 쪽으로 2cm 이동한 지점을 최적조건으로 하였으며, 이때 PET의 품위와 회수율이 98.5%와 86.2%인 결과를 얻었다.

Fig. 12는 종말품 heavy group 폐플라스틱의 재질분리에서 실험실의 상대습도가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 실험결과 상대습도 40%까지는 PET의 품위와 회수율에 큰 영향을 미치지 않지만, 이보다 상대습도가 증가하면 PET의 품위와 회수율이 크게 감소되어 선별효율을 크게 떨어뜨리게 되는 것을 알 수 있다. 즉, 상대습도가 가장 낮은 20%일 때 PET의 품위와 회수율이 각각 98.7%와 87.0%로 가장 높지만, 상대습도 40%에서도 각각 98.5%와 86.2%로 큰 차이를 보이지 않는다.

그러나 상대습도가 40% 이상이 되면 선별효율이 점차 저하되어 상대습도가 가장 높은 70%일 때 PET의 품위와 회수율이 각각 97.4%와 69.0%로 크게 감소되는 것을 알 수 있다. 따라서 선별효율을 높이기 위해서는 상대습도가 40% 이하로 유지되어야 함을 알 수 있다. 이와 같이 상대습도가 재질분리에 영향을 미치는 이유는, 마찰하전형정전선별에서 상대습도가 높으면 입자의 하전효율을 감소시키고 하전된 입자들의 방전을 진행시키기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 마찰하전형정전선별법을 적용하여 종말품 heavy group 폐플라스틱을 대상으로 재질분리를 위한 하전특성 및 분리특성 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에 사용된 시료는 습식 비중선별을 거친 heavy group 산물로서 대부분 PET와 PVC로 구성되어 있으며, THF 용액으로 분석한 결과 PET와 PVC가 각각 78.5%와 21.5%로 구성되어 있음을 확인하였다.
2. 수직 왕복형 하전장치를 이용한 종말품 heavy group 폐플라스틱의 하전물질 선정 기초실험에서 PET와 PVC의 분극과 하전량을 높일 수 있는 하전재질은 PS, PP, PE 재질이었으며, 하전량은 ± 20 nC/g 이상이였다. 또한 PET의 분리효율에 대한 하전량의 영향을 관찰하기

위한 실험에서 하전량이 약 3.5nC/g에서는 PET의 품위와 회수율이 각각 80%와 53%로 낮았으나, 하전량이 증가하여 약 35nC/g 이상에서는 98.7%의 품위와 87.1%의 회수율을 나타내어 하전량이 증가할수록 PET의 분리효율이 증가함을 알 수 있었다.

3. PP cyclone 하전장치를 이용한 분리실험 결과, 최적조건인 전극의 전압세기 30 kV, 공기의 세기 10.28m/s, splitter position -2cm 그리고 상대습도 40% 이하인 조건에서 PET의 품위와 회수율이 각각 98.5%와 86.2%인 결과를 얻어, 종말품 heavy group 폐플라스틱의 재활용을 위한 재질분리 기술을 확립하였다.

사 사

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

참고문헌

- Hoberg H., *et al.*, 1997: Material Recycling of Thermoplastics, XX International Mineral Processing Congress, pp. 415-419.
- 김혜태, 2002: 혼합 폐플라스틱 발생실태 및 재활용기술 현황에 관한 조사연구, 한국자원재생공사.
- 박철현, 전호석, 김병곤, 김완태, 2006: 플라스틱 대전서열 및 하전특성 연구, 한국자원리사이클링학회 춘계논문집, pp. 113-118.
- 전호석, 박철현, 김병곤, 박재구, 2006: 생활계 폐플라스틱 재활용을 위한 정전선별 기술개발, 한국자원리사이클링학회지, **15**(1), pp. 28-36.
- Li, T. X., Ban, H., Hower, J. C., Stencel, J. M., and Saito, K., 1999: Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: A Potential Application in Space Exploration, *Journal of Electrostatics*, **47**, pp. 133-142.
- Jean Cross, 1987: *Electrostatics : principles, problems and applications*, Adam Hilger, pp. 17-46, pp. 237-242, pp. 425-433.
- Jing Wei and Matthew J. Realf, 2003: Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling, *AIChE Journal*, **49**(12), pp. 3139-3149.
- Dr. Michael B. Biddle, 1999: Electrostatic separation, APC Durables recycling workshop III, pp.118 -127.
- Mihai Lungu, 2004: Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect, *Minerals Engineering*, **17**, pp. 69-75.
- Matsushita Y., Mori N., 1999: Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades, *Electrical Engineering in Japan*, **127**, pp. 33-40.
- H. S. Jeon, C. H. Park, B. K. Kim, J. K. Park, 2006: Development of triboelectrostatic separation technique for recycling of final waste plastic, *Geosystem Engineering*, **9**(1), pp. 21-24.

全 好 錫

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 선임연구원
- 당 학회지 제10권 3호 참조

白 尙 昊

- 현재 한국지질자원연구원 신진연구원
- 당 학회지 제15권 6호 참조

朴 哲 賢

- 현재 한양대학교 지구환경시스템공학과 박사과정
- 당 학회지 제15권 1호 참조

金 炳 坤

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 책임연구원
 - 당 학회지 제15권 1호 참조
-