

미국 플라스틱 폐기물 재활용 기술 동향

윤여환 / 미국 Virginia Polytechnic Institute and Statd Universtity 교수

I. 서두

1986년 이후 미국내 플라스틱 재생업체수는 6배나 증가했다.

이처럼 플라스틱 재활용은 가장 빨리 성장하는 산업중의 하나로 도시폐기물(Municipal Solids Waste : MSW)로부터 새로운 원료를 생산한다. 2000년에 2,685백만 파운드의 플라스틱(1,511파운드의 플라스틱병 포함)이 재활용되었고 52,000명이 고용되었다. 본 자료는 미국내 플라스틱 재활용의 상태와 최근 기술적 발전에 대해 간단히 언급하고자 한다.

1. 소개

2000년도 미국거주자, 사업자, 단체들은 거의 232백만 톤의 도시폐기물을 버렸으며 이는 한 사람이 하루에 대략 4.5파운드를 버린 것에 해당한다(1960년 2.7파운드 버림). 도시폐기물의 주성분은 종이 34.7%, 깎은 잔디 12.0%, 음식 찌꺼기 11.2%, 플라스틱 10.4%, 금속 7.8%, 유리 5.5%, 나무 5.5%, 고무·가죽·섬유류

6.7%, 기타 3.2%와 같다.

현재 30.1%의 도시폐기물이 회수되고 재활용되거나 퇴비화되고 있으며 14.5%가 연소설비시설에서 태워지고 55.3%가 매립되고 있다.

1990년 퇴비화를 포함한 재활용량은 3천3백만 톤이었지만 과거 매립하거나 소각되었던 폐기물이 재활용되면서 6,990만 톤으로 늘어났다. 도시폐기물 재활용률이 높아진 원동력은 매립지의 급격한 감소이며 1988년 8,000에서 1966년 2,400곳, 2000년에는 1,967곳으로 격감했다.

재활용은 지구기후에 영향을 끼치는 온실가스 방출을 감소시키는데도 일조하였다. 2000년에는 최소한 연 660조BTU(매년 6억만 가정에서 사용되는 에너지에 해당하는 양)의 절약이 재활용을 통해서 얻어졌다.

1960년대 오직 6.5%의 도시폐기물만이 재활용되었다. 그러므로 미광무국은 1966년에서 1979년의 기간동안 방대한 파일럿 규모의 시험 프로그램을 수행하였다. 이 선구자적 작업의 결과는 오늘날 다른 많은 국가에서 사용되어지고 있다.

[그림 1]은 미광물국(USBM)에서 개발한 전형적인 처리공정도를 보여준다.

원료는 double-opposed frail mill에서 굵게 잘려진다. 이 기계는 병과 깡통은 파쇄하지 않고 연소될 물질(63~83% 함유)만 파쇄되도록 설계되었다. 덩어리 형태의 금속물질은 날의 손상을 주지 않고 이 밀을 통과한다.

슈레더 배출물은 위에 후드가 설치된 콘베이어 벨트로 떨어진다.

슈레더에서 배출된 공기의 대부분은 송풍기의 역할을 하며 후드를 통과한다. 이때 경량물질은 공기와 함께 이동되고 무거운 물질은 벨트에 남

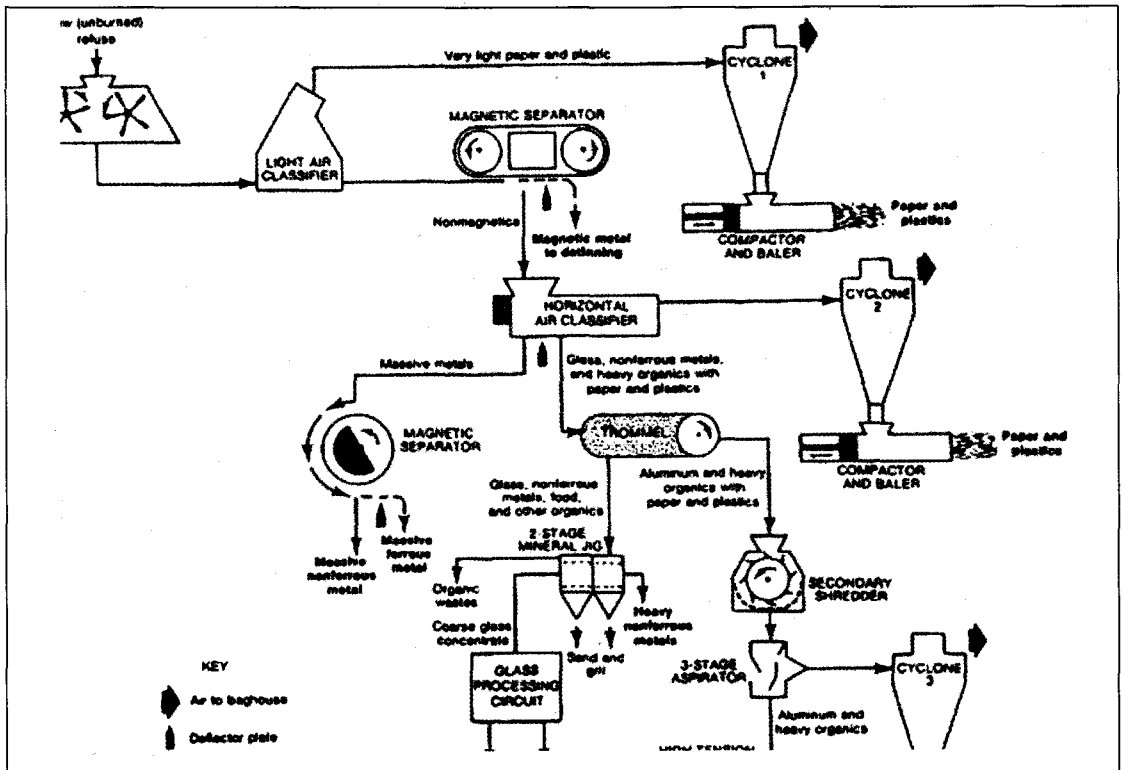
는다.

경량물질은 대부분 연소할 수 있는 물질로 사이클론으로 회수되어 압축기로 보내진다. 무거운 물질은 벨트를 따라 자선기(suspended belt magnetic separator)로 이동해 스틸 캔과 가벼운 철물질이 회수된다.

여기서 다음 3가지 산물이 회수된다.

- 1) 가벼운 연소물질들 - 교대로 사이클론과 압축기를 오간다.
- 2) 중간무게의 물질들 - 주로 유리, 알루미늄 캔, 나무, 기타 무거운 연소물질들
- 3) 덩어리 상태의 금속들 - 자선기로부터 자

[그림 1] 미광물국(VSBM)에서 개발한 공정처리도



성과 비자성 금속으로 분리된다.

중간무게의 물질들은 1인치 간극의 트롬멜 스크린으로 급광되며 이때 스크린 통과 산물은 mineral 지그(jig)로 투입된다. 여기서 음식찌꺼기와 다른 가벼운 유기폐기물의 대부분이 큰 유리조각들로부터 분리된다.

지그는 본 공정중에서 최초의 습식단위조작이다. 지그로부터 배출된 조립유리조각 산물들은 건조되고 광학분리기를 이용하여 투명(flint), 노랑, 녹색의 색깔별로 분리된다.

트롬멜 스크린 위의 산물은 0.5~2인치 조각으로 파쇄되고 특별히 고안된 공기분급기로 이동된다. 경량 연소물은 사이클론으로 옮겨지고 무거운 물질들은 바닥에 모인다.

무거운 물질들은 알루미늄과 나무, 고무, 두꺼운 플라스틱과 같은 연소물 등으로 구성되어 있다. 그리고 알루미늄은 정전선별기에 의해 연소물로부터 분리한다.

2. 플라스틱 재활용

2000년, 재활용된 플라스틱 용기의 부피는 151천만 파운드에 이르고 이중 745백만 파운드가 HDPE이며 758백만 파운드가 PET이다.

HDPE는 우유, 세제, 샴푸 포장용기로 사용되고 PET는 음료수, 물, 샐러드 드레싱용기 등으로 쓰인다. 2000년에 HDPE와 PET는 생산된 플라스틱 용기의 45%와 50%를 차지했고 그 용기들 중 50%와 49%가 재활용 됐다.

1990년 이후 플라스틱 용기의 재활용은 6배나 증가하였고 플라스틱 재활용사업은 3배나 신장했다.

결과적으로 전체 플라스틱 용기들 중 대략 23%가 2000년에 재활용되었다.

최종 소비재 플라스틱을 재활용하고 다루는 산업은 대략 1,700여 개에 이르며 52,000명의 고용효과를 창출한다.

오늘날 미국에서 12,000여 개가 넘는 단체가 재활용서비스를 제공한다.

2-1. 분류

플라스틱 용기들은 거리 수집물들과 폐기처리장들을 거쳐 수집된다. 수집된 플라스틱들은 폐기용품 처리장(material recovery facilities)이나 시설 플라스틱가공 전문업체로 보내진다.

총체적인 도시폐기물수집체계(commingled municipal program)에서 수집된 플라스틱들은 종류별로 분류할 수 있는 MRF로 보내지는 반면 제조상 불량품 수집체계(source separated program)에서 수집된 것들은 직접 플라스틱 가공업체로 보내진다.

MRF에서 플라스틱병들과 용기들은 폐지로부터 분리된 다음 자선기를 이용하여 금속캔을 제거한다.

그 다음 공정으로 와류정전 선별기를 이용하여 알루미늄캔을 제거하고 연속적으로 비중선별기를 이용하여 유리함유물을 제거한다.

그리고 나서 플라스틱병들은 수작업을 통해 PET, HDPE, PVC, PP병 등 종류별로 분류된다. 분리된 플라스틱들은 잘려져서 재생업체에 넘겨진다.

그러나 수작업은 노동집약적이어서 비용이 많이 든다. 따라서 최근 많은 여러 종류의 자동분류기체들이 개발되었다.

[그림 2]는 선별기계의 작동원리를 나타내는 그림이다. 원료는 물질들의 종류를 판별하는 센서나 일련의 센서들이 부착된 장치(판) 위를 통과한다.

센서신호는 컴퓨터에서 처리되어 솔레노이드로 보내어진다. 그러면 솔레노이드로부터 압축공기를 제어함으로 원료흐름방향과 다른 방향으로 종류가 다르게 판별된 물질을 제거한다. 몇몇 자동분류기들은 광학센서를 이용하기도 하고 적외선이나 X-ray fluorescence(XRF)센서를 이용하기도 한다.

오늘날 이용하는 자동분류기들은 빠른 이송속도에서 수지(樹脂)종류별로 플라스틱 병들을 분리할 수 있다.

오늘날 여러 회사들은 광복합물이나 분자표식기가 첨가된 새로운 센서기술들을 개발하여 종

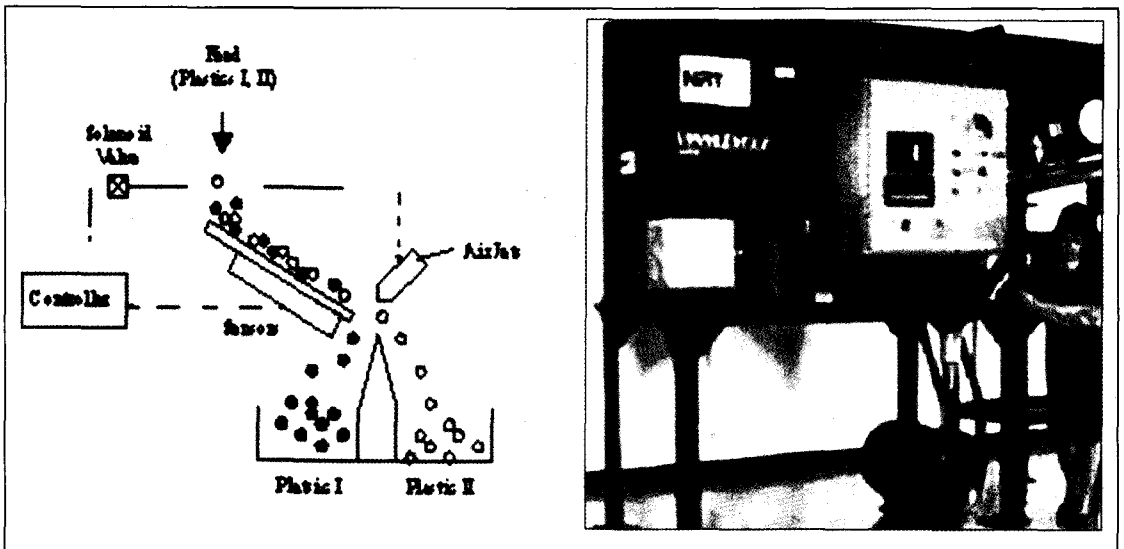
류별 판별뿐 아니라 수지의 품위까지 판별되게 하고 있다.

현재, 미국내 두 개의 회사가 플라스틱병 자동분류기를 생산하고 있다. National Recovery Technologies, Inc.(NRT)와 Magnetic Separation Systems(MSS)로서 둘다 Tennessee, Nashville에 위치하고 있으며 MRF와 플라스틱 회수체계(PRF)를 가지고 있다.

자동분류기는 다음과 같은 4개의 탐색장치들이 설치되어 있다.

- 고밀도배열 적외선(장치)- 내용물이 투명, 반투명, 불투명여부를 인지
- 색센서장치- 라벨을 무시하고 내용물내 안료의 색만 판별
- X-ray 투과장치- 염소원자를 감지하여 PVC를 판별

[그림 2] 선별기계의 작동원리



· 근적외선 스펙트럼 탐색기 - 다른 센서로부터 데이터를 받아 수지 종류를 판별하고 확인
Garden Services PRF에서 이용된 MSS체제는 플라스틱을 다음 부류로 분류한다.

- PVC
- HDPE 파란색과 하얀색
- HDPE 빨간색, 주황색, 노란색
- HDPE 색깔함유
- PET
- HDPE 천연 · PP

전체 시스템에 들어가는 비용은 대략 250,000 달러이다.

2-2. 파분쇄

플라스틱 용기들이 재질별로 분리되면 이들은 알루미늄, 오염물, 오일, 유리, 아교와 같은 불순물을 단체분리하기 위해 판상으로 파쇄된다.

이들 공정은 선별 전에 맥석으로부터 유용광물을 단체분리하기 위해 광물을 파분쇄 하는 것과 매우 유사하다. 선별전에 플라스틱을 파쇄하는데 사용하는 파쇄기는 매우 다양하다. 파쇄기(shredder)는 2개 혹은 4개의 절단축을 이용하며 절단기의 회전속도 조절은 파쇄에 있어서 매우 중요하다. 마대와 스티로폼 등과 같이 체적이 큰 산물을 위해 회전 스크류 축을 사용할 수 있다. 그리고 서로 부착되거나 뒤엉켜 있는 큰 폐기물을 분리하고자 할 때는 길로틴이라는 절단기를 사용한다.

플라스틱이 분리되고 세척된 다음 1/8"~1/4"의 입도로 그레놀화 될 것이다. 마찰열에 의해 일어날 수 있는 스크린의 막힘 현상과 품질저하

현상을 방지하기 위해 Wet-Milling이 종종 사용된다. 만일 미분쇄가 필요하다면 플라스틱은 극저온 분쇄기에 의해 분쇄할 수 있다.

2-3. 비중선별

석탄으로부터 일반광물들을 분리하기 위하여 비중차를 이용한 다양한 기술들이 사용되었다.

예를들어, 비중이 1.4(S.G.)인 석탄과 비중인 2.5(S.G.)인 맥석 광물들로부터 이들 사이의 비중을 갖고 있는 중액선별기에의해 분리할 수 있다.

이와 같은 기술은 플라스틱으로부터 구리, 알루미늄 그리고 철과이 비중이 높은 물질들을 분리하는데도 사용된다. 플라스틱과 금속은 큰 비중차이 때문에 선별이 매우 효과적으로 이루어질 것이다.

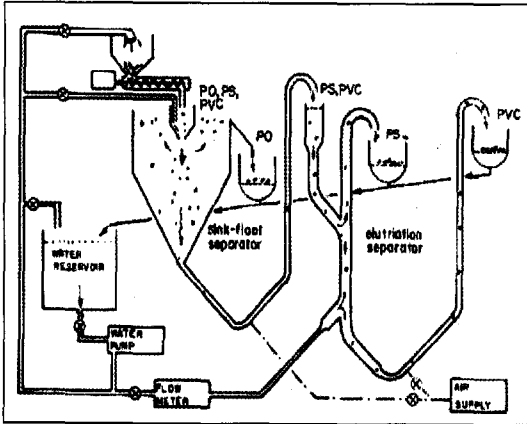
비중선별 기술을 사용하여 여러 종류의 플라스틱의 재질분리에 응용하는 것은 쉽지가 않다.

그럼에도 불구하고 보다 가벼운 플라스틱으로부터 비중이 높은 플라스틱을 선별하는데 이 기술을 이용하고 있다. [표 1]은 여러재질의 플라스틱 비중값을 나타낸 것이다.

[표 1] 재질별 플라스틱 비중값

Plastics	S.G.
PP	0.90~0.92
LDPE	0.91~0.93
HDPE	0.94~0.96
PET	1.35~1.38
PVC	1.32~1.42
PS	1.03~1.06

[그림 3] 비중에 의한 플라스틱 분리방법



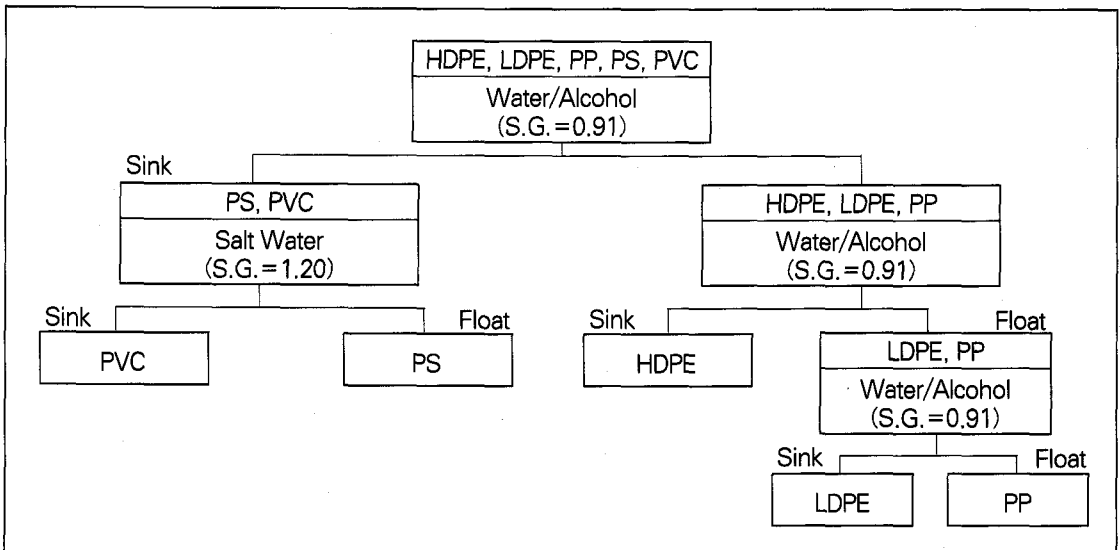
[그림 3]은 동일 재질의 플라스틱으로부터 다른 종류의 플라스틱을 분리하기 위해 사용된 연속공정의 부침(Float/Sink) 비중선별 공정을 나타낸 것이다. 알콜 및 소금과 같이 비중이 다른

Dense Media가 물과 혼합되어 준비되었다.

[그림 4]는 비중에 의한 플라스틱 분리의 다른 방법을 나타낸 것이다. 혼합된 플라스틱이 부침(Float/Sink) 선별기로 급광되면, 이곳에서 Polyolefins(올레핀 계열 : PE, PP)은 부유되어 제거되고 다른 플라스틱은 침전되어 분리가 이루어진다. 그리고 Heavy Fraction 물질들은 세척 컬럼으로 이동되어, 여기서 PS는 물의 흐름과 함께 이동되고 PVC는 침전되어 이루어지게 된다. 세척 컬럼 바닥으로 이동된 PVC는 수거 침전조에 남게된다. 모든 플라스틱 산물들은 스크린에서 수거되며 그러므로 대부분의 물은 재 활용이 된다.

14%의 플라스틱을 함유함 급광물이 물을 이용한 선별공정에 사용되었다. 선별실험 산물의 효율을 평가하기 위하여 이들 세 산물을 실험실

[그림 4] 연속공정의 부침 비중선별 공정



[표 2] PO와 PS산물의 오염도

Products		% wt in S.G. fractions			
	% wt	<1.0	1.0~1.2	1.2~1.5	>1.5
PO	48	97.0	3		
PS	33	0.5	95	4.5	

부침(Float/Sink)실험에 의해 분석하였다.

[표 2]와 같이 PO와 PS 산물은 PVC 산물과 비교하여 거의 오염되지 않았다.

2-4. 정전선별

Work Function 값이 다른 물질들이 서로 충돌을 하게되면, 전자는 한 물질에서 다른 물질로 이동하게 된다. [표 3]은 몇몇 범용플라스틱의 Work Function 값을 나타낸 것이다.

또한 다른 두 종류의 플라스틱이 마찰을 하게 되면 이들 플라스틱은 각각 다르게 하전이 되는 경향이 있다. 따라서 이들 하전된 입자들을 높은

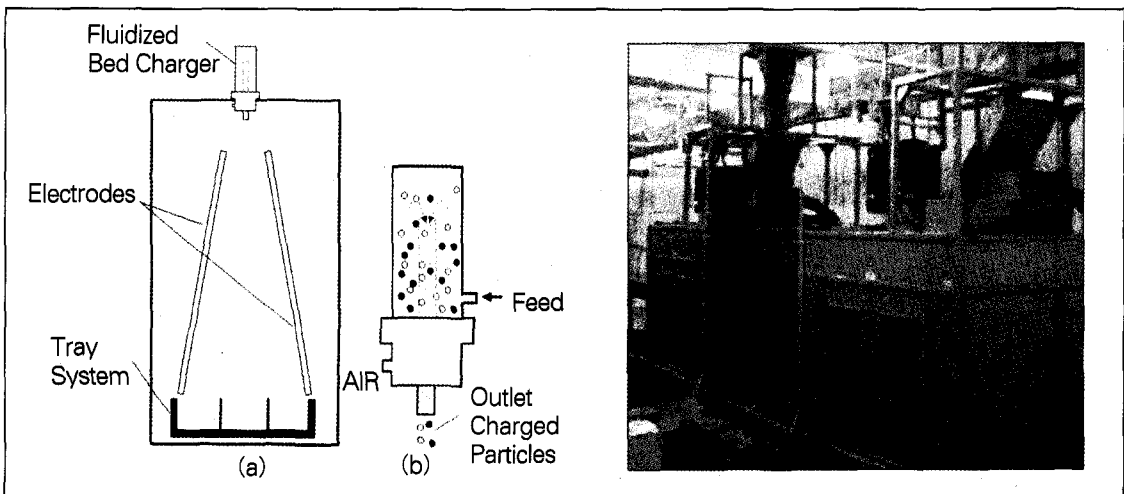
전류가 흐르는 전기장으로 보내게 되면 분리가 이루어 지게된다. 이러한 선별법을 마찰하전형 정전선별법이라고 한다.

[그림 5]는 이 기술의 개략도를 나타낸 것으로 분리하려고 하는 입자들은 유동층 하전장치에서

[표 3] 범용 플라스틱별 Work Function값

Plastics	Work function(eV)
Acrylic	2.9
Nylon	3.6
PVC	6.5
PE	7.2

[그림 5] 기술개략도



[표 4] 재질이 다른 두개의 혼합플라스틱으로부터 얻은 실험결과

Plastics		ΔW_e^* (eV)	Recovery(%)		Extract content	
A	B		A	B	A	B
Acrylic	Nylon	0.7	97.2	64.1	81.0	98.9
PVC	PE	0.7	98.9	98.7	99.4	100
Nylon	PVC	2.9	92.5	97.8	99.8	98.0
Acrylic	PVC	3.6	93.4	97.2	99.8	96.5
Nylon	PE	4.3	96.4	98.2	99.9	99.5

서로 충돌이 이루어 지게된다.

유동층 하전장치에서 빠져나온 하전된 입자들은 전기장이 형성된 두 개의 전극사이로 들어와서 분리가 이루어진다. [표 4]는 재질이 다른 두개의 혼합플라스틱으로부터 얻은 실험결과를 나타낸 것이다.

최근에는 플라스틱 입자들을 하전을 위한 새로운 방법들이 Inculet 등에 의해 개발되었다.

이 방법은 분리하려는 플라스틱의 사이의 Work Function값을 갖는 원형 파이프를 통해 플라스틱을 이동시키면서 하전을 시키는 것이

다. 이와 유사한 연구가 석탄회로부터 미연탄소분을 제거하기 위해 사용되었다.

2-5. 부유선별

[그림 6]은 PP, PE, PS, PVC 등과 같은 여러 종류의 플라스틱의 표면에서 물방울의 접촉각을 나타낸 것이다. 이들은 Saito에 의한 Sodium Lignosulfonate의 존재 여부에 의해 측정된다.

순수한 물에서 모든 플라스틱은 80° 보다 큰 접촉각을 나타내는데 이는 플라스틱이 소수성이라는 것을 나타내는 것이다.

[표 5] 부유선별 결과

Feed		Float		Sink	
Plastics	Composition(%)	Grade(%)	Recovery(%)	Grade(%)	Recovery(%)
PS	50		98.4		
PVC	50			96.5	98.4
PP	50		98.8		
PVC	50			97.8	98.8
PP	47	97.0	98.9		
PS	53			99.9	97.4
PP	50	98.8	97.3		
PE	50			97.3	98.0

[표 6] PVC와 PET의 회수율

	Amount added	Float	Residue
PET	7.92g	0.53g	7.39g
PVC	7.78g	7.59g	0.19g

이들 플라스틱간의 접촉각의 차이는 너무 작아 부유선별에 의해 분리하기란 쉽지가 않다. 그러나 Wetting 시약의 농도를 증가시킴으로 접촉각이 크게 작아져 플라스틱간의 접촉각 차이는 증가하게 된다. 이러한 현상은 부유선별에 의해 플라스틱을 선별할 수 있는 기초를 제공하게 된다. [표 5]는 Wetting 시약으로 Sodium Sulfonate를 사용한 Saito 등에 의해 얻은 부유선별 결과를 나타낸 것이다.

Sisson은 부유선별을 위해 플라스틱 표면의 소수성을 조절할 수 있는 다른 방법을 개발하였다. 그는 2~15% NaOH(or KOH)와 0.005~0.1%의 non-ionic 계면활성제를 포함하고 있는 액속에서 PET와 PVC의 혼합물을 조건화하면 PET는 접촉각이 25° 이하로 감소하게되고 PVC

는 45° 이상으로 남게되는 것을 발견했다.

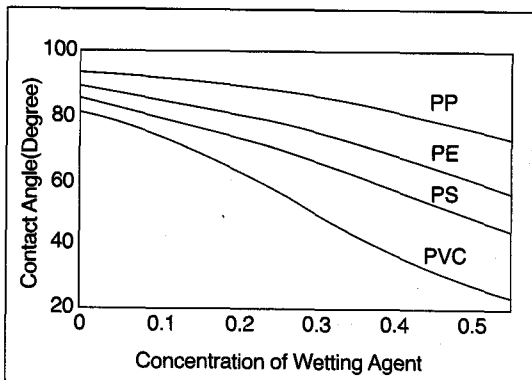
[표 6]은 1 : 1로 혼합된 플라스틱을 5%의 NaOHdyddor과 0.05% NEODOLR91-6로 조건화한 후 얻어진 실험결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 93.5%의 PVC 회수율과 97.5%의 PET 회수율을 나타내고 있다.

3. 요약 및 결론

플라스틱의 재활용은 미국에서 매우 중요한 부분을 이루게 되었다. 그러나 이것은 여전히 초기 단계에 머무르고 있어 많은 문제를 야기시키고 있다. 오늘날 응용되고 있는 여러 선별기술은 전통적인 광물선별 산업으로부터 유래가 되었다.

분광 Sorting, 비중선별, 정전선별, 부유선별 등이 대도시 폐기물로부터 플라스틱을 회수하는데 폭넓게 이용되고 있다. 이들 기술의 발전과 다른 선별 기술이 효율을 향상시키고 미래의 산업성장에 기여하고 있다. ☐

(그림 6) 플라스틱 표면 물방울 접촉각



신제품 및 업체 소개
월간 포장계 편집실

TEL : (02)835-9041

E-mail : kopac@chollian.net