

廢플라스틱의 選別技術

- 國內資源의 有效利用을 위한 處理 및 回收技術動向調查(3) -[†]

[†]吳在賢 · 金美星* · 申熙德** · 姜楨鎬*** · 閔芝源****

延世大學校 名譽教授, 에너지管理工團, 韓國科學技術情報研究院
自動車리싸이클링專門家, (社)韓國資源리싸이클링學會

Recent Developments in Plastic-Plastic Separation Techniques[†]

[†]Jae-Hyun Oh, Mi-Sung Kim*, Hee-Duck Shin**
Jung-Ho Kang*** and Ji-Won Min****

*Professor Emeritus of Yonsei University, *Korea Energy Management Corp.*

***Korea Institute of Science and Tech. Information, ***ELV Recycling Specialist*

*****The Korean Institute of Resources Recycling*

요 약

현대생활은 플라스틱 없이는 성립되지 않으며, 폐플라스틱량도 방대하다. 한편 2003년부터 EPR(확대생산자책임)제도가 도입됨에 따라 생활계 혼합 폐플라스틱 발생량이 급증하였다. 플라스틱 리싸이클링에는 플라스틱-플라스틱 간의 선별이 기본으로 되어 있다. 플라스틱간의 선별기술 고도화가 폐플라스틱 재활용의 관건이라 하여도 과언이 아니다. 본고에서는 이와 같은 관점에서 플라스틱 상호선별에 초점을 맞추어, 연구동향과 실용화되어 있는 기술을 기술하고자 한다.

주제어 : 플라스틱, 선별, 리싸이클링, 파이롯트 플랜트

Abstract

Plastic supply and recycling are increasingly becoming matters of social concern. In our country, Extended Producer Responsibility(EPR) system has been adopted in 2003 to expand recycle and reuse of waste resources at producer side, and due to expansion of the EPR system, amount of the mixed plastic waste generation has been drastically increased. Plastic-plastic separation is most fundamental technique to achieve effective plastic recycling. This paper reviews recent developments in plastic-plastic separation techniques and describe future tasks. The mechanisms of each separation which contain gravity separation, electrostatic separation, flotation, and separation of automotive shredder residue are described, and commercial scale and lab-scale results are introduced.

Key words : plastic, separation, recycling, pilot plant

1. 머리말

플라스틱리싸이클링의 어려운 점으로 ① 종류가 다양함 ② 분리·선별이 곤란함 ③ 열에 의해서 물성이 저하함 ④ 가열시 유해물질이 발생함 등을 열거하고 있다.

그러나, 근본적으로는 플라스틱 버진(virgin) 원료가 염가라는 데 있다. 당연한 일이지만 리싸이클링기업도 이윤을 창출하는 것이 원칙으로 되어있다. 환경보전이라든가 건강관리가 문제되기도 하지만, 기본적으로는 플라스틱의 시장가격이 중요한 요소이고 리싸이클의 기준으로 되어 있다. 즉 재생자원이 시장에서 경쟁력을 갖고 있을 때 폐기물은 경제가치를 갖고, 자연적으로 리싸이클된다.

다행히 2003년도부터 확대생산자책임(EPR)제도가 도

[†] 2007년 6월 28일 접수, 2007년 7월 30일 수리

*E-mail: kirr@kirr.or.kr

입됨에 따라 생활계 폐플라스틱의 재활용이 증가하고 있으나, 머티리얼 리사이클링과 같은 고도이용은 쉽지 않다. 따라서 플라스틱 리사이클링을 설계할 때 다음과 같은 컨셉트의 정립이 바람직하다.

- ◎ 혼합폐플라스틱부터 올레핀계소재를 선별해서, 다소 이물이 혼입해도 가공할 수 있는 저급형 재활용(cascade recycle).
- ◎ 고로환원, 열회수 등의 용도로 사용되는 폐플라스틱으로부터 PVC를 제거하는 경우. 이 경우는 물성차를 이용한 용이한 선별.
- ◎ 폐전선 피복재 및 PET병과 같은 소재별 선별. 이 경우에는 feed의 성상이 명확하며, 물성과 품질의 변동이 적음.
- ◎ 복합제품부터 플라스틱을 소재별로 선별회수하여, 동일 혹은 유사용도로 재이용하는 고도의 머티리얼 리사이클링

이러한 플라스틱 리사이클의 실용화는 플라스틱-플라스틱 간의 선별이 기본으로 되어있다. 플라스틱간의 선별기술의 고도화가 폐플라스틱 재활용의 관건이라 하여도 과언이 아니다. 본고에서는 이와 같은 관점에서 플라스틱 상호선별에 초점을 맞추어, 연구동향과 실용화되어 있는 기술을 소개하고자 한다.

2. 플라스틱의 利用과 폐플라스틱 발생에 대한 통계¹⁾

Table 1은 2005년도 우리나라 수지 생산·수출 및

내수량을 표시한 것이다. 13,135,297톤을 생산하여 6,150,275톤을 수출하고, 7,457,172톤을 국내에서 소비하였다. Table 2는 2005년도 우리나라 플라스틱 제품생산을 위한 각 수지의 용도별 투입량을 표시한 것이다. Fig. 1은 2005년도 우리나라 폐플라스틱 발생량 및 재활용량을 도시한 것이다. Table 3은 연도별 폐플라스틱 발생 및 재활용량을 표시한 것이다.

위의 통계치로부터 폐플라스틱 발생량이 계속 증가하고 있는 추세이며, 재활용량도 계속해서 증가하고 있음을 알 수 있다. 플라스틱 제품생산을 위한 각 수지의 용도별 투입량(Table 2)에 있어서, 공업용으로는 PVC가 가장 많고, 생활용으로는 PP가 제일 많다. 여기서 주목되는 것은, 생활용 제품에는 PVC의 투입이 전무함에도, 생활계 혼합폐플라스틱에는 2.4-4.0% PVC²⁾가 함유되어 있다는 사실이다.

폐플라스틱 재활용율에 있어서 생활계 폐플라스틱은 40.0%에 대해서 산업계 폐플라스틱은 24.1%에 불과하다. 이 숫자는 2004년도 우리나라 전체 폐기물 중 재활용율(생활계 49.2%, 산업계 95.8%)과 상반되는 결과를 제시하고 있다. 그것은 EPR제도와 무관하지 않다.

3. 플라스틱 - 플라스틱 선별

3.1. 선별기술

플라스틱 선별에 이용되고 있는 기술의 기본은 광물 처리기술에 유래하고 있다. 이 기술은 채굴한 광석 중의 유기물을 위주로 물리·화학적인 방법으로 전량 공정에 투입할 수 있는 품위로 높이는데 발전해온 선별기

Table 1. Production import, export and demand of plastics(2005).

(단위 : 톤/년)

수지종류		생산량 (①)	수입량 (②)	수출량 (③)	재고량 (④)	내수량 (① + ② - ③ - ④)
PE	LDPE	1,679,819	35,903	755,353	19,738	940,631
	HDPE	1,929,272	9,966	1,083,917	114,776	815,745
	소 계	3,609,091	45,869	1,839,270	134,514	1,756,376
PP		2,821,444	14,247	1,579,170	37,509	1,294,030
PS		1,172,900	9,430	682,563	100,000	483,287
ABS		1,193,847	5,134	965,884	3,871	236,968
PVC		1,254,718	21,298	392,291	23,912	859,813
소계		10,052,000	95,978	5,459,178	434,320	4,630,474
기타 열가소성		2,446,333	308,344	538,107	-	2,216,610
기타 열경화성		636,964	126,114	152,990	-	610,088
총 합계		13,135,297	530,436	6,150,275	434,320	7,457,172

Table 2. Demand of the polymers for the plastic products(2005). (단위 : 톤/년)

구 분	LDPE	HDPE	PP	PS	ABS	PVC	기타수지류	합계
제품별 생산량 합계	940,631	815,745	1,294,030	483,287	236,968	859,813	304,760	4,935,234
공업용	파이프류		38,949	4,176			110,056	153,181
	건자재	50,000			29,091		547,701	646,792
	자동차			16,126		22,512	30,000	68,638
	전기전자			127,354	118,790	137,915	14,617	438,676
	전선케이블	95,631	779	5,204			105,757	207,371
	기타공업용품	100,000	155,017	38,741		60,663	51,682	406,103
	소계	245,631	194,745	191,601	147,881	221,090	859,813	1,669,556
생활용	EPR 대상 용기류	40,000	273,000	192,662	48,486		70,000	624,148
	EPR 대상 필름류	230,000	192,000	209,240				631,240
	1회용봉투, 공산품포장재 등	392,000	156,000	212,322	26,667			786,989
	기타 생활용품	33,000		488,205	19,394	15,877		621,680
	소계	695,000	621,000	1,102,429	94,547	15,877		2,664,057

*6가지 범용수지를 제외한 기타 수지류(열가소성 수지 및 열경화성 수지)는 국내 소비량 중 섬유, 피혁 또는 액상으로 사용되는 양을 제외한 순수 플라스틱 제품으로의 사용량을 적용하였음.

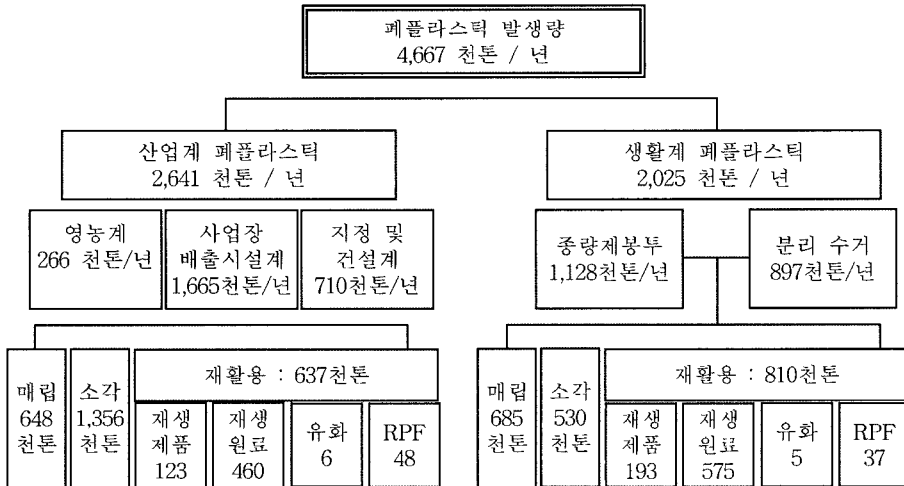


Fig. 1. Generation and recycling of plastics(2005).

Table 3. Generation of waste plastics and recycling (단위 : 천톤)

년도	폐플라스틱 발생량	재활용량	재활용율 (%)
2000	2,976	782	26.3
2001	3,442	911	26.6
2002	3,436	908	26.4
2003	3,548	738	20.8
2004	3,772	1,107	29.3
2005	4,667	1,447	31.0

술이다. 매년 저품질위화하고, 복잡화하는 광석을 대상으로 광물처리기술은 꾸준히 발전해 왔다. 그리하여 고체-고체간의 고도의 분리·선별기술로 위치를 확고히 하고 있다.

근년 이들의 기술을 폐플라스틱 등의 폐기물의 자원화에 응용하고 있고, 일부 실용화 하고 있다. 그러나 광석과 폐플라스틱은 비중, 입자크기, 입자형상, 단체분리성, 표면상태 및 반응성 등 성상이 현저히 다르다. 따라서 광물처리기술을 그대로 적용할 수도 있으나 높은 정

Table 4. Application of mineral processing techniques to plastic separation.

Property		Separation technique	Feed size of plastics[mm]
Gravity	Dry	Air separation	-8+2
	Wet	Sink and float	-8+2
		Cyclone	-15
Centrifugal sink and float Jig		-15 -50+0.5	
Electrostatic property	Dry		-8+2
Wetability	Wet		-10+2
Shape, color	Dry		+20
Grindability	Dry, wet		-several dozen+several

도(精度)의 선별을 기대하기 어렵다. 한편 플라스틱은 소재가 같더라도 첨가제의 영향에 따라 물성이 다른 경우가 많고, 표면의 열화(劣化) 및 오염이 선별성에 영향을 미치기 때문에 플라스틱 - 플라스틱의 상호선별이 어려운 것이 일반적이다. Table 4에 플라스틱 선별에 이용되고 있는 주요광물 처리기술을 표시하였다. 근적외선(NIR, Near Infrared)선별은, 광석처리기술로서는 이용이 없지만, 조립의 플라스틱 - 플라스틱 선별에 있어서 이용도가 매우 높다.

3.2. 비중차를 이용한 선별기술

유체중에서 입자의 침강속도(혹은 부상속도)는 비중, 입도 및 형상에 의존한다. 기본적으로는 고체 입자의 밀도 차를 이용한 선별법의 하나로 비중선별법이라고 한다. 이 선별법은 광물처리기술 중에서 가장 오래된 것의 하나이며, 200년 넘게 유용광물을 맥석부터 분리하는 중요한 수단으로 사용해 왔다. 근년 이 선별원리와 장치의 단순성 그리고 폭넓은 선별대상이 재인식되어 자원리싸이클링과 환경분야에서 이용하게 되었다.

비중선별장치에서는 공기 중에서 풍력을 이용하는 법, 수중에서 행하는 법, 비중을 조정된 용액 중에서 행하는 법이 있다. 플라스틱은 주로 탄소와 수소를 이루어져 있으므로, 이들의 비중은 대략 0.9~1.7 정도의 좁은 범위에 분포한다. 또 같은 종류라 하더라도 첨가제에 따라 비중이 다른 경우도 있다. 이러한 이유로 모든 플라스틱을 비중 차에 의해서 서로 분리한다는 것은 불가능하다.

PVC는 플라스틱 중에서 비중이 높아 선별이 용이하므로, 폐플라스틱을 고로환원제 및 열회수이용 등에서 PVC제거의 목적으로 실용화되고 있는 장치가 많다.

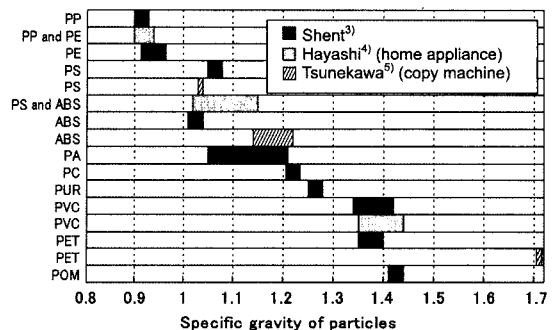


Fig. 2. Specific gravity of plastics from ref. 3, 4, 5.

Table 5. Specific gravities of plastics⁶⁾

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

Fig. 2에 伊藤眞由美와 恒川昌美가 조사한 플라스틱의 비중치³⁻⁵⁾를 그리고 Table 5에 최우진 등이 조사한 플라스틱의 비중치⁶⁾를 나타내었다. Fig. 3은 플라스틱 비중치에 의한 부침현상을 보여주고 있다.

3.2.1. 풍력선별

풍력선별은 건식법으로 사전처리에 많이 이용되고 있다. Fig. 4와 같은 지그재그(zigzag)형⁷⁾과 원통형이 있으며, 비중이 크든지 혹은 공기저항이 적어 아래쪽부터



Fig. 3. Demonstration of sink-float test(풍력/비중선별에 의한 혼합 폐플라스틱 재질 선별 실증 설비 시연회. 2007. 6. 22.)

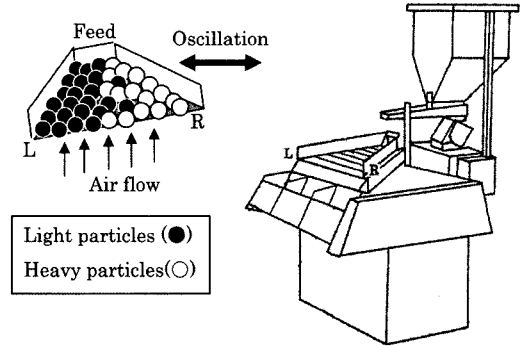


Fig. 5. Air table.

반 떠있는 상태라, 입자와 반면 및 입자층 내의 마찰계수가 감소한다. 그 결과, 고비중입자는 반면과 접촉하는 것만이 위쪽으로, 뜨기 쉬운 저비중 입자는 아래쪽으로 이동하게 되어 양자가 선별된다. 大井⁸⁾ 등의 연구에 의하면, PE와 PVC의 혼합시료(85:15)부터 고품위 PE(PVC함유율 0.8%)가 높은 회수율(99%)로 얻을 수 있다.

한편 宋泳俊^{9,10)} 등은 air table을 이용해서 입상 플라스틱 혼합물로부터 PVC를 제거 분리하는 연구를 수행하였다. 먼저 air table 상에서 플라스틱이 어떠한 운동을 하는가 연구하고, PVC 10%, PE 90%의 인공혼합시료를 사용하여, 분리기구 및 분리조건을 규명하였다. 실제 분리시험에서는 PE-PVC혼합물에서 99.96% 품위의 PE를 98.9% 얻을 수 있었고, 88.7%의 PVC를 99.6% 얻었다는 결과를 보고하고 있다.

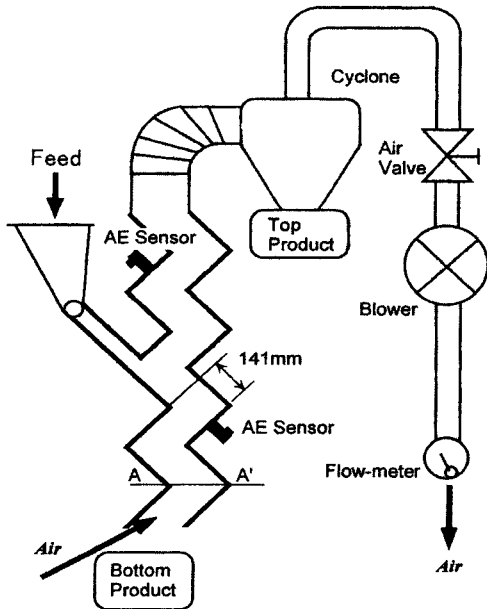


Fig. 4. Zigzag air separator [from ref. 7].

의 바람에 이겨 낙하한 것은 하부에서, 바람과 같이 부상한 것은 상부에서 회수된다. PET병의 PET플레이크(침하물)와 필립상 라벨(PE, PP, PS 및 PET제, 부상물)의 선별에 풍력선별이 잘 이용되고 있다. Fig. 5와 같은 에어테이블(air table)도 플라스틱선별에 사용할 수 있고, 그 원리는 다음과 같다. 경사된 반면(deck)을 왕복운동(진동)시키고, 동시에 망목(網目)으로 된 deck 하부로부터 공기를 불어 넣는다. deck상의 입자는 진동과 반면과 마찰에 의해서 사면을 위쪽으로 이동하려고 한다. 그러나 deck 저면부터의 상승기류 때문에 입자는

3.2.2. 수중에서의 비중선별

부침분리는, 물 혹은 비중액에 플라스틱을 투입하여, 용액의 비중보다 가벼운 것은 부상시키고, 비중이 큰 입자를 침강시켜서 선별하는 장치이다. 심플하지만 비교적 조대 입자이고, 비중차가 큰 물질 상호의 선별에는 효과적인 선별법이다. Table 5에서 알 수 있듯이, PE, PP, 발포우레탄은 물 위에 뜨고, PET, PVC, PS, ABS는 침하한다. Fig. 6의 장치¹¹⁾에서는 플라스틱을 세정·교반 혼합조에서 물과 친화하게 한 후에 선별장치 본체의 중심부에 피드한다. 본체 내에서는 층류상의 상승류와 하강류가 발생하고, 중질 플라스틱인 PVC는 하강류와 더불어 하부 배출구부터 배출된다. 한편, PE, PP등의 경질 플라스틱은 상승류에 수반되어 상부부터 회수된다.

일반적으로 광물처리에 있어서는, 중력장보다 원심력장에서 침강속도가 크기 때문에, 미립자군(0.5 mm이하)

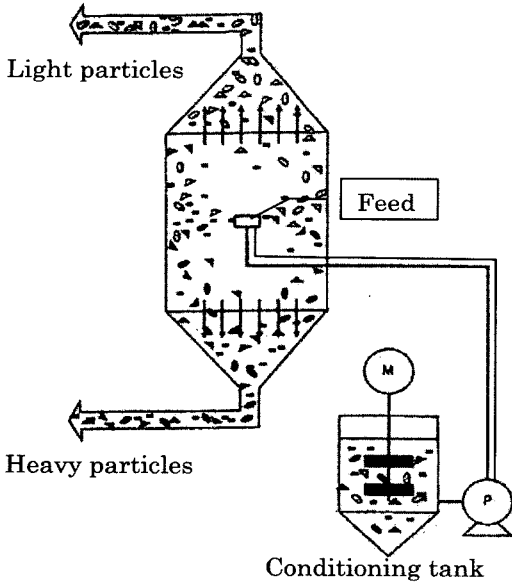


Fig. 6. Hydrogravity separator for plastics[from ref. 11].

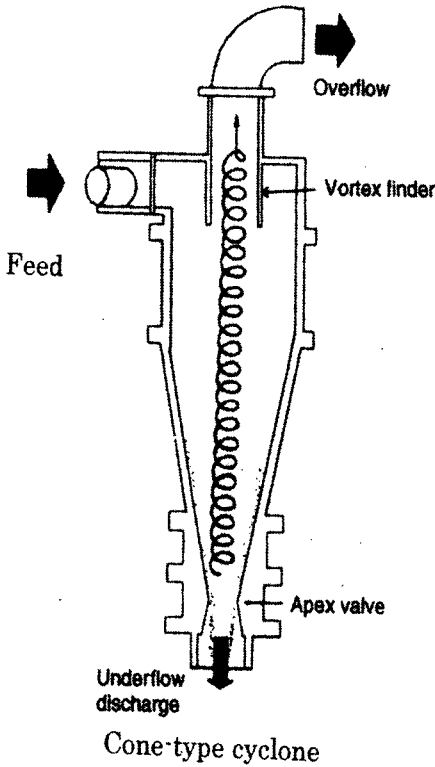


Fig. 7. Hydrocyclone separators.

에 대해서는 원심력장에서 선별을 행한다. 플라스틱의 경우, 10-15 mm이하의 입자에 대해서는 원심력장을 이

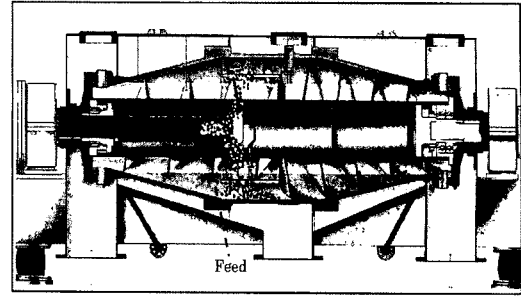


Fig. 8. Section of a sorting centrifuge(CENSOR) [from ref. 15].

용하는 장치가 효과적으로 알려져 있다¹²⁾. 근년 광물처리 분야의에서는 수십 μm 이하의 초미립자 선별에 적합한 Multi-gravity separator(MGS) 및 Knelson concentrator등의 비중선별기가 개발되고 있다. 페플라스틱에서는 수mm 정도에서 단체분리가 되기 때문에 오래전부터 Hydrocyclone¹³⁻¹⁴⁾등이 사용되었다. Fig. 7에 hydrocyclone의 개관도를 도시한다.

Fig. 8에는 독일 KHD Humboldt사가 개발·제조한 원심력을 이용한 선별기 CENSOR¹⁵⁾를 도시하였다. 상술한 cyclone등에서는 원심력을 이용한 선별장치에서의 선별존이 좁다. 그렇기 때문에 선별정도가 높지 않다. CENSOR는, 중력의 1500배의 원심가속도가 이용되며, 체류시간도 20초 정도로, hydrocyclone보다 오래 체류시킬 수 있어 선별정도의 향상을 도모할 수 있다. 독일에서는, DSD(독일의 포장용기 포장리싸이클법인)가 수집한 포장재 플라스틱류의 선별에 지그선별을 이용하고 있다. 지그선별(Jig separation)은 입자의 침강속도가 비중에 의해서 다른 을 이용해서, 수중의 고정망에 있는 입자층에 상하로 맥동하는 수류를 보내, 입자를 비중별로 망상에서 성층시켜, 선별하는 기술이다. 대표적인 지그선별기로 Baum Jig와 Batac Jig가 있다.

Table 6은 복사기(copy machine)에 사용되고 있는 3종의 플라스틱의 실물시료를 사용해서, 이들 혼합시료에 대한 파이롯트시험¹⁶⁾을 행한 결과이다. 고품위의 PS, ABS, PET가 각각 최상층산물, 중층산물, 최하층산물로서 선별 회수되었다. 지금까지 언급한 비중차를 이용한 습식선별에서는, 비중차 이외에도 입경의 차이에 의한 중력의 영향 및 형상의 차이에 의한 저항력의 차이에 의한 영향을 크게 받는다. 이와 같은 이유 때문에 분리정도가 높지 않고, 선별대상은 입경·형상이 가급적 균일한 비교적 조대한 입자에만 한정된다.

최우진¹⁷⁾ 등은 풍력 및 비중선별에 의한 혼합페플라

Table 6. Results of jig separation for mixed plastics from ref. 16

		Grade (wt %)			Recovery (wt %)			Newton's efficiency
		PET	ABS	PS	PET	ABS	PS	
JIG 1	Under	99.9	0.1	0.0	100.0			0.999
JIG 2	Under	0.0	98.7	1.3		96.6		0.954
	Over	0.0	3.3	96.7			98.8	

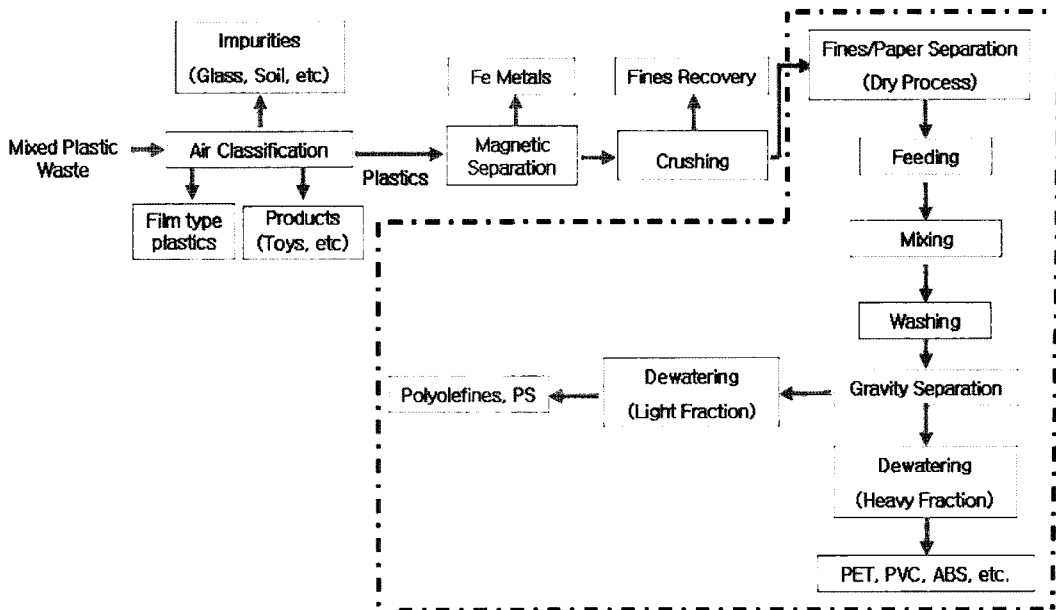


Fig. 9. Development of gravity separation system.

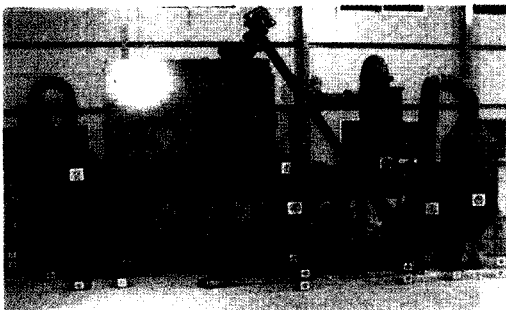


Fig. 10. Gravity separation system unit(plasor) capacity: 0.5 ton/hr.

스틱 재질선별기술을 개발하였다. 이 연구의 목적은 생활계 폐플라스틱에서 PVC 0.3% 이하의 polyolefin 및 PS를 회수하는 것이다. 이 연구에서 개발한 비중선별시스템(centrifugal)은 Fig. 9와 같다.

그리고 최우진 등은 시간당 0.5톤 처리용량의 습식 비중선별시스템(PLASOR)을 개발하여 혼합 폐플라스틱 부터 PVC 함유를 0.35%이하인 PE, PP, PS를 회수하였다(Fig. 10). 이는 생활계 폐플라스틱을 고로 환원제 및 열이용원료로 사용하는데 필요한 기술로서, 불원간 상업화 플랜트가 가동될 것으로 기대된다(2007년 6월 22일, 파이롯트 플랜트의 시연행사가 있었다).

3.3. 정전(靜電) 선별

플라스틱은 일반적으로 전기전도성이 낮지만, 서로 마찰시킴으로서, 한쪽이 정(+)으로, 다른쪽이 부(-)로 대전(마찰대전)하는 것을 이용해서 선별할 수 있다. 각종 플라스틱의 (+) 및 (-)에의 대전이 용이한 순번을 기재한 대전열을 Fig. 11에 도시하였다. 이 그림에서 임의의 두 플라스틱을 서로 마찰시키면, 대전열에서 좌측에 있는 입자는(-)로, 우측에 있는 입자는(+)로 대전한다. 이와

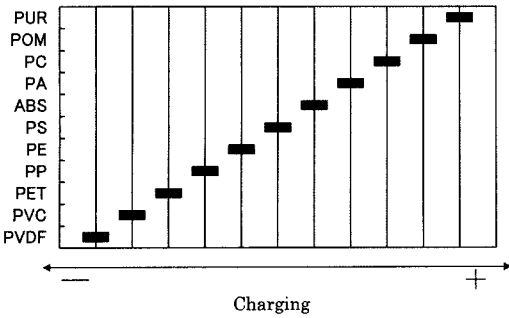


Fig. 11. Triboelectric charging sequence[from ref. 18].

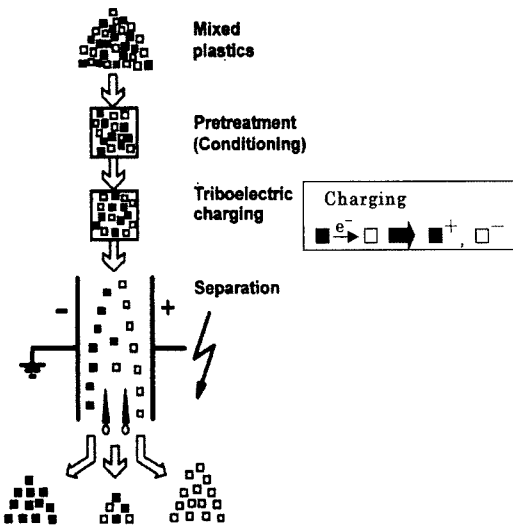


Fig. 12. Process of electrostatic separation [from ref. 18].

같이 대전시킨 입자는 Fig. 12와 같이 고전압계내에서 이 부호의 전극측에 흡인되어 선별된다¹⁸⁾.

PVC는 Cl기(基)에 기인해서 대부분의 플라스틱에 (-)로 대전하기 때문에, 혼합플라스틱부터 PVC를 제거할 수 있어, 실용화되고 있다. 정전선별은 플라스틱첨가제가 균일하고, 습도가 관리되어 있고, 시료가 건조되어 있어야 한다는 제약이 있지만, 건조법이기 때문에 수처리가 불필요하고, 비중차가 없을 경우도 선별할 수 있는 이점이 있다.

전호석^{19,20)} 등은 정전선별에 의한 산지별 혼합플라스틱 재질분리 기술개발을 진행하고 있다. 본 연구에서는 정전선별법 중에서 모든 재질의 분리가 가능한 마찰하전형정전선별법을 적용하여, 종말품 Heavy group 산물, 폐자동차 tail lamp 그리고 해초건조용 폐플라스틱 등

산지별 혼합 폐플라스틱을 대상으로 재질분리 연구를 수행하였다. 본 연구에서 현재까지 얻은 결과는 다음과 같다.

- ◎ 폐자동차 tail lamp의 재질분리를 위한 마찰하전형 정전선별 실험에서, 최적 선별실험 조건인 전극의 전압세기 25 kV, 시료이송 및 마찰하전을 유도하는 공기량 2.5 kg/cm², splitter position -3cm 그리고 상대습도 40% 이하인 실험조건에서 PMMA의 품위와 회수율이 각각 99.1%와 90.2%인 결과를 얻었다.
- ◎ 마찰하전형정전선별을 이용한 해초건조용 폐플라스틱 재질분리 실험결과, 최적 실험조건인 전극의 전압세기 25 kV, 공기의 세기 3 kg/cm², 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.

일본에서는, 폐가전의 혼합플라스틱으로부터의 PVC 제거²¹⁾, PVC병 리사이클을 위한 PET의 제거, 폐전선 피복재의 소재선별²²⁾에 실용화되고 있다.

3.4. 근적외선(NIR, Near Infrared) 분광법을 이용한 선별

플라스틱에 근적외선 영역의 빛을 조사하면, 각 플라스틱 특유의 흡수 스펙트럼을 얻을 수 있다. 최대 흡수를 나타내는 파장은 PVC, PE, PS, PP 및 PET 각각 다르다. 이 성질을 이용해서 플라스틱 재질을 인식시키고, 분사노즐로부터의 압축공기에 의해 선별된다²³⁾. 이 선별시스템을 Fig. 13과 같이 설명할 수 있다.

(주)이오니아이엔티 서강일 대표(ioniaent@ioniaent.com)는 “근적외선 분광법을 이용한 폐플라스틱 성분별 자동 건식 선별기술²⁴⁾”을 적용한 재활용 자동화 선별시스템을 국내 최초로 경상남도 밀양시 무안면 마홀리 소재 환경센터에 설치하였다. 그 공정도는 Fig. 14와 같으며, Fig. 15는 분광선별장치의 외관이다. 밀양시는 자동화 설비 건립 전에 수선별을 하였고, 이때의 가용인원은 혼합재활용품 일일 10톤 규모에 22명이 있었다. 건립 전과 건립 후의 비교는 Table 7²⁵⁾과 같다. Table 7에서 볼 수 있듯이 인원절감 및 선별량의 증가와 재활용품 판매금액의 증가를 볼 수 있다.

이 근적외선 분광 선별장치는 현대자원(인천 남동공

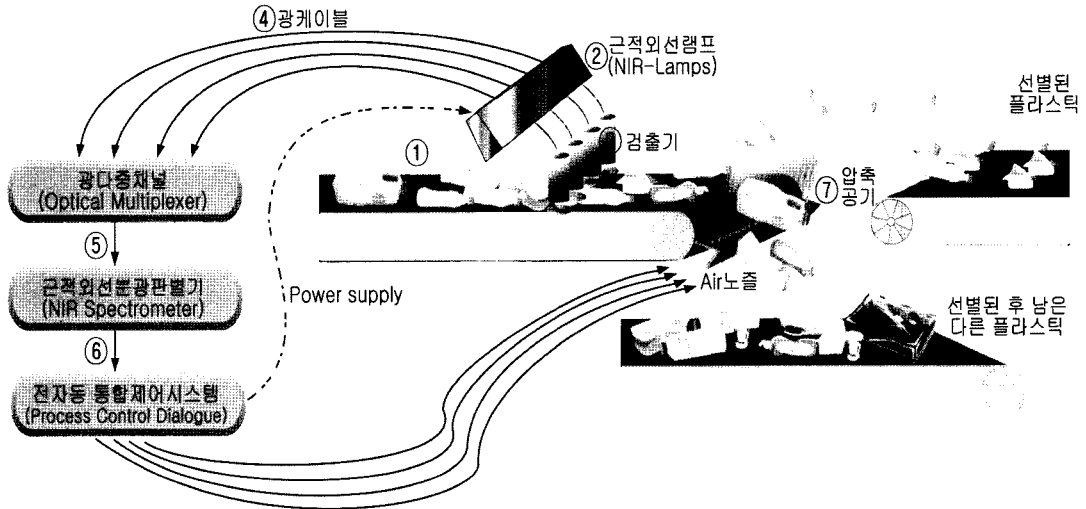


Fig. 13. Automatic sorting system for mixed plastics.

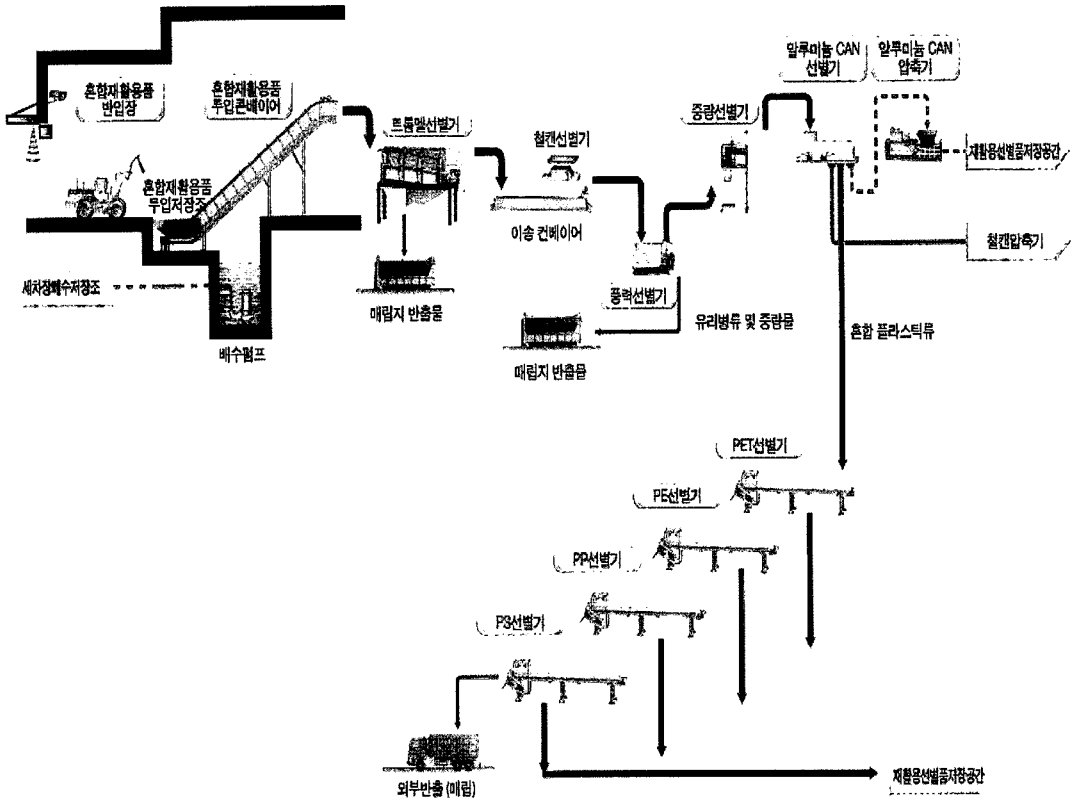


Fig. 14. Automatic sorting system for mixed plastics in Miryang.

단)에서도 이용하고 있고, 용인시 재활용자동화선별장 로 확충될 전망이다.
(처리량 : 90톤/일)에도 시설 중에 있어, 앞으로 전국적으

Table 7. Operation result of the automatic sorting system in Miryang²⁵⁾

구 분	수선별(건설 전)	자동화(건설 후)
인 원	22명	8명
근무시간	일일 8시간	일일 7시간
투입량(일일)	10톤	10톤
선별량(일일)	5톤	9.5톤
선별순도(%)	60%	95%
재활용품판매금액(천원)	27,000	140,000

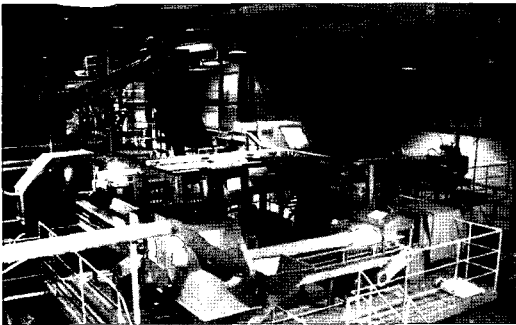


Fig. 15. Overview of automatic sorting system for mixed plastics in Miryang.

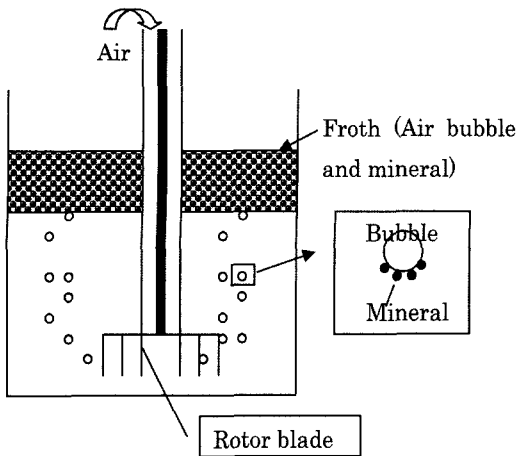


Fig. 16. Schematic view of flotation.

3.5. 부유선별, 부선(浮游選別, 浮選 : Flotation)

부선은 고체 표면에 대한 물(액체)의 습윤성(Wettability)의 차이를 이용한 선별법이기 때문에, 비중차가 없는 플라스틱을 상호 선별할 수 있다. Fig. 16에 도시한 바와 같이, 미세한 고체입자를 현탁한 수용액(펄프·pulp)에 공기를 도입해서 기포를 발생시키면, 소수성 표면을

가진 입자만이 선택적으로 기포표면에 부착하여, 그 부력에 의해 부상한다. 따라서, 펄프 표면에는, 소수성입자의 포말층(Froth)이 형성된다. 이 포말층을 회수함으로써, 친수성 표면을 가진 입자부터 소수성 입자를 선별할 수 있다.

이와 같은 선별의 원리를 이용한 부선법은, 전술의 비중선별 및 정전선별에서는 선별이 곤란한 플라스틱 상호의 분리선별에 위력을 발휘할 수 있다. 특히 PET와 PVC의 고도선별에 있어서, PET의 머티리얼리싸이클링을 위한 품위가 99.995% 이상을 요구하고 있어, 부선법의 적용이 기대된다. 부선에 의한 플라스틱의 선별에 관해서는, 1970년대에 시모이자카(下飯坂)²⁶⁾ 등에 의해서 이미 연구가 수행되었으며 마쓰이금속광업에 의해 특허가 취득되었다. 김진현²⁷⁾ 등은 부선에 의한 PVC와 PET의 분리를 행하였다. 먼저 NaOH용액으로 처리하여 각각의 표면을 개질하였으며, 소수성인 PET 표면을 친수성으로 변화시킨 다음 부선을 실시하여 두 물질을 95-100%까지 분리하였다. 플라스틱의 경우, 어느 종류의 것이나 일반적으로 소수성표면을 갖고 있다. 그러므로 플라스틱 상호를 선별하기 위해서는 특정의 플라스틱표면을 친수성으로 바꿀 필요가 있다. 표면을 친수성으로 바꾸기 위해서는 ① 습윤작용이 있는 시약을 특정의 플라스틱에 부착시키는 방법 ② 플라스틱 표면을 물리적 또는 화학적으로 산화해서 친수화하는 방법 ③ 기액계면장력을 저하시켜서 특정의 플라스틱을 기로에 부착이 어렵게 하는 방법(γ부선) 등이 있다. 그러나 실제의 경우, 부선은 비중선별의 후공정으로 실시되므로 이때 플라스틱 표면은 깨끗하고 소수성이라는 보장이 없다. 특히 친수화되어 있는 경우에는 소수화시킬 필요도 있다.

Fig. 17과 같이 중액선별과 부선을 연결시키면 PVC, PC, POM, PPE로 구성되어 있는 혼합플라스틱으로부터 높은 품위의 플라스틱산물을 고회수율로 얻을 수 있다는 보고²⁸⁾도 있다.

4. 자동차 슈레더 더스트(ASR)에서의 플라스틱 선별

오종기, 이화영²⁹⁻³¹⁾ 등은 광범위한 ASR의 이용연구를 행하였으며, 그 중에서도 폐자동차 ASR로부터 염소성분을 제거하기 위하여 풍력선별 및 비중선별 실험을 중점적으로 수행하였다. 사용한 시료는 전남소재 슈레더업체의 것이며, 비중실험의 결과 침강물질에 염소성분이 농축되어 있고, 부유물질에는 염소성분이 근소함을 확인하였다. 따라서 부유물질은 에너지원으로, 침강

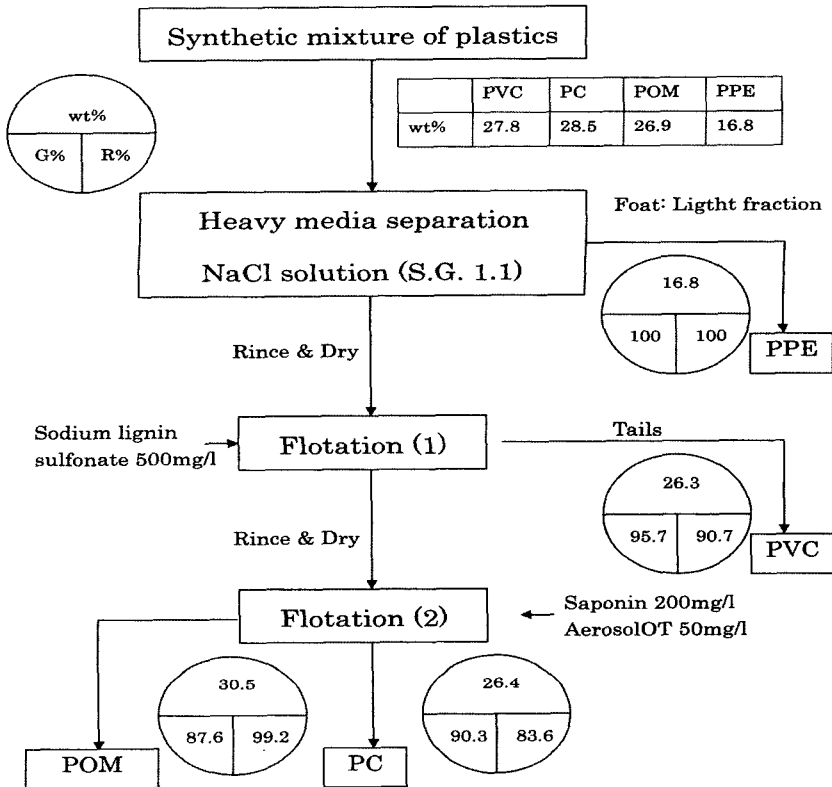


Fig. 17. Waste plastics treatment by flotation and heavy media separation [from ref. 28].

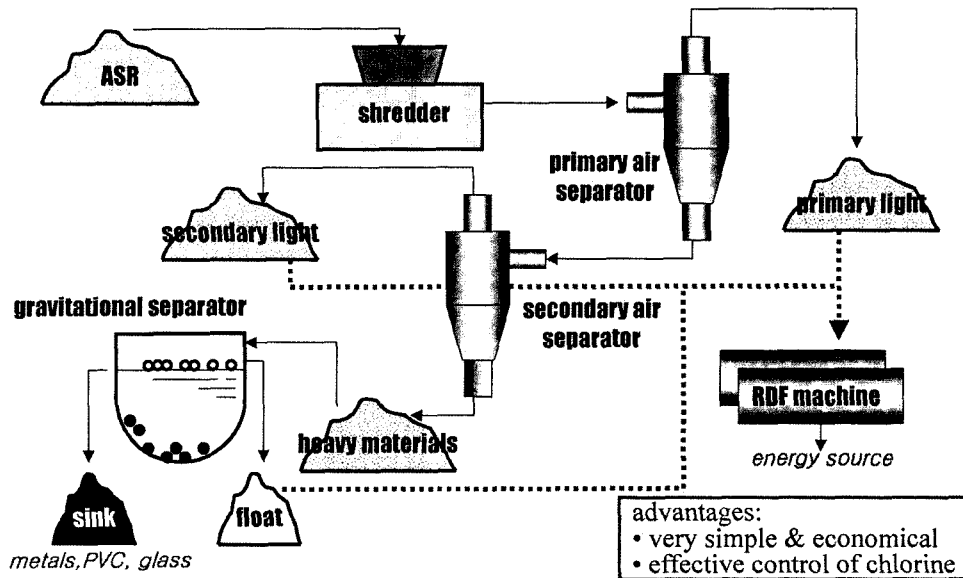


Fig. 18. Proposed flowsheet for treatment of ASR

Table 8. ASR composition of Kyusu metal and Kyunghan

재질	九州메탈		慶韓	
	輕質 ASR(%)	重質 ASR(%)	輕質 ASR(%)	重質 ASR(%)
우레탄, 섬유류	61.2	28.8	53.1	15.3
플라스틱	27.4	36.0	24.6	31.4
고무	7.0	14.3	10.3	38.7
금속	2.8	13.6	5.2	2.3
전선류	1.3	4.3	1.4	6.1
기타	0.3	3.0	5.4	6.2
합계	100.0	100.0	100.0	100.0

물질은 동제련소에서의 활용이 기대되며 다음과 같은 공정도(Fig. 18)를 제시하고 있다.

Furuyama Takashi³²⁾ 등은 Zigzag형 공기선별기와 교반식 건조기에 의한 ASR의 고행연료화연구를 행하였다. 이 연구에서는 ASR을 대체연료로서 에너지 리커버리의 관점에서 행하였다. Zigzag 공기선별기를 사용해서 ASR로부터 먼, 스폰지류 및 경질플라스틱 등의 경질물을 분리하여, 교반형 건조기에서 건조시켜 감용성형기에서 고행연료화하는 시스템 개발을 행하였다. 더욱 Furuyama(古山隆) 등은 ASR의 성장조사³³⁾와 자원화에 관한 광범위한 연구³⁴⁻³⁵⁾를 행하고 있다. 특히 최근 한국(경한)의 ASR 성장과 日本의九州메탈산업(주)의 ASR의 성장비교 연구(Table 8)³⁶⁾는 매우 흥미롭다.

5. 맺는 말

선별기술에는 비중차, 대전차, 표면의 젖음차 등, 플라스틱 표면의 물리화학적 성질의 차를 이용하는 여러 방법이 있으나, 모든 종류의 플라스틱 선별에 적용되는 만능의 선별법은 없다. 그러므로 목적에 따라서 다양한 기술의 개발이 바람직하다.

특히 플라스틱 선별에서는 소재의 성상이 첨가제, 분쇄처리, 열화(劣化) 등에 따라 그때그때 변화함으로 세심한 배려가 요망된다. 그러므로 해체, 분쇄, 정립(整粒)에 있어서나, 각 입군(各 粒群)에 있어서의 적절한 선별처리, 건조, 폐수처리에서나 일련의 흐름을 최적으로 설계함이 중요하다. 그리고 선별기술의 개발 시에는, 소재의 성장변화 및 처리계통 전체를 파악해 두는 것이 바람직하다. 금후, 폐플라스틱을 활용함에 있어서, 자원처리 기술을 핵으로 해서 타의 요소기술을 도입하여, 효율적인 리사이클링 프로세스를 개발해야 한다.

후 기

본 연구조사는 에너지관리공단의 재정적 지원으로 이루어졌으며, 지원해주신 에너지관리공단에 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. 김영각, 2006 : Plastic 생산·사용·폐기 및 처리통계 조사, 2006 플라스틱 재활용 워크샵, pp. 147-157, (사)한국플라스틱자원순환협회, 2006. 10. 1.
2. 최우진, 유재명, 박은규, 박래준, 2006 : 고분자리사이클링 심포지엄, pp. 85-98, (사)한국자원리사이클링학회, 2006. 9. 22.
3. H. Shent, R.J. Pugh and E. Forssberg, 1999 : Resources, Conservation and Recycling, **25**, pp. 85-109.
4. M. Hayashi, N. Arakance, T. Yoshida and T. Takagi 1997 : Shigen Shori Gijutu, **44**, pp. 130-138.
5. M. Tsunekawa, B. Naoi, T. Takubo, T. Hirajima, N. Hiroyoshi, K. Otani, M. Miyamoto and M. Ito, 2000 : Proc. 11th Haikibutsu Gakkai Kenkyuu Happyoukai, pp. 430-432.
6. ibid 2.
7. T. Hirajima, K. Kataoka, T. Nishida, R. Toshima and T. Tsunekawa, 2002 : Shigen-to-Sozai, Journal of MMLJ, **118**, pp. 681-686.
8. E. Oi, R. Arai, E. Kikuchi, S. Ito, 1995 : Shigen-to Kankyo, **4**, pp. 391-396.
9. Youngjun Song and Hiroki Yotsumoto, 2001 : Removal of PVC from granular plastic Mixture by using Air Table, J. of KIRR, **10**(6), pp. 35-42.
10. Youngjun Song, Hiroki Yotsumoto and Gyeseung Lee, 2002 : Dry separation of PVC Film from plastic Mixture by using Air Table, J. of KIRR, **11**(1), pp. 37-42.

11. K. Akiyoshi 1996 : Shigen Kankyo Taisaku, 32, pp. 1558-1561.
12. G. Ferrara, P. Bevilacqua, L. De Lorenzi and M. Zanin : Int. J. Miner. Process., 59, pp. 225-235.
13. N. Kusakawa, 1999 : Yokuwakaru Plastic Recycle, Kougyo Cyosakai, Tokyo, pp. 69-80.
14. T. Takagi, M. Hayashi, T. Hasegawa and T. Fukumoto 2000 : Proc. MMJ Fall Meeting, SI, pp. 34-37.
15. A. Bortram and K. H. Unkelbach, 1997 : Proc. 20th Int. Miner. Process. Congr., Aachen, pp. 373-382.
16. M. Tsunekawa, B. Naoi, S. Ogawa, K. Hori, N. Hiroyoshi, M. Ito and T. Hirajima, 2005 : Int. J. Miner. Process., 76, pp. 67-74.
17. ibid 2.
18. I. Stahl and P. M. Beier, 1997 : Proc. 20th Int. Mine. Process. Congr., Aachen, pp. 395-401.
19. Hoseok Jeon, Ohhyung Han, Shunmyung Shin and Roe-Hoan Yoon, 2002 : Development of Recycling Technique of Mill Reject Products using Triboelectrostatic Separation, J. of KIRR. 11(2), pp. 20-27.
20. 전호석, 백상호, 박철현, 김병곤, 2006 : 고분자리싸이클링 심포지엄, pp. 75-84, (사)한국자원리싸이클링학회, 2006. 9. 22.
21. T. Matumura, S. Yabu and Y. Izeki, 2001 : Mitsubishi Denki Giho, 75, pp. 316-319.
22. T. Kumagai, T. Ishikawa, Y. Nagao, A. Nakayama and T. Enami, 2002 : Hitachi Densen, 21, pp. 107-110.
23. K. Arakawa and Y. Tuji, 1998 : Shigen Shori Gijutu, 45, pp. 31-36.
24. 서강일, 2007 : 근적외선 분광법을 이용한 실시간 폐플라스틱 성분별 선별기술, 제29회 학술발표대회 자료집, pp. 101-108, (사)한국자원리싸이클링학회, 2007. 5. 17.
25. (주)이오니아이엔티, 2007 : 회사소개
26. J. Shimoiizaka, A. Kounosu and Y. Hayashi 1974 : Nihonn-Kogyo-Kaishi, 90, pp. 775-779.
27. Jin Hyeon Kim, J.D. Miller, Jae Chun Lee and Moon Young Jung, 1998 : Separation of PVC and PET by Froth Flotation, J. of Korean Knst. of Resources Recycling, 7(5), pp. 26-32.
28. J. Shibata, S. Matsumoto, H. Yamamoto, E. Kusaka and Pradip, 1996 : Int. J. Miner. Process., 48, pp. 127-134.
29. Jong-Kee Oh, Hwa-Young Lee and Sung-Gyu Kim, 2001 : Evaluation and Analysis of Composition of Shredder Residue from End-of-life Vehicle, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 10(4), pp. 34-41.
30. Hwa-Young Lee, Jong-Kee Oh and Sung-Gyu Kim, 2002 : Analysis and Separation of Constituent Materials of Old Car by Shredding Process, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 11(4), pp. 11-16.
31. Hwa-Young Lee and Jong-Kee Oh, 2005 : Treatment of ASR from End-of Life Vehicles by Air and Gravimetric Separation, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 14(2), pp. 3-9.
32. Takashi Furuyama, Abel Bissombolo, Sukeyuki Mori, Masamichi Hata, Tetsuo Ikejiri and Yoshitsugu Koga, 2003 : Development of a Processing System of Automobile Shredder Residues for Solid Fuel Using a Vertical Zig-zag Air Separator and a Rotary Drier, Shigen-to-Sozai, 119, pp. 107-112, The Mining and Materials Processing Institute of Japan.
33. Sukeyuki Mori, Takashi Furuyama, Naomi Hotta and Masamichi Hata, 1997 : Characterization of Shredded Automobile Residues, Shigen Shori Gijutsu, 44(3), pp. 1-4.
34. Takashi Furuyama, Abel Bissombolo, Tetsuo Ikejiri, Yoshitsugu Koga, Masamichi Hata and Sukeyuki Mori, 2003 : Recovery of Copper of Automobile Shredder Residues by Dry Tower Mill and Electric Separator, Kankyo Shigen Kougaku, 50(3), pp. 135-139.
35. Takashi Furuyama, Yukimasa Ikuta and Katsuaki Inoue, 2005 : Comminution of Automobile Shredder Residues by Media Agitating Mill, Kankyo Shigen Kougaku, 52(3), pp. 122-127.
36. 古山隆, 2007 : 韓國のASRの性状調査とリサイクル技術移轉の可能性, 第4回ELV研究會 報告, 2007. 1. 20.

吳 在 賢

- 현재 연세대학교 명예교수
한국자원리싸이클링학회 명예회장
 - 당 학회지 제10권 5호 참조
-

金 美 星

- 현재 에너지관리공단 기술개발기획실 부장
-

申 熙 德

- 현재 한국과학기술정보연구원 전문연구위원
 - 당 학회지 제12권 3호 참조
-

姜 楨 鎬

- 자동차리싸이클링 전문가
- 현재 (주)시노파이스트해운 이사

閔 芝 源

- 현재 한국자원리싸이클링학회 실장

〈광 고〉 본學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- * EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원
(The 2th International Symposium on East Asian Recycling Technology)
- * 자원리싸이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- * 학회지 합본집 I, II, III, IV, V, VI 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)
(I : 통권 제1호~제10호, II : 통권 제11호~제20호, III : 통권 제21호~제30호, IV : 통권 제31~제40호, V : 통권 제41호~제50호, VI : 통권 제51호~제60호)
- * 한 · 일자원리싸이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- * 한 · 미자원리싸이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- * 자원리싸이클링 총서II(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- * '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價格 : 15,000원
- * 日本의 리싸이클링 産業(1998년 1월)395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
- * EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價格 : 100,000원
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- * 오재현의 자동차 리싸이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
- * 리싸이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價格 : 15,000원, 발행처-文知社
- * 리싸이클링백서(자원재활용백서, 2004년), 578쪽, 價格 : 27,000원, 발행처-淸文閣