

폐플라스틱의 분리·선별기술

최형기·고재송·서강일

1. 서론

현재 우리나라의 플라스틱 생산량은 약 913만톤 (2000년 기준)으로 미국, 독일, 일본에 이어 세계 4위이나 재활용률은 26.3% (배출량 297만톤 중 78만톤 재활용, 2000)로 일본의 50% (배출량 997만톤 중 494만톤 재활용, 2000)에 비하여 상당히 저조한 실정이다. 이는 국내 재활용업체가 영세하고 재활용기술이 취약한 것이 주요인이지만 손쉽게 구할 수 있는 버진(virgin)수지를 선호하는 것도 큰 요인중에 하나다. 이렇게 낙후되어 있는 재활용율을 높이기 위해서는 폐플라스틱의 수거단계부터 분리·선별, 원료화, 제품 생산단계에 이르는 각각의 단계에서 핵심적인 요소기술의 개발이 절실하다.

폐플라스틱의 재활용의 방법에는 재료 리사이클, 화학적 리사이클, 열적 리사이클 등 크게 세 가지

종류로 대별된다. 위의 세 가지 재활용 방법 모두 플라스틱의 종류별 분리·선별이 선행되어야만 재활용의 효과를 기대할 수 있다. 예를 들어 재료 리사이클은 일반적으로 종류가 다른 폐플라스틱들이 서로 혼합되어 있어 분리·선별이 선행되지 않으면 재활용 시 성형성 및 물성 저하 등의 문제가 발생하며,¹ 화학적 리사이클 방법에서는 플라스틱을 분



고재송
 1992 단국대학교 고분자공학과 (학사)
 1994 단국대학교 화학공학과 (석사)
 1996~2001 산업자원부 기술표준원 연구원
 2002~ (주) 이오니아 기획실장
 현재



최형기
 1981 한양대학교 공업화학과 (학사)
 1985 한양대학교 공업화학과 (석사)
 1990 한양대학교 공업화학과 (박사)
 1981~1991 (주) 한화, 세원전자 등
 1992~1999 산업자원부 기술표준원
 1999~2000 공업연구원
 2000~2001 산업자원부 기술표준원
 현재 생물환경과장



서강일
 1996 서울산업대학교 전자공학과 (학사)
 1998 한양대학교 전자공학과 (석사)
 1992~1997 거산전자 대표이사
 1997~2000 테크밸리 연구소장
 2000~ (주) 이오니아 대표이사
 현재

Sorting and Separation Techniques for Used Plastics

산업자원부 기술표준원 생물화학기술표준부 (Hyeong Ki Choi, Dept. of Biotechnology and Chemical Engineering Division, Agency for Technology and Standards, MOCIE, Jungang-Dong, Gwacheon, Gyonggi-Do, Korea)

(주)이오니아 (Jae Song Koh and Kang Il Seo, IONIA CO., LTD., #505-1, Ace Techno-tower III, #197-48, Kuro 3-Dong, Kuro-Ku, Seoul, Korea)

해하여 화학원료(단량체)로 재활용하기 위해서는 폐플라스틱을 종류별로 분리·선별하는 것이 중요하며, 열적 리사이클에서도 소각로의 내벽 보전을 위해서는 폐플라스틱의 열량을 알아야 하나 플라스틱은 종류에 따라서 열량이 두배 이상 차이가 있으므로 분리·선별이 중요하다.

폐플라스틱의 재활용은 자원보존이라는 관점 및 에너지 측면 등에서 볼 때 재료의 소각, 매립, 분해가 필요 없이 직접 소재로 사용할 수 있는 재료 리사이클이 가장 바람직하다. 다만 이 경우에는 여러 가지 종류가 혼합되어있는 폐플라스틱을 종류별로 분리·선별하는 기술이 반드시 선행되어야 한다. 현재의 국내에서는 비교적 분리·선별이 용이한 농업용 필름, 병류, PET류, 스티로폼류 등을 수작업에 의해 종류별로 분리·선별하여 재활용을 하고 있으나 수작업에 의한 경제성 문제, 악취 발생 등 작업환경이 취약하므로 인해 발생하는 인력수급문제 등이 커지고 있어 폐플라스틱을 종류별로 분리 선별할 수 있는 기술 및 장치의 개발·보급이 시급히 요구되고 있다. 따라서 본 고에서는 개발이 진행중이거나 개발되어 실제 사용되고 있는 플라스틱의 분리·선별기술에 대하여 선진국의 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

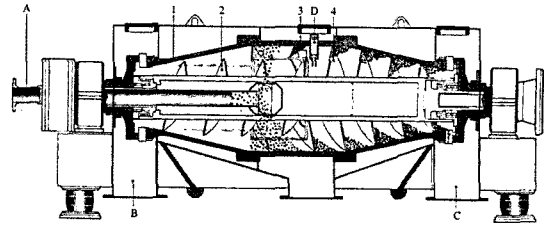


그림 1. CENSOR. A : 원료공급관, B : 경량물배출구, C : 중량물배출구, D : 수위설정노즐, 1 : 회전동체, 2 : 경량물스크류 conveyor, 3 : 중간크기의 디스크, 4 : 중량물스크류 conveyor.

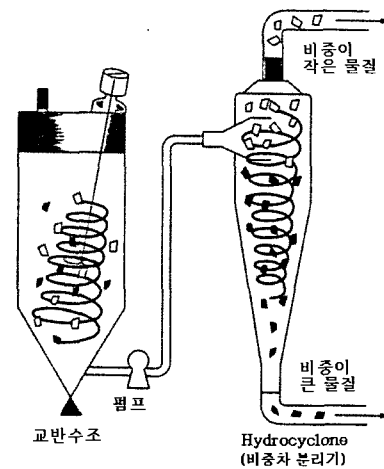


그림 2. Hydrocyclone 모식도.

2. 폐플라스틱의 분리기술

2.1 비중분리

원심력을 이용하여 플라스틱 혼합물을 비중차에 의하여 분리하는 장치로서 독일의 Humboldt사의 CENSOR와 토목이나 광산 분야에서 남아있는 모래 및 불순물을 제거하는데 사용했던 장치를 혼합플라스틱의 분리에 응용한 Hydrocyclone이 있으며 각각 그림 1과 그림 2에 나타내었다.²⁻⁴ CENSOR의 경우는 파쇄된 플라스틱을 수조에 투입하고 이 수조로부터 CENSOR로 원료가 공급되며 1대의 장치에서 세정, 분별, 탈수에 이르는 3가지 공정을 수행할 수 있어 경제적이다. 염수를 사용하면 좀더 비중이 높은 플라스틱을 분리할 수 있다. 또한 Hydrocyclone은 폐플라스틱 혼합물을 교반수조에 투입하여 균일하게 분산시킨 후 펌프를 통하여 Hydrocyclone으로 공급하면 cyclone의 상부에서는 비중이 낮은 플라스틱을, 하부에서는 비중이 높은 플라스틱을 얻을 수 있다. 일본 플라스틱 관련협회

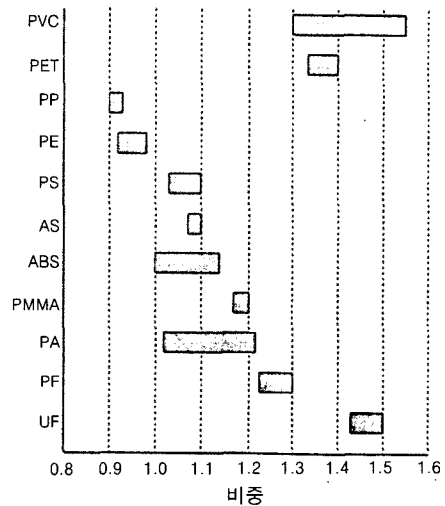


그림 3. 대표적인 플라스틱의 비중.

에 실증 실험한 바에 의하면 원료 파쇄품의 비중차가 PE/PVC와 같이 0.5 정도일 경우 99.9%까지

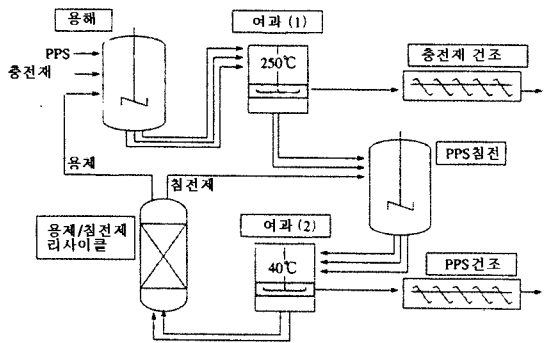


그림 4. 유리섬유강화 PPS의 용제분리 Process.

분리가 가능하고 PE(비중 0.93)/PS(비중 1.05) 또는 PP(비중 0.91)/PS(비중 1.05)와 같이 비중 차이가 0.1 정도인 혼합물은 99%까지 분리가 가능하다고 보고된 바 있다. 대표적인 플라스틱의 비중을 그림 3에 나타내었다.⁵

2.2 용제·용해분리

독일의 Hoechst사에서 자동차공업 및 전기·전자 부품으로 많이 사용되고 있는 polyphenylene sulfide (PPS)에 40%의 유리섬유가 첨가된 유리섬유 강화PPS (PPS-GF-40)에서 순수한 PPS를 회수하는 pilot plant를 완성하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 PPS와 유리섬유를 분리하는데는 PPS를 용해시킬 수 있는 특정 용제가 사용되며 250 °C에서 PPS를 용해시켜 1차 여과된 유리섬유를 배출시키고, PPS 용액에 침전제를 투입하여 PPS를 침전시킨 후 40 °C로 낮춰 2차 여과된 PPS를 배출시켜 건조한다. 사용된 침전제와 용제는 다시 재활용될 수 있도록 설계되어 있다.

2.3 정전분리

정전분리기술로는 분리대상물의 도전율의 차를 이용하는 것과 마찰대전 특성을 이용하는 것이 있지만, 플라스틱을 종류별로 분리하는데는 마찰대전 특성을 이용하는 것이 바람직하다. 마찰대전 특성으로는 다른 2종류의 절연물을 스치면서, 한 쪽의 표면이 플러스로 다른 쪽이 마이너스로 대전하고, 대전극성 및 전위에 따라서 대전의 경향을 경험적으로 종합한 것이 대전에(帶電列)이다. 대표적인 플라스틱의 대전 예를 표 1에 나타내었으며 정전분리 실험장치의 개략도를 그림 5에 나타내었다.⁵

또한 그림 6에서는 드럼전극접촉식의 정전분리 기술의 기본원리도를 나타내었다. 정전계장(靜電界場)을 형성하기 위한 전극의 한 쪽은 회전드럼 전

표 1. 플라스틱의 마찰대전 예

(+)	PMMA (Polymethylmethacrylate)
	PA (Polyamide)
	ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene Terpolymer)
	PS (Polystyrene)
	PP (Polypropylene)
	PE (Polyethylene)
	PET (Polyethylene Terephthalate)
	PVC (Polyvinyl chloride)
(-)	PTFE (polytetrafluoroethylene)

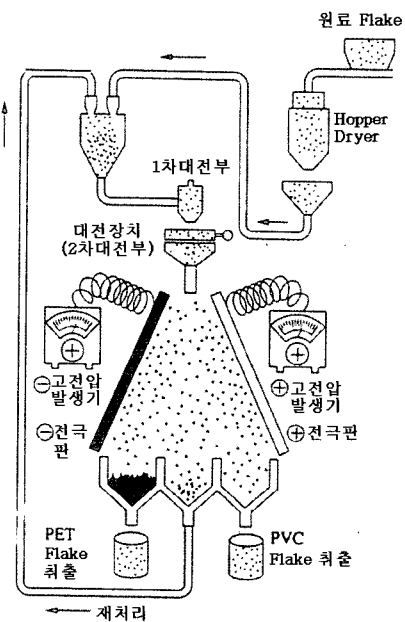


그림 5. 정전분리 실험장치의 개략도.

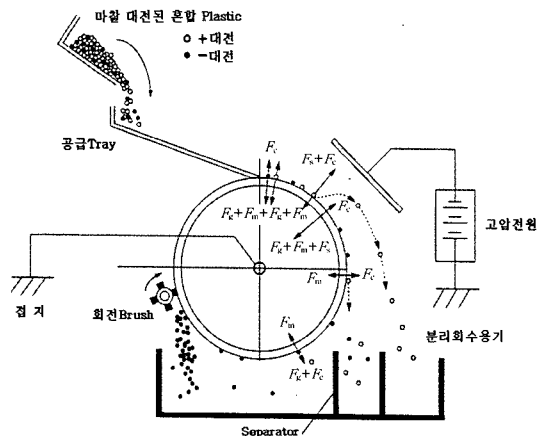


그림 6. 드럼전극접촉식 정전분리 기술의 원리도.

극으로서 접지시켜 놓았고, 대향전극(對向電極)은 고전압을 발생기가 부착된 플레이트 형태로 전극을 구성하였다. 이 장치에서는 정전력 뿐만 아니라 드럼이 회전함에 따라 생기는 원심력을 이용한다. 드럼전극접촉식 정전분리장치는 분리대상의 플라스틱 끼리 서로 마찰 대전시키는 마찰대전부, 대전된 플라스틱을 진동트레이에 의해 전극쪽 전체에 균일 분산시켜 정량적으로 드럼에 공급하는 공급부, 회전드럼전극, 대향전극 및 고전압 직류전원으로 구성되어 정전계장을 형성하여 분리하는 정전분리부, 분리의 목적에 합당하게 위치를 변화시킬수 있는 회수부로 구성된다.^{4,6,7}

2.4 선택적 부유분리

일본 관서대학교에서 약 3 L의 유리분리조에 기포제(起泡劑)와 PVC, PC, POM, PPE 4종류의 pellet 40 g을 넣고 분리실험한 선택적 부유분리의 공정도를 그림 7에 나타내었고 분리결과를 표 2에 나타내었다. 그림 7에서 보면 먼저 비중이 1.099의 NaCl 용액을 사용하여 PPE를 부유분리하고 남아있는 혼합물에 특정수지에 선택적으로 작용할 수 있는 특정한 약제를 순차적으로 가하여 분리하는

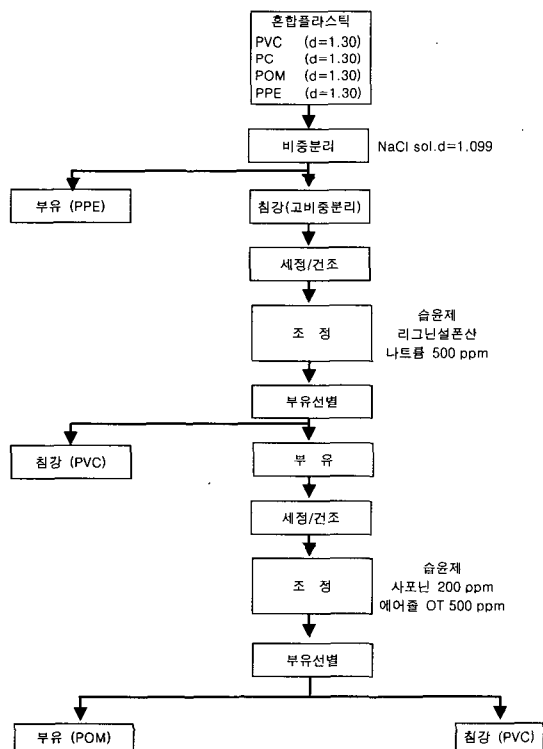


그림 7. 4 성분 혼합 플라스틱계의 분리시험 공정도.

방법이다.⁸

2.5 용융분리

캐나다의 ORTECH사에서는 용융분리에 의해서 폐전선 케이블로부터 동과 플라스틱 피복재를 분리하는 것을 개발하였다. 이 장치는 가열실린더 속의

표 2. 선택적 부유분리 결과

(a) 비중분리 (NaCl sol.d=1.099)

수지	첨가량 (g)	부유 (g)	침강 (g)
PVC	11.126	0.0	11.126
PC	11.427	0.0	11.427
POM	10.785	0.0	10.785
PPE	6.711	6.711	0.0
계	40.049	6.711	33.338

(b) 제 1 차 부유선별

수지	첨가량 (g)	부유 (g)	침강 (g)	총 회수율 (%)	PVC 순도 (%)
PVC	11.126	1.030	10.196	90.7	95.7
PC	11.427	11.067	0.360	-	-
POM	10.785	10.695	0.090	-	-
계	33.338	22.792	10.546	-	-

※ 습윤제 : 리그닌설포산나트륨 500 ppm.

(c) 제 2 차 부유선별

수지	첨가량 (g)	부유 (g)	침강 (g)	총 회수율 (%)	순도 (%)
PVC	1.030	0.0	1.030	-	-
PC	11.067	0.516	9.551	83.6	90.3
POM	10.695	10.695	0.0	99.2	87.6
계	22.792	12.211	10.581	-	-

※ 습윤제 : 사포닌 200 ppm + 에어줄 OT 50 ppm.

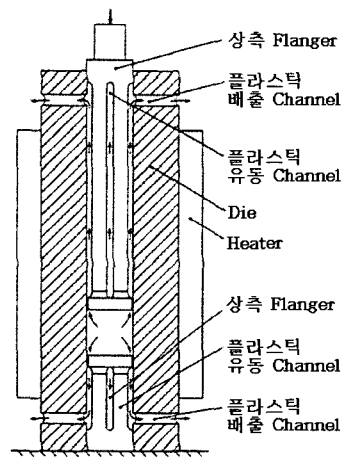


그림 8. ORTECH 사의 용융분리 공정.

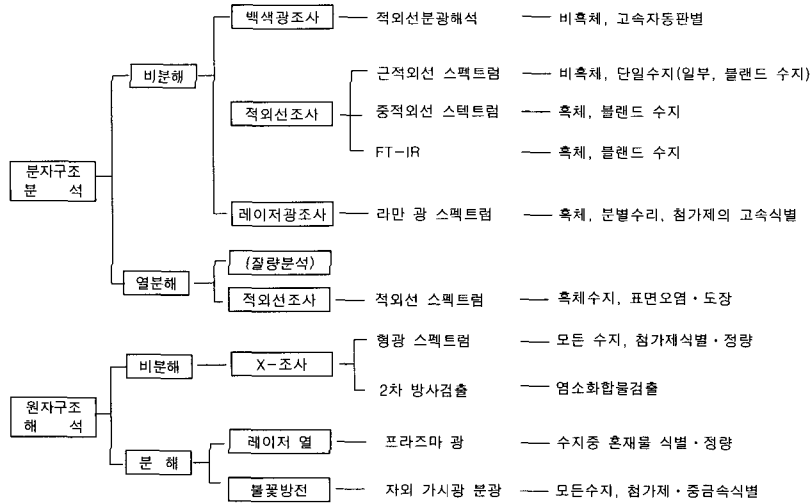


그림 9. 구조해석의 종류에 따른 페플라스틱의 판별기술.

중앙부에 전선 케이블을 놓고, 상부에 플렌저가 아래로 이동함에 따라 용융된 플라스틱을 배출시켜 얻어내는 방법이다. ORTECH사의 용융분리 개략도를 그림 8에 나타내었다.⁹

3. 페플라스틱의 판별기술

구조해석의 종류에 따른 페플라스틱의 판별기술을 그림 9에 나타내었다.⁸ 이 중 현재 독일 등 선진국에서 실제 사용하고 있는 근적외선에 의한 플라스틱 판별기술에 대하여 자세하게 알아보려고 한다.¹⁰

3.1 레이저 광에 의한 판별기술

미국의 Spectra Code사의 Rapid Plastics Identification System (RP-I)는 레이저 광을 시험편중의 직경 0.5 mm의 면적부분에서 분자를 여기시키는 것이다. 레이저 광은 100 μm 깊이 까지 투과하기 때문에 흑색, 고농도 착색품도 판별이 가능하다.⁹

3.2 형광 Tracer에 의한 판별

APME (Association of Plastics Manufacture in Europe)는 각종 플라스틱에 형광 tracer를 미리 첨가해 놓고 아크 등을 조사해서 판별하는 연구를 1999년부터 시작하였다. 무색, 내열성, 내광, 내후성, 상용성, 안전성의 관점에서부터 선택된 7종의 형광 tracer를 조합시켜 판별하는 기술로 그림 10에 나타내었다.⁹

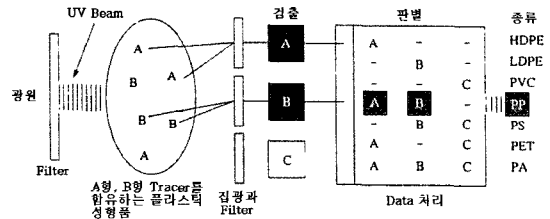


그림 10. 형광 tracer의 조합에 의한 판별.

3.3 근적외선에 의한 판별기술

근적외선은 0.8~2.5 μm의 파장을 가진 빛으로 적외선 중에서도 가시광선에 가까운 것을 말한다. 가시 자외선의 흡수는 주로 외곽전자에 의해 일어나는데 반해, 적외선의 흡수는 분자진동에 의해서 일어나는 것이 큰 차이점이며, 결국 가시광선보다는 흡수도가 높고 IR보다는 흡수도가 낮다는 특징이 있다. 근적외선 분석을 이용한 판별 방법은 과거부터 분광분석법의 하나로 알려져 왔으나 근적외선 분석이 기본분자 진동의 배음과 결합음에 기인하는 흡수 스펙트럼을 이용하기 때문에 적외선과 자외선 분석에 비해 입력과형이 복잡하고 미약해 컴퓨터 기술이 발전하기 전까지 스펙트럼 분석이 어려워 실용화되지 않았다. 그러나 1980년대에 들어 미국에서 보리의 단백질 정량에 실용화되면서 그 후 농업과 식품공업 분야를 중심으로 단백질, 지방, 유분, 당분 등의 분석에 사용되기 시작했다. 또 최근에는 혈액분석 등 생체계측, 생화학에 대한

응용개발도 이루어지고 있다. 분자구조로 탄소결합과 수소결합을 가진 물질, 즉 C-H, O-H, N-H, C=O, C=C 구조를 가진 물질에 근적외선 영역의 빛을 조사하면 그 구조에 따라 기준진동 배음과 결합음으로 공명을 일으켜 에너지가 흡수된다. 분자구조의 차이에 따라 파장별로 흡수 정도가 달라 파장에 대한 흡수 스펙트럼이 가능하다. 근적외선 흡수는 적외선 흡수에 비해 매우 미약하고 다수의 배음과 결합음에 의한 흡수가 중복되어 복잡한 스펙트럼을 보인다. 이러한 특징을 이용, 각종 플라스틱의 파형을 데이터 베이스로 등록해 측정 스펙트럼과 비교, 판별하게 되는 것이다. 근적외선 분광분석을 사용하면 유리한 점으로는 1) 보통 적외선보다 광섬유와 결정 중에서의 감쇠가 적어 광섬유 케이블의 길이를 늘일 수 있기 때문에 공업적인 계측에 효과적이다. 2) 근적외선 발광장치는 X선 등에 비해 시장에서 간단하게 구할 수 있으며 보수 및 점검도 용이하다. 3) 근적외선은 외부의 영향을 잘 받지 않아 측정매체로서 신뢰성이 높다. 4) 근적외선 영역의 파장은 기준진동에서는 거의 침투하지 않으나 1차 배음에서는 몇 mm 까지, 2차 배음에서는 10 mm 이상 침투한다. 시료에 적당한 깊이까지 침투하므로 시료표면의 더러움과 수분의 영향을 받지 않으면서 측정이 가능하다. 5) 많은 검출소자는 근적외선 영역에서 가장 감도가 높아 다른 파장을 사용하는 경우보다 유리하다. 6) 비파괴 분석, 신속한 분석, 전처리를 하지 않고 분석, 다성분 동시 분석, 고도의 정확도, 액체나 고체를 자동 시료용기로 분석할 수 있다는 장점이 있다.

3.3.1 독일 LLA의 근적외선 판별장치

플라스틱 판별용으로 두 가지 기종이 제품화되어 있다. 모두 반사방식을 채용하고 있으며 기본원리는 동일하며 주요부품도 공통으로 사용하고 있다. 한 가지는 가변식으로 시료에 직접 조사하거나 근사거리까지 접근하지 않으면 식별이 불가능한 형식(상품명: KUSTA 4001)이고 다른 한 가지는 비접촉식으로 시료에서 300 mm 정도 떨어져도 사용할 수 있으며 주로 선별기에 포함되는 형식(상품명: KUSTA 4002 and KUSTA multi)이다. 표 3은 KUSTA 4002 사양을 나타낸 것이다.

검출시스템의 구성은 1) 광원으로는 근적외선 영역의 빛이 발생하는 할로겐 램프를 사용한다. 검출 헤드에 50 W짜리 할로겐 램프 4개를 광축이 집중되도록 각도를 맞춰 배치해 빛의 강도를 높였

표 3. KUSTA 4002 의 사양

대상물	P.E Polythylene PP Polypropylene PET Polyethyleneterephthalate PS Polystyrene PVC Polyvinylchloride PA Polyamide ABS Acrylonitrile-butadiene-styrene PMMA Polymethylmethacrylate PC Polycarbonate PUR Polyurethane 다른 플라스틱도 검출가능
측정방법	근적외선 반사·분광방식, 비접촉에 의한 비파괴측정
측정시간	0.01 초
측정조건	표면형상, 습기, 더러움, 첨가물, 색은 측정장애가 되지 않음
측정면적	최소직경 40 mm
측정거리	300~350 mm

다. 반사광은 최종 검출위치를 중심으로 위치한 렌즈를 통해 광섬유에 집중된다. 이 때 대상물의 표면형상, 습기, 더러움, 첨가물, 색 등은 장애요인이 되지 않는다. 이런 식으로 모여진 반사광은 최고 3 m까지 연장 가능한 광섬유 케이블을 통해 본체에 설치된 Optical Analyzer로 도입된다. 광섬유 케이블로는 근적외선 영역에서 전달손실이 적은 특수한 재질의 물질을 사용한다. 2) Optical Analyzer는 분광기 및 근적외선 검출소자로 구성되며 광섬유에서 나온 반사광은 분광기(회절격자)에 의해 각 파장으로 분해된다. 3) LLA 사의 시스템 특징은 분광기와 검출소자의 특이한 설계에 있는데 이 부분이 데이터 해석법과 함께 고속, 고감도와 고안정성을 발휘한다. 4) 빛의 강약은 검출소자로 인해 아날로그 변환이 이루어져 전기신호가 되며, 앰프로 증폭된 후 디지털 신호로 변환되어 공업용 컴퓨터에 보내진다. 5) 컴퓨터에서는 각 플라스틱 별로 다른 스펙트럼 선 그래프를 우선 디지털화하고 데이터베이스로 메모리에 기억시켜 둔다. 그리고 측정된 스펙트럼 선그래프 데이터와 비교해 플라스틱의 종류를 식별한다. 이 부분은 식별정밀도와 속도에 영향을 미치는 중요한 부분으로 유사한 스펙트럼 선 그래프의 차이를 어떻게 식별할 것인지에 따라 각사는 여러 가지 방법을 채용하고 있다. 이 플라스틱 식별장치는 19종류의 플라스틱이 등록되어 있으며 그 데이터베이스는 자유로운 변경이 가능하다. 한 종류의 플라스틱이라도 각종 첨가제 등에 의해 몇 종류의 패턴으로 나뉘어지는데 각 패턴을 등록해 한 그룹으로 표시하는 것이 가능하다. 그림 11은

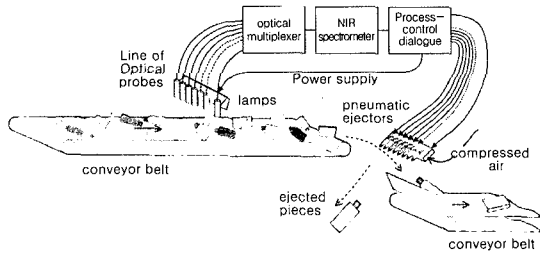


그림 11. KUSTA multi 의 개략도.

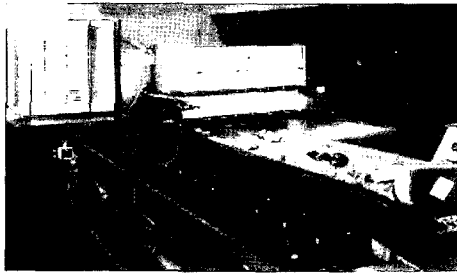


그림 12. 근적외선에 의한 폐플라스틱 선별장치.

KUSTA multi의 개략도이며 그림 12는 근적외선에 의한 선별장치 사진이다.

3.3.2 일본 Opt사의 근적외선 판별장치

플라스틱 종류별 판별기(상품명 Plascan)로서 근적외선 분광 방식 즉 반사·흡광 스펙트럼을 해석하는 방식으로 표준 15종류(Option에 따른 증감)를 선별하는 장치이다. 활용분야로는 폐플라스틱의 리사이클 분별, 제품재질의 체크 및 재생 공정의 제어 등에 이용된다. 분광방식은 grating 방식이 아닌 AOTF 방식을 사용한다. 제품의 사진, 장치의 구성도, 분광방식을 각각 그림 13, 14, 15에 나타내었다.^{3,11}

4. 결 론

우리나라의 쓰레기의 분리·수거 특히 플라스틱은 어느 정도 정착단계에 있다고 할 수 있을 것이다. 이상에서 설명한 바와 같이 폐플라스틱의 분리·선별에는 여가가지 종류의 기술이 있으나 우리나라 실정에 맞는 경제적이고 효율적인 분리·선별 기술을 개발하여 소각, 매립, 분해가 필요 없이 직접 소재로 사용할 수 있는 재료 리사이클이 활성화 된다면 우리나라 플라스틱 재활용율도 생산량 못지 않게 향상될 것으로 사료된다.

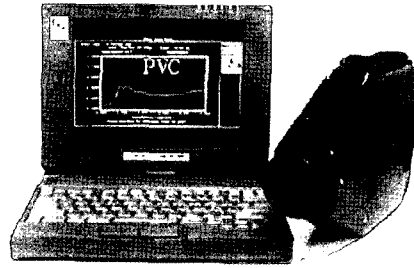


그림 13. Opt 사의 플라스틱 판별장치 (접촉식).

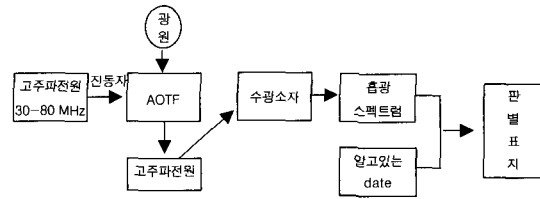


그림 14. Opt사의 플라스틱 판별장치 구성도.

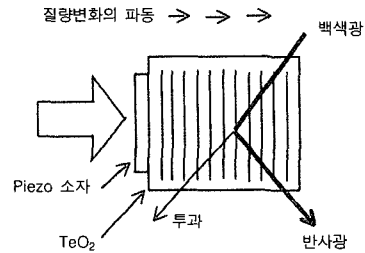


그림 15. Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF).

참 고 문 헌

1. B. Hegberg, G. Brenniman, and W. Hallenbeck, "Mixed Plastic Recycling Technology", Noyes Publications, New Jersey, 1991.
2. A. Miyake, *Plastics Age*, **43**, 67(1997).
3. J. Scheirs, "Polymer Recycling", John Wiley & Sons, Chichester, 1998.
4. J. Brandrup and M. Bittner, "Recycling and Recovery of Plastics", Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 1996.
5. Y. Okuda, *Plastics Age*, **44**, 95(1998).
6. M. Tsukahara and H. Maehada, *Plastics Age*, **46**, 122(2000).
7. 사단법인 일본플라스틱처리촉진협회, "플라스틱 리사이클 편람", 2000.
8. A. Miyake, *Plastics Age*, **44**, 51(1998).
9. A. Miyake, *Plastics Age*, **45**, 39(1999).
10. A. Miyake, *Plastics Age*, **47**, 62(2001).
11. K. Tanabe, *Plastics Age*, **45**, 104(1999).