

# 폐기물의 자원화 및 물질회수를 위한 전처리 설비



구 자 공(한국과학기술원 토목공학과)

- '75 서울대학교 산업공학(학사)
- '80 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign(석사)
- '85 Univ. of Texas at austin(박사)
- '85-현재 한국과학기술원 토목공학과 부교수

## 1. 서 론

국가 경제와 산업의 성장에 따른 국민 문화수준의 증가 등으로 인해 근래에 우리나라의 폐기물의 배출량은 꾸준히 증가하고 있고, 배출량의 증가와 더불어 폐기물 중의 산업폐기물이 차지하는 비율이 증가하여 질적으로도 다양화되고 악성화되고 있는 것이 최근의 현실이다. 그러나, 그 처리실태는 기초단계에 머물고 있어, 이에 따른 환경문제나, 폐기물의 비적정처리 등으로 인해 심각한 사회문제를 유발하고 있다. 지금까지의 폐기물의 처리는 주로 매립에 의존해 왔으나, 우리나라의 경우 국토 면적이 좁아 매립지의 확보가 어려우며, 최근 들어 NIMBY(Not In My Back Yard, 지역 이기주의의 하나)현상이 심해짐에 따라, 그 어려움의 정도가 점점 증가하고 있다. 그 동안 우리나라의 폐기물의 처리 개념은 장래를 고려하지 않고 눈앞의 현안만에 급급한 것이어서, 근래에 와서는 쓰레기와의 전쟁을 선포할 정도로 문제가 악화되었다.

폐기물의 이상적인 관리체계는 그림 1-1에 나타낸 바와 같이 11단계로 이루어진다고 할 수 있다. 배출원에서 폐기물 발생을 최대한 억제하고, 발생되는 폐기물은 분별 수거하여야 하며 인간이나 생태계에 치명적인 해를 줄 수 있는 유해 폐기물을 먼저 분리하여 후처리 과정에서 문제점을 최소화하고, 유기성 폐기물은 사료화, 퇴비화, 연료화를 위하여 분리한 후 환경적, 경제적 최적의 조건으로 처리한다. 재활용성 폐기물은 분리하여 자원회수하고, 기타 폐기물은 적환장에서 분리/파쇄하여 적정처리를 위하여 몇가지 폐기물

로 분리한다. 연탄재와 같은 불연성의 안정한 물질, 가연성 물질, 합성수지 등의 난연성 물질, 그리고 기타로 분리하여 각각에 대하여 적절하게 처리하여야 한다. 그리고 최종적으로는 이와 같은 처리과정에서 발생하는 2차오염문제를 감소시키기 위하여 지속적인 모니터링과 사후관리를 해야 한다.

95년 1월 1일 부터 폐기물 종량제가 전국적으로

실시된 이후로 30% 정도의 폐기물이 감소된 것으로 보고되고 있다. 이는 폐기물의 이상적인 관리체계의 제1단계인 감량화에 성공한 것으로 볼 수 있다. 특히 종량제 실시 이후 폐기물의 분리수거에 대한 인식이 높아지고 있어 그 참여율이 높아짐에 따라 그 이후 단계의 처리효율도 높아질 수 있어 폐기물의 바람직한 처리가 가능해지고 있다.

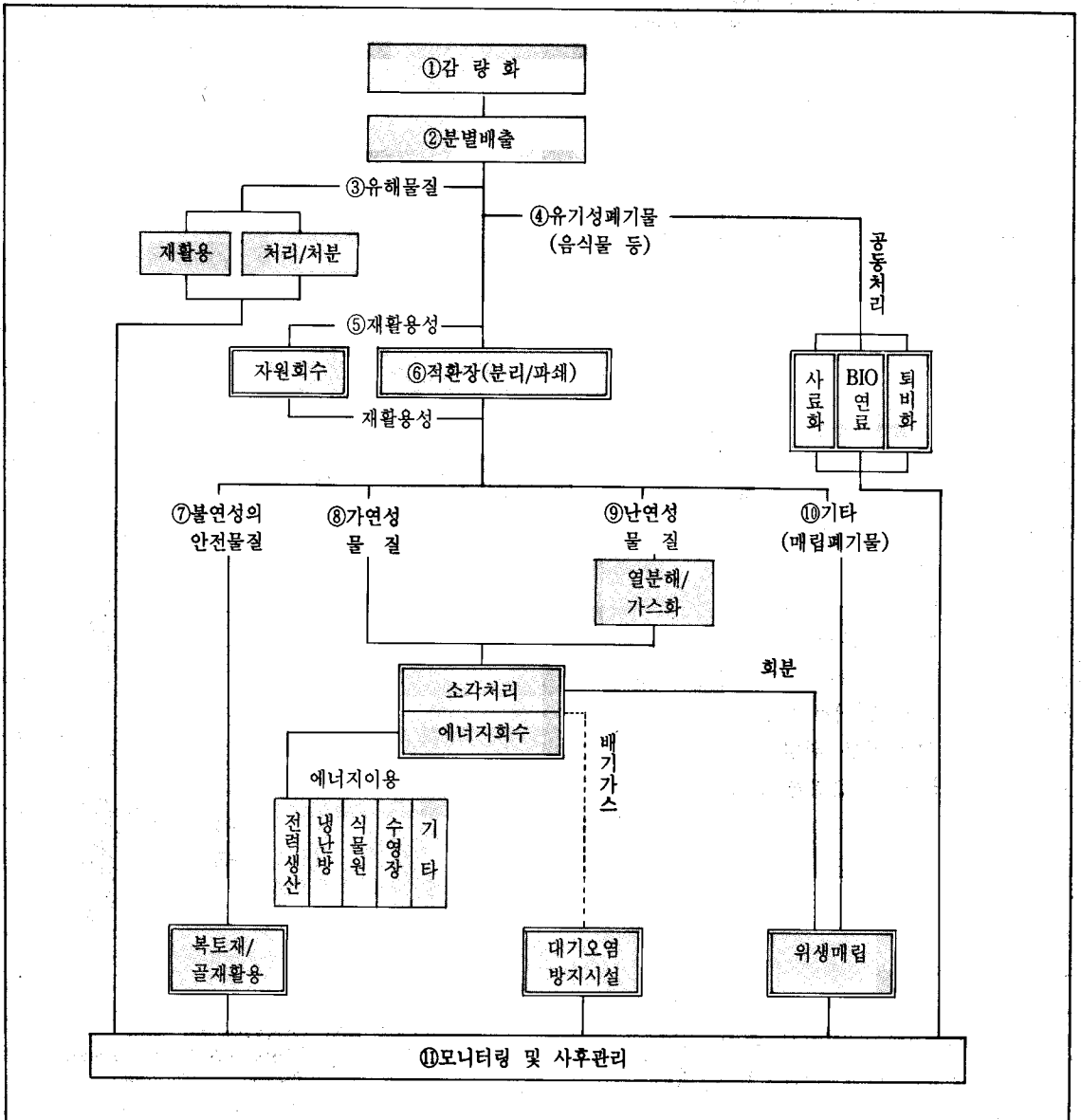


그림 1-1. 이상적인 일반폐기물 관리 체계

폐기물의 재활용에 대한 인식이 계속 증가하고 있고, 실제 2차원료(재활용에 의해 생산된 원료)를 사용하면 자원 절약의 효과 이외에 폐기물의 양의 감소에 의한 매립지용량의 절약 등 여러가지 부수적인 이익들을 기대할 수 있다. 그러나, 폐기물의 기본적인 특성이 여러가지 물질의 혼합이라는 점이 폐기물의 재활용이나 물질회수에 장애가 되고 있으므로 이에 대한 대응책으로써 이러한 다양한 물질들을 일정한 성분으로 분리하는 작업이 필요하다. 이때의 처리방법을 전단처리라 한다. 전단처리는 대상 폐기물의 물리, 화학적 성질을 이용하여 물질회수에 적절한 성분으로 분리하게 된다. 이러한 전단처리에 의해 물질회수가 용이해지고 후속처리가 쉬워지는 장점은 있으나, 전단처리 자체에 비용이 드는 단점이 있다.

본 원고에서는 이러한 재활용 및 물질회수를 위한 전단처리설비에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 본 론

전술한 바와 같이 폐기물 자원화에 있어 전단 처리는 매우 중요하다. 이는 폐기물의 기본적인 특성이 여러가지 종류의 폐기물이 혼합되어 있다는 점에 기인한다. 이러한 전단처리에는 폐기물을 파쇄하는 기술, 색깔이나 밀도, 비중 등 폐기물의 고유한 특성을 이용하거나 중력이나 전자기력 등 역학적인 특성 등을 이용한 선별 기술 등이 있다. 본 장에서는 이런 기술들에 대한 이론적인 설명과 함께 이런 기술들을 이용하여 실제로 폐기물 자원화를 위한 전처리에 이용되고 있는 설비들에 대한 설명을 하고자 한다.

### 2.1 파쇄 기술

파쇄 기술은 폐기물을 잘게 부수 부피를 줄임으로써 취급이 쉬워지고, 분리가 용이해지게 하여 이후의 선별과정에 도움을 주고, 재활용이 아닌 다른 측면에서 보더라도 매립이나 소각의 효율을 높이는 데도 커다란 기여를 하게 된다. 분쇄된 폐기물은 분쇄하지 않은 폐기물에 비해 입자크기가 일정해지고 입도분포가 균일하게 되어 훨씬 더 잘 압축되는 성질도 지니게 한다.

### 2.1.1 기본 이론

일반적으로 압축력(Compression forces), 충격력(Impact forces), 마찰력(Friction forces), 전단력(Shearing forces) 등 네가지 힘을 기본으로 한가지 또는 그 이상의 힘의 조합으로 기계가 구성된다. 압축력과 충격을 이용하는 설비의 경우 건축폐기물이나 그 외의 깨지기 쉬운 폐기물의 파쇄에 적합하고, 마찰력이나 전단력을 이용하는 설비의 경우 섬유류(Textile)나 종이류 등의 파쇄에 적합하다.

### 2.1.2 설비의 종류

#### 1) 건식 로터리 파쇄기(Dry rotary crushers)

회전축의 방향에 따라 수직형과 수평형이 있으며, 충격파쇄 시스템이나 전단력을 이용한 파쇄시스템, 또는 그 둘의 합으로 구성된다. 이 설비는 축과 적절한 위치에 설치된 칼날(Blade)로 구성되어 있다. 몇가지의 전형적인 형태는 아래와 같다.

#### i) Swing hammer type

그림 2-1과 같이 두개 이상의 swing hammers가

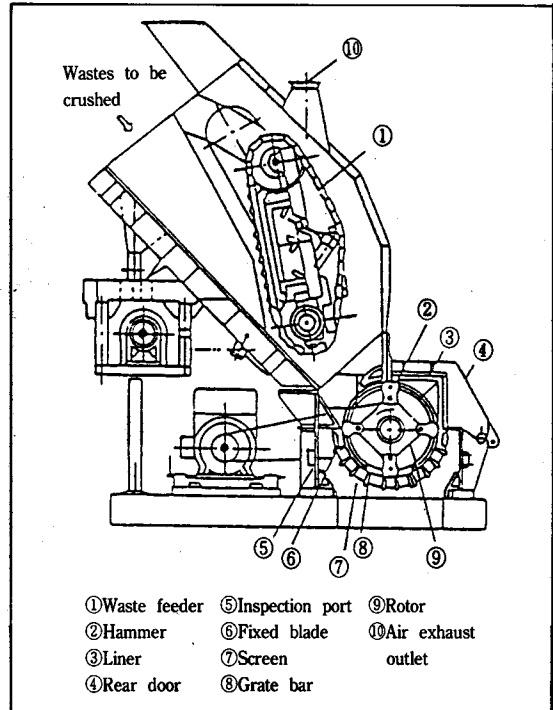


그림 2-1. Swing hammer type crusher

부착된 회전축과 고정된 칼날이 부착된 덮개, 그리고 폐기물의 입도분포를 고르게 하기 위한 체(screen)가 마련되어 있다.

ii) Ring hammer type

이 방식은 Swing hammer type과 거의 흡사하지만 swing hammer가 아닌 ring-shaped hammer로 구성되어 있다. Swing hammer type이 충격력을 사용하는 것에 비해 이 방식은 충격력과 전단력을 모두 사용하는 방법이다.

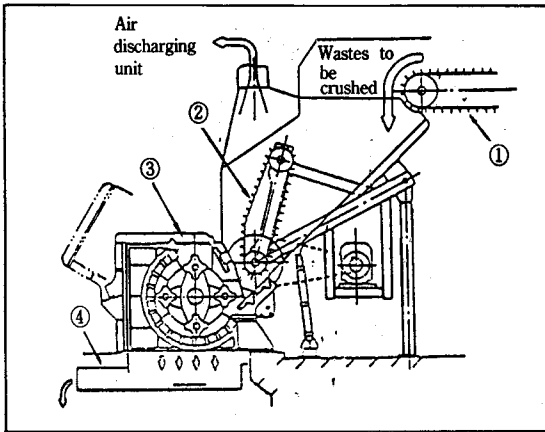


그림 2-2. Ring hammer type crusher

iii) Shearing type

일축과 이축 두가지 방식이 있다. 일축 방식의 경우 덮개에 고정된 칼날과 회전축에 설치된 회전가능한 칼날에 의한 전단력에 의해 폐기물을

파쇄하는 방식이고, 이축 방식의 경우 평행으로 설치된 두쌍의 칼날에 의해 발생하는 전단력에 의해 폐기물을 파쇄하는 방식이다.

iv) Impact type

이 방식은 충돌판(colliding plates)이 있는 덮개와 충격기(Impactor)가 설치되어 있는 회전축으로 구성된다. 주입된 폐기물은 충격기에 의해 파쇄되고 파쇄된 폐기물들은 충돌판에 계속적으로 충돌하거나 충격기에 의해 가해지는 충격에 의해 더욱 잘게 부서진다.

2) 습식 로타리 분쇄기(Wet rotary crushers)

습식 로타리 분쇄기는 분쇄된 물질의 입도와 완전히 분쇄되는데 필요한 시간의 차이를 이용하여 분쇄와 동시에 물질을 분리하는 설비이다.

i) Drum cutter type

반습식 선택 분쇄기(Semi-wet selective crusher/classifier)라고도 불리우며, 몇가지 크기의 체를 지닌 스크린 장치가 된 회전식 드럼과 스크린과 함께 회전하는 분쇄기가 있다. 이 설비는 물질마다 충격이나 압축력, 전단에 저항하는 힘이 다른 것을 이용하여 분쇄와 동시에 대상 폐기물을 종류별로 분리한다.

3) 절삭기(Cutter)

절삭기는 두개의 칼날의 전단력에 의해 물질을 절단시키는 분쇄기의 한 종류이다. 실제로는 두 날의 전단력보다는 물질들을 구부림(bending)으로써 물질을 파쇄한다.

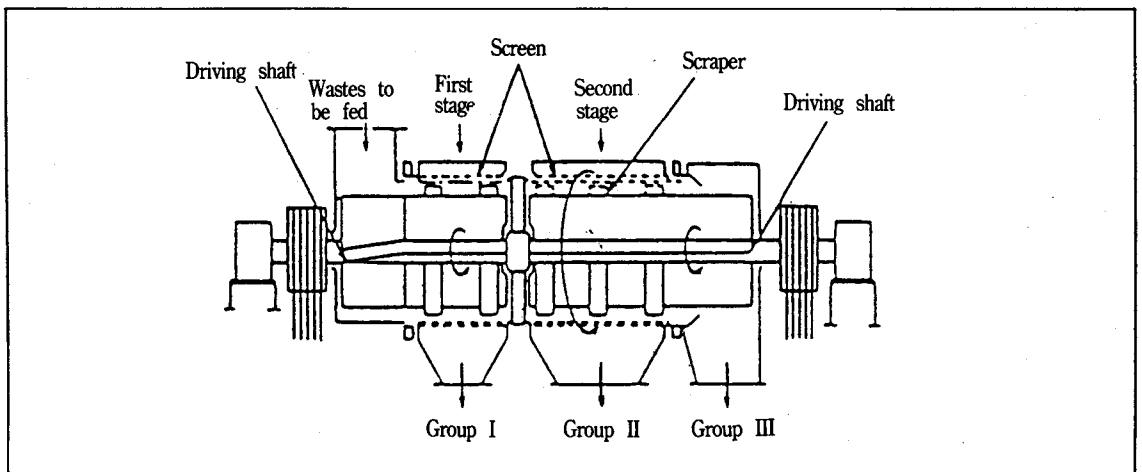


그림 2-3. Horizontal wet rotary crusher, drum cutter type

2.1.3 파쇄기 설비의 비교

표 2.1 파쇄기의 종류, 대상 파쇄물질 및 장단점 비교

	대상물질	적용목적	장 점	단 점	예
압축식	가연성 조대폐기물	미립파쇄 (입도 40mm 이하)	감용효과	탄성체 불가	가위형 압축파쇄기
충격식	가연성 모두 적용	파쇄 및 혼합	파쇄 효과	진동, 소음 및 전력 소모가 큼	자연낙하/ 강제충격식 파쇄기
전단식	드럼 등의 금속류, 가연성 조대쓰레기	미립파쇄(입도가 40mm보다 작지 않아도 될때)	진동 및 소음이 적음	처리능력에 한계가 있음	가위형 전단파쇄기
마찰식	(무른)폐기물	파쇄후 물질선별에 사용가능	파쇄입도가 작음	탄성체 불가	ring형 파쇄기

표 2.2 파쇄기의 구동방식에 따른 비교

구 분	전기모터 구동	유압모터 구동
효 율	유압식보다 높은 효율	전기에너지를 유압에너지로 변경시 약 30% 효율감소
설치 및 유지관리비	설치 및 유지보수비가 적음	설치 및 유지보수비가 다소 높음
소 음	소음이 적음	소음이 다소 있음
소요동력(HP)	200HP까지 사용가능	100-500HP까지 사용가능
처리방법	소형처리에 이용	중·대형 처리가능 혼합폐기물의 파쇄에 적합
사용전압	가동전압이 일정해야 하고 줄일 수 없음	다소 줄일 수 있음
긴급시 조작	고장시 즉시 중단됨	예기치 못한 상황에 대한 대처 능력이 큼

2.2 선별 기술(Sorting)

이 기술의 기본목적은 동일한 물리적, 또는 화학적 성질을 갖는 물질들끼리 나누는 것이다. 이 기술에는 스크리닝, 바람에 의한 스크리닝, 중력을 이용한 분리, 자기를 이용한 스크리닝 등이 있다. 이 기술을 사용할 경우에는 폐기물의 물리적 특성, 모양, 재활용 비율, 순도, 재활용될 물질의 경제적

가치, 2차오염발생의 예상치 등을 고려하여야 한다.

2.2.1 기본 이론

물질회수의 성능을 나타내는 것으로는 회수율, 순도 그리고 효율이 있다. 2원분리기와 다원분리기의 경우의 이들이 표 2-1와 같으며, 이때의 효율은 회수도와 순도를 모두 고려하여야 한다.

표 2.3 회수율과 순도, 선별공정의 효율

종류	이원분리기		다원분리기	
	항목	$x_0 + y_0 \rightarrow$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">                     Binary Separator                      1 <math>\rightarrow x_1 + y_1</math>                      2 <math>\rightarrow x_2 + y_2</math> </div>	$x_{10} + x_{20} + \dots + x_{n0} \rightarrow$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">                     Polynary Separator                      1 <math>\rightarrow x_{11} + x_{21} + \dots + x_{n1}</math>                      2 <math>\rightarrow x_{12} + x_{22} + \dots + x_{n2}</math>                      ⋮                      m <math>\rightarrow x_{1m} + x_{2m} + \dots + x_{nm}</math> </div>	
회수율 (%)	$R(x_1) = \frac{x_1}{x_0} \times 100$ $R(y_2) = \frac{y_2}{y_0} \times 100$	$R(x_{11}) = \frac{x_{11}}{x_{10}} \times 100$ $R(x_{nm}) = \frac{x_{nm}}{x_{n0}} \times 100$		
순도 (%)	$P(x_1) = \frac{x_1}{x_1 + y_1} \times 100$ $P(y_2) = \frac{y_2}{x_2 + y_2} \times 100$	$P(x_1) = \frac{x_{11}}{x_{11} + x_{21} + \dots + x_{n1}} \times 100$ $P(x_m) = \frac{x_m}{x_{1m} + x_{2m} + \dots + x_{nm}} \times 100$		
효율 (%)	Rietema 공식: $E(x, y) = 100 \left  \frac{x_1}{x_0} - \frac{y_1}{y_0} \right  = 100 \left  \frac{x_2}{x_0} - \frac{y_2}{y_0} \right $ Worrell 공식: $E(x, y) = \left( \frac{x_1}{x_0} - \frac{y_2}{y_0} \right) \times 100$			

2.2.2 종류별 분리 방법

표 2-4. 선별 설비의 종류

분리 방법	형태
Screening	Vibrating screen, rotary screen
Sorting by specific gravity	Mechanical or wet-type method using difference in specific gravity
Sorting by wind	Vertical, horizontal, and tilted type
Magnetic sorting	Drum type, belt type
Eddy current sorting	Rotary disc type, tilted plate type
Electrostatic separation	Steel belt type, corona discharge type
Sorting by magnetic field	Magnetic fluid type
Sorting by using a solvent	Dissolution with xylene
Sorting by cleaning	Flusing type, water/sieve type
Sorting by difference of strength	Semi-wet crushing type
Sorting by flotation	Ore flotation
Optical sorting	Reflection type
Sorting by elasticity	Rotary disc type, belt type

1) 체분리 기법(Screening unit)

스크리닝은 폐기물을 grain size의 크기에 따라 두개 이상의 그룹으로 묶어내는 작업이다. 스크리닝에 의한 분리는 스크린에 있는 체눈의 크기에 따라 조절할 수 있다. 스크리닝은 분쇄 또는 파쇄가 끝난 후, 공정으로써 주분리(폐기물을 성분별로 분리하는 과정)의 전처리공정으로써 사용된다.

대상 폐기물들이 처리되는 상태에 따라 건식과 습식이 있으며, 습식의 경우 수분을 공급해 주어야 하므로 건식이 유리하다. 진동스크린(vibrating screen)과 회전식 스크린(rotary screen, trommel)으로 구분할 수 있으며, 폐기물을 구분하는 성질에 따라 그외에도 여러가지의 스크리닝 장치가 있다.

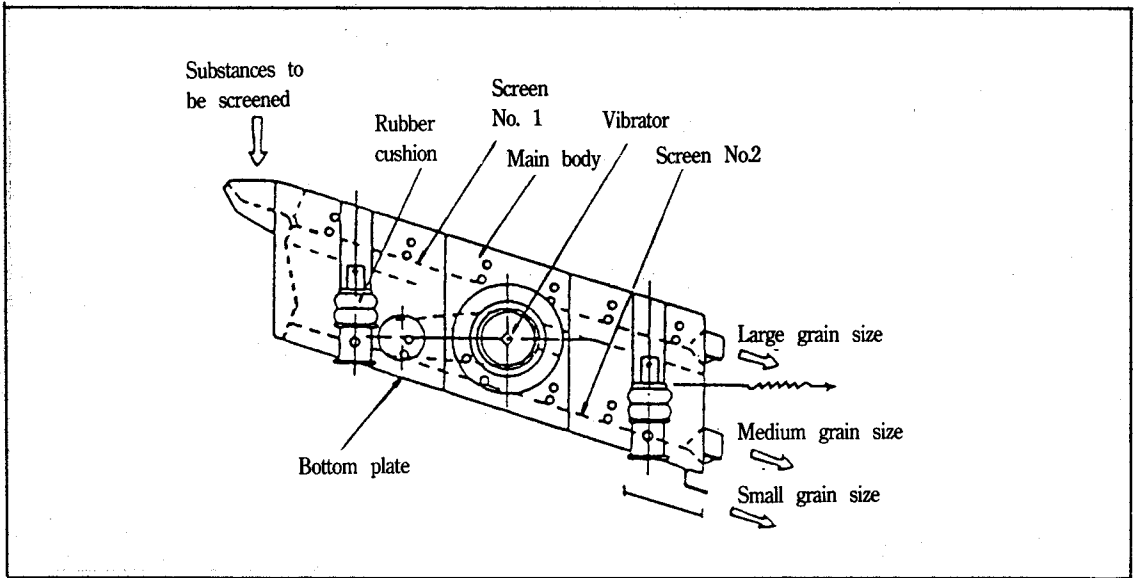


그림 2-4. Vibrating screen

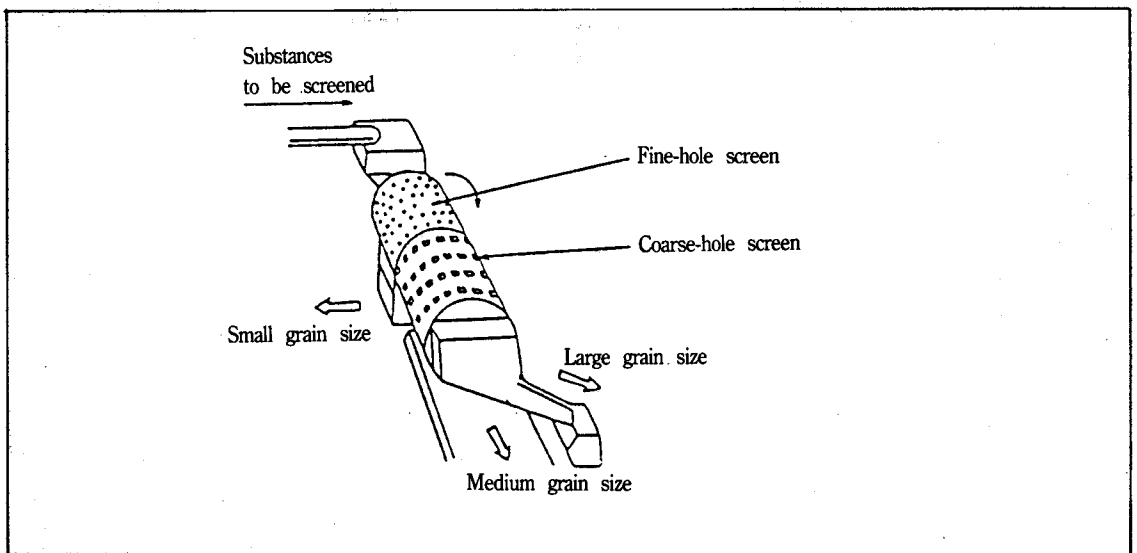


그림 2-5. Rotary screen

2) 중력에 의한 분리(Sorting by gravity)

이 방법은 물질의 비중(specific gravity)의 차이를 이용하여 물질을 나누는 방법이다. 이런 종류의 방법은 전처리로써 분쇄, 파쇄 등의 공정이 필요하다. 중력에 의한 분리방법에는 기계적인(mechanical)방법과 습식(wet-type) 방법이 있다. 습식방법은 물 또는 보다 무거운 액체를 이용하여 폐기물이 비중에 따라 뜨거나 가라앉는 성질을 이용하는 분리방법이며, 기계적인 방법은 입자의 크기(grain size)와 비중(specific gravity)을 동시에 이용하는 방법이다. 이 방법은 자유낙하하는 물체에 작용하는 중력과 쉽게 움직일 수 있는 와이어에 작용하는 반발력의 차이를 이용한 방법이다. 첫번째 단계에서는 입자의 크기에 따라, 두번째 단계에서는 입자의 비중에 따라서 물질을 분리해 낸다.

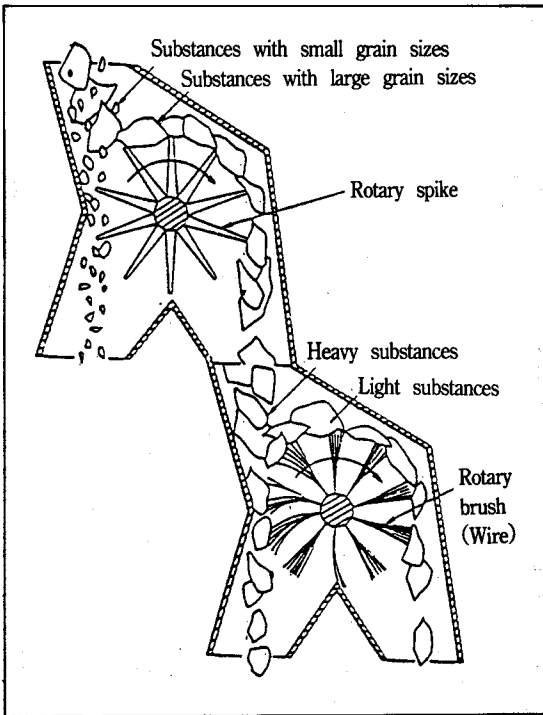


그림 2-6. Mechanical separator

3) 풍력에 의한 분리(Sorting by wind)

이 방법은 물질별로 다른 공기 저항에 의해 발생하는 자유낙하속도의 차이에 의해 물질을

분리해 내는 방법이다. 가장 좋은 예는 벼에서 피를 걸러내는 방법이다. 이 방식을 사용하는 설비는 일반적으로 왼쪽방향으로 향하는 공기주입기와 지그재그 패스(zigzag path)를 갖는 컨테이너로 구성된다.

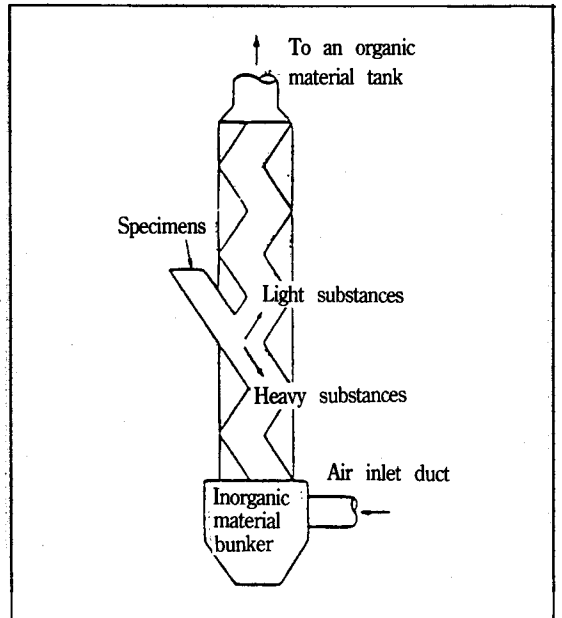


그림 2-7. External view of a vertical separator

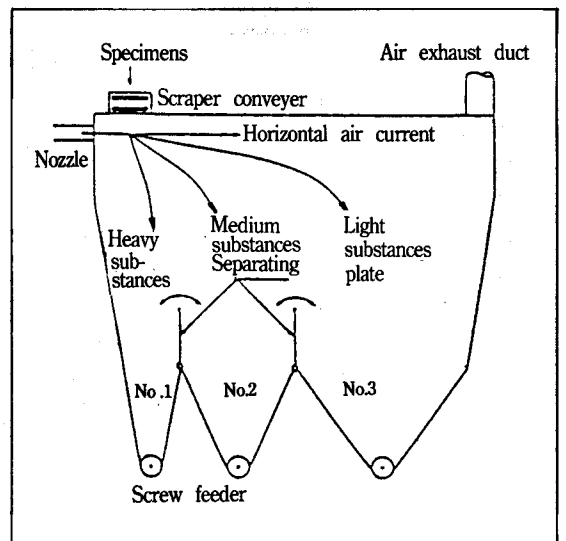


그림 2-8. External view of a horizontal separator



4) 자기력을 이용한 분리(Magnetic sorting)

자기력을 이용한 분리는 혼합폐기물 속에 들어 있는 금속성분을 전자석이나 영구자석을 이용하여 분리해내는 것이다. 일반적으로 자성을 띤 벨트를 이용해 철을 분리해 낸다.

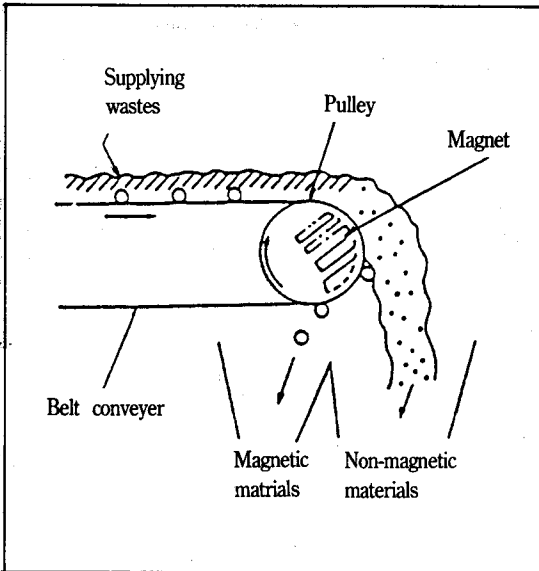


그림 2-9. Magnetic pulley-type separator

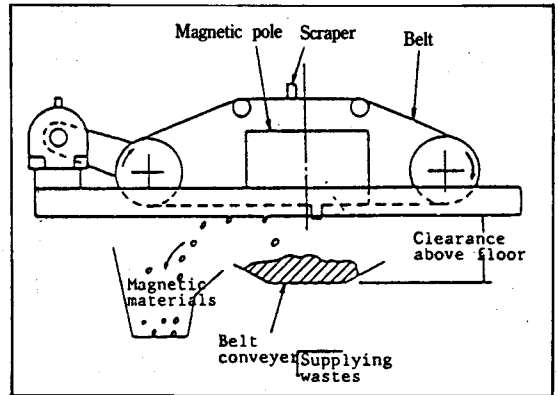


그림 2-10. Magnetic belt-type separator

5) 에디 커런트 선별(Eddy current sorting)  
이 방법의 기본 원리는 다음과 같다.

- ① 폐기물이 지나가는 통로의 양편에 자석을 달아 그 사이에 자기장을 형성한다.
- ② 자기장을 변형시켜 에디 커런트를 형성시킨 루트에 알루미늄과 같은 전기전도가 큰 물질을 통과시킨다.
- ③ 에디 커런트와 자기장의 간섭으로 인해 물질들을 움직일 만한 힘을 형성하고 그 힘으로 부터 비 자기성 물체를 비금속 물질로 부터 분리해 낸다.

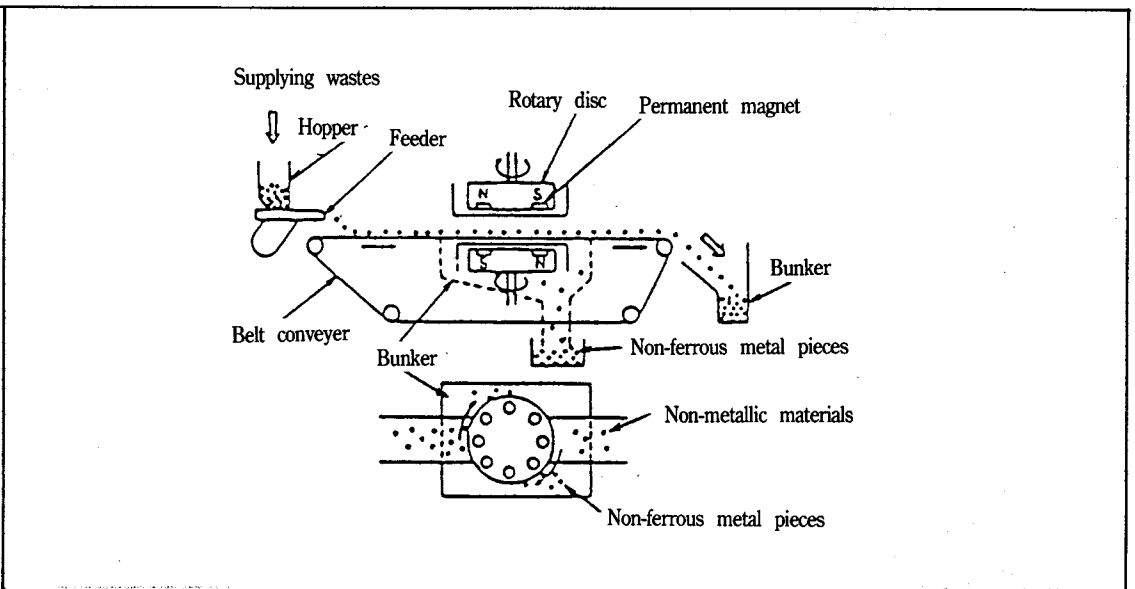


그림 2-11. Rotary disk-type eddy current separator

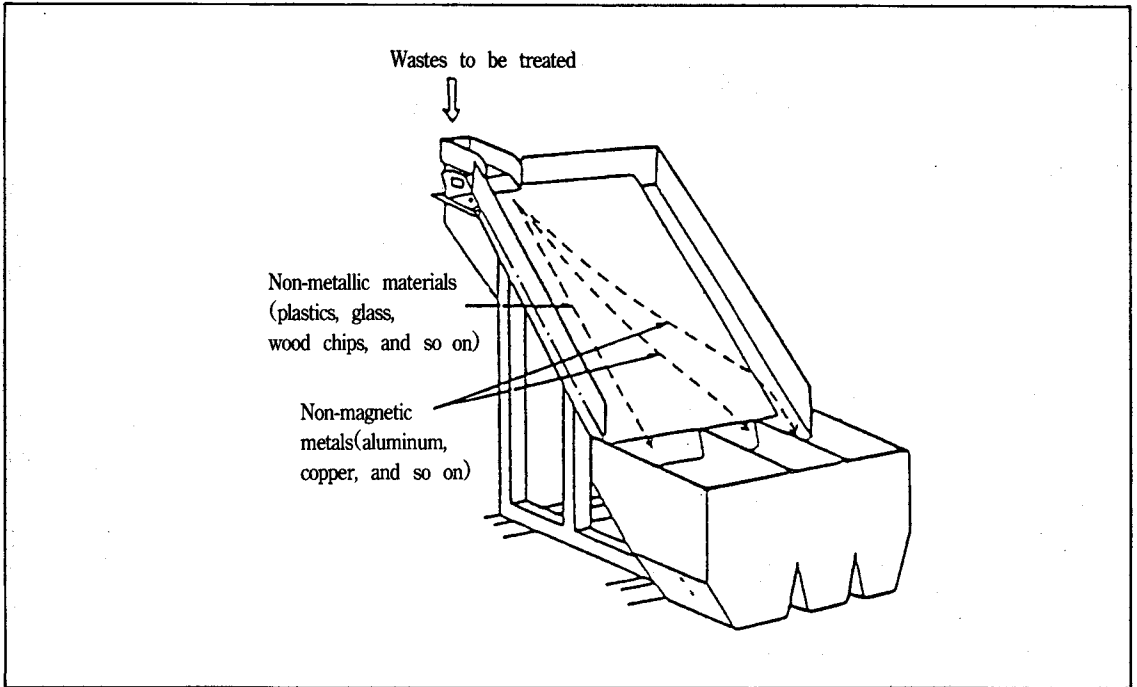


그림 2-12. Tilted plate-type eddy current separator

6) 전기장을 이용한 선별(Electrostatic separation)

이 방식은 물질을 전기장에 통과시켜 선별하는 방식이다. 기질들은 전기전도도, 전압에 대한 저항성, 유전상수와 같은 물리적인 특성에 의해 다른

방식으로 대전된다. 따라서, 이 방식은 비철금속으로 부터 구리나 알루미늄을 분리하거나, 플라스틱으로 부터 불순물을 제거하는 공정 등에 사용된다.

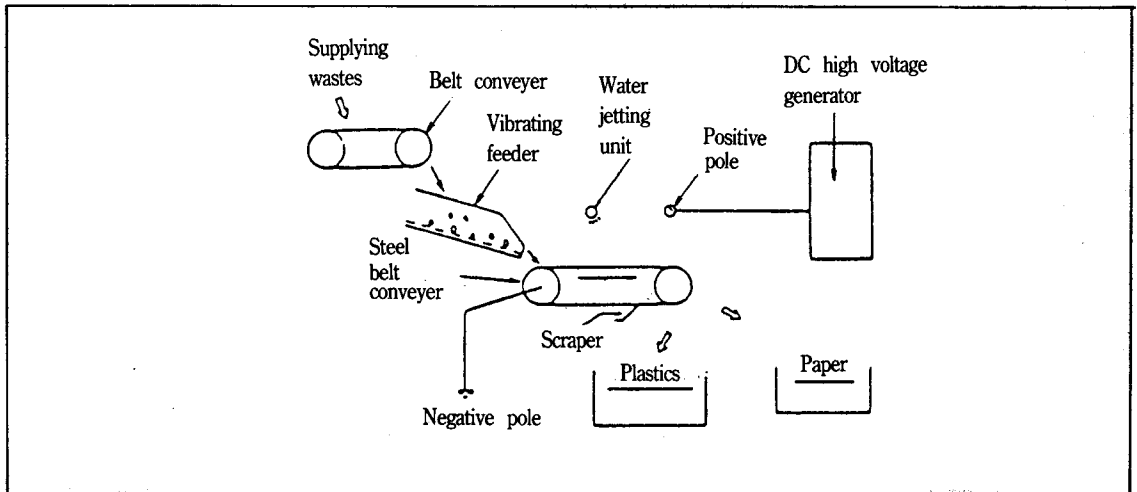


그림 2-13. Corona discharge-type electrostatic separator

7) 자기장을 이용한 선별

유체가 적절한 자기장속에 위치하게 되면, 비중이 변하는데 이런 성질을 이용하여 비중의 차이로 부터 물질을 분리해 내는 방법이다.

8) 용매를 이용한 선별

일반적으로 플라스틱은 어떤 특정한 용매에 대해 특정한 용해도를 보인다. 이러한 용해도의 차이를 이용해 물질을 선별하는 설비이다.

9) 광학을 이용한 선별(Optical separation)

주로 유리를 분리할 때 사용되는 방법으로 적외선 또는 다른 광선을 사용하여 반사되거나 투과되는 빛을 감지하여 그 빛의 성질로 부터 색깔별로 물질을 분리해 내는 기법이다.

10) 유체를 이용한 분리

①지그(Zig) : 플런저(plunger)에 의해 수위의 변화를 시킨 후 무게에 따라 분리를 하게 된다. 플라스틱류나 금속류에 응용이 가능하다.

②소토너(Stoner) : 공기테이블이라고도 하며 물 대신 공기를 사용하는 것이 Zig방식과 다른 점이다. 알미늄이나 퇴비로부터 유리를 제거하는 공정에 사용된다.

③침강/상승 분리기(Sink/float separator) : 액체보다 비중이 작은 물질을 가지는 물질을 부상시켜서 제거하는 방식으로 알미늄이나 가죽, 플라스틱 섬유류의 선별에 사용된다.

④부상법(Flotation) : 잘게 부쇄진 폐기물의 입자표면에 기체입자를 선택적으로 부착시켜 일정한 성분을 제거하거나 선별하는 방식. 유리회수시 알루미늄이나 산화철, 세라믹 등을 제거하는데 사용된다.

2.3 국내의 기술현황의 비교 평가

국내에서 폐기물의 재활용을 목적으로 1986년 서울시에서 1,500톤/일 규모의 파쇄 및 분리시스템을 최초로 도입하였으나, 쓰레기의 질적 특성 분석의 잘못과 설계상의 문제점으로 운영이 중단되었다. 이 시스템에서 고려된 분리장치는 Trommel(원통형 스크린), 자력 분리장치와 풍력선별기 등이다. 현재 국내에서 도시쓰레기의 재활용을 위한 파쇄 및 분리 시스템을 적용시키는 곳은 단 한곳도 없으며, 일부 산업폐기물 위탁처리업체에서

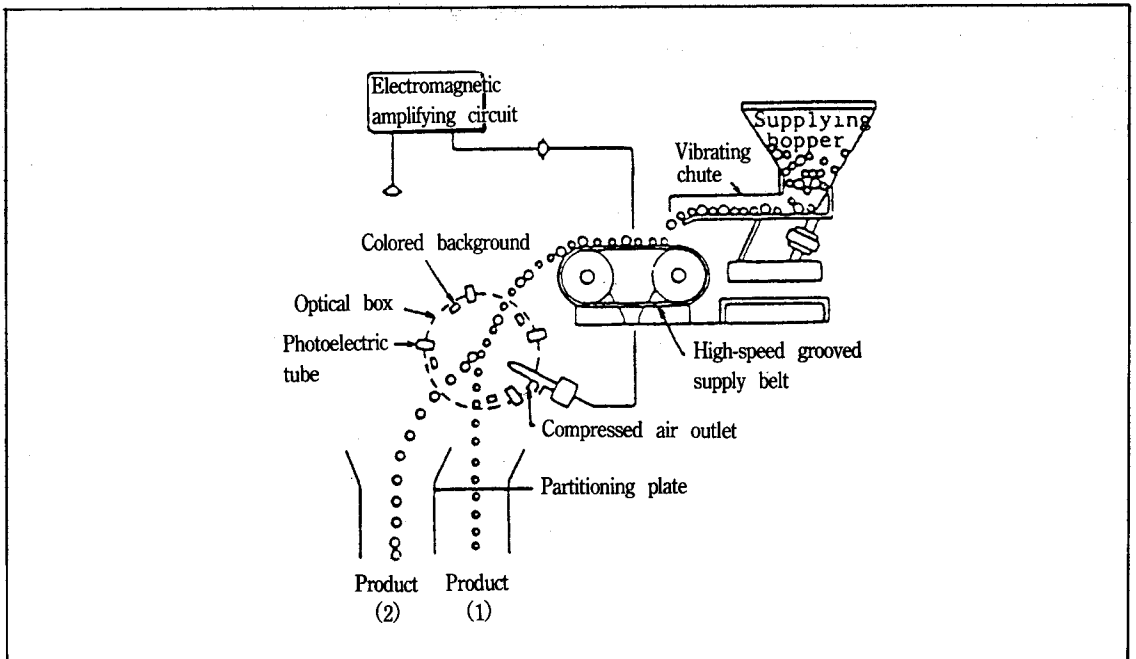


그림 2-14. Optical separator

표 2-5. 파쇄 및 분리기술의 국내외 현황

국 내	국 외
1. 상온 분쇄기(일부 부품은 수입) 2. 기계식 분리기와 자석 분리기 제작가능	1. 다양한 파쇄기를 개발하여 사용 2. 첨단 분리장치의 개발 3. 무인 파쇄 및 분리시스템의 개발연구
국내의 경우에는 비교적 간단한 장치의 제작만이 가능한 실정이며 첨단장치의 개발능력은 부족함. 부가가치가 큰 부품 및 시스템의 개발이 필요함.	

파쇄기를 활용하고 있고, 분리장치의 경우에는 수분리 또는 자력분리기를 이용한 철의 회수기 등을 이용하고 있다. 표 2-5는 파쇄 및 분리기술의 국내외 현황을 나타낸 것이다. 파쇄기 부분의 국내 기술현황은 파쇄기용 cutter 등의 부속품에 약간의 취약성을 갖고 있으며, 일부 또는 전량을 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 이는 자체적인 제작능력은 충분히 확보하고 있는 상황으로 볼 수 있다. 또한 분리기술 부분에서는 일부 광공업 분야에서 다소 많은 연구가 이루어졌으나, 아직까지 폐기물 분야에 적용시킬 수 있는 기술은 일부 스크린분리기와 자력선별기 정도로 주로 재래식 분리기술을 보유하고 있다. 따라서 앞으로는 폐기물의 자원화를 증진시키기 위해 전처리 기술로써의 파쇄 및 분리기술의 개발이 필요한 것으로 보여진다.

### 3. 결 론

이상에서 폐기물의 자원화 및 물질 분리를 위한 전처리 설비를 파쇄설비와 선별설비로 나누어서

기술하였다. 전술한 바와 같이 폐기물은 더 이상 그대로 최종처분되어서는 안되는 일종의 자원으로 파악되어야 하며, 이를 위해서는 적절한 전처리가 필수적이라 할 수 있다. 폐기물은 그 성분이 매우 다양하므로 이들을 적절한 성분으로 분리해 내기 위해서는 전술한 설비들 중 하나 또는 그 이상의 설비를 개발하는 일 역시 매우 중요하다 하겠다. 끝으로 폐기물의 문제들이 하나씩 하나씩 해결되기를 바라면서 본고를 마치고자 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] 구자공, 신항식, "자원화를 위한 전단처리", 화학공업과 기술 7권 1호, pp.36~48.
- [2] Clean Japan Center, "Recycling Industrial Wastes", 1990.
- [3] P. Aarne Vesilind, Alan E. Rimer, "Unit Operations in Resource Recovery Engineering", 1981.
- [4] Harvey Alter, "Materials Recovery from Municipal Waste", 1983.