

산업폐기물의 자원화

대량생산과 대량소비시대로 접어들면서 각종 폐기물이 급증하고 있다. 특히 산업폐기물은 환경뿐만 아니라 인체에 까지 치명적인 영향을 미쳐 국제적으로도 뒷처리에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이에 「'89한국과학기술총계 워크샵」에서 발표된 도갑수(숭실대 화학공학과) 교수의 “산업폐기물의 자원화” 논문을 게재하여 도움말을 얻고자 한다. (편집자註)

1. 서 론

산업폐기물은 오니 잔재물, 폐유, 폐산, 폐알카리, 폐고무, 폐합성수지 등으로 제품을 생산하는 과정에서 발생하는 것과 환경오염 방지시설에서 배출되는 것으로 구분할 수 있다.

이들 폐기물에는 자원화할 수 있는 가능성을 가진 성분들이 상당량 포함되어 있다. 그러나 이들을 그대로 방치하거나 버리게 되면 수질, 토양등에 많은 오염을 일으키고, 소각이나 고형화 처리를 할 때에는 많은 처리 비용이 소모될 뿐만 아니라 침출수나 각종 대기오염물질이 발생하게 되며, 매립처리할 경우에는 우리나라와 같이 국토가 좁은 지역에서는 매립지 부족난을 당하게 된다.

따라서 산업폐기물로부터 원자재와 에너지를 추출하여 이를 충분히 재사용할 수 있다면 이는 폐기물의 자원화에 크게 기여함과 동시에 폐기물의 감량화 및 무해화와 매립지 부족난도 어느 정도 해결할 수 있을 것이다.

여기에서는 각국의 산업폐기물의 발생 및 자원화현황과 산업폐기물의 자원화 기술을 국내외의 자료를 토대로 소개하고자 한다.

2. 각국의 산업폐기물 발생현황

지난해 환경청의 지원을 얻어 국내의 2천 2백 67개 업체를 대상으로 지역별(22개 지역), 업종별(24개 업종) 및 폐기물 종류별(일반 산업폐기물 및 특정산업폐기물 42종)로 발생현황을 조사하였다.

이 자료에 의하면, 업종별 발생량은 1차 금속업(40)이 57.0%로 가장 많았으며, 요업(13), 발전업(23)순이었고, 폐기물 종류별로는 일반 산업폐기물이 95.3%, 특정 산업폐기물이 4.7%였으며, 그중 연소재(광재포함)가 68.8%로 가장 많았고, 분진이 9.5%,오니류 8.4%, 금속편류가 3.9% 순이었으며, 특히 산업폐기물로는 폐산, 폐알카리가 2.2%, 폐합성수지가 13%, 폐유가 1.0%, 특정 유해물질이 0.2%를 차지하였다.

사업장별 발생율의 분포를 살펴보면, 1일 100톤 이상(가)을 발생하는 대형사업장이 29개나 되었고, 반면 0.1톤 이하(바)의 소형 배출 사업장도 약 40%인 837개나 되었다.

실제 소형 배출업소가 이것보다 더 많은 것으

로 추측되므로 이들의 관리에 더욱 노력하여야 하겠으며, 이들 여러 사업장이 공동 참여하는 전문 집단 회수시스템도 고려해 볼만하다.

외국의 경우에도 산업폐기물 발생량의 정확한 자료나 월 단위 발생량을 제시하는 자료가 드물다. 최근 미국 CMA가 그 회원사 529개 사업소(CMA회원의 35%)에 대하여 조사한 유독성 폐기물의 발생량은 2억 2천 50만톤으로 그중 98%가 폐수, 2%(4백 30만톤)가 고형폐기물이었다. 조사 사업장 가운데 12%에 해당하는 65개사가 고형폐기물을 발생시키지 않았으며, 이는 미국 사회에서 상당히 강조되어 오던 Zero Discharge가 정착되어가고 있음을 보여준다. 특히 유독성 고형 폐기물의 발생량의 중간값이 142톤

／년으로 상당히 낮았다.

일본의 경우 1985년의 총 발생량은 8천 7백 24만톤으로 일반폐기물의 약 2.5배나 되어 산업 폐기물의 비중이 우리나라에 비하여 월등히 높았다.

3. 산업폐기물의 자원화 현황

필자는 대량 배출업소 1,429개를 선정하여 산업폐기물의 공급원 및 수요원과 재활용 현황을 앙케이트 조사(약 50%를 회수)하였다. 이를 토대로 산업폐기물 성분별 조성과 각 성분의 자원 화율을 얻어 일본 자료와 함께 <표 1>에 나타 내었다.

<표 1> 산업별 폐기물 구성비 및 자원화율

구 분	구 성 비(%)		자 원 화 율(%)	
	한 국	일 본	한 국	일 본
Sludge	8.4	24.1	-	24.8
Oil	1.0	1.1	-	24.6
Acid	0.8	4.2	-	33.6
Alkali	1.2	1.8	-	28.8
Plastic	1.4	0.5	63.4	24.4
Paper	1.2	0.6	70.0	43.8
Wood	1.0	1.4	-	95.1
Animals & plants	0.9	0.2	55.9	83.3(97.5)*
Metal scrape	3.9	6.5	91.5	37.9
Ceramics	0.8	0.8	-	75.1
Slag (ash)	66.8	47.1	75.3	-
Construction debris	0.1	1.1	-	10.0
Patculate	9.5	7.9	79.2	64.7
others	3.2	2.7	-	25.0
계	100	100	62.5(평균)	58.5(평균)

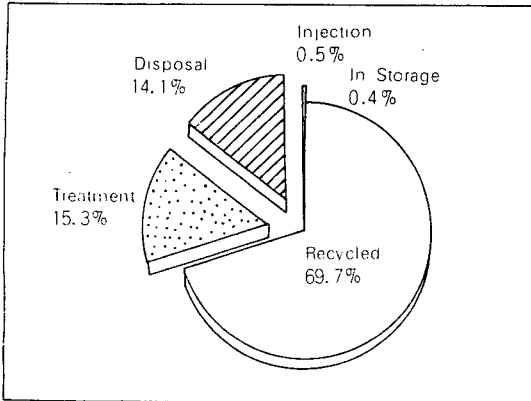
* Animals = 83.3%, Plants = 97.5%

<표 1>의 산업폐기물의 구성비로 보면 우리나라 폐기물의 광채비율이 일본보다 높았고, 반면 오니의 비율이 일본보다 낮았다. 이는 우리나라의 산업구조가 광채를 대량 배출하는 1차 금속산업이 주종을 이룸에 비하여 일본은 기계·화학공업 쪽으로 많은 배출업소가 있다는 것을 나타낸다. 산업폐기물의 자원화율은 우리나라가 62.5%로 일본의 58.5%보다 다소 높게 나타났다. 이는 대량 배출업소인 포항제철이나 광양만

제철이나 자체 재활용율이 높기 때문이라 생각한다. 종류별 자원화율은 두 나라가 비슷하게 금속편류가 가장 높고 목재류, 동식물 잔재 및 광채도 상당히 높았다. 그러나 일본의 경우에는 오니, 폐유, 폐산, 폐알카리 등에도 고른 자원화율을 보이는 것이 특징이다.

<그림 2>는 미국 CMA가 보고한 유독성 고형 폐기물의 관리현황을 나타낸 것으로 재활용, 즉 자원화율이 69.7%로 아주 높은 점이 우리

〈그림 2〉 유독성 고형 폐기물의 관리현황



의 실정과 비교, 특기할만하다.

4. 산업 폐기물의 자원화 기술

가. 석탄회의 재활용

석탄회의 종류는 보일러에서 발생하는 보일러 석탄회와 제철과정에서 철강 Slag가 있으며, 보일러 석탄회는 Fly Ash와 Bottom Ash, 철강 Slag와 제강 Slag로 구별된다.

국내 석탄회의 발생량은 추정치는 〈표 2〉와 같고, 이들의 재활용은 석탄회의 종류나 발생 양상에 따라 다른데 주로 시멘트 원료, 시멘트첨가

〈표 2〉 국내 석탄회 발생량의 추정치

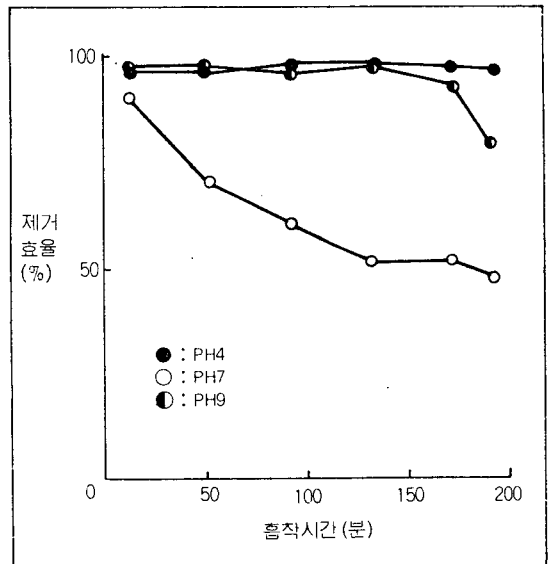
분류	연도	1983	1986	1991	1996	2001
1. Boiler Coal ashpower generation general industry		82	804	781	1,809	3,591
		1	35	166	242	500
	계	83	839	947	2,151	4,091
2. Iron Slag furnace slag steel slag		2,899	3,252	4,645	5,142	5,309
		1,242	1,421	2,028	2,246	2,320
	계	4,141	4,673	6,673	7,388	7,629

제, 규산 석회비료, 각종 건축자재 등 광범위하다. 우리나라의 경우 포항제철이나 광양만 제 2 제철소에서는 Slag 재활용이 90%로 높으나 그 외에는 대부분 매립하고 있는 실정이다.

필자는 Slag의 자원화를 높이기 위하여 제강 Slag 가운데 Fe 함량 40% 이상인 Slag를 이용하여 기계적분리 조작(자력식, 중력식, 부상식)을 통하여 여러가지 조작변수에 따른 분리효율을 조사하였다. 그 결과 습식 원통형 자력선별기를 사용할 경우 73.2% Fe의 정광을 Fe 회수율 96.3%로 얻을 수 있었고, 부유선별기를 사용할 경우 72.30% Fe의 정광을 Fe 회수율 94.9%로 얻을 수 있었다.

또 Slag를 사용한 Colum Test에서 pH 변화에 따른 접촉시간별 Ni와 Cu의 제거율을 측정하였다. 그 결과 Cu의 경우 〈그림 3〉와 같이 pH 4에서 90% 이상의 양호한 제거율을 얻었으며, Ni의 경우에도 비슷한 결과를 나타내었다. 또, 중금속이온이 흡착된 Slag를 산 세척한 결과 80~90% 중금속 회수율을 얻었다.

〈그림 3〉 pH변화에 따른 접촉시간별 Ni 및 Cu 제거율



나. 폐유의 회수, 자원화

폐유는 넓게는 폐유활유를 나타내나 이를 형태

별로 세분하면 윤활유, 세정유, 절삭유, 기타로 구분된다.

폐유는 환경오염에 미치는 영향이 큰 반면 재활용 가능성도 상당히 높으므로 EEC 회원국을 포함한 여러나라에서는 폐유의 처리 및 재활용에 대한 여러가지 조치를 취하여 왔다. 우리나라에서도 석유사업법으로 이들의 재활용을 장려하면서 폐기물 처리법에는 환경오염을 야기시키는 소각을 억제하고 있다.

이의 처리 및 재활용 기술은 1950년대부터 원활히 진행되었으며 폐유의 종류에 따라 황산 세정, 황성박토처리, 원심분리, 감압 증류, 여과등 재생방법이 다르다. 재생이 곤란한 폐유는 정제 처리하여 중유 등의 연료유를 만들고, 재생이나 정제가 모두 곤란한 것은 그대로 소각하여 열을 회수하는 경우도 있다.

폐유는 순수한 폐유상태로도 발생되나 경우에 따라서는 정유공정, 금속가공공정 등에서 발생하는 폐수처리과정에서 얻어지는 유분슬릿지 상태로 발생하는 경우도 있다. 한 예로 Gilbert Common Welth사의 금속가공공장 유분슬릿지에서 절삭유 회수공정을 소개한다.

폐수속의 유분은 자유유분(Free Oil) 상태와 유화유분(Emulsified Oil) 상태로 존재하고, 자유유분은 물리적·기계적 방법에 의하여 분리가능하나 유화유분은 Acid-alum Process나 Polymer-alum Process나 Polymer-alum Process로 부상 분리시킨 Oil 슬릿지로부터 Oil를 회수하여야 한다. Oil 회수율은 92%이었으며, 손익분기점은 500,000 gal / 2 year로 나타났다.

최근 자료에 의하면, 일본의 21세기 개발은 통산성·공업기술원·북해도 공업개발 시험소와 공동으로 Century Cracking Process라는 폐유연속 열분해 회수 처리장치를 개발하였다. 이 장치는 윤활유의 폐유나 석유탱크의 Cleaning 폐유, 각종 Grease의 폐기물을 열분해 처리하여 동유와 A 중유 등을 85%의 높은 효율을 회수할 수 있는 열분해 장치이다.

이의 공정을 요약하면 다음과 같다.

① 1단계 처리로서 점성, 고형, 액상에 관계없이 폐유를 120~130℃의 증기열로 용단용유

처리한다.

② 액상의 폐유를 3" 직경의 파이프에 주입하고, 280~350℃로 가열하여 열분해시킨다.

③ 생성된 Carbon을 연속적으로 제거하면서, 아울러 여과후 Wax와 회분을 완전히 제거하고 분해유를 정제한다.

이때 회수한 A 중유의 회수 비용도 1ℓ당 3.7엔으로 증진의 폐유 회수의 1/2 이하로 절감한다.

다. 폐플라스틱의 자원화

플라스틱은 각종 Polyme와 첨가제를 혼합하여 만든 것으로 그 사용목적에 따라 종류가 다양하므로 산업체에서 널리 사용되고 있고, 그 폐기량도 증가하는 추세에 있다. 폐플라스틱은 플라스틱 고유의 내구성 난분해성 때문에 매립시 매립지의 안정화에도 문제가 있고, 또 이를 소각할 경우에는 유독가스 발생가능성 때문에 대기오염을 야기시킬 수 있다. 따라서 폐플라스틱의 자원화는 폐자원 재활용과 환경오염 저감대책에 큰 의미를 가진다.

산업체에서 발생하는 산업 폐플라스틱에는 기술적 경제적인 조건하에서 자원화가 불가능한 공해플라스틱(Nuisance Plastic, NP)과 재공정에 의하여 상업적으로 자원화가 가능한 스크랩플라스틱(Scrap Plastic, S·P)이 있다.

스크랩 플라스틱의 재활용에도 다음과 같은 4가지 방법으로 구분할 수 있다.

① Primary Recycling — 불순물이 없는 것으로 새원료로 사용되어 스크랩이 야기된 유사한 형태의 제품을 만드는 공정

② Secondary Recycling — 불순물이 다소 포함되어 있는 경우 질이 낮은 플라스틱제품으로 만드는 공정

③ Tertiary Recycling — 폐플라스틱에서 각종 화학물질을 회수하는 공정

④ Quarternary Recycling — 폐플라스틱에서 에너지를 회수하는 공정

우리나라의 폐플라스틱 발생현황은 <표 3>과 같이 매년 크게 증가하고 있다. 최근에는 전자산업이나 재료공업의 발달로 플라스틱에 규사, 석

〈표 3〉 폐플라스틱 발생현황

(1,000M/T)

종류 \ 연도	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
LDPE	97.6	93.7	104.3	119	133.5	148	162.6	179.6
HDPE	15.9	18.9	26.5	38.6	43.9	49.8	52.5	52.3
PP	60.3	71	86	106	114.9	116.2	117	113
PVC	76	85.1	82.7	81.6	84.3	99.5	127.9	146.4
PS	9.8	13.5	10.7	15.4	22.9	33.8	50.9	58.7
ABS	7.4	8.5	9.4	10.1	12.2	14.2	16.9	119.5
계	267	290.7	319.6	370.7	411.7	461.5	527.9	569.5

〈표 4〉 시성분석과 열량분석 결과

(단위: Wt%)

Sample \ Item	moisture	V.S.	F.S.	LHV (kcal/kg)
A-a	6.35	6.12	87.35	---
A-b	4.14	36.25 2	59.61	---
A-c	0.10	42.78	57.12	---
A-d	0.32	56.32	43.36	5.037
A-d	0.08	56.37	43.55	---
B	0.07	28.17	71.76	2.862
B	0.08	28.45	71.47	---
Mixed ther-mopiastic	5.0	93.0	2.0	10.458
Mixed ther-moster	5.0	89.0	6.0	9.100
Synthetic rubber	5.0	85.0	10.0	8.180
Synthetic fiber	5.0	87.0	8.0	6.920
Average	5.0	85.0	10.0	8.067

면, 유리섬유, 금속등과 혼합체를 이룬 플라스틱 혼합물(Plastic Mixture)이 많아 이들의 처리에 신중을 요하고 있다.

필자가 조사·연구한 바에 의하면, 일본의 경우 전체 폐플라스틱의 42.6%가 플라스틱 혼합물이었으며, 단순 플라스틱 스크랩과 플라스틱 혼합물의 시성분석과 열량분석결과는 〈표 4〉와 같았다. 이는 플라스틱 혼합물은 자원화가 곤란하므로 적당크기로 절단 매립처리하여야 한다는 것을 명백히 나타내주고 있다.

플라스틱의 열분해(Pyrolysis)에 의한 물질회수는 많은 연구가 진행되었으나, Plant 화한 것은 많지 않다.

미국의 Devco가 1,500T/D로 Rotary Kiln을 운영하고 있고, 일본 Mitsui Shipbuilding & Engineering Co가 Stirred Tank Reactor로 PE에서 Fuel Oil을 생산하고 있다. 국

내에서는 환경연구원에서 실험실 규모와 Pilot Plant로 각종 유기계 폐기물의 열분해 실험을 실시할 정도로 Plant 화한 것은 거의 없는 실정이다.

플라스틱은 일반 폐기물에 비하여 발열량이 2~4배나 되며, 완전연소를 위하여 많은 공기량(일반폐기물의 10배)이 필요하고, 높은 불꽃온도(Flame Temperature)를 가진다. 이와 같은 문제들 때문에 폐플라스틱의 연소로는 다음 조건을 만족하여야 한다.

- ① 소각로는 양호한 연소와 그을음에 저항이 있게 설계되어야 한다.
- ② 벽과 노상은 플라스틱 연소에 의하여 야기 될 고온에 견딜 수 있어야 한다.
- ③ 공기 공급장치는 150~200%의 과잉공기를 공급하도록 설계되어야 한다.
- ④ 소각로는 1150℃ 이하의 온도를 유지할

수 있게 설계되어야 한다.

⑤ 배기가스의 양이 많으므로 표준 소각로보다는 직경이 큰 굴뚝을 사용하여야 한다.

⑥ 자동 소각되는 플라스틱을 다루기 위한 예열장치가 있어야 한다.

⑦ 플라스틱을 공급할 특수 공급장치가 필요하다.

대표적인 소각로의 구성은 수평 원통형로와 수직 원통형로로 되어 있고, 수평방향의 1차, 2차 공기는 혼합과 난류용으로 공급되고, 수직방향의 3차 공기는 최종 연소를 위하여 공급된다. 현재 국내에도 한국자원 재생공사가 농업용 HOPE와 LDPE를 소각하기 위한 소각로 11기(총 용량 1,620 kg/hr)가 설치·운영되고 있으나 대부분 소형이다.

라. 각종 금속 공업에서 금속의 회수

금속공업은 아주 다양하며, 여러가지 형태로 폐기물을 발생한다. 이 폐기물 속에 포함된 여러 금속성분은 매우 유독하므로 완벽하게 처분되어야 한다. 이들 금속은 상당한 가치가 있으므로 이를 회수 재활용하는 것이 가장 이상적이다.

국내에서도 1000~10,000 ppm 정도의 Cu를 함유한 용액에 대하여 Ferro-aluminum Powder를 첨가시켜 동 분말을 얻고 동시에 용액으로부터는 Al 함유한 정수제를 얻는 FAP Process가 개발되었다.

미국의 경우 한 예로 Brass의 Bright Dipping Process에서 Cu를 회수하는 Eco-Tec사(社)의 Acid Process Sing Unit(APU)가 있다. APU는 산 용액에서 금속 이온을 제거하는 방법으로 강염기성 이온교환수지의 Acid Retardation에 의하여 분리하는 것으로 알미늄 엡칭 폐액에서 질산회수 및 Al 회수에도 이용하였다.

APU는 이온교환수지탑, 두개의 가압저장조, 몇개의 자동밸브 및 배관시설로 되어 있으며, 그 면적이 24ft²을 차지하는 완전 자동시설이다. APU의 조작에는 두개의 연속사이클, 즉 Upstroke와 Downstroke로 이루어진다. Upstroke 동안 흐름이 이동되어 금속이 얻어지고, Down-

stroke 동안은 물저장조……→ 이온교환 수지탑……→ 팽택처리탱크 순으로 이동하면서 산이 농축된다.

이를 활용한 Modine-Trenton Facility는 평균 1일 160 Basket 부하를 처리할 수 있고, 이 경우 1년에 약 1만7천달러가 절약되었다.

5. 결 론

지금까지 미국, 일본과 우리나라의 산업폐기물의 발생 및 자원화 현황을 살펴보고, 어느 나라나 산업 폐기물의 발생량이 점점 증가하고 있어 각종 환경오염, 자원의 손실, 국토의 황폐 등 각종 문제가 심각해지고 있다.

그러나 이들 산업 폐기물속에는 여러가지 종류의 이용 가능한 성분들이 포함되고 있으므로 이들을 자원화함으로써 각종 문제를 긍정적으로 해결 궁극에는 Zero Discharge를 기대할 수 있을 것이다. 산업폐기물에는 성분이나 질이 다양하므로 이를 자원화시킬 기술에도 여러가지가 있을 수 있으므로 이에 대한 기술이 빈약한 현실로는 많은 기술개발이 요청된다. 산업 폐기물의 자원화를 효율적으로 수행하기 위하여는 정부의 제도적, 재정적인 뒷받침을 통하여 산업폐기물의 재활용 산업에 활기를 불어넣어야 한다.

끝으로 모든 사업장이 자원화의 필요성을 스스로 인식하여 적극적인 참여속에 폐기물의 자원화가 원활히 이루어지기를 기대한다. *

