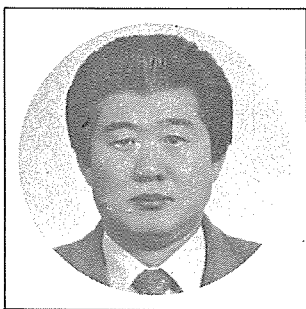


산업폐기물의 자원화

“財政的 지원과 資源化 인식이 제고되어야”



도 갑 수

(숭실대 공대교수 · 화학공학)

산업 폐기물은 오니 잔재물, 폐유, 폐산, 폐알카리, 폐고무, 폐합성수지 등으로 자원을 이용하여 제품을 제조하는 과정에서 발생하는 것과 환경오염 방지시설에서 배출되는 것으로 구분할 수 있다.

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

따라서 산업폐기물로 부터 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.

본고에서는 몇 나라의 산업폐기물의 발생 및

자원화 현황과 산업폐기물의 자원화기술을 필자의 연구와 국내외의 자료를 토대로 소개하고자 한다.

각국의 산업 폐기물 발생 현황

지난해에 환경청의 지원을 얻어 국내의 2,267개 업체를 대상으로 지역별(22개 지역), 업종별(24개 업종) 및 폐기물 종류별(일반 산업폐기물 및 특정산업폐기물, 42종)로 발생현황을 조사하였다. 자료에 의하면 업종별 발생량은 1차 금속업(04)가 57.0%로 가장 많았으며, 요업(13), 발전업(23)순이었고, 폐기물 종류별로는 일반 산업폐기물이 95.3%, 특정 산업폐기물이 4.7%였으며, 그 중 연소재(광재 포함)가 68.8%로 가장 많았고, 분진이 9.5%, 오니류 8.4%, 금속편류가 3.9% 순이었으며, 특정 산업폐기물로는 폐산, 폐알카리가 2.2%, 폐합성수지가 1.3%, 폐유가 1.0%, 특정유해물질이 0.2%를 차지하였다. 사업장 별 발생율의 분포를 나타낸 마지막 그

래프를 살펴보면 1일 100톤 이상(가)을 발생하
는 대형사업장이 29개나 되었고, 반면 0.1톤 이
하의 소형 배출사업장도 약 40%인 837개나 되
었다.

실제 소형 배출업소가 이것보다 더 많을 것
으로 추측되므로 이들의 관리에 더욱 노력하여
야 하겠으며, 이들 여러 사업장이 공동 참여하
는 전문집단 회수시스템도 고려해 볼만 하다.

외국의 경우에도 산업폐기물 발생량의 정확
한 자료나 원단위 발생량을 제시하는 자료가
드물다. 최근 미국CMA가 그 회원사 529개 사
업소(CMA 회원의 35%)에 대하여 조사한 유
독성 폐기물의 발생량은 220.5백만톤으로 그중
98%가 폐수, 2%(4.3백만톤)가 고형 폐기물이
었다. 조사 사업장 가운데 12%에 해당하는 65
개 사가 고형폐기물을 발생시키지 않았으며, 이
는 미국 사회에서 상당히 강조되어 오던 Zero
discharge가 정착이 되어 가고 있는 것을 나타
내주고 있다. 특히 유독성 고형폐기물의 발생량의
중간값이 142톤/년으로 상당히 낮았다.

일본의 경우 1985년의 총 발생량은 8,724만톤
으로 일반 폐기물의 약 2.5배나 되어 산업 폐기
물의 비중이 우리나라에 비하여 월등히 높았다.

산업 폐기물의 자원화 현황

대량 배출업소 1,429개를 선정하여 산업 폐기
물의 공급원 및 수요원과 재활용 현황을 앙케
이트 조사를 실시하여 약 50%의 회수율을 얻
었다. 이를 토대로 산업 폐기물의 성분별 조성
과 각 성분의 자원화율을 얻어 일본 자료와 함
계 Table.1에 나타내었다.

그 결과를 산업 폐기물의 구성비로 보면 우
리나라 폐기물의 광재 비율이 일본보다 높았고,
반면 오니의 비율이 일본보다 낮았다. 이는 우
리나라의 산업구조가 광재를 대량 배출하는 1
차 금속산업이 주종을 이룸에 비하여 일본은
기계, 화학공업쪽으로 많은 배출 업소가 있는
결과로 본다. 산업 폐기물의 자원화율은 우리나
라가 62.5%로 일본의 58.5%보다 다소 높게 나

타났다. 이는 대량 배출 업소인 포항제철이나

Table 1. The industrial waste recovery
in Korea and Japan

Type of Waste	Camposition (wt%)		Recycling ratio	
	Korea	Japan	Korea	Japan
Sludge	8.4	24.1	-	24.8
oil	1.0	1.1	-	34.6
Acid	0.8	4.2	-	33.6
Alkall	1.2	1.8	-	28.8
Plastic	1.4	0.5	63.4	24.4
Paper	1.2	0.5	70.0	43.8
Wood	1.0	1.4	-	95.1
Animals and plants	0.9	0.2	66.9	83.3
Metal scraps	3.9	6.5	91.5	97.5
Ceramics	0.6	0.8	-	37.9
Slag (ash)	66.8	47.1	75.3	75.1
Construction debris	0.1	1.1	-	10.0
Particulate	9.5	7.9	79.2	64.7
Others	3.2	2.7	-	25.0
Total	100	100	62.5 (aver)	58.5 (aver)

광량만제철의 자체 재활용율이 높기 때문이라
생각한다. 종류별 자원화율은 두 나라가 비슷하
게 금속편류가 가장 높고, 목재류, 동식물 잔재
및 광재도 상당히 높았다. 그러나 일본의 경우
에는 오니, 폐유, 폐산, 폐알카리 등에도 고른
자원화율을 보이는 것이 특징이다.

미국 CMA가 보고한 유독성 고형폐기물의 관
리현황을 보면 이의 재활용 즉 자원화율이 69.7
%로 아주 높은 것이 상당히 인상 깊다.

산업 폐기물의 자원화 기술

석탄회의 재활용

석탄회의 종류는 보일러에서 발생하는 보일
러 석탄회와 제철과정에서 발생하는 철강 Slag
가 있으며, 보일러 석탄회는 fly ash와 bottom
ash, 철강 slag는 고로 slag와 제강 slag로 구별
된다.

국내 석탄회의 발생량의 추정치는 Table.2와
같고, 이들의 재활용은 석탄회의 종류나 발생양
상에 따라 다르나 고로시멘트 원료, 시멘트 첨
가제, 규산 석회비료, 각종 건축자재 등 광범위

하나 우리나라의 경우 포항제철이나 광양만 제 2제철에서는 slag의 재활용율이 90%로 높으나 그 외에는 대부분 매립하고 있는 실정이다.

slag의 자원화를 높이기 위하여 제강slag 가운데 Fe 함량 40% 이상인 slag를 이용하여 기계적 분리 조작(자력식, 중력식, 부상식)을 통하여 여러가지 조작변수에 따른 분리 효율을 조사하였다. 그결과 습식 원통형 자력 선별기를 사용할 경우 73.2% Fe의 정광을 Fe회수율 96.3%로 얻을 수 있었고, 부유선별기를 사용할 경우 72.30% Fe의 정광을 Fe 회수율 94.9%로 얻을 수 있었다. 또 slag를 사용한 column test에서 PH변화에 따른 접촉시간별 Ni과 Cu의 제거율을 측정하였다. 그 결과 Cu의 경우 PH4에서 90% 이상의 양호한 제거율을 얻었으며, Ni의 경우에도 비슷한 결과를 나타내었다. 또 중금속이온이 흡착된 slag를 산세척 한 결과 80~90% 중금속 회수율을 얻었다.

Table 2. Estimated generation of Coal ash (unit 1,000ton)

year classification	1983	1986	1991	1996	2001
1. Boiler Coal ash					
-power generation	82	804	781	1,809	3,591
-general industry	1	35	166	342	500
sub total	83	839	947	2,151	4,091
2. Iron Slag					
-furnace slag	2,899	3,252	4,645	5,142	5,309
-steel slag	1,242	1,421	2,028	2,246	2,320
Total	4,141	4,673	6,673	7,388	7,629

폐유의 회수, 자원화

폐유는 넓게는 폐유활유를 나타내나 이를 형태별로 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 관리법에는 환경오염을 야기시키는 소각을 억제하고 있다.

이의 처리 및 재활용 기술은 1950년대 부터 활발히 진행되었으며 폐유의 종류에 따라 황산 세정, 활성박토처리, 원심분리, 감압증류, 여과 등 재생방법이 다르다. 재생이 곤란한 폐유는 정제처리하여 중유등의 연료유를 만들고, 재생이나 정제가 곤란한 모든 것은 그대로 소각하여 열을 회수하는 경우도 있다. 폐유는 순수한 폐유상태로도 발생되나 경우에 따라서는 정유 공정, 금속가공공정 등에서 발생하는 폐수처리 과정에서 얻어지는 유분슬러지상태로 발생하는 경우도 있다. 한 예로 Gilbert / Common Welth사의 금속가공공장 유분슬러지에서 절삭유 회수공정을 소개하겠다. 폐수속의 유분은 자유 유분(free oil)상태와 유화 유분(emulsified oil)상태로 존재하고 자유유분은 물리적, 기계적 방법에 의하여 분리가 가능하나 유화유분은 acid-alum process나 polymer-alum process로 부상 분리시킨 oil 슬러지로부터 oil을 회수하여야 한다.

최근 자료에 의하면 일본의 21세기 개발은 통산성 공업기술원 북해도 공업개발시험소와 공동으로 Century Cracking Process라는 폐유 연속 열분해 회수처리장치를 개발하였다. 이 장치는 윤활유의 폐유나 석유 탱크의 Cleaning폐유, 각종 grease의 폐기물을 열분해 처리하여 등유와 A중유 등을 85%의 높은 효율로 회수할 수 있는 열분해 장치이다.

이의 공정을 요약하면 다음과 같다.

①1단계 처리로서 점성, 고형, 액상에 관계없이 폐유를 120~130℃의 증기열로 용단용용 처리한다.

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

③생성된 Carbon을 연속적으로 제거하면서, 아울러 여과 후 Wax와 회분을 완전히 제거하고 분해유를 정제한다. 이 때 회수한 A중유의 회수비용도 1/당 3.7엔으로 종전의 폐유 회수의 1/2 이하로 절감된다.

페플라스틱의 자원화

플라스틱은 각종 polymer와 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 발생 가능성 때문에 대기오염을 야기시킬 수 있다. 따라서 폐플라스틱의 자원화는 폐자원 재활용과 환경오염 저감 대책에 큰 의미를 가진다.

산업체에서 발생하는 산업 폐플라스틱에는 기술적, 경제적인 조건하에서 자원화가 불가능한 공해 플라스틱(nuisance plastic, NP)과 재공정에 의하여 상업적으로 자원화가 가능한 스크랩 플라스틱(scrap plastic, S. P)이 있다.

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

- i) primary recycling - 불순물이 없는 것으로 새 원료로 사용되며 스크랩이 야기된 유사한 형태의 제품을 만드는 공정.
- ii) secondary recycling - 불순물이 다소 포함되어 있는 경우 질이 낮은 플라스틱제품으로 만드는 공정.
- iii) tertiary recycling - 폐플라스틱에서 각종 화학물질을 회수하는 공정.
- iv) quarternary recycling - 폐플라스틱에서 에너지를 회수하는 공정.

우리나라의 폐플라스틱의 발생현황은 Table. 3과 같이 매년 크게 증가 하고 있다. 최근에는 전자산업이나 재료공업의 발달로 플라스틱에

Table 3. Generating status of waste plastic in Korea.

Waste	Year							
	1981	1982	1983	1984	11985	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	19.5
Total	267	290.7	319.6	370.7	411.7	461.5	527.9	569.5

(1,000M/T)

규사, 석면, 유리섬유, 금속 등과 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 플라스틱혼합물이었으며, 단순 플라스틱 스크랩과 플라스틱 혼합물의 시성분석과 열량 분석 결과는 Table. 4와 같았다. 이는 플라스틱 혼합물은 자원화가 곤란하므로 적당크기로 절단 매립 처리하여야 한다는 것을 명백히 나타내주고 있다.

Table 4. The result of proximate and calorific analysis. (unit : 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	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 thermoplastic*		5.0	93.0	2.0	10,458
Mixed thermoset*		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

*reference 6) **Combustion at 450°C

플라스틱의 열분해(pyrolysis)에 의한 물질회수는 많은 연구가 진행되었으나, plant화한 것은 많지 않다. 미국의 Devco가 1,500T/D로 Rotary Kiln을 운영하고 있고 일본의 미쯔이조선 엔지니어링사가 Stirred Tank Reactor로 PE에서 연료유를 생산하고 있다. 국내에서는 환경연구원에서 실험실 규모와 파이렛 프랜트로 각종 유기체의 폐기물의 열분해 실험을 실시한 정도로 프랜트화한 것은 거의 없는 실정이다.

플라스틱은 일반 폐기물에 비하여 발열량이 2~4배나 되며, 완전 연소를 위하여 많은 공기량(일반 폐기물의 10배)이 필요하고 높은 불꽃

온도(flame temperature)를 가진다. 이와 같은 문제들 때문에 폐플라스틱의 연소로는 다음 조건을 만족하여야 한다.

- ① 소각로는 양호한 연소와 그으름에 저항이 있게 설계되어야 한다.
- ② 벽과 노상은 플라스틱연소에 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 수직원통형으로 되어 있고, 수평 방향의 1차, 2차 공기는 혼합과 난류용으로 공급되고, 수직 방향의 3차 공기는 최종연소를 위하여 공급된다. 현재 국내에도 한국자원재생공사가 농업용 HDPE와 LDPE를 소각하기 위한 소각로가 11기(총 용량 1,620 kg/hr)설치 운영되고 있으나 대부분 소형이다.

각종 금속공업에서 금속의 회수

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

국내에서도 1,000~10,000ppm 정도의 Cu를 함유한 용액에 대하여 Ferro-aluminum powder를 첨가시켜 동분말을 얻고 동시에 용액으로부터는 Al를 함유한 정수제를 얻는 FAP process가 개발되었다.

미국의 경우 한 예로 brass의 bright dipping process에서 Cu를 회수하는 Eco-Tec사의 Acid

Processing Unit(APU)가 있다. APU는 산 용액에서 금속이온을 제거하는 방법으로 강염기성 이온교환수지의 acid retardation에 의하여 분리하는 것으로 알미늄 에칭 폐액에서 질산회수 및 Al 회수에도 이용하였다.

APU는 질산 및 Al회수용 이온교환수지탑, 두개의 가압저장조, 몇개의 자동밸브 및 배관시설로 되어 있으며 그 면적이 24ft²을 차지하는 완전 자동시설이다. APU의 조작에는 두개의 연속사이클 즉 upstroke와 downstroke로 이루어진다. upstroke동안 회수과정의 흐름이 이동되어 금속이 얻어지고, downstroke동안은 물저장조 → 이온교환수지탑 → 팽창처리탱크 순으로 이동하면서 산이 농축된다.

이를 활용한 Modine-Trenton facility는 평균 1일 160basket 부하를 처리할 수 있고, 이 경우 1년에 약 17,000달러가 절약되었다.

결 론

지금까지 미국, 일본을 포함한 우리나라의 산업 폐기물의 발생 및 자원화현황을 살펴 보았고, 어느 나라나 산업폐기물의 발생량이 점점 증가하고 있어 각종 환경오염, 자원의 손실, 국토의 황폐 등 각종 문제가 심각해지고 있다.

그러나 이들 산업폐기물 속에는 여러가지 종류의 이용가능한 성분들이 포함되어 있으므로 이들을 자원화하므로 각종 문제를 긍정적으로 해결하고 궁극에는 zero discharge를 기대할 수 있을 것이다.

산업 폐기물에는 성분이나 질이 다양하므로 이를 자원화하는 기술에도 여러가지가 있을 수 있으므로 이에 대한 기술이 빈약한 우리 현실로는 많은 기술개발이 요청된다. 산업 폐기물의 자원화를 효율적으로 수행하기 위하여는 정부의 제도적, 재정적인 뒷받침을 통하여 산업 폐기물의 재활용산업에 활기를 불어넣어야 한다.

끝으로 모든 사업장이 자원화의 필요성을 스스로 인식하여 적극적인 참여 속에 폐기물의 자원화가 원활히 이루어 지기를 기대한다.