

산업폐기물의 소각과 여열이용

편집부

1. 서 론

도시쓰레기 소각료가 거의 전국적으로 보급되어 있는 오늘날 다음과 같은 문제들은 당연히 산업폐기물의 처리라는 이야기가 될 것이다. 도시쓰레기의 경우와는 달라서 처리방법에는 여러가지가 있지만 여기서는 소각처리할 수 있는 것에 관해서 검토를 시도해 보았다.

2. 소각처리대상이 되는 산업폐기물의 양

<표1>에는 법령으로 정해진 19종류의 산업폐기물 에 관해 발생량의 최신의 통계데이터를 표시했다. 표중 에서 ※는 소각처리의 대상이다. 후생성데이터를 기초 로 생각해보면 열원으로 되는 것이(표중에서◎표)합 계는 약 1,700만 t/년으로 전체의 5%이다. 또 소각처 리시에 보조연료를 필요로 한다고 여겨지는(※표)것 은 합계해서 1억8,000만 t/년으로 전체의 57%나 되는 데 실제로는 오니(汚泥)의 1/2은 요업 등에서 나오는 무 기오니이고, 이를 고려하면 유기오니로 소각처리의 대 상이 될 수 있는 것은 1억4천만 t/년으로 전체의 45%정 도가 된다. 뿐만 아니라 이가운데는 가축의 분뇨도 소 각기술의 측면에서 보면 유기오니에 포함되어 있다. 한 편 산업폐기물의 재이용률로서는 오니에서50%안팎, 페 플라스틱과 나무쓰레기가 25%전후로 알려져있기 때문 에 소각처리의 대상은 전술한 값 보다 실제로는 적어

<표1> 산업폐기물의 발생량

(단위 : 천t/년)

항 목	s60년조사 (후생성)	s62년조사 (통산성)
타고남은 재	2,409	4,265
※흙탕	112,821	99,019
◎ 폐유	3,672	1,812
폐산	4,302	21,690
폐알카리	923	9,737
◎ 폐플라스틱	2,816	2,666
◎ 종이쓰레기	2,072	3,259
◎ 나무쓰레기	8,092	7,987
◎ 섬유쓰레기	111	281
※ 동식물성잔담	5,157	2,275
◎ 고무쓰레기	78	38
금속쓰레기	8,877	10,699
유리, 도기쓰레기	3,910	2,284
광 재	41,649	65,824
건설폐재	48,948	2,076
※ 동물분뇨	62,462	
※ 동물사체	96	
먼지류	6,224	18,253
기타	1,230	525
계	315,867	252,660

질 것이다.

3. 연료적가치와 연소특성

산업폐기물의 경우 형상과 질이 모두 다양하기 때문에 연료로서의 성질도 석탄이나 증유에 비해 범위가 넓다. 형상적으로는 괴상, 니상, 분상, 액상 및 이들의 혼합상태의 것으로 분류된다. 니상물질에서는 전처리로서 농축, 탈수, 건조중에서 어느 상태인가에 따라 괴상인 것도 있고, 파쇄와 선별등에서, 또 폐유같은 것도 침전분리와 여과법 등의 전처리에서 연료적가치가 각각 달라지게 된다.

연료적가치를 논할 경우, 그 발열량이 얼마인가라는 것이 일반적이지만 나무, 종이, 섬유, 고무같은거나 폐플라스틱같은 것은 소각처리때 여열이 발생되어 열이용을 고려할수 있겠으며, 폐산, 폐알카리, 합수성폐용제 같은것은 보통 보조연료를 필요로 하는 것이다. 나아가 오니와 폐유같은 것은 그 상태에 따라 자연 또는 조열(보조연료)의 양면이 있다. <표2>에 주요한 플라스틱 및 식물성섬유에 대해 그 물성과 연소특성을 표시하였다.

다음에는 이 표의 보충으로서 각각의 연소특성을 기술기로 한다.

가. 플라스틱 폐기물

발열량은 약4,000~11,000kcal/kg로 높고 연소는 고온이 되며 토의 내화물과 화격자 등의 손상과 크랑카의 발생우려가 있다. 일부에는 유독가스의 발생, 고온연소에 따른 질소산화물의 발생, 불완전연소에 따른 폴리스티렌으로부터의 흑연발생과 염화비닐등에 따른 HCl가스의 발생같은 우려도 있다.

또 열가소성플라스틱은 연소를 시작할때 녹아내려화격자같은 것이 막히는 원인이 되는 수도 있다. 뿐만아니라 안정제와 착색제로서의 연과 카드뮴같은 것이 포함되어 있어서 이들이 열분해에 따라 배기가스중에 유해중 금속으로 변할 우려도 있다.

나. 목질계 폐기물

석탄같은데 비하면 뚜렷한 차이가 있다. 연료비가 낮고 휘발분이 주체이며 회분은 0.5%안팎이지만 바크(나무부스러기)같은것은 비교적 다량의 회분을 포함한다. 또 저장시의 토사의 혼입이나 건축해체폐재 등은

<표2> 고분자 및 식물성섬유의 연소특성

물 질	단 위	플리에틸렌	폴리스티렌	염화비닐	식물성섬유
원소분석치 (분자조성)	wt %	C : 85.7 H : 14.3	C : 92.3 H 7.7	C : 38.4 H : 4.8 Cl : 56.8	C : 48~50 H : 5.7~6.2 O : 44~46
인 화 점	℃	340	360	390	-
발 화 점	℃	440~450	488~496	454	착화점 : 150~250
열분해온도	℃	335~450	300~400	200~300	-
연소열 열분해생성물	kcal/kg	11140(경질) 부탄, N-부탄 프로판펜탄 에탄 프로피렌 지방산겨탄화수소	9,680 스티렌 2~4스티렌 중합체, CO, 톨론엔 벤젠	4,230 HCl, 벤젠 톨루엔, Cl ₂	4,000~4,500(저위) CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ 메탄, 에틸렌 벤젠아세토아르데 히트
연 소 성		약연성. 매연발생은 비교적 적다. 용융나 하시키면서 연소계 속	역연성. 반짝이는 황 백색의 불꽃으로 접은 연기를 냄. 연화용융	난연성. HCl에 의 한 질연의 불꽃 을 냄. 연화용융	역연성. 매연은 거 의 없다. 불꽃엔 휘 도가 있음. 잔차가 많음
연 소 가 스					CO ₂ 가 주체
공업분석치	CO ₂ -vol % H ₂ O-vol % N ₂ -vol % wt %	13.1 13.1 73.8 가연분 : 100	16.1 8.1 75.8 동좌 : 100	14.9 7.4(HCl) 70.3(7.4) 동좌 : 100	5~20 % - 휘 발 분 : 76~82
					고정탄소 : 17~22 회 분 : 1.8~0.3

〈표3〉 각종 소각로의 설계기본수치 예

로형식	폐기물의 종류	화격자형식등	피소각물발열량 kcal/kg (또는 수분 wt %)	화격자부하 kg/m ² h	화로부하 kcal/m ³ h	주5) 화격자효율 %
스토카	도시쓰레기등 섬유제폐기물	역송식 제단식등	400~2,500	150~350	×10 ⁶ 100~250	3~10
로터리 키트로	고분자계폐기물 오니 기타계기물	로터리키론 +재연실(+후 연스토카)	1,500~10,000 (50~90%)	주1) 10~30	주3) 100~250	5~15
유동로	오니 고합수폐기물	사상	수분 50~90%	주2) 200~300	주4) 100~250	0.1~0.05

(주) ①키론의 내면적(내주위×길이)에 의한.
 ②사부의 위에서 본 투영면적에 의한.
 ③키론내용적 및 가스화연소실의 합계용적에 의한.
 ④프리보드 용적에 의한.
 ⑤거의 잔차중의 미연분으로 보면 된다.

이물질의 혼입도 되하기가 어렵고 회분은3~3.5%정 도까지 달하는 일도 있다. 습베이스의 저위발열량의변 화를〈그림1〉에 표시한다. 연소특성으로서는 착화되 기쉽고, 고온에서 타 연소후의 잔회량도 적고 양질의 연소인 반면, 휘발분이 많기 때문에 연료와 공기 벨런 스가 깨지면 연기와 매연의 발생에 연결되기가 쉽다. 또 회분중에 Na, K가 많은 경우는 회의 용융온도가 내 려가 화격자상에서 크링카의 발생과보일러 전열면에서 의 데포짓 및 로벽에의 용융침식등의 우려가 있다.

다. 오니

주체는 유기오니이지만 소화오니와 생오니로 나뉜다. 전자는 유기물의 45~55%가 CH₄와 H₂O와 CO₂로되 어 버리기 때문에 나머지 고체물중의 절전베이스 발열 량은 1,500~2,000kcal/kg이상으로 높은것이 많다. 또한 습베이스발열량은 탈수기의 성능에도 관련되어 로의 열적인 시스템을 충분히 고려하면 자연이 가능하다. 그러나 탈수상태가 나쁜 오니에서 그나름의 조연유 를 필요로 한다. 연소특성으로서는 섬유계와 마찬가지로 생각하면 되는데 건조분말상이어서 연소기는 그 나름의 고려를 요한다. 좌우지간 소각처리를 하는데 있

어서는 열적시스템의 선택이 중요하다.

4. 폐기물의 종류에 따르는 적합로

폐기물의 소각로로서는 도시쓰레기용으로는 스토카 로, 하수오니용으로는 유동상로같은 것이 널리 보급되 어 있지만, 산업폐기물용 소각물의 성상이 일정하지 못 한점, 사업형태가 여러가지라는 점, 수집체제도 확립되 어있지 못하고 1개소의 플랜트당 처리량도 적다는 점 등으로 인해 여러가지 형식의 로가 각 케이스별로 제 획되어있다. 실제적으로 장치의 계획에 부당치면 ①연 소속도의 차이(고분자계는 섬유계에 비해 연소속도가 빠르고, 다량의 연소공기를 일시에 요하며, 또 오니의 경우는 착화전에 건조용의 시간을 요한다)②발열량의 차이(일부의 오니처럼 마이너스의 값에서 플라스틱처 럼 약 10,000kcal/kg정도까지 있다)③연소중의 변화 (연화, 용융, 적하등의 현상을 볼 수 있다)④연소가스 의 특성(지주성, 부식성, 독성, 흑연발생)등과 같은 요 소를 검토할 필요가 있다.

〈표3〉에 주된 로형식과 적용가능폐기물 및 설계 기본데이터를 표시한다.

가. 스토카로

원래 석탄같은데 쓰이던 것으로 섬유계 폐기물의 소각에 적합하다. 고정화격자와 가동화격자를 조립시켜 소각물의 혼합, 교반(攪拌)을 겨냥한 것이 주체인데 소각용공기는 일반적으로 화격자아래로부터, 또 오버파이어공기를 토상부에서 불어넣기도 한다. 화격자는 일반적으로 내열주물이고 유압등에 의해 구동된다. 또 로 벽에 크링카가 달라붙는 것을 방지하기 위해 SiC같은 벽들을 사용하기도 한다.

나. 로터키른

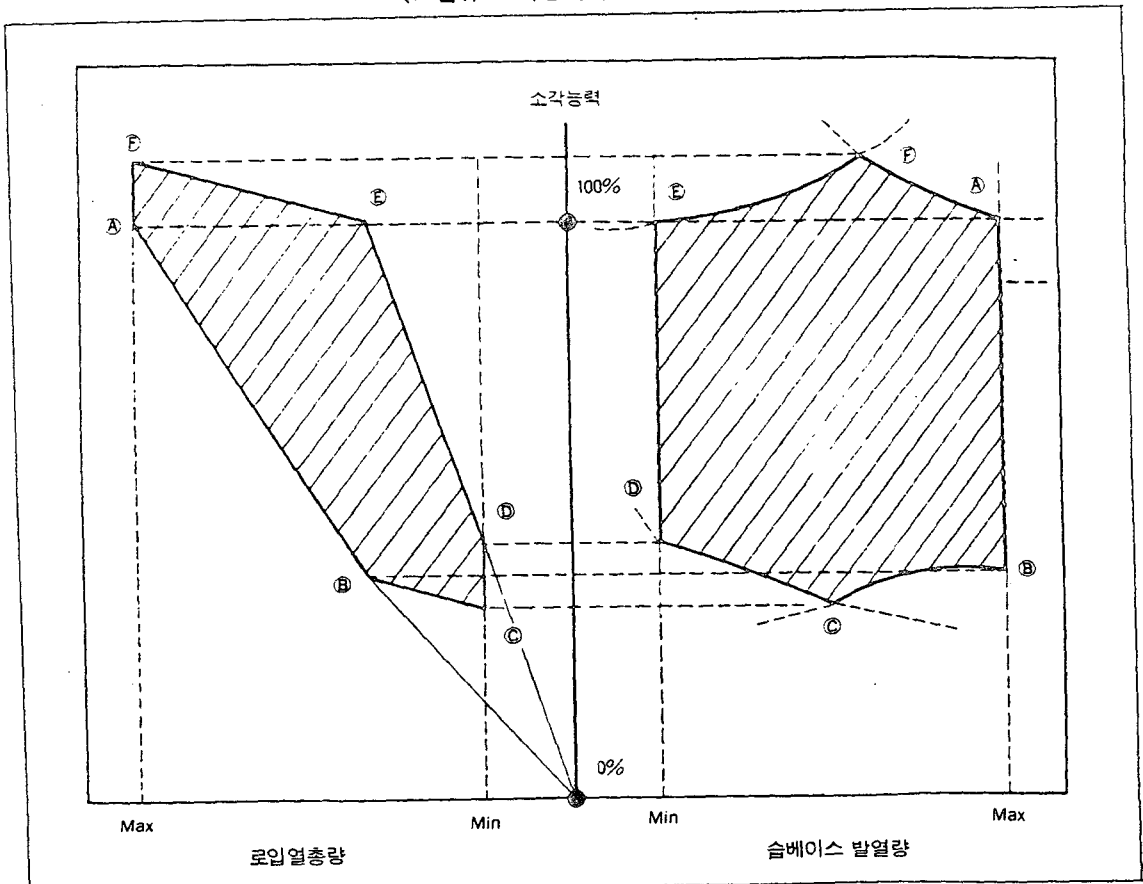
산업폐기물 소각처리의 중심을 이루는 것은 오니같은 발열량이 낮은데서부터 폐플라스틱처럼 발열량이 높은것까지 전소 또는 혼소용으로서 광범위하게 사용된다. 경사진 원통상의 로로 내부에는 내화물로 내장되어 있고 폐기물은 로의 회전에 따라 출구끝으로 이동

하는데 그사이에서 가스화되어 연소와 회화(灰化)가 진행된다. 그런데 폐기물의 성상에따라 연소방식은 다음 2종류가있다.

①적극연소방식 : 키른의 상류에서 하류를 향해 건조→착화→연소→회화가 이루어진다. 나무조각이나 오니처럼 건조를 필요로하고 또 연소속도가 낮고 섬유계처럼 한꺼번에 다량의 공기를 필요로 하지않는 것에 적합하다.

②가스화연소방식 : 고분자체를 소각하는 경우 연소속도가 빠르기때문에 공기공급이 적시에 이루어지지못해 불완전연소의 원인(혹연발생등)이 되기쉽다. 때문에 키른의 입구부근에 온도가 약300°C정도이며 산소농도가 희박한 배기가스의 일부를 집어넣어 복사열과 합해키른내에 고분자의 열분해에 필요한 온도영역을 먼저 형성해서 여기서 폐기물을 가스화시켜 재연소실

〈그림1〉 소각능력곡선의 일례



에서 충분한 공기와 접촉시켜 완전연소를 끝내는 방법이다.

다. 유동상로

수형원통의 로로서 내부는 내화재로 라이닝되어 있고 로내하부의 화상위에는 유동용모래가 들어있고 로 밑바닥에는 유동용공기노즐이 설치되어 있다. 오니는 입화되는 과정에서 유동용모래 층내에 공급된 보조연료의 연소열을 받아 이에 의해 수분의 증발과 유기물의 분해가 일어난다. 분해된 가연분은 피층상부의 영역(프리보드부)에서 공간연소되어 회분은 연소배기가스와 함께 로외로 배출되어 사이크론에서 보진된다. 유동상로의 특징은 단위화료용적당의 열부하가 높고 연소시간이 짧으며 또 회중의 미연분도 적다는데 있다. 그런데 이전에는 오니전소 소각용으로서 다단로가 많이 사용되었지만 오늘날에는 유동상로가 주류를 이루고 있다.

라. 폐액소각로

산과 알카리폐액 고BOD/COD폐액, 그리고 각종 폐유등의 처리방법으로는 화학적 또는 생물학적 처리법과 함께 소각 또는 증발처리가 행해지고 있다. 증기와 공기같은 분무매체에 의해 로내 분무된 폐액은 기름과 가스의 조연버너로부터의 열가스와 접촉되어 순간적으로 증발, 유기분이 열분해 또는 연소되어 로에서 배출되는 것이다.

마. 고정화격자로

커다란 괴상의 폐기물과 처리량이 적은 경우에 사용된다.

5. 소각장치의 평가법

석탄과 증유를 때는 보일러의 능력은 증발량(t/h)으로 그 플랜트의 능력표현이 가능하지만 폐기물의 경우는 피소각물의 성상이 항상 변동되기 때문에 그 플랜트의 능력표현이 대단히 어렵다. 도시쓰레기 소각로에서는 소각능력을 t/h로 표현하고있는데 이때 반드시 쓰레기발열량(습식베이스)을 조건으로 넣지 않으면 안되고 오니소각량의 경우는 습식베이스 발열량도 전술한 바와 같이 오니의 절조고형물의 발열량에 좌우되기 때문에 소각능력 표시에는 고형물의 건베이스의 발열

량 및 수분의 2가지 조건을 가미시킬 필요가 있다. 지금은 보조연료가 필요치 않아서 자연역만의 폐기물 또한 습베이스의 조위발열량과 수분사이에 상관관계가 있고 또 고형물의 건베이스 발열량이 거의 일정한것(도시쓰레기가 그 대표적 예이고 산폐에서도 섬유계의 것과 고분자계의 것이 일정비율로 존재되어 있는 것등)에 관해<그림1>에 평가성능곡선을 표시하였다.

그림의 오른쪽 절반은 습베이스발열량과 소각능력의 관계이고 왼쪽 절반은 습베이스발열량을 패러미터(parameter)로 한 총입열량과 소각능력의 관계이다. 그림중의 곡선과 각점을 다음과 같이 설명한다.

①-② : 주어진 최고발열량을 나타낸다.

②-③ : 화격자의 빼기와 투입슈트의 쓰레기로 인한 실(Seal) 때문에 이 이하의 투입량으로는 운전할수 없다는 최저능력을 나타낸다.

③-④ : 로온보지를 위해 최저로필요한 투입량으로서 다음과 같은 관계에 의한다. 즉 최저필요열량(일정) ∞ 발열량 × 투입량

④-⑤ : 주어진 최저발열량을 표시한다.

⑤-⑥ : 잔사중의 미연량의 규제치를 지키기 위한 최고 소각량(이 이상로에 넣으면 미연분이 규제치 이상으로 된다는 화격자연소율 또는 수분증발부하 등의 상한)

⑥-① : 화료용적부하, 보일러 IDF 또는 투입크레인 등에 따라 정해지는 최고입열량으로 다음과 같은 관계에의한다. 즉 최고입열량(일정) ∞ 발열량 × 투입량에따라서 각점에 관해서는 다음과 같은 의미가 있다.

①(또는⑥) : 주어진 최고(또는 최저) 발열량으로 100%능력의 점

②(또는③) : 주어진 최고(또는 최저) 발열량에서의 소각가능한 최저량을 나타내는 점.

③(또는④) : 그로의 최고(또는 최저)능력의 점<그림1>의 오른쪽 절반의 상변의 곡선은 최근 흔히 도시쓰레기의 능력상한곡선이라는 의미로 표현되고 있는데 로에는 하한도 있다는 사실을 잊어서는 안된다.

더욱이 ①의 보조연료를 필요로하는 경우 ②고분자 및 섬유계의 비율이 항상 변화되는 경우 및 ③오니처럼 고형물의 건베이스 발열량이 항상 변화되는 경우는<

그림1>에 있어서 오른쪽 절반의 횡축 습베이스 발열량을 고분자 함유율과 오니 건베이스 발열량과 수분의 변수로서 3차원적으로 표현할 필요가 있으며, 복잡해지기 때문에 여기서는 지면관계로 생략한다.

나이가 고분자제-섬유제-오니3종을 상호 임의의 비율로 혼소소각할 경우에는 능력곡선이 더욱 복잡해질 것으로 보인다.

6. 열이용의 형태

산업폐기물의 열이용 형태에 관해서는 배가스이용, 온수이용, 증기이용 및 전력으로 나누어지는데 그 어느 것의 경우도 폐플라스틱과 수피(樹皮) 등은 연료적 가치가 있고, 또 어느정도 일정한 양을 확보할 수 있는 경우에 흔히 이용되고 있는 것으로 보인다.

가. 배가스(온풍) 이용

이 형식은 가장 간단한 배열이용의 사례로서 조각로 배가스를 페이퍼슬러지(paper sludge)의 건조열원으로 하는것. 공기에열기 등에 의한 회수보일러의 연소용 공기에열 및 버너의 연소용공기에열 등을 들수 있다.

나. 온수이용

배가스를 교환기를 통해서 온수변환시켜 이것을 보일러급수와 난방, 그리고 급탕에 이용하는 것으로 폐용제, 폐유, 종이부스러기, 나무부스러기 등의 경우에 보일러급수와 욕조에 대한 급탕같은 예가 있다.

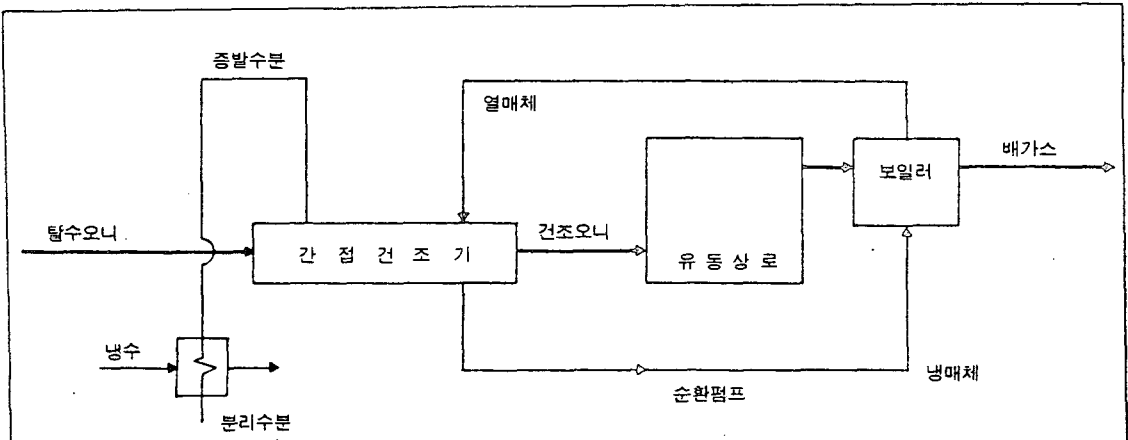
다. 증기이용

산업폐기물의 에너지이용형태로서는 가장 일반적인

방법으로 사용되는 보일러에는 원동식보일러(로통보일러, 연관보일러)와 수관식보일러가 있지만 설계의 자유도나 취급상의 이유로 자연순환식인 수관식보일러가 많이 사용되고 있다. 회수증기의 용도로서는 각 공장내의 프로세스용, 난방, 급탕 건조외에 연료등의 보온과 기기세척수의 가열등에도 쓰이고 있다. 증기의 압력은 전반적으로 저압이어서 공장에 따라서는 바라키가 크다. 예를들면 화학공업에서는 13~42기압, 자동차공업에서는 6~16기압의 범위로 흩어져있고, 이 이외의 난방과 급탕 또는 건조 등에는 보다 저압의증기가 사용되고 있다.

더욱 이같은 종류의 보일러에서는 피소각물에서 나오는 부식성가스 즉 HCl이나 SO_x등이 발생해서 금속표면이 부식되기 쉽다. 이같은 부식에는 일반적으로 HCl이 존재하는 조건에서는 금속표면이 350~400°C이상에서 발생하는 고온부식과 반대로 SO₂의 존재조건하에서 120-150°C이하에서 발생하는 저온부식이 있다. 그래서 보일러전열관의 표면온도를 200-300°C정도의 범위로 억제할 필요가 있고 특히 슈퍼히터를 설치할 경우에는 주의를 요한다. 또 폐기물소각에 따라서 발생하는 비회(플라이애쉬)는 1,000°C전후에서 연화현상을 일으켜서 보일러전열관 등에 부착되기 때문에 보일러 고온부는 방사전열면을 형성하여 배기가스온도를 적당히 냉각(700°C)시켜 먼지부착이 적은 저온부를 열전도효율이 좋은 접촉면(수관군)으로 하는 사례가 많다.

(그림 2) 오니건조 조각시스템



또 수관군의 관배레도 먼저 부착방지를 고려해서 기 반목배레를 하거나 관간격을 넓히거나 스토부로의 배열을 많이하는 등의 고려도 많이 한다.

라. 발 전

폐기물소각열에 의한 발전은 쓰레기소각플랜트에 있어서 지난 65년부터 처음으로 시작되었는데 산업폐기물의 소각열에 의한 발전은 종이 즉 펄프공업같은데서는 그 이전부터 하고있는 사례를 볼 수 있다. 이는 펄프 공업이 대량의 전력을 사용하고 자기발전비율이 높고 또 종이부스러기와 나무껍질같은 가연성폐기물이 대량으로 발생하는 특수성 때문인 것으로 보여진다.

7. 실 시 예

가. 로터리큰형 종합소각설비

전술한 바와 같이 고발열량의 고체폐기물을 소각하기 위해 개발된 것으로 셀룰로오스계 폐기물은 물론 오니, 폐유, 폐액 등에 대해서도 일부장치만 부가시켜서 혼합소각 하는것이 가능하다. 폐기물은 로터리큰속을 이동하는 동안에 열분해를하며 분해잔사(회분, 고정탄소분)는 재연소실 아래의 후연소 스트카에서 소각된다. 액상폐기물이 있는 경우에는 재연소실의 분무버너에 의해 소각 또는 증발된다. 분무연소가 불가능한 고점도 액상물은 직접로터리큰에 공급된다. 연소배가스는 열회수 및 냉각된 뒤에 전기집진기로 제거되어 필요에 따라 흡수탑에서 유해가스가 흡수된다. 또 배가스의 일부는 로터리큰 입구로 순환되어 전술한 바와 같은 가스화연소를 위해 사용되고 있다.

나. 바크(樹皮)보일러

수입저장설비는 나무부스러기의 형상과 형태에 따르는데 비중이 가볍고 부피가 크기 때문에 석유와 석탄에 비해 넓은 면적이나 용적을 필요로 한다. 또 연료가 치의 저하를 방지하기 위해 강우와 강설에 대비한 지붕도 필요하다.

구내반송에 관해서는 쇼벨로다, 각종 콘베이어류 이외에 칩(Chip)이나 선더류같은 것은 공기수송에 의존하고있다. 로본체는 이상식이나 주복동식의 스트카로가 중심으로 되어있다. 집진설비는 멀티사이클론이나 전기집진기를 설치하는 예가 많고 버크필터나 또는 습

식세정집진장치 등도 일부 사용되고 있다.

다. 오니소각

<그림2>에 성에너지를 목표로한 오니전조 소각시스템의 예를 표시하였다. 이는 유동상로에서 나오는 배가스로 열매(증기 또는 특수한 열매유)를 가열시켜 이것으로 탈수케이즈를 자연한계까지 간접적으로 건조시켜 오니중의 수분을 제외로 뽑아냄으로써 보조연료유의 대폭적인 절감을 기하려는 것으로서 이미 하수오니소각로에는 많이 채용되고 있으며 산업계의 오니에도 검토하기 시작하고 있다.

8. 맺음말

이상 산업폐기물의 소각과 열이용에 관해서 살펴본 있는데 도시 쓰레기소각로와 하수오니소각로를 비교해보면 오더메이드적인 색채가 강하다. 또 그 처리는 법적으로 사업자 책임으로 정해져 있고 배출원각사가 자체적으로 소각시설 등에 많은 설비투자가 이루어지고 있지만 그 처리규모의 범위는 넓다. 어쨌거나 앞으로 점점 공해방지와 성에너지의 견지에서 소각과 열이용이 촉진되어 나갈것이 예상된다.*

<자료 : 일본 성에너지'89/vol 41>