

유동층 소각기술

1995. 6

한국기계연구원

설비진단그룹

김 우 현

목 차

제 1 장 서론	135
제 2 장 유동층 연소이론	136
2.1 유동층의 원리 및 종류	136
2.2 유동층 연소법의 원리	138
제 3 장 유동층 연소장치의 현황 및 특징	143
3.1 유동층 연소장치의 현황	143
3.2 유동층 연소장치의 특징	145
3.3 유동층 연소장치에서 오염물질 제어	148
3.4 유동층 소각시설	154
3.5 유동층 소각로 설계	156
제 4 장 국내에서의 활용 예	159
4.1 포항제철 일반쓰레기 소각시설	159
4.2 전주제지 슬러지 소각로	159
4.3 태흥산업 슬러지 소각로	160
4.4 세풍제지 슬러지 소각로	160
4.5 성남시 도시쓰레기 소각시설	161
제 5 장 폐기물 소각설비에서의 대기오염 제어	163
제 6 장 결 론	165

참고문헌

제 1 장 서 론

최근 고도의 산업발전과 경제성장으로 인하여 도시와 산업체에서 발생하는 폐기물의 양은 급격하게 증가하고 있다. 이러한 폐기물들은 그 종류와 성상이 다양하며 난분해성 물질 및 중금속 등과 같은 인체에 유해한 물질을 다량 함유하고 있는 것으로 밝혀지고 있어 처리문제에 심각성을 더해주고 있다. 그리고 국민의 생활수준이 향상되고 급속한 공업화에 따른 도시로의 인구집중, 정화조보급을 증대 및 하수종말처리장의 설치 증가에 따라 최종부산물로 발생하는 하수슬러지의 발생량 또한 급속하게 증대되고 있다. 지금까지 이러한 폐기물이나 하수슬러지는 주로 단순매립에 의존하고 있으나 매립에 따른 2차 환경오염문제의 가중과 기존 매립지의 한계로 새로운 매립지 확보에 많은 어려움이 있어 폐기물처리가 심각한 사회문제로 대두되고 있다.

폐기물의 처분은 폐기물 종류의 다양성 때문에 그 처리도 여러가지 방법(토양매립, 해양투기, 열분해 또는 연소법)이 보고되어 왔으나, 1970년대까지는 토양매립에 의한 처리법이 대부분을 차지하여 왔다. 그러나 유독성 물질을 함유한 폐기물을 단순 매립에 의해 처리할 경우 2차 환경오염(토양오염 및 지하수오염)을 야기시킬 수 있고, 한편으로는 가용한 에너지 자원을 폐기하는 결과를 초래하게 되므로 선진국의 경우 유독성 폐기물의 안정적인 처리와 감량측면 그리고 폐자원의 활용(에너지화)면을 동시에 고려한 소각방법이 점차 증가하는 추세에 있다.

폐기물의 연소법에는 고정상식, 화격자식, 회전상식, 다단상식, 회전로식, 분무식, 유동상식, 건류식등 여러가지 방법이 있으며, 소각하고자 하는 폐기물의 특성에 따라 각각의 특성과 장단점을 지니고 있기 때문에 어떤 소각방법이 가장 우수하다고 말할 수는 없다. 본고에서는 이러한 여러 연소법중에서 최근에 폐기물의 소각에 적용이 성공하여 실용화, 상용화 되어 보급이 확대되고 있는 유동상식 소각법에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

제 2 장 유동층 연소이론

2. 1 유동층의 원리 및 종류

Fig. 1과 같이 반응장치내에 규사등의 유동매체(이하 유동사라고 함)를 충전한 후, 하부로부터 가스분산장치를 통하여 공기를 송풍하면 풍압에 따라 유동사의 상태가 변하게 되고, 그 유동상태에 따라 크게 다음의 3단계로 구분할 수 있다.

(1) 고정층(Fixed bed)

풍압이 약한 단계에서는 유동사가 충전된 상태로 그대로 정지하고 있다. 이 단계에서는 공기가 입자의 사이를 단순히 통과하므로써 입자가 정지한 채로 있기 때문에 고정층이라고 한다. Stoker식 소각로는 고정층 연소장치의 한 예이다.

(2) 유동층(Fluidized bed)

송풍압을 점점 강하게 하면 어느 순간에서 입자가 유동하기 시작하고(이 때를 유동화 개시점이라고 함), 그 이후에는 입자가 액체와 같은 특성을 보이게 되며, 기-액계의 기포와 같이 입자층을 큰 공극의 형태로 통과하는 기체가 출현하여 입자층은 격렬하게 끓는 액체와 같이 된다. 이와같이 입자층이 액체와 같은 특성을 보이는 단계를 유동층이라 한다.

(3) 수송층(Transportated bed)

송풍압을 더욱 높이면 입자의 종말속도를 넘게 되어 입자가 층으로 부터 튀어나오게 된다. 이러한 상태를 수송층이라고 한다.

Fig. 2는 가스유속(공탑속도)의 증가에 따른 층의 압력손실 변화를 나타낸 것이다.[1] 고정층에서는 압력손실이 공탑속도와 관계없이 압력이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 유동층에서의 압력손실은 이론적으로 유동층의 높이 및 공극율과 유동사와 유체의 밀도에 의하여 결정되어 진다. 그리고 수송층에서는 공탑속도가 증가함에 따라 입자의 밀도가 낮아지게 되므로 압력손실은 감소하게 된다. Fig. 3은 석탄연소에 사용되는 각종 연소장치의 고체 유동상태를 공탑속도에 따라 비교한 것이다.[2]

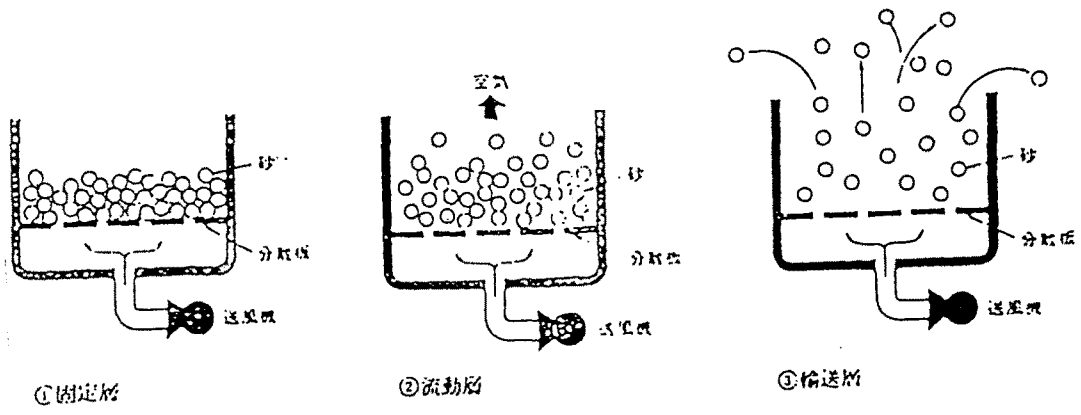


Fig 1. 유동층 흐름의 상태변화

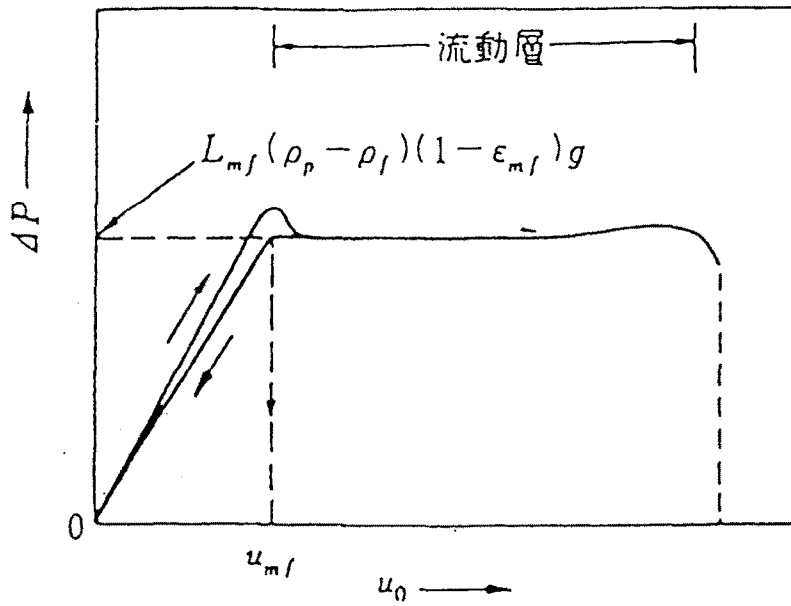


Fig. 2 유동층의 압력손실과 공탑속도

일반적으로 유동층은 조업압력에 따라 상압유동층과 가압유동층, 유동상태에 따라 기포유동층과 고체 순환유동층으로 나누고 있다.

상압유동층은 장치 내의 압력이 항상 대기압에 가까운 상태로 유지되는 유동층으로 가장 많이 사용되고 있으며, 가압유동층은 절대압 6~15 기압에서 운전되는 유동층으로 가스터어빈에 가압의 연소기체를 통과시킴으로써 복합발전을 이룰수 있기 때문에 동력생산에 우수한 장점이 있다.[3]

기포유동층에서는 기포의 상승에 따라 입자들의 상승과 하강이 빈번하게 형성되므로 기포발생이 많을 수록 고체 혼합도가 좋아지고, 일부 입자들이 층 표면에서 비산되어 그대로 배출되거나 또는 집진기에서 포집되어 재순환되지만 층 표면의 경계가 비교적 분명하며, 대부분의 고체가 유동층내에 머물러 있다. 한편, 기체의 유속이 보다 증가하면 층 표면에서의 비산현상이 점차 심하여지고 층표면의 경계도 불분명하게 되어 입자의 재순환이 없으면 고체층을 유지하기가 힘들어진다. 순환유동층은 그림과 같이 상당량의 고체를 비산 유출시킨 후 반응이 완료될 때까지 재순환시키는 방법으로서, 고체의 농도가 감소하고 기체의 유동층 내 체류 시간은 짧아지지만, 기체-고체간의 slip velocity가 최대로 되어 기체와 고체의 접촉효과가 크고, 접촉성 고체의 유동화에 유리하다.

폐기물소각로에는 기포유동층 연소방법(Bubbling Fluidized Bed Combustion)이 주로 사용되고 있고, 석탄 연소보일러에는 전세계 신설 FBC보일러의 년도별 증발량 총계를 나타낸 Fig. 4에서 보듯이 순환유동층연소(Circulating Fluidized Bed Combustion)가 증가하고 있는 추세이다.[4]

2.2 유동층 연소법의 원리

유동층 연소법은 연소실내의 고체입자층에 연소실 바닥의 다공형 공기분산판을 통하여 공기를 불어 넣으면 고체입자층은 마치 끓는 액체와 같이 비등상태 즉, 유동화(Fluidization) 현상이 일어나며, 우수하게 유동층이 형성된 연소로 내부에

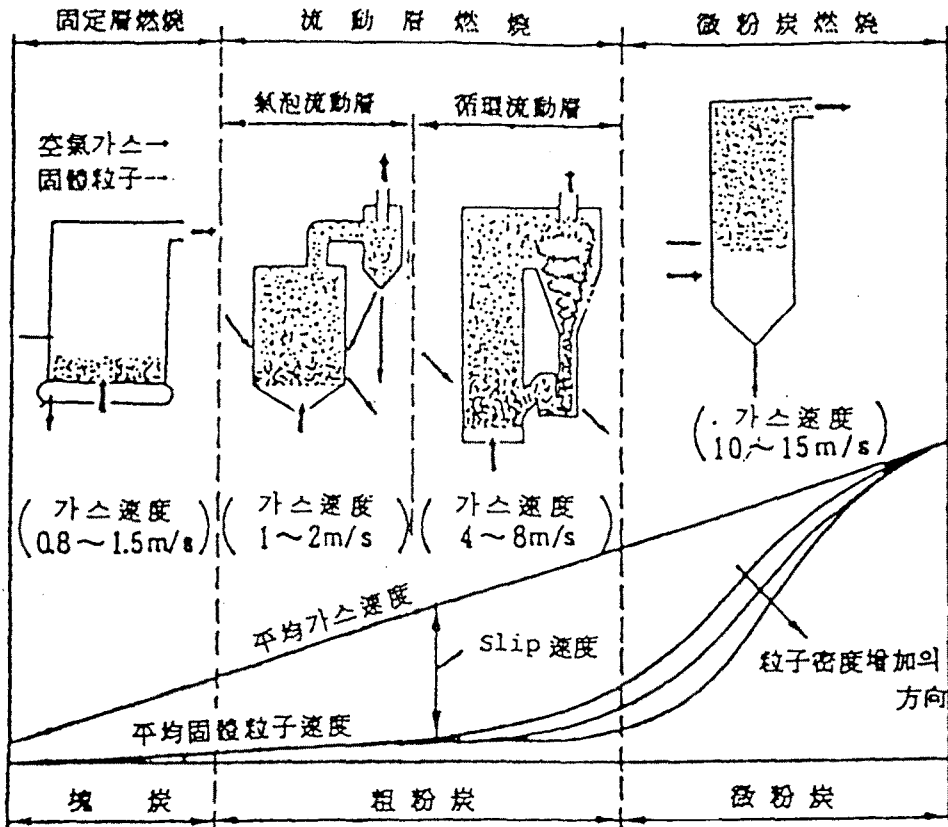


Fig. 3 가스속도에 의한 연소장치의 비교

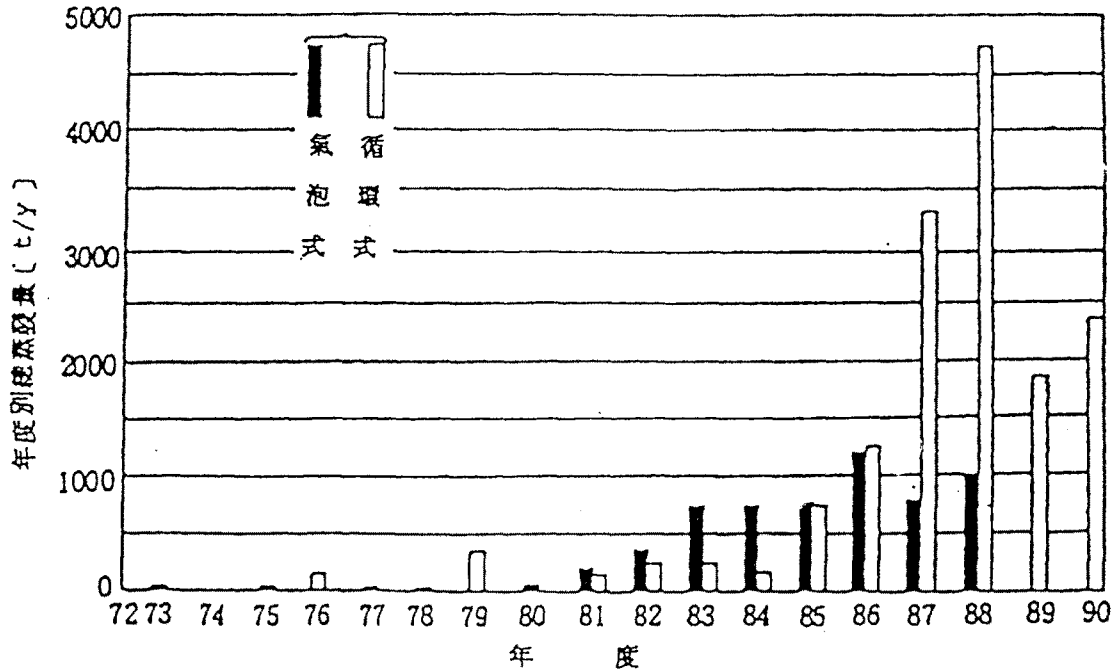


Fig. 4 전 세계 신설 FBC Boiler의 년도별 증발량 총계

피소각물을 정량적으로 공급하면 이미 예열된 고체입자들은 폐기물과 균일하게 혼합되면서 신속한 열전달이 일어나고, 이때 열분해된 가연성물질 대부분이 층내부에서 연소하게 되며 미연소분이나 불완전연소분은 freeboard부에서 완전 연소하게 된다. 좀더 상세하게 설명하자면 유동층 소각로의 내부는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 유동층과 연소실인 freeboard부로 구분되어진다. 소각로 내에 유동사를 일정한 높이로 충전시킨 후 가스 분산장치를 통하여 유동화 공기를 층내로 송풍하면 유동사는 유동층을 형성하게 된다. Burner로서 이 유동층과 로 내부 전체를 가열하여 충분한 연소반응이 일어날 만큼 고온으로 유지시킨 후 유동상태에 있는 층 내부로 일정한 크기 이하로 파쇄한 폐기물을 투입한다. 투입된 폐기물은 로 내의 축열 또는 유동사의 교반효과에 의하여 짧은 시간 동안 건조, 착화, 연소가 일어나게 된다. 그리고 연소의 일부는 연소실의 상부인 freeboard부에서 일어난다. 유동층과 freeboard부의 연소비율은 폐기물의 질, 1차공기량, 공탑속도 및 유동층의 높이등에 따라 달라지지만, 유동층 내에서는 약 55%가 연소되고 나머지 45% 정도가 freeboard부에서 연소된다.[5] Freeboard부에서의 연소는 stoker식 소각로 연소실에서의 연소와 같은 형태로 일어나게 된다.

그러나 층 내에서의 연소를 폐기물 표면에서의 연소형태로 보면, Fig. 6과 같이 stoker식 소각로에서는 표면연소와 함께 그 표면에 char, CO₂ 막 및 수증기 막 등이 형성되어 내부까지 완전 연소하는데 시간이 걸리게 되는 반면, 유동층 내에서는 유동사와 충돌하여 표면이 경신되므로 내부까지의 건조, 연소가 단 시간에 이루어지게 된다. 이처럼 유동층 연소법은 연료의 종류에 대한 제약이 적고 저위 발열량의 연료도 효과적으로 연소가 가능하며, 연소온도가 균일하고 높은 열전달 계수로 인하여 장치의 소형화를 꾀할 수 있으며 비교적 낮은 온도(800 - 900℃)에서 연소하므로 NO_x의 발생량이 적고 석회석과 같은 흡수제를 피소각물과 함께 주입하면 SO_x, HCl등과 같은 공해물질도 별도의 후처리장치를 설치하지 않고 제거가 가능하다. Fig. 7은 연소로내 압력변화에 의한 유동화상태의 변화를 나타낸 것이다. 점차 발생량이 증가하고 있는 하.폐수슬러지 및 액상폐유나 폐유슬러지 같은 비교적 연소가 어려운 물질들의 효과적인 소각을 위해서는 유동층 소각기술의 개발이 가급적 빠른 시일내에 이루어져 실용화, 상용화되므로써 소각기술의 국내 기반기술이 확립될 수 있도록 하여야 한다.

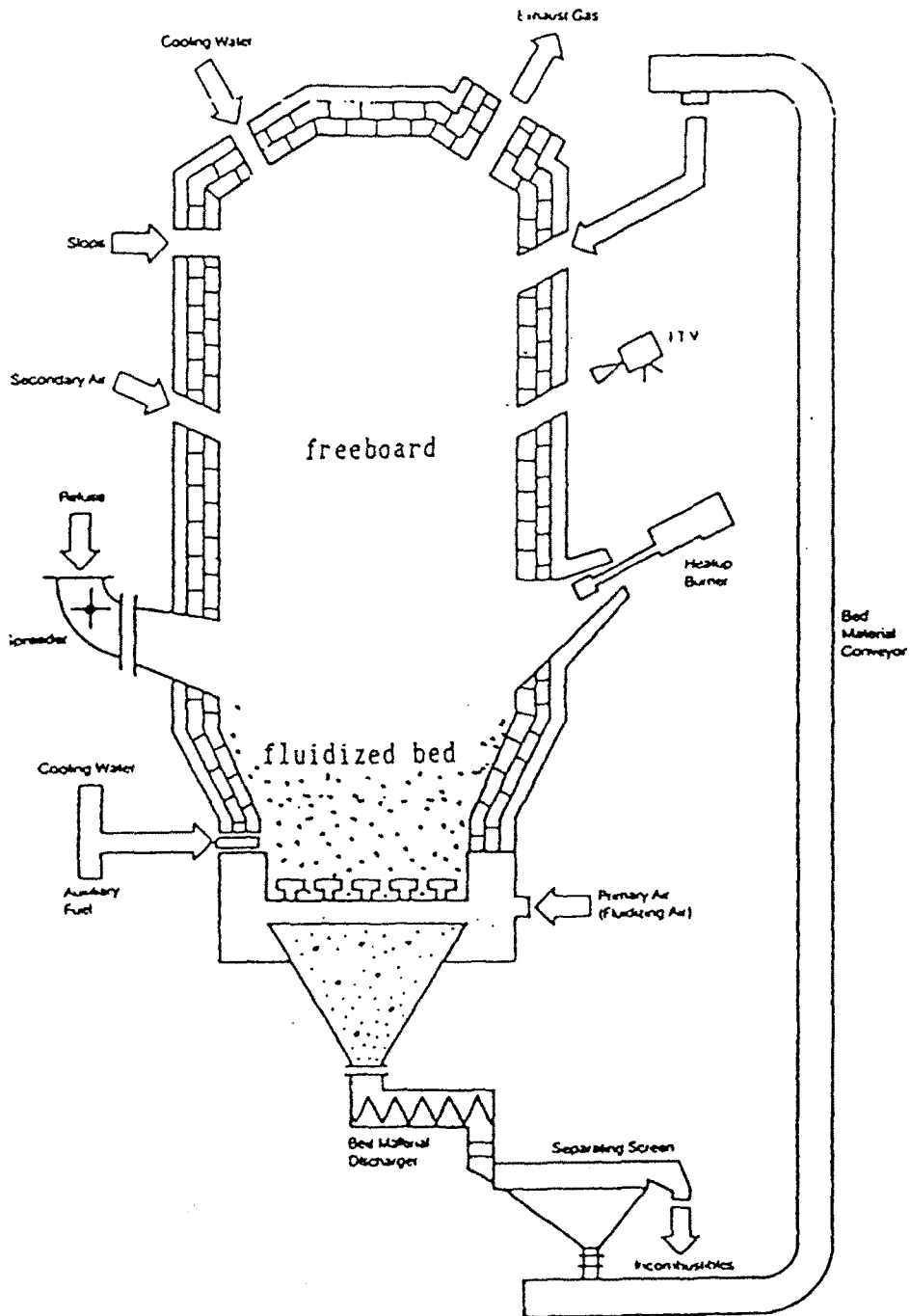


Fig. 5 유동층 소각로의 구조

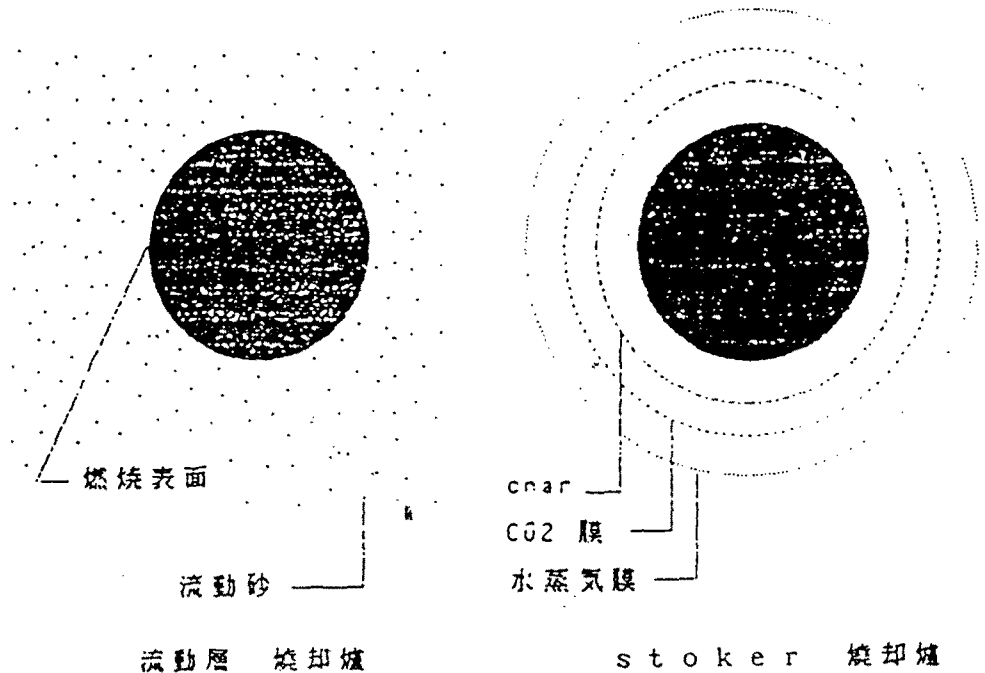


Fig. 6 폐기물 표면에서의 연소형태

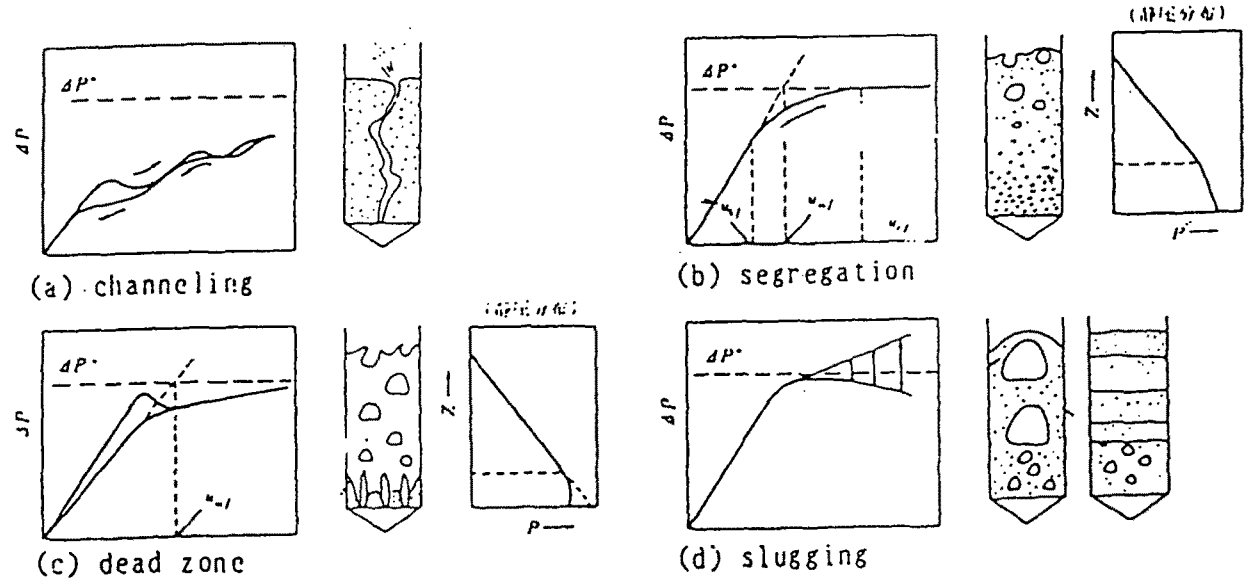


Fig. 7 압력측정에 의한 유동화상태의 판정

제 3 장 유동층 연소장치의 현황 및 특징

3. 1 유동층 연소장치의 현황

화학공업에서 주로 사용되고 있던 유동층기술을 석탄연소에 응용한 것은 1950년대 후반 영국의 NBC(石炭廳)에 의하여 시작되어 독일이나 스웨덴등의 유럽에서 주로 저품위탄의 이용 목적으로 널리 사용되어져 왔다. 반면에 미국에서는 특히 FBC의 SO₂ 제거능력에 주목하여 EPA(聯邦環境廳) 주도하에 1970년 초에 연구가 시작된 후 DOE(에너지청)에서 연구 개발하고 있다. 한편 폐기물 소각에 유동층 소각기술이 응용된 것은 1970년대 후반부터이다.

유동층 연소장치 개발의 추이를 보면 1960년대, 1970년대 및 1980년대로 나눌 수 있다. 1960년대에는 유동층 연소법의 기초연구 시대로써 특히 영국에서 많이 이루어 졌다. 유동층 연소보일러 개발의 전기가 된 것은 1973년의 석유위기이다. 이 시기에 개발된 유동층 연소보일러는 주로 산업용 보일러로서 지역난방용 또는 공업용 온수나 스팀을 공급하는 것이 주 목적이었고, 보일러의 규모는 증기발생량 30 - 50톤/시간 정도의 것이 많았다. 1980년대의 특징은 대형보일러의 개발로서 발전용보일러가 개발되기 시작한 점이다.

폐기물 소각로의 경우 지금까지 stoker식 소각로가 가장 많이 사용되어지고 있다. 그러나 최근 일본에서는 여러가지 장점을 지닌 유동층식 소각로의 사용이 Fig. 8에서 보는 것처럼 점차 증가하고 있는 실정이므로[6], 실적만으로 어떤 소각 방식을 사용하는 것이 유리한가를 판단하는 것이 힘들게 되었다. 1986년 자료로서 일본에서 사용되고 있는 유동층 소각로의 실적은 Table 1과 같다.[5] 총 308기중 도시쓰레기용으로는 150기가 설치되어 있고 150톤/시간이 최대 규모이며, 슬러지용으로는 73기가 설치되어 있으며 250톤/시간이 최대규모이고, 산업용으로는 85기가 설치되어 있고 300톤/시간이 가장 큰 규모이다. 우리나라의 대표적인 예를들면 대구염색공단등의 열병합발전소에서 석탄연소보일러로서 사용되고 있으며[7], 도시쓰레기용으로는 성남시에서 50톤/시간 규모로 2기를 건설, 가동하고 있다.[8]

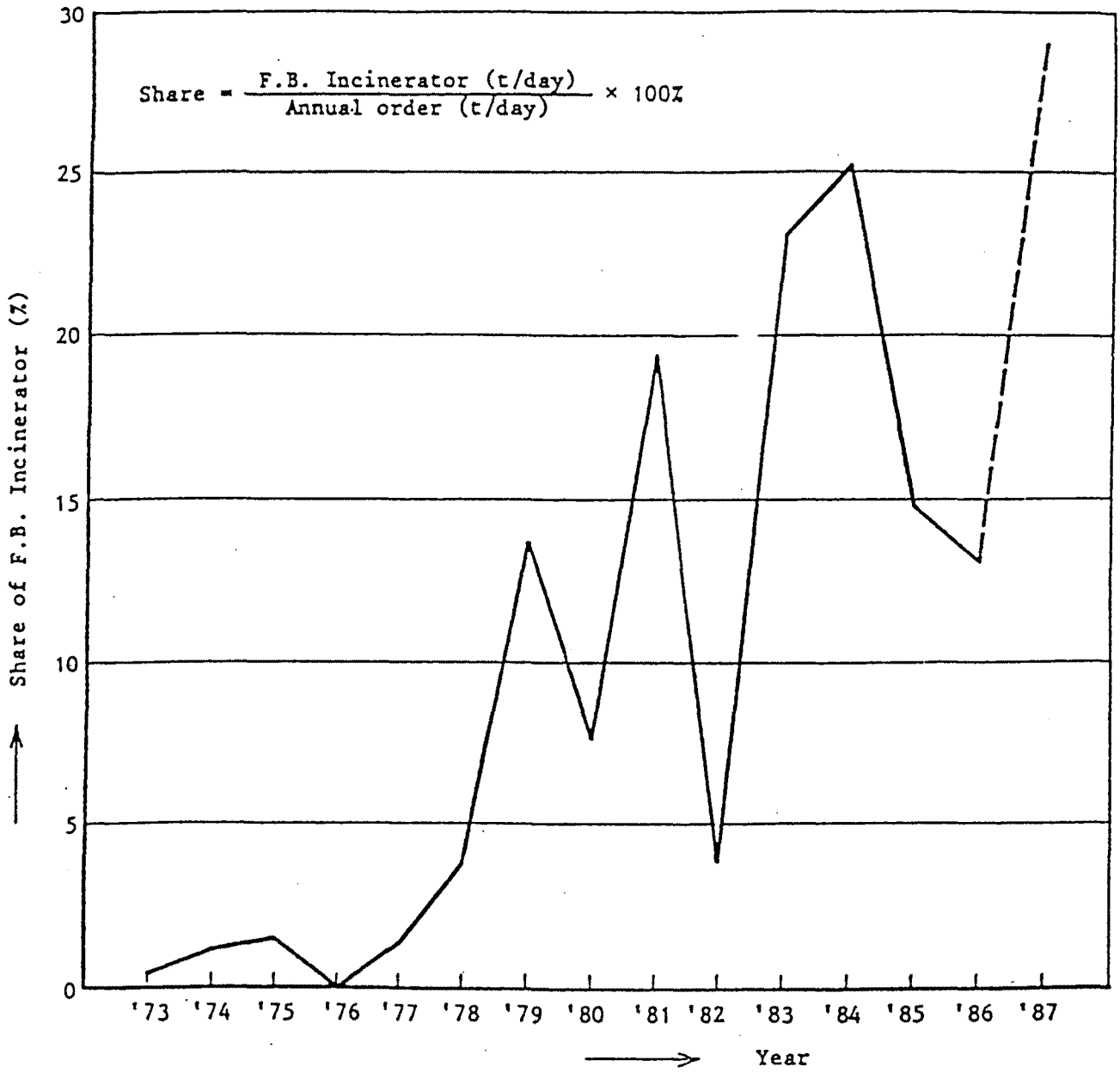


Fig. 8 유동층 소각로 점유율의 연도별 변화(Japan)

3. 2 유동층 연소장치의 특징

고체와 유체를 접촉시키는 장치는 대체로 Fig. 9와 같이 분류할수 있다. 고체-기체반응을 연속적으로 실시할 경우에 어떤 장치를 선택할 것인가 하는 문제는 프로세스개발에 있어서 기본적인 문제중의 하나이다. 폐기물의 소각처리시설을 계획할 경우에도 stoker식, 유동층식 및 회전식(rotary kiln)중 어떤 방법을 선택할 것인가 하는 것이 우선적으로 고려되어야 한다.

각종 고체-기체 반응장치의 특징 및 유동층장치의 장.단점을 비교하여 각각 Table 2 및 Table 3에 나타내었고[1], 폐기물 유동층소각로와 stoker식 소각로의 소각처리 특성, 공해방지 특성, 유지관리의 난이성, 자원회수성 및 경제성등에 관하여 개괄적으로 비교하여 Table 4에 나타내었다.[5] 또한 유동층 연소보일러의 특징을 다른 연소장치와 비교하여 Table 5에 나타내었다.[4, 9-10]

유동층의 가장 큰 특징은 입자의 혼합이 양호하다는 것이다. 따라서 층의 온도가 거의 균일하고, 가스와 입자의 온도차가 작기 때문에 온도의 균일성과 제어성이 좋다는 장점이 있는 반면, 입자와 가스의 출구온도가 같기 때문에 열교환효율에 한계가 있다는 단점이 있다. 또한 입자의 연속적인 공급이나 배출도 비교적 용이한 편이지만 미세하게 부수어진 입자들의 비산유출과 그 입자들의 분리가 가끔 문제가 된다. 이러한 면에서는 회전로가 유동층이나 이동층에서 일어나기 쉬운 입자 취급상에서의 문제점이 작기 때문에 열효율은 낮지만 조작성이 용이하다는 장점이 있다. 각 반응장치는 일장일단이 있기 때문에 일반적으로 어떤 것이 좋다는 평가는 하기가 힘들고 주어진 조건하에서 각종 인자를 충분히 검토한 후에 종합적으로 판단하여야 한다.

한편 유동층소각로와 stoker식 소각로를 비교하여 보면 유동층소각로가 넓은 범위의 폐기물을 처리할 수 있고 연소효율이 높으며, 로의 기동 및 정지가 용이하다는 장점이 있으나, 파쇄등의 전처리와 유동화를 위한 동력이 필요하므로 전력소비량이 많고 연소가스중의 분진농도가 높으며, 증기량이 변동하기 쉽다는 단점이 있다. 그러나 도시쓰레기 중의 플라스틱 함유율이 점점 증가하고 있는 반면에

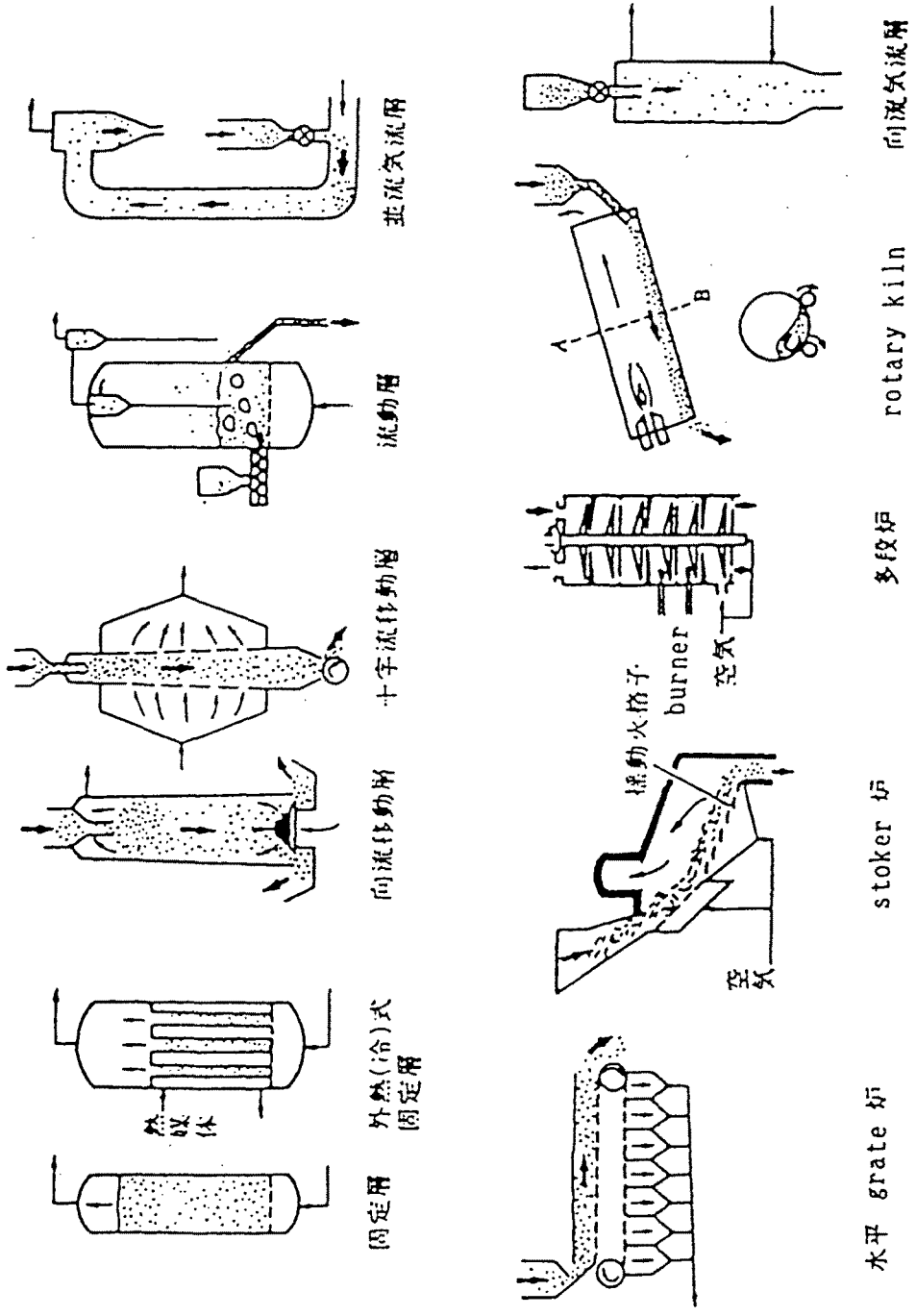


Fig. 9(a) 기체 - 고체 반응장치의 종류

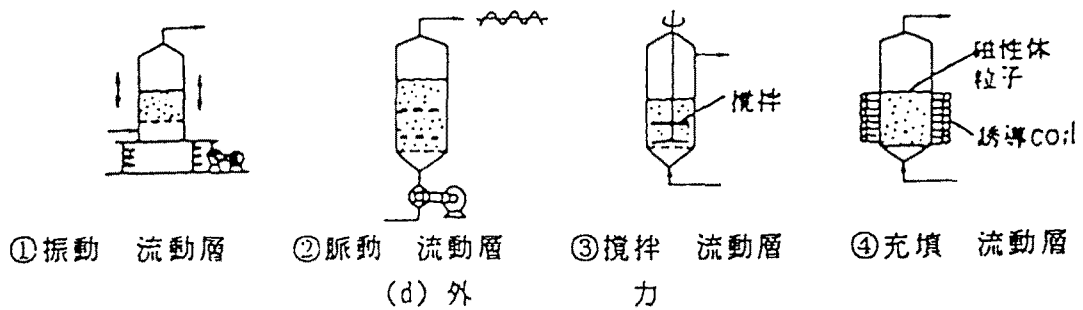
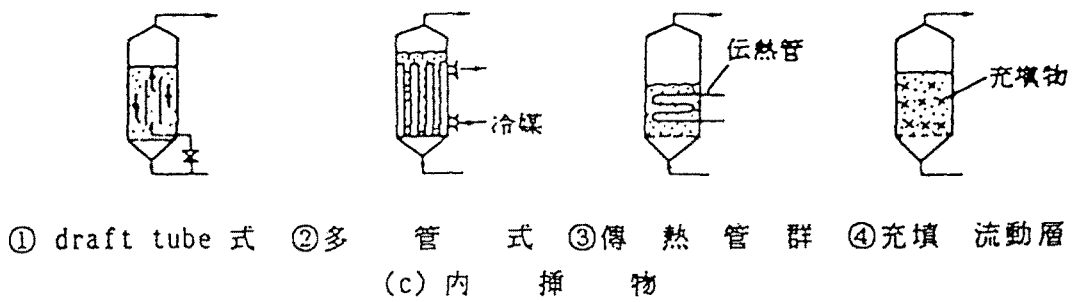
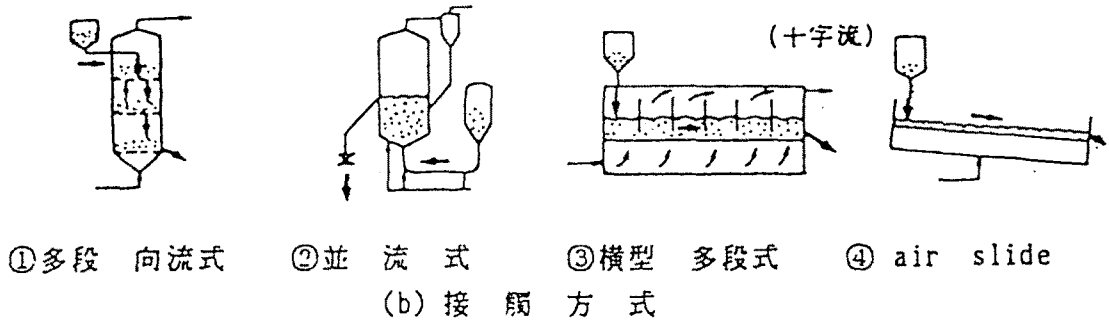
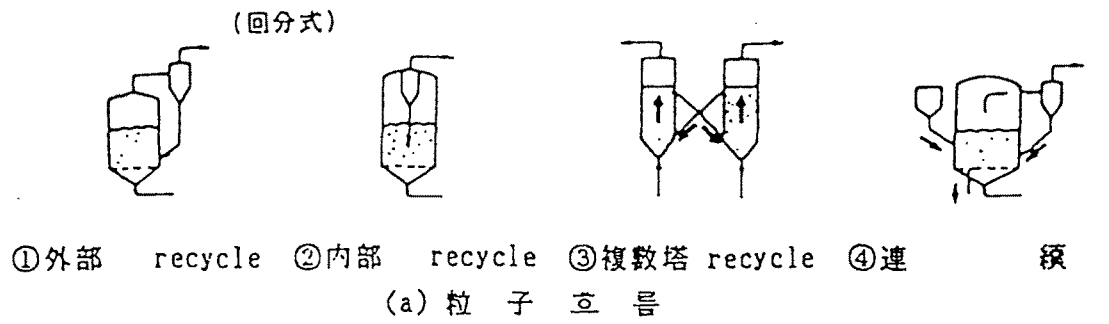


Fig. 9(b) 유동층장치의 종류

stoker식 소각로에서는 플라스틱의 처리가 힘들고, 로의 기동 및 정지시에 오염 물질이 많이 발생한다는 단점이 있기 때문에 유동층 소각로의 사용율이 점차 증가하고 있는 것이다.

3. 3 유동층소각로에서 오염물질 제어

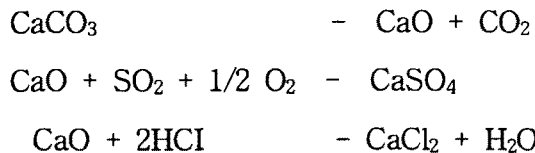
석탄연소 보일러의 경우, 기포유동층 연소장치가 미분탄 연소장치에 비하여 연소효율과 보일러효율이 떨어지지만, 로내 脫黃이나 낮은 연소온도와 2단연소법 등으로 인하여 황산화물(SOx)이나 질소산화물(NOx)등의 오염물질이 저감되고, 열전도율이 높아서 다른 연소장치 보다 설치공간이 적게 든다는 장점이 있다. 또한, 순환유동층 연소장치는 연소효율과 보일러효율을 높이고, 부하변동에 따른 응답성을 향상시켜서 기포유동층 연소장치의 단점을 보완시켰고, 기포유동층 연소장치보다 SOx 및 NOx를 더욱 저감시킬 수 있다는 점이 특징이다.

유동층 연소보일러에 있어서의 SOx 및 NOx 저감기구에 관하여 살펴보면, 다음과 같다. 물론, 이들은 폐기물 소각로의 경우에도 적용된다.

(1) 爐內 脫黃

로내 탈황이란, 석탄연소에 의하여 발생된 SOx를 로내에서 적절한 탈황제와 반응시켜 고품생성물로 전환시킴으로써, 발생된 SOx를 회수하는 것을 말한다. 탈황제로서는 석탄 재 중에 자체적으로 포함된 알칼리화합물 (CaO, Na₂O, MgO 등) 이 사용되기도 하지만, 이들의 함량이 낮은 경우에는 유동매체의 일부로 되는 석회석이나 백운석 (Dolomite)등의 알칼리화합물 탈황제를 로내로 공급한다.

로내에 공급된 탈황제에 의한 SOx의 탈황반응은 다음과 같다. 이 반응에 영향을 주는 인자로서는 Ca/S 몰비, 유동층 온도, 유동층 높이, 유동화 속도 및 탈황제 입경 등을 들 수가 있다[11].



① Ca/S 몰비 : 가장 중요한 인자로서, 일반적으로 Ca/S 몰비가 증가함에 따라 탈황율은 급격히 증가하나, 90%의 탈황율을 얻기 위하여는 Ca/S 몰비로 3~5가 필요하다[12].

② 流動層 溫度 : 최적온도는 800 - 900℃ 이다[9, 13].

③ 爐內 滯留時間 : 유동층 높이 및 유동화 속도는 탈황제 및 가스반응물의 층내 체류시간을 좌우하는 인자로서, 유동층 높이의 증가나 유동화 속도의 감소는 탈황율을 증가시킨다.

④ 脫黃劑 粒徑 : 유동화 속도와 밀접한 관계가 있으며, 입경이 작을수록 탈황율은 증가하나, 입경이 아주 작으면 비산 유출손실이 증가하므로 탈황율은 감소하고, 입경이 아주 크면 유동화의 균일한 유지가 곤란하게 된다.

한편, 상기 반응식에 따라 SO_x 외에 HCl 등의 할로젠 오염물질도 저감되고, 순환유동층 연소장치인 경우 입자순환에 따라 탈황제의 체류시간이 길어져 기포유동층 연소장치 보다 탈황효과가 더 크게 된다.

(2) 低 NO_x 燃燒

질소산화물(NO_x)은, 생성기구에 따라 fuel NO_x와 thermal NO_x로 나눌 수 있는데, fuel NO_x는 국소적인 산소농도에 영향을 받으며, thermal NO_x는 연소온도 및 산소농도가 낮고 고온에서의 연소가스 체류시간이 짧을수록 발생량이 적어진다.

유동층 연소보일러의 경우, 연소온도가 800 - 950℃로 낮기 때문에 Thermal NO_x 억제가 용이하며, 또한 2단 연소법의 적용이 가능하므로 fuel NO_x의 생성도 억제시킬 수 있다. 실제로 유동층 연소보일러에서의 NO_x 생성은 주로 연료중의 질소분 산화에 의한 것으로서, 단계적 공기공급이 NO_x의 생성을 억제하기 위한 효과적인 방법으로 평가되고 있다[9,11,13]. 한편, 유동층에서 발생한 NO_x가 freeboard부에서 char나 H₂, CO, NH₃등의 환원성가스에 의해 부차적으로 분해, 환원되기 때문에 NO_x의 생성량은 더욱 감소된다고 한다.[14,15]

Table 2. 各種 固體-氣體 反應裝置의 比較

因 子	向流移動層	流 動 層	竝流氣流層	ROTARY KILN
壓 力 損 失	中	大	小	小
加 壓 限 界	低 壓	高 壓	中 壓	常 壓
가스 處理能力	中	大	大	中
固體 處理能力	中	大	中	小
固 - 氣 接 觸	良 好	약간 不良하나 粒子表面積 큼	滯留時間 짧음	不 良
粒 度	大	中	小	제약 없음
粒度 分布範圍	좁 음	넓 음	中	넓 음
粒子的 連續取扱	機械的排出 또는 熔融排出	쉽지만 Fly ash 가 문제	쉽지만 負荷變動 範圍가 좁음	容 易
溫 度 分 布	軸 方 向 分 布	均 一	軸 方 向 分 布	軸 方 向 分 布 固體-氣體間의 溫度差가 큼
余 熱, 加 熱	내부 熱交換에 제약이 많음	다양하게 적용할 수 있음	內部 熱交換은 困難	困 難 (Burner加熱)
熱 效 率	高	中 가스와 입자의 출구온도가 층내 온도와 같음	低	低 벽으로부터의 열損失이 큼
制 御 性	困 難	容 易	困 難	容 易
Start up	困 難	容 易	容 易	容 易
操 作 變 更	困 難	容 易	容 易	困 難

Table 3. 流動層의 長. 短點

	長 點	短 點
粒 子 取 扱	<ul style="list-style-type: none"> - 분체의 연속적인 취급이 쉬움 - 입자의 입도범위가 넓음 - 입자의 분급배출이 가능함 - 반응완결층의 탈리에 따라 반응이 촉진됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 입자의 공급.배출부의 마모나 막힘등의 문제가 많음 - 유동매체의 마모가 심함 - 가스유속에 제한이 있음 - 부착성 및 초미분은 유동화가 곤란 - 층내에서 편석이 일어나기 쉬움
層 內 粒 子 混 합 · 傳 熱	<ul style="list-style-type: none"> - 입자 혼합이 양호함 - 층내온도가 균일하고, 온도조절이 용이함 - 생성가스의 온도를 고온으로 유지할 수 있음 - 내부에 열교환기 삽입이 가능함 - 고온.고압조작이 가능함 - 벽 및 내부삽입물의 표면 전열계수가 큼 - 난연성물질의 고온연소가 가능함 - 층의 열유지 능력이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> - 입자의 체류시간 분포가 큼 - 입자와 가스의 출구온도가 층내 온도와 비슷하여, 현열손실이 큼 - 벽 및 내부삽입물의 마모가 큼 - 유동매체의 소결에 의한 온도제한 - 분산판의 열응력이 큼
가 스 處 理	<ul style="list-style-type: none"> - 가스의 처리능력이 큼 - 공급가스의 혼합이 양호함 - 입자.가스간의 접촉면적이 큼 - 복합, 병합발전반응의 수율이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> - 압력손실이 커서 송풍동력이 커짐 - 층의 진동이 큼 - 기포중에 가스가 같이 포함되어 고체와 기체간의 접촉효율을 저하
其 他	<ul style="list-style-type: none"> - 다양하게 장치를 제작할 수 있음 - 액체의 분무나 가스의 2차공급이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> - 프로세스의 설계와 개발에 유동층 고유의 지식과 경험이 필요함

Table 4. 流動層 燒却爐와 stoker式 燒却爐의 比較

	流 動 層 燒 却 爐	S t o k e r 燒 却 爐
燒却爐特性	<ul style="list-style-type: none"> - 처리가능한 폐기물범위가 넓음 - Scale up에 한계가 있음 - 파쇄 등의 전처리가 필요함 - 연소열량의 변동제어가 힘들 - Fly ash 가 많음 	<ul style="list-style-type: none"> - Plastics 처리가 힘들 - 500 t/24hr 규모의 실적 - 연소열량의 변동이 적음 - 처리잔사는 주로 소각잔사임 - 연소 배가스량이 많음
公害防止性	<ul style="list-style-type: none"> - 연소가스 중의 분진농도 높음 - Fly ash 중의 중금속처리 필요 - 재에서 오수가 발생하지 않음 - 로 내에 CaCO₃등의 알칼리제 투입하면, HCl, SOx의 발생억제 - 연소 배가스량의 변동대책 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 물로써 재를 냉각시키므로, 중금속의 안정화처리를 위한 무기 오수 처리설비가 필요함
維持管理의 難 易 性	<ul style="list-style-type: none"> - 로의 기동·정지가 용이함 - 전처리설비의 보수가 필요함 - 내부 구조는 간단하나, 산기장치의 마모에 대한 대책 필요함 	<ul style="list-style-type: none"> - 연속운전, 자동화 운전 용이
資源回收性	<ul style="list-style-type: none"> - 증기량이 변동하기 쉬움 	<ul style="list-style-type: none"> - 열회수는 안정되어 있고, 발전할 경우에 유리함 - 증기에 의한 여열이용 범위가 넓음
經濟性	<ul style="list-style-type: none"> - 파쇄기 및 유동화를 위한 동력이 필요하므로, 전력소비량이 많음 	<ul style="list-style-type: none"> - 건설비는 유동층 소각로와 거의 같음

Table 5. 各種 燃燒裝置의 比較

項 目		種 類	STOKER 式	微 粉 炭	氣泡流動層	循環流動層
		燃 燒 裝 置	燃 燒 裝 置	燃 燒 裝 置	燃 燒 裝 置	
熱 的 特 性	燃 燒 溫 度 [°C]	< 1,000	1000 - 1500	750 - 950	750 - 950	
	재의 溶融問題	있 음	있 음	없 음	없 음	
	燃 燒 效 率 [%]	95 - 98	90 - 95	85 - 90	90 - 99	
	Boiler 效 率 [%]		90 - 92	86 - 89	90 - 92	
	熱交換管의 位置	對流傳熱部	對流傳熱部	層內埋設	壁 · 外部	
運 轉 特 性	Bed Type	固 定 層	懸濁噴流層	流 動 層	流 動 層	
	媒 體 粒 子	없 음	없 음	粗 粒 子	細 粒 子	
	燃料의 粒徑 [mm]	10 - 30	0.07	0.1 - 20	0.1 - 10	
	石灰石의 粒徑 [mm]			0.5 - 3.0	0.2 - 1.0	
	가스·固體 接觸部分 [m]			0.5 - 2.0	20 - 30	
	가스 線速度 [m/s]	0.8 - 1.5	10 - 15	1 - 3	4 - 10	
	過 剩 空 氣 比	1.4 - 1.6		1.2 - 1.4	1.1 - 1.3	
	燃料의 多 樣 性	넓 음	좁 음	넓 음	넓 음	
	石 炭 供 給 口 數			0.5-1/m ²	2/unit	
負荷變動適應速度 [%/min]		1 - 3	3 - 5	1 - 5		
環 境 特 性	SOx [ppm]		50 - 100 ³	< 50	< 50	
	Ca / S ¹			3 - 5	1.5 - 2	
	NOx [ppm]	130 - 380	50 ⁴	300 - 400 ⁵	100 - 200	
	粉 塵 ² [mg/Nm ³]	10	10	10	10	
	廢 棄 物 量 [%]		100	150 - 200	150	
經 濟 特 性	建 設 費 [%]		100	90	< 90	
	設 置 空 間 [%]		100	60	60	
				脫 黃 裝 置 不 要	脫 黃 · 脫 窒 裝 置 不 要	

* 1 : 脫黃率 90%를 얻기 위한 Ca/S mole比

* 2 : 高效率 集塵裝置 設置時의 粉塵濃度

* 3 : 脫黃裝置 設置時의 SOx 濃度

* 4 : 脫黃裝置 設置時의 NOx 濃度

* 5 : Boiler 出口에서의 NOx 濃度

3. 4 유동층 소각시설

일반적으로 시설이라고 함은 어떤 처리능력을 가진 장치의 집합체인 설비(예, 배수처리설비, 연소가스냉각설비등)를 하나의 시스템으로 구성한 플랜트를 말한다.[16] 도시쓰레기의 유동층 소각시설 기본시스템을 예를 Fig. 10에 나타내었다. 유동층 소각시설이 다른 소각시설과 비교하여 크게 다른점은 전처리설비로써 폐기물의 파쇄가 필요하다는 것이다. 제조업체에 따라서는 파쇄장치를 폐기물 공급장치와 합체시킨 경우도 있으나 일반적으로는 분리하고 있다. 또한 stoker식 소각로의 경우에는 연소가스 냉각설비의 종류에 관계없이 공기에열기를 선정할 수 있으나 유동층 소각로의 경우에는 연소가스 냉각설비가 물 분사형인 경우에는 고온부에 가스식 공기에열기를 설치하여야 하고, 폐열보일러인 경우에는 증기식 공기에열기를 설치하여야 한다.[5] 쓰레기는 crane으로 파쇄장치에 투입되고, 10 - 15cm로 파쇄된 쓰레기는 정량 공급장치에 의하여 소각로 내로 공급된다. 로 내에서는 약 800℃의 유동층에서 1차 연소하게 되고, 미연분들은 freeboard부에서 2차연소하게 된다. 연소실에서 배출되는 고온의 연소가스는 연소가스 냉각설비 및 유해가스 처리설비에 의하여 약 250℃까지 냉각된 후 전기집진기 등의 고효율 집진설비에서 분진을 제거하고 유안송풍기로서 굴뚝으로 배출하게 된다. 또한 연소용공기는 일반적으로 공기에열기를 거친 후 공급되는데 유동사의 유동화 및 유동층 내의 연소용 1차공기와 freeboard부에서 연소용 2차공기로 나누어서 공급한다. 그리고 소각잔사는 불연물 배출장치에 의하여 유동사와 함께 로의 하부로 부터 배출되고, 입경이 작은 것은 유동사로써 재이용된다. 이 때문에 불연물은 진동체거름을 거쳐 소각잔사와 유동사로 분리되고 유동사는 순환장치에 의하여 로 내로 재투입된다. 그리고 소각잔사중의 철 성분은 자력선별장치로 회수할 수도 있다.

유동층 소각시설을 구성하고 있는 각 설비는 다음과 같다

- (1) 유동층 소각로 본체 설비
- (2) 전처리설비 : pit, crane, shredder, magnetic seperator 등

- (3) 폐기물 공급설비 : 공급 conveyor, 정량 공급장치 등
- (4) 통풍설비 : 1, 2차송풍기(F.D.F), 유인송풍기(I.D.F)
- (5) 연소가스 냉각설비 : 폐열보일러 또는 물분사식 가스냉각설
- (6) 집진설비 : 원심력집진기, 전기집진기 등
- (7) 유해가스 처리설비 : 습식법, 건식법 및 반건식법
- (8) 백연방지설비 : 배가스가온법 또는 수증기제거법등
- (9) 재처리설비 : 시멘트고화법, 용융고화법, 및 탄산가스중화법등
- (10) 배수처리설비 : 보일러수처리, Pit 침출수, 세차 및 세정폐수처리등
- (11) 여열이용설비 : 폐열보일러, 온수열교환기, 발전설비등
- (12) 전기설비 : 수전, 변전, 배전, 동력 및 조명설비등
- (13) 계측설비 : 자동제어장치, 공해감시용계기, 연소관리용계기등
- (14) 연돌

3. 5 유동층 소각로 설계

유동층에서 대상으로 하는 반응조작은 다종다양하기 때문에 일반적인 설계계 산법을 나타내기는 힘들지만, 설계조건으로서 고체 입자의 처리량과 반응온도, 압력 및 반응율등이 미리 결정되어져 있는 경우에는 Fig. 11과 같은 순서로 설계할 수가 있다.

우선 유동층장치에 투입되는 입자의 입경을 선정하여야 한다. 입경이 정하여지면, 유동화실험과 반응속도실험으로 부터 얻어지는 반응속도와 물질수지 모델로 부터, 소요 가스유속, 탑경 및 층 높이 등을 추산한다. 또한, 가스유속(U)이 U_{mf} 보다 작던지 또는 slugging 한계를 넘을 경우에는 공급입경을 그에 따라 재선정할 필요가 있다. 다음에 가스 분산장치의 설계를 하여야 하고, 비산유출 입자량에 의하여 free board부의 높이와 cyclone의 설계를 한다. 이 단계에서 산출되는 송풍기의 소요 동력과 비산유출 입자량이 너무 크게 되던지 또는 층의 높이가 너무 높으면, 입경을 재선정하던지 또는 free board 구조를 재검토하여야 한다. 그리고, 열수

지 계산에 따라 가열 또는 제거열량을 구하고, 정열계수를 추산하여 소요 전열면적을 결정한다. 이 경우, 전열면적에 대하여 층 체적이 너무 작은 경우에는 층의 높이를 증대시키던가 또는 다단화시켜야 한다. 최후로 부속 프로세스의 설계를 하고, 비용효과 분석에 의하여 설계한 프로세스가 실현 가능한 지를 확인한다.

그러나, 비교적 반응속도가 빠른 FBC의 경우에는 다음식과 같이 고체의 공급량에 의하여 소요 전열면적이 결정되고, 연소실 용적은 고체의 공급열량에 의하여 결정된다. 또한, 공기비도 거의 일정하게 정하여져 있기 때문에 소요 공기량도 계산되어진다. 따라서, 결정하여야 할 설계변수는 층 단면적과 공기의 유속이다. 이외에 공급입자의 횡방향 분산속도에 대응하는 공급방법과 공급구의 수를 결정하여야 하고, 입자의 배출과 관련하여 유동사의 순환량을 결정하여야 하며, free board에서의 NOx 제거 반응속도에 의거하여 free board부의 높이나 2차 공기의 공급방법을 결정하여야 한다. 또한, 가스유속과 탑경 및 층 높이를 결정하는 단계에서 물질수지와 에너지수지를 동시에 고려하여, 층내 온도를 적절한 온도로 유지하기 위한 필요 조작 조건 (보조연료나 냉각수 등)등 동시에 결정하여야 한다.

$$\text{층 단면적(m}^2\text{)} = \text{고체 공급량(kg/hr)} / \text{화격자 연소율(kg/m}^2\text{. hr)}$$

$$\text{연소실 용적(m}^3\text{)} = \text{고체 공급열량(kcal/kg)} / \text{연소실 열부하(kcal/kg.m}^3\text{)}$$

일본의 폐기물 처리시설 구조지침[21]에 의하면, 유동층 소각로의 화격자 연소율은 약 450 kg/m²hr이고, 연소실 열부하는 8.0 - 15.0 × 10⁴ kcal/m³hr 이다.

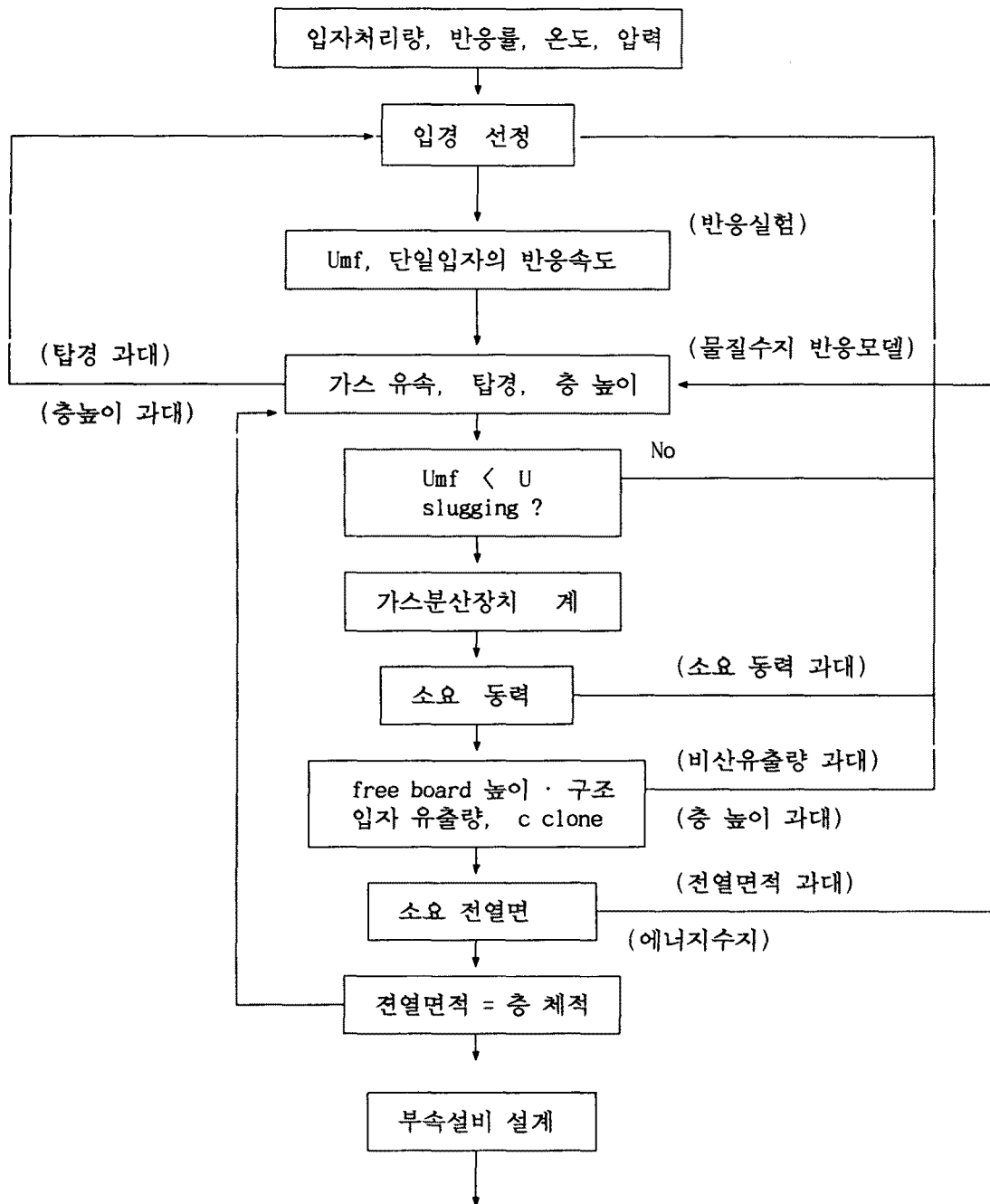


Fig. 11 유동층장치의 설계 순서

제 4 장 국내에서의 활용 예

4. 1 포항제철 일반쓰레기 소각시설

- 시설규모

주택단지 및 사무실 쓰레기 : 40 ton/day

폐 유 : 10 ton/day

총 계 : 50 ton/day

- 운전개시 : 1988년 8월
- 소각방식 : 유동층식
- 소각온도 : 로내 온도 650 °C
로출구 온도 850 °C
- 시공회사 : 롯데기공 / Nippon Zeon

4. 2 전주제지 슬러지 소각로

- 시설규모 : 100 ton/day (50 ton/day × 2기)

paper sludge (max 70% H₂O, 3,500 kcal/kg) : 60 ton/day

bark (4,500 kcal/kg) : 30 ton/day

총 계 : 90 ton/day

- 운전시간 / 연간가동일수 : 1일 24시간 / 연간 330일 가동
- 소각방식 : 유동층식
- 소각조건 : 로내온도 700 ~ 900°C
- 시공회사 : 삼성 엔지니어링

4. 3 태흥산업(주) 슬러지 소각로

- 시설규모 : 920kg/hr(14.72ton/day)
Wastewater treatment sludge(max 50% H₂O, 1,980kcal/kg) : 750kg/hr
폐용제합유 폐기물 : 80kg/hr
폐 P.E 류 : 90gk/hr

총 계 : 720kg.hr

- 운전시간 / 연간가동일수 : 1일 16시간 / 연간 300일 가동
- 소각방식 : 유동층식
- 소각조건 : 로내온도 700 ~ 900℃
제작회사 : 한국우노중공업(주)

4. 4 세풍제지 슬러지 소각로

- 시설규모 : 65ton/day
공정오니(max 75% H₂O, 4,000kcal/kg DB) : 22.5ton/day
폐지(Refuse) (5000kcal/kg) : 6.3ton/day
Waste wood (4,200kcal/kg) : 1.2ton/day
Bark (max 30% H₂O, 4,200kcal/kg DB) : 17.5ton/day
Bark (max 70% H₂O, 4,200kcal/kg DB) : 17.5ton/day

총 계 : 65ton/day

- 운전시간 / 연간 가동일수 : 1일 24시간 / 연간 330일 가동
- 소각방식 : 유동층식
- 운전조건 : 700 ~ 850℃
- 제작회사 : Babcock-Hitachi K. K (태림파이오니아)

4. 5 성남시 도시쓰레기 소각시설

- 시설규모 : 100 ton/day (50 ton/day × 2기)
- 운전시간 / 연간 가동일수 : 1일 24시간 / 연균 350일 가동
- 소각방식 : 유동층식
- 소각조건 : 노내온도 750 ~ 950℃ (연소실 출구 온도)
- 건물크기 : 건면적 1,355m², 지상 4층 높이, 연면적 2,913m²
- 건설공사 : 쌍용건설 / 미쯔이조선
- 설계감리 : 대림 엔지니어링
- 공사기간 : 1991. 3. 28 - 1993. 5. 27
- 기 타 : 최종 처분장을 부지내 건설
침출수의 처리시설까지 확보
- 주요설비

시 설 명	주 요 장 비	TYPE & SIZE	용 량	수 량
소 각 시 설	소각로	유동상식	2.1 T/H	2
가스냉각시설	가스냉각기	수분사식	11,000 Nm ³ /H	2
공해방지시설	BAG FILTER	건식	15,000 Nm ³ /H	2
	소석회 정량 공급비		30 kg/h	1
여열이용시설	공기가열기	PLATE TYPE	20,000 kcal/H	2
	온수발생기	FIN TUBE TYPE	380,000 kcal/H	1
소각재처리시설	소각재 가습기	TWO AXES SCREW	1.5 T/H	1
폐 수 처 리	응집침전조	생물화학적 처리	20 m ³ /D	1
침출수처리설비	회전원판	생물화학적 처리	50 m ³ /D	1

가. 성남시 도시폐기물 종류

- 가) 과일, 채소, 정원 쓰레기, 음식물 찌꺼기
- 나) 형궤, 가죽, 고무
- 다) 종이, 판지, 나무
- 라) 플라스틱
- 마) 금속류
- 바) 유리
- 사) 세라믹 제품
- 아) 기타 찌꺼기

쓰레기의 조성분율 (wt %)				
		저질 쓰레기	기준 쓰레기	고질 쓰레기
수 분		65.9	51.4	40.0
가 연 물 질	C	12.49	15.8	23.64
	H	1.9	2.35	3.33
	O	12.3	14.4	18.0
	N	0.47	0.52	0.61
	S	0.04	0.04	0.06
	Cl	0.1	0.19	0.36
회 분		4.08	9.2	8.40
불 연 물		2.72	6.1	5.60
Total		100	100	100
비 중		0.3	0.25	0.15
저위발열량 (kcal/kg 쓰레기)		794	1,216	2,096

* 저위 발열량의 값은 STEUER식으로 구한 값임.

제 5 장 폐기물 소각설비에서의 대기오염 제어

폐기물을 소각시킬 경우 Table 6과 같은 다양한 종류의 오염물질이 발생하게 되어 폐기물 소각에 따라 대기오염을 야기시킬 수 있기 때문에 세계 각 국가에서는 Table 7 과 같이 각 오염물질에 대한 배출허용 기준을 규정하여 놓고 있다. 따라서 폐기물 소각로의 설계시에는 사전에 적절한 저감방안을 수립하는 것이 필수적으로 이루어져야 한다.

폐기물 소각공정으로부터 배출되는 대기오염물질을 저감하기 위한 방안은 크게 세가지로 분류되는데, 첫째는 Table 6에 나타난 바와같이 대기오염물질의 생성원이 되는 성분을 폐기물로부터 사전에 제거하는 방법으로써 이를 연소전 제어방법(pre-combustion control method)라 한다. 두번째는 연소공정에서 대기오염물질의 배출량은 동일한 소각로에서 운전한다 하더라도 폐기물의 로내 체류시간, 과잉공기량, 조업온도와 같은 조업조건 변화에 따라 크게 영향을 받게 된다. 그러므로 폐기물 소각공정중에 대기오염물질 배출량을 극소화시킬 수 있는 조업조건을 찾아 그 조건에서 조업하므로써 대기오염물질량을 저감시키는 방법(inter-combustion control method)이 있다. 마지막으로 폐기물 소각공정으로부터 배출된 오염물질을 연도를 통해 대기중으로 방출시키기 전에 적절한 제어장치에서 오염물질농도를 저감시키는

Table 6. 폐기물 소각공정으로부터 배출되는 오염물질 종류 및 생성원

오염물질	생성원
입자상물질	폐기물중 회재(ash)
SO _x	폐기물중에 함유된 황성분
NO _x	폐기물중에 함유된 질소성분 및 연소용 공기
HCl	폐기물중에 함유된 염소성분
CO	불완전 연소
중금속(Hg, Pb, Cr, Zn등)	불완전 연소 중금속 성분
다이옥신류	폐기물중에 함유된 다이옥신류 및 염화유기계 전구물질(precursors)
기타 탄화수소	폐기물중의 유기화합물

방법(post-combustion control method)이 있다. 그러나 폐기물의 성상은 매우 다양하기 때문에 소각공정 전에 폐기물중에 함유된 오염원(source)을 제거하는 방법(pre-combustion control method)은 매우 어렵기 때문에 연소중 제어 방법(inter-combustion control method)과 연소후 저감 방법(post-combustion control method)에 의해 오염물질을 제어하고 있다.

따라서 폐기물 소각공정시 생성되는 오염물질을 연소공정중에 제어하기 위해서는 각종 대기오염물질에 대한 생성기구를 정확하게 파악하는 것이 필수적이며, 연소공정으로부터 발생된 오염물질을 효율적으로 저감시키기 위해서는 후처리 장비에 대한 오염물질 제어원리 및 장치의 성능평가가 이루어져야 한다.

Table 7. 각국의 오염물질 배출허용기준

구 분	한 국		Japan	European Community	독일(17.Blm SchV 1990)	Sweden	Michigan	Netherlands
	현재	'99이후						
분진(mg/Nm ³)	100	80	50	30	10	20	34	5
SO ₂ (ppm)	300	300	70	105	17.5	-	86	14
NO ₂ (ppm)	200	200	250	-	97.4	-	-	34
CO (ppm)	600	600	-	80	40	-	113	40
HCl (ppm)	80	50	430	30.7	6.1	63	90% reduction	6.1
HF (ppm)	5	3	-	2.24	1.12	-	-	1.12

Table 8. 대기오염원의 주요염물질별 발생량

(Estimated U.S nationwide emissions for 1977 (10⁶metric tons / year)

Pollutants	Transportation	Fuel combustion (stationary)	Industrial Processes	Solid Waste disposal	Miscellaneous	Total (%)
CO	85.5	1.2	8.3	2.6	4.9	102.5 (52.9)
SO _x	0.8	22.4	4.2	0	0	27.4 (14.1)
NO _x	9.2	13.0	0.7	0.1	0.1	23.1 (12.0)
C _x H _y	11.5	1.5	10.1	0.7	4.5	28.3 (14.6)
Particulate	1.1	4.8	5.4	0.4	0.7	12.4 (6.4)
Total (%)	108.1 (55.8)	42.9 (22.2)	28.7 (14.8)	3.8 (2.0)	10.2 (5.2)	193.7 (100)

제 6장 결 론

지금까지 유동층 소각시설에 대하여 간략하게 소개하였으나 서두에 언급한 것처럼 가정이나 산업체에서 배출되는 폐기물이나 쓰레기는 종류가 다양하고 성상이 복잡하며 각각의 연소특성이 제각기 다르기 때문에 어떤 소각로가 가장 적합하고 우수하다고 단정하여 말하기에는 어렵다. 따라서 소각로를 선정하기 전에 폐기물의 발생유형이나 성상을 충분히 파악한 다음 이러한 폐기물의 성상에 적합한 소각로를 선정하는 것이 바람직하다. 다만 일반적으로 알려져 있기로는 유동층 소각방법이 지금까지 알려진 소각방법중 가장 연소효율이 우수한 것으로는 판명되고 있으나 아직 국내에서는 시작단계에 있기 때문에 널리 인식되지 못하여 생소하기도 하며 거부감을 가지고 있는 것도 사실이다. 특히 성남시에 설치된 도시쓰레기 소각시설의 경우 운전미숙으로 인한 가동효율의 저하가 소각설비의 잘못으로 인식되기도 하며 유동층이라는 용어만 들어가면 모든것이 동일한 것으로 인식되고 있기도 하다. 그러나 고무적인 것은 많은 대학이나 연구기관 그리고 기업들이 유동층 소각로에 관심을 갖고 연구개발이 활발히 진행되고 있기 때문에 수년 이내 국내 기반기술이 정착되어 실용화 단계에 진입하리라 생각된다.

《 參 考 文 獻 》

1. 鞭 巖, 森 滋勝, 堀尾正勲, 流動層の 反應工學, 培風館 (1984)
2. 배성근, 最新 有煉炭 燃燒施設의 環境改善 效果와 그 使用에 관한 公聽會, 17 (1990. 11)
3. 김상돈, 제 6차 環境工學分野 産學協同公開講座 - 廢棄物 燒却 및 淸淨에너지화 技術, 한국과학기술원 토목공학과, 9-1 (1991. 7)
4. 谷下市松, ボイラ 研究, 233, 11 (1989)
5. 石川楨昭, 流動床式 ごみ燒却爐 設計의 實務, 工業出版社 (1987)
6. 白井隆, 流動層, 科學技術社 (1965)
7. Ergun, S., Chem. Eng. Progr., 48, 89 (1952)
8. Pattipati, R. R. and C. Y. Wen, Ind. Eng. Chem., Process Des. Develop. 20, 705 (1981)
9. 洪公弘, 山岐量平, 神保元二, 化學共學論文集, 7, 109 (1981)
10. Geldart, D., Powder Technol., 7, 285 (1975)
11. S.Yamada, Proc. of Solid Waste Incineration and Resource Recovery International Symposium Seoul, 43 (1987)
12. 배효주, 집단에너지 공급을 위한 유연탄보일러 이용기술 세미나, 에너지관리 공단, 69 (1990. 8)
13. 현병호, 제6차 環境工學分野 産學協同公開講座-廢棄物의 燒却 및 淸淨에너지화 技術, 한국과학기술원 토목공학과, 11-1 (1991. 7)
14. 日本産業機械工業會, 「環境保全, 資源有效利用システム技術開發事業-石炭燃料 轉換に 伴う 汚染物質處理技術調査報告書」 (1983. 7)
15. 高安正躬, 化學工學, 50, 7, 483 (1986)

16. 최정후, 집단에너지 공급을 위한 유연탄보일러 이용기술 세미나, 에너지관리 공단, 3 (1990. 8)
17. 西岡和正, 公害と對策, 18, 5, 17 (1982)
18. 조재수, 집단에너지 공급을 위한 유연탄보일러 이용기술 세미나, 에너지관리 공단, 39 (1990. 8)
19. 村上治郎, 藤間重久, 燃料協會誌, 58, 629, 775 (1979)
20. 古澤健彦. 森 滋勝, 燃料協會誌, 58, 629, 399 (1979)
21. 厚生省水道環境部監修, 廢棄物處理構造指針解說-處理施設構造指針篇, (社)全國都市清掃會議 (1982)
22. K. Mikawa, Proc. of Solid Waste Incineration and Resource Recovery International Symposium Seoul, 117 (1987)
23. H. Kudo and K. Mikawa, Proc. Fluidization '87 Korea and Japan (1987)
24. M. Horio, T. Shibata and I. Muchi, The 4th Int'l. Fluidization Conference (1983)