

유동층 소각로에 대하여

박 승 호

About Fluidized Bed Incinerators

Seungho Park



●박승호(홍익대 기계공학과)
●1958년생
●열공학을 전공하였으며, 복사열전달의 해석, 액적연소의 해석, 유동층 소각로의 개발 등의 문제에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

이 글에서는 유동층소각로와 관련된 기술적 사항을 정리하고자 한다. 일부 교과서적인 내용이 서술되어 있으나, 자세한 이론적 고찰보다는 현상적인 이해에 중점을 두고, 실제 유동층 소각로와 관련된 분야에서 연구를 수행하는 연구자들과의 토론 및 설계시 고려하여야 할 사항들을 간략히 포함한다. 일반적으로 유동층은 효율적인 화학반응으로서 주로 이용되고 있으나, 이 글에서는 환경 및 에너지분야와 일정한 관계가 있는 폐기물 소각로 및 석탄연소로로서의 유동층의 응용에 초점을 맞추고 있다. 우선 환경 및 에너지산업의 현황을 이해함으로써 유동층의 핵심적 역할 담당 가능성을 밝힌다. 그리고 소각로의 종류 및 유동층의 역사와 응용에 대하여 간략히 설명한다. 여타의 소각로와는 다른 특성인 기포유동특성 및 유동화에 대하여 논함으로써 유동층에 대한 기본현상을 파악한다. 유동층 소각로의 중요한 기능인 공해물질의 노내처리에 대하여 논하고, 기포유

동층보다 효율적인 순환유동층 및 가압유동층의 특성과 역할을 소개한다. 그리고 유동층 소각로의 예로 일본의 폐기물소각로 및 하수슬러지 소각로개발 현황을 소개한다. 최종적으로는 유동층 소각로의 실제 설계과정에 대하여 간략히 해설한다.

2. 환경산업의 현황

고도의 공업발전 및 경제규모의 팽창으로 막대한 양의 에너지가 요구되고 이에 따라 각종 폐기물이 발생하여 지역적인 오염뿐만 아니라 범지구적으로 환경을 오염시키고 있다. 환경변화 및 파괴의 주범은 이산화탄소, CFC, 황산화물, 질소산화물, Dioxin, 중금속 등으로 이 물질들은 산성비, 산성안개, 산성토양, 온난화, 각종 질병, 오존층의 파괴, 이상기후 등을 유발하고 있어, 이에 대한 적극적 대책이 필요하다.

환경 및 에너지에 대한 국제적인 관심은 1960년대부터 시작되었다고 볼 수 있으나, 보다 적극적인 대책으로는 '80년대 이후의 미국의 DOE 청정석탄기술(CCT) 프로그램

과 이를 강화한 1990⁽¹⁾년의 청정공기법수정, 생물다양성협약, 몬트리올의정서, 코펜하겐의정서, 지구환경금융, 기후변화협약 등을 들 수 있다. 1995년 WTO 출범 이후의 그린라운드(green round) 및 국제 표준기구의 표준화⁽²⁾ 등으로 환경, 경영, 무역 등을 연계시켜 점차적으로 각국의 경제활동에 상당한 영향력을 발휘할 것으로 예상되어 강화된 환경규제를 만족시키기 위하여 상당한 노력이 경주되고 있어, 현재 2,000~3,000억 달러의 국제환경시장이 2000년대에는 현재의 2배 이상 될 것으로 예상된다⁽³⁾.

국내의 대책으로는 저공해 소각기술, 고효율 집진기술 등의 환경개발사업 등으로 선진기술을 습득 또는 신기술을 개발하여 그린라운드 등에서도 적극적인 역할을 수행할 수 있도록 기대되고 있다. 정부는 현재 2%에도 못미치는 폐기물의 소각률을 2001년까지 25%(가연성 성분 40%)로 끌어올리는 계획, 1987년의 대체에너지 개발촉진법으로 탈석유정책 등이 유동층 소각로와 직접적인 관련이 있다. 이를 뒷받침하는 사업으로는 G-7 환경공학기술개발사업, 통상산업부의 공업기반과제, 쓰레기종량제 등을 들 수 있다. 그러나 5~10년을 주기로 국제적인 환경규제가 강화되고 있고, 미국, 일본, 독일, 스웨덴의 선진국 등은 환경규제를 약 10~20년 앞서는 신기술을 속속 개발하고 있다. 따라서, 강화되고 있는 환경규제를 만족하고 선진국이 보유하고 있는 기술과 경쟁하려면 보다 적극적인 대책이 마련되어야 한다.

국내의 환경산업⁽³⁾은 1960년대 태동하여 연평균증가율 13.8%로 현재에 도달하고 있으나, 이는 국민 총생산의 증가율에도 못미치므로 실질적으로는 영세성을 면치 못하고 있다. 최근의 발표에 따르면 대기·수질오염 방지기술은 선진국의 60~80%에 달하나 소각 기술은 20~30%밖에 안되므로 앞으로 많은 노력이 필요하고, 많은 투자가 예상된다. 따라서 2000년대에는 수 조 원의 국내 소각

로 시장이 예상되고 있다. 또한 국내 경제가 급성장함에 따라 에너지 수요가 기하급수적으로 증가하고 있어 1993년 현재 5,670MW(비율 20.8%)의 국내 석탄발전은 2006년에는 16,090MW(29.8%)로 계획⁽⁴⁾되어 고효율 및 저공해연소로 석탄유동층 소각로의 활약이 기대된다.

3. 소각기술의 분류 및 유동층의 응용

소각기술은 전처리, 소각로, 소각여열회수, 대기오염제어, 운전 및 제어기술의 복합기술⁽⁵⁾이다. 전처리기술은 연료의 파쇄, 절삭, 선별, 함수율 저감기술로 소각로의 특성에 따라 크게 달라진다. 소각로기술은 아래에 설명된 소각로의 종류에 따른 소각원리, 연료 및 소각원리에 따른 정상운전 모델 및 소각효율 관련기술이다. 소각여열회수 기술은 폐열이용, 열효율향상, 냉각기술로 설명될 수 있다. 대기오염 제어기술은 집진, Dioxin, NOx, SOx, 배연가스, 배수처리기술이고, 특히 유동층소각로에서 NOx 및 SOx 처리기술은 소각로기술과 직접적인 관계가 있다. 운전 및 제어기술은 다양한 연료 및 연료성분의 일시적 변화에 순응할 수 있도록 소각로를 운전하는 기술로서 많은 경험이 요구되는 기술이다. 폐기물 소각로로서는 유동층식뿐만 아니라, 화격자식, 회전로식 등이 이용되고 있고, 석탄연소로서는 중대형연소로로 미분탄연소로가 이용되고 있고, 중저질 등의 다양한 종류의 석탄용 연소로로서 유동층소각로가 이용되고 있다. 일반적인 폐기물 소각로의 특징을 비교하면 표 1과 같다.

유동층은 유화광 배소로(1879)나 Winkler의 석탄가스화로(1922)로부터 시작된다.⁽⁶⁾ 유동층의 자립과 보급을 가능케 한 기술은 석유산업의 발달에 따라 개발된 유동접촉분해(FCC: fluid catalytic cracking) 기술로 제2차 대전시 고옥탄 항공연료수요의 급증에 부응하여 상당한 사회적·군사적인 역할을

표 1 폐기물 소각로의 일반적 특성 비교

종류 성질	유동층 (fluidized bed)	화격자(stoker)	회전로 (rotary kiln)
연소형태	동시 건조 및 연소	건조, 연소 및 후연소 분리	동시 또는 분리
연료특성	저질~고질	플라스틱 함유량제한(25%)	고점도, 난연성
규모(폐기물)	소규모~200 t/d (5MW~350MW)	~500 t/d	~150 t/d
전처리	필요에서 불필요로	불필요	필요에서 불필요로
연소율	400~600 kg/m ² h	200~400	300~400
소요동력	많다	적다	적다
소각회	대부분이 비회	90% 노하부 배출	90% 노하부 배출
방진대책	필요	용이	용이
유지관리	전처리/분산처리	화격자	회전롤러
SOx	로내탈황(70~95%)	배연처리	배연처리
NOx	저온 및 저산소운전	배연처리	배연처리
기동/정지	고정탄소분 등-로내환원 용이	연속운전	연속운전

수행하였다. 유동층기술은 유동층내에 형성된 매우 균일한 온도장에 의하여 효율적인 촉매작용을 얻을 수 있어 화학반응으로서 주로 사용되었으며, 그와 같은 특성을 요구하는 다른 여러 분야에서도 널리 응용되고 있다. 예를 들면 고효율 열교환기, 과립화, 코팅, 건조, 흡착, 석탄연소로, 화학증기침전(CVD), 슬러지와 폐기물 소각로를 들 수 있다.

석탄이나 각종 연료를 연소시키는 유동층 연소로(FBC)의 구상이 FCC의 발명자 Odel에 의하여 1944년에 이미 특허 신청⁽⁷⁾되었다. 소련에서는 1940년대에 FBC가 실용화되어 중국에 전파되었다고 한다. 서양에서는 한 때 잊어버리고 있던 FBC의 구상은 1960년경 먼저 영국에서 재발견되어 에너지와 환경의 조화를 이룩할 수 있는 기술이라 하여 기포 유동층(BFBC)부터, 가압 유동층(PFBC), 가압 “토픽 사이클(topping cycle)” 등의 고효율 발전기술이나 폐기물처리 기술로 발전되고 있다. 1970년대 초의 석유파동, 1979년 5월의 IEA의 각료이사회에

서 채택된 “석탄에 관한 IEA 행동원칙”, 1984년~2003년의 미국의 CCT 프로그램 등으로 석탄의 효율적 이용이 한층 가속화되었다. 이에 따라 석회석 등에 의한 유황산화물의 흡수에 적당한 1,000℃ 이하의 저온에서 연소가 가능한 유동층이 주목되어 고가의 배연탈황장치를 필요로 하지 않는 유동층보일러의 개발이 적극적으로 진전되어 왔다.

1988년 미국통계에 따르면 전세계에 130기의 대형기포형 및 110기의 대형순환형이 설치되었고, 1991년 통계에 따르면 대형순환형이 243기나 설치되어 운전되고 있으며, 일본에서는 1992년에 32기의 기포형과 13기의 순환형보일러가 가동되고 있다.⁽⁷⁾ 현재 상압하에서 작동하는 유동층보일러는 선진국에서는 기술의 개발단계를 지나, 장치의 성능향상 및 용도확대의 단계에 들어와 있다. 40% 이상의 석탄발전효율 얻기 위하여 고온의 연소 가스로 구동하는 가스터빈과 중온의 가스 및 증기의 열을 이용하는 증기터빈을 조합시킨 복합발전을 위하여 가압유동층의 연구개발이 1960년대부터 시작되었다. 그리고 세계최초

의 대형 가압유동층으로서 1980년 60 MW 가압유동층이 영국의 Grimethorpe에 의해 운전을 개시하였다. 1981년에 스웨덴의 ABB Carbon 사에 의해 15 MW 시험공장을 시험하고, 1992년 350MW급의 설계에 들어갔다. 이는 특히 2000년대에 상용화 예정으로 현재는 실제 운전을 통한 경제성 평가단계에 있다.⁽¹⁾ (미국의 TIDD, SPORN 등)

특히, 발전소의 재동력용⁽¹⁾으로 유동층소각로가 이용되고 있다. 예를 들면, 미국 켄터키주의 TVA's Shawnee 화석연료 발전소의 미분탄 보일러를 TVA's 160 MW AFBC 전시용 기기(1988)로 개조하여 고유황함유의 역청탄을 연료로 사용하고, 미국 콜로라도주의 Nucla 발전소(36 MW)의 화격자 보일러를 110 MW CFBC(1987)로 개조하여 고회분 함유의 역청탄을 연료로 사용하고, 미국 Ohio 전력회사의 Tidd 공장의 보일러를 70 MW PFBC 복합사이클 시스템(1991)으로 개조하여 동력증가 및 저질석탄의 저공해연소의 이중효과를 얻고 있다.

일본에서의 폐기물 FBC⁽⁷⁾로는 도시 및 산업폐기물용으로 1970년부터 1991년까지 138 시설에 272기가 설치되어 가동중이고, 현재 하수 슬러지의 소각분야에서 FBC가 주류를 점하며, 1992년까지 약 100기가 건설되어 가동중이고 그 후 그 숫자가 급증하였다.

4. 기포유동층의 특성

4.1 액체와 같은 유동성

유동층의 대표적 특징은 층물질이 유동할 때에 액체와 같이 유동성이 있다는 것이다. 이에 따라 유동층이라 불리어지고 그림 1은 이와 같은 성질을 나타내고 있다. 층물질의 평균 밀도보다 가벼운 경우에는 유동층의 상부에 뜨게 된다. 용기가 기울어졌을 때에도 유동층 상부표면은 수평을 유지하게 되고 높이가 다른 두 개의 유동층이 연결될 경우에

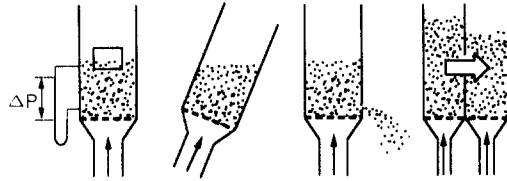


그림 1 액체와 같은 유동성을 갖는 유동층의 특성

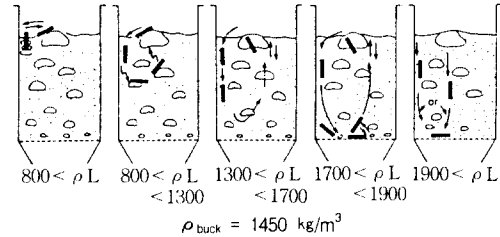


그림 2 층물질과 이물질과의 밀도차이에 따른 이물질의 유동층내에서의 움직임

도 유동매체가 흘러 유동층의 높이가 서로 같아지게 된다. 또한 층내에서 두 위치간의 압력 차이는 두 점에서의 정압차와 같아지고, 용기에 구멍이 있을 경우에는 제트처럼 유동매체가 분출하게 된다. 그림 2는 층물질의 평균 밀도와 층물질과 다른 밀도를 가진 이물질의 유동층 내의 거동을 나타낸다. 이 경우 층물질의 평균 밀도(bulk density)는 1,450 kg/m³으로서 일반 모래를 유동매체로 사용한 것과 같다. 일반적으로 연소 후의 회분은 밀도가 낮기 때문에 층의 상부에 많이 존재하고, 금속 등의 불연물은 층하부에 존재하게 되므로 이를 고려하여 집진기 및 불연물의 배출기구를 설계한다.

4.2 유동화 영역

층물질은 용기의 아래부분으로부터 공급되는 유체의 속도 및 물성에 따라 서로 다른 유동화 특성을 나타낸다. 이를 그림 3에 나타내었다. 속도가 매우 낮은 경우에는 유동매체의 움직임이 거의 없고, 유동화용 유체

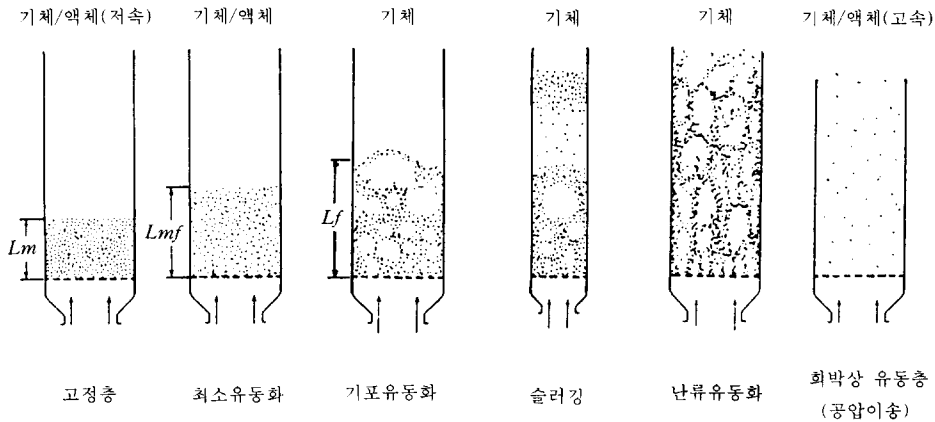


그림 3 유동화 영역 (fluidization regime)

는 유동사(유동매체)의 기공을 통하여 빠져 나가게 된다. 속도가 증가하면 유체의 마찰력이 유동사의 정압을 이길 수 있는 상태가 되고 유동사와 유동화유체와의 마찰력과 압력강하에 의한 압축력이 유동사의 무게와 힘의 균형을 이루게 된다. 이 때를 최소유동화 (minimum fluidization) 상태라 한다. 그 이상 속도를 증가시키면 액체의 경우에는 층이 균일하게 팽창하지만, 기체의 경우에는 기포가 발생하게 되며 이를 기포유동층(bubbling fluidized bed)라 한다. 유동층 소각로는 액체를 사용하지 않으므로 기체에 대하여만 언급하겠다. 생성된 기포는 유동사의 특징에 따라 합체와 분열을 하게 된다. 층의 종횡비 (aspect ratio; 층높이 대 층의 내경 비)가 큰 경우 기포가 점차 성장하여 층의 내경과 비슷한 크기로 커져 주기적인 압력변동을 가져오고, 또한 연소에 악영향을 미치는 상태가 된다. 이를 슬러깅유동층(slugging fluidized bed)이라 한다. 점차 속도가 증가하게 되면 층의 표면이 없어지고, 유동사의 비탈동반이 심하게 된다. 이를 난류유동층 (turbulent fluidized bed)이라 한다. 이때에는 기포대신에 다양한 모양의 유동사의 덩어리와 기체의 영역이 혼란스럽게 섞이게 된다. 속도를 더 증가시키면 기체를 따라 유동

사가 이동하게 되고 이를 희박상 유동층 (lean phase fluidization with pneumatic transport)이라 한다. 주로 소각로에서는 기포유동층 및 난류유동층과 같은 고속유동층을 이용하여 연료의 저온연소가 이루어진다.

4.3 최소유동화

유동층과 고정층을 구분하는 것이 최소유동화(minimum fluidization)의 개념이다. 앞에서 언급하였던 것처럼 기체의 속도가 증가함에 따라 층내에 걸리는 압력이 점차 증가하여 층전체에 대한 정압과 같아지는 상태에서 그림 4에 나타나 있다. 이에 대하여 이론적으로는 다음의 관계식을 사용하면 이론적

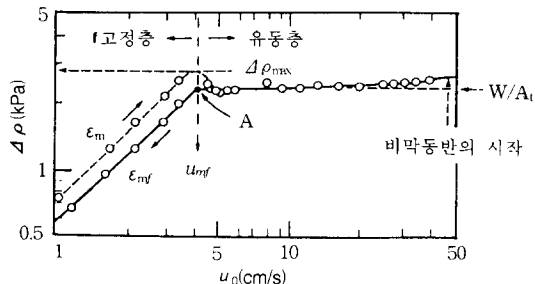


그림 4 최소유동화속도 (minimum fluidization velocity)

표 2 Geldart분류에 의한 입자의 특성⁽⁸⁾

분류	C	A	B	D
성질				
특성	점착성 (cohesive)	쉽게 날림	기포 (bubbly)	불균형 (spoutable)
예	밀가루	FCC촉매	모래	밀, 콩
입경 (2.5 g/cm ³)	$d_p < 20$	$20 < d_p < 90$	$90 < d_p < 650$	$d_p < 650 [\mu\text{m}]$
체널링	심함	약간	거의 없음	거의 없음
분출성	없음	없음	얕은 유동층	쉽게 발생
혼합성	매우 낮음	높음	중간	낮음
입경의 의존성	모름	있음	약간	분리성

최소유동화상태를 유도할 수 있다. 기체의 층내압력강하(ΔP)는 Ergun의 식으로 식 (1)과 같으며, 모래층에 걸리는 정압차(ΔP_b)는 식 (2)가 되므로 두 압력차를 같게 놓으면 최소유동화 상태를 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = 150 \frac{(1-\epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu u_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g u_{mf}^2}{\phi_s d_p} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1-\epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2)$$

여기서, 하첨자 mf 는 최소유동화 상태를, ϵ 은 기공률을, L 은 층의 높이를, ρ 는 밀도를, d_p 는 모래입자의 직경을, ϕ_s 는 구형도를 u_{mf} 는 최소유동화속도를 나타내고 있다. 최소유동화속도 및 상태는 연구실 규모의 실험에서는 상당히 중요하나, 실규모 소각로에서는 그리 중요치 않다. 규모가 작은 실험장치는 일반적으로 중형비 크기 때문에, 슬러징을 회피하면서 안정된 유동화를 얻기 위한 유속범위가 상당히 좁다. 즉, 유속이 최소유동화 속도에 비하여 그리 크지 않게 되므로 안정된 유동화상태를 유지하기 위하여 상당한 주의가 요구된다. 그러나 실규모에서는 중형비가 상당히 작아 슬러징의 우려는 거의 없으므로 유동화속도를 크게 유지할 수 있고, 실제로 최소유동화속도의 4~5배 이상으로 운전을 하기 때문에 최소유동화 상태에

주의를 기울일 필요가 별로 없다. 실제의 운전에서는 유동화 상태를 유동층에 걸리는 압력강하와 층의 정압을 비교함으로써 층의 유동화 상태를 예측할 수 있다.

4.4 Geldart의 분류 및 이에 따른 유동화 영역

유동층 물질의 크기 및 밀도에 따라 유동화 특성이 크게 달라진다. 이를 체계적으로 구분한 Geldart의 분류를 표 2 및 그림 5에 나타내었다. 유동화 매체의 물성에 의존하지 않도록 유동화특성을 다음의 무차원수로 무차원화한 것을 Geldart분류에 따라 그림 6에 나타내었다.

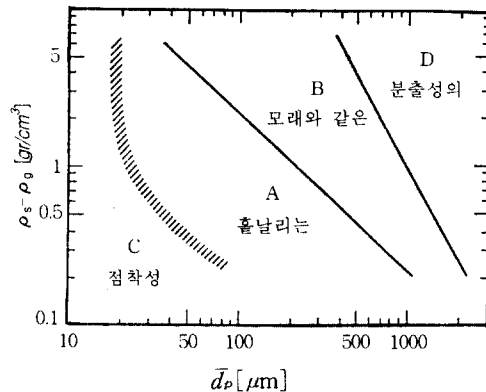


그림 5 입자의 평균직경 및 밀도에 따른 Geldart 분류

$$d^*_p = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (3)$$

$$u^* = u \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (4)$$

유동층소각로에서는 일반적으로 지름이 0.5 mm 전후의 모래를 사용하므로 Geldart B와 D에 속한다. 그러나 상온에서의 저온시험시와 실제 연소시에서의 공기의 밀도 및 점도가 크게 달라지므로 이를 설계시에 고려하여야 한다. 예를 들어 설명을 하면, 직경이 큰 모래의 경우 상온에서는 D군(group)의 특징을 보이나 연소시의 고온하에서는 B군의 특성을 보인다. 따라서 일반적으로 소각로의 설계에 대하여는 B군을 기준으로 하여 이에 대한 현상을 이해하고 설계하면 되겠다.

4.5 공기분산장치

유동층내에 균일한 연소용 공기를 공급하고 원하는 유동화상태를 유도하는 것은 전적으로 공기분산장치(air distributor)에 크게 의존한다. 따라서, 많은 경우에 있어 선진국의 각 회사마다 고유의 노-하우(know-how)가 있고 이를 특허로 보호하고 있어 이에 대한 고유기술의 개발이 필요하다. 공기분산장치는 그림 7에 나타난 것처럼 여러 종류가 있다. 공기분산장치의 설계시 고려사항⁽⁸⁾은 균일하고 안정된 유동화 유도, 층내물질 마모 및 층내 튜브 등의 침식 최소화, 분산장치의 구멍을 통한 층물질의 역류 방지 및 구멍막힘 최소화, 운전 속도 및 운전 온도 범위에서의 정상적인 유동화 보장, 분산장치 부근에서 정체영역(dead zone) 최소화, 과도한 압력강하의 최소화, 열응력 등에 저항성, 저가, 조립 및 분해의 용이함 등이다. 이에 따른 일반적인 분산장치 설계지침은 다음과 같다.

- (a) $\Delta p_d = 0.2 \sim 0.4 \Delta p_b$
- (b) $30 < u_{or} < 60 \text{ m/s}$

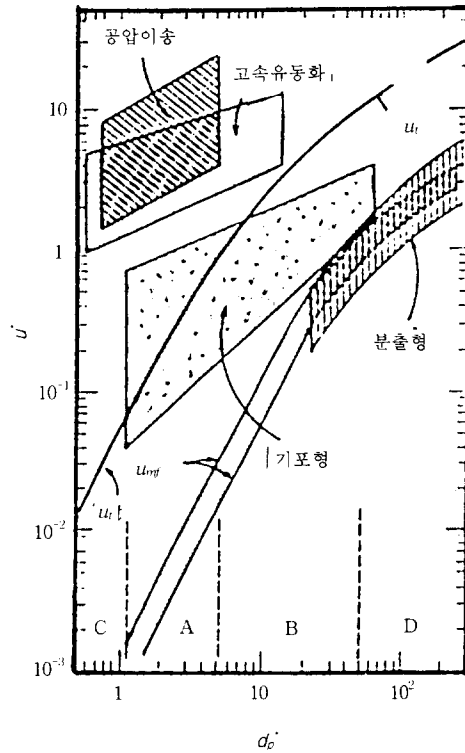


그림 6 Geldart 분류에 따른 유동화영역

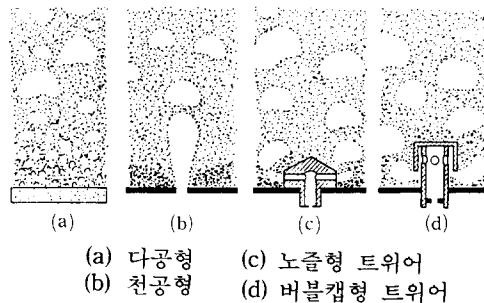


그림 7 분산장치의 종류 및 분산장치로부터 분출된 기포의 모습

- (c) 개구도 (0.5~3%)
- (d) Tuyere 노즐에서 오리피스에 의한 압력강하 (0.48 mm 모래 : 37°)

여기서, Δp_d 는 분산장치에 의한 압력강하를 u_{or} 는 오리피스에서의 유동화 공기의 분사속도를 의미한다. 그림 7(c)와 (d)의 공기 유

입구 부분에서는 압력강하용 오리피스가 달려 있다. 이는 설계기준(b)를 만족하면서 (a)를 동시에 만족하기 위함이다. 연구실 규모 실험에는 일반적으로 고려치 않아도 되나, 실규모에서는 이와 같은 압력강하용 보조장치가 필요하게 된다.

4.6 기포유동층에서 기포의 특성⁽⁶⁾

기포의 특성은 액체에서의 기포와 유사하나, 기포와 농후상을 분리하는 막이 없어 물질이동이 원활하여 반응물 및 물질이동률이 높게 된다. Geldart A군과 B군에 대한 기포의 특징은 빠른 기포상승속도($u_{br} > u_f$)와 기포주위에 연기(cloud)와 후류(wake)가 생성된다는 것이고, Geldart B와 D에 대한 기포의 층내 특징은 느린 기포상승속도($u_{br} < u_f$)이고 연기 및 후류가 없다는 것이다. 이를 그림 8에 기체의 유선과 함께 나타내었다. 여기서, u_{br} 은 기포의 상승속도를, u_f 는 유동사 사이로 흐르는 기체의 실제속도(emulsion velocity)를 나타낸다.

분산판으로부터 발생된 기포는 합체와 분열을 거듭하며 성장한다. B군과 D군에 대하여 기포의 성장을 다음식으로 표현할 수 있고, 이를 그림 9에 나타내었다.

$$\frac{d_{bm} - d_b}{d_{bm} - d_{b0}} = \exp(-0.3Z/D_{bed}) \quad (5)$$

여기서, d_{bm} 는 기포의 이론적 최대크기를, d_{b0} 는 오리피스에서 생성된 기포의 초기 크

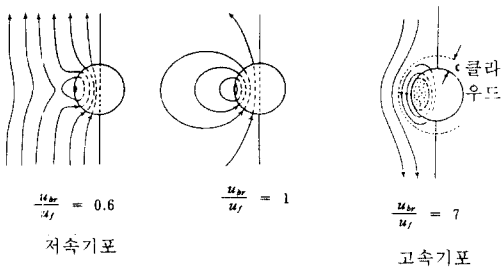


그림 8 Davidson의 기포모델

기를, Z 는 분산장치로부터의 위치, D_{bed} 는 유동층의 내경을 나타낸다. 분산장치로부터 생성된 기포가 성장을 하며, 층의 표면으로 이동하고, 이와 같은 기포의 이동에 따른 유동사의 거동을 그림 10에 나타내었다. 즉,

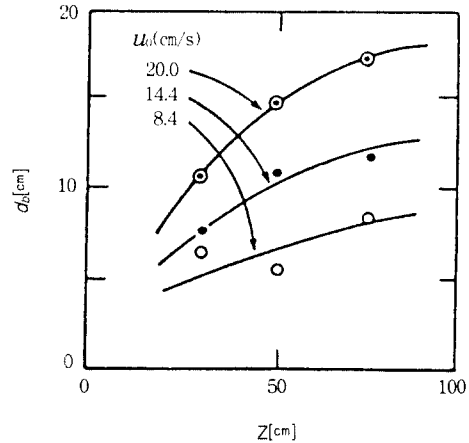


그림 9 Geldart B 군의 유동사에서의 기포의 성장

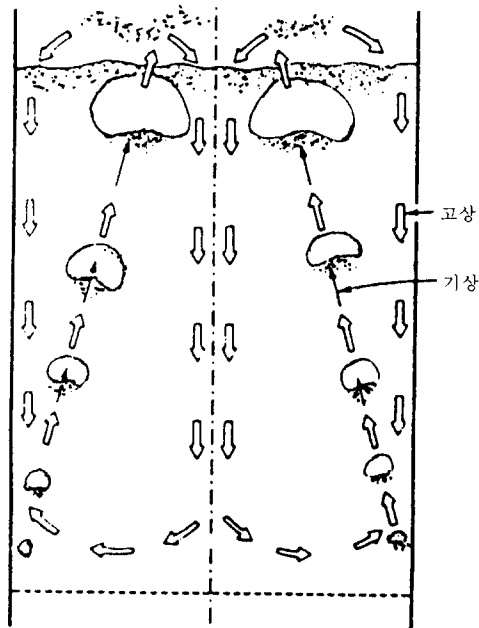


그림 10 유동층내에서의 기포의 발달과 유동사의 거동

유동사의 거시적 유동은 기포의 성장과 밀접한 관계가 있다.

4.7 입자의 비말동반 유출(Entrainment and Elutriation)

입자의 최종속도(u_t : terminal velocity)가 공탑속도(u_o : superficial velocity)보다 작은

경우의 입자뿐만 아니라 생성된 기포가 유동층 상부에서 터지면서 유동층 물질을 분사하여[그림 11(a)] 유동층 상부의 자유유동영역(freeboard region)에서는 다양한 크기의 입자들이 존재하게 된다. 그러나 일정높이 이상에서는 기체의 마찰력을 이길 수 있는 크기의 입자는 존재치 않게 되므로 평균농도가 그림 11(b)에서처럼 일정하게 된다. 이를 이동분리높이(TDH : transport disengaging height)라 한다. 실제의 경우 자유유동영역의 높이를 TDH만큼 높이지 않는 경우가 많다. 이는 소각로의 크기가 커짐에 따라 건설비가 증가하기 때문이라 사려된다. 따라서 자유유동높이가 TDH보다 낮은 경우에는 다량의 층물질 및 미연연료가 비산방출될 확률이 높아지므로 집진기의 부담이 커질 뿐만 아니라, 연소효율의 저하를 가져오게 된다. 이를 극복하기 위하여 순환유동층의 개념이 필요하게 되었다.

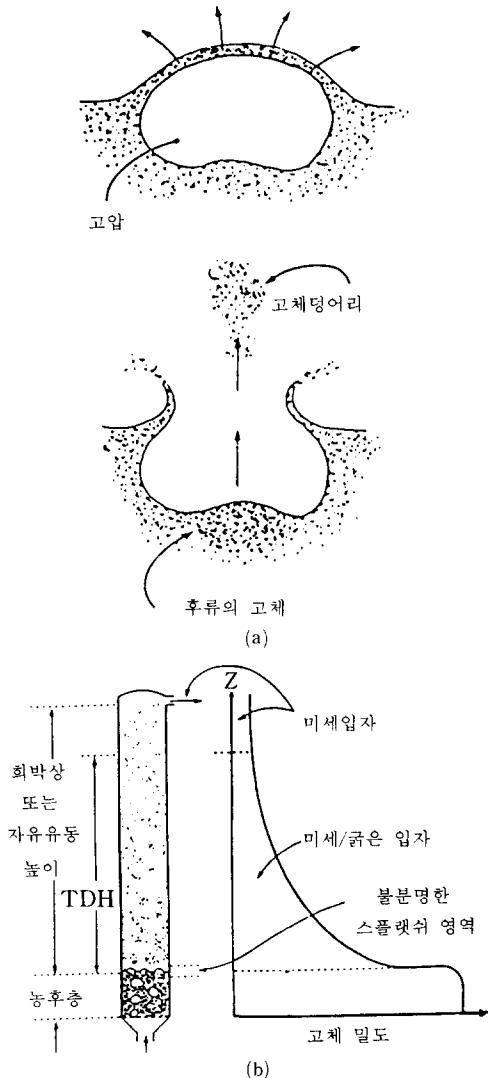


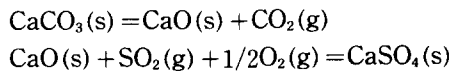
그림 11 유동사의 분출 메카니즘과 유동층과 자유유동영역에서의 밀도분포

5. 배기가스 제어

유동층 소각로의 특징은 높은 연소효율(85~98%)에 따른 시스템 효율이 높다는 것 이외에도 연소가스중 생성된 NOx 및 SOx를 로내에서 상당부분 제거할 수 있다는 것이다. 따라서, 다른 소각장치에 필수적인 배연탈황장치나 배연탈질장치를 설치하지 않아도 되므로 비용을 절감할 수 있다.

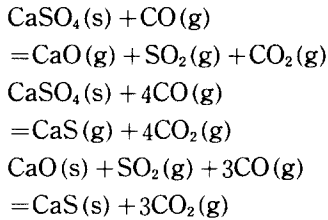
5.1 로내탈황

석회석이나 백운석(dolomite)을 로내에 직접 투입하므로 다음과 같은 탈황반응을 유도한다.



석회석의 탈황성능은 소성(calcination)된 상태에 강하게 의존한다. 또한 압력이 1~5기

압에서는 압력에 따라 현저히 증가하지만, 그 이상의 압력에서는 현저한 증가를 보이지 않는다. 특히 유동층연소에서 환원역이 존재하고, 생성된 CaSO₄의 환원분해반응이 진행될 가능성이 높고, 이는 온도나 환원가스 조성에 따라 다음의 반응이 진행된다.



이 계에서 수소가 CO에 대체되어 환원제로 존재할 경우, CaSO₄의 분해속도는 2~3배 빠르게 된다. CaS의 산화는 산소농도에 따라 아래와 같게 된다.

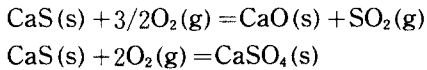


그림 12는 CaSO₄, CaO, CaS의 상평형도⁽⁹⁾를 나타낸다. 이 상평형도에서 800℃, 1,050 ppm SO₂의 조건으로 CO/CO₂의 비가 0.1 이상인 경우에는 CaSO₄는 CaS로 직접 이행하지만, SO₂의 농도가 낮은 경우에는 CaO

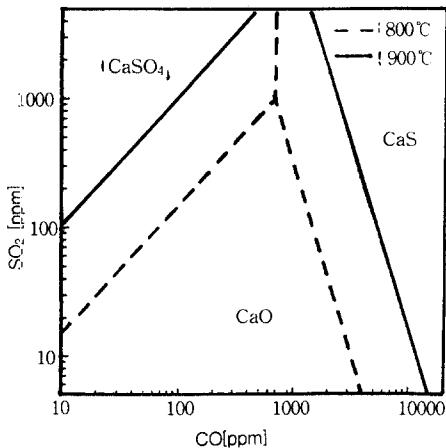


그림 12 CaO, CaSO₄, CaS, SO₂, 와 CO의 상평형도

를 경유하여 이행한다. 그림 13과 14에서는 순환유동층 연소의 경우 온도 및 배기가스중의 과잉산소농도에 대한 SO_x의 배출량을 나

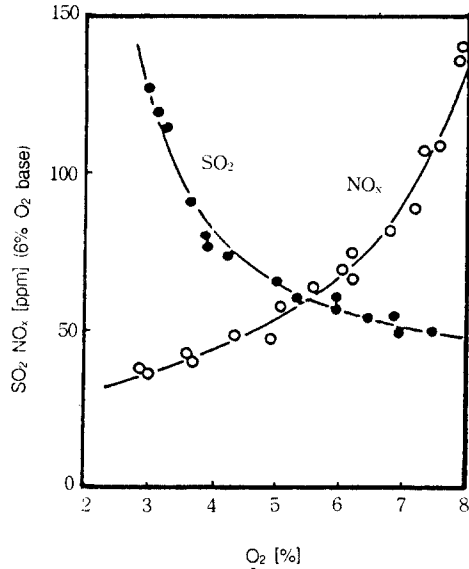


그림 13 O₂의 농도에 따른 NO_x와 SO_x의 배출농도

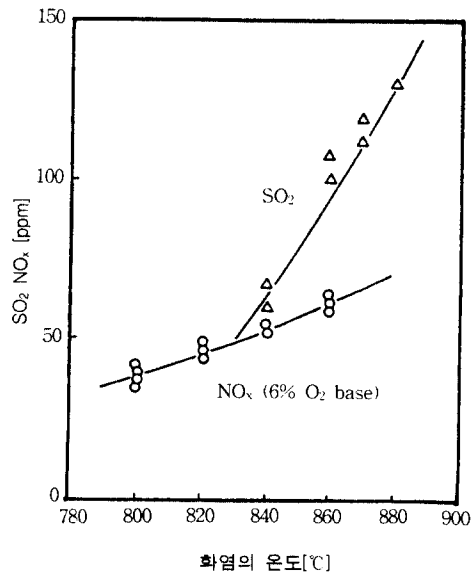


그림 14 화염의 온도에 따른 NO_x와 SO_x의 배출농도

타낸다.⁽¹⁰⁾ 탈황능력에 중요한 인자는 Ca/S의 몰비이다. 기포유동층의 경우 탈황제의 입경을 너무 작게 하면 탈황제가 연소가스에 동반되어 유동층내 체류시간이 짧게 되어 탈황률이 악화된다. 일반적인 BFBC는 Ca/S를 4~5로, CFBC는 2~3으로 운전할 경우에 75~95%의 탈황률을 얻고 있다. Ca/S를 줄이기 위한 노력의 일환으로 Ca를 첨가한 석탄(Ca exchanged coal)을 탈황제로 사용한 경우 CFBC에서 Ca/S비(탈황률 90%)를 1.2까지 줄일 수 있다는 연구가 최근에 발표되었다.⁽¹¹⁾

5.2 로내탈질

연소에서의 NO_x의 생성은 공기중의 질소를 근원으로 하는 열-NO_x와 연료중의 질소분을 근원으로 하는 연료-NO_x로 분류된다. 유동층에서는 연소온도가 비교적 낮기 때문에 열-NO_x가 차지하는 비율이 낮고, 연료가 농후한 연소영역에서 생성된 즉발-NO_x(prompt-NO_x) 및 연료중의 질소로부터 생성된 연료-NO_x가 주류를 이룬다.

기포유동층에서는 공극이 좁은 농후층에서 휘발분은 타기 어려워 기포중에서 연소되고, 고정탄소분은 농후층에서 연소된다고 생각한다. NO는 공기가 과잉으로 존재하는 분산판근처 및 기포내에서 급격히 생성되고 이후 감소하면서 자유유동에 방출되어 점차 감소하는 경향을 보인다. 연소시 생성된 고정탄소분(char), NH₃, HCN, CN, CO 등이 고정탄소분의 표면이나 세공내에서 NO를 환원하고 자유유동영역에 방출된 후에도 이들의 성분은 NO의 저감에 효과를 보인다. 이것은 유동층연소의 특징적인 거동이며, 유동층연소에 의한 NO_x 배출치를 억제하기 위하여는 자유유동영역에서의 NO_x의 분해를 충분히 고려하는 것이 중요하다. 2단연소에서는 1차공기로 탈황반응에 지장을 주지 않을 정도의 이론양보다 적은 공기로 연소가 이루

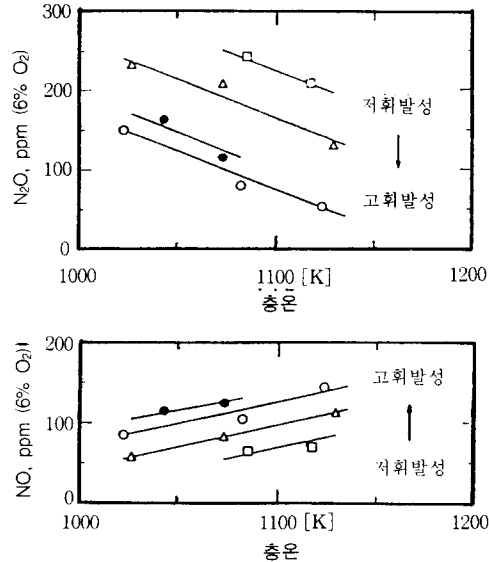


그림 15 N₂O와 NO의 생성에 대한 온도와 연료의 휘발성의 영향

어지도록 하면, 자유유동영역에서 앞서 언급한 바와 같이 NO의 감소를 얻고 있다. 이외에 제안되고 있는 유동층 연소에서의 NO_x의 저감법으로는 배기가스 재순환법, 암모니아 주입법, 2단 유동층법 등이 있다.

유동층연소에서 저 NO_x화가 진행되는 한 현으로 N₂O의 생성이 최근 문제로 대두되고 있다. N₂O의 영향은 온난화 및 성층권에서의 오존층 파괴를 들 수 있다. 그림 15에서 나타난 것과 같이 NO는 층온도와 함께 증가하는 것과는 반대로 N₂O는 감소한다는 것을 알 수 있다.⁽¹²⁾ N₂O의 연구는 이제 막 시작한 정도이며, 금후의 연구과제가 되고 있다. 아주 최근의 연구에 의하면 층물질은 γ -Al₂O₃로 사용한 경우 이의 촉매작용으로 N₂O의 배출이 감소될 수 있다고 발표되었다.

6. 순환유동층과 가압유동층

6.1 순환유동층

그림 16에 순환유동층(circulating FBC:

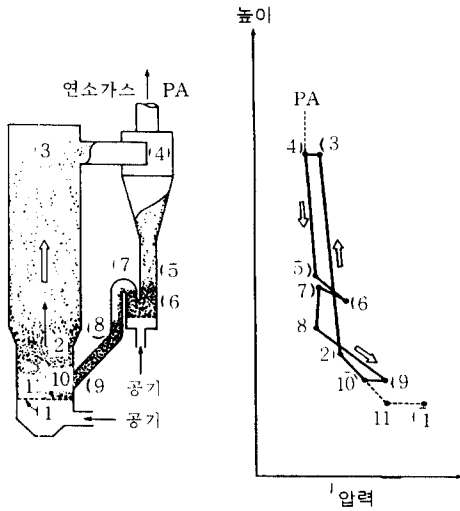


그림 16 순환유동층(CFBC)과 압력분포

CFBC)의 개념도를 보인다. 특징은 가스유속이 4~8m/s로 비교적 높은 것이다. 입자의 순환에 의한 긴 입자 체류시간, 큰 슬립 속도는 입자와 가스간의 물질이동 및 전열을 크게 하고, 연소로 전영역이 반응영역이 되므로 높은 연소효율 및 탈황률을 보인다.⁽⁷⁾ 따라서 낮은 Ca/S로의 운전이 가능하며, 고체폐기량의 저감도 가능하게 된다. NOx의 배출치에 대하여는 저온 연소에 의한 열-

NOx가 낮게 억제되고, 연료-NOx는 2단연소와 연소로 전체에 환원제가 되는 미연 고정탄소분이 분포되므로 기포유동층보다 더 낮게 되어 50~200 ppm까지 가능하다. 표 3은 일본의 기술제휴현황(CFBC 관련)으로서 참고로 첨부하였다.

6.2 가압유동층

가압유동층(pressurized FBC: PFBC) 연소보일러는 로내압을 6~20기압의 가압하에서 연소시켜 고온고압의 연소가스에 의해 가스터빈을 구동하고, 전열면을 통하여 회수한 열로 증기를 발생시켜 증기터빈을 구동함으로써 복합 사이클을 이루므로 송전단 효율은 40~42%까지 얻는다. 이는 종래의 미분탄 화력에 비해 5% 이상의 효율이 높은 것이다.

한편, 높은 압력이라도 유동층내 전열면의 전열계수가 현저히 향상되는 것이 아니므로 소요되는 크기의 전열관을 층내에 수용하기 위해 층높이는 필연적으로 높아야 한다. 보통 3.5~4m가 된다. PFBC는 오래된 화력발전소의 재동력화에도 적격이며, 종래출력의 1.2~1.3배로 상승되어 미국의 CCT 프로그램으로 운전 및 경제성이 평가되고 있다.⁽¹⁾

PFBC의 개발에는 층내전열면이나 로내전열면의 침식이나 부식에 의한 마모, 더불어 가스터빈 날개에 영향을 미치는 배가스중의 입자나, Na, K, Cl 등의 제거(고온가스 청정화) 기술 등 해결하여야 할 문제가 남아 있다. 대부분의 PFBC는 기포형이지만 순환형도 개발중에 있다.

최근에는 차세대의 PFBC로서 석탄의 부분가스화와 가압유동층 연소를 조합시킨 토핑 사이클 발전⁽¹³⁾이 관심을 끌고 있다. 열효율이 47~52%에 달한 것으로 예상된다. 영국에서 발표되고 있는 토핑 사이클의 일례를 그림 17에 나타내었다.

표 3 일본의 CFBC의 기술제휴 현황⁽⁸⁾

일본의 회사	기술제휴회사
Pyropower Japan	Ahlstrom
Kawasaki 중공업	VKW(DBE)
신일본제철	KDO
NKK	Steinmuller
Hitachi	Studsvik
IHI	Foster Wheeler
Mitsubishi	Lurgi
Mitsui Zosen	Battelle

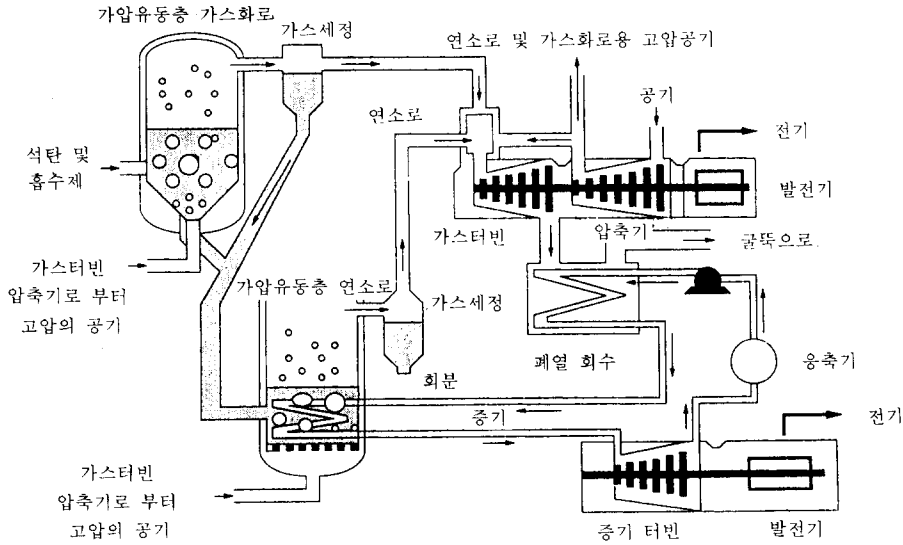


그림 17 차세대 가압유동층(PFBC)발전-토픽사이클 발전

7. 도시 및 산업폐기물 소각장치의 예

유동층에서 쓰레기를 소각하는 기술은 선진국에서는 오래전부터 사용되어져 비약적인 발전을 하고 있다. 그러나 국내에는 1994년에 성남에 도시쓰레기용 유동층 소각로가 일본의 기술 도움을 받아 설치되었으나 운전초기에 운전미숙과 전처리 미비로 인하여 약간의 어려움이 있었다. 현재에는 전문화된 인력으로 보강되어 운전이 양호한 상태이다.

이 글에서는 일본의 도시쓰레기 및 산업폐기물용 소각로중 대표적회사의 사례(7)를 기준으로 기술의 변천과 배경, 그리고 금후의 전망에 대하여 설명한다.

7.1 선회류형 FBC

일반적인 유동층내에서 모래의 유동은 상하운동이 주체이다. 이 때문에 모래중에서 쓰레기의 수평방향의 확산효과가 적어, 쓰레기를 파쇄하여 확산하기 쉽도록 공급하는 것이 필요하다. 그림 18의 선회류형 유동층소

각로는 쓰레기의 파쇄대신에, 구조적으로 유동층내의 혼합 속도 증가를 유도하여 안정적인 연소를 유지하도록 한다. 따라서 쓰레기의 정체가 없고 크링커 트러블은 발생하기 어렵다. 또한, 모래가 경사져서 불연물이 출구를 향하여 모래와 함께 이동하기 때문에

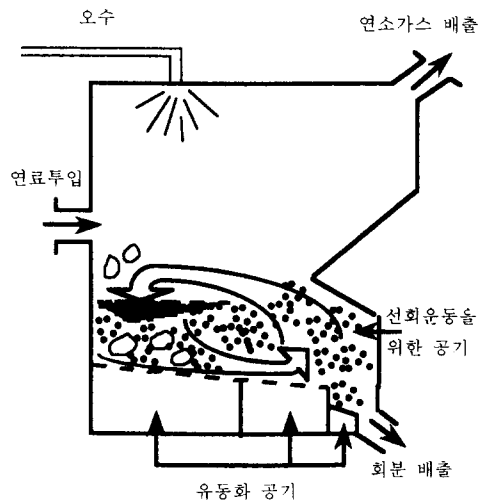


그림 18 선회류형 유동층 폐기물 소각로의 개략도

불연물의 발출이 용이하다.

7.2 무파쇄 선회류형 FBC

앞서의 선회류형 FBC를 무파쇄방식으로 개선한 TIF 무파쇄 선회류형 FBC를 그림 19에 나타내었다. TIF(twin interchanging fluidized-bed)는 이동층(moving-bed)과 유동층(fluidized-bed)의 두종류의 유동상태에 있어 순환류(interchanging)를 만든다는 의미이다. 여기서 쓰레기를 작은 조각으로 파쇄할 필요가 없으므로 파쇄기가 불필요하게 되고, 또한 로체구조의 개량에 의해 대형화도 가능하게 되었다. 이 기술에 의해 과거에 연소부적합하다 판단되어 매립하던 쓰레기도 연소가능하게 되어, 그 결과 미이용 연료를 에너지화하고, 매립지의 수명도 길게 할 수 있다. 특히 저발열량의 쓰레기 소각에 적합하다. 이 특성이 확인되어 일본의 기계학회상, 과학기술청 장관상 등을 수상하였다. 이후 가스냉각실과 소각로를 일체화하는 가스냉각형 일체형 TIF로 개량되어 가스냉각실의 소형화, 완전증발 스프레이의 실현 및 가스냉각실 바닥의 회배출기구가 필요없는 효과를 얻고 있다.

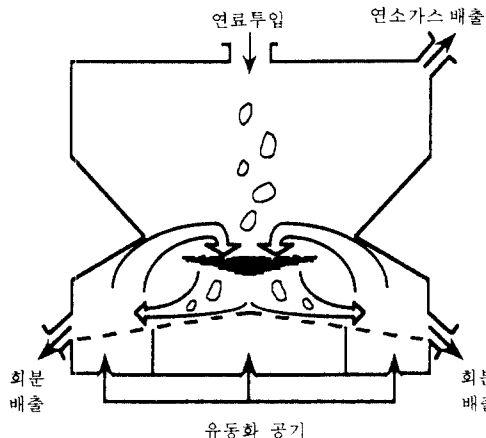


그림 19 TIF 무파쇄 선회류형 유동층 소각로의 개략도

7.3 내부순환유동층(ICFB)

유동층보일러의 개발이 활발히 이루어진 것은 다양한 연료에의 융통성과 로내 탈황 및 탈질 이점 때문이었지만, 실제로는 NOx, SOx 등의 제어에 있어 연료의 제약이 있고, 또한 연료투입계통의 복잡함, 부하변동제어의 어려움이 대두되곤 했다. 그리고 도시쓰레기의 발열량이 해마다 높아져서 층운을 유지하기 위하여 물을 뿌리는 제어가 필요하게 되어 열을 헛되이 버리게 되고, 배가스량이 증대되어 설비가 과대하게 되었다. 따라서 이를 극복하기 위하여 내부순환유동층(ICFB: internal circulating fluidized bed) 보일러가 개발되어 도시쓰레기에서 석탄까지 임의로 연료를 쓸 수 있고 자유자재로 층운 제어 및 부하변동제어를 가능케 하였다. 이 ICFB의 개념도가 그림 20에 나타나 있다. 연소실을 순환류에 의하여 효율적인 연소를 유도하는 주연소실과 열을 회수하는 열회수실로 구분지었다. ICFB의 열회수실의 이동층에서 총괄열전달계수와 유동화속도와와의 관계를 그림 21에 개략적으로 나타내었다. 일반적인 FBC에서의 총괄열전달계수는 유동

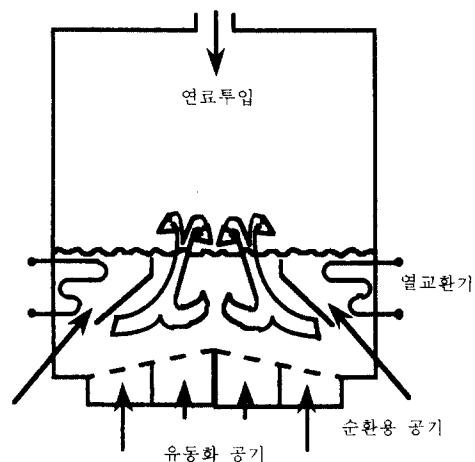


그림 20 내부순환 유동층(ICFB)의 개략도

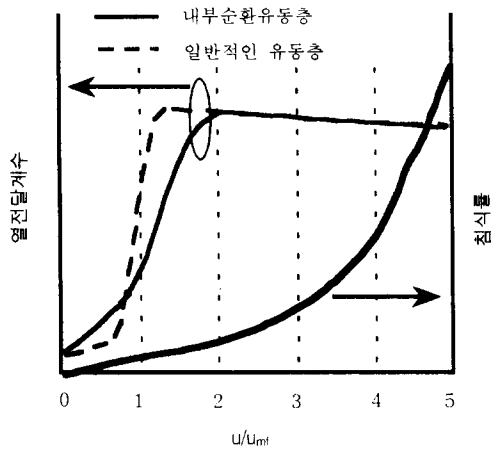


그림 21 유동화속도에 따른 총괄열전달계수 및 침식속도

화 속도 $u/u_{mf}=0\sim 1$ 의 범위에서는 완만히 증가하나 $u/u_{mf}=1$ 이후에서는 급격히 증가하고 $u/u_{mf}=2$ 이후에서는 변화가 작다. 층내의 전열관의 침식속도는 그림에서와 같이 유동화속도의 약 3승에 비례한다. 그런데 실 규모의 유동층내에서의 유동화속도는 u_{mf} 의 4~5배 이상으로 운전을 하므로 유동층내에서의 전열관이 침식이 큰 문제가 되고 있다. 그러나 ICFB에서의 열회수는 연소실과 독립된 열회수실에서 이루어지고 이곳을 저속유동화함으로써 전열관의 침식속도를 낮도록 유지한다. 더욱이 총괄열전달계수는 기존의 유동층에서 보다 선형적으로 증가하기에 유동화 속도를 조절하므로 열회수량 및 유동층의 온도를 임의로 제어할 수 있다.

ICFB의 실례로는 Nissan Oppama 공장⁽¹⁴⁾을 들 수 있다. 이 공장에 ICFB가 설치되기 전에는 고형폐기물은 스토킨식 소각로로, 슬러지와 액체폐기물은 회전로식 소각로로, 플라스틱 등의 난연성 폐기물은 기타 방법으로 처리하였으나 현재에는 ICFB로 모두 처리하고 있고(43.92 t/d의 고형, 42.48 t/d의 슬러지, 21.6 t/d의 액체 폐기물), 408 t/d의 0.98 MPa 포화증기를 생산하여 부차적인 이득을 얻고 있다. 2차공기의 2단연소 및 고정

탄소분의 재순환을 통하여 NOx를 136 ppm으로, 백운석을 투입하여 SOx를 31 ppm으로, 백하우스에 소석회를 투입하여 HCl를 35 ppm으로 배출하고 있다. 집진장치는 맥동분류(pulse jet) 백하우스를 사용하고 있고 연소효율이 99.95%에 달한다고 보고되었다.

이 ICFB를 응용하여 플라스틱류와 석탄의 혼합연소로, CFBC와 ICFB를 복합한 여러 가지의 새로운 모델들이 개발되고 있다. 이들의 특징은 고밀집되고, 중유보일러와 동등한 부하제어가 가능하고, 또한 NOx와 SOx의 배출이 50 ppm 이하이다.

7.4 하수슬러지 소각용 FBC

일본에서는 하수슬러지용 FBC가 1992년까지 약 100기가 건설되어 운전되고 있다. 하수슬러지의 특징은 수분이 중량비의 60~85%로서 대부분의 경우에 있어 보조연료를 필요로 한다. 규모는 작은 것부터 250 t/d까지 있고, 250t/d급 소각로의 자유유동부 직경은 약 8m 정도된다. 보조연료를 절약하기 위해 연소용공기를 대략 700~900 K까지 예열하고 있고, 수분이 많아 연소성이 떨어지므로 노상부하가 200~270 kg/m²h로 운전되고 있다. 일반적인 FBC와 비교하면, 하수슬러지용 FBC에서는 공기의 예열온도가 상당히 높고, 노상부하가 상당히 작은 편이다(표 1 참조). 보조연료를 더욱 절감하기 위하여 슬러지를 건조한 후 소각하는 방식도 검토되고 있다. 이 경우는 보조연료를 절약할 뿐만 아니라, 유동층소각로의 규모가 줄어들게 되고, 연료의 연소성도 크게 증가하게 되므로, 경제성 및 운전성 등 여러 측면에서 장점이 있다. 그러나 이 경우 건조기로부터의 고수분함유 배출가스의 환경적 처리를 반드시 고려하여야 한다. 하수 슬러지를 처리하기 위하여 열분해 또는 고온 용융 등의 공정이 개발되고 있으나, 현재까지는 소각이 제일 적합한 것으로, 소각기법중 유동

층 소각법이 적절한 것으로 판단되고 있어 이의 고효율화에 박차를 가하고 있는 실정이다.

8. 유동층 소각로의 설계

유동층 소각로의 설계는, 일반적으로 기계공학이론으로 해결할 수 있는 부분도 있지만, 많은 부분에 걸쳐 경험에 의존하고 있다. 중요한 설계인자는 일반적으로 실험실 규모의 작은 실험에서 얻거나, 또는 실규모 소각로의 운전경험으로부터 얻을 수 있지만 매우 제한적이다. 보다 더 체계적으로 설계를 하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으나, 실제 상황에서 적용하기란 용이한 일이 아니다. 유동층에 대한 연구가 진행되어 기본유동현상을 이해하고 정리하는 데에는 세계적으로 무려 30 년의 세월이 소요되었고, 일본의 경우 유동층기술을 이해하여 설계변경을 조금이라도 수행하기까지는 20년의 기간이 소요되었다. 유동층 반응기보다는 유동층 소각기술이 비교적 단순하다고 할 수 있지만, 공해물질 제어, 다양한 연료의 적응

성, 부하조절 등의 측면에서는 아직도 많은 연구가 필요하고, 강화되는 환경규제를 따라 가려면 지속적인 연구가 필요하다. 우리나라의 경우 이제 시작하는 단계로서 세부적인 연구를 수행할 수 있는 연구진은 많지만, 종합적인 시스템설계 경험이나 운전경험이 상당히 부족한 것이 사실이다. 앞서서도 언급한 것과 같이 미래의 환경규제를 만족할 만한 기술중의 하나로 유동층 소각기술이 유력시되어 전세계적으로 많은 투자가 이루어지고 있기에 우리도 현재에 만족하지 말고 앞선 기술을 개발하여야 할 것이다.

유동층 소각로를 설계할 때 기본적으로 생각할 수 있는 과정은 다음과 같다. 발주자의 요구, 환경에의 적합성, 경제성 등의 제약조건을 고려한 후, 유동화속도, 압력, 온도 등의 운전조건을 설정하고 열회수장치, 모듈의 수, 연료투입방법 등의 설계조건에 따라 소각로의 특성 및 성능을 예측한다. 즉 이와 같은 개념적인 설계를 수행하여 대략의 규모를 산정한다. 소각로 설계의 경험이 많은 경우는 기본설계, 상세설계로 직접 이어질 수 있으나, 경험이 부족하거나 새로운 모델일

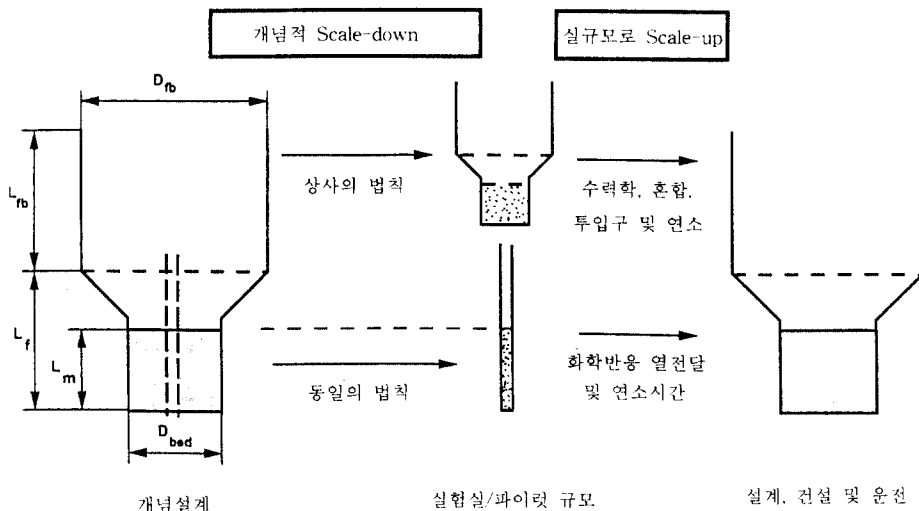


그림 22 유동층소각로의 일정비율 확대

경우는 기존의 경험 및 이론으로써 정확한 소각능력을 판단하기 힘들므로 적절한 방법으로 일정비율로 축소하여 실험실 규모의 소각로를 설계제작하여 보다 실질적인 예측을 한다. 실험실 규모의 소각로의 운전으로부터 소각로의 성능을 파악하고, 일정비율 확대하는 기법으로 실규모의 소각로를 설계한다. 이렇게 함으로써 많은 설계연구비용을 절감할 수 있을 뿐 아니라, 실규모의 소각로를 운전할 때 발생하는 많은 문제점을 소규모의 소각로의 운전으로부터 파악하여 해결할 수 있어 비용면에서나 시간면에서 매우 경제적이다.

일정비율 확대 또는 축소시의 기본 법칙⁽¹⁵⁾으로는 동일의 법칙(identity rule) 및 상사의 법칙(similarity rule)이 있다. 동일의 법칙으로는 유동층의 높이를 일정하게 하고 층의 면적을 줄여 실험실 규모의 실험소각로를 제작하여 운전하는 것으로 주로 탈황제의 성능 등 특정반응을 관찰하는데 적용된다. 그러나 이와 같은 실험을 제대로 수행하기는 슬러징의 발생 때문에 매우 어렵다. 상사의 법칙으로는 다른 분야에서와 같이 유동층내에서의 유동 및 제반현상에 대하여 무차원수로 설명하여, 이를 서로 상관시킴으로써 일정비율확대 또는 축소를 할 수 있다.⁽¹⁶⁾ 유동층내에 매우 복잡한 수력학적, 열화학적 현상 때문에 기존의 이론 이외에도 더 많은 연구개발이 필요하다. 이 일정비율 확대와 축소의 개념도는 그림 22에 나타내었다.

9. 맺음말

유동층소각기법은 우리가 직면하고 있는 도시 및 산업폐기물의 위생소각에 적절한 방법일 뿐 아니라, 고효율의 연소기법이기에 생산된 전력에너지당 CO₂ 배출을 최소화하는 기술로서 석탄이용 화력발전엔 널리 이용되고 있다. 특히 미래의 강화된 환경기준을 만족할 수 있는 유력한 기술이지만, 고도의

첨단기술이 아니므로 우리의 노력여하에 따라 좋은 결실을 맺을 것이라 생각된다.

기포형 FBC는 국내에서 외국기술을 도입하여 이해하거나 자체적인 연구의 결과로 기본 설계를 할 수 있는 단계에 도달하여 있고, 순환형 및 가압형 FBC는 기초연구단계에 있는 실정이다. 따라서 일천한 경험과 노하우가 많이 축적되어 있지 않는 현 상황에서는 기술의 보호 및 보안보다는 기술의 공동 개발 및 보유, 그리고 저공해화와 동시에 고효율화를 위한 지속적인 연구개발의 의지가 더욱 필요하다. 보다 쾌적한 미래와 확고한 기술자립을 위한 산·학·연의 끊임없는 노력과 정부 및 국민의 과감하고 적극적인 동참이 필요하다.

후 기

이 글은 상공자원부에서 시행한 공업기반 기술사업의 일부로서 관계자 여러분과 동사업에 같이 참여를 하셨던 홍익대, 동부건설, 한국코트렐의 연구원 여러분께 깊은 감사를 드립니다. 또한 자료수집 및 조언 등 도움을 주신 많은 분들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Weth, G. et al., 1991, *Proc. 11th Int. Conf. on FBC*, p. 1425.
- (2) 권철홍, 1994, "Green Round에 대한 수송부분의 대책," 에너지 R&D, 한국에너지기술연구소, p. 1.
- (3) 김병채, 1994, "국내 폐기물의 소각처리 현황," 대한기계학회지, 제34권 제8호, pp. 605~616.
- (4) 이진욱, 1994, 대한기계학회 1994년도 에너지 및 동력공학부문 학술강연회, p. 5
- (5) 손진영, 1994, "소각플랜트 엔지니어링," 대한기계학회지, 제34권, 제8호, pp. 626~631.

- (6) Kunii, D. and Levenspiel, O., 1991, Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann.
- (7) 일본화학학회, 1992, 화학공학의 진보, 진서당.
- (8) Basu, P., 1984, Fluidized Bed Boilers: Design and Application, Pergamon Press.
- (9) Hansen, P. F. B., et al., 1991, *Proc. 11th Int. Conf. on FBC*, p. 73
- (10) Mii, T., et al., 1991, *Proc. 11th Int. Conf. on FBC*, p. 373
- (11) Fujiwara, N., et al., 1994, *Fluidization '94, Fifth China-Japan Symposium*, p. 203
- (12) Moritomi, H., et al., 1991, *Proc. 11th Int. Conf. on FBC*, p. 1005
- (13) Minchener, A. J., et al., 1993, *Proc. 12th Int. Conf. on FBC*, p. 1129
- (14) Durnate, J. L., et al., 1993, *Proc. 12th Int. Conf. on FBC*, p. 743
- (15) Horio, M., et al., 1986, *AIChE J.*, Vol. 32, p. 1466
- (16) 김종억 외, 1994, "산업폐기물 유동층 방식 소각장치개발," 상공자원부. 