

유동층 연소로의 원리 및 응용

김 상돈

한국과학기술원 화학공학과

1. 서론

석유자원 분포의 편재성 및 고갈성에 대한 대책으로 석탄에너지 활용 기술에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 석탄은 세계적으로 고루 분포되어 있고 매장량이 풍부하여 석탄의 에너지 전환시 발생하는 공해 문제를 용이하게 처리할 수 있다면 무공해 에너지로서의 고도활용이 가능하기 때문에 급증되는 에너지 수요에 충당될 에너지원으로서 석탄을 활용하는 방안이 대두되고 있다. 그러므로, 석탄의 산업이용 확대와 함께 경제성 있는 새로운 석탄연소 기술개발이 시급히 요청되고 있다.

대체 에너지원으로서 석탄 및 여러 저급원료의 이용에는 다양한 연료에 대해 적용할 수 있는 기술이 요구되며 이에 부합되어 유동층 연소 기술이 한 방법으로 도입되었다. 유동층 연소기술은 분출층 (spouted bed) 으로 부터 시작되었으며 이후 여러 단계의 개선 및 응용을 거듭하여 근래에는 대형 석탄 연소 보일러 및 발전 설비에 적용되는 단계에까지 도달하였다. 유동층 연소기술은 각종 쓰레기, 슬러지 등의 저열량 물질의 우수한 연소효과를 가지며, 연소특성상 공해방지 특성이 우수하여 세계적으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 선진국에서는 이미 대용량의 유동층 연소보일러가 상용화되고 있는 실정이다. 근래에 이르러서는 국내에서도 유동층 연소기술은 주목의 대상이며 석탄의 연소특성을 비롯한 여러 연구가 한국과학기술원 및 한국에너지기술연구소등 일부 학계 및 연구소등에서 활발히 수행되고 있다.

그러므로, 본 고에서는 점차 기술의 진보와 대형화가 이루어져 보급과 응용이 확대되고 있는 유동층 연소기술의 기본적인 원리, 특성 및 기술현황에 대하여 고찰하였다.

2. 유동층의 기본 원리

유동층이란 고체입자가 채워진 층에 기체나 액체를 주입하여 유체와 같은 상태로 조업하는 것을 말한다. 유동층 반응기는 기체와 고체의 접촉을 향상시키고, 빠른 급격한 열전달, 연료 선택의 유연성, 향상된 고체혼합과 물질전달과 같은 특성이 있기 때문에 유동층 공정은 i) 건조, 흡착, 냉각, 냉동, 코팅, 이동, 열 조절, 먼지 여과(filtration), 항온조 등의 물리적 조작과 ii) FCC, oxychlorination, phthalic anhydride 생산과 같은 촉매반응에 사용되는 화학반응기와 iii) 석탄 연소, 석탄 가스화, 소성반응(calcination), 광물 배소(mineral roasting) 같은 무촉매와 에너지 변환공정등에 널리 이용되고 있다.

2.1 유동화 영역

다양한 유동층영역을 Fig. 1 에 나타내었다. 이들 유동화 영역들 사이의 전이는 입자와 기체 물성 뿐만 아니라 공탑속도에 의존하며, 층 직경과 같은 다른 물성들도 유동화 영역의 전이에 중요한 역할을 한다.

Fig. 1 에서와 같이 용기내 다공 분산판(perforated or porous distributor)위에 놓인

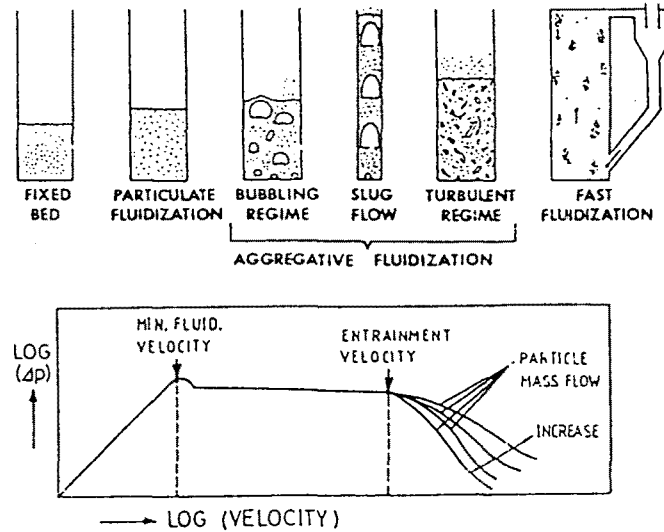


Fig. 1 Flow regimes and corresponding pressure drop in fluidized bed systems

고체층에 기체를 주입하며 기체량에 따라 고체층에서의 압력강하를 측정하면 초기에는 고체의 움직임이 거의 없는 가운데 압력강하는 고체층의 무게와 같아질 때까지 증가한다. 압력강하가 고체층의 무게와 같아지면 이 조건에서는 기체에 의해서 고체에 가해지는 항력(drag force)이 중력과 같아지며 고체들이 흔들리고 상호 움직임을 갖기 시작한다. 이 상태를 최소 유동화 상태라고 부르며 이때 기체의 공탑속도를 최소유동화속도 (minimum fluidized beds)라고 한다. 이후 계속적으로 유속이 증가하면 압력강하는 거의 일정하게 유지되지만 고체층이 팽창되며 고체들은 서로 분리되어 거동하고 층은 전체적으로 액체와 같은 특성을 보이기 시작한다. 아울러 층을 큰 공극의 형태로 통과하는 기체들이 출현하며, 이를 기-액계에서와 유사하게 기포라고 부른다. 이 기포의 거동은 층을 매우 격렬하게 끓는 액체와 같은 형상으로 만든다.

기포는 후류(wake)에 고체를 안고 상승하며, 층표면에서 파괴되어 기체와 고체가 각각 분리된다. 이와 같은 계속적인 거동은 기포에 의한 입자들의 상승과 상승한 기포와

입자에 의해 비워진 공간을 채우는 입자들의 하향거동을 층 내에 형성하며 기포흐름이 많을수록 점차 격렬해져 고체혼합도가 좋아진다. 한편 기체의 흐름은 고체입자의 마모 및 비산유출을 발생시키며, 유속이 증가함에 따라 급격히 증가한다. 이러한 현상을 기포 유동층(bubbling fluidized bed)이라고 한다. 분산판에서 생성된 기포는 상승하면서 서로의 충돌에 의해서 합체되어 성장한다. 기포 합체현상은 유속이 증가할수록 극심해지며 직경이 작은 유동층의 경우 기포의 직경이 층직경과 같아지며 이를 슬러깅(slugging)이라고 한다. 슬러깅(slugging)에 대한 선행조건들은 H/D가 적어도 1.5가 되고 최대로 안정한 기포크기가 층직경이나 이보다 커야 한다는 것이다. 이들 조건이 만족되면 슬러깅이 시작되는 공탑속도는 다음과 같이 주어진다(Stewart and Davidson, 1967).

$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (1)$$

여기서, U_{mf} 는 최소유동화속도, D 는 반응기의 직경이고 g 는 중력가속도이다. 원형관이 아닌 경우, 상당수력직경(equivalent hydraulic diameter)을 D 대신 사용해야 한다. 유속의 계속적인 증가는 슬러깅의 경우 슬러그(slug)를 작은 기포로 분쇄시키거나, 기포층의 경우에는 기포의 빈도수를 증가시켜 층의 균일도를 좋게하며 점차적으로 기포형태의 경계를 흐리게 한다. 이러한 현상을 난류유동층 (turbulent fluidized bed) 이라 한다. 난류층에서는 고체의 농도는 감소하지만 유동층은 계속 유지된다. 난류층에서 기체의 층내 체류시간은 기포층에서 보다 짧지만 기-고체간의 접촉효과는 더욱 우수하여 기포층에서는 유동화시키기에 어려운 점착성 고체의 유동화에 유리한 장점이 있다. 난류유동층에서는 유속이 빠르기 때문에 유체 처리량이 많으며 기포층에 비해서 기상의 역혼합(back mixing)이 상당히 작아진다.

난류유동층으로부터 유속이 더욱 증가하면 입자의 비산유출이 급증하게 되며 유속이 입자 수송속도를 넘으면 층내 모든 입자는 비산유출되어 사이클론에 의한 재순환이 없이는 층내 입자농도를 유지할수 없는 상태에 이른다. 이를 고속유동층(fast fluidized bed)이라고 하며, 층내 입자농도는 고체의 유량에 따라 변화된다. Fig. 1 에서 나타내는 바와 같이 이 영역에서는 유속의 증가에 따라 층내 압력강하가 입자농도의 감소로 인하여 하강하는 경향을 보이며, 그 추이는 고체의 유량이 증가함에 따라 더욱 완만해진다. 고속유동층에서도 고체의 역혼합은 매우 격렬하게 일어나며 이에 의해서 연소로의 경우에는 온도분포가 균일해질 뿐만아니라 주입된 차가운 고체 및 공기가 빠르게 조업온도로 가열될 수 있다.

2.2 기포

기포는 유동층에서 가장 흥미로운 특성중의 하나이다. 기포에 대한 이론적, 실험적 연구는 많이 이루어졌으나, 아직 이것에 대한 근원과 층내에서의 거동에 대하여는 확실한 결론을 내리지 못하고 있다. Fig. 2는 기포 형상을 보여주고 있는데, 여기서 알수 있듯이 기포는 후류 (wake)에 고체를 안고 상승하며 층표면에서 파괴되어 기체는 프리보드를 통해 흐르게 되고 후류의 고체입자는 층표면으로 쌓이면서 분리되는데, 이같은 후류의 고체입자는 층입자의 혼합에 중요한 요인이된다. 따라서 기포흐름이 많을수록 이같은 후류 고체입자의 거동이 더욱 격렬해져 고체 혼합도가 좋아진다. 유동층에서의 기포는 액체에서의 기포와 거의 비슷한 형상을 하고 있으나, 가장 큰 차이는 기포와 농후상 (dense phase) 을 분간하는 막이 없다는 것이다. 즉, 유동층 내에서 기포와 농후사이에 기체의 상호흐름이 이루어지고 있으며, 이것이 기-고 접촉에서는 매우 중요한 요인이 되고 있다. 따라서 기-고 유동층을 설계할 때에는 기포의 흐름, 크기, 거동의 고려가 필요하며 이에 대한 고찰이 필요하다.

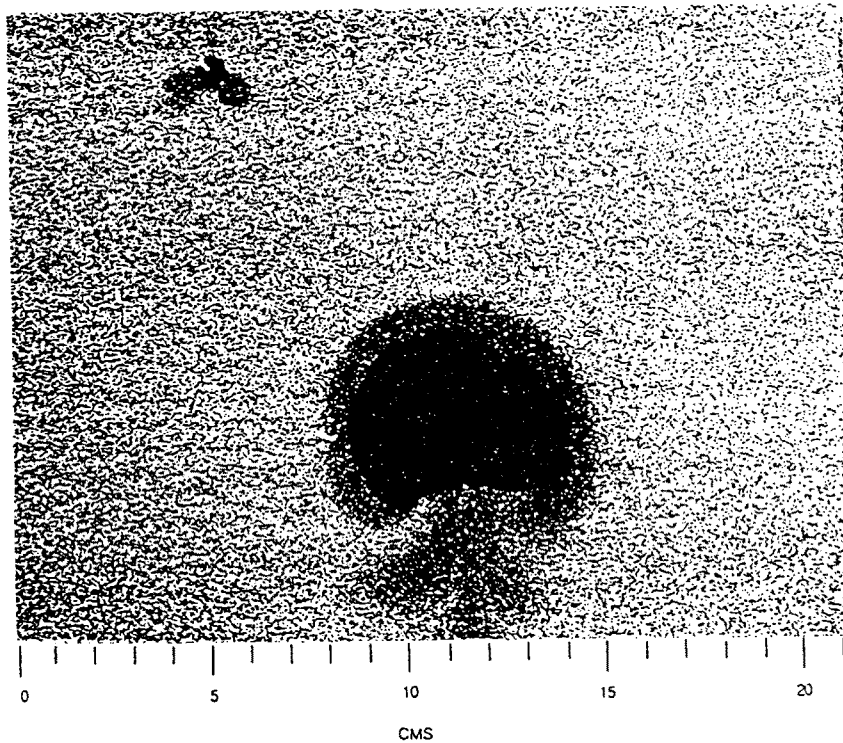


Fig. 2. Bubble shape

기포는 상승하면서 합체와 분열이 일어난다. 기포의 합체는 두개의 상승하는 기포

의 뒤를 따르는 기포가 앞서가는 기포의 후류속으로 들어가면서 가속, 합체가 일어나는 것과 또한 빠르게 상승하는 큰 기포주위의 작은 기포가 흡수됨으로써 더 큰 기포로 성장하게 된다(Clift and Grace, 1985). 기포의 분열은 상승하는 기포에 침두(cups)가 형성되어 이곳으로부터 분열이 일어나며, 분열에 의해 생성된 작은기포(daughter bubble)는 생성된 직후 거의 대부분 다시 큰 기포(mother bubble)로 흡수되는 현상을 나타나게 된다. 이러한 분열의 빈도는 최소유동화속도에 반비례하고, 기포크기에는 거의 영향을 받지 않는다(Toei et al., 1965).

기포상승속도는 실험적으로 측정되어 다음과 같이 표현되었다(Clift and Grace, 1985).

$$U_{br} = 0.711(gd_b)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 d_b 는 기포와 같은 부피를 갖게되는 구의 직경이다.

2.3 입자의 비말동반과 비산유출

일반적인 유동층은 최소유동화 속도 이상에서 조업되므로, 유동층에서 배출되는 기체는 약간의 부유입자(suspended particle)를 운반한다. 이들 고체의 플럭스(flux)를 비말동반(entrainment)이라 한다. 비산유출(elutriation)은 혼합물로부터 미세입자의 분리 또는 제거로 일반적으로 비말동반의 의미와 비슷하게 쓰여지고 있다. 유동층 설계시 비말동반되는 입자분포, 비말동반속도, 층 형상, 기체흐름속도, 그리고 기체의 배출되는 위치 등을 아는것은 중요하다. 유동층은 높이가 증가할수록 고체의 밀도가 감소하는 상부 희박층(lean)또는 분산상(dispersed phase)과 기포의 성장과 합체가 일어나는 농후기포영역(dense bubbling region) 의 두 영역으로 나눌 수 있다. 농후상 (dense phase)의 표면과 기체흐름 사이의 영역을 프리보드(freeboard)라 하고, 그 자체의 높이를 프리보드 높이라 한다.

프리보드내의 입자의 밀도는 높이에 따라 감소하므로, 높이가 증가할수록 비말동반되는 양이 감소하여 결과적으로 프리보드 높이에 따라 비말동반되는 양이 크게 변하지 않고 일정해지는 높이에 이르는데, 이때의 높이를 TDH(transfer disengaging height)라 한다.

Zenz와 Weil(1958)은 TDH를 기포가 터지면서 생성된 고속의 기체 켄트 (gas jet)가 사라져 원래의 기체속도(U)로 되돌아 오는 유동층 표면위의 높이로 해석하였다. 유동층으로부터 비산되는 입자들은 종말속도가 기체유속보다 작은 입자들만이며, 다른 입자들

은 유동층 표면으로 되돌아 온다. 그러므로, 기포유동층에서 적절한 조업속도의 범위는 입자가 유동화될 수 있는 속도 ($U=U_{mf}$) 에서 가장 큰 입자가 비산유출될수 있는 속도 ($U=U_0$)이다. 물론 모든 입자들이 비말동반과 비산유출 되더라도 적절히 설계된 사이클론이 유출되는 입자를 만족스럽게 포집하여 유동층으로 재투입시킴으로써 다소 일정한 유동층을 형성시킬 수 있다.

입자의 비산은 공압속도가 증가할수록 2 - 4배 정도로 크게 증가된다. 그리고, 유동층연소로에서 층표면에서의 비말동반되는 양은 상온유동층에 비해 크게 감소한다. 이것은 층온도의 증가로 밀도가 감소하기 때문이다(Choi et al., 1989).

3. 유동층 연소로의 특성

전형적인 석탄유동층 연소로를 Fig. 3 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 석탄과

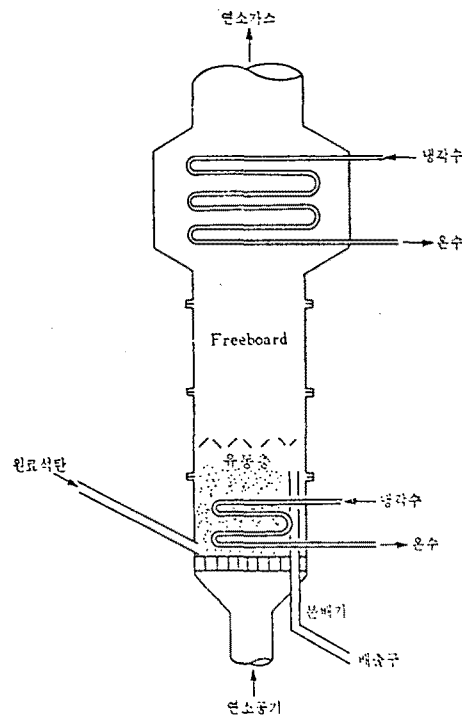


Fig. 3 Fluidized bed combustor

불활성 열매체가 분산판 위에 장입되어 있고 분산판을 통하여 전연소층에 균일하게 공기를 주입한다. 석탄의 주입은 분산판위에서 주입하거나 또는 유동층 위에서 주

입한다.

유동층 연소로는 고형물 뿐만 아니라 액체물도 연소시킬 수 있으며 무엇보다도 대기오염물질의 배출량이 적은 것이 특징이다.

석탄의 유동층 연소시 유동층내 석탄의 연소 특성은 연소로 조업특성을 결정하는 가장 중요한 부분으로써 연소효율, 대기오염물질 생성과 열효율등에 커다란 영향을 미친다. 또한 유동층에서의 열전달은 층내 온도 분포 뿐만 아니라 열전달 면적을 결정한다.

유동층 연소로가 석탄 연소시 정상조업 상태에 도달하려면 층에 주입된 석탄이 착화되기에 충분한 온도로 먼저 층을 가열하여 주어야만 한다. 이와 같은 층의 가열을 위해서 시동(start-up)계통이 필요하게 되며 이러한 목적을 위해서 여러 가지 장치와 방법들이 사용되고 있다. 또한 유동층 연소로의 정상적인 조업을 위해서는 연료와 석탄의 주입장치와 회재 배출을 위한 기계적인 장치가 필요하고, 연료와 석탄은 종류에 따라서 유동층내로 혹은 유동층 표면 위로 주입된다. 층내에 투입된 석탄 입자는 층에 투입된 후 곧 바로 연소되는 것이 아니고 일련의 과정을 거쳐서 휘발분(volatile matter)과 고정탄소(fixed carbon)로 전환되어 연소된다. 휘발분은 유동층내에서 연소되는 것이 바람직하나 대부분의 경우 휘발분은 층표면 상부의 프리보드에서 연소된다. 회박층내에서 휘발분의 연소는 연료의 특성과 조업조건에 따라 변화하며 조업조건(특히 공압속도와 유동화 상태, 입경분포)에 따라서는 비말동반된 탄소입자들도 회박층내에서 연소하게 된다. 따라서 유동층 연소로의 설계시 프리보드내에서 휘발분 불완전 연소에 의한 미연소 탄화수소의 배출을 억제하기 위해서는 프리보드내에 충분한 산소의 공급과 혼합상태를 유도하여야 하며 충분한 체류시간을 갖도록 설계하여야 한다.

일반적으로 정상조업하고 있는 유동층 연소로내에서 가연성분의 함량은 질량분율로 1-2% 내외의 매우 작은 값을 갖는다. 따라서 유동층내 석탄 입자의 연소는 단일 입자의 연소와 같다고 간주할 수 있으며 층물질의 대부분을 차지하는 불활성 물질(유동화 매질인 모래와 회분)은 연소하는 입자의 열을 층내로 고르게 전달하는 역할을 한다.

유동층 연소에 영향을 미치는 요인은 대단히 많으며 이러한 요인들은 크게 3가지 주된 그룹으로 분류될 수 있다(전해수등, 1993).

- 연료 변수(조성과 다른 특성치들).
- 설계 변수(연료 주입 장치, 분산판, 층내 파이프 구조물, 비산회재 재순환).

- 조업 변수(공기-연료 비, 층온도, 유동화 속도, 층 깊이, 층물질, 연료(석탄)와 흡수제 크기 혹은 입경분포).

석탄과 층물질의 비가 1-2%인 것을 고려하면, 석탄 입자 한 덩어리(batch)의 연소는 마치 단일 석탄 입자의 연소와 같이 일어난다고 가정할 수 있다.

유동층 연소로에서 연소효율은 대단히 중요하나 유동층 연소로의 가장 중요한 특성은 아니며 현재의 설계 개념의 관점에서 보면 다음과 같은 사항들이 중요한 특성이 된다. 즉, S + 3 E 로써 안전(Safety), 에너지(Energy), 환경(Ecology), 경제성(Economy)이 여기에 해당된다.

유동층은 실제 공업적 응용에 있어서 다른 반응기에 비해 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 연료의 수용폭(fuel flexibility)이 커서 저열량연료, 고유황합유연료, 점착성연료 등에 적용이 가능하고, 석탄으로는 반응성이 낮은 폐기물, 석유코크스, 갈탄에 이르기까지 적용이 가능하다.

- 입자의 부드럽고, 액체와 같은 흐름 성질때문에 조업이 쉽고, 연속적이고 자동화된 조업이 가능하다.

- 고체의 빠른 혼합으로 반응기 전체가 등온으로 유지된다.

- 두 유동층사이의 고체순환은 반응에 필요한 열공급이나, 반응에서 발생된 열의 제거를 원활하게 해준다.

- 유동층은 대규모 조업에 적당하다.

- 기체와 고체입자간의 열 및 물질전달 속도가 다른 반응기에 비해 빠르다.

- 유동층 반응기의 높은 열전달속도때문에 열교환기 설계시 상대적으로 열전달면적이 작아진다.

- 낮은 연소온도(850 - 950℃)와 단계적연소로 인하여 NO_x 생성 배출량이 적고, 탈황제의 로 내 주입에 의한 직접탈황으로 별도의 배연 탈황설비가 불필요하다.

4.. 기술개발동향

상압(기포, 순환)식은 1980년대중반부터 미국(Combustion Engineering, Foster Wheeler, Pyropower), 독일(Lurgi), 핀란드(Ahlstrom)의 boiler maker에서 판매를 시작하였다. 환경규제가 엄격한 미국에서는 2000년대까지 약 60%의 석탄보일러가 유동층보일러로 대체될 것으로 전망되고 있다. 근래의 동향은 발전용으로 상압식의 응용 및

scale-up, 시범플랜트단계의 가압유동층 연소기술의 개발이 계속되고 있다. 주요 기술보유기관으로는 각 보일러 제작사, Energy & Environmental Research Center(University of North Dakota, USA)가 대표적이다.

유동층 보일러는 1980년도 이후 환경규제의 강화로 본격적으로 보급되었으며 기포식은 전반기에 주로 설치되었고 순환식은 후반기에 급격한 증가추세를 보였다. 이는 보일러의 대형화가 가속되었고, 또 환경규제도 계속적으로 강화됨에 따라 기포식에서 순환식으로 발전되었기 때문이다. 기포식의 경우 1983년부터 1988까지 신설된 보일러의 증기용량은 연평균 약 800t/h로 단위용량이 20t/h인 소형 산업용보일러를 고려할 때 연간 약 40기가 설치되었고, 순환식의 경우에는 본격적으로 보급이 시작된 1985년부터 1990년까지 120t/h 열병합발전 보일러를 기준으로 약 119기가 보급되었다..

1986년도의 일본 Wakamatsu plant부터 시작된 발전용 보일러 개발은 주로 상압유동층 기술을 채택하고 있다. 1991년 현재까지 대부분의 규모는 50MWe에서 100MWe이고 미국, 일본, 독일, 프랑스, 핀란드, 스웨덴, 스페인 등에서 이루어지고 있다. 가장 활발한 개발이 이루어지고 있는 미국의 경우에는 1996년에 약 250MWe규모의 상압유동층 발전용 보일러의 개발을 계획하고 있다. 발전용에 유리한 가압유동층 보일러의 개발은 1989년부터 시작되었으며 미국에서는 1996년에 약 325MWe규모의 개발을 계획하고 있다 (Weth et al., 1991).

순환식 유동층 보일러의 경우는 순환식 보일러의 선두주자인 Lurgi와 Ahlstrom사는 1970년대말부터 개발을 시작하여 1985년 이후에는 급격한 scale-up을 이루었고 1990년에는 증기발생량 약 500t/h의 대용량 보일러의 보급에까지 이르고 있다. 그러나 현재의 규모는 열병합발전용에 있다고 볼 수 있으며 발전용 보일러로서는 아직 소규모에 적용될 수 있다고 평가되며, 궁극적으로는 발전용까지의 개발이 계속 추구하고 있다. 그밖의 보일러 제작사(Battelle, Gotaverken, Keeler/Dorr-Oliver, Studsvik)의 보급경험은 1990년 기준으로 증기발생량 약 100t/h의 수준에 있다 (Dry and La Nauze, 1990). Fig. 4 에 제작사별 순환유동층 보일러 특징을 비교하여 나타내었다.

한편, 국내의 경우 본격적인 연구는 1980년 이후부터 한국과학기술원을 중심으로 학계의 기초기술연구(Choi et al., 1986, 1988, Kim et al., 1991), 한국에너지기술연구소를 중심으로 연구소의 pilot 규모 기술개발 및 실용화 연구등이 이루어졌으며, 그 결과 기포식의 중소형 산업용 보일러는 상용화되었고 계속적으로 경제성 향상 및 성능 향상이 진행되는 단계에 있다.

순환유동층 보일러에 대한 연구는 1980년대 이후부터 한국과학기술원을 중심으로 수

력학적 특성(Namkung et al., 1994, Cho et al. 1994) 및 연소특성에 대한 기초연구가 실험실 규모로 수행되어 왔으며, 1985년부터 한국에너지기술연구소를 중심으로 pilot규모의 연구가 진행되고 있다(선도원등, 1993).

한편, 대기업들의 외국기술도입에 의한 보급이 이미 이루어지고 있다.

가압식에 관한 연구는 1986년에 한국과학기술연구원(KIST)에서 연구를 시작하였으나 곧 중단되었고 아직 기초연구단계에 있다.

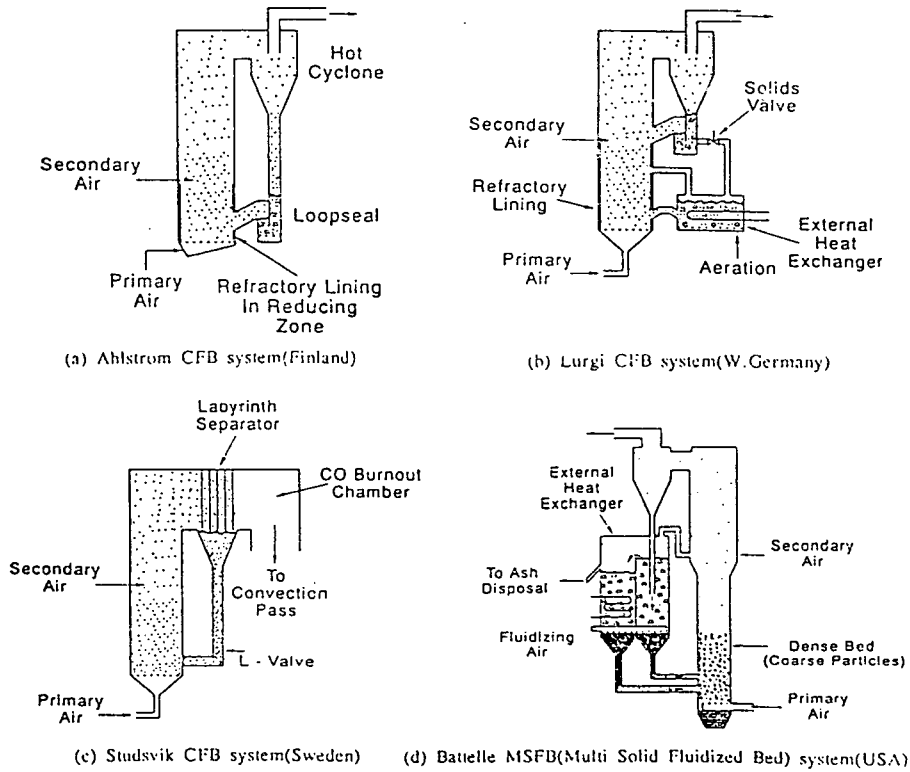


Fig. 4. Types of commercial CFB boilers

참고문헌

- Cho, Y.J., Namkung, W., Kim, S.D. and Park, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 158(1994).
- Choi, J.C., Kim, Y.J., Moon, S.H. and Kim, S.D.: *화학공학*, **23**, 153(1986).
- Choi, J.H., Son, J.E. and Kim, S.D.: *화학공학*, **26**, 494(1988).
- Choi, J.H., Son, J.E. and Kim, S.D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 597(1989).
- Clift, R. and Grace, J.R.: in "Fluidization", 2nd eds., Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D., eds., 73, Academic Press. New York(1985).
- Dry, R.J. and La Nauze, R.D.: *Chem. Eng. Progr.*, July, 31 (1990).
- Kim, S.D., Lim, P.O. and Kang, S.K.: Proc. of 1991 Intern. Conf. on FBC, 1199, Montreal(1991).
- Namkung, W., Cho, Y.J. and Kim, S.D.: *화학공학*, **32**, 241(1994).
- Stewart, P.S.B. and Davidson, J.F.: *Powder Technol.*, **1**, 61(1967).
- Toei, R., Matsuno, R., Sumitani, T. and Mori, M.: *Kagaku Kogaku*, **29**, 851(1965).
- Weth, G., Geffken, J. and Huber, D.A.: Proc. of 1991 Intern. Conf. on FBC, 468, Montreal(1991).
- Zenz, F.A. and Weil, N.A.: *AIChE J.*, **4**, 472(1958)
- 선도원, 손재익, 구철오, 한근희, 배달희, 임정환, 최정후: "저공해 유연탄 보일러 보급확대를 위한 순환유동층 기술개발(III)", 한국에너지기술연구소 연구보고서 KE9340G(1993).
- 전혜수, 김상돈, 이제근, 서용칠, 강용, 신용섭: "폐기물유동층소각", pp. 196-197(1993)