

# 유동층연소(FBC) 기술의 연구개발 현황

蔡 載 宇

<仁荷大學校 機械工學科>

## 1. 유동층이란?

고체입자 충전층의 하부로부터 유체를 통과시키게 되면, 처음에 속도가 낮은 경우에 유체는 고체입자 사이의 공극을 통과하지만, 속도를 점점 증가시켜, 유체의 압력손실과 고체입자의 중량이 서로 평형하게 되면 유동화가 시작되어 속도의 증가에 따라 고체입자와 유체가 거의 완전한 혼합상이 되어 단일유체와 비슷한 특성을 갖게되며, 그 기간중의 통과압력손실  $\Delta p$ 는 일정한데, 이러한 상태의 입자층을 '유동층'(Fluidized Bed; Wirbelschicht)이라하며(그림 1), 1920년대 독일의 석탄 가스화공업으로 발달되기 시작하여 촉매 분해반응, 석탄의 가스화, 액화등 기타 화학공업의 각종 반응조업에 널리 응용되어 오고 있다.

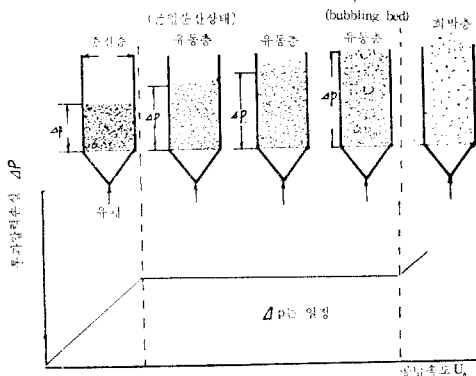


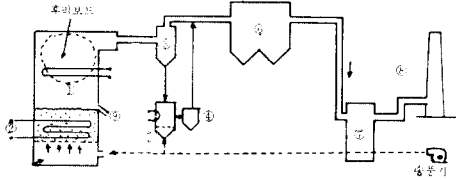
그림 1 유동층의 압력손실

## 2. 유동층 연소(Fluidized Bed Combustion)

연소기술에 유동층 원리를 이용한 것은 1928년 스트래튼(Stratton)의 분출 유동층연소 보일러(spouting FBC boiler)—석탄연소, 공탐속도 10~40ft/sec, 층내온도 2000°F 까지 거슬러 올라가나, 실제로의 개발은 제 2차 세계대전후, 60년대 초반 NCB(영국 석탄국) AFBC(상압유동층)발전으로부터 시작 되었다고 할 수 있다. 본 기술은 저질탄이나 쓰레기같이 발열량이 낮고, 착화온도가 높으며, 연소속도가 느린 물질의 연소에 우수한 효과를 지니며, 높은 열전달율, 저온연소에 의한 thermal NO<sub>x</sub>의 생성억제, 석회석등을 이용한 SO<sub>x</sub> 억제등, 공해방지 측면에서도 커다란 효과가 있으므로 세계 각국에서 활발하게 연구가 이루어지고 있다. 유동층연소에는 압력을 가하지 않고 대기압하에서 연소시키는 상압 유동층연소(AFBC)와 압력하(~10atm 정도)에서 연소시키는 가압 유동층연소(PFBC)가 있다. 대규모 발전용으로는 단위면적당 열발생율이 크고 터빈과 결합하여 복합발전이 가능한 PFBC 보일러가 유리하나, 아직도 해결하여야 할 기술적인 문제들이 많이 있으므로, 본고에서는 이미 상업화되어있는 AFBC 보일러를 중심으로 연구개발 현황을 기술하고자 한다.

### 3. 유동층연소의 기본특성

#### 3.1. 유동층 보일러의 구성



- ① 유동층로(MBC)
- ② 층내전열관
- ③ 사이 클론
- ④ 사이 클론
- ⑤ 화재연소로(CBC)
- ⑥ 고온집진기
- ⑦ 공기예열기
- ⑧ 연 돌
- ⑨ 오우버플로우 밸브

그림 2 유동층 보일러의 구성도<sup>(1)</sup>

그림 2는 석탄 AFBC 보일러의 구성도이다. 보일러 ①에 투입된 석탄입자(통상 15 mm 이하이며, 미분탄 연소방식의 약 0.1 mm와 비교할 때 분쇄비의 절감을 기대할 수 있다.)는 연소되어, 그 발생열은 전열관②에 의해 회수된다. 이 경우 층내의 잔류탄소 농도는 약 0.1~0.5% 정도이다. 층으로부터 비산된 미연탄소는 기계식 집진기③에 의해 포집되어, 고온 저속(950°~1000°C, 1~1.5 mm)으로 운전되는, 유동층연소방식의 재연소로(再燃燒爐)인 CBC(carbon burn-up cell) ⑤에서 다시 연소된 후 사이클론④를 거쳐, ③을 통과한 주 배기가스와 합류되어, 고온저속식 집진기⑥과 공기예열기⑦을 지나서 연돌⑧로 배출된다.

#### 3.2. 연소효율과 전열

연소효율은 과잉 공기량, 층온도, 압력, 층높이, 입경에 따라 변하나 통상 85~95% 이상이다. 연소효율 저하의 대부분은 입자의 비탈동반(entrainment)때문이며, 그 개선책으로는 상부화대부(freeboard)에 버플(baffle)설치, 집진기에 포집된 회(灰)의 재순환, CBC 설치등의 연구가 진행되고 있다.

층내 전열관의 총괄 열전달계수는 가스유속, 입자경, 압력, 관경 및 관군의 피치등에 따라서

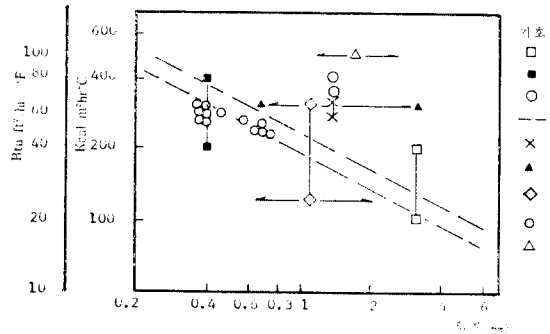


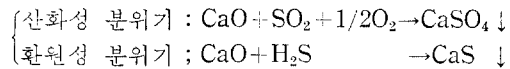
그림 3 전열관군의 총괄전열계수<sup>(1)</sup>

변화되나 통상 30~100 Btu/ft<sup>2</sup>·hr·°F(150~490 Kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C)의 범위에 있으며(그림 3), 미분탄 연소의 10~20 Btu/ft<sup>2</sup>·hr·°F와 비교하여 보면 5 배정도 크며 전열속도도 2 배정도가 된다<sup>(1)</sup>.

#### 3.3. SO<sub>x</sub>

FBC의 가장 큰 특징중의 하나는 연소와 동시에 전식탈황을 하여 배출 농도를 저감시킬 수 있다는 것이다. (미국 EPA는 액체연료일때 0.8 lbSO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup> Btu, 고체연료 사용시 1.2 lbSO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup> Btu로 규제하고 있다.) 탈황제로는 석회석(CaCO<sub>3</sub>), 백운석(CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)가 일반적으로 이용되고 있으며, 최근에 재사용성이 양호한 신탈황제(BaCO<sub>3</sub>, MgO, CaAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 개발이 행하여지고 있다.

탈황반응은 탈황제가 층내에서 소성된후,



의 반응식을 따라 진행된다.

그림 4는 Ca/S 비(공급 탈황제중의 Ca와 공

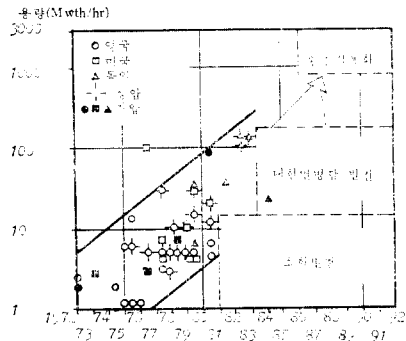
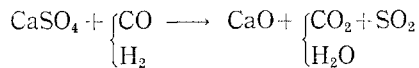


그림 4 Ca/S 몰의 비와 탈황율<sup>(1)</sup>

급탄중의 S의 몰비)와 탈황율과의 관계를 표시하고 있다. 백운석(dolomite)을 사용한 경우 광범위한 시험조건하에서 데이터가 1군으로 밀집되어 있고, Ca/S를 1.5 이상으로 하면 80% 이상의 탈황율을 얻었다.

한편 석회석의 경우 Ca/S=2에서도 80% 이하를 보여주고 있고, 또 상압에서 석회석의 탈황율은 750~850°C에서 최대가 850°C 되므로 부근에서 Ca/S의 비를 2 이상으로 유지하여야 한다. 흥미있는 것은 Brookhaven N.L.에서는 NaCl 3%를 부가한 경우에 반응속도가 100% 이상 크게 되었다는 보고가 있다.

탈황제의 재생반응은 다음 반응식이 주된 반응이나



고 탈황율, 폐탈황제와 회의 분리 및 처리기술 등의 기술적으로 해결해야 할 문제를 남기고 있으며, 이들 기술의 확립은 FBC 실용화의 중요한 관건중의 하나이다.

### 3.4. NO<sub>x</sub>

FBC 보일러는 저온연소에 의해 thermal NO<sub>x</sub>가 억제되지만 연료 NO<sub>x</sub>는 거의 변함이 없으며 1000°C에서 총 NO<sub>x</sub> 발생량의 90%를 연료 NO<sub>x</sub>가 차지하고 있다.

미국 EPA는 250×10<sup>6</sup>Btu/hr 연료소비 이상의 보일러에서 2시간중 최대 NO<sub>x</sub> 배출량으로 표 1과 같이 규제하고 있는바, 석탄 AFBC에서 200~500 ppm NO<sub>x</sub> 정도인 현재 기술로 어느 정도 충족시킬 수 있기 때문에, SO<sub>x</sub> 방제기술에 비해 활발하지 않으나, 일본의 경우는 50 ppm을 목표로 다단연소등 활발한 연구가 진행되고 있다.

표 1 EPA의 NO<sub>x</sub> 규제치<sup>(11)</sup>

연료구분	규제치(lb/10 <sup>6</sup> Btu)	비 고
기 체	0.20	약 175ppm
액 체	0.30	약 230ppm
고 체	0.70	약 575ppm

NO<sub>x</sub> 제거 기술로서는 다단연소, 다층연소, PFBC, 진류로의 복합프로세스등 여러가지가 있다.

다단연소법은 유동층을 1단계로 O<sub>2</sub>부족 상태로 연소시킨후 프리보어드 부분에서 2차 공기를 불어넣는 방식으로, 1차 공기비 λ<sub>1</sub>=0.9~0.95에서 최적치가 존재하며, 2차 공기구위치가 층표면에서 멀어질수록 NO<sub>x</sub> 농도는 감소하나 어느이상이면 거의 일정하다. 열부하가 증대하면 NO<sub>x</sub> 저감율도 떨어지며 CO 농도는 거의 변화가 없지만 비산탄소(飛散炭素)는 증가한다. 2단연소시의 최대 저감율을 얻으려면, 열부하의 제한, 연소효율의 저하라는 큰 문제가 있지만 여러 인자들을 최적화하면 NO<sub>x</sub> 배출을 크게 억제(1wt-%을 석탄 연소후 50~60 ppm까지 제어<sup>(4)</sup>)할 수 있는 효과적인 방법중의 하나이다.

일본 북해도 공업개발시험소에서는 유동층으로 구성하여 하단 유동층에 공급된 석탄을 연소시켜 연료의 N성분을 N<sub>2</sub>, NO로 전환하고, 이것을 상단 유동층에서 O<sub>2</sub> 존재하에 char가 NO를 분해하는 것을 이용하여 NO<sub>x</sub>를 억제하는 2단 유동층연소(2층연소)로 NO<sub>x</sub>를 150 ppm까지 억제하였으며, 상단을 탈황층으로 구성하는 것에 의해 폐탈황제를 회와 분리하는 것도 해결하였다. (그림 5)

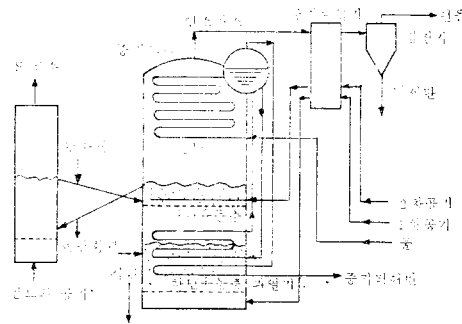


그림 5 북해도 공업개발시험소의 2층유동연소 구성도<sup>(4)</sup>

### 3.5. 기타

(가) 회 및 폐탈황제

탈황제의 재생을 하는 100 MW의 FBC 보일러

러에서 15 ton/hr 정도의 폐탈황제와 회가 배출된다. 이것의 이용기술로서 도로 기반재, 토질개량제, 콘크리트나 아스팔트 공사시의 혼합 등이 있으나, 입자의 성상에 관한 기초적 연구 등이 앞으로의 과제로 남아 있다.

(나) 집진

대부분의 FBC에서 사용하는 집진 장치로는 사이클론, 전기 집진기, fabric 필터등이 있으나, 고도의 고온 건식 집진을 하기 위하여 보다 많은 개선이 필요하며 세라믹 필터등의 연구가 진행되고 있다.

(다) 부식 및 마모

미분탄에 비해 저온연소이고, 회의 흡착으로 황화, 염화 알칼리 금속의 성분이 적으므로 부식은 감소하나 유동입자의 충돌로 인한 마모 등으로 전열관, 터어빈 등의 재질에 대한 연구를 진행하고 있다.

(라) 연료의 공급

보통 석탄 FBC 경우 분산판을 관통한 수직노즐(NCB, CBC)과 측벽면으로부터 경사노즐(PER, B&W)을 사용하여 공기수송으로 층저부에 불어 넣으나, 수평방향의 혼합속도가 불충분하기 때문에 불균일 연소로 인한 hot spot 발생과 NO<sub>x</sub> 배출량 증대를 일으키기 쉬우므로, 다수의 공급

구로부터 소량씩 공급하고 있다. 상압의 경우 NCB에서는 유동층 단위 단면적당 4.5 개/ft<sup>2</sup>, PER 과 B & W에서는 8~9 개/ft<sup>2</sup>, wheeler에서는 29~52 개/ft<sup>2</sup>가 필요하다고 하고 있으며, 가압의 경우 필요수량은 증가한다.

액체연료 FBC에서는 보통 이류체식 노즐을 사용하고 있으며, 코우킹(coking), 응집(agglomeration), 소결(sintering)등의 어려움 때문에 개발이 지연되어 오다가, 최근에 영국의 CSL(combustion system limited)는 액막형태로 연료가 상후 분사되는 'climbing film'노즐(그림 6)로 알코올부터 vacuum residues에 이르는 다양한 연료를 성공적으로 연소시켰다고 보고하고 있다.<sup>(8)</sup>

(마) 부분부하와 시동성

FBC의 부하 변동범위를 넓히기 위하여 여러 구획으로 층을 분할하는 방법, 층높이 변화로 전열면적을 조절하는 방법, 순환(circulating) FBC 등 여러 연구가 계속되고 있다.

시동하기 위한 방법으로는 층상부의 버너로 가열하거나 층내도 고온의 가스순환등으로 층내물질을 가열하는 방법, 예혼합(premixed) 가스의 층내 연소등의 방법이 사용되고 있으나 안전성, 가격, 효율등 여러문제가 남아있다. Reversville에서는 CBC(carbon burn-up cell)을 이용, 순차적 시동방법을 연구중에 있으나 아직도 수시간씩이나 걸리고 있어 개발이 시급한 형편이다.

4. 세계 각국의 개발 현황

FBC는 1964년 영국의 NCB를 중심으로 기초연구를 시작하여, 계속하여 bench scale, pilot plant, demonstration plant 건설등 착실히 발전해 왔다. 그러한 동안에 본 기술에 착안한 미국, 서독등지에서 이 연구성과를 기초로 적극적으로 유동층 보일러 개발에 주력하여, 현재 AFBC 보일러는 실용화 시대에 돌입하여 상용화 되었고, PFBC는 IEA(OECD의 국제 에너지 기구)의 국제 공동연구 프로젝트로 미국, 영국, 독일 3개국의 공동참여로 영국의 Grimthorpe에 20MWe의 플랜트가 건설 되었다. 영국의 경우 1974년

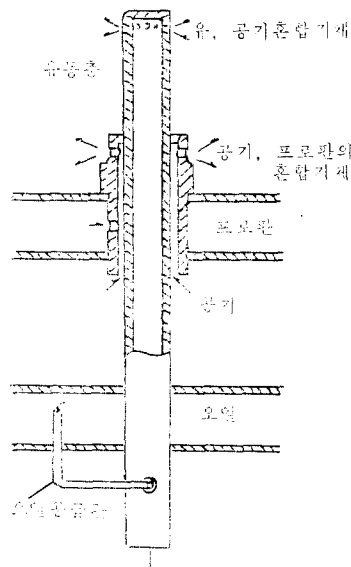


그림 6 CSL의 climbing film 분사노즐<sup>(8)</sup>



유동층연소(FBC)기술의 연구개발 현황

표 2 세계각국의 AFBC 프로젝트<sup>(4,6)</sup>

소유자	설치장소	용량	운전년도	형태	제작회사	연료	비고
TVA	Paducah ky.(미)	86t/h 20MWe	1982	D	BW	석탄	증기 (169kgf/cm <sup>2</sup> , 538°C)
TVA	미정	200MWe	1985	D	미상	석탄	Circulating Type 제열
Ashland Petroleum Co.	Catlettsburg Ky. (미)	147t/h	1983	Com	FWC	천연가스	증기(32kgf/cm <sup>2</sup> , 371°C) 2unit
NCB	Grimthrope, (영)	80t/h	1980	D	VKW	석탄	증기(31kgf/cm <sup>2</sup> , 440°C) IEA의 공동연구
B&W	Renfrew (스코틀랜드)	18t/h	1975	D	B&W	중석유탄	증기(28kgf/cm <sup>2</sup> , 270°C) 서방세계 최초의 대형 수관유동보일러(230t/h로 개량중)
Elektrizitätswerk Wesertal GmbH	Hameln (서독)	140t/h	1983	Com	DBW	석탄	증기(123kgf/cm <sup>2</sup> , 530°C)
City of Eksjö	Eksjö (스웨덴)	15t/h	1981	Com	GEN	도시쓰레기나	증기(8kgf/cm <sup>2</sup> , 171°C)
Atlas consal mining & Dev. Co.	Cebu (필리핀)	160t/h	1982	Com	VKW	아탄	증기(64kgf/cm <sup>2</sup> , 485°C) DBW와 제휴 2unit
A Ahlström Oy	Kautta (핀란드)	910t/h	1981	Com	AHL	이탄밥	증기(84kgf/cm <sup>2</sup> , 499°C) Circulation (제지공장에서 증기발생)
石炭技研	若松 P.S (일본)	20t/h	1981	D	Bopcock 一日立 川崎重工	석탄	증기(60kgf/cm <sup>2</sup> , 540°C) 통산성 보조사업
미상	Haifa Bay 이스라엘	27t/h	1982	Com	EPI	목화껍데기 생산폐기물	증기(14kgf/cm <sup>2</sup> , 포화)
ENEL	Porto Vesme (이태리)	79t/h	1984	D	ANS	석탄	증기(59kgf/cm <sup>2</sup> , 477°C)
Zellstoff und Papierfabric AG	Frantschach (오스트리아)	70t/h	1983	Com	AHL	갈탄나무	증기(85kgf/cm <sup>2</sup> , 521°C)
Shell Nederland Raffinaderij BV	Pirrus (네덜란드)	50t/h	1982	Com	FWC	석탄	증기(82kgf/cm <sup>2</sup> , 495°C)
Boise Cascade Corp	Kenora, Ont. (캐나다)	20t/h	1977	Com	EPI	나무 Sludge	증기(18kgf/cm <sup>2</sup> , 포화)
Sulzer Brothers Ltd.	Winterthur (스위스)	5.4t/h	1979	D	SUL	석탄	증기(31kgf/cm <sup>2</sup> , 300°C)

Com; Commercial contract D; Demonstration plant

초로 하여 1984년 10배의 확대(1ton/hr), 1986년에는 상용화 규모인 10 ton/hr의 demonstr-

ation plant 설치를 계획중에 있는데, 이와같이 단계적인 확장 이유는 scale-up에 있어 최적인

## 解 說

전조건을 위한 많은 기술의 축적이 필요하기 때문이다<sup>(10)</sup>.

한편 근자에 와서, 각 대학과 일반업체에서도 많은 관심을 가지고 연구에 힘을 기울이고 있는데, 동양화학(주)에서는 120 ton/hr의 열병합 FBC 건설을 핀란드 기술진과 추진하고 있으며 본 연구실에서도 고유황 벙커 C유의 유동층 연소를 위해 bench scale 연소로를 제작하여 연구를 수행 중에 있다.

우리나라 전체 석탄 매장량인 15억톤 중 약 40%인 6억톤가량이 발열량 3,500 Kcal/kg 이하인 저질탄이고, 산성비까지 내리는 심각한 환경오염 문제를 안고 있는 우리나라 실정에 비추어 볼 때, 향후 연소시스템에 있어 중요한 몫을 차지하게 될 FBC에 대한 관심과 연구지원이 적극요망되고 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) 千葉忠俊外, 石炭流動燃焼ホイラーの開発の現状と問題點, 化學工學, Vol. 42, No. 12, pp.14-22, 1978.
- (2) 玉貫滋, 石炭發電と FBC, *ibid*, pp.649-651.
- (3) 山口 弘外, 北海道工業開發試驗所における石炭の2段流動燃焼の研究, *ibid*, pp.673-675.
- (4) 館林 恂, 石炭流動床燃焼技術の開発狀況, 公害と對策, Vol. 17, No. 1, pp.20-27, 1981.
- (5) 燃焼に伴つ環境汚染物質の生成機構と抑制法, 日本機械學會, pp.150-155, 1978.
- (6) J. Makansi et al., Fluidized-bed Boilers, Special Reports.
- (7) H. Nack et al., Fluidized-bed Combustion Riview, GFER/FC-75/2, pp.35-65, 1975.
- (8) D. Barker et al., Development and Commercial Application of Liquid Fuelled Fluidized Combustion; Systems and Application, pp. IA3.1~IA3.11, 1980.
- (9) E.P. Johnson, Better Fluid-bed units Read to Make Debuts, Chemical Engineering, pp.39~43, 1982.
- (10) 손재익외, 저질탄의 유동층연소기술 및 공해방지에 관한 연구(II), 한국동력자원연구소, pp.17~34, 1982.
- (11) J. Wark, Air Pollution, Harper & Row Co., New York, pp.341-377, 1976.

