

순환유동층반응기의 도전 - 1. 에너지산업

세계적인 인구의 증가와 지속적인 발전은 효율적이고도 경제적인 그리고 최선의 오염조절 기능을 갖춘 공정을 요구하고 있다. CFB-상승관(riser)과 하강관(downer)처럼 미세입자를 위한 기체-고체 반응기들은 기존의 반응시스템과 경쟁하고 있으며 복잡다양한 새로운 공정과정들에 점점 더 사용되어지고 있다. 새로운 CFB-공정방향을 utility, 세멘트, 철강, 석유화학산업에서의 예를 들어서 설명하고자 한다. CFB의 연구개발은 단일장치 혹은 공정시스템의 한부분으로서 상승관과 하강관에 집중하여야 할 것이다. CFB 개발을 위한 접근방법은 대학과 산업체 그리고 프렌트 건설자와 사용자간의 협력으로부터 얻어지는 혁신적인 기초연구결과를 최대한 적절하게 이용하는 것이다.

1. 미세입자의 기-고체반응과 그 응용

근래에 들어와서 미세입자들을 고온반응에 적용하는 추세가 계속되고 있는데 이 추세는 오히려 더 증가될 것으로 예측된다. 입자들의 질량 비표면적이 킬로그램당 제곱미터로 100단위로 나타나기 때문에 100 마이크로 메타보다 적은 크기들의 미세입자들은 기-고체의 상대속도가 크고 높은 온도의 환경에서 처리될 경우 뛰어난 기-고체 열전달, 물질전달속도를 제공할 수 있는 잠재력을 제시하고 있다. 따라서 고체의 질량속도가 크고 크게 확장된 기-고체 흐름의 시스템, 즉 입자들의 활동성이 매우 큰 시스템에 많은 관심이 주어질 것이다.

이러한 형태에 들어있는 두가지의 전형적인 반응기를 Fig. 3에 보였다. 왼쪽에는 aluminiumtrihydrate의 소성에 처음으로 응용된 순환유동층반응기를 묘사하였다. 반응기 안에서 발열반응인 연소와 흡열반응인 소성반응(calcining reaction)이 상승하는 고체흐름에서 함께 일어난다. 고체의 순환은 자체조절된다. 가스의 체류시간분포는 관흐름에 접근하고 고체의 체류시간분포는 혼합흐름반응기로 접근하게된다. 내부적 외부적 고체의 순환 및 혼합이 크게 이루어져서 화학반응은 거의 등온조건하에 잘 수행될 수 있다. 오른쪽에 보인 단열 화염 싸이크론 반응기 (FCR, flame cyclone reactor)에서는 하강흐름조건에서 기체 고체들이 약 10 m/s의 적절히 빠른 속도를 갖고 조업된다. 매우 균일하지만 기-고체 체류시간이 일 초내외의 범위로 매우 짧기 때문에 이 체류시간보다 짧은 시간내에 아주 일정한 기체와 고체의 접촉이 요구된다.

CFB-riser 반응기는 여러가지 산업공정에 널리 퍼져오고 있다. 그러나 FCR같은 소위 "downer" 반응기는 아직 시장소개 단계에 있다. 아주 정확하게 미세입자를 공급

해야 하며 입자크기분포가 좁아야 하기 때문일 수 있다. 이제 막 끌려가는 단계에 있는 이 기술은 계속 개선되고 자주 응용되고 있기 때문에 장차 그 응용은 더 증가할 것이다(Zhu et al., 1995). 꽤 많이 사용되는 CFB 반응기의 응용을 더 자세히 살펴보면, 개략적인 결과로 Table 1에 이미 실용화되어 있는 주요분야를 열거하였다. 이 응용분야는 크게 세가지 묶음으로 나눌 수 있다:

1. 비촉매 불균일 고온반응, 주로 연료의 연소 분야로 발전, 폐기물 그리고 철광산업에서 사용된다.
2. 촉매 불균일반응, 170-650 °C의 중간온도 그리고 주로 가압의 조건에서 수행되는 반응으로 주로 정제산업이나 석유화학산업.
3. 저온의 불균일반응, 부분적으로 촉매사용, 산성가스나 중금속을 포함한 폐가스를 건식흡수하는 경우로 주로 발전, 폐기물, 철광산업에서 응용.

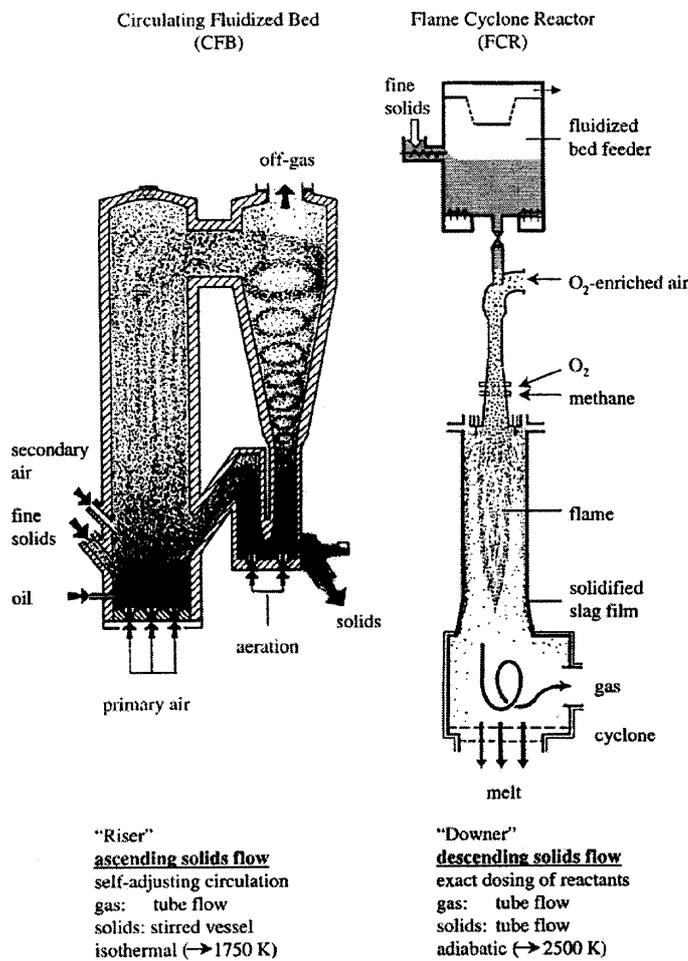


Fig. 3. High-temperature reactors for fine-grained solids.

Table 1
Different CFB-reactor applications

<i>High-temperature non-catalytic (> 400°C)</i>	
Calcination of aluminiumtrihydrate	I
Calcination of clay	I
Calcination of phosphate rock	P
Decomposition of sulfates (FeSO ₄ , MgSO ₄)	I
Decomposition of chlorides (AlCl ₃ ·6H ₂ O)	P
Decomposition of carbonates (CaCO ₃ , MgCO ₃)	I
Precalcination of cement raw meal	I
Roasting of sulfide ores (ZnS, Cu ₂ S, Gold ores)	I
Combustion of coals and shales (ACFB)	I
Combustion of coals (PCFB)	D, I
Combustion of wood, biomass and waste	I
Gasification of coals	D
Gasification of wood and biomass	I
Hot dry-scrubbing of coal gas	P
CFB-offgas-boilers (Fluxtherm, Circotherm)	I
Pyrohydrolysis of spent pot linings	P
Reduction of fine ores with H ₂ (Circored)	I
Reduction of fine ores with coal (ELRED, DIOS, Circofer)	D
Treatment of steel mill residues	D
<i>Heterogeneous catalytic (170–650°C)</i>	
Fluid catalytic cracking (FCC)	I
Fischer Tropsch synthesis	I
Butane oxidation to maleic anhydride	D
<i>o</i> -Xylene/naphthalene oxidation	I
Ethylen epoxidation	P
Oxidative dehydrogenation of butene	I
NO _x /SO ₂ -removal from off-gases	P
<i>Low-temperature heterogenous (< 170°C)</i>	
Dry-scrubbing	
Aluminium smelter off-gases (HF)	I
Waste incineration off-gases (HCl, HF, SO ₂ , Dioxines, heavy metals)	I
Pulverized fuel boiler off-gases	I
Turbine off-gases (SO ₂)	I

I = Industrial, D = Demonstration, P = Pilot.

1999년 현재 산업용 유니트의 최대 크기로는:

가장 큰 알루미나 소성공정은 하루 3000 ton의 알루미나를 처리하는 공정이고, 침출준비과정에서 광석을 굽는공정에서 하루 8000 ton의 광석을 처리한다. 250 MWe의 발전소에서는 3600 ton/day 석탄을 공급한다. 사용되고 있는 보일러 중 가장 큰 riser의 단면적은 170 m² (Lucat et al., 1993)이고 375 m² 짜리가 프로젝트 진행 중에 있다(Sapy, 1998).

비록 CFB 반응기에 대한 근본적인 이해가 완전하게 이루어지지는 않았으나, 더 복잡한 화학반응들이 CFB에서 수행되기 시작했다(Berruti et al., 1995). 유기화학공정이나 석유화학공정에서는 공정의 후단부에서 보다는 근본적인 원천쪽에서 오염물을 제거하는 것이 중요하므로 촉매를 사용한 기고체 상승관이나 하강관반응기는 새로운 영역을 개척하고 있다. 짧은 체류시간의 상승관에서 n-butane을 부분산화하여 tetrahydrofuran과 butanediol을 생산한다던가, 부탄을 증기상 촉매산화하여 maleic anhydride를 만드는 공정이 이러한 예이다(Lerou and Ng, 1996). 또 다른 예로는 오염된 고체를 열적으로 세척하거나 폭발성물질을 파괴하거나(Buck et al., 1996) chlorosilanes를 합성하는데도 사용되었다. 그러나 아직까지도 고온의 CFB 원리가 가장 빈번히 이용되는 분야는 환경적으로 깨끗하게 석탄을 연소하여 전기나 열을 공급하는 분야이다. 세계적으로 500개 이상의 CFBC 유니트가 조업되고 있다(Reh et al., 1997). 다음으로 많이 사용되는 것은 다양한 종류의 태우기 어려운 액체 혹은 고체폐기물을 연소하는 공정(Anthony, 1995) 그리고 발전소나 폐기물소각공정의 후처리부에서 나오는 산성가스를 건식흡수하는 공정이라 하겠다. 그리고 38개의 LURGI CFB-소성로는 전세계 알루미나 생산의 40%를 담당하고 있다.

이러한 연소 응용분야와 비교할 만 한 것은 FCC (fluid catalytic cracking)공정으로 350개 이상의 riser가 조업되고 있으며 세계적으로 가솔린의 50% 이상을 생산하는데 사용되고 있다(Yu, 1994). FCC riser와 CFB-발전소가 처음 실용화된것이 1970년대이므로 이로부터 CFB의 산업적 응용이 얼마나 역동적인가를 알 수 있겠다.

2. 여러가지 상이한 산업에의 도전

2.1 설비(utility) 산업

석탄을 연료로하는 CFB 발전소의 발전용량은 1980년에 도입된 이래로 꾸준히 증가하고 있음을 Fig. 4에서처럼 알 수 있다(Sapy, 1998). 이 중에 많은 점들이 열병합발전 모드로 운전되고 있다. 적절한 투자비, 높은 수준의 연료이용율과 석회석주입에 의한 SO₂ 제거, 단계적인 저온의 연소기술로 NO_x를 저감시키는 이 기술은 점차 길을 잘 닦아오고 있다. 제시된 프렌트의 이름들은 모두 대용량의 프렌트를

상업화하는데 혁신적인 단계들을 나타내고 있다.

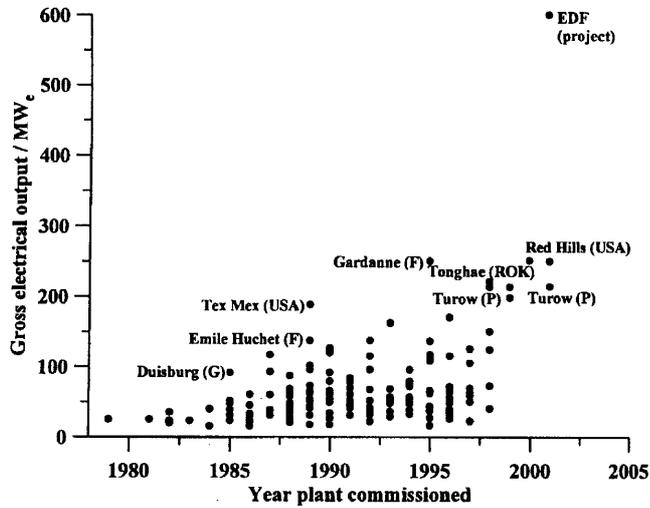


Fig. 4. Development of CFB-power plants.

Fig. 5에는 프랑스 Gardanne에 있는 250 MWe CFB 발전소의 사진을 보였는데 지난 수년간 잘 운전되고 있다고 보고되었다(Jacob et al., 1998). 이는 효율성검토를 수행중인 600 MWe로의 scale-up 프렌트 전략의 초석이 되고 있다. 보일러 공급업체인 ABB Combustion Engineering, Alstom Energy Systems, LURGI-Lentjes 그리고 Foster Wheeler는 250-400 MWe 규모의 프로젝트들을 추진하고 있다.

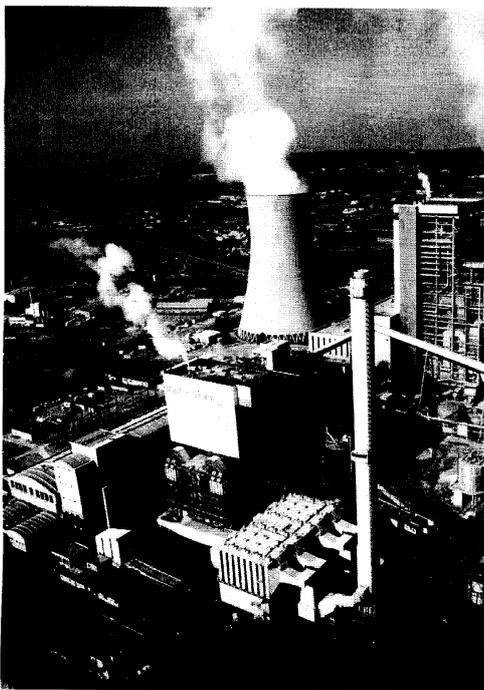


Fig. 5. CFB at Gardanne (F).

CFB 이외에도 배연가스탈황이 복합된 미분탄연소보일러 (PC+FGD)는 현재 갈탄을 연료로 900 MWe 규모가 동독에 실현되었다. 또한 가압기포유동층보일러(PBFBC)와 가스화복합발전(IGCC) 역시 상압의 ACFBC 혹은 가압의 PCFBC와 경쟁하고 있다. 세계적으로 경제적 기술적인 비교연구가 프랑스 발전회사에서 이루어졌으며 그 결과를 Table 2 (Anon, 1998)에 보였다. 단지 이 비교는 단일용기가 아니고 복합적인 플레트를 대상으로 한 것이며 동일한 연료조건하 그리고 전기생산만 고려한 것이다. 틀림없이 순수발전효율, 환경적 성능, 조업유연성, 그리고 오늘날 매우 중요한 항목인 투자비 면에 있어서 CFBC 플레트가 큰 잠재력을 보이고 있다.

Table 2
EDF's worldwide technical and economic comparison study

	PC + FGD	ACFBC	PBFBC	PCFBC	IGCC
State of development of the technology	In operation over 800 MWe	In operation up to 250 MWe, 600 MWe in project	Pilot plants up to 80 MWe, 350 MWe unit under construction	Development up to 10 MWth, 150 MWe in project	Pilot plant up to 250 MWe, 335 MWe unit in construction
Efficiency	38.5-45%	38-45%	42-46%	42-46%	42-49%
Environmental performances	Meet the strictest European standards for SO ₂ /NO _x /dust (200/200/30 mg/N m ³)				
Adaptation to the new regulation	Easy	Easy with SO ₂ , Medium for NO _x (SNCR)			Very easy
Operation flexibility	High	High	Medium	High	Low
Construction cost*	100	95	108	97	116

*European economic conditions (base 100).

상승관의 단면적을 증대시키는 것 외에도 체적당 연소부하를 증대시킴으로써 CFB 보일러의 투자비를 줄일 수 있으며 규모를 scale-up하는데 뛰어난 잠재력을 갖는다. 이 방향은 아직 완전히 탐구되지는 않았지만 아마도 유동화유속을 단계적으로 증가시키던가, 고농도 산소를 사용하던가, 상승관내를 20-30 기압의 범위로 가압시키던가 하여 실현시킬 수 있겠다.

Power 혹은 연료이용효율을 증대시키기 위해서는 공정내 복합되어있는 수단들을 사용할 수 있다. 즉, PC-보일러를 개선하는데 사용되듯이, BFBC나 CFB 플레트에도 초임계스팀을 사용하거나 스팀사이클의 과열증기 온도를 조절하거나, 저압의 스팀을 석탄의 건조에 간접적으로 사용할 수 있겠다.

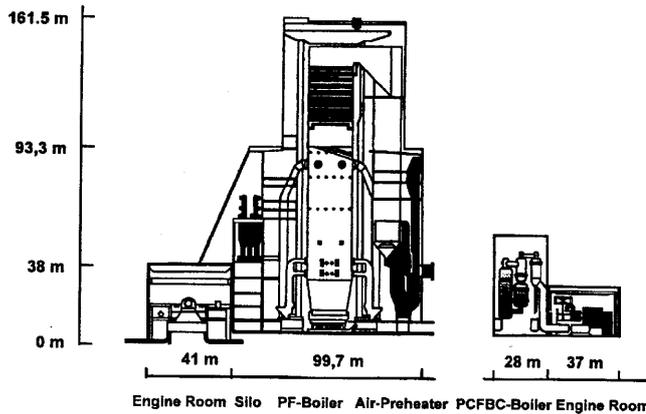


Fig. 6. Size comparison of conventional 800 MW_e PC-boiler with 500 MW_e PCFBC-boiler.

1960년대 영국에서 발전소에 기포유동층을 처음 사용한 이래 석탄연소프렌트의 높이와 체적을 크게 줄일 수 있다는 것은 특히 영국 연구자들에게 꿈이 되어왔다(Thurlow, 1970). 현재 이러한 잠재력을 Fig. 6에 보였다. 여기서 800 MWe 미분탄 보일러의 크기를 500 MWe 가압CFB유닛과 비교해보았다(Eitz, 1996). 가압순환 유동층보일러(PCFBC) 유닛이 상용화되기 위해서는 높은 열추출속도와 신뢰성있는 고온 가스정제부가 실질적으로 검증되어야 할 것이다.

Lakeland 시의 전기과에서는 Foster Wheeler, Westinghouse와 함께 Macintosh 발전소에 두 종류의 가압CFB 기술의 실증을 계획하였다(Anon, 1997). 첫번째 기본적인 PCFB 사이클은 850 °C, 14기압에서 연소를 수행하여 전형적인 Rankine 사이클을 통해 스팀을 생산하며 고온의 배출가스는 Brayton 사이클내 가스터빈을 통해 팽창하게 될 것이다. 두번째 프렌트는 부가적으로 PCFB "carbonizer"가 부착되어서 저열량 가스를 생산하여서 가스터빈 topping combustor가 조업된다. 공정이 좀 더 개선되고 나면 이 실증프렌트의 생산량은 235 MWe에 달할 것이며 순수발전효율은 50%를 기대하고 있다.

CO₂ 배출 증가문제를 해결하기 위해서 많은 나라에서 나무, 토탄(peat), 볏짚, 풀, 종이류와 같은 바이오매스, 음식물산업이나 도시하수슬러지 등을 에너지로 전환하는 것이 중요한 개발과제가 될 것이다. 또한 도시쓰레기, 플라스틱 포장재, 자동차처리잔재물, 재료재생공정의 잔류물 등은 열적인 재순환공정을 통해 전기나 열에너지로 전환시켜야 한다. 따라서 도시공동체와 시설회사들은 더욱 강화된 오염규정을 지켜가야 하므로 자원과 에너지의 사이클에 더 관심을 갖게 되어 CFB 기술에 눈을 주게 되었다. 따라서 PCFB 가스화기를 사용하는 바이오매스 IGCC 사이클(Stahl and Neergard, 1996)의 실증프로젝트를 살펴볼 수 있다. 또한 나무를 가스화하여 PC 보일러에 가스연료를 공급하던지(Palonen et al., 1998) 세멘트공장의 연료로

사용하기 위하여 PCFB 가스화기가 유럽에서 상용화된 바 있다(Kehl et al., 1998). 시카고에 위치한 자원재생프렌트내에 도시쓰레기소각공정에는 두 개의 CFB 연소로가 약 1500 ton/d의 RDF를 처리하여서 50 MW 전기를 생산하고 쓰레기의 부피를 95% 줄여주고 있다(Makansi, 1997).

Utility 산업에서는 벤츄리 형태의 상승관을 갖는 건식흡수저온CFB가 신뢰성있고 효율 좋고 투자비가 적어 경제적인 연소후처리 배연탈황시스템으로 증명되고 있다(Schröfelbauer et al., 1996). 호주에서는 300 MWe 가스터빈발전소의 후단부에 1 Mio. std cubic meter의 배출가스를 처리하는 CFB프렌트가 건설되었다(Graf, 1998). 이미 세계적으로 50여개의 유닛이 발전소나 소각프렌트내에 조업 중 혹은 건설 중에 있고, SO₂를 제거하는 것 이외에도 중금속을 잡기도 한다.

----- 2편에서 계속 -----

(출처: L. Reh, *Chem. Eng. Sci.*, 54, 5359-5368 (1999))