

일본의 가압유동층 복합발전(PFBC) 프로젝트 현황

주용진, 서석빈, 이윤경, 김종진
한전 전력연구원

The Present Situation for PFBC Project in Japan

Yong-Jin Joo, Suk-Bin Seo, Yoon-Kyoung Lee, Jong-Jin Kim
Korea Electric Power Research Institute

1. 서론

석탄화력발전의 기술적 한계를 극복하고 석탄의 고효율 및 환경친화적 이용 등 미래의 환경규제 강화에 대비하기 위해서는 환경 및 기술성이 우수한 신기술 발전방식으로의 기술 전환 필요성이 대두되고 있다. 이러한 청정석탄 발전기술(CCT, Clean Coal Technology)로서 주목받고 있는 발전방식에는 석탄가스화 복합발전기술(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)과 가압유동층 복합발전기술(PFBC, Pressurized Fluidized Bed Combustion)이 있으며, 이의 국내 적용은 제5차 장기전력수급계획(산업자원부 2000년 1월)에 의하면 300MW 급으로 2007년에 건설 계획이 반영되어 있다. 이에 두 후보기술의 국내 도입에 대비한 타당성 검토를 위하여 기술성, 경제성, 환경성 등 제반여건에 대한 심층적 상호 비교에 의한 평가가 필요한 바 IGCC 기술에 비하여 상대적으로 평가자료가 미비한 PFBC 기술에 대하여, 우선적으로 아시아에서 가장 활발히 개발되고 있는 일본의 PFBC 프로젝트 현황을 조사하였다.

2. PFBC 일반

가. 원리

가압된 연소로 내에서 연료를 탈황제와 함께 유동화 상태에서 연소시키는 방식으로 여기서 발생하는 증기를 이용하여 증기터빈을 구동하고 고압의 연소가스는 함유된 분진이 제거된 후 가스터빈을 구동하는 고효율 복합발전 방식이다.

나. 특성

저발열량 연료, petroleum coke, 고형폐기물 등의 다양한 연료의 연소가 가능하며, 연소온도가 800~900℃ 정도로 회분의 용융온도보다 낮아 회분용융에 기인하는 slagging 또는 fouling이 일어나지 않고, 공기 중의 질소가 산화되지 않아 Thermal NOx가 발생하지 않는다. 그리고 황산화물(SOx)이나 연료 질소산화물(NOx)의 배출을 저감하기 위한 별도의 설비를 추가할 필요가 없는데 이는 SOx는 석회석 또는 백운석과 같은 탈황제를 석탄과 함께 혼합하여 PFBC 연소공정에서 99% 까지 제거될 수 있으며, 연료 NOx는 연소과정동안

Freeboard에 암모니아를 주입함으로써 줄일 수 있기 때문이다.

유동층 연소로는 단위 부피당 열출력이 크고 열전도도가 높으며, 연소로 내에서의 열전달이 균일하게 이루어지는 특성이 있어 종래의 미분탄 발전과 비교하여 동일열량일 경우 전열 면적을 줄일 수 있으므로 보다 콤팩트한 설계가 가능하며 3~4% 효율이 더 높다. 그리고, 공급하는 공기와 연료를 감소시킴으로써 층 높이를 낮추고 이로 인한 증기 생산량을 줄이는 방식으로 부분부하 운전이 용이하다.

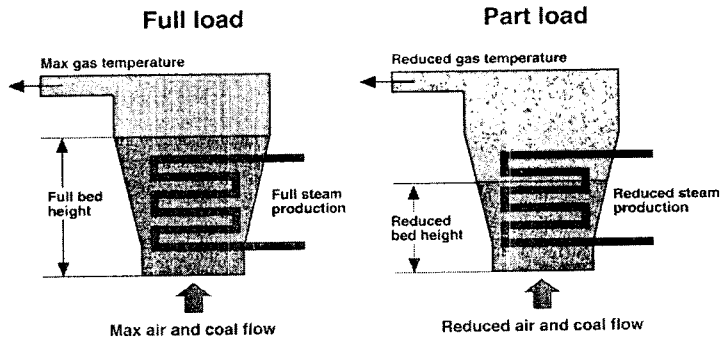


Figure 1. Concept of Full-load and Part-load operation

이외에도 배출되는 회는 방수성이 뛰어나고 강도가 높아 우수한 건축자재로의 재활용이 가능하다.

다. 기술개발 현황

현재 1세대형 PFBC는 상업화 초기단계에 있고, 낮은 연소온도에 기인한 저효율 극복을 위해 가스화기를 추가한 2세대형 Topping PFBC가 개발 중에 있으며, 최대 발전효율은 42%(송전단 기준) 정도로서 기력발전보다 3~4% 높은 수준이고 환경규제기준을 충분히 준수 할 수 있는 기술까지 발전하였다. 지금까지는 소용량(70~80MW) 위주로 운영 중이며, 건설 중인 최대용량은 일본 Karita 발전소 360MW급(2000. 7 준공예정)이 최초의 대용량 상용화 설비이다. 전 세계적으로 총 11기, 1,533 MWe의 PFBC 발전소가 가동완료, 가동중 및 건설 중이다.

3. 일본의 PFBC 프로젝트 현황

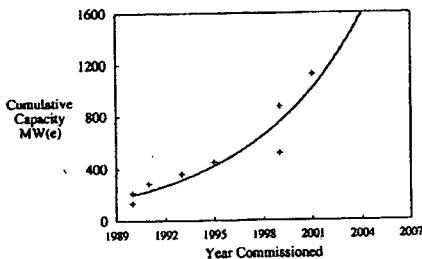


Figure 2. Cumulative PFBC commissioned capacity in Japan

일본에서는 PFBC가 이미 전력을 생산하는 상업화 기술로서 위치를 구축하고 있으며 총 1,016 MW가 운전되거나 건설 중에 있다 (Figure 2 참조).

Table 1에서 보여지듯이 일본에서는 총 4개의 PFBC 플랜트가 운전되고 있거나 건설 중에 있으며 모두 역청탄을 연료로 사용한다. Wakamatsu PFBC는 실증시험용으로 여기서 다양한 실험이 수행되었고, Hokkaido 전력의 Tomato-atsuma 3호기 85 MW급 PFBC의 상

업운전이 1998년 3월에 시작하였다. Kyusyu 전력의 Karita 플랜트는 1999년 8월 2일 처음으로 송전계통에 연계되어 80 MW를 생산한지 두 달만에 1999년 10월 2일에 성공적으로 정격출력 운전(350 MW)을 개시하였다. Chugoku 전력 주관 하에 Osaki 플랜트는 250 MW급 2기가 건설 중에 있으며 2000년과 2005년에 각각 운전을 시작할 예정이다.

Table 1. PFBC plants in Japan

Company		EPDC	Hokkaido EPCo	Kyusyu EPCo	Chugoku EPCo
Power Plant		Wakamatsu	Tomato-atsuma	Karita	Osaki
Plant Output(MW)		71	85	360	250 × 2 unit
Boiler	Model	Bubbling	Bubbling	Bubbling	Bubbling
	Evaporation(t/h)	146.6	195	760	522 × 2
	Combustion Pr(MPa)	0.9	1.08	1.47	0.98
	Combustion Temp(℃)	~ 870	870	870	865
	Coal Supply Method	Slurry	Dry	Slurry	Slurry
Steam TBN	Rated Output(MW)	56.2	75.3	290	215 × 2
	Steam Pr(MPa)	10	16.6	24.1	16.6
	Steam Temp(℃)	593/593	566/538	566/593	566/593
Gas TBN	Model	ABB GT35P	MW-151P	ABB GT140P	F7EA improved
	Rated Output(MW)	14.8	13.6	75	37 × 2
	Inlet Gas Temp(℃)	830	831	840	850
Dust Removal Method		Cyclone + CTF	Cyclone + CTF	Cyclone + EP	Cyclone + Bag
DeSOx Method		In-situ	In-situ	In-situ	In-situ
DeNOx Method		SCR	SCR	SCR	Noncatalytic DeNOx + SCR
Date of Operation Start		Sep-94	Mar-98	Jul-01	Dec-2000(250MW) Dec-2005(250MW)

가. Wakamatsu 플랜트

Wakamatsu 플랜트는 PFBC 복합발전을 실증하고 개발하기 위하여 기존 Wakamatsu 플랜트의 상압유동층 발전소를 개조한 것으로서, ABB-Carbon의 licence를 받아 일본의 IHI(Ishikawajima Harima Heavy Industry Co., LTD.)사가 1993년 71 MWe 용량으로 건설하여 현재 운전 중이다. 이 플랜트의 세부 목표는 다양한 탄종에 대한 연소특성, 환경배출특성, 대용량의 집진설비, 고온의 증기터빈 운전, 조업 및 유지보수 기술의 습득, scale-up 자료 및 조업성 확인이다.

상세설계는 1990년부터 시작하였으며 1992년 기반시설공사를 착수하여 1993년 3월에 수압시험이 진행되었고 1993년 7월 14일에 최초 화입되어 본격적인 시운전이 시작되었다. 1994년 6월에 최대출력을 생산하였고 1995년 1월 5일부터 실증시험을 수행하였다.

운전초기 석탄주입설비의 수송관 및 노즐에서의 막힘현상과 연소로 내부에서 공기분배관 상부의 agglomeration 생성현상을 설비개선하여 해결하였다. 또한 PFBC 연소보일러에서 배출되는 입자는 회분, 미연탄소분, 탈황제, 알칼리 금속혼합물 등으로 이는 가스터빈 블레이

드에 막대한 지장을 초래하는 바 고온고압 집진장치의 기술적 보완을 여러 차례 시행하였다. 다양한 시험을 통하여 분진제거를 위하여 1차로 사이클론을, 2차에는 세라믹 튜브 필터(Ceramic Tube Filters : CTF)를 갖는 집진장치에 대한 기술적 보완이 이루어 졌다.

최근의 기술개발의 성과로는 PFBC에서 fly Ash 재순환을 위한 '0-stage 사이클론'의 개발이다. Wakamatsu PFBC 발전소를 소유한 EPDC(Electric Power Development Company)와 ABB Carbon 그리고 Wakamatsu P200 보일러를 건설한 IHI가 공동으로 추진하였으며 이 기술의 목적은 탈황제 이용도를 높이고 반응성이 낮은 연료(petcoke, anthracite, LVB coals)의 연소와 관련해서 PFBC의 공정성능을 향상시킬 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 이 기술은 CFB에서 사용된 재순환 원리와 PFBC의 특징인 deep bed의 장점을 결합시킨 원리로, ABB Carbon은 1994년 최초 재순환 또는 '0-stage cyclone' 프로젝트를 착수하였다. Wakamatsu PFBC에서는 1997년에 시작하여 1998년 초에 설치완료 되었으며, 이 시스템은 1998년 8월부터 성공적으로 가동되고 있다. 'Zero-stage'는 1차와 2차 사이클론 시리즈에 선행하는 사이클론이라는 이유로 명명된 된 것이다.

운전데이터에서 볼 때 PFBC deep bubbling bed와 fly ash 재순환의 조합으로 인하여 SOx 배출의 저감뿐만 아니라 높은 탈황제 이용성과 연소효율을 나타내고 있다. 이와 함께 Fly ash 재순환은 상당히 높은 in-bed heat transfer의 결과를 도출하였다. 탈황제 소비에 대한 0-stage 사이클론의 영향에 관한 실험결과에 의하면 탈황에 필요한 석회석의 소요량을 30~40% 줄일 수 있다는 예측이 가능하였다. 이것은 0-stage 사이클론이 없이 90% 탈황을 이루려면 Ca/S 몰비율이 2.3이 필요한 반면, 0-stage를 갖는 설비에서는 1.4~1.6이 소요됨을 의미한다. 그리고 95% 탈황의 경우 0-stage 사이클론이 있는 경우 필요한 Ca/S 몰비율이 1.7~2.0 이라면 없는 경우는 2.8 만큼 높아야 함을 의미한다.

나. Tomato-atsuma 플랜트

Hokkaido 전력회사(HEPCO)는 Tomato-atsuma 3호기에 PFBC 복합발전을 적용하여 고효율 및 환경친화성을 평가하기로 하고, Mitsubishi 중공업(MHI)이 PFBC, 석탄공급장치, 세라믹 필터, 증기터빈, 가스터빈, HRSG, NOx 저감을 위한 SCR 장치, 그리고 직접 디지털 제어시스템 등의 모든 설비를 하나의 팩키지로 공급하였다. MHI는 상업적 규모의 발전소의 최종 설계규격 결정을 위하여 자체연구개발 프로그램에 의해 세라믹 필터와 가스터빈 기술을 개발하였으며, HEPCO와 MHI는 1990년 이후에 공동으로 연구개발 프로그램을 운영하고 있다. Tomato-atsuma 3호기의 시험운전은 1995년 5월에 시작되었고, 시험운전 기간동안 다양한 실증시험을 성공적으로 수행하여 1998년 3월부터 상업운전을 시작하였다.

이 플랜트의 성능시험은 1997년 12월에 수행되었고 시험결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Results of Performance Test

Rate	Load	Actual (Gross. HHV)
100 %	85.0 MW	41.2 %

실제 정격부하(100%) 운전에서 열효율은 41.2 %(HHV)이며 이 결과는 동일한 용량과 증기조건인 미분탄 발전소보다 이산화탄소 배출이 약 5 % 감소했음을 의미한다. 모든 부분부하 조건에서의 열효율도 각각의 보증치에 만족하는 결과를 얻었다.

분진, 황산화물, 질소산화물의 배출물 수치는 Table 3과 같으며, 이는 기준치와 비교하면 상당히 환경친화적인 설비라는 것을 입증하는 결과이다.

Tabel 3. Environmental Performance

Items	Units	Environmental Criteria	Results at Normal Operation	Remarks
Dust concentration	mg/m ³ N	28	< 5	-
SOx concentration	ppm	119	10	S in coal : 0.9% Ca/S : 3
NOx concentration	ppm	98	40	N in coal : 1.6% DeNOx inlet : 200 ppm

성능시험 과정에서 가장 큰 문제점으로 지목되었던 사항을 높은 부하운전에서 고온고압 집진장치인 세라믹 필터에서의 지나친 압력강하 현상을 방지하는 것이었으며, honeycomb type elements의 plugging 현상과 압력강하를 방지하기 어렵다는 판단 하에 tubular type elements로 교체하여 문제점을 해결하였다.

Tomato-atsuma 플랜트의 성공적인 상업운전 결과를 반영하여 MHI는 350 MW PFBC 플랜트 설치계획을 확정하였으며, 이의 예상 열효율은 43%(HHV)이고 세라믹 필터의 역세정(back pulsing) 시에는 보조동력비율을 줄이고 필요한 공기압축기의 용량을 최소화하기 위하여 공기대신 증기터빈에서 추기한 증기를 사용할 예정이다.

다. Karita 플랜트

Kyusyu 전력은 기존의 노후한 발전소를 개조하여 360 MWe급 Karita PFBC 플랜트를 건설하였다. 이 플랜트는 70 MWe PFBC-machine(GT140P) 가스터빈 1대와 290 MWe 증기터빈 1대 및 가압 유동층 보일러 P800 모듈로 구성되었으며, 수입된 저유황 석탄을 사용할 수 있도록 설계되었다. 가스터빈은 ABB Carbon의 GT140P PFBC-machine이 설치되었으며, P800 보일러는 ABB Carbon의 인가 하에 IHI에서 제조하였다. 크기가 지름 16m, 높이 52m, 총 무게가 3,600 ton에 달하는 이 보일러는 초임계압 241 bar/566℃, 재열증기는 593℃의 조건으로 설계되었다.

Karita 발전소의 시운전은 1999년에 시작되었고 1월부터 5월에는 cold testing, 5월부터 hot testing을 시작하였고, 1999년 8월 2일 처음으로 송전계통에 연계되어 80 MW를 생산한 지 두 달만인 1999년 10월 2일에 성공적으로 정격출력 운전(350 MW)을 개시하였다.

라. Osaki 플랜트

Chugoku 전력 소유인 Osaki 플랜트는 원래 오일과 LPG를 사용하는 500 MW 급 발전소로서 1979년에 계획되어 있었으나, 전력수요의 느린 성장으로 인하여 건설이 지연되었고, 수요가 급증한 이후에도 여러 번의 계획 변경이 있었으며 최종적으로 PFBC의 건설이 추진되었다. 250 MW급의 PFBC 2대가 1995년부터 설치되고 있으며, 1호기의 상업운전 개시는 2000년 12월 예정이며, 2호기의 상업운전은 2005년 12월로 예정되어 있다.

연소가스에서 NOx를 제거하기 위하여 선택적 비촉매 탈질장치(SNCR)가 보일러의 출구에 설치되고 촉매 탈질장치(SCR)는 가스터빈의 출구에 설치된다. 총 탈질율은 90.5 %로 설정되었다. 또한 연소가스에서 분진을 제거하기 위하여 가스터빈의 입구와 연돌의 입구에 각각 사이클론과 bagfilter를 조합한 분진제거장치를 설치하였으며, 총 집진율은 99.955 %로 예상하고 있다. 사이클론은 각 연소로의 출구에 2단 구조로 설치되어 있다.

4. 결 론

석탄화력 발전의 기술적 한계를 극복하고 석탄의 고효율 및 환경 친화적 이용 등 미래의 환경규제 강화에 대비하기 위해서 환경 및 기술성이 우수한 신기술 발전방식으로의 기술전환 필요성이 대두되고 있으며, 이러한 여건변화에 효과적으로 대응하기 위해 정부의 제5차 장기전력수급계획에 2007년 9월 준공예정인 청정석탄발전소(CCT) 300 MW급 건설계획이 반영되어 있다. 검토대상 발전방식으로는 IGCC와 PFBC가 있으며, 한전은 종합적인 평가에 있어서 기술적, 경제적, 환경적, 정책적 측면에서 심도있게 검토를 진행할 예정이다.

이에 아시아에서 가장 활발히 PFBC 기술을 개발 및 적용하고 있는 일본의 PFBC 입증 설비 건설 및 운전현황, 기술개발 동향 및 향후전망에 관한 최신 기술에 대하여 문헌 조사하였으며 앞으로도 PFBC의 국내도입 타당성 검토자료로 활용할 수 있도록 심층적인 PFBC 운전상태 분석과 운전성능예측 시뮬레이션 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 김종진 외, “가압유동층 복합발전 실용화 장애기술 및 핵심요소기술 분석 (최종보고서)”, 한전 전력연구원, 1996
2. 김종진 외, “가압유동층 발전기술 현황분석과 추진전략에 관한 연구 (최종보고서)”, 한전 전력연구원, 1996
3. 진경태 외, “Bench Scale 가압 유동층 석탄연소 기술개발에 관한 최종보고서”, 통상산업부, 1997
4. MITA, Shigeo, “Present Situation and Prospects for Coal Application Technology”, 일본 석탄이용국제회의, 1998
5. Nobuhiro Misawa 외, “Operating results and the test plan for ash circulation system of 71MWe PFBC demonstration plant in Wakamatsu”, Proceedings of the 15th international conference on fluidized bed combustion, 1999
6. Akira Toriyama 외, “Operating results of the Advanced Ceramic Tube Filter(ACTF) at Wakamatsu 71MW PFBC Demonstration plant”, Proceedings of the 15th international conference on fluidized bed combustion, 1999
7. “Karita PFBC P800 up to full load”, ABB Carbon, 1999
8. Jim Anderson, “Technical and commercial trends in PFBC”, ABB Carbon, 1999