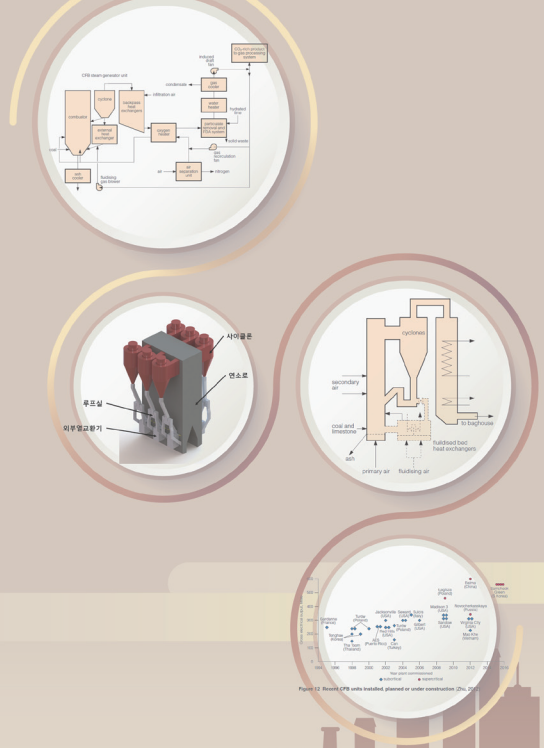


친환경 고효율 유동층 발전기술 개발 현황

이태희 | 한국전력공사



1. 서론

화석 연료는 현재 뿐만 아니라 가까운 미래까지 전력생산의 일차 에너지원으로 이용될 것이며, 이 가운데 석탄은 낮은 가격과 풍부한 매장량, 다양한 활용성으로 인해 주요 화석연료로 계속 남을 것으로 전망된다. 하지만 현재 석탄연소 발전이 CO₂와 각종 공해물질(미세먼지, NOx, SOx 등) 배출원으로 인식되고 있는 상황에서 더욱 엄격해지고 있는 환경규제를 충족시키기 위해서는 친환경 고효율 석탄발전 기술 개발이 필요한 시점이다. 본고에서는 다양한 연소기술 가운데 유동층 연소(fluidized bed combustion) 기술을 이용한 친환경 고효율 발전기술 개발 현황을 소개하고자 한다.

미세한 고체 입자(모래, 회)를 용기에 넣고 분산판을 통해 균일하게 유체(가스 또는 액체)를 공급하면서 유속을 증가시키면, 고체 입자에 작용하는 유동저항이 증가하여 마치 유체처럼 유동하는 상태가 된다. 유동층 보일러는 이러한 유동화 현상을 이용하여 연소로 내의 증물질(모래, 회)에 공기를 주입하여 유동화 시키면서 기동용 버너를 이용하여 증물질을 서서히 가열한 후, 충분한 온도에 도달하면 연료를 공급하여 연소반응을 일으키고 기동용 버너를 끈다. 유동층 연소는 미분탄(pulverized coal) 보일러와 달리 연료에 화염을 생성시키지 않고 고온의 증물질이 유동, 순환하면서 연료의 연소 및 열을 전달하여 증기를 만들어 발전하는 방식으로, 입자가 거

의 균일하게 혼합되고 고체 입자와 유체의 접촉이 좋아 다양한 종류와 크기의 연료를 연소시킬 수 있다. 이러한 특징으로 인해 유동층 보일러는 저급탄, 바이오매스, 폐기물 등의 다양한 연료의 이용이 가능하고 연소로 내부에 균일한 온도분포를 가질 뿐만 아니라, 미연탄소분의 재순환에 의한 체류시간의 증대로 높은 연소효율(>99%)을 가진다. 또한 낮은 연소온도(800~900°C)로 인해 NOx의 발생량이 적고, 연소 중 노내 탈황이 가능하여 청정발전 기술로 부각되고 있다.

2. 고효율 초임계 순환유동층 보일러 개발 현황

유동층 연소기술은 운전압력 및 유속에 따른 입자흐름 상태에 따라 상압과 가압, 그리고 기포유동층(bubbling fluidized bed)과 순환유동층(circulating fluidized bed) 기술로 구분된다. 이 가운데 상압에서 연소되는 순환유동층 보일러 기술이 현재 전력생산에 가장 널리 이용되고 있다. [그림 1]은 순환유동층 보일러의 일반적인 형태를 보여주고 있다. 순환유동층 보일러의 구성은 연료의 연소와 증물질의 유동-비산이 일어나는 연소로, 비산 유출되는 입자를 기체와 분리하여 포집하고 연소로 내부로 다시 순환시키는 사이클론(cyclone) 및 룽셀(loop-seal), 그리고 열흡수 및 성능을 조절하는 유동층열교환기, 보일러 대류전열부(convective back-pass)로 구성된다. 연소로 하단부 분산판을 통해 일차공기(primary air)가 주

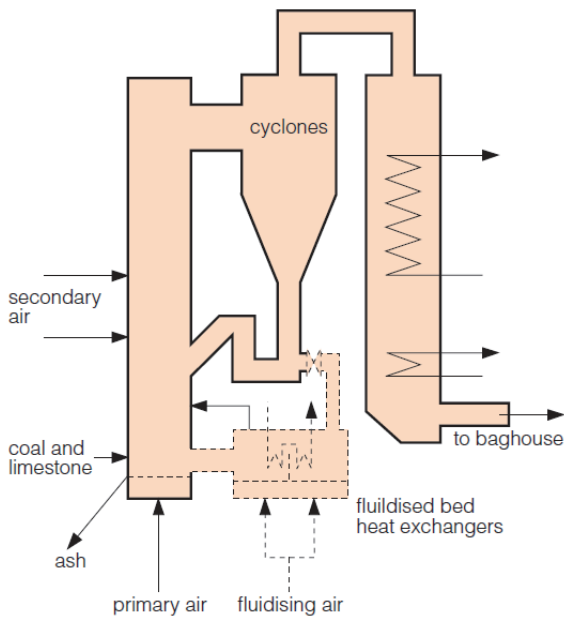


그림 1. 순환유동층 보일러 개략도

입되어 층물질의 유동을 일으키고, 이차공기(secondary air)는 일정 높이의 연소로 측면을 통해 공급되어 횡방향 혼합 및 연소공기로 이용된다. 연소로에서 연소반응으로 발생된 열은 층물질 및 고온의 연소가스에 의해 벽면의 전열관을 통해 일부 흡수되며, 잔여열은 밖으로 배출되는 미세 입자 및 배가스 등의 열원을 통해 대류전열부에서 흡수된다. 시스템의 종류에 따라 유동층 외부열교환기(fluidized bed heat exchanger) 혹은 저회 처리부에서 열원을 흡수하기도 한다.

순환유동층 보일러 기술은 자본비용을 줄이고 발전소 효율을 향상시키기 위하여 발전용량을 키우고 증기 조건을 초임계(super critical) 또는 초초임계(ultra super critical)로 올리는 연구를 수행하였다. 증기 압력 및 온도가 증가함에 따라서 발전효율 향상으로 공해물질 배출량도 저감할 수 있다. 아임계(sub-critical) 보일러의 경우 발전소 효율이 40% 미만이지만 초임계 발전소의 경우 42% 이상의 발전 효율을 얻을 수 있다. 그림 2는 전 세계적으로 개발된 주요한 순환유동층 발전소 현황을 보여주고 있다. 대용량 초초임계 분야에서는 삼척에 500 MW급 4기를 공급한 Foster Wheeler 사의 기술이 가장 앞선 것으로 평가되고 있다. Foster Wheeler는 독자적인 콤팩트 사이클론 및 INTREX(유동층 저회 냉각기와 열교환기 통합) 기술을 바탕으로 모듈 설계 및 용량증대를 통해 800 MW급의 초초임계 보일러 기술을 확보한 것으로 알려져 있다. Alstom 사

는 300 MW급의 순환유동층 발전소 운전경험을 바탕으로 이 중화상(pant-leg) 형상의 600 MW급의 초임계 보일러 설계 기술을 개발하였다. 더불어, Foster Wheeler 및 Alstom 등과 연계하여 기술개발을 이끌어온 중국에서도 동방, 하얼빈 및 상해 보일러 제작사들의 공동연구 및 실증을 통해 Baima 600 MW급 초초임계 순환유동층 보일러 상용화에 성공하였으며, 현재 800 MW급 이상의 순환유동층 보일러 설계 기술을 확보한 것으로 알려져 있다.

3. 친환경 유동층 신발전 기술

순환유동층 보일러의 증기 고도화 및 대용량화는 발전효율 증대와 경제적인 측면에서는 크게 기여할 수 있으나, 미세먼지와 CO₂ 등의 오염원 배출 저감에는 어느 정도 한계를 지니고 있다. 최근 국내외 화력발전 기술은 경제적, 안정적 전력 생산을 추구하는 고효율 발전기술에서 초정정 환경구현을 통한 Zero-Emission 기술 개발을 요구하고 있다. 특히, 국내에서는 미세먼지 배출의 주요 원인 중에 하나로 화력발전을 언급하고 있어, 이에 대한 해결책은 Zero-Emission 기술을 통한 No-Stack 발전 기술의 구현이다. 또한, 신재생에너지 활용을 통한 CO₂ 저감 정책에 부응할 수 있는 바이오매스 활용 기술 개발이 국내외에서 지속적으로 이루어지고 있다.

순산소 연소기술의 기본 개념은 연소용 공기를 산소로 대체함으로써 CO₂와 증기로 구성된 배가스에서 CO₂를 손쉽게 포집할 수 있도록 하는 것이다. 하지만 순수한 산소로 연소를 할 경우 화염 온도가 너무 높아 연소로에 손상을 주게 되므로 배가스의 일부를 재순환하여 산소와 혼합함으로써 연소로 온도를 제어하게 된다. 그림 3은 순산소 순환유동층 보일러의 개요인데, 크게 순환유동층 연소로, ASU(air separation unit), CO₂ 처리부로 구성된다. 그림에서 보는 것과 같이 순산소 순환유동층 보일러에서는 사이클론에서 포집된 층물질을 유동층 외부열교환기에서 냉각하여 연소로에 주입함으로써 연소로 온도를 제어할 수 있다. 이로 인해 연소로 온도 제어를 위해 재순환되는 배가스 양을 줄일 수 있어서 연소로 내의 산소 농도를 더 높일 수 있게 된다. 배가스 재순환 양의 감소 및 산소 농도의 증가는 보일러 크기 및 동력손실을 줄일 수 있으므로 비용 절감과 효율 증대를 기대할 수 있다. 일반적인 순산소 미분탄 연소와 비교하여 순산소 순환유동층 연소 기술은 다음

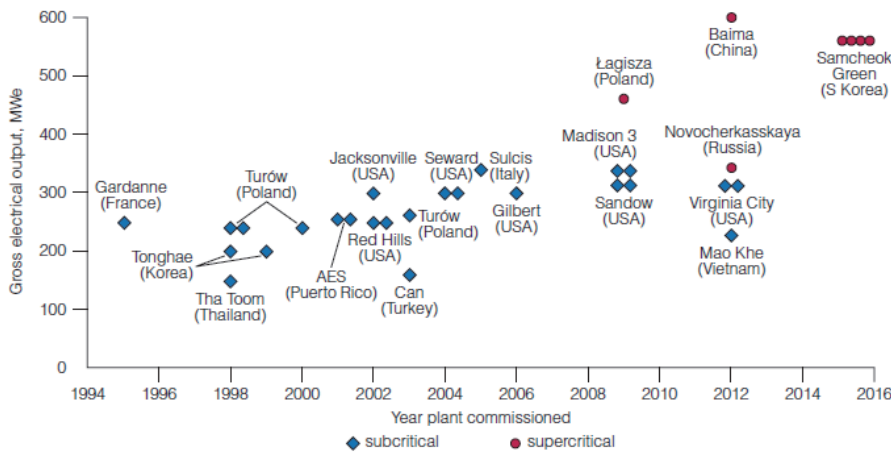


그림 2. 순환유동층 발전소 개발 현황

순산소 순환유동층 기술은 유럽을 중심으로 Foster Wheeler와 Alstom 등에서 설계를 통한 성능평가 및 타당성 검토를 통해 기술 개발이 이루어지고 있다. EU에서는 Spain의 CIUDEN에 3~30 MWth 순산소 순환유동층 기술개발을 완료하고 현재 300 MWe 상업화 추진 중에 있다. Foster Wheeler에서는 폴란드의 Łagisza 초임계 순환유동층 발전소를 순산소 유동층으로 Retrofit 하였을 경우의 성능평가를 통해, 순산소 유동층보일러 기술의 Ready 상태를 구현한 것으로 보고되고 있다. 국내에서는 2007년부터 지경부 에너지자원기술개발사업으로 진행된 미분탄 화력발전용 순산소 연소 기술 개발 과제가 한전 전력연구원 주관 하에 진행되었다. 해당 연구는 영동화력 1호기(한국의남발전 운영)에 순산소 연소 실증을 목표로 보

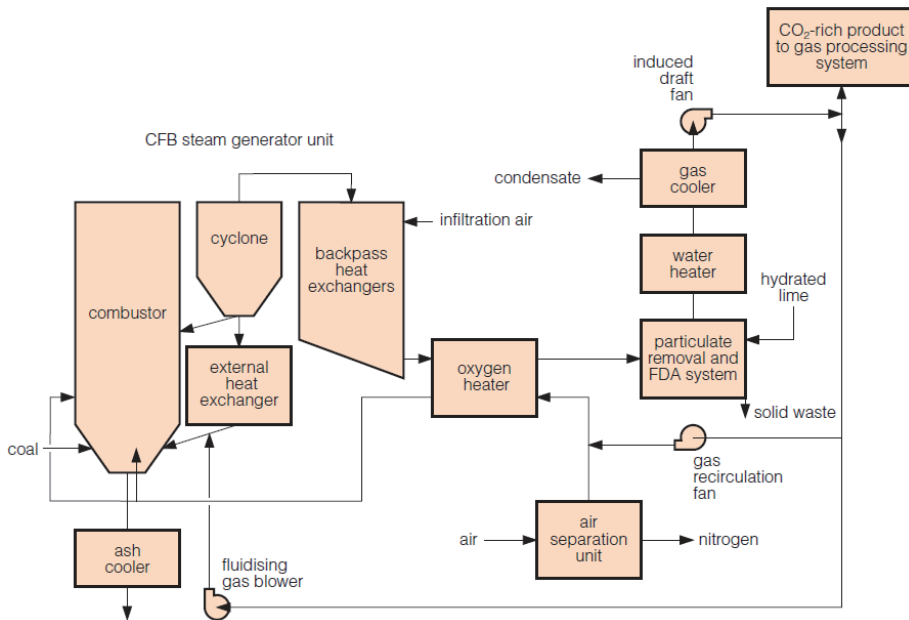


그림 3. 순산소 순환유동층(oxy-CFB) 보일러 개요도

과 같은 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

- 보일러 크기의 감소(높은 산소 농도)
- 공기 연소와 산소 연소 전환 용이
- 복잡한 버너 설계 및 운전기술 불필요
- 다양한 연료 사용(우수한 기체-고체 혼합 및 고체 재순환에 의한 높은 연소율, 미분 불필요)
- 공기 침투량 감소(대기압보다 미세하게 높은 연소로 압력으로 oxy-CFB 1%, oxy-PC 5%)
- 낮은 오염물질 배출량

일러, ASU, CPU(CO₂ processing unit), 환경설비, 통합 시스템에 대한 기본 설계까지 완료되었으나, CO₂ 포집 후 저장에 대한 문제와 더불어 순산소 미분탄의 발전 경제성 부분의 제고로 인해 실증 기술의 Ready 상태로 유지되고 있다. 한전 전력연구원에서는 이러한 미분탄 기반의 순산소 연소기술 뿐만 아니라, 순산소 유동층 발전기술 개발을 위한 개념 특허 및 공정의 기초해석을 수행하였다.

한편, 미국 및 캐나다 등에서는 미국 에너지성 지원으로 순산소 가압유동층 기술에 대한 연구가 진행되었는데, 미국

GTI(Gas Technology Institute) 주관으로 CanmetEnergy, Linde, Alstom, EPRI 등이 참여하였다. 현재 1 MW급 Pilot 규모의 순산소 가압유동층 기술을 개발하였으며, 후속 연구개발로 15 MWth급 Large Pilot 규모의 실증 연구개발을 계획 중에 있다. 순산소 가압유동층은 매우 콤팩트한 연소로 및 열교환기로 구성되어 기존 보일러의 1/3 크기에 비용도 절반 정도로 줄어들고, 배가스에서 순수한 CO₂를 얻을 수 있으므로 재순환 및 포집이 용이하며, 미세먼지와 SO_x 제거를 통해 공해물질 배출이 거의 없는 초청정 발전이 가능하다. 이를 통해 향후 CO₂ 포집이 가능한 고효율 초청정 신발전 기술로 열병합발전 또는 복합발전에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

유동층 연소 기술의 큰 장점으로 큰 설비의 변경 없이 다양한 종류의 연료를 이용할 수 있다는 점이다. 최근 기후환경 변화로 인해 CO₂ 배출량 감소가 이슈로 부각되고 있는 상황에서 바이오매스를 에너지원으로 이용하는 기술은 CO₂ 배출을 완화하기 위한 주요한 수단으로 인식되고 있다. 유동층 연소 기술을 활용하여 석탄 사용량의 15%를 바이오매스로 대체할 경우 CO₂ 배출량의 35% 가량을 감소시킬 수 있는 것으로 평가되고 있다. 유동층 보일러는 다양한 바이오매스(또는 관련 폐기물 연료)의 전소 및 석탄과 혼소를 시행하고 있으며 이를 통해 CO₂ 배출 저감 및 연료다변화에 기여하고 있다.

4. 전력연구원의 고효율 친환경 유동층 발전기술 개발

한전 전력연구원은 유동층 분야의 다양한 연구를 수행하면서 유동층 성능 예측 모델 및 진단 시스템 개발, 연료 다변화 및 혼소 실증에 관한 기술을 구축하였고, 국내외의 다양한 상용 순환유동층 발전소의 운전 최적화 및 성능 개선을 지원하였다. 이러한 순환유동층 연소 기술을 바탕으로 전력연구원은 두산중공업과 공동으로 600 MW급의 초초임계 순환유동층 보일러 설계기술 국산화 프로젝트를 수행하여 순환유동층 보일러 핵심기기의 고유모델 및 통합 설계틀을 개발하였다. 그림 4는 전력연구원과 두산이 공동으로 개발한 600 MW급 초초임계 순환유동층 보일러 외관을 보여주고 있다. 향후 확보된 설계기술을 바탕으로 실증사업을 통한 검증을 추진 중에 있다.

최근 전력연구원은 미세먼지, CO₂ 등의 환경 이슈에 따른 청정발전 요구에 대응하기 위해 순산소 가압유동층 연소기술

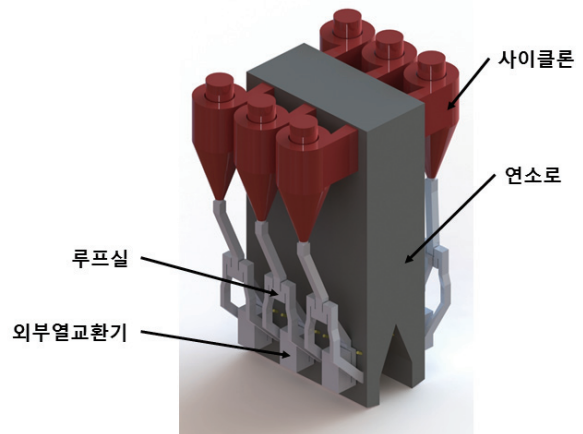



그림 4. 600 MW급 초초임계 순환유동층 보일러 외관(한전-두산 설계기술 공동 개발)

과 고온 CO₂ 가스화/열분해 기술을 융합한 복합발전 기술 개발을 시작하였다. 1단계(2018년 ~ 2020년)에서는 핵심공정과 기본모델 설계기술을 개발하고, 2단계에서는 Large Pilot(15 MWth급) 순산소 가압유동층 보일러의 실증을 목표로 하고 있다. 이를 통해 CO₂ 배출 대응과 공해물질 배출이 없는 고효율의 초청정 발전 기술을 구현할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 

참고문헌

- [1] Toby Lockwood, "Techno-economic analysis of PC versus CFB combustion technology", IEA Clean Coal Centre, 2013
- [2] Zhu Q, "Update on lignite firing", CCS/201, UK, IEA Clean Coal Centre, 2012
- [3] Nsakala N Y, et al., "Alstom's development of advanced CFB based technologies for CO₂ mitigation", Cleaner Air 2005 - the 8th International Conference on Energy for a Clean Environment, Portugal, 2005
- [4] Qian Zhu, "Developments in circulating fluidized bed combustion", IEA Clean Coal Centre, 2013
- [5] W. Follet, "Oxy-Combustion Pressurized Fluidized Bed with Carbon Dioxide Purification", 2016
- [6] Jäntti T, et al., "Circulating fluidized-bed technology-toward zero CO₂ emissions", 2007