

초초임계 순환유동층 보일러 기술 소개 및 현황

Introduction and Current Status of Ultra Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler

전북대학교 자원에너지공학과 이시훈
한국전력공사 전력연구원 이종민

DOI <http://dx.doi.org/10.18770/KEPCO.2016.02.02.211>



Abstract

The increase of world's population and economic development are the keys drivers behind growing demand for energy. Especially the demand for electricity would eventually result in an increase of coal usage. Therefore ultra supercritical circulating fluidized bed boiler has been developed as solutions of economic eco-friendly technologies for coal and of increasing supplies of low grade fuels. Ultra supercritical circulating fluidized bed boiler has an once through type of steam cycle different from drum type in subcritical circulating fluidized bed boiler. Also, the duplication of a proven commercial module with 100-300 MWe subcritical circulating fluidized bed might be the key for design of 500~800 MWe ultra supercritical circulating fluidized bed boiler. After 2017, ultra supercritical circulating fluidized bed boiler might become standard model over subcritical circulating fluidized bed boiler. Therefore, this paper will help you to understand ultra super critical circulating fluidized bed (USC-CFB) through describing the background, status and prospect of the CFB technology.

전세계의 인구 증가와 경제 발전은 지속적인 에너지 수요의 증가를 가져오고 있다. 특히, 전력부분에서는 아시아 및 아프리카, 그리고 중남미 등의 개발도상국을 중심으로 그 수요가 지속적으로 증가하고 있어 주요 에너지원인 석탄의 이용도 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있다. 그러나, 이산화탄소 및 대기오염원, 그리고 미세먼지 등의 배출 등은 석탄을 이용한 전력생산에 있어 환경친화적인 기술로의 대응방안 마련과 더불어, 고효율의 다양한 저급연료를 활용할 수 있는 발전 기술의 개발이 요구되고 있다. 이에, 기술개발 및 그 상용화 시장이 점차 증대되고 있는 초초임계 순환유동층 보일러에 대한 관심이 증대하고 있다. 초초임계 순환유동층 보일러는 중소형의 아임계의 드립형 구조에서 벗어나 대용량화의 기본 구조인 Once Through 형태의 증기 순환 구조를 지니고 100-300 MWe의 상업용 모듈의 복제를 통해 600 MW급이 상용화 운전 중에 있으며, 향후 설계가 완성된 800 MWe의 상업화 진행이 기대되고 있다. 초초임계 순환유동층 보일러는 2017년 이후 아임계 순환유동층 보일러 설치 용량을 추월하여 표준형 모델이 될 것으로 전망되고 있어, 본 논문에서의 이의 기술적 배경과 개발 현황 그리고 시장전망 등을 통해 기술적 이해를 도모하고자 한다

Keywords : Ultra supercritical, circulating fluidized bed, boiler, coal combustion

1. 서 론

전세계의 인구 증가와 경제의 발전은 에너지 수요를 증가시키는 주요 원인이다. 최근 발표된 BP사의 자료 [1]를 보면, 2035년까지 세계 인구는 15억명이 증가하여 거의 88억명의 인구에 도달하고 동시에 국내총생산(Gross domestic product, GDP)도 2배 이상 증가한다. 이와 같은 인구 및 경제의 발달

은 필연적으로 에너지 수요를 증가시킬 것이다. BP사는 2035년까지 전세계 GDP 성장이 둔화되고, 저탄소 사회로의 빠른 전환이 일어나며, 셰일 가스 및 셰일 오일의 영향력이 확대됨으로써 전세계 에너지 시장이 큰 변화를 겪을 것으로 예상된다. 특히 저탄소 사회로의 전환을 야기시키는 다양한 정책들의 시행은 에너지 믹스(Energy Mix)의 변화를 주도하게 되며 전체 에너지 시장은 세계 경제가 지속적으로 성장

함에 따라서 에너지에 대한 수요도 지속적으로 증가하게 될 것으로 예측하고 있다 [1][6]. 그림 1은 BP사가 석유, 석탄, 천연가스, 재생에너지 자원과 같은 주요 에너지원의 점유율을 2035년까지 예측한 자료이다 [1]. 그림을 보면 지난 10년 동안 석유 가격의 급변동으로 인해서 석유의 사용량이 감소하고 석탄의 사용량이 증가하나, 최근 개발이 확대되는 셰일가스와 같은 가스 자원의 지속적인 성장과 재생에너지 자원들에 대한 이용이 증가하면서 석탄과 석유의 사용량은 2035년까지 감소하는 것을 확인할 수 있다.

천연가스와 재생에너지 자원이 에너지 소비의 증가를 주도하는 발전 분야에서도 지속적으로 나타날 것으로 예상하고 있다 [1][2]. 전체 에너지 소비에서 발전 분야가 차지하는 비율은 42%에서 2035년 45%로 증가되고 2014년 43%를 차지한 석탄은 2035년 35% 수준으로 떨어지고 비화석연료들이 차지하는 비중이 증가된다 [2]. 그러나 지역별 석탄 소비량을 예측한 자료를 보면 [1], 전세계의 석탄 소비량은 2035년까지 지속적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 미국 및 유럽의 OECD 국가들이 풍부한 가스 자원들의 공급과 재생에너지의 비용 저감, 강력한 환경 규제로 인해서 석탄에 대한 의존도가 낮아지는 것을 제외하면, 중국의 석탄 의존도는 2035년까지 유지되고 그 외의 다른 지역들은 석탄에 대한 의존도가 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있다.

미국 에너지부 산하의 Energy Information Agency(EIA)는 2013년 38조 360억 kWh의 전기 생산량이 지속적으로 증가하여 2040년에는 47조 970억 kWh에 도달할 것으로 예측하였다 [2]. 2013년을 기준으로 석탄은 전체 전력 생산의 39%를 차지하고 있으나 천연가스의 이용 증가와 재생에너지의 확대에 인해서 점유율은 34%로 감소될 것으로 예측하고 있다 (그림 2, 3 참조). 그림에도 불구하고 석탄이 전력 시장에서 차지하는 비율이 가장 높으며 이는 석유 가격의 변동에

도 불구하고 발전 분야에서 석탄이 가장 중요한 위치를 차지하고 있음을 보여준다. 다만 석탄화력 발전이 2013년 304 GW에서 2040년 260 GW로 감소하는 것으로 예상하고 있다. 이는 신규 플랜트의 느린 성장과 오래된 석탄 화력 발전 플랜트의 퇴출에 기인한 것으로서 강화되는 환경 규제로 인해서 높은 비용이 예상되기 때문으로 보인다.

에너지 분야의 전문 기관들의 조사 결과에서 보듯이 발전 분야에서 현재 가장 많이 이용되고 향후에도 그 위치를 지속적으로 유지할 에너지 자원은 석탄이다. 이는 석유, 천연가스 등의 다른 화석연료와 비교할 때, 석탄은 부존량이 많고 전 세계 각국에 고르게 분포하고 있기 때문이다. 세계의 석탄 확인매장량은 BP의 자료에 의하면 9,091억 톤이고 가채연수는 155년이다. 이 같은 석탄의 매장량 및 이용에도 불구하고 석탄은 석유나 천연가스와 비교하여 질소분, 유황분, 회분을 다량 포함하기 때문에 질소산화물(NOx)나 유황산화물(SOx)등의 환경오염물질의 배출량이 많고 단위전력 당

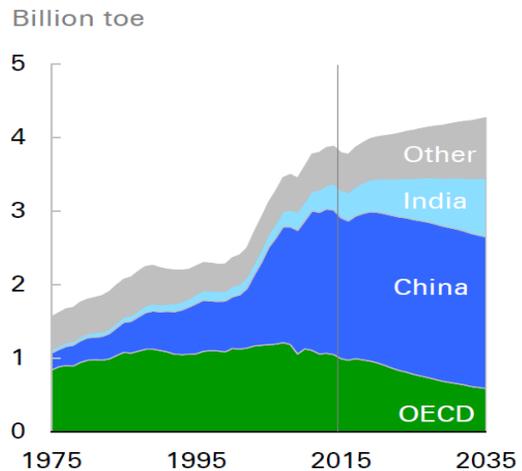


그림 2 지역별 석탄 소비량 [1]

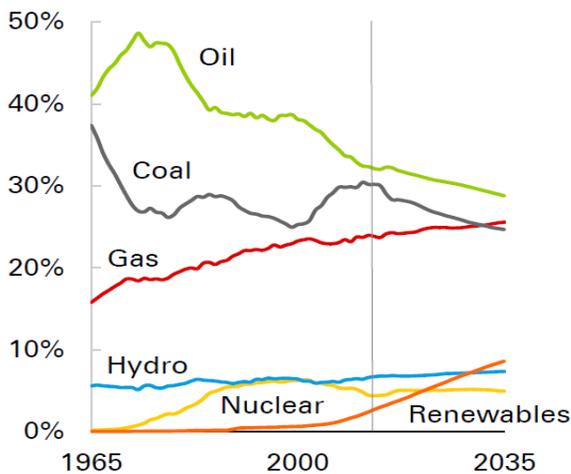


그림 1 주요 에너지원별 점유율 변화 [1]

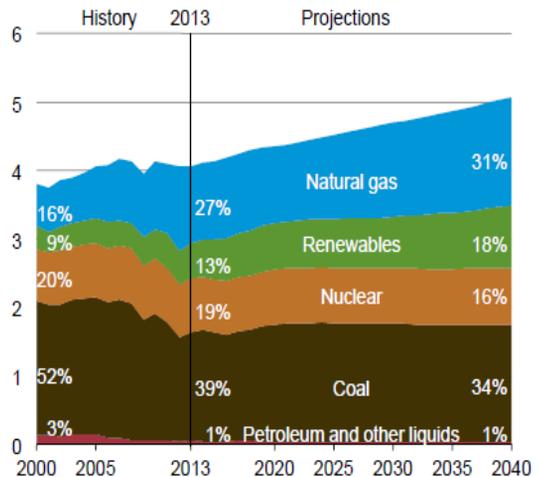


그림 3 연료별 전기 생산 [2]

CO₂ 배출량은 석유화력의 약 1.3배, LNG연소 가스터빈복합 발전의 약 1.9배에 달하기 때문에 환경오염이 심한 저급의 자원으로 인식되고 있는 상태이며 선진국을 중심으로 석탄 보다는 천연가스 및 재생에너지 자원으로부터 전력을 생산하려는 시도가 증가하여 석탄의 중요도가 감소되고 있다. 그럼에도 불구하고 자국 에너지 자원에 대한 개발 필요성의 증가, 상대적으로 저렴한 가격, 오염 물질들을 현저히 저감시켜 주는 새로운 발전 방식들과 정제 설비들의 개발에 힘입어 석탄 발전은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다 [6]-[9].

석탄을 이용하여 전력을 생산하는 기술로 전통적으로 이용되는 기술은 미분탄 연소 방식이다. 미분탄 발전소는 석탄은 75 μm 이하의 입자로 분쇄한 다음 버너를 이용하여 연소시키고 이를 통해 증기를 생산하는 방식으로 현재 아임계 발전 방식에서 벗어나 초초임계 발전까지 개발이 진행되었고 1기당 발전 용량이 1,000 MWe에 도달하였으며 이와 같은 높은 용량, 효율을 바탕으로 전체 석탄화력 발전 시장에서 85% 이상의 점유율을 차지하고 있다. 그러나 질소산화물, 황산화물에 대한 규제치가 낮아져 후처리 시설 비용이 증가하고 재생에너지 자원들의 낮은 이용으로 인하여 새로운 방식의 보일러 개발이 요구되고 있다 [8].

기존의 미분탄 발전 방식이 보유하고 있는 단점을 극복한 방식이 유동층 발전 방식으로 기포유동층, 순환유동층 등으로 다양하게 개발 및 설치되고 있다. 유동층 방식은 매체를 사용하여 석탄을 미분탄 발전 방식보다 낮은 온도에서 연소시켜 증기 터빈 또는 가스 터빈을 이용하여 전력을 생산하게 된다. 상압에서 운전되는 유동층, 순환유동층 방식은 연소 효율이 미분탄 발전 방식보다 높고 로내 탈황 등을 통해서 환경 오염물질의 배출이 적어 최근 빠르게 개발 및 보급이 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 보일러 시장의 주력으로 자리잡고 있는 미분탄 발전 방식에 비해 순환유동층 발전에 대한 이해도가 낮아 본 고에서는 새로운 발전 설비로서 순환유동층 발전 설비에 대해 설명하고자 한다. 특히 최근에 높은 발전 효율로 큰 관심을 받는 초초임계 순환유동층 보일러 기술에 대한 소개와 기술 개발 동향, 시장성을 분석하였다.

2. 순환유동층 보일러

2.1 유동층

유동층이란 고체 입자가 상승하는 기체 또는 액체와의 접촉으로 고체층이 액체와 같은 상태로 전이되는 현상이며 기체 유속에 따라 기포 유동층, 순환 유동층 등의 다양한 영역이 존재한다. 이들 유동층 영역들 사이의 전이는 고체와 유체의 물성뿐만 아니라 유체 유속에 의존하며, 층 직경과 같

은 다른 요인들도 유동화 영역의 전이에 중요한 역할을 한다. 유체가 낮은 유속으로 고체 입자층을 통과하면 유체는 정지되어 있는 입자들 사이의 빈 공간으로 침투하여 흐르게 되며 이를 고정층이라 한다. 이때, 층 내에 존재하는 입자의 움직임은 없다 [10].

그림 4에서 보듯이 유속이 증가함에 따라, 입자들이 움직이고 일부는 진동하고 제한된 영역에서 이동하기 시작한다. 이는 유체에 의해서 고체에 가해지는 항력 (drag force)이 중력과 같아지며 고체들이 상호 움직임을 갖기 시작한다 [10][11].

이 상태를 최소 유동화 상태라 하며, 이 상태의 공탐속도를 최소유동화속도 (minimum fluidizing velocity) 라고 한다. 이후 계속적으로 유속이 증가하면 압력강하는 거의 일정하게 유지되지만 고체층이 팽창되며 고체들은 서로 분리되어 거동하고 층은 전체적으로 액체와 같은 특성을 보이기 시작한다. 아울러 층에는 큰 공극의 형태로 통과하는 기체들이 출현하며, 이를 기-액계에서와 유사하게 기포라고 부른다. 이 기포의 거동은 층을 매우 격렬하게 끓는 액체와 같은 형상으로 만든다. 기체의 흐름은 고체입자의 마모 및 비산유출을 발생시키며, 유속이 증가함에 따라 급격히 증가한다. 이러한 현상이 나타나는 유동층을 기포유동층 (bubbling fluidized bed) 이라고 한다. 유속의 지속적인 증가는 기포의 빈도수를 증가시켜 층의 균일도를 좋게 하며 점차적으로 기포 형태의 경계를 흐리게 한다. 이를 난류유동층 (turbulent fluidized bed) 이라 한다. 난류유동층에서는 고체의 농도는 감소하지만 유동층은 계속 유지된다. 난류유동층에서 기체의 층내 체류시간은 기포유동층에서 보다 짧지만 기-고체간의 접촉효과는 더욱 우수하여 기포유동층에서는 유동화 시키기에 어려운 점착성 고체의 유동화에 유리한 장점이 있다. 난류유동층으로부터 유속이 더욱 증가하면 입자의 비산유출이 급증하게 되며 유속이 입자 수송속도를 넘으면 층내 모든 입자는 비산유출되어 싸이클론에 의한 재순환이 없이는 층내 입자농도를 유지할 수 없는 상태에 이른다. 이를 고속유동층 (fast fluidized bed) 또는 순환유동층이라고 하며, 층내 입자농도는 고체의 유량에 따라 변화된다. 그림 4에서 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 뿐만 아니라 주입된 차가운 고체 및 공기가 빠르게 조업온도로 가열될 수 있다 [10][11].

2.2 순환유동층 보일러

순환유동층 보일러 기술은 연소로 내부의 기체-고체 유동

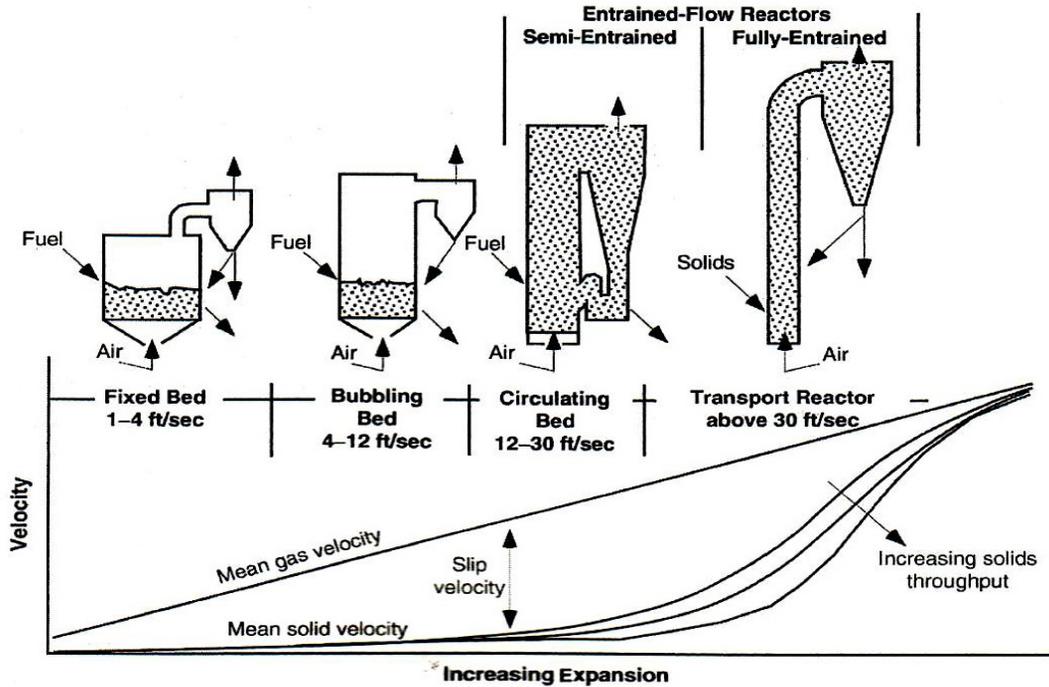


그림 4 기체 유속에 따른 유동층 분류 [11]

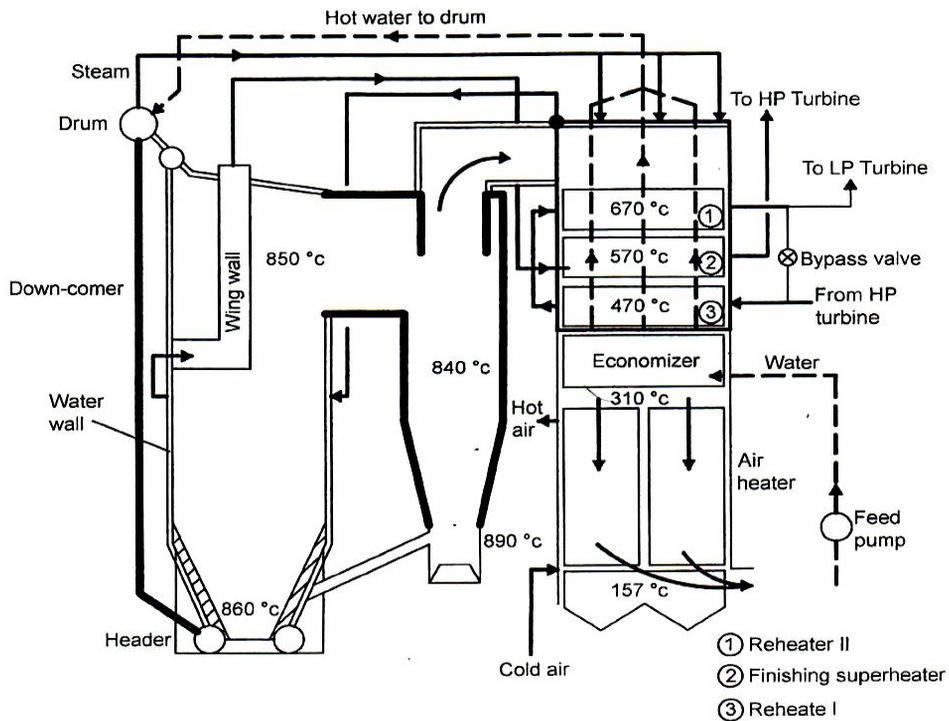


그림 5 순환유동층 보일러 개략도 [11]

조건에서 화석연료를 연소시키고, 이때 가열된 고온의 층물질이 비산 및 순환하면서 전열관으로 열이 전달되어 수증기를 발생시키는 발전 방식이다. 그림 5는 순환유동층 보일러의 일반적인 형태를 보여주고 있다.

순환유동층 보일러의 구성은 연료의 연소 및 층물질의 유동 및 비산이 일어나는 연소로와, 비산 유출되는 입자를 기체와 분리하여 포집하고 연소로 내부로 다시 순환시키는 사이클론(cyclone) 및 룽셀(loop-seal), 그리고 열흡수 및 성능을

조율하는 유동층열교환기 및 보일러 convective back-pass로 구성된다. 연소로 하단부 분산판을 통해 일차공기가 주입되어 층물질의 유동을 일으키고, 이차공기는 일정 높이의 연소로 측면을 통해 공급되어 횡방향 혼합 및 연소공기로 이용된다. 연소로에서 연소 반응으로 발생된 열은 층물질 및 고온의 연소가스에 의해 벽면의 전열관을 통해 일부 흡수되며, 잔여열은 밖으로 배출되는 미세 입자 및 배가스 등의 열원을 통해 convective back-pass에서 흡수된다. 또한, 시스템의 종류에 따라 외부 열교환기 혹은 bottom ash 처리부에서 열원을 흡수하기도 한다 [8][9][11].

순환유동층 보일러는 기존의 화염 연소 방식인 미분탄(PC : pulverized coal) 보일러와 달리 연료에 화염을 생성시키지 않는다. 순환유동층 보일러는 연소로 내에 층물질을 주입하고 분산판을 통해 공기를 공급하여 유동화 시키면서 기동용 버너를 이용하여 층물질을 서서히 가열시킨다. 층물질이 충분히 가열되면 연료를 공급하여 연소반응을 일으키고 기동용 버너는 정지하게 된다. 고온의 층물질이 유동, 순환하면서 열을 전달해 주는 연소방식을 갖고 있어서 화염이 생성되지 않는 연료도 고온의 층물질과 섞여 서서히 타면서 층물질을 가열하는 에너지원으로 사용될 수 있다. 따라서 저급의 고수분탄 및 고회분탄 뿐만 아니라 oil shale, petroleum coke, wood waste, 도시 및 산업 폐기물 등을 연료로 할 수 있으며 특히, 저열량 연료에 대해서도 보조 연료 없이 전소할 수 있는 장점이 있다. 또한 기체-고체의 원활한 혼합, 높은 연소 속도, 그리고 미연탄소분의 재순환에 의한 체류시간의 증대로 인해 높은 연소 효율을 얻을 수 있다.

순환유동층 보일러는 화염이 발생되지 않으므로 일반적으로 연소로의 온도가 800~900℃ 정도로 운전된다. 미분탄 보일러와 비교해 낮은 연소 온도로 인해 환경 측면에서는 석회석 첨가에 의한 연소 중 탈황이 가능할 뿐 아니라, 연소 중 약 95% 이상의 황산화물을 제거할 수 있는 것으로 보고

되고 있어 경우에 따라서는 별도의 배연탈황설비(Flue Gas Desulfurizer)를 설치할 필요가 없어 비용 절감효과를 기대할 수 있다. 또한, thermal NOx의 발생이 억제되어 NOx의 생성 및 배출이 타 연소 방식에 비해 매우 낮은 장점이 있다.

순환유동층 보일러와 일반적으로 널리 이용되고 있는 다른 형태의 보일러들(스토커, 기포 유동층, 미분탄 등)의 특성을 비교하여 표 1과 표 2에 나타내었다. 순환유동층 보일러는 높은 기체 유속, 넓은 연소 영역 등을 제외하면 기포 유동층과 유사한 특징을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 미분탄 연소와 비교하면 보다 큰 크기의 석탄, 낮은 질소산화물 배출, 로내 탈황의 특징을 지니고 있다. 표 2의 기고 연소 공정 비교를 보면 순환유동층 연소로의 유동층 입자는 0.05~0.5 mm가 주로 이용되고 고체 혼합이 매우 우수하고 0.85~0.99의 공극률을 지니며 온도차가 상대적으로 적으나 마모로 인한 고체 손실이 발생하고 있음을 확인할 수 있다 [8][11].

3. 초초임계 순환유동층 보일러

3.1 초초임계 순환유동층 보일러

현재의 순환유동층 보일러는 앞서 언급한 그림 5에서 보듯이 아임계(Sub-Critical)의 드럼형 보일러 구조로 300 MWe 급이 주 기술로 보급되어 있으며, 발전 경제성과 환경성 및 연료수급 안정성을 고려하여 점차 대용량화, 고효율화 되고 있는 상황이다. 순환유동층 보일러의 고효율화는 발생하는 증기의 온도 및 압력을 초임계(Super Critical) 또는 초초임계(Ultra Super Critical)로 올려 증기 사이클로부터 얻는 효율을 높이는 방법이 가장 유력한 방법으로 전세계의 많은 기업, 연구소들이 개발에 박차를 가하고 있다. 표 3과 그림 6은 증기 조건의 개선에 따른 효율의 증대를 보여준다.

표와 그림에서 보는 것과 같이 증기의 압력 및 온도가 증가함에 따라서 열전달 속도가 개선되고, 발전효율의 향상 및

표 1 보일러의 형태 및 특징 [11]

Characteristics	Stoker	Bubbling	Circulating	Pulverized
Height of furnace or burning zone(m)	0.2	1-2	15-40	27-45
Superficial gas velocity(m/s)	1-2	1.5-2.5	4-6	4-7
Excess air(%)	20-30	20-25	15-20	15-30
Grate heat-release rate(MW/m ²)	0.5-1.0	0.5-1.5	3-5	4-6
Coal size(mm)	6-32	0-6	0-6	<0.1
Turndown ratio	4:1	3:1	3.4:1	3:1
Combustion efficiency(%)	85-90	90-96	95-99.5	99-99.5
Nitrogen oxide(ppm)	400-600	300-400	50-200	400-600
Sulfur dioxide capture in furnace	None	80-90	80-90	None

표 2 Comparisons of principal gas-solid contacting combustion processes [11]

Property	Packed bed	Fluidized bed	Fast bed	Pneumatic transport
Application in boilers	Stoker fired	Bubbling fluidized	Circulating fluidized	Pulverized coal fired
Mean particle diameter(mm)	<300	0.03-3	0.05-0.5	0.02-0.08
Gas velocity through combustor zone	1-3	0.5-2.5	3.5-6	15-30
Typical U/Ut	0.01	0.3	2	40
Gas motion	Up	Up	Up	Up
Gas mixing	Near plug flow	Complex two phases	Dispersed plug flow	Near plug flow
Solids motion	Static	Up and down	Mostly up, some down	Up
solid-solid mixing	Negligible	Usually near perfect	Near perfect	Near plug flow
overall voidage	0.4-0.5	0.5-0.85	0.85-0.99	0.98-0.998
Temperature gradient	Large	Very small	Small	May be significant
Heat transfer coefficient(W/m ² K)	50-150	200-550	100-200	50-100
Attrition	Little	Some	Some	Considerable
Agglomeration	Considerable	Some	Less	No problem

표 3 아임계 보일러와 초임계, 초초임계 보일러의 작동 parameter 비교 [8]

Plant Type	Price (\$/kW)	Steam Pressure	Steam Temperature	Auxiliary Consumption	Efficiency (%)	CO ₂ (G/kWh)	SO ₂ (G/kWh)
Conventional	850	165	538/538	4-6	<40.0	~855	~2.4
580°C-SC	1050	290	580/580/580	5-7	>42.0	~780	~2.2
700°C-USC	1100	365	700/700/700	6-8	>48.0	~710	~2.0

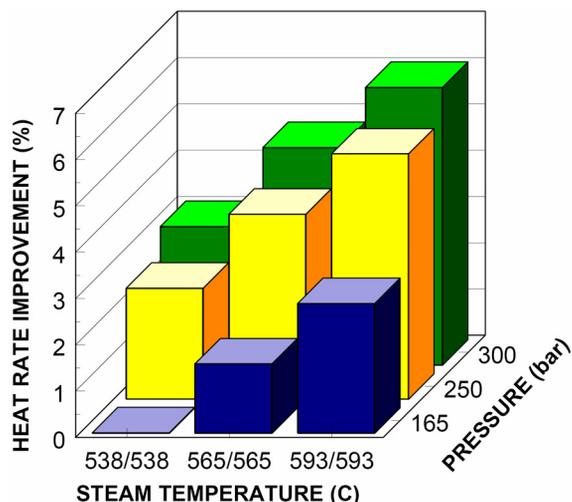


그림 6 증기 조건의 향상에 따른 열전달 향상 [8]

배출되는 공해물질 양도 저감되는 것을 알 수 있다. 현재의 아임계 보일러의 경우 발전소 효율이 40% 미만이지만, 증기 온도와 압력을 초초임계까지 올릴 경우 발전소 효율은 45% 이상을 얻을 수 있는 것으로 발표되었다 [8][9][12]-[16].

초초임계 순환유동층 보일러의 개발을 위하여 지금까지 고려된 핵심 사항은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 순환유동층 보일러의 대용량화를 위한 보일러 구조의 개발이다. 순환유동층 보일러의 대용량화를 위하여 순환유동층 보일러 기술을 선도하고 있는 Alstom사와 Foster Wheeler사의 대용량화 전략을 그림 7과 8에 나타내었다.

그림에서 보면 양사는 기존 실증된 상업화 모듈(100 ~ 300 MWe)의 duplication을 통한 대용량화를 진행하고 있다. 특히 사이클론의 크기와 입구 덕트의 디자인 및 고체 순환부는 순환유동층 보일러 대용량화의 핵심이다. 배가스에서 순환입자의 포획효율은 연소로 내부의 층물질 밀도를 일정하게 유지하고 전체 순환 루프 내에서 재순환 되는 미세입자를 보유하는 중요한 인자이다. 높은 층밀도 및 포획효율은 높은 열전달과 연소로 내 균일한 온도를 보장하고, 연료입자를 가능한 오랫동안 연소로 내에 체류케 함으로써 최적의 탈황 기능과 높은 연소 효율을 가지게 하며 균일한 온도 조건은 Thermal NOx의 저감에도 도움을 준다. 더불어 모듈의 증대가 대용량화의 핵심이므로 용량이 증가함에 따라서 보일러에 적용되는 사이클론 숫자가 증가하는 특징을 지닌다. 또한 초임계압

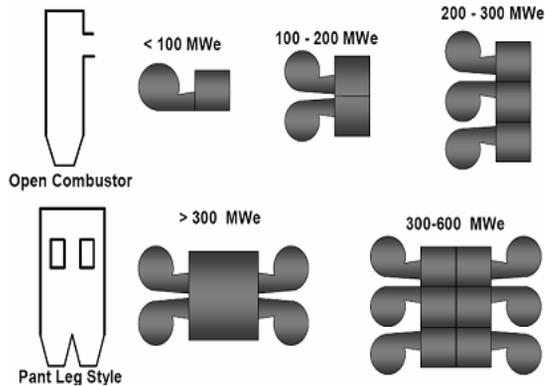


그림 7 Alstom사의 순환유동층 보일러 대응량화 [8]

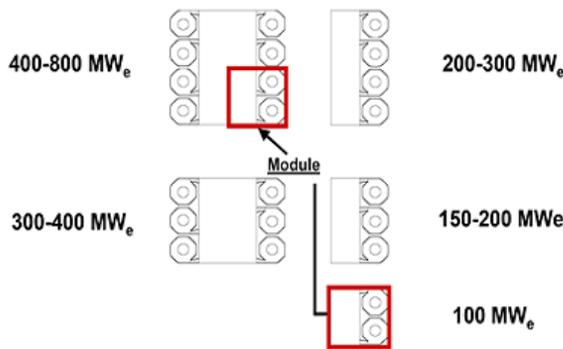


그림 8 Foster Wheeler사의 순환유동층 보일러 대응량화 [8]

CFB 보일러는 앞서 논의된 형태 중 대응량에 적합한 형태로 설계되어야 하며 초(초)임계에 해당하는 고온 고압의 스팀 생성을 위해 고려할 점이 있다고 보고되었다 [8][9][12].

- CFB와 PC 보일러는 연소로 내 절대온도의 차이 뿐 아니라 수직방향의 온도 구배에 큰 차이가 있어 열전달 특성이 다르며 이를 고려하여 수관의 모양과 형태가 달라져야 한다.
- CFB의 경우, PC에 비해 절대 온도가 낮으며 수직방향 온도 구배가 비교적 완만하다. 또한 하단의 온도가 가장 높으며 상단으로 갈수록 점진적으로 열전달율, 열흡수량이 하락한다.
- CFB의 경우 유동사의 순환에 의해 수관 벽면에서 발생하는 슬래깅(slagging) 및 파울링(fouling) 현상이 줄어들어 시간이 흐름에 따라 열전달율에 큰 변화가 없다.
- CFB 보일러의 경우 PC에 비하여 증발기 부분에 상대적으로 낮은 질량유량의 물이 필요하며 Rifled tube가 smooth tube에 비하여 큰 장점을 보이지는 않는다.
- CFB 보일러의 경우 Spiral tube에 의한 효과가 크지 않다.

둘째는 초초임계 달성을 위한 증기시스템의 고도화 및 고

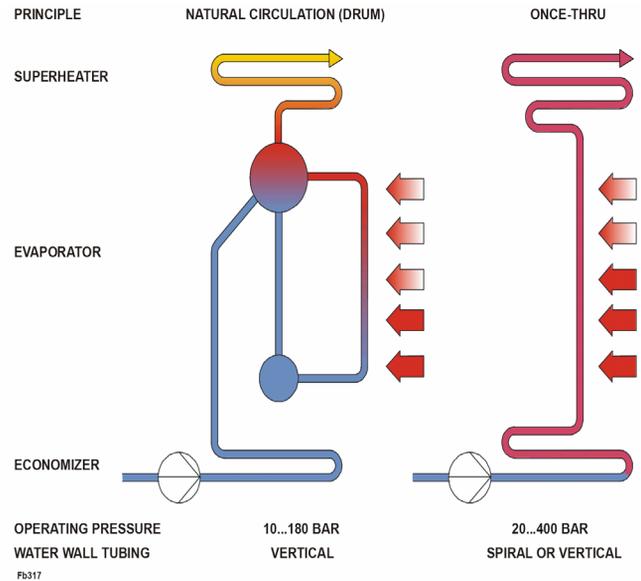


그림 9 보일러의 증기 순환 방식(아임계 vs 초임계) [8]

온, 고압 조건에 견딜 수 있는 재료의 선정이다. 일반적인 아임계 보일러는 상단에 드럼이 장착되어 있고 보일러 내 증발기 안에 물(하단부)과 스팀(상단부)이 함께 공존하는 형태이나 초임계 이상에 사용되는 보일러의 경우 증발기에 스팀만 존재하며 이에 따라 드럼이 필요 없는 Once Through 형태를 가진다 (그림 9 참조). 그림과 같이 아임계 조건에 사용되는 튜브는 유로의 저항을 최소화하기 위해 직경이 매우 크고, 튜브를 지나며 물이 완전히 스팀으로 전환되지 않기 때문에 포화증기 온도의 물이 튜브 표면에 항상 존재하여 각 튜브가 균일한 온도를 가지므로 열적 변형문제가 크지 않다. 그러나 초임계 조건의 튜브는 관내에서 스팀으로 완전히 변화되어 후류로 갈수록 스팀의 온도가 꾸준히 상승하며 아임계 조건에 비해 유체의 양이 상대적으로 적으므로 주변 온도에 대해 민감하게 변화하고 이는 각 튜브간의 온도차를 만들게 되어 각 튜브 간의 열적 변형 문제가 발생하게 된다. 이는 보일러 내 공간적인 온도차이가 심한 PC 보일러의 경우 매우 심각한 문제로, 실제 USC/SC PC 보일러에서 튜브 간의 열 흡수 차이는 30% 까지 다를 수 있다. 따라서 보일러 내 온도차가 심한 경우 튜브 내 최고 온도를 낮추기 위한 디자인이 필요하며 이를 위해 보일러 내 여러 부분을 통과하도록 수관을 배치하는 다중경로(multi-pass) 기법이나 수관의 나선형 배치(spiral arrangement)를 통한 관내 온도 균일화 기법이 개발되어 이용되고 있다 [8][11][16].

그림 10 은 보일러 수직방향의 heat flux의 변화를 각 보일러 형태에 따라 비교하여 나타낸 것이다 [8][9]. 그림에서 보면 wall-fired 또는 arch-fired 등의 미분탄 화력의 경우 높이에 따라 heat flux의 변화가 매우 심하게 나타나지만, 순환

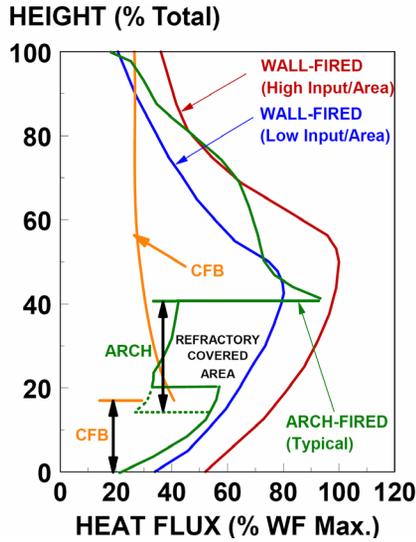


그림 10 Heat Flux의 비교 [12]

유동층 보일러의 경우 보일러 하단에서 약간 높은 온도를 보이고 상단 대부분의 위치에서 비슷한 수치를 보임을 알 수 있다. 앞서 once through 에서 발생할 수 있는 열적 변형 문제를 고려할 때 순환유동층 보일러가 가지는 우수성을 확인 할 수 있다. 이와 같이 초초임계의 증기 조건을 고려한 순환유동층 보일러의 우수성은 다음과 같다.

- PC firing에서 평균 heat flux보다 최대 heat flux가 훨씬 크지만 CFB에서 Heat flux의 최대 불균일성을 살펴보면 20% 이하로 PC에 비하여 매우 균일한 특성을 가진다.
- CFB 보일러에서 가장 높은 heat flux 영역은 증발기의 water heating section으로 가장 낮은 물 온도에서 최대 heat flux가 나타나므로 열전달효율 면에서 가장 유리하다.
- SC/USC CFB의 평균 heat flux는 PC 보일러와 큰 차이가 없다.
- CFB의 균일한 circumferential heat flux는 spiral furnace 튜브와 같은 복잡한 수관 배치 대신에 설치와 관리가 간단한 vertical furnace 튜브를 이용할 수 있게 한다.
- CFB boiler는 작고 일정한 heat flux($\sim 600 \text{ kg/m}^2$)에 대해 작은 mass flow를 이용할 수 있고 따라서 펌프손실이 적다.

3.2 기술개발 동향

석탄화력발전은 SC 및 USC 운전으로 얻어지는 사이클 상 열효율 증가로 대용량, 초임계압으로 기술 전환되고 있으며 2020년까지 초초임계압 발전기술이 화력발전의 주력 기종이 될 것이다. 또한 단위 발전용량은 계속 증가하여 1,000 MW 이상의 석탄화력 발전소가 상용 운전되고 있다. 순환유동층

기술도 미분탄 연소기술과 경쟁하며 대용량, USC 기술 개발로 전환 중이며, 현재 폴란드의 Lagisza CFB 발전소(460 MWe)가 SC급으로 상용 운전 중에 있으며, 중국의 Baima CFB 발전소(600 MWe)도 상용 운전에 들어간 것으로 발표되었다 (그림 11 참조) [13].

그림에서 보듯이 대부분의 주요 제작사들은 순환유동층 보일러의 대형화 기술 개발로 280기압, 600℃ 이상의 초초임계 증기 생산을 위한 기술 개발 및 이의 상용화에 집중하고 있어, U(SC) CFB 상업화 속도가 타 용량의 아임계 CFB 보다 큼을 알 수 있다. 순환유동층 보일러의 대용량화 기술개발은 크게 Foster Wheeler 사와 Alstom 사가 양분하여 성장하는 가운데, 신규 중국시장의 확대에 따른 중국기술(Dongfang, Harbin, Shanghai)의 상승이 부각되고 있다. 대용량 순환유동층 기술개발은 초초임계급으로 800 MWe급까지 설계가 되어 있는 것으로 보고되고 있으며 각 제작사별 고유한 순환유동층 기술 특징을 지닌 것으로 평가된다. Foster Wheeler 사의 경우 compact cyclone, INTREX 등의 고유한 기술이 있고, Alstom 사는 FBHE(Fluidizing Bed Heat Exchanger) 및 연소로 이중 화상(pent-leg) 구조 등의 고유한 기술의 통해 대용량의 초임계압 순환유동층 기술을 개발하고 있다 [8][9][14][18].

2012년 기준으로 중국에는 전체 CFB 보일러가 약 3,000 호기 보급되었으며 발전용량은 80 GWe에 이르는 것으로 알려져 있다. 그 가운데 300 MW급 이상의 CFB 보일러는 112 호기가 운영 중인 것으로 보고되고 있다. 중국 CFB 기술은 연구기관과 대학 및 중공업사 협력으로 자체 기술개발을 수행하는 것과 동시에 Foster Wheeler, Alstom 등에서 300 MWe 급 이하의 아임계 CFB 기술을 도입하였다. 중국은 도입한 아임계 CFB 기술로 2006년 300 MWe급 lignite CFB 발전소를 건설한 이래 기술흡수를 통한 CFB 기술 개선으로 Dongfang 보일러가 2013년에 세계 최대 규모인 600 MWe급 초임계 CFB 보일러인 Baima 발전소 운전에 성공하여 운전이 진행되고 있다 [18]. 또한 표 4에 나타난 바와 같이, 중국에서는 350 MW급 SC CFB 10기를 가동 중에 그리고 70여기 이상이 제작중에 있는 것으로 보고 되고 있어 세계 유동층 기술의 중심이 될 것으로 전망하고 있다 [13].

국내의 유동층 관련 연구는 1990년에 기포유동층 및 순환 유동층의 열분해, 연소, 열전달의 Lab. Scale 기초 연구 및 순환유동층, 가압유동층의 Lab, Bench, Pilot scale의 연소, 가스화, 요소기술 개발이 이루어졌다. 2000년대에는 아임계 상용 순환유동층에서 연소, 설계, 운영 기술 등이 개발되었으며 유동층 소각 기술과 가압유동층 핵심 기술이 개발되었다. 최근에는 순환유동층 열병합 국산화 및 요소기술 상용화, 운영기술 최적화, 연료다변화 상용 적용(폐기물에너지, 바이오매스)에 관한 기술 개발이 진행되고 있다. 현재 한전과

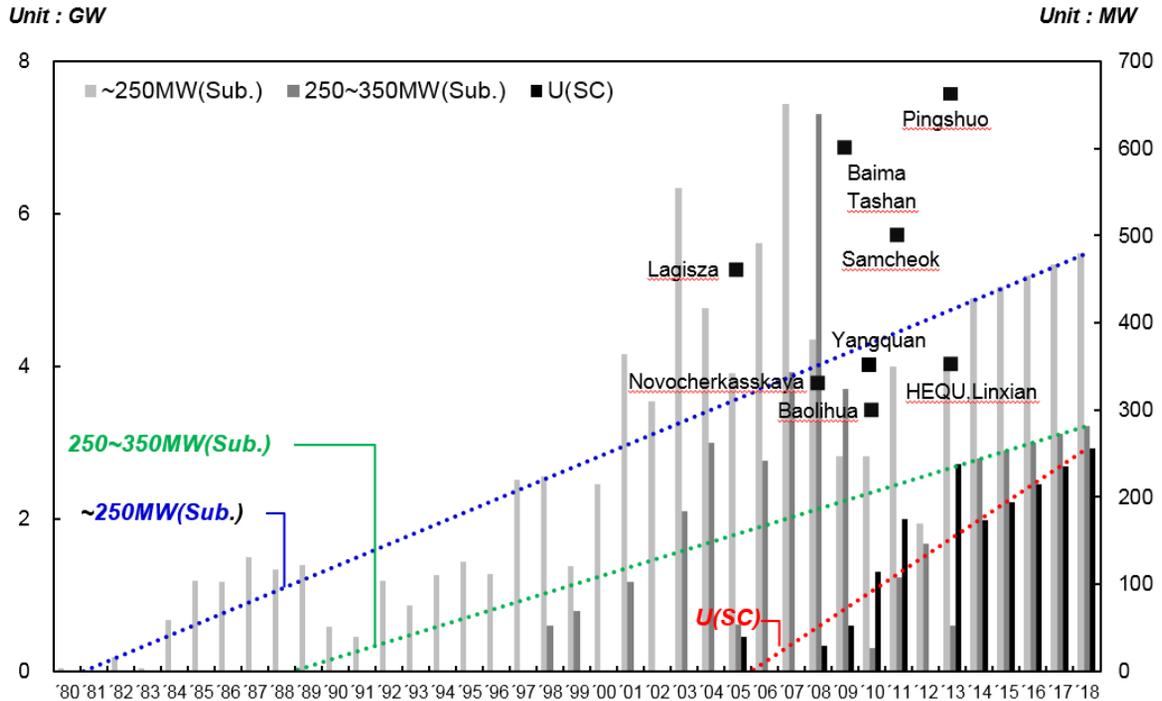


그림 11 건설 착수년 기준의 순환유동층 용량별 총 건설 현황 (1,145 units, 116.5 GW)

표 4 350MW supercritical CFB in operation

The Name of Owners	Providence	Unit	Boiler Manufacturer	Generator's output	Operatin
Shanxi Guojin	Shanxi	2	Dongfang Boiler Co., Ltd.	350 MW	2015, July
Huadian Shuozhou	Shanxi	2	Shanghai Boiler Co., Ltd.	350 MW	2015, October
Shendong Hequ	Shanxi	2	Dongfang Boiler Co., Ltd.	350 MW	2015, December
Shanxi Hepo	Shanxi	2	Dongfang Boiler Co., Ltd.	350 MW	2015, December
Xuzhou Huamei	Jiangsu	2	Dongfang Boiler Co., Ltd.	350 MW	2016, Janury

발전사들이 운영 중인 순환유동층 보일러는 세부의 100 MW급 2기, 동해화력의 200 MW급 2기, 여수화력의 300 MW급 1기가 있다. 여수화력에서는 추가적으로 300 MW급 1기 유동층 보일러로 전환 중에 있으며, 삼척화력에는 세계 최대 규모인 500 MW급의 초초임계 순환유동층 보일러 4기가 1,000 MW급 터빈 2기에 연결되어 발전하는 플랜트 2기가 건설 중에 있다. 운전기술은 수차례에 걸친 국내 보일러 설치 및 운전 경험으로 개선되고 있다. 한전 및 발전사들이 다양한 브랜드의 다양한 규격, 다양한 방식의 순환유동층 보일러를 보유하고 있으나, 대용량 순환유동층 보일러는 국외 기술로 설계되었다. 또한 대용량 순환유동층 보일러의 경우 대부분 운영 기술 및 요소기술에 초점을 맞춘 기술개발을 진행하고 있으며, 대용량화 및 초초임계압 보일러 설계 기술에 대한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다 [8][9]. 이에,

2016년 2월에 한전 및 발전 3사(남동, 남부, 동서) 그리고 두산중공업이 국내 자체 모델의 초초임계 순환유동층 개발을 위해 협동연구를 시작한 것으로 보고되고 있다 [13].

한편, 국내 주요 제작사인 두산중공업 및 현대중공업의 기술 개발 및 순환유동층 보일러 제작은 기술제휴 및 병합, 그리고 기술 흡수를 통해 이루어지고 있다. 중, 소용량(150 MW급 이하)의 순환유동층 보일러에 있어서는 현대중공업이 주요 요소기술의 국내 기술 자립 이룬 것으로 평가되고 있으며, 2012년에 두산중공업이 Lurgi(Lentjes)를 인수함에 따라 300 MWe 이하의 설계 능력을 보유한 것으로 판단된다. 더불어, 최대 운영사인 한전(전력연구원)의 경우, 최적 운영을 위한 기술개발 및 그 실용화가 상당부분 진척되어 있으며 그림 12에 나타낸 바와 같이 2013년에 600 MW급 USC-CFB의 개발설계를 도출한 바가 있어 각 기술의 흡수 및 통합을

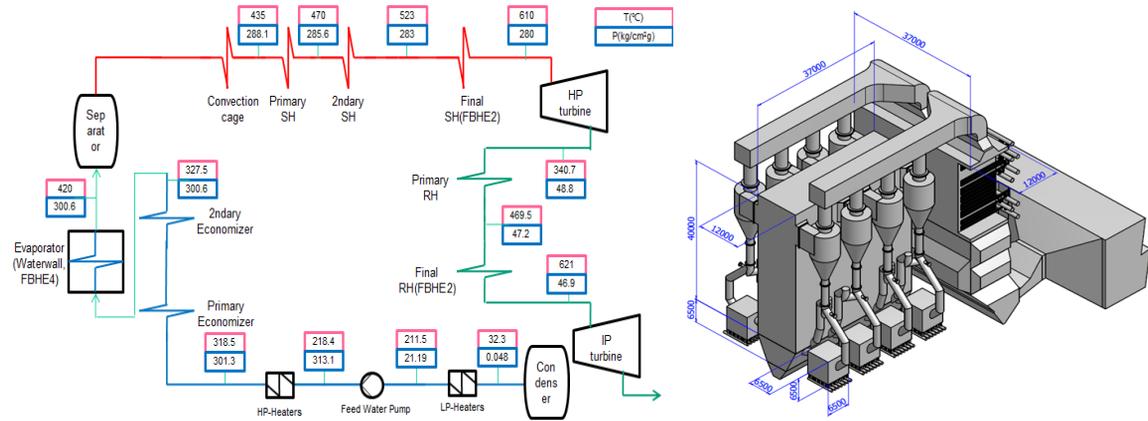


그림 12 전력연구원의 600W급 USC-CFB 개념 설계 도출안

통해 고효율의 초임계급 순환유동층 기술개발이 가능할 것으로 기대된다 [8][9].

3.3 순환유동층 보일러 시장 전망 및 대응 방안

전 세계적으로 1차 에너지로 석탄 사용량은 계속 증가할 전망이며, 이에 화력발전 설비를 이용한 전력생산은 오일 및 고급석탄(역청탄) 등의 공급 부족으로 연료 가격 상승에 따라 저급 연료(아역청탄, 갈탄 등)의 활용이 매우 중요하게 인식되고 있다. 이러한 상황에서 저급 연료의 활용에 있어 고효율, 친환경적 에너지 전환 공정으로서 가장 적합한 발전 설비로 순환유동층 보일러가 크게 주목받고 있다. 순환유동층 보일러 수요 시장은 석탄화력 발전용량이 급격히 증가될 것으로 보이는 아시아 개도국 및 저급탄 산지국, 그리고 석탄의 주요 수입국(한국 등)을 포함하는 인도, 인도네시아, 베

트남, 필리핀, 터키 및 중국 등 신발전 시장과 기존의 석탄 화력 효율 향상에 따라 저급탄으로 다변화하는 미국 및 유럽을 포함한 retrofit 시장으로 구분할 수 있다. ASEAN 지역 국가 중에서 저질탄 매장량 풍부한 인도네시아는 2020년까지 신규 건설 중 석탄발전 비중이 64%, 베트남은 2030년에 전체 발전설비의 절반 이상이 석탄발전으로 예상된다. 유럽 등 OECD 국가들은 신규전력수요 증가에 신재생에너지 확대 등으로 대체하며 석탄화력의 생산수요를 2035년까지 점진적 감소 추세이나, 발전비중은 여전히 큰 상태이다. 탈황 및 탈질 설비를 갖춘 미분탄발전소의 건설비와 운영비 등을 비교하면 고급 연료의 수급이 어려운 경우 순환유동층 발전소의 경제성이 비교우위에 있어 향후 건설될 석탄화력 발전은 순환유동층 발전방식 채택이 증가될 것으로 전망된다 [8][9].

유동층 방식을 이용한 발전 보일러는 1990년대 초 화력발전 신규시장의 2% 내외의 시장 점유율을 보이다 2000년대



그림 13 CFB 보일러 시장규모 및 연평균 성장률 (출처 : IDC, Business Insider, 언론보도자료 토대로 재구성, 2013년)

중반에 이르러 약 10%의 화력발전 신규시장 점유율 기록한다. 대용량 USC급의 순환유동층 보일러의 잠재적 시장 규모는 전체 석탄화력 플랜트 시장의 30% 수준으로 2013년 전체 시장규모 41,575억 달러 중 12,473억 달러로 예상된다. 그림 13은 순환유동층 보일러 시장 규모 및 연평균 성장률을 연로보도 자료를 토대로 재구성한 것으로 2013년부터 2025년까지 연평균 성장률이 약 21%에 이르는 것으로 전망되며 2025년 순환유동층 보일러 시장규모는 약 125,207억 달러가 될 것으로 예상하고 있다 [19][20].

Transparency Market Research는 CFB 보일러 전체 설치용량은 2011~2018년 사이 연평균 약 12.2% 성장되고, USC- CFB 보일러는 35.8%의 성장이 예상된다고 2013년 발표하였다 [21]. 이러한 결과를 고려할 때, 2017년 이후 SC급 이상의 CFB 보일러가 아임계 CFB 보일러의 설치 용량을 추월할 것으로 전망되며, 연평균 성장률에 대한 지역별 순위는 중국 및 일본, 호주 그리고 인도 및 동남아시아 순으로 예상된다 [8][9].

그러므로, 초초임계 순환유동층 기술개발은 석탄 화력 발전 시장의 고효율화 및 청정화 그리고 저급탄 시장의 지속적 증대 및 활용 필요성에 의해 필수 불가결하게 이루어져야 할 것으로 판단되며, 더불어 초초임계 순환유동층 발전 시장의 급격한 증가에 대해 국내 기술의 시장 진출을 위해서는 선제적 기술개발 및 실증을 통한 국산화 개발이 시급이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

증가하는 환경 규제를 만족시키고 효율 및 경제성을 향상시키면서 다양한 저등급 연료들을 이용하는 초초임계 순환유동층 보일러의 개발이 활발히 진행되고 있다. 드럼형의 증기 사이클을 이용하는 아임계 순환유동층 보일러에서 벗어나 once through 형태의 증기 사이클의 이용과 성능이 입증된 100~300 MWe의 순환유동층 보일러의 복제를 통해 현재 800 MWe의 초초임계 순환유동층 보일러 설계가 완료되었다. 선진 개발사인 Alstom사와 Foster Wheeler사가 기술 개발을 주도하고 있으나 중국 및 한전을 비롯한 국내 기업들도 기술 개발을 진행하고 있다. 선진국의 석탄 수요는 점차 가스로 대체될 것으로 예상되나 중국, 인도를 포함한 신발전 시장의 확대와 기존 설비의 retrofit 시장의 활성화가 초초임계 순환유동층 보일러의 개발을 이끄는 원동력이 되고 있으며 2017년 이후에는 아임계 순환유동층을 뛰어넘어 순환유동층 보일러의 표준 모델이 될 것이다.

References

- [1] BP, "BP energy outlook 2016 edition", www.bp.com (2016).
- [2] DOE, "Annual energy outlook 2015", DOE/EIA-0383, USA (2015).
- [3] 다카이 미키오, "세계 전기 사업의 동향", 전기평론, 일본, 2008.
- [4] 국무총리실, "제1차 국가에너지기본계획 -2008~2030-", 대한민국, 2008.
- [5] ABS Energy Research, "Power Predictor 6 Report Ed6-2007", London (www.absenergyresearch.com), UK, 2007.
- [6] 정만태, "고효율 발전설비 분야의 2020 비전과 전략", 산업연구원, 한국, 2007.
- [7] Zhen Fan, Archle Roberson, Stave Goldich, "800MWe Circulating Fluidized Bed Boiler with 1300oF Supercritical Steam", Florida, USA, 2008.
- [8] 한국산업기술진흥원, "Market leading products - 대용량 USC-CFB 보일러", 한국산업기술진흥원, 대한민국 (2014).
- [9] 한국에너지기술개발평가원, "대용량 초초임계압 순환유동층 발전기술 R&D 추진방향", 한국에너지기술개발평가원, 서울, 대한민국 (2014).
- [10] Daizo Kunii and Octave Levenspiel, "Fluidization Engineering", Butterworth-Heinemann, Boston, USA (1991).
- [11] Prabir Basu, "Circulating fluidized bed boilers", Springer, New York, USA (2015).
- [12] Rafal Psik, Ziemowit Slomczynski, PKE, "Final stage of first supercritical 460MWe CFB boiler construction - Project update", Power Gen International, Orlando, Florida, USA (2008).
- [13] McCoy Report Data (2015) and IEA-FBC IA Country Report (2011~2015), Draft Version (2016).
- [14] Ragnar Lundqvist, Rudolf Kral, Pertti Kinnunen, and Kari Myohanen, "The advantages of a supercritical circulating fluidized bed boiler", www.bhelpssr.co.ln.
- [15] Artur Blaszczyk, Wojciech Nowak, and Szymon Jagodzik, "Effects of operating conditions on deNOx system efficiency in supercritical circulating fluidized bed boiler", J. Power Technol., 93, 1-8 (2013).
- [16] Long Wang, Dong Yang, Zhi Shen, Kaiyuan Mao, and Jun Long, "Thermal-hydraulic calculation and analysis of a 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler with annular furnace", Applied Thermal Engineering, 95, 42-52 (2016).
- [17] Zhen Fan, Steve Goidich, Archie Robertson, and Song Wu, "Ultra-supercritical pressure CFB boiler conceptual design study", No. DE-FC26-03NT41737, DOE, USA (2006).
- [18] www.IEA-coal.org.uk
- [19] www.idc.com
- [20] www.businessinsider.com
- [21] www.transparencymarketresearch.com