

순환유동층 연소보일러의 설계 및 운전의 중요 요소

(Important Factors for Design and Operation of CFBC Boiler)

안 관 등* An, Gwan Deung

요 지

순환유동층 연소보일러는 1980년 초 상용화 이후 설비의 신뢰성 확보 및 용량의 대형화 등으로 날로 보급이 확대 되고 있다.

이는 순환유동층 연소보일러의 특·장점인 저가의 다양한 연료사용 및 환경측면에서의 우수한 열병합 발전과 중소 규모의 발전부문에서 경제성을 확보할 수 있기 때문이다.

이와 같은 순환유동층 연소 보일러를 적용한 발전소 건설을 위한 체계적인 기술축적이 필요할 것으로 사료되어 설계 및 운전에 고려하여야 할 중요사항을 검토 소개하고자 한다.

Abstract

The CFBC (Circuited Fluidized Bed Combustion) boilers have been expanded after commercialization in the early 1980s because of the improvement of reliability and the scale-up of the unit size. It can keep competitiveness of CFBC boilers which can use cheap and various kinds of fuel. In addition, they can be applied to the environment-friendly cogeneration plant and have economical efficiency in a middle scale power plant market. As a result, it is necessary to accumulate the systematic technology for CFBC boilers applied on power plants. Therefore, this study introduces important factors in terms of design and operation of the CFBC boilers.

* 대우엔지니어링 화공에너지사업본부 에너지사업그룹 차장

1. 서 론

에너지 자원은 점차적으로 고갈되어 가고 있는 반면에 온실가스 배출 등으로 지구 온난화 등이 심각한 환경 문제가 대두되고 있는 현실을 감안할 경우, 저렴하고 다양한 연료의 사용이 가능하고 환경측면에서 우수한 순환 유동층 연소보일러를 적용한 발전설비는 고체 연료를 사용하는 발전 분야에서 점차 경쟁력 우위를 확보하고 있으며, 특히 유가상승과 더불어 설비의 신뢰도 향상 및 규모의 대형화 등으로 1980년대 이후 급속하게 보급되고 있다.

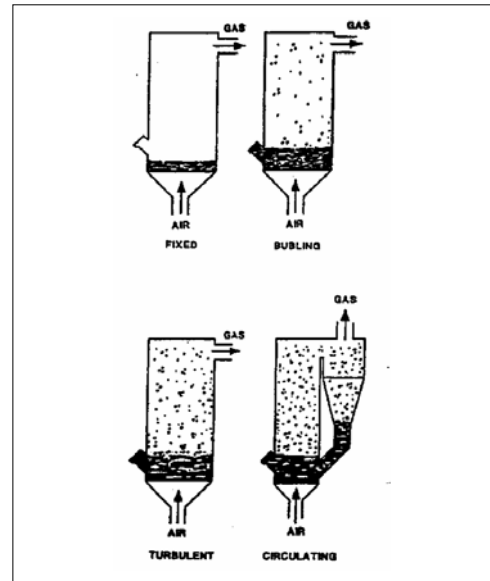
따라서 순환 유동층 연소보일러의 설계 및 운전에 고려되어야 할 주요 인자를 순환 유동층 연소이론 및 세계 유수 Maker의 기술 개발 사례로 검토 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 순환유동층 연소 보일러의 원리

기체를 고르게 분사하는 분산관으로 구성된 연소실 바닥 위에 적정 규격의 Bed material을 채워 공기의 유속을 점차적으로 증가시켜 일정유속에 도달하게 되면 입자의 유동 특성이 기포층 (Bubbling bed) → 난류층 (Turbulent bed) → 고속유동층 (Fast bed)으로 전환하게 되며 고속 유동층 하에서는 연소실내에서 질량 입경 분포에 따라 연소실 높이 영역 안에서 상하유동화 운동을 하고 연소실 밖으로 유출된 입자 중 일부는 Cyclone에서 포집되어 하부 Loop seal에 의해 연소실로 재순환 된다. Cyclone에서 포집되지 않는 미세 입자는 Second pass (Super Heater, Economizer, GAH)를 거치면서 연소, 전열 후 전기 집진기에서 Fly Ash로 포집된다.

이와 같이 순환유동층 연소 보일러는 유동매체를 사용하고자 하는 고체 연료의 착화온도 이상으로 보조연료를 이용하여 기동시 가열한 후 유동화가 가능한 적정크기의 고체 연료를 주입하여 유동매체와 함께 유동화, 재순환 연소방식을 채택한 기술이다.



[그림 1] 유동화 특성 변화

2.2 장점

- (1) 연소실 내를 유동하는 유동매체에 의해 전열면에서의 열전달율이 높다.
- (2) Cyclone에서 미연분을 포함한 유동매체를 포집하여 재순환을 시킴으로서 충분한 연소시간을 확보할 수 있기 때문에 완전 연소를 기할 수 있다.
- (3) 연소실 온도를 900℃ 이하로 유지할 수 있어 Thermal NOx 발생량을 감소시켜 별도의 방지시설 없이 유연탄 연소의 경우 약 50% 저감(200ppm 이하로 유지 가능)

(4) 연소실내에 석회석을 유동매체 및 탈황제 특성에 맞는 규격으로 주입할 경우 연소실 온도가 최적탈황 반응온도(850~880℃)로 유지 운전 시 낮은 Molar ratio ($Ca/S=1.2\sim1.5$)에서 90%이상의 우수한 연소탈황 효과를 거둘 수 있다.

(5) 순환유동매체의 보유열원이 연료고체 기체와 더불어 균일한 혼합 연소과정을 이루고 있어 저급의 Peat, Lignite, Petroleum coke, Bio-mass, Sludge, RDF, 도시쓰레기 등 다양한 연료의 완전한 연소가 가능하다.

(6) 연료입자를 유동화 가능 규격(5~20mm)으로 파쇄하여 사용하므로 미분탄 보일러에서 같은 연료의 미분쇄가 필요하지 않다.

(7) 내부 연소 탈황으로 배가스 중 SO_x 농도가 낮기 때문에 배가스 온도를 약 120℃정도까지 낮출 수 있어 보일러 효율을 2~3% 높일 수 있다.

(8) Ash의 용융점 이하 연소로 Slag가 생성되지 않는다.

(9) Turn down ratio를 4:1까지 가능하여 부하중 운전 유연성을 확보 할 수 있다.

(10) 환경 방지시설 투자비 최소화 및 운영비가 저렴하다.

2.3 단점

(1) 연소실에서 유동매체의 유동화에 의한 튜브전열면의 마모가 심하다.

(2) 유동화 Bed층이 균일하게 이루어 지지 않을 경우 Bed층의 국부적인 온도상승으로 인한 운전 장애가 발생할 수 있다.

(3) Cold start-up 시간이 8~10시간으로 길다. (노내 내화물 보호 및 Bed Material 승온 필요시간)

(4) Bed press 유지 및 Air flow 조정 (Primary air, Secondary air등)등 운전원의 숙달된 기능이 요구된다.

2.4 설계 및 운전 고려사항

(1) 순환유동층 연소 보일러의 최대 장점은 다양한 종류의 연료를 저온 연소(900℃ 이하) 시킴으로서 Thermal NO_x 발생 저감 및 연소과정 중에 SO_x 제거 기술 적용, 연소실에서 배출된 유동매체를 포집 재순환 연소시킴으로서 연소효율을 증대시키는 것이다. 따라서 연소실은 유동매체의 적정한 유동화 및 순환을 위한 이론 및 실증 경험을 통한 최적화 설계가 요구된다. 주요설계인자로는 유동매체 Bed 온도, 유동매체 분포도, 연소실에 주입되는 Lime Stone 및 연료의 Size와 Density, Gas의 체류시간, 연소실 높이, 연소실 전열면적, 연소실 하부 공급 분배 Nozzle에서 분출되는 공기유속 등 다양한 요소가 있다.

(2) 유동매체의 유동화, 재순환 과정에서 발생하는 마모에 대응한 설계 또한 중요한 요소이다.(적정높이까지 내화물 시공 등)

(3) Second pass (과열기, Economizer, Air

Heater 등)의 Ash, CaSO_4 에 의한 Erosion 및 Fouling에 대응한 설계 (In-Line Arrangement 등)

(4) 연소탈황으로 Flue Gas의 Sulfuric Acid dew point가 낮아지므로(약 120°C) ECO와 Air Heater 열전달계수를 고려한 적정 배가스 온도유지를 위한 전열면적배치

(5) Air Heater 하부 Hopper 및 ESP 1단 Hopper의 Fly ASH 성분 분석, 미연분 포함시 Furnace로 재순환 연소

(6) 유동매체

(가) 입자특성 분석 및 변화 고려

- 점착성이 크거나 매우 가는 입자는 입자간 상호 인력이 크기 때문에 정상적인 유동화가 일어나지 않는다.
- 석탄재 및 모래와 같은 적절한 Size와 Density를 갖는 입자군이 비교적 원활한 유동화가 일어난다.
- 건조, 연소, 유동화, 재순환 과정을 거치면서 입도변화가 크게 일어난다.
 - 고온영역에서 분열, 분해, 축소
 - 유동화 과정에서 마모, 파쇄 등

(나) 유동매체구성(Bed Material)및 분포

- 반응한 Lime Stone : 약 90%(CaSO_4)
- 미반응 Lime Stone : 약 2~3%
- 연료 : 약 2~3%
- ASH : 약 3~4%

(다) 유동매체의 규격화 및 재순환 과정

- CFBC 보일러의 운전 Parameter는 Bed Quality이다.

- Bed Material은 Cyclone을 통한 재순환 및 Furnace에서 Clarification 과정을 거치면서 규격화 된다.(100~500 μm)

- Loop Seal의 Bottom Material은 순환매체의 대표시료가 된다.

- 순환되는 유동매체 Size는 연소실 유동화 속도와 Cyclone 효율에 의존하며 이는 유동층 보일러 특성에 따라 유동매체가 규격화 되어야 하는 중요한 이유이다.

- 순환하는 유동매체의 양은 연소실 열전달에 영향을 준다. 즉 연소실 온도에 영향을 주며, 부적절한 규격은 연소실 온도를 상승시키고 탈황에 영향을 준다.

(7) 탈황제인 Lime Stone 규격의 중요성

(가) 순환 유동매체의 약 90%를 유지하고 있는 석회석 화합물은 순환유동층 보일러의 가장 중요한 설계 운전 요소이다.

(나) Lime Stone은 결정형과 무정형으로 구분되며 무정형이 부서지기 쉬우나 반응성이 우수하다.

(다) Lime Stone의 체류시간은 Lime Stone 사용에 영향을 주고 고체상의 CaO 와 기체상의 SO_2 가 이종(Heterogeneous)반응으로 충분한 체류 반응 시간이 필요하다.

(라) Lime Stone은 순환과정에서 분쇄, 마모, 분해 과정을 거치면서 유동매체 및 탈황제로서 역할을 하므로 물리적 특성은 매우 중요하다.

(마) 주입하는 최적의 Lime Stone Size는 순환 유동매체와 같다. 이는 순환 유동 매체

량 및 체류시간을 최대화 한다.

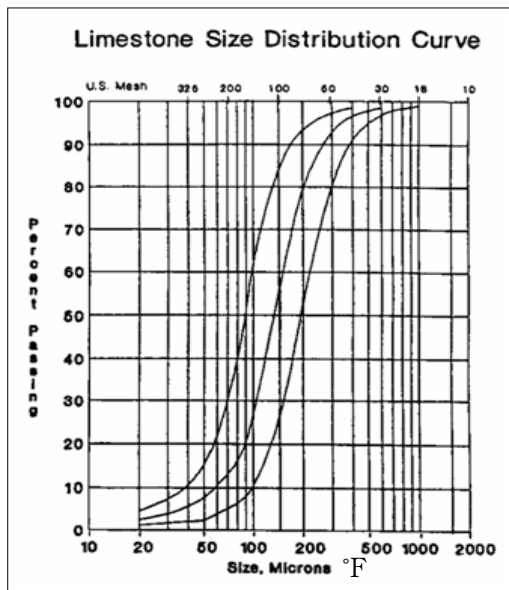
(바) 따라서 규격 외 Lime Stone 사용 시

- 석회석 사용량 증가
- Bed Temp. 증가
- 노내 전열량 감소로 과열기 Spray Water 사용량 증가 초래
- 배가스온도 상승
- NOx 및 SOx 배출량 증가
- Bottom ASH 배출량 증가
- Furnace 마모증가
- 불균일한 유동화 등

상기 사항이 운전의 중요 장애요인이 된다.

(사) Lime Stone Size Distribution Curve

(Pyropower 자료)



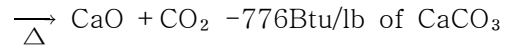
[그림 2] Lime Stone Size Distribution Curve

(8) Emission Control

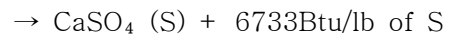
(가) SOx

- Ideal Reaction Temp. Range : 843~900℃(954℃이상에서는 반응이 없다.)

• Calcination



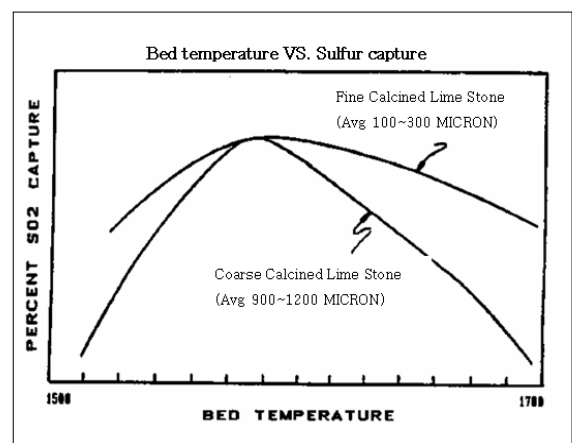
• SO₂ Reaction



• 제거 효율: 약 90% (Molar Ratio, Ca/S : 1.2~2.0)

• Calcium/Sulfur Ratio 영향인자

- Lime Stone Reactivity
- Fuel Sulfur Contents
- Lime Stone Size Distribution
- Mixing of Fuel and Lime Stone In Furnace
- Air Splits(Grid와 낮은 Nozzle Air 증가 운전시 Ca/S 감소, 이 경우 NOx생성을 미세하게 증가)
- Excess Oxygen(1차 공기 유량증가, Total 공기량 일정유지)
- Percent Removal of SO₂ Contents
- Bed Temp.(최적 860~893℃)



[그림 3] Bed temperature VS. Sulfur capture

(나) NO_x

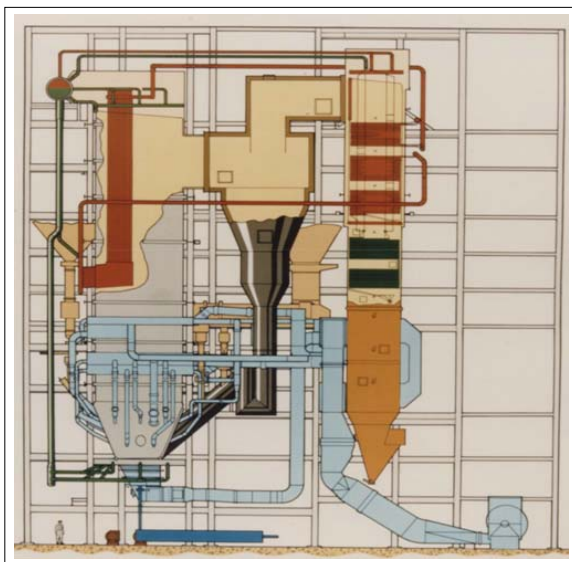
- NO_x는 Fuel NO_x와 Thermal NO_x로 구분
- 저온 순환유동층 연소로 Fuel NO_x 및 Thermal NO_x의 생성을 감소시키고 특히 이론적 연소공기량보다 적은 Primary Air 공급으로 Nitrogen Compound가 Fuel NO_x로 생성되기보다는 일정부분 N₂로 환원된다.

따라서 Primary, Secondary Air Ratio 조정에 의해 연소 효율 및 NO_x 저감을 동시에 얻을 수 있다.

(다) Particulate

탈황제로 사용되는 CaCO₃의 분해 및 탈황반응으로 생성된 CaO, CaSO₄의 고유저항에 따른 영향으로 ESP 집진면적의 다소 증가 필요

2.5 Scale up large Compact CFBC Boiler (300~800MWe)



[그림 4] Pyropower C.F.B.C Boiler

- CFBC 보일러의 신뢰성 및 운전의 유연성을 확보할 수 있는 기술축적과 다양한 신 설계 개

념의 완성으로 용량의 대형화 실현

(1) 1세대 Solid Separator; CBFC의 최대장점인 유동매체의 순환 과정에서 Furnace 출구로 배출된 Unburned Fuel을 포함하는 유동매체를 포집하여 Furnace로 재순환시키는 장치로 일반 산업용 Cyclone 적용으로 300mm 정도의 두꺼운 Refractory(벽체내에 열전달 Tube가 없음)로 Lining되어 있어 초기투자비는 적으나 Heat Loss 및 보수유지비가 크고, 기동시간이 긴 단점이 있음.

(2) 개선 기술

(Foster wheeler Energy Corporation)
Cyclone 벽체내에 Steam Cooled Tube를 설치하고 Metal Studs로 지지하는 25mm 두께의 Refractory로 Lining 함으로서 Refractory 보수 비용저감, Cooled Refractory 얇은 층은 낮은 온도에서 운전이 가능하며, 이러한 온도 조건은 Cyclone과 Furnace의 온도차가 감소하여 열팽창이 최소화 한다.

(가) Steam-Cooled Cyclone은 초기 투자비가 다소 크나, 이러한 투자비 증가의 주요 요인인 Curved Tubing Panel을 Flat Tubing Panel을 적용함으로써 Furnace에 근접 시킬 수 있으므로 Compact화 가능

(나) Integrated Recycle Heat Exchanger (INTREX)적용: 대형보일러에서 Furnace Wall은 유동매체의 열전달에 의한 Cooling을 위하여(적정 온도 유지) 충분한 면적이 확보되어야 하나 INTREX(Bubbling Bed Type)를 Loop Seal에 설치하여 Cyclone에서 포집된 Solid의 Temp.를 조절하여 재순환시킴으로써 연소실

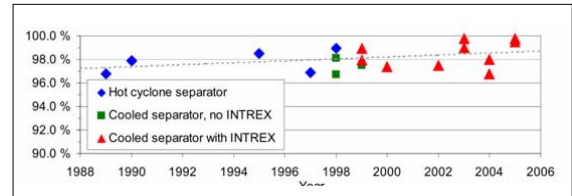
축소 및 운전 유연성의 확보가 가능하다.

(다) Cross Over Duct : Cyclone 출구인 Flue Gas Duct에도 Steam-Cooled Tubing 적용으로 Heat Recovery 할 수 있도록 구성 되어 얇은 내화물 시공 가능(내화물 두께 20~50mm)

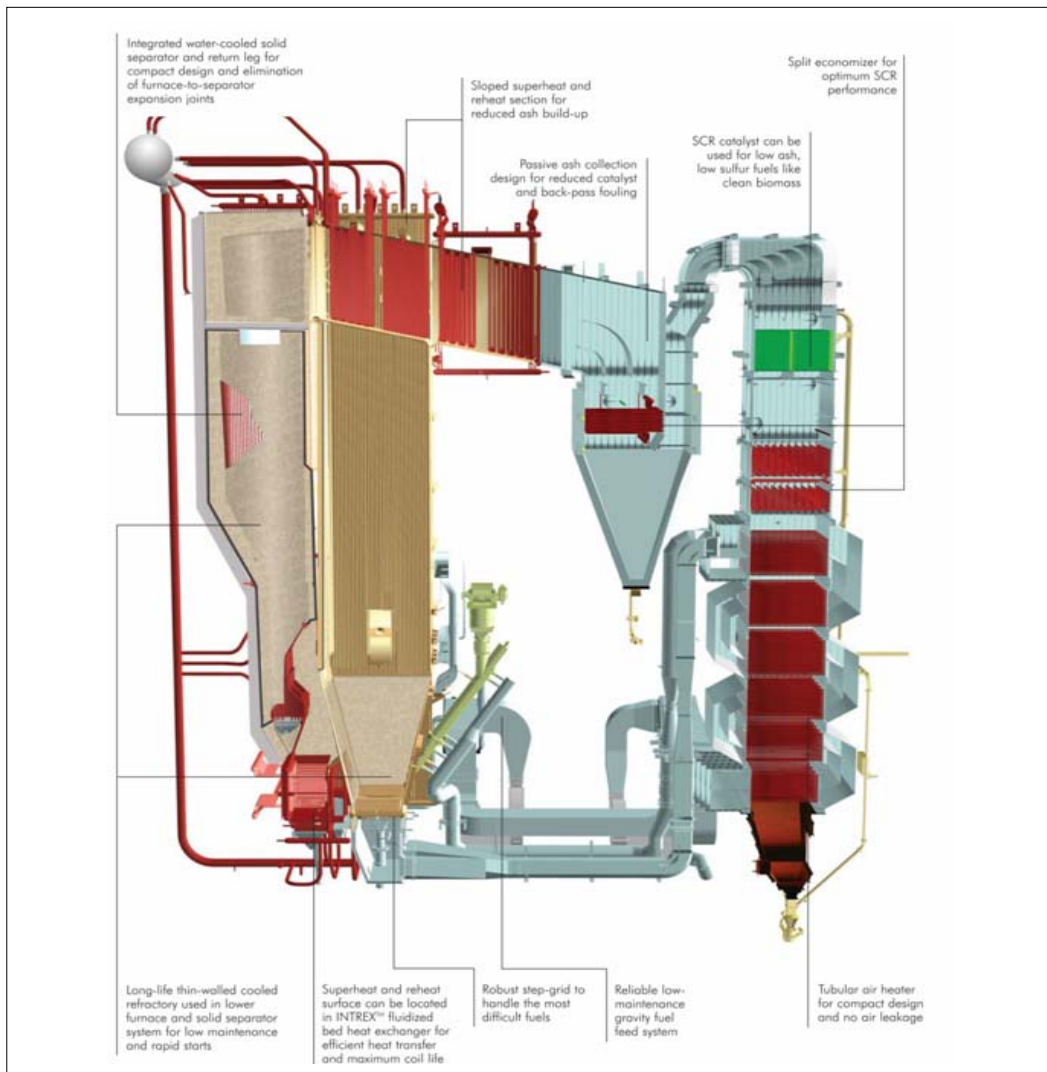
(라) Induct Start up Burner 적용; 짧은 Start up 시간으로 연료비 절감

(마) 배출 Bed Material Heat Recovery

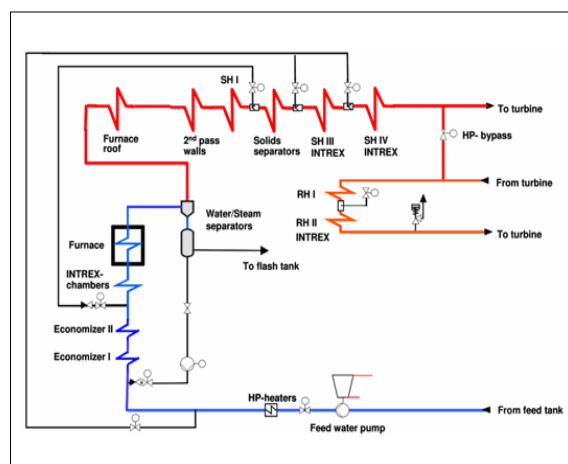
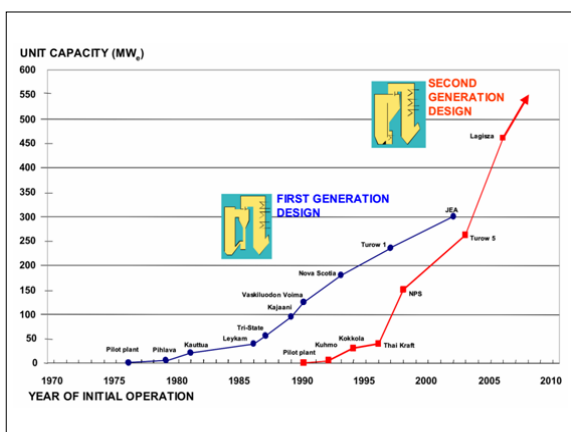
(바) Reheat Steam Bypass System: Reheat Steam Temp. Control 신뢰성 및 Cost 효율성 확보



[그림 5] The increase of the size of CFB Boilers



[그림 8] Foster Wheeler Advanced Compact C.F.B.C Boiler



Site Conditions:			Steam Conditions:		
Elevation	m (ft.)	152.4 (500)	Main Steam Flow Rate	kg/s (M lb/h)	568.8 (4514.0)
Design Air Pressure	bar (psia)	0.99 (14.4)	Main Steam Temperature	°C (°F)	604 (1119)
Dry Bulb Temperature	°C (°F)	17.2 (63)	Main Steam Pressure	barg (psig)	315 (4573)
Wet Bulb Temperature	°C (°F)	12.2 (54)	Reheat Steam Flow Rate	kg/s (M lb/h)	487.2 (3867.0)
Relative Humidity	%	55	Reheat Steam Temperature	°C (°F)	621 (1149)
			Reheat Steam Pressure	barg (psig)	44.1 (639)
Illinois No. 6 Coal			Feedwater Temperature	°C (°F)	289 (553)
Proximate Analysis			H&M Balance Parameters:		
Moisture	wt. %	11.12	Flow Rates:		
Ash	wt. %	9.70	Flue Gas	kg/s (M lb/h)	741.8 (5887.2)
Volatile Matter	wt. %	34.99	Combustion Air	kg/s (M lb/h)	681.5 (5408.8)
Fixed Carbon	wt. %	44.19	Coal	kg/s (M lb/h)	66.2 (525.4)
			Limestone	kg/s (M lb/h)	17.5 (139.1)
			Total Ash	kg/s (M lb/h)	23.5 (186.1)
Ultimate Analysis			Temperatures:		
Moisture	wt. %	11.12	Furnace Exit	°C (°F)	859 (1579)
Carbon	wt. %	63.75	Flue Gas Entering Air Heater	°C (°F)	327 (620)
Hydrogen	wt. %	4.50	Flue Gas Leaving Air Heater	°C (°F)	126 (258)
Nitrogen	wt. %	1.25	Bottom Ash	°C (°F)	260 (500)
Chlorine	wt. %	0.29			
Sulfur	wt. %	2.51	Excess Air	%	20
Ash	wt. %	9.70			
Oxygen (by difference)	wt. %	6.88			
HHV	kcal/kg (Btu/lb)	6481 (11,666)	Emissions:		
			Sulfur Capture	%	96
Greer Limestone			SO ₂	mg/NM3 (lb/MMBtu)	111 (0.09)
Calcium Carbonate	wt. %	80.4	NO _x	mg/NM3 (lb/MMBtu)	100 (0.07)
Magnesium Carbonate	wt. %	3.5	Particulate	mg/NM3 (lb/MMBtu)	14 (0.01)
Moisture	wt. %	0.1			
Inerts	wt. %	16.0			
Reactivity Index					
Power Generation			Plant Performance		
Gross Output	MWe	805	Turbine Back Pressure	psia (mm Hg)	1 (50.8)
Net Output	MWe	739	Net Plant Efficiency	% HHV Basis	40.7

* OTU : Once Through Utility

2.6 CFBC 보일러 Type별 비교 (Power-Gen Asia 2000 September)

Table 4 CFB Boiler Comparison				
	B&W IR-CFB*	Hot-Cyclone CFB	"Compact" Square Cyclone CFB	Cold-Cyclone CFB
Solids Separation System	Two-stage (100% efficiency for particles of d>80 micron*)	Single-stage (100% efficiency for particles of d>100 micron)	Single-stage (100% efficiency for particles of d>100 micron)	Single-stage (100% efficiency for particles of d>100 micron)
*Recycling finer particles increases furnace heat transfer rate, improves combustion efficiency and limestone utilization.				
Upper Furnace Density, (kg/m³)	11-16	8-11	8-11	5-8
Furnace Temperature Control	Desired temperature can be maintained within +/-5C interval for wide range of fuels and operating conditions by adjusting secondary solids recycle rate.	Temperature is pre-determined by furnace and heat exchanger design along with fuel and limestone properties/sizing.	Temperature is pre-determined by furnace and heat exchanger design along with fuel and limestone properties/sizing.	Lower bed temperature is controlled by adjusting cold cyclone ash recycle rate. Temperature span across furnace height is up to 100C.
Boiler Turndown Without Auxiliary Fuel	5 : 1	3.5 : 1	3.5 : 1	3.5 : 1
Refractory: Thickness, mm	15-50	~75	~75	~50
Covered Areas	Lower furnace, U-beam zone enclosure walls	Lower furnace, cyclone, recycle loop (5-10 times more than B&W CFB)	Lower furnace, cyclone, recycle loop (3-5 times more than B&W CFB)	Entire furnace, cyclone (3-4 times more than B&W CFB)
Hot-Temperature Expansion Joints	None	3-5 per cyclone	Number varies with arrangement	None
Furnace Velocity, m/s	4.9-7.3	4.9-5.5	4.9-5.5	4.0-4.5
Furnace Exit Velocity, m/s	6.4-9.8	22-26	22-26	?
High-Pressure Air	Not required	Required for J-valves	Required for J-valves	Required for siphons
Total Pressure Drop Across Solids Separator(s), kPa	1.0 (U-beams + MDC)	1.5-2.0	~1.5	1.0-1.5
Aux. Power Consumption	Lower	Higher	Higher	Moderate

* B&W IR : Babcock & Wilcox with Internal recirculation(IR) and impact U-beam Separator

3. 결 론

에너지 자원이 점차적으로 감소되어 가고 있는 제 여건을 감안할 경우 저렴하고 다양한 에너지원의 사용이 가능한 CFBC를 적용한 발전 사업 전망은 밝을 것으로 판단된다.

따라서 순환유동층 연소보일러의 원리 및 운

전기법의 이해와 더불어 신개념의 Compact화 한 대형화 C.F.B.C Boiler 적용기술을 습득하여 경쟁력을 갖추어야 할 것이다

- [1] “Power Gen Europe-June 2007; Reliability and Maintenance Improvements in Latest Generation in CFBC Boiler”
- [2] “Power Gen International Orlando”, Florida December2-4208
- [3] “Power Gen Asia 2000”, September 20-22
- [4] “Power Gen Americas '95” December 5-7 1995
- [5] “AHLSTROM pyropwer CFBC operation manual”
- [6] “유동층 연소 기술 현황” 2-97, 김재성
- [7] “유동층 연소 기술 현황” 1-97, 선도원
- [8] “ASME international Joint power Generation Conference”, November 3-5 1997
- [9] “Power Gen international '99”, November 30-December 2. 1999
- [10] “20th international Conference on Fluidized Bed Combustion”, May 18-20 2009
- [11] “Technical paper(Foster Wheeler