

규모별 순환유동상 보일러의 열설계 변수 비교 평가

김태현* · 최상민**

Comparative Evaluation of Thermal Design Parameters of Different Sizes of Circulating Fluidized Bed Boiler

Taehyun Kim and Sangmin Choi

ABSTRACT

The present paper discusses thermal design parameters of different sizes of circulating fluidized bed (CFB) boilers with capacities ranging from 2 MWe pilot scale boiler to a 600 MWe utility boiler. Physical boiler size and shape of furnace were identified and dimensional data have been summarized. By performing thermal design for each of the boilers, heat transfer surface area, furnace shape and size, and allocation of heat transfer surface for water-steam side heat absorption have been recalculated, and presented. Although boilers may have significantly different capacity, the facilities have common design parameters, when they are evaluated as basic thermal design processes. The significance of thermal design procedure is explicitly discussed.

Key Words : Circulating fluidized bed, Design parameter, Heat and mass balance

1. 서론

순환유동상 기술은 연소로 내 입자의 유동 및 순환을 통한 연소 방식으로, 뛰어난 연료 적응성으로 다양한 등급의 연료를 무난하게 처리하는 최적 기술로 인정받고 있다[1]. Fig. 1은 순환유동상 보일러 증기 발전 시스템의 개략도를 나타내었다. 일반적으로 석탄 및 석회석 투입장치, 공기주입부, 연소로, 기체 고체 분리기, 고체 재순환 장치, 외부 열교환기 등으로 구성된 1차 루프(Primary loop)와 대류 전열관부(backpass)로 구성 되어 있다.

이러한 순환유동상 보일러는 중소형 규모 발전 시스템의 기술적 신뢰를 바탕으로 단위 용량의 대형화가 이루어지고 있으며, 세계 최초로 폴란드에 460 MWe 급 초임계압 순환유동상 보일러가 상용 운전 에 들어갔다[2]. 현재 선진 기술을 보유한 몇 개의 회사를 중심으로 600 MWe 급 이상의 대형 순환유동상 보일러의 실증을 위한 노력을 경주하고 있다[3].

국내에서는 현재 여수에 340 MWe 급 순환유동상 보일러 프로젝트가 진행 되고 있으며, 상용 운전 중인 200 MWe 순환유동상 보일러 2기를 포함하여 약 15 기의 상용 순환유동상 보일러가 운전 혹은 건설 중에

있다. 하지만 보일러의 설계에 관한 주요기술은 아직도 외국기술에 의존하고 있으며, 설계 기술의 진보를 위해서 설계 자료와 운전 자료에 대한 구체적인 체계화가 절실히 요구되고 있다[4].

본 연구에서는 다양한 규모의 순환유동상 보일러의 설계 변수를 비교하였다. 파일럿 스케일의 순환유동상 보일러부터 상용 운전을 하고 있거나 건설 중인 발전용 순환유동상 보일러, 그리고 제안된 600 MWe 급 순환유동상 설계 안을 비교 범위로 잡았다.

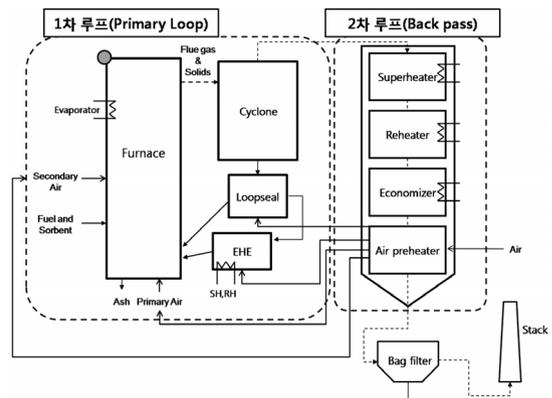


Fig. 1. Schematic diagram of a typical circulating fluidized bed boiler.

* KAIST 기계공학과

† 연락처자, smchoi@kaist.ac.kr

이러한 다양한 규모의 순환유동층 보일러의 설계 자료를 바탕으로 열 및 물질 정산을 통해 보일러 사이즈와 연계된 주요 설계 인자를 도출하였다. 도출된 설계 인자를 직접적으로 비교하고 평가하여 중소형 보일러와 대형 보일러 간의 공통점 및 차이점을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1. 대상 순환유동층 보일러

본 연구에서는 다음 6개의 보일러를 선정하여 열설계 방식을 비교 분석하였다.

- 1) 증기량 12 t/h의 순환유동상보일러(Kp)[5]
- 2) 증기량 75 t/h의 순환유동상 보일러 디자인(Kd)[6]
- 3) 200 MWe 순환유동상 보일러(Dp)[7,8,9]
- 4) 340 MWe 순환유동상 보일러(Yp)
- 5) 460 MWe 순환유동상 보일러(PL)[1,10]
- 6) 600 MWe 순환유동상 보일러 디자인(Zd)[12]

Fig. 2에 대상 순환유동상의 개략적인 크기 비교를 해보았다. Table 1은 규모별 순환유동상 보일러의

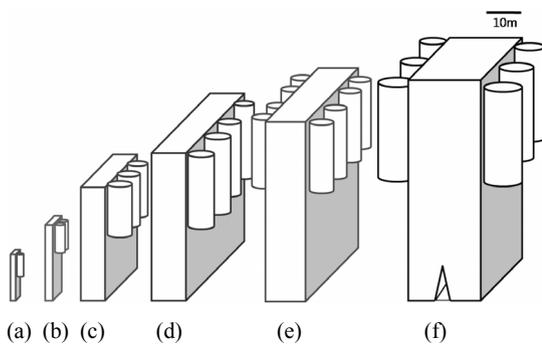


Fig. 2. Comparison of relative size of CFB boilers. (a) Kp, (b) Kd, (c) Dp, (d) Yp, (e) PL, (f) Zd

Table 1. Specification of CFB boilers

	Kp	Kd	Dp	Yp	PL	Zd
Capacity (MW)	2	-	200	340	460	600
Steam (t/h)	12	75	660	1,025	1,300	1,900
Width (m)	2.4	5.4	19	34	27.6	21*
Depth (m)	1.25	2.4	7	8	10.6	19*
Height (m)	14	22	32	42	48	62*

* size by heat calculation

연소실 크기를 대략적으로 나타내었다. 단면의 너비 및 폭은 연소로 상부를 기준으로 하였으며, Zd보일러의 규격은 열설계 값으로 실제 설계 값과는 차이를 보일 것으로 생각된다. Kp보일러의 경우 외부열교환기 없이 보일러의 수냉벽과 백패스를 사용하여 열을 회수한다. Kd보일러의 경우는 외부 열교환기가 존재하지 않으며 2개의 사이클론과 2개의 립실이 한 쪽 벽에 배치되어 있으며 외부 열교환기는 없다. Dp보일러의 경우 3개의 사이클론과 3개의 립실(Loopseal) 그리고 3개의 외부 유동상 열교환기(FBHE ; Fluidized bed heat exchanger)를 사용하여, 열을 회수한다. Yp보일러는 한쪽 면에 4개의 사이클론을 사용하고 연소실 내부에 열회수를 극대화하기 위한 날개벽(Wing Wall)과 격벽(Division Wall)을 사용한다. PL보일러는 Foster Wheeler사의 2세대 순환유동상 보일러의 개념으로 연소실과 사이클론이 일체화된 형태이며, 연소실의 양쪽 벽에 총 8개의 사이클론과 외부 유동상 INTREX™가 존재한다. Zd보일러는 바지가랑이(Pant-leg) 디자인의 로 하부 디자인을 가지고 있으며 사이클론이 한쪽 벽에 3개씩 총 6개가 배치되어 있으며, 6개의 외부 열교환기를 사용하여 열을 회수한다.

Fig. 3은 대상 순환유동상 보일러의 사이클론 크기를 개략적으로 비교한 것이다. PL 보일러가 Yp보일러 보다 더 큰 발전용량과 연소실을 가지고 있지만, 사이클론의 개수를 증가시켜 사이클론의 크기가 비교적 작다. 사이클론은 사이즈, 형태, 속도에 의해 결정된다. 일반적으로 유속이 증가함에 따라 집진효율은 증가하나, 압력손실도 증가하므로 이를 반영하여 유속조건을 결정해야 하며, 사이즈가 커질수록 집진효율은 저하하나 너무 작을 경우 내화재 라이닝의 어려움이 있다. 따라서 대형 순환유동상 보일러의 경우에는 사이클론을 여러 개 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 균일하지 못한 유동 흐름으로 사이클론의 효율에 문제가 있을 수도 있다[1]. 사이클론으로 유입되는 유량과 회전 수에 의해 사이클론의 직경이 결정되며, 결정된 사이클론의 직경에 따라 세부 규격이 결정된다. Lapple[17]이 제안한 기준 비율에 의해 사이클론 세부 크기를 결정할 수 있다. Fig. 4는 순환유동상 보일러의 사이클론 개략도를 나타내었고, Table 2는 개략도에 상응하는 세부 규격을 직경의 비율로

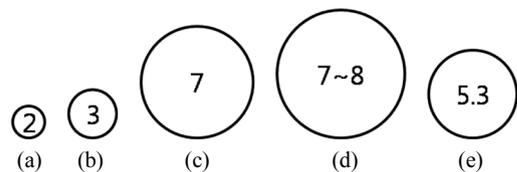


Fig. 3. Comparison of cyclone size (unit : m). (a) Kp, (b) Kd, (c) Dp, (d) Yp, (e) PL

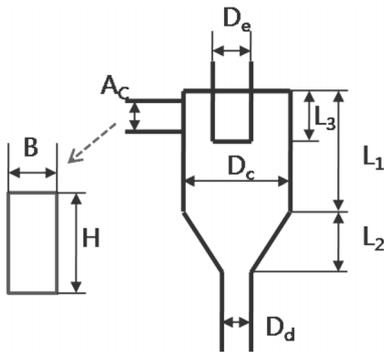


Fig. 4. Typical dimensions of a cyclone.

Table 2. Comparison of cyclone size proportions

	Kp	Kd	Dp	Average
L ₁	1.95 D _c	1.50 D _c	1.04 D _c	1.50 D _c
L ₂	1.95 D _c	1.83 D _c	1.26 D _c	1.68 D _c
D _e	0.49 D _c	0.75 D _c	0.53 D _c	0.59 D _c
H	0.49 D _c	0.75 D _c	0.86 D _c	0.70 D _c
B	0.25 D _c	0.33 D _c	0.44 D _c	0.34 D _c
D _d	0.25 D _c	0.50 D _c	0.19 D _c	0.31 D _c
L ₃	0.61 D _c	0.40 D _c	0.30 D _c	0.44 D _c

표현하였다. 각 세부 규격은 평균값을 기준으로 큰 차이를 보이지 않는다.

각 구성요소의 열부하는 보일러의 증기 조건에 따라 달라지며, 일반적으로 각각의 구성요소의 열부하를 얻기 위해서는 필요한 증기량과 최종과열기의 온도와 압력 최종재열기의 온도와 압력 그리고 절탄기로 유입되는 공급수의 온도가 필요하다. Table 3에는 대상 순환유동상 보일러의 과열증기, 재열증기, 공급수, 스팀량의 대한 정보를 나타내었다. Kp보일러와 Kd보일러는 아임계압이며 일반적인 증기사이클(Rankine Cycle)로 구성되어 있다. 랭킨 사이클은 흡열과정인 절탄기를 거쳐, 보일러(증발기)와 과열기를 통해 고온 고압으로 가열된 증기를 생성하여 열에너지를 동력에너지로 변환한다. Dp, Yp, PL보일러 그리고 Zd보일러는 좀더 높은 효율을 위해 재열 사이클을 사용하였고, Dp, Yp 보일러는 아임계압 발전 개념을 사용하고 있으며, PL보일러와 Zd 보일러는 초임계압(Supercritical) 발전 개념을 적용하고 있다. Dp, PL 그리고 Zd 보일러는 외부의 유동상 열교환기를 사용하여 추가적인 열 회수 면적을 확보하고 있다.

대상 순환유동상 보일러 연료의 성상과 계산된 발열량 값을 Table 4에 나타내었다. Kp보일러와 Kd보일러는 거의 유사한 설계탄을 사용하였고, Dp보일러의 경우에는 국내 무연탄을 대상으로 설계 탄을 선정하였기 때문에 40%의 회분 포함하여 발열량이 약

Table 3. Steam conditions of CFB boilers

	Kp	Kd	Dp	Yp	PL	Zd
Main steam flow rate (t/h)	12	75	693	1025	1300	1900
Superheater steam temperature (°C)	453	450	541	541	560	580
Superheater steam pressure (bar)	45.1	38.2	173	168	275	280
Reheater steam flow rate (t/h)	-	-	541	822	1101	417
Reheater steam temperature (°C)	-	-	541	541	580	580
Reheater steam pressure (bar)	-	-	39	30	54.8	44.0
Feedwater temperature (°C)	153	150	288	229	290	290

Table 4. Coal analysis and heating value

	Kp	Kd	Dp	Yp	PL	Zd
Coal analysis (wt%)						
Water	11.6	11.2	3.3	15.3	11.1	8.9
C	66.6	65.4	52.9	59.1	63.8	57.5
H	4.0	3.6	0.3	4.2	4.5	3.8
N	1.3	1.1	0.2	0.8	1.3	0.9
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
S	0.7	0.4	0.6	0.3	2.5	0.5
O	6.8	10.3	3.7	17.8	6.9	7.2
Ash	8.9	8.0	39.1	2.5	9.7	21.4
Heating value (kJ/kg)						
HHV	27119	25442	17701	22800	27220	23703

17,000 kJ/kg(4,200 kcal/kg)으로 다른 탄에 비해 발열량이 낮았다.

2.2. 설계 절차 및 방안

순환유동상 보일러 설계에서는 첫 단계에서는 기본 설계 조건이 결정되어야 한다. 기본 설계 조건에는 증기 발생량, 증기 온도, 압력 등의 보일러 용량에 관한 사항과 설계 대상탄에 대한 자료 등이 포함된다. 기본 설계 조건이 설정되면 가스계통, 고체 계통, 증기 계통 세 가지의 공정에 대해 열 및 물질 정산을 수행한다. 보일러에 대한 대부분의 정보가 이 작업으로부터 도출되는데, 들어가고 나가는 물질과 에너지의 양 및 상태를 알 수 있다. 물질 및 열의 출입에 대한 정보가 획득되면 보일러 개념 설계 요건을 따라 개념설계가 수행된다. 설계 변수들의 상세한 자료가 모아지게 되면, 보일러의 단위 장치 별로 크기와 사

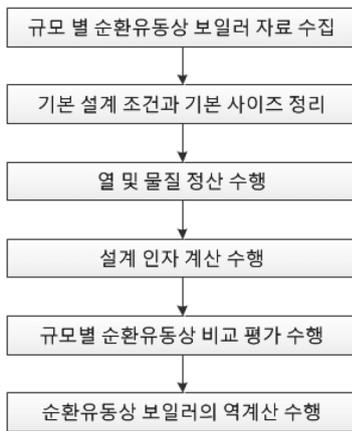


Fig. 5. Procedure of comparative evaluation.

양에 관한 기본 설계를 수행한다[1,6,14].

본 연구에서는 이러한 일반적인 설계절차를 역으로 기본설계 자료를 바탕으로 규모가 다른 여러 순환유동상 보일러의 역계산을 통해서 직접적인 비교가 가능한 설계 인자로 표시하고 이를 직접 비교 평가를 수행한다. 단위 별 연구순서는 Fig. 5에 나타내었다.

2.3. 계산 방법 설계 인자

규모가 다른 순환유동상 보일러를 직접 비교한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 기본 설계 자료를 바탕으로 열 및 물질 정산을 수행하여 각 보일러의 용량과 크기를 고려하여 직접 가능한 설계 인자로 표현하여 비교 평가한다. 직접 비교를 위해 고려된 설계인자는 다음과 같다.

- 화상열부하(Cross-sectional heat release rate, MW/m²)

$$q_F = \frac{B \cdot LHV}{A_{cross}} \quad (1)$$

화상열부하(q_F)는 연소실의 크기를 결정하는 매우 중요한 설계 인자이다. 화상 열부하는 연소실의 단면적에서 얼마나 많은 열 부하를 갖느냐를 나타내며 식 (1)로 나타낼 수 있다. B 는 연료량을 나타내며, A_{cross} 는 연소실의 단면적을 나타낸다[15].

- 체적열부하(Volumetric heat release rate, MW/m³)

$$q_V = \frac{B \cdot LHV}{V} \quad (2)$$

일반적으로 체적 열부하(q_V)는 연소실 설계에 중요한 설계 인자는 아니지만 연료의 반응을 완료하기 위한 공간의 기준을 세울 수 있다. 체적 열부하는 연소실의 유효 부피에서 얼마나 많은 열부하를 갖느냐 하

는 것으로 식 (2)로 나타낼 수 있다. V 는 연소실의 부피를 나타낸다[15].

- 공탑속도(Superficial velocity, m/s)

$$U_0 = \frac{\dot{V}}{A_{cross}} \quad (3)$$

공탑속도(U_0)는 기체속도와 고체속도를 별도로 고려하지 않은 겉보기 속도로 연소실 높이를 결정하는데 매우 중요한 설계 인자이다. 연소가스 체적유량(\dot{V})을 단면적으로 나눈 값이다. 이는 다시 체류시간으로 환산할 수 있으며 이는 연소실 설계에 있어서 가장 중요한 고려 대상 중에 하나이다. 질량 유량과 기체상의 반응물과 연소실의 부피로 계산할 수 있으며, 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1. 보일러의 구성 요소 별 열흡수 비율

Fig. 6에는 각 보일러의 주어진 증기 조건을 토대로 과열기, 재열기, 증발기와 절탄기에 대해서 물/증기 사이클에서의 엔탈피 계산을 통해 각 부위별 흡열량을 계산하여 나타내었다. Kp와 Kd의 보일러의 경우에는 재열기가 존재 하지 않아 이를 제외하고 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 증기의 압력에 따라 각 열전달면의 열부하의 분포가 변하게 되며 압력이 증가할수록 과열기의 부담이 증가한다.

3.2. 연소실

일반적 연소실 규격에서 크게 연소실 단면적과 높이 결정이 가장 중요하다. 먼저 연소실 단면적은 열전달 면적의 배치, 공탑속도, 2차 공기의 침투, 고체 입자의 순환 및 연료 공급 그리고 사이클과 대류 전열관 부의 배치에 따라 결정된다. 순환유동상 보일러의

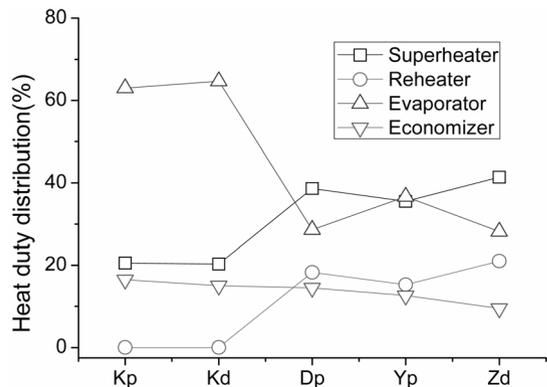


Fig. 6. Heat duty distribution of CFB boilers.

고체 순환을 위해서는 제한적인 유속조건과 고체 순환율 하에서 운전되어야 한다. 따라서 미분탄 보일러와는 달리 순환유동상 보일러는 단면적 결정에 상당한 주위를 기울여야 한다. 또한 단면적이 결정된 후에도 폭과 너비를 결정해야 한다. 폭과 너비는 열전달 면적의 확보와 2차 공기 침투 그리고 연료의 공급 및 입자의 분산에 영향을 받는다. 따라서 폭을 결정할 때도 2차 공기의 침투와 균일한 입자 분산을 위해 적절한 폭/너비 비율을 정해야 한다[1]. 따라서 폭이 매우 좁아지는 형태를 띠게 되는데 이를 해결하기 위해 바짓가랑이(Pant-leg)형태를 이용하여 폭을 약 두 배 가량 늘릴 수 있다. 또한 연소실 높이는 연료 좌 성분의 반응 시간, 열전달 면의 배치, 탈황 반응, 물/증기 순환 등에 의해 결정된다. 하지만 연소실 높이가 증가할 경우, 고체 입자의 밀도가 떨어지게 되어 열전달 계수가 감소하므로 이에 대해서도 고려해야 한다[16].

Fig. 7에는 간략한 연소실 역설계의 계산 순서도를 나타내었다[14]. 위의 방법을 통해 화상 열부하 및 체적 열부하 그리고 공탑속도를 계산하여 Table 5에 나타내었다. 화상 열부하는 연소실 설계에 매우 중요한

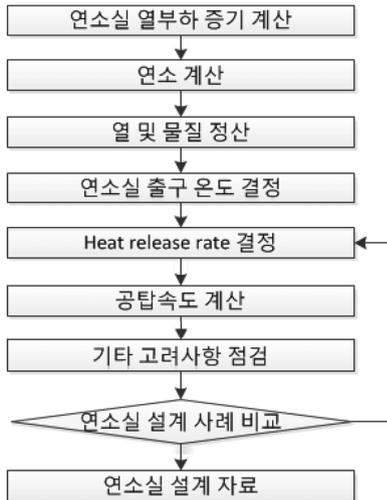


Fig. 7. Procedure of furnace reverse design.

Table 5. Comparative design parameters

Item	Kp	Kd	Dp	Yp	Zd
Cross-sectional heat release rate (MW/m ²)	3.63	5.24	4.3	3.36	4.08
Volumetric heat release rate (MW/m ³)	0.26	0.24	0.13	0.084	0.07
Superficial velocity (m/s)	4.7	5.48	5.1	4.8	5.38

설계 인자로 일반적인 상용 순환유동상 보일러의 화상열부하의 값은 3.0~4.5 MW/m²를 채택하고 있다. 또한 체적 열부하는 약 0.08~0.15 MW/m³의 값을 가진다[1]. 그리고 공탑속도의 경우 5.5~6.0 m/s 범위 값을 가진다[6]. 파일럿 규모의 Kp 보일러와 Kd 보일러의 경우 상대적으로 체적이 작기 때문에 체적열부하의 값이 커지게 된다.

3.4. 열배분

대상 순환유동상 보일러에 대하여 부분 별 열부하를 총 열부하 그리고 총 전열 면적으로 나누어 백분율로 나타내었다. Kp, Dp, Yp 그리고 Zd 보일러의 열배분 및 전열면적 비율을 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 그

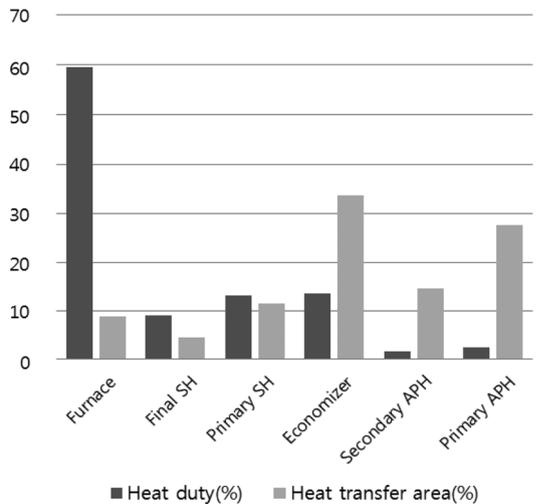


Fig. 8. Heat duties and heat transfer area of Kp boiler.

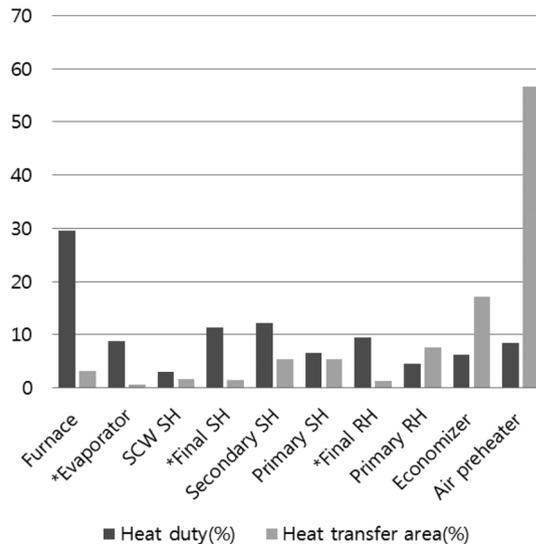


Fig. 9. Heat duties and heat transfer area of Dp boiler.

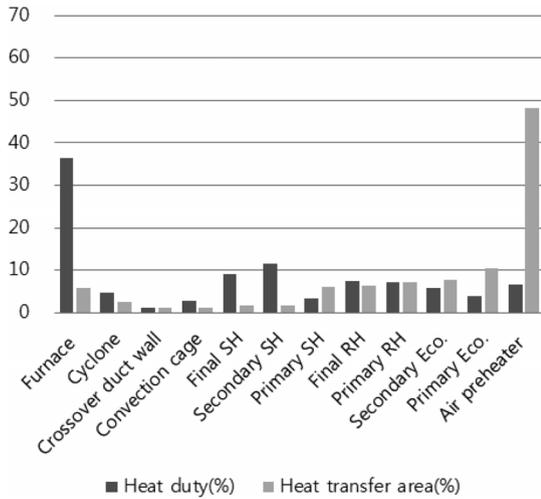


Fig. 10. Heat duties and heat transfer area of Yp boiler.

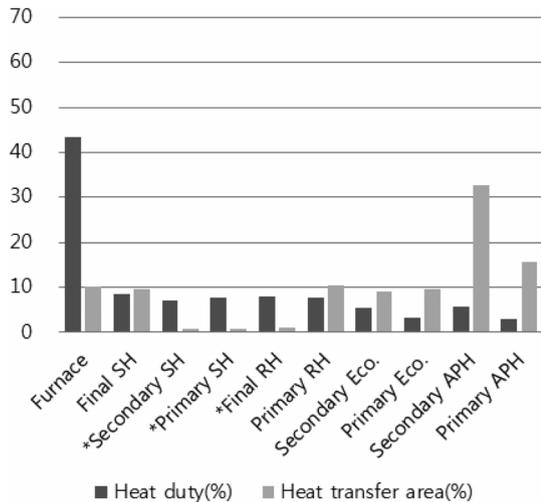


Fig. 11. Heat duties and heat transfer area of Zd boiler.

리고 Fig. 11에 나타내었다. 여기서, (*)는 외부 열교환기를 이용한 열회수 구간을 말한다. 공통적으로 연소실에서의 열 부하가 가장 높았으며, 차지하는 면적은 공기 예열기가 가장 많았다. 또한 외부 유동상 열교환기의 경우 높은 열전달율로 인해 열부하에 비해 전열 면적은 비교적 작은 것을 볼 수 있다. 하지만 각 보일러에서 열을 회수하는 방법은 매우 다르다. Kp보일러의 경우 재열기가 사용되지 않았으며, 2개의 과열기와 2개의 공기에열기를 사용하여 열을 회수하였다. Dp보일러의 경우 외부 유동상 열교환기 3기가 각각 과열기, 재열기, 증발기로 이용되고 있으며, 외부 유동상 열교환기에서 최종 과열기와 재열기로 배치하였으며, 연소실 벽면에서 SCW(Steam cooled wall)를 이용하여 부가적인 열을 회수하였다. Yp 보일러는 대부분의 열이 연소실에서 회수된다. 연소실 벽면을 포

Table 6. Heat duty of the external heat exchanger as a function of the heat absorbed in the CFB loop

	Evaporator (MW)	Superheater (MW)	Reheater (MW)	EHE duty (%)
Dp	46	60	50	50
PL	-	132	46.7	44.5
Zd	-	245	125.3	42.7
F	-	288	190	45.5

함하여 격벽과 날개벽을 사용하여 연소실 내에서의 대부분의 열을 회수하여 외부 열교환기를 사용하지 않았다. Zd 보일러는 총 6개의 외부 유동상 열교환기를 사용하여 4개는 과열기로 2개는 재열기로 사용하였으며, 최종 과열기는 백패스에 배치하고, 최종 재열기는 외부 열교환기에 배치하였다.

3.5. 외부 열교환기 열부하

순환유동상 보일러의 과열기를 부식으로부터 보호하기 위하여 외부 열교환기(EHE ; External Heat Exchanger)를 사용하며 순환유동상 보일러가 대형화됨에 따라 열을 회수할 수 있는 면적이 줄어들게 되므로 대용량보일러에서는 외부 열교환기를 고려하여 부족한 열전달 면적을 확보한다. 대상 보일러 중에서 Kp, Kd 보일러는 외부 열교환기를 사용하고 있지 않다. 따라서 Kp, Kd를 제외한 나머지 Dp, PL, Zd 보일러와 Foster Wheeler의 800 MWe 급 순환유동상 보일러 설계 방안(F)을 대상으로 계산을 수행하였다. 1차 루프의 상당 부분을 차지하고 있는 연소실 내의 증발기 열량을 1차 루프의 열부하로 가정하고, 외부 열교환기의 열부하를 증발기 열부하로 나누어 계산하여, Table 6에 1차 루프의 열부하 대비 외부 열교환기 열부하 비율을 나타내었다. 대용량 순환유동상 보일러는 비교적 비슷한 수준에서 외부 열교환기를 사용하는 확인하였다.

4. 결론

2 MWe에서 600 MWe에 이르기까지 다양한 크기의 순환유동상 보일러를 대상으로 하여, 순환유동상 보일러의 설계 자료 및 문헌 자료를 바탕으로 순환유동상 보일러 설계시 고려해야 할 사항들을 정리하였고, 기존 연구 및 보고서의 내용을 수집하여 규모별로 공통된 설계인자를 열 및 물질 정산을 통해 도출하여 직접적으로 비교하였다. 비교항목으로는 연소실 설계시의 화상열부하, 체적열부하, 공탑속도, 사이클론의 사이즈 결정 비율, 증기 조건에 따른 열회수 배분, 보일러 부분 별 열부하 배분 등을 고려하였다. 중소형 보일러와 대형 보일러 간의 공통점 및

차이점을 분석하였으며, 세부 전열면 구성의 차이를 제외하고 용량에 상관없이 공통적인 열설계기준이 존재함을 확인하였다. 또한 다른 순환유동상 보일러 설계에도 적용 가능한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 Brain Korea 21과 전력연구원 연구과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Prabir Basu, "Combustion and Gasification in Fluidized Beds", CRC press, New York, 2006
- [2] Timo Jäntti, Riku Parkkonen, "Lagisza 460 MWe Supercritical CFB-Design, Start-up and Initial Operation Experience", Power Gen Asia, Bangkok, Thailand, 2009
- [3] 김태현, 최상민, 이종민, "대용량 순환유동상 보일러 개념 비교평가 기준 정립", 한국연소학회지, Vol. 14, No. 3, pp. 1-15, 2009
- [4] 최정후, 손재익, "상용 순환유동층 연소로의 운전특성", Chemical Industry and Technology, Vol. 10, No. 1, 1992, pp. 20-29
- [5] 한근희, 현주수, 최원길, 이종섭, "2 MWe 순환유동층 발전 플랜트에서 유연탄과 북한 무연탄 혼소시험 특성 연구", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 47, No. 5, 2009, 580-586.
- [6] 선도원, 손재익, 진경태, 이창근, 박재현, 한근희, 배달희, 조성호, "열병합 발전을 위한 순환유동층 석탄연소 기술개발", 통상산업부연구과제보고서, 1997, KIER-973403.
- [7] Jong-Min Lee, Jae-Sung Kim, Jong Jin Kim, "Evaluation of the 200 MWe Tonghae CFB boiler performance with cyclone modification", Energy, Vol. 28, No. 6, 2003, pp. 575-589
- [8] 신동훈, 황정호, 이종민, 김재성, "발전용 순환유동층 보일러 공정해석 프로그램 개발연구", 2003년 한국에너지공학회 추계 학술발표회 논문, 2003, pp.181-186
- [9] 이시훈, 이종민, 김재성, 최정후, 김상돈, "D화력 순환유동층 보일러에서의 무연탄 연소 특성", HWAHAK KONGHAK, Vol.38, No.4, 2000, pp. 516-522
- [10] Stephen J. G., Song W., Zhen F., Arun C. Bose, "Design Aspects of the Ultra-supercritical CFB Boiler", International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, USA, 2005
- [11] Stephen J. Goidich, Ragnar G. Lundqvist, "The Utility CFB Boiler-Present Status, Short and Long Term Future with Supercritical and Ultra-Supercritical Steam Parameters", Proceedings of Power-Gen Europe, Milano, 2002
- [12] 劉靜, 王勤輝, 駱仲決, 岑可法, "600 MWe 超臨界循環流化床鍋爐的設計研究", Power Engineering, Vol. 23, No. 1, 2003, pp. 2179-2204
- [13] S. Mitra, P. Basu, T. K. Ghoshal, "Classification and Representation of Design Knowledge for Circulating Fluidized Bed Boiler", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 6, No. 5, 1993, pp. 457-464
- [14] K Cen, P Basu, L Cheng, MX Fang, ZY Luo, "Design and Performance Verification of a 62-MWt CFB Boiler", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 123, 2001, pp. 240-245
- [15] Prabir Basu, Cen Kefa, Louis Jestin, "Boiler and Burners: Design and Theory", Springer-Verlag New York, 2000
- [16] J. R. Grace, A. A. Avidan, T. M. Knowlton, "Circulating Fluidized Beds", Blackie Academic and Professional, Chapman & Hall, London, 1997
- [17] C. E. Lapple, "Processes use many collector types", Chem. Eng. Vol. 58 No. 5, 1951, pp. 144-151