

발전용 순환유동층 보일러 공정해석 프로그램 개발연구

신동훈, 황정호, 이종민*, 김재성*
연세대학교 CT연구단, *한전 전력연구원

A comprehensive model of circulating fluidized bed boiler
for power generation

Donghoon Shin, Jungho Hwang, Jongmin Lee*, Jaesung Kim*
Yonsei Center for Clean Technology, *Korea Electric Power Corporation

1. 서론

순환유동층은 유동사와 가스 그리고 연료의 높은 반응효율을 갖고 있는 장점으로 대형 석탄 보일러등 연소 및 발전시스템에서 활발하게 활용되고 있다. 국내에서도 10여기의 순환유동층 산업용 보일러가 운전중에 있으며, 그중 동해화력 발전소는 순환유동층을 연소로로 이용한 200 MWe 급 발전소로서, 연소가 까다로운 국내 무연탄을 연료로 하여 무난하게 운영되고 있다. 한편, 현재 국내에서 운영중인 순환유동층 설비들은 대부분 외국의 설계기술로 건설되었으며, 국내의 기술을 적용한 예는 몇몇 실험용 설비외에는 드물다.

외국기술에 의존함에 의해 발생할 수 있는 현상으로 최근 동해화력 발전에서 발생한 문제점을 예로 들 수 있겠다. 동해화력 발전소는 1998년 9월에 1호기가 준공된 이후, 1999년에 2호기가 준공되고, 시운전을 거쳐 지금은 정상적인 운영에 돌입하였다. 시운전 기간동안, 외국의 설계기준과 실제 운전조건이 크게 다른 점이 문제로 부각되었는데, 이는 연료가 유연탄이 아닌 국내 무연탄인 점이 가장 큰 영향을 주었다. 이 문제를 놓고 국내외 연구기관에서 다각도의 연구를 수행하여 주요 문제점들을 해결하였으며, 설계기술의 국산화가 중요함을 느끼게 하였다^[1]. 또한, 국내 유수의 화학공단에서 운영중인 순환유동층에서는 종종 연소로 과열, 클링커 과다생성, 유동화 불량등의 현상에 의한 운영중단현상이 발생하였으며, 여러 연구자들이 함께 고민하며 문제를 해결해나가고 있다^[2].

단순히 외국기술에 의존하여 건설 및 운영을 하게 되면, 운전조건이 맞지 않는 경우 비정상 운전으로 인하여 경제적 손실이 예상되기에, 국내 실정에 맞는 설비를 도입하기 위해서는 도입되는 외국 설계기술을 검증하고 평가 및 최적화할 수 있는 방안이 필요하다. 실험과 이론을 이용한 기초적인 연구와 더불어 플랜트 현장에서의 실제 설계자료 및 운전자료의 분석이 필요하다. 이러한 연구과정을 통해 최적 설계 및 운전을 위한 공학적 정보를 종합하고 정리 및 프로그램화하여 플랜트의 설계평가 및 운전조건 파악에 활용할 수 있어야 하겠다.

본 연구는 순환유동층 발전 보일러의 설계 및 운전상황을 모사할 수 있는 해석 이론개발과 시뮬레이션 소프트웨어개발을 목적으로 하며, 현재 운영중인 순환유동층 발전소에서 획득된 설계 및 운전자료들과 비교 검토하여 해석 이론의 정확도를 평가하고, 이를 바탕으로 순환유동층 설계 평가에 활용할 수 있는 해석도구를 개발하는 것이 주된 내용이다. 동해 순환유동층 발전용 보일러를 대상으로 해석모듈을 구성하였으며, 기본 설계서에 나타난 다양한 설계조건에 대한 비교평가를 수행하여 해석도구의 정확도를 검증하였다.

2. 순환유동층 보일러 모델링

2.1 공정 개요

본 연구의 모델링 대상은 동해화력 순환유동층 발전보일러로서 기본 설계조건은 Table 1

과 2와 같으며, Fig. 1과 같은 보일러 구성을 갖고 있다. 순환유동층 보일러에서 연소공기와 연료인 무연탄이 투입되면, 세 개의 FBHE(Fluidized Bed Heat Exchanger)와 사이클론에서 순환되는 고온의 유동사와 만나면서 연소가 진행되고 유동사와 연소가스, 그리고 비산재는 순환 유동층 보일러를 빠져나와 3개로 구성된 사이클론에서 유동사와 연소가스가 분리된다. 사이클론에서 분리된 입자들은 일부는 직접 순환유동층 보일러로 다시 유입되고, 나머지는 각 사이클론별로 연결된 FBHE로 이동하여, FBHE에 설치된 증기계통 관구에 열에너지를 공급하고 다시 순환유동층 보일러로 유입된다. 한편, 사이클론에서 분리된 연소가스는 복사과열기, 1,2차 과열기, 1차 재열기, 절탄기의 순으로 통과하면서 열에너지를 증기계통에 공급하게 된다. 연소가스는 절탄기 이후의 공기에열기에서 연소공기에 남아있는 열에너지를 공급하고 집진기를 거쳐 굴뚝으로 배출된다. 공기에열기에서 가열된 연소공기는 순환유동층 보일러와 세 개의 FBHE, 그리고 FBAC(Fluidized Bed Ash Cooler)의 유동화 공기로 분산되어 공급된다. 순환유동층 보일러에서 비산되지 못한 재는 FBAC로 유입되어 보일러 공급수를 가열하고 냉각되어 배출된다.

Table 1. Domestic coal characteristics for Tonghae power plant¹⁾

화학종	단위	값
C	% wt	50.324
H	% wt	0.276
O	% wt	3.496
N	% wt	0.184
S	% wt	0.552
Ash	% wt	37.168
Moisture	% wt	8
Total	% wt	100
HHV	kcal/kg	4230

Table 2. Design conditions for comparison¹⁾

항목	단위	BMCR	MGR	100%	75%	50%	30%
석탄투입	kg/h	108300	106750	98150	74560	52310	28400
공기투입	kg/hr	736564	726154	668344	509644	462624	466824
주증기유량	kg/hr	693198	679606	614244	443253	293514	182635
재열증기유량	kg/hr	550434	540582	492788	364295	247139	157143
공급수압력	kg/cm ² g	192.83	191.33	188.33	181.33	176.23	172.73
공급수온도	℃	289	287	280	260	236	211
증기드럼압력	kg/cm ² g	188.43	187.03	184.43	178.23	173.63	170.43
증기드럼온도	℃	359	358	357	355	352	351
재중 미연탄소비율	wt %	3.07	3.06	3.06	3.05	3.02	3

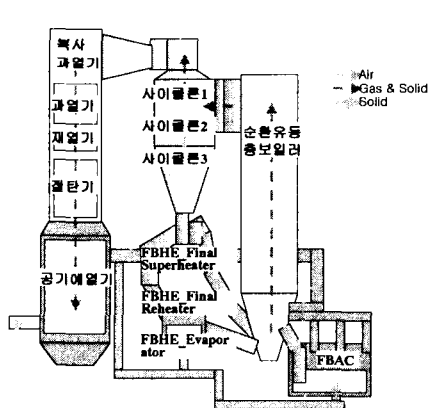


Fig. 1. Gas and solid process of Tonghae power plant boiler

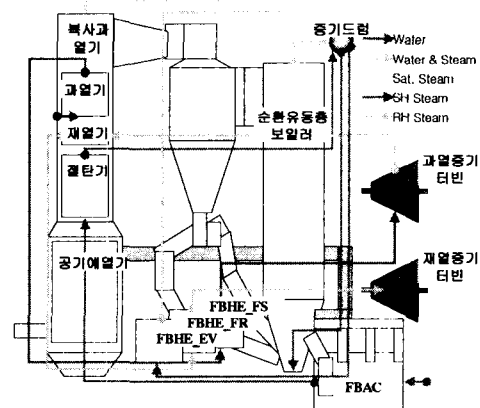


Fig. 2. Boiler steam process of Tonghae power plant

한편, 보일러 증기계통은 Fig. 2와 같은 흐름도를 갖는다. 보일러 공급수는 FBAC의 유동층 열교환기 관권내부로 흐르면서 재의 현열을 흡수하여 가열되고, 그 후에 백패스의 절탄기에서 배출가스에 의해 가열되어 증기드럼에 유입된다. 증기드럼에서 다운커머로 내려가는 공정수는 순환유동층 관벽과 FBHE_EV(Evaporator)의 두 설비로 나뉘어 유입되고, 각 설비에서 흡열하여 증발한 후에 다시 증기드럼으로 유입된다. 증기드럼에서 물과 증기는 분리되어 물은 다시 다운커머를 통해 순환하고, 증기는 복사과열기, 과열기, FBHE_FS(Final Superheater)를 거쳐 541℃까지 가열된 후에 과열증기터빈(High Pressure Turbine)으로 유입되어 동력에너지를 제공한다. 과열증기터빈을 통과한 낮은 압력의 증기중 일부는 다시 재열증기계통으로 유입되는데, 재열증기계통은 백패스의 재열기와 FBHE_FR(Final Reheater)를 거쳐 재열증기터빈(Intermediate Pressure Turbine)으로 유입되어 동력에너지를 제공한다.

이상과 같이 동해화력 순환유동층 보일러는 많은 설비들이 서로 연계되어 있는 복잡한 공정흐름을 보이고 있다. 각 설비들은 상호간에 밀접한 영향을 미치는 복잡한 연결관계에 있기에 개별 요소설비를 종합적이고 복합적인 공정모델을 구현하여 해석해야 할 필요가 있다.

2.2 공정 모델링

순환유동층 보일러 공정 모델은 다음과 같이 크게 세 개의 공정이 상호 연계된 것으로 구현하였다. 첫 번째는 Fig. 3에 나타난 공기 및 가스로 구성된 가스계통 공정이며 두 번째는 Fig. 4에 나타난 석탄, 재, 유동사등의 고체계통 공정이며 세 번째가 Fig. 5에 나타난 증기계통 공정이다. 가스 및 고체계통 공정은 공기 또는 연소가스(기체)와 유동사(고체)의 두가지 상이한 공간에 공존하여 설비에 따라 두 계통은 서로 혼합되어 거동하거나 분리되는 현상을 고려하였다. 증기계통은 물(액체)과 증기(기체)의 두가지 상이 혼합되어 있거나 분리되는 현상을 고려하였다. 세 개의 계통은 상호간 열전달을 통해 영향을 미치는데 각 설비별 열전달 계산은 Table 3 와 같은 이론식들을 이용하였으며, 각 물질의 비열, 엔탈피, 열전도계수, 점성계수 등의 물성치는 실측값 테이블로부터 내적(interpolation)으로 구하였다^[4,5].

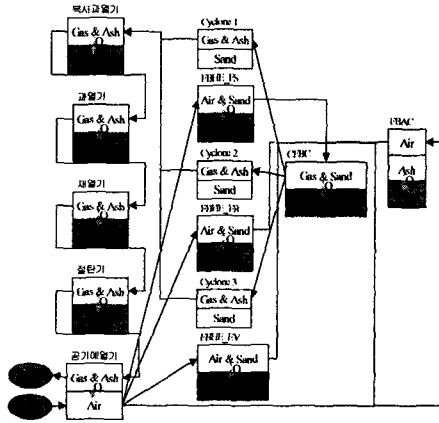


Fig. 3. Air and gas flow process

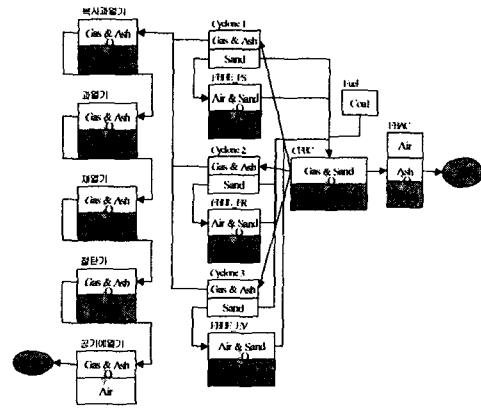


Fig. 4. Solid(coal, ash, sand) process

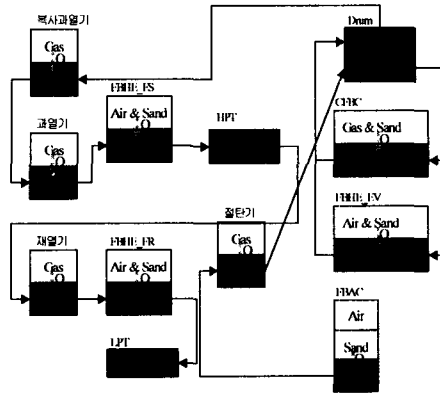


Fig. 5. Boiler steam system process

설비	모델식	비고
순환유동층	$Q = hA(T_{wall} - T_{gas}),$ $h = 150 \sim 170 \text{ W/K m}^2$	(Breitholtz, 1998) ^[6]
복사 열교환기	$Q = A\sigma \frac{\epsilon_w + 1}{2} [\epsilon_g T_{gas}^4 - \alpha_w T_{wall}^4]$	복사 과열기 (Hottel, 1985) ^[7]
대류 열교환기	$Q = (hc+hr)A(T_{wall} - T_{gas}),$ $\frac{h_c D}{k_g} = C Re_D^n Pr_{\infty}^{0.36} \left(\frac{Pr_{\infty}}{Pr_w} \right)^{1/4},$ $h_r = 5.1 \times 10^{-8} a_g T_{gas}^3 \left[\frac{1 - (T_{wall}/T_{gas})^3}{1 - (T_{wall}/T_{gas})} \right]$	과열기, 재열기, 질탄기, 공기에열기 (White, p.302) ^[5] (Sadik, p.402) ^[8]
유동층 열교환기	$Q = hA(T_{wall} - T_{gas}),$ $h = 400 \text{ W/K m}^2$	FBHE_FS, FBHE_FR, FBHE_EV, FBAC (Basu, 1978) ^[9]

Table 3. Heat transfer models

2.3 반복계산

이상의 총 16개의 구성요소 설비들은 상호간에 물질을 교환하면서 가스계통, 고체계통, 증기계통이 복잡하게 연결되어 있는데, 이러한 관계의 복잡성으로 인하여 반복계산을 통하여 정상상태에서의 주요 설계 및 운전인자값들을 계산하였다. 온도를 주요 인자로 설정하여, 초기 온도값을 지정하고, 그에 기준하여 전체 공정별 열물질 전달을 계산한 후에, 온도값을 수정하여 다시 전체 공정별 열물질 전달을 계산하는 방식으로, 온도값이 더 이상 변하지 않을 때까지 계산을 반복 수행하여 정상상태에서의 값을 획득한다.

3. 결과 및 토의

본 연구의 결과로 개발된 순환유동층 보일러 설계분석 프로그램과 동해화력 순환유동층 보일러 설계자료의 비교검토를 수행하여 해석 모델의 적절성 여부를 평가하였다^[3].

한편, 모델결과에 중요한 영향을 미치는 설계 및 운전 인자들중 순환유동층에서의 열전달 계수, FBHE에서의 열전달계수, 유동상 순환량은 모델 자체적으로 계산되지 않기에 실험결과에 근거한 적절한 값을 Table 4와 같이 선정하였다.

항목	단위	BMCR	MGR	100%	75%	50%	30%
순환유동층 열전달계수	W/m ² K	170	170	160	160	150	150
FBHE/FBAC 열전달계수	W/m ² K	400	400	400	400	400	400
유동사 순환량	kg/s	700	700	700	600	600	200

Table 4. Dominant parameters for calculation

모델결과와 기본설계를 비교해 보면 Fig. 6의 주증기 유량은 모델과 설계값이 매우 근접한 것을 확인할 수 있다. 한편, 모델의 정확도를 높이기 위해서는 Table 4에 나타난 주요한 인자들을 적절하게 선택하는 것이 영향을 받는다.

Fig. 7의 주증기최종온도, Fig. 8의 재열증기최종온도는 설계값과 모델값이 거의 일치하지만, 부하가 30%로 떨어지는 경우 오차가 심하게 나타나는데, 이 경우는 정상적인 운전이 불가능한 경우로서 큰 의미를 부여할 수 없다. Fig. 9의 절탄기 출구 가스온도는 연소가스가 보일러를 거처오면서 열에너지 방출이 적절한가를 판단하는 기준이 되는데 모델값이 설계값보다 다소 낮게 예측되는 것으로 나타나지만 비교적 오차는 적은 것으로 판단된다.

Fig. 10의 부하별 순환유동층 출구 가스온도는 설계치가 존재하지 않기에 비교대상이 없다. 그림에 나타난 이론치만 보면, 정상운전시 900℃ 이상을 보이지만 BMCR까지 부하를 올려도 크게 온도가 상승하지 않고 1000℃ 이하에서 운전될 수 있음을 확인할 수 있다. 한편, 부하가 75% 이하로 떨어지게 되면 순환유동층 출구온도가 900℃이하로 떨어지며 부하가 낮아질수록 온도도 급격하게 떨어져 부하 50%에서 713℃, 30%에서 583℃ 등 정상적인 연소반응에 부적절한 운영이 될 것을 예상할 수 있다.

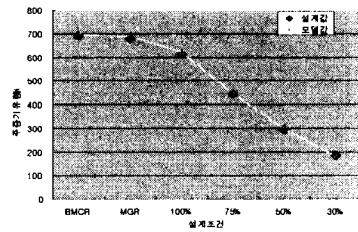


Fig. 6. Main steam flow rate

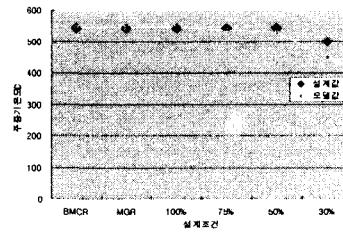


Fig. 7. Main steam temperature

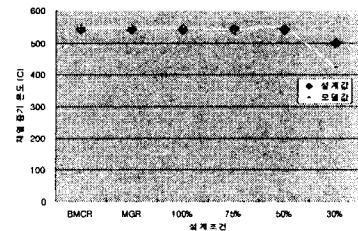


Fig. 8. Reheated steam temperature

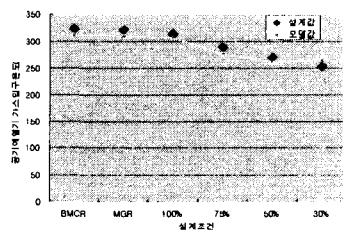


Fig. 9. Offgas temperature at the exit of economizer

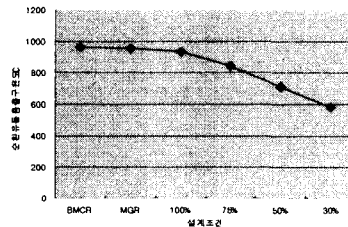


Fig. 10. CFBC offgas temperature

4. 결론

순환유동층 연소로는 유동사와 연료의 원활한 혼합, 그리고 유동사와 전열관의 높은 전열 효율 특성으로 국내 무연탄 등 저급 연료의 고효율 연소에 적합한 설비이지만, 사이클론, FBHE등을 거쳐 순환하는 복잡한 유동사의 거동 및 FBHE에서의 열전달 현상으로 인하여 다른 연소기기에 비해 설계 및 해석이 어려운 점이 있다. 이러한 모델링상의 복잡성을 해결하기 위하여 공기와 연소가스를 포함하는 가스계통, 유동사와 재의 흐름을 포함하는 고체계통, 그리고 보일러 관내에서 열을 흡수하는 증기계통에 대한 공정모델을 구축하였으며, 상호간 열 및 물질전달을 해석할 수 있는 모델을 구현하여 종합적이고 포괄적인 해석이 가능한 공정모델을 개발하였다.

개발된 모델 결과와 기본설계서에 나타난 설계조건들을 비교한 결과, 보일러 주증기 유량, 온도, 재열증기 온도 등 주요 성능인자가 일치하여 모델의 적절성을 확인하였다. 또한, 기본설계서에는 나타나지 않은 다양한 중요 인자들의 변화를 모델을 통해 예측할 수 있었다.

본 모델은 다양한 운전조건 변화에 대해 적절한 결과값을 제공하며, 또한, 설계수정시에 발생할 수 있는 현상들을 미리 예측할 수 있는 도구로서 유용하게 활용될 수 있다.

차후, 본 모델은 현재 모델이 갖고 있는 한계인, 순환유동층 및 FBHE 에서의 열전달계수 및 유동사 순환량에 대한 계산을 IEA-CFBC 코드를 병합하여 보다 정확한 결과를 도출할 수 있는 모델로 개선될 예정이다.

후기

본 연구는 2002년 에너지 관리공단 에너지 자원기술개발사업 청정에너지부문의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 국내탄용 순환유동층 보일러의 운전특성연구 (최종보고서), 한국전력공사 전력연구원 Technical Report TR.98GJ05.J2000.253, 2000년 5월
- [2] 제 8 회 유동층연소보일러 사용자 기술세미나, 산업자원부/에너지관리공단 기술개발본부, 한국에너지 기술연구원, 2003년 9월 25-26일
- [3] 동해화력 제2호기 보일러성능진단 결과보고서, 한국전력공사 전력연구원 Technical Memo, TM.C97GS04.G2001.031, 2001년 2월
- [4] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, "Thermodynamics an engineering approach," 4th International edition, McGraw-Hill, pp. 830-838, 2001
- [5] Frank M. White, "Heat Transfer," Addison-Wesley Publishing Company, Inc, pp. 542-558, 1984
- [6] Claes Breitholtz, Bo Leckner, "Heat balance over the fluid-dynamic boundary layer of a circulating fluidized bed furnace," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, Nos 8-9, pp.1013-1024, 1998
- [7] Hottel, H.C., "Radiation from carbon dioxide, water vapor and soot," American Flame Committee, 1985
- [8] Boilers, evaporators, and condensers, edited by Sadik Kakac, John Wiley & Sons, Inc, 1991
- [9] Prabir Basu, "Bed-to-wall heat transfer in a fluidized bed coal combustor," AIChE Symposium Series, Vol. 74, No. 176, pp.187-193, 1978