

# 340MWe급 순환 유동상 보일러의 단순 성능 예측 모형

양종인\* · 최상민\*†

## Performance Prediction Model of 340MWe Circulating Fluidized Bed Boiler

Jongin Yang\*, Sangmin Choi\*†

### ABSTRACT

Circulating fluidized bed(CFB) furnace which can use a variety of low-grade fuels because of high heat capacity and good mixing characteristic in its furnace have turned out to be effective system. There is no many research to predict performance considering total boiler system with water-steam side. Most of performance prediction model have focused on hydrodynamics or chemical mechanism in furnace. so, This study is aimed to develop performance prediction model which consider water-steam side.

**Key Words** : CFB, CFB Boiler, Circulating fluidized bed, Simulation, Boiler

순환 유동상 연소 기술은 연소 효율이 높고 탈황, 탈질에서의 장점을 가지며, 다양한 연료에 대해서 운전이 가능하다. 현재 최대 발전 용량 460 MWe 급의 순환 유동상 보일러가 상용운전 되고 있으며, 중국에서 600MWe 급 설비가 건설 중이다. 국내에서는 동해화력이 200MWe 규모로 현재 운영 중인 순환 유동상 보일러 중에서 가장 큰 용량을 가지고 있다. 또한 여수화력에서 340MWe 급의 순환 유동상 보일러가 운영되고 있다[1].

제작사별 구조적으로 다른 특징을 같은 순환 유동상 보일러의 성능을 제대로 예측하고 평가하는 일은 중요한 작업이 될 것이며, 현재까지 순환 유동상 보일러의 성능 예측 연구가 많은 부분에서 상당히 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구가 연소로 등의 구성 장치를 포함한 CFB 루프의 가스-고체 측 모델링에 초점을 맞추고 있으며, 특히 연소로의 반응 메커니즘 및 수력학적 특성에 관심이 집중되어 있다. 다시 말해서 대부분의 모델이 가스-고체 측과 물-증기 측을 함께 고려한 보일러 시스템적인 고려를 하지 않고 있다.

따라서, 본 연구는 물-증기측을 함께 고려한 순환 유동상 보일러의 성능 예측 모델을 개발하기 위해 시작되었다.

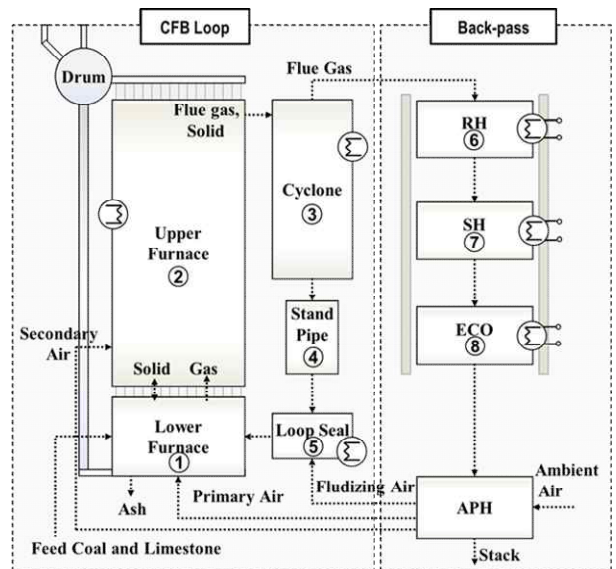


Fig. 1 Schematic diagram of CFB Boiler flow systems.

현재 해석 대상으로 삼고 있는 순환 유동상 보일러의 시스템 구조는 Fig. 1과 같다. 대상 보일러는 여수 화력의 국내 최대 규모의 순환 유동상 보일러이며, Fig. 1에 가스 상과 고체 상 각각의 흐름도를 나타내었다.

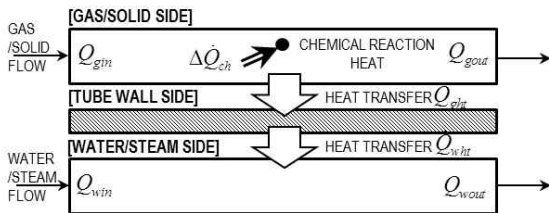
이미 여수 화력 순환 유동상 보일러에 대한 성능 예측 모델 개발과 관련된 연구가 시도되었다 [1]. 앞선 연구에서는 순환 유동상 보일러의 각 구성 장치를 Fig. 2의 (b)와 같이 완전 반응 및

\* 한국과학기술원 기계공학과  
† 연락처, [smchoi@kaist.ac.kr](mailto:smchoi@kaist.ac.kr)  
TEL : (042)350-3070 FAX : (042)350-3210

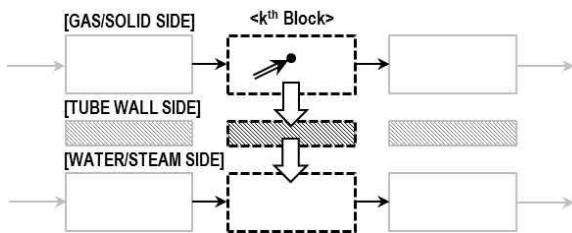
완전 혼합 가정을 바탕으로 정상 상태 기준으로 성능 예측을 할 수 있는 모델을 개발하였다. 이 모델의 경우 물-증기 측을 함께 고려하여 보일러 전체 시스템적으로 접근을 하였으나 단순 열역학적 사이클 계산을 통한 물-증기 측의 온도를 계산하였으며, 연소로 등의 구성 장치에서 높이 방향 및 시간에 따른 열전달, 화학 반응 및 수력학적 특성 등을 고려하지 않고 있다. 이러한 접근 방법은 정상 상태 기준 성능 예측 계산의 경우에는 문제없으나, 동적 거동 특성에서는 성능 예측을 수행 하는 데는 어려움이 뒤따를 수 있다.

따라서, 궁극적으로 본 연구에서는 앞서 진행된 340MWe급 순환 유동상 보일러의 성능 예측 모델을 보완하여, Fig.2 (c)와 같이 1차원 비정상 상태 계산을 수행할 수 있는 모델 개발을 하고자 하며, 최종적으로 개발된 성능 예측 모형은 실증 플랜트로부터 얻은 시운전 자료와의 비교를 통해 타당성을 검증하고자 한다.

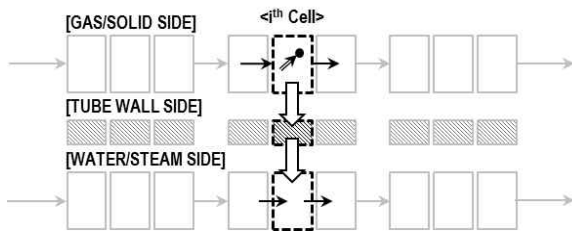
보일러는 발전소에서 연료를 연소시켜 발생된 열에너지를 물-증기 측으로 전달하여 고온 고압의 증기로 변환하는 역할을 수행한다.



(a) CFB boiler model basic concept



(b) Block model



(c) 1-D Unsteady model

Fig. 2 Performance prediction Model of CFB Boiler

이러한 보일러 장치의 기본 개념을 Fig. 2의 (a)에 나타내었으며, 크게 물-증기 측과 가스-고체 측 그리고 수관 측으로 구성되며, 이들은 여러 구성 장치를 포함하고 있다.

각 구성 장치의 모델 식은 해석 정도에 따라 물질, 운동량, 에너지 수지 식을 기본으로 구성되어 있다. 동적 거동 특성에 쉽게 이해를 줄 수 있는 셀의 에너지 수지 식을 아래에 나타내었고, 아래에 나타난 열량들을 구하기 위한 변수들을 순서대로 설명하였다.

$i^{th}$  cell's energy balance equation,

Gas/Solid side :

$$\frac{\partial E_{w,i}}{\partial t} = \dot{Q}_{win,i} - \dot{Q}_{wout,i} + \dot{Q}_{wht,i} \quad (1)$$

Tube wall side :

$$\frac{\partial E_{tw}}{\partial t} = \dot{Q}_{ght,i} - \dot{Q}_{wht,i} \quad (2)$$

Water/Steam side :

$$\frac{\partial E_{g,i}}{\partial t} = \dot{Q}_{gin,i} - \dot{Q}_{gout,i} + \Delta \dot{Q}_{ch,i} + \dot{Q}_{ght,i} \quad (3)$$

(1)식의 내부 에너지( $E_{g,i}$ )는 고체-가스 측의 열용량과 온도의 곱으로 표현되며, 열용량을 구하기 위해서는 가스-고체상의 체류량을 구해야 한다. 또한, 셀을 들어오고 나가는 물질의 현열( $\dot{Q}_{in}$ ,  $\dot{Q}_{out}$ )을 구하기 위해서는 가스-고체 상의 질량 유량 값을 필요로 한다.

연소로 내 고체 체류량은 고속 유동층에서 측방향 고상률(Solid volume fraction)의 분포를 알아야 하며, 이를 예측하기 위해 다음의 비말 동반(Entrainment model; Kunii and Levenspiel, 1990) 모델을 이용하였다.

$$\frac{\epsilon_s - \epsilon_{s,\infty}}{\epsilon_{s,d} - \epsilon_{s,\infty}} = e^{-a(h-H_d)} \quad (4)$$

여기서, 감쇠 상수  $a$ 는 실험적으로 얻은 데이터를 공탑 속도, 입자크기와 함께 관련시킨 연구(Kunii and Levenspiel, 1991)로부터 결정하였다.

고체의 질량 유량의 경우에는 여러 연구자에 의해서 여러 실험적인 상관식이 개발되었으나, 연구 결과가 다소 상이하므로 용량이 다양하고 제작사 별로 특징이 다른 순환 유동상 보일러에 일반적으로 적용 하는 데에 어려움이 따를 수 있다. 따라서 운전 자료로부터 얻은 데이터를 이용하여 상관식을 선택적으로 적용하였다.

열전달( $\dot{Q}_{ht}$ )은 열전달 계수(h)와 전열 면적(A) 그리고 온도차( $\Delta T$ )의 곱으로 표현되며, 에너지 수지 식을 구하기 위해선 열전달 계수를 구해야 한다.

열전달 메커니즘은 각 구성요소 상황에 따라 나타나며, 연소로의 경우에는 가스 대류 및 복사 그리고 입자 대류 복사를 산술적인 합으로 나타낸 다음의 Cluster renewal 모델(Basu and Fraser, 1991)을 이용하여 구하였다.

$$h = f(h_c + h_{cr}) + (1-f)(h_d + h_{dr}) \quad (5)$$

그 외 사이클론과 루프실에 대해서는 설계 자료로부터 역 계산을 취하여, 각각의 열전달 계수를 구하였다.

대류전열관부를 포함하고 있는 2차 루프의 경우에는 가스 복사 및 대류 열전달을 포함하고 있다. 직교 유동 관군에 적용 가능하며, 다음과 같이 산술적인 합으로 나타낸 식을 사용하였다.

$$h = h_{co} + h_{ra} \quad (6)$$

물-증기층의 경우에는 Dittus\_Boelter의 열전달 상관식을 이용하였다.

화학 반응으로부터 발생하는 열량( $\Delta \dot{Q}_{ch}$ )을 고려 하기 위해 주요 반응을 단순화 하여 화학반응 속도론(Kinetics)을 고려해 주었다. 연소로에서 일어나는 반응으로는 크게 연소 반응과 탈황 반응을 들 수 있으며, 이들 화학 반응은 매우 복잡한 메커니즘을 가진다. 계산에 있어 상대적으로 영향력이 적은 탈황 반응의 경우 순간적으로 모든 반응이 완결된다고 가정하였다.

연소 반응의 경우 탈황발과 기체-고체 반응의 최의 연소(Smih, 1982)를 각각 고려해 주었으며, 기체-기체 반응의 휘발분 연소(Jones and Lindstedt, 1998 & D.R. Vandervaart, 1998)를 함께 고려하였다.

**Table 1** Geometric parameters and working conditions of the CFB boiler

Cross-section of boiler(m <sup>2</sup> )	270
Boiler height(m)	42
Height of SA inject inlets(m)	2-4
BMCR steam flow rate(kg/s)	279
Superheated steam pressure(Pa)	18
Superheated steam temperature(°C)	540
Coal feed rate(kg/s)	44
Limestone feed rate(kg/s)	1.6
PA flow(Nm <sup>3</sup> /h)	195
PA ratio(%)	55.5

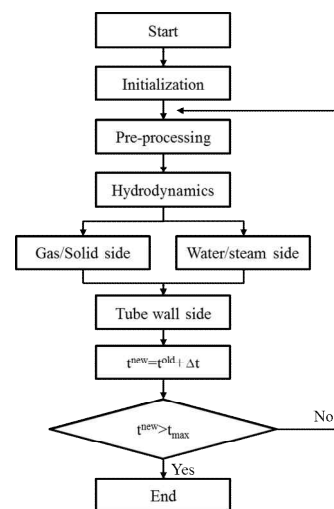
**Table 2.** Analysis of the coal

Proximate analysis	Value	Ultimate analysis	Value
Moisture(wt%)	25.0	C	52.4
Ash(wt%)	2.25	H	3.7
Volatile(%wt)	40.5	O	15.8
HHV(kcal/kg)	4910	N	0.8
		S	0.23

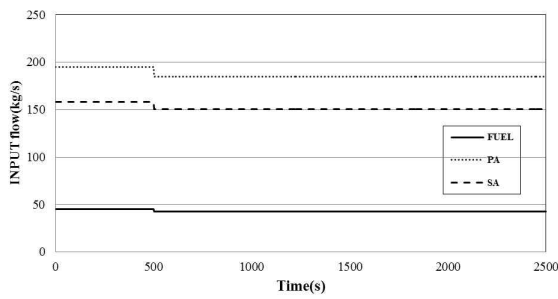
지금까지 언급한 모델에 근거하여, 최대 (1025 t/h)의 증기를 생산해내는 순환 유동상 보일러에 대하여 500초 후 연료 투입 상황 변화(+5%)에 대하여 우선적으로 계산이 시도되었다. Table. 1에 대상 보일러의 기하학적인 정보 및 초기 운전 조건을 나타내었고, Table. 2에 연료 조건에 대해 나타내었다. 제어되는 변수의 경우 몇 가지 가정을 통하여 계산을 수행하였다. 주입 공기량의 경우 연료의 투입량의 일정 당량비로 바로 주입되도록 계산하였으며, 급수의 경우 물의 수위 정보를 입력받아 수위가 0이 되도록 주입하였고, 밸브 상수의 경우는 항상 일정하다고 가정하였다.

성능 예측은 CFB 루프의 고체-가스 층을 각 구성요소 별로 수백여 개의 셀로 나누었으며, 물/증기 층 계산에 대해서는 각 구성 요소 별로 약 80여개의 셀로 나누어 해석하였다.

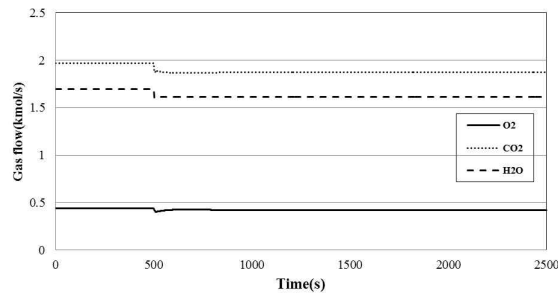
성능 예측 모델은 가스-고체층과 물-증기층의 모델로 구성되어 있으며, 각각의 미분 방정식은 음함수 해법, 상류 차분, 엇갈림 격자를 이용한 이산화를 통하여 대수 방정식으로 변환하였으며, TDMA를 이용하여 풀이 하였다. 또한, 운동량 및 물질 정산 식의 풀이는 SIMPLE 알고리즘을 이용하거나 Gauss-seidel법을 이용하여 해를 구하였다. 전체적인 계산 과정은 Fig. 3에 나타내었으며, 계산 결과는 Fig. 4와 같다.



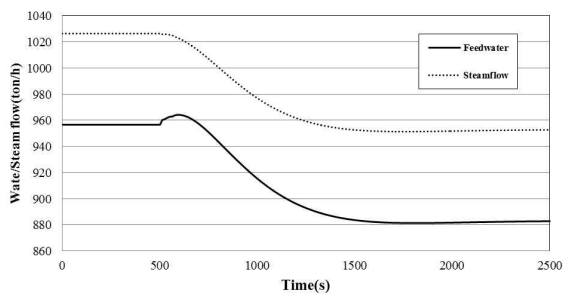
**Fig. 3** Overall calculation scheme



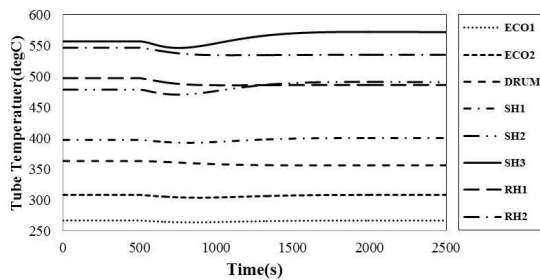
(a) Input



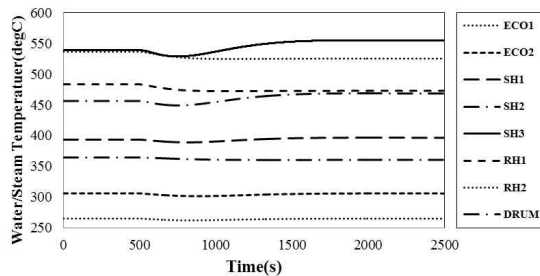
(b) Furnace exit gas flow



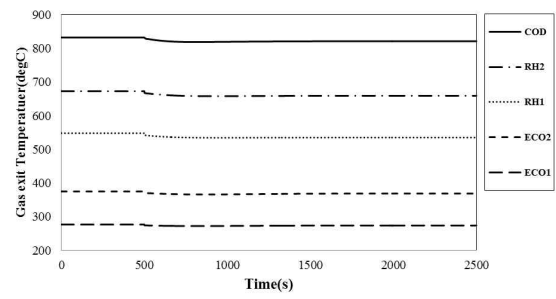
(b) Water/Steam flow rate



(c) Tube wall Temperature



(c)Water/Steam Temperature



(d) Gas exit Temperature

Fig. 4 Simulation result of Fuel flow 5% step change.

## 후 기

본 연구는 Brain Korea 21의 지원을 받아 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] 김태현, 최상민, "300MWe 순환 유동상 보일러의 성능 예측을 위한 시스템 시뮬레이션", 제 43회 KOSCO SYMPOSIUM, 2011, pp. 319-327
- [2] Kathleen Smolders and Jan Baeyens, "Hydrodynamic Modelling of a Low-Density Circulating Fluidized Bed", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 79, 2001, pp. 422-429.
- [3] Yang Chen, Gou Xiaolong, "Dynamic modeling and simulation of a 410t/h Pyroflow CFB boiler", Computers & Chemical Engineering, 2006, pp. 21-31.
- [4] A. Gungor, N. Eskin, "Analysis of environmental benefits of CFB combustors via one-dimensional model", Chemical Engineering, Vol. 131, 2007, pp. 301-317.