

## 국내 무연탄용 순환유동층 보일러 설계 최적화에 관한 연구

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

### A Study on Design Optimization of Circulating Fluidized Bed Boiler for Domestic Anthracite

Donghoon Shin, Jungho Hwang, Jongmin Lee\*, Dongwon Kim, 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 설비가 있다<sup>[1,2]</sup>.

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 국내탄용 순환유동층 보일러의 설계 최적화를 위한 연구로써, 다양한 해석모델을 개발 및 활용하여 대표적 국내탄용 순환유동층인 동해화력발전소를 대상으로 기존의 기본 설계의 보일러 관련 설계값들을 역으로 도출하고, 핵심 설계인자들을 도출하는데 필요한 공학적 도구들을 제시하는 것 목적으로 한다. 이를 위하여, 단일자 석탄연소모델, 1.5차원 순환유동층 연소모델 그리고, 전체 공정의 구성설비간 상호 영향을 평가하기 위한 공정해석모델을 개발하여, 주요 성능인자인 연소효율, 연소로 온도, 증기발생량, 증기온도 등에 연료변경, 부하변경, 연소로 형상 변경 등의 설계 및 운전인자변경이 미치는 영향을 이론적으로 분석할 수 있는 수치적 도구들을 개발하였다.

#### 2. 동해화력 순환유동층 보일러 구성 및 운전현황

본 연구의 해석대상은 동해화력 순환유동층 발전보일러로서 기본 설계조건은 Table 1과 Table 2에 나타나 있으며, Fig. 1은 전체 발전 공정을, Fig. 2와 Fig. 3은 각각 보일러 가스 및 고체계통 공정도와 증기계통 공정도를 보여준다. 전체 발전 공정은 Fig. 1과 같이 절탄기, 증발기, 과열기 및 재열기를 포함한 보일러 시스템과, 세 단계의 터빈 및 발전기, 응축기, 8단계의 공급수 가열기 및 탈기기 그리고 세 개의 펌프로 구성되어 있다. Fig. 2와 Fig. 3은 순환유동층보일러, 세 개의 사이클론, 세 개의 FBHE, FBAC 및 백패스로 구성된 보일러 공정에서의 연소가스, 고체상 물질, 증기의 흐름도를 보여준다.

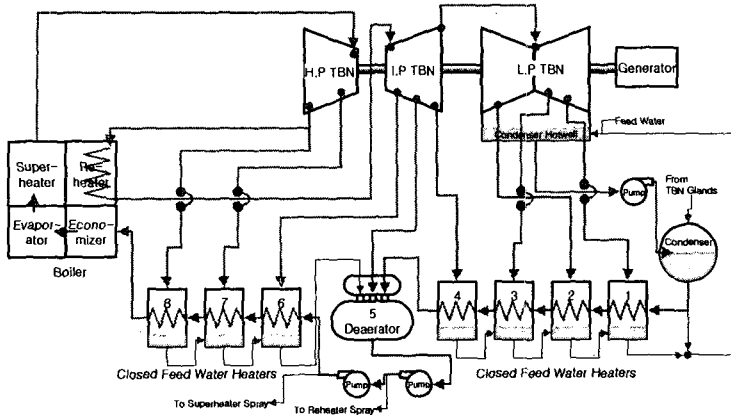


Fig. 1 Overall process diagram of Tonghae power plant.

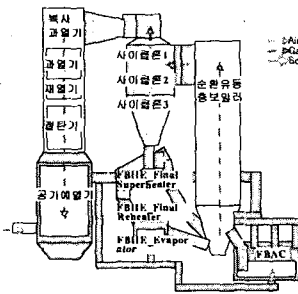


Fig. 2. Gas and solid process of Tonghae power plant boiler

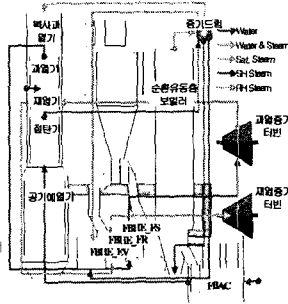


Fig. 3. Boiler steam process of Tonghae power plant

Table 1. Domestic coal characteristics for Tonghae power plant<sup>[3]</sup>

화학종	단위	설계기준
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
HHV	kcal/kg	4230

Table 2. Design conditions for comparison<sup>[4]</sup>

항목	단위	설계값					
		BMCR	MGR	100%	75%	50%	30%
석탄투입	kg/h	108300	106750	98150	74560	52310	28400
보조연료투입(경유)	kg/h	0	0	0	0	0	1940
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

이상과 같이 동해화학 순환유동층 보일러는 많은 설비들이 서로 연계되어 있는 복잡한 공정흐름을 보이고 있다. 각 설비들은 상호간에 밀접한 영향을 미치는 복잡한 연결관계에 있기에 개별 요소설비별 해석과 더불어 전체 공정을 종합적이고 복합적인 공정모델을 구현하여 해석해야 할 필요가 있다.

### 3. 해석모델

#### 3.1 단입자 연소모델

석탄연소에 있어서 가장 오랜 시간동안 지속되는 것이 고정탄소 반응이다. 입자의 크기에 따라 증가하는 경향이 있으며, 특히 국내 무연탄의 경우는 고정탄소함량이 높아서 연소에 소요

되는 시간이 오래 걸린다. Table 3는 일반적인 화 연소 화학반응식 및 반응계수를 보여준다

Table 3 Char reactions coefficients<sup>14)</sup>

$k_r = A_r T \exp(-E_r / RT)$			
	Ar (m/sK)	Er/R (K)	Heat of Reaction (kJ/kg)
$C + 0.5O_2 \Rightarrow CO$	2.3	11,100	9,242
$C + CO_2 \Rightarrow 2CO$	589	26,800	-14,321
$C + H_2O \Rightarrow CO + H_2$	0.0137	17,080	-10,930

다음 식 (1) 은 Smoot의 화연소모델을 나타낸다<sup>14)</sup>. 화 연소 모델은 온도에 의한 반응율과 산소의 확산속도, 그리고 화입자의 조직 구조에 따른 산소 확산속도의 세가지 지배 반응 요소가 있는데, 본 연구에서 해석하고자 하는 화입자의 연소효율은 식 (1)을 시간에 따라 적분하여 연소율을 계산하여 구한다. 한편, 본 연구에서는 산소 확산과 화입자 조직구조의 영향은 순환유동층의 특성상 빠른 혼합과 입자 마모의 특성으로 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였다.

$$r_i^{0,g} = (v_s M w_p A_p C_{i,g}) / (1/k_r \zeta + 1/k_m + 1/k_{eff}) \quad (1)$$

Fig. 6은 동해화력 발전소의 전기집진기에서 포집되는 입자의 입경분포를 보여준다. 대부분 100 μm 이하로서 평균 입도는 34 μm이다<sup>13)</sup>. 입도에 따라 반응시간에 차이가 있고 미연탄소 비율이 달라지므로 입도 분포를 고려한 연소효율 계산을 수행해야 한다. 다음 식은 비산재에 포함된 강열감량 계산식이다.

$$\text{평균강열감량} = \sum_{\text{입도}} \text{입도별질량비율} \times \text{입도별강열감량} \quad (2)$$

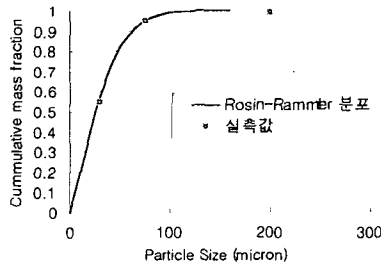


Fig. 6 Collected particle diameter distribution at EP

### 3.2 IEA-CFBC 모델

국제에너지기구(IEA)에서 개발한 순환유동층 연소 모델은 순환유동층내에서 발생하는 반응과 열전달, 그리고 물질전달을 현실적으로 해석할 수 있는 1.5차원 모델이다<sup>15)</sup>. 본 연구에서는 순환유동층 유동화거동 특성을 분석하고, 각종 반응 및 열전달을 해석하는데 본 코드를 활용하였다. 또한, 본 코드에서 도출된 설계인자들은 다음절의 공정모델링에 적용되는데, 특히, 유동사 순환량, 벽면 열전달량은 공정모델에서 활용하여 현실적인 공정해석에 필요한 자료를 제공한다.

### 3.3 공정 모델링

순환유동층 보일러 공정 모델은 다음과 같이 크게 세 개의 공정이 상호 연계된 것으로 구현하였다. 첫 번째는 Fig. 3에 나타난 공기 및 가스료 구성된 가스계통 공정이며 두 번째는 Fig. 4에 나타난 석탄, 재, 유동사등의 고체계통 공정이며 세 번째가 Fig. 5에 나타난 증기계통 공정

이다.<sup>[6]</sup>

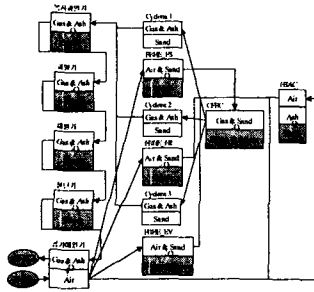


Fig. 8. Air and gas flow process

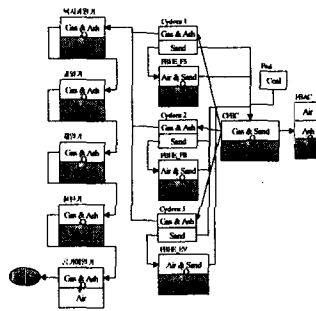


Fig. 9. Solid (coal, ash, sand) process

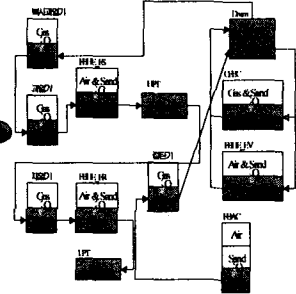


Fig. 10. Boiler steam system process

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 최 연소 모델을 이용한 연소효율 예측

Fig. 11과 Fig. 12는 최 연소 모델을 이용하여 연소로의 주요 설계 인자인 온도, 체류시간, 연료특성, 산소농도등의 영향을 이론적으로 예측한 결과이다. Fig. 11의 온도가 증가할 수록 비산재 강열감량이 떨어지는 것은 연소 반응이 온도에 민감하기 때문이다. 또한, 노내 체류시간이 길어질수록 비산재 강열감량이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 연료중 고정탄소 비율은 고정탄소 비율이 높을수록 비산재 강열감량이 증가하고 산소농도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 현재 동해화력 발전소의 운전조건은 온도: 950℃, 체류시간: 5~6초, 산소농도: 3~4%이고 연료중 고정탄소비율은 대략 57~61% 정도에 이른다. 이와 같은 조건에서 비산재 강열감량 예측치는 대략 15% 정도에 나타나는데 실제 측정결과는 17~19% 근처이다<sup>[3]</sup>. 이 모델을 활용하여 비산재 강열감량을 줄이는 방안을 강구할 수 있으며, 이는 전체 발전효율을 증대시킬 수 있는 설계근거를 제공할 수 있다.

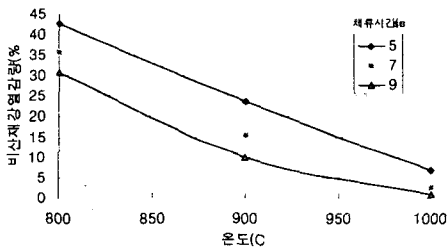


Fig. 11 Effect of temperature and residence time on unburned carbon ratio of the EP ash. (Fixed carbon of the fuel: 6%, oxygen in the gas: 3%)

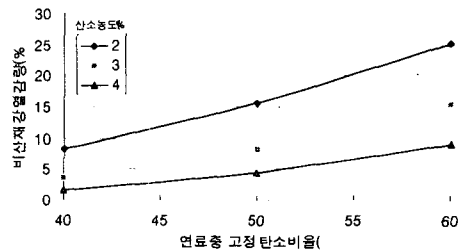


Fig. 12 Effect of fixed carbon rate in the fuel and oxygen concentration on unburned carbon ratio of the EP ash. (Temperature: 900℃, residence time: 7sec)

##### 4.2 IEA-CFBC 해석결과

Fig. 13과 Fig. 14는 IEA-CFBC 해석코드 결과중 온도와 고체상 질량 비율을 보여준다. IEA-CFBC코드는 이외에도 각종 화학종 분포, 열전달등을 계산할 수 있는 유용한 툴로서 설계에 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 IEA-CFBC 코드의 열전달계산과 고체상 순환율을 공정해석의 인자로 활용하였다.

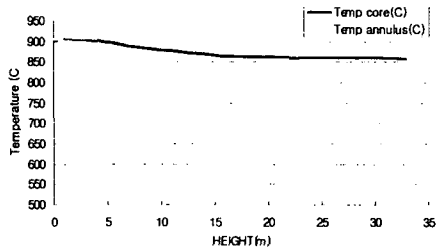


Fig. 13 Temperature distribution in CFBC

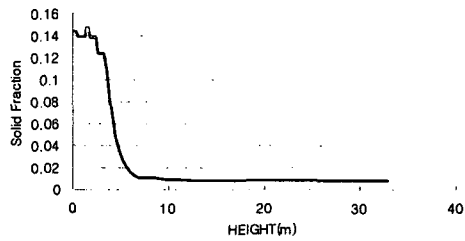


Fig. 14 Solid Fraction in the Riser

### 4.3 공정해석 결과

공정설계는 순환유동층 연소로와 상호간 영향을 미치는 여러 가지 설비들을 동시에 해석하여 상호간의 영향력을 파악할 수 있는 공학적 정보를 제공한다. 공정해석 모델결과와 기본설계를 비교해 보면 Fig. 15의 증기발생량, Fig. 16의 가스 온도등 핵심 설계 및 운전인자를 예측하는데 우수한 성능을 보여 설계 및 운전인자 변경등의 영향을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있다.

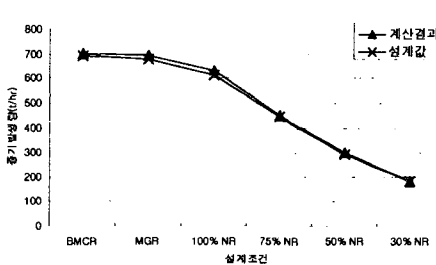


Fig. 15 Steam evaporation rate comparison

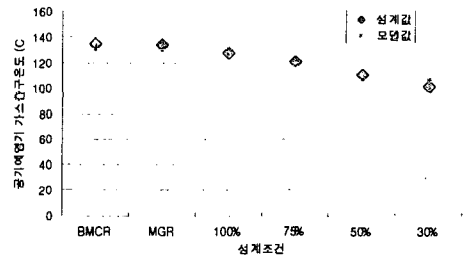


Fig. 16 Air pre-heater exhaust gas temperature comparison

## 5. 결론

국내탄용 순환유동층 보일러의 설계 및 운전 최적화에 기여할 수 있는 다양한 수준의 해석모델을 제작 및 활용하여 대표적 국내탄용 순환유동층인 동해화력발전소를 대상으로 기존의 기본 설계의 보일러 관련 설계값들을 역으로 도출하고, 핵심 설계인자들을 도출하는데 필요한 공학적 도구들을 제시하였다. 단일자 석탄연소모델, 1.5차원 순환유동층 연소모델 그리고, 전체 공정의 구성설비간 상호 영향을 평가하기 위한 공정해석모델을 개발하여, 주요 성능인자인 연소효율, 연소로 온도, 증기발생량, 증기온도 등이 연료변경, 부하변경, 연소로 형상 변경 등의 설계 및 운전인자변경이 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다.

최 연소 모델은 순환유동층 연소로 설계에 필요한 연소공학적 기초정보를 제공하여, 효율증대를 위한 설계 및 운전 가이드라인을 제공할 수 있는 기능을 갖음을 확인하였다. 다양한 변수변화 평가 및 실제 플랜트 측정값과 비교를 통해 차후 좀더 유용한 모델로 개선될 수 있음을 확인하였다.

IEA-CFBC 코드는 순환유동층 전용 코드로서 순환유동층내 반응, 열전달을 해석하며, 순환유동층 고유의 현상인 유동화 현상을 예측하는데 유용하므로 순환유동층 연소로 효율 향상을 위

한 연구에 유용한 도구임을 확인하였다.

순환유동층 보일러는 여러 구성 설비들 간에 밀접한 상관관계가 존재하여 실제 발생하는 현상을 해석하기 위해서는 모든 설비를 동시에 해석하는 공정해석 모델이 필요하다. 본 연구에서 개발한 공정해석 모델은 설계서와 비교하여 거의 일치하는 결과를 보였으며 차후, 설계변경, 운전조건 변경 그리고 최적 설계안 도출에 유용할 것으로 사료된다.

## 후기

본 연구는 2003년 에너지 관리공단 에너지 자원기술개발사업 청정에너지부문의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 기호설명

$r_i^{sp}$ , the single particle reaction rate (kg/s),

$\nu_i$ , the stoichiometric coefficient to identify the moles of carbon per mole of oxidant,

$M_{wp}$ , the molecular weight of the reactant in the particle (e.g. carbon)

$k_h$ , the rate constant for the heterogeneous oxidation or gasification reaction (m/s)

$k_m$ , film mass transfer coefficient (m/s),

$k_{eff}$ , effective mass transfer coefficient through the developing ash layer (m/s)

$\zeta$ , the particle area factor to account for internal surface burning (effective burning area of the entire particle/external area of the equivalent spherical particle)

$A_p$ , effective external surface area of the equivalent sphere (m<sup>2</sup>)

$C_{i,s}$ , the molar concentration of the oxidizer in the gas phase at the surface of the particle (kmol oxidizer/m<sup>3</sup>)

## 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] Smoot, L. D. and Smith, P. J., Coal combustion and gasification, Plenum Press, New York (1985)
- [5] Jens Paulus Hannes., "Mathematical Modelling of Circulating Fluidized Bed Combustion", Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology. The Netherlands (1996)
- [6] 신동훈, 황정호, 이종민, 김재성, "발전용 순환유동층 보일러 공정해석 프로그램 개발 연구," 2003 추계 에너지공학회 학술대회 논문집, p. 181-186