

## 운전변수에 따른 동해화력 순환유동층 보일러의 성능평가

김시문 · 이종민 · 김재성 · 송규근\*

한전 전력연구원, \*전북대학교

### Evaluation of Performance for The Tonghae CFBC with Operation Parameters

Si-Moon Kim, Jong-Min Lee, Jae-Sung Kim and Kyu-Kun Song\*

Korea Electric Power Research Institute, \*Chonbuk National University

#### 요 약

유동층 연소기술은 다양한 연료의 사용과 SO<sub>x</sub>와 같은 공해물질의 배출제어가 용이하며 환경규제에 대한 대처능력이 우수한 발전방식으로 널리 적용되고 있는 추세이다. 국내에서도 동해화력 1,2호기(200 MWe 급)가 유동층 연소방식을 도입하여 운전중에 있으며, 국내 무연탄을 연료로 사용하는 최대 규모의 순환 유동층 보일러라 할 수 있다. 본 논문에서는 IEA-CFBC 모델을 이용하여 개발된 동해화력 순환유동층 성능모사 시뮬레이션 틀을 이용하여 여러 가지 운전변수 변화에 따른 성능예측을 수행하였으며, 특히, 연소로의 성능향상을 위한 방안의 일환으로 사이클론 개조를 수행하고 그에 따른 성능모사를 고찰하였다. 본 성능평가 결과 연소로내 전체 차압을 증가시키는 운전을 지향하는 것이 연소로내 회박상의 온도분포를 낮추고, 탈황효율을 증가시켜 운전 안정화에 기여하는 것으로 나타났다. 또한, 본 시뮬레이션 틀을 이용한 운전변수 변화에 대한 성능예측 결과 동해화력 운전 실측치와 잘 일치하는 것으로 고찰되었다.

**Abstract**—Circulating fluidized bed combustion, which uses a variety of fuel type and facilitates a pollutant emission control, turns out to be a very effective combustion system. The 200MWe class Tonghae thermal power plant CFB boiler (2-unit) in Korea is the largest boiler to fire domestic anthracite for electric power generation. In this paper, we have examined the performance of the Tonghae thermal power plant CFB boiler using IEA-CFBC model depending on various operation parameters. Especially, the modification of the cyclones have been carried out and the performance evaluation of the CFB combustor have been conducted. As a result of this study, the increase of solid circulation rate and solid hold-up in lean phase by increasing the differential pressure allowed temperatures of the furnace and the emissions of SO<sub>x</sub> to be lower. The simulation results by IEA-CFBC model could explain well the performance of the modified Tonghae CFB combustor.

#### 1. 서 론

국내 무연탄을 사용하는 200 MWe급 동해화력 보일러는 순환유동층 연소방식을 채택한 발전설비로서 현재 상업유동층 2개 호기가 상업 운전중에 있으며, 1,2호기가 '98년 10월과 '99년, 10월에 각각 상업운전을 시작하였다<sup>1)</sup>. 그러나, 무연탄용 순환유동층 보일러에 대한 운전경험과 자료의 부족으로 초기 시운전 단계에서 많은 어려움과 잦은 설계개선이 불가피하였으며, 특히, 국내 무연탄의 특성상 반응성이 느리고 미분함량이 많아 후연

소를 유발시켜 전체 순환유동층의 성능을 저하시키고, 사이클론 및 sealpot의 온도상승을 야기시켜 클러킹 생성 및 플러깅에 의한 조업 중단을 초래하였다. 또한, SO<sub>2</sub>의 제거를 위한 탈황제의 주입이 기대이상으로 높게 유지되는 등의 문제점이 나타나 개선이 요구되었다. 따라서, 석탄 연소시 사이클론에서의 후연소 최소화 및 재순환량 증가를 통한 운전온도 정상화를 위한 사이클론 개조, 기동시 층물질의 가열시간 단축을 위한 Lance 버너설치, sealpot내 비유동화지역 형성을 억제하기 위한 grease air line설치 등 원활한 순환유동층 보일러의 조

업을 위해 일련의 설비개선을 수행하였다.

이에, 설비개선에 따른 동해화력 순환유동층 보일러의 성능평가가 요구되었으며, 본 논문에서는 실제 산업용 순환유동층 연소로의 적용을 통해 그 적용 가능성이 확인된<sup>[2]</sup> IEA-CFBC 모델을 이용하여 개발된 동해화력 순환유동층 성능모사 시뮬레이션 틀을 이용하여 여러 가지 운전변수에 따른 보일러 성능해석을 수행하고자 한다.

## 2. 동해화력 순환유동층 보일러 현황

### 2-1. 동해화력 순환유동층

동해화력 순환 유동층 연소로는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 크게 석탄 및 석회석 투입장치 및 silo, 공기주입부, 주연소로부(연소로, 사이클론, Loopseal, FBHE 및 FBAC) 그리고 Backpass로 구성되어 있다. 연소로는 직사각형(32×19×7 m) 구조로 분산판위로부터 7 m 지점에서 하단부로 15° 각도로 좁아지는(tapered) 형태를 취한다. 분산판은 각 열당 62개의 T-type four jet 노즐이 12열에 각각 교차되어 있는 형태를 이룬다. 순환 입자를 포집하여 재순환시키는 사이클론(7.6 m I.D.×15.7 m Height)은 3개가 설치되어 있으며, 각 사이클론은 loopseal (sealpot)과 외부열교환기인 fluidized bed heat exchanger (FBHE)를 갖는다. Loopseal에는 ash control valve (ACV)가 설치되어 있어 FBHE로 분기되는 고체량을 조

절하게 된다. 연소로 하단부에는 층물질을 FBAC로 배출시키는 밸브가 설치되어 그 양을 조절하게 되어 있으며, 이를 이용해 전체 로내의 압력을 조절하게 된다. 연소로로 주입되는 석탄주입구는 총 6개로 이루어져 있고 2차공기는 총 16개의 노즐을 통해 측면에서 주입된다. 분산판으로부터 4.3 m 지점에 오일 버너 2기, 그리고 dense층에 lance 버너 5기가 설치되어 있으며, 이를 통해 층물질의 가열 및 저부하에서의 온도를 유지한다. FBHE 및 FBAC에 사용되는 유동화 기체는 연소로내로 다시 순환된다.

### 2-2. 국내 무연탄 및 석회석 특성

동해화력 순환유동층 보일러에 사용되는 석탄은 국내 무연탄으로 ash가 39%, 고정탄소가 53.7%, 수분이 3.3% 그리고 휘발분이 4% 함유되어 있으며, 건조탄 기준으로 S 및 N의 함유량이 각각 0.6 및 0.2% 함유되어 있는 비교적 연소 반응성이 나쁜 탄종으로 알려져 있다<sup>[3]</sup>. 또한 석탄의 입도 분포는 설계치 기준으로 0.1~3.0 mm 사이의 입자가 95% 이상 되어야 하나, 동해화력의 경우 설계치 보다 작거나 혹은 큰 입도가 상당량 존재하는 것으로 나타났으며, 이러한 석탄 연료의 반응성 및 입도에 대한 영향은 초기 순환유동층 기동시 후단부(sealpot 및 cyclone)의 온도를 높이는 결과를 가져와 운전상 상당히 불안정한 요인으로 작용하는 것으로 밝혀졌다<sup>[4]</sup>.

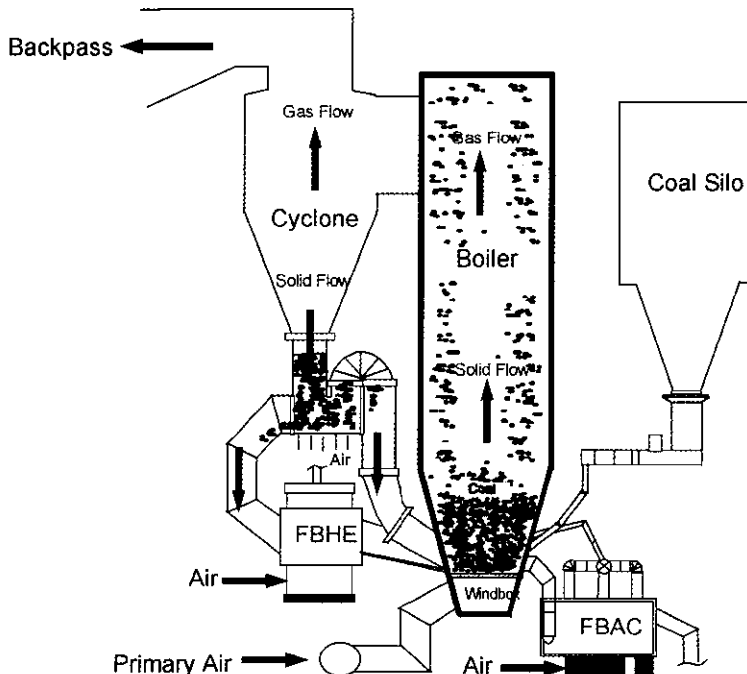


Fig. 1. Schematic Diagram of the Tonghae CFB Boiler.

**Table 1. Analysis of design coal in the Tonghae CFBC.**

Proximate analysis	wt. %	Ultimate analysis	wt.% (dry basis)	Size distribution (mm)	wt. %
				>9.5	0
				5.6-9.5	0
Moisture	3.3	C	54.7	4.75-5.6	1.0
Volatile matter	4.0	H	0.3	2.8-4.75	2.0
Fixed Carbon	53.7	O	3.8	2-2.8	16.0
Ash	39.0	N	0.2	1.0-2.0	31.0
Heating Value (dry basis)	4600 (kcal/kg)	S	0.6	0.6-1.0	16.0
		Ash	40.4	0.25-0.6	17.0
				0.1-0.25	10.
				0.075-0.1	2.0
				<0.075	5.0

Table 1에 국내 무연탄의 석탄분석치 및 기준 입도 분포를 나타내었다.

연소로내의 탈황반응을 위해 주입되는 석회석은 국내 제조된 것으로  $\text{CaCO}_3$  함유량이 90%, 그리고  $\text{MgCO}_3$ 가 4.2% 정도 함유되어 있으며, 1 mm 이하 입도가 100%, 0.7 mm 이하가 95%, 그리고 0.5 mm 이하가 90% 되는 비교적 작은 입도 분포를 갖는 석회석이 사용되었다.

**Table 2. Particle size distribution of design and sampled coal (#1, 2, 3) in field.**

Size distribution (mm)	Design PSD (wt.%)	#1-PSD (wt.%)	#2-PSD (wt.%)	#3-PSD (wt.%)
>9.5	0	1.0	0	0
5.6 9.5	0	14.4	5.0	24.4
4.75 - 5.6	1.0	5.1	1.2	5.1
2.8 4.75	2.0	12.3	2.9	11.5
2 2.8	16.0	7.2	2.4	4.0
1.0 2.0	31.0	20.0	14.0	11.0
0.6 1.0	16.0	14.6	20.0	6.0
0.25 0.6	17.0	14.6	26.0	12.0
0.1 0.25	10.0	5.8	17.9	13.6
0.075 0.1	2.0	3.0	3.1	2.4
<0.075	5.0	2.0	11.0	10.0

### 2-3. 시운전 경험 및 설비개선

동해화력 순환유동층 보일러의 최초 시운전은 98년 초에 수행되었다. 시운전 기간동안 유동층 형성 및 순환 상태 미흡으로 재순환계통의 막힘현상이 반복적으로 발생하여 대부분의 시운전 기간을 소비하였으며, 사이클론 및 sealpot 부분이 비교적 고온상태로 운전되었다. Table 2에 나타난 바와 같이 미분함량이 많은 국내 무연탄 특성상 유동매체를 가열하고 석탄을 점화하는 시점까지 미연분 입자가 비산하여 사이클론 및 Sealpot에서 후연소를 일으켜 후단부 온도를 상승시킴으로서 클링커 생성에 의한 정체구역을 형성하여 원활한 순환에 지장을 초래하였다. 이러한 현상은 석탄의 입도분포(PSD) 및 낮은 연소반응성에 기인하는 것으로 파악되었다<sup>1)</sup>.

상기의 운전 장애요인을 해소하기 위해서는 유동매체의 초기 가열시간의 단축을 통한 조속한 순환 유동층 형성, 재순환 계통내의 비유동화 지역의 제거가 이루어져야 한다. 이를 위해 로내에 랜스버너(lance burner)를 설치하여 유동매체 가열시간을 단축하므로써 석탄 투입온도를 상향시켜 미연 탄소분의 비산 및 후연소를 크게 감소시켰다. 다음으로 사이클론 개조에 따른 포집효율 증대를 통해 전체 순환량을 증대시킴으로써 사이클론 및 sealpot에서의 체류시간 감소 및 순환율을 증가

**Table 3. Modifications of the device for the Tonghae CFB boiler.**

Item	Contents for modifications	Marks
Grease air line at sealpot (diple)	2.5pipe 35 places at each sealpot	Addition
Grease air line around ACVs on FBHE	1 and 1.5 10 place at each ACV	Addition
Window for observation at sealpot	1 window at each sealpots	New
Duct water spray nozzles at cyclone inlet	2 pipe 3 places	New
Injection port of bed media (sand) to bed	6 pipe 3 places	New
Injection port of bed media to sealpots	6 pipe at each sealpots	New
Solids drain line at fluidizing air line	2 nozzles 7 places	New
Lance burner	5 places in the combustor	New
Fluidizing nozzles	Longer and steeper orifice tube	Exchange
Cyclone modification	Vortex finder and inlet width	Modification

시켰으며, 로내 온도 및 사이클론/scalpor에서의 운전은 도가 감소되었다. 사이클론 개조는 사이클론을 형성하는 vortex finder의 길이증가(0.9 m 증가)와 사이클론 입구 폭을 줄임(0.2 m 감소)으로서 사이클론 효율 향상을 도모하였다.

이와 더불어 동해화력 순환유동층 보일러의 시운전 기간동안에 수행된 설비개선 사항을 Table 3에 정리하였다.

### 3. IEA-CFBC 모델을 이용한 시뮬레이션 틀 개발

순환유동층 연소로에 대한 모델링은 기존에 널리 알려진 기포유동층 모델을 근간으로 1990년 초부터 활발히 진행되어 왔다. 순환유동층 연소로의 모델링 방향은 연소로 축방향만을 고려하는 1차원 모델링부터 연소로를 축방향 및 횡방향 일부(core와 annulus)로 나누는 1.5차원의 모델링, 그리고 축방향 및 횡방향을 모두 고려하는 3차원 모델링으로 구분되어 발전되고 있다. 3차원 모델링의 경우에는 최근에 많은 연구가 진행 중이 있으나 실제 응용에 있어서는 적용하기 어려워 아직은 개발 단계라고 할 수 있다<sup>[6,7]</sup>. 이에 반해 1차원 및 1.5차원은 많은 연구가 진행되어 왔으며<sup>[8,9]</sup>, 이의 응용 및 적용도 상당부분 이루어져 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 모델 중 IEA-CFBC 모델은 개발 및 적용에 있어서 매우 광범위하게 연구되어 있어 그 이용 가능성이 확인된 모델로써 본 연구에서는 이를 이용하여 동해화력의 운전변화에 따른 성능을 해석하였다. 모델링의 기본 구조는 수학적 특성, 입자 분포, 연소 특성 및 배가스 특성, 열전달과 그리고 재순환 등의 항목들로 구성되어 있으며, 계산 순서도는 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 IEA-CFB 모델의 무연탄용 동해화력 순환유동층의 적용을 위해 성능 예측 틀을 개발하는 작업을 수행하였으며, 예측 틀은 크게 모델 구성 인자의 민감도(sensitivity) 연구를 통한 각 운전변수의 조절 가능성 및 사용가능성 그리고 이의 도출을 위한 기본 실험 등을 수행하여 이를 완성하였다<sup>[10]</sup>. 이러한 모델 구성 인자의 사용 가능성은 동해화력의 실측 자료와 더불어 비교 검증을 통해 확정되었으며, 동해화력의 실측자료로는 로내 온도 분포 및 압력 분포, 석탄 연소 전환율, 입도 분포 및 회재 배출량 그리고 배가스 농도 등을 측정하여 모델 틀의 검증에 비교 분석자료로써 사용하였다<sup>[11]</sup>. 특히, 모델내에서 가장 중요한 인자로 쓰이는 순환유동층내의 입자 분포 곡선의 예측에 사용되는 decay constant 및 무연탄의 연소 kinetics 등은 냉간 순환유동층, 열침 침 반응기 및 TGA로부터 도출하여 본 모델에 적용하

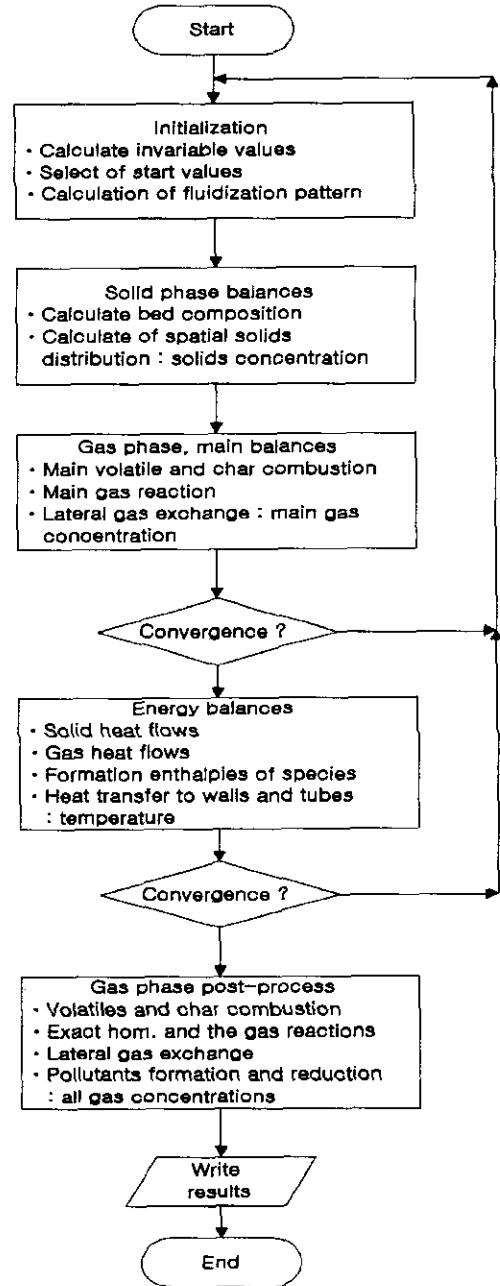


Fig. 2. IEA-CFBC model procedure.

였다<sup>[10,12]</sup>.

Decay constant,  $a$ 는 순환유동층 연소로내의 전이 영역에서의 고체 체류분포 특성을 나타내는 지수로써 연소로내의 온도 분포 및 미전환 입자의 분포 등에 영향을 주는 인자로 다음의 식으로부터 정의될 수 있다.

$$\frac{P}{(\rho_s - \rho_g)g} = \bar{\epsilon}_{s,d} H_d + \int_{H_d}^{H-d} (\bar{\epsilon}_{s,\infty} + (\epsilon_{s,d} - \bar{\epsilon}_{s,\infty}) \exp(-ah) dh) \quad (1)$$

여기서 decay constant  $a$ 는  $a \cdot U_o = \text{constant}$ 로 적용되며<sup>[13]</sup>, 본 연구에서는 냉간 순환유동층 실험으로부터 동해화력 순환유동층 flow regime에 대해 5~12 값을 얻어 이를 기준으로 적용하였다<sup>[10,12]</sup>.

한편, 무연탄의 연소 kinetic 상수는 기존의 IEA-CFBC 모델 적용이 유연탄에 한정되어 있어, 활성화 에너지 및 frequency factor의 기준 및 적용을 위해 동해화력 사용 탄에 대해 그 값을 구하여 이를 적용하였다. 본 모델에 적용된 연소 kinetic은 아래의 식 (2)~(5)와 같이 나타낼 수 있으며,  $k_{\text{react},0}$  및  $E$ 의 값은 열칭칭 반응기 및 TGA로부터 구해 각각 0.79 [kg/m<sup>2</sup>sPa] 및 19000 [K]를 기준으로 적용하였다.

$$r_{\text{char}} = \frac{6}{d_s} k_{\text{char}} \frac{P}{R_G T} X_{O_2, \text{bulk}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{k_{\text{char}}} = \frac{1}{k_{\text{react}}} + \frac{1}{k_{\text{diff}}} \quad (3)$$

$$k_{\text{react}} = k_{\text{react},0} \exp\left(-\frac{E}{R_G T_p}\right) \quad (4)$$

$$k_{\text{diff}} = \frac{Sh \cdot d}{d_s \cdot \text{char}} \quad (5)$$

본 사례레이션에서는 개발 검증된 틀을 이용하여 100% NR(nominal rate) 기준으로 사이클론 개조전·후의 순환유동층 성능 모사 및 운전변수에 따른 영향을 고찰하였으며, 동해화력 순환유동층 연소로에 공급되는 1차공기량 및 2차공기량, 그리고 loopseal 및 FBHE, FBAC에서 재순환되는 공기량 및 feeder로 공급되는 공기량 등을 각 부하별로 Table 4에 나타내었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1. 사이클론 개조 전후 성능비교

사이클론을 형성하는 vortex finder의 길이증가(0.9 m 증가)와 더불어 사이클론 입구의 폭(0.2 m 감소)을 줄임으로써 사이클론 효율상승을 이룰 수 있었다. 사이클론 효율증가에 따른 고체분율(solid hold-up) 및 로내 압력 차 증가가 회재 및 석회석의 재순환량 증가를 가져와 온도 안정화 및 SO<sub>2</sub> 제거효율이 증대하는 효과가 있음을 확인하였다<sup>[14]</sup>.

Fig. 3는 사이클론 개조전후의 고체분율과 압력분포를 비교한 그림이다. 농후상(dense bed) 영역의 고체분율은 개조전보다는 개조후에 더 낮은 값을 보이는 반면 회박상(freeboard) 영역의 고체분율은 개조후에 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 사이클론에서 포집할 수 있는 입자의 크기가 더 작아짐에 따라 연소로내로 재순환되는 고체입도가 작아져서 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 또한, 압력분포를 나타내는 그림을 보면 이러한 사실은 더 명확해 짐을 알 수 있다. 즉, 개조전의 상부차압은 대략 100~160 mmH<sub>2</sub>O로 측정된 반면에 개조 후에는 190~210 mmH<sub>2</sub>O 정도까지 상승함을 측정할 수 있었다. 또한 중간 차압도 개조전 400~500 mmH<sub>2</sub>O에서 개조후 450~550 mmH<sub>2</sub>O로 약 50 mmH<sub>2</sub>O 정도가 증가함을 측정할 수 있었으며, 이러한 사실로 연소로내 고체 순환량이 증가했음을 알 수 있다. 본 IEA-CFBC 모델을 이용한 성능평가 결과도 개조 전·후의 압력 실측 범위내에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4은 사이클론 개조전후의 연소로내의 온도 분포를 비교한 것으로 symbol은 동해화력의 실제 운전치를 나타내고 있다. 개조전 연소로의 온도(점선)는 880~925°C로 비교적 높게 유지가 되었으며 특히 상부 및 사이클론 입구에서 온도가 매우 높아 사이클론 및 sealpot에서

Table 4. Operation data for the Tonghae CFBC.

#	높이 [m]	너비 [m]	길이 [m]	Addition Air [m <sup>3</sup> /s]						Tap. l=y,0=n	Wall ratio
				BMCR	MGR	100%NR	75%NR	50%NR	30%NR		
1	0.0	19.05	3.35	87.22	87.22	87.22	76.3	65.58	68.34	1	1
2	0.43	19.05	3.58	14.60	14.01	10.26	4.4	4.4	4.4	1	1
3	1.37	19.05	4.09	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	1	1
4	1.70	19.05	4.26	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14	7.34	1	1
5	2.44	19.05	4.66	22.19	21.75	18.94	14.54	14.54	14.54	1	1
6	4.48	19.05	5.75	32.86	31.52	23.09	9.9	9.9	9.9	1	1
7	31.90	19.05	7.09	0	0	0	0	0	0	0	1
8		Coal [kg/s]		30.1	29.7	27.3	20.7	14.5	7.9		
9		Lime[kg/s]		0.92	0.91	0.83	0.63	0.44	0.38		

#1: Primary Air, #2: Secondary Air (4개), #3: Feeder (Coal and Lime) Transport Air, #4: Loopseal+FBHE Returned Air, #5: Secondary Air (3개), #6: Secondary Air (9개), #7 Top of Combustor, #8, #9, Coal, Lime Feed Rate, # Wall Ratio: [Membrane wall area]/[wall area], # Tap.: Tapered 형태, yes = 1, no = 0

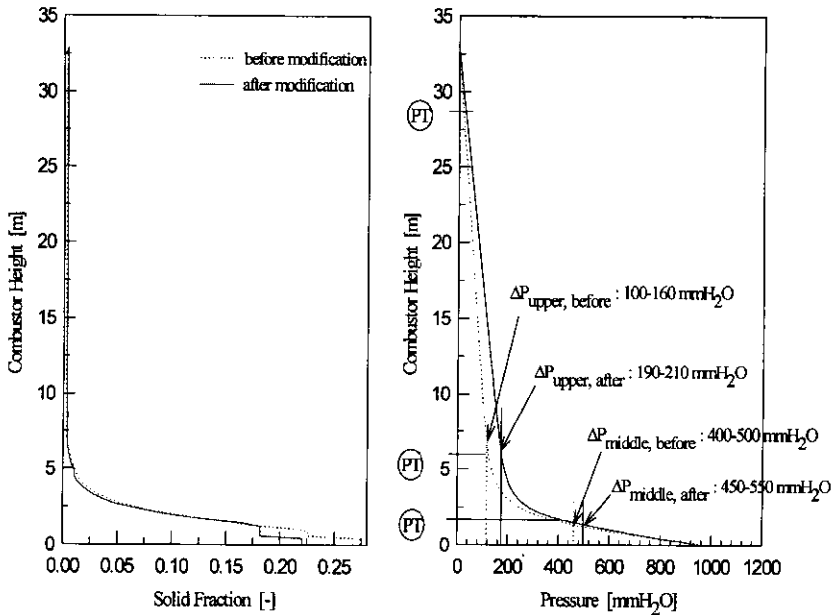


Fig. 3. Comparison of solid fraction and pressure profile between before and after modification of cyclone.

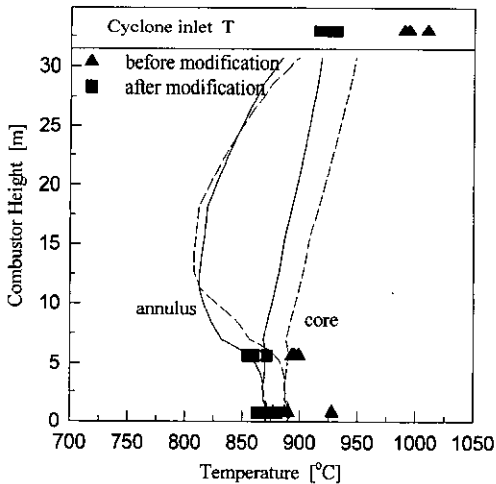


Fig. 4. Comparison of temperature profiles.

클링커 생성 가능성이 크다고 할 수 있다. 반면에 사이클론 개조후의 온도(실선)는 850~880°C로 나타났는데, 그 분포형상은 비슷하나 연소로하부(농후상 영역)의 온도가 많이 낮아졌으며 또한 연소로 상부 및 사이클론 입구 온도도 많이 낮아졌음을 볼 수 있다. 이는 사이클론 효율 상승에 의한 고체순환량의 증가로 인해 연소로에서 수냉벽으로의 열전달이 증가했기 때문으로 이해할 수 있다.

입도분포는 순환유동층 모든 지점에서(fly ash = filter, overflow = bottom ash, recirculation = FBHE/sealpot) 개

조전보다 입도가 작아지는 것으로 예측되었다. 즉, 사이클론 효율상승으로 인해 사이클론에서 포집되지 않고 전기집진기(EP)로 나가는 입도가 작아졌으며, 포집되어 순환되는 입도도 개조전보다는 작아져 연소로내 입도분포가 전체적으로 작아졌음을 의미한다. 이러한 작은 입도를 갖는 고체입자의 순환량 증대가 온도안정화 및 상부차압 형성에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 연소로내의 높이에 따른 가스 생성 및 소멸에 대해 도시한 것으로 symbol은 동해화력 연돌에서 측정된 실측치를 나타내고 있다. CO<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>는 서로 상반되는 농도분포를 가지며, CO<sub>2</sub>의 지속적인 증가경향은 연소로 전체에 걸쳐 연소반응이 고루 일어나고 있음을 나타낸다. 한편, 개조후의 CO<sub>2</sub> 농도가 미미하게 증가함을 보이고 있어 연소효율도 증가하였음을 알 수 있다. CO의 농도분포는 대부분 농후상(dense bed)에서 급격히 생성된 후, 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있으며, 개조후에 미분의 연소로내 증가로 인해 약간 증가하는 경향을 보이고 있다<sup>14)</sup>. SO<sub>2</sub>는 대부분이 농후상(dense bed) 영역에서 생성되어 회박상(freeboard)에서 점차 제거되는 농도분포 경향을 보이고 있으며, 이를 통해 대부분의 탈황반응은 연소로 상부(5 m 이상)에서 비산, 순환되는 석회석에 의해 일어남을 알 수 있다. 한편, 사이클론 개조 전 후의 SO<sub>2</sub> 농도 분포는 투입되는 석회석량이 상호간에 약간의 차이가 있어 SO<sub>2</sub> 절대량의 감소 비교는 어려우나, 개조후의 탈황반응에 의한 SO<sub>2</sub> 제거 기율기가 더 큼을 알 수 있어 석회석의 순환량 증가에 의한 탈황

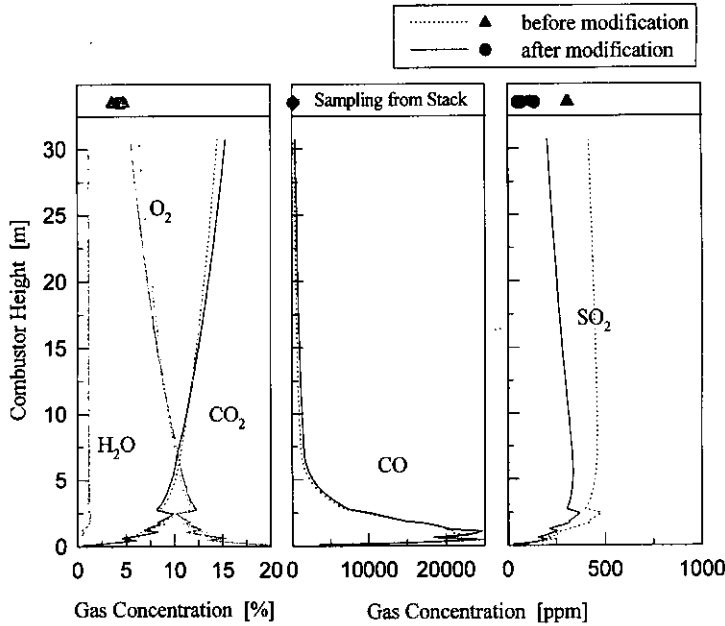


Fig. 5. Gas concentration profiles in the CFB combustor.

반응의 증가를 알 수 있다.

4-2. 일/이차 공기비 영향

동해화력 순환유동층 보일러에 공급되는 공기는 크게 연소로 하단의 분산판에서 주입되는 1차공기(PA), 연소로 측면 벽에서 공급되는 2차공기(SA), 그리고, FBHE,

FBAC 및 sealpot에 공급되는 유동화공기(FA)로 구분된다. 이중 1,2차 공기만이 연소로에 공급되며 연소 및 입자순환에 관여한다. 1,2차 공기비를 적절히 조절함으로써 연소효율, NOx 제어, 온도 및 고체순환량 등을 조절할 수 있어 연소로 성능에 영향을 준다. 동해화력 순환유동층의 경우 1,2차 공기비가 설계치 기준으로 0.68

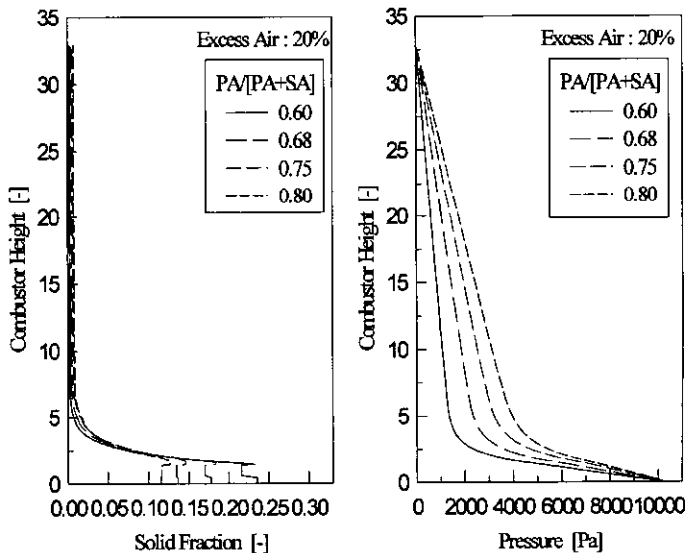


Fig. 6. Solid fraction and pressure profiles with PA/(PA+SA) ratio.

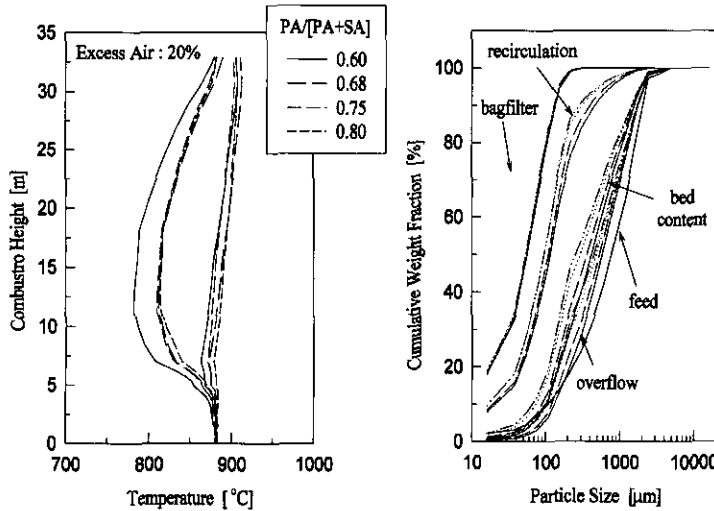


Fig. 7. Temperature profiles and particle size distribution with (PA/PA+SA).

이며, 1,2차 공기비에 따른 연소로 성능을 고찰하였다.

공기비에 따른 연소로내 고체분율 및 압력분포를 나타내는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 전체 공기량은 일정한 상태에서 1차 공기량이 증가한 경우, 즉 PA/(PA+SA)의 비가 증가함에 따라 농후상 영역에서는 고체분율이 감소하는 반면 희박상 영역에서는 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 1차 공기량 증가가 고체의 비산 및 순환을 향상시키는 것을 의미한다. 연소로내 압력분포 역시 고체분율 경향과 유사하게 1차 공기량 증가가 상부차압과 중간차압을 증가시키는 반면 하부차압은 감소시키는 것을 알 수 있다(상부차압은 연소로 5.2 m와 28.53 m 사이의 압력차이, 중간차압은 0.915 m와 28.53 m 사이의 압력차이, 하부차압은 0 m와 0.915 m 사이의 압력차이를 의미함).

Fig. 7은 1,2차 공기비에 따른 연소로내 온도분포 및 입도분포를 나타내고 있다. 1차 공기량비가 증가됨에 따라 농후상과 희박상의 전이영역(연소로 5 m 부근)에서의 온도가 점차 증가하는 경향을 보이며, 상부 희박상 영역으로 갈수록 그 차이는 미미함을 알 수 있다. 이는 PA 공기량비가 증가함에 따라 농후상 입자의 비산을 유도하여 고체량이 하부보다는 상부로 이동하게 되고, 전이 영역에서 2차 공기의 주입에 의한 연소반응이 촉진되어 온도가 증가하는 것으로 이해할 수 있다. 입도변화는 PA 공기량비 증가에 따라 순환되는 입도가 작아지는 경향을 보여주고 있어 순환량 증가에 기여하는 것으로 나타났다. 배가스 조성 및 연소효율은 1차 공기량 증가에 따라 연소반응이 증대되어 연소효율, CO, CO<sub>2</sub>가 증가하고, O<sub>2</sub>가 감소하였으며, SO<sub>2</sub>의 경우 감소하는 경향을 보

였다. 이는 1차 공기의 증가에 따라 농후상에서의 기체-고체 접촉빈도의 증가로 인한 연소반응의 증가와 더불어 석회석 입자의 비산 및 순환이 향상되어 탈황반응이 촉진된 것으로 이해할 수 있다.

4.3. 과잉공기비 영향

공급되는 석탄량은 일정하고 공기량을 변화시킬 경우 과잉공기비 변화에 따른 순환유동층 연소로의 영향을 고찰하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 과잉 공기비 증가에 따라 농후상의 고체분율은 점차 낮아지고 희박상의 고체분율은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 과잉공기비 증가에 의해 공기유량이 증가하고 연소로내 공기유속이 증가됨에 따라 고체입자의 상부로의 비산을 촉진하여 상부차압이 증가하는 경향을 나타낸다. 결국, 과잉공기비 증가는 순환입자의 양을 크게 증가시킴을 알 수 있다.

과잉공기비 증가에 따른 연소로내 온도분포 변화를 살펴보면, 연소로 상부로 갈수록 core와 annulus에서의 온도가 점차 증가함을 알 수 있다. Fig. 8에서 살펴본 바와 같이 열량을 지닌 비산 입자가 상부로 이동하기 때문이며, 이와 더불어 공기량이 늘어남에 따라 상부에서의 연소반응이 활발해지기 때문이다. 즉, 연소로내 공기량 증가에 의한 현열손실보다는 연소반응 활성화에 의한 온도 상승이 우세한 것으로 이해할 수 있다. 입도분포에 미치는 영향은 비산회(fly ash) 및 재순환 입도를 굵게 하는 반면 연소로내 입도 및 bottom ash의 입도는 가늘어지는 경향을 나타냈다. 이는 공기량 증가에 따른 유속증가로 비산, 순환되는 입자분율이 증가했기 때문이다.



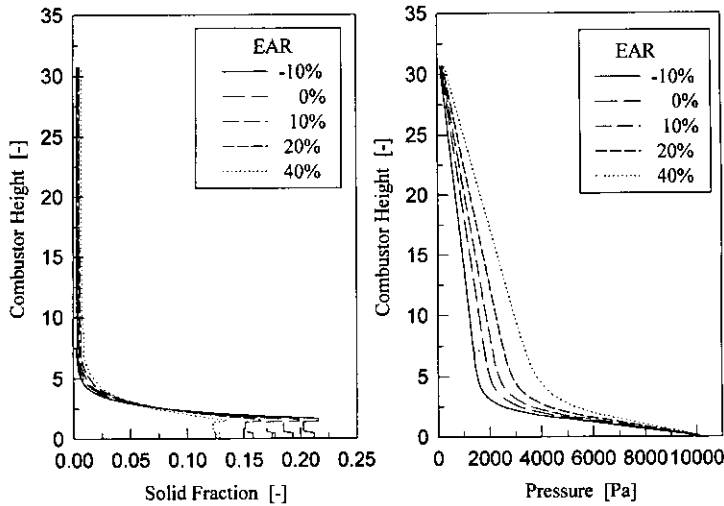


Fig. 8. Solid fraction and pressure profile with EAR (gas velocity).

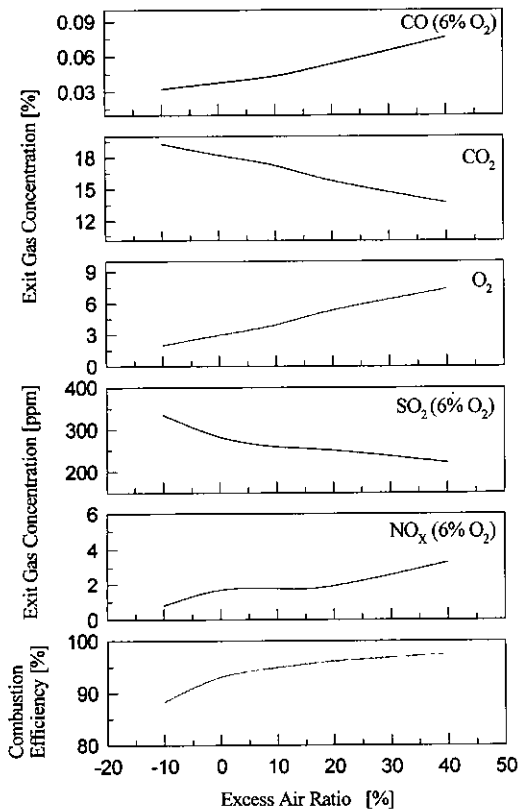


Fig. 9. Exit gas concentration and combustion efficiency with EAR (gas velocity).

배가스 특성 및 연소효율의 변화는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 연소효율, CO 및 NOx 농도는 1차공기량 증가

에 따른 배가스 특성과 동일하게 증가하는 경향을 보이지만, 반대로, CO<sub>2</sub> 농도는 감소하고 O<sub>2</sub> 농도는 증가하는 경향을 보였다. 과잉공기비 10%이상에서 과잉공기비가 약 10% 증가됨에 따라 CO농도는 약 28% 정도 증가하였고, SO<sub>2</sub>는 약 15% 정도 감소함을 알 수 있다. 이는 과잉공기비 증가에 따른 연소조건 활성화와 더불어 연소로 상부에 부유되어 순환되는 석회석 입자의 증가로 인한 영향으로 이해할 수 있다.

4-4. 연소로 압력 영향

연소로에서의 차압조절은 순환유동층 조업시 가장 중요한 운전변수중 하나로 동해화력의 경우 분산판 압력 강하를 포함해 1500 mmH<sub>2</sub>O~1700 mmH<sub>2</sub>O 사이에서 운전되며, 운전압력은 연소로내 저장된 고체량(inventory)과 밀접한 관계가 있다. 차압에 대한 영향은 1500 mmH<sub>2</sub>O~1700 mmH<sub>2</sub>O 범위에서 고찰하였으며, 분산판에 걸리는 압력 500 mmH<sub>2</sub>O를 제외하면 850 mmH<sub>2</sub>O~1250 mmH<sub>2</sub>O 라고 할 수 있다. 과잉공기비 증가에 따른 영향과 유사하게 연소로 차압이 증가할수록 농후상의 고체분율은 감소하고 회박상에서는 증가하는 경향을 보이며, 특히, 농후상의 높이가 차압증가에 따라 점차 높아짐을 알 수 있다. 압력분포 역시 연소로 차압이 증가할수록 상부차압과 중간차압이 증가함을 볼 수 있다. 이는 연소로내 고체충진량(inventory)의 증가를 의미하는 차압이 증가할수록 순환량이 증가함을 나타낸다.

다음으로 차압에 따른 연소로내 온도분포는 Fig. 10에서 보여지는 바와 같이 농후상과 전이영역에서 점차 증가하다가 회박상 영역으로 갈수록 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 연소로 벽면(annulus)에서의 온도분포는 core

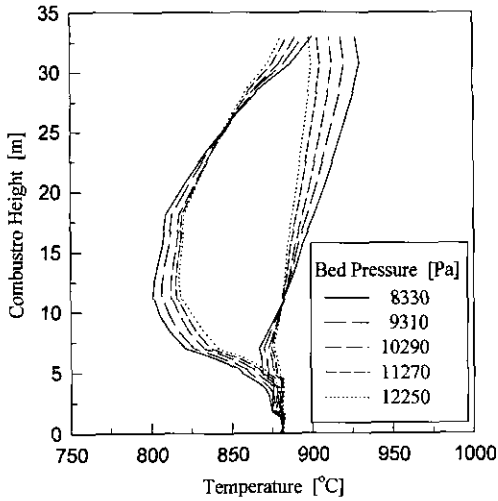


Fig. 10. Temperature profiles in the combustor.

와 유사한 형상을 나타내지만 온도분포가 반전되는 지점이 희박상 영역으로 상향됨을 알 수 있다. 이는 전체 차압 증가는 연소로내 고체 체류량 증가를 의미하고, 고체 체류량이 증가하였으므로 일정 입열 조건(석탄공급량 일정하에서) core 영역의 총물질 온도변화는 연소로내에서 미미하게 증가하였다. 또한, 벽면(annulus) 영역에서는 수냉벽으로 열전달을 위한 열매체 역할을 하는 총물질의 증가로 온도구배가 작아짐을 알 수 있다. 결과적으로 차압증가에 따른 고체 체류량증가가 열전달 매체의 증가를 의미하여 연소로 벽면과 중심부의 온도차가 줄어들게 된다. 차압증가에 따른 입도분포 또한 순환입도 및 연소로내 입도, 그리고 bottom ash 입도를 작은 입자로 변화시켰다.

Fig. 11에 보여진 연소로내 차압증가에 따른 배가스 조성을 살펴보면 대부분의 배가스 농도는 크게 변화하지 않았으며, 단지 CO 증가 및 SO<sub>2</sub> 감소 효과가 있었다. 이는 비산되는 입자량이 많을수록 희박상에서의 연소반응을 위한 체류시간이 짧아 CO생성이 증가하기 때문이며, SO<sub>2</sub> 감소는 연소로내 고체량 증가와 함께 석회석량이 증가하여 탈황효율이 증가하는 것으로 이해할 수 있다.

이상에서 고찰한 바와 같이 사이클론 성능향상, 1차 공기비 증가, 과잉 공기비 증가, 연소로내 차압증가 등의 영향이 전체 순환유동층 성능과 운전에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 이러한 운전변수들의 영향에 따른 순환유동층 보일러의 조업상태를 파악할 수 있었다. 또한, 배가스 조성에서 살펴본 바와 같이 순환량 증가 및 희박상 영역에서의 고체분율 증가가 CO 증가 및 SO<sub>2</sub> 감소효과를 가져오는 것을 알 수 있다.

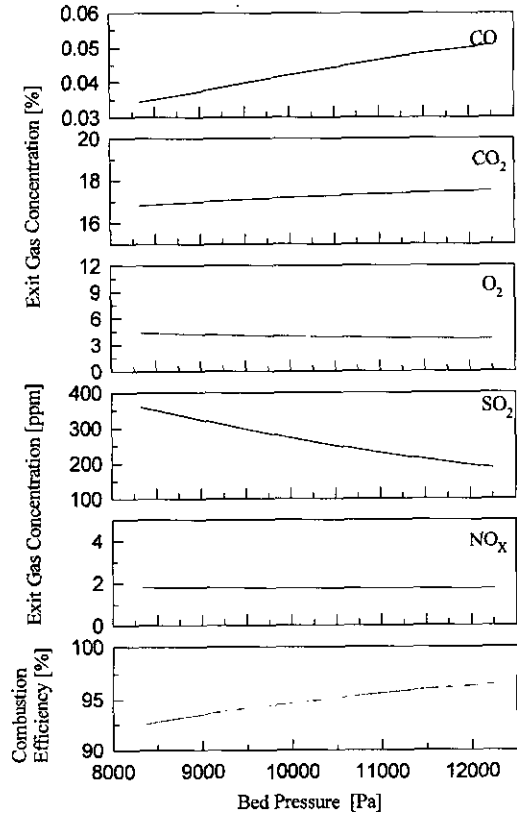


Fig. 11. Exit gas concentration and combustion efficiency with total differential pressure.

### 5. 결 론

동해화력 순환유동층 보일러의 성능향상을 위한 방안으로 사이클론 개조를 비롯한 일련의 설비개선을 수행하였으며, 동해화력 순환유동층 보일러의 성능예측을 위해 개발된 IEA-CFBC 모델 틀을 이용하여 여러 가지 운전변수 변화에 따른 영향을 고찰하여 보았다. 성능평가 결과 여러 가지 운전변수에 대해 연소로 전체 차압을 증가시키는 운전방식을 지향하는 것이 연소로내 고체분율(solid hold-up) 및 고체 순환량 증가를 유도하여 상부 희박상에서의 온도를 감소시키고 작은 입도분포를 형성하게 하여 전체 순환유동층 운전 안정화에 기여할 뿐만 아니라 탈황 효율 증대에도 유리함을 알 수 있었다.

또한, 여러 가지 운전변수에 변화에 따른 동해화력 순환유동층 보일러의 성능을 모사한 결과 순환 유동층 보일러의 성능을 잘 모사하는 것으로 나타나 향후 운전변수 변화시 성능예측 및 운전대책에 중요한 자료로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 사용기호

$a$	: exponential decay constant [1/m]
$D$	: diffusion coefficient [ $m^2/s$ ]
$d_{s,char}$	: char particle diameter [m]
$E$	: activation energy [J/mol]
$H$	: height [m]
$h_d$	: dense bed height [m]
$k_{char}$	: char combustion coefficient [m/s]
$k_{diff}$	: diffusion coefficient in char particle [m/s]
$k_{reac}$	: reaction coefficient for char combustion [m/s]
$p$	: pressure [Pa]
$R_G$	: universal gas constant [J/molK]
$r_{char}$	: char combustion rate [mol/m <sup>3</sup> s]
$Sh$	: sherwood number [-]
$\bar{T}$	: average temperature [K]
$T_p$	: particle temperature [K]
$X_{O_2,bulk}$	: molar gas fraction for oxygen [-]

### 그리스 문자

$\bar{\epsilon}_{s,d}$	: average solid volume fraction in dense bed [-]
$\bar{\epsilon}_{s,\infty}$	: average solid volume fraction at infinite height [-]
$\rho_g$	: gas density [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	: solid density [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi$	: C to O <sub>2</sub> ratio [-]

### 참고문헌

- Kim J.S, Lee J.M.: 2nd Korea-China Joint Workshop. Korea Institute of Energy Research, 445-454. (1998).
- Hannes J.P. Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands, (1996).
- 선도원, 배달희, 한근희, 손재익, 강 용, 위영호, 이정수, 지평삼: 화학공학, 34, 321-326 (1996).
- Lee, J.M. and Kim, J.S.: Proceedings of the 6th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactor, CheJu Island, Korea, 501-506 (1998).
- 이시훈, 이종민, 김재성, 최정후, 김상돈 : 화학공학, in press (2000).
- Pritchett J.W, Blake T.R, Garg S.K.: AIChE symp. Ser. 74, 134-148. (1978).
- Boemer A, Qi H, Renz U.: 29th IEA-FBC meeting Paris France, (1994).
- Mori S, Narukawa K, Yamada I, Takebayashi T, Tanii H, Tomoyasu Y, Mii T.: 11th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion. ASME, United Engineering Center, 3, 1261-1265 (1991).
- Zhang L, Li T.D, Zhen Q.Y, Lu C.D.: 11th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion. ASME, United Engineering Center, 1289-1294 (1991).
- 김재성, 이종민 정재화 외: "국내탄용 순환유동층 보일러의 운전특성 연구", 한전 전력연구원 최종보고서, TR.98GJ05.J2000.253 (2000).
- 이종민, 김재성: 화학공학, 38, 53-61 (2000).
- Lee, J. M., Kim, J. S. and Kim, J. J.: 7th Asian Conf. on FBC and 3-Phase Reactors, Hamanako, Japan, submitted (2000).
- Kunii, D. and Levenspiel, O.: Fluidization Engineering 2nd ed., Butterworth-Heinemann, USA (1991).
- Cheliand P.K, Gamble R.: 13th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion. ASME, United Engineering Center, 535-550 (1995).