

IEA-CFBC 모델을 이용한 동해화력 순환유동층 연소로의 성능모사 – 사이클론 성능변화에 따른 순환유동층 연소로의 성능모사 –

이종민[†] · 김재성

한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹
(1999년 4월 10일 접수, 1999년 10월 1일 채택)

Simulation of the Tonghae Thermal Power Plant CFB by using IEA-CFBC Model – Determination of the CFB Combustor Performance with Cyclone Modification –

Jong-Min Lee[†] and Jae-Sung Kim

Advanced Power Generation & Combustion Group, PGL, KEPRI, KEPCO
(Received 10 April 1999; accepted 1 October 1999)

요 약

동해화력 순환유동층 보일러는 200 MWe 규모로써 국내 무연탄을 사용하는 최대 규모의 발전설비이며, 현재 1호기가 상업운전중에 있으며, 2호기가 '99년 10월에 준공을 목표로 건설중에 있다. 현재 상업운전중에 있는 동해화력 순환유동층 보일러는 사이클론 개조에 따른 운전 안정화 및 운전 최적화를 수행중에 있으나, 최대 규모의 무연탄용 순환유동층에 대한 운전자료는 거의 알려진 바가 없어, 이에 대한 예측이 필요하다. 이에 본 연구에서는 IEA-CFBC 모델을 이용하여 동해화력 순환유동층의 성능을 모사할 수 있는 시뮬레이션 틀을 개발하였으며, 이를 이용하여 사이클론 효율 변화에 따른 순환유동층 성능 변화를 예측하였다. 또한 사이클론 개조시 사이클론의 성능 변화 및 재순환량, 그리고 미포집 입자량 등을 예측하여 개조에 따른 성능 향상을 결정하였다. 본 연구결과 동해화력 사이클론의 성능은 약 98.7% 정도로 나타났으며, 사이클론 효율이 증가함에 따라 로내 상부차압이 증가하는 경향을, 그리고 freeboard의 온도가 점차 낮아져 안정화되는 것으로 나타났다. 이러한 사이클론 효율의 상승을 위해 사이클론 vortex finder 및 입구 단면적 개조를 수행할 경우, 순환유동층 성능 향상이 기대되는 것으로 예측되었다.

Abstract – The 200 MWe Tonghae thermal power plant CFB(2-units) is the largest boiler to fire a Korean anthracite coal for generation of electric power. The #1-unit CFB boiler has been operated commercially since October 1998, and the #2-unit CFB boiler, of which commercial operation will be achieved at October 1999, is under construction. The optimization and stabilization of the CFB operation have been carried out through the modification of the cyclones for the units of #1 and #2. However the operation data for the large CFB combustor firing the anthracite coal are few, so it is necessary to predict the performance of the CFBC with variation of the operation conditions. Therefore, in this study, the development of the simulation scheme has been achieved by using IEA(International Energy Agency)-CFBC model, and the performance of the CFB combustor with variation of the cyclone efficiency has been determined. The improved performance of the modified cyclone, which have been carried out by increase of the vortex finder length and by decrease of the cross sectional area of the cyclone inlet, also has been determined. The cyclone efficiency has been evaluated 98.7%. As the cyclone efficiency increases, the upper differential pressure increases and the freeboard temperature becomes to be low and stable. The modifications of vortex finder and inlet duct of the cyclone have been predicted to improve the performance of the CFB combustor.

Key words: CFBC, IEA Model, Tonghae Boiler, Anthracite Coal, Cyclone

1. 서 론

한국전력에서는 국내 무연탄을 이용한 전력생산을 위해 1993년 초에 순환유동층 연소로의 설계 및 건설 프로젝트를 시작하였다. 순환유동층은 200 MWe 2기로써 동해시에 건설되며, 설계는 ABB-CE에서, 그

리고 주계약 및 공급은 한국중공업에서 담당하여 이루어지고 있다. 순환유동층 연소로 1호기는 1995년말에 스팀 generator를 설치하였고, 초기 점화 및 스팀 발생은 1997년 말에 이루어졌으며, 1998년 3월부터 기동 운전을 통해 1998년 10월에는 상업운전이 이루어졌다. 2호기 또한 현재 건설중에 있으며, 1999년 10월초에 준공이 이루어질 예정이다.

동해화력 순환유동층 연소로는 무연탄종을 대상으로 한 규모면에서

[†]E-mail: jmlee@kepri.re.kr

국내외적으로 가장 크고 처음 시도되는 것으로 그 관심도는 매우 크다 하겠다. 이러한 순환유동층 연소로의 성능 및 연소 특성, 배가스 특성 등은 현재 기동운전 data 이외에는 크게 알려진 것이 없으며 또한 앞으로의 정상운전 중에도 여러 운전 조건 변화에 따른 상기 특성들이 알려진 바가 거의 없기 때문에 이에 대한 예측 및 평가가 필요하다.

순환유동층 연소로에 대한 모델링은 기존에 널리 알려진 기포유동층 모델을 근간으로 1990년 초부터 활발히 진행되어 왔다. 순환유동층 연소로의 모델링 방향은 연소로 축방향만을 고려하는 1차원 모델링부터[1-7] 연소로를 축방향 및 횡방향 일부(core와 annulus)로 나누는 1.5차원의 모델링[9, 10], 그리고 축방향 및 횡방향을 모두 고려하는 3차원 모델링으로 구분되어 발전되고 있다[11, 12]. 3차원 모델링의 경우에는 최근에 많은 연구가 진행중에 있으나 실제 응용에 있어서는 적용하기 어려운 부분이 남아 있어 아직은 개발단계라고 말할 수 있다. 이에 반해 1차원 및 1.5차원은 많은 연구가 진행되어 왔으며 이의 응용 및 적용도 상당부분 이루어져 있는 것으로 보고되고 있다. 이들 모델링의 기본 구조는 수력학적 특성, 입자 분포, 연소 특성 및 배가스 특성, 열전달과 그리고 재순환 등의 항목들로 구성되어 있으며, 이의 모델링 적용예를 Table 1에 나타내었다. 특히 국제 에너지 기구(IEA, International Energy Agency) 산하 유동층부문위원회의 모델링 그룹에서도 1990년대 초부터 국제간 프로젝트로 기존의 기포 유동층 모델의 향상을 통해 순환유동층 모델 코드를 개발하였으며 이의 실제 산업용 순환유동층 연소로의 적용을 통해 그 이용 가능성을 확인하였다[13].

이에 본 연구에서는 IEA-CFBC 모델을 이용하여 동해화력 순환유동층 연소로의 운전 조건을 모사할 수 있는 시뮬레이션 틀을 개발하고 이의 적용을 통한 운전 성능 예측을 수행하고자 한다. 이러한 운전 성능 예측의 한 예로 사이클론 개조를 통한 순환량의 증대 및 로내의 온도 안정성 그리고 탈황 효율 증대를 도모하고자 하는 동해화력 순환유동층의 경우에 대한 성능 예측 해석을 수행하여 그 영향을 고찰하고자 한다.

2. IEA-CFBC 모델 구성

국제에너지기구(IEA) 산하 유동층 그룹에서 프로젝트화되어 개발되고, Hannes[10, 13]에 의해 정리, 프로그램화된 IEA-CFBC 모델은 크게 다음의 주요 구성요소로 이루어져 있다.

2-1. Fluidization Pattern of Solid Flow

순환유동층에서의 기체 및 고체의 상호작용 및 흐름은 riser내의 불균일한 흐름을 형성하며, 이것은 크게 riser 하단부에서는 dense 영역을, 상단 freeboard 구역에서는 transport 영역을, 그리고 상하단부 경

계영역에서는 전이영역의 고찰을 가능하게 해준다. 본 모델링에서는 각 영역을 모두 고려하였으며, 전이영역 및 freeboard 구역에서의 축방향 고체 농도변이는 Wen과 Chen[14]이 제시한 상관식을 적용하였으며, dense상의 층높이 및 고체 농도 분율은 압력 발란스의 경계조건을 준후, 다음의 Rhodes[15]가 제시한 식으로부터 각 입자군에 대해 계산하여 결정하였다.

$$\frac{p}{(\rho_s - \rho_g)g} = \left(\bar{\epsilon}_{s,d} H_d + \int_0^{H-h_d} [\bar{\epsilon}_{s,\infty} + (\bar{\epsilon}_{s,d} - \bar{\epsilon}_{s,\infty}) \exp(-ah)] dh \right) \quad (1)$$

여기서 a(exponential decay constant)는 Kunii와 Levenspiel[16]이 제안한 연소로내의 공탐속도와 반비례 관계에 있는 다음의 상관식을 적용하였으며, 상수는 모델내에 조절변수로 입력되도록 구성되어 있다.

$$a \cdot u_o = \text{constant} \quad (2)$$

일반적으로 상수는 작은 입자인 경우 2.5 s^{-1} , 그리고 큰 입자인 경우는 $4\text{--}12 \text{ s}^{-1}$ 로 관찰 보고되나, 가능하면 입자의 특성에 따라 실험으로 구하는 것이 합리적인 것으로 제시되었다. 본 연구에서는 parameter sensitivity 고찰을 통해 5.5의 값을 적용하였다.

Two phase theory(Davidson과 Harrison[17])의 기본틀을 적용한 dense 영역은 emulsion과 bubble 영역으로 나누어 고찰하였으며, dense상에서의 기포분율은 Johnsson[18]이 제시한 상관식을, 그리고 기포크기는 Darton 등[19]이 제시한 상관식을 각각 적용하였다. Freeboard 상의 횡방향 고체 분율 및 core-annulus의 경계 결정관계는 몇 가지의 가정과 함께 Seiter 및 Rhodes가 제시한 상관관계에 의해 결정하였다[13, 15].

이상과 같이 IEA-CFBC 모델에서 고체흐름의 경향은 크게 축방향 및 횡방향으로 나누어 고찰하였으며, 횡방향에 있어서는 core와 annulus구역으로 나누어 평균 특성을 적용하였기에 일반적으로 1.5차원의 모델링 형태를 취하고 있다.

2-2. Development of Particle Size Distribution

순환유동층내로 주입되는 입자군은 크게 석탄, 석회석 및 충물질(모래)로 구분될 수 있으며, 각 입자에 대해 다음과 같은 mass balance가 취해질 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 = & \dot{m}_{feed} w_{i,feed} - (1 - \eta_{i,exit})(1 - \eta_{i,cyc}) \dot{m}_{bag} w_i - \eta_{seg} \dot{m}_{discharge} w_i \\ & + \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} k_{i,attr}(u_o - u_{mf}) m_{tot} w_j - k_{i,attr}(u_o - u_{mf}) m_{tot} w_i \\ & + (k_{i,shrk} m_{tot} w_i) w_{i,i} - k_{i,shrk} m_{tot} w_i \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 m_{feed} 는 이미 fragmentation을 고려한 feeding flow이며, o 는 입자들을 잃어버리는 입자군을, 그리고 i 는 입자들을 받는 입자군을 나타낸 것이다.

Table 1. Overall models for circulating fluidized bed combustors

Ref.	Fluid dynamics	Size distrib.	Coal comb.	SO ₂	NO _x	Heat trans.	Steam proc.	Recirc.	State
Siegen[1]	1-dim	+	+	+	+	+	+	+	std
Zhang[2]	1-dim	-	+	+	+	+	-	+	dyn
Mori[8]	block	-	+	-	-	-	-	+	std
Basu[9]	1.5-dim	-	+	+	+	+	-	-	std
Xu[3]	1-dim	+	+	+	+	+	+	+	std
Lin[4]	1-dim	-	+	+	-	-	-	-	std
Halder[5]	1-dim	+	-	-	-	-	-	-	std
IST[6]	1-dim	-	+	+	+	+	-	-	std
Alstrom[7]	1-dim	-	+	-	+	+	-	-	dyn
Haider[10]	1.5-dim	-	+	-	+	+	-	-	std
Hiller[11]	1.5-dim	-	+	+	-	-	-	-	std
IEA[12]	1.5-dim	+	+	+	+	+	-	+	std

std : steady-state, dyn : dynamical, + : consideration, - : no consideration

본 모델링에서는 입자들의 주입시 열충격에 의해 깨지는 fragmentation 및 기계적 마모(attrition), 화학반응에 의한 입자 축소(shrinking) 등을 고려하였다. 고려된 크기별 입자는 전체 충압력과 경계조건을 기준으로 로하부로의 배출 및 filter로의 배출 및 포집, 그리고 재순환 등으로 구분되어 mass balance가 이루어진다.

2-3. Gas Flow

분산관을 통해 주입된 공기는 core, annulus 및 bubble 그리고 emulsion 상으로 나뉘어 흐름을 구성하며 각 흐름에서 횡방향의 기체 혼합은 각 상에서의 기체 교환 속도에 의해 결정된다. Bubble과 emulsion 상의 기체 혼합은 Johnsson 등[18]이 제시한 상관식을, 그리고 core와 annulus간의 기체 혼합은 Kruse 등[20]이 제시한 상관식을 적용하여 고려하였다.

또한 본 모델링에서는 이차공기의 주입 및 배가스의 재순환 등을 고려할 수 있도록 구성되어 있다.

2-4. Coal Conversion

석탄 입자에 대한 연소반응의 일반화된 규칙이 없기 때문에 석탄 입자의 정형화된 연소모델링은 매우 어렵다. 본 모델링에서는 석탄 입자의 연소로내의 투입이 이루어지면, 입자의 가열 및 건조, 그리고 탈휘발 및焦炭의 생성 그리고 생성焦炭의 연소 반응으로 이루어진다. 이러한 일련의 반응에서 기체 확산 및 반응 평형 그리고 반응열 생성 등은焦炭의 연소속도 및 입자 온도를 결정하며, 입자온도에 따라 상기 반응들은 순차적으로 일어나며,焦炭 농도는 기상의 산소 농도와 평형을 이루도록 모델링 상에 iteration loop를 형성하도록 구성되어 있다.

입자의 가열 및 건조는 입자로의 복사(radiation) 및 대류(convection) 그리고 증발열흐름(evaporation heat flows)을 고려한 상관식을 적용하였으며[13], 석탄 입자의 탈휘발은 원소분석에 근거를 두고 실험적, 통계적 고찰을 통해 얻은 Merrick[21]의 상관식을 적용하여 고려하였다. 탈휘발후 잔여焦炭의 연소는 반응산소의 확산 및 입자표면에서의 연소 그리고 입자의 온도변화 등을 고려한 Field[22] 등이 제시한 상관식을 적용하였으며, 이중 사용된 석탄의 활성화 에너지 및 frequency factor는 adjustable variable로 조절되도록 설정되어 있다. 동해화력에 사용되는 국내 무연탄의 경우 모델의 sensitivity study를 통해 활성화 에너지는 $158 \text{ kJ/mol}(=19000/R[K])$, 그리고 frequency factor는 $0.79[\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})]$ 를 적용하였으며, 반응차수는 1차반응으로 가정하여 적용하였다. 이 값은 무연탄에 대해 기존의 연구자들의 값과 비슷한 값으로 나타났다[26].

2-5. Homogeneous and Heterogeneous Gas Reactions

기상반응은 CO , CO_2 , H_2O , NO , N_2O , SO_2 , O_2 등에 대해 그 반응 영향을 고려하였으며, 횡방향 기상혼합이 각 상에서 완전하다고 가정하여 계산하였다. SO_2 생성 및 석회석 탈황반응에 대해서는 Schouten과 van den Bleek[23]가 개발한 기포유동층에서의 모델인 SURE 모델을 Wolff[24] 등이 개량 발전시킨 SURE2 모델을 적용하였다. Nitrogen의 반응으로 생성되는 NO_x 화합물에 대해서는 Johnsson 등[25]이 보고한 homogeneous 및 heterogeneous 반응 kinetics 모델을 적용하였으며, 그 밖의 기상생성물의 재연소 반응은 Howard 등 및 Hautman 등이 제시한 모델을 사용하였다[13, 26]. 한편, N_2O 및 NO 의 생성비는 현재 많은 연구가 이루어지지 않아 IEA-CFBC 모델내에서는 조절상수 값으로 입력하도록 구성되었다.

2-6. Heat Transfer

순환유동층에서의 열전달 특성은 입자의 convection 및 radiation에 의해 wall membrane으로 전달되는 열이 주 열교환이 되며, 이 밖에도

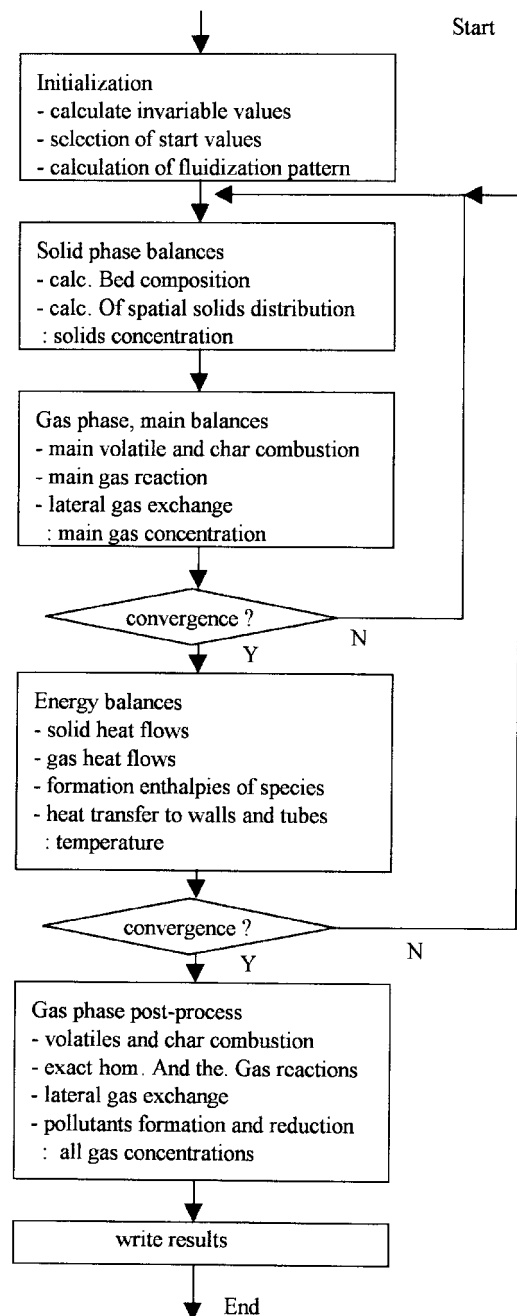


Fig. 1. IEA-CFBC model procedure.

외부 열교환기 및 ash cooler 등에서 전달되는 열이 존재할 수 있다. 본 모델링에서는 상기 각 part별 열전달을 Wirth 및 VDI-Warheatlas에서 제시한 모델식으로 적용, 고려하였으며, 또한 열전달 tube가 로내에 immersed된 경우도 고려할 수 있도록 구성되어 있다[13, 27].

Fig. 1은 IEA-CFBC 모델을 통한 시뮬레이션 procedure를 나타낸 것이다. 이상과 같이 IEA-CFBC 모델은 순환유동층에서 비교적 고려되어야 할 부분을 대부분 갖춘 모델 코드로서 그 유용함이 매우 크다 하겠다.

3. 동해화력 설계 및 운전 자료

본 연구에서는 상기 IEA-CFBC 모델코드를 사용하여 사이클론의 효율 변화에 따른 동해화력 순환유동층 연소로의 성능 및 연소 특성

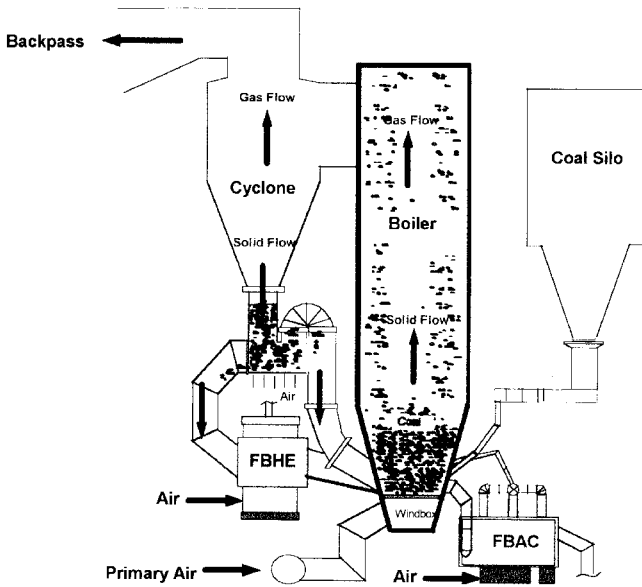


Fig. 2. Schematic diagram of the Tonghae CFB boiler.

을 고찰하고자 한다. 동해화력 순환유동층 연소로는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 크게 석탄 및 석회석 투입장치 및 silo, 공기주입부, 주연소로부(연소로, 사이클론, loopseal, FBHE 및 FBAC) 그리고 backpass로 구성되어 있다. 연소로는 rectangular(32×19×7 m) 구조로 분산판위로부터 7 m 지점에서 하단부로 15°의 tapered된 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 사이

클론당 각각의 loopseal과 FBHE를 구성하게 된다. Loopseal에는 ash control valve가 설치되어 있어 FBHE로 split 되는 양을 조절하게 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 이차공기는 총 16개의 노즐을 통해 주입된다. 분산판으로부터 4.3 m 지점에 오일 버너 2기가, 그리고 dense층에 Lance 버너 5기가 설치되어 있으며, 이를 통해 층물질의 가열 및 저부하에서의 온도를 유지한다. FBHE 및 FBAC에 사용되는 유동기체는 연소로내로 다시 순환된다.

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 석탄이라 알려져 있다[28]. 또한 석탄의 입도 분포는 설계치 기준으로 0.1-3.0 mm 사이의 입자가 95% 이상되어야 하나, 동해화력의 경우 설계치보다 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 운전에 상당히 불안정한 요인으로 작용하는 것으로 밝혀졌다[29]. Table 2에 석탄 분석치 및 기준 입도 분포를 나타내었다.

연소로내의 탈황반응을 위해 주입되는 석회석은 국내 제조된 것으로 CaCO₃ 함유량이 90%, 그리고 MgCO₃가 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 사용된다.

시뮬레이션에 사용된 동해화력 순환유동층 연소로에 공급되는 일차 공기량 및 이차공기량, 그리고 loopseal 및 FBHE, FBAC에서 재순환되는 공기량 및 feeder로 공급되는 공기량 등을 각 부하별로 Table

Table 2. 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	4600	S	0.6	0.6-1.0	16.0
(dry basis)	(kcal/kg)	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 3. Operation data for the Tonghae CFBC

#	Height [m]	Width [m]	Length [m]	Addition air[m ³ /s]						Tap. 1=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(4), #3: Feeder(Coal and Lime) Transport Air, #4: Loopseal+FBHE Returned Air, #5: Secondary Air(3), #6: Secondary Air(9), #7 Top of Combustor, #8, #9, Coal, Lime Feed Rate, # Wall Ratio: [Membrane wall area]/[wall area], # Tap.: Tapered type, yes=1, no=0

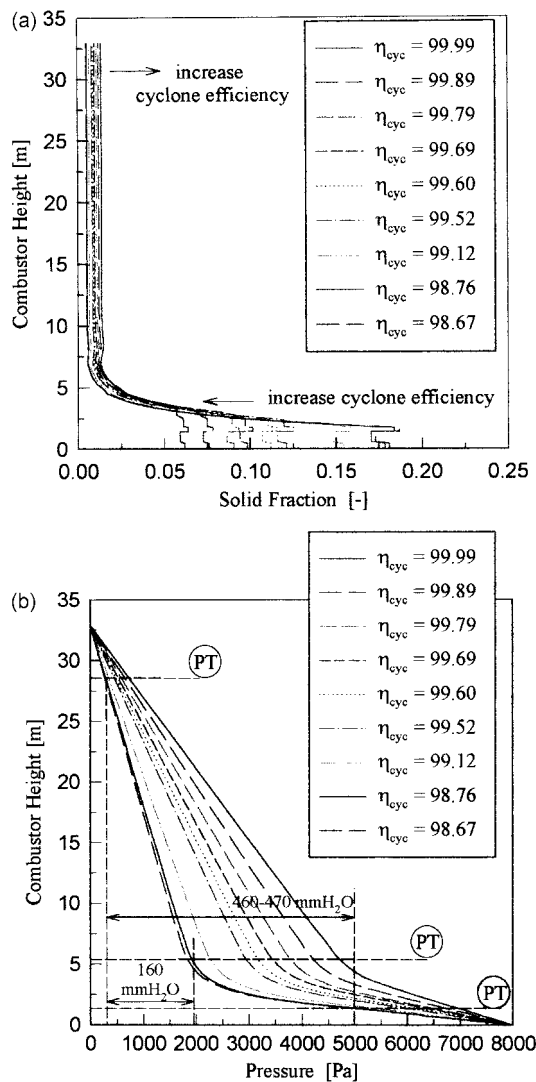


Fig. 3. Effect of cyclone efficiency on (a) solid fraction, and (b) pressure along the combustor height.

3에 나타내었다. 본 시뮬레이션에서는 100% NR(Nominal Rate) 기준으로 사이클론의 성능변화에 따른 순환유동층 성능모사를 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)와 (b)는 사이클론의 성능변화에 따른 동해화력 순환유동층 내의 축방향 solid hold-up 및 압력분포를 나타낸 것이다. 사이클론의 전체 포집 효율은 다음과 같이 정의될 수 있다. 우선, 사이클론 입구에서 입자특성과는 무관하게 단지 공기의 포화 운송력(saturation carrying capacity)을 넘는 양이 분리되는 현상에 의한 효율로서 보통 입구 효율(entrance efficiency or vortex efficiency)이라 정의되는 것과, 분리되지 않고 남아있는 입자에 대한 centrifugal force 및 drag force balance에 의해 정의되는 단일 입자 효율(single particle efficiency)이 있다. 이를 입자군 i 에 대해 수식으로 표현하면 다음과 같다[10, 13].

$$\eta_{cyc,i} = 1 - \frac{\mu_{s,sat}}{\mu_s} + \frac{\mu_{s,sat}}{\mu_s} \eta_{part,i} \quad (4)$$

여기서 saturation carrying capacity인 $\mu_{s,sat}$ 는 다음의 (5) 식으로 표현할 수 있으며, 또한 본 IEA-CFBC 모델에서 single particle efficiency

및 critical particle diameter는 다음의 (6), (7)식을 적용하였다.

$$\mu_{s,sat} = k_{cyc,e} \lambda \frac{R_{cyc}}{\sqrt{\pi A_{cyc,e}} k_{cyc,acc}^{1.5}} \frac{u_{cyc,e}}{\bar{u}_t} \quad (5)$$

$$\eta_{part,i} = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{d_{s,i} - d_{s,crit}}{d_{s,crit}}\right)} \quad (6)$$

$$d_{s,crit} = \sqrt{\frac{18 \mu_g u_{rad} \Gamma_{in}}{u_{in}^2 (\rho_2 - \rho_g)}} \quad (7)$$

IEA-CFBC 모델에서는 상기 사이클론의 모델을 실제 순환유동층에 적용함에 있어 k_{cyc} 를 조절 변수로 사용토록 되어 있다. 본 모델링의 경우 사이클론 개조를 통한 성능변화시 구조적 변화 수치뿐만 아니라, 효율변화에 큰 영향을 주는 $k_{cyc,e}$ 의 값을 변화(0.01-0.34)시켜 실제 사이클론의 효율 변화시 전체 순환유동층 연소로의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 $k_{cyc,e}$ 의 값을 조절을 통한 사이클론 효율의 증가(99.99-98.67)에 따라 dense 층의 solid hold up이 점차 감소(0.187-0.059)하며 반면에 freeboard(lean phase)에서는 점차 증가(0.005-0.014)하는 경향을 보이고 있다. 또한 dense 층의 층 높이가 사이클론 효율이 증가함에 따라 점차 높아지고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 사이클론 효율이 증가함에 따라 순환유동층 연소로 내의 고체농도 분포 및 순환량이 큰 영향을 받음을 알 수 있으며, 특히 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 실제 plant에서 운전 자료로 얻는 압력에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 실제 동해화력 CFBC에서 얻는 운전 압력 자료는 크게 분산판 압력강하를 포함한 전체 압력차와 그리고 분산판으로부터 0.9 m 위부터 상부 28.5 m 사이의 압력차, 그리고 분산판 5.2 m 위부터 상부 28.5 m 사이의 압력차를 측정 분석하고 있다. 이중 상부차압이라 일컫는 분산판 5.2 m 위부터 상부 28.5 m 사이의 압력차이는 고체 순환의 여부를 판별하는 기준으로 삼고 있으며 정상운전 중에 약 140-170 mmH₂O의 압력차를 보이고 있다. 또한 중간차압인 분산판 위로 0.9-28.5 m 사이의 압력차이는 약 340-490 mmH₂O의 값을 나타내고 있다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 상기 압력 범위에 드는 사이클론 효율의 값을 추정해 보면 현재 동해화력의 사이클론 효율은 98.7%정도인 것으로 나타난다. 동해화력 순환유동층 보일러의 기본 설계자인 ABB-CE에서는 현재의 사이클론 효율을 96.4%로 계산하고 있으나 이는 적용된 사이클론의 모델 및 순환량의 계산식 적용에 차이가 있어 단순 비교는 어려운 것으로 나타났다. 또한 사이클론 효율상승시 dense층에서의 압력차는 점차 감소하며 반면에 lean phase에서의 압력차는 점차 증가하는 경향을 나타내고 있어 순환량의 증대를 예상할 수 있으며, 사이클론 효율에 따른 각 압력측정치에서의 압력차를 예상할 수 있다.

Fig. 4는 로의 높이에 따른 annulus 및 core에서의 온도분포를 나타내고 있다. Dense층에서의 온도분포는 annulus 및 core의 온도분포가 약 900 °C에서 비교적 균일함을 볼 수 있으며 실제 온도 측정치(symbol)와도 비교적 잘 맞음을 볼 수 있다. 그러나 lean phase에서의 annulus 및 core의 온도분포는 사이클론 효율에 따라 크게 차이를 볼 수 있으며, 사이클론 효율이 증가함에 따라 점차 온도가 낮아짐을 볼 수 있다. 이는 사이클론 개조시 로내의 후단부 온도 안정에 큰 효과를 줄 수 있음을 의미한다. Annulus 온도 분포의 경우, dense층을 지나 온도가 급격히 낮아지다가 로상부에서 다시 증가하는 형태를 보이고 있으며, 이는 annulus의 하향흐름 고체에 의한 membrane wall tube로의 열전달이 일어나기 때문으로 생각할 수 있다. 즉, 로 상부에서의 고온의 하향흐름 고체가 열전달로 인해 점차 온도가 낮아지다가 dense층의 고체층과 가까워지면서 다시 증가하는 형태를 나타냄을

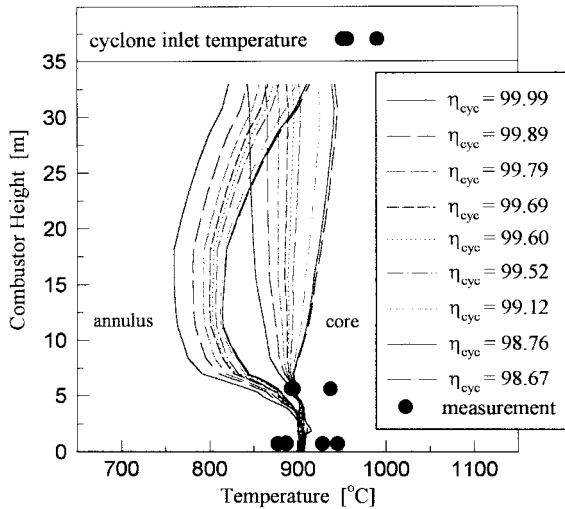


Fig. 4. Temperature vs. combustor height with variation of cyclone efficiency.

볼 수 있다. Annulus 및 core의 온도분포는 dense층을 지나서 free-board 구역에서 사이클론 효율이 증가함에 따라 점차 낮아지는 경향을 보이며, 이는 재순환되는 고체량이 증가하면서 로내의 온도를 낮추는 역할을 하기 때문이다. 현재 동해화력 순환유동층의 경우($\eta_{cyc} = 98.7\%$), core의 온도분포는 로의 높이가 증가함에 따라 점차 온도가 증가하는 현상을 보이며, 사이클론 inlet의 온도(symbol)가 약 950-1,000 °C 사이에 있어 모사한 결과의 연장선에서 살펴볼 경우 매우 비슷한 범위에 있음을 알 수 있다. 이는 국내 무연탄의 연소특성상 매우 낮은 연소반응성에서 비롯되는 것으로 이해될 수 있으며, 사이클론 inlet의 경우, 미연분의 미세입자 혹은 배가스중의 CO와 미반응된 산소의 재연소가 이루어져 로내의 온도보다는 다소 높은 온도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 비교적 기체흐름이 단순한 로내에서 미반응된 산소 및 CO 그리고 미연분이 사이클론 inlet 부근에서 격렬히 혼합되고 집약되는 것으로써 이해될 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 사이클론 효율의 증가는 로상부의 온도를 낮추는 역할을 하는 것으로 나타나, 사이클론 개조를 통해 포집 효율을 높일 경우, 비교적 높은 온도의 운전조건을 안정하게 낮추는 효과를 기대할 수 있다.

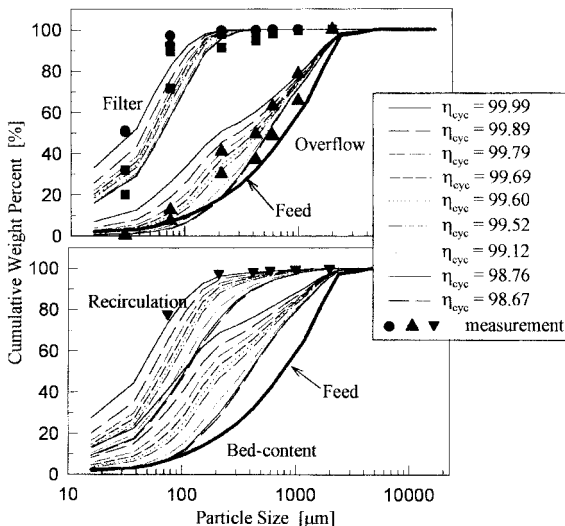


Fig. 5. Effect of cyclone efficiency on particle separation.

Fig. 5는 사이클론 효율에 따른 순환유동층 각 부위에서의 입도분포를 나타낸 것이다. Feed는 순환유동층내로 주입되는 석탄 및 석회석의 혼합 입도이며, filter로 표기된 부분은 사이클론에서 미포집되어 배출되는 입도분포를, 그리고 overflow는 층에서 배출되는 입도분포를 나타내며, recirculation 및 bed-content는 각각 재순환되는 입도 및 층내에 있는 입도분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 사이클론 효율이 증가함에 따라 포집, 재순환되는 입도가 전반적으로 작아져 모든 부분에서 입도분포가 점차 작아짐을 알 수 있다. 그림에서 symbol은 동해화력 순환유동층에서 샘플링을 위해 분석한 입도이며, 입도분포는 모사 결과($\eta_{cyc} = 98.7\%$)와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 단지, 재순환 입도의 경우는 FBHE 상부에서 샘플링한 입도를 표시한 것으로 모사된 재순환 입도보다는 비교적 작은 입도분포를 나타내고 있다. 이는 FBHE내의 공기유속이 비교적 낮게 운전되도록 설계되어 있어($\approx 0.3 \text{ m/s}$), 완전 혼합이 이루어지지 않고 어느정도의 편석(segregation)이 생기는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 6은 사이클론 효율변화에 따른 고체 입자의 재순환량 및 bottom ash로 배출되거나 혹은 사이클론에서 미포집되어 집진기로 배출되는 양을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 현 동해화력의 고체 재순환은 사이클론 효율을 98.7% 약 500 kg/s로 예측되며, 배출되는 ash의 형태는 bottom ash가 약 410-420 ton/day, 그리고 fly ash가 약 560-590 ton/day로 예상되어 fly ash의 배출량이 조금 더 높은 것으로 예측되었다. 사이클론 효율이 증가함에 따라 재순환량은 점차 증가하는 것을 볼 수 있으며, 또한 bottom ash의 양과 fly ash의 배출량 형태가 서로 뒤바뀌는 것을 고찰할 수 있다. 이는 전체 연소로의 운전을 일정한 전체 압력차로 운전하기 때문에 순환량이 증가할수록 bottom ash형태로 배출되는 ash량이 증가하기 때문이다. 현 동해화력의 ash 배출량은 fly ash와 bottom ash의 비가 약 6-5 : 4-5로 고찰되고 있으며, 그 양도 fly ash가 약 550-600 ton/day로 추정되고 있어 시뮬레이션 예측치가 비교적 잘 맞음을 알 수 있다.

Fig. 7은 사이클론 효율변화에 따른 연소로 출구에서의 배가스 특성 및 연소 효율을 나타낸 것이다. 사이클론 효율이 증가함에 따라 CO 및 O₂ 그리고 NO_x가 증가하는 경향을, 그리고 CO₂ 및 SO₂ 그리고 연소 효율이 감소함을 볼 수 있다. CO의 증가는 사이클론 포집효율

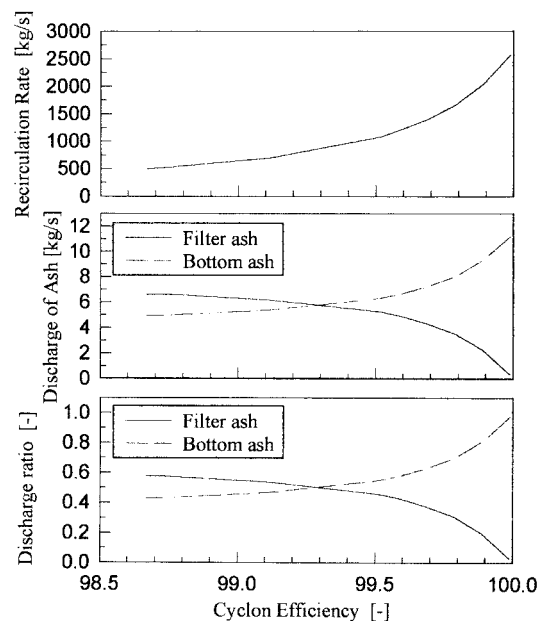


Fig. 6. Effect of cyclone efficiency on the recirculation and ash discharge rate.

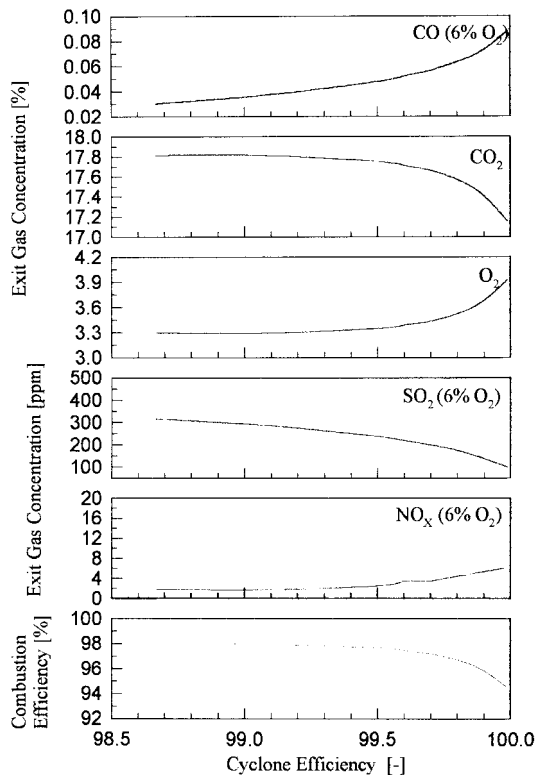


Fig. 7. Cyclone efficiency vs. exit gas concentration and combustion efficiency.

의 증가로 미분탄의 재순환량의 증가가 그 요인이며, 이는 Ahlstrom사의 미국 Pennsylvania에 있는 순환유동층 보일러의 미분탄 영향 실험에 있어서도 그 결과가 보고되고 있다[30]. SO_2 의 감소는 비교적 입도가 작은 미반응 석회석이 사이클론 포집 효율의 증가로 재순환되는 양이 증가하면서 탈황효율이 증가하는 것으로 이해될 수 있으며, 반면에 NO_x 의 배출량이 미세하나마 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 연소로 안의 석회석의 증가가 일정량의 NO_x 의 증가를 가져

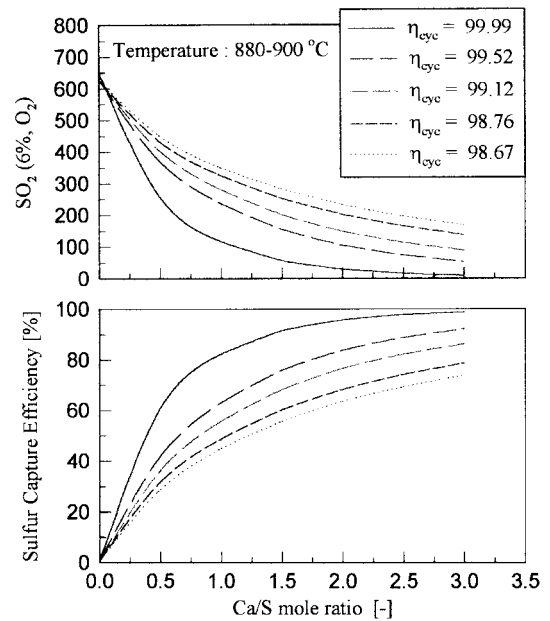


Fig. 8. Effect of Ca/S mole ratio on SO_2 concentration and sulfur capture efficiency with cyclone efficiency.

오는 결과로 이해될 수 있으며, 이러한 사실은 Jones 등[31]의 미국의 Scrbrass 순환유동층 조업경험 보고에서도 살펴볼 수 있다. 또한 사이클론 포집 효율의 증가로 인한 미분회재의 재순환 증가는 비교적 높은 연소로의 상부온도를 낮추는 결과를 가져옴과 동시에 미전환탄의 bottom으로의 배출을 증가시킴으로써 연소 효율 및 CO_2 의 배출을 낮추는 효과를 가져오는 것으로 예측되었다.

Fig. 8은 사이클론 효율 증가 및 Ca/S 몰비에 따른 SO_2 배출 및 탈황 효율을 나타낸 것이다. SO_2 배출 감소 및 탈황 효율은 사이클론 효율 및 Ca/S 몰비가 증가함에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났다. 또한 사이클론 효율이 높은 경우가 낮은 경우에 비해 Ca/S 몰비에 따라 더 크게 탈황 효율이 증가함을 볼 수 있으며, 이는 탈황 효율의 증가를 위해서 조업상의 Ca/S 몰비를 증가시키는데 한계가 있

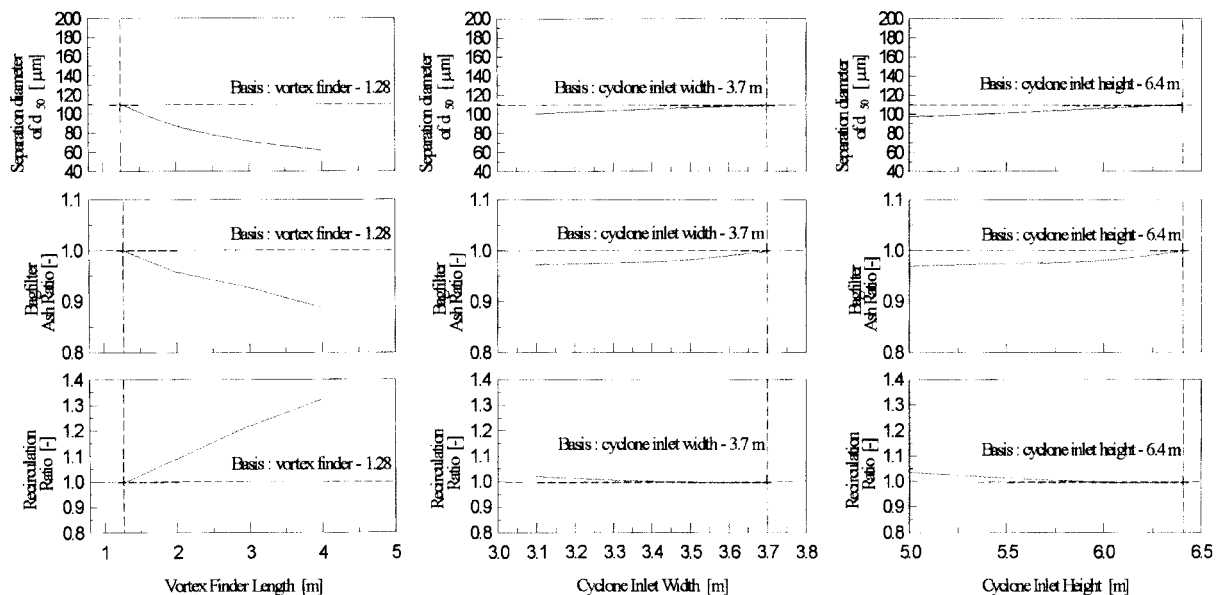


Fig. 9. Effect of cyclone modification on the performance of the cyclone.

는 경우, 적절한 사이클론 개조를 통해 탈황 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 그림에서 표현한 온도는 dense층의 온도분포이며, 앞의 Fig. 4에서도 볼 수 있듯이 사이클론 효율의 증가는 로 상부의 높은 온도를 낮추는 역할을 하기 때문에 탈황제의 고온 sintering에 의한 탈황 효율 감소를 방지하는 것으로 나타났다. 동해화력 순환 유동층의 경우 이미 Ca/S 몰비(1.0-3.6) 및 석회석 입도 변화에 대한 영향을 고찰하였으며, 초기 운전자료를 보면 대략 몰비에 따라 140-350 ppm 정도가 배출되는 것으로 나타나 시뮬레이션 결과($\eta_{cyc} = 98.7\%$)와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

한편, 동해화력 순환유동층의 경우, 사이클론내의 vortex finder의 길이 증가 및 입구 단면적 감소의 개조를 통해 fly ash 내의 미연분을 감소시키고 조업 온도를 안정화시키며 배가스내의 SO₂ 저감 등의 최적 운전을 도출하는 작업을 수행중에 있다. Fig. 9는 사이클론 개조에 따른 사이클론 cut-diameter 변화 및 미포집 입자의 배출량비, 그리고 재순환량비에 대한 예측치를 나타낸 것으로 개조되는 vortex finder의 길이변화 및 사이클론 입구의 높이 및 너비 변화는 예상되는 개조의 범위 내에서 나타난 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 vortex finder의 길이증가에 대해 현재 동해화력의 기준길이인 1.28 m보다 길어지는 경우, cut-diameter 및 미포집 입자의 배출량비는 감소하는 경향을 나타내었으며, 반면에 재순환량비는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 vortex finder의 길이증가가 사이클론내에서의 원심방향의 속도를 증가시키며, 직접 사이클론 출구로 나가는 기체흐름을 어느정도 막아주기 때문으로 이해될 수 있다. 반면에 사이클론 입구에서의 기체유속을 증가시켜 사이클론 효율의 상승을 갖고자 하는 목적으로 사이클론 입구의 단면적(높이 혹은 너비를 줄이는 경우)을 줄이는 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 약간의 효과는 보이지만 vortex finder의 길이증가에 비해 낮은 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 그러나 vortex finder 및 사이클론 입구개조는 입자에 의한 기계적 마모에 의한 교체, vortex finder의 지지 및 사이클론 inlet-duct에서의 fouling 등의 영향을 고려하여 선정되어야 할 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 사이클론 효율변화는 전체 순환유동층 성능 및 운전 자료에 큰 영향을 미치며, 이러한 영향의 예측을 통해 적절한 사이클론 개조는 순환유동층 성능의 향상을 이룰 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

IEA-CFBC 모델을 이용하여 동해화력 순환유동층의 사이클론 성능 변화에 따른 영향을 고찰하였다. 동해화력의 현 사이클론 효율은 약 98.7% 정도로 나타났으며, 사이클론 효율이 증가함에 따라 solid hold-up 및 로내 압력차가 dense층의 경우 점차 감소하며 반면에 freeboard의 solid hold-up 및 로내 압력차가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 로내 온도분포는 사이클론 효율의 증가에 따라 재순환량의 증가로 상부 freeboard의 온도가 점차 낮아져 안정화되는 것으로 나타났으며 입도분포 또한 점차 작은 입도분포로 변이되는 것으로 예측되었다. 온도 안정화 및 교체 재순환의 증가로 탈황 효율도 증가하나, 반면에 사이클론 효율이 매우 높을 경우에는 CO 배출량이 늘고, 연소 효율이 낮아지는 현상이 예측되었다. 또한 이러한 사이클론 효율의 상승을 위해 사이클론 vortex finder 및 입구 단면적 개조를 수행할 경우, 순환 유동층 성능 향상이 기대되는 것으로 예측되었다.

사용기호

a : exponential decay constant [1/m]

$A_{cyc,e}$: cross section area of cyclone entry [m²]

$d_{s,crit}$: critical particle diameter [m]

$d_{s,i}$: particle diameter of i class [m]

H : height [m]

H_d : dense bed height [m]

$k_{cyc,acc}$: acceleration coefficient of cyclone [-]

$k_{cyc,e}$: cyclone entrance efficiency coefficient [-]

$k_{i,attr}$: attrition constant of i class [1/m]

$k_{i,shrk}$: shrinking constant of i class [1/s]

\dot{m} : mass flow rate [kg/s]

w_i : particle size fraction [-]

p : pressure [Pa]

R_{cyc} : radius of cyclone [m]

$R_{cyc,vort}$: radius of vortex finder [m]

r_{in} : radius of cyclone inlet [m]

$u_{cyc,e}$: entrance gas velocity in cyclone [m/s]

u_o : superficial gas velocity [m/s]

u_{in} : inner directional gas velocity in cyclone [m/s]

u_{rad} : tangential gas velocity in cyclone [m/s]

\bar{u}_t : terminal velocity of mean particle size [m/s]

그리스 문자

$\bar{\epsilon}_{s,d}$: average solid volume fraction in dense bed [-]

$\bar{\epsilon}_{s,\infty}$: average solid volume fraction at infinite height [-]

λ : wall friction coefficient [-]

$\eta_{cyc,i}$: cyclone separation efficiency of i class [-]

$\eta_{part,i}$: eddy separation efficiency of i class [-]

η_{seg} : segregation function [-]

μ_g : dynamic gas viscosity [kg/ms]

μ_s : solid load in gas [kg/kg]

$\mu_{s,sat}$: saturation solid load in gas [kg/kg]

ρ_g : gas density [kg/m³]

ρ_s : solid density [kg/m³]

참고문헌

1. Heinbockel, I.: Ph. D. Dissertation, Siegen University, Germany(1995).
2. Zhang, L., Li, T. D., Zhen, Q. Y. and Lu, C. D.: 11th Int. Conf. on FBC, Montreal, Canada, 1289(1991).
3. Xu, X. and Mao, J.: Proc. 4th Int. Conf. on CFB, Somerset, PA, USA, 104(1993).
4. Lin, X. and Li, Y.: Proc. 4th Int. Conf. on CFB, Somerset, PA, USA, 547(1993).
5. Halder, P. K. and Datta, A.: Proc. 4th Int. Conf. on CFB, Somerset, PA, USA, 696(1993).
6. Saraiva, P. C., Azevedo, J. L. T. and Cavalho, M. G.: 12th Int. Conf. on FBC, San Diego, CA, USA, 375(1993).
7. Hypannen, T., Lee, Y. Y., Ketunen, A. and Riialti, J.: 12th Int. Conf. on FBC, San Diego, CA, USA, 1121(1993).
8. Mori, S., Narukawo, K., Yamada, I., Takebayashi, T., Tani, H., Tomoyasu, Y. and Mii, T.: 11th Int. Conf. on FBC, Montreal, Canada, 1261(1991).
9. Sengupta, S. P. and Basu, P.: 11th Int. Conf. on FBC, Montreal, Canada, 1295(1991).
10. Hannes, J. P., van den Bleek, C. M. and Renz, U.: Proceedings of the 13th Int. Cong. on FBC, Orlando, FL, USA, 287(1995).
11. Prichett, J. W., Blake, T. R. and Garg, S. K.: *AIChE Symp. Ser.*, **74**,

- 134(1978).
12. Balzer, G. and Simonin, O.: Proc. 5th Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, Paris, France(1993).
13. Hannes, J. P.: Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands(1996).
14. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**, 117(1982).
15. Rhodes, M.: *Powder Technology*, **53**, 155(1987).
16. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York(1977).
17. Davidson, J. F. and Harrison, D.: "Fluidized Particles," Cambridge University Press, New York(1963).
18. Johnsson, F., Andersson, S. and Leckner, B.: *Powder Techonlogy*, **68**, 117(1991).
19. Darton, R. C., LaNauze, R. D., Davidson, J. F. and Harrisson, D.: *TransIChemE*, 55(1977).
20. Kruse, M., Hartge, E. U. and Werther, J.: *Powder Technology*, **70**, 293(1992).
21. Merrick, D.: *Fuel*, **62**, 534(1983).
22. Field, M. A., Gill, D. W., Morgan, R. B. and Hawksley, P. G. W.: "Combustion of Pulverized Coal," British Coal Utilization Research Association, Great Britain(1967).
23. Schouten, J. C. and van den Bleek, C. M.: *Chemical Engineering Science*, **43**, 2051(1988).
24. Wolff, E. H. P.: Ph. D. Dissertation, TU-Delft University, The Netherlands(1991).
25. Johnsson, J. E.: Presented at the 21th IEA-AFBC Meeting in Beograd(1990).
26. Hautman, D. J., Dryer, F. L., Schug, K. P. and Glasman, I.: *Combustion Science and Technology*, **25**, 219(1981).
27. Wirth, K. E.: *Chemical Engineering Science*, **50**, 2137(1995).
28. Sun, D. W., Bae, D. H., Hee, K., Son, J. E., Kang, Y., Wee, Y. H., Lee, J. S. and Ji, P. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 321(1996).
29. Lee, J. M. and Kim, J. S.: Proceedings of the 6th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactor, CheJu Island, Korea, 501 (1998).
30. Cheliand, P. K. and Gamble, R.: "Fluidized Bed Combustion Volume-1," ASME, 535(1995).
31. Jones, P. A., Syngle, D. V. and Sinn, B. T.: "Fluidized Bed Combustion Volume-2," ASME, 1211(1995).