

순환유동층에서 유동매체량에 따른 수력학적 특성 연구

김은경* · 신동훈** · 황정호** · 이종민*** · 김재성***

Effect of Solid Mass Inventory on Hydrodynamics Characteristics in a Circulating Fluidized Bed

E. K. Kim, D. Shin and J. Hwang, J. Lee, J. Kim

ABSTRACT

This paper discusses effect of solid mass inventory on the hydrodynamic characteristics of circulating fluidized bed(CFB). Operating parameters of solid mass inventory and air flow rates were varied to understand their effects on fluidization pattern. Experimental measurements were made in a CFB of which height and diameter are 3m and 0.05m, respectively. Black SiC particles ranging from 100 μ m to 500 μ m were employed as the bed material. Superficial gas velocity of riser and J-valve fluidizing velocity were in the ranges of 1.39~3.24m/s and 0.139~0.232m/s, respectively. The axial solid fraction and solid circulation rate of CFB were calculated based on the experimental data and compared with modellings through IEA-CFBC Model and commercial CFD code.

Key Words : CFB, Hydrodynamics, Mass inventory, Fluidizing air rate, CFD, Modelling

기 호 설 명

A : cross section area of bed, m ²	$u_{s,cor}$: solid up velocity in core, m/s
a : exponential decay constant, 1/m	u_t : terminal settling velocity, m/s
D : dispersion coefficient, m ² /s	u_{tr} : transition velocity, m/s
d_b : bubble diameter in dense bed, m	V_b : bubble volume, m ³
f : function, as indicated, ...	w : particle size fraction, kg/kg
G_s : solid circulation flux, kg/m ² s	a_{ann} : annulus area fraction
g : gravity acceleration, m/s ²	a_{cor} : core area fraction
H : total height of riser, m	ϵ_b : bubble volume fraction
H_d : height of dense bed, m	ϵ_s : solid volume fraction
h : height, m	$\epsilon_{s,ann}$: annulus solid volume fraction
K_b : bubble gas exchange coefficient, 1/s	$\epsilon_{s,cor}$: core solid volume fraction
k_{attr} : attrition constant,	$\epsilon_{s,d}$: solid volume fraction in dense bed
n_{nozzle} : number of nozzles in fluidization,	$\epsilon_{s,mf}$: solids volume fraction at minimum fluidization
ΔP : pressure drop, Pa	$\epsilon_{s,\infty}$: solids volume fraction at infinite height
R : riser hydraulic radius, m	η_t : total cyclone separation efficiency
t : time, s	η_e : cyclone separation efficiency in entrance
u_0 : superficial gas velocity, m/s	η_i : eddy separation efficiency
u_b : bubble rising velocity, m/s	μ_{carry} : actual solid load in gas
u_g : gas velocity, m/s	μ_{ermx} : maximum carrying ratio
u_{mf} : minimum fluidization velocity, m/s	
$u_{s,ann}$: solid down velocity in annulus, m/s	

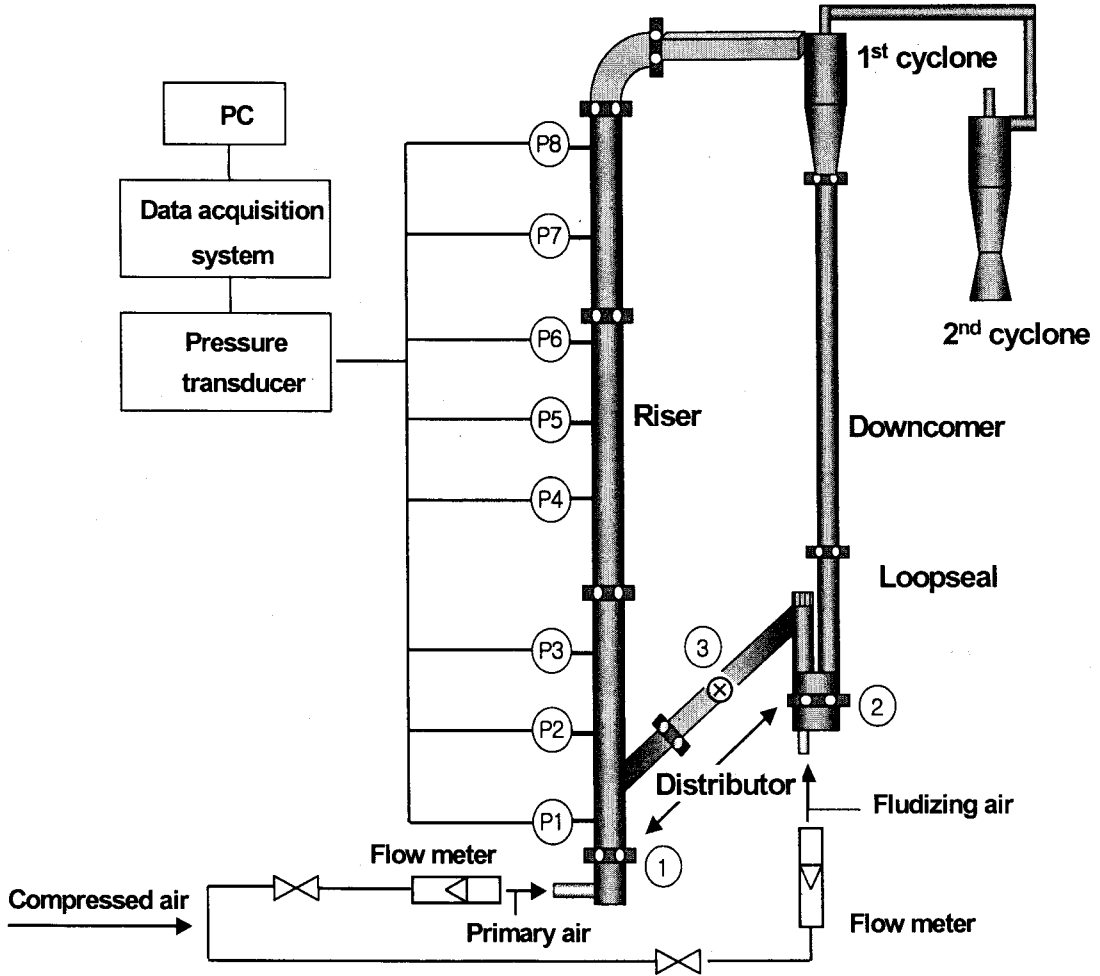


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1. 서론

1970년대 오일쇼크 이후 석유 및 가스자원의 지역적 편재성과 매장 유한성으로 인해 대체 에너지원으로 세계적으로 고르게 분포되어 있고 매장량이 풍부한 석탄에너지 활용기술에 대한 연구가 계속적으로 이어지고 있다. 특히 최근에는 선진국을 중심으로 지구환경 보존과 오염배출에 대한 규제가 강화되고 있어 청정 석탄 이용 기술(clean coal technology)이 경제적 및 환경적으로 관심이 고조되고 있다. 이에 부합하여 대체 에너지원인 석탄 및 저급원료의 이용에 다양한 연

료 적응성을 가진 유동층 연소기술이 도입되었고 연소기술의 향상을 통한 순환유동층(Circulating Fluidized Bed, CFB) 기술개발을 통해 유동층 기술의 진보와 대형화를 이루면서 응용과 보급이 되어왔다.

순환유동층의 수력학적 특성에 관한 기초 연구는 Geldart와 Rhode[1], Grace[2] 그리고 Rhodes와 Geldart[3] 등에 의해 유동층내 축방향 압력분포와 공극률 그리고 고체 체류량과 2차공기의 단계별 공급 등 공기 주입방법을 변화시킴에 따른 연구 등이 수행되어져 왔다. 이후 고속 유동층의 유동 특성에 관해 Li와 Kwauk[4]은 축방향 고체 분률에 대한 실험적 관찰에 의해 상승부 하단의 농후상(dense phase) 영역과 상승부 상단의 희박상(dilute phase) 영역이 공존하며 이 두 영역 사이에 변곡점(inflexion point)이 존재하는 S형태의 구조를 갖는 유동층으로 정의하였다. 그리고

* 연세대학교 기계공학과
 ** 연세대학교 CT(Clean Tech.) 연구단
 *** 한전 전력연구원 발전연구실
 † 연락처자, hwangjh@yonsei.ac.kr

기포유동층으로부터 고속유동층의 구별은 농후상과 희박상 사이의 전이영역의 두께로써 구별하였다. 따라서 유동층내의 고체량에 따른 고체 분율 등은 실제 유동해석 뿐 아니라 고체 순환량, 열 전달, 그리고 반응 등을 계산하는데 있어서 중요한 자료로 사용되며, 특히 이러한 값의 변화에 따른 연소 성능의 해석 및 예측은 매우 중요하다 [5,6].

본 연구는 순환유동층의 주요 설계 및 운전 변수의 하나인 유동매체량(solid mass inventory)에 따른 순환 유동층 내에서의 수력학적 특성을 파악하여 이를 바탕으로 운전 및 설계변수를 예측하는 것이 주된 목적이다. 실험실 규모의 순환 유동층 실험 데이터와 IEA-CFBC 및 상용 CFD 해석코드를 사용하여 순환유동층 내에서 수력학적 특성을 평가 및 비교하기 위한 기초 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2개의 분산판(distributor)과 상승부(riser), 2단의 기-고체 분리부(cyclone), 하강부(downcomer), 루프셀(loopseal) 등 크게 5부분으로 나누어진다. 순환 유동층은 순환하는 고체의 흐름을 원활하게 볼 수 있도록 아크릴관으로 제작하였고, 상승부는 직경 50mm, 높이 3000mm이다.

순환유동층 상승부에 사용한 1차 공기 분산판 ①은 내경 3mm의 오리피스를 8.33mm 정방간격으로 총 21개를 배열하였고, J-밸브의 유동화 공기 분산판 ②는 내경 2mm 오리피스를 7.5mm 정방간격으로 총 45개의 구멍을 갖는 다공형 분산판을 사용하였으며 미세철망을 깔아 유동사가 분산판하부로 유실되는 것을 방지하였다.

루프셀(Loopseal)은 상업용 CFB 보일러에서 입자 재순환 시스템의 비 기계적 밸브 중에서 가장 많이 쓰이는 J-밸브를 선택하였다[7]. 주어진 입자량의 순환에 적절하도록 내경 60mm, 높이 700mm의 원통 중간에 두께 2mm의 막(partition)을 설치하여 J-밸브를 제작하였다.

유동사의 상승부로의 재유입을 위해 루프셀과 상승부 사이의 재순환 부분은 45°의 경사를 이루며 연결이 되었으며, 시동시 발생하기 쉬운 하강부로의 역류를 제어하기 위해 하강부 영역[8]에 오리피스와 고체 순환을 조절하기 위한 별도의 수동 밸브 ③을 설치하여 유동매체의 원활한 순환을 유지했다.

유동사의 순환율은 J-밸브 위의 하강부에서 일정한 양의 유동사가 쌓이는 시간을 측정하여 계

산하였으며, 상승부 내부의 압력을 측정하기 위해 상승부 벽면에 300mm 간격으로 압력측정 탭이 설치되었으며(P1 ~ P8) 측정된 압력은 데이터 인식 프로그램 DAQ-100을 통해 컴퓨터로 출력되어 저장되었다.

2.2 실험조건 및 방법

본 연구에 사용된 유동물질은 흑색의 SiC로 입자의 물성치는 Table 1과 같다. Figure 2는 입자크기에 따른 입자종말속도를 나타내며, 사용된 입경분포는 100~500 μ m 범위로 100~150 μ m이 38.44%, 150~300 μ m이 53.76%, 300~500 μ m이 7.8%에 해당한다.

순환 유동층의 유동 특성은 상승부에 설치되어 있는 압력탭으로부터 압력을 측정하여 다음의

Table 1 Properties of bed materials

Properties	Value
Mean diameter(μ m)	197
Superficial density(g/cm ³)	1.9
True density(g/cm ³)	2.5
Minimum fluidization velocity(cm/s)*	0.92
Terminal velocity(m/s)*	2.31

*by Haider & Levenspiel(1991)'s method[9]

식(1)을 이용하여 높이별 평균 고체분율(ϵ_s)을 계산한다.

$$\frac{\Delta P}{L} = \epsilon_s (\rho_s - \rho_g) g \quad (1)$$

식(1)에서 두 지점 사이 거리(L)의 압력차(ΔP)를 알면, 고체분율(ϵ_s)을 알 수 있고, 이로부터 농후상과 희박상 그리고 전이영역에 대한 구분을 고체 분포와 공극률을 기준으로 추정할 수 있다.

유동물질 SiC를 2kg, 2.5kg, 3kg로 변화시켜 실험하였으며, 이는 장치의 내부체적(상승부+기-고체 분리부+하강부+루프셀+연결부)에 대한 유동물질 체적의 비율로 각각 8.4%, 10.5%, 13.3%를 나타낸다. 이때 상승부 고정층 높이는 각각의 경우에 대해 0.33m, 0.47m, 0.53m이었고 이를 내부체적에 대한 유동물질 거시체적 비율로 나타내면 6.8%, 9.7%, 10.9%를 나타낸다. 또한 J-밸브의 고정층 높이는 마찬가지로 각각의 경우에 대해 0.24m, 0.30m, 0.35m이며 이를 내부체적에 대한 유동물질의 거시체적 비율로는 5.0%,

Table 2 Models used in IEA-CFBC code

Dense region

- Bubble diameter : Darton[13]

$$d_b = 0.54 \frac{(u_o - u_{mf})^{0.4}}{g^{0.2}} \left(h + 4 \sqrt{\frac{A}{n_{nozzle}}} \right)^{0.8} \quad (2)$$

- Bubble fraction : Johnsson[14]

$$\varepsilon_b = \frac{1}{1 + \frac{1.3}{f} (u_0 - u_{mf})^{-0.8}} \quad (3)$$

where,

$$f = 0.24 [1.1 + 2.9 \exp(-330 \cdot d_s)] [0.15 + (u_0 - u_{mf})]^{-0.33}$$

- Height of dense bed region : Wen & Chen[15], Kunii & Levenspiel[16]

$$\frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_g)g} = \varepsilon_{s,d} H_d + \int_0^{H-H_d} [\varepsilon_{s,\infty} + (\varepsilon_{s,d} - \varepsilon_{s,\infty}) \exp(-ah)] dh \quad (4)$$

$$a \cdot u_0 = \text{constant} \quad (5)$$

Dilute region

- Core-annulus area fraction : Seiter[17], Rhodes[18]

$$\text{Area balance : } \varepsilon_s A = \varepsilon_{s,cor} \alpha_{cor} A + \varepsilon_{s,ann} \alpha_{ann} A$$

$$\text{Mass balance : } G_s A = u_{s,cor} (1 - \varepsilon_{cor}) A \rho_s \alpha_{cor} - u_{s,ann} (1 - \varepsilon_{ann}) A \rho_s \alpha_{ann}$$

$$\text{Solid volume fraction in annulus : } \varepsilon_{s,ann} \approx 2\varepsilon_s \text{ or } \varepsilon_{s,ann} \approx \varepsilon_{s,mf}$$

$$\text{Area fractions of core and annulus : } \alpha_{ann} = 1 - \alpha_{cor} \quad (6)$$

$$\text{Core area fraction : } \alpha_{cor} = 1 - \frac{\varepsilon_s - \frac{G_s}{\rho_s u_0}}{\varepsilon_{s,ann} \left(1 + \frac{u_{s,ann}}{u_{s,cor}} \right)}$$

Particle size distribution : Merrick & Highley[19]

$$\frac{dd_s}{dt} = -\frac{k_{attr}}{3} \sum_{i=1}^i w (u_0 - u_{mf}) d_s \quad (7)$$

Cyclone separation efficiency : Krambrock[20]

$$\eta = \eta_e + \frac{\mu_{cary}}{\mu_{cmx}} \eta_i \quad (8)$$

Gas flow : Johnsson[14], Kruse[21]

$$u = u_{mf} (1 - \varepsilon_b) + (u_b + u_{tr}) \varepsilon_b$$

$$K_b = \frac{\dot{V}_b}{V_b} = \frac{4u_{tr} \pi d_b \nabla h}{\pi d_b^2 \nabla h} = 4 \frac{u_{tr}}{d_b} \quad (9)$$

$$Pe = \frac{2u_g R}{D} = \text{constant} \quad (10)$$

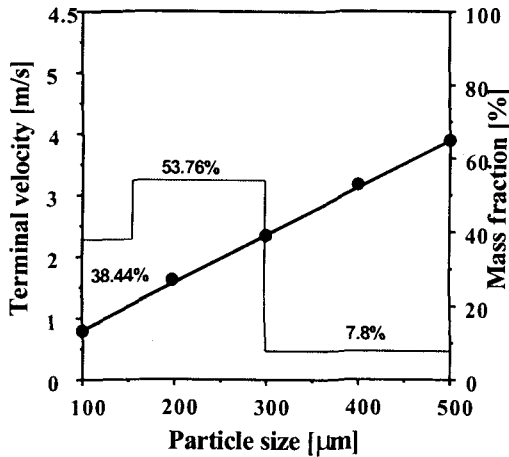


Fig. 2 Terminal velocity and particle sizedistribution

6.2%, 7.2%를 차지하였다. 상승부 분산판을 통해 공기 유량을 150~350lpm의 범위로 변화시키며 정상상태(steady state)를 유지하며 실험을 수행하였다. J-밸브 유동화 공기는 경험적 운전조작에 의해 얻어진 값으로 대략 15~25lpm의 범위에서 공급되었다.

3. 모델링

실험적 연구와 더불어 본 연구에서 사용된 이론적 방법은 1.5차원의 수치해석과 상용 CFD 코드를 이용한 3차원 해석이 포함되었다. 수치해석은 국제 에너지기구(IEA: International Energy Agency)[10] 산하 유동충부문위원회 모델링 그룹에서 개발한 1.5차원 순환유동충 모델링 프로그램인 IEA-CFBC 모델[11]과 상용 CFD 코드인 FLUENT 6을 사용하여 순환유동충의 수력학적 특성을 해석하였다.

3.1 IEA 이론 및 적용식

모델링의 기본구조는 수력학적 특성 즉 유동내 입자분포, 기체 흐름과 유동물질 재순환 등의 항목으로 구성된다. 순환유동충은 기-고체 간의 상호 불균일한 흐름을 이루고 있으며 상승부 하단의 농후 영역(dense region)과 상단의 희박 영역(dilute region)의 2부분으로 나뉜다. 또한 이 두 영역사이의 경계지역인 전이영역(transient region)이 존재한다. 본 모델링에선 각각의 영역을 모두 고려하였으며 적용된 식은 Table 2와 같다.

고체입자의 유동경향과 분포 변화에서 농후 영역은 Davidson과 Harrison[12]에 의해 제안된 기포상과 에멀전상의 두개의 상으로 나뉘는 모델을

사용했고, Darton[13]에 의해 제시된 식(2)에 의해 기포 크기가 결정된다. 그리고 기포 분률(ϵ_b)은 Johnson[14]에 의해 제안된 식(3)과 같으며, 입자 직경(d_s)에 영향을 받는다.

전이영역 및 희박전달 영역에서의 축방향 고체 분률 분포는 Wen과 Chen[15]이 제시한 상관식을 적용하였으며, 이를 이용해 농후상의 층높이 및 고체 분률은 압력 평형의 경계조건을 풀 다음에 각 입자군은 Sauter 직경을 사용하여 계산해서 결정하였다. 식(4)는 상승부에서의 압력(P)과 고체 분률(ϵ_s), 농후상 높이의 상관관계식으로서 농후상 높이(Hd)는 반복 계산에 의해 구해진다. Kunii와 Levenspiel[16]은 작은 입자($d_s < 88\mu m$)와 큰 입자($d_s > 88\mu m$)사이를 구별하였으며 공탑 속도(u_0)와 감쇄상수 a 사이의 관계식(5)를 제안했다. 감쇄상수는 모델내에 조절변수로 입력되도록 구성되어 있다. 작은 입자에 대해선 $a \cdot u_0 = 2 \sim 5 s^{-1}$ 이고 큰 입자는 $a \cdot u_0 = 4 \sim 12 s^{-1}$ 로 관찰되고 보고되었으나, 입자의 특성에 따라 실험에 의해 그 값을 구하는 것이 바람직한 것으로 제시되었다.

희박영역에서 반경방향 고체 분률 및 코어-에놀러스에 대한 경계를 결정하는 모델은 Seiter[17] 및 Rhodes[18]가 제시한 에놀러스 상관식(6)을 이용하였다.

입자크기 분포 변화는 총물질 주입에 따른 영향만을 고려하였다. 고려된 크기별 입자는 전체 베드압력과 경계조건을 기준으로 연소로 하단 부로의 배출 및 필터로의 배출과 포집 그리고 유동물질 재순환 등으로 구분되어 물질 평형이 유지된다. 입자들은 주입시 기계적 마모 및 입자들의 유동에 의한 충돌로 비롯된 마멸(attrition)만을 고려하였으며, 이는 Merrick과 Highley[19]가 제시한 식(7)을 적용하였다.

사이클론 모델은 Krambrock[20]에 의해 제안된 입자와 기체 포화운송력에 대한 상관식으로 결정되며 사이클론 효율은 입자특성과는 관계없이 기체의 포화운송력을 벗어난 입자량이 분리되어 포집되는 효율로 입구 효율과 분리되지 않고 남아있는 입자에 대한 원심력 및 항력 발란스에 의해 정의되는 단일 입자 효율로 이루어지며 포집 효율은 식(8)과 같다.

기체 흐름에 있어서는 분산판을 통해 공급된 1차공기는 코어, 에놀러스 및 기포와 에멀전 상으로 나뉘어서 그 흐름이 구성되며 각 흐름에서 반경방향 기체혼합은 각 상에서 기체 교환 속도에 의해 결정된다. 기포와 에멀전상의 기체 혼합은 기포를 통해 흐름을 갖는 기체에 의한 기포와 에멀전과의 혼합만을 적용하여 식(9)와 같이 표현되며, 코어와 에놀러스간의 기체혼합은 Kruse[21]가 제시한 무차원 Pelect수를 적용하였으며

Table 3 Boundary Conditions for calculation

Zone (Name)	Type	Conditions	
		Velocity (m/s)	Solid volume fraction
Primary air	Velocity inlet	2.78	0.2
J-valve fluidizing air	Velocity inlet	0.185	0.2
Outlet	Pressure	-	0.001

식(10)과 같다. 그러나 축방향 기체혼합은 운전 기체유속에 비해 축방향 혼합이 매우 적기 때문에 본 모델에서는 무시하였다.

3.2 CFD 경계조건 및 지배방정식

3차원 CFD 해석을 위한 격자 생성에는 Gambit을 이용하였으며, 약 2만 4천개의 격자가 사용되었다(Fig. 3).

유동장 해석을 위해서 Eulerian 모델에 의해 지배방정식은 3차원 비정상상태(unsteady state)의 직교좌표계에서 다상유동(기체상-고체상 등)의 체적 분률(volume fraction)에 대한 질량, 운동량 방정식을 적용한다[22,23]. 난류 모델은 표준 k-ε모델이 적용되었으며, 다상 모델에서 Eulerian 모델이 사용되었으며 1차상으로 공기와 2차상으로 고체입자상 모래를 선택하여 고체입자의 물성치를 각각 적용하였다. 1차상의 기체인 공기밀도는 1.225kg/m^3 이고 2차상의 고체입자 모래의 직경은 $200\mu\text{m}$ 으로 진밀도는 2500kg/m^3 이 적용되었다(Table 1).

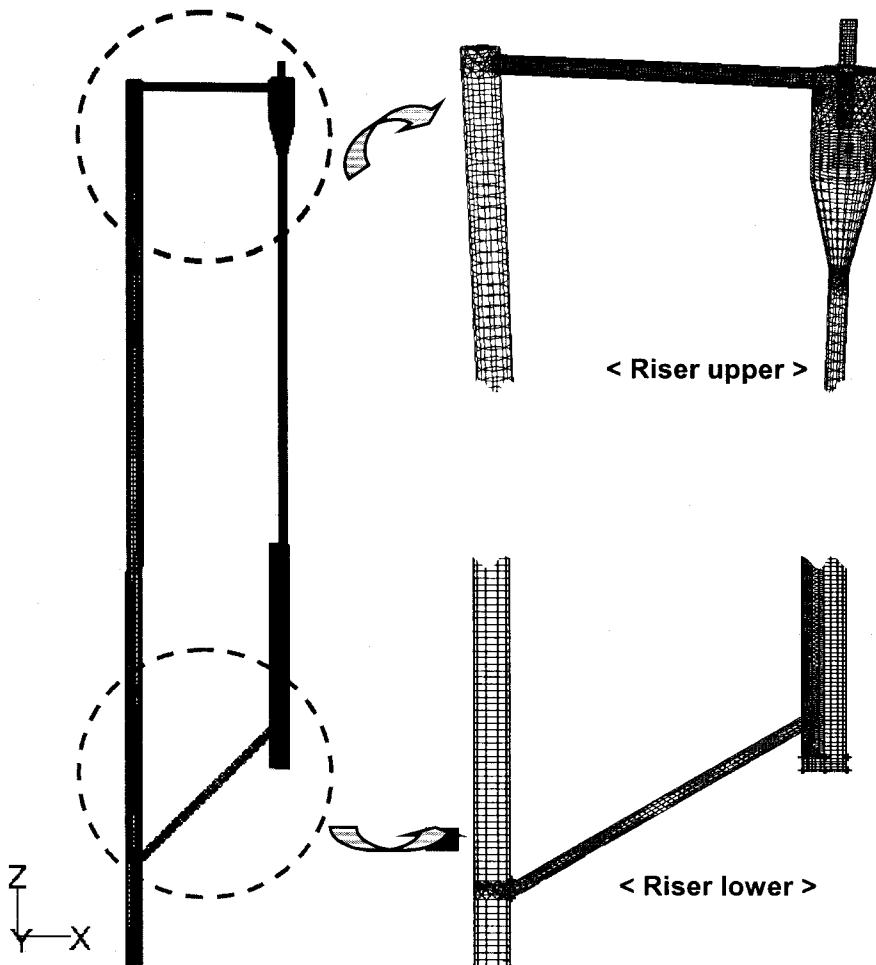


Fig. 3 3-D mesh generation of CFB

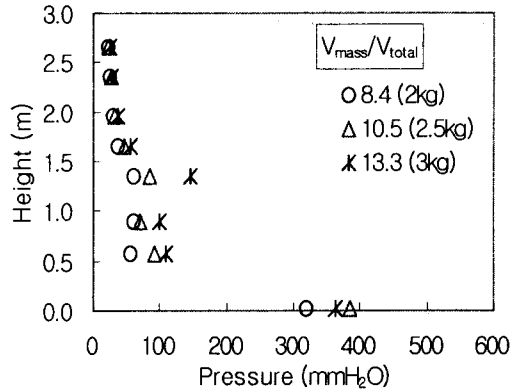
기체와 고체간 상호작용(phase interactions)에서 고체와 기체의 속도차(slip velocity)에는 Manninen[24] 이 제안한 값을 사용하였으며, 입자간 항력계수는 Gidaspow[25]에 의해 제안된 값을 사용하였다.

실험에서 얻어진 고속유동화 모드 조건으로 상승부 공탑속도는 2.78m/s(300lpm인 경우)와 J-벨브 유동화속도는 0.185m/s(20lpm인 경우)을 얻었다. 따라서 이 값을 CFD해석을 위한 경계조건값으로 사용하였으며 각각의 조건은 Table 3과 같다.

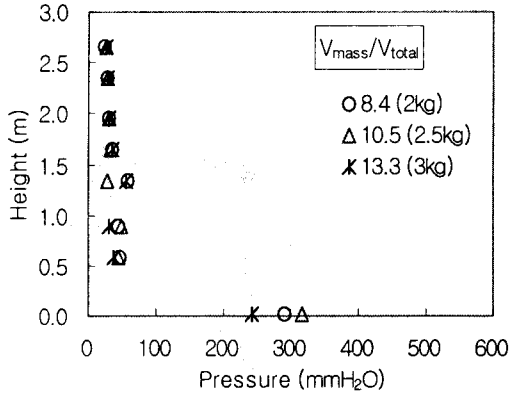
4. 결과 및 고찰

Figure. 4는 유동물질이 원활하게 순환이 이루어지기 시작하는 속도 범위에서 순환유동층 전체 내부체적(V_{total})에 대한 유동물질 체적(V_{mass}) 비율로 각 유동매체량(mass inventory) 별 상승부 내 압력분포를 나타낸다. Figure. 4(a)는 공탑속도(superficial velocity) 2.32m/s(250lpm인 경우)인 경우 각 유동매체량 별 압력분포를 나타낸다. 상승부 하단은 가속영역을 보이고, 0.5~1.5m 높이에서는 농후 영역과 전이 영역을 나타내며, 1.5~3m 높이에서는 압력분포가 일정한 상태로 유지되는 희박전달 영역을 나타내고 있다. 그림에 나타난 압력분포는 고속 유동화(fast fluidization) 상태에 도달하기 이전인 난류 유동화(turbulent fluidization) 상태[16]를 보여준다. Figure. 4(b)는 상승부에 2.78m/s(300lpm인 경우)의 기체 속도를 공급했을 때의 압력분포로 Fig. 4(a)와는 달리 상승부 하단 영역의 가속지역을 제외한 0.5~3m 구간에서 고속의 희박전달 영역으로 압력분포가 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 이전 유속 2.32m/s의 난류 유동화 상태에서 2.78m/s의 고속 유동화 상태로의 전환으로 볼 수 있다. Figure. 4(c)는 기체 유속을 3.24m/s(350lpm인 경우)로 유지했을 때의 유동매체량 별 압력분포로 Fig. 4(b)와 비슷한 고속 유동화 모드를 나타내고 있으며 유속의 증가로 인해 상승부 하단영역에서 압력이 감소함을 보인다.

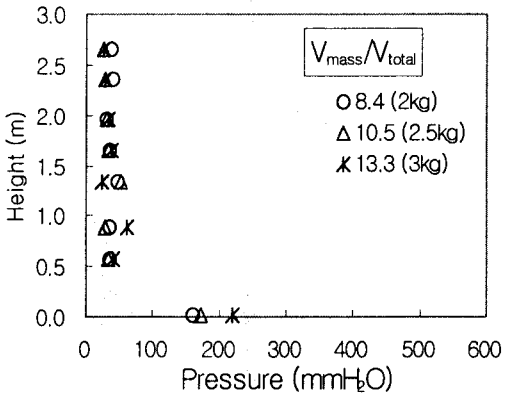
Figure. 5는 공탑 기체 속도의 변화에 따른 유동매체량에 대한 순환유동층 상승부 내에 고체 순환율을 나타낸다. 기체 속도가 2.32~3.24 m/s 범위에서 내부체적에 대한 유동물질 거시체적비율이 8.4%(유동매체량 2kg)와 10.5%(유동매체량 2.5kg)일 때 원활하게 순환하는 것을 나타내고 있다. 실험에 사용된 유동물질의 평균 입경은 약 200 μ m로 이때의 종말속도는 약 1.577m/s (Fig. 2 참조)가 된다. 하지만 실제 유



(a) $u_o=2.32\text{m/s}$



(b) $u_o=2.78\text{m/s}$



(c) $u_o=3.24\text{m/s}$

Fig. 4 Pressure profiles of different mass inventory

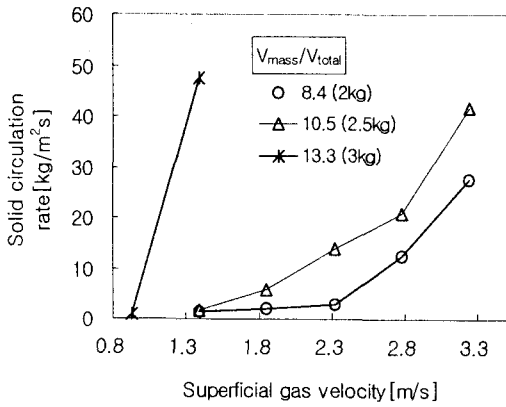


Fig. 5 Solids circulation rate of variable gas velocity at different mass inventory

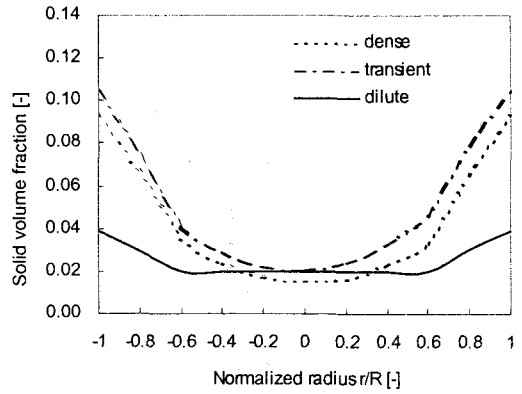


Fig. 8 Radial solid volume fraction in the different position at riser I.D. 50mm (CFD)

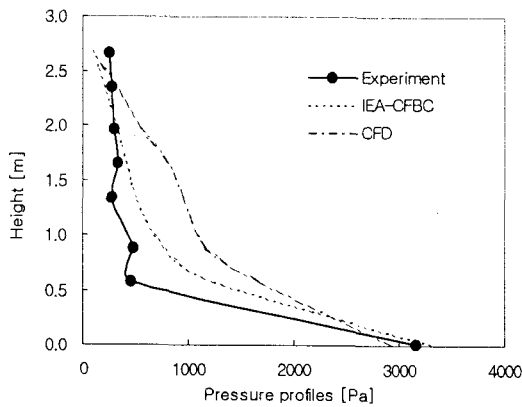


Fig. 6 Pressure profiles between experiment and calculation

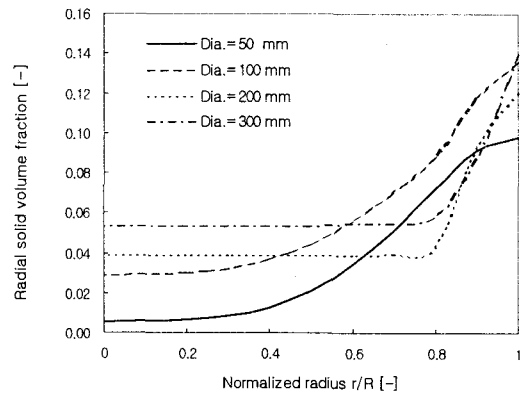


Fig. 9 Radial solid volume fraction in the different riser diameters (CFD)

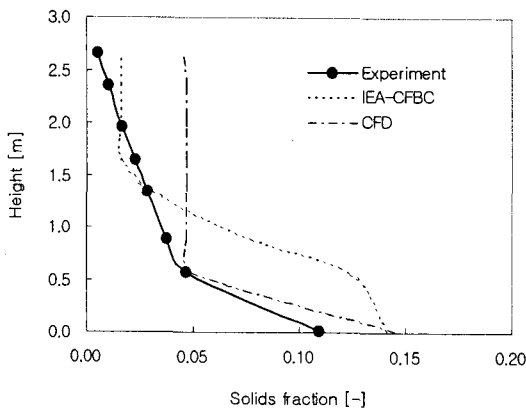


Fig. 7 Axial solid volume fraction between experiment and calculation

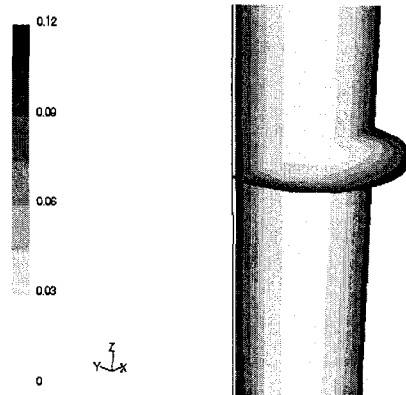


Fig. 10 Contours of solid volume fraction (CFD)

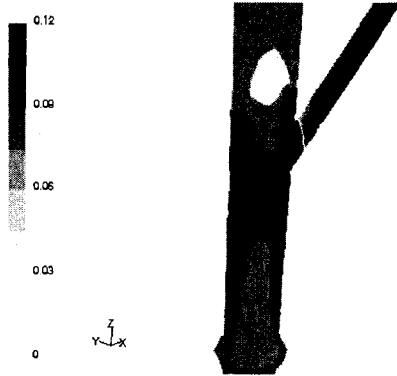


Fig. 11 Contours of solid volume fraction (CFD)

동매체량이 3kg일 경우엔 저속에서 높은 고체순환율을 보이고 있는데 이는 실제 순환된 입도분포가 150 μ m내의입을 추측할 수 있으며 실제 유동층내에서 공기의 유속은 공극률(voidage)에 역비례하여 증가하므로 실제 유속은 거시 유속(superficial vel.) 보다 높다. 또한 비율이 13.3%(유동매체량 3kg)일 때는 전체 시스템에 진동과 운전이 불안정한 상태를 나타냈다. 전반적으로 기체 속도 및 유동매체량이 증가할수록 순환율도 증가하는 것을 볼 수 있다.

Figure. 4와 5에서 실험 결과의 수력학적 특성을 유동매체량 변화에 따라 살펴보았다. 여기서 실험실 규모의 소형 순환유동층 연소로에서 전체 내부체적에 대한 유동물질 체적비율이 10.5%(유동매체량 2.5kg)일 때의 실험결과가 고속유동화 모드로 안정운전에 적당한 것으로 판단하여 주어진 실험 조건에서 나온 결과를 모델링의 입력값으로 사용하여 비교하고자 한다.

Figure. 6과 7은 Fig. 4와 5에서 찾은 고속유동화 상태를 유지하는 공탑 기체 속도를 2.78m/s로 입력값을 주었을 때 실험과 모델링(IEA-CFBC, CFD)을 비교한 것이다. Figure. 6은 축방향에 대한 압력분포를 나타낸 것으로 실험과 IEA-CFBC 해석은 거의 일치하고 CFD 해석도 유사한 경향을 볼 수 있다. Figure. 7은 축방향 고체 분율을 비교한 값으로 상승부 하단 농후영역에서는 실험과 CFD해석이 일치를 하고, 상단희박영역은 실험과 IEA-CFBC 해석이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

순환유동층에서 용량의 확대(scale-up)는 일반적으로 상승부의 직경을 증가시키는 것으로 수행된다. 따라서 상승부 직경을 변화시켰을 때의 반경방향 분포를 알아보고자 CFD를 이용해 비교

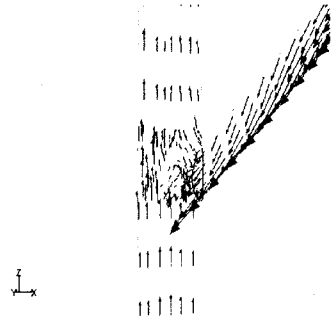


Fig. 12 Sand velocity vectors

해보았다. Figure. 8은 실험실 규모와 같은 형상으로 농후영역과 전이영역, 희박전달영역인 분산관 위 200mm, 600mm, 2300mm 높이에서의 반경방향 고체 분율을 나타낸다. 또한 중심부 $r/R=0$ 인 영역에서 농후영역의 고체 체적 분율이 다른 영역보다 작게 나타나는데 이는 농후영역에서는 타 영역에 비해 평균 고체분율이 높지만 그에 따라 실제 공기유속은 타 영역에 비해 높아져서 주된 공기 유로인 중심부분의 유속이 더욱 커지게 되어 중심부 고체 분율에 있어서 농후영역이 더 낮게 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 세 지점 모두 코어-애널리츠 영역이 존재함을 볼 수 있으며, 농후와 전이 영역은 선명한 포물선 형태를 이루고 있으며, 희박전달 영역은 다소 편평한 형태를 이룬다. Figure. 9는 CFD의 결과로 상승부 직경별 반경방향의 고체 분율을 나타낸다. 상승부 직경이 증가함에 따라 코어-애널리츠 영역이 확연히 드러나는 것을 볼 수 있다.

Figure. 10과 11은 상용코드 CFD 해석 결과 중 상승부의 고체 분율을 나타낸 것으로 고속유동화 모드의 입력조건을 주었을 경우 코어-애널리츠 영역이 확연히 존재함을 가시적으로 볼 수 있다. Figure. 12는 유동물질인 모래가 재순환 구간인 하강부와 루프필을 통해서 상승부로 다시 순환하는 것을 가시적으로 볼 수 있다.

5. 결론

유동매체량 별 순환 유동층 내에 수력학적 특성에 대한 실험과 IEA-CFBC 모델, 그리고 상용 CFD 코드를 통해 모델링을 수행하였다.

1) 내부체적에 대한 유동물질 체적 비율이 각각 8.4%(2kg), 10.5%(2.5kg), 13.3%(3kg) 별로 공기 유속을 달리 주었을 때 공탑속도 2.78~3.24 m/s이 운전되기에 적절한 속도임을 알 수 있다.

2) 유동매체량 별 실험에서는 내부체적에 대한 유동물질 체적 비율이 10.5%(2.5kg)일 경우가 가

장 좋은 유동화조건 및 고체순환율을 보였다.

3) 직경 0.05m와 높이 3m이내 소형 순환유동층에서 내부체적에 대한 유동물질 체적비율이 약 13.3%(3kg)를 초과하면 운전하기에 적절하지 않음을 알 수 있다.

4) IEA-CFBC 모델은 실험과 비교하여 축방향 고체 분율은 상승부 상단의 희박상(dilute phase) 영역에서 잘 일치하나 하단의 농후상(dense phase) 영역에서는 약간의 불일치함을 보였다.

5) 상용 CFD 코드는 실험과 비교하여 축방향 고체 분율에 있어 잘 일치함을 볼 수 있으며 차후 스케일업(scale-up) 연구에 유용한 방법이 될 것으로 예상되었다.

6) 상용코드를 이용한 3차원 반경방향 해석에 있어서도 코어(core)와 애놀러스(annulus) 영역의 명확한 구분을 볼 수 있으며, 상승부 내경이 작을수록 애놀러스 영역이 두껍고 고체 밀도가 포물선형을 이루며, 희박한 부분에서 이 반경분포가 다소 편평한 것을 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지 자원 기술 개발 사업(2002-C-FC01-P-013010)의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

- [1] Geldart, D. and Rhode, M. J., "Survey of Current World-wide Research in Gas Fluidization," *Powder Technol.*, Vol. 71, 1992, pp. 1-46.
- [2] Grace, J. R., "High-velocity Fluidized Bed Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 45, No. 8, 1990, pp. 1953-1966.
- [3] Rhode, M. J. and Geldart, D., "A Model for the Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.*, Vol. 53, 1987, pp. 155-162.
- [4] Li, Y. and Kwauk, M., "The Dynamics of Fast Fluidization," in Fluidization, ed. by Grace, J. R. and Masten, J. M., *Plenum Press*, New York, 1980, pp. 537-544.
- [5] Kobro, H. and Brereton, C., "Control and Fuel Flexibility of Circulating Fluidized Bed," CFB Technol., ed. by Basu, *Pergamon Press*, New York, 1986, pp. 263-272.
- [6] Tang, J. T. and Engstrom, F., "Technical Assessment on the Ahlstrom Pyro Flow Circulating and Conventional Bubbling Fluidized Bed," *Proc. of the 1987 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion*, New York, 1987, pp. 38.
- [7] 한국전력공사, 순환유동층(CFB) 보일러 설계 및 제조 기술개발에 관한 연구(I), 1992.
- [8] 한국전력공사, 순환유동층(CFB) 보일러 설계 및 제조 기술개발에 관한 연구(II), 1993.
- [9] Haider, A. and Levenspiel, O., "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," *Powder Technol.*, Vol. 58, 1989, pp. 63-70.
- [10] IEA, World Energy Outlook, 1995.
- [11] Hannes, J. P., Bleek, C. M. and Renz, U., "The IEA-Model for Circulating Fluidized Bed Combustion," *Proceedings of the 13th Int. Cong. on Fluidized Bed Combustion*, Orlando, FL, USA, 1995, pp. 287-296.
- [12] Davidson, J. F. and Harrison, D., "Fluidized Particles," *Cambridge University Press*, New York, 1963.
- [13] Darton, R. C., LaNauze, R. D., Davidson, J. F. and Harrison, D., "Bubble Growth due to Coalescence in Fluidized Beds," *Trans -IChemE*, Vol. 55, 1977.
- [14] Johnsson, F., "Fluid Dynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds - with Applications to Boilers," Ph.D, Chalmers University, Göteborg, Sweden, 1991.
- [15] Wen, Y. C., and Chen, L. H., "Fluidized Bed Phenomena: Elutriation and Entrainment," *AIChE Journal*, Vol. 28, 1982, pp. 117-128.
- [16] Kunii, D. and Levenspiel, O., "Fluidization Engineering," 2nd ed., *Butter-worth-heinemann*, 1991.
- [17] Seiter, M., "Radiale Feststoffkonzentrationen und axiale Feststoffgeschwindigkeit in wandnahen Bereichen zirkulierender Wirbel-schichtfeuerungen," Ph.D, Erlangen, Germany, 1990.
- [18] Rhodes, M. and Cheng, H., "Flow of Dilute Gas-Particle Suspensions," *AIChE J.*, Vol. 38, No. 12, 1992, pp. 1913-1915.
- [19] Merrick, D. and Highley, J., "Particle Size Reduction and Elutriation in a Fluidized Bed Process," *AIChE Symp. Ser.*, Vol. 70, No. 137, 1974, pp. 366-378.
- [20] Krambrock, W., "Die Berechnung des Zyklonabscheiders und praktische Gesichtspunkte zur Auslegung," *Aufbereitungs Technik*, Vol. 12, No. 7, 1971, pp. 391-401.

- [21] Kruse, M. E., Hartge, U. and Werther, J., "Radial Gas Mixing in the Upper Dilute Core of a Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.*, Vol. 70, 1992, pp. 293-301.
- [22] Anderson, T. B. and Jackson, R., "A Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds," *I & EC Fundam.*, Vol. 6, 1967, pp. 527-534.
- [23] Ogawa, S., Umemura, A. and Oshima, N., "On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials," *J. Appl. Math. Phys.*, Vol. 31, 1980, pp. 483.
- [24] Manninen, M., Taivassalo, V. and Kallio, S., "On the Mixture Model for Multiphase Flow," Technical Research Centre of Finland, *VTT Publications*, 1996, pp. 288.
- [25] Gidaspow, D., Bezburuah, R. and Ding, J., "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds; Kinetic Theory Approach," *Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, 1992, pp. 75-82.