

순환유동층에서 Solid Mass Inventory에 따른 수력학적 특성 연구

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

Hydrodynamic Characteristics of Circulating Fluidized Bed in Different Mass Inventories

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

Abstract

This paper discusses hydrodynamic characteristics of cold circulating fluidized bed(CFB) in different solid mass inventories. Operating parameters of solid mass inventory, primary air and J-valve fluidizing air were varied to find out the effect on the flow fluidization pattern. Experimental measurements were made in a 3m tall CFB that has 0.05m riser diameter and black silica-carbonate of particle sizes from 100 μ m to 500 μ m were employed as the bed material. The operating conditions of superficial gas velocity and J-valve fluidizing velocity were in the ranges of 1.39~3.24 m/s and 0.139~0.232 m/s respectively. The axial solid fraction and solid circulation rate of CFB were observed and compared with modelling through IEA-CFBC Model and commercial CFD code.

Key Words: CFB, Hydrodynamic, Mass Inventory, Fluidizing Air Rate, CFD, Modelling

1. 서론

1970년대 오일쇼크 이후 석유 및 가스자원의 지역적 편재성과 매장의 유한성으로 인해 대체에

너지원으로 세계적으로 고르게 분포되어 있고 매장량 또한 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 대체에너지원인 석탄 및 저급원료의 이용에 다양한 연료 적용성을 가진 유동층 연소기술이 도입되었고 연소기술의 향상을 통한 순환유동층 기술개발을 통해 유동층 기술의 진보와 대형화를 이루면

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 CT(Clean Tech.) 연구단

*** 한국전력연구원 발전연구실

† 연락처자, hwangjh@yonsei.ac.kr

서 응용과 보급이 되어왔다.

순환유동층의 수력학적 특성에 관한 기초 연구는 Geldart와 Rhode[1], Grace[2] 그리고 Rhode와 Geldart[3] 등에 의해 유동층내 축방향 압력분포와 공극률 그리고 고체 체류량과 2차공기의 단계별 공급 등 주입방법을 변화시킴에 따른 연구 등이 수행되어져 왔으며, 이후 고속 유동층(fast fluidization bed)의 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 정의하였으며, 기포유동층으로부터 고속유동층의 구별은 농후상과 희박상 사이의 전이영역의 두께로써 구별하였다. 따라서 유동층내의 고체량에 따른 고체 분율 등은 실제 유동해석 뿐 아니라 고체 순환량, 열전달, 그리고 반응 등을 계산하는데 있어서 중요한 자료로 사용되며, 특히 이러한 값의 변화에 따른 연소 성능의 해석 및 예측은 매우 중요하다(Kobro와 Brereton, Tang과 Engstrom[5,6])

본 연구는 순환유동층의 주요 운전 변수인 유동물질의 mass inventory에 따른 순환 유동층 내에서의 수력학적 특성을 파악하여 이를 바탕으로 운전 변수를 예측하는 것이 주 목적이다. 실험실 규모의 순환유동층 실험 데이터와 모델링의 IEA-CFBC 프로그램과 상용 CFD 코드를 사용하여 순환유동층 내에서 수력학적 특성을 평가 및 비교하기 위한 기초 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2개의 분산판(distributor)과 상승부(riser), 2개의 고체포집부(cyclone), 유동사재순환부(downcomer), 루프셀(loopseal) 등 크게 5부분으로 나누어진다. 순환유동층은 순환하는 고체의 흐름을 원활하게 할 수 있도록 아크릴관(acryl column)으로 제작을 하였고, 상승부는 직경 50mm, 높이 3000mm이다.

순환유동층 상승부에 사용한 1차 공기 분산판(①)은 내경 3mm의 오리피스를 8.33mm 정방간격으로 총 21개를 배열하고, J-밸브의 유동화 공기 분산판(②)은 내경2mm 오리피스를 7.5mm 정방간격으로 총 45개의 구멍을 갖는 다공형 분산판을 사용하였으며 미세철망을 깔아 유동사가 분산판하부로 유실되는 것을 방지하였다.

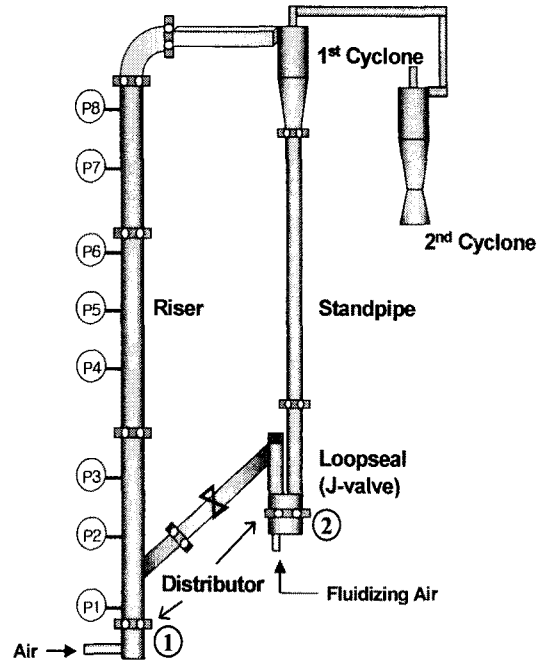


Fig. 1 Schematic diagram of cold CFBC

루프셀(Loopseal)은 상업용 CFB 보일러에서 입자 재순환 시스템의 비기계적 밸브 중에서 가장 많이 쓰이는 J-valve를 선택하였다.[7]

주어진 입자량의 순환에 적절하도록 내경 60mm, 높이 700mm의 원통으로 중간에 두께 2mm의 가로막(partition)을 설치하여 J-밸브를 제작하였다.

유동사의 상승부로의 재유입을 위해 루프셀과 상승부 사이에 재순환 부분은 45°의 경사를 이루며 연결이 되었으며, 시동시 발생하기 쉬운 하강부로의 역류를 제어하기 위해 downcomer[8]에 오리피스와 고체 순환을 조절하기 위한 별도의 수동 밸브를 설치하여 순환유동층의 원활한 순환을 유지했다.

상승부 내부의 압력을 측정하기 위해 상승부 벽면에 300mm 간격으로 압력측정 탭이 설치되었으며 측정된 압력은 데이터 인식 프로그램 DAQ-100을 통해 컴퓨터로 출력되어 저장되었다.

2.2 실험조건 및 방법

본 연구에 사용된 유동물질은 흑색의 silica carbonate(SiC)로 입자의 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 2는 입자크기에 따른 입자종말속도를 나타내며, 사용된 입경분포는 100~500 μ m 범위로

Table 1. Properties of bed materials

Properties	Value
Mean diameter(μm)	197
Superficial density(kg/m^3)	1,901
True density(kg/m^3)	2500
Minimum fluidization velocity(m/s)	9.238E-03
Terminal velocity(m/s)*	2.305

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

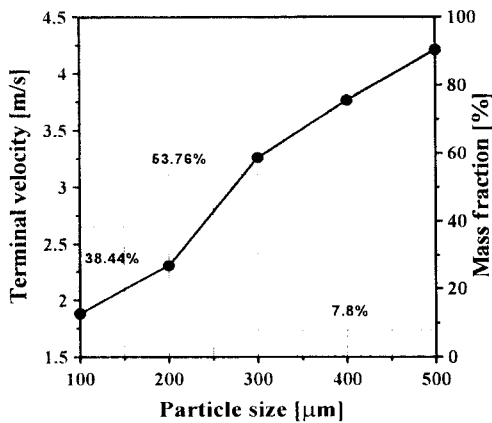


Fig. 2 Settling terminal velocity on the particle size

100~150 μm 이 38.44%, 150~300 μm 이 53.76%, 300~500 μm 이 7.8%에 해당한다.

순환 유동층의 유동 특성은 상승부에 설치되어 있는 압력탭으로부터 압력을 측정하여 다음의 식 (1)을 이용하여 높이별 평균 고체분률($1-\epsilon = \epsilon_s$)을 계산한다.

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

윗 식에서 두 지점 사이(L)의 압력차(ΔP)를 알면, 고체분률($1-\epsilon = \epsilon_s$)을 알 수 있고, 이로부터 농후상과 회박상 그리고 전이영역에 대한 구분은 고체 분포와 공극률을 기준으로 추정할 수 있다. ρ_s , ρ_g 는 각각 고체와 기체의 밀도(kg/m^3)이며, g 는 중력가속도(m/s^2)를 나타낸다.

상승부에서 고체량(inventory)은 사이클론과 유동사 재순환장치를 통해 순환되는 부유하는 유동물질(elutriated or entrainment material)의 양에 영향을 미친다.

Table 2. Experimental conditions

Variables	Range
Bed material (kg)	2, 2.5, 3
Fixed bed height (m)	0.33, 0.47, 0.53
J-valve bed height (m)	0.24, 0.30, 0.35
Riser air flow (lpm)	150~350
J-valve Fluidizing air flow(lpm)	15~25

유동물질은 상승부 내에서 질량총량(mass inventory) 변화에 따른 순환 유동층내 수력학적 특성을 알아보기 위해 흑색의 실리카 카보네이트(Silica Carbonate; SiC)를 2kg, 2.5kg, 3kg로 변화시켜 실험하였으며, 상승부 분산판을 통해 공기 유량을 150 ~ 350 lpm의 범위로 변화시키며 정상상태(steady state)를 유지하며 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

J-밸브 유동화 공기는 경험적 운전조작에 의해 얻어진 값으로 대략 15~25 lpm의 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 유동층부문위원회 모델링 그룹에서 개발한 1.5차원 순환유동층 모델링 프로그램인 IEA-CFBC 모델[11]과 상용 CFD 코드인 FLUENT 6을 사용하여 순환유동층의 수력학적 특성을 해석하였다.

3.1 수치해석 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.[12] 다음 식(2)는 다상유동에 대한 연속식(continuity)이다.

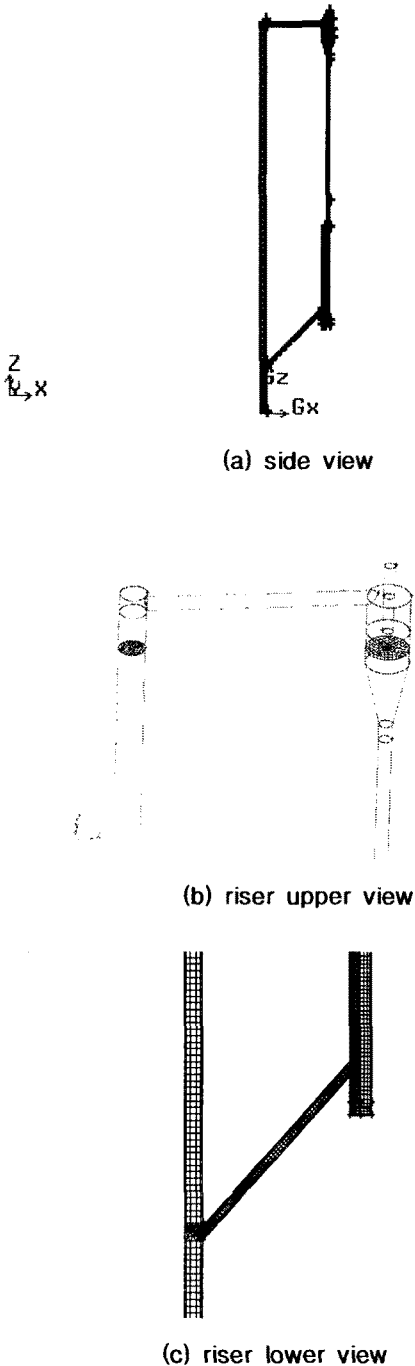


Fig. 3. 3-D mesh generation of CFB

Table 3. Boundary Conditions for Calculation

Zone (Name)	Type	Conditions	
		Velocity (m/s)	Volume fraction
Primary air	Velocity inlet	2.78	0.2
Fluidizing air	Velocity inlet	1	0.2
Outlet	Pressure	-	0.001

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} \left(\sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} - \alpha_q \frac{d_q \rho_q}{dt} \right) \quad (2)$$

여기서, α_q 는 q상에서 체적 분률(volume fraction)을 나타내고, \vec{v}_q 는 q상에서의 속도(m/s), \dot{m}_{pq} 는 p에서 q상까지의 물질전달을 의미한다.

다상(multiphase)에 대한 운동량 방정식은[13] 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) &= -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} \\ &+ \alpha_s \rho_s (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s}) \\ &+ \sum_{l=1}^n (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, p_s 는 입자상에 대한 고체 압력이며, \vec{F}_s 는 외부 힘(body force)이고, $\vec{F}_{lift,s}$ 는 양력(lift force)이며, $\vec{F}_{vm,s}$ 는 가상 질량힘(virtual mass force)을 나타낸다. $K_{ls}(=K_{sl})$ 는 기체상(l)과 고체상(s) 사이의 운동량 교환 계수이고, n 은 존재하는 총 상(phase)의 수이다.

기체와 고체간 상호작용(phase interactions)에는 고체와 기체의 속도차(slip velocity)에는 Manninen 등[14]이 제안한 값을 사용하였으며, 입자간 항력계수는 Gidaspow[15]에 의해 제안된

값을 사용하였다. 그리고 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델이 적용되었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4 ~ Fig. 6은 유동물질이 원활하게 순환이 이루어지기 시작하는 속도 범위의 유속에서 각 질량총량(mass inventory) 별 상승부 내 압력분포를 나타낸다. Fig. 4은 2.32 m/s의 기체 속도를 유지하면서 각 mass inventory 별 압력분포를 나타내는데, 상승부 하단은 초기 가속영역을 보이고, 0.5 ~ 1.5 m 높이에서는 농후 영역과 전이 영역을 나타내며, 1.5 ~ 3 m 높이에서는 압력분포가 일정한 상태로 유지되는 희박전달 영역을 나타내고 있다. 전체적인 압력분포에서 알 수 있듯이 고속 유동화(fast fluidization) 상태에 도달하기 이전인 난류 유동화(turbulent fluidization) 상태를 보여준다. Fig. 5은 상승부에 2.78 m/s의 기체 속도를 공급했을 때의 압력분포로 Fig. 4와는 달리 riser 하단 영역의 가속지역을 제외한 0.5 ~ 3 m 구간에서 고속의 희박전달 영역으로 압력분포가 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 이전 유속 2.32 m/s의 난류 유동화 상태에서 2.78 m/s의 고속 유동화 상태로의 전환으로 볼 수 있다. Fig. 6은 기체 유속을 3.24 m/s로 유지했을 때의 mass inventory 별 압력분포로 Fig. 5와 비슷한 유형을 보이며 고속 유동화 모드를 나타내고 있으나 유속의 증가로 인해 상승부 하단영역에서 압력이 감소함을 보인다.

Fig. 7은 초기 유입 가스속도의 변화에 따른 mass inventory 량에 대한 순환유동층 상승부 내에 고체 순환율을 나타낸다. 가스속도가 2.32 ~ 3.24 m/s 범위에서 고체가 원활하게 순환하는 것을 나타내고 있으며, 가스 속도가 증가할수록 순환율도 증가한다.

Fig. 8은 2kg와 2.5kg의 mass에 따른 초기 유입 가스속도별 고체 순환율을 나타낸다. 유속과 mass inventory가 클수록 고체 순환량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4 ~ Fig. 8은 실험 결과의 수력학적 특성을 mass inventory 변화에 따라 살펴 보았다. 여기서 실험실 규모의 소형 순환유동층 연소로에서 유동물질 주입량은 2.5kg이 실험결과와 경험적으로 적당한 것으로 판단하여 주어진 실험 조건에서 나온 결과를 모델링의 입력값으로 사용하여 다음 Fig. 9 ~ Fig. 10에서 비교하고자 한다.

Fig. 9와 Fig. 10은 초기 유입 가스속도를 고속 유동화 상태를 유지하는 2.78 m/s로 입력값을 주었을 때 실험과 모델링(IEA-CFBC, CFD)은

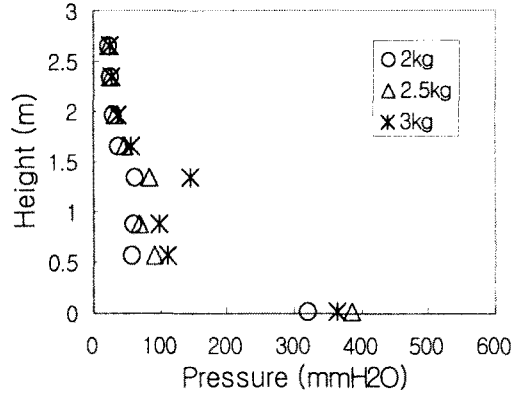


Fig. 4 Pressure profiles of different mass inventory at $u_0=2.32\text{m/s}$

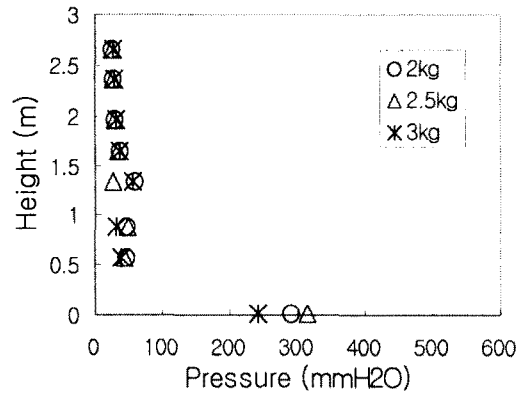


Fig. 5 Pressure profiles of different mass inventory at $u_0=2.78\text{m/s}$

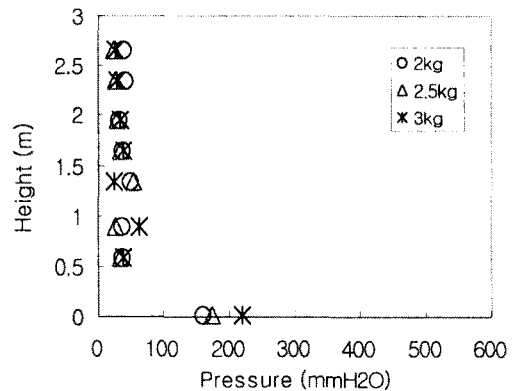


Fig. 6 Pressure profiles of different mass inventory at $u_0=3.24\text{m/s}$

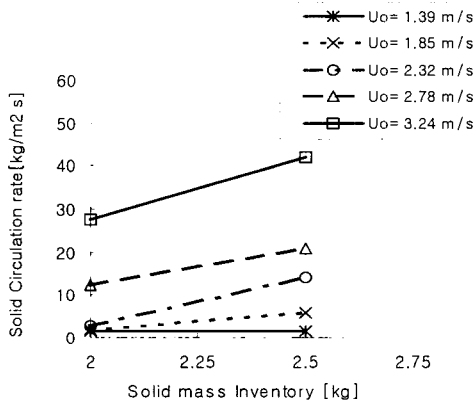


Fig. 7 Solids circulation rate of different mass inventory at variable gas velocity

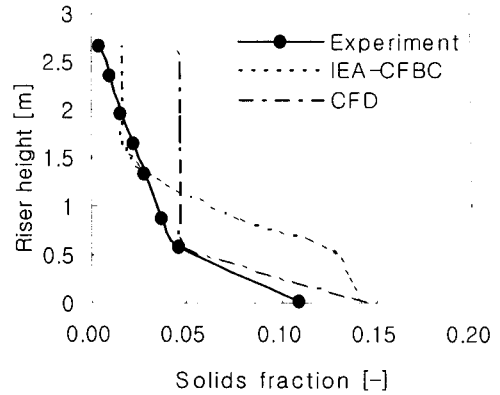


Fig. 10 Axial solid volume fraction between experiment and calculation

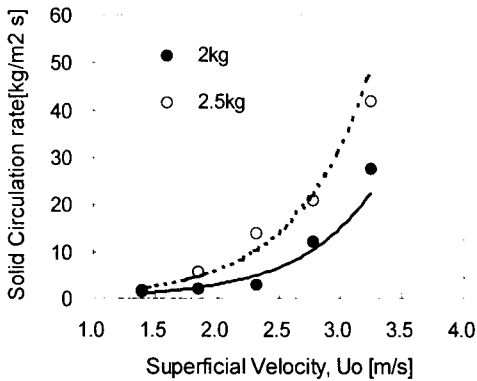


Fig. 8 Solids circulation rate of variable gas velocity at different mass inventory

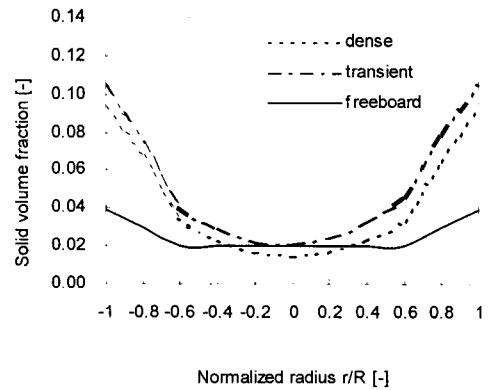


Fig. 11 Radial solid volume fraction in the different position at riser I.D. 5cm (CFD)

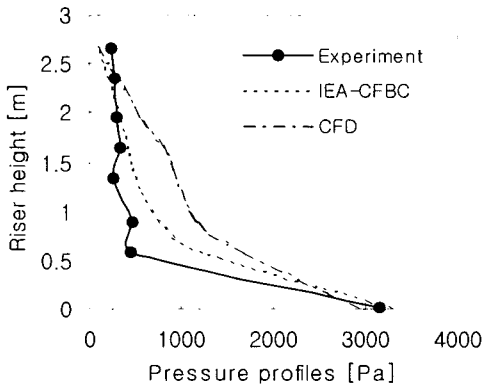


Fig. 9 Pressure profiles between experiment and calculation

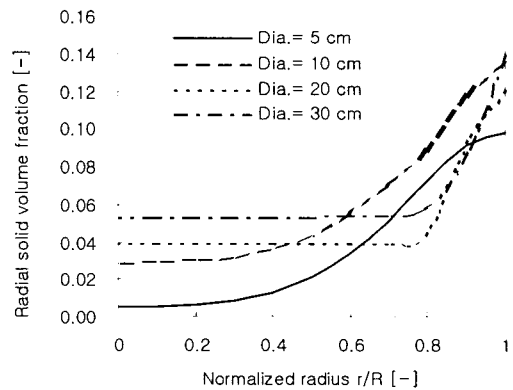


Fig. 12 Radial solid volume fraction in the different riser diameters (CFD)

비교한 것이다. Fig. 9는 축방향에 대한 압력분포를 나타낸 것으로 실험과 IEA-CFBC 해석은 거의 일치하고 CFD 해석도 일치하는 경향을 볼 수 있다. Fig. 10은 축방향 고체 분율을 비교한 값으로 riser 하단 농후영역에서는 실험과 CFD 해석이 일치할 하고, 상단 희박영역은 실험과 IEA-CFBC 해석이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

앞서 실험과 IEA-CFBC, CFD를 통해 기존 실험실 규모의 상승부 직경 5cm에서 수력학적 특성을 비교해 보았다. 일정 3m 높이의 상승부 직경을 변화시켰을 때의 반경방향 분포를 알아보고자 CFD를 통해 계산을 해보았다. Fig. 11은 우선 5cm 직경을 가진 상승부 높이별 반경방향 고체 분율을 나타낸다. 실험실 규모와 같은 형상으로 위치는 경험적으로 얻어진 농후영역과 진이 영역, 희박전달영역으로 나뉘는데 각각 분산관 위에서 축방향 200mm, 600mm, 2300mm로 하였다. 새 지점에서 core-annulus 영역이 존재함을 볼 수 있으며, 농후와 진이 영역은 선명한 포물선 형태를 이루고 있으며, 희박전달 영역은 약간 편평한 형태를 이룬다. Fig. 12는 CFD의 결과로 상승부 직경별 반경방향의 고체 분율을 나타낸다. 상승부 직경이 증가하므로 반경방향 고체분율 분포에서 core-annulus 영역이 확연히 드러나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 상승부의 고체 분율을 나타낸 것으로 core-annulus 영역이 존재함을 볼 수가 있다. Fig. 15는 유동물질인 모래(sand)가 재순환 부분을 통해서 상승부로 다시 순환하는 것을 가시적으로 볼 수 있다.

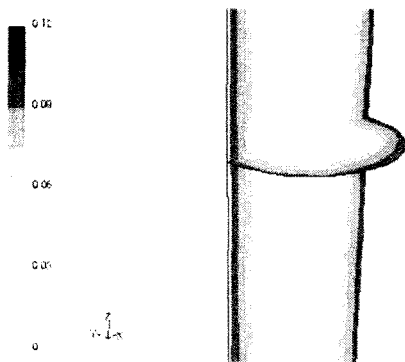


Fig. 13. Contours of riser solid volume fraction(CFD)

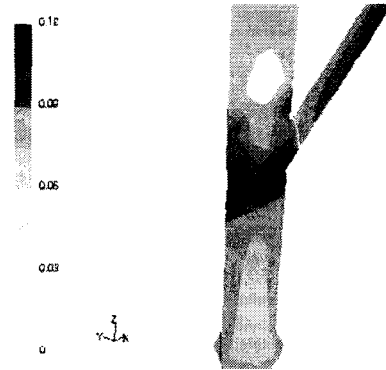


Fig. 14. Contours of riser solid volume fraction(CFD)

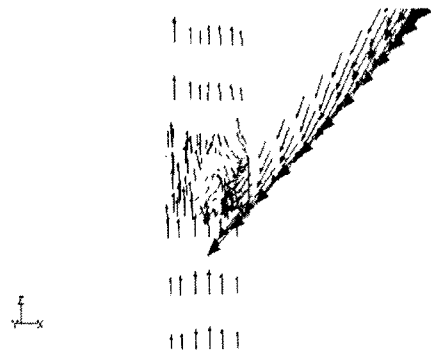


Fig. 15. Sand velocity colored by sand velocity magnitude, (m/s)

5. 결론

Mass inventory별 순환 유동층 내에 수력학적 특성에 대한 실험과 IEA-CFBC 모델과 상용 CFD를 통해 모델링을 수행하였다.

1. 2kg, 2.5kg, 3kg 별로 공기 유속을 달리 주었을 때 공탑속도 2.78m/s이 순환유동층이 운전되기에 적절한 속도임을 알 수 있다.

2. Mass inventory 변화에서는 2.5kg에서 가장 순환유동층 내에서 고체순환율이 좋음을 보였다.

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

4. 상용 CFD 코드는 실험과 비교하여 축방향 고체분율에 있어 잘 일치함을 볼 수 있으며 이는 3차원 해석에 기인한다고 본다.

5. 상용코드를 이용한 3차원 반경방향 해석에 있어서도 core와 annulus 영역의 명확한 구분을 볼 수 있으며, 상승부 내경이 작을수록 annulus 영역이 두껍고 고체 분포가 포물선형을 이루며, 희박한 부분에서 이 반경분포가 다소 편평한 것을 볼 수 있다.

후기

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

참고문헌

- [1] Geldart, D. and Rhode, M.J., 1st Int. Conference on CFB, Halifax, 1985
- [2] Grace, J.R., The Canadian J. of Chem. Eng., Vol. 64, p. 353, 1986
- [3] Rhode, M.J. and Geldart, D., Powder Technol., Vol. 53, p. 155, 1987
- [4] Li, Y. and Kwauk, M., "The Dynamics of Fast Fluidization," in Fluidization, eds. by J.R. Grace and J.M. Masten, Plenum Press, New York, pp. 537-544, 1980
- [5] Kobro, H. and Brereton, C., "Control and Fuel Flexibility of Circulating Fluidized Bed," CFB Technol., ed. by Basu, Pergamon Press, New York, pp. 263-272, 1986
- [6] Tang, J.T., and Engstrom, F., "Technical Assesment on the Ahlstrom Pyro Flow Circulating and Conventional Bubbling Fluidized Bed," Proc. of the 1987 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Ed by J.P. Mustonen, New York, p. 38, 1987
- [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, pp. 63-70, 1989
- [10] IEA, World Energy Outlook, 1995
- [11] Hannes, J.P., Bleek, C.M., Renz, U., "The IEA-Model for Circulating Fluidized Bed Combustion," Proceedings of the 13th Int. Cong. on Fluidized Bed Combustion, (K.J. Heinschel, ed.), Orlando, FL, USA pp. 287-296, 1995
- [12] Anderson, T.B., Jackson, R., "A Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds," I & EC Fundam., Vol. 6, pp. 527-534, 1967
- [13] Ogawa, S., Umemura, A., Oshima, N., "On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials", J. Appl. Math. Phys., Vol. 31, p. 483, 1980
- [14] Manninen, M, Taivassalo, V., Kallio, S., "On the Mixture Model for Multiphase Flow", Technical Research Centre of Finland, VTT Publications p. 288, 1996
- [15] Gidaspow, D., Bezburuah, R., Ding, J., "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach," Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, pp. 75-82, 1992