실험실 규모 순환유동층 연소로에서 2차공기 주입이 냉간유동에 미치는 영향

장석돈*· 라승혁*· 황정호*· 강경태**

Secondary Air Injection Effect on Cold Flow in a Laboratory-scale Circulating Fluidized Bed Combustor

S. D. Jang, S. H. La, J. H. Hwang and K. T. Kang

Key Words: CFBC(순환유동층), Secondary Air(2차공기), Cold Flow(냉간유동)

Abstract

Circulating Fluidized Bed Combustor(CFBC) has been used for the incineration of waste sewage sludge and for the power generation. In this study hydrodynamic characteristics of two phase flow have been studied in a riser section of CFBC. A lab-scale riser is designed and SiC (Geldart type B) is used for solid particles. Experiments are performed by controlling the fluidization parameters including superficial velocity and secondary air to primary air ratio for determination of solid holdup profiles in the riser. Superficial velocities of each fluidization regime are well agreed with results predicted by a theoretical model. The results show that the axial solid holdup distributions calculated by measuring differential static pressures in the riser are found to show a basic profile described by a simple exponential function. Our flow regime during experiments mainly belongs to fast fluidization regime for particle size of 300μm. As the SA/PA ratio increases, solid holdup in the lower dense region of the riser increases.

1 서 론

최근 여러 산업분야에서 그 유용성을 인정받고 있는 유동층 연소로에서는 미세 입자의 유동매체를 연소로 내에 채우고 연소공기를 로의 하부로부터 주입하여 끓는 액체와 같은 유동층을 형성시키며 투입된 폐기물 또는 연료는 유동매체와 함께 유동하면서 연소된다. 피연소물이 유동층 내에서 유동상태로 있기 때문에 혼합이 잘되고 유동매체와의 접촉빈도가 커져 다른 방식에 비해 연소속도가 빠르다. 유

* 연세대학교 기계공학과
** 생산기술연구원

동매체의 빠른 순환으로 유동층 전체가 거의 등온으로 유지되어 온도에 따라 연료량을 조절하여 운전상태를 변화시키기가 쉬우며 로내에 기계적인 구동부가 없어 고장이 거의 없다. 그리고 유동매체의 냉각 속도가 느려 짧은 시간에 정지, 가동을 예열없이 할 수 있으며 특히 공해물질 배출면(NOx, SOx 등)에서도 기존의 방식보다 우수한 장점을 가지고 있다.

유동층 연소로는 유동화의 구조 및 특성에 따라 기포유동층(BFB, Bubbling Fluidized Bed)과 순환 유동층(CFB, Circulating Fluidized Bed)으로 나눌 수 있다. 순환 유동층은 유동화공기의 속도가 2~7m/s 정도로 기포유동층에 비해 높아, 고속의 공기 유속에 의해 입자가 순환된다. 유동물질의 순환으로 연소로의 모든 부분으로 연소영역이 확대되고, 난분해성 물질의 체류시간을 증대시켜 충분히 분해되게 하는 장점이 있다. 입자의 순환으로 유동층 전체가 고른 온도 분포를 보이므로 연소온도가 낮아져서 Thermal NOx 배출을 억제할 수 있으며, 연소효율이 높다. 소각로나 발전소 보일러에 사용되는 유동물질은 크기가 0.5 mm 정도의 미세입자로 열충격에 강하고 융점이 높고 내마모성이 있으며 비중이 작고 입도 분포가 균일한 불활성 물질이어야 하는데, 주로 모래가 사용된다(90-650 μm, 2.6 g/ cm^3). 이는 Geldart Group B에 해당된다.

최근에는 유동층 소각로 Riser에 2차 공기(secondary air)를 주입하는 경우가 빈번한데 이는 첫째, 연소후 배출되는 NOx, CO등의 유해가스(emission)를 제어하기 위한 것이고[1-3], 둘째는 연소 과정에서 혼합(mixing)을 증대시켜 효율을 높이기 위함이다. 또한 연소로내의 체류시간을 증가시켜 반응시간을 충분하게 하는 목적도 있다. 유동층 연소로가 약 850℃에서 운전되므로 Thermal NOx는 형성되지 않지만 Fuel NOx가 발생이 되며 CO의 발생 비율이 높아지기 때문에 이들 방출을 조절할 필요가 있다. 2차 공기 주입시 로내의 혼합율을 향상시키기 위해 로의 직경방향(횡방향)으로 주입하기도 하며, 또한 횡단면의 원주방향으로 주입하여 선회류가 형성되기도 한다.

이와같이 Riser 부분으로 공급되는 2차 공기의 수력학적 영향을 살펴보면 주입위치에 따라서 유동화 영역에 결정적인 영향을 미친다. 2차 공기의 주입은 난류영역에서 고속영역으로의 천이를 야기한다[4]. 2차 공기 주입부의 아래 영역에서는 일반적으로 고체밀도와 난류강도가 증가하는 반면 그 위에서는 상대적으로 고체밀도가 감소하며 core-annulus 유동구조를 가지는 고속영역 또는 희박유동 상태가 된다[5]. 또한 2차 공기 주입비가 증가할수록 난류영역에서 입자 체류량 및 체류시간이 증가하며 2차 공기 주입위치에 따라서 Riser 부분에서 공극율 분포(voidage profile)가 달라진다[4]. 주입형태에 따른 유동특성 연구는 일반적으로 접선방향 주입이 반경방향 주입보다 강한 와류를 형성하여 유동사의 체류시간과 체류량 측면에서 유리함을 알 수 있다[6].

2차공기 주입 관련 기존의 연구는 다음과 같다. Yitian 등[7]은 순환유동층에서 층의 압력 강화와 전체 체류량이 2차 공기비를 증가 시킬수록 증가한다는 것을 제시하였다. Cho 등[8]은 2차 공기 주입비와 주입부 위치, 주입형태에 따라 순환 유동층에서 축방향 고체 체류량 분포에 2차 공기 주입 효과가 있다는 것을 보여주었다. Wang 등[9]은 순환유동층 실험을 통해 2차공기비와 주입위치가 가장 중요한 설계 변수라는 것을 제시하였다. Zijlma 등[10]은 순환유동층에서 2차공기의 주입이

고체 체류량 분포와 고체 순환율을 변화시킨다는 것을 보여 주었다. Kim 등[11]은 "closed loop" 순환 유동층에서 고체 순환 현상에 있어 2차 공기의 영향을 분석하였다. Xing 등[12]은 Riser내에서의 2차 공기 주입 방법중 선회 유동시의 입자 속도와 고체 체류량의 변화를 실험하였다. Arena 등[4]은 순환유동층에서 두가지 다른 2차 공기 주입 위치에 따른 압력과 고체 체류량을 측정하였다.

위에서 설명한 바와 같이 순환 유동층에서의 2차 공기 주입에 관하여 연구가 진행되었으며 수력학적 특성에 관한 그 성과도 있었지만 실제 설계와 운전에 적용하기 위한 정량적인 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순환 유동층 연소로에서의 2차 공기 주입에 의한 긍정적인 효과를 검증하기 위하여 냉간 유동 실험을 수행하였다. 전체 시스템의 특성을 좌우하는 Riser 부분에서의 주요 시스템 변수별 수력학적 특성들을 소개, 운전조건을 파악하고 특히 2차 공기 주입비에 따른 유동영역의 변화를 실험적으로 파악함을 목적으로 하였다.

2 순환유동층 수력학 이론

2.1. 유동화 모드

시스템 내에 유동물질을 채우고 공기를 하부로부터 공급하면 유동물질이 끓는 액체와 같은 거동을 나타낸다. 유동층의 평균 밀도보다 밀도가 낮은 물질은 유동층 상부에 뜨며, 유동층 상부표면은 수평을 유지하고, 높이가 다른 두 개의 유동층이 연결되면 유동물질이 흘러 높이가 같아진다. 유동층은 공기의 속도에 따라 유동화 특성이 달라진다. 속도가 매우 낮은 경우 유동물질의 움직임이 거의 없다가 속도가 증가함에 따라서 최소유동화상태(mf: minimum fluidization)를 거쳐서 기포유동층(bf: bubbling fluidization), 난류유동층(tf: turbulent fluidization), 고속유동층(ff: fast fludization) 그리고 희박상 유동층(pc: pneumatic condition)으로 변화한다.

Fig. 1은 공기속도가 점차적으로 증가했을 때 압력 강화가 일어나는 것을 보여주는 그림이다. u는 공탑속도(superficial velocity)라고도 불리우며 주입공기의 유량을 시스템 단면적으로 나눈 값이다. 처음에는 층의 형상은 변하지 않고 압력강하는 공기 속도에 비례하여 초기 유동화 부분에서 최대값에 도달한다. 최소 유동화 속도, u_{mf}, 이상으로 속도를 증가시키면 층의 압력강하는 일어나지 않는다. 충분히 높은 유동화 속도에서, 입자들은 층에서 이탈함으로써 기체와 함께 비말동반(entrainment)하게 될 것이다. 유동화 속도를 더 증가시키면 더 많은 입자가 점차적으로 비말동반하게 되어 시스템에서 이탈하게 되므로 층의 압력강하는 마침내 감소한다.

다음은 유동화 모드별 속도를 소개한다. 이들 모두 경험적으로 얻어진 결과이다. Fig. 1의 최소유동화속도 u_{mf}는 Grace[13]에 의해 다음과 같이 제시되었다. Geldart Group B의 경우 최소유동화조건은 최소기포조건과 같다.

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu_g} = \sqrt{27.2^2 + 0.0408 Ar} - 27.2 \quad (1)$$

여기서 ρ_g와 μ_g는 공기의 밀도와 점성계수를, d_p는 입자크기를 의미한다. 여기서는 입자가 구형이라고 가정한다.

여기서 Ar은 Archimedes 수로 다음과 같

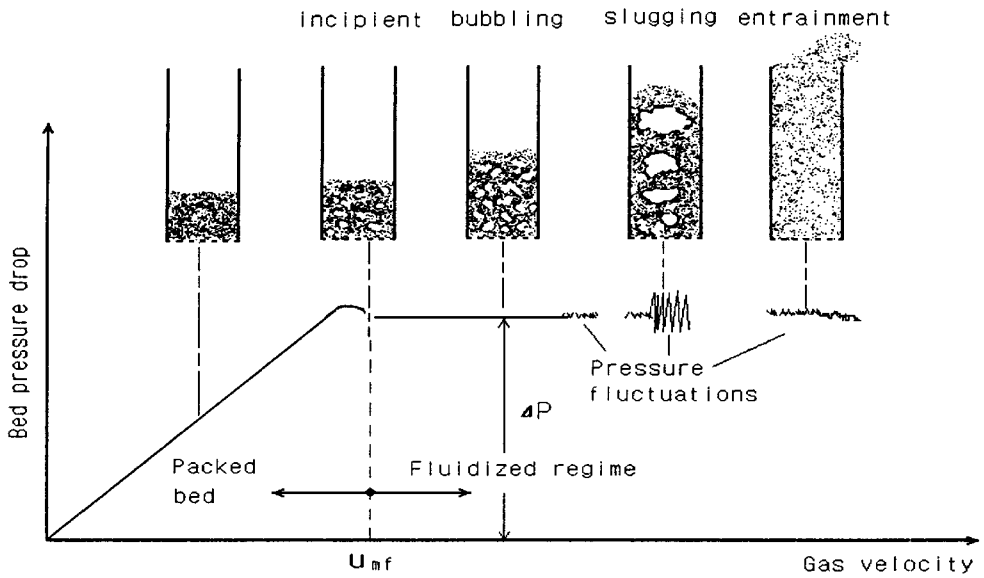


Fig. 1 Fluidization regime

이 정의된다.

$$Ar = \frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g)d_p^3 g}{\mu_g^2} \quad (2)$$

기포유동층에서 난류 유동층으로의 천이가 시작되는 속도($u = u_c$)와 천이가 끝나는 속도($u = u_k$), 그리고 난류영역에서 고속영역으로의 천이속도($u = u_{tr}$)에 대해 다음과 같은 경험식이 제시되었다.

$$Re_i = m_i Ar^{n_i} \quad (i = c, k, tr) \quad (3)$$

상수 m_i, n_i에 대해서는 여러 연구자들에 의해 제안되었는데 본 논문에서는 Table 1의 상수들을 사용하였다.

Table 1. Constants

i	m	n	reference
c	0.7	0.485	Lee and Kim[14]
k	1.41	0.56	Horio[15]
tr	2.916	0.354	Lee and Kim[16]

난류영역에서 고속영역으로 바뀔 때 많은 양의 유동매체가 Riser에서 이탈한다. 이때부터 소위 순환유동층(CFB)이라 불리운다.

2.2 CFB Riser 내부에서의 축방향 고체 체류량 (solid holdup) 분포

축방향 고체 체류량을 구하기 위한 방법에는 복잡한 CFD 해석, Core-Annulus 모델이 있지만 여기서는 고속 유동화 모드에 대해서 Lumped 모델[17]을 소개한다. 이 Lumped 모델은 단순한 반면 반경방향 분포에 대한 정보는 알려주지 않으며 실험등을 통해 몇몇 인자에 대한 정보가 사전에 필요하다는 단점이 있다. 모델에 의하면 Riser는 Fig. 2와 같이 dense lower region과 dilute upper region의 두 영역으로 나뉜다. 전자는 마치 기포유동층과 같은 성격을 띄며 후자는 다시 acceleration zone과 fully developed zone으로 구분된다. ε_1은 dense lower region에서의 평균 solid

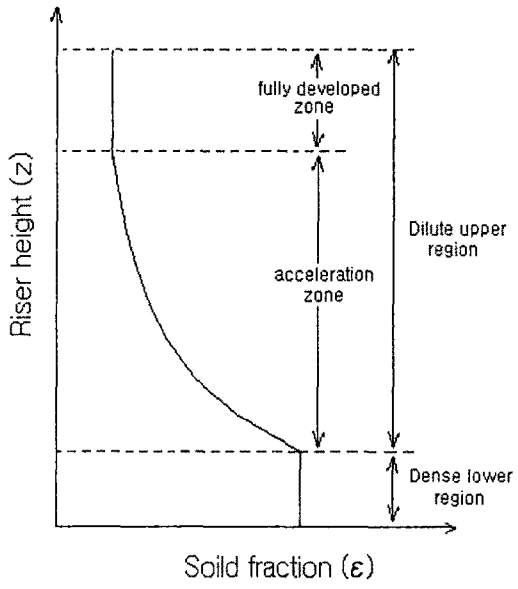


Fig. 2 Variation of void fraction with height in the riser

fraction(holdup)인데 Riser내의 유동매체 무게를 M, 단면적을 A, 베드의 높이(순환유동층을 일으키지 않을 정도의 u에 대해)를 L이라고 할 때 다음 식으로 구할 수 있다.

Kunii와 Levenspiel[18]에 의하면 ε_1이 0.16-0.2 일 경우에 dilute upper region에서 고속유동층이 형성된다고 한다.

$$M \approx \rho_p A L \varepsilon_1 \qquad (4)$$

acceleration zone과 fully developed zone에 대한 이론은 다음과 같이 요약된다.

acceleration zone

축방향 solid holdup분포 $\varepsilon(z)$는 다음 식과 같은 곡선으로 표시된다.

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon(z)}{\varepsilon^* - \varepsilon_1} = \exp(-az) \qquad (5)$$

a는 감소상수, z는 Riser 하단으로부터 높이, ε^*는 saturated 상태일 때의 값을 나타낸다. Kunii 와 Levenspiel[18]에 의하면 Geldart B solid의 경우 au = 7 (s^{-1})이다. 이때 ε^*는 $z=\infty$ 일때의 점근값으로 Geldart B solid의 경우 보통 0.01 이하이다.

fully developed zone

Pugsley와 Berruti[19]은 이 영역에서의 solid holdup을 다음과 같이 제시하였다.

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{\rho_p u}{\rho_p u + \phi G_s} \qquad (6)$$

여기서 $\phi = 1 + \frac{5.6}{Fr^2} + 0.47 Fr_t^{0.41}$이며 Fr은 Froude 수, Fr_t는 입자 Froude 수, G_s는 고체순환률(플럭스)를 나타낸다

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gd_p}}, \quad Fr_t = \frac{v_t}{\sqrt{gd_p}} \qquad (7)$$

여기서 v_t는 입자의 종단속도이며 다음과 같다.

$$v_t = \left[\frac{4d_p(\rho_p - \rho_g)g}{3\rho_g C_D}\right]^{1/2} \qquad (8)$$

이때 C_D는 마찰계수로 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24}{Re} + 3.3643 Re^{0.3471} + \frac{0.4607 Re}{Re + 2682.5} \qquad (9)$$

따라서 ε_2를 구하기 위해서는 G_s를 미리 알아야 한다. 이는 실험적으로 구할 수 있다.

3. 실 험

유동화 공기속도 및 연소로 직경 등의 운전특성을 결정하고 주된 반응이 발생되는 Riser 부분에 대한 냉간실험을 수행하였다. 전체적인 실험장치 구성은 Fig. 3과 같다. 순환유동 형태를 가지도록 설계 제

작한 Riser 부분은 입자의 흐름과 유동의 형태를 파악할 수 있도록 아크릴로 제작되었다.

Fig. 4는 Riser 형상에 대한 그림이고 각각의 치수와 설명은 아래와 같다. 1차 공기 주입부분은 직경 0.04 m로 테이퍼진 형태로 이루어져 있으며 Riser의 상단부는 직경 0.1 m 인 실린더 형태이다. Riser의 출구(크기 0.03× 0.04 m)는 접선방향으로 주입되는 2차 공기의 효과를 고려하여 Riser의 접선방향 형태로 이루어져 있다. 이러한 출구를 거친 유동사는 사이클론을 거쳐서 다시 Riser 부분으로 분산판 위의 0.15 m 지점에 설치된 재투입구를 통해 유입되게 된다. 유동사를 부유시키기 위한 1차 공기(PA)는 압축공기를 사용하였으며 유량계로 유입공기의 양을 조절하여 mesh 타입의 분산판을 거쳐 Riser 내부로 유입된다. 그리고 2차 공기(SA)는 분산판 위의 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 m지점에서 직경 0.004 m의 노즐을 통해 주입된다. Riser 내부의 압력 측정을 위해서 Riser의 벽면에 0.05 m 간격으로 압력탭을 설치하였으며 각 지점에서 manometer를 사용하여 측정값들을 비교하였다. 그리고 압력탭으로의 입자들의 유입을 방지하여 위하여 탭 입구 부분에 mesh 형태의 필터를 설치하였다. 유동사의 순환율(G_s)은 재투입구 부분에 설치된 screen에 일정한 양의 유동사가 쌓이는 시간을 측정하여 계산하였다.

본 실험에서 사용된 유동사는 Geldart Group B에 속하는 SiC(밀도: 3170 kg/m3)를 사용하였으며 직경 300 ㎛를 사용하였다. Riser 내부로 유입되는 1차 공기의 유량은 0~400 lpm이며 공기속도는 대략 0~4.2 m/sec로 정하였다. 그리고 2차 공기는 일반적으로 순환 유동층 연소로에서 사용되는 주입비(20~60%) [20] 중에서 20, 30, 40%로 선택하여 분산판으로부터 0.35 m 지점에서부터 주입하였다. 주입형태는 riser 외벽 원주부분에서 30° 각도로 4개의 입구로 주입되도록 하여 실험이 진행되었다.

고체 체류량 분포는 실험에서 측정한 압력으로 계산되었다. Fig. 3에서와 같이 각 지점에서의 압력센서를 통해 나온 값들은 Indicator로 확인할 수 있고 pc를 통해 결과를 구할 수 있다. solid acceleration, solid friction, gas friction에 의한 압력강하는 무시하고 단지 유동매체의 hydrostatic head에 의한 압력강하만 고려하면 다음과 같다.

$$\Delta P = \rho_p g \Delta h \varepsilon \qquad (10)$$

여기서 Δh는 분산판으로 부터의 높이이고 ε은 고체 체류량(Solid holdup)이다.

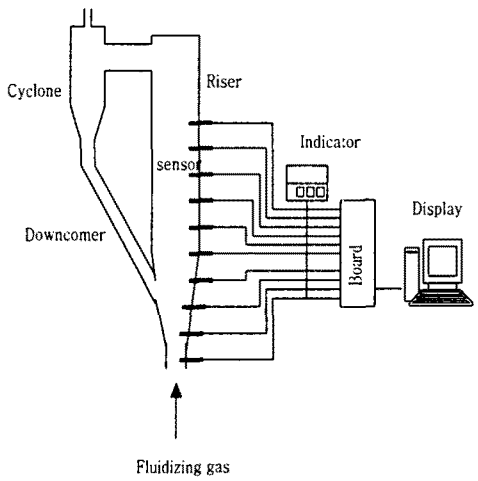
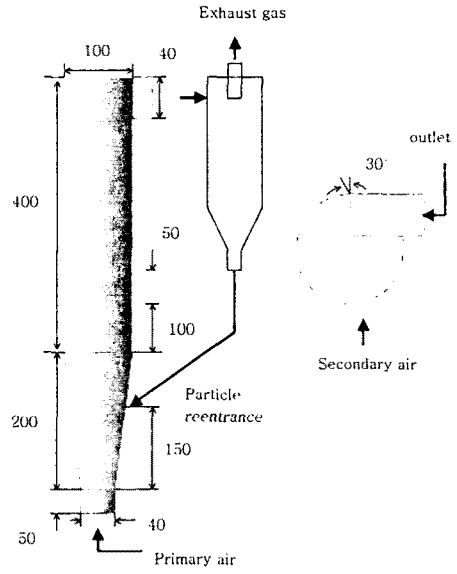


Fig. 3 Experimental setup



(a) (b)

Fig. 4 Experimental schematics of lab-scale riser
(a) Side view (b) Top view

4. 결과 및 고찰

먼저 고체 체류량 분포(solid holdup)을 알아보기에 앞서 본 연구에서의 냉간유동시의 운전 조건과 유동화 특성을 알아보기 위해 bed 내부에서의 속도 변화에 따른 압력분포를 구하였다. 2차 공기의 주입은 없으며 Riser내에서의 고정층(bed) 높이는 0.13m, 유동사 직경은 300㎛, 압력 측정은 일반 manometer로 측정하였다.

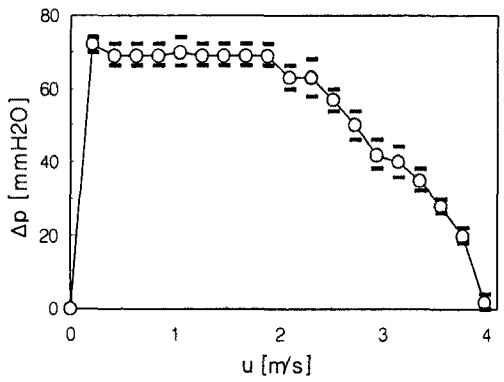


Fig. 5 Pressure drop versus gas velocity for a bed

manometer에서의 측정값 변동 때문에 Δ P를 평균값으로 표현하였으며, 변동의 최대값과 최소값을 다음과 같이 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 이론식과 비교하기위해 사용된 변수값들은 다음과 같다.

Ar=3055.84, ρ_p=3170 kg/ m^3, ρ_g=1.206 kg/ m^3, μ_g=1.82× 10^{-5} kg/m· s

앞에 나온 Fig. 1와 비교해서 유동 영역을 구분해 보면 속도를 서서히 증가시키면 층내에 걸리는 압력차는 계속적으로 증가하다가 압력이 어느 순간에 일정해지기 시작한다. 이 압력차가 일정해지는 부분의 속도를 최소 유동화 속도라고 하는데 식(1)에 의한 최소 유동화 속도는 u_{mf} ≈ 0.11 m/s이며 이때부터 유동화가 시작된다. 본 연구에서 실험으로 결정된 최소 유동화 속도는 약 0.21 m/s 인데 이론치와 거의 유사함을 알 수 있다.

이 이상의 속도에서는 압력차는 증가하지 않으며 모래층에 기포가 형성되고 격렬한 유동화가 시작되어 고체의 혼합이 일어나고 앞에서도 설명했듯이 모래층이 액체와 같은 현상을 띄게 된다. 기포유동층에서 난류 유동층으로의 천이가 시작되는 부분은 Lee 와 Kim[14]이 제시한 상수로, 끝나는 부분의 유속을 Horio[15]이 제시한 상수를 이용해 구해보면, 각각 1.73 m/s와 1.85 m/s가 나온다. 실험영역에서는 1.68～1.89 m/s까지를 천이 영역으로 볼수 있다.

그리고 이 이상으로 속도를 증가시키면 모래층 내에 형성된 기포가 깨지기 시작하며 매우 격렬한 모래층의 움직임을

관측 할 수 있다. 이때 부터를 난류 유동층라 한다. Lee 와 Kim[16]이 제시한 상수에 의해 난류영역에서 고속 영역으로의 천이가 시작되는 속도는 2.52 m/s이며 실험영역(약 2.52 m/s)과 비교했을 때와 잘 일치한다. 이때에는 기포대신에 다양한 모양의 유동사의 덩어리와 기체의 영역이 혼란스럽게 섞이게 된다. 이 이상의 속도가 되면 고속 유동층(u > 2.5 m/s)이 되고, 순환 유동층에서는 대략 이 고속 유동층 이상에서 조업되는 것으로 알려져 있다.

Fig. 6은 유입되는 1차 공기의 속도에 대한 고체 순환율을 나타낸 그림이다. Fig. 5에 대한 설명과 마찬가지로 공기속도가 2.5 m/s 이상에서 유동사가 순환함을 알 수 있다. 일반적으로 순환 유동층에서는 입자의 순환율을 일정한 상태로 고정, 조절하기 위해서 별도의 장치나 밸브를 통한 제어가 필요하지만 본 연구의 Riser 부분은 실제로는 내부순환유동 시스템에 내재된 형태로서 별도의 순환 제어 장치는 고려되고 있지않다. 따라서 본 연구에서의 고체 순환율의 측정은 별도의 순환제어 장치 없이 측정하였으며, 시간에 따라 사이클론을 통해 순환되는 유동사의 무게를 측정해 고체 순환율을 직접 계산하였다.

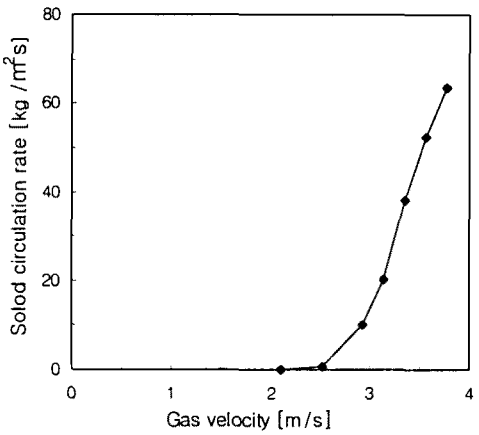


Fig. 6 Solid Circuratation rate

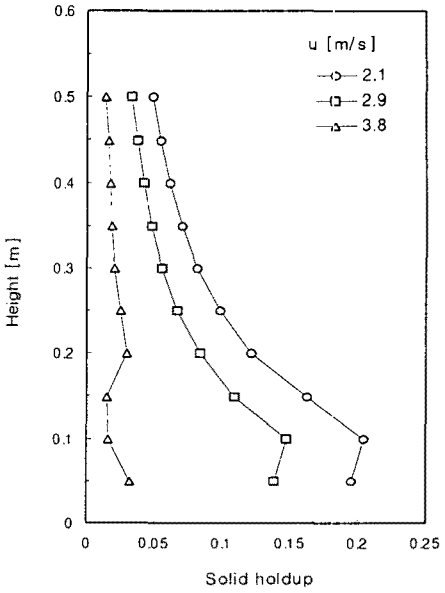


Fig. 7 Effects of gas velocity on the axial solid holdup distribution

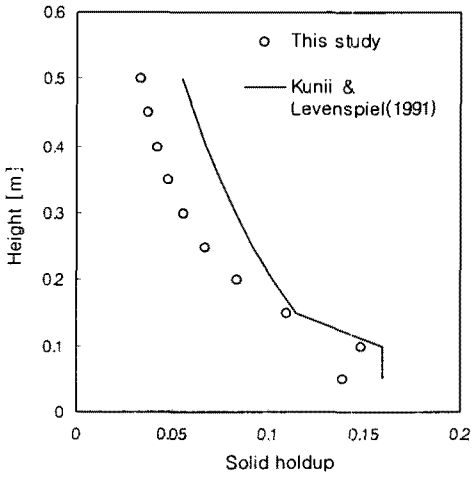
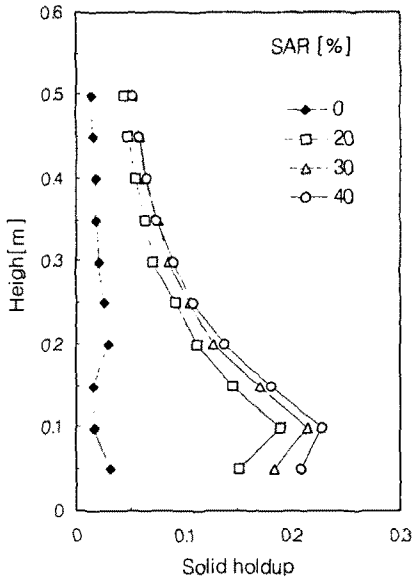
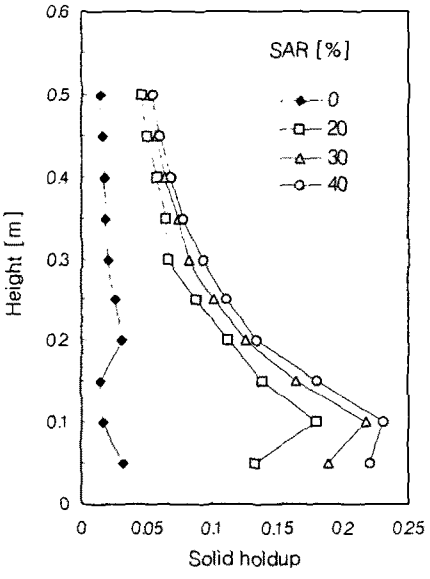


Fig. 8 Comparison between measured and calculated data

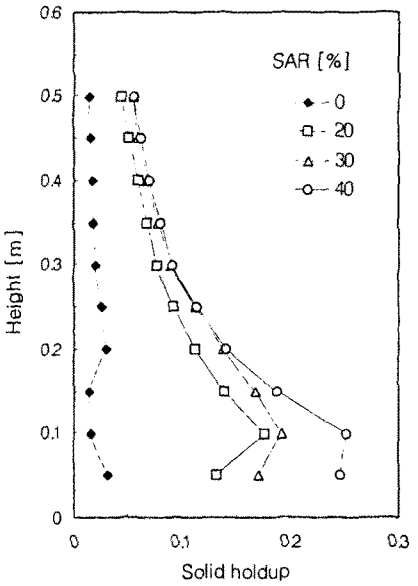
Fig. 7은 속도 변화에 따른 축방향 고체 체류량 분포를 보여주는데, Riser내에서의



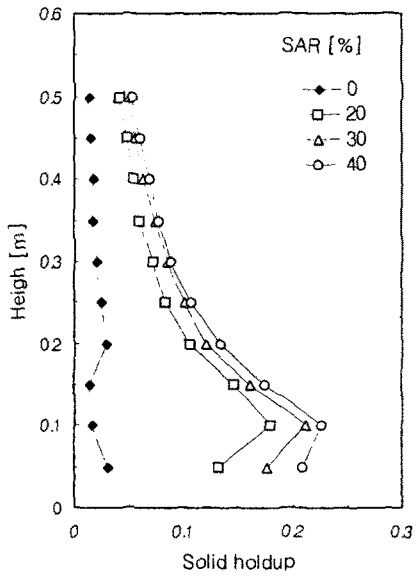
(a) H = 0.35m



(b) H = 0.40m

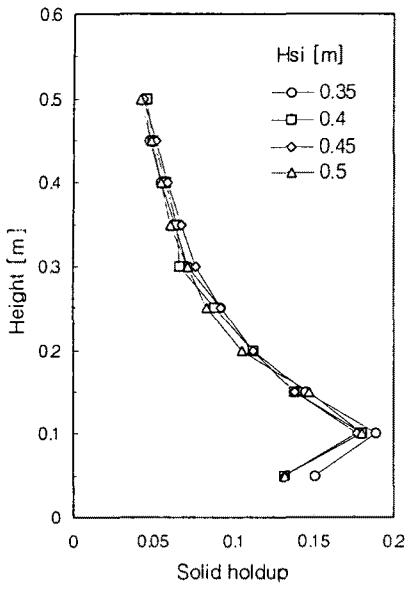


(c) H = 0.45m

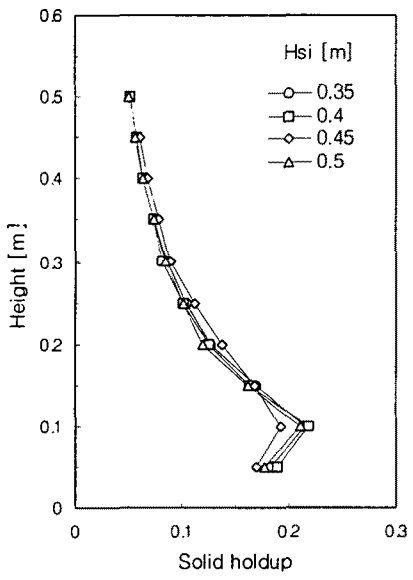


(d) H = 0.50m

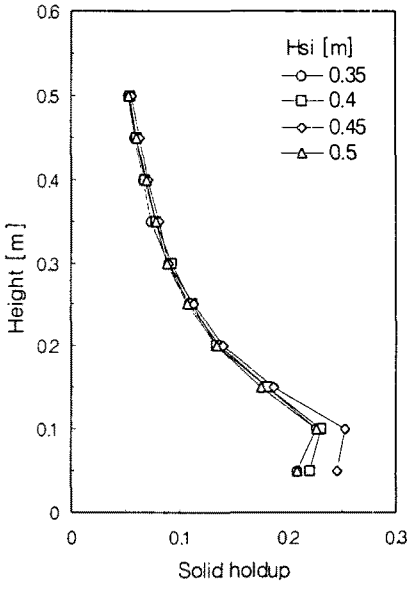
Fig. 9 Effect of secondary air injection ratio(SAR)



(a) SAR = 20%



(b) SAR=30%



(c) SAR=40%

Fig. 10 Effect of secondary air injection height

고체 체류량은 속도가 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 속도가 증가할수록 비말 동반되는 유동사의 양이 많아졌기 때문이다. 그리고 속도가 3.8 m/s가 되면 축 방향 고체 체류량은 일정해 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 Kunii 와 Levenspiel[17]가 제시한 Lumped 모델에 소개된 식으로 구한 결과와 본 연구에서 실험으로 구한 결과중 고속유동화 영역에 속하는 속도가 2.9 m/s 일때의 값을 비교한 것이다. 이론식(5)에 사용된 변수 값들은 다음과 같다.

$$\varepsilon_1 = 0.16, \quad \varepsilon^* = 0.01, \; a = 2.4$$

Fig. 9는 각각의 2차 공기 주입 위치에서 2차 공기 주입비를 변화시키면서 실험한 결과들이다. 2차 공기 주입비가 증가할수록 고체 체류량은 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 총 공기 속도(u =3.8

m/s)는 고정되어 있는 상태에서 2차 공기를 주입함으로써 1차 공기의 속도가 감소하기 때문이다. 즉 1차 공기의 속도가 감소함으로써 결과적으로는 입자가 비말 동반되기에는 충분하기 않게 되고 Riser의 밑 부분에 입자가 더 많이 존재하게 된다. 따라서, 2차 공기비가 증가할수록 고체 체류량도 높게 나타난다는 것이다. 이런 결과들은 기존에 연구된 결과[7,8,10]와 유사하다는 것을 알 수 있다. 또 실험에서 사용된 2차 공기비중 40%에서의 1차 공기 속도(u = 2.3m/s)로는 입자를 순환이 불안정하기 때문에 고체 체류량이 더 높게 나타난다고 볼 수 있다.

Fig. 10는 2차 공기 주입 위치(Height of secondary air injection port, H_{si})에 따른 효과를 알아본 것이다. 실험에서의 결과들은 기존의 연구[4,8]와는 달리 2차 공기 주입 위치에 따른 효과를 알 수 없었다. 이는 실험에서 사용된 Riser의 높이가 충분히 높지 않고 또한 입자의 크기가 크기 때문이라고 보여진다.

5. 결 론

2차 공기 주입은 실험실 규모의 순환 유동층 냉간 실험에서 축 방향 고체 체류량 분포에 효과가 있었다. 전체 공기 속도를 3.8 m/s로 고정하고 2차 공기 주입비를 20～40%로 변화 시켰을 때 고체 체류량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 2차 공기 주입 위치에 따라 2차 공기 주입비 효과는 알 수 없었다.

후 기

본 연구는 2000년 에너지기술 학술진흥사업의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Brem, G. and Brouwers, J. J. H., 1991, "Mathematical Modeling of Staged Combustion in an AFBC," *Fluidized Bed Combustion*, Vol. 1, pp. 449～458, ASME.

[2] Gulyurtlu, I. K., Bordalo, C. and Cabrita, I. A., 1995, "The Effect of Staging of Reburning Fuel to Reduce NOx and N_2O Levels during Fluidised Bed Coal Combustion," *Fluidized Bed Combustion*, Vol. 2, pp. 1351～1357, 1995.

[3] Lyngfelt, A. and Leckner, B., 1999, "Combustion of Wood-chips in Circulating Fluidized Bed Boilers-NO and CO Emissions as Functions of Temperature and Air-staging," *Fuel*, Vol. 78, pp. 1065～1072.

[4] Arena, U., Cammarota, A., Marzocchella, A. and Massimilla, L., 1993, "Hydrodynamics of a Circulating Fluidized Bed with Secondary Air Injection," *Fluidized Bed Combustion*, Vol. 2, pp. 899～905, ASME

[5] Aguillon, J., Shakourzadeh, K. and Guigon, P., 1996, "A New Method for Local Solid Concentration Measurement in Circulating Fluidized Bed," *Powder Tech.*, Vol. 86, pp. 251～255

[6] Namkung, W., Cho, Y. J., and Kim, S. D., 1994, "Axial Solid Holdup Distribution in a Circulating Fluidized Bed", *Hwahak Konghak*, Vol. 32, pp. 241～247.

[7] Yitian, F., Jiejie, H., Jianmin, Z. and Yang, W., 1999, "The Study on

Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed under Ambient and High Temperature Condition," *CFB Technol.*, Vol. VI, pp. 33~38.

[8] Cho, Y. J., Namkung, W., Kim, S. D. and Park, S., 1993, "Effect of Secondary Air Injection on Axial Solid Holdup Distribution in a Circulating Fluidized Bed," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 27, pp. 158~164.

[9] Wang, X. S. and Gibbs, B. M., 1991, "Hydrodynamics of a Circulating Fluidized Bed with Secondary Air Injection," *CFB Technol.*, Vol. III, pp. 225~230.

[10] Zijlma, G. J. Gerrritsen, A. W. and van den Bleek, C. M., 1999, "Influence of Secondary Air Injection on Solids Distribution and Circulation Rate in a Circulating Fluidized Bed," *CFB Technol.*, Vol. VI, pp. 27~32.

[11] Kim, J. H. and Shakourzadeh, K., 2000, "Analysis and Modeling of Solid Flow in a Closed Loop Circulating Fluidized Bed with Secondary Air Injection," *Powder Technol.*, Vol. 111, pp. 179~185.

[12] Xing, R., Zhanwen, W. Fei, W and Yong, J., 1999, "Particle Velocity And Solids Fraction Profiles Of A Swirling Flow In A Riser," *CFB Technol*, Vol. VI, pp. 131~136

[13] Grace, J. R. 1982, "Fluidized Bed Hydrodynamics," *Handbook of Multiphase Flow*, Chapter 8.1

[14] Lee, G. S. and Kim, S. D., 1988, "Pressure Fluctuations in Turbulent Fluidized Beds," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 21, pp. 515~521.

[15] Horio, M., 1986, "High Velocity Operation of Fluidized Beds," *J. Powder Technol. Japan*, Vol. 23, pp. 80~90.

[16] Lee, G. S. and Kim, S. D., 1990, "Bed Expansion Characteristics and Transition Velocity in Turbulent Fluidized Beds," *Powder Technol.*, Vol. 62, pp. 207~215.

[17] Kunii, D. and Levenspiel, O., 1991, "Flow Modeling of Fast Fluidized Beds," *CFB Technol.*, Vol. III, pp. 91~98.

[18] Kunii, D. and Levenspiel, O., 1997, "Circulating Fluidized-Bed Reactors," *Chemical Eng. Sci.*, Vol. 52, pp. 2471~2482.

[19] Pugsley, T. S. and Berruti, F., 1996, "A Predictive Hydrodynamic Model for Circulating Fluidized Bed Risers," *Powder Technol.*, Vol. 89, pp. 57~69.

[20] Kullendorff, A., and Andrson, S. 1986 "A General Review on Combustion in Circulating Fluidized Beds," *CFB Technol.*, ed. by P. Basu, pp. 83~9, Pergamon Press, Canada.