

순환유동층 소각로의 수력학적 특성에 관한 연구

변영철· 박선호· 황정호*· 김세원**

Hydrodynamic Characteristics of Circulating Fluidized Bed Incinerator

Y. C. Byun, S. H. Park, J. H. Hwang and S. W. Kim

Key Words: 내부순환유동층, 수력학적 특성

Abstract

Internally Circulating Fluidized Bed Combustor(ICFBC) has been used for the incineration of waste sewage sludge. In this study hydrodynamic characteristics of two phase flow have been studied in a riser section of ICFBC. A lab-scale riser(1/5 scale of pilot plant) is designed and SiC (Geldart type B) is used for solid particles. Experiments are performed by controlling the fluidization parameters including superficial velocity, particle diameter and secondary air to primary air ratio for determination of solid holdup profiles in the riser. Our flow regime during experiments mainly belongs to the onset of turbulent regime(for $d_p:300\mu m$) and fast fluidization regime(for $d_p:100\mu m$). Superficial velocities of each regime are well agreed with results obtained by other researches. 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. As the particle size decreases, solid holdup along the riser is more uniformly distributed. To prove these experimental results, numerical calculations are being performed.

1. 서론

최근 여러 산업분야에서 그 유용성을 인정받고 있는 유동층 시스템은 미세입

자의 유동매체를 소각로 내에 채우고 연소공기를 로의 하부로부터 주입하여 끓는 액체와 같은 유동층을 형성시키며 투입된 폐기물은 유동매체와 함께 유동하

* 연세대학교 기계공학과

** 생산기술연구원

면서 연소된다. 폐기물이 유동층 내에서 유동상태로 있기 때문에 혼합이 잘되고 유동매체와의 접촉빈도가 커져 다른 방식에 비해 연소속도가 빠르다. 유동매체의 빠른 순환으로 유동층 전체가 거의 등온으로 유지되어 온도에 따라 연료량을 조절하여 운전상태를 변화시키기가 쉬우며 공해물질 배출면(NO_x , SO_x 등)에서도 기존의 소각방식보다 우수한 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 최근들어 세계적으로 처리규제가 강화되고 있어서 활발한 연구가 진행되고 있는 하수 슬러지[1]에 대한 보다 효율적인 처리를 위하여 이러한 유동층 연소시스템의 장점을 활용하면서 동시에 기존처리 공법에서 사용되었던 하수 슬러지의 탈수 건조 및 보조연료의 비용을 절감하기 위해서 내부 순환형 시스템을 이용하고자 하였다. Fig. 1은 본 연구에서 최종적으로 적용할 시스템으로서 석탄가스화, 석탄연소, 표면코팅 등에서 많이 사용되고 있는 일반적인 내부순환 유동층 반응기[2]를 응용하였으며, 본 연구에 적용할 시스템과 일반적인 내부순환 유동층 반응기의 기본적인 원리는 크게 다를 바 없다. 본 시스템에서는 riser에 해당하는 내부벽에 2차 공기 주입부를 설치하여 접선 방향의 강한 와류를 형성시켜 유동상의 체류시간을 증대함과 동시에 외부벽에서의 사이클론 효과를 거두고자 하였다.

일반적으로 순환유동층 내부에 공급되는 2차 공기의 수력학적 영향을 살펴보면 먼저 주입위치에 따라서 유동화 영역에 결정적인 영향을 미친다. 2차 공기의 주입위치는 난류영역(turbulent bed regime)에서 고속영역(fast bed regime)으

로의 천이를 야기한다.[3] 2차 공기 주입부의 아래 영역에서는 일반적으로 고체 밀도와 난류강도가 증가하는 반면 그 위에서는 상대적으로 고체밀도가 감소하며 core-annulus 유동구조를 가지는 고속영역 또는 회박유동(pneumatic transport regime) 상태가 된다.[4] 또한 2차 공기와 1차 공기 주입비(SA/PA)가 증가할수록 난류영역에서 고체 체류량 및 체류시간이 증가하며 2차 공기 주입위치에 따라서 riser 부분에서 공극을 분포(voidage profile)가 달라진다.[3] 주입형태에 따른 유동특성 연구는 비록 순환유동층에서의 적용사례는 그리 많지는 않으나 일반적으로 접선 방향 주입이 반경방향 주입보다 강한 와류를 형성하여 고체의 체류시간과 체류량 측면에서 유리함을 알 수 있다.[5]

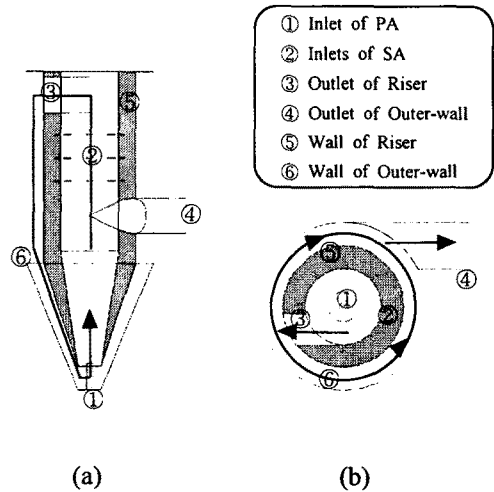


Fig. 1 Internally Circulating Fluidized Bed Combustion(ICFBC) System
(a) side view (b) top view

위에서 살펴본 바와 같이 순환유동층에서의 2차 공기 주입에 관하여 연구가

진행되었으며 수력학적 특성에 관한 그 성과도 있었지만 실제 설계와 운전에 적용하기 위한 정량적인 자료가 부족한 실정이다. 따라서 현재의 연구에서는 먼저 이러한 내부순환식 유동층 중에서 전체 시스템의 특성을 좌우하는 riser 부분에서의 주요 시스템 변수별 수력학적 특성들을 소개, 운전조건을 파악하고 특히 1차 공기와 2차 공기 주입비 및 2차 공기의 주입위치와 주입형태에 따른 유동영역의 변화를 실험적으로 파악함을 목적으로 하였다. 그리고 이러한 실험결과에 대한 이론적 검증을 위하여 현재 진행되고 있는 수치해석의 결과도 소개하였다.

2. 실험

Fig. 1의 내부 순환 유동층 시스템 중에서 내부벽 즉, riser 부분에서의 수력학적 특성 파악을 위하여 내부 순환식의 외부 실린더 대신에 Fig. 2와 같이 입자 포집을 위해서 사이클론을 설치하여 riser 부분을 통과한 모든 입자들이 다시 본체로 유입되도록 설계하였다. 실험은 냉간유동에 대해서 수행되었다. 전체적인 실험장치는 Fig. 2와 같으며 반응기의 크기는 실제 제작중인 pilot plant의 1/5 척도로 제작되었다. 순환유동 형태를 가지도록 설계 제작한 riser 부분은 입자의 흐름과 유동의 형태를 파악할 수 있도록 아크릴로 제작되었다. 1차 공기 주입 부분은 직경 0.04 m로 테이퍼진 형태로 이루어져 있으며 riser의 상단부는 직경 0.1 m 인 실린더 형태이다. Riser의 출구는

접선방향으로 주입되는 2차 공기의 효과를 고려하여 riser의 접선방향 형태(크기 0.03×0.04 m)로 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 0.44, 0.47, 0.50 m 지점에서 직경 0.01 m의 노즐을 통해 주입된다. Riser 내부의 압력 측정을 위해서 riser의 벽면에 5 cm 간격으로 압력탭을 설치하였으며 각 지점에서 digital manometer 및 일반 manometer를 사용하여 측정값들을

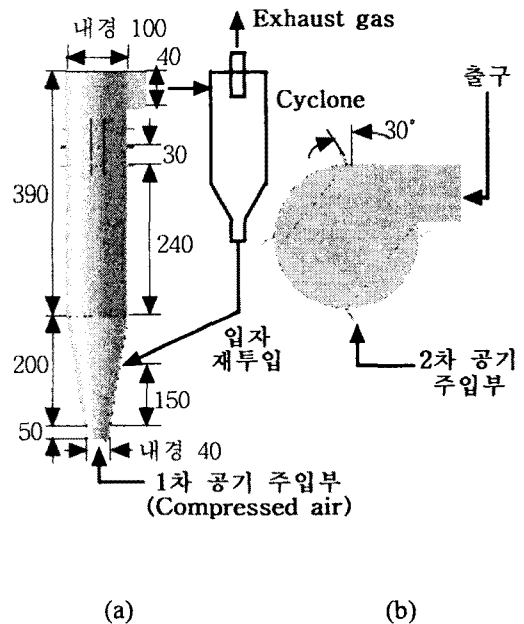


Fig. 2 Experimental Schematics of Lab-scale Riser for ICFBC
(a) Side view (b) Top view

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 B[6]에 속하는 SiC(밀도 : 3170 kg/m^3)를 사용하였으며 직경 100, 300, 500 μm 를 사용하였다. Riser 내부로 유입되는 1차 공기의 유량은 0~450 lpm이며 superficial velocity $\left[\frac{\text{Riser 내부유입유량}}{\text{Riser 평균단면적}} \right]$

는 대략 0~2.5 m/sec로 정하였다. 그리고 2차 공기는 일반적으로 순환 유동층 연소에서 사용되는 주입비(20~60%)[7] 중에서 20, 30, 40%로 선택하여 분산판으로부터 먼저 0.4 m 지점에서부터 주입하였다. 주입형태는 riser 외벽 원주부분에서 먼저 30° 각도로 4개의 입구로 주입되도록 하여 실험이 진행되었다. 현재 진행중인 실험변수와 그 범위는 Table 1에 정리되어 있다. 본 실험실 규모의 실험에서 Table 1에서와 같은 조건으로 실험범위를 선정한 이유는 현재 제작중인 pilot plant의 설계변수 사이에서의 순환 유동층 냉간유동 상사법칙에 충실한 해석을 위해서이다. 본 연구에서 적용하고자 하는 상사법칙은 Horio 등이 제안한 방법[8]으로서 scale이 다른 두 시스템 사이의 운전조건들은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 여기에서 위첨자 o는 pilot plant를 의미하고 D, L은 본체의 직경과 높이, u_o, v_o, u_t 는 각각 기체와 입자의 superficial velocity, 입자의 terminal velocity를 나타낸다. 그리고 Ar은 Archimedes number를 의미하며 ρ_g, ρ_p

는 각각 기체와 입자의 밀도를 나타낸다.

① 형상의 유사성

$$\frac{D}{D^o} = \frac{L}{L^o} = m$$

② 거시적 유동과 유동사에 대한 조건

$$\frac{u_o}{u_o^o} = \frac{v_o}{v_o^o} = \frac{u_t}{u_t^o} = \sqrt{m}$$

그리고 같은 물성치를 지닌 gas와 같은 밀도의 입자가 두 시스템에서 사용되었다면, 입자 크기에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\frac{d_p}{d_p^o} = m^{1/4} \quad (Ar \leq 104)$$

$$\frac{m^{1/2}}{m} \quad (104 < Ar \leq 94,300)$$

$$\frac{m}{m} \quad (94,300 < Ar)$$

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

이러한 조건하에서 유추할 수 있는 운전 변수들의 범위는 Table 1에 나타내었으며 pilot plant에 대해서는 현재 실험이

Table 1
Operating Conditions for Lab-scale
ICFB and Pilot Plant ICFB
(\blacksquare : under experiments)

	lab-scale	pilot plant
m	1/5	1
D [mm]	100	500
L [mm]	590	2950
u_o [m/s]	0~2.4	0~5.4
G_s [kg/m ² s]	0~40	0~89
d_p [μm]	100-500 (SiC)	400
ρ_g [kg/m ³]	1.18	1.18
ρ_p [kg/m ³]	3170	3170

진행중이다.

3. 수치계산

본 시스템(Fig. 1)에 대한 설계 및 운전변수들에 대한 정보를 제공하기 위해서 먼저 냉간유동에 있어서의 수력학적 특성들을 파악하고자 실험실 규모 시스템에 대한 수치계산을 수행하였다.

본 연구실에서 수행한 기포식 유동층에서의 유동특성 결과[9]를 바탕으로 순환유동층에서의 유동특성을 파악하고자 하였다. 현재 유동사를 고려한 순환유동층에서의 유동현상은 계산이 진행중에 있으며 유동사를 고려하지 않은 상태에서의 여러 가지 2차 공기 주입 변수에 의한 유동특성 연구를 수행하였다.

본 수치해석 대상은 Fig. 2과 같이 연료투입구, 1차 공기 주입부, 2차 공기 주입부(노즐형식, 4×3개), 그리고 출구로 이루어져 있다. 먼저 riser에 분산판으로부터 0.44 m(SA 1), 0.47 m(SA 2), 0.50 m(SA 3) 지점에서 주입각 30° 로 각 지점마다 4개씩 노즐배치를 하였다. 이러한 냉간유동 해석의 주요변수는 SA:PA, SA1:SA2:SA3의 비가 될 수 있으며 본 수치해석에 사용된 여러 조건들의 조합은 Table 2와 같다. 그러한 해석은 riser 내부의 체류시간, 출구에서의 속도변화 이외에 본 내부순환 유동시스템이 특징으로 하는 사이클론 효과를 이루도록 적절한 유동의 흐름을 형성시켜 줄 수 있는 조건의 도출에 역점을 두고 냉간유동에 대한 계산이 진행되었다. 계산은 Fluent 5.0을 이용하였으며 3차원 hybrid mesh를 사용, steady-state, segregated, k-ε 난류모델을 적용하였다.

Table 2.
SA Injection Condition

PA(lpm)	SA/PA	SA1:SA2:SA3
300	0.2	1:1:1
	0.3	
	0.4	
300	0.4	1:2:3
		3:2:1

4. 결과 및 고찰

4.1. 유동 영역 (Fluidization Regime)

Fig. 3은 일반적인 유동사 타입에 따른 기-고체 간의 접촉 유형 그래프를 나타낸다.[10] 먼저 본 실험에서 사용된 SiC 입자 300 μm(Geldart Group B)에 대해서 regime map을 적용해 보기위해서 입자크기와 가스상 속도, 입자의 terminal velocity를 다음 식에 의해서 무차원수로 나타낼 수 있다. 아래의 식에서 d_p 는 입자의 직경, ρ_p , ρ_g 는 입자의 밀도, 가스의 밀도이며 μ 는 가스의 점성계수를 나타낸다.

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3}$$

$$u^* = u \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_p - \rho_g) g} \right]^{1/3}$$

$$u_t^* = \left[\frac{18}{d_p^{*2}} + \frac{0.591}{d_p^*} \right]^{-1}$$

이러한 무차원 수를 이용하여 Fig. 3 및 Grace[11]가 제시한

$$Re_{mf} = \sqrt{27.2^2 + 0.0408Ar} - 27.2$$

에 의한 최소 유동화 속도($u_{mf}=0.11$ m/sec)와 실험으로 결정한 값(0.17 m/sec)과 거의 유사함을 알 수 있다. 그리고 본 실험에서 사용된 기체상 속도를 기준으로 하여 실험영역을 살펴보면 대략 난류 유동층의 시작 부분에 해당됨을 알 수 있으며 이는 Bi와 Grace[12]가 제시한

$$Re_c = 1.24 Ar^{0.45}$$

에 의한 때와도 정량적으로 잘 일치한다. 여기서 Re_c 는 기포영역에서 난류영역으로 천이할 때의 레이놀즈 수를 의미한다. 따라서 Fig. 3에서 점선으로 표시한

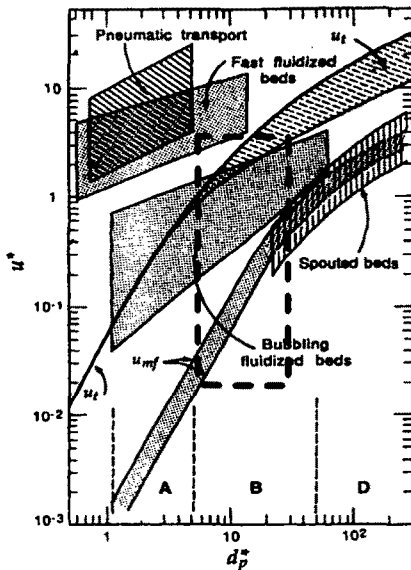


Fig. 3 Generalized map of gas-solid contacting [10]

영역이 본 실험대상이다.

4.2. 입자 순환율 (solid circulation rate, Gs)

일반적으로 순환 유동층에서는 입자의 순환율을 일정한 상태로 고정, 조절하기

위해서 별도의 밸브를 통한 제어가 필요하지만 본 연구의 riser 부분은 실제로 내부순환유동 시스템에 내재된 형태로서 별도의 순환 제어 장치가 실제로는 고려되고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 superficial velocity, 유동사 직경 그리고 정체층 높이에 따른 순환율을 별도의 순환제어 장치를 사용하지 않고 각각 측정하였다.

Fig. 4는 유동사 직경이 100, 300, 500 μm 로 변할 때 유동사의 순환율을 유입되는 1차 공기의 superficial velocity에 대해서 나타낸 그래프이다. 그리고 유동사의 직경이 300 μm 로 고정된 상태에서 bed의 정체층 높이가 0.1, 0.14 m인 경우에 대해서 함께 순환율을 비교하였다. 결국 유동사의 순환율은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 유동사 직경이 증가할수록 그 유동사의 입자의 terminal velocity가 증가하고 bed에서의 입자 유탈을 위한 가스상 유속의 증가가 필요하게 되어 그만큼 순환율은 더욱 감소한다.

4.3. Riser 내부에서의 축방향 고체 체류량 분포 (solid holdup)

일반적으로 순환유동층 반응기 하단부에서의 고체입자가 차지하는 부분은 유동영역에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.[10]

기포 유동층	0.4~0.6
난류 유동층	0.2~0.4
고속 유동층	0.06~0.2
pneumatic transport	0.01~0.06

Riser 내부에서의 고체 체류량 분포는

정압측정을 통하여 계산할 수 있다. 축방향 고체 체류량 ($1-\epsilon$)은 마찰력이 무시되면 다음과 같은 식으로부터 계산할 수 있다. ϵ 는 기체의 void fraction을 나타낸다.[13]

$$\Delta P = \rho_s g \Delta L (1 - \epsilon)$$

먼저 Fig. 5는 2차 공기의 주입이 없으며 정체층 높이가 0.1 m, 유동사 직경 300 μm 일 경우 유입되는 1차 공기 유량의 변화에 따른 고체 체류량을 나타내고 있으며 Fig. 6은 유동사 직경이 100 μm 일 경우이다. 먼저 Fig. 5에서 볼 때 유량이 증가할수록 비산되는 유동사의 양이 많아져서 축방향으로의 고체 체류량 분포가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 유량별 유동 영역을 구분해 보면 초기 최소 유동화 영역부터 기포발생(0.17 m/sec 이하)까지는 분산판에서의 일정한 압력변화만 발생하며 공기의 공급증가에 의한 고체 체류량의 변화는 없다. 기포의 발생과 slugging 유동영역(2 m/sec 이하)이 시작되면 규칙적인 유동사 덩어리가 bed 하단 부위에서 발생되면서 압력 진동폭이 상당히 증가하게되며 유동사 체류분포가 bed 위부분까지 점차 증가하는 경향을 보인다. 그렇지만 riser 내부의 고체 체류량이 밀한 지역과 소한 지역의 구분이 뚜렷함을 알 수 있다. 그러나 slugging 유동화 영역 이상의 유속에서는 압력변동 폭이 줄어들면서 난류 유동화 영역이 시작됨을 볼 수 있으며 이 때의 고체 체류량 분포 곡선의 기울기가 초기 기포 유동화 영역에 비해서 상당히 줄어들 수 있다. 이러한 경향 입자의 크기가 작은 Fig. 6에서도 볼 수 있으며 입자 직경이 300 μm 인 경우에서보다 더

낮은 유속에서 그러한 현상들이 발견됨을 알 수 있으며 고체 체류량 분포로부터 유동영역이 고속유동의 초기까지 진행됨을 볼 수 있다.

4.4. Riser 내부의 냉간유동장 해석

1차 공기 주입량이 300 lpm 이므로 1차 공기 주입부에서의 평균 속도는 약 4 m/s 이고, 2차 공기 주입비가 20, 30, 40% 로 증가함에 따라 출구에서의 평균 속도는 2.43, 2.53, 2.65 m/s 로 바뀌게 된다.

1차 공기 주입에 의해서 축방향으로 일정하게 진행되던 유동이 2차 공기 주입에 의하여 강한 swirl을 형성하게 되며 이런 현상은 사이클론 효과를 동반하게 된다. Fig. 7 (a), (b), (c)에서 이러한 swirl을 유지하면서 출구를 빠져나가는 것을 볼 수 있으며 2차 공기 주입비가 20, 30, 40%로 증가함에 따라 swirl 효과가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

슬러지 소각을 위한 내부 순환식 소각로에 대한 성능실험에 앞서서 본 시스템의 수력학적 특성을 결정할 수 있는 riser 부분에 대한 실험과 계산을 수행하였다. 먼저 본 실험은 직경 300 μm 유동사에 대해서는 초기 기포상태부터 난류 유동화 초기 단계까지 진행되었으며 각 유동특성이 발견되는 속도가 기존의 논문과 비교하여 정량적으로 잘 일치하였다. 또한 유동화 진행단계에서의 riser 내부의 고체입자 체류량 분포를 실험적으

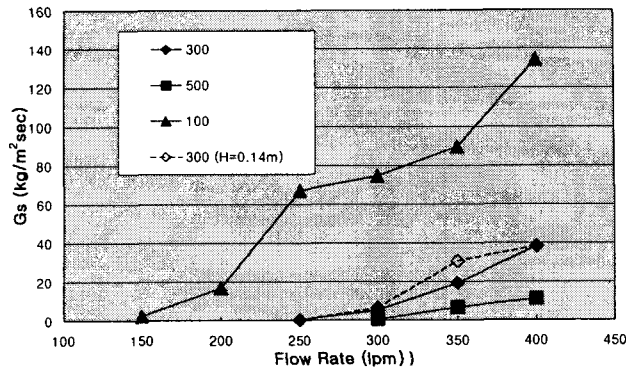


Fig. 4 Solid Circulation Rate, Gs

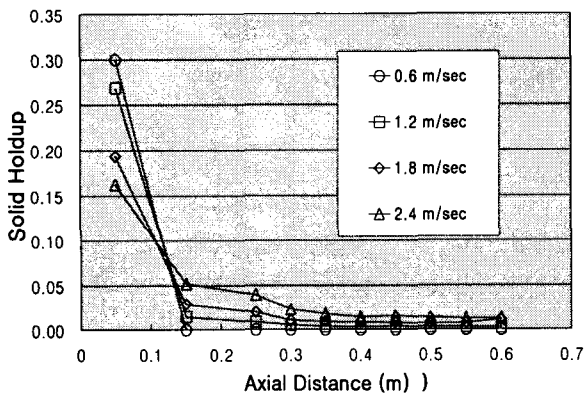


Fig. 5 Solid holdup profile along the riser without SA ($H=0.1$, $dp=300\mu\text{m}$)

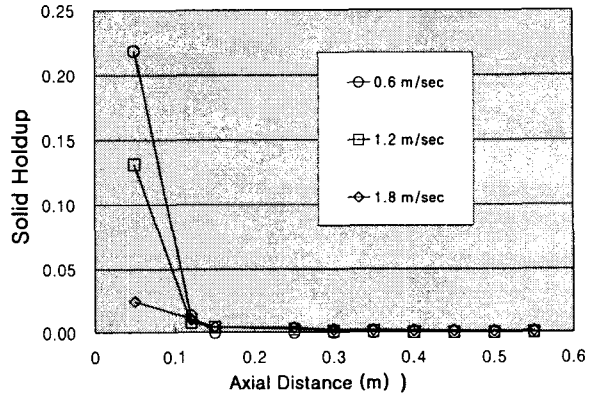


Fig. 6 Solid holdup profile along the riser without SA ($H=0.1$, $dp=100\mu\text{m}$)

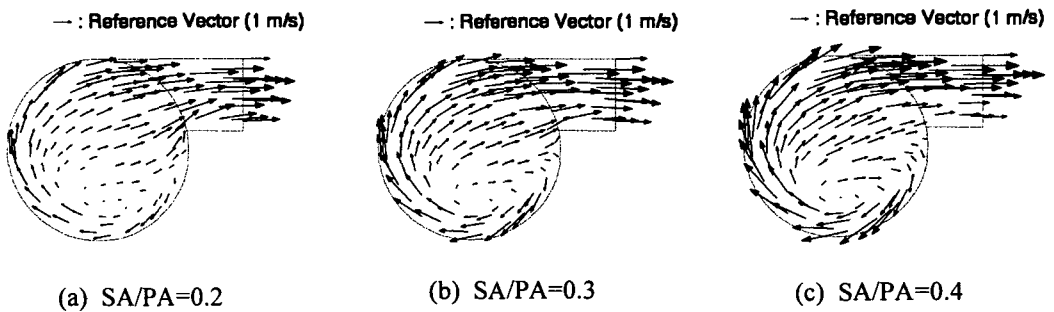


Fig. 7 Velocity Vector at 0.56 m Plane from Distributor

로 구하였으며 기존의 연구결과처럼 분포 profile이 난류 유동화 영역으로 진행될 수록 기울기가 완만해지고 riser 내부의 전체 고체 체류량도 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향을 바탕으로 실제 입자 순환율을 정량적으로 측정하였으며 입자의 크기가 커질수록 줄어드는 경향을 볼 수 있으며 bed의 높이에는 큰 영향을 받지 않는 결과를 얻었다. 이러한 실험결과의 타당성 검증을 위하여 수치계산이 진행중이며 현재 유동사를 고려하지않은 냉간유동에서의 2차 공기 주입 특성에 따른 출구쪽에서의 유동 특성을 파악하였다.

현재 riser 내부에 2차 공기를 주입했을 경우 입자 분포율을 측정하고 있으며 이러한 결과는 유동사 없이 진행된 riser 내부의 유동에 대한 수치계산 결과를 바탕으로 해석할 수 있으며 실제 유동사를 고려한 순환유동층에 대한 수치해석도 진행중이다.

후기

본 연구는 청정생산기술사업 세부사업 중 이중순환식 유동층 연소 방식에 의한 산업용 저공해 슬러지 소각장치 개발(과제번호 :99-2-B-1) 과제에서의 위탁과제로 진행되고 있으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wether, J. and Ogada, T. (1999) Sewage Sludge Combustion, *Progr. Ener. Comb. Sci.*, Vol. 25, pp. 93-116.
- (2) Milne, B. J., Berruti, F., Behie, L. A., and De Bruijn, T. J. W. (1992) The Internally Circulating Fluidized Bed (ICFB): A Novel Solution to Gas Bypassing in Spouted Beds, *Canadian J. Chem. Eng.*, Vol. 70, pp. 910-915.
- (3) Arena, U., Camarota, A., Marzochella, A., Massimilla, L. (1993) Fluidized Combustion-Volume 2, pp. 899-905, *ASME*,
- (4) Aguilon, 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.
- (5) 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.
- (6) Geldart, D. (1973) Types of Gas Fluidization, *Powder Technol.*, vol. 7, pp. 185-195.
- (7) Kullendorff, A., and Anderson, S. (1986) A General Review on Combustion in Circulating Fluidized Beds, *CFB Technol.*, ed. by P. Basu, pp. 83-96, Pergamon Press, Canada.
- (8) Horio, M., Ishii, H., Kobukai, Y. and Yamanish, N. (1989) A Scaling Law for Circulating Fluidized Beds, *J. Chem. Eng. of Japan*, Vol. 22, pp. 587-592.
- (9) 이재광, 황정호, 류태우, 이진호 (1999) 2차원 모델 유동층 소각로 내 열유동 및 열전달 계산, *한국폐기물*

학회지 16권 5호.

- (10) Kunii, D., and Levenspiel, O. (1997) Circulating Fluidized-Bed Reactors, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, pp. 2471-2482
- (11) Grace, J. R. (1982) Fluidized Bed Hydrodynamics, Chapter 8.1 in *Handbook of Multiphase Flow*, ed. by G. Hetsroni, Hemisphere, Washington.
- (12) Bi, H. T., and Grace, J. R. (1995) Effect of Measurement Methods on Velocities Used to Demarcate the Transition to Turbulent Fluidization, *Chem. Eng. J.*, Vol. 57, pp. 261-271
- (13) Arena, U., Cammarota, A. and Piston, L. (1986) High Velocity Fluidization Behaviour of Solids in a Laboratory Scale Circulating Bed, *CFB Technol.*, ed. by P. Basu, pp. 119-125, Pergamon Press, New York.