

3개의 순환고리를 갖는 순환유동층 상승관에서의 축방향 고체 체류량 분포 특성

이종민 · 김재성 · 김시문 · 김종진 · 송규근*

한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹, *전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

Characteristics of Axial Solid Hold-up Distribution in a CFB Riser with 3-Loops

Jong-Min Lee, Jae-Sung Kim, Si-Moon Kim, Jong-Jin Kim
and Kyu-Kun Song*

APG&C Group, Power Generation Lab., KEPRI, KEPCO

*Department of Precision Mechanical Engineering, Chonbuk National University

요 약

본 연구에서는 동해화력 순환유동층 보일러와 유사한 3개의 사이클론을 갖는 직사각형 구조의 순환유동층 반응기를 이용하여 동해화력 운전조건 -연소로 공기 속도, 일-이차 공기비, 전체 고체량(inventory), 입도 및 입도분포 등-에 따른 축방향 고체 체류량 및 순환량 등의 수력학적 특성을 고찰하였다. 상승관에서의 공기유속(U_0)이 증가함에 따라, 또는 PA/[PA + SA]비가 증가함에 따라, 그리고 전체 고체량(inventory)이 증가함에 따라 고체 체류량 및 순환량은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 넓은 입도 분포를 갖는 석탄 회재의 경우는 균일한 입도 분포의 입자들에 비해 입자 비산량 및 고체 순환량이 작은 것으로 나타났다. 한편, 층내에서의 고체 체류량 분포를 감소지수 a 및 K 를 사용하여 나타낼 수 있었으며, a 및 K 와 유속 및 입자간의 상관 특성치를 도출하여 유동 및 순환특성을 고찰하였다. 상기의 상관수는 균일한 입도의 모래에 비해 석탄회재가 비교적 큰 값을 나타내었으며, 상관수가 클수록 희박상 영역에서의 비산 및 고체 순환량이 작은 것으로 나타났다.

Abstract — Hydrodynamic characteristics in a cold CFB with 3-loops which has been designed by the analogy with the Tonghae CFB, has been determined with U_0 , PA/[PA + SA] ratio, total inventory and for sand particles (199, 281, 377 μm) and coal ash (174 μm). The axial solid hold up in the bed and the solid circulation rate increased with increasing of U_0 , PA/[PA + SA] ratio and total inventory. Axial solid hold up in the dilute phase and the circulation rate of coal ash particles with wide size distribution were lower than those of sand particles with narrow size distribution. The axial solid hold up distribution could be explained by using decay constants a and K which were obtained from splash and dilute phase, respectively. The value of correlation between decay constants a and K , and gas velocity ratio of U_0/U_1 for the coal ash was lower than that of sand, which showed that the value of correlation decreased as the axial solid hold up and the solid circulation rate increased.

1. 서 론

순환유동층 보일러는 연소로(상승관 : riser)에 공기를 고속으로 주입하여 비말동반되는 고체입자를 사이클론에서 포집하여 재주입하는 유동층을 일컫는 것으로, 난류유동층(turbulent fluidized bed), 고속유동층(fast fluidized

bed), 그리고 희박상 유동(dilute phase flow) 영역에서 조업이 이루어진다. 순환유동층은 비교적 높은 기체 유속에서 조업이 이루어지기 때문에 고체입자의 혼합 및 비산 그리고 재순환이 격렬하게 이루어지고, 기-고체간 접촉효율 및 전열계수가 높아 전체적인 처리량 및 효율이 좋은 장점을 가지고 있다^[1]. 이에 국내외적으로 순환

Table 1. Particle properties used in this experiment.

	Coal ash		Sand	
$d_{p,avg}$	174 μm	199 μm	281 μm	377 μm
ρ_s	2300 kg/m^3	2800 kg/m^3	2800 kg/m^3	2800 kg/m^3
U_{mf} [9]	0.023 m/s	0.036 m/s	0.071 m/s	0.125 m/s
U_i [10]	1.004 m/s	1.621 m/s	2.393 m/s	3.177 m/s

2-2. 시료물성 및 실험방법

본 연구에 사용된 입자는 sand의 일종인 silica carbonate (199, 281, 377 μm)와 동해화력에서 초기 충물질로 사용하는 석탄회재 (174 μm)로써 각각의 밀도는 2800 kg/m^3 및 2300 kg/m^3 이다. 이들 입자의 평균 입경^[11], 최소 유동화 속도^[9] 그리고 종말속도^[10] 등을 Table 1에 나타내었다. 한편, Fig. 2에 나타난 바와 같이 silica carbonate (3종)의 경우, 입도는 비교적 균일한 분포를 갖는 반면에, 석탄회재의 경우는 평균입경은 가장 적으나, 최고 3 mm까지의 입도를 갖는 매우 넓은 분포 특성을 갖고 있다.

본 연구에서의 실험 변수로는 크게 1차 공기유속(1.4~4.4 m/s), 1-2차 공기비(0.66~1.0), 고체량(inventory; 100~200 kg) 그리고 입도 변화(174~377 μm)에 대한 상승관에서의 측방향 고체 체류량의 영향에 대해 살펴보았다. 1차 공기유속은 동해화력 순환유동층 연소로에서의 flow regime 영역의 해석을 통해 각각의 입자에 대해 유사한 flow regime을 갖도록 하는 유속에서 결정하여 주입하였으며, 동해화력 순환유동층 연소로의 경우, 난류유동층 혹은 난류유동층에서 고속유동층으로 천이되는 단계의 유속에서 조업되는 것으로 나타났다^[11].

상승관에서의 고체 체류량의 측정은 높이에 따른 압

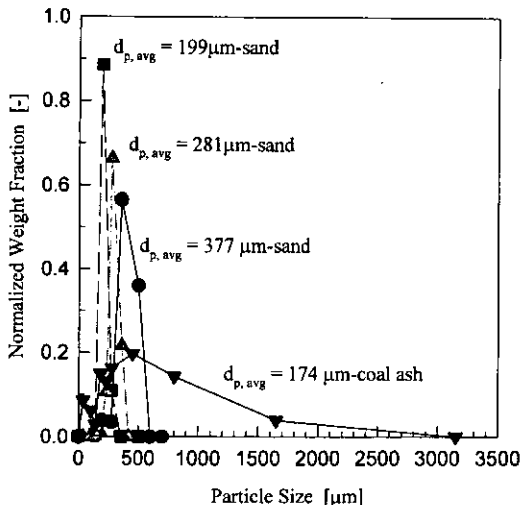


Fig. 2. Particle size distribution of sand and coal ash.

력측정에 따른 치압을 이용해 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

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

여기서 L은 측정된 압력탭간의 거리를 나타내며, 상승관에서의 압력탭은 분산판 기준으로 -0.15, 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 2.0, 4.0, 7.0, 9.5 m의 높이에 설치되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 순환유동층내의 압력 평형 해석

Fig. 3(a)와 (b)는 3개의 순환고리를 갖는 본 순환유동층 시스템에서 상승관내의 고체량에 따른 압력 평형을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 압력은 크게 연소로(riser)에서의 압력(#1~#9)과 사이클론에서 standpipe사이에서의 압력(#10~#13, #18~#21, #26~#29)), 그리고 loopseal에서의 압력(#14~#17, #22~#25, #30~#33) 강하로 나눌 수 있다. 연소로(riser)에서의 압력강하는 크게 연소로 하단부의 고체층인 농후상(dense phase)으로부터의 급격한 압력강하 부분과 그리고 연소로 상단부 희박상 영역(dilute phase)의 비교적 작은 압력강하 부분, 그리고 이 둘 지역사이의 경계 천이 구역(transition phase)에서의 압력강하 부분으로 나눌 수 있다. 압력강하의 의미는 앞에서 논의한 바와 같이(식 1) 고체 체류량 (solid hold-up, 혹은 고체 분율)과 밀접한 관계가 있다. 즉, 두 지점사이(L)의 압력차이(ΔP)는 고체체류량, $(1-\epsilon)$ 과 직접적인 비례관계가 있으며, 압력강하가 클수록 두 지점사이의 고체체류량이 많다는 것을 의미한다. 그러므로 압력강하가 큰 연소로 하단부(dense phase)에서는 비교적 고체체류량이 많음을 의미하고 있으며, 상부로 올라감에 따라 점차 그 양이 적어짐을 의미하고 있다. 연소로(riser)를 지나 사이클론에서 포집되어 재순환부(loopseal) 들어가는 고체체류량은 연소로 상부의 경향과 비슷한 희박상 영역을 보이고 있다. 반면 기포 유동층으로 조업되는 loopseal(#13~#17#)에서의 압력값은 다시 증가한 값을 보이고 있으며, 이러한 압력증가 값으로부터 sealing의 효과를 나타낸다고 이해될 수 있다.

전체 압력 loop에 대한 발란스는 연소로(riser)의 압력강하(ΔP_{CFB} : loopseal return part~#9), loopseal(move upward)에서의 압력강하(ΔP_s : #15~#17) 및 사이클론에서의 압력강하(ΔP_{cy} : #9~#10) 그리고 standpipe(move downward)에서의 압력강하(ΔP_{sp} : #10~#15)의 항목으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{is} + \Delta P_{CFB} + \Delta P_{cy} = \Delta P_{sp} \tag{2}$$

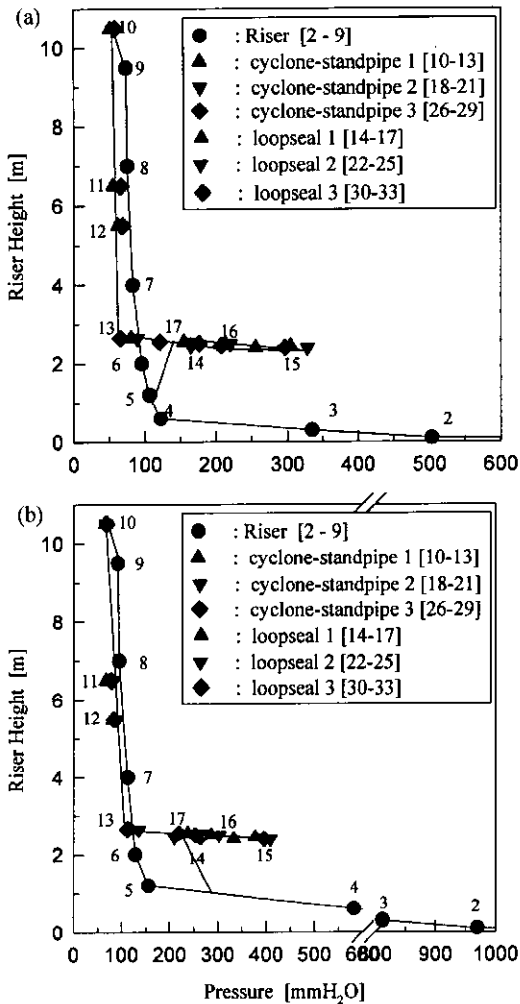


Fig. 3. Pressure balance for CFB system a) inventory = 100 kg, b) inventory = 200 kg (cyclone standpipe [10-13], [18-21] and [26-29] have same riser height and loopseal [14-17], [22-25] and [30-33] have same riser height).

여기서 loopseal에서 연소로로의 return part는 #4와 #5 사이에 위치하며, 각 부분에서의 압력강하 합은 standpipe에서의 downward에 걸리는 압력강하와 같고, 이의 변동시 상호 압력강하가 조율됨을 알 수 있다. 즉, 일정조건에서 loopseal에서 연소로(riser)로의 고체 순환은 압력 발란스에 의해 정해지며, 대략 ΔP_{sp} 와 나머지 압력강하 항목간($\Delta P_b + \Delta P_{CFB} + \Delta P_{cy}$)의 압력차이가 발생하였을 경우, 그 차이만큼 고체순환이 결정됨을 알 수 있다. 그림 a)와 b)에서 보는바와 같이 연소로내의 고체량(inventory)의 증가에 따라 ΔP_{CFB} 의(#5-#9) 값이 증가하며 이로 인해 ΔP_{sp} 의(#13-#15) 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 또

한 inventory 증가에 따라 loopseal에서 riser로의 return 부(H = 0.9 m, #4-#5)로의 압력이 상승함을 볼 수 있으며 이외의 발란스를 위해 loopseal에서의 downward 압력강하가 동시에 증가함을 볼 수 있다. 그러므로 loopseal에서의 원활한 유동화가 이루어질 경우, 고체량이 적은 경우(a)에 순환량 증가를 위해 유속 증가시 ΔP_{sp} 의 압력강하 영향이 (b)에 비해 적음을 예측할 수 있다.

3-2. 1차공기 유속(U_0) 및 입도에 따른 축방향 고체 체류량 분포 특성

순환유동층 상승관내에서 축방향에 따른 고체체류량은 매우 중요한 의미를 지닌다. 고체체류량에 따라 연소로에서의 고체 열전달 및 온도분포 그리고 이로 인한 연소효율 및 성능은 크게 변화하며, 이에 고체 체류량에 가장 크게 영향을 미치는 일차공기의 유속에 대해 그 영향을 조사하였다.

Fig. 4는 377 μm 의 sand에 대해 1차공기 유속 및 고체량에 따른 축방향 고체 체류량의 변화를 나타낸 것이다. 상승관 하부의 농후상 영역에서는 고체 체류량(solid hold up)이 약 0.3-0.35 정도로서 기포유동층의 농후상 영역과 비슷한 값을 갖고 있는 것으로 나타났으며, 유속의 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 순환유동층 조업자체가 기체유속이 매우 빠른 고속유동층 조업이 아닌 난류 혹은 난류에서 고속유동층으로의 경계부근에서 이루어지기 때문으로 이해될 수 있으며, 유속 증가에 따라 점차 농후상의 고체가 천이 영역과 희박상 영역으로 비산됨을 알 수 있다. 또한 유속이 증가함에 따라 희박상 영역에서의 고체 체류량의 절대값과 그 기울기는 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 희박상 영역에서의 고체 체류량은 축방향 높이 및 조업 유속에 따라 10^{-5} - 10^{-2} 까지 변화함을 볼 수 있으며, 매우 적은 값을 가짐을 알 수 있다. 한편, 천이영역에서의 고체 체류량은 유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 또한 그 기울기가 증가하는 경향을 보여주고 있다.

고체량(inventory)에 따른 고체체류량 변화 경향은 크게 농후상 층높이의 변화가 뚜렷하게 관찰되며, 또한 희박상 영역에서의 고체체류량도 같은 유속조건에서 어느 정도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 고체량(inventory)의 증가에 따라 상승관에서의 기-고 접촉 빈도가 증가하여 비산, 순환되는 고체가 증가하기 때문으로 이해될 수 있다.

입도변화(199, 281 μm)에 따른 상승관에서의 고체 체류량의 변화 경향은 377 μm 의 그것과 유사하며, 단지 입도가 작을수록 낮은 유속에서 같은 고체 체류량 및 체류량 기울기를 갖는 것으로 나타났다.

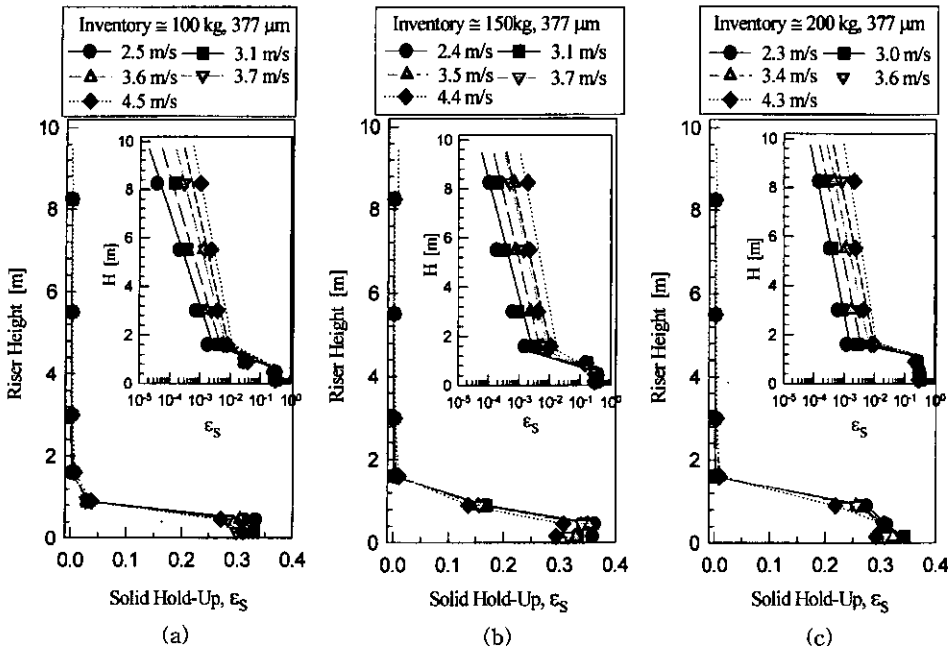


Fig. 4. Axial solid hold-up with U , ($d_{p,avg} = 377 \mu\text{m}$) a) inventory = 100 kg, b) inventory = 150 kg, c) inventory 200 kg.

Fig. 5는 각 loop에서의 입도에 따른 고체순환량을 U_o/U_i 로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 고체 순환량은 유속이 증가함에 따라 지수적으로 증가하며(log plot 참조), 모든 입도에 대해 같은 U_o/U_i 에서 같은 고체 순환속도를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 고체 종말속도가

순환량에 매우 직접적으로 영향을 미치는 것을 의미하고 있다. 한편, 양측 loop에서의 고체순환량과 가운데 loop에서의 고체순환량은 약 1.5배 정도 center loop이 더 큰 것으로 나타났으며, 이러한 고체순환 속도에 대한 상세한 결과 및 상관관계는 앞서 고찰한 결과에 자세히 나타내었다^[11].

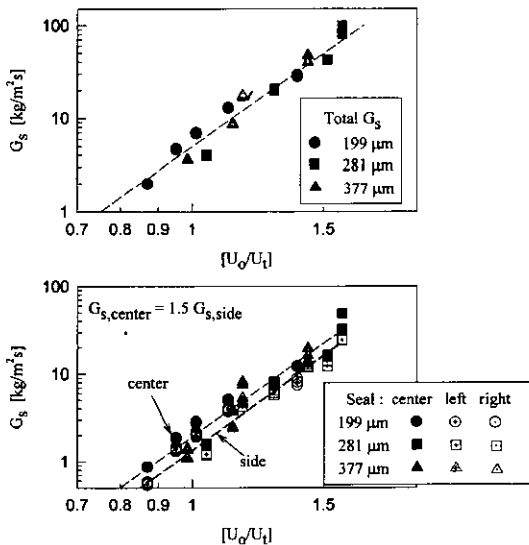


Fig. 5. Solid circulation rate, G_s , vs. U_o/U_i with particle size.

3-3. 고체량(Inventory) 및 2차공기비에 따른 고체 체류량 분포 특성

Fig. 6은 199, 377 μm 모래 입자에 대해 순환유동층 내 상승관내의 고체량(inventory)에 따른 고체 체류량 분포 특성을 나타내는 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 고체 체류량은 inventory가 증가함에 따라 설명한 바와 같이 농후상 영역의 층높이가 증가함을, 그리고 희박상 영역의 고체 체류량의 증가를 고찰할 수 있는 것으로 나타났다. 농후상의 층높이는 고정층 기준으로 각각 0.5 m(100 kg), 0.75 m(150 kg), 1.0 m(200 kg) 정도의 높이에서 순환유동층 조업상태로 전이되면, 농후상의 높이가 크게 팽창함을 볼 수 있으며, 천이 영역의 높이도 크게 증가함을 고찰할 수 있다. 또한 천이영역 및 희박상 영역에서의 고체 체류량은 점차 증가하는 경향을 보이고 있으나, 축방향 높이에 따른 기울기는 큰 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 이는 연소로(riser) 내의 고체량(inventory)이 증가함에 따라 전체적인 고체

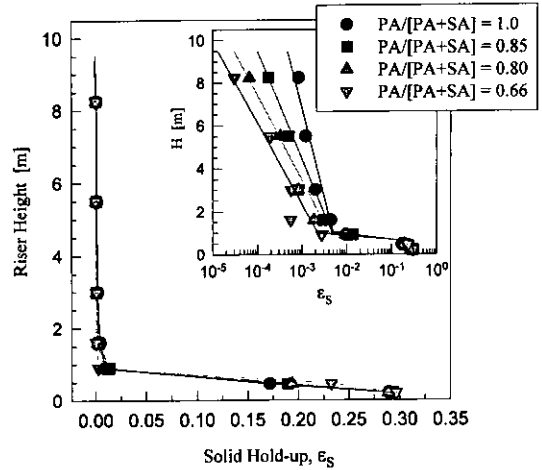
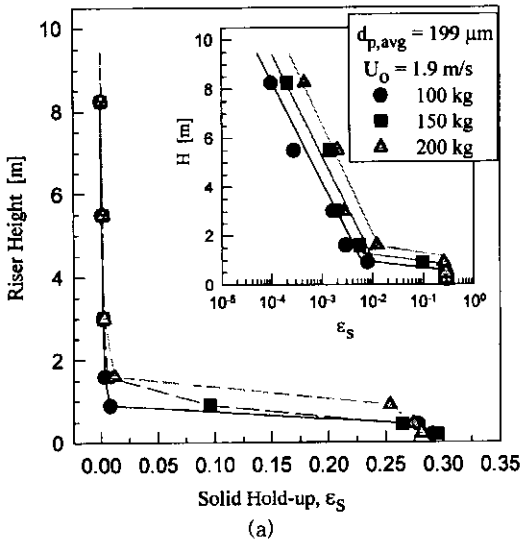


Fig. 7. Effect of PA/[PA + SA] ratio on the axial solid hold-up.

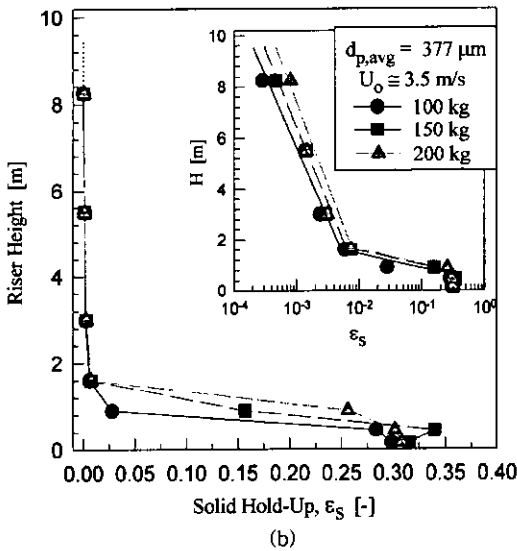


Fig. 6. Effect of total inventory on the axial solid hold with particle size.

체류량 경향 및 분포 특성은 바뀌지 않으나, 고체 체류량의 절대값은 inventory의 증가로 인한 연소로내의 하부 고체량 증가, 그리고 이를 통한 기-고 접촉빈도의 향상으로 인해 증가하는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 7은 전체 공기량이 일정할 때, 일-이차 공기비 ([PA]/([PA] + [SA]))에 따른 상승관(riser)에서의 고체 체류량을 나타낸 것이다($d_{p,avg} = 199 \mu m$, inventory = 100 kg, $U_o = 2.1 m/s$). 일차공기는 분산판을 통해 주입되었으며, 이차공기는 상승관의 양측 변면의 각각 4곳의 노즐을(0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m) 통해 상승관내로 공급되었다. 그

림에서 볼 수 있듯이 일-이차 공기비가 증가함에 따라 회박상 영역에서의 고체 체류량은 점차 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 특히 그 기울기의 크기가 점차 커지는 것을 고찰할 수 있다. 이는 일차 공기로의 주입량 비가 클 경우에는 농후상 영역에서 충분한 유속이 형성되고, 기-고의 접촉빈도도 크기 때문에 이차공기로의 주입이 있는 경우에 비해 상승관내의 비산율을 높여주어 회박상 영역의 고체 체류량이 크게 증가하는 것으로 이해할 수 있다. 반면, 천이영역(splash zone) 및 농후상 영역에서의 고체 체류량은 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 일-이차 공기비가 작아짐에 따라 하단부(농후상)의 기체 유속에 비해 이차공기 주입위치 이상(>0.5 m)의 높이에서 점차 기체 유속이 빨라지는 반면에 농후상으로부터의 고체 비산은 작아지기 때문에, 이로 인한 고체 체류량의 감소가 야기되기 때문으로 생각된다. 한편, 고체 순환량도 고체 체류량과 마찬가지로 일-이차 공기비의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 나타내는 것으로 고찰되었다. 그러므로, 전체 공기량이 일정할 경우, 이차공기의 증가는 상부의 고체 체류량 및 고체 순환량을 감소시키는 영향을 나타내므로, 순환유동층 연소시 NOx 발생의 문제점이 비교적 적은 경우에는 온도 안정화 및 농후상 영역에서의 연소 활성화를 위해 이차공기의 사용을 적게 하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

3-4. 석탄회재의 유속 및 고체량에 따른 축방향 고체 체류량 분포 특성

석탄 회재(ash)는 동해화력 순환유동층 보일러에서 실제 사용되고 있는 증물질로써 앞서 고찰한 silica car-

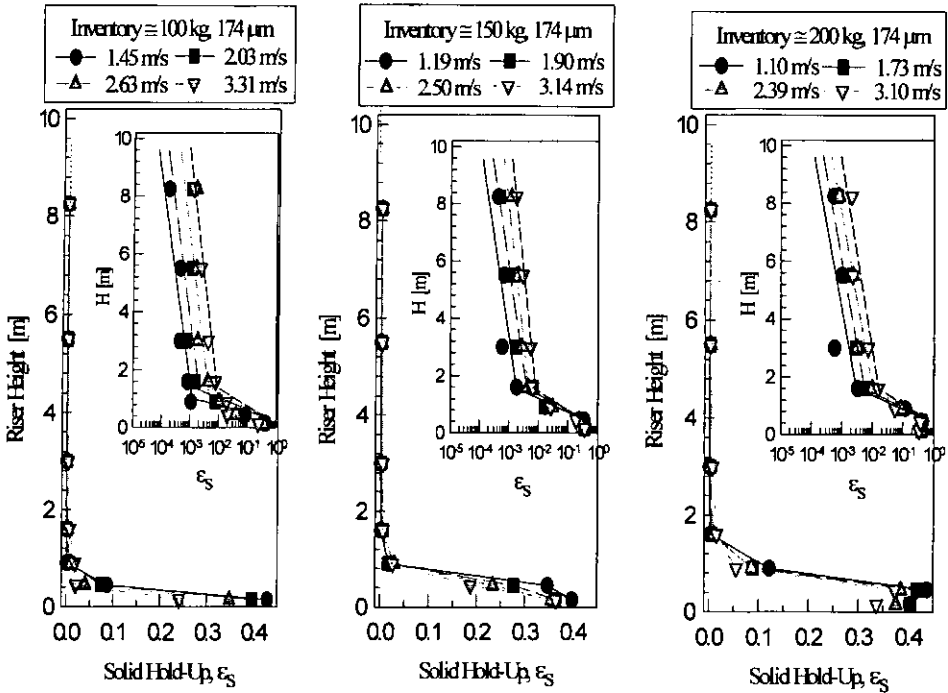


Fig. 8. Axial solid hold up with U_0 and solid inventory for coal ash.

bonate sand와는 달리 입도가 넓게 분포되어 있어(평균 입도 = 174 μm) 그 유동특성이 앞서 고찰한 것과는 다르게 나타날 것으로 기대된다. 또한, 동해화력의 실제 충전 입자를 사용함으로써, 동해화력의 초기 유동상태를 적절히 표현할 것으로 기대되나, 동해화력의 경우에는 장시간 운전시 충물질의 입도변화로 인한 유동현상의 변화는 어느 정도 존재할 것으로 예측된다.

Fig. 8은 상승관(riser) 유속에 따른 축방향 고체 체류량을 상승관(riser)내의 고체량(inventory)에 따라 나타낸 것이다. 석탄회재의 경우도 앞서 고찰한 sand와 마찬가지로 유속이 점차 증가함에 따라 농후상의 고체분율은 점차 감소하는 경향을, 그리고 회박상 영역에서의 고체분율은 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 또한 회박상 영역에서의 유속에 따른 고체 체류량 기울기는 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다. 상승관(riser)내의 고체량(inventory)의 증가에 따라서는 농후상의 고체 체류량은 크게 영향을 받지 않는 반면, 천이(splash) 영역과 회박상 영역에서의 고체체류량은 어느 정도 증가하는 경향을 나타내는 것으로 나타났다. 이는 앞서 고찰한 결과와 같은 경향을 나타내고 있는 것으로 보였다. 반면, 농후상 영역에서의 고체 체류량은 앞서 고찰한 모래에 비해 적용된 상승관(riser)내의 유속범위에서 다소 높은 것으로 나타났으며, 또한 천이영역 및 회박상 영역에서의

고체 체류량 및 이의 기울기는 앞서 고찰한 균일한 입도의 모래에 비해 다소 낮게 나타났다. 이는 석탄입자의 경우 평균 입경은 앞서 실험한 모래에 비해 다소 작지만, 입도 분포가 매우 넓게 분포되어 있어 각 영역에서의 주된 유동을 보이는 입자 크기가 정해져 있기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 농후상 영역에서는 평균입경(174 μm)을 기준으로 주입되는 공기유속에 대해 다소 큰 입자들이 비산되지 못하고 항상 농후상 영역에서만 유동을 보이고 있으며, 천이 영역과 회박상 영역에서도 마찬가지로 각각의 영역의 입자들이 나뉘어 유동현상을 보이고 있는 것으로 이해할 수 있다. 그러나, 앞서 고찰한 sand의 경우는 매우 균일한 입도 분포를 나타내고 있고, 농후상 및 천이 영역 그리고 회박상 영역들간에 입경이 비슷하기 때문에 상대적으로 석탄 회재에 비해 낮은 유속범위에서도 많이 비산하며 또한 입자 각각에 대해 비산 기회가 많이 주어지므로 축방향 고체 체류량이 더 클을 알 수 있다. 이러한 현상은 전체 입경에 대한 평균 입경을 사용함으로써 나타나는 현상으로 실제 연소소에서 고려해야 할 주요한 사항으로 이해할 수 있다.

한편, 이러한 고체 체류량의 분포 및 그 기울기는 입자의 종류 및 입도분포에 따라 다르게 표현되며, 이를 나타내기 위해 많은 연구자들이 상관관계식을 제시하였다. 본 연구에서는 다음의 상관 관계식으로부터 고체 체

류량을 표현하여 그 특성을 고찰하였다.

먼저 상승관(riser) 천이영역(splash zone)에서의 고체 체류량은 농후상의 고체 체류량, ϵ_{sd} 를 일정하다고 가정할 경우, 다음의 관계로 표현할 수 있다^[12].

$$\frac{\epsilon_s - \epsilon_s^*}{\epsilon_{s,d} - \epsilon_s} = e^{-a(h-H_d)} \quad (3)$$

여기서 ϵ_s 는 높이에 따른 고체 체류량이며, ϵ_s^* 는 상승관에서의 최소 고체체류량, 그리고 H_d 는 농후상의 고체층 높이이며, a 는 감소 지수(decay constant)로써 각 입자특성에 따라 위 식을 특정화하는 상수이다.

또한 천이 영역을 지나 상승관 상부의 회박상 영역에서는 다음의 관계로 표현할 수 있다^[13].

$$\epsilon_s = \epsilon_{exit} e^{K(H_{exit}-h)} \quad (4)$$

여기서 ϵ_{exit} 는 상승관(riser) 출구에서의 고체 체류량이며 H_{exit} 는 출구의 높이, 그리고 K 는 식(3)의 a 와 마찬가지로 회박상 영역에서의 감소 지수(decay constant)이다. 이의 두 관계로부터 Johnson과 Leckner^[3]는 천이 영역과 회박상 영역의 고체 체류량을 다음의 관계로 표현하였다. 즉, 농후상 영역 이상 높이에서의 전체 고체 체류량은 아래와 같으며,

$$\epsilon_s = \epsilon_{splash} + \epsilon_{transport} \quad (5)$$

이를 전체 연소로(riser)에서의 고체 체류량으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_{exit} & \text{for } h < H_d \\ \epsilon_s &= (\epsilon_d - \epsilon_{HX})e^{-a(h-H_d)} + \epsilon_{exit}e^{K(H_{exit}-h)}, & \text{for } H_d < h < H_{exit} \\ \text{where, } \epsilon_{HX} &= \epsilon_{exit}e^{K(H_{exit}-H_d)} \end{aligned} \quad (6)$$

상기 식으로부터 각 영역에서의 상수 a 및 K 그리고 농후상의 높이 및 고체 체류량, 그리고 출구에서의 고체 체류량을 알면 상승관(riser)에서의 전체 고체 체류량을 구할 수 있다. 각 영역에서의 상수 a 및 K 는 입자 특성에 따라 결정되는 상수이며, Figs. 3, 5 등에 표현한 바와 같이 일정 운전조건에서의 고체 체류량의 log plot의 기울기로부터 구할 수 있다. 또한 연소로의 운전 압력 강하, 혹은 기존 연구자들의 다양한 상관관계로부터 농후상의 고체 체류량 및 층높이 그리고 출구에서의 고체 체류량은 구할 수 있으므로, 전체 상승관(riser) 높이에 따른 고체 체류량을 상기 식으로부터 구할 수 있게 된다.

Fig. 9는 앞서 고찰한 silica carbonate sand(199, 281, 377 μm)에 대한 감소지수 a 를 기존의 연구결과 중 Kunni와 Levenspiel^[12]이 제시한 $a \cdot U_o = \text{const.}$ 라는 상관 관계에 맞추어 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 비

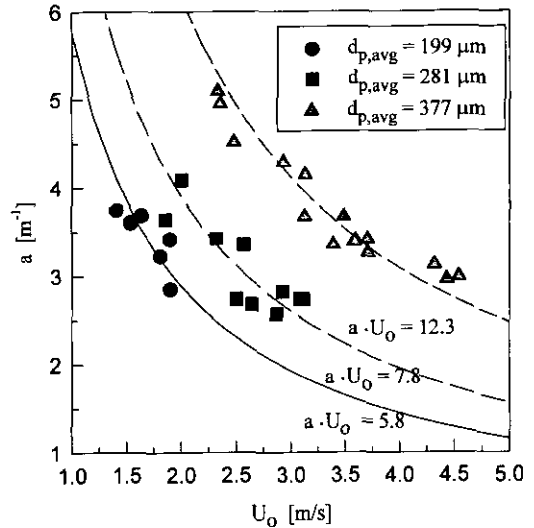


Fig. 9. Decay constant a vs. U_o with particle size of sand.

교적 상기의 상관 관계는 각 입자특성(입자크기)에 맞추어 기체 속도에 대해 그 관계를 매우 잘 나타냄을 알 수 있다. 감소지수 a 는 기체 유속이 증가함에 따라 점차 감소함을 나타내고 있으며, 입자 크기에 대해 $a \cdot U_o$ 의 값은 각각 5.8, 7.8, 12.3의 값으로 입자 크기가 증가함에 따라 점차 증가함을 고찰할 수 있었다. 그러나 상기의 표현은 각 입자크기에 따라 각각 a 과 U_o 와의 관계를 구해야 하기에 좀 불편한 방법의 표현이기도 하다.

이에 본 연구에서는 입자 특성을 표현하는 U_o (입자종말속도)의 값을 도입하여 단일 표현 방법으로써 감소지수의 표현을 하고자 하였으며, 이를 Fig. 10(a)와 (b)에 a 및 K 에 대해 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 decay constant a 및 K 는 비교적 입도에 상관없이 U_o/U_o 의 곱과 상수의 관계를 이루고 있으며, 각각 3.6과 0.37의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이를 통해 입자의 특성에 맞는 a 및 K 의 값을 구할 수 있으며, 이들 상수의 값이 작을수록 연소로 상·하부간의 고체 체류량의 차이가 크게 나타나며, 상부의 고체 체류량이 점차 커져서 상·하부간의 고체 체류량이 차이가 작아질수록 상수의 값들이 작게 표현됨을 알 수 있었다.

한편, 석탄회재에 대한 a 및 K 의 값은 Fig. 11에 보인 바와 같이 $a(U_o/U_o)$ 의 값이 6.3으로, 그리고 $K(U_o/U_o)$ 의 값이 0.58로 각각 나타낼 수 있으며, 이를 식(7)에 아래의 경우와 비교하여 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{sand} : a \cdot (U_o/U_o) &= 3.6, K \cdot (U_o/U_o) = 0.37 \\ \text{coal ash} : a \cdot (U_o/U_o) &= 6.3, K \cdot (U_o/U_o) = 0.58 \end{aligned} \quad (7)$$

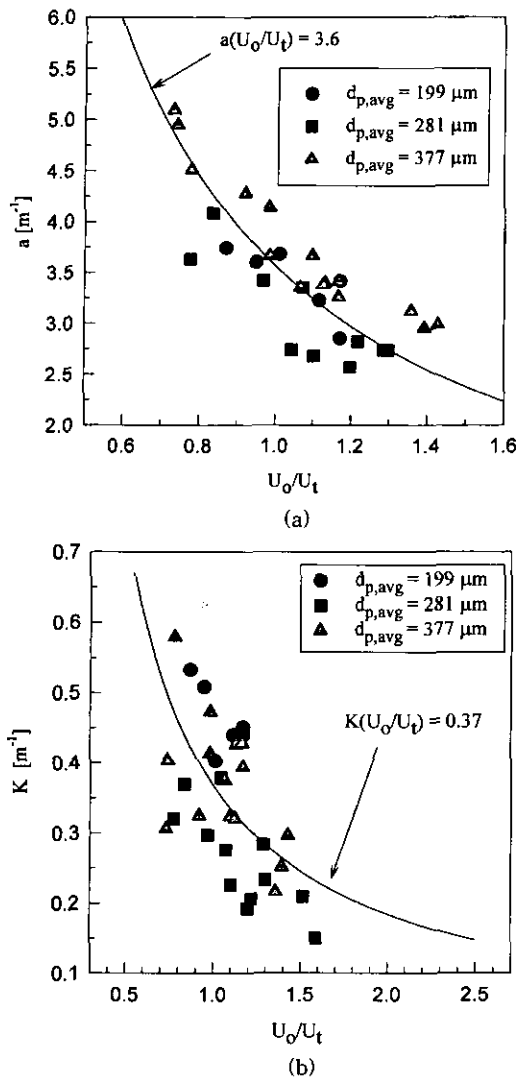


Fig. 10. Decay constant a (a) and K (b) vs. U_o/U_t for sand.

석탄회재의 경우, 상기 모래 경우에 비해 다소 큰 값을 갖고 있는 것으로 나타났다. 그러므로, 모래 및 석탄회재의 상기 상관 관계의 비교로부터 비산 정도 및 고체 체류량의 차이를 예측할 수 있으며, 상기의 감소 지수와의 상관 관계수($a(U_o/U_t)$, $K(U_o/U_t)$)가 클수록 비산하기 어려운 입자임을 판단할 수 있다.

석탄회재의 고체 순환량 역시, 모래의 그것에 비해 상대적으로 매우 적게 나타나는 것으로 고찰되었으며, 이는 고체 체류량에서 보인 바와 같이 그 분포가 상승관의 농후상 영역에 비해 회박상 영역에서의 고체 체류량이 급격히 떨어져 순환량 자체도 낮아질 수 밖에 없는

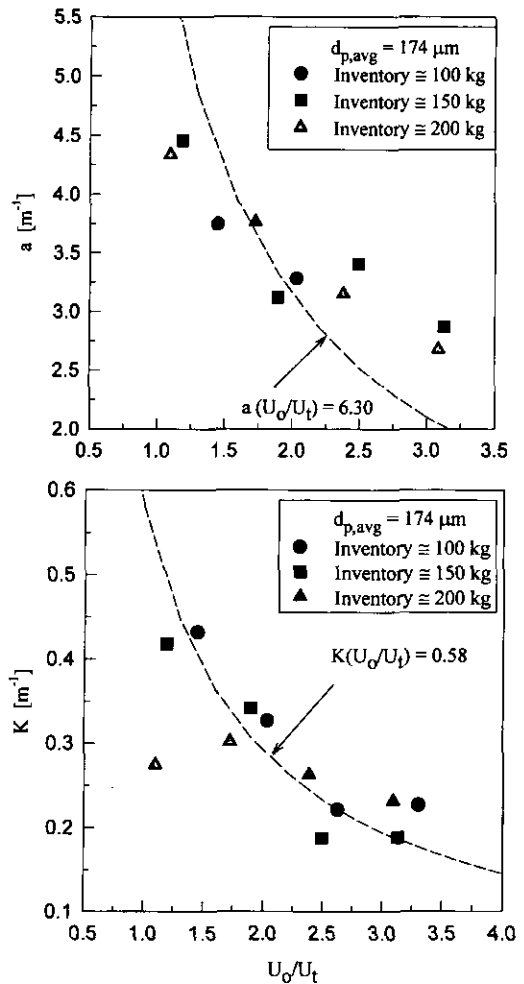


Fig. 11. Decay constant a (a) and K (b) vs. U_o/U_t for coal ash.

것으로 이해할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 순환유동층 상승관(연소로)의 고체 체류량 및 순환량의 해석시 전체 주입되는 입자의 평균입경에 대한 전체 고찰 및 계산을 통한 예측은 잘 맞지 않을 수 있으며, 이는 각 입자군에 대한 개별적 유동특성의 이해 혹은 전체 입도분포에 대한 유동특성 자료의 적용에 대한 고려가 있어야 하겠으며, 이의 일환으로 상기 지수의 도입을 통한 비산 및 유동 특성의 예측은 매우 유용할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 세 개의 순환고리를 갖는 순환유동층 상승관에서 운전변수에 따른 고체 체류량 및 순환량에

대해 고찰하였다. 상승관내의 기체 유속(U_o) 및 일차공기비($PA/PA + SA$) 그리고 전체고체량(total inventory)이 증가함에 따라 회박상 영역에서의 고체 체류량 및 순환량은 점차 증가하는 경향을 보였으며, 균일한 입도분포에 대해 평균입경이 작을수록 낮은 유속에서 큰 고체 체류량을 보이는 것으로 나타났다. 그러나, 비교적 입도분포가 넓은 입자에 대해서는 고체 체류량 및 순환량이 균일한 입도분포의 입자에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 또한, 천이영역 및 회박상 영역에서의 측방향 고체 체류량 분포특성은 천이영역에서의 감소지수 a 와 회박상 영역에서의 감소지수 K 를 사용해 나타낼 수 있었다. 한편, 입도분포가 균일한 sand가 입도분포가 넓은 석탄 회재에 비해 상대적으로 낮은 a 및 K 값을 갖는 것으로 나타났으며, 이의 값이 클수록 회박상에서의 고체 체류량 및 순환유동층에서의 고체 순환량이 작은 것으로 나타났다.

사용기호

a	: decay constant [m^{-1}]
d_p	: particle size [m]
g	: gravity acceleration [m/s^2]
g_c	: conversion factor [kgm/Ns^2]
h	: height [m]
H_d	: dense bed height [m]
H_{exit}	: exit height [m]
K	: decay constant [m^{-1}]
L	: length between two points [m]
ΔP	: pressure drop [Pa]
ΔP_{ls}	: pressure drop across the loopseal [Pa]
ΔP_{CFB}	: pressure drop across the riser [Pa]
ΔP_{cy}	: pressure drop across the cyclone [Pa]
ΔP_{sp}	: pressure drop across the standpipe [Pa]
U_{mf}	: minimum fluidizing velocity [m/s]
U_o	: superficial velocity in the riser [m/s]
U_t	: terminal velocity [m/s]

Greek Symbols

ϵ	: void fraction [-]
ϵ_{exit}	: volume fraction of solid at exit [-]
ϵ_s	: volume fraction of solid [-]

ϵ_s^*	: the lowest volume fraction of solid in the riser [-]
ϵ_{sd}	: volume fraction of solid in the dense bed [-]
ϵ_{splash}	: volume fraction of solid in the splash phase [-]
$\epsilon_{transport}$: volume fraction of solid in the transport phase [-]
ρ_s	: density of solid [kg/m^3]
ρ_g	: density of gas [kg/m^3]

참고문헌

- Grace, J.R., Avidan, A.A. and Knowlton, T.M.: *Circulating Fluidized Beds*, Blackie A&P, UK (1996).
- Lee, J.M., Kim, J.S., Kim, J.J. and Ji, P.S.: 13th Korea-U.S. Joint Workshop on Energy & Environment, Sep., Nevada, USA, pp. 41-50 (1999).
- Johnsson, F. and Leckner, B.: 13th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Florida, USA, pp. 671-679 (1995).
- Lee, J.M. and Kim, J.S.: *Korean J. Chem. Eng.*, 16, pp. 640-645 (1999).
- Johnsson, F., Andersson, S. and Leckner, B.: *Powder Technology*, 68, pp. 117-123 (1991).
- Svensson, A., Johnsson, F. and Leckner, B.: 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, San Diego, USA, pp. 887-897 (1993).
- Namkung, W., Cho, Y.J. and Kim, S.D.: *HWAHAK KONGHAK*, 32, pp. 241-247 (1994).
- Zhou, J., Grace, J.R., Qin, S., Brereton, C.M.H., Lin, C.J. and Zhu, J.: *Chem. Eng. Sci.*, 49, pp. 3217-3226 (1994).
- Wen, C.Y. and Yu, Y.H.: *AIChE J.*, 12, pp. 610-612 (1966).
- Haider, A. and Levenspiel, O.: *Powder Technology*, 58, pp. 63-70 (1989).
- Lee, J.M., Kim, J.S. and Kim, J.J.: *Theories and Application of Chem. Eng.*, 6, pp. 1093-1096 (2000).
- Kunii, D. and Levenspiel, O.: *Fluidization Engineering*, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, USA (1991).
- Zhang, W. and Johnsson, F., Report A91-193, ISSN 0281-0034, Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Tech., Sweden (1991).