

## 상온 순환유동층 연소로를 모사한 상온 순환유동층에서 수력학적 특성

손재익·최정후·이창근

한국동력자원연구소 폐자원연구실  
(1988년 3월 28일 접수, 1988년 8월 27일 채택)

## Hydrodynamics in a Cold Mode Circulating Fluidized Bed Simulating the Commercial Scale Combustor

Jae-Ek Son, Jeong-Hoo Choi, and Chang-Keun Lee

Waste Resources Utilization Division, Korea Institute of Energy & Resources, P.O. Box 339 Daejeon, Korea

(Received 28 March 1988; accepted 27 August 1988)

### 요 약

모래를 충물질로 사용하는 상온의 기-고 순환유동층에서 흐름영역의 경계속도와 freeboard 기체출구에  
서 입자의 비산유출속도를 측정하였다. 고속유동 및 희박상 수송의 시작속도는 고체의 재순환속도가 증가  
함에 따라 증가하였다. Freeboard 기체출구에서 입자의 비산유출속도는 유속이 증가할수록 그리고 정체  
층높이가 높을수록 증가하였다. 아울러 입자의 비산유출속도에 관한 모사를 고찰하였다.

**Abstract**—The transition velocity between flow regimes and the particle carry-over rate at the freeboard gas exit  
were measured in a gas-solid circulating fluidized bed which used sand as bed materials at ambient temperature. The  
onset velocities of the fast fluidization and the dilute transport increased with the increase of the solid circulation rate.  
The particle carry-over rate at the freeboard gas exit increased with the increase of the gas velocity and the static bed  
height. Model considerations on the particle carry-over rate were discussed additionally.

### 1. 서 론

일찌기 유동점촉분해(FCC) 공정에서 개발되었던 순  
환유동층은 기술적 진보와 적용분야의 확대가 계속 이  
루어져 왔고 석유파동 이후 근래에 이르러서는 대형 석  
탄보일러로 각광을 받고 있다[6, 12, 23]. 국내에서도  
일찌기 KAIST의 몇몇 연구자들[10, 13, 15, 19]에 의  
해서 상온 순환유동층 및 고온 순환유동층 연소로에서  
연구결과가 보고된 바 있으며, 특히 동양화학(주)에서  
는 대형 순환유동층 석탄보일러를 가동중에 있다. 한편

순환유동층에 대한 현재의 학문적 이해는 기술개발을  
밀받침하기에는 상당히 미진하며 연구되어야 할 분야가  
많이 산재되어 있는 기술이기도 하다.

순환유동층의 이해에는 층특성 해석, 흐름형태의 규  
명, 입자비산특성의 해석 등과 같은 수력학적 특성의  
해석이 기초가 될 수 있으며, 근래에 Kim과 Lee[12]  
는 순환유동층의 유동특성 및 혼합특성에 대한 광범위  
한 고찰을 보고한 바 있다. 순환유동층에서 흐름영역에  
대한 연구는 여러 관점에서 보고되어 왔으며[11, 16,  
17, 24], 이들은 대부분 시험된 변수로 구성되는 무차

원변수에 의해서 흐름영역의 경계를 제시하였다. 그러나 입자비산특성에 대한 이해는 극히 미진하며 이에 대한 연구는 절실하다.

본 연구는 상용 순환유동층 연소로의 수력학적 특성을 모사하기 위해서 수행되었다. 순환유동층 연소로는 탈황율의 제고와 이에 따른 고체폐기물의 감소,  $\text{NO}_x$  배출의 저감, 연소밀도의 제고 등 기포유동층보다 훨씬 우수한 장점을 지닌다. 한편 순환유동층 연소로는 고체 농도, 입자재순환속도, 입도와 같은 수력학적 특성에 있어서 기존에 주로 보고된 Geldart 분류 A 입자계의 고속유동층(fast fluidized bed)과 현저한 차이를 보이는 것으로 알려져 있다[6]. 본 연구에서는 먼저 2차 공기주입이 없고, 상용 연소로에서 사용되는 고체와 유사한 Geldart 분류 B 고체를 사용하는 상용유동층에서 기포층으로부터 연소로의 유동영역과 유사한 범위까지 유속을 변화시키며 흐름영역의 경계속도와 freeboard 기체출구에서 입자비산속도를 측정하였다. 나아가서 입자비산속도의 해석을 고찰하였다.

## 2. 실험

Fig. 1은 상용 순환유동층 장치를 나타낸다. 유동층 설비는 공기공급설비, 주탑, 재순환설비로 구성된다. 주탑과 1차 사이클론은 투명한 plexi-glas로 제작되었으며, 주탑은 내경 0.38m이며 기체분산판으로부터 freeboard 기체출구까지 높이 9.1m이다. 주탑에는 축 방향으로 15곳에 압력점이 있어 5개의 pressure transmitter와 10개의 마노미터(manometer)가 연결되어 있다. Pressure transmitter는 Apple II micro computer에 연결되어 있어서 연속적인 압력변화를 측정한다. 기체분산판으로는 직경 3mm의 구멍 1963개가 균일한 사각 피치(pitch)로 뚫려 있는 다공판을 사용하였다.

재순환설비는 직렬로 연결된 두 개의 사이클론(cyclone)과 두 개의 호퍼(hopper) 그리고 속도가 보정된 가변속 로타리 밸브(rotary valve)로 구성된다. 한편 유속이 작은 범위의 실험을 수행할 때에는 아래 호퍼와 로타리 밸브사이에 재순환되는 고체의 직접 채취를 위해서 diverter를 설치하였다.

공기는 forced draft fan으로 공급되며 유량조절 글로브 밸브와 annubar 형태 유량계(ANNUBAR MODEL ANR 76)를 거쳐서 주탑의 공기상자(plenum)로 주입된다.

충물질로는 입자마모에 의한 영향을 방지하기 위해서

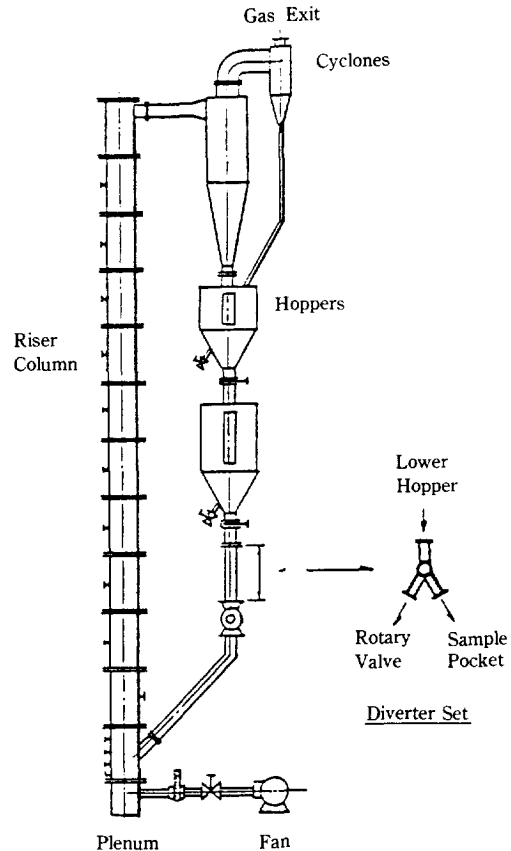


Fig. 1. Schematic diagram of test unit.

모래를 사용하였다. 모래의 겉보기 밀도는  $2630 \text{ kg/m}^3$ 이며 bulk density는  $1350 \text{ kg/m}^3$ 이다. Table 1은 모래의 입도분포를 나타내며 대수평균입경(logarithmic mean diameter)은  $0.43 \text{ mm}$ 이다. 유속에 따른 층내 압력강하의 변화를 측정하여 결정된 최소유동화속도는  $0.11 \text{ m/s}$ 이었다.

실험초기에 모래를 일정 높이로 층에 채우고 재순환 설비의 로타리 밸브를 가동시킨다. Fan을 가동시켜서 일정 유속으로 층을 유동화시킨다. 층의 유동화시 주탑에서 비산유출된 입자는 두 개의 사이클론에서 거의 모두 포집되어 층내로 재주입된다. 측정은 주탑내의 압력 분포가 더 이상 변화하지 않는 상태를 정상상태로 간주

Table 1. Size distribution of sand

Mesh	-1.00	-0.71	-0.42	-0.25	-0.149	-0.088
Range (mm)	+0.71	+0.42	+0.25	+0.149	+0.088	+0
Fraction	0.014	0.301	0.415	0.168	0.069	0.033

하고 이를 확인한 후 수행하였다.

먼저 실험영역에서 흐름형태를 규명하기 위해서 유속을 변화하며  $U_c$ , 난류유동의 시작속도, 고속유동의 시작속도, 희박상 수송의 시작속도를 기존의 Yerushalmi와 Cankurt[24], Satija와 Fan[18], Takeuchi 등[22]의 방법에 의해서 각각 측정하였다.

$U_c$ 는 기체분산판으로부터 0.2m 높이의 압력점에서 유속을 변화시키며 시간에 따른 압력요동과 시간평균 압력을 측정하여 시간평균압력으로 나눈 압력요동이 최대값을 보이는 유속으로 결정하였다[24]. 난류유동의 시작속도는 유속을 변화시키면서 최소유동화상태에서 층높이의 1.5배 높이와 freeboard 기체출구의 압력점 사이의 압력차를 시간에 따라 연속적으로 측정하여 각 유속에서 압력 0의 확률밀도값을 구하여 이 값이 0이 되는 유속으로 하였다[18]. 고속유동의 시작속도는 주어진 고체재순환속도에서 층이 choking되지 않고 유지되는 최소속도로 결정하였으며 희박상 수송속도는 주어진 고체재순환속도에서 주탑의 층바닥으로부터 측방향 압력분포가 균일하게 유지되는 최소속도로 하였다[22]. 이때 재순환되는 고체는 아래 호퍼에 채워져 있으며 회전속도에 따라 유량이 미리 보정된 가변속 로타리 밸브의 회전속도로 정량되어 투입되었다.

유속이 작은 범위에서 (2.4m/s 이하), freeboard 기체출구에서 입자의 비산속도는 Gugnoni와 Zenz[9]의 방법에서와 같이 아래 호퍼와 로타리 밸브 사이에 diverter를 설치하고 임의시간(0-30s) 동안 diverter를 져서서 재순환되는 고체를 직접 채취하여 무게를 달아서 결정하였다. 유속이 큰 범위 (2.4m/s 이상)에서는 입자비산속도가 커서 시료의 직접 채취에 의한 측정이 어렵기 때문에 diverter를 제거하고 로타리 밸브의 평형속도로 고체의 재순환속도를 결정하여 이를 비산유출속도로 하였다. 로타리 밸브의 평형속도는 로타리 밸브 위로부터 아래 호퍼내까지 쌓인 정채된 고체두 (solid head)가 일정하게 유지되는 회전속도로 하였다. 비산된 입자의 입도분포는 재순환고체를 직접 채취하여 채분식으로 결정하였고 채취된 시료는 분석후 층에 재주입하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 전이속도

Fig. 2는 Yerushalmi와 Cankurt[24]의 방법에 의한  $U_c$ 의 결정을 나타낸다. 비산유출된 입자의 재순환

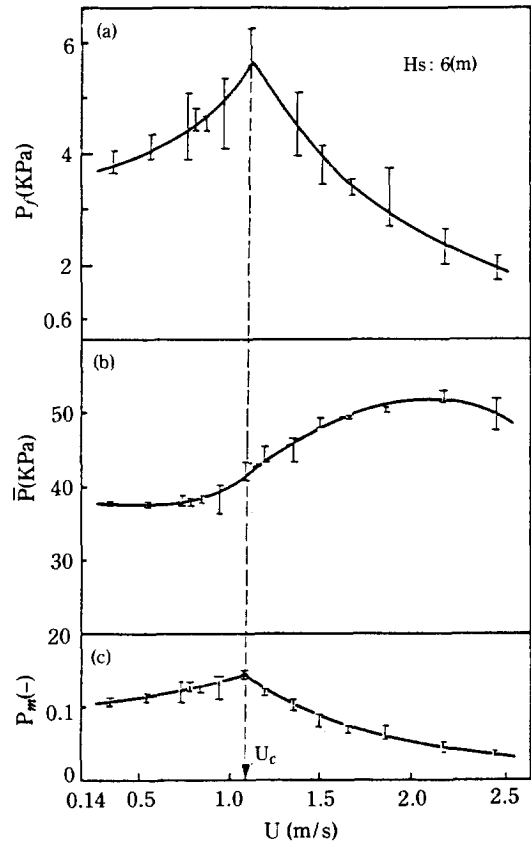


Fig. 2. (a) Pressure fluctuation, (b) time-averaged pressure and (c) relative pressure fluctuation with gas velocity at 0.2m high above the distributor.

이 없는 가운데 유속을 증가시키면서 분배기로부터 0.2 m 높이의 층내에서 측정된 압력요동, 시간평균 정압을 나타내며 압력요동을 시간평균 정압으로 나눈 상대적인 압력요동도 나타낸다. 기포층(bubbling bed)과 슬러그층(slugging bed)을 지나면서 slugging이 극에 달하여 마침내 slug가 깨지기 시작하는 속도로 정의되는  $U_c$ 는 상대압력요동이 최고에 달하는 유속으로 정하며 본 실험에서는 약 1.1m/s로 나타났다. 이 값은 Lee와 Kim[14]의 보고에서 고찰된 기준 측정값들과 유사하며 그들의 상관식에 의해서 계산된 값 약 1.2m/s와 아주 흡사하다.

Fig. 3은 Satija와 Fan[18]의 방법에 의한 난류유동 (turbulent fluidization) 시작속도의 결정을 나타낸다. 분배기로부터 최소유동화된 층높이의 1.5배 높이에서 유속에 따라 측정된 압력의 확률밀도에서 게이지

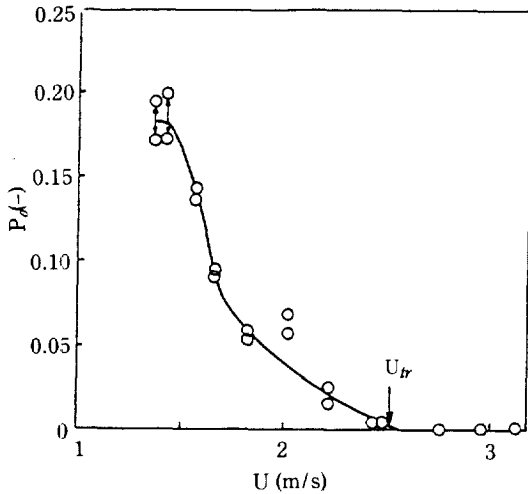


Fig. 3. Probability density of zero pressure with gas velocity.

압이 0인 확률밀도를 나타낸다. 이때 압력은 freeboard가 대기에 노출되어 있을 경우에는 정압으로 취하고 freeboard가 대기에 노출되지 않을 경우에는 freeboard 정상과의 압력차로 취하게 되는데 본 연구에서는 후자를 따랐다. 제이압이 0인 확률밀도는 유속이 증가함에 따라 입자의 비산현상으로 점차 감소하며 최종에는 압력점이 splashing 영역에 완전히 잠겨서 확률밀도는 0이 된다. 이 확률밀도가 0이 되는 유속으로 정의되는 난류유동의 시작속도는 약 2.5m/s이다. 여기서 층입자의 평균입경(0.43mm)에 해당하는 종말속도는 약 3.5m/s이며 이 종말속도에 대한  $U_{tr}$ 의 비는 0.71로 Satija와 Fan[18]의 고찰에서 입경이 감소됨에 따라 이 비가 증가하는 경향과 유사함을 보인다.

Fig. 4는 Takeuchi 등[22]의 방법에 의해서 측정된 고속유동(fast fluidization)의 시작속도와 회박상 수송(dilute transport)의 시작속도를 고체재순환속도와 함께 나타낸다. 두 시작속도는 고체재순환속도가 증가함에 따라 수송되어야 할 입자량이 증가하므로 증가한다. 그런데 본 실험에서 측정된 고속유동의 시작속도와 회박상 수송의 경계속도는 Takeuchi 등[22]의 측정값보다 훨씬 큰 유속에서 나타난다. 이는 본 실험에서 사용된 고체의 입도가 훨씬 크기 때문이며 입도가 훨씬 작거나 입자밀도가 작은 Geldart 분류 A 입자계에서 주로 연구되어온 기존의 고속유동층(fast fluidized bed)과는 수력학적 특성에 있어서 크게 차이가 있음을 엿볼 수 있다. 또한 그림에서 나타내는 바와 같이 순환

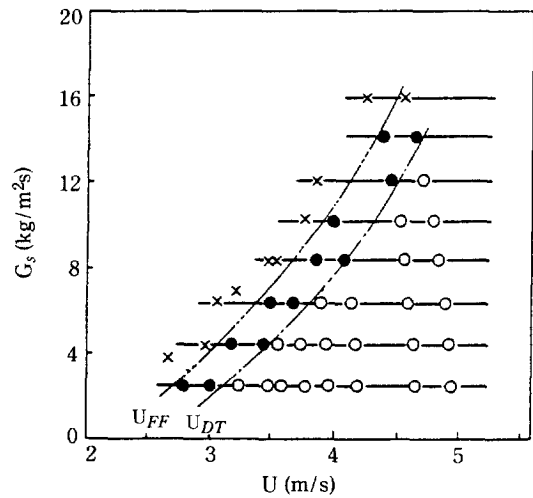


Fig. 4. Onset velocities of fast fluidization and dilute transport with solid recirculating rate. Regimes of axially uniform pressure gradient(○), dense bed existing(●) and bed choking(×).

유동층 연소로내 2차 공기가 주입되는 높이 이하의 로하부 조밀입자층(dense bed)에서 통상적인 조건인 기체속도 3-4m/s에서는 난류유동과 고속유동이 서로 겹침을 알 수 있다. 한편 실제 연소로에서와 같이 2차 공기가 주입되면 비산유출속도가 증가될 것이며 따라서 고속유동영역이 어느 정도 확장될 것으로 예측된다.

유동층의 흐름영역에 대한 일반적인 분류로는 Reh[17]와 Horio 등[11]의 보고를 들 수 있으며, 비록 난류유동의 시작속도에 대한 모호함이 있고 고체의 재순환속도에 따른 고속유동 및 회박상 수송 시작속도의 변화를 볼 수는 없으나 위에서 측정된 전이속도로 나누어지는 구체적인 분류는 Horio 등[11]의 보고서에서 나타내진다. 한편 측정된 최소유동화속도,  $U_0$ , 난류유동의 시작속도, 고속유동의 시작속도, 회박상 수송의 시작속도는 Horio 등[11]의 흐름영역도에서 나타내는 경계속도보다 약 20-50% 정도 작은 값을 나타낸다.

### 3-2. 입자비산

Fig. 5는 측정된 입자비산 플럭스(flux)를 유속에 따라 나타낸다. 유속이 증가함에 따라 비산되는 입경이 커지고 층표면에서 초기 비산속도가 증가하기 때문에 비산플럭스는 급격히 증가한다. 그림에서는 Gugnoni와 Zenz[9]의 직경 0.91m 유동층과 George와 Grace[8]의 단면적  $0.25 \times 0.43m$  유동층에서 측정된 비산플

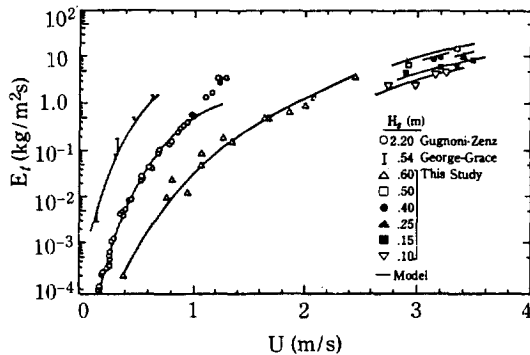


Fig. 5. Total carry-over flux with gas velocity and static bed height.

력스도 함께 나타낸다. 난류유동이 시작되는 2.5m/s 이하의 기포층 및 슬러그층에서 비산플럭스는 이들의 측정값과 유사한 변화경향을 보인다. 여기서 앞서 보고된 두 연구에서 사용된 입자의 특성은 서로 유사하지만 Gugnoni와 Zenz[9]의 유동층은, George와 Grace[8]의 유동층보다 단면적이 넓고 층높이가 훨씬 높기 때문에 비산속도가 더 크며 본 실험에서 사용된 입자는 훨씬 작은 입도분포를 갖기 때문에 George와 Grace[8]의 비산유출속도보다 작다.

Fig. 5는 순환유동층 연소로의 하부 조밀입자층(dense bed)에서 유동화속도(3-4 m/s)와 유사한 유속 범위에서 정체층높이의 변화에 따른 비산플럭스의 변화도 함께 나타낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 이 영역에서도 비산플럭스는 유속이 증가함에 따라 증가하며 또한 정체층높이가 증가함에 따라 역시 증가한다. 이는 정체층높이가 증가할수록 조밀 입자층의 높이가 freeboard 기체층구와 더욱 가까워지기 때문으로 사료되며 정체층높이의 영향은 유속의 영향에 비해서 작게 나타난다. 여기서 정체층높이는 압력차로 측정된 주탑 내의 고체부하를 고체의 bulk density로 환산하여 정하였다.

Fig. 6은 측정된 비산유출입자의 입도분포를 나타낸다. 예측되는 바와 같이 비산유출된 입자의 평균입경은 유속이 증가함에 따라 증가한다. 한편 유속이 약 3.5 m/s일 때 입도분포는 층입자의 입도분포에 근접함을 보였다.

### 3-3. 입자비산에 관한 모사의 고려

Fig. 4에서 고찰된 바와 같이 순환유동층의 흐름영역은 입자비산속도와 밀접한 관계를 가지며, 입자비산속도의 예측은 흐름영역의 구조적 해석에 필수 불가결하

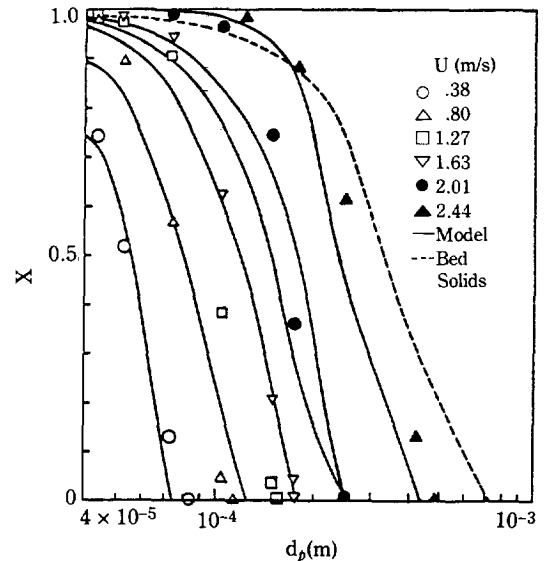


Fig. 6. Size distribution of entrained particles with gas velocity.

다.

기포유동층에서 입자비산속도에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해서 보고된 바 있으며[7] 근래에 Son과 Choi[20, 21]는 상온유동층과 유동층 연소로에서 비산속도를 해석한 바 있다. 그러나 순환유동층에서 입자비산속도에 관한 해석은 아직 극히 미진하다. 한편 기포유동층으로부터 고속유동층영역에서 측방향의 입자밀도 분포는 기포유동층의 측방향 입자밀도분포와 그 경향이 유사하여 층하부에 조밀한 입자층이 존재함을 보일 뿐만 아니라, Son과 Choi[20, 21]의 실험영역은 난류유동을 일부 포함하기 때문에 그들의 입자비산속도에 관한 해석을 본 실험영역에 확장함은 타당성 있게 검토될 수 있다. 따라서 본 고에서는 Son과 Choi[20, 21]의 해석을 도입하였다.

Do 등[5]의 기포유동층에서 고려와 유사한 모사를 도입하며 모사의 간결화를 위해서 다음을 가정한다.

(1) 층입자는 층표면에서 파괴되는 기포에 의해서 freeboard로 올려진다.

(2) Freeboard에서 입자간의 상호영향과 벽영향은 무시한다.

(3) 마모에 의한 입자무게 및 크기의 변화는 무시된다.

(4) Freeboard에서 입자거동은 운동식(equation of motion)으로 해석된다.

(5) Freeboard의 기체층구 높이에 도달한 모든 입

자는 출구효과(end effect)에 의해서 빨려나간다.

(6) 충입자는 완전혼합 상태이다.

가정 (2)에 의해서 freeboard에서 입자거동은 간소화되어 수직방향만 고려되며 운동식에 의해서 다음과 같이 나타내진다[5].

$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{3}{4} \frac{C_d \rho_g (V_p - U) |V_p - U|}{\rho_p d_p} - \frac{(\rho_p - \rho_g) g}{\rho_p} \quad (1)$$

초기조건으로는 입자가 충표면에서 던져질 때 초기상승 속도이며,

$$\text{초기조건: } t=0, V_p = V_{p0} \quad (2)$$

식 (1)에서  $C_d$ 는 drag상수로 입자 Reynolds수로 다음과 같이 나타내진다.

$$N_{re} = \frac{\rho_g d_p |V_p - U|}{\mu} < 10^5 \quad (3)$$

일 때

$$C_d = \frac{24}{N_{re}} (1 + 0.15 N_{re}^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \times 10^4 N_{re}^{-1.16}} \quad (4)$$

그러므로 입자가 충표면에서 올려진 후 임의시간  $t$ 에서 충표면으로부터 높이는

$$h(t) = \int_0^t V_p dt \quad (5)$$

로 나타내지며 입자가 freeboard 기체출구로 유출되는 지의 여부는 가정 (5)로 결정된다.

여기서 충표면에서 올려진 입자의 freeboard내 제적과 비산속도를 결정하기 위해서는 초기상승속도와 초기 비산속도에 대한 정보가 필요하며 Son과 Choi[20, 21]는 다음의 상관식을 제시한 바 있다.

$$V_{p0}/V_{p0max} = \exp(-2.44x) \quad (6)$$

$$V_{p0max}/U_{bs} = 7.92 \times 10^{-6} d_p^{-1.65} \quad (7)$$

$$E_o = 9.45 (U - U_{mf})^{2.5} AD_{bs} \quad (8)$$

입자의 초기상승속도는 동일한 입경이라 할지라도 입의 속도분포를 가지며 식 (6), (7)은 입의 유동조건에서 입경에 따른 최대 초기상승속도와 초기상승속도 분포를 나타낸다. 여기서  $x$ 는 입경  $d_p$ 인 입자중 초기상승속도가  $V_{p0}$ 보다 큰 입자의 누적분율을 나타낸다.  $A$ 는 충표면의 단면적이며  $D_{bs}$ 와  $U_{bs}$ 는 각각 충표면에서 기포크기와 기포상승속도이다.

본 연구에서는 격렬한 입자거동으로 충표면의 위치를 결정함이 매우 임의적이었으며 충표면 위치는 주탑내 고체부하와 2상 이론에 의해서 결정된다. 2상 이론에

의하면 팽창충높이는 다음과 같이 나타내진다[2].

$$H_e = \frac{H_{mf}}{1 - \frac{\int_0^{H_e} \frac{U - U_{mf}}{U_b} dH}{H_e}} \quad (9)$$

여기서  $H_{mf}$ 는 최소유동화상태에서 충높이이며 이는 근사하게 정제충높이로 대신될 수 있다. 기포의 상승속도는 Davidson과 Harrison[4]의 상관식으로 다음과 같이 나타내질 수 있으며

$$U_b = U - U_{mf} + 0.711 \sqrt{g D_b} \quad (10)$$

기포크기는 Choi 등[1]의 상관식에 의해서 다음과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} (D_b - D_{b0}) (U - U_{mf}) + 0.474 g^{1/2} (D_b^{3/2} - D_{b0}^{3/2}) \\ = 1.132 (U - U_{mf}) H \end{aligned} \quad (11)$$

분배기에서 초기기포크기는 Darton 등[3]의 상관식으로 다음과 같이 나타내진다.

$$D_{b0} = 1.63 \left( \frac{(U - U_{mf}) A}{No \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (12)$$

그러므로 식 (9)-(12)에서 팽창충 높이와 충표면에서 기포의 크기 및 상승속도가 구해질 수 있으며 식 (6)-(8)에서 충표면에서 비산속도 및 입자의 초기상승속도 분포가 결정되며 식 (1)-(5)와 가정 (5)에 의해서 freeboard 기체출구에서 입자비산유출속도가 결정된다.

Fig. 5의 실선은 본 모사에 의해서 계산된 비산속도를 나타낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 계산된 값은 기포유동충영역으로부터, 고속유동충영역에까지 측정값과 잘 일치한다. Fig. 6의 실선은 모사에서 계산된 비산된 입자의 입도분포를 나타낸다. 모사의 예측은 측정값보다 대체로 작은 입도분포를 나타낸다. 이는 실제계에서는 입자의 구형도(sphericity)가 1보다 작고, 주변입자의 영향에 의해서 더 큰 입자가 비산유출되기 때문으로 사료된다. 그러나 실제계의 복잡성에 비추어 단순화된 본 모사의 예측은 측정값과 비교적 유사한 일치를 보인다. 한편 난류유동충영역과 고속유동충영역에서 기포특성의 정의와 2상 이론의 고려는 애매하여 이들 영역에서 본 해석의 적용가능성은 장차 더 시험되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

Geldart 분류 B 입자계의 모래를 충물질로 사용한 상온 순환유동충에서 최소유동화속도는 0.11 m/s,  $U_c$

는 1.1 m/s, 난류유동의 시작속도는 2.5 m/s이었다. 고속유동 및 회박상 수송의 시작속도는 고체의 재순환 속도가 증가함에 따라 증가하였다.

Freeboard 기체출구에서 입자의 비산유출속도는 유속이 증가할수록 그리고 정체층높이가 높을수록 증가하였다.

## NOMENCLATURE

$A$	: bed area, m
$C_d$	: drag coefficient, -
$D_b$	: spherical bubble diameter, m
$D_{bo}$	: spherical bubble diameter at the distributor plate, m
$D_{bs}$	: spherical bubble diameter at the bed surface, m
$d_p$	: particle diameter, m
$E_o$	: total entrainment flux at the bed surface, kg/m <sup>2</sup> s
$E_t$	: total carry-over flux, kg/m <sup>2</sup> s
$G_s$	: solid recirculating rate, kg/m <sup>2</sup> s
$g$	: gravitational acceleration, m/s <sup>2</sup>
$H$	: height above the distributor, m
$h$	: height above the bed surface, m
$H_e$	: expanded bed height, m
$H_{mf}, H_s$	: minimum fluidizing bed height and static bed height, m
$N_o$	: number of orifice on the distributor, -
$N_{Re}$	: particle Reynolds number, -
$\bar{P}, P_f$	: time-averaged pressure and pressure fluctuation, KPa
$P_m$	: relative pressure fluctuation, -
$P_o$	: probability density of zero pressure, -
$t$	: time, s
$U$	: fluidizing velocity, m/s
$U_b$	: bubble-rising velocity, m/s
$U_{bs}$	: bubble-rising velocity at the bed surface, m/s
$U_c$	: gas velocity at which the maximum value of the relative pressure fluctuations occurs, m/s
$U_{DT}, U_{FF}$	: onset gas velocities of dilute transport and fast fluidization, m/s
$U_{mf}$	: minimum fluidizing velocity, m/s
$U_{tr}$	: onset gas velocity of turbulent fluidization, m/s
$V_p$	: vertical velocity of an entrained particle in the freeboard, m/s
$V_{pomax}$	: maximum vertical ejecting velocity of a particle at the bed surface, m/s
$V_{po}$	: vertical ejecting velocity of a particle at the bed surface, m/s

$X$	: cumulative fraction of particles, -
$\rho_g, \rho_p$	: gas and particle density, kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	: gas viscosity, Pa s

## REFERENCES

- Choi, J.H., Son, J.E., and Kim, S.D.: *J. Chem. Engng. Japan*, **21**, 171 (1988).
- Clift, R. and Grace, J.R.: "Fluidization", 2nd ed., Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D. (eds.), Academic Press, London, 121 (1985).
- Darton, R.C., La Nauze, R.D., Davidson, J.F., and Harrison, D.: *Trans. Instn. Chem. Engr.*, **55**, 274 (1977).
- Davidson, J.F. and Harrison, D.: "Fluidized Particles", Cambridge Univ. Press, London (1963).
- Do, H., Grace, J.R., and Clift, R.: *Powder Technology*, **6**, 195 (1972).
- Furusawa, T. and Shimizu, T.: Fluidization '87 Korea & Japan, Proceedings of the First Korea-Japan Symposium on Fluidization, 209 (1987).
- Geldart, D.: "Fluidization", 2nd ed., Davidson, J.F., Clift, R., and Harrison, D.(eds.), Academic Press, London, 383 (1985).
- George, S.E. and Grace, J.R.: *Can. J. Chem. Engng.*, **59**, 279 (1981).
- Gugnoni, R.J. and Zenz, F.A.: in "Fluidization", Grace, J.R. and Matsen, J.M.(ed.), Plenum Press, New York, 501 (1980).
- Han, G.Y., Lee, G.S., and Kim, S.D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **2**, 141 (1985).
- Horio, M., Morishita, K., and Tachibana, O.: Proceedings of World Congress III of Chem. Engng., **3**, 536 (1986).
- Kim, S.D. and Lee, G.S.: *Chemical Industry & Technology*, **5**, 292 (1987).
- Lee, G.S., Han, G.Y., and Kim, S.D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **1**, 71 (1984).
- Lee, G.S. and Kim, S.D.: Proceedings of Fall Meeting of Korean Institute of Chemical Engineers, 390 (1987).
- Lee, J.S. and Kim, S.D.: *HWAHAK KONGHAK*, **20**, 207 (1982).
- Li, Y. and Kwauk, M.: in "Fluidization", Grace, J.R. and Matsen, J.M.(ed.), Plenum press, New York, 537 (1980).
- Reh, L.: *Chem. Engng. Prog.*, **67**, 58 (1971).
- Satija, S. and Fan, L.S.: *A.I.Ch.E. J.*, **31**, 1554 (1985).
- Shin, B.C., Koh, Y.B., and Kim, S.D.: *HWAHAK KONGHAK*, **22**, 253 (1984).
- Son, J.E. and Choi, J.H.: Proceedings of the 9th Int. Conf. on FBC, **1**, 535 (1987a).

21. Son, J.E. and Choi, J.H.: Fluidization '87 Korea & Japan, Proceedings of the First Korea-Japan Symposium on Fluidization, 10 (1987b).
22. Takeuchi, H., Hiram, T., Chiba, T., and Leung, L.S.: Proceedings of World Congress III of *Chem. Engng.*, **3**, 477 (1986).
23. Yerushalmi, J. and Avidan, A.: "Fluidization", 2nd ed., Davidson, J.F., Clift, R., and Harrison, D.(eds.), Academic Press, London, 237 (1985).
24. Yerushalmi, J. and Cankurt, N.T.: *CHEMTECH*, **8**, 564 (1978).