

## 내부순환유동층 소각로에서의 수력학적 특성-cold bed

김요한, 노선아, 이시훈, 이동현, 김상돈  
한국과학기술원 화학공학과  
및 에너지·환경연구센터

### Hydrodynamics of an Internally Circulating Fluidized Bed Incinerator - cold bed

Yo Han Kim, Son A Noh, Si Hun Lee, Dong Hyun Lee and Sang Don Kim  
Dept. of Chem. Eng. and Energy & Environment Research Center  
KAIST, DaeJou, Korea

#### 1. 서론

최근 고도의 산업발전과 경제성장으로 인하여 도시 및 산업체에서 발생하는 폐기물의 양은 점차 증가하고 있다. 지금까지 폐기물의 처리는 상당부분을 단순매립에 의존해오고 있으나 매립에 따른 2차 공해문제의 가중과 기존 매립지의 한계로 새로운 매립지 확보에 많은 어려움이 있어 폐기물의 처리가 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 더욱이 사회 전반에 NIMBY (Not In My Back Yard) 현상의 팽배로 인해 부족한 매립지를 확보하는데 어려움을 가중시키고 있다. 이와 같은 이유로 고품 폐기물을 소각시킬 수 있는 다양한 방식의 소각로의 개발과 건설이 활발하게 이루어지고 있다.

순환유동층은 주탑에서 비말동반된 입자를 cyclone 과 같은 입자 포집 장치에서 회수하여 다시 주탑으로 재 주입함으로써 입자의 순환이 일어나는 외부순환계와 draft tube 나 평판 (partition plate) 을 설치하여 두 개의 층으로 분리하고 분산판 위의 orifice opening 을 통해 입자를 이동층 (moving bed) 에서 유동층 (fluidized bed) 으로 강제 순환시키는 내부순환계로 분류할 수 있다. Draft tube를 갖는 내부순환유동층은 annulus 보다 draft tube 로 더욱 빠른 유속의 기체를 주입함으로써 발생하는 draft tube 와 annulus 간의 밀도차로 인하여 입자들이 draft tube 위로, annulus 의 아래로 순환하는 패턴을 형성한다. 입자순환을 보다 원활히 하기 위해 보통 annulus 는 최소 유동화 상태에 가깝도록 유지한다. Draft tube 를 갖는 내부순환유동층은 기체와 고체의 적절한 접촉을 통해 반응이 이루어지며, 이러한 내부순환유동층 반응기는 석탄가스화, 석탄연소, surface coating, blending, 소각로 등의 다양한 화학공정에 적용될 수 있다.

내부순환유동층 소각로는 설계 개념이 단순하고, 운전 온도가 낮다는 일반적인 유동층의 장점을 살리고, 열의 효율적인 운용이 가능한 순환유동층의 장점을 동시에 가지고 있는 새로운 개념의 소각로다. 내부순환유동층을 소각로로 사용하는 경우 입자순환 특성으로 인하여 반응기로부터 미세입자들이 비산 유출되는 정도를 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 미세입자들의 반응기내 체류시간이 훨씬 길어지기 때문에 전형적인 유동층에 비해 높은 소각효율을 얻을 수 있다. 특히 토양세척기법으로 오염물질 제거가 어려운 미세토양 (250 $\mu$ m 이하) 의 소각시 이 같은 장점을 충분히 살릴 수 있다. 또한 함수율이 높은 슬러지의 소각시, draft tube 에 의해 반응구역을 각각 연소구역 (draft tube region) 과 건조구역 (annulus region) 으로 나눔으로써 슬러지의 탈수와 건조에 대한 전처리 공정을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

내부순환유동층 소각로의 개발과 그 조업을 위해서 고체입자의 순환 특성을 고찰할 수

있는 cold bed 실험은 매우 중요하다. 본 실험에서 사용한 내부순환유동층 cold bed 는 draft tube 와 annulus 간의 bypassing 현상을 제거하기 위해서 draft tube 와 distributor 사이의 간격 (gap height) 을 없애고 draft tube 에 orifice 를 갖도록 했다 (Ahn, 1999). 또한 미세입자의 비말동반을 줄이고, 강제 하방 흐름을 주기 위해 draft tube 상부에 impact cap 을 설치하였다. 분산판은 dead zone 이 발생할 수 있는 Flat plate type 을 피하고 개선된 형태의 분산판인 conical type 을 사용하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

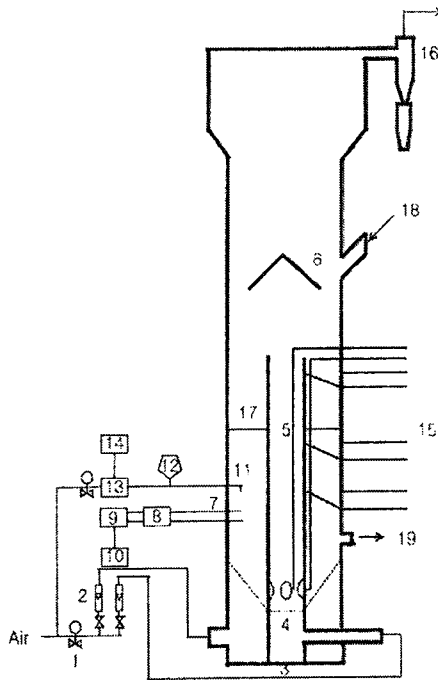


Fig. 5-1 Schematic diagram of experimental apparatus.  
 1. Pressure regulator 2. flow-meter 3. air box 4. distributor  
 5. draft tube 6. impact cap 7. thermocouple 8. bridge circuit  
 9. data aquisition system 10. personal computer 11. tracer injection tube 12. solid hopper 13. solenoid valve 14. timer  
 15. manometer 16 cyclone 17. supporter 18. Solid in  
 19. Solid out

본 연구에서는 orifice 형태의 draft tube 를 갖는 내부순환유동층 장치 내에서 수력학적 특성을 고찰하기 위하여 상온실험 (cold model) 을 수행하였다. 본 연구에 사용된 draft tube 를 갖는 내부순환유동층 반응기의 개략도는 Fig. 1 에 나타내었다. 내부순환유동층 (0.28 m-I. D. × 2.1 m- height) 은 입자흐름을 관찰할 수 있도록 acryl column (thickness 10mm) 으로 제작되었다.

장치는 크게 세 부분 (air box 와 분산판, 주탑, freeboard) 으로 나눌 수 있다. 공기 압축기에서 나오는 공기는 filter 를 거쳐 rotameter 로 속도가 조절되어 air box 로 주입된다. Air box 는 draft tube 와 annulus 로 공기를 독립적으로 공급할 수 있도록 설계되었다. Air box 를 통해서 draft tube 와 annulus 에 각각 공급된 air 에 의해 입자들이 유동화 되며, draft tube 하부에 위치한 orifice 를 통해 입자들이 draft tube 의쪽으로 annulus 의 아래로 입자순환이 일어날 수 있도록 하였다. 분산판으로부터 0.76 m 지점에는 프렌지를 설치하여 draft tube 를 고정시켰

다. Draft tube 는 주탑을 두 부분으로 나누게 된다. Draft tube 안쪽은 기포 (또는 슬러그) 가 있는 유동층 (bubbling fluidized bed or slugging bed) 으로 annulus 쪽은 기포가 없는 이동층 (moving bed) 으로 이루어진다. Draft tube와 annulus 에는 분산판으로부터 0.04 m, 0.46 m, 0.66 m, 0.84 m 지점에 압력탭이 각각 설치되어 있고 물을 채운 U자 모양의 manometer 로 annulus 의 축방향 압력차를 측정하였다. 압력의 fluctuation 이 심한 draft tube 내부는 pressure transmitter 를 이용하여 압력차를 측정하였다.

Draft tube 의 상부에는 impact cap 을 설치하여 입자들이 강제순환 되도록 하였으며, 반응기를 통하여 빠져나가는 미세한 모래는 cyclone 으로 포집하였다.

고체 입자는 분산판으로부터 1.3 m 위에 있는 투입구를 통해서 주입되며, 배출은 0.21 m 지점의 배출구를 통해서 이뤄진다.

## 2.2 실험방법

Draft tube 의 내부와 annulus 영역에 일정한 양의 모래를 정지층 높이로 채운다. 고체 입자의 흐름을 향상시키기 위해 공기 밸브를 열어 annulus 쪽은 최소 유동화 상태에 가깝게 유지한 후, draft tube 쪽을 지정된 유속으로 유지시킨다. Draft tube 와 annulus 를 통한 압력강하는 transmitter 와 manometer 에 의해 측정하였다. Hopper 에서 450-500 °C 로 가열된 추적자입자를 solenoid valve를 이용하여 이동층의 분산판 위 0.58 m 되는 지점에 설치된 L-모양의 tube를 통해 pulse 로 공기수송에 의해 주입하였다. 이동층으로 들어온 가열된 모래는 분산판 위의 0.51 와 0.46 m 지점에 설치되어 있는 두 개의 thermistor probe 를 통과하게 되고, 이때 probe 에서 유발된 저항차가 bridge circuit 을 통해 전압으로 증폭되어 data acquisition system 을 통해 personal computer 에 저장된다.

이 실험에서 벽면에서의 shear stress 는 무시할 수 있을 정도로 작아서 annulus 의 흐름이 plug flow 라고 가정하고, 측정된 두 signal 사이의 time-lag 와 두 thermistor probe 사이의 거리로 이동층에서 입자의 평균속도를 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2-a 는 고체입자의 순환속도 ( $G_s$ ) 에 대한 annulus 로 주입되는 기체유속 ( $U_a$ ) 의 영향을 나타낸 그림이다. 기체유속이 증가함에 따라 입자 순환속도는 linear 하게 증가하는 경향을 나타낸다. 기체유속이 증가함에 따라 annulus 의 상태는 fixed bed 에서 최소유동화 조건을 거쳐 기포유동층으로 발전한다. Yang and Kearins (1978) 은  $U_z$  가  $0.55 U_{mf}$  정도 일때 입자의 순환속도가 크게 증가한다고 보고하였는데, 본 실험에서는  $U_z$  가 낮을 때는

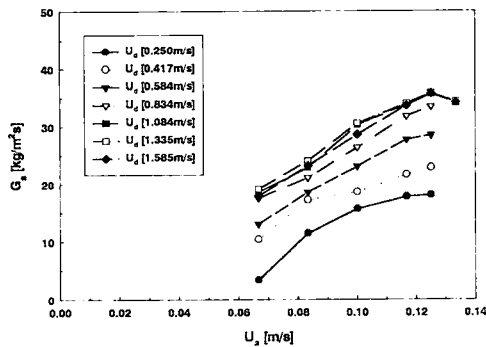


Fig. 2-a Effect of  $U_a$  on  $G_s$  with variation of  $U_s$

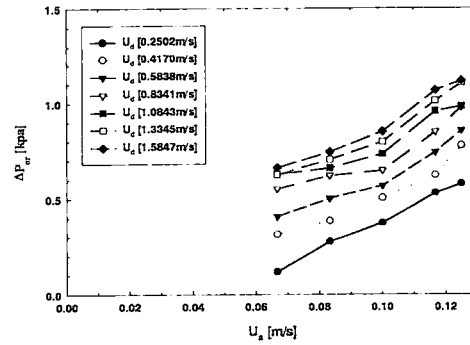


Fig. 2-b Effect of  $U_a$  on pressure drop across the orifice with variation of  $U_s$

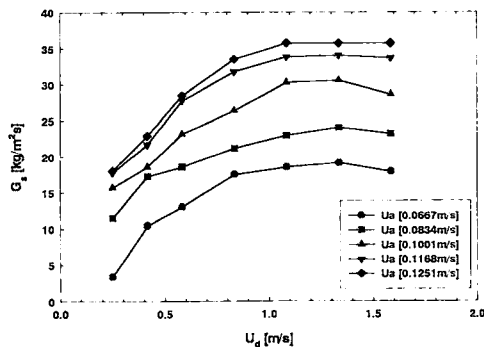


Fig. 3-a Effect of  $U_s$  with variation of  $U_a$

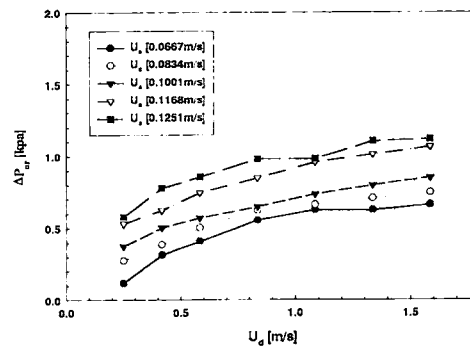


Fig. 3-b Effect of  $U_s$  on pressure drop across the orifice with variation of  $U_a$

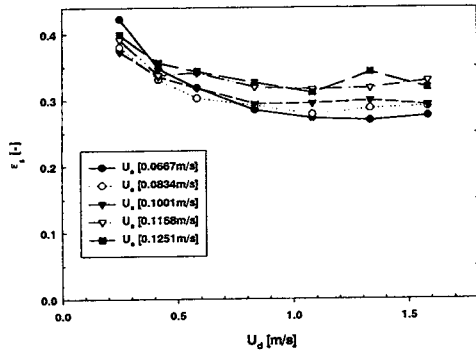


Fig. 3-c Effect of  $U_d$  on solid hold-up of draft tube

draft tube 로의 기체유속 ( $U_d$ ) 이 높더라도 고체 입자의 순환이 일어나지 않았으며,  $U_a$  가  $0.8 U_{mf}$  (0.067 m/s) 가 되었을 때 입자의 순환속도가 크게 증가하였다.  $U_a$  가  $1.6 U_{mf}$  (0.13 m/s) 이상에서는 annulus 영역이 기포유동층 조건이 되어서 annulus 와 draft tube 내부의 밀도차가 줄어들게 되어 입자의 순환속도는 감소한다. Fig. 2-b 는  $U_a$  에 따른 draft tube 내부와 외부의 압력차 ( $\Delta P_{or}$ ) 를 나타낸 그림이다.  $U_a$  가 증가할수록 annulus 영역은 최소유동화조건에 가까워지고, bed 내의 압력은 증가한다. annulus 와 draft tube 내부의 높은 압력

차는 입자의 순환을 일으키는 구동력으로 작용한다.

Fig. 3-a 는  $G_s$  에 대한 draft tube 로 주입되는 기체유속 ( $U_d$ ) 의 영향을 나타낸 그림이다.  $U_d$  가 증가함에 따라  $G_s$  는 급격하게 증가하고,  $U_d$  가 10-13  $U_{mf}$  (1.1-1.3 m/s) 에 이르게 되면  $G_s$  는 최대 값을 갖는다.  $U_d$  가 더 높아지면, Fig. 3-b 처럼  $\Delta P_{or}$  은 증가하지만, Fig. 3-c 와 같이  $\epsilon_s$  값이 낮아지게 되어서 오히려  $G_s$  값이 3-7 % 감소하게 된다. Milne et al (1992) 은 일정  $U_a$  에서  $U_d$  를 증가시키면 입자의 순환속도가 변화가 없거나 약간 (5-10 %) 감소한다고 보고하였는데, 본 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.  $U_a$  가  $U_{mf}$  이하일 경우 annulus 부분의 solid 흐름이 원활하게 이뤄지지 않게 되므로,  $U_a$  에 따른  $G_s$  의 증가율이 비교적 낮다. 반면  $U_a$  가 1.2  $U_{mf}$  이상일 때는  $G_s$  의 증가율이 높지만,  $U_d$  가 13  $U_{mf}$  이상일 때  $G_s$  의 감소폭 또한 크게 나타나는 경향을 보인다.

#### 4. 결론

Draft tube 를 갖는 내부순환 유동층에서 수력학적특성에 대한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. Annulus 로 주입되는 기체유속이 증가함에 따라서 고체입자의 순환속도와  $\Delta P_{or}$  는 선형적으로 증가한다. Draft tube 로 주입되는 기체유속에 대해서  $G_s$  는 최고 값을 가지는 점이 존재한다. 따라서 가장 높은 고체입자의 순환속도를 얻기 위해서  $U_a$  는 annulus 영역이 기포 유동층이 되기 전 1.4-1.5  $U_{mf}$  가 적당하며,  $U_d$  는 10-13  $U_{mf}$  에서 조절해야 한다.

#### 5. 참고문헌

1. Ahn, H. S., Lee, W. J., Kim, S. D. and Song, B. H., "Solid circulation and Gas Bypassing in an internally circulating fluidized bed with an orifice type draft tube" *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(5), 618 (1999).
2. Milne, B. J., Berruti, F. and Behie, L. A., "The Internally Circulating Fluidized Bed (ICFB) : A Novel Solution to Gas Bypassing in Spouted Beds," *Can. J. Chem. Eng.*, **70**, 910 (1992)
3. Yang, W. C. and Keairns, D. L., "Comparison of Recirculating Fluidized Bed Performance in Two Dimensional and Three Dimensional Beds," *Fluidization Technology*, Vol. II, Kearins, (ed.), (1976).