

순환유동층의 소개(1) - 그 특성 및 응용

1. 소개

고체입자들은 화학공정, 광물처리, 약품제조, 에너지관련공정 등에서 큰 관심의 대상이다. 어떤 경우에는 촉매로 작용하고, 철광석 처리공정에서처럼 어떤 경우는 입자가 화학적으로 변화되기도 한다. 한편 아직도 고체입자의 건조처럼 물리적인 변화만 이루어지기도 한다. 이러한 반응이나 접촉공정을 수행하는데에는 다양한 형태가 가능하다. 예를 들어 소성이나 연소공정에서는 여러가지 기술들이 오랫동안 경쟁되어오고있다. 고정층(혹은 입자들이 서로 접촉하면서 서서히 아래로 이동하는 moving packed bed), 유동층(입자들이 반응용기의 바닥에있는 분산기를 통해 주입되는 유체에 의해 지지되는 형태), 그리고 회박상 이송계(입자들이 덕트나 파이프를 통하여 이송된다).

순환유동층(CFB, circulating fluidized bed)는 지난 2세기를 걸쳐 주요한 응용의 관점에서 뚜렷하게 돋보이는 시스템이다. 전형적인 형상을 Fig. 1.1에 보였다. 일단 높은 용기가 하나 필요하고, 바닥근방에서 입자들을 주입하는 수단이 하나 필요하고, 입자들이 용기의 상부에서 대부분 비산되기에 충분한 상승 유체흐름이 필요하다. 그리고 이 대부분의 입자들을 잡아서 다시 용기의 바닥부로 순환시키는 수단이 필요하다. 여기서 평상적인 의미의 '층'은 존재하지 않는 것 같다; 특히 대부분의 순환유동층은 소위 '고속 유동층'이라고 하는 수력학적인 영역에서 운전되는데 이 때는 명확히 인지할 만한 층의 상부표면이 존재하지 않는다.

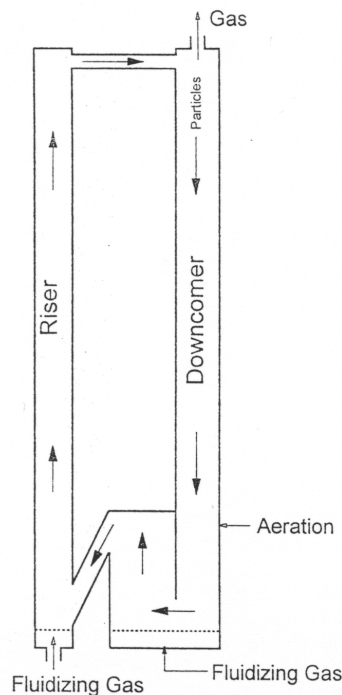


Figure 1.1 Typical configuration for circulating fluidized bed system.

1.2 구별되는 특성들

기-고체 수직 이상흐름은 세가지 방식으로 운전될 수 있다: Fig. 1.2 에서 보듯이 병류상승 흐름, 병류하강흐름, 그리고 가스가 상승하는 향류흐름. Figure 1.1에 보인 순환유동층은 입자들이 용기 하부에서 도망가지 못하도록 작용하는 하부 억제부(bottom restraint) 시스템과 유사하다. 입자의 공급속도가 낮은 경우에는, 주입된 모든 입자들이 상승하면서 병류 상승흐름을 형성하게 된다. 입자의 공급속도를 증가시켜서 입자의 상승흐름이 포화되어 무너지면 그 이상의 입자들은 아래로 떨어져서 상승관의 하부에 입자밀도가 높은 구역이 형성된다. 따라서 순환유동층은 기체유속과 입자순환속도에 따라 병류상승흐름 혹은 고속유동층으로 운전할 수 있다. 시스템의 물리적인 형상은 다양하게 변화시킬 수 있다. 병류하강흐름(downer)반응기[Figure 1.2(b)]의 경우에는 유동층을 나타내지는 않지만 특정한 응용에서, 예를 들어 반응이 아주 빠르고 입자들의 체류시간이 서로 다를 경우 효율이 떨어지는 경우, 관심을 끌고 있다.

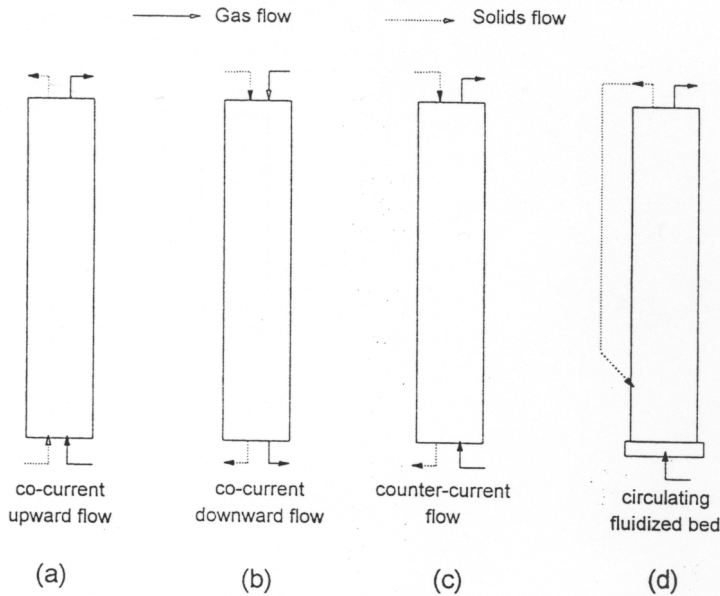


Figure 1.2 Flow modes of gas-solids vertical flow systems.

한편 Table 1.1에 보였듯이 전형적인 CFB 시스템은 저속의 유동층이나 회박상이송시스템과는 구별된다. 표에 보이는 수치들은 산업분야에서 현재 사용되는 조업범위이며 조업의 한계는 아니다. 예를 들어 50 - 500 μm 보다 작거나 훨씬 큰 입자들도 공정상 유리한 경우에는 사용할 수 있겠다. 표에서 알수 있듯이 CFB는 일반적으로 저속유동층과 회박상이송시스템의 중간치에 속한다. 어떤 공정들은 입자의 혼합, 기체고체의 접촉성, 체류시간 열전달 특성 등의 조합에서 CFB가 잇점이 많아서 근래에 자신만의 특정 시장분야를 개척하고 있다.

Table 1.1 Key features that distinguish circulating fluidized bed reactors from low-velocity fluidized beds and from dilute-phase transport reactors

	Low-velocity fluidized bed reactors	Circulating fluidized bed reactors	Dilute-phase transport reactors
Particle histories	Particles spend substantial time (minutes or hours) in main reactor vessel. Occasional excursions through cyclone and standpipe	Particles pass repeatedly through the recirculating system; residence time in the main vessel for each circuit is counted in seconds	Once-through system
Hydrodynamic regime (see section 1.5)	Bubbling, slugging or turbulent fluidization, with a distinct upper interface	Usually fast fluidization, though bottom of the reactor may correspond to turbulent fluidization conditions or even bubbling	Dilute transport conditions
Superficial gas velocity	Generally below 2 m/s	Usually 3 to 16 m/s	Usually 15 to 20 m/s
Mean particle diameter	0.03 to 3 mm	Usually 0.05 to 0.5 mm	Typically 0.02 to 0.08 mm
Net circulation flux of solids	Low, generally 0.1 to 5 kg/m ² s	Substantial, e.g. 15 to 1000 kg/m ² s	Up to ~20 kg/m ² s
Voidage	Typically 0.6 to 0.8 in bed. Much higher in freeboard above bed	Typically 0.8 to 0.98 averaged over riser	Generally >0.99
Gas mixing	Substantial axial dispersion: complex two-phase behaviour	Some gas downflow near walls typically results in intermediate gas mixing	Very little axial dispersion

1.3 CFB의 장점과 단점

이제 CFB 장비와 그 수력학적인 특성을 논하였으므로 장점과 단점을 얘기해보자. 전형적인 저속의 유동층과의 비교를 Table 1.2에 나타냈다. 각 응용분야에서 장치의 선택에 영향을 주는 인자들에 대한 경제적인 분석과 비교는 주의 깊게 이루어져야 할 것이다. 일반적으로 말하자면, CFB 시스템의 추가적인 투자경비는 작은시스템보다는 큰 시스템에서 감당할 수 있다.

Table 1.2 Typical advantages and disadvantages of CFB reactors relative to conventional low-velocity fluidized bed reactors without baffles

Advantages:

1. Improved gas–solid contacting given the lack of bubbles;
2. Reduced axial dispersion of gas;
3. Reduced cross-sectional area given the higher superficial velocities;
4. Potentially more control over suspension-to-wall heat transfer because of the ability to use the solids circulation flux as an additional variable;
5. No region like the freeboard region of low-velocity beds where there can be substantial temperature gradients;
6. Less tendency to show particle segregation and agglomeration;
7. Recirculation loop provides a location where a separate operation (e.g. regeneration or heat transfer) can be carried out;
8. Easier to have staged processes;
9. Because of superior radial mixing, fewer solids feed-points are needed;
10. Higher solids flux through the reactor.

Disadvantages:

1. Increased overall reactor height;
2. Higher capital cost;
3. Decreased suspension-to-wall heat transfer coefficients for given particles;
4. Somewhat more restricted range of particle properties;
5. Do not lend themselves to horizontal surfaces due to erosion of in-bed surfaces;
6. Added complexity in designing and operating recirculating loop;
7. Increased particle attrition.

1.4 CFB의 응용분야

CFB 반응기는 그 독특함과 장점들로 인하여 여러가지 화학공정에 사용되고 있다. 건조같은 물리적인 공정에는 크게 응용되고 있지 않다. Fluid catalytic cracking (FCC) 와 circulating fluidized bed combustion (CFBC, 순환유동층연소)가 주요한 응용분야이다. 고속유동층에 대한 이전의 연구들, 특히 탄화수소처리공정에 있어서의 업적들이 Squires(1994)에 의해 정리된 바 있다. FCC공정을 위해 1940년대 CFB의 조건을 알아본 바 있지만 조업상의 문제점과 촉매 문제로 인해 수십년에 걸친 연구가 더 필요했다. CFBC의 경우에는 CFB의 소성반응 경험을 갖고 있던 Reh (1971)의 개척적인 연구가 CFB 기술의 급속한 개발을 가져왔다. Reh (1986)는 Lurgi가 이루었던 소성과 연소공정의 개발 역사를 간략히 정리하였다. 1990년대 중반에는 CFB 상승관을 갖는 FCC 유닛이 세계적으로 약 250개가 운전되었으며 CFBC 유닛은 약 400개에 이르렀다. 더불어 70개 이상의 실험실 cold model들이 운전되었다. FCC와 CFBC가 순환유동층의 주된 기술로 자리잡고 있지만, 한편으로는 수많은 다른 응용분야가 연구되었고 이 중에 일부는 상업적으로 개발되었거나 개발 중에 있다. Table 1.3에 응용분야와 주요 참고문헌을 정리하였다.

Table 1.3 Applications of CFB reactors and key references

I. Gas–solids reactions (see also Chapters 10 to 12)	
Combustion of coal, wood and shale	Reh, 1986, 1995; Yerushalmi, 1986
Incineration of solid waste	Chang <i>et al.</i> , 1987
	Hallstrom and Karlsson, 1991
Synthesis of AlF ₃ and SiC	Reh, 1995
Recovery/cleaning of off-gases	Reh, 1986
Desulphurization of flue gas	Graf, 1986
Gasification of coal, biomass, etc.	Blackadder <i>et al.</i> , 1991; Hirsch <i>et al.</i> , 1986; Reh, 1995
Calcination of alumina, phosphate rock, clay, etc.	Reh, 1971, 1986, 1995
Reduction of iron ore, lateritic nickel ore, etc.	Hirsch <i>et al.</i> , 1986; Suzuki <i>et al.</i> , 1990
Roasting of sulphidic ores (ZnS, Cu ₂ S, gold ores)	Reh, 1995
Dehydration of boric acid	Li <i>et al.</i> , 1990
Decomposition of sulphate, chloride and carbonate	Reh, 1995
Cement production	Deng, 1993
II. Solid-catalysed gas-phase reactions (see also Chapters 13 and 14)	
Fluid catalytic cracking (FCC)	Avidan <i>et al.</i> , 1990; King, 1992
Fischer–Tropsch synthesis	Shingles and McDonald, 1988
Butane oxidation to maleic anhydride	Contractor, 1988
Oxidation of <i>o</i> -xylene/naphthalene to phthalic anhydride	Wainwright and Hoffman, 1974
Ethylene epoxidation	Park and Gau, 1986
Oxidative dehydrogenation of butene to butadiene	Liu <i>et al.</i> , 1989
Oxidative coupling of methane to ethylene and ethane	Baerns <i>et al.</i> , 1994
Methanol to olefins	Schoenfelder <i>et al.</i> , 1994
Simultaneous NO _x and SO ₂ removal from off-gases	Reh, 1995

순환유동층의 소개(II)로 계속됩니다.