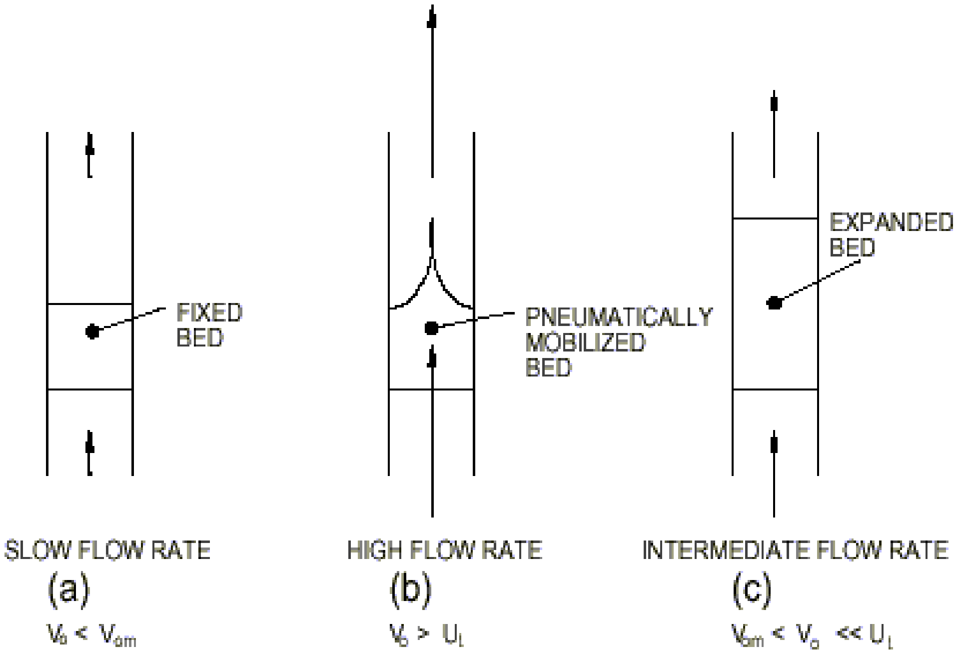
분체의 유동화(流動化)

1. 유동화 현상

유체가 미세 분체층을 거쳐 매우 낮은 유동율로 상향 펌핑될 때 유체는 층의 분산없이 빈공간(미세공)을 통해 스며 나온다. 이것은 고정층(Fixed Bed)과정이다.

상향 유동율이 매우 크게 된다면 그 층은 뉴메틱적으로 움직이며 용기 밖으로 휩쓸려 나갈 것이다. 중간 유동율에서는 그 층은 팽창되고 팽창상태(Expanded State)에 있다고 한다. 고정층에서는 각자 다른 무게를 지지받고 있는 입자들이 직접적으로 서로 접촉하고 있다. 팽창층에서는 입자들간의 평균자유거리를 가지며 입자들이 유체의 항력에 의해 지지된다. 팽창층은 일련의 유체특성을 가지며 " 유동화 층 "이라고 한다.

[그림 1]에 나타난 바와 같이 층을 통과하는 중력반대방향의 유체속도에 따라 층이 고정되거나, 팽창되거나 혹은 휩쓸려 나갈지 가 결정된다. 층이 막 유동화를 시작하는 최저유동화속도 V_{om} 이 있다. 접근속도 V_o(빈용기의 속도로 알려진 것과는 달리, 유체유동율을 용기



[그림 1 : 분체의 고정층, 동적층, 확산층]

고정층(a)는 접근속도 V_o 가 최저유동화속도 V_{om} 보다 많이 작을 때 일어난다. 공기 힘에 의해 움직이는 동적층은 접근속도가 입자의 말단속도 U_t 보다 많이 클 때 일어나며 확산층은 접근속도가 최저유동화속도와 입자말단속도의 중간일 때 일어난다.

의 단면적으로 나눈 값이다.)가 최저유동화속도와 같거나 클 때 그리고 입자의 말단속도보다 작을 때인 $V_{om} \leq V_o \ll U_t$ 이면 분체층은 유동화 층을 형성한다. $V_o < V_{om}$ 면 분체층은 고정층으로 유지되면 극단적으로 $V_o \geq U_t$ 이면 분체층은 움직인다.

많은 액체-고체 시스템에서 상기의 최저유동화속도 V_{om} 의 증가는 분체층이 완만하게 점진적으로 확산되는 결과를 나타낸다. 분체층에서 큰 규모의 불안정과 불균일 현상은 관찰되지 않는다. 이와 같은 분체층을 균일유동화층 이라 한다. 이것은 유체와 분체가 비슷한 고유밀도를 가질 때 전형적으로 관찰된다.

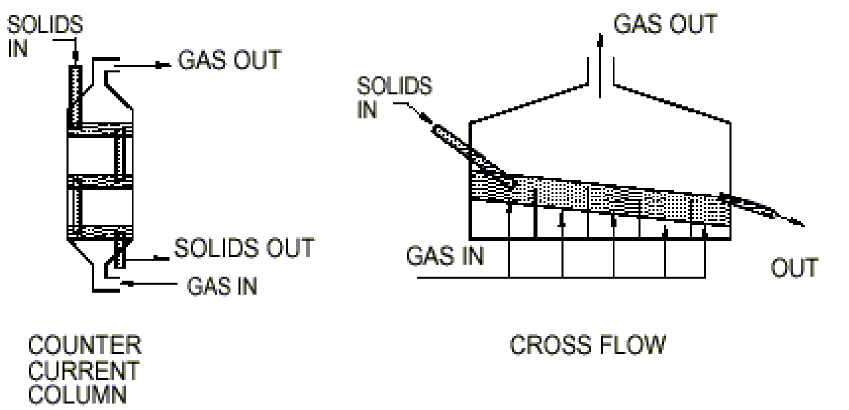
유체와 분체의 밀도가 크게 다를 경우, 유체속도의 증가는 통상적으로 커다란 기포 혹은 이와 같은 불안정한 상태를 일으킨다. 여러 종류의 불안정 상태들이 " 쿠니, 레벤스페일 " 들에 의해 설명되었다.(Fluidization Engineering. 2ed. 1991)

공기 힘에 의해 움직이는 난류성 동적층의 경우, 대부분의 분체층이 용기밖으로 나가게 될 것이다. 안정된 상태의 운전을 위해 입자들은 사이클론과 같은 것으로 복구되어야 한다.

분출층은 유체의 흐름이 용기의 중심축을 따라 집중되고 분체는 용기의 벽을 따라 움직이는 유동화층의 변형이다. 유동화층은 다음과 같이 액체와 같은 여러 성상들을 나타낸다.

- 가벼운 물체는 층의 상부로 띄운다(즉, 분체층의 체적밀도보다 낮은 밀도의 물체)
- 경사진 층에서도 표면은 수평을 이룬다.
- 분체는 마치 액체와 같이 용기의 뚫린 곳을 통해 흐를 수 있다.
- 분체층은 중력에 의해 $r_o gh$ 의 정압수두(靜壓水頭)를 가진다.
- 비슷한 높이의 두 유동화층은 정압수두가 같아지게 된다.

[그림 2 : 유동화층 설계에서 연속적으로 접촉하고 있는 역류와 횡류방식]



연속운전의 가스-유동화 시스템을 운전하고 설계하는데 는 여러 가지 방법이 있다. [그림 2]는 역류칼럼과 횡류 시스템을 나타낸 것이다.

2. 접촉방식들의 비교

쿠니와 레벤스페일은 다음과 같은 유동화층을 고정층과 비교하였다.

- 고정층
- 동적층
- 거품/난류층
- 견고한 유동화층
- 로타리 실린더
- 평상(平床)

유동화층은 다음과 같은 장점들을 가진다.

- 액체와 같이 작용하며 조절과 자동화가 쉽다.
- 빠른 혼합, 균일한 온도와 농도.
- 운전조건 변화에 서서히 반응하므로 빠른 온도변화의 방지와 발열반응에 따른 온도 손실방지.
- 열교환을 위한 유동화층간 순환가능.
- 대규모 혹은 소규모 운전에 적용가능.
- 작은 표면적으로 열과 질량의 높은 전달율.

유동화층은 다음과 같은 단점들도 가진다.

- 미세분체의 거품층들은 효율이 낮고 예측이 어렵다.
- 분체의 빠른 혼합은 연속유동 반응기에서의 체류시간의 불균일을 초래한다.
- 입자의 분쇄가 잘 일어난다.
- 분체입자들의 충돌로 인한 관로와 용기내벽의 침식.

3. 유동화의 용도

유동화층의 용도는 우리의 창의력에 따라 제한될 수 있다. 대표적인 용도는 다음과 같다.

- 반응기
  - 탄화수소류의 분해.증류
  - 석탄의 기체화.
  - 석탄 건류.
  - 하소(calcinations : 煆燒)
- 열교환
- 건조작업
- 코팅(금속표면에 대한 폴리머 코팅)
- 응고와 결정화
- 흡착과 추출
- 입자성장
- 생물 유동화
- 기타

4. 입자의 겔다-트 분류

“ 겔다-트 “ 는 입자 종류에 따른 고유한 유동화 특성들을 관찰했다. 그는 유체상(流體相)과 분체들의 종류에 따라 다른 “상대밀도 對 입자직경”으로 그의 관찰을 분류했다. 겔다-트는 유동화 특성이 확실하게 정의될 수 있는 4개 영역으로 구분했다.

A 그룹 : 이 그룹의 입자들은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 거품층 유동화
- 분체층은 거품이 일어나기 전에 상당히 확산된다.
  - 기포는 기체의 잔류보다 더 빠르게 상승한다.
  - 기포는 분체층을 통해 때때로 올라 가거나 합쳐진다.
  - 기포의 최대크기는 10 cm 이하.
  - 내부 유동전향기는 유동화를 향상 시키지 않는다.
- 전체적인 분체의 순환이 일어난다.

B 그룹 : 가장 흔한 분체층을 이루며 그 분체층은

- A그룹 입자들 보다 밀도가 높고 굵은 입자들로 만들어 진다.
- 가스의 속도가 최저 유동화속도 V_{om} 을 초과하자 마자 기포를 형성한다.
- 분배기에서 분체층 전체에 걸쳐 크기가 커지는 작은 기포를 형성한다.

- 입자크기와 무관한 기포크기를 가지며
- 전체적으로 순환한다.

C 그룹 : 입자들은

- 유동화 시키기 어려우며 분체 덩어리로 상승하는 경향이 있다.
- 유동화가 없는 대형층에 채널(channel)을 형성한다.
- 결합되는 경향이 있다.

D 그룹 : 입자들은

- 매우 굵고 밀도가 높다.
- 빨리 합쳐져서 커지는 기포를 형성한다.
- 잔류기체보다 느리게 상승하는 기포를 형성한다.
- 기포들을 둘러싸는 낮은 공극을 갖는 분체층을 형성한다.
- 기포크기가 분체층의 직경에 접근할 때 분체층에 덩어리 형성을 야기한다.
- 분체층의 상부로부터 쉽게 쏟아진다.

쿠니와 레벤스페일은 유동화 체계를 분류하기 위해 보다 일반화된 도표를 소개하고 무차원 속도 u^* 對 무차원 입자직경 d_p^* 를 그렸다. 여기에서

$$d_p^* = d_p\left[\frac{r(r_p - r)}{m^2}\right]^{1/3} = \left(\frac{3}{4} C_D R_{ep}^2\right)^{1/3} \qquad (1)$$

$$u^* = u\left[\frac{r^2}{m(r_p - r)g}\right]^{1/3} = \left(\frac{4}{3}\frac{R_{ep}}{C_D}\right)^{1/3} \qquad (2)$$

이런 방식으로 배열된 데이터로 아래와 같은 여러 가지 흥미로운 특성들을 확인 했다.

- 겔다-트 분류
- 종속도 u^t
- 최저 유동화속도 u_{mf}
- 유동화 종류 (분출층, 기포층, 견고한 분체층, 동적 분체층)

5. 최저 유동화의 예측

분체층을 유동화하는데 는 최저속도가 요구된다. 이 속도가 너무 작다면 분체층은 고정되고 충진층으로 운전된다.

Ergun 방정식은 충진층을 통과하는 유동율에 따른 압력강하와 관련있는 무차원 형식으로 제시되는 것을 상기해 보자. 유동화 시작시 압력강하는 Ergun 방정식에 의한 속도에 관계되어 있다는 것과 같이 입자들은 여전히 서로가 결합되어 있다. 압력강하로 인한 힘 또한 분체층을 이루는 분체의 총중량에 관련되어 있다.

$$\Delta PA = (\rho_p - \rho)(1 - \varepsilon_f)(AL_f)\frac{g}{g_f} \qquad (3)$$

식(3)의 오른 쪽은 분체의 무게에서 치환된 유체에 의한 부력을 뺀 것이다. 아래 쓰인 f 는 그 량(量)이 분체층에 대한 것이란 의미이다.

분체층에 분체의 유입과 유출이 없는 것으로 가정하고 분체에 대한 총질량 평형을 고찰한다면 분체의 총질량은 다음과 같이 일정하다.

$$M_{solids} = \rho_p(1 - \varepsilon_f)AL_f = constant \qquad (4)$$

유동화율의 차이에 따라 공극률 ε 와 층높이 L 은 변하지만 식(4)의 나머지 항들은 일정하다. 이것은 유동율 1 과 2 에서의 공극률과 층높이는 다음의 관계를 갖는다는 것을 의미한다.

$$(1 - \varepsilon_1)L_1 = (1 - \varepsilon_2)L_2 \qquad (5)$$

액체와 기체의 경우, 압력강하가 작으면 유체상밀도(流體相密度)는 일정하다. 식(3)의 오른 쪽이 일정하고 그래서 유동화층에서의 압력강하는 속도에 관계없이 일정하다.

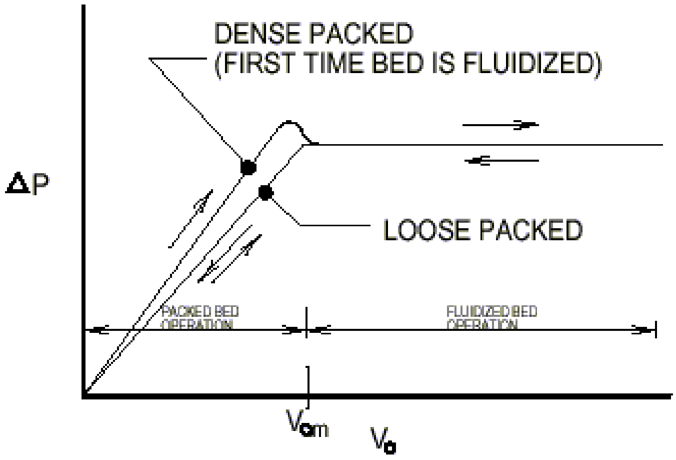
실험데이타는 이것이 사실임을 나타낸다. 압력강하 對 속도의 전형적인 그래프를 [그림 3]에서 보여준다. 유동화층에 대해 식(3)을 치환하여 수정한 Ergun 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1.75}{\varepsilon_f^3\Phi} R_{ep_f}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_f)}{\varepsilon_f^3\Phi^2} R_{ep_f} = N_{GA} \qquad (6)$$

여기에서

$$R_{ep_f} = \frac{\rho V_{0f} d_p}{\mu} \qquad (7)$$

$$N_{GA} = \frac{d_p^3 \rho(\rho_p - \rho)g}{\mu^2} \qquad (8)$$



[그림 3 : 유동화층에서 압력강하 對 속도의 전형적인 그래프]

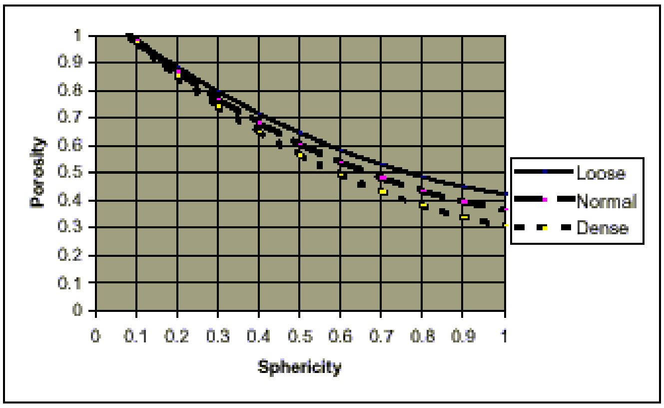
초기에 분체층이 고밀도로 충진된다면 압력강하는 입자들이 분리되고 유동화될 때 까지 유동화 압력을 상회하게 된다.

입자가 매우 작은 즉 $R_{ep_f} < 1$ 인 경우, $R_{ep_f}^2$ 은 무시될 수 있고 Blake - Kozeny식을 취할 수 있다.

$$\frac{150(1-e_f)}{e_f^3\Phi^2} R_{ep_f} = N_{GA} \cdots\cdots\cdots \; for \;\; R_{ep_f} \langle 1 \qquad (9)$$

$$V_{0f} = \frac{d_p^2(r_p - r)ge_f^3\Phi^2}{150m(1-e_f)} \qquad (10)$$

[그림 4 : 구면률과 충진상태의 함수로서의 공극률]



유동화 개시를 평가하기 위해서는 최저 유동화 상태를 평가할 수 있다. 최저 유동화 공극률

e_{mf} 은 저밀도 충진과 구면률 Φ 를 [그림 4]로부터 평가될 수 있다. e_{mf} 의 이 값을 이용하여 최저 유동화 속도 V_{om_f} 를 구하기 위한 Ergun 방정식을 풀 수 있다.

e_{mf} 와 Φ 를 모를 때도 최저 유동화 속도를 평가할 수 있다. 수정된 Ergun 방정식, 식(6)은 다음과 같이 다시 표현된다.

$$K_2 R_{ep_{mf}}^2 + K_1 R_{ep_{mf}} = N_{GA} \qquad (11)$$

여기에서 $K_1 = \dfrac{150(1 - e_{mf})}{e_{mf}^3 \Phi^2}$, $K_2 = \dfrac{1.75}{e_{mf}^3 \Phi}$

" 웬 " 과 " 유 "는 $0.001 < R_{ep_{mf}} < 4,000$ 와 같이 넓은 범위의 입자들에 대해 K_1 과 K_2 는 거의 일정하게 머물며 그래서 34%의 표준편차를 가지는 V_{om_f} 를 예측할 수 있다는 것을 정리 했다. 식(11)을 통해 알게된 K_1과 K_2 로 최저유동화속도를 구할 수 있다.

$$R_{ep_{mf}} = \sqrt{\left(\frac{K_1}{2K_2}\right) + \frac{1}{K_2} N_{GA}} - \left(\frac{K_1}{2K_2}\right) \qquad (12)$$

웬과 유는 $\left(K_1/2K_2\right) = 33.7$, $\left(1/K_2\right) = 0.0408$ 로 정의 했다.

웬과 유의 작업이후 다른 사람들이 K_1와 K_2 값을 미세입자와 거친 입자들에 대해 [표1]과 같이 요약하여 정리했다.

[표 1 : 웬과 유의 관계식(12)의 상수값]

입자종류	$(K_1/2K_2)$	$1/K_2$	출처
미세입자	33.7	0.0408	Wen & Yu, AIChE J, 12(3) 610~612, 1966
굵은입자	28.7	0.0494	Chitester etc. Chem.Eng.Sci., 39, 253, 1984

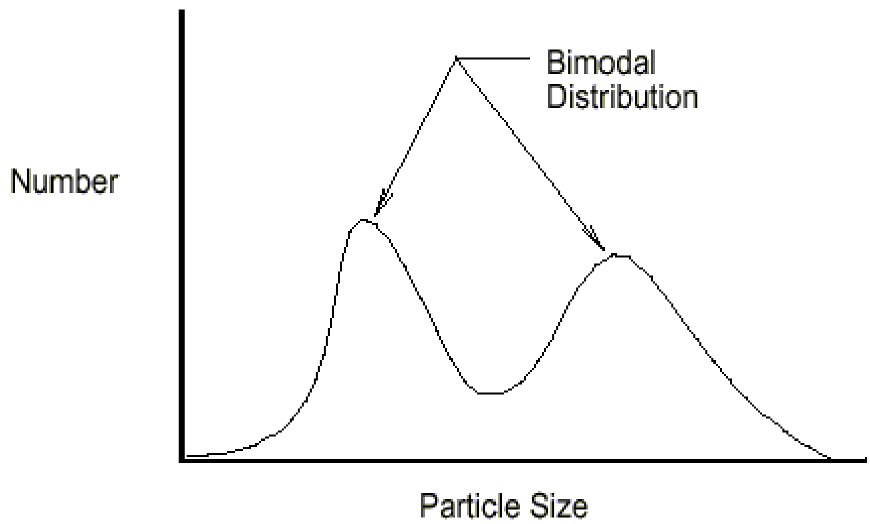
6. 입자크기의 광범위 분포

앞선 논의는 입자크기의 분포가 좁은 분체층에 우선적으로 적용한다. 무슨 현상이 발생하며 유동화층에 큰 입자가 언제 분포되는지를 고찰해 보자.

이런 분체층에서 최저 유동화속도 V_{om_f} 는 분체층의 실제적인 입자분포가 정의되어야 한다. 미세입자의 세척, 입자의 분쇄 혹은 결합공정 후 다시 공급할 때 크기분포는 두드러지게 다를 것이다.

평균 입자크기를 사용하여 V_{om_f} 를 계산할 수 있다(투과성 평균은 대부분 적절하다). 유체가 상향 유동하고 그 유동이 증가될 때 큰 입자들 사이의 공간이 있는 미세입자들은 큰 입자들에 앞서 유동할 것이다. 이런 부분적인 유동화는 평균 V_{om_f} 보다 작은 속도에서 일어날 것이다.

광범위한 입자크기에 대한 V_{om_f} 계산은 혼합액체의 비등점을 측정하는 것과 유사하다. 비등점은 고정되어 있지 않고 조성에 따라 변한다. 전체 분체층의 유동화에 대한 지속적인 계산을 얻기 위해서 V_{om_f} 는 가장 큰 입자에 대해 계산되어야 한다. 미분을 투입하지 않고 분체층 상부에서 유출하지 않은 상태에서 가장 작은 입자의 말단속도도 조사해야 한다.

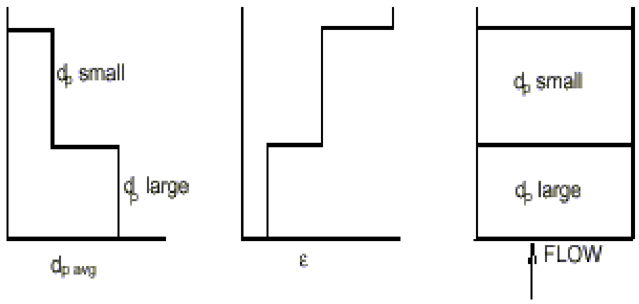


[그림 5 : 크기별 입자수에서 2개 정점(형태)를 보여주고 있는 입자크기의 2개 형태분포]

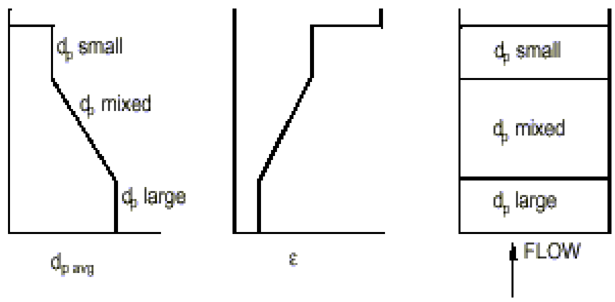
분체층이 2개 형태의 분포를 가진다면 [그림 5]의 예와 같이 2개의 크기 범위를 가진다.

여러 가지 유동화 상태들은 2개 형태 크기분포의 유동화층에서 있을 수 있으며 이 상태들은 [그림 6]에 나타나 있다.

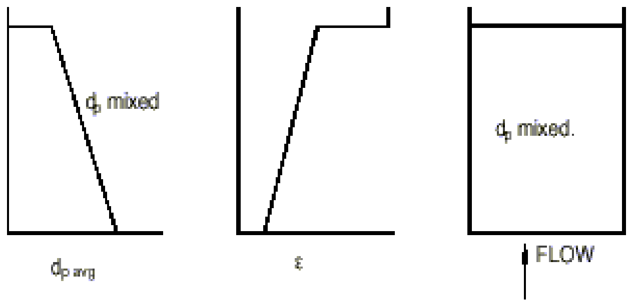
[그림 6 : 2개 형태 크기 분포의 유동화층]



(a) 큰 입자가 주도적인 영역과 작은 입자가 주도적인 영역에서의 입자들의 완전한 분리, 이 분리는 분체층의 공극율이 급격히 변하는 특징을 가질 것이다.



(b) 크기가 다른 입자들이 혼합된 층에 의해 다른 크기의 입자들로 분리된 2개 영역에서의 부분 분리.



(c) 입자의 분리가 없음, 평균 입자크기는 분체층 깊이를 따라 점진적으로 변할 것이다.