

## 입경분포가 있는 정상상태 유동층으로부터의 입자의 선별 유출

전종열·송영목\*·김희영·윤 풍

한국화학연구소 화공부

\*동부산업 주식회사

(1988년 2월 10일 접수, 1988년 6월 3일 채택)

## Selective Particle Withdrawal from Steady-State Fluidized Bed with Particle Size Distribution

Jong-Yeol Jeon, Young-Mok Song, Hee Young Kim and Poong Yoon

Chemical Engineering Department, Korea Research Institute of Chemical Technology

\*Dong Bu Industrial Co., Ltd.

(Received 10 February 1988; accepted 3 June 1988)

### 요 약

입자가 성장하는 연속 정상상태 유동층 반응기에서의 입자 유동을 상온에서 모사할 수 있는 반응부 유동층의 하부에 큰 제품입자를 선별 유출할 수 있는 분리관을 설치하여 입경분포를 갖는 반응부 유동층 입자들의 분리를 연구하였다. 이 분리관을 통해 정상상태 반응부 유동층내에서 큰 입자들을 선택적으로 계속 유출하기 위해 혼합입자의 최대 및 최소 입자에 대한 초기 유동속도의 범위내에서 분리관 내부의 유동상태를 유지시켰다. 이러한 분리관을 이용하여 반응부 유동층에서의 유동조건에 영향을 미치지 않고 높은 입자 분리 효과를 거둘 수 있었는데, 이를 위해서는 반응부 유동층의 평균입경 및 분포의 특성과 분리관에서의 유동 특성에 대해 제한적인 조업범위가 존재함이 나타났다. 이러한 허용 조업범위하에서의 실험결과를 토대로 주어진 구조에 대해 반응부 유동층의 입경분포와 선별 유출된 입자들의 입경분포와의 관계식을 조업 특성 변수들과 입경의 함수로 표시하여 실험값들을 정량적으로 설명할 수 있음을 밝혔다.

**Abstract**—Continuous segregation of particles with size distribution was studied in a particle withdrawal boot attached to the bottom of a fluidized bed which was installed to simulate the particle dynamics in a particle growing reactor. In order to withdraw continuously and preferentially large particles in steady state from the main fluidized bed the boot was mildly fluidized between the incipient fluidization velocities of the largest and smallest size fractions. It was observed that a high degree of segregation can be achieved in the limited range of the fluidization condition at the boot as well as of the particle size and distribution mode at the main fluidized bed. In the acceptable operation range the segregation efficiency of large particles could fairly well be related to those operational parameters for a given boot geometry, and the empirical relationship proposed in this study were in good agreement with experimental observations.

### 1. 서 론

유입기체(반응기체 및 carrier 기체)의 흐름에 의해

고체입자가 유동화되고 화학증기증착(CVD) 등의 반응에 의해 연속적으로 유입되는 입자핵(seed particles)의 크기가 증가하게 되는 연속 정상상태 유동층 반응기

에서는 성장된 큰 입자들을 연속적으로 유출시켜야 한다. 그런데, 일반적으로 입자핵들이 입경분포를 가지므로 이러한 반응기 내부에서는 성장되는 입자들도 일정한 입경분포를 유지하게 된다. 따라서 가급적 큰 입자(이하 “제품입자”)들을 제품으로 선택분리(segregation) 해내는 일은 반응기의 설계 및 조업조건을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

이와같이 입경분포를 갖는 유동층으로부터의 입자분리는 유입가스의 유량을 조절하거나 입자 유출관의 위치를 잘 선택하면 어느정도 가능하다. 그러나, 가스 분산관을 사용한 유동층이나[1-4] spout형 유동상[5]에 있어서 크기가 다른 이성분 혼합입자의 입자분리에 관한 연구결과를 볼 때 큰 입자만의 선택분리를 위해 유출관의 위치를 정확히 선택하는 것은 사실상 불가능하다. 한편, 유동층 반응기 하부에 관 형태의 유동분리장치(segregation boot 혹은 withdrawal tube)를 반응기의 일부분으로 설치하여 적절한 입자 유동을 일으켜 혼합물중 큰 입자는 아래로, 작은 입자는 상부 반응층으로 이동시키는 방법을 고려할 수 있다[6]. 이와같은 분리관을 이용하면, 설치가 용이하고, 입자분리에 필요한 유동을 위해 반응기에 유입되는 가스를 일부 사용할 수 있고, 제품입자중 미세 입자는 반응층으로 다시 보내 입자 성장을 계속시켜 제품 손실을 줄이고, 제품입자의 냉각을 동시에 시킬 수 있다.

본 연구에서는 한 등[7]이 발표한 정상상태 연속 유동층 반응기에서의 입자크기 분포의 모사와 관련하여, 반응부 유동층 하부에 분리관을 부착하여 제품입자를 선택분리할 때 운전조건이 입자분리에 미치는 영향을 밝히고자 하였다. 이를 위해 직경 104mm의 spout형 유동층 모사 반응기를 설치, 운전하여 효과적인 제품입자 분리를 위한 조업변수의 범위를 파악하였다. 그리고, 이러한 허용 조업범위하에서 적용될 수 있게 반응부 내부 입자의 크기 및 분포와 분리관에서의 입자 유동특성이 입자분리에 미치는 영향을 경험식으로 나타내어 실험결과와 비교하였다.

## 2. 실험

정상상태에서 연속적인 입자 성장이 일어나는 spout형 반응기 내부의 입자 유동현상과 그 하부에 부착된 분리관에서 진행되는 입자의 분리를 상온에서 모사할 수 있게 실험장치를 Fig. 1과 같이 설치하였다. 주요 장치는 모두 아크릴관을 사용하여 육안관찰이 가능하게

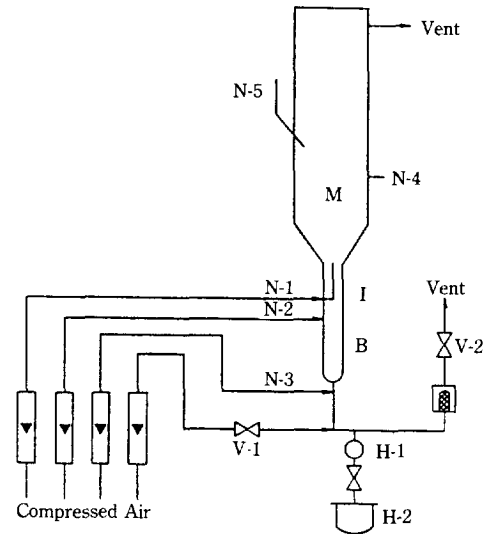


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

했는데 반응부 유동층(M)은 직경 20cm, 높이 1.3m, 분리관(B)은 직경 3.7cm, 높이 18cm이며, 그 중간에 연결관(I)을 높이 15cm로 설치하였다. 그리고 반응부와 연결관 사이는 60° 각도의 축소관으로 연결했다.

반응부 유동상에서의 입자들은 직경 18mm의 노즐(N-1)을 통해 공급되는 건조 공기로 spout형의 유동층을 이루는데, 이때 유량은 선속도  $U_b$  및 유동층내 평균입경  $\bar{D}_b$ 에 대한 최소 유동화 속도  $U_{mf}$ 의 비율( $U_b/U_{mf}$ )이 2.5가 되게 유지시켰다. 여기서 입경  $\bar{D}_b$ 에 대한  $U_{mf}$ 는  $D_b U_b \rho_g / \mu_g < 20$  범위에서 적용될 수 있는 다음의 Ergun 식[8]으로 계산된다.

$$U_{mf}(\bar{D}_b) = \frac{(\phi \bar{D}_b)^2}{150} \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu_g} g \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} \quad (1)$$

여기서  $\rho_g$  및  $\mu_g$ 는 공기의 밀도 및 점도이며, 사용된 실리콘입자에 대해서는 구형도  $\phi=0.67$ , 최소 유동시 공극율  $\epsilon=0.56$ , 밀도  $\rho_s=2,195$ 의 값들을 사용하였다[9]. 분리관에서는 제품입자의 분리를 위해 노즐(N-3)을 통해 167-317 cc/sec의 범위에서 공기를 공급하여 유동을 일으켰다. 그리고 반응부 유동층과 분리관 사이의 연결관에는 노즐(N-2)을 통해 원주방향으로 골고루 83 cc/sec의 공기를 공급하여 반응부 하부와 분리관 사이에서 교차되는 입자들의 혼합을 향상시키고 상부 유동층에서 생길 수 있는 진동이 분리관으로 파급되는 것을 막도록 했다.

본 실험에서 사용된 각 장치의 사양 및 조업범위는 사전실험을 통하여 결정되었기 때문에, 반응부에서의 유동상태는 매우 양호했으며 분리관에서는 좁은관에서 흔히 나타나는 slugging 현상이 각 시료에 대해 실시된 최대 유량에서도 뚜렷이 본격화 되지는 않았다.

실험에 사용된 실리콘입자는 분리기(Ro-Tap Shaker)를 이용하여 ASTM 규격의 체로 분리한 다음 Fig. 2와 같이 연속분포의 성질을 갖게 혼합시켜 8가지 시료를 준비하였다. 시료-1, 2, 3은 모두  $407.4 \mu\text{m}$ 의 평균입경  $\bar{D}_b$ (평균 입경  $D_i$ 를 갖는  $i$ 번째 cut의 무게분율  $w_b(D_i)$  기준,  $\bar{D}_b = 1/\sum [w_b(D_i)/D_i]$ 을 가지며 평방근 편차  $\sigma$ (r.m.s. 값 기준) 값이 다른 즉, 분포의 형태가 각기 다른 12성분 입자 혼합물이다. 여기서 편차값은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma^2 = \sum (D_i - \bar{D}_b)^2 w_b(D_i) \quad (2)$$

시료-4, 5, 6은 동일한 분포형태( $\sigma/\bar{D}_b$ 값)를 가지나 각기 다른  $\bar{D}_b$  값을 갖는 9성분의 혼합물이다. 또한, 시료-7, 8은 시료 1과 같은  $\bar{D}_b$ 값을 가지나 분포 형태가 다르면서 최대 및 최소 입경의 범위를 줄인 각각 9 및 8성분의 혼합입자이다.

건조과정을 거친 2 kg의 실리콘 혼합입자 시료를 반응부 및 그 하부에 채운 뒤 각 노즐을 통해 공기를 공급한다. 분리관에서 분리를 거친 제품입자는 15분 간격으로 80g씩 solenoid valve(V-1, 2)를 이용 정량 hopper(H-1)를 통하여 주기적으로 hopper(H-2)로 이동시켜 추출한 다음 입자 분리기로 입경 분석을 실시하고 다시 노즐(N-5)을 통해 반응부 내부로 순환시켰

다. 이와같은 주기적인 입자의 재순환 과정을 통해 유동층의 입자무게 및 분포도를 일정하게 유지시켜 연속 정상상태의 유동화가 일어나게 하였다. 또한 반응부 유동층 내부 위치에 따른 입자분포의 차이 여부를 확인하기 위해 노즐(N-4)의 위치를 임의로 바꿀 수 있게 설치하여 수시로 입자를 추출하여 크기 및 분포를 분석할 수 있게 했다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3-1. 반응부 유동층에서의 입자혼합

입자 분리관에서의 분리효과를 정상상태 유동층 반응기 내부에서의 입자 성장과 분리시켜 해석하기 위해서는 반응부 유동층(M)에서 위치에 따른 분리현상이 없어야 한다. 실험에서는  $U_b/U_{mf}(\bar{D}_b) = 2.5$ 의 유동가스 유량과 반응기 하부에서 올라오는 유량까지 합쳐져서 반응부 내에서는 spout형 유동이 양호하게 일어나고, 노즐(N-4)을 통해 임의로 추출된 입자들의 분석결과 별다른 입자분리 현상이 관찰되지 않았다. 이 결과는 최소 spouting을 위한 유속  $U_{ms}$ 에 대해  $U_b/U_{ms} > 2$  범위에서는 크기가 다른 이성분 혼합입자에서 입자분리가 없다는 연구결과[5]와도 같은 현상을 나타낸다. 그러므로, 본 실험의 운전범위에서는 반응부 유동층 내부에서 입자들이 균일하게 혼합되었다고 가정할 수 있었다.

#### 3-2. 분리관에서의 입자분리

입자분리관을 통해 유출되는 직경이  $D_i$ 인 제품입자의 무게분율  $w_i(D_i)$ 과 반응부 유동층 내부에서의 값  $w_b(D_i)$ 과의 비율을 선택분리 인자  $\Psi$ 로 정의하면,

$$\Psi(D_i) = w_i(D_i)/w_b(D_i) \quad (3)$$

따라서, 큰 입자의 경우  $\Psi > 1$ , 작은 입자의 경우  $\Psi < 1$ 이 된다. 실험결과에 따르면 큰 입자의 경우 분리관에서의 공기유량  $Q$ 가 클수록 높은 분리효과를 나타내었다. 예를 들어 시료-1의 경우 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 낮은 유량(167 cc/sec)에서는 입경이 커질수록 일정한  $\Psi$ 값으로 수렴하는 경향을 보이는데 반하여, 높은 유량(250 cc/sec)에서는  $\Psi$ 값이 입경에 따라 지수함수의 형태로 계속 증가함을 보여준다. 그런데 유량이 너무 증가하면 오히려 분리효과가 저하되는 것으로 나타난다. 이와같은 현상은 시료-2, 3, 5 및 6에 대해 직접 확인되었는데(Table 1 및 2 참조), 예를 들어 시료-5의 경우(Fig. 3의 점선), 250에서 283cc/sec로

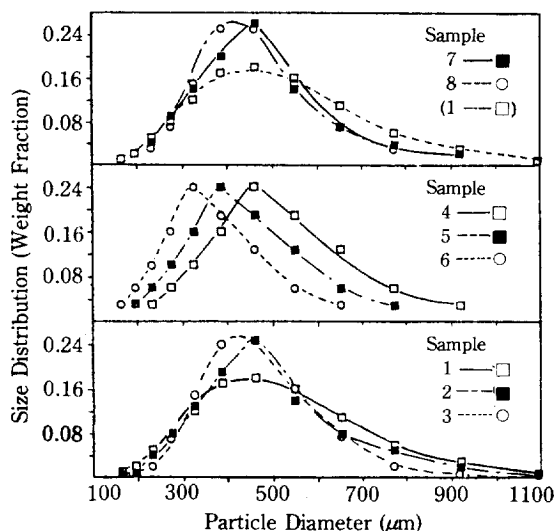


Fig. 2. Particle size distributions of samples.

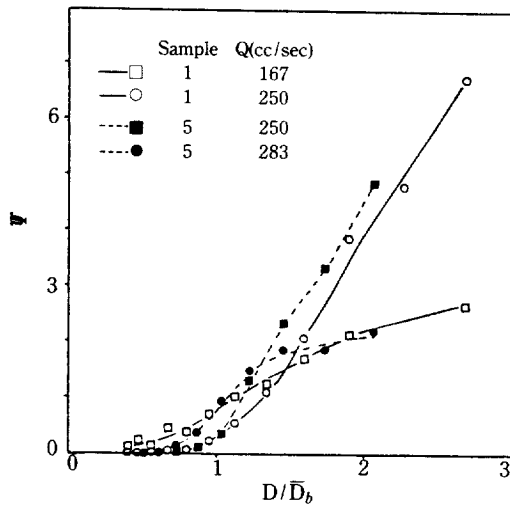


Fig. 3. Segregation factor  $\Psi$  plotted against particle size.

유량이 증가함에 따라 큰 입자의  $\Psi$  값이 급격히 저하됨이 잘 나타나 있다.

이와같이 입자분리에 미치는 유동 특성을 분리관에서의 평균 선속도  $U$ 와 최소 유동화 속도  $U_{mf}$ 의 비율로 표시할 수 있는데, 입경분포를 갖는 혼합물의 경우  $U_{mf}$  값의 계산은 용이하지 못하다[10]. 더우기 분리관 내에서는 높이에 따라 입자의 조성이 변하게 되어 그 계산의 기준 설정은 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 반응부 유동층에서의 일정한  $\bar{D}_b$  값을 기준으로한

$U/U_{mf}(\bar{D}_b)$ 의 무차원 계수를 분리관에서의 유동 특성을 간접적으로 나타내는 계수로 사용하도록 한다[이하  $U_{mf}$ 는  $U_{mf}(\bar{D}_b)$ 를 의미]. 본 실험에서 사용된 분리관에서의 유량은  $0.6 < U/U_{mf} < 1.6$ 의 범위로 각 시료의 최대입경( $D_{max}$ )과 최소입경( $D_{min}$ )에 대한 최소 유동화 속도값 사이에서 정하였다. 이러한 유량범위에서 분리관에서의 선택적 분리효과를 제품입자의 평균입경  $\bar{D}_l$ 과 주 반응 유동상에서의 값  $\bar{D}_b$ 의 비율로 표시할 수 있다. Table 1에는  $\bar{D}_b$  값이 같은( $407\mu m$ ) 시료-1, 2, 3, 7 및 8, 또 Table 2에는 입경분포 형태가 같은( $\sigma/\bar{D}_b = 0.363$ ) 시료-4, 5, 6의  $U/U_{mf}$ 에 따른  $\bar{D}_l/\bar{D}_b$  값의 변화가 각각 나타나 있는데, 이들 결과를 종합해 보건데 분리관에서는  $U/U_{mf} \approx 1.0$  근처에서 입자 유동이 분리효과의 면에서 적절한 것으로 나타났다. 이는 낮은 유량조건( $U/U_{mf}$ )에서 작은 입자의 유동이 가능하지만 주위에 존재하는 큰 입자들이 고정화 되기 때문에 작은 입자가 반응기쪽의 상부로 이동하기가 힘들다. 유량이 증가하여  $U$ 값이  $U_{mf}$ 에 가까워지면(평균 입경이  $\bar{D}_b$ 보다 큰 분리관에서의 최소 유동화 속도는 계산상으로는  $U_{mf}$  값보다 크다)  $\bar{D}_b$ 보다 작은 입자들이 유동을 시작하는 범위에서 분리가 일어난다. 작은 입자와 주변 큰 입자들의 진동에 편승하여 유동중인 작은 입자들은 상부로 이동하게 되고, 이는 또한 큰 입자의 침강을 유도하게 되어 높은 분리효과가 나타난다고 볼 수 있다. 그런데, 유량이 더욱 증가하여  $\bar{D}_b$ 보다 큰 입자들의 유동

Table 1. Degree of segregation( $\bar{D}_l/\bar{D}_b$ ) of samples with the same average particle size( $\bar{D}_b = 407\mu m$ ).

Sample	Cut No.	$\sigma/\bar{D}_b$	$\bar{D}_l/\bar{D}_b$				
			$U/U_{mf} = 0.636$	0.764	0.954	1.082	1.175
1	12	0.466	1.248	1.328	1.497	1.578	—
2	12	0.403	—	1.302	1.470	1.530	1.369
3	12	0.326	1.142	1.245	1.278	1.231	—
7	9	0.366	1.227	1.329	1.476	1.541	—
8	8	0.302	1.160	1.237	1.341	—	—

Table 2. Degree of segregation of samples with the same mode of particle size distribution ( $\sigma/\bar{D}_b = 0.363$ ).

Q(cc/sec)	Sample-4		Sample-5		Sample-6	
	$U/U_{mf}$	$\bar{D}_l/\bar{D}_b$	$U/U_{mf}$	$\bar{D}_l/\bar{D}_b$	$U/U_{mf}$	$\bar{D}_l/\bar{D}_b$
167	—	—	0.756	1.222	1.069	1.349
200	0.641	1.176	0.907	1.351	1.282	1.431
250	0.801	1.273	1.134	1.430	1.603	1.337
283	0.908	1.322	1.170	1.254	—	—
317	1.015	1.407	—	—	—	—
$\bar{D}_b(\mu m)$	444.6		373.9		314.4	

시작과 이에 따른 큰 입자들의 침강이 억제되면 slugging에 조금씩 가까워지면서 입자혼합이 심해지고 분리효과의 감소가 초래된다고 보여진다.

본 실험결과는 분리관에서의 유동 특성의 영향이외에도 반응부 유동층에서의 입자들의 평균직경 및 분포도가 입자분리에 영향을 준다는 것을 밝히고 있다. Table 1에 나타난 결과들은 같은  $\bar{D}_b$ 에 대해서 평방근편차  $\sigma$  값으로 표시된 분포도에 따라 크게 두가지로 분류될 수 있다. 즉,  $\sigma/\bar{D}_b \geq 0.366$ 인 시료-1, 2, 7의 경우와  $\sigma/\bar{D}_b \leq 0.326$ 인 좁은 분포를 갖는 시료-3, 8로 대별하는데, 전자의 시료들이 후자들보다  $U/U_{mf}$  값 각각에 대해 항상 높은  $\bar{D}_i/\bar{D}_b$  값을 나타냈다. 또한, 이임계  $\sigma/\bar{D}_b$  값 이상 또는 이하에서는 분리효과의  $\sigma/\bar{D}_b$  값에 대한 의존성이 없이 거의 같은  $\bar{D}_i/\bar{D}_b$  값을 갖는 것으로 밝혀졌다. 이같은 결과로부터 분리관에서 분리효과를 얻기 위해서는  $\sigma/\bar{D}_b$ 의 분포 특성 계수가 임계값 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

### 3-3. 분리인자 관계식

이상의 분석결과에 따르면, 혼합입자를 분리관에서 효과적으로 분리하기 위해서는  $U/U_{mf}$ 와  $\sigma/\bar{D}_b$ 의 두가지 특성 계수가 적정 범위내에 포함되어야 함이 나타났다. 이 계수값들의 필요조건은 선택분리의 허용범위에 따라 정해지기 때문에, 본 연구에서는 제품입자중  $\bar{D}_b$ 보다 큰 입자들이 90% 이상(무게 기준)이며, 동시에  $\bar{D}_i/\bar{D}_b > 1.4$ 인 높은 분리가 일어나는 경우를 운전 허용범위로 선정하였다. 이 조건들을 만족시키는 실험결과는 시료-1과 2( $Q=250, 283$  cc/sec), 시료-4( $Q=317$ ) 및 시료-5( $Q=250$ )의 6가지 경우가 해당된다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 입자중 크기가 증가할수록 분리인자  $\Psi$ 값이 증가하는데 상기 허용범위를 만족하는 6가지 경우에는 입경에 따라  $\Psi$ 값들이 지속적으로 증가하며 동시에  $\Psi(D_{max})$ 값들이 모두 5보다 크다. 이와 같은 허용범위를 만족하는 6가지 경우의 실험결과를 Table 1과 2를 통해 분석하면 다음과 같은 최적 분리를 위한 필요조건을 두가지 무차원 특성계수  $U/U_{mf}$  ( $\bar{D}_b$ )와  $\sigma/\bar{D}_b$ 에 대해 구할 수 있다.

$$0.95 \leq U/U_{mf}(\bar{D}_b) \leq 1.15 \quad (4)$$

$$\sigma/\bar{D}_b \geq 0.36 \quad (5)$$

이 범위에 해당되는 본 연구의 입자분리효과는 최근 Hsu 등[6]이 분리관을 이용 유동층 CVD 반응기로부터 실리콘입자를 선택분리시켜 얻은 결과보다 훨씬 높은 것으로 나타났다. 그들의 실험결과에 따르면  $\bar{D}_b =$

$220 \mu m$ 에 대해  $\bar{D}_b$ 보다 큰 제품입자가 50%이며  $\Psi(D_{max})=1.4$ 밖에 되지 않아 본 연구에서 채택된 허용 범위에서의 결과보다 아주 낮은 분리효과를 나타내었다. 이와같은 차이는 최적 조건의 준수여부에 그 원인이 있다고 여겨진다. 이밖에 실험 장치상의 차이로 볼 때 본 연구의 높은 분리효과는 새로이 설치된 연결관(I, Fig. 1)의 덕택으로 볼 수 있다. 이는 분리관에서 상승하는 작은 입자들과 상부 반응부 유동층으로부터 하강하는 큰 입자들이 연결관에서 원활히 혼합됨으로써 해서 분리관에서의 지속적인 입자분리를 유지시키기 때문이다.

식 (4) 및 (5)의 허용 조업범위내에서 분리인자  $\Psi$ 는 두가지 계수  $\sigma/\bar{D}_b$ ,  $U/U_{mf}(\bar{D}_b)$  및  $\bar{D}_b$ 와 입경  $D_i$ 의 함수가 될 것이다.  $\Psi(D_{min})$ 값이 0으로 수렴하고  $\Psi$ 가 무차원 값임을 고려하면 다음과 같이 식의 형태를 예상할 수 있다.

$$\Psi(\bar{D}_b, \sigma, U/U_{mf}, D_i) \propto A \left( \frac{D_i - D_{min}}{\bar{D}_b} \right)^B \quad (6)$$

식 (4) 및 (5)의 필요조건을 만족하는 6가지 각각의 실험결과에 대해 (6)식의 A, B값들을 BSOLVE algorithm[11]에 의한 least square 방법으로 계산할 수 있다. 이 값들을 종합하면, 계수 A는 입자분포의 영향을 받아  $A \propto (\sigma/\bar{D}_b)^{-2}$  그리고 지수 B는 유량조건에 의해 주로 좌우되어  $B=1.6$   $U/U_{mf}$ 의 관계로 표시되어

$$\Psi = k \left( \frac{\sigma}{\bar{D}_b} \right)^{-2} \left( \frac{D_i - D_{min}}{\bar{D}_b} \right)^{1.6 U/U_{mf}} \quad (7)$$

의 관계식이 구해지고 비례상수 k값은 약 1/3이 얻어진다. 이때, 6가지 실험결과에 대한 (7)식의 least square objective function 값  $\sum_i [\Psi_i(\text{계산값}) - \Psi_i(\text{실$

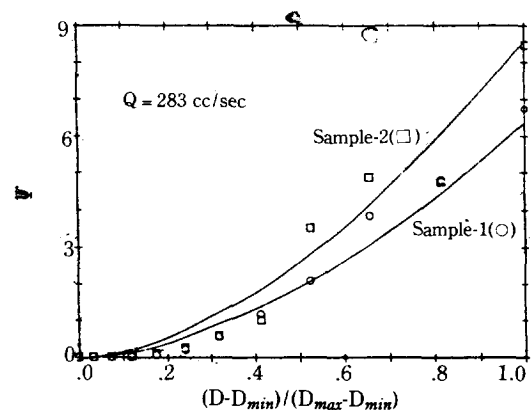


Fig. 4. Comparison between observed segregation factors and calculated values.

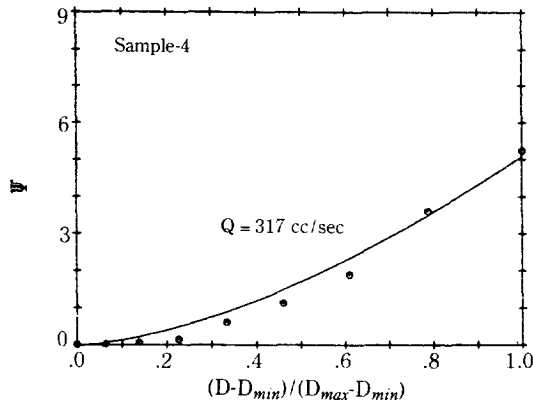


Fig. 5. Comparison between observed segregation factors and calculated values.

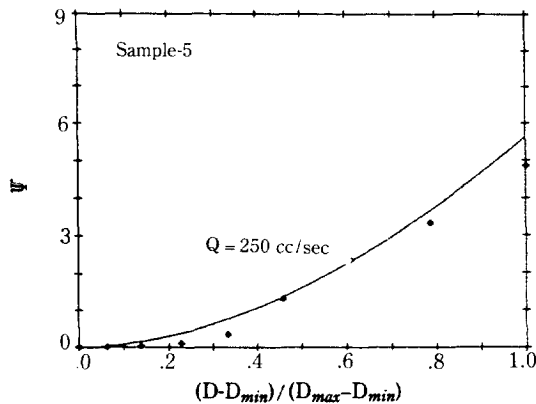


Fig. 6. Comparison between observed segregation factors and calculated values.

험값)]<sup>2</sup>은 최저 0.62, 최대 4.22의 범위내에 속한다. 여기서 얻어진 허용 조업범위에서의 분리인자 관계식은 Fig. 4-6에 나타난 바와 같이 큰 입경의 분리결과를 일관성있게 잘 설명해주고 있음을 보여준다. 이러한 결과는  $\sigma$  및  $\bar{D}_b$ 의 반응부 유동층의 입자분포 특성과  $U/U_{mf}$ 로 표시되는 분리관에서의 유동 특성이 식 (7)의 형태로 표시될 수 있는 가능성을 나타내고 있다. 다만 이 식에 사용되는 지수값들은 입자의 종류와 분리관의 구조에 따라서, 또 조업  $\bar{D}_b$ 의 범위에 따라 실험에 의해 결정되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

정상상태 연속 유동층으로부터 분리관을 이용하여 반응부 유동층의 혼합입자로부터 큰 입자들을 선택분리해

내는 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 반응부 유동층 하부에 설치된 분리관에서의 입자 분리는 반응부에서의 입자 성장과정과 분리시켜 해석할 수 있으며 분리관에서의 적절한 입자 유동을 통해 높은 분리효과를 얻을 수 있다.
2. 반응부와 분리관을 연결하는 연결관에서의 원활한 입자혼합이 분리관 내부의 연속적 입자분리에 중요하다.
3. 입자의 선택분리인자는 주어진 구조하에서 반응부 내부의 입경 및 분포의 혼합특성 ( $\sigma/\bar{D}_b$ )과  $U/U_{mf}$  ( $\bar{D}_b$ )의 계수로 표시되는 분리관에서의 유동 특성에 의해 설명될 수 있으며, 본 실험에서 사용한 실리콘입자의 높은 입자분리를 위해서는  $0.95 \leq U/U_{mf} \leq 1.15$  및  $\sigma/\bar{D}_b \geq 0.36$ 의 필요 조건이 존재한다. 이 경우  $\bar{D}_b$ 보다 큰 제품입자가 90% 이상,  $\Psi(D_{max}) > 5$ 의 높은 분리가 가능하다.
4. 이러한 조업범위하에서 입경에 따른 분리인자가  $U/U_{mf}(\bar{D}_b)$ ,  $\sigma$ ,  $\bar{D}_b$  값을 계수로 하는 간단한 함수 형태로 표시될 수 있으며, 해당 실험결과 값들을 잘 설명하는 것으로 나타났다.

#### NOMENCLATURE

- $D_i$  : Average diameter of silicon particles of i-th cut ( $\mu\text{m}$ )  
 $\bar{D}_f$  : Mean diameter of product silicon particles ( $\mu\text{m}$ )  
 $\bar{D}_b$  : Mean diameter of silicon particles within main fluidized bed ( $\mu\text{m}$ )  
 $g$  : Acceleration of gravity = 980  $\text{cm/sec}^2$   
 $Q$  : Gas flow rate ( $\text{cc/sec}$ )  
 $U$  : Superficial gas velocity at segregation boot ( $\text{cm/sec}$ )  
 $U_b$  : Superficial gas velocity at main fluidized bed ( $\text{cm/sec}$ )  
 $U_{mf}$  : Superficial gas velocity at minimum fluidization condition ( $\text{cm/sec}$ )  
 $w_f, w_b$  : Weight fraction at product particles and main fluidized bed

#### Greek Letters

- $\epsilon$  : Void fraction at  $U_{mf}$   
 $\mu$  : Viscosity of gas ( $\text{g/cm}\cdot\text{sec}$ )  
 $\rho$  : Density of solid particles( $\rho_s$ ) and gas( $\rho_g$ ) ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\sigma$  : Root-mean-square of standard deviation ( $\mu\text{m}$ )  
 $\phi$  : Sphericity of particles

$\Psi$  : Segregation factor

## REFERENCES

1. Rowe, P.N., Nienow, A.W. and Agbim, A.J.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **50**, 310 (1972).
2. Rowe, P.N. and Nienow, A.W.: *Powder Technology*, **15**, 141 (1976).
3. Cheung, L., Nienow, A.W. and Rowe, P.N.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1301 (1974).
4. Geldart, D., Baeyens, J., Pope, D.J. and Van De Wijer, P.: *Powder Technology*, **30**, 195 (1981).
5. Piccinini, N., Bernhard, A., Campagna, P. and Vallana, F.: *Can. J. Chem. Eng.*, **55**, 122 (1977).
6. Hsu, G., Rohatgi, N. and Housemann, J.: *AIChE J.*, **33**, 784 (1987).
7. Han, M.W., Jeon, J.Y., Kang S., Park, D.W. and Yoon, P.: *Hwahak Konghak*, **25**, 327 (1987).
8. Kunii, D. and Levenspiel, D.: "Fluidization Engineering", John Wiley, New York, pp 73, (1969).
9. UCC Final Report: "Low Cost Solar Array Project", June (1979).
10. Rowe, P.N. and Nienow, A.W.: *Chem. Eng. Sci.*, **30**, 1365 (1975).
11. Kuester, J. L. and Mize, J.H.: "Optimization Techniques with Fortran", McGraw-Hill, New York (1973).