

## Zig-Zag 형기류 분급기에서 분체의 분리

윤석호·강 용·조승호·강석호\*

충남대학교 공과대학 화학공학과

\*영남대학교 공과대학 화학공학과

(1988년 3월 12일 접수, 1988년 7월 28일 채택)

## Particle Separation in a Zig-Zag Air Classifier

S.H. Yoon, Y. Kang, S.H. Cho and S. H. Kang\*

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Chungnam National University

\*Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Yeungnam University

(Received 12 March 1988; accepted 28 July 1988)

### 요 약

Zig-Zag 형태의 분급기에서 분체의 분리에 대하여 검토하였는데 입자의 크기분포, 원료 입자 투입 속도 및 공기 유속이 분급기의 성능(performance)에 미치는 영향을 고찰하였다. Zig-Zag 공기 분급기는 4각 단면을 갖는 10단으로 구성되었으며 각 단들은 Zig-Zag Channel을 형성할 수 있도록 120°의 각도로 연결되었는데, Zig-Zag Channel을 통하여 미세 입자는 상승 기류와 더불어 상승하고 굵은 입자는 하강하도록 되어 있다. 본 연구의 실험결과 Zig-Zag 공기 분급기는 입자를 순도높게 연속적, 효율적으로 분리하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 나타났다.

**Abstract**—Separation of particles were investigated in a Zig-Zag type air classifier, and the effects of particle size distribution, feeding rate and gas flow rate on the performance of air classifier were evaluated.

The Zig-Zag air classifier consisted of ten stages with a rectangular cross section connected to each other at a 120° angle to create a Zig-Zag channel, where finer particles carried upwards by the upflowing air stream and the coarse particles descended along the lower section walls. From the experimental results of this study, it was revealed favorable for the Zig-Zag air classifier to be employed for the separation of high quality particles continuously and efficiently.

### 1. 서 론

화학공장, 제약공장 및 식품공장들에서 뿐만 아니라 석탄, 시멘트, 비료 그리고 도료, 안료 등 fine chemical을 다루는 많은 공정들에서 분체의 효과적인 분리 및 분급은 필수적이며 매우 중요한 문제로 되어 있다.

분체의 분리 및 분급공정은 일반적으로 분급기 내부에서 입자에 작용하는 중력이나 원심력 또는 입자들 상

호간의 충돌에 의한 힘 그리고 흐르는 유체로부터 받는 Drag 등의 힘을 이용하는 것이 대부분인데 이들중 몇 가지 힘을 복합적으로 이용하여 보다 효율적인 분리장치 및 공정의 설계 및 개발에 대한 연구들이 최근 많이 진행되어 오고 있다[1-6].

Zig-Zag형 분급기는 입자에 작용하는 중력과 유체의 흐름에 의한 Drag를 이용하되 유체와 입자의 흐름에 형태적 저항(form disturbance)을 주어 입자의 크기에 따른 분리 및 분급 효과를 증대시키는 효과를 나타

낼 수 있다. 뿐만 아니라 Zig-Zag형 분급기는 여러 개의 단(Stage)으로 구성되어 있으므로 각 단계에서의 입자의 분리 효과가 다음 단계로 전달될 수 있으며 유체와 입자가 각 단계에서 모두 독특한 흐름 형태를 가져서 입자의 분리, 분급을 연속적으로 많은 양을 처리할 수 있다는 등의 장점을 가지고 있다. Kaiser[7-8]는 Zig-Zag 형태의 Channel에서 입자들과 공기의 흐름 특성에 대하여 연구를 하였으며 Zig-Zag Channel에서 입자의 상승 및 하강 속도 등 속도의 변화를 측정하였으며, Senden과 Tels[9-10]는 Zig-Zag 분급기에 의한 다단분리(multistage separation) 효율을 Stochastic model을 사용하여 해석하였으며, 단과 단 사이의 각도를 90°와 120°로 변화시켜 가면서 분리 효율을 측정하였다.

한편, Worell과 Vesilind[11]는 도시의 고체형태 쓰레기의 처리에 응용할 수 있는 세가지 형태의 Zig-Zag형 공기 분급기(air classifier)를 사용하여 실험을 하였는데 이들 각 형태의 분급기들의 분급 효율은 공기 유속에 따라 각각 다른 최적값을 나타내었다.

최근에 Hou[12], Hou와 Kozak[13] 등은 공기에 의한 미분체의 분리 및 분급에는 분리된 입자의 크기에 따른 분리 입자의 무게나 부피의 비보다는 갯수의 비분포(number-size distribution)가 분급기의 조작이나 분리 효율 예측 및 분급기의 설계 등에 보다 신뢰성 있는 정보를 제공한다고 보고한 바 있다.

그러나 아직도 분체를 연속적으로 다량 분리하되 효과적으로 처리할 수 있는 분리 및 분급기에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이며 주로 사이클론에 대한 연구가 주종을 이루는 정도이다.

따라서 본 연구에서는 고체입자를 다량 효과적으로 분리, 분급할 수 있는 방법으로 Zig-Zag 형태의 공기 분급기를 사용하여 분급 효율을 측정하였으며, 이와같은 특수 형태의 공기 분급기의 효율에 각 조작변수들이 미치는 영향을 검토하였다. 이와같은 연구는 입자의 건조, 연소 및 기체화 반응 등에 응용될 수 있으며 석탄, 시멘트, 제약, 비료공장 등에서 뿐만 아니라 도시 쓰레기의 효율적 처리 등에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 입자의 등급 효율

Zig-Zag 분급기내에서 모든 feed의 양은 상단과 하단에서 포집된 입자들의 양과 같고 분급기내에서의 분쇄나 손실을 무시한다면 식 (1)과 같은 입자 크기  $x$ 에

대한 물질수지가 가능하다.

$$(N_F)_x = (N_B)_x + (N_O)_x \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 입자의 수를 나타내며 첨자 F, B 및 O는 각각 feed, bottom product 및 overflow product를 나타내는데 이 식 (1)을 미분형태로 나타내면 식 (2)와 같이 표시된다.

$$N_F \frac{dF(x)}{dx} = N_B \frac{dB(x)}{dx} + N_O \frac{dO(x)}{dx} \quad (2)$$

식 (2)에서  $x$ 의 함수  $F(x)$ ,  $B(x)$  및  $O(x)$ 는 각각 feed, bottom product 및 overflow product에서 입자수-크기분포 함수(number-size distribution function)를 나타낸다.

공기를 사용한 입자분급기에서 입자분리의 전효율(total efficiency)은 일반적으로 식 (3)과 같이 쓸 수 있으므로[12, 13], 식 (2)와 (3)으로부터 입자분급기의 전효율은 식 (4)와 같이 feed, bottom product 및 overflow product의 입자수-크기분포들만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$E_{tot} = \frac{N_B}{N_F} = 1 - \frac{N_O}{N_F} \quad (3)$$

$$E_{tot} = \frac{O(x) - F(x)}{O(x) - B(x)} \quad (4)$$

한편 입자분급기에서 입자의 크기에 따른 분리 효율인 등급 효율(grade efficiency)은 식 (5)와 같이 유도될 수 있으므로[12, 13],

$$G(x) = \frac{(N_B)_x}{(N_F)_x} = \frac{N_B}{N_F} \cdot \frac{dB(x)/dx}{dF(x)/dx} \quad (5)$$

식 (2), (3) 및 (5)로부터 등급 효율은 식 (6)과 같이 feed와 overflow product의 분포 함수와 전효율의 함수로 나타낼 수 있다.

$$G(x) = 1 - (1 - E_{tot}) \frac{dO(x)}{dF(x)} \quad (6)$$

## 3. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Zig-Zag형 분급기, 사이클론, 원료투입장치, 송풍장치 및 유속과 압력강하를 측정할 수 있는 rotameter와 manometer 등으로 구성되어 있다. Zig-Zag형 분급기는 모두 10단으로 구성되어 있는데 각 단은 10 cm × 20 cm × 0.5 cm의 아크릴판으로 만들었으며 그 단면은 10 cm × 10 cm로 균일하게 하였고 단과 단 사이의 각도는 120°를 유지하였다.

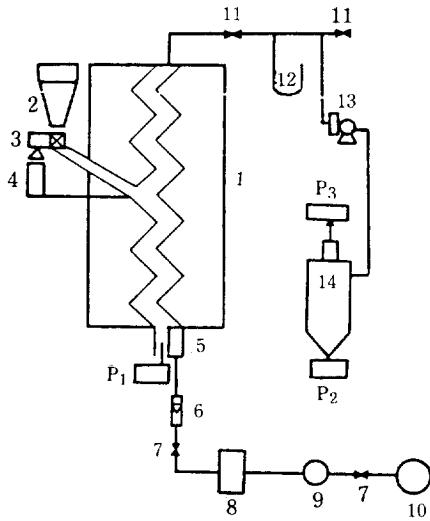


Fig. 1. Experimental apparatus.

- |                    |                  |
|--------------------|------------------|
| 1. Zig-Zag Channel | 8. Air Filter    |
| 2. Feed Hopper     | 9. Air Regulator |
| 3. Rotary Valve    | 10. Compressor   |
| 4. Vibrator        | 11. Gate Valve   |
| 5. Air Distributor | 12. Manometer    |
| 6. Rotameter       | 13. Blower       |
| 7. Globe Valve     | 14. Cyclone      |

Zig-Zag형 분급기에 분리하고자 하는 원료시료는 분급기의 밑에서부터 5번째되는 단에 투입하였으며, 원료 투입장치는 원료 투입 속도를 일정하게 유지할 수 있도록 vibrator와 rotary valve를 부착하여 사용하였다. Zig-Zag형 분급기에 원료의 투입 속도는 20-50 g/min의 범위에서 실험을 하였으며, 사용된 시료 원료는 Fig. 2 및 3에서 보는 바와 같은 number-size 분포를 갖는 두 종류의 모래알을 사용하였는데 이들의 평균밀도는  $2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 이었다. Zig-Zag형 분급기에 공기의 공급은 분급기 밑부분의 compressor와 분급기 상부의 Blower를 사용하였으며 공기유속은 분급기 하부의 rotameter와 exhaust line의 manometer를 사용하여 측정하였는데 공기 유속범위는 180-250 cm/s였다. Zig-Zag형 분급기 내부에서 공급되는 공기의 균일 분포를 도모하기 위하여 분급기 하단에는 기체분산기 (gas distributor)를 설치하였으며, 분급기에서 분리된 입자는 overflow line을 거쳐 싸이클론에서 포집하였으며 싸이클론에서 포집되지 않은 초미분 입자는 bag filter에서 포집하고 vent시켰고, 굵은 입자는 분급기 하단에서 bottom product로 포집하였다.

본 실험에 사용한 원료시료, overflow product 및 bottom product의 number-size distribution은

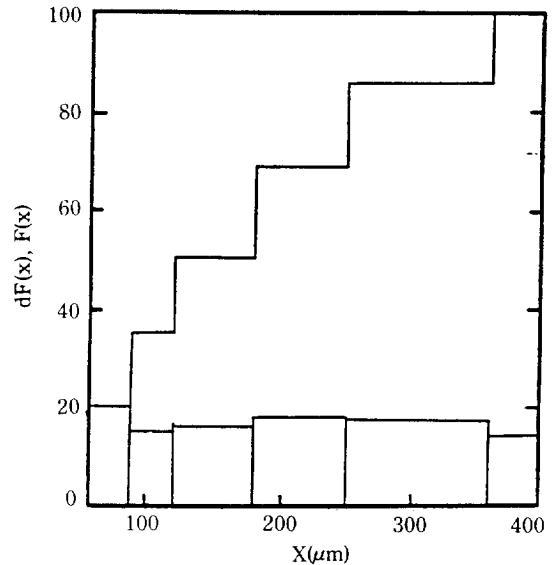


Fig. 2. Particle number-size distribution of feed Sample I.

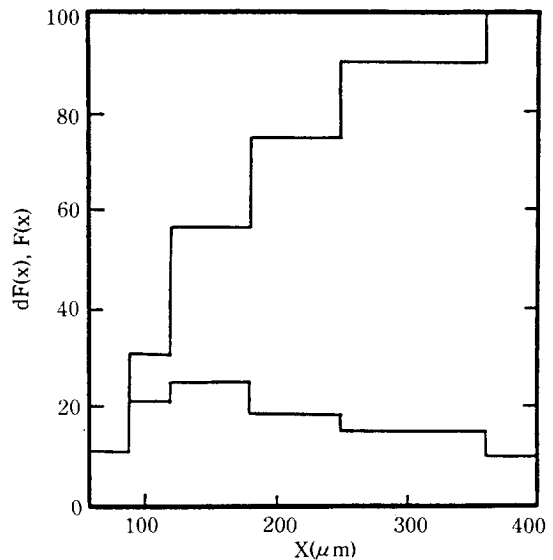


Fig. 3. Particle number-size distribution of feed Sample II.

coulter counter(model TA-II)를 사용하여 분석하였으며, 원료시료는 입자의 습기에 의한 영향을 막기 위하여 24시간 이상 건조기에서 건조하여 사용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구의 실험장치에서 Zig-Zag 분급기의 단과 단

(stage) 사이의 각도는 가장 적당한 것으로 문헌[9-10]에 보고되어 있는  $120^\circ$ 를 택하였으며, 원료 입자 및 분리, 분급된 입자들의 크기 분포 측정은 신뢰도를 높이기 위하여 5번 이상 반복하여 Sampling하고 분석하였다.

Fig. 2, 3과 같은 크기 분포를 갖는 원료 입자의 평균 입자 크기는 식 (7)에 의해 구하였는데 [3, 14], Sample I과 Sample II 각각  $144.4\mu\text{m}$ 와  $148.7\mu\text{m}$ 이었으며, 이들 각 Sample의 평균 종말속도(Terminal Velocity)는 이들의 입자 레이놀즈수(Particle Reynolds Number)가 0.4와 500의 범위에 속하므로 식 (8)에 의하여 각각  $120.7\text{cm/s}$ 와  $124.3\text{cm/s}$ 를 얻었다[3].

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_i (dF(x)/x)_i} \quad (7)$$

$$U_t = \left( \frac{4(\rho_s - \rho_a)g^2}{225\rho_a\mu} \right)^{1/3} \bar{d}_p \quad (8)$$

따라서, 입자의 분리 및 분급 실험은 공기유속을 원료 입자 평균 종말속도의 1.5배 정도되는  $180\text{cm/s}$ 에서부터 시작하여 평균 종말속도의 2배 정도되는  $250\text{cm/s}$ 까지 조정, 유지하였다.

시료 I의 원료 투입 속도(feed rate,  $R_f$ )를  $40\text{g/}$

min로 유지하면서 공기의 유속을 각각  $180\text{cm/s}$ ,  $200\text{cm/s}$  및  $250\text{cm/s}$ 로 하였을 경우의 하부 생산물(bottom product)의 입자크기분포(number-size distribution)를 Fig. 4에 나타내었으며, 시료 II를 원료로 사용하고 공기유속을  $200\text{cm/s}$ 로 유지하면서 원료투입 속도를 각각  $35\text{g/min}$ 와  $45\text{g/min}$ 로 한 경우의 상부 생산물(overflow product)의 입자크기분포를 Fig. 5에 나타내었는데 원료투입의 속도가 작은 경우에 더 효율적으로 미세입자를 분리할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 및 5와 같은 실험결과들로부터 각 실험조건에 따른 원료시료 및 상부 생산물과 하부 생산물들의 입자 크기에 따른 누적분포(cumulative distribution)를 구할 수 있으며, 따라서 식 (4)에 의하여 입자분리의 전 효율(total efficiency)을 구할 수 있다.

시료 I의 원료 투입 속도를  $40\text{g/min}$ 로 유지하면서 공기유속을  $180$ ,  $200$  및  $250\text{cm/s}$ 로 변화시킨 각각의 경우에 대해서 입자 분리 전효율을 Fig. 6에 나타내었는데 공기유속이 증가할수록 입자 분리 전효율은 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 시료 II를 사용하고 공기유속을  $200\text{cm/s}$ 로 유지시키면서 원료 투입 속도를  $35\text{g/min}$ 와  $45\text{g/min}$ 로

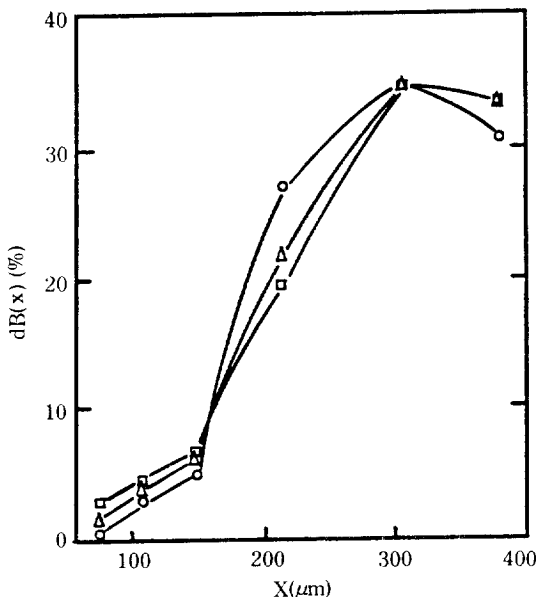


Fig. 4. Particle size distribution in the bottom product (Sample I).

$U_g(\text{cm/s})$	○ : 250	△ : 200	□ : 180
$R_f(\text{g/min})$	: 40	40	40

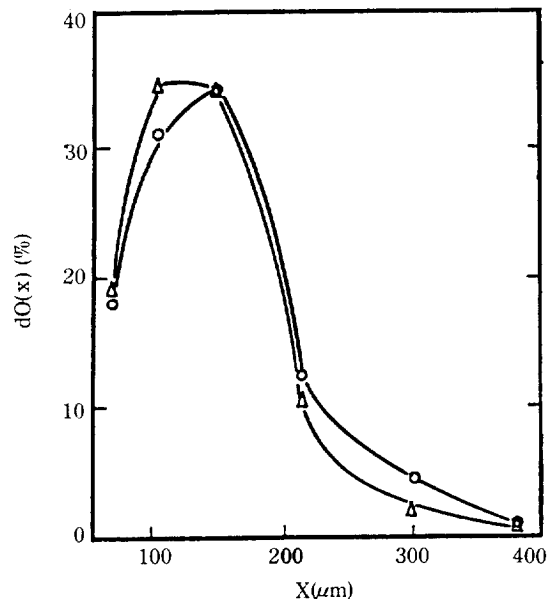


Fig. 5. Particle size distribution in the overflow product (Sample II).

$U_g(\text{cm/s})$	○ : 200	△ : 200
$R_f(\text{g/min})$	: 45	35

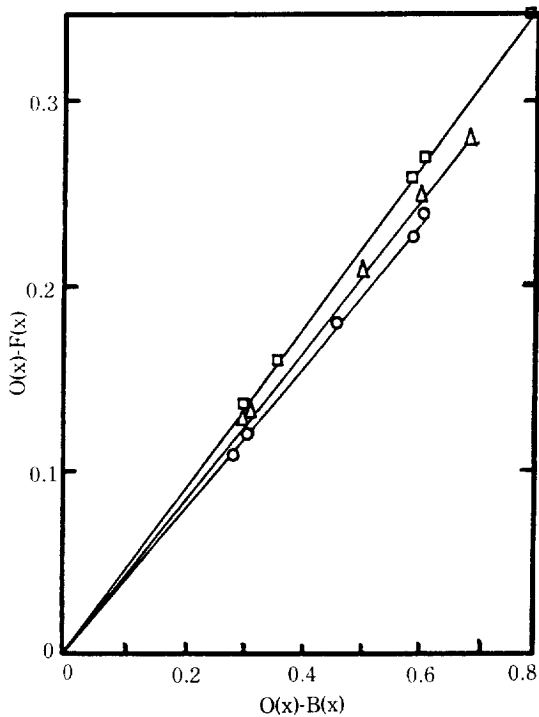


Fig. 6. Plots of  $[O(x)-F(x)]$  vs.  $[O(x)-B(x)]$  for the determination of total efficiency (Sample I).

○	△	□
$U_R(\text{cm/s})$ : 250	200	180
$R_f(\text{g/min})$ : 40	40	40

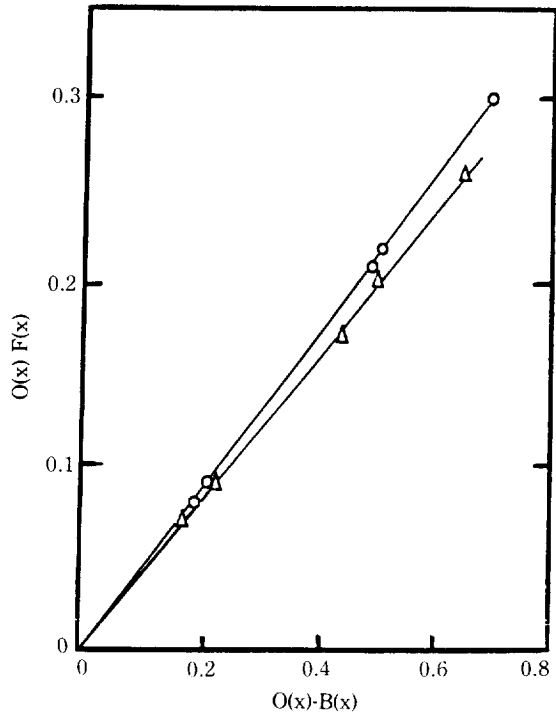


Fig. 7. Plots of  $[O(x)-F(x)]$  vs.  $[O(x)-B(x)]$  for the determination of total efficiency (Sample II).

○	△
$U_R(\text{cm/s})$ : 200	200
$R_f(\text{g/min})$ : 35	45

한 경우의 입자 분리 전효율을 Fig. 7에 나타내었는데 원료 입자의 투입속도가 큰 경우의 입자 분리 전효율이 작은 값을 나타냄을 볼 수 있다. 그러나, 이들 입자 분리 전효율값은 상, 하부 생산물의 양(quantity)을 고려하지 않고, 상, 하부 생산물의 입자 크기 분포만을 고려한 것이므로 주어진 생산 여건에서 최적 조작조건을 찾기 위해서는 입자 분리 전효율과 아울러 생산물의 생산량을 함께 고려하여야 할 것으로 판단된다. 입자의 크기에 따른 상부 생산물의 누적분포를 원료 입자의 누적분포에 대해 plot하면 Fig. 8을 얻을 수 있으며, 이들 data와 Fig. 6, 7에서 얻은 각 경우의 입자 분리 전효율로부터 각각의 경우에 대해서 입자의 크기에 따른 분리 효율인 등급 효율(grade efficiency)을 Fig. 9와 10에 각각 나타내었다. 시료 I을 사용한 Fig. 9에서 apparent bypass는 2-6% 정도임을 알 수 있으며, 분리 및 분급기의 분리 특성이며 상부 생산물의 입자 크기 분포에 큰 영향을 미치는 Cut Size[15, 16]는 190-225 $\mu\text{m}$ 인데 공기유속이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

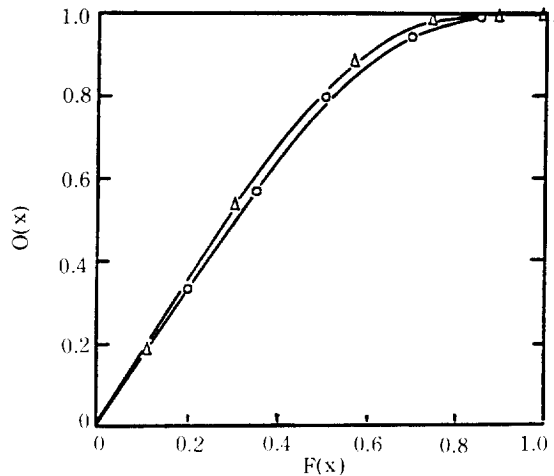


Fig. 8. Plots of  $O(x)$  vs.  $F(x)$  for the determination of grade efficiency.

○	△
Sample : I	II
$U_R(\text{cm/s})$ : 200	180
$R_f(\text{g/min})$ : 40	35

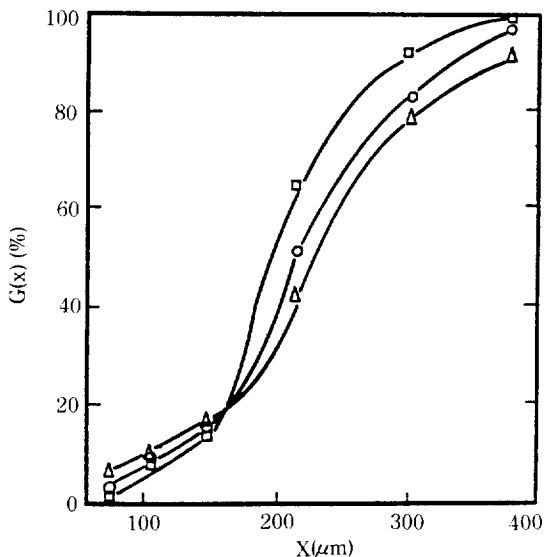


Fig. 9. Grade efficiency of zig-zag air classifier (Sample I).

○  $U_g$ (cm/s) : 200  
 $R_f$ (g/min) : 40  
 △ 250  
 40  
 □ 180  
 40

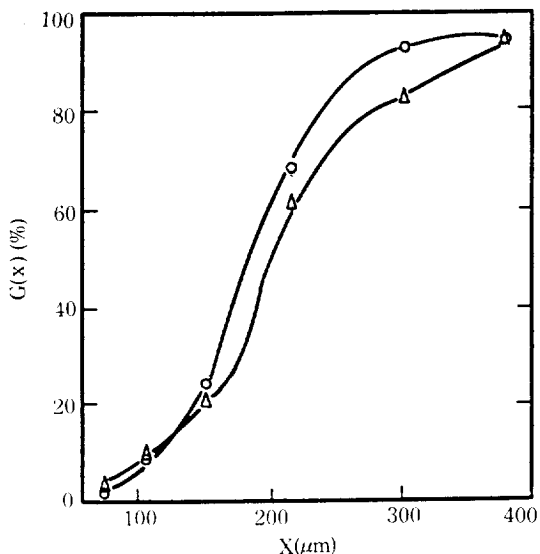


Fig. 10. Grade efficiency of zig-zag air classifier (Sample II).

○  $U_g$ (cm/s) : 200  
 $R_f$ (g/min) : 35  
 △ 200  
 45

자료 II를 사용한 Fig. 10에서 apparent bypass는 2-4% 정도였으며, Cut Size는 원료 입자의 투입 속도가 35 g/min 및 45 g/min일 때 각각 180  $\mu$ m와 200  $\mu$ m로 나타나 Cut Size는 원료 입자의 투입 속도가 작

Table 1. Calculation of grade efficiency.

Sample; Sample I, $U_g = 200$ cm/s, $R_f = 40$ g/min							
X( $\mu$ m)	dF(x)	F(x)	dB(x)	B(x)	dO(x)	O(x)	G(x)
75	0.2	0.2	0.013	0.013	0.33	0.33	0.03
105	0.15	0.35	0.035	0.048	0.23	0.56	0.09
150	0.16	0.51	0.062	0.11	0.23	0.79	0.15
215	0.18	0.69	0.22	0.33	0.15	0.94	0.51
305	0.17	0.86	0.34	0.67	0.05	0.99	0.83
380	0.14	1.00	0.33	1.0	0.01	1.00	0.96

Sample; Sample II, $U_g = 200$ cm/s, $R_f = 45$ g/min							
X( $\mu$ m)	dF(x)	F(x)	dB(x)	B(x)	dO(x)	O(x)	G(x)
75	0.01	0.11	0.006	0.006	0.18	0.18	0.04
105	0.21	0.32	0.054	0.065	0.31	0.49	0.10
150	0.25	0.57	0.12	0.18	0.34	0.83	0.19
215	0.18	0.75	0.27	0.45	0.12	0.95	0.61
305	0.15	0.90	0.32	0.77	0.04	0.99	0.82
380	0.10	1.00	0.23	1.00	0.01	1.00	0.94

을 경우 작은 것을 알 수 있다.

따라서 입자의 효율적 분리를 위해서는 원료 입자의 투입 속도가 작아야 한다는 것을 알 수 있다.

입자 분리의 효율이나 조작조건을 나타내는 방법에는 여러가지가 있으나 그중 AICHe 장치 검정기준[15]이나 Hand Book[16] 등에 Cut Size와 Sharpness Index 등이 가장 대표적인 것으로 나타나 있다. Cut Size는 입자 분리의 등급 분리 효율이 50%가 되는 입자의 크기를 나타내며 Sharpness Index는 입자의 등급 분리 효율(grade efficiency)이 50%인 때의 기울기를 나타내는데, 일반적으로 등급 분리 효율이 25%인 입자 크기와 75%인 입자 크기의 비율로 나타낸다.

Fig. 9와 10으로부터 본 연구의 실험장치인 Zig-Zag 입자 분리의 Sharpness Index는 본 연구의 실험범위에서 0.68 정도임을 알 수 있으며 각 실험조건의 차이에 따라 약 5% 정도의 오차를 나타냈다. 각 Fig.의 정리 방법의 예를 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 Air Classifier의 경우 Sharpness Index가 0.5-0.8 정도이면 경제성이 있으며 0.6 이상이면 효율이 좋은 것으로 알려져 있으므로[15, 16] Zig-Zag 형태의 Air Classifier를 사용하면 효과적으로 입자를 분리 및 분류할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구의 실험범위에서 Zig-Zag Air Classifier의

apparent bypass는 2-6%, Cut Size는 180-225 $\mu$ m 였는데 시료의 입자 분포가 apparent bypass나 Cut Size에 미치는 영향은 크지 않았다.

본 연구에 사용한 Zig-Zag Air Classifier의 Sharpness Index는 0.68 정도로 우수한 분리효율을 나타 내었다.

## 갑 사

본 연구는 86 과기처 특정과제연구비의 일부로 진행 되었으며 과기처와 민간기업으로 참여해 주신 한국 규 조토 공업(주)에 감사드립니다.

## NOMENCLATURE

B(x)	: Cumulative fraction of particle size in the bot- tom product (%)
dB(x)	: Fraction or distribution of particle size in the bottom product (%)
dF(x)	: Fraction or distribution of particle size in the feed (%)
dO(x)	: Fraction or distribution of particle size in the overflow product (%)
$\bar{d}_p$	: Average spherical particle size (cm)
$E_{tot}$	: Total separation efficiency (%)
F(x)	: Cumulative fraction of particle size in the feed (%)
g	: Gravity acceleration (cm/sec <sup>2</sup> )
G(x)	: Grade efficiency (%)
$N_B$	: Number of particle in the bottom product
$N_F$	: Number of particle in the feed
$N_O$	: Number of particle in the overflow product
O(x)	: Cumulative fraction of particle size in the over flow product
$R_f$	: Feed rate (g/min)
$U_g$	: Superficial gas flow rate (cm/s)
$U_t$	: Terminal velocity of a particle (cm/s)
x	: Particle size ( $\mu$ m)

## Greek Letters

$\rho$  : Density (g/cm<sup>3</sup>)

$\mu$  : Viscosity (g/cm sec)

## Subscripts

B	: Bottom product
F	: Feed
g	: Gas
O	: Overflow product
S	: Solid

## REFERENCES

1. Treasure, C.R.G.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **43**, 199 (1965).
2. Beddow, J.K.: "Particulate Science and Technology", Chemical Publishing Co., Inc., N.Y. (1980).
3. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", John Wiley & Sons, Inc., N.Y. (1969).
4. Yoon, S.H.: Proc. World Congress III of Chem. Eng., 8i-156, 121 Tokyo (1986).
5. Kang, S.H.: Proc. World Congress III of Chem. Eng., 8h-105, 17 Tokyo (1986).
6. Yoon, S.H., Kang, Y., Cho, S.H. and Kang, S.H.: Proc. 4th APCCHE '87 Singapore, 451 (1987).
7. Kaiser, O.F.: *Chem. Ing. Tech.*, **35**(4), 273 (1963).
8. Kaiser, O.F.: *Aufbereitungs-Technik*, Nr. 11, 662 (1970).
9. Senden, M.M.G. and Tels, M.T.: *J. Powder and Bulk Solids Tech.*, **2**(1), 16, (1978).
10. Senden, M.M.G. and Tels, M.T.: Proc. Int. Symp. on Powder Tech., 774, Kyoto, (1981).
11. Worrell, W.A. and Vesilind, P.A.: *Resour. Recovery and Conserv.*, **4**, 247 (1979).
12. Hou, T.H.: *Powder Tech.*, **41**, 99 (1985).
13. Hou, T.H. and Kozak, M.F.: Monsanto Internal Research Report, (1983).
14. Allen, T.: "Particle Size Measurement", 3rd ed., Chapman and Hall, London (1981).
15. "Particle Size Classifiers"-A Guide to Performance Evaluation, AIChE Equipment Testing Procedure, (1980).
16. Perry, R.H. and Chilton, C.H.: "Chemical Engineer's Handbook" 6th ed., 8-16, McGraw-Hill, N.Y. (1984).