

垂直 보조날개를 가진 Air Sep'의 分級 메카니즘 (粒子的 運動을 中心하여)

徐 胎 洙

〈韓國化學研究所 無機研究部〉

1. 서 론

현재까지 portland 시멘트 크링커의 분쇄에 Sturtevant 형 분급기가 널리 사용되어 왔다. 원래 이 분급기는 조분부분의 분리가 양호하기 때문에, 시멘트의 미분화에 따른 요구에 상응해서 제작된 것이지만, 그 특징은 분산판 윗측에 수직 보조날개가 부착되어 있는 점이다.

그러면 이 보조날개의 역할은 무엇이며, 그것이 부착되어 있는 분급기내에서 입자는 어떠한 운동형태를 취할 것인지. 최근 분급기에 관한 논문이 수많이 발표되어 있으나, 분급 메카니즘의 해석 예는 극히 적으므로^{1,2,4,5}, 필자들은 이 분급 메카니즘에 관해서 고찰을 행하였다.

분급기는 성능을 평가함에 있어서 중요한 지표가 되는 분리 입자경에 대하여 Tanaka⁶, Gotō²는 각각 상이한 생각에 의해 생각을 시도하고 있다. Tanaka는 분산판에서 방출된 입자는 분산판의 각속도로 비행한다고 가정하여 입자의 반경방향 속도를 부여하고 있다. 한편, 축방향에서는 입자가 공기속도로 상승하고, 이 축방향 속도에서 정해지는 입자의 분급실내 체류시간내에 내통벽에 도달하는 입자는 조분측으로 회수된다고 가정하여 분리 입자경을 구하고 있다. 이에 반하여 Goto²는 보조날개에 충돌한 입자는 전부 조분측으로 회수된다고 가정하고 입자경과 보조날개에 대한 충돌효율의 관계를 구하여 분리 입자경 및 부분분리 효율곡선을 구

하고 있다.

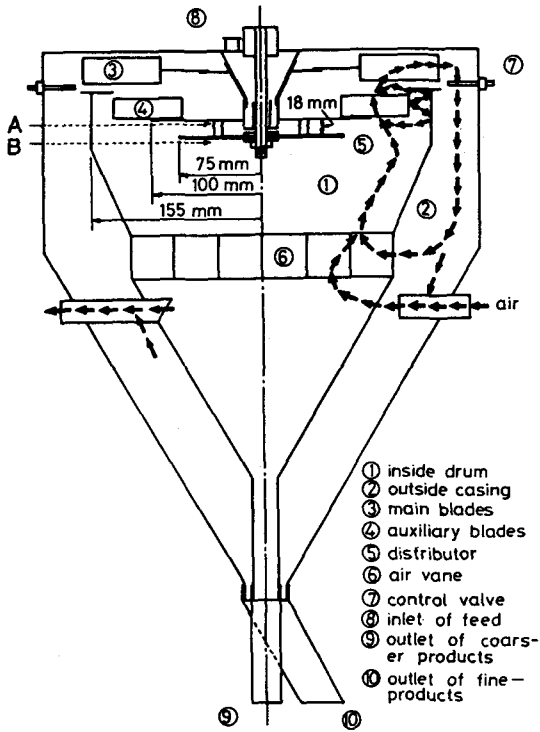
분급 메카니즘을 보다 상세히 검토하기 위해서는 분산판을 비출한 입자의 궤적을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 분급기내의 풍속분포는 실험용 Sturtevant 형 분급기를 이용하여 5공 구형 pitot 관에 의해 3차원적으로 측정하고 분산판에서의 입자 비출 속도는 모델 분산판을 이용하여 사진촬영에 의해 2차원적으로 측정했다.

양 실측치에 기인하여 수치계산에 의해 입자 궤적을 구하고 50% 분리 입자경을 산출한 결과 실험결과와 비교적 양호한 일치를 보았다.

2. 분급기내 풍속분포의 측정방법 및 결과

분급 메카니즘을 해명하기 위해서는 분급기내 입자의 운동궤적을 파악하는 일이 불가결하지만 그것을 실측한다는 것은 거의 불가능하다. 그 한 가지 시도로서 여기서는 입자 유체간의 운동방정식을 수치계산하여 입자의 운동궤적을 구했다. 운동방정식의 수치계산에는 분급기내의 풍속분포와 분산판에서의 입자 비출 속도가 필요하며 우선 풍속분포의 측정방법 및 결과에 대해서 언급해 본다.

〈그림-1〉은 실험용 Sturtevant 형 분급기(O.D = 0.4 φ)의 개략이다. 본체는 내통① 외통②로 구성되어 있으며, 주날개③ 보조날개④ 및 분산판⑤로 gear shaft에 의해 동축회전을

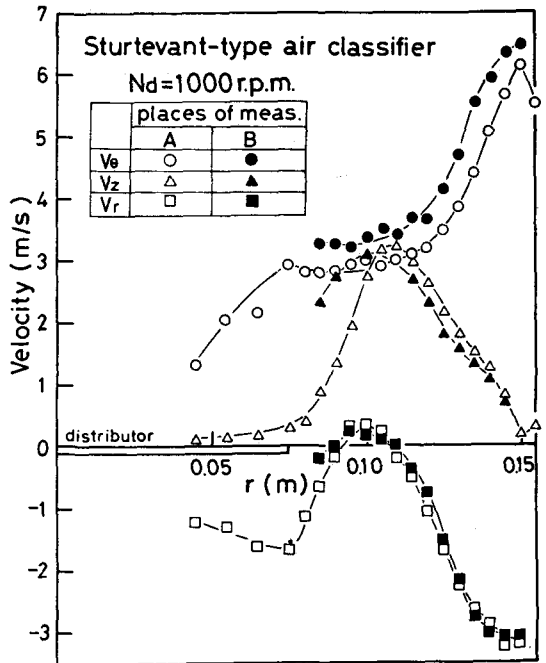


〈그림-1〉 Schematic diagram of the model Sturtevant-type air classifier.

한다. 여기서 주날개는 분급기내에서 상승기류를 만들어 분체를 윗측으로 운반하는 역할을 하고 있는 반면 보조날개는 날개주위에 토출류를 형성하여 상승입자의 진로를 방해하고 있다. 분산판에서 방출·분산된 입자는 이 주날개와 보조날개의 영향을 받아 그 중에서 상승기류를 교묘하게 타는 입자만이 외통에 운반되어 미분으로서 채집된다.

풍속의 측정장소는 2개소이며 보조날개와 분산판 사이(측정위치 A) 및 분산판 바로 밑(측정위치 B)을 선정했다. 풍속측정은 3차원 공기류의 측정에 적합한 직경 5mm의 5공 구형 pitot 관³⁾을 이용해서 시행했다. pitot 관의 삽입범위는 분급기의 중심축에서 반경 4.5-15.5 cm이며 그 사이에서 pitot 관을 조금씩 이동해 가면서 유속을 측정했다.

〈그림-2〉는 측정위치 A, B에 있어서의 풍속분포의 측정결과이다. 풍속분포의 주방향 축



〈그림-2〉 Three dimensional air velocity distributions within the inside drum of the model classifier with 8 main blades and 40 auxiliary blades at 1000 rpm.

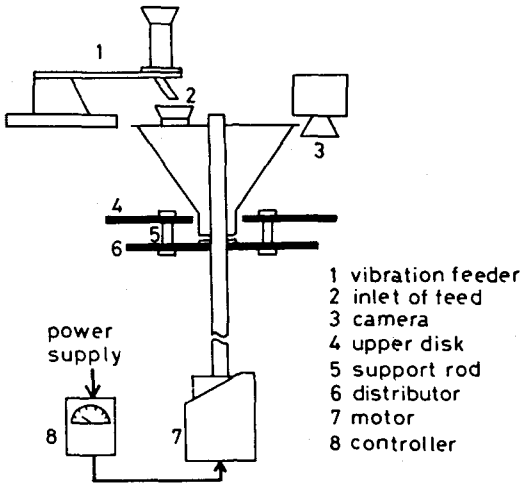
방향, 반경방향 속도가 각각 나타내져 있다. 여기서 반경방향 속도는 거의 마이너스 속도로 되어 있으나, 이에 관해서는 고찰편에서 재검토한다.

3. 분산판에서의 입자 비출속도의 측정

실장치내에서 입자 비출속도를 측정하는 일은 불가능하므로, 실장치의 공급부와 분산부분을 모의한 장치를 작성하고, 그 분산판위의 입자궤적을 사진촬영하여, 입자의 비출속도를 실측했다.

3.1 측정장치

모델 분산장치의 개략을 〈그림-3〉에 나타냈다. 공급입자는 chute 밑의 gap에서 배출되어, 분산판위에 고정된 8개의 support rod(5) 사이로부터 방출된다. 여기서는 입자궤적을 보다 명료히 사진촬영하기 위하여, 마주 향한 2개소의

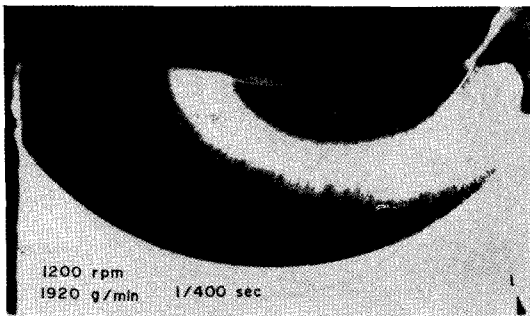


〈그림-3〉 Schematic diagram of a model distributor with an upper disk of plexiglas which is removable.

support rod 간격만을 선정하고, 다른 곳은 봉하였다. upper disk(4)는 보조날개의 지지판으로서, 투명 아아크릴제이다.

입자궤적 사진의 1 예를 〈그림-4〉에 나타냈다. shut speed의 적용범위는 1/400-1/500 초이다. 또한 사진촬영은 upper disk를 부착한 경우와 부착하지 않은 경우의 양쪽에 대하여 실시했다.

조작변수로서 분산판의 회전속도와 시료 공급량을 선정하였으며 시료는 평균경 67 μ m의 알루미나 분말을 사용했다.

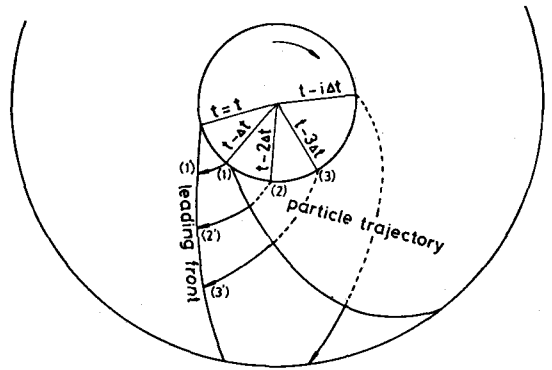


〈그림-4〉 Photograph of particle trace of fused alumina powder on the model distributor at 1200 rpm.

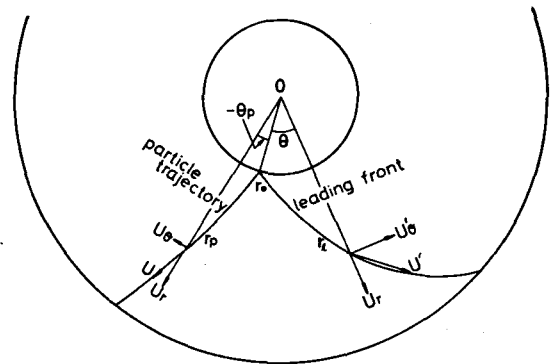
3.2 측정원리

〈그림-4〉에 나타낸 입자궤적의 사진을 〈그림-5〉에서 설명한다. 〈그림-5〉는 시간 t 에 있어서의 입자궤적 사진을 모델적으로 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 〈그림-4〉의 입자군의 전체적 운곽은 시간 t 보다 앞서 배출구의 각 위치에서 배출된 입자궤적이 중합한 것으로 되어 있다. 따라서 〈그림-5〉에서의 leading front는 입자와 분산판과의 상대운동을 나타내고 있다.

지금, 〈그림-4〉에 나타낸 것과 같은 입자군의 궤적사진상에 투명한 종이를 조금씩 회전시켜 1개 입자의 운동궤적을 덧그리면 〈그림-6〉에 나타낸 것처럼 한선의 입자궤적을 얻을 수가 있다.



〈그림-5〉 Sketch of a particle trace on the rotating distributor.



〈그림-6〉 Relation between the leading front and the particle trajectory.

〈그림-6〉에 나타낸 leading front particle trajectory를 digitizer에 의해 읽고 차식으로 근사한다.

$$r_1 = r_0 + a_1 \theta_1^{k_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$r_p = r_0 + a_p (-\theta_p)^{k_p} \dots\dots\dots (2)$$

한편, 〈그림-6〉에 나타낸 것처럼 입자운동의 반경방향, 주방향 속도성분을 각각 u_r, u_θ 로 하고, 입자와 분산판의 상대속도를 u' 로 하면, u' 의 반경방향, 주방향 속도성분은 u_r, u_θ 가 되어 Eq.(3)이 성립한다.

$$u'_\theta = u_\theta - u_{d\theta} \dots\dots\dots (3)$$

단, $u_{d\theta}$ 는 분산판의 주방향 속도이다.

또한 leading front, particle trajectory에 대하여 입자의 반경방향 및 주방향 속도간의 속도비를 취하면 Eqs (4), (5)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{u_r}{u'_\theta} = \frac{\dot{r}_1}{r_1 \dot{\theta}_1} = \frac{1}{r_1} \frac{dr_1}{d\theta_1} \dots\dots\dots (4)$$

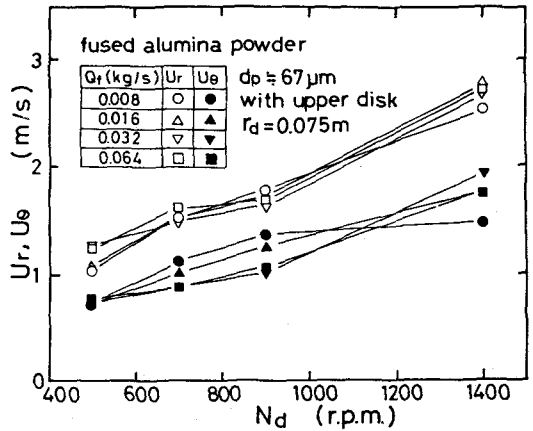
$$\frac{u_r}{u_\theta} = \frac{\dot{r}_p}{r_p \dot{\theta}_p} = \frac{1}{r_p} \frac{dr_p}{d\theta_p} \dots\dots\dots (5)$$

따라서 Eqs (1), (2)를 Eqs (4), (5)에 대입하여 Eq.(3)과 연립해서 풀면 반경 r_p 에 있어서의 입자속도 u 의 반경방향 및 주방향 속도성분 u_r, u_θ 를 각각 결정할 수 있다.

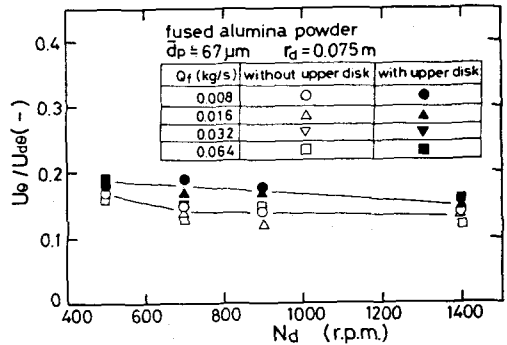
3.3 측정결과

〈그림-7〉은 분산판 edge 즉 $r_d = 7.5$ cm에서의 입자 비출속도의 측정결과이다. 입자의 반경방향 속도 u_r , 주방향 속도 u_θ 는 분산판의 회전수에 대하여 거의 직선적인 관계임을 인정할 수 있다. 또한 u_r, u_θ 는 시료 공급량에 의해 거의 변화하지 않으므로, 분급기내의 입자궤적을 계산할 시에는 그 평균치를 이용하고 공급량의 영향을 무시했다.

〈그림-8〉은 입자와 분산판의 주방향 속도비 $u_\theta/u_{d\theta}$ 를 나타낸 것이다. 입자와 분산판간의 큰 지연속도가 보이지만, 속도비 $u_\theta/u_{d\theta}$ 는 N_d 및 Q_f 에 대하여 큰 영향을 볼 수 없다. 실제로 속도비는 매우 중요하며, 그 값에 따라 분리 입



〈그림-7〉 Particle ejecting velocities of fused alumina powder on the rotating distributor with upper disk.



〈그림-8〉 Ratio of the tangential velocity of particles to the circumferential velocity of distributor.

자경이 크게 바뀌어진다. Tanaka⁶⁾의 분급이론에서는 $u_\theta/u_{d\theta}$ 를 1.0으로 가정하고 있으나, 본 데이터에서 보면 그 값이 0.1~0.2임이 밝혀졌다. 이것은 Tanaka의 이론치가 실험치로부터 크게 벗어나는 주원인이 되며 상세한 점은 차후에 다시 검토한다.

4. 분급기내 입자궤적의 계산

이상 분급기내의 풍속분포와 분산판에서의 입자 비출속도를 구하였으므로 양 결과를 바탕으로 하여 입자의 운동방정식에 의해 분급기내의 입자궤적을 계산하고 50% 분리 입자경을

산출해 본다.

4.1 입자의 운동방정식

Sturtevant 형 분급기에 있어서 분급실의 구조는 원통형으로 되어 있으므로 그 공간내의 운동입자를 원통좌표로 기술한다.

입자의 운동방정식은 일반적으로 차식으로 주어진다.

$$m\vec{a} = C_D \cdot S \left(\frac{1}{2} \rho_f |\vec{V}| \vec{V} \right) + \vec{F} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 m, a, S, \vec{V} , F는 질량 가속도 투영 단면적 공기의 상대속도 외력이다.

저항계수 C_D 에 있어서 여기서는 보다 넓은 적용범위 ($0 < Re < 1000$)를 갖는 Odar의식을 채택했다.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.125 Re^{0.72}) \dots\dots\dots (7)$$

여기서, $Re = \frac{d_p |\vec{V}| \rho_f}{\mu}$, $\vec{V} = \vec{v} - \vec{u}$,

$$|\vec{V}| = \sqrt{(v_r - u_r)^2 + (v_\theta - u_\theta)^2 + (v_z - u_z)^2}$$

단, $d_p, \rho_f, \vec{v}, \vec{u}$ 는 입자경 공기밀도 공기속도, 입자속도이다.

모델 분산판에 있어서 입자의 운동을 원통좌표로 나타내면,

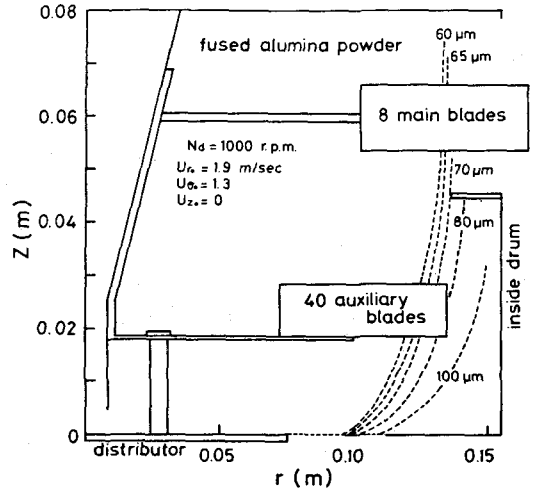
$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} (v_r - \dot{r}) (1 + 0.125 Re^{0.72}) \dots\dots\dots (8)$$

$$r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} (v_\theta - r\dot{\theta}) (1 + 0.125 Re^{0.72}) \dots\dots\dots (9)$$

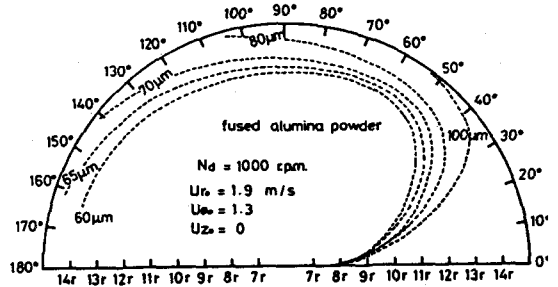
$$\ddot{z} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} (v_z - \dot{z}) (1 + 0.125 Re^{0.72}) - g \dots\dots\dots (10)$$

이 경우, 축방향에는 외력으로서 중력이 작용하기 때문에, Eq (10)에 중력항 g가 가해졌다.

분급기내의 입자궤적은 Eqs (8), (9), (10)에 전술한 풍속분포와 분산판 edge에서의 입자 비출속도를 대입하여 Runge-Kutta 법에 의해 수치계산을 행하여 구했다.



<그림-9> Vertical trajectories of particles ejected at the edge of the model distributor (at $N_d = 1000$ rpm, $r_d = 0.075$ m).



<그림-10> Horizontal particle trajectories.

수치계산에 있어서 풍속분포는 <그림-1, 2>의 측정위치 A에서의 값을 이용하고 시간 증가 폭은 0.0025초로 했다.

4.2 50% 분리 입자경의 산출

<그림-9, 10>은 분급기내의 입자궤적을 수직좌표 및 평면좌표로 나타낸 것이다. 분산판 edge에서 비출된 입자는 거의 직선적으로 튀어나가. 그 이후 주날개가 일으키는 선회기류를 타고 점차 상승하기 시작한다. 이와같이 입자는 분산판에서의 비출속도의 영향을 강하게 받고 있으며 비출속도에 따라 입자의 운동궤적이 크게 달라진다. 여기서는 내통 상부 edge에 가장 가까

이 비행하는 입자를 분리 입자경으로 정하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 70 μm 보다 큰 입자는 조분으로서 내통에 멎고 70 μm 보다 작은 입자는 미분으로서 외통에 배출된다. 한편, 알루미늄 분말의 실험(1000 rpm)에서는 분리 입자경이 52 μm 라는 결과가 얻어졌으며 실험치쪽이 계산치보다 작게 산출되어 있다.

5. 계산결과 및 고찰

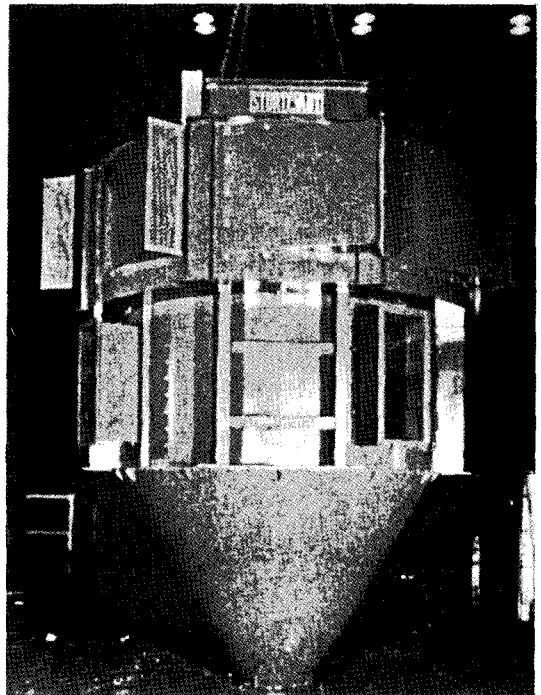
이상 분급기내의 입자궤적을 나타내 왔으나 분리 입자경의 계산치와 실험치에는 상이가 인정되었으므로 이하에서는 그 점에 대하여 약간의 고찰을 향해 본다.

<그림-11>에 분리 입자경의 계산치 실험치 및 종래의 분급모델에 의하여 구한 이론치를 각각 나타내었다. 분리 입자경의 계산치쪽이 실험치보다 크게 산출되어 있지만 회전수에 대한 의존성을 볼 것 같으면 양자의 경향이 같고 종래의 모델과 비교할 때보다 일치한 결과로 되어 있다. 그에 반하여 종래의 이론치는 실험치와 크게 다르며 양자의 절대치의 차는 회전수가 증가함에 따라 현저하다.

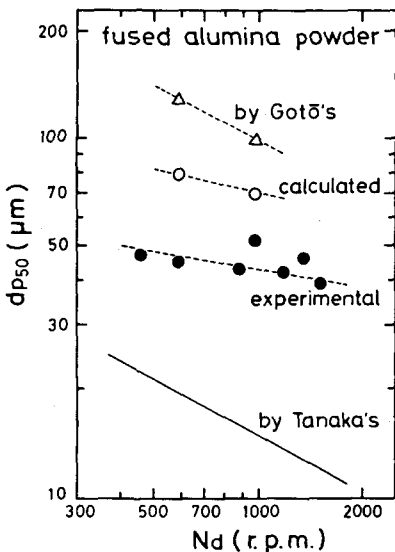
분리 입자경의 계산치가 실험치보다 크게 산

출되어 있는 한 가지 이유로서 풍속분포를 생각할 수가 있다. 전술과 같이 본 실험에서는 풍속측정을 보조날개와 분산판 사이에서 행했기 때문에 보조날개에 의한 토출류가 실측되어 있지 않다. 따라서 풍속분포의 반경방향 속도는 <그림-2>에 나타낸 것처럼 매우 작은 값으로 되어있고 그 결과 분리 입자경의 계산치가 실험치보다 크게 산출된 것으로 생각된다.

한편 Tanaka⁶⁾의 이론치는 실험치보다 훨씬 작게 계산되어 있으나 이것은 입자의 주방향 속도의 가정에 기인한 것으로 생각된다. Tanaka는 입자가 분산판의 회전속도와 같은 속도를 가지고 분산판에서 비출된다는 이념을 취하고 있으며 이것은 분리 입자경을 작게하는 원인이 된다. 또한 필자등과 다른 착상을 한 Gotō²⁾의 분급모델에 의하여 구한 분리 입자경의 이론



치는 실험치보다 모두 크게 산출되어 있으나, 이것은 보조날개 사이의 입자 체류시간의 가정에 기인한 것으로 여겨진다. Gotō는 입자속도를 생각에 넣지 않고 풍속은 축방향만을 고려했기 때문에 그 결과 분리 입자경이 크게 산출된 것으로 생각된다.



<그림-11> Comparison among calculated and observed cut sizes.

이상 분급기내의 입자궤적을 바탕으로 하여 50 % 분리 입자경을 계산하고 실험치 및 종래 모델치와의 비교를 향해 왔다. 그 결과 분리 입자경의 계산치와 실험치에는 상이가 인정되지 만 회전수에 대한 양자의 경향이 같고 종래의 분급모델에 의해 구한 값에 비하여 보다 일치한 결과를 얻을 수 있었다. 금후 분리 입자경의 계산치에 전술한 토출류의 영향을 고려하면 실험치에 한결 근사할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

- 1) 수직 보조날개를 가진 Sturtevant 형 분급기내의 풍속분포를 3 차원적으로 측정했다.
- 2) 분산판위의 입자속도를 2 차원적으로 측정하는 수법을 확립했다.
- 3) 입자속도의 실측치와 풍속분포의 실측치를 이용하여 수치계산에 의해 분급기내의 입자궤적을 3 차원적으로 구했다.
- 4) 분리 입자경의 비교로부터 입자궤적에서 구한 계산치는 종래의 모델에 의해 구한 값과 비교하여 실험치와 잘 일치했다.

NOMENCLATURE

a_p, a_p	constants in Eqs. (1) and (2)
a	acceleration in Eq. (6), m/s^2
C_D	Drag coefficient
d_p	particle diameter, m
d_{p50}	cut size, m
d_p	volume mean diameter, m
F	external force, N
g	acceleration of gravity, m/s^2
k_l, k_p	constants in Eqs. (1) and (2)
m	mass of a particle, kg
N_d	rotating speed of the distributor, rad/s
Q_f	feed rate, kg/s
R_e	particle Reynolds number
r	radius in the classifier, m
r_0	initial particle position on the distributor, in
r_d	radius of the distributor, m

r_l, r_p	radial particle position on the distributor, m
S	projected area of a particle, m^2
t	time, s
u	particle velocity, m/s
u_0	initial particle velocity, m/s
$u_{d\theta}$	tangential velocity of the distributor, m/s
u_r	radial component of u , m/s
u_θ	tangential component of u , m/s
u_z	axial component of u , m/s
u'	relative velocity of a particle to the distributor, m/s
u'_θ	tangential component of u' , m/s
V	relative air velocity, m/s
v	air velocity, m/s
v_r	radial component of v , m/s
v_z	axial component of v , m/s
v_θ	tangential component of v , m/s
z	height above the distributor, m
θ	angle in the cylindrical coordinates, deg
θ_l	angle of delay of a particle on the distributor, deg
θ_p	angle of rotation of a particle on the distributor, deg

REFERENCES

- 1) Burson, J. H., III, Keng, E. Y. H., and Orr, Jr., C.: *Powd. Technol.*, 1, 305 (1967/68).
- 2) Goto, K.: *Cement Gijutsu Nempo* (Proceedings of Japan Cement Engineering Association, Japan), 13, 102 (1959).
- 3) Linoya, K., and Kimura, N.: *Kikai no Kenkyu* (Science of Machine, Japan), 3, 600 (1951).
- 4) Jimbo, G., Suh, T. S., Tsubaki, J., and Yamazaki, M.: *J. Soc. Powder Tech. Japan*, 10, 576 (1982).
- 5) Suh, T. S., Koike, T., Tsubaki, J., Yamazaki, M., and Jimbo, G.: *Proceedings of the Third Pacific Chem. Eng. Congress*, 1, 131 (1983).
- 6) Tanaka, T., Kuwano, K., and Kawai, S.: *Kagaku Kogaku* (Chemical Engineering, Japan), 21, 798 (1957).