

원반형 조립기를 이용한 구형입자의 성장에 관한 연구

김동권 · 이정민 · 이보성*

한국화학연구소 화공부

*충남대학교 화학공학과

(1990년 8월 20일 접수, 1991년 3월 16일 채택)

A Study on the Growth of Balls in a Disk Granulator

Dong-Kwon Kim, Jung-Min Lee and Bo-Sung Rhee*

Department of Chemical Engineering, Korea Research Institute of Chemical Technology

*Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

(Received 20 August 1990; accepted 16 March 1991)

요 약

입상조립은 어떤 회전체에서 적당한 점결제(binder)를 첨가한 고체 분말에 물을 연속적으로 분사함으로써 일정크기의 구형입자로 성장하는 고체 취급 공정이다. 본 연구에서는 시간에 따라 성장하는 입자크기를 예측하기 위한 수학적 모델을 제안하고 그 가능성을 실험을 통해 확인하였다. 점착계수 D의 값은 분말혼련의 주입속도(F)가 감소할 때 증가하고, 일정한 주입속도에서 점착계수 D의 값은 물의 분사속도(W)와 회전체(disc)의 rpm(N)에 따라 증가한다. 그리고 점착계수 D와 조작변수간의 상관관계식은 다음과 같다.

$$D = 0.560 \times 10^{-3} (W/F)^{3.90} N^{1.50}$$

결과적으로 수학적 모델로부터 얻은 이론값인 점착계수 D는 실험값과 잘 일치하며 설정된 모델은 ball 성장에 대한 다른 계에도 적용될 수 있다.

Abstract—Granulation is an operating process for solid treating in which powdered material grows into spherical granules of some sizes on a rotating disc by adding a certain amount of an appropriate binder and spraying water continuously. In this research a mathematical model for predicting the sizes growing granules with time was proposed and its applicability was examined through a series of experiments. Adhesion coefficient D increased as the feed rate(F) of powdered graphite decreased and when feed rate(F) was fixed, the D values increased as the spraying rate of water(W) and rpm(N) of the disc increased. An empirical correlation between adhesion coefficient D and operating variables was obtained as follows,

$$D = 0.560 \times 10^{-3} (W/F)^{3.90} N^{1.50}$$

Finally, the theoretical results of D from the proposed mathematical model were in good agreement with those from experiments and so the assumed model may well be applicable to other systems of spherical growing ball.

1. 서 론

입상조립(granulation)은 맨처음 비료공업과 제약업에서 시작되어 powder의 입상 또는 정제화에 활용되었다. 그밖에 현재에는 촉매제조, 광업용 첨가제 제조 및 활성탄(active carbon) 제조 등 광범위하게 사용되고 있다. Granulation 방법에는 정제화(tableting), 조피(briquetting), 교반(agitation), 압출(extrusion) 등의 방법이 있고, 그 용도와 모양에 따라 적당한 방법을 선택, 사용한다[1, 2]. 이에 대한 연구는 맨처음 1958 Newatt and Coneway Jones[3]가 발표한 일정량의 물량에서 유착에 의한 ball의 성장에 관한 연구에서 시작되어, 그 후 1964년에 Kapur와 Fuerstenau[4-7]의 granule size의 분포에 관한 연구가 발표되었다. 또한 1965년에 Capes와 Danckwerts[8, 9]의 유착기구에서 유착할 수 있는 볼의 성장한계에 관한 연구 등 현재까지 많은 연구가 행해져 왔다[10-20]. 그러나 지금까지 발표된 문헌들은 체계화 되지 못하고 각기 다른 이론을 제시하고 있어 객관성이 없을 뿐 아니라 실제 공정에 적용하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 이론과 실험결과를 참고로 하여 보다 타당성있는 이론을 제시하고자 했다.

본 연구에서는 원반형 교반식에 의한 회전체에서의 입상조립에 관해 연구하였다. 이 장치는 시료투입과 동시에 물의 분사(water spray)가 시작되면, 분말이 원반의 회전에 의해 일정한 핵(nuclei or seed)을 형성한다. 형성된 핵은 시간이 경과함에 따라 원반의 회전작용에 의해 다른 핵 또는 주위의 분말을 유착함으로써 성장하게 된다. 이 때, 일정한 크기(size)로 성장된 볼은 점차 원심력에 의해 바깥쪽으로 이동하여 원반(Disk 또는 Pan)의 경사도에 의해 밖으로 튀어 나오게 된다.

본 연구의 목적은 입상조립(granulation)에 있어서 몇 가지 가정으로부터 수학적 model을 세우고, 이 설정된 model로부터 예측한 결과를 실험을 통해 확인함으로써 상호 변수들간의 상관관계식을 얻고자 했다. 또한 이 관계식을 실제 공정에 적용함으로써 공정의 개선은 물론 process 자동화로의 접근을 시도할 수 있는 기틀을 마련하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. 조립기(Disk granulator)의 이론

조립기의 수행능력(performance)를 좌우하는 변수로는 원반의 직경 및 회전속도, 원반의 경사각, collar height, feed chutes의 위치, 분무기의 위치, scraper의

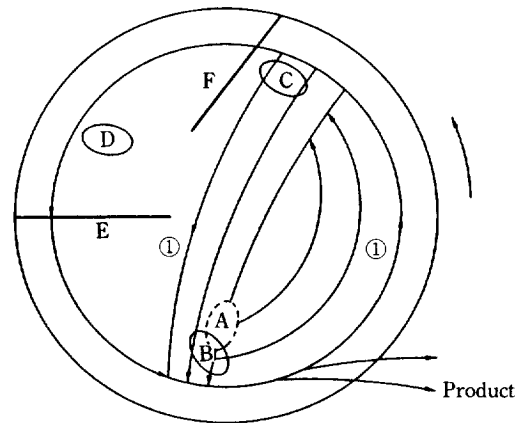


Fig. 1. Schematic front view of a pan.

위치, 원료의 주입속도 등이 있다. 원반의 임계 회전속도(critical speed)는 원심력에 의해서 입자가 구르지 않고 collar wall에 붙기 시작할 때의 회전속도이며 다음과 같이 표시된다.

$$N_c = 42.3 \sqrt{\frac{\sin \theta}{d}}$$

조립기(granulator)의 회전속도는 임계 회전속도의 60-75%로 작동되며 collar height는 원반직경의 20% 정도이고, 원반의 수평에 대한 각도는 45-55°가 적당한데 45°일 때 입자의 평균크기는 동일한 feed rates에서 55°일 때보다 두 배 정도 커진다[14]. 입자의 평균크기는 수분함량이 증가할수록, 체류시간이 커질수록 거의 직선적으로 증가하지만 원료주입속도가 증가할수록 감소된다. 원반의 안정된 작동과 최적조작을 위해서는 feed chutes의 위치, 분무기의 위치 및 bottom scraper의 위치가 매우 중요하다.

Fig. 1에서 A지점에 feed chutes를 두고 B지점에 분무기가 있으면 주로 coalescence가 일어나 입자의 성장속도가 빠르며 B지점 대신 C지점에 물을 분무하면 주로 snowballing이 일어나므로 입자의 강도가 양호하게 된다.

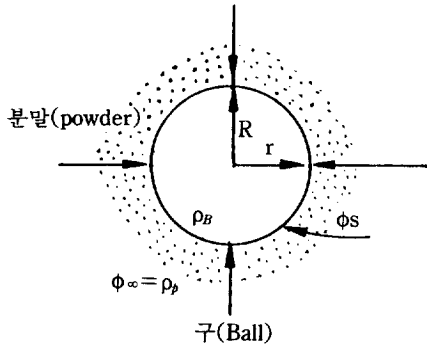
입자의 이동경로는 주로 line (1)이내의 지역이며 line(1) 이외의 지역은 입자의 성장에 거의 도움을 주지 못한다. 따라서 E지점보다 F지점에 scraper가 있으면 원반의 바닥에 붙어 있는 원료분말이 line (1)이내에서만 움직이므로 입자와 원료분말간의 접촉이 잘 일어나 입자의 성장속도가 빠르게 된다. Scraper가 E지점에 있을 경우 D지점에 물을 분무하면 작은 입자를 생성시킬 수 있다.

2-2. 수학적 modeling

2-2-1. 모델 설정을 위한 가설

일정한 분말로로부터 시간에 따라 구(sphere)로 성장하는 실제의 과정은 연속적인 분말의 feed rate와 pan 작용에 의해 볼도 운동하고 분말(powder)도 운동하지만 상대적 운동을 고려하면 볼이 정지하여 있고 분말이 운동하고 있는 계로 바꾸어 생각할 수 있다. 이 경우 분말은 복잡한 형태의 운동에 의해 정지하고 있는 볼(nuclei 또는 seed)의 표면에 연속적으로 접촉한다고 볼 수 있다. 따라서 볼은 시간이 변함에 따라 계속 성장하게 되는데 여기서 볼이 성장하는 속도는 분말과 볼의 상대농도, 분말의 접착력, 그리고 분말의 bulk density에 의존하게 된다. 즉, 이러한 과정은 하나의 볼에 random한 운동을 하는 입자(particle)들이 접근하여 접촉하는 계로 볼 수 있으며 이것은 무한히 작은 하나의 볼의 radial growth model로 생각할 수 있다. 여기서 볼의 radial growth는 moving boundary diffusion model equation으로 쓸 수 있으며 diffusion model에서의 diffusivity에 해당하는 계수는 분말이 볼에 접근하여 접촉하는 성질을 나타내는 물리적인 계수로 대응시킬 수 있다.

위의 가설로부터 다음과 같은 모델을 설정할 수 있다.



가 정

(1) 볼은 실제로 운동하고 있으나 분말과의 상대적 관계를 고려하여 정지된 ball로 가정한다.

(2) 볼 주위에는 균일한 밀도를 가진 분말로 둘러싸여 있으며 실제 이들은 random하게 운동하지만 볼에 접촉하는 분말들은 볼에 고정된 coordinate의 radial 방향으로만 운동하고 있다.

(3) 볼 표면에서의 분말의 농도(φ_s)는 "0"이다. 실제 분말이 ball의 표면에 접촉하면 이들은 분말로 존재하지 않고 이미 볼 자체가 되어 있다고 본다. 만약 ball의 표면에 분말이 존재하면 새로운 분말과 slip이 일어나므로 볼의 성장이 일어나지 않게 된다. 따라서 ball의 성장이 계속되는 한 ball 표면에서의 누적된 분말은 존

재하지 않는다고 볼 수 있다.

(4) 볼 주위에 균일하게 둘러싸여 있는 분말의 농도는 φ_∞로 표시하고 이것을 분말의 bulk density(ρ_p)로 표시한다.

2-2-2. 수학적 전개

구형입자에 대한 비정상상태에서 구(sphere) 표면에서의 물질의 확산방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = D \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (1)$$

즉 (1) 식은 구형입자에 대한 diffusion equation으로서 볼의 성장에 관한 모델에 응용될 수 있다. 여기서 φ는 분말의 농도이며, D는 diffusion model에서 diffusivity이지만 본 연구에서는 ball과 분말간에서 분말이 ball에 접촉하는 속도를 결정해 주는 계수가 된다. 따라서 본 연구에서는 D의 접착계수(adhesion coefficient)로 볼 수 있으며 시간에 따라 입자의 경계면이 성장하는 moving boundary 개념을 (1)식에 적용시키면 얻고자 하는 구형입자의 성장속도 관계식을 구할 수 있는데 이 때의 초기조건(initial condition)과 경계조건(boundary condition)은 다음과 같다.

$$r=0, \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \text{ (at } t=0) \quad (2)$$

$$\phi(R(t), t) = \phi_s = 0 \quad (3)$$

$$\phi(\infty, t) = \phi_\infty = \rho_p \quad (4)$$

볼에 대한 solid의 농도 φ는 r과 t의 함수로서 다음과 같이 표시할 수 있는데 위의 편미분 방정식을 산술적 해가 가능한 상미분 방정식으로 고치기 위하여 두 개의 독립변수 r, t를 하나의 매개변수 s로 치환하면 다음과 같다[20].

$$\phi(r, t) = \phi(s) \quad (5)$$

여기서 $s = r/\sqrt{Dt}$ 로 정의하고, radial coordinate r과 시간 t에 관해서 미분하고 결과식을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음식을 구할 수 있다[20].

$$\left(\frac{r}{2\sqrt{Dt}} + \frac{2\sqrt{Dt}}{r} \right) \frac{\partial \phi}{\partial s} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} = 0 \quad (6)$$

위 식 (6)에 $s = r/\sqrt{Dt}$ 를 대입하고 정리하면,

$$\left(\frac{s}{2} + \frac{2}{s}\right) \frac{\partial \phi}{\partial s} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} = 0 \quad (7)$$

식 (7)에서 $\partial \phi / \partial s = p$ 로 치환하고 방정식을 풀면,

$$p = \frac{\partial \phi}{\partial s} = -As^{-2} \text{EXP}\left(-\frac{1}{4}s^2\right)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \phi &= A \int_s^\infty z^{-2} \text{EXP}\left(-\frac{1}{4}z^2\right) dz + \phi_\infty \\ &= A \left[s^{-1} \text{EXP}\left(-\frac{1}{4}s^2\right) - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{2}s\right) \right] + \phi_\infty \quad (8) \end{aligned}$$

식 (8)에 $s=r/\sqrt{Dt}$ 을 대입하고 정리하면,

$$\begin{aligned} \phi &= A \left[\frac{\sqrt{Dt}}{r} \text{EXP}\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \\ &\quad + \phi_\infty \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)에서 계수 A를 구하기 위해서 미분하고 구한 식에 $r=R$ 을 대입하면 다음식이 얻어진다[20].

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=R} = A \left[\frac{-\sqrt{Dt}}{R^2} \text{EXP}\left(-\frac{R^2}{4Dt}\right) \right] \quad (10)$$

Fick's의 first law[21], $NA = -D(\partial c / \partial r)$ 형태의 total mass flux, $-D(\partial \phi / \partial r)|_{r=R}$ 에 볼의 표면적을 곱하고 $R=S\sqrt{Dt}$ 를 대입하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$-4\pi R^2 D \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right)_{r=R} = 4\pi A D^{3/2} t^{1/2} \text{EXP}\left(-\frac{S^2}{4}\right) \quad (11)$$

또 볼의 성장이 진행됨에 따라 형성된 구의 단위 부피당 접착된 양을 q라 하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} 4\pi A D^{3/2} t^{1/2} \text{EXP}\left(-\frac{S^2}{4}\right) &\equiv q \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \\ &= q (2\pi S^3 D^{3/2} t^{1/2}) \quad (12) \end{aligned}$$

식 (12)로부터 계수 A를 구하면 다음식이 얻어진다.

$$A = \frac{1}{2} q S^3 \text{EXP}\left(\frac{S^2}{4}\right) \quad (13)$$

식 (13)을 식 (9)에 대입하고 $S=R/\sqrt{Dt}$ 과 $r=R$ 로 치환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있는데 이 때 성장하는 구(sphere)의 표면에서 ϕ 는 일정한 값을 갖는다.

$$\phi_s = \frac{1}{2} q \left(\frac{R}{\sqrt{Dt}} \right)^3 \text{EXP}\left(\frac{R^2}{4Dt}\right) \left[\frac{\sqrt{Dt}}{R} \text{EXP}\left(-\frac{R^2}{4Dt}\right) \right]$$

$$- \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc}\left(\frac{R}{2\sqrt{Dt}}\right) \Big] + \phi_\infty \quad (14)$$

식 (14)에서 앞의 가정과 경계조건을 고려하면 다음과 같이 변형시킬 수 있다. 위 식(14)에 $\phi_s=0$, $q=\rho_B$, $\phi_\infty=\rho_p$ 를 대입하고 정리한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_B \left(\frac{R}{\sqrt{Dt}} \right)^3 \text{EXP}\left(\frac{R^2}{4Dt}\right) \left[\frac{\sqrt{Dt}}{R} \text{EXP}\left(-\frac{R^2}{4Dt}\right) \right] \\ - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc}\left(\frac{R}{2\sqrt{Dt}}\right) \Big] + \rho_p = 0 \quad (15) \end{aligned}$$

식 (15)에서 $R/t=X$, $t/D=Y$ 로 치환하고 그 결과식에서 $X\sqrt{Y}=Z$ 로 치환하면 다음과 같이 Z만의 함수로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_B Z^3 \text{EXP}\left(\frac{Z^2}{4}\right) \left[\frac{1}{Z} \text{EXP}\left(-\frac{Z^2}{4}\right) \right] \\ - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc}\left(\frac{Z}{2}\right) \Big] + \rho_p = 0 \quad (16) \end{aligned}$$

그러나 이 결과식은 직접 풀리지 않으므로 Newton-Raphson method와 Simpson Rule을 적용하면 수치해석적인 방법으로 근을 구할 수 있는데[22] 식 (16)에서 상수값 즉, 볼의 bulk density, $\rho_B=1.376 \text{ g/cm}^3$, 분말의 bulk density, $\rho_p=0.950$ 을 대입하고 computer에 의해서 풀면 근은 $Z=3.008766$ 이다. 또 위 식에서 치환한 식 $Y=t/D$, $R=D\sqrt{Y}Z$ 로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{Dt} Z \\ &= 3.008766 \sqrt{Dt} \quad (17) \end{aligned}$$

식 (17)로부터 접착계수 값을 가정하면 시간에 따라 변화하는 구의 반경을 구할 수 있는데 접착계수에 대한 구의 반경 R과 시간 t의 관계를 Graph로 나타내면 Fig. 2와 같다.

3. 실험

수학적 모델로부터 구한 이론치와 실험에서 얻은 결과가 일치하는가를 확인하고 일정한 크기의 구형입자를 성장시키는데 필요한 변수들간의 최적조건을 구하기 위해서 다음과 같은 실험을 행하였다.

3-1. 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 처리용량은 0.5 kg/min 이며 시료 10 kg 을 담을 수

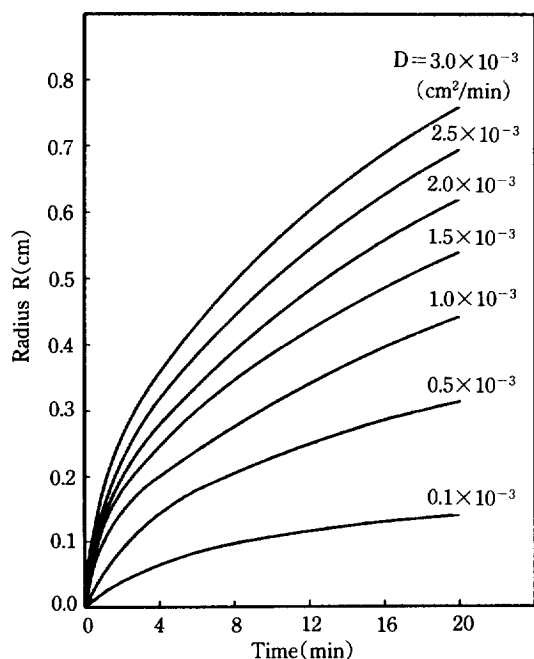


Fig. 2. Change of adhesion coefficient D values on the R vs. T plot.

있는 hopper, 시료의 균일한 혼합을 위한 paddle mixer, 입상조립을 위한 직경 60 cm인 disc 그리고 물 분사를 위해 직경 0.5 mm인 nozzle과 용량이 200 cc/min인 rotameter를 설치하였다.

3-1-1. Hopper

내부가 깔때기 모형으로 되어 시료가 중력에 의해 자유로이 흘러 내릴 수 있도록 하였으며 하부에는 screw feeder를 부착하여 시료가 일정하게 나오도록 하였다.

3-1-2. 혼합기(paddle mixer)

두 개의 shaft를 평행하게 연결하여 서로 안쪽으로 회전하도록 하였으며 축에는 15°로 굽어진 blade를 부착하여 시료가 앞쪽으로 나오도록 했다.

3-1-3. 원반(Disc 또는 Pan)

원반은 직경 60 cm, 칼라 높이 12 cm로 하였으며 ball이 무한히 성장하는 것을 막고, 일정한 크기의 구형입자를 성장시킬 수 있도록 각도를 55°로 고정했다.

3-2. 시료

본 실험에 사용한 시료는 무정형 흑연(amorphous graphite)과 접결제(binder)로 백색분말인 CMC(sodium carboxymethyl cellulose: $\text{RnOCH}_2\text{COONa}$)를 선택하여 실험하였다. 무정형 흑연은 -35 mesh를 사

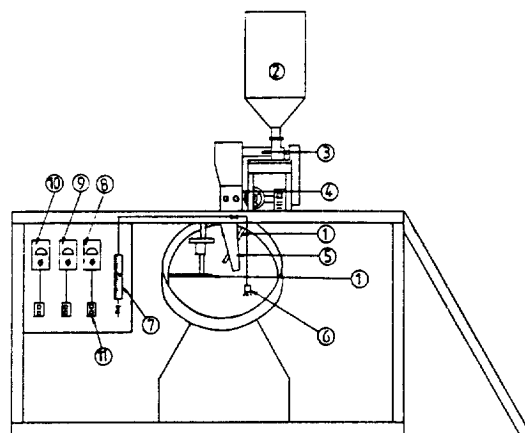


Fig. 3. Front view of experimental apparatus.

용하였으며 CMC는 무정형 흑연의 3 wt%를 사용하였다.

3-3. 실험방법

실험에 필요한 변수를 살펴보면 분무기에서 분사된 물의 양(water content), 원반속도(pan, rpm), 원료 주입속도(feed rate), 원반의 경사각도(pan angle), binder 농도, 원료의 입자크기 등이 있다.

본 실험에서는 원반의 경사각도를 55°로 고정했으며 binder의 농도는 3 wt%로 했다. 또한 원반의 입자크기는 무정형 흑연 -35 mesh를 선택하여 실험했으며 실험방법은 다음과 같다.

- (1) 실험을 위해 -35 mesh 무정형 흑연에 3 wt%의 CMC를 넣고 충분히 혼합한다.
- (2) 혼합된 원료를 hopper에 넣고 screw feeder를 작동시켜 일정속도로 paddle mixer에 투입되도록 한다.
- (3) Hopper로부터 나온 원료는 screw feeder를 통해 혼합기(paddle mixer)로 흘러 나오는데 여기서 196.5 g/min, 263.0 g/min의 속도로 원반에 투입된다.
- (4) 투입된 원료는 원반의 속도를 13, 18, 23 rpm으로 변화시켜 가며 실험했다. 각각의 원반속도에 spray nozzle을 통해 67, 74, 88 cc/min으로 물을 분사하므로써 원반내에는 초기에 powder로부터 아주 작은 핵(nuclei 또는 seed)이 형성되며 일정시간이 지난 후 각각의 다른 크기의 ball이 성장된다.
- (5) 형성된 ball은 원반의 경사각도와 collar height의

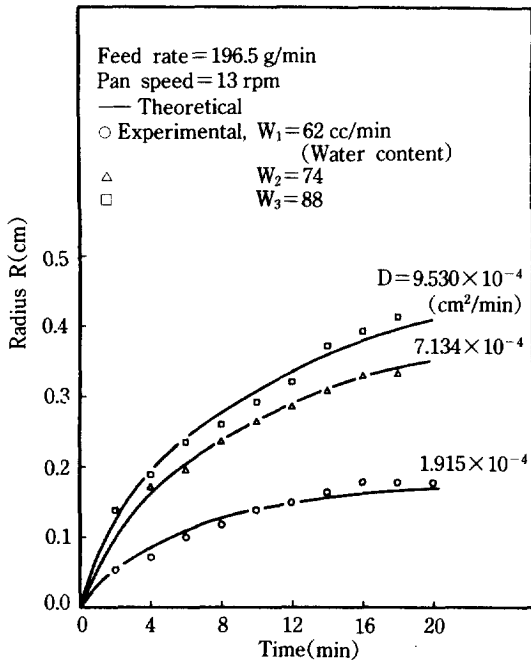


Fig. 4. Change of adhesion coefficient values on the R vs. T plot.

함수로서 원반 밖으로 튀어 나오게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 모델에서 구한 이론치와 실험치의 비교

Fig. 4와 5는 모델로부터 구한 이론치와 실험치의 차이를 알 수 있는 그래프로써 실험치는 기호로 표시하고 모델로부터 예측한 이론치는 실선으로 표시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 모델에서 구한 이론치와 실험치는 잘 일치함을 알 수 있다. 여기에서 Fig. 4와 5의 접착계수 D 값은 실험으로부터 구한 시간(time)에 따라 변화하는 구(ball)의 반경(R)을 가정하고 식 (17)을 이용하여 computer로 계산한 이론치이다.

Fig. 4는 원료주입속도(feed rate)를 196.5 g/min으로 하고 원반속도(disk speed)를 13 rpm으로 고정시킨 후 물의 양(water content)을 변화시켜 가며 실험한 결과이다. 여기서 물의 양이 증가함에 따라 접착계수 값이 증가하는 경향을 보여주는데 이것은 물의 양이 증가함에 따라 분말이 구의 표면에 정착할 수 있는 능력이 증가되어 상대적으로 구의 반경이 증가한 것을 나타낸다.

Fig. 5의 경우는 원료주입속도를 263.0 g/min으로 하고 원반속도를 13 rpm으로 한 경우이다. 이 경우 원료주입속도가 196.5 g/min에서 263.0 g/min으로 증가하였

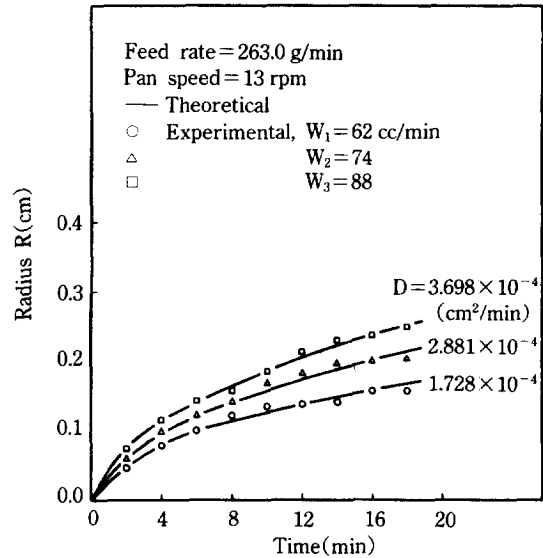


Fig. 5. Change of adhesion coefficient D values on the R vs. T plot.

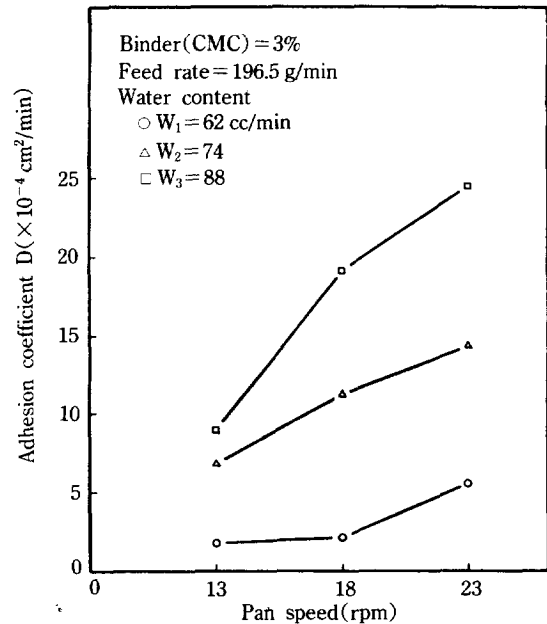


Fig. 6. Change of adhesion coefficient D values on the change of pan speed.

을 때 접착계수 값이 크게 감소하였다는 것을 보여준다. Fig. 4의 경우와 비교할 때 같은 조건에서 원료주입속도의 증가는 단위량의 원료에 공급되는 물의 분사량이 작아져서 정착능력이 감소되므로 볼의 성장속도가 저

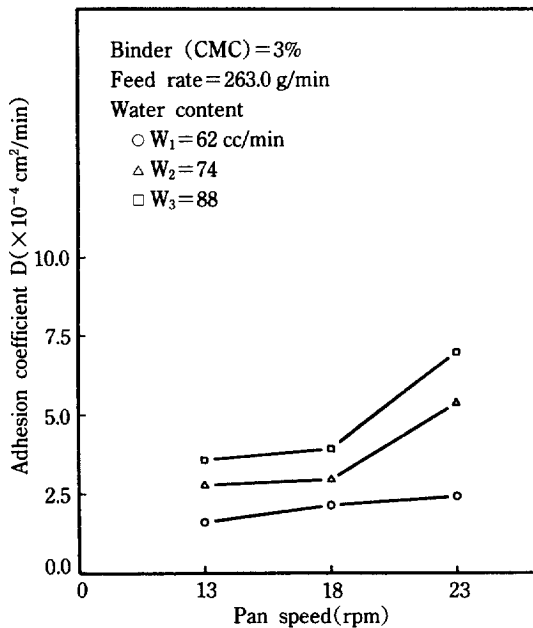


Fig. 7. Change of adhesion coefficient D values on the change of pan speed.

하되어 접착계수 값이 감소한 것을 나타낸다.

4-2. 원반속도(Disc speed) 변화에 따른 접착계수의 영향

원반속도 변화에 대한 접착계수 D의 변화는 Fig. 6과 7에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 일정한 원반속도에서 접착계수 D는 물의 양과 disc speed의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 6은 CMC를 3%로 하고 원료주입속도를 196.5 g/min으로 고정했을 때 물의 첨가량과 원반속도의 증가에 따라 접착계수 D가 증가하는 것을 보여준다. 이것은 접착계수 D가 작을수록 평균구형입자의 크기가 작아지고, 평균구형입자가 작을수록 성장속도가 느리고, 클수록 속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 CMC가 3%인 경우 원료주입속도를 263.0 g/min으로 증가시켰을 때 접착계수 D는 크게 감소하는 경향을 보인다. 이것은 Fig. 6과 비교할 때 원료주입속도의 증가는 분사된 물량의 감소를 가져와 점결할 수 있는 기회가 작아졌기 때문이다. 결국 D 값의 감소는 평균구형입자의 크기가 작아졌고 원료주입속도를 일정하게 했을 경우 원반속도 변화에 따른 접착계수는 물량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 결과적으로 원료주입속도가 증가함에 따라 접착계수 D 값의 감소 즉, 평균구형입자의 감소를 보여주며 물의 양과 원반속도의 증가에 따라 접착계수 값은 증

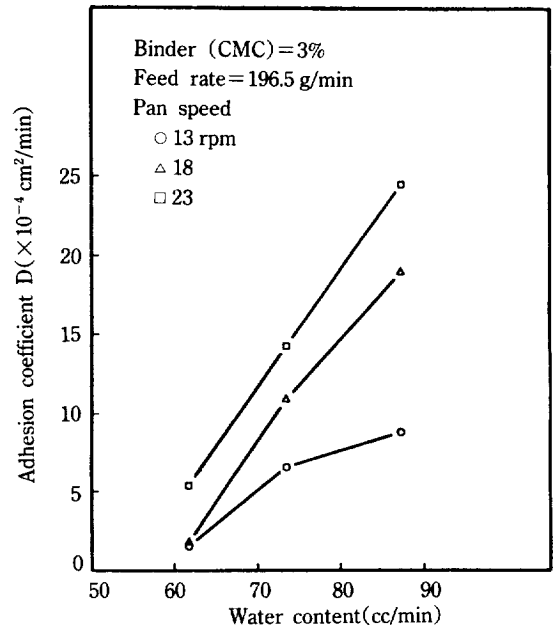


Fig. 8. Change of adhesion coefficient D values on the change of water content.

가하는 경향을 보여준다.

4-3. 물의 첨가량에 대한 접착계수의 영향

Fig. 8과 9는 첨가된 물량의 변화에 대한 접착계수 (adhesion coefficient)의 변화를 보여준다. Fig. 8의 경우 원료주입속도를 196.5 g/min으로 하고 binder인 CMC를 3 wt%로 고정했을 때 첨가된 물량의 변화에 따른 접착계수의 변화를 나타내는 그래프로 원반속도의 증가는 접착계수의 증가를 보여준다. 이 경우 원반속도가 증가할수록 접착계수 값은 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보여준다.

Fig. 9의 경우 원료주입속도를 263.0 g/min으로 하고 CMC를 3 wt%로 고정했을 때 첨가된 물량의 변화에 따른 접착계수 값의 변화를 나타낸다. 이 경우 원반속도의 증가에 따라 접착계수 D값이 증가하는 경향을 나타낸다. 결과적으로 두 그래프에서 볼 수 있듯이 Fig. 8의 경우가 접착계수의 증가속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 즉, 이것은 첨가된 물량변화에 따른 원료주입속도가 적을수록 성장하는 구의 크기가 크다는 것을 나타낸다. 또한 원반속도가 증가함에 따라 접착계수 값이 커지는 경향을 알 수 있다.

4-4. 접착계수(D)에 대한 변수들간의 상관관계

실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 접착계수 D의

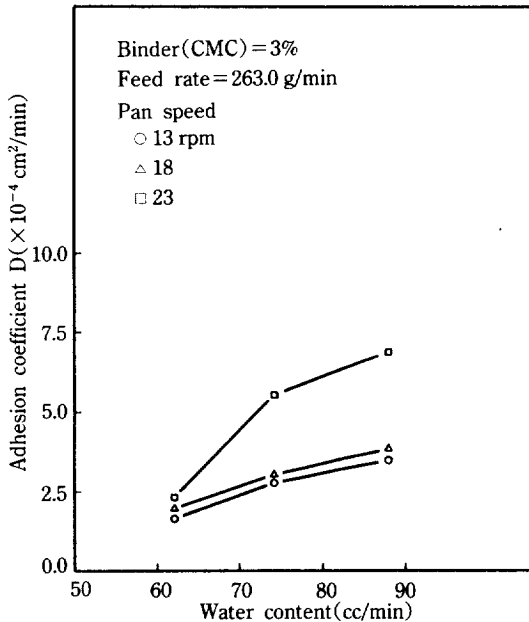


Fig. 9. Change of adhesion coefficient D values on the change of water content.

같은 실험변수들 즉, water feed rate(W), pan speed (N), solid feed rate(F), pan angle(θ), binder concentration(C), particle size(P) 등의 변수에 따라 영향을 받는다. 즉, $D = D(W, N, F, \theta, C, P, \dots)$ 의 함수로 주어지는데 본 실험에서는 $\theta = 55^\circ$, $C = 3 \text{ wt\%}$, $P = -35 \text{ mesh}$ 로 고정하였다. 따라서 본 연구의 변수로서는 물의 양(W), 원반속도(N), 원료공급속도(F)를 사용하였고, 이들의 상관관계는 다음 식으로 가정하여 구할 수 있다.

$$D = \alpha W^\beta N^r F^\delta \quad (4-1)$$

여기서, D = adhesion coefficient (cm^2/min)

W = water feed rate (cc/min)

N = pan speed (rpm)

F = solid feed rate (g/min)

α, β, r, δ = constants

본 실험에서 물량(W)과 원료공급속도(F)의 접착계수 D 에 대한 영향은 서로 역의 관계가 있으므로 $\delta = -\beta$ 로 둘 수 있다. 따라서 식 (4-1)은,

$$D = \alpha (W/F)^\beta N^r \text{가 된다.} \quad (4-2)$$

식 (4-2)에서 각 parameter α, β, r 의 값은 주어진 실험 data와 non-linear regression method를 이용하여 computer programming으로부터 구할 수 있다. 구한 α, β, r 의 값을 식 (4-2)에 대입하면 결과적으로 다음과

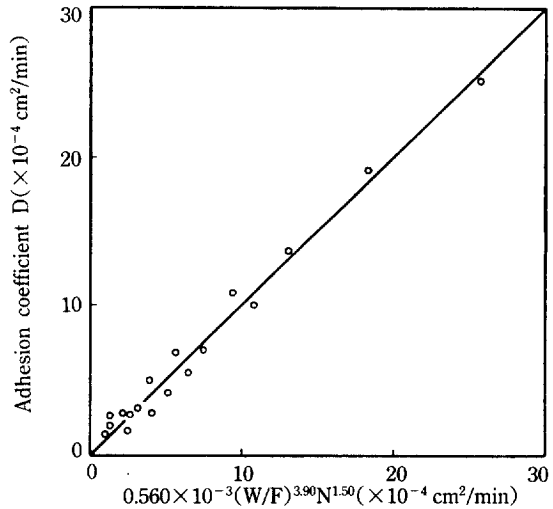


Fig. 10. Correlation of adhesion coefficient with water to solid ratio and pan revolution per minute.

같은 식을 얻을 수 있다.

$$D = 0.560 \times 10^{-3} (W/F)^{3.90} N^{1.50} [\text{cm}^2/\text{min}] \quad (4-3)$$

Fig. 10은 실험에서 얻은 접착계수 D 의 값과 식 (4-3)을 이용하여 구한 D 의 값의 관계를 나타내고 있으며 양자의 값들은 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 실험의 결과 및 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Diffusion model로 가정한 pan granulator에서의 ball growing mechanism은 본 연구의 전 영역에서 실제와 잘 일치한다.

(2) 접착계수 D 의 값과 water feed rate(W), pan speed(N), solid feed rate(F)와의 상관관계는 다음식과 같다.

$$D = 0.560 \times 10^{-3} (W/F)^{3.90} N^{1.50} [\text{cm}^2/\text{min}]$$

(3) 물의 양(water content)과 원반속도(pan speed)의 증가에 따라 접착계수 D 의 값은 계속 증가하며 원료주입속도(solid feed rate)의 증가에 따라 감소한다.

(4) 접착계수 D 의 값은 pan speed보다 water feed rate와 solid feed rate에 더욱 큰 영향을 받는다.

NOMENCLATURE

A : constant

C : binder concentration [g/cm³]
 D : adhesion coefficient [cm²/min]
 d : disk diameter [m]
 F : solid feed rate [g/min]
 N : disk speed [rpm]
 N_c : critical speed of disk [rpm]
 P : particle size of material [mesh]
 q : amount of diffusant expelled per unit volume of new phase formed as growing proceeds [g/cm³]
 R : radius of balls [mm]
 r : radial coordinate
 S : parameter defined as $R = S\sqrt{Dt}$
 s : parameter defined as $r = s\sqrt{Dt}$
 t : time [min]
 W : water feed rate [cc/min]

Subscripts

α, β, r, δ : constant
 θ : disk angle
 ρ_B : bulk density of balls [g/cm³]
 ρ_p : bulk density of powder [g/cm³]
 ϕ : powder concentration of balls [g/cm³]
 ϕ_R : powder concentration of balls at radius, R [g/cm³]
 ϕ_s : powder concentration on the surface of balls [g/cm³]
 ϕ^∞ : powder concentration surrounding balls [g/cm³]

REFERENCES

- Berry C. E. and Blank, A. G.: *Chem. Eng.*, 161-174 (Oct. 1951).
- Browning, J. E.: *Chem. Eng.*, 147 (Dec. 4, 1967).
- Newitt, D. M. and Conway-Jones, J. M.: *Trans-Instr. Chem. Engrs.*, 36, 422 (1958).
- Kapur, P. C.: *Chem. Eng. Sci.*, 27, 1863 (1972).
- Kapur, P. C. and Fuerstenau, D. W.: *I&EC(PDD)*, 6(1), 56 (1969).
- Kapur, P. C. and Fuerstenau, D. W.: *I&EC(PDD)*, 5, 5 (1966).
- Kapur, P. C. and Fuerstenau, D. W.: *Trans. AIME*, 229 (1964).
- Capes, C. E.: *I&EC(PDD)*, 6, 391 (1967).
- Capes, C. E., Coleman, R. D. and Thayer, W. L.: "The Production of Uniformly-Sized Spherical Agglomerates in Balling Drums and Discs", National Research Council, Ottawa, Canada (Dec. 1978).
- Ouchiyama, N. and Tanaka, T.: *I&EC(PDD)*, 13, 383 (1974).
- Ouchiyama, N. and Tanaka, T.: *I&EC(PDD)*, 19, 555 (1980).
- Ouchiyama, N. and Tanaka, T.: *I&EC(PDD)*, 14 (3), 286 (1975).
- Han, C. D.: *Chem. Eng. Sci.*, 25, 875 (1970).
- Han, C. D. and Wilenitz, I.: *I&EC(Fundam.)*, 9, 401 (1970).
- Ouchiyama, N. and Tanaka, T.: *I&EC(PDD)*, 20, 340 (1981).
- Perry, R. H. and Chilton, C. H.: "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed., 8-57 (1973).
- Kapur, P. C., Kalanadh, V. S., Sastry and Fuerstenau, D. W.: *I&EC(PDD)*, 20, 519 (1981).
- Ludwig, C.: *Chem. Eng.*, 156 (Jan. 1954).
- Kapur, P. C.: "Advanced in Chemical Engineering", Vol. 10, p. 55 (1978).
- Crank, J.: "The Mathematics of Diffusion", 2nd ed., Oxford Univ. Press (1975).
- Bennett, C. O. and Myers, J. E.: "Momentum, Heat, and Mass Transfer", 2nd ed., McGraw-Hill (1974).
- Bird, Stewart and Lightfoot: "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc., NY (1975).