

매체 순환유동층을 이용한 미세입자의 건조특성

김옥신, 이동현*, 김상돈¹
 성균관대학교, ¹한국과학기술원
 (dhlee@skku.edu*)

Drying Characteristics of Fine powders in an Inert Medium Circulating Fluidized Bed

Og Sin Kim, Dong Hyun Lee*, Sang Done Kim¹
 SungKyunKwan University, ¹Korea Advanced Institute of Science and Technology
 (dhlee@skku.edu*)

Introduction

미세입자(fine powders)는 독특한 물리적 특성에 의하여 전자재료, 제약, 식품 등의 많은 공업 분야에서 사용이 증가하고 있는데 제조 용이성과 경제성 문제로 인해 주로 액상에서 제조가 이루어지므로 액체 용매를 제거하는 건조과정이 필요하다. Geldart [1]의 고체 입자 크기 및 종류에 따른 유동화 현상 분류에 의하면, 본 실험의 미세입자는 group C 입자이며 이들의 일반적 건조방법으로는 agitated pan dryer, 기류건조기, 회전 건조기, 분무건조기 등이 있다[2]. 그러나 이 방법들은 여러 가지 단점들이 있어서[2, 3] 유동층 건조 방식이 이용가능하나 Group C 입자들은 큰 표면에너지에 의해 입자들 간의 힘이 커 점착성이 강하고 유동화 시키기가 어렵기 때문에[4] 매체를 이용한 유동층 건조기가 이용된다. 매체 유동층 건조기는 유동화 및 열전달 매체인 inert particle을 이용하여 미세입자를 유동 및 건조시키고 건조된 미세입자는 열풍과 같이 유동층 밖으로 이송된 후 포집함으로써 기류건조기나 회전건조기의 단점을 해결하고 총괄 열전달계수를 상승시키며 처리량 문제도 해결한다[3, 5]. 그러나 일반적인 매체 기포 유동층 건조기는 건조된 미세입자의 column wall 부착현상이 발생하여 수율 및 품질하락과 같은 단점이 있다. Column 내 입자를 순환과 동시에 건조 시키는 매체 순환형 유동층 건조 장치를 이용하면 이러한 단점을 해결할 수 있는데, 순환되는 매체입자가 wall에 부착되는 미세입자를 계속 털어내어 입자의 wall 부착현상을 최소화해준다. 따라서 이와 같은 순환형 매체유동층 건조기를 사용하면 건조 효율은 상승하며 적은 에너지를 이용하여 고품질의 미세입자 획득이 가능해진다. Lee et al.[3, 5]은 매체유동층에서 회분식과 연속식 건조에 관한 연구 결과를 발표하였다. Grbavcic et al.[6]는 매체유동층 건조기를 사용하여 살균제, copper hydroxide, calcium carbonate와 순수한 물이 혼합된 slurry의 건조 실험을 실시하였다. Kato et al.[7, 8]은 수백 μm 크기의 coarse particle(Geldart B) bed 안으로 미세입자를 연속적으로 공급하는 유동층 system인 powder-particle fluidized bed(PPFB)를 개발했다. Nakazato et al.[9]은 Geldart B 입자 대신 A 입자를 이용, PPFB를 circulating powder-particle fluidized bed(CPPFB)로 개조했다. 그러나 이런 선행연구들은 매체 순환형 유동층을 이용한 미세입자의 건조 특성에 대한 설명을 하지 못하므로, 본 연구에서는 열풍유량($31\sim 36\text{m}^3/\text{hr}$), 열풍 온도($50\sim 80^\circ\text{C}$), 매체입자와 미세입자의 질량비(F/I ratio, $0.1\sim 0.2$), 초기 수분함량($8\sim 31\%$, wet basis)이 건조속도에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

Theory

Lee and Kim[5]은 매체유동층에서 건조공정 메커니즘을 설명하였다. 이는 매체 순환유동층에서의 건조공정 메커니즘과 동일하나, 입자의 순환과 건조가 동시에 이루어진다. 유입된 가스에 의해 유동화가 시작되면 column내 매체입자와 습윤한 미세입자들의 혼합과

미세입자의 매체입자로의 분산이 이루어진다. 이후 열풍에 의해 입자들이 상승하면서 건조가 이루어지고 유출된 입자들은 cyclone에 의해 분리 및 재순환되는데, 건조된 미세입자는 bag-filter로, 매체입자와 미건조된 미세입자 덩어리들은 column으로 순환된다.

건조 전·후의 상대습도(ϕ) 값으로부터 다음 (1)식에 의해 절대습도를 구할 수 있다.

$$Y = \frac{m_A(\text{kg of vapor})}{m_B(\text{kg of dry air})} = \frac{0.622 \phi P_{A,eq}}{P - \phi P_{A,eq}} \quad (1)$$

절대습도 $Y(\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg dry air})$ 를 이용하여 습윤 용적(V)을 다음의 (2)식에서 구한다.

$$V = 22.4 \left(\frac{1}{M_B} + \frac{Y}{M_A} \right) \frac{273 + T_g}{273} = 22.4 \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18} \right) \frac{273 + T_g}{273} \quad (2)$$

(1)식과 (2)식을 이용하여 건조된 수분의 양 $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 를 (3)식으로부터 구할 수 있다.

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = \bar{m}_g \int_0^t (Y_{g0} - Y_{gi}) dt, \quad \bar{m}_g = \frac{Q(m^3/s)}{V(m^3/kg)} \quad (3)$$

건조속도(R_D)는 식(4)의 관계에 의해 계산할 수 있다 [5].

$$R_D = \frac{1}{A_t} \frac{d}{dt} W_{\text{H}_2\text{O}} \quad (4)$$

Experimental

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 회분식 매체 순환유동층 건조기를 나타낸다. Column은 stainless steel(0.085m-ID×1.0m-H)이며 windbox는 동일 재질의 높이 0.2m이다. Distributor는 직경 3.7 mm, 22 mm pitch의 11개 hole이 뚫린 다공판을 사용하였다. Cyclone에서 column으로 연결되는 downstream은 직경 25mm의 stainless steel (type 304)로 제작하였으며 중간에 입자를 순환시키기 위한 ball valve를 설치하였고 valve 근처를 acryl로 제작하여 순환유무를 육안으로 확인하였다. 매체입자는 평균 327.5 μm 인 glass beads를, 미세입자는 평균 12 μm 크기의 PMMA beads를 사용하였다. 매체입자의 투입 양은 2.50 kg이며 습도는 hygrometer, 온도는 RTD-type thermocouple을 이용하여 측정하였다. Air dehumidifier를 거치며 일정한 낮은 습도로 유지된 air가 flowmeter를 거쳐 공기 예열기로 들어가기 전에 상대습도와 온도가 측정된다. 예열기에 의해 뜨거워진 공기를 column내로 불어넣어 주어 매체입자를 순환시키면서 예열시킨다. 순환을 위해서는 처음에 ball valve를 잠갔다 air에 의해 유출된 입자가 acryl쪽에 쌓이면 ball valve를 열어주어 순환을 시킨다. 열풍에 의해 입자들이 예열되어 적정온도를 유지하면 solenoid valve를 사용하여 열풍의 유입을 차단하고 시료 투입 후 다시 열풍을 불어넣어 주면 입자들이 순환이 되면서 건조가 이루어진다. 건조 중 측정되는 outlet air의 상대습도와 온도를 이용, 건조 전과 후의 절대습도의 차이로부터 건조된 수분의 양을 계산한다. 매체입자를 순환시키기 위해서는 종말속도(U_t) 이상의 유속이 필요하며, 이론적인 $U_t = 2.35\text{m/s}$ ($Q_t = 48.0 \text{ m}^3/\text{hr}$)이나 실험에서는 대략 유량, $Q = 25\text{m}^3/\text{hr}$ 에서부터 유출이 일어났다. 이는 아마도 이 입자의 크기와 유속에 대한 TDH (Transport Disengaging Height)가 대략 1m이기 때문으로 보인다. Table 1은 실험 변수와 범위를 나타내었다.

Table 1 실험 변수와 범위

No	Variable	Unit	Operating range
1	Gas temperature	°C	50, 60, 70, 80
2	Gas flow rate	m ³ /hr	31.2, 32.7, 34.2, 35.7
3	F/I ratio	—	0.05, 0.1, 0.15, 0.2
4	Initial water content	%	8, 17, 26, 31

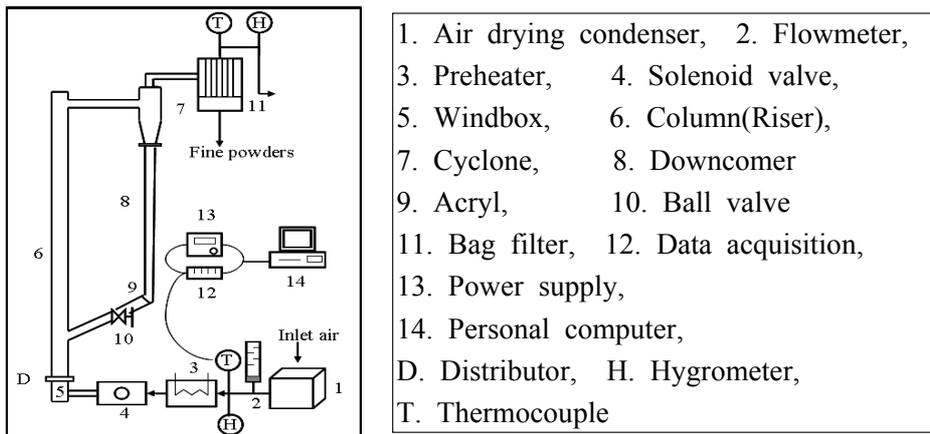


Fig. 1. 매체 순환유동층 건조 실험 장치

Results and Discussion

Fig. 2(a)는 $F/I=0.1$, 기준온도(windbox)= 70°C 유량(Q)= $31.2 \text{ m}^3/\text{hr}$ (유속, $U_g=1.53 \text{ m/s}$), 초기수분함량(X_0)= $26.8 \text{ wt}\%$ wet basis일 때 식(3)에 의해 얻어진 절대습도 변화와 유입·유출 공기와 windbox, 층내 온도변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 2(a)에서 절대습도와 시간에 대한 그래프의 면적이 건조된 수분의 양이며 이렇게 측정된 수분의 양은 0.066kg 이며 이론 값은 0.067kg 이다. 0sec가 시료를 넣어주어 건조를 시작했을 때이고 건조가 대략 700sec 부근에서 끝날 것이라는 걸 예상할 수 있다. Windbox 온도는 70°C 를 가리키고 있고 beds 의 온도는 초기에 습하고 차가운 시료에 의해 급격히 줄었다가 건조가 진행되면서 점점 초기 온도에 접근한다. 그러나 입자 순환과정에서의 열손실로 인하여 bed 내 입자들의 온도는 열풍온도까지는 상승하지 못한다. Fig. 2(b)는 동일한 조건하에서 얻은 건조속도 그래프이다. 다른 유량과 온도조건에 대해서도 위와 같은 그래프들을 얻을 수 있으며 그래프의 peak를 최대 건조속도 DR_{max} 로 정의한다.

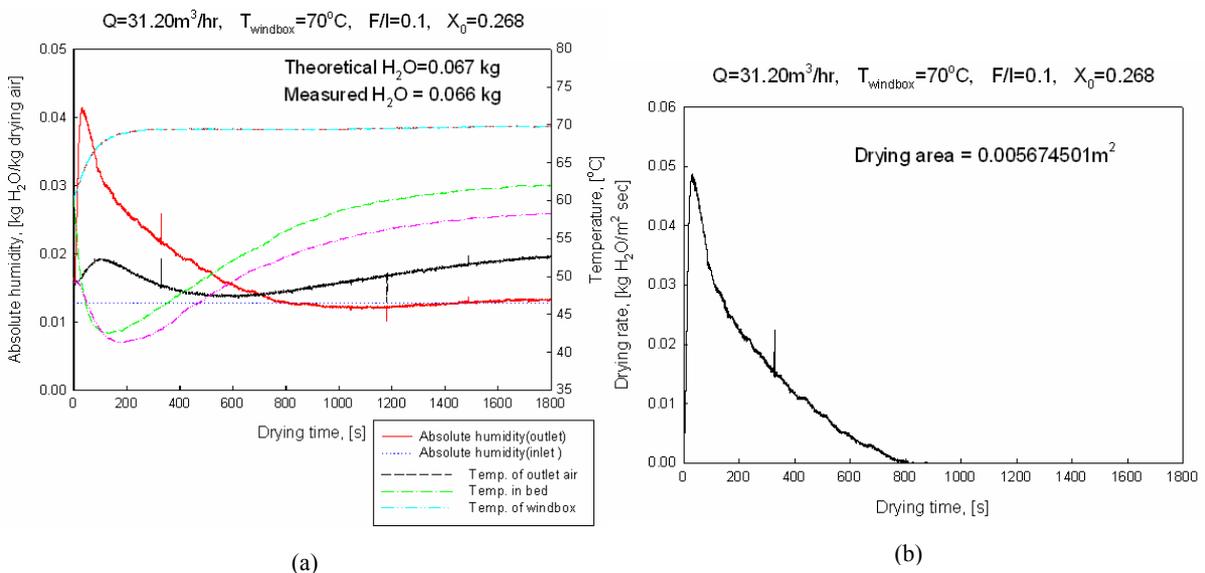


Fig. 2. $Q=31.20\text{m}^3/\text{hr}$, $T_{\text{windbox}}=70^{\circ}\text{C}$, $X_0=26.8\%$, $F/I=0.1$ 일 때, (a)절대습도와 온도변화, (b)건조속도 그래프.

온도가 건조 속도에 미치는 영향을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 유입 열풍 온도가 커질수록 건조속도는 빨라지며 동일한 조건에서 건조속도는 유량이 클수록, 수분함량이 커질수록

빨라진다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 유입가스가 건조속도에 미치는 영향을 나타내며, 보는 바와 같이 유속이 빨라질수록 건조속도가 커짐을 알 수 있다. 동일한 조건에서 열풍 온도가 커지면 유입속도에 따른 DR_{max} 도 커지며, 동일한 조건하에서의 초기수분함량의 변화에 대해서도 큰 수분함량이 더큰 DR_{max} 를 갖는다. Fig. 5를 통하여 PMMA beads에 대하여 매체입자와 미세입자의 질량비 F/I ratio가 증가함에 따라서 DR_{max} 는 대체로 증가함을 알 수 있는데 이는 Lee and Kim[5]의 매체유동층을 이용한 전분의 건조실험과는 다소 상반된다. 동일한 유량과 온도에서 수분함량이 적을수록 F/I ratio에 따라 DR_{max} 는 작다.

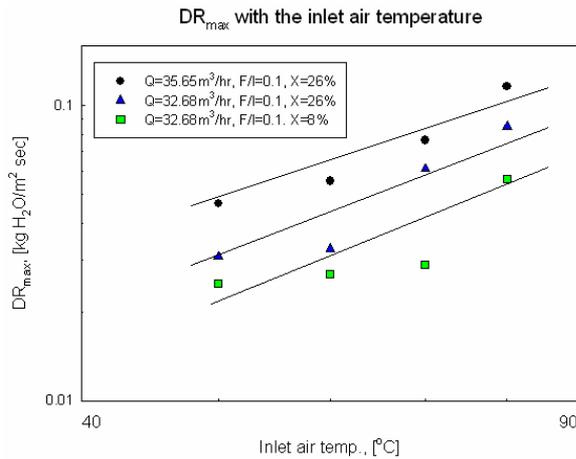


Fig. 3. 유입열풍온도에 따른 건조속도 영향.

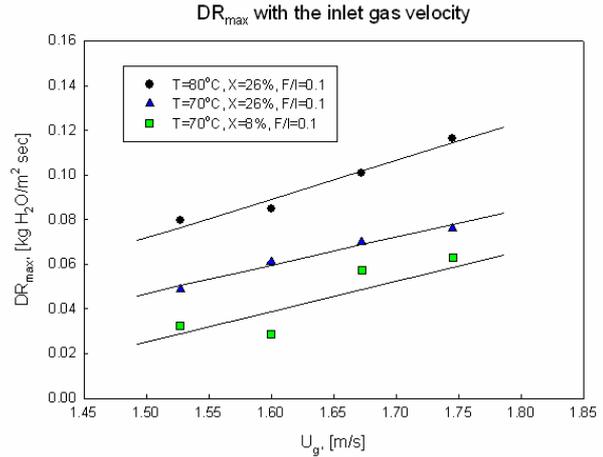


Fig. 4. 유입유속에 따른 건조속도 영향.

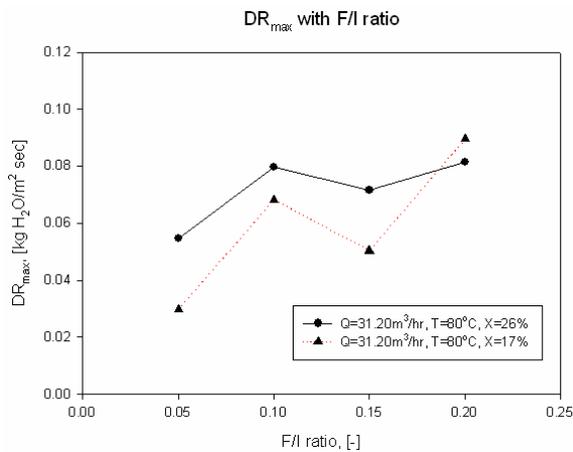


Fig. 5. F/I ratio에 따른 건조속도 영향

REFERENCES

1. D. Geldart, *Powder Technol.*, **6**(4), 201-215 (1972).
2. C. M. Land, *Chem. Eng.*, **53**, 111-121 (1984).
3. D. H. Lee and S. D. Kim, *Korean Chem. Eng. Research*, **32**(3), 463-468 (1994).
4. D. Geldart, *AIChE Symposium. Ser. 85*, **270**, 111-121 (1989).
5. D. H. Lee and S. D. Kim, *Chem. Eng. Technol.*, **16**(4), 263-269 (1993).
6. Z. B. Grbavcic, Z. L. Arsenijevic and R. V. Garic-Grulovic, *Drying Technology*, **22**(8), 1793-1812 (2004).
7. K. Kato, T. Rakarada, A. Koshinuma, I. Kanazawa and T. Sugihara, *Fluidization*, VI, 351-358 (1989).
8. K. Kato, T. Takarada, N. Matsuo, T. Suto and N. Nakagawa, *Int. Chem. Eng.*, **34**, 605-610 (1991).
9. T. Nakazato, J. Li, H. Mitsui, S. Sawada, and K. Kato, *Powder Technology*, **146**, 46-55 (2002).