

매체입자를 가진 기포 유동층과 순환유동층에서 미세입자의 건조

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

Drying of Fine Powders in Bubbling and Circulating Fluidized Beds with Inert Particles

Og Sin Kim, Dong Hyun Lee*, Sang Done Kim¹

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

¹Department of Chemical and Biomolecular Engineering and Energy & Environment Research Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology
 (dhlee@skku.edu*)

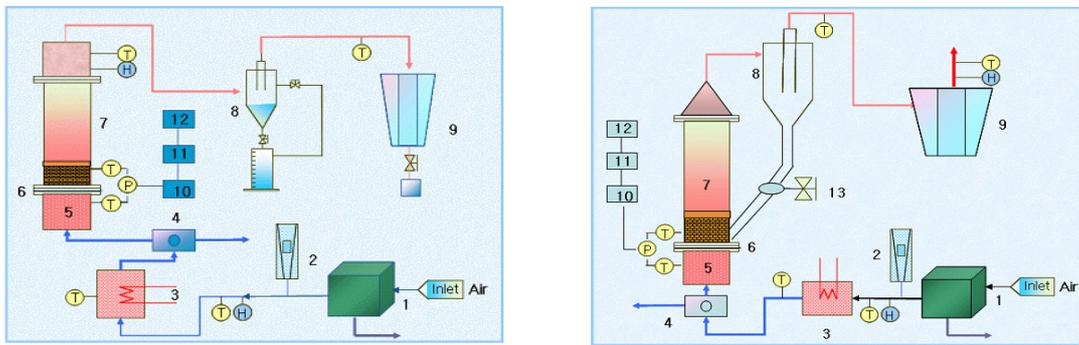
1. Introduction

Fine powders는 독특한 물리적 특성에 의하여 많은 공업 분야에서 사용이 증가하고 있다. 이 입자들은 액체 용매 하에서 생성되는데 이 과정에서 사용된 액체 용매를 제거해야만 입자로서의 활용이 가능하다. Geldart [1]의 고체 입자 크기 및 종류에 따른 유동화 현상 분류 (group A~D)에 의하면, 본 실험의 미세입자는 group C 입자에 해당하며 일반적인 건조방법에는 agitated pan dryer, 기류건조기, rotary dryer, spray dryer 등이 사용되고 있다 [2]. 그러나 이들은 처리용량이 작고 동력소모가 많거나 [2], 혹은 총괄 열전달 계수가 작거나 [3], 건조기 표면에 시료의 부착현상의 발생, atomizer의 유지보수가 어려운 단점이 있다 [3]. 따라서 유동층 건조기가 이용가능하나 Group C 입자들은 표면에너지가 커서 입자들 간의 힘이 커서 점착성이 있고 유동화 시키기가 어렵기 때문에 [4] 매체를 이용한 유동층 건조기가 이용된다. 매체 유동층 건조기는 유동화 및 열전달 매체인 inert particle을 유동화 시키면서 미세입자를 건조시키고 건조된 미세입자는 열풍과 같이 유동층 밖으로 이송된 후 포집되게 하여 기류건조기나 rotary dryer의 단점을 해결하고 총괄 열전달계수를 상승시키며 처리량도 탁월하다 [3,5]. 그러나 매체 기포 유동층 건조기는 건조 과정에서 건조된 미세입자의 column wall 부착현상이 발생하여 최종 수득물에 차이가 있다. 따라서 column 내 모든 입자를 순환시키면서 건조 하는 새로운 개념의 순환 매체 유동층 건조를 이용할 수 있다. Wall에 묻은 미세입자는 순환되는 매체 입자로 인해 떼어지며 매체입자와 함께 cyclone으로 들어가 미세입자는 bag filter로, 매체입자는 column으로 순환하게 된다. 따라서 건조 효율이 상승하며 적은 에너지로도 동일한 효과를 낼 수 있다. Lee et al. [3,5]은 매체유동층에서 회분식과 연속식 건조에 관한 연구 결과를 발표하였다. Kudra and Mujundar [6]는 classical fluid bed, spouted bed, spout-fluid bed 등이 매체입자를 이용하여 건조가 가능한 dryers라고 발표하였다. Grbavcic et al. [7]는 매체유동층 건조기를 사용하여 zineb fungicide, copper hydroxide, calcium carbonate와 순수한 물이 혼합된 slurry의 건조 실험을 실시하였다. Kato et al. [8,9]은 수백 μm 의 coarse particle (Geldart B) 유동층 안으로 미세입자를 연속적으로 공급하는 유동층 system인 powder-particle fluidized bed (PPFB)를 개발했다. Nakazato et al. [10]은 Geldart B 입자 대신 A 입자를 이용, PPFB를 circulating powder-particle fluidized bed (CPPFB)로 개조했다. 본 연구에서는 매체 기포 유동층과 순환 유동층 건조기에서 열풍유량 (17~20 m³/hr), 열풍온도 (40~80 °C), 매체입자와 미세입자의 질량비 F/I ratio (0.1~0.4)가 건조에 미치는 영향에 대하여 고찰하도록 한다.

2. Experimental

Fig. 1은 (a) 회분식 매체 기포유동층 건조기와 (b) 회분식 매체 순환유동층 건조기이다.

(a) 회분식 매체 기포유동층 건조기의 column은 0.15m-ID×1.0m-High stainless steel이며 windbox는 동일 직경·재질에 높이 0.2m이다. 열풍 분배기는 직경 3.0 mm, 20 mm pitch인 33 개의 구멍이 균일하게 배치된 다공판이며 매체입자는 평균 590 μ m이고 밀도는 2,500 kg/m³인 glass beads, 미세입자는 wet cake 상태(수분함량=약 30 wt%, wet basis)의 평균입경 20 μ m인 PMMA beads를 사용하였다. 매체입자의 최소유동화 속도, $U_{mf}=0.23\text{m/s}$ 로 측정되었으며 투입 양은 5.82 kg이다. (b) 회분식 매체 순환유동층 건조기에서 유동층은 0.085m, 높이 1.0 m의 stainless steel이며 windbox는 동일 직경·재질의 높이 0.2m이다. 분배기는 직경 3.7 mm, 22 mm pitch의 11개 구멍이 배치된 다공판을 사용하였다. Cyclone에서 column으로 연결되는 downstream은 직경 25mm의 stainless steel (type 304) 로 제작하였으며 중간에 butterfly valve를 설치하였고 부근은 acryl로 제작하여 순환유무를 육안으로 확인한다. 매체입자는 평균 275 μ m인 glass beads를, 미세입자는 동일한 PMMA beads를 사용하였다. 매체입자의 이론적인 최소유동화 속도, $U_{mf}=0.061\text{m/s}$ 이며 투입 양은 1.70 kg이다. Drying condenser를 거치며 응축된 수분은 외부로 배출되고 일정한 낮은 습도로 유지된 air가 flowmeter를 거쳐 공기 예열기로 들어가며 상대습도와 온도가 측정된다. 예열기를 거치며 뜨거워진 공기를 column내로 불어넣어 주어 column내 매체입자를 설정온도까지 예열시킨다. 매체 순환유동층에서는 매체입자를 순환시키면서 예열시킨다. 적정 온도에서 solenoid valve를 사용하여 열풍의 유입을 차단하고 시료 투입 후 다시 열풍을 불어넣어 준다. 순환유동층은 다시 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 $U_t=2.35\text{m/s}$ ($Q=48.00 \text{ m}^3/\text{hr}$)이나 실험에서는 유량, $Q=18\text{m}^3/\text{hr}$ 에서부터 유출이 일어났다. 이는 아마도 TDH가 대략 1m이기 때문으로 보인다. Table 1은 실험 변수와 범위를 나타낸다.



1. Air drying condenser, 2. Flowmeter, 3. Preheater, 4. Solenoid valve, 5. Windbox, 6. Distributor, 7. Main Column, 8. Cyclone, 9. Bag filter, 10. Pressure transducer, 11. Data acquisition, 12. Personal computer, 13. Butterfly valve, H. Hygrometer, T. Thermocouple, P. Pressure tap

Fig. 1. (a)매체 기포유동층 건조기와 (b)매체 순환유동층 건조기 실험 장치.

Table 1 실험 변수와 범위

| No. | Variable | Unit | Operating range |
|-----|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Gas temperature | °C | 42, 50, 65, 80 |
| 2 | Gas flow rate | m ³ /hr | 17, 18, 19, 20 |
| 3 | F/I ratio | — | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |

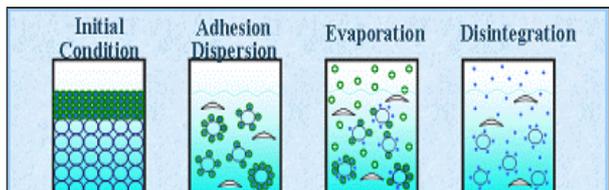


Fig. 2. 매체 유동층에서 건조 메커니즘 [5].

2.1 Drying Mechanism in an Inert Medium Bubbling and Circulating Fluidized Beds.

매체 기포유동층에서 건조공정 메커니즘은 Fig. 2에 나타난 바와 같다[5]. 매체 순환유동층에서 건조공정은 크게 두가지로 나뉘 설명할 수 있다. 1) Column 내부; column 내에

서 이루어지는 건조는 Fig. 2에서 설명한 방식과 동일하다고 할 수 있다. 2) Circulating 공정; 전체적인 공정 모습은 다음 Fig. 3와 같다. 유동화가 시작되면 1단계인 입자들의 혼합과 분산 단계가 된다. 매체입자와 습윤한 미세입자들이 가스의 유입으로 유동화되면서 혼합과 분산이 이루어진다. 이 과정이 column 내부 공정과 관련 있다. 2단계는 입자들의 순환과 분리단계이다. 건조된 미세입자는 bag-filter로, 매체입자와 건조되지 않은 덩어리진 미세입자들은 순환하면서 계속 건조와 입자의 분리가 이루어진다. 3단계는 마무리단계로 매체입자만이 순환을 계속한다.

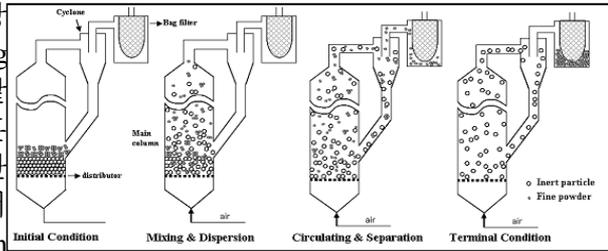


Fig. 3. 매체 순환유동층의 건조 공정.

2.2 Drying Rate

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 (kg H₂O/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_{H_2O} 를 (3)식으로부터 구할 수 있다.

$$W_{H_2O} = \bar{m}_g \int_0^t (Y_{g0} - Y_{gt}) dt, \quad \bar{m}_g = \frac{Q (m^3/s)}{V (m^3/kg)} \quad (3)$$

건조속도(R_D)는 식(4)의 관계에 의해 계산할 수 있다 [5].

$$R_D = \frac{1}{A_t} \frac{d}{dt} W_{H_2O} \quad (4)$$

3. Results and Discussion

Fig. 4는 $F/I=0.1$, 기준온도(windbox)=80°C 유량(Q)=20 m³/hr(유속, $U_g=0.305$ m/s), 초기수분함량(X_0)=30 wt% wet basis일 때 측정된 상대습도와 온도로부터 (3)에 의해 얻어진 절대습도 변화와 유입·유출 공기와 windbox, bed내 온도변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 4에서 절대습도와 시간에 대한 그래프의 면적이 건조된 수분의 양이다. 이렇게 측정된 수분의 양은 0.124kg이며 이론값은 0.170kg이다. 모든 실험 변수에 대한 실험 과정 동안 hygrometer의 변화가 없으므로 모든 data에 동일하게 적용 가능하다. 0sec가 시료를 넣어 주어 건조를 시작했을 때이고 건조가 대략 1,000sec 부근에서 끝날 것이라는 걸 예상할 수 있다. Windbox 온도는 80°C를 가리키고 있고 beds의 온도는 초기에 습하고 차가운 시료에 의해 급격히 줄었다가 건조가 진행되면서 점점 유입 열풍 온도에 접근해 감을 알 수 있다. Fig. 5는 동일한 조건하에서 얻은 건조속도 그래프이다. 다른 유량과 온도조건에 대해서도 위와 같은 그래프들을 얻을 수 있다. 온도가 건조 속도에 미치는 영향을 최대 건조속도(DR_{max})에 대해 나타낸 것이 Fig. 6이다. Fig. 6에 실험과 비교를 위하여 직경 0.24m인 agitated pan dryer에서 DR_{max} data[11]와 회분식 유동층에서 DR_{max} data[12], 매체유동층에서 전분[5] data를 함께 도시하였다. 유속이 건조 속도에 미치는 영향을 나타낸 것이 Fig. 7이다. 역시 비교를 위하여 전분[5] data를 도시하였다. DR_{max} 는 전분이든 PMMA beads이든 매체입자와 미세입자의 질량비 F/I ratio가 증가함에 따라 감소함을 볼 수 있다. 매체입자가 있는 없든[12] 유동층의 DR_{max} 는 agitated pan dryer보다 크다. 또 매체입자의 크기 d_p 가 커지면 건조속도에 영향을 끼치며 대체로 건조속도를 빠르게 만든다.

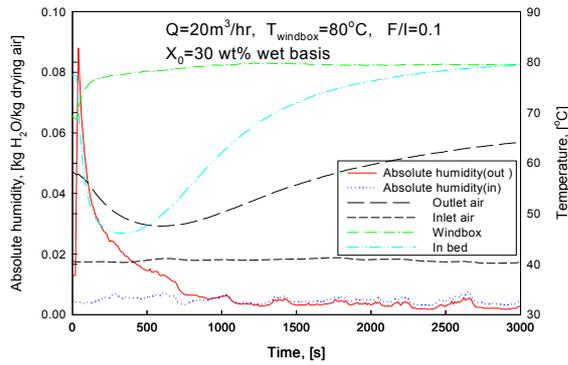


Fig. 4. 건조시간에 따른 Y와 T의 변화

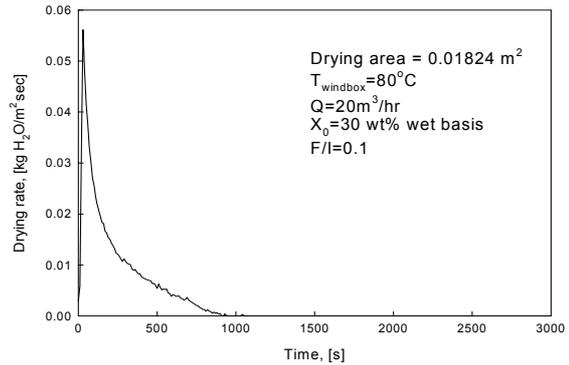


Fig. 5. 건조시간에 따른 DR_max 변화.

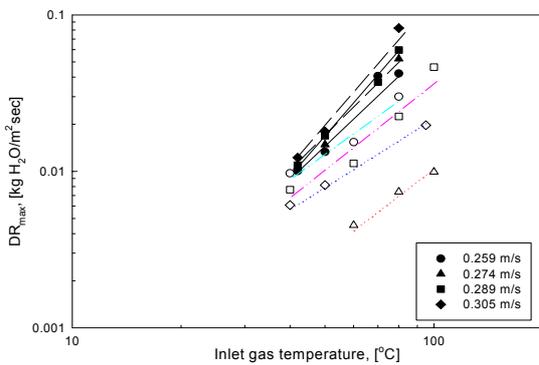


Fig. 6. 열풍 온도가 건조속도에 미치는 영향

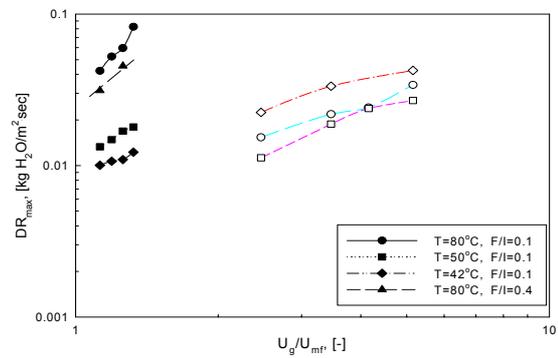


Fig. 7. 유입 유속이 건조속도에 미치는 영향.

| Symbol | d _p , [mm] | F/l, [-] | T _{gi} , [°C] | Remark |
|--------|-----------------------|----------|------------------------|------------------|
| Black | 0.59 | 0.1 | - | This work |
| | | 0.4 | | |
| ○ | 0.40 | 0.1 | 60 | Lee & Kim [5] |
| □ | 0.40 | 0.2 | 60 | |
| ◇ | 0.40 | 0.2 | 80 | |

| Symbol | d _p , [mm] | F/l, [-] | U _g , [m/s] | Remark |
|--------|---|----------|------------------------|------------------|
| Black | 0.59 | 0.1 | - | This work |
| ○ | 0.40 | 0.1 | 0.32 | Lee & Kim [5] |
| □ | 0.40 | 0.2 | 0.32 | |
| △ | Agitated pan dryer, Schlünder [11] | | | |
| ◇ | Fluidized bed dryer, Chandran et al. [12] | | | |

사용기호

A_c: area of column,[m²]; m_g: mass flow rate,[kg/s]; M_A: molecular weight,[kg/kmol];
 P: pressure,[Pa]; P_{eq}: saturated vapor pressure,[Pa]; T_{gi, go}: temp. of inlet or outlet gas,[°C];
 t: time,[s]; Y_{go, gi}: absolute humidity of outlet or inlet gas,[kg H₂O/kg dry air]

REFERENCES

[1] Geldart, D. (1972). *Powder Technol*, **6**(4), 201-215
 [2] Land, C.M. van't. (1984). *Chem. Eng.*, March, 53, 111-121.
 [3] Lee, D. H. and Kim, S. D. (1994). *Korean Chem. Eng. Research*, **32**(3), 463-468
 [4] Geldart, D. (1989) *AIChE Symposium*. Ser. 85, No. 270, 111-121
 [5] Lee, D. H. and Kim, S. D. (1993). *Chem. Eng. Technol.*, **16**(4), 263-269
 [6] Kudra, R. and Mujundar, A.S. (2000). *Advanced Drying Technologies*, New York.
 [7] Grbavcic, Z.B., Z.L. Arsenijevic and R.V. Garic-Grulovic. (2004). *Drying Technology*, 22(8), 1793-1812
 [8] Kato, K., Rakarada, T., Koshinuma, A., Kanazawa, I. and Sugihara, T. (1989). *Fluidization*, vol. VI. 351-358
 [9] Kato, K., Takarada, T., Matsuo, N., Suto, T. and Nakagawa, N. (1991). *Int. Chem. Eng.*, 34, 605-610
 [10] Nakazato, T., Li, J., Mitsui, H., Sawada, S. and Kato, K. (2002). *Powder Technology*, 146, 46-55.
 [11] Schlunder, E.-U. (1985). *Drying '85* (Toei, R., Mujumdar, A.S., EDS), 75-83 .
 [12] Chandran, A. N., Rao, S.S. and Varma, Y.B.G. (1990). *AIChE J.* **36**(1), 29-38.