

매체유동층에서 PVC 수지의 건조특성

이동현 · 김상돈[†]

한국과학기술원 화학공학과
(1994년 1월 10일 접수, 1994년 2월 26일 채택)

Drying Characteristics of PVC Resin in an Inert Medium Fluidized Bed

Dong Hyun Lee and Sang Done Kim[†]

Dept. of Chem. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology,
371-1, Kusung-dong, Yuseong-ku, Taejon 305-701, Korea
(Received 10 January 1994; accepted 26 February 1994)

요 약

매체유동층 건조기에서 열풍온도(80-110°C), 열풍유속(0.32-0.67 m/s)과 PVC resin 공급속도(0.048-0.192 kg/hr)가 건조효율에 미치는 영향을 내경 0.083 m, 높이 1.2 m인 stainless steel column에서 결정하였다. 매체유동층에서 건조효율은 PVC resin 공급속도에 따라서는 증가하지만 열풍온도와 유속에 따라서는 감소하였다. 또한 유동층으로 유입되는 열풍의 질량유속과 건조처리된 PVC resin의 질량유속의 비인 mass loading에 따라서는 건조효율이 증가하였다. 매체유동층에서 PVC 수지의 건조효율을 mass loading과 Kossovich 수로 표현된 무차원관계식으로 제시하였다.

Abstract—The effects of the inlet gas temperature(80-110°C), the gas velocity(0.32-0.67 m/s) and the feed rate of PVC resin(0.048-0.192 kg/hr) on the drying efficiency have been determined in a 0.083 m-ID×1.2 m-high stainless steel column. The drying efficiency in an inert medium fluidized bed increases with increasing the feed rate of PVC resin, but it decreases with increasing the inlet gas temperature and gas velocity. The drying efficiency increases with increasing the mass loading which is the mass ratio of inlet gas to the dried PVC resin from the bed. The drying efficiency of PVC resin in an inert medium fluidized bed has been correlated with the mass loading and Kossovich Number.

1. 서 론

최근 미세입자의 사용은 그들의 독특한 물리적 특성에 의하여 ceramics, electronics, polymer, 식품 등 많은 공업분야에 그 사용이 증가되고 있다. 미세입자는 종종 액체용매안에서 생성되므로 건조과정을 이용하여 분리된다. 그러므로 미세입자를 건조할 수 있는 효과적인 건조기를 개발하는 것은 매우 중요하다[1].

Geldart[2]는 고체입자의 크기와 종류에 따라 유동

화되는 현상을 주의깊게 관찰한 결과 group A에서 D까지 4가지 group으로 분류하였다. 본 연구에 사용되는 입자는 Geldart 분류에 따르면 group C 입자로서 그 특징은 입자크기가 매우 미세하여 비표면적이 크고 cohesive force가 강하여 입자들간의 응집현상이 일어나 유동화시키기가 어렵다.

Group C 입자들로 분류될 수 있는 미세입자들의 일반적인 건조방법으로는 agitated pan dryer, pneumatic transportation에 의한 기류건조기, rotary dryer, spray

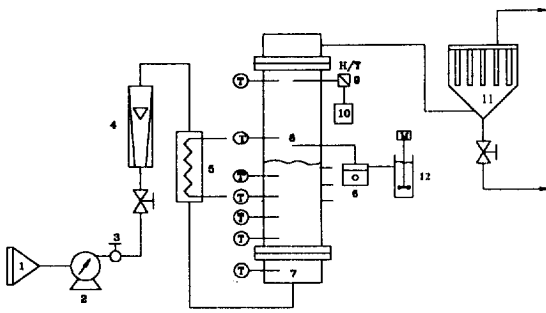


Fig. 1. Experimental apparatus of continuous drying in an inert medium fluidized bed dryer.

- | | |
|-----------------------|--------------------------------|
| 1. Air filter | 8. Main bed |
| 2. Compressor | 9. Hygrometer |
| 3. Pressure regulator | 10. Personal computer (IBM-AT) |
| 4. Rotameter | 11. Bag filter |
| 5. Air preheater | 12. Reservoir |
| 6. Latex feed pump | |
| 7. Air box | |

dryer 등이 사용되고 있다[3]. Agitated pan dryer는 용매회수가 용이하고 액체나 slurry 상태에서도 건조가 가능하다는 장점이 있으나 처리용량이 작고 wet cake의 교반에 의한 동력소모가 많다[3]. 기류건조기는 회박상에서 기체와 고체간의 열전달이 일어나므로 총괄열전달계수가 매우 작고 입자내부에 있는 수분제거가 어려우며 scale-up과 scale-down이 용이하지 못하므로 설계상에도 커다란 어려움이 있다. Rotary dryer는 건조기 표면에 시료의 부착현상과 drum과 피건조물 전체를 기계적으로 회전시켜야 하므로 동력비가 크게 소모된다. 분무건조기는 액체 또는 slurry 상태인 피건조물의 처리가 가능하지만 단위체적당 처리량이 적고, 공급된 latex를 균일하게 분산시키기 위하여 고속회전을 하는 atomizer의 유지보수가 어려우며 건조기표면에 피건조물의 부착성에 의하여 열에 약한 식품이나 고분자의 건조시 특별한 주의가 필요하다. Jariwara와 Hoelscher[4]는 전분의 산화열분해에서 전분의 유동특성을 개선하기 위하여 모래를 무게비로 1:1로 사용한 결과 매우 양호한 유동특성을 얻었다고 보고하였다. 전분의 산화열분해시 사용한 모래는 유동특성을 개선하기 위한 유동화 매체인 동시에 산화반응에서 생성된 반응열을 제거하기 위한 열전달매체로 작용한다. 매체를 이용한 유동층 건조기는 유동화 및 열전달 매체인 inert particle를 유동화시키면서 미세입자를 건조시키고 건조된 미세입자는 열풍과 같이 유동층 밖으로 이송된 후 포집되므로써 기류건조기나 rotary 건조기의 단점을 해결하면서 총괄 열전달계수를 상승시킬 수 있다.

Table 1. Ranges of the experimental variables in continuous drying

No.	Variable	Unit	Operating ranges
1	Gas temperature	°C	80, 90, 100, 110
2	Gas velocity	m/s	0.32, 0.45, 0.54, 0.67
3	Feed rate of PVC resin	kg/hr	0.048, 0.096, 0.144, 0.192

본 연구에서는 열에 민감하고 비표면적이 크며 응집력이 있는 PVC resin을 유동화 시키면서 건조할 수 있는 매체입자를 이용한 유동층건조기의 조업조건(열풍유속, 열풍온도, PVC resin의 공급속도)에 대한 건조특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

Fig. 1은 연속식 매체유동층 건조장치의 개략도를 나타내었다. 유동층은 직경 0.083 m이고 높이 1.2 m인 stainless steel로 제작되었다. 열풍의 분배기로는 직경 3.0 mm이고 20 mm pitch인 19개의 구멍이 균일하게 배치된 다공판을 사용하였다. Compressor로부터의 공기가 oil filter와 regulator를 통과한 후 공기예열기(air preheater)를 통하여 일정온도로 유지되면서 분배기 아래 windbox로 공급되었다. 열풍의 유량은 유량계를 사용하여 측정되었다. 주탑과 배관은 열손실을 방지하기 위하여 단열재(kaowool)를 사용하여 단열시켰다. 매체 입자로는 0.4 mm인 glass beads를 사용하였으며 미세 입자로는 평균입경이 1.0 μ m인 PVC resin을 사용하였다. PVC resin이 물에 혼합된 latex는 정체층높이가 0.2 m인 매체입자가 유동화되고 있는 유동층에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 micro-tube pump(Masterflex, Cole Parmer)를 이용하여 주입되었다. Latex 공급을 위한 nozzle은 분배기위 0.63 m에 설치되었다. 유동층안으로 공급된 미세입자는 Lee와 Kim[5]이 발표한 건조메카니즘에 따라 매체입자에 균일하게 분산된 후 열풍에 의하여 건조된다. 건조된 미세입자는 매체입자와의 종말속도(terminal velocity) 차에 의하여 유동층 밖으로 유출된 후 bag-filter에서 포집된다. 유동층내의 온도분포는 분배기의 상부 측방향으로 5 cm 간격으로 4곳에서 T-type 열전대로 측정되며 유동층 탑상부에서도 배출되는 air의 온도를 측정한다. 열풍의 입출구 온도는 windbox와 분배기위 0.7 m에서 측정되었다. 열풍의 습도는 건구온도와 습구온도를 이용하여 측정하였다. 연속식 건조실험의 실험변수와 변수범위를 Table 1에 나타내었다.

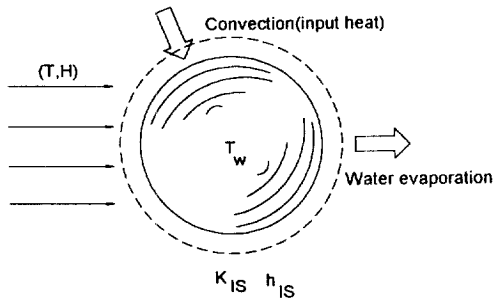


Fig. 2. Wet bulb temperature.

2-1. 습구온도

Fig. 2에 나타난 바와 같이 한 개의 액적을 어떤 온도, 습도의 공기흐름중에 방치하였을 때 액적은 주위로부터 열을 받아 액적표면에서 물의 증발에 의하여 증발잠열이 이탈된다. 그 결과 액적온도는 동적평형온도에 급속히 접근한다. 만약 주위에서의 열전달이 대류전열인 경우 그 동적 평형온도를 습구온도라 한다. 액적표면의 가스측 전열계수를 h_{IS} , 물질이동계수를 k_{IS} , 물의 증발 잠열을 λ , 유입열량은 전부 물의 증발에 사용된다고 하면 다음 식이 성립된다.

$$h_{IS}(T - T_w) = k_{IS}(H_w - H)\lambda \quad (1)$$

이 식중에서 h_{IS}/k_{IS} 의 값에 대해서는 Chilton-Colburn의 상관식이 성립된다[6].

$$\frac{h_{IS}}{k_{IS}} = C_H (Sc/Pr)^{2/3} \quad (2)$$

여기서 Sc 는 Schmidt 수이며 Pr 은 Prandtl 수이다. 특히 공기-물계에서는 다음의 Lewis의 관계가 성립한다[6].

$$\frac{h_{IS}}{k_{IS}} = C_H \left(\frac{0.62}{0.70} \right)^{2/3} \approx C_H \quad (3)$$

따라서 식 (1)은 식 (4)로 된다.

$$\frac{H_w - H}{T - T_w} = \frac{C_H}{\lambda} \quad (4)$$

T 와 T_w 를 측정하면 위 식을 이용하여 H 가 계산된다.

2-2. 건조효율

매체유동층에서 건조된 PVC resin은 입자내부가 비다공성이므로 유동층 밖으로 유출되는 PVC resin의 수분함량은 무시할 정도로 적다. 출구에서 PVC resin의 수분농도가 무시할 정도로 적으므로 정상상태에서 에너지수지와 물질수지식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

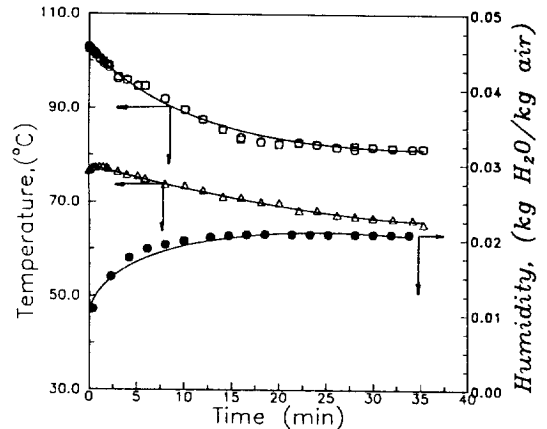


Fig. 3. Time progresses of temperatures at each point and humidity of outlet gas.

○: T_b , □: T_{g2} , △: T_{bf} , ●: H_2

$$F_s x_f = \rho_g U_g A_i H_2 - \rho_g U_g A_i H_1 \quad (5)$$

$$F_s (C_{ps} + C_{pw} x_f) (T_{g2} - T_s) + F_s x_f \lambda = \rho_g A_i U_g C_H T_{g1} - \rho_g A_i U_g C_H T_{g2} \quad (6)$$

여기서 F_s 는 PVC resin의 공급속도이며 x_f 는 미세입자의 수분농도이다. 식 (5)와 (6)으로부터 출구온도와 습도를 계산할 수 있다. 그러므로 건조효율은 식 (7)과 같이 계산될 수 있다.

$$\eta_d = \frac{H_2 - H_1}{H_w - H_1} \quad (7)$$

여기서 H_1 와 H_2 는 각각 입출입 열풍의 절대습도를 나타내며, H_w 는 유입열풍의 포화습도이다.

3. 결과 및 고찰

출구열풍온도(T_{g2}), bag filter 온도(T_{bf}), 출구의 열풍습도(H_2)와 층온도(T_b)를 건조시간의 함수로 Fig. 3에 나타내었다. 유입 열풍온도는 100°C, 유속은 0.45 m/s이고 PVC resin의 공급속도는 0.048 kg/hr이다. 또한 유동층으로 공급되는 PVC resin의 수분함량(x_f)은 1.5이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 층온도(T_b), 출구열풍온도(T_{g2})와 bag filter 온도(T_{bf})는 건조시작 20분까지 시간에 따라 점차로 감소하다가 일정해진다. 한편 출구의 열풍습도(H_2)는 건조시간에 따라 점차 증가하다가 약 5분이 경과되면 일정해진다. 그러므로 온도보다는 열풍습도가 정상상태에 도달되는 시간이 짧으며, 현재 system에서 정상상태를 유지하기 위해서는 약 20분 정도의 시간이 필요하다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 출

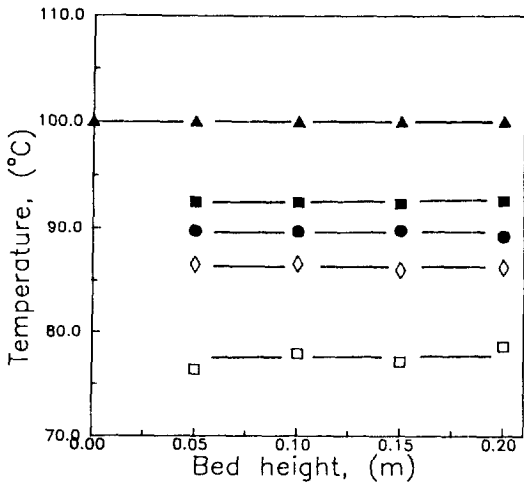


Fig. 4. Axial distribution of temperature in an inert fluidized bed.

	F_s (kg/s)	U_g (m/s)
●	0.048	0.32
■	0.048	0.45
□	0.096	0.45
◇	0.096	0.67
▲	No PVC latex feeding	

구열풍온도가 층온도와 거의 같은 온도를 나타내므로 층내에서의 열손실이 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 그러나 bag filter에서 열풍온도는 층온도보다 약 20°C 정도 낮으므로 bed와 bag filter 사이에서 열손실이 크다는 것을 알 수 있다.

유입열풍의 온도가 100°C로 일정할 때 축방향으로 층내 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 참고로 latex가 공급되지 않는 상황에서의 층내 온도분포도 함께 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 층내 온도분포는 층높이에 따라 일정하고 기상유속이 증가함에 따라 층온도가 상승함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 유동층내에서 고체입자의 축방향 혼합이 격렬하여 균일한 층내 온도분포를 나타내며, 이것이 공업적으로 유동층반응기가 많이 사용될 수 있도록 하는 중요한 잇점중의 하나이다[7]. 또한 PVC resin의 공급속도(수분함량 1.5 kg H₂O/kg dry PVC)가 증가함에 따라 유동층내 공급되는 수분의 양이 증가되므로 층내 온도가 감소한다.

건조효율에 대한 기상유속의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 일정한 PVC resin의 공급속도에서는 건조될 수 있는 수분의 양이 일정하고, 일정한 열풍온도에서 습구온도가 정해 지므로 기상유속이 증가함에 따라 상대습도가 감소하여 건조효율은

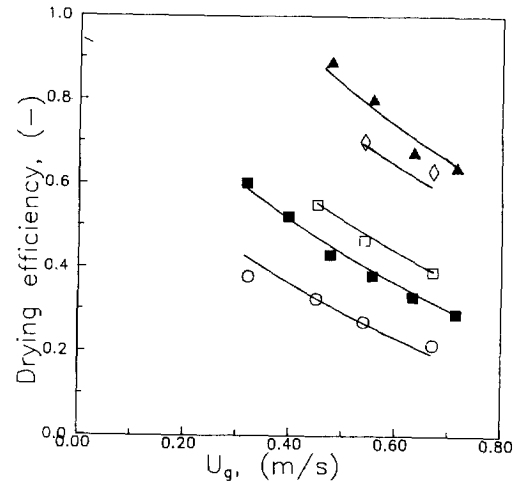


Fig. 5. Effect of gas velocity on drying efficiency in the bed.

	T_{g1} (°C)	F_s (kg/s)	x_f (-)	
○	80.0	0.048	1.5	This work
◇	80.0	0.048	1.5	“
□	100.0	0.096	1.5	“
▲	130.0	0.212	0.6	Nakagawa et al. (1992)
■	130.0	0.097	0.6	“

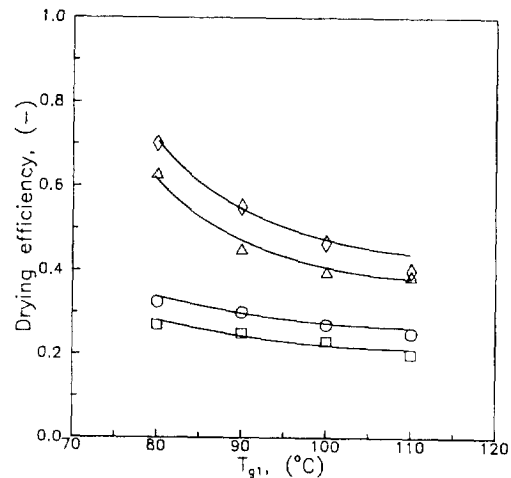


Fig. 6. Effect of inlet gas temperature on drying efficiency in the bed.

	F_s (kg/s)	U_g (m/s)
○	0.048	0.32
□	0.048	0.54
△	0.096	0.67
◇	0.096	0.54

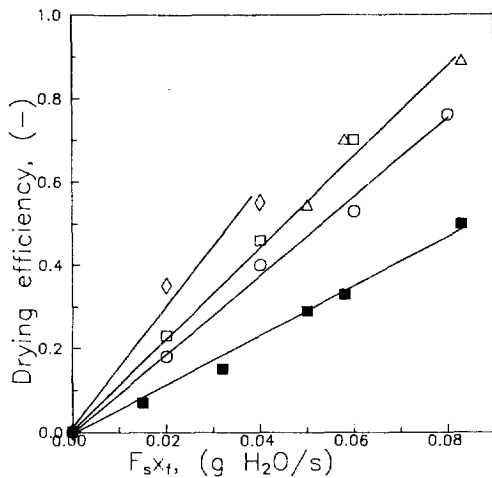


Fig. 7. Effect of the moisture feed rate on drying efficiency in the bed.

	T_{g1} (°C)	U_g (m/s)	
◇	100.0	0.32	This work
□	100.0	0.54	“
○	100.0	0.67	“
△	130.0	0.32	Nakagawa et al. (1992)
■	130.0	0.64	“

감소한다. 또한 Nakagawa 등[1]도 일정한 유입열풍온도(130°C)에서 기상유속에 따른 건조효율을 측정하여 기상유속에 따라 건조효율이 감소함을 발표하였다. 그러나 유입열풍온도가 80°C 이고 PVC resin의 공급속도가 0.096 kg/hr 일 때 유속이 0.45 m/s 보다 작으면 유동층으로 공급된 latex는 건조되지 못하고 매체입자와 함께 덩어리(lump)를 형성하여 연속조업이 유지되지 못한다.

건조효율에 대한 유입되는 열풍온도의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 건조효율은 일정한 기상유속에서 유입되는 열풍온도에 따라 감소함을 알 수 있다. 일정한 latex feed rate에서는 건조될 수 있는 수분량이 일정한데 유입되는 열풍온도가 증가함에 따라 수분을 건조하는데 사용된 열량이 감소되고 출구열풍온도의 상승을 유도하므로 건조효율은 감소한다.

건조효율에 대한 PVC latex에 포함된 수분공급속도의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 유입되는 열풍의 온도는 100°C 이고 기상유속이 0.32, 0.54와 0.67 m/s일 때 PVC resin의 수분함량이 1.5(kg H₂O/kg dry solid)이므로 PVC resin의 공급속도가 증가하면 건조되어야 할 수분의 양이 증가되므로 출구열

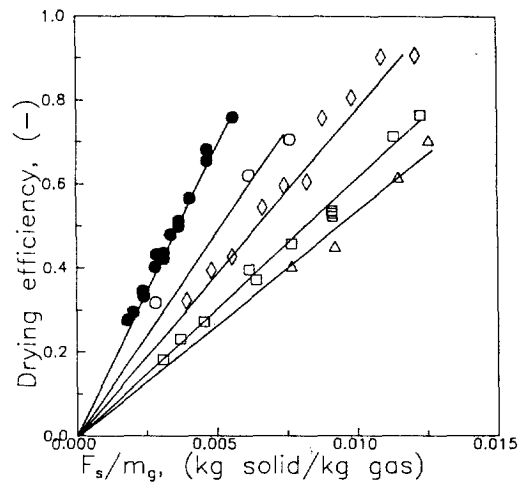


Fig. 8. Effect of the mass loading on the drying efficiency in the bed.

	T_{g1} (°C)	x_f (-)	
○	80.0	1.5	This work
□	100.0	1.5	“
△	110.0	1.5	“
◇	130.0	0.6	Nakagawa et al. (1992)
●	130.0	1.0	“

풍의 상대습도가 증가된다. 그러므로 PVC resin의 공급속도가 증가함에 따라 건조효율이 증가함을 알 수 있다. 또한 같은 온도(100°C)에서 기상유속이 감소함에 따라 건조효율은 증가한다. 이와 같은 결과는 activated alumina에서 건조효율을 측정한 Nakagawa 등[1]의 결과와 일치함을 알 수 있다. 그러므로 PVC latex에 포함된 수분공급속도가 증가함에 따라 건조효율이 증가함을 알 수 있다.

건조효율에 대한 mass loading의 영향을 Fig. 8에 나타내었다. Strumillo와 Lopez-Cacicedo[8]는 건조기로 유입되는 열풍의 질량유속과 건조처리된 건조물의 질량유속의 비를 mass loading이라 하였다. 일반적 건조기인 rotary 또는 band 건조기에서 mass loading이 증가함에 따라 건조효율이 증가하다가 maximum 건조효율이 얻어진 후에 감소하는데 유동층 건조기에서는 de-fluidization 현상이 일어나는 시점의 건조효율이 최대값을 나타낸다고 할 수 있다. 일정한 유입열풍온도에서 mass loading이 증가함에 따라 건조효율이 증가하였다. 이와 같은 결과는 powder-particle 유동층에서 유입되는 열풍의 온도가 130°C 일 때 activated alumina(1.8, 13.0 μm)와 SiO₂ flux(2.6 μm)에서 얻은 Nakagawa 등[1]의 실험결과와도 일치하였다. 또한 rotary 건조기에서 유

입되는 열풍이 233, 344와 455℃ 일 때 wood의 수분함량이 20 wt%에서 4 wt%까지 건조되는 Strumillo와 Lopez-Cacicedo[8]의 건조결과와도 일치하였다.

4. 상관식

매체입자를 이용한 유동층에서 PVC 수지의 건조효율에 대한 각 조업변수의 영향을 결정하기 위하여 본 연구의 실험자료로부터 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$\eta_d = 6.94 \times 10^2 U_g^{-0.746} T_{g1}^{-1.169} F_s^{1.023} \quad (8)$$

식 (8)의 상관계수는 0.98이고 표준편차는 0.08이다. 또한 무차원 상관식을 제시하기 위하여 유동층으로 유입되는 열풍의 질량유속과 건조처리된 PVC 수지의 질량유속의 비인 mass loading과 Kossovich 수를 사용하여 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\eta_d = 4.150 \times 10^1 \left(\frac{F_s}{m_g} \right)^{0.066} \left(\frac{\lambda x_f}{C_{ps} \Delta T_m} \right)^{-0.852} \quad (9)$$

식 (9)의 상관계수는 0.90이고 표준편차는 0.18이다. 식 (8)과 (9)의 실험변수범위는 $0.32 \leq U_g \leq 0.67$ m/s, $80 \leq T_{g1} \leq 110^\circ\text{C}$, $0.048 \leq F_s \leq 0.192$ kg/hr이다.

5. 결 론

일반 유동층에서 건조되지 않는 Geldart group C 입자인 PVC resin(1.0 μm)이 매체유동층을 이용하여 건조됨을 확인하였다. 매체유동층에서 건조효율이 PVC resin의 공급속도에 따라서는 증가하지만 열풍온도와 유속이 증가함에 따라서는 감소하였다. 또한 유동층으로 유입되는 열풍의 질량유속과 건조처리된 PVC resin의 질량유속의 비인 mass loading에 따라서는 건조효율이 증가하였다. 매체유동층에서 PVC 수지의 건조효율을 mass loading과 Kossovich 수로 표현된 무차원관계식으로 제시하였다.

감 사

본 연구는 학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 대하여 감사사를 드립니다.

사용기호

C_H	: humid heat [kJ/kg dry gas K]
C_{ps}	: specific heat of fine particle [kJ/kg K]
C_{pw}	: specific heat of water [kJ/kg K]
F_s	: feed rate of PVC resins [kg PVC/hr]
H_1	: humidity of inlet gas [kg H ₂ O/kg dry air]
H_2	: humidity of outlet gas [kg H ₂ O/kg dry air]
h_{JS}	: gas to particle heat transfer coefficient [J/s m ² K]
k_{JS}	: gas to particle mass transfer coefficient [1/s]
m_g	: mass velocity of inlet gas [kg/hr]
T_b	: bed temperature [°C]
T_{bf}	: bag filter temperature of outlet gas [°C]
T_{g1}	: temperature of inlet gas [°C]
T_{g2}	: temperature of outlet gas [°C]
T_s	: temperature of inlet solid [°C]
T_{w1}	: wet bulb temperature of inlet gas [°C]
ΔT_m	: mean temperature difference between heat transfer medium and material [°C]
U_g	: superficial gas velocity [m/s]
x_f	: moisture content of feed latex [kg H ₂ O/kg PVC]
ρ_g	: gas density [kg/m ³]
λ	: latent heat of vaporization [J/kg H ₂ O]

참고문헌

1. Nakagawa, N., Ohsawa, K., Takarada, T. and Kato, K.: *J. of Chem. Eng. Japan*, **25**, 495(1992).
2. Geldart, D.: *Powder Technol.*, **7**, 285(1973).
3. Land, C. M. van't: *Chem. Eng.*, **March**, 53(1984).
4. Jariwara, S. L. and Hoelscher, H. E.: *Ind. Eng. Chem.*, **9**, 278(1970).
5. Lee, D. H. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Tech.*, **16**, 263(1993).
6. Perry, R. H. and Green, D. W.: *Perry's Chemical Engineering Handbook*, chap. 12, 3(1984).
7. Rowe, P. N. and Sutherland, K. S.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **42**, T55(1964).
8. Strumillo, C. and Lopez-Cacicedo, C.: *Handbook of Industrial Drying*, Ed. A. S. Mujumdar, 823(1986).