

이성분계 물질을 함유한 다공성 물질 건조공정의 선택성

김위경[†] · 강안수^{*}

한국원자력연구소 열유동시험실

^{*}명지대학교 화학공학과

(1995년 4월 24일 접수, 1995년 6월 30일 채택)

Selectivity of the Drying Process of Porous Materials Containing Binary Mixture

Wee Kyong Kim[†] and An Soo Kang^{*}

Thermal Hydraulics Department, Korea Atomic Energy Research Institute

^{}Department of Chemical Engineering, Myong Ji University*

(Received 24 April 1995; accepted 30 June 1995)

요 약

이성분계 혼합물을 함유하는 다공성 물질의 건조시 잔류하는 혼합물의 농도는 어떤 한 성분이 우선적으로 제거되는 건조공정의 선택성에 의하여 변한다. 건조공정의 선택성은 주어진 건조조건에서의 평형상태, 기상 및 액상측 물질전달 현상에 의존한다. 이로 인하여 공비점을 가지는 혼합물의 건조시 건조공정의 선택성에 의하여 휘발성이 낮은 물질이 우선적으로 제거되기도 한다. 특히, 액상측 물질전달 현상은 정속구간과 감속구간에서 서로 상이하며, 다공성 물질의 특성에도(모세관의 크기 및 길이) 좌우된다. 이러한 특성때문에 액상측 물질전달 현상이 선택성에 미치는 영향은 매우 중요하다. 본 연구에서는 액상측 물질전달 현상이 선택성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 건조물체 내의 농도 및 함량분포를 측정하였다.

Abstract—The concentration of the mixture changes during the drying process of porous materials containing binary mixture, when a component is removed preferentially, so called the selectivity of the drying process. The selectivity depends on the phase equilibria, gas- and liquid-side mass transfer for given drying conditions. For this reason the less volatile component can be removed preferentially during the drying of porous materials containing binary mixture with azeotrope point. The liquid-side mass transfer rate of the constant rate period differs from that of the falling rate period. The liquid-side mass transfer rate depends on the characteristic of the porous materials (size and length of the capillary). The influence of the liquid-side mass transfer on the selectivity is, therefore, very important. In this study, the distribution of the concentration and the content of the binary mixtures in the porous materials were determined to investigate the influence of the liquid-side mass transfer on the selectivity.

1. 서 론

건조는 대부분의 생산공정 중 마지막 단계의 단위공

정이며, 열을 가함으로써 고체 물질에 잔존하는 수분 또는 유기 용매의 함량을 감소시키는 공정이다. 잔류하는 액체가 수분과 같이 단일 성분인 경우 이미 많은

연구가 진행되어 왔다[1]. 그러나 유가공 제품, 의약품과 같은 생산공정에서는 잔류성분이 대부분 유기 용매인 혼합물이다. 이러한 경우 건조조건(건조 공기의 온도, 속도 및 습도)을 최적화하기 위해서는 건조속도(drying rate : \dot{m} [kg/m²h])에 관한 지식뿐만 아니라, 잔류하는 성분의 조성변화도 고려하여야 한다. 또한 조성의 변화에 대한 지식은 폭발성이 있는 유기 용매의 건조시 배기가스에 포함된 유기용매의 농도의 초과로 인한 폭발의 위험성을 배제할 수 있는 중요한 역할을 하며, 무엇보다도 건조 공기에 필요한 성분을 추가하여 제품에 함유하는 성분의 양을 조절하는 건조공정(additive drying process)을 사용하여 제품의 질을 향상시키는 역할을 하고 있다.

잔류성분의 조성은 건조조건에 따라 어떤 한 성분이 우선적으로 제거되는 건조공정의 선택성(selectivity)에 의하여 변하게 된다. 건조공정의 선택성은 일반적으로 열역학적 평형상태와 기상 및 액상측 물질전달 현상에 의존한다. 또한 같은 건조공정에서도 선택성은 건조속도가 일정한 정속구간(constant rate period)과 감속구간(falling rate period)에서의 물질전달 현상이 상이하기 때문에 변하게 된다. 또한 다공성 물질이 공비점을 가지는 유기 혼합물을 함유할 경우 건조공정이 비선택적으로 일어나는 의사 공비점(pseudo-azeotrope point)이 존재한다. 의사 공비점의 농도는 상대 휘발도, 기상측 물질전달 계수 및 건조 공기의 건조기 내 체류 시간에 의하여 결정되며, 공비점과 의사 공비점에서의 농도 차이로 인하여 휘발성이 낮은 성분이 우선적으로 제거되는 현상이 일어날 수 있다.

Schluender와 Turner[2,3]의 연구 결과에 의하면 액상측에 농도구배가 형성되지 않은 건조 초기상태와 sample의 크기가 액상측에 형성된 농도구배의 두께보다 작은 경우에는 액상측 물질전달 현상이 미치는 영향을 무시할 수 있으나, 일단 sample 내에 농도구배가 형성되면 선택성은 액상측 물질전달 현상에도 의존한다고 하였다. 이로 인하여 건조속도가 비교적 큰 정속구간에서는 건조공정이 비선택적으로 일어나며, 건조속도가 느린 감속구간에서는 선택적으로 일어난다. 이러한 현상은 sample이 무한히 클 경우 sample 내에 일정한 농도구배가 형성되었을 때 적용할 수 있다. 일반적으로 sample의 크기는 한정되어 있으며, sample 내의 농도구배는 시간에 따라 변하게 된다.

본 연구에서는 액상측 물질전달 현상이 다공성 물질 건조공정의 선택성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 sample 내에 형성되는 농도구배를 측정하였다. 이를 위하여 다공성 물질로 평균 직경이 225 μ m인 유리구슬을 사용하였으며 직경이 50 mm이고 깊이가 21 mm인

용기 안에 담아 사용하였다. 이성분계 혼합물은 isopropyl alcohol과 물을 사용하였으며, 이 혼합물은 1기압, 30°C에서 isopropyl alcohol의 농도가 0.64인 경우 공비점을 갖는다. 또한 건조공정의 선택성은 건조 시간에 따른 건조속도 및 잔류성분의 조성을 측정함으로써 결정할 수 있었으며, Turner의 연구 결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

건조공정의 선택도는 성분 1의 단위면적 당 상대건조속도[$\dot{r}_1(t)$: relative drying flux]와

$$\dot{r}_1(t) = \frac{\dot{N}_1(t)}{\dot{N}_1(t) + \dot{N}_2(t)} \quad (1)$$

성분 1의 몰농도 (\bar{x}_1)의 차로 표시된다

$$S_1(t) = \dot{r}_1(t) - \bar{x}_1(t) \quad (2)$$

식 (1)에서 $\dot{N}_i(t)$ 는 성분 i의 단위면적 당 몰 건조속도(molar drying flux [kmol/m²h])이다. Schluender[4]는 이성분계 혼합물의 자유 표면에서 단열증발 현상을 다공성 물질의 건조공정에 적용함으로써 건조공정의 상대건조속도를 다음과 같은 간단한 식에 의하여 계산하였다.

$$\dot{r}_1^2 + p(\bar{x}_1) \cdot \dot{r}_1 + q(\bar{x}_1) = 0 \quad (3)$$

여기에서 $p(\bar{x}_1)$ 와 $q(\bar{x}_1)$ 는

$$p(\bar{x}_1) = \frac{1 + (1 - K_g/\alpha_{12}) \cdot (\bar{x}_1 - K_l)}{(1 - K_g/\alpha_{12}) \cdot (1 - K_l)} \quad (4)$$

$$q(\bar{x}_1) = \frac{\bar{x}_1}{(1 - K_g/\alpha_{12}) \cdot (1 - K_l)} \quad (5)$$

이며, 이 식에는 열역학적 평형상태와 기상 및 액상측 물질전달 현상을 나타내는 α_{12} , K_g , K_l 의 세 가지 특성상수(characteristic number)들이 포함되어 있다. 상대 휘발도(relative volatility) α_{12} 는 기상이 이상기체로 이루어진 이상용액일 경우 다음과 같이 포화 증기압과 활동도 계수로 표현되며,

$$\alpha_{12} = \frac{\gamma_1(\bar{x}_1, T) \cdot p_1^*(T)}{\gamma_2(\bar{x}_1, T) \cdot p_2^*(T)} \quad (6)$$

기상측 물질전달을 표현하는 특성상수 K_g 는 기상측 물질전달계수 $k_{g,i}$ 와 건조공기의 유속 \dot{V}_g 의 함수인 각 성분의 기상측 NTU(Number of Transfer Unit)의 합수로 표현된다.

$$\frac{1}{K_g} = \frac{NTU_{g,1}}{1+NTU_{g,1}} \cdot \frac{1+NTU_{g,2}}{NTU_{g,2}} \quad (7)$$

여기에서 i 성분의 기상측 NTU 정의는 다음과 같다.

$$NTU_{g,i} = \frac{k_{g,i} \cdot A_{ph}}{\dot{V}_g} \quad (8)$$

K_g 의 값은 각 성분의 NTU 값이 0, 즉 건조 공기가 기-액 경계면에 접하는 시간이 짧으면 다음과 같은 간단한 식에서 예측할 수 있다[3].

$$\lim_{NTU \rightarrow 0} \frac{1}{K_g} = \frac{NTU_{g,1}}{NTU_{g,2}} = \frac{k_{g,1}}{k_{g,2}} = \left(\frac{D_{g,13}}{D_{g,23}} \right)^m \cong 0.384^m \quad (9)$$

여기에서 $D_{g,13}$, $D_{g,23}$ 은 성분 1과 2의 확산 계수이며, m 의 값은 유체의 흐름이 난류인 경우 0.58, 층류인 경우 1이다[2]. 건조물질 내부의 물질전달 현상을 표현하는 특성 상수 K_g 은 다음과 같다.

$$K_g = \exp\left(-\frac{v_l}{k_l}\right) \quad (10)$$

여기에서 v_l 과 k_l 은 각각 모세관 힘에 의한 유체전달 속도(liquid-phase bulk velocity)와 액상측 물질전달계수(liquid-phase mass transfer coefficient)이다.

$$v_l = \frac{\dot{N}}{A \cdot \Psi \cdot \rho_l} \quad (11)$$

이들 특성상수의 값에 따른 건조공정의 선택성은 다음과 같다.

2-1. 열역학적 평형 상태($NTU_{g,i} \rightarrow \infty$)

이러한 상태는 건조 공기와 건조물질과의 접촉 시간이 충분히 긴 경우 일어나며, 실질적으로 건조 공기의 속도가 매우 작을 경우 건조 공기는 수분 또는 유기 용매에 포화된 상태로 배출되는 것을 의미한다. 이러한 경우 식 (8)에 의하여 $NTU_{g,i}$ 의 값은 무한대이며($K_g \rightarrow 1$), 건조속도가 매우 작아 ($v_l \ll k_l$) K_g 의 값은 1이 된다. 즉, 건조과정은 기상 및 액상의 확산 현상에 의존하지 않고, 단지 열역학적 평형상태에 의하여 지배된다. 이러한 상태에서의 상대건조속도(relative drying flux)는 다음 식에서 계산할 수 있으며,

$$\dot{r}_1 = \frac{\alpha_{12} \cdot \tilde{x}_1}{1 + (\alpha_{12} - 1) \cdot \tilde{x}_1} \quad (12)$$

건조공정의 선택성은 식 (2)에 의하여 다음과 같다.

$$S_1 = \frac{(\alpha_{12} - 1) \cdot (1 - \tilde{x}_1) \cdot \tilde{x}_1}{1 + (\alpha_{12} - 1) \cdot \tilde{x}_1} \quad (13)$$

이 식으로부터 선택성은 상대 휘발도의 값에 따라 다음과 같은 값을 가진다.

- $\alpha_{12} > 1$ 인 경우 $S_1 > 0$
- $\alpha_{12} = 1$ 인 경우 $S_1 = 0$
- $\alpha_{12} < 1$ 인 경우 $S_1 < 0$

즉, isopropyl alcohol의 농도가 0.64인 경우(azeotrope point) 건조공정은 비선택성이 되며, 상대 휘발도가 1보다 큰 경우에는($\tilde{x}_1 < 0.64$) 휘발성이 큰 isopropyl alcohol이 우선적으로 제거된다.

2-2. $NTU_{g,i} \rightarrow 0$

기상과 액상의 접촉 시간이 충분히 크지 않을 경우 기-액 경계면에는 열역학적 평형상태에 이르지 못하고 건조 과정은 기상 및 액상측의 물질전달 현상에 의해서도 지배된다.

* $K_g \rightarrow 1$

건조속도가 매우 느릴 경우($v_l \rightarrow 0$) 식 (10)에 의하여 K_g 값은 1이 되며, 액상에는 농도구배가 형성되지 않는다. 이러한 경우 건조 과정의 상대건조속도 및 선택성은 열역학적 평형상수와 기상측 특성상수의 함수로 표시할 수 있다.

$$\dot{r}_1 = \frac{\tilde{x}_1}{K_g/\alpha_{12} + (1 - K_g/\alpha_{12}) \cdot \tilde{x}_1} \quad (14)$$

$$S_1 = \frac{(1 - K_g/\alpha_{12}) \cdot (1 - \tilde{x}_1) \cdot \tilde{x}_1}{K_g/\alpha_{12} + (1 - K_g/\alpha_{12}) \cdot \tilde{x}_1} \quad (15)$$

이 식으로부터 선택성은 열역학적 평형상수와 기상측

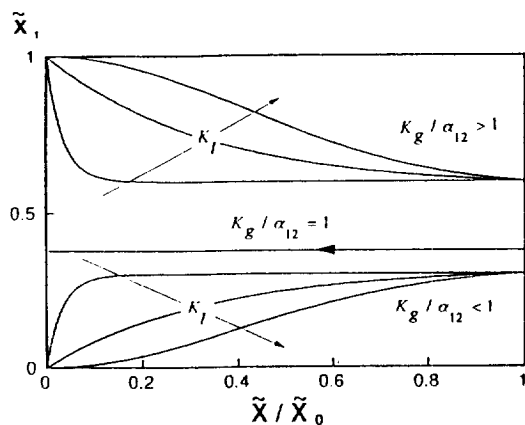


Fig. 1. Schematic diagram of the composition curves for gas- and liquid-phase diffusion-controlled drying process.

특성상수의 값에 따라 다음과 같은 값을 가진다.

- $K_g/\alpha_{12} > 1$ 인 경우 $S_1 > 0$
- $K_g/\alpha_{12} = 1$ 인 경우 $S_1 = 0$
- $K_g/\alpha_{12} < 1$ 인 경우 $S_1 < 0$

30℃의 isopropyl alcohol-water 혼합물의 경우 의사 공비점의 농도가 $\bar{x}_1 = 0.41$ 이므로[3] isopropyl alcohol의 상대 휘발도가 1보다 큰 경우에도($\bar{x}_1 < 0.64$) 기상측 특성 상수의 값에 따라 isopropyl alcohol보다 물이 우선적으로 제거될 수 있다. 각각의 경우에 해당하는 농도 변화도는 Fig. 1에 도식적으로 나타나 있다.

* $K_g \rightarrow 0$

액상측 확산계수가 작거나, 또는 상대적으로 건조속도가 빠를 경우 식 (10)에 의하여 K_g 의 값은 매우 작게 되며 각 성분의 물질전달 속도식으로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$K_g = \exp\left(-\frac{\dot{N}}{A \cdot \Psi \cdot \bar{\rho}_1 \cdot k_g}\right) = \frac{\dot{r}_1 - \bar{x}_{1,0}}{\dot{r}_1 - \bar{x}_{1,\infty}} \rightarrow 0 \quad (16)$$

식 (16)에서 상대건조속도는 초기 농도와 거의 같아 야만 한다. 즉, 선택성은 식 (2)에 의하여 0에 가까워 지는 것을 알 수 있다(Fig. 1 참조).

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 대류 건조장치의 개략도를 보여 주고 있다. 본 실험에서는 송풍기(BL1)를 통과한 대기 중의 공기를 여과기(F1, F2)와 건조기(molecular sieve: M1, M2)를 통과시켜 먼지 및 습기를 제거하여 건조매체로 사용하였다. 또한 습도계(MM)를 사용하여 건조기를 통과한 공기의 습도를 측정하였다. 건조기를 통한 공기가 습기를 많이 포함하였을 경우에 송풍기(BL2)와 열 저장 가열기(HT1, HT2)를 통과한 250-300℃의 공기를 사용하여 건조기를 재생하였다.

공기의 유량은 drying channel에서의 유속이 0.2 m/s가 되도록 orifice meter(O)와 valve를 사용하여 조절하였으며, 유입되는 공기의 온도(50, 90, 130℃)는 열 저장 가열기(HT3)를 사용하여 조절하였다. 단면이 150 × 150 mm인 drying channel(DC) 안에는 sample(S)이

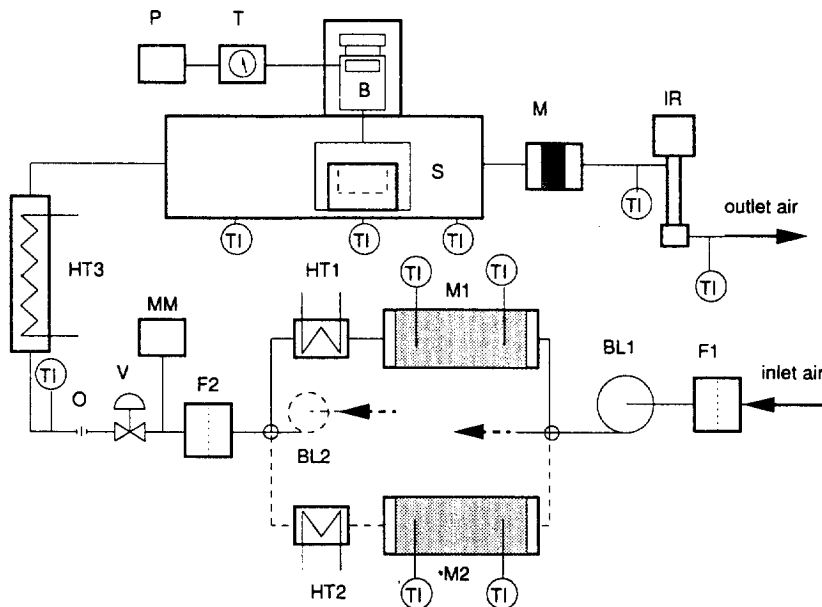


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental equipment.

BL1, 2: Blowers	F1, 2: Filters	T: Timer
HT1, 2, 3: Electrical resistance heaters	B: Balance	P: Printer
M1, 2: Molecular sieve	O: Orifice meter	IR: IR-gas analyzer
S: Sample	DC: Drying channel	MM: Moisture meter

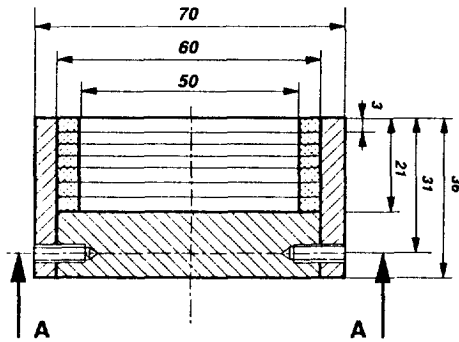
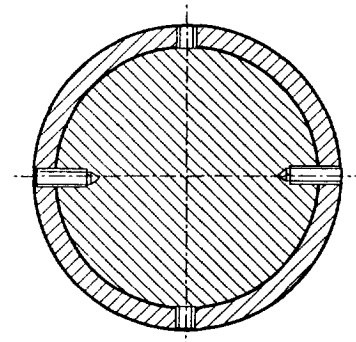


Fig. 3. Cross section of the sample cylinder.

저울(B)에 매달려 있어 sample의 무게 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 단위 시간당 감소하는 수용액의 양은 printer와 시계를 사용하여 기록하였으며, 이로부터 건조속도 곡선을 작성하였다. Drying channel은 열손실을 방지하기 위하여 유리섬유로 단열이 되어 있으며, drying channel 내의 유체의 흐름을 균일하게 하기 위하여 channel입구 부분에는 distributor가 설치되어 있다. Channel출구 부분에서 공기 중에 포함된 isopropyl alcohol의 농도는 IR 가스분석기를 사용하여 측정하였다. 가스분석기 앞에는 static mixer(M)를 설치하여 공기와 증발된 수용액의 증기가 충분히 혼합되도록 하였다.

본 실험에서는 다공성 물질을 모사하기 위하여 평균 직경이 225 μm 인 유리구슬 충전체를 사용하였다. 유리구슬 충전체 내의 잔류하는 성분의 양과 농도구배를 조사하기 위하여 Fig. 3에서 보여 주는 용기가 제작되었다. 이 용기는 직경이 70 mm인 원통 및 직경이 60 mm인 밀받침과 안쪽 직경이 50 mm이고 높이가 3 mm인 7개의 ring으로 구성이 되어 있다. 밀받침에 장치된 4개의 나사를 제거하면 밀받침을 밀어 올릴 수 있으며, 한 개의 ring 높이만큼 밀어 올린 후 하나의 ring에 들어 있는 유리구슬 충전체를 용기로부터 분리할 수 있다. 이러한 방법으로 임의의 시간이 지난 후 Drying channel로부터 용기를 꺼내어 7개 층으로 분리하였다.

이러한 방법으로 분리된 7개의 건조가 완전히 이루어지지 않은 유리구슬 충전체는 Fig. 4에서 보여 주는 증발과 응축을 반복하는 장치를 사용하여 다시 잔류성분과 유리구슬 충전체로 분리되었다. 이 장치의 작동 방법은 다음과 같다. 우선 7개로 분리된 것을 각각 시험관에 넣은 후 Fig. 4에서 보여 주는 장치 한쪽에 부착시키고 반대편에는 빈 시험관을 부착한다. Sample이 존재하는 시험관들을 액체질소를 사용하여 응고시킨 후



section A-A

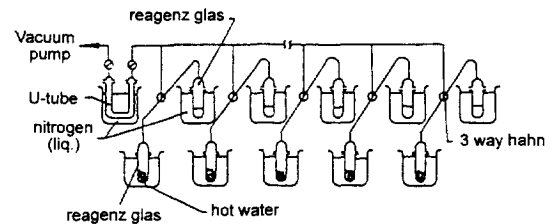


Fig. 4. Schematic diagram of the equipment for evaporation and condensation

장치 내에 존재하는 공기 및 습기를 진공펌프를 사용하여 제거한다. 이 과정이 끝난 후 밸브를 닫고 액체 질소를 빈 시험관쪽으로 옮긴다. Sample 쪽을 뜨거운 물로 가열하면 잔류성분이 증발되며, 증발된 잔류성분은 빈 시험관에서 응고되어 유리구슬 충전체와 잔류성분을 분리할 수 있다. 잔류성분의 농도는 밀도계를 이용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 건조속도 및 조성 곡선

Fig. 5-7은 서로 공기의 온도가 서로 다른 경우에 측정한 건조속도 및 잔류성분의 조성과 잔류하는 함량(또는 건조 시간)과의 상관관계를 보여 주고 있다. 잔류성분의 초기농도는 각각 0.0, 0.3, 0.6, 1.0이었으며, drying channel 내에서 건조공기의 속도는 모든 실험에서 0.2 m/s로 조정되었다. 공기의 온도는 50, 90, 130 $^{\circ}\text{C}$ 로 조절하여 건조속도가 선택성에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 유리구슬이 담긴 용기를 drying channel에 삽입할 때 온도의 영향을 줄이기 위하여, 삽입하기 전에 용기 및 유리구슬 충전체의 온도는 주어진 건조

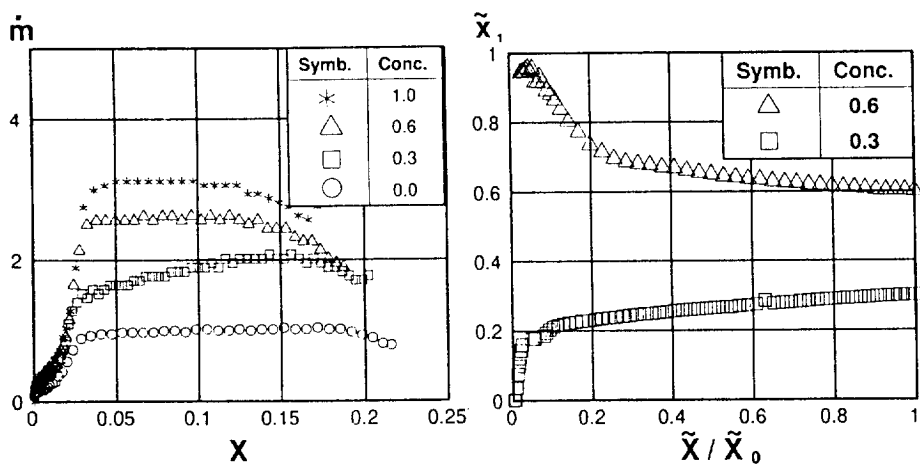


Fig. 5. Drying rate and composition curves for the air temperature 50°C.

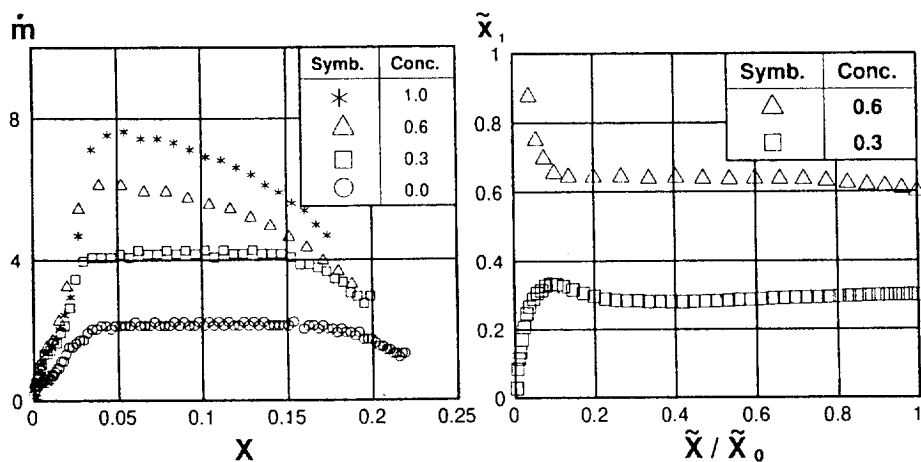


Fig. 6. Drying rate and composition curves for the air temperature 90°C.

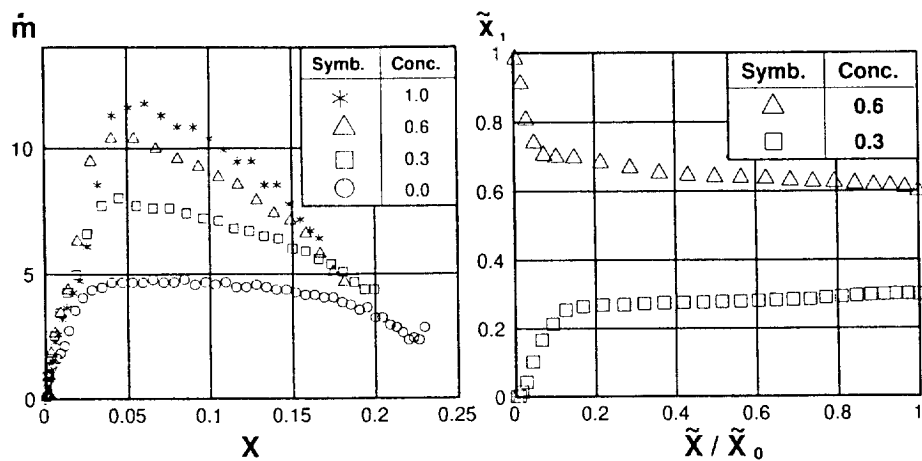


Fig. 7. Drying rate and composition curves for the air temperature 130°C.

조건의 단열포화온도(wet-bulb temperature)로 유지하였다.

잔류성분이 수분인 경우 정속구간이 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 모세관 힘에 의하여 충전체 내부로부터 잔류성분이 끊임없이 보충되어 증발 현상이 단지 충전체 상부 표면에서 일어나기 때문이다. 시간이 지남에 따라 잔류성분의 함량이 줄어들어 임계 수분 함량(critical moisture content) 이하로 되면 이미 건조된 부분에서의 열 및 물질전달 저항이 증가하며, 건조속도가 급격히 감소하는 감속구간이 시작된다.

순수한 isopropyl alcohol의 경우 Thurner의 실험결과와 마찬가지로 건조속도는 수분인 경우에 비하여 3배 정도 큰 것을 알 수 있다. 이는 isopropyl alcohol의 증발 잠열이($\Delta h_v = 670 \text{ kJ/kg}$) 물(2257 kJ/kg)보다 약 3배가량 작고 증기압이 높기 때문이다. 정속구간은 순수한 수분의 경우에 비하여 찾아 보기 어려운 것을 알 수 있다. 이는 건조속도가 순수한 수분인 경우에 비하여 높은 반면에 표면장력은 낮기 때문에 기인한다. 또한 본 실험에서는 건조가 충전체 상부에서만 일어나는 반면에, 유리섬유로 단열되어 있는 용기의 측면과 하부를 통하여 열이 전달되기 때문에 건조 초기에 건조속도가 상승하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 온도가 높을수록 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다.

잔류성분이 혼합물인 경우 정속구간의 건조속도 곡선은 순수한 성분의 두 곡선 사이에 놓여 있으며 곡선의 모양도 비슷한 것을 알 수 있다. 이는 잔류성분의 증발잠열이 일정하다는 것, 즉, 이 구간에서의 건조는 비선택성 또는 미약한 선택성이라는 것을 의미한다. 잔류성분의 조성 변화를 나타내는 오른쪽 그림들은 정속구간의 건조공정이 미약하나마 선택적으로 진행되고 있는 것을 보여 주고 있으며, 온도가 높을수록 선택성이 감소한다. 건조 물체의 두께(21 mm)가 액상에 형성되는 농도구배의 두께보다 상당히 크기 때문에 Thurner[2, 3]에 의하면 이 물체는 비선택적으로 진행되어야만 한다. 또한 이 그림들에서 감속구간의 선택성이 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 온도의 변화와 상관없이 초기농도가 0.3인 경우 isopropyl alcohol이 먼저 증발하는 것에 비하여, 초기농도가 0.6인 경우에는 이 혼합물의 azeotrope point는 isopropyl alcohol의 농도가 0.64임에도 불구하고 휘발성이 높은 isopropyl alcohol보다 수분이 우선적으로 증발하는 것을 알 수 있다.

본 실험에서는 건조 공기와 충전체 경계면 사이의 접촉 시간이 매우 짧기 때문에 열역학적 평형 상태가 도달하지 못하게 되며, 결국 NTU_g 는 0에 가까운 값을 가지게 된다. 이론적인 배경에서 고찰한 바와 같이 이러한 상태의 건조 과정은 K_g/α_{12} 과 K_i 의 영향을 받는다.

각각의 특성상수 값은 문헌[2, 7-9]을 이용하여 계산할 수 있다. 건조공정이 비선택적으로 일어나는 의사 공비점은 isopropyl alcohol의 초기 농도가 0.41일 경우에 나타난다. 그러므로 초기 농도가 0.3인 경우에는 K_g/α_{12} 의 값이 1보다 작아 isopropyl alcohol이 우선적으로 증발하지만, 초기 농도가 0.6인 경우에는 건조공정의 선택성은 1보다 크며, 이로 인하여 휘발성이 작은 수분이 우선적으로 증발한다. 또한 온도가 감소함에 따라 건조속도 또는 모세관 힘에 의한 유체전달 속도(v_i)가 감소하며, K_i 는 식 (10)에 의하여 증가하게 된다. 이로 인하여 건조의 선택성은 Fig. 5-7에서 보여 주는 바와 같이 온도가 감소함에 따라 강하게 나타난다. 건조 말기에는 건조의 선택성이 더욱 강하게 나타나는데, 이는 건조속도가 급격히 감소하였고, 상대적으로 확산길이 짧아져 물질전달계수가 증가하기 때문이다.

4-2. 잔류성분 및 조성 분포

Fig. 8은 건조 공기의 온도가 50°C 이고, 건조 공기의 속도가 0.2 m/s 인 경우, 잔류성분의 초기 농도가 각각 0.3 과 0.6인 유리구슬 충전체가 건조 시간이 5, 10, 20, 30, 55, 60, 120분이 경과하였을 때 7개의 층으로 분리된 충전체의 농도를 표시하였다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 초기 농도가 0.3인 경우 기-액 경계층에서의 isopropyl alcohol농도가 0.3보다 작지만, 초기 농도가 0.6인 경우 수분이 선택적으로 많이 증발되어 0.6보다 크다는 것을 명백히 알 수 있다. 또한 경계층 부분에서의 농도구배가 건조가 시작된 지 얼마 지나지 않아 형성되는 것을 알 수 있고, 시간이 증가함에 따라 농도구배가 급격하게 된다. 약 한시간 정도 시간이 흐르면 하부에 위치한 층의 농도도 변화하는 것을 알 수 있다. 이는

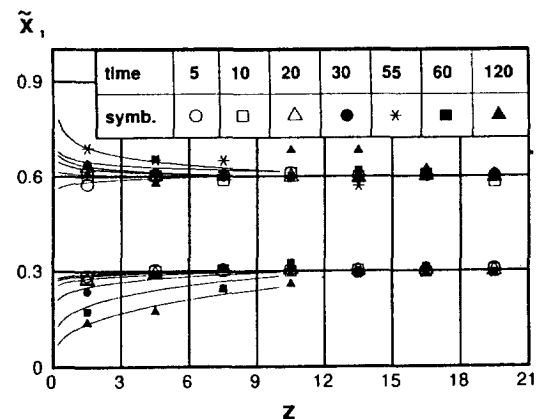


Fig. 8. Composition distribution in the sample (air temperature 50°C).

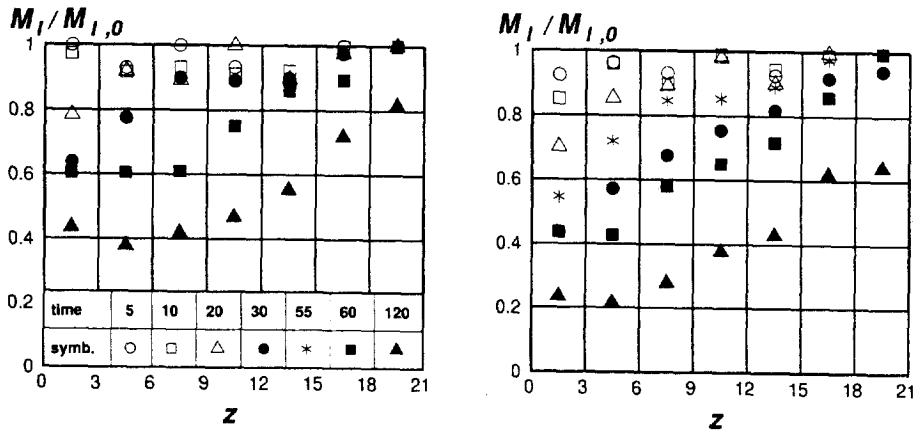


Fig. 9. Moisture distribution in the sample with the initial concentration of isopropyl alcohol 0.3 and 0.6 (air temperature 50°C).

용기의 크기가 한정되어 있기 때문에 나타나며, Turner가 반 무한대로 확장된 계에서 이론적으로 조사한 것과 다른 것을 의미한다. 즉, 액상에 형성된 농도구배의 두께가 건조 물체에 비하여 작기 때문에 정속구간에서의 선택성은 0이 되어야 하지만, Fig. 5-7에서 건조속도가 일정한 정속구간에서도 미약한 선택성을 보여 주고 있는 것은 이러한 현상으로 설명할 수 있겠다.

이러한 현상은 Fig. 9에서 더욱 자세히 알 수 있다. 이 그림에는 초기 농도가 각각 0.3과 0.6이고, 건조 공기의 온도가 50°C인 경우 서로 다른 건조시간에서의 충전체의 높이에 따른 충전체가 함유하고 있는 잔류성분의 양을 보여 주고 있다. 분포 곡선은 건조 초기에는 위로 볼록한 포물선이며, 시간이 지남에 따라 변곡점을 가치는 곡선으로 변하게 된다. 이는 Whitaker[8]와 Ceaglske와 Hougen[9]의 연구 결과에 부합되는 것으로 시간이 더 경과하면 아래로 볼록한 포물선이 된다. Ceaglske와 Hougen[9]는 또한 잔류성분의 함량에 따른 모세관 압으로부터 용액의 분포를 예측하는 방법도 제시하였다.

초기 농도가 0.3인 경우 약 30분에서 한시간 정도의 시간이 경과하여도 충전체 하부($z=21$ mm)에 포함되어 있는 용액의 양이 초기의 양과 같지만, 시간이 경과함에 따라 충전체 하부에 포함되어 있는 용액도 감소하는 것을 알 수 있다. 초기 농도가 0.6인 경우 건조속도가 초기 농도가 0.3인 경우에 비하여 크기 때문에 이러한 현상이 이른 시간에 나타난다.

5. 결 론

이성분계 혼합물을 함유하는 다공성 물질의 건조시

건조공정의 선택성은 열역학적 평형상태, 기상 및 액상측 물질전달 현상에 의존한다. 이로 인하여 혼합물의 초기 농도 및 건조조건에 따라 휘발성이 낮은 성분이 우선적으로 제거되기도 한다. 본 연구에서는 액상측 물질전달 현상이 건조공정의 선택성에 미치는 영향을 조사하였다.

일반적으로 건조속도가 빠른 정속구간에서는 건조공정이 비선택적으로 알려져 있으나, 건조체의 크기가 한정되어 있기 때문에 미약한 선택성이 나타난다. 건조 초기에는 농도구배가 공기와 접촉하는 상부에만 형성이 되며, 시간이 경과함에 따라 농도구배가 다공성 물질의 표면뿐만 아니라 내부에서도 형성되었다. 또한 표면에서의 자유수분함량도 감소함으로 인하여 정속구간에서도 미약한 선택성이 나타난다. 건조공기의 온도가 증가할수록 선택성이 미약해지는 원인은 건조속도가 증가하기 때문이다. 감속구간에서는 건조속도가 급격히 감소하기 때문에 건조공정의 선택성은 강하게 나타난다.

사용기호

- A : area [m^2]
- D_{ij} : diffusion coefficient [m^2/s]
- Δh_v : latent heat of vaporization [kJ/kg]
- K_g : characteristic number of gas-phase mass transfer [-]
- K_l : characteristic number of liquid-phase mass transfer [-]
- k_g : gas-phase mass transfer coefficient [m/s]
- k_l : liquid-phase mass transfer coefficient [m/s]
- \dot{m} : drying flux [$\text{kg/m}^2\text{h}$]

M : mass [kg]
 \dot{N} : molar drying flux [kmol/m²h]
 NTU: number of transfer unit [-]
 p : pressure [atm]
 \dot{r}_1 : relative drying rate of component 1 [-]
 S_1 : selectivity [-]
 T : temperature [°C]
 v_l : liquid-phase bulk velocity [m/s]
 X : moisture [kg/kg air]
 \bar{X} : molar moisture [kmol/kg air]
 \bar{x} : mole fraction [kg/kg]
 z : height [mm]
 α_{12} : relative volatility [-]
 γ : activity coefficient [-]
 ρ : density [kg/m³]
 Ψ : porosity [-]

상첨자

* : saturated state

하첨자

0 : initial condition
 1 : isopropyl alcohol
 2 : water
 3 : drying medium
 g : gas-phase
 l : liquid phase

ph : gas-liquid interface

참고문헌

1. Krischer, O. and Kast, W.: *Trocknungstechnik*, 3rd ed., Spriner Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978.
2. Thurner, F. and Schluender, E. U.: *Chem. Eng. Process*, **20**, 9(1986).
3. Thurner, F.: Ph.D. Dissertation, Institute of Thermal Process Engineering, University Karlsruhe, Germany(1985).
4. Schluender, E. U.: *Einfuehrung in die Stoffuebertragung*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1984.
5. Gmehling, J. and Onken, U.: *Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection*, Chemistry Data Series, Vol. 1, Part 1, DECHEMA, Frankfurt, (1977).
6. Renon, H. and Prausnitz, J. M.: *AIChE J.*, **14**, 135 (1968).
7. Krebs, C.: Ph.D. Dissertation, Institute of Thermal Process Engineering, University Karlsruhe, Germany(1977).
8. Whitaker, S.: *Heat and Mass Transfer in Granular Porous Media*, Advances in Drying, Hemisphere Pub. Corp., (1980).
9. Ceaglske, N. H. and Hougen, O. H.: *Ind. Eng. Chem.*, **29**, (1937).