

흡착과 탈착 과정 동안 제습 로터의 열/물질 전달[§]

신 현 근* · 박 일 석**

* 경북대학교 기계공학부

Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Rotor During Adsorption and Desorption Process

Hyun-Geun Shin* and Il Seouk Park**†

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received May 1, 2013 ; Revised June 28, 2013 ; Accepted July 22, 2013)

Key Words: Hygroscopic Rotor(제습 로터), Adsorption(흡착), Desorption(탈착), Diffusion(확산)

초록: 흡착식 제습기에 적용되는 제습 로터는 높은 제습 성능을 달성키 위해, 흡수율이 높은 재질로 구성된 수많은 미세 채널을 포함하고 있다. 본 연구에서는 습공기 흐름에 의해 나타나는 제습 로터 내부의 반복적인 흡착/탈착 과정에 대한 수치해석 결과를 소개한다. 수치해석의 정확도와 효율성을 고려하여 흡습층 내부에서는 표면 확산(surface diffusion)만을 고려하여 해석을 수행하였다. 해석결과는 이전의 연구와 비교하였고, 온도에 대한 비교 오차는 약 2%이하인 점을 감안하여 해석결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 단일 채널 내부에서 유동층(flow layer)과 흡습층(desiccant layer) 간 열/물질전달 연계 해석을 통하여 채널 내부의 수증기 분율, 흡수된 물 분율과 온도 등에 대한 시간 및 공간적 변화를 나타내었다.

Abstract: A hygroscopic rotor comprises many microchannels with high adsorption characteristics. In this study, the iterative adsorption/desorption processes that were affected by the humid air flow in a channel were numerically simulated. In consideration of the accuracy and computational costs, in the desiccant layer, only surface diffusion was considered in this simulation. The results were compared with the previous numerical results and found to show good agreement. By conjugating the heat and mass transfer between the desiccant and the flow layers, temporal and spatial changes in the vapor mass fraction, adsorbed liquid water mass fraction, and temperature in the channel were presented.

- 기호설명 -

$C_{p,d}$: 흡습층의 정압비열 [J/kgK]	$h_{v,i}$: 유동/흡습층 경계에서 수증기엔탈피 [J/kg]
$C_{p,g,v}$: 습공기의 정압비열 [J/kgK]	$\dot{m}_{v,gs}$: Ordinary 확산에 의한 질량유속 [kg/m ² s]
$D_{g,v}$: 습공기의 확산계수 [m ² /s]	$\dot{m}_{\ell,ss}$: 표면 확산에 의한 질량유속 [kg/m ² s]
$D_{s,eff}$: 유효 표면확산계수 [m ² /s]	p : 압력 [Pa]
k_d : 흡습층의 열전도계수 [W/m ² K]	\dot{q}_{ss} : 고체흡습층에서의 전도 열유속 [J/m ² s]
$k_{g,v}$: 습공기의 열전도계수 [W/m ² K]	\dot{q}_{gs} : 유동층에서의 전도 열유속 [J/m ² s]
$h_{\ell,i}$: 유동/흡습층 경계에서 물의 엔탈피 [J/kg]	T : 온도 [K]
h_{ads} : 수증기의 흡착열 [J/kg]	t : 시간 [s]
	u : 속도 [m/s]
	x, y : 좌표성분 [m]

§ 이 논문은 대한기계학회 유체공학부 2013년도 춘계학술대회 (2013. 5. 9.-10., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, einstein@knu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

그리스문자

$\rho_{g,v}$: 습공기 밀도 [kg/m³]

ϕ_v : 습공기에 대한 수증기의 질량분율 [kg/kg]

- ρ_d^* : 흡습층의 겔보기밀도 [kg/m^3]
 φ_ℓ : 고체흡습층에 대한 흡수된 물의 질량
 분율 [kg/kg]
 $\varepsilon_{g,v}$: 흡습층 내부의 기체 공극률 [-]

하첨자

- d : 흡습층 (desiccant)
 dry : 건조상태
 eff : 유효 (effective)
 fg : 상변화잠열
 g : 건공기
 gs : 유동/흡습층 경계에서 유동층 쪽(gas side)
 i : 유동/흡습층 경계 (interface)
 l : 물 (liquid water)
 p : 정압
 s : 표면확산 (surface diffusion)
 ss : 유동/흡습층 경계에서 흡습층 쪽(solid side)
 v : 수증기

상첨자

- * : 겔보기

1. 서 론

제습 로터는 여러 개의 미소 채널로 이루어져 있고 채널 내부에서는 흡착과 탈착 과정이 반복적으로 일어난다. 채널 내부의 흡착/탈착에 관한 열/물질전달 현상을 수치해석하기 위하여 로터 전체를 해석하는 것은 효율성을 제고해볼 때 바람직하지 않으므로 단위 채널에서의 열/물질전달에 대한 연구가 오랫동안 수행되어왔다. 채널은 수력직경이 2~5 mm, 길이가 10~20 mm 정도로 매우 작지만 그 안에서 일어나는 현상들은 매우 복잡하기 때문에 해석의 간략화를 위한 다양한 수치해석 방법들이 연구되어 왔다.

Sherony 등⁽¹⁾은 유동층(flow layer)과 흡습층(desiccant layer)의 경계에서 이론식을 바탕으로 경계조건을 지정하고 흡습층 내부의 열/물질전달 현상에 대해 해석을 수행하였다. Simonson 등^(2,3)은 흡습층과 유동층의 경계에서 수증기가 모두 응축해서 물로 변한다고 가정하여 흡습층 내부에서의 공간적 열/물질전달을 고려하지 않고 일차원 해석을 수행하였다. Zhang 등⁽⁴⁾은 작동유체와 흡습층의 열물성값들의 변화를 무시한 채, 채널 단면 형상 효과를 고려하여 일차원 열/물질전달 해석을 수행하였다. 일정한 열물성치 가정은 열/물질 전달 현상의 비선형성을 상당히 줄여주므로 해석의 효율성은 증대되지만 넓은 온도 범위에서의 적용에 한

계가 있다. Majumdar⁽⁵⁾는 흡습층의 공극률을 고려하여 열/물질전달 해석을 수행하였으며, 흡습층 내부에서의 물질전달 해석을 위해 ordinary 확산(ordinary diffusion)과 Knudsen 확산(Knudsen diffusion)을 조합한 유효 확산 계수와 표면 확산(surface diffusion)에 의한 유효 표면 확산 계수를 고려하여 해석을 수행하였다. 흡습층으로 silica gel RD를 사용한 Ruivo 등^(6,7)은 흡습층 내에서는 ordinary 확산을 무시하고 Knudsen 확산과 표면 확산만을 고려한 연구를 수행하였다. 유동층 내 공기 유동을 bulk flow로 가정한 simplified model과 직접 수치해석을 통해 유동 및 열/물질 전달을 해석하는 detailed model을 서로 비교하였으며, Knudsen 및 표면 확산 각각의 영향에 관한 비교 연구를 수행하였다.

Pesaran 등⁽⁸⁾은 silica gel RD(regular density)와 ID(intermediate density)에서 지배적인 확산 모드에 대해 연구하였다. 실제로 흡습층 내부에서의 물질전달은 고체 흡습층 내에서 흡착제 입자에서의 Knudsen 확산과 표면 확산에 의해 지배되는데, silica gel RD의 경우는 흡착제 입자에서 물질 확산은 주로 표면 확산에 의해 지배되는 것을 확인하였다.

이상 살펴본 이전 연구들은 흡착 또는 탈착 과정 각각에 대해 연구하였고 주로 채널 내부의 변화보다는 채널 출구에서 온도와 습도를 조사하는데 중점을 두었다.

본 연구에서는 이전 연구들과 달리 흡착과 탈착 과정을 연속적으로 한 주기 동안 시간에 따른 채널 내부의 수증기 량과 온도 변화와 같은 열/물질 전달 결과를 수치해석적으로 나타내고 있다. 흡습층과 유동층 간의 열/물질전달 연계를 위하여 경계면에서 온도 및 수증기 분율 값들과 각각의 1차 미분값(유속, flux)의 연속조건을 적용하여 복합 열/물질전달(conjugate heat and mass transfer) 해석을 수행하였다. Silica gel RD로 코팅된 제습 로터에 대하여 표면 확산의 영향만 고려하여 채널 내부의 수증기 질량분율, 흡수된 물의 질량분율과 온도 등의 시공간적 분포를 이해하기 쉽게 나타내었다.

2. 제습 로터의 작동 환경 및 현상

제습 로터는 Fig. 1과 같이 매우 많은 미소 채널들로 이루어져 있고, 작동 시에는 회전 중인 로터의 채널로 습공기가 유입된다. 로터로 접근하는 공기 흐름은 난류이지만 채널의 크기가 매우 작아 채널 내부의 공기 흐름은 완전한 층류로 가정할

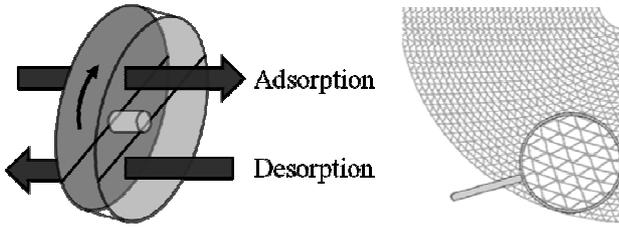


Fig. 1 Typical configuration of hygroscopic rotor

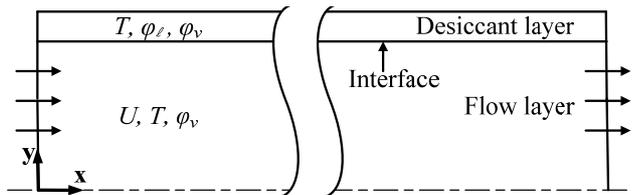


Fig. 2 Computational domain of a channel

수 있다. 로터의 회전은 채널 내부의 습공기 유동에 원심력과 같은 반경방향 운동량 소스를 제공하지만 실제 로터의 회전수가 분당 1 회 정도로 매우 작고 주유동방향 운동량이 상대적으로 매우 크기 때문에 본 연구에서는 로터 회전에 의한 운동량 변화 효과는 없는 것으로 가정한다.

단위 채널의 구조는 Fig. 2 와 같이 중앙 부분의 유동층과 외곽의 흡습층으로 단순화시킬 수 있다. 채널 내부의 흡착 및 탈착 과정은 유동층과 흡습층 간의 복합열/물질전달 현상에 의해 지배된다. 흡착 과정 중에는 우선 차가운 습공기가 채널로 유입되어 흡습층을 냉각하고, 냉각된 흡습층으로 유입습공기에 포함된 수증기가 흡수되며, 이후 흡수된 수증기가 고체 흡습층 내부의 흡착제 입자에 흡착되므로 유입 습공기는 절대습도가 매우 낮은 상태로 채널을 빠져나가게 된다. 또한 이 과정 중에 흡습층 내부에서 일어나는 흡착현상으로 수증기는 흡착열을 방출하게 된다.

탈착 과정 중에는 별도로 준비된 열원에 의해 데워진 따뜻한 습공기가 채널로 유입되어 흡습층을 데우고(heating), 데워진 흡습층에서는 내부에 흡착되어 있던 물이 수증기로 증발되어 흡습층을 거쳐 유동층으로 빠져나오므로써 흡습층의 함수량을 떨어뜨리고, 이 때 흡습층 내부에서 일어나는 탈착현상으로 흡습층의 열흡수(heat sink)가 발생한다.

3. 모델링

3.1 지배방정식

유동층과 흡습층에서의 유동, 열/물질전달에 대한 지배방정식으로 아래와 같이 질량, 운동량, 에

너지, 수증기 질량분율 및 물의 질량분율에 관한 보존방정식들이 적용되었다.

$$\frac{\partial(\rho_{g,v}\phi_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{g,v}u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_{g,v}u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{g,v}u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_{g,v}C_{p,g,v}T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{g,v}C_{p,g,v}u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{g,v} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_{g,v}\phi_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{g,v}u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_{g,v}D_{g,v} \frac{\partial \phi_v}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_d^* \phi_l)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_d^* D_{s,eff} \frac{\partial \phi_l}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(\rho_{g,v}^* \phi_v)}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_d^* C_{p,d} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_d \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (-\rho_{g,v}^* \phi_v h_{ads}) \quad (6)$$

식 (1)-(4)는 각각 유동층에서의 습공기의 질량, 운동량, 에너지, 수증기 질량분율에 관한 보존식을 나타내고 있다. 식 (5)는 흡습층에 스며든 물에 대한 보존방정식으로 ϕ_l 은 고체 흡습층에 대한 흡습층에 스며든 물의 질량분율을 나타낸다. 식 (5)의 우변 마지막 항은 흡습층 내부에 체류하고 있는 수증기의 응축과 물의 증발에 따른 물 질량분율의 생성항 (source term)을 나타내고 있다. 식 (6)은 흡습층 내부에서의 에너지보존식이며, 우변 마지막 항은 수증기의 흡착제 입자에 흡착될 때 발생하는 흡착열에 의한 열발생을 나타낸다. 수증기의 흡착은 먼저 흡습층 내에서 수증기가 물로 상 변화한 후 물이 입자에 흡착되는 과정을 겪는다. 그러므로 흡습층 내부에서 발생하는 흡착열은 응축잠열과 heat of wetting 으로 이루어져 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 silica gel RD의 경우 Knudsen 확산의 영향이 미미하다고 밝힌 Ruivo 등⁽⁷⁾의 연구 결과를 이용하여 흡습층 내부의 Knudsen 확산의 영향을 해석하지 않고 다만 흡습층의 표면 확산 현상만을 식 (5)의 보존방정식에 의해 해석하고, 흡습층 내부에서의 수증기 분율은 기존의 연구⁽⁶⁾에서 제시된 수증기 분율과 물 분율 간의 열역학적 평형관계를 이용하여 현시적으로 구해내고 있다.

식 (1)-(6)의 지배방정식에 사용된 각종 계수들은 가능한 온도와 습도의 영향이 고려되도록 다음의 식들을 사용하였다.

$$D_{g,v} = 1.758 \times 10^{-4} \frac{(T + 273.15)^{1.685}}{P_{atm}} \quad (7)$$

$$D_{s,eff} = \frac{1.6 \times 10^{-6}}{\tau_l} \exp \left[-0.974 \times 10^{-3} \times \frac{h_{ads}}{T + 273.15} \right] \quad (8)$$

$$h_{ads} = -0.02T^3 + T^2 - 2386.2T + 2501600 + 1000 \times (420\varphi_l - 375.867 - 550 \log \varphi_l) \quad (9)$$

$$\rho_{g,v}^* = \varepsilon_{g,v} \rho_{g,v} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{g,v} = \varepsilon_{dry} - \varphi_l \frac{\rho_d^*}{\rho_l} \quad (11)$$

식 (7)은 유동층에서 공기와 수증기간의 확산 계수를 나타내고 있고, 식 (8)은 흡습층 내부에서 물의 유효확산계수를, 식 (9)는 흡습층 내에서 수증기의 흡착열, 식 (10)은 흡습층 내부 수증기의 겉보기 밀도를 나타내고 있다.

식 (8)에 나타난 τ_l 은 흡습층 내에서 물분자의 이동 경로에 대한 비틀림 상수값, 식 (10)의 $\varepsilon_{g,v}$ 는 흡습층의 기체 공극률로서 식 (11)로 나타낸다. 흡습층은 다공 구조로 되어있어서 흡수된 물 량을 계산할 때 공극률을 고려해야 한다. 공극률은 식 (11)와 같이 흡수된 물 량을 반영하여 계산된다.

3.2 경계 조건

Fig. 2는 채널 내부 해석영역을 나타내며, 흡습층의 바깥 부분은 열/물질전달이 없도록 온도와 물 질량분율의 채널 높이방향 1 차 미분이 영이 되도록 설정하고, 유동층의 하부 경계에는 대칭 조건을 설정하였다. 해석 영역의 길이는 0.1 m, 대칭면에서 흡습층 상부 경계까지의 높이는 1.6 mm, 흡습층 만의 높이는 0.1 mm 이다. 다음의 식 (13)-(14)는 흡습층과 유동층의 열/물질전달을 연계하여 해석하기 위한 경계면에서의 조건이다.

$$\dot{m}_{v,gs} h_{v,i} + \dot{q}_{gs} = \dot{m}_{l,ss} h_{l,i} + \dot{q}_{ss} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{v,gs} = \dot{m}_{l,ss} \quad (14)$$

Table 1 Properties of desiccant region

Porosity	0.485
Thermal conductivity	0.144 W m ⁻¹ °C ⁻¹
Apparent density	1129 kg m ⁻³
Specific heat	921 J kg ⁻¹ °C ⁻¹
Tortuosity	2.24
Desiccant thickness	0.1mm

식 (13)은 경계면에서 열량 이동에 관한 평형관계, 식 (14)는 경계면에서 물질 이동에 관한 평형을 나타내고 있다.

4. 결과 및 토의

4.1 검증

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 흡습층 내부의 수증기 확산에 대한 보존방정식(Knudsen 확산)을 직접 풀지 않고, 물의 표면 확산에 관한 보존방정식을 풀어 얻은 물 질량분율과 온도, 수증기와 물 간의 열역학적 관계식을 이용하여 현시적으로 수증기 분율을 계산하고 있다. 따라서 Knudsen 확산을 직접 수치해석하지 않는 본 연구의 해석절차를 검증하기 위해 Ruivo 등⁽⁶⁾의 이전 연구 결과와 비교 연구를 수행하였다. Table 1은 계산에 필요한 흡습층의 물성치이고 Table 2는 초기 및 경계 조건이다. Porosity는 건조한 상태의 흡습층 공극률, ε_{dry} 를 tortuosity는 흡습층 내에서 물분자의 이동 경로에 대한 비틀림 상수, τ_l 이다. Fig. 3은 채널 길이방향의 한 위치에서 수증기 분율과 온도에 대한 채널 두께방향(Position) 프로파일을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Knudsen 확산을 무시한 본 연구의 해석결과와

Table 2 Initial and boundary condition for validation

Initial temperature	100°C
Initial φ_l	0.012 kg/kg
Inlet temperature	30°C
Inlet φ_v	0.01 kg/kg
Inlet mass flux	1.5 kg/s•m ²

Table 3 Initial and inlet conditions in a cycle

Initial φ_l	0.2	
Initial temperature	10°C	
Desorption	Temperature	40°C
	φ_l	0.01
	Velocity	1 m/s
	Duration	30 s
Adsorption	Temperature	10°C
	φ_l	0.004
	Velocity	0.9 m/s
	Duration	30 s

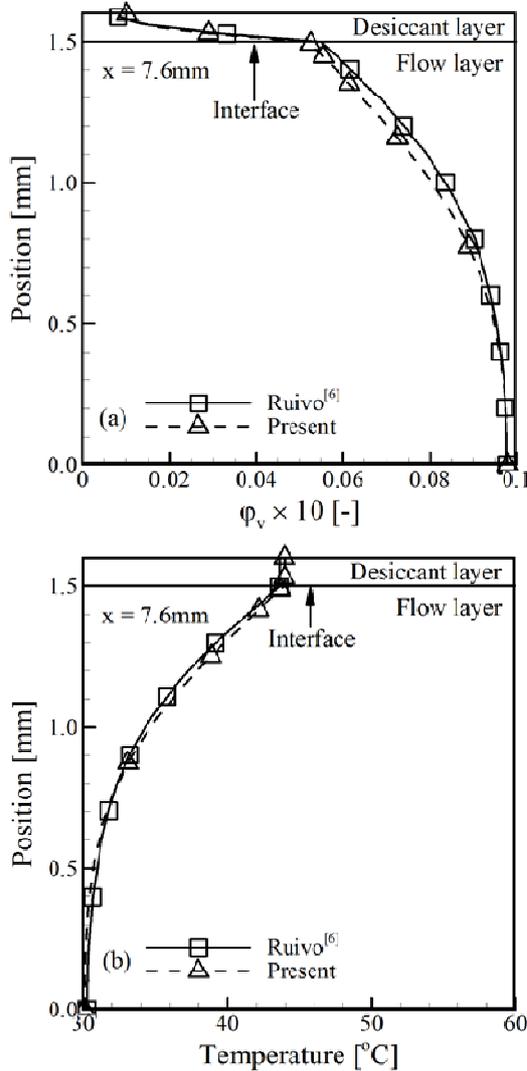


Fig. 3 Comparison for (a) ratio of water vapor to humid air and (b) temperature

Ruivo 등^[6]의 결과가 매우 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(a)에서 수증기 분율 분포를 살펴보면 흡습층에서의 수증기는 거의 선형적으로 확산되고 있음을 확인할 수 있고, Fig. 3(b)에서 유동층과 흡습층 간의 열전도 계수의 차이로 경계에서 온도 기울기가 불연속적인 것을 확인할 수 있다.

4.2 한 주기 동안 채널 계산 결과

검증이 완료된 단일 채널 내부의 열/물질전달 해석 모델을 바탕으로 흡착과 탈착의 한 주기 동안 채널 내부에서 온도 및 수증기 질량분율의 변화를 해석하였다. Table 3은 해석에 사용된 흡착 채널의 초기 조건과 흡착과 탈착 시 적용되는 습공기 유입 조건을 나타내고 있다. 다음의 해석 결과 그래프들은 Fig. 2의 y축 위치를 Position로 나

타내고 있다.

Fig. 4는 채널 길이방향으로 1, 5, 9 cm의 위치에서 시간에 따른 수증기 질량분율 프로파일의 변화를 나타내고 있다. 탈착 시작 근처에는 유입되는 습공기의 수증기 분율이 흡습층의 수증기 분율보다 크기 때문에 탈착 과정임에도 불구하고 오히려 유동층 수증기가 흡습층으로 이동하여 흡착된다. 탈착 시작 5 s 후, 채널 입구 근처에서는 흡습층의 수증기 분율이 유동층보다 커지는 역전 현상이 나타나기 시작한다. 이는 뜨거운 습공기의 유입으로 인해 흡습층이 데워지고 흡습층 내부에 스며들어 있던 물이 탈착하며 수증기로 변화하기 때문이다. 이와 같은 역전 현상은 시간이 지남에 따라 채널 전 영역으로 확장되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 탈착 과정 중에 채널 길이방향으로 1, 5, 9 cm의 위치에서 시간에 따른 온도 프로파일의 변화를 나타내고 있다. 탈착을 위해 뜨거운 습공기가 유입됨에 따라 입구에서부터 서서히 온도가 상승하여 탈착 과정이 종료되는 30 s 근처에서는 채널 내부 거의 모든 영역에서의 온도가 습공기 유입온도와 비슷해진다. 탈착 초기에는 흡습층 내부에서 수증기의 흡착으로 흡착열이 방출되며, 이후 흡습층 내부 물이 탈착함에 따라 열흡수 현상이 일어난다.

Fig. 6은 흡착 과정 중의 채널 내부 수증기 질량분율 분포를 나타내고 있다. 흡착 과정에서는 수증기의 유입 방향이 반대이므로 9 cm 부근이 습공기 입구 영역이다. 흡착 과정 중에는 차가운 습공기가 채널 내부로 유입되고 이로 인해 흡습층이 냉각되며, 습공기에 포함된 수증기가 흡습층 내부로 흡수/흡착되므로 결과적으로 수분이 제거된 건조한 공기가 채널 출구로 배출된다.

Fig. 6의 흡착 초기 (30.5 s) 그래프를 보면, 탈착이 막 끝난 흡착 초기에는 흡습층의 온도가 높기 때문에 흡습층에 스며들어 있던 물의 탈착에 의해 흡습층 내부의 수증기 분율이 유동층보다 높은 값을 가진다. 이후 차가운 습공기의 유입으로 시간이 지남에 따라 채널의 온도가 낮아지면서 흡습층의 수증기가 물로 흡착하며 흡습층 내부 수증기 질량분율이 작아지기 시작한다. 흡착 과정이 진행됨에 따라 채널 전체 구간을 통해 흡습층의 수증기 질량분율이 유동층보다 더 낮은 값을 형성하게 되어 유동층으로부터 지속적으로 수증기 흡수가 일어난다.

Fig. 7은 흡착 과정 중 채널 내부의 온도 분포를 나타내고 있다. 흡착 과정 동안 흡습층 내부에

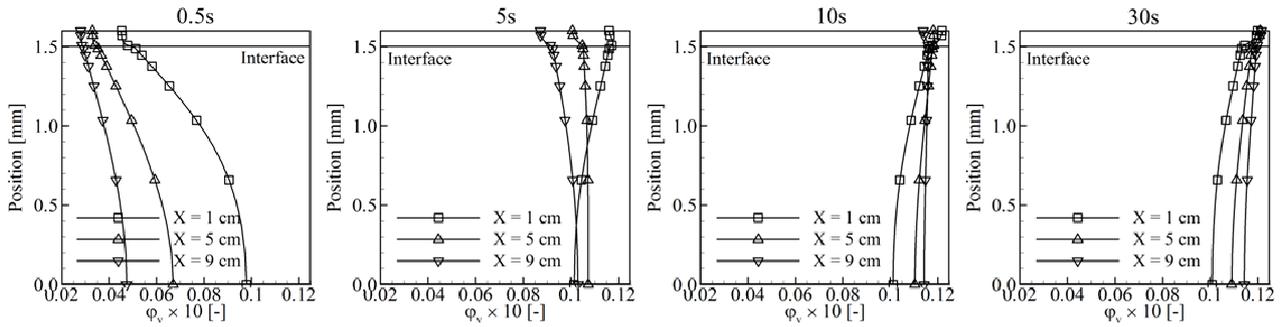


Fig. 4 Profiles ratio of water vapor to humid air during desorption process

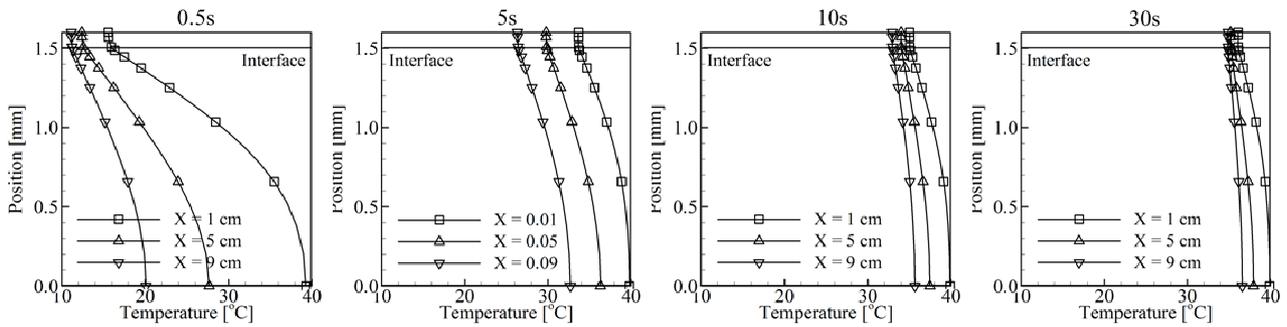


Fig. 5 Profiles of temperature during desorption process

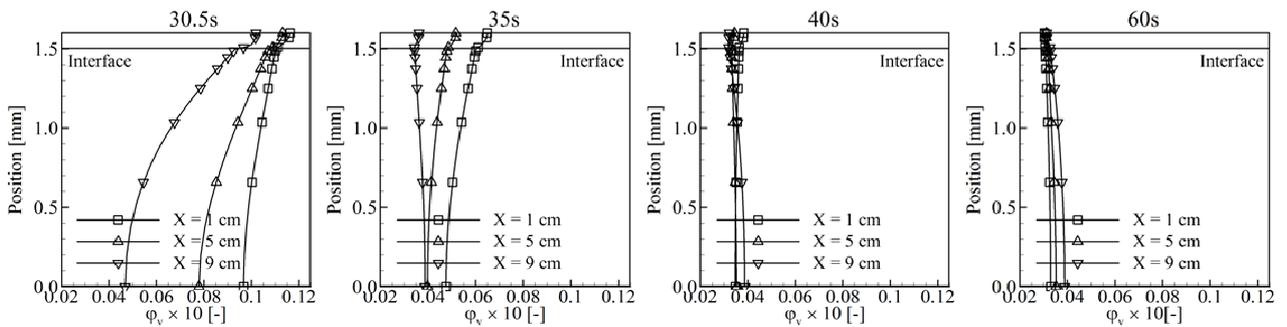


Fig. 6 Profiles of ratio of water vapor to humid air during adsorption process

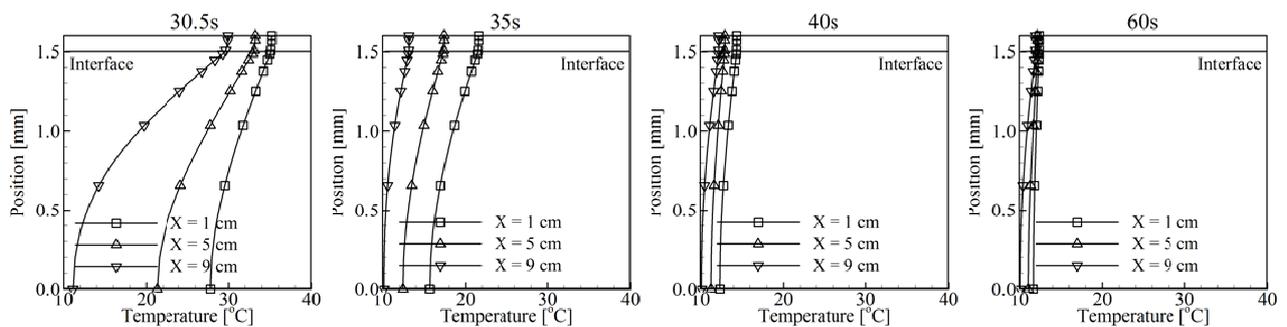


Fig. 7 Profiles of temperature during adsorption process

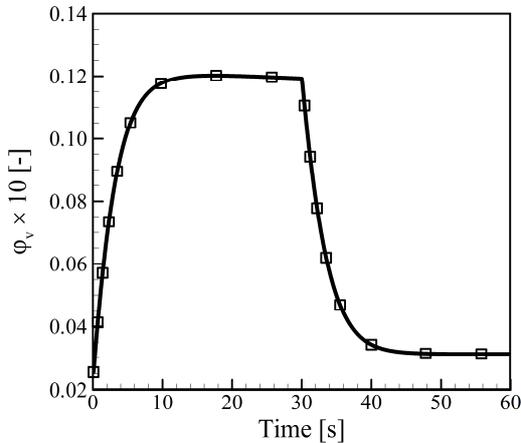


Fig. 8 Average ratio of water vapor to humid air in desiccant layer

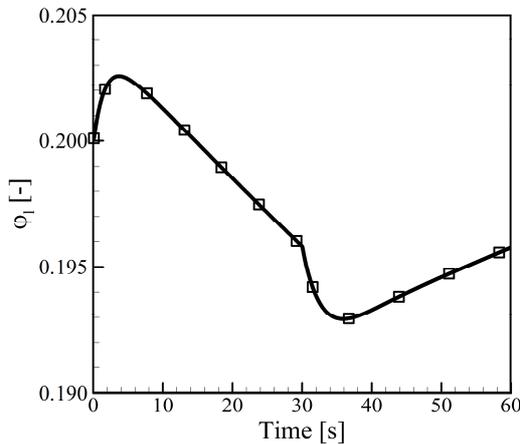


Fig. 9 Average ratio of liquid water to desiccant in desiccant layer

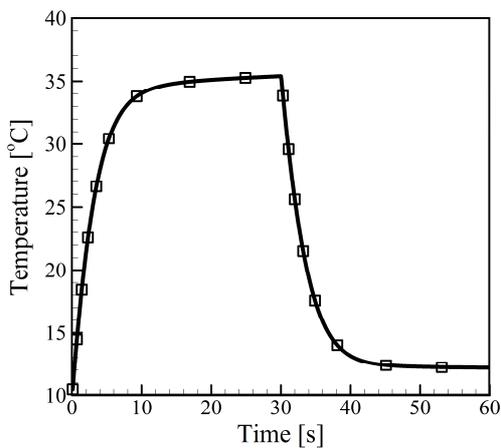


Fig. 10 Average temperature in desiccant layer

서 수증기가 물로 변하면서 흡착열을 방출하지만 차가운 습공기가 계속 유입되기 때문에 시간에 따라 채널의 온도는 점차 낮아지고 있다.

Fig. 8 은 탈착과 흡착 과정으로 구성된 한 주기 동안 흡습층 내부 평균 수증기 분율의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 흡습층 내부의 수증기 분율은 탈착 시작 근처인 0~10 s 구간과 흡착 시작 근처인 30~40 s 구간에서 급격한 변화를 보이고 이후 변화가 거의 없이 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 각 과정에서 수증기 질량분율이 일정한 값으로 수렴하는 것은 유동층과 흡습층 사이의 수증기 이동량과 흡습층 내부의 탈착 혹은 흡착량이 서로 평형을 이룸을 의미한다.

Fig. 9 는 탈착/흡착 과정 동안 흡습층 내부에 존재하는 물의 질량분율 평균값의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 흡습층 내부의 물 분율은 탈착과 흡착 과정이 시작됨에 따라 바로 감소하거나 증가하지 않고 흡습층이 데워지거나 식혀지는데 걸리는 시간만큼 시간지연을 보이며 탈착 시에는 증가 후 감소, 흡착 시에는 감소 후 증가한다.

Fig. 10 은 흡습층 내부 평균 온도의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 수증기 분율의 변화와 같이 온도의 변화는 0~10 s 구간과 30~40 s 구간에서 급격한 변화를 보인다. 탈착 과정에서는 뜨거운 습공기가 채널 내부로 유입되므로 채널 온도가 차츰 상승한다. 하지만 흡습층 내부 물의 탈착으로 인한 열흡수로 흡습층의 온도가 유입 습공기의 온도까지 도달하지는 못한다. 이와 유사하게 흡착 과정에서는 차가운 습공기가 채널 내부로 유입되어 채널이 식혀지지만 흡습층 내부에서의 수증기 흡착으로 인한 흡착열방출로 흡습층의 온도가 유입 습공기의 온도까지 낮아지지는 않는다.

5. 결론

본 연구에서는 단위 채널의 복합열/물질전달 현상에 대한 모델을 제시하였고 Ruivo 등⁽⁶⁾의 이전 연구 결과와 비교하였다. 온도에 관한 해석 결과는 약 2% 내의 오차 범위에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 탈착과 흡착 과정을 한 주기로 설정하고 탈착에서 흡착과정으로 진행되는 동안 제습 로터의 복합열/물질 전달 현상을 수치 해석하였고 채널 길이 방향으로 여러 위치에서 채널 내부의 수증기 분율 및 온도의 시간에 따른 변화 특성을 관찰하였다. 또 탈착/흡착 과정으로 구성된 한 주기 동안, 흡습층 내부의 수증기 분율, 흡수된 물 분율과 온도의 시간 변화 특성을 연관된 열/물질전달 현상에 근거하여 설명하였다.

후기

본 연구는 환경부의 "차세대에코이노베이션사

업” 및 2012 학년도 경북대학교 학술연구비에 의한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Sherony, D. F. and Solbrig, C. W., 1970, "Analytical Investigation of Heat or Mass Transfer and Friction Factors in a Corrugated Duct Heat or Mass Exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 13, No. 1, pp. 145~159.
- (2) Simonson, C. J. and Besant, R. W., 1997, "Heat and Moisture Transfer in Desiccant Coated Rotary Energy Exchangers: Part I. Numerical Model," *HVAC&R Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 325~350.
- (3) Simonson, C. J. and Besant, R. W., 1999, "Energy Wheel Effectiveness: Part I-Development of Dimensionless Groups," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 12, pp. 2161~2170.
- (4) Zhang, X. J., Dai, Y. J. and Wang, R. Z., 2003, "A Simulation Study of Heat and Mass Transfer in a Honeycombed Rotary Desiccant Dehumidifier," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 989~1003.
- (5) Majumdar, P., 1998, "Heat and Mass Transfer in Composite Desiccant Pore Structures for Dehumidification," *Solar Energy*, Vol. 62, No. 1, pp. 1~10.
- (6) Ruivo, C. R., Costa, J. J. and Figueiredo, A. R., 2007, "On the Behavior of Hygroscopic Wheels: Part I - Channel Modelling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 23-24, pp. 4812~4822.
- (7) Ruivo, C. R., Costa, J. J. and Figueiredo, A. R., 2006, "Analysis of Simplifying Assumptions for the Numerical Modeling of the Heat and Mass Transfer in a Porous Desiccant Medium," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 49, No. 9, pp. 851~872.
- (8) Pesaran, A. A. and Mills, A. F., 1987, "Moisture Transport in Silica Gel Packed Beds-I. Theoretical Study," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 6, pp. 1037~1049.