

운전조건에 따른 제습로터의 제습특성과 유용도에 관한 실험적 연구

강 병 하, 이 진 주*, 김 석 현†

국민대학교 기계시스템공학부, *국민대학교 대학원

An Experimental Study on the Dehumidification Characteristics and the Effectiveness for Operating Conditions of a Desiccant Rotor

Byung Ha Kang, Jin Joo Lee*, Sukhyun Kim†

school of mechanical engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**graduate school, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received June 28, 2011; revision received November 17, 2011)

ABSTRACT: An experimental study has been carried out to investigate the dehumidification characteristics for several operating conditions of a compact desiccant rotor. This problem is of particular interest in the design of a desiccant type of dehumidifier. Room temperature, room humidity, regeneration temperature, revolution speed and frontal air velocity of desiccant rotor are varied as operating conditions. The results obtained indicate that dehumidification rate is increased with an increase in the room humidity while dehumidification effectiveness is not changed much. It is also found that the optimal rotor speed and optimal regeneration temperature exist for maximum dehumidification rate and dehumidification effectiveness.

Key words: Desiccant rotor(제습로터), Dehumidification(제습), Dehumidification effectiveness (제습 유용도), Humidity ratio(절대습도)

<hr style="width: 100%;"/>		기 호 설 명	<hr style="width: 100%;"/>	
<p>A : 로터면적 [m^2] V : 공기 유속 [m/s] \dot{m} : 질량유량 [kg/s] \dot{w} : 제습율 [kg/s] x : 절대습도 [kg/kg]</p>	<p>ρ : 밀도 [kg/m^3]</p>	<p style="text-align: center;">하첨자</p> <p>in : 입구 out : 출구 $ideal$: 이론적 ef : 유체역학적 입구 em : 물질전달 입구</p>		
그리스 문자				
ϵ : 제습 유용도				

1. 서 론

최근 에너지 이용에 관한 효율성 증대와 실내 공기질 등의 문제로 인하여 다양한 종류의 제습기기

† Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4673; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: skim@kookmin.ac.kr

가 열시스템에 적용되고 있으며, 제습제를 이용한 기술이 주목을 받고 있다.

실용상의 제습제로는 실리카겔, 활성알루미나, 제올라이트 등의 고체 흡착제나 염화리튬 수용액 또는 트리에틸렌글리콜 등의 액체 흡수제가 적용되고 있다. 제습제의 특성은 비열, 밀도, 기타 열물성은 물론, 액체 흡수제 계면의 포화특성이나 고체흡착제의 경우 기공율, 수증기 흡착 및 재생특성 등에 의해 좌우되며 제습제 자체의 제습능력은 주로 제습공기의 상대습도에 따라 결정되는 것이지만 교환기 형태로 제작된 제습로터의 성능은 제습제의 특성과 그 재생상태는 물론 로터의 직경, 길이, 공기 통로의 형상, 다공도 등 형상에 관련된 인자와 공기 유량과 온습도, 로터 회전속도 등의 운전조건에 관련된 것 등에 따라 결정된다. 특히 재생과정의 특성이 제습과정의 성능에 직결되어 있으므로 재생부의 인자들이 복합적으로 제습로터의 성능에 영향을 미치게 되며 이러한 수많은 인자들의 상관관계도 매우 복잡하여 난해한 현상을 이루고 있다.

제습로터의 성능에 영향을 미치는 여러 가지 인자들 중 재생공기의 온도와 제습로터의 회전속도에 관한 결정은 매우 중요하다. Zheng and Worek⁽¹⁾ 및 Lee et al.⁽²⁾은 실리카겔 제습기의 성능을 선형화 가정 하에 이론적으로 분석하였고 수치해로 검증하였으며 Kodama et al.⁽³⁾은 제습로터의 최적화 연구의 도구로 습공기선도의 사용을 제시하였다. Gao, et al.⁽⁴⁾은 이론해석을 통하여 제습로터의 제습제 층의 두께와 같은 형태적인 문제도 회전속도와 같은 최적화 목표가 될 수 있다고 지적하였고 공기 유동 채널의 형상에 따른 영향도 제시하였다. Lee and Song⁽⁵⁾은 제습로터에 대한 지배방정식으로부터 최적 회전주기에 대한 해를 유도하였으며 특히 전면 풍속이 로터 성능에 큰 영향을 미침을 보였다.

제습로터를 이용한 제습기의 이러한 연구들에도 불구하고 매우 복잡한 각 인자들의 상호작용이나 상관관계에 대한 이론은 간결하게 정립되어 있지 않은 상태이고, 합당한 실험적 검증 데이터도 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 제습로터의 성능에 영향을 미치는 인자 중 제습풍량, 제습 및 재생측 공기 온도 및 상대 습도, 그리고 로터의 회전속도 등의 운전조건을 변화시키면서 제습특성을 측정, 분석하여 제시하였다.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다. 실험장치는 제습부와 재생부로 분할된 제습로터를 중심으로 제습부 공기의 공급회로, 재생 공기를 공급하는 건조-가열장치, 단열된 덕트-송풍 시스템, 그리고 계측장치 등으로 구성하였으며 항온항습실 내에 설치하여 제습부의 공급공기 상태를 조건에 맞도록 일정하게 유지하였다.

제습로터는 중앙에 장착된 저속 모터에 의하여 조정된 속도로 회전되며, 제습과정과 재생과정이 동시에 이루어진다. 제습로터에 유입되는 공기는 유동이 균일하도록 부압으로 유지되고 제습된 건공기는 상태 측정 후 장치 후단에 부착된 블로어를 통하여 외부로 배출된다. 한편 재생회로는 수냉식 제습장치의 응축기와 재열코일을 통과한 고온 건조한 공기가 공급되어 제습로터를 재생시키는 밀폐된 덕트 시스템으로 구성하였다. 온도와 상대습도는 고정밀 측정기(Testo 645)를 사용하여 제시된 위치에서 측정하였으며, 이에 따른 측정오차는 각각 $\pm 0.1\%$ 이내로 나타났다.

본 연구에 사용된 제습로터는 DRI사(India)의 제품으로서 무기섬유 기질에 메탈실리케이트(metal silicate)를 함침시킨 것이다. 로터의 직경 및 높이는 각각 300 mm, 20 mm이며 벌집모양의 공기통로는 1.8×3.5 mm로서 수력직경이 2.4 mm이고 기공률 ϵ_v 는 60.4%로 실측되었다. Fig. 2에 실험에 사용

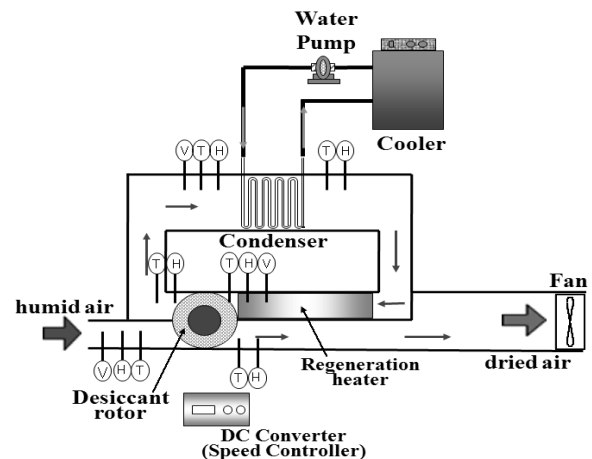


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

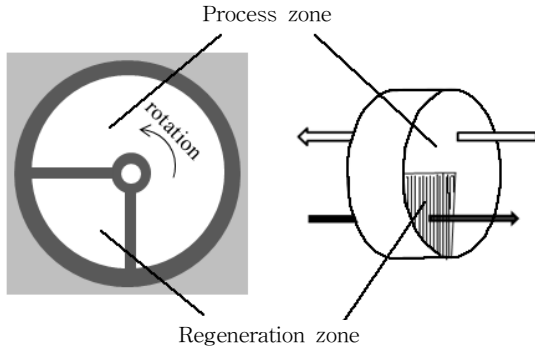


Fig. 2 Figures of the desiccant rotor.

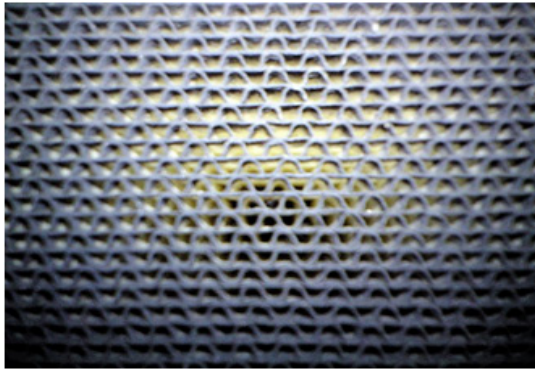


Fig. 3 Corrugated air flow channel of the desiccant rotor.

된 로터의 형상을 나타낸 그림을, 그리고 Fig. 3에
는 로터통로의 확대된 사진을 나타내었다.

2.2 실험조건 및 방법

각 실험에 대하여 표준상태를 실내 온도 27℃, 상대습도 70% RH, 로터의 회전속도 1 rpm, 재생공기의 온도 100℃로 설정하였다. 제습로터에 관한 공인 시험 규격이 없어 실용 범위내의 온도와 풍속으로 정하였으며 특히 풍속은 유지비용과 관련된 송풍동력의 합리화와 유용도 제고를 위하여 층류범위에 정하는 것으로 하였다.

실내습도변화에 대한 실험에서는 각 상태를 고정시킨 후 실내 습도를 50~80% RH로 변화시켜가며 제습량을 측정하였다. 로터의 회전속도 변화에 대한 실험에서는 각 상태를 고정시킨 후 로터 회전속도를 0.4 rpm에서 3 rpm까지 0.3 rpm 간격으로 변화시켜가며 제습량을 측정하였고, 재생공기의 온도변화에 대한 실험에서는 재생공기의 온도를 40℃에서 150℃까지 10℃ 간격으로 변화시켜가며 제습량을 측정하였다. 재생부의 전면 유속은 0.3 m/s로 일정하였

Table 1 Parameter range

	Units	Nominal case	Range
Process air			
Temperature	℃	27	24~33
Relative humidity	%	70	50~80
Frontal velocity	m/s	1	1.0~2.5
Regenerating air			
Temperature	℃	100	40~150
Relative humidity	%	3	-
Rotational speed of the rotor	rpm	1	0.4~3.0

으며 로터 제습부의 전면속도는 1.0 m/s로부터 2.5 m/s까지 변화시키며 로터 통과유속의 영향을 검토하였다.

실험 인자의 기준 값과 그 변화 범위를 Table 1에 나타내었다.

2.3 성능지표의 계산

제습로터 성능을 나타내는 방법은 크게 두 가지로 구별할 수 있다. 첫째 주어진 기하학적 크기의 로터가 얼마나 제습능력을 크게 가지는가, 즉 단위체적당 시간당의 제습량의 개념이며 다른 한 가지는 실제 제습량과 주어진 형상에서 가능한 최대의 제습용량의 비로 주어지는 무차원 유용도의 개념이다.

제습능력을 산출하기 위한 제습량은 제습공기의 절대습도 변화에 질량 풍량을 곱하여 산정하였다.

$$\dot{w} = \dot{m}(x_{in} - x_{out}); \quad \dot{m} = \rho A V \quad (1)$$

무차원 성능지표인 제습유용도는 Lee et al.⁽⁵⁾의 제안을 따라 다음과 같이 계산하였다.

$$\varepsilon = \frac{x_{in} - x_{out}}{x_{in} - x_{ideal}} \quad (2)$$

위의 정의는 습공기선도 상의 과정에서도 명확한 바 Neti and Wolfe,⁽⁶⁾ Zhang⁽⁷⁾ 등이 사용하였고 이론적 최대 제습 가능치를 0으로 간주하는 Zhang and Niu⁽⁸⁾나 Cho et al.⁽⁹⁾의 제습효율 정의보다 합리적인 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 제습로터에서의 제습과정과 재생과정을

습공기전도상에 나타낸 그림이다. ①의 상태에서 이상적인 단열제습이 진행된다면 ②의 상태를 향하는 과정이 되지만 실제로는 고온의 재생부에서 받은 열량으로 인하여 단열과정이 되지 못하고 ③의 상태로 진행하게 되며 제습 가능량도 감소하게 된다. ④에서 ⑤ 또는 ⑥으로 진행되는 재생과정도 유사한 이유에서 ⑥의 방향으로 향하게 되어 재생의 효과가 감소하게 된다.

실제로 단열제습이 진행된다 하더라도 ②의 상태 값을 얻으려면 무한히 긴 통로를 가진 로터여야 하며, 통로 길이가 유한하다면 단열이 되더라도 그 결과는 ②의 상태에 도달할 수는 없다. 따라서 이상적인 단열제습과정선상에 있는 ⑦의 상태를 실험으로 얻을 수 있는 결과라 가정 한 후 이론적으로 가능한 최대의 성능지표를 구한다.

제습장치의 물질전달현상을 단류형으로 가정하면 이론적인 유용도 ϵ_{ideal} 는 식(3)과 같다.

$$\epsilon_{ideal} = 1 - e^{-Ntu} \quad (3)$$

물질전달의 전달단위수 Ntu 는 물질전달계수 g_m 을 포함하여 다음과 같이 정의된다.

$$Ntu = \frac{g_m A}{\dot{m}} \quad (4)$$

여기서 \dot{m} 은 질량유량이며 접촉면적 A 는 개별통로 면적에 통로의 개수를 곱하여 구할 수 있다.

이 경우 식(2)로 표시되는 실제유용도 ϵ 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

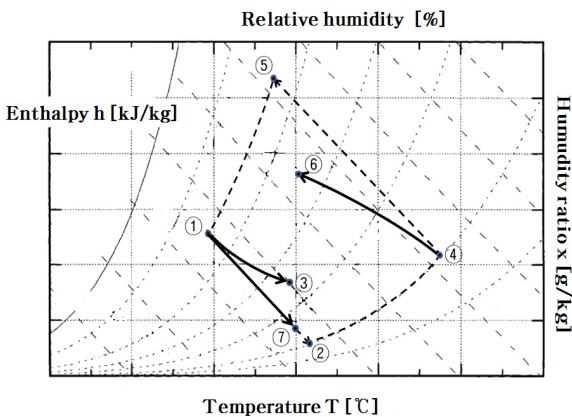


Fig. 4 Desiccant processing and regenerating processes.

$$\epsilon = \epsilon_{ideal} \cdot \epsilon_h \quad (5)$$

여기서 ϵ_h 는 제습과정 측의 단열효과의 이행정도를 나타내는 지표로서, 재생측 열량이 제습 과정으로 이전되는 불가피한 현상으로 인한 ϵ 의 손실부분이며 Fig. 4에서 단열과정에서의 일탈 부분으로 나타난다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5 및 Fig. 6은 온도, 풍속, 재생공기의 상태, 회전속도 등의 값이 표준치로 유지될 때 제습공기의 상대습도 변화에 따른 제습량과 제습유용도를 보인 것으로 상대습도가 증가함에 따라 제습량도 소량의 증가를 보였다. 이것은 제습제의 제습능력이 상대습도에만 의존하는 현상을 그대로 반영하는

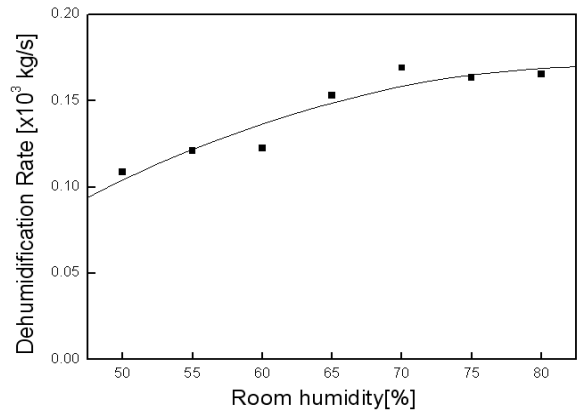


Fig. 5 Dehumidification rate vs. room humidity.

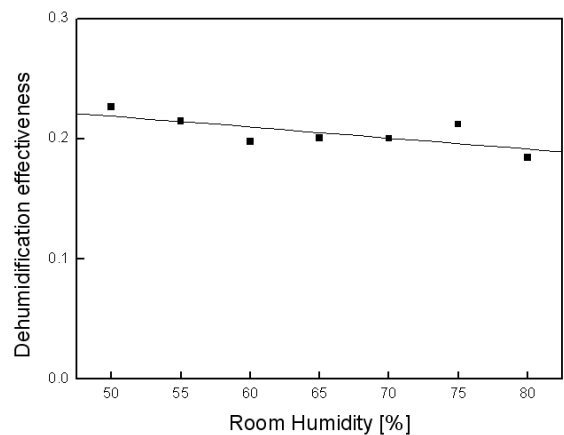


Fig. 6 Effects of room humidity on dehumidification effectiveness.

것이다. 다만 제습유용도의 경우 그 변화는 크지 않으며 소량 감소하는 경향을 나타낸다. 제습량의 증가에 따라 제습-재생 전체 사이클에서 로터에 가해지는 흡착열의 부하가 증가하는데 기인하는 것으로 판단된다.

한편 상대습도는 70%로 일정한 상태에서 로터 입구의 건구온도가 상승하는데 따른 제습량과 제습유용도의 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 이는 제습층의 온도가 높을 때 재생층 공기와의 엔탈피 차이 즉 열적 편차가 감소하므로 Fig. 4에 보인 ③의 상태변화와 같은 일탈이 억제되기 때문이다.

Fig. 9 및 Fig. 10에는 제습층 상태가 일정한 환경에서 재생층 공기 온도에 따른 제습량과 제습유용도의 변화를 각각 나타내었다. 표준 운전조건에서 재생 온도가 100℃ 근방에서 제습량과 제습유용도가 최대치를 보이고 있다. 고온의 공기를 이용할

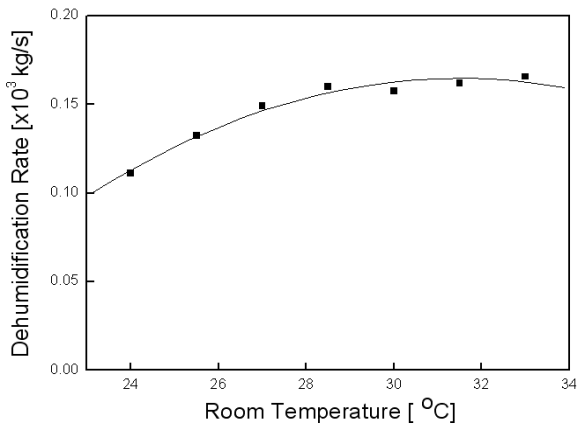


Fig. 7 Dehumidification rate vs. room temperature.

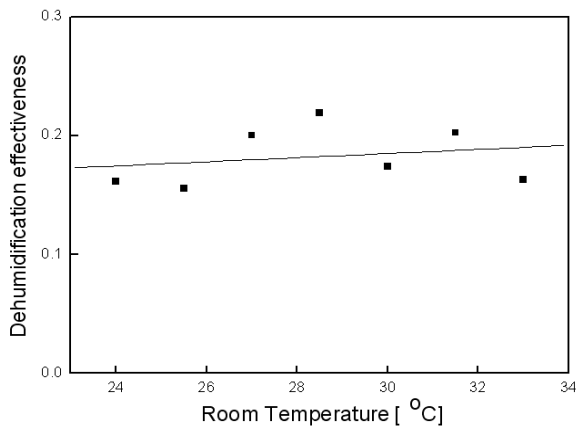


Fig. 8 Effects of room temperature on dehumidification effectiveness.

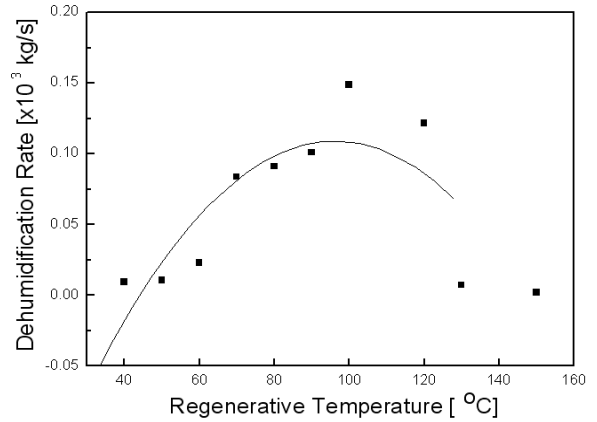


Fig. 9 Dehumidification rate vs. regenerative temperature.

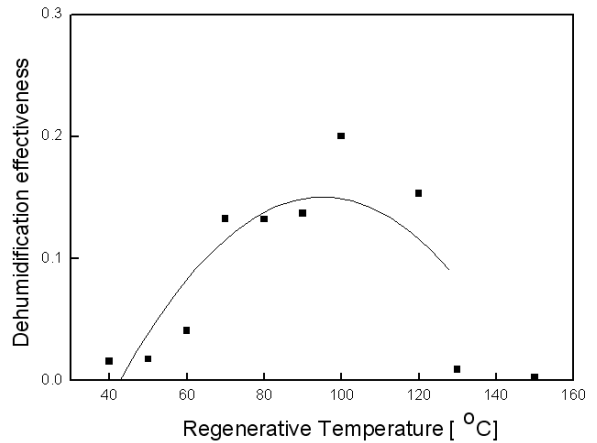


Fig. 10 Effects of regenerative temperature on dehumidification effectiveness.

때 낮은 상대습도로 재생은 매우 유리해지나 제습-재생 과정의 열적인 편차가 급격히 증대하여 제습 과정을 단순 가열에 가까운 경로로 유도하게 되고, 결국은 유용도가 거의 0에 접근하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 제습로터의 설계에는 재생과정에서 로터에 가해지는 열적 부하를 억제함으로써 제습과정이 단열과정에 근접하도록 하여야 할 것이다.

로터의 회전 속도에 따른 제습기 성능이 Fig. 11 및 Fig. 12에 주어져 있다. 로터의 회전속도가 약 1.0~1.5 rpm 범위에서 일 때 두 가지 성능지표가 모두 최고치를 나타내고 있으며 Kodama et al.⁽³⁾ 및 Lee and Song⁽⁵⁾ 등이 제시한 바와 같이 최적 회전 주기가 존재함을 확인할 수 있다. 회전수가 일정 속도를 초과하면 제습-재생의 주기가 지나치게 단축되며 불완전 재생 등으로 유용도가 급격히 감소하게 되므로 이에 관한 정량적 분석과 설계자료 구축

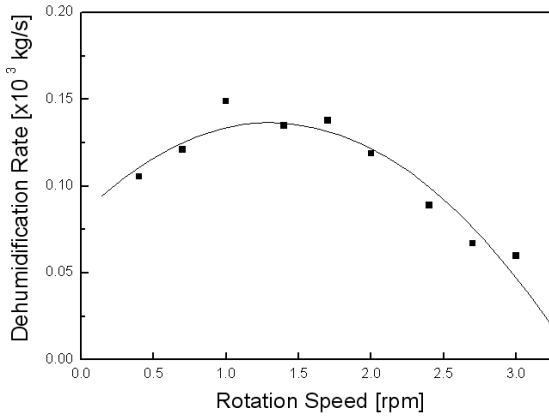


Fig. 11 Dehumidification rate vs. rotation speed.

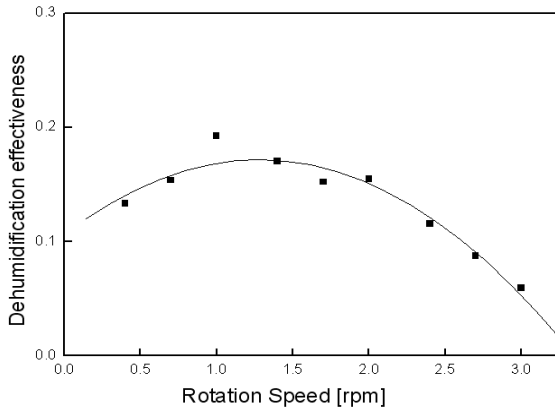


Fig. 12 Effects of rotation speed on dehumidification effectiveness.

이 필요하다.

제습기내 물질전달현상의 적정한 파악을 위하여 로터 길이 및 전면 풍속에 따라 정해지는 유동 및 물질전달현상의 확립 여부를 확인할 필요가 있다. 실험범위의 Reynolds 수는 230~810로서 층류 유동 영역에 있다. 전면 풍속에 따른 로터 유동통로에서의 전달 특성을 판단하기 위하여 유체역학적 입구 길이 L_{ef} 와 물질전달 입구길이 L_{em} 을 다음과 같이 추산하였다.

$$L_{ef} = 0.05 Re_{D_h} D_h \quad (6)$$

$$L_{em} = 0.017 Re_{D_h} Sc D_h \quad (7)$$

유체역학적 입구길이 L_{ef} 와 물질전달 입구 길이 L_{em} 의 계산 결과를 Fig. 13에 제시하였으며 유동 및 물질전달계수가 매우 큰 입구영역의 범위에 걸

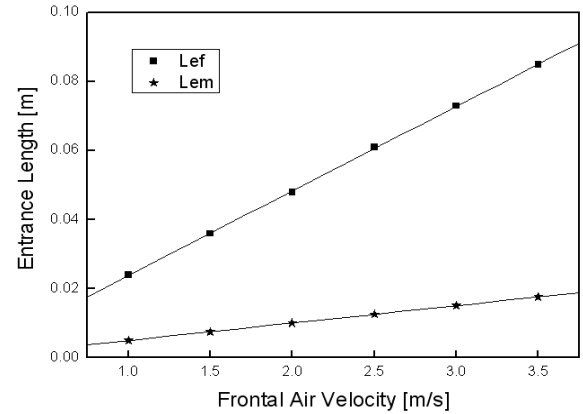


Fig. 13 L_{ef} and L_{em} vs. various frontal air velocity.

쳐 있음을 나타내고 있다.

이론적 유용도를 계산하기 위한 물질전달계수 g_m 은 무차원수인 Sherwood 수 Sh 수와 물질확산계수 D_m 을 이용하여 다음의 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$g_m = Sh \rho D_m / D_h \quad (8)$$

여기서 Sh 는 평균 Nusselt 수에 관한 관계식으로 부터 유추 계산할 수 있으며 Lewis 수를 1로 가정할 때 길이 L 전체가 입구영역에 해당하는 원관의 경우

$$Sh_{D_h} = 3.66 + \frac{0.065 (D_h/L) Re_{D_h} Sc}{1 + 0.04 [(D_h/L) Re_{D_h} Sc]^2} \quad (9)$$

$$Re \leq 2300$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 공기내 수증기 확산현상에 대한 Sc 수는 대체로 0.61이며 물질확산계수 D_m 는 식(10)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$D_{H_2O\ air} = 1.97 \times 10^{-5} \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.685} m^2/s; \quad (10)$$

$$273K < T < 373K, \quad P_0 = 1\ atm$$

계산 결과 실험범위의 Re 수 230~810에 대하여 Sh 수의 범위는 4.5~6.0이며 제습과정 측의 단열효과도의 이행정도를 나타내는 지표인 ε_h 의 값은 0.25전 후로서 재생과 제습과정 사이의 엔탈피 이동이 제습로터 성능을 크게 감소시키는 악영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

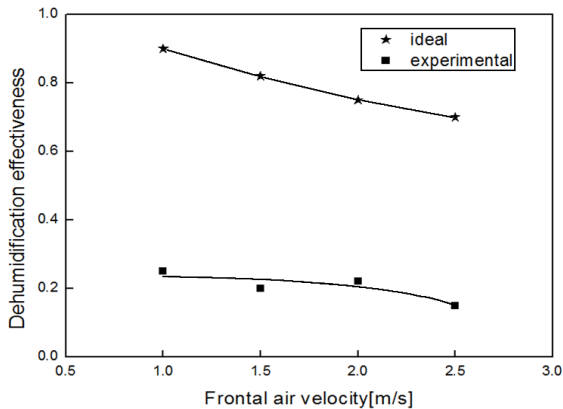


Fig. 14 Effects of frontal air velocity on dehumidification effectiveness.

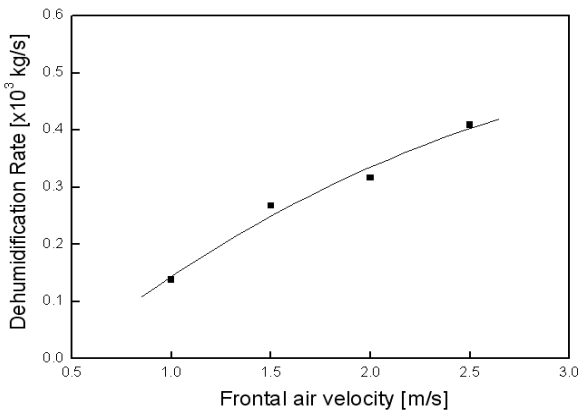


Fig. 15 Dehumidification rate vs. frontal air velocity.

Fig. 14에 제습로터의 전면 풍속에 따른 유용도 변화를 이론적인 유용도 ϵ_{ideal} 와 함께 제시하였다. 전면 풍속의 증가는 유용도 및 Ntu 의 감소로 나타나지만 Fig. 15에 주어진 것과 같이 풍량에 비례하는 제습량은 전면풍속에 따라 단순 증가함을 보여 주고 있다. 또한 ϵ_{ideal} 과 실제 유용도의 차이는 앞서 기술된 바와 같이 제습-재생과정에서의 엔탈피 이동으로 인한 유용도 손실이며 실용제품의 설계상 극복해야 할 가장 중요한 문제로 생각된다.

4. 결 론

제습기의 제반 운전조건에 따른 제습 로터 특성에 관하여 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 제습-재생 사이클간의 엔탈피 이동으로 제습 및 재생 유용도가 공히 감소하여 그 크기 ϵ_h 가 75%

에 이르는 것을 확인하였으며 실제 로터의 설계상을 줄이는 다양한 방안이 추구되어야 한다.

(2) 제습층의 온도가 높을 때 재생층 공기와의 엔탈피 차이 즉 열적 편차가 감소하므로 제습량과 제습유용도가 다소 증가하였다. 또한 상대습도의 증가에 따라 제습량은 일정치에 접근하는 단순증가를 보이나 유용도는 오차범위에서 0.2부근의 값을 가진다.

(3) 재생온도가 낮을 때는 재생불량으로 유용도가 크게 감소하며 재생 온도가 높아질 때 재생은 유리해 지나 제습-재생 과정의 열적인 편차가 급격히 증대하여 제습층의 유용도가 0까지 감소하는 결과를 초래한다. 따라서 시스템에 대한 최적 재생온도가 존재하며 본 연구의 100℃ 전후가 되었다.

(4) 제습 로터의 최적 회전수가 존재하며 일정치를 초과하면 제습-재생의 주기가 지나치게 단축되어 불완전 재생 등으로 유용도가 최대치의 1/4수준으로 급격히 감소하게 된다.

(5) 전면풍속이 증가함에 따라 유용도가 다소 감소하는 것과 풍량증가로 인한 제습량의 증가 특성은 통상의 열교환기의 특성과 유사하다.

(6) 제습기내 물질전달현상의 적정한 파악을 위하여 로터 길이 및 전면 풍속에 따라 정해지는 유동 및 물질전달현상의 확립 여부를 확인할 필요가 있으며 본 연구에 적용된 것과 유사한 소형 제습기의 경우 전달현상이 입구영역 범위에 걸쳐 있음을 유의하여야 한다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원과 2010년도 국민대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드린다.

참고문헌

1. Zheng, W. and Worek, W. M., 1993, Numerical simulation of combined heat and mass transfer processes in a rotary dehumidifier, Numerical Heat Transfer, Vol. 23, pp. 211-232.
2. Lee, G., Lee, D.-Y., and Kim, M. S., 2004, Development of a linearized model and verification of the exact solution for the analysis of a desiccant dehumidifier, Korean Journal of

- Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 811-819.
3. Kodama, A., Hirayama, T., Goto, M., Hirose, T., and Critoph, R. E., 2001, The use of psychrometric charts for the optimisation of a thermal swing desiccant wheel, Applied Thermal Engineering, pp. 1657-1674.
 4. Gao, Z., Mei, V. C., and Tomlinson, J. J., 2005, Theoretical analysis of dehumidification process in a desiccant wheel, Heat Mass Transfer, Vol. 211-232.
 5. Lee, D.-Y. and Song G.-E., 2009, Theoretical derivation of the optimum rotation speed of a desiccant rotor, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 21, No. 10, pp. 575-582.
 6. Neti, S. and Wolfe, E. I., 2000, Measurements of effectiveness in a silica gel rotary exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 309-322.
 7. Zhang, L. Z., 2006, Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures, Energy, Vol. 31, No. 8/9, pp. 1228-1242.
 8. Zhang, L. Z. and Niu, J. L., 2002, Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery, Applied Thermal Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 1347-1367.
 9. Cho, S. J., Moon, I. H., Jung, M. J., and Hwang, Y. K., 2000, An experimental study on Characteristics of performance of rotary dehumidifier, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, pp. 374-379.