대한설비공학회 2008 하계학술발표대회 논문집 pp. 0603 ~ 0608

08-S-100

이론적 방법에 의한 제습로터 최적 회전속도의 결정

송 귀 은, 이 대 영†

한국과학기술연구원 에너지 메카닉스 연구센터

Theoretical Determination of Optimum Rotating Speed of Desiccant Rotor

Gwi-Eun Song, Dae-Young Lee†

Energy Mechanics Research Center, KIST, Seoul 120-700, Korea

(Received May 16, 2008)

ABSTRACT: A simple equation to find a optimum speed of desiccant rotor is presented in this theoretical study. Usually the determination of optimum speed of desiccant rotor requires tedious and lengthy procedures by solving governing differential equations with many complicated parameters. The determining equation of optimal rotating speed is derivated from governing differential equations with three linearization assumptions, which simplify temperature profile linear along the desiccant rotor depth, psychrometric chart within a proper range, and relative humidity-sorption capacity relation. This study shows that the dominant parameters of optimal rotating speed of desiccant rotor are NTU, flow velocity, desiccant rotor depth, and temperature different between dehumidification and regeneration. The comparison shows the good agreement between complicated calculation results and simple theoretical equation prediction.

Key words: Desiccant rotor(제습로터), Optimal rotating speed(최적 회전속도), Analytic solution(이론해)

기 호 설 명

C_p	: 비열	[J/kg・K]	
C_{pm}	: 흡착량포함 제습로터 비열	[J/kg・K]	
f_m	: 제습제 질량비		
h	: 대류열전달계수	[W/m^2・K]	
h_D	: 핀의 열전도율	[W/m^{2}K]	
i_{fg}	: 흡착열	[kJ/kg]	
L	: 채널길이	[m]	
N	: NTU		
T	: 온도	[^{o}C]	
t_p	: 제습주기	[s]	
u_a	: 전면속도	[m/s]	
W	: 제습제흡습량	[kg/kg]	
Y	: 절대습도	[kg/kg]	

그리스 문자

α	: 단위체적당 표면적	[m^2/m^3]
γ	: 제습제 등온선의 기울기	
ε	: 공극률	

† Corresponding author
Tel.: +82-2-958-5674; fax: +82-2-958-5690
E-mail address: ldy@kist.re.kr

θ : 무차원 온도
λ : 해석해의 지수
ϱ : 밀도 [kg/m^3]
σ : 제습제의 흡습량과 관련된 무차원수
τ : 무차원 시간
ψ : 무차원화된 온도변화에 따른 습도변화율
ϕ : 상대습도
ω : 무차원 절대습도

하첨자

a : 공기
i : 입구, 엔탈피
o : 출구
p : 제습과정
r : 재생과정
w : 재습기

1. 서 론

산업기술의 발전과 쾌적한 환경의 중요성이 커짐에 따라 품질 향상, 생산성 증대, 및 공기 질을 위하여 적절한 습도조절의 중요성이 증가되어왔다. 습도조절을 위한 제습 방법은 냉각식과 제습로터를 이용하는 방법이 있으며 냉각식에 비하여 제습로터를 이용하는 방법은 재열이나 착상의 문제가 없는 등의 이점들이 있어서 관련 연구자들의 관심이 지속적으로 증가되고 있다. 제습로터에 사용되는 제습제는 습기에 대하여 강한 친화력이 있는 물질로서 주위 공기에서 직접 수증기를 흡수할 수 있으며 제습제에 열을 가하면 흡수된 수증기가 증발하여 제습제가 다시 건조되므로 반복하여 사용할 수 있다. 반복 사용을 위해 Fig. 1에서처럼 제습제를 코팅한 벌집구조를 로터형태로 제작하여 제습 공기와 재생 공기가 분리되어 흐르는 덕트에 설치하고 제습로터를 회전시킴으로서 제습과 재생 과정이 이루어지게 된다.

제습로터의 성능에 영향을 미치는 요인으로는 제습제의 등온선(isotherm curve), 비열, 밀도 등 물성에 관련된 것, 제습기의 다공도, 유로형상, 유로길이, 지름 등 형상에 관련된 것, 제습공기 온습도, 재생공기 온습도, 유량, 제습기 회전속도 등 운전조건에 관련된 것 등 상당히 여러 가지 인자들이 복합적으로 영향을 미치고 있다. 수치해석 기법을 통해서 개별적인 인자들이 제습로터

Fig. 1 Schematic drawing of desiccant rotor

성능에 미치는 영향을 파악할 수는 있지만, 수많은 인자들의 상관관계를 분석하거나 제습 및 재생과정의 근본적인 현상을 이해하기 위한 방법으로는 모자라는 점이 있다.

이러한 많은 인자들 중에서도 특히 최적 제습로터 회전속도의 결정이 중요하다. 이 회전속도는 제습로터 제조업체에서 표시하여 납품하며, 저회전속도 운전조건에서는 제습성능이 크게 낮아지는 경향이 있으며 고회전속도 운전 조건에서는 극단적으로 회전수를 크게 하지 않는 한 제습성능은 별로 저하하지 않는다. 그러나 제습기 건조 출구공기의 온도는 상승하기 때문에 실내로의 급기온도도 상승해 프로세스 성능의 저하를 초래할 수도 있다. 재생 공기량에 대해서는 투입열량에 직접 영향을 주기 때문에 적절한 풍량을 선택할 필요가 있다. 재생 공기량이 과다하면 프로세스의 배기온도가 상승해 COP가 저하하고 반대로 적어지면 제습성능의 저하를 일으킨다.

기존의 이론연구에서 실제 제습로터가 사용되는 설계 및 운전 조건에서는 제습제 등온선, 습공기 선도, 제습로터 내의 공기 온습도 분포 등이 거의 선형적인 모습을 보이므로 이들에 대한 선형화 가정을 통하여 제습기에서의 열 및 물질 전달 관련된 지배방정식들을 선형화하여 제습로터의 제습 및 재생 과정에서의 온습도 변화에 대한 이론해(3)를 구할 수 있으며 수치해석 결과와 잘 맞는 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 이러한 이론해에 바탕을 두어 제습로터 출구에서의 절대습도가 최소가 될 수 있는 최적 회전속도를 얻을 수 있는 최적 회전속도식을 이론적으로 유도하였다. 단순한 형태의 이론식을 통해 최적 회전속도의 결정 인자와 그 관계를 제시하였으며, 수치해석 결과와 유도된

이론식의 계산 결과를 서로 비교하여 그 이론식의 타당성을 검증하였다.

2. 지배 방정식과 무차원 인자

제습기에서의 제습 및 재생과정을 간략 모델화한 식들로부터 제습기에서의 열 및 물질 전달 과정을 다음의 식(1)들로 나타낼 수 있다.

$$\rho_a\left(\varepsilon\frac{\partial Y_a}{\partial t}+u_a\frac{\partial Y_a}{\partial x}\right)=\alpha h_D(Y_w-Y_a) \tag{1}$$

$$(C_{pa}+Y_aC_{pv})\rho_a\left(\varepsilon\frac{\partial T_a}{\partial t}+u_a\frac{\partial T_a}{\partial x}\right)=\alpha h(T_w-T_a) \tag{2}$$

$$f_m\rho_w(1-\varepsilon)\frac{\partial W}{\partial t}=\alpha h_D(Y_a-Y_w) \tag{3}$$

$$\rho_w(1-\varepsilon)\frac{\partial(C_{pw}+f_mWC_{pl})T_w}{\partial t} =\alpha(h_D(Y_a-Y_w)i_{fg}+h(T_a-T_w)) \tag{4}$$

위의 식들을 이론해를 구하기위해서 3가지 가정을 하여 지배방정식을 선형화하여 풀 수 있다. 제습제 등온선의 선형화, 습공기 선도의 선형화, 공기온습도 분포의 선형화(4)의 3가지 선형화 과정을 통해서 출구에서의 온도와 습도에 대한 다음의 이론해(3)를 구할 수 있다.

$$\theta_{a,p,o}=\left[A\exp(-\lambda_1\tau)+B\exp(-\lambda_2\tau)\right]\frac{1}{1/N+1/2} \tag{5}$$

$$\omega_{a,p,o}=\left[C\exp(-\lambda_1\tau)-D\exp(-\lambda_2\tau)\right]\frac{1}{1/N+1/2} \tag{6}$$

이 이론해는 도출에 사용된 많은 선형화 가정들에도 불구하고 이론해와 수치해가 거의 유사한 결과를 보이는 것으로 알려져 있으며, 식에서 사용된 무차원화된 변수들의 정의는 다음과 같다.

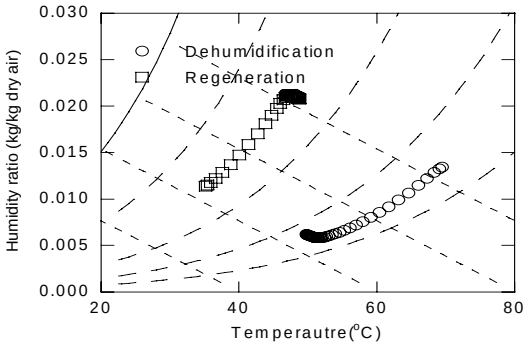


Fig. 2 Psychrometric variation of process outlet air

$$\tau=t/t_p \tag{7}$$

$$\theta=\frac{T-T_{a,p,i}}{T_{a,r,i}-T_{a,p,i}} \tag{8}$$

$$\omega=\frac{Y-Y_{a,p,i}}{C_{pa}(T_{a,r,i}-T_{a,p,i})/i_{fg}} \tag{9}$$

$$N=\frac{\alpha hL}{\rho_aC_{pa}u_a} \tag{10}$$

주요 무차원 인자(5)들의 정의를 Table 1에 정리하였다. 제습로터에서의 열 및 물질전달은 ψ, κ, σ, N의 4가지 무차원 인자들만에 의하여 결정되며, 이 4가지 무차원 인자들은 각각 제습로터 내의 온습도분포 범위에서 상대습도 일정선의 평균 기울기, 제습로터의 열용량, 제습로터의 흡

Table 1 Expression of parameters

	Expression		Expression		Expression
A	$\frac{1-\kappa\lambda_2+\omega_{a,r,i}}{\kappa(\lambda_1-\lambda_2)(1+\exp(-\lambda_1))}$	C	$(\kappa\lambda_1-1)A$	λ_1	$\frac{1+\psi+\kappa/\sigma}{2\kappa}\left(1+\sqrt{1-\frac{4\kappa/\sigma}{(1+\psi+\kappa/\sigma)^2}}\right)$
B	$\frac{\kappa\lambda_1-1-\omega_{a,r,i}}{\kappa(\lambda_1-\lambda_2)(1+\exp(-\lambda_2))}$	D	$(1-\kappa\lambda_2)B$	λ_2	$\frac{1+\psi+\kappa/\sigma}{2\kappa}\left(1-\sqrt{1-\frac{4\kappa/\sigma}{(1+\psi+\kappa/\sigma)^2}}\right)$
ψ	$\frac{Y_{s0}i_{fg}\xi}{C_{pa}(T_{a,r,i}-T_{a,p,i})}$	κ	$\frac{\rho_wC_{pm}(1-\varepsilon)}{\rho_aC_{pa}u_a}\frac{L}{t_p}(1/N+1/2)$	σ	$\frac{\gamma f_m\rho_w(1-\varepsilon)}{\rho_au_aY_{s0}}\frac{L}{t_p}(1/N+1/2)$

Table 2 Calculation condition

parameter	unit	value
$T_{a,p,i}$	℃	30
$T_{a,r,i}$	℃	60
$Y_{a,p,i}$	kg/kg	0.015
$Y_{a,r,i}$	kg/kg	0.015
f_m	-	0.7
ε	-	0.85
L	m	0.2
u_a	m/s	2.0
NTU	-	8.0

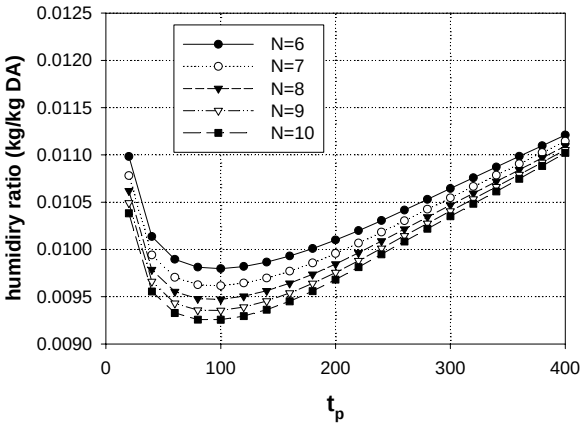
습용량, 열 및 물질전달의 용이성을 각각 의미한다.

3. 설계 변수에 따른 성능 변화

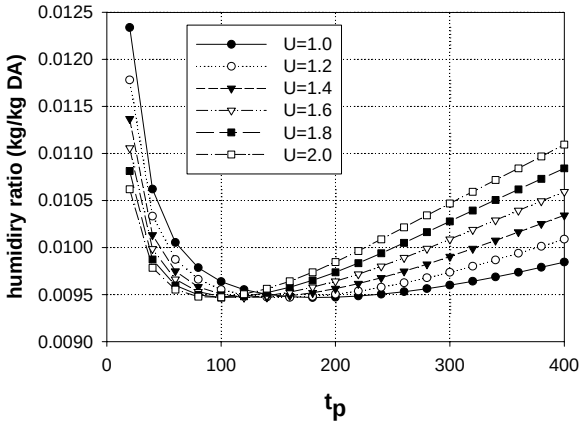
표준 계산 조건들을 Table 2에 정리하였으며, 이러한 조건에서 제습로터에서의 열 및 물질 전달에 관한 지배방정식을 수치적으로 풀어서 얻은 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 계산은 NTU, 유속, 제습로터의 깊이를 각기 달리했을 때에 제습로터 회전 주기에 따라 제습출구 공기에서의 절대습도의 변화를 살펴보았다.

제습 주기가 길어질수록 제습 출구 공기의 온도는 지속적으로 낮아지며, 출구 절대습도는 낮아지다가 다시 증가하는 경향을 보이며 출구 절대 습도가 최소가 되는 제습 주기가 존재함을 알 수 있다. 다른 인자들은 모두 일정하고 NTU만 변화하는 경우의 계산 결과인 Fig. 3(a)를 통해 NTU 증감의 영향을 볼 수 있다. NTU가 증가함에 따라 출구 공기 온도는 증가하고 절대 습도는 감소하는 경향을 보이며 출구공기 절대습도가 최소가 되는 제습 주기는 큰 변화 없이 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

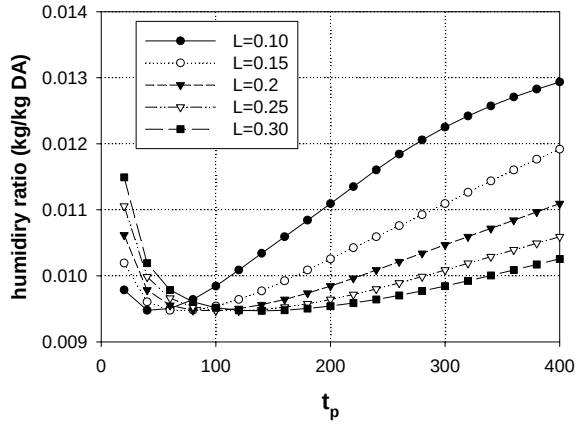
공기 유속만을 달리할 경우의 출구 공기의 절대습도의 변화를 정리한 Fig 3(b)를 보면, 최소 절대습도는 큰 변화 없이 일정하지만 최적 회전 주기는 크게 변화하여 유속이 빠를수록 최적 회전 주기가 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 공기가 빨리 제습로터를 지나갈수록 로터의 회전 속도를 높여주어야 하며, 유속을 낮춘다고 해서 이론적으로 얻을 수 있는 최소 절대습도를



(a) NTU



(b) Velocity



(c) Length

Fig. 3 Effect of dehumidification period on process outlet humidity (a) humidity -NTU, (b) humidity-velocity, (c) humidity-flow depth

변화시킬 수는 없다. 또한 유속이 빠를수록 최적 회전속도에 따른 성능 변화가 크지만 유속이 느린 경우에는 회전 주기에 따른 출구 절대습도의 기울기가 완만하여 회전속도 변화에 따른 성능 변화가 비교적 적다.

NTU와 공기 유속을 일정하게 하고 제습로터의 깊이를 달리했을 때의 출구 절대습도의 변화를 Fig. 3(c)에서 살펴볼 수 있다. NTU와 공기 유속가 일정할 때에 제습로터의 깊이를 늘림에 따라 제습 주기가 늘어나며 기울기가 완만해지므로 제습로터 회전속도의 영향이 감소하게 된다.

4. 최적 회전속도 이론해

최적 회전속도를 계산하기위해서 식(6)의 출구 습도의 이론해를 한 주기에 대하여 적분하고, 제습주기에 대하여 기울기가 0인 조건을 만족하는 제습주기를 이론해로부터 구할 수 있다.(6)

$$\lambda_1 \lambda_2^2 = 12 \tag{11}$$

최적 회전속도가 이론해의 시상수들로 이루어진 함수가 12가 되는 조건에서 이루어지는 것을 알 수 있다. 위의 식에서 다시 Table 1의 정의를 적용하여 κ에 대하여 정리하면 다음의 식으로 정리된다.

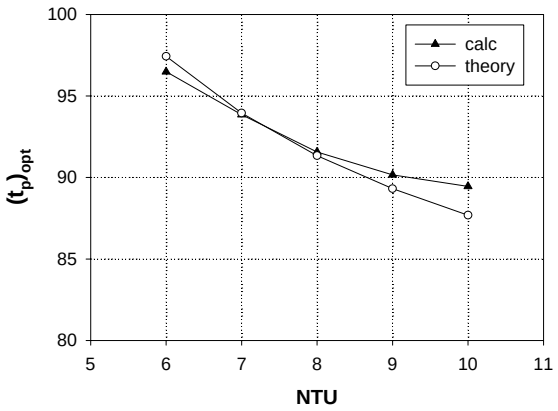
$$\kappa(t_p)\big|_{opt} = \left(\frac{1+\psi+\kappa/\sigma}{2}\right)\sqrt[3]{\frac{(\kappa/\sigma)\left(1-\sqrt{1-\dfrac{4\kappa/\sigma}{(1+\psi+\kappa/\sigma)^2}}\right)}{3(1+\psi+\kappa/\sigma)^2}} \tag{12}$$

일반적인 값 범위에서 최적 회전속도에서의 κ 식은 아래의 식으로 단순화 될 수 있다.

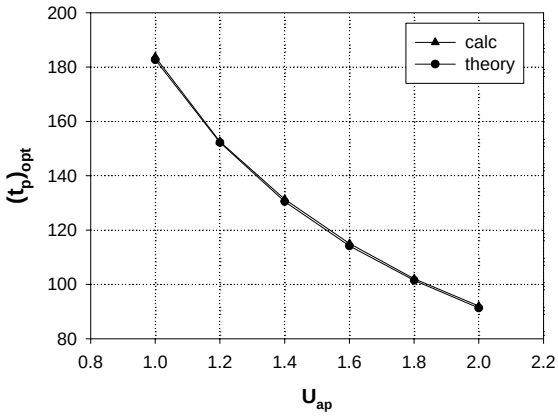
$$\kappa(t_p)\big|_{opt} = \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{2}{3}}\left[\frac{(\kappa/\sigma)^2}{(1+\psi+\kappa/\sigma)}\right]^{1/3} \tag{13}$$

최적 회전속도에 대한 위의 식을 Table 1에서 κ의 정의에 대입하여 최적 회전 속도에 대한 식을 이끌어 낼 수 있다.

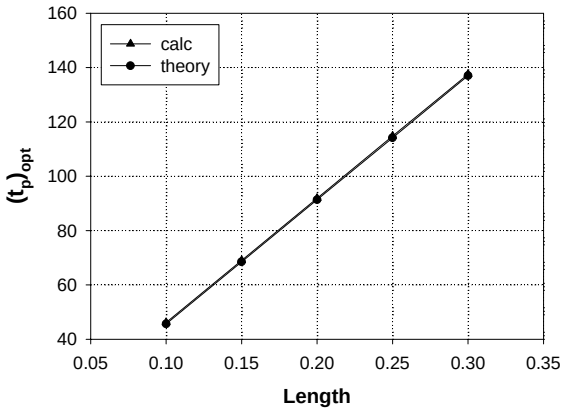
$$(t_p)_{opt} = \frac{\rho_w C_{pm}(1-\varepsilon)L}{\rho_a C_{pa} u_a \kappa_{opt}}(1/N+1/2) \tag{14}$$



(a) NTU



(b) Velocity



(c) Length

Fig. 4 Parameter dependency of optimal rotating period of desiccant rotor (a) $(t_p)_{opt}$-NTU, (b) $(t_p)_{opt}$-velocity, (c) $(t_p)_{opt}$-flow depth

따라서 비열, 밀도, 다공도, 유로길이, 제습공기 온습도, 재생공기 온습도, 유량 등이 설계되었으면 제습로터의 최적 회전속도를 손쉽게 결정할 수 있다. 일반적인 경우에 최적 회전속도에서의 κ/σ 는 ψ에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작으므로 최적 회전속도는 유속, 제습로터 길이, 제습/재생 온도차, NTU에 의해 결정되며 다음의 비례식 관계로 표현할 수 있다.

$$\left(t_p\right)_{opt} \sim \frac{L\left(1/N+1/2\right)\left(\frac{C_{pa}}{Y_{s0} i_{fg} \xi}+\frac{1}{\Delta T}\right)^{1/3}}{u_a} \qquad (15)$$

5. 설계변수에 따른 최적 회전속도의 변화

수치 계산을 통해서 최적 회전속도를 계산하기 위해서 Fig. 3의 그림에서 기울기가 0이 되는 최소값의 회전 주기를 수치 해석적 방법으로 계산하여 이론식과 수치계산 결과와의 비교를 Fig. 4에 제시하였다. 최적 회전주기가 1/NTU에 비례하므로 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 전체적으로 역비례 관계가 양쪽 결과에서 잘 들어맞고 있다. 이것은 이론식으로부터 유도된 비례식(15)에서 최적 회전주기가 NTU와 역비례관계에 있다는 설명과 일치하는 결과이며 NTU가 6~10 범위에서 3 % 미만의 차이를 보이고 있다. NTU가 커질수록 주기가 짧아져서 더욱 빠른 속도로 제습로터를 회전시켜야함을 알 수 있다.

유동 속도를 1 m/s에서 2 m/s로 증가시키는 경우에도 비례식(15)의 역비례 관계가 Fig. 4(b)를 통해서 잘 확인되고 있다. 제습로터 길이를 변화시킨 경우의 계산 결과의 비교에서도 비례식(15)의 비례 관계가 잘 들어맞고 있음을 확인 할 수 있다.

6. 결 론

제습로터의 회전속도는 제습냉방 시스템의 성능에 중요한 영향을 미침에도 불구하고 최적 회전속도를 결정하기 위해서는 여러 영향 인자들을 각각 고려하여 많은 수치계산을 통해서 결정하여야 하였다. 그러나 제습로터 내의 공기 온도분포의 선형화, 습공기 선도의 선형화, 제습제 등온곡선의 선형화 과정을 통해서 최적의 회전속도를 계산할 수 있는 이론해를 유도하였다.

이론해와 수치계산 결과와의 비교를 통해서 적절한 운전 및 설계 범위에서 이론적 예측이 여러 선형화 가정에도 불구하고 상당히 정확한 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있었으며, 다양한 설계변수 등을 일일이 고려하여 지루하고 장황한 수치계산이 아닌 손쉬운 계산을 통해서 최적 회전속도를 결정할 수 있다. 이러한 최적 회전 속도에 대한 이론해는 각 설계 및 운전 인자에 따른 정성적 변화예측에 활용하거나 실험 결과를 보완하여 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Zheng, W. and Worek, W. M., 1993, Numerical simulation of combined heat and mass transfer process in a rotary dehumidifier, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 23, pp. 211-232.
2. Pesaran, A., and Mills, A., 1984, Modeling of solid-side transfer in desiccant particle beds, Solar Engineering, pp. 177-185.
3. 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.
4. Hwang, Y.-S., Lee, D.-Y., and Park, B., 2004, Theoretical analysis on the heat and mass transfer in a sorption cool pad, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 167-174.
5. 이길봉, 김민수, 이대영, 2005, 제습로터의 운전 특성을 지배하는 무차원 인자의 도출과 해석, 설비공학회 논문집, 제17권, 제7호, pp. 611-619.
6. 송귀은, 이대영, 2007, 제습로터의 최적 회전속도, 설비공학회 하계학술대회.