

로터리 제습기의 일반 해석 모델

김 동 선[†], 이 대 영^{*}
 한국교통대학교 기계공학과, ^{*}KIST

Development of a General Analytical Model for Desiccant Wheels

Dong-Seon Kim[†], Dae-Young Lee^{*}

Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation,
 Chungbuk 380-702, Korea

^{*}Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received November 30, 2012; revision received January 26, 2013)

ABSTRACT: The absence of a simple and general analytical model has been a problem in the design and analysis of desiccant-assisted air-conditioning systems. In this study, such an analytical model has been developed based on the approximate integral solution of the coupled transient ordinary differential equations for the heat and mass transfer processes in a desiccant wheel. It turned out that the initial conditions should be determined by the solution of four linear algebraic equations including the heat and mass transfer equations for the air flow as well as the energy and mass conservation equations for the desiccant bed. It is also shown that time-averaged exit air temperature and humidity relations could be given in terms of the heat and mass transfer effectiveness.

Key words: Desiccant evaporative cooling(제습냉방), Analytical model(해석모델), Effectiveness(유효도), Desiccant wheel(로터리 제습기)

기 호 설 명

A	: 면적 [m ²]	\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
c	: 단위부피당 수분함유량 [kg/m ³]	N	: Number of Transfer Units [-]
C^*	: 열용량비, $\dot{m}_a C_{pa} \tau / m_s C_{ps}$ [-]	\dot{n}	: 물질유속 [kg/m ² s]
C_p	: 비열 [kJ/kgK]	\dot{q}	: 열유속 [kW/m ²]
h	: 열, 물질전달계수 [kW/m ² K, m/s]	T	: 온도 [K]
h_{fg}^*	: 흡착열 [kJ/kg _{water}]	t	: 시간 [s]
Ja	: Jakob 수 [-]	t^*	: 무차원 시간, t/τ [-]
L	: 유로길이 [m]	u	: 평균속도 [m/s]
m	: 질량 [kg]	x	: 유동방향 좌표 [m]

그리스 문자

χ	: 절대습도 [kg _{water} /kg _{dry air}]
ε	: 유효도 [-]
ρ	: 밀도 [kg/m ³]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-43-841-5125; fax: +82-43-841-5120

E-mail address: dongseonkim@ut.ac.kr

τ : 제습 또는 재생주기 [s]
 ξ : 유동방향 무차원 좌표, x/L [-]

상 · 하첨자

0, 1 : 시작, 종료시점
 p, r : 제습, 재생운전
 i, o : 입, 출구
 t, m : 열, 물질전달
 s, a : 제습제, 공기
 s, l : 현열, 잠열

1. 서 론

로터리 제습기는 실내 환경의 쾌적성 또는 산업 환경의 요구조건에 맞추어 건조한 공기를 제조하기 위해 많이 사용되는 제습기 중의 하나로서 저급 열에너지로 구동할 수 있기 때문에 신재생에너지의 보급과 관련하여 전 세계적으로 많은 관심을 받고 있다. 로터리 제습기에 대해서는 과거로부터 상당한 연구가 진행되어왔지만 로터리 제습기의 주기적, 비선형적 거동을 정확하고 단순하게 기술할 수 있는 모델이 개발되어 있지 않아 로터리 제습기를 포함한 공조 설비의 성능해석과 모사에 큰 문제점으로 남아있다.

전술한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 국내에서는 최근 Kim⁽¹⁾이 Kim et al.⁽²⁾의 근사해를 바탕으로 유용도 모델을 개발하여 발표한 바 있다. 하지만 이 모델은 제습과 재생 운전 주기가 동일한 경우에만 적용이 가능하기 때문에 보통 고온으로 제습기를 재생하는 경우 제습구간보다 재생구간을 작게 하여 최적화^(3,4)를 이루어 볼 때 그 적용 범위가 제한적이다. 이런 이유로 본 연구에서는 보다 넓은 운전조건에서 일반적으로 적용할 수 있는 모델을 제시하고 기존의 실험 데이터를 이용하여 검증하겠다.

2. 일반모델

2.1 근사해

Kim et al.⁽²⁾은 공간적으로 제습제와 공기의 경계면에서 열과 물질 유속이 균일하다고 가정하고 제습제에 대한 지배방정식을 풀어 제습제의 평균 온

도와 수분함량에 대한 시간의 함수를 구하였다. 그러나 균일유속의 가정은 제습과 재생 주기가 아주 길 경우에만 유효하므로 고온으로 짧은 시간 동안만 재생할 경우 오차가 무시할 수 없을 정도로 커진다. 또한 공기가 아니라 제습제의 상태를 근사해로 주었기 때문에 우선 제습제의 상태를 계산한 후에 공기의 상태를 계산해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 비균일유속을 가정하고 공기 흐름에 대한 지배방정식을 풀어 건구온도와 절대습도의 근사해를 구하였다.

실용적인 관점에서 일반모델은 짧은 재생주기(τ_r)와 긴 제습주기(τ_p)를 갖는 사이클에서 로터리 제습기의 거동을 사실적으로 기술할 수 있어야 한다. 이해를 돕기 위해 이런 경우의 제습기의 유로 내부 온도 분포를 Fig. 1에 개략적으로 도시하였다. 제습공기는 $x = 0$ 에서 유입하고 재생공기는 $x = L$ 에서 유입하며 제습운전의 초기($t = 0$)에는 T_{spi} 와 T_{spo} 사이의 실선으로 제습제의 온도 분포를 표시하였고 재생운전의 초기($t' = 0$)에는 T_{sri} 와 T_{sro} 사이의 실선으로 온도 분포를 표시하였다. 또한 파선(---)은 제습공기, 일점쇄선(-.-)은 재생공기의 온도 분포를 나타낸다. 그림에서는 $\tau_p > \tau_r$ 인 경우를 나타내었는데 주목할 점은 $x = 0$ 에서의 제습제 온도차 ΔT_{s1} 이 $x = L$ 에서의 ΔT_{s2} 와 같지 않다는 것이다. 이는 다음과 같이 추론할 수 있다. $\tau_p > \tau_r$ 인 경우 제습제의 평균온도는 제습공기의 입구온도 T_{api} 에 더 가까워야 하므로 제습제의 온도 분포는 전반적으로 그림의 하부로 치우쳐있다. 우선 $x = 0$ 에서 T_{spi} 는 제습주기 τ_p 동안 T_{api} 에 의해 냉각되어 T_{sro} 까지 ΔT_{s1} 만큼 온도가 내려가고 그 크기는 초기값 ΔT_{s1m} 과 τ_p 에 비례한다.

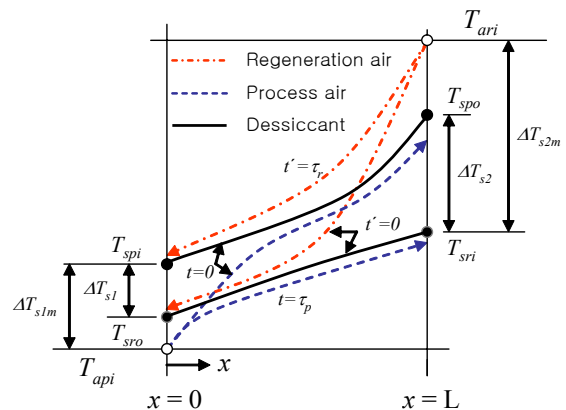


Fig. 1 Temperature profiles along the air channel in a desiccant wheel ($\tau_p > \tau_r$).

마찬가지로 $x = L$ 에서 T_{sm} 는 재생주기 τ 동안 T_{ari} 에 의해 가열되어 ΔT_{s2} 만큼 승온되는데 그 크기는 ΔT_{s2m} 과 τ 에 비례한다. 따라서 $\tau_p \neq \tau$ 인 경우에는 $\Delta T_{s1} \neq \Delta T_{s2}$ 임을 추측할 수 있다. 한편 그림에서 $\Delta T_{s2} > \Delta T_{s1}$ 로 나타낸 것은 ΔT_s 의 τ 에 대한 의존성보다는 ΔT_{sm} 에의 의존성이 더 크기 때문에 그림과 같이 $\Delta T_{s2m} > \Delta T_{s1m}$ 의 경우에 $\Delta T_{s2} > \Delta T_{s1}$ 으로 도시한 것이다. ΔT_{s2} 와 ΔT_{s1} 의 예측은 본 모델의 핵심적인 내용으로서 이후에 자세히 설명하겠다. 정리하면 Kim⁽¹⁾에서는 $\tau_p = \tau$ 이므로 $\Delta T_{s1} = \Delta T_{s2}$ 로 가정했으며 더 나아가 공기와 제습제의 온(습)도 분포들이 서로 평행(균일유속)하다고 가정하였으나 Fig. 1에 도시하였듯이 본 모델에서는 $\Delta T_{s1} \neq \Delta T_{s2}$ 이며 공기와 제습제의 온(습)도 분포들은 서로 평행하지 않음 즉, 열(물질)유속은 균일하지 않음을 가정한다. 비록 Fig. 1에서 온도 분포를 도시하고 설명하였으나 이상의 내용은 습도 분포에 대해서도 동일함을 기억하기 바란다.

우선 Kim et al.⁽²⁾의 제습제 평균온도 방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{d\bar{T}_s}{dt} = -\frac{A(\bar{q} + h_{fg}^* \bar{n})}{m_s C_{ps}} \quad (1)$$

여기서 A 와 m_s 는 단일 유로내의 제습제 표면적과 질량을 의미하며 변수위의 (-)는 공간 평균을 의미한다. 식(1)을 포함하여 이하의 식들은 제습과 재생운전을 막론하고 유효하므로 아래에서는 특별히 구분하지 않겠다.

한편 평균 열유속 \bar{q} 의 시간 구배는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = h_t \frac{d}{dt} (\bar{T}_s - \bar{T}_a) \quad (2)$$

여기서 공기온도의 공간평균인 \bar{T}_a 의 시간 구배가 출구온도 T_{ao} 의 시간구배와 동일함을 가정하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\bar{T}_a}{dt} = \frac{dT_{ao}}{dt} = \frac{A}{m_a C_{pa}} \frac{d\bar{q}}{dt} \quad (3)$$

그러면 식(1)과 식(3)을 식(2)에 대입하고 정리

하여 다음과 같이 \bar{q} 의 지배방정식을 얻는다.

$$\frac{d\bar{q}}{dt^*} = -\varepsilon_t C^* (\bar{q} + h_{fg}^* \bar{n}) \quad (4)$$

여기서 무차원 시간 t^* 는 $t^* = t/\tau$ 이고 ε_t 와 C^* 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon_t = \frac{N_t}{1 + N_t} \quad (5)$$

$$C^* = \frac{\dot{m}_a C_{pa} \tau}{m_s C_{ps}} \quad (6)$$

식(5)에서 N_t 는 열전달 NTU로서 $N_t = hA/\dot{m}_a C_{pa}$ 로 정의되며 식(6)의 C^* 는 제습제와 공기유동의 열용량비로 이해할 수 있다.

한편 Kim et al.⁽²⁾로부터 제습제의 평균 수분함량 방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{d\bar{c}_s}{dt} = -\frac{\rho_s A \bar{n}}{m_s} \quad (7)$$

또한 선형 평형방정식으로부터 다음의 관계를 얻는다.

$$\frac{d\bar{c}_a^*}{dt} = \left(\frac{\partial c_a^*}{\partial T} \right) \frac{d\bar{T}_s}{dt} + \left(\frac{\partial c_a^*}{\partial c_s} \right) \frac{d\bar{c}_s}{dt} \quad (8)$$

식(1)과 식(7)을 식(8)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 제습제와 평형상태인 공기의 수분함량 \bar{c}_a^* 에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\bar{c}_a^*}{dt} = -\frac{A}{m_s C_{ps}} \frac{\rho_a C_{pa}}{h_{fg}^* Ja_a} \left[\bar{q} + (1 + Ja_s) h_{fg}^* \bar{n} \right] \quad (9)$$

식(9)에서 Ja_a 와 Ja_s 는 두 종류의 Jakob 수로서 다음과 같이 정의하였다.

$$Ja_a = \frac{\rho_a C_{pa}}{h_{fg}^*} \left(\frac{\partial T}{\partial c_a^*} \right) \quad (10)$$

$$Ja_s = \frac{\rho_s C_{ps}}{h_{fg}^*} \left(\frac{\partial c_a^*}{\partial c_s} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial c_a^*} \right) \quad (11)$$

식(10)과 식(11)에서 볼 수 있듯이 Ja_a 와 Ja_s 는 각각 c_a^* 와 c_s 의 변화에 따른 제습제의 온도변화를 나타내는 인자로서 잠열에 대한 현열의 변화율을 결정하는 제습제의 열역학적 특성치들이다.

한편 식(2)와 식(3)에서와 같이 평균 물질유속 $\dot{\bar{n}}$ 와 공기의 평균 수분함량 \bar{c}_a 에 대해서도 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$\frac{d\bar{n}}{dt} = h_m \frac{d}{dt} (\bar{c}_a^* - \bar{c}_a) \tag{12}$$

$$\frac{d\bar{c}_a}{dt} = \frac{dc_{ao}}{dt} = \frac{\rho_a A}{m_a} \frac{d\bar{n}}{dt} \tag{13}$$

식(9)와 식(13)을 식(12)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 \bar{n} 의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\bar{n}}{dt^*} = - \frac{\varepsilon_m C^*}{h_{fg}^* Ja_a} \left[\bar{q} + (1 + Ja_s) h_{fg}^* \bar{n} \right] \tag{14}$$

식(14)에서 ε_m 은 물질전달 NTU, $N_m = \rho_a h_m A / \dot{m}_a$ 의 함수로서 아래와 같이 정의된다.

$$\varepsilon_m = \frac{N_m}{1 + N_m} \tag{15}$$

이상으로 \bar{q} 의 지배 방정식 식(4)와 \bar{n} 의 지배방정식을 식(14)를 유도하였다. 아래에서는 편의상 공간 평균을 의미하는 (-)를 생략하겠다. 또한 지배방정식들의 단위를 통일하기 위해 물질유속 대신 잠열유속 즉, $\dot{q}_l = h_{fg}^* \dot{\bar{n}}$ 를 정의하고 이와 구분하기 위해 현열유속 \bar{q} 는 \dot{q}_s 로 표기하겠다. 식(4)와 식(14)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d\dot{q}_s}{dt^*} = a_{11} \dot{q}_s + a_{12} \dot{q}_l \tag{16}$$

$$\frac{d\dot{q}_l}{dt^*} = a_{21} \dot{q}_s + a_{22} \dot{q}_l \tag{17}$$

여기서 a_{11} - a_{22} 는 다음과 같다.

$$a_{11} = -\varepsilon_t C^*, \quad a_{12} = -\varepsilon_t C^*, \quad a_{21} = -\frac{\varepsilon_m C^*}{Ja_a}$$

$$a_{21} = -\frac{\varepsilon_m C^*}{Ja_a} (1 + Ja_s) \tag{18}$$

식(16)과 식(17)의 해는 Kim⁽¹⁾과 Kim et al.⁽²⁾에 서와 마찬가지로 부록 A와 같이 주어진다. 식(16)과 식(17)의 해를 완성하기 위해서는 \dot{q}_s 와 \dot{q}_l 의 초기값인 \dot{q}_{s0} 와 \dot{q}_{l0} 가 주어져야 한다. \dot{q}_{s0} 와 \dot{q}_{l0} 는 $t = 0$ 에서 제습제의 온도분포 $T_s(t = 0, x)$ 와 제습제와 평형상태인 공기의 수분함량 분포 $c_a^*(0, x)$ 에 의존하는데 이들 분포함수는 여전히 알지 못한다. 초기값을 결정하기 위해서는 별도의 모델이 필요하며 다음 절에 본 연구에서 개발한 초기값 모델을 기술하였다.

2.2 초기조건

예를 들어 제습운전 초기에 Fig. 2와 같이 $T_s(0, x)$ 가 주어진 경우 속도 u 의 공기 흐름은 시간 $t = 0 \rightarrow L/u$ 사이에 $\xi (= x/L) = 0 \rightarrow 1$ 의 공간을 이동하고 이때 준정상상태(quasi-steady state)를 가정하면 공기흐름의 에너지 보존방정식은 식(19)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{m}_a C_{pa} \frac{dT_a}{d\xi} = h_t A (T_s - T_a) \tag{19}$$

식(19)의 해는 $T_s(0, x)$ 가 주어지면 적분을 통해 간단히 구할 수 있으나 $T_s(0, x)$ 를 알지 못하므로 다음과 같이 단순화하였다.

우선 식(19)를 $\xi = 1$ 에서 쓰면 다음과 같다.

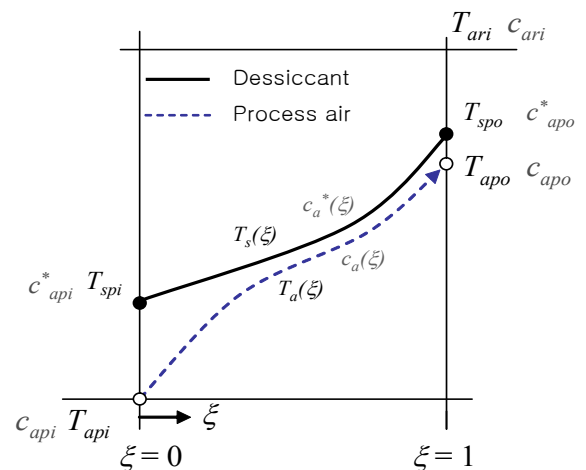


Fig. 2 Temp. and conc. profiles at $t = 0$.

$$\left(\frac{dT_a}{d\xi}\right)_{\xi=1} = N_{tp}(T_{spo} - T_{apo}) \quad (20)$$

이때 $\xi = 1$ 에서 T_s 의 기울기가 T_a 의 평균 기울기와 동일하다고 가정하면 T_s 의 기울기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{dT_s}{d\xi}\right)_{\xi=1} = \left(\frac{dT_a}{d\xi}\right) = T_{apo} - T_{api} \quad (21)$$

식(21)은 N_t 가 크고 T_s 의 분포가 직선에 가까울수록 오차가 작다. 식(21)을 식(20)에 대입하고 정리하면 T_{spo} 와 초기 현열유속 \dot{q}_{s0p} 에 대한 다음의 관계식을 얻는다.

$$T_{spo} - T_{ari} = \frac{1 + N_{tp}}{h_{tp}} \dot{q}_{s0p} - (T_{ari} - T_{api}) \quad (22)$$

문제를 단순화하기 위해 제습과 재생운전시의 열전달계수를 동일하다(i.e. $h_{tp} = h_{tr} = h_t$)고 가정하고 식(22)의 양변에 h_t 를 곱하여 다음을 얻는다.

$$(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1} = (1 + N_{tp})\dot{q}_{s0p} - \dot{q}_{smp} \quad (23)$$

여기서 \dot{q}_{smp} 은 $\dot{q}_{smp} = h_t(T_{ari} - T_{api})$ 로 정의되고 제습공기가 얻을 수 있는 최대의 현열유속을 의미하며 $(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1}$ 은 $(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1} = h_t(T_{spo} - T_{ari})$ 로 정의되고 이전 운전모드인 재생운전 종료시점의 $\xi = 1(x = L)$ 즉, 재생공기 입구에서의 현열유속을 의미한다.

한편 $t = 0$ 에서 잠열유속에 대해서도 현열과 동일하게 모델링하면 재생운전 종료시점의 재생공기 입구에서의 잠열유속도 식(23)과 유사하게 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\dot{q}_{l1r})_{\xi=1} = (1 + N_{mp})\dot{q}_{l0p} - \dot{q}_{lmp} \quad (24)$$

여기서 \dot{q}_{lmp} 은 $\dot{q}_{lmp} = h_{fg}^* h_m(C_{ari} - C_{api})$ 로 정의된다.

이제 식(23)과 식(24)의 $(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1}$ 와 $(\dot{q}_{l1r})_{\xi=1}$ 에 대한 표현이 필요하다. 이들은 재생운전의 종료시점에 재생공기 입구에서의 현열과 잠열유속이며 정확한 기술을 위해서는 별도의 '입구모델'이 필요하다. 이 입구모델은 제 2.1절의 모델과 몇 가지 면에서 달

라야하는데 가장 큰 차이는 입구영역에서는 속도를 포함하여 온도와 수분 함량의 분포가 채 발달되지 않았다는 사실에 기인한다. 그러나 별도의 입구모델을 도입하여 개선되는 오차의 수준이 무시할 정도로 작기 때문에 본 연구에서는 입구에서도 식(16)과 식(17)의 해를 그대로 적용하여 식(23)을 부록 A의 식(A7)에 따라 다음과 같이 썼다.

$$C_{11}^r(\dot{q}_{s0r})_{\xi=1} + C_{12}^r(\dot{q}_{l0r})_{\xi=1} = (1 + N_{tp})\dot{q}_{s0p} - \dot{q}_{smp} \quad (25)$$

여기서 C_{11}^r 과 C_{12}^r 의 상첨자 r 은 재생공기(Regeneration air)에 대해 식(A10)으로 구한 계수들을 의미한다. 마찬가지로 식(24)도 식(A8)에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_{21}^r(\dot{q}_{s0r})_{\xi=1} + C_{22}^r(\dot{q}_{l0r})_{\xi=1} = (1 + N_{mp})\dot{q}_{l0p} - \dot{q}_{lmp} \quad (26)$$

식(25)와 식(26)의 $(\dot{q}_{s0r})_{\xi=1}$ 는 Fig. 1에서 도시한 $x = L$ 에서의 최대온도차 ΔT_{s2m} 에 비례하는 현열유속임 즉, $(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1} = h_t \Delta T_{s2m} = h_t(T_{sri} - T_{ari})$ 임을 고려하면 $(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1}$ 와 $(\dot{q}_{s0r})_{\xi=1}$ 가 다음의 관계를 가짐을 안다.

$$\Delta T_{s2} (= T_{spo} - T_{sri}) = \frac{1}{h_t} [(\dot{q}_{s1r})_{\xi=1} - (\dot{q}_{s0r})_{\xi=1}] \quad (27)$$

마찬가지로 Fig. 1의 $x = L$ 에서 $t = 0$ 와 $t = \tau_p$ 의 ca^* 의 차이를 $\Delta ca2^*$ 로 약속하면 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$\Delta ca2^* (= c_{apo}^* - c_{ari}^*) = \frac{1}{h_{fg}^* h_m} [(\dot{q}_{l1r})_{\xi=1} - (\dot{q}_{l0r})_{\xi=1}] \quad (28)$$

식(23)~식(26)을 이용하여 식(27)을 쓰면 다음을 얻는다.

$$\Delta T_{s2} = \frac{1}{h_t} \left(1 - \frac{C_{22}^r}{F^r}\right) [(1 + N_{tp})\dot{q}_{s0p} - \dot{q}_{smp}] + \frac{C_{12}^r}{h_t F^r} [(1 + N_{mp})\dot{q}_{l0p} - \dot{q}_{lmp}] \quad (29)$$

여기서 F^r 은 $C_{11}^r \sim C_{22}^r$ 의 함수로서 부록 B의 식(B21)을 재생공기에 대해 계산한 값이다. 마찬가

지로 식(28)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta c_{a2}^* = \frac{C_{21}^r}{h_{fg}^* h_m F^r} [(1 + N_{tp}) \dot{q}_{s0p} - \dot{q}_{smp}] \quad (30)$$

$$+ \frac{1}{h_{fg}^* h_m} \left(1 + \frac{C_{11}^r}{F^r} \right) [(1 + N_{mp}) \dot{q}_{l0p} - \dot{q}_{lmp}]$$

식(29)와 식(30)에 ΔT_{s2} 와 Δca_2^* 가 주어지면 두 식을 연립하여 풀어 \dot{q}_{s0p} 와 \dot{q}_{l0p} 을 구한 후 식(A11)과 식(A12)를 이용하여 출구에서 제습공기의 평균 건구온도와 습도를 구할 수 있으므로 문제가 완전히 풀린다. 그러므로 마지막 단계는 ΔT_{s2} 와 Δca_2^* 를 결정하는 것이 된다.

전술한 바와 같이 ΔT_{s2} 는 제습운전의 이전 운전 모드 즉, 재생운전의 $t' = 0 \rightarrow \tau_r$ 동안에 $x = L$ 에서 제습제의 온도변화량이다. 당연히 제습운전 $t = 0 \rightarrow \tau_p$ 동안에 같은 크기로 역방향의 온도변화가 이루어져야 하므로 같은 위치에서 제습운전 동안의 온도변화량과 일치해야 한다. 만약 이 변화량이 제습운전 동안의 '평균' 온도 변화량과 같다면 ΔT_{s2} 는 식(1)을 $t = 0 \rightarrow \tau_p$ 사이에서 적분하여 얻은 평균 제습제 온도차 ΔT_s 와 같다.

$$\Delta T_s = - \frac{\tau_p A (\tilde{q}_{sp} + \tilde{q}_{lp})}{m_s C_{ps}} \quad (31)$$

여기서 \tilde{q}_{sp} 과 \tilde{q}_{lp} 은 제습운전 동안의 '평균' 현열 및 잠열유속으로 부록 A의 식(A11)과 식(A12)에 의해 식(31)은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta T_s = \frac{\tau_p A}{m_s C_{ps}} [(D_{11}^p + D_{21}^p) \dot{q}_{s0p} + (D_{12}^p + D_{22}^p) \dot{q}_{l0p}] \quad (32)$$

여기서 $D_{11}^p \sim D_{22}^p$ 의 상첨자 p 는 제습공기(Process air)에 대해 식(A13)으로 계산했음을 의미한다. 한편 마찬가지로 식(9)를 $t = 0 \rightarrow \tau_p$ 사이에서 적분하여 제습제와 평형인 공기의 평균 습도차 Δca^* 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta ca^* = \frac{\tau_p A}{m_s C_{ps}} \frac{\rho_a C_{pa}}{h_{fg}^* J a_a} \times \quad (33)$$

$$\{ [D_{11}^p + (1 + J a_s) D_{21}^p] \dot{q}_{s0p} + [D_{12}^p + (1 + J a_s) D_{22}^p] \dot{q}_{l0p} \}$$

전술한 바와 같이 $\Delta T_{s2} = \Delta T_s$ 이고 $\Delta ca_2^* = \Delta ca^*$ 이면 식(32)와 식(33)을 식(29)와 식(30)에 대입하고 정리하여 \dot{q}_{s0p} 과 \dot{q}_{l0p} 을 \dot{q}_{smp} 과 \dot{q}_{lmp} 의 함수 즉, $(T_{ari} - T_{api})$ 와 $(C_{ari} - C_{api})$ 의 함수로 얻을 수 있다. 그러나 $\Delta T_{s2} = \Delta T_s$ 와 $\Delta ca_2^* = \Delta ca^*$ 의 가정은 제습과 재생운전의 해가 대칭인 경우에만 고려할 수 있는데 Kim⁽¹⁾의 모델이 여기에 해당된다.

제습과 재생운전 조건이 다르면 두 해는 비대칭이며 전술한 바와 같이 Fig. 1에서 $\Delta T_{s1} \neq \Delta T_{s2}$ 이고 $\Delta ca_2^* \neq \Delta ca^*$ 이므로 ΔT_{s1} , ΔT_{s2} 와 ΔT_s 그리고 Δca_1^* , Δca_2^* 와 Δca^* 사이의 관계를 결정해야만 한다. 여기서는 단순히 아래와 같이 가정하였다.

$$\Delta T_{s1} + \Delta T_{s2} = 2 \Delta T_s \quad (34)$$

$$\Delta ca_1^* + \Delta ca_2^* = 2 \Delta ca^* \quad (35)$$

식(34)와 식(35)를 풀기 위해서는 ΔT_{s1} 과 Δca_1^* 의 방정식이 주어져야 한다. 이들은 식(29)와 식(30)을 유도한 과정을 재생운전의 경우에 동일하게 반복하면 다음과 같이 주어진다.

$$- \Delta T_{s1} = \frac{1}{h_t} \left(1 - \frac{C_{22}^p}{F^p} \right) [(1 + N_{tr}) \dot{q}_{s0r} - \dot{q}_{smr}] \quad (36)$$

$$+ \frac{C_{12}^p}{h_t F^p} [(1 + N_{mr}) \dot{q}_{l0r} - \dot{q}_{lmr}]$$

$$- \Delta ca_1^* = \frac{C_{21}^p}{h_{fg}^* h_m F^p} [(1 + N_{tr}) \dot{q}_{s0r} - \dot{q}_{smr}] \quad (37)$$

$$+ \frac{1}{h_{fg}^* h_m} \left(1 + \frac{C_{11}^p}{F^p} \right) [(1 + N_{mr}) \dot{q}_{l0r} - \dot{q}_{lmr}]$$

식(29)와 식(36), 식(30)과 식(37)을 비교하면 우측에 C 와 F 의 상첨자가 r 에서 p 로 바뀌고 \dot{q} 의 하첨자가 p 에서 r 로 바뀌었으며 좌측의 부호가 (+)에서 (-)로 바뀌었다. 우측의 \dot{q}_{smr} 과 \dot{q}_{lmr} 는 단순히 $\dot{q}_{smr} = -\dot{q}_{smp}$ 이고 $\dot{q}_{lmr} = -\dot{q}_{lmp}$ 이다.

식(34)와 식(35)에는 \dot{q}_{s0p} 과 \dot{q}_{l0p} 뿐 아니라 \dot{q}_{s0r} 과 \dot{q}_{l0r} 까지 총 4개의 미지수가 있다. 따라서 문제를 풀기 위해 두 개의 조건이 더 필요하다.

제습과 재생운전을 반복하는 동안에도 에너지와 질량은 보존되어야 하므로 보존법칙에 의해 나머지 두 조건이 주어진다. 즉, $t = 0 \rightarrow \tau_p$ 동안에 제습

공기가 얻은 현열의 총합 $\tau_p \widetilde{q}_{sp}$ 와 $t' = 0 \rightarrow \tau$ -동안 재생공기가 얻은 현열의 총합 $\tau_r \widetilde{q}_{sr}$ 의 합은 0이고 또 잠열의 경우에도 마찬가지로 $\tau_p \widetilde{q}_{lp} + \tau_r \widetilde{q}_{lr} = 0$ 이므로 다음의 두 식을 얻는다.

$$\tau_p \widetilde{q}_{sp} + \tau_r \widetilde{q}_{sr} = \tau_p D_{11}^p \dot{q}_{s0p} + \tau_p D_{12}^p \dot{q}_{l0p} + \tau_r D_{11}^r \dot{q}_{s0r} + \tau_r D_{12}^r \dot{q}_{l0r} = 0 \quad (38)$$

$$\tau_p \widetilde{q}_{lp} + \tau_r \widetilde{q}_{lr} = \tau_p D_{21}^p \dot{q}_{s0p} + \tau_p D_{22}^p \dot{q}_{l0p} + \tau_r D_{21}^r \dot{q}_{s0r} + \tau_r D_{22}^r \dot{q}_{l0r} = 0 \quad (39)$$

식(34), 식(35)와 식(38), 식(39)는 \dot{q}_{s0p} , \dot{q}_{l0p} , \dot{q}_{s0r} 와 \dot{q}_{l0r} 의 총 4개 미지수를 가진 대수연립 방정식으로서 부록 B와 같이 풀면 다음과 같은 형태로 \dot{q}_{s0p} 과 \dot{q}_{l0p} 을 얻을 수 있다.

$$\dot{q}_{s0p} = E_{11}(T_{ari} - T_{api}) + E_{12}(c_{ari} - c_{api}) \quad (40)$$

$$\dot{q}_{l0p} = E_{21}(T_{ari} - T_{api}) + E_{22}(c_{ari} - c_{api}) \quad (41)$$

여기서 $E_{11} \sim E_{22}$ 는 τ_p 와 τ_r 의 함수로서 정확한 표현은 부록 B의 행렬방정식을 풀어 얻을 수 있으나 과도한 복잡성 때문에 여기서는 유도하지 않겠다.

식(40)과 식(41)을 식(A11)과 식(A12)에 대입하여 정리하면 마침내 다음과 같이 현열과 잠열유속에 대한 시간평균을 얻을 수 있다.

$$\widetilde{q}_{sp} = (D_{11}^p E_{11} + D_{12}^p E_{21})(T_{ari} - T_{api}) + (D_{11}^p E_{12} + D_{12}^p E_{22})(c_{ari} - c_{api}) \quad (42)$$

$$\widetilde{q}_{lp} = (D_{21}^p E_{11} + D_{22}^p E_{21})(T_{ari} - T_{api}) + (D_{21}^p E_{12} + D_{22}^p E_{22})(c_{ari} - c_{api}) \quad (43)$$

따라서 제습공기 출구에서의 건구온도와 절대습도의 시간평균은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\widetilde{T}_{apo} = T_{api} + \frac{A \widetilde{q}_{sp}}{(\dot{m}_a C_{pa})_p} \quad (44)$$

$$\widetilde{\chi}_{po} = \chi^{vi} + \frac{A \widetilde{q}_{lp}}{h_{fg}^* \dot{m}_{ap}} \quad (45)$$

마지막으로 평형상태 방정식을 포함하여 본 모

델에서 필요한 모든 물성치는 다음의 T_0 와 기준습도 χ^0 에서 구하였다.

$$T_0 = \frac{1}{\tau_p + \tau_r} (\tau_p T_{api} + \tau_r T_{ari}), \quad (46)$$

$$\chi_0 = \frac{1}{\tau_p + \tau_r} (\tau_p \chi^{pi} + \tau_r \chi^{ri})$$

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

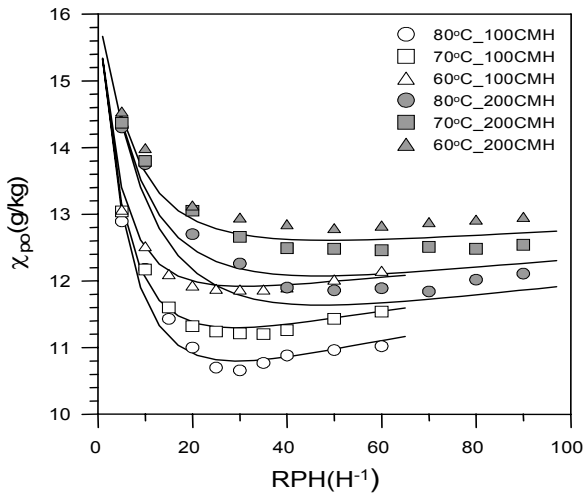
모델의 정확성을 확인하기 위해 아래에 두 개의 실험데이터와 비교하였다.

먼저 Fig. 3(a)에 Enteria et al.⁽⁵⁾의 실험데이터(기호)와 본 모델(실선)을 비교했는데 실험에 사용된 제습휠은 직경 300 mm에 길이 100 mm이고 silica gel이 코팅된 종이 재질의 유로는 높이와 너비가 각각 1.57 mm, 3.81 mm이며 제습과 재생구간의 비율이 같다. 실험은 100, 200 CMH의 유량에 대해 재생공기 입구온도(T_{ari})를 60, 70, 80°C로 변화시켜가며 제습공기 출구 습도(χ_{po})를 측정하였다. 이때 제습공기 입구온도(T_{api})와 습도(χ^{pi})은 각각 30°C, 16 g/kg으로 고정하였고 재생공기 입구습도(χ^{ri})는 12 g/kg으로 일정하다. 제습제의 평형상태식은 Enteria et al.⁽⁵⁾에는 주어지지 않아 같은 논문을 분석한 Ruivo et al.⁽⁶⁾을 참고하였다. 식(18)의 계수를 계산하기 위해서는 평형상태식 외에 몇 가지 입력값이 더 필요하지만 원문에 주어지지 않아 시행착오를 거쳐 실험결과와 모델이 일치하도록 인자들을 변화시켰고 그 결과를 그림에 실선으로 도시하였으며 이때 입력값으로 사용한 인자들의 평균값을 Table 1에 정리하였다.

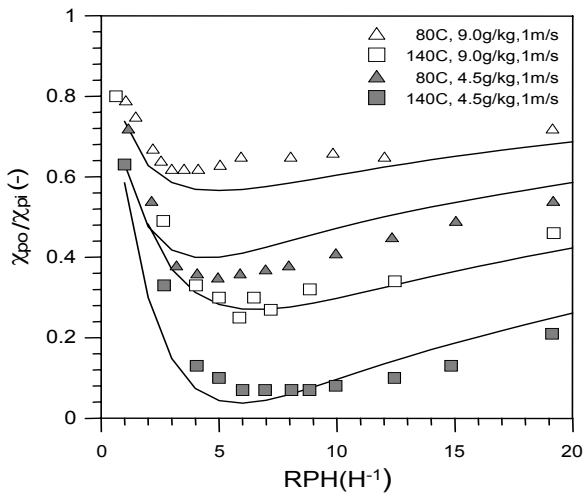
Fig. 3(b)에는 Kodama et al.⁽⁷⁾의 실험데이터(기호)와 본 모델(실선)을 비교하였다. 실험에는 직경 320 mm에 길이 200 mm의 제습휠을 사용하였는데 제습과 재생구간의 비율은 0.715 : 0.215이고 세라믹 섬유 재질에 silica gel을 화학적으로 고착한 높이 1.8 mm, 너비 3.2 mm의 유로를 가진다. 그림에서는 두 가지의 제습공기 입구조건(\square : $T_{api} = 24-27^\circ\text{C}$, $\chi^{pi} = 8-9\text{g/kg}$; \blacktriangle : $T_{api} = 24-27^\circ\text{C}$, $\chi^{pi} = 4.5-5\text{g/kg}$)에 대해 재생공기 입구온도 80°C와 140°C의 경우 측정된 제습공기 출구 습도(χ_{po})를 입구습도(χ^{pi})에 대한 비율로 도시하였다. Kodama et al.⁽⁷⁾의 원문에도 평형상태식 외에 필요한 정보

가 부족하여 시행착오를 거쳐 얻은 입력 값들의 평균을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 본 모델은 실험결과의 거동을 적절하게 예측할 수 있다. 그러나 Table 1에



(a) Exit air humidity vs. revolution speed⁽⁵⁾



(b) Humidity ratio vs. revolution speed⁽⁷⁾

Fig. 3 Comparison with experimental data (Symbols : exp. data; Lines : this study).

Table 1 Input parameters for the model

Ref.	N_t (-)	N_m (-)	h_t (W/m ² K)	h_m (mm/s)	$m_s C_{ps}$ (J/K)	τ_p/τ_c
5	4.8 2.4*	3.2 1.6*	20	16	0.15	0.5
7	9.2	9.8	22	15	0.24	0.715

Note) * NTUs for 200CMH cases.

정리한 입력 값이 갖는 불확실성 때문에 오차를 정확히 판단하기는 어렵다. 예를 들어 Table 1에서 맨 오른쪽 칸의 τ_p/τ_c 를 조금 변화시켜 실험결과에 더 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있는데 여기서 τ_c 는 휠의 회전주기를 의미한다. Kodama et al.⁽⁷⁾의 경우 제습휠의 제습과 재생구간을 분리하는 벽의 두께를 고려하여 제습과 재생구간의 비를 0.715 : 0.215로 주었는데 두 구간의 비율의 합이 1이 아니다.

즉, 본 모델의 경우 τ_p/τ_c 를 최소 0.715에서 최대 0.785의 범위 내에서 임의로 결정해도 되는 불확실성이 있으며 실제로 τ_p/τ_c 를 이 범위 내에서 조정하면 Fig. 3(b)보다 더 나은 결과를 얻을 수도 있고 이는 Enteria et al.⁽⁵⁾의 경우에도 마찬가지이다. 따라서 이런 이유 등으로 정량적인 오차를 논하는 것이 큰 의미는 없으나 그림에 나타난 결과만을 보면 Enteria et al.⁽⁵⁾의 실험결과와는 약 0.5 g/kg, Kodama et al.⁽⁷⁾의 결과와는 약 0.7 g/kg의 최대 차이가 있다. 따라서 Fig. 3은 본 연구에서 개발한 모델이 제습휠의 거동을 사실적으로 기술 할 수 있음을 보여주는 근거로 보는 것이 합당할 것이다.

3.2 고찰

Fig. 3에서도 볼 수 있듯이 제습휠의 성능은 회전속도의 함수로서 그 성능이 최대화되는 특정 회전속도가 존재한다.^(3, 4) 실험결과와 마찬가지로 본 모델도 그러한 최적 운전조건의 존재를 잘 예측하고 있다.

운전조건은 Kim⁽¹⁾과 같은 유용도 모델을 개발하여 제습량이 최대가 되는 조건을 찾는 방법으로 최적화할 수 있을 것이다. 본 연구의 결과를 이용해 유용도에 대한 해석적 표현을 얻을 수 있다. 식(44)와 식(45)를 다시 쓰면 Kim⁽¹⁾과 동일한 형태의 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\widetilde{T}_{apo} - T_{api} = \varepsilon_{t1}(T_{ari} - T_{api}) + \varepsilon_{t2}(\chi_{ri} - \chi_{pi}) \quad (47)$$

$$\widetilde{\chi}_{po} - \chi_{pi} = \varepsilon_{m1}(T_{ari} - T_{api}) + \varepsilon_{m2}(\chi_{ri} - \chi_{pi}) \quad (48)$$

여기서 열전달 유용도 ε_{t1} 과 ε_{t2} , 물질전달 유용도 ε_{m1} 과 ε_{m2} 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_{t1} = \frac{A}{(\dot{m}_a C_{pa})_p} (D_{11}^p E_{11} + D_{12}^p E_{21}) \quad (49)$$

$$\varepsilon_{t2} = \frac{A}{(\dot{m}_{a1} C_{pa})_p} (D_{11}^p E_{12} + D_{12}^p E_{22}) \quad (50)$$

$$\varepsilon_{m1} = \frac{\rho_a A}{h_{fg}^* \dot{m}_{ap}} (D_{21}^p E_{11} + D_{22}^p E_{21}) \quad (51)$$

$$\varepsilon_{m2} = \frac{\rho_a A}{h_{fg}^* \dot{m}_{ap}} (D_{21}^p E_{12} + D_{22}^p E_{22}) \quad (52)$$

유감스럽게도 $E_{11} \sim E_{22}$ 가 상당히 복잡하여 그 결과를 여기에 싣기 어렵다. 향후에는 본 모델을 이용하여 식(49)~식(52)의 유용도 상관식을 해석적으로 단순하게 표현할 수 있는 방법을 찾고 최적화 문제에 적용하는 작업이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 넓은 운전영역에서 일반적으로 적용할 수 있는 로터리 제습기의 해석모델을 개발하였다. 우선 완전히 발달한 공기의 온습도 분포를 가정하고 평균 온도와 습도에 대한 1차 선형 미분방정식을 유도하여 근사해를 구하였고 NTU가 큰 경우에 공기측 열, 물질전달 방정식을 단순화하여 제습과 재생운전의 초기조건을 결정하였다. 제습과 재생운전의 조건이 비대칭인 경우 초기조건은 공기측 열 및 물질전달 방정식과 제습제의 에너지 및 질량 보존 방정식을 연립하여 얻을 수 있으며 출구 공기의 평균 온습도는 유용도를 포함한 대수방정식으로 나타낼 수 있음을 보였다. 기존의 실험결과와 비교한 결과 본 모델은 최적운전 속도의 존재를 잘 예측하였으며 약 1g/kg 이내의 불확실성 내에서 제습기의 거동을 사실적으로 기술할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

<부록 A> 지배방정식의 해

식(16)과 식(17)의 연립방정식의 해는 다음과 같이 주어진다. $t^*(= t/\tau) = 0$ 에서 $\dot{q}_s = \dot{q}_{s0}$, $\dot{q}_l = \dot{q}_{l0}$ 라 하면 0과 1사이 임의의 t^* 에서 \dot{q}_s 와 \dot{q}_l 은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{q}_s = B_{11} e^{\lambda_1 t^*} + B_{12} e^{\lambda_2 t^*} \quad (A1)$$

$$\dot{q}_l = B_{21} e^{\lambda_1 t^*} + B_{22} e^{\lambda_2 t^*} \quad (A2)$$

여기서 $B_{11} \sim B_{22}$ 는

$$B_{11} = -\frac{\nu_1(\dot{q}_{s0} - \nu_2 \dot{q}_{l0})}{\nu_2 - \nu_1}, \quad B_{12} = \frac{\nu_2(\dot{q}_{s0} - \nu_1 \dot{q}_{l0})}{\nu_2 - \nu_1},$$

$$B_{21} = -\frac{(\dot{q}_{s0} - \nu_2 \dot{q}_{l0})}{\nu_2 - \nu_1}, \quad B_{22} = \frac{(\dot{q}_{s0} - \nu_1 \dot{q}_{l0})}{\nu_2 - \nu_1} \quad (A3)$$

여기서 고유치와 고유벡터는 다음과 같다.

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} [(a_{11} + a_{22}) \pm \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}] \quad (A4)$$

$$\nu_1 = (\lambda_1 - a_{22})/a_{21} \quad (A5)$$

$$\nu_2 = (\lambda_2 - a_{22})/a_{21} \quad (A6)$$

식(A1)과 식(A2)를 다시 정리하면 다음과 같이 쓸 수도 있다. $t^* = 1$ 에서 $\dot{q}_s = \dot{q}_{s1}$, $\dot{q}_l = \dot{q}_{l1}$ 라 하면

$$\dot{q}_{s1} = C_{11} \dot{q}_{s0} + C_{12} \dot{q}_{l0} \quad (A7)$$

$$\dot{q}_{l1} = C_{21} \dot{q}_{s0} + C_{22} \dot{q}_{l0} \quad (A8)$$

$$C_{11} = \frac{-\nu_1 e^{\lambda_1} + \nu_2 e^{\lambda_2}}{\nu_2 - \nu_1}, \quad C_{12} = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{\lambda_1} - e^{\lambda_2})}{\nu_2 - \nu_1},$$

$$C_{21} = \frac{-e^{\lambda_1} + e^{\lambda_2}}{\nu_2 - \nu_1}, \quad C_{22} = \frac{\nu_2 e^{\lambda_1} - \nu_1 e^{\lambda_2}}{\nu_2 - \nu_1} \quad (A10)$$

한편 $t^* = 0 \sim 1$ 사이의 시간평균은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\dot{q}}_s = D_{11} \dot{q}_{s0} + D_{12} \dot{q}_{l0} \quad (A11)$$

$$\bar{\dot{q}}_l = D_{21} \dot{q}_{s0} + D_{22} \dot{q}_{l0} \quad (A12)$$

$$D_{11} = \frac{-\nu_1(e^{\lambda_1} - 1)/\lambda_1 + \nu_2(e^{\lambda_2} - 1)/\lambda_2}{\nu_2 - \nu_1},$$

$$D_{12} = \frac{\nu_1 \nu_2 [(e^{\lambda_1} - 1)/\lambda_1 - (e^{\lambda_2} - 1)/\lambda_2]}{\nu_2 - \nu_1},$$

$$D_{21} = \frac{-(e^{\lambda_1} - 1)/\lambda_1 + (e^{\lambda_2} - 1)/\lambda_2}{\nu_2 - \nu_1},$$

$$D_{22} = \frac{\nu_2(e^{\lambda_1} - 1)/\lambda_1 - \nu_1(e^{\lambda_2} - 1)/\lambda_2}{\nu_2 - \nu_1} \quad (A13)$$

<부록 B> 초기조건의 행렬방정식

식(34), 식(35)와 식(38), 식(39)는 다음의 행렬방정식으로 표현하여 간단히 계산할 수 있다.

$$[M] \begin{pmatrix} \dot{q}_{s0p} \\ \dot{q}_{l0p} \\ \dot{q}_{s0r} \\ \dot{q}_{l0r} \end{pmatrix} = [R] \quad (B1)$$

[M]은 4×4 정칙행렬로서 다음의 요소를 갖는다.

$$M_{11} = \left(1 - \frac{C_{22}^r}{F^r}\right) (1 + N_{tp}) - 2(N_t C^*)_p (D_{11}^p + D_{21}^p) \quad (B2)$$

$$M_{12} = \frac{C_{12}^r}{F^r} (1 + N_{mp}) - 2(N_t C^*)_p (D_{12}^p + D_{22}^p) \quad (B3)$$

$$M_{13} = -\left(1 - \frac{C_{22}^p}{F^p}\right) (1 + N_{tr}) \quad (B4)$$

$$M_{14} = -\frac{C_{12}^p}{F^p} (1 + N_{mr}) \quad (B5)$$

$$M_{21} = \frac{C_{21}^r}{F^r} (1 + N_{tp}) - \frac{2(N_m C)_p}{J_{a_a}} [D_{11}^p + (1 + J_{a_s}) D_{21}^p] \quad (B6)$$

$$M_{22} = \left(1 + \frac{C_{11}^r}{F^r}\right) (1 + N_{mp}) - \frac{2(N_m C^*)_p}{J_{a_a}} [D_{12}^p + (1 + J_{a_s}) D_{22}^p] \quad (B7)$$

$$M_{23} = -\frac{C_{21}^p}{F^p} (1 + N_{tr}) \quad (B8)$$

$$M_{24} = -\left(1 + \frac{C_{11}^p}{F^p}\right) (1 + N_{mr}) \quad (B9)$$

$$M_{31} = \tau_p D_{11}^p \quad (B10)$$

$$M_{32} = \tau_p D_{12}^p \quad (B11)$$

$$M_{33} = \tau_r D_{11}^r \quad (B12)$$

$$M_{34} = \tau_r D_{12}^r \quad (B13)$$

$$M_{41} = \tau_p D_{21}^p \quad (B14)$$

$$M_{42} = \tau_p D_{22}^p \quad (B15)$$

$$M_{43} = \tau_r D_{21}^r \quad (B16)$$

$$M_{44} = \tau_r D_{22}^r \quad (B17)$$

또 [R]은 4×1 열행렬로서 다음의 요소를 갖는다.

$$R_{11} = \left(2 - \frac{C_{22}^r}{F^r} - \frac{C_{22}^p}{F^p}\right) \dot{q}_{smp} + \left(\frac{C_{12}^r}{F^r} + \frac{C_{12}^p}{F^p}\right) \dot{q}_{lmp} \quad (B18)$$

$$R_{21} = \left(\frac{C_{21}^r}{F^r} + \frac{C_{21}^p}{F^p}\right) \dot{q}_{smp} + \left(2 + \frac{C_{11}^r}{F^r} + \frac{C_{11}^p}{F^p}\right) \dot{q}_{lmp} \quad (B19)$$

$$R_{31} = R_{41} = 0 \quad (B20)$$

이상에서 C^r 과 D^r 은 부록 A의 식(A10)과 식(A13)을 재생운전에 대해 구한 값이고 C^p 와 D^p 는 제습운전에 대해 구한 값이며 각 경우에 대해 F 는 다음과 같이 정의된다.

$$F = C_{22} C_{11} - C_{12} C_{21} \quad (B21)$$

참고문헌

1. Kim, D. S., 2012, Development of a simple analytical model for desiccant wheels-II. Effectiveness correlations, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 9-15.
2. Kim, D. S., Choi, Y. D., and Lee, D. Y., 2011, Development of a simple analytical model for desiccant wheels-I. Approximate solution of the governing equations, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 821-827.
3. Ahmed, M. H., Kattab, N. M., and Fouad, M., 2005. Evaluation and optimization of solar desiccant wheel performance, Renewable Energy Vol. 30, pp. 305-325.
4. Chung, J. D. and Lee, D. Y., 2009, Effect of desiccant isotherm on the performance of desiccant wheel, Int. J. Refrig. Vol. 32, pp. 720-726.
5. Enteria, N., Yoshino, H., Satake, A., Mochida, A. Takaki, R., Yoshie, R., Mitamura, T., and Baba, S., 2010, Experimental heat and mass transfer of the separated and coupled rotating desiccant wheel and heat wheel, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, pp. 603-615.
6. Ruivo, C. R., Costa, J. J., Figueiredo, A. R., and Kodama, A., 2012, Effectiveness parameters for the prediction of the global performance of desiccant wheels-An assessment based on experimental data, Renewable Energy, Vol. 38, pp. 181-187.
7. Kodama, A., Hirayama, T., Goto, M., Hirose, T., and Critoph, R. E., 2001, The use of psychrometric charts for the optimization of a thermal swirl desiccant wheel, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1657-1674.