

바닥복사냉방의 결로방지를 위한 제습제어에 관한 연구

김 용 이[†], 김 광 우^{*}

군산대학교 건축공학과, *서울대학교 건축학과

A Study on the Dehumidification Control to Prevent Condensation for Radiant Floor Cooling

Yong-Yee Kim[†], Kwang-Woo Kim^{*}

Department of Architectural Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

*Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received December 12, 2002; revision received December ~, 2002)

ABSTRACT: In the forming of an integrated system of radiant floor cooling and dehumidifying, chilled coil can be used for cooling and dehumidification. Therefore, it is necessary to find the efficient control method which can eliminates latent load efficiently. This study has been conducted to find this method by dividing the dehumidification system into 3 types according to the control variables and analyzing characteristics of each system. To prevent the floor surface condensation, the amount of condensation can be manipulated by water temperatures, water flow rates in chilled coil, and air flow rates passing by it. So dehumidification system control can be divided into constant air flow control and variable air flow control. Regarding dehumidification control, variable air flow control, which eliminates latent load rather than sensible load, is preferable to constant flow control.

Key words: Radiant floor cooling(바닥복사냉방), Dehumidification system(제습시스템), Ondol(온돌), Condensation(결로), Control(제어)

기 호 설 명

C_{air} : 공기의 capacity rate로 인입조건이 엔탈피인 경우에는 공기량 [kg/s]
 C_{min} : C_w 와 C_{air} 중에서 작은 값 [kg/s]
 c_p : 물의 비열 [J/kg℃]
 $c_{p, sat}$: 수온과 같은 포화공기의 유효비열 [J/kg℃]
 C_w : 냉수의 capacity rate로 인입조건이 엔탈피인 경우에는 냉수유량 [kg/s]

$DPTS$: 설정노점온도, 바닥표면온도에서 안전율을 뺀 값 [℃]
 DP_{err} : 설정노점온도오차, 설정노점온도와 노점온도의 차이 [℃]
 $h_{air, ent}$: 냉각코일 입구공기의 엔탈피 [J/kg]
 $h_{air, lvg}$: 냉각코일 출구공기의 엔탈피 [J/kg]
 $h_{liq, ent, sat}$: 냉수입구의 수온과 같은 공기가 갖는 포화상태의 엔탈피 [J/kg]
 M_{air} : 냉각코일을 지나는 건조공기량 [kg/s]
 M_{liq} : 냉수 공급유량 [kg/s]
 RC : 바닥복사냉방 여부 [true or false]
 $T_{air, ent}$: 냉각코일로 들어오는 공기온도 [℃]
 $T_{air, lvg}$: 냉각코일을 지난 후의 공기온도 [℃]
 T_d : 실내 노점온도 [℃]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-469-4787; fax: +82-63-469-4781

E-mail address: solarview@kunsan.ac.kr

- T_{dh_s} : 냉각코일의 공급냉수온도 [°C]
- T_f : 바닥표면온도 [°C]
- T_{liq_ent} : 냉각코일에 공급되는 냉수온도 [°C]
- T_{liq_lvg} : 냉각코일을 지난 후의 냉수온도 [°C]
- T_o : 외기온 [°C]
- T_r : 실온 [°C]
- T_{rf_s} : 바닥패널의 공급냉수온도 [°C]
- W_{air_ent} : 냉각코일로 들어오는 공기 절대습도 [kg/kg(DA)]
- W_{air_lvg} : 냉각코일을 지난 후의 공기 절대습도 [kg/kg(DA)]
- W_r : 실내공기의 절대습도 [kg/kg(DA)]

1. 서 론

여름철에 쾌적한 생활을 추구하는 사람들이 늘어남에 따라 냉방기기 보급 및 냉방에 대한 요구가 증가되고 있다. 이로 인해 여름철 최대전력 수요 문제가 발생하였고, 개별 냉방기기에 대한 대안으로 기존 온돌구조체를 냉방에 활용하는 바닥복사냉방시스템이 제안되었다.⁽¹⁾ 제안된 시스템에 대하여 바닥패널의 제어방식 및 그 적용 가능성, 제습능이 고려된 냉방시스템의 적용 가능성에 관한 연구가 진행되었다.⁽²⁻⁵⁾ 이들 연구를 통하여 바닥복사냉방과 냉각제습이 통합되는 시스템이 구성되었으며, 통합시스템의 실온 및 실내 노점온도에 의한 제어로 결로를 방지할 수 있음이 확인되었다. 그러나 냉각제습을 실내 노점온도에 따라 결로를 제어하는 경우에는 제습과 동시에 실내 공기를 냉각하므로, 바닥복사냉방이 중지되거나 축소되는 현상이 발생하게 된다. 따라서 바

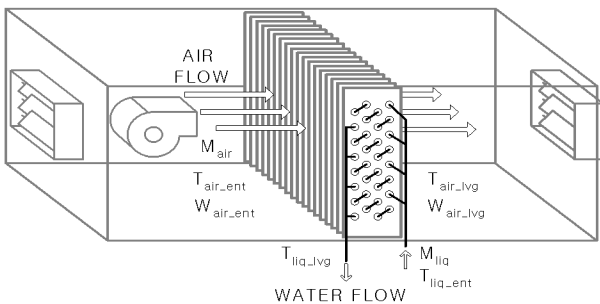


Fig. 1 Schematic diagram of cross-counter flow cooling and dehumidifying coil.

다복사냉방이 이루어지면서 냉각제습을 효과적으로 수행할 수 있는 제어가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 냉각제습량을 조절하는 제어인자에 따라 제어방식을 분류하여, 각 제어방식에 의한 냉방상태를 비교하는 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 제어방식에 따른 실내 환경과 운전특성을 비교 분석하여 효과적인 제습 제어방안을 제시하고자 하였다.

2. 제습시스템의 제어방법

바닥복사냉방을 위해 차가와진 바닥표면에서 결로가 발생하는 것을 막기 위해서는 실의 노점온도가 바닥표면온도보다 항상 낮게 유지되어야 한다. 실의 노점온도가 바닥표면온도보다 낮게 유지하기 위해서는 실내의 습기가 제습시스템에 의해서 제거되어야 한다. 실내 습기의 제거는 Fig. 1과 같은 제습시스템에서 실내 공기가 냉각코일의 차가운 표면을 지나면서 공기 중의 수증기가 응축됨으로써 이루어진다. 이때 냉각코일의 냉수유량과 냉수온도, 코일을 통과하는 공기의 양을 조절함으로써 제습되는 습기량을 제어할 수 있다. 따라서 냉각제습량을 조절하는 인자에 따라 제어방식을 분류하면, Fig. 2와 같이 풍량이 일정하면서 냉각코일의 냉수유량이나 냉수온도를 조절하는 정풍량방식(Fig. 2의 Case 1과 Case 2)과, 풍량을 조절하고 냉각코일의 냉수유량과 냉수온도를 일정하게 하는 변풍량방식(Fig. 2의 Case 3)으로 구분될 수 있다. 냉각코일의 냉수유량 조절 방법은 일반 공조방식에서 가장 많이 사용되는

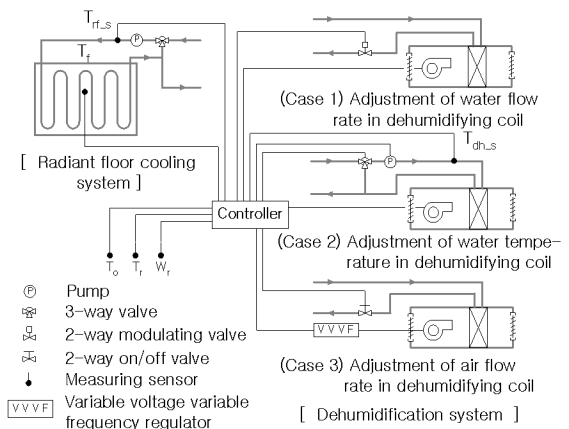


Fig. 2 Schematic diagram of control methods in integrated system.

제습방법으로, 냉수밸브의 스템 위치를 비례제어함으로써 냉매인 냉수의 유량을 조절한다. 이때 풍량은 최대 제습량을 기준으로 일정하게 공급되고, 냉수유량을 조절함으로써 실내 노점온도가 제어된다. 냉각코일의 냉수온도 조절방법은 요구되는 제습량에 따라 밸브 스템이 움직여 냉수온도가 비례적으로 조절되고, 냉각코일을 통과하는 공기의 양을 제어하는 방법은 팬 모터에 연결된 주파수변환기(VVVF)를 이용하여 팬의 회전수가 조절된다. 바닥표면의 결로발생을 막기 위해 각 방식의 제습시스템을 적용하는 경우, 결로발생구간에 대해서 제습시스템의 운전을 최소한으로 줄일수록 에너지소비를 줄일 수 있다.

3. 바닥복사냉방의 제습제어 시뮬레이션

3.1 해석 알고리즘

공동주택에 대한 복사냉방과 제습에 관한 열해석 프로그램은 구조체의 축열 효과 해석, 표면간의 복사 열교환 해석, 공기 중의 온도 및 습도 해석이 가능해야 하며, 또한 제습과정에 대한 해석도 가능해야 한다. 건물 벽체, 바닥, 창과 바닥 패널의 해석 알고리즘은 기존 바닥패널의 제어방식을 위한 연구에서 사용되어진 해석방법을 이용하였다. 온돌해석은 fin 효율과 Effectiveness-NTU 방법을 적용하였고, 실외측 벽체표면의 계산은 상

당의기온과 벽체 내부로의 열전도에 의한 열교환을 고려하였으며, 실내측 표면은 Modified thermal balance model을 적용한 복사열교환과 벽체 내부로의 전도열교환, 실내공기와의 대류열교환, 일사열획득 등을 고려하였다. 실온의 해석은 각 표면과의 대류열전달, 인체, 조명, 기기의 대류발열 성분 및 침기와 급기의 양에 의해 결정하였다. 그리고 결로발생에 영향을 주는 잠열부하의 해석은 외기의 영향과 내부발열요소 중 잠열부하의 영향을 고려하였다. 제습에 필요한 냉각코일은 Threlkeld과 Kuehn이 기술한 엔탈피 유효도 개념에 근거하여, 총합 열전달계수로 표현되었으며, 엔탈피 유효도는 식(1)~(3)과 같이 코일의 입구와 출구 상태의 엔탈피 차와 입구공기의 엔탈피와 입구공기의 온도와 같은 포화공기의 엔탈피 차의 비율로 결정하였다.

$$\varepsilon = \frac{C_{air}(h_{air,ent} - h_{air,lg})}{C_{min}(h_{air,ent} - h_{liq,ent,sat})} \quad (1)$$

$$C_{air} = M_{air} \quad (2)$$

$$C_w = \left(M_{liq} \frac{c_p}{c_{p,sat}} \right) \quad (3)$$

3.2 시뮬레이션 조건 및 방법

시뮬레이션은 국내의 일반적인 32평형 공동주택에 대하여 실시하였다. 가장 많은 비율을 차지하는 중간층 중간 세대에 대하여 안방을 대상으로 분석하였으며 입력 데이터 조건은 Table 1과

Table 1 Input data for the simulation

Categories			Input data
Building location			37.5°N 127.0°E
Weather condition			Standard weather data for Seoul
Infiltration during cooling season			1 ACH (constant rate)
People	Sensible heat	Convective	21.3 W/person
		Radiative	49.7 W/person
	Latent heat		45.0 W/person
Number of occupants			2 persons
Lighting	Sensible heat	Convective	11.8 W/m ²
		Radiative	9.2 W/m ²
Equipment	Sensible heat	Convective	8.3 W/m ²
		Radiative	8.3 W/m ²
	Latent Heat		N/A

Table 2 Simulation condition for dehumidifier control according to dew point temperature

		Case 1	Case 2	Case 3
Control method for floor panel		Outdoor reset with indoor temperature feedback control		
Control method for dehumidifier	Control variable	Dew point temperature		
	Water flow rate	Controlled 0~0.04 kg/s	Fixed 0.04 kg/s	Fixed 0.04 kg/s
	Water temperature	Fixed 15°C	Controlled 15~24°C	Fixed 15°C
	Air flow rate	Fixed 41 CMH	Fixed 41 CMH	Controlled 0~41 CMH

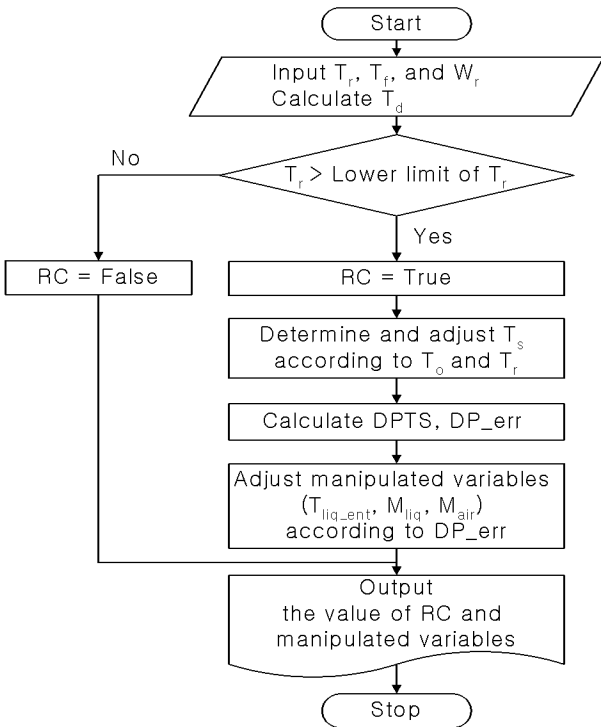


Fig. 3 Control algorithm of integrated system for radiant cooling.

같다. 냉방제어에 있어서는 Table 2와 Fig. 3과 같이 바닥복사냉방 제어와 제습제어가 조합되었다. 바닥복사냉방은 외기보상 실온 피드백 제어를 적용하였고, 제습시스템의 제어는 바닥표면온도에 따라 노점온도의 제어기준값(설정노점온도)을 결정하여 조절변수인 냉수유량(Case 1)과 냉수온도(Case 2), 공기의 양(Case 3)을 조절하여 실내 노점온도를 제어하였다. 설정노점온도는 바닥표면온도를 기준으로 결정되기 때문에, 운전기간 동안 계속 변화되게 하였다.

4. 시뮬레이션 결과 분석 및 고찰

4.1 실내 환경 및 시스템 운전특성 분석

바닥복사냉방을 외기보상 실온 피드백 방식으로 제어하고 제습시스템을 노점온도에 따라 제어하여 시뮬레이션을 실시한 결과, 냉방기간 중에 결로가 발생되지 않으면서도 실온이 설정실온으로 유지되었다. 냉방이 이루어진 전기간의 실내 환경은 Table 3과 같이 실내온도를 비롯하여 바닥표면온도, 평균 복사온도, 작용온도, PMV가 제어방식별로 거의 차이가 없었다.

Table 3 Room thermal environment during the whole cooling period according to control methods

Case	Case 1	Case 2	Case 3
Room air temperature(°C)	25.7	25.7	25.7
Floor surface temperature(°C)	24.8	24.7	24.6
Relative humidity(%)	81.0	80.6	80.3
MRT(°C)	25.4	25.3	25.2
OT(°C)	25.5	25.5	25.4
PMV	0.1	0.1	0.2

실내환경 유지를 위한 시스템 운전특성은 Fig. 4와 Table 4와 같이 제어방법에 따라 차이가 나타났다. 제습시스템에서 제거된 잠열량은 23~28 kWh로 제어방식별로 거의 차이가 없으나, 현열량은 냉수유량제어 34.6 kWh, 냉수온도제어 27.4 kWh, 풍량제어 16.5 kWh로 제어방식별로 차이가 발생하였다. 즉 제습시스템이 제거한 부하량 중 잠열량의 비율(잠열비)은 냉수유량제어 40.1%, 냉수온도제어 49.0%, 풍량제어 62.9%가 되었다. 시스템 간의 역할분담 차원에서 제습시스템의 풍량제어가 정풍량방식의 냉수유량제어와 냉수온도제어보다 효과적으로 잠열부하를 제거한 것으로 판단된다. 이것은 수증기를 제거할 만큼의 공기에 대해서 제습하는 제어(변풍량제어)가 생각되는 공기의 양이 적게 하여, 현열부하를 최소화하면서 잠열부하를 효과적으로 제거한다는 것을 의미한다. 반대로, 냉수유량과 냉수온도에 의한 제어는 정풍량방식으로 차가운 냉각코일을 지난 일정한 풍량이 계속 공급되어 실내의 현열을 제거하는

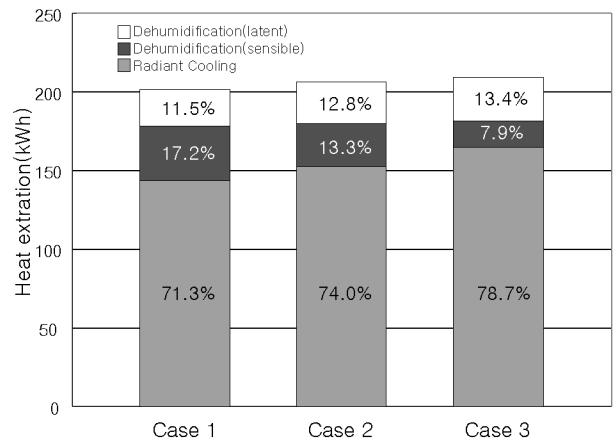
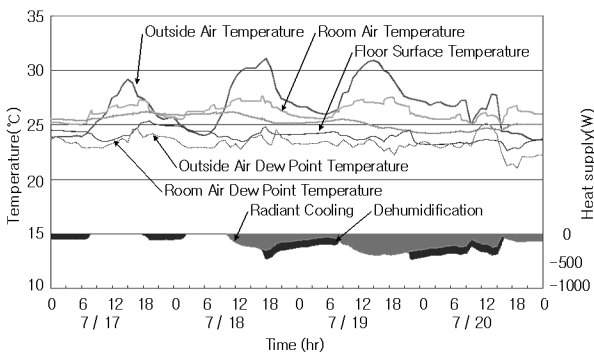


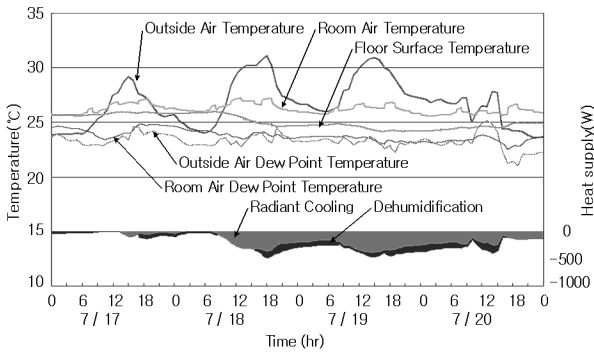
Fig. 4 Heat extraction according to control methods during the whole cooling period.

Table 4 Heat extraction and its component ratio according to control methods during the whole cooling period

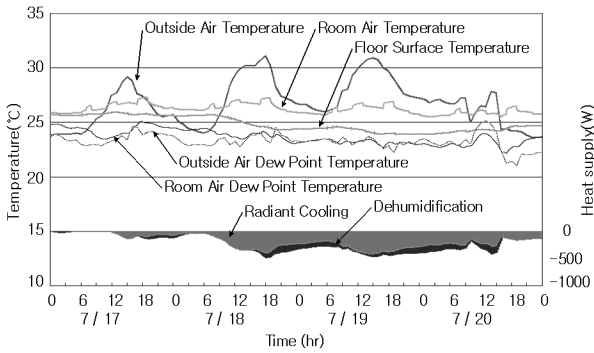
Case	Case 1		Case 2		Case 3	
	Heat extraction (kWh)	Ratio (%)	Heat extraction (kWh)	Ratio (%)	Heat extraction (kWh)	Ratio (%)
Radiant cooling	143.7	71.3	152.5	74.0	164.8	78.7
Dehumidification (sensible)	34.6	17.2	27.4	13.3	16.5	7.9
Dehumidification (latent)	23.1	11.5	26.3	12.7	28.0	13.4
Sum	201.4	100	206.2	100	209.3	100



(a) Case 1. Water flow rate adjustment

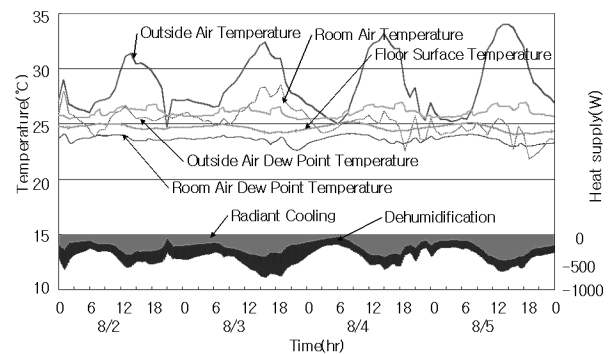


(b) Case 2. Water temperature adjustment

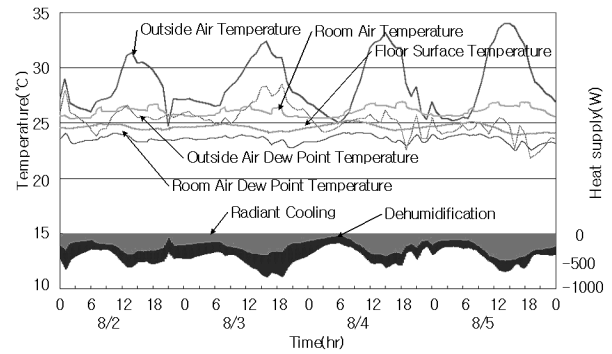


(c) Case 3. Air flow rate adjustment

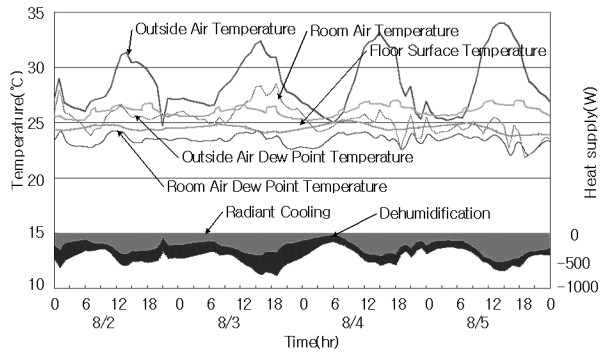
Fig. 5 Room thermal environment and heat extraction rate during the first period of condensation occurrence.



(a) Case 1. Water flow rate adjustment



(b) Case 2. Water temperature adjustment



(c) Case 3. Air flow rate adjustment

Fig. 6 Room thermal environment and heat extraction rate during the first period of condensation occurrence.

능력을 가지게 된다. 즉, 일정량의 공기 중에서 수증기를 제거하는 제습과 함께 그만큼 공기를 냉각하게 되며, 냉각된 공기가 일정량씩 계속해서 실내에 공급됨으로 인해 실내의 공기온도를 낮추면서 현열을 제거하게 된다.

Fig. 5에서 제습량이 적은 구간(제습시스템이 처음 운전되는 기간)은 변풍량방식의 제어가 정풍량방식의 제어보다 효율적으로 잠열부하가 제거됨을 더 분명하게 알 수 있다. 정풍량방식의 제어가 변풍량방식의 제어보다 제거된 현열의 비율이 높게 나타났는데, 이는 부하에 대한 반응이 빠른 제습시스템이 먼저 작동하여, 바닥복사냉방 시스템은 운전시간이 줄어들었기 때문이다.

결과가 연속해서 발생하여 제습량이 많은 구간에 대한 결과는 Fig. 6과 같다. 이 구간에서는 제습시스템의 운전조건이 설계조건과 거의 일치하기 때문에 제어방식에 따라 제거열량과 그의 구성비에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 변풍량방식의 제습제어가 정풍량방식의 제습제어보다 현열제거량이 적어서, 바닥복사냉방의 현열담당비율이 약간 더 많은 것으로 나타났다.

4.2 제습제어방식별 특성곡선 분석

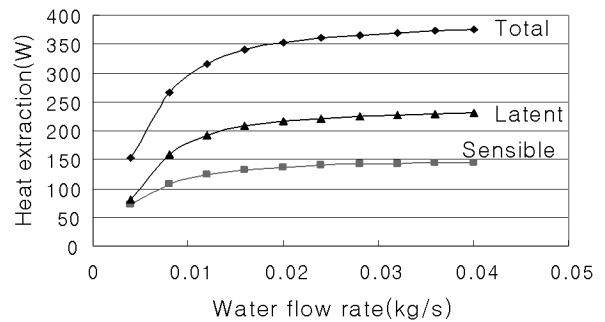
각 제어방식별 제습시스템의 특성곡선을 보면 Fig. 7과 같으며, 제습시스템의 성능은 냉각코일의 설계조건인 냉수유량과 온도, 냉각코일을 통과하는 공기량, 공기의 온도와 습도에 따라 달라진다. 여기서 냉수의 유량과 온도, 그리고 풍량은 제어방식별 조절변수이고, 공기의 온도와 습도는 실내 공기의 상태에 따라서 달라진다.

냉수유량을 제어할 경우, 제습시스템의 특성곡선은 Fig. 7의 (a)와 같이 냉수유량이 적을 때는 잠열 제거비율이 적고 냉수유량이 많을 때는 잠열 제거비율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 제습부하가 적을 경우, 제습과 함께 실온 냉각에도 상당한 영향을 주게 된다. 그리고 냉수 유량변화에 대하여 제거열량이 선형적으로 변하지 않기 때문에 제어의 실제적용에 있어서는 이러한 특성을 고려하여 해야 할 것으로 판단된다.

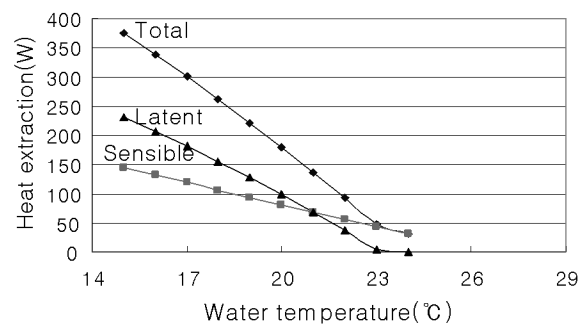
냉수온도제어의 경우, Fig. 7의 (b)와 같이 제습할 양이 적을 때는 실내 노점온도와 같거나 높은 온도의 냉수가 냉각코일에 공급되기 때문에 제습은 이루어지지 않고, 냉각코일을 통과하는 공기의 온도와 냉수온도의 차이에 의해서 공기 중의

현열이 제거된다. 냉각코일에 흐르는 냉수의 온도가 실내 노점온도보다 낮아지면서 제습이 시작되며, 냉수의 온도가 낮아짐에 따라 잠열제거비율도 따라서 증가하게 된다.

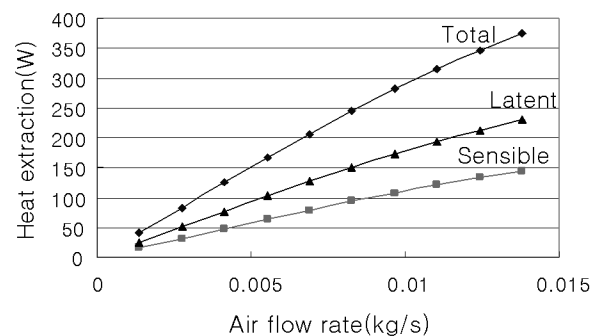
Fig. 7의 (c)는 풍량변화에 따른 제습시스템의 특성곡선으로, 풍량이 적거나 많거나 관계없이 잠열을 제거하는 비율을 일정하게 유지하는 것으로 나타났다. 이것은 냉각코일을 통과한 공기가 제습과 함께 냉각이 이루어지지만, 그 양으로 조절되어 양이 적을수록 실내 공기의 온도에 영향을 적게 주기 때문에 발생하는 현상이라고 판단된다. 그러므로 제습부하가 적은 구간에서도 잠열제거비율이 높게 유지되는 것으로 판단된다.



(a) Case 1. Water flow rate adjustment



(b) Case 2. Water temperature adjustment



(c) Case 3. Air flow rate adjustment

Fig. 7 Characteristic curve of dehumidifier.

5. 결 론

본 연구에서는 냉각제습량을 조절하는 제어인자에 따라 제어방식을 분류하여, 각 제어방식에 의한 실내 환경과 운전특성을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하여 효과적인 제습제어방안을 제시하고자 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제습시스템에서는 냉각코일의 냉수유량과 냉수온도, 코일을 통과하는 공기의 양을 제어함으로써 냉방기간 동안 결로를 방지하면서 실온을 설정온도로 유지하였다. 또한, 냉방이 이루어진 전기간의 실내 환경은 실내 온도를 비롯하여 바닥표면온도, 평균 복사온도, 작용온도, PMV가 제어방식별로 거의 차이가 없었다.

(2) 노점온도에 따라 냉수의 유량과 온도를 조절하는 정풍량방식의 제습제어는, 일정량의 공기가 냉각코일을 통과하면서 제습뿐만 아니라 냉각도 되기 때문에 잠열부하가 적은 경우에는 실내의 잠열부하와 현열부하를 모두 제거하여 바닥복사냉방시스템은 거의 작동하지 않는 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

(3) 노점온도에 따라 공기의 양을 조절하는 변풍량방식의 제습제어는, 냉각코일을 통과하여 냉각과 제습이 이루어진 공기의 양을 조절할 수 있기 때문에 제습량이 적게 필요한 시기에도 실내 공기온도에 영향을 적게 주면서 잠열부하를 제거하는 것으로 나타났다.

(4) 결로 연속발생구간에서는 제습시스템이 설계조건과 가까운 조건으로 운전되기 때문에 제습제어방식에 관계없이 제거된 부하 중 잠열부하의 비율은 거의 동일하게 나타났다.

(5) 따라서 바닥복사냉방을 위한 제습시스템의 제어에 있어서, 실내 공기온도에 영향을 적게 주면서 잠열부하를 제거할 수 있도록, 변풍량방식과 같이 적은 풍량을 보낼 수 있는 제어가 사용

되거나 정풍량방식의 설계풍량과 냉각코일의 온도 등이 재조정되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Koo, S. Y., 2000, A Study on the Application of Radiant Floor Cooling using Ondol in Korean Residential Buildings, Seoul National University, Seoul, Korea.
2. Kim, Y. Y. and Kim, K. W., 2001, A study on the thermal environmental analysis and the application of radiant floor cooling in apartment building, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 541-548.
3. Kim, Y. Y., Yoon, H. L. and Yeo, M. S., 2001, A study on the control of water flow and temperature in the radiant cooling system through simulations, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 532-540.
4. Kim, Y. Y., Lim, J. H., Yeo, M. S. and Kim, K. W., 2001, An experimental study on control performance of radiant floor cooling using Ondol, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 1165-1173.
5. Lee, S. Y., Hwang, S. H., Kim, K. H. and Leigh, S. B., 2002, An experimental study for evaluating performance of radiant floor cooling system integrated with dehumidification, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 142-152.