

온돌을 이용한 바닥복사냉방의 제습시스템 적용에 관한 연구

임 재 한, 여 명 석*, 양 인 호**, 김 광 우**†

서울대학교 대학원 건축학과, *성균관대학교 건축공학과, **서울대학교 건축학과

A Study on the Application of the Dehumidification System for Radiant Floor Cooling Using Ondol

Jae-Han Lim, Myoung-Souk Yeo*, In-Ho Yang**, Kwang-Woo Kim**†

Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Department of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

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

(Received May 3, 2002; revision received June 17, 2002)

ABSTRACT: This study has been conducted to evaluate the applicability of the control method in the dehumidification-integrated radiant floor cooling system in terms of stability of the room air temperature and the control variables through experiments. To do this, the relationship between the control variables in preventing floor surface condensation is first analyzed and the control method is predetermined through simulations. The results are as follows. First, it is necessary to determine the operation status of the dehumidification system according to the relationship between floor surface temperature and dew point temperature in the conditioned space. Second, outdoor reset with indoor temperature feedback control is better than on/off bang-bang control with respect to temperature stability in controlling the room air temperature and the possibility of energy savings. Finally, the humidity sensor can be located with the current thermostat in that there are small differences in absolute humidity in vertical distribution.

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

기 호 설 명

AVG : 평균

DA : 건조공기(dry air)

DF : 실온 제어시 제어편차 [°C]

DH_{on} : 제습시스템의 작동 여부

I : 일사량 [W/m²]

q_{lat} : 실내 잠열부하 [W/m²]

q_{sen} : 실내 현열부하 [W/m²]

RFC_{on} : 바닥복사냉방 작동 여부

SD : 표준편차

SR : 제습시스템 운전시 안전율 [%]

T_d : 노점온도 [°C]

T_{in} : 실온 [°C]

T_{out} : 외기온 [°C]

T_{return} : 바닥패널의 환수온도 [°C]

T_s : 바닥표면온도 [°C]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7065; fax: +82-2-885-8057

E-mail address: snukkw@snu.ac.kr

T_{supply} : 바닥패널의 냉수 공급온도 [$^{\circ}\text{C}$]

w_{in} : 실내습도 [g/kg(DA)]

w_{out} : 외기의 절대습도 [g/kg(DA)]

T_{set} : 설정실온 [$^{\circ}\text{C}$]

w_{supply} : 제습시스템에서 공급되는 공기의 절대습도 [g/kg(DA)]

1. 서 론

최근 국내 주택의 개별 냉방기기 보급 및 냉방에 대한 요구가 증가됨에 따라 여름철 일시적인 최대 전력수요가 크게 증가하고 있다. 이에 기존 난방에서 사용되어 온 온돌을 냉방에 활용하는 바닥복사냉방 시스템이 대안으로 제시되어,⁽¹⁾ 시뮬레이션과 실험, 현장실측을 통해 바닥패널의 제어방식 및 그 적용 가능성에 관한 연구가 진행되었다.⁽²⁻⁴⁾ 그리고 차가운 바닥 표면에서의 결로 발생을 제어하기 위해 제습기능이 고려된 시스템이 제안되었다.⁽⁵⁾ 그러나 바닥복사냉방 시스템에 제습시스템을 적용하기 위해서는 결로발생 제어 인자와 제어방식의 분석, 부하변화에 따른 시스템의 실온제어 안정성 및 결로제어 가능성에 대한 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 결로발생 제어인자를 분석하고, 기존 연구에 의해 상대적으로 에너지 소비가 적은 것으로 나타난⁽⁶⁾ 냉각제습을 복사냉방시스템에 적용하여 제어방식을 구성하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 실온제어의 안정성, 바닥 표면의 결로제어, 에너지 절감의 가능성 측면에서 제어성능을 분석하여 적합한 제어방식을 도출하였다. 이 제어방식을 냉방기간 동안 모델 실험하여, 결로제어시 실부하 변화에 따른 시스템의 실온제어 안정성과 결로제어 인자값의 변화를 분석함으로써 복사냉방시스템에 제습시스템의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 바닥복사냉방의 제어인자와 제어방식

2.1 제어인자

표면의 결로는 수증기가 공기 중의 노점온도보다 낮은 온도를 갖는 표면과 접촉한 경우에 발생하는 것으로, 바닥복사냉방에서는 Fig. 1과 같이

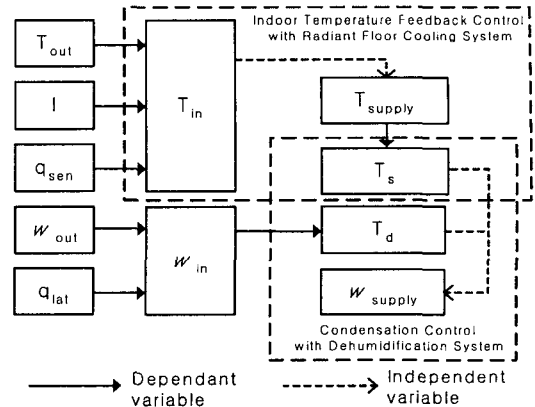
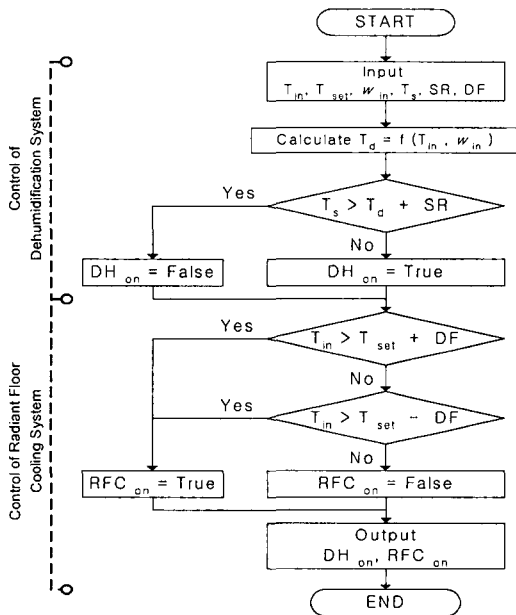


Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between the control parameters.

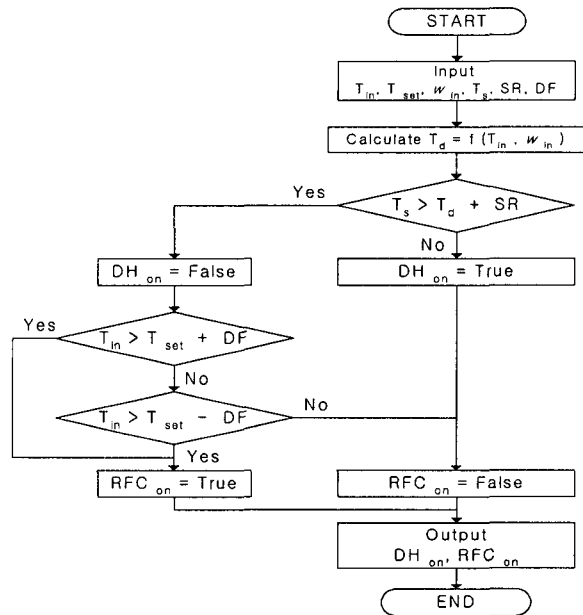
냉방에 의해 낮아진 바닥표면온도와 실온, 실내습도의 변화에 의해 표면결로가 발생한다. 이중 실온의 변화는 일사 등의 외기부하 요소와 인체, 조명, 기기발열과 같은 내부부하 요소에 의해 이루어지고, 실내습도의 변화는 환기나 침기에 의한 외기부하 요소와 인체나 기기에 의한 내부부하 요소에 의해 이루어진다. 그리고 바닥 표면온도의 변화는 설정실온을 유지하기 위해 공급냉수의 유량이나 온도가 변화됨으로써, 바닥구조체의 시간지연 특성에 따라 다르게 나타난다. 그러므로 바닥복사냉방에 결로발생을 제어하기 위한 제습시스템이 적용될 경우에는 바닥 표면온도와 노점온도의 관계에 의해 제습시스템의 운전 여부를 결정하여, 실의 노점온도가 항상 바닥 표면온도보다 낮게 유지되도록 제어해야 할 것이다.

2.2 제어방식

바닥복사냉방에서 냉수공급에 따른 방열량은 공급 냉수의 유량과 온도에 의해 결정되므로, 이에 따라 제어방식은 개폐식 제어나 변유량 제어와 같은 공급유량 제어, 그리고 외기보상 제어나 외기보상 실온 피드백 제어와 같은 공급 냉수온도 제어로 분류될 수 있다. 그리고 제습기능이 통합된 바닥복사냉방 시스템에서 실온과 바닥 표면의 결로발생을 동시에 제어할 경우, 실온, 바닥 표면온도, 실내습도의 제어인자가 서로 영향을 미치며 변화된다. 그러므로 제어방식은 Fig. 2와 같이, 제습 운전시 바닥복사냉방의 운전이 영향 받지 않는 경우(서로 독립적인 경우, Fig. 2의 (a))



(a) Radiant floor cooling system is operated independently to the dehumidification system



(b) Radiant floor cooling system is operated dependently to the dehumidification system

Fig. 2 Control algorithms of the dehumidification-integrated radiant floor cooling system.

와, 제습 운전시 바닥복사냉방의 운전이 영향 받는 경우(바닥복사냉방이 제습시스템에 종속적인 경우, Fig. 2의 (b))로 나누어질 수 있다. 본 연구에서는 제습기능이 통합된 바닥복사냉방 시스템의 제어방식으로, 기존 공동주택의 난방 시스템에서 일반적으로 적용되고 있는 개폐식 제어방식(Table 2의 Case I, II)과, 기존 연구⁽⁴⁾에 의해서 얻은 제어성능이 좋은 것으로 나타난 외기보상실온 피드백 제어방식(Table 2의 Case III, IV)을 적용하였다. 제습시스템의 경우, 패키지 에어컨을 냉각제습 목적으로 사용하였으며, 바닥 표면온도와 노점온도와 안전율⁽⁴⁾을 1℃로 하여 압축기와 팬을 on/off 제어하였다.

3. 제습시스템이 적용된 바닥복사냉방의 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 프로그램의 해석 알고리즘

건물의 벽체, 바닥, 창과 바닥패널의 해석 알고리즘은 기존 바닥패널의 제어방식을 위한 연구⁽³⁾에서 사용되어진 해석방법을 이용하였다. 온돌해

석은 fin 효율과 Effectiveness-NTU 방법을 적용하였고, 실외측 벽체 표면의 계산은 상당외기온과 벽체 내부로의 열전도에 의한 열교환을 고려하였으며, 실내측 표면은 modified thermal balance model을 적용한 복사열교환과 벽체 내부로의 전도열교환, 실내공기와 대류열교환, 일사열획득 등을 고려하였다. 실온의 해석은 각 표면과의 대류열전달, 인체, 조명, 기기의 대류발열성분 및 침기와 급기의 양에 의해 결정하였다. 그리고 결로발생에 영향을 주는 잠열부하의 해석은 외기의 영향과 내부발열요소 중 잠열부하의 영향을 고려하였다. 그리고 직패식 코일의 모델링⁽¹³⁾은 코일에 들어가는 공기의 건구온도와 절대습도, 공기 유입량, 외기의 건구온도를 입력 받아서, 코일 출구의 건구온도와 절대습도를 계산하였다.

3.2 시뮬레이션 조건 및 방법

3.2.1 시뮬레이션 조건

일반적인 32평형 공동주택의 중간층 중간세대 안방을 대상공간으로 하였으며, 입력 데이터 조건은 Table 1과 같다. 직패식 코일은 일반 공동

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		-
Settings for radiant cooling	Water flow rate		2.2 lpm
	Set-point of room air temperature		26°C

주택에서 사용되는 냉방용량 7kW, 소비전력 2 kW 규모로 산정하였으며, 풍량은 3.6 CMM으로 일정하게 하였다.

3.2.2 시뮬레이션 방법

기상 데이터에서 가장 높은 외기온이 발생하는 일주일(8월 2일~8월 8일) 동안 외기보상제어를 실시하여 외기보상량을 구하고, 이를 전체 냉방

기간 동안 적용하여 외기보상 실온 피드백 제어를 실시하였다. 그리고 여기서 분석된 외기온-냉수 공급온도의 관계에 따라 냉수의 최저 공급온도를 결정하여 개폐식 제어에 적용하였다. 바닥 패널의 각 제어방식은 제습운전이 이루어지는 동안 두 시스템이 서로 독립적인 경우(Table 2의 Case I, III)와 종속적인 경우(Table 2의 Case II, IV)로 나누어 실시하였다.

3.3 시뮬레이션 결과 분석 및 고찰

3.3.1 실온제어 안정성

각 제어방식에 따라 실온과 바닥 표면의 결로 발생을 제어한 결과, Fig. 3과 같이 전체 냉방기간 동안 설정실온에서 약 1°C 내외의 오차범위에서 제어가 이루어졌고, 바닥 표면의 결로발생을 막을 수 있었다. 그러나 Table 2와 같이 개폐식 제어방식이 제습운전과 결합될 경우(Case II), 밸브가 닫혀 냉수의 공급이 중단됨으로 인해 실온 평균(AVG)이 0.5°C 정도 높게 나타남을 알 수 있었다. 특히 최고 외기온이 발생한 일주일 동안(8월 2일~8월 8일)에는 Fig. 3(b)와 같이 실온과 바닥 표면온도가 다른 방식에 비해 약 0.9°C 정도 높게 나타나, 고온다습한 외기조건에서 개폐식 제어 적용시 실온이 과열될 수 있음을 알 수 있었다. 실온의 평균값이 비슷한 경우(Case I, III), 외기보상 실온 피드백 제어(Case III)는 개폐

Table 2 Comparison of room air temperature, floor surface temperature, and total operating time of packaged unit with DX coil

	Room air temp.(°C)		Floor surface temp.(°C)		Dew point temp.(°C)		Total operating time of packaged unit (hr)
	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	
Case I	26.0	0.6	24.2	1.1	21.4	1.7	6
Case II	26.5	0.5	24.9	0.9	22.0	1.9	4
Case III	26.0	0.4	24.3	0.6	20.9	2.2	3
Case IV	26.0	0.4	24.3	0.6	20.9	2.2	3
Case V	26.1	0.3	25.3	0.6	22.8	2.4	299

Case I: Radiant floor cooling system (on/off control) is operated independently to the dehumidification system.

Case II: Radiant floor cooling system (on/off control) is operated dependently to the dehumidification system.

Case III: Radiant floor cooling system (outdoor reset with indoor feedback control) is operated independently to the dehumidification system.

Case IV: Radiant floor cooling system (outdoor reset with indoor feedback control) is operated dependently to the dehumidification system.

Case V: Only packaged unit with DX coil is used for room air temperature control.

* Floor surface condensation is not occurred in every cases.

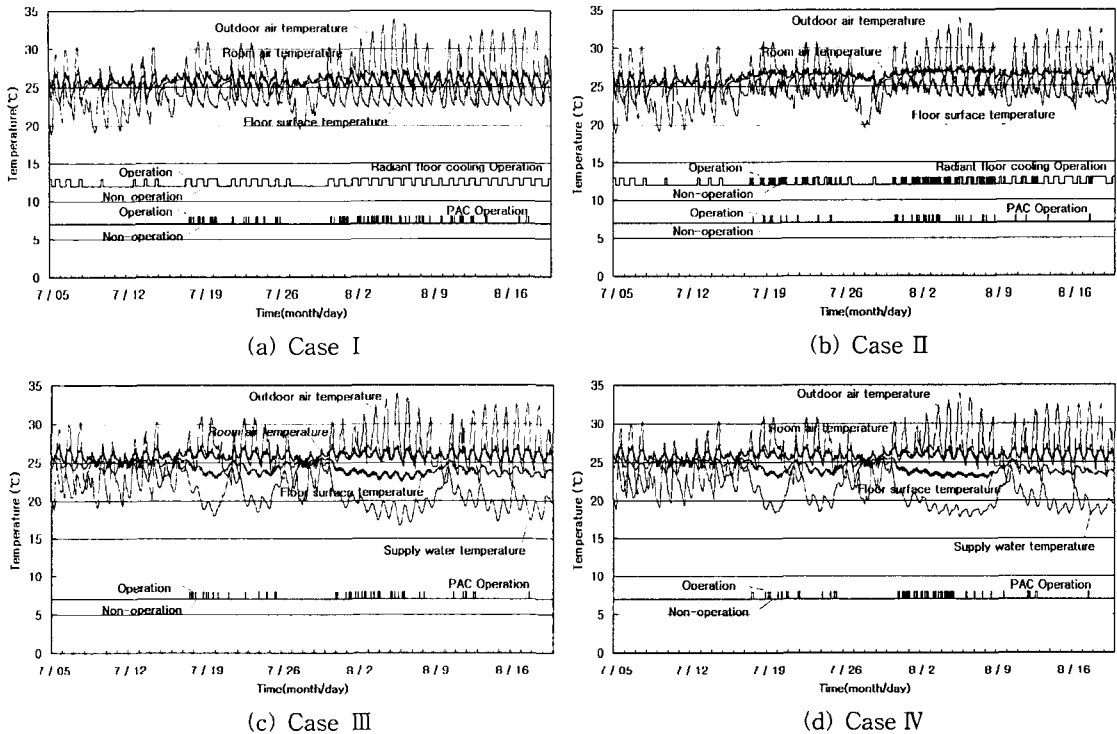


Fig. 3 Comparison of room air temperature, floor surface temperature, operations of the radiant floor cooling and dehumidification system (DX coil) (refer to Table 2).

식 제어(Case I)보다 실온의 제어편차(SD)가 약 0.2°C 정도 작게 나타났으며, 바닥 표면온도의 제어편차(SD)도 개폐식 제어의 경우 약 1.1°C 인 반면, 외기보상 실온 피드백 제어의 경우 약 0.6°C 로 나타나 그 분포가 더 안정적인 것으로 나타났다. 바닥패널의 제어방식을 외기보상 실온 피드백 제어로 동일하게 적용한 경우(Case III, IV)에는 실온 및 바닥 표면온도의 분포가 비슷하게 나타나, 제습시스템의 운전이 통합시스템의 실온제어에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

3.3.2 바닥 표면의 결로제어

바닥복사냉방의 결로발생을 제어하기 위해 직팽식 코일을 이용한 제습시스템을 적용한 결과, 실내의 노점온도를 항상 바닥 표면온도보다 낮게 유지함으로써 각 제어방식에서 바닥 표면의 결로발생을 막을 수 있었다. 제습시스템은 Fig. 3과 같이 주로 최고 외기온이 발생한 일주일(8월 2일~8월 8일) 동안 작동하였는데, 이 기간 동안 실의 노점온도는 개폐식 제어(Case I)와 외기보상

실온 피드백 제어(Case III)에서 각각 평균(AVG) 22°C , 20°C 로 나타나, 외기보상 실온 피드백 제어가 결로제어에서 더 안정적인 성능을 나타냈다. 그리고 제어성능이 유사한 경우(Case III, IV)에는 적용의 편의성을 고려하여 두 개의 시스템이 서로 영향을 받는 것(Case IV)보다는 독립적으로 제어되는 것(Case III)이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고 Case III에 있어 제습시스템은 실내습도가 약 17.5 g/kg(DA) 이상으로 올라간 경우에 작동하였으며, 특히 바닥 표면온도가 23°C 까지 올라가는 시간에도 작동하는 것으로 나타나, 바닥패널에 의한 냉방 요구량이 적은 경우에도 제습시스템의 작동이 필요함을 알 수 있었다.

3.3.3 에너지절감 가능성

바닥복사냉방에 제습시스템을 적용한 경우의 에너지절감 가능성을 평가하기 위해, 패키지 에어컨을 결로제어 목적으로 사용한 경우(Case I ~ Case IV)와 실온제어 목적으로 사용한 경우(Case V)의 운전시간을 비교하였다. Table 2의 Case V

는 기존 패키지 에어컨과 같이 직팽식 코일을 실온제어 목적으로 압축기와 팬을 on/off 제어한 것으로써, 기존 조사연구⁽⁷⁾의 278 hr과 10% 정도의 범위에서 일치하였다. 그리고 에어컨이 바닥복사냉방과 함께 결로제어를 위해 사용될 경우, 가동시간은 개폐식 제어(Case I)가 약 6시간, 외기보상 실온 피드백 제어(Case III)가 약 3시간으로 나타나 여름철 에어컨의 사용시간을 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 제습시스템과 결합된 바닥복사냉방에서 전체 냉방기간 동안 에너지사용량을 총체적으로 평가하기 위해서는, 바닥패널을 위한 열원의 에너지사용과 제습을 위한 열원의 에너지사용을 모두 고려해야 할 것이다.

4. 제습시스템이 적용된 바닥복사냉방의 모델실험

4.1 실험개요

바닥 표면의 국부적인 결로발생은 실제 공간의 수직적인 실온이나 실내습도의 분포, 바닥 표면온도의 수평적인 분포에 영향받을 수 있으므로, 제어방식이 적용된 실험을 통해 표면 결로발생과 관련된 인자들을 분석하는 것이 필요하다. 그러므로 시뮬레이션에서 가장 제어효과가 양호한 Case III에 대하여, 모델실험공간에서 현열 및 잠열 부하조건을 변화시키며 실온과 바닥 표면의 결로발생을 제어하는 실험을 실시하였다. 그 결과 부하조건에 따라 실온제어의 안정성을 검토하고, 바닥 표면 결로발생과 관련된 제어인자값의 변화를 분석하였다.

4.2 실험모델 및 장치구성

4.2.1 실험모델 구성

국내 공동주택 중 남향인 32평형 안방을 기준으로 외피의 열관류율이 동일하게 모델공간을 구성하였고, 발코니의 돌출길이를 동일하게 외부차양을 설치하였다. 바닥구조체는 기존 공동주택과 동일하게 적용하였으며, 제습시스템은 직팽식 코일이 포함된 패키지 에어컨을 이용하여 압축기와 팬을 on/off 제어하였다.

4.2.2 실험장치 구성

바닥복사냉방에 필요한 냉수를 일정한 온도로

공급하기 위해 빙축열조를 열원으로 사용하였다. 그리고 판열 열교환기를 사용하여 바닥패널에 공급되는 냉수의 온도를 16.5℃로 일정하게 재조정하였으며, 이를 외기온과 모델공간의 실온에 따라 외기보상 실온 피드백 제어하여 바닥패널에 공급하였다.

실온과 바닥 표면의 결로발생을 제어하기 위해 모델공간의 실온과 실내습도, 바닥 표면온도, 냉수 공급온도, 환수온도, 외기온, 외기습도를 측정하였다. 실온은 수직분포를 측정하기 위해 바닥으로부터 10 cm되는 높이에서 50 cm 간격으로 5개의 T-type 열전대를 설치하였고, 실온제어는 일반적인 실온제어기가 설치되는 높이인 1.1 m를 기준으로 하였다. 바닥 표면온도는 냉수공급에 따른 바닥 표면온도의 분포를 분석하기 위해 12 지점에 T-type 열전대를 부착하였고, 결로제어를 위해 공급측 냉수 인입상부 바닥 표면온도를 측정하였다. 냉수 공급온도와 환수온도를 측정하기 위해 배관에 설치할 수 있는 센서를 제작하여 사용하였다.

측정된 온도, 습도조건에 따라 바닥패널에 공급되는 냉수온도와 패키지 에어컨의 압축기, 팬을 제어하기 위해, 각 센서와 밸브, 펌프, 압축기, 팬을 입출력 보드를 통해 컴퓨터와 연결하여 이를 자체 제작한 제어 프로그램과 연동하였다.

4.3 실험조건 및 방법

바닥복사패널은 외기보상 실온 피드백 제어로 3방밸브를 조절하여 실온을 제어하였고, 바닥 표면의 결로발생을 방지하기 위해 모델공간의 바닥 표면온도가 노점온도에 안전율(1℃)을 더한 값보다 낮아지게 되면, 패키지 에어컨의 압축기와 팬이 작동하여 바닥패널의 운전과 독립적으로 제어되도록 하였다. 그리고 부하변동에 따른 모델공간의 제어반응을 알아보기 위해 발열장치와 가습장치를 사용하여 Fig. 4와 같이 현열과 잠열을 발생시켰다.

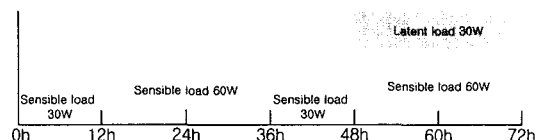


Fig. 4 Internal load schedule.

4.4 실험결과 분석 및 고찰

4.4.1 실온 제어 안정성 분석

제습기능이 통합된 바닥복사냉방 시스템의 실부하 변화에 따른 실온제어 안정성을 분석한 결과 Table 3과 같이 내부부하 변동에 따라 실온의 평균값(AVG)이 각각 25.9℃, 26.5℃, 26.8℃로 나타났다. 내부에 30 W의 현열이 가해진 경우에는 상대적으로 작은 제어편차(SD)가 나타난 반면, 부하가 커짐에 따라 실온의 제어편차(SD)가 약 1.5 배 정도 크게 나타났는데, 이는 Fig. 5와 같이 외기온이 30℃ 이상으로 올라가는 시간 동안 내부 발열의 크기가 증가한 경우, 냉수 공급온도의 하한값(13.5℃)을 설정해 놓음으로 인해 바닥패널이 부하에 즉각적으로 반응하지 못하고, 설정온도(26℃)에서 최대 2℃ 정도의 과열이 발생하였기 때문으로 판단된다. 냉방성능만을 고려하여 냉수 공급온도의 하한값을 설정하지 않을 경우, 실온의 제어성능은 더 안정적일 수 있지만, 바닥 표면온도 저하에 의해 불쾌적이 발생할 수 있으므로,

Table 3 Results of experiment according to the internal load conditions

	Internal sensible heat generation 30 W			
	Room air temp. (℃)	Floor surface temp. (℃)	Room air humidity (g/kg(DA))	Outdoor air temp. (℃)
AVG	25.9	23.4	13.6	25.5
SD	0.6	0.5	0.4	2.9
Max	27.6	24.4	14.2	29.5
Min	24.7	22.5	13.0	19.1
	Internal sensible heat generation 60 W			
	Room air temp. (℃)	Floor surface temp. (℃)	Room air humidity (g/kg(DA))	Outdoor air temp. (℃)
AVG	26.5	23.6	13.7	26.2
SD	0.9	0.5	0.8	3.1
Max	28.2	24.4	15.9	30.5
Min	25.6	22.5	11.2	19.7
	Internal sensible heat generation 60 W & Internal latent heat generation 30 W			
	Room air temp. (℃)	Floor surface temp. (℃)	Room air humidity (g/kg(DA))	Outdoor air temp. (℃)
AVG	26.8	23.1	14.1	26.3
SD	0.8	0.6	0.4	3.2
Max	28.2	24.1	14.8	30.2
Min	25.1	22.2	12.9	19.9

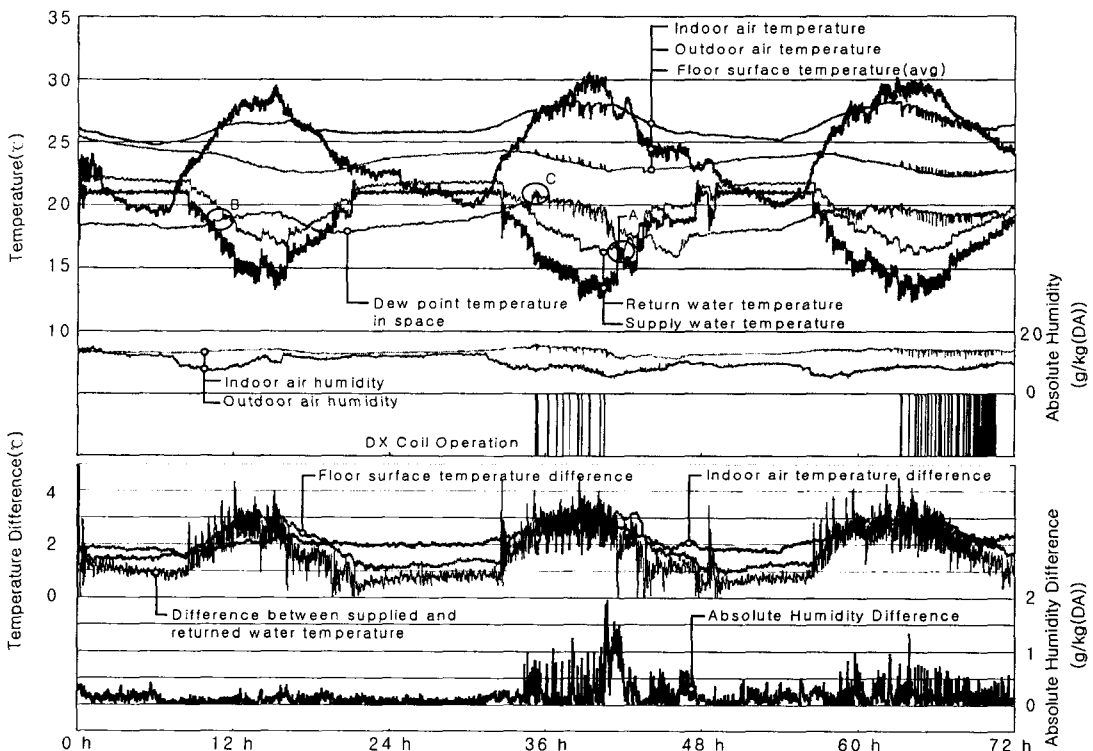


Fig. 5 Experimental results in room air temperature, floor surface temperature, dew point temperature, and supplied and returned water temperatures.

패적을 고려할 경우에는 실내부하의 크기에 따라 보조냉방장치의 설치가 요구될 것으로 판단되며, 특히 패키지 에어컨을 냉각제습 목적으로 이용할 경우에는 제어 알고리즘을 수정함으로써 쉽게 적용이 가능할 것이다.

주간과 동일한 내부발열이 야간에 주어진 경우, 바닥패널이 주간에 평균 23℃로 충분히 냉각됨으로 인해, 실의 내부발열이 증가함에도 실온의 과열은 발생하지 않았다. 이를 통해 볼 때, 바닥복사냉방은 그 축냉 특성으로 인해 열대야 현상이 빈번한 도심의 공동주택에서 적용이 적합할 것으로 판단된다.

4.4.2 표면결로 제어인자 분석

바닥 표면의 결로발생을 제어하기 위해 모델공간의 냉수 인입배관 상부 바닥 표면온도를 측정하여, 노점온도에 안전율(1℃)을 적용함으로써 제습시스템을 제어하였다. 제어방식의 실험결과, 설정실온을 유지하기 위해 바닥 표면온도가 평균 23.5℃, 최소 22.2℃로 유지되었으며, 실내의 노점온도가 평균 18.7℃, 최대 21.2℃로 제어됨으로써 표면의 결로가 발생하지 않았음을 판단할 수 있었다. 그리고 바닥 표면온도의 평균값은 시뮬레이션 결과에 비해 0.8℃ 정도 낮게 나타났는데, 이는 시뮬레이션의 결과값이 전체 냉방기간에 걸쳐 분석되어 높게 나타났기 때문으로 판단된다.

바닥 표면의 결로발생과 관련된 제어인자로서 실온, 실내습도, 바닥 표면온도를 분석하기 위해 일반적인 실온제어기가 설치되는 1.1 m 높이와 바닥 표면으로부터 0.1 m 높이에서의 실온과 실내습도를 분석하였고, 모델공간의 12지점 평균 바닥온도와 냉수 인입배관 상부 바닥 표면온도를 비교 분석하였다. 실온의 수직분포는 Table 4와 같이 평균 2.1℃, 최대 2.9℃로 나타나, 패적에 관한 기존 연구⁽¹²⁾에서 제시된 값(실온의 수직온도

분포가 약 3.7℃일 경우 PPD=10)보다 낮게 유지됨으로써, 실온의 수직분포에 따른 국부적인 불쾌적이 문제되지 않을 것으로 판단된다. 실내습도에 있어서는 그 차이가 평균 0.15 g/kg(DA), 최대 1.9 g/kg(DA)로서, 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이를 통해 볼 때, 실내습도센서는 기존의 실온조절기와 동일한 높이에 설치 가능할 것으로 판단된다. 바닥 표면온도는 Table 4와 같이, 평균 2.0℃, 최대 3.2℃의 차이가 나타났고, 이를 공급 냉수온도와 환수온도의 차이(ΔT)에 따라 도시하면 Fig. 6과 같다. 이를 통해 볼 때, 최소 바닥 표면온도와 노점온도에 따라 결로발생을 제어할 경우 전반적인 바닥 표면온도의 분포가 최소 22℃ 이상으로 유지됨으로써, 바닥 표면 온도 저하에 의한 국부적인 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단되며, 바닥패널의 설계에 있어

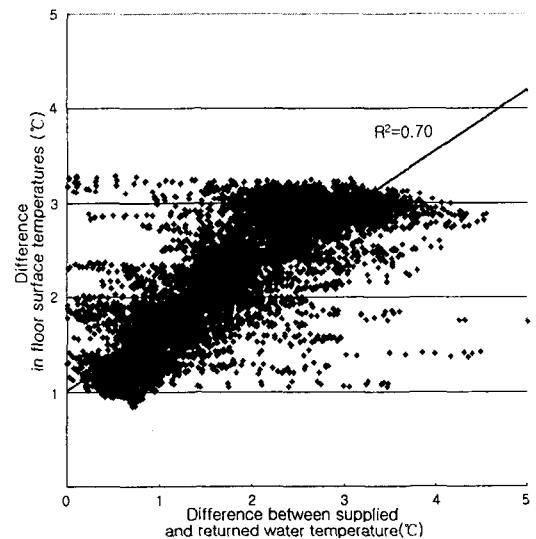


Fig. 6 Difference in floor surface temperatures according to the $\Delta T(T_{\text{return}} - T_{\text{supply}})$.

Table 4 Difference of room air temperature, floor surface temperature, supplied and returned water temperature, and indoor air humidity

	Room air temperature difference (°C)	Floor surface temperature difference (°C)	Difference between supplied and returned water temperature (°C)	Indoor air humidity difference (g/kg(DA))
AVG	2.1	2.0	1.6	0.15
SD	0.4	0.7	0.9	0.18
MAX	2.9	3.2	6.2	1.9
MIN	1.3	0.8	0	0

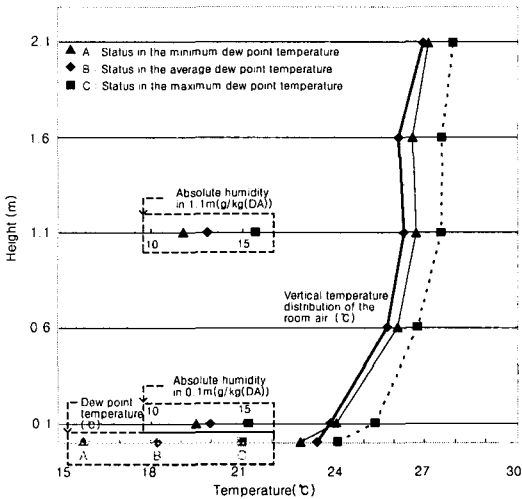


Fig. 7 Profiles in vertical room temperature, floor surface temperature, dew point temperature, and room air humidity.

서 공급냉수의 온도차는 냉동기의 허용 온도차 (5°C)와 배관에서 손실을 고려하여 최대 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 정도가 적합하고, 이를 초과할 경우에는 난방시 적용된 공급 냉수유량 및 배관의 크기, 펌프의 크기를 재검토해야 할 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 7의 A는 모델공간의 노점온도가 최소인 경우(15.8°C)로서, 이전시간 동안 제습시스템이 작동하여 Fig. 5와 같이 모델공간의 절대습도량이 감소하였으며, 바닥 표면온도는 축냉에 따른 시간지연이 발생하여 약 22.9°C 를 유지되었다. B의 경우는 모델공간의 노점온도가 평균인 경우(18.2°C)로서, 제습시스템은 운전되지 않고, 바닥 표면온도 23.4°C , 실온 26.3°C 로 실온을 안정적으로 유지하였다. C의 경우는 노점온도가 최대인 경우(21.1°C)로서, 실온(27.5°C)과 바닥 표면온도(24.1°C)가 높게 유지되었지만, 인입배관 상부의 바닥 표면온도가 22.1°C 이하로 내려가면서, 제습시스템이 운전되는 것을 알 수 있었다. 즉, 바닥복사냉방이 약 2시간의 타임랙(time-lag)을 두고 실온을 제어하는 반면, 제습시스템은 노점온도와 인입배관 상부의 바닥 표면온도 차이에 따라 곧바로 결로발생을 제어함으로써, 실온 제어에 미치는 영향이 적게 나타났고, 실온이 설정값보다 높은 온도일 때 제습시스템이 작동함으로 인해, 냉각 제습시스템의 적용에 따른 과냉현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 제습시스템을 바닥복사냉방 시스템에 적용하기 위해, 제어인자 및 제어방식을 분석하고, 시뮬레이션을 통해 적합한 제어방식의 선정하였으며, 모델실험을 통해 제어방식의 적용가능성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 바닥복사냉방에 제습시스템을 적용하여, 실의 바닥 표면온도와 노점온도에 따라 시스템의 운전 여부를 결정하고, 실에 공급되는 공기의 습도를 조절함으로써 바닥 표면의 결로 발생을 제어할 수 있었다.

(2) 외기보상 실온 피드백 제어방식이 제습시스템과 결합된 경우, 개폐식 제어에 비해 실온 제어편차가 약 0.9°C 정도, 바닥 표면온도의 제어편차가 약 0.4°C 정도 낮게 나타났다. 그리고 결로제어를 위한 제습시스템의 운전시간도 약 50% 정도 적게 나타나 에너지 절감 가능성이 큰 것으로 판단된다.

(3) 바닥복사냉방 시스템에 제습시스템을 적용하여 모델실험을 실시한 결과, 평균 $25.9\sim 26.8^{\circ}\text{C}$ 로 실온이 유지되었으나, 바닥 표면온도의 저하에 의한 불쾌적이 발생하는 것을 막기 위해 공급냉수온도의 하한값을 설정해 놓음으로써 최대 2°C 정도 과열이 발생하였다. 바닥 표면온도 저하에 의한 국부적인 불쾌적을 고려할 경우, 보조 냉방장치의 설치가 요구되며, 패키지 에어컨을 제습시스템으로 이용할 경우에는 제어 알고리즘을 수정함으로써 쉽게 적용할 수 있을 것이다. 그리고 바닥복사냉방은 바닥패널의 축냉에 따른 시간지연 특성으로 인해 열대야 현상이 빈번한 도심의 공동주택에서 적용이 적합할 것으로 판단된다.

(4) 실온은 평균 2.1°C , 최대 2.9°C 의 수직적인 구배가 나타나, 기존 쾌적기준에 비취볼 때, 국부적인 불쾌적이 문제되지 않을 것으로 판단된다. 그리고 절대습도에 있어서는 평균 0.15 g/kg(DA) 로 큰 차이가 나타나지 않아, 실내습도센서를 기존의 실온조절기와 동일한 높이에 설치할 수 있을 것으로 판단된다. 바닥 표면온도는 평균 2.0°C , 최대 3.2°C 의 차이를 나타냈으며, 최소 22°C 이상으로 유지됨으로써, 바닥 표면의 결로제어시 표면온도 저하에 의한 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 그리고 실온제어와 바닥 표면

의 결로제어에 있어 시간지연이 발생함으로써, 냉각 제습시스템의 적용에 따른 과냉현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 공학연구소, 2002년도 두뇌한국21 사업과 에너지관리공단의 연구지원으로 진행되었다.

참고문헌

1. Koo, S. Y., Kim, Y. Y., Seok, H. T., Lee, H. W. and Kim, K. W., 2000, A Study on the applicability of radiant cooling using Ondol, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 200-208.
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.
6. Imanari, T., Omori, T. and Bogaki, K., 1999, Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system, Comparison with the conventional all-air system, Energy and Buildings, Vol. 30, pp. 167-175.
7. Yeom, J. K., 2000, Survey on electricity consumption characteristics of home appliances, Korea Electric Power Co., RP-31003.
8. Kitagawa, K., Komoda, N., Hayano, H. and Tanabe, S., 1999, Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under radiant ceiling by subjective experiments, Energy and Buildings, Vol. 30, pp. 185-193.
9. McQuiston, F. C., 1992, Cooling and heating load calculation manual(2nd edition), ASHRAE 2001, pp. 28.4-28.5
10. Matsuki, N., Nakano, Y., Miyanaga, T., Yokoo, N. and Oka, T., 1999, Performance of radiant cooling system integrated with ice storage, Energy and Buildings, Vol. 30, pp. 177-183.
11. Olesen, B. W., 1977, Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, ASHRAE Transactions 83(2).
12. Olesen, B. W., 2002, Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 537-548.
13. Michael, J. B., HVAC 2 tool kit-A toolkit for secondary HVAC System Energy Calculations, ASHRAE, 1993, pp. 81-96.
14. McQuiston, F. C., 1992, Cooling and heating load calculation manual, 2nd ed., ASHRAE, p. 5.7.