시뮬레이션을 통한 바닥복사냉방 시스템의 공급유량 및 냉수온도 제어에 관한 연구

김 용 이†, 윤 혜 림*, 여 명 석**
서울대학교 대학원 건축학과, * 중부대학교 건설공학부, 서울대학교 건축학과

A Study on the Control of Water Flow and Water Temperature in the Radiant Cooling System through Simulations

Yong-Yee Kim†, Hae-Lim Yoon*, Myoung-Souk Yeo**
Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
**School of Construction Engineering, JoongBu University, Chungcheongnamdo 312-702, Korea*
***Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received May 8, 2001; revision received May 19, 2001)

ABSTRACT: The objectives of this study are to analyze the control variables according to condensation occurrence, to find the range in floor surface temperature and frequency of condensation, and to evaluate the control methods through simulations when the radiant heating system is used for cooling. Through the simulation analysis the control methods such as on/off control, variable flow control and outdoor reset with indoor temperature feedback control are evaluated and compared.

The results show that the lowest floor surface temperature is around 23℃, the surface condensation can be prevented by controlling indoor humidity within 20 g/kg (DA), and that outdoor reset with indoor temperature feedback control is more appropriate than on/off control and variable flow control with regard to prevention of the condensation and thermal comfort.

Key words: Radiant cooling system(**복사냉방 시스템**), On/off control(On/off **제어**), Variable flow control(**변유량 제어**), Outdoor reset with indoor temperature feedback control(**외기보상 실온 피드백 제어**)

기 호 설 명

$\dot{q}$	: **발열량** [W]
A_f	: **총발열 면적** [m²]
δx_o	: **발열층의 두께** [m]
ε_{PNL}	: **패널의 열교환율**
$\dot{m}_w$	: **유량** [kg/sec]
C_{pw}	: **물의 비열** [J/kg℃]
T_{wi}	: **공급수 입구온도** [℃]
T_m	: **발열층의 평균온도** [℃]
ρ_{air}	: **공기의 밀도** [kg/m³]
C_{air}	: **공기의 비열** [J/kg℃]
V_{room}	: **실의 용적** [m²]
T_{room}^{p+1}	: **실내 공기의 미래 온도** [℃]
T_{room}^{p}	: **실내 공기의 현재 온도** [℃]

† Corresponding author
Tel.: +82-2-880-7066; fax: +82-2-885-8057
E-mail address: luke@ondol.snu.ac.kr

Δt : 계산시간간격 [sec]
q_h : 바닥, 벽체, 창문 대류열전달 [W]
q_{infil} : 침기에 의한 열전달 [W]
q_{supply} : 급기에 의한 열전달 [W]
q_{c_p} : 인체발열 대류성분 [W]
q_{c_l} : 조명발열 대류성분 [W]
q_{c_e} : 기기발열 대류성분 [W]
VOL : 실용적 [m^3]
x_R : 실의 절대습도량 [kg/kg(DA)]
x_a : 외기의 절대습도량 [kg/kg(DA)]
G_o : 틈새바람의 양 [kg/s]
LH : 실내 수증기 발생량 [kg/s]
T_{water} : 공급 냉수온도 [℃]
T_{out} : 외기온 [℃]
RR : 외기보상률(reset ratio)
T_{do} : 설계 최고 외기온 [℃]
T_{dw} : 설계 최저 공급 냉수온도 [℃]
T_{shift} : 외기보상률의 변동률 [℃]
e : 설정 실온과의 오차 [℃]
X : 밸브의 개도위치(0에서 1 사이의 값)
M_{flow} : 공급유량 [m^3/hr]
$M_{flow\ max}$: 설계 최대 공급유량 [m^3/hr]
ΔP_{flow} : 밸브의 압력손실 [kg/cm^2]
$\Delta P_{flow\ max}$: 밸브의 최대 압력손실 [kg/cm^2]

1. 서 론

지금까지 공동주택의 냉방시스템은 온돌을 이용한 난방시스템과는 별도로 단위세대별 패키지 에어컨이 주로 사용되어 왔지만, 최근 냉방수요가 급증함에 따라 온돌을 이용한 복사냉방방식이 대안으로 제시되었다.(1) 온돌을 냉방에 적용하기 위해서는 실제 공동주택에 적용시 바닥온도의 범위를 파악하고, 바닥 표면의 결로 발생을 제어해야 하는 등 여러 가지 측면이 검토되어야 하고 이를 적절하게 조절할 수 있는 제어방식이 필요하다.

그러므로, 본 연구에서는 기존 온돌 난방 제어방법을 적용한 시뮬레이션을 실시하여, 공급 냉수온도와 바닥 표면온도의 범위, 결로발생 여부에 따른 제어인자의 범위를 분석하였다. 그리고, 각 제어방식별로 냉방시 바닥 표면온도와 실온의 안정성, PMV에 의한 쾌적성, 바닥 표면의 결로 발생을 분석하여 그 성능을 비교하였다.

2. 복사냉방의 제어방식

2.1 기존 바닥 복사난방 시스템의 제어방식(2)

기존 바닥 복사난방 시스템의 제어방식은 온수를 제어하는 인자에 따라 공급 온수온도제어와 공급 유량제어로 분류될 수 있다.

공급 온수온도제어는 방열량을 제어하기 위해 공급되는 온수의 온도를 제어하는 방법으로, 외기보상률(reset ratio)에 따라 온수온도를 제어하는 외기보상제어와, 외기보상률에 따라 결정된 온도의 온수를 일정시간 간격 동안 실온 피드백을 통해 3방 밸브를 사용하여 재조정한 후, 대상공간에 공급하는 외기보상 실온 피드백 제어가 있다.

공급 유량제어는 일정한 온수온도조건에서 공급되는 유량을 제어하는 방법으로, on/off 밸브를 사용하여 설정온도에 대한 일정 편차범위에서 2위치 제어하는 on/off 제어와, 방열량-유량의 관계가 등비율 특성(equal percentage characteristic)인 유량조절 밸브를 사용하여 유량을 연속적으로 제어하는 변유량 제어가 있다. 국내에서는 초기 투자비가 적고, 설치 후 밸브 및 제어기의 사용이 간단한 on/off 제어가 주로 사용되고 있다.

2.2 바닥복사냉방에서의 적용제어방식

냉방에서 공급수 온도제어를 적용할 경우, 난방과 달리 외부 일사와 실내의 발열요소에 의해 냉방부하 발생이 크게 달라지므로, 외기보상제어만으로는 실온을 유지하기 어려우므로, 제어방식 비교를 위한 복사냉방 시뮬레이션에서는 Fig. 1과 같이 실온과 외기온을 입력하여 공급온수를 변화시키는 외기보상 실온 피드백 제어를 적용하였다. 이 경우 바닥 패널을 통과한 냉수와 열원에서 직접 공급되는 냉수를 3방 밸브를 사용하여 혼합함으로써 공급 냉수의 온도를 조절한다.

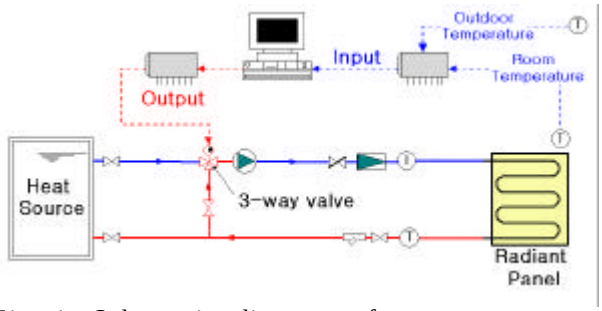

Fig. 1 Schematic diagram of water temperature control.

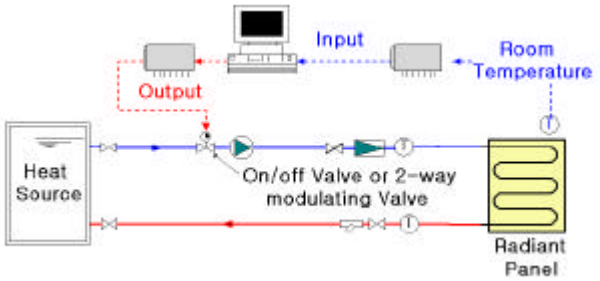

Fig. 2 Schematic diagram of water flow control.

공급 유량제어는 Fig. 2와 같이 실온을 피드백하여, on/off 밸브를 작동하는 on/off 제어와 유량조절 2방 밸브(2-way modulating valve)를 작동하는 변유량 제어를 적용하였다.

3. 바닥복사냉방 시스템의 제어성능 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 프로그램

3.1.1 시뮬레이션 프로그램의 해석 알고리즘

벽체와 바닥, 창 등을 열평형방정식으로 모델링하여 이를 유한 차분법으로 해석할 수 있도록 개발한 기존 복사난방 해석용 프로그램[3]을 복사냉방 시뮬레이션에 적합하게 수정하여 사용하였다. 온돌 바닥의 해석은 식(1)과 같이 fin 효율과 Effectiveness-NTU 방법[4]을 적용하였고, 실외측 벽체 표면의 계산은 상당외기온과 벽체 내부로 전도에 의한 열교환을 고려하였으며, 실내측 표면은 Modified thermal balance model[5]을 적용한 복사 열교환과 벽체 내부로의 전도 열교환, 실내공기와의 대류 열교환, 일사 열획득 등을 고려하였다. 실온의 해석은 식(2)과 같이 각 표면과의 대류열전달, 인체, 조명, 기기의 대류 발열성분 및 침기와 급기의 양에 의해 결정하였다. 그리고, 결로발생에 영향을 주는 잠열부하의 해석[4]을 위해 식(3)과 같이 외기의 영향과 내부 발열요소의 잠열부하 영향을 고려하였다.

$$\dot{q} \cdot A_f \cdot \delta x_O = \varepsilon_{PNL} \dot{m}_w C_{pw} (T_{wi} - T_m) \quad (1)$$

$$\rho_{air} \cdot C_{air} \cdot V_{room} \frac{T_{room}^{p+1} - T_{room}^{p}}{\Delta t} = \sum q_h + q_{infil} + q_{supply} + q_{c\_p} + q_{c\_l} + q_{c\_e} \quad (2)$$

$$\rho \cdot VOL \frac{dx_R}{dt} = G_o (x_a - x_R) + \sum L H \quad (3)$$

3.1.2 시뮬레이션 프로그램의 검증

(1) 검증실험

서울지역 남향의 공동주택을 모델로 선정하여 4개의 테스트 셀을 구성한 후, 빙축열조와 열교환기를 통해 냉수를 공급하였다. 테스트 셀에는 제어용 센서를 설치하여 제어신호를 A/D 컨버터로 입력받은 후, 변유량 제어용 2-way 밸브, on/off 제어용 솔레노이드 밸브, 공급 온수온도 제어용 3-way 밸브를 설치하고, 이를 D/A 컨버터를 통해 자체 제작한 제어 프로그램으로 제어하였다.

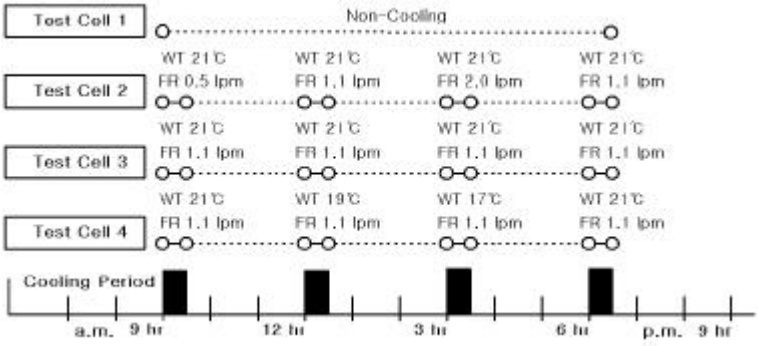

Fig. 3 Time schedule in experiment for program validation.

Table 1 Simulation program validation results

		Room Temp. (℃)	Floor Surface Temp.(℃)	Relative Humidity (%)
Test Cell 1	Test	26.7	26.8	77.5
	Simulation	27.2	27.0	74.3
	Difference	0.4	0.2	3.2
Test Cell 2	Test	26.2	25.7	77.4
	Simulation	26.5	25.9	77.3
	Difference	0.3	0.2	0.1
Test Cell 3	Test	26.2	25.7	75.7
	Simulation	26.7	26.0	74.3
	Difference	0.5	0.3	1.4
Test Cell 4	Test	26.0	25.7	75.4
	Simulation	26.5	25.8	74.7
	Difference	0.5	0.1	0.7

(2) 검증결과 분석

각 셀별로 제어밸브를 사용하여 일정한 냉수를 Fig. 3과 같은 스케줄에 따라 공급하였다. 실의 상태변화를 측정한 데이터를 시뮬레이션 결과와 비교해 본 결과, Table 1과 같이 실온과 바닥온도 편차 평균은 0.5℃ 이내, 상대습도는 3.2% 이내로 시뮬레이션 프로그램의 타당성을 검증할 수 있었다.

3.2 시뮬레이션 모델 및 조건

시뮬레이션은 일반적인 32평형 공동주택의 중간층 중간 세대 안방을 대상 공간으로 하였으며, 입력데이터 조건은 Table 2와 같다. 시뮬레이션에서는 시스템 측면에서 제어기기 및 밸브의 측정오차와 시간지연 효과는 고려하지 않았다.

3.3 시뮬레이션 방법

기상데이터에서 가장 높은 외기온이 발생하는 일주일을 대상 기간으로 외기보상제어를 실시하여 식(4)와 같은 외기보상률(RR)을 구하였다. 이렇게 구한 외기보상률을 적용하여 실온 피드백 제어를 위한 외기보상변동률(T_{shift})을 식(5), (6)과 같이 구하고 전 냉방기간 동안 외기보상 실온 피드백 제어 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 2 Simulation program input data

Item		Input data
Model House	Location	Central housing unit on a typical floor
	Orientation	South
	Model room	Master bedroom (area : 18.0 m^2, ceiling height : 2.3 m)
Weather		Seoul Standard Weather Data[8]
Air Change Rate	Natural ventilation	27 ACH
	Radiant cooling	1 ACH
People[7]	Convection	21.3 W/person
	Radiation	49.7 W/person
	Latent	45 W/person
	Number	2 persons
Lighting[7]	Convection	11.8 W/m^2
	Radiation	9.2 W/m^2
Equipment	Convection	8.3 W/m^2
	Radiation	8.3 W/m^2
	Latent	0 W/m^2
Operation Conditions	Method	Continuous cooling
	Flow rate	1.1 lpm × 2
	Set point	26 ℃

$$T_{water} = RR(T_{out} - T_{do}) + T_{dw} \quad (4)$$

$$T_{water} - T_{shift} = RR(T_{out} - T_{shift}) \quad (5)$$

$$T_{shift} = K_p e + K_i \int e\,dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

외기보상 실온 피드백 제어 시뮬레이션을 실시하여 외기온-공급냉수온도 관계를 분석한 후, 최저공급 냉수온도로 일정한 냉수공급에 의해 제어편차 ±1℃로 냉방기간 on/off 제어 시뮬레이션을 실시하였다. 동일한 냉수온도를 변유량 제어 시뮬레이션에도 적용하여, 식(7)과 같이 등비율 특성 2방 밸브의 스템위치에 따른 유량의 변화[6]를 식(8)과 같이 밸브 개도위치를 조절하여 제어하였다.

$$\frac{M_{flow}/\sqrt{\Delta P_{flow}}}{M_{flow\ max}/\sqrt{\Delta P_{flow\ max}}} = e^{k(1-X)} \quad (7)$$

$$X = K_p e + K_i \int e\,dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

4. 시뮬레이션 결과분석

4.1 공급 냉수온도 분석

냉방기간 동안 외기보상 실온 피드백 제어를 통해 공급된 냉수온도를 외기온에 따라 분석해 보면 Fig. 4와 같다. 서울지역 최고 외기온 범위에서 최저 공급냉수온도는 17℃ 전후인 것으로 나타났다. 이 경우 바닥 표면온도의 하한값은 Fig. 5에서와 같이 23℃ 내외로 나타나 ASHRAE[9] 및 ISO 기준[10]에서 정하는 바닥 표면의 쾌적 기준 하한값인 19℃보다 높은 것으로 나타났다. 냉방기간 동안 최저 바닥 표면온도는 반드시 외기온이 높은 구간에서 발생하지 않고 외기온이 26 ℃ 내외 구간에서 나타나는데, 이는 냉방부하 피크가 외기온뿐 아니라 일사 유입과 구조체 축열에 의해 발생하기 때문으로 판단된다.

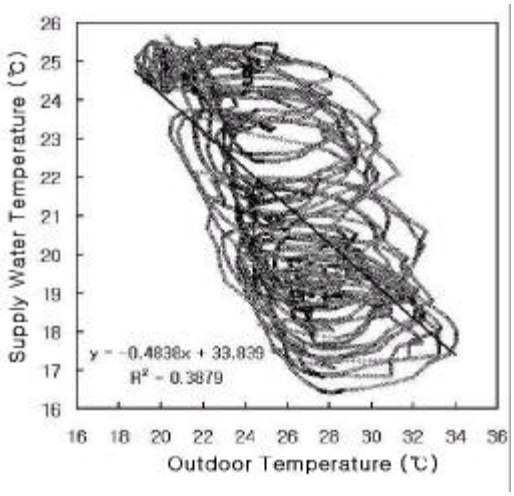

Fig. 4 Relation between the outdoor temperature and the supply water temperature.

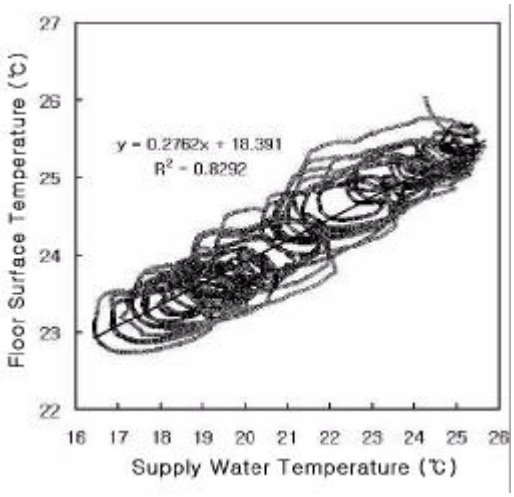

Fig. 5 Relation between the supply water temperature and the floor surface temperature.

4.2 결로발생 여부에 따른 제어인자범위 분석

냉방기간 동안 외기보상 실온 피드백 제어를 대상으로 외기 절대습도와 실내 절대습도의 관계

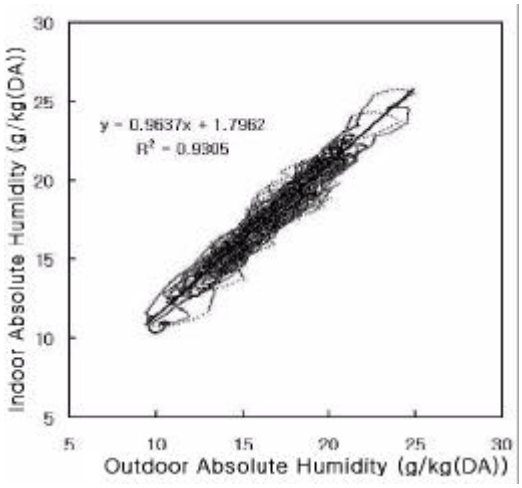

Fig. 6 Relation between the outdoor absolute humidity and the indoor absolute humidity.

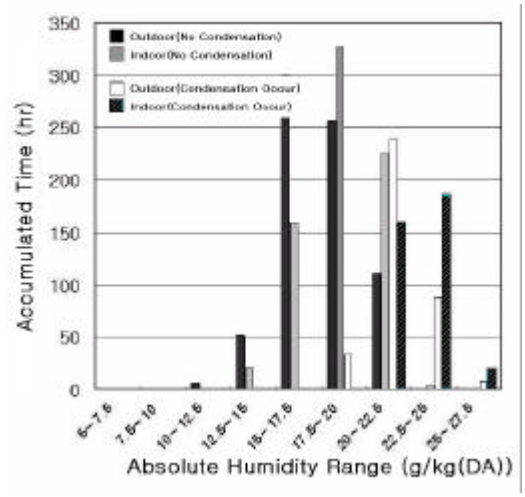

Fig. 7 Distribution of accumulated time in indoor and outdoor absolute humidity range according to condensation occurence.

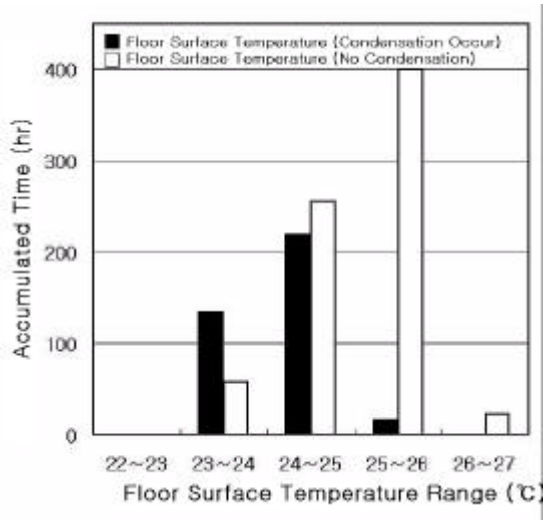

Fig. 8 Distribution of accumulated time in the floor surface temperature range according to the condensation occurrence.

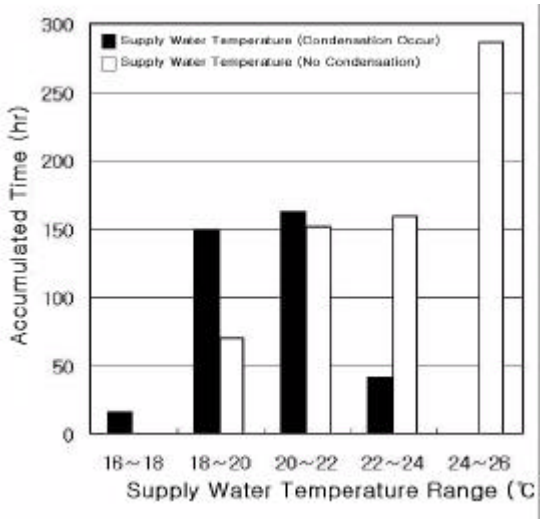

Fig. 9 Distribution of accumulated time in the supply water temperature range according to condensation occurrence.

를 분석해 보면, Fig. 6과 같이 강한 상관관계를 나타낸다. 이를 결로발생 여부에 따라 분석하면, Fig. 7과 같이 실내 절대습도가 약 20 g/kg(DA) 이상이 되면 결로발생이 증가하고, 외기 절대습도가 약 20 g/kg(DA) 미만일 경우 결로발생이 감소함을 알 수 있다. 바닥 표면온도는 Fig. 8과 같이 약 25℃ 이상이 되어야 결로발생이 줄어든다. 그러므로, 결로발생을 줄이기 위해 25℃ 이상으로 바닥온도를 유지하면 바닥복사 패널의 방열량이 작아져 부하의 처리가 어렵게 된다. 공급 냉수온도도 이와 비슷하여 Fig. 9와 같이 복사 패널에 약 22℃ 이상의 냉수가 공급되어야 비로소 결로발생이 줄어든다.

4.3 각 제어방식별 비교분석

4.3.1 실온과 바닥 표면온도의 안정성

Fig. 10은 기상 데이터에서 가장 높은 외기온이 발생하는 일주일 동안 각 제어방식별 실온과 바닥 표면온도, PMV를 비교한 결과로서, 세 가지 방식 모두 실온은 ±1℃ 내외의 편차로 제어되지만, on/off 제어나 변유량 제어의 경우 외기보상 실온 피드백 제어보다 바닥 표면온도의 변동폭이 큰 것을 볼 수 있다.

냉방기간 동안 실온의 발생빈도는 Fig. 11과 같이 외기보상 실온 피드백 제어, on/off 제어, 변유량 제어의 순서로 실온유지가 잘되고 있다. 바

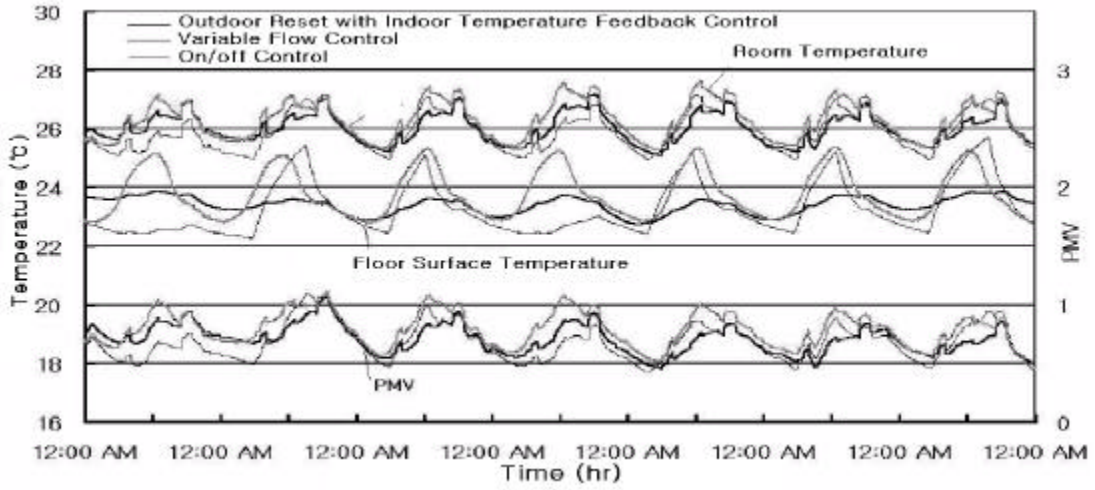

Fig. 10 Comparison of room temperature, floor surface temperature and PMV.

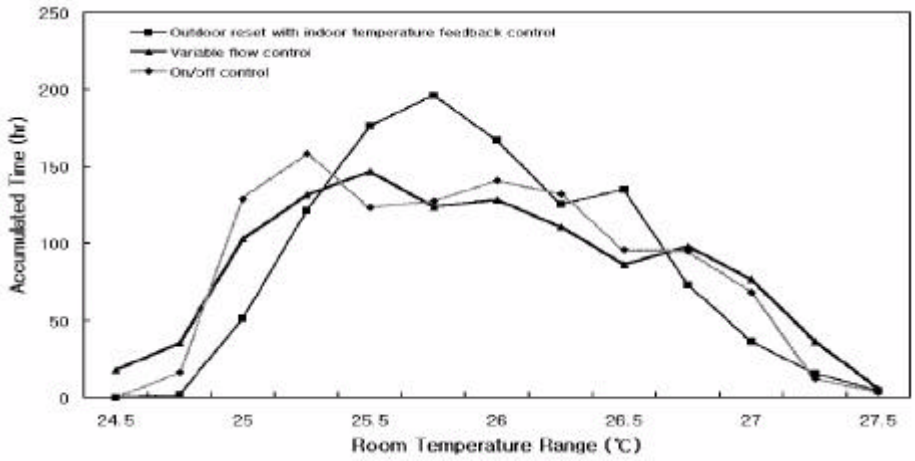

Fig. 11 Comparison of accumulated time in room temperature range.

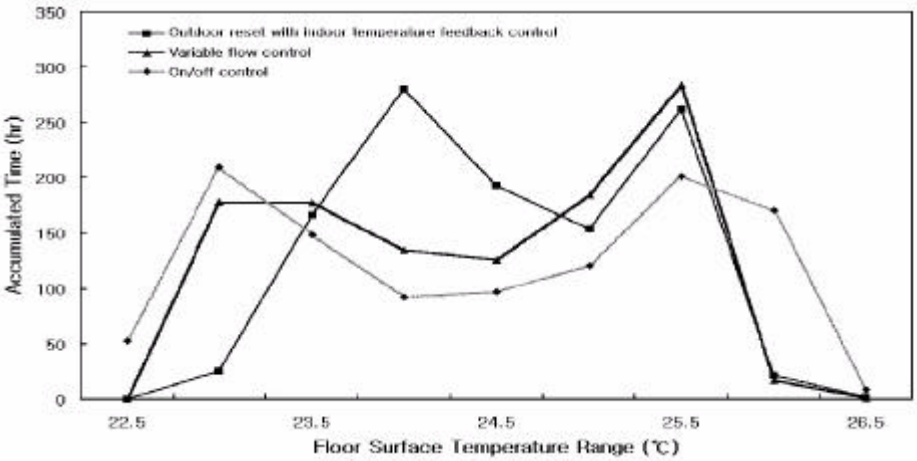

Fig. 12 Comparison of accumulated time in floor surface temperature.

Table 3 Comparison of accumulated time of condensation frequency, room temperature, floor surface temperature and PMV

		On/off control		Variable flow control		Outdoor reset with indoor temperature feedback control
		Water supply	Water stop	Open	Fully closed	
Accumulated time of condensation (hr)		284.6	59.5	314.9	19.0	287.3
		344.0		333.9		
Room Temp. (℃)	Average	25.7		25.7		25.9
	STDEV	0.7		0.7		0.5
	Maximum	27.5		27.2		27.4
	Minimum	24.3		24.1		24.3
Floor Surface Temp. (℃)	Average	24.3		24.2		24.6
	STDEV	1.0		0.8		0.6
	Maximum	26.0		25.6		25.5
	Minimum	22.5		22.6		22.5
PMV (hr)	0 0.2	6.0		39.5		10.0
	0.2 0.4	196.0		233.5		141.0
	0.4 0.6	490.5		467.0		516.0
	0.6 0.8	413.5		376.5		493.5
	0.8 1.0	166.0		155.5		110.5

* Total analysis time is 1,271 hours

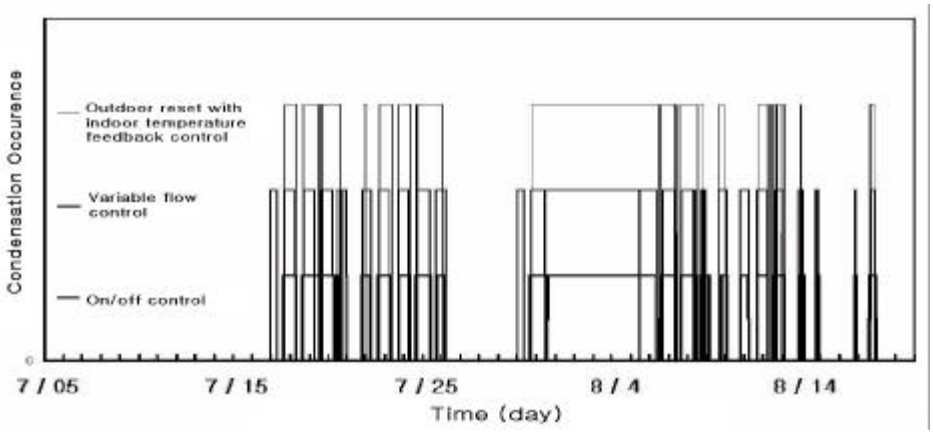

Fig. 13 Comparison of condensation occurrence.

닥 표면온도의 발생빈도는 Fig. 12와 같이 외기보상 실온 피드백 제어가 낮은 온도영역(22 24 ℃)에서 변유량 제어나 on/off 제어에 비해 낮게 나타나 바닥 표면온도 저하에 의한 국부적 불쾌적을 유발할 가능성이 적은 것으로 나타났다. 이처럼 on/off 제어나 변유량 제어가 낮은 온도영역에서 발생빈도가 높게 나타나는 것은 냉수공급이 중단되어도 패널 배관 내 냉수로부터 방냉이 되어 실온이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

4.3.2 PMV에 의한 쾌적성 분석

Table 3과 같이 각 제어방식의 PMV값을 분석한 결과, 외기보상 실온 피드백 제어와 on/off 제어, 변유량 제어의 쾌적분포는 비슷하게 나타났다. 그러나, 외기온이 높은 기간 동안에는 Fig. 10과 같이 PMV값은 +0.5 +1.0이고, 외기보상 실온 피드백 제어가 on/off 제어나 변유량 제어에 비해 더 작은 변화폭을 나타낸다.

4.3.3 결로발생시간

결로발생시간은 Table 3과 같이 외기보상 실온 피드백 제어, 변유량 제어, on/off 제어의 순서대로 작게 나타났다. 특히 on/off 제어의 경우 유량이 흐르지 않는 경우에도 결로가 발생하므로 적용시 이러한 부분에 대한 대처방안이 필요하다. 각 제어방식에 따라 결로발생을 전 냉방기간에 걸쳐 분석해 보면 Fig. 12와 같이 상대적으로 외기보상 실온 피드백 제어가 결로발생 빈도가 작고 세 가지 제어방식이 비슷한 기간에 결로가 발생함을 볼 수 있다. 결로발생만을 고려할 경우 전 냉방기간에 걸쳐 on/off 제어는 약 73%, 변유량 제어는 약 75%, 외기보상 실온 피드백 제어는 약 78%가 바닥복사냉방이 가능한 것으로 나타났고, 세 가지 제어방식에서 모두 결로가 발생하지 않는 기간은 전 냉방기간의 약 67%로 나타났다. 이 경우, 결로 발생 가능성이 큰 구간에서는 외기온도 및 외기 절대습도, 실내 절대습도가 높게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 32평형 공동주택의 안방을 대상공간으로 기존 온돌난방 제어방법을 적용한 시뮬레이션을 실시하여, 공급 냉수온도와 결로발생 여부에 따른 제어인자의 범위를 분석하였으며, 각 제어방식별로 성능을 비교 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 바닥 복사냉방을 적용할 경우, 최대 부하가 발생하는 날(최고 외기온 34℃)에 대해서도 부하를 제거하기 위해서는 최저 바닥온도는 약 23℃, 최저 공급 냉수온도는 약 17℃가 되어야 하며, 이에 따라 냉방기간에 부하를 제거하는 동안 결로가 전체 기간의 약 22 27% 정도 발생하는 것으로 나타났다.

(2) 실내 절대습도와 바닥 표면온도 범위에 따른 결로발생 여부를 분석한 결과, 실내 절대습도는 약 20 g/kg(DA) 이하, 바닥 표면온도는 25℃ 이상에서 결로가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이 조건은 최대 부하제거를 위한 조건보다 높은 수준이므로 부하제거와 동시에 결로발생을 막기 위해서는 바닥 표면온도에 의한 결로방지제어나 제습방법을 통한 습도제어와 같은 결로제어 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(3) 실온, 바닥온도의 안정성 측면이나 결로발

생 측면에서 on/off 제어나 변유량 제어보다는 외기보상 실온 피드백 제어가 상대적으로 유리하다. 이는 외기보상 실온 피드백 제어의 경우 냉방기간 동안 공급 냉수온도가 부하에 따라 변화함으로 바닥 표면온도가 상대적으로 높게 유지되기 때문이다. 반면, 개폐식 제어나 변유량 제어의 경우, 최대 부하에 대한 온도로 공급되므로 바닥 표면온도가 상대적으로 낮게 유지되고 그 변화폭이 크며, 냉수공급 중단시도 관내 냉수에 의해 결로가 발생하므로, 적용시 대처방안이 필요하다.

후 기

본 연구는 서울대학교 공학연구소, 2000년도 두뇌한국21 사업 및 에너지 관리공단의 연구지원으로 진행되었다.

참고문헌

1. Koo, S. Y., 2000, A Study on the Application of Radiant Floor Cooling using Ondol in Korean Residential Buildings, MS thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
2. Yeo, M. S. et al., 1998, A Comparative Study on the control Method of Hydronic Radiant Floor heating in Apartment Buildings, Proceedings of the SAREK '98 Summer Annual Conference, pp. 1627-1632.
3. Kim, Y. Y., 1997, A Study on the Time-Division Hot Water Sypply for Energy Saving of Radiant Floor heating System, MS thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
4. Udagawa, M., 1986, Calculating Methods of Air Conditioning Systems with personal Computers, Ohm-sha.
5. Radu Zmeureanu, Paul Fazio, 1988, Thermal Performance of a Hollow Core Concrete Floor System for Passive Cooling, Building and Environments, Vol. 23, No. 3, pp. 243-245.
6. Haines, R. W., 1983, Control Systems for Heating, Ventilating and Air Conditioning, Chapman & Hall Inc., pp. 80-88.
7. Faye C. McQuiston, 1992, Cooling and Heating Load Calculation Manual, 2nd ed., ASHRAE, p. 5.7.
8. SAREK, 1996, Seoul Standard Weather Data, SAREK.
9. ASHRAE, ASHRAE Standard 55-1992: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 1992.
10. ISO, International Standard 7730, 1984.