공동주택의 열환경분석과 바닥복사냉방의 적용에 관한 연구

김 용 이†, 김 광 우*
서울대학교 대학원 건축학과, *서울대학교 건축학과

A Study on the Thermal Environmental Analysis and the Application of Radiant Floor Cooling in Apartment Building

Yong-Yee Kim†, Kwang-Woo Kim*
Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
**Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

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

ABSTRACT: The objective of this study is to analyze the possibilities and considerations for the application of the radiant floor cooling system by analyzing the problems of a conventional cooling system through field tests and thermal performance simulations of the radiant floor cooling in an apartment building. The results are as follows.

(1) Problems of the conventional cooling system with PAC (packaged air conditioner)'s include draft, local discomfort, and excessive electrical peak demand.

(2) According to the measurement during the cooling and intermediate seasons, the floor surface temperatures which are experienced at the time of cooling with PAC's and during intermediate season are similar to the temperatures for radiant floor cooling.

(3) The radiant floor cooling system is applicable to apartment buildings during the cooling season, especially on hot and clear days.

Key words: Radiant floor cooling(바닥복사냉방), Packaged air conditioner(패키지 에어컨), Thermal environment(열환경), Field tests(현장실험), Simulation(시뮬레이션)

1. 서 론

최근 생활수준의 향상으로 공동주택의 실내환경에 대한 관심이 증가하여 여름철 냉방기기에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 냉방기기로서 패키지 에어컨의 수요증가는 가전용 에어컨의 추가적인 설치와 최대 전력수요 문제를 야기시키고 있다. 이를 해결하기 위해 기존의 온돌을 활용한 바닥복사냉방 시스템이 대안으로 대두되고 있다.[1]

바닥복사냉방 시스템을 공동주택에 적용하기 위해서는 기존 냉방인 패키지 에어컨의 문제점,국내의 기후와 공동주택의 열적 특성에 대한 분석을 통해 적용 가능성을 파악하고, 바닥복사냉방시의 예상되는 바닥 표면온도의 쾌적과 결로에 의한 냉방 용량제한에 대한 검토[2]가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내 기후의 분석과 현장실험을 통하여 패키지 에어컨의 문제점을 파악한 후, 열해석 프로그램에 의한 바닥복사냉방 시스템의 적용성을 분석하고자 한다.

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

2. 기후분석

Givoni는 지역 기후특성 분석을 통하여 해당 지역에 적합한 자연형 또는 설비형 수단이 있음을 밝히고, 인간, 기후, 건물을 고려한 기후기반 설계 이론을 세웠다.[3] 이를 바탕으로 Climate Consultant[3]와 같은 기후분석 도구가 개발되었으며, 본 연구에서는 이 도구를 이용하여 서울지역의 기후특성을 분석하였다.

Fig. 1은 이 프로그램에 의한 분석결과를 건물생체기후도로 표시한 것으로, 국내 기후에 적합한 냉방방법은 일사차단(sun shading)을 비롯하여, 구조체의 축열성능활용(high mass), 공기조화(air conditioning), 환기(ventilation) 순으로 나타나고 있다. 현재 대부분의 공동주택이 기본적으로 발코니가 설치되어 있어 상당부분의 일사가 차단되고 있으나 그 외의 냉방은 주로 패키지 에어컨에 의한 공기조화와 거주자의 환기에 의존하고 있다. 이는 국내 공동주택 특성상 중량구조체의 활용보다는 패키지 에어컨에 의한 냉방만 의존함으로써 축열성능활용에 의한 바닥냉방은 활용하지 않고 있음을 의미한다.

본 연구 4장의 열해석 프로그램을 활용한 자연상태의 실내공간에 대한 시뮬레이션 결과, 구조체의 축열성능은 Fig. 2와 같이 실내 온습도의 변동폭이 외기 온습도의 변동폭보다 작아 외부환경의 변화에 대하여 구조체가 완충 역할을 하는 것으로 나타났다. 특히 하계에 (a), (b)와 같이 비냉방시의 실내조건이 외기조건에 비하여 부하에 의해 전체적으로 고온 쪽으로 이동하여, 습도가 상대적으로 낮은 기간에는 구조체 냉각을 통하여 실내조건을 전체적으로 쾌적범위로 이동시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, (b)에서 보는 바와 같이 냉방기간의 구간에 따라 외기와 실내의 노점온도가 25℃를 넘어, 실온을 일반적인 설정온도 6℃, 온도편차 ±1℃로 유지하기 위해 냉방할 경우 구조체의 냉각으로 결로 발생의 위험이 있는 것으로 나타나 복사냉방 적용시 구간별 고려가 필요할 것으로 판단된다.

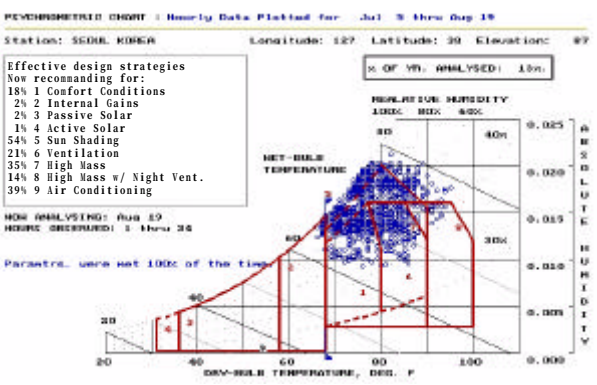
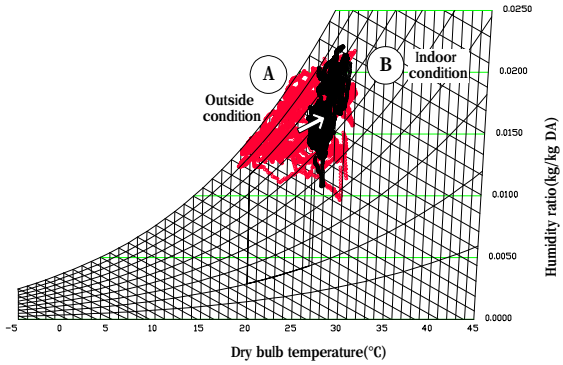


Fig. 1 Climatic analysis using building bioclimatic chart during the cooling season.

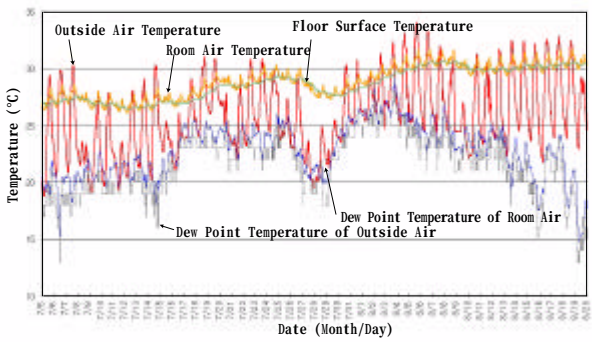
3. 현장실험

3.1 실험내용 및 방법

패키지 에어컨을 추가설치시 대부분의 공동주택세대에서 경제적인 면에서 대용량의 기기를 1대만 설치하므로 여러 가지 문제를 발생시키고 있다. 이 문제는 주로 과도한 풍량에 의한 기류



(a) Climatic conditions described on a psychrometric chart



(b) Climatic conditions during the cooling season

Fig. 2 Outdoor and indoor climatic conditions without cooling during summer.

Table 1 Test methods

Period		Condition	Remark
Summer (AUG)	Natural mode	∙Natural condition without any occupants, cooling, and ventilation	∙Indoor/outdoor air temperature and humidity ∙Floor surface temperature
	Non-cooling mode	∙With any occupants but without cooling	〃
	Air conditioning with air temperature control	∙Setpoint : 24℃ ∙Supply airflow mode : high, medium, low ∙With or without ventilation	〃 ∙Air velocity, electric power
	Air conditioning with humidity control	∙Setpoint : 55±5%	〃
Intermediate period (SEP ~ OCT)		∙Continuous data acquisition until the beginning of the heating season	∙Indoor/outside air temperature and humidity

Table 2 Room air temperature when PAC is in operation

Room	Average (℃)	Standard deviation	Maximum (℃)	Minimum (℃)
Master room	27.2	0.3	27.9	26.3
Living room	25.1	0.5	26.1	24.7
Kitchen	25.7	0.4	26.5	25.1

불균등, 각 실별 실온 불균등, 그리고 전력소비의 집중에 의한 주간 피크 소비전력 등으로 이에 대한 분석이 필요하여 공동주택을 대상으로 현장실험을 실시하였다.

아울러 구조체의 축열성능을 활용한 바닥복사냉방 시스템을 적용할 경우, 바닥이 차가워져 좌식생활을 하는 주거문화에서 이를 수용하기 힘들 수 있다. 이에 공동주택의 바닥온도변화를 실측하여 실질적으로 거주자에 의해 경험되고 있는 바닥온도와 바닥복사냉방시의 바닥온도를 비교 분석하였다. 또한, 차가워진 표면과 공기 중의 수증기가 접촉하여 결로를 발생시킬 수 있으므로 외기조건에 따른 공동주택의 실내온도, 습도변화 추이를 파악하여 바닥복사냉방의 적용성을 분석하였다.

실험대상은 국내 공동주택에서 가장 일반적인 32평형을 대상으로 선정하였다. 안방과 거실의 향은 동향, 재실인원은 3인이었으며, 대상 공동주택의 온도, 습도, 전력량 등을 데이터 로거를 통해 연속 측정하였다. 실험기간은 8월부터 10월까지 냉방가동, 내부발열, 냉방시 설정조건 등을 Table 1과 같이 변화시켜 반복하여 실험을 실시하였다.

3.2 현장실험의 결과분석

3.3.1 기존냉방시스템의 문제점

냉방기간 동안 패키지 에어컨으로 냉방할 경우(Air conditioning with air temperature control)의 실내 기류 분포는 패키지 에어컨이 설치된 거실 내에서 강풍의 경우 0.06 ~ 1.20 m/s, 중풍의 경우 0.02 ~ 0.13 m/s로 국부적인 지점별로 기류속도의 차이가 나타났으며, 특히 에어컨 부근은 강풍의 경우 1.2 m/s, 중풍의 경우 0.8 m/s로 기류속도가 높은 것으로 나타났다. 이는 냉방부하가 클 때에 많은 풍량을 요구함으로 거주자에게 불쾌감을 유발할 수 있다.

각 실별 온도분포에 있어서도 Table 2와 같이 패키지 에어컨이 설치된 거실은 온도가 낮고, 거실과 연결된 주방은 그보다 약 1℃ 정도 높게 나타나며, 간벽으로 차단된 안방은 약 2 ~ 3℃ 이상 높게 나타났다. 이는 측정시 안방문을 개방하였으나, 패키지 에어컨을 거실에 1대 설치하여 사용하는 경우 기류의 이동경로가 길어져서 경로의 길이에 따라 각 실별 실온의 불균등이 발생한 것으로 판단된다.

패키지 에어컨의 소비전력 패턴을 분석하기 위

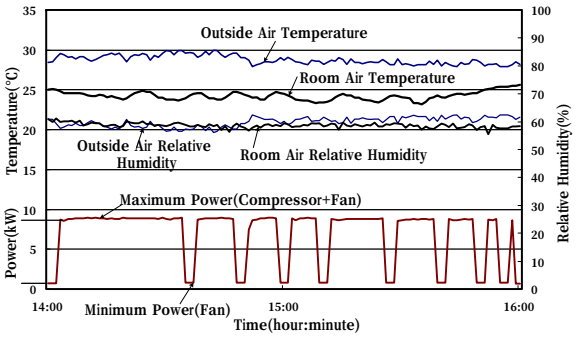


Fig. 3 Results of operating PAC when mean outdoor temperature is 29℃.

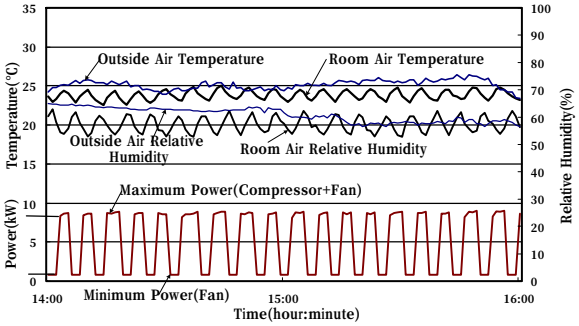


Fig. 4 Results of operating PAC when mean outdoor temperature is 25℃.

하여 에어컨을 일반적인 운전모드인 설정온도 기준운전에 대하여 실측결과는 Fig. 3, Fig. 4와 같으며, 평균 외기온이 각각 29℃, 25℃인 날에 대하여 패키지 에어컨 가동시 전력 패턴을 보여준다. 실험에 사용된 패키지 에어컨의 전력소비량은 팬만 가동시 0.17 kW, 컴프레서와 팬 동시 가동시 1.7 kW로서 외기온이 서로 다른 날에 대한 패키지 에어컨 전력소비 변화 패턴을 보면, 동일한 실온을 유지하기 위하여 부하에 따라 패키지 에어컨 컴프레서의 운전 횟수와 시간이 변하며, 외기온에 따른 냉방부하의 증감과 무관하게 컴프레셔는 단속적으로 계속 운전되며 이때 최대 소비전력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 각 세대에 설치된 패키지 에어컨의 운전이 동시에 전력소비가 높은 컴프레서 운전상태가 되면 세대수에 정비례하여 주간 피크 소비전력 증가를 야기시킬 수 있다는 것을 의미한다.

3.3.2 바닥복사냉방 시스템의 적용성 분석

냉방기간과 중간기 동안 바닥온도의 추이를 측

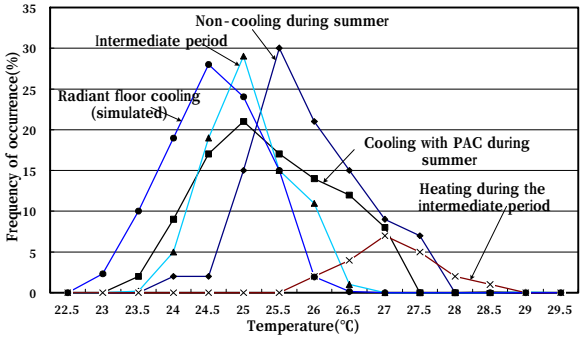


Fig. 5 Frequency of temperatures during the cooling, intermediate, and heating period.

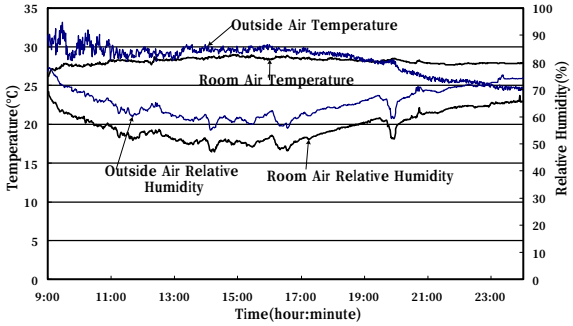


Fig. 6 Profiles of temperature and humidity without air conditioning.

정한 결과 Fig. 5과 같이 여름철 비냉방인 경우 안방 바닥온도의 평균값은 27.2℃이며 범위는 24.3 ~ 29.4℃로 나타났다. 패키지 에어컨을 가동한 경우 안방 바닥온도의 평균값은 25.3℃이며 범위는 24.6 ~ 26.1℃로 나타났다. 중간기 안방 바닥온도의 평균값은 25.6℃이며 범위는 23.4 ~ 28.4℃로 나타났다. 이는 바닥복사냉방 시뮬레이션에서 나타나는 바닥온도와 실제 공동주택에서 가장 많이 나타나는 바닥온도는 최소 0.5℃, 최대 1℃ 차이가 나는 것으로 복사냉방을 위한 계산된 바닥 표면온도가 일상에서 경험하는 바닥 표면온도와 차이가 적음을 알 수 있으며, 냉방시의 최저 바닥 표면온도 22.3℃와 중간기의 최저 바닥 표면온도와는 거의 유사함을 알 수 있다. 그리고 바닥 표면의 재질에 따라 쾌적범위가 확대될 수 있다는 기존 연구[5]에 의하면, 적합한 재질의 선택으로 이러한 온도차는 극복될 수 있을 것으로 판단된다.

냉방기간 동안 자연상태(natural mode)에서 실

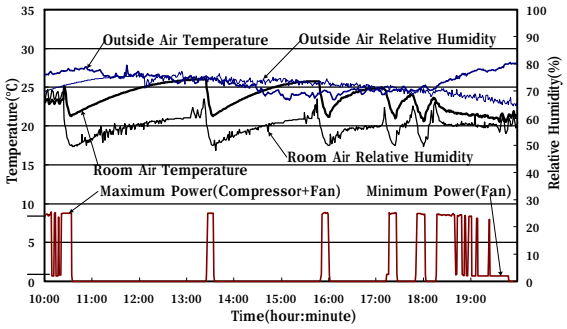


Fig. 7 Results of air conditioning according to setpoint humidity.

내 환경을 측정한 결과, 일사량이 많고 더운 전형적인 여름 날씨에 대하여 실내외 환경은 Fig. 6과 같이 나타났다. 실내 습도는 창문 밀폐시 외기보다 10% 정도로 낮았으며, 주간 12~17시 실내 습도는 평균 50% 정도로 나타났다. 절대습도의 측면에서도 외기 절대습도에 비해 실내 절대습도가 낮게 유지되고 있다. 그러므로 실내의 노점온도가 높아져 바닥복사냉방을 적용시에 결로가 발생하지 않는 상태에서 냉방할 수 있는 가능성이 많은 것을 알 수 있다. 또한, 창문을 통한 일사 유입은 차가워진 바닥 표면에 의하여 축열되기 전에 제거될 수 있음을 의미한다.

외기온이 20시 이후로 낮아지더라도 주간의 일사 유입 등으로 구조체 축열이 방열되어 실온은 여전히 높게 유지된다. 만약 주간에 구조체를 냉각하면 이러한 축열 부하를 효율적으로 제거할 것으로 판단된다.

패키지 에어컨을 설정습도 기준으로 운전(Air conditioning with humidity control)했을 때의 측정결과는 Fig. 7과 같으며, Fig. 4와 비교하여 비슷한 외기온상태에서 에어컨이 제습을 위해 작동되는 시간은 상대적으로 작게 나타났다. 즉, Fig. 7에서처럼 1회 제습 후 다시 제습할 때까지의 패키지 에어컨(컴프레셔)의 작동시간은 패키지 에어컨을 설정습도에 따라 운전할 경우가 설정온도에 따라 운전할 경우보다 컴프레셔의 작동 횟수 및 시간이 현저하게 감소되는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 주간 시간대에 공동주택의 잠열 부하량이 많지 않으며, 패키지 에어컨이 제습을 위해 작동되는 시간이 많지 않음을 의미한다.

4. 복사냉방 시뮬레이션

본 연구에서는 기후분석과 현장실험에서 밝혀진 구조체의 축열 성능활용 측면에서의 복사냉방 시스템이 국내 기후와 건물상황에 적용 가능한지를 열해석 프로그램에 의한 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

4.1 열해석 프로그램

공동주택에 대한 열해석 프로그램은 구조체의 축열 효과 해석, 표면간의 복사 열교환 해석, 공기 중의 온도 및 습도 해석, 그리고 인접실과의 연계 해석이 가능해야 분석 대상실에 대한 열성능을 평가할 수 있다. 따라서, 벽체와 바닥, 창 등을 열평형방정식으로 모델링하여 이를 유한차분법으로 해석할 수 있도록 개발되고 검증된 기존의 다실공간 열해석 프로그램[4,6]을 사용하였다.

Table 3 Simulation program input data

Variable	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[9]	Convection	21.3 W/person
	Radiation	49.7 W/person
	Latent	45 W/person
	Number	2 persons
Lighting[9]	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	0.0 W/m^2
Operation Conditions	Method	Continuous cooling
	Flowrate	1.1 lpm×2 (panel coil)
	Set point	26℃

4.2 시뮬레이션 조건 및 방법

시뮬레이션은 국내의 일반적인 32평형 공동주택에 대하여 실시하였다. 가장 많은 비율을 차지하는 중간층 중간세대에 대하여 안방을 대상으로 분석하였으며 입력데이터 조건은 Table 3과 같다.

기후분석에서 제시된 구조체의 축열 성능활용과 환기를 통하여 바닥복사냉방의 적용을 분석하였다. 냉방이 적용되지 않은 자연상태를 기준으로 하여, 바닥복사냉방이 적용된 경우와 바닥복사냉방과 환기가 적용된 경우를 기후조건이 다른 날에 대하여 분석하였다.

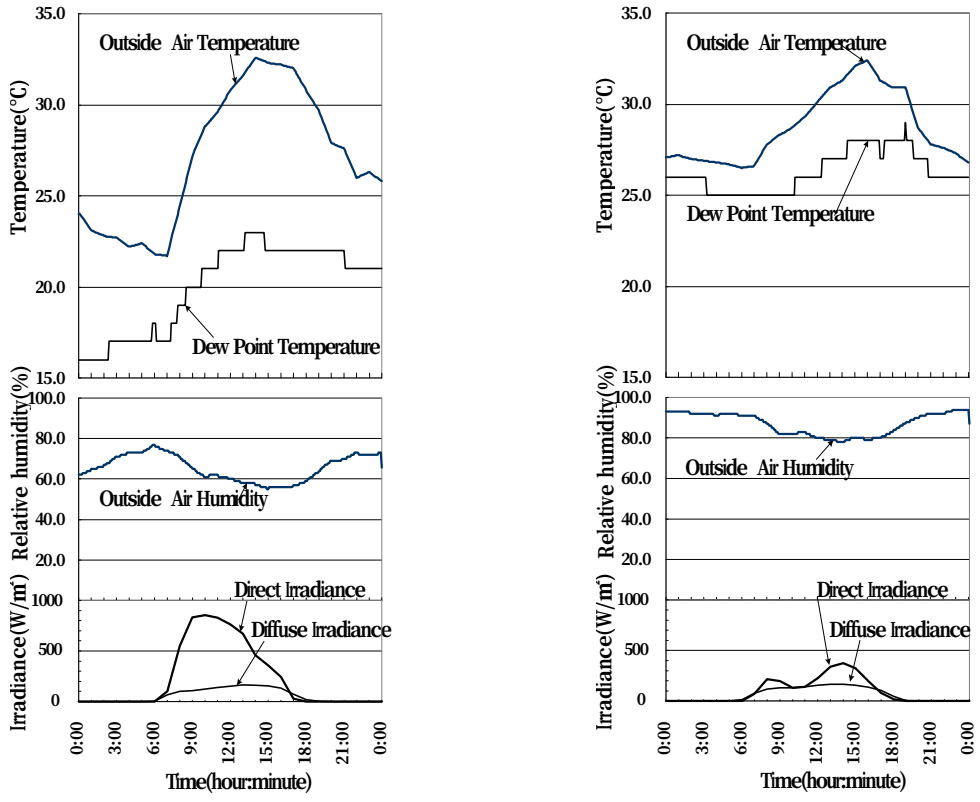
바닥복사냉방은 설정온도 26℃로 실내 온도를 유지하기 위하여 냉수를 부하변동에 따라 변하도록 제어되게 하였다. 즉, 공급 냉수온도는 외기온에 의해서 일차적으로 결정되며, 실온의 변화에 따라 추가적으로 조정되도록 하는 외기보상 실온 피드백 제어[(4)]가 적용되었다.

바닥복사냉방의 결로를 방지하기 위하여 환기를 보충적으로 적용할 경우는, 냉수온도를 일정하게 하여 공급하며 결로 위험시 바닥복사냉방을 중지하고 외기에 의한 환기가 이루어지도록 하였다. 공급 냉수온도는 최대 부하를 만족시키기 위한 최저 공급 냉수온도가 적용되었고, 제어편차 ±1℃로 냉방기간 on/off 제어가 되도록 하였다. 환기를 적용할 경우, 결로의 발생이 우려되는 구간에서는 환기 팬을 사용하여 환기량을 2회/시간으로 환기시키는 것으로 하였다.

4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

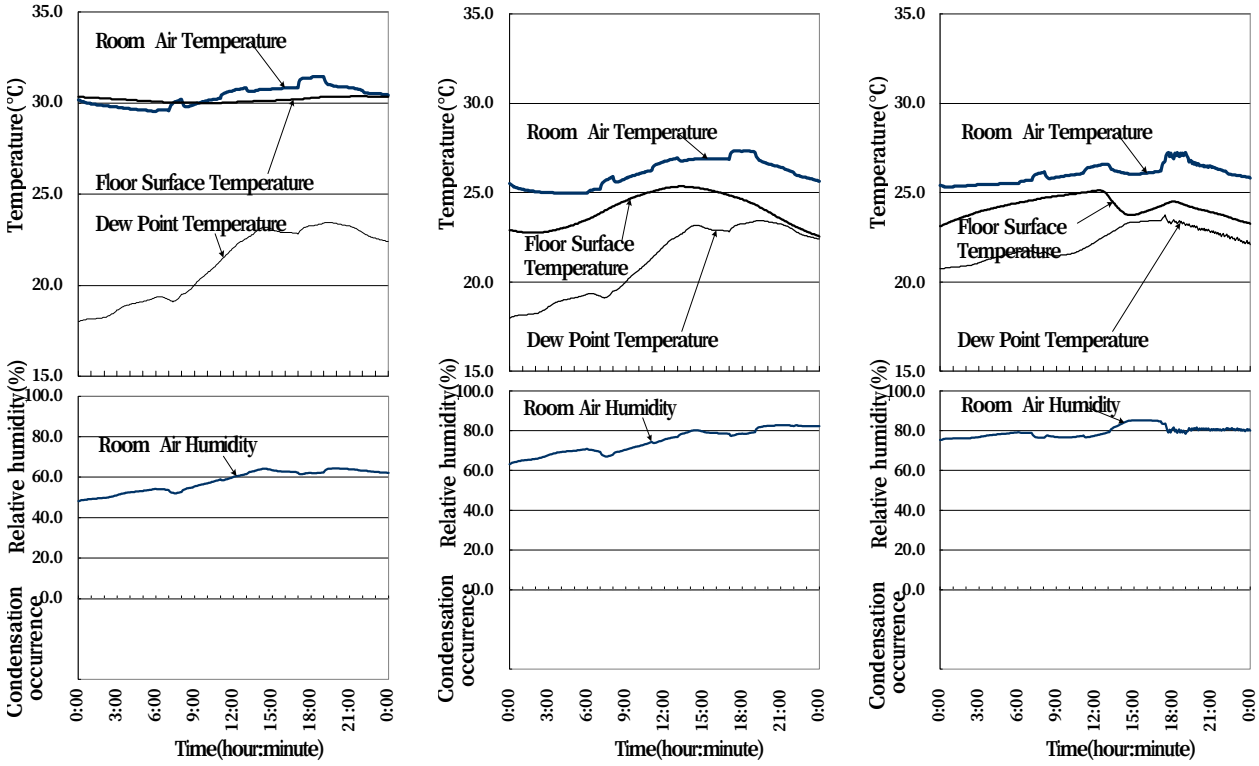
국내의 여름철 기후는 대부분 외기온과 습도가 높으나, 기후분석에서와 같이 상대적으로 습도가 낮거나 높은 날로 구분될 수 있다. 주로 장마철을 전후로 습도가 낮고 장마철 주위로 높은 습도가 유지된다. Fig. 8은 냉방부하가 큰 날로서 외기온이 높고 일사량이 많으며 습도가 상대적으로 낮은 날과 외기온이 높고 일사량이 적으며 습도가 상대적으로 높은 날의 기상조건을 보여준다. 두 날 모두 야간에 외기온이 25℃를 넘어서는 열대야가 발생하는 날이다.

Fig. 9는 상대습도가 평균 66%로 상대적으로



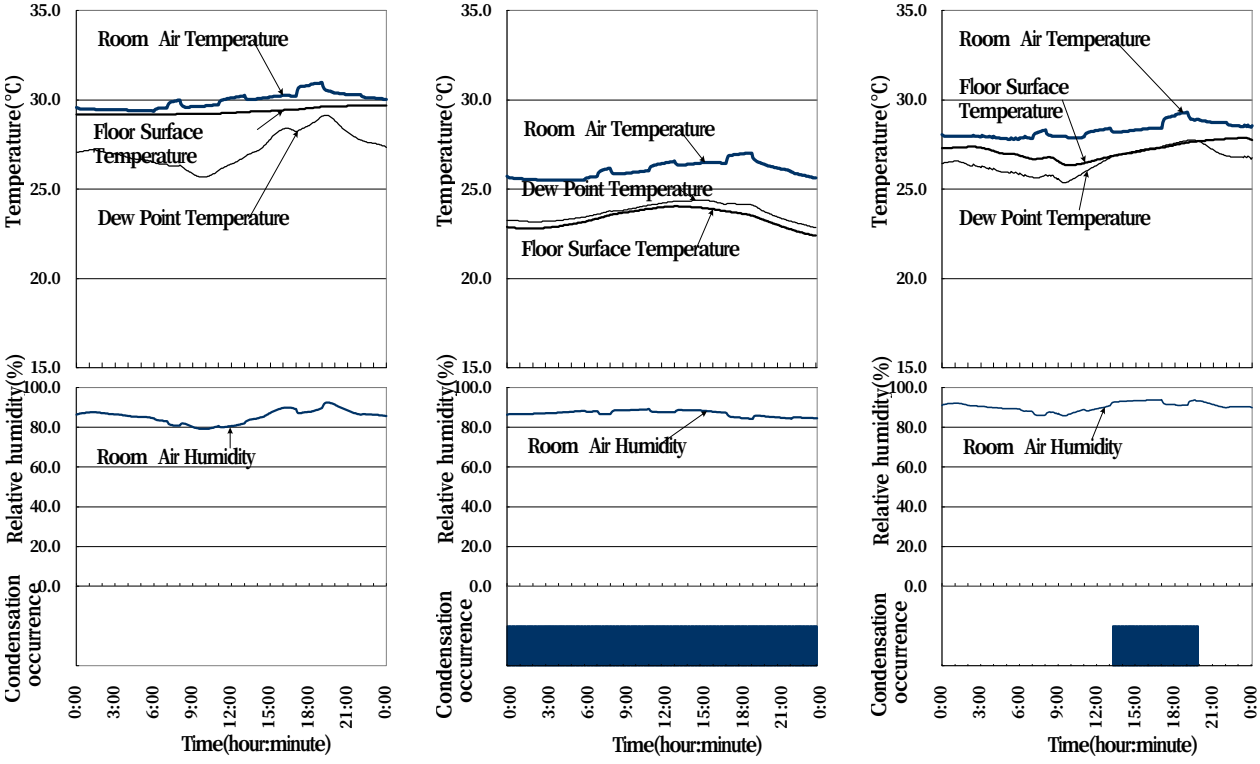
(a)Hot and clear summer day(August 16) (b)Hot and very humid summer day(August 3)

Fig. 8 Outside conditions (Seoul).



(a) Natural condition (b) Radiant cooling (c) Radiant cooling+ventilation

Fig. 9 Room thermal environment on a hot and clear summer day (August 16, Seoul).



(a) Natural condition (b) Radiant cooling (c) Radiant cooling+ventilation

Fig. 10 Room thermal environment on a hot and very humid summer day (August 3, Seoul).

습도가 낮으며 일사량이 많은 날에 대하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 바닥복사냉방만 적용된 경우와 바닥복사냉방에 환기가 포함된 경우, 둘 다 실온을 설정온도로 유지하며, 결로도 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 온도가 높고 일사량이 많은 날, 즉 현열비가 높은 날에 대하여 복사냉방의 적용이 가능한 것을 보여주는 것이다.

적절한 환기를 추가적으로 적용할 경우, 실내온도의 변동이 더 적게 되며, 바닥 표면온도가 노점온도보다 더 높게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 환기를 통하여 낮은 습도의 외기를 도입함으로 바닥복사냉방의 적용 가능성을 높일 수 있음을 의미한다.

Fig. 10은 상대습도가 평균 87%로 상대적으로 습도가 높으며 일사량이 적은 날에 대하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 바닥복사냉방만 적용된 경우에는 부하를 제거하기 위해 연속적으로 냉방이 이루어져 실온은 설정온도로 유지하였으나, 결로가 하루 종일 발생하였다. 복사냉방과 환기를 적용한 경우에는 실온이 설정온도보다 조금 높게 유지되었으나, 결로발생이 줄었다. 결로의 위험은 완전히 제거된 것이 아니기에 제습에 대한 추가적인 조치, 예를 들어 패키지 에어컨과 같은 공기조화가 필요하다. 그러나, 이 경우에도 복사냉방이 병용되면 패키지 에어컨만의 냉방보다 용량과 운전시간이 감소될 것으로 판단된다.

5. 결 론

국내 기후의 분석과 현장실험을 통하여 패키지 에어컨의 문제점을 파악한 후, 열해석 프로그램에 의한 바닥복사냉방 시스템의 적용성을 분석한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 국내 기후에 적합한 냉방은 공기조화뿐만 아니라 구조체의 축열성능 활용과 환기로도 가능할 것으로 판단된다.

(2) 기존 냉방 시스템인 패키지 에어컨은 기류로 인하여 국부적인 불쾌감을 유발할 수 있으며, 컴프레서의 가동/정지 후 시간이 짧음에 따라 주간 피크소비전력을 증가시킬 수 있다. 또한 패키지 에어컨을 1대 사용시 각 실별 온도의 불균등이 있었다.

(3) 냉방기간과 중간기에 경험되는 평균 바닥온도는 바닥복사냉방에 필요한 바닥온도와 차이가 적으며, 최저 바닥온도는 서로 비슷하였다.

(4) 자연상태일 때의 실내 온습도 분석을 통하여 주간에 구조체 축열방지를 통하여 야간에 실온을 낮출 수 있으므로 바닥복사냉방의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

(5) 냉방기간 동안 고온이며 비교적 습도나 낮은 기간에 대하여 바닥복사냉방 시스템이 적용가능하며, 고온다습한 기간에 대해서도 보조적인 냉방으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 서울대학교 공학연구소, 2000년도 두뇌한국21 사업과 에너지관리공단의 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 Univ., Seoul, Korea.
2. Olesen, B.W., 1997, Possibilities and Limitations of Radiant Floor Cooling, ASHRAE Transactions, pp. 42-48.
3. Watson, Donald, 1983, Climatic Design, McGraw-Hill, New York, USA.
4. Kim, Y.Y., J.H. Lim, M.S. Yeo, and K.W. Kim, 2000, A Study on the Radiant Cooling Using Ondol in Apartment Buildings, Proceedings of of the SAREK 2000 Winter Annual Conference, pp. 308-312.
5. Song, G.S., B.G. Jeon, and L.H. Lee, 2000, A Study on the Thermal Comfort Comparison between Wooden Floor and Concrete Floor based on Seating Life Style, Journal of the Architectural Institute of Korea, Planning and Design Part, Vol. 16, No. 2, pp. 105-114.
6. 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 Univ., Seoul, Korea.

7. Udagawa, M., 1986, Calculating Methods of Air Conditioning, Ohm Inc., p. 179.
8. SAREK, 1996, Seoul Standard Weather Data, SAREK.
9. Faye C. McQuiston, Cooling and Heating Load Calculation Manual, 2nd ed., ASHRAE, 1992, p. 5.7.
10. Yeo, M. S., 1997, A Study on the Separated Heating Surface Control of Radiant Floor Heating System in an Apartment House, Ph. D. thesis, Seoul National Univ., Seoul, Korea.