

주거 건물의 복사냉방시스템 적용에 관한 연구

A Study on the Application of the Radiant Floor Cooling System in Residential Building

임재한*

Lim, Jae-Han

여명석**

Yeo, Myoung-Souk

김광우***

Kim, Kwang-Woo

Abstract

The objective of this study is to demonstrate the potential of radiant cooling systems using Ondol as an alternative cooling system in residential buildings. For this purpose, computer simulation and model experiments have been performed for the system performance analysis regarding comfort, floor surface condensation, and supply water temperature. The results of this study is the following: In radiant floor cooling system, room air temperatures were maintained within the set temperature range of $\pm 1^{\circ}\text{C}$ without any discomfort condition. And taking into account only the condensation occurrence, it was possible to achieve radiant floor cooling for a period of about 77% of the total cooling period in weather condition of Seoul. The minimum supply water temperature is about 15°C , so renewable energy system such as ground heat exchange system can be used as an alternative in cooling source. Also, floor surface condensation can be prevented by integrating with the dehumidification system.

Keywords : Ondol, Radiant floor cooling, Thermal comfort, Condensation

주 요 어 : 온돌, 바닥복사냉방, 열쾌적, 결로

I. 서 론

국내에서의 패키지에어컨의 출하량은 1989년에서 1997년까지 10년 동안 약 400% 이상 증가하였으며, 이러한 추세는 향후 계속될 것으로 예측된다. 현재 국내 공동주택에 주로 사용되는 개별냉방방식인 패키지에어컨은 개별 운전이 쉽고, 각 세대별 욕구를 만족시켜 줄 수 있으며 설치 및 유지관리가 간편하다는 등의 장점이 있다. 그러나 기기 설치로 인한 건물 외관의 손상 및 운전의 비효율성으로 인한 에너지 낭비와 냉매에 의한 환경오염의 문제점이 지적

되고 있으며, 하계의 전력 피크부하를 상승시켜 국가적인 차원에서의 에너지낭비를 초래하고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 근래에 이르러 주거건물의 특성에 맞는 새로운 냉방 시스템에 대한 개발의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 지금까지 난방 시스템으로만 사용된 온돌을 냉방 시스템으로 적용한 복사냉방방식을 제안하고, 시뮬레이션과 모델실험을 통해 적용가능기간과 공급냉수온도, 패적 성능을 분석함으로써 그 가능성을 검토하였다. 그리고 바닥표면의 결로발생을 제어하기 위해 바닥복사냉방에 제습시스템을 적용하여, 실온제어성능과 결로제어성능을 분석하였다.

II. 바닥복사냉방시스템의 개념 및 설계

1. 복사냉방시스템의 개념

냉방시스템은 전기나 가스, 지역난방열, 지중열 등

*정회원, 서울대 대학원 박사수료

**정회원, 서울대 건축학과 조교수, 공학박사

***정회원, 서울대 건축학과 교수, 건축학박사

※건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연 C103A1040001-03A0204-00310)에 의한 것임

을 이용하는 냉열원(cooling source system)과 냉열을 전달하기 위한 분배시스템(distribution system), 각 대상공간에서 부하를 제거하기 위한 터미널유닛(load system: terminal unit)으로 구성된다. 복사냉방시스템은 일반적으로 터미널유닛을 구성함에 있어서 천장폐널이나 모세관 튜브, 콘크리트 구조체 등을 이용하는 것을 말한다. 천장폐널을 이용하는 방식(suspended ceiling panel system)은 가장 널리 알려져 있는 방식으로, 알루미늄 폐널에 인접한 금속관으로 냉수를 순환시켜 냉방하는 방식이다. 열전도율이 좋은 재료를 사용하면, 실부하의 변화에 빠르게 대응할 수 있는 시스템을 만들 수 있다. 모세관 튜브를 이용하는 방식(capillary tube system)은 냉수관의 간격을 조밀하게 하여 석고나 접성보드에 매몰하거나 천장면에 부착하여 사용하는 방식으로 플라스틱관의 유연성 때문에 개보수시 사용하기에 적합한 시스템이다. 그리고 콘크리트 구조체를 이용하는 방식(concrete core system)은 바닥난방시스템과 동시에 사용이 가능한 방식으로, 축열체인 콘크리트에 의한 축열냉방을 하는 방식이다. 지연효과(time-lag)에 의하여, 실부하의 변화에 빠르게 대응하기 위한 제어가 어렵다는 단점이 있으나, 기존 난방시스템을 냉방에 효과적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 현재 유럽에서 가장 많이 이용되는 방식은 천장에 냉방폐널을 부착하는 방식으로, 이 경우 냉방능력을 제한하는 요소로는 결로와 수직온도분포의 불균일로 인한 불쾌감을 들 수 있다.

슬래브 자체에 냉수관을 두는 경우는 바닥복사냉방(radiant floor cooling)이라고 일컬어지며, 냉방바닥(cooling floor), 표면냉방(surface cooling) 등도 이 방식을 지칭하는 용어이다. 유럽에서는 최근 10년 사이에 바닥복사난방을 하는 건물이 많아짐에 따라, 바닥복사냉방에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 같이 바닥구조체의 배관에 냉수를 순환시키려는 시도는 이미 50년 전부터 행해져 왔으나, 바닥표면에 결로가 생길 위험이 있다는 문제를 안고 있다. 우리나라에서 가장 적용가능성이 높은 복사냉방은 기존 공동주택에서 난방을 위해 사용되는 바닥의 온돌구조체를 냉방시에도 적용하는 것으로써, 온돌 내 배관에 냉수를 공급하여 바닥표면의 결로발생을 제어함과 동시에 쾌적에 영향을 미치지 않도록 실온을 제

어하는 것이다.

현재 주거 건물에서 적용되고 있는 패키지 에어컨을 이용한 냉방 방식은 대류열교환에 의해 공기를 매체로 실온이 제어되는 방식이고, 복사냉방시스템은 주로 복사열교환에 의해 실온을 제어하는 방식이다. 다른 용도의 건물에 비해 거주자가 장시간 재실하는 주거 공간에서는 공기시스템을 사용할 경우, 공기의 흡입 및 토출로 인한 실내 기류에 의하여 발생하는 먼지의 비산과 드래프트, 기계 소음의 발생의 문제가 있다. 그러나 복사냉방시스템은 실내 기류로 인한 문제점이 상대적으로 경미하며, 주로 복사열교환에 의해 실내 열부하를 처리하므로 평균복사온도가 낮아 열전달 특성상 공기시스템에 비하여 높은 설정온도로도 재실자의 쾌적감을 유지할 수 있으므로 에너지 절약적이다. 바닥폐널을 이용한 복사냉방을 적용할 경우, 기존 주택의 난방으로 사용되어 온 설비를 하계의 냉방설비로 이용함으로써 초기투자비가 절감되고, 냉수온도가 상대적으로 높아서 열원으로서 미활용 에너지를 사용하기가 용이하여, 이로 인한 에너지비용 절감과 친환경적 접근이 가능하다. 그리고 중량구조체인 바닥폐널의 축냉이 가능하고, 습도가 낮고 부하발생이 적은 기간에는 폐널냉방의 운전만으로 냉방이 가능하며, 냉방능력을 시스템이 작동되는 시간에 걸쳐 분산시킬 수 있으므로 최대 전력수요에 따른 전력예비율을 높일 수 있고, 이로 인한 국가 경제적인 예산절감도 가능하다.

2. 바닥복사냉방시스템의 설계

바닥복사냉방시스템에서 바닥구조체가 대상공간의 현열을 제거하며, 바닥을 둘러싼 벽체의 온도가 모두 같다고 가정하면, 실에서 발생하는 현열부하는 외기온이나 일사량과 같은 외기조건, 벽체의 열관류율이나 건물의 기밀도와 같은 건물구조체 특성, 그리고 내부 인체, 조명, 기기 발열의 합수로 나타나고, 바닥구조체가 제거할 수 있는 열량은 표면의 열전달 계수와 바닥의 면적, 실온과 바닥표면의 온도 차이에 의해 결정된다. 이러한 바닥복사냉방시스템의 설계인자를 기후적, 건축적, 설비적 인자로 나누어 고려하면, <표 1>과 같다. 즉, 건물은 놓이는 장소의 기후적 특성이나 건축적 특성에 따라 건물이 갖는 부하가 달라지고, 이에 따라 배관이나 펌프, 밸브 등

표 1. 복사냉방 시스템의 설계인자

		설계인자			
		기후적 인자	건축적 인자	설비적 인자	
부하요소	열관류율(K) 일사(I)	○	○		벽체구성, 창문 면적비, 외기조건
	외기온(Tout)	○			외기조건
	침기(qinfil)	○	○		
설계요소	인체, 조명, 기기발열 (qsp, qls, qse)			○	발열밀도 발열 스케줄
	바닥면적(Af)		○		유효방열면적
	설정온도(Ti)			○	
	바닥표면온도(Ts)		○	○	

의 분배시스템이나 냉동기, 보일러 등의 열원시스템의 용량이나 구성이 달라진다. 그러므로 이러한 설계인자들은 설계단계에서부터 서로 연관을 갖고 고려되어야 한다.

설계단계에서 가장 먼저 고려해야 할 요소로서 주거 건물의 외피를 들 수 있다. 대부분의 주거 건물 외피는 콘크리트와 같은 축열성능을 가지는 재료로 구성되어 있다. 축열성능은 열류지연효과, 즉 타임랙과 진폭감쇄율로 나타나며, 전체 전열량에는 변화를 주지 않지만 구조체의 상태를 동적으로 지연시켜 실내공간에서 시간에 따른 온도감각을 지속시킬 수 있는 특징이 있다. 구조체가 가지는 열전달에 대한 저항성, 축열성 및 확산성이 없다면 내부표면의 온도 사이클은 외기온과 같아질 것이다. 그러나 실제로는 외부 열환경 조건의 영향이 실내로 전달되는 시간을 지연시키고, 그 진폭을 감소되어 나타난다. 일반적으로 주거건물에서는 구조체로 사용되는 콘크리트의 두께는 대부분 유사하므로, 축열성능이 유사하다. 그러므로 건물의 외피가 가지는 열관류율에 따라 외부의 열환경조건이 실내에 미치는 영향이 달라진다. 외피의 열관류율이 낮아지면 외부의 열환경 조건이 실내에 미치는 영향이 줄어들게 되므로 실내설정온도를 만족시키기 위해 시스템이 제거하거나 공급해야 할 열량이 줄어들게 된다. 그러므로 전체 시스템에 사용되는 에너지를 줄일 수 있다. 두 번째로는 실제 방열량이나 패적 등의 열적 성능과 직접적인 관계를 갖는 바닥구조체에 대한 고려가 필요하다. 바닥복사냉방 시스템은 축열성능을 갖는 바닥구조체를 사용하므로 실내부하의 변동에 따라 냉수를 공급하더라도 바닥구조체의 축냉과정을 거쳐 실내에 영향을 미

친다. 바닥구조체의 배관 간격과 축열층의 두께, 배관매설위치, 배관에 흐르는 유량에 따라 바닥구조체가 가지는 성능이 달라질 수 있다. 그러므로 시스템이 최적의 성능을 유지하기 위해서는 바닥구조체에 공급된 열이 실 공간에 효과적으로 전달될 수 있도록 적합하게 구성되어야 한다. 또한 바닥표면의 온도가 너무 높거나 낮으면 거주자의 쾌적감을 저해시키며, 냉방의 경우 바닥표면의 결로발생 가능성이 높아진다. ISO에서는 바닥표면온도의 쾌적 범위를 19~29°C로 규정하고 있는데, 이러한 조건을 만족시키기 위해서 부하와 바닥구조체의 냉방능력에 대한 분석이 필요하다. 마지막으로 배관이나 펌프, 밸브와 같은 분배시스템과 냉수를 만들어내는 열원시스템, 이를 제어하여 설정 실온을 유지하도록 하는 제어시스템과 같은 설비적 요소에 대한 고려가 필요하다. 이들은 서로 밀접하게 관련되어 있어서 제어의 유형에 따라 사용되는 밸브의 종류나 펌프의 유량, 배관의 구성이 달라진다. 그리고 바닥복사냉방에서 냉수 공급에 따른 방열량은 공급냉수의 유량과 온도에 의해 결정되므로, 이에 따라 제어방식은 개폐식제어나 변유량제어와 같은 공급유량제어, 그리고 외기보상제어나 외기보상 실온피드백제어와 같은 공급냉수온도제어로 분류될 수 있다. 특히 건물외피와 바닥구조체의 축열성능이 유사할 경우에는 바닥복사냉방 시스템에서 외기보상제어를 적용할 경우 효과적으로 시스템을 운영할 수 있는데, 이를 위해서는 바닥구조체로 공급되는 냉수온도를 조절할 수 있도록 분배시스템을 구성해야 하므로, 3방 밸브나 4방 밸브를 사용하게 된다. 외기보상제어를 위한 배관의 구성은 좀 더 자세히 살펴보면 <그림 1>과 같다. (a)는 3방 밸

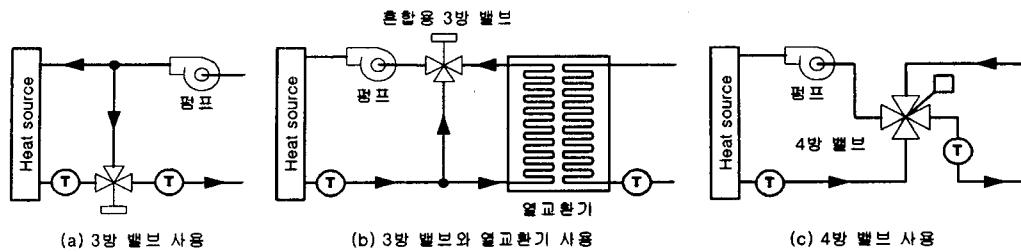


그림 1. 외기보상 제어를 위한 분배 시스템 구성

밸브를 사용하여 배관을 구성한 것으로 바닥구조체에 공급되는 냉수유량을 일정하게 유지하기 위해서는 혼합형(mixing type) 3방 밸브를 사용해야 한다. (b)는 3방 밸브와 열교환기를 사용하여 구성한 것으로 열원과 열교환기 사이의 순환펌프 외에도 바닥구조체와 열교환기 사이를 순환시킬 수 있는 펌프가 추가로 필요하다. 이 같은 방법은 열교환기를 거치면서 열손실이 발생하므로 에너지효율이 낮아지는 단점이 있다. (c)는 4방 밸브를 사용하여 배관을 구성한 것으로 펌프의 위치에 관계없이 유량을 일정하게 유지할 수 있게 된다.

III. 바닥복사냉방의 적용 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서는 벽체와 바닥, 창 등을 열평형방정식으로 모델링하여, 이를 유한차분법으로 해석할 수 있도록 개발한 기존 프로그램을 복사냉방 시뮬레이션에 적합하게 수정하여 사용하였다. 온돌 바닥의 해석은 fin효율과 Effectiveness-NTU방법을 적용하였고, 실외측 벽체 표면의 계산은 상당외기온과 벽체 내부로 전도에 의한 열교환을 고려하였으며, 실내측 표면은 Modified thermal balance model을 적용한 복사 열교환과 벽체 내부로의 전도 열교환, 실내공기와의 대류 열교환, 일사 열획득 등을 고려하였다. 결론 발생에 영향을 주는 잠열 부하의 해석은 외기의 영향과 내부 잠열 부하 영향을 고려하였다.

2. 시뮬레이션 조건 및 방법

시뮬레이션을 위해 현재 국내 공동주택 규모에서 가장 일반적인 평수인 32평형 중간층 중간 세대의 안방을 대상공간으로 선정하였다. 환기 및 인체, 조

표 2. 시뮬레이션 프로그램 입력 자료

항 목	입력 자료	
대상 모델	32평 공동주택 중간층 중간 세대, 정남향의 안방 (면적 : 18.0 m ²)	
기상 자료	서울지역 표준 기상 데이터	
환기 횟수	1 회/h	
인체	대류	21.3 W/인
	복사	49.7 W/인
	잠열	45 W/인
	재실 인원	2 인
조명	대류	11.8 W/m ²
	복사	9.2 W/m ²
기기	대류	8.3 W/m ²
	복사	8.3 W/m ²
시스템 운전 조건	운전 방식	연속 냉방
	유량	1.1 lpm × 2
	설정 온도	26°C

명, 기기 발열 및 시스템의 운전 조건은 <표 2>와 같이 가정하였다. 외기기상조건은 서울지역을 대상으로 작성된 공조학회 표준기상데이터를 이용하였고, 냉수의 유량은 난방시 적용되는 유량과 동일하게 적용하였다. 본 연구에서는 6월부터 9월까지의 기간동안 비냉방 자연 상태조건의 시뮬레이션을 실시하여, 실온이 26°C 이상을 초과하는 시간을 기준으로 냉방기간을 설정하였다. 그리고 공급냉수온도를 결정하기 위해 기상데이터에서 가장 높은 외기온이 발생하는 일주일을 대상 기간으로 우선 외기보상제어를 실시하여 식 (1)과 같은 외기보상율(RR)을 구하였다. 그리고 실온을 피드백하여 설정실온과의 편차에 따라 식 (2), (3)과 같이 공급냉수온도를 재조정하여 바닥페널에 공급되는 냉수온도를 결정하였다.

$$T_{\text{water}} = RR(T_{\text{out}} - T_{\text{do}}) + T_{\text{dw}} \quad (1)$$

$$T_{\text{water}} - T_{\text{shift}} = RR(T_{\text{out}} - T_{\text{shift}}) \quad (2)$$

$$T_{\text{shift}} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (3)$$

여기서, T_{water} : 공급냉수온도 [°C]

RR : 외기보상율

T_{out} : 외기온 [°C]

T_{do} : 설계 최고 외기온 [°C]

T_{dw} : 설계 최저 공급냉수온도 [°C]

T_{shift} : 외기보상율의 변동값 [°C]

e : 설정실온과의 오차 [°C]

K_p : 비례 계수

K_i : 적분 계수

K_d : 미분 계수

3. 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션을 통해 바닥복사냉방의 적용가능성을 평가하기 위해, 실내 환경 및 외기온 조건에 따른 공급냉수온도, PMV에 의한 쾌적성, 냉방기간 중 바닥표면의 결로발생시간을 분석하였다. <그림 2>와 같이 기상 데이터에서 가장 높은 외기온이 나타나는 기간동안에도 실온은 설정온도(26°C)에서 ±1°C의 편차로 제어되었고, 바닥표면온도도 약 22°C 이상으로 유지되었다. 그러므로 기존 ASHRAE 및 ISO 기준, 국내외 연구 결과에 비춰 볼 때, 실온을 26°C 내외로 제어하면서도 바닥표면온도의 저하에 의한 불쾌적이 나타나지 않을 것으로 판단된다. 표준 기상 데이터에 나타난 서울지역 최대 외기온(34°C) 조건

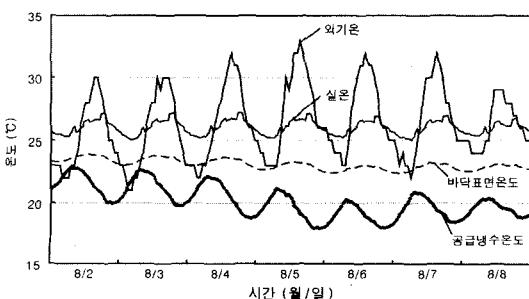


그림 2. 바닥복사냉방에 의한 실온, 바닥표면온도, 공급냉수온도 변화

에서 공급냉수온도의 최저값은 약 17°C로서, 연속적으로 바닥복사냉방을 운전할 경우 열원으로서 지하수 등의 미활용에너지의 이용이 가능할 것으로 판단된다. 전체 냉방기간의 쾌적을 PMV에 의해 평가해 본 결과, 촉의량 0.5 clo(일반적인 하복), 인체대사량 1.2 met(가만히 서 있는 조건, 70 W/m²), 설정실온 26°C의 조건에서 평균 +0.5로 나타났다. 하절기 주거건물에서의 일반적인 촉의량이 0.5 clo보다 작아지는 경우, PMV 값은 보다 0에 가까워 질 것으로 판단된다. 그리고 전체 냉방기간 중 바닥표면의 결로발생시간을 분석해 보면, 전체 1270시간 중 약 290 시간으로 나타나, 바닥복사냉방을 연속적으로 운전할 경우 서울의 기상조건에서 약 77%기간동안 적용 가능한 것으로 나타났다. 외기의 영향에 의해 결로 발생은 대부분 고온다습한 기간동안 나타났으며, 실내의 인체 및 기기발열에 의해 잠열부하가 시뮬레이션 조건보다 커질 경우, 결로 발생없이 안전하게 운전하기 위해서 제습에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 바닥복사냉방의 적용 모델실험

1. 모델 실험실 및 실험 장치

바닥복사냉방을 적용하기 위한 테스트 셀은 시뮬레이션의 대상공간과 단위면적당 외부부하가 동일하도록, 외피의 열관류율, 창문의 크기, 일사 유입 등을 고려하여 <그림 3>과 같이, 2.4×2.4×2.3 m(W×D×H) 크기로 제작하였다. 바닥구조체는 기존의 공동주택의 방열 특성을 동일하게 하기 위해 기존의



그림 3. 모델실험실 내부 전경

복사난방시스템과 동일하게 적용하였다. 바닥복사냉방에 의한 실내환경을 측정하기 위해, 실온의 수직분포, 부위별 바닥표면온도 분포, 벽체 및 창문의 표면온도, 외기온습도, 공급냉수온도와 환수온도를 측정하였다. 측정된 값은 인터페이스용 입력보드를 통해 컴퓨터에 저장되고, 밸브와 펌프는 자체 제작한 프로그램을 이용하여 제어알고리즘에 따라 연동되어 제어되도록 하였다. 내부에는 발열체를 설치하여 실내부하가 발생하도록 하였다.

2. 실험 내용 및 방법

외기온과 냉수온도의 관계를 나타내는 외기보상을 구하여 바닥복사냉방에 적용이 가능한 공급냉수온도의 범위를 결정하였다. 공급냉수의 유량은 기존 바닥복사난방에서의 설계유량을 계산하여 동일하게 적용함으로써, 실제 주거건물에서 기존 난방설계유량의 냉방 적용가능성을 확인하였다. 모델공간의 설정온도는 건축물의 에너지절약 설계기준인 26°C로 제어하였다. 그리고 바닥복사냉방이 이루어지는 공간에서의 실내 환경을 쾌적과 결로의 관점에서 분석하여 바닥복사냉방의 적용성을 평가하였다. 본 실험은 여름철 냉방기간(2001년 8월 22일~29일)동안 실제 기상조건에서 1일 단위로 진행되었다. 그리고 테스트 셀 내부의 실내 온습도, 바닥표면온도, 공급냉수온도, 환수온도, 외기 온습도를 측정하였다.

3. 실험 결과 분석

바닥복사냉방을 적용한 모델실험을 통해 실내환경의 변화를 분석하고, 공급냉수온도와 환수온도에 따른 바닥표면온도의 상관관계를 분석하였다. 그리고 바닥표면온도 변화에 의한 쾌적조건을 기준 연구 자료와 비교 분석하였으며, 실온의 수직분포를 분석함으로써 모델공간의 쾌적을 분석하였다.

1) 실내 환경 및 공급냉수온도 분석

바닥복사냉방에 의한 실내 환경의 변화는 <그림 4>와 같이 나타났다. 외기온이 하루동안 약 7°C 정도 변화하는 동안, 실온은 설정온도 26°C를 중심으로 1°C 내외로 유지되는 것을 알 수 있다. 냉방 중 일부 시간동안 냉수가 처음 모델공간으로 공급되는 냉수배관 인입부의 직상부에서 바닥표면의 결로가 발생하였으며, 이 지점의 온도는 바닥표면의 평균온도보다 1~2°C 정도 낮게 나타났고, 외기온이 증가함에 따라 바닥표면온도의 차이는 더 크게 나타났다. 온도의 차이가 설계 최고 외기온(31°C)에 대하여도 1°C 내외로 나타나므로, 바닥복사냉방을 실제 적용할 경우 결로를 방지하기 위해서는 배관인입부 직상부의 온도를 고려하여 1~2°C 정도의 안전율을 고려해야 할 것으로 판단된다. 실온이 26°C인 경우, 상대습도가 70%로 유지되면서 바닥표면온도가 약 20°C 이하로 내려가면 표면 결로가 발생하게 된다. 이 경우, 바닥표면의 결로 발생을 막기 위해서는 바닥복사냉방시스템의 운전을 멈추거나, 상대습도를 70%

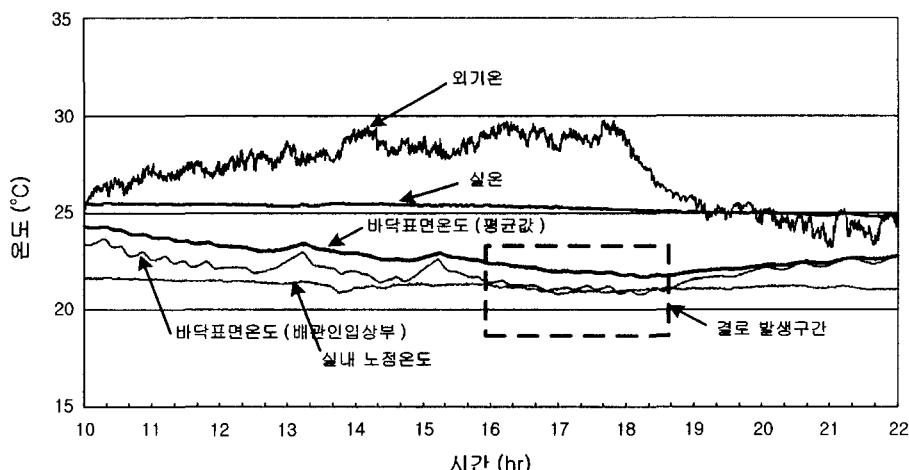


그림 4. 실온 및 바닥표면온도, 노점온도의 변화

이하로 낮출 수 있도록 제습시스템을 설치, 운전해야 할 것이다. 실내의 상대습도가 60%이하로 유지되는 경우에는 바닥표면온도가 17°C 이상을 유지하면 결로 발생을 막을 수 있다. 그러므로 실내에서의 제습시스템의 운전을 통해 실내 노점온도를 낮춤으로써, 바닥복사냉방의 허용 냉방능력을 크게 할 수 있을 것이다.

외기보상에 따른 공급냉수온도는 서울지역 냉방설계 외기온(31°C)에서 약 15°C로 나타났으며, 시뮬레이션을 통해 구한 값(17°C)보다는 약간 낮게 나타났다. 이는 외기보상율을 적용할 때, 시뮬레이션에서는 배관이나 펌프 등에 의한 열취득을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 그리고 외기보상율에 따라 결정된 냉수온도는 열교환기와 밸브, 펌프를 거치는 복잡한 제어과정 속에서 열취득과 밸브에서의 제어오차가 발생하여 실제는 선형적 특성이 강하게 나타나지 못하였다. 그러므로 실제 주거건물에 적용할 때에는 세대내 공급유량에 따라 허용압력에 따라 적합한 밸브의 Cv값(유량계수)을 고려하여 밸브를 선정하고, 배관이나 펌프에서의 열손실을 반영하여 냉수온도를 결정해야 할 것이다. 그리고 바닥표면온도를 공급냉수온도와 환수온도에 따라 분석해 보면, <그림 5>와 같은 상관관계가 나타남을 알 수 있다. 그러므로 공급냉수온도나 환수온도를 측정함으로써 바닥표면온도의 범위를 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

2) 복사냉방공간의 열쾌적

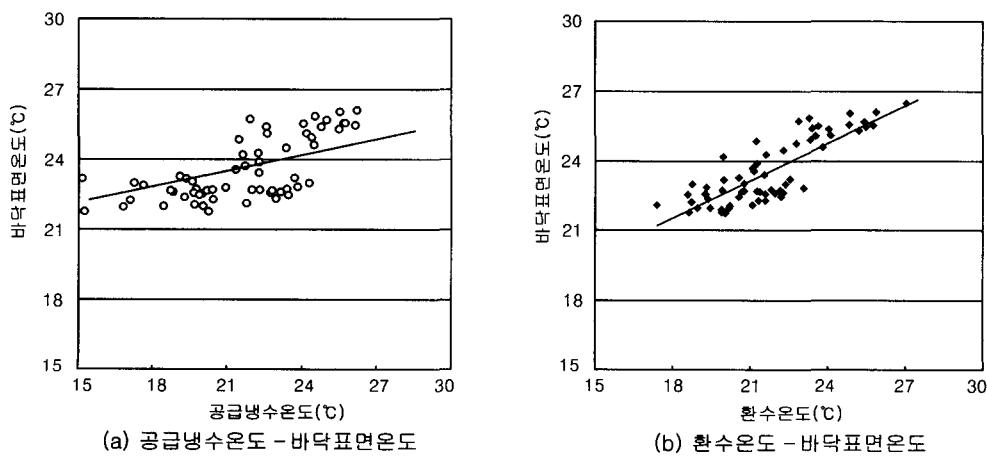


그림 5. 공급냉수온도, 환수온도에 따른 바닥표면온도

복사냉방공간에서의 열쾌적은 바닥표면온도 저하에 따른 쾌적성과 실내 수직온도 차이에 의한 쾌적성으로 나누어 분석할 수 있다. 바닥표면온도에 따른 쾌적성은 기존 연구에서 바닥의 마감재질이나 거주자의 자세에 따라 다르게 제시하고 있다. 송국섭의 연구에 따르면, 거주자가 바닥에 눕거나 앉아 있을 경우, 쾌적 바닥온도의 범위가 소나무 재질에서는 18~30°C이고, 우레탄 고무 재질에서는 18~23°C로 나타났다. 이주연의 연구에서는 실온이 27°C, 29°C인 경우, 바닥표면온도 24°C에서 쾌적한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 설계 외기온(31°C)에 있어서 바닥표면온도가 20°C 이상으로 분포되어, 국내의 바닥마감이 리놀륨이나 목재로 이루어져 있음을 감안할 때, 바닥표면온도 저하에 의한 불쾌적은 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 그리고 복사방식에 의해 쾌적 설정 실온이 올라갈 경우, 바닥표면온도가 높아져도 되기 때문에 온도저하에 의한 불쾌적은 유발되지 않을 것이다. 바닥표면온도의 분포에 있어서는 배관직상부와 배관피치 중심의 온도차가 약 2°C 이하로서, 일반적인 복사난방에서의 설계값(4°C 이하)과 비교해 볼 때, 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 바닥복사냉방이 이루어지는 공간의 벽체 및 창문과 바닥과의 표면온도차도 10°C 이하로 나타나, 바닥복사냉방 적용시 바닥온도와 주벽의 온도에 의한 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 실온을 설정온도로 유지하는 동안, 실온의 수직분포는 최대 1.9°C, 평균 1.3°C로 나타나 앉은 사람의 발

목(0.1 m)과 머리(1.1 m)의 온도차를 3°C 이하로 권장하는 폐적기준을 만족하면서 냉방이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

IV. 바닥표면의 결로 제어

1. 바닥복사냉방과 제습시스템 적용

바닥복사냉방에서는 냉방에 의해 낮아진 바닥표면온도와 실내습도의 변화에 의해 표면결로가 발생할 수 있다. 바닥표면온도의 변화는 설정실온을 유지하기 위해 공급 냉수의 유량이나 온도가 변화됨으로써, 바닥구조체의 시간 지연특성에 따라 다르게 나타난다. 그러나 실내습도는 갑작스런 실내의 부하요소에 의해 순간적으로 변화되므로, 결로발생을 제어하기 위해서는 실내 공기의 제습이 필요하다. 기존 제습시스템은 일반적으로 냉각코일을 사용하여 공기를 냉각하여 수증기를 응축시키는 냉각제습방식과 흡습성있는 고체나 액체에 공기를 접촉시켜 제습하는 화학제습방식이 있다. 본 연구에서는 기존 연구에 의해 에너지 소비가 적은 것으로 나타난 냉각제습을 냉수식과 직팽식으로 구분하여, 바닥복사냉방에 적용함으로써 통합시스템을 구성하였다. 그리고 냉방기간동안 모델공간을 대상으로 실험을 진행하여, 내부부하 변화에 따른 시스템의 실온제어성능과 결로제어성능을 확인하였다.

2. 실험 내용 및 방법

바닥복사냉방을 적용한 모델실험실에 직팽식 코일

이 포함된 패키지 에어컨과 냉수식 코일이 포함된 공기조화기를 이용하여 제습시스템을 구성하였다. 바닥복사냉방은 3방 밸브를 이용하여 냉수의 공급 온도를 조절함으로써 실온을 제어하였고, 바닥표면온도와 노점온도에 따라, 각각 패키지 에어컨의 압축기와 팬, 공기조화기의 3방 밸브와 팬을 제어하였다. 그리고 부하변동에 따른 모델공간의 제어 반응을 알아보기 위해 발열장치와 가습장치를 사용하여 현열과 잠열을 발생시켰다.

3. 실험 결과 분석

실내 부하조건에 따라 실온변화를 분석한 결과, <그림 6>과 같이 평균 25.8~26.8°C로 나타났다. 그리고 전반적인 바닥표면온도의 분포는 최소 21°C 이상으로 유지됨으로써, 바닥표면온도 저하에 의한 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 그리고 실온의 제어편차는 실내 부하가 커질수록 더 크게 나타났으며, 배관인입상부의 바닥표면온도는 최고 외기온(30.5°C)이 나타나는 시간대에 약 19°C까지 낮아져 제습시스템이 동시에 운전되었다. 결로 제어성능을 분석하면, <그림 7>과 같이 설정실온을 유지하기 위해 바닥표면온도가 전체적으로 평균 23.5°C, 최소 22.2°C로 유지되었으며, 실내의 노점온도가 평균 18.7°C, 최대 21.2°C로 제어됨으로써 표면의 결로가 발생하지 않았음을 판단할 수 있었다. 실의 노점온도가 가장 높게 나타나는 경우에도 바닥표면온도와 약 2.5°C 정도 차이가 나타나 결로가 발생하지 않았다.

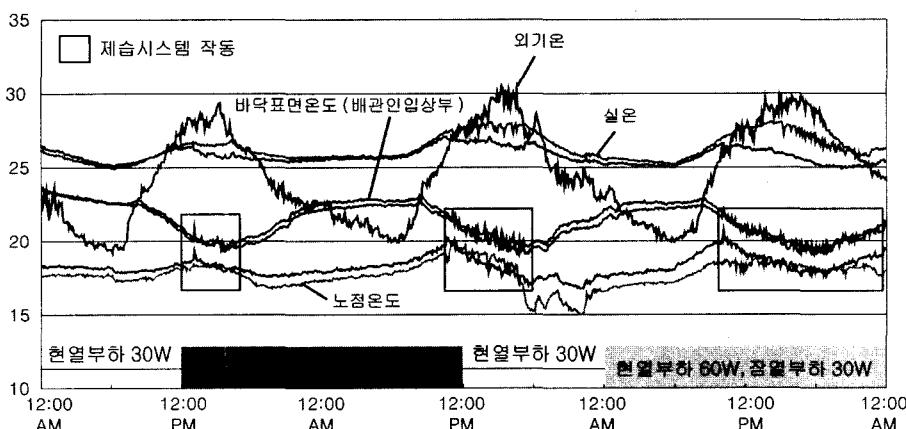


그림 6. 결로제어시 모델공간의 실온, 바닥표면온도, 노점온도 변화

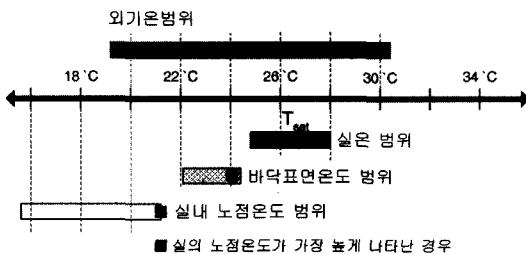


그림 7. 결로 제어시 실온, 바닥표면온도, 노점온도 범위

다. 부하가 크게 발생하는 주간에 바닥복사냉방의 운전을 가동하는 경우, 운전 초기 실온과 바닥표면온도의 차이가 커져서 결로 발생 위험이 커지고, 바닥표면온도 저하에 의한 불쾌적이 커질 것으로 판단된다. 즉 바닥복사냉방의 적용시 냉방성능만을 고려하여 냉수공급온도의 하한값을 설정하지 않을 경우, 실온의 제어성능은 더 안정적일 수 있지만, 바닥표면온도 저하에 의해 불쾌적이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로 복사냉방의 냉방능력과 쾌적성능을 동시에 고려할 경우, 실내부하의 크기에 따라 보조냉방장치의 설치가 요구될 것이다. 패키지에어컨이나 팬코일유닛과 같은 냉각제습이 복사냉방에 적용된 경우에는 결로발생을 제어함과 동시에 보조냉방장치로 적용이 가능할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 지금까지 난방으로만 사용되어온 온돌을 냉방시스템으로 적용한 복사냉방방식을 제안하였고, 시뮬레이션과 모델실험을 통해 바닥복사냉방의 적용가능기간, 적용시 실내환경 및 공급냉수온도 범위, 쾌적성능을 분석하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 주거건물에 바닥복사냉방을 적용할 경우, 서울의 기상조건에서 약 77%간간동안은 결로발생이 없이 실온을 26°C 내외로 유지할 수 있으며, PMV도 평균 +0.5의 값으로 나타났다.

(2) 실제 주거건물에 적용할 때에는 세대내 공급유량에 따라 허용압력에 따라 적합한 밸브의 Cv값(유량계수)을 고려하여 밸브를 선정하고, 배관이나 펌프에서의 열손실을 반영하여 냉수온도를 결정해야 할 것이다. 패널에 공급되는 냉수온도는 13~24°C 정도

로서, 부분부하 상황에서 연속적으로 운전된다면 공급냉수온도가 보다 높아짐으로써, 지하수 등의 미활용 에너지의 이용도 가능할 것이다.

(3) 주거건물에 바닥복사냉방 적용할 경우, 바닥표면온도는 20°C 이상, 실온의 수직온도차는 3°C 이하로서 국부적인 불쾌적이 나타나지 않을 것으로 판단된다.

(4) 바닥복사냉방에 제습시스템을 적용한 결과, 실온이 26°C 내외로 유지되었고, 바닥표면의 결로발생을 막을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 구소영, 김용이, 김광우(1999), 공동주택에서의 온돌을 이용한 복사냉방의 가능성에 관한 연구, 대한건축학회 추계 학술발표논문집, 제19권 제2호, pp. 1015- 1020.
2. 공기조화·냉동공학회(1998), 서울지역 표준 기상 데이터, 공기조화·냉동공학회.
3. 김난행, 안병우(2003), 공동주택의 냉방시 실내온열환경 평가 연구, 한국주거학회 논문집, 제14권 제3호, pp. 1-8.
4. 에너지경제연구소(2003), 국내에너지동향 (Energy news in korea), 2003년 6월호, pp. 1-14.
5. 이주연, 磯田憲生, 光田惠(2000), 바닥냉방이 인체에 미치는 온열쾌적성에 관한 연구, 한국생활환경학회지, 제7권, 제2호, pp. 20-26.
6. 이형우, 홍원화(2002), 노인복지시설의 하절기 실내 온열환경과 노인의 주관적 반응 평가에 관한 연구, 한국주거학회 제13권 제2호, pp. 23-30.
7. 임재한(2000), 공동주택의 온돌을 이용한 바닥복사냉방의 결로 방지 제어에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대 대학원.
8. 송국섭, 전봉구, 이현우(2000), 콘크리트 바닥과 나무 바닥의 좌식 생활 자세별 온열감 비교 연구, 대한건축학회 논문집, 제16권 제2호, pp.105-114.
9. 송국섭(2002), 20°C 온도에서 나무바닥의 두께가 인체의 피부온도와 혈류량에 미치는 효과, 한국생활환경학회지, 제9권 제4호, pp.306-313.
10. 송국섭(2003), 온돌바닥의 합판 마감 두께와 인체의 온열생리반응비교, 한국생활환경학회지, 제10권 제3호, pp.169-175.
11. 한국전력공사 전력거래처(2000), 가전기기 보급률 및 가정 용전력 소비행태 조사.
12. ASHRAE(1992), ASHRAE Standard 55-1992 : Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE.
13. ASHRAE Learning Institute, Fundamentals of water system design, ASHRAE.
14. Corina Stetiu(1998), Radiant cooling in U.S. office buildings, Berkeley Ph.D. Thesis,
15. Faye C. McQuiston(1992), Cooling and Heating Load Calculation Manual(2nd Edition), ASHRAE, p.5.7.
16. ISO(1984), International Standard 7730.
17. Imanari T., Toshiaki O., and Kazuaki B(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.
- 18. Jean-Paul Isoardi(1995), Surface cooling in hospitals : Use of computer-aided design packages, ASHRAE Transactions, p.717.
 - 19. Martin Behne(1995), Is there a risk of draft in rooms with cooled ceilings?, ASHRAE Transactions, p.744.
 - 20. Olesen B.W.(1977), Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, ASHRAE Transactions 83(2).
 - 21. Olesen B.W., Parsons K.C.(2002), Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730, Energy and Buildings Vol 34, pp. 537-548.
 - 22. P. O. Fanger, Panel heating and cooling;comfort and standards, International Ondol Conference, Seoul, Korea, pp. 8-19.
 - 23. Sung Hyun Kim, Tae Heon Kim, Youngduk Kim, and In-Gang Na(2001), Korean energy demand in the new millennium: outlook and policy implications, 2000-2005, Energy Policy, Vol 29, pp. 899-910.

(接受: 2003. 11. 19)