



## 복사냉방 시스템의 적용

기존 바닥구조체를 이용한 주택 복사냉방 시스템의 적용원리와 구성을 살펴보고, 설계인자 및 바닥표면 경로방지를 위한 제어 방안을 소개하고자 한다.

김 광 우 / 부회장

서울대학교 건축학과 (snukkw@snu.ac.kr)

### 적용원리 및 적용 이점

현재 주택에서 적용되고 있는 대표적인 공조방식인 공기시스템(패키지 에어컨을 이용한 냉방 방식)과 복사냉방 시스템의 열전달 특성을 비교하면, 전자는 주로 대류열교환에 의해 공기를 매체로 온도와 습도를 제어하는 방식이며, 후자는 주로 복사열교환에 의해 온도를 제어하는 방식이다.

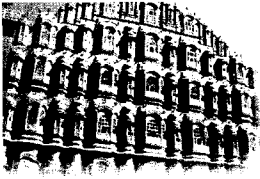
다른 용도의 건물에 비해 거주자가 장시간 재실하는 주거 공간에서는 공기시스템을 사용할 경우, 공기의 흡입 및 토출로 인한 실내 기류에 의하여 발생하는 먼지의 비산과 드래프트, 기계 소음의 발생의 문제가 있다. 반면 복사냉방 시스템은 실내 기류로 인한 문제점이 상대적으로 경미하며, 주로 복사열교환에 의해 실내 열부하를 처리하므로 평균복사온도가 낮아 열전달 특성상 공기시스템에 비하여 높은 설정온도로도 재실자의 쾌적감을 유지할 수 있으므로 에너지 절약적이다. 뿐만 아니라, 개별 냉방기기 사용의 증가는 여름철 일시적인 냉방수요 급증에 의해 최대 전력수요를 높하게 됨으로써 국가적인 차원에서 발전소의 건설 투자비용의 증대와 에너지낭비 등의 문제를 일으키고 있으며, 기기 설치로 인한 건물외관의 손상 및 냉매에 의한 환경문제 등을 유발하고 있다. 그러나 바닥패널을 이용한 복사냉방을 적용할 경우, 기존 주택의 난방으로 사용되어 온 설비를 하계의 냉방설비로 이용함으로써 초기투자비가 절감되고, 냉

수온도가 상대적으로 높아서 열원으로서 미활용 에너지를 사용하기가 용이하여, 이로 인한 에너지비용 절감과 친환경적 접근이 가능하다. 그리고 중량구조체인 바닥패널의 축냉이 가능하고, 습도가 낮고 부하발생이 적은 기간에는 패널냉방의 운전만으로 냉방이 가능하며, 냉방능력을 시스템이 작동되는 시간에 걸쳐 분산시킬 수 있으므로 최대 전력수요에 따른 전력예비율을 높일 수 있고, 이로 인한 국가 경제적인 예산절감도 가능하다.

### 복사냉방 시스템의 구성

냉방시스템은 그림 1과 같이 전기나 가스, 지역난방 열, 지중열과 같은 열원을 통해 냉열을 만드는 냉열원(cooling source system)과 냉열을 전달하기 위한 분배시스템(distribution system), 각 대상공간에서 부하를 제거하기 위한 터미널유닛(load system : terminal unit)으로 크게 이루어져 있다. 냉방시스템에서 복사냉방 시스템이라 함은, 일반적으로 터미널유닛을 구성함에 있어서 그림 2와 같이 천장패널이나 모세관 튜브, 콘크리트 구조체 등을 이용하는 것을 말한다.

천장패널을 이용하는 방식(suspended ceiling panel system)은 가장 널리 알려져 있는 방식으로, 알루미늄 패널에 인접한 금속관으로 냉수를 순환시켜 냉방하는 방식이다. 열전도율이 좋은 재료를 사용하면, 실부하의 변화에 빠르게 대응할 수 있는 시스템을 만들 수

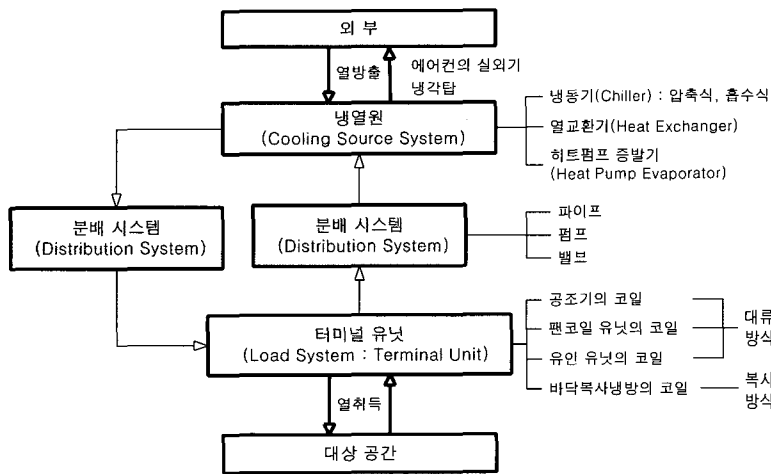


있다. 모세관 튜브를 이용하는 방식(capillary tube system)은 냉수관의 간격을 조밀하게 하여 석고나 집성보드에 매몰하거나 천장면에 부착하여 사용하는 방식으로 플라스틱관의 유연성 때문에 개보수시 사용하기에 적합한 시스템이다. 그리고 콘크리트 구조체를 이용하는 방식(concrete core system)은 바닥난방 시스템과 동시에 사용이 가능한 방식으로, 축열체인 콘크리트에 의한 축열냉방을 한다. 지연효과(time-lag)에 의하여, 실부하의 변화에 빠르게 대응하기 위한 제어기가 어렵다는 단점이 있으나, 냉방과 난방을 동시에 적용할 수 있다.

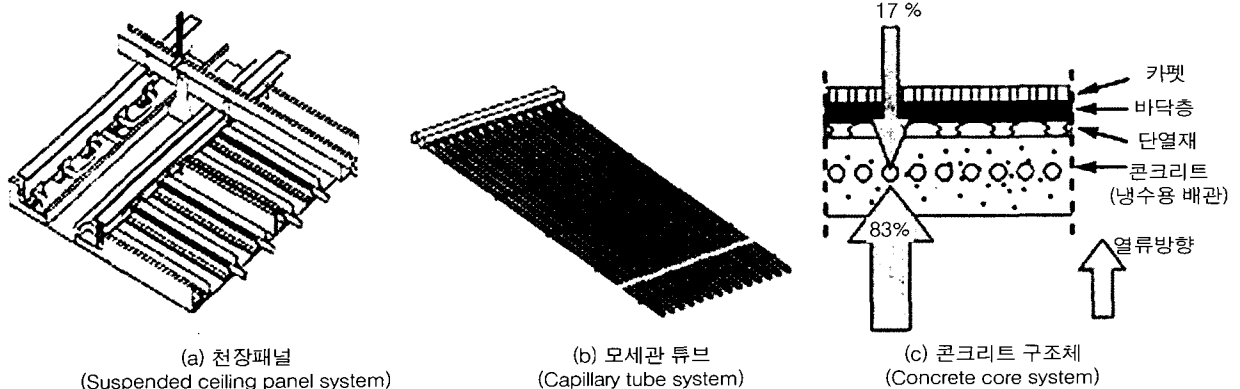
현재 유럽에서 가장 많이 이용되는 방식은 천장에 냉

방패널을 부착하는 방식<sup>1)</sup>으로, 이 경우 냉방능력을 제한하는 요소로는 결로와 수직온도분포의 불균일로 인한 불쾌감을 들 수 있다. 일반적으로 복사냉방은 전공기방식에 비하여 드래프트(draft)로 인한 불쾌감을 줄일 수 있으나, 복사냉방 방식 중 천정 패널방식의 경우에는 냉방부하가 100W/m<sup>2</sup> 이상이면 드래프트 발생의 위험이 있다.<sup>2)</sup>

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 바닥복사냉방을 하는 건물이 많아짐에 따라, 바닥복사냉방에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 같이 바닥구조체의 배관에 냉수를 순환시키려는 시도는 이미 50년 전부터 행해져 왔으나,<sup>3)</sup> 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 제어하는 것이다.



[그림 1] 냉방 시스템의 구성



[그림 2] 복사냉방 시스템의 유형



### 바닥복사냉방 시스템의 설계인자

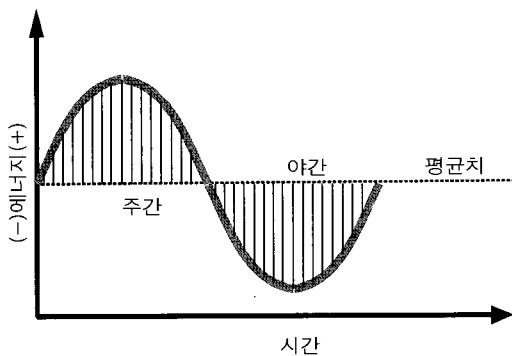
바닥복사냉방 시스템에서 바닥구조체가 대상공간의 현열을 제거하며, 바닥을 둘러싼 벽체의 온도가 모두 같다고 가정하면, 실에서 발생하는 현열부하는 외기온이나 일사량과 같은 외기조건, 벽체의 열관류율이나 건물의 기밀도와 같은 건물구조체 특성, 그리고 내부 인체, 조명, 기기 발열의 함수로 나타나고, 바닥구조체가 제거할 수 있는 열량은 표면의 열전달계수와 바닥의 면적, 실온과 바닥표면의 온도 차이에 의해 결정된다. 이러한 바닥복사냉방 시스템의 설계인자를 기후적, 건축적, 설비적 인자로 나누어 고려하면, 표 1과 같다. 즉, 건물은 놓이는 장소의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

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

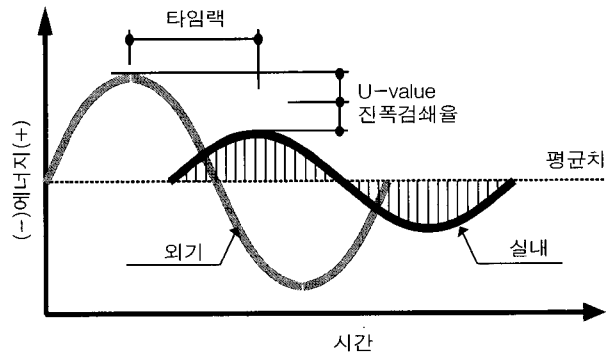
설계단계에서 가장 먼저 고려해야 할 요소로서 주거 건물의 외피를 들 수 있다. 대부분의 주거 건물의 외피는 콘크리트와 같은 축열성능을 가지는 재료로 구성되어 있다. 축열성능은 열류지연효과, 즉 타임랙과 진폭감쇄율로 나타나며, 전체 전열량에는 변화를 주지 않지만 구조체의 상태를 동적으로 지연시켜 실내 공간에서 시간에 따른 온도감각을 지속시킬 수 있는 특징이 있다. 이러한 구조체의 축열효과는 그림 3과 같다. 하루동안 외기의 온도사이클을 (a)라고 할 때, 구조체가 가지는 열전달에 대한 저항성, 축열성 및 확산성이 없다면 내부표면의 온도사이클은 외기온과 같아질 것이다. 그러나 대부분의 구조체는 외부 열환경 조건의 영향이 실내로 전달되는 시간을 지연시키고, 그 진폭을 감소시키는 현상을 초래한다. 일반적으로 주거건물에서는 구조체로 사용되는 콘크리트의 두께는 대부분 유사하므로, 축열성능은 비슷할 것이다. 그러므로 건물의 외피가 가지는 열관류율에 따라 외부의 열환경조건이 실내에 미치는 영향이 달라진다. 외피의 열관류율이 낮아지면 외부의 열환경 조건이 실내에 미치는 영향이 줄어들게 되므로 실내설정 온도를 만족시키기 위해 시스템이 제거하거나 공급해야 할 열량이 줄어들게 된다. 따라서 전체 시스템에

<표 1> 복사냉방 시스템의 설계인자

		설계인자			
		기후적 인자	건축적 인자	설비적 인자	
부하 요소	열관류율(K) 일사(I)	○	○		벽체구성, 창문 면적비, 외기조건
	외기온( $T_{out}$ )	○			외기온도
	침기( $q_{int}$ )	○	○		
설계 요소	인체, 조명, 기기발열 ( $q_{so}$ , $q_{ls}$ , $q_{so}$ )			○	발열밀도 발열 스케줄
	바닥면적(A)		○		유효방열면적
	설정실온(T)			○	
	바닥표면온( $T_s$ )		○	○	

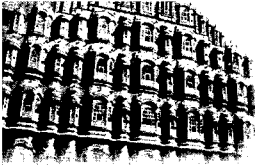


(a) 일일 외기온도 사이클



(b) 일일 실내 온도 사이클

[그림 3] 구조체의 열저항과 열용량이 미치는 영향



사용되는 에너지를 줄일 수 있다.

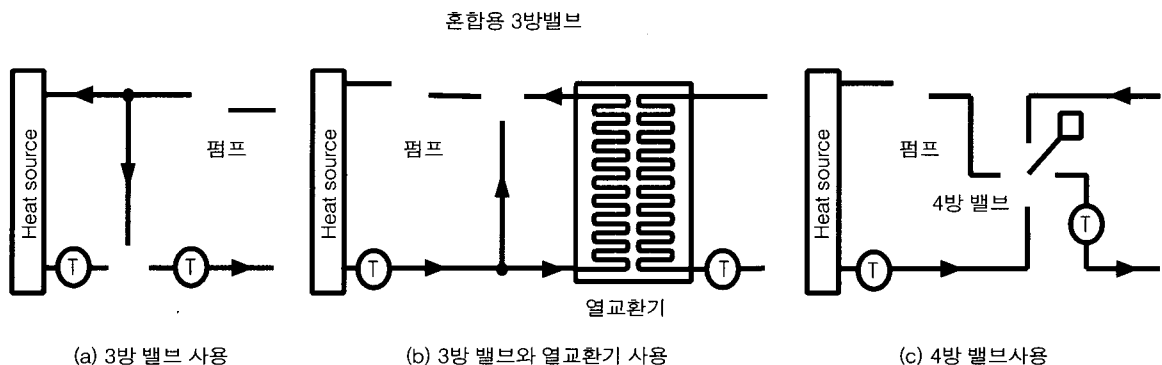
두 번째로는 실제 방열량이나 쾌적 등의 열적 성능과 직접적인 관계를 갖는 바닥구조체에 대한 고려가 필요하다. 바닥복사냉방 시스템은 축열성능을 갖는 바닥구조체를 사용하므로 실내부하의 변동에 따라 냉수를 공급하더라도 바닥구조체의 축냉과정을 거쳐 실내에 영향을 미친다. 바닥구조체의 배관 간격과 축열층의 두께, 배관매설위치, 배관에 흐르는 유량에 따라 바닥구조체가 가지는 성능이 달라질 수 있다. 그러므로 시스템이 최적의 성능을 유지하기 위해서는 바닥구조체에 공급된 열이 실 공간에 효과적으로 전달될 수 있도록 적합하게 구성되어야 한다. 또한 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 냉방능력을 비교, 검토할 필요가 있다.

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 냉수공급에 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 구성을 좀 더 자세히 살펴보면 그림 4와 같다. (a)는 3방 밸브를 사용하여 배관을 구성한 것으로 바닥구조체로 공급되는 냉수유량을 일정하게 유지하기 위해서는 혼합용(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.

### 바닥복사냉방의 적용

바닥복사냉방을 적용하기 위한 공급 냉수온도를 결정하고, 적용 시 바닥표면온도와 각 부위 표면온도 분포, 실온의 수직분포 관점에서의 쾌적을 분석하기 위해 모델공간에서 실험을 진행하였다. 외기온에 따



[그림 4] 외기보상 제어를 위한 분배 시스템 구성

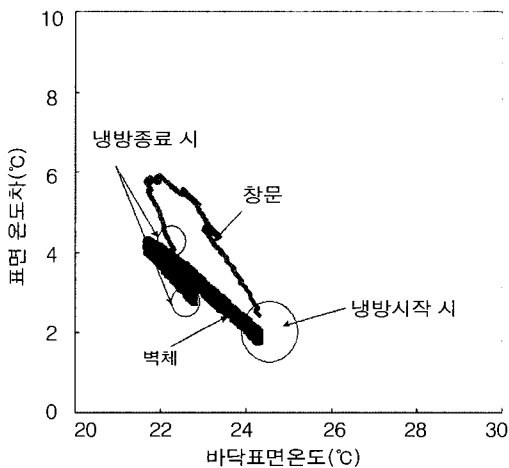


라 공급 냉수온도를 조절한 결과, 서울지역 냉방설계 외기온(31.1 °C)에서 약 15 °C의 냉수온도가 요구됨을 알 수 있었다. 그리고 설정실온(26 °C)에서 제어 편차(±1 °C) 내로 유지하면서 바닥표면온도가 20 °C 이상으로 최저 바닥온도기준(ASHRAE 1992<sup>4)</sup>, ISO 1984<sup>5)</sup>, 국내실험<sup>6)</sup>)에 비교하여 높게 나타났다. 모델공간의 각 벽체와 바닥과의 표면온도차도 그림 5의 (a)와 같이 10 °C 이하로 국부적 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 실온의 수직분포에 있어서도 (b)에서와 같이 최대 1.9 °C, 평균 1.3 °C로 나타나 앉은 사람의 발목(0.1 m)과 머리(1.1 m)의 온도차를 3 °C 이하로 권장하는 쾌적범위에 속하면서 냉방이 이루어졌다. 또한 전체 냉방시간동안 수직온도분포가 변화하는 중에도 1.1 m 높이의 최대온도 25.8 °C와 0.1 m 높이의 최소온도 23.5 °C 사이의 온도차도 2.3 °C 정도만 발생하였다. 이는 바닥에 차가운 공기가 정체되더라도 쾌적범위를 벗어나지 않으며, 바닥복사냉방만으로 충분히 냉방이 이루어질 수 있음을 나타낸다. 또한 냉방이 이루어지는 시간 내내 수직온도분포는 3 °C의 온도차를 벗어나지 않는 것으로 나타나 하루 중일 불쾌적은 발생하지 않을 것으로 예상되었다. 최상층부에서 온도가 상승하면서 전체적으로 S자형의 모양을 한 것은 모델공간의 천장이 외기의 영향을 받았기 때문으로 실제 공동주

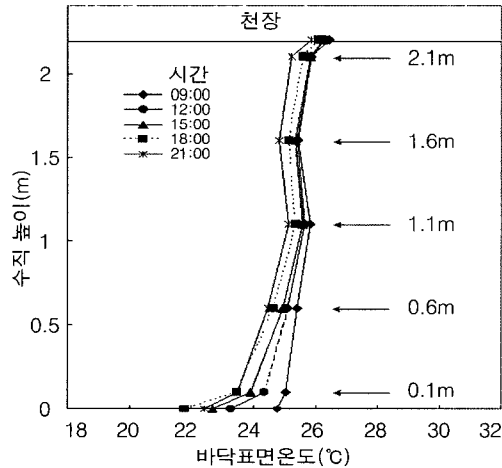
택의 최상층에서는 이러한 현상이 발생할 수 있으며, 중간층일 경우 온도차이는 줄어들 수 있을 것이다.

### 바닥표면의 결로방지를 위한 제어방안

바닥복사냉방 시스템을 결로발생없이 운전하기 위해서는 제습시스템이 도입되어야 한다. 표면의 결로는 수증기가 공기 중의 노점온도보다 낮은 온도를 갖는 표면과 접촉한 경우에 발생하는 것으로, 바닥복사냉방에서는 냉방에 의해 낮아진 바닥표면온도와 실노점온도의 변화에 의해 표면결로가 발생하게 된다. 그러므로 실노점온도가 바닥표면온도보다 계속해서 낮게 유지되기 위해서는 제습시스템의 제습량을 제어할 필요가 있다. 제습시스템은 일반적으로 실내공기를 제습기의 냉각코일을 통과시켜, 냉각코일의 차가운 표면에서 공기 중의 수증기를 응축시킴으로써 제습하기 때문에 냉각코일 냉수의 유량과 온도, 냉각코일을 통과하는 공기의 양을 제어함으로써 제습량을 제어할 수 있다. 즉 냉각코일에서 수증기로 응축되는 양은 일차적으로 냉각코일 설계시 효율에 의해 좌우되지만, 동일한 효율을 가진 제습시스템에 대해 제습량을 조절하는 것은 냉각코일에 흐르는 냉수의 유량과 온도를 변화시키거나, 냉각코일을 통과하는 송풍량을 변화시킴으로써 가능하게 된다.

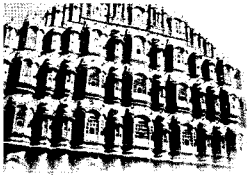


(a) 바닥표면온도와 각부 표면온도 차이



(b) 실온의 수직 분포

[그림 5] 바닥복사냉방 적용시 온도분포



냉각코일의 냉수유량 조절방법은 일반 공조의 냉방에서 가장 많이 사용되는 방법으로, 냉수 제어밸브를 비례제어함으로써 냉매인 냉수의 유량을 조절하여 냉각코일의 제습량을 조절하는 방법이다. 이 때 풍량을 최대 제습량을 기준으로 일정하게 공급하게 된다.

냉각코일의 냉수온도 조절방법은 냉방부하가 커서 바닥표면온도가 낮아지고, 실내 노점온도를 그보다 낮추기 위해서 제습량을 늘려야 할 경우, 냉수온도를 비례적으로 낮추며, 반대로 냉방부하가 적어 바닥표면온도가 높아지고, 이에 따라 실내 노점온도를 높게 유지할 수 있어 제습량을 감소시키고자 할 경우, 냉수온도를 비례적으로 높이는 제어방법이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 제습량이 0인 경우에서부터 최대일 경우까지 필요한 냉수온도를 변화시켜야 한다. 제습량이 0이 되려면 냉수온도가 공기 노점온도보다 같거나 높아야 되는데, 이 온도는 대략 24℃가 된다.

냉각코일을 통과하는 풍량조절방법은 변풍량방식의 일종으로 냉각코일의 냉수유량과 온도를 일정하게 하면서 냉각 코일을 통과하는 풍량을 조절함으로써 제습량을 조절한다. 냉각코일의 냉수유량과 냉수온도는 최대제습량에 대한 조건으로 설정되며, 실내 노점온도가 설정 노점온도와와의 차이에 따라 냉각코일을 통과하는 풍량을 결정하여 제습시스템이 운전되게 된다.

### 실용화를 위한 추후 연구방향

바닥복사냉방 시스템은 제습시스템과 통합되어 결로가 발생하지 않으면서 충분한 열성능을 확보하며 실

제 적용가능성이 있을 것이다. 이러한 시스템에 대한 연구는 현재 유럽의 여러 나라와 미국, 일본 등지에서 활발하게 진행되고 있으며, 추후 전체 시스템의 구성 및 에너지 소비, 이에 따른 경제성을 비교하는 연구와 제습시스템의 급기와 환기에 따른 실내 공기 유동에 대한 연구, 쾌적과 결로 및 시스템 제어에 대한 현장 실험 연구가 진행된다면 주택 냉방시스템의 하나의 대안으로서 자리매김할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. Corina Stetiu, Radiant cooling in U.S. office buildings, Berkeley Ph.D. Thesis, 1998. p.24.
2. Martin Behne, Is there a risk of draft in rooms with cooled ceilings?, ASHRAE Transactions, 1995, p.744.
3. Jean-Paul Isoardi, Surface cooling in hospitals : Use of computer-aided design packages, ASHRAE Transactions, 1995, p.717.
4. ASHRAE 1992 ASHRAE, 1992, ASHRAE Standard 55-1992 : Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE.
5. ISO, 1984, International Standard 7730.
6. 송국섭, 전봉구, 이현우, 2000, "콘크리트 바닥과 나무 바닥의 좌식 생활 자세별 온열감 비교 연구", 대한건축학회 논문집, 제16권 제2호, pp.105~114. 