

# 온돌을 이용한 바닥복사냉방의 제어성능에 관한 실험적 연구

김 용 이, 임 재 한, 여 명 석\*, 김 광 우\*\*

서울대학교 대학원 건축학과, \*서울대학교 건축학과

## An Experimental Study on Control Performance of Radiant Floor Cooling Using Ondol

Yong-Yee Kim, Jae-Han Lim, Myoung-Souk Yeo\*, 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 October 9, 2001; revision received October 18, 2001)

**ABSTRACT:** The objectives of this study are to analyze the application of radiant floor cooling and to evaluate the control methods through experiments when the radiant heating system is used for cooling. Through the experiment 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 cooling curve(reset ratio) is found for radiant cooling, which shows the relation between outside air temperature and supply water temperature. Comparison of cooling methods shows 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(복사냉방시스템), On/off control(개폐식 제어), Variable flow control(변유량 제어), Outdoor reset with indoor temperature feedback control(외기보상 실온 피드백 제어)

### 1. 서 론

지금까지 공동주택의 냉방시스템은 온돌을 이용한 난방시스템과는 별도로 단위세대별 패키지 에어컨이 주로 사용되어 왔지만, 최근 냉방수요가 급증함에 따라 온돌을 이용한 바닥복사냉방방식이 대안으로 제시되고 있으며,<sup>(1)</sup> 적용 가능성에 대한 연구<sup>(2,3)</sup>가 진행되고 있다. 그러나, 바닥복사냉방의 개념정립과 시뮬레이션에 의한 검토 및 비교는 이론적인 접근으로서, 실제 건물에 대한

바닥복사냉방의 적용성과 이에 따른 제어성능에 대한 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 바닥복사냉방을 적용한 실험을 실시하여 바닥복사냉방을 위한 냉방조건을 검토하고, 바닥복사냉방시 실내 환경의 분석을 통하여 바닥복사냉방 적용시의 고려사항을 평가하며, 또한 바닥복사냉방을 위한 제어방식의 성능을 비교하였다.

### 2. 바닥복사냉방 실험모델 및 장치

#### 2.1 실험모델

바닥복사냉방의 적용과 제어를 위한 모델은 현

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7065; fax: +82-2-871-5518

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

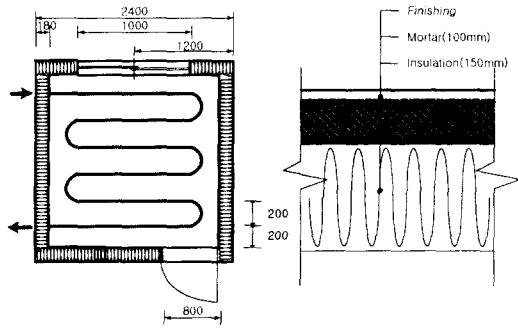


Fig. 1 Plan of test cell and section of floor.

제 국내 공동주택의 가장 일반적인 32평형 공동주택의 기준층 중간세대 안방을 기준으로 단위면적당 부하가 동일하도록 외피의 열관류율, 창문의 크기, 치기, 일사유입 등을 산정하여 4개의 단위실험공간(test cell)을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 바닥구조체에 있어서도 기존의 공동주택에 적용된 바닥복사난방시스템과 동일하도록 Fig. 1과 같이 설치하였다.

2.2 실험장치

기존의 온수온도를 이용하여 바닥복사냉방을 적용할 수 있도록 냉열원설비와 냉수순환장치를 설치하고, 바닥복사냉방의 제어성능을 비교할 수 있도록 개폐식 제어, 변유량 제어, 외기보상실온 피드백 제어에 대한 측정장치와 제어장치를 설치하였다.

2.2.1 냉열원설비와 냉수순환장치

연속적인 냉방제어의 비교를 위하여 Fig. 2와 같이 냉수를 필요한 일정한 온도로 공급할 수 있도록 빙축열조를 사용하였으며, 바닥냉방에 필요한 공급냉수온도를 공급하기 위하여 판형 열교환기를 설치하여 축열조의 냉수보다 높은 온도의 냉수공급이 가능하도록 하였다. 또한, 열교환기에서 공급되는 냉수는 3방밸브 혹은 2방밸브를 통하여 온도나 유량이 조절되어 순환할 수 있도록 하였다.

2.2.2 측정 및 제어장치

바닥복사냉방에 의한 실내 환경을 측정하기 위하여 부위별 바닥 표면온도와 높이별 실내 온도 그리고 벽체 및 창문의 표면온도, 외기온도 및 습도, 공급냉수온도 및 환수온도를 측정하였다.

바닥복사냉방시 제어방식에 따라 운전할 수 있도록 센서와 밸브의 인터페이스용 입출력 보드를 컴퓨터와 연동하여 제어할 수 있도록 하였으며, 제어 알고리즘은 자체 제작한 프로그램을 이용하

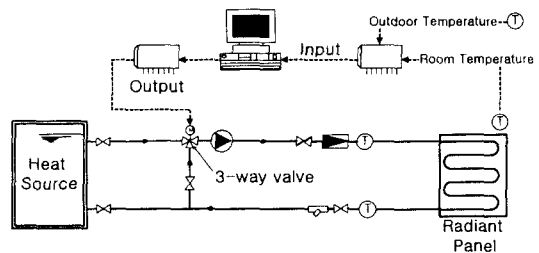


Fig. 3 Schematic diagram of water temperature control.

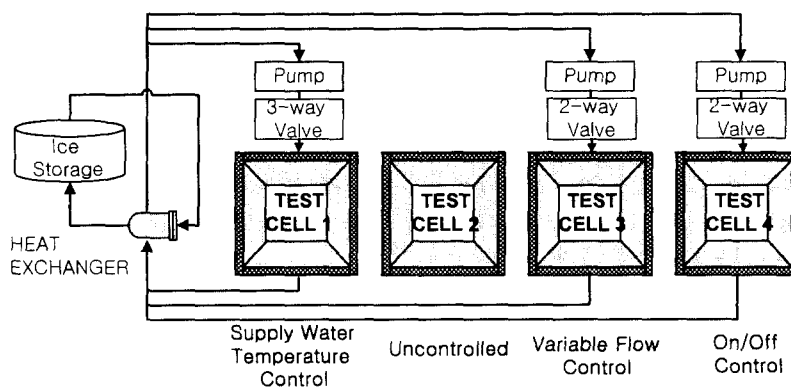


Fig. 2 Diagram of piping system and controls.

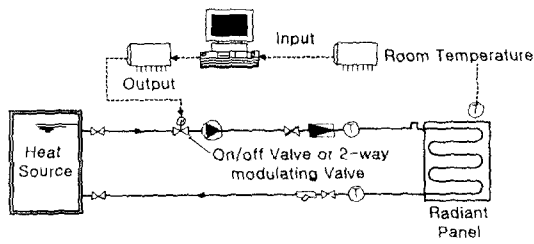


Fig. 4 Schematic diagram of water flow control.

여 Fig. 3, 4와 같이 공급냉수의 온도 및 유량제어가 가능하도록 제어시스템을 구성하였다. 또한, 제어성능 비교를 위해 내부 발열체를 설치하여 실내 발열을 발생시켰다.

### 3. 실험내용 및 방법

#### 3.1 실험의 개요

외기온의 변화에 의해 냉방부하가 달라지기 때문에 바닥복사냉방을 적용하기 위한 냉방조건인 공급냉수의 온도를 결정하기 위해, 외기온도와 냉수온도의 관계를 나타내는 외기보상률을 구하여 공급냉수온도를 결정하였다. 결정된 공급냉수온도를 기준으로 유량제어와 온도제어를 실시하여 제어성능을 비교하였다.

Fig. 5는 실험의 개요를 나타낸 것이다. 외기보상결정실험에서는 외기보상률을 구하면서 냉방과 정에서의 실내 환경을 쾌적과 결로의 관점에서 분석하여 바닥복사냉방의 적용성에 대하여 평가하였다. 제어성능실험에서는 국내에서 난방방식

으로 가장 많이 적용되는 개폐식(on/off) 제어를 비롯하여 변유량 제어, 그리고 실내외 부하에 따라 냉수온도를 변화시키는 외기보상실은 피드백 제어를 설정온도 유지와 결로의 관점에서 비교하였다.

#### 3.2 실험조건

외기보상결정실험은 외기보상 실은 피드백 제어를 실시하여 외기보상제어뿐 아니라 공급유량 제어를 적용할 경우 외기온에 따른 공급냉수온도를 결정하기 위해서, 일사와 내부 발열이 없는 조건에서 1차적으로 외기온-공급냉수온도의 관계를 결정하고, 2차적으로 일사와 내부 발열을 주었을 경우의 변동률을 적용하여 외기온-공급냉수온도의 관계를 구하였다. 이를 위해 우선 외기보상제어를 위한 외기보상률(reset ratio)은 내 개의 셀을 활용한 반복적인 실험을 통해 찾았으며, 이 값을 1개의 공간에 적용하여 외기보상결정실험을 실시하였다.

제어성능실험은 각 제어방식별로 제어성능을 비교하기 위해, 일사를 유입시키고 내부 발열체를 스케줄에 따라 운전시켜 각 셀별로 개폐식 제어, 변유량 제어, 외기보상 실은 피드백 제어를 적용하였다. 내부 발열체의 스케줄은 Fig. 6과 같이, 24시간 지속적으로 내부 발열이 있으면서 오전, 오후 각각 1회씩 내부 발열량을 증가시킴으로 내부 발열 부하의 변화에 따른 제어방식별 실온유지 성능을 비교하였다.

공급냉수 유량은 기존 바닥복사난방시스템의 난방부하에 필요한 유량을 냉방시에도 그대로 적용

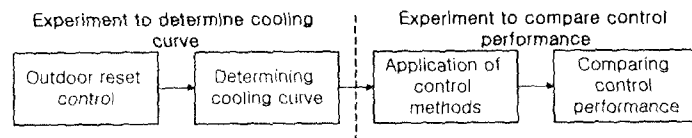


Fig. 5 Outline of experiments.

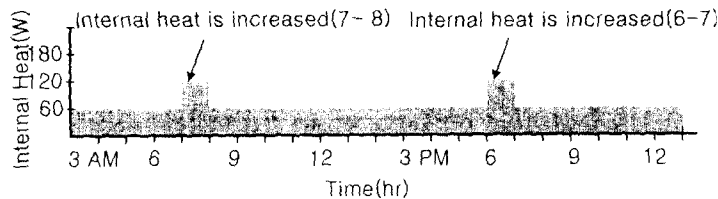


Fig. 6 Schedule of internal heat gain.

할 수 있도록, 실제 대상 공동주택의 설계유량과 비교하여 1.2 lpm으로 결정하였다. 그리고, 셀 내 설정온도는 건축물의 에너지 절약 설계기준인 26℃로 하였으며, 측정 높이는 일반적으로 실온조절기가 위치하는 1.1 m 높이를 기준으로 하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 외기보상결정실험의 결과분석

외기보상결정실험에서는 외기온-공급냉수온도의 관계를 통하여 공급냉수온도를 결정하며, 외기온-바닥 표면온도, 바닥 표면온도-표면온도 편차의 관계와 바닥 표면의 불균등 복사와 실온의 수직

분포를 통하여 실의 쾌적을 분석하였다.

건물에 따라 부하조건이 다르고 그에 적합하게 외기보상률을 조정하여 외기온도-공급냉수온도의 관계(외기보상률)를 Fig. 7(a)와 같이 구하였다. 여기서 서울지역 냉방설계 외기온도 31.1℃에 대한 공급냉수온도는 15℃로, 시뮬레이션을 통한 기존연구<sup>(2)</sup>에서 제시한 냉수온도 17℃보다는 낮게 나타나 실제 적용시 외기보상률에 의한 냉수온도를 운전전에 정확히 설정하는 것이 필요하다. 또한, Fig. 7(b)는 제어기에 입력된 외기보상률에 따라 실제 패널에 공급된 냉수온도를 측정된 결과로서, 외기온도와 냉수온도가 반비례관계에 있지만 열교환기와 3방밸브를 거치는 복잡한 제어 과정 속에서 발생한 오차에 의하여 선형적인 관

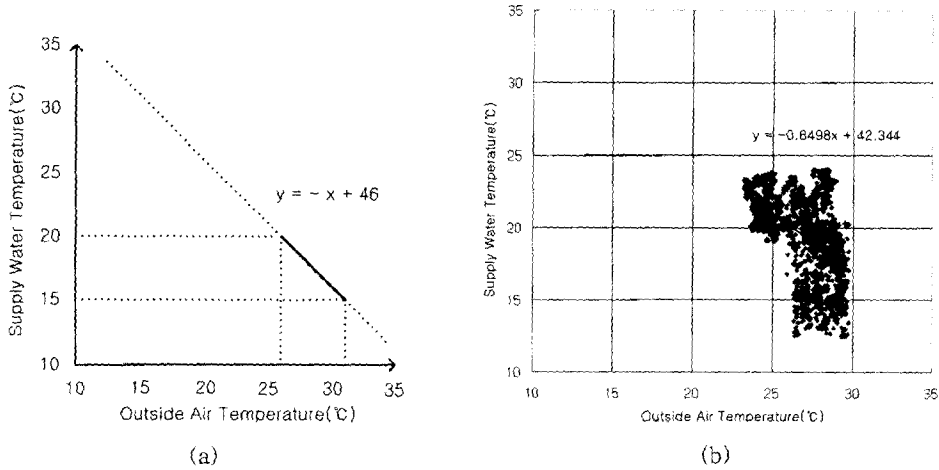


Fig. 7 Relation between outside air temperature and supply water temperature.

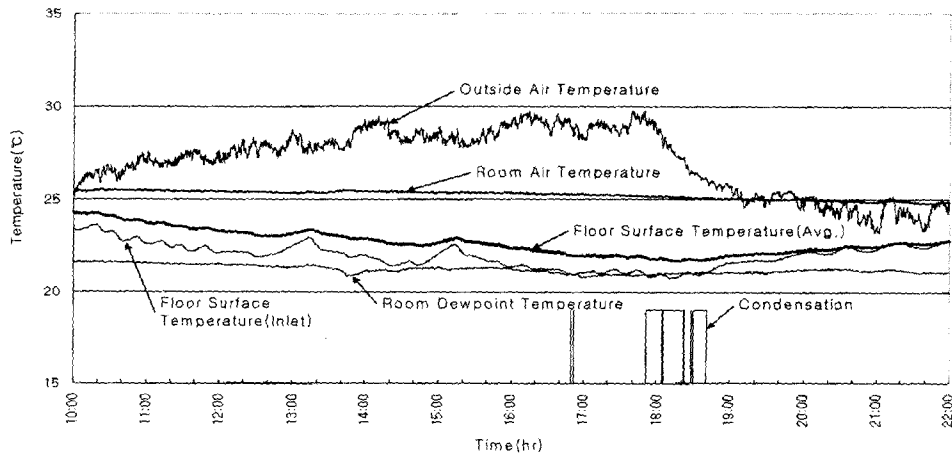


Fig. 8 Profiles of room conditions by radiant cooling.

계로 표현되지 않았다. 그리고, 건물구조체의 축열에 의하여 외기온과 실내 발열의 영향에 대하여 냉수공급이 늦게 대응할 수 있어 외기온이 최고일 때 냉수온도가 최저가 아닌 경우가 발생하였다.

바닥복사냉방에 의한 실내 환경의 변화는 Fig. 8과 같이 나타났다. 외기온이 7°C 정도 변화하는 동안 실온이 설정온도를 중심으로 1°C 내외로 유지하는 것을 볼 수 있다. 냉방 중 일부 시간에 냉수가 처음 실에 공급되는 부분에 결로가 냉수

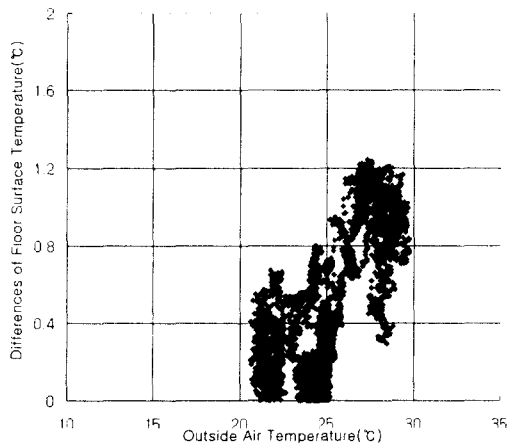


Fig. 9 Difference between average floor surface temperature and floor surface temperature above the supply pipe.

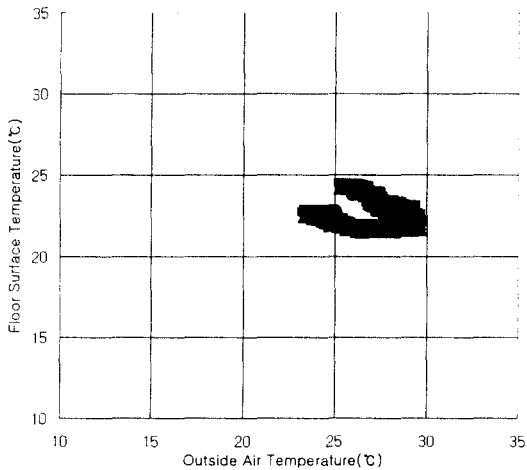


Fig. 10 Relation between outside air temperature and floor surface temperature.

배관 인입부의 직상부에서 발생하였으며, 이 지점의 온도가 바닥 표면온도의 평균보다 1~2°C 낮게 나타났다. 또한 Fig. 9에서와 같이 외기온도가 증가함에 따라 그 차는 커지는 것으로 나타나지만 최고 외기온에 대하여서도 2°C 이내이므로, 바닥복사냉방을 실제 적용시 결로를 방지하기 위해서는 배관 인입부 직상부의 온도를 고려하여 1~2°C 정도의 안전율이 필요할 것으로 판단된다.

바닥복사냉방이 적용된 단위실험공간의 쾌적을 바닥온도와 그 분포 측면에서 보면, 설정 실온을 유지하기 위한 바닥온도가 Fig. 10과 같이 외기온이 증가함에 따라 낮아지는 반비례관계를 보이면서, 바닥의 축열에 의해서 선형에 가까운 타원형의 모습을 나타냈다. 그러나, 바닥온도가 설계 외기온 31.1°C인 경우 및 최저바닥온도에 대해서도 20°C 이상으로 분포되어 최저바닥온도 기준 (ASHRAE 1992,<sup>(4)</sup> ISO 1984,<sup>(5)</sup> 국내 쾌적실험<sup>(6)</sup>)에 비교하여 높게 나타났다. 복사냉방이 이루어지는 공간의 각 벽체와 바닥과의 표면온도차도 Fig. 11과 같이 10°C 이하<sup>(7)</sup>로 나타났다. 따라서, 바닥복사냉방 적용시 바닥온도와 주벽의 온도에 의한 불쾌적이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

실온을 설정온도로 유지하는 과정의 수직온도 분포에 있어서도, Fig. 12와 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 추천하는 쾌적

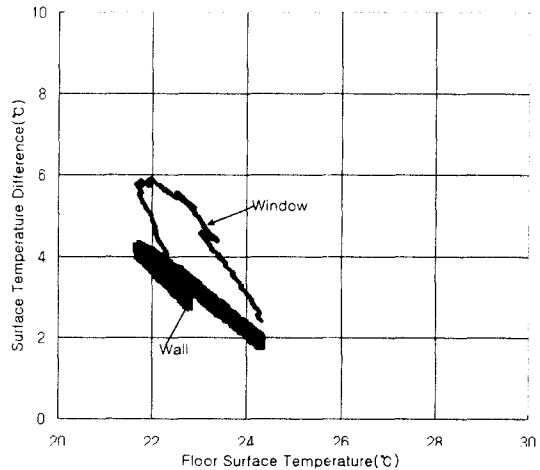


Fig. 11 Differences between floor surface temperature and wall surface temperature.

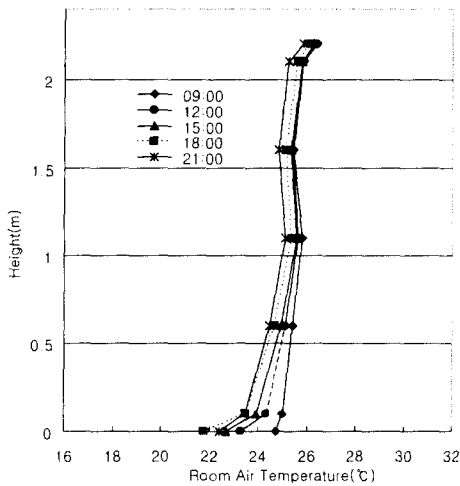


Fig. 12 Profiles of vertical air temperature.

범위(ASHRAE 1992, ISO 1984)에 속하면서 바닥 복사냉방이 이루어졌다.

4.2 제어성능실험의 결과분석

제어성능실험에서는 개폐식 제어, 변유량 제어, 외기보상 실온 피드백 제어에 대하여 부하변동에 대한 설정실온 유지와 바닥 표면온도의 변화에 의한 결로발생을 비교하였다. 또한 각 제어방식 별로 외기보상 실온 피드백 제어의 경우 공급되

는 냉수의 온도를, 개폐식 제어의 경우 on/off 시간을, 변유량 제어의 경우 공급되는 유량을 분석하여 바닥복사냉방에 적용시 고려사항을 검토하였다.

4.2.1 제어성능 비교

냉방시 갑작스런 부하변동이 발생할 때의 설정실온 유지 및 안전성과 결로발생에 대하여 분석한 결과 Table 1과 같이 나타났다. 개폐식 제어와 외기보상 실온 피드백 제어는 평균이나 표준편차에 있어서 설정온도를 잘 유지하는 것으로 나타났다. 그러나, 변유량 제어의 경우 설정실온에 대한 절대오차의 평균(mean absolute error, MAE)가 아닌 평균 실온에 대한 절대오차의 평균을 보면 개폐식 제어나 외기보상 실온 피드백 제어와 거의 동일한 제어편차를 두고 운전되는 것을 보여준다. 이는 변유량 제어를 위해 설정한 계수들, 비례계수, 적분계수, 미분계수에 대한 설정이 정확하지 않아 설정온도에 대해서 오프셋(offset)이 발생한 것으로 판단되며, 적용시 계수설정 에 대한 주의가 필요하다.

내부발열의 증가에 대한 반응에 있어서 순차적으로 유량과 온도를 변화시키는 변유량 제어와 외기보상 실온 피드백 제어보다는 바로 냉수를 공급하는 개폐식 제어가 상대적으로 빠르게 대응

Table 1 Comparison of on/off bang-bang control, variable flow control, and outdoor reset with indoor temperature feedback control

Control		On/off	Variable flow	Outdoor reset with indoor temperature feedback
Room Temp. (°C)	Avg.	25.64	24.19	26.09
	STDEV	0.60	0.71	0.77
	Max.	26.82	25.90	27.77
	Min.	24.72	22.67	24.66
Floor Surface Temp. (°C)	Avg.	22.73	20.83	22.92
	STDEV	1.18	0.37	0.95
	Max.	25.28	21.73	24.52
	Min.	20.01	19.89	20.93
MAE (Room Temp.-Setpoint)	Avg.	0.61	1.81	0.65
	Internal heat	0.34	1.33	0.86
	Non-heat	0.64	1.86	0.63
MAE (Room Temp.-Average)	Average	0.53	0.57	0.65
	Internal heat	0.50	0.64	0.82
	Non-heat	0.53	0.56	0.64
Condensation (hour : minute)		12 : 32	1 : 10	0 : 00

하여 절대평균 오차값이 적게 나왔다. 그러나, 기존의 연구<sup>(2)</sup>에서와 같이 그 차이는 측정장치의 오차범위에 포함될 수 있을 만큼 미소하였다.

결로발생에 있어서는 제어방식간의 차이가 많이 발생하였으며, 결로발생시간이 최고 12시간에서 발생하지도 않는 제어가 있었다. 개폐식 제어는 최대부하에 대한 최저온냉수의 공급 여부가 부하발생에 따라 결정되기 때문에 냉수입구의 바닥 표면에서 차가운 냉수에 의한 결로가 발생하는 것으로 판단된다. 변유량 제어에서도 공급냉수의 유량을 부하에 따라 변동시키는 것으로 최

대부하시의 차가운 냉수가 공급되기 때문에 결로가 발생하였다(Fig. 13). 그러나 개폐식 제어보다는 그 유량이 단계적으로 변동하기 때문에 냉수입구의 바닥 표면이 급격히 차가워지지 않아서 개폐식 제어보다 상당히 결로발생시간이 감소되었다(Fig. 14). 외기보상 실온 피드백 제어에서는 결로가 전혀 발생하지 않는 것으로 나타나(Fig. 15), 결로의 문제는 표면온도에 좌우되는 문제로서 부하변동에 따라 공급냉수의 온도를 단계적으로 변화시키는 것이 고정된 냉수온도로 유량을 변화시키는 것보다 유리한 것으로 판단된다.

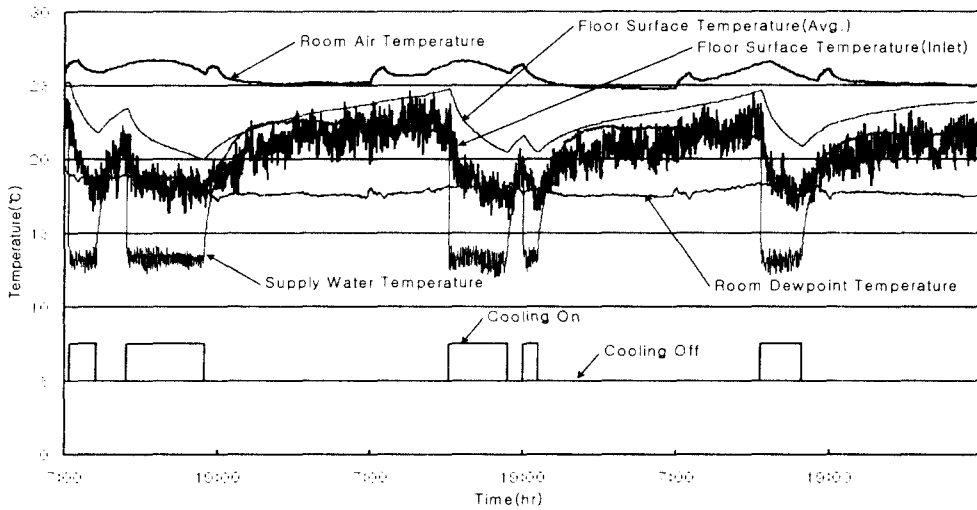


Fig. 13 Profiles of temperatures and flow for on/off control.

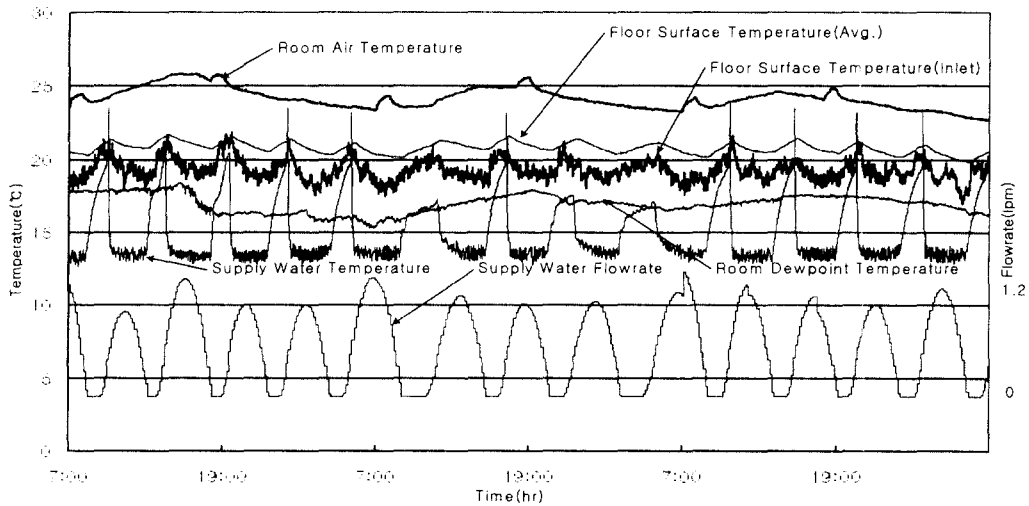


Fig. 14 Profiles of temperatures and flowrate for variable flow control.

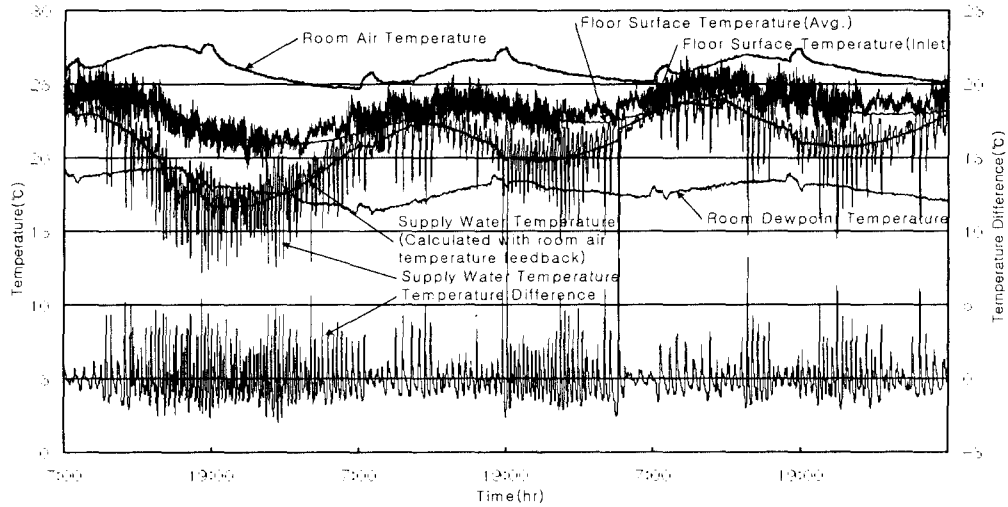


Fig. 15 Profiles of temperatures for outdoor reset with indoor temperature feedback control.

#### 4.2.2 개폐식 제어

개폐식 제어의 경우는 Fig. 13에서와 같이, 외기보상 실온 피드백 제어에 비해 초기부터 실온이 안정화된 조건으로 유지되고 있음을 알 수 있는데, 이는 3방 밸브보다 슬래노이드 밸브가 시스템 구성과 제어가 간단하여, 실제 적용에 있어서 실온제어가 쉽게 이루어질 수 있었기 때문이다. 그러나, 평균 바닥 표면온도나 냉수공급측의 바닥 표면온도 모두가 최대부하에 대한 최저온도로 결정된 공급냉수온도로 인하여 급격하게 냉각됨으로 인해 결로발생을 제어하기에는 불리한 조건을 보임으로써, 실제 냉방에 적용할 경우 결로발생을 제어하기 위해서는 공급냉수의 온도를 단계적으로 변화시키는 외기보상제어와 연결하여 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

#### 4.2.3 변유량 제어

변유량 제어의 경우 Fig. 14와 같이, 실온을 일정하게 유지하기 위해 밸브의 스템(stem)이 큰 폭으로 움직이고 있다. 그리고, 지나친 스템의 움직임으로 인해, 바닥 표면온도의 변화가 실온의 변화와는 상관없이 잦은 주기로 일어나고 있다. 이는 2방 밸브가 밸브 자체와 전체 시스템 간의 압력손실비에 따라서 밸브의 유량곡선이 달라지게 되는데, 실제 실험에 사용된 밸브의 압력손실이 시스템의 압력손실에 비해 작게 나타남으로 인해, 밸브의 유량 특성이 거의 직선특성

(linear type)으로 나타났기 때문으로 판단된다. 따라서, 바닥복사냉방을 위한 제어로 적용할 경우, 설치시 밸브의 유량 특성을 고려하는 것이 필요하다.

#### 4.2.4 외기보상 실온 피드백 제어

외기보상 실온 피드백 제어의 경우, Fig. 15와 같이 초기에는 부하에 대한 반응이 늦어서, 설정 실온을 유지하기 위한 과열, 과냉현상이 발생하지만, 점차 온도변동폭이 줄어들고 있다. 이는 외기보상 실온 피드백 제어에 있어 3방 밸브를 처음 작동할 경우, 온돌 구조체를 축냉하기 위해 낮은 온도의 냉수가 필요하지만, 점차 온돌 구조체가 안정화됨에 따라 공급되는 냉수의 변동폭이 줄어들기 때문으로 판단된다. 그러므로, 초기 기동시 안정화되기까지 시간지연이 발생하겠지만, 연속 냉방을 실시할 경우, 점차 공급냉수온도는 높아질 수 있고, 구조체가 갖는 열관성 때문에 실온이나 바닥 표면온도는 더욱 안정화될 것으로 판단된다.

공급냉수온도의 계산값과 실제 공급된 냉수온도와의 오차는 약  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로서, 이 온도편차가 작을수록 제어의 반응은 더 정확하게 이루어질 수 있지만, 이것은 제어밸브와 공급되는 냉수의 특성에 따라서 달라질 수 있으므로, 시스템의 특성에 맞는 밸브의 선택이 중요하다는 것을 의미한다. 그리고, 열원 및 배관 시스템의 구성이 복잡



할수록 예상한 공급냉수온도와의 차이가 커질 수 있으므로, 밸브를 통한 제어시스템은 열원과 직접 연결되도록 해야 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

**5. 결 론**

본 연구는 온돌을 이용한 바닥복사냉방시스템의 제어성능을 평가하고자 하였으며, 실험결과는 다음과 같다.

(1) 외기온과 공급냉수온도와 관계를 도출하여 공급냉수온도 곡선을 구했으며, 약 15℃ 내외의 냉수공급으로 냉방이 가능하며, 실제 적용시 건물에 따라 온도조정이 필요한 것으로 사료된다.

(2) 바닥복사냉방의 적용시, 실온이 설정실온을 유지하면서도 바닥 표면온도와 분포, 바닥 표면과 벽체 표면의 온도차와 실내 공기의 수직온도 분포가 쾌적범위 내에 위치하는 것으로 나타나 실제 적용시 불쾌적의 문제를 발생하지 않을 것으로 판단된다.

(3) 모델실험을 통해 제어방식별 성능을 비교한 결과, 운전 초기에는 개폐식 제어가 실온을 유지하는 안정성이 좋지만, 시간이 경과함에 따라 외기보상 실온 피드백 제어가 개폐식 제어보다 실온을 더 안정화시키는 것으로 나타났다.

(4) 바닥복사냉방의 적용시 결로의 위험이 존재하며 이를 방지하기 위해서는 고정된 냉수온도에 의한 유량제어보다는 부하변동에 따라 공급냉수의 온도를 변화시키는 온도제어가 유리한 것으로 판단된다.

(5) 따라서 바닥복사냉방 적용시 온도제어를 위해서 열원측에 외기보상제어를, 부하변동에 대한 대응을 위해서는 단위공간에 개폐식 제어를 적용하는 것이 설정실온유지와 결로방지의 관점에서 적정 제어방식인 것으로 판단된다.

**후 기**

본 연구는 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, Seoul National University, Seoul, Korea.
2. Kim, Y. Y. and K.W. Kim, 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, pp. 541-548.
3. Kim, Y. Y., H.L. Yoon, and M.S. Yeo, 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, pp. 532-540.
4. ASHRAE, ASHRAE Standard 55-1992: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 1992.
5. ISO, International Standard 7730, 1984.
6. Song, G.S., B.K. Jeon, and H.W. 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.
7. Olesen, B. W., 1977, Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, ASHRAE Transactions 83(2).
8. Haines, R. W., 1983, Control Systems for Heating, Ventilating and Air Conditioning, Chapman & Hall Inc., pp. 80-88.