

## 온돌 실내공간의 온도제어

### Temperature Control of Ondol Indoor-Space

신찬배,\* 이재원,\*\* 사종엽,\*\* 이상천,\*\* 조성환,\*\*\* 서항석\*\*\*

C.B.Shin, J.W.Lee, J.Y.Sah, S.C.Lee, S.H.Cho, H.S.Suh

**Key words :** Ondol Heating System(온돌난방시스템), On-Off Controller(On-Off제어기), PID Controller(PID제어기), Position Type Fuzzy Controller(위치형 퍼지제어기)

#### Abstract

The heat transfer model of ondol heating system is derived in the linear form. The step responses of On-Off controller, PID controller and Position type fuzzy controllers are compared in the sense of several aspects : variation of temperature feedback variable, variation of supplied heat quantity by the boiler, variation of flow rate, variation of thickness of the base, variation of the outdoor temperature.

#### 1. 서 론

외국의 난방기술은 주로 덕트를 이용하여 더운 공기를 직접 주입하는 방식이거나 라디에이터를 이용하는 방식이다. 이에 반해, 우리 나라의 난방시스템은 외국과는 달리 온수를 이용하여 바닥을 가열하는 바닥복사난방인 온돌시스템을 이용하고 있다. 따라서, 온돌주택의 온도제어에 관련된 기술은 외국기술에 의존할 수 없으며 독자적인 기술개발이 필요한 분야이다.<sup>1)</sup> 온도의 열 성능 향상을 위하여 온돌바닥 구조체의 열적 특성 해석<sup>2)~5)</sup>에 관한 연구는 많이 되어왔으나 에너지를 절약하기 위한 온돌난방시스템의 자동운전방식에 관한 연구는 드물다. 현재 우리 나라의 건물에너지 자동화기술은 외국기술을 도입하여 보급하고 있는 단계이나 도입된

대부분의 기술이 상업용 건물에 적용되고 있다<sup>6)</sup>.

현재의 온돌난방시스템은 주로 간헐난방 방식이다. 따라서, 온수가 공급될 경우에는 바닥온도가 지나치게 가열된다던가, 혹은 실내온도가 지나치게 더워서 창문을 열어놓는 경우가 있다. 반면, 온수가 공급되지 않을 경우에는 실내가 춥게 느껴지는 불편이 있다. 이러한 간헐난방 방식의 단점을 보완하기 위하여 연속난방 방식을 채택할 필요가 있다. 이와 같은 연속난방 방식을 이용하여 실내온도와 바닥온도를 모두 쾌적하게 유지하기 위해서 여러 가지 제어기법이 필요하다. 현재 외국의 난방시스템에서 사용되고 있는 온도 제어방식은 주로 On-Off, PI, PID 또는 최적제어기법이다<sup>7)~10)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하는 On-Off 제어기와 현장에서 정밀온도제어를 위해 최근 많이 사용하는 PID제어기 및 여기서 제시한 퍼지제어기를 온돌주택의 실내온도제어에 적용하여 그 제어특성의 차이점들을 비교하고자 한다. 비교하고자 하는 제어특성들은 향후 실험주택을 통한 실험결과와

\* 영남대학교 기계공학과 대학원

\*\* 영남대학교 기계공학과

\*\*\* 한국에너지기술연구소 건축연구부

비교하기 위한 것들로 다음과 같다.

- 1) 설정온도에 도달하는 시간 및 정상상태 오차
- 2) 피드백 변수로서 실내온도와 바닥온도 중 어느 것이 더 나은지 여부
- 3) 보일러의 용량변화가 제어성능에 미치는 영향
- 4) 유량의 변화나 배관의 노후화와 같은 시스템의 내부변수가 변화하거나 시간간변이 생겼을 경우의 제어성능
- 5) 바닥두께의 변화 같은 축열층의 변화가 제어성능에 미치는 영향
- 6) 외부온도의 변화가 제어성능에 미치는 영향

2. 온돌주택 난방시스템의 모델링

본 연구를 위한 온돌주택 난방시스템의 모델은 한국에너지 기술연구소에서 개별난방의 온도제어 연구를 위하여 설치한 실험주택으로 개략적인 구조는 Fig.1과 같다. 여기서의 구성은 개략적으로 보일러와 온수저장탱크 및 방으로 구성된 시스템을 설정하였다. 그리고 실제 온돌주택 난방시스템에서 일어나는 열 유동 현상을 고려하기 위해서 보일러와 방사이의 연결배관을 고려하였고 방에도 외부와의 열 유동을 고려하기 위해 벽 외에도 창문까지 고려하였다. Fig.1에서의 난방 시스템에 대한 지배방정식은 다음과 같이 각각에 대한 에너지 보존방정식으로부터 구할 수 있다.

1) 저장 탱크에서의 에너지 보존 방정식

보일러로부터 물을 가열시키는데 사용된 열량과 단위시간당 펌프에 의하여 순환되는 물에 의한 열 유동 및 저장탱크 내의 물의 온도변화량을 고려하

면 식(1)과 같다.

$$\rho_{\text{wat}} C_{\text{wat}} V_s \frac{dT_H}{dt} = \dot{Q} - \dot{m} C_{\text{wat}} T_H + \dot{m} C_{\text{wat}} T_C \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{\text{wat}}$ 는 물의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $C_{\text{wat}}$ 는 물의 비열[J/kg K],  $V_s$ 는 저장탱크 내의 물의 체적[m<sup>3</sup>],  $T_H$ 는 보일러에서 공급되는 온수 온도[°C],  $\dot{Q}$ 는 보일러로부터 물을 가열시키는데 사용된 열량[J/s],  $\dot{m}$ 는 펌프에 의하여 순환되는 물의 단위 시간당 질량[l/s],  $T_C$ 는 보일러로 유입되는 냉수의 온도[°C]이다.

2) 배관에 대한 에너지 보존 방정식

$$\rho_{\text{wat}} C_{\text{wat}} V_m \frac{dT_m}{dt} = \dot{m} C_{\text{wat}} T_H - \dot{m} C_{\text{wat}} T_C - h_m A_m (T_m - T_b) - h_p A_p (T_m - T_0) \quad (2)$$

여기서,  $V_m$ 은 배관내 물의 체적[m<sup>3</sup>],  $T_m$ 은 배관내 물의 평균 온도[°C],  $h_m$ 은 바닥배관과 바닥체 사이의 대류 열 전달 계수[W/m<sup>2</sup> K],  $A_m$ 은 바닥 배관과 바닥체 사이의 대류 열 전달 면적[m<sup>2</sup>],  $T_b$ 은 건물 바닥 체의 평균 온도[°C],  $h_p$ 는 연결 배관과 외부공기 사이의 대류 열 전달 계수[W/m<sup>2</sup> K],  $A_p$ 는 연결 배관과 외부 공기 사이의 대류열 전달 면적[m<sup>2</sup>],  $T_0$ 는 건물 외부의 평균 온도[°C]이다.

3) 온돌 바닥에 대한 에너지 보존 방정식

$$\rho_{\text{bot}} C_{\text{bot}} V_b \frac{dT_b}{dt} = h_m A_m (T_m - T_b) - h_b A_b (T_b - T_i) \quad (3)$$

여기서,  $\rho_{\text{bot}}$ 는 건물 바닥 체의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $C_{\text{bot}}$ 는 건물 바닥 체의 비열[J/kg K],  $V_b$ 는 건물 바닥 체의 체적[m<sup>3</sup>],  $h_b$ 는 건물 바닥 체와 실내 공기 사이의 대류 열 전달 계수[W/m<sup>2</sup> K],  $A_b$ 는 건물 바닥체와 실내 공기 사이의 대류 열 전달 면적[m<sup>2</sup>],  $T_i$ 는 실내 공기의 평균 온도[°C]이다.

4) 실내 공기에 대한 에너지 보존 방정식

$$\rho_{\text{air}} C_{\text{air}} V_i \frac{dT_i}{dt} = h_b A_b (T_b - T_i) - h_0 A_0 (T_i - T_0) - h_w A_w (T_i - T_w) + I \quad (4)$$

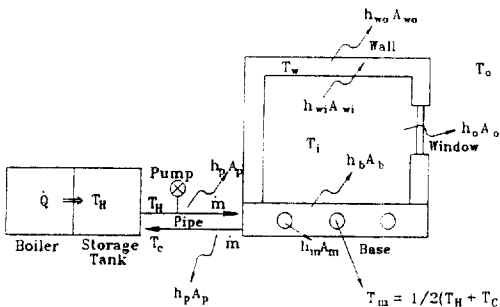


Fig.1 Schematic diagram of Ondol-heating System.

여기서,  $\rho_{air}$ 는 공기의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $C_{air}$ 는 공기의 비열[J/kg K],  $V_i$ 는 실내 공기의 체적[m<sup>3</sup>],  $h_0$ 는 유리창을 통한 실내 공기와 외부 공기 사이의 대류 열 전달 계수[W/m<sup>2</sup> K],  $A_0$ 는 유리창을 통한 실내 공기와 외부 공기 사이의 대류 열 전달 면적[m<sup>2</sup>],  $h_{wi}$ 는 실내 공기와 건물 벽체 사이의 대류 열 전달 계수[W/m<sup>2</sup> K],  $A_{wi}$ 는 실내 공기와 물 벽체 사이의 대류 열 전달 면적[m<sup>2</sup>],  $T_w$ 는 건물 벽체의 평균 온도[°C],  $I$ 는 실내에서 발생하는 열량[J/s]이다.

5) 건물 벽면에 대한 에너지 보존 방정식

$$\rho_{wal}C_{wal}V_w \frac{dT_w}{dt} = h_{wi}A_{wi}(T_i - T_w) - h_{wo}A_{wo}(T_w - T_0) + S_g \quad (5)$$

여기서,  $\rho_{wal}$ 은 건물 벽체의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $C_{wal}$ 은 건물 벽체의 비열[J/kg K],  $V_w$ 는 건물 벽체의 체적[m<sup>3</sup>],  $h_{wo}$ 는 외부 공기와 건물 벽체 사이의 대류 열 전달 계수[W/m<sup>2</sup> K],  $A_{wo}$ 는 외부 공기와 건물 벽체 사이의 대류 열 전달 면적[m<sup>2</sup>],  $S_g$ 는 태양 복사열에 의한 열량[J/s]이다.

배관내 물의 평균온도( $T_m = (T_H + T_C)/2$ )를 이용하여  $T_C = 2T_m - T_H$ 로 표현할 수 있으므로 위의 에너지 보존 방정식들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_{wat}C_{wat}V_s \frac{dT_H}{dt} = -2mC_{wat}T_H + 2mC_{wat}T_m + Q$$

$$\rho_{wat}C_{wat}V_m \frac{dT_m}{dt} = -(2mC_{wat} + h_m A_{im} + h_p A_{ip})T_m + 2mC_{wat}T_H + h_m A_{im}T_b + h_p A_{ip}T_0$$

$$\rho_{bot}C_{bot}V_b \frac{dT_b}{dt} = -(h_m A_{im} + h_b A_{ib})T_b + h_m A_{im}T_m + h_b A_{ib}T_i \quad (6)$$

$$\rho_{air}C_{air}V_i \frac{dT_i}{dt} = -(h_b A_{ib} + h_0 A_{io} + h_{wi} A_{wi})T_i + h_b A_{ib}T_b + h_0 A_{io}T_0 + h_{wi} A_{wi}T_w + I$$

$$\rho_{wal}C_{wal}V_w \frac{dT_w}{dt} = -(h_{wi} A_{wi} + h_{wo} A_{wo})T_w + h_{wi} A_{wi}T_i + h_{wo} A_{wo}T_0 + S_g$$

### 3. 기준시스템에 대한 제어기의 응답특성

본 논문에서는 온돌주택의 실내온도제어를 위해 차동값을 가진 On-Off제어기와 PID제어기, 위치형 퍼지 제어기를 사용하였다. 시뮬레이션을 통하여 온돌주택의 실내온도제어에 대한 각 제어기의 특성을 알아보려고 한다. 본 연구에서는 피드백 요소로서 실내온도와 바닥온도를 선정하였다. Fig.2는 온돌난방장치의 블록 선도를 나타낸다.

#### 3.1 On-Off 제어기 설계

차동값은  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 하였으며 샘플링 시간은 밸브의 응답특성을 고려하여 60초로 하였다. 이 On-Off제어기는 On동작시 4,000J/s의 열량을 보일러에 공급하고, Off동작시는 열량을 공급하지 않는다<sup>12)</sup>.

#### 3.2 PID 제어기 설계

PID제어기의 게인 값(비례 게인  $K_p$ 는 1.7, 적분 게인  $K_i$ 는 0.00003, 미분 게인  $K_d$ 는 0.6)은 오

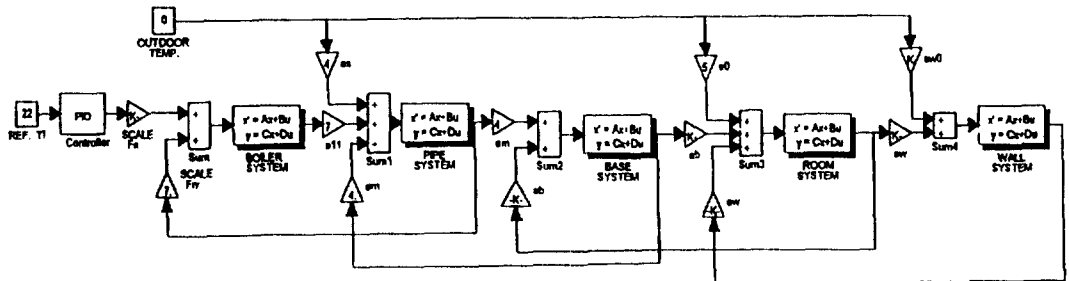


Fig.2- Block diagram of Ondol-heating system.

버슈트와 정상상태가 발생하지 않으면서도 적절한 제어가 이루어지도록 Zigler-Nichols방법을 이용하여 정하였다<sup>11)</sup>. 이 때 오차 량은 온도단위이며, 제어기에서 나온 신호는 온도단위이므로 제어기 다음에 온도단위를 열량단위로 바꾸어 주는 스케일 값을 두어서 보일러제어량이 열량이 되도록 하였다. 스케일 값은 온도 1°C차이에 대해 4,000J/s로 하였다. 이와 같은 스케일링은 퍼지 제어기에도 동일하게 사용하였다.

3.3 퍼지 제어기 설계

퍼지제어에 있어서 전건부 변수로는 출력의 편차 E와 한 샘플링시간 동안의 E변화량 ΔE를 이용하였으며, 후건부 변수는 조작량 U로 설정하였다.

본 논문에서 사용한 membership함수는 계산이 간단한 삼각형으로 Fig.3과 같이 퍼지변수를 7개로 하였으며 label은 다음과 같다.

- NB=Negative Big      PB=Positive Big
- NM=Negative Medium    PM=Positive Medium
- NS=Negative Small      PS=Positive Small
- ZO=Zero

퍼지추론방법은 일반적으로 많이 사용하는 Mamdani의 Minimum-Maximum-Gravity법을 사용하였다.<sup>13)</sup>

3.4 기준시스템의 응답특성

어떠한 제어기법이 실내온도 제어를 하는 데 적합한지를 비교하기 위해서 기준 시스템이 필요하다. 기준시스템에 사용된 특성치들은 한국에너지기술연구소 실험주택의 것으로 Table 1과 같다.

1) 실내온도 피드백의 경우

Fig.4는 보일러 열 용량을 4,000J/s로 하고 원하는 실내온도를 22°C로 하여 피드백 제어한 경우

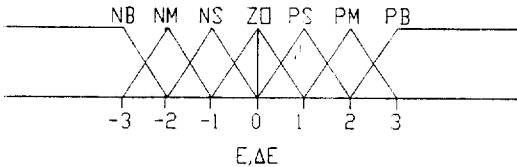
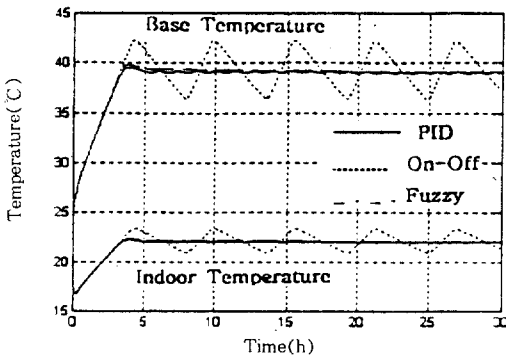


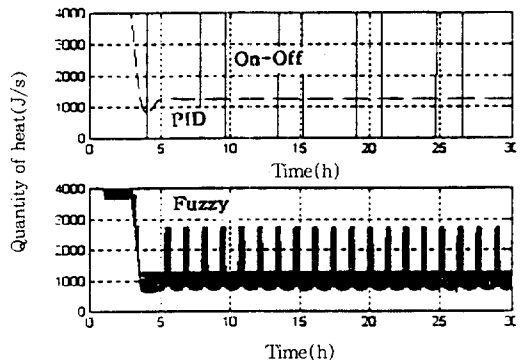
Fig.3 Membership function of triangular type.

Table 1. Specification of reference system.

Feedback Parameter	Room or Base Temperature
Max Supply Heat Quantity	4,000[J/s]
Flow Rate	300[ℓ/h]
Base Thickness	100[mm]
Wall Thickness	330[mm]
Outdoor Temperature	0°C



(a) Variation of base and room temperature.



(b) Variation of boiler supplied heat quantity.

Fig.4 Response of room temperature feedback. (desired room temperature : 22°C)

의 응답을 나타낸 것이다. Fig.4(a)는 실내온도와 바닥온도의 변화를 나타낸 것으로, 점선은 On-Off 제어를 한 경우의 응답이며, 쇠선은 PID제어를 한 경우의 응답이고, 실선은 퍼지제어를 한 경우의 응답을 나타낸다. On-Off제어의 경우 바닥의 온도는 최고 42°C까지 상승하고, 실내온도는 차동값 온도 범위인  $\pm 1^\circ\text{C}$ 보다 조금 더 큰 범위로 요동한다. 이는 보일러가 Off된 뒤에도 물이 계속 순환된다고 가정하였기 때문에 온도가 상승한다. 또한 보일러가 On되고도 온도가 조금 더 떨어지는 것은 열량공급이 온도변화에 영향을 미치기까지의 시간 지연 때문이다. PID제어의 경우는 실내온도가 설정 온도 22°C에 도달할 때쯤에 바닥온도가 약 40°C까지 상승하였다가 실내온도와 바닥온도간의 평형상태온도인 38°C로 가는 것을 알 수가 있다. 퍼지제어의 경우도 PID제어의 경우와 같이 실내온도가 오버슈트와 정상상태 오차없이 설정온도로 도달하는 것을 볼 수 있다. 위의 결과들에서 초기 바닥온도가 평형상태보다 높게 상승하는 이유는 벽의 초기온도가 벽과의 평형상태 온도보다 낮아서 벽으로 열량을 빼앗기기 때문이다.

Fig.4(b)는 제어기 작동시 공급되는 보일러 열량으로 실선이 On-Off 제어를 나타내며 쇠선은 PID 제어를 나타낸다. 또한, Fig.4(b)의 아래 그림은 퍼지제어를 나타낸다. On-Off제어의 경우 열량이 간헐적으로 공급되는 것을 알 수 있다. PID제어의 경우는 열량공급이 초기에는 최대한으로 공

급되다가 어느 정도 시간이 지난 다음부터는 여량공급이 줄어들기 시작하는 과도기를 거친 다음 일정한 열량이 공급되는 것을 볼 수 있다. 이렇게 일정한 열량을 공급하여 주기 위해서는 열량을 정밀하게 공급하게 줄 수 있는 장치가 필요하다. 퍼지제어의 경우는 PID제어와 열량공급 변화곡선의 경향은 유사하나 공급열량에 요동이 발생하는 것을 볼 수 있다.

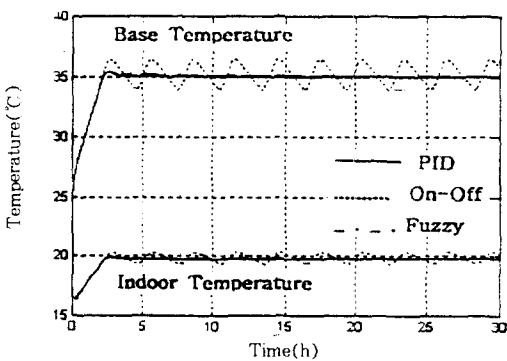
2) 바닥온도 피드백의 경우

Fig.5는 바닥온도를 35°C로 설정하여 제어했을 경우의 응답이다. Fig.5(a)는 실내온도 및 바닥온도를 나타낸 것으로, On-Off 제어기와 PID제어기 및 퍼지제어기는 피드백요소의 변화에도 불구하고 바닥 설정온도를 잘 추종하여 유지하여 주는 것을 볼 수 있다. 그리고 실내온도를 피드백한 경우보다 바닥온도를 피드백한 경우가 정상상태 도달시간이나 온도의 편차량이 적음을 알 수 있다.

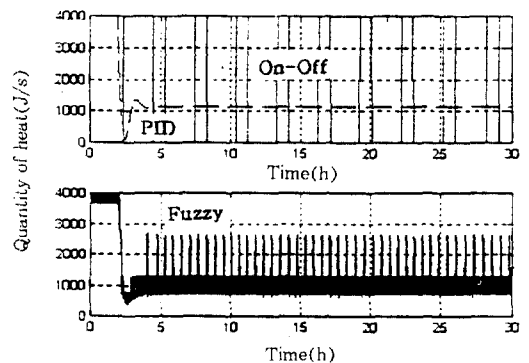
Fig.5(b)는 바닥온도 피드백한 경우의 보일러 공급열량으로서 실내온도 피드백의 경우와 열량공급의 변화곡선이 거의 유사함을 알 수 있다. 다만 On-Off제어의 경우 열량 공급주기가 짧아짐을 알 수 있다.

4. 시스템 변수의 변화에 따른 응답특성

기준 시스템에 시스템 물성치를 바꾸어 적용하여 보면 실제 제어환경에서 어떤 제어기가 좋은 결과



(a) Variation of base and room temperature.



(b) Variation of boiler supplied heat quantity.

Fig.5 Response of base temperature feedback. (desired base temperature : 35°C)

를 낼 수 있는지를 살펴볼 수 있다.

4.1 최대 공급 열량 변화에 대한 응답특성

Fig.6은 보일러의 용량이 3,000 J/s인 경우의 실내온도와 바닥온도의 응답을 그린 것으로, Fig.6(a)는 실내온도를 피드백하여 제어한 경우이고, Fig.6(b)는 바닥온도를 피드백하여 제어한 경우이다. 공급열량을 감소시키면 설정온도 도달시간이 길어지는 것 이외에는 큰 변화가 없다. 따라서 보일러 용량 차이에도 불구하고 실내온도를 잘 유지하여 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

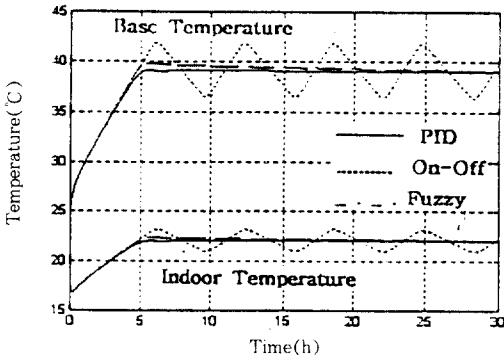
4.2 온수 공급유량 변화에 대한 응답특성

온돌난방장치에서 온돌파이프에 녹이 슬거나 순

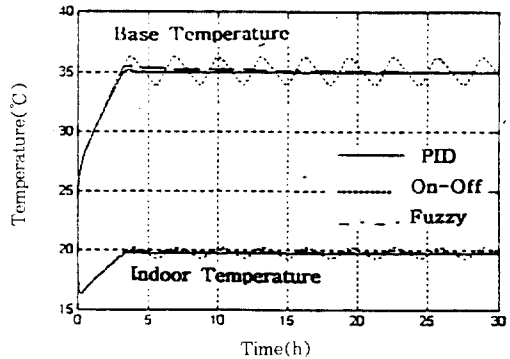
환모터의 성능이 저하될 경우에 공급유량이 줄어든다. Fig.7은 온수 공급유량이 20% 정도 줄어든 경우(240 l/h)의 실내온도와 바닥온도의 응답이다. Fig.7(a)는 실내온도를 피드백하여 제어한 경우이고, Fig.7(b)는 바닥온도를 피드백하여 제어한 경우이다. 유량을 감소시킨 경우에 실내온도를 피드백하면 바닥온도가 상승하지만, 바닥온도를 피드백하면 유량감소의 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다.

4.3 바닥 두께변화에 대한 응답특성

Fig.8은 바닥 두께를 50% 감소하였을 때 (50 mm)의 실내온도와 바닥온도의 응답이다. Fig.8(a)은 실내온도를 피드백하여 제어한 경우이고, Fig.8

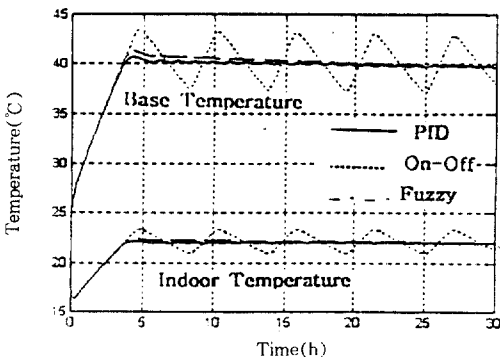


(a) Case of room temperature feedback.

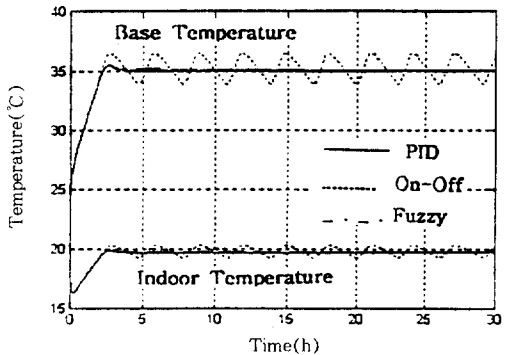


(b) Case of base temperature feedback.

Fig.6 Response of base and room temperature in case of 3,000J/s supply heat quantity



(a) Case of room temperature feedback.



(b) Case of base temperature feedback.

Fig.7 Response of base and room temperature in case of 240 l/h supply flow rate

(b)는 바닥온도를 피드백하여 제어한 경우이다. 바닥두께를 감소시켜 축열층을 얇게 하면 설정온도 도달시간이 빨라진다. 실내온도 피드백의 경우는 전체적으로 바닥온도도 1°C 가량 상승하지만 바닥온도를 피드백한 경우는 설정온도 도달시간이 빨라지는 것 외에는 큰 영향이 없다.

4.4 외부온도 변화에 대한 응답특성

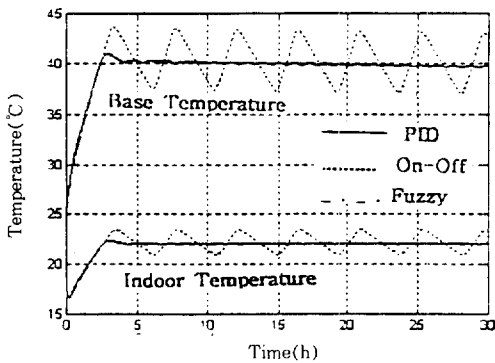
Fig.9는 외부온도가 -10°C로 감소한 경우의 실내온도와 바닥온도의 응답을 보여준다. Fig.9(a)는 실내온도를 피드백하여 제어한 경우이고, Fig.9(b)는 바닥온도를 피드백하여 제어한 경우이다. 외부온도가 하강하면 실내온도 피드백의 경우는 바닥온도가 상승하고, 바닥온도 피드백의 경우는 실내

온도가 하강한다. 따라서, 현재와 같은 제어시스템은 외부온도변화에 잘 적응하지 못한다고 판단된다.

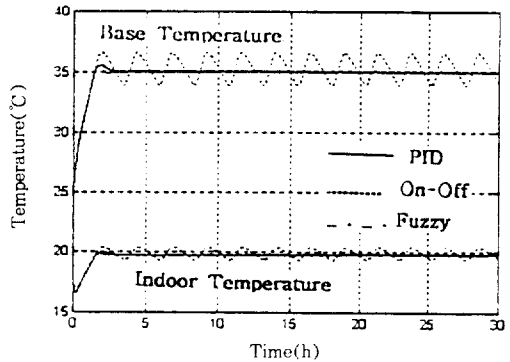
5. 결 론

본 연구에서는 보일러를 사용한 온돌주택 난방시스템의 열 전달 특성을 간략화 된 선형방정식으로 모델링하였다. 또한, 온돌주택의 실내온도를 제어하기 위하여 현재는 On-Off형태의 제어를 많이 사용하고 있지만, 본 논문에서는 위치형 퍼지제어기와 PID제어기를 사용하였을 경우와 그 제어특성을 비교해 보았다.

시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

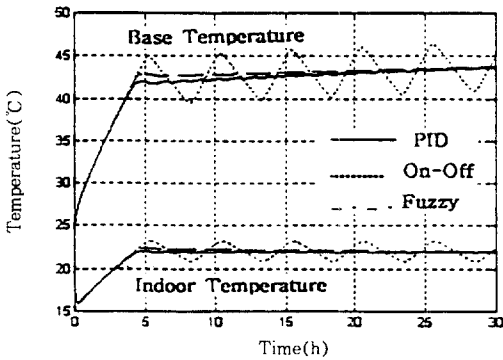


(a) Case of room temperature feedback.

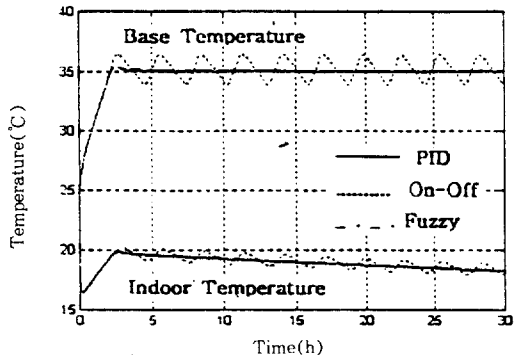


(b) Case of base temperature feedback.

Fig.8 Response of base and room temperature in case of 50mm base thickness.



(a) Case of room temperature feedback.



(b) Case of base temperature feedback.

Fig.9 Response of base and room temperature of -10°C outdoor temperature. (initial wall temperature : 10°C)

- 1) 실내온도를 피드백한 경우는 실내온도를 직접 제어할 수 있다는 장점이 있지만 바닥온도를 피드백한 경우보다 시스템의 변화에 대하여 민감하다.
- 2) 시스템이 변하여도 설정온도에 도달하는 시간, 오버슈트 및 정상상태의 오차와 같은 제어특성은 퍼지제어와 PID제어의 경우가 On-Off제어보다 잘 적용한다.
- 3) 보일러 용량이나 유량변화 및 바닥두께의 변화는 설정온도 도달시간에만 영향을 미친다.
- 4) 본 연구에서 제시된 제어방식들은 외부온도가 변화할 경우 피드백되는 변수만 제어할 수 있지만 실내온도와 바닥온도를 동시에 제어할 수 없다.

따라서 앞으로의 연구방향은

- 실내온도나 바닥온도만의 피드백이 아닌 실내온도와 바닥온도 및 외부온도를 함께 고려한 제어방안을 강구하여야 한다.
- 본 연구에서 시도한 열량에 의한 온도제어 뿐만 아니라 유량이나 공급온수에 의한 온도제어방안을 모색하여야 한다.

### 참 고 문 헌

1. 김상열, 1994, “아파트 난방의 문제점과 개선 방안”, 공기조화 냉동공학회지, 23권, 1호, pp. 5~8.
2. 안병욱, 1994, “응답계수법을 이용한 온돌바닥 구조체의 열 해석 방법에 관한 연구”, 공기조화 냉동공학회지, 23권, 1호, pp. 26~36.
3. 손장열, 정광섭, 손병욱, 1990, “축열층 두께에 따른 온수온돌난방의 바닥온도 변화특성에 관한 실험연구”, 대한건축학논문집, 6권, 5호.

pp. 185~191.

4. 중앙설비엔지니어링, 민만기. 1989, “공동주택 온수배관 시스템의 적정난방 열공급기술개발”, 에너지관리공단 연구보고서 89연-4.
5. 한국에너지기술연구소, 1991~1993, “저가 고효율 난방시스템 개발연구”.
6. 이승복, 1994, “제어시스템 개수에 따른 건물 의 에너지 절감효과”, 공기조화 냉동공학회지, 23권, 1호. pp. 16~25.
7. Virk, G. S. and Loveday, D. L., 1992, “A Comparison of Predictive, PID, and On/Off Techniques for Energy Management and Control”, Proceedings of ASHRAE, pp. 3~10.
8. Bekker, J. E., Meckl, P. H., and Hittle, D. C., 1991, “Tuning Method for First-Order Processes with PI Controllers”, Proceedings of ASHRAE, pp. 19~23.
9. Zaheer-Uddin, M., 1994, “Multivariable Integral Control of Hydronic Heating Systems”, Energy Convers. Mgmt, Vol.35. No.5, pp. 403~412.
10. Zaheer-Uddin, M., 1993, “The Design and Simulation of a Sub-Optimal Controller for Space Heating”, Proceedings of ASHRAE, pp. 554~564.
11. 이재원, 황찬선, 기창두, 정성중, 김종식, 1992, “피드백 제어시스템”, 반도체출판사/서울, pp. 99~116.
12. 주해호, 이종원, 이만동, 1987, “최신 제어공학”, pp. 170~194, 문운당, 서울.
13. 박문용, 최한식, 1990, “퍼지 제어 시스템”, 대영사/서울, pp. 76~92.