680 설비공학 논문집 제 12 권 제 7 호(2000)/pp. 680~687

# 인공신경망 모델을 이용한 온돌시스템의 최적 제어에 관한 연구

양 인 호, 이 진 영*†, 김 광 우*
서울대학교 공학연구소, *서울대학교 건축학과

# A Study on the Optimal Control of Ondol System Using Artificial Neural Network

**In-Ho Yang, Jin-Young Lee*†, Kwang-Woo Kim***
*Research Institute of Engneering Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*
**Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

*(Received May 8, 2000; revision received May 25, 2000)*

**ABSTRACT:** The objective of this study is to improve the control performance of Ondol system which causes overheating and underheating with 2-position on/off control. For this, a predictive control that determines the suitable on/off positions using Artificial Neural Network(ANN) model was proposed. Dynamic analyses using computer simulation show that the neural network used in the predictive control is adapted to each room whose loads variation and thermal characteristics are different. To examine the applicability of this predictive control with ANN, it was compared with 2-position on/off control through experiments.

**Key words:** Ondol(온돌), Predictive control(예측제어), ANN(Artificial Neural Network, 인공신경망)

## 기 호 설 명

$\dot{q}$ : 발열량 [W]
$A_f$ : 총발열 면적 [㎡]
$\delta x_O$ : 발열층의 두께[m]
$\varepsilon_{PNL}$ : 패널의 열교환율
$\dot{m}_w$ : 유량 [kg/sec]
$C_{pw}$ : 물의 비열 [J/kg℃]
$T_{wi}$ : 온수 입구 온도 [℃]
$T_m$ : 발열층의 평균온도 [℃]
$C_{air}$ : 공기의 비열 [J/kg℃]
$V_{room}$ : 실의 용적[㎥]
$\rho_{air}$ : 공기의 밀도 [kg/㎥]
$T_{room}^{p+1}$ : 실내 공기의 미래온도 [℃]
$T_{room}^{p}$ : 실내 공기의 현재온도 [℃]
$\Delta t$ : 계산 시간간격[sec]
$q_h$ : 바닥·벽체·창문 대류열전달 [W]
$q_{infil}$ : 침기에 의한 열전달 [W]
$q_{supply}$ : 급기에 의한 열량공급 [W]
$q_{c_p}$ : 인체발열 대류성분 [W]
$q_{c_l}$ : 조명발열 대류성분 [W]
$q_{c_e}$ : 기기발열 대류성분 [W]

† Corresponding author
Tel.: +82-2-880-7066; fax: +82-2-885-8057
*E-mail address*: ansaod2@snu.ac.kr

## 1. 서 론

현재 우리 나라 공동주택에서 주로 사용되는 난방방식은 바닥복사 온돌난방방식으로 설정실온을 중심으로 허용 편차(differential 또는 throttling range)를 두어 이것의 최대한계에 도달하면 열 공급을 중지하고, 최소한계에 도달하면 열 공급을 개시하는 2-위치(2-position)제어방식이 주로 사용되고 있다.

현재의 2-위치 제어방식은 열용량이 큰 바닥패널에서 열을 공급하는 구조체의 특성상 열적 지연효과(time-lag)로 인해 설정온도범위 한계에서의 on/off 동작 후 과열(overheating) 및 과냉(underheating) 현상이 일어나 실온이 설정온도 범위를 벗어나게 되는 문제점이 있다.

따라서 시스템이 간단한 on/off방식을 적용하면서, 구조체의 특성을 파악하여 설정 한계온도에 도달하기 전에 미리 열을 공급하거나 중지하는 예측제어가 가능하다면, 공급온수 온도를 변화시키는 방식보다는 경제적이면서 기존의 2-위치 제어에 비해서는 더욱 향상된 제어성능을 얻을 수 있다.

여기서 예측제어를 위해 인공 신경망(artificial neural network)이라는 학습기법이 유용하게 사용될 수 있다. 인공 신경망을 이용하여 공동주택 온돌시스템에 난방을 실시할 경우 과거 자료를 토대로 실시간으로 구조체 특성을 학습하므로, 운전시 관리자가 별도의 제어변수를 조정할 필요가 없으며, 장기적으로 구조체 성능이 변하더라도 그것에 대응할 수 있는 장점이 있다.

기존연구[1]에서는 이러한 인공 신경망을 이용한 예측제어방식은 온돌난방공간에 적용할 경우 간단한 on/off 시스템을 유지하면서 과열과 과냉을 없애고 열원 공급 시간도 절약될 수 있다는 것이 입증되었다. 여기서 신경망을 이용한 예측제어를 실제 건물에 적용하기 위해서는 다양한 조건에 대한 적응성의 평가가 필요하고, 아울러 보다 효율적인 신경망 학습을 위해서는 입력변수에 대한 최적화 작업이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 다양한 조건을 가진 실에 대한 적응성을 평가하고, 신경망 학습효율을 높이기 위해 입력변수 최적화를 통해 보다 향상된 예측제어성능을 가진 인공신경망 모델을 개발하고자 한다.

## 2. 존별 제어성능 검증을 위한 시뮬레이션

### 2.1 시뮬레이션의 개요

부하조건이 다른 실들에 대해 각각 신경망을 이용한 예측제어가 적용하여 동작하는지 평가하기 위해, 향과 부하조건이 다른 실들을 포함하고 있는 공동주택 내의 세대를 선정하고 이에 대해 기존의 온돌 열해석 성능이 검증된 프로그램을 사용하여 열해석 시뮬레이션을 실시하였다.

### 2.2 예측제어를 위한 해석 프로그램

실험을 통해 온돌난방공간에 대한 바닥온도계산 및 실내온도 계산과 난방시간 등의 열해석 성능이 검증된[2] 기존의 해석 프로그램에 본 연구에서 개발한 예측제어 모듈을 추가하여 예측제어를 위한 해석 프로그램을 구성하였다.

온돌난방공간의 전열해석은 현실적인 적용 및 응용에 있어서의 효용성이 고려된 해석 방법이 적용되어야 하고, 특정한 단위공간에 대한 정밀분석을 위해서는 정확도가 높은 방법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 각 구조체마다 정밀도 높은 계산이 가능한 유한차분법을 기본으로 하여 전체 공간에 대해서 해석하였다.

#### 2.1.1 온돌 구조체 해석

현재까지 알려진 온수온돌 바닥구조체 해석방법은 fin 효율을 이용한 Kollmar Liese's Method와 같은 정적 1차원 해석방법, fin 효율과 Effectiveness-NTU(Number of Transfer Unit)를 이용한 동적 1차원 해석방법, 그리고 유한차분법에 의한 동적 2차원 해석방법 등이 있다. 본 해석 프로그램에는 기존의 연구[3]에서 그 타당성이 검증된 fin 효율과 Effectiveness-NTU를 이용한 동적 1차원 해석방법이 적용되었다. 온돌 구조체 해석을 위한 열평형방정식은 식(1)과 같다.

$$\dot{q} \cdot A_f \cdot \delta x_O = \varepsilon_{PNL}\ \dot{m}_w C_{pw}(T_{wi} - T_m) \quad (1)$$

2.2.2 벽체 해석

유한차분법에 의한 벽체 해석을 할 경우, 벽체에 노드(node)를 나누어 해석하게 되며, 나누어진 노드에 따라 각각 열평형 방정식을 세워야 한다. 여기서, 해석 노드의 위치에 따라 열전달 형태가 다르게 된다.

① 벽체 외표면 노드의 온도 해석

벽체의 외표면 노드는 태양의 일사에 노출되어 있으며, 바람의 영향을 받게 된다. 따라서, 외표면에 입사되는 일사량과 바람에 의한 외표면 열전달계수를 계산해야 한다. 이를 종합하면 상당외기온(sol-air temperature)으로 표현될 수 있다. 반대편은 벽체 내부 노드와의 전도에 의한 열교환을 계산해야 한다.

② 벽체 내부 노드의 온도 해석

벽체 내부의 노드는 전도에 의한 열교환이 이루어지는 곳으로, 노드간의 열플럭스 계산이 정확히 표현되어야 한다.[4] 특히 노드를 경계로 재료가 달라질 경우 경계면에서의 열전도 계산이 중요해진다. 따라서 산술평균에 의한 계산이 아닌 조화평균에 의한 계산으로 노드간의 열전도계수(conductivity)와 컨덕턴스(conductance)를 계산한다.

③ 벽체 내표면 노드의 온도 해석

실내측 표면은 다른 벽체, 창문, 인체, 조명, 기기와의 복사에 의한 열교환과 벽체 내부로부터의 전도에 의한 열교환, 실내공기와의 대류에 의한 열교환이 이루어진다. 더욱이 복사열교환이 많은 온돌구조체가 있는 온돌난방공간에서의 복사열전달에 대한 해석은 중요해서 대류에 의한 열전달만 해석을 할 경우 전체 열적 거동이 왜곡되기 때문에 복사열교환에 대한 고려가 필요하다[5]. 따라서 본 프로그램에서는 복사열교환 해석에 대해서는 평균복사온도와의 열교환 계산법이, 표면열전달계수에 대해서는 열류방향에 따라 계산하는 방법이 적용되었다.

2.2.3 실온해석

실온은 각 표면과의 대류열전달과, 인체, 조명, 기기의 대류발열 성분 및 침기, 급기에 의해 결정된다. 여기서 인체, 조명, 기기 발열 및 급기에 의한 실 열량공급은 스케줄에 따라 이루어진다. 실온에 대한 열평형 방정식은 식(2)와 같다.

$$\rho_{air} \cdot C_{air} \cdot V_{room} \frac{T_{room}^{p+1} - T_{room}^{p}}{\Delta t} = \sum q_h + q_{infil} + q_{suppy} + q_{c_p} + q_{c_l} + q_{c_e} \quad (2)$$

## 2.3 시뮬레이션 계획

2.3.1 시뮬레이션 모델

시뮬레이션을 위한 단위세대로는 지역난방방식의 공동주택 기준층의 중간세대를 대상 공간으로 선정하였으며, 상하층은 동일한 온돌 난방공간으로 되어있다. 또한 본 시뮬레이션에서 모델의 향은 정남향이며, 단지 내 최남단에 위치하는 것으로 가정하였다.

물리적 조건이 다른 퍼지 신경망의 예측성능을 평가하기 위하여 선정된 단위 세대 내에서 각기 향 · 물성치에 따라 부하가 다른 Room A(안방), Room B(거실), Room C(문간방), Room D(건넌방), Room E(주방)를 각각 독립된 제어 단위공간으로 설정하였다.

국내 건설회사의 온돌 시공방법을 조사, 검토한 결과[6]를 토대로 가장 일반적인 온돌구조체 모델을 설정하였다.

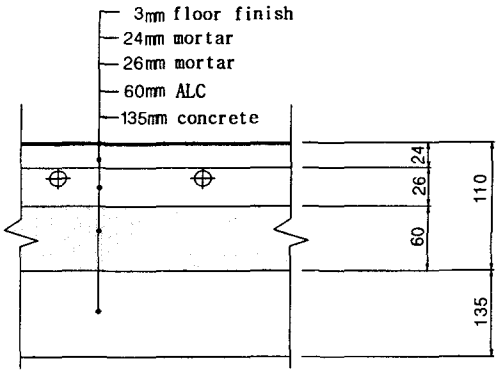


Fig. 1 The Structure of model Ondol for simulation.(unit: mm)

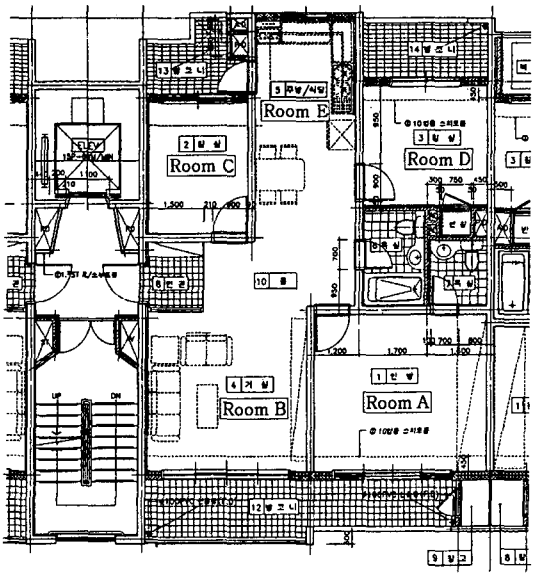


Fig. 2 The unit plan of apartment house for simulation.(unit: mm)

2.3.2 시뮬레이션 조건 및 방법

(1) 학습자료 취득을 위한 예비 시뮬레이션

신경망의 초기 학습자료를 얻기 위해 예비시뮬레이션을 실시하였다. 예비 시뮬레이션에서는 서울지역을 대상으로 작성된 표준기상자료[7]에서 난방부하가 가장 많이 발생하는 가장 추운 기간 일주일(1월 12일~1월 18일)의 기상자료를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

연속난방을 위한 중앙난방과 지역난방을 기준으로 공급 온수온도는 60℃로[8] 하였으며, 유량은 세대 부하계산 결과 3LPM으로 하였다.

Table 1 Conditions for preliminary simulation to get learning data

| setpoint temp. | condition | acquisition data |
|---|---|---|
| 21℃±0.3 | solar radiation : admitted<br>control method : on/off<br>hot water supply temp. : 60℃<br>hot water flow rate : 3LPM | room air temp., outdoor air temp., upper limit of over shoot, lower limit of under shoot |
| 21℃±0.5 | | |
| 21℃±1.0 | | |

쾌적에 관한 여러 연구에 의하면 실내온도의 쾌적범위는 최저 16℃에서 최고 26℃까지 상당히 넓은 범위에 걸쳐 나타나 있지만 공통범위로는 20.5~22.5℃를 포함하므로, 본 연구에서는 예측제어에 의해 유지하고자하는 실내 설정온도를 21℃±1로 하였다. 이 범위내의 실온에서 on/off가 될 때의 자료를 학습자료로 취득하기 위하여 설정온도 범위를 21℃±0.3, 21℃±0.5, 21℃±1.0로 변화시키며 2-위치 제어를 적용하여 세 차례에 걸쳐 시뮬레이션을 실시하였다.

(2) 존별 예측제어성능 검증을 위한 시뮬레이션

예비시뮬레이션을 통해 얻은 학습데이터를 각 5개 실별로 신경망에 학습시킨 후, 기상자료에서 가장 추운 기간인 1월 12일~1월 30일 중 예비시뮬레이션 기간이 아닌 후반부 일주일(1월 24일~1월 30일)의 기상자료를 이용하여 5개 실 모두 예측제어를 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 2 Conditions for simulation with the predictive control

| setpoint temp. | condition | acquisition data |
|---|---|---|
| 21℃±1.0 | solar radiation : admitted<br>control method : predictive<br>hot water supply temp. : 60℃<br>hot water flow rate : 3LPM | room air temp., outdoor air temp., direct/diffuse solar radiation |

## 2.4 시뮬레이션 결과 분석

예측제어 모델의 성능을 평가하기 위해 1월 24일에서 30일까지 일주일 동안의 기상데이터를 이용하여 예측제어에 의한 실온을 제어하도록 하고, 동일한 조건에서 기존의 2-위치 제어에 의해 실온을 제어하는 두 번의 시뮬레이션을 실시하여 각 실별 실온변화를 비교하였다.

Fig. 3~Fig. 7은 각 실별 제어방식에 따른 실온의 변화를 외기온과 함께 나타낸 것이다. Fig. 8은 돌발적 부하변동 요소인 일사의 영향을 검토하기 위하여 낮 시간 동안의 일사량을 출력하게 하여 일사의 영향을 직접적으로 받는 남향인

Room A의 실온변동과 함께 나타낸 것이다.

Table 3은 제어방식에 따라 실별로 각 실온 상하한 온도를 비교한 것이다. 남측 쪼에 위치한 Room A와 Room B의 경우 일사의 영향을 받은 시간대의 최대 상승 온도는 열원 공급이 중단된 상태에서 외란(external disturbance)에 의해 실온이 상승하는 것이며, 이 경우 예측제어 하에서의 실온 상승은 기존의 2-위치 제어를 적용하였을 때와 유사한 온도 변화를 보였다.

Table 4는 제어방식에 따른 각 실별 총 난방 가동시간을 나타내고 있으며 Room B를 제외한 모든 실에서 예측제어를 이용한 방식이 가동시간이 더 짧은 것으로 나타나 에너지 절약측면에서 유리한 것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of room air temperature according to the control method(unit: ℃)

| room \ control method | | predictive control | 2-position on/off control |
|---|---|---|---|
| Room A | upper peak | 21.85~22.15 | 22.40~22.58 |
| | lower peak | 19.98~20.04 | 19.97~19.98 |
| Room B | upper peak | 21.8~22.15 | 22.20~22.46 |
| | lower peak | 19.96~20.05 | 19.94~19.98 |
| Room C | upper peak | 21.86~22.06 | 22.53~22.64 |
| | lower peak | 19.99~20.02 | 19.98~19.99 |
| Room D | upper peak | 21.9~22.24 | 22.23~22.36 |
| | lower peak | 19.97~20.13 | 19.97~19.98 |
| Room E | upper peak | 21.96~22.05 | 22.35~22.49 |
| | lower peak | 19.99~20.00 | 19.97~19.99 |

Table 4 Comparison of heating time(unit: minute)

| control method \ room | Room A | Room B | Room C | Room D | Room E |
|---|---|---|---|---|---|
| predictive control | 725 | 1000 | 745 | 1175 | 1230 |
| 2-position on/off control | 780 | 980 | 795 | 1215 | 1270 |

Fig. 3~Fig. 7의 실온변화 곡선을 보면, 각 난방 싸이클 별 실온의 하한온도는 두 제어방식이 별 차이가 없으나 off를 한 후 과열되는 상한 온도의 경우는 2-위치 제어를 적용한 경우 각 실별로 불규칙하게 설정 상한온도 위로 0.23~0.58℃ 정도 과열이 일어나지만, 예측제어를 적용한 경우에는 남측 쪼 Room A와 Room B에서 일사의 영향을 받은 경우를 제외하면 실 상한온도가 설정 상한온도 22℃이내로 유지되었다.

상대적으로 일사의 영향을 적게 받는 북측 쪼의 Room C, Room D, Room E의 경우, 2위치제어와 예측제어의 실온유지 성능 차이를 보다 정확히 알 수 있다. 위의 시뮬레이션 결과로부터 부하가 다른 5개실 모두 예측제어 방법이 기존의 2위치 제어에 비해 설정 실온범위를 더 정확히 유지시킴을 알 수 있다.

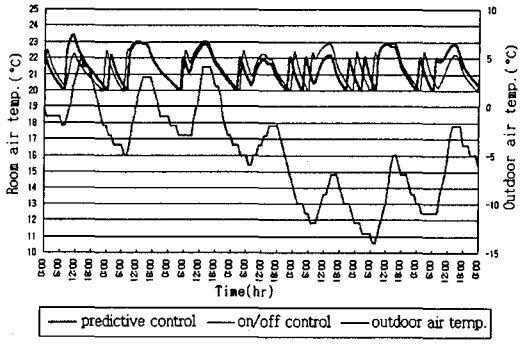


Fig. 3 Patterns of room air temperature in Room A according to the control method.

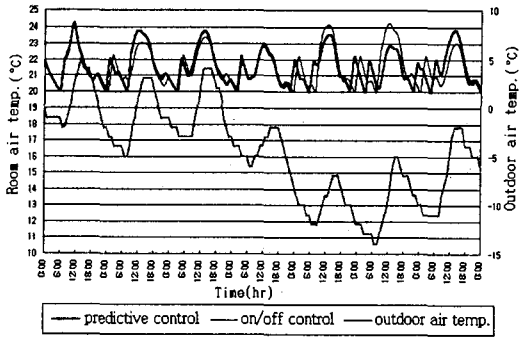


Fig. 4 Patterns of room air temperature in Room B according to the control method.

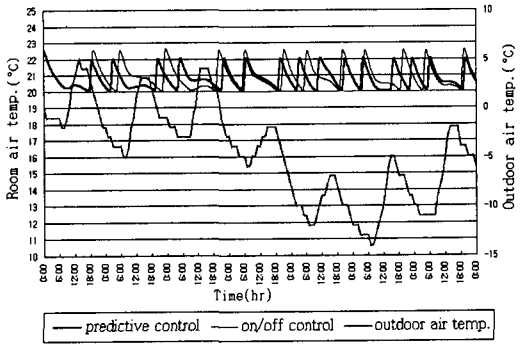


Fig. 5 Patterns of room air temperature in Room C according to the control method.

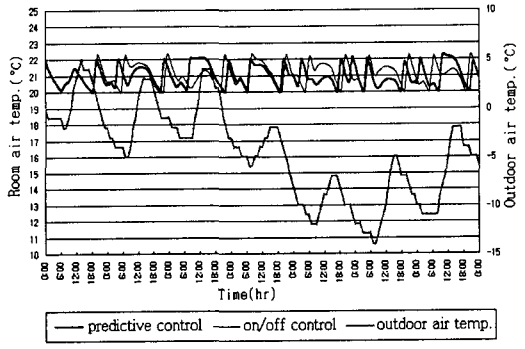


Fig. 6 Patterns of room air temperature in Room D according to the control method.

## 3. 인공 신경망 모델의 입력변수 최적화

기존 연구에서 수행한 제어 방식의 실제 가능성 평가를 위한 실험결과를 분석해 본 결과, 단시간 동안의 외기온 변동 값은 그 추이가 매우 불규칙하여 다른 입력변수에 비해 신경망의 학습에 영향을 적게 줌을 알 수 있었다. 따라서 인공신경망 모델의 학습효율을 높이기 위해 외기변동을 입력변수에서 배제하였다.

사용자가 설정온도를 변화시킬 경우에 대응하고 낮은 실온에서 처음 기동시에 발생되는 높은 과열을 억제하기 위해서는 새로운 입력변수의 추가가 요구된다.

이를 위해서는 구조체의 열관성을 신경망에 반

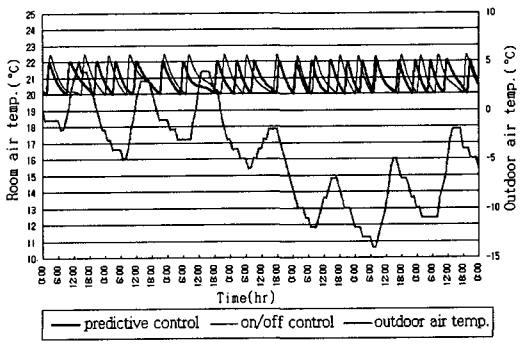


Fig. 7 Patterns of room air temperature in Room E according to the control method.

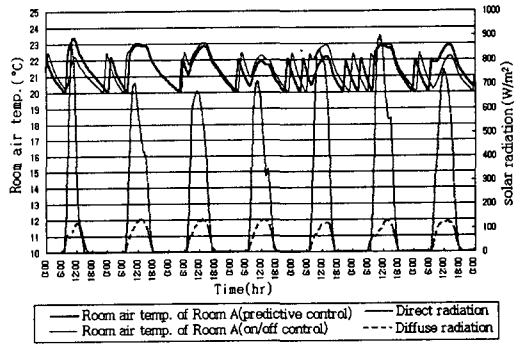


Fig. 8 Patterns of room air temperature in Room A according to the control method and solar radiation.

영하여야 하며, 난방을 시작하는 온도가 달라짐에 따라 과열의 정도가 달라진다는 사실로부터 off시점을 결정할 때는 이전 실온의 최소값을, on 시점을 결정할 때는 이전 실온의 최대값을 입력변수에 추가하였다. Fig. 9는 최적화된 인공 신경망 모델의 구조를 나타내고 있다.

Table 5 Range of added variables(unit: ℃)

| input variable | min. value | max. value |
|---|---|---|
| previous min. room air temp. | 15 | 23 |
| previous max. room air temp. | 20 | 25 |

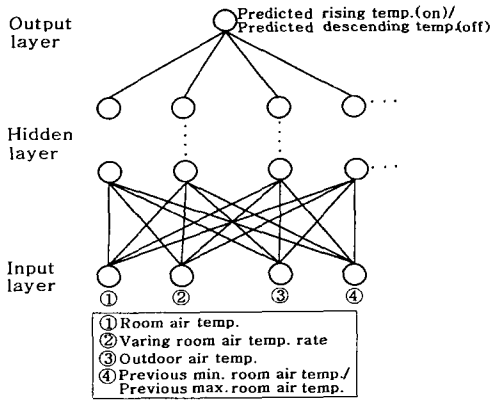


Fig. 9 Structure of the modified ANN model.

## 4. 모델실험에 의한 인공 신경망 모델의 성능 검증

### 4.1 실험 개요

입력변수를 수정한 신경망의 예측성능 및 일사 유입시의 오동작 여부의 실제적인 검증을 위해 실제 공간을 대상으로 모델실험을 실시하였다. 실험모델 A실은 기존의 예비시뮬레이션을 통해 새롭게 학습된 신경망을 이용한 예측제어를 실시한 실이며, 실험모델 B실은 기존의 2위치 제어 방식을 적용한 실이다. 설정온도는 21℃로 하고 허용편차는 ±1.0℃로 하였다. 본 실험에서는 신경망에 대한 일사유입의 영향을 알아보기 위해 남측의 창문을 별도의 차양 없이 그대로 노출시켜 직달일사가 유입되도록 하였다.

연속난방시의 일정한 공급온수 온도를 유지하기 위하여 각 단위 실험공간 마다 항온수조를 설치하였다. 이 항온수조에는 각각 디지털 온도 조절계를 설치하여 자동으로 설정온도를 유지하도록 하였다. Table 6은 실험조건을, Fig. 10은 예측제어의 흐름도를 나타내고 있다.

### 4.2 실험 결과 분석

Fig. 11은 4일간 측정한 실험 결과로서, 시간에 따른 외기온 변화와 두 실의 실온 변화, 열원의 on/off상태를 나타내고 있다. 낮 시간대에는 일사의 영향으로 열원 공급없이도 실온이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 밤 시간대 동안은 예측제어를 적용한 실험모델 A실은 그 동안의 학습 능력을 보유한 채, 정확히 off시점을 예측한 것을 알 수 있다. 실험모델 B실은 밤시간 동안에도 0.7℃~1.0℃정도의 과열이 발생했다. 또한, 2위치 제어를 적용한 실험모델 B실의 경우 새벽시간의 과열이 일출 후 낮시간의 일사에 의한 실온상승에 영향을 주게 되어 실온의 최고 상승 값이 실험모델 A실보다 높아졌음을 알 수 있다.

Table 6 Conditions for experiment

| setpoint temp. | condition | acquisition data |
|---|---|---|
| 21℃±1.0 | solar radiation : admitted<br>control method : predictive<br>hot water supply temp.: 50℃<br>hot water flow rate : 6LPM | room air temp., outdoor air temp., on/off time |

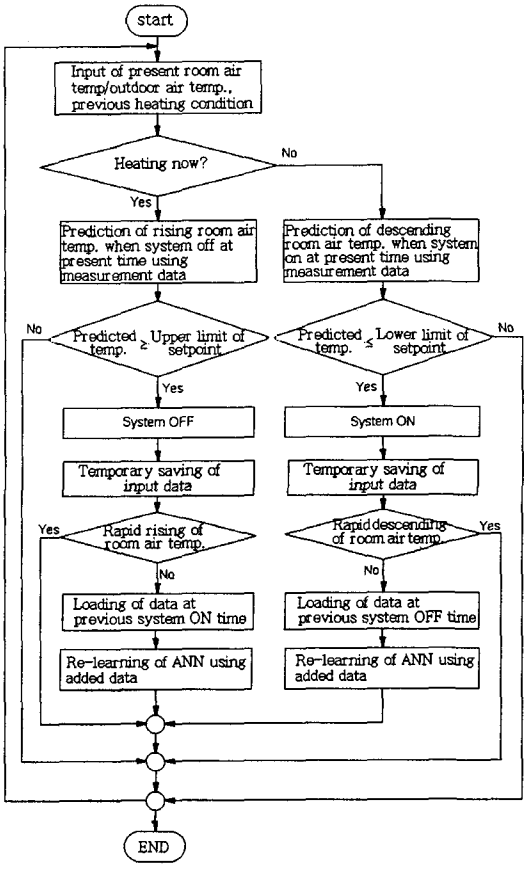


Fig. 10 Flow chart for predictive control.

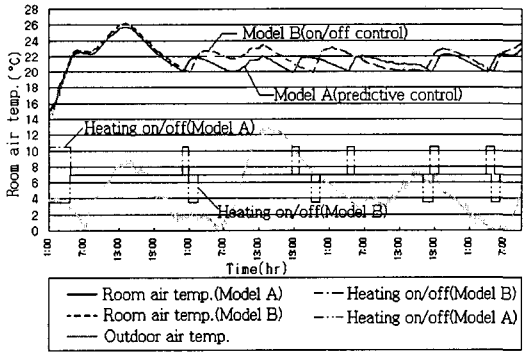


Fig. 11 Prediction performance of the modified ANN model.

반면, 실험모델 A실의 경우와 같이 밤시간 동안의 과열이 일어나지 않을 경우에 낮 시간의 실온상승도 현저하게 감소시킴을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 공동주택에 예측제어를 적용하기 위해 일반적인 단위 세대를 대상으로 열해석 시뮬레이션 기법을 사용하여 세대내의 각 실별로 예측제어 및 2-위치 제어에 대한 성능을 비교하였다. 아울러 실내 돌발적인 부하요소들에 의한 신경망의 오동작 방지 알고리즘을 개발하고 입력변수 최적화를 통해 그 성능을 평가한 결론은 다음과 같다.

(1) 실온제어측면에서 볼 때, 2-위치 제어를 적용하여 시뮬레이션을 실시한 경우에는 각 실별로 0.2~0.6℃정도 과열이 일어났으나, 예측제어를 적용한 경우에는 실온이 설정온도 범위내에서 정확히 유지되어 제어성능면에서 우수한 것으로 나타났다.

(2) 시스템 가동시간 측면에서 볼 때, 예측제어를 적용한 경우에 가동시간이 더 짧게 나타나, 에너지절약 성능면에서도 우수한 것으로 나타났다.

(3) 실험결과 분석을 통해 Fig. 9와 같이 개선된 인공신경망 모델을 제시하였으며, 동적 열해석을 통해 수정된 제어 알고리즘을 평가한 결과 일사 유입시의 입력자료에 대한 학습이 방지되고, 설정온도를 정확하게 유지하여 예측제어 성능이 유지됨을 알 수 있다.

(4) 개선된 예측제어 알고리즘에 대해 모델 실험을 통한 일사 유입시의 오동작 방지 성능 및 예측제어 성능을 검증한 결과, 정확한 on/off시점을 계산할 수 있고 기존 예측 제어 방식에 비해 낮 시간동안 부하변동에 의한 온도편차도 작은 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 BK21 "건물성능 향상을 위한 건축기술 개발"분야 연구결과의 일부임.

## 참고문헌

1. Lee, J. Y., et al., 1998, A Study on the Predictive Control of Ondol System in Apartment Building, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 14, No. 11, pp. 331-339.
2. Kim, Y. Y., 1997, A Study on the Time-Division Hot Water Supply for Energy Saving of Radiant Floor Heating System, MS thesis, Seoul National Univerdity, Seoul, Korea, pp. 35-40.
3. KIER, 1991, A New Housing Technology Development ( I )", KIER.
4. Patankar, Suhas V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemishphere, pp. 41-77.
5. Choi, Y. D., at al., 1994, Simulation of Heat Supply Control of Continuous Heating Sytem of Multistoried Apartment in Consideration of Radiant Heat Transfer, Korean Jounal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 78-92.
6. Ministry of Commerce, Industry and Energy, 1996, Study on Development of Ondol Heating System for Energy Saving, Report of MCIE.
7. SAREK, 1990, SAREK Standard Weather Data (Seoul district).
8. Korea National Housing Corp., 1995, Mechanical Design Data, KNHC, pp. 29-138.