

바닥복사 난방공간의 효율적인 난방제어방법

The Effective Heating Control Method of the Radiant Floor Heating System

조 성 환*, 태 춘 섭*
S. H. Cho, C. S. Tae

Key words : Radiant floor heating system(바닥복사난방 시스템), Two parameter on-off control(두가지 제어인자에 의한 개폐제어), Two parameter switching control(두가지 제어인자에 의한 스위칭 제어)

Abstract

By describing the floor slab of a radiant heating system as a one dimensional transient heat exchanger problem, a dynamic analysis model to incorporate with TRNSYS program was developed and their results were compared with experimental results.

Results showed that the both of TPOC(Two Parameter On-off Control) and TPSC(Two Parameter Switching Control) method using room air temperature and floor surface temperature as the control parameters does not maintain room air and floor surface temperature exactly at the setting temperatures. But TPSC method is a better candidate for the temperature regulations of room air and floor surface temperature than TPOC method which can keep on the upper and lower limit temperature according to outside temperature and wall structure etc.

And better thermal circumstance can be given by TPSC method than On-off and TPOC method and the overheating which can be occurred at the radiant floor heating system with on-off heating control will be reduced.

기 호 설 명

A_r : 바닥면적[m]	\dot{m}_w : 유량[kg/h]
C_p : 물의 비열[kcal/kg°C]	q : 열전달량[kcal]
D : 편의 두께[m]	\dot{q} : 내부발열량[kcal/h]
dT : 시간에 따른 발열층의 온도변화[°C]	R_b : 열저항[m ² h°C/kcal]
K : 파이프 매설층의 열전도율[kcal/mh°C]	T_m : 발열층 평균온도[°C]
L : 파이프 전장[m]	T_{ps} : 온수관이 매설된 가열층 평균온도[°C]
	T_w : 온수입구온도[°C]
	U_p : 배관내에서부터 파이프까지의 열관류율 [kcal/m ² h°C]
	α_w : 배관내의 대류 열전달 계수[kcal/m ² h°C]

* 정회원, 한국에너지기술연구소 건축설비연구팀

- ϵ_{px} : 열교환기의 유효성(Effectiveness of Heat Exchanger)
- ρ : 밀도[kg/m³]
- Δx : Node간의 거리[m]
- Δt : 시간간격[h]

참 자

- a : 전체
- c : 대류
- r : 복사
- m, m + 1, m - 1 : 바닥 구조체의 층(layer)

1. 서 론

국내 주거용 건물의 대부분은 바닥내에 매설된 온수관을 통하여 온수를 순환시킴으로써 바닥을 가열하는 바닥복사 난방방식을 이용하고 있다. 이 방식은 바닥을 통한 복사 및 대류열에 의하여 실내를 가열하기 때문에 실내의 온도분포가 균일하여 쾌적성이 우수한 난방방식으로 알려져 있다. 그러나 바닥구조체의 큰 열용량 때문에 바닥을 통한 열전달이 상당히 지연되거나 실내온도 및 바닥표면온도가 동시에 쾌적범위대에 유지되도록 제어되어야 하는 등 해결하여야 할 많은 문제점들이 남아 있다.

Friedlander와 Adelman은 외기온과 공급온수 온도 사이에 선형관계가 있음에 착안해서 외기온에 역비례로 공급온수온도를 제어하는 Outdoor reset control 방법을 제안했다⁽¹⁾⁽²⁾.

Fort는 바닥복사난방 방식을 채택한 각 실별로 온도조절기에 의하여 작동되는 제어밸브의 사용을 제안하였다⁽³⁾.

Mac Culer는 바닥구조체에 전달되는 열전달량을 제어할 수 있는 Flux modulation control 방법을 제안하였다⁽⁴⁾.

Berglund 등은 복사난방 공간의 쾌적한 환경조성을 위해서는 실내 대류온도와 복사온도가 고려된 작용온도(Operative temperature)로 제어하는 것이 유리하다는 결과를 제시하였다⁽⁵⁾.

지금까지 복사난방공간의 제어관련 연구들은 실내온도 한가지 만을 제어대상으로 하였지만, 이러한 제어방법에 의해서는 실내공기온도 및 바닥표면

온도가 모두 쾌적범위내(실내공기온도 : 20 ± 2℃, 바닥표면온도 : 30 ± 2℃)로 유지될 때 쾌적감을 느끼는 온도에 의한 복사난방공간의 경우에는 열적 특성상 실내의 쾌적환경유지에 문제가 있다.

이러한 문제점들을 보완코자, 조 등은 실내공기 온도 및 바닥표면 온도를 제어대상으로 할 수 있는 다인자 제어방법(Multi-parameter control)을 제안하였다⁽⁶⁾. 그러나 기존의 다인자 제어방법은 외기온 및 건물구조체에 따라서 실내온도 및 바닥표면온도가 항상 설정범위의 극한치에 유지될 수 있는 단점이 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 바닥 복사난방 공간에 적합한 다인자 제어방법의 한 방법으로 스위칭(switching) 온도제어방법을 제시한 후 이에 관한 실험적 및 이론적 연구결과를 제시함으로써, 향후 복사난방 공간의 효율적인 제어기 설계에 이용코자 한다.

2. 이론적 해석방법

실내공간의 동적해석을 위해서 본 연구에서는 미국의 Wisconsin 대학에서 개발되어 건물의 동적에너지 해석에 많이 이용되고 있는 TRNSYS 프로그램을 이용하였다. 일반적으로 TRNSYS 프로그램을 이용하기 위해서는 건물의 벽체나 바닥의 경우 TFM(Transfer Function Method)을 이용하고 있다⁽⁷⁾. 그러나 본 연구에서는 Fin Efficiency와 Effectiveness-NTU를 이용한 해석방법과 복사난방 공간의 온도제어 방법들을 프로그램화하여 TRNSYS 프로그램의 각 모듈로 구성하였다.

2.1 바닥구조체를 통한 열전달

Fig.1은 이론적 해석을 위하여 채택한 바닥구조체의 단면을 나타낸다. 이 때 여러층으로 분할되어 있는 바닥구조체의 한층에 온수관이 설치되어 있는 경우, 이층을 발열층이라 가정하면 발열층에 대하여 아래와 같은 차분식을 얻을 수 있다⁽⁸⁾.

$$K_m A_f \frac{(T_{m-1} - T_m)}{\Delta x} + K_{m+1} A_f \frac{(T_{m+1} - T_m)}{\Delta x} + \dot{q} = (\rho_m C_{pm} \Delta x / 2 A_f + \rho_{m+1} C_{pm+1} \Delta x / 2 A_f) \frac{dT_m}{\Delta t} \quad (1)$$

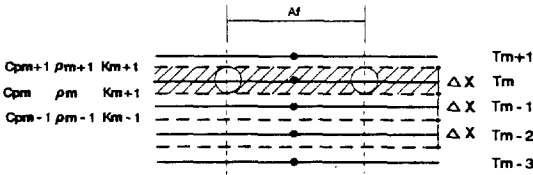


Fig.1 Aanalysis model of floor slab

여기서 K_m , ρ_m , C_{pm} 는 m 층의 열전도율, 밀도, 열용량을 나타내며 A_f 및 \dot{q} 는 바닥의 면적과 온수에 의한 바닥면의 가열량을 나타낸다. 따라서 발열면이 아닌 경우는 \dot{q} 를 무시하면 된다.

온수관을 통한 바닥복사난방의 경우는 파이프 표면평균온도 T_{px} 와 온수입구온도 T_{wi} 와의 함수로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\dot{q} = \dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot \epsilon_{px} (T_{wi} - T_{px}) \quad (2)$$

여기서 \dot{m}_w 및 C_{pw} 는 물의 유량 및 비열을 나타내며 ϵ_{px} 는 열통과 유효도를 나타낸다. 일반적으로 발열층에서는 수평방향으로 온도분포가 생긴다. 이 영향을 핀 효율 η_m 를 이용하여 표시한 후 발열층에서의 평균온도 T_m 과 T_{wi} 의 함수로 나타내면 아래와 같다.

$$T_m = T_{px} - \frac{\dot{q}/A_f}{1/R_m + 1/R_{m+1}} \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (m=p) \quad (3)$$

$$\frac{q}{A_f} = \frac{\epsilon_{PNL}(\dot{m}_w C_{pw})}{A_f} (T_{wi} - T_m) = W_p (T_{wi} - T_m) \quad (4)$$

여기서 $\epsilon_{PNL} = \frac{\epsilon_{px}}{1 + \left(\frac{\epsilon_{PNL}(\dot{m}_w C_{pw})}{A_f P} \right) (1/\eta_m - 1)}$

$$W_p = \frac{\epsilon_{PNL} \dot{m}_w C_{pw}}{A_f}$$

$$P = 1/R_m + 1/R_{m+1}$$

핀 효율은 발열면(m)에서 상하의 절점 $m-1$, $m+1$ 으로의 방열을 고려하여, 파이프사이의 1/2 지점을 단열경계로 설정하여 h 로 대표한다고 가정하면 다음식과 같이 된다.

$$\eta = 1/h\{D + (h-D) \tanh Z/Z\} \quad (5)$$

$$Z = (h-D/2) (C_l/K_m D)^{1/2} \quad (6)$$

여기서 K_m 은 온돌패널 발열층의 열전달율이고 D 는 핀의 두께로 파이프 지름과 같다고 가정하였다. ϵ_{px} 는 파이프내 온수에서 파이프 외부까지 열관류율 U_p 를 사용해서 다음식으로 계산한다.

$$\epsilon_{px} = 1 - \exp\left(-\frac{U_p A_f}{\dot{m}_w C_{pw}}\right) \quad (7)$$

$$\frac{1}{U_p} = \frac{A_f}{L} \left(\frac{1}{\pi D \alpha_w} + R_b \right) \quad (8)$$

여기서 α_w 는 파이프내 열전달율, R_b 는 바닥면과 파이프사이의 단위 길이당 열저항, L 은 파이프의 전 길이를 나타낸다. 이 때 바닥표면으로 부터 실내공간으로의 열전달량은 ASHRAE에서 제시한 아래의 실험식을 이용하였다.

$$q_a = (q_i + q_c) A_f \quad (9)$$

$$q_i = 4.93 \times 10^{-8} ((T_{m+1} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) \quad (10)$$

$$q_c = 2.18 (T_{m+1} - T_r)^{1.31} \quad (11)$$

여기서 q_i 는 바닥면으로 부터 실내로 복사에 의한 열전달량, q_c 는 대류에 의한 열전달량, q_a 는 전체 열전달량을 나타낸다.

2.2 제어방법

본 연구에서는 아래의 4가지 제어방법을 온돌에 의한 바닥 복사난방시스템에 적용하였을 때에 나타나는 결과들에 대하여 비교 분석하였다.

- 실내온도를 제어인자로 하는 On-off 및 PI Control
 - 실내온도 및 바닥표면온도를 동시에 제어인자로 하는 Two Parameter On-off Control (TPOC)
 - 실내온도 및 바닥표면온도를 동시에 제어인자로 하면서 제어시간 개념이 포함된 Two Parameter Switching Control(TPSC)
- 위의 제어방법에서 On-off 및 PI Control은 일

반적으로 많이 사용하는 방법이지만 TPOC 제어방법이나 TPSC 제어방법은 복사난방공간의 제어를 위하여 새로 시도되는 방법이다.

TPOC 제어방법은 제어기에서 실내온도 및 바닥 표면온도를 동시에 제어인자로 받은 후 실내온도 및 바닥표면온도의 설정범위를 벗어나는 곳을 제어 대상으로 On-off 제어하는 방법이다⁽⁶⁾.

반면에 TPSC 제어방법은 제어기에서 실내온도 및 바닥 표면온도를 순차적으로 제어인자로 받으면서 주어진 시간동안 실내온도와 바닥표면온도를 번갈아(Switching)가면서 제어대상으로 하여 두가지 온도를 설정범위에 만족시킬 수 있도록 하는 방법이다.

2.3 수치해석방법

Fig.2는 본 연구에서 사용한 TRNSYS 프로그램

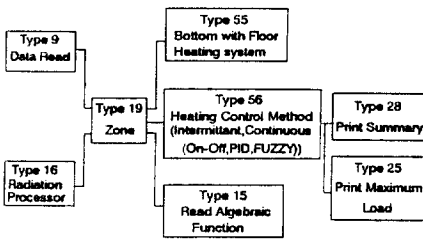


Fig.2 Flow chart of modified TRNSYS program

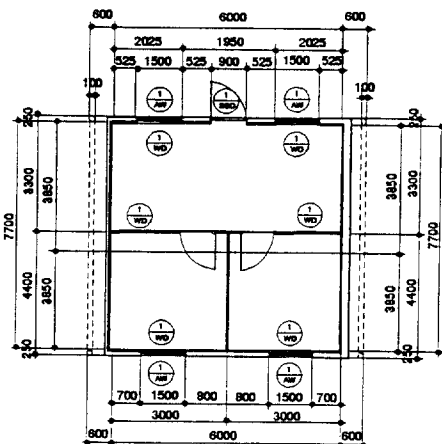


Fig.3 Plane diagram of experimental room

의 Flow Chart를 나타낸다. 그림에서 보면 복사난방공간의 동적해석을 위한 수치해석 모델은 3가지의 주요한 서브루틴으로 구성되어 있다.

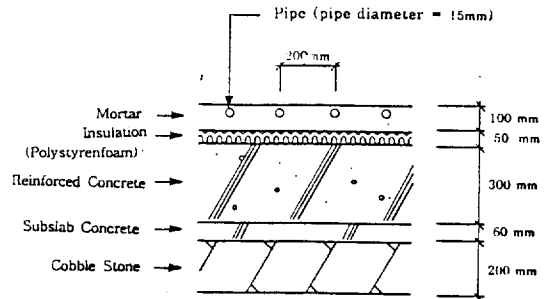
- 실내공간의 해석 모델
- 온수관이 설치된 바닥 Slab의 해석 모델
- 각종 제어방법에 대한 해석 모델

위의 3가지 해석 모델에서 첫번째 부분, 실내공간의 해석부분은 TRNSYS 프로그램을 이용하였고, 두번째, 세번째 부분의 해석 모델은 본 연구에서 새로 개발하여 첫번째 부분과 연계될 수 있도록 하였다.

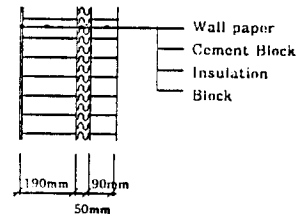
3. 실험

3.1 설비시스템

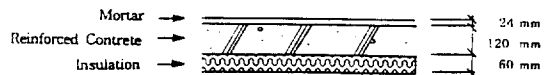
본 연구에서는 이론적인 해석결과의 타당성을 검



(a) Floor



(b) Wall



(c) Ceiling

Fig.4 Cross section of wall, ceiling and floor

토하기 위하여 3.0^(W) × 4.4^(L) × 3.8^(H) m 규모의 동일한 2개의 복사난방실험실을 건립하여 각기 다른 제어방식에 따른 결과를 동시에 비교 분석할 수 있도록 하였다.

Fig.3은 실험실의 전체 평면도, Fig.4는 단면상세도, Fig.5는 실험실의 전경을 나타낸다. 그리고

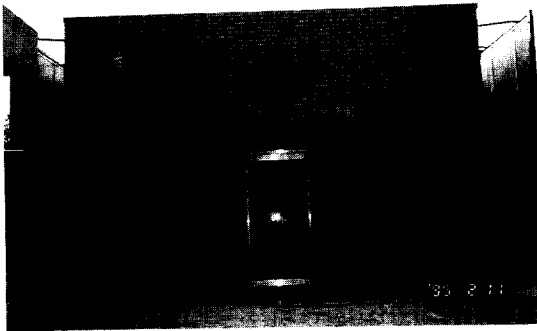


Fig.5 Overview of experimental room

Fig.6은 실험실에 설치된 복사난방 설비시스템을 나타낸다.

그림에서 보면 본 시스템은 가스보일러(6,500kcal/h), 온수탱크(400리터), 펌프(15리터/min), 밸브(코일) 및 파이프($\phi=20\text{mm}$) 등으로 구성되어 있다. 펌프 및 밸브는 Controller인 HY-P100에 의하여 PC에 연결되는데, HY-P100 자체에 의해서도 기존의 제어방법(On-Off, PID)으로 제어할 수 있지만 새로운 제어방법(TPOC, TPSC 제어)은 PC에 의해서만 제어가 가능하다.

3.2 측정시스템

Fig.7은 Temp Scan/1000TM을 이용한 데이터 기록계(data aquisition system)을 나타낸다. 실내외 온도, 공급환수온도 및 공급유량이 각각 T-Type Thermocouple, RTD-Type Thermocouple, Turbine Flow Meter에 의하여 측정되면 측정된 신호는 Temp Scan/1000TM으로 보내진다. 이때

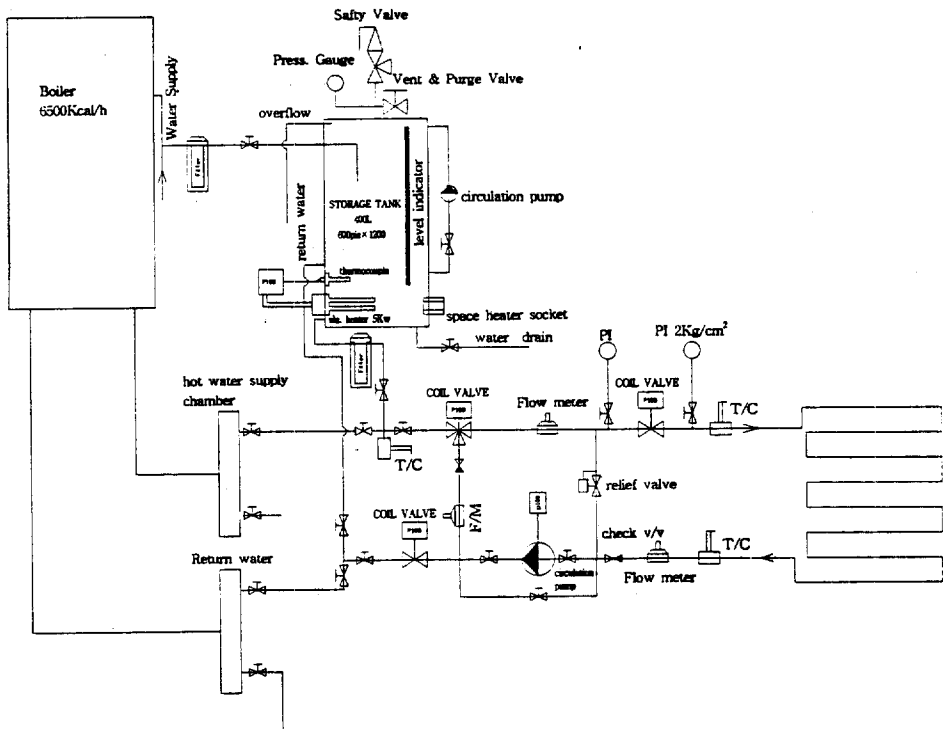


Fig.6 Schematic diagram of heating system

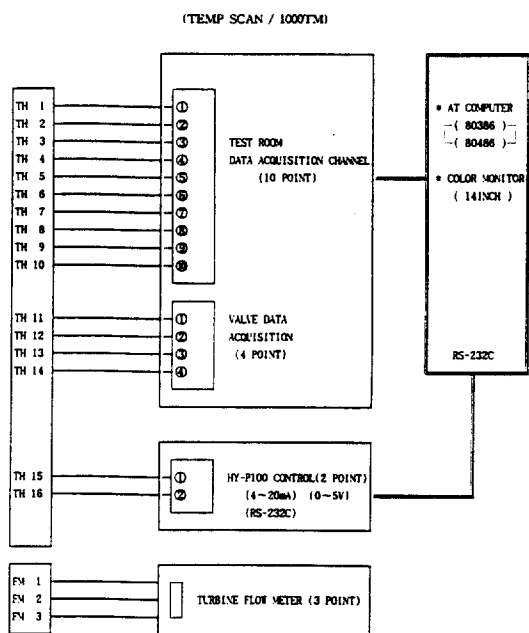


Fig.7 Data acquisition system

Temp Scan은 감지된 신호를 온도 및 유량으로 환산한 후 RS-232C를 통하여 PC로 보내게 되고 PC에서는 이러한 데이터를 보관한다. 그리고 제어인자로 채택된 채널에서의 데이터를 제어프로그램에서 연산한 후, 제어신호를 RC-232C와 HY-P100을 거친 후 제어할 밸브의 액츄에이터나 펌프의 모터로 보내게 된다. 이와 같이 함으로써 HY-P100에서 밸브 및 펌프가 제어되는 상황을 파악할 수 있으며 PC에 저장된 데이터들을 플롯(plot) 프로그램으로 넘겨서 분석할 수 있도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과와 이론해석 결과의 비교

이론해석 결과의 타당성을 검토하기 위하여, Fig.8은 1995년 3월 16일에 공급수온도를 55℃로 하고 실내온도를 제어인자로 하여 온수공급 펌프를 On-off 제어한 시험결과와 이론해석 결과를 비교한 것이며 Fig.9는 1995년 3월 19일에 실내온도를 제어인자로 하여 밸브를 PI제어한 경우를

비교한 것이다.

그림에서 보면 IT(EXP), IT(THEO)는 실험 및 이론해석 결과인 실내온도(℃)를 나타낸다. 그리고 OT(EXP)는 실험측정을 수행한 날의 대전지역의 외기온을 나타낸다.

Fig.8은 실내온도를 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 설정한 상태에서 펌프를 On-off 제어한 경우이다. 그림에서 보면 전체적인 온도분포의 경향은 실험 및 이론해석에 의한 결과가 실내온도는 2°C 이내에서 편차를 보이고 있고 바닥 표면온도는 이보다 큰 최대 5°C 정도의 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 가열기간과 냉각기간의 비가 실험과 이론해석에서 차이가 있는 것을 알 수 있다.

Fig.9는 실내온도를 22°C 로 설정한 상태에서 밸브를 PI 제어한 경우이다. 그림에서 보면 두가지 경우 모두 실내온도 22°C 에서 큰 편차를 보이지 않고 유지되고 있지만 바닥표면 온도는 실험결과와 이론해석 결과가 실험 초기에는 $5 \sim 6^\circ\text{C}$ 편차를 나타내다가 시간이 흐르면서 편차가 줄어드는 경향을 보이고 있다.

결과적으로 On-off, PI제어 모두 외기온의 변화나 제어방법의 변화에 대하여 전체적인 경향은 일치함을 알 수 있고 실내온도 보다는 바닥표면온도의 편차가 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 오차는 이론해석이 1차원적으로 수행되었고, 이론해석시 입력한 창문을 통한 침기량이나 태양열의 실내 유입량 등이 실제 상황과 차이가 있기 때문이며, 이론해석에서는 바닥표면온도가 전체 바닥표면의 평균온도를 나타내지만 실험에서의 바닥표면온도는 파이프와 파이프 중간에서의 바닥표면온도를 나타내기 때문이라 사료된다. 그리고 On-off 제어에서 이론해석과 실험실 가열기간과 비가열기간의 차이는 이론해석이 input data 등의 차이로 벽체나 바닥의 축열현상을 정확하게 반영시키지 못하기 때문이라 사료된다.

4.2 스위칭(switching) 온도제어

기존의 복사난방공간의 열적 제어와 관련된 연구들은 실내공기 온도만을 제어대상으로 하였지만 이러한 제어방법에 의해서는 실내공기와 바닥표면온도가 모두 쾌적 범위에 유지될 때 열적 쾌적감을

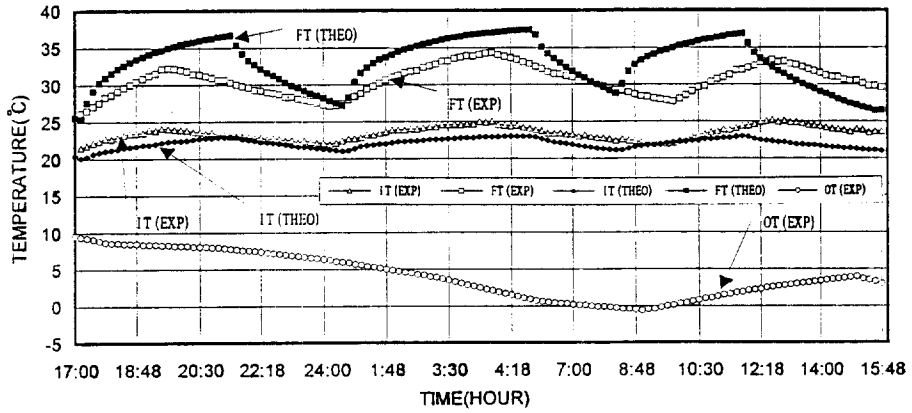


Fig.8 Comparison between experimental and analytical results(On-off control)

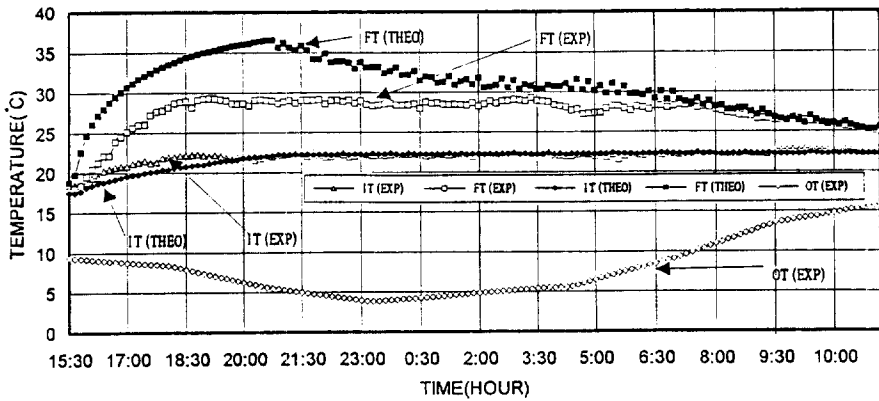


Fig.9 Comparison between experimental and analytical results(PI control)

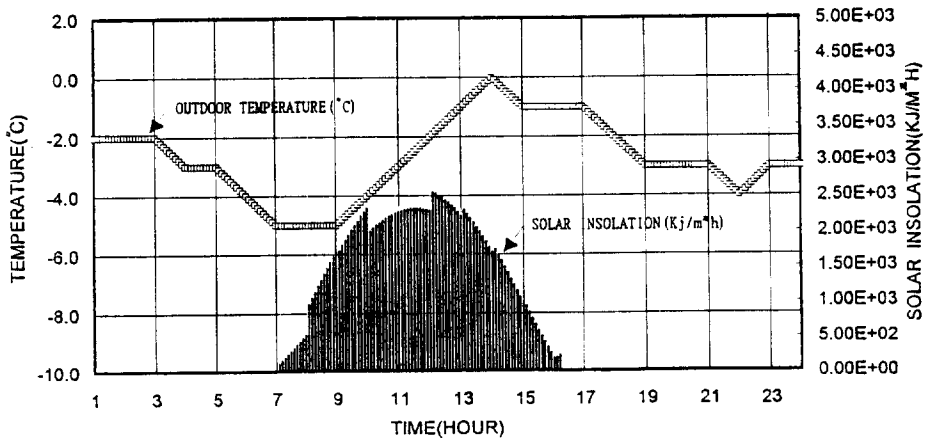


Fig.10 Typical weather of Seoul on the winter

느끼는 우리나라 온돌난방공간의 열적 특성상 실내의 쾌적 환경 유지에 문제가 있을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실내온도 및 바닥표면온도를 동시에 제어대상으로 하는 TPOC 방법(Two Parameter On-off Control)과 TPSC 방법(Two Parameter Switching Control)에 대하여 수치해석 결과를 보면서 각각의 특성을 설명한 후 다양한 조건에 대한 TPSC 방법의 특성을 규명코자 한다. 이 때 이론해석을 위하여 채택한 복사난방공간은 실험에서 채택된 것과 동일한 구조를 갖는 것으로 하였고 공급온수의 온도는 60℃로 일정하게 유지되는 것으로 하였다. 외기조건은 Fig.10에 나타낸 바와 같은 서울의 전형적인 1월달 기상조건을 이

용하였다.

Fig.11은 실내온도의 설정치를 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 하고 On-off 제어를 한 경우와 실내온도의 설정치를 $19 \sim 22^\circ\text{C}$, 바닥표면온도의 설정치를 $30 \sim 33^\circ\text{C}$ 로 하고 TPOC 제어를 한 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 IT는 실내온도(℃), FT는 바닥표면온도(℃)를 나타내며 ON-OFF는 On-off 제어, TWO는 TPOC 제어를 나타낸다.

그림에서 보면 On-off 제어인 경우는 실내온도는 2.5℃, 바닥표면온도는 9℃ 정도의 편차를 나타내는데 비하여 TPOC 제어인 경우는 실내온도 및 바닥표면온도 모두 0.5℃ 이내에서 균등한 온도분포를 나타내고 있다. 그러나 바닥표면온도가 설정

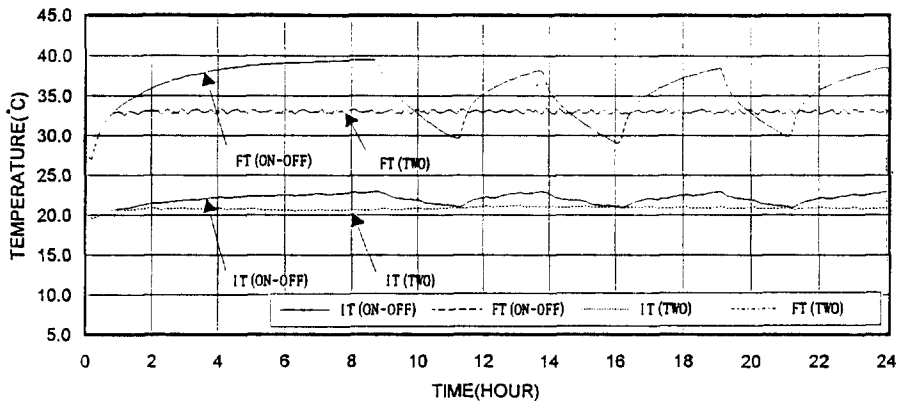


Fig.11 Comparison between On-off control and TPOC control

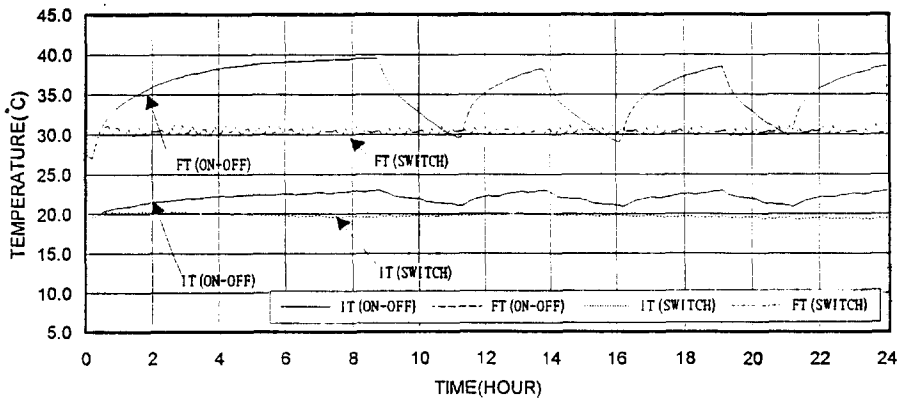


Fig.12 Comparison between On-off control and TPSC control

치(30~33℃)의 상한값(33℃)에 주로 머무는 것을 알 수 있다. 이는 이론해석에 사용한 1월의 외기온이 0℃ 이하로서 상당히 낮게 유지되기 때문이다.

이 결과로 볼 때 바닥복사난방 공간에서 TPOC 방법은 On-off 제어방법 보다 실내 열환경을 상당히 개선시킬 수 있지만 외기조건에 따라서 실내온도나 바닥표면온도가 외기온이 차감계 유지될 경우에는 상한치에, 외기온이 따뜻하게 유지될 경우에는 하한치에만 장기간 동안 유지될 소지가 있어서 이것이 단점으로 지적될 수가 있다.

Fig.12는 Fig.11에서와 같이 실내온도를 제어 대상으로 하여 On-off 제어를 한 경우와 실내온도의

설정치를 22℃, 바닥표면온도의 설정치를 30℃로 한 상태에서 15분간격으로 실내온도를 제어 대상으로 하여 제어하고 15분간은 바닥표면온도를 제어 대상으로 하여 제어한 TPSC 제어방법에 대한 결과이다. 그림에서 IT는 실내온도(℃), FT는 바닥표면온도(℃)를 나타내며 ON-OFF는 On-off 제어, SWITCH는 TPSC 제어를 나타낸다.

그림에서 보면 제어인자별 제어시간에 따라서 변할 수는 있지만 TPSC 제어인 경우에는 실내온도 보다는 바닥표면온도의 제어조건에 더 지배를 받아서 바닥표면온도 설정치(30℃)를 기준으로 제어되는 것을 나타내고 있다.

즉 앞의 두 그림에서 볼 때 TPSC 제어방법은

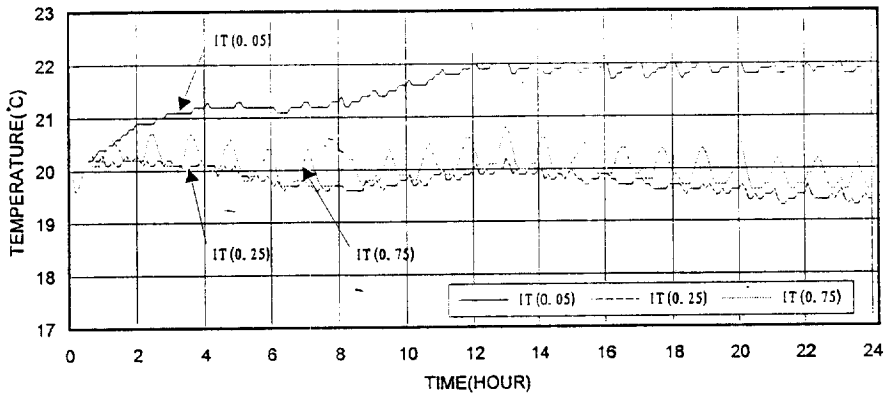


Fig.13 Indoor temperature with the variations of switching time

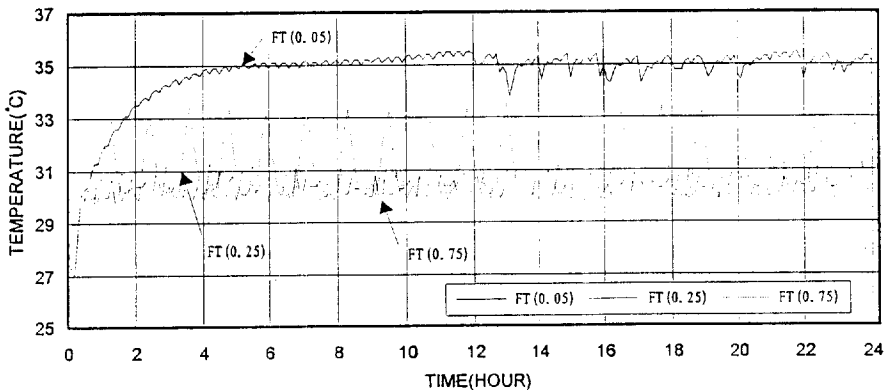


Fig.14 Floor surface temperature with the variations of switching time

제어인자별 제어시간의 적당한 배분에 의해서 TPOC 제어방법보다는 실내온도 및 바닥표면온도를 동시에 제재 범위대에 유지시키는데 유리한 결과를 나타낼 수 있을 것이라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 TPSC 제어방법의 제어시간을 변화시켜 가면서 실내온도 및 바닥표면 온도를 동시에 제어하였을 경우에 나타나는 결과를 통하여 적정제어시간 간격을 규명하여 보고자 한다.

Fig.13 및 Fig.14는 제어시간 간격이 0.025h인 상태에서 실내온도 및 바닥표면온도에 의하여 순차적으로 동일한 시간동안 스위칭(switching) 온도 제어를 할 경우에 1Cycle당 전체 제어시간이 0.05h(3min), 0.25h(15min), 0.75h(45min)인 경

우의 IT(실내온도), FT(바닥표면온도)를 나타낸 것이다. 여기서 전체 제어시간이 0.25h라는 것은 제어회수의 1cycle이 10회(0.25h/0.025h=10회)를 의미하므로 5회는 실내온도를 기준으로 하여 제어하고 5회는 바닥표면온도를 기준으로 하여 제어하는 것을 의미한다. 이 때 실내온도의 설정치는 22℃, 바닥표면온도의 설정치는 30℃로 하였다.

그림에서 보면 스위칭(switching)되는 시간이 짧을수록 실내온도에 지배를 받아서 실내온도의 설정치(22℃)를 기준으로 제어가 되는 것을 알 수 있으며 스위칭되는 시간이 길수록 바닥표면온도에 지배를 받아서 바닥표면온도의 설정치(30℃)를 기준으로 제어가 되는 것을 알 수 있다. 그러나 스위

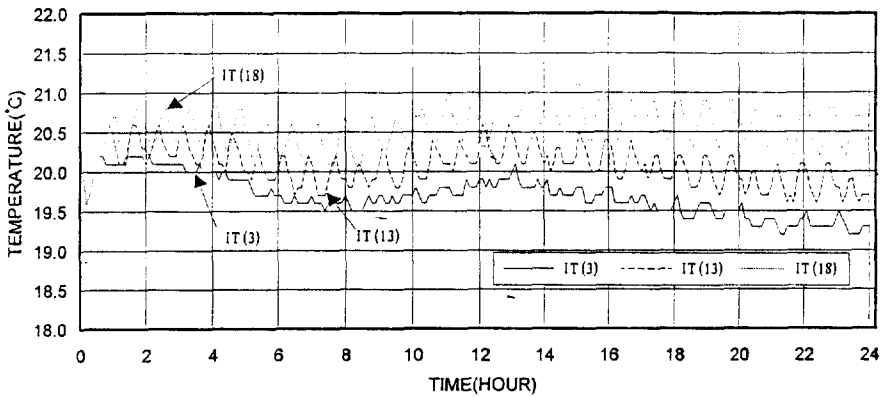


Fig.15 Indoor temperature with the variations of switching number

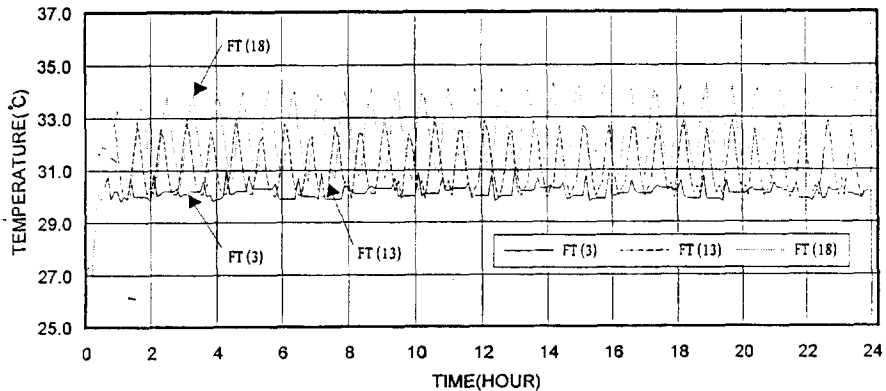


Fig.16 Floor surface temperature with the variations of switching number

칭 시간이 너무 길어지면 온도의 진폭이 커지게 되므로 TPSC 제어의 경우에 제어인자인 실내온도 및 바닥표면온도에 대하여 적절한 스위칭 제어시간 비율이 존재함을 알 수 있다.

Fig.15 및 Fig.16은 TPSC 제어에서 실내온도 및 바닥표면온도의 적절한 제어시간 비율이 어느 정도인지 규명하기 위하여 제어시간을 동일한 시간 간격으로 스위칭 제어를 하지 않고 스위칭되는 시간비율을 변경시킨 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. 즉 1회의 제어 간격이 0.025h(1.5min)인 상황에서 1Cycle당 전체 제어시간이 0.5h(30min), 즉 20회(N=0.5h/0.025h=20회)의 제어가 일어나는 경우에 바닥 표면온도를 기준으로 제어하는 회수를 나타낸 것이다. 그림에서 N=3이라는 것은 실내온도 및 바닥 표면온도를 모두 제어하는 1Cycle당 제어회수가 20번일 때 3번째부터 바닥 표면온도를 기준으로 제어한 것이고 N=18이라는 것은 총 제어회수 20회 중에서 18번째부터 바닥 표면온도를 기준으로 제어한 것이다. 즉 N이 작다는 것은 바닥표면온도를 제어하는 회수가 많다는 것을 의미하고 N이 크다는 것은 실내온도를 제어하는 회수가 많다는 것을 의미한다.

그림에서 보면 바닥표면온도를 기준으로 제어하는 회수가 많아지면, 즉 N이 적어지면 바닥표면온도 및 실내온도의 진폭이 작아지는 반면에 실내온

도를 기준으로 제어하는 회수가 많아지면, 즉 N이 커지면 실내온도 및 바닥표면온도의 진폭이 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 실내온도를 기준으로 제어하는 회수가 많아지면 바닥표면온도는 0.5~3°C 정도, 실내온도는 0.5~1.5°C 정도 상승하는 경향을 나타내었다.

전체적으로 두가지 제어인자를 대상으로 제어하는 TPOC 제어나 TPSC 제어의 경우에, TPSC 제어에서도 TPOC 제어에서와 같이 실내온도나 바닥표면온도의 설정치를 정확하게 유지시키지 못하는 것을 알 수 있다. 그러나 바닥표면온도를 제어하는 시간이 적어지고 실내온도를 제어하는 시간이 많아지는 경우, 즉 N이 큰 경우가 전체적으로 실내온도 및 바닥표면온도의 설정치(22°C, 30°C)근방에 더 근접하는 경향을 나타내었다. 따라서 바닥 난방방식을 채택한 온돌 주택에 본 제어방법을 채택할 때는 N을 크게하는 것이 유리함을 알 수 있다.

Fig.17 및 Fig.18은 기존의 On-off 제어와 TPOC 제어 및 TPSC 제어에서 스위칭 시간을 변경시켰을 때의 24시간 동안에 대한 실내평균온도(°C), 바닥평균온도(°C) 및 실내로 공급된 열량(Mj)을 나타낸 것이다.

Fig.17에서 보면 On-off 제어인 경우보다 TPOC 제어인 경우에는 실내온도 및 바닥표면의

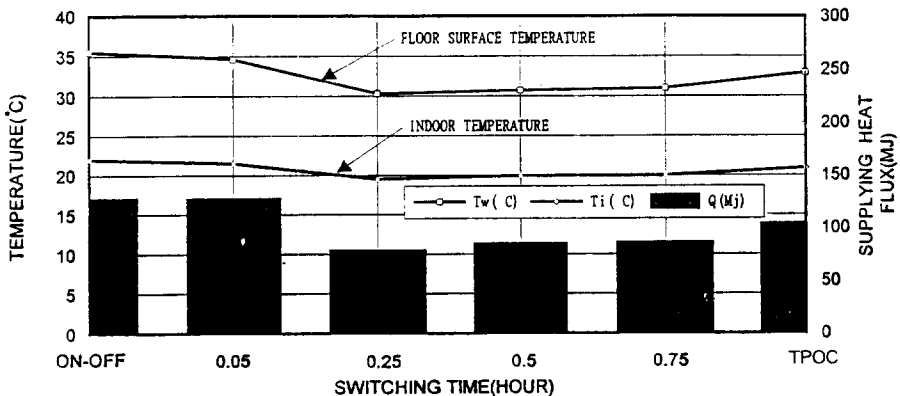


Fig.17 Average temperatures and heat flux of On-off, TPOC and TPSC control for various switching time

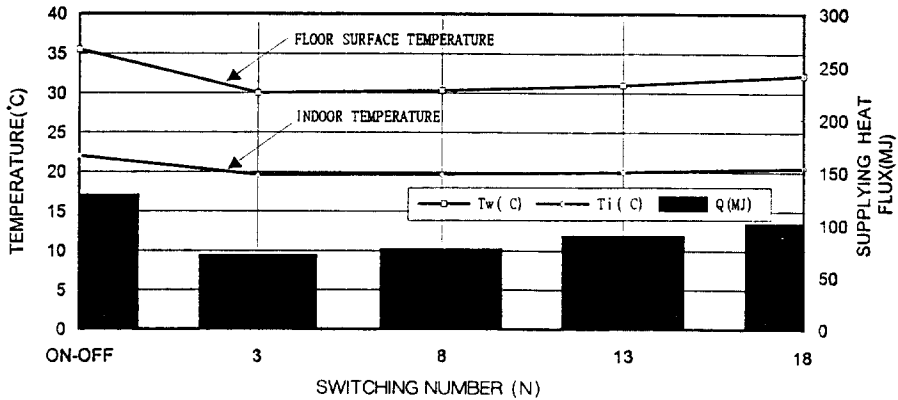


Fig.18 Average temperatures and heat flux of On-off and TPSC control for various switching number

평균온도가 1°C 및 2°C 정도 낮게 유지되고 있다. 그리고 TPSC 제어에서는 스위칭 시간의 변화에 따라서 스위칭 시간이 적은 0.05h인 경우를 제외하고는 전체적으로 실내온도는 2°C 정도 바닥 표면온도는 5°C 정도 차이를 나타내었다. 이러한 온도 차이의 결과에 의하여 실내로 공급되는 열량은 On-off 제어보다 TPSC 제어에서 34% 정도 감소되는 결과를 나타내었다.

이와 같은 결과는 스위칭되는 시간 비율을 변경한 경우인 Fig.18에서도 유사하게 나타나서 바닥 표면온도를 기준으로 제어하는 시간이 길어질수록 실내로 공급되는 열량이 감소되는데 최대 40% 가까이까지 감소되는 경향을 나타내었다.

에너지 소비 측면에서 볼 때 본 연구에서 채택된 외적조건과 제어조건에서 최적의 ST는 0.25h이고 N은 3인 것을 알 수 있다. 그러나 에너지 소비가 적다는 것은 본 연구에서 채택한 모델 주택의 경우에 바닥표면온도를 중심으로 제어한다는 것을 의미한다. 따라서 향후 주택의 규모, 벽체의 종류, 기상 조건 등 외적인 조건에 따른 최적제어조건에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

5. 결 론

두가지 제어인자를 제어대상으로 하는 TPOC (Two Parameter On-off Control) 제어나 TPSC

(Two Parameter Switching Control) 제어의 경우, TPSC 제어에서도 TPOC 제어와 같이 실내온도나 바닥표면온도의 설정치를 정확하게 유지시키지 못하는 것으로 나타났다.

그러나 TPSC 제어는 외기조건이나 벽체구조에 따라서 실내온도나 바닥표면온도가 설정범위의 상한치나 하한치에만 유지될 가능성이 있는 TPOC 제어의 단점을 상당히 보완해 줄 수 있는 것으로 나타났다. 또한 TPSC 제어의 적절한 이용은 기존의 On-off 제어에서 발생할 수 있는 과열난방의 단점을 보완시켜 줌으로써 실내환경 개선은 물론 소요에너지도 30% 이상 절약할 수 있음을 나타내었다.

참 고 문 헌

- Adelman, D., 1988, "Some control strategies for radiant floor heating", Radiant Times, March, pp. 4~5.
- Friedlander, M., 1986, "Premium heating with radiant slabs", Solar Age, April, pp. 66~71.
- Fort, K., 1987, "Untersuchung des amicchen verhaltens von fussbodenheizungen", Klima Kaelte Heizung, December, pp. 549~552.
- MacCluer, C. R., 1989, "Temperatur varia-

- tions of flux modulated radiant slab system”, ASHRAE Trans 1989 a, pp. 1010~1014.
5. Berglund, L., R. Rascati, and L. M. Markel, 1982, “Radiant heating and control for comfort during transient conditions.” ASHRAE Transactions, vol. 86, pp. 765~775.
 6. 조성환, 1995, “온돌 주택의 난방제어 방식에 따른 실내환경 특성”, 공기조화냉동공학회 '95 하계학술발표회.
 7. University of Wisconsin-Madison, “TRNSYS (A Transient system simulation program)”, 1983.
 8. 박상동 외, 1992, “신주택 기술개발 - 저가 고효율 난방 시스템 개발연구(Ⅱ)”, pp. 49~59.