

바닥복사 난방시스템의 에너지 유동특성에 관한 시뮬레이션 및 실험적 연구

안 병 천 , 송 재 엽[†], 이 태 원* , 김 용 기*

경원대학교 건축설비공학과, [†]경원대학교 건축설비공학과 대학원, *한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부

Simulation and Experimental Study for Energy Flow Dynamics of Floor Radiant Heating System

Byung-Cheon Ahn, Jae-Yeob Song[†], Tae-Won Lee*, Yong-Ki Kim*

ABSTRACT: A simulation and experimental study for energy flow dynamics of floor radiant heating system were performed. The study was done under both environmental chamber and a house with several rooms. The unsteady energy analysis method using equivalent R-C circuit and radiation heat transfer analysis of enclosure analysis method with simple structured rooms were used for computer simulation. Also, first order dynamics with time delay in analyzing the return water was considered. The results of temperature changes of the simulation study are good fit with the ones of experimental one.

Key words: Floor radiant heating system(바닥복사 난방시스템), Unsteady energy analysis (비정상 에너지 해석), Equivalent R-C circuit(등가 열저항-열용량 회로), First order system dynamics(1차 동특성)

1. 서 론

국내 공동주택의 대부분은 온수에 의한 바닥 복사 난방시스템을 채택하고 있으며, 열원의 생산방식에 따라 분류하면 세대별로 설치된 보일러에 의해 난방운전을 하는 개별난방방식과 각 단지별 중앙기계실에서 생산된 열원을 열교환기를 거쳐 각 세대에 공급하는 중앙난방방식, 그리고 열병합 발전이나 산업폐열을 이용하여 대단위 공동주택에 24시간 연속적으로 공급하는 지역난방방식등으로 구분할 수 있다.

이러한 바닥복사 난방방식들에 대하여 실내의 공급유량 및 공급온도에 따라 실내온도를 쾌적한 범위로 유지하기 위한 연구들이 진행되고 있으나 여러 가지 난방방식에 따라 실내온도 변화의 동적 특성과 열량 변화가 각각 다르게 나타나고 있으며 최근 국내 건축물이 공급자 중심으로부터 수요자 중심으로 변화함에 따라 수요자의 다양한 요구에 부응하고, 생활수준의 향상에 따른 쾌적 주거공간 수요증대에 따라 실내 공간의 에너지 해석에 따른 연구가 증가하게 되었다.

또한 에너지 절감에 따른 관심이 높아짐에 따라 절약에 따른 법규들이 늘어나고 있으며 이와 같은 현상으로 인해 정확한 실내 열환경에 대한 에너지 해석의 중요성은 날로 높아지고 있으나 에너지 절약 성능에 대한 자료 및 연구가 부족한 실정이다.

[†]Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5314; fax: +82-31-750-5314

E-mail address: finalfortres@naver.com

바닥 복사 난방시스템에 관련된 연구로서 Friedlander⁽¹⁾와 Adelman⁽²⁾은 온수가 순환하고 있는 상태에서 외기 온도의 변화에 따라 공급온수를 반비례적으로 조절하는 outdoor reset control방식을 제안하였으며, 특히 Adelman의 경우 바닥 복사 난방시스템에서 실내로 유입되는 열량의 제어에 있어서는 서모스탯(thermostat)이 효과적이지 못하다고 하였다.

이에 비해 국내에서는 안⁽³⁾등이 공동주택 바닥 난방시스템에 대해 순환펌프의 회전수제어에 의한 공급온수 유량제어방식을 도입하여 기존의 간헐난방 및 서모스탯을 이용한 단속난방방식들과의 실내열환경 및 에너지 소모량 측면을 비교 연구하였다.

또한 송⁽⁴⁾ 등은 바닥 복사 난방시스템에 대하여 에너지 사용을 절감하고자 자동온도조절기 조절 특성에 대한 시뮬레이션 연구가 이루어졌으나 본 연구에서 사용된 에너지해석 프로그램의 검증이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 바닥 복사 난방 시스템의 실내 에너지 해석을 수행하였으며 이에 대한 실험적 검증이 이루어졌다. 여기서 온수의 공급 유량 및 공급온도, 외기온도 변화에 따른 실내 열환경의 변화특성을 고찰하고, 시뮬레이션 연구 및 실험에 의한 검증 등이 수행되었다.

2. 실험장치 및 구성

본 연구에서는 실내 공간에서의 에너지 해석에 대한 검증연구를 위하여 실험장치를 구성하였는데 Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

바닥패널에 매설된 배관에 일정한 온도의 난방수를 공급하기 위하여 보일러와 열교환기 및 난방 부하나 순간 열량공급의 변동에 따른 난방수의 온도변화를 방지를 위한 실험의 수행에 충분한 용량의 축열조를 설치함으로써 저장온수는 설정된 온도로써 일정하게 유지될 수 있도록 하였다.

한편 실내공간의 난방상태를 분석하기 위하여 바닥패널의 평균온도를 측정할 수 있을 것으로 사료되는 실의 중앙지점의 난방코일에 제일 가까운 부분과 난방코일 사이의 중심부를 선정하여 온도를 측정하였으며 각 벽면과 천정 그리고 실내공기의 온도를 측정하기 위하여 각각의 중앙지점의 위

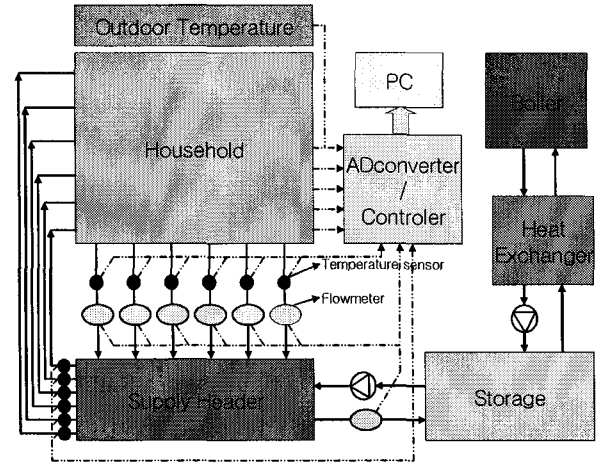


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment.

치에 열전대를 설치하였다. 특히 실내온도의 측정을 위해서는 실 중앙의 지상으로부터 1.5m의 위치에 온도센서를 설치하였다.

또한 실 주변 외기를 일정한 온도로 유지하기 위하여 인공기후실 부하에 충분한 용량을 가진 저온냉동기를 설치하여 기후조건에 관계없이 실험조건에 부합하는 실 주변의 온도를 얻을 수 있게 하였다.

이와 같이 설치되어진 공간에서 다양한 운전조건의 변화를 주어 실험을 수행하였으며 그에 따른 운전조건은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1 Operating conditions (enviromental chamber).

Description	Flow rate	Supply water temperature	Outdoor temperature
Case1	2LPM	50℃	8℃
Case2	3LPM	50℃	8℃
Case3	3LPM	60℃	8℃
Case4	2LPM	50℃	2℃

또한 세대내 실 구분에 따른 에너지 해석결과에 대한 검증 실험을 수행하고자 Fig. 2와 같이 실 구분이 이루어진 세대를 대상으로 실험을 수행하였다.

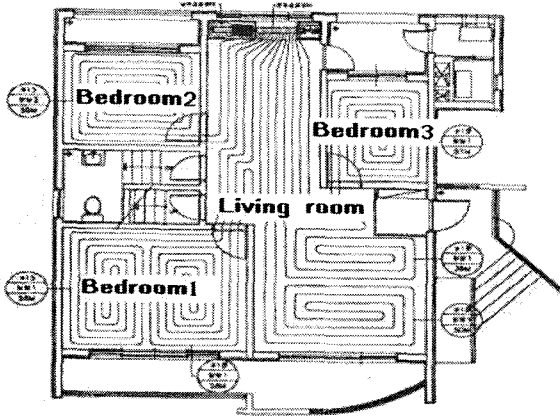


Fig. 2 Floor pipe networks in household.

세대는 방이 3개, 거실로 구성되어 있고 온수는 공급헤더(header)에서 6개의 분기관으로 나뉘어 공급되어지고 있으며 침실1과 거실에 각 2구, 침실2와 침실3에 1구씩 분기되어있다.

이 실험에서의 운전조건은 축열조의 온수온도를 50℃로 설정하고, 10LPM의 유량을 공급하여 주었으며 외기온도는 세대 주변의 두 위치에서 온도를 측정하여 평균값을 사용하였다. 또한 침실1에 제어기를 설치하여 설정온도를 20℃로 하고 차동값을 ±0.5℃로 하여 온수공급펌프를 On-Off되게 하였다. 그리고 각 실의 공급유량 값은 예비실험을 통해 구해내었다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 에너지 해석 프로그램은 외기온도 및 공급유량 공급온도 등의 여러 제어변수를 통하여 실내 공기 및 벽면 바닥 등의 온도를 해석 할 수 있도록 하였으며 그 밖에 여러 가지 운전특성들을 고려할 수 있도록 구성되어 있다.

실의 공간에서의 해석은 복사열 에너지 해석이 용이하도록 Fig. 3의 그림과 같이 수행하였으며 실의 구분이 있는 세대에 관해서는 도면을 바탕으로 실의 구조를 단순화 시켜 해석을 수행하였다.

또한 환수온도의 경우 유량 공급 시와 유량 공급이 이루어지지 않을 시 급수온도와 공급유량 등을 고려할 때 환수온도는 시간지연요소를 갖고 있기 때문에 본 연구에서는 환수온도 계산 시 시

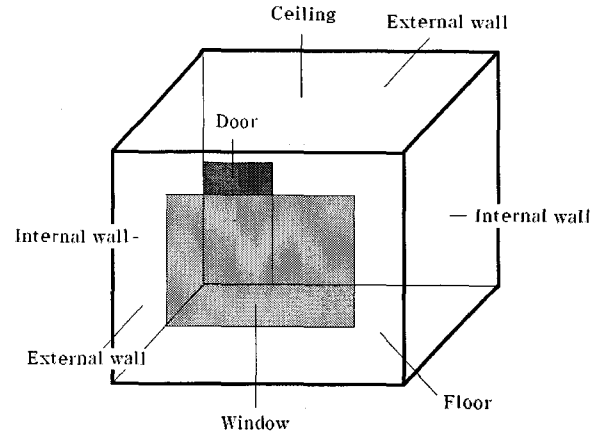


Fig. 3 Simplified room model for radiation heat transfer analysis in room.

간지연을 갖는 1차 동특성이 있는 시스템으로 가정하여 해석하였다. 식 (1)은 1차 동특성 해석을 위한 함수이다.

$$Y(s) = \frac{1}{\tau s + 1} X(s) \quad (1)$$

여기서, τ 는 시상수(time constant)이며, 시물레이션 시행작업을 통해 구해내었다.

각 실의 모델은 실의 열적 구성요소들을 질량 집중 모델인 등가 열저항-열용량 회로로 나타내어 구하였다.⁽⁵⁾ 이러한 모델링 방법은 비정상 열전달의 수치해석에 많이 사용하는 유한 차분해석법이나 응답계수법에 비해 전산 시간을 줄일 수 있어 전체 바닥난방 시스템의 시뮬레이션을 용이하게 만드는 장점이 있다.

시뮬레이션에서 사용한 적분방법은 Runge Kutta 4차 방법이며 $\Delta t=0.01$ sec로 선정하였고 프로그램의 실행을 위해 윈도우 XP환경에서 작업이 가능한 마이크로소프트사의 Fortran Powerstation version 4.0을 사용하였다. 컴퓨터는 펜티엄 2.8GHz(2.8GHz)로서 1GB RAM, 120GB HDD, 512KB 캐쉬메모리를 가지고 있다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 환수온도의 실험데이터와 1차동특성을 적용하지 않은 시뮬레이션 값과 적용한 값을 비

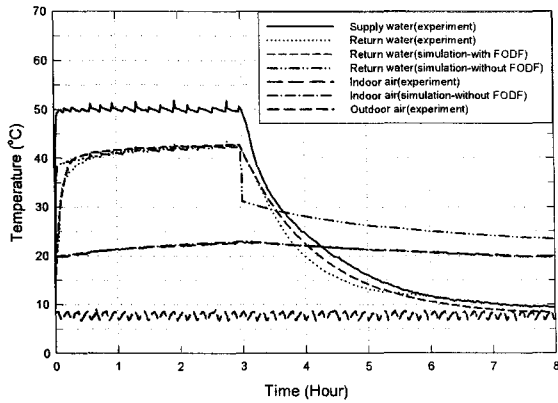


Fig. 4 The temperature responses of return water.

교해 놓은 그림이다. 1차 동특성 함수(FODF : First Order Dynamic Function)를 적용시켰을 경우 시뮬레이션 값은 실험데이터 값을 상당히 추종하지만 적용하지 않았을 시에는 유량공급 때의 초기 동특성과 유량공급이 중지된 후의 동특성이 크게 차이를 나타내었다. 이는 시간의 경과에 따른 시뮬레이션 해석의 문제로 열전달에 대한 응답이 빠르게 나타나기 때문이다.

이에 따라 다음 결과에 관해서는 1차동특성 해석이 이루어진 환수온도의 시뮬레이션 값을 적용하여 나타내었다.

먼저 인공기후실 Chamber에 설치되어진 한개실의 열적 동특성을 살펴보고자 실험시간을 총 8시간으로 하고 3시간동안 온수를 공급한 후에 5시간동안 온수공급을 중단하였다. 실험을 통해 얻어낸 공급온도와 유량 그리고 외기온도값을 이용하여 시뮬레이션에 적용 실험값과 시뮬레이션에 따른 결과값을 비교 하였다.

Fig. 5는 온도 설정치를 8°C로 하여 냉동기를 가동하여 실 주변온도를 유지하고 공급온수온도를 50°C로 설정 후 2LPM의 유량을 공급하였을 때 실내의 열적 동특성을 살펴본 그림이다.

바닥표면온도의 경우 실험값은 바닥의 고온부와 저온부의 온도를 나타내고 있으며 시뮬레이션 값은 두 지점의 평균온도와 유사한 동특성을 나타내었다. 외기온도의 경우 냉동기의 제어성능으로 인해 설정치에 대해 $\pm 1^\circ\text{C}$ 가량 유동하였다.

Fig. 6은 초기실험조건에 대해 공급유량을 3LPM으로 하였을 때의 실내의 열적 동특성을 살펴본 그림이다. Fig. 5와 비교해 볼 때 상대적으로

많은 유량공급으로 인해 환수온도의 초기 동특성이 더욱 빠르게 나타나고 있다.

Fig. 7은 전 실험조건에 대해 온수공급온도를 60°C로 설정하여 공급하였을 때 실내의 열적동특성을 살펴본 그림이다. 전 실험과 비교해 상대적으로 높은 온수온도로 인해 환수온도 또한 높게 나타났으며 바닥표면온도의 경우 고온부와 저온부의 온도차가 Fig. 6에 비해 크게 나타나는데 이는 고온부의 경우 난방코일과의 거리가 저온부에 비해 상대적으로 가까우므로 열전달계수 및 열용량의 차이로 인해 고온부의 초기동특성은 빠르나 저온부는 느리게 나타나기 때문이다. 실내공기온도 및 내벽면 온도 또한 더 많은 열량공급으로 인해 전 실험과 대비해 높은 온도를 나타내었다. 또한 환수온도의 경우 온수공급이 이루어지지 않을 때 실험값이 지수함수와 비슷한 특성을 보이며 시뮬레이션 값과 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 높은 온수 공급으로 인해 외기온도와 온도차가 커짐에 따라 온수공급이 중지된 초기에 빠른 온도의 하강으로 보이며 이후 실의 바닥 패널의 상대적으로 낮은 온도하강으로 인하여 실내 바닥 코일의 온수가 실 밖으로 열유동 함으로써 느린 동특성을 나타내는 것이다.

Fig. 8은 초기 실험운전조건에 대해 실 주변의 외기온도를 2°C로 설정하여 냉동기를 가동하였을 때 실내의 열적 동특성을 살펴본 그림으로써 Fig. 5와 비교해 볼 때 상대적으로 낮은 외기온도로 인해 환수온도 및 바닥표면온도, 실내공기온도, 내벽면 온도가 낮게 나타나고 있다. 그리고 Fig. 7에서 나타난 바와 마찬가지로 온수공급이 이루어지지 않을 시에 환수온도 값의 차이가 크게 나타나며

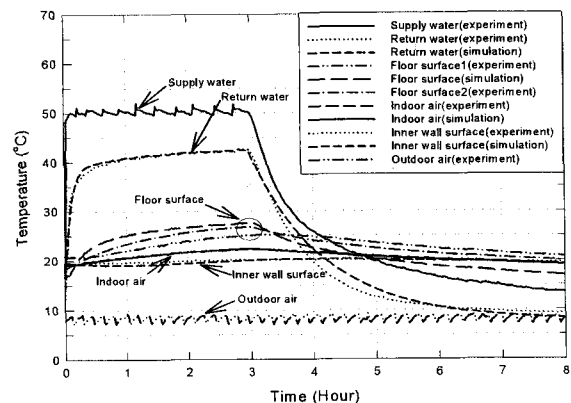


Fig. 5 Various temperature changes in room. ($T_s=50^\circ\text{C}$, Flow rate=2lpm, $T_o=8^\circ\text{C}$)

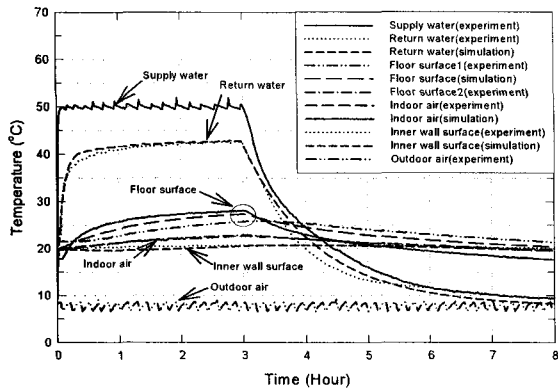


Fig. 6 Various temperature changes in room. (Ts=50°C, Flow rate=3lpm, To=8°C)

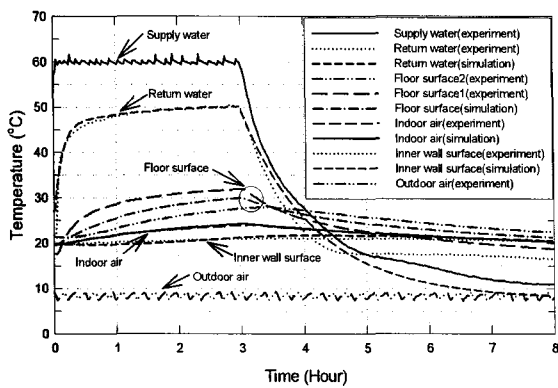


Fig. 7 Various temperature changes in room. (Ts=60°C, Flow rate=3lpm, To=8°C)

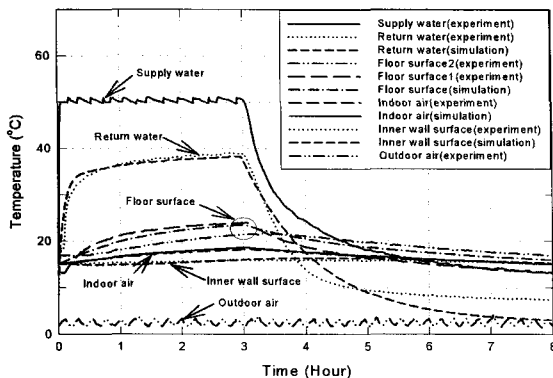


Fig. 8 Various temperature changes in room. (Ts=50°C, Flow rate=3lpm, To=2°C)

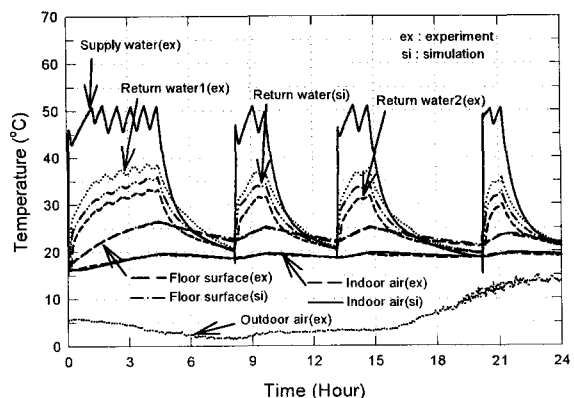
이는 외기온도가 상대적으로 낮아짐으로 인하여 위에서 설명한 바와 같이 온수와 외기의 상대적으로 큰 온도차와 실내 바닥코일의 온수의 열유동에 의한 것이다.

Fig. 5~8에서 살펴보았을 때 유량 및 공급온도, 외기온도 등 제어변수들의 다양한 운전조건의 변화를 주었음에도 불구하고 시뮬레이션 값들은 실험 값과 유사한 동특성을 나타내며 양호한 응답특성을 나타내었다.

다음은 실 구분이 되어진 한 세대에 대하여 각 실에 대한 열적 동특성을 살펴보고자 운전조건에 따라 1일간의 실험을 실시하고 실험을 통해 얻어낸 데이터를 시뮬레이션에 적용하여 실험값과 시뮬레이션에 따른 결과 값을 비교하였다.

Fig. 9는 각 실의 온도 변화 동특성을 살펴본 그림이다. 그림에서 살펴보면 시뮬레이션 에너지 해석을 용이하게 하기 위해 단순화 해석 모델을 적용했음에도 불구하고 실험값과 유사한 동특성을 나타내었다.

공급온수온도의 경우 축열조의 용량의 크기가 세대 부하에 비해 충분하지 못하여 온도변화가 크게 나타났으며 거실의 분기관의 환수온도 차이가 침실1의 경우보다 코일의 길이와 공급유량의 차이로 인하여 크게 나타나는 모습을 보였다. 그리고 펌프가 운전하는 시간이 각각 다르게 나타나는데 이는 냉각되어 있는 실을 설정온도까지 난방하는데 많은 시간이 되어 초기운전 시간이 길게 나타나며 이후 외기온도가 중반부터 점점 증가함에 따라 난방부하가 줄어들어 운전시간이 줄어들음을 알 수 있었다. 또한 세대 내 각 실에 대한 온도 동특성에 대해 살펴본 결과 실의 구조와 특성에 따른 열용량과 공급유량 등의 차이로 인하여 각 실 간의 온도응답 특성은 차이점을 나타내었으며 외기를 간접으로 접한 침실1과 침실2의 경우 실내 공기온도의 변화폭이 상대적으로 작게 나타났다. 또한 각 실의 초기 동특성의 차이도 나타났다.



(a) Living room

5. 결론

바닥복사 난방시스템에 대하여 에너지 동특성에 대한 실험 및 시뮬레이션 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

환수온도의 시간지연요소에 따른 1차동특성을 시뮬레이션에 적용함으로써 실험데이터에 대해 양호한 추종성을 나타냈으며 실내의 에너지해석은 질량집중 모델인 등가 열저항-열용량 회로를 적용하여 실 공간의 열해석을 검증한 결과 실험데이터에 대해 유사한 동특성을 가진 시뮬레이션 데이터를 얻어낼 수 있었다.

또한 공급온수의 유량 및 온도, 외기온도 등의 운전조건의 변화에 대한 검증을 통해서도 응답특성이 양호하게 나타났고 세대 내 실구분에 따른 해석이 어려운 해석 모델에 대해서 복사열 에너지의 원활한 해석을 위해 밀폐된 공간의 정방형의 단순화 모델로 해석을 수행하였음에도 불구하고 적은 오차의 양호한 동특성을 나타내었다.

참고문헌

1. Friedlander, M., 1986, "Premium heating with radiant slabs" Solar Age Magazine, April, pp. 66-71.
2. Adelman, D., 1988, "Some control strategies for radiant floor heating", Radiant times, pp. 4-5
3. Ahn, B. C. 2004, "Optimal Operation Methods for Hot water Radiant Panel Heating System in Residential Buildings", Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 800-806
4. Song, J. Y. 2005, "A study on the Performance of Automatic Thermostatic Valves for Hot Water Heating System in Residential Buildings", Proceedings of the SAREK 2005 Winter Annual Conference, pp.457-462
5. Ahn, B. C. and Chang, H. W. 1996, "The Energy Analysis and control Characteristics of A Hot water Heating Systems for Apartment Houses", Proceedings of the SAREK 1996 Conference, pp.76-87

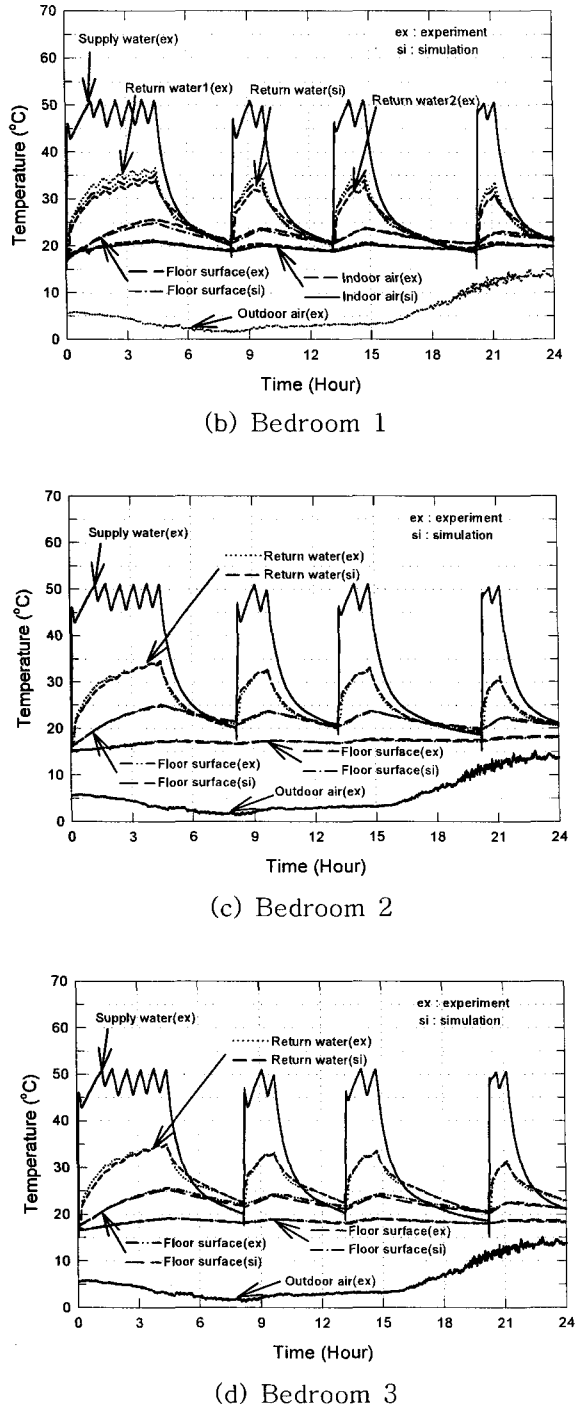


Fig. 9 Various temperature responses of each room in household.