

# 온돌 난방에 대한 동적 시뮬레이션

홍 희 기<sup>†</sup>, 김 시 환<sup>\*</sup>

경희대학교 기계공학과, \*경동네트워크

## Method of Dynamic Simulation for Ondol Heating

Hiki Hong<sup>†</sup>, Sihwan Kim<sup>\*</sup>

**ABSTRACT:** Ondol heating, a kind of radiant floor heating, is a main method used in housing units in Korea. Building energy simulation including ondol and relevant facilities has not been performed due to its complexity. For evaluating energy consumption and indoor temperature variation, a new method should be proposed. At the present work, a dynamic simulation on ondol heating was tried by combining TRNSYS and EES. Characteristic functions for a pump, hot water coils and a gas boiler were simultaneously solved by EES, and calculated flow rates and supply temperature of hot water were provided as inputs of the active layer of TYPE 56 in TRNSYS. The results by the simulation on a typical housing unit in Korea shows a good trend in a viewpoint of actual behavior of ondol heating.

**Key words:** Ondol(온돌), Heating(난방), Building energy simulation(건물 에너지 시뮬레이션), Apartment house(아파트), TRNSYS, EES

### 기 호 설 명

- $d$  : 배관내경(m)
- $f$  : 마찰계수
- $l$  : 온수코일길이(m)
- $\dot{m}$  : 질량유량(kg/s)
- $p$  : 압력(kPa)
- $v$  : 유속(m/s)

- coils : 온돌온수코일
- $n$  :  $n$ 번째 코일
- pump : 순환펌프

### 그리스 문자

- $\gamma$  : 난방제어함수값
- $\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

### 하첨자

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-2625

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

### 1. 서 론

주거용 건물의 난방과 급탕에 소비되는 에너지 비율이 우리나라 총 에너지의 13% 정도로 큰 비중을 차지한다. 따라서 한3국 주택의 58%을 차지하고 있는 아파트를 대상으로 하는 에너지 절약은 과급효과가 매우 크며, 에너지 소비에 미치는 여러 요인에 대해 분석한 논문이 다수 발표된 바 있다.<sup>(1-3)</sup>

적절한 에너지 절약방안이 제시되어도 실제건물을 대상으로 실증실험을 통해 검증하는 것은 용이하지 않다. 이를 보완하는 것이 컴퓨터에 의한 시뮬레이션으로서, 건물에너지 추정을 위한 시뮬레이션의 경우 이상적인 난방기를 전제로 하

여 DOE2, TRNSYS가 주로 사용되었으나, 설비를 포함한 예는 거의 없었다. 주된 이유는 한국의 난방 방식이 개별보일러 혹은 지역난방을 열원으로 하는 온돌에 기인한다. 온돌 자체의 복잡함과 축열효과 및 시스템 응답의 지연 등 계산상 다수의 어려움이 수반된다.

온돌을 포함시키지 않은 상태에서 아파트의 에너지 시뮬레이션은 가치 있는 일이나, 실내온도 변화 및 쾌적성을 예측하는 데 실제 상황과는 적지 않은 차이를 가져오기도 한다. 설비가 포함되지 않은 건물에너지 시뮬레이션은, 연속 난방의 경우에는 비교적 총 에너지 소비량의 적절한 추정이 가능하나, 간헐 난방에 적용하면 상당한 차이를 가져올 수 있다. 따라서 대부분의 난방방식이 온돌인 한국의 주택에 대한 정확한 에너지 및 쾌적성 시뮬레이션을 위해서는 온돌을 포함시킨 해석이 필요하며, 본 연구에서는 이에 대한 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 온돌 난방 시뮬레이션

### 2.1 대상공간

우리나라 아파트의 약 1/4을 차지하는 30평형대에서도 대표적인 32평 아파트를 대상으로 하며, Fig. 1의 전용면적 84.7 m<sup>2</sup>(천장높이 2.3 m)를 선정하였다. 상세한 벽체 및 창호조건은 이전 연구<sup>(4)</sup>를 참고하기로 하고, 온돌 구조만을 Fig. 2에 나타내었다.

건물에너지 시뮬레이션의 결과에 큰 영향을 미치면서도 불확실성이 큰 변수가 환기횟수이다. 거주자의 출입이 거의 없는 오후 9시부터 다음날 오전 7시까지의 시간당 0.1회, 그 외의 시간대는 0.7회로 설정하였다. 일반적으로 사용하고 있는 방식을 고려하여, 남쪽 혹은 동쪽을 향하는 전면 발코니는 확장한 것으로 하였으며, 모든 유리는 이중창(4/16/4, 2.83 W/m<sup>2</sup>K)으로 하였다.

온수코일은 내경 16 mm, 중심간 거리는 200 mm로 하였으며, 0.25~0.3 m/s의 유속을 갖도록 설정하였다. 각 구획에 설치되는 온수코일의 길이 등을 Table 1에 정리하였다.

과거에는 한 구획의 온수코일의 길이를 50m 이하로 규정하였으나 현재에는 제약이 없는 상태이다. 각 구획에 설치되는 대표적인 예를 Fig. 3

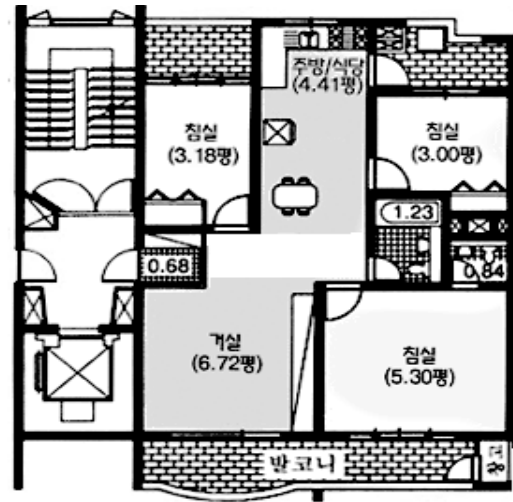


Fig. 1 The plan of an apartment house used in simulation

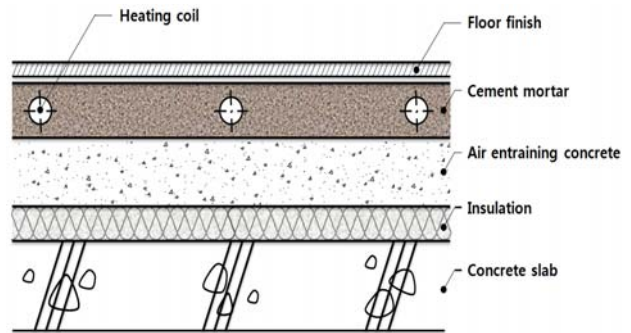


Fig. 2 Section of floor with ondol coil.

에 보인다. 그러나 지나치게 코일 길이가 길어지면 원활한 유량 공급이 어려워지므로 120 m를 넘기지 않는 경향이다. 따라서 거실의 경우에는 103 m의 온수코일을 두 개의 루프로 구성하였다.

온수코일의 길이가 서로 다른 각 구획에 적절한 온수유량을 공급하기 위해 난방분배기를 설치하게 되며, 개략도를 Fig. 3에 함께 보인다. 보일러 혹은 열교환기에서 가열된 온수는 난방분배기의 공급헤더를 통해 각 구획으로 분배되며, 난방차단을 위한 수동밸브, 유량조절을 위한 미세유량조절밸브, 전자밸브 등이 설치된다. 보일러의 용량조절과 더불어 난방제어기의 온오프제어, 정유량제어, 비례제어 등을 통해 각 구획의 실내온도를 조절하게 된다. 본 연구에서는 현재 가장 많이 채택되고 있는 정유량제어 방식을 대상으로 하였으며 Table 1의 유량이 되도록 미세유량 조

Table 1 Ondol coil specifications

zone	area (m <sup>2</sup> )	length of coil (m)	additional length (m)	flow rate (lpm)
bedroom 1	20.7	104	0	3.6
bedroom 2	10.9	55	80	3.1
bedroom 3	8.1	41	100	3.0
living & kitchen	41.2	103×2	0	3.6
bathroom	4.9	25	130	2.9

절밸브의 개도를 조정하게 된다. 계산에서는 개도에 해당되는 등가길이를 산출하였다. 개도 조정을 하지 않는 경우 코일 길이가 가장 짧은 구획에 가장 많은 유량을 보이게 되고 이로 인해 과열현상이 발생할 수 있다. 따라서 정유량제어 방식에서의 미세유량 조절밸브에 의한 조정은 매우 중요하며 필수적이다.

## 2.2 시뮬레이션 방법

건물에너지 동적 해석 소프트웨어인 TRNSYS 16.1의 TYPE 56에는 복사냉난방을 모델링하기 위해 벽체에 활성층(active layer)을 포함시킬 수 있는 기능이 추가되었다. Fig. 2에 보인 바와 같이 벽체는 여러 층으로 구성되며, 활성층이라는 명칭은 유체가 흐르는 코일을 통해 능동적으로 벽체 표면으로부터 열을 방출 혹은 제거할 수 있기 때문에 붙여진 것이다. 활성층에 대한 상세한 수학적 모델링은 관련문헌<sup>(6)</sup>을 참고하기로 하고, 활성층이 바닥에 설치된 것이 온돌이며, 온수코일의 루프수, 내경, 코일의 중심간 거리 등을 TRNSYS의 TRNBuild를 통해 설정하게 된다.

온돌 입구수온과 유량은 상수, 설정된 함수 혹은 외부에서 계산된 결과를 입력하게 된다. 개략적인 계산이라면 상수나 간단한 함수를 통해서도 가능하나, 실제 상황의 시뮬레이션을 위해서는 이 값들을 다른 모듈을 통해 정밀하게 산출하여야 한다.

상용화된 지 30년이 넘는 TRNSYS가 지속적으로 업그레이드되면서 현재에 이르게 된 것은 개발 초기부터 각 구성요소를 TYPE이라 불리우는 모듈 형태로 작성하였기 때문이다. 다구획건

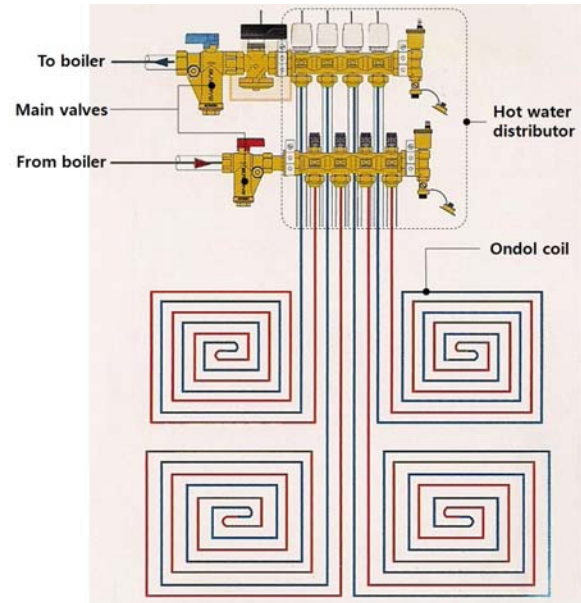


Fig. 3 Ondol coil with hot water distributor.

물(multizone building)을 모델링한 모듈이 TYPE 56이다. 이외에도 다수의 TYPE이 존재하며, 새로운 구성요소가 포함될 때마다 추가로 포함된다. 그러나 이 작업은 상당히 숙달된 전문가 영역으로서 일반 사용자들에게는 용이하지 않다. 또 다른 방법이 EES, Matlab, Excel, FLUENT 등의 소프트웨어를 통해 매 시각마다 수행된 결과를 WINDOWS의 동적데이터교환(DDE, Dynamic Data Exchange)를 통해 TRNSYS와 주고 받는 것이다.

EES(Engineering Equation Solver)<sup>(7)</sup> 프로그램은 연립방정식을 자동으로 풀어주는 주기능 이외에도 미분방정식, 최적화 등이 가능하며 특히 방대한 양의 열유체 물성치를 함수 형태로 내장하고 있어 열유체해석에 적합하다. 본 연구에서는 EES를 통해 펌프, 온수코일 및 배관계통, 보일러 등의 성능함수를 연립하여 풀고, 각 구획의 온수 순환량, 입구수온을 결정하게 된다.

TRNSYS의 TYPE 56으로부터 각 구획의 난방 제어함수값  $\gamma$ (0이면 OFF, 1이면 ON)와 온돌출구수온값을 EES가 전달받고, EES에서 수행된 계산결과인 각 구획으로의 유량, 공급수온도를 다시 TYPE 56으로 보내게 된다.

## 2.3 EES의 계산

30평대 아파트의 난방순환 펌프로 사용되고 있

는 펌프의 특성곡선을 입수하였으며, 2차식으로 나타낸 것이 식(1)이다.

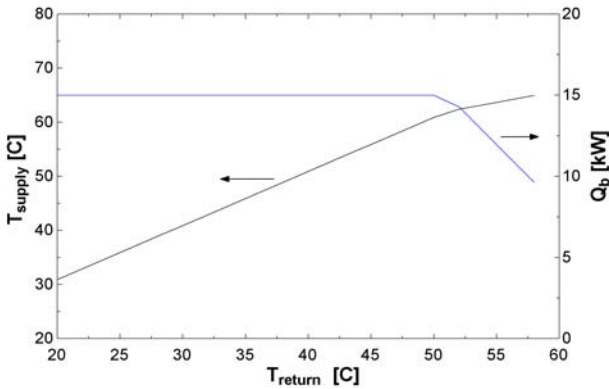
$$\Delta p_{pump} = 87.6 - 22.8\dot{m} - 167.5\dot{m}^2 \quad (1)$$

Fig. 3에 보인 각 온수코일의 양단, 즉 입출구 헤더에 걸리는 압력 손실은 모두 같으며

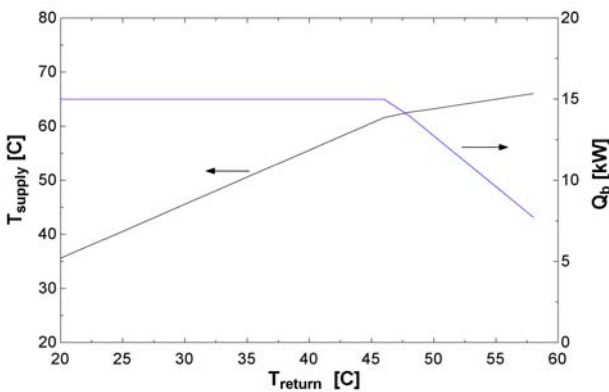
$$\Delta p_{coils} = \Delta p_1 = \dots = \Delta p_5 = \Delta p_n = f \frac{l_n}{d} \frac{\rho v_n^2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta p_{pump} = \Delta p_{coils} + \Delta p_{other} \quad (3)$$

를 동시에 만족하는  $v_n, \dot{m}_n, \Delta p$ , 즉 각 온수코일



(a) Case 1



(b) Case 4

Fig. 4 Return temp. vs. supply temp. and boiler output

에서의 유속, 질량유량, 압력손실이 결정된다.

만약 어느 한 구획의 난방이 차단되면, 전체 질량유량  $\dot{m}$ 은 감소하나 나머지 다른 구획들의 질량유량은 증가하게 된다.

보일러의 용량은 개략적으로 평당 500 kcal/h 정도로 선정하며, 32평형은 16,000 kcal/h를 많이 사용하나, 급탕부하가 동시에 걸리는 것에 대비하여 안전상 20,000 kcal/h의 용량을 사용하기도 한다. 그러나 최근의 아파트는 고기밀, 고단열로 시공되고 있어 평당 300 kcal/h를 권장하기도 하며, 급탕부하가 걸리는 경우에는 잠시 난방을 차단하는 방식을 사용하면 13,000 kcal/h의 용량으로도 충분하므로, 이를 계산에 사용하기로 하며 최대 15 kW의 열을 공급할 수 있는 것으로 하였다. 용량제어는 환수온도로 제어하는 경우도 있으나, 본 논문에서는 일반적인 방식인 공급수온도를 기준으로 제어하는 것으로 하였다. 62°C까지는 최대출력, 62~67°C 사이에는 40%~100% (고성능 보일러의 경우에는 10%~100%의 제어 가능)의 출력으로 비례제어, 67°C 이상에서는 보일러의 가동이 정지되는 것으로 하였다.

### 3. 계산결과 및 분석

#### 3.1 EES에 의한 계산 결과

TRNSYS와 연계하기 전에 먼저 EES 단독으로 계산된 결과의 타당성을 분석할 필요가 있다. 난방 초기에는 모든 방(구획)에 동시에 온수를 공급하게 되나 먼저 일정온도에 도달한 방서부터 온수공급이 차단된다. 각 방의 ON, OFF에 대한 모든 경우의 수를 나타내기는 곤란하므로 Table 2에 일부만을 보였다.

모든 방의 난방밸브가 열려 있을 때 압력손실이 최소가 되고 총유량은 최대가 된다. 닫힌 방이 많아질수록 총유량이 감소하게 되나, 열려 있는 방의 유량은 오히려 증가하는 것을 알 수 있으며 방 하나만 열려 있을 때 그 방의 유량은 최대가 된다.

보일러 용량은 공급수온도(보일러 출구온도)에 따라 달라지는데, 공급수온도는 총유량과 환수온도에 의해 결정된다. 즉 닫힌 방이 많아져 총유량이 감소하면 동일한 환수온도라도 공급수온도가 상승하며 이에 따라 보일러 출력이 감소한다.

Table 2 Flow rate and pressure drop

case	room 1	room 2	room 3	living room	bath room	total (lpm)	$\Delta p_{pump}$ (kPa)
1	3.54	3.11	3.04	7.12	2.90	19.72	62.1
2	4.05	3.56	3.48	8.15	0	19.24	63.1
3	6.04	5.30	5.19	0	0	16.53	68.6
4	7.34	6.45	0	0	0	13.79	73.5
5	8.83	0	0	0	0	8.83	80.64

Table 2의 case 1과 4에 대해 환수온도에 따른 공급수온도와 보일러출력의 관계를 Fig. 4에 보인다.

모든 방이 켜져 있는 총유량 최대의 case 1에 비해 2개의 방만이 난방 중인 상태인 case 4가, 즉 유량이 작아질 때 더 낮은 환수온도에서 보일러 출력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 진술한 바와 같이 공급수온도가 설정치인 67°C에 더 빨리 접근하기 때문이다. case 5와 같은 경우에 실내온도가 설정온도에 도달하지 못한 상태에서도 공급수온도가 상한치를 넘어서 온수공급이 안되는 상황이 발생할 수 있다.

### 3.2 TRNSYS와 EES에 의한 시뮬레이션 결과

설비공학회의 서울에 대한 표준기상데이터를 사용하여 1월1일부터 7일까지 1주일에 걸쳐 Fig. 1의 아파트에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이상적인 난방기기를 사용하였을 때와 온돌난방에 의한 난방에너지를 Table 3에 비교하였다.

이상적인 난방의 경우 실내온도는 24°C로 설정하였으며, 정확히 이 온도를 유지하는 데 필요한 에너지를 지체없이 공급할 수 있다는 것을 전제로 하였다. 반면에 온돌난방의 경우 23.5~24.5°C로 설정하였으며, 각 방의 온도가 23.5°C 이하에서 난방이 시작되고 24.5°C를 넘기면 다시 23.5°C 이하가 될 때까지 그 방의 난방이 차단되도록 제어하였다. 난방 기간 전체에 걸쳐 평균을 취하면 24.1°C가 되나, 실제로는 23.5~24.5°C를 벗어나는

과열, 과냉구간도 존재하게 된다. 이는 축열효과에 기인한 온돌난방의 특징이며, 정밀한 제어를 어렵게 하는 요인이다. 비례제어가 설정온도 유지에 유리함에도 건물 냉난방의 경우 시스템 응답이 늦어 사실상 적용이 어려운 이유이기도 하다. 즉 24.5°C를 넘겨 난방차단이 이루어져도 온돌에 저장된 열이 실내에 방출되어 실내온도를 계속 상승시키게 된다.

Table 3에서 이상적인 난방기기와 온돌에 의한 난방의 공급열량 차이는 바로 축열 및 난방지연 효과로 설명할 수 있다. 난방초기의 벽체온도 및 실내온도는 20°C로 취하였으며, 이를 24°C로 상승시키는 데 많은 에너지가 소비된다. 그러나 온돌의 경우에는 실내온도가 24.5°C에 도달한 후 보일러 작동이 멈춘 이후에도 많은 열이 실내에 방출되며 과열 현상이 발생한다. 이로 인해 난방초기에는 더 많은 에너지를 소비하게 되며, 이후에는 오히려 감소하기도 한다. 따라서 하루 단위로는 차이를 보이나 1주일에 걸친 적산값은 차이가 현격히 줄어든다. 이로부터 이상적인 난방기를 전제로 한 건물 에너지 소비량 해석 및 추정된 설비를 포함하지 않은 비교적 단순한 계산임에도 불구하고 연속난방의 경우 타당한 결과임을 알 수 있다.

Fig. 5에 보일러가 공급한 열량 변화를 나타내었다. 실제 상황과 마찬가지로 연속운전이 아닌 간헐운전의 형태를 보인다. Fig. 6에 실내 공기온도 및 외기온도의 변화를 보인다. 제어 상한치인 24.5°C를 넘는 구간도 나타남을 알 수 있다.

Table 3 Daily heating energy consumption( $\times 10^5$  kJ)

	1	2	3	4	5	6	7	total
Ideal	4.01	2.83	2.65	2.55	2.57	2.29	2.52	19.4
Ondol	5.95	2.53	2.28	2.66	2.30	2.02	2.37	20.1

보일러 용량이 클수록 과열, 과냉 현상이 더욱 심화될 가능성이 높으며, 에너지 낭비로 직결된다. 반대로 지나치게 용량이 작게 선정되면 난방 시작 후에도 실내온도를 상승시키는 데 많은 시간이 소요되어 쾌적성 저하로 이어진다. 최근에 보급되고 있는 10~100%의 범위의 용량제어가 가능한 보일러는 이와 같은 현상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이와 관련하여 간헐난방, 보일러 용량 및 난방분배기의 제어 등에 대해 후속연구에서 심도있게 다룰 예정이다.

#### 4. 결론

TRNSYS와 EES를 연계하여 온돌난방에 대한 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 펌프, 온수보일러 및 배관계통, 보일러의 성능함수는 EES를 통해 연결해서 풀고, 산출된 각 방의 온수유량과 공급수온도를 매 시각마다 TRNSYS TYPE56의 입력으로 제공하는 방식을 취했다. EES 모델링에 의한 계산결과는 실제상황을 잘 추종하는 것으로 확인하였다.

32평형 아파트를 대상으로 1주일 간의 온돌을 포함한 건물에너지 시뮬레이션 결과 이상적인 난방기를 전제로 한 것과 거의 일치하는 값을 보였다. 그러나 1일 단위로는 적지 않은 차이를 보였는데, 온돌의 축열효과와 보일러의 간헐운전에 의한 것으로 판단할 수 있다. 실제상황과 마찬가지로 실내온도설정 범위인 23.5~24.5℃를 벗어나는 구간도 관찰되어 모델링 및 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 향후 실측운전치와의 비교를 통한 검증 및 다양한 제어조건에 대한 분석 등의 연구가 이어질 예정이다.

#### 참고문헌

1. Park, Y. W., Yoo, H. and Hong, H., 2005, Analysis of heating energy in a Korean-style apartment building 3: The effect of room condition settings, Korean J. of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 722-728.
2. Lee, K. N., Ryu, S. R., Kim, Y.-Y., Yeo, M. S. and Kim, K. W., 2004, A study on the energy simulation considering the response

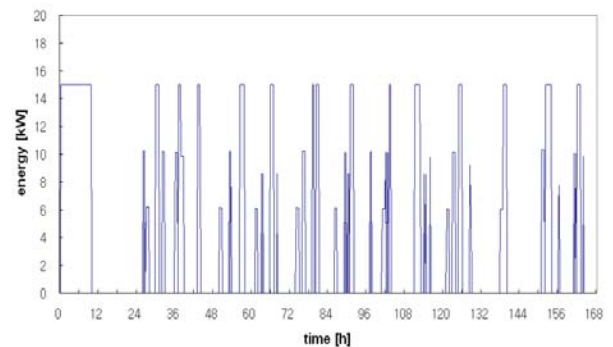


Fig. 5 Energy supplied by boiler

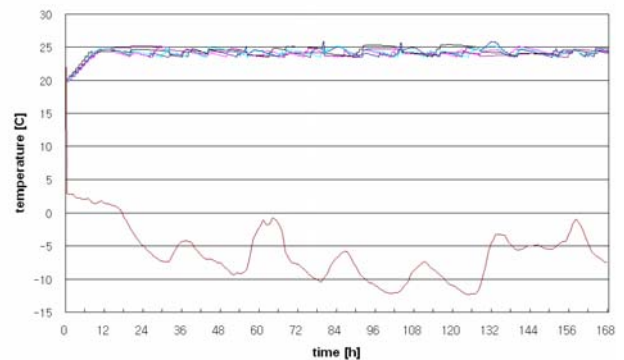


Fig. 6 Indoor and outdoor temperature variations

time of radiant floor heating system, Proceeding of the SAREK 2004 Summer Conference, pp. 620-625.

3. Hong, W., Bae, H., Kim, S. and Choi, M., 1998, A study on the energy consumption by the life style of resident in apartment houses, Korean Journal of AKI, Vo. 14, No. 6, pp. 193-200.
4. Yoo, H., Hyun, S. K., Park, Y. W., Kim, Y. and Hong, H., 2004, Analysis of heating energy in a Korean-style apartment building 1: the effect of location, Korean J. of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 101-110.
5. Samyang, Valve., 2003, Design for Ondol Hot water Heating and Header.
6. Solar Energy Lab., 2005, TRNSYS 16.1 reference manual, University of Wisconsin-Madison.
7. Klein, S. A., Engineering Equation Solver.