

바닥 복사 난방 시스템의 제어전략에 따른 에너지 사용량 분석

이준우*, 박철수**

*성균관대학교 건축공학과 석사과정(junu@skku.edu),

**성균관대학교 건축공학과(cheolspark@skku.ac.kr)

Energy Saving Potentials of Radiant Floor Heating Systems Based on Control Strategies

Lee, Joon-Woo*, Park, Cheol-Soo**

*Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, SungKyunKwan University(junu@skku.edu),

**Dept. of Architectural Engineering, SungKyunKwan University(cheolspark@skku.ac.kr)

Abstract

The dominant heating system used in Korean residential apartment buildings is a hydronic radiant floor heating system, known as the Ondol system. The most common control strategy applied to this traditional hydronic radiant system is a simple on-off control that intermittently supplies "hot water of a fixed temperature" at a "constant flow rate" to each room. However, the current problems with the aforementioned control are as follows: (1) since the simple on-off control is usually based on a one point measured temperature (a signal from a thermostat installed in a living room) in each dwelling unit, heating energy use for unoccupied rooms as well as a difference in temperatures between spaces (master bedroom, living room, bedroom1, bedroom2) can occur occasionally. (2) the most widely used residential water splitter has static valves, and is thus not able to change the flow rate to each room depending on the space heating load. In other words, the ratio of flow rates to rooms is fixed after construction, resulting in over- or under-heating and an improper use of energy. The aim of this paper is therefore to investigate the differences in the system's performance between control strategies in terms of the flow rate control and sensor location. It is shown that energy savings of control strategies are strongly influenced by occupant schedule.

Keywords : 바닥복사 난방시스템(Hydronic radiant floor heating systems), 제어전략(Control strategies), 에너지 절약(Energy savings)

1. 서 론

온돌(溫突)로부터 발전한 바닥복사 난방시

스템은 현재 주거용 건물의 일반적 난방시스템으로 적용된다. 최근 주거환경의 질에 대한 기대가 커짐에 따라 온돌시스템의 열원

장치, 온수 분배기, 패널 및 온수 제어 등에 관한 기술 개발이 확대되고 있다.

현재 국내에서 가장 널리 적용되는 제어 방식은 일정온도·일정유량을 간헐적으로 공급하는 ‘개폐식 제어(on/off control)’이다.¹⁾ 열용량이 큰 슬래브를 이용한 바닥복사 난방시스템은 열관성에 의한 지연효과가 크다. 따라서 개폐식 제어의 경우, 바닥복사 난방시스템의 동특성으로 인해 overshooting 혹은 undershooting이 발생할 수 있다. 개폐식 제어의 문제점을 줄이기 위한 방안으로 ‘비례 제어’를 들 수 있다. 비례제어의 경우, 실내 설정온도에 대한 오차에 비례적으로 제어 밸브를 조절할 수 있는 장점이 있다. 하지만 개폐식제어에 비해 초기 투자비용이 높아지는 단점이 있다.

또, 써모스탯의 위치에 따라 ‘대표실 제어’와 ‘실별 제어’로 구분될 수 있다. ‘대표실 제어’의 경우, 최대 난방부하를 기준으로 실별 온수 분배 비율을 설계단계에서 결정한 후, 대표실(주로 ‘거실’)에 설치된 써모스탯을 통해 세대 각 실에 온수를 공급한다. 하지만, 각 실별 온수 분배 비율이 최대 난방 부하를 기준으로 설정되어 있어, 실별 부하 변동(창을 통한 일사 유입, 내부발열, 재실 스케줄, 침기/환기 등)에 능동적으로 대처하지 못하고, 난방 불균형 현상을 초래할 수 있다. 난방 불균형 현상은 재실자의 온열감에 영향을 미치며, 과난방시 에너지를 낭비하게 된다. ‘대표실 제어’의 문제점을 해결하기 위한 방안으로, 각 실에 써모스탯을 설치하고, 이를 통해 실별 공급 유량을 조절하는 ‘실별제어’를 들 수 있다. 실별제어는 실별 부하 변동에 능동적으로 대처하는 장점이 있지만, 밸런싱

밸브를 적용해야 하고, 실별로 써모스탯이 필요하여, 초기 투자비 상승을 초래한다.

본 연구에서는, 바닥복사 난방 시스템에 적용 가능한 네 가지 제어전략(개폐식제어+대표실제어, 비례제어+대표실제어, 개폐식제어+실별제어, 비례제어+실별제어)을 정량적으로 평가하고자 한다. 제어전략의 평가기준으로 (1) 에너지 사용량, (2) 제어성(설정온도에 얼마나 근접하게 실내온도가 유지되는가에 대한 평가), (3) 실간 온도차, (4) 응답성(원하는 시간 내에 얼마나 빨리 설정온도에 도달하는가에 대한 평가)을 선정하였다. 본 연구에서는 지면 관계상 에너지 사용량에 대해서만 논한다.

위에서 제시한 네 가지 제어전략을 평가함에 있어, 재실자의 행동 패턴은 매우 중요하다. 특히, 대표실 제어와 실별 제어의 경우, 재실자의 스케줄은 크게 중요하다. 재실자 스케줄의 예측은 빌딩 시뮬레이션에서 가장 중요한 요소이지만, 역설적으로 가장 미발견된 영역이다²⁾. 본 연구에서는 공동주택 현장 조사와 인터뷰³⁾를 통해 구한 30세대의 실제 재실자 스케줄을 연구에 적용하였다.

2. 제어전략 시뮬레이션

2.1 제어전략 선정

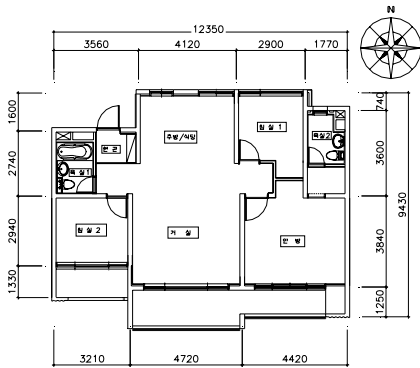
바닥복사 난방시스템의 제어방식에는 크게 온수유량제어, 온수온도제어, 열전달율을 제어하는 열류제어방식(heat flux control)⁴⁾이 있다. 열류제어 방식은 현재 국내에서 거의 적용되지 않고 있으며, 난방온수 온도의 경우, 지역 난방/중앙난방에서 일정 온도로 공급되므로,

1) Ryu, S.R., Lim, J.H., Yeo, M.S. and Kim, K.W. (2004), A study on the control methods for radiant floor heating and cooling system in residential building. ASHRAE Transactions, 110(2), pp. 106-116.

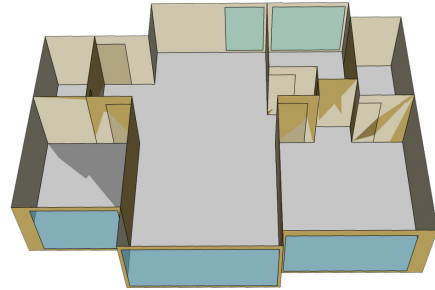
2) 김영진, 박철수 (2009), 확률적 모델을 이용한 재실 인원 예측, 대한건축학회 논문집, 25권 제3호 (계제예정)

3) 현세훈, 박철수 (2006), 노후 공동주택 구조 및 설비성능 개선 기술 개발, 건설교통부 1차년도 연차실적 보고서

4) MacCluer, C. R., 1989, The temperature stability of a radiant slab-on-grade, ASHRAE transactions, 1989a CH-89-17-1, pp. 1001-1009.



a) 대상세대 평면



b) EnergyPlus 모델

그림 1. 대상세대 평면 및 EnergyPlus 모델

본 연구에서는 전술한 바와 같이 개폐식 제어/비례 제어만 다루기로 한다. 또, 써모스탯의 위치는 거실에만 설치한 경우(대표실제어)와 각실(거실, 안방, 침실1, 침실2)에 설치한 경우(실별제어)의 두 가지 경우로 나누었다.

위에서 설명한 바를 바탕으로 본 연구에서는 유량제어방식과 실별 제어방식에 따라 표 1과 같이 4가지 제어전략을 선정하였고, 각 제어전략에 따른 성능평가를 실시하였다.

표 1. 4가지 바닥복사 난방시스템 제어전략

구분	유량제어방식	센서위치
Strategy 1	On/off	거실
Strategy 2		거실+안방+침실1+침실2
Strategy 3	비례제어	거실
Strategy 4		거실+안방+침실1+침실2

2.2 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 대상건물은 3개의 침실과 2개의 화장실, 거실/주방으로 구성된 35평형 아파트로 선정하였다(그림 1-a). 시뮬레이션 툴로써, EnergyPlus 3.0를 선정하였다. EnergyPlus는 다양한 종류의 시스템, 제어 전략에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 또, 시간 간격을 자유롭게 설정할 수 있으며, 각 존간의 공기 유동도 모사할 수 있다. 그림 1(b)는 EnergyPlus로 모델링한 단위 세대를 보여 준다. 세대의 측벽과 천정, 바닥면은 다른 세대와 인접하다고 가정하였고, 대다수의

공동주택에서 확장된 발코니를 사용함을 고려하여, 모델링하였다.

온수온도는 기존의 온수온도제어 방법에 관한 연구⁵⁾에서 제안한 최저외기온에 대한 적정 공급 온수 온도인 53℃로 설정하였고, 침기는 공동주택의 침기에 대한 연구에서 최빈값으로 도출된 0.2회/h로 설정하였다.⁶⁾

2.3 재실자 스케줄

대표실 제어와 실별 제어의 성능 비교는 각 실별 재실자 스케줄에 가장 큰 영향을 받는다. 빌딩 시뮬레이션에서 재실자의 행동 패턴의 예측은 아주 중요한 요소이지만, 아직까지 가장 미발견된 영역 중의 하나이다.⁷⁾

본 연구에서는 재실자 스케줄을 적용하기 위해 서울시 목동에 거주하는 30세대의 실별 재실 스케줄을 설문조사 및 인터뷰를 통해 1시간 간격으로 구한 데이터⁸⁾를 사용하였다.

5) 여명석, 석호태, 김광우 (1998), 공동주택 온수온도 바닥복사 난방시스템의 온수온도 제어방법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제 14권 제 12호, pp. 203-210.

6) Hyun, S.H., Park, C.S., and Augenbroe, G. (2008), Analysis of uncertainty in natural ventilation predictions of high-rise apartment buildings, Building Services Engineering Research and Technology, Vol.23, no.4, pp.311-326

7) 김영진, 박철수 (2009), 확률적 모델을 이용한 재실 인원 예측, 대한건축학회 논문집, 25권 제3호 (계제 예정)

8) 현세훈, 박철수 (2006), 노후 공동주택 구조 및 설비성능 개선 기술 개발, 건설교통부 1차년도 연차실적 보고서

3. 제어전략 평가기준

제어전략의 평가기준으로 (1) 에너지 사용량, (2) 제어성(설정온도에 대한 근접성), (3) 실간 온도차, (4)응답성 등으로 평가할 수 있다. 본 논문에서는 지면관계상, 에너지 사용량만을 평가하기로 한다. 다른 평가 기준에 대한 논의는 Lee et al.⁹⁾을 참조하면 된다.

난방 시스템은 겨울철에만 사용되므로, 매 시간별 재실 스케줄을 일년치 시뮬레이션에 적용하지 않고, 겨울철 하루(1월 15일)에 대한 에너지 사용(kWh/day)으로 제어전략을 평가하고자 한다. 필요에 따라 외삽법(外挿法, Extrapolation) 또는 기간별 시뮬레이션을 통해 제어전략 간의 기간별 우위를 분석할 수 있다.

시스템의 성능을 비교·분석함에 있어 모델링과 계산 절차에서의 많은 가정들과 시스템 모델의 단순화가 필요하다¹⁰⁾. 본 연구의 시뮬레이션 결과는 실재(reality)에 대한 가장 근사한 값은 아닐 수 있지만, 시뮬레이션에 영향을 미치는 불확실성을 배제한 표준적이고 규범적인 접근으로 보아야 한다. 다시 말해 본 연구의 목적이 “물리적 시스템을 최대한 있는 그대로(as it is) 모사하는 것”이 아니고, “제어 전략간의 차이를 구하기 위함”이므로 실제 시스템에서 존재하는 여러 가지 불확실한 시뮬레이션 입력변수(펌프의 정격 효율 대 실제 효율, 열성능데이터, 기후, 개구부의 개구정도, 침기 등)을 제거한 비교결과로 보아야 한다.

4. 결과 분석

30세대의 에너지 사용량은 표 3과 같다. 표 3을 보면 대표실제어(제어전략 1, 3)에 비해 실별제어(제어전략 2, 4)에서 평균적으로 각각 9%, 10% (1 vs. 2, 3 vs. 4)의 에너지 절감이 가능하다. on/off제어에 비례제어를 적용(1 vs. 3, 2 vs. 4)함에 따른 이득은 평균 1%정도로 미미하게 나타났다.

표 3. 재실스케줄에 따른 제어전략별 에너지 사용량 (kWh/day)

세대 번호	제어전략1		제어전략2		제어전략3		제어전략4	
	a	a/a	b	b/a	c	c/a	d	d/a
1	49.5	100%	44.5	90%	50.0	101%	44.7	90%
2	49.4	100%	45.8	93%	49.9	101%	45.8	93%
3	49.6	100%	45.8	92%	49.4	100%	44.6	90%
4	49.5	100%	44.2	89%	48.3	98%	44.5	90%
5	49.4	100%	46.3	94%	50.6	103%	46.4	94%
6	51.2	100%	46.0	90%	51.3	100%	45.4	89%
7	49.6	100%	44.3	89%	48.7	98%	45.0	91%
8	49.2	100%	46.2	94%	49.7	101%	45.8	93%
9	49.1	100%	45.3	92%	49.7	101%	44.9	91%
10	49.4	100%	45.8	93%	49.0	99%	44.5	90%
11	47.5	100%	43.7	92%	47.5	100%	43.8	92%
12	51.3	100%	45.5	89%	50.3	98%	45.0	88%
13	49.5	100%	45.0	91%	49.3	100%	44.7	90%
14	49.4	100%	44.1	89%	48.4	98%	44.7	90%
15	47.5	100%	44.6	94%	48.4	102%	44.1	93%
16	47.5	100%	44.1	93%	48.5	102%	44.4	94%
17	51.2	100%	43.3	85%	51.0	99%	44.3	86%
18	49.4	100%	46.3	94%	49.6	100%	46.7	95%
19	49.5	100%	45.5	92%	49.1	99%	44.9	91%
20	51.3	100%	44.1	86%	50.4	98%	44.2	86%
21	51.1	100%	41.4	81%	50.5	99%	41.8	82%
22	51.1	100%	43.7	85%	51.3	100%	42.1	82%
23	49.6	100%	43.5	88%	47.9	97%	44.1	89%
24	49.2	100%	43.0	87%	50.0	102%	43.1	88%
25	47.5	100%	45.4	95%	48.8	103%	45.6	96%
26	49.4	100%	46.7	94%	49.8	101%	46.2	94%
27	47.5	100%	45.3	95%	47.5	100%	43.8	92%
28	49.4	100%	44.1	89%	48.4	98%	44.7	90%
29	47.5	100%	44.6	94%	48.4	102%	44.1	93%
30	47.5	100%	44.1	93%	48.5	102%	44.4	94%
평균	49.3	100%	44.7	91%	49.3	100%	44.6	90%
최대	51.3	100%	46.7	95%	51.3	103%	46.7	96%
최소	47.5	100%	41.4	81%	47.5	97%	41.8	82%

- 실별제어가 가장 유리한 경우 (세대21; 제어전략1 (100%) vs. 제어전략2 (81%), 제어전략3 (99%) vs. 제어전략4 (82%)): 일반적으로 실별제어는 대표실제어에 비해 유리하다. 그 중 세대21은 가장 많은 에너지 절감율을 보인다. 세대21의 실별 재실스케줄(그림3)를 보면 24시간동안 침실1과 침실

9) Lee, J.W. and Park, C.S. (2009), Comparative Study of Radiant floor Heating System Controls in Residential Buildings, Proceedings of the 11th IBPSA Conference, July 27-30, Glasgow, Scotland (full paper submitted)

10) 박철수 (2006), 규범적 건물성능 평가방법, 대한건축학회 논문집 22권 11호, pp. 337-344

2에 재실자가 없어 실별 제어시 난방에너지를 절감하게 된다. 대표실제어는 세대내에 1명 이상이 있을 경우 실 전체가 난방이 이뤄지게 되어, 사용하지 않는 침실1과 침실2에도 난방이 이뤄지므로, 실별제어에 비해 난방에너지의 낭비가 크다.

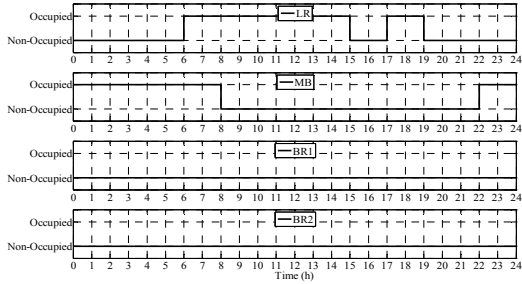


그림 3. 세대 21의 재실 스케줄

가장 유리한 경우인 세대21과 대조적이다. 세대21은 침실1,2에서 24시간동안 재실자가 없어 가장 큰 에너지 절감율(17-19%)을 보였다. 그러나 세대 27은 안방에 24시간동안 재실자가 존재하여 가장 적은 에너지 절감율(5%)을 보였다.

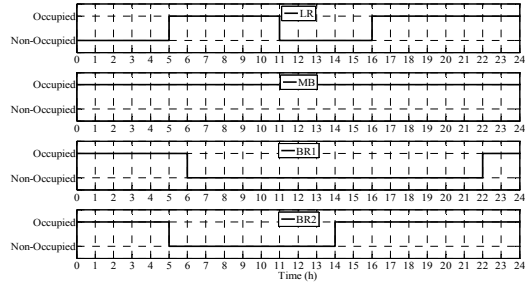


그림 4. 세대 27의 재실 스케줄

- 대표실제어와 실별제어가 큰 차이가 없는 경우 (세대27; 제어전략 1(100%) vs. 제어전략2(95%)): 평균적으로 대표실제어는 9-10%의 에너지 절감률을 보이나 세대27의 경우는 가장 적은 차이(5%)를 보인다. 재실스케줄(그림 4)상의 특징은 안방에 재실자가 24시간동안 상주한다는 것이다. 이러한 재실스케줄상의 특징은 실별제어가

그림 5는 평균재실시간과 실별제어 적용시 에너지절약 성능간의 상관관계를 정리한 그림이다. 그림에서 보듯이 에너지 절감율은 평균재실시간이 적은 경우에 크게 나타났다. 평균 재실시간이 약 9시간 미만인 경우에 평균 에너지 절감율인 9.5%보다 큰 에너지 절감율을 보인다. 이처럼 평균재실시간이 적은 경우, 일반적으로 비어있는 방의 수가 많아

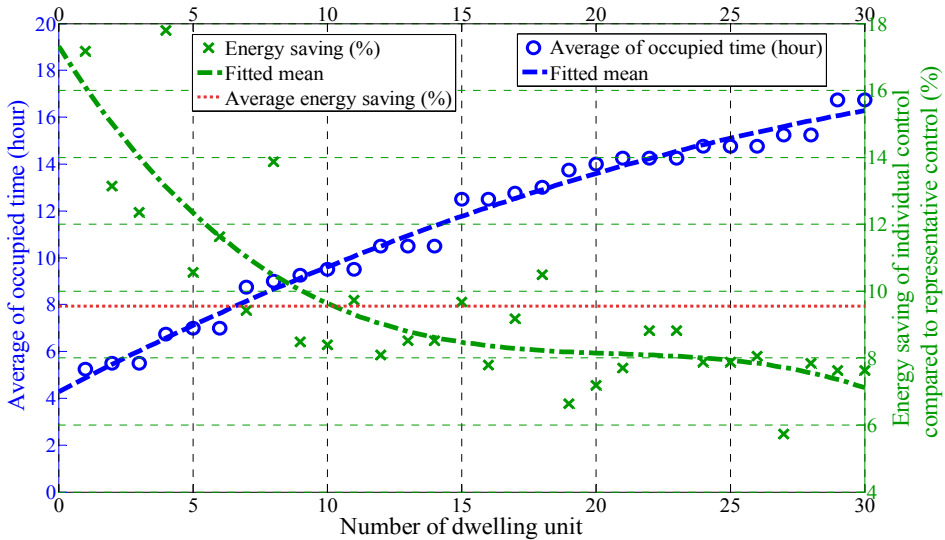


그림 5. 평균재실시간과 에너지절약 성능간의 상관관계

지므로 실별제어의 에너지 절감율이 커진다. 따라서, 제어 전략에 관한 의사결정은 재실자의 스케줄을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

5. 결론

바닥복사 난방시스템의 유량 제어방식에 대해 간헐적으로 유량을 공급하는 방식(on/off 제어)과 비례적으로 유량을 공급하는 방식(비례제어)으로, 또 써모스탯의 위치에 따라 대표실제어방식과 실별제어방식으로 제어전략을 구분하고, 재실자의 스케줄을 적용하여 제어전략의 성능을 평가하였다.

4가지 제어전략에 대한 분석결과에 따르면, 실별제어방식(제어전략2,4)이 대표실제어방식(제어전략1,3)에 비해 에너지사용량 측면에서 유리하다. 실별제어방식은 모든 실이 독립적으로 난방이 되어, 각 실의 난방부하 특성과 재실패턴에 따라 모든 실이 독립적으로 난방되므로, 에너지사용량측면에서 평균 10% 최대 19% 정도 유리했다. 또, 재실스케줄과 에너지절약성능의 상관관계를 분석한 결과, 평균재실시간이 9시간 미만인 경우, 대표실제어에 대한 실별제어의 난방에너지 절약성능이 최대 19%, 최소 11%로 평균인 9.5%에 비해 커짐을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 재실스케줄에 의한 난방 시스템의 제어전략 선정은 최적 계측포인트의 도출 및 홈 네트워크와의 결합 등에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 에너지·자원기술 개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김영진, 박철수 (2009), 확률적 모델을 이용한 재실 인원 예측, 대한건축학회 논문집 25권 제3호 (게재 예정)
2. 박철수 (2006), 규범적 건물성능 평가방법, 대한건축학회 논문집 제22권 제11호, pp. 337-344
3. 여명석, 석호태, 김광우 (1998), 공동주택 온수온돌 바닥복사 난방시스템의 온수온도 제어방법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제14권 제12호, pp. 203-210.
4. 현세훈, 박철수 (2006), 노후 공동주택 구조 및 설비성능 개선 기술 개발, 건설교통부 1차년도 연차실적 보고서
5. Hyun, S.H., Park, C.S., and Augenbroe, G. (2008), Analysis of uncertainty in natural ventilation predictions of high-rise apartment buildings, Building Services Engineering Research and Technology, Vol.29, No.4, pp.311-326
6. Lee, J.W. and Park, C.S. (2009), Comparative Study of Radiant floor Heating System Controls in Residential Buildings, Proceedings of the 11th IBPSA Conference, July 27-30, Glasgow, Scotland (full paper submitted)
7. MacCluer, C.R., (1989), The temperature stability of a radiant slab-on-grade, ASHRAE transactions, 1989a CH-89-17-1, pp. 1001-1009.
8. Ryu, S.R., Lim, J.H., Yeo, M.S. and Kim, K.W. (2004), A study on the control methods for radiant floor heating and cooling system in residential building. ASHRAE Transactions, 110(2), pp. 106-116.