

시스템의 응답시간을 고려한 에너지 시뮬레이션에 관한 연구 - 복사난방시스템의 온도조절밸브를 대상으로

이 규 남, 류 성 룡, 김 오 봉, 김 용 이*, 여 명 석, 김 광 우**†
 서울대학교 건축학과 대학원, *군산대학교 건축공학과, **서울대학교 건축학과

A Study on the Energy Simulation Considering the Response Time of Radiant Floor Heating System

Kyu-Nam Lee, Seong-Ryong Ryu, Wu-feng Jin,
 Yong-Yee Kim*, Myoung-Souk Yeo, Kwang-Woo Kim**†

ABSTRACT: The objective of this study is to verify that it is necessary to take account of the system response time for more accurate building simulation. In a radiant floor heating system, thermal capacitance of the system is so large that it is required to evaluate the effect of the system response time upon the building thermal performance. To do this, various simulation time steps were examined and a proper time step which can model a system change within the response time was proposed. And simulations were performed with various response time of the thermostatic valve used in radiant floor heating system. It is concluded that the response time does not influence the thermal performance profoundly, especially when supply water temperature is relatively low and the thermal mass of the building is small.

Key words: Radiant floor heating system(바닥복사난방시스템), Response time(응답시간), Simulation time step(시뮬레이션 타임스텝), Thermostatic valve(온도조절밸브)

기 호 설 명

그리스 문자

\dot{q} : 온돌내부 발열량 [W]
 W_p : 발열계수 [W/m^2]
 T_w : 공급온수온도 [$^{\circ}C$]
 T_m : 발열층 평균 온도 [$^{\circ}C$]
 δx_m : 온돌내부 발열층 두께 [m]
 A_f : 온수 온돌 바닥 면적 [m^2]
 K_p : 발열층 열전달율 [$W/m^2^{\circ}C$]
 \dot{m} : 온수유량 [kg/s]

ε : 열교환 효율
 η : 배관단면적을 고려한 핀 효율

1. 서 론

건물 에너지 시뮬레이션의 목적은 건물의 부하를 산정하고 시스템이나 플랜트에서 담당해야 하는 에너지를 산출하여 열원의 용량을 결정하거나 에너지 소비량을 예측하는데 있다. 대부분의 에너지 시뮬레이션에서는 시스템의 응답시간이 시뮬레이션의 타임스텝에 비해 작은 것으로 가정하고, 시뮬레이션 타임스텝 안에서는 시스템

† Corresponding author
 Tel.: +82-2-880-7065; fax: +82-2-885-8057
 E-mail address: snukkw@snu.ac.kr

이 준정상상태(quasi steady-state)로 작동하는 것으로 모델링하고 있다⁽¹⁾. 그러나 시스템은 건물의 열적거동에 비해 빠른 속도로 변화하므로 시스템에서의 반응이 정확히 피드백되지 않는다면 실온이 부정확하게 계산될 가능성이 높다. 실온을 정확하게 예측하는 것은 장비의 용량 산정, 거주자의 쾌적에 있어 필수적인 사항이므로, 시스템의 반응을 모델링하여 에너지 시뮬레이션에 반영하는 것이 필요하다⁽²⁾.

특히 복사난방시스템의 경우 구조체의 열용량으로 인해 공정의 시정수(time constant)가 커서 시스템 차원의 응답시간이 일반적인 공조시스템보다 크기 때문에 에너지 시뮬레이션에서 시스템의 응답시간을 고려해야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 복사난방이 적용된 공간에 대해 타임스텝을 조절할 수 있는 해석 프로그램을 작성하고, 응답시간 내에서의 시스템의 변화를 반영할 수 있는 적정타임스텝을 결정한 후 이를 이용하여 시스템의 응답시간이 공간의 열성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 시스템 응답시간의 시뮬레이션 반영

2.1 시스템의 응답시간

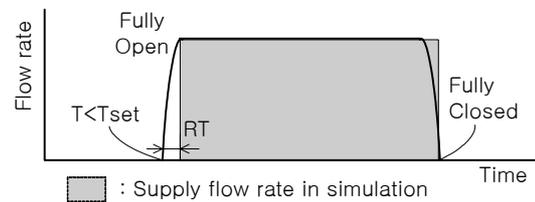
복사난방의 경우 시스템 차원의 응답시간을 고려해야 하는 것은 온수분배기에 설치되어 각 구획별로 온수 공급을 제어하는 자동 온도조절밸브(thermostatic valve)이다. 온도조절밸브의 응답시간은 제어기로부터 신호를 받은 후 밸브가 완전히 열리거나 닫히는 데까지 걸리는 시간을 말한다.

온도조절밸브의 응답시간을 결정하는 것은 밸브 액츄에이터의 구동방식으로서, 온도조절밸브는 구동방식에 따라 솔레노이드 구동방식, 모터 구동방식, 열팽창 구동방식으로 분류할 수 있다. 전자석을 이용하는 솔레노이드 구동 방식의 경우 응답시간이 가장 짧아서 밸브 개폐에 1초가 소요되며, AC모터의 힘으로 밸브를 닫고 개방시에는 리턴 스프링을 이용하는 모터 구동방식의 경우 5초가 소요된다. 그리고 내부에 봉입된 파라핀이나 왁스등 액체의 팽창 및 수축으로 작동하는 열팽창 구동방식의 경우에는 밸브개폐에 2~5분 정도가 소요되어 응답시간이 다소 긴 특성을 가지고 있다.

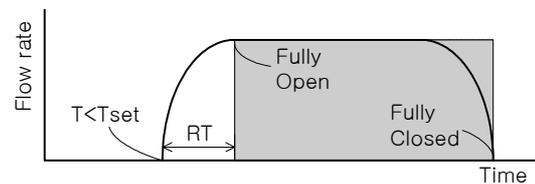
2.2 시스템 응답시간의 모델링

솔레노이드 방식의 밸브와 같이 응답시간(RT)이 짧은 경우에는 Fig. 1(a)와 같이 밸브가 완전히 열렸을 때부터 완전히 닫힐 때까지 유량이 공급되는 것으로 해석해도 가능할 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 응답시간이 긴 경우에 밸브가 완전히 열렸을 때부터 닫힐 때까지 유량이 공급되는 것으로 모델링하면, 실제 공급되는 유량과 다른 값이 입력되어 실온변화양상이 왜곡될 가능성이 있다.

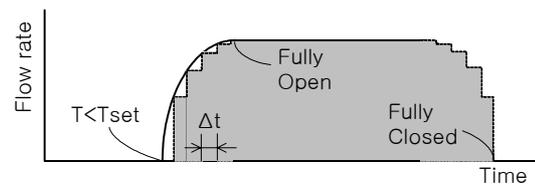
그러므로 온도조절밸브의 응답시간이 긴 경우 유량을 정확히 입력하기 위해서는 Fig. 1(c)와 같이 시뮬레이션의 타임스텝(Δt)을 응답시간 이하로 설정하여 타임스텝에 따른 개도 및 유량의 변화를 반영해야 할 것으로 판단된다. 이 경우 계산의 정밀도와 소요시간의 관점에서 타임스텝을 어떻게 설정하느냐가 문제가 된다. 본 연구에서는 적정 타임스텝을 설정하기 위해 타임스텝을 조절하여 타임스텝마다 변화하는 유량을 반영할 수 있는 해석 프로그램을 작성하고, 응답시간 이내에서 타임스텝을 변화시켜가며 시뮬레이션을 실행하였다.



(a) Modelling of short response time



(b) Modelling of long response time



(c) Modelling concept considering flow rate change with simulation time step

Fig 1. Modelling of response time

3. 타임스텝 설정을 위한 시뮬레이션

3.1 열해석 방법

복사난방시스템에서 온도조절밸브의 응답시간을 시뮬레이션에 반영하기 위해, 기존의 연구에서 타당성이 검증된 바 있는 온돌해석프로그램⁽³⁾에 타임스텝마다 밸브의 개도 및 유량을 조절할 수 있는 모듈을 추가하고 제어 알고리즘에 따라 각 타임스텝별로 유량의 변화를 입력할 수 있도록 하였다. 벽체전열, 실온해석 등 프로그램의 기본구조는 유한차분법을 이용하였으며, 온돌구조체에서의 열전달은 식 (1)~식 (3)과 같이 fin efficiency와 ϵ -NTU를 이용한 동적 1차원 해석 방법⁽⁴⁾을 적용하였다.

$$\dot{q} = W_p(T_w - T_m) \frac{1}{\delta x_m} \quad (1)$$

$$= \frac{\epsilon_{PNL} \dot{m} C_{pw}}{A_f} (T_w - T_m) \frac{1}{\delta x_m}$$

$$\epsilon_{PNL} = \frac{\epsilon_{PX}}{1 + \left(\frac{\epsilon_{PX} \dot{m} C_{pw}}{A_f K_p}\right) \left(\frac{1}{\eta_m} - 1\right)} \quad (2)$$

$$\epsilon_{PX} = 1 - \exp\left(-\frac{UA_f}{\dot{m} C_{pw}}\right) \quad (3)$$

식 (1)에서 발열계수 W_p 와 유량 \dot{m} 이 선형적인 관계가 있음을 착안하여, 타임스텝마다 밸브의 개도를 계산하고 발열계수(유량)를 밸브 개도의 함수로 표현하여 발열층에 온수가 공급되는 것으로 하였다. 밸브의 개도는 복사난방의 온도조절 밸브가 on-off 밸브임을 감안하여 퀵오프닝 특성의 유량특성곡선을 사용하여 계산하였다. 이상의 내용을 일반적인 주택에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 개폐식 뱅뱅제어방식을 기준으로 정리하면 Fig. 2와 같다.

3.2 시뮬레이션 대상 모델

시뮬레이션 해석 대상 모델은 서울 지역의 전형적인 32평형 공동주택의 안방으로 설정하였다. 난방시 최악의 조건을 가정하기 위해 서울지역의 기상데이터 중 외기온이 가장 낮은 1월 29일~2월 4일에 대해 1주일 간 시뮬레이션을 수행하였으며, 일사 및 내부발열 효과는 배제하였다.

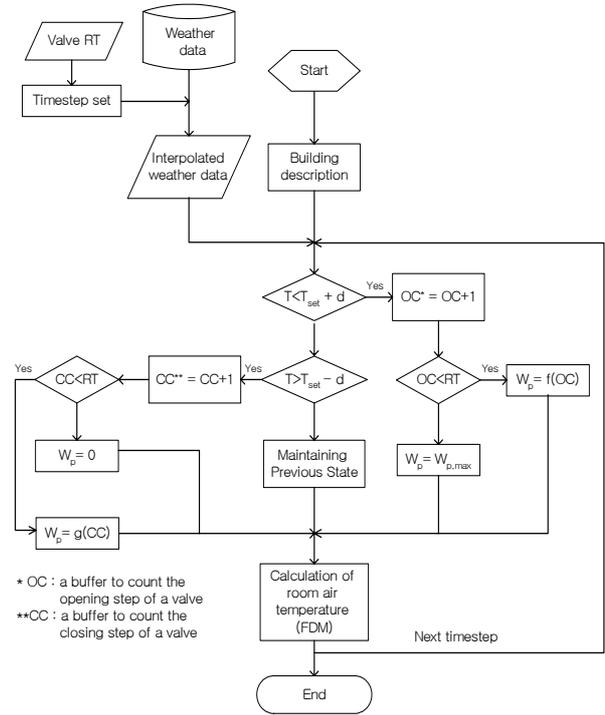


Fig. 2 Simulation algorithm considering response time of thermostatic valve

대상 공간은 남쪽면만 외기에 접해있고, 그 이외의 벽들은 난방공간과 접해있는 것으로 가정하였다. 바닥 온돌 구조체는 하부로부터 콘크리트 슬라브 120mm, 단열층인 경량기포콘크리트 60mm, 발열층 및 마감층인 몰탈 70mm, 마감재 3mm로 구성하였고, 설정온도 $22.5^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 인 on-off 제어방식을 적용하여 난방시 70°C 의 온수가 공급되도록 하였다.

3.3 응답시간에 따른 타임스텝 설정

건물의 에너지 시뮬레이션에서 가장 정밀한 결과를 얻기 위해서는 1초 단위로 시스템 변화를 반영하는 것이 가장 이상적이나, 이는 계산시간 및 효율 면에서 바람직하지 못할 것으로 판단된다. 그러므로 계산의 정밀도 및 효율성을 동시에 유지할 수 있는 타임스텝을 설정하는 것이 요구된다고 하겠다. 이를 위해 타임스텝을 변화시켜가며 시뮬레이션을 실행하고, 그 결과를 타임스텝이 1초인 경우의 실온편차와 비교하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 응답시간이 1분 이하로 짧은 경우에는 타임스텝이 1초인 경우와 응답시간을 타임스텝으로 설정한 경우의 실온편차가

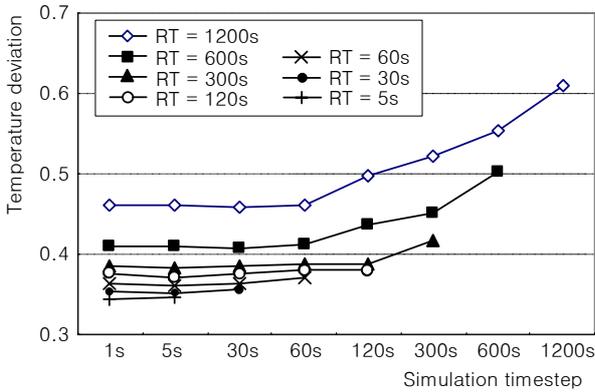


Fig. 3 Temperature deviation with time step

거의 동일하게 나타난 것을 알 수 있다. 그러므로 응답시간이 짧은 시스템의 경우에는 시스템의 앞의 Fig. 1(a)와 같이 시스템의 응답시간을 타임스텝으로 설정하는 것이 가능하다고 판단된다. 그러나 응답시간이 점차 길어짐에 따라 타임스텝을 미세하게 조정하지 않으면 실온편차가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 필요한 열량이 제 시간에 공급되지 못하고, 밸브가 닫히면서 공급되는 열이 실제보다 크게 입력되어 과열현상을 유발하였기 때문으로 판단된다.

그러나 Fig. 3과 같이 응답시간의 각 경우에 대해 타임스텝이 1분 이하인 경우에는 실온편차가 일정하게 유지되고, 1초를 타임스텝으로 시뮬레이션한 경우와 실온편차가 거의 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러므로 온도조절밸브의 응답시간 동안 유량변화를 반영하기 위해서는 시뮬레이션의 타임스텝을 1분으로 하는 것이 적절하다고 판단된다.

4. 시스템의 응답시간에 따른 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 인자도출

앞에서 분석한 시스템 응답시간과 시뮬레이션의 타임스텝에 대한 결과를 토대로 시스템 응답시간의 차이가 복사난방공간의 열성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템의 응답시간은 순간적으로 개폐되는 솔레노이드 밸브와 모터구동 밸브에 대해 5초로 설정하고, 열팽창 구동방식의 경우 개방 시 2분, 폐쇄 시 5분으로 설정하였다.

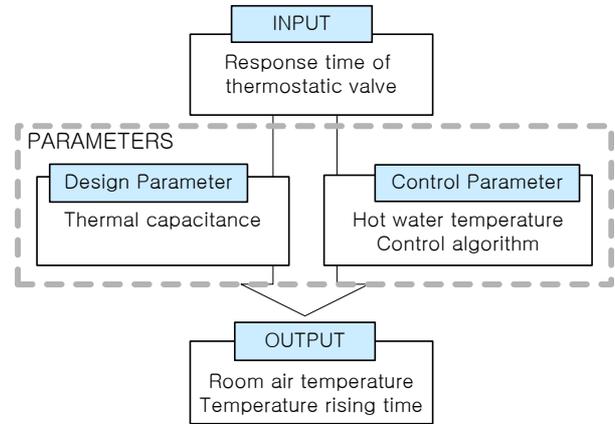


Fig. 4 Simulation process to evaluate the influence of response time upon thermal performance

열팽창 구동방식의 밸브는 상온에서는 5분 이내로 작동하지만 주위 온도가 상승할 경우 봉입액체의 수축이 늦어져 밸브가 닫히는 시간이 연장되는 경우가 있으므로 10분 만에 닫히는 경우도 추가적으로 시뮬레이션하였다.

응답시간이 길어질 경우 문제가 되는 것은 복사난방시스템의 축열로 인해 시간지연 효과가 누적되어 과열현상이 유발되고 그에 따른 에너지소비량이 증가할 우려가 있는 것이다. 그러므로 복사난방시스템의 열용량에 영향을 미칠 수 있는 인자를 도출하고, 이들 인자들의 변화에 따라 응답시간의 차이가 공간의 열성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. Fig. 4와 같이 열용량과 관계있는 인자들을 크게 설계관련변수와 제어관련변수로 분류하고 설계관련변수는 축열층의 두께, 제어관련변수는 온수온도와 제어알고리즘으로 세분하였으며, 시뮬레이션의 결과는 쾌적측면에서 실온제어성능과 난방초기 시 설정온도까지 소요되는 승온시간을 기준으로 평가하였다.

4.2 시뮬레이션 조건

대상공간과 입력자료 등 시뮬레이션 조건은 3장에서 적용한 것과 동일하다. 축열층의 두께는 “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(건축법 제 56조 1항)”에 의거 40mm~70mm 사이에서 15mm간격으로 설정하였으며, 공급온수온도는 현행 난방방식의 온도범위인 40℃~70℃사이를 15℃간격으로 변화시켜 시뮬레이션을 실시하였다. 제어알고리즘은 국내 공동주택에서 가장 일반적으로 적용

되고 있는 개폐식뱅뱅제어 방식과 외기보상 개폐식뱅뱅제어 방식을 적용하였으며, 외기보상 개폐식뱅뱅제어에서의 외기보상률은 기존연구⁽⁵⁾에서 공동주택에 대해 산출한 난방곡선을 활용하였다.

4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

축열층 55mm, 온수온도 55℃로 개폐식 뱅뱅제어를 실행한 경우 응답시간에 따른 실온변동은 Fig. 5와 같다. 응답시간이 길어지면, 밸브가 닫혀야 할 시점 이후에도 응답시간동안 열량이 공급되어 과열현상이 일어날 수 있다. 과열여부를 판단하기 위해 응답시간별로 최대온도를 비교한 결과, 응답시간이 길어져도 응답시간이 짧은 경우에 비해 0.1~0.2℃ 높게 나타나 과열의 문제는 심각하지 않은 것으로 보인다. 그러나 열팽창 밸브의 경우 주위 온도의 상승에 의해 밸브가 닫히는 데 걸리는 시간이 증가함으로써 과잉열량이 공급될 수 있으므로 밀폐공간에 설치 시 환기 등의 조치를 취해할 것으로 판단된다.

설정온도까지 상승하는데 소요된 승온시간은, 열동식 구동밸브의 개방시 응답시간이 2분이므로 응답시간이 짧은 경우와 비교하였을 때 2~3분 가

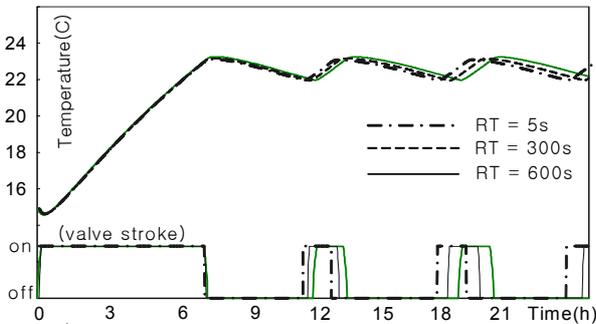


Fig. 5 Room air temperature fluctuation with different response time

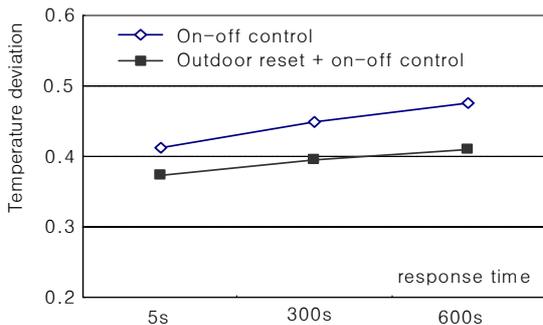


Fig. 6 Temperature deviation with different control method

량 더 소요된 것으로 보인다. 그러므로 장기간 난방중지 후나 셋백 후에 설정온도까지 상승하는데 소요되는 시간에 있어서는 밸브의 종류별로 큰 차이를 보이지 않을 것으로 판단된다.

또한 두 가지 제어방식별로 실온편차를 비교하면 외기보상 개폐식뱅뱅제어를 적용한 경우 최대온도가 0.1~0.2℃ 감소하였으며, Fig. 6과 같이 응답시간의 증가에 따른 실온편차의 증가율이 완화됨을 알 수 있다. 그러므로 제어방식을 보완하면 응답시간이 긴 밸브를 사용하더라도 실온을 안정적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 Fig. 7~Fig. 8과 같이 온수온도가 높고 축열층이 두꺼워질수록 응답시간이 길어짐에 따라 실온편차가 증가하는 것을 알 수 있다. 온수온도가 높을 경우 구조체의 온도변화폭이 증가하게 되므로, 여기에 밸브 응답시간이 길어질 경우 추가되는 열량의 증가로 실온의 변동폭이 더 커지게 된 것으로 판단된다. 그리고 축열층이 두꺼울 경우에는 구조체에 저장되는 열량이 증가하므로, 응답시간이 길어짐에 따라 밸브가 닫히는 중에 공급되는 열이 구조체의 온도를 더 높임으로써 실온변동폭을 더 증가시킨 것으로 판단된다.

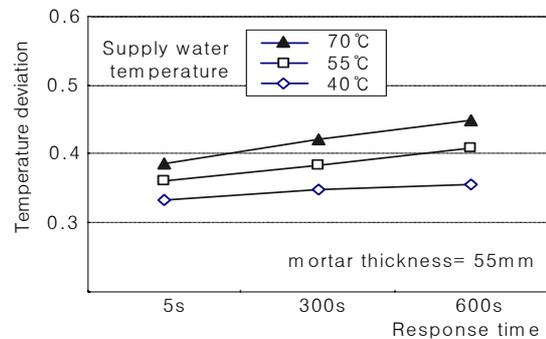


Fig. 7 The effect of supply water temperature upon thermal performance

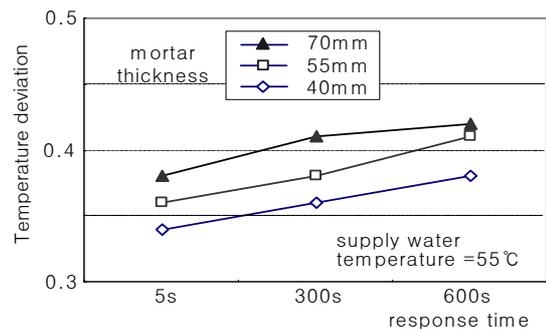


Fig. 8 The effect of mortar thickness upon thermal performance

Table 1. Summary of the simulation results

T _{hw} **	RT criteria	T* 40mm			55mm			70mm		
		5s	300s	600s	5s	300s	600s	5s	300s	600s
40℃	Max(℃)	23.1	23.1	23.2	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.2
	STDEV	0.32	0.34	0.35	0.33	0.35	0.36	0.35	0.36	0.37
	rise time(min)	636	639	641	672	675	677	709	712	714
55℃	Max(℃)	23.1	23.2	23.2	23.1	23.2	23.3	23.2	23.3	23.3
	STDEV	0.34	0.36	0.38	0.36	0.38	0.41	0.38	0.41	0.42
	rise time(min)	380	382	384	402	404	406	424	427	429
70℃	Max(℃)	23.2	23.3	23.4	23.3	23.3	23.3	23.4	23.4	23.5
	STDEV	0.36	0.39	0.42	0.39	0.42	0.44	0.41	0.45	0.48
	rise time(min)	273	276	278	289	292	294	306	308	310

*T = mortar thickness, **T_{hw} = supply water temperature

5. 결 론

본 연구에서는 시스템의 응답시간을 반영하기 위한 시뮬레이션 타임스텝에 대해 분석하고, 복사난방시스템에서 응답시간이 공간의 열성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션을 실행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 시뮬레이션 결과 현재 온돌난방에서 사용되고 있는 자동 온도조절밸브의 응답시간 범위 안에서는 응답시간에 따른 최대온도의 차이가 크지 않으므로 응답시간의 증가에 의한 과열의 위험은 없는 것으로 판단된다. 한편 현재 고효율에너지기자재에 관한 기준에서는 과열의 위험을 근거로 온도조절밸브의 응답시간에 대한 성능기준을 10초로 규정하고 있으나, 밸브의 응답시간보다 내구성·정숙성·경제성 등을 근거로 성능기준을 검토해야 할 것으로 판단된다.

(2) 외기보상 개폐식 뱅뱅제어를 적용하였을 경우 공급온수의 온도가 외기온의 변화에 대응하여 낮게 조정되므로, 개폐식 뱅뱅제어에 비해 응답시간에 따른 실온편차의 증가율이 완화됨을 알 수 있다.

(3) 공급온수의 온도가 높고 축열층이 두꺼울수록 응답시간의 증가에 따라 실온편차가 증가하였다. 그러므로 축열층의 두께가 감소되고 낮은 온도의 온수가 공급될 경우 응답시간의 증가에 따른 실온변동폭을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C103A1040001-03A0204-00310)에 의한 것임

참 고 문 헌

- Hensen, J. and Clarke J. A., 2001, Integrated Simulation for HVAC Performance Prediction : State-of-the-art Illustration, Proceedings, ASHRAE/CIBSE Conference, Dublin
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pederson, C. O., and Winkelmann, F. C., 2000, EnergyPlus: Energy Simulation Program, ASHRAE Journal, Vol. 42, pp.49-56
- Kim, Y. Y., 1997, A Study on the Time-Division Hot Water Supply for Energy Saving of Radiant Floor Heating System, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, pp.35-40
- Udagawa, M., 1993, Simulation of Panel Cooling Systems with Linear Subsystem Model, ASHRAE Transactions
- Yeo, M. S., and Kim, K. W., 1999, A Study on the Control Methods of Hydronic Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 15, No. 3, pp.119-126