Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 28, No. 2 (2016), pp.069-074
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2016.28.2.069

공동주택 세대별 난방 성능 개선 연구

A Study on Improved Heating Performance of an Apartment Housing Unit

서정아(Jeong-Ah Seo)[1], **신영기**(Younggy Shin)[1†], **김용기**(Yong-Ki Kim)[2], **이태원**(Tae-Won Lee)[2]
[1]세종대학교 기계공학과, [2]한국건설기술연구원
[1]*Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Korea*
[2]*Korea Institute of Civil Engineering and Buidling Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea*

(Received November 23, 2015; revision received January 7, 2016; Accepted: January 11, 2016)

Abstract Most hot water heating valves for apartments are constant-flow types, which limit the flow rate through an individual household for even distribution of heating water to other households. The constant-flow type is implemented by an on-off control. As a result, heating water is supplied intermittently and hence, indoor air temperature also fluctuates. Returning water temperature is also high, which reduces energy efficiency. To implement continuous feedback control, the indoor temperature dynamics was simulated to fit a measured temperature history by a state-of-the-art physical model. From the model, it was found that the most important disturbance is outdoor temperature and its effect on indoor temperature lasts about an hour. To cope with the slow response and the significant disturbance, a prediction control with proportional feedback is proposed. The control was found to be successful in implementing continuous heating water flow and improved indoor temperature control.

Key words Floor heating(바닥 난방), Heating control(난방 제어), Prediction control(예측제어), Proportional control (비례제어), Constant-flow heating valve(정유량 난방 밸브)

† Corresponding author, E-mail: *ygshin@sejong.edu*

기호설명

c_p : 정압비열 [J/kg℃]
K_m : 외란 보상 이득 [%/℃]
K_p : 비례제어 이득 [%/℃]
$\dot{m}$: 질량 유량 [kg/sec]
MC : 열용량 [W/℃]
$\dot{Q}$: 열전달량 [W]
T : 온도 [℃]
t : 시간
UA : 총합열전달계수 [W/℃]

하첨자

a : air
i : indoor
o : outdoor
r : room

1. 서 론

공동주택 세대별 난방을 위한 온수유량 밸브는 거의 모두 정유량 방식이다. 정유량 방식의 목적은 한 건물 내 각 세대에 공급되는 온수 공급 능력을 균등하게 하기 위해 세대별로 허용되는 최대 유량을 제한하는 것이다. 정유량 방식은 난방이 필요할 때는 정유량으로 흐르고 필요가 없으면 공급이 중단되는 방식이라서 각 세대에는 온수가 단속적으로 흐르게 된다. 그러한 On-off 제어의 결과 실내 온도는 설정온도 주변에서 부단히 진동하게 된다. 이 외에도 정유량 제어 방식은 난방 열 공급 시에는 최대 허용 유량으로 흐르기 때문에 세대를 통과하는 환수온도가 높아 엑서지 관점에서도 효율이 떨어지고 온수를 공급하는 펌프에도 큰 유량 부하와 변동을 초래한다.

정유량 방식의 문제점 개선을 위해 Jany et al.[(1)]은 동적 유량 밸런싱(비례제어) 기능이 가능한 밸브로 대체하여 온수 유량 및 난방 에너지를 절감하였다고 보고하고 있으나, 절감 성능을 입증할 제어논리에 관한 서술이 없다. Lee et al.[(2)]은 On-off 제어와 PID 제어를 혼합한 Hybrid 제어 방식을 제안하였다. 착안한 점은 PID와 같은 연속제어의 경우 최소 유량 근처에서 발생하는 소음 등의 문제를 해결하기 위해 허용 최소 유량

Fig. 1 Front view of hyundai jookjeon hometown apartment.

이하에서는 On-off 방식으로 제어하고 그 이상 유량에서는 PID 제어를 하는 것인데 비례 제어만으로는 정상상태 오차가 크므로 적분제어로 오차를 제거하고 미분제어를 도입하여 외란에 대한 강인성을 향상 시키는 의도였다. 성능 입증을 위해 실내 환경을 모사할 수 있는 실험실에서 실험을 수행하였으나 PID 계수를 결정하는 방법론에 대한 설명이 없다.

On-off 제어가 아닌 연속제어를 최적화하려면 제어대상의 동적 거동을 먼저 파악해야 하고 이를 근거로 최적설계가 이루어져야 한다. 공동주택 실내 열환경의 모델링 방법으로는 물리적 모델에 근거한 방법[3]과 black box로 가정하여 실험 데이터를 선형 근사하거나[4] 인공신경망으로 학습하는 방법 등이 시도되었다.[5] 그러나 이들 방법은 제어기 설계의 관점이 아니라 제어 성능 평가에 유용하지 않다.

본 연구는 세대별 난방 제어 개선을 위해 일차적으로 동특성 모델링 연구방안을 제시하고 이를 기반으로 제어 개선 아이디어를 제시한다.

2. 세대별 난방 열환경 모델링

2.1 모델링 대상 공동주택

모델링 대상은 경기도 용인시 죽전동 현대 홈타운 4차 1단지의 9층에 위치한 전용면적 105. 62 ㎡인 세대로 하였다. Lee[6] 등은 대상 아파트의 기계실 및 세대별 난방 열량 공급 관련 데이터를 측정하였으며 Fig. 2는 그 예를 나타낸다. Fig. 2에 따르면 세대 내 온도를 25℃ 근처로 유지하도록 정유량 제어가 이루어지고 있다. 그 결과 세대 난방 입출수 온도는 각각 47℃와 37℃ 수준이다.

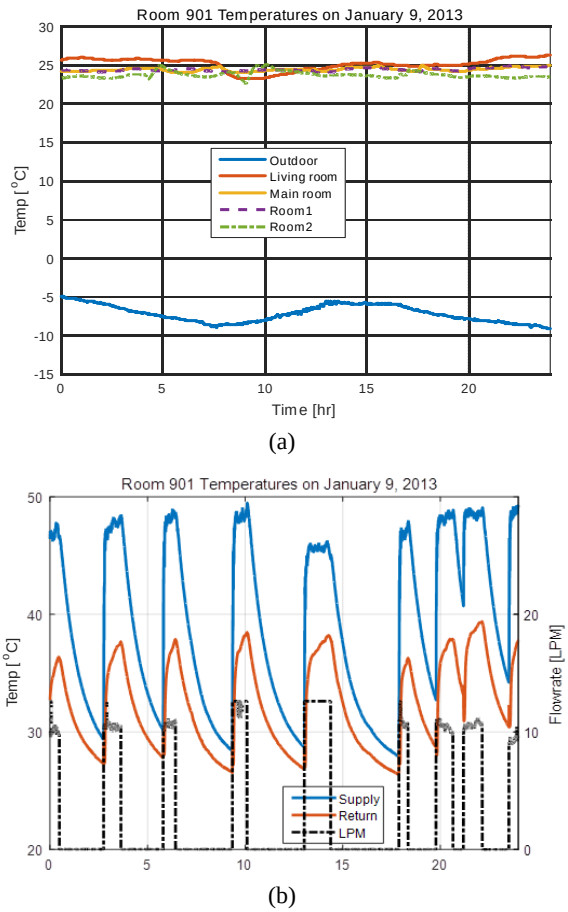
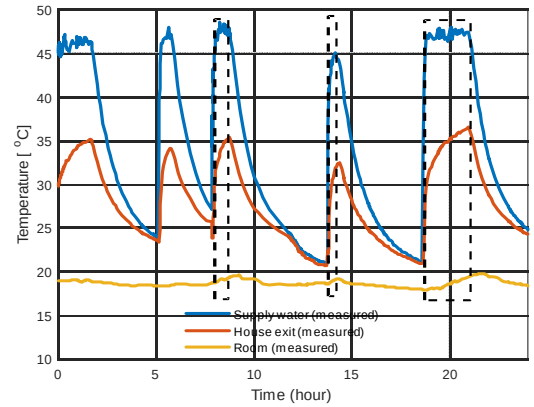


Fig. 2 Measurement at a 9th floor household (a) air and water temperatures (b) flow rate of hot water.

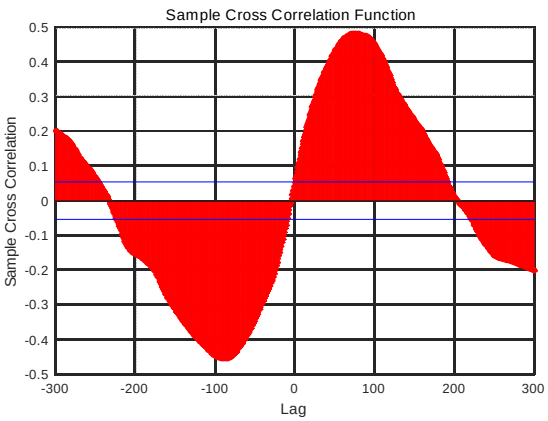
2.2 동적 모델의 파악

세대 난방 제어 알고리즘을 설계하려면 제어 대상인 실내 열환경 동적 거동 예측 모델이 필요하다. 대상 시스템이 비교적 간단하면 기본 물리법칙에 의해 이론 모델을 구축할 수 있고, 복잡한 경우에는 입출력 데이터만을 근거로 동특성을 파악해내는 black-box 접근법이 있다. 모델링에 앞서 대상 시스템의 입출력 특성을 먼저 파악해야 한다. Fig. 3은 안방 공기 온도와 온수 공급시점간의 반응지연 관계를 나타낸다. Fig. 3(a)는 시간 영역에서 온수 공급 직후 실내 온도 반응은 30분 ~60분 정도의 반응지연을 나타내는 것으로 판단된다. 입력의 시간지연 반응을 고려할 수 있는 대표적 선형 모델인 ARMAX(Auto-Regressive Moving Average model with eXogenous input) 모델을 적용하여 입출력 데이터로부터 적합도가 높은 모델 변수를 찾아내게 하였으나 적합수준이 성공적이지 못했다. 가장 큰 이유는 긴

ⓒ SAREK



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Room temperature response to heating water supply(Room 301, Jan. 9, 2013) (b) Cross-correlation between heating water supply and indoor temperatures (1 minute per sample).

지연시간이다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)와 동일 데이터를 통계기법인 cross-correlation 기법으로 반응지연을 계산한 것이다. 샘플 간격은 1분으로서 지연 첨두치는 약 80분 근처에 위치하며 다양한 지연 시점의 데이터들이 영향을 미치는 비선형성을 보이고 있다. ARMAX 등의 선형모델은 지연시간을 대개 최대 10 samples 정도를 취하는데 그 이상이 되면 관련된 과거 입력 항들의 모델 계수를 full rank로 계산할 수 있는 데이터의 질 확보가 일반적으로 어렵기 때문이다. 같은 이유에서 인공신경망으로 학습시키는 경우에도 긴 지연시간은 지연시간만큼 입력변수 개수를 늘려야 해서 실용적인 구조를 확보하기 어렵다. 그렇다고 샘플 시간 간격을 늘리면 제어에 필요한 동적 모델의 응답성 구현이 불가능하다. 따라서 black-box 기반 동특성 파악 방법은 본 연구의 동적 모델 적용에 적합하지 않다고 판단한다.

대안으로서 물리적 모델에 기반한 동특성 모델을 시도한다. 건물 에너지 동특성 모델 분야에서 잘 알려진 EnergyPlus나 TRNSYS와 같이 집중 열용량 방식으로 세대 내 열환경 모델을 다음과 같이 구성하였다. 하첨자 번호는 출입문이 있는 면을 1로 하여 시계방향으로 증가시키고 바닥면 5번, 천정면을 6번으로 설정하였다.

$$MC_r\frac{dT_r}{dt}=\sum_{k=1}^{6}\left[UA_{ik}(T_k-T_r)+\dot{Q}_k\right]+\dot{m}_a c_{pa}(T_{outdoor}-T_r) \quad (1)$$

$$MC_k\frac{dT_k}{dt}=UA_{ik}(T_r-T_k)+UA_{ok}(T_{ok}-T_k) \quad (2)$$

식(1)에서 필요한 총합열전달 계수는 EnergyPlus의 Engineering Reference[7] 관계식을 준용하였다. 외부 열공급 $\dot{Q}_k$는 온수에 의한 바닥 난방과 일사에 의한 복사열을 고려하였다. 식(1)의 마지막 항은 외기누설 및 환기에 의한 열손실이다. 문제는 열용량 부분이다. 식(1)~식(2)와 같은 집중 열용량 모델이 유효하려면 열전도율이 매우 커서 무차원수인 Biot 수가 1보다 매우 작아야 한다. 실내공기와 관련된 Biot 수는 1보다 크기 때문에 실내 공기 열용량의 단순 계산으로는 실제 실내온도를 제대로 모사할 수 없다. 대안은 실험 결과와 비교하여 동적 거동을 유사하게 모사할 수 있는 유효 열용량을 추정해야 한다. 본 연구에서는 시험 결과의 반응시간과 비교하여 시행착오 방식으로 공기의 열용량을 조정하였다. 조정결과에 의하면 세대 내 실내 체적의 약 20% 수준이었다. 난방부하 오차는 식(1)의 마지막 항인 외기 엔탈피 손실을 미세 조정하여 최소화하였다. 조정을 통하여 얻어진 외기량 $\dot{m}_a$은 우연히도 법적 기준인 시간당 0.7회의 환기량과 유사한 값을 나타내었으며 다른 세대 측정 사례들에서도 유사한 결과가 나오는지 다음 연구를 통해 고찰할 예정이다.

이 모델을 Matlab Simscape toolbox를 이용하여 Fig. 4와 같이 구현하였다. 이 모델에 대하여 Fig. 5는 실제의 정유량 방식과 유사하게 ±0.5℃의 불감대를 갖는 On-off 제어를 적용하여 얻은 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 온수 공급 횟수나 유량이 유사하게 모사되었으므로 이 모델을 대상 세대의 제어기 설계를 위한 가상 동적 플랜트로 확정하였다.

3. 세대별 난방 제어 알고리즘

현재 가장 많이 사용되는 정유량 밸브는 설정온도 범위의 상한과 하한을 벗어나면 작동하는 On-off 방식이므로 동특성 모델이 필요치 않다. 반면에 실내온도 변동폭을 줄이고 출수온도를 낮추기 위한 연속 유량제어

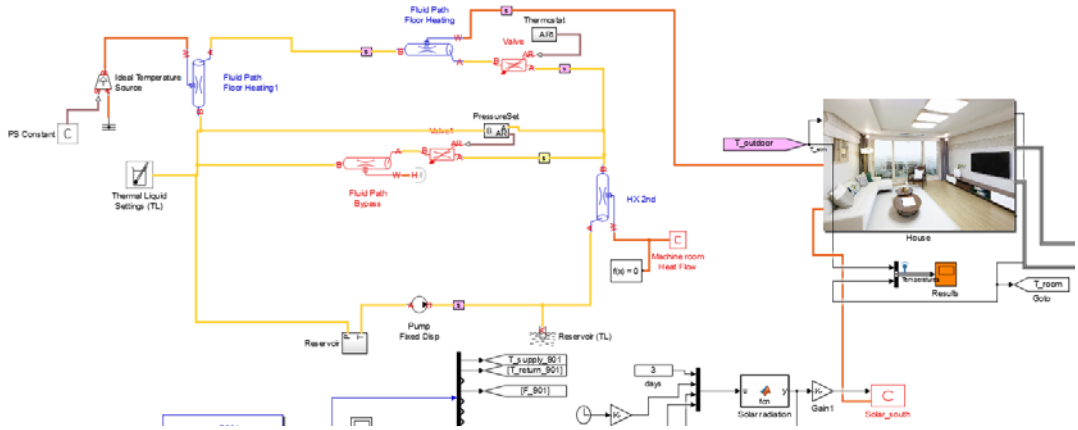
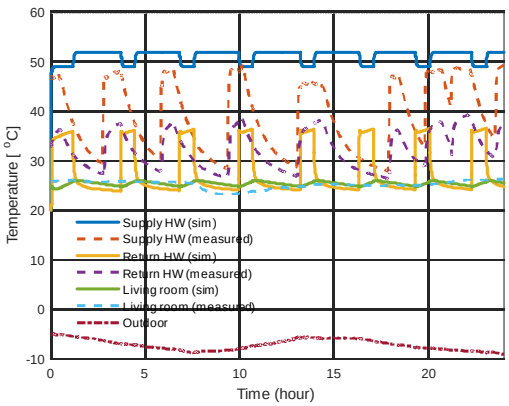
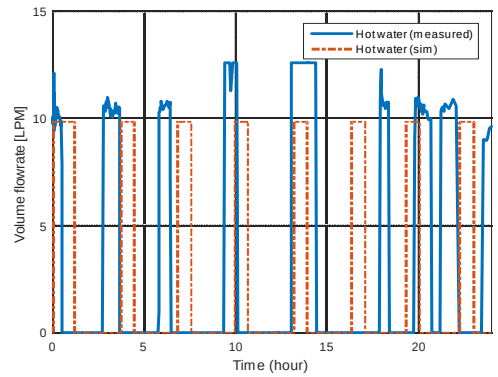


Fig. 4 Modeling of household heating in matlab simscape.

방식은 제어 알고리즘 설계와 성능 평가를 위해 동특성 모델이 필요하다. 연속 유량 제어방식의 알려진 장점에도 불구하고 실용화되지 못하는 중요한 이유는 적



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of the physical model with the measurement (a) air and water temperatures (b) flow rate of hot water.

용할 제어 로직의 최적설계와 안정성 확보가 쉽지 않다는 점이다. PID 계수 설정은 세대마다 다를 수 있고 잘못 설정된 값은 밸브가 개도 상한과 하한을 수시로 채터링하여 소음과 밸브 조기마모를 유발하거나 설정값을 추종하지 못하여 난방 불만의 원인이 된다. 따라서 이러한 문제를 개선할 수 있도록 안정된 제어 알고리즘을 제시해야 연속 유량 밸브 적용을 실용화할 수 있다.

전 절에서 파악한 바와 같이 외기나 온수 공급에 대한 실내온도의 반응시간이 길다. 반응지연이 길수록 제어 안정성이 저하되고 그 결과 비례제어 이득을 줄여야 한다. 비례 이득이 작으면 외란에 대한 강건성이 약화되므로 바람직하지 못하다. 또한 작은 비례이득은 정상상태 오차를 키우게 된다. 오차 제거를 위해 적분동작을 추가하면 원점 근처의 극점(pole)의 증가로 제어 불안정성이 커진다. 비례이득을 키워 외란과 정상상태 오차의 영향을 줄이면서 안정성을 개선하는 방안은 시스템의 느린 반응지연을 미리 예측할 수 있는 방법을 찾는 것이다. Fig. 6은 외기온도가 실내온도에 미치는 반응지연을 판단할 수 있는 cross-correlation 예이다. Fig. 3(b)와 비교해서 알 수 있듯이 외기온도나 온수 유량 공급이 실내온도 거동에 미치는 영향은 대략 한 시간 근처로 해서 비선형적 형태를 띤다. 비선형성은 있지만 유의미한 관찰은 외기온도와 온수 공급량 변화가 실내온도에 반영되는 시간지연이 대략 비슷한 크기라는 점이다.

이 점에 착안하여 외기온도가 실내온도에 미칠 난방부하를 필요 공급유량으로 계산하여 실시간으로 공급하는 예측제어 기능을 적용하였다. Fig. 7은 제어 알고리즘을 나타낸다. 세대별 난방 제어기에 적용되는 마이크로프로세서는 정수형 연산만 가능한 저가형이므로 제어 로직도 최대한 단순해야 한다. 본 연구에서는 K_p = 30[%/℃], K_m = 60/(25-(-30))[%/℃]으로 설계

ⓒ SAREK

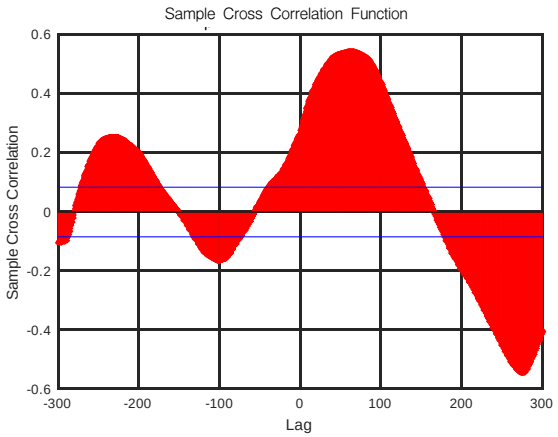


Fig. 6 Cross-correlation between outdoor and indoor temperatures(Room 901).

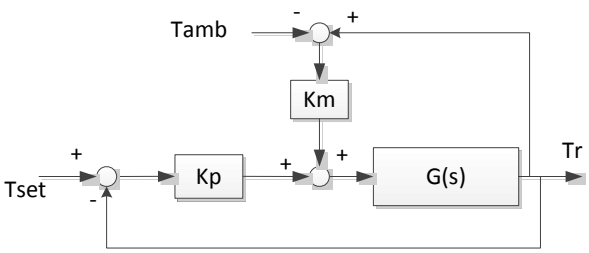
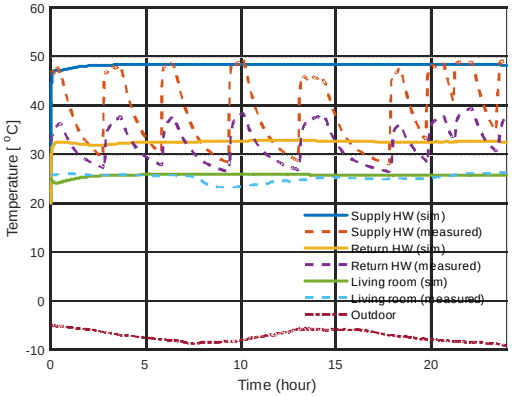


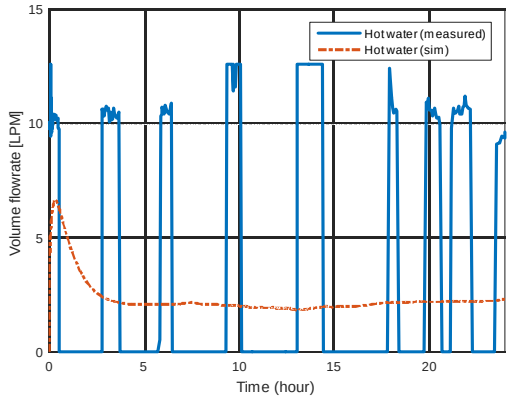
Fig. 7 Control algorithm block diagram.

하였다. 여기서 %는 밸브 개도를 나타낸다. 값을 결정한 근거는 수학적인 최적해를 구하는 방식이 아닌 시행착오 방식이었다. 불확실도가 있는 동적 모델에 기반하여 복잡하게 최적해를 유도하기 보다는 미지수가 2개이므로 시행착오 방식이 더 효율적이라고 판단하였다. 비례이득 K_p는 오차에 과도하게 반응하여 밸브의 빈번한 개도조작에 따른 수명단축과 소음이 유발되지 않도록 최대한 작은 값으로 설정하였다. 그리고 작은 K_p로 인한 큰 정상상태 오차 제거를 줄이기 위해 부하 예측제어 이득인 K_m을 조정하였다. 이 논리에 따르면 구조가 비슷한 공동주택 세대의 경우 K_p는 거의 동일한 값으로 고정할 수 있고 K_m만 세대별 단열이나 환기특성 등에 따라서 가변적으로 설정되게 하면 최적화에 가까운 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 8은 이 알고리즘의 성능을 나타낸다. 결과에 의하면 실험결과인 정유량 방식에 비해 연속적인 유량공급의 결과 환수온도 및 실내온도의 편차가 감소하고 거의 일정함을 알 수 있다. 제안된 제어의 실용성을 검증하고자 다른 공동주택 세대인 301호에도 적용하였다. Fig. 9의 결과에서 보는 바와 같이 별도의 K_m, K_p 조정 없이도 다른 세대에서도 유사한 제어성능을 나타내었다.



(a)



(b)

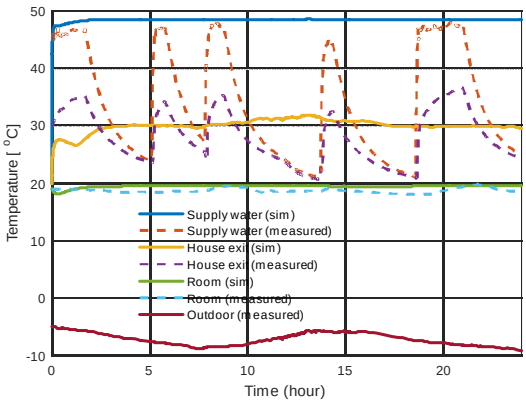
Fig. 8 Comparison of the proposed control case with the measurement(Room 901) (a) air and water temperatures (b) flow rate of hot water.

4. 결 론

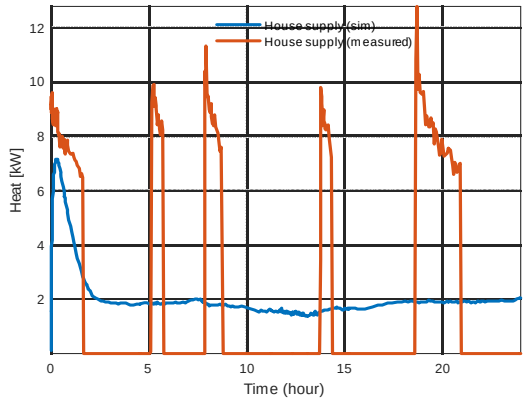
많이 사용되는 공동주택의 세대별 정유량 난방 밸브는 유량을 단속적으로 제어하는 결과 환수온도가 높아져 열손실 및 엑서지 효율 저하를 초래한다. 또한 정유량 방식이라 실내 온도제어도 On-off 제어로만 가능하여 실내온도도 설정값 주변을 헌팅하는 현상을 피할 수 없다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 열환경 동적 모델을 수행하고 이를 근거로 연속제어 알고리즘을 설계하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세대별 실내온도 거동 모사를 위해 개발한 집중 열용량 기반 물리 모델의 일부 계수를 시험결과와 비교하여 조정하는 Grey-box model을 적용하여 실제와 유사한 난방부하의 크기와 동적 거동을 모사하는 모델을 얻을 수 있었다.

(2) Cross-corelation을 통하여 분석한 결과 외기온도 및 온수 공급유량은 실내온도에 대하여 약 한 시간의 지연을 첨두치로 하여 넓게 분포된 비선형성을 보였다.



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of the proposed control case with the measurement(Room 301) (a) air and water temperatures (b) flow rate of hot water.

(3) 실내외 온도차에 비례한 난방부하 예측과 제어 안정성을 위한 비례제어의 채용으로 안정적인 연속제어 구현이 가능하였다. 그 결과 환수온도도 낮추고 적은 연속 유량으로 질 높은 난방 구현이 가능하였다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(과제번호 : 2015-0182)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Jang, Y. S., Ahn, M. H., Kim, Y. S., and Song, J. H., 2014, Experimental Study on the Floor Heating System using Proportional Control, Proceedings of SAREK Summer Conference, 14-S-065, pp. 269-272.
2. Lee, T. W., Kim, Y. K., and Ho, J. W., 2009, An Experimental Study on the Optimal Control Methods for the Radiant Floor Heating Panel, Proceedings of SAREK Winter Conference, 09-W-072, pp. 419-424.
3. Lee, E. J., Lee, D. Y., Hong, H., and Kim, Y. K., 2014, Measurement and Simulation of Heating Energy for Apartments with District Heating, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 12, pp. 572-578.
4. Royer, S., Thil, S., Talbert, T., and Polit, M., 2014, A procedure for modeling buildings and their thermal zones using co-simulation and system identification, Energy and Buildings, Vol. 78, pp. 231-237.
5. Ruano, A. E., Crispim, E. M., Conceicao¸ E. Z. E., and Lu'cio, M. M. J. R., 2006, Prediction of building's temperature using neural networks models, Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 682-694.
6. Lee, T. W., 2011, Research Service on Investigating Fault Status of Heat Meters of Apartment Households and Diagnosing Their Energy Consumption for ESCO Enterprise, Korea District Heating Corp., KICT, pp. 2011-017.
7. EnergyPlus, 2015, Engineering Reference The Reference to EnergyPlus Calculations, https://energyplus.net.

ⓒ SAREK