

바닥난방 시스템용 비례식 자동온도조절밸브의 성능해석에 관한 연구

송재엽[†], 안병천, 김용기*, 이태원*

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

A Study on the Performance Analysis of Proportional Automatic Thermostatic Valves in Floor Radiant Heating System

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

ABSTRACT: The control characteristics for radiant panel heating system with automatic thermostatic valves were researched by computer simulation and experiment. The unsteady energy analysis using equivalent R-C circuit method and radiation heat transfer analysis of enclosure analysis method with simple structured rooms was performed. The results of flow rate changes of the simulation study are good fit with the ones of experimental one.

Key words: Floor radiant heating system(바닥복사 난방시스템), Automatic thermostatic valve(자동온도조절밸브), Equivalent R-C circuit(등가 열저항-열용량 회로)

1. 서론

최근 에너지 절감에 따른 관심이 높아짐에 따라 이를 위해서 에너지 절약에 따른 법규들이 시시각각 늘어나고 있다.

현재 국내 공동주택의 대부분은 온수에 의한 바닥복사 난방시스템을 채택하고 있는데 1980년대 말 동력자원부에서는 건물부문의 에너지사용을 절감하고자 각 공동주택에 자동온도조절기를 의무적으로 설치하도록 법규를 지정하였다. 또한 자동온도조절밸브가 고효율기자재로 등록되면서 이에 대한 관심이 점차 높아지고 있는 추세이다.

그러나 바닥복사 난방방식들에 대하여 실내의 공급유량 및 공급온도에 따라 실내온도를 쾌적한 범위로 유지하기 위한 연구들이 진행되고 있으나

현재 국내에서는 자동온도조절밸브에 대한 연구가 턱없이 부족한 실정이다.

최근에 김⁽¹⁾ 등은 바닥복사 난방시스템의 기존 제어방식들을 제어인자에 따라 분류하고, 실온과 바닥온도의 안정성을 비교하는 제어성능실험을 실시하여 각 제어방식 별 제어성능을 통합적으로 분석하였으며, 여⁽²⁾ 등은 기존 시스템의 문제점을 분석하고 공동주택의 실별 제어시스템의 제어성능 및 에너지성능을 평가를 수행 및 복사난방 시스템의 적정유량분배 방안에 대하여 제시하였다. 그러나 이러한 공동주택에서의 복사난방 공간에 적합한 인자들을 이용하여 제어하는 방법들은 현재 에너지 절약의 한 방편으로 국내에서 보급되고 있는 자동온도조절기에 대한 적용이 거의 이루어지지 않았으며 단순히 실내공기온도 제어나 난방시스템의 기존 시스템에 대한 제어에 대해서만 연구가 수행되었다. 또한 자동온도조절밸브에 대한 연구에서도 마찬가지로 자동온도조절밸브의 고효율기

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-750-5314; fax: +82-31-750-5314
E-mail address: finalfortres@naver.com

자재로서의 성능해석에 관한 연구조차 아직 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 바닥 복사 난방 시스템용 비례식 자동온도조절밸브의 성능해석을 위하여 실험 및 시뮬레이션 연구를 수행하였으며, 밸브의 성능해석을 위한 방안을 제시하였다.

2. 실험장치 및 구성

본 연구에서는 비례식 자동온도조절밸브의 성능해석을 위하여 실험장치를 구성하였는데 그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

바닥패널에 매설된 배관에 일정한 온도의 난방수를 공급하기 위하여 보일러와 열교환기 및 난방부하나 순간 열량공급의 변동에 따른 난방수의 온도변화를 방지할 위한 실험의 수행에 충분한 용량의 축열조를 설치함으로써 저장온수는 설정된 온도로서 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 위치에 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 실험

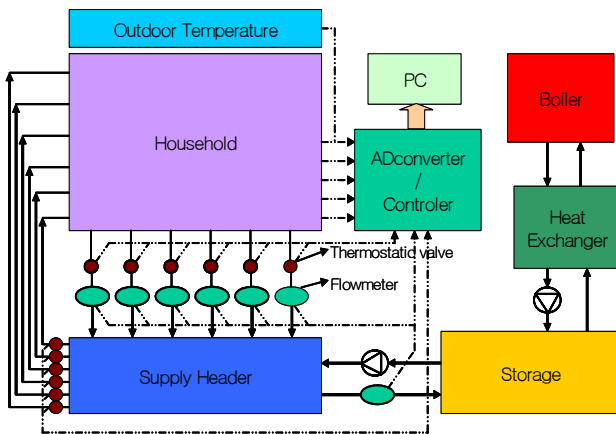


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment.

조건에 부합하는 실 주변의 온도를 얻을 수 있게 하였다.

이와 같이 설치되어진 공간에서 자동온도조절밸브를 설치하고 실내공기온도 및 환수온도별 유량변화에 대한 밸브의 제어특성들을 살펴보았다. 실험방법은 다음의 표 1과 같다.

Table 1 Operating conditions.

Description	Experiment 1	Experiment 2
Valve	Air temperature sensing proportion valve (stage-3)	Water temperature sensing proportion valve (34°C-type)
Supply water temperature	45°C	45°C
Outdoor temperature	8°C	8°C
Flow rate	1.4lpm	1.4lpm
Operating time	1day	1day

3. 컴퓨터 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 밸브의 제어성능 해석 프로그램은 외기온도 및 공급유량 공급온도 등의 여러 제어변수를 통하여 실내 공기 및 환수온도 등의 온도를 해석 할 수 있도록 하였으며 그 밖에 여러 가지 운전특성들을 고려할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 밸브의 성능 해석이 용이하도록 여러 변수들의 실제데이터 입력 및 밸브의 유량과 온도와의 관계수식 등을 적용하여 해석할 수 있도록 구성되어 있다.

비례제어밸브의 성능에 대한 해석은 실험을 통해 얻어지는 온도와 유량과의 데이터 및 임의의 상수의 값들을 입력하여 그 사이의 데이터를 선형 보간법을 통하여 얻어낼 수 있도록 되어있다.

실내의 열환경 해석은 실의 열적 구성요소들을 질량집중 모델인 등가 열저항-열용량 회로로 나타내어 구하였다.⁽³⁾ 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.

4. 결과 및 고찰

그림 2는 실험에서 사용한 기온감지식 난방용 자동온도조절기의 밸브전후 압력차에 따른 유량의 변화를 살펴본 그래프이다. 밸브는 조절개도를 3단계(실내공기온도 22°C 설정)로 하였을 경우이며 실내공기온도를 16~24°C까지 변화시켜 유량을 살펴보았다. 실내공기온도가 22°C 와 24°C일 경우는 조절개도를 3단계로 유지함에 따라 유량 공급이 전혀 이루어지지 않았으며, 밸브전후의 압력차에 대하여 밸브통과유량은 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었으나 증가율은 압력차가 증가함에 따라 감소하였다. 또한 실내공기온도가 낮아질수록 밸브통과유량이 증가하였으며 증가율은 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 3은 실험에서 사용한 기온감지식 난방용 자동온도조절기의 실내온도설정기의 조절단계에 따른 유량변화를 실내온도에 따라 도시한 것으로서 이 경우 밸브전후의 압력차는 0.1kgf/cm²이다. 그림에서 살펴보면 실내설정온도 조절단계에 따라 밸브의 제어특성이 각각 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 1단계의 경우 실내온도 16°C 이상에서는 밸브통과 유량이 전혀 나타나지 않았고 점차적인 단계의 증가에 따라 유량의 변화가 다르게 나타났다. 2단계의 경우 18°C 이하에서 제어가 이루어지며, 본 연구에서 사용된 3단계의 경우 실내온도

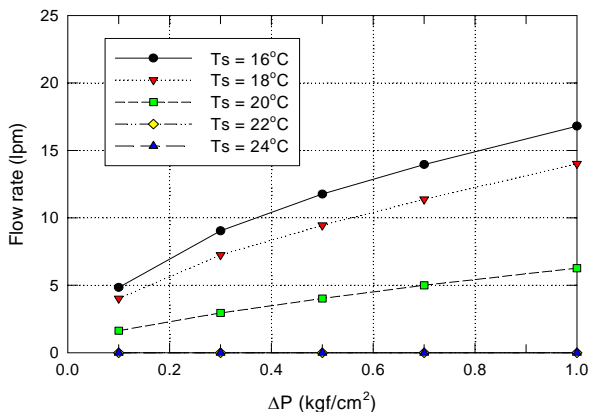


Fig. 2 Flow rate changes for different pressure with air temperature sensing proportion valve.

18~22°C사이에서 주된 제어가 이루어지고, 4단계는 20~24°C, 5단계는 22°C이상에서 제어가 이루어짐을 예측할 수 있다.

그림 4는 수온감지식 비례제어밸브(34°C-type)의 난방순환수의 온도를 저온으로부터 상승시킬 때 밸브 통과유량의 변화를 밸브 양단의 압력차에 대하여 도시한 것이다. 그림에서 살펴보면 각 밸브전후의 압력차의 경우에는 전반적으로 환수온도가 증가함에 따라 밸브 통과 유량은 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 온도증가에 따른 유량의 감소율은 밸브전후의 압력차에 따라 다소 차이는 있으나 대략 환수온도가 30~38°C사이에서 유량변화가 크게 나타나는 것으로 보아 온도변화에 따른 유량제어가 이 영역에서 수행될 것임을 예상할 수 있다. 동일한 환수온도의 조건에 있어서는 밸브 양단의 압력차가 증가함에 따라 밸브 통과 유량이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

그림 5는 기온감지식 난방용 자동온도조절기의 실제유량변화 실험데이터 및 실험데이터와 동일한 공급온수온도와 외기온도조건을 입력값으로 주고 실내공기온도 변화에 따른 유량변화 제어특성곡선을 시뮬레이션 프로그램에 적용한 후 시뮬레이션 하였을 경우에 대한 유량변화의 비교 그래프이다. 시간의 지남에 따라 실내공기온도가 증가하면서 밸브통과유량의 측정값은 점차적으로 감소하고 있으며 유량의 감소가 지속적이지 않고 일정시간마다 크게 변화하는 것으로 보아 밸브구동에 있어서 시간지연적인 제어가 이루어지는 것으로 보인다. 또한 밸브전후 압력차에 따른 밸브제어 특성곡

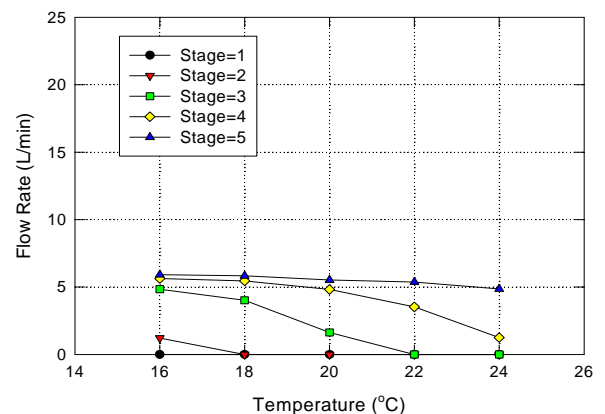


Fig. 3 Flow rate changes for different hot water temperature with air temperature sensing proportion valve($\Delta p=0.1$).

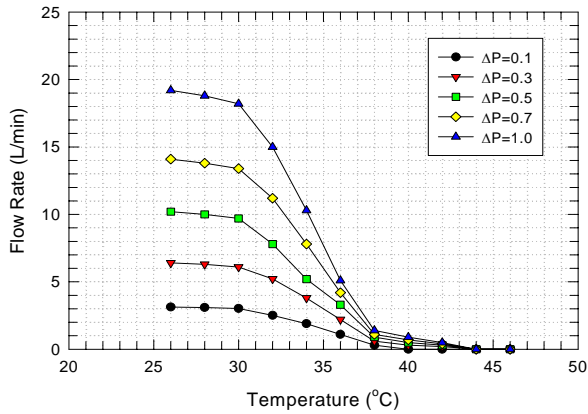


Fig. 4 Flow rate changes for different hot water temperature with water temperature sensing proportion valve.

선을 적용한 시뮬레이션 결과 값과 유량변화를 비교해 본 결과 6시간 이후에는 밸브전후 압력차가 0.5kgf/cm^2 일 경우와 유량변화 동특성이 거의 일치하였으나 그 이전에는 밸브전후압력차에 따라 실험데이터에 추종하는 시뮬레이션 결과값이 나타나지 않았으며. 그림에는 나타나지 않았지만 시뮬레이션의 실내공기온도 변화도 실험데이터와 동특성의 차이가 나타났다. 그러나 압력차가 줄어들어 따라 주된 제어가 이루어지는 영역에서 기온기가 원만해지고 있음을 그래프를 통해 알 수 있는데 이를 통해 밸브제어가 이루어짐에 따라 밸브전후의 압력차의 변화가 발생하고 6시간 이전에는 0.1kgf/cm^2 보다 적은 압력차로 유량제어가 이루어짐을 짐작할 수 있다.

그림 2의 데이터를 이용하여 선형보간법을 통해 그림 5의 6시간 이전의 압력차이를 계산해 본 결과 약 0.05kgf/cm^2 일 때의 밸브특성곡선이 실험데이터와 거의 유사한 특성을 나타내었다. 이에 따라 6시간 이전에는 밸브전후압력차를 0.05kgf/cm^2 으로 6시간 이후에는 0.5kgf/cm^2 으로 밸브제어특성곡선을 적용하여 시뮬레이션 한 결과 다음 그림 6과 같은 결과를 구해낼 수 있었다. 그림 6에서 살펴보면 유량의 경우 시뮬레이션 결과값이 실험데이터의 동특성 경향에 양호하게 추종하고 있음을 알 수 있으며 실내공기온도 또한 양호한 결과값을 나타내었다. 본 연구에서는 단지 두 구간의 밸브전후 압력차이를 이용하여 유량변화의 동특성을 유추해 내었으나 실시간으로 제어되는 밸브에 있어서 밸브전후의 압력차는 계속적으로 변화하며 이에 알맞은 밸브제어특성곡선을 적용하는 것은

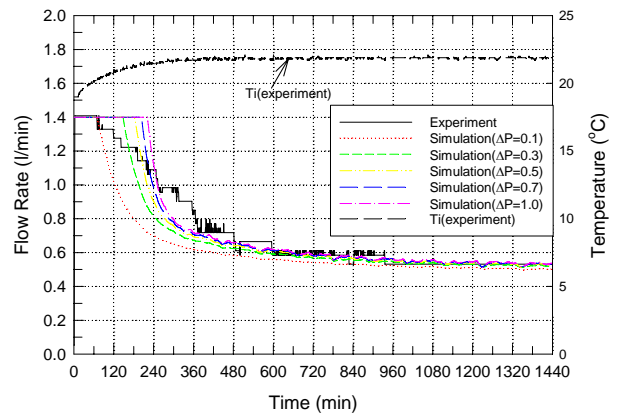


Fig. 5 The control characteristics of flow rate by simulation and experiment at study.

매우 어렵다. 따라서 실내열환경 및 자동온도 조절밸브의 제어특성을 더욱 정확히 살펴보기 위해서는 실시간으로 변화하는 온도에 따른 유량의 변화동특성 값이 확보되는 일이 무엇보다 중요하다.

그림 7은 본 연구에서 기온감지식 자동온도조절기의 실험을 통해 얻어낸 유량데이터를 시뮬레이션 프로그램에 적용했을 경우 나타난 환수온도 및 실내공기온도의 동특성을 실험데이터와 비교한 그래프로써 그림에서 살펴보면 유량의 변화에 따라 환수온도 및 실내공기온도의 시뮬레이션 값들이 실제 실험데이터와 양호한 추종성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 본 실험은 공급온수온도 45°C , 외기온도 8°C , 최대유량을 1.4Lpm 로 설정하고 기온감지식 자동온도조절기를 3단계로 했을 경우에 대한 실험으로써 실내공기온도 및 환수온도의 초기온도를 약 19°C 로 하였다. 실험결과를 살

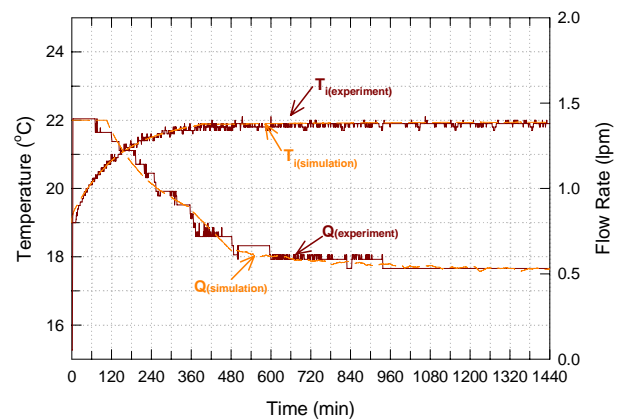


Fig. 6 The control characteristics of flow rate and indoor temperature with air temperature sensing proportion valve.

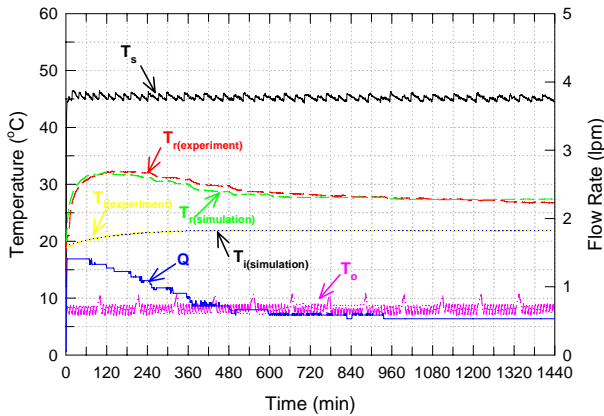


Fig. 7 Various temperature and flow rate changes in room with air temperature sensing proportion valve.

펴보면 실내공기온도가 20°C에 도달할 때까지는 최대유량이 공급되나 그 이후 유량이 점차적으로 줄어들어 실험후반에는 약 0.6Lpm으로 유지되었으며 그때의 실내공기온도는 21.9°C였다. 이로써 비추어 볼 때 그림 3에서 설명한 것과 마찬가지로 기온감지식 자동온도조절밸브를 3단계로 하였을 경우 실내공기온도 20~22°C에서 가장 활발한 제어를 보여주었다. 또한 실내공기온도 19~20°C구간에 최대유량이 흐르는 것을 알 수 있는데 이는 본 실험이 공동주택의 설계유량을 고려하여 1.4Lpm로 설정함에 따라서 나타난 결과로써 설계유량을 더 크게 하였을 경우 19~20°C구간에서 더욱 큰 제어특성 변화폭을 살펴볼 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8은 그림 6의 경우와 마찬가지로 수온감지 비례제어식 자동온도조절밸브의 밸브전후 압력차에 따른 밸브특성곡선(그림 4)을 이용하여 실험데이터의 유량변화 동특성과 유사한 밸브특성을 가지는 밸브전후 압력차를 찾아내어 시뮬레이션 해본 결과이다. 3시간 이전까지는 선형보간법을 이용하여 구해본 결과 약 0.05kgf/cm²의 밸브특성, 3시간 이후는 약 0.08kgf/cm²일 경우의 밸브특성 곡선과 유사하게 나타내어 3시간 전후로 하여 두 밸브전후압력차의 밸브특성으로 시뮬레이션 하였다. 그림에서 살펴보면 유량의 경우 시뮬레이션 결과값이 실험데이터의 동특성 경향에 양호하게 추종하고 있음을 알 수 있으며 환수온도 또한 양호한 결과 값을 나타내었다. 그러나 실험데이터에서 유량이 종종 급격히 변화함을 알 수 있는데

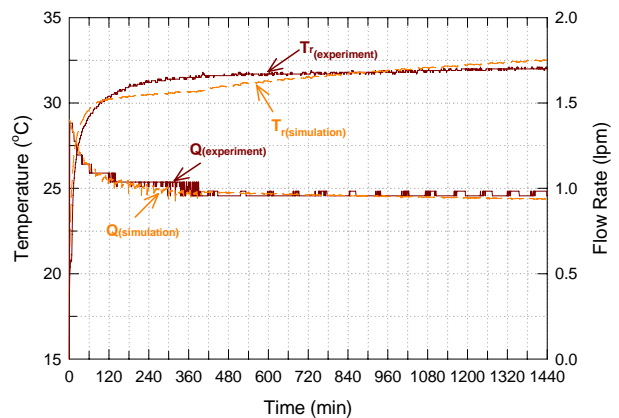


Fig. 8 The control characteristics of flow rate and indoor temperature with water temperature sensing proportion valve.

이는 본 실험에서 사용한 밸브의 종류가 형상기억 합금을 이용한 수온감지식 비례제어 밸브임에 따라 형상기억합금 스프링의 변태특성에 따른 것으로 보인다. 이로 인하여 시뮬레이션 데이터 값이 유량변화의 경향은 추종하나 유량값의 차이가 발생함으로 인하여 환수온도도 어느 정도 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 밸브의 제어특성 곡선만을 이용하여 밸브의 제어성능을 분석하기에는 어려움이 따를 것으로 보이며, 기온감지식 자동온도조절밸브와 마찬가지로 더욱 정확한 밸브의 제어특성을 살펴보기 위해서는 온도에 따른 유량의 변화동특성 값이 확보되는 일이 무엇보다 중요하다.

그림 9는 본 연구에서 수온감지식 자동온도조절기의 실험을 통해 얻어낸 유량데이터를 시뮬레이션 프로그램에 적용했을 경우 나타난 환수온도 및 실내공기온도의 동특성을 실험데이터와 비교한 그래프로서, 그림에서 살펴보면 유량의 변화에 따라 환수온도 및 실내공기온도의 시뮬레이션 값들이 실제 실험데이터와 양호한 추종성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 본 실험은 공급온수온도 45°C, 외기온도 8°C, 최대유량을 1.4Lpm로 설정하고 수온감지식 자동온도조절기(34°C-type)을 적용했을 경우에 대한 실험으로써 실내공기온도 및 환수온도의 초기온도를 약 19°C로 하였다. 기온감지식과는 달리 유량의 변화는 초기부터 나타나며 유량은 점차적으로 감소해 약 1Lpm정도로 유지되고 환수온도는 초기동특성을 제외하고 약 31.5°C정도로 유지된다. 24시간동안 살펴본 결과 수온감지방

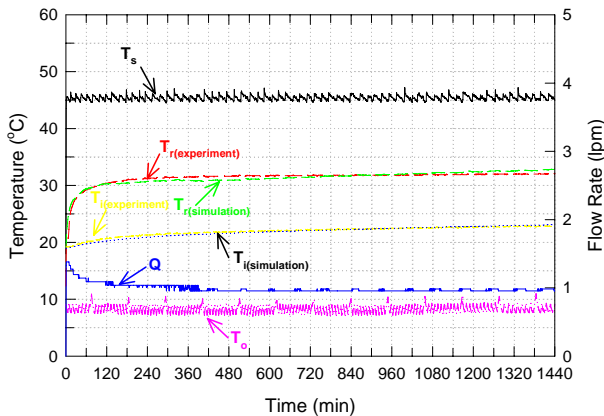


Fig. 9 Various temperature and flow rate changes with water temperature sensing proportion valve.

식의 특성상 실내공기온도는 점차적으로 증가하는 경향을 보이고 있다

5. 결론

바닥복사 난방시스템에 대하여 비례식 자동온도 조절밸브의 실험 및 시뮬레이션을 통한 성능해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

비례식 자동온도조절밸브에 있어서 온도와 유량제어특성을 살펴보기 위해서는 밸브전후간의 압력차이와 밸브의 구동시간 및 이상특성 등을 면밀히 검토하는 것이 무엇보다 중요하며 시뮬레이션을 통해 특성을 살펴보기 위해서는 이러한 모든 상황이 고려되어야 실제데이터에 추종하는 제어특성을 살펴볼 수 있다. 그러나 실시간으로 제어되는 밸브에 있어서 밸브전후의 압력차는 계속적으로 변화하고 또한 밸브고유의 이상특성이 나타남에 따라 시뮬레이션에 알맞은 밸브제어특성곡선을 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 밸브적용에 따른 실내 열환경 및 에너지, 밸브의 제어특성 등의 성능해석을 명확히 하기 위해서는 실시간으로 변화하는 온도에 따른 유량의 변화 동특성 데이터를 필요로 한다.

이러한 유량의 변화 동특성 실제 실험데이터를 시뮬레이션에 적용한 결과 실내공기온도 및 환수온도의 변화에 있어서 실험데이터와 유사한 동특성 시뮬레이션 데이터를 얻어낼 수 있었다.

참고문헌

1. Kim, K. W. et al, 2001.12, "An Experimental Study on the Control Methods of Radiant Heating Floor Heating Systems", Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering vol 13, no 12, pp.1297-1305
2. Yeo, M. S. et al, 2004.5, "A Study on the Individual Room Control of Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings", Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol 16, no 5, pp.421-429
3. 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
4. Song, J. Y, Ahn, B. C. et al, 2006.6 "Simulation and Experimental Study for Energy Flow Dynamics of Floor Radiant Heating System", Proceedings of the SAREK 2006, Summer Annual Conference, pp.927-932
5. Song, J. Y, Ahn, B. C. et al, 2005.11 "A study on the Performance of Automatic Thermostatic Valves for Hot Water Heating System in Residential Buildings", Proceeding of the SAREK 2005 Winter Annual Conference, pp.457-462