

바닥복사 난방시스템의 밸브구동 특성을 고려한 실내 열환경 성능 개선 연구

A Study on the Improvement of Indoor Thermal Performance of Floor Radiant Heating System Considering Valve Operation Characteristics

송재엽(Jae-Yeob Song), 안병천(Byung-Cheon Ahn)*[†]

유한대학교 건축설비공학과 교수, *가천대학교 기계공학과 교수
Professor, Department of Building Equipment System Engineering, Yuhan University, 14780, Korea
*Professor, Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 13120, Korea

Abstract

In this study, to improve the indoor thermal environment of the radiant floor heating system, a study was conducted on the temperature change characteristics and energy consumption according to the change of the indoor air set temperature, the supply hot water temperature and the outdoor temperature. As for the control method, the on/off control and the thermal difference proportional control method proposed through previous studies were applied. In addition, in consideration of field applicability, numerical analysis was performed for the case where the indoor air temperature sensor was affected by the wall temperature. As a result, it was found that the temperature difference proportional control method is more effective for thermal comfort and energy saving than on/off control.

Key words: Floor radiant heating system(바닥복사난방시스템), Thermal difference propotional control(온도차비례제어), Indoor thermal characteristics(실내열적특성), Floor surface temperature(바닥표면온도), Energy consumption(에너지 소비량)

[†]Corresponding author

E-mail: bcahn@gachon.ac.kr

접수일: 2021년 10월 15일; 심사일: 1차:2021년 11월 9일, 2차:2021년 11월 23일; 채택일: 2021년 11월 23일

1. 서 론

우리나라 주거용 공동주택의 난방시스템은 보급초기에 개별식 보일러(연탄)에 의한 난방방식을 위주로 발전하여 왔으며, 1970년대 이후에는 열원으로 온수를 사용하고 온수배관을 바닥구조체 내에 매설하는 온수식 바닥난방 시스템이 주거용 건물의 일반적인 난방시스템으로 정착·보급되었다.

바닥난방시스템에 대하여 열원의 생산방식에 따라 분류하면 세대별로 설치된 보일러에 의해 난방운전을 하는 개별난방방식과 각 단지별 중앙기계실에서 생산된 열원을 열교환기를 거쳐 각 세대에 공급하는 중앙난방방식, 그리고 열병합 발전이나 산업폐열을 이용하여 대단위 공동주택에 24시간 연속적으로 공급하는 지역난방방식 등으로 구분할 수 있다. 이러한 바닥난방시스템은 우리나라의 전통난방방식인 온돌시스템과 시스템이 유사하여 국내 정서와 잘 맞을 뿐만 아니라 시공비용이 저렴하고, 쾌적감이 매우 뛰어나 국내 대부분의 공동주택에는 바닥난방시스템이 설치되어 사용되고 있으며, 더 나아가 개발을 거듭하여 온열환경이나 에너지를 절감하기 위한 연구들이 지속적으로 수행되고 있다.

특히, 에너지문제가 환경문제와 더불어 인류가 직면하고 있는 최대 과제가 됨에 따라 지구온난화를 초래하고 있는 에너지문제에 대한 해결방안이 절실히 필요한 것이 현실이다. 국내의 경우 에너지의 대부분을 해외에서 보급하고 있으며 특히 건물부문의 에너지사용량은 전체와 대비했을 때 약 30%에 달한다. 따라서 건물분야에서 에너지를 절감하기 위한 기술 개발은 지구온난화 문제 등을 해결하기 위해 매우 필요하다.

1980년대 바닥복사 난방시스템의 에너지절감을 위하여 공동주택에 자동온도조절밸브의 설치 방안을 의무화 시켜 법규를 정하였으나 국내 여건상 자동온도조절기를 생산할 수 있는 기술이나 시설 등이 없어 외국에서 수입하게 되었으며, 이렇게 국내에 공급된 자동온도조절기는 국내의 바닥복사난방시스템 실정과는 맞지 않는 부분이 있어 여러 가지 문제점이 나타나게 되었다. 먼저, 바닥난방시스템에 적용된 자동온도조절기는 대부분이 on/off 방식으로 실내공기온도의 변화에 따라 각 실에 공급되는 온수유량의 공급을 전개 혹은 전폐하는 방식을 취하고 있는데, 실내로 따뜻한 공기를 공급하는 공조방식의 경우 난방코일에 공급되는 유량 공급을 조절하게 되면 실내공기온도 변화 반응이 빠르게 이루어지는데 반해 바닥난방시스템의 경우 바닥구조체의 가열을 통해 바닥표면으로부터 복사열 및 대류를 통해 실내공기로 열이 전달되어 반응이 상대적으로 늦어지는 단점을 나타냈으며, 이로 인해 실내설정온도의 상한 또는 하한 온도보다 높거나 낮은 난방제어가 이루어졌다. 이에 따라 on/off 제어방식 대신에 비례제어 방식을 적용하거나 난방수 온도를 제어하는 방식이 제시되었지만, 밸브의 내구성의 문제 및 수온 제어에 따른 실내공기온도의 쾌적성을 확보하기 어려운 문제점이 나타났다[1].

바닥복사난방시스템 및 열적 쾌적성과 관련된 연구로는 Jin[2] 등은 국내외에서 제안 및 적용되고 있는 제어방식들을 제어인자에 따라 분류하고, 실내온도와 바닥표면온도의 안정성을 비교하는 실험을 실시하여 적용성을 평가하였으며, 실내쾌적성을 고려하여 실별로 유량 밸런싱 및 실온제어에 관한 연구[3]를 진행하였다.

제어방식의 변화에 관한 연구로는 Lee[4] 등은 지역난방을 열원으로 하는 공동주택을 대상으로 하여 정유량 제어방식과 메인유량 조절방식을 제안하고 적용하였으며, Seo[5] 등은 on/off 제어방식을 개선하고자 세대별 난방 제어 개선을 위해 연속제어 방식을 제안하였다.

그러나 이러한 방식들은 현재 구축되고 있는 바닥난방시스템에 대하여 제어로직의 적용이나 밸브구동 방식의 변경이 까다로워 쉽게 적용하기 어려운 면이 있다. 또한, 바닥난방시스템의 실내온도센서가 벽체에 부착된 자동온도조절기에 삽입 시공됨에 따라 벽체 온도의 영향력이 크게 나타나 실내온도를 대표하기 어려운 문제점이 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하고자 기존의 실내공기 설정온도에 차동값을 두어 온수를 on/off 제어하는 밸브 구동 특성을 보완하여 실내공기의 설정온도와 대상온도 차 크기에 따라 유량의 공급시간을 제어하는 온도차 비례제어방식을 선행연구[6]를 통해 제안하였으며, 본 연구에서는 온도차 비례제어의 현장적용성을 고려하기 위하여 실내공기 설정온도, 공급온수온도 및 외기온도 등의 제어변수와 환경변수 변화에 따른 밸브의 구동으로 인한 온도 변화특성을 분석하고, 또한 벽체 온도의 영향으로 실내공기온도 제어가 제대로 이루어지지 않는 상황을 고려하여 시뮬레이션을 수행해 기존의 on/off 제어방식과 온도변화 특성 및 에너지 소모량을 비교 분석하였다.

2. 온도차 비례제어

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 on/off 제어방식과 온도차 비례제어방식의 제어흐름도를 나타낸 것이다. 온도차 비례제어는 밸브의 구동방식은 on/off 제어와 기본적으로 동일하나 on/off 제어방식의 경우 설정온도의 상한과 하한값에 따라 밸브가 동작하는 반면에 온도차 비례제어는 실내설정온도와 실내온도의 차에 따라 유량 공급시간을 결정하여 밸브 동작이 결정된다.

먼저, on/off 제어방식의 경우 Fig. 1에서 살펴보면 실내설정온도와 차동값을 각각 입력하게 되고, 차동값에 따라 설정온도의 상한값과 하한값을 정하게 되며, 실내온도를 측정하여 실내온도가 하한값보다 낮을 경우 밸브를 열고, 상한값보다 높을 경우 밸브를 닫는 제어방식을 취하고 있다. 밸브가 동작한 후 각각 상한값, 하한값에 도달할 때까지 현재의 밸브 상태를 유지하게 되는 방식으로 동작된다.

Fig. 2의 온도차 비례제어의 경우 입력되어진 Reset time에 따라 매 주기마다 유량공급시간을 계산하여 밸브를 제어하는 방식을 취하게 된다. 예를 들어 Reset time을 90분으로 설정하게 되면, Current time이 90분 이상이 되기 전까지는 연산 및 제어가 유지가 되는 것이다.

제어흐름도를 자세히 설명하자면, 앞서 말한 Reset time 및 Indoor set temperature, Temperature Divisor, Control constant를 입력하고 Current time과 Indoor temperature를 측정하게 되면 기본적인 제어준비가 완료된다. 여기서, Indoor set temperature와 Indoor temperature는 각각 실내설정온도와 실내온도를 의미하며, Temperature Divisor는 실내설정온도와 실내온도의 차의 크기 기준을 잡기 위한 상수이다. 또한, Control constant는 실내설정온도와 실내온도차에 따라 얼마만큼의 시간동안 밸브를 열어 유량을 공급할 것인지 결정해주는 상수이며, Current time은 제어가 이루어지는 동안 측정되는 시간이다.

제어흐름도는 다음과 같다. 먼저, 실내설정온도와 실내온도의 차를 구해낸 후 이를 Temperature Divisor로 나눈 값을 소수첫째자리에서 올림하여 B값을 구해낸 후 여기에 Control constant값을 곱하여 밸브가 구동하기 위한 시간 OT(Operation time, 동작시간)을 구해낸다. 예를 들어 실내설정온도를 23℃로 하였을 경우 실내온도가 20℃라 할 때 Temperature Divisor를 0.5로, Control constant를 10분으로 설정하게 되면, 총 동작시간은 60분으로 산출되게 된다. 이 때 산출된 동작시간 동안 밸브는 열려 유량공급이 이루어지게 되는데 만약 Current time이 계산된 동작시간보다 작으면 유량은 계속공급이 되고, 커지면 유량공급을 중단하게 된다.

또한, Current time이 Reset time보다 크거나 같아지게 되면, 앞서 진행한 연산을 다시 수행하게 되며, 그 이전까지는 Current time과 동작시간을 비교하여 밸브를 구동하는 제어를 반복수행한다. 만약, 산출된 동작시간이 Reset time보다 큰 경우라 하더라도 남은 동작시간에 관계없이 연산을 다시 수행하여 제어한다. 예를 들어 Reset time이 90분으로 설정되어 있고, 작동시간이 120분으로 산출되어졌다면 남은 작동시간 30분과는 상관없이 실내설정온도와 실내온도차를 다시 계산하여 다음 주기 Reset time 90분 동안의 밸브 동작시간을 구해내는 것이다.

이런 온도차 반복제어방식은 기존의 on/off 제어와 다르게 피드백제어의 측면보다 피드포워드제어 방식을 취하고 있으며, 이는 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 기온감지 on/off 제어방식이 구조체 축열방식으로 인한 과난방 또는 벽체에 부착된 자동온도조절기의 실내온도센서로 인하여 반응속도가 느려 정확한 피

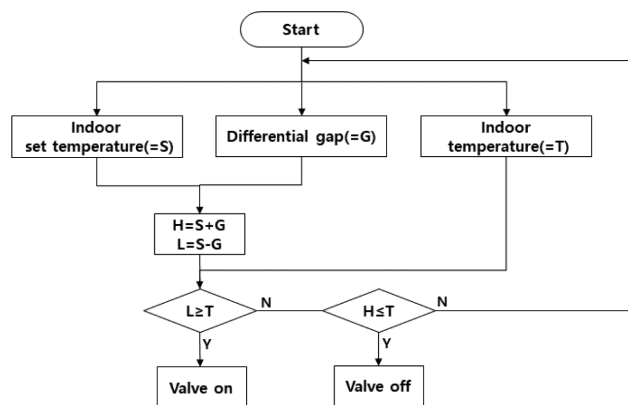


Fig. 1. Flow-chart of on/off control method

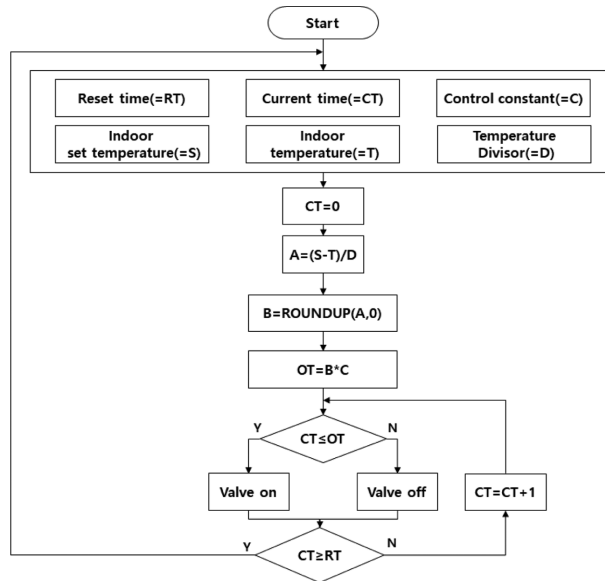


Fig. 2. Flow-chart of thermal difference proportional control method

드백 제어가 어려운 문제점을 해결하기 위한 방안이다. 또한 밸브의 잦은 구동으로 인한 고장과 피드포워드 제어 방식의 문제점을 보완하기 위하여 Reset time, Control constant 및 Temperature Divisor 값의 제어 변수를 추가시켜 제어흐름도를 작성하였다.

3. 시뮬레이션 방법

본 연구를 위한 시뮬레이션 모델은 국내의 전형적인 주택 규모의 거실을 포함한 방 4개의 평면구조로 되어 있는 건축면적 85.47 m²의 세대를 바탕으로 하여 기본적인 시뮬레이션 모델링을 수행하였다. 시뮬레이션 모델의 경우 선행연구[7]를 통해 실내의 온도 변화 동적 특성에 대하여 검증을 수행한 모델을 사용하였다. 이 모델의 경우 데이터는 국내에 공급되는 공동주택의 구조체 데이터를 기반으로 하였으며, 바닥구조체는 콘크리트, 경량기포 콘크리트, 몰탈, 카펫을 포함하여 약 320 mm의 두께로 구성되어 있고, 외벽의 경우 콘크리트와 단열재를 포함하여 약 245 mm의 두께로 구성되어 있다. 이 밖에 내벽은 150 mm의 철근 콘크리트 구조이며, 유리창은 두께 16 mm, 열전도율 11.76(kJ/m²H°C)의 복층유리로 되어 있다. 이 때 사용한 시뮬레이션 프로그램은 Compaq visual Fortran 6.5를 사용하여 실내공간에서 공기 및 유체의 전도, 대류, 복사열전달 해석을 수행할 수 있도록 구성되었다[8]. 세대의 설계유량은 지역난방방식의 경우 설계유량이 하나의 방에 0.6~1.2 lpm으로 공급되는 점을 감안하여 4 lpm으로 선정하였으며, 각 방의 배관길이를 50m를 기준조건으로 하였다.

또한 본 시뮬레이션 프로그램은 공급온수온도, 공급유량, 외기온도 등의 입력값의 변화가 가능하고 다양한 로직 등을 적용할 수 있게 구성하였으며, 기온감지 on/off 방식과 온도차 비례제어방식의 비교연구를 수행하였다. 온도차 비례제어 방식의 경우 선행연구를 통해 공급온수온도 50°C, 외기온도 -5°C~5°C의 조건에서 최적의 설정값으로 선정한 Reset time 60분, 실내설정온도와 실내온도차 0.5°C 마다 유량 10분 공급을 기준조건으로 하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 온도차 비례제어 방식이 사용자의 실내온도 설정과 공급온수온도 및 외기온도 변화에 따라 어떠한 특성을 나타내는지 살펴보기 위하여 운전조건을 다음 Table 1과 같이 선정하고 시뮬레이션을 수

Table 1. Operation conditions for floor radiant heating system

Control variables	Operational conditions		
Indoor set temperature	22°C	23°C	24°C
Hot water temperature	50°C		55°C
Outdoor temperature	-5~5°C		-10~0°C
Flow-rate		1 l pm	
Simulation time		24 hours	
Control method	on/off control	Thermal difference proportional control	

행하여 on/off 제어방법과 비교분석을 수행하였다. 외기온도 조건의 경우 1일간 sin그래프 형태로 외기온도가 변화하게 되고 표에는 그에 따른 1일 최고온도와 최저온도를 표시하였다.

또한 운전시간은 24시간, 시뮬레이션의 sampling time은 1분으로 하였으며, 공급유량의 변화는 각방의 배관저항이 동일하다는 가정 하에 한세대의 설계유량이 4 lpm일 때 각 방의 밸브제어에 의해 제어되는 공급유량을 고려하여 결과값에는 기준실 1개를 대상으로 1 lpm의 유량을 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

또한, 실내온도 센서가 일반적으로 실내 벽체에 부착된 자동온도조절기 안에 시공되는 점을 감안하여 벽체의 온도값이 온도센서에 영향을 끼치는 경우에 대해 가상적으로 시뮬레이션을 수행하여 특성을 살펴보았다.

분석조건의 경우 실내공기온도가 정상상태에 도달한 후의 에너지 비교를 위해 실내공기온도의 초기운전조건이 각각 20°C, 23°C일 경우에 대해 12시~24시 사이의 데이터를 비교 분석하였다. 에너지 사용량의 경우 온수의 유량과 온도차에 의한 열량에 대해서 해석을 수행하였으며, 펌프의 에너지 사용량은 제외하였다.

이밖에도 reset time 제어의 단점으로 지적될 수 있는 공급온수온도, 외기온도, 유량변화에 따른 Reset time 및 가동시간 보정에 관한 연구를 수행하였으나 본 논문에서는 지면상의 이유로 내용을 담지 않았으며, 추가적으로 연구내용을 제시할 예정이다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 on/off 제어방식과 온도차 비례제어방식에 대하여 실내설정온도, 공급온수온도 및 외기변화에 따른 실내 열적동특성과 에너지 소모량을 비교분석하였으며, 실내온도센서가 벽체에 부착된 자동온도조절기에 설치되어 있음에 따라 센서가 벽체온도에 영향을 받는 경우에 대해서도 가상하여 해석을 수행하였다.

먼저, Fig. 3는 on/off 방식과 온도차 비례제어 방식의 실내설정온도 변화에 따른 온도변화 특성을 나타낸 것이면, Table 2는 이에 따른 온도의 특성값들과 에너지 소모량을 비교분석한 것이다. 분석 조건은 실내공기온도가 설정값에 도달한 이후인 12시~24시 사이의 데이터를 분석하였다.

Fig. 3(a)의 on/off 제어방식의 경우 실내공기온도의 초기운전조건을 20°C로 설정하였을 때 설정온도가 증가할수록 에너지 소모량이 비례적으로 증가하는 경향을 보이며 이는 온도변화 동특성에서 나타나는 바와 같이 초기 설정온도까지의 도달시간의 차이로 인한 특성을 나타냈다.

최고최저온도차는 on/off 제어의 경우 실내설정온도가 증가함에 따라 초기온도 도달 오버슈트가 크게 나타났다. 12시 이후에는 실내공기 온도차이는 큰 차이를 나타내지 않았다. 바닥표면온도의 경우 설정온도가 증가함에 따라 오히려 바닥표면온도의 최고최저 온도차가 줄어드는 것을 알 수 있는데 이는 높은 열량공급으로 인하여 바닥구조체가 충분히 축열됨에 따라 공급온수온도와 온도차가 줄어들어 나타나는 특성으로 보인다.

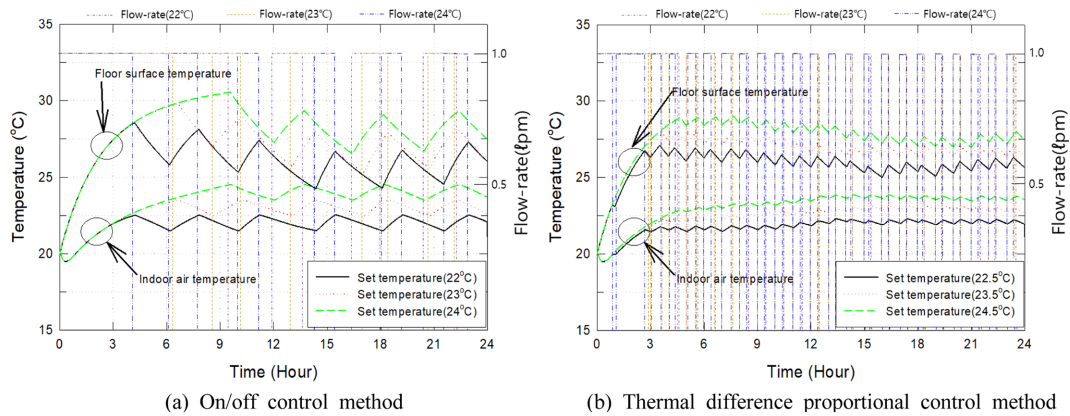


Fig. 3. Comparison of temperature and flow-rate responses for Indoor set temperature changes

Table 2. Results of simulations for indoor set temperature changes

Classification		Set temperature = 22°C	Set temperature = 23°C	Set temperature = 24°C
Indoor air temperature	Average	22.01°C	22.99°C	24.04°C
	Maximum	22.53°C	23.52°C	24.52°C
	Minimum	21.49°C	22.49°C	23.48°C
On/off control Floor surface	Average	25.62°C	26.74°C	28.06°C
	Maximum	27.31°C	28.21°C	29.35°C
	Minimum	24.24°C	25.32°C	26.52°C
Hot water supply time		215 min.	259 min.	324 min.
Energy consumption		2952 MJ	3287 MJ	3529 MJ
Thermal difference proportional control Indoor air temperature	Average	22.09°C	22.94°C	23.67°C
	Maximum	22.28°C	23.16°C	23.85°C
	Minimum	21.84°C	22.60°C	23.44°C
Floor surface	Average	25.72°C	26.74°C	27.59°C
	Maximum	26.38°C	27.23°C	28.53°C
	Minimum	24.99°C	26.38°C	26.95°C
Hot water supply time		221 min.	251 min.	281 min.
Energy consumption		3051 MJ	3167 MJ	3254 MJ

Fig. 3(b)의 온도차 비례제어의 경우 설정온도를 변화시켰을 경우에도 불구하고 안정된 제어 성능을 나타내었으며, 앞서 on/off 제어방식과 비교하였을 때 상대적으로 온도차도 작게 나타나 쾌적한 실내환경을 유지할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 에너지 소모량에 있어서 on/off 제어방식과 온도차 비례제어를 비교분석하였을 때 설정온도가 22°C일 경우 on/off 제어방식이 온도차 비례제어보다 3.2%정도 에너지를 적게 소모하였으며, 실내평균온도는 약 0.1°C정도 높게 유지하는 특성을 나타내었다. 그러나 실내설정온도 23°C에서는 온도차 비례제어 방식이 3.6% 정도 에너지를 적게 소모하였으며, 24°C 조건에서는 7.8% 정도의 에너지를 적게 소모하였다.

이로써 미루어볼 때 온도차 비례제어 방식이 on/off 제어보다 실내의 열적 쾌적성 면이나 실내온도의 과난방을 줄여줄 수 있다는 점에서 효과적이긴 하나 피드포워드 제어의 특성으로 인하여 온도차 비례제어의 설정값이 보정이 필요할 수 있다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

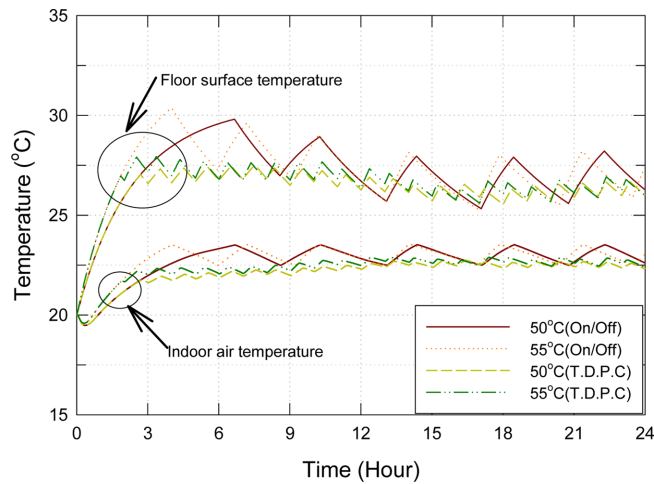


Fig. 4. Comparison of temperature responses for hot water set temperature

Fig. 4는 실내에 공급되는 온수온도를 50°C와 55°C로 설정하였을 때 on/off 제어방식과 온도차제어방식의 실내공기온도와 바닥표면온도의 변화특성을 나타낸 그림이다. 여기서, 그림에 나타난 T.D.P.C.는 온도차 비례제어방식을 의미한다.

on/off 제어방식과 온도차 비례제어방식의 실내공기 설정온도는 동일하게 23°C로 설정하였으며, 공급온수온도를 다르게 설정하였을 경우 설정온도까지의 상승시간에서는 차이를 보였으며, on/off 제어방식의 경우보다 온도차 비례제어방식이 온도변화 특성에 있어서 공급온수온도의 변화에도 불구하고 온도차가 작은 안정된 특성을 보였다.

Table 3에서 살펴볼 때 공급온수온도가 50°C에서 55°C로 증가하였을 때 실내공기 평균온도가 on/off 제어방식보다 온도차 비례제어방식이 두 경우 동일하게 0.57°C 가량 낮게 나타났으나, 에너지 소모량은 오히려 6.5%에서 9.8% 증가하는 특성을 나타내었다. 이로써 미루어볼 때 온도차 비례제어방식의 경우 on/off 제어방식보다 공급온수온도가 증가할수록 에너지 절감에 있어서 더욱 효율적임을 알 수 있었다. 그러나, 실내공기 평균온도 값이 상대적으로 낮게 나타나 공급온수온도 변화에 따라서 온도차 비례제어 기준설정 값을 보정해 주어야 하는 필요성을 나타내었다.

Fig. 5와 Table 4는 공급온수온도가 55°C일 경우 외기온도의 변화에 따른 on/off 제어와 온도차 비례제어의 시뮬레이션 결과 값을 나타낸 것이다. 외기온도의 변화는 1일 24시간동안 sin형태의 변화곡선으로 최저

Table 3. Results of simulations for hot water set temperature

Control method		On/Off control		Thermal difference proportional control	
Supply water temperature		50°C		55°C	
Indoor air temperature		Average 22.70°C		Average 22.13°C	
		Maximum 23.52°C	23.53°C	22.74°C	22.88°C
		Minimum 20°C	20°C	20°C	20°C
		$\Delta T=3.52^\circ\text{C}$		$\Delta T=2.74^\circ\text{C}$	
		$\Delta T=3.53^\circ\text{C}$		$\Delta T=2.88^\circ\text{C}$	
Floor surface		Average 27.08°C		Average 26.28°C	
		Maximum 29.81°C	30.38°C	27.52°C	27.93°C
		Minimum 20°C	20°C	20°C	20°C
		$\Delta T=9.81^\circ\text{C}$		$\Delta T=7.52^\circ\text{C}$	
		$\Delta T=10.38^\circ\text{C}$		$\Delta T=7.93^\circ\text{C}$	
Hot water supply time		749 min.		692 min.	
Energy consumption		9223 MJ		8993 MJ	
		9556 MJ		8700 MJ	

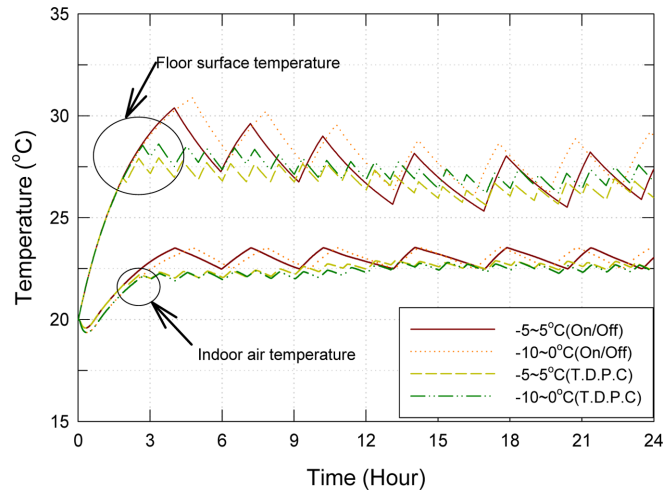


Fig. 5. Comparison of temperature responses for outdoor temperature.

Table 4. Results of simulations for outdoor temperature

Control method		On/Off control		Thermal difference proportional control	
Outdoor temperature		-5~-5°C		-10~0°C	
Indoor air temperature		-5~-5°C		-10~0°C	
	Average	22.78°C	22.75°C	22.35°C	22.20°C
	Maximum	23.53°C	23.53°C	22.88°C	22.81°C
	Minimum	20°C	20°C	20°C	20°C
		$\Delta T=3.53^\circ\text{C}$	$\Delta T=3.53^\circ\text{C}$	$\Delta T=2.88^\circ\text{C}$	$\Delta T=2.81^\circ\text{C}$
Floor surface		-5~-5°C		-10~0°C	
	Average	27.19°C	27.86°C	26.54°C	27.06°C
	Maximum	30.38°C	30.87°C	27.93°C	28.61°C
	Minimum	20°C	20°C	20°C	20°C
		$\Delta T=10.38^\circ\text{C}$	$\Delta T=10.87^\circ\text{C}$	$\Delta T=7.93^\circ\text{C}$	$\Delta T=8.61^\circ\text{C}$
Hot water supply time		573 min.	704 min.	493 min.	592 min.
Energy consumption		9556MJ	11225MJ	8700MJ	10097MJ

온도와 최고온도가 -5°C, 5°C일 경우와 -10°C, 0°C일 두 가지 경우에 대해서 비교분석 하였다.

Fig. 5는 외기온도 변화에 따른 on/off 제어방식과 온도차 비례제어방식과의 실내공기온도 및 바닥표면 온도 변화를 나타낸 그림이며, 그림에서 살펴보면 외기온도의 변화에 따라서 바닥표면온도는 등특성에 있어서 큰 영향을 받지 않으나, 실내공기온도에는 많은 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다.

on/off 제어방식의 경우 차동값에 따라 설정온도의 상한값과 하한값의 차가 커져 실내온도 또한 상대적으로 그 값이 크게 나타나나 외기온도 변화에 민감한 특성을 나타내었으며, 온도차 비례제어방식의 경우는 반대로 밸브의 개폐 시에 상한값과 하한값의 차는 적게 나타나나 외기온도 외란에 둔감한 특성을 나타냈다. 그러나 온도차 등 변화폭을 살펴봤을 때 온도차 비례제어가 on/off 제어보다 실내공기온도 및 바닥 표면온도의 온도차가 적게 나타나 실내쾌적성 유지에는 효과적임을 알 수 있었다.

Table 4에서 살펴볼 때 on/off 제어방식의 실내공기 평균온도는 외기온도가 5°C가 낮아짐에도 불구하고 거의 동일한 값을 유지하나 온도차 제어방식은 약 0.15°C가량 차이가 나타났으며, 이로써 미루어볼 때 온도차 비례제어의 경우 외기온도 변화 등에 둔감하여 별도의 보정치를 따로 계산해 주어야 함을 알 수 있었다.

Fig. 6과 Table 5는 실내공기온도를 측정하여 제어를 수행하는 기온감지 형태의 제어방식이 현장에서 일반적으로 온도를 측정하는 센서가 벽체에 부착된 자동온도조절기에 설치되어 있는 것을 감안해 실내공기

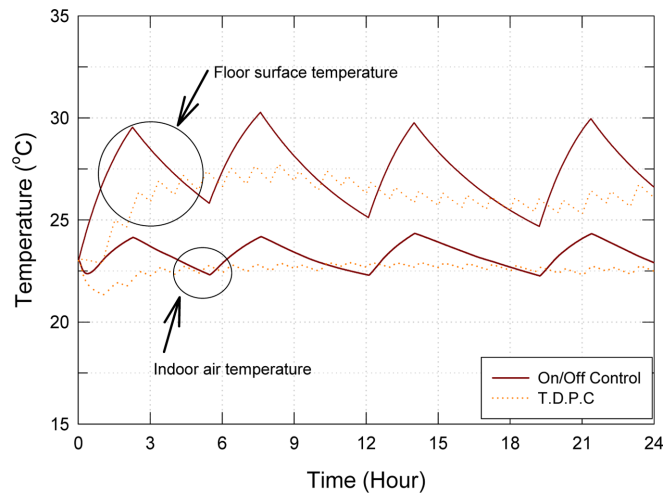


Fig. 6. Comparison of temperature responses for disturbance of indoor temperature

온도가 벽체 온도의 영향을 받아 온도센서가 실내공기온도를 정확히 측정하지 못하게 되는 경우를 가정하여 on/off 제어와 온도차 비례제어방식의 온도변화 특성 및 에너지 소모량을 분석한 결과이다. 이 때 온도센서의 측정온도 값은 실내공기온도와 벽체표면온도의 평균값으로 가상하여 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저, Fig. 6은 이에 대한 제어방식별 실내공기온도 및 바닥표면온도의 변화를 나타낸 그림으로써 그림에서 살펴보면 설정온도를 23°C로 설정함에 따라 on/off 제어방식은 앞서 실내온도센서가 벽체 온도의 영향을 받지 않았던 상황으로 해석되었던 경우보다 바닥표면온도의 최대최소온도차가 더욱 크게 나타났다. 그러나 온도차 비례제어방식은 온도차에 따라서 공급시간을 조절해 주는 방식으로 인하여 on/off 제어방식과는 다르게 실내공기 및 바닥표면 최고 최저온도차가 큰 폭으로 나타나지 않고 실내공기온도와 벽체표면온도의 평균값으로 제어함에도 불구하고 과다난방을 줄여줄 수 있음을 알 수 있었다.

Table 5에서 살펴볼 때 on/off 제어방식은 설정온도가 23°C임에 따라 22.5~23.5°C사이를 유지하여야 함에도 불구하고 실내공기 최고온도가 24.33°C로 나타나 과난방상태가 되었으나, 온도차 비례제어는 정상상태 이후에 22.7°C정도의 실내공기온도 분포를 나타내어 과난방상태를 초래하지 않았으며, 바닥표면온도에서도 최고 최저 온도차가 on/off 제어방식보다 온도차 비례제어방식이 약 3.6°C가량 적게 나타나는 특성을 보여 실내 열적 불쾌감을 크게 줄여줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이 때 에너지 소모량은 온도차 비례제어방식이 on/off 제어방식보다 약 8.6% 정도의 에너지를 적게 소모하는 것으로 나타났다.

Table 5. Results of simulations for disturbance of indoor temperature

Control conditions	Classification	on/off control	Thermal difference proportional control
Initial indoor temperature : 23°C	Indoor air temperature	Average	22.56°C
		Maximum	24.33°C
		Minimum	22.26°C
Analysis condition : 0 o'clock ~ 24 o'clock	Floor surface	Average	27.44°C
		Maximum	30.27°C
		Minimum	24.18°C
	Hot water supply time	506 min.	
	Energy consumption	6400MJ	

5. 결 론

본 연구에서는 바닥복사난방시스템의 자동온도조절밸브에 대하여 실내공기 온도차에 따라 온수의 유량 공급을 제어하는 온도차 비례제어방식을 제안하였으며, 기존에 대부분 적용되어 있는 on/off 제어방식과 함께 다양한 제어변수 및 환경변수 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하여 실내공기온도 및 바닥표면온도 변화에 대한 열적 동특성과 에너지 소모량을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바닥복사 난방시스템의 실내 열환경 개선을 위하여 기존의 on/off 제어와 온도차 비례제어 방식에 대하여 실내설정온도, 공급온수온도 및 외기온도의 변화에 대하여 시뮬레이션을 수행해 실내공기온도, 바닥 표면온도, 유량공급시간 및 에너지 소모량을 분석한 결과 온도차 비례제어 방식이 on/off 제어방식에 비해 과난방 방지 등 실내 열적 쾌적성 유지 및 에너지절감에 있어서 더 효과적임을 알 수 있었다.

(2) 현장 적용성을 고려하여 자동온도조절기의 실내온도센서가 벽체온도 등의 영향을 받아 온도를 정확히 측정하지 못할 경우를 시뮬레이션한 결과 on/off 제어방식의 경우 과난방 현상이 뚜렷하게 나타났으며, 온도차 비례제어의 경우 이를 줄여주어 약 8.6% 정도의 에너지절감 성능을 나타내었다.

(3) 바닥복사 난방시스템에서 제어변수 및 환경변수 변화에 따라 온도차 비례제어는 피드포워드 제어방식이 적용됨에 따라 실내공기온도 및 바닥표면의 온도차는 on/off 제어보다 적게 나타나나, 외란에 둔감한 특성을 나타내어 실내공기 평균온도는 상대적으로 설정온도보다 낮은 특성을 나타남에 따라 온도차 비례제어의 운전시간 보정 등이 필요함을 알 수 있었다.

References

1. Byung-Cheon Ahn, Jae-Yeob Song, 2010, Response Characteristics of Control Methods for Automatic Thermostatic Valves in Floor Radiant Heating System, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 2, pp. 231-238.
2. Wu-feng Jin, Jin-Young Lee, Myoung-Souk Yeo, Ho-Tae Seok, Kwang-Woo Kim, 2001, An Experimental Study on the Control Methods of Radiant Floor Heating Systems, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 1297-1306.
3. Wu-feng Jin, Mi-Kyoeng Lee, Myoung-Souk Yeo, Kwang-Woo Kim, 2004, A Study on the Individual Room Control of Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 421-429.
4. 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.
5. Jeong-Ah Seo, Younggy Shin, Yong-Ki Kim, Tae-Won Lee, 2016, A Study on Improved Heating Performance of an Apartment Housing Unit, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 69-74.
6. Jae-Yeob Song, Byung-Cheon Ahn, 2016, Simulation Study for Control Strategies of Indoor Air Temperature in Floor Radiant Heating System, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 12, No. 4, pp. 21-26.
7. Byung-Cheon Ahn, Jae-Yeob Song, 2008, A Study on Heat Flow Dynamic Analysis for Floor Radiant Heating System, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 24, No. 8, pp. 293-300.
8. B. C. Ahn, J. Y. Song, 2010, Control characteristics and heating performance analysis of automatic thermostatic valves for radiant slab heating system in residential apartments, Energy 35, pp. 1615-1624.