

## 바닥복사 난방시스템의 공급온수특성에 따른 에너지 소비특성 연구

송재엽\* · 안병천\*\*†

\*(주)나라컨트롤, \*\*가천대학교 기계공학과

### The Effects of Hot Water Supply on Energy Consumption for Floor Radiant Heating System

Jae-Yeob Song\* and Byung-Cheon Ahn\*\*†

\*Department of Building Services, Nara Controls Inc., Seoul 135-100, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Gachon university, 461-701, Korea

#### Abstract

In this study, the effect of hot water supply flow rates on energy consumption for radiant floor heating system in apartment were researched by computer simulation. The parametric study of different hot water supply flow rates was done with regard to energy performance and control characteristics, respectively. Also the effect of different hot water supply flow rates on the hot water supply temperatures is studied. As a result, energy consumption were reduced but the response time is increased by reducing the supply flow rate. And energy consumption can be saved by adjusting the hot water supply temperatures with different supply flow rates.

**Key words:** Radiant floor heating system(바닥복사난방시스템), Hot water supply temperature(온수 공급온도), hot water supply flow rates(온수공급유량), Energy consumption(에너지 소비량)

#### 1. 서 론

현재 국내의 아파트 등 공동주택에서 실내의 온열 환경을 위해서 가장 많이 사용되고 있는 시스템은 바닥복사 난방 시스템이다. 바닥복사 난방 시스템은 보편적으로 바닥에 설치되어진 배관에 보일러나 지역난방 등을 통해 온수를 공급하여 난방을 수행하는 시스템으로 국내의 실내 쾌적감에 따른 수요에 적합하며, 초기투자비용 및 유지비용이 적어 저렴한 계 구성할 수 있는 장점이 있다. 또한, 배관 주변으

로의 열전달 면적이 넓어 바닥과 공기온도차가 적어, 저온의 온수로 쾌적감을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 다른 시스템들과의 연계시스템 구성이 가능하다는 장점이 있다.

일반적으로 바닥복사 난방시스템은 실내공기온도 유지를 위하여 바닥배관으로 공급되는 유량을 조절할 수 있는 자동온도조절밸브를 통해 제어가 수행되며, 제어방법 중 전개 및 전폐를 이용한 On-Off 방식이 가장 많이 사용된다. On-Off 방식은 제어방법이 단순하고 밸브의 내구성 유지에 좋고, 이 밖에도 실내온도 제어 방식의 경우 실내온도를 유지하는데 효과적이나 온도제어차 설정으로 인해 바닥온도에 대한 열적 쾌적성에 문제가 발생할 우려가 있다[1].

관련된 연구로서 Cho와 Zaheer-uddin[2]은 바닥난방 시스템의 간헐운전에 대해서 에너지효율을 높이

†Corresponding author

Tel: +82-31-750-5309, Fax: +82-31-750-5532

E-mail: bcahn@gachon.ac.kr

접수일: 2019년 10월 28일

심사일: 1차:2019년 11월 12일

채택일: 2019년 11월 27일

기 위하여 외기온도를 예상하여 제어 하는 방법을 제안하고 이를 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 분석하여 10~12%의 에너지 절감성능을 확인하였으며, TPSC (Two Parameter Switching Control) 및 On-Off 제어 등의 여러 가지 밸브제어를 통하여 실험적 연구를 수행하고 온도변화 및 유량변화를 살펴보았다.

Ahn and Song[3]은 On-Off 제어방법에 대하여 실내공기의 설정온도와 대상온도와의 온도차에 따라 온수공급시간을 조절하여 실내열환경의 쾌적감의 조성이 가능한 새로운 제어방법을 제안하고 그에 따른 제어특성을 분석하고 연구하였다.

위의 연구들은 주로 제어방식에 따른 에너지 및 실내 열환경 특성을 살펴본 연구이다.

또한 S. Sattari와 B. Farhnieh[4]는 바닥난방시스템을 구성하는 배관에 대한 크기와 물성치 등을 변화시켜 시스템의 열성능에 미치는 영향을 살펴보았는데 유한요소법을 통해 실내 전도 및 대류, 복사열 전달을 해석하였다. 그러나 이러한 유한 요소법을 적용할 경우 많은 전산시간을 소요하게 된다.

Ahn[5]은 바닥복사 난방시스템에 대해 공급 온수 온도가 실내열환경에 미치는 영향을 고찰하였는데 외기온도변화에 따라 공급온수온도를 적절히 조절해줌으로써 에너지 소비량을 줄일 수 있으며, 또한 열적환경을 개선할 수 있음을 보여주었다. 여기서는 해석방법으로 빠른 수치해석이 가능한 등가 열저항-열용량(equivalent resistance-capacitance) 회로를 이용한 해석 방법을 사용하였다.

일반적으로 바닥복사 난방시스템이 적용된 주거용 건물에서는 세대에 공급되는 유량은 룸(room)별 온도제어가 이루어질 경우 룸의 온도가 설정온도에 도달되어 밸브가 차단될 경우 다른 룸들로 공급되는 유량이 증가하게 되는 등 유량변화가 지속적으로 나타나게 되어 바람직하지 못한 열적환경을 나타나게 될 수가 있다. 그리고 동일한 공급온수 온도 조건에서 유량의 증가는 에너지 소비량의 증가로 나타나게 된다. 따라서 멀티존(multi-zone) 형태의 주거용 건물에서의 바닥복사 난방시스템은 유량의 증가에 대처해서 공급온수의 온도를 조절해줌을 고려해 볼 필요가 있으며, 실내 열환경 개선 및 에너지 소비량의 절감 등을 위해서 이에 대한 연구의 필요성은 크다고 판단된다. 그러나 기존 연구에서 볼 수 있듯이 공급온수의 특성으로 공급온수의 유량변화에 따른 에너지 및 열환경 특성에 대한 연구는 매

우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 등가 열저항-열용량회로를 이용한 해석방법을 적용하여 바닥복사 난방시스템에서 가장 많이 사용되는 제어방식인 자동온도조절기의 On-Off제어를 적용한 상태에서 공급온수의 유량 크기가 열환경에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 유량의 크기와 공급온수 온도의 크기와의 상관관계를 통해서 실내공기의 열적 동특성 개선 및 에너지 절감을 달성할 수 있는 방안에 대해 연구를 수행하였다.

## 2. 시스템 모델링

먼저 단위세대내의 방바닥 속에 묻힌 배관(Fig. 1)에서 온수의 유동에 따른 전달열손실은 방바닥 표면으로 방출되는 열량과 아래층 천정으로 방출되는 열량의 합이 된다. 세대내 방바닥 온도  $T_1$ 과 아래층의 천정표면온도  $T_2$ 가 일정하다고 가정하면 배관출구의 온수온도는 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

따라서  $T_1$ 과  $T_2$ 가 일정하다고 가정하고, 관의 길이  $L$ 에 대한 배관출구의 온수온도는 다음과 같은 배관 입구의 온수온도 함수로 나타낼 수 있다.

$$T_0 = \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2} + \left( T_i - \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2} \right) \times \exp\left(-\frac{U_1 + U_2 \cdot A_p \cdot L}{\rho \cdot A \cdot C_p \cdot v}\right) \quad (1)$$

여기서,

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{R_1 \ln(R_2/R_1)}{K_c} + \frac{R_1 \cosh^{-1}(B/R_2)}{K_b}}$$

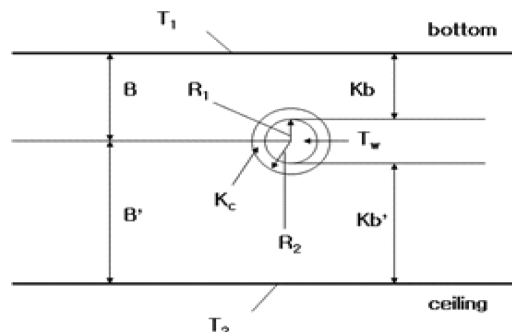


Fig. 1. Pipe buried in semi-infinite medium having isothermal surface.

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{R_1 \ln(R_2/R_1)}{K_c} + \frac{R_1 \cosh^{-1}(B'/R_2)}{K_b'}}$$

여기서  $T_o$ ,  $T_i$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ 는 각각 온수의 세대출구온도, 출구온도, 방바닥온도 및 밀층의 천정온도이다.  $U_1$ 과  $U_2$ 는 파이프표면에서 방바닥까지의 열전달계수와 파이프표면에서 아래층천정까지의 열전달계수이다. 그리고  $h_i$ ,  $K_c$ ,  $K_b$ ,  $K_b'$ ,  $B$  및  $B'$ 는 각각 관내부의 온수의 열전달계수, 동관의 열전도율, 관 표면에서 방바닥까지의 등가 열전도율, 관에서 밀층 천정표면까지의 등가 열전도율, 관의 중심위치에서 방바닥까지의 거리 및 밀층 천정표면까지의 거리이다. 또한  $A$ 와  $A_p$ 는 관의 단면적과 관의 둘레( $2\pi \cdot R_1$ )를 각각 나타낸다. 또한  $\rho$ ,  $c_p$ 와  $v$ 는 온수의 밀도, 비열, 그리고 유속을 각각 나타낸다.

또한, 식(1)에서  $T_o$ 를  $T_x$ 로 하고  $L$ 을  $x$ 로 하여 길이 전체의 값으로 적분할 경우 온수의 평균온도( $T_w$ )를 구할 수 있다.

$$T_w = \frac{1}{L} \int_0^L T_x dx \tag{2}$$

$$= \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2} + \left( T_i - \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2} \right) \left( \frac{1 - e^{-DL}}{DL} \right)$$

여기서,  $D = \frac{(U_1 + U_2) \cdot A_p}{\rho \cdot A \cdot C_p \cdot v}$

Fig. 2는 바닥난방시스템에 있어서 실내에서의 열전달 해석을 위한 열적흐름을 나타낸 그림이다. 실내에서의 열전달 현상은 방바닥표면 및 천정표면 그리고 각 벽면 자체에서의 전도열전달, 실내공기와

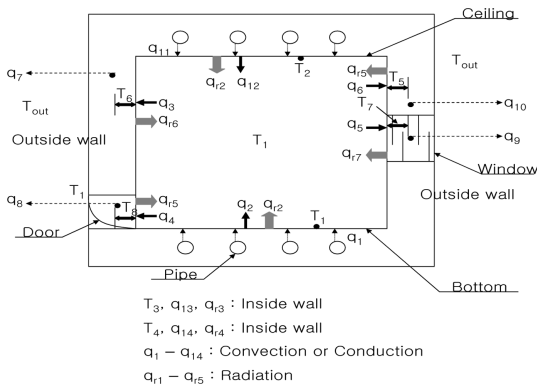


Fig. 2. A Schematic diagram for heat transfer analysis in room.

의 대류열전달, 배관을 통해 공급되는 온수에 의해 가열되는 방바닥과 천정 및 각 벽면사이의 복사열전달 등으로 전체 열전달이 구성된다[5].

Fig. 3은 앞서 Fig. 2에서 언급한 각 열전달 부분들의 온도와 열량과의 관계를 간편한 해석이 가능한 등가 열저항-열용량(R-C)회로로 표현한 그림으로서 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 실내공기온도와 천정온도에 해당하는 회로 구성내용을 예시로 표현한 것이다. 등가 열저항-열용량 해석방법을 적용함에 있어 각 벽체의 열용량을 한점으로 집중되어 있다는 가정 하에 연구를 수행하였다. 이 때 집중되는 점의 위치는 점 중앙에서 양쪽 벽체표면까지의 등가 열저항값이 같도록 선정하였으며, 외부 공기로의 열량 손실은 열용량 집중점과 내벽면 사이의와 양쪽 등가 열저항값이 같아질 수 있게 새로운 집중점을 선정되도록 하였다.

따라서 각 집중점에서의 에너지 평형 방정식은 다음 식 (3)과 같이 나타내어질 수 있다.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum q_i - \sum q_o - q_{rk} \tag{3}$$

여기서,  $C_i$ 와  $T_i$ 는 각 부분의 열용량과 온도를 나타내며, 또한  $q_i$ 와  $q_o$ 는 대류 혹은 전도에 의한 유입 및 유출 열전달량을,  $q_{rk}$ 는 복사 열전달량을 나타낸다.

이밖에 각각의 벽체 표면들 간에 복사열전달량  $q_{rk}$ ( $k=1-8$ )은 밀폐된 공간에서의 해석 방법(enclosure analysis method)을 사용하여 계산하였으며 그에 따른 복사열전달량 계산방법은 식 (4)와 같다.

$$q_{rk} = A_k \epsilon_k \sigma_k T_k - \sum_{i=1} A_k \epsilon_k \sigma_k T_k G_{jk} \tag{4}$$

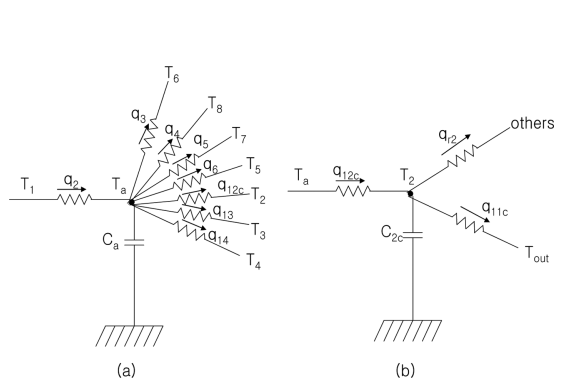


Fig. 3. A equivalent R-C circuit for unsteady energy analysis.

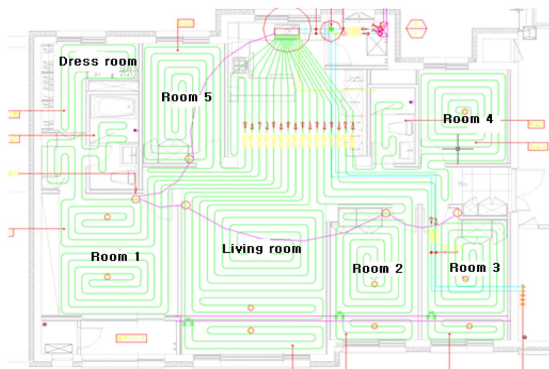


Fig. 4. Floor pipe networks in household.

여기서  $G_{jk} = F_{j-k}\epsilon_k + F_{j-k}\rho_1 G_{1k} + F_{j-k}\rho_n G_{nk}$ 으로 표현이 되며,  $\epsilon, \rho, F, A, T$ 는 반사율, 볼츠만상수, 밀도, 형상계수, 면적 그리고 온도값이다. 또한  $q_{rk}$ 는 k 번째의 면에 대한 복사열전달량을 나타낸다.

또한 바닥구조체의 구성요소와 배관길이에 따른 특성, 배관에 공급되는 온수온도의 상관관계를 고려하여 환수온도를 구해낸 후 실내에 공급되는 공급열량을 공급환수온도차를 이용하여 구하였다[5].

Fig. 4는 연구를 위해 선정된 대상세대의 난방바닥배관구성을 나타낸 그림으로 대상세대의 총 면적은 161.7m<sup>2</sup>이며, 총 7개의 실 구성에 7구 분배기로 온수가 공급되어진다.

먼저 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 거실 및 다른 실, 외기와 접하고 복사난방의 영향 특성을 뚜렷하게 살펴볼 수 있는 침실 2를 실내모델 중 기준실로 선정하여 실 특성데이터를 산출하고 시뮬레이션 모델링 후 수치해석을 수행하였다. 여기서 인접한 다른 방은 난방이 이루어진다고 가정하였다. 침실 2는 총 14.8m<sup>2</sup>의 바닥면적, 난방배관 길이 70.3m, 남향실이며, 이밖에 침실2의 각 특성데이터는 Table 1과 같다.

Table 1. Simulation model data for Room 2

	Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> K)	Area (m <sup>2</sup> )	Thermal capacitance (kJ/°C)
North wall	0.572	6.693	411.54
East wall	0.572	10.396	478.40
West wall	1.587	10.396	639.20
South wall	Wall: 0.27 Window: 0.64	Wall: 4.68 Window: 4.43	Wall: 681.15 Window: 120.67

Table 2. Properties of building materials

	Conductivity [W/m°C]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Specific heat [J/kg°C]
Cement mortar	1.4	2200	1130
Cement brick	1.4	1800	840
Concrete	1.633	2300	879
Styrofoam	0.041	24	1382
Gravel	0.373	1850	837
Steel	47.8	7850	586
Glass	1.167	2700	840
Slate	1.283	2000	960
Tail	1.283	2700	754
Air space	0.026	1.18	1005
Gypsum board	0.443	1440	840

### 3. 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 바닥복사 난방시스템에서의 공급 온수의 유량 크기가 열환경에 미치는 영향 및 유량의 크기와 공급온수 온도의 크기와의 상관관계를 통해서 실내의 열적 동특성 개선과 동시에 에너지 절감이 가능한 방안을 도출하고자 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

일반적으로 바닥복사 난방시스템은 바닥구조체의 축열효과로 인하여 실내공기온도가 설정온도에 도달하여 유량공급이 중단되더라도 축열된 바닥구조체에서 열평형이 이루어지는 순간까지 열량이 공급되어 실내공기온도가 상승하는 경우가 발생한다. 이는 바닥복사 난방시스템에서 실내공기 설정온도가 제어범위 안에서 제어되지 못하고 있는 특성을 보이는 것으로 이것은 실내 열적 쾌적성을 떨어뜨림과 동시에 과난방에 의한 에너지 손실의 결과로 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 공급온수의 유량과 온도의 크기를 조절했을 때의 실내 열환경의 변화 및 에너지 소비 특성을 고찰하였다.

본 연구를 위해 앞서 언급한 수식 등을 바탕으로 Compaq Visual Fortran 6을 활용하여 프로그래밍한 자체 해석 프로그램을 작성하여 사용하였으며, 시뮬레이션 프로그램에 대한 실험적인 검증은 선행연구 [5]를 통하여 외기온도, 공급온수온도 및 공급유량의 변화에 대하여 환수온도, 실내공기온도, 바닥표면온도 및 벽면온도의 해석결과를 실험값과 비교하여 이루어졌으며, 시뮬레이션과 실험값과의 오차범

**Table 3.** Operation conditions of simulation

Classification	Operation conditions
Supply water flow rate(Lpm)	1-6
Supply water temperatures(°C)	45, 50, 55, 65
Indoor air set temperature(°C)	22±0.5

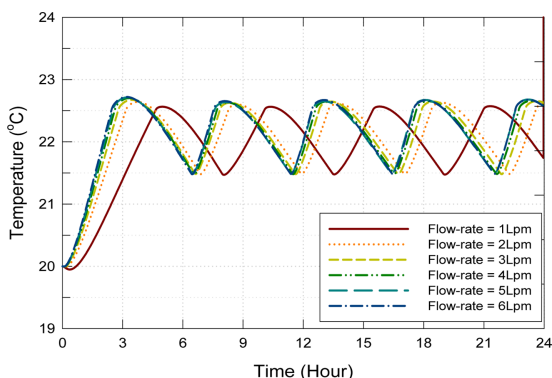
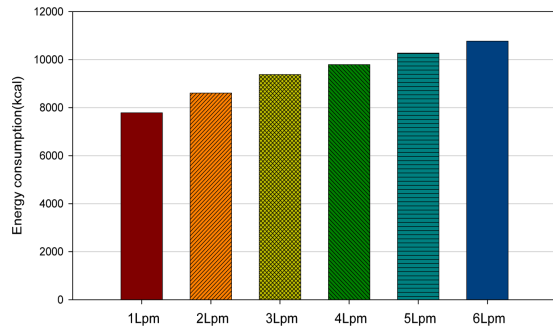
위는 최대 9.5% 이내의 양호한 검증결과를 나타내었다[5].

Table 3은 시뮬레이션 해석을 위해 적용된 변수값들을 나타낸 것으로서, 운전시간은 1일간 24시간으로 하였다. 그리고 외기온도는 일정한 온도(0°C)가 유지되는 것으로 하였으며, 공급온수온도는 45-65°C의 크기를 고려하여 주었다. 또한 실내공기 설정온도는 22°C로 하였으며 On-Off 제어를 위한 차동값은 ±0.5°C로 하였다. 그리고 공급유량은 보일러 순환펌프의 유량이 10.4~16.7 LPM인 점(분배기 7구)을 감안하여 기준조건을 2 LPM으로 선정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 외기온도 0°C, 공급온수온도 55°C일 경우 공급유량 변화에 따른 온도변화 동특성을 나타낸 그림이며, Fig. 6은 그에 따른 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 이때의 실내공기온도의 초기조건은 20°C, 실내공기온도 제어설정값은 22°C, 차동값은 ±0.5°C로 하였다.

이 시뮬레이션 해석 결과는 전체 실에 난방이 이루어졌을 때를 고려하여 수행한 수치해석 결과이다. 공동주택의 바닥복사 난방시스템의 온수 공급방식은 세대 보일러에 의한 개별난방 혹은 폐열 등을 이

**Fig. 5.** Comparison of room air temperatures with different supply water flow rates.**Fig. 6.** Comparison of energy consumptions with different supply water flow rates.

용하여 공급하는 지역난방방식이 대부분 적용되고 있다. 지역난방방식과 개별난방방식의 경우 공급되는 유량이 다르게 설계되고 있으며, 이 중에서 개별난방방식의 경우 자동온도조절밸브의 개폐수에 따라 총 공급유량이 지속적으로 변동되며, 이로 인해 각 방들로 유량공급이 중단될 경우 밸브가 열려 있는 실로 유량이 공급되게 된다.

특히, 방의 실내공기온도가 설정온도에 도달될 경우 밸브가 차단되어 방에 온수의 공급이 이루어지지 않으며, 이로 인해 다른 방들로 공급되는 유량값이 변화하게 되는데, 이러한 공급유량 변동특성을 고려하여 세대 특성에 맞게 유량 혹은 온도제어를 수행할 경우 효과적인 열량공급을 수행할 수 있다.

Fig. 5에서 살펴보면 공급유량이 증가할수록 실내공기온도의 설정값까지의 도달시간은 짧아지지만 실내공기온도의 오버슈트는 커지게 된다.

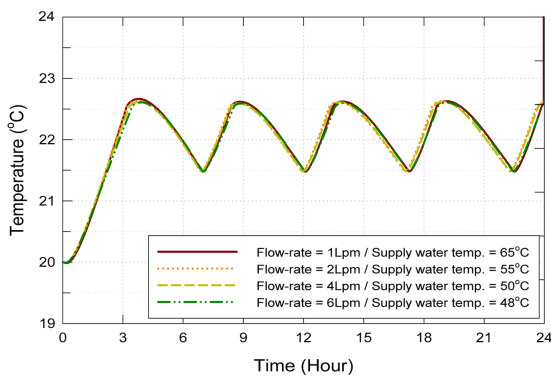
Fig. 6은 공급유량의 변화에 따른 에너지소모량을 나타낸 것이다. 그림에 살펴보면 2 Lpm을 공급하였을 때를 기준으로 하여 4 Lpm으로 2배의 유량이 공급될 경우 약 12%, 6 Lpm으로 세배가 되었을 경우 약 19%의 에너지 사용량의 차이가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6을 종합하여 살펴볼 때 온수의 유량공급이 증가할수록 에너지 사용량은 증가하나 설정값까지의 도달시간이 짧아지게 되고, 감소할 경우 이와 반대의 특성을 나타낸다. 그러나 도달시간의 경우 큰 차이가 나타나지 않아 공급유량을 줄이게 되면 에너지절감효과를 얻어낼 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4는 온수 공급유량 변화에 따른 실내공기의 평균온도 및 에너지 소모량을 비교한 것이다.

**Table 4.** Comparison of room air temperatures and energy consumption with different supply water flow rates

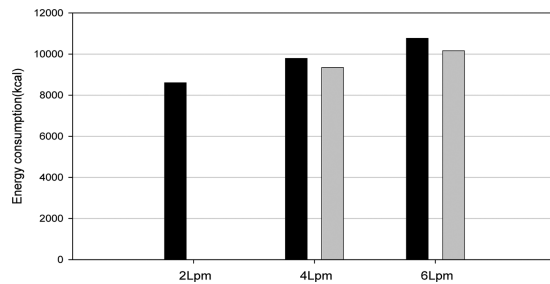
		Room air mean temperature(°C)	Energy consumption(kcal)
Flow rate	1Lpm	21.89	7786
	2Lpm	22.0	8606
	3Lpm	22.05	9378
	4Lpm	22.07	9764
	5Lpm	22.09	10272
	6Lpm	22.1	10772



**Fig. 7.** Comparison of room air temperatures with different supply water temperatures and flow rates.

Fig. 7은 공급유량의 변화에 따라 공급온수온도에 변화를 주었을 경우에 대한 실내공기온도의 온도변화 동특성을 나타낸 그림으로써, 그림에서 살펴보면 공급되는 온수온도가 같을 때 유량의 변화에 따라 실내온도특성도 차이가 났으나 공급유량 변화에 맞추어 온도를 변화시켰을 때 동특성은 거의 유사한 특성을 나타내었다.

Fig. 8은 공급온수온도 55°C, 공급유량 2 Lpm을 기준으로 하여 공급유량의 변화에 따라 공급온수온도에 변화를 주었을 경우(Fig. 7)에 대한 에너지 소



**Fig. 8.** Comparison of energy consumptions with different supply water temperatures and flow rates before and after calibrating temperatures.

비를 비교한 결과이다. 여기서 공급유량변화에 따른 적절한 온수온도 설정치는 시행착오를 통한 시뮬레이션 해석을 통해 구해내었으며 각각 유량변화에 따라 공급유량이 2 Lpm일 경우 온수온도 55°C를 기준으로 하였을 때 4 Lpm 공급 시 온수온도 50°C, 6 Lpm 공급 시 온수온도 48°C가 가장 유사한 특성을 나타내었다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 유량 변화에 따라 온수온도를 변화시켜 주었을 때 Fig. 6과 비교해 에너지 사용량이 줄어들었으며 이를 통해 최적의 공급유량 및 공급온수온도의 조합이 존재한다는 것을 알 수 있다.

Table 5는 공급유량변화에 따른 공급온수온도 보정전후(Fig. 8 참조)의 실내공기평균온도 및 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 4 Lpm과 6 Lpm에서의 평균온도가 기준조건 22°C에 정확히 일치하지 않아 정확한 값의 비교는 어려우나 공급온수온도를 보정한 후에는 에너지 소비량이 감소하고 있음을 알 수 있었다. 기준조건인 2 Lpm에서는 동일하지만, 4 Lpm에서는 약 4.3%, 6 Lpm에서는 약 6.2%의 에너지절감을 나타내었다. 만약 실내평균온도가 동일한 조건에서 해석이 이루어졌다면 에너지절감의 수치

**Table 5.** Comparison of room air temperatures and energy consumptions with different supply water temperatures and flow rates before and after calibrating temperatures

		Before calibration		After calibration	
		Room air mean temperature (°C)	Energy consumption (kcal)	Room air mean temperature (°C)	Energy consumption (kcal)
Flow rate	2Lpm	22.0	8606	22.0	8606
	4Lpm	22.07	9764	21.99	9347
	6Lpm	22.1	10772	21.97	10165

는 다소 줄어들 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 공동주택의 바닥복사 난방시스템의 On-Off 제어밸브 방식에 대하여 공급온수의 유량 크기가 열환경에 미치는 영향 및 유량의 크기와 공급온수 온도의 크기와의 상관관계를 통해서 실내의 열적 동특성을 개선하고 에너지 사용량을 줄일 수 있는 방안에 대해 시뮬레이션 연구를 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 바닥복사 난방시스템에서 공급유량이 증가할수록 실내온도의 설정값까지의 도달시간이 짧아지나 실내공기온도의 오버슈트는 커지며, 또한 공급유량의 변화에 따라 에너지소모량의 변화도 달리 나타나고, 2 Lpm을 공급하였을 때를 기준으로 하여 4 Lpm일 경우 약 12%, 6 Lpm일 경우 약 19%의 에너지 소모량이 증가함을 알 수 있었다.

(2) 공급유량의 변화에 따라 공급온수온도에 변화를 주었을 때 열환경을 개선시켜줄 수 있었으며, 공급유량이 증가할 경우 공급온수온도를 낮춰줌으로써 기준조건인 2 Lpm에서는 55℃로 할 경우 4 Lpm에서는 50℃로 하여 약 4.3%, 6 Lpm에서는 48℃로 하여 약 6.2%의 에너지소비량을 각각 절감할 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(과제번호 19AUDP-B099686-05)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Song, J. Y. and Ahn, B. C., 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.
2. S. H. Cho and M. Zaheer-uddin, 2003, Predictive control of intermittently operated radiant floor heating system, Energy Conversion and Management, 44, pp. 1333-1342.
3. Ahn, B. C. and Song, J. Y., 2010, Control characteristics and heating performance analysis of automatic thermostatic valves for floor radiant heating system in residential apartment, Energy, 35, pp. 1615-1624.
4. S. Sattari and B. Farhanieh, 2006, A parametric study on radiant floor heating system performance, Renewable Energy, No. 31, pp. 1617-1626.
5. Ahn, B. C., 2018, The Effects of Hot Water Supply Temperature on Indoor Thermal Characteristics for Floor Radiant Heating System, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 13-19.