

# 최적 파라미터를 이용한 단순 모델 기반 바닥 난방 시스템 모델링

## Simple Modeling of Floor Heating Systems based on Optimal Parameter Settings

박승훈(Seung Hoon Park)<sup>1</sup>, 장용성(Yong Sung Jang)<sup>2</sup>, 김의종(Eui-Jong Kim)<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 대학원, <sup>2</sup>GS건설 기술연구소, <sup>3</sup>인하대학교

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, INHA University Graduation School, Incheon, 22212, Korea

<sup>2</sup>GS E&C Building Science Research Team, Yongin, 17130, Korea

<sup>3</sup>Department of Architectural Engineering, INHA University, Incheon, 22212, Korea

(Received July 25, 2017; revision received August 23, 2017; Accepted: August 29, 2017)

**Abstract** Radiant floor heating systems have been used as common heating supply systems in most residential buildings in Korea. Since the system uses a floor as thermal storage, proper control strategy should be adopted to avoid over- or under-heating problems. So far, studies related to control of the floor heating system have been conducted based on computer simulations. The active layer in TRNSYS is known for its usability as a floor heating system model and is integrated with the TRNSYS building model (Type 56). However, floor heating system simulations with the active layer are operated only if pre-defined minimum mass flow rate is ensured. This study proposes a simple RC (Resistance-Capacitance) model for radiant floor heating systems. Model parameters such as Rs and Cs are defined by optimization. The active layer, in this study, is used as the target system to search for optimal values. A TRNOPT optimization tool was used to conduct optimization under given simulation conditions. The RC model with optimal parameters are tested in other mass flow rates that were not used during optimization. Results reveal the RC model describes the active layer with successfully optimized model parameters. The RC model has fewer model limitations, and is expected to be used for various target systems, e.g. experimental data of a real radiant heating system.

**Key words** Floor heating(바닥 난방), Optimization(최적화), RC model(RC모델), TRNSYS(트랜시스)

\* Corresponding author, E-mail: ejkim@inha.ac.kr

### 기호설명

$a$  : 유체 평균온도 계수  
 $A$  : 면적 [ $m^2$ ]  
 $C$  : 열용량 [ $kJ/K$ ]  
 $c$  : 비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]  
 $f$  : 함수  
 $k$  : 열전도도 [ $W/m \cdot K$ ]  
 $l$  : 바닥 난방 코일 총 길이 [ $m$ ]  
 $\dot{m}$  : 유량 [ $kg/h$ ]  
 $Q$  : 열량 [ $W$ ]  
 $\dot{q}$  : 단위 체적 당 발열량 [ $W/m^3$ ]  
 $R$  : 열저항 [ $m^2 \cdot K/W$ ]  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$t$  : 시간 [ $s$ ]  
 $w$  : 바닥 슬래브 두께 [ $m$ ]  
 $x$  :  $x$  방향 계 [ $m$ ]  
 $a$  : 열확산계수 [ $m^2/s$ ]

### 하첨자

$f$  : 난방 순환수  
 $in$  : 공급  
 $o$  : 초기 조건( $t = 0$ )  
 $obj$  : 목적  
 $out$  : 환수  
 $p$  : 정압

pipe : 배관  
r : 실내

w : 바닥  
win : 창문

### 1. 연구배경 및 목적

온돌은 바닥 구조물을 축열체로 이용하는 우리나라 전통적인 방식의 난방 시스템이다. 건물의 구조체를 축열조로 사용 할 경우 건물에서 발생하는 상당한 부하를 시간 지연(Time-lag)을 통해 효과적으로 대응 할 수 있다는 장점이 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 온돌의 원리를 이용한 바닥복사 난방 시스템은 우수한 축열 능력으로 연속적인 난방에 적합하여 상시 거주자가 재실하는 우리나라 대부분의 주거공간에 난방공급 시스템으로 사용하고 있다.<sup>(2, 3)</sup>

반면 이러한 축열 효과는 재실변화 등 부하 변동에 대해 시스템 제어 시 즉각적인 대응이 어렵다는 문제점이 있다. 제어 방식에 따라 자칫 과도한 에너지소비를 발생시킬 우려가 있으며 경우에 따라서는 재실자의 불쾌적을 초래하게 된다.<sup>(4)</sup> 이런 이유로 중앙제어방식 보다는 개별 존(zone)에 대한 제어를 권장하기도 한다.<sup>(5, 6)</sup>

바닥 복사 난방 시스템의 제어에 관한 연구는 국내뿐 아니라 국외 여러 국가에서 현재까지도 활발히 이루어지고 있다. Table 1은 국내 및 국외에서 발표된 바닥 복사 난방(또는 냉방) 시스템의 제어와 관련된 몇 가지 연구 사례를 나타낸 것이다. 문헌들은 다양한 제어방법을 채택하고 있으나 바닥 복사 난방(또는 냉방) 시스템 제어에 관한 연구는 공통적으로 시뮬레이션 기반 분석을 통해 발전되어 왔음을 파악할 수 있다. 그 중 TRNSYS를 이용한 시뮬레이션 연구가 다수 존재한다. TRNSYS는 동적 에너지 해석이 가능한 상용 시뮬레이션 도구로써 건물 에너지 및 설비 시스템의 동적 시뮬레이션을 활용한 설계 및 제어 목적으로 현재까지도 널리 이용되고 있다.<sup>(7)</sup> 또한, TRNSYS는 상세한 건물 모델을 구성할 수 있는 Type 56 컴포넌트를 제공하고 있으며, 해당 컴포넌트에는 바닥, 벽, 천장 등에 유체가 흐르는 코일을 통해 실내와의 열전달을 묘사하는 ‘Active

Table 1 Summary of previous work related to control strategies for radiant floor heating(or cooling) systems

Authors	Control Strategy	Methodology	
		Simulation	Experiment
Cho, S. H. and M. Zaheer-uddin. <sup>(8)</sup>	• Model predictive	TRNSYS	✓
Weitzmann, P. et al. <sup>(9)</sup>	• On/Off	FHSim	
Ibanez, M. et al. <sup>(10)</sup>	• Indoor temperature	TRNSYS	
Song, D. S. et al. <sup>(11)</sup>	• Outdoor reset with indoor temperature feedback	TRNSYS	✓
Memon, R. A. et al. <sup>(12)</sup>	• Indoor temperature feedback	TRNSYS	
Chen, T. Y. <sup>(4)</sup>	• General predictive • On/Off • PI control	By modelling	
Lim, J. H. et al. <sup>(3)</sup>	• On/Off bang-bang • Variable flow • Outdoor reset with indoor temperature feedback	By modelling	✓
Mazo, J. et al. <sup>(13)</sup>	• On/Off	Energy Plus	✓
Laouadi, A. et al. <sup>(14)</sup>	• Model predictive	By modelling	
Hong, H. K. and Kim, S. <sup>(15)</sup>	• On/Off • Constant flow	TRNSYS, EES	
Yeo, M. S. et al. <sup>(16)</sup>	• Outdoor reset • Outdoor reset with indoor temperature feedback • Flux modulation	By modelling	
Choi, J. M. et al. <sup>(17)</sup>	• Multi zone(proposed by their work) • On/Off	TRNSYS	✓

Layer'가 제공되고 있다.<sup>(18)</sup> 이 Active Layer는 바닥 난방 코일 입·출구 온도의 안정성을 유지하기 위해 바닥 면적 당 13 kg/h의 최소질량유량을 항상 유지하도록 설정되어 있다. 만일, 해당 유량 값 보다 작은 값의 유량을 사용하고자 하는 경우에는 'Auto segment' 기능을 통해 단일 난방 구조체의 바닥 면적을 2개 이상의 동일한 면적으로 나누어 시뮬레이션 하도록 지정되어있다. 이 경우, 첫 번째 세그먼트는 해당 면적에서 가장 많은 양의 열량을 Type 56의 실내온도 node에 공급하기 위해 바닥 표면온도를 가장 높게 만들고, 두 번째 세그먼트는 첫 번째 세그먼트보다 작은 열량을 전달하게 된다. 이 'Auto segment' 기능은 앞서 언급한 최소 질량 유량값 (13 kg/h)과 함께 사용자 임의로 설정이 불가능하도록 제한되어있다. Active Layer를 사용하여 바닥 난방 시스템을 시뮬레이션 할 경우 바닥 난방 모델을 별도로 구성 할 필요 없이 TRNSYS 단일 템플릿 내에서 시뮬레이션이 가능하지만, 위와 같은 Active Layer의 제약조건 등으로 많은 연구자들이 바닥 복사 난방 모델을 별도로 구축하여 사용하고 있다. 국내에서는 Active Layer를 사용하는 대신에 EES를 사용하여 바닥 구조체를 직접 모델링하여 TRNSYS와 연계하거나,<sup>(15)</sup> 열교환기 모델링에 주로 사용되는  $\epsilon$ -NTU 방법을 이용하여 시뮬레이션을 실시한 사례<sup>(16, 19)</sup> 등이 있다.

이와 같은 연구의 일환으로 본 연구에서는 구조가 단순한 RC(Resistance-Capacitance) 모델과 파라미터 최적화 방법을 이용하여 TRNSYS 단일 템플릿 내에서 제어 목적으로 사용할 수 있는 바닥 난방 모델링 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구의 절차는 Fig. 1과 같다. 대상 건물은 공동주택 단일 세대이며, 실제 건물의 데이터를 이용하여 모델을 구성하는 것이 최종 목표이나, 본 논문에서는 기존 상세 시뮬레이션 결과를 기준 값으로 정의하였다. 바닥 복사 난방 모델로 간단한 RC모델을 사용하고 TRNSYS 단일 템플릿 내에서 사용하기 위해 상태-공간 모델의 표현식을 이용하여 W-editor에 모델링한다. 그 후 일정한 유량이 공급되는 상황을 전제로 RC모델의 열적 거동이 상세 모델인 Active Layer를 이용한 바닥 난방 시뮬레이션의 결과와 같아지도록 최적화 알고리즘을 이용하여 RC모델의 파라미터(Table 4 참조)를 학습한다. 학습된 결과를 바탕으로 유량을 달리 한 상황에서 RC모델과 Active Layer의 열적 거동을 시뮬레이션을 통해 비교하여 모델을 검증하고자 한다.

## 3. 바닥 난방 RC모델

바닥 난방 RC모델은 Fig. 2와 같이 바닥 난방 순환수의 공급온도( $T_{f,m}$ )와 실내온도( $T_r$ )를 경계조건으로 하는 3R2C 모델로 구성하였다. RC모델은 열저항(Resistance)과 열용량(Capacitance)으로 구성된 열 회로로 표현할 수 있으며, ISO 13790에서는 건물 에너지 소요량 및 요구량을 계산하기 위한 상세 모델로 권장하기도 한다.<sup>(20)</sup> 본 연구에서 사용한 3R2C 모델의 입력 및 출력 값은 Table 2에 나타내었으며, RC모델 출력 값인 실내방열량( $Q_m$ )은 Type 56에 구성된 건물 모델의 입력 값이 된다. Fig. 2의 RC모델에서, 바닥 난방 순환수의 온도와 유량을 입력값, 실내 방열량을 출력값으로 설정하면 상태-공간 모델(State-Space Model)로 표현할 수 있다.<sup>(21)</sup> 상태-공간 행렬식은 시스템 다수의 입력과 출력으로 구성될 경우, 제어 목적으로 입출력 값을 처리하기 위해 사용되기도 한다.<sup>(22)</sup>

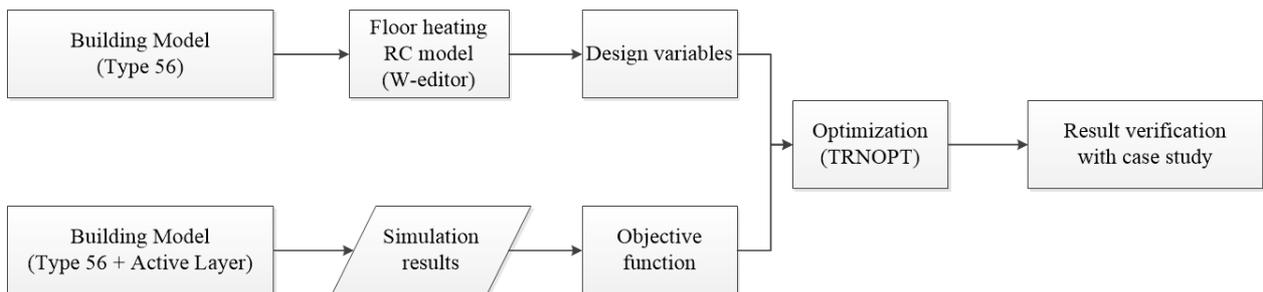


Fig. 1 Flow chart of modelling process for the floor-heating RC model with the TRNSYS Active layer.

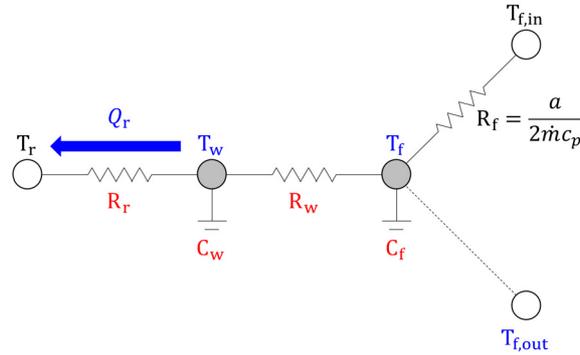


Fig. 2 3R2C model for a floor heating system.

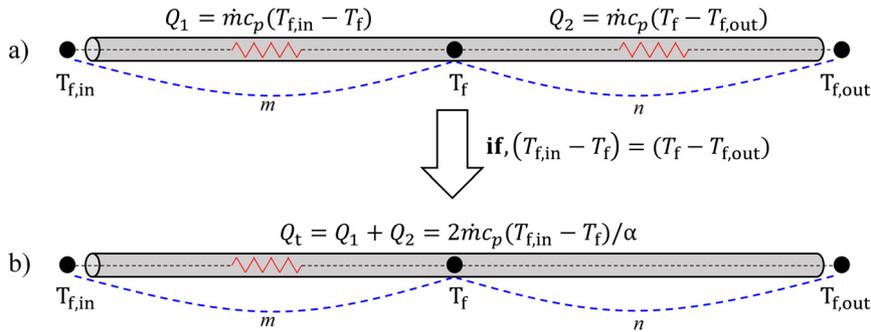


Fig. 3 Modeling assumption of the fluid portion of the floor heating system.

아래 식(1)로 표현되는 상태-공간 방정식에서 다른 모든 파라미터( $R, C$ )의 경우 시간에 대해 독립적인 변수 (time-independent variant) 이나  $R_r$ 의 경우 유체의 유량에 따라 매 시간 간격(time step) 마다 변화하게 된다. 본 연구에서는 상태-공간 모델을 행렬식으로 구성하고 미분방정식 음해법(Implicity Method)을 이용하여 이산화한 후 수치해를 찾는 방법을 이용한다.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{J}\mathbf{T} + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} C_f \frac{dT_f}{dt} = \frac{T_{f,in} - T_f}{R_f} + \frac{T_w - T_f}{R_w} \\ C_w \frac{dT_w}{dt} = \frac{T_f - T_w}{R_w} + \frac{T_r - T_w}{R_r} \\ Q_r = \frac{T_w - T_r}{R_r} \\ T_{f,out} = 2T_f - T_{f,in} \end{cases} \quad (1)$$

Fig. 2의 바닥 난방 모델은  $T_{f,in}$ 와  $T_f$  두 온도 점을 이용하여 배관에서 바닥 구조체로 열량을 전달하도록 고안되었다. Fig. 3의 a)에서와 같이  $T_{f,in}, T_f, T_{f,out}$  각각의 온도차로 인해 발생하는 주변 방향 열전달은 각각  $Q_1, Q_2$ 로 표현할 수 있다. 유체 전체를 대표하는 유체 평균 온도인  $T_f$ 가 배관 입출구( $T_{f,in}, T_{f,out}$ ) 온도의 산술평균 온도라면 방열되는 총 에너지량은  $2Q_1(Q_1 = Q_2)$ 가 되어 해당 열저항은  $R_f = 1/2 \dot{m}c_p$ 로 표현할 수 있으나, 유체 평균 온도는 유체의 온도 구배 특성에 따라 이 가능하지만,  $T_{f,in}$ 과  $T_{f,out}$ 을 각각  $m:n$ 으로 내분하는 온도에 위치하므로 이를 반영하기 위해 유체 평균온도계수( $a$ )를 사용하고 해당 열저항을  $R_f = a/2 \dot{m}c_p$ 로 표현하였다. 여기서  $a$ 는 다른 미지 파라미터(unknown parameter)와 함께 최적화 대상이 된다. 최적 대상 파라미터와 입출력 변수 그리고 초기 가정으로 처리되는 파라미터는 Table 2에 정리되었다.

Table 2 Input and output variables and parameters of the 3R2C model

	Letter	Description	Zone 1	Zone 2	Unit	
Parameters	$A_{pipe}$	Inner pipe cross sectional area	$2.01 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-4}$	$m^2$	
	$A_w$	Floor surface area	49.34	20.89	$m^2$	
	$C_f$	Fluid thermal capacity	Optimizing		$kJ/m^3 \cdot K$	
	$C_w$	Floor thermal capacity	Optimizing		$kJ/m^3 \cdot K$	
	$R_w$	Floor thermal resistance	Optimizing		$m^2 \cdot K/W$	
	$R_r$	Indoor thermal resistance	Optimizing		$m^2 \cdot K/W$	
	$T_{fo}$	Initial temperature of fluid medium	Optimizing		$^{\circ}C$	
	$T_{wo}$	Initial temperature of floor medium	Optimizing		$^{\circ}C$	
	$a$	Equivalent flow rate coefficient	Optimizing		-	
	$c_p$	Fluid specific heat	4.19	4.19	$kJ/kg \cdot K$	
	$l$	Overall pipe length of floor heating coil	208	116	m	
	$w$	Floor slab thickness	0.18	0.18	m	
	Inputs	$T_r$	Indoor zone temperature	Calculated by type 56		$^{\circ}C$
		$T_{f,in}$	Fluid supply temperature of heating coil	Data input(Fig. 5)		$^{\circ}C$
$\dot{m}$		Fluid mass flow rate	400	250	kg/h	
Outputs	$Q_r$	Heat transfer rate from $T_w$ to $T_r$	-	-	W	
	$T_{f,out}$	Fluid return temperature of heating coil	-	-	$^{\circ}C$	

#### 4. RC모델 파라미터 최적화

Active layer는 일종의 Black box 모델이나, 설계자가 입력한 값을 토대로 해당 Zone에 열량을 공급함과 동시에 실내 설정 온도와 환수온도를 파악할 수 있는 바닥 난방 시뮬레이션이 가능하다. 이에 따라서 RC 모델과 Active layer 모두 동일한 유량 조건에서 Active layer를 바닥 난방 모델로 사용한 경우의 실내온도와 환수온도를 3R2C 모델이 그대로 묘사할 수 있도록 적절한 값의 열저항( $R_r$ ,  $R_w$ )과 열용량( $C_w$ ,  $C_f$ )을 최적화 알고리즘을 이용하여 결정하고자 한다.

##### 4.1 대상 건물 및 Active Layer 구성

건물 모델은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 바닥면적  $124 m^2$ 의 공동주택 중  $49.34 m^2$ 에 해당하는 거실(Zone 1)과  $20.89 m^2$ 에 해당하는 침실(Zone 2)이 대상이며 두 Zone에 지속적인 바닥 난방을 공급하는 시나리오를 가정하였다. 대상 기간은 겨울철 난방기 중 3월 8일 오전 7시 33분부터 10일 오전 09시 30분까지 약 이틀간 분 단위의 시뮬레이션을 수행하였다. 각 난방 공급 Zone의 실내 설정온도는 모두  $22^{\circ}C$ 이며 각 Zone의 부하는 Fig. 4에

Table 3 Active layer inputs for radiant floor heating

Active Layer inputs	Zoon 1	Zoon 2	Unit
Inlet temperature	Data input(Fig. 5)		$^{\circ}C$
Inlet mass flow rate	400	250	kg/h
Floor area	49.34	20.89	$m^2$
Min. mass flow rate	360	209	$kg/h \cdot m^2$
Number of fluid loops	20	20	-

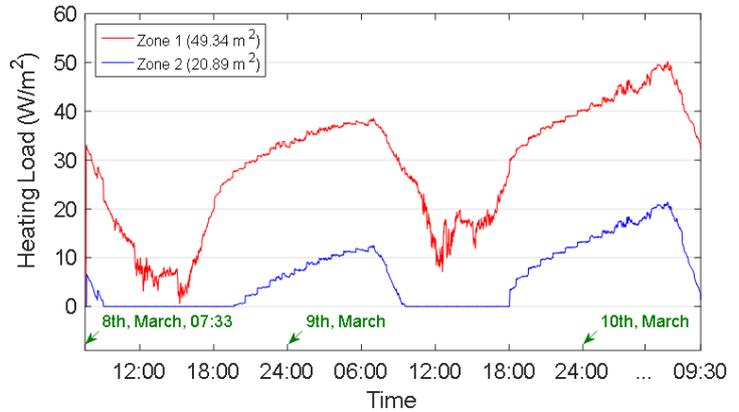
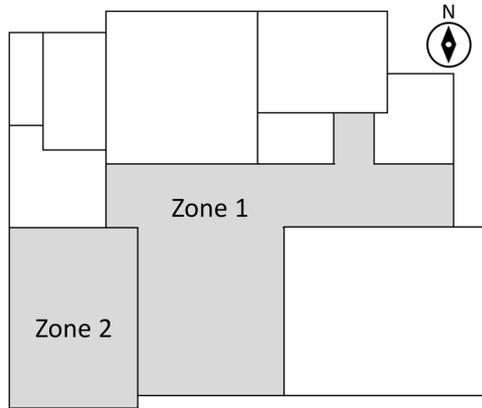


Fig. 4 Radiant floor heating zones(Left) and heating loads of zones(Right).

나타냈다. Active layer의 물성치는 Table 3에 나타내었고 ‘Auto segment’ 기능이 활성화 되지 않은 상태에서 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 유량은 Zone 1에서 400 kg/h, Zone 2에서 250 kg/h로 각각 설정하였다.

#### 4.2 TRNOPT를 이용한 파라미터 최적화

Active layer를 사용하였던 바닥 난방 시뮬레이션의 결과를 RC모델로 동일하게 구현하기 위해 본 연구에서는 TRNOPT 최적화 알고리즘을 이용하였다. TRNOPT는 GenOpt로 알려져 있는 단일 목적 최적화 알고리즘 상용 프로그램을 TRNSYS에서 사용 할 수 있도록 TESS 라이브러리 형태로 제공된 컴포넌트이다.<sup>(23)</sup> 본 연구에서는 TRNOPT에서 제공하는 단일 목적 최적화 알고리즘 중, 좌표 추정 방법(Coordinate research method)을 사용하였다. 이 방법은 목적함수와 설계변수, 설계변수의 유계(bound)를 지정하여 사용 할 수 있으며, 일반적으로 설계 변수의 최적 값을 얻기 위해 여러 공학 분야에서 사용하기도 한다.<sup>(24)</sup>

TRNOPT는 목적함수의 결과 값이 최소가 되도록 만드는 설계변수를 찾아내기 위해 반복적인 시뮬레이션을 실시한다. 식(2)는 전체 시뮬레이션 시간에 대한 RC모델과 Active layer의 평균 온도차를 의미하며 본 연구에서는 이를 목적함수로 사용하였다. Fig. 2의  $R_r$ ,  $R_w$ ,  $C_f$ ,  $C_w$ 를 포함하여 축열체의 초기온도  $T_{fo}$ ,  $T_{wo}$ 를 최적화 알고리즘의 설계변수로 지정하였다. Table 4는 최적화 알고리즘의 파라미터와 설계변수들의 초기 값, 범위 등을 나타낸 것이다. 초기 값은 일반적인 재료의 열 물성치에 근거한 수 계산을 통해 계산하고, 최댓값 및 최솟값의 범위는 해당 초기값을 기준으로  $10^{-1}$ ~10배가 되도록 지정하였다.

$$\min f_{obj} = \sum_{start}^{stop} \left( \frac{|T_{r,RC} - T_{r,Act}| + |T_{fout,RC} - T_{fout,Act}|}{n} \right) \quad (2)$$

Table 4 Parameters and constraint for optimization

Design variables	Unit	Zone 1			Zone 2		
		Min.	Initial	Max.	Min.	Initial	Max.
$a$	-	0	1	2	equal to the left		
$R_r$	$m^2 \cdot K/W$	0.00794	0.07944	0.7944	0.013	0.13	1.3
$R_w$	$m^2 \cdot K/W$	0.00282	0.0282	0.282	0.0063	0.063	0.63
$C_f$	$kJ/K$	0.001	103.52	$\infty$	0.001	34.33	$\infty$
$C_w$	$kJ/m^3 \cdot K$	0.001	2,400	$\infty$	0.001	9,024.48	$\infty$
$T_{fo}$	$^{\circ}C$	5	38.81	50	5	36	50
$T_{wo}$	$^{\circ}C$	5	22	50	5	22	50

### 5. 결과 및 검증

난방 부하가 발생하는 두 개의 실(Zone 1, Zone 2)을 대상으로, 동일 조건에서 Active layer를 사용한 시뮬레이션 결과와 RC모델을 사용한 시뮬레이션의 결과가 같아지도록 RC모델의 파라미터를 TRNOPT 최적화 알고리즘을 통해 학습시켰다. Zone 1과 Zone 2 모두 같은 온도의 난방수가 일정 유량으로 공급되는 상황을 가정하였으며, Zone 1은 400 kg/h, Zone 2는 250 kg/h의 일정한 유량이 공급되는 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. Table 5와 Table 6은 앞서 Table 4에서 지정한 설계 변수들의 최적화 결과 값을 나타낸 것이며, 도출된 설계 변수들의 결과 값을 RC모델에 입력한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타냈다.

Fig. 5와 Fig. 6의 상단에는 식(3)에 정의된 목적함수를 나타냈으며 하단에는 Active layer 및 RC모델 모두 동일한 난방 공급온도가 주어질 때의 환수온도( $T_{f,out}$ ) 및 실내온도( $T_r$ ) 비교 결과를 나타냈다. 최적화 결과로 도출된 RC모델의 파라미터를 사용하였을 때 목적함수는 Zone 1과 Zone 2 모두 0에 근접하는 경향을 보이며 Active layer의 환수온도 및 실내온도를 RC모델이 매우 유사하게 묘사하고 있음을 보여준다.

Table 5와 Table 6에 제시된 열저항( $R$ ) 및 열용량( $C$ )값은 RC모델이 Active layer의 열적 거동을 그대로 묘사하기 위해 필요한 값을 의미한다. 최적화 결과 중 바닥 난방 작동유체의 열용량( $C_f$ )은 바닥체 열용량에 비해 큰 값이 도출되었다. 이는 Active layer의 환수온도가 시뮬레이션 시작 시점부터 1일이 경과 된 시점에서도 정상상태에 도달하지 못하는 결과를 보였고, 파라미터를 최적화하는 과정에서 최적화 알고리즘이 이를 묘사하기 위해 RC모델의 작동유체의 열용량( $C_f$ ) 값을 증가시켰기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 이는 달리 말하면, 초기 Fig. 1과 같이 단순하게 구성한 RC모델에서 유체의 열용량은 주변 바닥 난방 매스를 포함하는 방식으로 구성되는 것이 대상 시스템(Active layer)을 가장 잘 묘사하는 방식일 수 있다는 것을 의미한다.

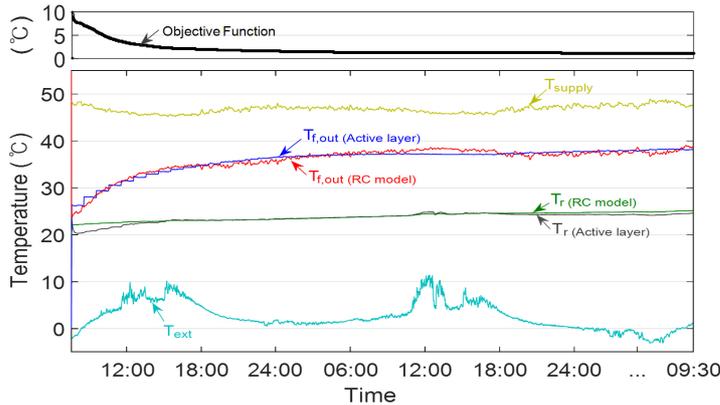


Fig. 5 The result of optimized RC model compared with active layer(Zone 1).

Zone 1		
Parameters	Values	Unit
$\dot{m}$	400	kg/h
$a$	0.3	-
$R_r$	0.0738	$m^2 \cdot K/W$
$R_w$	0.1534	$m^2 \cdot K/W$
$C_f$	88,229	kJ/K
$C_w$	7,198	$kJ/m^3 \cdot K$
$T_{fo}$	35.88	$^{\circ}C$
$T_{wo}$	25.75	$^{\circ}C$

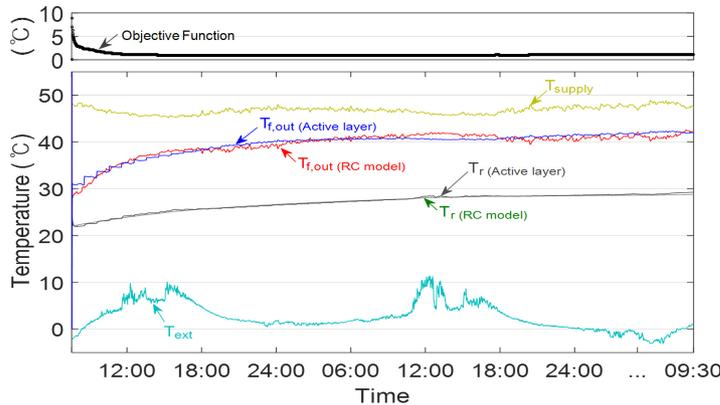


Fig. 6 The result of optimized RC model compared with active layer(Zone 2).

Zone 2		
Parameters	Values	Unit
$\dot{m}$	250	kg/h
$a$	0.3	-
$R_r$	0.0181	$m^2 \cdot K/W$
$R_w$	0.1788	$m^2 \cdot K/W$
$C_f$	53,250	kJ/K
$C_w$	3,025	$kJ/m^3 \cdot K$
$T_{fo}$	38.13	$^{\circ}C$
$T_{wo}$	22.25	$^{\circ}C$

추후, 대상 시스템을 Active layer가 아닌 실증 실험 주택 등으로 변경하여 보다 구체적인 결과분석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

Table 5와 Table 6의 결과 값이 타당한지 여부를 판단하기 위해 도출된 RC모델의 파라미터를 그대로 사용하여 Zone 1에는 600 kg/h, Zone 2에는 400 kg/h의 초기 최적화 과정에서 사용된 값과 다른 유량을 공급하여 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Fig. 7 및 Fig. 8에 나타난 바와 같이 Zone 1과 Zone 2에 각각 증가된 유량이 공급되는 상황에서도 목적함수의 값이 0에 근접하였으며, 난방 공급이 시작되는 초기를 제외하고는 RC모델과 Active layer의 거동이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

한편, 시뮬레이션 초기에 Active layer의 환수온도는 RC모델과 다소 차이를 보인다. RC모델의 파라미터 최적화는 이전에 사용된 유량하에서 진행되었으며 유량이 변동된 경우에도 초기 온도 값을 그대로 사용하였기 때문에 발생한 차이로 보인다. 즉 Active layer의 경우 유량이 변화되면 그에 따라 바닥층의 초기 온도를 재설정하는 알고리즘이 있는 것으로 보이며, 설정방법은 사용자에게 공개되고 있지 않다. 그러나 본 검증 단계의 목적이 최적화 과정에서 사용되지 않은 입력 변수에서도 모델이 대상 시스템을 묘사할 수 있는지를 판단하는 것이기 때문에 이에 대한 개선 작업은 수행하지 않았다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 간단한 RC모델을 이용하여 기존 바닥 난방 시스템 모델로 사용되었던 Active layer를 묘사하는 방법을 제안하였다. 바닥면적 49.32 m<sup>2</sup>과 20.89 m<sup>2</sup>의 공동주택 개별 Zone을 대상으로 각각 일정한 유량이

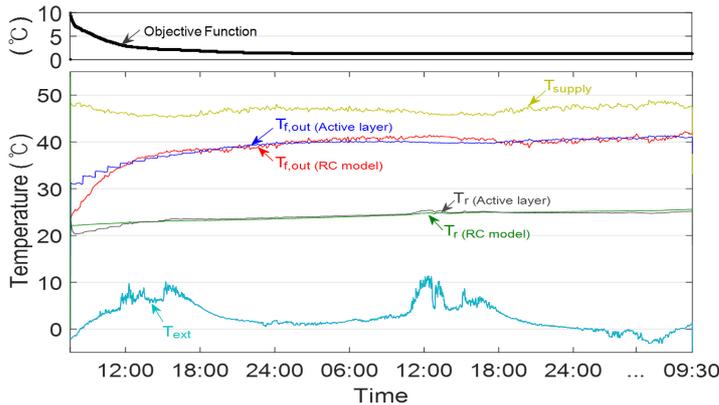


Fig. 7 The result of case study for zone 1( $\dot{m} = 600$  kg/h).

Zone 1		
Parameters	Values	Unit
$\dot{m}$	600	kg/h
$a$	0.3	-
$R_r$	0.0738	m <sup>2</sup> · K/W
$R_w$	0.1534	m <sup>2</sup> · K/W
$C_f$	88,229	kJ/K
$C_w$	7,198	kJ/m <sup>3</sup> · K
$T_{fo}$	35.88	°C
$T_{wo}$	25.75	°C

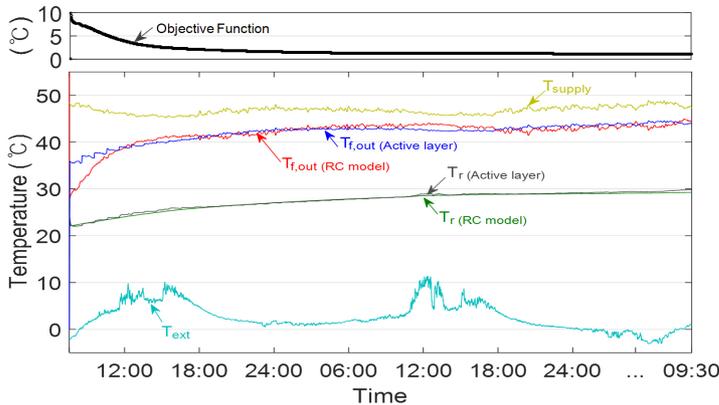


Fig. 8 The result of case study for zone 2( $\dot{m} = 400$  kg/h).

Zone 2		
Parameters	Values	Unit
$\dot{m}$	400	kg/h
$a$	0.3	-
$R_r$	0.0181	m <sup>2</sup> · K/W
$R_w$	0.1788	m <sup>2</sup> · K/W
$C_f$	53,250	kJ/K
$C_w$	3,025	kJ/m <sup>3</sup> · K
$T_{fo}$	38.13	°C
$T_{wo}$	22.25	°C

공급되는 상황에서 Active layer로 바닥 난방 시뮬레이션을 수행하였고, 이 결과를 RC모델이 그대로 묘사할 수 있도록 RC모델의 파라미터를 TRNOPT 최적화 알고리즘을 통해 학습하였다. 최적화 결과로 도출된 값을 사용한 결과, 서로 다른 유량이 공급되는 상황에서도 RC모델이 Active layer의 열적 거동을 매우 유사하게 묘사할 수 있음을 확인하였다. Active layer의 환수온도를 묘사하기 위해 RC모델의 설계 변수 값이 일반적인 값을 초과하여 결정되었던 결과는 향후 실험을 통해 얻어진 데이터를 대상으로 본 연구에서 제안한 RC 모델을 학습하여 추가 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2016R1C1B2011097), 더불어 기술 협력 해 주신 GS E&C 기술연구소에게도 감사드립니다.

## References

1. Braun, J. E., Montgomery, K. W., and Chaturvedi, N., 2001, Evaluating the performance of building thermal mass control strategies, HVAC&R Research, Vol. 7, No. 4, pp. 403-428.
2. Hong, H. K., 2014, Korean traditional heating ondol and modernization, Magazine of the SAREK, Vol. 43, No. 1, pp. 62-70.
3. Lim, J. H., Jo, J. H., Kim, Y. Y., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2006, Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings, Building and Environment, Vol. 41, No. 1, pp. 60-73.
4. Chen, T. Y., 2002, Application of adaptive predictive control to a floor heating system with a large thermal lag, Energy and Buildings, Vol. 34, No. 1, pp. 45-51.
5. Rhee, K. N., Ryu, S. R., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2010, Simulation study on hydronic balancing to improve individual room control for radiant floor heating system, Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 31, No. 1, pp. 57-73.
6. Jin, W. F., Rhie, M. K., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 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.
7. University of Wisconsin-Madison. Solar Energy Laboratory, and Klein, S. A., 1979, TRNSYS, a transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
8. Cho, S. H. and Zaheer-Uddin, M., 2003, Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems, Energy Conversion and Management, Vol. 44, No. 8, pp. 1333-1342.
9. Weitzmann, P., Kragh, J., Roots, P., and Svendsen, S., 2005, Modelling floor heating systems using a validated two-dimensional ground-coupled numerical model, Building and Environment, Vol. 40, No. 2, pp. 153-163.
10. Ibanez, M., Lázaro, A., Zalba, B., and Cabeza, L. F., 2005, An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, No. 11, pp. 1796-1807.
11. Song, D., Kim, T., Song, S., Hwang, S., and Leigh, S. B., 2008, Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 11, pp. 1299-1311.
12. Memon, R. A., Chirattananon, S., and Vangtook, P., 2008, Thermal comfort assessment and application of radiant cooling : a case study, Building and environment, Vol. 43, No. 7, pp. 1185-1196.
13. Mazo, J., Delgado, M., Marin, J. M., and Zalba, B., 2012, Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool : Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump, Energy and Buildings, Vol. 47, pp. 458-466.
14. Laouadi, A., 2004, Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software, Building and Environment, Vol. 39, No. 4, pp. 421-431.

15. Hong, H. K. and Kim, S. H., 2010, Method and analysis of dynamic simulation for Ondol heating, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 375-382.
16. Yeo, M. S., Seok, H. T., and Kim, K. W., 1998, A study on the Water Temperature Control Method of Hydronic Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings, JOURNAL-ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA PLANNING AND DESIGN, Vol. 14, pp. 203-210.
17. Choi, J. M., Lee, K. N., Ryu, S. R., Kim, Y. Y., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2007, A study on the required supply water temperature calculating method for the control of multizone radiant floor heating system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 77-85.
18. SEL, T. and CSTB, T., 2004, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild.
19. Shin, U. C., Jang, M. S., Yoo, H. H., and Min, J. H., 2002, Characteristics of heat transfer in the apartment with ondol heating system, In Proceeding of Annual Conference in AIK, Vol. 18, No. 1, pp. 179-185.
20. EN ISO, 13790 : 2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, pp. 24-26.
21. Nise, Norman S., 2010, Control Systems Engineering (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
22. Verhaegen, M., and Dewilde, P., 1992, Subspace model identification part 2. Analysis of the elementary output-error state-space model identification algorithm. International journal of control, Vol. 56, No. 5, pp. 1211-1241.
23. Wetter, M., 2009, Generic Optimization Program User Manual Version 3.1.1., Lawrence Berkeley National Laboratory.
24. Park, S. H., Lee, H. S., Jang, Y. S., and Kim, E. J., 2016, Sizing of Vertical Borehole Heat Exchangers using TRNOPT, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 10, pp. 402-407.