

## PSO 알고리즘을 이용한 건물 실내온도 제어

김정혁<sup>1</sup>, 김호찬<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>제주대학교 전기공학과

### Building Indoor Temperature Control Using PSO Algorithm

Jeong-Hyuk Kim<sup>1</sup> and Ho-Chan Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Jeju National University

**요약** 본 논문에서는 단일존 빌딩의 모델링과 PSO 알고리즘을 이용한 냉방시스템 제어구간 건물 실내온도 제어 알고리즘을 제안한다. 최적제어를 하기 위한 제어구간 설정은 스위칭방법과 PSO 알고리즘을 사용하고 냉방시스템 사용요금은 TOU와 피크요금을 포함 하여 산정한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 제어구간 설정방법을 적용하면 전력 사용에 따른 비용의 절감과 피크전력 절감을 확인할 수 있다.

**Abstract** In this paper, we proposed the modeling in one zone buildings and the energy efficient temperature control algorithm using particle swarm optimization (PSO). A control horizon switching method with PSO is used for optimal control, and the TOU tariff is included to calculate the energy costs. Simulation results show that the reductions of energy cost and peak power can be obtained using proposed algorithms.

**Key Words** : Energy saving, Builind modeling, Particle swarm optimization, control horizon, building indoor temperature

### 1. 서론

건물에서의 에너지사용량은 전 세계적으로 총 에너지 사용량의 약 40%를 차지하고 있으며, 우리나라의 경우도 총에너지사용량의 약 25%를 차지하고 있다 [1]. 또한 온실가스도 국가온실가스 배출량의 1/4을 차지하고 있어 점차적으로 건물에너지소비에 대한 규제를 강화하고 있다[2]. 건물에서 발생하는 에너지 절감을 위해서는 고효율의 단열자재 사용과 냉난방을 고려한 사전적 에너지 절감 방안이 선행되어야 한다. 그러나 기존 건물은 형태나 방향이 고정되어 있어 변형이나 변경을 할 수 없으며, 건물의 외피나 창호의 교체는 경제적인 문제를 고려해야 하기 때문에 건물에서 손실되는 에너지와 소비되는 분야의 효율을 높여 에너지를 절감하는 방법을 주로 이용하고 있다. 건물에서 전기를 이용한 에너지소비를 구분해 보면 조명, 전열, 동력, 냉난방으로 분류 할 수 있으며, 그 중 에너지소비가 가장 많은 분야가 냉난방으로 이는 건

물 내부에서 생활하는 재실자의 건강과 업무능률 향상을 위한 실내 환경의 쾌적성을 고려한 에너지 소비가 이루어지기 때문이다. 건물의 냉난방으로 발생하는 에너지비용과 전력피크를 절감하기 위해서는 실제 에너지 사용의 흐름을 파악하는 것이 무엇보다 중요하며 실제 에너지 사용의 흐름을 파악하는 기법으로 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 또는, DOE-2, EnergyPlus, TRNSYS 등의 패키지를 이용하여 건물에 대한 모델링을 한다[3,4].

본 논문에서는 단일존(one zone) 형태의 실제 건물을 대상으로 상태공간(state space) 모델을 사용하여 모델링한 후, 실제 측정된 데이터와 모델링 결과를 비교하고, 여름철 냉방시스템이 가동되는 09시부터 오후 18시까지의 9시간동안 2℃ 온도제어 범위를 설정한 후 TOU(time of use) 요금제 기반에서 제안한 PSO(particle swarm optimization) 알고리즘 방법과 기존의 온-오프와 LP(linear programming) 알고리즘을 적용한 후 결과를 비교하여 에너지 비용 절감과 전력피크를 감소시킬 수 있는 방법을

본 논문은 2013학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Ho-Chan Kim(Jeju National Univ.)

Tel: +82-64-754-3676 email: [hckim@jeju.ac.kr](mailto:hckim@jeju.ac.kr)

Received April 2, 2013

Revised (1st April 29, 2013, 2nd May 3, 2013)

Accepted May 9, 2013

제안한다.

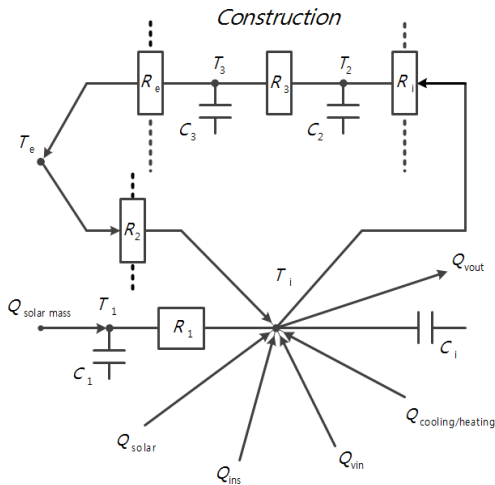
## 2. 단일존 건물 모델링

건물 전체에 대한 열손실( $H$ )은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$H = H_i + H_v + H_e \quad (1)$$

여기서  $H_i$ 는 벽, 창, 문, 바닥 등을 통한 열손실,  $H_v$ 는 환기에 의한 열손실, 그리고  $H_e$ 는 창, 벽 개구부의 빈틈 등 출입구의 문을 개폐함에 따라 외부에서 실내로 들어 오는 침기(infiltration)로 구분 할 수 있다. 건물의 모델링 방법으로 하나의 벽체를 몇 개의 열저항과 열용량을 등가회로로 변환시켜 각 벽체의 회로 방정식을 연립으로 해석하는 집중인자(lumped parameter) 모델을 사용한다 [5].

Fig. 1은 단일존 형태의 건물에 집중인자 모델을 사용하여 열저항( $R$ )과 열용량( $C$ )를 사용하여 건물의 열전달을 간단하게 모델링한 회로를 나타내었다. 하나의 벽체를 3개의 열저항과 2개의 열용량 및 유리의 열저항, 실내에 에너지의 증감에 대한 열용량으로 나타내고 실내온도에 영향을 미치는 입력성분인 실내의 에너지 흐름은 냉방시스템 가동에 의해 발생하는 에너지( $Q_{ch}$ )와 환기(ventilation)로 인해 유입( $Q_{vin}$ )·유출( $Q_{vout}$ )되는 에너지, 실내 열이득( $Q_{ins}$ ), 태양에너지 의한 복사( $Q_{solar}$ ), 열질량에서 태양에너지( $Q_{solar\ mass}$ )의 흐름으로 나타낼 수 있다 [5].



[Fig. 1] Simplified thermal network of one zone buildings

Fig. 1의 열전달 모델에서 각 교점에서의 순수열전달은 내부에너지의 증감으로 나타낼 수 있는데, 5개의 열저항과 4개의 열용량으로 구성되는 단일존 건물에서의 내부에너지의 변화는 다음과 같은 온도에 대한 에너지 등가식은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [6].

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= \frac{T_i - T_1}{R_1} + Q_{solar\ mass} d_f \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= \frac{T_i - T_2}{R_i} - \frac{T_2 - T_3}{R_3} \\ C_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{T_2 - T_3}{R_3} - \frac{T_3 - T_e}{R_e} \\ C_i \frac{dT_i}{dt} &= Q_{ch} + Q_{ins} + Q_{solar\ mass} (1 - d_f) + \dot{m}cT_e \\ &\quad - \dot{m}cT_i - \frac{T_i - T_1}{R_1} - \frac{T_i - T_2}{R_i} - \frac{T_i - T_e}{R_2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $R_1$ 은 실내공기 대류에 의한 열저항,  $R_i$ ,  $R_3$ ,  $R_e$ 는 벽구조에 대한 열저항,  $R_2$ 는 유리과 관련된 열저항을 나타낸다. 또한  $T_1$ 은 실내질량 온도,  $T_i$ 는 실내 공기온도,  $T_2$ 는 실내표면온도,  $T_3$ 는 실외표면온도,  $T_e$ 는 외부온도를 나타낸다.  $Q_{solar\ mass}$ 는 태양 복사열과 창의 방향 등에 의해 변화되는 에너지 값이며, 각 창의 면적 [ $m^2$ ]과 창의 투과계수(window transmission coefficient)의 곱으로 나타낼 수 있다. 그리고  $d_f$ 는 태양에너지가 투과되었을 때 실내질량온도( $T_i$ )를 높이는 계수를 나타내며, 실내온도( $T_i$ )에서는  $(1 - d_f)$ 만큼 실내온도를 높이게 된다.

건물외벽과 내부 대한 저차모델(reduced-order model)과 제어를 구성하기 위해 다음과 같은 선형화된 상태공간모델을 사용할 수 있다 [6].

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \underline{Ax} + \underline{Bu} \\ \underline{y} &= \underline{Cx} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}, \quad \underline{y} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}, \quad \underline{u} = \begin{bmatrix} T_e \\ Q_{ch} \\ Q_{ins} \\ Q_{zone} \end{bmatrix}$$

여기서  $\underline{x}$ 와  $\underline{y}$ 는 각각 실내외에 관련된 온도들을 나타내는 상태벡터와 출력이며,  $\underline{u}$ 는 외기온도와 외부에서 유입되는 에너지들을 나타내는 입력벡터를 나타낸다. 이때 상태공간에서 사용되는 행렬들은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & \frac{1}{R_1 C_1} \\ 0 & \frac{-1}{C_2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) & \frac{1}{R_3 C_2} & \frac{1}{R_1 C_2} \\ 0 & \frac{1}{R_3 C_3} & \frac{-1}{C_3} \left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_e} \right) & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_i} & \frac{1}{R_1 C_i} & 0 & \frac{-1}{C_i} \left( m_c + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_2} \right) \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{d_f}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_e C_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_i} \left( m_c + \frac{1}{R_2} \right) & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{(1-d_f)}{C_i} \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

### 3. PSO를 이용한 건물 실내온도 제어

#### 3.1 PSO 알고리즘

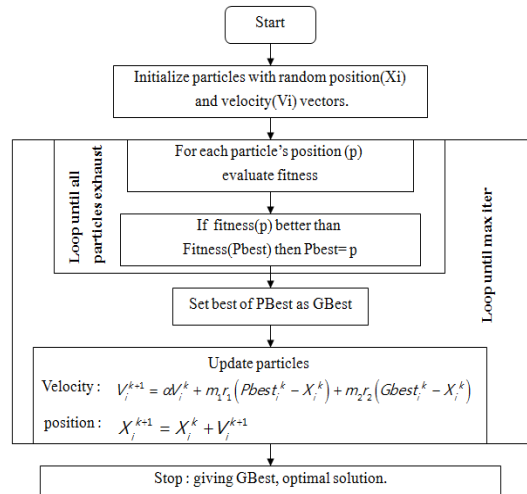
제한한 냉방시스템을 이용한 실내온도 조절 스위칭 최적화 문제를 해결하기 위해 PSO 알고리즘을 사용하였다. PSO는 AI를 기반으로 하는 경험적 최적화기법의 알고리즘으로, 특징으로는 수학적인 알고리즘이나 어떠한 경험적인 최적화를 위한 기법에 비해 이론이 간결하고, 구현의 용이하며 파라미터 제어의 견고성 및 연산의 효율성이 좋다 [7]. PSO에서 개별의 파티클은  $n$ -차원 공간에서 하나의 해로 가정하며, 위치벡터( $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ )와 속도벡터( $V_i = (v_{i1}, \dots, v_{in})$ )를 포함하는 가능한 솔루션으로 나타낸다. 시간에 따라 이동하는 개별의 속도 파티클은 지속적으로 최적의 파티클( $P_{best_i} = (x_{i1}^{P_{best}}, \dots, x_{in}^{P_{best}})$ )로 이동 하도록 결정하며,  $P_{best}$  위치들 중에 최적의 적합도를 가지는 파티클이 전역 최적위치 파티클( $G_{best} = (x_{i1}^{G_{best}}, \dots, x_{in}^{G_{best}})$ )이 된다. 임의로 생성된 가중치 계수( $\alpha, r_1, r_2$ )와 가속상수( $m_1, m_2$ )에 의해 개별의 파티클들은 시간이 지남에 따라 점차 전역최적위치로 이동하게 된다. PSO의 두 가지 업데이트 규칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_i^{k+1} &= \alpha V_i^k + m_1 r_1 (P_{best_i}^k - X_i^k) \\
 &\quad + m_2 r_2 (G_{best}^k - X_i^k) \\
 X_i^{k+1} &= X_i^k + V_i^{k+1}
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $V_i^{k+1}$ 는  $i$ 번째 파티클의  $k+1$ 번째 속도 벡터,

$X_i^{k+1}$ 는  $i$ 번째 파티클의  $k+1$ 번째 위치벡터,  $\alpha$ 는 관성가중치,  $m_1$ 과  $m_2$ 는 양의 실수,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 (0, 1)사이의 랜덤함수,  $P_{best_i}^k$ 는  $i$ 번째 최적의 파티클 위치벡터,  $G_{best}^k$ 는 전체 파티클 중 최적의 위치 벡터,  $k$ 는 반복수이다.

Fig. 2는 PSO 알고리즘에 대한 수행절차를 나타내었다.



[Fig. 2] Schematic diagram of PSO algorithm

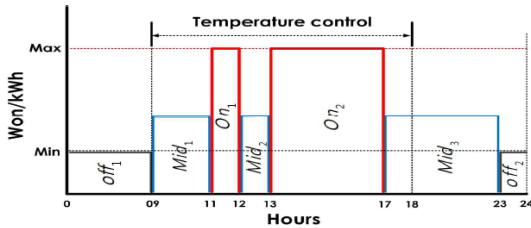
#### 3.2 온도제어 알고리즘

TOU 요금제 기반에서 전기요금을 구분하여 부과하는 일반용전력인 경우, 계약전력이 300[kW]미만은 일반용 전력(갑), 300[kW]이상은 일반용전력(을)로 구분하며, 다시 여름철과 봄가을철, 겨울철 시간대를 기준으로 경부하, 중부하, 최대부하로 구분하고 있다. 여름철 전력요금을 기준으로 한 냉방시스템 온도제어 알고리즘은 전력요금이 상대적으로 낮은 중부하 시간대 가동하고 최대부하 시간대 이전에 설정한 온도 값으로 냉방시스템이 가동될 수 있도록 한다. 전체적으로 가변적인 실내온도의 기울기를 조절할 수 있게 냉방시스템을 제어하여 최대부하 시간대 구간에서는 냉방시스템의 가동을 최대한 억제시켜 전체적으로 전력사용 시간의 이전(shifting)을 통한 전력요금 절감 및 최대전력 사용을 제한하는 효과를 얻을 수 있다 [8].

냉방시스템의 1시간 평균에 대한 전력요금 계산식  $C(t)$ 는 계절, 선택요금, 시간대별 요금제도로 결정되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(t) = C_b \cdot P_t + \left( \sum_i^{Mfd} P_{th} + \sum_i^{On} P_{tm} \right) \quad (6)$$

여기서  $C_b$ 와  $P_t$ 는 각각 기본요금과 전력을 사용한 기간의 최소화한 15분에 대한 평균사용 전력량으로 사용기간 수요시한 중 최대 부하 전력량 값이며,  $Mid$ 는 중부하,  $On$ 은 최대부하 시간대에 사용한 전력에 각각의 비용을 곱한 값을 나타낸다. Fig. 3은 여름철 TOU 요금제의 시간대 구분을 나타낸 것으로, 본 논문에서 고려한 건물에 적용되는 요금제는 일반용 전력(을) 고압 A 선택[I]이며, 경부하( $Off_1$ ,  $Off_2$ ) 52.6원, 중부하( $Mid_1$ ,  $Mid_2$ ,  $Mid_3$ ) 100.4원, 최대부하( $On_1$ ,  $On_2$ ) 172.9원이다.



[Fig. 3] TOU tariffs

본 논문에서는 현재 실내온도를 기준으로 단일존의 냉방시스템이 가동되기 때문에 시간에 대해서 새로 생성되는 현재의 실내 온도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{t+1} = T_0 + \sum_{k=1}^t (TIN(k) - TOU(k) \cdot u(k)) \quad (7)$$

여기서  $T_0$ 는 현재 실내온도,  $t$ 는 냉방시스템 제어구간에서 스위칭 시한의 총합, 냉방시스템의 스위칭을 통한 실내 온도의 상승열량과 하강열량은  $TIN(k)$ 과  $TOU(k)$ 으로 나타낸다.

제어구간을 설정한 냉방시스템 가동이 시작되면 ( $u > 0$ ) 실내의 온도가 상승열량에서 하강열량의 차이만큼 실내 온도차가 발생하면 냉방시스템은 가동을 정지하게 되어( $u = 0$ ) 실내온도는 다시 올라가게 된다. 따라서 실내온도는 냉방 시스템이 가동 되는 시간동안 실내온도의 상한치와 하한치 범위 내에 있어야 하기 때문에 다음과 같은 실내온도 조절 경계 제어 범위 조건이 필요하다.

$$T_{low} \leq T_t \leq T_{high} \quad (8)$$

여기서  $T_t$ 은 현재 실내온도,  $T_{low}$ 와  $T_{high}$ 는 시간에 따른 실내온도의 상한치와 냉방시스템 가동으로 설정온도에 도달 하는 하한치의 온도조절 범위를 나타내며, 실내온도 조절 경계조건에 도달하면 냉방시스템은 가동과

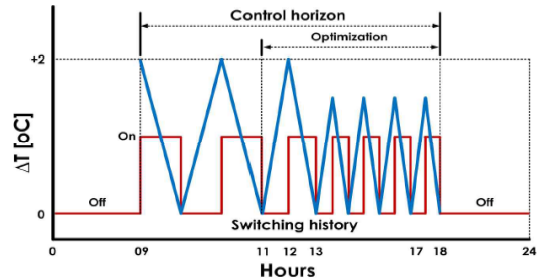
정지를 우선적으로 수행하게 된다.

시간대별 요금제에서 냉방시스템의 가동비용을 절감하는 것은 전체적으로 전력피크를 줄이며 부하사용을 이동 또는 감소시키는 방법으로, 주어진 요금 시간대에 따른 최적화된 운전시기를 결정하여 전력요금을 최소화 하는 것을 목적으로 한다 [9]. 본 논문에서는 건물의 시간대별 냉방시스템 가동시간을 09시부터 18시까지의 에너지 비용을 최소화 하도록 하는 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min J = \sum_{k=1}^N \{u(k) \cdot p(k) \cdot c(k)\} \quad (9)$$

여기서  $N$ 은 건물온도를 제어하기 위해 사용되는 스위칭 총합으로 15분 기준인 경우 36이 되며,  $u(k)$ 는 냉방시스템 가동상태,  $p(k)$ 는 사용전력,  $c(k)$ 는 시간을 기준으로 수용가에 부과되는 전력요금  $C(t)$ 에서 기본요금과 최대사용 전력의 곱을 제외한 중부하와 최대부하시간대의 사용시간에 따른 스위칭 시한  $k$ 에 대한 전력사용 요금이다.

수용가 전력사용을 09시부터 냉방시스템의 전력사용량 기반으로 중부하와 최대부하 시간대의 출력을 계산하기 위해 최적화 구간을 설정하고, 냉방시스템 제어를 위해 Fig. 4와 같이 시간에 따른 온도와 냉방시스템 동작을 설계한다. 냉방시스템 제어구간은 하루 기준으로 설계되며, 다음날의 최초의 중부하 시간대의 입력변화가 발생하게 되면 새로운 제어 구간 설정을 할 수 있는 구조로 설계되어 진다.



[Fig. 4] Control horizon switching strategy

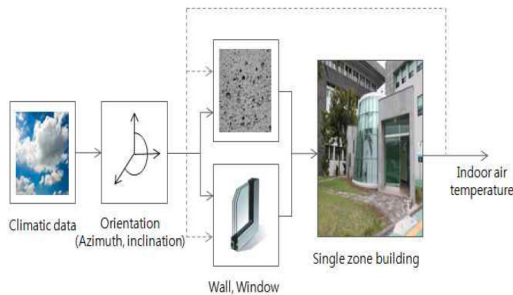
## 4. 컴퓨터 시뮬레이션

### 4.1 단일존 건물 모델링 및 시뮬레이션

건물내부의 실제 에너지흐름은 외부의 기후변화에 따

라 전도, 대류, 복사 등의 모든 열전달 현상을 포함한 복합적이며 상호영향을 미치는 동적시스템으로 구성되어 있다. 따라서 건물의 시뮬레이션 모델링에는 수많은 가정 요소와 단순한 기법이 도입되고 있으며 도입 정도에 따라 해석 능력과 범위가 결정된다 [10].

Fig. 5는 해석대상 건물이 태양으로부터 발생하는 일사량과 외부의 기온변화에 의해 건물의 외벽과 유리창의 열 변환과정에 의한 복사에너지가 건물의 실내로 전달되는 열 변환과정 모델을 보여주고 있다.



[Fig. 5] Heat transfer models

Fig. 6은 해석 대상 시뮬레이션에 사용된 지상 1층의 상업용 부속 건물로, 면적은  $54.85[m^2]$ , 철근 콘크리트 구조로 건물의 방향은 남쪽을 향하고 있다.



[Fig. 6] Conventional test building

건물의 남쪽 면에는 유리외벽(glass curtain wall)으로 마감을 하였으며, 주출입구인 동쪽과 서쪽은 강화유리도어를 설치하였고, 북쪽 면에는 드라이비트로 마감하였다. 냉방과 난방은 EHP (electric heat pump) 방식을 사용하고 있으며, 시뮬레이션을 수행하기 위해 설정한 건물 파라미터 값들은 Table 1과 같이 주어진다.

[Table 1] Building parameters

Parameter	Value
Volume zone	253[m <sup>3</sup> ]
Ventilation	1[hour]
Facade surface	57[m <sup>2</sup> ]
Facade heat resistance Rc	3.6[m <sup>2</sup> K/ W]
Floor and internal walls surface	60.45[m <sup>2</sup> ]
Window surface	37[m <sup>2</sup> ]
Window heat resistance	0.043[m <sup>2</sup> K/ W]

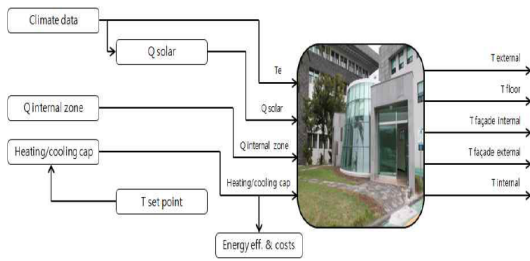
단일존 건물의 특성을 확인하기 위해 여름철 냉방시스템을 가동하지 않은 해석대상 건물에 동쪽과 서쪽의 간격은 3.5[m], 유리창과 안쪽 벽과의 간격은 5.4[m], 각각의 상단과 하단의 높이는 0.8[m]와 2[m]로 구분하여 8개의 온도센서를 설치하였다. 하루 동안 동쪽과 서쪽, 상단과 하단 벽 네 곳의 센서에서 1분 단위로 측정된 데이터를 한 시간 단위로 평균하여 실측치를 구하였으며, 시간당 일사량과 외부기온, 실내온도는 Table 2와 같이 주어진다.

[Table 2] Solar radiation parameters

Parameter	Hours	Solar radiation[wh/m <sup>2</sup> ]	Exter. temp. [°C]	Inter. temp. [°C]
Value	7	4.44	26.1	27.9
	8	21.4	27.1	28.3
	9	43.3	29.4	29
	10	60	30.5	29.7
	11	73.9	31.2	30.9
	12	84.5	31.7	31.8
	13	85.6	31.6	32.8
	14	88.4	33.7	33.3
	15	76.1	33.8	33.8
	16	53.9	33.4	33.3
	17	41.4	33.5	33
	18	30	33.1	32.8
	19	9.45	30.9	32.7
20	0.27	30.3	32.5	

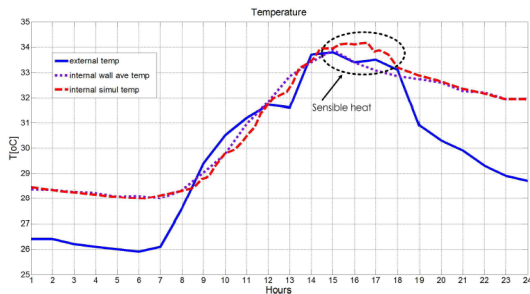
본 논문에서는 일사량에 의한 외부기온, 창을 통해 들어오는 복사열과 설정온도에 대한 냉방시스템, 그리고 상 태공간의 건물영역을 포함하는 시스템 구성도를 Fig. 7에 나타내었으며, Matlab/Simulink 프로그램을 사용하여 모델링을 수행하였다.





[Fig. 7] Building simulation configuration

기상청에서 제공된 제주(청) 지상관측자료 중 요소별 자료인 외부기온과 일사량 값을 입력으로 하였을 때 실제 측정된 건물의 실내온도와 Matlab/Simulink 시뮬레이션 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 대상건물의 실내온도가 증가함에 따라 발생하는 현열(sensible heat) 구간에서 오차가 발생하였으나 전체적으로 대상건물의 실내 온도변화를 나타내는 두 개의 곡선이 서로 일치하고 있어 대상 건물에 대한 모델링의 결과가 우수함을 확인 할 수 있다.

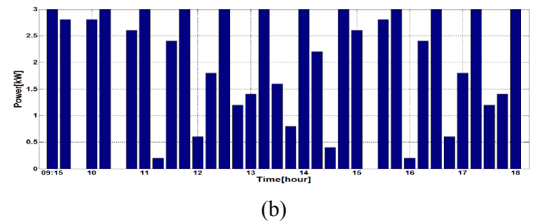
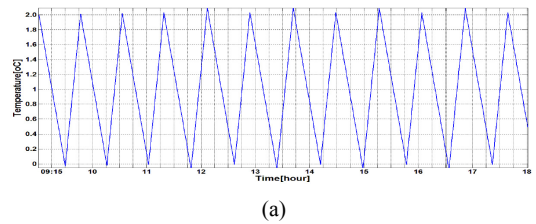


[Fig. 8] comparison of the internal temperature

### 4.2 PSO를 이용한 건물 실내온도 제어

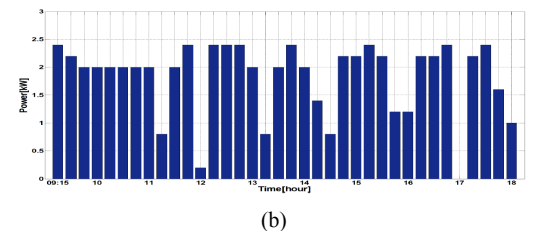
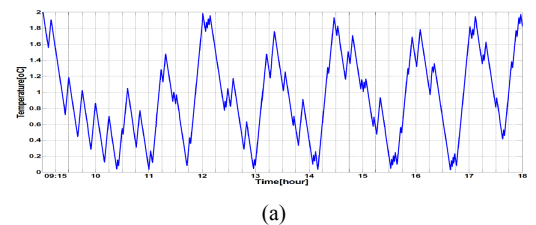
대상건물에 대한 에너지 비용 절감 및 최대부하 시간대의 전력피크를 억제하기 위한 냉방시스템 가동방식의 효과를 검증하기 위해 온도제어 대한 외기온도를 28[°C]로 고정하였다.

Fig. 9는 기존의 실내 온도제어에 사용되는 온-오프(on-off) 제어를 적용하여 시뮬레이션 하였을 때 가동상태와 온도변화를 나타내었다. Fig. 9(a)는 냉방시스템이 시간을 고려하지 않고 상한치와 하한치의 설정 값에 따라 가동되어 실내온도가 연속적으로 2[°C] 온도제어 범위 내에서 설정온도 변화의 범위가 일정한 패턴을 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 온-오프 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 최대부하 시간대의 전력사용에 대한 피크값이 최대 3[kW]를 나타내고 있다.



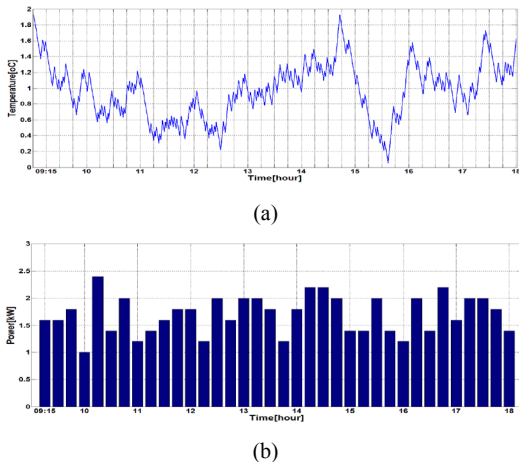
[Fig. 9] (a) On-off temperature control and (b) power usage

Fig. 10은 LP 알고리즘을 적용하여 설정된 제어구간의 입력으로 인가하여 시뮬레이션을 수행하였을 때 가동상태와 온도변화 결과를 나타내었다 [6]. 최대부하 시간대의 냉방시스템 가동을 최소화하기 위해 최대부하시간대가 처음 시작되는 11시에 실내온도는 하한치가 되도록 하였다. Fig. 10(a)는 기준온도에서 변할 수 있는 2[°C]온도 제어 범위에서 설정온도 변화가 불규칙적으로 변하고 있으나 온-오프 온도제어의 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 LP 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 냉방시스템 운전방식에 대한 전력피크가 결정되는 15분단위의 전력사용은 중부하와 최대부하 시간대의 전력사용에 대한 피크값이 최대 2.4[kW]를 나타내고 있으며, 최대부하 시간대의 전력사용에 대한 값도 최대 2[kW]에서 2.2[kW]를 나타내고 있다.



[Fig. 10] (a) LP temperature control and (b) power usage

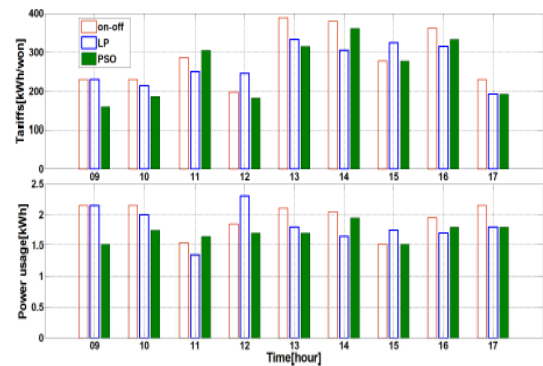
Fig. 11은 PSO 알고리즘을 LP 알고리즘과 동일한 방법을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11(a)는 기준온도에서 변할 수 있는 2°C 온도제어 범위 내에서 설정온도 변화가 불규칙적으로 변화하고 있으나 온-오프 제어와 LP 알고리즘을 적용한 제어 결과 보다 온도변화의 상한치와 하한치의 폭이 좁게 나타나고 있어 쾌적성이 기존방법보다 좋은 결과로 나타나고 있다. Fig. 11(b)는 PSO 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 냉방시스템 운전방식에 대한 전력피크가 결정되는 15분단위의 전력사용은 중부하 시간대의 전력사용에 대한 피크값이 최대 2.4[kW]를 나타내고 있으며, 최대부하 시간대의 전력사용 값은 최대 1.8[kW]에서 2.2[kW]를 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 PSO 알고리즘을 적용한 제어 방법을 적용하면 기존의 온-오프와 LP 제어방법 보다 최대전력사용량이 감소함을 알 수 있다. 특히 오전과 오후 최대부하 시간대의 냉방시스템 가동을 최대 2.2 [kW] 이하로 유지함으로써 냉방수요가 집중되는 시간에 전력사용 요금과 전력피크 감소에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.



[Fig. 11] (a) PSO temperature control and (b) power usage

Fig. 12는 온-오프 제어와 LP 알고리즘 및 PSO 알고리즘을 적용하여 1시간 단위의 에너지 비용 및 전력사용량에 대한 결과를 나타낸 것으로, 에너지 비용은 냉방시스템의 가동 제어방식에 따른 전력사용[kWh]과 시간[hour]의 곱으로 계산하였다. 3[kWh] 용량의 전력을 사용하는 단일존 건물을 대상으로 온-오프, LP 그리고 PSO 제어방식을 사용하는 경우에 하루기준 전력사용 요금은 각각 2,583 [Won]과 2,411 [Won], 2,315 [Won]으로 제안한 PSO 제어 방식이 LP와 온-오프 제어방식에 비해 4[%]와 10.4[%]가 감소함을 알 수가 있었다. 기존의 온-오프 제

어 방식의 냉방시스템 가동은 시간대별 사용요금을 고려하지 않은 중부하와 최대부하 시간대에 냉방시스템이 가동됨으로써 순수하게 사용한 전력량에 비해 높은 요금이 부과되었다. 또한 하루기준 09시부터 18시까지의 전력사용량도 17.45[kWh]와 16.5[kWh], 15.35[kWh]로 제안한 PSO 제어방식이 LP 제어 방식보다 7[%], 온-오프 제어방식 보다 11.5[%] 정도가 감소함을 알 수 있었다.



[Fig. 12] Comparison of a energy costs and power usage

## 5. 결론

본 논문에서는 TOU 요금제 기반에서 PSO 알고리즘을 적용하여 에너지 비용과 전력피크를 감소시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 단일존 건물의 모델링을 위해 실제 센서를 이용한 건물내부의 온도변화를 측정하였고, 건물 모델링과 Matlab/Simulink 통한 결과와 실측치가 유사한 결과를 나타내도록 모델링을 수행하였다. 제안한 PSO 방식의 제어알고리즘을 적용한 온도제어는 설정범위 내의 온도변화 폭이 좁게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내었다. 또한 전력요금도 기존의 온-오프와 LP 제어방법을 적용할 경우에 비해 각각 약 10.4[%]와 4[%]가 절감하였고, 또한 전력사용량도 약 12[%]와 7[%]가 감소하였다. 따라서 PSO 제어구간 설정 제어방식을 적용한 경우에는 전력 사용기간이 늘어날수록 기존의 제어방식에 비해 에너지 비용이 낮아지고 전력 사용에 대한 피크전력 또한 감소하여 전기를 사용하는 수용가에게 부과되는 전력요금은 상대적으로 더 낮아질 가능성이 있음을 확인하였다.

## References

[1] Korea Institute of Energy Technology Evaluation and

- Planning, Green Energy Strategy Load Map, 2011.
- [2] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 녹색 건축물 조성 지원법, 2013.
- [3] N. Mendes, G. H. C. Oliveira, H. X. Araújo, and L. S. Coelho, "A Matlabbased simulation tool for building thermal performance analysis," In Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003.
- [4] I. Beausoleil Morrison, F. Macdonald, M. Kummert, T. McDowell, R. Jost, and A. Ferguson, "The design of an ESPr and TRNSYS cosimulator," In Proc. Building Simulation 2011, pp. 2333 - 2340, 2011.
- [5] A. W. M. van. Schijndel, Integrated Heat Air and Moisture Modeling and Simulation, PhD Dissertation, Eindhoven University of Technology, 2007.
- [6] C.-J. Boo, J.-H. Kim, and H.-C. Kim, "Building indoor temperature control using control horizon method in cooling systems", Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society, vol. 13, no. 10, pp. 4902-4909, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.10.4902>
- [7] J.S. Heo, K.Y. Lee and R. Garduno-Ramirez: Multiobjective control of power plants using particle swarm optimization techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, pp. 552-561, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2005.858078>
- [8] I. Hazyuk, C. Ghiaus, and D. Penhouet, "Optimal temperature control of intermittently heated buildings using model predictive control: Part I - Building modeling", Building and Environment, vol. 51, pp. 379 - 387, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.009>
- [9] Y. Yang, A. Pinto, A. Sangiovanni-Vincentelli, and Q. Zhu, "A design flow for building automation and control systems", 31st IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS'10), pp. 105-116, San Diego, CA, December 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RTSS.2010.26>
- [10] C.-B. Park, A Study on the Application of Low Energy Cooling System in Office Building, PhD Dissertation, Chung-Ang University, 2011.

**김 정 혁(Jeong-Hyuk Kim)**

[정회원]



- 2005년 8월 : 제주대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 박사과정

<관심분야>

에너지효율, 건물에너지시스템, 스마트그리드

**김 호 찬(Ho-Chan Kim)**

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2009년 2월 : 미국펜스테이트 방문교수
- 1995년 9월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

신재생에너지, 스마트그리드, 에너지효율, 건물에너지 시스템