

# 주거자 만족도를 고려한 주택 에너지관리 시스템의 부하제어 방법 연구

## A Study on Load Control Method for Home Energy Management System (H-EMS) Considering the Human Comfort

전 정 표\* · 김 광 호†  
(Jeong-Pyo Jeon · Kwang-Ho Kim)

**Abstract** - The effective energy management method will provide the significant advantage to the residential customers under real time pricing plan since it can reduce the electricity charge by controlling the energy consumption according to electricity rate. The earlier studies for load management mainly aim to minimize the electricity charges and peak power but put a less emphasis on the human comfort dwelling in the residence. The discomfort and displeasure from the energy management only focusing on reduction of electricity charge will make the residential customer reluctant to enroll the real time pricing plan. In this paper, therefore, we propose optimal load control strategy which aim to achieve not only minimizing the electricity charges but also maintaining human comfort by introducing "the human comfort coefficient." Using the human comfort coefficient, the energy management system can reflect the various human personality and control the loads within the range that the human comfort is maintained. Simulation results show that proposed load control strategy leads to significant reduction in the electricity charges and peak power in comparison with the conventional load management method.

**Key Words** : Real-time electricity pricing, Energy management system, Human comfort

### 1. 서 론

오늘날 에너지수요는 크게 해마다 증가하고 있으며 다른 수송가에 비하여 가정 및 상업용 건물부분에서의 에너지 사용률은 큰 증가율을 보이고 있다. 건물부분의 에너지소비량은 전체 에너지소비량의 약 30%를 차지하고 있으며, 이중 상당부분이 냉·난방부분에서 사용되고 있다. 종래에는 이러한 냉·난방부분에 대한 에너지는 석유, 가스와 같은 화석연료들이 사용되었지만 최근 1차 에너지원에 대한 가격상승과 상대적으로 저렴한 전기에너지의 가격 특성상 매년 건물부분에서의 전력수요는 크게 증가되고 있다[1]. 특히 냉방부분에서의 전력사용량의 급증은 매년 하계기간의 반복적인 전력수급의 문제를 야기하고 있으며, 이에 정부는 전력수요 안정화를 위한 일부 건물에 대한 냉방온도 제한정책 등의 수요안정화 정책을 실시하고 있다. 또한 이와 함께 상대적으로 저렴한 전기에너지에 대한 가격현실화와 함께 전력시장의 상황을 반영한 실시간 전기요금의 적용을 고려하고 있다. 실시간 전기요금은 전력시장의 수급상황에 따라 요금단가 변동함으로써 전력소비자들로 하여금 최대부하 시간동안의 전력사용량을 절감하는 등의 효율적인 전력소비를 유도

하는 기능을 가지고 있다. 그러나 몇몇 연구에 따르면 기존의 시스템에서의 실시간 전기요금의 도입은 그의 효과를 기대하기 어렵다고 전망하고 있다[2][3].

기존의 전기요금환경과 달리 실시간 전기요금 환경에서는 총 전력사용량뿐만 아니라 시간대별 전력사용량 비중 또한 전기요금을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 전력수용가는 변동적인 전기요금에 반응하여 그들의 부하사용을 조절할 필요가 있지만, 대부분의 사용자들이 전 시간적으로 변화하는 전기요금단가를 모니터링하고 이에 따라 부하제어를 실시하는 것은 현실적으로는 불가능한 것이 사실이다. 따라서 실시간 전기요금 환경에서는 주택내의 부하를 자동적으로 모니터링하고 제어할 수 있는 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)의 필요성은 대단히 크다 할 수 있다. 이에 따라 지금까지 EMS에 관한 다양한 연구가 요금절감 및 피크전력 절감에 초점을 맞추고 진행되어 왔다. 그러나 주택용의 경우 부하제어의 궁극적인 목적이 요금절감과 피크전력 절감에 있다 하더라도 해당 주택에 주거하는 사람의 편안함, 즉 주거 환경에 대한 만족도 또한 대단히 중요하게 고려되어야 할 요소이다.

본 연구에서는 실시간 전기요금을 적용받는 주택에서 주거자의 쾌적도까지 고려한 부하제어방법을 제안하고자 한다. 제안한 방법에서는 가변적인 실시간 전기요금을 고려하여 전체적인 전기요금 및 최대부하를 줄이도록 부하운전계획을 마련한다. 여기에 주거자의 환경 만족도를 모델링하고 최적화 단계에서 계수로 도입함으로써 실내의 거주자가 느끼는 쾌적함은 유지하면서 경제적인 운전이 가능하도록 하였다. 또한 서울의 주택을 대상으로 시도한 사례연구를 통

\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr

Received : January 27, 2014; Accepted : April 24, 2014

하여 제안된 부하제어방법을 통해 거주자의 주거 만족도는 유지하면서 경제적인 부하운전계획을 실행하여도 상당한 수준의 요금절감 및 최대부하 전력 감소 효과를 얻을 수 있음을 보였다.

## 2. 주거자 만족도를 고려한 EMS 부하제어방법의 제안

### 2.1 부하제어의 개요

주택 EMS의 부하제어는 일반적으로 냉·난방시스템의 설정온도 및 조명밝기 조절 그리고 단속적 부하(세탁기, 청소기 등)의 사용시각의 제어로 구성될 수 있다. 본 연구에서 제안된 부하제어 전략은 냉방기기의 설정온도 및 단속적 부하의 사용시각 제어를 대상으로 하며, 대략적인 제어절차는 다음과 같다.

(1) 다음날의 부하제어를 위하여 전일, 주거자는 EMS에 원하는 부하 사용시각 및 만족도계수를 입력한다.

$t_{ost}$ : 주거자 선택 단속적부하의 사용시각(1~24 중 선택)

$\lambda_{user}$ : 만족도계수(0~1)

일시적이고 간헐적으로 사용되는 단속적 부하들은 주거자의 원하는 사용시각에 임의로 결정된다. 따라서 본 논문에서는 이를 반영하기 위하여 부하운전 계획을 산출하기 전에 주거자가 원하는 가동시각을 단속적부하의 사용시각( $t_{ost}$ )으로 입력하게 된다. 일반적으로 일부 사람들은 부하제어를 통한 요금절감을 중시하며, 반면에 어떤 부류의 사람들은 요금절감 보다는 쾌적한 환경이나 자신이 원하는 시각에 부하를 사용하기 원할 것이다. 이와 같이 주택 주거자들의 성향은 매우 다양하고 상이할 것이나 각 주거자들이 가장 최적이라고 생각하는 시각은 일반적으로 하나로 정해질 것이라고 가정하였다. 이러한 성향을 반영하기 위하여 본 논문에서는 주거자 만족도 계수( $\lambda_{user}$ )를 도입하였다. 주거자 만족도 계수는 주거자의 성향에 따른 만족도 수준을 결정하는 계수로 0~1사이의 값을 가진다. 만약 요금절감보다는 쾌적한 환경이나 높은 만족도를 중시하는 주거자의 경우 1에 근접한 값을 설정하며, 이 경우 실내 환경은 쾌적한 온도를 유지하며, 단속적 부하는 주거자가 설정한 시각에 운행 될 것이다. 반면에 조금의 불편함을 감수하고 보다 많은 요금절감을 희망하는 주거자의 경우 0에 근접한 값을 설정하게 되며, 이 경우 부하들은 최대한의 요금절감을 위하여 운전될 것이다.

(2) 외부기관에서 전송받는 기상데이터 및 요금데이터를 기반으로 주거자 만족도계수를 통하여 결정된 제어범위에서 2.4절의 최적화 함수식에 따라 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 다음날의 최적의 냉방시스템의 운전 및 부하사용 스케줄을 산출한다.

### 2.2 주거자 만족도

이번 절에서는 부하사용에 대한 주거자들의 만족도를 정

의하도록 한다. 만약 적절한 실내온도가 유지되고 부하가 주거자가 원하는 시각에 가동된다면 주거자는 부하사용에 대하여 높은 만족도를 보일 것이며, 반대의 경우 불쾌감을 느끼게 된다. 따라서 본 연구에서의 만족도는 부하제어 요소인 냉방시스템의 설정온도 및 단속적 부하의 사용시각에 따라 결정되며, 최적화 함수식 형태의 부하제어 전략과의 연계가 용이하도록 실내온도와 부하사용시각에 따라 느낄 수 있는 주거자의 불만족도를 주거자의 만족도로써 정의하였다. 우선 시간대별 주거자 선택 단속적 부하의 사용시각과의 차이에 따른 주거자 불만족도는 식 (1)과 같다.

$$U_s(t) = \delta_s (|t_{ost} - t|) \tag{1}$$

여기서,

$U_s(t)$  : 단속적 부하의 사용시각에 따른 불만족도

$t$  : 시간대(1~24)

$\delta_s$  : 기기에 따른 불만족도 민감도 계수

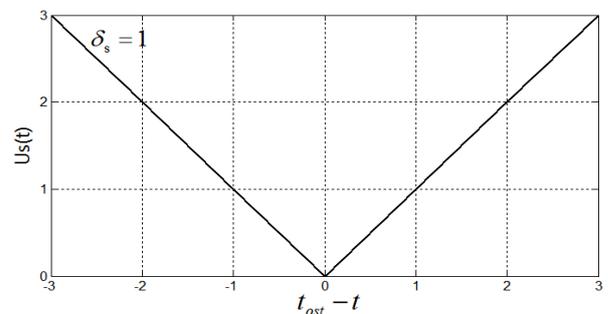


그림 1 부하 사용시각에 따른 주거자 불만족도

Fig. 1 The user's discomfort according to the starting time of load

단속적 부하에 대한 주거자의 불만족도( $U_s(t)$ )는 그림 1과 같이 주거자가 미리 설정해둔 사용시각( $t_{ost}$ )과 실제 사용시각 차이가 커질수록 불만족도가 증가하게 될 것이다. 이 경우 사용시각의 차이의 변화에 따른 불만족도의 변화량은 주거자의 성향에 따라 다양한 형태로 모델링이 가능하나 본 논문에서는 선형적으로 증가하는 것으로 가정하여 모델링하였다. 기기에 따른 불만족도 민감도 계수( $\delta_s$ )는 부하종류에 따른 주거자의 불만족도 민감도를 조정하기 위한 계수로 사용되었으며, 즉, 민감도가 높은 부하는 사용시각의 차이가 커질수록 불만족도가 급격하게 변화하며, 민감도가 낮은 부하의 불만족도는 완만하게 변화하게 된다. 실내온도에 대한 주거자 만족도는 단속적 부하와 달리 이전에 연구에 의하여 상당부분 정형화가 이루어졌다. 본 연구에서는 ISO-7730에서 규정한 PMV(Predicted Mean Vote)를 실내온도에 대한 주거자 불만족도로 모델링하는데 사용하였다. PMV는 인간의 온열환경에 대한 반응의 평균치를 예측한 것으로 3(hot), 2(pleasantly warm), 1(warm), 0(neutral), -1(cool), -2(pleasantly cool), -3(cold)의 7단계로 다수의 사람들이 특정 실내온도에 대한 느끼는 온열감을 정량화한 것이다. 특정 시간대  $t$ 에 대한 PMV의 식은 다음과 같다[4].

$$PMV(t) = (0.303e^{-0.036M(t)} + 0.028) \times \left\{ \begin{aligned} & [M(t) - W(t)] - 0.305 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M(t) - W(t)) - P_a(t)] \\ & - 0.42 \times [(M(t) - W(t)) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(t)(5867 - P_a(t)) \\ & - 0.0014M(t)(34 - T_i(t)) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl}(t) + 237)^4 \\ & - (T_r(t) + 237)^4] - f_{cl} h_c(t)(T_{cl}(t) - T_i(t)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서,

- $M(t)$  : t 시간의 인체 활동량 ( $W/m^2$ )
- $W(t)$  : t 시간의 외부 일 ( $W/m^2$ , 0)
- $P_a(t)$  : t 시간의 수증기 분압 ( $Pa$ ),  
 $= (rh(t)/100) \times P_{ws}(t)$
- $rh(t)$  : t 시간의 상대습도(%)
- $P_{ws}(t)$  : t 시간의 포화 수증기압 ( $Pa$ )
- $T_{cl}(t)$  : t 시간의 의복 표면온도 ( $^{\circ}C$ )
- $T_i(t)$  : t 시간의 실내온도 ( $^{\circ}C$ )
- $T_r(t)$  : t 시간의 평균 복사온도 ( $^{\circ}C$ ),  $= T_i(t)$ ,
- $h_c(t)$  : t시간의 인체 표면의 대류 열 전달률 ( $W/m^2 \cdot C$ )
- $f_{cl}$  : 착의시 피부 노출 면적비
- $I_{cl}$  : 의복의 단열값 ( $m^2 \cdot C/W$ , 0.094)

PMV로 대표되는 실내 열 쾌적도는 일반적으로 실내온도, 습도, 인체 활동량 그리고 착의량 등의 여러 요인에 의하여 영향을 받게 된다. 그러나 본 연구에서 PMV에 큰 영향을 주는 실내온도( $T_i(t)$ ), 습도( $rh(t)$ ), 활동량( $M(t)$ ) 등을 변수로 하여  $PMV(t)$ 를 산출하였으며, 다른 값들은 선행연구를 참조하여 일반적인 값을 적용하였다[5]. 식(2)을 이용하여 특정 시간대에서의 실내온도에 따른 대한 주거자 불만족도는 다음과 같이 산출된다.

$$U_{PMV}(t) = |PMV(t)| \quad (3)$$

여기서,

$U_{PMV}(t)$  : t시간에서의 실내온도에 따른 주거자의 불만족도

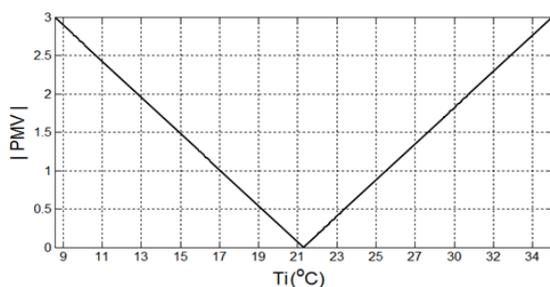


그림 2 실내온도와 |PMV|의 관계  
 Fig. 2 The relation between the |PMV| and the indoor temperature

위의 그림 2는 실외온도  $30[^{\circ}C]$ , 상대습도 [30%], 활동량  $70[W/m^2]$ 를 보이는 특정 시간대 t에서의 실내온도에 따른 불만족도  $U_{PMV}(t)$  값을 예시로 보여준다. 일반적으로 PMV가 0에 근접한 값을 가질수록 대다수의 실내 거주자는 실내온도에 대하여 쾌적함을 느끼며, 0에서 멀어질수록 불쾌감을 느끼게 된다. 따라서 실내온도에 대한 주거자는 불만족도

또한 PMV가 0에서 멀어질수록 불만족도가 증가하는 형태로 정의하였다.

### 2.3 주택용 3단계 계시별 전기요금

구분	0-9	~10	~11	~12	~13	~14	~15	~16	~17	~18	~19	~20	~21	~22	~23	~24
봄, 여름, 가을	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
겨울	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
비고	○ 시간대 : ■ 최대부하시간대, ■ 중간부하시간대, ■ 경부하시간대 ○ 계절 : 여름(7~9월), 봄(3~6월), 가을(9~10월), 겨울(11~익년2월)															

그림 3 주택용 실시간 전기요금제

Fig. 3 The real-time electricity pricing for household

현재 주택의 전기요금 체계는 누진율을 적용한 사용량기반의 전기요금이며, 실시간 전기요금은 아직 적용하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 제주 스마트그리드 실증단지에서 시범 적용중인 주택용 실시간 요금제인 실시간 3단계 계시별 요금 산출방법을 적용하도록 한다[6]. 제주 스마트그리드 실증단지의 주택용 실시간 3단계 요금제는 위의 그림 3과 같이 최대, 중간, 경부하시간대 구간으로 구분되며, 주택용 실시간 전기요금(여름철 기준)은 해당일의 계통 한계가격(SMP: System Marginal Price)을 기반으로 다음식과 같이 결정된다.

$$C_g(t) = C_g^p \quad \forall t = 12, 14 \sim 17 \quad (4)$$

$$C_g(t) = C_g^m \quad \forall t = 10 \sim 11, 13, 18 \sim 23 \quad (5)$$

$$C_g(t) = C_g^l \quad \forall t = 1 \sim 9, 24 \quad (6)$$

여기서,

$C_g(t)$  : 시간대별 전기요금단가(원/kWh)

$C_g^p$  : 최대부하시간대 단가(원/kWh),  $= \sum(SMP^1 \sim SMP^5)/5$

$C_g^m$  : 중간부하시간대 단가(원/kWh),  $= \sum(SMP^6 \sim SMP^{14})/9$

$C_g^l$  : 경부하시간대 단가(원/kWh),  $= \sum(SMP^{15} \sim SMP^{24})/10$

$SMP^1 \sim SMP^{24}$  : 일일 최대~최저 SMP 단가(원/kWh)

해당일의 SMP를 단가가 높은 순서로  $SMP^1 \sim SMP^{24}$ 로 정렬한 후, 가장 높은 5시간의 SMP의 평균을 최대부하, 다음 9시간의 평균을 중간부하, 그리고 나머지 시간의 평균을 경부하 시간대 단가로 적용한다. 따라서 주택용 실시간 3단계 계시별 전기요금의 단가는 SMP에 따라 수시로 변경되지만, 구간별 시간대는 기존의 계시별 요금제와 유사하게 적용된다. 또한 주택용 실시간 전기요금의 경우 타 수용가에 비하여 전력사용량이 적은 것을 고려하여 기본요금은 부과하지 않는 방침에 따라 본 논문에서도 계약전력 및 최대전력으로 산출되는 기본요금은 적용하지 않았다.

### 2.4 최적화 모델링

#### 2.4.1 목적함수

다음 식(7)은 주택에서의 부하제어를 위해 최적화 함수식이다. 제안된 최적화 함수식은 실시간 전기요금 환경에서

주거자 만족도계수를 통하여 결정된 제어범위에서 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 각 시간대별 최적화 변수  $op_1(t)$ ,  $op_2(t)$ 의 값을 결정한다.

Minimize Cost :

$$\sum_{t=1}^{24} C_g(t)P_{load}(t) + \lambda_{user}U_{cost}(t) \quad (7)$$

여기서,

$op_1(t)$  : 냉방시스템 설정온도 최적화 변수,  $= T_{set}(t)$

$op_2(t)$  : 단속적 부하의 사용시간 최적화 변수(0 or 1)

$P_{load}(t)$  : 시간당 부하전력량(kWh),  
 $= P_n(t) + P_{a.c}(t) + P_s(t)$

$P_n(t)$  : 비-제어 부하의 소비전력량(kWh)

$P_{a.c}(t)$  : 냉방시스템 소비전력량(kWh),

$$= \left[ \frac{\epsilon T_i(t) - T_{set}(t)}{1 - \epsilon} + T_o(t) \right] \frac{A}{\eta}$$

$T_{set}(t)$  : t 시간의 냉방시스템 설정온도( $^{\circ}C$ )

$T_i(t)$  : t 시간의 실내온도( $^{\circ}C$ ),  $= T_{set}(t-1)$

$T_o(t)$  : t 시간의 실외온도( $^{\circ}C$ )

$\eta$  : 냉방시스템의 성능계수(COP, 3)

A : 주택의 열전도율( $kW/^{\circ}C$ , 0.2518)

$\epsilon$  : 건물의 열 시간계수(0.93)

$P_s(t)$  : 단속적 부하 소비전력량(kWh),  $= op_2(t)P_s$

$P_s$  : 단속적 부하의 정격소비전력(kW)

$U_{cost}(t)$  : 단속적 부하에 대한 불만족도 요금(원),  
 $= C_U U_s(t) P_s(t)$

$C_U$  : 불만족도 요금단가(원/kWh),  $= (C_g^p - C_g^t)\lambda_{user}$

최적화 변수  $op_1(t)$ 은 해당시간의 냉방시스템 설정온도  $T_{set}(t)$ 를 결정하며, 냉방시스템의 설정온도는 다음시간의 실내온도  $T_i(t+1)$ 를 결정하게 된다. 이에 설정온도에 따른 냉방시스템의 전력사용량을 결정하기 위한 함수식 및 계수값 [7]을 참조하여 모델링하였다. 최적화 변수  $op_2(t)$ 로 결정되는 단속적 부하에 대한 사용시간은 최적화 함수식 내에서 부하이동에 의한 불만족도 요금의 형태로 적용된다. 특정 부하를 요금단가가 저렴한 시간으로 이동시키는 경우 요금 단가 차이로 인한 요금절감의 이득이 발생하며, 이와 반대로 주거자의 만족도는 하락하게 된다. 이를 고려하여 부하이동에 따른 만족도 하락을 소위 불만족도 요금의 형태로 정의하고 이를 부과하도록 하였다. 즉, 부하이동을 통한 얻어지는 요금상의 이득이 불만족도 요금보다 큰 경우 이동을 시키고 반대의 경우는 이동을 하지 않도록 하였다. 이때 불만족도 요금은 주거자 만족도 계수에 의해 영향을 받으므로 주거자의 성향이 반영된 부하제어가 가능하게 된다. 부하이전에 대한 불만족도 요금은 부하제어 스케줄 산출을 위해서만 사용되기 때문에 실제 전기요금에는 포함되지 않는다.

### 2.4.2 제약조건

다음 수식은 최적부하제어에 따른 제약조건을 나타낸다.

Subject to:

$$0 \leq P_{a.c}(t) \leq P_{a.c,max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{load}(t) \leq P_{contract} \quad (9)$$

$$0 \leq U_{PMV}(t) \leq PMV_{limit} \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^{24} op_2(t) = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^{24} op_2(i)op_2(j) = 0, \quad \forall i \neq j \quad (12)$$

여기서,

$P_{a.c,max}$  : 냉방시스템의 최대 전력소비량(kWh, 3)

$P_{contract}$  : 계약전력량(kWh, 3)

$PMV_{limit}$  :  $|PMV|$ 의 한계값,  $= 1 - \lambda_{user}$

수식 (8),(9)는 시간당 냉방시스템의 소비전력량 및 부하 사용량을 각각 정격 소비전력량과 계약전력량으로 제한하기 위한 제약조건이며, 냉방시스템에 대한 정격 소비전력량 및 계약전력량은 일반적으로 사용되는 값을 참조하여 각각 3kWh으로 제한하도록 하였다. 수식(10)은 주거자의 만족도 계수에 따라 PMV의 제어범위를 결정하는 제약조건이다. 주거자의 만족도계수가 1에 가까울수록 PMV는 0에 가깝도록 제한되어, 쾌적한 실내온도를 유지하도록 제어된다. 마지막으로 수식 (11),(12)은 세탁기와 같은 단속적 부하가 일반적으로 하루에 한번 사용되는 특성을 고려하여 단속적 부하의 최적 사용시간이 하루 한번 산출될 수 있도록 제한을 두는 조건이 되겠다.

### 2.4.3 최적화 프로그램

본 연구에서의 사용된 최적화 문제를 해결하기 위하여 MATLAB의 Optimization Toolbox를 이용하였다. MATLAB의 Optimization Toolbox는 다양한 형태의 최적화 문제를 풀 수 있는 기능을 제공하고 있으며, 현재 제안된 최적화 식은 선형 목적함수와 비선형 제약조건이 혼합된 형태로 구성되어 본 논문에서는 제약조건을 가진 비선형 최적화 문제에 적합한 “Fmincon” 풀이법을 적용하였다[8]. MATLAB의 “Fmincon” 풀이에서는 4가지의 최적화 풀이 알고리즘을 제공하고 있으나, 본 논문에서는 다른 비선형 최적화 기법과 비교하여 해의 산출속도가 비교적 빠른 “SQP(Sequential Quadratic Programming)” 알고리즘을 1차적으로 적용 후, 최적해에 수렴하지 않는 경우에 한하여 2차적으로 해의 산출속도는 다소 느리지만 신뢰도가 높은 “Active-Set” 알고리즘을 적용하여 최적해를 구하였다. SQP법은 비선형 함수 형태의 목적함수와 제약조건을 테일러급 수 전개를 통하여 목적함수는 2차식으로 제약조건은 1차식으로 근사하여 최적화 문제를 해결하는 방법이다. SQP법의 테일러 근사에 의한 문제정의는 다음과 같이 한다.

Minimize:

$$q(x) = \frac{1}{2}d^T H d + \nabla f(x_k)^T d \quad (13)$$

Subject to:

$$\nabla g_i^T + g_i^k \leq 0, i = m_e + 1, \dots, m \quad (14)$$

$$\nabla h_i^T + h_i^k = 0, i = 1, \dots, m_e \quad (15)$$

여기서, H는 Lagrange function의 Hessian 행렬을 나타내며,  $x_k$ 는 현재의 반복단계에서의 변수값을 나타낸다. SQP법은 비선형 목적함수를 풀기 위하여 2차 프로그래밍 부속 문제의 해를 구하는 반복계산에 바탕을 두고, 그 탐색방향으로의 강하함수를 최소화하여 이동거리를 구하는 방식이다. 매 반복에서 변수는  $x_{k+1} = x_k + a_k d_k$ 에 의하여 변화하며,  $a_k$ 는 이동거리를 나타낸다. 여기서 최적조건이 얻어지면 수렴되어 계산이 종료되고 그렇지 못하면 Hessian Matrix가 BFGS(Broyden Fletcher Goldfarb Shanno Method)에 의해 개선되어 반복 계산을 수행한다. BFGS는 매 반복 때마다 Hessian 행렬을 수정하는 방법이다. “Active-Set” 알고리즘의 경우 일반적인 최적화기법과 달리 “Feasible sets” 구간에서만 최적해를 탐색하게 된다. Feasible sets란 여러 제약 조건 중에서 최적해가 만족해야하는 제약조건 구간으로 Active-Set 알고리즘은 이 구간에 한정된 값에 한하여 최적해를 탐색하므로 결과적으로 제약조건이 제거된 최적화 문제로 해를 산출하게 된다.

### 3. 사례연구

#### 3.1 사례연구의 개요

이번 절에서는 제안된 부하제어 방법의 효과를 검증하기 위한 사례연구 결과를 제시하였다. 본 연구에서의 대상 주택은 서울에 위치한 주거용 주택을 대상으로 설정하였으며 시뮬레이션 기간은 2011년 7월로 선정하였으며, 이에 2011년 7월 서울지역의 기상데이터 및 SMP 데이터를 이용하였다.[9][10] 또한 단속적 부하로는 세탁기( $P_s=0.755\text{kW}$ )를 선정하였으며, 주거자 지정 사용시간( $t_{ost}$ )은 오후 12시로 설정하였다. 추가적인 단속적 부하의 경우 주택에서 제어가 용이한 추가 부하가 없어 세탁기뿐만 제한하였으며, 따라서 세탁기의 불만족도 민감도 계수( $\delta_s$ )는 1로 동일하게 설정하였다.

표 1 시뮬레이션 사례의 분류

Table 1 The classification of Simulation Case

제어방식	$\lambda_{user}$	$t_{ost}$	$\delta_s$	냉방 설정온도 범위
기존방법		12	1	$23^\circ C$
최적 운전	사례1	0.8	12	$ PMV  \leq 0.2$
	사례2	0.5	12	$ PMV  \leq 0.5$
	사례3	0.2	12	$ PMV  \leq 0.8$

위의 표 1는 본 연구에서 적용된 주요 부하제어 시나리오를 보여준다. 기존의 주택에서 적용되는 기존방법의 경우 고정적인 설정온도로 운행하는 냉방운행 방법을 적용하였으며, 설정온도의 경우 미국 냉난방 공조기술자 학회(ASHRAE)에서 정의한 여름철 쾌적온도를 참조하여  $23^\circ C$ 로 설정하였으며[11], 단속적 부하의 경우 미리 지정된 시각 12시에만 가동되도록 제한된다. 반면에, 본 연구에서

제안된 최적 부하제어방법의 경우, 사용자 만족도 계수( $\lambda_{user}$ )를 3가지 경우로 나누어 시뮬레이션을 실시하였다. 사례 1의 경우 요금절감 보다는 쾌적한 환경 및 높은 만족도를 추구하는 사용자 성향을 대표하도록 하였으며, 사례3은 쾌적한 환경보다는 요금절감을 중시하는 사용자의 성향을 반영하였다. 마지막으로 사례 2의  $|PMV|$ 값은 0.5 이내로 제한하였으며, 이는 일반적으로 PMV 값이 0.5 이내로 유지되는 경우 대다수의 사용자가 현재 실내온도에 대하여 만족감을 느끼는 경우를 반영한 사례가 되겠다.

#### 3.2 1일 부하제어결과

본 연구에서 제안된 부하제어전략의 효과를 검증하기 위하여 1차적으로 하절기의 2011년 7월 20일을 대상으로 하여 1일 운행결과를 산출하였다. 아래의 그림 4, 5는 각각 7월 20일의 기상데이터 및 주택용 실시간 3단계 계시별 전기요금 단가를 나타내며, 그림 6은 본 연구에서 사용된 주거자의 활동량 패턴을 보여준다. 일반적으로 주거자의 활동량 패턴은 주택 주거자의 생활 스케줄 등의 다양한 요인에 따라 상당히 가변적인 특성을 보이므로 본 연구에서는 기존의 연구문헌들을 참조하여 가상의 활동량 패턴을 산출 및 적용하였다.

2011년 7월 20일을 대상으로 한 운전결과는 그림 7, 8과 같다. 기존제어 방법의 경우 냉방설정온도  $23^\circ C$ 를 유지하기 위하여 24시간 동안 냉방운행을 지속하는 반면, 제안된 부하제어방법에서는 지정된  $PMV_{limit}$ 을 만족하는 범위에서 냉방장치의 출력을 적절히 조절하고, 필요시 단속적 부하의 사용을 다른 시간으로 이동시키는 등 유연한 제어를 실시하였다. 따라서 전기요금의 높고 낮음과는 무관하게 정해진 설정치에 따라 운전되는 기본 방식과는 달리, 제안된 최적부

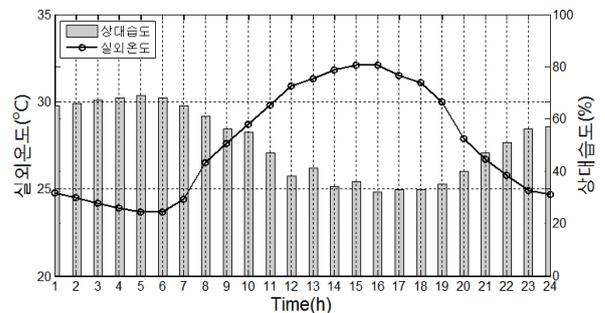


그림 4 실외온도 및 상대습도

Fig. 4 Outdoor temperature and Relative humidity

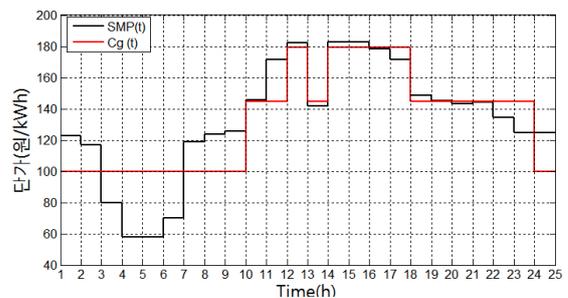


그림 5 실시간 전기요금 곡선

Fig. 5 Real time electricity charge curve

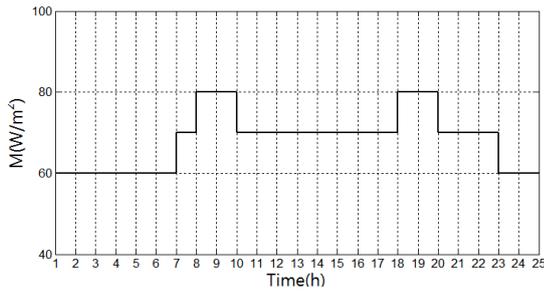


그림 6 주거자의 활동량 스케줄  
Fig. 6 The schedule of user's metabolic rate

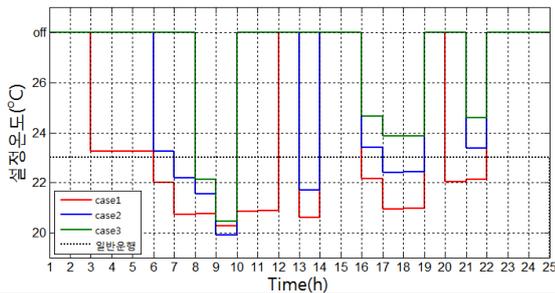


그림 7 설정온도 비교  
Fig. 7 Comparison of the setting temperature

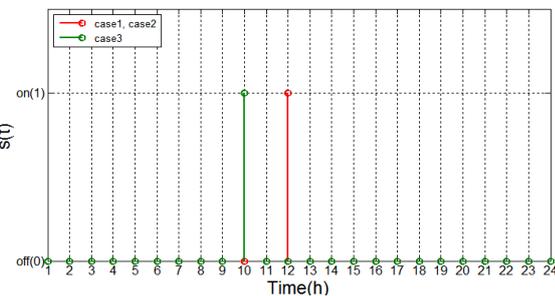
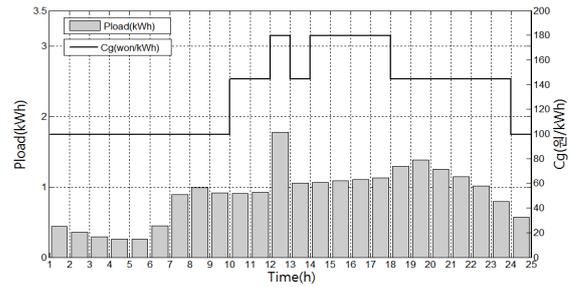


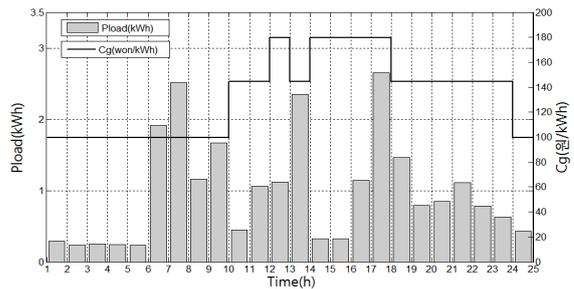
그림 8 부하 사용시각 비교  
Fig. 8 Comparison of the starting time of load

하제어 방법의 경우는 전기요금의 단가변동에 따라 유연하게 부하운전을 제어하여 그림 9의 (b),(c),(d)와 같이 전기요금 단가가 높은 시간대(12, 14~17시)에는 냉방을 최대한 억제하고 요금이 저렴한 시간대에 부하사용이 집중될 수 있도록 한다. 특히 사례 3의 경우 냉방운행의 제어와 함께 단속적 부하기기(세탁기)의 운행시각을 전기요금 단가가 보다 저렴한 시간대로 이전하여 최대한의 요금절감 효과를 얻도록 제어하였다.

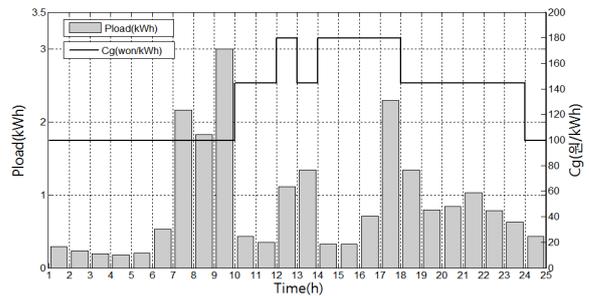
그림 10은 제어방법에 따른 시간대별  $PMV$ 곡선을 보여 준다. 앞 절에서 언급되었듯이 일반적으로  $PMV \leq 0.5$  일때는 대다수의 주거자들이 쾌적함을 느끼게 된다. 예상과 달리 기존 방법을 적용하였을 경우, 24시간 동안 설정온도를 유지하기 위해서 냉방장치를 가동하였다 하더라도  $PMV$ 가 0.5를 초과하는 경우가 하루 약 5시간까지 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이와는 달리 제안한 최적부하제어방법이 적용된 경우 요금절감을 중시하는 사례 3을 제외하고는 모든



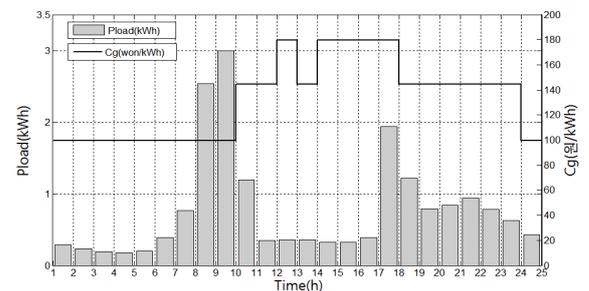
(a) 기존 제어 방법  
(a)The conventional load control method



(b) 제안된 최적 부하제어 방법 (사례1)  
(b) The proposed load control method (CASE1)



(c) 제안된 최적 부하제어 방법 (사례2)  
(c) The proposed load control method (CASE2)



(d) 제안된 최적 부하제어 방법 (사례3)  
(d) The proposed load control method (CASE3)

그림 9 소비전력량의 비교  
Fig. 9 Comparison of energy consumption

시간에서 쾌적한  $PMV$ 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 7월 20일의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 주거자

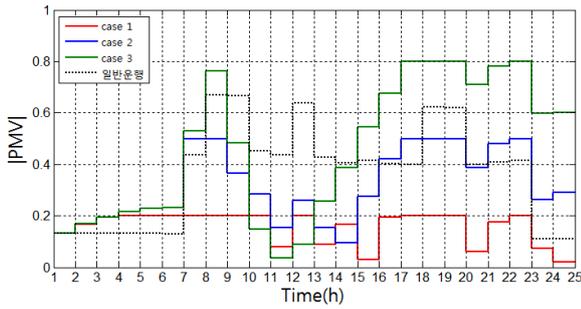


그림 10 평균 |PMV|의 비교  
Fig. 10 Comparison of the average |PMV|

표 2 7월 20일의 시뮬레이션 결과 비교  
Table 2 Comparison of the simulation results on July 20

제어 방식	기존방법	제안된 부하제어방법		
		사례1	사례2	사례3
일일 전력사용량(kWh)	21.32	23.96	21.32	18.64
최대시간대 부하사용량(kWh)	6.15	5.55	4.75	3.33
평균 PMV	0.37	0.16	0.32	0.46
일일 전기요금(원)	3,052	3,255	2,841	2,442
요금 변화율(%)		6.7	-6.9	-20.0

의 쾌적도를 증시한 사례 1을 제외하고는 모든 최적부하제어 방법에서 전기요금이 절감되었음을 확인할 수 있다. 사례1은 주거자 만족도계수( $\lambda_{user}$ )가 0.8로써 주거자는 요금절감보다는 주거 만족도를 중요시 하는 경우로 기존 방법에 비하여 전기요금은 증가하였지만 가장 우수한 실내 쾌적도를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 제안된 최적부하제어 방법을 적용한 3가지 모든 사례에서 기존방법에 비하여 최대부하 시간대(12, 14~17시) 전력사용량의 합이 절감되는 것으로 나타나 전력요금의 절감과 더불어 최대수요감축 효과도 얻을 수 있음을 볼 수 있었다.

### 3.3 1개월 부하제어결과

이번 절에서는 2011년 7월의 기상데이터 및 SMP 데이터를 이용하여 기존방법과 제안된 부하제어방법에 대한 한 달간의 시뮬레이션 결과를 검토하였다. 시뮬레이션 결과는 아래의 표 3과 같다.

표 3 7월의 시뮬레이션 결과 비교  
Table 3 Comparison of the simulation results for the month of July

제어 방식	기존방법	제안된 부하제어방법		
		사례1	사례2	사례3
월 전력사용량(kWh)	517.9	691.0	528.7	440.9
평균 PMV	0.41	0.14	0.28	0.45
월 전기요금(원)	62,365	80,852	60,620	51,728
요금 변화율(%)		29.6	-2.8	-17.0

1일 부하제어 결과와 유사하게 사례1을 제외한 사례2, 사례3에서의 요금절감 효과를 보여주는 것으로 나타났으며, 특히 사례2의 경우 기존방법에 비하여 보다 쾌적한 PMV값을 보이는 동시에 전기요금 또한 절감된 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안된 부하제어 전략은 냉방장치를 주요 제어 대상으로 했기 때문에 주택에서의 냉방장치 사용시간 및 빈도에 따라 그 효과가 달라질 수 있을 것으로 판단되며 냉방기기의 사용이 빈번한 하절기 피크 시에는 더 많은 전기요금 절감효과가 나타날 것으로 예상된다. 또한 표 3의 결과에서 보듯이 목표 쾌적도를 적절히 조정한다면 상황에 따라 원하는 수준의 전기요금 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 보여진다.

## 4. 결론

최근의 전력수요의 안정화 및 효율적인 소비를 유도하기 위한 방안으로 실시간 전기요금의 적용을 고려하고 있다. 그러나 보다 효과적인 에너지관리시스템 및 최적의 부하제어 기법이 마련되어야 실시간 전기요금 도입, 스마트그리드의 보급 확대 등이 이루어질 것으로 판단된다. 또한 전기요금 또는 전력사용량의 절감에 초점을 맞추어서 개발된 기존의 주택용 부하제어 방법 및 EMS 알고리즘은 이제 주거자의 만족도도 함께 고려할 수 있는 보다 진보된 방식으로 개선이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 주택에서의 주거자들의 주거 만족도 성향도 함께 고려할 수 있는 새로운 방식의 최적 부하제어방법을 제안하였다. 제안된 부하제어 방법은 변동하는 실시간 전기요금에 따라 최적의 부하운전 스케줄을 계획함으로써 주거자에게 최대한의 전력요금 절감 효과를 제공하며, 피크시간대의 최대부하 감소도 유도할 수 있다. 이와 함께 제안된 부하제어 방법은 부적절한 부하제어로 인한 주거자들의 실내 쾌적도 저하를 최대한 억제할 수 있도록 하였다. 또한 지극히 개인적인 성향 및 기준에 따라 결정된 주거자의 실내 만족도 수준을 반영할 수 있도록 본 연구에서는 주거자 만족도계수를 도입하여 다양한 주거자의 개별적인 성향을 반영하고자 하였다. 사례연구를 통하여 제안된 부하제어 방법은 주거자의 쾌적도를 만족하는 범위내에서 실시간 전기요금 단가의 변동에 따라 최적의 부하운전 스케줄을 계획함으로써 일반적인 부하제어 방법과 비교할 때, 주거자의 만족도와 경제성을 모두 높일 수 있음을 입증하였다.

### 감사의 글

본 논문은 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 수행된 연구 결과입니다. (과제번호-120140230).

### References

[1] KEMCO[Online], Available: <http://www.kemco.or.kr/>  
[2] LLC Working Group 2Measurement and Evaluation Committee, and California Edison Company, Apr, "Demand response program evaluation-Final report

Quantum Consulting Inc. and Summit Blue Consulting”, 2005

- [3] M. Ann-Piette, G. Ghatikar, S. Kiliccote, D. Watson, E. Koch, and D. Hennage, “Design and operation of an open, interoperable automated demand response infrastructure for commercial buildings,” J. Comput. Inf. Sci. Eng., vol. 9, pp. 1 - 9, Jun. 2009.
- [4] ISO Standard 7730, “Ergonomics of the thermal environment Analytical calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.”, 2005
- [5] Chenxu Duan, Xudong Ding, Fenggang Shi, Xianhua Xiao, Peiyong Duan, “PMV-based Fuzzy Algorithms for Controlling Indoor Temperature” Industrial Electronics and Applications, pp 1492-1496, 2011
- [6] KSGI[Online], Available: <http://www.smartgrid.or.kr/>
- [7] Constantopoulos, “ESTIA: A Real-time Consumer control Scheme for Space Conditioning Usage Under Spot Electricity Pricing.” Computers Operations Research, vol 19, no. 8, pp 751-765, 1991
- [8] The MathWorks<sup>TM</sup>, “Optimization Toolbox<sup>TM</sup> 4 User’s Guide”
- [9] KMA[Online], Available: <http://www.kma.go.kr/>
- [10] KPX[Online], Available: <http://www.kpx.or.kr/>
- [11] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Standard: ANSI/ASHRAE 55-1992

## 저 자 소 개



### 전 정 표 (全 鼎 杓)

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 졸업. 2011년 2월 동 대학원 전기전자공학 졸업(석사). 2011년 3월 ~ 현재 동 대학원 전기전자공학부 박사과정.

E-mail : jeong823@kangwon.ac.kr



### 김 광 호 (金 光 鎬)

1966년 1월 17일생. 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월 ~ 현재 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 교수

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr