

# 신재생에너지 단독주택 모델 냉방운전의 선형계획법 기반 운전 최적화 연구

## Optimal Cooling Operation of a Single Family House Model Equipped with Renewable Energy Facility by Linear Programming

신영기(Younggy Shin)<sup>1†</sup>, 김의중(Eui-Jong Kim)<sup>2</sup>, 이경호(Kyoung-ho Lee)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 기계공학과, <sup>2</sup>인하대학교 건축공학과, <sup>3</sup>한국에너지기술연구원

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22201, Republic of Korea

<sup>3</sup>Solar Thermal Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Republic of Korea

(Received August 8, 2017; revision received October 26, 2017; Accepted: October 27, 2017)

**Abstract** Optimal cooling operation algorithm was developed based on a simulation case of a single family house model equipped with renewable energy facility. EnergyPlus simulation results were used as virtual test data. The model contained three energy storage elements: thermal heat capacity of the living room, chilled water storage tank, and battery. Their charging and discharging schedules were optimized so that daily electricity bill became minimal. As an optimization tool, linear programming was considered because it was possible to obtain results in real time. For its adoption, EnergyPlus-based house model had to be linearly approximated. Results of this study revealed that dynamic cooling load of the living room could be approximated by a linear RC model. Scheduling based on the linear programming was then compared to that by a nonlinear optimization algorithm which was made using GenOpt developed by a national lab in USA. They showed quite similar performances. Therefore, linear programming can be a practical solution to optimal operation scheduling if linear dynamic models are tuned to simulate their real equivalents with reasonable accuracy.

**Key words** Renewable energy(신재생에너지), Optimization(최적화), Linear programming(선형계획법), PV arrays(태양광 전지), Thermal storage tank(축열조)

† Corresponding author, E-mail: ygshin@sejong.edu

### 기호설명

$A$	: matrix	$k$	: 현재 시점 [hr]
$C$	: 배터리 충전량 [J], 열용량 [J/°C]	$lb$	: lower bound
$c$	: 전력요금제 [won/kWh]	$N_B$	: 배터리 수
$Ch$	: 충전 전력 [W]	$P$	: electric power [W]
$D$	: 수요 전력(= $P_{home} + P_{ac}$ ) [W]	$Q$	: heat [W]
$Dch$	: 방전 전력 [W]	$RC_B$	: Battery rated capacity [W]
$DOD$	: Depth of discharge	$T$	: temperature [°C]
$e$	: 온도오차 [°C]	$x$	: 의사결정 변수
$EPS$	: 과잉공급전력 [W]	$ub$	: upper bound
$K$	: 목적함수 계수 행렬	$\Delta t$	: 시간 간격 [sec]

<b>하첨자</b>		<i>max</i>	: 최대
<i>a</i>	: ambient	<i>o</i>	: outside
<i>ac</i>	: air conditioning	<i>PV</i>	: photovoltaic
<i>B</i>	: battery	<i>s1, s2</i>	: solar(1 : 건물 외벽, 2 : 실내)
<i>eq</i>	: 등식	<i>st</i>	: storage tank
<i>grid</i>	: main grid	<i>set</i>	: 설정
<i>others</i>	: home use except for heating and cooling	<i>w</i>	: 거실을 둘러싼 벽체
<i>i</i>	: inside home	<i>z</i>	: 거실 구역 내 공기와 인테리어

## 1. 서 론

화석연료 사용을 줄이기 위해 신재생에너지 설비의 실용적 보급을 위한 노력이 정책 측면에서 많이 개발되고 있다. 현재는 태양광 발전, 지열 열펌프 등의 설비가 단독으로 운영되고 있으며 이들 설비를 조합하여 최적운전계획을 수립하는 실용화 연구가 다소 부진하다. 서 등<sup>(1)</sup>은 최적운전 계획 알고리즘을 제안한 바 있다. 그러나 그 연구성과는 QP(Quadratic Programming)에 의한 단독 주택 내 신재생에너지 설비의 최적운전 가능성을 확인한 것이고 실용화를 위해서는 추가의 연구가 필요했다.

본 연구는 실용화의 관점에서 서 등<sup>(1)</sup>이 제안한 알고리즘을 가상 테스트베드인 에너지플러스 기반의 단독주택 시뮬레이터에 직접 적용하여 에너지 절약 효과를 정량화하였다. 그리고 제안한 최적화 알고리즘이 이상적인 최적운전계획 대비 어느 수준인지를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이상적인 최적운전은 비선형 시스템의 경우 사실상 모순되는 표현이나 일반적인 최적화 기법으로 잘 알려진 GenOpt<sup>(2)</sup> 알고리즘을 이에 근사한다고 가정하고 동일한 에너지플러스 기반 단독주택 모델에 적용한 결과와 비교하였다.

## 2. EnergyPlus 기반 신재생에너지 주택 모델

### 2.1 주택 및 신재생에너지 설비 모델

Fig. 1은 건물 면적이 186 m<sup>2</sup>인 단독주택 모델을 나타낸다. 주택은 거실, 차고 및 다락의 3개 존으로 구성되며 거실 공간만 공조를 한다. 냉난방을 위해 지열 열펌프 설비를 적용하였으며 기후데이터는 EnergyPlus(EP)가 epw 포맷으로 제공하는 서울지역 자료를 적용하였다. 태양전지판은 남향에 위치한 지붕에 88.11 m<sup>2</sup>의 면적으로 설치하였다. 태양전지판 성능은 EnergyPlus DB에 구축되어 있는 BP Solar BP275 모델을 적용하였다.

Fig. 1에 사용된 주택모델은 EnergyPlus가 제공하는 SingleFamilyHouse\_TwoSpeed\_ZoneAirBalance.idf라는 기준 주택모델 파일에 본 연구를 위한 신재생에너지 설비인 지열 열펌프, 태양열, 태양광 발전 설비를 추가한 것이다. 따라서 주택 단열구조는 미국의 단열 기준을 충족한다. 거실 환기의 경우 국내법 기준에 맞게 0.5 ACH(air changes per hour)를 적용하였다. 재실 스케줄 및 기기 발열 등에 의한 내부 발열조건은 기준 모델 파일의 조건을 그대로 사용하였다.

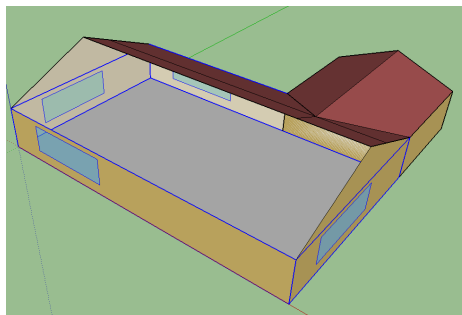


Fig. 1 EnergyPlus model of a single family house.

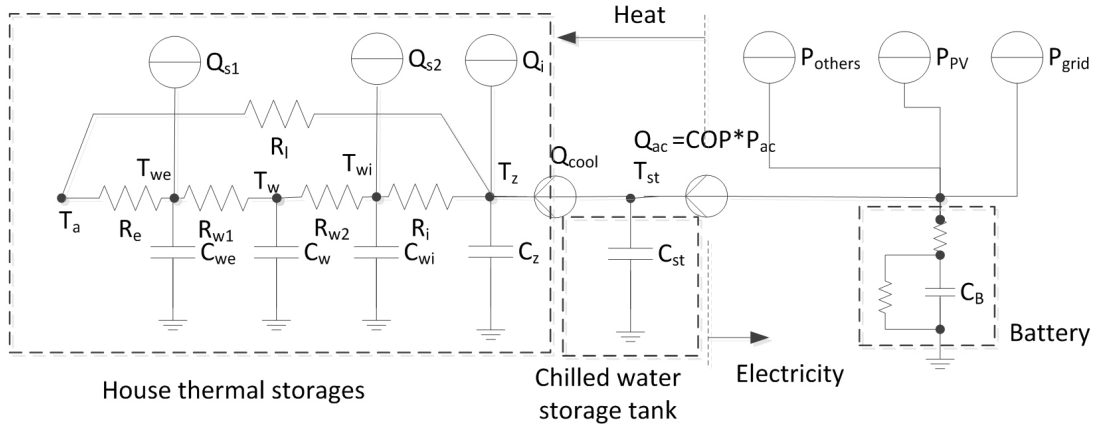


Fig. 2 Linearized thermal model for optimal operation.

### 2.2 거실 온도 거동 선형 근사 모델

Fig. 2는 Fig. 1의 EP 주택모델을 선형 RC 모델로 단순화한 구조를 나타낸다. 복잡한 구조의 건물도 열적 거동의 측면에서는 단순화된 RC 모델로 근사할 수 있다고 알려져 있다.<sup>(3)</sup> Fig. 2에서 House thermal storages는 거실의 축열 거동을 모사하는 것으로서  $Q_{s1}$ ,  $Q_{s2}$ 는 각각 건물 외벽과 실내에 입사되는 태양 복사에너지로서 건물 방향, 창문 위치를 고려하여 계산되었고,  $Q_i$ 는 실내 내부 발열이다. 벽체의 단열 때문에 외벽, 중간벽, 내벽에 해당하는  $T_{we}$ ,  $T_w$ ,  $T_{wi}$ 의 세 개 온도로 표현하였고  $T_z$ 는 거실온도이다. 거실온도의 동적 거동은 외기 온도, 일사 및 냉방코일 제거부하  $Q_{cool}$ 에 의해 결정된다. 7월 15일부터 보름간의 EP 시뮬레이션 결과를 Fig. 2에 제시된 Grey model이 근사하게 모사하도록 유전알고리즘을 적용하여 RC 계수를 구하였다. Fig. 2에는 열적 거동과 전력 관리가 통합되어 있는데, 주택 내 전력 관리시스템은 태양광 발전( $P_{PV}$ ), 배터리( $C_B$ ), 냉방전력( $P_{ac}$ ), 냉방을 제외한 기타 소비전력( $P_{others}$ ) 및 외부전력( $P_{grid}$ )의 연결계통을 나타내고 있다. RC 모델의 열에너지 보존방정식은 다음과 같다. 식(1)~식(4)는 열저장 요소인 벽체( $C_{we}$ ,  $C_w$ ,  $C_{wi}$ ) 및 실내공기( $C_z$ )에 출입하는 열원( $Q$ )과 온도차와 열저항( $R$ )에 의한 열전달의 열평형 관계식을 표현하고 있다.

$$C_{we} \frac{dT_{we}}{dt} = aQ_{s1} + \frac{T_a - T_{we}}{R_e} + \frac{T_w - T_{we}}{R_{w1}} \quad (1)$$

$$C_w \frac{dT_w}{dt} = \frac{T_{we} - T_w}{R_{w1}} + \frac{T_{wi} - T_w}{R_{w2}} \quad (2)$$

$$C_{wi} \frac{dT_{wi}}{dt} = bQ_{s2} + \frac{T_w - T_{wi}}{R_{w2}} + \frac{T_z - T_{wi}}{R_i} \quad (3)$$

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = Q_i - Q_{ac} + \frac{T_{wi} - T_z}{R_i} + \frac{T_a - T_z}{R_l} \quad (4)$$

### 2.3 축열조 및 배터리 동적 거동 선형 모델

축열조의 냉수는 거실 냉방부하를 처리하기 위해 열교환을 하고 그 온도를 일정 범위로 유지하기 위해 지열 열펌프가 작동하여 필요한 열을 제거한다. 축열조 온도 조절에 열펌프 전력이 소비되므로 전력의 함수로 표현되어야 한다. EP 시뮬레이션 데이터에 대하여 모사 정확도가 높은 다음과 같은 선형 모델의 계수를 최소 오차 자승법으로 구하였다.

$$\dot{Q}_{ac}[k] = a_1 P_{ac}[k] + b_1 T_{st}[k] \quad (5)$$

$$T_{st}[k] = a_2 T_{st}[k-1] + b_2 (Q_{cool}[k] - \dot{Q}_{ac}[k]) \quad (6)$$

배터리는 충전 및 방전이 가능한 전력이 충전량(SoC; state of charge)의 크기에 따라 변하는 비선형성을 나타낸다.<sup>(4)</sup> 본 연구의 일차적 목적은 선형 모델에 기반한 최적 운전의 타당성을 연구하는 것이므로 배터리 용량을 충분히 키워서 충전전 전력 크기의 제한이 없게 하였다. 이 경우도 EP 배터리 충전전과 충전량과의 시뮬레이션 결과를 학습하여 다음과 같은 배터리 충전량 동적 거동 모델을 수립하였다.

$$C_B[k] = a_3 C_B[k-1] + b_3 Ch[k] - d_3 Dch[k] \quad (7)$$

### 3. 최적화 운전 알고리즘

#### 3.1 서론

설비운전에 에너지 저장요소가 포함된 경우에는 미래 시점에서의 에너지 수요와 공급을 예측하여 비용을 최소화하도록 설비 운전계획을 세워야 한다. 따라서 일차적으로 미래의 수요와 공급을 예측할 수 있는 기술이 개발되어야 하지만 이는 또 다른 큰 주제이므로 본 연구에서는 미래의 수요와 공급은 정확히 알려져 있다고 가정한다. 그 다음 단계인 최적운전 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서는 실시간 운전이 가능한 실용적 기법인 선형계획법(Linear Programming; LP)을 적용한다. 그리고 비선형 최적해를 구하기 위한 범용 탐색 알고리즘인 GenOpt의 Hooke-Jeeves 알고리즘<sup>(2)</sup>을 적용한 결과를 이상적 최적운전 결과로 가정하고 이에 대하여 상대적 성능을 정량화하였다. 비선형 최적화 기법들은 결과는 우수하지만 시간이 많이 걸려 설비의 최적운전을 위한 실용적 기법이 되지는 못한다.

#### 3.2 선형계획법의 설계

선형계획법의 목적함수는 전력비용을 최소화하는 것이다. 비용함수  $J$ 의 표준형은 다음과 같다.

$$J = \min \left( \sum_{k=1}^n c[k] P_{grid}[k] \right) \quad (8)$$

여기서 전력비용은

$$c[k] = \begin{cases} 56.1 & (0 \leq k \leq 9) \\ 109.0 & (rest\ of\ hours) \\ 191.1 & (10 \leq k \leq 12, 13 < k \leq 17) \end{cases} \quad (9)$$

위의 비용함수를 최소화하면서 미래의 24시간에 대하여 결정해야 할 의사결정변수 벡터  $x$ 는 다음과 같다.

$$x = [T_z \ Q_{cool} \ P_{ac} \ Ch \ Dch \ P_{grid} \ C_B \ T_{st} \ T_{we} \ T_w \ T_{wi}]^T \quad (10)$$

최적해를 구하기 위해서는 전절에서 서술한 물리 관계식들을 아래의 표준형 중 등식에 맞추어 정리하고 상한과 하한의 범위를 설정해 준다.

$$Ax \leq b \quad (11)$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (12)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (13)$$

위의 부등식은 전력의 수요와 공급의 균형을 표현하는데 적용하였는데, 수요와 공급이 모든 시간에 대하여 일치하는 것은 가혹한 조건이라 최적해가 존재하지 않는다. 따라서 과부족 전력(EP; Excessive Power Supply)을 1[W]로 하여 수요 공급 편차의 상한과 하한을 설정한 다음의 부등식을 적용하였다.

$$P_{PV}(k) - Ch_B(k) + Dch_B(k) + P_{grid}(k) - D(k) \leq EPS \tag{14}$$

$$P_{PV}(k) - Ch_B(k) + Dch_B(k) + P_{grid}(k) - D(k) \geq -EPS \tag{15}$$

## 4. 최적화 계산 결과

### 4.1 거실 냉방부하 동적 모델의 정확도

Fig. 3은 8월 2일의 EP 거실 실내온도 제어와 그에 따른 냉방부하 그리고 열펌프 소비전력 거동을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 EP가 아닌 선형 모델의 동적 거동을 나타낸 것이고 Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에서 제시된 운전계획대로 EP 거실 모델을 구동한 결과이다. 선형 모델의 모사 정확도가 높을수록 최적운전 계획에 의한 비용 절감효과가 크므로 정확도 개선이 중요하다. 선형 계획법에서 전력 단가가 낮은 낮 12시와 오후 6시 이후에 열펌프 사용을 늘리고 있음을 알 수 있다. EP 모델은 선형 모델과 차이가 있어 정확히 일치하지는 않지만 유사한 동적 거동임을 확인할 수 있다. Fig. 3의 냉방부하에서 초기 8시간 동안 다소 차이가 있는 이유는 선형 모델 계수 학습에 적용된 훈련용 데이터의 실내온도가 25℃로 정적인 Fig. 3보다 24℃에서 26℃ 사이를 일일 주기로 동적으로 변화였기 때문이다.

### 4.2 최적운전 계획 성능 평가

GenOpt는 설비 별 작동 범위 내에서 다양한 조합의 설비운전 입력을 EP에 입력하고 그 결과를 분석하여 민감도에 따라 개선된 운전 조합을 찾아 가는 방식으로 비선형 시스템의 최적해를 탐색해가는 알고리즘이다. 입력의 범위, 초기치, 범위 세분화 정도에 따라 다양한 결과가 나올 수 있다. 본 연구에서는 최적운전 해를 찾기 위해 1,287회의 계산을 수행했으며 범용 노트북 컴퓨터로 4시간 35분이 소요되었다.

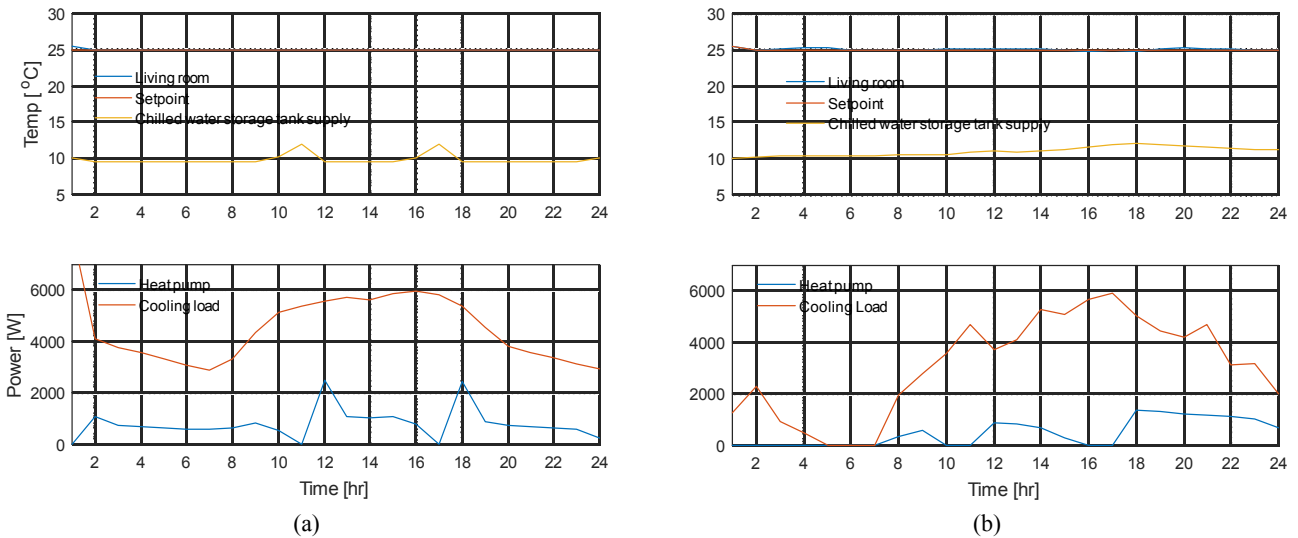


Fig. 3 Cooling load : (a) Linear model (b) EnergyPlus simulation.

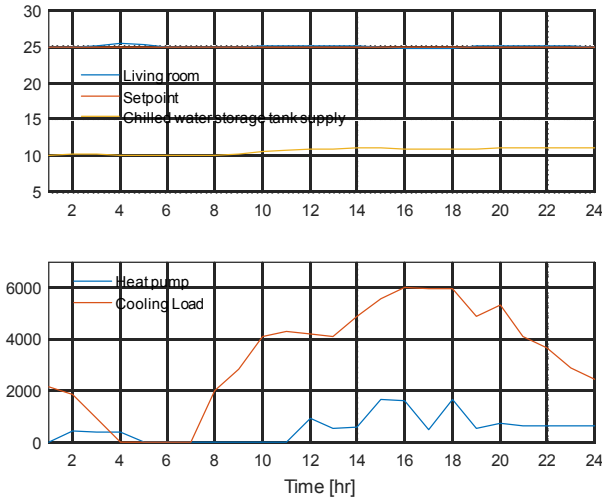


Fig. 4 Cooling load : Global optimization by GenOpt.

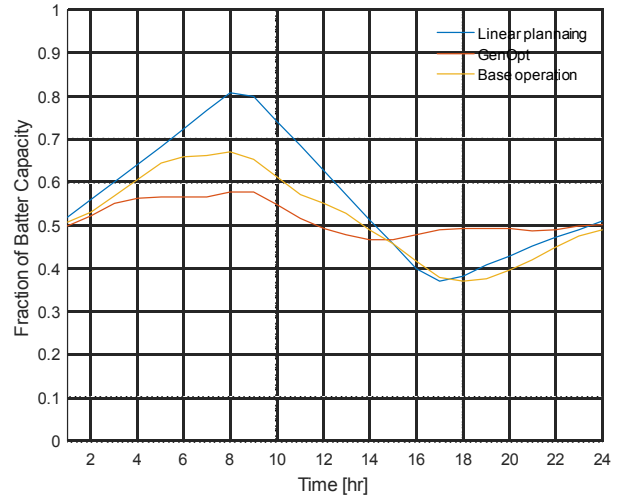


Fig. 5 Comparison of battery charging strategies.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일 조건에서 GenOpt로 최적인전계획을 수립하여 EP를 구동한 결과이다. 외형상으로는 냉방부하와 열펌프 사용전력의 두드러진 차이를 파악하기 어렵다. 이 기간 중 이들을 합산한 결과를 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 GenOpt의 경우 냉방부하는 2 kWh, 열펌프 소비전력은 2.5 kWh의 감소를 보이고 있다. Fig. 5는 배터리의 충방전 운전결과를 나타낸다. 그림에 의하면 전력요금이 비싼 오전 8시부터 오후 5시 사이의 시기에 방전이 이루어지고 나머지 시간에 주로 충전이 이루어짐을 알 수 있다. GenOpt는 배터리 충방전을 최소화하는 반면에 선형계획법은 큰 편이다.

방전 하한을 0.37로 설정하였으므로 선형계획법은 충방전 용량을 최대한 활용한 반면 GenOpt는 최소화하는 방향으로 전략을 펴고 있다. GenOpt의 다른 시도를 유도하기 위해 다양한 초기치 등을 적용하여도 결과는 유사하였다. 배터리의 충방전 효율에 의한 전력손실 대비 충방전에 의한 저렴한 전력요금제로의 이동에 따른 이득에 대한 구체적 검토가 필요하나 그 차이가 크지 않아 각기 다른 전략을 추구하였다고 판단된다.

Table 1은 기본 운전, 선형계획 운전과 GenOpt 기반 운전 결과에 대한 정량적 비교를 나타낸다. 기본 운전은 EP 자체의 제어 로직과 사용자가 요금제를 감안하여 임의로 설정한 충방전 전략에 따른 것이다. 메인 그리드 소비전력량에 있어서 선형계획 운전과 GenOpt 운전이 큰 차이를 보이는데 이는 각기 다른 전략을 구사하였기 때문이다. 배터리 충방전의 경우에서도 보는 바와 같이 GenOpt는 전력 사용 자체를 최소화하는 방향으로 운전 하였고 선형계획법은 식(9)에 제시된 실시간 전력요금제를 활용하여 전력사용량보다는 전력요금 총액 절감을 최적화한 것으로 보인다. 그 결과 전력요금이 비싼 시간대에는 전력을 메인 그리드에 팔고 저렴한 요금대에는 전력을 상대적으로 많이 매입한 것으로 판단된다.

본 연구의 주요 관점은 선형 모델에 의해 거실 냉방부하의 복잡한 동적 거동을 비교적 유사하게 모사할 수 있었다는 점이며 그 외 운전 전략의 수립에 있어 선형계획과 GenOpt가 차이를 보이는 점은 앞으로 더 연구를 통해 원인을 분석하고 그 차이를 줄이는 방향으로 추가 연구를 진행할 예정이다.

본 연구의 한계는 기후는 서울 지역을 적용하였으나 평가 대상 건축물의 설계가 미국 기준으로서 국내 기준과 다소 차이가 날 수 있다는 점이다. 따라서 실용적 최적화 운전을 위해서는 건축물 설계 변경을 고려해야 한다.

Table 1 Performance comparison

Operation	Base	LP optimal	GenOpt optimal
Cooling load [kWh]	80.9	80.2	78.2
Heat pump electricity [kWh]	15.4	15.1	12.6
Grid power purchased [kWh]	11.7	15.1	4.3
Battery charged power [kWh]	-0.44	-2.6	-0.32
Electricity cost [KRW]	-1,764	-2,953	-3,238

## 5. 결 론

본 연구에서는 EP 시뮬레이션을 선형모델로 근사하여 최적운전을 수행하는 선형계획법의 실용성을 평가하고자 하였다. 성능 평가를 위해 global optimization에 상응하는 GenOpt 기반의 최적운전 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 거실 냉방부하를 선형 모델로 근사하는 것이 가능하다.
- (2) 구속조건의 적절한 설계에 의해 선형계획법에 의한 운전 결과가 비용면에서는 global optimization과는 유사하였으나 냉방 부하를 제외한 나머지 설비의 운전계획에서는 다소 차이가 있었고 그 원인은 향후 추가 연구를 통해 규명할 필요가 있다.
- (3) 단독주택에 대한 일반화된 선형계획 모델이므로 비용 최소화 또는 전력소비 최소화 등의 다양한 비용함수 설정과 그에 따른 운전계획 수립이 실시간으로 구현 가능하다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B7-2423-01).

## References

1. Seo, J. A., Shin, Y., and Lee, K. H., 2016, Study on optimal control algorithm of electricity use in a single family house model reflecting PV power generation and cooling demand, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 10, pp. 381-386.
2. Wetter, M., 2016, GenOpt Generic Optimization Program User Manual Version 3.1.1, Lawrence Berkeley National Laboratory.
3. Harish, V. S. K. V. and Kumar, A., 2016, Reduced order modeling and parameter identification of a building energy system model through an optimization routine, Applied Energy, Vol. 162, pp. 1010-1023.
4. EnergyPlus, 2016, EnergyPlus Engineering Reference, pp. 1593-1597.