

# 넷 제로에너지주택의 부하매칭에 관한 연구

김법전\* · 임희원\* · 김덕성\*\* · 신우철\*\*\*\*

\*대전대학교 대학원 건축공학과

\*\*솔라테크(주)

\*\*\*대전대학교 건축공학과

## A Study of Load Matching on the Net-Zero Energy House

Kim Beob-Jeon\* · Lim Hee-Won\* · Kim Deok-Sung\*\* · Shin U-Cheul\*\*\*\*

\*Department of Architectural Engineering, Graduate School, Daejeon University

\*\*Solar Tech CO.,LTD

\*\*\*Department of Architectural Engineering, Daejeon University

†Corresponding author: shinuc@dju.ac.kr

### Abstract

nZEH (net-Zero Energy House) is defined as a self-sufficient energy building where the sum of energy output generated from new & renewable energy system and annual energy consumption is zero. The electricity generated by new & renewable energy system with the form of distributed generation is preferentially supplied to electrical demand, and surplus electricity is transmitted back to grid. Due to the recent expansion of houses with photovoltaic system and the nZEH mandatory by 2025, the rapid increase of distributed generation is expected. Which means, we must prepare for an electricity-power accident and stable electricity supply. Also electricity charges have to be reduce and the grid-connected should be operated efficiently. The introduction of ESS is suggested as a solution, so the analysis of the load matching and grid interaction is required to optimize ESS design. This study analyzed the load matching and grid interaction by expected consumption behavior using actual data measured in one-minute intervals. The experiment was conducted in three nZEH with photovoltaic system, called all-electric houses. LCF (Load Cover Factor), SCF (Supply Cover Factor) and  $f_{grid}$  (Grid Interaction Index) were evaluated as an analysis indicator. As a result, LCF, SCF and  $f_{grid}$  of A house were 0.25, 0.23 and 0.27 respectively; That of B house were 0.23, 0.23, 0.19, and that of C were 0.20, 0.19, 0.27 respectively.

**Keywords:** 계통상호작용(Grid Interaction), 분산발전(Distributed Generation), 부하매칭(Load Matching), 넷 제로에너지주택(net-Zero Energy House)

### 기호설명

$d(t)$  : 수전전력 (kW)

$e(t)$  : 송전전력 (kW)

$f_{grid}$  : 계통상호작용지표 (-)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.38, No.4, pp.55-66, August 2018  
<https://doi.org/10.7836/kses.2018.38.4.055>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 12 June 2018

Revised: 05 July 2018

Accepted: 10 July 2018

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$g(t)$ : 발전전력(kW)

$l(t)$ : 전기부하 (kW)

$ne(t)$ : 계통 순전력 (kW)

## 그리스 문자

$\gamma_{load}$ : 부하커버팩터 (-)

$\gamma_{supply}$ : 공급커버팩터 (-)

## 1. 서론

넷 제로에너지주택(net-Zero Energy House, nZEH)은 연간 에너지 소비와 신재생에너지시스템(New & Renewable Energy System)의 생산된 에너지 합이 0이 되는 에너지 자립주택을 의미한다. 넷 제로에너지주택의 기술요소는 패시브(Passive) 요소와 액티브(Active) 요소를 결합하여 에너지 소비를 최소화하고 태양광발전 시스템이나 태양열시스템, 연료전지 등과 같은 신재생에너지시스템을 이용하여 에너지를 공급하게 된다. 여기서 계통 연계된 신재생에너지시스템은 소규모 분산발전(Distributed Generation)의 한 형태로, 생산된 전력은 주택의 전력 수요에 우선 공급되며 잉여전력은 계통으로 역 송전된다. 그러나 최근 태양광발전주택의 보급 확대와 2025년 제로에너지건물 의무화 정책에 따라 이와 같은 분산발전의 급격한 증가가 예상되며, 이 과정에서 계통연계 운영에 따른 전압변동, 주파수 변동으로 인한 계통 불안정, 고장이나 휴전으로 계통분리 시 감전 위험<sup>1)</sup> 등이 문제점으로 제기되고 있다. 이에 효율적인 계통연계 운영과 전력사과의 대비, 전력공급의 안정성 등의 해결 방안으로 에너지저장시스템(Energy Storage System, 이하 ESS)의 도입과 더불어 분산발전의 형태로 넷 제로에너지주택을 평가하기 위한 부하매칭과 계통 상호작용(Load Matching and Grid Interaction, 이하 LMGI)의 정량적 지표가 제안되고 있다<sup>2)</sup>.

이와 관련하여 Voss et al.<sup>3)</sup>은 IEA Task 40/Annex 52를 통해 수행된 연구일환(Subtask A)으로 제로에너지빌딩의 LMGI에 대한 정량적 지표를 제안하고 그 결과를 예측하였다. 이어 Salom et al.<sup>4)</sup>은 가장 일반적으로 언급되는 LMGI의 정량적 지표를 소개하고 사례건물에 적용하였으며, 그 결과 제로에너지빌딩의 다양한 부하관리전략(Load Management Strategies)에 대한 평가수단으로 LMGI 지표가 갖는 유효성을 강조하였다. 또한 Salom et al.<sup>5)</sup>은 시뮬레이션과 실측된 5개의 사례분석을 통해 제로에너지건물에 적용된 다양한 LMGI 정량적 지표의 장단점을 평가하고, 사용자 그룹에 가장 적합한 지표를 제안하였다.

한편 2017년부터 계약전력 1천 kW 이상의 신축 공공기관에 대해 계약전력 5% 이상 규모의 ESS 설치를 의무화하고 있는 국내에서도, 전력 소비 비중이 13.3% (2016년 기준)를 차지하는 주택분야(가정용)에 대한 소형 ESS 도입이 점차 제기되고 있다<sup>6)</sup>. 이에 따라 현저히 떨어지는 소형 ESS에 대한 경제성을 보완하기 위해 설치보

조금과 ESS 기본요금 및 충전전력 할인, ESS 자가소비 인센티브 제공 등의 논의와 더불어 ESS 최적화 설계를 위한 국내 제로에너지주택의 LMGI 관련 실태파악이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 태양광발전시스템이 설치된 3가구 전전화주택(All Electric Houses)을 대상으로 제로에너지주택에서 예상되는 다양한 에너지 소비 행태에 따른 LMGI를 1분 간격으로 측정된 실측자료를 기반으로 분석하고, ESS 도입에 따른 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실증주택

### 2.1 실증주택현황

Fig. 1은 대전광역시 유성구 죽동(위도 36.38°, 경도 127.32°)에 위치한 실증주택 3가구의 전경을 나타낸 것이다. Table 1과 같이 이들 주택은 거의 동일한 구조 및 규모를 갖는 3층 건물로 정남향으로 배치되어 있으며, 취사와 난방, 급탕을 포함한 모든 에너지를 전기로 사용하고 가스 및 유류 등은 전혀 공급되지 않는 전기에너지 주택이다<sup>7)</sup>.



Fig. 1 Overview of houses

Table 1 Architectural overview

House	A	B	C
Building area (m <sup>2</sup> )	87	87	87
Total floor area (m <sup>2</sup> )	203	194	184

Table 2는 실증주택의 재생에너지시스템의 설치현황을 나타낸 것이다. 모든 주택에는 3 kWp의 계통 연계형 태양광발전시스템과 냉난방 및 급탕 공급을 위한 지열히트펌프시스템이 설치되어 있으며, 그 용량은 A와 C 주택 및 B 주택이 각각 5 RT와 3 RT로 설계되었다. 한편 B 주택은 4 m<sup>2</sup>의 태양열급탕시스템이 추가로 적용되어 있다.

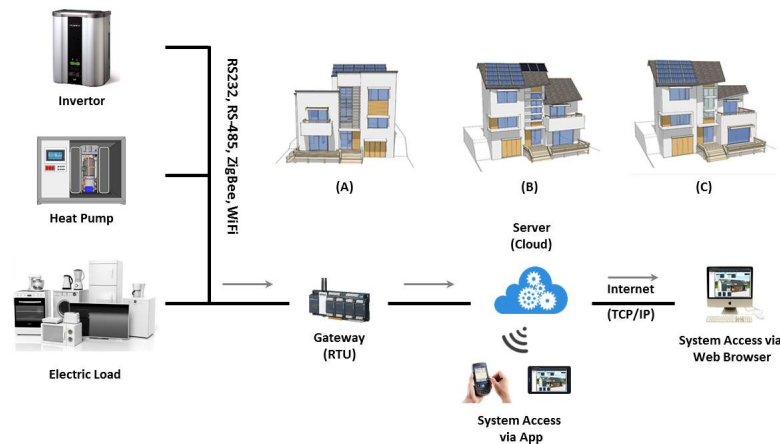
**Table 2** Renewable energy systems

House	A	B	C	Remark
Photovoltaic system (kWp)	3	3	3	
Ground source heat pump (RT)	5	3	5	
Solar hot water system (m <sup>2</sup> )	-	4	-	Evacuated tube collector area

각 주택의 태양광모듈은 30° 경사각의 지붕에 덧댄 형식으로 아스팔트 싱글(Asphalt Shingle) 마감재 상부 가  
대에 통기형으로 설치되었으며, 연간 주변 장애물에 의한 음영발생은 없는 것으로 나타났다.

### 2.2 실증주택 원격모니터링시스템

Fig. 2는 실증주택에 설치된 웹기반 원격 모니터링 시스템 개념도를 나타낸 것이다. 인버터와 각종 센서는  
RS-485와 RS-232C 통신과 연결된 원격단말장치(RTU : Remote Terminal Unit)를 통해 서버 컴퓨터의 데이  
터베이스에 전송되며, 웹서버를 통해 개인 컴퓨터 또는 스마트폰으로도 데이터를 확인할 수 있다.



**Fig. 2** Web-based remote monitoring system

## 3. 실증주택의 에너지성능평가

### 3.1 실증주택의 발전 및 전력소비

Figs. 3~5는 각 주택의 월별 일일 태양광발전량과 전력소비량을 비교한 것이다. 3 가구 모두 동일한 발전 형  
태로 5월 15.5 kWh/day로 가장 많이 발전되었으며, 가장 적은 11월의 5 kWh/day에 비해 3배 이상 증가하였  
다. 이에 반해 전력소비는 태양광발전과 매우 대조적인 형태를 보이고 있다. 모든 주택에서 1월 전력소비가 가  
장 높고 5~6월과 9~10월에 가장 낮은 유사한 분포를 갖고 있으나, 월별 최대 편차는 B 주택의 2.4배에서 C 주  
택의 3.5배까지 나타났으며, 각 주택의 연간 사용량이 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

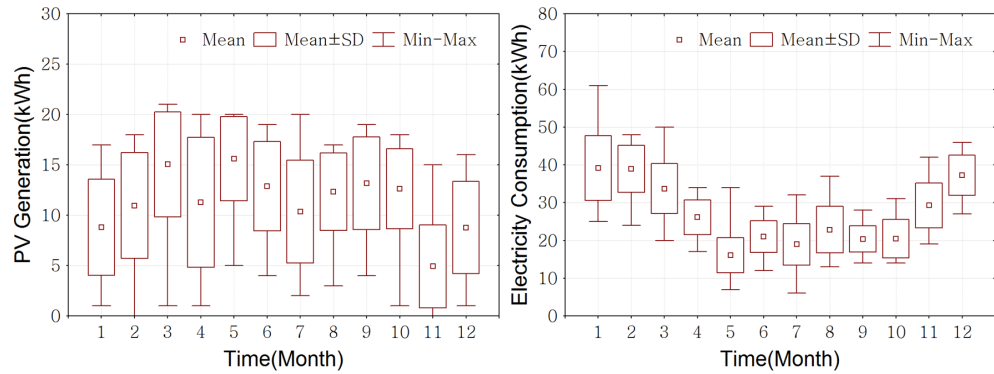


Fig. 3 PV generation (left) and electricity consumption (right) for house A

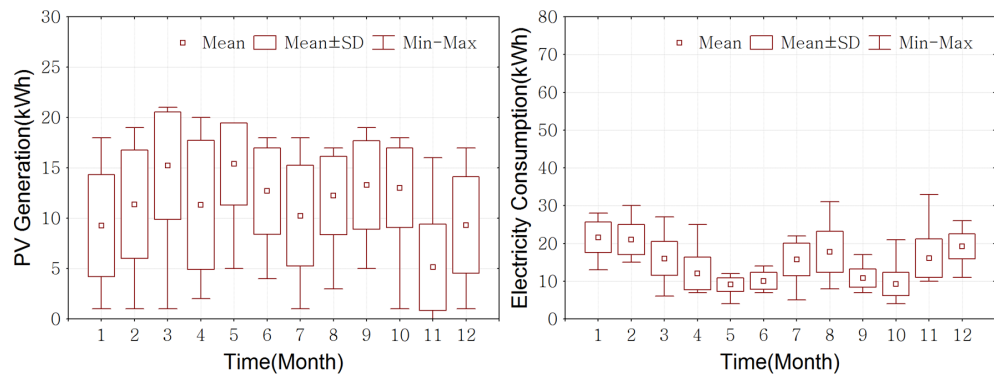


Fig. 4 PV generation (left) and electricity consumption (right) for house B

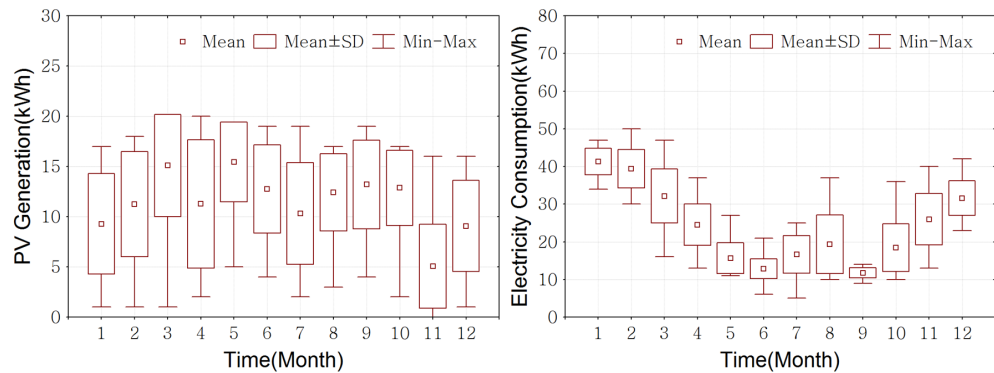


Fig. 5 PV generation (left) and electricity consumption (right) for house C

### 3.2 실증주택 에너지자립율

Table 3은 태양광발전에 따른 실증주택의 연간 에너지자립율(Energy Independence Rate, EIR)을 평가한 것이다. 3 주택의 연간 태양광발전량은 4,112~4,167 kWh로 거의 동일한 반면, 전력소비량은 5,459~10,146 kWh로 매우 상이한 분포를 보이고 있다. 이에 따른 식(1)의 연간 에너지자립율은 A 주택이 40.5%, B 주택 76.3%, C 주택 46.6%로 나타났다.

$$EIR = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} g(t)dt}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} l(t)dt} \tag{1}$$

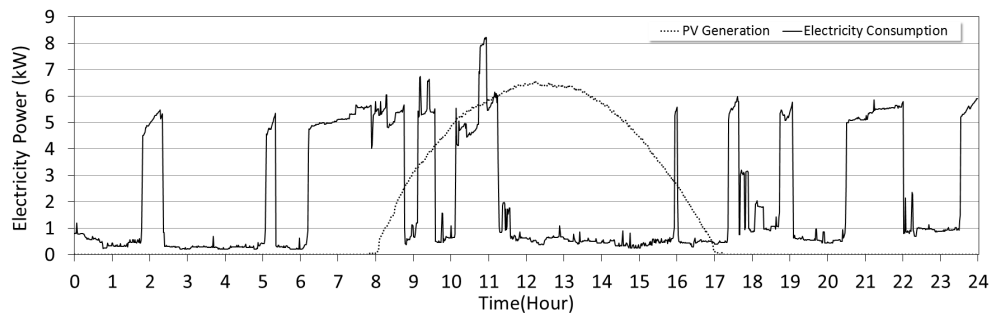
이상의 결과를 통해, 실증주택에 태양광발전시스템이 (1~5kWp) 추가로 설치되는 경우 넷 제로에너지를 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 A와 B, C 주택에 각각 5 kWp와 1 kWp, 4 kWp의 태양광발전시스템을 증설하고 발전량은 기존 설치용량에 비례한다는 전제하에, 이들 실증주택을 넷 제로에너지주택으로 가정하였다.

**Table 3** Energy independence rate

House	Before PV expansion				After PV expansion			
	PV capacity (kW)	PV generation (kWh)	Electricity consumption (kWh)	EIR (%)	PV capacity (kW)	PV generation (kWh)	Electricity consumption (kWh)	EIR (%)
A	3	4,112	10,146	40.5	8	10,280	10,146	101.3
B	3	4,167	5,459	76.3	4	5,556	5,459	101.7
C	3	4,143	8,889	46.6	7	8,977	8,889	100.9

### 3.3 에너지제로주택의 PV 발전 및 전력소비형태

Figs. 6 ~ 8은 A(제로에너지)주택의 계절별 일일 소비전력 및 태양광 발전분포를 나타낸 것이다. 소비전력을 살펴보면 계절별 편차는 있으나 250 ~ 1,000W 전력이 지속적으로 사용되고 있으며, 냉·난방 부하특성에 따라 히트펌프의 작동이 상이한 것을 알 수 있다. 동절기(Fig. 6) 오전 태양광 발전전력은 히트펌프의 난방 작동동력으로 우선 공급되고 오후 대부분 계통으로 송전되는 반면, 하절기(Fig. 8)에는 오전 대부분 계통으로 송전되고, 오후 냉방동력으로 많은 전력이 사용되고 있다. 한편 중간기(Fig. 7)에는 대부분의 태양광 발전전력은 계통으로 송전되고 있다.



**Fig. 6** Electricity consumption and PV generation for selected day in winter season

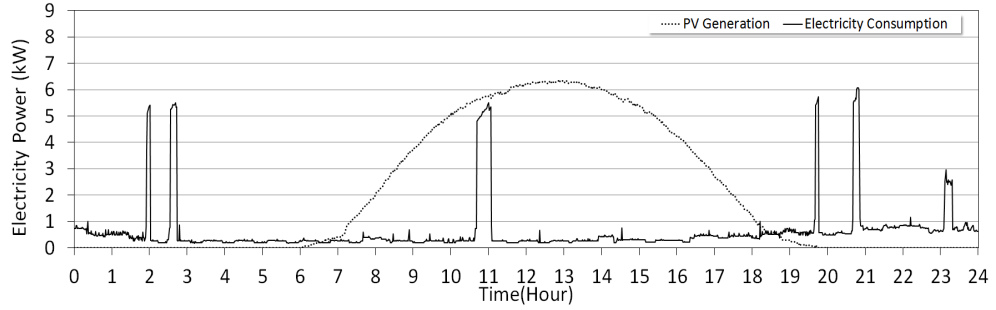


Fig. 7 Electricity consumption and PV generation for selected day in intermediate season

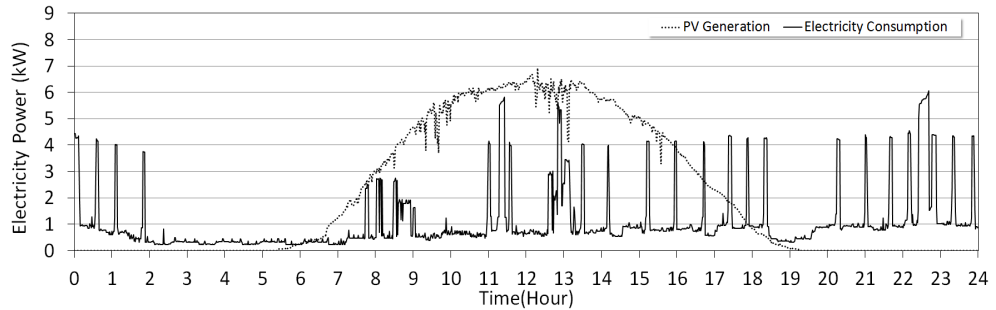


Fig. 8 Electricity consumption and PV generation for selected day in summer season

#### 4. 넷 제로에너지주택의 부하매칭

##### 4.1 분석지표

본 연구에서는 부하매칭(Load Matching)과 계통 상호작용(Grid Interaction)의 정량적 평가 지표로 부하커버팩터(Load Cover Factor, LCF)와 공급커버팩터(Supply Cover Factor, 이하 SCF) 및 계통 상호작용지표(Grid Interaction Index)를 각각 분석하였다.

LCF는 전력 소비량에 실시간으로 공급되는 PV 발전량의 비율을 의미하며 식(2)와 같이 정의된다.

$$\gamma_{load} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} \min[g(t), l(t)] dt}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} l(t) dt} \quad (2)$$

SCF는 태양광 발전량에서 실시간으로 소비되는 전력량의 비율을 나타내며 식(3)과 같이 정의된다.

$$\gamma_{supply} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} \min[g(t), l(t)] dt}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} g(t) dt} \quad (3)$$

계통 상호작용지표,  $f_{grid}$ 는 가장 높은 절대 값으로 정규화(Normalized)된 송전이나 수전된 전력의 변동성을 나타내는 지표로서 식(4)와 같다.

$$f_{grid} = STD\left(\frac{ne(t)}{\max(|ne(t)|)}\right) \quad (4)$$

여기서

$$ne(t) = e(t) - d(t) \quad (5)$$

### 4.2 분석결과

Figs. 9~11은 전술한 계절별 일일 태양광 발전 및 전력소비 형태를 LCF와 SCF로 분석한 것이다. 일조시간이 길고 냉방 전력사용량이 많은 하절기 일평균 LCF는 0.51로 가장 높았으며, 중간기의 0.41과 동절기의 0.25 순으로 나타났다. SCF는 동절기와 하절기에 각각 0.32와 0.26이 되었으며, 중간기가 가장 낮은 0.08로 대부분의 발전전력이 계통으로 송전되는 것을 의미한다.

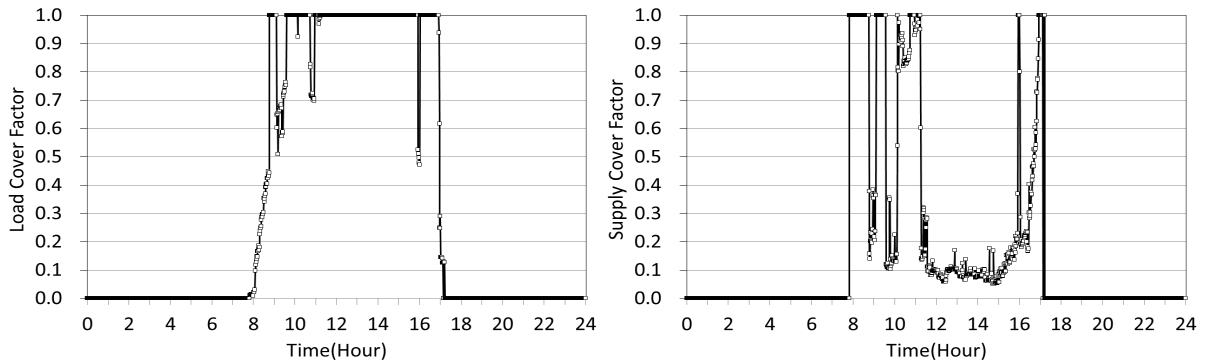


Fig. 9 Load cover factor (left) and supply cover factor (right) for selected day in winter season

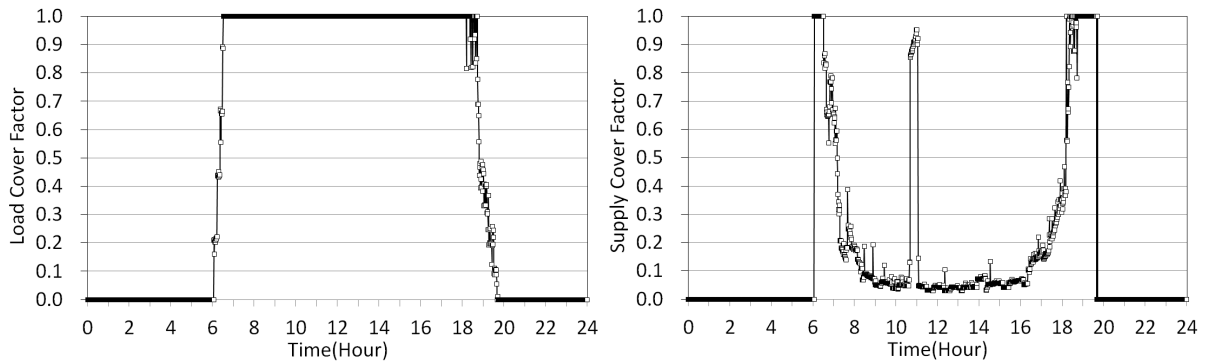


Fig. 10 Load cover factor (left) and supply cover factor (right) for selected day in intermediate season



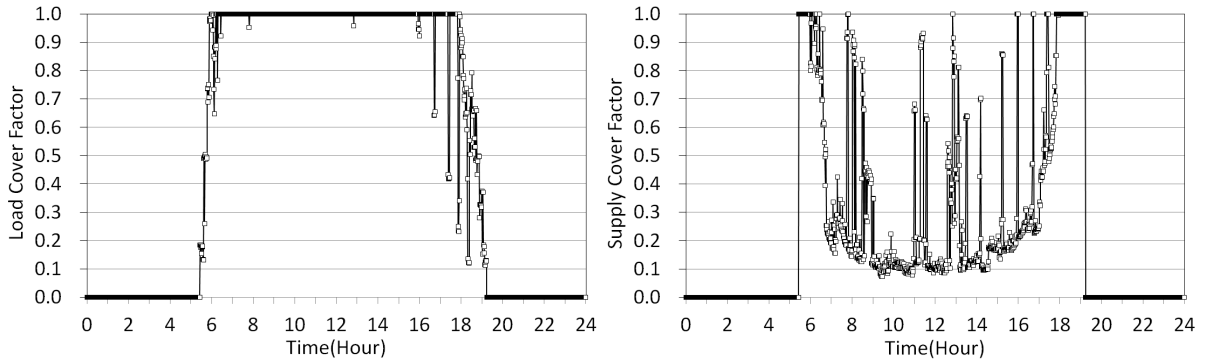


Fig. 11 Load cover factor (left) and supply cover factor (right) for selected day in summer season

Figs. 12 ~14는 제로에너지주택의 월별 부하매칭을 비교한 것이다. 주택에서 LCF는 가장 낮은 11월이 0.11로, 가장 높은 5월의 0.44와 큰 편차를 드러내며 연 평균 LCF는 0.25가 되었다. SCF는 5월이 가장 낮은 0.15, 11월이 가장 높은 0.41로 연 평균 SCF는 0.23이 되었다. 전력소비량이 가장 적고 태양열급탕시스템이 설치된 B 주택의 월 최저 및 최고 LCF는 11월과 5월이 각각 0.09와 0.45로 A 주택에 비해 그 편차는 더욱 증가하였으며, 연 평균 LCF는 0.23이 되었다. SCF는 1월이 가장 낮은 0.15, 8월이 가장 높은 0.41로 다소 상이한 분포로 보였으

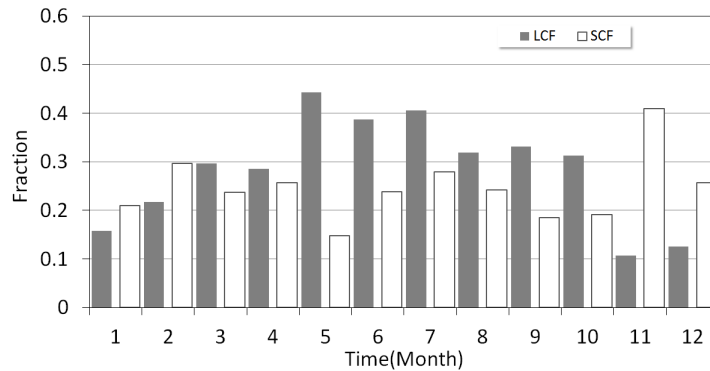


Fig. 12 Monthly LCF and SCF for house A

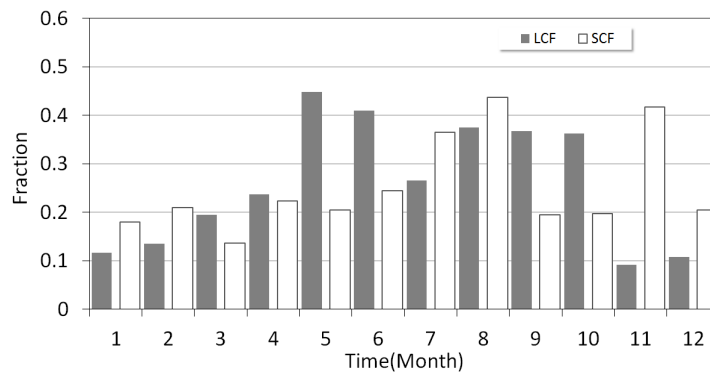


Fig. 13 Monthly LCF and SCF for house B

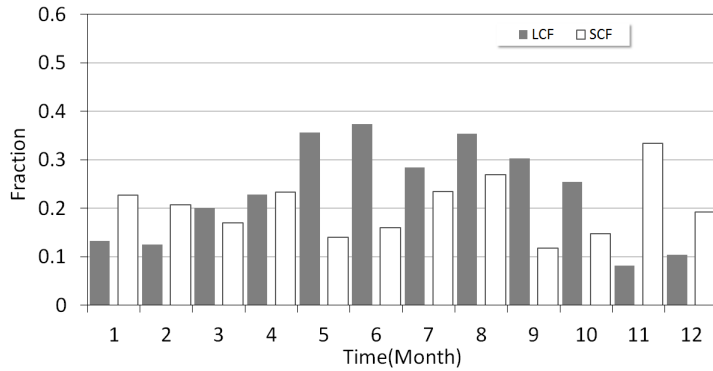


Fig. 14 Monthly LCF and SCF for house C

나, 연 평균 SCF는 A 주택과 동일한 0.23으로 나타났다. 한편 C 주택은 LCF는 11월과 6월이 각각 0.08과 0.37이 되었으며, 연 평균 LCF는 0.20로 다른 주택에 비해 다소 낮게 나타났다. 또한 SCF는 5월이 0.14로 가장 낮고, 11월이 가장 높은 0.33으로 연 평균 SCF는 0.19가 되어 A와 B 주택의 0.23에 비해 큰 차이를 보이고 있다. 이상의 분석결과 제로에너지주택의 부하매칭은 덴마크와 스웨덴의 실증 주택 4가구<sup>2)</sup>의 LCF (0.14~0.239)와 SCF (0.216~0.588)와 유사하나, 전력소비량에는 부합하지 않음을 알 수 있다. 또한 이는 사무소 건물<sup>2)</sup>의 LCF (0.582), SCF (0.575)에 비해 낮은 수준이다.

Fig. 15는 계통 순 전력( $ne$ )의 지속곡선(Duration Curve)을 비교한 것이다. 순 전력이 0이 될 때 완벽한 부하매칭을 의미하며 (+)와 (-)는 계통을 통한 송전 및 수전을 나타낸 것으로, 연간 8,760시간 중 약 30%에 해당하는 2,700시간 내외 계통 송전 상태에 있으며, 나머지 대부분 시간은 수전되고 있는 것을 알 수 있다. 한편 전력소비량이 가장 많은 A 주택과 C 주택의 지속곡선은 거의 유사한 분포를 보이고 있다. A 주택의 최대 송전전력은 8.4 kW로 C 주택의 7.91 kW에 비해 높았으나, 최대 수전전력은 각각 9.77 kW와 10.30 kW로 C 주택이 오히려 다소 높게 나타났다. 전력소비량이 가장 적은 B 주택의 경우 계통 순전력은 두 주택에 비해 확연히 낮은 분포를 갖고 있으며, 최대 송전 및 수전 전력은 각각 4.16 kW와 7.37 kW로 나타났다.

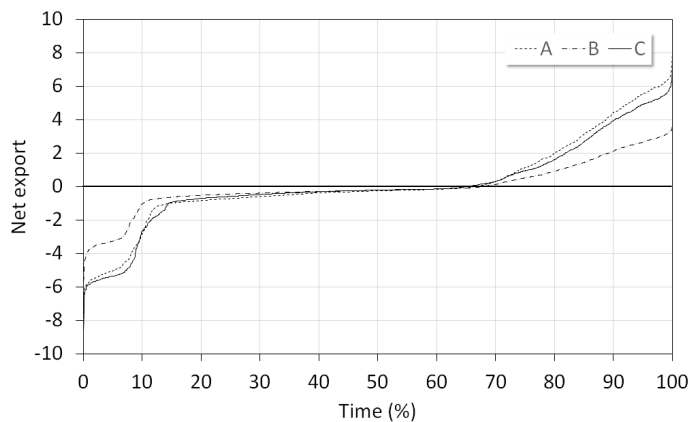


Fig. 15 Duration curve for the net exported electricity

Table 4는 제로에너지주택의  $f_{grid}$ 를 분석한 것이다. 지속곡선에서 확인된 바와 같이 소비전력과 태양광발전 용량이 유사한 A와 C 주택이 소비전력이 적은 B 주택에 비해 변동성이 큰 것을 알 수 있다.

**Table 4** Yearly grid interaction index

House	A	B	C
$f_{grid}$	0.27	0.19	0.27

## 5. 결론

본 연구에서는 태양광발전시스템이 설치된 3 가구 전전화 주택을 대상으로 제로에너지주택에서 예상되는 다양한 에너지 소비행태에 따른 부하매칭과 계통 상호작용의 정량적 평가지표를 1분 간격으로 측정된 실측자료를 기반으로 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 제로에너지주택 3 가구의 LCF와 SCF는 각각 0.20 ~ 0.25와 0.19 ~ 0.23으로 덴마크와 스웨덴에서 실증된 제로에너지주택 4가구의 유사한 수준으로 나타났다.
- (2) 에너지제로주택에서 연간 8,760시간 중 약 30%에 해당하는 2,700시간 내외 계통 송전 상태로 나타났으며, 나머지 대부분 시간은 수전 상태가 되었다.
- (3) 계통 순전력의 변동성을 나타내는 계통상호작용지표,  $f_{grid}$ 는 0.19 ~ 0.27이 되었으며, 소비전력과 태양광발전용량이 증가할수록 높게 나타났다.
- (4) 국내 저렴한 전기료로 인해 저용량 가정용 배터리의 경제성이 현저하게 떨어지는 현실을 고려할 때, 부하 평준화를 통해 제로에너지주택의 부하매칭 수준을 높이는 방안이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20173010140800).

## REFERENCES

1. Ahn, J. B. and Kim, Y. S., Distributed Generation and Grid Connection Technology, Journal of Electrical World Monthly Magazine, Issue. 347, pp. 12-20, 2005.
2. Salom, J., Marszal, A. J., Candanedo, J., Widén, J. Lindberg, K. B., and Sartori, I., Analysis of Load Match and Grid Interaction Indicators in NZEB with High-Resolution Data, IEA Task 40 / Annex 52, pp. 1-100, 2013.
3. Voss, K. Sartori, I. Napolitano, A. Geier, S. Gonzalves, H. Hall, M. Heiselberg, P. Widén, J., Candanedo, J. A., Musall, E., Karlsson, B., and Torcellin, P., Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings, EuroSun 2010, Graz, Austria, 2010.
4. Salom, J., Widén, J., Candanedo, J., Sartori, I., Voss, K., and Marszal, A., Understanding Net Zero Energy

- Buildings: Evaluation of Load Matchinbg and Grid Interaction Indicators, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011.
5. Salom, J., Marszal, A. J., Widen, J., Candanedo, J., and Lindberg, K. B., Analysis of Load Match and Grid Interaction Indicators in Net Zero Energy Buildings with Simulated and Monitored Data, *Applied Energy*, Vol. 136, pp. 119-131, 2014.
  6. INI R&C, A Survey on the Current State of ESS Enlargement Policies and Proposal for Introduction of Domestic ESS in Response to the New Climate Regime, Korea Energy Agency, 2017.
  7. Baek, N. C., Kim, S. B., Oh, B. C., Yoon, J. H., and Shin, U. C., Energy Performance Evaluation of Low Energy Houses using Metering Data, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 369-374, 2015.