

# 제한급전하는 오프그리드의 독립형 마이크로그리드 최적 설계 및 경제성 평가를 위한 일부하곡선 추정 방안에 관한 연구

## A Study on the Estimation Method of Daily Load Curve for the Optimization Design and Economic Evaluation of Stand-alone Microgrids Based on HOMER Simulation in Off-Grid Limiting the Supply of Electricity

남 용 현\* · 윤 석 민\* · 김 정 훈\* · 황 성 욱\*  
(Yong-Hyun Nam · Seok-Min Youn · Jung-Hoon Kim · Sung-Wook Hwang)

**Abstract** - There is a growing interest in various microgrid solutions that supply electricity 24 hours a day to off-grid areas where are not connected with the main grid, and Korea has many positive effects by constructing overseas microgrids as a country operating the emission trading scheme. Since it is not clear how to obtain load curves that is one of the inputs of the HOMER used to design a microgrid optimization plan, or it is necessary to examine whether electricity is supplied to the peak load level of the areas where have not received the electricity benefits from the viewpoint of the demand management, a methodology should be developed to know the load composition ratio and the shape of the daily load curve. In this paper, the relative coefficient and average load information for each load group obtained from the survey are used besides peak load and total average load. A mathematical model is proposed to derive the load composition ratio in the form of a Quadratic Programming and the load forecasting is performed using simple linear regression with future indicators. The effectiveness of the proposed method is confirmed for the Philippine island region supported by Korea Energy Agency and the Asian Development Bank.

**Key Words** : Off-grid, Microgrid, HOMER, Daily load curve, Load composition ratio, Quadratic programming, Linear regression

### 1. 서 론

오늘날 전 세계의 인구 중 약 19%에 달하는 사람들이 전기 없이 생활하며, 약 39%는 전기의 혜택을 거의 누리지 못하고 있다[1]. 육지 전력계통과 연계가 쉽지 않은 섬 또는 오지에서는 전력공급 설비를 구축함에 있어서 경제성이 좋지 않고, 관련 기술력 조달의 문제가 있다. 또한, 독립적으로 발전기 설치가 가능한 지역이라 할지라도, 주거용 및 기본시설 등에서 요구하는 전력수요량에 공급량이 미치지 못하여 야간시간대에 디젤 발전기를 이용한 간헐적으로 전력을 공급하는 곳이 여전히 많다[2]. 전 세계적으로 최근 10여 년간 이러한 오프그리드 지역을 대상으로 에너지 자립을 위한 해법 중 하나로서 마이크로그리드 구축에 대한 관심이 높아졌다. 국내에서는 가사도, 가파도, 동·서거차도, 울릉도[3] 등을 비롯하여 여러 도서지역에 다양한 형태와 규모의 마이크로그리드를 이미 구축하였거나 구축이 진행되고 있고, 이

러한 구축 경험과 기술을 바탕으로 필리핀 코브라도섬[4], 모잠비크[5] 등 해외 마이크로그리드 사업에도 진출하고 있다. 미국의 하와이주 마우이 지역, 일본의 10개 섬 등 선진국의 마이크로그리드 역시 오프그리드 지역에서 많은 실증이 진행되고 있다[6]. 한편, 우리나라는 탄소배출권 거래제도 운영 국가로서, 해외 지역에 마이크로그리드를 구축한 규모에 따라 탄소배출 감축을 인정받을 수 있다[7]. 이러한 배경에서 국내 전력계통이 포화되어 가는 상황을 고려할 때, 마이크로그리드 관련 기술의 개발은 전력기술 전문인력의 해외 활용 측면에서 긍정적 효과가 크다.

마이크로그리드를 설계하는데 있어 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 공인된 소프트웨어 중 하나인 HOMER의 수행을 위해 필요한 데이터 중 대상 지역의 일부하곡선은 매우 중요하다. 오프그리드 지역은 유용한 부하 데이터가 없어 대부분 단순한 근거로 산정하거나[8][9], 유사한 주변지역 부하 데이터를 활용하게 된다[10][11]. 또는 경험적으로 추정된 피크부하를 이용하여 전체 일부하곡선을 추정하기도 하는데[12] 이 역시 명확한 결과를 보장할 수 없다. 한편, 전기의 혜택을 누리지 못하는 지역의 피크 부하까지 전력을 공급할 필요가 있는지는 수요관리 관점에서 검토할 필요가 있다. 즉, 해당 지역의 부하 특성을 기반으로 수요관리 대상 부하를 파악할 수 있으므로 필요 이상의 설비 구축을 회피할 수 있다. 여기서 절감된 회피비용으로 다른 지역에 전력 설비를 건설하여 전기 혜택을 제공할 수 있다. 따라서 부하구성

\* Corresponding Author : Planning and Management Office, KEPCO Research Institute, Daejeon, Korea  
E-mail: [sungwook.hwang@kepco.co.kr](mailto:sungwook.hwang@kepco.co.kr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-0321>

\* School of Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea.

Received : October 23, 2018; Accepted : December 27, 2018

비 및 일부하곡선 형태를 알 수 있는 방법론의 개발이 필요하다.

이러한 관점에서 본 논문은 선행 연구[13]에서 부하곡선으로부터 부하구성비를 도출했던 것과는 달리 전체 부하를 추정할 때 부하군별 부하 형태를 함께 추정하고 이를 합성하면 전체 부하곡선을 만들 수 있다는 착안을 하였다. 즉, 피크부하와 전체 평균부하 외에 설문조사를 통해 얻은 각 부하군별 상대계수와 평균부하의 정보를 이용하고 인근지역의 시간대별 부하 사용 경향 정보를 이용하여 각 부하군별로 구체적인 부하곡선과 부하구성비를 함께 도출한다. 이를 위해 2차계획법(Quadratic Programming) 형태로 수리모델을 제안하였다. 또한, 미래부하 자료가 필요한 경우를 대비하여 미래 지표를 이용한 단순선형회귀법 기반 부하예측을 수행하여 미래부하에 대한 설비계획이 가능하도록 하였다. 사례연구로는 한국에너지공단과 아시아개발은행(ADB)이 지원한 필리핀 도서지역을 대상으로 제안한 방법의 효용성을 확인하였다.

## 2. 대상지역 일부하곡선 추정 및 예측 절차

오프그리드 지역은 전기 사용이 없거나 제한 급전하고 있기 때문에 대상 지역의 설문조사를 시행하고 인근 타 지역 또는 타 국가에서 수집한 부하 관련 데이터를 가공하여 사용한다. 이렇게 획득한 데이터 중 신뢰도가 높은 데이터는 제약조건으로, 신뢰도가 낮은 데이터는 그에 따른 가중값을 도입하여 목적함수로 하는 2차 형식으로 나타낸다. 또한, 추정된 부하군별 부하구성비가 조사 오류 등에 의해 실제와 많이 어긋난 부하값을 나타낼 수 있으므로, 부하 특성에 따라 데이터에 적합한 상하한 값을 부등호 제약으로 설정하여 수리모델을 수립한다. 이렇게 수립된 수리모델은 2차계획법(Quadratic Programming)으로 표현되며, 라그랑지 승수를 도입하여 풀린 부하군별 일부하곡선과 대상지역 일부하곡선을 함께 구할 수 있다. 이어서 인근 지역 부하 데이터로 검증 및 오차보정을 한 후, 최종 추정된 일부하곡선에 미래 지표를 나타내는 자료를 이용하여 선형회귀법으로 미래부하를 예측할 수 있다. 이 절차를 그림 1에 도식화하였다.

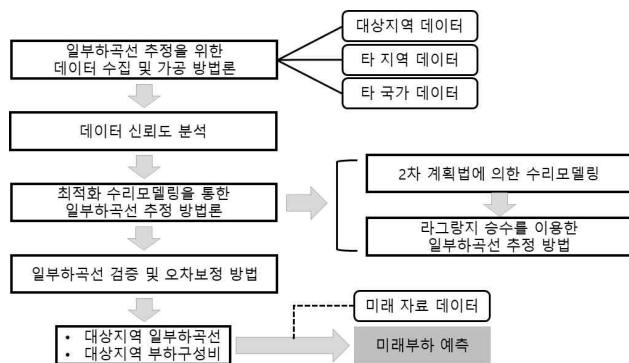


그림 1 대상지역 일부하곡선 추정 절차도  
**Fig. 1** Procedures for estimating daily load curves of the target area

## 3. 일부하곡선 추정 방법론

### 3.1 일부하곡선 추정을 위한 데이터 수집 및 목적함수 수립

대상 지역인 오프그리드 지역에서는 부분적인 제한 급전으로 일부 가구가 간헐적으로 전력을 공급받는 경향이 높다. 그러므로 마이크로그리드 구축 시 모든 가구가 24시간 공급될 경우의 일부하곡선 정보를 확보하기 전까지는 전기 사용이 없는 지역과 경마찬가지로 입수된 부하 데이터의 신뢰성이 매우 낮아 유용하지 않다. 따라서 대상 지역 설문자료 이외의 타 지역 및 타 국가에서 유사한 패턴의 데이터를 수집하여 가공할 필요가 있다.

대상 지역에서 확보할 수 있는 데이터는 관련 자료로부터 추정된 피크부하와 평균부하 밖에 없다. 그 이외의 데이터는 외부에서 확보해야 하고, 가능하다면 전력망이 구축된 인근 오프그리드 지역의 일부하곡선을 가져오거나, 비슷한 수준 및 환경의 국가에서 데이터를 활용하여 일부하곡선을 얻을 수 있다.

그러나 대상 지역의 주거 및 산업 특성이 타 지역과 동일할 수 없으므로 상세한 부하군별 상대계수 및 평균부하의 경우 데이터의 신뢰도가 떨어진다. 따라서 대상 지역 내에서 향후 부하 사용에 대한 설문조사를 수행하여 예상 부하를 파악하고, 수집된 데이터들로부터 비슷한 특성을 가진 부하들끼리 묶어서 분류·가공하여 초기 부하군별 상대계수 및 평균부하를 만들 수 있다. 이렇게 주변 환경을 고려하여 합리적인 절차로 확보한 데이터라 할 지라도 불확실성을 줄이기 위하여 추정값에서 벌어지는 오차를 최소화해야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 추정값과의 차이의 제곱에 데이터의 신뢰도를 따른 가중값을 부여한 가중 제곱의 합을 최소화하는 것으로 목적함수를 취한다.

### 3.2 데이터의 신뢰도를 근거로 한 제약조건과 수리모델 수립

피크부하는 여러 상황을 고려하여 결정되는 값이므로 가장 정확한 값으로 간주된다. 타 지역 및 타 국가의 일부하곡선은 비슷한 여건인 실제 부하 사용 사례이기 때문에 곡선의 형태 자체는 신뢰도는 높다고 할 수 있다. 하지만, 타 국가의 일부하곡선은 인근 지역의 일부하곡선보다 상대적으로 신뢰도가 낮다. 설문조사 데이터의 경우 어떤 경우도 전수조사 형태가 될 수 없고 설문에 대한 이해도도 높지 않다는 측면에서 신뢰도가 떨어질 수 있으나 경향성은 좋다고 판단된다. 설문조사를 통해서 상대계수와 부하군별 평균부하를 대체적으로 추정할 수 있는데, 이 중 부하군별 평균부하는 상대계수에 비해 신뢰도가 높은 편이다.

피크부하는 신뢰도가 매우 높은 데이터이기 때문에 등호제약 조건으로 적용 가능하고, 일부하곡선과 부하군별 평균부하는 피크부하보다는 신뢰성이 낮지만 상대계수보다는 신뢰할 수 있는 데이터로 간주하여 가중값을 크게 하고, 상대계수는 가중값을 가장 낮게 하여 목적함수에 반영함으로써 이들 값들과 오차를 최소화하는 2차계획법(Quadratic Programming) 형태로 수리모델을 수립한다.

### 3.3 최적화 수리모델링을 통한 일부하곡선 추정 방법론

#### 3.3.1 2차 계획법에 의한 수리모델링

인근 지역의 일부하곡선 자료는 신뢰도가 떨어지나, 경향성이 좋으므로 두 번째로 신뢰도가 높다고 간주하여 상대계수 개념을 도입한다. 식 (1)을 통해 인근지역 일부하곡선의 시간대별 부하값인  $p_t^{*(m)}$ 와 대상 시간 수  $N_t$ (최대 24시간)를 이용하여 일부하 상대계수  $\beta_t^{(m)}$ 로 계산하여 그 곡선 형태를 가져온다. 이 값에 신뢰도가 높은 데이터인 대상지역의 피크부하  $\bar{p}_{peak}^{(m)}$ 를 가장 높은 부하값으로 사용하면 대상지역 일부하곡선의 시간대별 부하 값  $p_t^{(m)}$ 을 식 (2)와 같이 결정할 수 있다.  $\bar{p}_{peak}^{(m)}$ 에  $\beta_{peak}^{(m)}$ 를 나누면 대상지역의 크기에 해당하는 평균부하  $p_m^{(m)}$ 이 된다는 것을 고려하면 비교적 정확하다고 볼 수 있다. 이 값을 측정값으로 사용한다.

$$\beta_t^{(m)} = \frac{p_t^{*(m)}}{\sum_{t=1}^{N_t} p_t^{*(m)} / N_t} \quad (1)$$

$$p_t^{(m)} = \beta_t^{(m)} \cdot p_m^{(m)} = \frac{\beta_t^{(m)}}{\beta_{peak}^{(m)}} \cdot \bar{p}_{peak}^{(m)} \quad (2)$$

설문조사를 통해 얻어지는 부하군별 상대계수에 대한 자료는 신뢰도가 낮아, 이를 결정해야 할 변수, 즉, 미지수로 취하고 목적함수에 낮은 신뢰도를 갖는 가중값  $Q_t$ 를 반영하여 그 자료와 미지수 사이의 오차의 자승값을 반영한다. 즉, 설문조사를 통해 추정된 부하군별 상대계수는 오차가 많은 측정값으로 취급하고 식 (2)에서 구한 시간대별 부하값  $p_t^{(m)}$ 을 측정값으로 삼아 부하군별 상대계수  $A_{lt}$ 에 부하군별 평균부하  $\bar{P}_l^{(m)}$ 을 곱한 값과의 오차를 신뢰도 가중값  $r_t$ 을 이용한 이차형식(Quadratic form)으로 표현하면 식 (3)과 같다. 또한, 수식 전개의 편의를 위하여 이를 행렬과 벡터로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$MIN_{\alpha_{lt}} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{l=1}^{N_L} q_{lt} (\alpha_{lt} - \alpha_{lt}^{(m)})^2 + r_t \left( \sum_{l=1}^{N_L} \alpha_{lt} \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)} \right)^2 \quad (3)$$

$$MIN_{\alpha_{lt}} \sum_{t=1}^{N_t} [A_{lt} - A_{lt}^{(m)}]^T Q_t [A_{lt} - A_{lt}^{(m)}] + [A_{lt}^T \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)}]^T r_t [A_{lt}^T \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)}] \quad (4)$$

여기서,

$$Q_t = \begin{bmatrix} q_{1t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & q_{N_L t} \end{bmatrix}, A_{lt} = \begin{bmatrix} \alpha_{1t} \\ \vdots \\ \alpha_{N_L t} \end{bmatrix}, A_{lt}^{(m)} = \begin{bmatrix} \alpha_{1t}^{(m)} \\ \vdots \\ \alpha_{N_L t}^{(m)} \end{bmatrix}, \bar{P}_l^{(m)} = \begin{bmatrix} \bar{P}_1^{(m)} \\ \vdots \\ \bar{P}_{N_L}^{(m)} \end{bmatrix}$$

$q_{lt}$  :  $l$ 번째 부하군의  $t$ 시간에서의 상대계수의 신뢰도 가중값 ( $l = 1, \dots, N_L$ )

$\alpha_{lt}^{(m)}$  : 설문 조사된 부하군별 상대계수 ( $l = 1, \dots, N_L$ )  
 $\alpha_{lt}$  :  $l$ 번째 부하군의  $t$ 시간에서의 부하군별 상대계수 ( $l = 1, \dots, N_L, t = 1, \dots, N_t$ )  
 $\bar{p}_l^{(m)}$  : 부하군별 평균부하 ( $l = 1, \dots, N_L$ )  
 $N_L$  : 부하군 수  
 $N_t$  : 시간 수

또한, 부하군별 피크 시간대의 값은 신뢰도가 가장 높은 데이터인 피크 시간대 부하군별 상대계수에  $\bar{P}_l^{(m)}$ 을 곱한 값이므로 등호제약조건으로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 부하군별 상대계수의 평균은 1이 되어야 하기 때문에 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 아울러 선행 연구[13]에 근거하여 식 (7)과 같은 부등호 제약조건으로 납득할 수 있는 충분한 범위의 상하한 값을 추가하여 자료 검증 정보로 사용한다.

$$\text{Subject to } \bar{p}_{peak}^{(m)} = (A_{l,peak})^T \bar{P}_l^{(m)} \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{t=1}^{N_t} \alpha_{lt}}{N_t} = 1 \quad (t = 1, \dots, N_t) \quad (6)$$

$$\alpha_{lt}^{\min} \leq \alpha_{lt} \leq \alpha_{lt}^{\max} \quad (t = 1, \dots, N_t) \quad (7)$$

여기서,

$$A_{l,peak} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,peak} \\ \vdots \\ \alpha_{N_L,peak} \end{bmatrix}$$

$\alpha_{l,peak}$  :  $l$ 번째 부하군의 피크시간에서의 부하군별 상대계수 ( $l = 1, \dots, N_L$ )

#### 3.3.2 라그랑지 승수를 이용한 일부하곡선 추정 방법

위 수리모델은 등호제약조건인 개수보다 결정변수가 많은 최적화 문제이므로 라그랑지 승수를 도입하여 식 (8)과 같이 라그랑지안 함수를 세울 수 있고, 이를 풀기 위하여  $\mathcal{L}$ 을 각 변수에 대하여 편미분하여 최적조건 식 (9)~(12)로 나타낸다.

$$\mathcal{L} = \left( \sum_{t=1}^{N_t} [A_{lt} - A_{lt}^{(m)}]^T Q_t [A_{lt} - A_{lt}^{(m)}] + [A_{lt}^T \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)}]^T r_t [A_{lt}^T \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)}] - \lambda_{peak} (\bar{p}_{peak}^{(m)} - (A_{l,peak})^T \bar{P}_l^{(m)}) - \left( \sum_{l=1}^{N_L} \lambda_l (\sum_{t=1}^{N_t} \alpha_{lt} - N_t) \right) \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_{lt}} = 2q_{lt} (\alpha_{lt} - \alpha_{lt}^{(m)}) - 2r_t \bar{P}_l^{(m)} \left( \sum_{l=1}^{N_L} \alpha_{lt} \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_{l,peak}} = 2q_{l,peak} (\alpha_{l,peak} - \alpha_{l,peak}^{(m)}) - 2r_l \bar{P}_l^{(m)} \left( \sum_{l=1}^{N_L} \alpha_{lt} \bar{P}_l^{(m)} - p_t^{(m)} \right) - \lambda_{peak} \bar{P}_l^{(m)} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_{peak}} = p_{peak}^{-(m)} - \sum_{l=1}^{N_l} A_{l,peak} \bar{P}_l^{(m)} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_l} = \sum_{t=1}^{N_t} \alpha_{lt} - N_l = 0 \quad (12)$$

### 3.4 경향성에 위배된 변수값 검증 및 오차보정 방법

초기에 추정된 부하군별 일부하곡선은 상대계수의 제한이 없는 상태에서 구해지기 때문에 신뢰성이 떨어지는 경우에는 경향성이 좋지 않은 부하값 또는 부하구성비가 나타날 수 있다. 따라서 상하한 값에 걸렸을 때는 신뢰도 계수  $q_l, r_l$ 를 조정하여 데이터의 신뢰도를 낮게 간주한다.

또한, 대상 지역의 부하 특성이 검증되지 않은 상태이기 때문에 이를 확인하는 방법이 필요하다. 대상 지역이 아닌 유사한 생활패턴을 보이는 인근 지역의 경우와 유사한 부하 특성을 나타낼 확률이 높다. 따라서 추정된 일부하곡선은 인근 지역의 상대계수 값과 비교하여 오차허용범위 내에 있는지를 검증하여야 하며, 오차범위 내에 들어올 수 있도록 추정된 상대계수 값들을 축차적으로 조정한다. 그림 2에 검증 절차를 보였다.

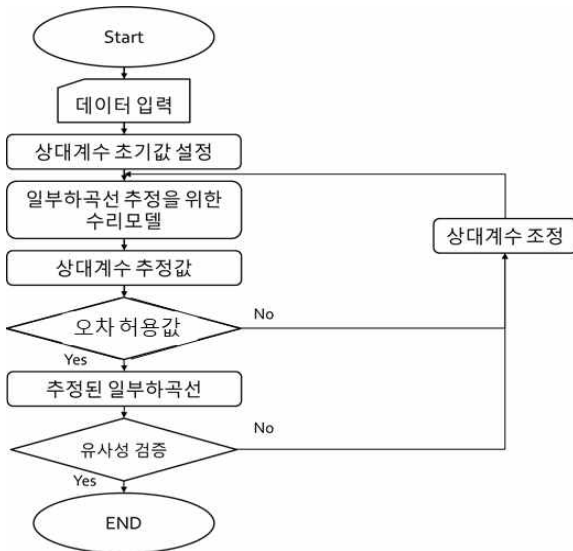


그림 2 일부하곡선 검증 절차도  
Fig. 2 Procedures for the verification of daily load curve

### 4. 미래부하 예측을 통한 일부하곡선 추정 방법론

통상적으로 과거의 전력 사용정보를 기반으로 미래부하를 예측하지만, 동남아시아 도서지역, 아프리카 오지 등과 같이 24시간 전력 공급에 대한 정보가 존재하지 않는 지역에는 적용하기 어려운 방법이다. 이러한 경우에는 현존하는 데이터 중 부하 사용량 및 증가율에 영향을 많이 주는 과거 GDP 증가율과 인구증가율 등의 경제지표를 활용하여 선형 회귀법을 기반으로 각 요소의 미

래 데이터를 예측하고, 두 값의 곱을 통하여 부하성장률을 예측하기로 한다. 또한, 신뢰구간은 일반적으로 많이 사용하는 95% 범위로 예측하고[14], 95% 신뢰 범위를 지정하기 위해 평균과 표준편차를 이용한 정규분포 곡선을 사용하여 미래부하의 범위를 예측한다. 이러한 과정을 그림 3에 도식화하였다.

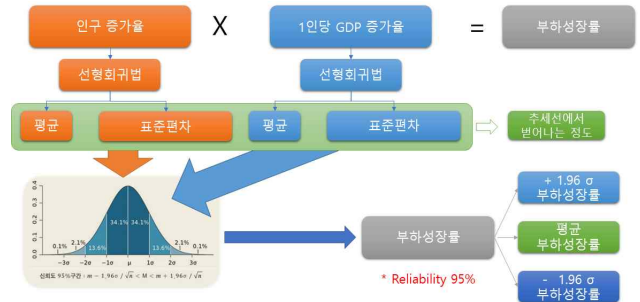


그림 3 미래부하 예측 절차  
Fig. 3 Process for the future load forecast

## 5. 사례연구

### 5.1 일부하곡선 추정

오프그리드 지역으로서 한국에너지공단과 아시아개발은행(ADB)이 지원한 필리핀 도서지역 중 3개 지역을 선정하여 사례 연구를 수행하고 3개 지역 중 하나인 S 지역의 사례연구 결과를 보인다.

#### 5.1.1 입력데이터

대상 지역의 피크부하는 2014년에 141 kW이고, 설문조사 데이터를 통하여 표 1과 같은 6개의 부하군별 평균부하를 산정하였다. 하지만, 대상 지역이 전기가 공급되지 않던 지역이기 때문에 설문조사로 부하군별 상대계수를 추정할 후 상황이 유사한 지역의 부하군별 상대계수를 반영하여 가공한 상대계수를 오차가 약간 있는 측정값으로 삼았다. 이 결과는 그림 4와 같다. 또한, 인근 B 지역의 일부하곡선은 그림 5와 같이 사용하였다.

표 1 부하군별 평균부하

Table 1 Average power of load groups

부하군	조명	TV	선풍기	냉장고	밥솥	기타
평균부하 [kW]	9.21	20.60	10.15	12.34	26.56	6.39

#### 5.1.2 수리모델링을 통한 일부하곡선 추정 및 검증

표 2는 그림 4의 부하군별 상대계수와 그림 5의 인근지역 일부하곡선을 상대계수화한 값을 수리모델을 통하여 구해진 상대계

표 2 상대계수의 기존 값과 추정값 차이의 평균오차

Table 2 Average errors of relative coefficients between the existed and the estimated

평균 오차	부하군별						전체 부하
	조명	TV	선풍기	냉장고	밥솥	기타	
상대 계수	0.0215	0.2262	0.1834	0.0189	0.0890	0.3753	0.0143

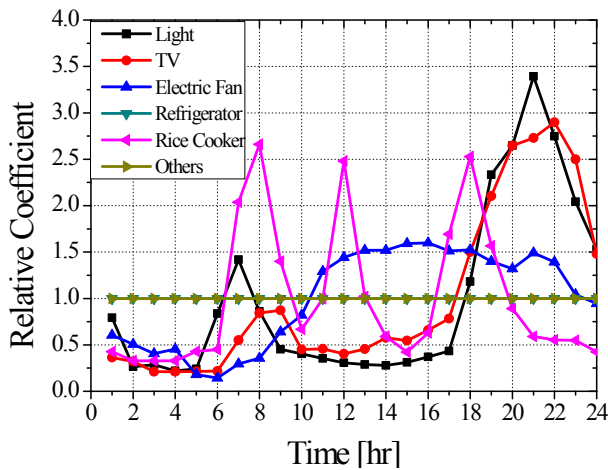


그림 4 부하군별 상대계수

Fig. 4 Relative coefficients by load groups

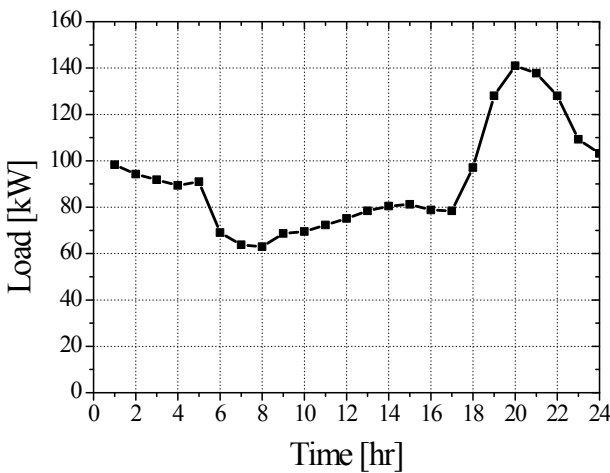


그림 5 인근지역의 정규화 일부하곡선 [15]

Fig. 5 Normalized daily load curve in the neighborhood [15]

수와의 차이의 자승값을 시간대별 값의 평균으로 나타낸 것이다. 각 부하군 별 상대계수 및 인근지역 시간대별 부하는 신뢰도가 높은 경우  $q_{it}$ ,  $r_{it}$ 을 높게 주되 기본적으로  $r_{it}$ 를 더 높게 주었기 때문에 전체부하의 시간대별 상대계수의 자승값 평균이 가장 낮

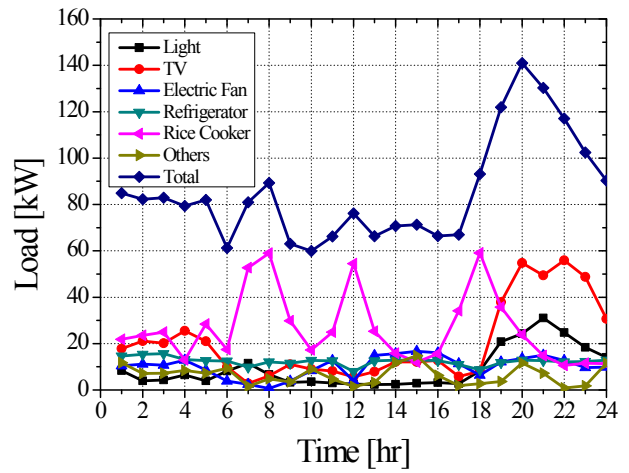


그림 6 전체 및 부하군별 부하곡선 추정 결과

Fig. 6 Result of estimated daily load curves of total and load groups

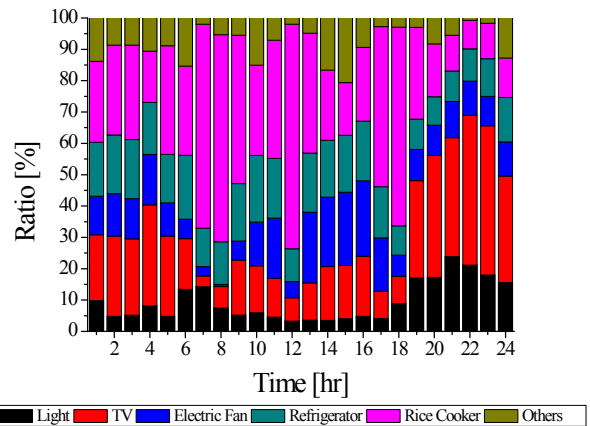


그림 7 부하구성비 추정 결과

Fig. 7 Result of estimated load composition rate

게 나타났다. 부하군은 냉장고, 조명, 밥솥, 선풍기, TV, 기타부하 순으로  $q_{it}$ 의 값을 크게 주었고 자승값 평균 또한 동일한 경향성을 나타내었다. 이렇게 추정된 상대계수를 그림 6과 같이 부하곡선 추정결과로 보였다. 신뢰도가 높은 냉장고, 조명, 밥솥이 그림 4의 기존 상대계수와 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 그림 7의 부하구성비에서도 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 다른 2개 지역과 부하군별 상대계수를 비교하여 데이터의 오차를 보정하였다. 그림 8와 그림 9에서 지역별 동일 부하군의 상대계수 그래프를 통하여 보정됨을 확인할 수 있다.

### 5.1.3 미래부하 예측을 통한 일부하곡선

대상 지역의 미래부하를 예측하기 위해 필리핀의 과거 인구 및 1인당 GDP 데이터를 확보하여[16] 선형 회귀법 기반의 함수

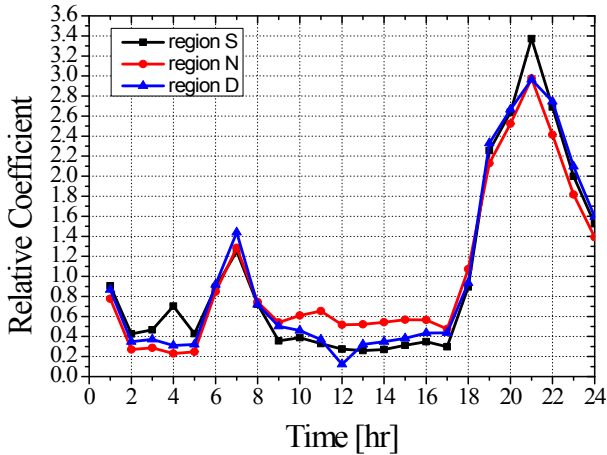


그림 8 지역별 조명 상대계수  
Fig. 8 Relative coefficients of light load by region

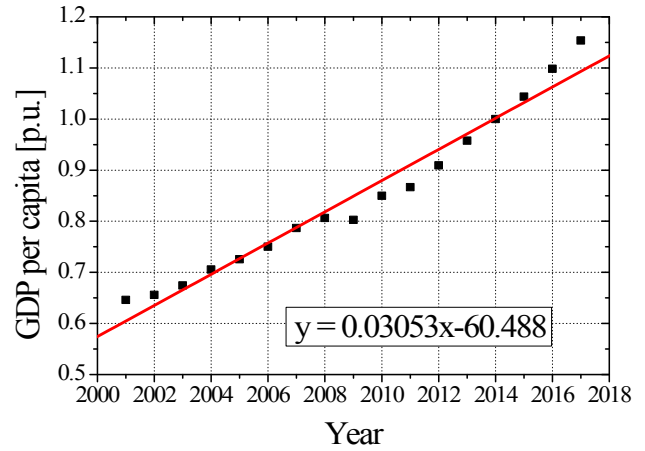


그림 11 1인당 GDP를 이용한 선형회귀함수  
Fig. 11 Linear regression function using GDP per capita

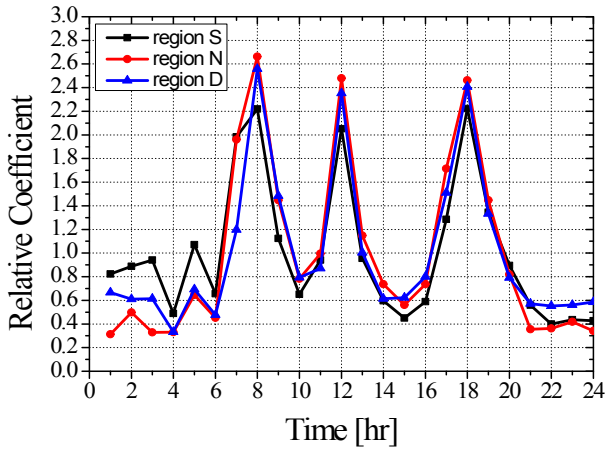


그림 9 지역별 밥솥 상대계수  
Fig. 9 Relative coefficients of rice cooker load by region

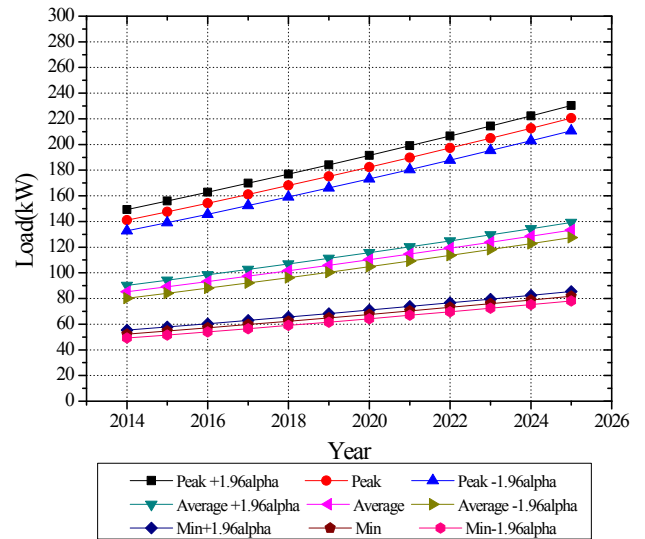


그림 12 미래부하 예측 결과  
Fig. 12 Forecasting results of future load

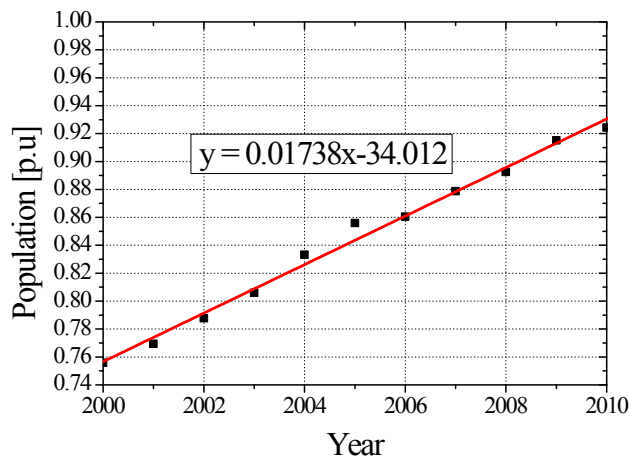


그림 10 인구를 이용한 선형회귀함수  
Fig. 10 Linear regression function using population

를 만들었다. 앞의 일부하곡선은 2014년 설계를 기준으로 추정하였기 때문에 2014년 데이터를 기준으로 단위법을 사용하여 그림 10 및 그림 11과 같은 2개의 직선함수를 얻을 수 있다. 또한, 두 개의 데이터를 곱하여 그림 12와 같이 피크부하, 평균부하, 최소부하를 얻을 수 있다. 이들 각각을 추정한 일부하곡선에 적용함으로써 같은 미래 일부하곡선의 범위를 예측할 수 있다. 그림 14는 2025년의 미래 일부하곡선을 예측한 결과이다.

피크시간대의 사용 부하군 중 부하관리를 통하여 다른 시간대로 이전할 수 있는 부하가 있으면 설비의 건설을 일정 규모 회피할 수 있다. 그림 13의 20시 피크부하에서 부하군 중 밥솥의 사용량을 다른 시간대로 옮길 경우 피크부하가 그림에 표시한 정도만큼 낮아질 수 있다. 이에 대한 효과를 검증하기 위하여 추정

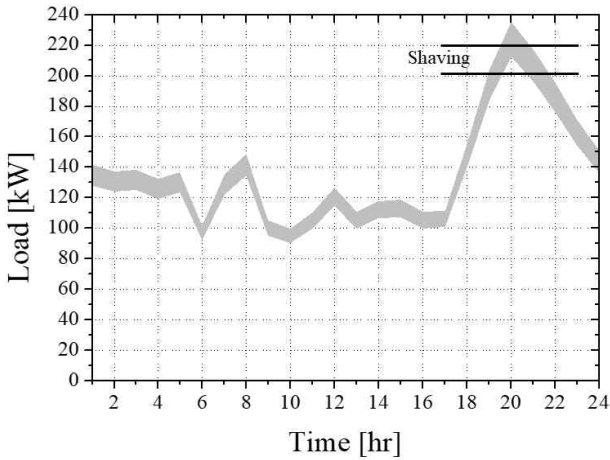


그림 13 미래 일부하곡선 범위  
Fig. 13 Scope of future daily load curve

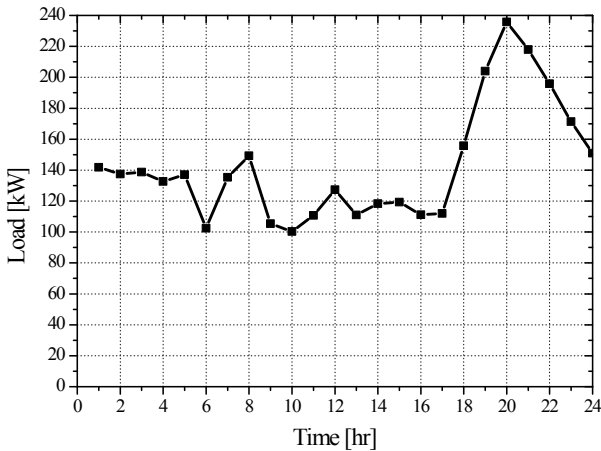


그림 14 사례 1의 일부하곡선  
Fig. 14 The daily load curve of case 1

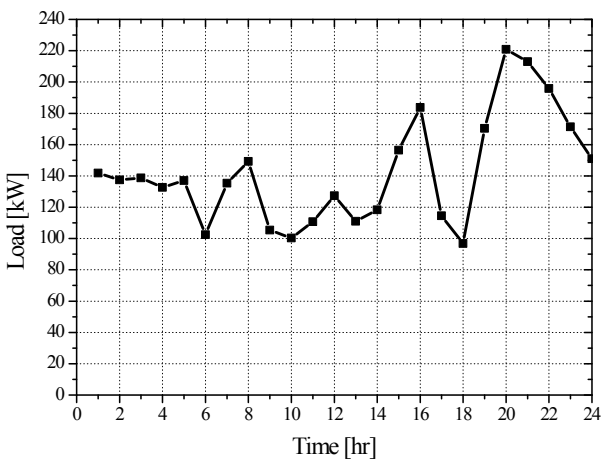


그림 15 사례 2의 일부하곡선  
Fig. 15 The daily load curve of case 2

된 미래 2025년 일부하곡선은 그림 14의 최대 235 kW의 피크 부하를 갖는 사례 1과 그림 15와 같이 밥솥부하를 이전하여 피크 부하가 약 14 kW 더 낮은 경우인 사례 2로 구분하여 시행하였다. 즉, 효율성 검증을 위해 서로 같은 전력사용량이지만 피크 부하가 다른 두 사례를 예시로 최적화 설계 및 경제성 평가를 수행하였다.

### 5.2 추정된 부하를 입력으로 한 최적화 설계 및 경제성 평가

2025년도 두 사례의 일부하곡선을 입력하여 HOMER를 이용하여 설비들의 최적용량을 결정하였다.

#### 5.2.1 입력자료

설비 스펙 등과 관련된 데이터는 사례연구 지역에서 사용된 발전기 및 컨버터, 배터리와 동일한 데이터를 사용하였고, 각 설비의 비용단가는 표 3과 같다.

표 3 주요 설비 단가

Table 3 Unit price of main facilities

설비	단가	건설/교체비용 [\$ /kW]	연간유지보수비용 [\$ /kW/year]
PV		2,100	1
Wind		7,000	35
Diesel		300	0.01
Battery		600	1
Converter		900	25

평균 일사량은 HOMER에서 지원해주는 평균 일사량, 디젤 연료가격은 필리핀 현지 가격인 0.58 \$/L를 적용하였으며, 이외에 대상지역에서 확보하기 어려운 입력 자료는 기존의 논문에서 사용된 데이터를 이용하였다[17]. 평균 풍력은 7.421 m/s, 평균 일사량은 4.5021 kWh/m<sup>2</sup>/d, 평균 청명도는 0.543을 적용하였다. 또한, 실질 이자율은 0.242 %로 적용하고, 프로젝트 수명은 25년, 시간간격은 60분으로 고려하였다. 고정비용은 규모산정 결과에 영향이 없으므로 기본값인 0으로 하고, 정전비용은 디젤발전기 운전비용인 0.116 \$/kWh를 적용하였다.

#### 5.2.2 최적화 설계 결과 및 경제성 평가

사례 1과 사례 2에 대한 최적화 설계 결과를 표 4에 보였다. 전체 하루 전력량은 동일하기 때문에 운영비용에서 큰 차이는 없으나, 피크부하가 더 낮은 사례 2가 전체적인 설비용량이 작고, 초기투자비용도 작은 것을 확인할 수 있다. 본 결과를 통하여 수요관리 대상 부하군을 파악할 수 있다면 불필요한 설비의 건설을 회피할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

표 4 S 지역 설계 데이터 비교

Table 4 Comparison of local design data

구 분	사례 1	사례 2
PV (kW)	205	189
Wind (kW)	150	150
Diesel (kW)	180	169
Battery (kWh)	342	304
Converter (kW)	142	141
초기투자비용 (\$)	1,867,500	1,806,900
연간운영비용 (\$/yr)	185,418	185,466

### 6. 결 론

본 논문에서는 오프그리드인 대상지역, 혹은 인근 다른 지역 및 국가에서 관련 데이터를 수집하고, 그 데이터의 신뢰도를 분석하여 상대계수에 관한 목적함수 수리모델링을 통한 일부하곡선 추정방법을 제안하였다. 신뢰도가 높은 데이터는 등호제약조건으로 표현하고, 상대계수의 오차를 줄이는 가중값을 반영한 이차식 형태(Quadratic form)의 목적함수로 수리모델을 수립하였으며, 라그랑지 승수를 이용하여 일부하곡선 및 부하구성비를 추정하였다. 또한 추정한 일부하곡선은 비정상적인 값을 나타낼 가능성이 있고 부하 특성의 검증이 되지 않았기 때문에, 다른 대상지역의 데이터와 비교하여 오차 범위 이내가 될 때까지 축차적(Iterative)으로 오차를 보정하는 방법과 단순 선형 회귀법을 사용한 미래부하 예측방법을 제안하여 미래부하를 대상으로 설비계획을 할 수 있도록 하였다. 이를 필리핀 3개 도시지역에 적용하는 사례연구를 수행하고 그 중 1개 지역의 부하군별 일부하곡선 및 부하구성비를 나타내었다. 또한, 추정된 일부하곡선은 부하군의 사용 시간대 변경으로 피크부하를 이전하여 다른 형태의 일부하곡선을 만든 후, 두 사례의 설계 결과를 비교함으로써 부하관리를 통하여 초기투자비용을 낮출 수 있음을 보여 본 논문의 효용성을 입증하였다.

기준에 마이크로그리드를 설계할 때는 부하군을 고려하지 않았던 것과 달리, 본 논문에서 제안한 바와 같이 부하군에 대한 구체적인 추정을 하게 되면, 향후 정전비용이 매우 싼 경우 더 효과적인 수요관리를 할 수 있다는 측면에서 적용성이 좋아 설비 건설의 회피 효과를 얻을 수 있다. 하지만, 현재 HOMER에서는 부하군을 고려하는 것이 아닌 일부하곡선으로 설계가 가능하므로 추후 부하구성 상태를 고려하여 최적설비계획을 할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다. 또한, 대상 지역의 정전비용이 낮기 때문에 자체 전력사용량을 줄임으로써 주변 지역에 우선적으로 공급하는 것이 바람직하며, 이를 위한 최적 공급 방안 연구도 추가적으로 요청된다.

### 감사의 글

이 논문은 한국전력공사 지원에 의하여 전력연구원의 주관으로 수행된 과제(R16DA11)의 연구 결과입니다.

### References

[1] World Energy Outlook 2011, IEA , pp.472, 2011.

[2] S. H. Ahn, K. T. Lee, B. Bhandari, G. H. Lee, S. Y. Lee, C. K. Song, "Formation Strategy of Renewable Energy Sources for High Mountain Off-grid System Considering Sustainability", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 9, pp. 958-963, 2012.

[3] D. K Kim, "Strategy for the Advancement of Domestic Microgrid in Southeast Asia", 2016.

[4] H. S. Choi, "Energy Corporation Announces Renewable Energy Supply to Philippines", *Industry news*, 2018. 9. 17.

[5] B. H. Yoon, "KEPCO completed Microgrid project in Mozambique", *EBN*, 2015.11.20

[6] Final Report of Feasibility Study for Microgrid Construction, Jeju Energy Corporation, pp. 24-42, 2016.

[7] J. H. Kim, "Basic research for the establishment of efficiency standards for domestic electrical equipment in preparation for the Convention on Climate Change and International Standardization", *KEPRI*, 2008.

[8] Y. Li, Y.S. Choi, Y.S. Zhang and K.S. Lee, "Economical Feasibility Evaluation of Solar-Fuel Cells in Hybrid Energy System for Domestic Electricity Demands", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 59P, No. 1, pp. 117-122, 2010.

[9] H.S. Ahn, M.B. Lee, G.J. Choi, H.Y. Jung, D.H. Back and J.H. Kim, "Design and Establishment of Off-Grid System based on PV generator using Bi-directional Inverter", *KIEE Conference*, pp. 459-461, 2010. 04

[10] T.H. Han, J.H. Lee, H.J. Kim and B.M. Han, "Optimized Design and Coordinated Control for Stand-alone DC Micro-grid", *Journal of Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 63-71, 2013.

[11] S. H. Yang, C. J. Boo and H. C. Kim, "Optimization of Stand-Alone Hybrid Power Systems Using HOMER Program", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, No. 2, 2012.

[12] S. B. Son and H. C. Song, "Generation of 1-day load curves for performance improvement of power system Peak-Shaving", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 141-146, 2014.

[13] J.H. Kim, J.Y. Lim, J.O. Kim and Singh C, "Application of expert system to load composition rate estimation algorithm", *IEEE Journals & Magazines*, Vol. 14, No. 3, pp. 1137-1143, 1999.

[14] Jarkko Isotalo, Basics of Statistics, CreateSpace Independent Publishing Platform, pp. 43-45, 2014.



- [15] Philippines SPUG, <http://www.spug.ph/>  
[16] World Bank Databank, <http://databank.worldbank.org/>  
[17] J. H. Kim, S. M. Youn, W. J. Jung, H. K. Lee and Y. S. Lee, "Study on the Impact Assessment of the Optimal Capacity of the Existing Generation including Renewable Power Plant using the HOMER Program in the Off- grid with Uncertain Load Conditions", *KIEE Conference*, pp. 239-241, 2014. 11

## 저 자 소 개



### 남용현 (Yong-Hyun Nam)

1994년 1월 29일생. 2018년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업(학사). 현재 동 대학원 전기·정보·제어공학과 석사과정  
Tel : 02-320-1621  
E-mail : namy129@naver.com



### 윤석민 (Seok-Min Youn)

1988년 1월 17일생. 2014년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업(학사). 현재 동 대학원 전기·정보·제어공학과 석사과정  
Tel : 02-320-1621  
E-mail : ysm515@hongik.ac.kr



### 김정훈 (Jung-Hoon Kim)

1955년 9월 13일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.  
Tel : 02-320-1621  
E-mail : kimjh@hongik.ac.kr



### 황성욱 (Sung-Wook Hwang)

1974년 4월 20일생. 2012년 홍익대학교 전기·정보·제어공학과 졸업(박사). 2008년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 기획관리실 선임보연구원.  
Tel : 042-865-5082  
E-mail : sungwook.hwang@kepeco.co.kr