

# 주택용 연료전지 효율 향상을 위한 다중 스택 연료전지 시스템의 전력 분배 최적화

강태성<sup>1,2</sup> · 함성현<sup>1,2</sup> · 오환영<sup>1</sup> · 최윤영<sup>1</sup> · 김민진<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 수소에너지연구소 연료전지연구실, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 수소에너지공학전공

## Power Distribution Optimization of Multi-stack Fuel Cell Systems for Improving the Efficiency of Residential Fuel Cell

TAESEONG KANG<sup>1,2</sup>, SEONGHYEON HAM<sup>1,2</sup>, HWANYEONG OH<sup>1</sup>, YOON-YOUNG CHOI<sup>1</sup>, MINJIN KIM<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Fuel Cell Laboratory, Hydrogen Energy Institute, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

<sup>2</sup>Hydrogen Energy Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

†Corresponding author :  
minjin@kier.re.kr

Received 20 March, 2023

Revised 21 July, 2023

Accepted 7 August, 2023

**Abstract** >> The fuel cell market is expected to grow rapidly. Therefore, it is necessary to scale up fuel cells for buildings, power generation, and ships. A multi-stack system can be an effective way to expand the capacity of a fuel cell. Multi-stack fuel cell systems are better than single-stack systems in terms of efficiency, reliability, durability and maintenance. In this research, we developed a residential fuel cell stack and system model that generates electricity using the fuel cell-photovoltaic hybrid system. The efficiency and hydrogen consumption of the fuel cell system were calculated according to the three proposed power distribution methods (equivalent, Daisy-chain, and optimal method). As a result, the optimal power distribution method increases the efficiency of the fuel cell system and reduces hydrogen consumption. The more frequently the multi-stack fuel cell system is exposed to lower power levels, the greater the effectiveness of the optimal power distribution method.

**Key words** : Fuel cell(연료전지), Multi-stack(다중 스택), Power distribution(전력 분배), Optimization(최적화), Modeling(모델링)

## Nomenclature

$a_c$  : surface area of catalyst.

BOP : balance of plant.

$E_c$  : activation energy,  $kJ/mol$ .

F : Faraday constant,  $96,485 C/mol$ .

FC : fuel cell.

i : current density,  $A/cm^2$ .

- $i_{0,c}$  : exchange current density for the oxygen reaction,  $A/cm^2$ .
- $k_1, k_2, k_3, k_4$ : power allocation coefficient.
- $L_c$  : usage of catalyst.
- $P$  : pressure, bar.
- $P_{max,each}$  : maximum power output for each FC system,  $kW$ .
- $P_r$  : partial pressure of reactants, bar.
- $P_{tot}$  : total power output,  $kW$ .
- PV : photo voltaic.
- $R$  : gas constant,  $J/mol \cdot K$ .
- $RH$  : relative humidity.
- $T$  : temperature,  $K$ .
- $t_m$  : thickness of membrane,  $cm$ .
- $T_{ref}$  : reference temperature,  $298.15 K$ .
- $V_{cell}$  : cell voltage,  $V$ .
- $V_{rev}$  : reversible voltage,  $V$ .

## Greek letters

- $\alpha$  : kinetic parameter.
- $\eta_{act}$  : activation overvoltage,  $V$ .
- $\eta_{BOP}$  : efficiency of BOP.
- $\eta_{converter}$  : efficiency of converter.
- $\eta_{inverter}$  : efficiency of inverter.
- $\eta_{ohmic}$  : ohmic loss,  $V$ .
- $\eta_{stack}$  : efficiency of stack.
- $\eta_{sys}$  : efficiency of total system.
- $\eta_{sys,i}$  : efficiency of each system.
- $\eta_{sys,tot}$  : efficiency of overall system.
- $\lambda$  : water contents of membrane.
- $\sigma_m$  : membrane conductivity,  $S/cm$ .

## Subscripts

- a : anode.
- c : cathode.
- m : membrane.

## 1. 서론

기후 위기와 탄소중립 문제로 신재생에너지의 수요가 증가하고 있는 가운데, 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 에너지 체계 변화가 가속화되고 있다. 재생에너지의 간헐성 문제로 수소가 에너지 저장원으로 주목받고 있으며, 수소를 사용하여 에너지를 생산하는 연료전지에 대한 관심이 확대되고 있다<sup>1)</sup>. 연료전지는 전기 화학 반응으로 전기, 물, 열만 생성하므로 친환경적이다. 또한 탄소를 배출하지 않는 발전 장치로 환경 문제 개선에 기여할 수 있다.

전 세계의 수소에너지 수요는 2015년 8 EJ에서 2050년 78 EJ로 급속하게 증가할 것으로 예상되고 있다<sup>2)</sup>. 전 세계적으로 수소경제 사회를 대비하여 수소 생산, 저장, 운송, 활용 기술 개발 및 지속적인 기반 시설 확대가 이루어지고 있다<sup>3)</sup>. 2030년 전 세계의 연료전지 시장이 50조 원 규모로 성장할 것으로 예상되어 연료전지의 수요 및 공급이 지속적으로 증가할 것으로 보인다<sup>4)</sup>. 이에 따라 건물용, 발전용, 선박용으로 연료전지의 대형화가 요구되고 있다.

연료전지 대형화를 위한 방법 중 하나로 다중 스택 시스템이 고려된다. 다중 스택 시스템은 단일 스택 시스템에 비해 전체 시스템 효율을 높일 수 있고, 일부 스택 고장 시에도 운전이 가능하며, 스택 추가, 제거가 용이하여 유지 보수 시간 및 비용 절감이 가능하다.

이러한 장점으로 인해 다중 스택 시스템은 유체, 전기, 열 구조, 전력 관리, 물 및 열 관리 측면에서 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>5)</sup>. Cardozo 등<sup>6)</sup>은 다중 스택 연료전지 시스템을 주거 환경에 적용하여 전력 분배 방법에 따른 수소 소비량, 시동 사이클, 연속 운전 시간 등을 고려하여 경제성 평가를 하였다. Garcia 등<sup>7)</sup>은 다중 스택 연료전지 시스템을 연료전지-배터리 하이브리드 차량에 적용하여 전력 분배 방법에 따른 전체 시스템 효율을 비교하였다. Marx 등<sup>8)</sup>은 다중 스택 연료전지 시스템에서 일부 스택 고장 시 열화모드 운전을 분석하였다. 하지만 다중 스택 시스템의 전력 분배 방법을 실제 활용처에 적용

한 사례는 부족하다. 전력 분배 방법에 따른 다중 스택 시스템과 단일 스택 시스템의 효율, 수소 소비량 비교에 대한 연구는 있지만 스택의 운전 범위를 명확히 하지 않아 정확한 다중 스택의 효과 판단이 어렵다.

본 연구에서는 개별 스택의 운전 범위를 최대 0.4 A/cm<sup>2</sup> 전류 밀도로 제한하여 태양광-연료전지 하이브리드 시스템을 적용한 주거 환경에서 전력 분배 방법이 다중 스택 연료전지 시스템에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

## 2. 모델링

Fig. 1은 연구 방법을 개략적으로 나타낸 모식도이다. 실험 데이터를 기반으로 매개변수 추정(parameter estimation) 기법을 사용하여 스택 모델을 구축하였다. 스택과 주변 장치(balance of plant, BOP)를 고려하여 시스템 모델을 구축하였고 시스템 효율을 높이기 위한 전력 분배를 최적화하였다. 그리고 이를 주거 환경의 태양광-연료전지 하이브리드 시스템에 적용하고 평가하였다.

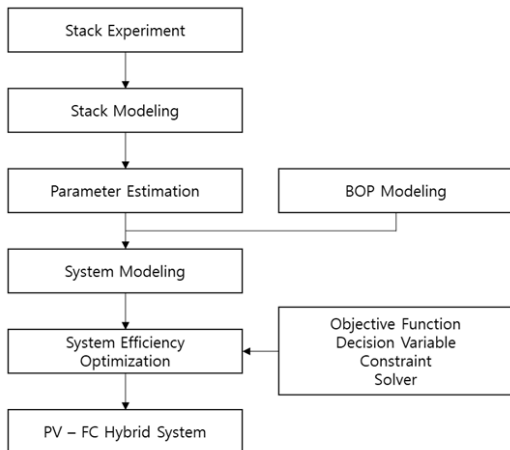


Fig. 1. Methods and flowcharts of research

### 2.1 스택 모델링

각 스택은 활성화 면적이 350 cm<sup>2</sup>인 셀 110개를 사용하였다. 전류 밀도 및 전압의 운전 범위는 각각 0.02-0.4 A/cm<sup>2</sup>, 0.874-0.725 V이며, 최대 출력은 9.87 kW이다. 정격 전압이 0.75 V일 때 전류는 108.5 A, 출력은 7.92 kW, 전력 효율은 53.09%이다.

#### 2.1.1 가정

막의 유체 투과도는 일정하다고 가정하였다. 스택 내의 압력 강하, 애노드의 셀 과전압, 농도 손실 과전압은 무시하였다. 채널에서 전압 강하는 없고 가역 전위( $V_{rev}$ )는 상수라고 가정하였다.

#### 2.1.2 스택 작동 전압

스택 전압은 이론 전위, 활성화 손실, 저항 손실을 고려하였고, 농도 손실은 무시하였다.

$$V_{cell} = V_{rev} - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \tag{1}$$

##### 2.1.2.1 활성화 손실

활성화 손실을 계산하기 위해 Butler-Volmer 식을 사용하였다. 수소 산화 반응이 산소 환원 반응에 비해 매우 빠르기 때문에 애노드의 활성화 손실은 무시하고 캐소드의 활성화 손실만을 고려하였다. 교환 전류 밀도가 높을수록 활성화 손실은 작아진다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{4\alpha F} \ln \frac{i}{i_{0,c} P_{r,c}} \tag{2}$$

$$i_{0,c} = i_{0,c}^{ref} \times a_c \times L_c \times \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}}\right) \times \exp\left(\frac{E_C}{RT} \times \frac{T - T_{ref}}{T_{ref}}\right) \tag{3}$$

##### 2.1.2.2 저항 손실

저항 손실은 전해질 막의 이온 흐름에 대한 저항만을 고려하였다. 나피온의 물 함수율  $\lambda$ 는 간단히 상대습도  $RH_a$ 에 계수  $coeff(\lambda)$ 를 곱해 계산하였다.

$$\eta_{ohmic} = \frac{t_m}{\sigma_m} \times i \quad (4)$$

$$\sigma_m = (0.005139 \times \lambda - 0.00326) \times \exp(1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})) \quad (5)$$

$$\lambda = coeff(\lambda) \times RH_a \quad (6)$$

### 2.1.3 매개변수 추정

스택 모델과 실험 데이터의 i-V 곡선을 일치시키기 위해 매개변수 추정을 수행하고 모델의 정확도를 검증하였다. Fig. 2는 실험 결과와 스택 모델 매개변수 추정 수행 전후의 i-V 곡선을 나타낸 그래프이다. 관심 영역(0.4 A/cm<sup>2</sup> 이하)의 실험과 모델 데이터를 표준화(standardization)한 후 평균 제곱근 오차(root mean square error)를 계산하였다. 오차는 0.0608로 모델 예측값이 실험값과 유사하게 거동하는 것을 확인하였다. Table 1은 매개변수들의 추정 수행 전

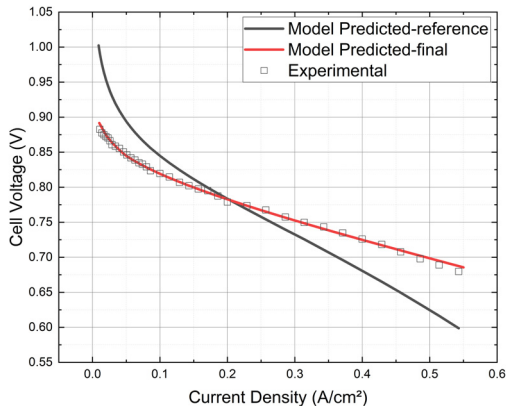


Fig. 2. Validation result of experimental data and modeling data

Table 1. Parameter comparison before and after parameter estimation

Parameter		Reference	Final
$\alpha$	Kinetic parameter	0.125	0.356654
$coeff(i_{0,c})$	Coefficient of exchange current density ( $i_{0,c}^{ref} \times a_c \times L_c \times (\frac{P_r}{P_r^{ref}})$ )	0.01	0.000126107
$coeff(\lambda)$	Coefficient, water contents of membrane	14	5.95424
$V_{rev}$	Reversible voltage	1.1	0.950004

(reference)과 후(final)의 값을 정리한 것이다.

## 2.2 BOP 구성

연료전지 시스템이 작동하기 위해서는 스택뿐만 아니라 연료 공급 시스템, 공기 공급 시스템, 물 및 열 관리 시스템, 전력 변환 시스템 등의 BOP가 필요하다. BOP는 연료전지 시스템의 효율과 안정성 등 성능에 영향을 미치는 중요한 요소다.

Fig. 3은 시스템 모델에 사용한 BOP들의 소비 전력 곡선, 효율 곡선을 나타내고 있다.

Fig. 3(a)는 공기 블로어의 소비 전력 곡선이다. 연료전지에서 전력을 생성하기 위해서는 충분한 양의 산소가 공급되어야 한다. 이를 위하여 공기 블로어를 통해 스택에 공기를 공급한다. 공기 블로어의 소비 동력은 전체 BOP 소비 동력의 70% 이상을 차지하며, 연료전지 스택 출력의 최대 7-10%에 달하기 때문에 공기 블로어는 BOP 중에서 가장 중요한 요소이다<sup>9)</sup>. 원심형 블로어의 성능 곡선을 차용하였으며<sup>10)</sup>, 연료전지 시스템 용량에 맞게 소비 동력을 설정하였다.

Fig. 3(b)는 재순환 블로어의 소비 전력 곡선이다. 재순환 블로어는 스택에서 배출된 미반응 수소를 애노드 입구로 보내주는 역할을 한다. 재순환 블로어는 연료 이용률을 높여 전체 시스템 효율 향상에 기여한다.

Fig. 3(c)는 워터 펌프의 소비 전력 곡선이다<sup>11)</sup>. 워터 펌프는 스택에서 생성되는 열을 배출하여 스택의 운전 온도를 유지하는 역할을 한다. 스택 하나에 스택을 순환하는 물을 이송시키는 워터 펌프 1개, 물탱

크를 순환하는 물을 이송시키는 워터 펌프 1개로 총 2개의 워터 펌프를 사용하였다.

Fig. 3(d)와 Fig. 3(e)는 각각 컨버터, 인버터의 효율 곡선이다. 컨버터는 스택에서 생성되는 전력의 일부를 BOP 구동에 알맞은 전압으로 변환시키는 역할을 한다. 인버터는 BOP 구동에 사용된 전력을 제외

한 전력을 수요처에 교류로 공급하기 위해 변환시키는 역할을 수행한다. 컨버터, 인버터 효율 모두 저전력 영역에서 낮고 부하가 증가함에 따라 회복되는 모습을 보인다. 컨버터, 인버터 모두 각 스택에 개별적으로 사용하였다. 컨버터는 감압 컨버터를 차용하였고<sup>12)</sup>, 인버터는 일반적인 인버터 성능을 차용했다<sup>13)</sup>.

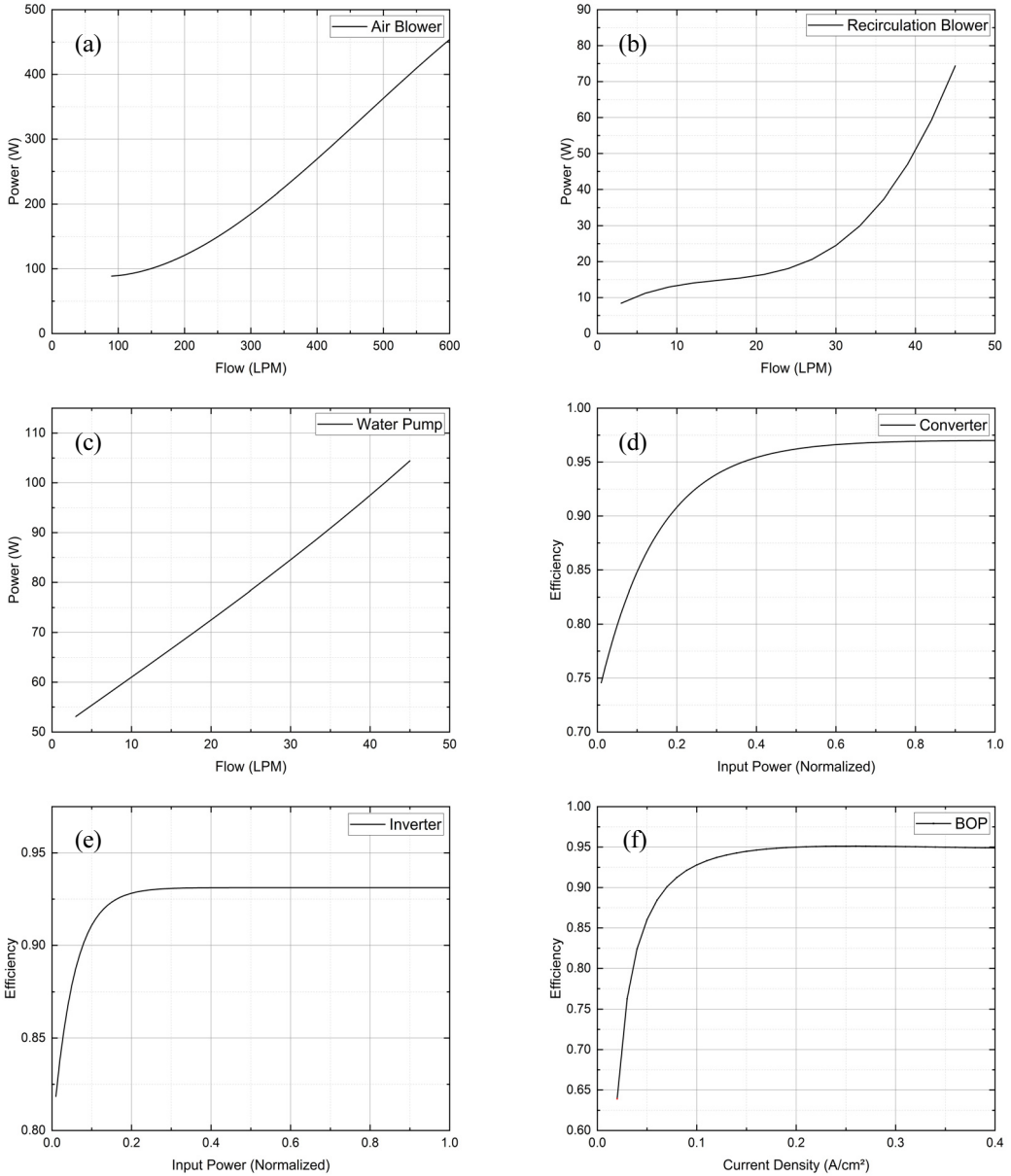


Fig. 3. Power and efficiency curves of each BOP. (a) Power curve of air blower, (b) power curve of recirculation blower, (c) power curve of water pump, (d) efficiency curve of converter, (e) efficiency curve of inverter, (f) efficiency curve of BOP

Fig. 3(f)는 인버터를 제외하고 위에서 설명한 전체 BOP들의 통합 효율 곡선을 나타내고 있다. BOP 효율은 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_{BOP} = 1 - \frac{BOP\ Consumption\ Power}{Stack\ Production\ Power \times \eta_{converter}} \quad (7)$$

BOP 효율은 컨버터 효율 및 BOP의 기저전력으로 인해 저전류 영역에서 낮고 전류가 증가함에 따라 회복하는 모습을 보인다.

### 2.3 시스템 모델링

스택 4개를 사용하여 다중 스택 연료전지 시스템을 구축하였다. 수소탱크를 통해 스택 가동에 필요한 연료를 공급한다. 스택의 애노드에서 배출되는 미반응 수소와 물은 각각의 재순환 블로어를 통해 애노드 입구로 이송된다. 애노드의 가습 조건은 애노드에서 배출되는 물로 충족한다. 그리고 공기 블로어를 통해 캐소드에 공기를 공급한다. 캐소드의 가습 조건은 막 가습기를 통해 캐소드에서 배출되는 물로 충족한다.

연료전지에서 발생하는 열은 발생기(generator)로 모사하였으며 워터 펌프와 이송되는 물로 열을 관리

하였고 생성되는 전력은 계산기(calculator)로 처리하였다. Fig. 4는 Aspen Plus (Aspen Technology Inc., Bedford, MA, USA)를 사용하여 구축한 다중 스택 시스템의 레이아웃이다. Fig. 5는 개별 연료전지 시스템의 구성을 나타낸 간단한 개념도이다.

Fig. 6은 개별 스택 시스템의 효율과 출력 곡선을 나타낸 그래프이다. 시스템 효율은 연료전지 저부하 영역에서 최고점까지 증가 후 부하가 증가하면서 점차 감소한다. 시스템 효율은 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_{sys} = \eta_{stack} \times \eta_{BOP} \times \eta_{inverter} \quad (8)$$

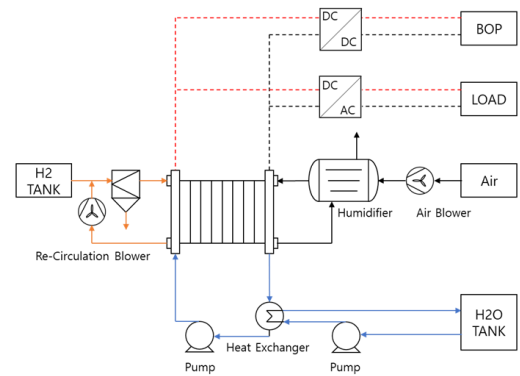


Fig. 5. Diagram of each fuel cell system model

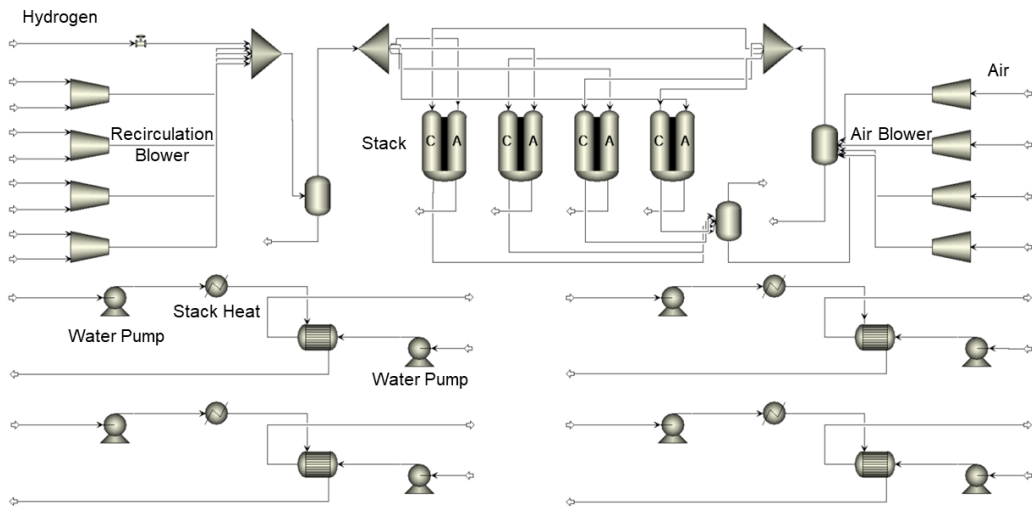


Fig. 4. layout of multi-stack fuel cell system model (Aspen Plus)

### 3. 전력 분배 방법

다중 스택 시스템의 경우 전력 분배 방법에 따라 전체 시스템 효율 곡선의 모양이 달라진다. 본 연구에서는 4개의 스택을 전기적으로 병렬로 연결한 연료전지 시스템에 3가지 전력 분배 방법을 적용하였다.

#### 3.1 동일 전력 분배

동일 전력 분배 방법은 각 스택에 전력을 동일하게 분배하는 방법이다. 단일 스택 또는 전기적으로 직렬로 연결한 다중 스택 시스템과 유사하게 거동한다.

#### 3.2 데이지-체인 전력 분배

데이지-체인(Daisy-chain) 전력 분배 방법은 각 스택에 순차적으로 전력을 분배하는 방법이다. (n-1)번째 스택이 최대 출력에 도달할 경우 (n)번째 스택을 가동한다.

#### 3.3 최적 전력 분배

최적 전력 분배 방법은 주어진 출력에서 전체 시스템 효율이 최대가 되게 전력을 분배하는 방법이다. 시스템 전체 효율을 목적 함수로 지정하고 최대화 조건을 설정하였고, 전력 할당 계수  $k$ 를 결정변수로

지정하였다. 제약 조건으로 전력 할당 계수  $k$ 를 0과 1사이의 값을 갖게 하고, 계수들의 합이 1이 되도록 설정하였다. 그리고 각 스택의 출력이 전류 밀도  $0.4 A/cm^2$ 에서의 출력을 초과하지 않게 설정했다. 최적화 solver는 generalized reduced gradient (GRG) non-linear method를 사용했다.

목적 함수

$$\eta_{sys,tot} = \frac{P_{tot}}{\sum_{i=1}^4 \frac{P_{tot} \times k_i}{\eta_{sys,i}}} \quad (9)$$

결정변수

$$k_1, k_2, k_3, k_4 \quad (10)$$

제약 조건

$$0 \leq k_1, k_2, k_3, k_4 \leq 1 \quad (11)$$

$$k_1 \geq k_2 \geq k_3 \geq k_4 \quad (12)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1 \quad (13)$$

$$P_{tot} \times k_1 \leq P_{max,each} (0.4 A/cm^2) \quad (14)$$

$$P_{tot} \times k_2 \leq P_{max,each} (0.4 A/cm^2) \quad (15)$$

$$P_{tot} \times k_3 \leq P_{max,each} (0.4 A/cm^2) \quad (16)$$

$$P_{tot} \times k_4 \leq P_{max,each} (0.4 A/cm^2) \quad (17)$$

솔버(solver)

GRG non-linear method.

Fig. 7은 전력 분배 방법에 따른 전체 시스템의 효율을 나타낸다. 3가지 전력 분배 방법 중 최적 전력 분배 방법의 효율이 가장 좋다. 최적 전력 분배 방법은 일정 전력에 도달하면 동일 전력 분배 방법의 효율과 동일하게 거동한다.

데이지-체인 전력 분배 방법은 간단한 전력 분배 방법으로 저전력 운전 시 동일 전력 분배 방법보다 효율이 좋으나 대부분의 운전 범위에서 동일 전력보다 효율이 낮다. 데이지-체인 전력 분배 방법은 개별

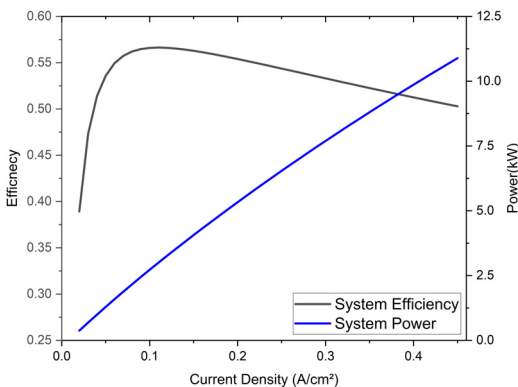


Fig. 6. Efficiency and power curve of each fuel cell system

스택 운전 범위의 한계에 따라 효율 곡선이 달라진다.

Fig. 8은 최적 전력 분배 시 개별 스택에 할당되는 전력의 비율을 나타내고 있다. 4개의 구간으로 나뉘며, 각 구간별 전력 할당 계수  $k$ 는 동일하다. 실제 시스템에 적용할 경우 전력 분배 알고리즘을 구축하는 것이 어렵지 않을 것으로 예상된다.

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 한국 주택, 전력 소비 프로파일(7월)

Fig. 9는 한국 주택의 시간별 전력 소비량 데이터

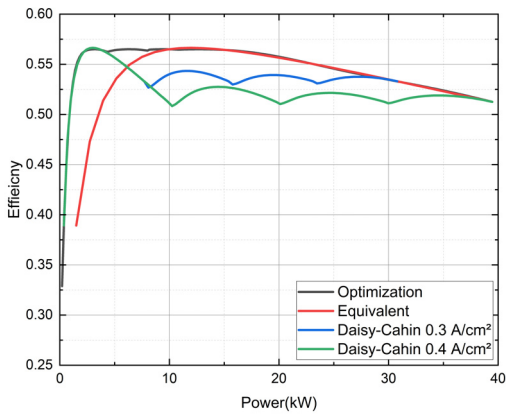


Fig. 7. Efficiency curves according to power distribution methods

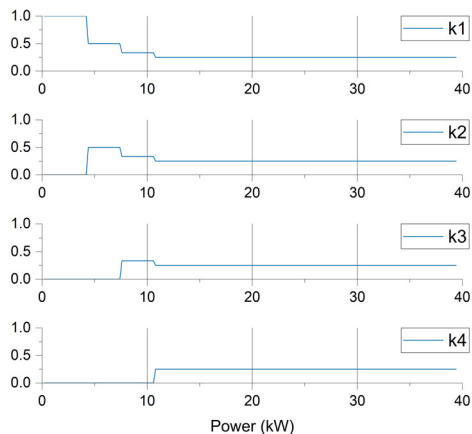


Fig. 8. Allocate power to each stack at optimal power distribution

를 바탕으로 가공된 상대계수로, 일간 평균(1,000)을 기준으로 하여 시간별 사용량을 상대적으로 산출한 그래프이다<sup>14)</sup>.

### 4.2 태양광 전력 프로파일

Fig. 10은 상용급 태양광 발전 장치의 시간별 전력 생산량을 나타낸 그래프이다<sup>15)</sup>. 최대 출력은 0.89 kW이다.

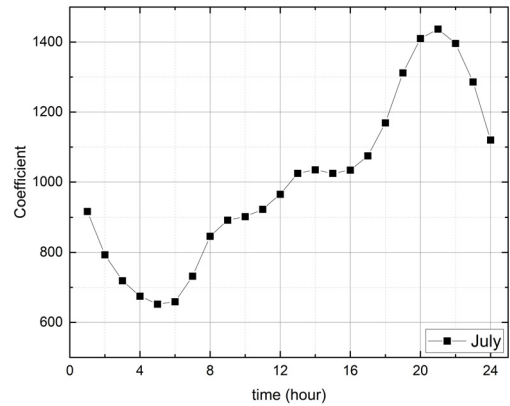


Fig. 9. Power consumption coefficient of house between 1 and 24 hours in July (Korea)

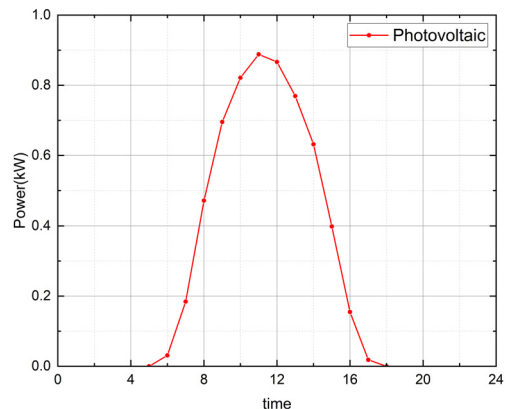


Fig. 10. Solar power generation curve



### 4.3 태양광-연료전지 하이브리드 전력 프로파일

Fig. 11은 주택용 전력 소비 프로파일에 태양광-연료전지 하이브리드 시스템을 도입하였을 때 연료전지 시스템의 전력 부하를 나타내는 그래프이다. 주택에서 요구하는 전력을 태양광 시스템이 먼저 충당하고 부족분은 연료전지 시스템이 충당한다.

Case 1과 case 2는 태양광 발전 장치의 규모를 달리하였다. Case 1의 태양광 전력 생산량은 Fig. 10의 전력 프로파일의 40배, case 2는 20배이고, 최대 출력은 각각 35.52 kW와 17.76 kW이다. 주택의 소비 전력은 최대 30 kW로 설정했다.

Case 1에서는 낮 시간(7시-13시) 동안 태양광 시

스템이 주택의 소비 전력을 전부 충당하여 연료전지 시스템은 가동을 중단한다. Case 2에서는 태양광 시스템이 주택 소비 전력의 일부만 충당하기 때문에 연료전지 시스템은 24시간 가동한다.

### 4.4 결과 및 토의

Fig. 12는 태양광-연료전지 하이브리드 시스템에서 연료전지 시스템의 효율과 전력 빈도를 나타내는 그래프이다. Case 1은 연료전지 시스템이 가동하지 않는 7시간을 제외하고 case 2보다 상대적으로 고전력 영역의 빈도가 높다. Case 2는 연료전지 시스템이 24시간 가동하고 case 1보다 저전력 영역의 빈도가

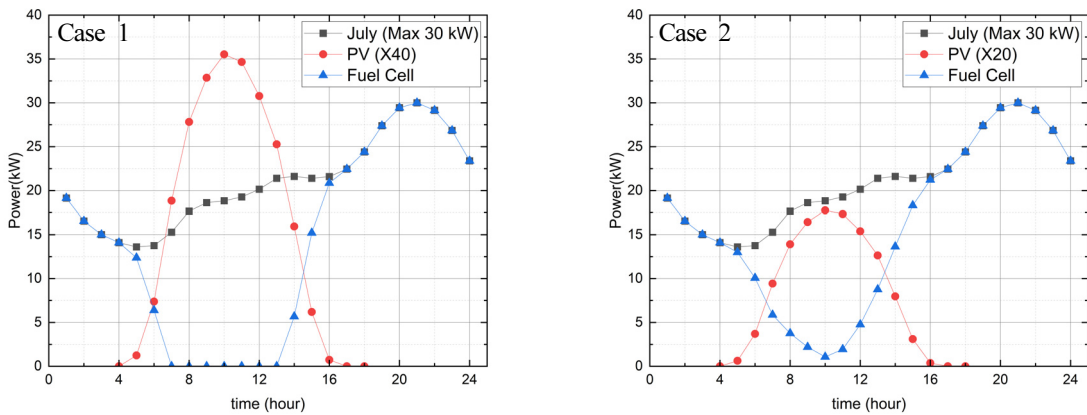


Fig. 11. Load of FC system in PV-FC hybrid system for residential application

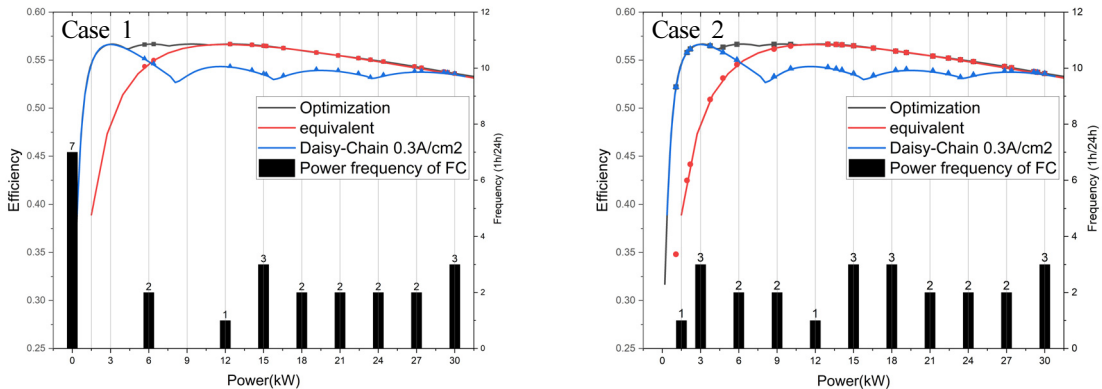


Fig. 12. Efficiency and power frequency of FC system in PV-FC hybrid system for residential application

상대적으로 높다. 최적 전력 분배 방법이 동일 전력 분배 방법보다 높은 효율로 운전하는 시간은 24시간 중 8시간이다.

Table 2는 각 case에 따른 30일간의 수소 소모량과 평균 효율을 나타내고 있다. 평균 효율은 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{24} Power_i}{\sum_{i=1}^{24} \frac{Power_i}{\eta_i}} \quad (18)$$

Case 1의 경우 연료전지 시스템이 저전력에서 운전하는 빈도가 낮아 동일 전력 분배 방법과 최적 전력 분배 방법의 수소 소모량과 평균 효율 차이가 각각 0.69 kg, 0.068%p로 미미하다. Case 2의 경우 연료전지 시스템이 저전력에서 운전하는 빈도가 상대적으로 높아 수소 소모량과 평균 효율의 차이가 각각 4.50 kg, 0.395%p로 case 1보다 크다. 즉 동일 전력 분배 방법보다 최적 전력 분배 방법이 효율이 좋은 저전력 영역에서 연료전지 시스템의 운전 빈도가 높을수록 최적 전력 분배 방법의 효율 향상 효과는 커진다.

시스템 구성(스택, BOP 등)을 변경하여 시스템 효율 곡선의 최고점이 우측(고전력 영역)으로 이동한다면 고전력 운전 영역에서도 최적 전력 분배 방법의 효과를 더욱 극대화할 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 연료전지 지배 방정식을 간단히 반영하여 Aspen Custom Modeler (Aspen Technology

Inc.), Aspen Plus 상용 소프트웨어를 사용하여 스택 및 시스템을 구축하였다. 세 가지 전력 분배 방법을 다중 스택 시스템에 적용하고 주거 환경의 태양광-연료전지 하이브리드 발전 시스템에서 연료전지 시스템의 수소 소모량 및 효율을 분석하였다.

1) 다중 스택의 경우 전력 분배 방법에 따라 연료전지 시스템 효율 및 수소 소모량이 달라진다. 대표적인 전력 분배 방법은 3가지로 동일, 데이지-체인, 최적 전력 분배 방법이 있다. 동일 전력 분배 방법은 동급의 단일 스택의 운전과 거동이 유사하고 저전력 영역에서 효율이 낮다는 단점이 있다. 데이지-체인 전력 분배 방법은 순차적인 전력 분배 방법으로 조작이 간단하며, 개별 스택의 운전 범위에 따라 효율 곡선이 달라지는 특징이 있다. 최적 전력 분배 방법은 전력 효율을 최적화한 것으로 다중 스택 시스템에서 가장 좋은 효율을 나타낸다.

2) 전력 분배 방법을 주거 환경의 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 연료전지 시스템에 적용하였을 때 태양광의 생성 전력량에 따라 효율 및 수소 소모량 절감의 효과가 다르다. 연료전지 시스템이 저전력 영역에서 운전되는 빈도가 높은 case 2의 최적 전력 분배 방법은 동일 전력 분배 방법 대비 4.50 kg의 수소 소모량을 절감시켰고, 이로 인해 0.395%p의 효율이 상승하였다.

3) 다중 스택 연료전지 시스템은 사용처에 따라 단일 스택 연료전지 시스템에 비해 전체 시스템 효율 상승 효과가 분명하다. 뿐만 아니라 내구성이 좋고 유지 보수가 용이하다는 등의 장점이 있기 때문에 실제 연료전지 시스템 제작 시 고려할 수 있는 요소 중 하나이다.

Table 2. Hydrogen consumption and average efficiency for each case per 30 days

Power distribution	Case 1		Case 2	
	Hydrogen consumption (kg)	Average efficiency	Hydrogen consumption (kg)	Average efficiency
Equivalent Distribution	552.12	54.923%	626.28	54.727%
Daisy-Chain Distribution	564.27	53.739%	636.84	53.818%
Optimal distribution	551.43	54.991%	621.78	55.122%

## Acknowledgement

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다(No.20203040030090).

## References

1. H. Oh, Y. Y. Choi, and Y. J. Sohn, "A study on the fuel cell equivalent circuit modeling", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 3, 2022, pp. 226-231, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.3.226>.
2. Hydrogen Council, "Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition", Hydrogen Council, 2017. Retrieved from [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up\\_Hydrogen-Council\\_2017.compressed.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf).
3. Y. D. Lee, J. Y. Kim, D. J. Yoo, H. Ju, and H. Kim, "Review of research trend in fuel cell: analysis on fuel-cell-related technologies in electrode, electrolyte, separator plate, stack, system, balance of plant, and diagnosis areas", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 530-545, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.530>.
4. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Roadmap to revitalize the hydrogen economy", MOTIE, 2019. Retrieved from [http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs\\_seq\\_n=161262&bbs\\_cd\\_n=81&currentPage=1&search\\_key\\_n=&cate\\_n=&dept\\_v=&search\\_val\\_v=](http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81&currentPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=).
5. S. Zhou, L. Fan, G. Zhang, J. Gao, Y. Lu, P. Zhao, C. Wen, L. Shi, and Z. Hu, "A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management", *Applied Energy*, Vol. 310, 2022, pp. 118555, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118555>.
6. J. Cardozo, N. Marx, L. Boulon, and D. Hissel, "Comparison of multi-stack fuel cell system architectures for residential power generation applications including electrical vehicle charging", In: *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion*; 2015 Oct 19-22; Montreal, Canada, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2015.7352912>.
7. J. E. Garcia, D. F. Herrera, L. Boulon, P. Sicard, and A. Hernandez, "Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system", In: *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics*; 2014 Jun 1-4; Istanbul, Turkey, pp. 218-223, doi: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864614>.
8. N. Marx, D. C. T. Cárdenas, L. Boulon, F. Gustin, and D. Hissel, "Degraded mode operation of multi-stack fuel cell systems", *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 6, No. 1, 2016, pp. 3-11, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0012>.
9. B. Eom, "A study on the energy management strategy of dual fuel cell mounted FCEV: improve efficiency and realism by using PSO-based fuzzy logic and cascade control [Master's thesis]", Yongin: Myongji University; 2018.
10. The Engineering ToolBox, "Types of Fans", The Engineering ToolBox, 2003. Retrieved from [https://www.engineeringtoolbox.com/fan-types-d\\_142.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fan-types-d_142.html).
11. IWAKI Korea, "Direct drive pumps: easy-to-install canned motor pumps", IWAKI Korea, 2012. Retrieved from <https://iwakikorea.co.kr/ko/boards/catalogs?sv=rd>.
12. G. Graditi, D. Colonnese, and N. Femia, "Efficiency and reliability comparison of DC-DC converters for single phase grid connected photovoltaic inverters", In: *SPEEDAM 2010*; 2010 Jun 14-16; Pisa, Italy, pp. 140-147, doi: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5542235>.
13. K. N. D. Malamaki and C. S. Demoulias, "Minimization of electrical losses in two-axis tracking PV systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 4, 2013, pp. 2445-2455, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2272405>.
14. Korea Electric Power Corporation, "Analysis of power consumption behavior, monthly power consumption factor from 1:00 to 24:00 for house", Korean Statistical Information Service, 2022. Retrieved from [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=310&tblId=DT\\_3664N\\_1&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=310&tblId=DT_3664N_1&conn_path=I2).
15. J. J. Hwang, L. K. Lai, W. Wu, and W. R. Chang, "Dynamic modeling of a photovoltaic hydrogen fuel cell hybrid system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 23, 2009, pp. 9531-9542, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.100>.