

## 수소 재순환 특성을 고려한 연료전지 시뮬레이터

Fuel Cell Simulator considering Hydrogen Recirculation Characteristics

---

저자 (Authors)	엄태호, 김준모, 이정, 정성문, 신민호, 이정효, 원충연 Tae-Ho Eom, Jun-Mo Kim, Jeong Lee, Sung-Mun Jeong, Min-Ho Shin, Jung-Hyo Lee, Chung-Yuen Won
출처 (Source)	<a href="#">조명전기설비학회논문지 32(7)</a> , 2018.7, 8-19(12 pages) <a href="#">Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 32(7)</a> , 2018.7, 8-19(12 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국조명전기설비학회</a> The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeld=NODE07503799">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeld=NODE07503799</a>
APA Style	엄태호, 김준모, 이정, 정성문, 신민호, 이정효, 원충연 (2018). 수소 재순환 특성을 고려한 연료전지 시뮬레이터. 조명전기설비학회 논문지, 32(7), 8-19
이용정보 (Accessed)	군산대학교 203.234.58.*** 2021/01/06 17:14 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

## 수소 재순환 특성을 고려한 연료전지 시뮬레이터

(Fuel Cell Simulator considering Hydrogen Recirculation Characteristics)

엄태호\* · 김준모 · 이정 · 정성문 · 신민호 · 이정호 · 원충연\*\*

(Tae-Ho Eom · Jun-Mo Kim · Jeong Lee · Sung-Mun Jeong ·  
Min-Ho Shin · Jung-Hyo Lee · Chung-Yuen Won)

### Abstract

In order to compensate a loss from the dynamic, a hydrogen fuel cell supplies the hydrogen more than 10% to its rated capacity. It brings the issue that a utilization rate of fuel cell degrades to 10%, therefore, the method is applied which recirculating the emitted hydrogen after their reaction. When their hydrogen recirculating, it results in emitting not the pure hydrogen but impurity, as a result it enables the electric energy to unstable. When a load requires certain power, a membrane of fuel cell has damaged due to voltage drop. In order to develop the charger which charging the energy into battery in fuel cell and battery hybrid system, it requires protection operation according to fuel cell output characteristic results from hydrogen recirculation. In fuel cell charger, selecting the level of protection operation voltage and current through experiment brings significant problem that damage of costly fuel cell. In this paper, we explain the design and control method of the fuel cell simulator which has output characteristic according to current density, temperature of fuel cell including hydrogen recirculation function and verify the validity through simulation and experiment.

Key Words : Fuel Cell Simulator, Proton Exchange Membrane Fuel Cell(PEMFC),  
Hydrogen Recirculation System, Fuel Cell Characteristics, Full Bridge Converter

### 1. 서 론

화석연료의 사용으로 환경오염, 지구온난화, 이상기온 및 미세먼지등과 같은 환경변화가 발생했고 이러한 환경변화는 지구의 생존환경을 무너트리고 있다. 전 세계의 각 정부는 환경변화를 막기 위해 많은 신재생에너지의 연구를 지원하고 있으며, 신재생에너지 중 하나인 연료전지는 특수한 환경이 필요하지 않고 소형화가 가능하여 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 연료전지 실험 시, 연료전지의 쇼트에 의하여 백금 촉

---

\* Main author : Combined M.S./Ph.D. course in Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University  
\*\* Corresponding author : Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University  
Tel : 031-290-7164, Fax : 031-290-7179  
E-mail : taehooo@skku.edu  
Received : 2018. 4. 9.  
Accepted : 2018. 7. 12.

매의 열화가 발생되어 수명이 저하, MEA(Membrane electrode assembly)에 파손이 생겨 사용할 수 없게 되기도 한다. 또한, 연료전지는 활성화 반응손실과 내부 저항 손실을 고려하여 실제 반응양보다 10% 이상 많은 수소를 공급하고 반응 후 남은 수소는 배출되기 때문에 수소이용률이 낮다[1-2]. 낮은 수소이용률에 따른 수소공급량 부족으로 인한 전압강하를 발생시켜 연료전지의 파손을 발생시킬 수 있다. 이러한 파손을 방지하기 위하여 연료전지 시뮬레이터에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 연료전지의 수소이용률을 높일 수 있는 방법으로 수소 재순환 시스템을 제안한다[3]. 제안하는 연료전지 시뮬레이터는 기존의 시뮬레이터와 같은 연료전지 V-I 특성 곡선에 따른 출력력 뿐만 아니라 수소 재순환 시스템에서 재순환 시 발생하는 수소의 순도 변화로 인해 발생하는 전압강하 특성과 촉매의 전류밀도와 온도의 변화에 따른 동특성을 시뮬레이터에 적용하였고, 시뮬레이터의 설계 및 제작하여 제안하는 연료전지 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다.

## 2. 연료전지 시뮬레이터

### 2.1 기존의 연료전지 시뮬레이터

기존의 연료전지 시뮬레이터는 벽 컨버터를 기반으로 하는 시뮬레이터이다. 벽 컨버터의 사용 이유로는 저항 손실 영역에서 전류 전압에 대하여 1차 함수로 모델링 하여 제어가 가능했기 때문이다. 연료전지는 반응온도 및 실온 양극 및 음극 압력 상대습도 등의 화학적인 요소 보다는 전류가 전기 회로 적으로 접근하기 용이하여 전기적으로 제어가 용이하여, 시뮬레이터의 출력전압은 식 (1)과 같이 전류의 함수로 표현되며, 저항 손실 영역 또한 1차 방정식을 통하여 시뮬레이터의 전압 제어에 사용된다[4].

$$v_{fc}(i_{fc}) = v_{fca}(0 < i_{fc} < i_{fca}) \quad (1)$$

$$v_{fc}(i_{fc}) = v \left[ \frac{v_{fef} - v_{fca}}{i_{fef} - i_{fca}} \right] i_{fc} - \left[ \frac{v_{fef} - v_{fca}}{i_{fef} - i_{fca}} i_{fca} - v_{fca} \right] \quad (0 < i_{fc} < i_{fca})$$

$$v_{fc}(i_{fc}) = 0 \quad (< i_{fc} < i_{fca})$$

( $v_{fca}$  = 초기전압,  $v_{fef}$  = 최종전압,  $i_{fca}$  = 초기전류,  $i_{fef}$  = 최종전류)

### 2.2 제안하는 수소 재순환 기능이 포함된 연료전지 시뮬레이터

기존의 연료전지 스택은 반응 셀이 적층 되어있는 연료전지 스택에서는 공급된 공기와 수소가 100%의 화학반응을 이루지 못하고 있는 수소를 외부로 방출하여 수소이용률이 낮다. 그러므로 스택의 성능 확보 및 수명 증대를 위하여 스택에서 반응하고 남은 수소는, 연료의 낭비를 막아 시스템의 수소이용률을 높이기 위해 배출되는 수소를 스택 입구로 되돌려 재사용한다.

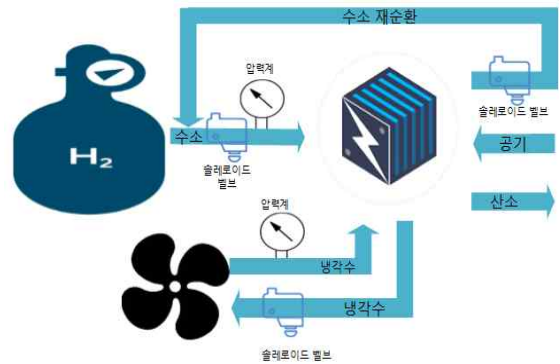


Fig. 1. Hydrogen recirculation configuration of PEMFC

수소 재순환 기법을 적용하면 기존의 반응하고 남은 수소를 재순환시켜 추가적인 수소를 공급하지 않아 수소이용률 증가시키는 장점을 갖는다. 그림 1과 같은 제안하는 수소 재순환 기법은 기존의 연료전지 시스템에서 수소 재순환 라인과 솔레노이드 밸브 부착만으로 구현이 가능하여 기존의 시스템에서도 매우 간편하게 적용이 가능하다.

그림 2와 같이 수소 재순환 시스템을 적용하고 정전류 제어를 할 경우 순수한 수소가 아닌 재순환 과정에서 불순물이 포함된 수소가 공급된다. 불순물이 포함

된 수소를 사용할 경우 전력밀도의 감소로 전압 강하가 발생되어 연료전지의 수명을 저하시킨다. 또한 기존의 토폴로지인 벡 컨버터는 비절연형으로 인한 연료전지 시스템의 안정성이 낮은 문제를 가지고 있다. PEMFC의 경우 연료전지의 출력전압을 승압하기 위한 절연형 풀 브릿지 컨버터로 소자의 수가 많으나 정격전류의 용량이 크기 때문에 채택하여 사용하였다.

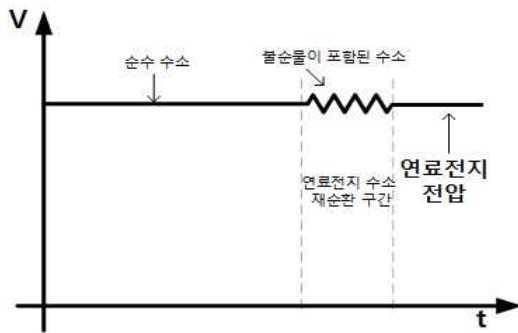


Fig. 2. Fuel cell voltage when hydrogen recirculation operation

### 3. 연료전지 시뮬레이터 설계

#### 3.1 연료전지 시뮬레이터 설계

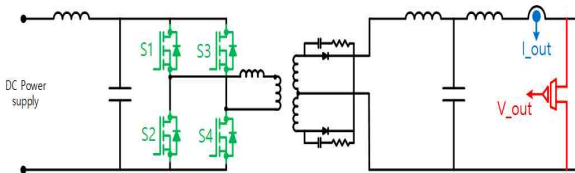


Fig. 3. Converter circuit of fuel cell simulator

연료전지에 사용되는 풀 브릿지 컨버터는 그림 3과 같이 높은 전류의 제어를 용이하기 위해 센터 탭 방식의 변압기를 이용하였다. 액티브 소자와 패시브 소자로 구성되어 있으며, 액티브 소자에는 전력용 반도체인 MOSFET와 전력용 다이오드가 있고 패시브 소자에는 출력 필터로 사용되는 인덕터와 커패시터가 있으며, 1차 측 전압의 승압을 위해 사용하는 고

주파 변압기가 있다. 연료전지 시뮬레이터 설계 사양은 표 1과 같고, 시뮬레이터의 전기적 사양은 표 2와 같다.

Table 1. Components specifications of fuel cell simulator

부품	사양	기타
스위치	600V, 90A	IXFN110N60P
다이오드	600V, 60A	VBE60-06
커패시터	600V, 2200uF	
인덕터	30A, 500uH	
변압기	17:21	센터 탭

Table 2. Electrical specifications of fuel cell simulator

	사양	기타
연료전지 모델	2.5kW	PEMFC
DC/DC 컨버터	2.5kW	Full bridge Converter
제어 방법	-	Output Voltage Control
통신방식	-	CAN, RS-232
스위칭 주파수	25kHz	-

#### 3.2 연료전지 시뮬레이터 모델링

그림 4는 PEMFC의 전류 밀도에 셀 전압곡선을 나타낸다. 이상적인 연료전지는 초기 개방회로 전압으로 1Cell 당 1.2V를 갖지만 실제 반응에서는 손실로 인하여 1Cell 당 1V이다. 연료전지 시스템은 구동 시 발생하는 손실 구간이 3가지로 나뉜다. 구동 후 연료전지의 화학반응에 의한 전압감소구간이 발생 1V에서 0.7V로 강하되며 활성화 손실구간이라고 한다. 내부저항 손실구간으로 연료전지의 내부 저항에 의한 손실로 전압이 일정하게 강하되는 구간이다[5]. 마지막 구간은 연료 부족으로 인한 순수도 감소로 인한 전압의 급강하가 발생되어 연료전지의 과손이 발생된다[6].

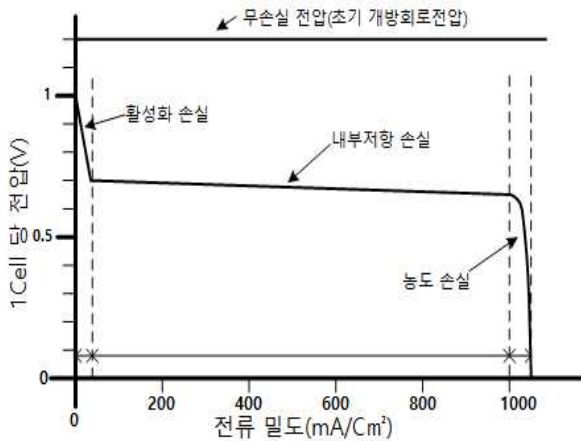


Fig. 4. V-I characteristic curves of PEMFC

이상적인 연료전지의 초기전압 개방회로 전압은 식 (2)로 구할 수 있다. 100℃ 이하에서 동작하는 셀에서 각 셀 당 전압은 1.2V가 된다. PEMFC는 주로 이동수단에 사용되어 빠른 시동 시간이 요구되기에 동작온도를 60℃~70℃로 제어한다[1].

$$E = \frac{-\Delta g_f}{2F} \quad (2)$$

$$\Delta V_{cell} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (3)$$

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (4)$$

( $g_f$  = 자유 에너지변화,  $F$  = फैष이온도,  $E$  = 에너지,  $A$  = 전극 물질 상수,  $T$  = 절대온도,  $R$  = 비례상수,  $i_0$  = 교환 전류밀도,  $\alpha$  = 전하 전달 계수)

활성화 반응 손실은 타펠의 식을 변형한 식 (3)을 이용하여 셀 당 전압을 구할 수 있다. 전기화학반응이 느린 경우 상수  $A$ 는 커지며, 반응이 빨라지면  $i_0$ 가 커진다. 상수  $A$ 를 구하는 식 (4)과 같이 연료전지 스택 내부의 저항 값과 온도에 비례하여 변화되는 것을 알 수 있다. 변화된 값은 그림 5와 같이 온도가 낮을수록 셀 당 전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다[7].

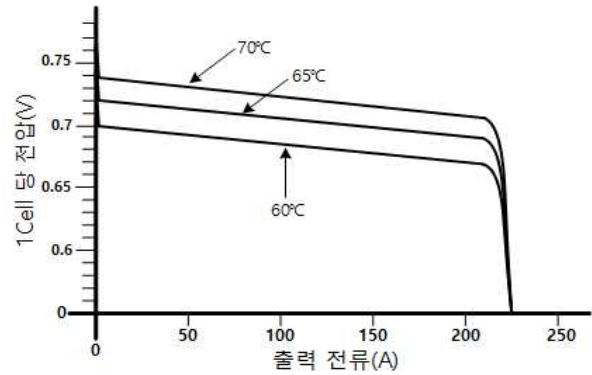


Fig. 5. V-I characteristic curves according to PEMFC temperature

그림 6은 백금촉매의 밀도에 따른 셀 당 전압을 나타낸다. 연료전지는 백금촉매의 밀도에 따라 출력 가능한 전류량이 변동된다. 수소 연료를 사용할수록 백금촉매가 소모되며, 촉매의 밀도가 낮아질수록 연료전지가 출력할 수 있는 전류량이 감소하게 된다.

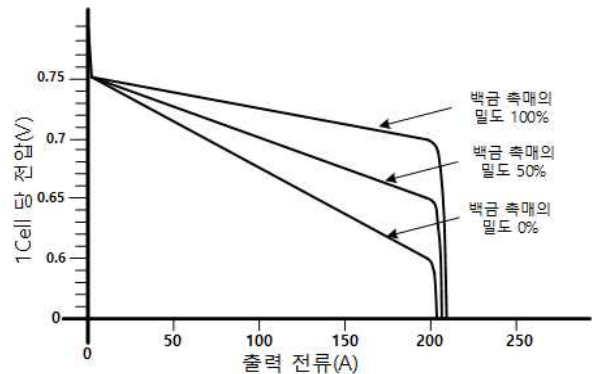


Fig. 6. V-I characteristic curves according to change of current density of platinum catalyst

### 3.3 제안하는 시뮬레이터 제어기법

제안하는 시뮬레이터의 경우 폴 브릿지 컨버터로 구성하였으며, 구성된 스위치는 서로 상보적으로 동작한다. 제어 알고리즘은 그림 7과 같다. 스타트 모드는 초기 입력된  $V_{open}$  값을 초기의 온도와 전류밀도 값을 가지고 식 (3)을 이용하여 도출된 전압 값을  $V_{OUT}$ 을 출력한다. 운전 모드는 온도 또는 촉매의

전류밀도 또는 수소 재순환 특성 조건을 입력받아  $V_{ref}$  값을 정하고  $V_{ref}$  값을 기존의 출력 전압인  $V_{OUT}$  값을 센싱하여 입력받은  $V_{out}$  값과 비교하여 같을 경우 출력한다[8].

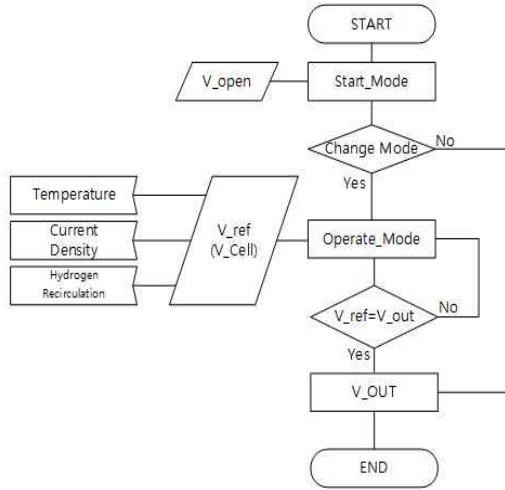


Fig. 7. Proposed control algorithm of fuel cell simulator

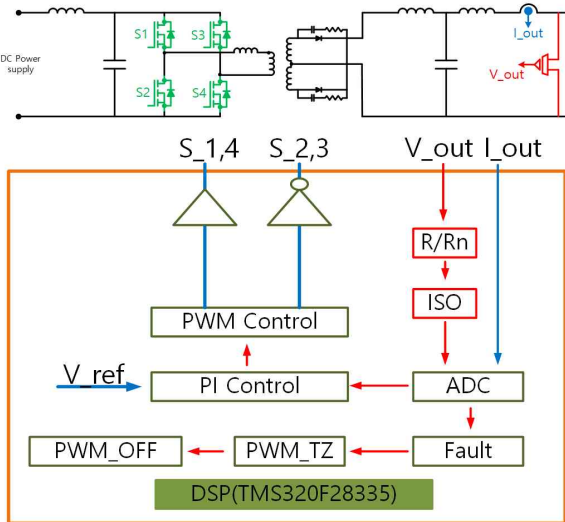


Fig. 8. Control block diagram of fuel cell simulator

그림 8은 연료전지 시뮬레이터의 제어 블록도이다. CPU로는 TI 社의 TMS320F28335를 이용하여 연산하며, 백금 촉매의 전류밀도와 연료전지 스택의 온도에

따른 출력 전압제어 및 재순환시 발생하는 전압변동 특성을 출력할 수 있다.

## 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 4.1 연료전지 시뮬레이터의 시뮬레이션

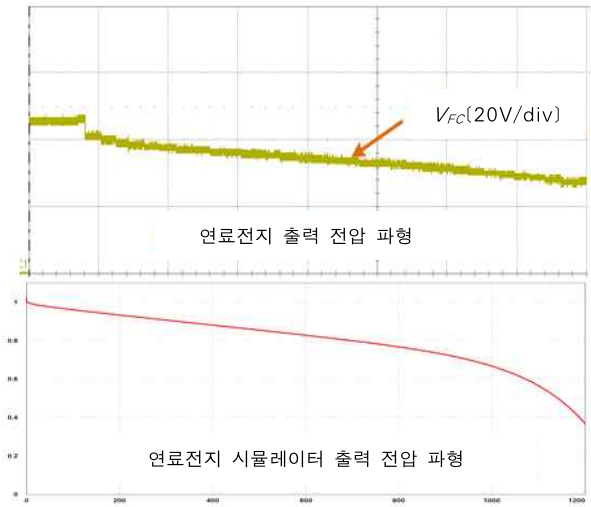


Fig. 9. Output voltage dynamic characteristic of fuel cell simulator

그림 9는 실제 연료전지의 출력 전압과 제안하는 연료전지 시뮬레이터의 시뮬레이션 출력 전압 파형이다. 실제 연료전지의 출력 파형은 연료전지의 특성과 유사한 형태이며, 연료전지 시뮬레이터의 시뮬레이션 파형 또한 유사한 것을 알 수 있다.

$$V_{Cell} = E - \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (5)$$

$$i_o = \frac{A}{E - V_{Cell}} \quad (6)$$

$$V_{cell} = \frac{V_{stack}}{n_{cell}} \quad (7)$$

$$i_o = \frac{\frac{RT}{2\alpha F}}{E - \frac{V_{stack}}{n_{cell}}} \quad (8)$$



( $F$  = 섭씨온도,  $E$  = 에너지,  $A$  = 전극 물질 상수,  $T$  = 절대온도,  $R$  = 비례상수,  $i_0$  = 교환 전류밀도,  $\alpha$  = 전하 전달 계수)

이상적인 연료전지 식을 이용하면 연료전지 스택의 온도가 상승하면 백금 촉매의 교환전류 밀도가 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 실제적으로 상수 값에 의한 변화 보다는 백금 촉매의 교환 전류밀도에 따른 변화가 크다. 따라서 이상적인 연료전지 전압 식에서 실제적인 연료전지 전압은 식 (5)을 통해서 구할 수 있다. 식(5)을 통해서 식 (6)을 구할 수 있고, 연료전지의 셀 전압은 전체 스택의 셀 개수로 나눈 식 (7)이 된다. 식 (6)과 식 (7)을 통하여 식 (8)을 구할 수 있다. 식 (8)에서의 교환전류밀도를 식 (5)에 대입하여 실제 연료전지 전압을 구하는 식을 도출할 수 있다. 식 (5)을 기본으로 온도조건 60°C와 70°C에서 교환전류밀도에 따른 출력 전압을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

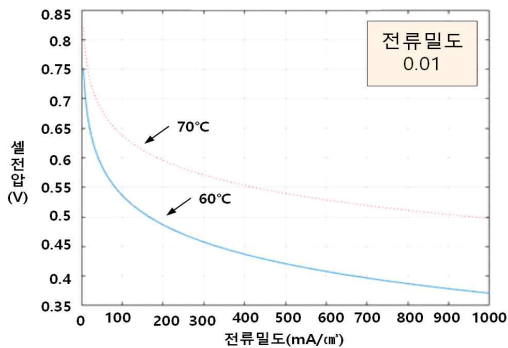


Fig. 10. Cell voltage curve according to temperature at the current density 0.01

그림 10은 교환전류밀도가 0.01mA/cm<sup>2</sup>일 때, 출력 셀 전압 파형이다. 전류밀도가 100mA/cm<sup>2</sup>을 기준으로 온도 60°C일 때, 셀 전압 0.54V이고 온도 70°C일 때, 셀 전압 0.64V이다.

그림 11은 교환전류밀도가 0.02mA/cm<sup>2</sup>일 때, 출력 셀 전압 파형이다. 전류밀도가 100mA/cm<sup>2</sup>을 기준으로 온도 60°C일 때, 셀 전압 0.58V이고 온도 70°C일 때, 셀 전압 0.67V이다.

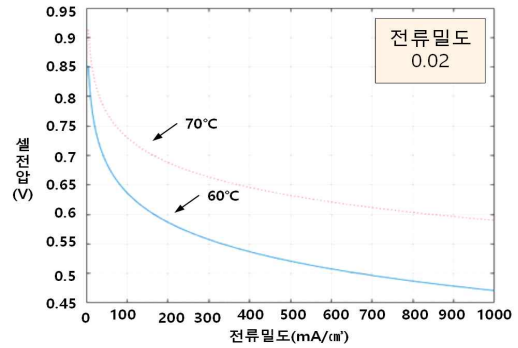


Fig. 11. Cell voltage curve according to temperature at the current density 0.02

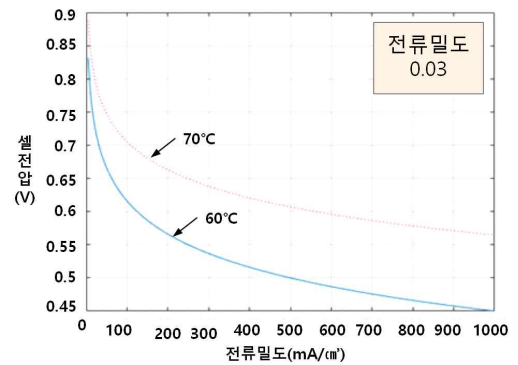


Fig. 12. Cell voltage curve according to temperature at the current density 0.03

그림 12는 교환전류밀도가 0.03mA/cm<sup>2</sup>일 때, 출력 셀 전압 파형이다. 전류밀도가 100mA/cm<sup>2</sup>을 기준으로 온도 60°C일 때, 셀 전압 0.61V이고 온도 70°C일 때, 셀 전압 0.7V이다.

그림 13은 교환전류밀도가 0.04mA/cm<sup>2</sup>일 때, 출력 셀 전압 파형이다. 전류밀도가 100mA/cm<sup>2</sup>을 기준으로 온도 60°C일 때, 셀 전압 0.64V이고 온도 70°C일 때, 셀 전압 0.73V이다. 전류밀도 100mA/cm<sup>2</sup>에서 비교하였을 때, 교환전류밀도가 0.01mA/cm<sup>2</sup>씩 증가할 경우 셀 전압이 0.03V씩 증가하며, 전압강하 폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 교환전류밀도가 클수록 연료전지의 출력전압이 높아지는 것을 검증하였다. 또한 동일한 교환전류밀도에서 온도가 높을 경우, 셀 전압이 높은 것을 확인하였다. 이는 활성화 반

응 시 발생하는 활성화 손실을 온도를 높임으로서 손실을 줄일 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

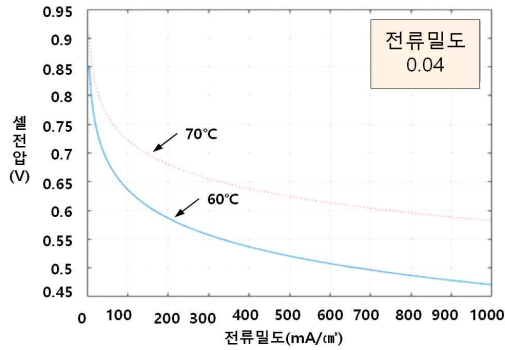


Fig. 13. Cell voltage curve according to temperature at the current density 0.04

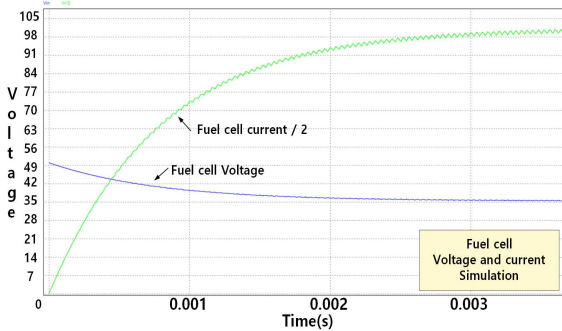


Fig. 14. Output voltage, current waveform of fuel cell simulator

그림 14는 온도가 70°C에서 교환전류밀도를 고려한 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압과 전류 파형이다. 출력 전류량에 따른 전압 강하 동특성이 적용되었으며, 최대 전류에서 출력 전압이 36V로 강하되는 것을 확인할 수 있다.

그림 15는 연료전지 시뮬레이터의 온도별 출력 셀 전압 곡선을 나타낸다. 식 (5)을 이용해서 온도조건에 따른 출력 셀 전압을 비교하였다. 초기 활성화 전압에 의하여 전압강하가 발생 후 내부저항에 의한 선형적인 전압강하를 비교하여 온도에 따라 연료전지 시뮬레이터의 임피던스 변화가 있는 것을 확인할 수 있다.

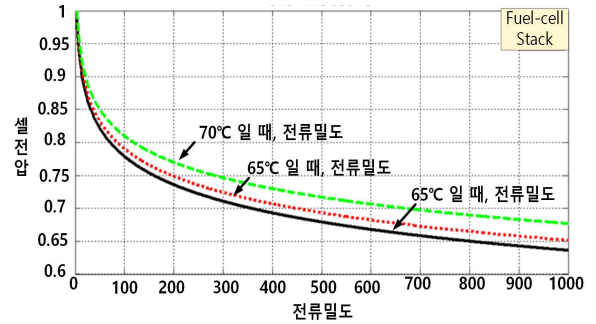


Fig. 15. Output cell voltage curves according to temperature of fuel cell simulator

#### 4.2 연료전지 시뮬레이터의 하드웨어 구성

연료전지 시뮬레이터의 하드웨어는 그림 16과 같이 구성하였으며, 센터 탭 방식의 변압기를 사용한 풀 브릿지 컨버터로 구성하였다. DSP 제어보드의 전원은 SMPS로 공급하고, 출력 단에 전압 센서와 전류 센서를 구성하여 출력 전압과 출력 전류를 센싱한다.

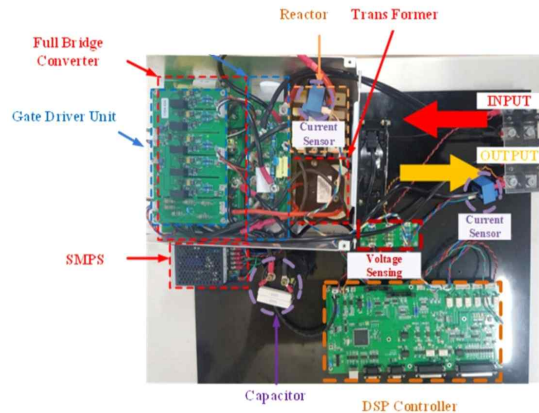


Fig. 16. Hardware configuration of fuel cell simulator

#### 4.3 연료전지 시뮬레이터의 특성 실험

연료전지 시뮬레이터의  $V_{open}$  값은 50V로 임의로 설정하였고, 초기온도는 60°C, 전류밀도는 800mA/cm<sup>2</sup>의 조건으로 입력하였다. 수소의 공급량은 같으며, 변화하는 출력 특성 조건은 온도와 전류밀도 및 수소



재순환 특성이다. 온도 조건은 60°C, 65°C, 70°C, 80°C, 90°C로 총 5가지 조건이다. 또한 전류밀도는 650 mA/cm<sup>2</sup>, 700mA/cm<sup>2</sup>, 750mA/cm<sup>2</sup>, 800mA/cm<sup>2</sup>로 총 4가지 조건으로 변화를 주었다. 온도 조건을 변화시킬 때 전류밀도 조건은 800mA/cm<sup>2</sup>로 고정을 하였고, 전류밀도를 변화시킬 때, 온도조건을 90°C로 고정하여 출력 전압과 전류 파형을 확인하였다. 그리고 수소 재순환 특성을 적용하여 재순환 시 발생하는 출력특성을 확인할 수 있다.

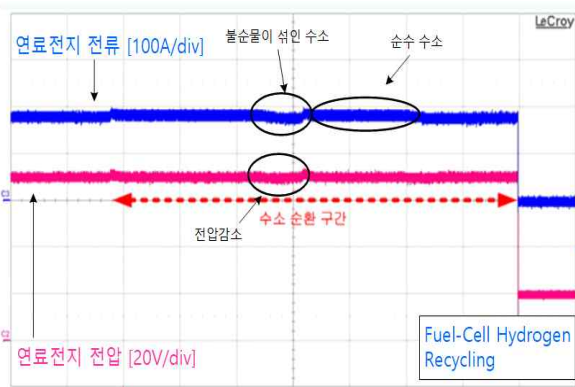


Fig. 17. Output voltage, current waveform of fuel cell simulator at hydrogen recirculation

그림 17은 연료전지 시뮬레이터의 수소 재순환 시, 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압, 전류 파형이다. 수소 재순환 과정에서 일정하게 출력되다가 불순물이 섞인 수소가 공급되면 전류밀도 감소로 인하여 출력 전류가 감소되어 순간적으로 전압강하가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 18~그림 22는 전류밀도를 800mA/cm<sup>2</sup>로 고정하고, 온도조건을 60°C, 65°C, 70°C, 80°C, 90°C로 바꾸며 설정한 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압, 전류 파형이다. 각 온도 조건에 따른 활성화 손실로 인한 전압강하를 확인할 수 있다. 해당 실험 결과를 통해 연료전지 스택의 온도가 연료전지의 출력 동특성에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

그림 18의 실험 결과를 통하여 스택 온도 60°C일 때, 활성화 손실에 의한 전압강하가 50V에서 41V로 9V의 전압강하가 발생하는 것을 확인하였다.

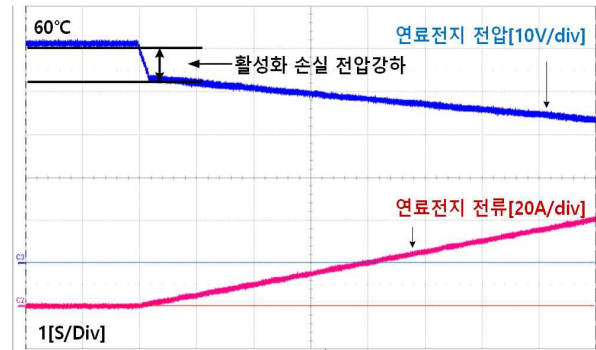


Fig. 18. Output voltage, current waveform of fuel cell at stack temperature 60°C

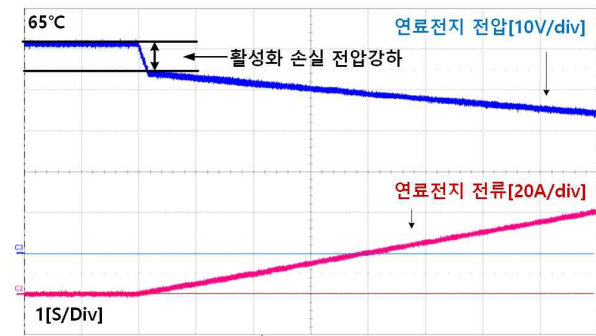


Fig. 19. Output voltage, current waveform of fuel cell at stack temperature 65°C

그림 19의 실험 결과를 통하여 스택 온도 65°C일 때, 활성화 손실에 의한 전압강하가 50V에서 42V로 8V의 전압강하가 발생하는 것을 확인하였다.

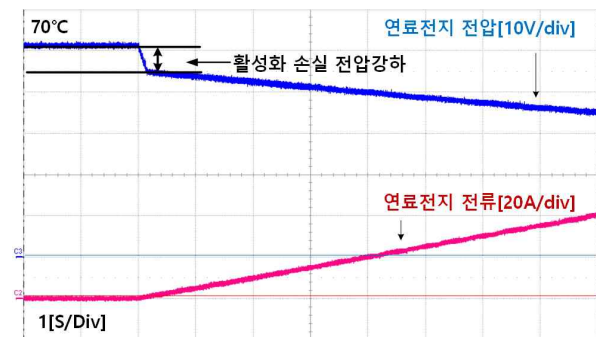


Fig. 20. Output voltage, current waveform of fuel cell at stack temperature 70°C

그림 20의 실험 결과를 통하여 스택 온도 70°C일 때, 활성화 손실에 의한 전압강하가 50V에서 43V로 7V의

전압강하가 발생하는 것을 확인하였다.

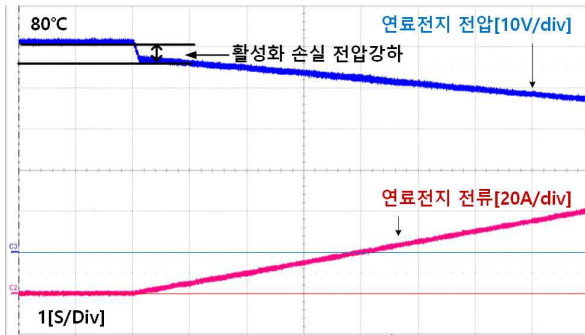


Fig. 21. Output voltage, current waveform of fuel cell at stack temperature 80°C

그림 21의 실험 결과를 통하여 스택 온도 80°C일 때, 활성화 손실에 의한 전압강하가 50V에서 45V로 5V의 전압강하가 발생하는 것을 확인하였다.

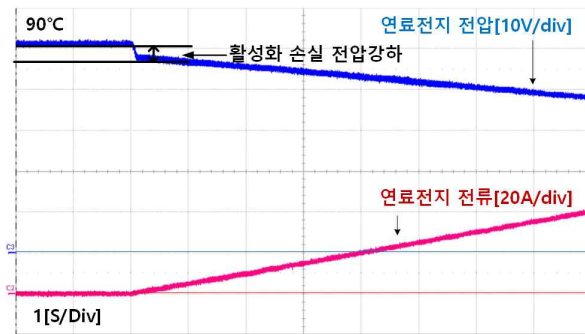


Fig. 22. Output voltage, current waveform of fuel cell at stack temperature 90°C

그림 22의 실험 결과를 통하여 스택 온도 90°C일 때, 활성화 손실에 의한 전압강하가 50V에서 46V로 4V의 전압강하가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 실험 결과로 연료전지 구동 시 발생하는 활성화 손실은 온도가 높을수록 활성화 손실에 의한 전압강하 폭이 감소하는 것을 확인하였다.

그림 23~그림 26은 온도조건을 90°C로 고정하고, 백금 촉매의 전류밀도 조건을 650mA/cm<sup>2</sup>, 700mA/cm<sup>2</sup>, 750mA/cm<sup>2</sup>, 800mA/cm<sup>2</sup>로 바꾸며 설정한 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압, 전류 파형이다. 각 촉매의 전류밀도 조건에 따른 내부저항에 의한 손실로 발생하는 전압

강하를 확인할 수 있다. 해당 실험 결과를 통해 연료전지 백금 촉매의 전류밀도가 연료전지의 출력 동특성에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

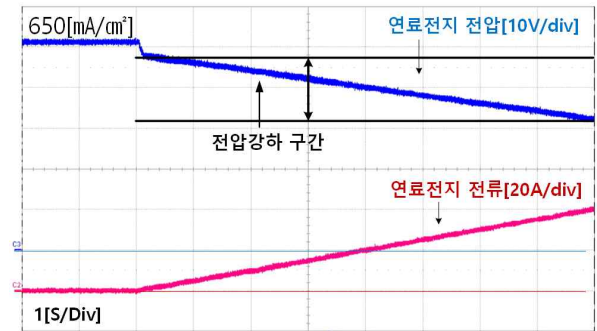


Fig. 23. Output voltage, current waveform of fuel cell at platinum catalyst current density 650mA/cm<sup>2</sup>

그림 23의 실험 결과를 통하여 연료전지의 백금 촉매 전류밀도가 650mA/cm<sup>2</sup>일 때, 내부저항에 의한 손실 구간에서 전압강하가 46V에서 31V로 감소하는 것을 확인하였다.

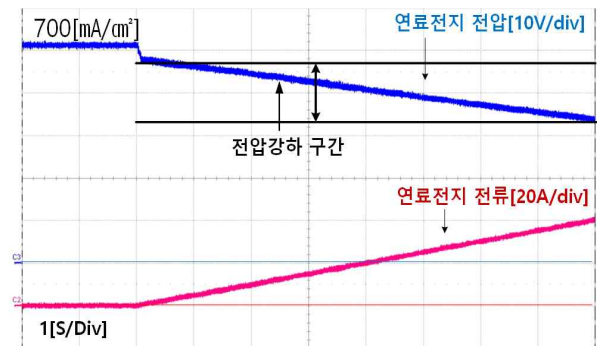


Fig. 24. Output voltage, current waveform of fuel cell at platinum catalyst current density 700mA/cm<sup>2</sup>

그림 24의 실험 결과를 통하여 연료전지의 백금 촉매 전류밀도가 700mA/cm<sup>2</sup>일 때, 내부저항에 의한 손실 구간에서 전압강하가 46V에서 33V로 감소하는 것을 확인하였다.

그림 25의 실험 결과를 통하여 연료전지의 백금 촉매 전류밀도가 750mA/cm<sup>2</sup>일 때, 내부저항에 의한 손실

구간에서 전압강하가 46V에서 35V로 감소하는 것을 확인하였다.

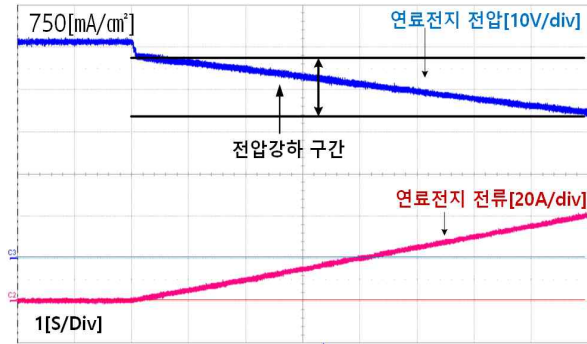


Fig. 25. Output voltage, current waveform of fuel cell at platinum catalyst current density 750mA/cm<sup>2</sup>

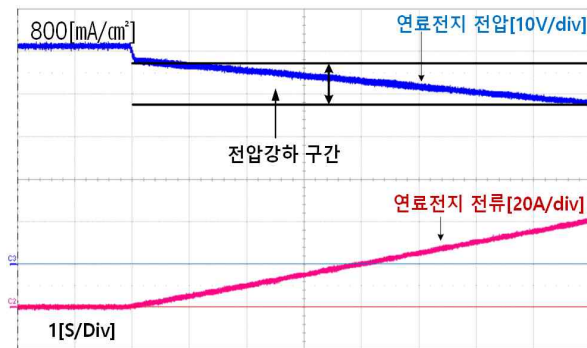


Fig. 26. Output voltage, current waveform of fuel cell at platinum catalyst current density 800mA/cm<sup>2</sup>

그림 26의 실험 결과를 통하여 연료전지의 백금 촉매 전류밀도가 800mA/cm<sup>2</sup>일 때, 내부저항에 의한 손실 구간에서 전압강하가 46V에서 37V로 감소하는 것을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과로 연료전지 구동시 발생하는 내부저항에 의한 손실은 백금 촉매 전류밀도가 클수록 전압강하 폭이 감소하는 것을 확인하였다.

#### 4.4 연료전지 시뮬레이터 연계 실험

연료전지의 온도와 백금 촉매 전류밀도의 변화에 대한 특성 변동을 적용한 연료전지 시뮬레이터를 기존

의 연료전지 스택과 동일하게 구성하여 실험을 진행하였다. 또한 수소 재순환 기법을 적용하여 제안하는 연료전지 시뮬레이터의 안정적인 출력 동작을 검증하였다. 그림 27은 기존 연료전지 스택의 출력 전압과 전류 파형을 나타내며, 그림 28은 제안하는 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압과 전류 파형을 나타낸다.



Fig. 27. Output voltage, current waveform of conventional fuel cell stack



Fig. 28. Output voltage, current waveform of proposed fuel cell simulator

## 5. 결론

본 논문에서는 수소 재순환 기법을 포함한 연료전지 시스템의 백금 촉매 전류밀도와 온도에 따라 변화하는 출력 특성을 고려한 연료전지 시뮬레이터의 설계 및 제어 기법을 제안하였다. 연료전지의 화학 반응에 의하여 생성되는 전력은 백금 촉매 전류밀도와 연료전지 스택의 온도, 수소 재순환을 포함한 수소의 순수도에 따라 활성화 손실 및 내부저항에 의한 손실이 필연적으로 발생되며, 이에 대한 이론적인 분석을

수행하였다. 또한 해당 변수에 대하여 다양한 조건에서의 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안하는 연료전지 시뮬레이터의 설계와 제어 기법의 타당성을 검증하였다.

연료전지 시뮬레이터의 연계 실험 결과로 수소 재순환 동작 시, 기존의 실제 연료전지 스택과 제안하는 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압과 전류를 비교하여 본 논문의 타당성을 검증하였다.

연료전지 시뮬레이터는 고가인 연료전지의 파손에 대비하기 위하여 실제 연료전지의 특성과 유사하게 동작하는 장치로써 높은 신뢰성을 갖도록 제작하는 기술이 중요하다. 본 논문에서 제안하는 연료전지 시뮬레이터는 수소 연료의 이용률을 증가시키는 수소 재순환 기법이 포함된 시뮬레이터로써 연료전지에 관한 연구와 선진 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

**Acknowledgement**

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2017년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

**References**

[1] Kang, D. H., "Predictive Control Method of Output Voltage in Fuel Cell Simulator considering Hydrogen Recycling Characteristics," M.Sc. Thesis, College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, 2017.

[2] Kwag, H. J., Chung, J. T., Kim, J. C., Kim, Y. C. and Oh, H. S., "Two-Phase Flow Analysis of The Hydrogen Recirculation System for Automotive Pem Fuel Cell," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 32, No. 6, pp. 446-453, 2008.

[3] Kwon, S. H., Kim, T. H., Bang, K. C., Kim, K. W. and Lee, S. W., "Development of Hydrogen Recirculation Blower for FCEV," International Journal of Automotive Technology, pp. 1640-1644, 2012.

[4] Oum, J. H., Lim, Y. C. and Jung, Y. G., "Implementation of a DSP Based Fuel Cell Hardware Simulator," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 23, No. 1, pp. 59-68, 2009.

[5] Park, Y. H., "Design and Control of Fuel Cell and Battery Hybrid System for Forklift," M.Sc. Thesis, College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, 2016.

[6] Oh, H. W., Lee, Y. I. and Min, K. D., "Experimental Analysis of the Mass Transport Resistance through Each Part of a PEMFC," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1258-1260, 2015.

[7] Dicks, A., and Rand, D. A. J., "Fuel Cell Systems Explained," John Wiley & Sons Ltd., 2nd Edition, 2003.

[8] Lee, J., Shin, M. H., Eom, T. H. Kim, J. M., Kim, S. H., and Won, C. Y., "Current Control Technique for Compensating Voltage Drop considering Hydrogen Recycle of Fuel Cell-Battery Hybrid System for Forklift", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 31, No. 11, pp. 52-60, 2017.

**Biography**



**Tae-Ho Eom**

He received his B.S. degree in Electrical Engineering from Soon-chunhyang University, Asan, Korea, in 2013. He is presently working towards his M.S. and Ph.D. degree in Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University. His current research interests include power converters, EV charger, fuel cell system, resonant converter, energy storage system.



**Jun-Mo Kim**

He received his B.S. degree in Electronic Engineering from Nam-seoul University, Cheonan, Korea, in 2016; and his M.S. degree in Mechatronics Engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 2018. He is presently working towards his Ph.D. degree in College of Photovoltaic System Engineering, Sungkyunkwan University. His current research interests include power converters, EV charger, resonant converter, energy storage system.



**Jeong Lee**

She received her B.S. degree in Electronic Engineering from University of Science and Technology, Ansan, Korea, in 2016; and her M.S. degree in Energy System Engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 2018. She is presently working towards her Ph.D. degree in College of Photovoltaic System Engineering, Sungkyunkwan University. Her current research interests include power converters, EV charger, resonant converter, energy storage system.





### Sung-Mun Jeong

He received his B.S. degree in Intelligence Robot Engineering from Bucheon University, Bucheon, Korea, in 2017. He is presently working towards his M.S degrees in College of Information and Communication

Engineering, Sungkyunkwan University. His current research interests include power converter, fuel cell system, renewable energy.



### Min-Ho Shin

He received his B.S. degree in Electrical Engineering from Hanyang Cyber University, Seoul, Korea, in 2008; and his M.S. and Ph.D degree in College of Information and Communication Engineering from Sung-

kyunkwan University, Suwon, Korea, in 2011 and 2017, respectively. From 2017, He has been a CEO in APEL Co. Ltd. His current research interests include power converters, fuel cell system, EV charger, energy storage system.



### Jung-Hyo Lee

He received his B.S. degree in Electrical Engineering from Konkuk University, Seoul, Korea, in 2006; and the M.S. and the Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Sungkyunkwan University, Suwon,

Korea, in 2008 and 2013, respectively. From 2013, He has been a senior researcher of automotive component R&D Team in LG Innotek. From 2016, He has been an assistant professor in Electrical Engineering department of Kunsan National University. His research interests include power converters and inverters for motor drive application.



### Chung-Yuen Won

He was born in Korea, in 1955. He received his B.S. degree in Electrical Engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 1978; and his M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Seoul

National University, Seoul, Korea, in 1980 to 1991, he was with the Department of Electrical Engineering, University of Tennessee, Knoxville, TN, USA, as a Visiting Professor. Since 1988, he has been a member of the faculty of Sungkyunkwan University, where he is a professor in the Department of Electrical and Computer Engineering. He is also the director of the Samsung Energy Power Research Center. He was the President of the Korean Institute of Power Electronics, in 2010. Since 2011, he has been a director of the Korean Federation of Science and Technology Societies. Since 2016, he has been a director of the DC distribution research center. His current research interests include the power electronics of electric machines, electric/hybrid vehicle drives, and power converters for renewable energy system. He is a Senior Member of the Institute of Electrical and Electronics Engineers.(IEEE).