

200 W급 휴대용 고분자 전해질막 연료전지 시스템 개발

한 훈 식, 김 윤 호*, 조 창 환**, 김 서 영***†, 현 재 민

한국과학기술원 기계공학과, *서울시립대학교 기계정보학과,
LG전자 CAC연구소, *한국과학기술연구원 에너지메카닉스센터

Development of a 200 W Portable PEM Fuel Cell System

Hun Sik Han, Yun Ho Kim*, Changhwan Cho**, Seo Young Kim***†, Jae Min Hyun

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Daejeon 350-701, Korea

*Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

**CAC Laboratory, LG Electronics, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 642-711, Korea

***Energy Mechanics Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received August 8, 2011; revision received October 28, 2011)

ABSTRACT: A 200 W portable polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system is developed. The PEMFC system consists of an air-cooled fuel cell stack module, a fuel supply subsystem, a power management subsystem, and a control electronics subsystem. The control logic is designed for the stable system operation. The system-level performance evaluation discloses that the present PEMFC system provides a rated power output of 200.5 W at 13.4 V with the maximum balance-of-plant (BOP) efficiency of 72%, and maximum system efficiency based on lower heating value (LHV) is 37% at 120.7 W system power output.

Key words: Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질막 연료전지), System(시스템), Balance-of-plant(주변장치), Efficiency(효율)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

F : Faraday 상수, 96485.34 C/mol
 I : 전류 [A]
 n : 단위 셀 수 [EA]
 V : 전압 [V]
 P : 전력 [W]
 Q : 열량 [W]
 U_{fuel} : 수소 공급량 [mol/s]

Δh_{LHV} : 저위발열량 기준 반응 엔탈피 [J/mol]
 η : 효율
 λ : 당량비

하첨자

$batt$: 2차 전지
 BOP : 주변장치
 eff : 유효
 $load$: 부하
 $stack$: 연료전지 스택
 sys : 연료전지 시스템

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

1. 서 론

화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 연료전지는 고효율, 친환경, 저소음, 구동부의 적음, 다양한 연료사용 등의 다양한 장점으로 인하여 전세계적인 환경오염 규제강화와 에너지 부존자원량의 감소에 대응할 수 있는 미래 발전기술로 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 다양한 종류의 연료전지 중 고분자 전해질막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 높은 출력밀도, 단순한 시스템 구성, 빠른 시동 및 응답속도, 높은 내구성 등의 특징으로 인해 휴대용, 수송용 및 가정용 분야의 차세대 전원으로 그 관심이 집중되고 있다.^(1, 2) 전해질, 전극, 분리판 등의 단위 셀(cell) 구조나 구성 재료에 대한 광범위한 연구가 수행되었으며 최근에는 주변장치를 포함한 연료전지 시스템의 개발도 활발히 이루어지고 있다.

50 W급 상업용 및 군수용 발전 시스템,⁽³⁾ 42 W급 노트북 컴퓨터용 전원공급 시스템,⁽⁴⁾ 30 W급 야외용 발전 시스템,⁽⁵⁾ 80 W급 무정전 전원공급(Uninterrupted Power Supply, UPS) 시스템⁽⁶⁾ 등의 휴대용 발전 시스템이 개발되었으며, 이와 같은 고분자 전해질막 연료전지 시스템은 일반적으로 연료전지 스택 및 이를 구동하기 위한 연료공급장치, 공기공급장치, 물관리장치, 열관리장치, 전력관리장치 및 시스템 제어장치의 주변장치(Balance of Plant, BOP)로 구성된다. 연료전지 스택은 시스템의 발전성능을 결정하는 중요한 요소이며 이를 안정적으로 구동하기 위해서는 신뢰성 있는 주변장치의 설계가 필수적이다. 그러나 과도한 주변장치의 설계는 불필요한 기생전력의 증대를 초래하여 시스템 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 시스템 부피와 무게를 증가시켜 시스템 소형화를 저해한다. 따라서 고효율 연료전지 시스템을 개발하는데 있어 발전용량을 고려한 주변장치의 최적화가 반드시 선행되어야 하며 이를 위해 시스템 출력에 따른 시스템 발전 성능을 주변장치의 관점에서 자세히 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 직류 전기를 안정적으로 공급할 수 있는 200 W급 휴대용 고분자 전해질막 연료전지 시스템을 개발하였고 다양한 부하 조건에서 스택 발전 전력, 2차 전지 충·방전전력 및 주변장치의 기생전력을 측정함으로써 시스템 출력에 따른 발전성능을 분석하였다. 개발된 연료전지 시스템은 Fig. 1과 같이 공랭식 연료전지 스택 모듈, 연료공급장치, 전력

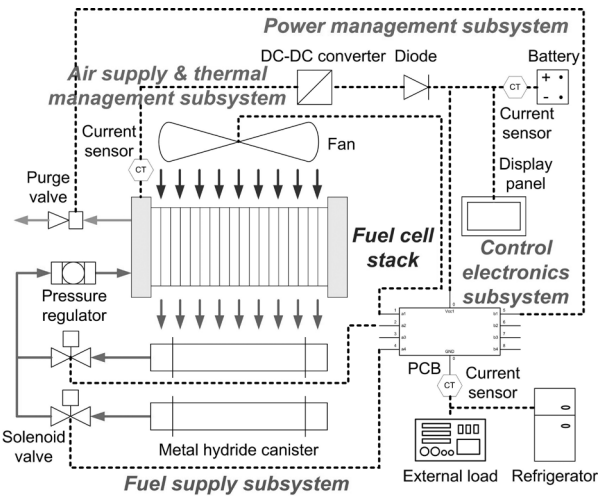


Fig. 1 Schematic diagram of the PEMFC system.

관리장치 및 시스템 제어장치로 구성되며 이를 위해 사용된 주요 요소부품을 Table 1에 나타내었다.










2. 시스템 설계

2.1 스택 및 공기공급장치

고분자 전해질막 연료전지 스택은 냉각방식에 따라 공랭식 스택과 수랭식 스택으로 구분할 수 있다. 수랭식 스택은 냉각수를 이용하여 스택을 냉각시키며 이를 위해 냉각수 순환유로, 냉각수 펌프, 가열된 냉각수를 냉각하기 위한 열교환기 및 송풍기를 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 수랭식 스택은 시스템의 구조가 복잡해지고 부피가 늘어나며 펌프의 높은 소모전력으로 인하여 시스템 효율이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 전체적인 셀의 온도를 균일하게 유지하기가 쉽고 열회수가 용이할 뿐만 아니라 냉각 성능이 공랭식보다 월등히 우수하여 공랭식으로는 스택 냉각이 불가능한 대용량 시스템이나 정밀한 스택 온도 제어가 필요한 시스템에 주로 적용된다.

이에 반해 공랭식 스택의 경우 공기공급장치가 전기화학반응에 필요한 공기를 스택에 공급할 뿐만 아니라 동시에 스택을 냉각시킨다. 이때 공기측 유로를 직렬로 설계할 경우 높은 압력강하로 인해 소비전력이 큰 고압용 원심형 송풍기를 사용해야 하지만 공기 측 분리판에 직렬 유로 대신 개방형의 직선 유로를 병렬로 다수 배치할 경우 압력강하가 줄어들어 원심형 송풍기 대신 소비전력이 상대적으로 적은 축류형 송풍기를 사용할 수 있다. 따라서 개방형

Table 1 Components of the PEMFC system

Item	Maker(model)	
PEMFC stack	Horizon Fuel Cell Technologies(H-300)	
Metal hydride canister	Ovonic Hydrogen Systems LLC (85G555B-NPT)	
Solenoid valve	SMC (VX2110M-01-6G1)	
Pressure regulator	Beswick Engineering Co. (PRD2-1N1-2-6X)	
DC-DC converter	Goldmac Co. (GMS300-48-15)	
Lead acid battery	Rocket Electric Co. (ESH 5-12)	
PCBs	Customized design	
Current sensor	Hankook Sensor Co. (PL1S030)	
LCD panel	Alls Technology (EZ-TFT350T)	

공기극 유로의 공랭식 스택을 사용할 경우 상대적으로 셀 온도를 균일하게 냉각하기가 어렵고 물관리도 쉽지 않은 면이 있으나 공기공급 및 냉각 장치에 의한 기생전력을 대폭 감소시킬 수 있다.^(7, 8) 이러한 공랭식 스택은 냉각수 펌프를 사용하지 않으므로 시스템 효율이 높을 뿐만 아니라 냉각수 유로와 열교환기 등의 설치가 필요 없어 시스템의 구조가 간단하고 부피가 작아 주로 소용량의 휴대용 시스템에 응용된다.^(1, 2)

따라서 본 연구에서는 200 W급 휴대용 연료전지 시스템을 개발하는데 있어 주변장치의 기생전력을 감안하여 스택의 최대 발전량을 300 W로 산정하였으며 시스템 휴대성을 고려하여 개방형 공기극 유로의 공랭식 고분자 전해질막 연료전지 스택(Horizon Fuel Cell H-300)을 채택하였다. H-300 스택 모듈은 스택뿐만 아니라 공기공급 및 스택 냉각을 위한 축류형 팬, 수소공급을 위한 입구 측 솔레노이드 밸브

(solenoid valve), 연료극 폐쇄형 운전(anode dead-end operation)을 위한 출구 측 퍼지 밸브(purge valve)와 이를 제어하기 위한 스택 제어기를 포함하며 제조사에서 제공하는 주요 재원을 Table 2에 도시하였다.

H-300 스택의 성능을 평가하기 위해 약 25°C의 외기 온도에서 다음과 같이 실험을 수행하였다. 수소공급을 위해 Table 1의 수소저장합금용기(metal hydride canister)와 압력조정기(pressure regulator)를 솔레노이드 밸브 전단에 설치하였고 직류전원장치(Agilent E3633A)를 사용하여 스택 제어기에 전력을 공급함으로써 팬, 솔레노이드 밸브 및 퍼지 밸브를 가동하였다. 발전성능 측정을 위해 PRODIGIT ELECTRONICS사의 3302C/3311D 전기부하기(electronic loader)를 사용하였으며 전류를 순차적으로 증가시키며 정상상태의 전압을 데이터 수집장치(Agilent 34970A)를 사용하여 기록하였다.

H-300 스택의 부하전류에 따른 성능시험 결과를 제조사가 제품출고 시 측정하여 제공하는 분극곡선(polarization curve) 및 전력곡선(power curve)과 함께 Fig. 2에 도시하였다. 전류를 증가시키에 따라 스택의 전압이 감소하는 전형적인 연료전지의 특성이 나타나며^(1, 2) 전류가 높아짐에 따라 발전량은 증가하는 것을 알 수 있다. 7 A의 전류에서 발전전력은 292 W로 측정되었고 이는 스택의 정격출력에 근접한 발전량을 나타낸다. 측정된 전압 및 발전전력이 제조사가 보장하는 성능과 비교적 잘 일치하며 전류가 상대적으로 높은 농도분극(concentration polarization) 영역에서는 부하전류가 증가함에 따라 발전량이 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 2 Technical specifications of the H-300 PEMFC stack module

Number of cells	63
Rated power	300 W(36 V @ 8.4 A)
External temp.	5~35°C
Max. stack temp.	67°C
H ₂ pressure	5.8~6.5 psi
H ₂ purity	≥99.99% dry H ₂
Purge valve voltage	12 V(dead-end operation)
Flow rate	3.9 lpm @ 300 W
Humidification	self-humidified
Cooling	air(integrated cooling fan)
Fan voltage	12 V
Start up time	immediate
Efficiency	45% @ 36 V
Dimensions	105×220×122 mm ³
Weight	1.7 kg

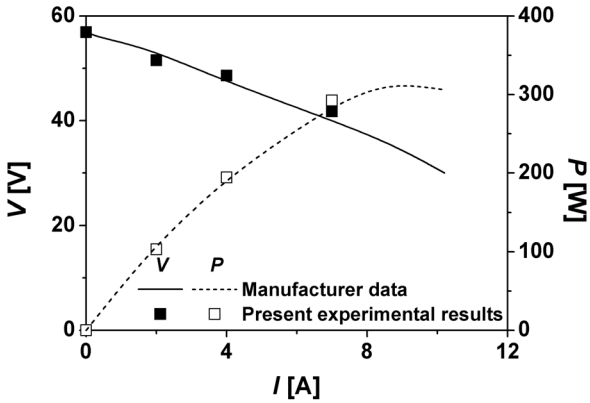


Fig. 2 Polarization and power curves of the H-300 PEMFC stack.

Fig. 3은 스택을 가동하기 위해 소모된 기생전력의 변화를 나타낸다. 부하전류가 증가함에 따라 더 많은 기생전력이 소모되며 이는 팬이 스택의 작동온도를 60°C 이하로 유지하기 위해 스택 제어기에 의해 단단 제어되어 부하조건에 따라 팬 소모전력이 바뀌기 때문이다. 즉, 부하전류가 증가하여 스택의 전압이 감소함에 따라 전기화학반응에 의해 발생하는 열이 증가하므로^(1, 2) 원활한 스택 냉각을 위해 팬의 소모전력이 증가하는 것이다.

2.2 연료공급장치

고분자 전해질막 연료전지 스택에 수소를 공급하기 위한 수소 공급원으로써 수소 저장합금용기를 선택하였고 시스템의 연속적인 운전을 위해 Fig. 1과 같이 2개의 용기를 병렬로 배치하였다. 시스템 가동으로 인하여 첫 번째 용기안의 수소가 완전히 소진되었을 경우 두 번째 용기를 이용하여 시스템을 구동시

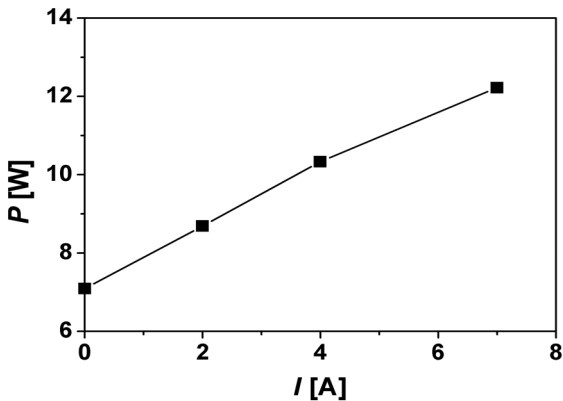


Fig. 3 Parasitic loss for the H-300 PEMFC stack operation.

키고 소진된 용기는 새로운 용기로 교체하여 추후 발생할 두 번째 용기의 연료소진에 대비할 수 있다. 이와 같은 선택적인 수소 저장합금용기의 사용을 위해 각 용기마다 솔레노이드 밸브(SMC VX2110M-01-6G1)를 설치하였으며 H-300 스택의 구동이 가능한 범위로 수소 압력을 조절하기 위하여 압력조정기(Beswick Engineering PRD2-1N1-2-6X)를 스택 전단에 배치하였다. 수소 저장합금용기의 용량을 결정하기 위해 연료전지 스택 발전량에 따른 수소 공급요구량($v_{fuel} = 0.5\lambda nI/F$)을 산정하였고⁽²⁾ 이에 따른 스택 구동시간을 제조사(Ovonic Hydrogen Systems LLC)가 제공하는 수소 저장합금용기의 저장용량을 기준으로 계산하여 Fig. 4에 도시하였다. 연료전지 스택의 연속출력이 310 W일 경우 760 L 용량의 수소 저장합금용기 2개를 사용한다면 스택 가동시간이 약 5.5시간이지만 250 L 용기를 2개 사용할 경우에는 사용시간이 약 1.8시간으로 줄어든다. 즉, 수소 저장용량이 작은 용기를 사용할수록 연속적인 시스템 가동을 위해 소모된 용기를 완충된 용기로 교체하는 일이 빈번히 발생하며 이는 연료전지 시스템을 사용하는 데 있어 불편을 초래하게 된다. 사용시간과 시스템 크기를 고려하여 저장용량이 760 L인 85G555B-NPT 수소 저장합금용기를 채택하였고 연료공급장치를 구성하는 요소부품의 재원을 Table 3에 정리하였다.

별도의 가습기나 연료 재순환장치를 사용하지 않고 용기로부터의 압력조정기와 연료전지 스택 출구의 퍼지 밸브에 의해서만 수소가 공급되는 폐쇄형 운전 방식은 시스템 구성이 단순하여 소용량의 휴대용 시스템에 주로 적용된다. 이러한 폐쇄형 운전 방식은 개방형 운전 방식에 비해 당량비(stoichiometry)가

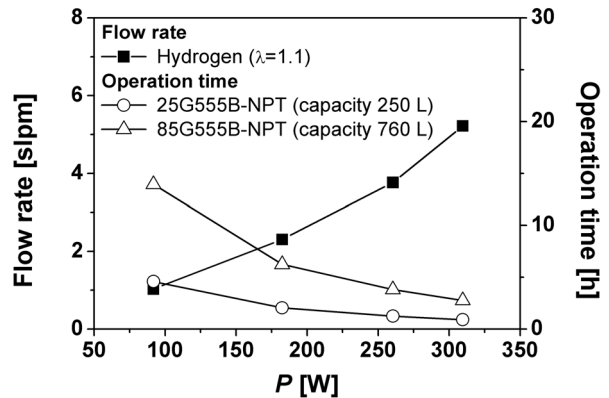


Fig. 4 Hydrogen consumption and operation time versus the stack power output (@STP-25°C, 100 kPa).

Table 3 Technical specifications of the fuel supply subsystem components

Metal hydride canister(85G555B-NPT)	
Nominal H ₂ capacity	68 g(760 std. L)
Rated discharge	6 slpm
Refilling	approx. 8 h at 250 psi (in flowing ambient air)
Operating temperature	0~75°C
Storage temperature	-29~54°C
Diameter/length	89 mm/419 mm
Weight	6.5 kg
Solenoid valve(VX2110M-01-6G1)	
Input voltage	12 V
Max. pressure	3 MPa
Fluid temperature	-10~60°C
Weight	0.3 kg
Pressure regulator(PRD2-1N1-2-6X)	
Material	316 stainless steel
Inlet pressure	0~500 psi
Outlet pressure	0~20 psi
Weight	0.05 kg

상대적으로 낮아 효율적인 운전이 가능한 것이 특징이며 생성된 물에 의해 유로가 막히어 다공성막으로의 수소 공급이 급격히 줄어드는 현상(flooding)을 방지하기 위해 적절한 주기로 퍼지 밸브를 개방하여 내부에 존재하는 물과 미반응 수소를 주기적으로 배출(periodic purge)시켜야 한다.^(6, 9) H-300 스택에도 폐쇄형 운전방식이 적용되었으며 퍼지 밸브는 10초를 주기로 1초간 작동한다.

2.3 전력관리장치

연료전지는 자기 시동(self starting)이 불가능하며 급격한 부하변동에 취약하므로 연료전지 시스템 시동 시 주변장치에 필요한 전력을 공급하고 급격한 부하변동에 안정적으로 대응하기 위해서는 연료전지와 2차 전지의 하이브리드 시스템(hybrid system) 구성이 필수적이다. 연료전지와 2차 전지의 하이브리드 운용 전략 중 본 연구에서는 2차 전지가 부하를 담당하고 연료전지는 2차 전지 전압이 기준치보다 낮은 경우 전지를 충전하기 위해 가동되는 자동 충전기(automatic battery charger) 개념의 하이브리드 운전 방식을 채택하였고⁽¹⁰⁾ 이를 구현하기 위해 Fig. 5와 같이 시스템 시동, 2차 전지 충전 및 방전의 시스템 작동 모드에 따른 전력관리 전략을 수립하였

다. 실시간으로 시스템 상태를 입력받아 적절한 제어를 수행하기 위한 시스템 제어장치는 시스템 작동 모드와 관계없이 항상 전력을 공급 받아야 한다. 이를 위해 연료 전지 작동 여부에 따라 연료전지 또는 2차 전지의 전원이 액정표시장치(Liquid Crystal Display, LCD)의 사용자 조작부(user interface)와 인쇄회로기판(Printed-Circuit Board, PCB)에 항상 연결되도록 시스템을 설계하였다. 연료전지는 2차 전지의 전위가 일정수준 이하로 내려가 충전이 필요한 경우에만 가동되며 시동 시 주변장치에 필요한 전력은 2차 전지로부터 공급받게 된다. 연료전지로부터 안정적인 전원이 확보되면 2차 전지의 충전과 주변장치로의 전력 공급을 연료전지가 담당하게 되며 2차 전지가 완충되었을 경우 연료전지의 가동은 정지된다. 이러한 각각의 작동 모드에 있어 부하가 존재할 경우 부하전력은 연료전지 작동 여부에 따라 연료전지 또는 2차 전지가 선택적으로 담당하게 된다.

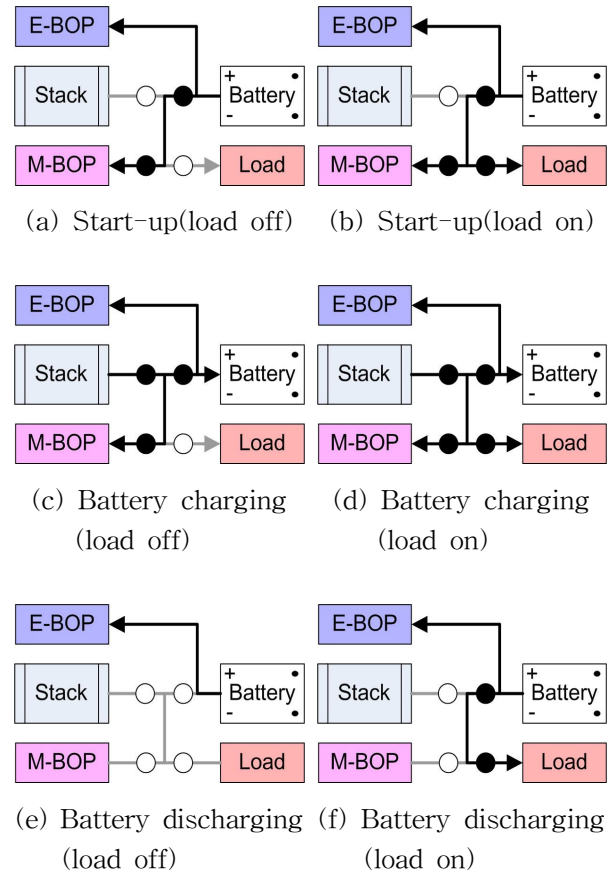


Fig. 5 Power management strategy according to the system operation mode(● relay on, ○ relay off).

H-300 스택의 전압은 Fig. 2와 같이 부하조건에 따라 변하며 주기적인 퍼지 밸브의 작동으로 진동하는 모습을 보인다. 이와 같은 전압의 주기적인 변동은 사용하고자 하는 전자기기에 손상을 가하여 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 전압범위도 전자기기의 사용전압과 상이하므로 직류 전압 변환기(DC-DC converter)를 사용하여 연료전지 스택의 전압을 전자기기에 적합한 사용전압으로 변환해야 한다. 연료전지 스택의 전압범위, 최대발전량 및 전자기기 사용전압 등을 고려하여 Table 4의 직류 전압 변환기(Goldmac GMS300-48-15)를 선정하였고 2차 전지로는 사용전압과 시스템 시동 시의 필요전력을 감안하여 12 V용 납축전지(Rocket Electric ESH 5-12)를 채택하였으며 이를 Fig. 1과 같이 배치하여 전력 관리장치를 구성하였다.

2.4 시스템 제어장치

연료전지 시스템을 안정적으로 운전하기 위해 연료전지 스택 시동 및 정지, 2차 전지 충·방전 전력관리, 수소저장용기 교체 등의 일련의 모든 과정을 제어할 수 있는 시스템 제어로직을 개발하였으며 Fig. 6에 시스템 제어 알고리즘(control algorithm)을 나타내었다. 시스템 상태를 확인한 후 2차 전지의 전압을 일정한 범위로 유지하기 위해 연료전지 스택이 가동되거나 정지하며, 연료전지 스택이 가동 중일 때 스택 전압이 특정 전압 이하로 감소하면 사용 중인 용기가 소진된 경우이므로 스택 가동을 정지하고 새로운 용기를 이용하여 연료전지 스택을 재가동한다. 이와 같은 시스템 제어 알고리즘을 기반

Table 4 Technical specifications of the power management subsystem components

DC-DC converter(GMS300-48-15)	
Input voltage	DC 36~72 V
Output voltage	DC 15 V
Maximum power output	300 W
Operating temperature	-20~70°C
Efficiency	max. 87%
Dimensions	117×61×13 mm ³
Lead acid battery(ESH 5-12)	
Voltage	DC 12 V
Capacity	5.4 Ah ³
Dimensions	90×70×106 mm ³
Weight	1.8 kg

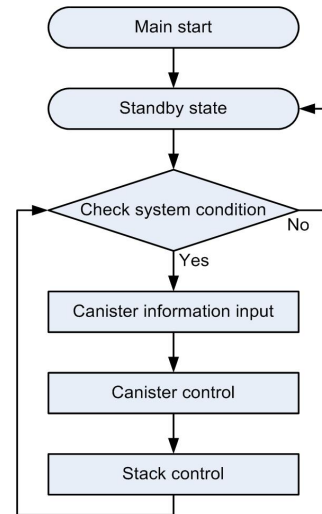


Fig. 6 Flow diagram of the main control algorithm for the system operation.

으로 ATMEL사의 ATmega16 집적회로(Integrated Circuit, IC)를 이용하여 인쇄회로기판(PCB)을 제작하였으며 연료전지 스택, 2차 전지, 부하, 솔레노이드 밸브 1, 솔레노이드 밸브 2 및 스택 제어기의 회로를 개폐하기 위해 총 6개의 계전기를 사용하여 Fig. 5와 같이 발전전력을 관리하였다. 또한 전류센서(Hankook Sensor PL1S030)를 Fig. 1과 같이 설치하여 스택 전류 및 2차 전지 충·방전전류를 입력 데이터로 사용하였고 시스템 가동 정보를 액정표시장치(Alls EZ-TFT350T)에 나타내어 사용자 편의를 도모하였다. 이와 같은 시스템 제어장치를 구성하는 주요 부품의 재원을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Technical specifications of the control subsystem components

Controller and relay PCBs	
IC chip	ATMEL ATmega16
Relay number	6 EA
Dimensions	117×61 mm ² (controller) 117×48 mm ² (relay)
Current sensor(PL1S030)	
Linear range	6 A
Operating temperature	-10~80°C
Dimensions	39×36×13 mm ³
LCD panel(EZ-TFT-350T)	
Processor	32 bit RISC ARM920T
LCD	320×240 QVGA
Display area	70×53 mm ²
Power consumption	5 V/0.47 A
Dimensions	100×77×15 mm ³

3. 시스템 통합 및 성능 분석

3.1 시스템 통합

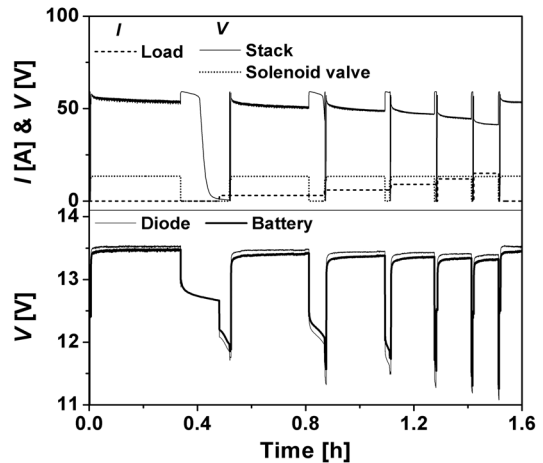
공랭식 연료전지 스택 모듈과 이를 구동하기 위한 연료공급장치, 전력관리장치 및 시스템 제어장치의 주변장치를 시스템 통합하여 고분자 전해질막 연료전지 시스템을 개발하였으며 각 구성부의 배치를 Fig. 7에 나타내었다. 시스템 상부에 수소 용기가 장착되는 연료공급장치가 배치되어 있으며 나머지 구성장치는 하부에 위치하여 연료공급장치로부터 수소를 공급받아 전기를 생산한다. 수소저장함용기에서 수소가 배출되는 과정은 흡열과정이므로 연료전지 가동 시 수소 용기는 원활한 수소 배출을 위해 열을 충분히 공급받아야 한다. 이를 위해 Fig. 7(a)와 같이 연료공급장치와 연료전지 스택 사이에 배치되는 수소 용기 고정판에 관통 구멍을 형성하여 스택에 의해 가열된 공기를 수소 용기로 송풍되도록 함으로써 스택의 배열을 수소저장함용기에 공급하였다. Fig. 7(b)는 연료공급장치를 제외한 연료전지 시스템의 형상으로써 공랭식 H-300 스택과 이를 구동시키기 위한 주변장치의 배치 모습을 나타낸다. 시스템 크기는 410×200×110 mm³으로 약 9 L이고 무게는 연료전지 시스템 고정판을 포함하여 약 8.2 kg이다.

3.2 시스템 성능 분석

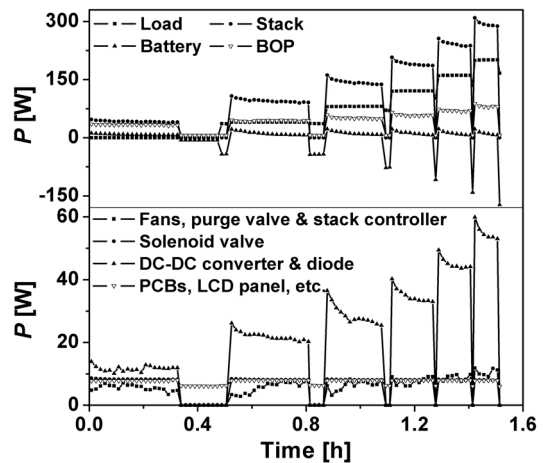
개발한 고분자 전해질막 연료전지 시스템의 발전 성능을 분석하기 위해 다양한 부하 조건에서 연료전지 스택의 발전전력, 2차 전지 충·방전전력 및 주변장치의 기생전력을 측정하였다. 전기부하기(PRO-DIGIT 3302C/3311D)를 사용하여 부하전류를 인가하였고 연료전지 스택 전압, 다이오드 후단의 전압,

솔레노이드 밸브 전압 및 2차 전지 전압을 데이터 수집장치(Agilent 34970 A)를 이용하여 기록하였다. MEXTEX사의 M-3860M 멀티미터(multimeter)를 이용하여 직류 전압 변환기의 입·출력 전류, 스택 제어기 소모전류, 솔레노이드 밸브 소모전류 및 2차 전지의 충·방전전류를 측정하였고 이로부터 부하 조건에 따른 시스템 전력분배 상태를 분석하였다.

Fig. 8(a)는 부하전류(0 A, 3 A, 6 A, 9 A, 12 A & 15 A)와 시스템 작동 모드에 따른 스택, 솔레노이드 밸브, 다이오드 후단 및 2차 전지의 전압변화를 나타낸다. 2차 전지의 전압 변화에 따라 2차 전지의 충전을 위해 연료전지 스택이 주기적으로 가동되며 연료전지 스택 가동 시 수소 공급을 위해 솔레노이드 밸브에 전압이 인가되는 것을 알 수 있다. 연료전지 스택의 전압은 부하전류가 증가할수록 감소하는



(a) Voltage variation



(b) Power variation

Fig. 8 Performance of the PEMFC system at various current loading conditions.

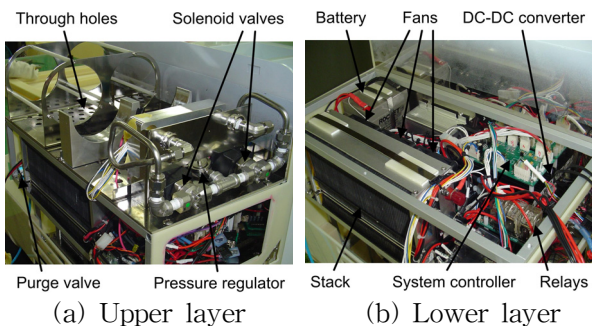


Fig. 7 Interior structure of the PEMFC system.

전형적인 연료전지의 특성을 나타내며 스택 가동이 멈추어 부하를 담당하지 않는 경우에는 유로 내의 잔류 수소로 인하여 전압이 급격히 상승하였다가 서서히 감소하고 시스템 시동 시 솔레노이드 밸브의 가동으로 인하여 전압이 다시 상승하는 양상을 나타낸다.

연료전지 스택이 가동될 경우 다이오드 후단의 전압이 2차 전지 전압보다 높아 2차 전지의 충전이 이루어지며 2차 전지의 충전이 완료되어 스택 가동이 정지한 경우 2차 전지의 방전으로 인하여 전지 전압이 감소하는 모습을 보인다. 부하전류가 작은 경우에는 2차 전지의 전압이 서서히 감소하지만 부하전류가 증가할수록 2차 전지의 전압이 낮아질 뿐만 아니라 시간에 따라 급격히 감소하여 연료전지 시스템 시동 시 2차 전지가 부하와 주변장치를 동시에 감당할 수 없게 된다. 따라서 9 A 이상의 부하전류에서는 시스템 시동 시 부하를 제거하여 주변장치에 필요한 전력을 원활하게 공급하였으며 연료전지 스택에서 안정적으로 전력이 발생되면 부하전류를 다시 인가하였다. 이와 같은 높은 부하에서의 시스템 시동 문제는 사용범위와 목적에 따라 2차 전지의 용량을 증가시키거나 시스템 시동 시 부하를 제거하도록 시스템을 제어함으로써 해결할 수 있다.

전류와 전압 측정을 통하여 구한 연료전지 스택의 발전전력, 2차 전지 충·방전전력 및 주변장치에 의해 소모되는 기생전력을 부하전력과 함께 Fig. 8(b)에 나타내었다. 연료전지 스택의 발전전력은 부하전력, 2차 전지 충·방전전력 및 기생전력으로 배분되므로($P_{\text{stack}} = P_{\text{load}} + P_{\text{batt}} + P_{\text{BOP}}$) 측정된 스택의 발전전력, 2차 전지 충·방전전력 및 부하전력으로부터 기생전력을 산정할 수 있다. 이와 같이 산정한 기생전력과 직류 전압 변환기, 다이오드, 팬, 퍼지 밸브, 스택 제어기 및 솔레노이드 밸브의 소모전력 측정값을 비교하였고 이로부터 인쇄 회로 기판, 액정표시 장치, 계전기 및 센서 등으로 구성되어 있는 시스템 제어장치의 소모전력과 부가적인 전력손실 등의 나머지 기생전력을 추정하였다.

부하전력에 따른 발전 특성을 살펴보면 부하전력이 높을수록 연료전지 스택의 발전량이 증가하며 스택으로부터 높은 전력을 발생시키기 위해 주변장치의 기생전력도 증가하는 모습을 보인다. 그러나 2차 전지의 충전전력은 부하에 관계없이 일정한 범위의 값을 보이는데 이는 충전전류의 흐름을 발생

시키는 다이오드 후단과 2차 전지의 전위차가 부하에 관계없이 일정한 범위내로 발생하기 때문이다. 또한 2차 전지는 모든 부하 조건에 대해 충전이 진행될수록 전압이 상승하여 다이오드 후단과의 전위차가 줄어들고 이로 인하여 충전전력이 감소하는 모습을 나타낸다. 따라서 연료전지 스택의 발전량도 부하 조건에 관계없이 시간에 따라 서서히 감소하는 모습을 보이며 스택의 발전량에 거의 비례적으로 발생하는 직류 전압 변환기와 다이오드의 변환손실도 모든 부하 조건에 대하여 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 전압 변환 시 직류 전압 변환기와 다이오드에 변환 효율이 존재하기 때문이며 따라서 연료전지 스택의 발전전력이 증가할수록 전력변환 손실도 증가하게 된다.

또한 팬에 의한 소모전력도 스택 발전전력이 증가함에 따라 전반적으로 상승하는 모습을 보이는데 이는 발전전력이 증가할수록 발생하는 배열도 증대되므로 스택을 냉각시키기 위해 많은 공기 유량이 필요하기 때문이다. 이에 반해 솔레노이드 밸브와 시스템 제어장치는 부하에 관계없이 거의 일정한 전력을 소모하며 따라서 부하전력 증가에 수반되는 기생전력 증대는 전압 변환 손실 및 팬 소모전력의 상승이 주요 요인으로 작용하는 것을 알 수 있다. 연료전지 스택이 가동을 멈춘 경우 2차 전지의 방전이 이루어져 전력 값이 음수로 나타나며 이때 2차 전지는 시스템 제어장치와 부하를 모두 담당하므로 부하의 증가에 따라 방전전력도 상승하는 경향을 보인다. 시스템 제어장치는 시스템이 가동 중인 경우에만 솔레노이드 밸브와 직류 전압 변환기용 계전기가 작동하므로 시스템이 정지한 경우보다 시스템 가동 시에 근소하게 높은 전력이 소모되는 것으로 판단된다.

Fig. 8(b)에 있어 2차 전지 충전을 위해 연료전지 시스템이 작동할 경우의 전력분배 상태를 각 부하 조건에 대해 시간 평균하여 Table 6에 나타내었다. 부하가 200.5 W인 경우 스택의 발전전력과 기생전력은 각각 294.4 W와 81.6 W이고 부하가 존재하지 않는 경우의 스택의 발전전력과 기생전력은 각각 42.0 W와 33.3 W이다. 이로부터 부하가 낮을수록 스택 발전량 중 기생전력이 차지하는 비율이 높아지는 것을 알 수 있으며 따라서 부하가 낮은 조건에서 시스템을 운전하는 것이 상대적으로 비효율적임을 짐작할 수 있다. 이는 연료전지 스택이 발전전력이 없는 개회로 전압(Open-Circuit Voltage, OCV) 상태

Table 6 Power distribution according to the external load

Power[W]	Current loading[A]					
	0	3	6	9	12	15
Load	0.0	40.4	80.6	120.7	160.8	200.5
Battery	8.7	11.4	12.3	12.4	12.1	12.3
BOP	33.3	43.8	51.0	58.6	69.8	81.6
- DC-DC converter and diode	11.7	22.0	28.7	34.9	45.2	55.1
- Fans, purge valve and stack controller	5.5	5.7	6.4	7.7	8.7	10.6
- Solenoid valve	8.3	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0
- PCBs, LCD panel, relays, sensors, etc.	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
Stack	42.0	95.6	143.9	191.7	242.7	294.4

에 있더라도 기생전력이 소모되므로 부하가 낮아질수록 시스템 효율이 감소하는 현상에서 기인한다.^(6, 10)

연료전지 스택 발전량 중 실제 사용이 가능한 유효전력이 차지하는 비율을 부하 조건에 따라 비교하기 위하여 주변장치 효율을 식(1)과 같이 시스템 유효 발전전력의 연료전지 스택 발전전력에 대한 비로 정의하였다. 이때 완충된 2차 전지는 연료전지 시스템이 정지하였을 경우 부하를 담당하는 전원으로 사용되므로 연료전지 시스템 가동 시 2차 전지의 충전전력은 기생전력이 아닌 부하전력으로 간주하는 것이 타당하며 따라서 시스템의 유효 발전전력은 부하전력과 2차 전지 충전전력의 합으로 나타내었다. 또한 연료전지 스택에 공급된 연료의 화학에너지가 전기에너지로 변환되는 정도를 나타내는 연료전지 스택의 효율은 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)을 기준으로 식(2)과 같이 표현되므로^(1, 2) 시스템에 공급한 연료를 기준으로 어느 정도의 전력을 실제 사용할 수 있는지를 의미하는 연료전지 시스템의 효율은 식(3)과 같이 연료전지 스택 효율과 주변장치 효율의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{\text{BOP}} = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{stack}}} = \frac{P_{\text{load}} + P_{\text{latt}}}{P_{\text{stack}}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{stack}} = - \frac{P_{\text{stack}}}{v_{\text{fuel}} \Delta h_{\text{LHV}}} = - \frac{2FV_{\text{stack}}}{\lambda n \Delta h_{\text{LHV}}} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{stack}} \eta_{\text{BOP}} \quad (3)$$

이와 같이 산정한 연료전지 시스템의 주변장치 효율과 시스템 효율을 Fig. 9에 나타내었다. 주변장치의 효율은 부하가 없는 경우 약 21%이지만 부하전력이 200.5 W로 증가함에 따라 약 72%로 증대된

다. 이는 높은 부하전력에 대응하기 위해 상승하는 스택 발전전력에 비해 주변장치의 소비전력 증가량이 상대적으로 매우 작기 때문이다. 또한 부하가 작은 영역에서는 부하전력의 증가에 따라 주변장치 효율이 급격히 증가하지만 상대적으로 부하가 높은 영역일수록 그 증가폭이 둔화되는 것을 알 수 있다. 수소 공급 유량을 부하에 관계없이 Table 2의 스택 정격출력 기준으로 유지할 경우 연료전지 스택 효율은 부하전력이 증가함에 따라 상승하는 모습을 보인다. 이는 수소가 일정한 유량으로 공급되는 경우 식(2)와 같이 스택 효율이 스택 발전량에 비례하여 증가하기 때문으로 부하가 낮아질수록 전기화학 반응에 참여하지 않고 버려지는 수소가 늘어남을 의미한다. 따라서 전기화학 반응에 필요한 양에 비해 과급되는 정도를 나타내는 수소 당량비($\lambda = 2Fv_{\text{fuel}}/nI_{\text{stack}}$)는 부하가 0 W에서 200.5 W로 증가함에 따라 $\lambda = 10.48$ 에서 $\lambda = 1.15$ 로 감소하는 모습을 나타낸다. 시스템 효율은 부하에 따라 거의 선형적으로 증가

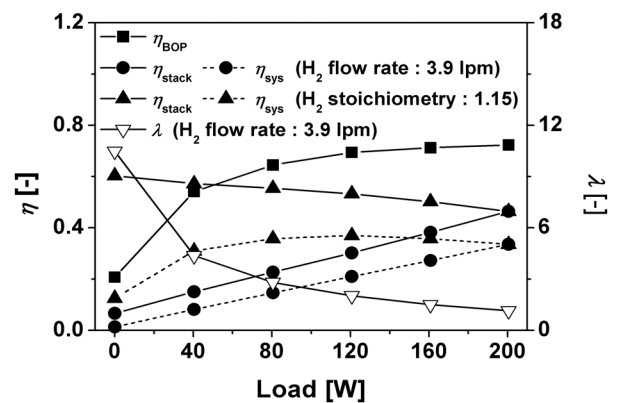


Fig. 9 Efficiency of the BOP, fuel cell stack and fuel cell system according to the external load (@STP-25°C, 100 kPa).

Table 7 Technical specifications of the PEMFC system

Rated power	200.5 W(13.4 V @ 15 A)
Voltage	12~13.4 V DC
External temp.	5~35°C
Start up time	immediate
Efficiency	max. 37%
Dimensions/weight	410×200×110 mm ³ /8.2 kg (w/o fuel supply subsystem)

하여 부하전력이 200.5 W일 때 약 34%를 나타낸다.

시스템을 보다 효율적으로 운용하기 위해서는 모든 부하조건에 대해 당량비를 일정하게 유지하여 수소를 공급해야 하며 이 경우 스택 효율은 식(2)와 같이 연료전지 스택의 전압에 비례하게 된다. Fig. 9에 부하 조건에 관계없이 수소 당량비를 1.15로 유지하였을 경우의 스택 효율과 시스템 효율을 도시하였으며 스택전압이 Fig. 8과 같이 부하전력이 증가함에 따라 감소하므로 스택 효율 또한 부하전력이 상승할수록 낮아지는 모습을 보인다. 또한 스택 효율과 주변장치 효율의 곱으로 표현되는 시스템 효율은 부하전력이 높아짐에 따라 증가하다 감소하여 부하전력이 120.7 W일 때 효율이 약 37%로 최대가 되며 이로부터 부하 전력에 따른 최적의 운전점이 존재하는 것을 알 수 있다.⁽⁶⁾ 개발한 고분자 전해질막 연료전지 시스템의 성능 평가를 통하여 산정한 시스템 정격출력, 전압, 시스템 효율 등의 주요 재원을 Table 7에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 직류 전기를 안정적으로 공급할 수 있는 200 W급 휴대용 고분자 전해질막 연료전지 시스템을 개발하였다. 개발된 연료전지 시스템은 소용량 휴대용에 적합한 공랭식 스택 모듈과 이를 구동하기 위한 연료공급장치, 전력관리장치 및 시스템 제어장치의 주변장치로 구성된다. 시스템 기본설계, 요소 부품 선정·개발·성능평가 등을 수행하였고 각 구성장치를 시스템 통합하여 연료전지 시스템을 제작하였다. 연료전지 시스템을 안정적으로 구동하기 위해 연료전지 스택 시동 및 정지, 2차 전지 충·방전 전력관리, 수소저장용기 교체 등의 시스템 제어로직을 설계하였으며 실제 연료전지 시스템 구동 시 안정적인 발전이 이루어지는 것을 확인하였다.

개발한 연료전지 시스템의 성능평가를 위해 시스

템 출력에 따른 스택 발전전력, 2차 전지 충·방전 전력 및 주변장치의 기생전력을 측정함으로써 시스템 발전 성능을 분석하였고 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 개발한 연료전지 시스템의 출력전압 범위는 직류 12 V에서 13.4 V이며 정격출력은 200.5 W(13.4 V @ 15 A)로 측정되었고 이때 주변장치는 72%의 최대효율을 나타내었다.

(2) 주변장치 효율은 시스템 출력이 증가함에 따라 상승하며 출력이 높아질수록 그 증가폭이 둔화되었다.

(3) 수소 공급량을 시스템 출력에 관계없이 스택 정격출력 기준으로 유지할 경우 시스템 출력이 증가함에 따라 시스템 효율이 거의 선형적으로 향상되어 시스템 출력이 200.5 W일 때 약 34%의 효율을 나타내었다.

(4) 시스템 출력에 관계없이 수소 공급 당량비를 1.15로 유지하였을 경우 시스템 출력에 따라 시스템 효율이 최대가 되는 최적 운전점이 존재하며 시스템 출력이 120.7 W일 때 시스템 효율이 약 37%로 최대가 되었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원의 신기술융합형 성장동력사업(과제번호 2N34431)의 일환으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- O'Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W., and Prinz, F. B., 2006, Fuel Cell Fundamentals, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Larminie, A., 2003, Fuel Cell Systems Explained, second ed., John Wiley and Sons Ltd., Chichester.
- Chu, D., Jiang, R., Gradner, K., Jacobs, R., Schmidt, J., Quakenbush, T., and Stephens, J., 2001, Polymer electrolyte membrane fuel cells for communication applications, J. Power Sources, Vol. 96, pp. 174-178.
- Tuber, K., Zobel, M., Schmidt, H., and Hebling, C., 2003, A polymer electrolyte membrane fuel cell system for powering portable computers, J. Power Sources, Vol. 122, pp. 1-8.

5. Oszcipok, M., Zedda, M., Hesselmann, J., Huppmann, M., Wodrich, M., Junghardt, M., and Hebling, C., 2006, Portable proton exchange membrane fuel-cell systems for outdoor applications, *J. Power Sources*, Vol. 157, pp. 666-673.
6. Chang, H. P., Chou, C. L., Chen, Y. S., Hou, T. I., and Weng, B. J., 2007, The design and cost analysis of a portable PEMFC UPS system, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 316-322.
7. Santa Rosa, D. T., Pinto, D. G., Silva, V. S., Silva, R. A., and Rangel, C. M., 2007, High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient pressure and temperature conditions, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 4350-4357.
8. Wu, J., Galli, S., Lagana, I., Pozio, A., Monteleone, G., Yuan, X. Z., Martin, J., and Wang, H., 2009, An air-cooled proton exchange membrane fuel cell with combined oxidant and coolant flow, *J. Power Sources*, Vol. 188, pp. 199-204.
9. Nguyen, T. V. and Knobbe, M. W., 2003, A liquid water management strategy for PEM fuel cell stacks, *J. Power Sources*, Vol. 114, pp. 70-79.
10. Jossen, A., Garche, J., Doering, H., Goetz, M., Knaupp, W., and Joerissen, L., 2005, Hybrid systems with lead-acid battery and proton-exchange membrane fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 144, pp. 395-401.