

< 기술논문 >

재생전원 시스템의 지상 시뮬레이터용 1kW급 재생형 연료전지 개발

김형모[†] · 양철남^{*} · 홍병선^{**} · 박영일^{***}
(2005년 9월 7일 접수, 2006년 8월 24일 심사완료)

Development of the 1kW Class Regenerative Fuel Cell for Ground Simulator of Regeneration Electric Power System

Hyung Mo Kim, Cheol Nam Yang, Byung Sun Hong and Young Il Park

Key Words: Regenerative Fuel Cell(재생형 연료전지), Stack(스택), PEM(고분자 전해질)

Abstract

The PEM type regenerative fuel cell(RFC) for the ground simulator of the regeneration electric power system has been designed, manufactured, and tested. In this paper, the designing and manufacturing procedures of the RFC were presented. Also, the performance test results were showed briefly. The RFC consists of PEM type stack, humidifier, pressure and flow control valve, storage tanks, pump and controller. The performance tests were carried out with stack and system performance tests. The performance targets are more than 50% stack efficiency, 1.5kW stack power, less 400W parasitic power in design condition. Most of the performances required are satisfied.

기호설명

- n : 셀의 개수
- I or A : 전류
- V_c : 셀 전압
- P_e : 스택 전력
- F : 패러데이 상수, 96485 Coulombs/mol
- λ : 화학양론비

1. 서론

태양전지와 수전해장치, 재생형 연료전지를 결합하는 재생전원시스템은 주간에는 태양전지를 통해 소요 전력을 공급하고 잉여 전력으로 수전

해 장치를 통해 물을 분해하여 수소와 산소로 분리하여 저장한다. 그리고, 태양전지가 작동할 수 없는 야간에는 연료전지시스템에서 주간에 수전해장치에서 물분해로 생성된 수소와 산소를 전기화학반응시켜 소요 전력을 공급하게 된다. 이때 전기화학반응에 의해 생성된 물은 물저장탱크에 저장되어 주간에 수전해장치에서 다시 태양전지의 전원을 이용하여 수소와 산소로 분해됨으로써 결국, 야간에 연료전지의 에너지원으로 공급된다. 이러한 재생형 연료전지시스템은 무한에너지인 태양에너지를 이용하여 수전해장치와 연료전지를 연동한 물 순환시스템으로서 외부의 전력 공급 없이 장시간 전력 공급이 가능한 재생전원 시스템이다. 고도 21km 가량의 성층권에서 통신 중계, 지상 탐사 등의 임무를 수행할 성층권 무인 비행과 같이 1년 이상의 장기체공이 필요한 경우에 시스템의 요구 동력 및 전력을 공급하기 위해서는 기존의 화학연료를 싣는 것은 불가능하며 재생형 에너지원만이 유일한 해결책이 된다. 이러한 시스템의 후보로서 쉽게 생각할 수 있는 것이 축전지이나 에너지 밀도가 낮기 때문에 적합

[†] 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 항공추진그룹
E-mail : hmkim@kari.re.kr

TEL : (042)860-2858 FAX : (042)860-2626

^{*} 한국기계연구원 표면기술연구소

^{**} (주) 퓨얼셀 파워

^{***} 회원, 한국항공우주연구원 항공추진그룹

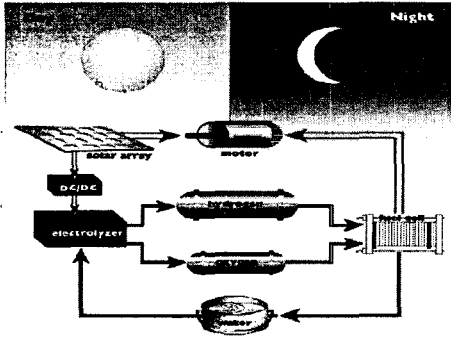


Fig. 1 Concept of Solar-RFC electric power system

하지 않으며, 따라서 400Wh/kg 이상의 뛰어난 에너지 밀도를 갖는 재생형 연료전지 시스템이 성층권 비행선과 같은 시스템의 전원시스템으로 사용될 가능성이 매우 크다.

재생전원시스템의 개요는 Fig. 1과 같다. 주요 구성품으로는 태양전지, 연료전지 및 수전해 장치, 가스 및 물탱크, 전체 시스템의 모니터링 및 제어를 위한 시스템 제어장치, 전력 부하의 소비를 위한 로드뱅크 등으로 구성된다.

재생전원시스템에서 제작된 연료전지는 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)로서 수소이온 교환특성을 갖는 고분자막을 전해질로 사용하는 연료전지이며, 고체고분자전해질 연료전지는 다른 형태의 연료전지에 비하여 작동온도가 80°C 정도로 낮고 효율이 높으며, 출력밀도가 크고 시동시간이 짧은 동시에 부하변화에 따른 응답이 빠른 특성이 있다. 특히 고분자막을 전해질로 사용하기 때문에 부식에 민감하지 않고 전해질을 순환시킬 필요가 없어 디자인이 간단하고 제작이 쉬우며 다양한 범위의 전력을 낼 수 있는 장점이 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 항공우주연구원에서 진행중인 성층권 장기체공 무인비행선의 추진시스템 설계, 해석 및 시험과제와 관련하여 재생전원 시스템 지상 시뮬레이터의 구성요소 중 1kW급 재생형 연료전지시스템의 장치구축 및 성능시험의 결과에 대하여 서술하고자 한다.

2. 연료전지 장치구축

2.1 장치구축 개요

1kW급 재생전원시스템 지상 시뮬레이터에 적

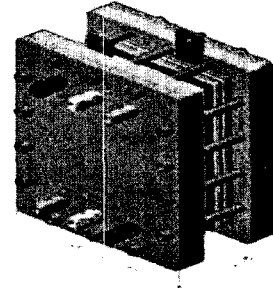


Fig. 2 Schematic of stack in system

용할 연료전지 시스템은 재생형전원시스템의 기저부하용으로 설계하였으며 최대 120%의 Peak 부하까지 운전이 가능하고 외부전력 1kW를 공급 하면서 약 50% 이상의 스택 효율을 목표로 하였다. 연료전지 시스템 구동을 위한 기생전력은 400W 미만이며, 시스템내의 제어기는 시스템내의 각종 변수 및 연료전지 스택의 각 셀의 전압을 모니터링 함으로써 스택내의 각 셀간 편차가 커지거나 특정 셀이 이상이 있을 경우 스택 및 시스템을 보호하기 위해 섰다운 되도록 하였다. 연료전지 시스템은 PEM 타입의 스택과 가습기, 압력 및 유량조절기, 반응가스재순환 장치, 열교환기, 상분리기, 연료(수소), 산화제(산소) 탱크, 냉각수 저장탱크, 냉각수 순환펌프, 전원제어장치 등으로 구성되었다.

2.2 주요 구성품

2.2.1 재생형 연료전지 시스템

1kW급 외부전원을 구현하기 위한 연료전지 시스템은 반응가스의 재순환 방식을 채택하도록 하고 정상 작동온도에서 저위발열량 기준으로 스택 효율 50% 이상을 구현할 수 있도록 설계하였다. Fig. 2는 연료전지 시스템내의 스택의 개략도이다. 연료전지 시스템을 구동하기 위해 요구되는 기생전력 400W를 포함하여 외부전력 1kW를 내기 위해 연료전지 스택은 1.5kW 급으로 설계하였다. 스택을 설계하기 위한 기본 데이터는 단위 전지 성능곡선을 기준으로 전극면적(Active area) 300cm², 15셀의 스택을 쌓았을 때 단위전지 성능 대비 스택의 성능감소를 고려하여 설계하였다. 스택 설계 요구조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Stack design specification

Description	Specification
Number of cells	15
Active area	300cm ²
Dimension(mm)	W260×H395×D200
Weight	42kg
Fuel	Hydrogen 99.99%(dry base)
Oxidant	Oxygen 99.99%(dry base)
Coolant	De-ionized water (<10 μs)
Operating pressure	< 1 barg.
Operating temp.	65°C

Table 2 Stack operation mode

	Idle	Min.	Design	Peak
Cell voltage[V]	0.82	0.8	0.7	0.6
Current density[A/cm ²]	0.11	0.12	0.5	1.0
Stack voltage[V]	12.3	12.0	10.5	9.0
stack power[W]	400	432	1575	2700
Parasite power[W]	400	400	400	400
Net output power[W]	0	32	1175	2300

연료전지시스템에 사용되는 연료, 산화제, 냉각수 등 반응가스의 유량은 다음 식 (2), (4), (5)⁽¹⁾과 같이 계산된다.

(i) 연료(수소: 99.99%)의 유량

$$H_2 \text{ Usage} = \frac{nI}{2F} \text{mole/s} = \frac{P_e}{2V_c F} \text{mole/s} \quad (2)$$

유량을 LPM 단위로 변환하기 위해 다음의 식 (3)을 사용한다.

$$H_2 \text{ Usage} = 0.00696 \times A \times n \text{ of Cells} \times \lambda \quad (3)$$

여기서 수소의 경우 λ=1.11의 값을 가진다. 식 (3)을 이용하여 연료 수소의 유량은 설계점에서 17.4lpm의 값을 갖는다.

(ii) 산화제(산소:99.99%)의 유량

$$O_2 \text{ Usage} = \frac{nI}{4F} \text{mole/s} = \frac{P_e}{4V_c F} \text{mole/s} \quad (4)$$

산소의 화학양론비는 2이며 LPM 단위로 변환하기 위해서 식 (3)을 사용하면 산화제 산소의 유량은 설계점에서 15.66lpm의 값을 가진다.

연료전지 스택에서 생산되는 물의 유량은 다음과 식 (5)에 의해 계산 되어진다.

$$\text{Water generation} = \frac{P_e}{2V_c F} \text{mole/s} \quad (5)$$

1kW급 연료전지를 0.7V에서 한 시간 운전한다고 하면 시간당 0.48kg의 물이 생성된다. 따라서 1kW 연료전지를 한 시간 운전하면 대략 0.5 l의 물이 발생된다고 계산할 수 있다. 12시간 운전을 고려하면 약 6 l의 물이 생성되나 시스템에 사용되는 물탱크의 경우 수전해 장치와 함께 사용되므로 안전계수를 고려하여 20 l로 설계하였다.

연료전지 제어기(Slave controller)는 전원제어장치(Master controller)에서 시동 신호를 받으면 연

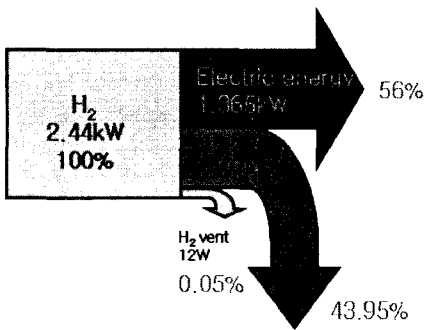


Fig. 3 Sankey diagram

시스템 전체의 무게는 250kg이며, 외부 프레임은 알루미늄 프로파일을 이용하여 제작하였고 외각치수는 W800×H1750×D700이다. 시스템의 제어는 사용자 편의를 위해 외부에서 터치스크린을 이용한 수동 및 자동 제어가 가능하다. 연료전지 시스템의 전체 에너지 흐름은 Sankey diagram을 Fig. 3에 나타내었다. 수소의 이용률을 90%로 가정하는 경우이다. 연료전지는 Table 2와 같은 스택운전조건을 가지고 전력을 낼 수 있도록 설계되었다.

연료전지를 운전할 때 발생하는 열량을 저위발열량을 기준으로 다음 식 (1)⁽¹⁾에 의해 계산 되어진다.

$$\begin{aligned} \text{Heating rate} &= nI(1.25 - V_c) \text{ Watts} \\ &= P_e \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \text{ Watts} \end{aligned} \quad (1)$$

위 식 (1)을 이용하여 설계점 운전시 발생하는 열량은 1.237kW이고 Peak시에는 2.925kW이다. 따라서 열용량은 설계점에서 운전할 때를 고려하여 1.5kW급으로 설계하였다.

료전지 시스템내의 모든 상태신호를 체크하고 일정 시간 퍼지기를 하고 연료와 산화제를 공급하는 시퀀스, 시스템에 이상이 발생하거나 사용자가 시스템을 정지시키고자 할 때 구동하는 시퀀스, 가변적으로 부하를 변동하면서 전력을 발생시키는 시퀀스, 외부에 전력을 발생시키지 않고 연료전지 독립시스템 자체구동을 위한 시퀀스 등으로 구분되어 있으며, 수동 및 자동으로 시스템을 운전할 수 있도록 하였다.

2.2.2 전원제어장치

연료전지시스템의 제어는 계층적 구조로 이루어져 있으며, 하부 제어계통의 정보는 상위 계통에서 주기적으로 수집되어 관리되며 해당하는 제어 신호를 연산하여 빠르게 응답할 수 있도록 구성되어 있다. 연료전지 시스템 내부의 모든 운전 및 안전관련 제어신호는 연료전지 제어기 모듈에 의해 통합 관리되며 연료 및 산화제가 계속 공급되는 한 외부 부하에 대응하여 독립적으로 운전이 가능하다. 연료전지시스템의 기동 및 정지는 외부 인터페이스를 통해 전원제어장치의 신호를 받아서 수행되나, 단독으로 사용할 경우 시스템 제어기에서 독립 운전할 수 있도록 하였다. 전원제어장치와 연동되어 설치된 후에는 기동 및 정지 신호는 전원제어장치의 신호를 따르며 특히 기동시에는 전원제어장치에서 기동신호를 연료전지시스템에 보내면 연료전지시스템내의 제어기에서 모든 상태변수를 확인후 전원제어장치로 정상상태임을 알려야 기동이 가능하다. 연료전지 제어기와 전원제어장치간의 제어 및 상태 신호의 전송은 RS485 통신을 사용하며, 한편으로 비상셏오프 제어는 아날로그 신호를 사용함으로써 전원제어장치에서 통신이 두절될 경우에도 연료전지시스템의 비상셏오프를 할 수 있도록 하였다. 초기 시동은 시스템에 장착된 축전지에 의해 기동되어 메뉴얼 모드와 자동 모드를 선택하게 된다. 자동 모드로 시스템을 시작하면 기동 시퀀스의 순서에 의해 시스템의 상태를 점검한 후 스택내로 반응가스가 공급된다. 스택의 개로전압(Open circuit voltage)을 확인하여 일정 전압 이상이 되면 시스템의 부하는 스택에서 부담하게 되며 시스템은 무부하 상태가 되어 홀로 구동하게 된다. 퍼지 및 셋다운 모드는 시스템내의 상태신호가 일정 제어 범위를 벗어날 때 자동으로 구동

된다. 셋다운 모드에서는 먼저 외부 부하를 차단하고 반응가스의 차단과 동시에 질소 퍼지기를 행함으로써 시스템을 보호할 수 있도록 구성하였다. 감시 모드는 자동 모드로 연료전지 시스템 운전중에 수소감지기가 1000ppm 이상의 수소를 감지하거나 스택의 제어 범위를 벗어났을 때 시스템과 스택을 보호하기 위해 구동된다. 모든 시스템의 근간이 되는 오버헤드 모드는 시스템을 구동하면 가장 먼저 작동되며 가습기 및 상분리기의 수위조절을 위해 수위 센서의 신호를 받아 시스템내의 수위 조절을 행한다. 특히 연료전지 스택에서 전극 반응이 진행되면 점차 물이 생성되어 쌓이게 되며 물저장탱크의 수위도 점차 올라가게 된다. 이때 일정수준 이상으로 올라가게 되면 밸브를 열고 펌프를 구동시켜 외부 물탱크로 물을 배출시킴으로써 시스템내의 수위를 일정범위 이내로 유지시킨다. 외부 배출된 물은 외부 저장탱크에 저장된 후 주간에 태양전지의 전원을 이용하여 수전해장치에서 물분해 반응을 통해 수소, 산소로 분해 되어 저장된다.

3. 성능 시험

3.1 연료전지 성능 시험

스택의 성능은 전극 및 분리판을 체결하여 스택의 기밀시험 결과에서 기밀 상태를 확인한 후 측정하였고 셀간 전위의 균일성을 확인하기 위해 모든 셀의 전압을 모니터링 하면서 셀간 편차를 측정하였다. 전류를 단계별로 증가시키면서 측정한 결과 초기 개로 전압 보다 점차적으로 셀간 편차가 커졌으나 0.05V 미만이었다. 동특성 시험에서도 셀간 편차가 커지지 않는 상태에서 부하 추종이 우수하였다. 실제 냉간 시동 및 셋다운 시험에서도 상온온도조건에서 시작하여 1분 이내에 기동이 가능하였다.

3.2.1 셀간 전위 균일성

1kW 이상의 부하를 가한 상태에서 스택내 셀간 전위 편차를 아래의 Fig. 4에 나타내었다. 셀평균은 0.75V정도이며 셀간 편차도 0.05V 이하임을 알 수 있다.

3.2.2 전력 전류 전압특성 시험

초기 개로전압 상태에서 전류를 점차 증가시키면서 스택의 전류-전압 성능을 Fig. 5와 같이

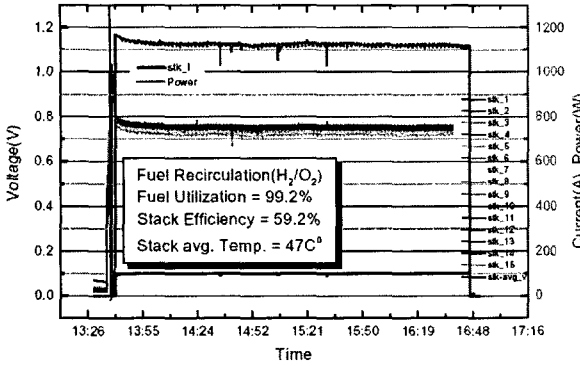


Fig. 4 Cell uniformity & system efficiency

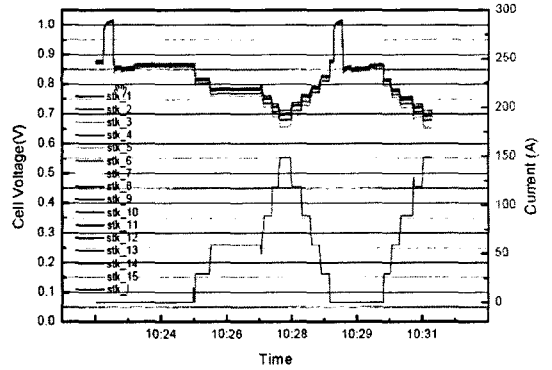


Fig. 6 Step current test

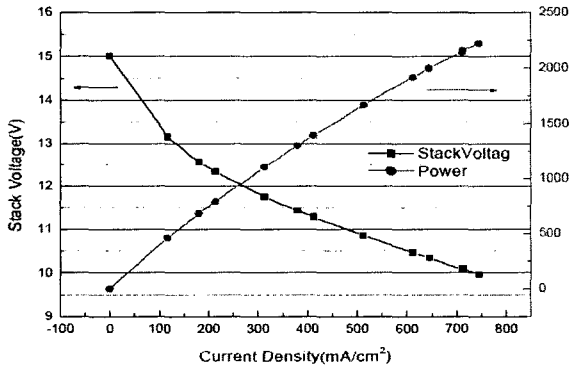


Fig. 5 I-V performance

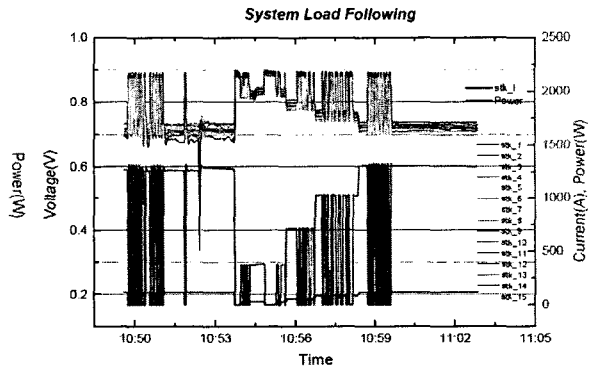


Fig. 7 System load following

확인하였다. 단위면적당 300mA/cm²에서 스택 성능이 1kW를 상회하는 것으로 나타났고 단위면적당 700mA/cm²를 가할 경우 스택의 성능은 2kW 이상의 출력을 나타내었다.

3.2.3 단계별 전류 증가 시험

Fig. 6과 같이 단계별로 전류를 증가시키면서 스택의 성능을 확인하였다. 전류가 증가함에 따라 셀 전위는 점점 감소하였으나 0.65V 이상을 유지하여 스택 전위가 500mA/cm²의 부하에서 0.63V 이상을 유지하였다.

3.2.4 부하 추종

Fig. 7은 가변적인 부하에 대한 스택의 부하추종 성능을 나타내고 있다. 가변적으로 전류를 가할 경우 스택의 전위 추종이 빠르게 반응하고 있

으며 셀 전위가 0.6V에서 유지됨을 알 수 있다.

3.2.5 냉간 기동 시험

스택 성능을 평가한 후 스택과 시스템의 연동 시험 및 냉간 기동 시험을 수행하였다. 초기 냉간 기동 시험은 자동모드에서 정해진 시퀀스에 따라 시스템이 기동할 때 시스템에 전원이 공급되고 시스템의 제어 로직에 의해 스택에 반응가스가 공급되어 결국 모든 시스템 및 외부 출력에 대한 파워를 스택에서 공급하는 일련의 과정을 시험하였다. Fig. 8은 시스템이 초기 기동하여 1.5kW 외부 전력을 내는 과정에서 나타나는 전압 전류 및 셀간 전위를 나타내고 있다. 초기 기동시퀀스에 따라 축전지에 의해 시스템이 구동되면 이후의 모든 시스템에 요구되는 전원은 연료전지 스택에 공급된다. 또한 Fig. 8은 모든 기동

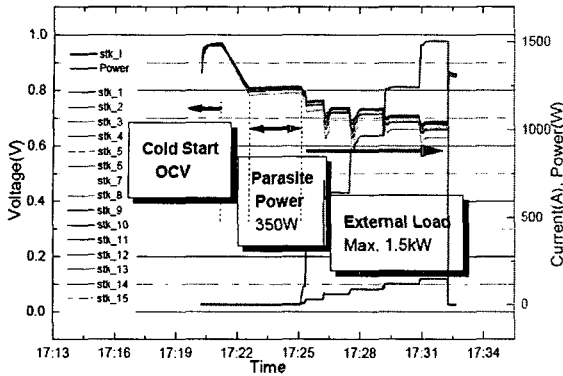


Fig. 8 System power analysis

전원 및 외부전원을 스택에서 발생된 전력을 이용하여 시스템이 자가구동(stand-alone)하는데 350W의 기생전력을 소비하면서 외부로 1.5kW 전력을 낼 수 있음을 보여주고 있다.

3.2.6 스택 효율

스택의 효율은 작동되는 전위에 의해 결정된다. 셀 평균 전위가 0.75V이므로 저위발열량 기준으로 가스 이용률이 99.5%를 고려하면 스택 효율은 59%이다. 특히 스택을 지난 미반응 가스를 재순환시켜 다시 반응가스로 사용함으로써 연료 이용률이 99.5% 이상이므로 상온과 낮은 온도에서 냉간 기동되어도 스택 효율은 50% 이상임을 확인할 수 있었다. Fig. 4에서 스택 온도가 47℃로 증가되었을 때 외부출력 1.1kW에서 스택 효율이 59.2%를 나타내고 있다. 개발된 연료전지 시스템은 초기에 목표로 했던 스택효율 50% 이상 상회함을 알 수 있다.

3.3 기생전력 시험

1kW급 연료전지 시스템을 운전하기 위해 필요한 기생전력을 낮추는 것은 스택 및 시스템의 효율을 높이는 데 중요한 인자이다. 시스템이 1kW 외부 부하를 내면서 그에 따른 펌프 및 밸브가 작동될 때 시스템을 구동하는데 소요되는 전력을 평가하는 시험을 하였다. 초기 축전지에 의해 시스템이 구동되면 스택에서 나온 전력은 시스템을 구동시키는 전력과 외부의 부하에 대응하는 전력으로 나뉘지게 된다. 초기 기동부터 점차 전류를 증가시키면서 시스템에 소요되는 전력을 Fig. 9에 나타내었다. 기생전력은 350W 이내로 시스템이

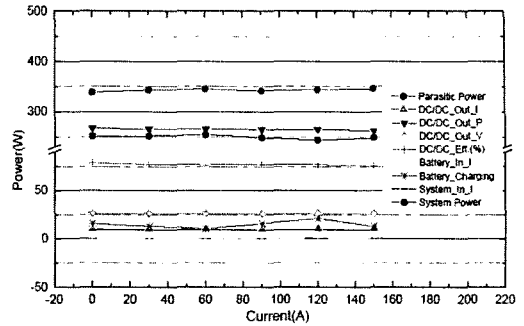


Fig. 9 Parasitic power

목표로 했던 400W 미만임을 알 수 있었다. 350W의 기생전력 중 시스템을 구동하는데 소요되는 전력은 270W 미만이며 나머지 80W는 축전지로 충전되는 전력임을 알 수 있다. 축전지로 충전되는 80W의 전력은 축전지의 충전이 완료되면 더 이상 소비전력을 소모하지 않으므로 시스템의 기생전원은 270W로 될 것이다.

4. 결론

재생전원시스템의 지상 시뮬레이터의 1kW급 재생형 연료전지시스템의 장치구축 및 성능시험을 수행하였다. 재생형 연료전지는 고분자 전해질 방식을 채택하였으며 스택의 효율은 외부출력 1.1kW에서 저위발열량 기준으로 59%를 달성하였다. 재생형 연료전지시스템은 스택을 지난 미반응 가스를 재순환 시켜 반응가스로 사용함으로써 연료 이용률을 99.5% 이상으로 높였고, 작동온도가 상온에서 65℃의 낮은 온도조건에서도 기동이 가능하고 가변적인 부하에서도 우수한 부하추종 특성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 산업자원의 차세대기술 사업으로 수행되는 "성충권 장기제공 무인비행선의 추진시스템 기술개발" 과제에의 연구 결과물입니다.

참고문헌

(1) James Larminie and Andrew Dicks, 2001, "Fuel Cell Systems Explained."