

2 모듈 스택을 이용한 5kW급 SOFC 시스템 운전결과

이태희[†], 최미화, 유명성*

*한전전력연구원 녹색성장연구소

Operation Results of a 5kW-Class SOFC System Composed of 2 Sub-Module Stacks

TAEHEE LEE[†], MIHWA CHOI*, YOUNGSUNG YOO*

*Green Growth Technology Laboratory, KEPCO Research Institute, 105 Munji-Ro,
Yuseong-Gu, Daejeon, 305-760, Korea

ABSTRACT

A 5 kW class SOFC system for cogeneration power units was consisted of a hot box part and cold BOPs. High temperature components such as a stack, a fuel reformer, a catalytic combustor, and heat exchanges are arranged in the hot box considering their operating temperatures for the system efficiency. The hot box was made of ceramic boards for the thermal insulation. A 5 kW class SOFC stack was composed of 2 sub-modules and each module had 64 cells with $15 \times 15 \text{ cm}^2$ area and stainless steel interconnects. The 5 kW class SOFC system was operated with a hydrogen and a city gas. With a hydrogen, the total power of the stacks was about 7.1 kW_{DC} and electrical efficiency was about 49.3% at 80 A. With a city gas, the total power of the stacks was about 5.7 kW_{DC} and electrical efficiency was about 38.8% at 60 A. Under self-sustained operating condition, the system efficiency including a power conditioning loss and a consumed power by BOPs was about 30.2%.

KEY WORDS : Solid oxide fuel cell(고체산화물 연료전지), Cogeneration system(열병합발전시스템), Sub-module stack(모듈형 스택), Fuel reformer(연료개질기), Balance of plant(시스템주변장치), Thermal management system(열교환망)

Nomenclature

P : power, W
E : efficiency, %
V : flow rate, mol/s

H : enthalpy, J/mol
DC : direct current
AC : alternating current

Subscripts

[†]Corresponding author : leethee@kepcoco.kr

LHV : lower heating value

[접수일 : 2011.6.22 수정일 : 2011.8.4 게재확정일 : 2011.10.21]

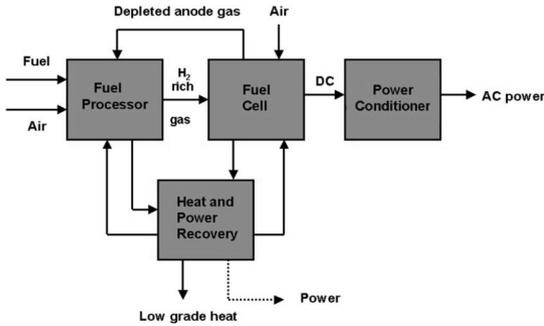


Fig. 1 Schematic of fuel cell system⁴⁾

1. 서 론

연료전지는 연료가 갖는 화학에너지를 전기화학 반응을 통해 직접 전기로 변환시키는 장치로써, 연료의 공급에 의해 연속적인 발전이 가능하다. 에너지변환의 중간과정이 없기 때문에 기존의 발전장치와 비교해 효율이 높고 오염물질의 배출을 줄일 수 있으며 수소를 연료로 사용할 경우 물 이외의 오염물질을 배출하지 않는 친환경 발전방식이다. 또한 모듈화를 통한 용량조절이 용이하여 이동용 및 소형발전에서 중·대형 발전설비에 이르기까지 다양한 분야에 적용이 가능하다. 연료전지는 이온 전도성을 가진 전해질의 종류에 따라 특성이 달라지는데 고체산화물 연료전지는 전해질 및 전극이 세라믹으로 구성되어 있어 운전온도가 높고(500~1000℃) 발전효율이 높으며, 열병합 및 복합발전 시스템 구성이 용이하다. 저온형 연료전지와 달리 일산화탄소에 의한 전극 촉매 피독문제가 없어 수소 이외에도 다양한 연료를 간단한 개질공정을 통해 사용할 수 있어 수송용 및 발전설비 등 다양한 분야에서 연구가 진행 중이다¹⁻³⁾.

연료전지 시스템은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 전기를 생산하는 연료전지 스택(모듈)을 중심으로 연료공급 및 공급된 연료를 스택에서 사용할 수 있도록 수소가 다량 함유된 가스로 변환시키는 연료개질장치, 스택에서 생산된 직류전기를 교류전기로 변환시키고 전압을 조절해 주는 전력변환장치(PCS, power conditioning system), 열교환 및 열회수 시

스템 등으로 구성되어 있다. 이러한 시스템 주변장치(BOP, balance of plant)는 연료전지 스택이 안정적으로 운전될 수 있도록 특성에 맞게 구성되어야만 한다.

SOFC 발전시스템의 효율을 향상시키기 위해서는 스택을 비롯한 연료개질기, 전력변환기, 각종 펌프 및 블로워 등의 시스템 구성요소의 성능개선뿐만 아니라 단일 및 열관리 시스템 설계가 매우 중요하다. 특히 고온에서 운전되는 SOFC는 효율적인 열관리를 통해 외부의 열원 없이 SOFC 시스템 내부에서 생성되는 열을 이용하여 스택온도 유지, 반응물 예열, 개질반응에 필요한 수증기 생성 등이 가능하도록 시스템을 설계해야만 한다.

한전전력연구원에서는 평판형의 연료극 지지체식 SOFC 스택 및 이를 이용한 열병합 발전시스템을 연구 중이다. 가정용 및 상업용을 목표로 개발한 5 kW급 시스템은 15 × 15cm² 크기의 단전지를 이용한 2개의 모듈로 구성이 되었는데, 5kW 스택 운전에 앞서 15 × 15cm² 크기의 15 장 전극으로 구성된 모듈 2개를 병렬로 연결하여 스택 및 시스템 설계의 타당성 확인을 위한 예비실험을 수행하였다⁵⁾. 본 논문에서는 2 개의 모듈을 이용하여 제작된 5kW급 SOFC 스택 및 시스템 운전결과를 정리하였다.

2. 시스템 제작 및 성능시험

2.1 단전지 및 모듈 제작

SOFC 단전지를 제작하기 위해서 먼저 NiO와 8 mol% YSZ(yttria-stabilized zirconia) 분말을 일축 가압 방법으로 성형하고 1400℃에서 1 시간 동안 열처리를 하여 연료극 지지체를 제조하였다. 가소결된 지지체 위에 연료극 기능층(functional layer)과 YSZ 전해질을 슬러리 코팅방법으로 올린 후 소결하였다. 전해질이 코팅된 시편에 공기극 물질인 LSCF ((La_{0.6}Sr_{0.4})(Co_{0.2}Fe_{0.8})O₃)를 스크린 프린팅 한 후 열처리를 하여 최종적으로 셀을 제조하였다.

5kW급 스택은 15 × 15cm² 크기(유효면적 약 13.5 × 13.5cm²)의 64 장 전극으로 구성된 모듈 2 개로 구성되었다. SOFC 단전지는 ferritic 계의 금속

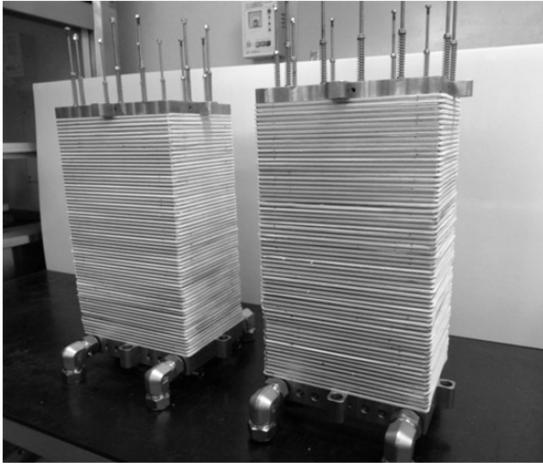


Fig. 2 Sub-module stacks composed of 64 cells with $15 \times 15 \text{ cm}^2$ area

분리판 및 유리조성의 고온 밀봉재를 이용하여 적층하였으며, 분리판과 단전지 사이에는 집전체로 니켈 또는 인코넬 메쉬가 삽입되었다. Fig. 2는 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 크기의 64 장 전극으로 구성된 2 모듈 스택을 보여주고 있다.

2.2 시스템 설계 및 제작

5kW급 시스템은 2 모듈로 구성된 스택의 특성에 맞게 설계되었다. Table 1은 설계된 5kW급 시스템의 제원을 보여주고 있다. 스택을 비롯하여 작동온도가 높은 연료개질기, 촉매연소기, 기화기, 열교환기 등이 고온박스 내부에 위치하고 있으며, 2 모듈 스택이 병렬로 연결되도록 스택 거치대가 설치되었

Table 1 The specification of a 5kW class SOFC system

Contents	Specification
Output Power	AC 5kW
Stack	2 sub-module stacks, 64 cells ($15 \times 15 \text{ cm}^2$) / module
Stack Type	Anode-supported planar type
Dimension	$888 \times 1525 \times 1752 \text{ mm}^3$
Fuel	H_2 , natural gas
Reformer	Pre-reformer, steam reformer

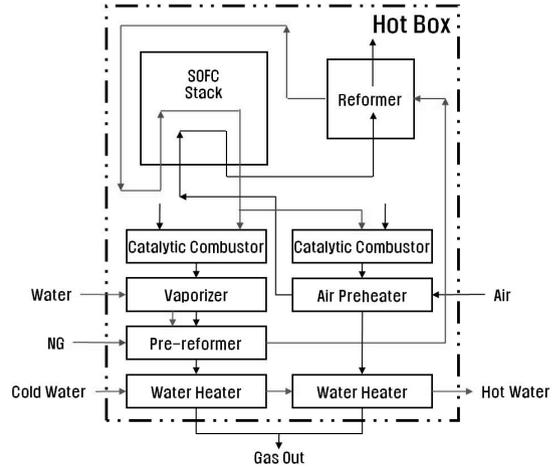


Fig. 3 Schematic diagram inside the hot box for the 5kW SOFC system

다. 연료개질기, 촉매연소기, 기화기, 열교환기 등은 각 모듈별로 구성이 되었으며, Fig. 3에서 보는 것과 같이 스택 모듈을 중심으로 작동온도 및 열용량을 고려하여 구성품이 설계되었다.

스택에는 이용률을 고려하여 과량의 연료와 공기가 공급되는데, 스택 내부에서 전기화학반응에 참여하지 않은 고온의 미반응 공기는 연료개질기에 필요한 열량을 공급한 후 고온박스 내부로 배출된다. 고온박스는 연료공급 배관 및 측정선 등의 외부 연결 부위에 고온 가스켓을 적용하여 가스밀봉이 될 수 있도록 제작되었다. 스택 미반응 연료는 스택 하부에 위치하고 있는 촉매연소기에서 공기극 미반응 가스와 연소반응을 통해 고온의 배기가스가 만들어지고 기화기와 반응물 예열에 필요한 열량을 공급해 준다.

열병합 발전 및 시스템 냉각을 위해 고온박스 아래쪽에는 물 라인이 지나간다. 반응물 예열과 기화기에 필요한 열량을 공급한 배기가스는 최종적으로 냉각수와 열교환을 통해 온수를 만들어 온수저장탱크로 보내진다. 열교환을 모두 끝낸 배기가스는 기액분리기를 거친 후 대기로 배출된다. 기액분리기에 모인 물은 펌프를 이용하여 다시 기화기로 보내져서 연료개질에 이용된다. 기화기에서 만들어진 수증기

는 공급된 연료와 혼합되어 예개질기(pre-reformer)로 들어간다. 예개질기는 작동온도를 고려하여 고온박스에서 온도가 낮은 하부에 위치하고 있다. 예개질기에서 1차적으로 개질이 된 연료는 다시 수증기개질기(steam reformer)에서 반응이 일어난 후 스택 모듈로 공급된다. 연료극 미반응 가스의 일부를 수증기개질에서 연소할 수 있는 장치를 추가하여 개질기 온도를 제어할 수 있도록 하였다.

5kW SOFC 시스템 하부에는 반응물 공급을 위한 각종 펌프와 블로워, 탈황장치, 기액분리기 등이 위치하고 있다. 스택에서 생산된 DC 전력은 전력변환장치에서 승압을 한 후 교류로 변환되어 계통에 공급된다.

2.3 시스템 성능평가

15 × 15cm² 크기의 64 장 전극으로 구성된 모듈 2 개를 전기적으로 병렬연결이 되도록 시스템에 설치하였다. 성능평가에 앞서 고온박스 내부의 전기로를 이용하여 온도를 올리면서 정해진 절차에 따라 단계적으로 스택 제조 시 사용된 밀봉재와 바인더 등의 유기물을 제거한다. 그리고 수소 및 공기를 주입하면서 연료극과 공기극이 정상적으로 성능을 낼 수 있도록 전처리 과정을 수행하였다. 전처리를 위한 반응물 공급은 별도의 MFC(mass flow controller) 모듈을 이용하였으며, 전처리 시 스택에 일정한 면압을 가함으로써 스택의 밀봉 및 전기적 접촉성을 향상시키는 과정도 함께 실시되었다.

전처리가 끝난 스택의 연료극에는 MFC를 이용하여 수소와 질소를 공급하였고, 공기극에는 블로워를 이용하여 공기를 공급하였다. Table 2는 수소를 이용한 성능평가 시 하나의 모듈에 공급된 반응물 공급량을 나타내고 있으며, 2 개의 모듈에 대해 동일한 유량으로 각각 반응물을 공급하였다.

성능시험은 전력변환장치를 이용하여 인가전류를 변화시키면서 스택 및 시스템의 출력을 측정하는 방법으로 수행되었다. 이 때, 2 개의 모듈을 전기적으로 병렬로 연결된 상태에서 2 개의 모듈에서 나오는 직류 전력을 각각 DC/DC converter가 병렬로

Table 2 Flow rates of reactants per a module operated with hydrogen

Anode		Cathode
H ₂ (SLM)	N ₂ (SLM)	Air (SLM)
40	25.6	156

전압을 조정해 주고, 후단에 연결된 DC/AC inverter가 AC로 변환한 후 계통에 전력을 공급하도록 설계하였다.

수소를 이용한 스택의 성능시험을 완료한 후 연료를 도시가스로 전환하고 성능시험을 수행하였다. 천연가스는 기화기에서 만들어진 수증기와 혼합되어 예개질기 및 수증기개질기에서 전환된 후 2 개의 모듈에 각각 공급되었다. 이 때, 천연가스는 압축기를 이용하여 정량적으로 공급하였고, 물은 펌프를 이용하여 개질기에 공급하였다. 공기극에는 블로워를 이용하여 공기를 공급하였다. 스택 및 개질기 입·출구 쪽에는 개질가스 조성분석을 위한 별도의 배관을 설치하여 운전 중 개질기의 상태를 확인하였다.

Table 3은 도시가스를 이용한 성능 시험 시 하나의 모듈에 공급된 반응물의 양을 나타내고 있다. 도시가스를 이용한 성능평가는 전기로의 전원을 차단하고 시스템 내부에서 발생하는 열을 이용한 자연 운전 조건으로 수행되었다. 운전 시 탄소침적을 억제하기 위해 수증기와 탄소 비율을 약 3.0 이상으로 유지하도록 물을 공급하였다⁶⁾. 탄소침적이 발생할 경우 개질기 및 스택에 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 저울을 이용하여 수시로 공급되는 물의 양을 확인하였다.

수소 운전과 달리 천연가스를 이용한 성능시험에서는 반응물 예열과 수증기 생성 및 연료개질에 필

Table 3 Flow rates of reactants per a module operated with natural gas

Anode		Cathode
NG (SLM)	Water (g/min)	Air (SLM)
11.27	25.2	230

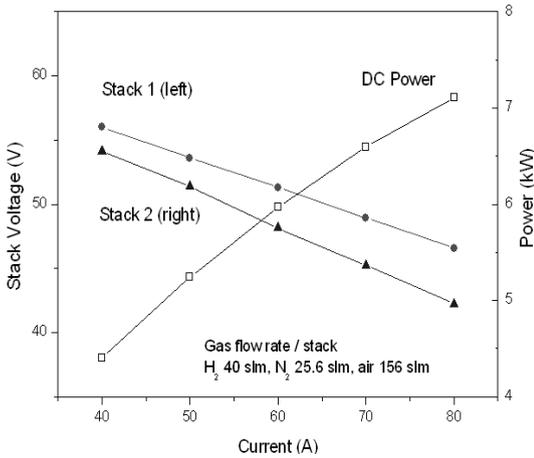


Fig. 4 The performance of 2 sub-module stacks with hydrogen

요한 열을 모두 고온의 배기가스와 스택 발생열을 이용하여 적절히 공급해야만 한다. 다양한 반응 조건과 상황에 따라 각 부위의 온도를 제어하기 위하여 스택 배기가라인 주요 부분에 밸브를 설치하여 압력차이로 배기가스의 유량을 조절함으로써 주요 부위의 온도를 제어할 수 있도록 설계하였다. 이때 스택 및 시스템 주요 부위에는 열전대와 압력센서를 이용하여 내부 상황을 계측하였다. 수소 운전과 동일하게 전력변환장치를 이용하여 부하운전을 수행하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 수소를 이용한 스택 운전 결과

전기로를 이용하여 고온박스 내부 온도를 750°C로 유지하고 MFC 및 블로워를 이용하여 각 모듈별로 Table 2와 같이 수소 및 반응물을 공급하면서 2 모듈 스택에 대한 성능시험을 수행하였다. Fig. 4는 전력변환장치를 이용하여 각 모듈에 인가되는 전류량을 증가시키면서 측정된 스택의 DC 전압 및 출력을 보여주고 있다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 2 개의 모듈이 같은 수량의 단위전지로 구성되었지만 stack #1(왼쪽 모듈)의 성능이 더 좋다. 이는 모듈 제작 시 단위전지 및 분리판의 상태, 모듈의 밀봉도

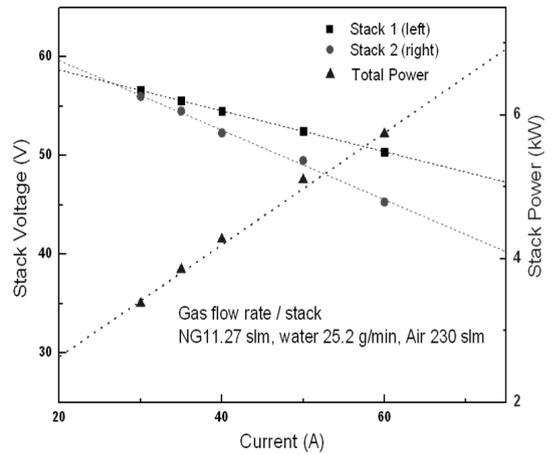


Fig. 5 The performance of 2 sub-module stacks with city gas under self-sustained operation

가 동일하지 않기 때문인 것으로 추측된다. 각 모듈에 60A 전류를 인가할 시 전체 스택의 출력은 약 6.0kW 이고, 전력변환효율은 약 41.7% 이다. 각 모듈에 80A 전류 인가 시 전체 스택 출력은 약 7.1kW 이고 스택 전력변환효율은 약 49.3% 이다. 여기서 스택의 전력변환효율 E_{stack} 는 다음과 같이 구하였다.

$$E_{stack} = \frac{P_{stack}}{\Delta H_{fuel.LHV} \cdot V_{fuel}} \quad (1)$$

3.2 도시가스를 이용한 자열운전 결과

수소를 이용한 스택 성능평가를 완료한 후 도시가스를 이용한 시스템 자열운전을 수행하였다. 단계적으로 수소 유량을 줄이면서 도시가스로 전환한 후, 스택 및 시스템 주요부위의 온도를 점검하며 전기로의 전원을 차단하고 고온박스 내부의 연소열을 이용한 자열운전 조건을 확인하였다. 이때 각 모듈별로 공급된 반응물 양은 Table 3과 같고, 60 A 인가 시 스택 상부가 약 760~785°C, 하부가 약 690~700°C 정도를 보였으며, 수증기개질기의 온도는 약 680~700°C, 예개질기 온도는 약 300°C 정도가 되었다.

Fig. 5는 도시가스를 이용한 시스템 자열운전 상황에서 각 모듈의 인가 전류량에 따른 전압을 보여

Table 4 The performance of a 5kW class SOFC system with city gas under self-sustained operation

Contents	Stack#1	Stack#2	Total
Current (A)	60	60	120
Voltage (V)	50.4	45.2	-
DC Power (W)	3,024	2,712	5,736
AC power (W)	-	-	5,121
BOP power (W)	-	-	669.1

주고 있다. 앞서 수소를 이용한 성능시험과 동일하게 stack #1(왼쪽 모듈)의 성능이 더 좋은 것을 볼 수 있다. Table 4는 도시가스를 이용한 시스템 자열 운전 조건에서 각 모듈에 60A의 전류를 인가할 때의 시스템 성능을 보여주고 있다. 60A 인가전류에서 stack #1은 50.4V, stack #2는 45.2V의 전압을 보였으며, 이는 약 5.736kW의 스택출력을 얻을 수 있었다. 도시가스의 발열량은 한국가스공사의 표준열량 기준으로 9,393 kcal/Nm³ 인데, 이를 기준으로 한 스택의 전력변환효율 Es는 약 38.8%였다.

시스템 성능을 평가할 때는 스택의 전력변환효율 뿐만 아니라 스택에서 생산된 직류 전원의 전압을 조절하고 교류로 변환해주는 전력변환장치의 효율과 반응물 공급 및 시스템 제어를 위해 시스템 주변장치(BOP)에서 소모되는 소비전력을 고려해야만 한다. Table 4에서 보는 것과 같이 전력변환기를 통해 공급되는 220V의 AC 전력은 약 5.121kW이며 이를 고려한 시스템 AC 효율 E_{AC}는 약 34.7%이다. 반응물 공급을 위한 펌프, 블로워 등과 시스템 운전에 필요한 제어장치 등의 시스템 주변장치에서 소모된 전력은 약 669.1W이다. 이를 고려한 전체 시스템의 발전효율은 약 30.2% 이다. 여기서 시스템 발전효율은 다음과 같이 계산하였다.

$$E_{system} = \frac{P_{AC} - P_{consumed}}{\Delta H_{fuel,LHV} \cdot V_{fuel}} \quad (2)$$

상대적으로 성능이 우수한 stack #1(왼쪽 모듈)의 전류량을 80A까지 인가하면서 스택 전압을 측정하였으며, Fig. 6은 그 결과를 보여주고 있다. Stack

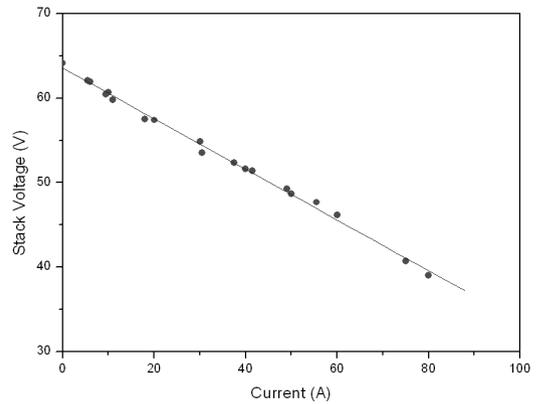


Fig. 6 The Voltage/Current curve of the stack#1(left) with city gas under self-sustained operation

#1은 인가전류 80A에서 약 3.1kW의 DC 출력을 나타내었으며, 전력변환기를 통한 220V의 AC 전력은 약 2.9kW를 얻을 수 있었다. 80A 인가조건에 전력변환효율 식 (1)을 이용하여 계산한 stack#1의 DC 전력변환효율은 약 42.2%, 시스템 주변장치의 소비전력을 제외한 시스템 AC 전력변환효율은 약 38.9%를 보여준다. 이때, 시스템 주변장치에서 소비되는 전력을 335W라고 가정했을 때 시스템발전효율은 약 35%로 계산된다.

4. 결 론

본 논문에서는 2 개의 모듈로 구성된 5kW급 SOFC 시스템의 운전결과를 정리하였다. 15 × 15cm² 크기의 64 장 전극을 적층한 모듈 2 개를 병렬로 연결하여 수소를 이용한 성능시험 및 도시가스를 이용한 시스템의 자열운전시험을 수행함으로써 5kW SOFC 시스템의 운전 특성을 분석하였다.

- 1) 5kW SOFC 시스템은 15 × 15cm² 크기의 단전지를 이용한 2 모듈 스택으로 제작되었다. 시스템 상부의 고온박스에는 스택, 촉매연소기, 수증기 개질기, 열교환기 등의 고온에서 운전되는 구성품이 작동온도와 열용량에 따라 배치되어 효율적인 열관리가 이루어지도록 설계하였다.
- 2) 15 × 15cm² 크기의 64 장 전극으로 제작된 모듈

2개를 병렬로 연결한 후 수소를 이용하여 750°C에서 운전한 결과 각 모듈에 60A 전류 인가 시 약 6.0kW의 스택출력과 41.7%의 전력변환효율을 보였다. 각 모듈에 80A 전류 인가 시 전체 스택 출력은 약 7.1kW이며 약 49.3%의 스택발전 효율을 얻었다.

- 3) 도시가스를 연료로 공급하고 시스템 내부에서 발생하는 열만을 이용한 자열운전 조건으로 5kW 시스템을 운전하였다. 각 모듈에 60A 전류 인가 시 전체 스택출력은 약 5.74kW이며, 전력변환기를 통해 220V의 AC로 변환된 시스템 출력은 약 5.12kW를 보였다. 시스템 AC 출력에서 운전을 위해 시스템 내부에서 소비된 전력을 제외한 시스템 발전효율은 약 30.2%를 얻었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받은 “5kW급 열병합 고체 산화물 연료전지 발전시스템 개발”(2006-N-FC12-P-04) 과제 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Ryan O’Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella

and Fritz B. Prinz, “FUEL CELL FUNDAMENTALS”, John Wiley & Sons, New York, 2006, pp. 3-19.

- 2) James Larminie and Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained”, 2nd Edition, John Willey & Sons, UK, 2003, pp. 3-24.
- 3) N. Q. Minh and T. Takahashi, “Science and Technology of Ceramic Fuel Cells”, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1995, pp. 3-19.
- 4) P. F. van den Oosterkamp, “Critical issues in heat transfer for fuel cell systems”, Energy Conversion and Management, Vol. 47, 2006, pp. 3552-3561.
- 5) 이태희, “2 모듈 스택을 이용한 SOFC 시스템 운전결과”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No. 5, 2009, pp. 405-411.
- 6) Tatsuya Takeguchi, Yukimune Kani, Tatsuya Yano, Ryuji Kikuchi, Koichi Eguchi, Keigo Tsujimoto, Yoshitaka Uchida, Akira Ueno, Koji Omshiki and Masanobu Aizawa, “Study on steam reforming of CH₄ and C₂ hydrocarbons and carbon deposition on Ni-YSZ cermets”, Journal of Power Sources, Vol. 112, 2002, pp. 588-595.