

50 kW급 인산형연료전지 발전시스템의 장기 운전평가

임희천 · 안교상 · 설진호 · 이창우
전력연구원 전력연구실 연료전지연구팀

Evaluation of Long Term Operation of 50 kW Phosphoric Acid Fuel Cell System

Hee Chun Lim, Kyo Sang Ahn, Jin Ho Seol and Chang Woo Lee
Fuel Cell Project Team, KEPRI

요 약

차세대의 새로운 발전방식인 인산형 연료전지 발전시스템의 운용기술의 확립을 위하여 50 kW급 실증설비를 도입하고 주변기기를 설계, 설치하여 장기운전 특성시험을 실시하였다. 이 설비는 1993년 8월부터 1994년 11월 말까지 총 6,003시간의 운전기간 동안 187,190 kWh의 발전전력량을 기록하였고, 이 기간 동안의 발전운전시간 이용율은 63.01%, 평균출력은 33.5 kW였다. 설비의 운전특성에 있어서 정부하시 평균전압 및 전류는 각각 DC 130 V와 461 A였으며, 경시전압감소율은 1,000시간당 3.8 mV 정도로 나타났다. 설비의 기동·정지 특성중 기동시간은 냉간기동시 평균 4시간 50분, 난기동시 2시간 34분 정도가 소요되었고, 발전효율은 정부하시 전기효율이 37.46%, 배열이용효율은 43.8%로 전체효율 81.26%를 나타냈다. 환경 특성중 배가스중의 NOx 농도는 1 ppm 미만이었으며, 소음도 63 dB 정도로 양호한 특성을 보여주었다. 운전기간 중 발생한 사고는 총 23회로, 외부운전조건에 대한 민감성이 큰 것으로 나타났으며, PAFC 시스템의 상용화를 위해서는 스택수명 및 운전신뢰성을 향상시키는 것이 필요하다.

Abstract—To establish the practicing technology of phosphoric acid fuel cell (PAFC) power generation system, KEPRI (Korea Electric Power Research Institute) executed the long term operation test of the 50 kW PAFC system. This system recorded 6,003 hours of accumulative generating time and produced 187,190 kWh electricity by the end of 1994. At the rated power, measured electrical efficiency was 37.46% and thermal efficiency was 43.8%. The average electric capacity factor and output of this system showed 63.01% and 33.5 kW respectively for the entire operation period. In terms of system performance, after more than 5,000 hours of operation, the voltage degradation of 3.8 mV/1,000 hr was observed in this system. NOx in the exghaust gas was under 1 ppm and the noise detected at four different position was 63 dB. More than 23 times of package troubles were experienced by the end of 1994. Throughout test operation, the problems encountered are due to high sensitivity of the plant to the changes in external operation condition. We confirmed that it will be needed to improve the life time of stack and operation reliablity for practising the PAFC system.

1. 서 론

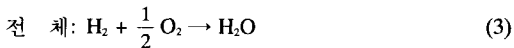
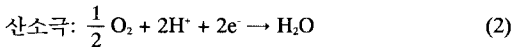
연료전지발전은 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 직접 발전방식으로 에너지 변환효율이 높고, 다양한 연료의 사용이 가능하며 공해가 적다는 등의 장

점으로 소규모 분산형 전원으로 부터 대형 화력발전 대체용 전원까지 다양한 용도로 이용이 가능하다. 일반적으로 연료전지는 동작온도 및 전해질의 종류에 따라 분류되는데 저온 연료전지로 불리는 인산형 연료전지는 동작온도가 200°C 정도이고, 고온 연료전지인 용융탄산

염형 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell)는 650°C, 그리고 고체전해질 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)는 1,000°C이다. 이러한 다양한 연료전지 발전기술 중에서 가장 실용화가 앞서 있는 방식이 인산형 연료전지로 일본의 경우 11 MW급 설비가 미국으로부터 도입되어 실증운전시험되고 있고, 자국기술로는 5 MW급 설비 그리고 50 kW에서 200 kW급 규모의 설비가 전력회사 및 가스회사를 중심으로 실증시험 운전되고 있다¹⁾. 국내의 경우에도 한전에서 국내최초로 5.9 kW급 스택을 도입하여 시스템을 구성 실증시험을 실시하였고, 이어 50 kW급 설비를 도입하여 장래 발전방식으로서 도입가능성 파악 및 연료전지 발전시스템에 관한 기본특성을 확인하기 위하여 장기운전 특성시험을 실시하였다²⁾. 본고에서는 한전에서 도입하여 운전특성시험을 실시한 50 kW급 인산형 연료전지의 기본구성 및 주변기기의 설계 및 제작 그리고 설비특성 및 장기운전시험에 대한 결과를 기술하므로써 인산형 연료전지 시스템의 국내 적용가능성을 도출하였다.

2. 동작원리

연료전지란 연료가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학적인 방법으로 전기에너지로 직접 변환시키는 발전장치로 이중 인산형 연료전지의 단위전지(Unit Cell) 구성은 연료극(Anode), 전해질(Electrolyte), 산소극(Cathode) 등으로 되어 있다. 원리를 살펴보면 재질이 카본 페이퍼(Carbon paper)인 연료극에서는 수소(H₂)가 백금촉매의 영향으로 수소이온(H⁺)과 전자(e⁻)로 분리되고 이때 발생하는 전자는 외부회로를 통하여 산소극계면으로 이동하며, 수소이온은 농인산 수용액으로 이루어진 전해질을 따라 이동하여 역시 산소극계면에 도달한다. 산소극계면에서는 공기중의 산소와 전해질 및 외부회로를 통하여 온 수소이온과 전자가 반응하여 화학적으로 안정된 상태인 물을 생성한다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.



이때 외부회로에 부하를 연결하면 전자의 흐름과 반대되는 방향으로 전류가 흐르게 되고, 전체적으로는 수소와 산소가 결합하여 물이 되면서 전기를 발생하는 반응이 된다³⁾. 인산형 연료전지에서 얻을 수 있는 최대 전기에너지는 전지반응에서의 자유에너지변화량(ΔG : Gibb's

free energy)에 해당된다. 이때 엔탈피의 변화량을 ΔH 라고 하면 연료전지의 열효율 ϵ 는 식 (4)로 표현된다.

$$\epsilon = -\Delta G / \Delta H \quad (4)$$

이러한 반응이 25°C에서 일어난다고 하면 이때의 엔탈피 변화량 ΔH 는 -286 kJ/mol, 자유에너지 변화량 ΔG 는 -237 kJ/mol(H.H.V 기준)이 된다. 즉 전기화학 반응이 가역적 일 때, 총 286 kJ 중 237 kJ이 전기에너지로 변환되고 나머지는 열로 방출되어 전기에너지로 전환가능한 이론적인 효율은 약 83% 정도가 된다. 그러나 실제로는 대부분이 열로 방출되고 보통 40~60% 정도가 전기에너지로 변환되어 이용된다⁴⁾.

연료전지의 기전력 E는 이용되는 전자수를 n, Faraday상수를 F(96487 Coulomb/mol)라 할 때

$$E = -\Delta G / nF \quad (5)$$

로 표시할 수 있다. 이때 얻어지는 기전력은 매우 낮으므로 우리가 원하는 크기의 전력을 얻기 위하여 단위전지(Unit Cell)를 여러장 적층하여 직렬로 연결하므로써 필요한 만큼의 전력을 얻을 수 있다. 이를 연료전지 스택(Fuel Cell Stack)이라고 한다⁵⁾.

3. 설치 및 운전

본 연구의 목적은 차세대 발전설비인 연료전지 발전의 실용화를 위하여 실용규모 설비를 도입 연료전지 발전플랜트로서 설비의 설치, 운전시험 운전자료 분석을 통하여 운용 등에 관한 제반 기술을 습득하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 50 kW급 인산형 연료전지 시스템(이하 PAFC System)을 일본 Fuji전기로부터 도입하여 '93 대전 EXPO 전기에너지관 별관에 설치하였다. PAFC System의 운전을 위해서는 연료가스인 액화천연가스(LNG)공급설비, 개질용 순수 공급설비와 시스템내의 배열회수 및 방열을 위한 냉각수 순환설비 그리고 전기의 수배전설비등과 같은 주변기기(BOP: Balance of Plant)를 필요로 하며 이들은 국내에서 설계 및 설치공사를 완료하였다. 1993년 6월초에 부산항에 도착한 PAFC System은 저상 트레일러를 이용하여 EXPO 전기에너지관으로 운송하여 설치한 후 시운전 및 조정시험을 거쳐 93년 7월 28일 국내에서는 최초로 계통에 연계되어 발전을 시작하였다. PAFC 발전설비의 연속 운전 시험은 1993년 8월부터 시작하여 1994년 11월말까지 실시하였고, 이 기간 동안에 구성기기의 특성조사 및 운전특성시험을 실시하였다. 운전특성시험은 정부하운전, 기동 및 정지특성 시험과 배열이용특성 및 환경특성 등을 조사하고 이를 평가하였다⁶⁾.

3-1. 설비의 구성

PAFC System의 기본 구성을 Fig. 1에 나타냈다. 시스템은 전기를 발생시키는 연료전지 스택과 연료인 천연가스(LNG)를 수증기를 가하여 수소와 이산화탄소로 개질시키는 개질기(Reformer), 그리고 연료전지 스택에서 발생하는 DC전기를 AC전기로 변환시키는 직교류변환장치(Inverter) 등으로 구성된다. Table 1은 도입된 PAFC System의 기술규격을 보여주고 있다⁷⁾.

3-2. 주변기기(B.O.P)의 설계 및 설치

Fig. 2에 50 kW급 PAFC 발전설비의 전체 구성을 나타냈다. PAFC System의 운전을 위하여 그 기능에 따라서 다음과 같은 주변기기를 설계·제작·설치하였다.

Table 1. Technical specification of the 50 kW PAFC system.

Rated Power	50 kW AC
Frequency	60 Hz
Aux power	4.5 kW
Plant AC Efficiency	38.5% (LHV)
Heat Recovery	39.6% (LHV)
DC Power	59.9 kW
Stack Current	474.1 A
Stack Voltage	126.4 V
Cell Voltage	661.8 mV
Operation Temp	190°C
Operation Pressure	1.07 kg/cm ²
H ₂ /O ₂ Utilization Rate	79.9%/50.0%
Reformer S/C Ratio	3.25
Methane Conversion	91.5%

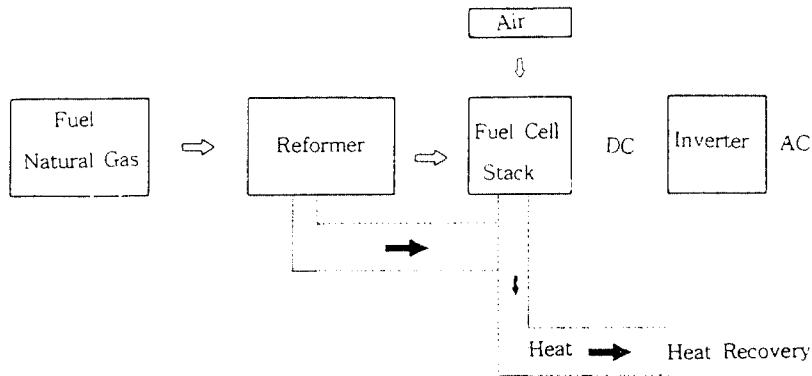


Fig. 1. Schematic diagram of 50 kW PAFC system.

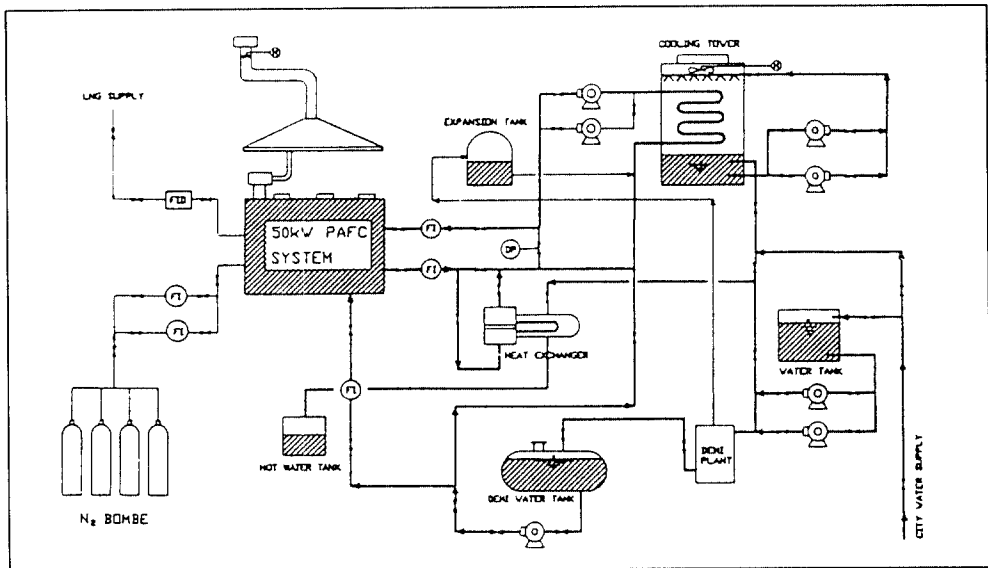


Fig. 2. Flow diagram of 50 kW PAFC power generation system.

3-2-1. 가스 및 수공급설비

우선 연료인 천연가스의 원활한 공급을 위한 설비와 연료전지내의 반응가스제거 및 정지시 설비보존을 위한 질소가스 공급설비 및 연료전지의 운전온도 유지를 위해 내부에서 발생하는 열을 외부로 방출하거나 발생열을 이용하기 위한 냉각수 순환설비를 설치했다. 본 시스템에서는 설비의 입구부에서의 공급가스 압력이 150 mmAq에서 250 mmAq가 되도록 압력과 유량을 조절하였고, 질소가스는 불시정지 또는 휴지시 공급량이 조건에 따라 조절될 수 있도록 설치하였다. 냉각수 순환시스템은 방열용 냉각탑(Cooling Tower)과 온수생성용 열교환기(Heat exchanger)로 구성되었다. 정격출력(50 kW)에서의 냉각수 온도조건은 발전설비의 입구온도가 45°C 그리고 출구 온도가 65°C 이하이며, 냉각수 순환량은 2.8 Ton/hr이다. 본 시스템에서는 연료전지 본체내의 오염방지를 위해 폐쇄순환(Closed Cycle)방식의 냉각수 순환 설비를 설치하여 신뢰성을 높였다. 근본적으로 연료전지는 운전시 별도의 물의 공급을 필요로 하지 않으나 초기기동 및 운전시의 부족분 보충을 위하여 순수공급 시스템을 설치하였고, 수질의 유지를 위해 물처리 설비를 별도로 설치하였다.

3-2-2. 전기설비

일본에서 개발된 PAFC System은 3상 3선 220 V의 출력전압을 가지고 있기 때문에 국내규격인 3상 4선 380 V의 배전선로에 연계시켜 시스템에서 필요로 하는 전기를 수전하고 발생한 전기를 계통에 배전하기 위하여 별도의 Y-Δ 변압기 및 수배전설비를 설치하였다. 전

기설비는 계통연계 및 단독운전을 위하여 연료전지설비로부터 운전 관련 신호를 받아 PLC(Programable Logic Controller)에 의하여 마그네틱 스위치를 제어 동작하므로써 자동으로 선택되어 운전될 수 있도록 구성하였다.

3-2-3. 제어 및 계측시스템

보조설비(B.O.P) 및 PAFC System의 온도, 유량, 압력 등을 계측하고 이들 운전 상태를 PC 모니터를 통하여 감시하고 제어할 수 있는 감시설비 및 배전반을 설치하였고, 이를 통하여 운전자료 자동수집 및 분석기능도 갖도록 설계하였다. 또한 스택, 개질기 및 탈황기 입/출구의 가스성분 분석을 위해 가스취출 라인을 On-line상으로 설치하였으며, Gas analyzing system 및 Gas chromatograph(Hewlett Packard Model HP5890)를 설치하였다. 그리고 설비내의 내부온전감시를 위해 Program Loader(Fuji LITE D25)를 설치·운영하였다.

3-3. 운전

PAFC System은 크게 기동, 운전, 정지의 3가지 과정으로 동작된다. Fig. 3은 기동과정에서의 설비의 승온과정을 보여주고 있는 그림이다⁷⁾. 기동키를 누르면 설비내에 급수펌프가 가동되어 급수탱크 및 기수분리기 등에 물을 공급하게 되고 이어 수위가 정상이면 설비는 가열모드 1(Heating Mode 1)으로 전환된다. 가열모드 1은 외부 공급 천연가스를 연소하여 개질기 온도를 개질 가능한 온도까지 가열시키는 과정으로 이 과정에서는 변성기, 탈황기, 스택의 온도도 함께 가열되며 적정온도가 될때

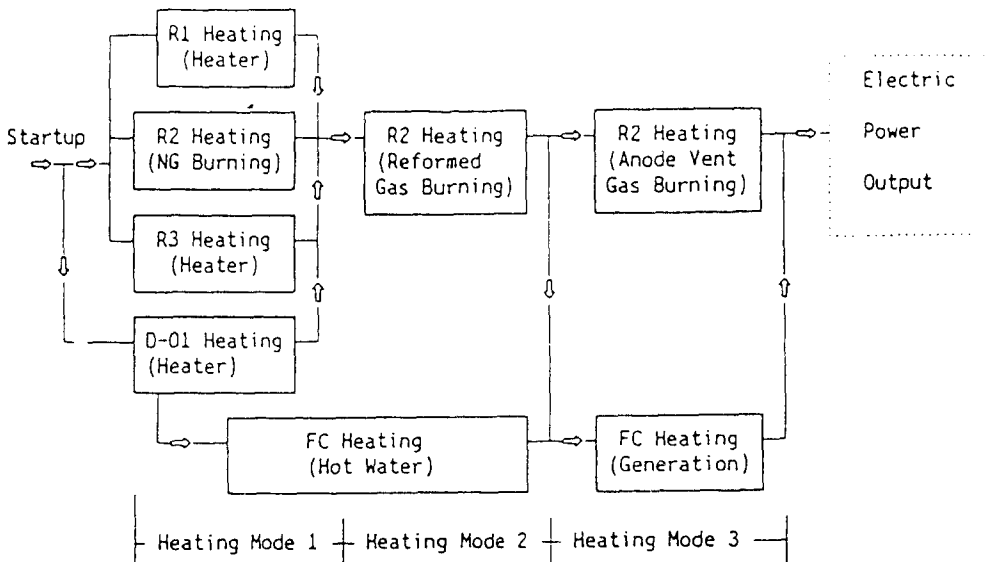


Fig. 3. Flow chart of start-up processing.

가열모드2로 전환된다. 가열모드2(Heating Mode 2)는 생산되는 개질가스가 연료전지 스택내로 공급되지 않고 by Pass되어 개질기 버너로 공급하여 연료전지에서 필요로 하는 가스조성이 될 때까지 개질계를 승온하는 과정으로 개질기 버너에는 천연가스가 공급되지 않게 된다. 가열모드 3(Heating Mode 3)은 전지본체에 개질가스와 공기가 공급되어 발전을 시작하면서 100% 출력이 가능하도록 승온하는 과정이다. 이 과정에서 스택의 개회로전압이 170 V 이상이 되면 바로 설비내 부하와 연결되어 전기를 발생하며 이 전기는 기수분리기용 히터의 전원으로 이용된다. 이 과정에서 스택온도가 180°C 이상이 되면 대기모드(Stand by Mode)로 전환되게 된다.

대기운전은 외부적으로 전기출력이 없는 운전상태로 계통연계운전 및 단독운전을 연결하는 중간단계이다. 계통연계운전의 출력조정은 외부시출력치(유효전력 P 및 무효전력 Q)에 따라 출력을 제어하는 정전류 제어방식이다. 독립부하운전은 계통에서 독립된 부하에 전력을 공급하는데 부하의 변동에 따라 출력이 조정되게 된다.

정지(Stop)는 정상정지와 비상정지가 있는데 정상정지인 경우에는 정지 조작에 의해 이루어지며, 비상정지인 경우는 비정상적인 운전조건이 시스템내에서 감지될 때 자동으로 정지된다. 정지모드는 냉각모드 1(Cooling Mode1)과 2로 이루어져 있는데, 냉각모드 1은 발전중인 연료전지 스택에서 자체내의 부하로 잔류가스를 소모한 후 스택의 온도를 낮추는 과정이다. 냉각모드 2는 발전을 정지하여 개질계 및 연료전지 스택에 질소가스를 공급하여 Purge를 실시하며, 방전저항을 투입 전지의 전압을 낮추면서 냉각수에 의하여 강제로 전지의 온도를 적정한 온도까지 냉각시키는 과정이다. 전지온도가 80°C 이하가 되면 정지상태로 전환되고 설비 유지를 위하여 적은 양의 질소가스가 공급된다.

4. 시험 결과 및 고찰

4-1. 운전실적

본 시스템은 1993년 7월 28일 최초로 운전을 시작하여 정격부하인 50 kW 발전에 도달하였고 그해 8월부터 본격적인 운전시험을 실시하여 1994년 12월 31일까지 총 발전시간 6,003 시간에 187,190 kWh의 발전 전력량을 기록하였다. 이때의 발전시간 이용율은 63.01%이며 최장 연속운전 발전시간은 1,459 시간이었으며 이때의 발전전력량은 50,742 kWh를 기록하였다. Fig. 4는 월별 발전량 및 이용율을 나타낸 도표이다. 월별 운전기록을 분석하면 1994년 10월이 가장 많은 전력량인 27 MWh를 생산하였고 따라서 가장 높은 이용율인 79.9%를 기록하였다. 연간 발전실적을 살펴보면 1993년의 운전시

간 이용율이 62.7%로 1994년 운전시간 이용율 60%보다 약간 상회하고 있고, 전체적으로 연간 평균 이용시간은 약 3,001 시간으로 발전설비의 운전신뢰성을 확보하기 위하여는 설비의 이용율을 높이고 발전 전력을 높여야 할 필요성이 있다. Table 2에 본 시스템의 운전실적을 간략히 나타냈다.

4-2. 연료전지 구성요소의 운전특성

4-2-1. 연료전지본체

설비를 구성하고 있는 각 구성요소의 운전특성을 살펴봐왔다. 우선 연료전지 본체에 있어서는 정격 운전시간인 송전단 출력 50 kW AC 일때의 스택의 전압은 전류 461 A에서 DC130 V였으며 이때의 평균 단위전지 전압은 660.6 mV, 전류밀도는 241 mA/cm² 정도가 된다. 본 설비는 1년 6개월 운전동안 총 19번의 기동 및 정지횟수를 기록하고 있는데 기동횟수에 따른 단위전지당 전압강하율을 살펴보면 40 kW 부하를 기준으로 할때 1.7 mV/회를 보여주고 있어 기동정지 횟수가 단위전지의 성능에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 장기간 정지시가 단기간 정지시보다 많은 전압 강하를 보여주었다. 발전설비의 운용자로서 시스템의 운전특성 중 가장 큰 관심은 스택의 시간에 따른 성능감소를 나

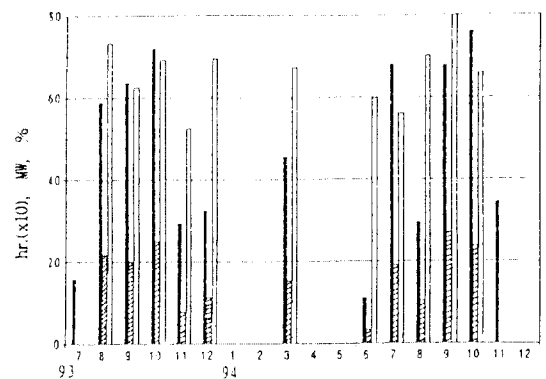


Fig. 4. Monthly Operation hour, generating electricity & utilization of the system (■, Oper. hr (×10); □, Generating electricity (MW); □, utilization (%)).

Table 2. Operation records and performance of 50 kW PAFC system⁶⁾.

Accumulated Generating Time	6,003.1 hr.
Accumulated Generating Electricity	187,190 kWh
Max. Continious Generating Time	1,459 hr.
No. of Start-up	19 times
Electric Capacity Factor (%)	63.01%
Average Power output	33.5 kW

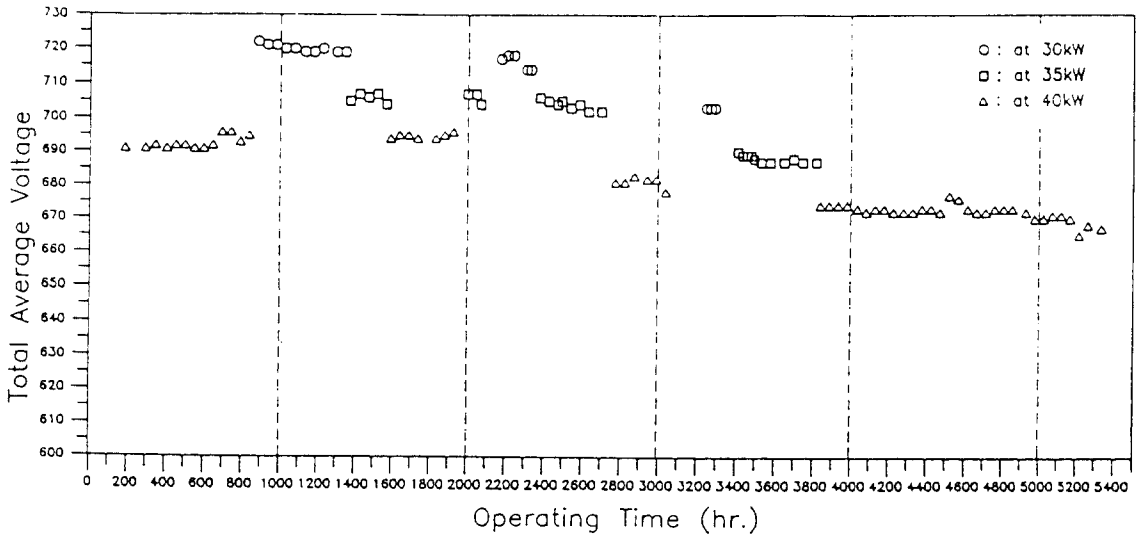


Fig. 5. Stack voltage drop by elapsed time.

타내는 경시변화와 수명이다⁹⁾. Fig. 5는 전지본체의 단위전지의 경시전압 변화를 보여주고 있다. 본 시스템의 경우 5,000시간 운전후 연료전지 본체의 경시전압변화 특성은 전체적으로 1,000시간당 약 3.8 mV 정도의 감소를 보였다. 경시전압변화는 초기 800 시간까지는 단위전지의 평균전압이 다소 증가하는 경향을 보였으나, 그 이후부터는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 연료전지는 초기전압에 대하여 10% 이상의 성능이 감소하면 수명이 다하는 것으로 알려지고 있다¹⁰⁾. 본 시스템의 경우 초기전압치의 10%인 69 mV까지 경시전압특성과 같은 비율로 떨어진다고 한다면 전체적인 연료전지 스택의 수명은 약 18,000 시간 정도가 예상되어 실용화 목표 스택 수명인 40,000 시간까지는 많은 차이가 있어 스택 성능 향상과 더불어 스택의 수명 연장에도 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4-2-2. 연료개질기 및 인버터

연료개질기의 성능은 개질기의 가스조성의 변화로 확인할 수 있는데, 정격출력시의 가스조성은 연료전지본체 입구부가 수소 74%, 일산화탄소 0.31%로서 양호한 성능을 보여주었다. 개질기 역시 연료전지 스택과 같이 개질용 촉매가 들어있어 경시변화 현상을 일으킬 수 있는데, 5,000 시간 이후의 가스조성도 수소 80%, 일산화탄소 0.14%로 나타나고 있어 안정적으로 운전되고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 80% 부하(40 kW)로 운전될 때 연료전지의 각 구성요소별 가스조성 및 물질수지를 살펴본 그림이다.

인버터의 특성은 전압 및 전류왜곡율이 각각 1.9%, 1.8% 정도를 나타내고 있어 아주 양호한 상태를 보여주

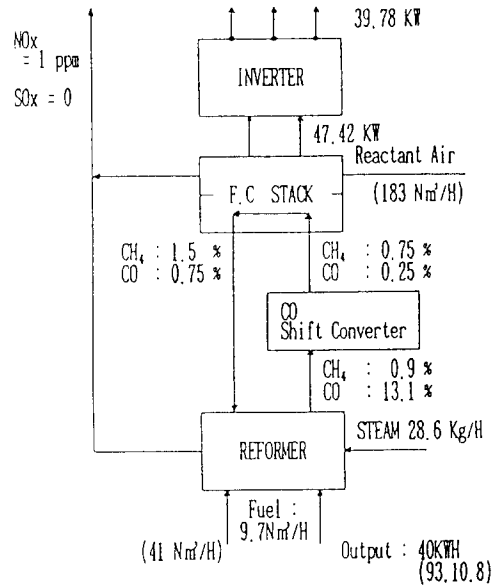


Fig. 6. Gas composition of each component at the state of 40 kW operation.

었다.

4-3. 발전설비운전특성

4-3-1. 기동 및 정지특성

본 시스템에서 시운전시를 제외하면 운전기간중에는 총 16번의 기동횟수를 기록하고 있는데 이중 불시정지는 9번이고 계획정지는 7번으로 나타나고 있다. 불시정

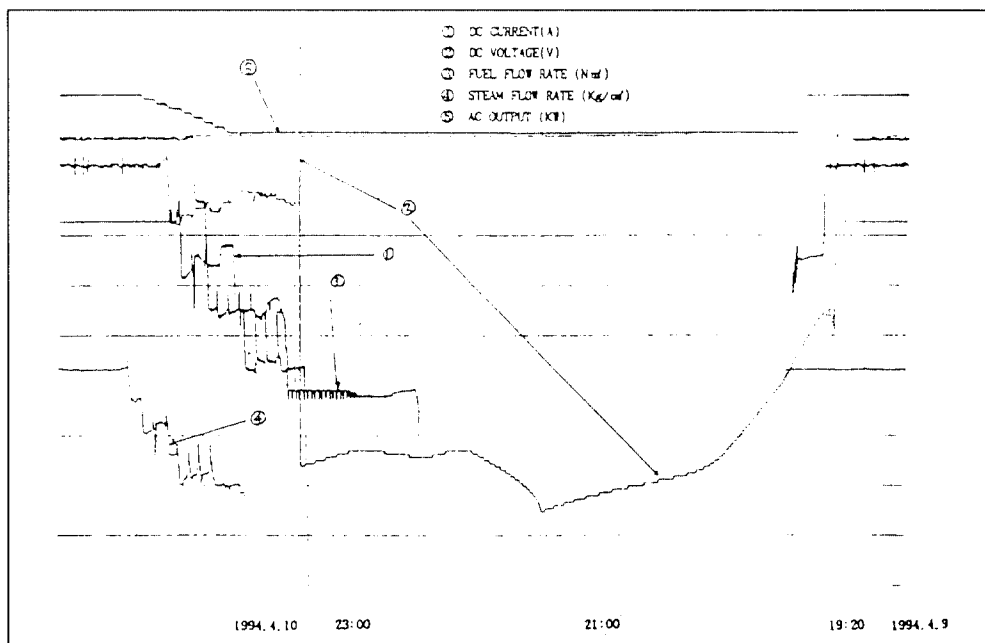


Fig. 7. Characteristics of start-up & stop process.

지의 대부분은 사고에 의한 발전정지이기 때문에 고장 원인의 해결 즉시 기동하여 난기동은 4번 냉간기동은 12번을 기록하였다. 시스템의 운전특성중 냉간기동에 소요되는 평균시간은 약 4시간 50분 그리고 난기동시에는 약 2시간 34분 정도가 소요되었고 운전시간의 경과에 따라 기동시간이 다소 연장되는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 7은 기동 정지시의 유량, 전압 및 전류의 변화를 보여주고 있다. 기동시 스택의 전압, 전류 변화는 가열 모드 1과 2에서 스택내의 온도상승에 따라 미세한 전압의 상승을 보이다 가열모드 3에서 반응가스 공급이 시작됨에 따라 개회로전압(OCV)이 걸리고 이어 부하가 연결된 후 일정전압 및 전류를 유지하게 된다. 정지시에는 전류의 급격한 차단에 따라 전압이 급상승하고 이어 서서히 감소하는 현상을 나타낸다. 정지시에 소요되는 시간은 약 1시간 정도이고 기동시 평균 연료소비량은 5.4 Nm³/h 정도이다.

4-3-2. 정부하 특성

PAFC 발전설비를 일정한 출력(부하)으로 운전할때의 전류, 전압과 주요 구성요소의 온도, 유량 및 가스조성 등을 조사하였다. Fig. 8은 각 부하에서의 전압, 전류 및 출력특성을 나타냈다. 부하가 증가함에 따라 전압은 일정하게 감소하고 발전단 출력은 증가하고 있지만, 전류는 50% 부하 이하에서는 내부이용히터에 의해 거의 변화가

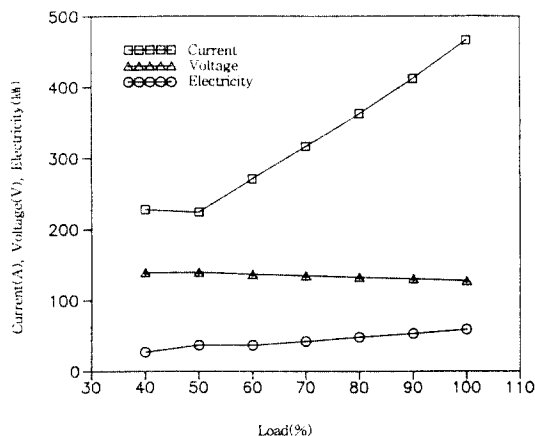


Fig. 8. Voltage, current & electricity characteristics under variable load.

없고 그 이후 일정하게 증가하고 있다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 스택의 온도는 부하 변화에 관계없이 거의 일정한 온도를 유지한 반면 개질기, CO변성기 및 탈황기 등의 온도는 70% 부하 이후에서 서서히 증가하는 경향을 보였다. 정부하 운전시의 전압, 전류 및 주요 구성요소의 온도, 유량 등의 운전자료를 Table 3에 나타냈다.

4-3-3. 열효율

연료전지의 효율은 여러가지로 표현될 수 있지만, 본

설비는 패키이지화 되어있어 시스템의 효율을 입력된 에너지양에 대한 출력 전기량 및 배열량을 시스템의 효율로 정의하여 전기효율 및 배열 효율로 나누어 계산하였다. 전기효율 η_{ACELE} , 배열이용효율 η_{THE} , 및 종합효율 η_{TOTAL} 은 각각 식 (6), (7), (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_{ACELE} = \frac{(AC \text{ 송전단 발생출력} \times 860 \times 100)}{LNG \text{ 유량} \times LNG \text{ 발열량}} \quad (6)$$

$$= \frac{(E \text{ kWh} \times 860 \text{ kCal/H})}{(M \text{ Nm}^3/\text{H} \times Q_f \text{ kCal/Nm}^3)}$$

$$\eta_{THE} = \frac{(\text{설비 냉각수의 입출구온도차} \times \text{냉각수량})}{LNG \text{ 유량} \times LNG \text{ 발열량}} \quad (7)$$

$$= \frac{(\Delta T \times Q_c)}{(M \text{ Nm}^3 \times Q_f \text{ kCal/H})}$$

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{ACELE} + \eta_{THE} \quad (8)$$

본 시스템의 정격부하인 50 kW 운전에서의 발전단 출력은 58.8 kw(DC), 연료유량 12.11 Nm³/h, 배열량이 41700 kcal로서 식 (6), (7), (8)에 의해 전기효율은 37.46%, 배열이용 효율은 43.8%, 종합적인 효율은 81.26%를 나타내 설계치보다 높은 효율을 보여주고 있다. 40% 부하에서 전기효율은 27.1%였고 부하 증가에 따라 증가하여 90% 부하에서 37.8%로 최대를 나타냈으나, 배열이용효율은 오히려 40% 부하에서 52.2%로 최대를 나타냈고 최저 35.4%까지 부하에 따라 심한 변화를 보였으며, 종합효율은 전기효율과 같이 90% 부하에서 83.4%로 최대를 보였다.

4-3-4. 환경특성

본 시스템에 있어서 배가스중의 NOx는 설계치인 10 ppm에 훨씬 못 미치는 1 ppm을 항상 나타내고 있고 SOx와 CO도 거의 나타나고 있지 않다. 분진에 있어서도 거의 측정되지 않고 있는데 이는 운전시 개질용 연

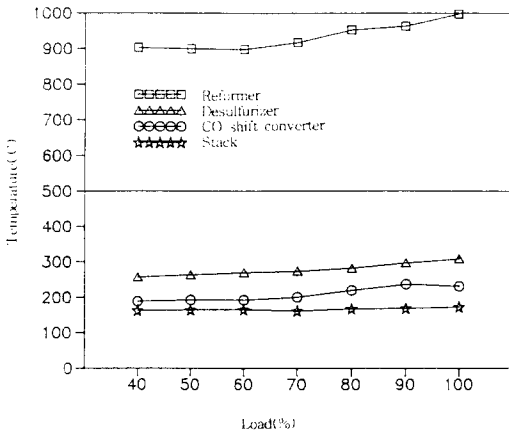


Fig. 9. Temperature variation of PAFC components.

Table 3. Operation data at partial and full load.

Load	%	40	50	60	70	80	90	100
DC Voltage	V	139	139	136	134	132	130	127
DC Current	A	228	224	271	317	363	412	466
Output (DC)	kW	27.2	36.8	36.7	42	48	53.1	58.8
Reformer Temp.	°C	903	900	898	917	953	963	997
Desulfurizer Catalyst Temp.	°C	257	264	270	274	282	297	308
CO Shift Converter Temp.	°C	189	193	193	201	220	237	231
Stack Temp.	°C	163	165	166	162	168	169	173
Steam Separater Pressure	kg/cm ²	5.6	7.5	7.4	5.9	6.4	6.4	6.3
Steam Flow Rate	kg/h	19.9	19.7	21.9	25.5	28.9	32.1	35.8
Fuel Flow Rate	Nm ³ /h	5.6	7.5	7.4	8.6	9.7	10.8	12.11
Water Flow	Ton	2.87	2.87	2.25	2.62	2.8	2.91	2.78
Water Temp. Diff.	°C	11	11	11	12	14	16	15
Heat Flux	kcal	31570	31570	24750	31440	39200	46560	41700
Electric Efficiency	%	27.1	30.2	36.6	36.8	37.4	37.8	37.4
Heat Efficiency	%	52.2	44.5	35.4	38.7	42.8	45.6	44.2
Total Efficiency	%	79.3	74.7	72	75.5	80.2	83.4	81.6

료로 수소를 연소하여 사용하기 때문이다. 소음은 설비의 전후 1 m에서의 측정치가 63 dB에서 65 dB로 설계치에 비하여 양호한 결과를 보여주고 있다.

4-3-5. 운전의 신뢰성

1993년 7월부터 94년 말까지 본 시스템을 운영하면서 발전이 정지되거나 송전이 중단된 사고는 총 23건이었고 이중 대부분의 고장원인은 정전사고나 계통에서의 지락사고에 의한 것이고 연료전지본체 결합 그리고 제어계 및 냉각수계등 설비내의 고장에 의한 것도 4건, 연료처리계통도 7건으로 나타나고 있다. 본 시스템의 운영상의 문제점은 설비가 아직은 상용설비 이전의 상태이기 때문에 정전이나 지락사고 등과 같은 외란에 대하여 쉽게 영향을 받아 운전이 중지되고 있으며, 설비 고장의 주된 원인도 스택을 포함하는 연료전지 구성부품의 내구·신뢰성의 부족에 기인하기 때문에 상용화를 위해서는 이에 대한 문제점의 해결에 주안을 두어야 할 것으로 생각된다¹⁾.

5. 결 론

실용규모의 50 kW의 인산형 연료전지 발전시스템의 선정에서부터 도입, 주변기기의 설계, 설치 그리고 운전특성시험과 운전 및 운영자료 수집, 분석을 통하여 관련 기술의 국내 축적과 함께 국산화 기기의 개발을 앞당기고 국내 보급 기반을 확립할 수 있을 것으로 생각된다. 특성시험에서 나타난 결론은 다음과 같다.

1) 50 kW PAFC System을 도입하고 시스템구성을 위하여 주변기기를 설계·설치하여 1993년 8월부터 1994년 11월 말까지 총 6003시간의 운전동안 187,190 kWh의 발전량을 기록하였고, 최장 운전기록은 1,459시간을 기록하였다. 발전운전시간 이용율은 63.01%를 기록하였으며 평균출력은 33.5 kW를 기록하였다.

2) 설비의 운전특성중 정부하시 평균전압은 DC 130 V, 461 A였으며 경시전압 특성은 1,000 시간당 3.8 mV 정도로 나타나 연료전지설비의 실용화를 위하여는 설비의 성능 향상 및 수명의 연장이 필요하다

3) 기동정지 운전특성은 냉간기동시 평균 4시간 50분, 난기동시 2시간 34분이 소요되었고 정지시에는 평균 1시간 정도가 소요되었다. 발전효율은 정부하시 전기효율이 37.46%, 배열이용효율은 43.8%이었고, 환경특성은 NOx 가 1 ppm 미만으로 양호한 성능을 보여주었다.

4) 운전중 발생한 사고는 총 23건으로 대부분의 사고는 계통의 지락이나 정전사고에 기인하였으나 설비내의 부품고장에 의한 사고도 발생하고 있어, 운전신뢰성 향상을 위해서는 외란에 대한 대비 및 구성 부품의 신뢰성 확보가 필요하다.

사용기호

ϵ_c	: thermal efficiency of fuel cell
E	: electromotive force
E	: electricity
F	: faraday constant
ΔG	: gibb's free energy change
ΔH	: entalphy change
M	: LNG flow
n	: mole of electron
Q_c	: cooling water flow
Q_i	: heating value of LNG
ΔT	: temperature change
η_{ACELF}	: electric efficiency
η_{THE}	: exhust thermal efficiency
η_{TOTAL}	: total efficiency

참고문헌

1. John. H. Hirschenhofer: "International Databook on Fuel Cell Activities", U.S DOE, pp.39-43 (1994).
2. 임희천, 신동열외: "인산형연료전지 발전설비 성능 개선연구", 최종보고서(90G J03), 한전기술연구원 (1992).
3. J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Englemaqn: "Fuel Cells A Handbook", U.S DOE/METC-94/1006 (1994).
4. 서정원, 김성준, 설용건, 이태희: "천연가스를 사용하는 50 kW 인산형연료전지 시스템의 전산모사", 에너지공학, 2(1), pp.75-80 (1993).
5. 電氣學會 燃料電池 運轉性調査専門委員會: "燃料電池 發電", コロナ (1994).
6. 이창우, 임희천외: "40 kW급 인산형연료전지 발전 시스템 개발(50 kW급 인산형연료전지 발전시스템 운전특성 연구)", 최종보고서(92G S03), 한전기술연구원 (1994).
7. Manual book of 50 kW PAFC package, Fuji Electric Co. Ltd (1993).
8. 小野春雄外: "オンサイト用 燃料電池 發電装置の開発", 富士時報, 63(11), (1990).
9. "The first FCDIC Fuel Cell Symposium Proceedings", FCDIC in Japan, pp.26-31, June 27-28, Tokyo (1994).
10. Leo J. Blomen, Michael N. Mugegura: "Fuel Cell Systems", Plenum, pp.310 (1994).
11. H.C. Lim, C.W. Lee, K.S. Ahn, Program and Abstracts of 1994 Fuel Cell Seminar, San Diego Nov. 28-Dec. 1, pp.507-510 (1994).