

## 소형 인산형 연료전지발전 시스템의 출력 및 효율 특성

### Electrical Characteristics and System Efficiency of the 5.9kW Phosphoric Acid Fuel Cell Power Generation System

정 두환<sup>\*</sup>, 이원용, 이선근,<sup>0</sup>임 회천, 신동열, 최수현  
한국에너지기술연구소, <sup>0</sup>한국전력기술연구원

D.H. Jung<sup>\*</sup>, W.Y. Lee, S.G. Lee,<sup>0</sup> H.C. Lim, D.R. Shin, S.H. Choi  
Korea Institute of Energy Research, <sup>0</sup>KEPCO Research Center

#### 1. 요약

수력, 화력, 원자력 다음으로 제 4의 전원으로서 관심의 대상이 되고 있는 연료전지는 연료가 가지고있는 화학에너지를 직접에너지로 변환시키는 점에서 종래의 발전 기술과는 원리적으로 다르며, 카르노(Carnot)사이클에 의한 에너지 변환 효율의 제한을 받지 않기 때문에 효율이 높으며 공해가 없는 특징을 가지고 있다. 연료전지의 발전 방식은 작동 온도, 전해질 등에 의해서 분류되나 현재 실용화 단계의 기술은 인산형연료전지 발전이다. 인산형 연료전지의 발전용 연료는 천연가스, 메탄올, 납사등과 같은 탄화수소 계열의 다양한 연료를 사용할 수있으며, 이들 연료들을 수소가 많이 함유된 가스로 변환시켜 연료전지에 공급하여야 한다.

연료전지발전시스템 개발은 주로 전력이용 측면에서 천연가스를 개질연료로 사용하는 연구가 주류를 이루었으나, 최근에는 전 세계적으로 대기 공해에 시달리고 있는 도시의 환경개선을 위하여 도심용 버스 및 대형 트럭 등에 응용하기 위한 무공해 수송용 자동차엔진의 개발, 국방용 이동전원 개발 및 100kW 미만의 현지설치용 및 낙도용 전원으로서 메탄올을 연료로한 연료전지의 개발이 활발히 진행 되고 있다.

한국에너지기술연구소는 한국전력 기술연구원과 공동으로 1989년 부터 1992년 까지 본체를 제외한 5.9kW급 인산형연료전지 발전시스템 즉, 메탄올 연료 개질장치, 운전자동화 시스템, 배열이용 시스템, 종합 배관 등을 설계 구성하여 발전 플랜트의 운전 특성 연구를 수행 하였으며, 본 고에서는 이들 설비들의 운전 특성과 발전 플랜트로서의 효율 특성에 대한 고찰을 수행하였다. 본 시스템은 연료개질기가 연결되고 배열을 이용하는 국내최초의 종합적인 연료전지 발전 시스템으로서 개질된 연료로 운전하였을 경우 본체의 효율은 31.9%, 배열을 회수한 종합발전 플랜트의 효율은 45.2% 였다.

#### 2. 발전 시스템의 설계 및 구성

본 연구에서 구성한 인산형 연료전지 발전 시스템의 구성은 Fig.1에 나타난 바와 같이 연료개질장치, 연료전지 본체, 부하장치, 시스템제어 및 데이터 수집 장치로 구성하였다.

연료개질장치는 연료전지 연료극이 요구하는 수소연료를 생산 공급하는 장치로서 본 연구에서는 메탄올을 연소용 연료로 사용하고 또한 수증기와 개질 시켜 다량의 수소가 함유된 발전용연료(Hydrogen rich gas)를 생산하였다. 가열방법은 개질장치의 하부에 버너를 설치하여 연소가스가 하부로 부터 상부로 이동하여 최상단에서 반전하여 다시 상부로 부터 하부로 이동 하면서 촉매층을 가열할 수 있도록 하였다. 촉매층의 온도의 유지를 위해 촉매층의 중간 부위의 온도를 감지하여 PID 방법으로 연소용 메탄올 유량을 제어하였다. 수소의 발생량은 이론적인 설계 용량인  $6\text{Nm}^3/\text{h}$ 를 발생시키기 위하여 6kg의 촉매(Low temperature shift catalyst)를 내장시켰으며, 공간반응속도(WHSV)는  $0.51\text{h}^{-1}$ 로 하였다. 개질 촉매층의 온도 범위는  $265^\circ\text{C}$ - $275^\circ\text{C}$ 의 범위에서 운전하였고 물/메탄올의 물비는 1.3-1.5의 범위에서 운전하였다. 연료전지본체는(이하 스택) 연료극의 수소와 공기극의 산소가 반응하여 직접 전기에너지를 생산하는 장치로서 본 연구에서는 일본 Fuji 사에서 DC 출력 규모로 설계용량 5.9kW 스택을 사용하였다. 스택 내부에는 총 65개의 단위전지로 구성되어 있으며, 냉각 방식은 공냉 방식을 채택하고 있다. 운전 압력은 상압, 운전 온도는  $175^\circ\text{C}$  이다.

배열설비는 개질기 출구에서 나오는 습증기 상태의 연료가스를 스택의 운전 조건에 맞는 건가스 조건으로 만들기 위한 열교환기와 연료개질기 및 연료전지 스택에의 연료및 반응공기 극에서 나오는 배가스를 이용하기 위한 열교환기로 구성 하였다. 배열이용시 열교환기의 회수량은 연료전지 발전시스템의 최대직류 출력값과 동일한 7kW로 설정하였으며 온수의 양은 개질가스 냉각수의 유량인 2.5 리터로 하였다.

연료전지는 스택의 온도제어, 운전압력, 극간차압 등의 제어가 시스템의 성능에 매우 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 1개의 주시퀀스와 3개의 부시퀀스로 나누어 구성하였으며, 주 시퀀스는 중앙제어반으로 부터 받은 신호로 전체 시스템의 상태를 파악하고, 부시퀀스에 대해 적절한 제어 명령을 내리게 하였고, 부시퀀스는 기동 및 정지와 같은 정상운전 제어와 운전시 이상이 발생하였을 경우 시스템과 인명 보호를 위하여 프랜트를 안전하게 정지 시킬 수있는 비상정지 시퀀스로 구성하였다.

### 3. 발전시스템 운전

연료개질기는 기동 후 30 분, 스택은 예열 후 2 시간 후에 정상 운전이 가능 하였으나, 스택의 온도가  $120^\circ\text{C}$  에 도달하였을 때를 예열이 종료된 것으로 판단하고, 개질가스를 스택으로 공급 하여 발전을 시작하였다. 발전은 저부하전류에서 고부하 전류로 증가 시키면서 행하였으며, 유량, 온도, 압력이 설계의 상한선

을 넘지 않도록 시스템을 보호하면서 운전을 행하였다. Table 1 는 발전 시스템의 정상운전 일례 이다.

Table 1 5.9kW 인산형연료전지 발전시스템의 정상운전 조건(일례)

적층 촉매량 : 6Kg	냉각공기 입구 온도 : 178℃
개질연료량 : 5.51/h	냉각공기 출구온도 : 188℃
WHSV : 0.51h <sup>-1</sup> ( CH <sub>3</sub> OH, 78.13 mol)	연료 이용율 : 67.4%
H <sub>2</sub> O/CH <sub>3</sub> OH : 1.3	공기 이용율 : 40 %
연소메탄올 량 : 2.5 l/h	연료극 연료 온도 : 141℃
촉매층 운전 온도 : 275℃	공기극 연료 온도 : 31℃
메탄올전환율 : 100%	연료극 공급 압력 : 81 mmAq
가스 조성	공기극 공급 압력 : 245 mmAq
CO : 1.7%	냉각공기 입구 압력 : 193 mmAq
CO <sub>2</sub> : 23.3%	열교환기 입구가스 온도: 138℃
H <sub>2</sub> : 75%	온수 입구온도 : 13℃
수소발생량 : 259 mol/h	온수 출구온도 : 34℃
반응공기 공급량 : 26 Nm <sup>3</sup> /h	온수 유량 : 300 l/h
냉각공기 공급량 : 540 Nm <sup>3</sup> /h	배열 회수량 : 7.35kW

#### 4. 전기적 출력 및 효율 특성

Fig.2 는 개질가스를 발전 연료로 사용하였을 경우 부하전류의 변화에 따른 전압 및 전기적인 출력(kW) 특성 추이이다. 무부하 상태에서 반응연료를 스택으로 공급하였을 경우 개회로 전압은 62V 였으며 부하의 증가와 함께 전압은 급격히 감소하여 부하전류가 94%(160A :100%) 였을 경우는 38 V 이었다. 전기적인 출력은 최고 운전 부하 150A 에서 5.5 kW 를 얻을 수 있었으나, 50% 부하 전류(80A) 까지는 직선적으로 전기적인 출력이 증가하나 이후 부터는 감소하는 전형적인 연료전지의 발전 형태를 보여 주고 있다. 이의 특성은 연료전지의 발전 부하의 증가에 따른 분극의 상승에 의한 결과이다.

연료전지의 발전효율은 연료 개질기의 에너지 변환효율, 스택의 발전 효율, 열교환기의 에너지 회수율에 의해 결정 된다. 연료 개질기의 효율은 발생가스의 LHV/개질연료의 LHV의 비 이며, 스택 발전 효율은 DC 에너지 생산량/반응연료의 LHV의 비이다. 본 연구에서는 연료개질기의 발전 효율, 스택의 발전 효율 및 시스템의 발전효율을 Table 2 와 같이 정의 하였다.

Table 2 인산형연료전지 발전 시스템의 효율식

효 율	효 율 식
연료개질기의 열효율	$\eta_{FP}(\%) = \frac{Q_{CO} + Q_{H_2}}{7 M_{CH_3OH} + Q_{CH_3OH}} \times 100$
스택효율(봄베수소)	$\epsilon_{FC}(\%) = \frac{860E}{M_H Q_H} \times 100$
스택효율(개질가스)	$\epsilon_{FC}(\%) = \frac{860E}{M_H Q_H + M_{CO} Q_{CO}} \times 100$
시스템 발전효율 (배열 미고려)	$\epsilon_{FC}(\%) = \frac{860E}{M_H Q_H + M_{CO} Q_{CO} + M_{CH_3OH} Q_{CH_3OH}} \times 100$
시스템 발전 효율 (배열 고려)	$\epsilon_{FC}(\%) = \frac{860E + Q}{M_H Q_H + M_{CO} Q_{CO} + M_{CH_3OH} Q_{CH_3OH}} \times 100$

여기서,  $M_{CO}, M_H$ 는 개질가스에 포함되어 있는 일산화탄소의 몰수 및 수소의 몰수(mol/h)이며,  $M_{CH_3OH}$ 는 개질메탄올 열량(Kcal/mol),  $Q_{CO}, Q_H$ 는 일산화탄소 및 수소의 열량,  $Q_{CH_3OH}$ 는 개질시 요구되는 연소용메탄올의 저위 발열량(Kcal/mol),  $\eta$ 는 메탄올 전환율이다.  $Q_R$ 은 배열로 회수한 양(Kcal/h)으로 다음과 같이 정의된다.

$$Q_R = m_w C_{pw} (T_{wh} - T_{wc})$$

여기서,  $m_w$ 는 공급되는 온수량(1/h),  $C_{pw}$ 는 물의 비열(Kcal/kg. °C),  $T_{wh}$ 는 온수 온도(°C),  $T_{wc}$ 는 냉각수 온도(°C)이다. Fig. 3은 본 발전시스템의 효율과 발전시스템의 용량이 동일한 일본 시코쿠전력의 발전 효율을 비교 도시하였다.

연료개질기의 열효율은 본 연구에서 개발한 것은 78.5% 인 것에 비해 시코쿠전력에서 개발한 시스템은 82%로 약 4% 효율이 떨어 지는 것을 볼수 있다. 이는 촉매층의 온도 유지를 위하여 본 시스템에서는 메탄올의 연소열만 이용한 반면 시코쿠전력에서는 미반응 수소를 개질기로 환원 시켜 보조 열원 재사용 하였기 때문이다. 스택의 발전효율은 봄베 수소만을 이용하였을 경우에는 39.6% 였으며 개질기를 이용하였을 경우에는 31.9% 였다. 이의 값은 일본의 시코쿠전력 운전 결과 보다 2.5% 떨어지는 값을 보인다. 이의 결과는 연료극의 미반응 가스를 사용하지 않은데서 온 개질기의 효율 저하가 전 시스템의 효율에 영향을 미친 결과이다. 종합시스템의 발전 효율은 배열을 이용하지 않았을 경우 20% 였으나 열교환기를 이용하여 온수를 회수한 열량을 고려하였을 경우에는 45.2% 로서 열이 배열

회수 장치를 통해 25.2 %의 효율을 향상시킬수 있었다. 또한 종합 발전 효율을 일본의 시코쿠 전력의 운전 결과와 비교하면 약 8% 증대 된 값을 얻을 수 있었다. 이의 값으로부터 본 시스템의 배열 시스템은 효율적으로 설계제작 되었음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

소형 인산형연료전지의 발전시스템의 특성연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연료개질장치, 스택내, 배열이용 시스템, 자동제어 시스템을 구축하여 연료 전지 발전 플랜트의 신뢰성 있는 운전 기술과 발전 플랜트의 평가 기술이 배양 되었다.
2. 발전시스템은 150A에서 5.5kW 의 전기적 출력을 얻었으며, 50% 까지는 전기적 출력값이 직선적으로 증가하나 그 이후 부터는 감소하는 전형적인 연료전지의 출력특성을 보였다.
3. 발전시스템의 연료개질장치 에너지 변환효율은 78.6%, 개질가스로 운전한 스택 발전 효율은 31.9% 였으며, 이들의 값은 종래 개발된 발전시스템의 효율 보다 다소 낮았다.
4. 발전시스템의 종합 효율은 45.2% 였으며, 배열 회수 장치를 이용함으로써 25.2 % 의 효율을 늘일수 있었다.

## 6. 참고문헌

1. 신 동열 외, "인산형 연료전지 발전설비 성능개선 연구", 한전기술연구원, 최종보고서, KRC-89G-J06, 1992
2. Stanley S, Kurpit, " 1.5 and 3 kW Indirect Methanol-Air Fuel Cell Power Plant", IECEC, 222(1975)
3. 朱原吉和 外, "小形燃料電池發電裝置の 開發研究", 四國電力研究報告書, No 8802, 1990
4. T.G. Benjamin et al, Hand book of Fuel Cell Performance, DOE Report, 1980
5. 정두환 외, "메탄올연료 인산형연료전지 발전시스템 운전특성", 93 춘계 화공학술 발표 대회 논문집, 71(1993)

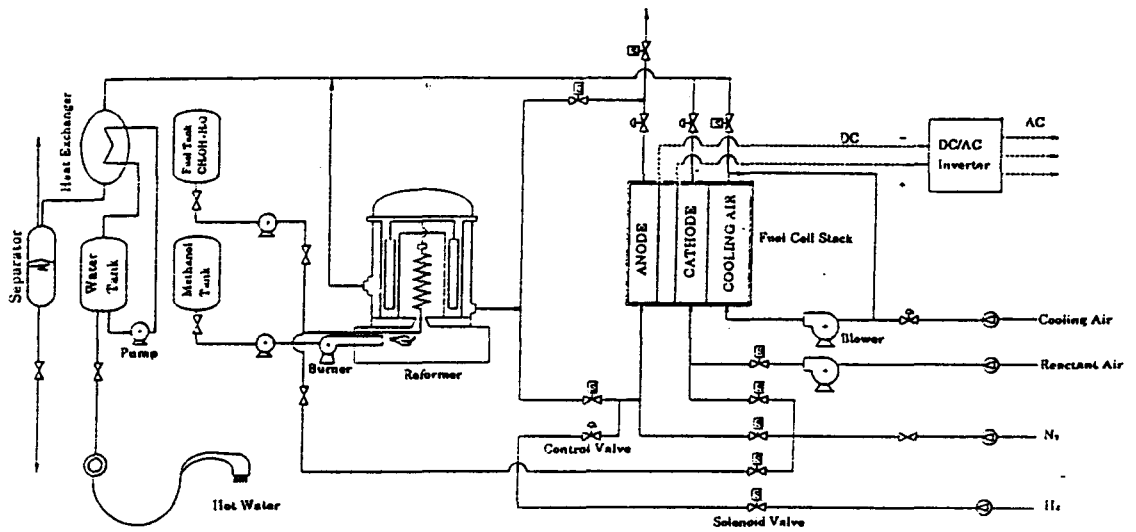


Fig.1 5.9kW 인산형연료전지 발전시스템 개략도

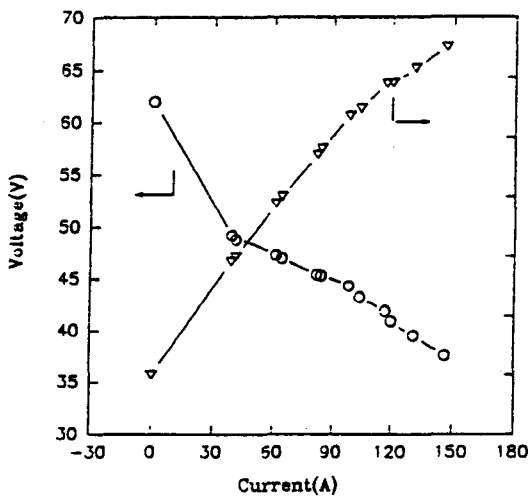


Fig.2 발전시스템의 전압 전류 특성 및 효율 특성

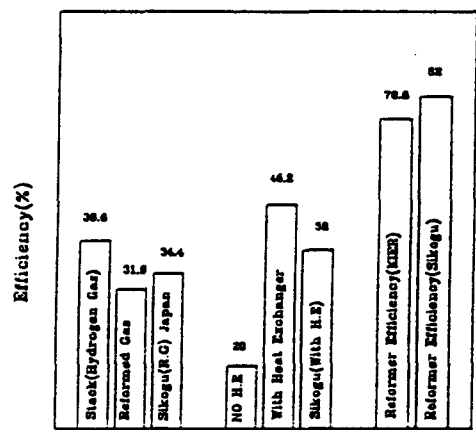


Fig.3 발전 시스템의 효율 특성 비교