

# 공작기계 동력용 연료전지의 전압과 전류특성에 관한 연구

김홍건\*, 김유신<sup>†</sup>, 김홍열<sup>‡‡</sup>

(논문접수일 2004. 8. 3, 심사완료일 2004. 10. 20)

## Electric Voltage and Current Characteristics of Fuel Cell for Machine Tool Power Supply

H. G. Kim\*, Y. S. Kim<sup>†</sup>, H. Y. Kim<sup>‡‡</sup>

### Abstract

PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) is considered as an attractive option to produce electric power in many applications. A fundamental step of theoretical fuel cell open circuit potential is examined and compared with the measured data from 1.2KW PEMFC module. The hydrogen pressure and stack temperature are also measured during the operation of PEMFC module. It is found that the stack voltage and current data agree in general with the results calculated by chemical potential approach though they still have a discrepancy. It is analysed that the discrepancy is due to activation polarization, concentration overvoltage and ohmic overvoltage.

**Key Words :** PEMFC(고분자전해질 연료전지), Open circuit potential(개방회로 전위차), Stack voltage(스택전압), Stack current (스택전류), Polarization(분극현상)

## 1. 서 론

연료전지(Fuel Cell)는 1839년 영국의 W.R. Grove가 1839년 황산 용액에 두 전극을 담그고 산소와 수소를 흘려 주어 전기를 발생시킨 것이 연료전지의 시작이다<sup>(1)</sup>. 그 이후로 많은 연료전지들에 대한 소규모 실험들이 순수한 과학적 흥미 때문에 수행되었다. 주로 산소와 수소의 반응을 이용한 실험들이었으며, 전극 물질로는 값비싼 금이나 백금을 사용했기 때문에 실용화는 염두에 두지 않았던 순수한 실험실 규모의 연구들이었다. 확실한 원리나 전극 메커

니즘에 근거한 본격적인 연구는 20세기 중반 이후이다. 20세기 초반 연구의 특징은 Jungner가 최초로 제안했던 “산화 환원(Redox)” 전지 시스템들에 대한 연구였다. 이 시스템은 화학 반응이 일어나는 장소와 전극 반응이 생기는 장소를 분리함으로써, 산소와 수소가 직접 만나는 것을 방지할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 최근 고분자전해질 연료전지 연구개발에 있어 단기간에 괄목할 만한 성장이 있었음에도 불구하고 국내의 기술수준은 연구기간, 연구인력, 연구비의 열세로 인해 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있는 상태이다. 실제로 미국의 경우 Energy Partner가 1993년에

\* 전주대학교 기계공학과 (hkim@jj.ac.kr)

주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

+ 전주대학교 대학원 기계공학과

++ 전주대학교 공학기술 종합연구소

일본의 경우 Mazda가 1992년에 처음으로 시험용 연료전지 전동차를 개발한 것과 비교하면 우리나라의 연료전지자동차의 개발은 선진국에 비해 다소 뒤쳐 있는 것으로 볼 수 있다<sup>(2)</sup>. 또한 환경규제가 가시화되고 기후변화협약(선진국 2012년까지 1990년 배출량 대비 평균 5.2%감축의무) 등에 대응한 국내 에너지 정책의 핵심 기조가 미래사회 요구에 부응하는 친환경적 에너지산업 구조로의 전환이 시급한 실정이다. 이에 연료전지는 차세대 대체에너지로서 육성해야 할 정책과제로 자리잡아가고 있으며 비상전원용, 가정용, 휴대용, 자동차용, 발전소용 등 여러 산업분야에 부합하여 개발되어야 한다. 따라서 공작기계에 사용하기 위하여 연료전지의 성능향상, 대면적화, 신뢰성 및 장기성능 제고 등에 대해서 보다 집중적인 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

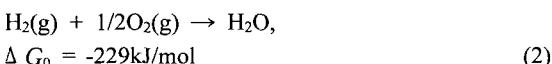
본 논문에서는 공작기계 전원 공급을 위한 일반 동력원 및 비상전원 동력원으로 적합한 고분자 연료전지 시스템에 관해 이론적 개방회로 전위차를 정식화했으며, 또한 연료전지 시스템을 이용하여 스택을 통하여 출력되는 전압과 전류 특성을 조사하였다. 이러한 연료전지는 화학반응을 통하여 화학에너지를 직접 전기에너지로 바꾸는 에너지 전환 장치이며 재충전이 필요 없는 무공해 발전시스템이다<sup>(3,4)</sup>. 평가방법으로 연료전지 시스템의 시간에 따른 전압과 전류를 측정하여 이론적 전위차와 연료전지 시스템의 전압 발생을 비교하였으며, 또 전위차 손실원인에 대한 연구를 수행하였다. 이와같은 선행연구를 통하여 차후 연료전지는 비상전원용 및 공작기계 전원용으로 적용 가능하게 될 것이다.

## 2. 이론해석 및 응용분야

연료전지는 연료의 화학에너지를 직접전기에너지로 변환시키는 장치로 연료전지를 통해 얻어질 수 있는 이론적인 최대 에너지는 식 (1)과 같이 Gibbs Free Energy 변화  $\Delta G$  와 관계가 있다.

$$\Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (1)$$

여기서,  $\Delta h$  : 반응 Enthalpy 변화,  $\Delta s$  : 반응 Entropy 변화,  $T$  : 절대온도 (K)이다. 25°C의 온도와 1atm의 가스압력에서 수소와 산소가 반응할 때의 Gibbs 자유에너지 변화  $\Delta G_0$ 은 다음과 같다.



여기서,  $\Delta G_0$ 가 음의 값을 나타내는 것은 시스템으로부터 에너지를 방출하는 것을 의미한다. 수소가 연소되어 열을 얻는 것과 같이 수소의 에너지 함량 (여기서 반응 Enthalpy는 연소 Enthalpy 또는 Heat value, Lower heating value (LHV))이 연료전지의 전기에너지로 모두 전환되지는 않는다. 여기서  $n$ 을 반응식당 교환되는 전자의 수라고 하면 아래의 식으로부터 평형상태에서의 Cell potential을 얻을 수 있다.  $K_F$ 는 패러데이상수(96487A · s/mol)이다.

$$\Delta G_0 = -n K_F E_0 \quad (3)$$

연료로서는 주로 천연가스로부터 쉽게 생산해 낼 수 있는 수소와 공기 중의 산소가 사용되는데 수소와 산소는 각각 양극과 음극에서 전자를 주고받는 반응에 참여하며 양극에서 음극으로 흐른 전자를 이용한다. Fig. 1은 연료전지의 양극과 음극에서 일어나는 전극반응 원리를 나타낸다<sup>(5~8)</sup>.

Gibbs Free Energy는 온도, 압력 및 반응특성의 함수로서 연료전지의 반응에 대한 Gibbs Free Energy는 식 (4)와 같이 정의 된다. 여기서  $G$ 는 Gibbs Free Energy,  $\Pi_i$ 는  $i$ 의 화학적 전위차,  $h_i$ 는  $i$ 의 엔탈피,  $s_i$ 는  $i$ 의 엔트로피 그리고  $\nu_i$ 는  $i$ 의 비체적을 의미한다.

$$\Delta G(T, p) = \Pi_{\text{H}_2\text{O}}(T, p) - \Pi_{\text{H}_2}(T, p) - \frac{1}{2} \Pi_{\text{O}_2}(T, p) \quad (4)$$

전위차는 주어진 온도와 압력에서 생성된 음의 엔트로피 화학에너지로서 정의된다.

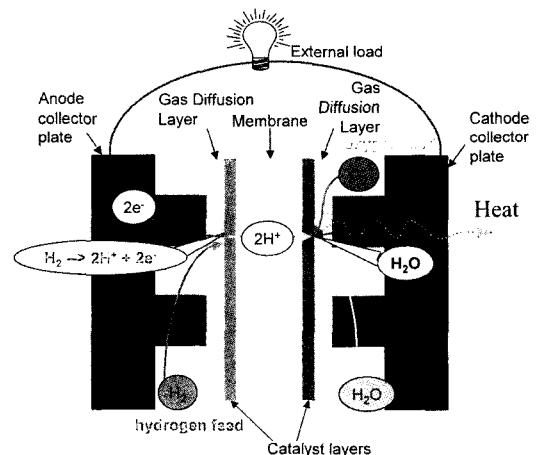


Fig. 1 Schematic diagram of PEMFC

$$\Pi_i(T, p) = h_i(T, p) - Ts_i(T, p) \quad (5)$$

화학적 전위차의 온도와 압력의 함수 의존도는 원하는 값에 온도와 압력에 기인한 식 (4)를 편미분한 후 적분함으로서 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pi_i(T, p) &= \Delta h_{i,0} + \int_{T_{i,0}}^T \frac{\partial h_i}{\partial T} dT + \int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial h_i}{\partial p} dp \\ &- T \Delta s_{i,0} - T \int_{T_{i,0}}^T \frac{\partial s_i}{\partial T} dT \\ &- T \int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial s_i}{\partial p} dp \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 적분항들은 다음의 항들로 축소된다.

$$\Delta \Pi_{i,0} = \Delta h_{i,0} - T \Delta s_{i,0} \quad (7)$$

$$\int_{T_{i,0}}^T \frac{\partial h_i}{\partial T} dT = \int_{T_{i,0}}^T C_{p,i} dT \quad (8)$$

$$T \int_{T_{i,0}}^T \frac{\partial s_i}{\partial T} dT = T \int_{T_{i,0}}^T C_{p,i} \frac{dT}{T} \quad (9)$$

$$\int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial h_i}{\partial p} dp = \int_{p_{i,0}}^p [v_i - T \frac{\partial v_i}{\partial T}] dp \quad (10)$$

$$T \int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial s_i}{\partial p} dp = -T \int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial v_i}{\partial T} dp \quad (11)$$

이상기체 방정식은 비체적을 고려하여 사용되었으며 Thermochemical Table<sup>(9)</sup>의 같은 비열용량에 대해서 사용될 수 있기 때문에 다음의 식 (12)과 식 (13)를 도입할 수 있다.

여기서  $C_{p,i}$ 는  $i$ 에 대한 열용량이고,  $K_{i,j}$ 는 열용량 계수를 나타낸다.

$$v_i = \frac{RT}{p} \quad (12)$$

$$C_{p,i} = \sum_{j=0}^n K_{i,j} T^j \quad (13)$$

여기서 식 (12)와 식 (13)을 식 (8)~(11)에 대입하면, 온도와 압력에 대한 엔탈피와 엔트로피를 얻을 수 있게 된다.

$$\int_{T_{i,0}}^T \frac{\partial h_i}{\partial T} dT = \sum_{j=0}^n \frac{K_{i,j}}{j+1} (T_i^{j+1} - T_{i,0}^{j+1}) \quad (14)$$

$$\int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial h_i}{\partial p} dp = 0 \quad (15)$$

$$T \int_{p_{i,0}}^p \frac{\partial s_i}{\partial p} dp = RT \ln \frac{p_i}{p_{i,0}} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} T \int_{T_{i,0}}^T \frac{\partial s_i}{\partial T} dT &= T K_{i,0} \ln \frac{T}{T_{i,0}} \\ &+ T \sum_{j=1}^n \frac{K_{i,j}}{j} (T_i^j - T_{i,0}^j) \end{aligned} \quad (17)$$

모든 과정들이 표준상태라고 가정하면 화학적 전위차는 식 (18)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pi_i(T, p) &= \Delta \Pi_{i,0} + \sum_{j=0}^n \frac{K_{i,j}}{j+1} (T^{j+1} - T_{i,0}^{j+1}) \\ &- T K_{i,0} \ln \frac{T}{T_{i,0}} - T \sum_{j=1}^n \frac{K_{i,j}}{j} (T^j - T_{i,0}^j) \\ &- RT \ln \frac{p_i}{p_{i,0}} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)의 화학적 전위차는 이제 식 (4)에 대입될 수 있고 식 (18)과 식 (4)를 비교함으로써 이상기체의 활동을 관찰할 수 있다. 여기서 물은 액체상태 혹은 수증기상태로 생성이 될 수 있다. 물이 액체상태에서 생성되면, 물의 활성은 근사적으로 일치하여 액체상태의 Gibbs Free Energy가 사용되어야 한다. 또한 물이 수증기상태로 생성되면, 물의 활성은 물분율에 의해 정의된다. 이때 기준압력과 총 압력은 일치하여 수증기상태의 Gibbs Free Energy가 사용되어야 한다. 따라서 연료전지의 이론적인 개방회로의 전위차에 대한 공식은 물이 액체상태에서 생성될 경우 식 (19)와 물이 수증기상태에서 생성될 경우 식 (20)으로 표현된다. 여기서  $E$ 는 전위차,  $G_f$ 는 액체상태의 Gibbs Energy,  $G_g$ 는 수증기상태의 Gibbs Energy,  $x_i$ 는  $i$ 에 대한 물분율이다.

$$\begin{aligned} E(T, p) &= \frac{1}{2K_f} [\Delta G_{f,0} + \sum_{j=0}^n \frac{K_{f,j}}{j+1} (T^{j+1} - T_0^{j+1})] \\ &- T K_0 \ln \frac{T}{T_{i,0}} - T \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{j} (T^j - T_{i,0}^j) \\ &- RT \ln \frac{1}{x_{H_2} x_{O_2}^{1/2}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} E(T, p) &= \frac{1}{2K_f} [\Delta G_{g,0} + \sum_{j=0}^n \frac{K_{g,j}}{j+1} (T^{j+1} - T_0^{j+1})] \\ &- T K_0 \ln \frac{T}{T_{i,0}} - T \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{j} (T^j - T_{i,0}^j) \\ &- RT \ln \frac{x_{H_2O}}{x_{H_2} x_{O_2}^{1/2}} \end{aligned} \quad (20)$$

지금까지 개발되어 연구가 진행중인 연료전지의 동력계통도는 Fig. 2와 같이 연료전지의 작동연료인 수소를 공급함과 동시에 대기 중의 산소를 화학적 반응을 시켜 요구되는

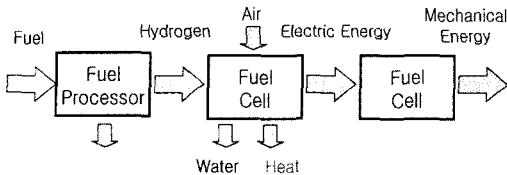


Fig. 2 Powertrain of Fuel Cell

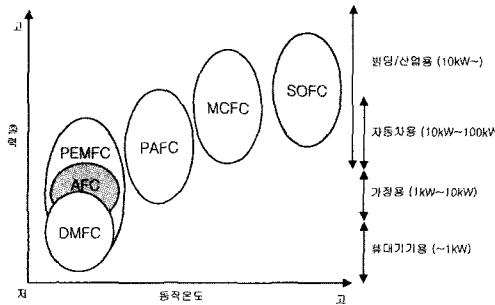


Fig. 3 Operating Region of Fuel Cell

는 전기, 즉 기계적 에너지를 얻게 된다. 여기서 발생된 기계적 에너지를 이용하여 휴대용, 가정용, 공작기계의 비상 전원용으로 작동이 가능하다.

또한 Fig. 3은 연료전지의 동작온도에 따른 출력특성을 나타낸 것이다. 이중에서 PEMFC는 작동온도가 상온에서 운전이 가능하여 가장 많이 개발되고 있으며, SOFC는 산업용도로서 공장의 전원관리 및 발전용으로 사용되고 있다.

### 3. 실험방법 및 절차

지금까지 정식화된 전위차 수식을 이용하여 단위전지(연료전지 스택 1개)의 전위차를 계산하면 전위차  $E(T, P) = 1.187V$ 가 된다. 상기의 식 (3)에서  $n = 2$ ,  $F = 96487 \text{ C/mol}$  (Faraday's constant)이고 계산된 화학적 전위차는 평형상태, 즉 전류가 흐르지 않는 상태에서의 표준가역셀전위차 (Standard reversible cell potential)이다. 이 값은 표준상태에서 연료전지의 이론적 전위(Potential)가 최대로 되는 것을 나타낸다. 반응 Enthalpy가 완전하게 전기에너지로 전환되는 것은 열적중립전위(Thermal neutral potential)을 의미한다. 다음의 Fig. 4는 실험을 위하여 설계된 PEMFC System 설계 구성도이며, Fig. 5는 성능시험을 위한 측정 장면이다.

본 논문에서는 Gibbs Free Energy를 기준으로 유도된 액

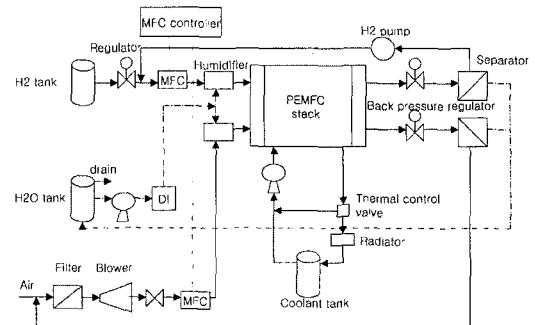


Fig. 4 Diagram of PEMFC system design

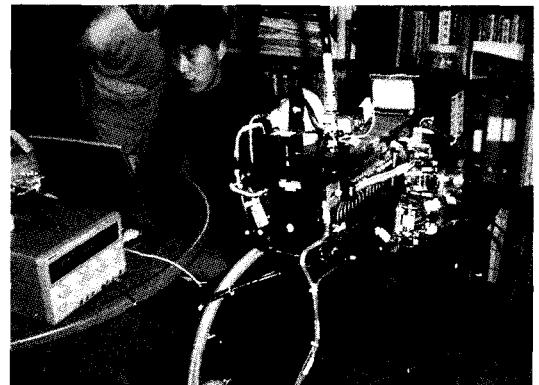


Fig. 5 Picture of performance test for PEMFC module

체상태 및 기체상태의 개방회로의 전위차식으로부터 성능 평가를 위하여 연료전지의 전압과 전류특성을 실험하였다. 결과식들의 정확성을 검증하기 위하여 1.2KW급 연료전지 시스템을 구동하여 시간에 따른 출력 특성을 고찰하였다. 출력용 부하는 1KW급 전열 Heater를 이용하였고 출력측 부하의 급격한 상승을 막기 위하여 보호용 차단회로를 장착하여 실험을 실시하였다.

### 4. 결과 및 고찰

위의 실험방법 및 절차에 의하여 측정된 연료전지 시스템의 전압 및 전류 특성은 다음과 같다. 아래의 Fig. 6에서는 연료전지 시스템의 부하를 측정하기 위하여 요구되는 수소의 공급압력을 나타내며, 공급압력은 2Bar에서 안정된 출력특성을 보였다. 또한 Fig. 7에서는 작동시간에 따른 연료전지 시스템의 Stack 온도의 변화를 보이고 있다. 최초 29°C의 상온에서 시간의 흐름에 따라 연료전지 시스템의 온도를 측

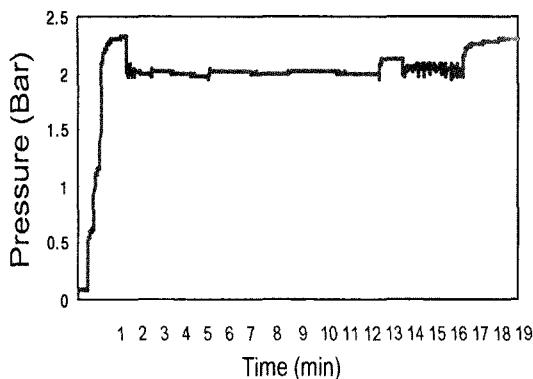


Fig. 6 Required hydrogen pressure according to PEMFC operating time

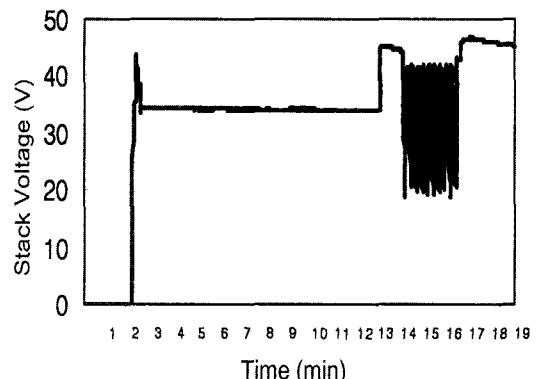


Fig. 8 Output voltage according to PEMFC operating time

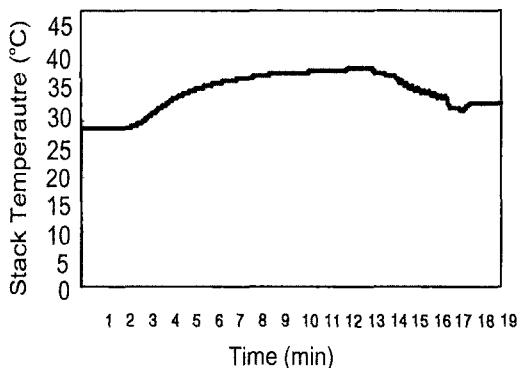


Fig. 7 Stack temperature according to PEMFC operating time

정하였고 또 PEMFC의 작동온도가 대체적으로 낮기 때문에 별도의 냉각기가 필요로 하지 않고 공기 냉각방식으로 실험할 수 있었다.

Fig. 8은 연료전지 시스템의 부하 특성중 시간에 따른 Stack의 전압분포를 나타내며, Fig. 9는 시간에 따른 전류 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 처음 가동시 Stack 전압은 0의 값에서 약 2분 경과 후부터 급격히 상승하다가 Peak value를 넘어서면서 34V의 안정 값으로 기록하였다. 또 Stack 전류는 0의 값에서 약 2분 경과 후부터 급격히 상승하다가 10A 근처에서 안정적인 값을 기록하였다. 이는 부하로 사용한 전열 히터의 내부저항이 3.5 Ω인 점과 연료전지 모듈의 전압-전류 성능곡선<sup>(10~11)</sup>을 비교하였을 때 오음의 법칙과 성능곡선을 동시에 만족시키는 출력전압과 전류가 각각 35V, 10A가 될 것이라는 예측과 일치하였다. 여기서 주목할 점은 이론적으로 연료전지는 단위전지당 1.187V

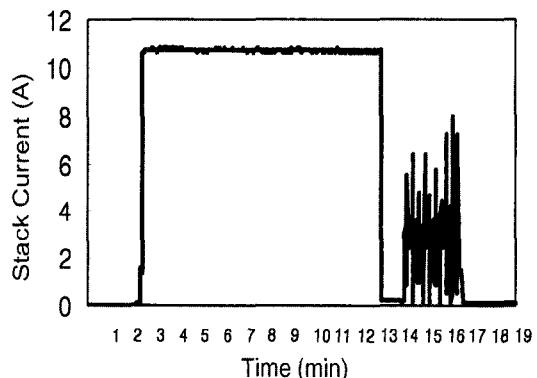


Fig. 9 Output current according to PEMFC operating time

의 전위를 얻을 수 있는데 본 실험조건에서의 연료전지시스템(단위전지 47개)에서는 34V의 전위를 얻을 수 있었고 이는 단위전지 당 0.729V에 해당한다. 이러한 전위손실을 설명하기 위해 Table 1에서는 스택의 개수에 따른 단위전지의 이론전위와 연료전지시스템의 실제전위를 비교하였다. Fig. 10의 곡선은 양전극 및 음전극 부위에서의 전류밀도를 함께 나타낸 것이다. 여기에서 생긴 손실은 과전압(Overvoltage)으로 표시된다. 곡선에서 특징적인 것은 양전극에서의 과전압은 매우 크고 음전극에서의 과전압은 작다는 것이다. 개회로 전위에서 전류가 증가하면 전지의 전압이 낮아진다.

Table 1 이론전위와 연료전지시스템의 실제전위

Stack 수 1(unit cell)	이론전위 1.187 V	실제전위 0.7~0.8 V
47	56 V	34 V

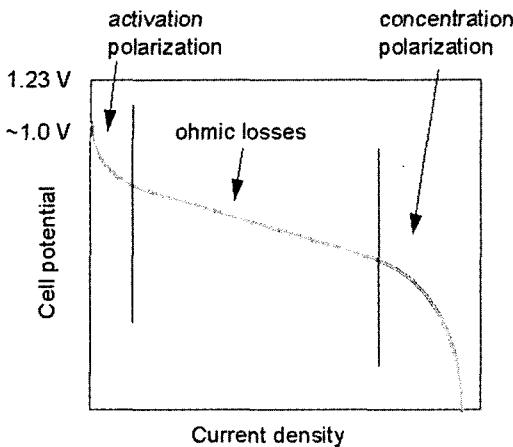


Fig. 10 Polarization of the Fuel Cell

낮은 전류밀도에서 전위는 로그함수에 따라 감소하고 높은 전류밀도에서는 직선적으로 감소한다. 이 후 전류밀도를 계속 높여나가면 전위는 급격히 떨어지게 되고 결국 0에 이르게 된다.

이러한 손실을 일으키는 원인이 되는 현상들은 다음과 같은 것들이 있으며, 이 손실들은 식 (21)에서와 같이 분극현상(Polarization), 과전위(Overpotential) 또는 과전압(Overvoltage)이라고 한다.

- Activation Polarization  $\eta_A$
- Resistance 또는 Ohmic overvoltage  $\eta_\Omega$
- Diffusion 또는 Concentration overvoltage  $\eta_D$

따라서 전지의 총 Overvoltage  $\eta$ 는 다음과 같다.

$$\eta = \eta_A + \eta_\Omega + \eta_D \quad (21)$$

즉, 낮은 전류밀도에서 나타나는 Activation Polarization ( $\eta_A$ )은 전극표면에서 산화환원반응의 화학반응 속도가 늦어져 일어나는 현상이며 특히 음극에서의 산소 환원반응이 가장 늦어 이 단계에서의 전위손실의 대부분을 차지한다<sup>(12)</sup>. Ohmic Overpotential ( $\eta_\Omega$ )은 고분자전해질의 저항으로써 수소이온 전도도에 직선적으로 반비례하는데 특히 가습조건에 민감한 영향을 받게 된다. 높은 전류밀도에서 급격히 전위가 떨어지는 현상(Concentration Overpotential,  $\eta_D$ )은 전극표면에 공급된 반응물(수소와 산소)의 대부분이 소모되어 반응물의 농도가 급격히 낮아진 결과이다.

본 실험조건에 따른 결과(10A, 34V)에서 연료전지시스템의 전압-전류 성능곡선을 참조하면 오음저항이 지배하는 평탄한 손실이 시작되는 부분임을 확인할 수 있다. 따라서 Table 1에 나타낸 34V의 실제전위는 56V의 이론전위에 비해 22V의 손실전위를 보이는데 이는 대부분 Activation Polarization에 의한 손실임을 알 수 있고 Ohmic Overpotential에 의한 손실이 일부분 개재되어 있다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 연료전지의 성능평가와 손실원인을 파악하기 위하여 개방회로 전위차에 대한 수식을 정식화하였고, 연료전지 시스템을 이용하여 요구되는 수소 압력, Stack 온도, 전류 및 전압을 측정하였다. 여기서 시스템이 가동 후 약 2분이 경과되면서부터 안정적인 출력값이 나오는 것을 확인하였으며, 본 실험조건에서 연료전지로부터의 전위는 이론전위에 비하여 약 63%로 2차전지에 비하여 효율이 매우 크고, 이때 출력손실의 원인은 Activation Polarization(활성분극), Ohmic Resistance(내부저항)인 경우로 확인되었다. 또한 전류밀도를 더욱 높여 실험한다면 Diffusion Overpotential(확산분극)이 중요한 손실의 원인이 될 것이라고 예측할 수 있었다. 이를 통하여 고분자전해질 연료전지시스템의 성능평가와 더불어 손실원인을 파악할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 한국산업기술재단(KOTEF)의 지원에 따른 지역전략사업 석·박사 연구인력 사업의 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Patil, P. G., 1996, "Alternative Fuels in Future Vehicles," *Automotive Engineering*, pp. 39~43.
- (2) Barbir, F., 1998, "Technical Challenges in PEM Fuel Cell Development," *Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina* 21~25. Vol. 2. pp. 1589~1596.
- (3) Blomen, L., and Mugerwa, M. N., 1993, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press.
- (4) Oh, I. H., 2002, "PEMFC Technique of Vehicle

- Power," *HYUNDAI Fuel Cell Workshop*, pp. 97~114.
- (5) Kim, H. G., Nah, S. C., Kim, S. C., Kang, Y. W., Yang, G. E., Lee, H. K., and Choi, M. C., 2004, "A Study on the Dynamic Analysis in the Shaft of Turbo- Blower for Fuel Cell," *KSMTE*, Vol. 13, pp. 81~87.
- (6) Kim, H. G., Kang, Y. W., and Yu, G. H., 2003, "A Study on the Vehicle Dynamics Design of Mini-BAJA Driven by Battery," *Journal of the institute for engineering and technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 41~48.
- (7) Kim, H. G., Kang Y. W., and Yu G. H., 2003, "A Study on the Motor Control System Driven by Battery," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference* 2003, pp. 195~200.
- (8) Kim, H. G., Kang Y. W., and Kim, Y. S., 2004, "Fundamental Study on Performance Analysis and Design of Fuel Cell Vehicle," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference* 2004, pp. 178~183.
- (9) Chase, M. W. (ed.), 1985, JANAF Thermochemical Tables, 3rd Edition, *Journal of physical and chemical reference data*.
- (10) Laurencelle, F., Chahine, R., Hamelin, J., Agbossou, K., Fournier, M., Bose, T. K., and Laperriere, A., 2001, "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," *Fuel Cells*, No. 1, pp. 66~71.
- (11) NixaTM Power Module User's Manual, 2003, Ballard Power Systems, pp. 181~202.
- (12) Jiang, R., and Chu, D., 2001, "Stack Design and Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 93, No. pp. 1~2.