

전기화학적 전력 기기의 모델링을 위한 저가의 임피던스 분광 시스템의 개발

李周炯*, 崔宇鎮†

Development of the Low Cost Impedance Spectroscopy System
for Modeling the Electrochemical Power Sources

Ju-Hyung Lee and Woo-Jin Choi

요 약

본 논문에서는 연료전지나 배터리 및 슈퍼카파시터 등의 전기화학적 전력기기의 임피던스 모델링에 적합한 저가의 임피던스 분광 시스템을 설계하고 구현하였다. 제안된 시스템은 간단한 센서회로 및 상용 DAQ(Data Acquisition) Board와 강력한 HMI(Human-Machine Interface)를 지원하는 그래픽 언어인 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 구성되었고 고가의 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 장비를 대체하여 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 제안된 시스템에서는 Lock-in Amplifier를 이용함으로써 노이즈(Noise)가 많은 환경에서도 측정 주파수 성분의 정확한 측정이 가능하게 하였다. 제안된 시스템을 이용하여 Ballard Nexa 1.2kW PEM 연료전지 스택의 주파수별 임피던스를 측정하였고, 이를 바탕으로 한 등가 임피던스 모델도 제안된다. 제시된 모델과 개발된 장비의 유용함은 리플전류에 의한 연료전지 스택의 교류 손실 측정을 통해 증명된다.

ABSTRACT

In this paper, a low-cost impedance spectroscopy system(LCISS) suitable for modeling the electrochemical power sources such as fuel cells, batteries and supercapacitors is designed and implemented. Since the developed LCISS is composed of simple sensor circuits, commercial data acquisition board and LabVIEW software, a graphic language with powerful HMI(Human-Machine Interface), it is expected to be widely used in substitution of the expensive EIS instruments. In the proposed system, the digital lock-in amplifier is adopted to achieve the accurate measurements even in the presence of the high level of noises. The developed hardware and software is applied to measure the impedance spectrum of the Ballard Nexa 1.2kW proton exchange membrane fuel cell stack and an equivalent impedance model is proposed based on the measurement results. The validity of the proposed equivalent circuit and the developed system is proven by the measurement of the ac power losses of the PEM fuel cell stack by the ripple current.

Key Words : Fuel Cell Stack, Impedance Spectroscopy, Lock-in Amplifier, LabVIEW, Equivalent Circuit

1. 서 론

†교신저자 : 정희원, 숭실대 전기공학부 조교수
E-mail : cwj77@ssu.ac.kr

*학생회원, 숭실대 전기공학부 석사과정
접수일자 : 2007. 10. 15 1차 심사 : 2007. 11. 21
심사완료 : 2007. 12. 17

화석연료의 고갈과 지구온난화의 문제로 연료전지와 같은 전기화학적 에너지원의 역할이 매우 중요해질 것으로 기대되고 있다. 연료전지는 수소와 공기 중의 산

소를 이용하여 전력을 생산하고 부산물로는 물과 열만을 방출하는 청정 에너지원이다. 또한, 전 운전영역에서 매우 높은 효율을 나타내며 휴대용에서 발전용에 이르기까지 다양한 용량으로 제작될 수 있어 유용하다. 그러나 연료전지는 주로 낮은 전압의 DC를 출력하므로 상용부하에 전력을 공급하기 위해서는 전력변환기의 사용이 필수적이며, 따라서 전력변환기의 설계자에게 이러한 새로운 에너지원의 정특성 및 동특성에 관한 정보는 효율적인 고성능 기기의 설계를 위해 매우 중요하다.

연료전지는 연료를 전기에너지로 변환하는 전기화학적 에너지 변환기로서 그의 동특성은 내부화학 반응과 열역학적 프로세스에 의존하게 된다. 연료전지를 모델링하기 위한 다수의 방법이 연구되어 왔다^[1-8]. 대부분의 모델링 방법은 제작자 외에는 알기 어려운 연료전지의 설계변수를 필요로 하거나^[1-6], 복잡한 화학 방정식으로 구성되어 있어 그것을 풀거나 시뮬레이션 하는 것이 매우 어려우며^[7-9], 특히 전력변환기 등과 연동하여 시뮬레이션 하는 것은 거의 불가능하다.

전기화학적 임피던스 분광법(EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy)은 주로 전기화학분야에서 전극반응이나 복합체의 특성을 분석하기 위한 유용한 도구로서 널리 활용되고 있다. 시스템 응답의 분석은 복합체의 성질 및 구조, 그리고 거기서 일어나는 반응에 관한 종합적인 정보를 제공하므로, 응용화학분야나 의공학 및 생체공학분야에서도 매우 유용한 도구로 이용되고 있다^[10]. EIS라고 불리는 전기화학적 임피던스 분광법은 측정대상의 임피던스를 주파수별로 측정하고 그 결과로부터 같은 응답을 주는 등가 임피던스 모델을 선정하고 파라미터를 계산하는 방법을 말한다. 따라서 연료전지의 내부에서 일어나는 화학반응은 전기적인 임피던스로 모델링 되며 각각의 동작점에서 같은 실험을 반복함으로써 서로 다른 파라미터를 얻게 되어 각 동작점에서의 등가 임피던스 모델이 확립되게 된다. 따라서 이러한 모델을 이용하게 되면 기존의 모델링에서 필요로 하는 연료전지의 내부 설계 파라미터 없이 연료전지를 모델링 할 수 있다는 장점이 있으며, 이러한 모델과 전력변환기 모델을 연동시킨 시뮬레이션이 가능하므로 두 모델이 결합된 경우의 동특성을 확인할 수도 있다. 이러한 방법으로 얻어진 연료전지의 동특성에 관한 정보는 전력변환기의 설계에 그대로 적용될 수 있으므로 설계의 최적화 및 고성능화에 기여하게 된다. EIS의 또 다른 장점으로는 한번의 시험으로 많은 파라미터를 동시에 측정하는 것이 가능하다

는 것과 상대적으로 간단한 측정 장치만으로 측정이 가능하고, 시스템의 운전 상태를 크게 방해하지 않으면서 시행할 수 있는 일종의 비파괴 검사(Non-Destructive Test)라는 것이다.

최근에는 이러한 전기화학적 임피던스 분광법을 이용하여 연료전지, 배터리, 슈퍼커패시터와 같은 전기화학적 전력기기를 모델링하고 등가 임피던스 모델의 파라미터 변화를 감지하여 그 상태를 진단하는 연구가 다수 진행되고 있다^[11-13]. 전기화학적 전력기기의 임피던스 모델링을 수행할 수 있는 상용 장비들이 다수 개발되어 있으나 매우 고가이며, 대부분의 장비는 셀 단위 시험에 적절하게 개발되어 연료전지 스택이나 대용량의 배터리 및 슈퍼커패시터 모듈의 모델링에 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 이러한 고가의 장비를 대체할 수 있는 저가의 전기화학적 임피던스 분광 시스템을 제안한다. 제안된 장비는 간단한 센서회로 및 PC를 기반으로 하는 상용 DAQ Board와 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 구성되었으며 전자부하의 용량과 측정 센서를 변화시킬 경우 단위 셀에서 대용량 스택에 이르기까지 그 임피던스의 측정이 가능하다.

또한 디지털 신호처리를 위해 FFT(Fast Fourier Transform)방식에 비해 계산량이 적고 정밀한 Digital Lock-in Amplifier 방식을 채택하여 노이즈가 많이 포함된 신호에서도 시험 주파수의 성분만을 정확히 분리해 냉으로써 측정의 정밀도를 높였다. 개발된 시스템을 이용하여 Ballard Nexa 1.2kW PEM 연료전지의 임피던스를 동작점 별로 측정하고 그 결과를 이용하여 등가 임피던스 모델을 도출하였다. 도출된 결과의 정확성은 연료전지 스택의 교류 손실 측정을 통해 증명되었고, 개발 장비의 신뢰성 또한 확인할 수 있었다.

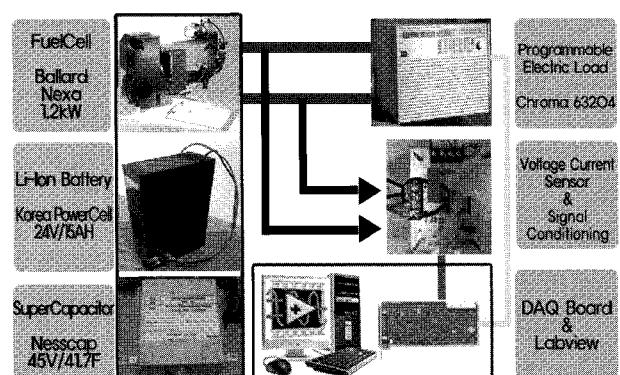


그림 1 제안된 저가형 임피던스 분광시스템의 구성

Fig. 1 Proposed low-cost impedance spectroscopy system

2. 저가형 임피던스 분광 시스템

2.1 전체 시스템의 구성 및 임피던스 측정의 전제조건

그림 1은 제안된 저가형 임피던스 분광 시스템의 구성을 나타내고 있다. 제안된 시스템은 그림과 같이 간단한 전압 및 전류 센싱 회로와 상용 DAQ Board, 전자부하, LabVIEW로 작성한 소프트웨어로 구성된다. 측정대상은 연료전지, 배터리, 슈퍼카파시터 등의 전기화학적 에너지 발생기 또는 저장장치들이고 이들은 프로그램이 가능한 전자부하(Programmable Electronic Load)에 연결되어 있다. LabVIEW에 의해 발생된 기준 정현 신호는 전자부하의 외부 제어단자에 가해져서 측정대상으로부터 특정 운전점에서 특정 주파수의 전류를 출력하도록 제어되며, 이때의 전류 및 전압은 간단한 센서 회로를 통해 DAQ Board로 입력되어 디지털 데이터로 변환된다. 입력된 데이터로부터 Lock-in Amplifier를 이용하여 가해진 특정주파수 성분만을 추출하고, 그 주파수에서의 AC 임피던스를 계산하게 된다. 이러한 방법은 측정 주파수 전범위에서 일정한 주파수 간격으로 반복되며 그 결과로부터 Bode 선도 또는 Nyquist 선도로 그려지게 된다.

그런데, 전기화학적 임피던스 분광법은 기본적으로 측정대상 시스템을 섭동(Perturbing)시키고 그 응답을 관찰하는 시험법이며, 서로 다른 프로세스에 관련된 임피던스는 서로 다른 시상수(Time Constant)를 갖는다는 것에 기초하므로 측정의 유용함을 보장하기 위해서는 다음의 네 가지 선결조건이 만족되어야 한다^[11,13].

첫째는 선형성(Linearity)으로 임피던스의 측정은 측정 대상 시스템이 선형적으로 반응한다는 가정 하에서만 유용하다. 따라서 섭동전류(Perturbation Current)의 크기는 그에 의해 생기는 응답 전압의 최대 크기가 식(1)과 같이 표현되는 열전압(Thermal Voltage)보다 적게 되도록 선정하여야 한다. 일반적으로 연료전지를 포함하는 전기화학적 전력 기기들은 매우 비선형적 특성을 갖는 것이 사실이지만 식 (1)로 주어지는 적은 섭동에 대해서는 선형적으로 반응한다.

$$V_T = \frac{RT}{F} = 29mV @ 65^\circ C \quad (1)$$

$$R = 8.314 [J/mole \cdot K]$$

$$T = Temp [K]$$

$$F = 96485 [C/equiv]$$

둘째는 인과성(Causality)으로 시스템에 주어진 섭동

주파수와 동일한 주파수의 응답이 측정되어야 한다는 것이며, 세째로 안정성(Stability)으로 측정 기간 동안 시스템의 특성이 변하지 않아야 하고, 또 섭동이 제거된 후에는 원상태로 복귀하여야 한다는 것이며, 넷째는 유한성(Finite)으로 측정대상의 임피던스는 0과 무한대의 주파수에서 유한한 값을 가져야 하며 임의의 주파수에서 연속적이고 유한한 값을 가져야 한다는 것이다. 따라서 본 실험에서는 이러한 요구조건을 모두 만족시키도록 시스템을 구성하고 조건을 유지하면서 실험을 실시하였다.

2.2 시스템 하드웨어의 구성

실험에 사용된 전자부하는 Chroma사의 63204 모델로 0.1Hz~20kHz까지 Dynamic Loading이 가능하다. LabVIEW로 작성된 VI(Virtual Instruments)에 의해 측정 주파수 대역에서 선정된 주파수별 Sine 신호를 DAQ Board를 통해 전자부하의 외부제어 단자로 출력하며, 전자부하는 동일한 형태의 전류를 측정대상으로부터 출력시킨다. 이때 전압은 저항분배회로를 이용하여 측정되고, 전류는 LEM사의 전류센서 LA55-P를 통해 측정되었다. 측정값들은 DAQ Board를 통해 디지털 데이터로 변환된 후 컴퓨터 내부로 전달된다. 여기서 센서에서 측정된 전압과 전류를 동시에 샘플하기 위하여 사용된 NI사의 PCI-6154 DAQ Board는 16bit A/D 컨버터를 내장한 각기 절연된 4개의 아날로그 입력 채널을 갖고 있으며 각 채널은 최고 250kS/s의 속도로 아날로그 신호를 디지털 데이터로 변환한다. 또한 동일한 분해능과 속도의 D/A 컨버터를 가진 아날로그 출력 채널을 갖고 있어 이를 통하여 섭동을 만들기 위한 제어 신호를 출력하였다. 주파수 별 임피던스 값은 측정 데이터로부터 Lock-in Amplifier를 이용하여 다음 절에서 설명하는 방식으로 계산된다.

2.3 시스템 소프트웨어의 구성

소프트웨어는 측정된 전압, 전류 데이터로부터 Lock-in Amplifier를 이용하여 각각의 시험 주파수 대역의 신호를 추출하여 주파수별 임피던스를 계산한 뒤 Nyquist 선도를 그리는 데이터 수집 모드(Data Acquisition Mode)와 주파수별 임피던스 데이터를 적절한 등가회로를 선정하여 커브 피팅(Curve Fitting)하는 분석 모드(Analysis Mode)로 나눠진다.

먼저 데이터 수집 모드에서 섭동 전류의 크기와 주파수 범위, 그리고 Offset 값(DC 운전점)을 지정하면 해당 과정이 프로그램된 VI에서 생성되고 DAQ Board

의 아날로그 출력포트를 통해 출력되어 전자부하를 제어하게 된다. 이때의 전류변화에 따른 측정대상의 출력전압 변화가 측정되어 DAQ Board를 통해 PC로 입력되어 임피던스가 계산된다. 그럼 2에서 보듯이 화면상에 설치된 컨트롤 입력창에서 지정된 값에 따라 VI를 통해 만들어진 스위핑 정현신호(Sweeping Sinusoids)가 전자부하로 출력되며 이 신호가 전자부하를 제어하여 요청되는 주파수의 전류가 연료전지로부터 출력되도록 한다.

임피던스는 Lock-in Amplifier를 이용하여 다음과 같이 계산된다^[14-15]. 기준 신호를 식 (2)와 같이 표현하면, 측정된 전압과 전류는 식 (3)처럼 기준신호와 같은 주파수이나 크기와 위상이 다른 신호와 Noise와의 합으로 표현될 수 있다.

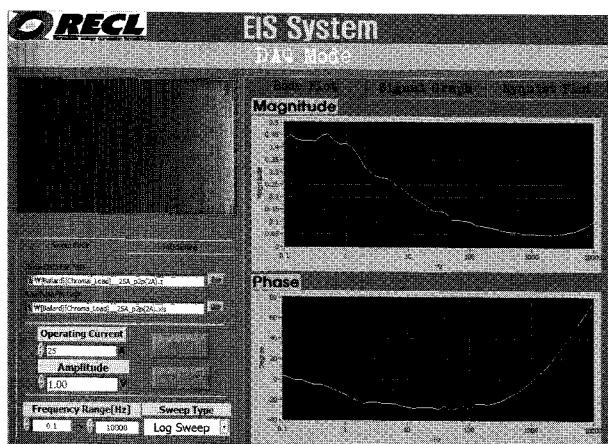


그림 2 개발된 소프트웨어의 데이터 수집 모드

Fig. 2 Data acquisition mode of the developed software

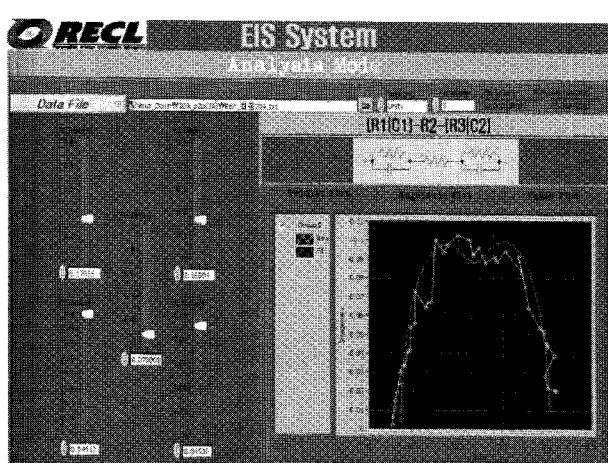


그림 3 개발된 소프트웨어의 분석모드

Fig. 3 Analysis mode of the developed software

$$r(t) = 2\sin(2\pi f_r t) \quad (2)$$

$$m(t) = A\sin(2\pi f_r t + \varphi) + n(t) \quad (3)$$

식 (2)의 기준신호는 식 (4)와 같은 위상의 동상성분과 90도 위상차가 나는 이상성분으로 만들어져 측정데이터와 곱해진다.

$$r_P(t) = \sin(2\pi f_r t), \quad r_Q(t) = \cos(2\pi f_r t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Real &= m(t) \times r_P(t) \\ &= A\cos(\varphi) - A\cos(4\pi f_r t + \varphi) + A\sin(2\pi f_r t) * n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Imag &= m(t) \times r_Q(t) \\ &= A\sin(\varphi) + A\sin(4\pi f_r t + \varphi) + A\cos(2\pi f_r t) * n(t) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5) 및 (6) 으로부터 측정신호의 실수 및 헤수 성분은 측정 기준 주파수의 충분한 배수의 주기 동안 평균값을 취한다면 교류성분은 모두 0으로 수렴하고 직류성분만이 남는다는 것을 알 수 있으며, 따라서 측정신호에서 기준신호와 동상성분과 이상성분을 계산하고, 이 값으로부터 크기와 위상을 계산한다. 같은 과정을 전압, 전류 모두에 적용하여 계산된 각각의 크기와 위상 데이터로부터 식 (7)과 같이 임피던스의 크기와 위상을 계산한다.

$$Z \angle \theta_Z = \frac{V}{I} \angle (\theta_V - \theta_I) \quad (7)$$

2.4 측정 결과의 등가회로 분석

그림 3에 나타낸 분석모드에서는 측정된 데이터로부터 적절한 등가 임피던스 모델을 선정하고 커브 피팅을 수행하여 파라메터를 추출하는 과정을 수행한다. 먼저 측정 대상의 내부 화학반응을 설명하기에 적합한 등가 임피던스 모델을 선정하여야 한다. 연료전지의 내부 화학반응을 설명하기 위한 많은 모델들이 제시되어 왔다^[10]. 그림 4에는 Randle의 등가회로를 나타내는데 저항 두 개와 커패시터 하나로 구성된 가장 간단한 모델로서 단위전지를 모델링할 경우 자주 언급되는 회로이다. 용액저항(Solution Resistance)을 나타내는 R_s 와 MEA(Membrane Electrode Assembly) 내부에 형성되는 전기 이중층 커패시터(Double Layer Capacitor) C_{dl} , 그리고 전하 전송 반응(Charge

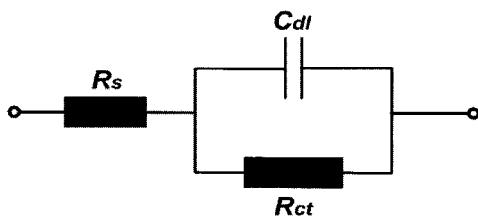


그림 4 Randle의 등가회로
Fig. 4 Randle's equivalent circuit

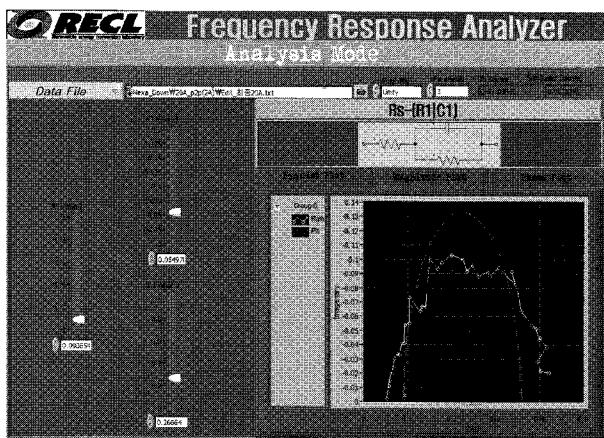


그림 5 Randle의 등가회로를 이용한 커브 피팅 결과
Fig. 5 Curve fitting result with Randle's equivalent circuit

Transfer Reaction)에 의해 생기는 전하 전송 저항 또는 분극저항(Charge Transfer or Polarization Resistance)이라고 불리는 R_{ct} 의 소자로 이루어져 가장 간단한 형태이지만, 실제 이 회로를 이용하여 측정된 데이터를 커브 피팅 할 경우 허용할 수 있는 오차 범위(1~2%) 이내로 파라메터를 맞추는 것이 불가능하며, 이것은 결국 이러한 간단한 회로로는 연료전지의 내부 반응을 표현하는 것이 적절하지 않음을 의미한다. 식(8)은 그림 4의 Randle 회로의 임피던스를 나타내며, 그림 5는 이를 이용한 커브 피팅의 결과를 나타낸다.

$$Z(\omega) = \left(R_s + \frac{R_{ct}}{1 + \omega^2 R_{ct}^2 C_{dl}^2} \right) - j \left(\frac{\omega R_{ct}^2 C_{dl}}{1 + \omega^2 R_{ct}^2 C_{dl}^2} \right) \quad (8)$$

따라서 본 연구에서는 그림 6과 같이 연료전지의 내부회로에 근거하여 각 전극의 반응을 하나의 시정수로 보고 모델링한 두 개의 시상수를 가진 모델을 이용하여 커브 피팅을 수행하였다^[10]. 이 모델에서는 각각의 전극 반응은 저항과 커페시터가 병렬 연결된 회로로

모델링 되었으며 여기서, 전하전송저항(Charge Transfer Resistance) $R_{ct,a}$ 와 $R_{ct,c}$ 는 Anode 및 Cathode에서 수소의 산화와 산소의 환원반응을 나타내며, $C_{dl,a}$ 와 $C_{dl,c}$ 는 각 전극에서 나타나는 전기 이중층 커페시터 (Electric Double Layer Capacitor)이다. 전극의 반응을 나타내는 두 시정수 사이에는 전해질(Electrolyte) 막의 저항성분을 나타내는 막저항이 있다. 커브 피팅은 이와 같은 모델을 이용하여 이를 모델이 갖고 있는 등가 수동소자의 파라메터 초기치를 입력하여 시작된다. 이 후 이를 파라메터의 값은 그림 5에 나타난 슬라이드 바를 이용하여 용이하게 변경될 수 있으며 이 때 등가회로의 주파수별 임피던스는 측정결과와 더불어 화면에 동시에 표시되므로 파라메터를 변경시키며 임피던스 궤적의 변화와 피팅의 정확도를 동시에 모니터링 하는 것이 가능하다. 이러한 기능을 이용하면 파라메터의 변화가 임피던스 궤적의 변화에 어떻게 영향을 미치는지 실질적인 정보를 터득할 수 있게 되어 관련 분야 연구에 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있다. 피팅의 정확도는 식(9)와 같이 표현되는 Chi-Square를 계산함에 의해 실시간 계산되어 디스플레이 된다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (9)$$

y_i : Measured Data
 $f(x_i)$: Fitted Data
 σ_i : Standard Deviation

식(9)의 제곱근이 측정 데이터의 에러를 나타내며, 피팅의 정확도가 된다. 계산된 값이 1~2% 이내로 수렴할 경우 측정 데이터와 등가회로는 아주 밀접한 상관성을 갖고 있는 것으로 판단되며, 따라서 적용된 모델 회로가 측정된 결과를 나타내기 적절함을 알 수 있다. 그림 7은 전체 시스템의 블록도를 나타낸다.

3. 실험 및 고찰

그림 8과 같이 개발된 장비와 소프트웨어를 이용하여 Ballard Nexa 1.2kW PEM 연료전지 스택의 임피던스를 0.1Hz~5kHz 범위에서 측정하고 측정된 데이터로부터 그림 6의 등가 임피던스 모델을 이용한 파라메터의 추출을 시도해 보았다.

우선 실험을 위해 연료전지는 서서히 부하를 증가시켜 충분한 시간동안 가동하여 동작온도가 최적온도인

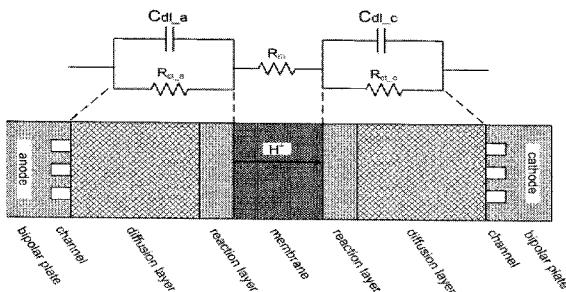


그림 6 PEM 연료전지의 내부구조 및 등가 임피던스 모델
Fig. 6 Internal structure of the PEM fuel cell and an equivalent circuit

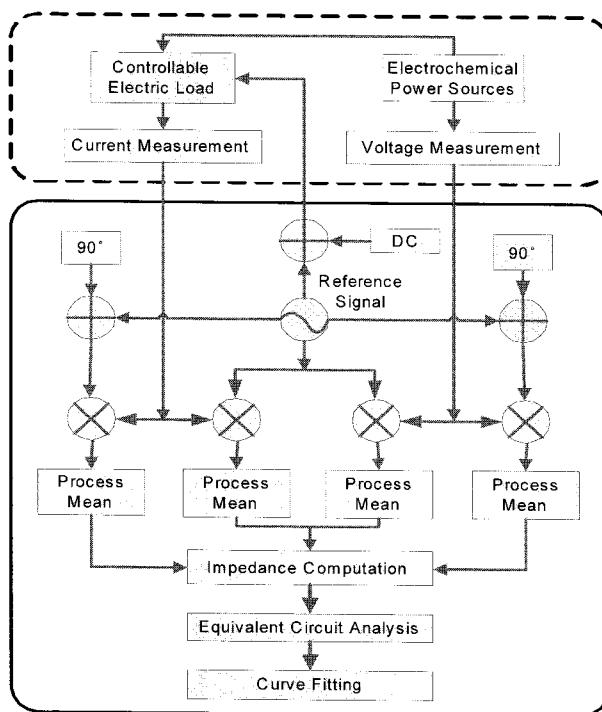


그림 7 개발된 시스템의 블록도
Fig. 7 Block diagram of the developed system

60°C 정도에 이르게 하여 열적인 안정 상태를 유지하도록 하였다. 이후 개발된 장비를 가동하여 주파수를 측정 주파수 대역에서 일정한 간격으로 변화시켜면서 전압과 전류를 측정하고 이 값으로부터 LabVIEW를 이용하여 개발된 Lock-in Amplifier를 통해 시험주파수의 성분을 추출한 뒤 임피던스를 계산하였다.

이러한 과정은 측정 주파수 대역에 걸쳐서 연속적으로 실행되며 계산된 값은 Bode 선도 또는 Nyquist 선도로 그려진다. 한 동작점에서 실험이 끝나면 다음 동작점으로 연료전지의 동작점을 이동시키고 다시 열적

평형 상태에 도달할 때까지 기다린 뒤 온도의 변화가 없을 경우에 실험을 실시하였다. 40[A]부터 10[A]까지 5[A] 단위로 DC 운전점을 변화시키면서 반복 측정된 데이터는 그림 9처럼 나타나며, 이를 바탕으로 그림 6의 등가회로를 이용하여 커브 피팅 한 결과가 그림 10에 나타나 있다.

그림에서 보는 바와 같이 연료전지의 동작점별 임피던스는 운전점의 변화에 따라 상당한 변화를 나타내는 것을 알 수 있다. 그림에서 임피던스 선도의 반경이 변화하는 것을 볼 수 있는데 이것은 연료전지 스택의 Polarization Curve의 기울기와 그 추세를 같이 한다. 또한 이러한 현상은 그림 11에 나타낸 연료전지 스택의 운전점별 등가모델 파라미터의 변화를 관찰함으로

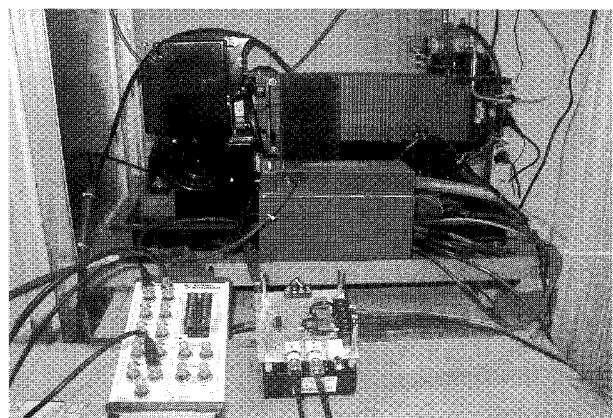


그림 8 NEXA 1.2kW PEM 연료전지 스택 및 센서회로
Fig. 8 NEXA 1.2kW PEM stack and sensor circuits

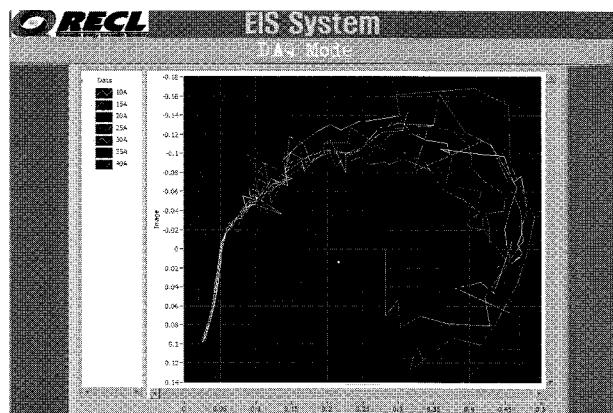


그림 9 서로 다른 운전점에서 측정한 임피던스의 Nyquist 선도들
Fig. 9 Nyquist plots of the measured impedance at different operating points

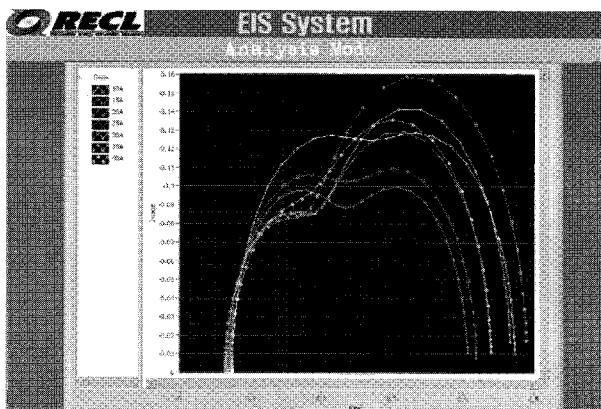


그림 10 연료전지 스택의 운전점별 임피던스 스펙트럼의 변화

Fig. 10 Variation of the impedance spectrum of the fuel cell stack at each operating points

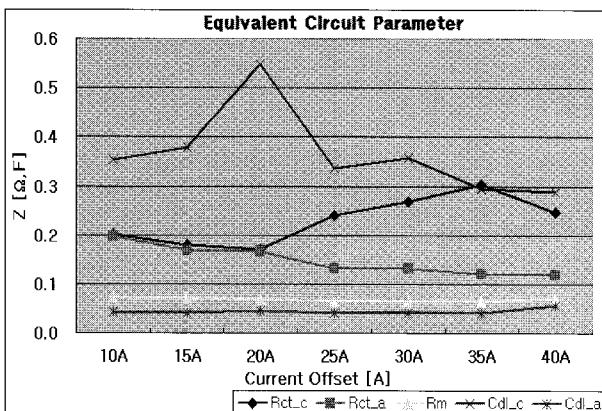


그림 11 연료전지 스택의 운전점별 등가모델 파라미터의 변화

Fig. 11 Parameter variation of the fuel cell stack at each operating points

써 해석이 가능하다. 전 구간에서 막저항(R_m)의 변화는 거의 없는 반면 운전전류가 커짐에 따라 수소의 산화반응 보다 느린 속도의 산소의 환원반응에 의해 Cathode측 전하전송저항(R_{ct_c})의 값이 커지면서 임피던스의 궤적이 달라짐을 알 수 있다. 그림 10과 11에서는 임피던스 궤적의 변화 이외에도 몇 가지 현상을 더 발견할 수 있는데 이들에 대한 해석은 본 논문의 범주를 벗어나므로 여기서는 다루지 않기로 한다.

개발된 장비를 이용하여 측정된 임피던스의 정확성을 확인하기 위하여 운전점별로 측정된 교류 임피던스를 이용하여 리플전류에 의해 생기는 전력손실을 예측하고 실험결과와 비교하였다. 그림 10의 Nyquist 선도

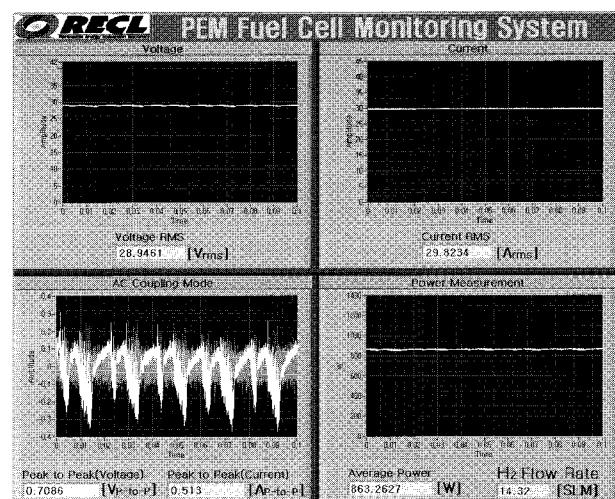


그림 12 특정 운전점(30[A])에서 연료전지 스택의 실험파형

Fig. 12 Experimental waveforms of the fuel cell stack at a certain DC operating point (30[A])

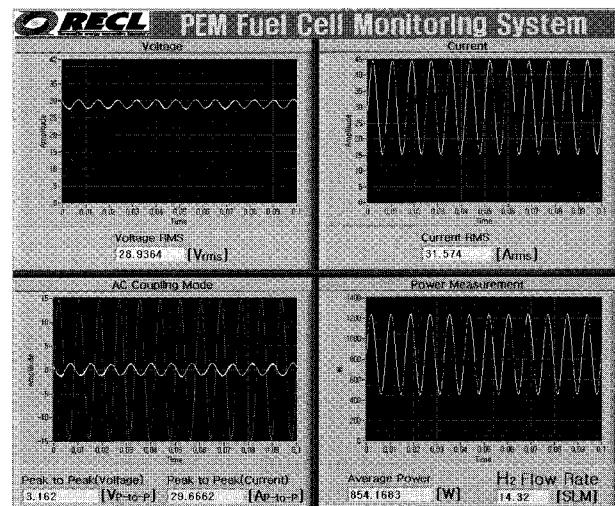


그림 13 특정 운전점(30[A])에서 120Hz AC 성분 (15[A])이 중첩된 전류를 출력할 경우 연료전지 스택의 실험파형

Fig. 13 Experimental waveforms of the fuel cell stack pulling out 120Hz AC ripple current (15[A]) at a certain DC operating point (30[A])

에서 보듯이 연료전지 스택은 저주파수 영역에서는 같은 주파수에서도 운전점별로 서로 다른 값의 임피던스를 갖고 있고 이러한 교류 임피던스의 성분 중 실수 성분은 연료전지가 리플 전류를 출력할 경우 손실을 일으킨다는 사실이 이미 알려져 있으며, 이러한 손실은 식(10)과 같이 계산된다^[11].

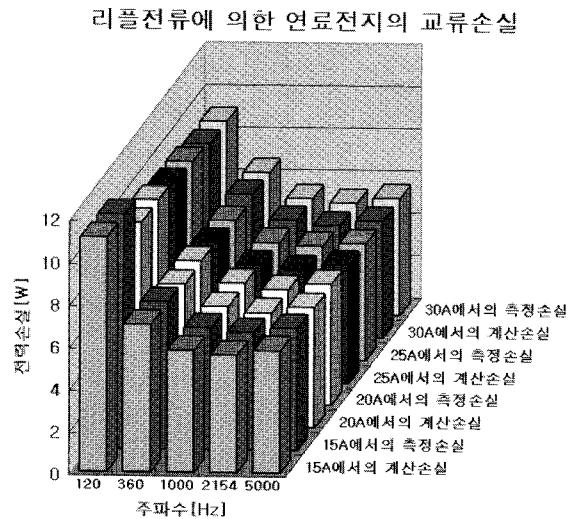


그림 14 서로 다른 운전점과 주파수에서 리플전류에 의한 교류 전력손실의 계산치와 실험치

Fig. 14 Experimental and calculated AC power loss due to the ripple current of different frequency at each operating point (30[A])

$$P_{ac_loss} = I_{ripple_rms}^2 * Z_{Real} \quad (10)$$

따라서 특정 크기와 주파수를 가진 리플전류를 연료전지 스택으로부터 출력시킬 경우 연료전지 스택에서 발생하는 손실의 계산치와 실험치가 일치할 경우 개발된 장비에 의해 측정된 임피던스는 정확하다고 판단할 수 있다.

그림 12는 특정 운전점(30[A])에서 운전되고 있는 연료전지 스택의 파형들이다. 왼쪽 위부터 시계방향으로 연료전지 스택의 전압, 전류, 출력, AC Coupling Mode로 잡은 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 그림 13에서는 30[A] 운전점에서 15[A]의 피크치를 가진 120Hz의 리플전류를 중첩하여 연료전지에서 출력되도록 하였을 경우의 파형들인데 예상대로 수소의 사용량이 같음에도 불구하고 연료전지의 출력이 863[W]에서 854[W]로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 실험을 운전점별로, 서로 다른 주파수의 리플전류를 이용하여 실시한 후 측정된 손실의 실험치와 식 (10)을 이용하여 계산된 손실을 비교해 보았다. 그림 14에서 보듯이 실험치와 계산치는 모두 1%이내에서 일치하였으므로 측정결과는 매우 양호한 정확도를 갖고 있음을 알 수 있으며, 따라서 개발된 장비의 성능도 간접적으로 확인된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용 DAQ Board와 LabVIEW 소프트웨어를 이용한 저가형 임피던스 분광시스템을 개발하고, 이를 이용하여 1.2kW PEM 연료전지의 임피던스 모델링을 수행하였다. 개발된 시스템은 고가의 EIS 장비를 대체하여 전기화학적 에너지기기의 임피던스 측정을 통한 모델링에 널리 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이러한 장비로 측정된 임피던스를 바탕으로 표준 등가회로 모델을 확립하고 등가회로의 파라미터 값을 모니터링 할 경우 이들 기기의 고장 진단이나 수명 예측이 가능해 질 것으로 판단되며 향후 이러한 연구를 속행할 예정이다.

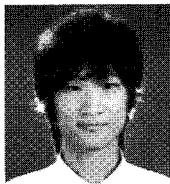
본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-7-050-01) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] G. Maggio, V. Recupero, L. pino, "Modeling polymer electrolyte fuel cells: an innovative approach," *Journal of Power Source 101*, pp. 257 - 286, 2001.
- [2] J.C. Amphlett, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, A. Rodrigues, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells," *Jounral of Power Source 61*, pp. 183 - 188, 1996.
- [3] J.M. Correa, F.A. Farret, L.N. Canha, "An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electrochemical Model," *The 27th Annual Conference of the IEEE IECON*, vol. 1, pp. 141 - 146, 2001.
- [4] R.S. Gemmen, "Analysis for the effect of the ripple current on fuel cell operating condition," *ASME 369 (4)*, pp. 279 - 289, 2001.
- [5] J.R. Sleman, Y.P. Lin, "Application of AC impedance in fuel cell research and development," *Electrochim Acta 38 (14)*, pp. 2063 - 2073, 1993.
- [6] L. Y. Chiu, B. Diong, R. S. Gemmen, "An Improved Small-Signal Model of the Dynamic Behavior of PEM Fuel Cells," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 40. No. 4, pp. 970-977, 2004.
- [7] C. Wang, M. H. Nehrir, S. R. Shaw, "Dynamic and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20. No. 2, pp. 442-451, 2005.

- [8] J. M. Correa, F. A. Farret, V. A. Popov, M. G. Simoes, "Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20. No. 1, pp. 211-218, 2005, March.
- [9] W. Friede, S. Rael, B. Davat, "Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19. No. 5, pp. 794-797, 2004, September.
- [10] J.R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [11] W. Choi, J. Howze, P. Enjeti, Development of an equivalent circuit of the a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current, *Journal of Power Source 158*, pp. 1324 - 1332, 2006.
- [12] Eckhard Karden, Stephan Buller, RikW. De Doncker, "Impedance measurements on lead acid batteries for state of charge, state of health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources 144*, pp. 72 - 78, 2000.
- [13] Kevin Cooper, "Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Diagnostics," *The 2006 Short Course in Fuel Cell Technology*, 2006, February.
- [14] Stanford Research System, About Lock-in Amplifier, Application Note #3.(www.thinkSRS.com)
- [15] Princeton Applied Research, Electrochemical Impedance Measurements: Instruments and Techniques, Application Note AC-3. (www.princetonappliedresearch.com)
- [16] Yoon-Ho Kim, Byung-Soo Lee and Chang-Hee Lim, "Analysis of fuel cell operation characteristics using equivalent models", Proceedings ICPE'95, Seoul 575-580.
- [17] 이수호, 이현우, 권순걸, "연료전지 전원 시스템의 설계 및 분석을 위한 PEMFC의 회로 모델," 전력전자 학술 대회 논문집, pp. 197-199, 2006.
- [18] 최우진, 전희종, "연료전지 시스템을 이용한 Line-Interactive 방식의 무정전 전원 공급 장치의 설계," 한국조명설비학회 논문지 18권 6호, pp. 205-212, 2004.

저 자 소 개



이주영(李周炯)

1983년 9월 5일생. 2007년 숭실대 공대 전기공학부 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



최우진(崔宇鎮)

1967년 1월 7일생. 1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Texas A&M University 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1998년 (주) 대우중공업 중앙연구소 전자기술실. 2005년~현재 숭실대 전기공학부 조교수. 현재 당 학회 학술위원.