

# EDLC 슈퍼 캐피시터 특성 분석을 위한 양산용 전기화학 분석 장치 개발

박찬희<sup>1\*</sup>, 이해인<sup>1</sup>, 김상중<sup>2</sup>, 이정호<sup>1</sup>, 김성진<sup>1</sup>, 이희관<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>(사)전북대학교 자동차부품금형기술혁신센터, <sup>2</sup>(주)브이엔아이

## Development of an Electro Impedance Spectroscopy device for EDLC super capacitor characterization in a mass production line

Chan-Hee Park<sup>1\*</sup>, Hye-In Lee<sup>1</sup>, Sang-Jung Kim<sup>2</sup>, Jung-Ho Lee<sup>1</sup>, Sung-Jin Kim<sup>1</sup>  
and Hee-Gwan Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chonbuk National University Automobile Parts & Mold Technology Innovation Center  
<sup>2</sup>VNI Corporation

**요 약** 본 논문에서는 기존에 주로 연료전지나 배터리 분석용으로 사용되었던 EIS 장비를 그 적용 범위를 넓혀 차세대 축전지인 EDLC 슈퍼캐피터까지도 분석할 수 있도록 개발하였다. 시스템은 다양한 패턴을 발생시킬 수 있는 신호 발생기, 정전위기, 수집된 신호처리를 위한 고속 디지털 필터 및 측정 프로그램으로 구성되었다. 개발된 시스템은 연구실 레벨에 그치지 않고 휴대용이면서 양산용에도 적합한 전기화학 분석 장치이다. 시스템의 특징으로는 0.01에서 20kHz까지 신호 출력이 가능하며, 동시에 수집된 전류신호는 푸리에변환을 이용하여 빠르게 분석할 수 있다. 장치를 이용하여 분석한 EDLC의 특성인 복소 저항 임피던스와, 등가이론을 적용한 등가회로 임피던스 데이터를 비교한 결과, 비슷한 결과를 확인 할 수 있었다. 이 시스템을 사용하면, 슈퍼캐피터의 생산 과정에서 시간에 따라 변하는 전기화학적 임피던스 변화를 빠른시간에 측정 할 수 있을 것으로 예상된다.

**Abstract** In this paper, we developed an electro impedance spectroscopy (EIS) device, which are primarily used for the analysis of fuel cells or batteries, to widen its coverage to the next generation super capacitor EDLC characterization. The developed system was composed of a signal generator that can generate various signal patterns, a potentiostatic generator, and a high speed digital filter for signal processing and measurement program. The developed system is portable, which is not only suitable laboratory use but also for mass production line. The special features of the system include a patterned output signal from 0.01 to 20 kHz, and a fast Fourier transform (FFT) analysis of current signals, both of which are acquired simultaneously. Our tests showed similar results after comparing the analysis from our newly-developed device showing the characteristics of EDLC complex impedance and the analysis from an equivalent impedance which was applied to an equivalent circuit. Now, we can expect a fast inspection time from the application of the present system to the super capacitor production line, based on time-varying changes in electrochemical impedance.

**Key Words** : EDLC super capacitor; Fast fourier transform; Impedance Spectroscopy; LabVIEW

### 1. 서론

전해질 용액과 전극 사이의 계면에 대한 임피던스를

연구하기 시작한 것은 20세기 초이지만 1970년대에 들어서서 임피던스 측정에 대한 연구가 보편화되기 시작 하였다.[1] 이후 전자기기와 컴퓨터의 발달로 인하여 점차

본 논문은 2011년 지역기반육성기술개발사업 연구과제로 수행되었음.(전북테크노파크)

\*Corresponding Author : Chan-Hee Park (Chonbuk National University)

Tel: +82-63-219-0320 email: chpark@camtic.or.kr

Received August 31, 2012

Revised October 12, 2012

Accepted December 6, 2012

일반화 되어 갔으며, 현재는 전기화학임피던스 분석 장치(이하 EIS : Electrochemical Impedance Spectroscopy)라는 이름으로 널리 알려져 있다. EIS 는 전기화학소자 및 시스템에 교류 전위를 인가하고 이때 검출되는 교류 전류로부터 락-인 앰프(Lock in amplifier)나 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용하여 복소 저항 임피던스를 측정하는 전기화학적 분석법이며, 주로 Li-Ion 배터리나 EDLC 슈퍼커패시터와 같은 소자의 특성을 분석하는 장치 가운데 가장 많이 사용되고 있다[2-4]. EIS의 측정에 관한 전기화학적 기본 이론은 많은 연구결과를 통하여 알 수 있으나 [5-9], 대부분의 연구가 연료 전지 혹은 전기 자동차용 Li-Ion 배터리 분석용으로 치우쳐져 있다 [10-11]. 그러나 최근 카본 소재를 이용한 차세대 축전지인 EDLC 슈퍼커패시터와 같은 소자를 적용한 연구에 있어서는 많은 연구가 이뤄지지 않고 있다.

EDLC(Electrochemical double layer capacitors)는 슈퍼커패시터(super capacitor) 혹은 울트라커패시터(ultra capacitor)라고 불리며, 고전압 스토리지(high power storage)나 특히 자동차에 널리 사용되고 있다[12]. Oliver Bohlen et al. 등은 2007년 EDLC 슈퍼커패시터의 특성 분석 및 새로운 Ageing 모델을 개발하는데 있어서 EIS를 적용한 연구 결과를 발표 하였다[13]. 또한 슈퍼커패시터의 특성 중, 가장 중요한 열에 의한 특성 변화를 분석하고자 R.Kotz와 Shin et al 등은 42V용 자동차 슈퍼커패시터의 열적 변화에 대한 모델링을 구현하고 유한 요소 해석법을 이용하여 수명 예측을 시뮬레이션하고 칼로리미터를 이용하여 충방전(charge and discharge)을 측정분석 하였다[2, 14]. 그러나 대부분의 연구가 상용화된 EIS를 이용하여 다양한 환경 변수하에서 연구실 레벨의 분석에 그치고 있으며, 휴대용이면서 양산용에 적합한 슈퍼커패시터 분석용 EIS 개발은 이뤄지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 OPA541을 이용한 Potentiostat을 개발하고 이를 EDLC 슈퍼커패시터의 특성 분석을 위한 양산용 EIS 개발을 완료 하였으며, 다양한 종류의 슈퍼커패시터를 이용하여 성능 분석 실험을 통하여 개발된 EIS 장치의 성능을 평가 하였다.

## 2. 임피던스 모델(Impedance model)

EIS 는 일반적으로 AC 전압을 전기화학 셀(electrochemical cell)에 인가 한 뒤, 셀에서 나오는 전류를 측정하여 임피던스를 계산한다. 사인파형의 AC 전압을 셀에 인가하면, 셀에서는 인가된 AC 전압 파형의 주파수와 하모닉(harmonics)성분이 포함된 AC 전류 신호가

출력된다. 이때의 전류 신호는 정현파형의 함수들의 합으로 표현되기 때문에, 이것을 가상 선형 신호(Pseudo-linear)라고 부르며, 이때의 응답은 작은 AC 전압의 인가만으로도 측정할 수 있다. 이와 같은 선형 시스템(Linear system)에서 출력되는 AC 전류는 인가된 AC전압과 동일한 주파수 성분을 가지고 있지만 위상은  $\Phi$ 만큼 이동한 값이 출력된다. 이를 수식으로 표현하면, 셀에 인가되는 활성신호(excitation signal)를 식 (1) 과 같이 표현할 수 있다.

$$E_t = E_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

$E_t$  는 인가되는 신호를 말하며,  $E_0$  는 신호의 크기, 그리고  $\omega$  는 각속도 radial frequency 이다. 이때의  $\omega$  는 식 (2)와 같이 주파수  $f$ 로 표현할 수 있다.

$$\omega = 2\pi f \tag{2}$$

선형 시스템에서 응답 신호  $I_t$  는 식(3)과 같이  $\Phi$  만큼 위상이 이동한 식으로 표현 할 수 있다.

$$I_t = I_0 \sin(\omega t + \Phi) \tag{3}$$

Ohm의 법칙에 따라서 시스템의 임피던스는 식 5와 같이 표현 할 수 있다.

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \Phi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \Phi)} \tag{5}$$

한편, 식 5를 Euler 식을 이용하여 표현하면 식 9와 같이 표현 할 수 있다.

$$\exp(j\Phi) = \cos\Phi + j\sin\Phi \tag{6}$$

$$E_t = E_0 \exp(j\omega t) \tag{7}$$

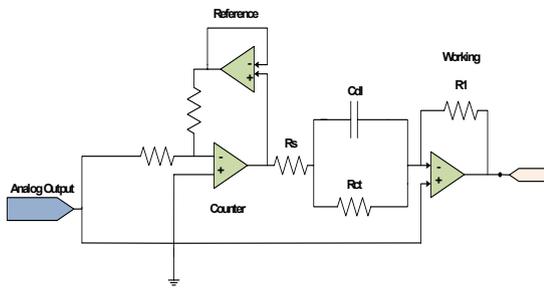
$$I_t = I_0 \exp(j\omega t - \Phi) \tag{8}$$

$$Z(\omega) = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(j\Phi) = Z_0 (\cos\Phi + j\sin\Phi) \tag{9}$$

식(9)는 나이퀴스트 플롯(Nyquist plot)으로 표현되는 데 이는 교류 임피던스의 real과 imaginary part로 나타낼 수 있으며, 이론적인 커패시터의 나이퀴스트 플롯은 Real part의 Z값이 0을 가지며, 이때 Y축(Imaginary)에 해당하는 데이터는  $Z = 1/(j\omega C)$ 에 의거하여 수직 형태로 출력된다. 이론적으로 커패시터는 점점 저항을 표시하기 위한

저항( $R_s$ )와 직렬로 연결하고, 이 등가 회로에서 출력되는 전류를 분석하여 나이퀴스트 플롯을 그려 보면, 저항( $R_s$ ) 용량만큼 이동됨을 확인할 수 있다. 실제로 EDLC (전기 이중층 커패시터)는 RC직렬회로로 표현할 수 있으며, 이때  $R$ 과  $C=1/(\omega ImZ)$ 는 주파수에 의존함을 알 수 있으며, 그 결과 임피던스의 Real 파트는 등가 직렬 저항(ESR: Equivalent series resistance)으로 나타낼 수 있다.

한편 본 연구에서는 그림 1과 같이 측정 대상의 내부 화학반응을 전기적으로 설명하기에 적합한 등가 임피던스 모델을 선정하였다[15]. 등가회로는 용액 저항( $R_s$ ), 박막내부에 형성되는 전기 이중층 커패시터(Cdl) 전하 전송 저항 혹은 분극 저항이라고 불리는  $R_{ct}$  로 구성되며, 이를 전기 화학적인 방법으로 측정하기 위하여 활성신호를 주기 위한 Counter 부, 전기화학적 기준 전위를 주기 위한 Reference 부 그리고 전류를 측정하기 위한 Working 부로 나누어 회로를 완성하였다. 이렇게 구현한 등가회로는 많은 실제의 측정계와 연관성이 많이 있는 회로로서 셀 임피던스를 근사하는 데에 유용하고 전극 반응의 정량적 해석의 기초가 되고 있다[16].

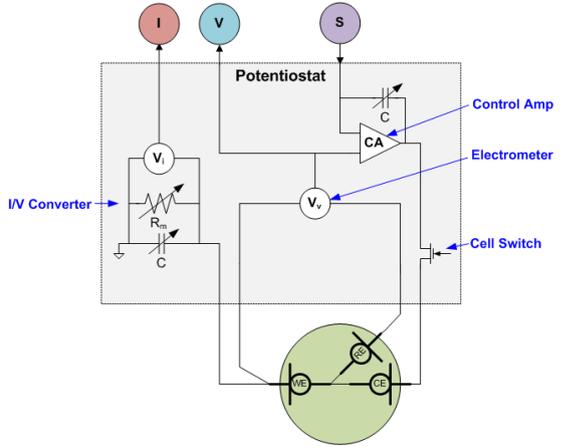


[Fig. 1] The equivalent circuit for super capacitor measurement

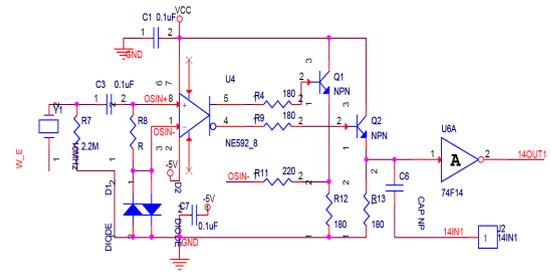
### 3. 실험(Experiment)

실험에 사용된 재료로는 크게 2가지로 나눌 수 있는데, Fast charge 특성 분석의 경우, 일반적으로 많이 사용하는 SHL 전해 커패시터(47uF, 100uF, 330uF, 470uF)를 사용하였으며, EIS 분석의 경우, (주)비나텍에서 제공받은 EDLC 슈퍼커패시터로서 Rated Voltage는 2.7V, Capacitance 는 25F, 50F, 100F의 용량을 가지는 슈퍼커패시터를 각 해당 범위 별로 3개씩 준비하여 실험을 하였다. 그리고 슈퍼커패시터에 정전압의 외부 활성신호를 입력하고 출력되는 전류 신호를 측정하기 위한 Potentiostat은 그림 2(a)와 같이 Two wired 방식으로 측정할 수 있도

록 설계 하였으며, 실제 개발된 회로로는 그림 2(b)와 같이 고전압용 Opamp(OPA541)와 고전압 저항(저항 종류)을 이용하여 개발 하였다.



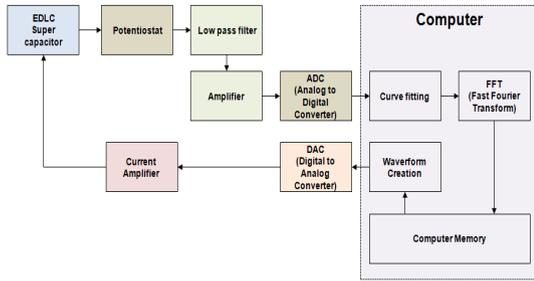
(a) The concept of analog potentiostat



(b) The overall circuit of potentiostat

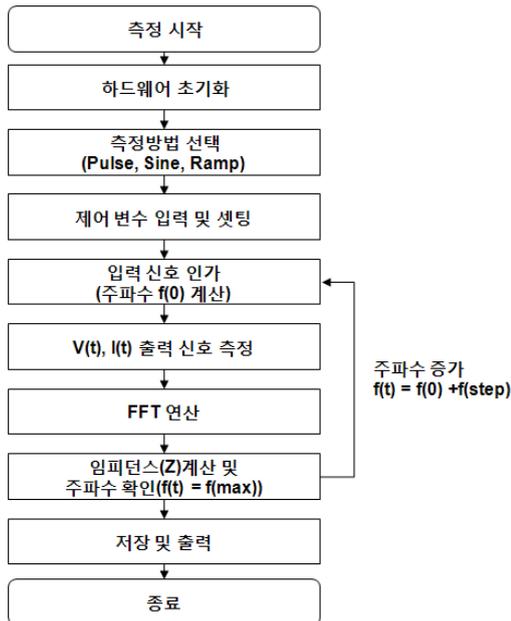
[Fig. 2] Developed the concept block diagram of potentiometer (a) and the developed circuit (b)

그리고, 개발된 Potentiostat에서 검출한 전압 및 전류의 잡음과, 바이어스 전압을 제거 하여 2채널의 아날로그 디지털 변환하기 위한 시스템은 그림 3과 같다. 변환된 신호의 고주파 성분을 차단하기 위하여 저역 통과 필터(Lowpass filter)를 설계 하였으며, 이 과정에서 생기는 오차를 줄이고 높은 주파수에서 생기는 노이즈를 감소시키기 위해 전류 데이터를 피팅(Fitting) 하는 과정도 추가 하였다. 이를 통하여 노이즈의 발생 및 분석에서 생기는 오차를 낮출 수 있도록 하였다. 이렇게 입력된 최적화된 응답 특성을 FFT 함수에 의해서 특정 주파수에서 반응하는 임피던스 스펙트럼으로 확인하였다.

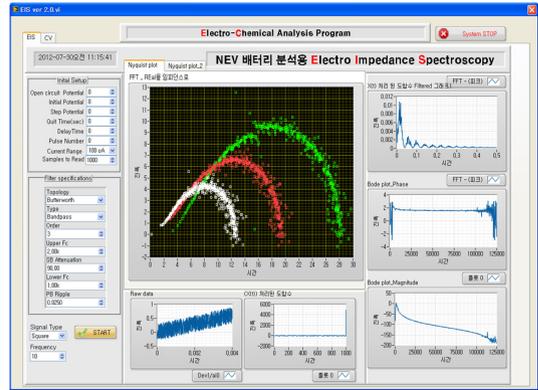


[Fig. 3] The block diagram of the developed system

한편, 개발된 프로그램의 분석 방법은 그림 4와 같은 순서로 진행되며, 그림 4에서와 같이 먼저 하드웨어를 선택하고 측정방법을 선택한다. 선택한 측정방법이 펄스 전압 방법 혹은 정현파(Sine)나 램프(Ramp pattern)일 경우에 제어변수를 입력 및 세팅하고, 슈퍼커패시터에 정전압을 여기 신호(excitation signal)로 인가하며, 인가한 여기 신호에 따른 슈퍼커패시터의 전압  $V(t)$  및 전류  $I(t)$ 의 변화를 입력하여 FFT 함수를 통하여, 계산한 임피던스  $Z(s)$ 를 계산한 후 저장 및 출력한다. 프로그램은 그림 5와 같이 양산과정에서도 누구나 손쉽게 핸들링이 가능하도록 설계 되었으며, 이를 반영하여 한 번의 클릭으로 모든 실험완료 및 데이터 저장 그리고 양분 판정 리포트가 가능하다.



[Fig. 4] The system operation flowchart of the developed EIS system



[Fig. 5] The front panel of developed EIS program

## 4. 실험 결과

### 4.1 Fast charging 실험 결과

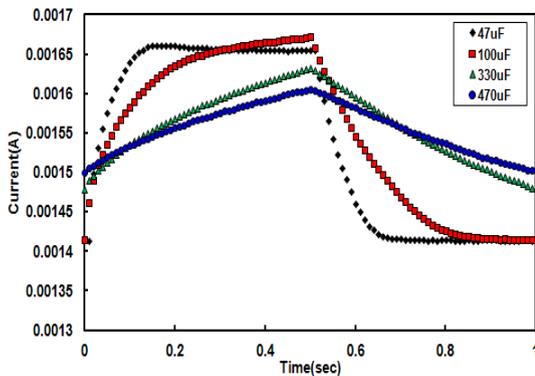
개발된 시스템의 안정성을 평가하기 위해서 전기 화학 시스템의 가장 기본적인 기능인 fast charging 테스트를 먼저 수행하였다. 실험에 사용된 커패시터는 총 4종류로서, 용량은 47 $\mu$ F, 100 $\mu$ F, 330 $\mu$ F, 470 $\mu$ F 이며, 이들의 성능은 표 1과 같다.

[Table 1] The characteristics of SHL series capacitors

Capacitor( $\mu$ F)	50(1H)	Z(-25 $^{\circ}$ C) / (20 $^{\circ}$ C)	Z(-40 $^{\circ}$ C) / (400 $^{\circ}$ C)
47( $\mu$ F)	177	Z=2	Z=3
100( $\mu$ F)	306		
330( $\mu$ F)	706		
470( $\mu$ F)	918		

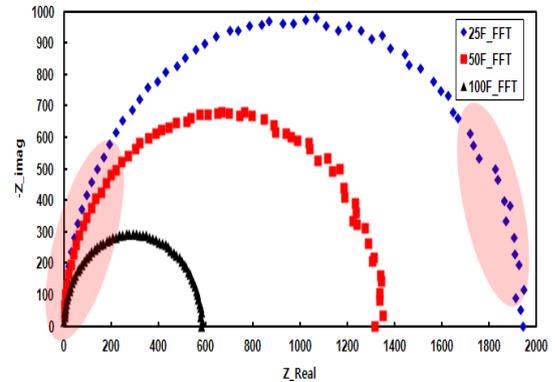
실험을 위하여 커패시터에 인가되는 전압 파형은 DC offset 5V, Peak to Peak 5V 그리고 Duty ratio 50 : 50 의 사각파형을 10번 반복해서 출력하도록 하였다. 그리고 10회의 데이터는 Ensemble Averaging 법에 의해서 평균을 취하여, 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림 6(a)의 경우는 Fast charging 실험에서 얻은 전류 파형 그래프이며, 그림 6(b)의 경우는 전압 파형 그래프이다. 두 개의 그래프에서 모두 47 $\mu$ F의 경우는 커패시터의 용량이 작기 때문에, 활성 전압 인가 후, 0.14초에서 6V와 1.65mA의 크기로 충전됨을 확인 할 수 있었으며, 0.37초 동안 충전 상태가 유지 되다가, 약 0.51초에서 방전되기 시작함을 확인 할 수 있었다. 100 $\mu$ F, 330 $\mu$ F, 470 $\mu$ F의 경우는 모두 활성 전압 패턴의 High(10V) 상태 동안 계속

해서 충전 상태를 유지 하였으나, 0.5초 동안 모두 충전 되지 않고 방전을 시작 하는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 47 $\mu$ F 커패시터의 경우 방전 시작 후 0.66초에서 1.34V 만큼 방전 상태가 유지 되었으며, 100 $\mu$ F의 경우는 방전 시작 후, 0.83 초에서 1.34V 만큼 방전 상태가 유지 되었다. 그러나 330 $\mu$ F, 470 $\mu$ F의 경우는 상대적으로 커패시터의 용량이 47 $\mu$ F, 100 $\mu$ F보다 큰 이유로, 모두 완전 방전이 되지 않은 상태에서 다시 충전됨을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 형태는 전류에서도 비슷한 경향을 보였다.

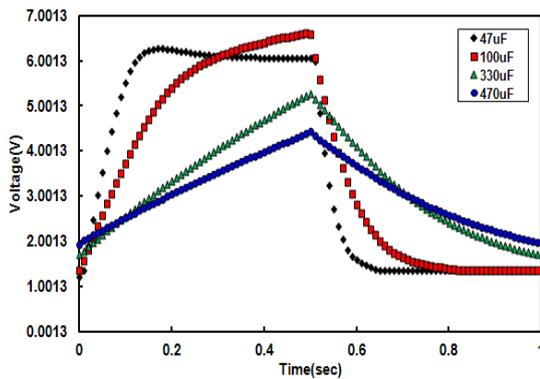


(a) Current waveform graph of fast charging experiment

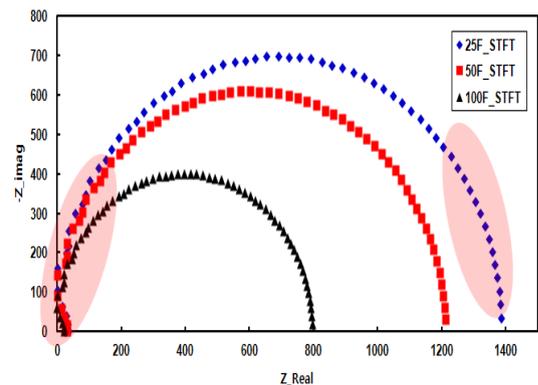
의 저항을 뜻하며, Rct 는 전하 전달(charge transfer)과 관련된 저항으로 반응 속도와 역수 관계에 있고, Cdl은 전기적 이중층의 정전 용량(double layer transfer)을 의미한다. 이 회로에는 보정된 용액 저항, 즉 기준전극과 보조전극 사이의 저항이 없으므로 기준 전극과 보조 전극은 서로 이어진 상태이다. 그리고, 개발된 시스템에 반영된 FFT함수의 안전성을 평가하기 위하여 STFT 함수를 이용하여 비교 하였다. 각각 동일한 frequency bins(128)을 적용하였다.



(a) FFT function used



(b) Voltage waveform graph of fast charging experiment



(b) STFT function used

[Fig. 6] The result graph of fast charging analysis

[Fig. 7] Comparison of between FFT function and STFT function for evaluation of the stability of the experiment

## 4.2 E.I.S 실험 결과

### 4.2.1 FFT 함수와 STFT 함수 성능 비교

제작된 시스템에 반영된 FFT 법의 성능을 평가하기 위하여 전극 계면의 가장 일반적인 모델로서 저항과 축전기를 이용하여 그림 1과 같이 가상 Cell을 구성하였다. 여기에서 Rs는 보정되지 않은 용액 저항으로 기준 전극(reference electrode)과 작업 전극(working electrode) 사이

각 해당 함수에 따른 임피던스를 구하여 복소수 평면에 그려보면, 그림 7과 같이 반원 형태가 되며, 이 반원의 지름은 가상 Cell의 Rct에 해당되며 반원의 높은 주파수 쪽이 X축과 만난 곳이 Rs에 해당된다. 그림 7(a)와 같이 FFT 함수를 사용한 결과는 저주파 영역에서 노이즈가 발

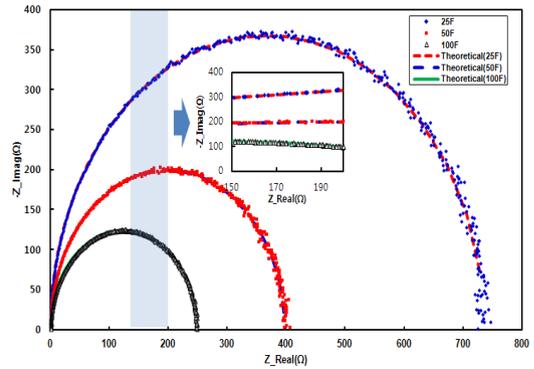
생하였지만, 고주파 영역에서는 안정된 결과를 얻을 수 있었다. 반대로 STFT 함수를 사용하면 그림 7(b)와 같이 저주파에서는 안정된 결과를 얻을 수 있었지만, 고주파 영역에서는 노이즈가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 본 연구는 저주파보다, 고주파영역에 더 관심이 많기 때문에, STFT함수보다 FFT 함수를 사용하였다.

#### 4.2.2 슈퍼커패시터 EDLC 성능 평가 실험

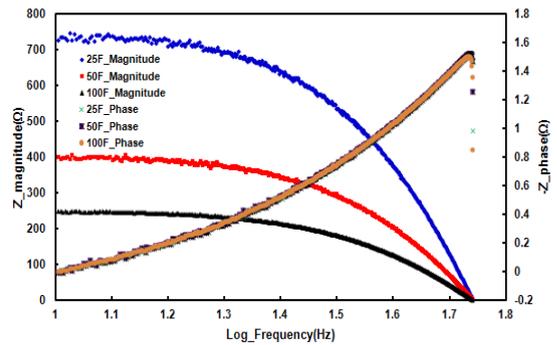
이상적인 커패시터는 세상에 존재 하지 않기 때문에, 커패시터의 성능을 측정하는데 몇 가지의 변수가 영향을 미치게 된다. 대표적으로 커패시터와 연결되는 전극의 리드 저항과 포텐서미미터에 연결된 작업 전극, 카운터 및 레퍼런스 저항등이 있다. 이와 같은 변수들을 반영한 등가 회로는 그림 1과 같으며, 이를 이용한 이론값과 실험값은 그림 8과 같다. 실험에 사용한 주파수 범위는 1Hz~100Hz, 이때의 step 주파수는 0.1Hz 이며, 2.5V Offset에 Peak to Peak 전압 2.5V로 변수를 세팅하고 상온에서 3개의 EDLC 슈퍼커패시터를 이용하여 각각 총 3 번의 실험을 하였다. 실험 결과 그림 8(a)와 같이 25F에 비해서 50F의 임피던스가 더 작았으며, 50F에 비해서 100F의 임피던스가 역시 더 작았다. 즉, 슈퍼커패시터의 용량이 클수록 내부 임피던스는 더 작은 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 그림 1의 등가회로를 적용한 이론치 값과 비교 하였을 때도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 이론값을 구하는데 사용된 변수들은 표 2와 같으며, 이와 같은 변수들이 사용된 등가회로를 통하여 이론치를 얻기 위한 프로그램은 그림 9와 같다. 한편, 실험을 통하여 얻은 데이터 중에서 저주파 영역에서 데이터의 노이즈가 발생함을 확인할 수 있었으나, 이는 저주파 영역에서 Step Frequency의 resolution을 높이는 것으로 해결 할 수 있다.

[Table 2] Experimental parameters for EIS test

Cell pattern	Type 1
Frequency range(Hz)	0.1~100
Rs (Ω)	0.1
Rct (Ω)	733.5(25F), 400.2(50F), 278.79(100F)
Cdl (μF)	0.2208
Sampling rate(Hz)	1000

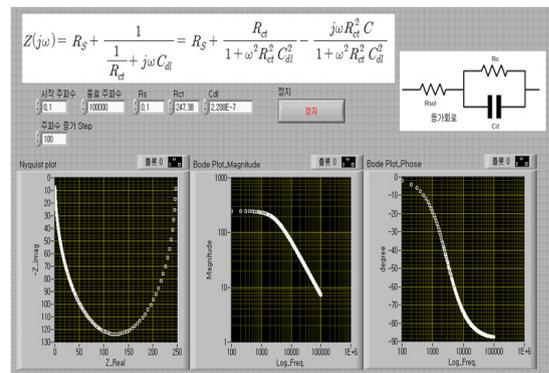


(a) Nyquist plot of theoretical and experimental data



(b) Bode plot of theoretical and experimental data

[Fig. 8] The nyquist plot and bode plot graphs after EIS experiment



[Fig. 9] The simulation program for theoretical data calculation

## 5. 결론

본 연구는 EDLC 타입의 슈퍼커패시터의 임피던스를

평가 할 수 있는 시스템을 개발 하였으며, 슈퍼커패시터의 등가 회로를 완성하여 실제 실험값과 비교 분석 하였다. 분석한 결과 실험값과 이론값이 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 개발된 시스템이 슈퍼커패시터의 성능 평가에 사용할 수 있음을 증명 하였다. 또한, 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 신호 선형화 작업(linearization) 후, 미분을 추가하여 저주파 영역에서도 정확한 측정이 가능 하도록 하였으며, 양산 라인에서도 쉽게 사용할 수 있도록 프로그램을 개발 하였다. 앞으로 이 시스템을 이용하여 EDLC 타입의 슈퍼커패시터의 양산 과정에서 빠르고 높은 신뢰성을 가진 평가 시스템을 적용 할 수 있게 될 것이다.

## Reference

- [1]. Euijin Hwang, Sanghyup Oh, "Construction of the Electrochemical Impedance measurement system using fourier transform", Journal of the Korean Chemical Society, Vol.35, pp. 713-719, 1991
- [2] R.Kotz, M.Hahn, R.Gallay, " Temperature behavior and impedance fundamentals of supercapacitors", Journal of power sorces, Vol 154, pp. 550-555, 2005.
- [3] Jerzy Hoja, Grzegorz Lentka, "Electrochemical Impedance Spectroscopy Analyzer with Digital Potentiostat", 16th IMEKO TC4 Symposium, Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements Sept. pp. 22-24, 2008, Florence, Italy
- [4] Gamry instruments, "Basics of electrochemical impedance spectroscopy", Application note rev 1.09, www.gamry.com
- [5] J.R. Macdonald (Ed.), "Impedance Spectroscopy", Annals of Biomedical engineering, Vol 20, pp. 289-305, 1992, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [6] C. Gabrielli (Ed.), "Proceedings of the First International Symposium on Electrochemical Impedance Spectroscopy", Held at Bombannes, France 22-26 May, 1989
- [7] Jonghyun Jang, Seungmo Oh, "Complex capacitance analysis of impedance data and its applications", Journal of the Korean electrochemical society, vol 13, No.4, pp 223-234, 2010
- [8] C. Gabrielli, "Identification of electrochemical processes by frequency response analysis", Solartron Analytical, Technical Report Number 004/83, March 1998.
- [9] Andrzej Lasia, "Electrochemical impedance spectroscopy and its applications", Kluwer academic/plenum publishers, NewYork, Vol 32, p. 143-248, 1999
- [10] Juhyung Lee, Woojin Choi, " Development of the low cost impedance spectroscopy system for modeling the electrochemical power sources", The Korean institute of power electronics, No.13, pp. 46-54, 2008, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [11] H. Tian, S. G. Corcoran, M. J. Kelley, C. E. Reece, "Novel characterization of the electropolishing of niobium with sulfuric and hydrofluoric acid mixtures", Proceedings of SRF2007, Peking Univ., Beijing, China, pp 370-376, 2007
- [12] C. Ashtiani, R. Wright, G. Hunt, " Ultracapacitors for automotive applications", Journal of power sources, vol. 154 (2), pp. 561 - 566, 2006, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [13] Oliver Bohlen, Julia Kowal, Dirk Uwe Sauer, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors Part I. Experimental study and ageing model", Journal of Power Sources Vol. 72, pp 468 - 475, 2007, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [14] Dae Hun Lee a, Ui Seong Kima, Chee Burm Shin a, Baek Haeng Lee b, Byung Woo Kimb, Young-Ho Kimc, "Modelling of the thermal behaviour of an ultracapacitor for a 42-V automotive electrical system", Journal of Power Sources, Vol. 175, pp. 664 - 668, 2008, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [15] E. Karden, "Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries", Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, pp. 1-113, 2001.
- [16] Jaeman Jung, Chiwoo Lee, "Electrochemical measurement", Free academy, 1994

## 박 찬 희(Chan-Hee Park)

[정회원]



- 2012년 2월 : 전북대학교 공과대학 바이오나노시스템공학과(공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2009년 4월 : 한국내쇼날인스트루먼트(주) 대리 (LG 전자 Account Manager)
- 2009년 5월 ~ 현재 : (사)전북대학교자동차부품금형기술혁신센터 연구개발실 선행기술팀 선임 연구원

<관심분야>

기계 시스템분야, 바이오나노분야 제어계측 시스템 개발

**이 혜 인(Hye-In Lee)**

[정회원]



- 2011년 2월 : 호남대학교 전자공학과
- 2011년 1월 ~ 2월 : 한국 한국내쇼날인스트루먼트(주) 인턴
- 2011년 6월 ~ 현재 : (사)전북대학교 자동차부품금형기술혁신센터 연구개발실 선행기술팀 연구원

<관심분야>

기계 시스템분야 개발, 제어계측 시스템 개발

**김 성 진(Sung-Jin Kim)**

[정회원]



- 2006년 3월 ~ 현재 : (사)전북대학교 자동차부품금형기술혁신센터 선임연구원/팀장
- 2010년 2월 : 전북대학교 공과대학 기계공학과(공학박사수료)
- 1999년 2월 : 전북대학교 공과대학 기계공학과(공학석사)

<관심분야>

기계 시스템분야 개발, 자동화 및 머신 비전 시스템 개발

**김 상 중(Sang-Jung Kim)**

[정회원]



- 1985년 3월 ~ 1989년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 졸업
- 1989년 1월 ~ 2002년 7월 : (주)대우전자부품 /직위:과장 /담당:테스트 팀장 및 생산기술, 설비 담당
- 2002년 9월 ~ 2005년 9월 : (주)하이브론 /직위:차장 /담당:기술 지원 및 검사가 회로개발

- 2005년 10월 ~ 현재 : (주)브이엔아이 이사 겸 연구소장

<관심분야>

자동차 전장부품연구개발분야, 센서 및 시험기 개발분야

**이 희 관(Hee-Gwan Lee)**

[정회원]



- 2000년 5월 ~ 현재 : (사)전북대학교 자동차부품금형기술혁신센터 수석연구원/사무국장
- 2007년 11월 ~ 현재 : (사)전주벤처촉진지구발전협의회 사무국장
- 1998년 2월 : 전북대학교 공과대학 기계공학과(공학박사)

<관심분야>

정밀가공기술 분야, 복합재 성형기술 분야, 기계시스템 분야

**이 정 호(Jung-Ho Lee)**

[정회원]



- 2011년 2월 : 전북대학교 공과대학 정밀기계공학(학사)
- 2011년 2월 ~ 현재 : (사)전북대학교 자동차부품금형기술혁신센터 연구개발실 선행기술팀 연구원

<관심분야>

기계 시스템분야 개발, 제어계측 시스템 개발