

# 자연방전을 고려한 개선된 슈퍼커패시터의 동특성 모델 개발

金尙鉉\*, 李敎範\*\*, 崔世琬\*\*\*, 崔宇鎮†

## Development of the Improved Dynamic Model of the Supercapacitor Considering Self-Discharge

Sang-Hyun Kim, Kyo-Beum Lee, Se-Wan Choi and Woojin Choi

### 요 약

슈퍼커패시터는 전력밀도가 높고 사이클 수명이 길며 깨끗한 특성으로 인해 신재생에너지원의 동특성 보상 및 배터리의 동작시간이나 수명연장을 목적으로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 개선된 슈퍼커패시터의 동특성 모델을 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy)을 이용하여 개발한다. 개발된 모델은 슈퍼커패시터의 정확한 동적 행동을 예측하거나 특정 충전상태(State-Of-Charge)에서의 정확한 정전용량 값을 계산하는데 사용될 수 있다. 주파수영역에서 개발된 모델은 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 위하여 시간영역으로 등가 변환된다. 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 일치하였으며, 이를 통해 개발된 모델의 유용함과 정확성을 증명하였다.

### ABSTRACT

Due to its high power density, long cycle life and clean nature supercapacitors are widely used for improving the dynamic characteristics of the new and renewable energy sources and extending the battery run-time and life. In this paper improved dynamic model of the supercapacitor is developed by the electrochemical impedance spectroscopy technique. The developed model can be used to accurately estimate the dynamic behaviour of the supercapacitor and calculate the exact capacitance value at a certain state of charges. The model of the supercapacitor in the frequency domain is equivalently transformed into that in the time domain for Matlab/Simulink simulator. The simulation data shows fine agreements with experimental results, thereby proving the validity and the accuracy of the developed model.

**Key Words** : Supercapacitor, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Dynamic Simulation, Equivalent Circuit

### 1. 서 론

지구환경 문제와 화석연료의 고갈로 인해 관심의 대상이 되고 있는 연료전지, 태양전지, 풍력발전기와 같

은 신재생에너지원들은 모두 부하변동에 강인하게 대처하기 어려운 특성을 갖고 있어 에너지원으로서 단독 사용될 경우 출력전압의 변동과 궁극적으로 연계된 계통의 전력품질 문제를 야기할 수 있다. 슈퍼커패시터는 전력밀도(Power Density)가 높고 사이클 수명(Cycle-Life)이 길며 깨끗한 특성으로 인해 이러한 신재생에너지원의 느린 응답특성이나 과부하의 보상에 유용하게 사용될 수 있으며, 배터리와 함께 사용할 경우 배터리의 동작시간과 수명의 연장이 가능해진다<sup>[1][2]</sup>. 또한, 이차전지에 비해 높은 출력 밀도로 인해 순

†교신저자 : 정회원, 숭실대 전기공학부 조교수

E-mail : cwj777@ssu.ac.kr

\*학생회원, 숭실대 전기공학부 석사과정

\*\*정회원, 아주대 전자공학부 조교수

\*\*\*정회원, 서울산업대 제어계측공학과 교수

접수일자 : 2009. 1. 23

1차 심사 : 2009. 2. 24

심사완료 : 2009. 3. 12

시 피크 부하를 담당하기 적합하여 첨두부하절감(Peak Shaving)이나 부하 평준화(Load Leveling)용으로 각광을 받고 있다. 연료전지나 태양광발전 시스템에 함께 사용될 경우 시스템을 과부하로부터 보호하여 불필요한 시스템의 차단(Shut-down)을 방지할 수 있으며, 풍력발전 시스템에서는 순간적인 파워가 요구되는 피치제어시스템(Pitch Control System)에 유용하게 사용되고 있다. 또한 친환경적인 소재를 사용하기 때문에 증금속을 사용하는 이차 전지와 달리 환경문제를 일으키지 않는 점, 이차 전지에 비해 낮은 등가직렬저항으로 인한 우수한 입, 출력 특성을 갖고 있는 점, 저온에서도 성능 저하가 거의 없어 넓은 작동 온도범위를 갖고 있는 점, 반영구적인 수명과 극성이 바뀌어도 파괴되지 않는 안정성 등으로 차세대 에너지 저장 장치로서 각광을 받고 있다. 따라서 이러한 슈퍼커패시터의 동특성 모델 개발을 통한 동특성에 관한 이해는 전력변환기를 포함하는 관련된 시스템의 최적설계에 있어서 유용한 정보가 되며, 이와 관련된 연구들이 진행되어 왔다<sup>[3][4]</sup>.

기존에는 슈퍼커패시터의 특성을 관찰하기 위하여 주로 정전류 시험(Constant Current Test)을 시행하여 왔으나, 슈퍼커패시터는 충전상태(SOC: State of Charge)와 온도에 따라서 그 성질이 매우 가변적이므로 정전류 시험처럼 넓은 구간에서 실시되는 시험을 통해서는 충전상태별 특성을 정확히 파악하는 것이 거의 불가능 하다.

따라서 본 논문에서는 슈퍼커패시터의 정밀한 동특성 모델을 개발하기 위해 전기화학적 임피던스 분광법(EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy)을 이용하였다. EIS 기술을 통해 복합체의 특성, 구조 그리고 내부 반응에 따른 주파수 특성 등 종합적인 정보를 얻을 수 있으므로, 슈퍼커패시터의 충전상태별 실험을 실시하고 이를 바탕으로 동특성 모델을 개발하였다. 또한, 개발된 동특성 모델을 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션하고 실험결과와의 비교를 통해 개발된 모델의 유용함을 증명하였다.

## 2. 슈퍼커패시터 모듈의 동특성 모델링

### 2.1 슈퍼커패시터의 구조와 특성

슈퍼커패시터는 이온의 흡/탈착에 의한 물리적 현상을 통해 충/방전이 이루어지는 에너지 저장장치로서 그 내부 반응과 동특성을 모델링하기 위해서 다수의 연구가 진행되어 왔다<sup>[5][6]</sup>.

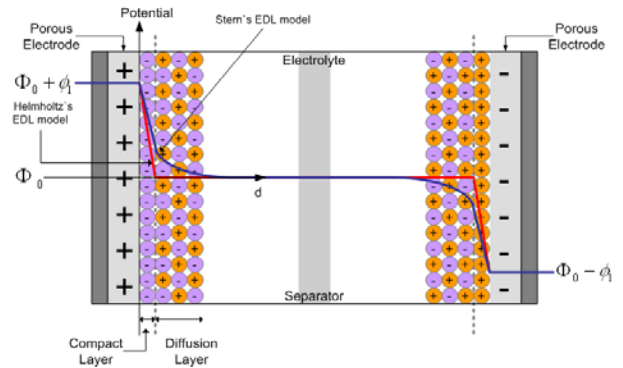


그림 1 슈퍼커패시터의 내부 구조  
Fig. 1 Internal structure of a supercapacitor

1967년에는 다공성 전극의 임피던스가 수식으로 제시되었으며<sup>[7]</sup>, 현재까지 진행된 많은 연구에서 이를 슈퍼커패시터의 다공성 전극의 임피던스 모델로 사용하고 있다<sup>[8]</sup>. 또한, 슈퍼커패시터를 설명하는 중요한 현상인 전기이중층(EDL: Electric Double Layer)에서 생기는 정전용량에 대한 연구가 1879년 Helmholtz에 의해 시작된 이후로 많은 연구들이 이어져 현재는 1924년 Stern에 의해서 제시된 정전용량 모델이 지배적으로 사용되고 있다<sup>[9-11]</sup>.

슈퍼커패시터는 격리 막을 가운데 두고 다공성 전극이 양쪽으로 평행하게 위치해 있으며 그 사이를 전해질이 채우고 있는 형태이다. 전해질은 이온화가 가능한 용질과 용매로 이루어져 있으며, 그림 1에서와 같이 충전 시에 양전극에 음이온이 흡착 되고 음전극에 양이온이 흡착 되어 에너지를 저장하게 된다.

Helmholtz에 의해 제시된 전기 이중층 모델은 전극과 전해질 사이의 경계면에 양전하와 음전하가 가까운 거리를 두고 일렬로 마주하는 모습으로 전압 강하가 거리에 따라 선형적으로 일어나는 모습이다(그림 1). 이 때 Helmholtz 전기 이중층의 정전용량은 다음과 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$C_H = \epsilon \frac{A}{d} \tag{1}$$

$\epsilon$ : Dielectric constant  
 $A$ : Surface of electrode  
 $d$ : Distance of electrode to ions

1910년에 Gouy는 전해질 속의 이온들은 불규칙한 분포로 퍼져있고 전위는 전극과 이온의 거리에 대하여 비선형적인 곡선을 그리게 된다고 설명하였다. 이 이

론은 1913년에 Champman에 의해서 식 (2)와 같이 정립되었고, 이것을 Gouy-Champman의 정전용량 모델이라고 한다<sup>[11]</sup>. 식 (2)에서 보듯이 슈퍼커패시터는 충전전압과 온도 그리고 전해질의 농도 등에 따라 정전용량의 값이 달라진다.

$$C_{GC} = zFA \sqrt{\frac{2\epsilon c}{RT}} \cosh\left(\frac{zF\phi}{2RT}\right) \quad (2)$$

$z$  : Valancy of the ions  
 $\phi$  : Voltage across the double-layer  
 $c$  : Concentration at the electrode  
 $F$  : Faraday constant  
 $R$  : Universal gas constant  
 $T$  : Absolute temperature

그러나 Gouy-Champman의 정전용량 모델에서는 전극 가까이 갈수록 전압강하가 매우 급격해져 계산된 커패시턴스의 값은 실제보다 매우 작은 값이 된다. 이에 Stern은 1923년 전기 이중층 모델의 정전용량은 조밀층(Compact Layer)과 확산층(Diffusion Layer)에 의해 형성되는 두 가지 성분의 합으로 표현된다는 새로운 가설을 제시하였다. 따라서 전체 정전용량은 헬름홀츠 층(Helmholtz Layer)이라고도 불리는 조밀층에 의한 일정한 정전용량( $C_H$ )과 확산층에서 형성되는 전극과 이온 사이의 거리와 충전전압 및 온도에 따라 가변적인 정전용량을 갖는 Gouy-Champman 정전용량( $C_{GC}$ )의 합으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 Stern 모델이라고 한다<sup>[9-11]</sup>.

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \quad (3)$$

그림 1에는 앞서 설명한 슈퍼커패시터의 내부구조와 Helmholtz의 이론과 Stern의 이론에 의한 전극과 이온 간의 거리와 전압과의 관계가 도시되어 있다.

### 2.2 슈퍼커패시터 등가회로 모델링

슈퍼커패시터 내부 등가 임피던스의 주된 성분은 우선 이온저항(Ionic Resistance)과 다공성 전극(Porous Electrode)의 임피던스를 나타내는  $Z_{pore}$ 의 직렬회로로 나타낼 수 있다. 여기서 다공성 전극은 전극저항(Electrode Resistance) 성분  $R_e$ 와 전기 이중층 커패시터(Electric Double Layer Capacitance)  $C_d$ 가 병렬 연결된 사다리 회로로 De. Levie에 의해 식 (4)와 같은 수학적식으로 제시되었다<sup>[7]</sup>.

$$Z_{pore} = \sqrt{\left(\frac{R_e}{j\omega C_d}\right)} \coth(\sqrt{j\omega C_d R_e}) \quad (4)$$

여기에 외부적인 요소인 접속 단자에 의해 생기는 인덕턴스와 저항성분을 합하여서 슈퍼 커패시터의 등가 임피던스 모델은 등가직렬 인덕턴스와 등가직렬 저항(ESR: Equivalent Series Resistance) 그리고 다공성 전극 임피던스의 직렬의 합으로 그림 2와 같이 나타나게 된다<sup>[8]</sup>.

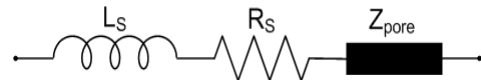


그림 2 슈퍼커패시터의 등가 임피던스 모델  
 Fig. 2 Equivalent impedance model of a supercapacitor

### 2.3 슈퍼커패시터 자연방전 모델링

그림2에서 제시된 기존의 슈퍼커패시터의 임피던스 모델은 다공질 전극구조의 형태를 임피던스로 정확히 표현하였으나 슈퍼커패시터에서 발생하는 자연 방전 현상을 잘 표현하지 못하는 단점이 있다. 슈퍼커패시터의 자연방전은 대표적으로 다음과 같은 두 가지의 이유에 의해 나타난다<sup>[12][13]</sup>.

첫째는 슈퍼커패시터의 충전/방전 시 전해질로부터 전극으로 또는 전극으로부터 전해질로 이온의 확산이 일어나는데, 충전/방전 직후에는 전극으로부터의 거리에 따른 이온의 농도차에 의해 반대 방향으로의 확산현상이 발생한다. 이러한 확산 반응은 Fick의 법칙으로 설명될 수 있으며 슈퍼커패시터에서는 자연방전의 형태로 나타나게 된다. 이는 전기화학반응에서만 사용되는 와버그 임피던스(Warburg Impedance)로 표현되며, 전해질에서 일어나는 반응을 묘사한 것이므로 다공성 전극 임피던스에 직렬 연결된 형태로 표현하는 것이 적절하다.

또한, 이것은 PN접합 다이오드에서 순방향 바이어스에 의해 정공과 이온이 확산 현상에 의해서 교차하다가 전류가 차단될 경우 역확산 되어 공핍층을 형성하는 현상과 유사하며, 식 (5)와 같이 표현된다<sup>[14]</sup>.

$$Z_W = \frac{1}{Q\sqrt{j\omega}} \quad (5)$$

여기서,  $Q$ 는 의사커패시턴스(Pseudo Capacitance)로 슈퍼커패시터의 충전용량과 온도에 따라 달리 나타나는 값이다.

둘째는 전극과 전해질 사이에서 나타나는 누설전류에 의한 영향으로 이는 누설 저항( $R_L$ : Leakage Resistance)으로 모델링 할 수 있으며, 누설전류에 의한 자연방전의 모델은 다공질 전극 임피던스와 병렬로 연결된 페루프 형태의 회로로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 기존에 제안된 슈퍼커패시터의 임피던스 모델에 전해질에서 이온의 확산 및 누설 전류에 의해 발생하는 자연 방전현상을 와버그 임피던스 및 누설저항을 통해 모델링 한 새로운 등가 임피던스 모델을 그림 3과 같이 제안하였다.

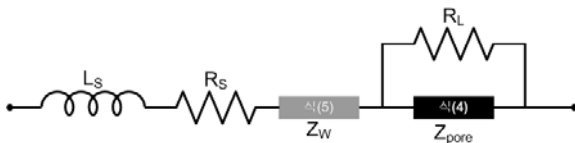


그림 3 제안된 슈퍼커패시터의 등가 임피던스 모델  
Fig. 3 Proposed Equivalent impedance model of a supercapacitor

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1 임피던스 분광법에 의한 실험 및 모델링

실험 장치는 본 연구실에서 개발된 EIS 측정 장비 및 소프트웨어를 이용하여 그림 4와 같이 구성하였으며, 충/방전 및 전류 섭동(Current Perturbation)을 위해 NF사의 양방향 전원 BP4610을 이용하였다. 슈퍼커패시터의 전류와 전압은 NI사의 DAQ Board PCI-6154를 이용하여 측정되고, 디지털 변환된 데이터는 개발된 소프트웨어로 전송되며, Lock-in Amplifier를 이용하여 시험주파수 대역의 신호를 추출하고 임피던스를 계산하여 그림 5와 같은 임피던스 스펙트럼이 그려진다. 전기화학적 임피던스 분광법은 측정대상을 섭동시키고 그 응답을 분석하는 시험법으로 시스템의 선형성을 보장하기 위해 인가된 섭동 전류의 크기는 슈퍼커패시터의 충전전하량의 5% 이하로 제한하여 실시하였으며, 실험 전후의 전하량 변화가 없도록 하였다.<sup>[15][16]</sup>

실험대상으로 Maxwell사의 Boostcap(2.7V 2600F)을 사용하였으며, 80% SOC에서 측정한 결과를 바탕으로 슈퍼커패시터 임피던스 모델의 파라미터를 얻기 위해 기존 모델 및 제안된 모델을 이용하여 각각 커브피팅하고 그 결과를 비교하였다. 표 1에는 기존의 모델과 제안된 모델을 이용하여 얻어진 슈퍼커패시터 등가 임피던스의 파라미터 값을 나타내었다.

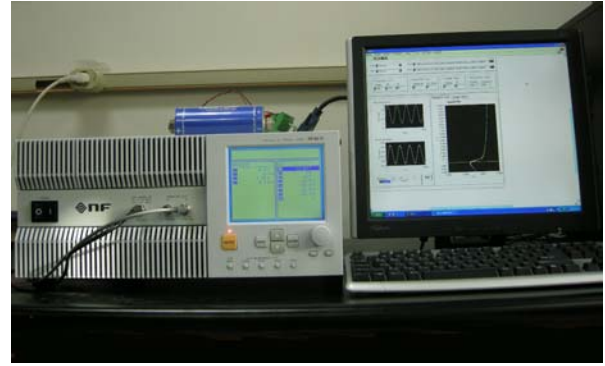


그림 4 EIS를 위한 실험 장치  
Fig. 4 Experimental set-up for EIS

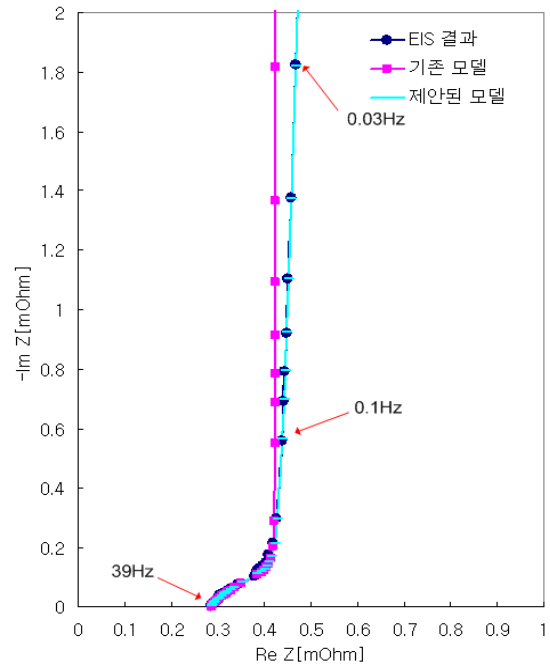


그림 5 Maxwell 슈퍼커패시터(2.7V 2600F)의 Impedance Nyquist Plot (80% SOC, 20°C)  
Fig. 5 Impedance Nyquist Plot of the Maxwell supercapacitor(2.7V 2600F) (80% SOC, 20°C)

표 1 슈퍼커패시터 등가회로의 파라미터(80% SOC)  
Table 1 Parameters for the Equivalent Circuit of the supercapacitor (80% SOC)

	$L_s$ [nH]	$R_s$ [mΩ]	$C_d$ [F]	$R_e$ [mΩ]	Q	$R_L$ [Ω]
기본모델	41.98	0.27	2989	0.39	N/A	N/A
제안된 모델	41.98	0.27	2989	0.39	26312	0.568

먼저, 그림 5의 EIS 측정결과를 살펴보면 주파수에 따라 실수와 허수 성분이 변함을 알 수 있다. 이는 주파수에 따른 이온저항과 다공성 전극 임피던스의 변화 때문이며, 고주파 영역에서는 45°의 직선 형태로 표현되고 저주파 영역에서는 자연방전에 의한 임피던스가 표현된다. 여기서, 허수 성분이 0이 되는 지점에서의 실수값을 고주파 등가직렬저항 이라고 하여  $R_s$ (Series Resistance)로 표현한다.

커브피팅 결과를 보면 기존모델과 제안된 모델 모두 고주파 영역에서는 실험결과를 잘 추종하고 있으나 저주파 영역에서는 차이가 있음을 알 수 있다. 기존 모델에는 다공성 전극 임피던스만이 존재함으로 인해 특정 저주파 이하에서는 임피던스 궤적이 실수 성분 축에 대해 거의 90도를 이루는 반면 제안된 모델은 추가된 와버그 임피던스와 누설저항으로 인해 저주파 영역에서 실수성분이 증가됨에 따라 90도 이하의 예각으로 나타나게 된다. 따라서 자연방전 현상을 반영한 제안된 모델이 실험결과와 더 잘 일치함을 알 수 있다.

슈퍼커패시터의 EIS 결과는 충전상태(SOC)에 따라서 그 파라미터의 값이 달라진다. 그림 6은 Maxwell사의 Boostcap(2.7V 2600F)의 임피던스 스펙트럼을 충전상태를 0%~100% 까지 변경하여 가면서 측정한 실험 결과이다. 충전상태에 따라서 고주파 등가직렬저항  $R_s$ (Series Resistance) 및  $R_L$ (Leakage Resistance) 그리고 와버그 임피던스 값이 달라지는데 여기서 가장 중요한 파라미터는 정전용량, 즉 전기 이중층 커패시터(Electric Double Layer Capacitor)  $C_s$ 의 값이다. 그림 6에서 저주파 영역의 임피던스 값을 보면 충전상태(SOC)가 증가할수록 임피던스의 허수성분 값이 점차 작아지는 모습을 확인할 수 있다.

슈퍼커패시터의 임피던스 허수 성분과 식 (6)을 이용하여 전기 이중층 커패시터(Electric Double Layer Capacitor)  $C_s$ 의 값을 계산해 낼 수 있으며, 이를 충전상태에 따른 주파수별 커패시턴스를 계산하면 그림 7과 같은 결과가 얻어진다.

$$Im Z = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi f C_s} \tag{6}$$

커패시턴스 값은 고주파 영역에서 거의 0의 값을 가지며, 저주파 영역으로 가면서 큰 값으로 변화하는 것을 알 수 있는데 이는 고주파에서 전류의 교차 시간이 너무 짧아 이온이 다공질 전극의 깊은 곳 까지 도달할 수 없기 때문이다<sup>[17]</sup>. 또한 충전상태(SOC)에 따라 나

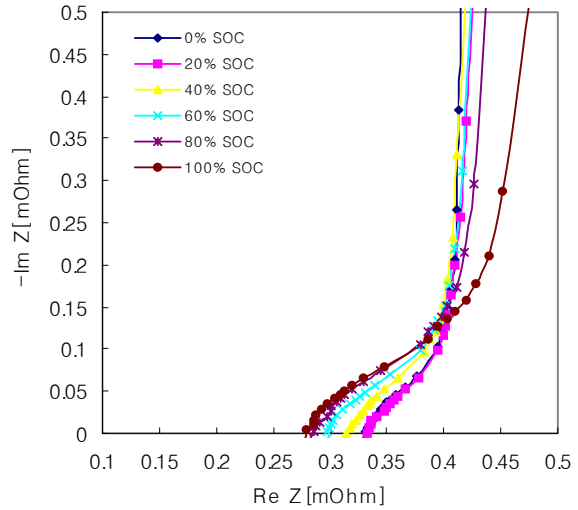


그림 6 Maxwell 슈퍼커패시터(2.7V 2600F)의 Impedance Nyquist Plot (0~100% SOC, 20°C)

Fig. 6 Impedance Nyquist Plot of the Maxwell supercapacitor (0~100% SOC, 20°C)

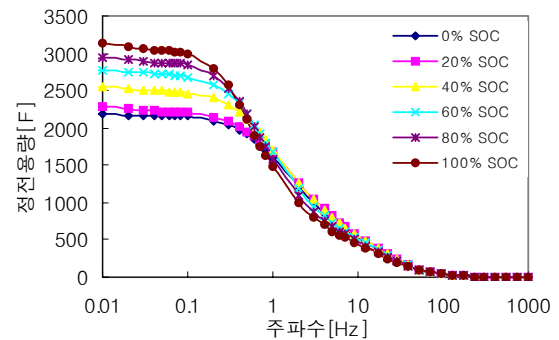


그림 7 Maxwell 슈퍼커패시터(2.7V 2600F)의 주파수 및 전압별 정전용량(20°C)

Fig. 7 Capacitance of the Maxwell supercapacitor (2.7V 2600F) at each frequency and SOC(20°C)

타나는 정전용량의 값이 상당히 달라지는 것을 확인할 수 있는데 이는 식 (2)에서 보인 Gouy-Champman 정전용량( $C_{GC}$ )의 영향이다.

### 3.2 SOC별 정전용량 커브피팅 결과

그림 7에서의 주파수 및 충전상태별 정전용량 그래프를 확인해 보면 0.01Hz에서는 더 이상 정전용량 값이 증가 하지 않고 일정한 값에 수렴하는 모습을 보이고 있으며 이를 토대로 그림 8과 같이 충전상태별 정전용량의 그래프를 도출할 수 있다.

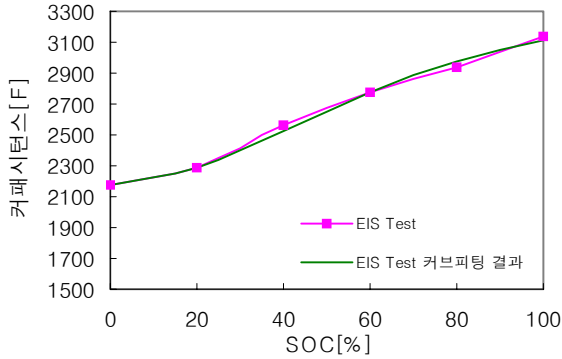


그림 8 Maxwell 슈퍼커패시터(2.7V 2600F)의 충전상태별 정전용량(0.01Hz, 20°C)

Fig. 8 Capacitance of the Maxwell supercapacitor (2.7V 2600F) at each SOC (0.01Hz, 20°C)

또한 각각의 충전상태에서 추출한 정전용량의 값은 식 (1)~(3)에 의해 식 (7)과 같이 전압( $\phi$ )에 연동되는 식으로 표현할 수 있다.

$$C_s = \left[ \frac{1}{C_H} + \frac{1}{\alpha \cosh(\beta\phi)} \right]^{-1} \quad (7)$$

여기서

$$\alpha = zFA \sqrt{\frac{2\epsilon c}{RT}}$$

$$\beta = \frac{zF}{2RT}$$

그림 8의 임피던스 분광법으로 얻어진 결과를 식 (7)을 이용하여 커브피팅 하면 식 (8)과 같이 슈퍼커패시터의 전압과 커패시턴스와의 관계식을 얻을 수 있다.

$$C_s = \left[ \frac{1}{3321} + \frac{1}{6355 \cosh(1.0162\phi)} \right]^{-1} R^2 = 0.995 \quad (8)$$

식(8)의 회귀분석으로 부터 얻어진 결정계수의 값 (99.5%)에서 Stern에 의해 제시된 모델이 EIS 실험을 통해 측정되어 계산된 정전용량과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 그림 8에서 보듯이 내부 충전 전하가 증가하여 전압이 높아질수록 커패시턴스가 커지는 것을 볼 수 있으며, 수식 (7)로부터 Datasheet에 표기된 정격 커패시턴스 값은 완전 방전 시 그 보다 18% 정도 작아지며 만충전 시에는 14% 정도 커짐을 알 수 있다. 이러한 SOC에 따른 정전용량의 변화는 실제 사용이나 다이내믹 시뮬레이션에 있어서 가장 많은 영향을 줄 수 있는 중요한 파라미터가 된다.

#### 4. Matlab/Simulink를 이용한 다이내믹 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 모델에서 방전 저항과 병렬 연결된 다공성 임피던스의 계산을 위해 쌍곡선 코탄젠트 함수로 표현되는 다공성 전극 임피던스를 식 (9)와 같이 라플라스 역변환을 통해 상수 및 지수함수의 합으로 나타내었다. 여기서, 상수항은 커패시터로, 지수 항들은 저항과 커패시터의 병렬회로로 변환될 수 있으므로, 다공성 전극의 임피던스는 그림 9와 같이 등가 변환될 수 있다.<sup>[18][19]</sup>

$$\sqrt{\left(\frac{R_e}{j\omega C_d}\right) \coth(\sqrt{j\omega C_d R_e})} \leftrightarrow \frac{1}{C_d} + \frac{2}{C_d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{R_e C_d} t} \quad (9)$$

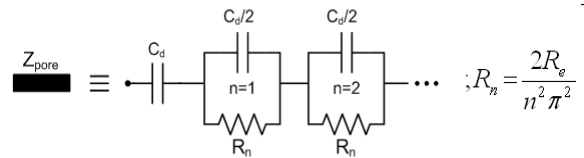


그림 9 다공질 전극의 등가 임피던스 모델

Fig. 9 Equivalent impedance model of the porous electrode

따라서, 제안된 슈퍼커패시터의 등가 임피던스 모델은 최종적으로 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

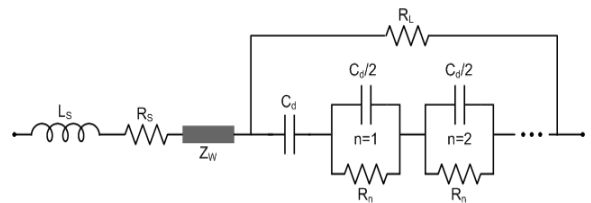


그림 10 슈퍼커패시터의 등가 임피던스 모델

Fig. 10 Equivalent impedance model of a supercapacitor

제안된 모델의 정확성과 유용함을 검증하기 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 그림 11과 같이 모델링한 슈퍼커패시터 등가회로를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에서는 그림 10에서 보인 등가 임피던스 모델에 슈퍼커패시터의 SOC별 파라미터를 적용하여 식 (10)과 같이 전류 함수와의 곱으로 응답전압을 얻을 수 있고, 주파수 영역에서의 응답 전압을 시간 영역의 응답 전압으로 변환하기 위해 식 (11)과 같이 합성곱(Convolution)을 적용하였다.<sup>[20]</sup>

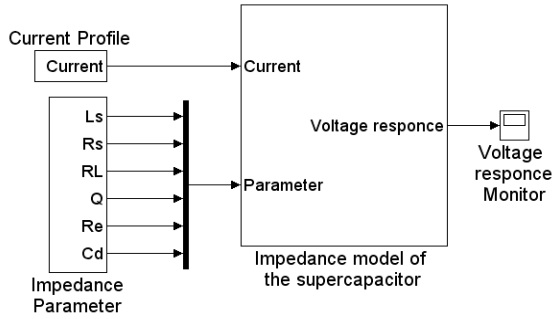


그림 11 Matlab/Simulink 구성도  
Fig. 11 Matlab/Simulink Block diagram

$$V(s) = I(s) \times Z(s) \tag{10}$$

$$v(t) = \int_0^t i(t-\tau) \cdot z(\tau) d\tau \tag{11}$$

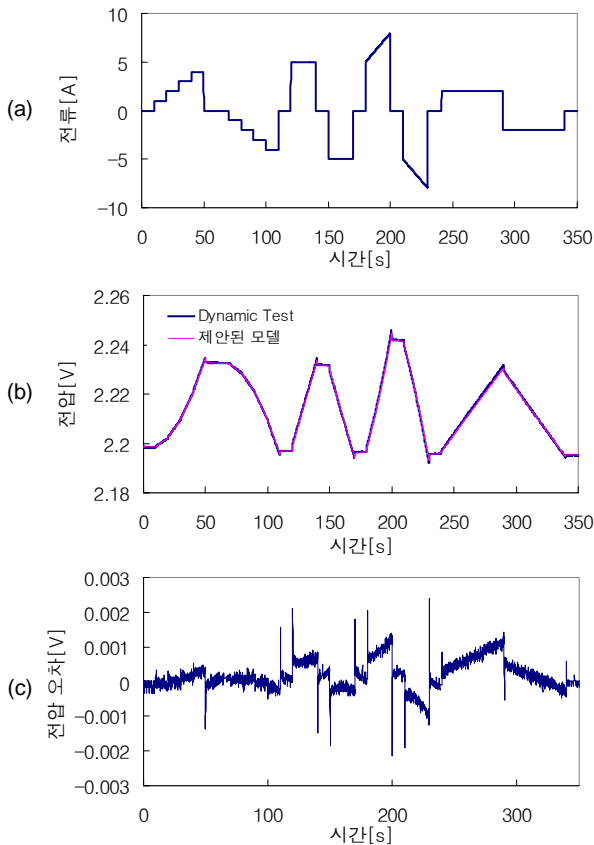


그림 12 부하 전류 변화에 따른 측정 전압과 시뮬레이션 전압의 비교  
Fig. 12 Comparison between measured voltage and simulated voltage due to load current change

그림 12의 (a)에는 시간에 따른 슈퍼커패시터의 계단 및 램프 형태의 충/방전 전류를 나타내며, 이는 NI사의 LabVIEW를 이용하여 구현된 신호를 양방향 전원 BP4610의 외부제어 단자에 입력함으로 구현되었고, 이때 슈퍼커패시터의 양단전압을 측정하여 그림 13의 (b)와 같은 응답전압을 얻을 수 있었다. 자연방전의 효과를 관찰하기 위해 부하전류 파형에서 총 70초 동안의 휴지 기간을 주었으며, Matlab/Simulink 시뮬레이션에도 같은 전류 파형을 적용시켜 결과를 얻어내고 실험결과와 비교하였다. 그림 (b)에서 보듯이 제안된 모델은 슈퍼커패시터의 동특성뿐 아니라 자연방전의 효과까지 완벽하게 추종하는 모습을 보이고 있다. 실험결과와 시뮬레이션의 차이 값은 그림 12의 (c)에서 보듯이 최대 3[mV] 이내임을 알 수 있다.

그림 13에서는 구형파로 슈퍼커패시터를 충/방전 하였을 경우 순간적인 전압의 변화 및 동특성을 실험을 통해 측정된 후 시뮬레이션 결과와 비교해 보았다.

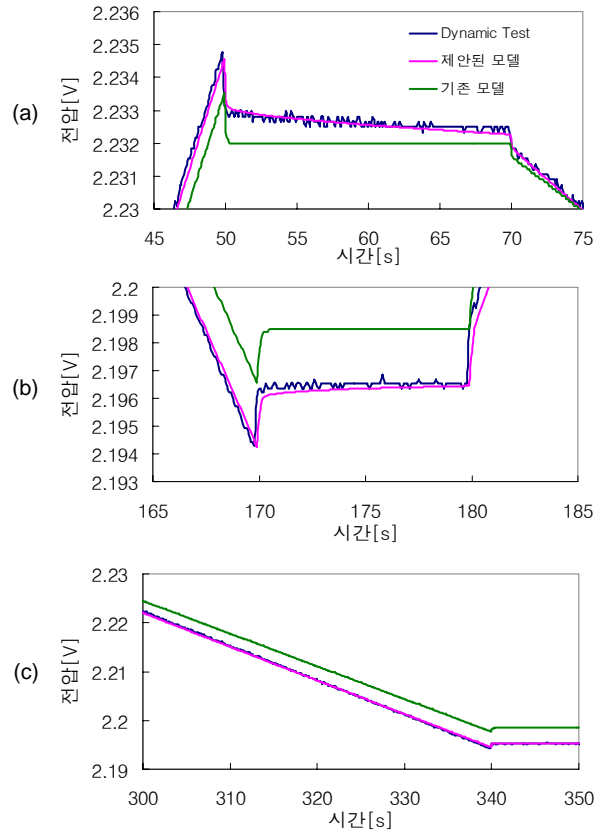


그림 13 기존 모델과 제안된 모델의 시뮬레이션 결과와 측정결과와의 비교  
Fig. 13 Comparison between simulation results with conventional and proposed model and experiments

그림 13의 (a)와 (b)에서 보듯이 충전과 방전 모두의 경우에서 제안된 모델의 시뮬레이션 결과가 실험 파형을 좀 더 근사하게 추종하고 있음을 볼 수 있다.

또한, 그림 13의 (c)에서 보듯이 350초 동안 계속된 실험에서 자연방전을 고려하지 않은 기존 모델을 이용해 계산된 전압은 오차가 누적되어 커지는 반면 제안된 모델은 거의 오차 없이 정확하게 실험치를 추종함을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 모델이 슈퍼커패시터의 다공성 전극 및 전해질 내에서의 이온의 움직임과 확산 및 누설전류에 의한 자연 방전현상을 더욱 잘 표현하므로 기존의 모델보다 슈퍼커패시터의 동특성을 설명하는데 더욱 적합함을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 슈퍼커패시터의 내부구조 및 화학반응 현상에 근거한 새로운 등가 임피던스 모델을 제안하고 이를 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 제안된 모델은 슈퍼커패시터의 다공성 전극의 등가 임피던스뿐만 아니라 이온의 확산현상에 의한 와버그 임피던스 및 누설전류에 의한 누설저항까지 모델링하여 기존 모델 보다 우수한 동특성 모사 성능과 정밀한 추종 특성을 나타내었다.

제안된 모델링 및 시뮬레이션 방법은 다양한 종류의 슈퍼커패시터 모듈의 모델링에 적용되어 정확한 슈퍼커패시터 모듈의 동특성을 예측할 수 있게 해줄 뿐 아니라 경제적이며 효율적인 고성능 전력변환기 및 시스템의 설계에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2008-3)주관으로 수행된 과제임.

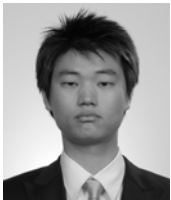
## 참 고 문 헌

- [1] Aurelien Du Pasquir, Irene Plitz, Serafin Menical, Glenn Amatucci, "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 115, pp. 171-178, 2003.
- [2] J.N. Marie Francoise, H. Gualous, R. Outbib, A. Berthon, "42V Power Net with supercapacitor and battery for automotive applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 143, pp. 275-283, 2005.
- [3] Eugenio Faggioli, Piergeorgio Rena, Veronique Danel, X. Andrieu, Ronald Mallant, Hans Kahlen, "Supercapacitors for the energy management of electric vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 84, pp. 261-269, 1999.
- [4] Phatiphat Thounthong, Sthpane Rael, Bernard Davat, "Fuel Cell and Supercapacitors for Automotive Hybrid Electrical System", *ECTI Transactions on Electrical ENG.*, Vol. 3, 2005.
- [5] R. Faranda, M. Gallina and D.T. Son, "A new simplified model of Double-Layer Capacitors", *IEEE*, 2007.
- [6] Luis Zubieta, Richard Bonert, "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 36, No. 1, 2000.
- [7] R. De Levie, "Electrochemical Response of Porous and Rough Electrodes", *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*, Vol. 6, 1967.
- [8] S. Buller, E. Karden, D. kok, De Doncker, "Modeling the Dynamic Behavior of Supercapacitors Using Impedance Spectroscopy", *IEEE*, Vol. 38, No. 6, 2002.
- [9] B.E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Principles and Technological Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
- [10] F. Belhachemi, S. Rael, B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors", *IEEE-IAC*, Vol. 5, pp. 3069-3076, 2000.
- [11] 백운기, 박수문, 전기화학, 청문각, 2007
- [12] B.W. Ricketts, C. Ton-That, "Self-discharge of carbon-based supercapacitors with organic electrolytes", *Journal of Power Sources*, Vol. 89, pp. 64-69, 2000.
- [13] B.E. Conway, W.G. Pell, T-C. Liu, "Diagnostic analysis for mechanisms of self-discharge of electrochemical capacitors and batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 65, pp. 53-59, 1997.
- [14] J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, "Complex plane analysis of pn junction forward-voltage impedance", *IEEE Electronics Letters*, Vol. 33, No. 10, 1997.
- [15] 이주형, 최우진, "전기화학적 전력기기의 모델링을 위한 저가형 임피던스 분광 시스템의 개발", *전력전자학회 논문지*, Vol. 13, No. 1, pp. 46-54, 2008, Feb.
- [16] J.R. Macdonald, "Impedance Spectroscopy", A John Wiley & Sons, Inc. Publication 1987.
- [17] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, A. Berthon, "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling", *Journal of Power Sources*, Vol. 165, pp. 928-934, 2007.



- [18] P. Mauracher, "Modellbildung und Verbundoptimierung bei Elektrostraßenfahrzeugen", JPh.D. dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Germany, 1996.
- [19] Murray R. Spiegel, Laplace Transform, 1965.
- [20] A. Salkind, T. Atwater, P. Singh, S. Nelatury, S. Damodar, C. Fennie Jr, D. Reisner, "Dynamic characterization of small lead-acid cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 96, pp. 151-159, 2001.

## 저 자 소 개



### **김상현(金尙鉉)**

1981년 7월 14일생. 2008년 숭실대 전기공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



### **이교범(李敎範)**

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학박). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



### **최세완(崔世琿)**

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 미국 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 교수. 당 학회 국제이사.



### **최우진(崔宇鎭)**

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