고출력/저온 방전을 위한 리튬전지와 슈퍼캐패시터 하이브리드 셀의 방전 거동 특성 연구

장 우 진¹⁾ · 홍 승 철¹⁾ · 홍 정 표¹⁾ · 황 태 선¹⁾ · 오 준 석¹⁾ · 고 성 연³⁾ · 이 가 은³⁾ · 안 균 영⁵⁾ ·
김 현 수³⁾ · 서 종 환⁴⁾ · 남 재 도^{*2)}

성균관대학교 고분자공학과¹⁾ · 성균관대학교 에너지과학과²⁾ · 성균관대학교 기계공학과³⁾ ·
델라웨어대학교 기계공학과⁴⁾ · 현대자동차 배터리시스템설계팀⁵⁾

Performance Characteristics of Li-ion Battery and Supercapacitor Hybrid Cell for High Power / Low Temperature Discharge

Woojin Jang¹⁾ · Seung-Chul Hong¹⁾ · Jung-Pyo Hong¹⁾ · Taeseon Hwang¹⁾ · Joon-Suk Oh¹⁾ ·
Sungyeon Ko³⁾ · Gaeun Lee³⁾ · Kyunyoung Ahn⁵⁾ · Hyunsoo Kim³⁾ · Jonghwan Suhr⁴⁾ · Jae-Do Nam^{*2)}

¹⁾Polymer Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

²⁾Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, DE 19716, USA

⁵⁾Battery System Engineering Design Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si,
Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 16 January 2013 / Revised 28 March 2013 / Accepted 27 May 2013)

Abstract : In this study, we fabricated a parallelly connected Li-ion battery/supercapacitor hybrid cell to combine the advantageous characteristics of Li-ion battery and supercapacitor, high energy density and high power density, respectively, and investigated its discharging characteristics over a wide temperature range from -40 to 25°C. At the initial state of discharging of the hybrid cell, the power was mostly provided by the supercapacitor and then the portion of the Li-ion battery was gradually increased. By installing a switching system into the hybrid cell, which controls the discharging sequence of Li-ion battery and supercapacitor, the maximum power was improved by 40% compared with non switching system. In addition at low temperatures, the power and discharging time of the hybrid cell were significantly enhanced compared to a battery-alone system. The hybrid cell is expected to be applied in electric vehicles and small domestic appliances that require high power at initial discharging state.

Key words : Li-ion battery(리튬전지), Supercapacitor(슈퍼캐패시터), Parallel circuit(병렬회로), Electric vehicle(EV, 전기자동차), Hybrid cell(하이브리드 셀)

Nomenclature

J/kg : joule per kilogram

W/kg : watt per kilogram

A : ampere

mΩ : miliohm

V : voltage

W : watt

mAh : miliampere hour

F : farad

Subscript

*Corresponding author, E-mail: jdnam@skku.edu

(+), (-) : anode, cathode

1. 서 론

20세기 후반부터, 석유를 에너지원으로 사용한 내연기관 자동차의 환경적인 문제와 한정적인 에너지 자원으로 인한 문제를 극복하기 위해서 리튬전지, 연료전지, 태양전지, 수소전지 등을 이용한 전기 자동차에 대한 관심이 증폭되고 있다.¹⁾ 특히, 그들 중에서 리튬전지는 10^5 J/kg의 높은 에너지밀도를 지니고 있고, 지속적으로 일정한 전력을 제공할 수 있어 이를 이용한 전기 자동차의 개발이 두드러지고 있다.^{2,3)} 고용량의 리튬전지를 만들기 위해서 전극의 물성, 분리막의 투과성, 전해질의 이동성, 집전체의 계면특성 등을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{4,6)} 하지만, 전기자동차의 구동 초기 또는 급가동 등의 상황에서 높은 전력이 필요하기 때문에 전원장치의 초기 전력을 높여 줄 필요성이 있다.⁷⁾ 또한, -10°C 이하의 온도에서는 방전 시간이 크게 감소하는 문제점 등을 가지고 있다.⁸⁾

반면에, 슈퍼캐패시터는 빠른 충전과 방전 거동을 나타내며 $\sim 10^6$ W/kg의 높은 출력 밀도를 지니며 저온 조건에서도 특유의 방전특성을 유지할 수 있다는 장점이 있다.⁹⁾ 하지만, 슈퍼캐패시터는 낮은 에너지 밀도를 가지고 있어 단독으로 전기자동차의 저장장치로 사용되기에는 한계를 갖고 있다.¹⁰⁾

기존의 연구에서는 리튬전지의 낮은 출력밀도를 향상시키기 위해 전극에 silicon crystalline-amorphous core shell을 이용하거나 lithium mangante oxide (LiMn_2O_4) nano wire를 이용해 빠른 충/방전이 가능하게 하거나, 슈퍼캐패시터의 낮은 에너지밀도를 향상시키기 위해 전극에 그래핀(Graphene)이나 루테늄(Ruthenium)을 사용해 단위용량을 증가시키기도 하였다.¹¹⁻¹⁴⁾ 하지만, 최근 들어 높은 에너지밀도와 높은 출력밀도를 동시에 만족시켜야 하는 에너지 저장장치의 요구가 늘어나고 있고, 단일 셀만으로는 이를 만족시키는 데에 한계가 있다. 그래서 우리는 단일 셀의 방전특성을 향상시키는 것과는 달리 슈퍼캐패시터를 리튬전지와 병렬 연결하여 하이브리드 셀을 구성하고, 방전특성을 연구하였다. 이 하이브리드 셀은 슈퍼캐패시터의 높은 출력밀도와 리튬전지의 높은 에너지밀도를 동시에 갖출 수 있을 것으로 기대된다. 더 나아가 하이브리드 셀 내부

에 스위치를 장착하고 초기방전을 제어하여 출력을 높이는 방법을 제안하였다. 또한, 자가충전 실험을 통해 셀이 스스로 전위를 회복하는 것을 확인하였고, 저온실험을 통해 -20°C 이하의 저온조건에서도 셀이 방전이 가능한 것을 확인하였다.

2. 리튬전지 / 슈퍼캐패시터 하이브리드 셀의 제작

리튬전지는 리튬산화물과 탄소재료 이루어진 전극을 사용하며, 폴리올레핀(Polyolefin) 계열의 다공성 분리막과 Lithium hexafluorophosphate (LiPF_6)를 전해질로 사용하는 2,600 mAh의 원통형 전지(LG화학)를 사용했으며, 슈퍼캐패시터는 탄소재료 이루어진 전극과 유기 전해질을 사용하는 360 F 용량의 원통형 Electric double layer capacitor (EDLC, Nesscap)를 사용했다.

Fig. 1은 병렬구조를 갖는 하이브리드 셀의 대략적인 모식도이다. 리튬전지는 LiB로 표시하고, 슈퍼캐패시터는 Scap, 이렇게 구성된 하이브리드 셀은 Hybrid로 표시하였다. 또한 리튬전지, 슈퍼캐패시터, 하이브리드 셀에 연결된 전압계를 각각 V_B , V_S , V_H 로 전류계를 각각 A_B , A_S , A_H 로 나타냈다. 그리고 A_B , A_S 에서 측정된 전류는 각각 I_B , I_S 로 나타났다. 리튬전지를 충전하고 회로 내의 쇼트를 방지하기 위해서 슈퍼캐패시터를 직렬로 두 셀을 연결해

Fig. 1 Schematic of Li-ion battery/supercapacitor hybrid cell in which Li-ion battery cell was connected parallel to supercapacitor module

서 전위를 맞춰주었다. 그 후에 리튬전지와 슈퍼캐패시터를 병렬로 연결하여 하이브리드 셀을 구성하였다.

3. 하이브리드 셀의 특성분석

구성한 하이브리드 셀을 Wonatech사의 WBCS 3000HP 고전류형 충/방전기를 이용하여 정 전류로 방전을 시켰다.

Table 1 Information of Li-ion battery and supercapacitor unit cell

	리튬전지	슈퍼캐패시터
최대용량	2600 mAh	360 F
최대전압	4.2 V	2.7 V
최대전류	5.2 A	226 A
제조사	LG화학	Nesscap
module 구성	1 cell	2 cell

3.1 리튬전지 단일 셀 방전 특성

하이브리드 셀을 구성하기에 앞서 구성요소인 리튬전지의 특성을 파악하기 위해서 리튬전지의 단위 셀 방전 특성을 확인하고 방전초기에 나타나는 IR drop을 이용하여 내부저항을 측정하였다. 리튬전지는 4.1 V까지 충전하여 각각 3, 5, 7 A (1, 2, 3 C-rate)의 정 전류로 2.2 V까지 방전을 하였다.

Fig. 2(a)는 리튬전지를 3, 5, 7 A의 정 전류로 방전하고 전위변화를 시간에 대해 나타낸 그래프이다. 리튬전지를 3 A로 방전을 하면 500 ~ 2,000 s 까지 비교적 일정한 전위를 유지하는 구간이 보이며 이는 리튬전지의 고유한 방전특성이다.³⁾ 2.2 V까지 방전하는데 소모되는 시간은 총 2,670 초이다. 5 A로 방전을 시키게 되면 일정한 전위를 유지하는 구간이 나타나며 방전시간은 총 1,613 초가 소모된다. 7 A로 방전을 시키게 되면 리튬전지의 일정한 전위를 유지하는 구간이 나타나지 않으며, 방전하는 데에 걸리는 총 시간은 1,118 초이다. Fig. 2(b)는 리튬전지를 방전하는 도중 10초간 방전을 중단했다 다시 방전을 시작할 때 나타나는 전압 강하를 보여주는 그래프이다. 리튬전지의 내부저항은 방전시작과 동시에 발생하는 IR drop을 이용해서 측정하였다. 각각 3, 5, 7 A로 방전 시 발생하는 전위손실을 이용해

(a)

(b)

Fig. 2 Discharge voltage profiles of the Li-ion battery at current of 3, 5, 7 A (a), and IR drop of Li-ion battery at cut-off the circuit during 10 s (b)

Table 2 Internal resistances of Li-ion battery with each current

전류 (A)	3	5	7
내부저항 (mΩ)	93	93	93

서 역으로 전원장치가 가지고 있는 내부저항을 계산해 낼 수 있었다. Table 1에서 보이는 것처럼 리튬전지는 방전전류가 높아져도 93 mΩ로 내부저항이 일정한 것을 알 수 있었다.

3.2 슈퍼캐패시터 단위 셀 방전 특성

슈퍼캐패시터의 특성을 파악하기 위해서 슈퍼캐패시터의 단위 셀 방전 특성을 확인하고 방전초기에 나타나는 IR drop을 이용하여 내부저항을 측정하였다. 슈퍼캐패시터는 2.7 V로 충전하여 각각 3, 5, 7 A의 정 전류로 0 V까지 방전을 하였다.

Fig. 3(a)는 슈퍼캐패시터를 3, 5, 7 A의 정 전류로 방전하고 전위변화를 시간에 대해 나타낸 그래프이

Fig. 3 Discharge voltage profiles of the supercapacitor at current of 3, 5, 7 A, (a) and IR drop of supercapacitor at cut-off the circuit during 10 s (b)

Table 3 Internal resistances of supercapacitor with each current

전류 (A)	3	5	7
내부저항 (mΩ)	16	19	22

다. 슈퍼캐패시터를 3 A로 방전을 하면 시간이 지남에 따라 일정한 기울기로 전위가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 슈퍼캐패시터의 고유한 방전 특성이다.⁹⁾ 0 V까지 방전하는 데 소모되는 시간은 총 329 초이다. 5 A로 방전을 시키게 되면 방전시간은 총 187 초가 소모되고, 7 A로 방전을 시키게 되면 방전하는 데에 걸리는 총 시간은 142 초가 된다. Fig. 3(b)는 슈퍼캐패시터를 방전하는 도중 10초간 방전을 중단했다 다시 방전을 시작할 때 나타나는 전압강하를 보여주는 그래프이다. 슈퍼캐패시터의 내부저항은 배터리와 마찬가지로 방전 시작과 동시에 발생하는 IR Drop을 이용하여 측정하였다. 각각 3, 5, 7 A로 방전 시 발생하는 전위손실을 이용해서 역

으로 전원장치가 가지고 있는 내부저항을 계산해 낼 수 있었다. 위 Table 2에서 보이는 것처럼 슈퍼캐패시터는 방전전류가 높아지면 16, 19, 22 mΩ으로 내부저항이 일정하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 반면에, 배터리는 고유의 방전특성을 잃어버렸던 7 A의 방전전류에서도 고유의 방전특성을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 하이브리드 셀 방전특성

리튬전지와 직렬로 연결된 슈퍼캐패시터에 모두 4.1 V로 충전하여 전위를 맞춘 후 하이브리드 셀을 구성하고 3 A로 방전을 시킬 때 나타나는 시간에 따른 방전 특성을 확인하였다. 회로 내 저항으로 인한 IR Drop으로 초기전압은 3.9 V로 나타난다.

Fig. 4(a)는 하이브리드 셀의 3 A 방전 시 시간에 따른 각 구성요소의 전위 변화를 보여주는 그래프이다. 방전 초기에는 슈퍼캐패시터 쪽에서 더 많은 양의 전위 손실이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 슈퍼캐패시터의 내부저항이 리튬전지의 내부저항에 비해서 낮기 때문에 방전 초기에 슈퍼캐패시터 쪽에서 더 많은 양의 전류를 방전하기 때문이다. Fig. 4(b)는 이를 확인하기 위해서 측정한 시간에 따른 전류변화를 나타낸 그래프이다. 방전이 시작됨과 동시에 슈퍼캐패시터 쪽에서 먼저 2 A 정도의 전류를 부하 쪽으로 방전하는 것을 확인할 수 있다. 방전 시작 후 약 12 초 정도가 지나면 슈퍼캐패시터의 방전전류가 리튬전지의 방전전류와 교차되고, 이후 대부분의 방전을 리튬전지가 담당하게 된다. Fig. 4(c)는 측정한 전압과 전류를 이용해서 계산한 전력을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 전체 하이브리드 셀의 전력곡선은 리튬전지를 단독으로 사용했을 때와 비슷한 모양을 나타내지만, 하이브리드 셀 내부의 슈퍼캐패시터와 리튬전지 각 셀의 전력곡선을 분석해 보면 방전 초기엔 전체 전력의 대부분을 슈퍼캐패시터가 담당하게 되고, 시간이 지나면서 리튬전지가 전체 전력의 대부분을 담당하게 된다는 것을 확인할 수 있다.

전기자동차를 운행하는 중에는 반복적으로 구동과 제동을 하게 되고, 이는 곧 전기자동차의 전원에 비교적 짧은 시간에 높은 전력을 요구하게 된다.⁸⁾ 하이브리드 셀은 방전 초기에는 슈퍼캐패시터가 대

Fig. 4 Discharge performances of Li-ion battery and supercapacitor units in hybrid cell with discharging current of 3 A. (a) Discharging voltage curves (b) Discharging current curves (c) Discharging power curves

부분의 전력을 공급하게 되므로 리튬전지에 가해지는 부하를 줄일 수 있게 된다. 이를 통해 리튬전지의 수명연장을 기대할 수 있다.¹⁵⁻¹⁸⁾

3.4 스위치를 도입하여 초기방전을 제어할 수 있는 하이브리드 셀

방전 초기에 방전되는 전력을 향상시키기 위해서 하이브리드 셀 내부의 리튬전지 쪽에 스위치를 연

Fig. 5 Schematic of Li-ion battery/supercapacitor hybrid cell with switching system which was installed at Li-ion battery to control the discharging sequence

결하여 초기방전을 제어할 수 있는 회로를 구성하였다. 회로 내 쇼트를 방지하기 위해서 슈퍼캐패시터와 리튬전지의 전위를 맞춰주었던 스위치가 없는 경우의 하이브리드 셀과 비교하여 스위치를 도입한 하이브리드 셀은 슈퍼캐패시터의 초기 전압을 더 높일 수 있기 때문에 방전초기에 더 높은 출력을 얻을 수 있다.

리튬전지와 직렬로 연결된 슈퍼캐패시터에 모두 4.1 V로 충전하여 전위를 맞춘 후 스위치가 연결된 하이브리드 셀을 구성하고 3 A로 방전을 시킬 때 나타나는 시간에 따른 방전 특성을 확인하였다. 회로 내 저항으로 인한 IR Drop으로 리튬전지의 초기전압은 4.0 V로 나타난다.

Fig. 5는 스위치를 도입하여 방전시간을 제어할 수 있는 하이브리드 셀의 대략적인 모식도이다. 리튬전지 쪽의 스위치는 열어두고 방전을 시작하다가 슈퍼캐패시터와 리튬전지의 전위가 같아지면 리튬전지 쪽의 스위치를 닫아서 슈퍼캐패시터와 동시에 방전을 하도록 제어하였다. 이때는 슈퍼캐패시터와 리튬전지가 병렬연결된 Fig. 1의 구성으로 변환된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 스위치를 도입한 하이브리드 셀의 3 A 방전 시 시간에 따른 전위 변화를 보여주는 그래프이다. 초기에 리튬전지의 스위치가 열려있는 상태

Fig. 6 Discharge performances of Li-ion battery and super-capacitor units in hybrid cell which was installed switch with discharging current of 3 A. a) Discharging voltage curves b) Discharging current curves c) Discharging power curves d) Discharging power curves at 0 - 150 s

이므로 슈퍼캐패시터 쪽에서만 방전을 하게 된다. 스위치를 닫아주는 시간은 90초이며 그 이후로는 리튬전지도 함께 방전을 하게 되어 Fig. 4에서 보여준 스위치가 없는 경우의 하이브리드 셀과 같은 방전 곡선이 나타나게 된다. Fig. 6(b)는 시간에 따른 전류변화를 나타낸 그래프이다. 90초까지는 슈퍼캐패시터가 3 A 전부를 방전하다가 스위치를 닫은 시점부터 리튬전지 쪽에서 방전이 시작되고 서서히 방전전류가 증가하다가 그 후엔 리튬전지가 모든 방전 전류를 담당하게 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 측정된 전압과 전류를 이용해서 계산한 시간에 따른 전력변화를 나타낸 그래프이다. switch는 스위치를 도입한 하이브리드 셀의 전력을 나타내며, hybrid는 스위치가 없는 경우의 하이브리드 셀의 전력을 나타낸다. Fig. 6(d)의 방전 초기를 확대한 그래프에서 보이듯이 스위치가 없는 경우의 하이브리드 셀과 비교해 봤을 때 초기 전력이 11.5 W에서 16 W로 40% 높아진 것을 확인할 수 있다. 초기엔 슈퍼캐패시터가 대부분의 전력을 담당하다가 스위치를 닫으면 리튬전지의 전력이 서서히 증가하여 이후 10 W 정도의 일정한 전력을 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다.

이를 통해서 구동 초기에 높은 전력을 필요로 하는 전기자동차에 전원으로 사용하기에 적합하며, 스위치를 닫은 후에는 하이브리드 셀의 방전특성을 나타내기 때문에 지속적인 전력 공급이 가능하다는 것을 알 수 있다.

3.5 자가 충전 실험

리튬전지는 방전이 끝난 후 잃어버렸던 전위를 스스로 일정량 회복하는 특성을 지닌 반면에 슈퍼캐패시터는 잃어버린 전위를 스스로 회복하지 못하는 특성을 지니고 있다.¹⁹⁾ 하이브리드 셀의 경우 방전이 끝나고 잃어버렸던 전위를 다시 회복하는 지를 확인하기 위하여 5분 동안 방전한 후에 5분 동안 부하를 제거하고 하이브리드 셀의 전위회복 특성을 관찰하였다.

Fig. 7은 자가 충전에 의한 하이브리드 셀 내부의 리튬전지와 슈퍼캐패시터의 시간에 따른 전위 변화를 보여주는 그래프이다. 방전 시작 5분 후 부하가

Fig. 7 Self recharging characteristics for Li-ion battery and supercapacitor units of hybrid cell

Fig. 8 Discharging voltage curves for Li-ion battery, supercapacitor and hybrid cell at -20°C (a), and for hybrid cell at various temperature ranging from -40°C to 25°C

제거되면 리튬전지가 5분에 걸쳐 3.95 V까지 서서히 전위를 회복하는 것을 확인할 수 있다. 이 과정에서 슈퍼캐패시터와 발생하는 전위차로 인하여 병렬 회로를 통해 슈퍼캐패시터 쪽으로 전류를 흘려주고 스스로 전위를 회복할 수 없는 슈퍼캐패시터가 전위를 회복하는 것을 확인할 수 있다. 초기 전위를 기준으로 방전하여 감소된 전위의 80%까지 회복하는데 걸리는 자가 충전 시간은 420 초이며, 90%까지 회복하는 데 걸리는 자가 충전 시간은 600 초이다.

이를 통해 하이브리드 셀은 스스로 전위를 회복할

수 있게 되고 결과적으로 하이브리드 셀의 충전에 필요한 전력을 감소시켜 경제적으로 효과적이다.²⁰⁾

3.6 저온 실험

리튬전지는 저온에서 방전 특성이 현저히 낮아지기 때문에 겨울철이나 극한지역에서는 전기자동차의 전원장치로 쓰이기에는 문제점이 있다.⁸⁾ 반면에, 슈퍼캐패시터는 저온에서도 고유의 방전특성을 유지하며 방전 할 수 있다.⁹⁾ 하이브리드 셀의 저온에서의 방전특성을 확인하기 위하여 High-Speed Temperature/Humidity Test Chamber (540 FCH 80/4, Servathin)를 이용하여 각각 -40 , -30 , -20 , -10 , 0 , 25°C 에서 방전 시키고 각각의 방전시간을 분석하였다.

Fig. 8(a)는 -20°C 에서 5 A로 방전했을 때 리튬전지, 슈퍼캐패시터, 하이브리드 셀의 시간의 따른 전위 변화를 나타낸 그래프이며, 리튬전지와 슈퍼캐패시터의 그래프는 각 단위 셀의 전위변화를 나타낸다. 리튬전지는 방전 초기에 급격히 높아진 내부 저항으로 인해서 큰 폭의 IR drop이 발생하고 상온에 비해서 매우 낮아진 초기 전위를 나타낸다. 반면에, 슈퍼캐패시터는 상온과 같은 전위변화를 나타낸다. 하이브리드 셀은 상온에 비해서 총 방전시간은 짧아지지만 슈퍼캐패시터로 인해 상온에서와 같은 초기 전위를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 각 온도별로 측정한 하이브리드 셀의 시간에 따른 전위변화를 나타낸 그래프이다. 상온에서는 4.1 V부터 2.2 V까지 용량이 2643 mAh로, 0°C 에서는 1325 mAh, -10°C 에서는 1313 mAh, -20°C 에서는 925 mAh, -30°C 에서는 233 mAh, -40°C 에서는 140 mAh로 나타난다. 온도가 낮아짐에 따라 용량이 지속적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 특히 -20°C 보다 낮은 온도에서는 일정한 전위를 유지하는 특유의 방전구간이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 리튬전지의 전해질인 LiPF_6 의 전도도가 저온에서는 급격하게 감소하기 때문이다.⁸⁾ 하지만, 슈퍼캐패시터는 고유의 방전특성을 유지하며 하이브리드 셀이 방전을 할 수 있도록 만들어 주고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 비교적 짧은 시간 동안 방전이 가능하기 때문에 전기자동차의 구동을 가능하게 해준다.

4. 결 론

이 연구에서는 리튬전지와 슈퍼캐패시터를 병렬로 연결한 하이브리드 셀을 구성하고 방전특성을 분석하였다. 이를 리튬전지 및 슈퍼캐패시터 단위 셀의 방전특성과 비교하고 전력을 향상시키는 방법과 저온특성 등을 분석하였다.

스위치를 달아 초기방전을 제어하면 방전 초기에 전력을 40% 향상시킬 수 있었고, 자가 충전 실험을 통해서 하이브리드 셀이 스스로 전위를 회복하는 것을 확인하였으며 그로인해 충전에 필요한 전력소모를 줄여 경제성이 있다는 것을 확인하였다. 마지막으로 저온에서의 방전특성을 확인하여 -20°C 이상에서는 리튬전지와 비교하여 더 높은 전력을 제공하고 -20°C 이하에서도 비교적 짧은 시간이지만 방전이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, 기존의 리튬전지만을 사용하는 전기자동차에 비해서 슈퍼캐패시터를 병렬로 연결한 하이브리드 셀을 사용하게 되면 높은 출력을 제공할 수 있고 저온에서도 전기자동차의 구동이 가능하도록 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 더 나아가 전기자동차 뿐만 아니라 전원의 on/off가 잦은 소형전자기기 등에서도 방전 초기에 높은 전력을 제공할 수 있어 효과적인 전원장치로 제공될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 한국연구재단을 통한 세계수준의 연구중심대학(World Class University) 육성사업(R31-2008-10029)과 연구지원금(2010-0028939)을 통한 연구 지원을 받았으며, 또한 성균관대학교 내 경기도지역협력 연구센터(GRRC)를 통한 연구 및 장비 지원과 현대자동차를 통한 연구 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) Y. Hori, Y. Toyoda and Y. Tsuruoka, "Traction Control of Electric Vehicle: Basic Experimental Result Using the Test EV 'UoT Electric March'," IEEE Transactions on Industry Appli-

- cations, Vol.34, No.5, pp.1131-1138, 1998.
- 2) A. D. Pasquier, I. Plitz, S. Menocal and G. Amatucci, "A Comparative Study of Li-ion Battery, Supercapacitor and Nonaqueous Asymmetric Hybrid Devices for Automotive Applications," Journal of Power Sources, Vol.115, No.1, pp.171-178, 2003.
- 3) G. Sikha, R. E. White and B. N. Popov, "Performance Studies of Li-ion Battery-super Capacitor Hybrid Systems," The Electrochemical Society, Abs. 204th Meeting, 2003.
- 4) G. Ning, B. Haran and N. Popov, "Capacity Fade Study of Lithium-ion Batteries Cycled at High Discharge Rates," Journal of Power Sources, Vol.117, No.1-2, pp.160-169, 2003.
- 5) K. Min, M. Lee, J. Son and J. Lee, "Rheology as a Powerful Tool for Industrial Material Development," Korea-Australia Rheology Journal, Vol.22, No.1, pp.1-10, 2010.
- 6) I. Ozen, C. Rustal, K. Dirnberger, H. Fritz and C. Eisenbach, "Flow Induced Surface Enrichment of Poly(Ethylene-block-ethylene Oxide) on Polypropylene by Capillary Rheometer," Korea-Australia Rheology Journal, Vol.23, No.1, pp.33-40, 2011.
- 7) A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi and C. Tassoni, "Battery Choice and Management for New-generation Electric Vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.52, No.5, pp.1343-1349, 2005.
- 8) K. Tikhonov and R. Koch, Li-ion Battery Electrolytes Designed for a Wide Temperature Range, Technical Report; Covalent Associates, Inc., Woburn, Ma, USA, 2006.
- 9) J. Jeong, H. Lee, C. Kim, H. Choi and B. Cho, "A Development of an Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitor," The 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electronic Vehicle Symposium & Exhibition, pp.1379-1389, 2002.
- 10) G. Sikha, R. E. White and B. N. Popov, "A Mathematical Model for a Lithium-ion Battery/Electrochemical Capacitor Hybrid System," Journal of the Electrochemical Society, Vol.152, No.8, pp.1682-1693, 2005.

- 11) L. Cui, R. Ruffo, C. K. Chan, H. Peng and Y. Cui, "Crystalline-amorphous Core-shell Silicon Nanowires for High Capacity and High Current Battery Electrodes," *Nano Letters*, Vol.9, No.1, pp.491-495, 2009.
- 12) E. Hosono, T. Cudo, I. Honma, H. Matsuda and H. Zhou, "Synthesis of Single Crystalline Spinel LiMn_2O_4 Nanowires for a Lithium Ion Battery with High Power Density," *Nano Letters*, Vol.9, No.3, pp.1045-1051, 2009.
- 13) C. Liu, Z. Yu, D. Neff, A. Zhamu and B. Z. Jang, "Graphene-based Supercapacitor with an Ultrahigh Energy Density," *Nano Letters*, Vol.10, No.12, pp.4863-4868, 2010.
- 14) J. M. Miller, B. Dunn, T. D. Tran and R. W. Pekala, "Deposition of Ruthenium Nanoparticles on Carbon Aerogels for High Energy Density Supercapacitor Electrodes," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.144, No.12, pp.L309-L311, 1997.
- 15) P. A. Nelson and J. R. Owen, "A High-performance Supercapacitor/Battery Hybrid Incorporating Templated Mesoporous Electrodes," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.150, No.10, pp.1313-1317, 2003.
- 16) G. Lee, S. Ko, S. Hong, K. Ahn, J. Nam and H. Kim, "Development of Control Strategy and Performance Verification for Battery/Supercapacitor Hybrid ESU in Room and Low Temperatures," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.2622-2627, 2011.
- 17) B. J. Arnet and L. P. Haines, "Combining Ultracapacitors with Lead-acid Batteries," 17th International Electric Vehicle Symposium, Paper 2B-2, 2000.
- 18) A. F. Burke and M. Miller, "Update of Ultracapacitor Technology and Hybrid Vehicle Applications: Passenger Cars and Transit Buses," 18th International Electric Vehicle Symposium, Paper PP044, 2001.
- 19) E. M. Genies, P. Hany and Ch. Santier, "A Rechargeable Battery of the Type Polyaniline/Propylene Carbonate- $\text{LiClO}_4/\text{Li-Al}$," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol.18, No.5, pp.751-756, 1988.
- 20) S. Pay and Y. Baghzouz, "Effectiveness of Battery-supercapacitor Combination in Electric Vehicles," *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Vol.3, pp.1-6, 2003.