

A Study on the Characteristics of Supercapacitpr for High Voltage System

김 병 우*
(Byeong Woo Kim)

Abstract - Supercapacitors as novel energy storage devices between conventional capacitors and batteries, with more specific capacitance and energy densities than conventional capacitors and more power densities than batteries are to be used in many fields. And, social demand on fuel economy and reducing pollution needs equipment of new function such as energy storage system with good power performance, high cyclability and good energy efficiency. Supercapacitor is regarded as one of good alternatives for meeting the requirement of market with excellent power performance and high cyclability. This paper deals with the fundamental characteristics of supercapacitor unit and charge and discharge behavior of supercapacitor module for developing 42V hybrid energy storage system with lead acid battery and supercapacitor in order to adopt to 42V power net for vehicle.

Key Words : BiPbSrCaCuO system, Thick films, Spray pyrolysis

1. 서 론

친환경 자동차 기술을 구현하기 위해서는 다양한 핵심 기술 및 부품이 필요한데, 이 중에서도 에너지 저장장치는 가장 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 자동차용 에너지 저장장치는 2차 전지와 초고용량 축전지로 구분할 수 있다.

현재 자동차분야의 초고용량 축전지의 응용은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다[1]-[2]. 첫째, 자동차 시동용을 들 수 있는데, 자동차 시동용은 다시 디젤엔진을 장착한 대형 트럭의 콜드 크랭킹(Cold cranking)용과 시동 횟수가 많은 차량의 시동 보조용으로 분류된다. 둘째, 초고용량 축전지를 사용한 하이브리드 자동차는 연비향상과 공해물질 저감으로 인하여 비용대비 효과를 거둘 수 있는 장점이 있다. 이 때문에 전지 및 자동차 업체에서 기본적인 특성해석 연구를 진행하고 있다. 기존 연구에서는 초고용량 축전지에 대한 전기적 특성을 개선하기 위한 셀 단위의 연구가 주류를 이루었다. 이 같은 현상은 아직까지 초고용량 축전지가 갖고 있는 전기적 특성이 하이브리드 시스템에서 요구하고 있는 에너지 밀도 및 가격 요건을 만족시키지 못함에 기인한다[3]. 하이브리드 자동차의 특성을 향상시키기 위해서는 에너지 저장장치에서 2차 전지의 약점을 보완할 수 있는 초고용량 축전지의 성능향상과 더불어 하이브리드 시스템에 대한 적용

가능성 연구가 필요하다. 또한, 하이브리드 시스템의 에너지 저장장치 연구는 2차 전지를 중심으로 진행되어 하이브리드 시스템의 파워 측면에 대한 해결책이 명확하게 제시되지 못하였다[4]-[5].

따라서, 본 연구에서는 기존 자동차 기능대비 Regenerative braking, Stop & Go, Launch assist, Boost assist 구현이 가능한 Mild hybrid 시스템에 적용을 위한 초고용량 축전지 모듈의 전기적 특성을 해석하고 차량 적용 가능성을 논의하고자 한다. 특히, 기존 42V Mild hybrid에 적용된 납산 축전지를 배제하고 2차 전지와 초고용량 축전지를 결부시킨 하이브리드형 에너지 저장장치 구성을 위한 초고용량 축전지의 특성과 시스템 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 초고용량 축전지 특성 해석

초고용량 축전지의 전기적 특성을 해석하기 위해서는 전기 이중층 커패시터를 구성하고 있는 셀과 셀로 구성된 모듈에 대한 연구가 필요하다. 특히, 모듈은 자체 내부저항에 의하여 전류손실이 발생하며 2차 전지와 초고용량 축전지 모듈이 물리적으로 서로 병렬 연결될 때 접촉저항 등으로 인하여 전류의 손실이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 전기 에너지 보존특성을 측정하기 위해서 모듈의 자가방전(Self-discharge)특성을 비롯한 다양한 평가가 요구된다. 이때 장비는 MT-30(120V/500A, Aerovironment) 충방전기를 사용하였다. 또한, 평가 대상으로 설정한 초고용량 축전지는 국내 N사에서 제작한 5000F/2.7V 전기 이중층 커패시터를 사용하였는데, 대표적 사양은 Table 1과 같다.

* 정 회 원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
부교수·공박

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 10일

최종완료 : 2009년 12월 21일

표 1 고용량 축전지 5000F/2.7V의 대표적 사양

Table 1 Specifications of supercapacitor 5000F/2.7V cell

정격 전압	2.7V
용량	5000F
서지 전압	2.85V
저항	0.4mOhm 이하
에너지 밀도	5.8Wh/kg, 6.9Wh/L
파워 밀도	5.2kW/kg, 6.2kW/L
중량	870g
부피	713ml

2-1 기본 셀 특성 해석

가. 충방전 특성 해석

초고용량 축전지의 단위 셀에 대한 충방전 특성을 평가하기 위해 전용 충방전 장치를 이용하였다. 충전조건은 25°C에서 100A의 전류로 2.7V까지 정전류 충전(Constant current charge)을 실시한 후 2.7V에서 2분간 정전압 충전(Constant voltage charge)후 전류별로 0.1V까지 정전류 방전(Constant current discharge) 하였다.

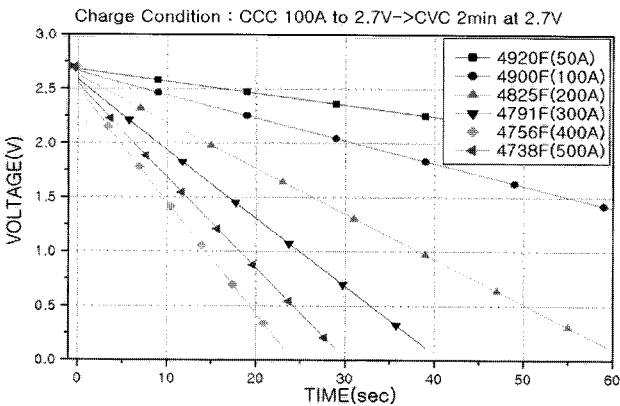


그림 1 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 정전류 충방전 특성
Fig. 1 Constant current discharge characteristics for 5000F/2.7V cell

그림 1은 초고용량 축전지의 정전류 충방전 특성을 측정 한 결과이다. 정전류 충방전특성 측정을 통해 5000F /2.7V 초고용량 축전지의 용량(Capacitance)을 측정 한 결과 용량은 4920F이었다. 정전류 충방전 특성 측정에서 충전과 방전특성에서 알수있듯이 초고용량 축전지는 종래의 2차 전지와는 달리 방전전류가 증가하더라도 용량변화가 작기 때문에 고속의 충방전이 가능함을 확인할 수 있었다.

그림 2는 정전류 충방전 특성을 측정하여 얻어진 방전전류와 용량과의 관계를 나타낸 것이다. 초고용량 축전지는 방전전류가 증가되더라도 용량은 거의 선형적으로 감소하고 방전전류가 500A까지 증가하더라도 방전전류가 50A인 경우에 비해 용량감소가 3.7%에 지나지 않는다. 이 같은 현상에 의하여 초고용량 축전지는 우수한 파워특성을 나타내게 되는데, 이것은 활물질의 표면에 물리적으로 전하를 저장하는 초고용량 축전지의 반응 역학에 기인하고 있다.

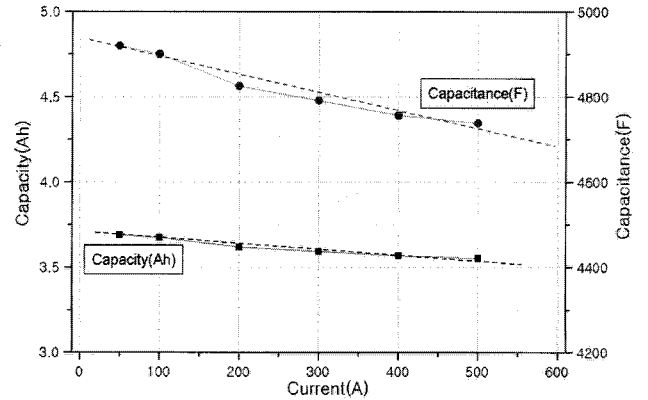


그림 2 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 방전 전류대 용량
Fig. 2 Discharge current vs capacity characteristics for 5000F/2.7V

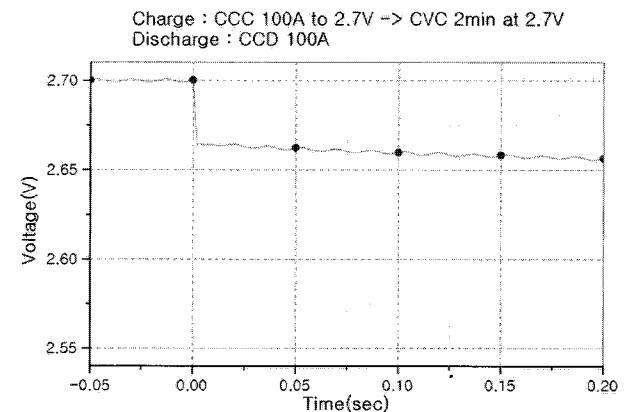


그림 3 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 직류저항 측정 결과
Fig. 3 DC ESR characteristics for 5000F/2.7V cell

그림 3은 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 직류저항을 측정한 결과이다. 직류저항법으로 저항을 측정하는 경우 순간적인 전압강하를 측정하는 방법에는 2가지가 있다. 본 연구에서는 미국 DOE(Department of energy)에서 제정한 Electric vehicle capacitor test procedure manual (DOE/ID-10491)²⁾에 수록된 방법을 적용하였다. 상기 방법에 의하여 측정 한 결과, 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 내부저항은 0.36mOhm으로 측정되었다. 따라서, 초고용량 축전지는 일반 2차 전지의 내부저항에 비하여 매우 작기 때문에 자동차 에너지 저장장치로서의 장점을 확인할 수 있었다.

나. 누설 및 자가 방전 특성 해석

초고용량 축전지의 전기에너지 보존특성을 측정하기 위하여 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 누설전류(Leakage current)와 자가방전(Self discharge)을 측정하였다. 측정조건은 5000F/2.7V 초고용량 축전지를 5A의 전류로 정격전압인 2.7V까지 정전류 충전을 실시하고 2.7V에서 72시간동안 정전압 충전을 한 후 2.7V에서 초고용량 축전지에 인가되는 전류를 측정하였다. Fig. 4는 시간별로 초고용량 축전지에 흐르는 전류변화를 나타내는 측정결과이다. 측정결과 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 누설전류는 7mA를 나타냈다.

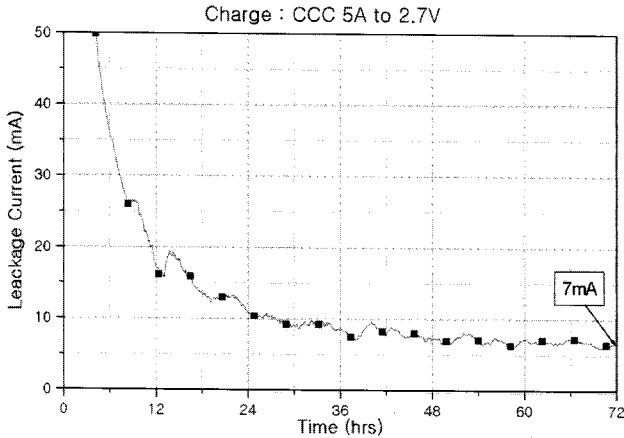


그림 4 5000F/2.7V 울트라커패시터의 시간에 따른 전류변화
Fig. 4 Leakage current vs. time for 5000F/2.7V cell

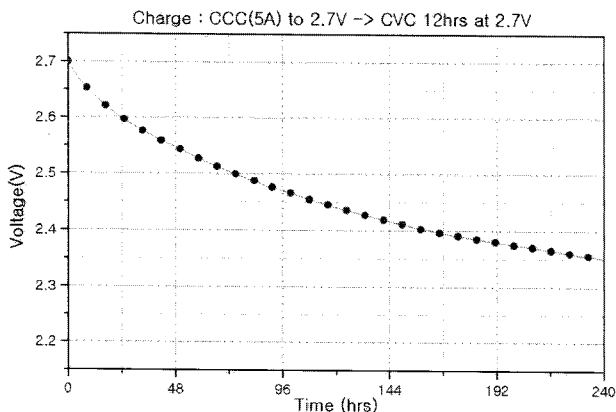


그림 5 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 자가 방전 특성
Fig. 5 Self discharge characteristics for 5000F/2.7V cell

그림 5는 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 자가방전 특성을 측정한 결과이다. 초고용량 축전지를 240시간 경과 후에 자가방전된 전압은 2.35V를 나타냈는데, 이는 초기전압 2.7V에 비해 0.35V 강하한 것으로서 전기에너지 보존량은 초기치의 75%에 해당된다. 여기에서 특히 주목할 것은 240시간 경과 후에 전압 강하비율이 현저하게 저감된 것을 알 수 있었다. 이 같은 전압강하 비율 평가에서도 5000F/2.7V 초고용량 축전지를 자동차분야에 응용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 누설전류 및 자가방전은 결국 커패시터에 포함된 불순물이 원인을 제공하는데, 초고용량 축전지는 전기화학반응에 의해 불순물이 거의 존재하지 않기 때문에 사용시간이 경과함에 따라 작아지는 거동을 나타냈다.

다. 온도 특성 해석

온도특성측정은 초고용량 축전지의 성능을 나타내는 항목인 용량과 내부저항을 온도별로 3시간동안 방치한 후 정전류 충방전과 동일한 방법으로 실시하였다. 그림 6은 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 측정된 온도특성을 상온을 기준으로 온도별 변화율로 나타낸 것이다. 초고용량 축전지의 온도특성결과가 나타내는 것처럼 초고용량 축전지는 온도특성이 매우 안정되어 있는 전기 에너지 저장장치임을 확

인하였다. 특히 2차 전지의 경우 저온특성이 열악하나 초고용량 축전지는 -40°C 의 저온에서도 상온과 거의 동일한 성능을 유지하고 있었다. 이러한 특성은 위에서 언급한 것처럼 초고용량 축전지인 경우에는 물리적으로 전하를 저장하기 때문에 발생하는 현상이다.

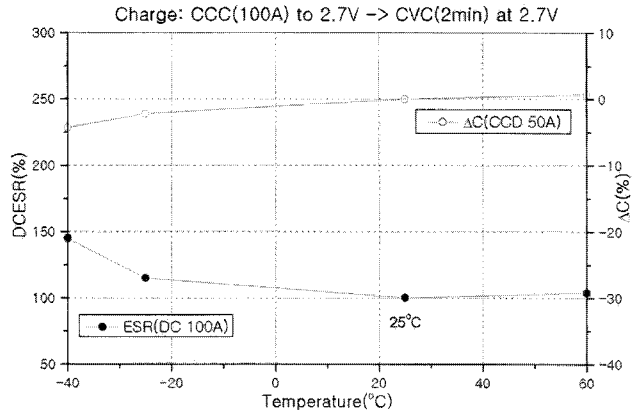


그림 6 5000F/2.7V 축전지 온도특성
Fig. 6 Temperature characteristics for 5000F/2.7V cell

2-2. 모듈 특성 해석

단위 셀의 용량이 5000F인 18개의 초고용량 축전지를 직렬 연결하여 구성된 모듈의 용량을 측정하였다. 측정방법은 단위 셀의 정전류 충방전특성 측정과 동일한 방법을 사용하였다. 단위 셀의 정격전압이 2.7V인 반면에 초고용량 축전지 모듈의 정격전압은 45V이므로 충방전기를 ABC-150(450V/530A)를 사용하였다. 먼저 용량을 측정하기 위해 초고용량 축전지 모듈을 50A의 전류로 45V까지 정전류로 충전한 후 45V에서 2분간 정전압 충전을 수행하고 EIAJ-RC-2377에 따른 용량측정 전류인 50A의 전류로 9V까지 정전류 방전을 실시하였다.

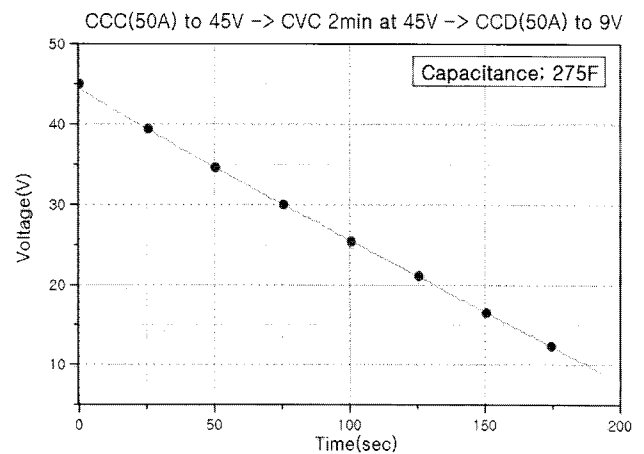


그림 7 5000F 18직렬 축전지 모듈의 정전류방전 특성
Fig. 7 Constant current discharge characteristics for 5000F/18S

그림 7은 용량측정을 위한 정전류 방전시험 결과를 나타낸 것이다. 측정결과 용량은 275F이었으며 직류저항은 5.2mOhm 이었다. 275F/45V 울트라커패시터 모듈의 42V Power Net 동작전압구간(30~44V)내에서 파워특성을 측정하였다. 파워특성을 측정하기 위해 초고용량 축전지 모듈을 100A의 전류로 44V까지 정전류 충전 후 44V에서 2분간 정전압 충전을 수행한 후 30V까지 파워별로 정전력 방전을 실시하였다. 그림 8은 정전력 방전특성 측정결과를 나타낸 것이다. 측정결과를 살펴보면 구성된 초고용량 축전지 모듈은 6kW로 19.7초를 사용할 수 있으며 15kW를 사용하더라도 6.3초간 사용할 수 있다. 10초간 사용할 수 있는 출력을 최대출력으로 하였을 때 구성된 모듈의 최대 출력은 10kW를 상회함을 알 수 있다. 또한 275F/45V 초고용량 축전지 모듈의 동작전압 구간 내에서 총방전 효율을 정전류 충전 전을 통하여 측정하였다. 총 방전 효율측정은 30V에서 25A부터 200A까지 전류별로 44V까지 충전 후 1초간 휴지한 상태에서 충전전류와 동일한 전류로 30V까지 정전류 방전을 실시한 후 총 방전 효율을 계산하였다.

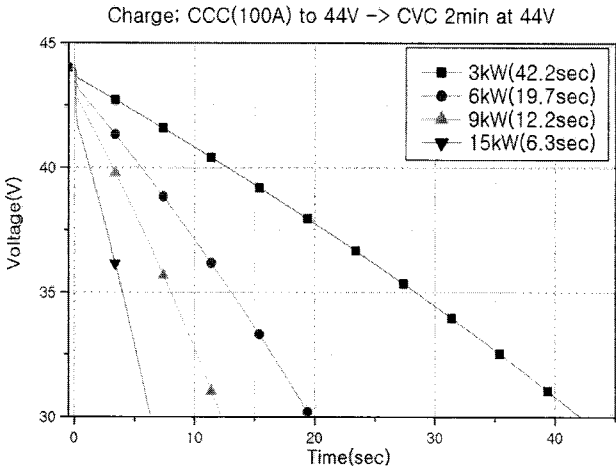


그림 8 275F/45V 축전지 모듈의 정전력 방전 특성
Fig. 8 Constant power discharge characteristics for 275F/45V

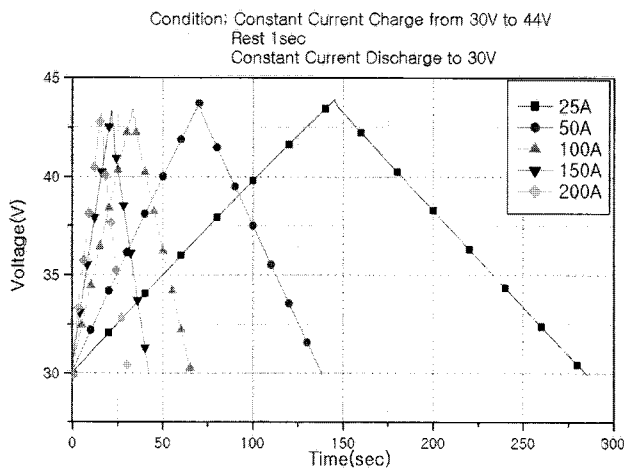


그림 9 275F/45V 축전지 모듈의 전류별 정전류 총방전
Fig. 9 Charge & discharge characteristics for 275F/45V

표 2 275F/45V 초고용량 축전지 모듈의 총 방전 효율
Table 2 Charge & discharge efficiency for 275F/45V module

전류(A)	충전		방전		총방전효율(%)	
	Ah	Wh	Ah	Wh	Ah	Wh
25	1.030	38.228	0.986	36.230	95.7	94.8
50	0.994	36.861	0.949	34.697	95.6	94.1
100	0.947	35.139	0.887	32.073	93.7	91.3
150	0.912	33.895	0.837	29.978	91.7	88.4
200	0.880	32.757	0.785	27.860	89.2	85.1

그림 9는 275F/45V 초고용량 축전지 모듈의 총 방전효율을 측정하기 위한 정전류 충전 그래프이다. 정전류 충전 전을 통해 측정된 275F /45V 초고용량 축전지 모듈의 총 방전효율을 계산하면 표 2와 같다. 계산된 총 방전효율을 분석하면 저전류에서는 비교적 높은 총 방전효율을 나타내지만 총 방전전류가 증가할수록 총 방전효율이 감소할 뿐만 아니라 충전용량도 감소하였다.

3. 결론

본 논문은 42V Power Net에 적용하기 위한 42V 하이브리드 에너지저장장치를 개발하기 위하여 필요한 초고용량 축전지의 제반 특성을 평가하였다. 초고용량 축전지에 대한 정확한 해석을 위하여 셀 단위 평가와 모듈단위 평가를 병행하여 자동차 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 단위 셀이 500F/2.7V 용량을 갖는 초고용량 축전지는 방전전류를 50A에서 500A까지 증가시키더라도 용량 감소가 3.7%에 불과한 우수한 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 자가방전 측면에서는 240시간 경과 후에도 초기 전압의 75%에 머물러 일반 2차 전지에 비하여 우수한 특성을 나타냈다.

또한, 초고용량 축전지 셀 18개를 직렬로 연결하여 용량이 275F이고 정격전압이 45V인 초고용량 축전지 모듈을 구성하면 최대출력인 10초간 10kW를 만족시킬 수 있음을 확인하였는바, Mild hybrid 자동차와 같은 친환경 자동차로의 적용 가능성을 확인하였다. 향후에는 본 고용량 축전지의 기본 특성을 활용하여 42V 하이브리드 에너지저장치에 필요한 에너지 관리 로직에 대한 적용방안을 연구하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 지식경제부에서 지원하고 있는 부품소재기술개발사업과 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] L. J. Gao, R. A. Dougal, and S. Y. Liu, "Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 20, no. 1, pp. 236 - 243, 2005.

- [2] R. Kötz and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15 - 16, pp. 2483 - 2498, May 2000.
- [3] N. Mutoh, Y. Hayano, H. Yahagi, and K. Takita, "Electric braking control methods for electric vehicles with independently driven front and rear wheels," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 1168 - 1176, April 2007.
- [4] G.J. Suppes, S. Lopes and C.W. Chiu, "Plug-in fuel cell hybrids as transition technology to hydrogen infrastructure," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 29, no. 4, pp. 369 - 374, 2004.
- [5] P. Thounthong, S. Raël and B. Davat, "Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle," *J Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 806 - 814, 2006.

저 자 소 개



김 병 우 (金柄禹)

1965년 4월 15일생. 1987년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1990년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 정밀기계공학과(박사). 1989년 일본 KOSAKA연구소 초빙연구원. 1994~2006년 자동차부품연구원 전장기술연구센터장. 2006년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수.

Tel : 052-259-1287

Fax : 052-259-1686

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr