

A Study on the Characteristics of Supercapacitor Module for High Voltage System

김 병 우[†] · 허 진^{*}
(Byeong Woo Kim · Jin Hur)

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. 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 characteristics of 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. An analysis performed in this paper indicates that supercapacitor storage system may be cost effective for high cycle applications

Key Words : Hybrid system, Storage module, Energy storage, battery

1. 서 론

자동차가 급증함에 따라서 이로 인한 환경 및 에너지 문제가 급격하게 확대되고 있다. 이 같은 문제를 해결하기 위하여 자동차 완성차 및 부품업체에서는 기존 내연기관 연료를 대체시키는 다양한 에너지원 개발을 추진하고 있다. 자동차에 적용되고 있는 에너지 저장장치는 크게 2차 전지와 초고용량 축전지를 들 수 있다. 2차 전지는 에너지 밀도 특성이 우수하고 초고용량 축전지는 출력 밀도 특성이 우수하다. 이 같은 두 가지 에너지 저장장치의 장점을 활용하여 2차 전지와 초고용량 축전지를 결합한 것이 하이브리드형 에너지 저장장치이다[1]-[2]. 본 연구에서는 마일드 하이브리드 자동차 적용이 가능한 초고용량 축전지의 전기적 특성을 해석하고자 하였다. 기존 연구에서는 초고용량 축전지 자체의 셀 및 모듈의 특성에 집중하여 다양한 연구가 진행되었다. 그러나, 자동차에 적용되는 에너지 저장장치는 셀 및 모듈만의 특성이 아닌 자동차 시스템을 고려한 설계 및 제작이 요구된다.

또한, 기존 연구에서는 초고용량 축전지 셀 또는 모듈의 일반 전기적 성능을 극대화시키기 위하여 다양한 재료합성 방법 및 제조공법에 집중하였다. 이 같은 축전지 성능의 극대화 연구를 통하여 일정 수준의 성능 향상이 구현되었으나 획기적으로 가격을 저하시키는 연구결과는 얻지 못하였다[3]-[5]. 초고용량 축전지는 우수한 출력 특성을 지니고 있기 때문에 하이브리드 자동차의 핵심 기능인 Power assist 기

능이 가능함에도 불구하고 가격이 높기 때문에 실제 자동차에 제한적으로 적용되고 있다[6]. 따라서, 초고용량 축전지의 성능을 획기적으로 높이는 연구와 더불어 기 결정된 축전지의 조합을 최적화시키는 연구도 필요하다.

본 연구에서는 마일드 하이브리드 자동차에 적용되는 초고용량 축전지의 셀 단위 특성을 기반으로 축전지 모듈의 전기적 특성을 해석하고자 한다. 또한, 초고용량 축전지 모듈의 전기적 특성을 해석하고자 하였다. 또한, 초고용량 축전지 모듈의 전기적 특성을 해석하고 이 전기적 특성이 마일드 하이브리드 시스템에 미치는 영향을 분석하여 상용화 가능성을 검증하였다.

2. 축전지 Cell 기본 특성

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

초고용량 축전지의 단위 셀에 대한 충 방전 특성을 평가하기 위해 전용 충 방전 장치를 이용하였다. 충전 조건은 25°C에서 100A의 전류로 2.7V까지 정전류 충전(Constant

[†] 교신저자, 정회원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
부교수

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr

^{*} 시니어회원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수
접수일자 : 2010년 3월 23일

최종완료 : 2010년 6월 8일

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

current charge)을 실시한 후에 2.7V에서 2분간 정전압 충전(Constant voltage charge)하고 전류별로 0.1V까지 정전류 방전(Constant current discharge)을 실시하였다.

그림 1은 초고용량 축전지의 정 전류 충 방전 특성을 측정 한 결과이다. 정 전류 충 방전특성 측정을 통해 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 용량(Capacitance)을 측정 한 결과 용량은 4920F이었다.

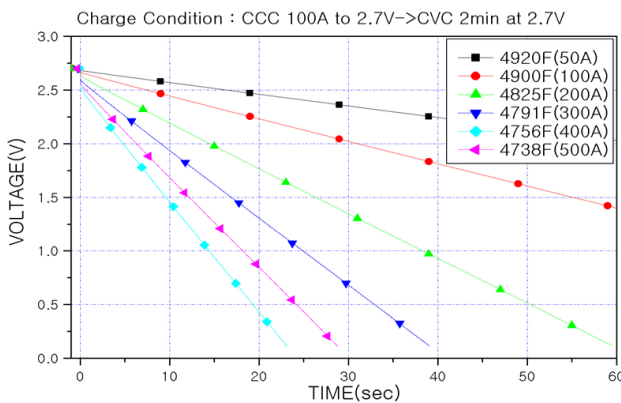


그림 1 5000F/2.7V 초고용량 축전지의 정 전류 충 방전 특성
Fig. 1 Characteristics of constant current discharge for 5000F/2.7V cell

초고용량 축전지 모듈의 정 전류 충 방전 특성에서 확인할 수 있듯이 초고용량 축전지는 종래의 2차 전지와는 달리 방전전류가 증가하더라도 용량변화가 작기 때문에 고속의 충 방전이 가능함을 확인할 수 있었다.

3. 축전지 Module 특성

초고용량 축전지는 일반 2차 전지 등의 에너지 저장장치와 마찬가지로 단위 셀의 정격전압이 2.3~2.7V에 불과하다. 따라서, 큰 전력을 발생시키기 위해서는 초고용량 축전지를 직렬로 연결하여 정격 전압을 증가시킬 필요가 있다. 초고용량 축전지는 일반 2차 전지와 동일하게 정격 전압을 초과한 전압이 인가되는 경우 수명이 급격하게 짧아진다. 이를 예방하기 위해서는 직렬 연결된 단위 셀에 정격 전압을 초과하는 전압이 인가되지 않도록 하여야 한다. 그러나, 직렬 연결 시 각 단위 셀의 용량편차, 누설전류편차 등의 요인에 의해

단위 셀 간에 전압 불균형이 초래될 수 있다. 이를 예방하기 위해서는 각 단위 셀에 인가되는 평균전압을 각 단위 셀의 정격 전압에 비하여 약간 낮게 설정되어야 한다. 또한, 42V 전력체계에서 동작 전압범위는 30~44V에서 작동되기 때문에 본 연구에서 대상으로 하고 있는 초고용량 축전지 모듈의 전압도 30~44V에 맞추었다.

42V 전력체계 기반의 마일드 하이브리드용 전기 에너지 저장장치 모듈을 개발하기 위하여 충 방전특성 및 SOC(State of charge)에 따른 부하특성 평가가 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 국내 N사에서 개발한 5000F/2.7V 단위 셀 18개를 직렬로 연결한 것으로서 용량이 278F이고 정격전압이 45V(단위 셀당 평균전압 2.5V)인 초고용량 축전지 모듈을 구성하였다.

3-1 충 방전 특성 해석

단위 셀의 용량이 5000F인 18개의 초고용량 축전지를 직렬 연결하여 구성된 초고용량 축전지 모듈의 용량을 측정하였다. 충전조건은 25°C에서 100A의 전류로 2.7V까지 정 전류 충전(Constant current charge)을 실시하고 2.7V에서 2분간 정 전압 충전(Constant voltage charge)후에 세부 전류별로 0.1V까지 정 전류 방전(Constant current discharge)을 실시하였다. 충 방전기는 단위 셀의 정격전압이 2.7V인 반면에 초고용량 축전지 모듈의 정격전압은 45V이기 때문에 이 영역을 계속할 수 있는 Aerovironment사 ABC-150(450V/530A)을 사용하였다. 먼저 초고용량 축전지 모듈의 용량 측정을 위하여 축전지 모듈을 50A의 전류로 45V까지 정 전류로 충전한 후에 45V에서 2분간 정전압 충전을 실시하였다. 또한, EIAJ-RC-2377 평가규칙에 따라서 용량 측정 전류인 50A의 전류로 9V까지 정 전류 방전을 실시하였다. 그림 2는 용량 측정을 위하여 실시한 정 전류 방전시험 결과를 나타낸 것이다.

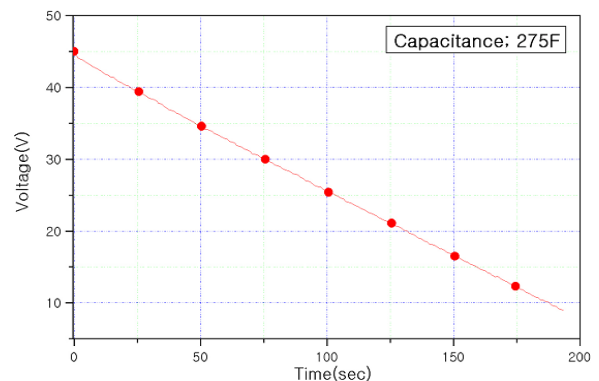


그림 2 5000F 18 직렬 초고용량 축전지 모듈의 정 전류 방 전 특성

Fig. 2 Characteristics of constant current discharge for 5000F/18

그림 2에서 알 수 있듯이, 초고용량 축전지의 용량은 275F 이고 직류저항은 5.2mOhm을 나타냈다. 또한, 마일드 하이브리드 시스템에서 안정적인 최저 전압 구간이라 할 수 있는

30V 기준으로 75sec가 유지됨을 확인할 수 있었다. 이를 통하여, 마일드 하이브리드 자동차에서 요구하고 있는 가속보조 기능을 충분히 발휘할 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한, 42V 전력체계 동작 전압구간(30~44V)내에서 275F/45V 초고용량 축전지 모듈의 출력특성을 평가하였다. 초고용량 축전지 모듈의 출력특성을 측정하기 위하여 대상 모듈을 100A의 전류로 44V까지 정 전류 충전하고 44V에서 2분간 정 전압 충전을 수행한 후에 30V까지 출력별로 정 전류 방전을 실시하였다. 그림 3은 정 전류 방전특성의 측정 결과를 나타낸 것이다.

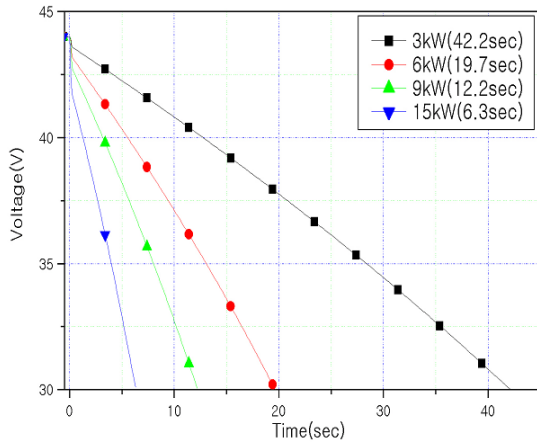


그림 3 275F/45V 울트라커패시터 모듈의 정 전류 방전 특성
Fig. 3 Characteristics of constant power discharge for 275F/45V

그림 4는 275F/45V 초고용량 축전지 모듈의 충 방전 효율을 측정하기 위한 정 전류 충 방전 특성 결과이다. 초고용량 축전지 모듈의 충 방전 효율은 275F/45V 모듈의 동작전압 구간에서 정 전류 충 방전 특성 값을 해석하였다. 초고용량 축전지 모듈의 충 방전 효율 측정은 30V에서 25A부터 200A까지 전류별로 44V까지 충전한 후에 1초간 휴지한 상태에서 충전 전류와 동일한 전류로 30V까지 정 전류 방전을 실시하여 충 방전 효율을 계산하였다.

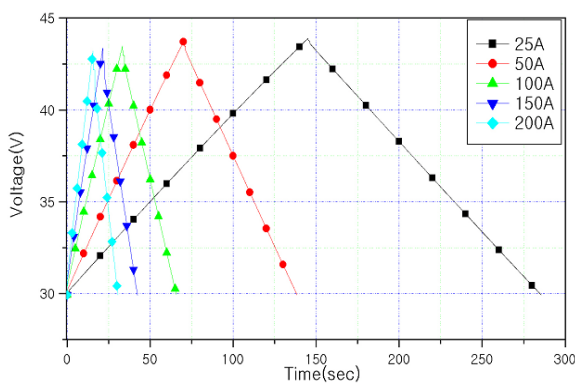


그림 4 275F/45V 울트라커패시터 모듈의 전류별 정 전류 충 방전 그래프
Fig. 4 Characteristics of constant current charge & discharge for 275F/45V

표 2 275F/45V 울트라커패시터 모듈의 충 방전 효율

Table 2 Charge & discharge efficiency for 275F/45V module

전류(A)	충전		방전		충. 방전효율(%)	
	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

정 전류 충 방전을 통하여 측정한 275F /45V 초고용량 축전지 모듈의 충 방전 효율을 계산하면 표 2와 같다. 계산된 충 방전 효율을 분석하면 저 전류에서는 비교적 높은 충 방전효율을 나타내지만 충 방전 전류가 증가할수록 충 방전 효율이 감소할 뿐만 아니라 충전용량도 감소함을 나타내고 있다. 이와 같이 전류가 증가함에 따라서 충 방전 효율과 용량이 저하되는 것은 전류 증가에 비례하여 내부 저항이 증가하는 현상에 기인하는 것이다. 한편, 충 방전 용량이 275F 이고 저항이 5.2mOhm 인 초고용량 축전지의 이론적인 충 방전 효율을 계산하면 표 3과 같다.

초고용량 축전지 모듈의 충 방전 효율은 단위 셀의 용량이 200A 방전 시 2%정도 감소하는 것을 감안한다면 이론값과 측정값이 큰 차이를 나타내지는 않았다. 그러나 전류가 증가함에 따라 충전용량이 이론값과 다소간의 차이가 발생하는 것은 충 방전기에 의한 영향이라 추정된다. ABC-150 충 방전기는 구조적으로 4 단자법이 아닌 2 단자법을 채용하고 있다.

초고용량 축전지 모듈과 충 방전기를 연결하는 전력 케이블의 저항에 의한 전압강하가 전체 전압으로 인식하기 때문에 전류가 증가할수록 전력 케이블의 저항에 의한 전압강하가 확대된다. 따라서, 초고용량 축전지 모듈에 실제로 인가되는 전압이 감소하게 된다. 실제로 디지털 오실로스코프를 이용하여 초고용량 축전지 모듈의 충전 종료 전압을 측정할 결과, 충전전류 25A에 대하여 43.89V, 50A에 대하여 43.47V, 100A에 대하여 43.49V, 150A에 대하여 43.36V, 200A에 대하여 43.21V였다. 이를 전하량으로 환산하면 각각 0.01Ah, 0.04Ah, 0.04Ah, 0.05Ah, 0.06Ah에 해당되며 각 전류별로 실제 충전된 전압에 대한 충전에너지를 이론적으로 계산하면 각각 38.8Wh, 37.0Wh, 36.3Wh, 35.1Wh, 33.8Wh이다. 계산결과로부터 충 방전기가 측정에 상당부분 영향을 미쳤음을 알 수 있으며 이를 감안하면 25A로 충 방전하는 경우와 200A로 충 방전하는 경우의 용량차이는 10%를 나타냈다.

표 3 275F/5.2mOhm 축전지 모듈의 이론상 충. 방전 효율

Table 3 Charge & discharge efficiency for 275F/5.2mOhm module (theory)

전류(A)	충전		방전		충. 방전 효율(%)	
	Ah	Wh	Ah	Wh	Ah	Wh
25	1.060	39.133	1.050	38.698	99.1	98.9
50	1.050	38.698	1.030	37.832	98.1	97.8
100	1.030	37.832	0.990	36.115	96.1	95.5
150	1.010	36.971	0.950	34.419	94.1	93.1
200	0.990	36.115	0.911	32.744	92.0	90.7

3-2 충전 상태별 부하 특성

42V 전력체계의 동작 전압범위 내에서 운영 가능한 275F/45V 초고용량 축전지 모듈을 충전 상태별로 6kW 정 전력 방전시험을 실시하였다. 본 정 전력 방전시험을 통하여 축전지 모듈의 사용 가능한 에너지 기준을 제시하였다. 먼저, 275F/45V 초고용량 축전지 모듈의 OCV(Open circuit voltage)가 44V인 경우에 초고용량 축전지 모듈에 충전된 에너지를 100%로 하여 5%단위로 OCV를 계산하고 계산된 OCV로부터 30V까지 정 전력 방전을 수행하였다. 이때 SOC별 전압은 표 4와 같다. 표 4에서 SOC_{44V}는 44V에 저장된 에너지를 기준으로 한 것이며 SOC_{44~30V}는 동작 전압 범위인 30~44V구간에서 사용될 수 있는 에너지를 기준으로 한 것이다. 편의상 측정 시의 OCV를 소수 첫째자리에서 반올림하여 사용하였으며 충전조건은 100A전류로 SOC별 전압까지 정 전류 충전하고 해당 전압에서 2분 동안 정 전압 충전을 수행한 후에 30V까지 6kW로 정 전력 방전을 실시하였다.

표 4 OCV 인자에 따른 SOC 변화

Table 4 SOC Variation by OCV factor

OCV	SOC _{44V} (%)	SOC _{44~30V} (%)
44.00	100	100
42.89	95	91
41.74	90	81
40.57	85	72
39.35	80	63
38.11	75	53
36.81	70	44
35.47	65	35
34.08	60	35

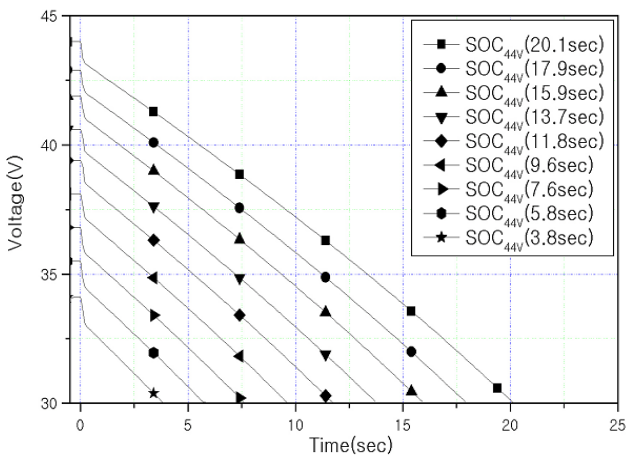


그림 5 SOC에 따른 정 전력 방전

Fig. 5 Constant power discharge according to SOC

표 5 275F/45V 모듈의 SOC별 정 전력 방전

Table 5 Constant power discharge according to SOC of 275F/45V module

OCV (V)	SOC _{44V} (%)	SOC _{30~44V} (%)	ENERc1 (Wh)	ENERc2 (Wh)	Discharge time(sec)	ENERm (Wh)
44.0	100	100	39.561	34.419	20.1	33.500
42.9	95	91	35.918	30.899	17.9	29.833
41.7	90	81	32.041	27.165	15.9	26.500
40.6	85	72	28.583	23.838	13.7	22.833
39.4	80	63	24.917	20.314	11.8	19.667
38.1	75	53	21.068	16.621	9.6	16.000
36.8	70	44	17.349	13.057	7.6	12.667
35.5	65	35	13.760	9.622	5.8	9.667
34.1	60	25	10.038	6.067	3.8	6.333

그림 5는 SOC별 6kW 정 전력 방전시험 결과이다. 또한, 측정된 정 전력 방전 특성 값으로 부터 방전된 에너지를 정리하면 표 5와 같다. 표 5에서 ENERc1은 내부저항이 Zero 인 경우 방전되는 이론상 에너지이고 ENERc2는 5.2mOhm의 내부저항이 존재하는 경우 6kW 정 전력 방전 시 방전되는 이론적인 방전 에너지이다. 또한, ENERm은 6kW 정 전력 방전 시 실제 측정된 방전 에너지이다. 상기 결과를 통하여, 측정된 OCV로 부터 다양한 부하에 따른 초고용량 축전지의 사용 가능한 에너지 크기를 정량적으로 예측할 수 있었다.

3. 결 론

42V 전력체계를 기반으로 하는 마일드 하이브리드 자동차에 적용하기 위한 초고용량 축전지 모듈을 제작하였다. 이를 기반으로 하여 셀 및 모듈의 전기적 특성을 분석하고 마일드 하이브리드 시스템에서 요구하고 있는 사양에 적합 여부를 비교분석하였다.

자동차 마일드 하이브리드 자동차 시스템의 성능(10kW 출력에서 10sec 유지)을 만족시키기 위한 최적의 초고용량 축전지 모듈 조건은 5000F /2.7V 임을 확인하였다. 실제 자동차 주행 모드에 기초한 초고용량 축전지 모듈(5000F /2.7V)에 대하여 정 전류 충 방전 특성 평가를 실시한 결과, 축전지 모듈은 고속으로 변화되는 자동차의 추력 변화를 능동적으로 추종하였다. 이 같은 현상은 일반 2차 전지에 비하여 방전 전류가 급증하더라도 용량변화가 작기 때문에 발생하는 것이라 판단된다.

또한, 마일드 하이브리드 시스템에서 요구되는 최저 전압 구간인 30V를 기준으로 하였을 때, 작동시간이 75sec를 나타냈다. 이를 통하여, 마일드 하이브리드 시스템에서 요구하는 가속 보조 기능을 충분히 담당할 수 있음을 확인하였다. 이와 함께, 초고용량 축전지의 OCV 결과로 부터 부하별 사용 가능한 에너지 크기를 정량화할 수 있었기 때문에 마일드 하이브리드 시스템에서 요구하고 있는 에너지 상태에 능동적인 대응이 가능함을 확인하였다.

향후, 연구에서는 본 초고용량 축전지를 이용하여 실제

마일드 하이브리드 시스템에 적용하고 이를 실제로 검증하는 응용연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하고 있는 부품소재 기술개발사업과 산업원천기술개발사업으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] R. Kötz and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," Electrochimica Acta, vol. 45, no. 15 - 16, pp. 2483 - 2498, May 2000.
- [4] W. Henson, "Optimal battery/ultracapacitor storage combination," J Power Sources, vol. 179, no. 1, pp. 417 - 423, January 2000.
- [5] A. G. Pandolfo, "Carbon properties and their role in supercapacitors," J Power Sources, vol. vol. 157, no. 4, pp. 11 - 27, 2006.
- [6] M. S. Alam, "Load Sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle," J Hydrogen Energy, vol. 34, no. 3, pp. 1497 - 1507, 2009.

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 교수.
 Tel : 052-259-1287
 Fax : 052-259-1686
 E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr



허 진 (許眞)

1999년 공학박사, 한양대(전기공학), 1999년~2000년 Texas A&M Univ. Post doc. Research Associate, 2000년~2001년 한양대 연구교수, 2002년~2008년 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장, 2008년~현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 조교수, 2004년~현재 IEEE Senior member, 2006년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Power Electronics, 2008년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2008년~현재, IEEE Intelec 2009 Publication Chair.
 E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr