

전기화학 축전기 신기술과 응용

김 종 휘

(한국에너지기술연구원 에너지저장연구센터장)

1. 서 론

전기 에너지를 편리하게 저장하는 기기로 우리는 흔히 전지와 콘덴서를 생각한다. 산업혁명 이후 과학과 기술의 엄청난 발전에 따라 여러 분야에서 다양한 문명이기의 개발과 활용이 있어왔지만 우리 생활에 밀접히 활용되고 있으며 각종 전기전자 시스템의 핵심 구성품인 이러한 전지나 콘덴서의 기술 발전 속도는 다른 분야에 비하여 상대적으로 뒤쳐진 상황이라고 볼 수 있다. 그러나 최근 10여년 동안 괄목할 만한 소재기술의 발전에 힘입어서 재래식의 콘덴서나 전지가 갖지 못하는 전기적 특성을 갖는 새로운 형식인 전기화학 축전기의 개발이 실현되었다(그림 1 참조). 이에, 본 고에서는 전기화학 축전기에 대한 소개와 그 신기술 및 응용에 대한 개괄적인 소개를 하고자 한다.

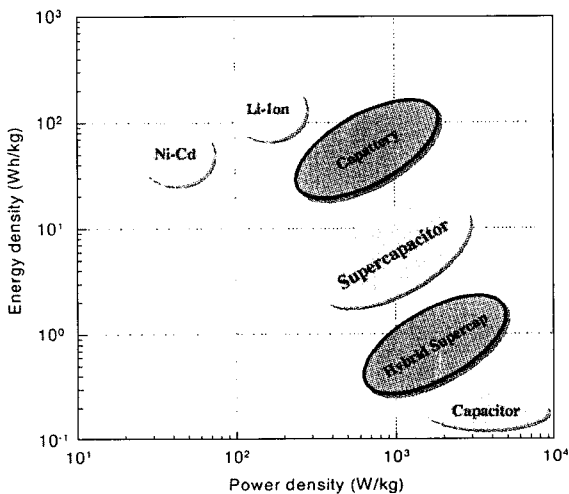


그림 1. 축전기의 에너지밀도 및 동력밀도 특성영역

2. 본 론

2.1 전기화학 축전기(electrochemical capacitor)란?

전기에너지를 저장하는 축전기를 통칭하여 캐패시터(capacitor)라고 한다(흔히 말하는 '콘덴서(condenser)'라는 명칭은 과학기술용어로서의 축전기만을 의미하지 않으므로 용어의 사용에 유의할 필요가 있다). 축전기 또는 캐패시터에는 크게 두 가지 종류가 있다. 즉, 축전하는 원리가 정전기적(electrostatic)인 것과 전기화학적(electrochemical)인 것으로 나누어진다. 전자는 양극과 음극으로 구성되는 두 전극 사이에 유전체(dielectric material)가 전기장 내에서 극성을 띄고 분극되어 배열되는 현상을 이용하고 후자는 전해질(electrolytic material)의 이온이 양이온과 음이온으로 해리되어 전기장을 따라 이동하는 현상을 이용하는 것이다. 이해를 돕기 위하여 비유적으로 설명하면, 유전체는 강에 있는 징검다리 역할을 하여 전자(electron)들이 강을 쉽게 건너가게 한다고 말할 수 있으며 전해질은 해리(charge separation)된 양이온(cation)과 음이온(anion)들을 실어 나르는 나룻배와 같다고 할 수 있다.

전기화학 축전기와 전지(battery)가 전기화학적인 축전원리를 이용하는 점에 있어서 유사성은 있으나 크게 구별되는 점은 전해질이 전극과의 계면에서 반응할 때 상호간에 전자의 이동이 있는 패러데이 반응(Faradaic reaction)의 여부에 따라 구별된다. 패러데이 반응이 있으면 충분히 가역적이지 못한 열역학적 현상이 동반하게 되는데 이러한 종류의 축전기를 일반적으로 전지(1차전지와 2차전지를 포함하여)라고 한다.

한편, 전기화학 축전기(electrochemical capacitor)를 분류하면 지금까지 전해 콘덴서라고 말하고 있는 전해 캐패시터(electrolytic capacitor)를 넓은 의미에서 포함시킬 수 있다.((표 1) 참조) 또한 전해 캐패시터 보다도 전극의 단위 면적당 비축전용량(specific capacitance)이 수만배 이상 크게

표 1. 축전기의 분류

분류		종류	전극중량당 축전용량 (per gram)	단위 cell 당 사용전압	특징
정전기 캐패시터 (Electrostatic Capacitors)		Ceramic Capacitor	1.0 μ F ~ 2.2 μ F	~ 1.5kV	유전체의 정전기적 분극성을 이용, 자유전자의 정전기적 축전, 고전압, 고출력 밀도, 저에너지 밀도,
		Glass Capacitor	0.5 μ F ~ 10000 μ F	100 ~ 500V	
		Mica Capacitor	1.0 μ F ~ 10000 μ F	100V ~ 2.5kV	
		Plastic/Metalized Film Capacitor	0.001 ~ 100 μ F	~ 15kV	
전기화학 축전기 (Electro- chemical Capacitors)	전해 캐패시터 (Electrolytic Capacitors)	Aluminium Electrolytic Capacitor	0.68 μ F ~ 0.22F	~ 350V	금속전극과 전해질 이용, 이온흡착에 의한 전하유기 축전, 공해성
		Tantalum Electrolytic Capacitor	0.001 μ F ~ 1000 μ F	6 ~ 120V	
	Hybrid Super- capacitor	Aluminum/Tantalum + Carbon/Metal-oxide	~ 100F	~ 600V	전해콘덴서와 Supercapacitor의 중간형
	초고용량 캐패시터 (Super- capacitor)	Double Layer Capacitor (전기이중층 캐패시터)	~ 150F	0.8 ~ 3.0V	다공성 전극과 전해액 이용, fully reversible chemisorption, 긴 수명, 고출력 밀도, 무공해성 소재
		Redox Capacitor (유사 축전기)	~ 750F	0.8 ~ 3.0V	
하이브리드 전지 (Capattery)	Metal + Carbon	~ 2000F	~ 3.0V	Battery와 Supercapacitor의 중간형	
신형 2차전지 (Secondary Batteries)		Ni-MH 전지	> 10,000F	~ 2.0V	irreversible redox process, 짧은수명, 저출력 밀도, 고에너지 밀도, 사용안전 주의필요
		Li-ion 전지	> 10,000F	~ 3.0V	
		Li-polymer 전지	> 10,000F	~ 4.0V	

향상된 '초고용량 캐패시터 (supercapacitor or ultra-capacitor)' 가 있다. 이러한 비축전용량의 혁신적인 증가는 다공성으로써 비표면적 (specific surface area)이 2000~3000 m²/g까지 크게 증가되고 전기전도성이 좋은 활성탄소와 같은 전극소재를 활용할 수 있게 되었기 때문이다. 현재, 전극소재로써는 활성탄소 뿐만 아니라 고분자계, 금속산화물계 등의 다양한 소재를 사용하고 있으며 이러한 소재를 서로 혼합하여 사용하는 경우의 복합전극소재에 대한 연구개발도 상당히 진행되었다.

초고용량 캐패시터를 보다 자세히 분류하면, 먼저, 전하를 축전하는 메카니즘에서 전기이중층 (electric double layer) 효과를 충분히 이용하는 전기이중층 캐패시터 (EDLC: electric double layer capacitor)가 있다. 또한, 축전 메카니즘이 산화환원 과정을 갖으나 충분히 가역적이어서 전압차 (ΔV)에 따른 축전 전하량 (Δq)이 비례적인 관계를 유지하며 축전용량 (capacitance) $C = \Delta q / \Delta V$ 의 관계를 갖는 특수한 경우인 유사축전 (pseudocapacitance) 효과를 이용하는 유사축

전기 (일명 redox capacitor)로 나누어진다. 초고용량 캐패시터의 특징은 정전기 캐패시터나 전해 캐패시터와 같이 충전 (또는 방전)시에 전압상승 (감소)에 따른 충전 (방전) 전하량 즉, 충 (방)전류의 증가 (감소)가 서로 비례적인 관계를 유지한다는 것이다. 전지의 경우 특정한 전압범위 ($\Delta V = V_{max} - V_{min}$)에서만 충방전 전하량이 발생하므로 저장되는 에너지의 양을 $E = Q(\Delta V)$ 으로 표시하는 것에 비하여, 초고용량 캐패시터의 경우는 저장되는 에너지의 양을 $E = C(V_{max})^2 / 2$, 여기서 $C =$ 축전용량 (capacitance: F), 으로 표시한다.

2.2 전기화학 축전기 신기술

2.2.1 하이브리드 전지 (hybrid battery or capattery) 기술

2차전지가 갖는 높은 에너지밀도 (energy density: 단위 중량 또는 체적당 저장할 수 있는 에너지의 양)의 특성을 최대한 유지하면서 초고용량 캐패시터가 갖는 높은 동력밀도 (power density: 단위시간 동안에 단위 중량 또는 체적의 축전기가 입출력 할 수 있는 에너지의 양)의 장점을 이용하기

표 2. 축전기의 특성비교

항목	구분	전해액전지	Hybrid Supercapacitor	Supercapacitor	Capattery	최신형 2차전지
정격방전시간	수초	수초~수분	수초~수(십)분	수십분~수시간	수시간	수시간
정격충전시간	수초이내	수초~수분	수(십)분이내	수십분이내	수시간	수시간
에너지밀도(Wh/kg)	~0.1	0.1~1	2~10	5~20	20~100	20~100
동력밀도 (W/kg)	10,000이상	5,000~20,000	1,000~2,000	200~1,000	50~200	50~200
충방전효율 (%)	90~98	90~98	90~95	85~90	70~85	70~85
작동온도(°C)	-25~65	-40~90	-40~90	-30~70	-20~70	-20~70
cell 전압(VDC)	120~900	1~500	1~3.0	1~3.0	~3.0	~3.0
충방전반복횟수	1,000,000이상	200,000이상	100,000이상	100,000이하	500~1000	500~1000

위하여 최근부터 연구개발이 활발히 시작되고 있는 전기화학 축전기 신기술 중에서 하이브리드 전지 기술이 있다.

2차전지는 저전류 장시간 충방전 사용이 가능한 반면, 대전류의 빠른 라이징 타임(rising time)을 갖는 펄스 충방전이 요구되는 경우에는 적합한 특성을 보이지 못한다. 이는 축전 메카니즘이 산화환원 반응에 의존하기 때문이며 이때 산화환원의 반응속도와 그 반응량(전하량)이 크게 제한되어 큰 내부 저항(internal resistance)을 갖게 때문이다. 아울러, 충분히 가역적이지 못한 축전 메카니즘으로 인하여 전극소재의 열화 현상(degradation)이 발생하고 충방전 반복수명이 500~1000회 이내에서 제한된다.(〈표 2〉 참조) 따라서, 고가의 소재를 사용하는 2차전지의 경우 동력밀도의 향상과 충방전 반복사용 수명의 획기적인 연장이 요구되고 있다.

최근들어, 니켈수소전지나 리튬이온전지 기술을 응용하여 에너지밀도는 리튬이온전지보다 다소 낮으나 동력밀도가 현격하게 향상된 하이브리드 전지를 연구 개발코자하는 노력이 더욱 활발해 지고 있다. 니켈수소전지의 특성과 전기이중층 캐패시터의 특성을 결합한 형태의 하이브리드 전지는 현재 러시아의 ESMA사와 ELIT사에서 개발하여 상품화 초기단계에 있다. 일본에서는 리튬이온전지와 초고용량 캐패시터의 중간형인 유기전해액계 하이브리드 전지 연구개발을 진행 중에 있다. 국내에서는 한국에너지기술연구원 에너지저장연구센터에서는 자체연구사업의 일환으로 이들 러시아 제품과 같이 니켈수소전지와 전기이중층 캐패시터의 중간형인 하이브리드 전지 개발연구를 진행 중에 있으며 상당한 연구성과를 거두고 있다.

한국에너지기술연구원 에너지저장연구센터에서 수행 중인 하이브리드 전지 연구개발 진행내용을 간략히 소개하면, 전극소재로서 양극은 니켈계 금속분말과 활성탄소분말을 혼합하여 사용하고 음극은 활성탄소만을 사용한다. 각각의 전극을 제작

한 후 충분한 에이징(aging) 과정을 거친 후 단위 셀(cell)을 조립하게 된다. 뚜렷한 성능 특성으로서는 수용성 전해액(KOH)에서도 단위 셀 전압을 1.6 Volt(최대 1.7 Volt)까지 올릴 수 있어서 전기이중층 캐패시터보다 훨씬 증가된 에너지 밀도(~5.0 Wh/kg, 전해액과 케이스 및 단자 중량 포함)를 갖으며 니켈수소전지보다 크게 증가된 동력밀도(약 2 kW/kg 이상)를 보인다. 그러나 작동전압 범위는 초고용량 캐패시터의 경우와는 달리 약 0.8V에서 1.6V의 범위로 제한된다.

2.2.2 하이브리드 초고용량 캐패시터 (hybrid supercapacitor)기술

하이브리드 초고용량 캐패시터는 전해캐패시터와 전기이중층 캐패시터의 중간형인 전기화학 축전기이다. 수초 이내의 짧은 충방전 시간에 큰 펄스 출력을 요구하며 높은 전압과 주파수 영역에서 사용되는 축전기가 가져야할 특성영역을 만족시키게 된다. 특히, 초고용량 캐패시터와 2차전지는 단위 셀의 전압이 1-3V의 범위에서 제한되는 문제점이 있다. 이러한 문제는 실제의 응용시스템에서 수십 볼트(Volt) 이상을 요구하는 축전시스템 전압을 유지하기 위하여 전압평형회로(voltage equalization circuit)등과 같은 별도의 보완기능을 추가해야함을 의미한다.

예를 들어, 전압이 3V-10F인 단위 팩(pack) 10개를 직렬로 연결해서 30V-1F인 축전시스템을 구성한다고 할 때 10개의 단위 팩들의 내부저항이 동일하다는 전제를 하고 있음을 명심할 필요가 있다. 수 밀리 옴(milli-Ohm) 범위의 내부저항을 가진 단위 팩들이 실제적으로 10% 정도의 내부저항 오차를 가진다면 어떤 단위 팩은 충전전압이 3.3V가되고 어떤 단위 팩은 2.7V가 되는 전압불균형 문제가 발생한다. 실제적으로 이는 축전시스템의 내부저항의 증가와 충방전시에 축전시스템의 과열발생과 충방전 효율의 감소 원인이 되므로 각각의 팩에 대한 과충전 방지 및 등전압 유지를 위한 별도의 제어회로를 구성하고 더 많은 수의 단위 팩을 여분으로 한 축전시스템을 구성하고 있다. 그러나 만약 축전용량은 1/100이지만 단위 셀의 전압이 10배 높은(즉, 동일한 에너지밀도의) 30V-0.1F급 단위 팩 축전기가 있다면 이러한 등전압 유지를 위한 보호회로가 불필요하게 되고 이러한 단위 팩 축전기 10개만으로 단순 병렬 연결하면 동일한 에너지량을 만족시키고 내부저항은 오히려 감소하게 되는 큰 장점이 있다.

세계적으로 하이브리드 초고용량 캐패시터를 연구 개발한 회사는 미국의 EVANS사와 AEROVOX사가 있다. 미국의 두 회사에서는 양극물질로써 알루미늄(Al)과 탄탈륨(Ta)을 음극물질로써 루테튬(Ru)을 주로 사용하여 동일한 용량의 전해 캐패시터에 비하여 에너지밀도를 5배 이상 향상시켰다. 한국에너지기술연구원에서는 양극소재를 알루미늄으로 하고 음극소재를 활성탄소를 사용하는 하이브리드 초고용량 캐패

시터 신기술을 연구개발하고 있다. 본 신기술의 핵심은 300V까지의 단위 셀 전압과 100 정도의 사용온도에서도 안정한 전해액을 조성하는 것과 양극에서의 산화막을 균일하게 형성하면서도 큰 비표면적을 만들어 축전용량을 크게 증가시키는 소재기술에 있다.

2.3 전기화학 축전기의 응용

전기화학 축전기의 활용은 방전시간에 따른 방전 전류의 정도에 따라 <표 3>에서와 같이 크게 네 가지 정도로 구별할 수 있다. 방전시간이 매우 짧은 펄스파워용으로는 매우 큰 방전 전류를 낼 수 있어야 하는데 전기화학 축전기의 내부저항은 전지에 비하여 매우 적으므로 가능하다. 실제로 약 600g의 중량을 가진 2.7V-3000F급의 상용화된 전기이중층 캐패시터의 경우 1kHz에서의 내부저항 값이 약 0.5 milli-Ohm을 갖으며 500Amp 이상의 방전전류를 2-3초간 발생할 수 있다. 이와 같이 전기화학 축전기들은 저전압에서도 대전류 충방전이 가능하며, 충방전 효율이 95%이상으로 매우 높고, 충방전 반복사용수명이 매우 길며 무공해성 소재를 사용하는 축전장치이므로 그 특징을 살려서 활용할 수 있는 분야가 매우 광범위하다.

특히, 차세대형 무공해 전원인 연료전지시스템이나 태양전지 시스템에서 전력저장용으로 사용하게 되면 부하 측에서 발생될 수 있는 순간과부하를 감당할 수 있는 부하조절 능력이 탁월하다. 예를 들어, 연료전지시스템의 운전개시에 필요한 부속장치의 가열을 비롯하여 펌프, 밸브 등의 부품 작동에 소요되는 전력을 전기화학 축전기로 감당할 수 있다. 또한, 운전 중에 정격출력보다 훨씬 큰 과부하를 신속히 충족시켜 주어야 할 경우에는 연료전지 스택(stack)의 출력만으로는 만족시킬 수 없거나 수십 초 내지 수 분 이상이 소요되므로 2차전지보다 동력밀도가 큰 전기화학 축전기를 사용하는 것이 고효율 연료전지 시스템을 구성할 수 있는 훌륭한 방법이 된다.

각종 전자제품의 경우 메모리 칩(chip)의 백업(back-up)용으로써 코인(coin) 모양으로 제작된 5F급 미만의 소용량 전기이중층 캐패시터를 이미 많이 활용하고 있지만 앞으로는 점점

표 3. 전기화학 축전기의 기능별 활용분야

기능별 분류	방전시간	활용분야
Pulse Power	0.001초 이하	High Energy Pulse Power Laser System, Military/Medical Equipment
Bridge Power	수 초 이하	Internal Combustion Engine Starter, Industrial Motor Starter, Air-Bag/Actuator
Load Leveling	수 분 이하	EV/HEV, Fuel-Cell System, Power Line Network
Standby Power	수 시간	Solar-Cell system, Memory Protection

대용량 고전압화된 모듈 내지 뱅크(bank) 형태로 전기화학 축전기가 많이 활용될 전망이다. 예를 들면 태양전지를 이용한 차선표시 및 도로표시등의 경우 5V-수 십F급 이상이 활용되며 직류전원 용접기의 경우 수 십V-수 천F급 이상이 사용된다. 아울러, 내연기관 엔진과 전기모터 구동방식이 같이 내장된 하이브리드 차량(HEV: Hybrid Electric Vehicle)의 경우 300-400V 정도의 전압을 유지하며 정격출력 20-40kW의 출력을 낼 수 있는 전기화학 축전기 뱅크가 장착된다. 이러한 HEV 차량의 경우 2차전지로서는 불가능한 브레이킹 에너지 재생(breaking energy regeneration) 기능을 가지게 되며 내연기관 엔진이 최고 효율점에서 연속운전이 가능해 지므로 약 40%이상의 연비향상 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

표 4. 전기화학 축전기의 활용 용도별 주요제원

분 야	품 명	제 원 범 위
가전분야	VCR	0.047~1F, 5.5V, 3min~1hr
	Audio System	1F, 5.5V, 4days, Micro PD1704C28 chip, PD1709STC127 chip
	Video Camera	0.022F, 5.5V, 1hour, 64KCMOS SRAM
	Flash Camera	0.043~0.056F, 5.5V, 1hour
	CATV	1F, 5.5V, Micro 170886-023 chip, DSS IC (TV channel memory)
컴퓨터분야	SRAM	1F, 5.5V, ~1sec, 64KCMOS SRAM
	Sequence Controllers	1F, 5.5V, 64KCMOS SRAM, 256CMOS SRAM, 1Mega CMOS SRAM
	Computer Bridge Power	0.01~1.5F, 5.5~11V, 50~70gr, 10~25cc, lap-top computer(UPS)
차량용	Actuator	11V, solenoid valve Electric Power Steering 25~50F, 16V, 1yrs. (fuel saving)
	Engine Starting (CE)	60F, 16V (Battery saving)
	Electric Vehicle	100~200F, 300V (Hybrid EV load leveling)
	Cappattery	Capacitor + Battery, 65F, 16V(1/3 of Battery size)
산업용	Motor Starter	10~200F, 1~100V, 1~5kg, 0.1~10Litter Large cranking circuit for large ocean-going vessels Dissel electric locomotives
	Amusement Park Ride	470V, 2.3V, Rapid Charging System
	UPS	~300VDC, ~10F, High frequency
	Welding Machine	~20VDC, ~1000F, High current
군사/우주용	Weapons System	0.01~1.5F, 5.5~11V, 50~75 gravitafinal accl., 10~25cc volume(in missile for after firing)
	Satellite Data	Solar Energy Energy Storage Pulse Power Supply
	Transmission	System (under development)
기 타	Taxi Meters	0.22F, 5.5V, 12hours
	Solar Battery	0.22F, 5.5V, 1hour
	Cellular Phone	1-5F, 5.5V, days
	Automotive	Ignition System, Air-bag Atuator, Catalitic Device Preheating
	Medical/Food	Defibrillators, Sterilization
High Power System	Pulse Power Laser System, Plasma Switching device	

표 5. 전기화학 축전기의 세계시장 규모

전압 \ 년도	2002	2003	2004	2005	2006
12V 이하	378	412	476	693	1,006
12-48V	63	70	80	91	112
48V 이상	96	155	498	908	1,275
합계(백만US\$)	536	637	1,054	1,692	2,394

시스템 전압이 수 백 Volt급으로 고전압이며 고주파 영역에서 사용해야하는 경우 지금까지 사용하고 있는 전해 캐패시터를 대체하여 하이브리드 초고용량 캐패시터를 UPS, 전력변환기, 대형 전동기 구동회로 등에 활용하게 되면 기기나 장치를 보다 소형 경량화할 수 있으며 신뢰성을 높일 수 있다. 현재 미국의 경우, 이러한 종류의 하이브리드 초고용량 축전기는 군사용과 인공위성용 등으로 채택하여 이미 사용하고 있다. 그 밖의 전기화학 축전기의 활용분야는 <표 4>에 표시하였다.

초고용량 캐패시터와 하이브리드 전지 그리고 하이브리드 초고용량 캐패시터를 포함한 신기술 전기화학 축전기의 세계시장규모에 대한 예측치를 사용전압별로 구분하여 <표 5>에 표시하였다. 지금까지의 수요는 12V 미만의 저전압 소용량형이 주축을 이루고 있지만 향후에는 48V 이상 대용량형으로 진행될 것을 예상하고 있으며 향후 4년 후에는 세계시장 규모가 현재의 4배 이상인 약 24억달러 규모를 예측하고 있다. 그러나, 전기화학 축전기 신기술의 개발 성과에 따라서는 예측치를 훨씬 상회할 가능성이 있다. 이는, 기존의 전해 캐패시터와 2차전지 수요를 용도와 특성영역에 따라 신기술 전기화학 축전기가 대체할 수 있게되기 때문이다.

3. 결 론

대부분의 전력전자회로 설계자나 전기 기기 제작자들에게는 아직까지는 생소한 '전기화학 축전기'에 대한 소개를 간략히 해보았다. 학문적인 입장에서 전기화학적 원리를 이용한다는 것 외에는 '전기화학 축전기'라고 이름지을 이유가 없으나 그 종류가 점점 다양하게 세분화되고 있어서 세계 여러 나라의 학자와 연구개발자들이 공통적으로 정한 명칭일 뿐이다. 기존의 전기 에너지저장 기기인 전지나 콘덴서(캐패시터)만을 염두에 두고 설계나 제작을 고집하여 재래의 기술제품을 생산/활용해서는 세계적인 기술경쟁력을 유지할 수 없음을 자명하다. 첨단소재기술에 바탕을 두고 급속히 발전하고 있는 신기술 분야인 전기화학 축전기 기술에 대한 깊은 관심과 투자와 노력이 있게되면 이 분야 기술 선진국이 앞서가고 있는 약 5-10년의 기술격차는 3-4년 동안에 극복할 수 있을 것으로 확신한다. ■

<감사의 글>

본 원고의 내용의 있기까지 그 동안 민군겸용기술개발사업과 국가지정연구실사업으로 연구개발비 지원을 해주신 과학기술부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors : scientific fundamentals and technological applications", Kluwer Academic/ Plenum publishers, New York, 1999.
- [2] Florida Educational Seminars, Inc., "The 9th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices", December 6-8, 1999.
- [3] Florida Educational Seminars, Inc., "The 10th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices", December 4-6, 2000.
- [4] Florida Educational Seminars, Inc., "The 10th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices", December 3-5, 2001.
- [5] Paumanok Publication Inc., "Supercapacitors: World Markets, Technologies and Opportunities: 1999-2004", -135 pp., 2000.

<저 자 소 개>



김종휘

1980년 인하대 공대 항공우주공학과(학사).
1992년 미국 Hampton Univ. 물리학과(석사).
1998년 러시아 Kurchatov Institute 물리학과(박사). 현재 한국에너지기술연구원 에너지저장 연구센터장, 주요연구분야는 Supercapacitor 기술 및 전기화학적 에너지 저장 신기술.