

고출력, 반영구적 사이클수명의 슈퍼커패시터 기술 동향

김 영 호

(네스캡 이사, 연구소장)

1. 서론

슈퍼커패시터는 축전용량이 대단히 큰 커패시터로 울트라 커패시터(ultracapacitor)라고도 불린다. 학술적인 용어로는 기존의 정전기식(electrostatic) 또는 전해식(electrolytic)과 구분해 전기화학식 커패시터(electrochemical capacitor)라고 불린다.

슈퍼커패시터는 화학반응을 이용하는 배터리와 달리 전극과 전해질 계면으로의 단순한 이온의 이동이나 표면화학반응에 의한 축전현상을 이용한다. 이에 따라 급속충방전이 가능하고 높은 충방전효율 및 반영구적인 사이클수명 특성으로 보조배터리나 배터리 대체용으로 사용될 수 있는 차세대 에너지 저장장치로 각광받고 있다.

슈퍼커패시터는 1980년대부터 상용화되기 시작해 개발의 역사는 비교적 짧지만 전통적으로 사용되어 왔던 활성탄을 포함한 금속산화물, 전도성고분자 등의 신규 전극재료와 비대칭 전극을 사용하는 하이브리드형 제품디자인 기술의 개발로 그 발전 속도는 매우 빠르다. 최근에 발표된 제품은 에너지밀도가 Ni-MH 배터리를 넘어서는 것도 있어 일본에서는 이러한 비약적인 기술의 발전을 '축전혁명'이라 일컫고 있다.

본 글은 슈퍼커패시터의 축전메카니즘에 따른 구분, 응용, 기술개발 및 업체동향, 향후 전망의 순으로 전개하고자 한다.

2. 축전메카니즘에 따른 구분

슈퍼커패시터는 전극물질과 그에 의존하는 축전메카니즘에

따라 크게 전기이중층 커패시터와 의사커패시터(Pseudocapacitor)로 구분된다. 이를 표 1에 나타내었다.

가장 많이 상용화되어있는 것은 전기이중층커패시터(Electric Double Layer capacitor)이다. 전기이중층커패시터는 특수 활성탄을 전극소재로 사용해 전극과 전해액의 계면에 형성되는 전기이중층에서의 축전현상을 이용한 것이다. 활성탄은 대단히 큰 비표면적(통상 1500m²/g 이상)과 70% 이상의 큰 기공율을 가지며 활성탄의 큰 비표면적과 수십 옴스트롬(Å)이하의 얇은 전기이중층에 의해 대단히 큰 축전용량을 보이게 된다. 충전시키면 용액 속에서 자유로이 분포되어 있던 이온들은 반대 극성을 띠는 전극으로 이동해 축적되어 전하를 저장하게 되며, 방전시키면 외부 부하로 전자가 흘러 전기적인 일을 하면서 용액내의 이온들은 다시 무질서한 분포를 하게 된다. 활성탄 전극과 전해액의 이온 및 외부회로를 통한 전자의 이동과정을 그림 1에 나타내었다.

금속산화물 전극재료의 경우 RuO₂는 박막전극으로 제조할 경우 저항이 낮아 고출력 특성의 초고용량 커패시터를 제조할 수 있으며, 비정질의 수화물(RuO₂ · xH₂O)을 전극재료로 사용하면 비정전용량이 720F/g으로 월등하게 증가된다고 보고되었다. 그러나 루테늄의 높은 가격이 큰 단점으로 지적되고 있어 가격이 싼 니켈 등을 사용하는 전극재료의 개발연구가 많이 시도되고 있다.

전도성고분자는 무게가 가볍고 비교적 쉽게 합성할 수 있기 때문에 많은 연구가 이루어져 오고 있으나 전도성고분자의 열화에 의하여 수명이 짧은 단점이 있었다. 최근 2~3년 전부터 일본에서는 거대분자를 탄소섬유화 복합화하여 수명을 획기

표 1 슈퍼커패시터의 분류

특성	종류	의사커패시터		
		전기이중층커패시터	금속산화물	전도성 고분자
충전메카니즘		전기이중층 전하흡착	표면 산화, 환원반응	n, p-doping
전극물질		활성탄 (분말, 섬유), 카본에어로젤, 카본나노튜브	RuO ₂ , Ni(OH) ₂ , MnO ₂ , PbO ₂	Poly-(aromatics), Supramolecules
비표면적 (m ² /g)		1500~3000	90~150	-
비정전용량 (F/g)		400~800 (수계), 160~320 (비수계)	300~760	400~500
전해질		수계, 비수계	수계, 비수계	수계, 비수계
작동전압 (V)		1.0 (수계), 2.3~3.0 (비수계)	1~2	1~3
에너지밀도 (Wh/kg)		1~3 (수계), 2~10 (비수계)	0.8~20	3~15
출력밀도 (kW/kg)		0.8~5 (수계), 0.5~3 (수계),	< 10	4
상대 가격		중 ~ 고	저 ~ 초고	저

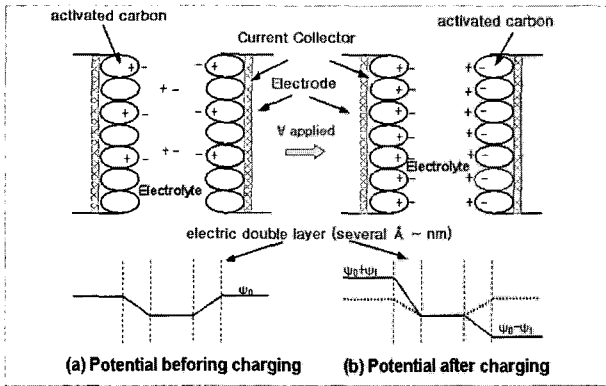


그림 1 전기이중층커패시터의 충전전개념도

적으로 개선시킨 연구가 발표되고 있다.

3. 제품 및 응용

슈퍼커패시터는 용량대별로 1F 이하를 소형, 1~100F 사이를 중형, 100F 이상을 대형으로 구분한다. 소형은 코인형, 버튼형, 원통형 제품으로 전자기기의 메모리백업용으로 주로 사용된다. 중형은 각형과 원통형으로 액추에이터, 장난감, 태양광 저장식 LED 발광장치에 주로 사용된다. 최근에는 자동차용 ABS 브레이크 어시스트용 전원용으로도 수요가 급증하고 있다. 대형은 하이브리드 자동차용, 풍력발전기용 및 산업

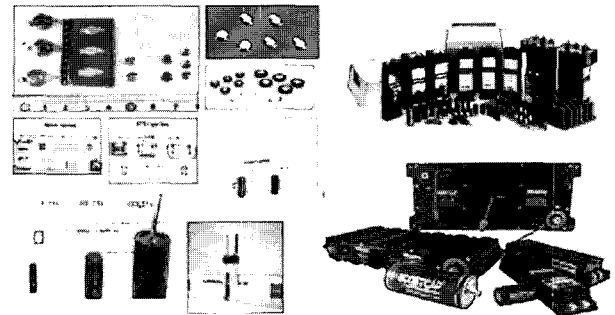


그림 2 각종 슈퍼커패시터 제품의 예

용 무정전전원장치나 순시전압 보상기 등에 사용된다. 그림 2에 각종 제품의 예를 나타내었다.

슈퍼커패시터의 용도는 요구되는 특성에 따라 대단히 다양하다. 슈퍼커패시터는 일반적으로 에너지원은 아니다. 커패시터와 마찬가지로 방전되기 전에 반드시 충전되어야 하기 때문에 항상 충전소스가 옆에 있어야만 한다. 슈퍼커패시터가 저장할 수 있는 에너지는 배터리보다 작지만 아주 짧은 시간동안의 순시 첨두 전력(instantaneous peak power)을 공급할 수 있는 능력은 배터리의 10배에서 100배 이상이다. 따라서 수 초, 수 시간 또는 수 일간 에너지를 저장하고 있다가 큰 전력이 필요할 경우 에너지를 공급할 수 있다. 슈퍼커패시터를 배터리와 조합해 사용하면 피크 출력(peak power)을 슈퍼커패시터가 담당함으로써 배터리에 부과되는 과도한 스

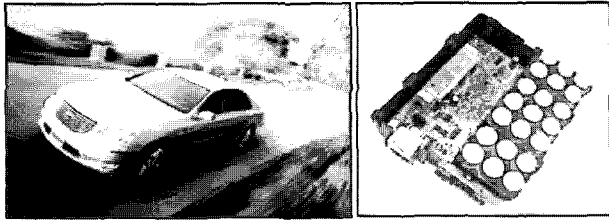


그림 3 도요타 마제스타와 전자제어식 브레이크 시스템에 사용되는 슈퍼커패시터 모듈

표 2 슈퍼커패시터의 자동차 적용 개발 현황

업체	차종	수용량/전압	수퍼커패시터 개발업체	차량구분	비고
Honda	ACEV0	2700F, 275V	자이 (Okamura Lab)	FCV	Delivery Truck
	ACEV5	3090F, 330V		FCV	City Bus
	ACEV6	2830F, 330V		HEV	City Bus
	FCX-V3, V4	625W, 1308F, 400V		FCV	SUV
Toyota-Hino	FCM-SUS2		Maxwell 회	EV	Hino 독자-문헌없음
Nissan Diesel	Hybrid Bus		Okamura Lab (NEDO 후원)	LNG엔진	City Bus
	Hybrid Truck	200kW		디젤엔진	Truck
VW	Bora HyPower	60kW	Maxwell 회	FCV	중간승용
BMW	BMW-X5		Maxwell 회	연진 HEV	완전트럭
D-C	Dodge Sprinter			FCV	VAN
Mazda	Bongo Friend	1800F, 92V	Maxwell 회	FCV	납산 EV의 최종적전용
	Damio	20kW	Maxwell 회	FCV	소형 승용
Solectria	Force EV	-2700F, 48V -3400F, 120V(145형)	Maxwell 회 Hesscap 회	HEV	납산 EV의 최종적전용
HMC	Santa-FE	1700F, 270V	Hesscap 회	FCV	SUV

(출처: 현대자동차, '05년 차세대성장동력기술개발사 차세대전지분야 통합워크샵)

트레스 즉, 중부하 방전을 완화시켜 에너지저장시스템의 출력특성 향상 및 배터리의 수명을 연장할 수 있다. 슈퍼커패시터의 높은 출력밀도는 낮은 등가직렬저항 (Equivalent Series Resistance, ESR)에서 비롯되며, 낮은 내부저항과 높은 정전용량 때문에 배터리와 재래식 커패시터 각각의 장점을 가지고 가교역할을 할 수 있는 중간적인 특성을 보인다. 따라서 슈퍼커패시터의 기술은 전력 및 에너지산업의 세계에서 고유의 틈새시장(niche market)을 차지하며, 배터리의 대체 및 보완시장 그리고 슈퍼커패시터만이 가능한 유망신규시장의 창출이 기대된다고 할 수 있다.

아래에 몇 가지 대표적인 응용분야에 대해 예를 들어 설명한다.

가장 큰 유망시장은 자동차 분야이다. 슈퍼커패시터는 전자제어식 브레이크(ECB, Electronically Control Brake System)의 안정적인 전력공급용으로 사용된다. 도요타에서는 2003년 9월부터 하이브리드자동차인 뉴프리우스와 미니밴 에스티마, 일반 고급 세단인 마제스타(수출명 렉서스) 3개 차종의 전자제어식 브레이크용 전원으로 슈퍼커패시터를 사용하기 시작했다. 그림 3은 마제스타와 장착된 슈퍼커패시터의 사진이다.

하이브리드나 연료전지자동차에서 stop-start(또는 idle-stop)의 반복에 의한 재출발(restarting or re-cranking),

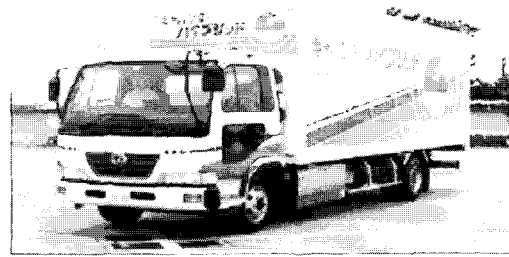


그림 4 슈퍼커패시터가 채용된 자동차의 예. 위로부터 닛산의 커패시터-하이브리드 트럭, 혼다의 FCX-V3, BMW의 Efficient Dynamics.

electric power assist(또는 engine torque assist) 또는 회생 제동기능의 구현을 위해서는 고효율 및 장수명의 에너지저장 장치가 핵심부품이다. 슈퍼커패시터는 이러한 극도의 다이내믹한 차량의 운영환경에 최고로 적합한 특성을 갖는다. Stop-start 기능의 구현시 엔진의 시동회수는 기존의 차량에 비하여 통상 4 배에서 10 배까지 증가하게 되며, 가속 및 추월 시에 ISG(Integrated Starter Generator) 또는 traction motor에 공급되는 전력은 평상시 차량소요전력의 10배 이상이다.

표 2에 슈퍼커패시터를 적용한 세계 여러자동차메이커들의 개발현황을 요약해 나타내었다.

닛산은 2002년 세계 최초로 슈퍼커패시터를 채용한 커패시터-하이브리드 트럭의 생산을 개시했다. 이 트럭은 60만 km, 240만번의 사이클을 반복해도 슈퍼커패시터는 전혀 문제가 없으며, 종래의 디젤차에 비해 연비가 1.5배 이상, 유동성 배기가스는 33~70% 가량 감소된다고 한다. 혼다는 2003년 슈퍼커패시터가 장착된 수소연료전지차 FCX-V3'를 양산하

였다. 최근에 BMW는 슈퍼커패시터를 사용하는 하이브리드 컨셉트카 X3 이피션트다이내믹스(EfficientDynamics)'를 2005년 도쿄 모터쇼에 첫 공개했다. 이 차는 직렬 6기통 엔진을 장착했고, 최대 시속 235km의 가속성을 갖췄다. 그림 4에 대표적인 3종의 차량을 나타내었다.

슈퍼커패시터를 이용하면 전력 신뢰성과 전력의 품질을 향상시킬 수 있다. 공장의 DC 전력과 함께 슈퍼커패시터를 병렬로 사용하면 전압강하를 보상할 수 있다. 슈퍼커패시터는 주 전원의 일부 에너지를 이용하여 충전 상태를 유지할 수 있고, 전압이 강하할 경우 떨어진 전압만큼을 방전하여 채워준 후 주 전원을 이용하여 재충전 된다.

슈퍼커패시터는 수십 초 이하의 백업시간이 필요한 무정전 전원장치의 전원으로 사용된다. 대전력의 백업이 필요한 대규모 시설에 있어서는 배터리에 의해 공급할 수 있는 전력과 에너지에 한계가 있어 무정전전원장치는 디젤발전기 등의 자가발전장비가 가동하기까지 수십 초 이내의 백업을 담당하게 된다. 이처럼 짧은 시간동안의 가교전력(bridge power)의 백업용으로는 순시파워공급 및 응답속도가 빠른 슈퍼커패시터가 배터리보다 더욱 적합하다.

Stiffening capacitor는 일반적으로 앰프에 병렬로 연결하는 1000 μ F 이상의 큰 콘덴서를 말한다. 사용하는 목적은 얼터네이터나 배터리로부터 전원을 공급받아 저장한 뒤 앰프가 큰 출력을 낼 때 신속하게 전원을 공급하기 위함이다. 커패시터는 앰프 가까이서 항상 배터리의 전압을 유지시켜주며 특성상 순간 방전과 재충전이 이루어지기 때문에 전압 강하 없이 베이스를 강하게 받쳐주며 앰프의 온도가 올라가지 않게

도와준다. 또한 DC전원에 AC성분이 섞여 들어오면 앰프의 전압이 내려갈 수 있으나 병렬로 연결된 커패시터는 Low-pass Filter 역할을 하므로 AC성분을 제거하고 깨끗한 전원을 공급하여 모든 주파수대역의 재생을 더욱 더 깨끗하게 해준다. 현재 stiffening capacitor는 주로 재래식 알루미늄 전해커패시터가 사용되는데 최고용량이 2F 미만이며, 보다 강력한 출력보강을 위해 10F 이상의 대용량 슈퍼커패시터를 이용한 제품이 출시되고 있다.

4. 기술개발 동향

슈퍼커패시터는 초기에 메모리백업용 상품화가 시작되었으나 배터리와 차별되는 고유의 고출력 특성이 발휘되는 분야로 기술이 발전하고 있다.

전극 소재 측면에서는 고성능 활성탄의 도입, 산화물 및 기타 전극재를 이용한 신형 슈퍼커패시터 및 배터리의 기술을 접목한 하이브리드커패시터의 개발이 병행되고 있다. 전해액은 수계에서 비수계로 1차적인 진보가 이루어진 후에 비수계에서도 아세트나이트릴계에서 프로필렌카보네이트계로의 진화가 이루어짐으로써 고전압, 고출력, 고에너지 특성이 구현되고 있다. 셀의 구조는 기존의 코인형에서 고출력형 원통형, 각형제품으로 다양화 되고 있다.

슈퍼커패시터 메이커는 전 세계 약 30여개 이상이며 여기서는 기술개발이 활발한 중대형 제품의 주요 메이커의 현황을 표 3에 나타낸다.

최근 들어서는 슈퍼커패시터의 단점인 저에너지밀도를 극

표 3 슈퍼커패시터 메이커 현황

기업	전극 구성 (전해액)	현황
Maxwell Technologies	활성탄, 탄소섬유/유기계(ACN)	2.7V/~2700F 원통형/각형 단셀 및 모듈제품. 자동차, 연료전지, 항공기, 철도 등 신시장 개척으로 시장 주도.
EPCOS	활성탄/유기계(ACN)	2.5V/~5000F 원통형 단셀 및 모듈. 낮은 내부저항(ESR) 제품이 특징.
Matsushita (Panasonic)	활성탄/유기계(PC)	중소형 세계 1위 점유율. 중대형은 PC계 위주로 개발. 자동차업계에서 ECB용으로 슈퍼캡 최초 적용.
NEC Tokin	활성탄/유기계(PC)	2.5V/~100F 중형 제품 위주, Stacking Packaging 기술 보유. 고에너지 밀도형 제품.
Nesscap	활성탄/유기계 (PC/ACN)	2.7V/~5000F 원통형/각형 단셀 및 모듈제품 생산. 수송용, 산업용, 소비자 가전용 전 분야에 걸친 제품 개발 및 생산.
Nippon Chemicon	활성탄/유기계(PC)	이스즈자동차와 합병회사인 CCR의 사업을 인수. 자동차용 중대형품 위주로 개발에 주력하나 다소 높은 ESR의 해결이 필요.
Asahi Glass	활성탄/유기계(PC)	전지의 부하경감용 및 자동차용 고에너지밀도의 중대형품 개발에 집중.

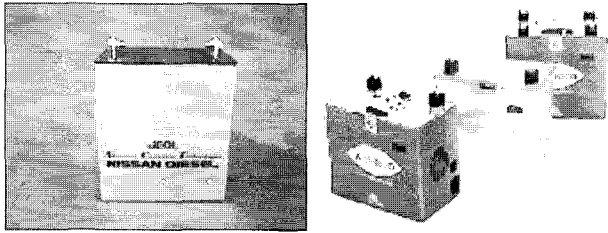


그림 5 'Nanogate Capacitor' 기술을 활용한 제품들

복합한 새로운 탄소계 전극소재 및 하이브리드형 커패시터 방식의 신기술이 개발되어 리튬이차전지의 대를 이을 차세대 전지로서 부각되고 있다.

2003년 10월에 일본전자(JEOL)은 에너지밀도를 50~75Wh/kg으로 향상시킨 'Nanogate Capacitor'를 발표하고 상품명은 'EcoCache'로 등록하였다. 에너지밀도는 기존제품의 10배 이상의 능력이며 내전압도 높여 일약 관심을 모았다. 동사는 닛산디젤과 자동차용 제품도 공동개발하고 있다. 미쯔이물산과 음론전기가 공동으로 투자한 일본의 파워시스템사(Power Systems)는 원천기술보유사인 오카무라연구소(岡村研究所)의 'Nanogate Capacitor'와 전자제어 기술을 이용한 새로운 축전시스템을 'ECaSS[®] (Energy Capacitor Systems)라 명명하고 2006년부터 10만셀/월 규모로 본격적인 양산에 착수했다. 그림 5에 이들 제품을 나타내었다.

나노게이트 커패시터는 비다공성 탄소 소재를 전계부활(Electrical Activation)이라는 특수 공정을 이용해 기공구조를 최적화함으로써 순수한 탄소-탄소계의 전기이중층커패시터의 에너지밀도를 비약적으로 향상시켰다는 점에서 획기적이라 할 수 있다. 그러나 고출력 방전시 발열의 문제와 사이클수명의 문제도 있어 단기간 자동차용보다는 1~10분 정도의 심야전력저장이나 태양광발전 및 UPS(Uninterruptible Power Supply) 시장에 진출할 전망이다 것으로 알려지고 있다.

닛신보는 이온성액체(Ionic Liquid)를 전해액으로 채용하고 전극재료나 도전 접착제를 고안하여 내부저항을 저감, -40℃에서도 상온 정전용량의 90% 이상을 유지하는 전기이중층커패시터를 개발하였다. 나아가 단위 셀을 6개 직렬로 접속하여 전압밸런스를 제어한 정격전압 14V에 대응한 모듈로 발전시켰다.

아사히글라스는 전극과 전해액을 독자개발하여 3V 내전압과 20Wh/L(1000W/L)인 전기이중층커패시터 개발에 성공하였다. 종래보다 3배 정도 에너지밀도가 향상되어 대용량 실용화를 목표로 하고 있다. 또한 자회사인 아사히카세이 일렉트로닉스는 KRI(구 칸사이기술연구소)와 공동으로 새로운 축전소자를 개발하였다. 종래의 전기이중층커패시터와 같은


수준의 출력으로 전기를 꺼낼 수 있고 에너지용량은 전기이중층커패시터보다 3~5배 큰 것으로 알려지고 있다.

NEC토킨은 수계 전해액으로 자동차 ISG용을 목표로 하는 전기이중층커패시터 개발을 진행해 왔으나 내부저항이 높은 결점을 극복하지 못하고 일본철도연구소와 함께 전차 ABS의 축전매체로서 제품화하였다.

이상의 각종 새로운 기술들은 어느 것이나 개발수준의 발표로 상용화에는 좀 더 시간이 소요될 것이나 자동차용을 목표로 하는 분위기가 역력하여 자동차용은 에너지밀도의 향상이 필수조건임을 시사하고 있다.

국내에서는 네스캡이 대용량 전기이중층커패시터 및 하이브리드커패시터 개발에서 선도적인 활약을 보여주고 있으며 코칩, SY Hightech, 뉴인텍 등에서 소규모로 제품 생산이 이루어지고 있다. 2005년부터 대기업인 LS전선이 신규로 사업에 참여하고 있어 향후 국내에서도 제품개발경쟁이 가속화될 것으로 예상된다. 한국에너지기술연구원, 한국전기연구원, 전자부품연구원, 산업과학연구원, 서울대, 연세대 등에서 소규모 제품개발 및 소재연구가 진행되고 있다.

5. 향후 전망

슈퍼커패시터(supercapacitor)는 출력과 에너지 관리의 세계에서 독특한 위치를 점한다. 향후 신기술 자동차나 일반 산업용 에너지장치로 중요한 핵심부품이 될 것이며 하나의 산업군으로 자리잡아가고 있다. 화학반응 없이 물리적 작용에 의해 전기에너지를 저장하는 방법 중의 하나인 슈퍼커패시터는 사실상 무한대의 충방전이 가능하므로 2차전지나 연료전지 동력원과 조합될 경우 전기에너지 이용효율을 크게 높일 수 있다. 이처럼 슈퍼커패시터는 밝고 확실한 전망을 가지고 있어 정부가 추진 중인 10대 차세대성장동력사업의 하나로 개발이 진행되고 있지만 일본, 미국 등 선진국과 비교할 때 개발체계가 아직 미미한 실정이다. 또한 에너지밀도의 향상 및 제조원가의 절감 등 해결해야 할 기술적 과제도 많다. 따라서 이 분야에 대한 좀 더 폭넓은 인식의 확산과 함께 적극적인 투자가 필요하다고 사료된다. 

참고 문헌

- [1] World Ultracapacitor Markets, Frost and Sulliban, 2003.
- [2] 電氣二重層コンデンサ市場の徹底研究, 矢野經濟研究所, 2004.
- [3] Proc. of the "International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. 1994~2005". Florida Educational

Seminars, Inc.

- [4] Proc. of the "International Advanced Automotive Battery and Ultracapacitor Conference, 2002~2005".
- [5] Proc. of the "Advanced Capacitor World Summit, 2003~2005".
- [6] 大容量キャパシタ機術と材料Ⅱ (電機二重層キャパシタとスーパーキャパシタの最新動向, CMC 出版, 2003
- [7] Dell A. Crouch, Gary L. Ballard, "Batteries for 42/14 Volt Automotive Electrical Systems", SAE Technical Paper 2000-01-3065.

〈 저 자 소 개 〉



김영호(金榮浩)

1964년 10월 1일생. 1986년 서울대 무기재료공학과 졸업. 1990년 한국과학기술원 재료공학(전자요업) 졸업(석사). 1994년 한국과학기술원 무기재료공학(전자요업) 졸업(공학). 1994년~1995년 한국원자력연구소. 1995년~1998년 대우전자부품 선임연구원. 1998년~2000년 고등기술연구원 선임연구원. 2000년~2002년 (주)네스캡 부장. 2002년~2006년 (주)네스캡 부장. 2004년~현재 (주)네스캡 이사·연구소장.