



에너지저장장치 슈퍼커패시터 기술개발 동향

스마트섬유개발팀



1 개 요

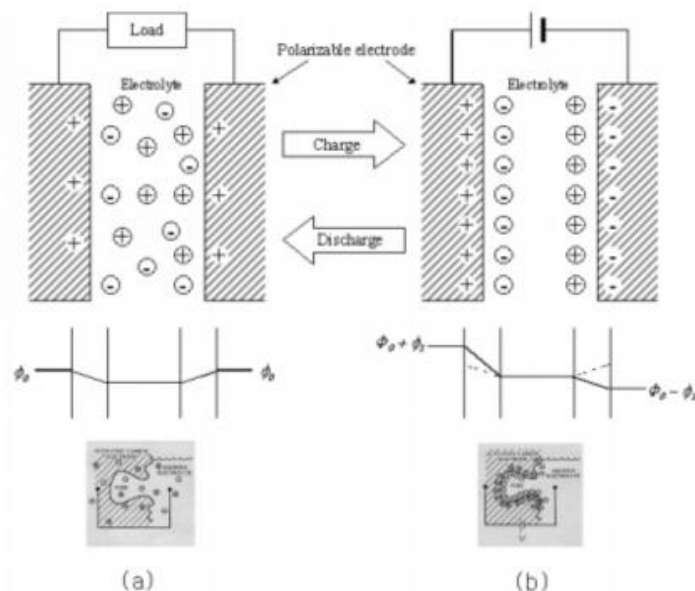
□ 기술개발의 중요성

- 최근 원유 가격 급등 및 친환경 에너지 시책에 따라 화석 원료 절감을 위한 에너지정책을 발표, 시행하고 있다. 국가 총 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우, 연평균 에너지소비 증가율이 1.1%에 달하고 있으며, 전체 에너지원의 83%가 화석연료로서 선진국에 비하여 많은 이산화탄소를 발생하고 있어 기후변화협약에 따른 온실가스 배출 규제, 국제환경 규제 강화 등으로 인한산업경쟁력이 약화되고 있음. 이러한 환경 규제 및 에너지 정책에 의하여 친환경 EV(전기자동차), 스마트그리드가 주목 받으면서 에너지 저장 장치의 개발 필요성이 대두되었고, 급성장을 보이고 있음.
- 현재 가장 많이 적용되고 있는 에너지 저장 장치로는 니켈수소 이차 전지와 리튬이차전지가 사용되고 있으나 이차 전지의 경우 고출력 방전시 전압 강하 및 반복사용 수명이 짧아지므로 2~3 년 주기로 교체가 필요하다. 따라서 최근에 슈퍼커패시터가 주목을 받고 있음. 슈퍼커패시터는 1995 년 일본, 러시아, 미국 등에서 상용화되기 시작하여 소형에서 대형에 이르기까지 그 응용분야가 다양하게 확대되고 있으며, 최근 들어 신재생에너지의 획기적 증가와 더불어 주요 에너지 저장장치로 각광받고 있음. 연료전지발전, 태양광발전, 풍력발전 등의 신재생에너지 발전은 에너지원이나 부하의 변동에 민감하게 반응하므로 단독으로 사용될 경우 출력 전압의 변동을 포함한 전력품질의 저하를 피할 수 없음.

- 하지만 슈퍼커패시터는 전력밀도가 높고, 충방전 속도가 빠르며, 충방전 사이클 수명이 50 만 사이클 이상으로 매우 길다는 특성을 갖고 있어, 부하응답 특성이 느린 신재생에너지 발전시스템에 슈퍼커패시터를 사용하면 발전된 전력과 부하전력 사이의 차이를 슈퍼커패시터가 흡수 또는 방출함으로써 전력품질을 확보하는데 기여하고 있음.
- 따라서 본고에서는 에너지 저장장치의 유망한 품목으로 부상하고 있는 슈퍼커패시터의 국내외 기술동향에 대해서 알아보고자 함.

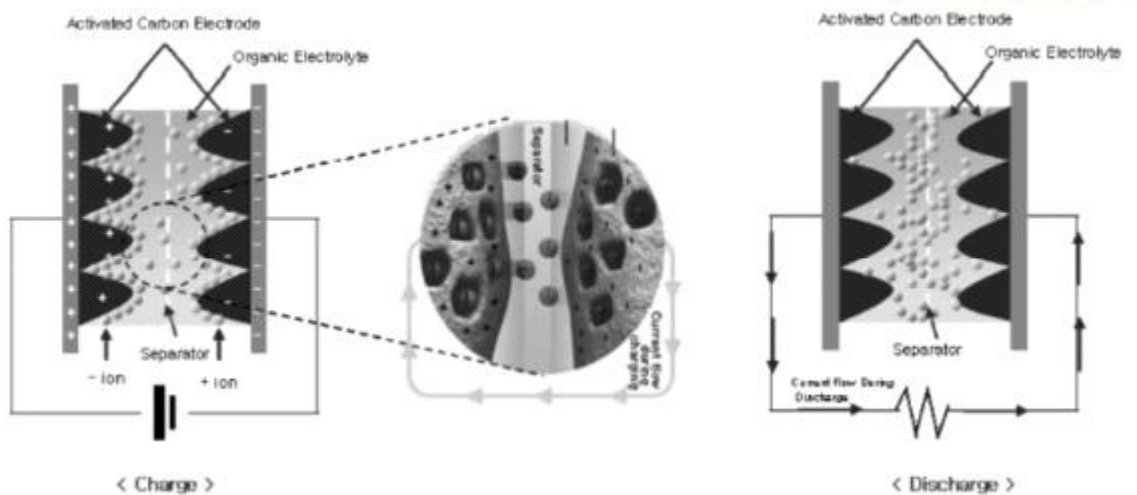
□ 슈퍼커패시터의 원리 및 구조

- 두 개의 분극성 전극으로 이루어진 EDLC의 충방전 원리는 <그림 1>와 같으며 전극-용액 계면에 전하가 배열됨. 전기 이중층 이론에 의하여 단위면적 당 전하밀도와 전기 이중층 전위와의 관계는 유전율에 비례하고 거리에 반비례하며, 수은전극에 수소의 흡착에 의한 용량은 $15\sim40 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 정도임.



<그림 1>전기이중층 캐패시터의 원리 (a)방전, (b)충전

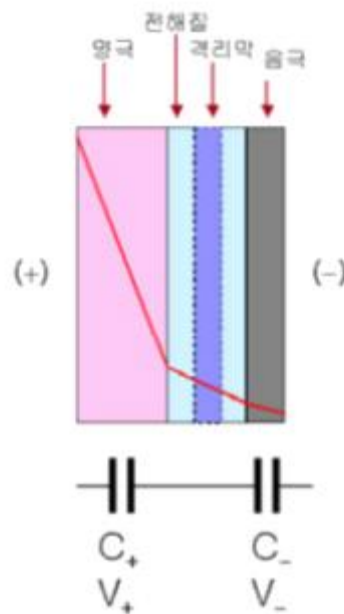
- 단위무게당 비표면적을 증가시킨 활성탄소(~3000m²/g)를 전극재료로 사용하여 슈퍼커패시터의 비약적인 용량증가를 가져왔음. 커패시터의 구조는 다공성 전극(electrode: 양극 및 음극), 격리막(separator), 전해질(electrolyte), 집전체(current collector) 및 케이스로 이루어져 있으며 2 차전지에 비하여 비교적 단순한 구조로 이루어져 있음.



<그림 2>EDLC 기본 개념도

- 하이브리드 커패시터의 원리는 양극과 음극에 서로 다른 비대칭 전극을 사용함으로써 한쪽 극은 고용량 특성의 전극재료를 사용하고, 반대 극은 고출력 특성 전극재료를 사용하여 용량 특성을 개선하고자 한 것임. 아래 <그림 3>에 hybrid capacitor의 개념을 나타냈는데, 전체 커패시터 용량은 $1/C = 1/C+ + 1/C-$ 로 주어지며, $C- \gg C+$ 이므로 전체 용량은 $C+$ 에 의하여 결정됨.
- 저전압-고용량 hybrid capacitor 에서는 양극 소재를 용량이 큰 금속 산화물을 주로 사용하여 단위 중량 당 에너지밀도를 향상시킬 수가 있는데, 슈퍼커패시터와 2 차전지의 중간적인 특성을 가지며, 작동전압은 전해질 및 전극재료의 특성에 영향을 받게 되어 수용성에서는 약 2V, 유기성에서는 약 4V의 작동전압을 가짐.

- 이와는 달리 고전압-저용량형의 hybrid capacitor에서는 양극으로 유전체를 사용하여 작동전압을 결정하게 되고, 음극은 보다 큰 용량을 가지는 전극을 사용함으로써 재래식 캐패시터와 슈퍼커패시터의 중간적인 특성을 나타내고 있음.
- 일반적으로 슈퍼커패시터의 작동전압은 전해질에 따라 결정되지만 hybrid capacitor에서는 양극의 내전압이 hybrid capacitor의 작동전압이 되기 때문에 고전압화가 가능함.



$C+$: 양극용량, $C-$: 음극용량
 $V+$: 양극전압, $V-$: 음극전압

<그림 3>Hybrid capacitor의 개념

□ 슈퍼커패시터의 종류와 특성

- 슈퍼커패시터는 사용되는 전해질에 따라 수용성과 비수용성으로 구분되며, 수용성 전해질의 경우 출력특성은 높지만 셀당 1V 정도의 낮은 작동전압을 나타내므로, 에너지밀도가 낮은 단점을 가지고 있다. 유기성의 경우 ESR(Equivalent Series Resistance)은 불리하지만, 셀당 약

2.3~3V 의 작동전압을 가지므로 에너지밀도 특성이 우수함. <표 1>은 초고용량 커패시터의 분류 및 각각의 특성을 나타냄.

- EDLC 는 앞 절에서 언급하였듯이 전기이중층 매커니즘을 적용한 것으로 전극 재료로서는 활성탄, 활성탄소 섬유, 카본 에어로젤이 적용되며, 이미 상업화에 성공하여 에너지 밀도 20Wh/kg, 출력밀도 3kW/kg 까지 상용화되어 적용되고 있음. Pseudo capacitor 는 전극과 전기화학 산화물 반응물의 산화 환원 반응을 이용하여 화학 반응을 전기적 에너지로 전환하여 저장하는 커패시터로서 EDLC 가 전기화학 이중층형 전극 표면에 형성된 이중층에만 전하를 저장하는데 비하여 전극 재료의 표면 근처까지 전하를 저장 할 수 있어 저장 용량이 EDLC 에 비하여 약 5배정도 큼. 금속산화물 전극재료의 경우 대표적으로 RuO_x , IrO_x , MnO_x 등이 있으며, 연구 결과에 의하면 결정도가 높은 재료보다는 비정질재료가 용량과 기타 물성에서 유리한 것으로 알려져 있음. Hybrid capacitor 원리는 양극과 음극에 작동전압 영역 및 비축전 용량이 상이한 비대칭전극을 사용함으로써 한쪽 전극은 고용량 특성의 전극재료를 사용하고, 반대극은 고출력 특성 전극 재료를 사용하여 용량 특성을 개선하고자 한 것임. Hybrid super capacitor는 고출력 특성 손실을 최소화하며, 높은 작동 전압 및 높은 에너지밀도 특성을 발현하는 새로운 개념의 초고용량 커패시터 기술임. 에너지밀도의 향상을 위한 Hybrid capacitor 의 경우 전극 소재의 전극 전위, 가용 전극 전위 영역, 비축전 용량, 고속 충·방전 특성을 고려하여 다양한 비대칭 전극의 조합이 가능하므로 이를 고려한 신개념 비대칭 Hybrid capacitor 및 이의 적용의 위한 전극 소재, 전해질에 대한 연구 개발이 진행되고 있음.



<표 1> Super capacitor 종류 및 특성

분류특성	EDLC		Pseudo capacitor		Hybrid super capacitor	
전극재료	활성탄소분말 활성탄소섬유 카본에어로젤		금속 산화물	전도성 고분자	탄소/활성탄 금속산화물(LTO) Li-ion	
전해질	수용성	비수용성	수용성	수용성/ 비수용성	수용성	비수용성
작동전압(V)	1	3	1~2	1~3	2	4
비에너지(Wh/kg)	1~3	2~10	0.8~2	3~10	2~7	8~15
비출력(kW/kg)	0.8~5	0.5~3	0.5~4	4	0.8~5	0.5~5
비표면적(F/g)	1,500~3,000		90~150	NA	NA	
비정전 용량(m/g)	100~200	40~80	300~760	400~500	100~200	40~80
메커니즘	전기이중층 (전하흡착)		Redox 반응		전기이중층 Redox 반응 Intercalation	
상대비용	Medium~high		Very high	Low	Medium~high	



2 동향 분석

□ 국내 연구개발 동향

- 1980 년대 활성탄소재료의 고비표면적을 이용한 소형 EDLC 가 전자 기기의 메모리 백업용으로 상용화되었고, 근래에는 전극재료와 제조 기술 발달로 고출력 특성의 중·대형 제품이 개발되어 효율적인 에너지 사용을 위해 고부가 장비의 높은 신뢰성의 차세대 에너지 저장 장치로 중요시되고 있음.
- 과학기술지원의 민·군 겸용 기술개발사업을 통하여 슈퍼커패시터에 대한 연구가 수행되었다. 이런 국가지정 연구 사업을 통하여 전해 캐 패시터와 슈퍼커패시터의 하이브리드형 캐패시터 개발연구가 진행되고 있음.
- 에너지기술연구원은 1994 년부터 EDLC 제조에 대한 지속적인 연구를 하고 있으며, 산학연 공동으로 활성탄 제조기술, 피치로부터 탄소 섬유제조 및 활성화 기술 개발, 금속산화물 전극제조 기술 등의 기술을 개발하고 있음. 최근에는 수용성 하이브리드 캐패시터의 제조 및 특성에 대한 연구를 진행하고 있으며, HEV 에 prototype 을제작하여 장착하는 실증시험 단계에 있음.
- 또한 2001 년부터 3 년 간 기본연구 사업으로 수행한 전기화학 축전기 개발연구로 국내 최초로 비대칭전극을 사용하는 대용량 고출력 전기화학 축전기를 개발하였음. 이는 상용화된 러시아 제품보다 우수한 성능을 나타내며 제품은 수용성전해질을 사용하여 1.6V/400F 급 전기화학 축전기 224 개를 직렬로 연결하여 50 kW급 뱅크를 구성하였고 기존 수용성 캐패시터에 비해 무게 당 에너지밀도를 3 배 이상 향상시켰음.
- 아래 <표 2>는 국내에서 슈퍼커패시터를 개발하고 있는 기업과 연구 소 및 학교에 대한 설명과 이들이 개발 중인 슈퍼커패시터에 대한 내용을 나타낸 것임.

<표 2> 슈퍼커패시터의 연구기관

기관명		내용
기업	(주)네스캡	활성탄소계 유기성 EDLC, 하이브리드 캐패시터
	(주)에스와이 하이테크	5.5V, 0.47F, 1F 생산 판매 중·대형 EDLC 연구
	(주)코칩	5.5V, 0.1F 이하 제품 생산 판매 중 소형 하이브리드 캐패시터 개발
	엔파워캡	수용성 하이브리드 캐패시터 고전압 하이브리드 캐패시터 개발
연구소/학교	에너지기술연구소	수용성/유기성 EDLC 연구 수용성 하이브리드 캐패시터, HEV 장착 시험 고전압 하이브리드 캐패시터
	전기연구원	활성탄소계 유기성 EDLC 연구
	KIST	EDLC-전지 하이브리드
	단국대	활성탄소계, 금속 산화물계 기초연구
	포항공대	탄소계 전극 소재 및 표면처리
	연세대	금속산화물계 기초연구
	전남대	활성탄소 섬유 제조연구

- 국내 업체 동향을 살펴보면, 네스캡의 경우 활성탄계 유기성 EDLC 및 하이브리드 슈퍼커패시터 개발에 주력하고 있고, (주)코칩의 경우는 소형 하이브리드 슈퍼커패시터, 엔파워캡은 수용성 하이브리드 및 고전압 하이브리드의 슈퍼커패시터 개발에 주력 중이다. 현대자동차는 고밀도 자동차용 슈퍼커패시터 개발을 진행 중인 것으로 알려져 있음. 또한 차세대 LIC 개발을 위해 한국전기연구원, 전자부품연구원, 생산기술연구원 등의 연구소와 연세대, 전남대, 성균관대 등의 학계를 중심으로 새로운 소재 및 구조에 대한 다양한 연구가 시도되고 있음.



□ 해외 연구개발 동향

○ 미국

- 대표적인 미국 슈퍼커패시터 기업인 Maxwell Technologies 사에서는 최근 하이브리드 버스, 에너지 그리드, 세미 트럭, 리프팅 적재, 하이브리드 전기자동차 등의 제품에 집중적용하기 시작하여 2.5V, 최대 2kW/kg 급 파워밀도를 갖는 PowerCache 라인업을 보유하고 있음. GE의 경우에는 주로 픽업 트럭에서 첨단 에너지 저장 기술을 대체할 수 있는 원천기술을 개발했고, 특히 이 분야에서 가장 많은 특허를 보유하고 있다. EPRI는 전력축적용 커패시터, UPS 용 연료전지 하이브리드, 배전소용 납전지 대체 등 전력분야의 슈퍼커패시터에 관한 지속적인 실증 및 연구 개발을 수행하고 있음. 또한 ISE는 플러그인 하이브리드 자동차에 사용할 수 있는 MEMS 기술과 소형 박막 기술을 적용한 슈퍼캐시터 원천기술과 특허를 소유하고 있음.

○ 일본

- 일본의 경우, 대표적인 LIC 생산업체인 JM Energy 를 선두로 NEC Tokin, Shoei Electronics, FDK 등이 현재 20Wh/kg 급 제품을 양산하기 시작했다. 닛산 디젤모터 및 혼다가 각각 디젤엔진 하이브리드 차, 연료전지 하이브리드 전기차용 제품을 발표하였고, United Chemicon 사는 알루미늄 전해질 커패시터를 중심으로 태양광 등 전력 변환용을 중심으로 개발하고 있음.

○ 러시아

- ELTON(러시아)은 Redox 커패시터용 금속산화물 양극과 EDLC 용 음극을 사용하여 상품화하였는데, 이는 나노입자를 전극 활성 물질에 코팅하여 전극의 효율과 수명을 향상시킨 기술임.



○ 중국

- 중국은 대학에서 기초연구로 DVD 법으로 합성한 다층 탄소나노튜브를 EDLC 전극으로 사용하고, 38wt%의 황산용액을 전해질로 사용하여 비정전용량 113F/g, 출력밀도 8 kW/kg, 에너지밀도 0.56Wh/kg 인 슈퍼커패시터를 개발하였음. 중국에서 슈퍼커패시터와 관련한 대학의 연구는 하얼빈 대학, 칭화 대학, 푸단 대학, 중국 과학 아카데미를 중심으로 개발되고 있음.



3 향후 전망

□ 슈퍼커패시터 기술개발 전망

- 미래에 고도화된 산업 사회에서 친환경 에너지 관련 산업은 선택이 아닌 필수임. 특히, 우리나라와 같이 에너지 관련 해외 의존도가 큰 경우 신재생에너지의 개발과 효율적인 에너지 사용을 위한 기술 확보가 매우 중요함. Super capacitor 는 낮은 내부 저항과 고출력 특성으로 스마트 그리드 및 신재생 에너지 분야에 있어 가장 적합한 에너지 저장장치로 파급효과가 매우 큼. 우리나라의 경우도 아직은 시작단계이지만 최근 친환경에너지에 대한 중요성이 인식되면서, 다양한 소재와 제품 개발이 이루어지고 있음.
- 2011 년 일본의 동일본 대지진에 의한 후쿠시마 원전사태로 유발된 전력 문제는 일본뿐만 아니라 국내에서도 큰 사회적 이슈로 등장하였으며, 원자력과 신재생에너지의 역할분담에 대한 다양한 찬반 논란이 이어지고 있음. 초고용량 커패시터는 충·방전 성능이 우수한 에너지 저장장치로 이를 활용한 효율극대화의 시도가 지속적으로 이뤄지고 있음. 일본의 신재생에너지 단지에서는 단주기용 초고용량 커패시터와 장주기용 리튬이차전지, NaS 전지 등을 활용한 에너지저장 효율 극대화 시도들이 이뤄지고 있음. 풍력, 태양광의 경우 발생전력의 변동이 심하기 때문에 이러한 부하변동에 대응할 수 있는 초고용량 커패시터가 좋은 대안으로 제시되고 있음.
- 아직까지는 초고용량 커패시터를 상용화 하기에는 가격이 가장 큰 장애요소이지만, 다양한 실증 및 보급 사업을 통해 신재생에너지 효율 향상 방안으로 대두될 전망이다.
- 또한 초고용량 커패시터 기술은 모바일기기부터 산업용, 친환경자동차, 에너지저장장치까지 적용분야가 폭 넓고, 응용분야가 다양한 차세대 성장 동력산업이라고 할 수 있음. 이러한 초고용량커패시터 산업이 세계 1 위로 도약하기 위해서는 산·학·연·관의 체계적인 산업육성 의지를 바탕으로 기술개발·산업육성의 장기비전을 제시할 수 있는 추진전략 수립이 필요함.

*출처 - 덕산공조연구소 송근수 책임연구원