

에너지 저장시스템을 위한 슈퍼커패시터 최신 연구 동향

손명숙¹, 류준형^{1,2,*}

¹동국대학교 경주캠퍼스 미래에너지연구원
38066 경북 경주시 동대로 123

²동국대학교 경주캠퍼스 창의융합공학부
38066 경북 경주시 동대로 123

(2021년 10월 25일 접수; 2021년 11월 11일 수정본 접수; 2021년 11월 11일 채택)

Recent Research Trends of Supercapacitors for Energy Storage Systems

MyungSuk Son¹, and JunHyung Ryu^{1,2,*}

¹Advanced Research Center for Future Energy, Dongguk University, Gyeongju Campus
Dongdaero 123, Gyeongju-si, Gyeongbuk 38066, Republic of Korea

²Division of Creative Convergence Engineering, Dongguk University, Gyeongju Campus
Dongdaero 123, Gyeongju-si, Gyeongbuk 38066, Republic of Korea

(Received for review October 25, 2021; Revision received November 11, 2021; Accepted November 11, 2021)

요 약

슈퍼커패시터는 일반 커패시터(축전기, 콘덴서)에 비해 정전용량이 매우 큰 커패시터로 전기화학 커패시터 혹은 울트라 커패시터(ultracapacitor) 라고도 부르는데, 화학반응을 이용하는 배터리와 달리 전극과 전해질 계면의 단순한 이온 이동이나 표면 화학반응에 의한 충전현상을 이용한다. 짧은 충전시간(~30초), 우수한 출력특성, 반영구적 수명(~100,000 cycle), 낮은 유지 비용, 빠른 응답특성, 높은 안정성 등을 특징으로 하여, 백업용 전원, 무정전전원장치, 수송 기계 및 스마트 그리드의 고출력 보조 전원 등 급속 충전이 필요한 전자기기 및 고출력이 요구되는 산업분야에서 활용되고 있다. 태양광과 풍력 같은 불규칙적인 전력을 활용하는 발전에서 2차 배터리와 함께 에너지저장장치로 구성되어 상대적으로 느린 배터리의 충·방전 특성을 보상하고 배터리 수명연장에 기여하며 시스템의 전체 전력 품질을 향상시킬 수 있다. 본 고에서는 이처럼 에너지저장장치로 다양한 분야에서 활용되고 있는 슈퍼커패시터에 대해, 전극 재료에 따른 에너지 저장 원리 및 메커니즘, 분류를 간략하게 살펴보고, 국내외 제품 연구, 특히, 시장 및 제품 현황을 제시하여 활용성을 검토하고 향후 전망을 살펴보았다. 에너지 저장 소자로 슈퍼커패시터가 관련 산업 수요에 대응하기 위해서는, 고전압 모듈 기술, 고효율 충전, 안전성, 추가적인 성능개선 및 비용 경쟁력 등 아직까지 해결해야 할 과제들이 많다.

주제어 : 슈퍼커패시터, 에너지저장시스템, 전기에너지저장, 전기화학커패시터, 울트라커패시터

Abstract : A supercapacitor, also called an ultracapacitor or an electrochemical capacitor, stores electrochemical energy by the adsorption/desorption of electrolytic ions or a fast and reversible redox reaction at the electrode surface, which is distinct from the chemical reaction of a battery. A supercapacitor features high specific power, high capacitance, almost infinite cyclability (~100,000 cycle), short charging time, good stability, low maintenance cost, and fast frequency response. Supercapacitors have been used in electronic devices to meet the requirements of rapid charging/discharging, such as for memory back-up, and uninterruptible power supply (UPS). Also, their use is being extended to transportation and large industry applications that require high power/energy density, such as for electric vehicles and power quality systems of smart grids. In power generation using intermittent power sources such as solar and wind, a supercapacitor is configured in the energy storage system together with a battery to compensate for the relatively slow charging/discharging time of the battery, to contribute to extending the lifecycle of the battery, and to improve the system power quality. This article provides a concise overview of the principles, mechanisms, and classification of energy storage of supercapacitors in accordance with the electrode materials. Also,

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jhryu@dongguk.ac.kr; Tel: +82-54-770-2859; Fax: +82-54-770-2874

이 논문은 부경대학교 우희철 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

doi: 10.7464/ksct.2021.27.4.277 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

it provides a review of the status of recent research and patent, product, and market trends in supercapacitor technology. There are many challenges to be solved to meet industrial demands such as for high voltage module technologies, high efficiency charging, safety, performance improvement, and competitive prices.

Keywords : Supercapacitor, Energy storage system, Electric energy storage, Electrochemical capacitor, Ultracapacitor

1. 서론

기후변화와 화석연료 자원의 고갈 문제로 지속가능하고 재생 가능한 신재생 에너지 자원을 활용한 발전은 범지구적으로 꾸준히 확대되어 왔다. 한국 또한 2017년 12월 재생에너지 3020(RE3020) 계획에서 2030년까지 재생에너지 발전량 비중 20%를 목표로 설정하고 신규설비 용량 95% 이상을 태양광·풍력 등의 청정에너지로 공급할 계획을 발표하였고, 2020년 제25차 기후변화당사국총회 COP25 이후 탄소중립 2050 선언을 통해 청정 재생에너지와 그린 수소 중심으로 전력공급체계를 전환할 계획을 공표하였다.

탄소중립 실현을 위해서는 최종 사용 에너지 전기의 비중이 높아져야 하고, 대부분의 전기는 태양광 및 풍력 재생에너지로부터 청정하게 생산하여야 한다. 기존의 출력이 잘 제어되는 화력발전기에서는 변동되는 전력 수요에 따라 조속기(governor) 응답 혹은 자동 제어 운전 등으로 유효 전력의 수요공급 균형을 맞추어 규정 주파수(전력 품질)를 유지하지만, 태양광은 일사량 및 일조량, 풍력은 바람의 세기 같은 기상 조건에 따라 급속한 출력 변동이 발생하며 발전 변동폭이 커 필요에 따라 출력을 증감할 수 없다. 이처럼 부하 응답 특성이 느린 변동성을 가진 재생에너지원의 활용을 위해서는 발전 전력을 저장장치에 저장하였다가, 전력이 필요할 때 공급해 전력계통을 안정화하고 전력 사용 효율을 향상시키는 장치인 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)이 반드시 필요하다.

에너지 저장장치는 (1) 신재생에너지원에서 생산된 대량의 에너지를 에너지 수요 발생 시점(배터리 및 연료전지)으로 옮기는 일과, (2) 깨끗하고 안정적인 전력 및 주파수를 생산하여 슈퍼커패시터 및 고전력 배터리에 의한 전압스파이크를 방지하는, 크게 두 가지 중요한 작업을 수행한다[1]. 빠른 응답 특성과 우수한 출력 특성을 가진 슈퍼커패시터는 이차전지와 함께 에너지저장장치의 저장 매체로 구성되어, 상대적으로 느린 이차 전지의 충방전 특성을 보상하며 이차전지 수명연장에 기여하고 전체 전력 품질을 향상시킨다[1-4].

본 논문에서는 에너지 저장 장치로 재조명 받고 있는 슈퍼커패시터의 기술발전 현황을 검토하고, 슈퍼커패시터의 현위치와 에너지 저장 매커니즘을 소개한다. 각 구성요소들의 기본적인 작동 원리 및 전극 재료의 구성, 최근의 연구들과 시장 현황, 기술 응용에 대한 미래 과제와 전망에 대해 간결하게 논의하였다. 이를 통해 슈퍼커패시터의 향후 주요 개발 방향을 예측하여 이에 선도적 역할을 수행할 연구진들에게 통찰력을 제공할 수 있다. 수많은 연구 노력이 존재하지만 그래핀 등의 새롭게 주목받은 전극재료들로 인한 제품 상용화 성과 정리가 국내에선 상대적으로 소홀하였으므로, 최근 십여 년 사이의 연구

가 반영된 제품 및 업체 현황을 정리하여 소개하였다.

2. 에너지 저장 시스템의 구성 및 분류

에너지 저장 시스템은 에너지 저장 매체(storage medium), 전력변환 시스템(power conversion system, PCS), 배터리관리시스템(battery management system, BMS), 에너지관리시스템(energy management system, EMS) 등으로 구성된다. 저장 매체는 전기에너지를 다른 형태로 변환하여 저장하는 부분으로 주로 배터리라 부르는데, 전극 소재 및 전지·커패시터, 모듈·팩 등의 기술을 포함한다. 전력변환시스템은 교류와 직류를 변환하고 전력계통에서 요구하는 전원의 품질 수준(전압 및 주파수)과 배터리가 요구하는 충방전 전류를 조절하는 기능을 한다. 배터리관리시스템은 배터리를 모니터링하고 전력의 충·방전을 제어하며, 에너지관리 시스템은 배터리 및 PCS의 상태를 모니터링·제어하여 ESS 전체를 관리하는 운영 시스템이다[5].

에너지 저장 기술은 Figure 1과 같이 저장 형태에 따라 전기화학적 저장, 화학적 저장, 열역학적 저장, 물리적 저장, 전자기적 저장 등으로 분류한다. 분류된 대표적 에너지 저장 기술들을 Table 1에서 각각의 에너지 밀도(energy density, E_d), 전력 밀도(power density, P_d), 방전시간, 충방전 효율 등의 특징들에 대해 포괄적으로 검토하였다[1,5-7].

Akinyele and Rayudu [5]는 2014년 기술 개발 현황으로 양수

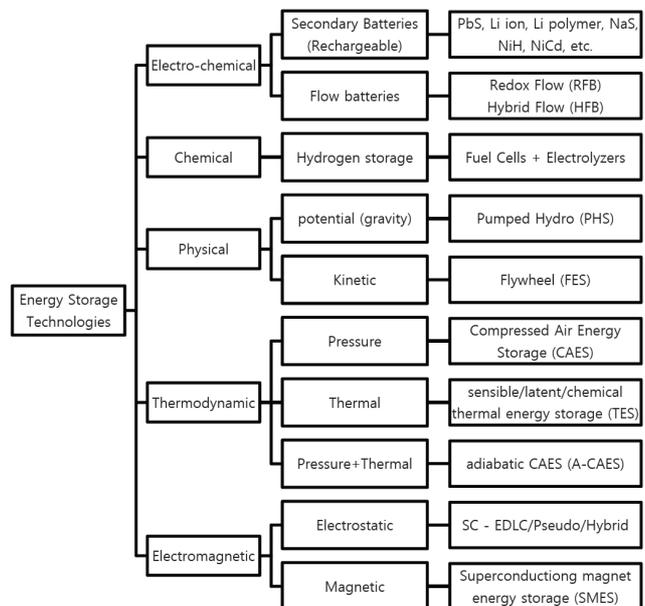


Figure 1. Classification of energy storage and conversion technologies [1,6,7].

Table 1. Comparison of properties of storage technologies [5,8]

Technology	Energy density [Wh kg ⁻¹]	Power density [W kg ⁻¹]	Discharge time	Round trip efficiency [%]	Cycling capacity	Life time [yr]	Suitable storage duration
PHS	0.5 ~ 1.5		1 ~ 24 h+	65 ~ 80	20,000 ~ 50,000	40 ~ 60	h ~ mo
CAES	30 ~ 60		1 ~ 24 h+	70 ~ 89	10,000 ~ 30,000	20 ~ 40	h ~ mo
CES	150 ~ 250	10 ~ 30	1 ~ 8 h	40 ~ 50		20 ~ 40	min ~ d
HTES	80 ~ 200		1 ~ 24 h+			5 ~ 15	min ~ mo
NaS	150 ~ 240	150 ~ 230	s ~ h	70 ~ 90	2,500	10 ~ 15	s ~ h
VRB	10 ~ 30		s ~ h	60 ~ 85	12,000+	5 ~ 10	h ~ mo
ZEBRA	100 ~ 120	150 ~ 200	s ~ h	85 ~ 90	2,500+	10 ~ 14	s ~ h
ZnBr	30 ~ 60		s ~ 10 h	60 ~ 85	2,000+	5 ~ 10	h ~ mo
Ni-Cd	50 ~ 75	150 ~ 300	s ~ h	72	2,000 ~ 2,500	10 ~ 20	min ~ d
Lead-Acid	30 ~ 50	75 ~ 300	s ~ h	70 ~ 90	500 ~ 1,000	5 ~ 15	min ~ d
Li-ion	120 ~ 265	150 ~ 340	m ~ h	85 ~ 90	1,000 ~ 10,000+	5 ~ 15	min ~ d
Fuel cells	800 ~ 10,000	500+	s ~ 24 h+		1,000+	5 ~ 15	h ~ mo
Metal-Air	150 ~ 3,000		s ~ 24 h+	< 50	100 ~ 300		h ~ mo
SMES	0.5 ~ 5	500 ~ 2,000	ms ~ 8 s	~ 97	100,000+	20+	min ~ h
FES	10 ~ 30	400 ~ 1,500	ms ~ 15 min	80 ~ 95	20,000+	~ 15	s ~ min
SCES	2.5 ~ 15	500 ~ 10,000	ms ~ 60 min	75 ~ 80	100,000+	20+	s ~ h
CS	0.05 ~ 5	~ 100,000	ms ~ 60 min	60 ~ 90	50,000+	~ 5	s ~ h

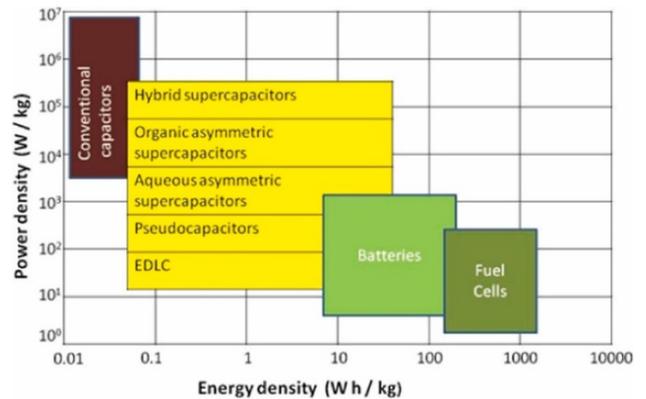
발전(pumped hydro storage, PHS), 납 축전지(Lead-Acid, PbS)는 완전히 발달한 단계로, 압축공기에너지저장(compressed-air energy storage, CAES), 니켈카드뮴(nickel-cadmium, Ni-Cd), 나트륨 유황 전지(sodium sulfur, NaS), 고온 세라믹 배터리(zero emissions batteries research activity, ZEBRA), 리튬이온 배터리(Li-ion) 등을 상업화 단계, 플라이휠 에너지저장(flywheel energy storage, FES), 단열 CAES, 아연-브롬 전지(zinc-bromine redox battery, ZnBr), 바나듐 산화환원 흐름전지(vanadium redox battery, VRB), 열에너지저장(hot thermal energy storage, HTES) 등의 저장 기술을 실증 단계로 분류하고 광범위한 초기 자본비용을 제시하였다.

각 저장 기술별로 현재 모바일 시장을 장악 중인 리튬이온 전지에는 리튬 비용·안전(폭발 위험성)·수명 등의 이슈가, 슈퍼커패시터는 이차전지 대비 낮은 에너지밀도 이슈, 연료전지는 운영 및 시스템 이슈 등의 기술의 고유 특성에서 유래한 장단점이 존재하므로 적용 분야의 시장 요구사항에 따라 시스템을 구성해야 한다[1].

3. 슈퍼커패시터

3.1. 슈퍼커패시터 특징

슈퍼커패시터는 일반 축전지에 비해 정전용량(capacitance)이 매우 큰 커패시터로 울트라 커패시터(ultracapacitor) 혹은 초고용량 커패시터 등으로 부르는데, 화학반응을 이용하는 배터리와 달리 전극과 전해질 계면의 단순한 이온 이동이나 표면화학반응에 의한 충전현상을 이용한다. 슈퍼커패시터는 1,000 W kg⁻¹ 이상의 높은 전력 밀도, 100,000 cycle 이상의 수명, 80%

**Figure 2.** Ragone plot for different energy storage devices [10].

이상의 비교적 높은 효율을 갖는 특성으로 일반적으로 연료전지나 배터리의 charge equalization 기능에 적합하다. 실제론 다른 배터리 등의 다른 전원에 비해 훨씬 낮은 에너지 밀도 3 ~ 7 Wh kg⁻¹를 가지며, 무게와 공간을 고려하면 시스템은 100 ~ 200 Wh의 에너지만을 제공하므로 단독으로 사용하기 보다는 배터리 등과 함께 에너지 저장 장치를 구성한다. 마이크로그리드처럼 전력 품질을 고려한 설계에서 슈퍼커패시터는 이차전지에 앞서 충전과 방전을 수행하는 알고리즘으로 동작하며 전력품질 향상에 기여한다[2,9].

Figure 2의 라고니 플롯(Ragone plot)과 Table 2에서 다른 에너지 저장장치와 슈퍼커패시터의 상대적 에너지 밀도(E_d) 및 전력 밀도(P_d)를 비교해 보면, 슈퍼커패시터는 일반 축전지(커패시터, 콘덴서)에 비해 낮은 전력밀도를 갖는다. 슈퍼커패시터의 일반 축전지와 가장 큰 차이점은 유전물질이 없다는 것

Table 2. Comparison of the performance for electrochemical different energy storage system [11]

Parameter	Capacitor	Supercapacitor	Battery
Energy density (Wh kg ⁻¹)	< 0.1	1 ~ 10 (~ 1,091)	70 ~ 100 (~ 1,606)
Power density (W kg ⁻¹)	> 10,000	1,000 ~ 2,000 (~ 196,000)	50 ~ 200 (< 1,000)
Charge time	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻³ s	s to min	0.03 ~ 3 h
Discharge time	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻³ s	s to min	1 ~ 5 h
Coulombic efficiency (%)	~ 100	90 ~ 95 (up to 99)	70 ~ 85
Cycle Life (cycle)	> 500,000 (~ infinite)	> 100,000	500 ~ 2,000
Charge storage determinants	Electrode area, dielectric	Microstructure of electrode and electrolyte	Thermodynamics and active mass

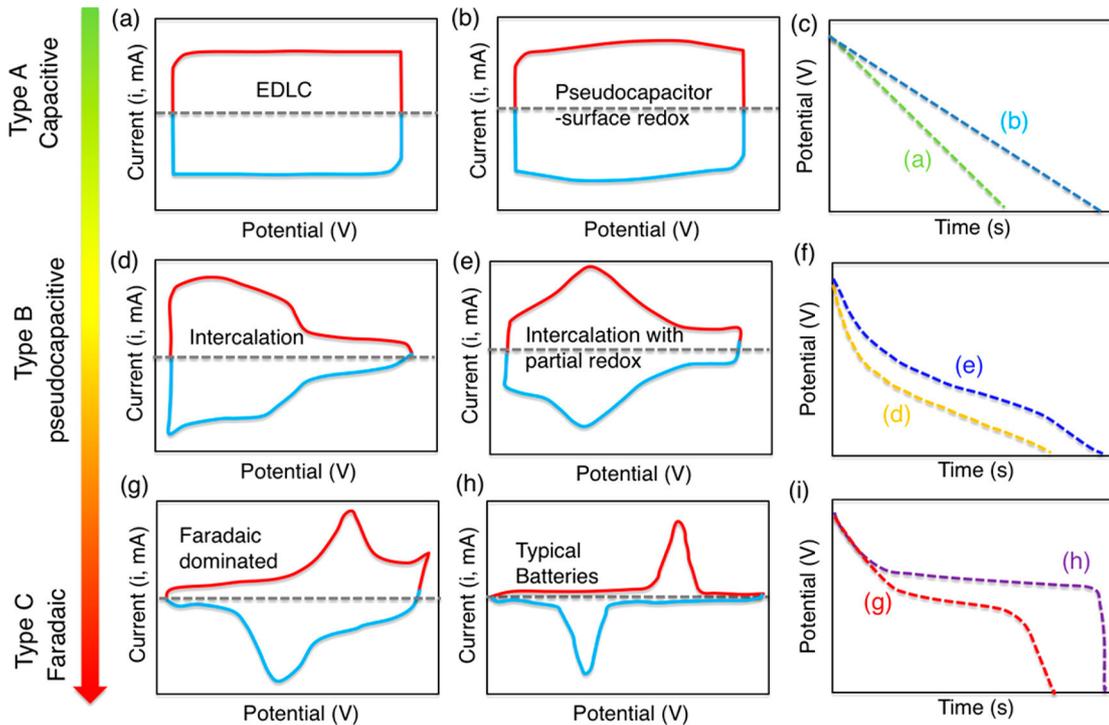


Figure 3. Schematic cyclic voltammograms (a, b, d, e, g, h) and corresponding galvanostatic discharge curves (c, f, i) for various kinds of energy-storage materials (1) electric double layer materials: (a), (c) potential-independent capacitance and current, (2) pseudocapacitive materials: (b) surface redox materials (d) intercalation-type materials, or (e) intercalation-type materials showing broad but electrochemically reversible redox (3) battery-like materials : (g ~ i) [12].

으로, 기존의 축전지는 정전하 저장을 위한 유전체 플레이트로 구성되는 반면 슈퍼커패시터는 전해질 이온 확산을 촉진하지 않던 전극의 직접적 접촉이나 단락을 막는 분리기를 통해 전해질 용액 내 잠긴 분리된 전극으로 구성된다. 현재의 이차 전지들의 구동은 주로 확산(diffusion)에 의해 조절되는 양이온의 삽입(intercalation) 및 방출(de-intercalation) 방식으로, 이 확산이 충방전 속도 및 출력밀도를 제한한다. 슈퍼커패시터는 배터리에 비해 활성 중에 이온이 분산되지 않고 전하의 저장을 위해 전극 외층에서 일어나는 반응이기 때문에 훨씬 더 큰 전력밀도를 제공하지만 더 낮은 에너지 밀도나 용량 값을 갖는 경향을 보인다[10,11].

Figure 3에서 커패시터, 배터리 등 다양한 종류의 전기화학적 에너지 저장 물질에 대한 순환 전압 주사법 및 정전류 충방전법으로 얻어지는 전형적인 성능 곡선을 확인할 수 있다. 커패시

터의 Figure 3(a), 3(b)처럼 전압에 독립적인 전류 형태로 직사각형 순환전압도를 나타내고, 방전 곡선은 Figure 3(c)에서 보듯 시간에 따라 선형적 특성을 갖는다. 유사 용량(pseudo capacitance)을 갖는 전극 재료들은 일반적으로 Figure 3(b), 3(d), 3(e) 중 하나 혹은 조합의 전기화학적 특성을 가지며, 배터리 유형 전극 물질의 전기화학적 반응은 Figure 3(g), 3(h)에서처럼 명백하게 분리된 산화 환원 피크를 포함한 순환 전압도를 갖거나, 명백한 안정기가 있는 정전류 충전/방전 곡선 Figure 3(i)을 가진다[1,12].

3.2. 슈퍼커패시터의 구성 및 분류

양극 및 음극으로 구성된 다공성 전극(electrode), 전해질(electrolyte), 집전체(current collector), 분리막(separator)으로 이루어진 슈퍼커패시터는 단위 셀 전극 양단에 전압을 가해 전해

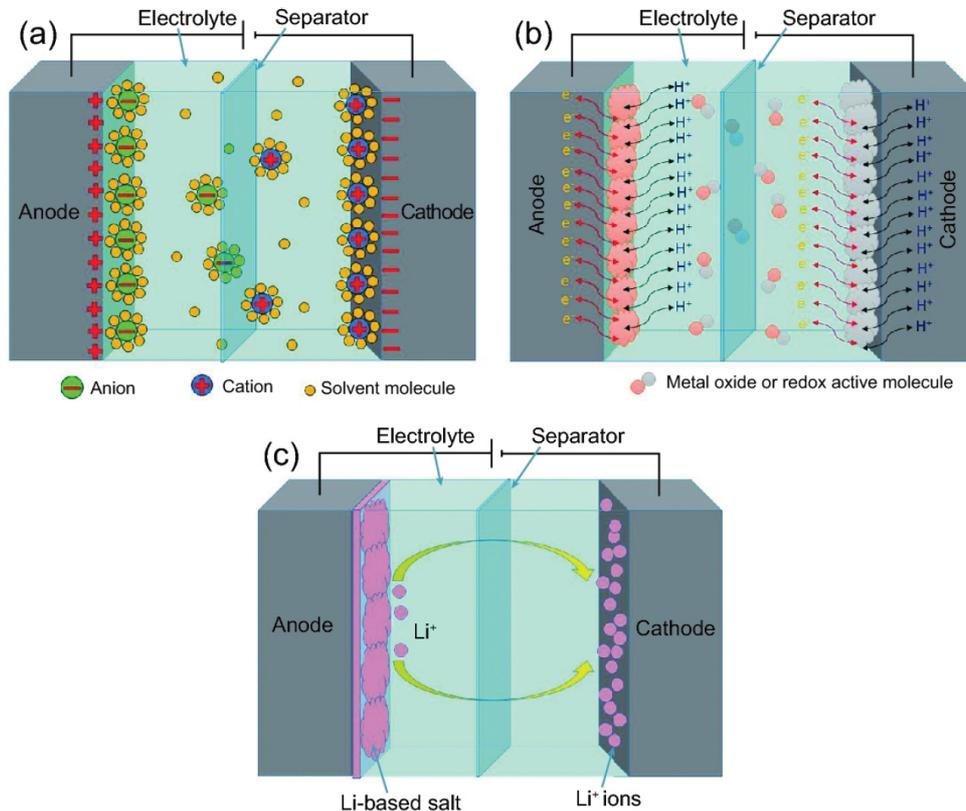


Figure 4. Schematic representation of (a) electrical double-layer capacitors (EDLCs), (b) pseudocapacitors (PCs) and (c) hybrid supercapacitors (HCs) [17].

액 내 이온들이 전기장을 따라 이동하여 전극표면에 흡착되어 발생하는 전기화학적 메커니즘을 통해 작동하고 이로 인해 전기 화학 커패시터라고 부르기도 한다(Figure 4). 슈퍼커패시터의 에너지 저장은 전하의 축적 혹은 가역적 산화환원 반응을 기반으로 하므로, 전극 및 메커니즘에 따라 크게 3가지 전기이중층 슈퍼커패시터(electric double layer capacitors, EDLCs), 유사슈퍼커패시터(pseudo supercapacitor or redox supercapacitor, PCs), 하이브리드 슈퍼커패시터(hybrid supercapacitors, HCs)로 구분된다[2-3,10].

EDLC는 탄소 기반의 다공성 나노물질을 전극으로 사용하고, 전해질과 전극 사이 계면에 정전기적으로 전하를 저장하는(전극과 전해질 사이 전하 이동이 없는 비패러데이 프로세스) 전기 이중층 전하흡착 메커니즘을 따른다(Figure 4(a)). 유사슈퍼커패시터는 금속 산화물(metal oxides, MOs)과 전도성 고분자(conducting polymers, CPs)를 전극재료로 사용하고, 유사용량을 가지는 커패시터로 전기흡착, 빠르고 가역적인 산화-환원 반응(전해질과 전극 사이의 전하가 이동하는 패러데이 프로세스), Li⁺ 나 Na⁺와 같은 전하 보상 이온의 삽입(intercalation) 메커니즘 등을 통해 전하를 저장한다(Figure 4(b)). 유사용량(pseudo capacitance)은 전극의 구조 및 전극 기공의 크기와 전극 표면에 흡착된 이온에 대한 물질의 화학적 친화도에 따라 달라진다. 일반적으로 하이브리드 슈퍼커패시터는 EDLC와 유사슈퍼커패시터의 두 저장 메커니즘을 조합한 것이다. 2007년 FDK에 의해 연구된 리튬 이온 커패시터는 탄소전극과 리튬 이온 전극을 결합

하여 정전용량을 증가시키고 셀전압을 향상시켜 에너지밀도를 증가시켰다(Figure 4(c)). 높은 정전용량을 갖는 패러데이 전극은 더 높은 에너지밀도를, 비패러데이 전극은 더 높은 전력 밀도를 제공한다. 이와 같은 하이브리드 커패시터의 비대칭 거동 특성은 각각의 정전용량 값을 개선하여 각각에 비해 높은 에너지밀도와 전력밀도를 가져 많은 주목을 받고 있다[1,10,13-15]. Table 3에 세 종류의 슈퍼커패시터의 특성을 구분하여 명시하였다[1].

3.3. 전극 재료 및 전해질

슈퍼커패시터의 전극은 높은 전도도, 온도 안정성, 우수한 화학적 안정성(비활성), 높은 비표면적, 내식성을 갖고 환경 친화적이며 저비용일 것이 요구된다. 패러데이 전하 이동을 수행하는 물질의 용량은 총 정전용량을 증가시킨다. 일반적으로 기공이 작을수록 정전용량이 커지므로 에너지밀도가 증가되지만, 기공이 작을수록 등가직렬저항(equivalent series resistance, ESR)이 증가하여 전력 밀도가 감소한다. 따라서 용도에 따라 더 많은 피크 전력이 필요한 응용분야에선 더 큰 기공으로 전극을 제작하고 큰 에너지 밀도가 필요한 경우엔 작은 기공을 갖는 전극재료로 슈퍼커패시터를 제작한다[10].

일반적으로 EDLC는 나노 혹은 메조 다공성 탄소 재료로 활성탄소(activated carbon, AC), 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 탄소 에어로겔(frozen smoke), 그래핀(graphene macro assemblies) 등을 전극재료로 사용한다. 활성탄은 상대적으로

Table 3. Material selection and performance characteristics of EDLC, PC and HC [1,13-16]

Characteristics	EDLC	Pseudo capacitor (PC)	Hybrid capacitor (HC)
Electrode material	Carbon-based materials: activated carbon, graphene, CNT and polymeric carbons	MOs: MnO ₂ , NiO, RuO ₂ CPs: PANI, PT and PPY	Combination of ELD material and pseudo-capacitive material
Electrolyte (Working Volatage)	Aqueous (> 1) Nonaqueous (> 3.3)	Aqueous (> 1) Nonaqueous (> 3)	Aqueous (> 1) Nonaqueous (> 4.2)
Energy density (Wh kg ⁻¹)	6.8 ~ 12 <5.2 ~ 6.2>	167 ~ 223 <9.1>	132 ~ 231 <6.2 ~ 37>
Power density (kW kg ⁻¹)	98,000 ~ 165 <5.8 ~ 6.6>	21,000 ~ 220 <1.4>	2,800 ~ 57 <0.9 ~ 3.5>
Specific capacitance (F g ⁻¹)	200 ~ 300 <5.2 ~ 6.1>	200 ~ 1,340 <12.5>	50 ~ 1,893 <8.5 ~ 44.4>
Cyclability (cycles)	100,000 <5E5 ~ 1E6>	5,000 <1E5>	12,000 <2.5E4>
Capacitance retention (%)	60 ~ 100	52 ~ 96	80 ~ 95
Charge storage mechanism	Physical: (non-faradaic) ELD (electrosorption)	Chemical (faradaic): Redox reactions	Physical + Chemical: EDL, Redox, intercalation
Summary	Low E _d , low C _s , good rate capability, good cyclic stability	High E _d , high C _s , high P _d , low rate capability	High E _d & P _d , good cyclability, polymer/C composite: moderate cost & stability, Li/C capacitor: high cost

<>: Universal values of commercialized products - Maxwell (BCAP3000, BCAP0310, PCAP0300), Vinatech (VEC 2R7 308 HG-W, VHC 2R3 807 QG), YUNASKO (3000 F E-cell, 1.3 Ah cell) [16]

Table 4. Comparison of carbon and its composite as supercapacitor electrodes [15]

Electrode material	Pore size	Specific surface aREA	Capacitance	Rate capability	Stability	Cost
Carbon	Pore size can be designed	High	Low	High	Good	Low
Metal oxides	Difficult to tailor	Low	High	Low	Poor	High
Carbon-MOs composite	Pore size can be tailored	Controlled by the carbon material	High	Good	Good	Moderate

저렴한 비용으로 대량으로 구할 수 있어 아직까지 대부분의 슈퍼커패시터 전극 구조에 활용되고 있는 활성탄은 유효면적이 크고 매우 큰 정전용량을 갖지만, 불규칙한 형태, 넓은 기공의 아주 약하게 흑연화 된 프레임워크를 갖는다. 이에 비해 CNT는 비교적 균일한 표면기공을 조성할 수 있고, 안정성(기계, 열)과 뛰어나며 전기적 특성이 우수하다. 그래핀은 최근 10여년 사이에 고용량 EDLC 전극재료로 크게 부상하였는데, 유효 표면적이 넓고 전기·전기화학적·기계적 특성이 우수한 독특한 계층구조를 가졌다[15].

유사 커패시터의 전극재료는 IrO₂, RuO₂, Fe₃O₄, MnO₂, NiO, V₂O₅, Co₃O₄ 등의 전이금속산화물(MOs) 및 전이 금속 황화물, 전도성 고분자[polyaniline (PANI), polythiophene (PT), polypyrrole (PPY), polyvinyl alcohol, poly (3,4-ethylene dioxythiophene) (PEDOT), polyacetylene, poly (4-styrene sulfonate) (PSS), polyphenylene-vinylene (PPV)] 등이 사용된다. 특히 표면 산화 환원 반응을 통해 에너지를 저장하는 전이금속 산화물은 자체로는 낮은 전도성으로 고속 에너지 저장 환경에 적합하지 않아, 전도도를 높이기 위해 그래핀, CNT, 코어셸 구조 탄소 기반 소재와 함께 복합체로 제작하거나, 양이온 치환을 통해 도핑 된 구조로 많이 연구되었다. 이처럼 공유결합 유기골격 물질(covalent organic frameworks, COFs), 금속-유기 골격구조 물질(metal-organic frameworks, MOFs), 맥신(MXenes), 금속 황화물, 금속 질화물, 혼합 전도체, 2-D 재료 등 새로운 전극 재료들의 연구 성과가 주목할 만하다[15].

전해질/용액은 전력밀도, 온도범위 및 전도도 등의 중요한

특성을 설정하는데 필수적인 역할을 하는데, 높은 이온 농도, 넓은 전위 범위, 전기화학적 안정성, 낮은 저항(ESR), 낮은 휘발성, 낮은 점도, 무독성, 용매화 되었을 때 작은 이온 크기, 낮은 비용 등을 요구한다. 전극물질의 다공성 표면을 충분히 활용하기 위해서 전극 물질의 기공 크기 및 전해질의 이온 크기 사이의 상용성(compatibility) 문제도 반드시 고려되어야 한다. 수용성, 유기성, 산화환원형, 고체 및 반고체 전해질, 이온성 액체가 슈퍼커패시터에 대해 광범위하게 고려되며 도입되고 있다. 전극재료와 전해질에 대해 보고된 연구 결과들의 정전용량, 에너지밀도, 전력밀도, 효율과 사이클 등 최근 향상된 중요한 성능인자를 다양한 생산 기술들과 함께 정리한 리뷰 연구들도 다양하게 수행되었다[10,11,15,17].

많은 연구진들이 전극과 전해질의 계면반응에 대한 에너지 저장 메커니즘의 심층적인 이해를 바탕으로, 계층적으로 상호 연결된 다공성 전극을 데드 볼륨이 생기지 않도록 전극을 설계하고, 높은 전기화학 성능을 갖는 구조를 얻기 위해 계면 상호 작용을 제어하며 supercapacitor (SC) 성능 개선을 위해 노력하고 있다[17]. Table 4에서 탄소, 금속산화물, 그리고 그 복합체에 해당되는 전극 재료의 특성을 비교하였고, Table 5에서 각 슈퍼커패시터 별 연구되고 있는 전극 재료와 전해질 조합들의 정전용량범위를 정리하였다[10,15].

한편, 슈퍼커패시터에서 분리막은 일반적으로 이온 투과성이지만 전극 사이 하전 이온 이동을 허용하기 위해 전해질로 적셔진 전기 절연성으로 만들기도 한다. 고분자나 종이 분리막

Table 5. Different Capacitor electrode materials [10]

Classification	Electrode materials	Electrolyte	Capacitance (F g ⁻¹)
EDLC electrode materials	AC	Aqueous (NaOH / KOH)	200 ~ 400
	Templated carbon	Aqueous (NaOH / KOH)	120 ~ 350
	CNT	Aqueous (NaOH / KOH)	20 ~ 180
	Carbide-driven carbon	Ionic liquids (KCl / NaCl)	100 ~ 150
	Carbon black	Aqueous (NaOH / KOH)	< 300
	Carbon Aerogels / xerogels	Aqueous (NaOH / KOH)	40 ~ 200
	Graphite and reduced Graphene oxide (rGO)	Tetraethylammonium tetrafluoroborate (Et ₄ NBF ₄)	10 ~ 150
	Mesoporous carbon	KOH	180
	AC fibers	KOH	180 ~ 210
Pseudocapacitive electrode materials	RuO ₂	H ₂ SO ₄	650 ~ 735
	MnO ₂	K ₂ SO ₄	261
	Ni(OH) ₂	KOH	578
	MnFeO ₂	PF ₆ (Hexafluorophosphate)	126
	TiN	KOH	238
	V ₂ O ₅	KCl	262
	Polyaniline (PANI)	Aqueous	120 ~ 1,530
		Non-aqueous	100 ~ 670
	Polypyrrole (PPY)	Aqueous	40 ~ 588
		Non-aqueous	20 ~ 355
	Polythiophene (PTh)	Non-aqueous	1.5 ~ 6
	Poly (3-methyl thiophene) (PMT)	Non-aqueous	20 ~ 220
		Ionic liquid	15 ~ 225
	Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT)	Aqueous	100 ~ 250
		Non-aqueous	121
Ionic liquid		130	
Poly (4-fluorophenyl-3-thiophene) (PFPT)	Non-aqueous	10 ~ 48	
Hybrid supercapacitor electrode materials	Carbon / rGO	Na ₂ SO ₄	175 ~ 430
	RuO ₂ / MWCNT	H ₂ SO ₄	169.4 mF cm ⁻¹
	MnO ₂ / MWCNT	Na ₂ SO ₄	141
	MnO ₂ / CNTA ^a	Na ₂ SO ₄	144
	rGO / MnO ₂	Na ₂ SO ₄	60
	PAN ^a / Carbon nanofibers	KOH	134
	PANI / MWCNT	H ₂ SO ₄	360
	PPY / MWCNT ^a	H ₂ SO ₄	200
	PANI nanotubes / Titanium nanotubes	H ₂ SO ₄	740

^a MWCNT ~ Multiwalled carbon nanotubes, CNTA ~ carbon nanotube arrays, PAN ~ Polyacrylonitrile.

은 유기 전해질과 함께 자주 사용되고, 세라믹과 유리섬유 분리막은 수용성 전해질에 많이 사용된다[17].

4. 연구, 특허, 시장 및 업체 동향

4.1. 연구 동향: 연구 개발 기관 및 국가 연구 지원 현황

국내외 수많은 대학 및 연구기관에서 고출력 특성의 초고용량 제조 공정 기술 및 나노 소재 중심의 연구 개발 중이다. Scopus에서 supercapacitor와 energy storage를 동시에 키워드

로 하는 게재 절차가 완료된 영문 연구 논문의 수를 연도별로 살펴보면(Figure 5) 2010년대 초반부터 꾸준히 증가한 것으로 나타났다. 또한 NTIS 통계에서 살펴본 국가 연구지원 현황은 Figure 6처럼 증가하는 추세를 보였다. 2017년부터 2021년까지 건수(금액비율)로 연도별 R&D통계를 살펴보면, 연구개발 단계별로는 기초연구 339건(43%), 응용연구 56건(17%), 개발연구 94건(25%), 기타 24건(15%)로 나타났고, 연구 수행 주체는 대학 362건(41%), 중소기업 80건(29%), 국공립 및 출연연 47건(10%), 중견기업 15건(9%) 순으로, 대학의 전극 및 재료

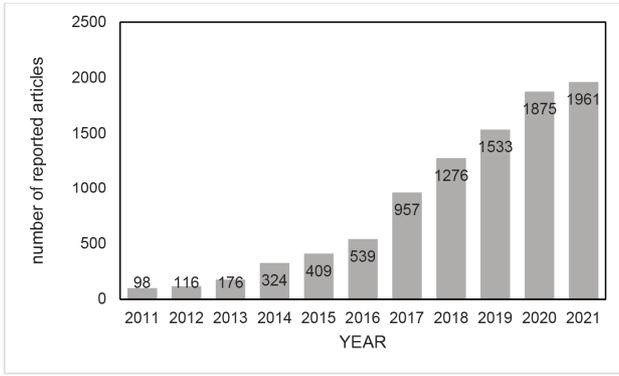


Figure 5. The number of reported research articles including keywords both supercapacitor and energy storage (Analyzed with Scopus data in Oct. 26th 2021).



Figure 6. Trend of the number of research projects and funding by government (Analyzed with NTIS data in Nov. 2021).

관련 기초 연구 지원이 많으며 중소 및 중견기업에 상대적으로 지원금 규모가 큰 개발 과제가 많다. 같은 기간 슈퍼커패시터는 활성탄, 그래핀, 전극소재, 하이브리드, 에너지소재, 배터리, 이차전지, 태양전지, 고출력, 고체전해질, 에너지저장 및 에너

지저장장치 등을 주요 연관 키워드로 한다. 이로부터 높은 출력을 목표로 새로운 전극 및 전해질 소재를 개발하여 이차전지와 상호 발전적으로 에너지저장 시스템을 구성하려는 연구 경향을 파악할 수 있다. Table 6에서 NTIS에서 확인한 연구기관별 주요 연구 분야를 확인할 수 있으며 우수 연구 성과들로 국내에서 최근 5년 사이 큰 관심을 받은 연구들 몇 건을 소개하였다.

KAIST 강정구 교수 연구 그룹은 그래핀 구조와 금속 산화물체의 질소 도핑 기법, 금속 황화물 등의 전극물질 나노복합체 조합에 대한 하이브리드 우수한 성능의 에너지 저장 전극 소재들을 개발해 왔다[18-20]. 가시로 덮인 코어-셸 황화니켈 코발트 양극과, 3D구조의 환원된 산화 그래핀 에어로졸에 황화철 입자를 도입한 음극의 수계 시스템을 개발하여 120.5 Wh kg⁻¹, 23,998 W kg⁻¹, 5만회 이상의 충·방전 안정성을 보고했다[20].

UNIST 장지현 교수 연구그룹은 2013년 고분자와 금속이온만을 이용한 제조기술로 고품질 3차원 다공성 그래핀 나노볼을 대량 합성하는 기술을 개발하였고, 2020년 김건태 교수 연구그룹과의 공동연구로 물질의 밀도는 높으면서 표면의 개질이 가능한 페로브스카이트 산화물(perovskite oxide) 전극 소재 (Co₃O₄ PrBaMn_{1.7}Co_{0.3}O_{5+δ} 215.8 Wh kg⁻¹, 14.8 kW kg⁻¹)를 개발하여 하이브리드 슈퍼커패시터의 3차원 전극 구조 내 빈공간이 발생하는 단점을 해결하였다. 또한 웨어러블 디바이스 전원용 유연 슈퍼커패시터 제작에 성공하여 상용화 가능성을 입증하였다[3,21].

서울대 화학부 전연준 교수 연구팀은 분자동역학 시뮬레이션 기법을 사용하여 이온성 액체 전해질 슈퍼커패시터(EDLC) 내부에서 충·방전 과정 중 반대 전하 이온 간의 흡착보다 공전하 이온 사이의 탈착이 슈퍼커패시터 전지 효율에 더 중요하다는 상관관계의 메커니즘을 규명하였다[22].

Table 6. Current status of major research organizations [30]

Organization	Research project description
Incheon National University	Low-cost, High Performance, Green Supercapacitors via 2-Dimensional Transition Metal Sulphide / CNT Heterostructure and Its Application Toward Monolithic IoT Flexible Module Platform
UNIST	Development of film-type flexible supercapacitors with microstructured electrodes based on nanomaterials
KIER	Development of Meta Metal-Organic Frameworks and Its Energy Storage
KAIST	On-demand high efficiency battery and supercapacitor for energy cloud system
KIST	Synthesis of Edge-Rich Graphene Coated on Highly Ordered Multi-Block Nanotubes for Anode in Lithium Ion Battery and Supercapacitors
KERI	Development of high-efficiency H ₂ Ti ₁₂ O ₂₅ / graphene composites and hybrid supercapacitors
KICET	Unuse woody biomass derived activated carbons for supercapacitors
POSCO Chemical	Development of manufacturing technology independence of advanced activated carbons and application for high performance supercapacitor
Samwha Capacitor	The development of battery capacitor (58 Wh L ⁻¹) composed of graphene and lithium transition metal oxide based flexible electrode for IoT device

고려대학교 윤영수 교수, 인하대 진형주 교수, 강원대 임형규 교수 공동 연구진에서는 마그네슘-글라임 전하수송체(Mg ion-DME complex)의 높은 결합력을 이용하여 고전압 마그네슘 이온 슈퍼커패시터를 개발(4 V, ~106 Wh kg⁻¹, ~11,870 W kg⁻¹)하였다. 이들은 비표면적이 넓은 탄소계 전극의 기공특성이 전하 수송체의 안정성에 기여할 수 있음을 규명하고, 고전압에서도 높은 정전용량을 구현할 수 있는 슈퍼커패시터를 개발해 다가온 기반 슈퍼커패시터 분야의 기반을 확장했다[23].

한국과학기술연구원(KIST) 김명중연구원 연구팀은 탄소봉 내부에 그래핀 산화물과 질소가 포함된 폴리아닐린을 첨가하고 4천도로 순간 가열하는 아크방전 기술을 이용하여, 그래핀 형성 과정에 결정성(전기전도성 비례) 훼손 없이 고농도 질소 도핑 그래핀 분말(1~1.5% 기존 대비~3.5% N)의 제조에 성공하여 높은 정전용량(63 μF cm²) 유지에 성공하였다[24].

한국전력과 전력연구원은 단주기 ESS 신기술로서 에너지밀도가 기존 상용품 대비 5배 이상 향상된 100 kW급 그래핀 슈퍼커패시터의 2019년 자체개발 성과를 활용하여, 비나텍사와 함께 전력계통 안정화를 위한 MW급 고용량 슈퍼커패시터 병행 운전 시스템을 개발 및 실증 중이다[25].

미국 Kansas State University의 Suprem Das 교수, Christopher Sorensen 교수 공동 연구진은 슈퍼커패시터를 적층제조 방식으로 제작할 수 있는 그래핀 기반 나노잉크 제조기술을 개발하였다. 이들은 폴리이미드 기판 위에 그래핀 기반 나노잉크를 프린팅하여 마이크로슈퍼커패시터(0~1 V, 55 μF cm², 3.25 F cm³)를 제작하고, 10,000회의 충전 및 방전 후에도 안정적으로 80% 성능을 유지하는 신뢰도를 실증했다. 이들은 대용량 챔버 내에서 통제된 산소와 아세틸렌 같은 불포화 탄화수소를 폭발시키는 화학적 전구체 폭발 기술로, 촉매없이 무독성으로 에너지 효율적으로 그래핀 에어로졸 젤 형태의 고품질 다층 그래핀을 생산할 수 있는 기술을 개발하여 그래핀 상용화를 위한 기반을 확보하였다[26].

최근에는 SC는 전기화학적 성능 향상 외에도 SC의 유연성, 휴대형 장치 사용을 위한 착용성, 사람들의 선택을 돕는 스마트 기능 추가와 같은 여러 기능을 통합하는데 주력해 왔고, WO₃재료를 활용한 전기 변색 SC (electrochromo-supercapacitor), flexible micro-SC, self-healing SC, photo-SC, Piezoelectric SC, AC line-filtering SC, shape memory SC, 열 충전 가능한 SC와 같은 새로운 응용분야의 합성도 배터리-슈퍼커패시터 하이브리드 설비 등 에너지 산업에서 함께 추가적으로 주목받고 있다[15].

4.2. 특허 동향

특허청에 따르면 슈퍼커패시터에 관한 국내 특허는 2014년 기점으로 최근 5년간 연평균 출원수가 증가하는 추세이며 (Figure 7), 세부 기술별 특허출원 동향은 전극관련 기술(548건, 56%), 모듈 및 케이스 기술(229건, 23%), 전해질 관련 기술(116건, 12%) 순이며, 출원인 유형은 국내기업(39%), 국내대학·연구소(36%), 외국기업(21%), 외국대학·연구소(3%)으로 소재 개발 및 특성 개선의 연구 특허가 많다[27].

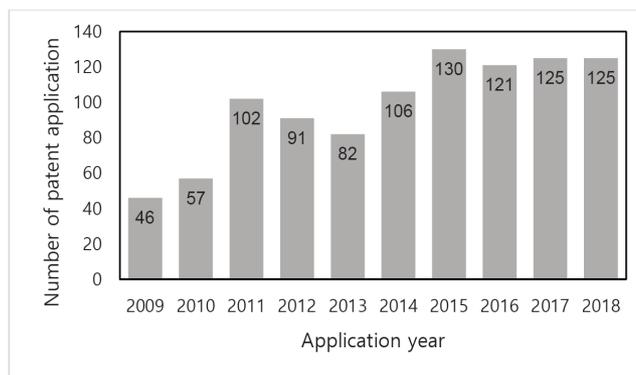


Figure 7. Patent application trend of supercapacitor (2009~2018) [27].

4.3. 시장 및 업체 현황

친환경 전기자동차 및 스마트 그리드의 주목으로 슈퍼커패시터는 일본, 러시아, 미국 등에서 상용화 되기 시작하여 소형에서 대형에 이르기까지 응용분야가 확대되고 있다. 주로 1F 이하 코인 타입의 소형 슈퍼커패시터는 휴대폰이나 소형 전자 기기 메모리 백업용으로 널리 활용되고 있으며 2020년 기준 일본에서 90% 이상을 생산하고 있다. 1000F 이상의 각형이나 원통형 대형 슈퍼커패시터는 의료기기나 하이브리드 차량, 군용 탄두, UPS, 풍력 터빈 등에서 주전원 공백의 백업파워 용이나, 재생에너지의 저장 및 피크 파워 보조용도 등으로 널리 활용되고 있다. 소형 시장은 일본 파나소닉이, 대형 제품은 미국의 맥스웰 사가, 그 사이 중형 시장은 한국 비나텍이 시장 점유율 1위를 달성하고 있다[11,31].

글로벌 ESS 시장 규모는 2019년 11.1 GWh에서 2020년 19.9 GWh로 확대되었고(Table 7), 향후 5년간 연평균 36% 이상 성장해 2025년 94.2 GWh로 확대될 것이라 예상하며, 국내 ESS시장 규모는 2019년 3.7 GWh로 2018년 5.6 GWh보다 33.9% 감소하였으며, REC 현물 가격의 폭락 및 폭발 이슈, 배터리(이차전지) 수급 불안정, 금융 투자 부족 등을 원인으로 꼽는다[28,29].

한편, 글로벌 슈퍼커패시터 시장은 2018년 52억 9천만 달러에서 연평균성장률(CAGR) 28.5%로 성장하여 24년까지 171억 9천만 달러에 도달할 것이며 주로 수송 및 에너지, 산업, 가전 전자 제품 분야의 시장 확대를, 국내시장은 가전기기, 수송, 산업용 에너지 분야에서 주도적으로 형성하고 있으며 18년 1조 676억원 규모에서 CAGR 13.7%로 성장하여 24년 2조 3,071억 원에 이를 것이라 전망하였다. 차량의 시동과 정지 등과 같은 수송 분야에서 15.6%로 높은 연평균 성장률을 보이며, 향후 스마트미터 분야의 시장 확대가 기대된다[30].

중소벤처기업부에서는 LDA (Latent Dirichlet Allocation) 클

Table 7. Global ESS market size [28]

(GWh)	2019	2020	2021	2022	2025
Global	11.1	19.9	29.5	43	94.2
North America	3.6	8.4	12.7	18	36.9

Table 8. Roadmap of supercapacitor technologies by Ministry of SMEs and Startups [30]

Technologies	Key indicators	Target (~ 23')	Requirements description
Current collector (electrode)	Leakage current (mA)	50	High temperature stability, highly conductive material, thin film processability, light weight, corrosion resistance and potential stability
Activated C (electrode)	Capacitance (F g ⁻¹)	35	High capacity, high density, and high conductivity
Electric binder (electrode)	Resistance (mΩ)	3	Good cohesion, low resistance, potential stability
Electrolytes	Voltage (V)	3.5	Potential stability, high ionic conductivity, suitable temperature characteristics
Hybrid SC module	Resistance (mΩ)	20	The operation of balancing circuit, overvoltage, module voltage drops, efficiencies of inverter conversion and module discharge
EDLC module	Power density (kW kg ⁻¹)	20	Large capacity, high voltage, insulation, light weight, internal resistance
SC housing	Electrochemical characteristics within the operating temperature	-40°C ~ +100°C	Corrosion resistance, high temperature stability (Electrochemical characteristics by vapor pressure and operating temperatures)
Capacitor management system	Cell to cell voltage deviation	Standardization of evaluation technology	overcharging, overtemperature, and voltage monitoring (design of control module, analysis and standardization of evaluation technology)

Table 9. SWOT analysis of detailed component technologies [32]

Active carbon	[S] ◦ demand growth prospect ◦ Variety of applications.	[W] ◦ small domestic market ◦ Lack of source technology and infrastructure
	[O] ◦ Expansion of applications (HEV, EV) ◦ Expanded range of use of high-power ESS	[T] ◦ Relatively high cost compared to batteries ◦ Japanese monopoly ◦ Chinese price competitiveness
Electrolyte	[S] ◦ Increased demand for large-sized SCs	[W] ◦ Lack of original technology for various electrolytes
	[O] ◦ Quantitative & qualitative increase in domestic cell manufacturer ◦ The growth of global demand	[T] ◦ Lack of source technology ◦ Lack of industrial property rights
Collector	[S] ◦ demand growth ◦ customer-tailored quality improvement	[W] ◦ small domestic market ◦ Lack of source technology and infrastructure
	[O] ◦ The growth of global demand	[T] ◦ Japanese technology and market monopoly ◦ a narrow market

[S] Strength, [W] Weakness, [O] Opportunities [T] Threats

러스터링 기법의 토폭모델링을 수행하고, 특허의 주요 IPC 기술체계에 기반한 요소기술 분석을 전문가의 검토를 거쳐 핵심 기술을 Table 8과 같이 분류하였다. 또한 2023년 말까지 전극의 집전체, 활성탄, 바인더 및 전해질, 그리고 모듈·하우징·관리 기술 등의 분류한 핵심 기술 분야별 단계 목표를 설정하여 제시하고, 기술 생태계 현황을 공유하였다[30]. 최고 기술국인 일본 대비 우리나라는 약 80%의 기술수준, 기술격차 1.9년으로 평가되며, 기술격차 순서는 미국(95.4%), 중국(88.8%), EU(81.3%), 한국(79.9%)로 큰 차이가 없으나 주요

전극재인 활성탄을 일본의 Kuraray Chemical과 Osaka Gas Chemical에서 대부분 장악하고 있으며 전해액 외의 대부분을 수입에 의존하고 있어 소재의 국산화 필요성이 여전히 이슈로 남아있다[31].

Table 9에서 시장 요인에 따른 세부 구성품 별 SWOT분석 결과를 정리하였으며[32], Table 10 및 Table 11에서 각각 슈퍼커패시터 제품을 생산하여 시장을 선도 중인 대표적인 글로벌 및 국내 제품 생산 기업들의 현황을 조사하여 정리하였다.

Table 10. Global supercapacitor manufacturing company

Company	Description
MAXWELL TECHNOLOGIES (USA)	Research and production parts in San Diego Produced small products in Taiwan and large ones in Europe Products lineup of various E_d & P_d (3 ~ 3,400 F, 2.7 ~ 3 V), Engine start module (U.S.) for heavy-duty truck, start-stop system for vehicles in 2014, regenerative braking system of Lamborghini's Sián in 2019 (for weight and recharge time), Mounted on over 1 million EVs M&A by TESLA in 2019, and sold to UCAP power™ in 2021
Yageo Corporation (Taiwan) - KEMET (U.S.) - TOKIN (JPN)	KEMET (U.S.) complete acquisition of NEC TOKIN in 2017 In 2020, KEMET corporation was acquired by Yageo of Taiwan TOKIN corporation: Having thin film EDLC with low ESR for initial and long-term use. Product 20 Wh kg^{-1} class KEMET: Ceramic, tantalum, Al electrolytic capacitors, and supercapacitors (SMD can / radial pin 0.047 ~ 1 F, radial molded 0.047 ~ 0.1 F, radial 1 ~ 50 F, snap-in 100 & 200 F) for low voltage & DC hold-up applications. Yageo: company specializes in passive devices (global 3 rd in 2020) - chip resistors, capacitors (No. 1 in tantalum capacitor, No. 3 in multilayer ceramic capacitor) and inductors.
NIPPON CHEMI-CON CORPORATION (JPN)	Manufacturer capacitors and electronics components, having two subsidiaries: United Chemi-Con (in U.S.) and Europe Chemi-Con (in Germany) The Expansion ELDC business for automotive in 2014 Supplied to capacitor-powered start-stop system of Honda. Product: DLCAP™ DXE/DXF/DXG/DKA series and modules 7.5 V 133 F & 466 F (日本ケミコン株式会社)
EPRI (USA)	Development a distributed power system combining 3 kW-PEMFC and EDLC with subsidiaries (NREL ORNL) in 2001. Target: Grid-related hybrid fuel cell system with high speed response and high load adaptability. kWh ~ 1 MWh class of ESS combining FC and SCs by 2009. To evaluate a series of capacitor-based energy-saving devices for utilities and end-use customers in 2021.
INMATECH (USA)	Application for smart mobility and smart grid, by reinventing SC technology Several supercapacitor projects for hybrid electric vehicles. Aqueous electrolyte product, safe and economical price
IOXUS (JPN)	The only company in North America with fully integrated SC design and manufacturing facilities ISO9001:2015, UL certified Products : iCAP supercapacitor, iMOD modules, THiNCAP cell Power Systems Co., Ltd was acquired by IOXUS in 2012. EDLC module supplied for hybrid buses and wind power generation in China (2014). A product designed to operate at > 1,000,000 cycles and > 70 °C. Application: pitch control of wind mills, vehicle subsystems, UPS, backup power supplies, small portable devices, grid/power compensation and hybrid driving trains, ESS, etc.
Skeleton Technologies (EU)	Started developing graphene-based SC in 2009 Manufacturing facility in Estonia (2014) and Germany (2018). SkelGrid for grid scale power solution SkelMod modules SkelCap graphene Cells: 5,000 F, 3.0 V, 0.2 mΩ, 28.4 kW kg^{-1} , 11.1 Wh kg^{-1} ~ 2.85 V, 300 F, 20 kW kg^{-1} , 5.4 Wh kg^{-1} ISO 9001:2014, 14001:2014, RoHS Compliant, UL certified.
General Electric (USA)	First developer (patent application) of EDLC in 1957 and Holds lots of patents. For advanced energy storage technology in pickup trucks Graphene SCs for vehicles in 2014
PANASONIC (JPN)	Matsushita Electric to changes name to Panasonic corporation in 2008, worldwide leader in the development and manufacture of electronic products. The module of automotive EDLC as a power storage element instead of batteries, and adopted as backup power supply of a brake system in Aug. 2021 Discontinued small-sized ELDCs (gold capacitors): multilayer coin type (Jan. 2020) and wound type (Oct. 2021), and to focus new products of Conductive polymer electrolytic capacitors, Al electrolytic capacitors, film capacitors.

Table 11. Domestic supercapacitor manufacturing company

Company	Description
LS materials (KOR)	Spin-off from LS Mtron in 2021, Started research in 2005, and began production in 2006. Developed with a focus on high-capacity products and application for wind power, UPS, hybrid vehicles, and bus applications. Patents related to module and connection parts contact resistance Supplied to Chinese commercialized bus. A variety of products: cell LSUC (100 ~ 3,400 F), module LSUM (4.1 F 403.2 V 450 mΩ ~ 500 F 16.2 V 1.7 mΩ). Applications: home appliances, SSD, windmill pitch control system, robots, military, vehicles and trams, etc.
VINA tech (KOR)	Started research in 2004, and began mass production in 2005. Construction of a production plant in Vietnam in 2018. Now occupied 16% of the global market for medium-sized SCs. On sales HyCap brand cell and modules (Cylindrical chip & coin types), Hybrid Li capacitor 3.8 V 30 ~ 250 F with low leakage current Applications: smart meter, battery auxiliary system, RTC and memory backup, blackbox, etc.
Samwha Electric (KOR)	Hybrid capacitor development in Oct. 2013 Wide ranges of various products (100 ~ 7,500 F, EDLC, hybrid) Green-cap (EDLC: single cell and module), Al E-cap (Aluminum Electrolyte capacitor: conductive polymer hybrid, miniature, large, surface mount, conductive polymer), etc. Application: IoT, medical devices, UPS, hybrid & FC vehicles, wind power pitch control, solar street lamp, railway regenerative braking auxiliary power, subway and tram, hybrid bus.
KORCHIP (KOR)	a partner company of Samsung Electro-Mechanics STARCAP (EDLC): Small coin type (3.3 ~ 6.3 V, 0.033 ~ 1.5 F), radial type (2.3 ~ 3.0 V, 1 ~ 120 F), module type (5.0 ~ 7.5 V, 0.33 ~ 7.5 F), Lug type (2.5 ~ 2.7 V, 100 ~ 360 F) for UPS. Application: wind power generation, solar photovoltaic, and electric vehicles, mobile and small home appliances, meters, GPS, etc.
VITZRO (KOR)	Subsidiary company of VITZRO Tech, Li batteries specialist. EDLCs from 2013: VSCS (Lead and Lug type) and VSCM Series (2021)

5. 결론 및 고찰

에너지저장시스템은 원하는 때에 원하는 양을 발전할 수 없는 친환경 변동성 에너지를 안정적으로 수요가 발생하는 시간에 사용하고 전력 계통 시스템에서 전력 품질 문제에 대응할 수 있다. 에너지 저장시스템을 위해 다양한 저장 기술들이 있으며, 그 중 슈퍼커패시터는 실험실 규모에서는 상용 리튬이온 배터리 수준에 상응할 만큼 빠르게 성장하였다. 단시간에 전기 에너지를 저장하고 필요 시 큰 전류를 빠르게 연속적으로 공급할 수 있는 슈퍼커패시터는, 백업용 전원, 무정전전원장치, 수송 및 기계의 고출력 보조전원처럼 급속 방전이 필요한 전자기기부터 자동차의 회생제동 시스템, 무가선 트램, 사물인터넷 및 무선센서 네트워크, 신재생에너지 연계 전력 저장장치 등 다양한 분야에서 그 응용범위가 고려되고 있다. 앞으로도 폭발적인 시장 확대를 전망하는 전기차 및 하이브리드 자동차(버스)의 대형 슈퍼커패시터 제품 시장을 위하여 효율적이고 안전한 고전압화 모듈 기술이 강조되며, 고효율 충전, 대용량 방전 가격 경쟁력 등을 필요로 한다. 급격한 수요에 대응하기 위해서는, 실현가능한 목표를 설정하고 정부 주도의 적극적인 투자를 통해 슈퍼커패시터 산업의 전략적 성장이 필요하다. 외교적 무역 이슈에 취약한 소재기술을 국산화하기 위한 원천 기술 연

구에 보다 많은 지원이 필요하며, 현장 적용을 위한 관련법(전기사업법, 시행령 등)의 개정으로 산업군으로 정착할 수 있도록 지원해야 할 것이다.

슈퍼커패시터가 실제 제품 시장의 응용분야에서 필요한 에너지/전력 밀도에 대응하기 위해서는 많은 R&D 노력이 필요하다. SC의 성능 향상 및 비용 저감을 위해서, (1) 에너지밀도를 개선하고 접근할 수 없는 표면 구조(dead volume)없이 높은 전력 밀도를 유지할 수 있는 계층적 다공성 미세구조를 갖는 전극 재료를, (2) 새롭고 더 좋은 합성 기술로 합성할 수 있어야 하며, (3) 전극/전극 계면에서 계면반응에 대한 심도 깊은 이해가 필요하고, (4) 다양한 표면 개질 기술을 활용해 전해질 이온과 전기활성 물질 사이의 계면 상호작용을 개선해야 한다. (5) 작동 온도 범위·자체 방전율·제품 수명 등도 개선하고, 집전체·분리막·포장재의 열화 같은 몇 가지 이슈도 해결하여 전체 전기 성능을 개선하고, (6) 정밀한 모듈 제조 기술들이 필요하다. 특히 제품 설계 단계에서는 시스템 레벨부터 모듈까지 다양한 전압 밸런싱을 포함한 전기 모델들, 열모델 등을 고려하여 신뢰성 기반의 설계가 수행되어야 하고, 제품 생산 이후의 모니터링 및 제어 기술, 데이터베이스를 활용한 잔여 수명 예측 등도 가능해야 한다[1,16].

감사

초기 자료 조사를 수행해 준 이슬 연구원에게 감사드립니다. 이 논문은 2021년도 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2019M3R6A1065258)사업의 지원을 받음. 류준형은 2020년 동국대학교 DG선진연구강화사업의 지원을 받았음.

References

1. Abbas, Q., Mirzaeian, M., Hunt, M. R. C., Hall, P., and Raza, R., "Current State and Future Prospects for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems," *Energies*, **13**(21), 5847 (2020).
2. Jung, J.-H., No, U.-C., Kim, H.-G., and Jeon, T.-W., "Energy Storage System Using Supercapacitors," *KIPE Magazine*, **17**(5), 32-36 (2012).
3. Chun, H. W., and You, I. K., "Market and Technology Trends in Supercapacitor," *Electronics and Telecommunications Trends*, **29**(5), 186-194 (2014).
4. Yu, J.-J., "Electrochemical Capacitor Technology and Research Trends," *Electrical & Electronic materials*, **33**(1), 29-37 (2020).
5. Akinyele, D. O., and Rayudu, R. K., "Review of Energy Storage Technologies for Sustainable Power Networks," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, **8**, 74-91 (2014).
6. Maisanam, A. K. S., Biswas, A., and Sharma, K. K., "An Innovative Framework for Electrical Energy Storage System Selection for Remote Area Electrification with Renewable Energy System: Case of a Remote Village in India," *J. Renew. Sustain. Energy*, **12**(2) 024101 (2020).
7. Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A., and Ayob, A., "Review of Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications: Issues and Challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **69**, 771-789 (2017).
8. Hemmati, R., and Saboori, H., "Emergence of Hybrid Energy Storage Systems in Renewable Energy and Transport Applications - A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **65**, 11-23 (2016).
9. Ameer, A., Berrada, A., Loudiyi, K., and Adomatis, R., "Chapter 6 - Performance and Energetic Modeling of Hybrid PV Systems Coupled with Battery Energy Storage," *Hybrid Energy System Models*, 195-238 (2021).
10. Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., and Thirumalai, J., "A Review on Recent Advances in Hybrid Supercapacitors: Design, Fabrication and Applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **101**, 123-145 (2019).
11. Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K.-H., Yang, J., Kumar, S., Mehmood, A., and Kwon, E. E., "Recent Advancements in Supercapacitor Technology," *Nano Energy*, **52**, 441-473 (2018).
12. Gogotsi, Y., and Penner, R. M., "Energy Storage in Nanomaterials - Capacitive, Pseudocapacitive, or Battery-like?," *ACS Nano*, **12**(3), 2081-2083 (2018).
13. Park, J. K., and Bae, Y. C., "Supercapacitor Technology and Information Analysis," KISTI (2013).
14. Song, G. S., "Development Trends of Supercapacitor Technology for Energy Storage System," KEITI, Konetic Report 2016-111 (2016).
15. Poonam, Sharma, K., Arora, A., and Tripathi, S. K., "Review of Supercapacitors: Materials and Devices," *J. Energy Storage*, **21**, 801-825 (2019).
16. Liu, S., Wei, L., and Wang, H., "Review on Reliability of Supercapacitors in Energy Storage Applications," *Appl. Energy*, **278**, 115436 (2020).
17. Chen, X., Paul, R., and Dai, L., "Carbon-based Supercapacitors for Efficient Energy Storage," *Natl. Sci. Rev.*, **4**(3), 453-489 (2017).
18. Lee, G. H., and Kang, J. K., "Synthesis of Nitrogen-Doped Mesoporous Structures from Metal-Organic Frameworks and Their Utilization Enabling High Performances in Hybrid Sodium-Ion Energy Storages," *Adv. Sci.*, **7**(6), 1902986 (2020).
19. Jeong, H. M., Lee, J. W., Shin, W. H., Choi, Y. J., Shin, H. J., Kang, J. K., and Choi, J. W., "Nitrogen-Doped Graphene for High-Performance Ultracapacitors and the Importance of Nitrogen-Doped Sites at Basal Planes," *Nano Lett.*, **11**(6), 2472-2477 (2011).
20. Park, M. G., Choi, J. W., Ock, I. W., Kim, G. H., and Kang, J. K., "Mesoporous Thorn-Covered Core-Shell Cathode and 3D Reduced Graphene Oxide Aerogel Composite Anode with Conductive Multivalence Metal Sulfides for High-Performance Aqueous Hybrid Capacitors," *Adv. Energy Mater.*, **11**(12), 2003563 (2021).
21. Kang, K.-N., Lee, H., Kim, J., Kwak, M.-J., Jeong, H. Y., Kim, G., and Jang, J.-H., "Co₃O₄ Exsolved Defective Layered Perovskite Oxide for Energy Storage Systems," *ACS Energy Lett.*, **5**(12), 3828-3836 (2020).
22. Noh, C., and Jung, Y., "Understanding the Charging Dynamics of an Ionic Liquid Electric Double Layer Capacitor Via Molecular Dynamics Simulations," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **21**(13), 6790-6800 (2019).
23. Moon, S., Lee, S. M., Lim, H.-K., Jin, H.-J., and Yun, Y. S., "Relationship between Multivalent Cation Charge Carriers and Organic Solvents on Nanoporous Carbons in 4 V-Window Magnesium Ion Supercapacitors," *Adv. Energy Mater.*, **11**(30), 2101054 (2021).
24. Pham, T. V., Kim, J.-G., Jung, J. Y., Kim, J. H., Cho, H., Seo, T. H., Lee, H., Kim, N. D., and Kim, M. J., "High Areal Capacitance of N-Doped Graphene Synthesized by Arc Discharge," *Adv. Funct. Mater.*, **29**(48), 1905511 (2019).
25. <http://www.dmbnews.kr/news/articleView.html?idxno=20779> (accessed Aug. 2021)
26. Gaur, A. P. S., Xiang, W., Nepal, A., Wright, J. P., Chen, P., Nagaraja, T., Sigdel, S., LaCroix, B., Sorensen, C. M., and

- Das, S. R., "Graphene Aerosol Gel Ink for Printing Micro-Supercapacitors," *ACS Appl. Energy Mater.*, **4**(8), 7632-7641 (2021).
27. "Eco-friendly Energy Storage Warehouse, Super Capacitor Patent Application Active," Korean Intellectual Property Office (2020).
28. <https://www.fnnews.com/news/202105160221232011> (accessed Aug. 2021).
29. Jang, W. S., and Lee, J. H., "Crisis of the ESS Industrial Ecosystem in Korea," Hyundai Research Institute, VIP Report 20-02 (2020).
30. Ministry of SMEs and Startups, "TECHNOLOGY ROADMAP FOR SME 2021-2023 Secondary Battery", 174-214 (2020).
31. KOREA Investor Relations Service, "Supercapacitor" Innovative Growth Item Report 2021-32 (2021).
32. Korea Battery Industry Association, "Strategy to Strengthen the Industrial Competitiveness of Ultracapacitor for IT Application," 10-Policy-14 (2010).