

고온 안정성을 가지는 고에너지밀도 NaS전지 개발 동향

송다인*, 김세일, 김대호
국방기술진흥연구소

Development trends of high energy density NaSbatteries with high-temperature stability in the defense field

Da-in Song*, Se-il Kim, Dae-ho Kim

Korea Research Institute for defense Technology planning and advantage

요약 국방 분야에서 필요한 이차전지 기술을 식별하기 위해서 분야별 국방전략기술을 분석하고, 이차전지 관련 핵심기술 연구 현황을 조사하였다. 다양한 핵심기술 중 대전력 전원 기술에 대해 연구하였다. 대전력 전원 기술은 미래지향적인 미래형 첨단 기술 분야 핵심기술로 레이저, 레일건 등 지향성 에너지무기에 적용할 수 있는 기술이다. 고온 안정성이 요구되며 대전력 전원으로 활용할 수 있도록 고에너지밀도를 가지고 있어야 한다. 고온에서 안정하며, 자기방전이 없고, 높은 이론에너지밀도를 가지는 NaS전지가 가장 적절하다고 제시하였다. 제시된 이차전지의 타당성 확인을 위해 NaS전지 동향에 대해 조사하였다. NaS전지는 양극으로 부도체인 S를 사용한다. S전극 제조 시 도전성을 확보할 수 있는 도전재가 추가되어야 한다. C펠트, C/SiO₂펠트를 활용하여 우수한 도전성을 가지는 S펠트 전극을 제조하는 연구가 있다. 신재생에너지분야 보급 확대를 위해 NaS전지를 도입하는 연구도 진행되고 있으며, NaS전지의 활용성 및 휴대성 증가시킬 수 있도록 평판형으로 설계하는 연구도 있다. 첨단 신기술을 적용한 미래 무기체계 소요 확대에 차세대 군용 에너지원에 대한 개발 요구가 증대되고 있다. 기존 리튬이차전지에 비해 에너지밀도가 높고 고온 환경에서 운용 가능한 NaS전지에 대한 연구가 필요하다. 민간 분야 기술 성장과 함께 국방 분야에서도 활용될 수 있도록 NaS전지 연구가 추진되어야 한다. 국방 분야에서 NaS전지가 활용되면 지향성 에너지 무기체계 등 대용량 에너지원을 요구하는 체계에 적용되어 성능 향상에 큰 기여를 할 것이다.

Abstract In order to identify secondary battery technologies required in defense applications, strategic defense technologies were analyzed, and the current status of research on critical technologies related to secondary batteries was investigated. Among the various critical technologies, high-power electric power technology was studied. High-power electric power technology is critical for future applications and could be applied to directed-energy weapons (DEWs), such as lasers and rail guns. High-temperature stability and high energy density are required for use as a high-power electric power source. NaS batteries are stable at high temperature, have no self-discharge, and have a high theoretical energy density, so they are proposed as the most suitable candidate. NaS battery trends were investigated to verify the validity of the proposed secondary battery. NaS batteries use S, an insulator, as the cathode. When manufacturing the S electrode, a conductive material that can secure conductivity must be added. A previous study was done on manufacturing S felt electrodes and obtained excellent conductivity by using C felt and C/SiO₂ felt. In order to expand the supply of renewable energy, research on introducing NaS batteries is being conducted, and there is also research on designing NaS batteries as flat plates to increase their usability and portability. Demand for development of next-generation military energy sources is increasing due to the expansion of future weapon systems using advanced new technologies. Research is required on NaS batteries that have higher energy density and are more operational in high-temperature environments compared with existing lithium secondary batteries. NaS battery research should be promoted so that the batteries can be used in defense applications along with the growth of technology in civilian applications. If NaS batteries are used in defense applications, they could be applied to systems that require large-capacity energy sources, such as DEW systems, which will greatly contribute to the improvement of performance.

Keywords : Secondary Battery, NaS Battery, High Energy Density, ESS, Defense Field

*Corresponding Author : Da-in Song(Korea Research Institute for defense Technology planning and advantage)
email: vkds126@naver.com

Received June 1, 2023

Revised June 27, 2023

Accepted July 7, 2023

Published July 31, 2023

1. 서론

「국방과학기술혁신 기본계획」의 국방과학기술 발전 방향에 근거하는 국방기술기획서를 기반으로 국방전략기술을 분석하였다. 미래지향적 미래 무기체계로 레이저, 레일건 등 지향성 에너지무기(DEW : Direct Energy Weapon)가 등장하면서, 국방 분야에서 고출력 전원공급이 가능한 차세대 에너지원의 개발 요구가 증대되고 있다. 차세대 에너지원으로 활용할 수 있는 이차전지에 관한 연구의 필요성을 인식하고, 이차전지 핵심기술 분석하였다. 다양한 이차전지 중에서도 대규모 전력을 저장할 수 있는 ESS(Energy Storage System)용 이차전지를 연구하였고, 고온 안정성을 가지고 있으며, 다양한 실증 사례가 존재하는 NaS전지가 적합하다고 제시하였다. 이차전지 및 EV/ESS 개요를 소개하고, 이차전지 및 ESS용 이차전지 동향과 NaS전지의 동향에 대해서 연구하였다.

2. 이차전지 및 EV/ESS 개요

2.1 이차전지 개요

이차전지는 축전지(storage battery), 충전지(rechargeable battery, 충전식 전지) 혹은 배터리(battery)라고 불리며, 외부의 전기 에너지를 화학 에너지 형태로 변경하여 저장해 두었다가 필요할 때에 전기를 만들어내는 장치이다. 이차전지는 두 번(또는 그 이상) 쓸 수 있다는 뜻이 아니라 충전을 통해 반영구적으로 사용하는 전지를 의미한다. 1900년대 납축전지, 1950년대 Ni-Cd 전지, Ni-MH 전지의 등장으로 이차전지는 사람들에게 알려졌으며, 1990년대 리튬이온 전지가 등장하면서 본격적으로 발전하였다. 노트북, 휴대폰, 캠코더, 디지털카메라 등 휴대용 전자기기에 사용되는 소형전지부터, EV/ESS 등에 사용되는 중대형전지까지 다양한 분야에 사용되고 있다. 1990, 2000년대에는 소형 이차전지를 중심으로 발전하였고, 2010년대부터는 EV/ESS 등에 사용되는 중대형전지 중심으로 연구되고 있다.

2.2 EV/ESS 개요

EV는 내연기관 대신 전기 모터를 사용하여 운동에너지를 얻는 자동차를 의미한다. 구동에 필요한 전기에너지를 얻는 방식에 따라 배터리스 전기자동차, 수소 연료 전기자동차 등으로 분류된다. 배터리스 전기자동차는 현재 기술로는 전력량의 한계로 대형차에 적용 불가하며,

자동차 수명보다 전지의 수명이 짧다는 단점이 존재한다. 하지만 수소 연료 전기자동차보다 충전소의 수가 많으며, 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 현재 EV 시장은 배터리스 전기자동차가 주도하고 있다.

ESS는 생성된 에너지를 저장해 두었다가 필요한 시기에 공급하여 에너지의 효율을 높이는 시스템이다. 일반 가정에서 사용하는 건전지나 전자제품에 사용하는 소형 배터리도 에너지를 저장할 수 있지만 이런 소규모 전력 저장장치를 ESS라고 말하지는 않고, 일반적으로 수백 kWh 이상의 전력을 저장하는 단독 시스템을 ESS라고 부른다. 대부분의 ESS는 비용, 입지 특성, 환경영향, 효율성 측면에서 전기화학적 방식인 이차전지를 기반으로 보급되어 있다.

EV/ESS분야에서는 대규모 전력을 저장할 수 있는 고에너지밀도 이차전지에 대해서 다양한 연구가 진행되고 있다.

3. 이차전지 및 EV/ESS용 전지 개발 동향

3.1 이차전지 동향

미래 산업의 핵심 키워드는 전동화(Electrification)·무선화(Cordless)이다. 모든 사물이 이차전지로 움직이는 시대가 도래할 것이다. 미국, 중국, 일본 등 다양한 국가에서 이차전지 연구가 이루어지고 있다. 우리나라 정부는 2021년 7월 「2030 이차전지 산업(K-battery) 발전 전략」을 발표하였다. 2020년 대비 2030년에는 이차전지분야 매출액을 약 7.3배, 수출액을 약 2.6배 상승시키기 위한 다양한 국가사업을 추진 및 진행 예정이다.

NaS전지 관련 국가사업도 진행되고 있다. 2022년 NaS전지 국산화 및 이를 기반으로 한 대용량 장주기 ESS 연구개발 기획(6T 관련 기술(에너지저장 이용기술), 국가중점과학기술(대용량 장수명 이차전지 기술)), 2023년 장주기 대용량 전력 에너지 저장용 배터리 커패시터 개발(6T 관련 기술(에너지소재 기술)) 등이 있다.

국방 분야 이차전지 동향을 조사하기 위해 국방기술기획서를 분석하였다. 국방기술기획서는 「과학기술혁신 기본계획」의 국방과학기술 발전 방향에 근거하여, 군사적 요구능력과 국가과학기술의 국방 분야 중점 과학기술을 기반으로 도출된 국방전략기술 분야에 대한 구체적인 기술개발 방향 및 확보 방안을 제시하고 있다. 국방기본정책서, 합동군사전략서 및 합동군사전략목표기획서를 근간으로 미래 첨단무기체계 발전 추세를 고려한 국방전략

Table 1. The field of defense Strategic Technologies, Critical Technologies.

Feild	Defense Strategic Technologies	Critical Technologies
AI intelligent surveillance and reconnaissance feild	Space power system design technology	Space solar battery technology
Super speed and hypervelocity precision guided munitions feild	Trajectory flight Smart Technology	High-shock resistant video acquisition and Transmit/Receive device design technology
		Ultra-long-range glide guided munition development technology
Future propulsion and stealth platform feild	Submarine low-noise high-power propulsion technology	High-capacity Air Independent Propulsion(AIP) system technology
	Unmanned maritime system high-performance propulsion technology	Unmanned maritime reliable energy source technology
	Aircraft high-power propulsion/energy technology	Aircraft technology energy storage system development technology
	High speed underwater propulsion technology	High-power high-efficiency thermal battery technology
MUM-T(manned-unmanned teaming) Combat System feild	Unmanned ground propulsion and energy technology	extrem enviornments electric power technology
		fibers composite materials structural battery technology
		Micro robot electric power technology
		Secondary battery technology
		High-voltage battery cooling technology
High-tech Individual Combat System feild	Individual Combat System wearable computing technology	Individual Combat System ultra-light powerpack technology
Future high-tech new technology feild	Renewable energy technology (fuel cell)	-
	electromagnetic propulsion technology	High-power electric power technology

기술을 분야별로 분류하였다. 국방전략기술에 연동되는 핵심기술을 분석하였다. Table 1과 같이 감시정찰 분야, 정밀타격 분야 등 다양한 분야에서 국방전략기술 개발을 위한 핵심기술 연구가 추진되고 있다. 태양전지, 열전지, 연료전지, 해수전지, 베타전지, 전고체전지 등 다양한 전지에 대한 연구가 진행 중이거나, 진행될 예정이다[1].

국방과학기술 발전 방향에 근거하는 국방기술기획서에 다양한 소요 기술이 식별되어 있다. 그중 미래지향적인 미래형 첨단 신기술 분야(Future high-tech new technology feild)에 대해 연구하였다. 물리·화학·생물, 지향성 에너지 등 미래형 기술의 독자적 개발을 통해 격차 해소와 무기체계의 혁신적 발전을 도모하는 분야이다. 미래지향적 레이저, 레일건 등 지향성 에너지무기를 확보하기 위해 ‘대전력 전원 기술(High-power electric power technology)’을 핵심기술로 선정되었다. 대전력 전원 기술을 개발하기 위해서는 고에너지밀도 전지에 대한 연구가 필요하다. 에너지무기에 적용하기 위해서는 고온 안정성 확보도 중요하다. 따라서, 고온 안정성 및 고에너지밀도를 가지는 이차전지에 대한 연구가 필요하다.

3.2 EV/ESS용 이차전지 동향

EV는 가격, 효율성 등에 따라 동력장치로 이차전지를 활용하고 있으며, 이차전지 중에서도 리튬이온전지를 사용하고 있다. Fig. 1은 2012~2020년까지 ESS용 전력저장장치의 비율을 나타내고 있다. ESS는 전력저장장치로 대부분 이차전지를 사용한다.

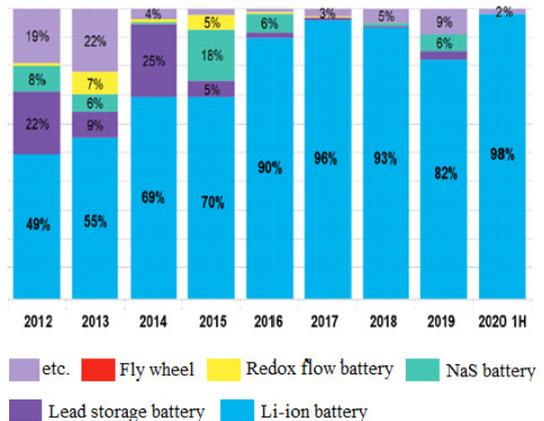


Fig. 1. Penetration rate by type of ESS technology.

이차전지 중에서도 리튬이온전지가 가장 많이 활용되며, 납축전지(Lead storage battery) 및 NaS전지도 활용되는 경우가 있다. 활용도가 높은 리튬이온전지, 납축전지, NaS전지의 특성에 대해 Table 2와 같이 조사하였다. 에너지밀도, 사이클 수, 사이클 효율, 용량 당 비용을 비교해보면 NaS전지가 우수하다는 사실을 알 수 있다. 하지만 NaS전지는 고온(300℃)에서 작동이 가능하기 때문에 운용환경을 고온으로 설정할 수 있는 히터기가 추가되어야 한다. 에너지무기는 고온에서 작동하므로, 고온 환경에서 안정적인 NaS전지를 활용할 수 있다 [2-4].

Table 2. Technical and economical characteristics of electrical energy storage technologies.

Spec.	Li-ion battery	Lead-acid battery	NaS battery
Energy density (Wh/l)	200~500	50~90	150~400
Cycling Times (Cycles)	1,500	900	25,00
Cycle efficiency (%)	90~97	63~90	75~90
Energy capital costs (USD/kWh)	600~3,800	200~600	300~500

4. NaS전지의 원리 및 개발동향

4.1 NaS전지의 원리

일반적인 이차전지와 같이 양극, 음극, 전해질 및 분리막으로 구성되어 있다. 양극에는 황(S), 음극에는 소듐(Na), 전해질 및 분리막으로 β-알루미나가 사용된다. 양극 활물질인 S은 부도체이기 때문에 도전재, 결합재가 양극재로 추가되어야 한다.

NaS전지의 개방전압은 350℃에서 2.076 V이며, 상용화된 전지 중에서 765Wh/kg이라는 가장 높은 이론 에너지밀도를 가진다. 자기방전(Self discharge)이 없다는 장점을 가지고 있다. Fig. 2, 3과 같이 350℃라는 고온에서 작동하는 이차전지이므로 양극과 음극 활물질은 그림과 같이 액상으로 존재한다. 소듐과 황이 전기화학적으로 반응하여 다황화소듐을 형성하면서 작동하게 된다. 셀이 방전될 때 액상 소듐은 고체전해질인 β-알루미나를 통해 이동하고 소듐과 β-알루미나의 계면에서 산화되어 소듐 이온(Na+)이 형성된다(반응식 (1)). 소듐 이

온은 β-알루미나를 통해 양극으로 이동하고 반응식 (2)에 의해서 생성된 황이온과 반응하여 다황화소듐을 생성하게 된다(반응식 (3)). 그리고 셀이 충전하게 되면 전기화학반응은 역반응이 일어나서 다황화소듐은 양극에서 분해되고 소듐이온은 음극으로 되돌아간다.

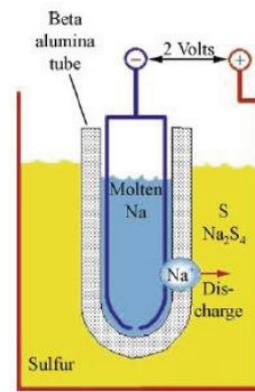
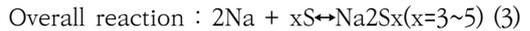
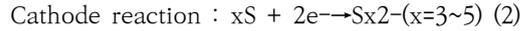


Fig. 2. Diagram NaS battery.

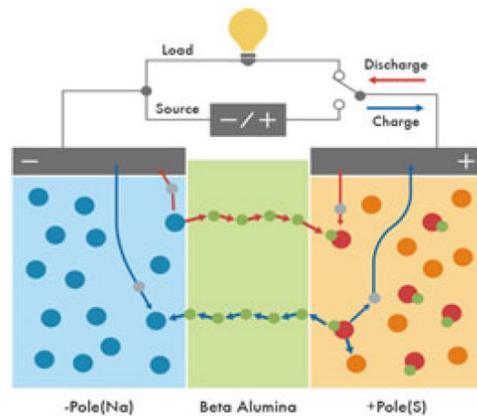


Fig. 3. Operation principle NaS battery.

4.2 NaS전지의 개발동향

NaS전지는 수kW급 리튬이온전지 대비 MW급 출력을 가지며, 자기방전이 없으므로, 대용량 ESS용 전지로 적합하다. 전지의 구성요소인 전극(Na, S)과 전해질(β-알루미나)의 가격이 저렴하다. 아래 Fig. 4와 같이 1960년대 미국의 Ford 자동차 회사에서 처음으로 기본원리가 공표되었고, 전기 자동차용 전지로 개발이 시작되었

다. 1980년대 이후에는 일본의 ‘Moonlight’ 프로젝트의 일환으로 컨소시엄에 참여한 Tokyo Electric Power Co.(TEPCO)와 세라믹 절연체 전문 기업인 NGK사의 공동 개발로 NaS전지기술의 획기적인 진보를 이루었고 현재까지 기술을 주도하고 있다.

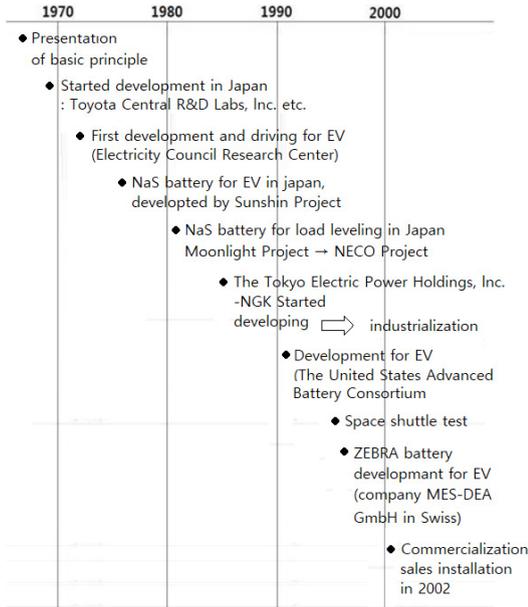


Fig. 4. Development history NaS battery.

NaS전지는 세계 최초로 상용화에 성공한 일본 NGK사가 선두하고 있으며, 작동온도 350 ℃, 용량 200 kW ~ 1,200 kWh, 가격 450 USD/kWh의 성능을 가지는 ESS를 보급하고 있다. 보증기간은 15년 또는 4,500 Cycles이며, 24시간 원격지원서비스가 제공된다. 아래 표와 같이 다양한 실증 사업을 통해 성능, 안정성, 경제성이 검증되었다[5-7].

Table 3. Technical and economical characteristics of electrical energy storage technologies.

Year	Nation	System Capacity	System type
2010	Abu Dhabi	108MW/648MWh	Substation load leveling
2013	Canada	1MW/7.2MWh	Peak shaving and backup electric power ESS
2015	Italy	34.8MW/250MWh	Reliable energy support system
2021	Belgium	0.95MW/5.8MWh	Production facility support system
2023	Australia	0.25MW/1.45MWh	Mine support system

양극의 활물질인 S는 부도체이므로 도전성을 확보할 수 있도록 도전제가 추가되어야 한다. 도전재로는 열 및 전기적 안정성이 뛰어나며 우수한 도전성을 가지는 C가 주로 사용되며, Fig. 5와 같이 펠트 형태를 적용하여 도전성을 향상시키고 활물질을 증가시킨 S전극을 제조할 수 있다. Fig. 6과 같이 C펠트를 활용하여 양극을 제조하는 다양한 연구가 진행되고 있다. C만으로는 우수한 도전성 확보에 한계가 있으므로 2019년 Fig. 7과 같이 SiO₂를 추가하여 C펠트 보다 우수한 도전성을 가지는 C/SiO₂ 펠트를 제조하는 연구도 있다[4,8,9].

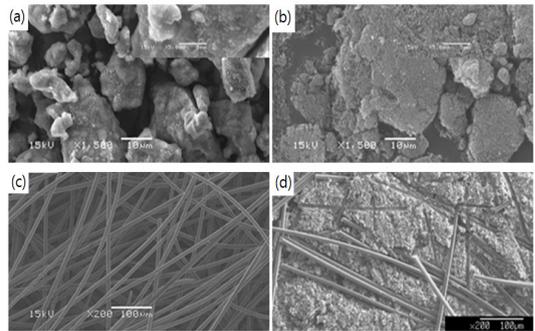


Fig. 5. SEM image and elements mapping results of raw materials and electrode (a) Sulfur, (b) MWNT, (c) Pure carbon felt, (d) Sulfur electrode.

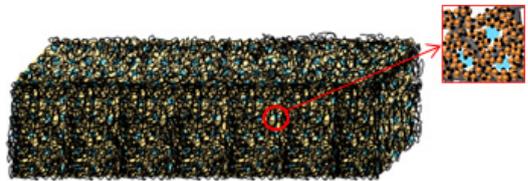


Fig. 6. The structure of the Sulfur electrode.

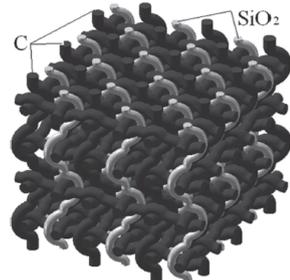


Fig. 7. The structure of the C/SiO₂ composite felt.

풍력과 같은 신재생에너지의 경우 풍속, 풍향이 갑자기 바뀌는 등 돌발 상황이 발생할 수 있다. 수급 여건이 급변할 경우 주파수가 요동치거나, 전압이 떨어지는 등 전력품질 저하가 일어난다. 변동성을 제어하기 위해 전력 저장장치의 운영이 필수적이다. 신재생에너지 설치 시 고에너지밀도를 가지는 NaS전지를 도입한 전력망을 연계해 신재생에너지의 변동성을 흡수할 수 있다.

신재생에너지 확대를 위해 발전 능력과 소비 수요 사이 완충장치 역할을 할 전력 저장장치를 도입하는 다양한 시도가 진행되고 있다. 덴마크의 Dong Energy는 풍력으로 생산한 전기를 전기차에 저장하는 방법을 연구하고 있다. Fig. 8과 같이 미국의 전력회사 AEP 역시 소형 전력 저장장치를 제어하는 Community Energy Storage 프로젝트를 진행하고 있다. 여러 국가가 인접해 있는 유럽에서는 넓은 지역에 산재되어 있는 신재생에너지를 하나의 초대형 전력망(Super Grid)으로 엮기 위해 독일, 프랑스, 네덜란드, 덴마크, 스웨덴 등 총 9개 국가가 참여한 North Sea grid 프로젝트가 있다.

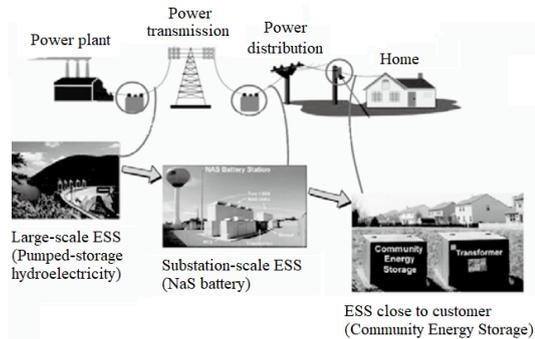


Fig. 8. AEP community energy storage.

2022년 신재생에너지의 보급률 상상을 위해 MATLAB CHIO(Cor)를 활용하여 풍력, 태양광과 함께 NaS전지를 설치하여 최적화된 솔루션을 제시하는 연구도 있다. 아래와 같이 3단계의 과정을 통해 검증하였다. 버스에 걸리는 부하를 식별하여 SCR(Self consumption rate) 최적화, 유효전력 손실 최소화, 에너지 관리비용 공식 기반 최적화된 운용비용 제시 등 3단계를 통해 효율성 높은 신재생에너지 활용법을 제시하였다[10].

NaS전지의 활용성 및 휴대성 증대를 위해 2022년 그림과 같이 평판형(Planar)으로 제조하는 연구도 진행되고 있다. 평판형으로 제조하면 발전량이 높고, Cell packing에 용이하며, 조립 및 열관리가 쉽다. NaS전지는 형상을 변경시키기 어렵다는 제약이 컸지만, 이러한

연구를 통해 활용도를 증가시키는 시도가 진행되고 있다 [11].

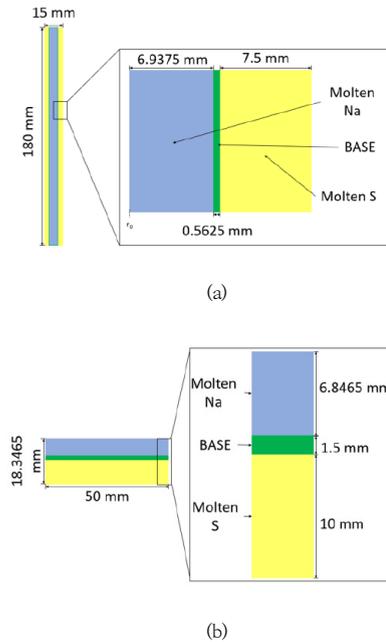


Fig. 9. Schematic diagram and dimensions of tubular (a) and planar (b) geometries of the NaS cell

5. 결론

국방 분야에서 필요한 이차전지 기술을 식별하기 위해 서 국방기술기획서를 기반으로 분야별 국방전력기술을 분석하고, 이차전지 관련 핵심기술 연구 현황을 조사하였다. 신기술을 적용한 미래 무기체계 소요 확대에 차세대 군용 에너지원에 대한 개발 요구가 증대되고 있음을 알 수 있었다. 이차전지 핵심기술인 '대전력 전원 기술(High-power electric power technology)'에 대한 연구가 필요하다. 이차전지 동향을 조사하면서 대전력 전원 기술에는 EV/ESS용 전지에 적합하다고 판단하여 EV/ESS용 개발 동향에 대해 조사하였다. NaS전지는 고온에서 안정하며, 자기방전이 없고 높은 이론에너지밀도를 가진다는 장점과 함께 다양한 실증사례가 존재한다. 이러한 특징에 따라 대전력 전원 기술에 활용할 수 있는 이차전지는 NaS전지임을 제시하였고, NaS전지 동향에 대해 조사하였다.

NaS전지의 효율성을 향상시키기 위한 S펠트전극에 대한 연구가 진행되고 있었고, 신재생에너지 분야에서도

보급 확대를 위한 고에너지밀도를 가지는 NaS전지의 도입이 필수적임을 입증하는 연구가 있었다. NaS전지의 활용성 및 휴대성을 증가시키기 위해 평판형 설계에 대한 연구가 진행되고 있다.

민간기술 성장과 함께 국방분야에서 적용할 수 있도록 다양한 NaS전지 연구가 진행되어야 한다. 현재 지향성 에너지 무기체계에는 리튬이온전지가 사용되므로 NaS전지로 대체하였을 때, 용량을 10% 이상 증가시킬 수 있을 것으로 기대되며, 용량 증가에 따라 운용시간이 향상될 것이다. 국방 분야에서 NaS전지가 활용되면 지향성 에너지 무기체계 등 대용량 에너지원을 요구하는 체계에 적용되어 성능 향상에 큰 기여를 할 것이다.

References

- [1] '22-'36 Defense technology planning paper, Planning paper, Korea Research Institute for Defense Technology planning and advancement, April 2022, Available From : https://dtims.krit.re.kr/vps/OINF_searchBookList10.do
- [2] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", *Applied Energy*, Vol.137, pp.511-536, January 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- [3] Y. Jiang, L. Kang, Y. Liu, "Optimal configuration of battery energy storage system with multiple types of batteries based on supply-demand characteristics", *Energy*, Vol.206, pp.118093, September 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118093>
- [4] L. Tiexin, X. Jing, W. Chengyin, W. Wenjian, "The latest advances in the critical factors (positive electrode, electrolytes, separators) for sodium-sulfur battery", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.792, pp.797-817, July 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.343>
- [5] G. Nikiforidis, M. C. M. (Richard) van de Sanden, M. N. Tsampas, "High and intermediate temperature sodium-sulfur batteries for energy storage: development, challenges and perspectives", *RSC Adv.*, 2019, Vol.9, pp.5649-5673, February 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1039/C8RA08658C>
- [6] D. Kumara, S. Kumar Rajouriab, S. B. Kuharc, D.K. Kanchand, "Progress and prospects of sodium-sulfur batteries: A review", *Solid State Ionics*, Vol. 312, pp. 8-16, December 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2017.10.004>
- [7] S. Pushpitha Vudata, D. Bhattacharyya, "Thermal management of a high temperature sodium sulphur battery stack", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 181, 122025, December 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122025>
- [8] S. dain, "Study of a high energy density battery using a 3D sulfur electrode", *New & Renewable Energy*, Vol.16, pp.1-8, December 2022.
DOI: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2020.0010>
- [9] W. Zhaoyin, H. Yingying, W. Xiangwei, H. Jinduo, G. Zhonghua, "Main Challenges for High Performance NAS Battery: Materials and Interfaces", *Adv. Funct. Mater.*, Vol.23, pp.1005-1018, May 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201200473>
- [10] M. Alqarni, "Sodium sulfur batteries allocation in high renewable penetration microgrids using coronavirus herd immunity optimization", *ASEJ*, Vol.13, Issue 2, 101590, March 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.09.017>
- [11] Hezekiah C. Antonano, Jay Mark F. Panganiban, John Vincent T. Yu, Michael T. Castro, Joey D. Ocon, "Multiphysics Modeling of High Temperature Planar Sodium Sulfur Batteries", *Chem. Eng. Trans.* Vol.94, pp.1093-1098, September 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2294182>

송 다 인(Da-in Song)

[정회원]



- 2015년 2월 : 경상대학교 나노신소재융합공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

국방기획, 에너지

김 세 일(Se-il Kim)

[정회원]



- 2019년 8월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2019년 12월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

국방기획, 레이더

김 대 호(Dae-ho Kim)

[정회원]



- 2016년 8월 : 전북대학교 전자공학
학과 (공학사)
- 2017년 9월 ~ 2020년 12월 :
국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진
흥연구소 연구원

〈관심분야〉

국방기획, 정보통신