

포스트 리튬 이차전지 기술 동향

Technology Trends in Post-Lithium Secondary Batteries

최윤호 (Y.H. Choi, wing0123@etri.re.kr) 전략기술기획실 선임연구원
정형석 (H.S. Chung, chunghs@etri.re.kr) 전략기술기획실 책임연구원/실장

ABSTRACT

Lithium accounts for only 0.0017% of the earth crust, and it is produced in geographically limited regions such as South America, the United States, and China. Since the first half of 2017, the price of lithium has been continuously increasing, and with the rapid adoption of electric vehicles, lithium resources are expected to be depleted in the near future. In addition, economic blocs worldwide face intensifying scenarios such as competition for technological supremacy and protectionism of domestic industries. Consequently, Korea is deepening its dependence on China for core materials and is vulnerable to the influence of the United States Inflation Reduction Act. We analyze post-lithium secondary battery technologies that rely on more earth-abundant elements to replace lithium, whose production is limited to specific regions. Specifically, we focus on the technological status and issues of sodium-ion, zinc-air, and redox-flow batteries. In addition, research trends in post-lithium secondary batteries are examined. Post-lithium secondary batteries seem promising for large-capacity energy storage systems while reducing the costs of raw materials compared with existing lithium-based technologies.

KEYWORDS 나트륨 이온 전지, 레독스 흐름 전지, 아연-공기 전지, 포스트 리튬 이차전지

1. 서론

리튬은 지구 지각에서 0.0017%만을 차지하고 있으며, 남미, 미국, 중국 등 지리적으로 제한적인 곳에서만 생산되고 있다. 2017년 상반기 이후 리튬 원자재의 가격이 계속해서 상승하고 있으며, 전기 자동차의 부상과 함께 이른 시일 내에 리튬 자원의

고갈이 예상된다.

또한, 최근 세계적으로 기술패권 경쟁 및 자국산 업 보호주의 등 경제 블록화 물결이 심화되는 상황에서, 우리나라는 핵심 소재의 중국 의존도가 심화되고 있어 미국 IRA(Inflation Reduction Act)의 영향에 취약한 실정이다.

이 동향 분석에서는 지리적으로 제한된 지역에

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2023.J.380613>

* 이 논문은 한국전자통신연구원 내부연구사업 기획·정책연구사업[미래 선도를 위한 혁신 ICT 기술 발굴 및 기획 연구, 23YE1100]의 논문임.



서 한정적으로 생산되는 리튬을 대체하기 위해, 지구상에 더욱 풍부하게 존재하는 원소를 응용하는 포스트 리튬 이차전지 기술을 소개한다. 그중 대표되는 나트륨 이온 전지, 아연-공기 전지 및 레독스 흐름 전지에 대한 기술 현황과 이슈에 대해 알아보며, 또한 국내외 포스트 리튬 이차전지에 대한 연구 동향을 소개한다. 이러한 포스트 리튬 이차전지는 기존 리튬 기반 기술보다 저렴한 원자재 가격으로 대용량 에너지 저장장치(ESS: Energy Storage System) 등에 효과적으로 사용될 것으로 기대한다.

II. 포스트 리튬 이차전지 개요

1. 포스트 리튬 이차전지 특징

가. 기존 리튬 이차전지와 가격경쟁력

리튬의 제한적인 지리적, 양적 매장량을 극복하기 위해 제시된 만큼, 저렴한 가격의 원자재만을 응용하여 이차전지의 충전/방전 반응을 설계한다. 이차전지의 가격을 크게 원자재 가격과 공정가격으로 나누었을 때, 원자재 가격에서 경쟁력이 있으나 비슷한 공정가격을 가지는 대체기술(예: 나트륨 이온 전지)과 공정가격을 획기적으로 줄이는 대체기술(예: 레독스 흐름 전지)들이 제시되고 있다.

나. 제한적인 에너지 저장용량

리튬은 수소와 헬륨을 제외한 가장 가벼운 원소로, 대부분의 포스트 리튬 이차전지의 경우 단위 무게당 에너지 저장용량이 리튬보다 낮아지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Mg^{2+} , Al^{3+} 등의 다가이온(Multivalent Ion)을 응용한 이차전지 기술이 제시되고 있으나, 아직 연구 개발 수준에 머무르고 있다.

나트륨 이온은 리튬보다 약 30% 정도 큰 부피를

차지하며, 이로 인해 단위 부피당 에너지 저장용량에서 리튬보다 확연히 낮아지는 단점이 있다. 이는 부피가 제한적인 전기자동차 등의 응용처에서 제한적인 단점이 존재하며, 전고체 배터리로 만들었을 때 이온의 크기에 따라 배터리 소자 내에 걸리는 응력이 결정되므로, 리튬 이온보다 전고체 배터리를 구성하기 어렵다. 아연이나 바나듐 등의 다가이온은 부피가 리튬과 유사하여 앞서 언급된 문제로부터 자유로우나, 다가이온으로 인해 산화물의 생성을 억제하는 공정이 필요하다.

이에 포스트 리튬 이차전지의 경우 제한적인 단위 무게 및 부피당 에너지 용량으로 인해 그리드 스케일, 병원용 ESS 등 대용량 응용처를 목표로 연구되고 있다.

2. 포스트 리튬 이차전지 구성

포스트 리튬 이차전지는 전하를 수송하는 이온과 그 이온의 전해질, 그리고 이를 저장하는 전극으로 구성된다.

가. 전하 수송이온

리튬 이온 전지의 경우 Li^+ 이온 하나가 +1 단위 전하를 수송한다. 리튬을 대체하기 위한 전하 수송 이온으로 금속 이온(예: Na^+ 이온, Zn^{2+} 이온 등), 비금속 이온(예: O^{2-} 등) 및 레독스 복합체(예: $Fe(CN)_6^{3-}$ 등) 등을 기반으로 구성된다.

나. 전극 소재

포스트 리튬 이차전지의 전극 소재는 전하 수송 이온을 저장하는 물질로, 전하 수송 이온을 저장했을 때 화학퍼텐셜 차이에 따라 양극, 음극으로 나뉜다. 전극 소재는 전지 설계에 따라 고체 혹은 액체 모두 개발되고 있으며, 아연-공기 전지의 경우 외

부의 공기와 맞닿아 반응을 일으킬 수 있도록 다공성 형태로 개발되고 있다.

다. 전해질 소재

양극과 음극 사이에서 전하 수송 이온을 전달하는 물질로, 대부분 높은 이온전도도를 위해 액체 전해질을 다공성 분리막에 넣은 형태로 구성된다. 일반적인 리튬 이온 혹은 나트륨 이온 전지에 응용되는 유기용매 기반 전해질은 수분이 제거된 상태에서 전지를 조립해야 하며, 이로 인해 높은 공정가격이 형성된다.

Ⅲ. 포스트 리튬 이차전지 기술 현황

1. 나트륨 이온 전지

나트륨은 지구 표면에 리튬보다 1,000배 이상 풍부하며, 추출과 정제비용 역시 리튬보다 저렴하다. 나트륨 이온 전지는 1970년대부터 연구가 시작되었으나 상대적으로 적은 단위의 무게/부피당 에너지 저장량으로 인해 1990년대 이후부터 리튬 이온 전지 위주로 연구가 진행되었다. 이후 2000년대 후반부터 리튬의 가격 및 제한적인 매장량에 대한 우려와 함께, 대용량 에너지 저장장치에 대한 수요로 나트륨 이온 전지에 대한 연구 수요가 팽창하였다.

나트륨 이온 전지 전극은 전극 타입에 따라, 나트륨 삽입으로 전극의 구조가 변하지 않는 인터칼레이션 기반 전극과 나트륨 삽입에 따라 화학반응이 일어나는 컨버전 타입 전극, 그리고 금속의 합금 반응에 의해 나트륨을 저장하는 합금 전극 소재로 나눌 수 있다[1].

2009년 일본 동경과학대학은 같은 층상구조를 가지는 LiCrO_2 와 NaCrO_2 를 비교하여 리튬 이온 전극으로 작동하지 않는 LiCrO_2 가 나트륨 이온 전극

으로 충분한 성능을 가지는 것을 보이며, 제한적인 리튬 이온 전극 후보에 비해 나트륨 이온 전극은 더 다양한 전극 소재의 가능성이 존재함을 제시하였다[2].

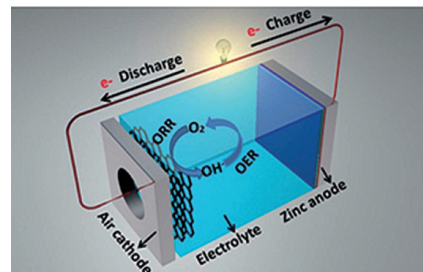
2016년 중국 우한공업대학은 3차원 프레임 기반 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 를 응용한 양극 소재로 1만 5천 번 이상의 사이클 수명과 높은 고온 안정성을 가지는 나트륨 배터리 구성을 발표하였다[3].

2. 아연-공기 전지

아연-공기 전지는 높은 에너지 저장밀도, 저렴한 가격, 높은 충·방전 사이클 용량으로 인해 최근 관련 연구가 주목받고 있다. 아연-공기 일차전지는 1930년대에 상용화되었으며, 충전 가능한 아연-공기 이차전지는 1970년대부터 연구가 진행되었으나 아직 지속해서 충전 가능한 이차전지에 관한 연구 개발이 진행 중이다.

아연-공기 이차전지는 아연 금속 음극과 공기가 통과할 수 있는 다공성 양극 소재, 분리막과 알칼리 수용액 기반 전해질로 구성된다(그림 1).

수용액 기반 아연-공기 이차전지의 전해질은 발화의 원인 중 하나로 지목되는 리튬 이온 이차전지의 전해질과 달리 화재위험을 획기적으로 낮출 수



출처 Reprinted from [1], CC BY 4.0.

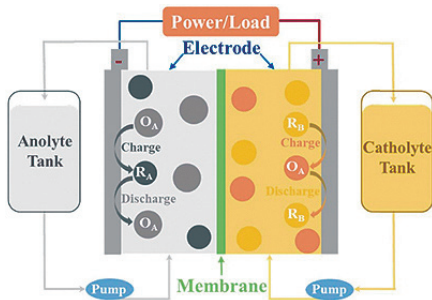
그림 1 아연-공기 전지의 작동원리 모식도

있다.

2015년 스톡홀름 환경기관은 현재 아연-공기 이차전지의 가격이 US \$160~200/kWh 정도이며, 연구 개발을 통해 US \$70/kWh까지 낮아질 수 있으며, 이는 전기자동차 이차전지의 가격 목표인 US \$150/kWh보다 확연히 낮은 수치로 아연-공기 이차전지의 경제적인 장점을 강조하였다[4].

3. 레독스 흐름 전지

레독스 흐름 전지는 수용액 기반 전해질, 높은 충·방전 사이클과 재활용 및 충전이 가능한 전해질로 인해 주목받는 대용량 에너지 저장용 이차전지 개념이다. 레독스 흐름 전지에서 전하는 전극 소재 대신 양극용 전해질(Catholyte)과 음극용 전해질(Anolyte)에 나뉘어 저장되며, 이 두 전해질은 외부에 별도의 탱크에 각각 저장된다. 셀 내부 양극용 전해질과 음극용 전해질 사이에는 이온교환막(Membrane)이 존재하며, 이온교환막을 통해 양(+) 전해질 사이에서 이온이 이동하며 각 전해질의 전하 균형을 유지한다. 이차전지의 총에너지 저장량은 각 전해질의 양에, 이차전지의 순간 최대 출력에너지는 전극의 크기 및 반응속도에 따라 결정되므로,



출처 Reprinted from [1], CC BY 4.0.

그림 2 레독스 흐름 전지와 전하를 저장하는 전해질의 모식도

이차전지의 에너지 저장량과 출력을 각각 조절할 수 있다는 장점이 있다(그림 2).

현재 바나듐 기반 혹은 아연 기반 레독스 흐름 전지가 주로 개발되고 있으며, 바나듐 기반 흐름 전지는 30곳 이상에 설치되어 운영되고 있다.

IV. 포스트 리튬 이차전지 기술 이슈

1. 나트륨 이온 전지

가. 양극 전극 소재의 에너지 저장용량

나트륨 이온의 이온화 퍼텐셜이 리튬보다 약 0.3V 높아, 같은 조건에서 배터리를 구성할 시 작동 전압이 최소 0.3V 이상 낮아진다.

그리고 리튬 이온에 비해 30% 이상 큰 나트륨 이온을 반복적으로 저장했다가 뺄 수 있는 결정구조 소재의 개발이 더디게 진행되고 있으며, 나트륨 이온의 크기로 인한 느린 이동속도(Diffusivity) 때문에 충·방전 시 속도의 제약이 존재한다. 동경공업대학에서 제시한 NaCrO₂ 기반 소재는 단위 무게당 나트륨 이온의 저장량이 리튬보다 35% 이상 적은 수준이다(110mAh/g vs. 170mAh/g 리튬 이온). 또한, 리튬에 비해 큰 나트륨 이온을 반복적으로 충전/방전할 시 전극 물질에 가해지는 부피 변화가 리튬에 비해 커 장시간 사용할 경우, 더욱 빠른 속도로 충전 용량이 감소한다. 이에 큰 부피의 나트륨 이온을 수용하기 위해 페인트 등에 사용되는 저렴한 물질인 프리시안 블루 등을 통한 전극개발이 고려되고 있다[5].

나. 적절한 음극 전극 소재의 부재

기존 리튬 이온 이차전지에 사용되는 흑연 기반 음극 소재는 나트륨을 저장하지 못한다. 그리고 다른 탄소 형태의 음극 소재는 낮은 퍼텐셜에서 나트륨 저장이 가능하나 기존 흑연 전극보다 저장

용량이 낮은 편이다(300mAh/g vs. 350mAh/g 혹은). $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 등의 산화물 전극 소재가 연구되고 있으나, 퍼텐셜이 높아 이차전지의 출력 전압을 떨어뜨리는 한계가 있으며 저장용량 역시 제한적이다[6].

나트륨 합금 소재는 낮은 퍼텐셜에서 높은 저장용량을 가지는 음극 후보물질이나, 부피가 큰 나트륨 원자의 반복적인 삽입/탈리로 인한 부피 변화 때문에 반복적인 충·방전 시 성능 저하가 크다.

2. 아연-공기 전지

가. 아연 음극 전극의 비가역적 반응

충·방전 시 아연 음극 전극은 두세 번의 충전 이후 기존과 같은 저장량을 보이지 못하는데, 이는 아연 덴드라이트 및 예상치 못한 아연의 재배치가 일어나기 때문이다. 아연 덴드라이트는 아연 전극에 아연 이온이 증착될 때 균일하게 증착되는 것이 아닌 나뭇가지와 같이 뾰족하게 형성되는 형상을 뜻하며, 반대 전극과 접촉하여 전지를 단락시킬 가능성이 있다. 또한, 아연이 수계 전해질과 접촉하는 표면에서 아연 산화물이 비가역적으로 생성되어 아연 전극의 성능을 떨어뜨린다.

현재 다공성 아연 전극, 단단한 아연 표면 코팅, 아연에 국한된 전극구조 등 다양한 전극구조들이 시도되고 있으나, 아직 높은 에너지 저장밀도, 반복적인 충·방전 안정성과 높은 아연 활용도를 모두 만족하는 전극개발은 연구가 진행되고 있다[7].

나. 양극 전극의 성능과 부식, 가격

충전과 방전 시 양극 전극에서는 각각 산소 생성, 산소 환원 반응이 일어나는데, 전극의 성능을 높이기 위해서는 이 반응을 위한 효과적인 촉매가 필수적이다. 산소 생성과 환원 반응을 위한 촉매는 주

로 귀금속과 그 산화물들이 사용되는데, 높은 가격과 부족한 생산량 및 제한적인 안정성이 문제로 제기된다. 수십 년간 귀금속이 아닌 금속을 기반으로 한 산소 생성 촉매를 개발하기 위해 많은 연구가 이루어졌으나, 아직도 연구 개발이 더 필요한 상황이다. 탄소 기반 촉매 소재의 개발이 높은 가격경쟁력과 촉매 성능을 동시에 만족하는 결과를 보여주었으나, 염기성 전해질 환경에서 쉽게 산화되며 장기간 충전과 방전을 반복할 경우 안정성이 떨어지는 문제가 있다[8].

3. 레독스 흐름 전지

가. 수계 전해액의 에너지 저장량과 가격

수계 전해액은 화재의 위험을 제거하고 공정가격을 획기적으로 낮출 수 있지만, 레독스 이온의 낮은 용해도로 인해 에너지 저장량을 제한하게 된다. 또한, 수계 전해액을 사용할 경우 두 전극에서 각각 수전해로 인해 수소 생성 반응과 산소 생성 반응이 일어나게 되어, 충전 및 방전 시 전압을 수전해 전압인 1.2V 이하에서 작동하게 되며, 이로 인해 에너지 저장량 손실이 생긴다.

장기간 충·방전 사이클 시 전극 표면에서 예상치 못한 석출 등의 부반응으로 안정성이 크게 떨어지는 문제가 있다. 수계 전해질을 기반으로 한 현재 바나듐 레독스 흐름 전지의 경우 에너지 저장 단가가 약 US \$400/kWh 정도로 리튬 이온에 비해 비싼 편에 속해 대용량 에너지 저장장치로서 가격이 매우 높은 단점이 있다. 가격을 획기적으로 낮추기 위해 아연-브롬 흐름 전지, 퀴논 등의 유기분자 기반 흐름 전지 등 새로운 전해액이 제시되어 있으나, 아직 낮은 전류 밀도와 안정성을 개선하기 위한 연구가 진행 중이다[9].

나. 비수계 전해액의 위험성과 전류 밀도

수계 전해질의 낮은 에너지 저장량을 개선하기 위해 유기용매 기반의 레독스 흐름 전지가 개발되고 있으나, 인화성이 있는 유기용매로 인한 위험성이 제기되고 있다. 또한, 유기용매는 일반적으로 수계용매보다 레독스 이온의 전도도가 10배 이상 낮아, 전류 밀도가 수계 전해질보다 현저히 낮아지는 단점이 있다. 이는 산소나 수소 생성 반응이 없는 유기용매로 인해 총에너지 저장량을 획기적으로 높일 수 있으나, 실질적인 응용을 위한 에너지 출력은 감소하는 문제가 있다. 또한, 반복적인 충·방전 사이클 시 유기용매가 분해되어 전극 표면에 부착되는 안정성 문제에 대한 개선도 필요하다.

V. 포스트 리튬 이차전지 연구 동향

1. 나트륨 이온 전지

CATL사는 2023년까지 160Wh/kg급 나트륨 이온 전지를 시장에 출시할 계획을 발표하였으며, 장기적으로 160Wh/kg급 배터리를 200Wh/kg 이상으로 끌어올려 현재 약 180Wh/kg인 리튬 이온 이차전지를 상회할 수 있도록 개발 중이다. 프러시안 블루 기반의 양극재와 다공성 탄소 기반의 음극 물질을 사용하여 저렴한 대용량 에너지 저장장치를 목표로 한 제품을 계획 중이다. 고속 충전 지원으로 15분 내로 80% 충전할 수 있으며, -20℃에서 90% 이상 충전량을 가지는 이차전지로 리튬 이온보다 단위 무게/부피당 에너지 저장량은 다소 낮지만, 고속 충전과 저온 성능이 뛰어난 이차전지를 개발하고 있다.

NATRON Energy사는 미국 Stanford 대학에서 스피노프한 스타트업으로 프러시안 블루 기반의 양극과 음극을 응용한 나트륨 이차전지를 개발하였다. 현재 프로토타입은 약 140Wh/kg의 저장용량

을 가지며, 2020년 미국 에너지부의 ARPA-E 프로젝트로부터 200억 규모의 투자를 유치하여 데이터 센터와 통신업체를 목표로 하는 이차전지를 개발하고 있다고 밝혔다. 장기적으로 나트륨 이차전지를 리튬에 비교우위가 있는 비 휴대용, 대용량 응용처에 적용하고자 개발 중이다[10].

Faradion Limited사는 2011년 영국에서 창업한 회사로 산화물 양극 소재와 탄소 음극 소재를 기반으로 나트륨 이차전지를 개발 중이다. Faradion사의 프로토타입 전지는 150Wh/kg 정도 에너지 저장용량을 가지며 20분 이내로 완전 충전이 가능한 고속 충·방전 이차전지를 발표하였다. 현재 100% 용량을 반복적으로 충·방전할 시 약 300회, 80% 용량을 충·방전할 시 1,000회 정도 충전 용량을 유지하고 있으며, 전기자전거와 전기 스쿠터 등의 모바일 응용처를 목표로 하고 있다.

2. 아연-공기 전지

가. 아연 음극 소재

미국 Naval Research Laboratory Deborah Rolison 박사 연구팀은 기존 아연 입자로부터 제작하는 아연 음극이 입자와 입자 사이 연결이 끊어질 때 덴드라이트를 형성하는 것임을 밝혀냈다. 이에 아연 입자를 바탕으로 음극 전극을 제작하는 기존의 방식에서, 다공성 '아연 스폰지'를 아연-공기 전지에 응용하여 입자와 입자 사이 연결이 끊어지지 않도록 전극을 제작하였다. 이렇게 제작된 삼차원 다공성 전극은 덴드라이트와 산화물 형성에 따른 전극 표면의 열화현상을 방지할 수 있다. 삼차원 '아연 스폰지'를 80% 이상 충·방전에 활용할 경우 120Wh/kg 이상 에너지 저장밀도를 가지며 리튬 이온 이차전지와 비교 가능한 에너지 저장밀도를 가질 것으로 예상된다[7].

미국 Stanford University Yi Cui 교수 연구팀은 덴드라이트 형성으로 인해 단락이 되는 기존의 아연-공기 전지의 단점을 보완하기 위해 물리적으로 아연 전극의 전해질 계면을 단단한 절연 물질로 접착하였다. 이렇게 접착된 전극은 단단한 계면 대신 옆면 혹은 뒷면을 통해 아연이 성장하게 되어, 덴드라이트가 형성되더라도 전지의 내구성을 해치지 않도록 설계하였다. 이를 바탕으로 제작한 음극의 성능은 200번(5분 이내 완전충전 속도)에서 800번 이상의 안정적인 충전과 방전을 할 수 있다는 것을 보여주었다[11].

나. 다공성 양극 소재

캐나다 워터루대학 Zhongwei Chen 교수 연구팀은 나노입자를 통해 제작한 촉매 양극 전극이 장시간 충전과 방전 후에 뭉쳐서 복합체를 형성, 우수한 촉매 특성을 잃어버리는 것을 방지하기 위해 코발트 나노입자를 탄소 구조체에 감싼 촉매를 제작하였다. 질소가 도핑된 탄소 구조체에 형성된 작은 구멍들에 코발트 나노입자가 분포되면서 형성되는 Co-N-C 결합이 코발트 나노입자의 촉매 성능을 획기적으로 향상하는 것을 보였으며, 이렇게 제작된 촉매 소재를 바탕으로 450시간 이상 안정적으로 연속적인 충·방전 사이클을 진행할 수 있다는 것을 보고하였다[12].

다. 아연-공기 이차전지 제조

세계은행과 미국 에너지부의 지원을 받은 미국 스타트업 NantEnergy사는 아연-공기 이차전지를 통해 US \$100/kWh 미만의 에너지 저장 솔루션 제공을 목표로 하고 있다.

이는 현재 약 US \$190/kWh 정도인 리튬 이온 이차전지(테슬라 모델3 기준)의 에너지 저장 가격을 획기적으로 낮추는 기술이다. 지난 9년 동안 9개 국

가에서 3,000개 이상의 장소에 아연-공기 이차전지 기반의 대용량 에너지 저장장치를 설치하고 테스트해왔으며, 일부 설치장소에서 US \$100/kWh 미만의 가격으로 설치를 제공하고 있다. 현재 아프리카와 아시아에서 약 20만 명 이상이 태양 전지와 NantEnergy사의 아연-공기 이차전지를 기반으로 한 마이크로 전기 그리드를 사용하고 있다[13].

3. 레독스 흐름 전지

미국 하버드 대학 Michael Aziz 교수 연구팀은 미국 에너지부의 ARPA-E 프로그램을 통해 매우 안전하고 잘 알려진 유기분자인 퀴논 기반 전해액을 개발하였다[14]. 퀴논 기반 레독스 흐름 전지는 금속을 포함하지 않아 원자재 가격이 US \$81/kWh 정도로 기존에 알려진 바나듐 레독스 흐름 전지나 기존 이차전지(US \$700/kWh)에 비해 획기적으로 가격을 줄일 수 있다. 퀴논 기반 전해액은 매우 빠른 산화/환원 반응 능력과 99% 이상의 재사용성을 보여, 그리드 스케일 전지에 적합한 높은 전류 밀도와 장기간 사용 안정성을 보인다. Aziz 교수 연구팀은 이 기술을 이탈리아 기반 스타트업 Green Energy Storage에 라이선싱하여 현지 설치를 진행하고 있다.

영국의 스타트업 Invinity Energy Systems사는 자체 개발한 바나듐 기반 전해액을 바탕으로 20,000회 이상 충전과 방전을 반복할 수 있는 레독스 흐름 전지를 개발하여 제작하였다. 이 바나듐 기반 레독스 흐름 전지는 최대 40MWh급 대용량 에너지 저장장치로 25년 이상 사용 가능하도록 설계되었다. 이 이차전지는 외부 탱크를 통해 전해액을 저장하며 에너지 충전과 방전은 모두 최대 12시간 이내에 완료될 수 있도록 설계하여 순간적으로 높은 출력이 필요한 용도에서도 응용 가능한 이차전지를 개

말하였다[15].

미국의 스타트업 Primus Power사는 미국 에너지부 ARPA-E 프로그램으로부터 US \$3.5M 이상을 지원받아 아연-브롬 기반의 수계 레독스 흐름 전지를 개발하여 공급하고 있다. Primus Power사의 레독스 흐름 전지는 수명 저하와 가격상승의 요인이 되던 이온교환막과 흑연 기반 전극을 제거하고, 분리막 없이 티타늄 기반 전극을 응용해 획기적으로 레독스 흐름 전지의 가격을 낮췄다. 현재 20년간 작동할 수 있는 125kWh급(25kW 출력) 에너지 저장 모듈을 판매하고 있으며, 이를 바탕으로 스케일업이 가능한 에너지 저장장치를 제공하고 있다 [16].

VI. 결론

지금까지 포스트 리튬 이차전지를 위해 나트륨 이온 전지, 아연-공기 전지 및 레독스 흐름 전지에 대한 기술 이슈와 동향에 대해 소개하였다.

현재 정부에서는 제5차 과학기술기본계획을 기반으로 차세대 전지 초격차 R&D 전략 및 27대 핵심기술을 발표하였다. 안정성과 내구성 향상을 위해 비(非)리튬계 소재 기반 고안정성 전고체 및 수계 이차전지와 고안정성/장수명 레독스 흐름 전지를 핵심기술로 선정하였다. 그리고 원료와 소재 자립화를 위해 나트륨 이온 전지 및 다가이온 전지를 선정하고 추진 전략 및 계획을 수립하고 있다.

이에 포스트 리튬 이차전지는 안전성을 극대화 하면서 경제성이 높고 고출력·대용량 구현을 위한 기술개발의 방향으로 중장기적 연구가 진행될 것으로 예상된다.

용어해설

Redox Flow Battery(레독스 흐름 전지) 환원(Reduction), 산화(Oxidation), 흐름(Flow)의 단어를 합성한 용어로, 산화-환원 반응을 통해 전자가 음극에서 양극으로 이동하며 전기에너지를 발생시키는 방식으로 작동함

Vanadium(바나듐) 단단하고 연성과 전성이 뛰어난 회백색 원소 (기호 V, 원자 번호 23번), 자연에서는 화합물 형태로만 산출되지만, 인공적으로 순수한 형태로 분리하면 표면에 산화 피막을 형성하여 그 이상의 산화를 막음

Multivalent Ion(다가이온) 하나의 원소가 여러 가지 산화 상태의 이온을 가지는 형태

약어 정리

ARPA	Advanced Research Projects Agency
ESS	Energy Storage System

참고문헌

- [1] J. Ma et al., "The 2021 battery technology roadmap," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 54, no. 18, 2021, p. 183001.
- [2] S. Komaba et al., "Electrochemical intercalation activity of layered NaCrO₂ vs. LiCrO₂," Electrochem. commun., vol. 12, no. 3, 2010, pp. 355-358.
- [3] Y. Xu et al., "Layer-by-layer Na₃V₂(PO₄)₃ embedded in reduced graphene oxide as superior rate and ultralong-life sodium-ion battery cathode," Adv. Energy Mater., vol. 6, no. 14, 2016, p. 1600389.
- [4] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," Nat. Clim. Chang., vol. 5, no. 4, 2015, pp. 329-332.
- [5] Y. Lu et al., "Prussian blue: A new framework of electrode materials for sodium batteries," Chem. Commun., vol. 48, no. 52, 2012, pp. 6544-6546.
- [6] M. Dahbi et al., "Negative electrodes for Na-ion batteries," Phys. Chem. Chem. Phys., vol. 16, no. 29, 2014, pp. 15007-15028.
- [7] J.F. Parker et al., "Rechargeable nickel-3D zinc batteries: An energy-dense, safer alternative to lithium-ion," Science, vol. 356, no. 6336, 2017, pp. 415-418.
- [8] F. Meng et al., "Recent advances toward the rational design of efficient bifunctional air electrodes for rechargeable Zn-air batteries," Small, vol. 14, no. 32, 2018, p. 1703843.
- [9] W. Liu et al., "Aqueous flow batteries: research and development," Chem. Eur. J., vol. 25, no. 7, 2019, pp. 1649-1664.

- [10] <https://natron.energy/product/>
- [11] S. Higashi et al., "Avoiding short circuits from zinc metal dendrites in anode by backside-plating configuration," *Nat. Commun.*, vol. 7, no. 1, 2016, pp. 1-6.
- [12] Z. Xing et al., "Carbon-pore-sheathed cobalt nanoseeds: an exceptional and durable bifunctional catalyst for zinc-air batteries," *Nano Energy*, vol. 65, 2019, p. 104051.
- [13] <https://www.upsbatterycenter.com/blog/zinc-batteries-could-shift-the-paradigm/>
- [14] B. Huskinson et al., "A metal-free organic-inorganic aqueous flow battery," *Nature*, vol. 505, no. 7482, 2014, pp. 195-198.
- [15] <https://invinity.com/vanadium-flow-batteries/>
- [16] <https://primuspower.com/en/energy-storage/>