

전기에너지저장 기술 현황 및 전망



최진혁 | 한전전력연구원 선임연구원
임지훈 | 한전전력연구원 선임연구원

I. 개요

전기 에너지는 현재 우리가 사용하고 있는 에너지의 형태 중 편리하게 사용할 수 있기 때문에 가장 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 생산과 동시에 소비가 이루어져야 하고 저장에 어려운 특성을 가지고 있다. 급변하는 전력수요에 대응하기 위해서는, 천연가스 발전소와 같이 기동속도는 빠르나 연료비 단가가 높은 발전소를 가동해야 하기 때문에 발전 비용이 증가한다. 세계 전력 수요 전망을 보면, '10년 21.0조kWh에서 '20년 27.5조kWh로 연 2.7% 증가할 것으로 전망되며 따라서 발전설비 확대가 불가피한 상황이다. 계절별 전력수요의 편차가 점차 커지고 있으며 최대 피크전력 수요에 대응하기 위해서는 대규모 예비전력이 필요하다. 또한 전력 수요 예측은 어려워지고 있는 상황이어서 전력설비 이용률은 계속 저하되고 있다. 결국 계절별, 주야간 전력부하 격차가 심화되어 신규발전설비 건설 부담과 설비 이용률 저하라는 이중고에 시달릴 것으로 예상된다. 그리

신재생에너지(풍력·태양광 등)의
설비 용량이 증가함에 따라
전력 공급의 안정성이 저하

고 발전량과 발전 시점의 예측이 불가능한 신재생에너지(풍력·태양광 등)의 설비 용량이 증가함에 따라 전력 공급의 안정성이 저하되고 있다. 전 세계 신재생에너지의 발전설비는, 풍력의 경우 '10년부터 '20년까지 172GW에서 709GW로, 태양광은 22GW에서 160GW로 각각 증가하여 신재생에너지 발전 설비 비중이 '10년 2.0%에서 '20년 7.8%로 증가할 것으로 전망된다. 태양광이나 풍력을 통해 발생된 전기는 일정한 패턴이 보이지 않고 자연조건에 따라 크게 영향을 받기 때문에, 신재생에너지원으로부터 생산된 전기에너지 출력을 안정화시키기 위한 해결책이 필요하다.

또한 안정적인 전력 공급을 위해서는 전압 및 주파수를 유지하기 위한 보조서비스가 필요하다. 우리나라의 경우 안정적인 주파수 유지를 위해 1GW이상의 예비력을 확보하고 있으며, 그 중 500MW 용량을 석탄화력 발전소 상시 출력감발을 통해 확보하고 있기 때문에 그 만큼의 고원가 발전소를 운영하고 있는 실정이다.

에너지저장시스템은 전력수요가 낮은 시기에 전기를 저장한 후, 전력수요가 높은 시기에 활용함으로써 전력설비 투자

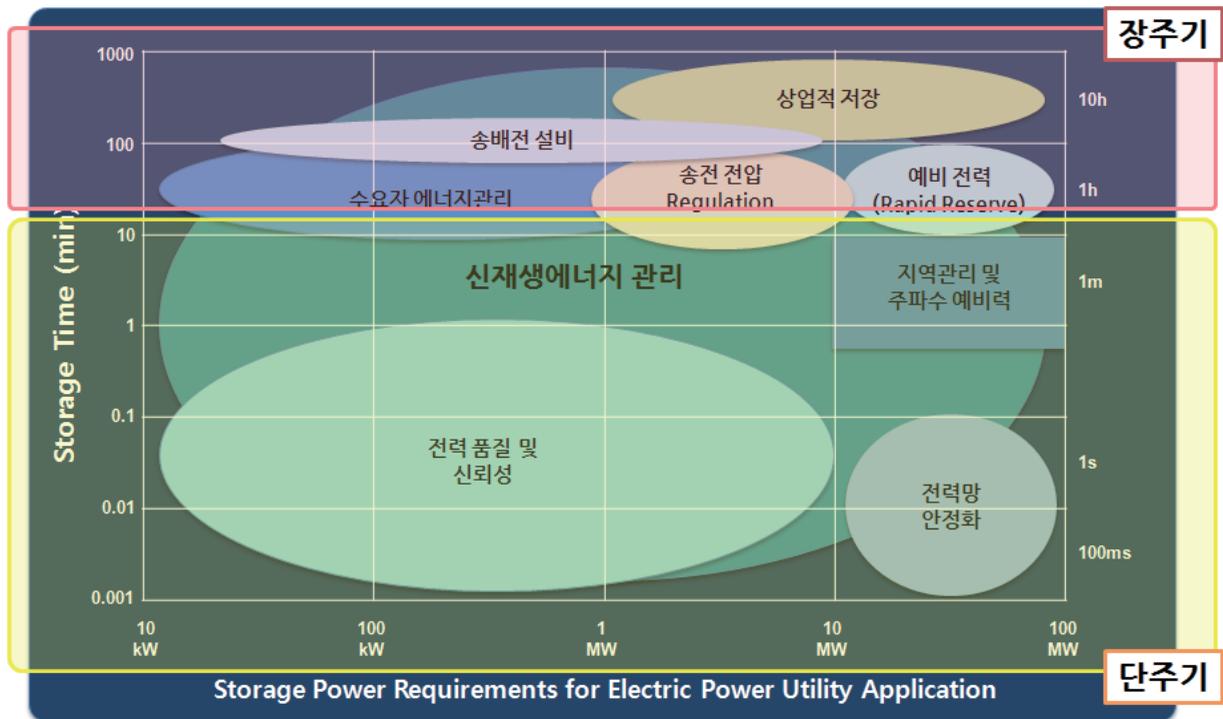


그림 1. 에너지저장시스템 적용 분야[1]

를 최소화할 수 있으며, 설비 이용률 극대화에 기여할 수 있다. 또한 에너지저장시스템을 활용하여 신재생에너지 발전원의 불안정성을 해소함으로써 전력계통의 안정적 운영 및 신재생에너지 발전원의 수용성 증대에도 기여할 수 있으며, 주파수 조정 서비스에 활용하여 석탄화력 발전소 출력을 증가시킴으로써 고원가 천연가스발전소를 대체하여 연료비 절감 및 석탄화력 발전설비 이용률 향상 등을 통한 이익을 확보할 수 있다.

전기에너지는 기본적으로
생산과 동시에 소비가
이루어져야한다는 특성

II. 에너지저장 기술

전기에너지는 기본적으로 생산과 동시에 소비가 이루어져야한다는 특성 때문에 전력수급 균형을 맞추기 위한 상시 수급체계를 갖추어야 하며 이에 따른 상당한 기회비용과 비효율이 발생하게 된다. 따라서 현재 에너지저장시스템은 IT기술을

활용하여 전력공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환하고, 필요한 시기에 전기에너지를 공급하여 에너지 효율을 향상시키는 시스템 기술로 진화하고 있다.

전력계통에서 요구되는 에너지저장시스템은 그림 1에서와 같이 출력과 저장시간에 따라 적용되는 분야가 크게 장주기와 단주기로 구분된다. 장주기로 시스템은 기저부하의 유효전력을 이용함으로써, 전력

계통의 효율적 운영 및 안정성을 증대시키기 위한 용도로 사용되며, 에너지저장 기술로는 주로 리튬이차전지, 레독스 플로우 전지(Redox Flow Battery), 나트륨-황 전지(NaS battery) 및 CAES(Compressed Air Energy Storage) 기술 등이 사용된다. 단주기로 에너지저장시스템의 적용분야는 스마트 그리드의 순간 정전 방지 및 신재생에너지원의 단주기 출력 변동 완화를 위한 전력안정화, 그리고 전력계통의 안정적 운영을 위한 주파수조정 분야 등으로 구분되며, 리튬이차전지, 초고용량 커패시터

표 1. 에너지저장시스템 기술별 특성

구분		방전지속 시간	가격(\$/kWh)	수명(년)	효율(%)
단주기	Flywheel	> 15분	-	20	90
	Super-Capacitor	> 30초	-	10	90
범용	납축전지	10초~2시간	~150	5	80
	리튬이차전지	10분~2시간	520	10	96
장주기	CAES	2~24시간	100~300	30	70
	RFB	2~8시간	600~1,000	20	70
	NaS	6~8시간	200~300	15	90

패시터 및 FESS (Flywheel Energy Storage System)가 대표적인 장치이다. 이중 리튬이차전지의 경우 우리나라 제약업체들이 앞선 기술력을 통해 세계시장을 선도하고 있어 이를 이용한 다양한 실증연구와 보급사업이 활발히 추진 중에 있다. 특히 한국전력공사에서는 제주 조천변전소에서 4MW/8MWh급 에너지저장시스템 실증 연구과제를 성공적으로 완료하였으며, 리튬이차전지의 고효율성 및

속응성을 이용하여 주파수조정용 에너지저장시스템 설치 및 운영 사업을 대규모로 추진하고 있다. 본 고에서는 대표적인 에너지저장 기술로 활용되고 있는 배터리 기술 중, 단주기 용도의 리튬이차전지와 장주기 용도로 사용되는 레독스 플로우 전지 기술에 대해 좀 더 자세히 설명하고 향후 에너지저장시스템으로의 적용이 전망되는 차세대 전지 기술인 나트륨이온전지와 마그네슘 이차전지 기술에 대해 소개하고자 한다.

A. 리튬이차전지

리튬이차전지는 일차 전지를 재충전이 가능하도록 개선하고자 하는 목적으로 개발이 시작되었다. 따라서 초기의 리튬이차전지에서는 리튬 금속을 음극으로 사용하였다. 리튬 금속은 용량이 크나 충전 시 리튬 금속이 침상(dendrite)으로 전착되어 얇은 고분자 분리막을 관통함으로써 내부 단락(internal short)에 의한 발화 또는 폭발의 문제를 유발할 수 있다. 충전 반응을 통하여 리튬 금속이 전착되면 새로운 리튬 표면이 전해액에 노출되므로 여기에서 전해액이 분해하여 SEI(Solid

Electrolyte Interface)를 형성하게 된다. 이때 SEI는 이온 전도성은 가지나 전자에 의한 전도성이 없으므로 새로 전착된 일부 리튬 입자가 SEI에 의해 둘러 싸이게 되면 전극으로부터 전기적으로 분리된다. 이렇게 전기적으로 분리된 리튬 금속은 충방전 반응에 참여할 수 없으므로 전기화학적 활성을 잃는다. 비활성 리튬의 생성과 침상으로 성장을 방지하기 위하여

새로운 전해질을 개발하고, 첨가제를 사용하고 리튬 대신 리튬 합금을 사용하는 등 여러 시도가 있었지만 현재까지 괄목할 만한 성과는 없는 실정이다. 그러나 현재 리튬이차전지의 음극으로 보편적으로 사용하고 있는 흑연의 이론 용량 (372mAh/g)보다

리튬 금속의 이론 용량이 매우 크다(3,830mAh/g)는 점에서 리튬 금속을 음극으로 사용하는 리튬이차전지의 개발 노력은 계속 진행되고 있다.[2]

리튬 금속을 대신할 새로운 음극으로 흑연이 개발되어 현재 가장 많이 사용되고 있다. 흑연과 리튬 이온의 전기화학 산화/환원 반응의 평형전위 범위가 0.2~0.3V (vs. Li/Li⁺)로 Li/Li⁺의 그것과 매우 유사하다. 따라서 이를 음극으로 사용할 때 이론 용량은 리튬 금속에 비해 작으나, 전지의 작동 전압은 큰 차이가 나지 않는다는 장점이 있다. 흑연은 층상구조를 가지고 있으며, 층간(inter-layer)으로 리튬 이온의 삽입(intercalation)과 탈리(de-intercalation)가 가능하다. 한편 양극으로는 리튬 이온의 삽입이 가능한 층상구조를 갖는 리튬 금속산화물 또는 스피넬 구조를 갖는 리튬금속산화물 또는 올리빈(olivine)구조의 리튬인산전이금속 계열의 화합물이 사용

리튬이차전지는 일차 전지를
재충전이 가능하도록
개선하고자 하는 목적

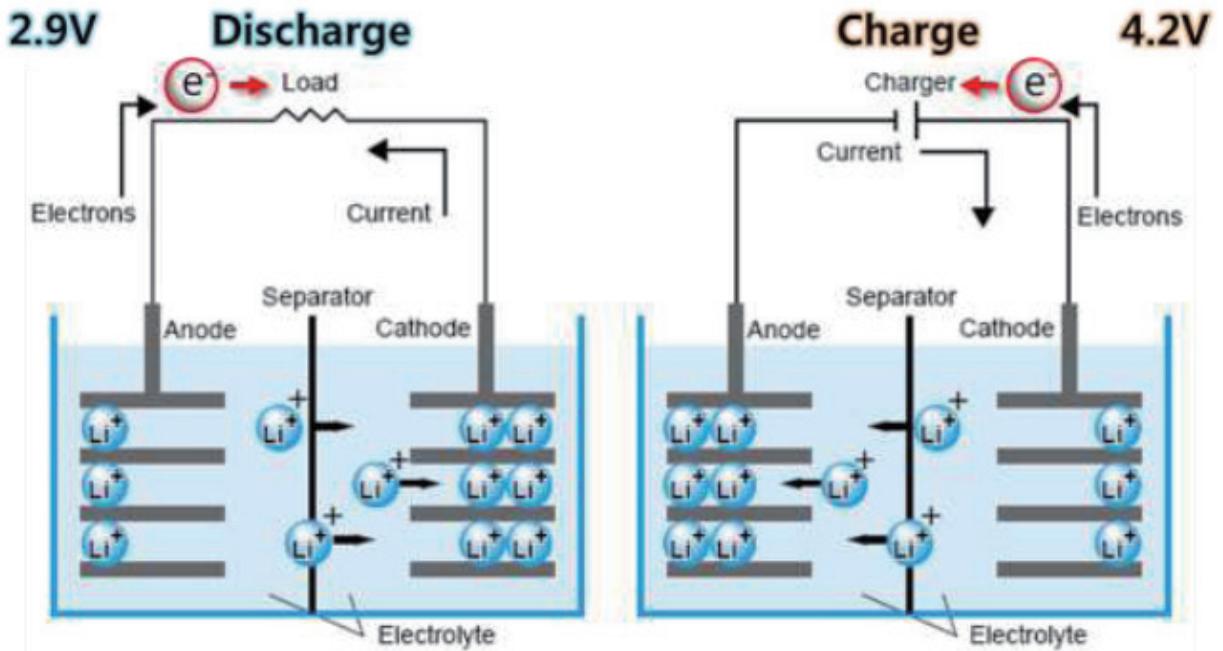


그림 2. 리튬이차전지 충전전 개념도(3)

되고 있다. 이들 양극 활물질의 평형전위 값은 4V (vs. Li/Li⁺) 근처이므로 흑연 음극과 전지를 구성하였을 때 방전 전압은 3.2 ~ 4.0V가 된다. 충전전에 따라 음극과 양극에서 이온의 삽입과 탈리에 의해 리튬 이온이 두 전극 사이를 왕복하므로 이를 안락의자 (rocking-chair) 전지라 부르기도 하였고, 리튬이 금속 상태가 아닌 이온 상태로 반응에 참여한다고 하여 리튬이온전지 (lithium ion battery)라 부르게 되었다. 리튬 금속을 전극으로 사용하지 않으므로 비활성 리튬 문제와 리튬의 침상 성장에 의한 내부 단락 문제를 크게 개선하였다. 흑연 음극의 반응평형전위 범위가 리튬 금속의 그것과 유사하므로 흑연을 음극으로 사용할 때에도 전해액은 강한 환원 조건에 놓이게 된다. 따라서 일반적으로 유기 전해액이 전기화학적으로 안정한 전압 범위가 존재하며, 대략 0.8V (vs. Li/Li⁺) 이하에서는 환원반응에 의해 전해액이 분해되어 음극 표면에 SEI를 형성하고, 4.5V 이상에서는 산화반응에 의해 분해된다. 따라서 일반적인 유기 전해액의 사용범위는 0.8 ~ 4.5V (vs. Li/Li⁺) 범위이다. 따라서 0.8V 이하에서 음극표면에 안정적인 SEI를 생성할 수 있는 전

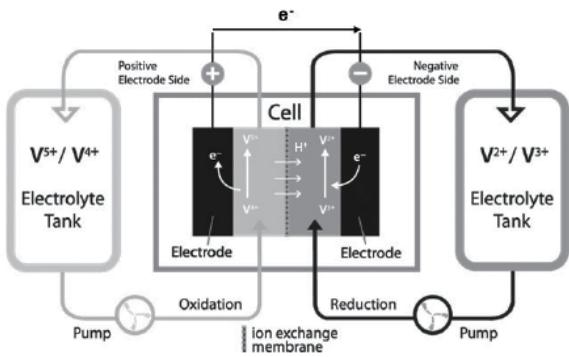
리튬이차전지는
고에너지밀도, 고출력밀도,
높은 충전전 효율

해액 용매를 선정하는 것이 매우 중요하다.

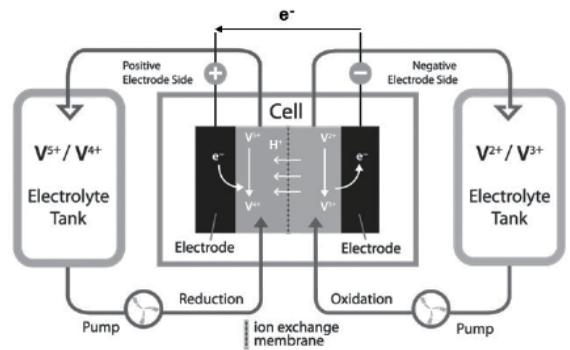
리튬이차전지는 고에너지밀도, 고출력밀도, 높은 충전전 효율 그리고 소형 전자기기 산업에서 확보한 양산성 등의 장점으로 인해 대용량 에너지저장시스템에서 많은 관심을 받고 있으나 높은 가격으로 인해 아직은 보급이 제한적이다. 에너지저장 분야에서 리튬이차전지가 경쟁력을 갖기 위해서는 현재 가격수준의 절반 이하 수준까지 가격을 낮추어야 하며, 추가적으로 수명 특성 등 장기 성능의 개선이 필요하다.

B. 레독스 플로우 전지

레독스 플로우 전지는 이차전지로서 전해액에 녹아 있는 두 종류의 산화 환원 쌍(redox couples)을 전지 내부로 주입하여 비활성 전극에서 산화 또는 환원 반응을 통하여 방전시키며, 충전 시에는 전기에너지를 공급하여 반대 반응을 진행시킨다. 실제 전기화학 반응은 스택에서 일어나고 전해액을 펌프를 이용하여 스택 내부에 지속적으로 순환시킴으로써 작동한다. 활물질로 사용되는 산화 환원 쌍은 V/V, Zn/Br, Fe/Cr 등 다양하



[VRFB 충전과정]



[VRFB 방전과정]

그림 3. 바나듐 레독스 플로우전지의 구조 및 충전전(4)

며, 이 중 V/V, Zn/Br 산화 환원 쌍이 가장 널리 사용된다. 가장 대표적인 레독스 플로우 전지는 그림 3에서와 같이 바나듐 금속이온을 산화 환원 쌍으로 사용하는 바나듐 레독스 플로우 전지가 있으며, 바나듐 레독스 플로우 전지에서 방전 시 V^{2+} 을 포함하는 황산 전해액이 음극으로 유입되어 V^{3+} 로 산화되고, VO_2^+ 이온을 포함하는 황산 전해액이 양극으로 공급되어 VO^{2+} 이온으로 환원되고, 충전 과정에서는 그 역반응이 일어난다. 분리막으로는 수소이온(H^+) 교환막이 사용되고, 전지의 작동 전압은 상온에서 1.26V이다. 이 전지의 용량은 산화 환원 쌍을 저장하는 전해액 저장 용기의 크기를 크게 하거나 산화 환원 쌍의 농도를 높여서 증가시킬 수 있고, 출력은 용액의 유입속도를 증가시키거나 스택에 사용되는 단전지의 수량을 늘이거나 단전지 면적을 대면적화함으로써 증가시킬 수 있다. 따라서 전지 출력과 용량을 독립적으로 설계할 수 있다는 장점이 있기 때문에 에너지 용량을 증대시킬 경우 출력과 관련된 스택은 고정되고 전해액 용기의 용량만 증가시키면 되므로 다른 전지 시스템에 비해 투자비용을 절감할 수 있으며, 따라서 장주기 용도의 에너지저장시스템으로 적용 시 장점을 갖는다. 작동 온도가 낮고 수명 특성도 좋아 현재 대규모 전기에너지저장, 태양광 또는 풍력 발전으로 얻어지는 전기 에너지를 저장하는 장주기 용도의 에너지저장장치로 개발 및 실증 중에 있다.

바나듐 레독스 플로우 전지는 1985년 호주의 University

of New South Wales의 Skyllas Kazacos 교수팀이 개발한 이후 전 세계적으로 5~10개 정도의 회사에서 상용화에 성공하였다. 일본은 2013년 1MW/5MWh급 시스템 실증을 완료하였

으며, 홋카이도 지역의 신재생에너지 출력 안정화를 목적으로 15MW/60MWh급 시스템을 설치하였다. 중국은 2012년 중국과학기술원을 통한 독자 기술개발로 5MW/10MWh급 시스템을 구현하였으며, 독일에서도 2013년 Pellworm 지역 마이크로그리드 구현을 위해 200kW/1.6MWh급 시스템을 설치하여

운영 중에 있다. 국내에서는 에이치투, OCI, 한국에너지기술연구원 등이 상용화급 시스템 개발을 위한 연구를 수행 중에 있으며, 에이치투는 신재생연계형 250kW/1MWh급 시스템을 개발 중에 있다.

레독스 플로우 전지는
전지 출력과 용량을
독립적으로 설계할 수
있다는 장점

C. 나트륨이온전지(Na-Ion battery)

최근 차세대 이차전지로 관심을 받고 있는 나트륨이온전지는 새로운 개념의 전지가 아니라 1970년대에서 1980년대에 리튬이차전지와 함께 연구되었던 이차전지로 리튬이차전지의 상업적인 성공 이후 그 중요도가 감소하였던 시스템이다. 그러나 모바일 전자기기 분야에서 리튬이차전지의 수요가 지속적으로 증가하고, 전기자동차에 이차전지가 적용되는 시점에서 향후 전기자동차 시장의 본격화에 따라 예상되는 리튬이차전지 수요 증가를 충당하기에 충분한 리튬의 공급 가능성

표 2. 나트륨과 리튬 원소 비교

구분	Na	Li
이온반경 (Å)	0.98	0.69
원자량 (g/mol)	23	6.9
산화/환원 전위 (V, vs.NHE)	-2.7	-3.0
이론용량 (Ah/g)	1.16	3.86
용융점 (°C)	97.7	180.5
분포 지역	전 세계	남미 70%
가격 (\$/kg, 카보네이트 형태)	0.1~0.5	5.5~6.0

문제, 또한 예상되는 가격상승의 우려에 따라 다시 관심을 받게 되었다. 특히 최근 리튬이차전지를 또 다른 중대형 적용 분야인 에너지저장시스템으로도 적용하는 사례가 증가함에 따라 이러한 우려는 가중되고 있다. 소형 모바일 분야에서는 리튬이차전지에 비해 경쟁력이 낮으나 중대형 분야 특히 에너지 밀도보다는 가격경쟁력이 중요한 에너지저장시스템 분야에서는 나트륨이온전지가 새롭게 주목을 받고 있다. 표 2에서와 같이 리튬과 비교해 볼 때 나트륨은 유사한 물리적 화학적 특성을 가지고 있지만 풍부한 매장량을 기초로 원재료 가격 부분에 경쟁력을 가지고 있다. 나트륨은 리튬보다 조금 무겁고 전기화학 산화/환원전위가 조금 높아 에너지 밀도 부분에 있어서 리튬에 비해 열세에 있지만, 에너지저장 분야에서는 에너지 밀도의 중요성이 상대적으로 낮고 오히려 가격이 더 중요한 요소가 되기 때문에 중대형 에너지저장시스템에 있어서는 적용 가능성이 큰 이차전지로 관심으로 모으고 있다.

나트륨이온전지는 상온에서 작동하며 유독물질이 없다. 이는 같은 나트륨 계열의 전지이지만 고온에서 작동하고 양극으로 황을 사용하기 때문에 안전성에 대한 부담을 갖고 있는 나트륨-황 전지와는 차별성을 갖는다. 작동원리는 리튬이차전지와 매우 유사하며, 운전 시 전달되는 이온이 리튬 이온이 아닌 나트륨 이온이라는 차이가 있다.

나트륨이온전지의 양극에서 일어나는 삽입/탈리 반응은 기본적으로 리튬이차전지의 양극 반응과 유사하기 때문에 유사

한 양극소재의 적용이 가능하나, 리튬이차전지에서 주로 사용되는 음극 소재인 흑연계 탄소재료를 사용할 수 없기 때문에 음극 소재 개발이 필수적이다. 열적 안정성이 우수하고 물질 자체의 inductive 효과에 의해 작동전압이 높은 전이금속 산계 양극소재의 이론용량은 리튬이차전지에 사용되는 소재와 이론용량 면에서 유사한 값을 갖는다.[5] 이와 같은 소재는 전기화학적 활성을 극대화하기 위해 나노구조 형상을 가져야하며, 전도성 향상을 위한 표면 코팅이 필요하다. 리튬이차전지에서 주로 사용하는 음극 소재인 흑연의 경우 리튬이온과 반응할 때 나타나는 단계별 삽입현상이 나트륨이온에서는 거의 발생하지 않고 흑연에 삽입될 때의 전위가 나트륨 환원전위보다 낮아 가역적 산화/환원 반응을 기대할 수 없다. 따라서 비정질 탄소계열의 소재가 후보 음극 소재로 연구되고 있다.

나트륨이온전지는 가격경쟁력과 대용량화 그리고 설치 장소의 공간제약이 상대적으로 덜한 에너지저장 응용분야에서 리튬이차전지에 비해 경쟁력을 가질 수 있는 유망한 이차전지 시스템이다. 아직은 초기 연구단계에 있지만 향후 에너지저장 분야 시장의 본격적인 성장이 예상되는 현 시점에서 지속적인 관심이 필요한 기술로 판단된다.

D. 마그네슘 이차전지

리튬이차전지의 개념은 전지에 사용되는 음극으로 리튬 금속을 고려한 것에서부터 시작하였으며, 다음으로 높은 에너지

나트륨이온전지의 양극에서 일어나는 삽입/탈리 반응은 기본적으로 리튬이차전지의 양극 반응과 유사

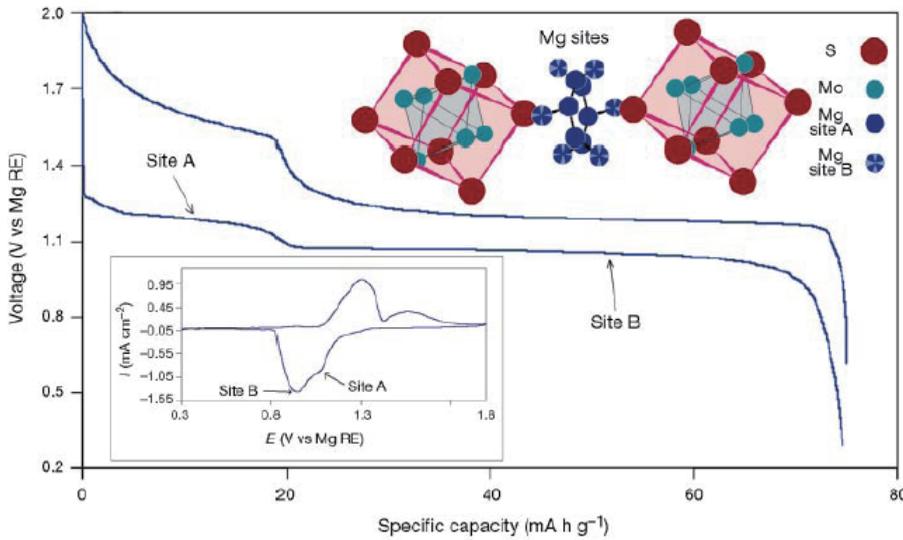


그림 4. $Mg_xMo_3S_4$ 전극의 전기화학적 특성 및 구조(7)

를 갖는 이차전지 음극 소재 후보는 마그네슘이다. 마그네슘의 물질 특성은 밀도 $1.74g/cm^3$, 이론 용량 $2.23Ah/g$, 산화환원 전위 $-2.36V$ (vs. NHE)로 낮은 산화환원 전위, 높은 이론 용량 등 음극 소재로 여러 가지 장점을 갖고 있으며 산화 환원 반응 시 전달되는 전자 수가 2개이기 때문에 리튬이나 나트륨에 비해 단위 반응당 2배의 전류를 얻을 수 있다. 또한 마그네슘의 풍부한 매장량, 낮은 가격, 환경 친화성, 취급 용이성 등은 단순히 성능 뿐 아니라 실제 상용화하는데 큰 장점이 될 수 있다. 지난 20여년 동안 마그네슘 전기화학 분야에 여러 가지 연구들이 진행되어 마그네슘 이차전지의 가능성을 보여주기도 하였으나, 제한적인 부분은 아직 존재한다.[6] 기술개발의 핵심은 마그네슘을 가역적으로 충방전할 수 있는 전해질 개발에 있다. 마그네슘은 그 표면이 MgO , $Mg(OH)_2$, $MgCO_3$ 형태의 박막으로 코팅되어있으며, 일반적으로 사용되는 전해질 용매와 쉽게 반응하여 용해되지 않는 염을 생성한다. 표면에 얇은 염으로 이루어진 막을 형성하고 리튬이온이 이 막을 통해 쉽게 이동하는 리튬 금속과 달리 마그네슘 표면에 생성된 막을 통해 마그네슘 이온의 이동은 불가능하다. 마그네슘의 용

마그네슘의 증착은
마그네슘 염으로 이루어진
표면 막에 의해 완전히 차단

용은 대부분 극성 용매 내에서 표면 막의 분해 메커니즘을 통해서만 일어나고 마그네슘의 증착은 마그네슘 염으로 이루어진 표면 막에 의해 완전히 차단되어 가역적 반응이 불가능하다. 다만 ether계 용매와 Grignard 염($RMgX$, R:alkyl, aryl, X:halide)으로 이루어진 용액 내에서는 예외적으로 마그네슘 용융 및 증착 반응이 가역적으로 일어난다. 그러나 이와 같은 용액은 전기화학적으로 안정한 영역

(electrochemical stable window)이 너무 좁아 이차전지에 적용하기에는 무리가 있다.

많은 연구 그룹들이 Grignard계 전해질의 전기화학 반응 전위창 확대와 마그네슘의 삽입 및 탈리가 가능한 양극 소재 분야에서 지속적인 연구를 수행하던 중, 이스라엘 Bar-Ilan University에서 최초로 금속 마그네슘 음극, $Mg_xMo_3S_4$

양극, Grignard 염-THF (Tetrahydrofuran) 전해질로 구성된 마그네슘 이차전지를 성공적으로 구현하였다. 위 그림 4는 $Mg_xMo_3S_4$ 양극 활물질의 전기화학적 특성이다. 충방전 곡선 및 cyclic voltammetry에서 확인할 수 있는

바와 같이 Mg은 A site와 B site에 순차적으로 삽입 탈리가 발생하고 이 반응은 가역적으로 발생하며, 다른 마그네슘 이차전지와 달리 전해액 분해 반응이 발생하지 않는다. 전극과 전해질의 부반응이 발생하지 않기 때문에 수천 사이클 이상의 장수명 특성을 보인다.

Ⅲ. 결 론

에너지저장시스템은 화학적 기계적 전기화학적 저장 기술 등 다양한 방식으로 개발되고 있다. 현재 전기화학적 에너지 저장 기술인 전지 기술의 활용도가 높으며, 다양한 전지 기술이 현재 실용화 또는 연구개발 단계에 있다. 리튬이차전지는 비교적 단주기 용도로 현재 실증 및 상용화 단계에서 사용되고 있다. 지속적이고 광범위한 분야에 리튬이차전지를 적용하기 위해서는 가격경쟁력 향상과 수명개선 등이 필요하다. 레독스 플로우 전지는 장주기 용도에 주로 활용되며, 출력과 용량을 독립적으로 설계할 수 있고 장수명 특성을 갖는 장점이 있으나, 비교적 낮은 효율 개선 및 출력 특성 개선 등이 필요하다.

앞으로 에너지저장 용도로 활용될 것으로 전망되는 나트륨 이온전지 및 마그네슘 이차전지는 소재로 사용되는 물질이 지구상에 풍부하게 존재한다는 장점과 전지 반응에 있어서의 전압 및 전류 특성으로 인해 차세대 전지 기술로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 시스템 상용화를 위한 핵심 소재의 개발이 아직 진행 중에 있다. 향후 전기자동차 및 에너지저장시스템과 같은 대용량 전지의 보급이 확대가 전망됨에 따라 가격 경쟁력 확보가 시장 확대에 있어 중요한 변수로 작용할 것으로 생각되며 이에 나트륨이온전지 및 마그네슘 이차전지는 더욱 유망한 에너지저장 기술로 각광받을 것으로 기대된다. 

참 고 문 헌

- [1] 전용재, 윤용범 “대용량 전력저장장치 소개 및 국내 적용 사례”, p35~41, Journal of the Electric World, July, 2015.
- [2] 오승모, “전기화학”, 자유아카데미, 2010.
- [3] SNE Research, “글로벌 ESS 시장 전망과 제조사 현황 (2014~2020)”, May, 2015.
- [4] 한신, 김유종, 허지향, “Vanadium Redox Flow Battery 개발 및 국내 실증”, p48~54, Journal of the Electric World, June, 2014.
- [5] Chan Sun Park et al., “Anomalous Manganese Activation of a Pyrophosphate Cathode in Sodium Ion Batteries: A Combined Experimental and Theoretical Study”, p2787~2792, 135 (7), J. Am. Chem. Soc., 2013.
- [6] Kwan Woo Nam et al., “The High Performance of Crystal Water Containing Manganese Birnessite Cathodes for Magnesium Batteries”, p4071~4079, 15 (6), Nano Lett., 2015.
- [7] D. Aurbach et al., “Prototype systems for rechargeable magnesium batteries”, p724~727, 407 (6805), Nature, Oct., 2000.