



파고들다

III. Sodium-ion battery

이안나 2차전지

02 3770 5599

anna.lee@yuantakorea.com



I. Sodium-ion 배터리 기본 특성 및 기술 방향

04

II. Sodium-ion 배터리 기술 개발 현황

21

III. Sodium-ion에 대한 생각

25

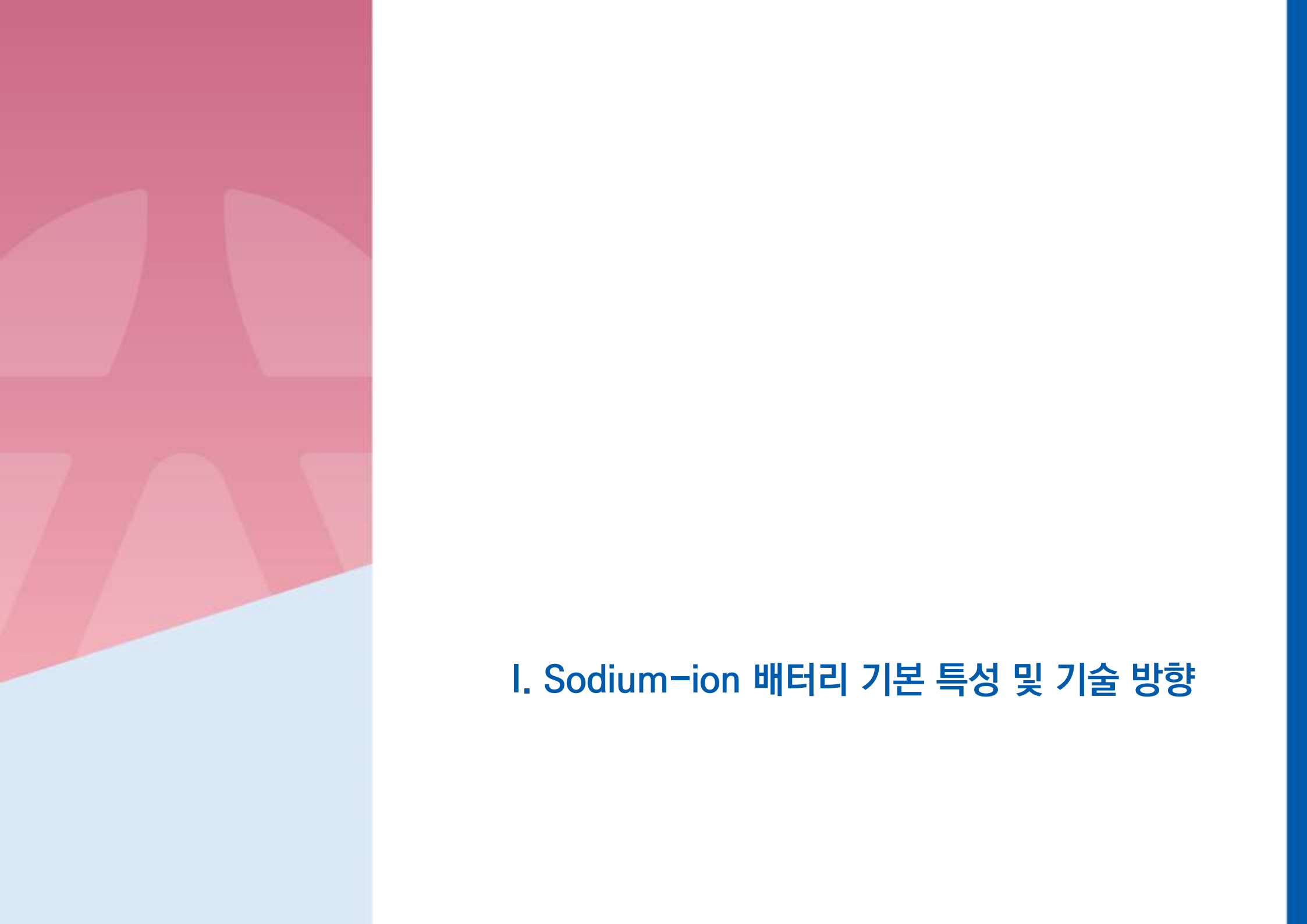


이안나

2차전지/전기전자

02 3770 5599

anna.lee@yuantakorea.com



I. Sodium-ion 배터리 기본 특성 및 기술 방향

Sodium-ion 배터리에 대한 이해

• Sodium-ion 배터리란,

리튬이온배터리는 리튬이 양극에서 이온 상태로 빠져나와 음극에 삽입되는 메커니즘. 나트륨이온배터리는 나트륨이 양극에서 이온 상태로 빠져나와 음극에 삽입되는 메커니즘. 즉, 충방전 시 이동하는 물질이 리튬-이온이 아닌 나트륨-이온인 것. 이는 리튬과 나트륨은 주기율표 상 1족 알칼리금속이기 때문.

이온화 시 전자 한 개를 잃는 1가 이온 형태로 존재하며 주기율표 특성 상 비슷한 성질을 가지고 있음

- 리튬이온배터리 대비 장점은 1) 풍부하고 저렴한 원료(자원 고갈 및 공급망 문제에서 자유로움), 2) 저렴한 비용, 4) 안정성이 더 높아 열폭주 위험 낮음, 4) 저온 특성에서 더 강함, 5) 충방전 사이클 더 높으며 deep discharge에도 안정적, 6) 환경 문제에서 자유로움 등이 있음

리튬이온배터리 vs 나트륨이온배터리

구분	나트륨이온배터리	LFP 배터리	삼원계 배터리
안전성	좋음	좋음	일반
에너지밀도	80~140Wh/kg	150~220Wh/kg	220~300Wh/kg
배터리 사이클	2,000~	2,000~	3,000~
저온 성능	영하 20도씨 저온 환경에서 에너지 보유율 85%+	60~70%	70%+
양극활물질	PW와 Layerd 구조 산화물	LFP 배터리	NCM, NCA
음극활물질	하드 카본 등 탄소 기반 소재	흑연	흑연
전해액	LiPF6 등	LiPF6 등	LiPF6 등

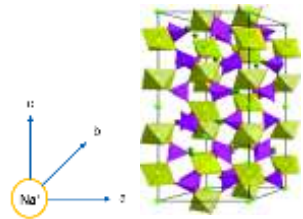
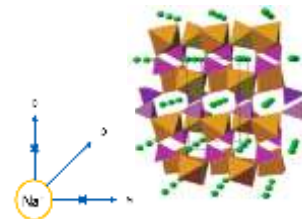
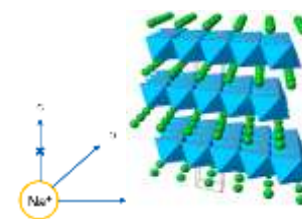
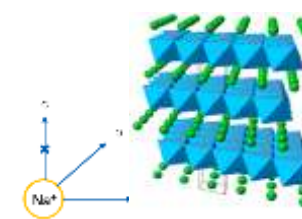
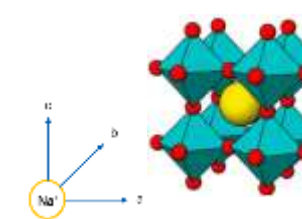
Sodium-ion 배터리에 대한 이해

• Sodium-ion 배터리란,

리튬이온배터리 대비 나트륨이온배터리의 단점은 1) 낮은 에너지밀도(리튬보다 무겁고 이온 반경 큼), 2) 초기 효율이 낮아질 수 있음, 3) 낮은 이온전도도로 충전속도 느림 등이 있음

- 아직 기술이 성숙화되기 전이기 때문에 주로 양극활물질 위주로 연구개발 진행 중. 크게 1) Layered Oxides, 2) Prussian Blue 및 유사 구조(예: PW 등), 3) Polyanionic Compounds(예: NVP, NFP 등) 등을 중심으로 개발 진행

나트륨이온배터리 양극활물질 비교

Batteries	$\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (NVP)	NaFePO_4 (NFP)	Na_xMnO_2	$\text{Na}_x\text{CuFeMnO}_6$	Prussian White (PW)
Crystal structure	 Nasicon	 Olivine	 Layered	 Layered	 Perovskite
Cathode	Sodium Vanadium Phosphate	Sodium iron phosphate	Sodium manganese oxide	CuFeMn	$\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 구조 기반
Anode	Hard Carbon	Hard Carbon	Hard Carbon	Hard Carbon	Hard Carbon
Voltages	Nominal: 3.50V Operating range: 3.4~3.6V/cell	Nominal: 3.20V Operating range: 2.0~3.6V/cell	Nominal: 3.10V Operating range: 2.0~3.8V/cell	Nominal: 3.30, 3.50V Operating range: 2.0~3.8V/cell	Nominal: 3.00, 3.40V Operating range: 2.0~3.8V/cell
Specific Energy (capacity)	90~120Wh/kg	90~100Wh/kg	90~120Wh/kg	120~140Wh/kg	100~120Wh/kg
Charge(C-rate)	1~3C, 최대 5V까지 충전	0.5~1C, 최대 2C	0.5~1C, 최대 2C	0.5~1C, 최대 2C	0.5~1C, 최대 2C
Discharge(C-rate)	1C; 일부 셀에서는 10C 가능	1C~2C; 최대 5C	1C~2C; 최대 5C	1C~2C; 최대 5C	1C~2C; 최대 5C
Cycle Life	2,000~	2,000~3,000	1,000~2,000	1,000~1,500	2,000~
Thermal runaway	150°C(500°F)	270°C(5~600°F)	>300°C 열방출 시작	>300°C 열방출 시작	>250°C 열방출 시작

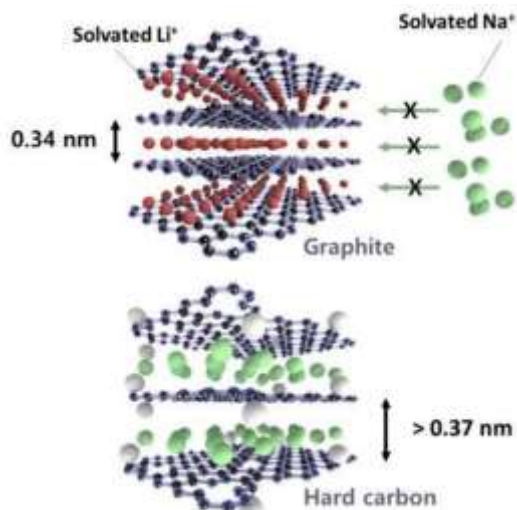
Sodium-ion 배터리에 대한 이해

• SiB 배터리 한계 I. 낮은 리튬이온 확산 속도 및 전기전도도

나트륨이온 물리적 특성: 나트륨이온(Na^+)의 반경은 약 1.02 Å로, 리튬이온(Li^+)의 약 0.76 Å보다 훨씬 큼. 또한 나트륨 원자는 리튬 원자보다 무거움 (원자량 23 vs. 7)

- 흑연 등 탄소 음극활물질과의 상호작용: 흑연의 층간 간격은 약 0.34 nm로, 리튬이온이 삽입되기에는 충분하지만, 나트륨이온은 크기가 커서 삽입 어려움. hard carbon은 더 넓은 층간 간격을 제공하지만 리튬 기반 흑연과 같은 전극 재료와 비교하면 여전히 속도 느림. 따라서 리튬이온은 전극 재료와의 강한 상호작용으로 안정적 흡/탈착이 가능하지만 나트륨이온은 결합 에너지가 낮아 확산 효율 감소
- 낮은 이온전도도: 나트륨이온의 큰 반경으로 인해 전해질 내 이동 시, 점도(viscosity)와 이온 저항 영향 큼. 특히, 전해질의 용매 분자와 강하게 결합하여 큰 solvation shell 형성. 이로 인해 이동 속도 제한. 이러한 특성으로 인해 리튬이온 대비 확산 계수가 낮음. (Hard carbon 기준, 리튬이온의 확산 계수는 약 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, 나트륨이온은 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$)

탄소 음극활물질과의 상호작용 비교(Li vs Na)



리튬, 나트륨 등 다양한 알칼리 금속 간 물리적 특성 비교

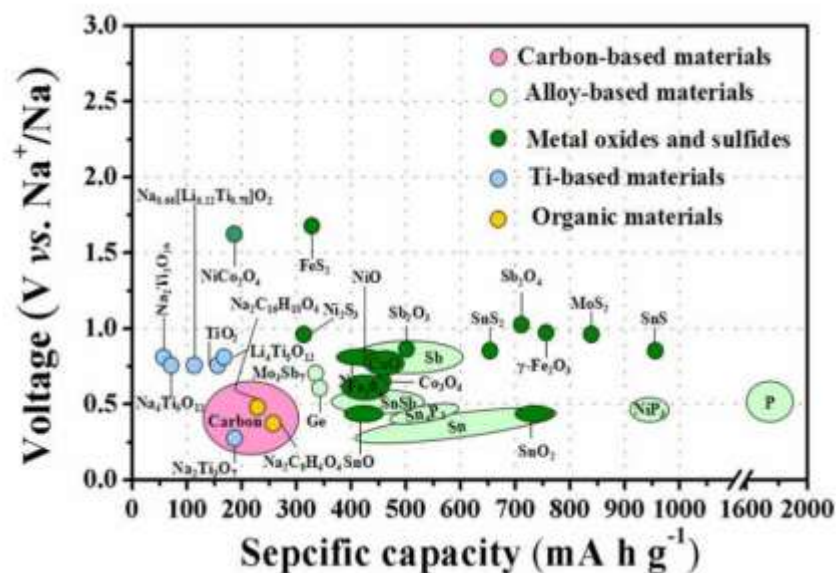
Element	Electronegativity	Electron Affinity (eV)	1st Ionization (eV)	Radius (Å)	Ionic Radius (Å)	Electrochemical Potential (V)
Li	0.98	0.618	5.39	1.52	1.82	-3.04
Na	0.93	0.548	5.14	1.86	2.27	-2.71
K	0.82	0.501	4.34	2.32	2.75	-2.92
Mg	1.31	N/A	7.65	1.6	1.73	-2.35
Ca	1	0.019	6.12	1.97	N/A	-2.84

- 낮은 이론 용량:

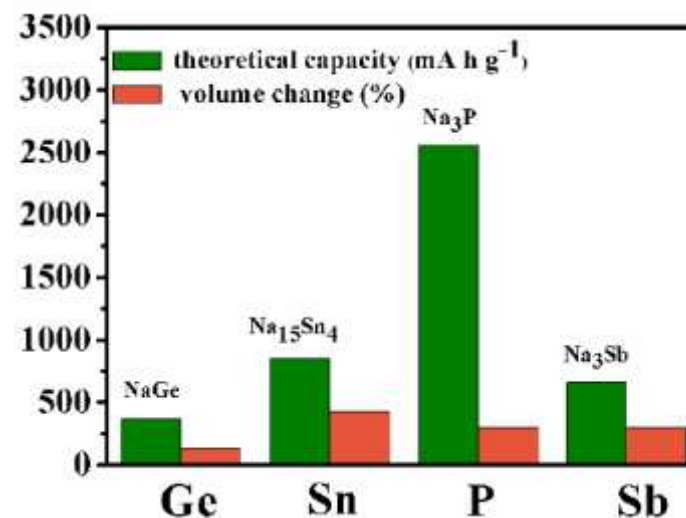
1) 양극 용량 낮음: 리튬이온 배터리에서 사용되는 양극 재료(LiCoO_2 , LiFePO_4 등)는 높은 이론 용량($140\text{--}200\text{ mAh/g}$)을 제공하지만, 나트륨이온 배터리에서 사용되는 양극 재료(Na_xMO_2 , Prussian Blue 유사체 등)의 이론 용량은 상대적으로 낮음($100\text{--}150\text{ mAh/g}$). 이는 나트륨 기반 양극 물질은 리튬보다 전하 밀도가 낮고, 안정적인 산화 상태를 유지하기 위해 재료 내에서 나트륨 이온 농도를 제한하기 때문

- 2) 음극 용량 낮음: 리튬이온 배터리는 흑연(LiC_6)을 음극으로 사용하며, 높은 용량(372 mAh/g)을 제공. 반면 나트륨이온 배터리는 흑연 구조에 안정적으로 삽입되지 못하므로 hard carbon 또는 티탄계 물질이 주로 사용되며, 이들의 용량은 $250\text{--}300 \text{ mAh/g}$ 수준으로 낮음

SiB 음극활물질 별 평균 전압(방전) vs 용량



Alloy-based materials, 이론적 용량 및 부피 변화를



Sodium-ion 배터리에 대한 이해

• SiB 배터리 한계 II. 낮은 에너지밀도

낮은 작동 전압:

활물질 종류에 따라 다르지만, 대체로 리튬이온 배터리보다 전위가 낮음

예: NaFePO_4 (작동 전압 $\sim 2.9\text{V}$) vs. LiFePO_4 (작동 전압 $\sim 3.4\text{V}$)

• 전해질의 한계

1) 낮은 용매 안정성: 리튬 기반 배터리에서 일반적으로 사용되는 용매(예: 카보네이트 계열)는 나트륨 기반 배터리에서도 활용될 수 있음. 그러나 나트륨의 높은 반응성으로 용매의 산화 및 환원 안정성이 낮아짐. 특히, 고전압 환경에서 분해 가능성 증가

2) 염의 한계: 리튬 배터리는 일반적으로 LiPF_6 와 같은 안정적인 염을 사용하는데, 이는 높은 전압 안정성과 좋은 이온 전도성 제공. 나트륨 배터리는 NaPF_6 , NaClO_4 와 같은 염을 사용하며, 이들 염은 리튬 염에 비해 화학적 안정성이 낮고 전압이 높아질수록 분해 가능성 증가

3) SEI 층 분해 가능성: SEI 층이 고전압 환경에서 쉽게 분해되어 나트륨 전해질의 불안정성 초래

즉, 고전압에서 1) 용매 산화, 2) 염 분해, 3) 계면 반응 등으로 인해 전해질 분해 가능성 높아짐

SEI층 품질 관련 Li vs Na

구분	Li	Na
SEI 품질	좋음 (튼튼함)	나쁨 (부서지기 쉬움)
수지상 형태	바늘처럼 뾰족	덤불처럼 퍼짐
전해질과 반응성	보통	매우 강함
개선 방법	기존 전해질 OK	전해질 바뀌어야 함, 첨가제 필요

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 I. 양극활물질 개발

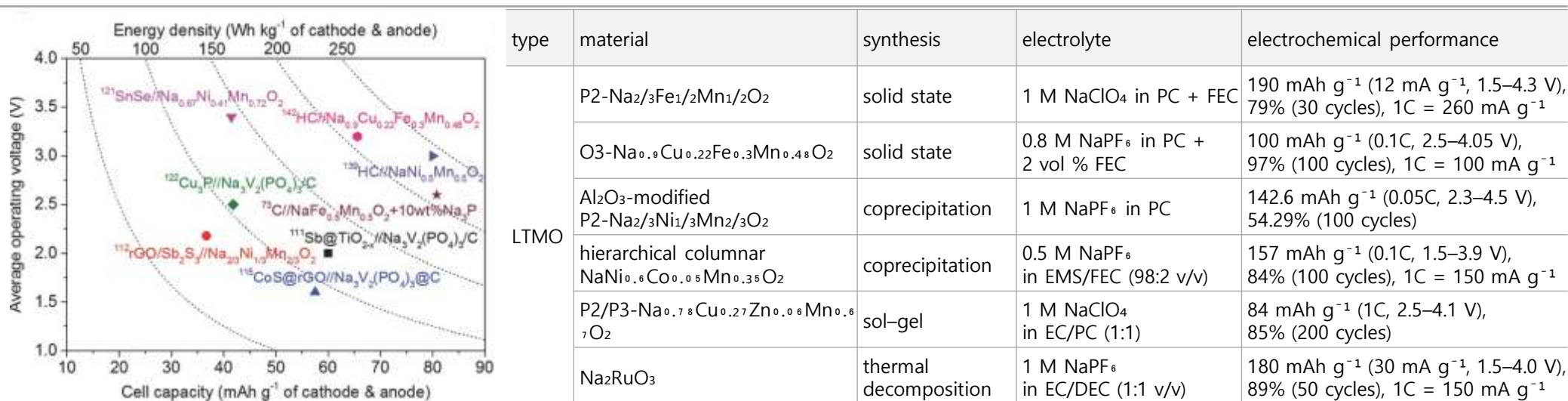
- SiB 배터리 기술적 한계 개선을 위한 방향은 크게 1) 나트륨이온확산 속도 및 전기전도성 개선, 2) 에너지밀도 향상으로 구분
양극활물질 개발을 통해, 나트륨이온의 큰 이온 반경, 낮은 확산 속도, 전기화학적 안정성을 보완하도록 설계해야 함

• (1) 층상 구조 금속 산화물 (Layered Transition Metal Oxides):

Na_xMO_2 (M = Fe, Mn, Co, Ni와 같은 전이 금속)는 LIB 양극과 유사하게, 나트륨 층은 금속 산화물 층과 번갈아 가며 적층 구조 이룸

- 이러한 구조는 나트륨 이온 점유 위치 및 함량에 따라 1) O_3 type: $(\text{Na}_x(\text{TM})\text{O}_2)$ ($0.7 \leq x \leq 1$)), 2) P_2 type : $(\text{Na}_x(\text{TM})\text{O}_2)$ ($x \leq 0.7$))형으로 구분
(참고: O_3 , P_2 에서 3, 2는 특정 산소 배열을 가진 전이 금속 층의 개수로 쉽게 말하면 P_2 는 삼각기둥형, O_3 는 팔면체형 의미)
- 즉, 결정구조 최적화를 통해 나트륨이온 확산 속도를 향상시킬 수 있음. 또한 고용량 금속을 통합하여 에너지밀도를 높일 수 있음.

층상 구조 금속 산화물 양극활물질 성능 비교



Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 I. 양극활물질 개발

- 다만, 고전압 사이클링에서 P₂에서 O₃로의 상 전이로 구조를 불안정하게 만들 수 있음. P₂구조는 원래 나트륨 이온이 잘 이동할 수 있도록 설계된 구조인데 O₃로 바뀌면서 층간 거리가 좁아져 나트륨 이온이 이동하기 힘들어짐. 또한 한번 O₃로 가게 되면 P₂로 되돌아올 때 완전 원상 복구되지 못하는 경우가 많아 구조가 영구적으로 손상될 위험이 있음. 이에 P₂ 상 안정화를 위한 다양한 연구 개발 진행.
- 크게 4가지 방법으로 기술 개발 중
 - 1) 원소 도핑과 표면 코팅: 다양한 전이금속 (Fe, Ni, Mn, Co 등)을 도핑해 재료를 튼튼하게 만듦. (Fe: 싸고 풍부, Ni: 전압 범위 넓음, Mn: 용량 크지만 구조 불안정, Co: 비싸지만 전기 잘 통함), Al₂O₃ 같은 얇은 막으로 코팅해 수분, 산성물질이 양극재 구조가 무너지는 걸 막아줌
 - 2) 구조 조정: 입자 크기 및 모양이 재각기면 충방전 속도가 느려지고 수명도 짧아짐. 이에 졸-겔(sol-gel) 방식이나 공동침전법(co-precipitation) 등을 통해 입자 크기 균일, 기둥 모양 구조로의 변형으로 고용량, 고성능 양극활물질 도출
 - 3) 나트륨 충전: 일부 양극활물질은 나트륨이 충분히 들어있지 않아 성능이 떨어질 수 있음. P₂나 O₃ 같은 층상 구조 양극재를 만들 때, 합성 과정(특히 고온 소성) 중에 Na이 휘발되어 날아가 최종 양극활물질에 나트륨 함량이 줄어들게 되는 경우임(즉, Na_xMO₂에서 x값이 작아짐). 이럴 경우 특히 고전압에서 구조가 쉽게 무너짐. 그래서 예전에는 Sacrificial Sodium Salt라고 해서 일부러 Na을 많이 넣고 고온 열처리 중 날아가도 최종 제품에 적정량의 나트륨이 남게 만드는 방식을 사용 했었음. 그러나 이 방법은 추가 재료비 및 공정의 복잡성, 균일 제어가 어려워 대량 생산에 부적합하여 다른 방법으로 기술 개발 중. 대표적으로 P₂ + P₃ 복합구조가 있음. 즉, P₂ 단독 구조에서는 최종 제품에 나트륨이 부족해질 위험이 크기 때문에 P₃ 구조를 일부러 섞어서 제조해 전체 구조 안에 자연스럽게 나트륨이 많이 저장되도록 유도하는 방식. 이 설계에 의한 대표적인 활물질은 Na_{0.78}Cu_{0.27}Zn_{0.06}Mn_{0.67}O₂
 - 4) 음이온 산화환원(Anionic redox): 기존 배터리는 전기를 저장하는 방식이 금속이 전자를 주고 받는 방식. 이를 양이온 산화환원 반응이라 함. 그러나 한 금속이 줄 수 있는 전자 수는 정해져 있어 에너지 용량에 상한선이 생김. 그래서 나온 발상이 금속 말고 산소 이온도 전자를 주고 받게 하자는 것. 이를 음이온 산화환원이라 부름. 즉, 배터리 안에서 산소도 에너지 저장에 직접 참여하는 방식. 산소까지 동원하게 되면 더 많은 전자를 주고 받아 훨씬 더 많은 에너지를 같은 무게, 부피 내에서 저장할 수 있음. → 배터리 용량 증가

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 I. 양극활물질 개발

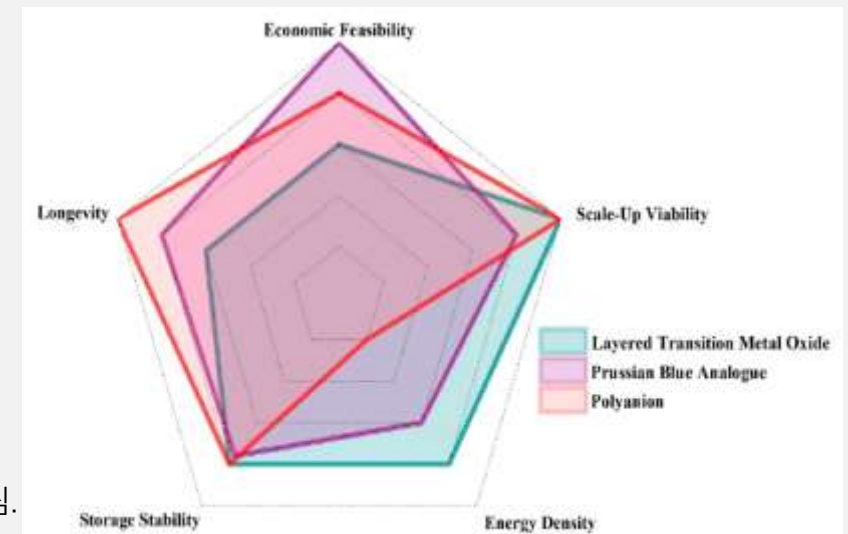
• (2) 다중음이온 화합물 (polyanion계):

PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} 와 같은 폴리음이온 그룹과 전이 금속이 결합하여 형성된 구조. 폴리음이온 그룹의 강력한 공유 결합으로 전이 금속 산화물 구조보다 더 높은 열적 안정성, 충방전 중 구조 붕괴에 대한 화학적 안정성이 있음. 또한 강한 전자를 잡아당기는 힘으로 인해 전이 금속이 쉽게 산화할 수 있어 전기 에너지가 커짐. 즉, 방전 전압이 더 높아지게 됨

- 1) NaFePO_4 기반 화합물: 저렴하고 환경 친화적이며 안정성도 높아 양극활물질 후보로 각광. 다만, NaFePO_4 는 올리빈(olivine) 구조로 나트륨 이온이 움직이는 길이 오직 한방향(1D). 이에 이온 전도도가 낮고, 급속 충방전에 어려움이 있음. 이를 해결하기 위해 나노구조화, 탄소 코팅, 이온 도핑 등의 방법 사용

- 2) NASICON 구조: 나트륨 이온이 3차원(3D) 방향으로 이온전도도 높음.
대표적인 활물질은 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (NVP), $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ (NVPF)가 있음.
 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (NVP)는 바나듐 이온이 산화-환원하면서 약 3.4V 전압 낼 수 있음.
그러나 바나듐 양이 제한되어 용량은 117 mAh/g에 그침.
이에 나온 개선책인 플루오린화(fluorination)임.
인산염(PO_4) 그룹 일부를 플루오린(F) 원자로 바꿔줘 높은 전압을 도출.
이렇게 나온 활물질이 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ (NVPF)임.
NVPF는 고속 충방전 잘되고 수명도 길어 상업화 가능성이 매우 높다고 평가되고 있음

- 3) 황산염(SO_4^{2-}) 기반 화합물: PO_4 보다 전이 금속이 더 쉽게 산화되어 전압이 더 높아짐.
대표적으로 $\text{Na}_2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 는 3.8V 전압에 100 mAh/g 이상 용량도 가능.
다만, 황산염 기반 물질이 공기 중 수분에 잘 반응해 제조 또는 저장 시 습기 관리에 신경을 많이 써야 함



Sodium-ion 배터리 기술 방향

다중음이온 화합물 양극활물질 성능 비교

type	material	synthesis	electrolyte	electrochemical performance
polyanion	polythiophene-modified NaFePO ₄	in situ polymerization + sodiation	1 M NaClO ₄ in DEC/PC/EC (1:1:1 v/v)	142 mAh g ⁻¹ (10 mA g ⁻¹ , 2.2–4.0 V), 94% (100 cycles)
	maricite NaFePO ₄	low-temperature solid state	1 M NaPF ₆ in EC/PC (1:1 v/v)	142 mAh g ⁻¹ (0.05C, 1.5–4.5 V), 95% (200 cycles)
	Na ₄ Fe ₇ (PO ₄) ₆	spray-drying	1 M NaClO ₄ in EC/DEC/FEC (1:1:0.5 w/w)	66.5 mAh g ⁻¹ (5 mA g ⁻¹ , 1.5–4.2 V), 100% (1000 cycles)
	Na ₃ V(PO ₃) ₃ N/NGO	freeze-drying	1 M NaClO ₄ in EC/PC (1:1 v/v) + 5 vol % FEC	78.9 mAh g ⁻¹ (0.1C, 3.0–4.25 V), 100% (100 cycles), 1C = 80 mA g ⁻¹
	Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₂ F ₃	carbothermal reduction	1 M NaClO ₄ in PC	111.6 mAh g ⁻¹ (0.091C, 1.6–4.6 V), 97.6% (50 cycles)
	alluaudite Na ₂ Fe ₂ (SO ₄) ₃	low-temperature solid state	1 M NaPF ₆ in EC/DEC (5:5 v/v)	100 mAh g ⁻¹ (0.05C, 2.0–4.5 V), 91% (30 cycles)
	eldeelite NaFe(SO ₄) ₂	low-temperature solution route	1 M NaClO ₄ in 10% FEC in PC	80 mAh g ⁻¹ (0.1C, 2.0–4.0 V), 79% (80 cycles)
	Na ₄ Fe ₃ (PO ₄) ₂ P ₂ O ₇	solid state	1 M NaClO ₄ in PC	129 mAh g ⁻¹ (0.025C, 1.7–4.3 V), 86% (100 cycles)
	Na _{3.1} V ₁ (PO ₄) _{2.9} (SiO ₄) _{0.1}	sol-gel	1 M NaClO ₄ in PC + 5 vol % FEC	109.4 mAh g ⁻¹ (0.2C, 2.3–3.9 V), 98% (500 cycles)

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 I. 양극활물질 개발

• (3) 프러시안 블루 유사체 (Prussian Blue Analogues, PBAs):

프러시안 블루(Prussian Blue)는 옛날부터 쓰던 푸른색 안료로 $\text{Fe}-\text{C}\equiv\text{N}-\text{Fe}$ 골격을 가진 복잡한 격자 구조를 가지고 있음. 이를 응용해서 만든 구조체가 프러시안 블루 유사체(PBAs)임. 금속(M)이 연결된 3차원 프레임워크 안에 큰 빈 공간들이 있어 나트륨 이온이 쉽게 탈리할 수 있음. 이에 이온전도도가 높고 충방전 속도가 빠르며 전압도 높음

- 장점은 저렴하고 만들기 쉬우며(물같은 간단한 용매에서 쉽게 합성 가능), 친환경적이고, 빠른 충방전, 높은 전압(3.2~3.8V), 안정적 구조로 수명도 김. 그러나 구조 안에 물(H_2O)이 끼어들기 쉬워 충방전 중 구조적 불안정성이 생기며 이로 인해 전기 흐름도 방해. 또한 $\text{Fe}-\text{C}\equiv\text{N}-\text{M}$ 골격이 완벽하지 않고 빈 공간(vacancy)이 생기기도 해 이온이 제대로 이동하지 못하고 성능이 떨어질 수 있음

PBA 양극활물질 성능 비교

type	material	synthesis	electrolyte	electrochemical performance
PBA	$\text{Na}^{1.92}\text{Fe}^2(\text{CN})_6$	solution and washing based route	1 M NaPF_6 in EC/DEC (1:1 v/v) + 5 wt% FEC	157 mAh g^{-1} (10 mA g^{-1} , 1.5–4.5 V), 80% (1000 cycles), 1C = 150 mA g^{-1}
	$\text{Na}_2\text{Mn}^{0.15}\text{Co}^{0.15}\text{Ni}^{0.1}\text{Fe}^{0.6}\text{Fe}(\text{CN})_6$	modified coprecipitation	1 M NaClO_4 in EC/DEC (1:1 v/v) + 8 vol% FEC + 1 wt% AlCl_3	117 mAh g^{-1} (0.1C, 2.0–4.0 V), 81.1% (500 cycles), 1C = 170 mA g^{-1}
	$\text{Na}^{1.58}\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{0.92}$ nanosphere	hydrothermal	1 M NaPF_6 in EC/PC (1:1 v/v) + 5% FEC	142 mAh g^{-1} (17 mA g^{-1} , 2.0–4.2 V), 90% (800 cycles), 1C = 170 mA g^{-1}

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 I. 양극활물질 개발

- 이에 1) 고온 침전법(높은 온도를 통해 빈자리와 수분 감소 유도), 2) 폴리올 합성법(용매를 바꿔서 균일하게 제조), 3) 건조/후처리(후처리 시 습기 완벽 제거 및 코팅을 통해 수분 유입 방지), 4) 금속 조합 조정(Fe 대신 Mn, Co 같은 다른 금속을 적절히 섞어서 성능 향상) 등의 방법 개발 중
- 대표적으로 Prussian White (PW)가 있음. 이는 PB 또는 철(III) 헥사시아노페레이트(II)의 파생 종으로 PB를 기반으로 전지에 최적화 시킨 버전. PB를 환원시켜서 Na^+ 같은 이온을 넣은 것. Prussian Blue가 $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ 산화/환원 반응이 일어난다면 Prussian White는 $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{1+}$ 로 움직여 상대적으로 전기화학 반응이 빠름. Fe^{1+} 상태는 불안정하지만, 격자 내부에서 안정화됨

PB, PW 성질 비교

속성	Prussian Blue	Prussian White
화학적 조성	철(III)과 헥사시아노페레이트(II)의 혼합 구조	헥사시아노페레이트(II) 상태로만 구성
색상	진한 청색	옅은 색 또는 무색
산화 상태	혼합된 산화 상태 (철(III), 헥사시아노페레이트(II))	환원된 상태 (헥사시아노페레이트(II) 포함)
용도	안료, 흡착제, 배터리 소재	주로 나트륨-이온 배터리 양극 소재
전기화학적 특성	산화/환원에 따라 가변적	안정적이고 높은 이온 전도성

자료: 유안타증권 리서치센터

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 II. 음극활물질 개발

- SIB의 음극 재료는 반복적인 사이클 동안 구조적 무결성을 유지하는 동시에 큰 크기의 나트륨 이온을 수용해야 함. 따라서 리튬이온 배터리에 기본적으로 적용되는 흑연은 나트륨 이온 크기로 인해 흑연 층 사이로 삽입되지 못함. 또한 최근 리튬이온배터리에서 급부상 중인 실리콘 음극재는 나트륨을 흡수하지 못해 나트륨 이온 배터리에서는 효과적이지 않음. 이에 나트륨 이온 배터리에서 음극활물질 개발도 활발
- NIBs용 음극재는 크게 5가지로 구분. (1) 탄소 기반 소재(예: 하드카본, 그래핀 등), (2) 합금 기반 소재(예: Sn, P, Ge, Sb 등), (3) 전환 반응 기반 금속 산화물 및 황화물(예: Fe_2O_3 , SnO_2 , MoS_2 등), (4) 티타늄 화합물(예: TiO_2 , $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 등), (5) 유기 복합체 (예: 유기염, 폴리머 기반 음극재 등)
- (1) 탄소 기반 소재(예: 하드카본, 그래핀 등):
 - 1) Expanded graphite: 흑연의 층간 거리를 넓혀($4.3\text{\AA}$) 나트륨 이온 삽입을 가능하게 함
 - 2) 하드 카본(가장 널리 사용됨): 높은 나트륨 이온 저장 용량($\sim 300\text{ mAh/g}$), 적절한 초기 쿨롱 효율($\sim 80\text{--}90\%$), 원자재가 풍부하고 비용이 저렴. 다만, 고체 전해질 계면(SEI) 형성으로 인한 낮은 1차 사이클 효율과 비교적 낮은 전도도가 해결해야 할 과제. 현재까지 적용 가능성이 가장 높음
 - 3) 그래핀: 전기 전도성과 화학적 안정성이 뛰어나며, 다공성 구조나 도핑(질소, 붕소)을 통해 성능을 개선할 수 있음. 다만, 비용 측면 부담
- 각 탄소 기반 소재들의 기술적 한계를 개선하기 위해 나노구조화, 중공 구조 설계, 이종 원소 도핑 등의 기술 개발 중에 있음

탄소 기반 음극활물질 성능 비교

Carbon materials	Electronic Conductivity (S cm^{-1})	Interlayer Distance (nm)	Voltage (V versus Na^+/Na)	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	Mechanism
Expanded graphite	100	0.43	0-0.3, 0.3-2	30-34	insertion
Graphene	$10^3 - 10^6$	0.365 - 0.371	0.01-2	330.9	adsorption
Hard carbon	10 - 100	0.39	0.1, 0.1-1.2	1,272	insertion between parallel layers and into nanopores
Nanosheets	10 - 100	0.388	0.2, 0.2-1.2	196.6	insertion between graphene layers (mainly)
Hollow carbon nanospheres	10 - 100	0.401	0-1.5	410	insertion between graphene layers (mainly)
N-doped nanofibers	-	0.369	0.01-1.5	81.7	surface adsorption and redox reactions

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 II. 음극활물질 개발

• (2) 합금 기반 소재(예: Sn, P, Ge, Sb 등):

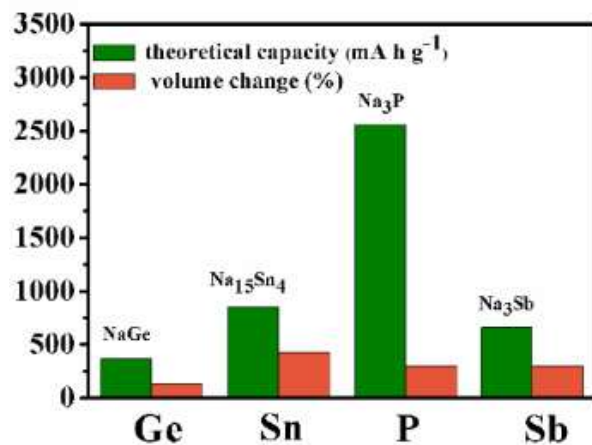
리튬이온배터리에서는 실리콘(Si)이 대표적인 합금형 음극재지만, 나트륨이온배터리에서는 실리콘이 나트륨과 반응하지 않아 사용이 어려움.

• 나트륨 이온 배터리에서 주로 연구되는 합금 소재는,

- 1) 주석(Sn): $\text{Na}_{15}\text{Sn}_4$ 합금까지 형성되며, 이론 용량 847 mAh/g, 부피팽창 420%,
- 2) 안티모니(Sb): Na_3Sb 로 변하며, 이론 용량 660 mAh/g, 부피팽창 293%
- 3) 게르마늄(Ge): NaGe 를 형성, 이론 용량 369 mAh/g
- 4) 인(P): Na_3P 를 형성, 이론 용량 무려 2596 mAh/g, 그러나 전기전도도 매우 낮음 (10^{-14} S/cm)

• 다만, 충방전 시 부피가 크게 팽창해 전극이 부서지고 이에 따라 성능이 급격하게 저하됨

Alloy-based materials, 이론적 용량 및 부피 변화율



자료: Journal of Materials Chemistry

합금기반 음극활물질 성능 비교

Materials	Electrical conductivity (S cm ⁻¹)	Theoretical capacity (mA h g ⁻¹)	Abundance in the earth crust (ppm)
Sn	9×10^4	847	2.2
P	10^{-14}	2596	1000
Ge	$\sim 10^{-2}$	369	1.8
Sb	2.5×10^4	660	0.2-0.5

자료: Journal of Materials Chemistry, 유안타증권 리서치센터

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 II. 음극활물질 개발

• (3) 전환 반응 기반 금속 산화물 및 황화물(예: Fe_2O_3 , SnO_2 , MoS_2 등):

다양한 금속 산화물(MO_x)이 나트륨이온배터리(NIB)용 음극재로 연구되고 있음. 특히, 전환 반응(conversion reaction)을 통해 나트륨을 저장하는 금속 산화물들이 주목받고 있음

• 1) 전기화학적으로 비활성 금속(Fe , Co , Ni , Cu , Mn , Mo 등)이 포함된 경우: $\text{MO}_x + x\text{Na}^+ + xe^- \leftrightarrow x\text{Na}_2\text{O} + \text{M}$

2) 전기화학적으로 활성 금속(Sn , Sb 등)이 포함된 경우: $\text{MO}_x + \text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{Metal}$

그 이후 금속이 추가로 나트륨과 합금(2단계 반응) 형성

• 한번 반응에 전자 여러 개를 주고 받기 때문에 탄소계나 합금계보다 이론상 용량이 높음. 다만, 초기 쿨롱 효율이 낮고(처음 충방전 시 잃는 전하량 많음), 전압 지연이 크며, 충방전 수명이 짧음

• 1) 대표적 금속 산화물: NiCo_2O_4 , Fe_2O_3 (저렴하지만 사이클 문제 있음), CuO (탄소랑 섞으면 수명 좋아짐), Co_3O_4 , MnO_x (층층 구조로 나트륨 삽입 적합)

전환반응 기반 대표적 금속산화물음극활물질 성능 비교

Material	Electrical conductivity (S cm^{-1})	Theoretical capacity (mA h g^{-1})	Abundance in the earth crust (ppm)
NiCo_2O_4	0.1-0.3	890	-
Fe_2O_3	7×10^{-3}	1,007	41,000
CuO	0.03-1	674	100
Co_3O_4	3.1×10^{-5}	890	10
MnO_x	10^{-4} - 10^{-6}	700-1,000	950

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 II. 음극활물질 개발

• (3) 전환 반응 기반 금속 산화물 및 황화물(예: Fe_2O_3 , SnO_2 , MoS_2 등):

2) 안티모니(Sb) 기반 산화물: Sb_2O_3 , SbOx , Sb_2O_4

Sb_2O_3 는 200사이클 후에도 400mAh/g 이상 유지. 또한 그래핀 복합체 제작 시 훨씬 좋은 사이클 성능 확보 가능

• 3) 금속 황화물(MS): MoS_2

두 가지 반응 경로: 나트륨 삽입 (Intercalation) → 전환 반응 (Conversion → 금속과 Na_2S 생성)

층층 구조라서 나트륨 삽입에 적합. 이 기술은 Few-layer MoS_2 (얇은 층수) 제작, 그래핀 복합체(MoS_2 /Graphene), 단층 MoS_2 제작을 통해 성능 개선 가능(용량 확대)

• 4) 비층상 금속 황화물: FeS_2 , Sb_2S_3 , Ni_3S_2 등

FeS_2 는 과거에는 성능이 나빴지만, 최근 전해질 최적화(예: Diglyme 전해질)로 20,000사이클 이상 수명 달성한 연구도 있음

전환반응 기반 금속산화물 및 황화물 음극활물질 성능 비교

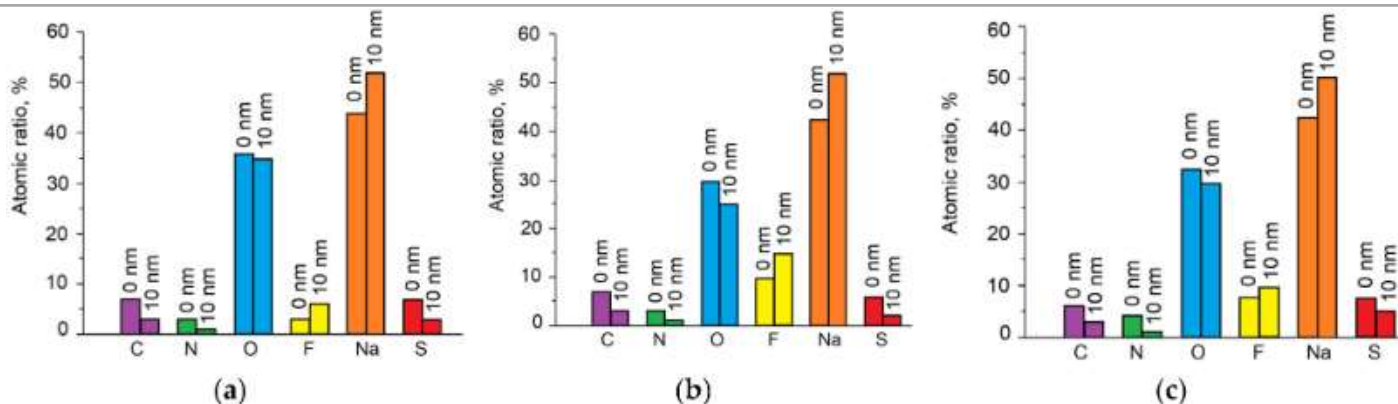
Material	Electrical conductivity (S cm^{-1})	Theoretical capacity (mA h g^{-1})	Abundance in the earth crust (ppm)
SnO_2	4.5×10^{-5}	782	2.2
Sb_2O_3	-	1102	0.2-0.5
MoS_2	3.3×10^{-7} (bulk)	670	1.5
SnS_2	2×10^{-3}	584	2.2
FeS_2	0.06^{-5}	893	41000

Sodium-ion 배터리 기술 방향

• SiB 배터리 기술방향 III. 전해질 개발

- SIB의 전해질은 SEI 개선을 위해 전해질 조성을 최적화하거나, 첨가제(FES 등)를 사용해서 인공 SEI를 만들려는 시도가 진행 중
대표적으로 탄산염계 전해질과 에테르계 전해질이 있음. 탄산염계 전해질은 SEI 보호력이 낮으나 에테르계는 보호력이 높음. 특히, Glyme(예: DME) 같은 에테르 용매와 NaFSI 조합은 매우 높은 품질의 SEI 형성
- 특이한 방법으로는 액체 암모니아 기반 전해질 ($\text{NaI} \cdot 3.3\text{NH}_3$ 등), SO_2 기반 전해질 ($\text{NaAlCl}_4 \cdot 2\text{SO}_2$) 등도 품질 좋은 SEI 형성으로 연구되고 있음
- 첨가제는 FEC가 가장 많이 연구되고 있음. FEC는 SEI를 더 단단하게 만들어주고 전해질 분해를 억제함. 다만, 나트륨 이온 배터리에서는 FEC 농도를 리튬보다 더 높게 써야함. 이에 어떤 연구에서는 FEC가 오히려 나쁘다는 결과도 있음
- 최근 기술 동향
 - 1) 수성 전해질(Aqueous Electrolytes): 환경친화적이고 비용 효율적이지만 전기화학적 안정창이 좁아 상업화까지 추가 연구가 필요
 - 2) 이온성 액체(Ionic Liquids): 비가연성과 높은 전기화학적 안정성을 제공하나, 비용이 높은 문제점 존재
 - 3) 고체-액체 혼합 전해질: 고체와 액체의 장점을 결합한 하이브리드 전해질 연구가 진행 중

전해질 종류 및 구성에 따른 SEI 조성 변화 비교 - a) 1.7M NaFSI in DME, b) 5.2M NaFSI in DME, c) 2.1M NaFSI in DME:BTFE



II. Sodium-ion 배터리 기술 개발 현황

Sodium-ion 배터리 기술 개발 현황

- SiB 배터리 기술 개발 현황 - 셀

- 중국

CATL(Contemporary Amperex Technology Co., Ltd.):

2024년 10월, CATL은 1세대 나트륨 이온 배터리인 'Freevoy' 배터리 공개. 이는 AB 배터리 시스템 통합 기술로 나트륨 이온 + 리튬 이온을 정해진 비율로 혼합해 직렬/병렬 연결한 것. 이를 통해 저온 주행거리 5% 개선. 이 때는 나트륨 이온을 리튬 이온 배터리 SOC(State of Charge) 보정용으로 사용해 시스템 정밀도를 30% 개선 시켜 주행거리를 10km 증가. 당시 에너지 밀도가 160Wh/kg. 당시 1세대는 2024년 상용화, 2027년까지는 2세대 배터리를 양산한다는 계획 발표

- 2025년 4월 발표한 Naxtra 승용차용 EV 배터리는 영하 40도에서도 90%의 사용 가능 전력을 유지하고 1kg당 175Wh의 에너지 밀도 달성. 이는 전 세계 나트륨 이온 배터리 중 가장 높은 수치이며 LFP 배터리와 유사
- 중국에서 나트륨 이온 뿐 아니라 리튬이온배터리에서도 가장 많이 연구되고 있는 분야가 동적 배터리임. 이를 2세대에도 적용했을 가능성 높음. 다만, 1세대 처럼 배터리 팩 레벨에서 리튬,나트륨 병직렬 조합인 단순 연결이 아니라 각각 셀마다 미세하게 리튬/나트륨 비율을 조절하고 동일 모듈 안에서도 각각 다른 온도/전압 구간을 맡게 했을 가능성 높음
- 양극활물질은 1세대와 유사하게 Prussian white계 소재로 연구가 진행되었을 것으로 예상되며, 음극활물질은 Porous hard carbon으로 추정됨
- 동사는 2025년 12월부터 'Naxin'이라는 브랜드로 대량양산에 들어갈 것을 발표. 이미 동사는 2023년 말 11Gwh 규모의 나트륨 이온 배터리 생산을 시작했으며 2030년까지 10GWh 추가 증설할 것을 발표했음



Sodium-ion 배터리 기술 개발 현황

- SiB 배터리 기술 개발 현황 - 셀

- 중국

Faradion:

중국 최초의 나트륨 이온 배터리 생산 라인이 2022년에 가동 시작. 그리드 규모의 에너지 저장과 전기 자동차의 상업적 활용에 중점

- HiNa Battery Technology:

1세대로 최대 155Wh/kg의 에너지 밀도를 갖춘 셀을 출시했으며 대량 생산을 준비 중

2025년 2세대 발표: 대형 트럭용 나트륨이온 배터리 출시. 에너지밀도는 226kWh/kg 추정

- 현재 ESS용 나트륨 배터리 적용에는 1, 2위가 Zhongke Haina와 Weike Technology가 차지

- 유럽

Altris (Sweden):

PB 기반 양극활물질 소재 전문. 비용 효율적인 고정형 에너지 저장 솔루션을 목표로 함

- Tiamat (France):

ESS 및 경량 EV용 나트륨 이온 배터리 개발

- 인도

Reliance New Energy Limited(Faradion의 소유주):

인도의 에너지 저장 기술 자립 추진에 힘입어 재생 가능 에너지 저장을 위한 나트륨 이온 배터리 개발

Sodium-ion 배터리 기술 개발 현황

- SiB 배터리 기술 개발 현황 - 소재

- 양극활물질

Zhongke Haina, Xiangying, Wanrun, Jiana, Ronbay, Zhongna Energy 등

폴리음이온 기반 양극활물질 2024년 하반기부터 대세로 떠오르는 중. NFPP 및 NFS 기술 확대 중
NFPP 및 NFS 양극활물질 기업은 Lepu, Jiana, Zhongna Energy 등이 있음

- 음극활물질

Baisige, BTR, Zhongke Haina, Rongna 등

주로 하드카본 적용

- 전해질

Saiwei, Tinci, Kunlun, Langu, Nachuang, Fengshan, Jinhui 등

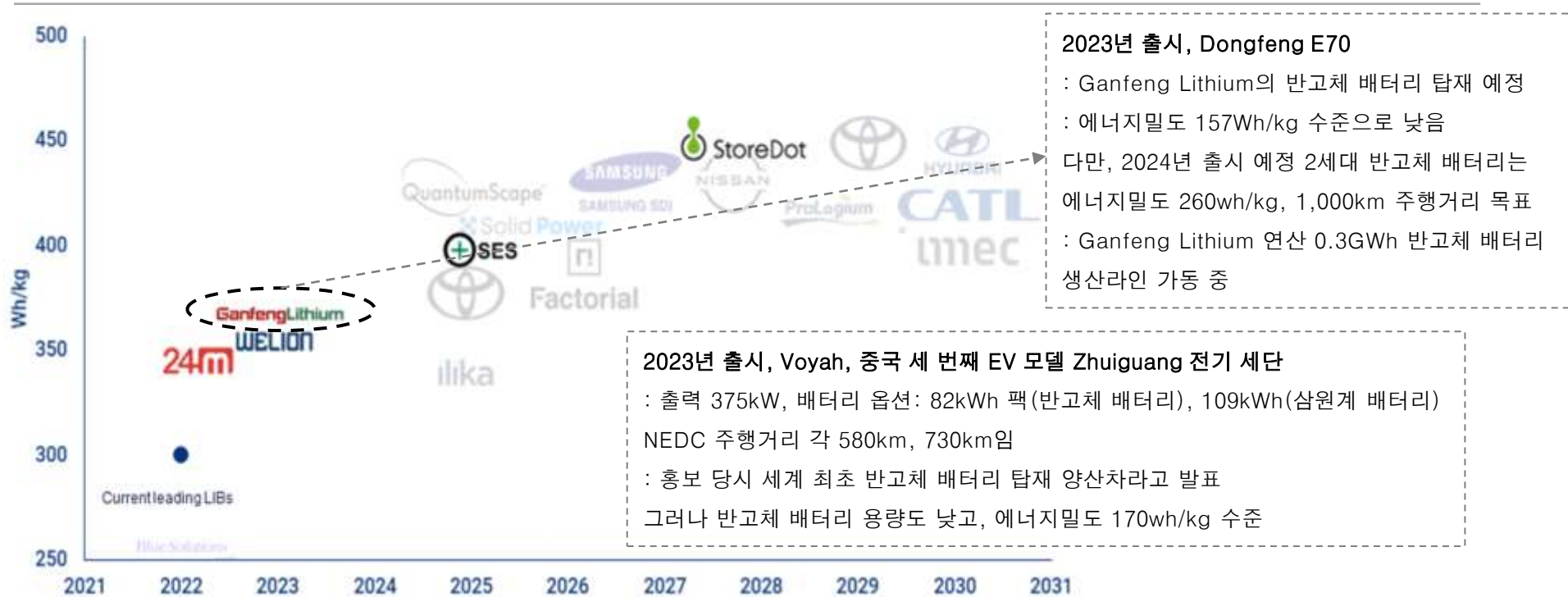
III. Sodium-ion에 대한 생각

Sodium-ion에 대한 생각

- CATL, SiB 2세대 발표 → 배터리 패러다임 전환?
- 중국은 신기술이 등장하면 이를 빠르게 양산하고 자국 OEM 기업을 중심으로 제품 적용을 확대하는 전략을 지속해 옴.
반복적인 시행착오를 통해 기술 완성도를 끌어올리는 것. 나트륨이온 배터리 뿐 아니라, 2023년부터 양산에 들어간 반고체 배터리도 같은 맥락
- 반고체 배터리의 경우 실제 전기차 적용 시 에너지 밀도가 기존 LFP 대비 낮은 수준에 머물렀음.
- 이는 중국 기업들의 대량 생산 능력과 기술 개발 속도가 빠르다는 점은 인정되지만, 대량 양산이 곧바로 시장 내 기술 채택 또는 배터리 기술 패러다임 전환으로 이어지는 것은 아니라는 것.
- 현재 전기차 산업에서 배터리 기술의 핵심 방향성은 '롱레인지 구현을 위한 가격 경쟁력, 고에너지 밀도, 그리고 안전성 확보'
- 이 세 가지 요건을 동시에 충족하는 기술력 확보가 중요하며, 해당 분야에서의 기술 경쟁은 한·중·일 3국이 유사한 수준에서 전개되고 있음.
- 관련 2차전지 배터리 기술은 '46시리즈 기술'
- 다만, 빠르게 중국 기업들의 배터리 기술이 올라오고 있는 만큼 46시리즈 기술력도 지속적인 업데이트 필요

Sodium-ion에 대한 생각 – 반고체를 통해 보자

글로벌 반고체 배터리 양산 로드맵



자료:wood Mackenzie, 유안타증권 리서치센터

Sodium-ion에 대한 생각 - 반고체를 통해 보자

• 반고체 기술 현황

- Guoxuan: 2023년 상반기 1세대 반고체 배터리 셀 대량 생산 시작 발표
2022년 5월 개발 완료된 1세대 반고체 팩 세부 스펙은 셀 에너지밀도 360wh/kg, 팩 에너지밀도 260wh/kg, GCTP 72%, 용량 160kWh, 주행거리 1,000km, 양극재 NCM을 적용. 2세대 목표 400wh/kg
- Farasis: 2022년 출시된 1세대 반고체 배터리(슈퍼 파우치 배터리) 2023년 1월 일부 양산 중 (에너지밀도 330Wh /kg). 양극재는 NCM811, NCM 622 파우치 셀만 제공. 음극은 실리콘 음극 사용.
동사 제품 탑재한 메르세데스 벤츠 EQS도 유럽 시장에서 수주 시작
- WeLion: 설립자 Li Hong, China EV 100 포럼에서 NIO와의 협력 확인.
1회 충전 주행거리 1,000km 하이브리드 고체-액체 전해질 배터리 ET7에 탑재 발표.
NIO는 2023년 상반기 150kWh 용량, 360Wh/kg 에너지밀도 반고체 배터리 팩 공급받게 될 것이라 밝힘.
현재 산둥성에서 100GWh 규모의 배터리 착공. 투자 규모 400억 위안(63억 달러), 이 중 102억 위안은 반고체, 전고체 배터리 20GWh에 투자



• 이 자료에 게재된 내용들은 본인의 의견을 정확하게 반영하고 있으며 타인의 부당한 압력이나 간섭 없이 작성되었음을 확인함.

(작성자: 이안나)

- 당사는 자료공표일 현재 동 종목 발행주식을 1%이상 보유하고 있지 않습니다.
- 당사는 자료공표일 현재 해당 기업과 관련하여 특별한 이해관계가 없습니다.
- 당사는 동 자료를 전문투자자 및 제 3자에게 사전 제공한 사실이 없습니다.
- 동 자료의 금융투자분석사와 배우자는 자료공표일 현재 대상법인의 주식관련 금융투자상품 및 권리를 보유하고 있지 않습니다.
- 종목 투자등급 (Guide Line): 투자기간 6~12개월, 절대수익률 기준 투자등급 4단계(Strong Buy, Buy, Hold, Sell)로 구분한다
- Strong Buy: 30%이상 Buy: 10%이상, Hold: -10~10%, Sell: -10%이하로 구분
- 업종 투자등급 Guide Line: 투자기간 6~12개월, 시가총액 대비 업종 비중 기준의 투자등급 3단계(Overweight, Neutral, Underweight)로 구분
- 2014년 2월21일부터 당사 투자등급이 기존 3단계 + 2단계에서 4단계로 변경

본 자료는 투자자의 투자를 권유할 목적으로 작성된 것이 아니라, 투자자의 투자판단에 참고가 되는 정보제공을 목적으로 작성된 참고 자료입니다. 본 자료는 금융투자분석사가 신뢰할만 하다고 판단되는 자료와 정보에 의거하여 만들어진 것이지만, 당사와 금융투자분석사가 그 정확성이나 완전성을 보장할 수는 없습니다. 따라서, 본 자료를 참고한 투자자의 투자 의사결정은 전적으로 투자자 자신의 판단과 책임하에 이루어져야 하며, 당사는 본 자료의 내용에 의거하여 행해진 일체의 투자행위 결과에 대하여 어떠한 책임도 지지 않습니다. 또한, 본 자료는 당사 투자자에게만 제공되는 자료로 당사의 동의 없이 본 자료를 무단으로 복제 전송 인용 배포하는 행위는 법으로 금지되어 있습니다.

