



# 에너지 스토리지의 미래

글로벌 규모의 완벽한 배터리를 향하여

Gene Berdichevsky, CEO & Gleb Yushin, CTO

Sila

2020년 9월 2일

## 개요

- 향후 5~10 년 내에 리튬이온(Li-ion) 배터리 셀은 킬로와트시(kWh)당 50 달러가 될 것이며, 급속 충전이 가능하고, 10,000 회 이상의 사이클, 100 만 마일 이상, 30 년 이상의 수명을 제공하며 전 세계에서 발견되는 풍부한 원자재로 생산되고 재활용이 가능할 것으로 전망된다.
  - 현재 이러한 특성 일부를 구현했다는 주장도 있지만, 배터리 고유의 균형을 타협하지 않으면서 모든 것을 단일 셀에 통합하는 것이 과제다(예를 들어, 100 만 마일 성능의 배터리가 kWh 당 200 달러라면 소용이 없음). 이러한 조합을 달성하려면 5~10 년간의 글로벌 혁신이 필요하다.
- 에너지 스토리지 기술의 가장 혁신적인 시기는 이제 막 시작되었으며 향후 10 년간 지속 전망이다.
- 2030 년부터 이번 세기 중반까지 이러한 신기술은 세계적으로 보기 드문 속도로 확장될 것이며, 화석 연료를 대체하려면 엄청난 규모가 필요하다.
- 이러한 전환은 전기차(EV) 수요에 의해 주도될 것이며, 자율주행차와 간헐적인 재생 에너지의 저장을 통해 더욱 가속화될 전망이다. 이를 위해서는 전 세계 배터리 생산량이 EV 보급 이전의 연간 20GWh 에서 2030 년까지 연간 2,000GWh 로 증가해야 하며, 2050 년 모든 EV 및 재생 에너지 기반의 글로벌 에너지 및 운송 시스템이 있는 세계에서는 연간 30,000GWh(약 1,000 배 이상)로 증가해야 한다.
- 리튬이온 배터리가 전부를 차지하지는 않겠지만, 주요 핵심 위치를 차지할 것으로 예상된다. 리튬이온이 아닌 배터리는 틈새 응용 분야에서 찾아볼 수 있을 것이나, 리튬이온 기술에 비해 상대적으로 작은 규모가 될 것이다.
  - 전고체 배터리는 기껏해야 틈새 시장을 차지하고 혁명과는 무관할 가능성이 높음
- 에너지 스토리지 전환은 정책이 아니라 더 나은 기술, 제품, 경제성에 의해 추진될 것이다. 강력한 국가 기술 및 제조 정책은 장기적인 구조적 경제적 이익을 창출할 뿐만 아니라 변화를 가속화하는 데 도움이 될 수 있다.
- 스토리지 혁신의 미래는 신소재 기술과 배터리 제조 공정 혁신이라는 두 가지 주요 형태로 나타날 것이다.
  - 고급 리튬이온 기술의 첫 번째 핵심은 실리콘 음극임. 이를 위해서는 다음과 같은 솔루션이 필요:
    - 하이브리드로 시작하더라도 흑연을 완전히 대체할 수 있는 기술
    - 주요 스웰링 문제를 극복하기 위한 고급 엔지니어링 입자 설계
    - 이 설계를 산업적 규모로 생산할 수 있는 새로운 대량 제조 기술
    - 저렴한 비용으로 수백만 톤까지 확장할 수 있는 글로벌 원자재 투입
  - 실리콘 음극은 다른 신소재 혁신의 활용을 가능하게 함:
    - 귀한 니켈과 코발트 양극재를 더 흔한 철과 구리로 대체
    - 세라믹 분리막이 기존의 폴리머 분리막을 대체
    - 고급 액체 전해질이 사이클 수명과 신뢰성 연장
  - 새로운 소재와 화학 외에도, 새로운 제조 공정은 다음을 가능하게 함:
    - 환경 친화적이지 않은 유기 용제 사용 배제
    - 현재 무작위로 제작된 전극을 엔지니어링 전극으로 대체
    - 셀 조립, 활성화, 에이징, 팩 통합의 재구상

- 새로운 리튬이온 기술은 자동차뿐만 아니라 소비자 전자제품 시장에도 큰 영향을 미칠 것이다. 소비자 전자제품 시장은 더 작은 규모, 덜 까다로운 제품 요건, 현재 배터리 성능에 대한 고객의 강한 불만으로 인해 새로운 기술을 더 빨리 채택할 수 있다. 두 시장과 호환되는 기술은 성공할 수 있는 가장 좋은 기회를 갖게 된다. 소비자 전자제품 제품은 개선점을 더 중시하고 자동차 시장에 진출할 수 있는 길을 열어주기 때문이다.
- 오늘날의 지배적인 자동차 배터리 제조사(CATL, LG, Panasonic, 삼성, SK)는 신규 진입업체로 인해 흔들릴 수 있지만, 기존의 리튬이온 제조 공정과 호환되는 기술을 빠르게 채택한다면 스스로의 운명을 통제할 수 있다. 일부 새로운 셀 제조업체들은 그들의 대열에 합류할 것이며, 만약 기존 업체들이 신기술에 느리게 접근할 경우 이 분야의 선두 기업이 될 수 있다.
- 배터리 생산량이 2,000GWh로 증가함에 따라 2030년까지 최대 1억 대의 EV가 도로에 등장할 수 있다.
- 2020년대 중반 전기차 도입이 급격히 가속화되면서 지금 전동화에 올인하지 않는 자동차 회사들은 큰 혼란을 겪게 될 것이다. 많은 기업이 충분히 신속하게 움직이지 않을 것이며, 뒤늦게 EV 혁명에 참여하려고 하는 기업의 절반은 심각한 파산 위험에 처하게 될 전망이다.
- 이번 세기 중반까지 이러한 에너지 스토리지의 획기적인 발전은 재생 에너지 발전의 채택 증가와 세계 경제의 탈탄소화를 위한 길을 닦을 것이며, 운송 분야를 변화시키고, 국가들이 에너지 수요를 충족하기 위해 자국 내 풍력 및 태양광 자원을 사용할 수 있게 할 것이다.



역대 수치 출처: H. Takeshita

## 대중 시장 리튬이온 셀의 가격

그림 1. 리튬이온 배터리의 가격은 90년대 후반과 2000년대 초반에 극적으로 하락했는데, 특히 18650 원통형 셀 팩터 수십억 대가 생산되어 거의 모든 노트북에 사용되었다. Tesla는 최초의 현대식 EV를 만들기 위해 이 범용 노트북 셀을 사용했다.

## 서론 - 미래의 비전

지난 30년간 세계는 오늘날 지구상의 거의 모든 사람들이 주머니에 넣고 다니는 장치의 발명으로 번모했다. 이 장치는 매년 수십억 대가 생산되고 있으며 세기 중반까지 연간 수조 대의 생산량에 도달할 수 있다. 물론 이 장치는 평범한 리튬이온 배터리다.

반도체, 라디오, 그리고 인터넷에 의해 차례로 가능해진 휴대폰으로 정의되는 기술의 현대에 대해 생각해 볼 때, 1970년대 말과 1980년대 초 기본적인 리튬이온 배터리의 발명으로 지난해 노벨 화학상을 수상한 Goodenough, Whittingham, Yoshino의 발명이 없었다면 이 이동성의 세계는 오지 않았을 것이다.<sup>1</sup>

리튬이온 배터리 기술은 1991년 상용화 이후, 이전의 배터리 기술보다 에너지 저장 능력이 4배 향상되었다. 이러한 개선이 없었다면, 휴대폰은 노트북 크기가 되었거나 점심 시간이 되면 충전해야만 했을 것이다. 마찬가지로, 거의 대부분 키보드 아래에 배터리가 있는 노트북은 너무 무거워서 책상 위에 놓고 절대 들고 다니지 않았을 것이다. 간단히 말해, 리튬이온 배터리가 없었다면 오늘날과 같은 모바일과 커넥티드의 세계는 없었다.

미래에 리튬이온 배터리는 수십억 명의 사람들을 인터넷상의 장소뿐만 아니라 육상, 경우에 따라서는 해상 및 항공 이동 수단으로 물리적 세계의 장소로도 데려갈 것이다. 현대의 전기차는 이미 그 가능성을 보여주었지만, 가격 2배 절감(그림 1), 에너지 스토리지 2배 개선(그림 2), 충전 속도 3배 증가, 수명 10배 연장이 가능하여 화석 연료에서 재생 에너지로의 전환을 가속화할 것이다. 이 보고서에서는 우리 업계가 10년 동안 겪게 될 것으로 예상되는 주요 혁신과 이것이 세계에 미칠 영향에 대해 논의할 것이다.

## 오늘날에 이르기까지(역사)

약 200년 전에 Alessandro Volta가 첫 번째 배터리를 발표한 이후, 학계에서 수백 가지의 충전식 배터리 화학 구성이 발견 및 테스트되었으며 수십 가지는 어떤 형태로든(다수는 정식 생산되지 않음) 상업적으로 개발되었다. 그러나 단 네 가지의 충전식 화학 구성만이 큰 상업적 타당성을 갖고 있다. 네 가지 화학 구성은 각각 납산, 니켈카드뮴, 니켈수소합금, 그리고 기존 리튬이온(인터칼레이션 유형)으로, 과학적 혁신과 엄청난 상용화 노력을 필요로 했다. 미래에 다섯 번째 화학 구성인 고급 리튬이온은 그러한 것을 더 많이 필요로 할 것이다.

## 고급 리튬이온 기술의 미래



Wh/L: Wh/L, T: Wh/L

그림 2. 에너지 밀도가 증가하면 셀은 더 많은 전하를 저장할 수 있으며 대량 제조 규모는 셀 비용을 절감할 수 있다. 이 조합은 kWh 당 가격을 낮추는 강한 원동력이 된다. 그러나 오늘날 사용되는 화학 구성은 한계에 도달했고 새로운 기술 곡선이 필요하다.

<sup>1</sup> John Goodenough, Stan Whittingham, Akira Yoshino 외에도, 기술을 실용적이고 상업적으로 만드는 데 필요한 통찰력을 가진 뛰어난 과학자와 엔지니어로 Michel Armand, Doron Aurbach, Samar Basu, Peter Bruce, Yet-Ming Chiang, Jeff Dahn, Kristina Edström, Robert Huggins, Ned Godshall, Arumugam Manthiram, Koichi Mizushima, Linda Nazar, John Newman, Yoshio Nishi, Emanuel Peled, Jean-Marie Tarascon, Michael Thackeray, Richard Yazami 등을 비롯하여 여기 열거하지 않은 많은 이들이 있었다.

배터리는 항상 상호 절충을 수반한다. 한 성능 영역에서 가능성을 보여주는 신기술이 다른 영역에서는 문제를 일으키는 경우가 많다. 대학 연구실에서는 대부분의 혁신이 유지된다. 가장 중요한 혁신은 다른 영역에서 이미 우수한 성능을 유지하면서 동시에 여러 성능 매개변수를 개선할 수 있는 혁신이다.

리튬이온 기술이 시장에 출시되자, 더 높은 성능으로 인해 니켈수소합금에 비해 더 나은 선택이 되었다. 처음에는 대부분의 응용 분야에서 비용이 만만치 않았지만, 셀 제조가 확장되기 시작하면서 리튬이온은 90년대 후반부터 비용 절감과 함께 엄청난 성능 향상을 거쳤다. 가장 일반적으로 생산되는 18650 폼 팩터가 인기를 잃은 후 새로운 기기마다 더 고가의 맞춤형 파우치 셀이 표준이 되어 코발트와 니켈 가격이 일시적으로 상승하면서, 2000년대 중반에는 비용 개선 속도가 둔화되었다. 그러나 순전히 EV 출하량 규모에 힘입어, 2010년 누적 생산량이 10만 MWh를 넘어서면서 비용 절감 효과가 다시 증가했다. 태양 에너지 비용의 엄청난 하락을 추적하고 예측한 스완슨 법칙(Swanson's Law)<sup>2,3</sup>에 영감을 받아, 우리는 수많은 출처의 데이터를 자체적인 업계 경험과 함께 취합하여 역사적으로 검토하고 리튬이온 기술의 비용이 규모에 따라 어떻게 될지 예측했다. 최근 비용 곡선의 평탄화는 생산 증가 속도가 계속 빨라짐에도 불구하고 배터리 비용을 지속적으로 낮추고 EV 채택을 가속화하려면 기본 리튬이온 화학 구성의 양적 확장 이상의 무언가가 필요하다는 것을 의미한다. 2030년까지 1억 대의 전기차가 운행할 수 있게 한다는 목표를 달성하기 위해서는 혁신이 필요하다(그림 3).

### 규모에 따른 리튬이온 배터리 제조 학습



그림 3. 기존 리튬이온 배터리의 제조 학습 곡선은 그 규모가 이전에는 헤아릴 수 없었던 양에 도달했음에도 불구하고 평평해지고 있다.

2 [https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s_law)

3 Swanson, R.M. (2006), A vision for crystalline silicon photovoltaics. Prog. Photovolt: Res. Appl., 14: 443-453. doi:10.1002/pip.709

## 오늘날 리튬이온 배터리의 한계와 절충

오늘날 기존 리튬이온 배터리(그림 4)는 kWh 당 약 \$100 에 생산할 수 있으며, 에너지 밀도는 720Wh/L 이상이고, 10 년간 지속된다. 성능 저하가 오기 전에 최대 5,000 회의 완전 충전-방전 주기를 완료할 수 있으며, 10 분 이내에 재충전할 수 있다. 하지만 한 가지 함정이 있다. 오늘날 어떤 배터리도 이 모든 요소를 동시에 달성할 수 없다.

리튬이온 배터리에서 가장 중요한 매개변수는 서로 긴장 관계에 있다. 생산되는 모든 리튬이온 배터리는 일부 성능 영역에서 다른 영역에 유리하게 절충되어야 한다. 이는 또한 우리 분야에서 이루어진 많은 비교가 오해의 소지가 있거나 잘못된 이유이기도 하다. 본질적으로 사과 맛과 오렌지 맛 리튬이온 배터리를 서로 비교하는 것과 같은 것이다.

모든 매개변수 중에서 \$/kWh 는 무엇보다 우선시되며, 특히 EV 응용 분야의 경우 사이클 수명 및 전력과 같은 다른 매개변수는 중간 임계값만 충족하면 된다. 이는 \$/kWh 가 EV 에서 가장 크고 고가이며 가장 중요한 구성 요소인 배터리 시스템의 비용을 결정하기 때문이다. 이어서 배터리 팩은 주행 거리, 가속도, 충전 시간, 안전성, 비용 등 자동차의 가장 중요한 매개변수를 결정한다. 따라서 아래에서 논의하는 혁신은 에너지 밀도 증가에 중점을 두더라도, 항상 \$/kWh 기준으로 비용을 절감할 수 있는 능력으로 판단된다.

**기본과 절충.** 리튬이온 배터리의 절충에 대한 상세한 내용을 단순화하려면, 리튬이온 배터리의 두 가지 주요 특징인 에너지 셀과 파워 셀을 고려하는 것이 유용하다. 리튬이온 배터리에서 대부분의 절충은 이 두 가지 유형의 최적화된 셀로 귀결되는 하나의 주된 절충으로 요약될 수 있다. 첫 번째 유형의 셀은 비용과 에너지 밀도를 중시하며(Panasonic 의 셀과 같음) ‘에너지 셀’이라고 부를 수 있다. 두 번째 유형의 리튬이온 배터리는 사이클 수명과 충전 속도를 중시하며(CATL 의 리튬인산철 셀과 같음) ‘파워 셀’이라고 부를 수 있다. 아래에서 다른 미묘한 차이를 다루지만, 이 절충은 고급 리튬이온 기술이 그 잠재력을 최대한 발휘하기 위해 극복해야 하는 핵심적인 절충이다. 장점이 혼합된 중간 버전을 만들 수도 있지만, 단점도 혼합되거나 결합될 수 있다.

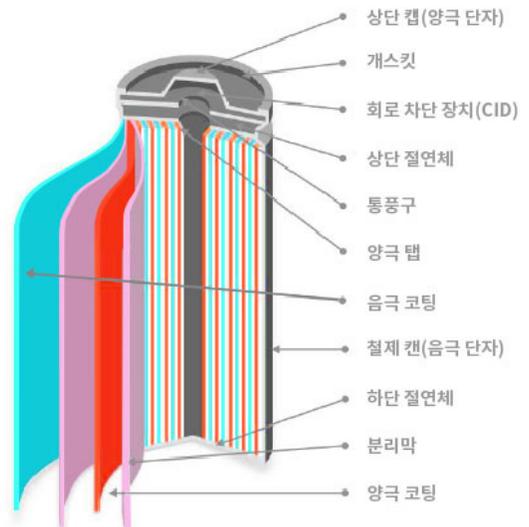


그림 4. 전형적인 원통형 리튬이온 셀의 단면으로 전극이 어떻게 층을 이루고 감겨 있는지 보여준다.

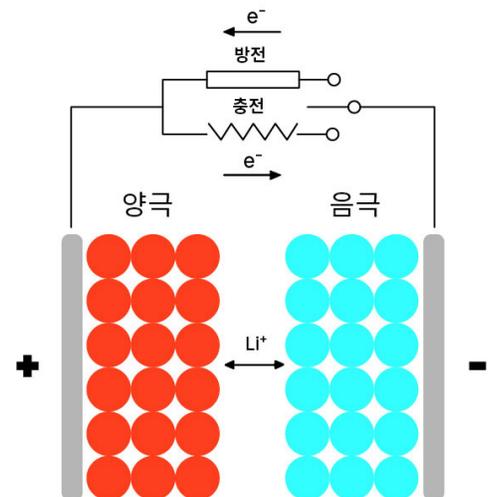


그림 5. 리튬이온 셀의 기본 작동에는 리튬 원자가 양전하(이온화) 상태로 방전 중에 음극에서 양극으로, 충전 중에는 그 반대로 이동하는 것이 포함된다. 그 이동은 다공성 분리막을 통해 액체 전해질을 거쳐 이루어진다. 그 동안 리튬 원자의 전자는 부하 또는 충전기와 같은 외부 회로를 통해 이동한다.

두 가지 유형의 셀에 대해 더 깊이 논의하기 전에 명칭에서부터 리튬이온 배터리의 기본을 살펴보도록 하자(그림 5, 6). “리튬이온”은 이온화(양전하)된 형태의 리튬이 시스템의 에너지 운반체 역할을 하는 것을 나타내는 매우 포괄적이고 중요한 용어다. 그러나 그 에너지 운반체는 활발히 충전되거나 방전되지 않을 때 집이 필요한데, 그것이 바로 음극과 양극 물질이다. “Li-ion”으로 통칭되는 셀을 포함하여 리튬을 에너지 운반체로 사용하는 모든 셀은 “리튬이온”이라고 불릴 수 있다. “LCO”, “리튬인산철 또는 LFP”, “NCA”, “NCM”, “리튬 금속”, “전고체”, “고체 전해질” 등은 주로 배터리의 핵심 특징 구성 요소를 나타내며, 나머지 구성 요소가 가장 표준적인 리튬이온 종류임을 의미한다. 그 차이는 아래에서 다루고 있다(그림 7).

기존의 기본 Li-ion 배터리는 충전 중에 결정질 음극 물질 내의 작은 구멍에 리튬 원자(이온 형태)가 삽입(개재)되는 “인터칼레이션” 메커니즘이라고 하는 방식으로 작동한다. 그런 다음 방전 중에는 결정질 양극 물질 내의 작은 구멍으로 이동하게 된다.<sup>4</sup> 이 과정은 화학 결합이 깨지지 않고 부피가 크게 변하지 않아 거의 완벽하게 가역적이다. 자주 사용되는 비유를 빌리자면, 음극은 배터리가 충전될 때 리튬이온이 자리를 차지하는 객석이고, 양극은 배터리가 방전될 때 리튬이온이 이동하여 자리를 차지하는 홀 건너편의 두 번째 객석이다(다소 불완전하지만 유용한 비유로 이후 다시 사용함).

---

4 N. Nitta, F. Wu, J.T. Lee, G. Yushin “Li-ion Battery Materials: Present and Future” *Materials Today*, 18(5) p. 252-264, 2015 (DOI:10.1016/j.mattod.2014.10.040)

음극의 경우, 오늘날 리튬이온 배터리에 의미있게 사용되는 단 하나의 물질은 흑연질 탄소다. 리튬이온 음극재 시장의 99%가 몇 종류의 흑연으로 구성되어 있다.

양극의 경우 자동차용 리튬이온 배터리에 사용되는 기존 물질의 두 가지 주요 제품군이 있으며, 첫 번째 제품군에는 몇 가지 하위 유형이 있다. 여기에는 (i) 고전압, 고용량 Ni-rich 리튬 니켈 코발트 알루미늄 산화물(NCA) 또는 리튬 니켈 코발트 망간 산화물(NCM)<sup>5</sup>, (ii) 저전압, 저용량 리튬 인산 철 LiFePO<sub>4</sub>(LFP)가 있다.<sup>6</sup> 니켈과 코발트 금속의 비용이 철에 비해 훨씬 높음에도, NCA 및 NCM 기반 리튬이온 배터리 셀은 LFP 기반 배터리 셀에 비해 동일한 에너지(즉, Wh/L 기준)에서 1.3~2 배 더 작고 25% 더 저렴한다(\$/kWh 기준), 이는 LFP의 에너지 밀도가 훨씬 낮기 때문이다. 사실상, NCA 또는 NCM 으로 만들어진 셀이 더 비싸 분자 "\$"가 더 크지만, 동일한 셀에서 에너지 "kWh"의 분모가 더 크기 때문에 에너지 저장 비용 \$/kWh 가 낮아지게 된다.

**에너지 셀.** 오늘날 최고의 에너지 셀은 이 섹션의 시작 부분에서 설명한 몇 가지 우수한 특성인 720Wh/L 의 에너지 밀도 및 \$100/kWh 의 생산 비용을 달성할 수 있다. 그러나 완전 충전/방전 사이클 5,000 회에는 도달할 수 없으며, 약 1,000 회의 완전 사이클 또는 이에 상응하는 전체 사이클 후에는 성능이 저하된다. 즉, 200~300 마일 EV 의 경우 20 만~30 만 마일을 달리면 상당한 성능 저하가 시작된다.



그림 6. 상단의 5 개 이미지는 리튬이온 셀의 다양한 폼 팩터를 보여준다. 프리즘형 및 파우치형은 자동차 시장용, 원통형, 파우치형, 버튼형은 전자제품 시장용이다. 리튬이온 배터리의 폼 팩터 또는 응용 분야에 관계없이, 광학 단면 이미지 (하단)는 오늘날 모든 리튬이온 셀에서 볼 수 있는 레이어 구조를 나타낸다.

5 T. Kim, W.T. Song, D.Y. Son, L.K. Ono, Y.B. Qi, "Lithium-ion Batteries: Outlook on Present, Future, and Hybridized Technologies" Journal of Materials Chemistry A, 7(7), p. 2942-2964, 2019 (DOI:10.1039/c8ta10513h)  
 6 J.J. Wang, X.L. Sun, "Olivine LiFePO<sub>4</sub>: the Remaining Challenges for Future Energy Storage" Energy & Environmental Science, 8(4), p. 1110-1138, 2015 (DOI:10.1039/c4ee04016c)

자동차 분야에서 이러한 셀은 거의 모든 경우에 흑연 음극과 함께 NCA 또는 NCM(일반적으로 NCM-622 나 최근에는 NCM-811 로, 이 숫자는 니켈, 코발트, 망간의 상대 비율을 나타냄. 즉, 8:1:1 비율은 6:2:2 보다 적은 코발트를 사용함) 양극을 사용한다. 이 보고서를 작성하는 현재 생산되는 최고의 에너지 셀은 Tesla 가 사용하는 Panasonic 2170 인 것으로 보인다. 이 셀은 가장 높은 니켈 함량을 사용하며(양극의 성능을 높이기 위해) 흑연 음극에 약 5%의 실리콘을 혼합하여 음극 성능을 높였다. 이는 720Wh/L 의 가장 높은 에너지 밀도 셀을 만들어 낸 동시에, 가장 저렴한 셀로 판명되었다. 그 이유는 간단하다. \$/kWh 기준으로 비용을 측정하므로, 셀의 에너지 스토리지(kWh)가 증가할수록 셀 자체의 비용이 상대적으로 일정하게 유지되더라도 \$/kWh 가 낮아진다. 셀에 더 많은 에너지를 담을수록 \$/kWh 는 낮아지게 된다. 그러나 에너지를 고려한 설계는 다음에 다룰 몇 가지 이유로 인해 배터리의 사이클 수명과 충전 속도를 저하시킨다.

**파워 셀.** 오늘날 최고의 파워 셀은 처음에 설명한 다른 우수한 최신 속성인 5,000 회의 충/방전 사이클과 10 분의 충전 속도를 달성할 수 있다. 그러나 이러한 셀은 \$/kWh 기준으로 25~50% 더 높아 에너지 셀과 동일한 비용에 도달하지 못하며, 에너지 밀도는 450Wh/L 로 에너지 셀의 720Wh/L 에 비해 낮다. 파워 셀이 가진 빠른 충전 속도의 장점과 낮은 에너지 밀도의 단점은 객석 비유를 더 발전시켜 설명할 수 있다. NCA 와 NCM 객석을 비교했을 때, LFP 객석은 같은 크기인데 설치된 좌석이 3 분의 1 밖에 되지 않는다고 상상해 보자. 다른 모든 좌석은 제거되어 모든 의자 사이마다 통로가 생겼다. 이렇게 하면 객석에 입장하는 모든 사람(리튬이온)이 큰 어려움 없이 좌석으로 갈 수 있다. 동시에, 좌석이 절반 뿐이기 때문에 객석은 절반만 채워진다.

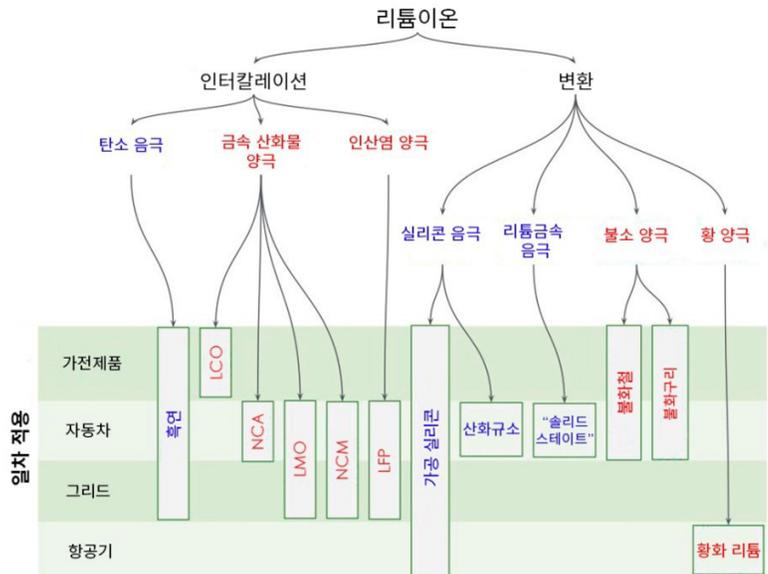


그림 7. 리튬이온 배터리 가계도. 모든 음극과 양극은 적절한 리튬이온 셀을 만들기 위해 함께 작동할 수 있다. 자동차 셀의 다음 단계는 흑연을 가공 실리콘 음극으로 대체하는 것이다.

높은 kWh 당 비용과 낮은 에너지 밀도의 단점에도, 파워 셀은 중국에서 EV 용으로 매우 인기가 있으며 Tesla 도 2021 년에 중국 시장에서 이 배터리로 차량을 출시할 것이라는 소문이 있다. 이는 또한 많은 경우 전력망 응용 분야에 가장 적합한 선택이 될 수 있다. 낮은 에너지 밀도와 kWh 당 비용에도 불구하고 LFP 양극 화학 구성이 다시 인기를 얻고 있는 주요 이유로는 다음 네 가지가 있다.

- 첫째, NCM 과 NCA 에 필요한 니켈과 코발트 모두 공급에 한계가 있다. 코발트와 니켈은 광산에 경제적으로 수익을 안겨줄 수 있는 가격으로 운송의 완전 전기화를 달성할 수 있을 만큼 공급이 충분하지 않다. 향후 10~20 년 내에 이러한 고급 광석이 고갈이 예상됨에 따라 가격 변동성이 발생하고 이미 비싼 금속의 가격이 전반적으로 상승하게 될 것이다.<sup>7</sup> 또한, 대부분의 코발트와 니켈 광산은 북미, 유럽, 동아시아 등 주요 전기차 시장 밖에 위치해 있다. 이러한 광산 중 일부는 콩고와 같이 노동 관행이 열악한 국가에 있다.<sup>8</sup>

7 <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05752-3>

8 <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/>

- 둘째, LFP 의 더 낮은 전압은 양극의 전해질 산화를 최소화하고 이 화학 구성에 대해 더 긴 전체 수명 및 사이클 수명을 가능하게 한다(더 단순한 냉각을 사용하는 경우에도). 30 만 마일 이상의 수명을 가진 현재의 배터리는 소비자용 EV 에 충분하지만, 자율주행차, 버스, 트럭의 출현은 LFP 가 달성할 수 있는 100 만 마일 이상의 배터리 수요를 창출할 것이다(예: 200 마일 범위 X 5,000 사이클 = 100 만 마일). 전력망 스토리지의 급속한 확대는 15 년간 거의 매일 5,000 사이클이 적합한 수요에 유사하게 기여할 것이다.
- 셋째, LFP 셀은 배터리가 자체 에너지로부터 발화하는 현상을 일컫는 기술 용어인 "열 폭주"에 덜 취약하며, 자체 발열을 유발하는 내부 저항이 적기 때문에 정상 작동 시 더 낮은 온도로 작동할 수 있다. 이러한 요인이 결합되어 LFP 셀로 만든 배터리 팩은 극히 단순한 냉각 기술로 작동하여 팩 제조간접비, 무게, 배터리 관리 시스템 복잡성을 낮춘다.
- 마지막으로, 셀 제조 비용의 점진적인 감소는 양극재 비용을 최종 셀 가격을 결정하는 가장 지배적인 요인으로 만들 것이다. 이러한 모든 요인으로 인해 LFP 배터리 팩은 NCA 및 NCM 기반 배터리 팩에 경쟁력 있는 가격이 책정될 수 있으며, 니켈 또는 코발트 가격이 공급 부족으로 인해 상승할 경우 가격이 더 저렴해진다.

## 기회 - 차세대 화학 구성 및 소재

배터리 성능의 이론적 한계는 항상 음극, 양극, 전해질, 분리막 같은 주요 구성 요소에 의해 제한된다. 그러나 이러한 성능 목표의 실질적인 실현은 제조의 우수성에 의해 제한된다. 이 섹션에서는 리튬이온 배터리의 구성 요소에서 기대되는 혁신을 다룬다. 다음 섹션에서는 이러한 구성 요소를 조립하는 데 있어 제조 혁신에 대해 다룰 것이다.

**고급 음극 - 실리콘.** 단기적으로 고급 리튬이온 배터리에 가장 큰 영향을 미칠 혁신은 실리콘 음극이 될 것이다. 흑연은 다른 어떤 구성 요소보다 더 많은 공간을 차지하는 배터리의 약한 고리이기 때문에, 실리콘 음극은 큰 이득을 주는 것뿐만 아니라 다른 혁신이 큰 영향을 미칠 수 있는 기회도 열어준다.

기본(인터칼레이션 유형) 음극재는 흑연으로, 일반적으로 천연 흑연과 합성 흑연을 혼합하여 사용한다. 흑연을 완전히 대체할 수 있는 초고용량 실리콘(Si) 음극의 출현은 리튬이온 셀의 에너지 밀도를 높이고 특히 에너지 셀의 경우 리튬이온 배터리 비용을 크게 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있다(그림 8).

실리콘은 인터칼레이션 메커니즘을 사용하여 리튬이온을 저장하지 않는다. 대신, 실리콘과 리튬 원자가 전기화학적 합금을 형성하여 충전-방전 사이클 동안 화학적 결합을 끊고 복원하는 소위 "변환" 메커니즘에 의해 작동한다. 변환이라는 명칭은 한 구조에서 다른 구조로 변환되거나 전환되는 것에서 나온 것이다. 기본 인터칼레이션 반응은 셔츠 주머니에 천 조각(인터칼레이션된 리튬 원자)을 채운 다음 없애는 것이라고 생각하면 된다. 같은 방식으로, 변환 반응은 완전히 새로운 큰 천 조각을 셔츠에 꿰매서 매번 잘라내는 것으로 비유할 수 있다. 변환 반응으로 만들어진 결합은 훨씬 더 강하지만(따라서 더 많은 에너지를 저장 가능), 장기적인 손상 없이 반복 가능한 방식으로 만들고 끊기가 더 어렵다.

Si 음극 사이클 능력을 달성하는 것은 기술적으로 더 어렵다. 최초의 학문적 발견은 1953~1956 년에 이루어졌으며,<sup>9,10</sup> 최초의 현대적 상업적 노력은 2006 년부터 시작되었다. 긴 개발 시간에도 불구하고, 실리콘 음극이 흑연 음극을 완전히 대체한 대용량 상용 리튬이온 배터리는 아직 없다. 그것이 이루어질 경우, 그 보상은 기다릴만한 가치가 있다. 실리콘 우주 음극과 짝을 이루는 NCA 또는 NCM 양극이 있는 자동차 셀은 에너지 밀도를 최대 50%까지 증가시켜 10 년 이내에 kWh 비용을 30~40%까지 낮출 것으로 예상된다.

에너지 셀과 파워 셀 간의 절충을 극복하는 데 도움이 되는 실리콘 음극의 또 다른 주요 이점은 리튬을 훨씬 더 작은 부피로 저장함으로써 더 얇아진 Si 음극으로 인해 훨씬 더 빠른 충전이 가능하다는 것이다. 더 얇은 전극을 사용하면 리튬이온이 음극 입자에 훨씬 빠르고 쉽게 도달할 수 있다. 이론적 한계에서 실리콘 음극을 흑연 음극보다 3 배 더 얇게 개발하면 확산 시간이 최대 9 배까지 감소하여 충전 속도가 매우 크게(양극에서의 한계로 인해 9 배는 아니지만 여전히 크게) 증가하므로, 에너지 셀과 파워 셀 간의 주요 절충 가운데 하나를 극복할 수 있다.

---

<sup>9</sup> C.S. Fuller and J.A. Ditzenberger "Diffusion of Lithium Into Germanium and Silicon" Physical Review, 91 (1), p. 193, 1953 (DOI: 10.1103/PhysRev.91.193);

<sup>10</sup> A. J. Pietruszkiewicz "Solubility of Lithium in Doped and Undoped Silicon, Evidence for Compound Formation" Journal of Chemical Physics, 25 (4) pp 650-655, 1956 (DOI: 10.1063/1.1743021)

이러한 극적인 개선의 원인은 간단하다. 하나의 Si 원자는 4 개의 리튬 원자를 효과적으로 저장할 수 있는 반면, 흑연 음극에 동일하게 4 개의 리튬 원자를 저장하려면 24 개의 탄소 원자가 필요하다. 결과적으로 Si 음극은 최대 10 배 더 높은 그램당 용량을 제공하며(mAh/g), 부피 용량(mAh/cc)은 최대 3 배를 제공한다(그림 8).<sup>11</sup> 여기서 객석 비유를 더 확장할 수 있다. 이제 실리콘 음극 객석에, 이전에 흑연 객석에서 개별 좌석이 하나씩 있었던 것과 동일한 지점에 10 개의 좌석이 포개져 있다고 상상해 보자. 문이 열리면 10 배 더 많은 사람들이 좌석을 채우기 위해 달려온다. 그들은 포개진 좌석을 해체하여 같은 객석에 넣으려고 하지만, 공간이 충분하지 않으므로 사람들이 넘치게 된다.

보다 기술적인 측면에서 보면, 실리콘은 충전 중에 리튬과 반응할 때 3 배 팽창하고 방전 중에는 다시 3 배 수축한다는 것이 가장 큰 과제다. 이에 반해 흑연은 충전 시 약 7% 팽창하고 방전 시 약 7% 수축한다. 이러한 팽창으로 인해 실리콘이 흑연을 대체하지 못하게 되는 문제가 발생한다. 특히 실리콘의 큰 입자는 이러한 팽창 중에 분쇄되기 때문에, 많은 회사에서 파손될 정도의 응력을 형성하지 않는 "나노 실리콘" 소재를 개발했다. 그러나 나노 크기의 입자는 훨씬 더 큰 문제인 실리콘 표면에 발생하는 손상을 해결하지 못하는데, 실리콘에는 보통 원치 않는 부반응을 방지하는 고체 전해질 계면(SEI)이라는 보호막이 있다. 이러한 손상이 SEI 에 발생하면 원치 않는 부반응이 리튬 원자를 가두어 용량을 매우 빠르게 저하시킨다.

이 문제를 극복하기 위해 셀 제조업체는 흑연 음극에 10% 미만, 일반적으로 3~5%에 가까운 매우 적은 양의 실리콘을 혼합한다. 이렇게 하면 에너지 밀도가 약간 높아지지만, 실리콘을 더 추가하면 실제 적용에 있어 사이클 수명을 파괴할 수 있다. 순수 나노 실리콘 음극은 일반적으로 비용 효율적으로 대규모 복제가 불가능한 트릭을 사용하지 않고는 최대 100 회 이상의 완전 충방전 사이클을 달성할 수 없다.

	흑연	실리콘
화학 반응	$C_6 \leftrightarrow LiC_6$	$Si_4 \leftrightarrow Li_{15}Si_4$
원소 비율	1:6	3.75:1 (23배 우수)
중량측정 용량	372 mAh/g	3,579 mAh/g
용적 용량	~700 mAh/cc	~2,100 mAh/cc
충전 중 팽창	7%	300%

그림 8. 흑연과 실리콘 음극의 기본 비교 표. 극적으로 향상된 성능에도 불구하고, 현재까지 실리콘의 상용화는 팽창으로 인한 기술적 문제로 인해 지연되었다.

<sup>11</sup> X.X. Zuo, J. Zhu, P. Muller-Buschbaum, Y.J. Cheng, "Silicon Based Lithium-ion Battery Anodes: A Chronicle Perspective Review" Nano Energy 31, p. 113-143, 2017 (DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.11.013); N. Nitta, G. Yushin "High-Capacity Anode Materials for Lithium- Ion Batteries: Choice of Elements and Structures for Active Particles" Particle & Particle Systems Characterization 31(3), p. 317-336, 2014 (DOI:10.1002/ppsc.201300231)

흑연을 완전히 대체하려면 공학적 입자 구조의 설계를 통해 실리콘의 팽창을 보상하는 소재가 필요하다. 입자 외부에 전해질을 유지하면서 입자 내부에서 실리콘의 팽창과 수축이 일어나도록 하는 입자를 만들 수 있다면, 원치 않는 부반응 없이 소재를 1,000 번, 아마도 10,000 번 가역적으로 순환할 수 있다. 분명히 말하자면, 이러한 유형의 소재가 바로 Sila 가 개발하여 현재 확장 및 배포하고 있는 것이다. Sila 가 이 효과를 달성할 수 있는 유일한 방법을 찾은 것 같지는 않지만, 모든 기본 나노 실리콘 접근법은 고착되어 출시되지 못할 것으로 보인다. 다시 비유하자면, 가공 실리콘 음극재를 만드는 것은 포개지 않은 의자로 다층 객석을 만드는 것과 같다. 이는 훨씬 더 신뢰할 수 있는 설계다.

이러한 입자를 개발하는 것은 어려운 일이지만(Sila 의 경우 대학에서의 초기 발명과 40,000 번의 재료 합성 반복을 포함하면 최대 10 년이 걸림), 필요한 비용으로 제조 규모를 자동차 규모로 확장하는 것이 훨씬 더 어렵다. 과거에는 그러한 소재가 필요하지 않았다는 점을 감안할 때, 구조를 합성하려면 완전히 새로운 화학 처리 기술이 필요하므로 기존 화학 제조업체가 수행하기 어려운 과제다. 또한 모든 평면 공정(예: 태양전지 제조 방법)은 규모에 비해 10~100 배 더 많은 비용이 들기 때문에 공정을 대량으로 수행해야 한다. 마지막으로, 대규모 공급 부족 사태를 방지하기 위해 모든 투입 재료는 기존의 글로벌 원자재여야 한다.

오늘날 전 세계적으로 생산되는 음극재의 약 1%가 실리콘이라는 점은 주목할 가치가 있다. 이 실리콘은 위에서 설명한 흑연 기반 셀에 소량의 첨가제로 사용된다. 가장 눈에 띄는 예는 Tesla 가 2015 년부터 사용한 Panasonic 2170 셀이며 몇 가지 다른 셀도 있다. Panasonic/Tesla 셀에는 흑연 음극에 혼합된 실리콘 산화물의 형태로 약 5%의 실리콘이 포함되어 있다. 이는 매우 적은 양의 에너지를 높여 준다. 그러나 이 기술은 거의 한계에 도달했으며, 흑연을 사용하지 않는 음극으로 점프하려면 Sila 의 실리콘과 같은 새로운 유형의 제품이 필요할 것이다.

흑연을 대체할 수 있는 가공 실리콘 소재로 단번에 대체해야 한다는 의미는 아니다. 상용화의 관점에서, 흑연과 이 소재를 다음 세대에서 용량의 25%, 50%, 100% 순으로 혼합하여 셀 성능을 최적화하고, 더 빠르게 도입하며, 시장 출시 과정을 보다 원활하게 하는 것이 큰 이점이 있다. 그러나 핵심은 100%에 도달할 수 있는 기술로 시작하는 것이다. 10%에서 한계에 달하는 소재로 작업하는 것은 장기적인 전략 없이 엄청난 자원을 소비하는 일이다.

**고급 양극 - 불소.** 오늘날 양극에 대한 대부분의 상용화 작업은 NCA 및 NCM 화학 구성의 코발트 함량을 줄이고 니켈 함량을 높이는 데 중점을 두고 있다. 이는 코발트에 대한 의존도를 줄임으로써 몇 퍼센트 더 비용을 절감하면서 셀 수준의 에너지 밀도를 5%까지 증가시킬 수 있다. 그러나 이러한 개선은 혁신적이지는 않다. 혁신적인 개선을 위해서는 양극재 기술도 LFP, NCA, NCM 등의 인터칼레이션형 소재에서 변환형 소재로 전환해야 한다(그림 9).

또한 인터칼레이션형 흑연 음극에서 변환형 실리콘 음극으로의 성공적인 전환은 인터칼레이션형 양극에서 변환형 양극으로의 전환을 가능하게 하여 셀의 에너지 밀도를 더욱 높이고 kWh 당 비용을 절감할 수 있다. 실리콘 음극이 먼저 필요한 이유는 셀의 균형과 관련이 있다. 오늘날 양극의 주요 개선은 평범한 음극으로 인해 제한된다. 음극이 2~3 배 더 좋아지면 양극은 상대적으로 평범한 파트너가 되며 업그레이드가 필요하다. 두 가지 새로운 기술을 함께 사용하면 최대 1400Wh/L 의 에너지 밀도를 가진 배터리를 만들 수 있다.

시장을 지배할 가능성이 있는 두 가지 주요 변환형 활성 양극재는 (i) 금속 불소 기반 양극(예: 플루오르화철 또는 플루오르화구리) 및 (ii) 황 기반 양극이다.<sup>12</sup> 이러한 전환은 실리콘 음극과 함께 짝을 이뤄 자동차 리튬이온 셀 가격을 2030 년까지 \$50/kWh, 2040 년까지 \$30/kWh 로 낮추는 열쇠가 될 것이다. 또한 고용량 변환형 양극은 NCA 및 NCM 양극과 같이 고전압에 노출되지 않기 때문에, 이러한 시스템에서 전해질 산화 및 결과적으로 발생하는 가스 및 산 생성으로 인해 리튬이온 셀의 성능 저하를 피할 수 있다. 결과적으로 변환형 활성 소재의 용해를 방지하는 올바른 재료 설계 및 생산 공정으로 더 긴 사이클 및 캘린더 수명을 얻을 수 있다. 변환형 양극과 가공을 거친 저평창 실리콘 음극으로 리튬이온의 사이클 수명을 10,000 사이클까지 연장할 수 있는 동시에, 시장에서 가장 높은 에너지 밀도를 가질 수 있어 파워 셀과 에너지 셀의 절충을 극복할 수 있다.

**고급 세라믹 분리막 및 더 나은 전해질.** 우리는 또한 전해질 및 분리막 개발에서 작지만 중요한 혁신이 일어날 것으로 기대한다. 상업용 리튬이온 셀에 사용되는 전해질은 전극 표면에서 반응하고 분해되면서 성능이 저하된다. 그러나 분해 시 이러한 표면의 반응성을 감소시키는 이른바 음극의 고체 전해질 계면(SEI) 및 양극의 양극 전해질 계면(CEI)이라는 표면층이 형성되어("패시베이션"이라는 과정) 전해질의 성능 저하를 늦춘다. 미래에 전해질은 분해에 대한 저항력이 더 강해지고 훨씬 더 안정적인 SEI 및 CEI 패시베이션 층을 형성하여 향상된 셀 안정성과 안전성에 기여할 것이다. 전해질은 향후 10 년 이내에 대부분의 시장에서 진정한 고체 상태로 이동하지 않을 것이다. 끝에 있는 보너스 섹션에서 그 이유를 확인할 수 있다.

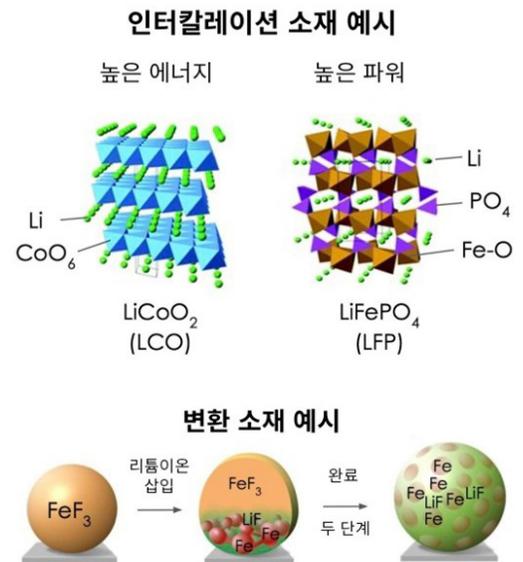


그림 9. 인터칼레이션 소재는 리튬 원자가 호스트를 변경하거나 손상시키지 않고 쉽게 들어오고 나갈 수 있는 안정적인 결정 구조 호스트를 사용한다. 변환 소재는 반응 중에 호스트 물질의 원자 구조를 변형시켜 부반응 없이 공정을 안정시키고 되돌리기가 더욱 어려워진다.

<sup>12</sup> N. Nitta, F. Wu, J. Lee and G. Yushin, "Lithium Battery Materials: Present and Future", *Materials Today*, 18(5), p.252-264, 2015 (DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040); F. Wu and G. Yushin, "Conversion Cathodes for Rechargeable Lithium and Lithium-Ion Batteries", *Energy & Environmental Science*, 10(2), p. 435-459, 2017 (DOI:10.1039/C6EE02326F).

<sup>13</sup> D. Lei, J. Benson, A. Magasinski, G. Berdichevsky, G. Yushin "Transformation of Bulk Alloys to Oxide Nanowires" *Science* 355 (6322), pp. 267-271, 2017 (DOI: 10.1126/science.aal2239)

또한 다공성 폴리머 분리막은 열 안정성, 압축 강도 및 이온 전도도가 크게 개선되어 더 안전하고 강력하며 더 빠른 배터리 충전을 가능하게 하는 세라믹 및 세라믹 우세 분리막으로 대체될 것이다.<sup>13</sup> 여기에서 마지막으로 객석 비유를 사용할 수 있다. 이 비유에서 분리막은 사람들이 한 객석에서 다른 객석으로 건너갈 수 있는 복도다. 오늘날의 폴리머 분리막은 매우 긴 홀 전체에 2 피트 간격으로 배치된 4 피트 직경의 기둥이 있는 복도와 같다. 사람들은 한 쪽에서 다른 쪽으로 돌진할 때, 거대한 기둥들 사이의 작은 구멍들을 끊임없이 비집고 들어가야 한다. 그러나 세라믹 분리막은 복도를 6 피트 간격으로 1 피트 크기의 작은 기둥을 사용하여 대부분의 공간을 개방할 수 있으며, 복도의 길이를 축소하여 훨씬 빠르게 전환시킬 수 있다.

**소비자 전자제품 시장을 통한 성능 소재 확장.** 기술 전문가들이 종종 간과하는 혁신의 중요한 요소는 새로운 기술을 시장에 출시하는 방법이다. 리튬이온의 경우 소비자 전자제품 시장은 모든 신기술에 대해 탁월하고 필요한 경로를 제시한다.

배터리 기술이 자동차 부문에서 작동할 수 있는지 확인하는 가장 좋은 방법은 먼저 소비자 전자제품 부문에서 작동하는지 확인하는 것이다. 이는 EV 에 도입하기에 앞서 노트북과 휴대폰에서 시작된 기본 리튬이온 기술에서 볼 수 있었다. 하이브리드 및 일부 플러그인 차량의 표준이 되기에 앞서 전동 공구에서 시작된 LFP 기술에서도 이를 볼 수 있었다. 또한 2000 년대 초에 노트북의 화재 사고를 방지하기 위해 개발된 더 안전한 분리막과 같은 작은 혁신에서도 이를 볼 수 있다.

이러한 시장 진입 기회는 성능을 개선하는(비용 절감뿐만 아니라) 소재 혁신에 대부분 해당된다. 배터리 성능 향상은 우리가 매일 사용하는 장치에 매우 중요한 역할을 하기 때문이다. 이러한 추론에 따라 귀결점이 나온다. 성능을 극적으로 향상시킨다고 주장하지만 소비자 기기에 적용되지 않는 새로운 혁신은 상업적으로 준비된 기술이라기보다 여전히 실험에 가깝다.

배터리는 대부분의 노트북과 휴대폰에서 거의 절반의 공간을 차지한다. 50% 개선된 배터리는 더 아름다운 제품을 만들거나 5G, 향상된 카메라, 더 강력한 사운드 또는 미니 프로젝터와 같은 새롭고 더 나은 기능을 위한 공간을 만들 수 있다. 물론 리튬이온 셀이 소형 휴대폰의 핵심 요소였던 것처럼, 새로운 배터리는 휴대하기보다는 착용하게 될 더 작은 기기의 핵심 요소가 될 것이다. 그리고 초기 EV 를 구입하는 것이 저렴한 EV 를 위한 R&D 를 추진하는 데 도움이 되었던 것과 달리, 고급 배터리가 장착된 휴대폰을 구입하는 것은 EV 혁명을 가속화하기 위한 R&D 를 추진하는 데 도움이 된다.

**다가오는 소재 혁신의 요약.** 가장 큰 레버리지는 조립된 리튬이온 배터리의 거의 전부를 구성하는 이러한 구성 요소에서 나오며 극적인 성능 향상을 가져온다. 배터리를 구성하는 소재가 훨씬 더 높은 성능을 발휘하면, 작업 중인 제조 공정이나 규모 또는 대상 시장에 관계없이 배터리 자체의 성능이 빠르게 향상된다. 그러나 이러한 소재 개선 외에도, 다음 섹션에서 논의할 배터리 구성 방식의 주요 개선도 구상하고 있다. 제조 개선은 방금 다른 구성 요소 개선과 매우 큰 시너지 효과를 낼 수 있으며 비용 절감 및 성능 향상을 더욱 가속화할 수 있다.

## 기회 - 리튬이온 제조 개선

**제조 기초.** 구성 요소(소재), R&D 비용, 판매 비용 및 이익을 제외한 셀 제조 비용에는 세 가지 주요 요인이 있다. (i) 전극 생산 (최대 40%), (ii) 셀 조립 (최대 20%) 및 (iii) 셀 마감 (최대 40%). 이들 각각에서 주요 혁신이 예상되며 아래에서 세부적으로 설명할 예정이다.

오늘날의 전극은 활성 물질(음극 입자 또는 양극 입자)을 몇 퍼센트의 전도성 첨가제, 약간의 폴리머 바인더 및 물과 같은 액체 용매와 혼합하여 슬러리를 생성함으로써 생산된다.<sup>14</sup> 그런 다음 이 슬러리를 금속 호일 집전체(음극용 구리, 양극용 알루미늄)에서 약 0.2~0.4mm 층으로 코팅한다. 그런 다음 액체 용매를 제거하기 위해 천천히 말린 다음, 코팅 두께를 0.06~0.09mm(사람 머리카락의 절반 두께)로 조밀하게 만들기 위해 압축하고, 최종적으로 진공 건조하여 표면에 남아 있는 물 분자를 제거한다.

그런 다음 전극을 절단하여 (음극 전극, 분리막, 양극 전극, 분리막), (음극 전극, 분리막, 양극 전극, 분리막) 등의 순서로 함께 적층한다(또는 압연). 우리의 비유에서, 각각의 반복 스택은 복도를 사이에 둔 객석 한 쌍이다. 일반적인 휴대폰 배터리에는 20~30 개의 반복되는 적층이 있을 수 있다. 더 두꺼운 자동차 배터리에는 100 개의 반복 적층이 있을 수 있다. 적층이 이것을 시각화하는 가장 쉬운 방법이지만, 긴 전극 쌍을 원통형으로 감아도 동일한 효과를 얻을 수 있다.

이 적층된(또는 감긴) 전극 및 분리막 세트는 그런 다음 케이스(알루미늄 하드 케이스 또는 파우치 소프트

케이스) 내부에 배치되고 전해질로 채워진다. 그런 다음 셀은 배터리를 "형성"하기 위해 초기 충전-방전 사이클을 거친다. 이 첫 번째 충전-방전 "형성" 단계는 배터리 전극을 "패시베이션"하는 일회성 부반응을 많이 일으켜 사이클을 거치는 동안 그 이후부터 배터리 전극을 안정적(즉, 수동적)으로 유지한다. 이 형성이 완료되면 부반응 가스가 배출되고 셀이 영구적으로 밀폐된다. 마지막으로, 셀은 팩 조립을 위해 선적되기 전에 긴 노후화 및 품질 관리 테스트를 거친다. 이는 매우 긴 과정이다(그림 10).

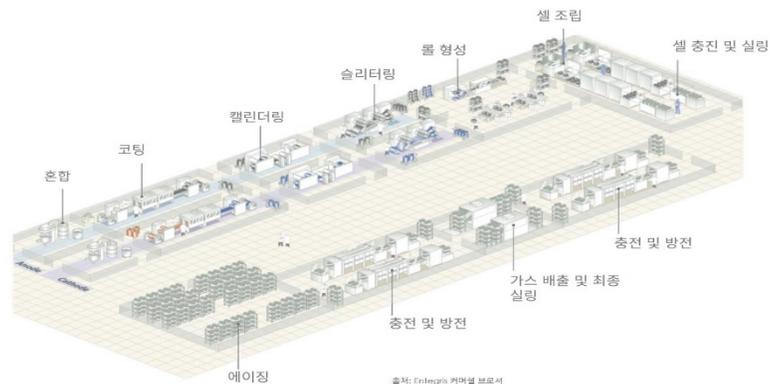


그림 10. 일반적인 리튬이온 공장의 공정 흐름. 공정은 혼합에서 시작하여 공장 주변을 이동하고 노후화로 끝난다.

<sup>14</sup> D. Wood, J.L. Li, C. Daniel, "Prospects for Reducing the Processing Cost of Lithium ion Batteries" Journal of Power Sources 275, p. 234-242, 2015 (DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.11.019)

**고급 전극 생산.** 향후 10년 동안 전극 생산에서는 세 가지 주요 개선이 일어날 것이다. 첫째, 업계는 전극 주조에 사용되는 모든 유독성 유기 용제를 건식 전극 공정(용매 없음) 또는 수성 기반의 속건조 공정(음극 생산은 이미 물을 사용함)으로 대체할 것이다. 이것은 오늘날 독성 유기 용매를 포집하여 재활용할 수 있도록 하는 건조 기계의 비용을 절감할 것이다. 물을 사용하면 환경에 해를 끼치지 않고 값비싼 포집 및 재활용 구성 요소를 제거할 수 있다.

둘째, 전극 설계가 더욱 정교해질 것으로 예상된다. 오늘날 전극은 크기와 방향이 불규칙하고 상대적으로 잘 포장되지 않은 활성 물질로 만들어지며, 리튬이온이 이동할 수 있는 전해질을 통해 길고 간접적인 경로를 생성한다. 소재 과학에서 이러한 경로는 “길고 복잡한” 것으로 묘사된다. 이 길고 복잡한 경로는 객석에 좌석이 줄지어 있지 않고 무작위로 배치된 것과 유사하다. 또한 오늘날의 전극은 폴리머 바인더 및 전도성 첨가제와 같은 비활성 물질을 과도하게 사용한다. 그 이유는 이러한 비활성 물질을 전극에서 필요한 부분, 즉 입자가 서로 접촉하는 지점에만 분배하기 어렵기 때문이다.

미래에 전극은 더 적은 양의 정밀하게 분포된 비활성 물질을 사용하기 때문에(새로운 처리 기술을 통해), 복잡성이 극적으로 감소한 형태로 가공되어 더 빠르게 이온이 이동할 수 있을 것이다. 이는 더 균일하고 보다 정렬된 활성 물질 입자의 두께 증가와 조밀화를 가능하게 하여 셀에 필요한 반복 적층의 수를 줄여 제조 공정의 속도를 높이고 비용을 줄이게 된다.

마지막으로 강도와 접착력이 더 우수한 바인더는 바인더 함량을 줄이면서 전극 무결성을 보장한다. 이러한 더 강한 바인더는 전극의 팽창을 낮추고 바인더/입자 계면에서 전해질과 활성 물질 사이의 바람직하지 않은 반응을 최소화하며 저항을 낮출 수 있다.<sup>15,16</sup> 전반적으로 더 나은 바인더는 전극의 설계 공간을 확장하는 데 큰 역할을 하여 성능을 향상시키고 비용을 절감할 수 있다.

**고급 셀 조립.** 셀 조립의 개선은 여러 구성 요소가 결합되어 이루어진다. 예를 들어, 분리막은 음극과 양극 사이의 독립된 층이 아닌 음극의 상단 표면에 통합될 수 있고 그럴 가능성이 높다. 오늘날 독립적인 분리막을 다루는 것은 매우 어렵다. 분리막은 현재 8 $\mu$ m(마이크론) 정도로 얇아졌고, 다공성으로 인해 흡입하여 집기 어려우며, 높은 비전도성과 정전기로 인한 빈번한 움직임으로 정밀 조립이 어렵고, 화재 등 배터리 고장의 치명적인 원인이 될 수 있는 사소한 결함에도 민감하다. 훨씬 더 나은 접근 방식은 적층 또는 와인딩 공정 전에 비전도성 분리막 재료 층을 전극에 직접 통합하는 것이다.

또한 개선된 기계적 특성과 집전체에 대한 접착력을 가진 더 균일한 전극은 훨씬 더 빠른 속도로 적층되거나 압연될 수 있을 것으로 예상된다. 고급 센서와 인라인 진단은 품질을 저하시키지 않으면서 셀 조립 속도를 비슷하게 극대화할 것이다. 고속 레이저 절삭의 개발은 더 나은 에지 품질을 제공하고, 단락을 유발하고 셀 생산 수율을 감소시키는 파편을 제거할 수 있기 때문에 결국 기계적 전극 슬리팅을 대체할 것이다.

**고급 셀 마감.** 셀 마감의 세 가지 주요 개선도 예상된다. 첫째, 세라믹 분리막과 복잡성이 감소한 전극을 사용하면 셀에 전해질을 충전하는 속도가 크게 빨라진다. 오늘날의 폴리머 분리막은 전해질을 셀로 흡수하는 것이 부족하고 다공성도 약 40%에 불과하다. 세라믹 분리막은 최대 80%의 다공성에 도달할 수 있고 우수한 전해질 흡수 특성을 가지고 있어 충전 성능을 개선하고 제조 공정을 가속화한다.

둘째, 최적화된 펄스 또는 교류 충전을 사용하는 새로운 충전 알고리즘<sup>17</sup>은 전극 형성을 가속화하고, 전극의 패시베이션 품질을 향상시켜 사이클 수명을 개선하고 제조 속도를 높일 수 있다. 마지막으로, 셀 진단의 개선된 정밀도는 노후화 및 품질 관리 단계의 길이를 최소화할 것이다. 예를 들어, 보다 정밀한 전자 장비를 새로운 진단 기술과 결합하여 사용하면(예: 초음파 사용<sup>18</sup>) 오늘날의 공정보다 훨씬 빠르게 셀 작동의 바람직하지 않은 불규칙성을 감지하고 품질 수율을 개선하여 전체 비용을 낮출 수 있다.

**통합 셀, 모듈, 팩 설계.** VW 및 Tesla 에서와 같이 셀을 자체 제조하기로 결정한 OEM 이나, CATL 에서 시도하고 있는 것처럼 차량 새시 설계에 더 가까이 가고자 하는 셀 제조업체에게만 가능한 혁신이 있다. 셀이 모듈 및 팩과 동일한 공장에서 제조되고 부품으로 판매되지 않는 경우, 셀, 팩, 자동차의 제조 공정을 함께 통합하여 셀 설계를 독점 모듈에 맞게 더욱 맞춤화할 수 있다(그림 11).

설계를 사용자 정의할 때 모듈에 직접 연결하고 냉각 시스템에 이상적인 연결을 생성하도록 셀 형태를 설계할 수 있으므로, 모듈을 설계하고 기존 셀 주위를 냉각할 필요가 없다. 나아가, 셀 케이스는 모듈의 기본 구조가 되도록 설계될 수 있다. 본질적으로 모듈이 되기 위해 조립되는 셀을 구축하는 대신 모듈에 직접 전극을 구축하는 것이다. 셀은 또한 각 차량에 맞게 높이를 맞춤화할 수 있다. 대형 차량은 팩 플랫폼 설계를 변경하지 않고 SUV 의 더 큰 배터리 용량 요구를 수용하기 위해 더 큰 셀(EV 바닥판 아래 수직으로 정렬됨)을 사용한다. 예를 들어, 세단과 SUV 는 팩 레이아웃과 아키텍처가 동일하지만 높이가 20% 더 높은 셀을 사용한다. 이는 많은 자동차 OEM 고객을 보유한 독립적인 셀 제조업체는 하기 어려울 것이다. 각 OEM 은 고유한 모듈 기술을 가지고 있기 때문이다.

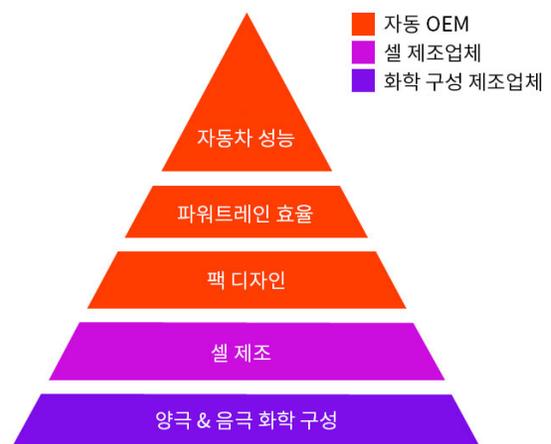


그림 11. 동급 최고의 차량을 만들기 위해서는 화학, 셀 제조, 팩 및 파워트레인 설계에 이르기까지 전체 스택에서 동급 최고의 기술이 필요하다. 모든 계층에서 표준 이하의 성능은 다른 기술 계층의 이점을 무효화하고 더 높은 차량 비용을 초래한다.

<sup>15</sup> D. Bresser, D. Buchholz, A. Moretti, A. Varzi and S. Passerini "Alternative Binders for Sustainable Electrochemical Energy Storage – the Transition to Aqueous Electrode Processing and Bio-Derived Polymers" Energy Environ. Sci., 11, pp.3096-3127, 2018 (DOI:10.1039/C8EE00640G)

<sup>16</sup> A. Magasinski, B. Zdyrko, I. Kovalenko, B. Hertzberg, R. Burtovyy, C.F. Huebner, T.F. Fuller, I. Luzinov, G. Yushin "Toward Efficient Binders for Li-ion Battery Si-Based Anodes: Polyacrylic Acid" ACS Appl Mater Interfaces, 2(11), 3004-10, 2010 (DOI: 10.1021/am100871y)

<sup>17</sup> S.Q. Zhu, C. Hu, Y. Xu, Y. Jin, J.L. Shui, "Performance Improvement of Lithium-ion Battery by Pulse Current" Journal of Energy Chemistry 46, p. 208-214, 2020 (DOI:10.1016/j.jechem.2019.11.007); X.R.Huang, Y.Y. Li, A.B. Acharya, X. Sui, J.H. Meng, R. Teodorescu, D.I. Stroe, "A Review of Pulsed Current Technique for Lithium-ion Batteries" 13(10) A2458, 2020 (DOI: 10.3390/en13102458)

<sup>18</sup> C. Bommier, W. Chang, J.L. Li, S. Biswas, G. Davies, J. Nanda, D. Steingart, "Operando Acoustic Monitoring of SEI Formation and Long-Term Cycling in NMC/SiGr Composite Pouch Cells" Journal of the Electrochemical Society, 167(2) A. 020517 2020 (DOI: 10.1149/1945-7111/ab68d6)

셀에서 자동차까지 제조 공정을 통합하면 모듈, 팩 또는 차량에 조립되는 동안 셀의 노후화 공정을 수행할 수 있다. 즉 노후화 공정을 거치는 동안 재고로 두는 셀의 수를 줄여 비용이 절감된다. 모듈 통합 후 결함 있는 셀이 식별되면(셀 노후화의 이점 중 하나는 오류를 찾는 것), 모듈이 내결합성을 염두에 두고 설계된 경우 내결합성 모듈 설계에서 셀을 분리, 교체, 제거할 수 있다.

**제조 혁신 요약.** 리튬이온 셀 제조 공정은 지난 30 년 동안 매우 정교하게 개선되었지만, 이를 단순화하고 성능을 높이며 비용을 낮추기 위해 속도를 높일 수 있는 좋은 기회는 계속 존재한다. 이러한 개선은 재료 구성 요소의 개선만큼 영향력이 크지는 않지만 제조 개선은 상호 보완적이기 때문에, 영향이 결합되면 혁신적일 수 있다.

## 규모

에너지 스토리지의 미래를 고려할 때, 현재 리튬이온 기술의 규모와 미래에 필요할 규모를 고려하는 것이 중요하다. 리튬이온을 대체할 것이라고 주장하는 기술은 종종 헤드라인을 장식하지만 규모의 제한으로 인해 한 세대 내에서는 실현이 불가능하다. 이는 2050 년까지 리튬이온이 모든 에너지 스토리지를 구성하지는 않지만 가장 지배적인 화학 구성이 되고 그 이외의 것은 틈새 응용 분야로 분류될 것으로 예상되는 이유다. 이러한 틈새 응용 분야는 수십억 달러 규모의 시장이 될 것이지만 수조 달러 규모의 전체 스토리지 시장을 고려하면 여전히 틈새 시장이다.

Tesla 가 설립되기 전에 리튬이온 배터리는 주로 노트북 및 휴대폰과 같은 소비자 전자제품에 거의 독점적으로 사용되었다. 2008 년 Tesla Roadster 출시 당시 전 세계의 총 리튬이온 제조 능력은 연간 약 20GWh 였다. 셀 제조업체에서 이미 발표한 계획에 따르면 2030 년까지 연간 생산 능력은 2,000GWh 이상에 달할 것으로 예상된다.<sup>19</sup>

셀 가격이 \$50/kWh 에 도달한다고 가정하면 시장은 셀 수준에서 2030 년 연간 \$1,000 억에 이를 것이다(팩과 시스템까지 합친 시장은 25~50% 증가한 규모).

EV 혁명이 시작된 이후 2030 년까지 생산 규모가 50 배 이상 증가하는 것은 전례가 없는 일이며, 리튬이온을 대체할 기술이 업계에 처음 등장했을 때 이 규모의 기존 기업과 어떻게 경쟁할 것인지에 대한 명확한 계획을 세워야 한다. 이는 쉽지 않을 것이다.

2030 년 이후에는 모든 경량 운송 수단을 전환하는 데 약 10,000GWh 가 필요하고 세기 중반까지 트럭, 버스 및 기타 중형 및 대형 운송 수단을 지원하는 데 비슷한 양이 필요할 것이다. 100% 재생 에너지로 전환하는 데 필요한 일일 사용 그리드 스토리지 요건과 글로벌 개발과 전력 및 교통 수요 증가를 더하면, 이번 세기 중반에는 리튬이온 스토리지에 대한 글로벌 수요가 30,000GWh 에 이르고 시장 규모는 연간 1 조 달러에 달할 것으로 예상된다. 운 좋게 에너지 스토리지가 이러한 규모에 도달할 수 있다면 전력과 운송을 모두 포함하여 경제를 탄소 집약적 연료 공급원에서 100% 재생 에너지 기반으로 전환시킬 수 있을 것이다. 이러한 미래를 달성하기 위해서는 혁신뿐만 아니라 대규모 혁신에 집중해야 한다.

<sup>19</sup> <https://www.benchmarkminerals.com/benchmarks-megafactory-tracker-exceeds-2-terawatt-hours-as-solid-state-makes-its-first-appearance/>

오늘날의 구성 요소를 사용하여 이 30,000GWh 용량에 도달하려면 연간 총량으로 각 구성 요소의 수요를 계산할 수 있다.

- 흑연 음극의 경우 이 용량을 지원하려면 연간 약 2,300 만 톤의 흑연이 필요하다.
- 그러나 실리콘 음극의 경우 흑연에 비해 실리콘의 킬로그램당 용량이 훨씬 더 높기 때문에 5~10 배 더 적은 양(연간 200 만~400 만 톤의 실리콘)이 필요하다.
- NCA 또는 NCM 양극의 경우 니켈 90%와 코발트 5%를 가정하면 업계에서는 코발트 120 만 톤과 니켈 2,200 만 톤이 필요하다.
- 이 수치는 매우 크므로 가능한 모든 곳에서 재사용하고 가능하지 않은 경우에는 재활용하여, 환경과 지속 가능성을 염두에 두고 이 규모를 달성할 수 있는 방안에 전념해야 한다. 참고로 우리는 **매일 지구에서** 대략 1,200 만 톤의 석유, 2,100 만 톤의 석탄, 700 만 톤의 천연가스를 추출한다는 사실에 유념해야 한다. 여기서 배터리 재료 수는 연간 기준이다.

흑연 및 실리콘 수치는 전 세계 자원 부족 관점에서 실질적인 문제가 되지 않지만 코발트 및 니켈 규모는 도전 과제가 될 것이다. 현재 전 세계는 성장을 경험하고 있는 다양한 산업(자석, 초합금, 철강, 항공 우주 등)의 다양한 응용 분야를 위해 연간 15 만 톤의 코발트와 250 만 톤의 니켈을 생산한다. 상업적으로 사용 가능한 전 세계 매장량은 고급(채굴 비용이 상대적으로 저렴한) 코발트의 경우 150 만 톤, Class 1(배터리 등급) 니켈의 경우 3,600 만 톤으로 제한된다. 예상되는 수요 증가에 따라 이러한 금속의 심각한 부족과 그에 따른 상당한 가격 상승이 빠르면 10 년 내에 발생할 수 있다.<sup>20</sup>

먼저 2030 년까지 2,000GWh로, 2050 년까지 30,000GWh로 확장하려면 막대한 자본 투자가 필요할 것이다. 오늘날 자동차 규모의 리튬이온 생산 공장은 세계적으로 CATL, LG, Panasonic, Samsung SDI, SK 와 최근에 진입한 Farasis 및 Northvolt(이 분야에 진출하기 위해 설립된 다른 여러 회사가 있지만 아직 큰 진전을 이루지 못함) 등 소수의 회사들에 의해 건설되고 있다. 업계 발표에 따르면 리튬이온 제조 공장의 비용은 연간 생산 능력에서 GWh 당 5,000 만~1 억 달러 사이이다.

---

20 K. Turcheniuk, D. Bondarev, G. G. Amatucci, G. Yushin, "Battery Materials for Low-Cost Electric Transportation", Materials Today (in review, 2020)

이러한 추정치를 통해 2020 년에서 2030 년 사이에 용량을 2,000GWh 로 확장하려면 예상되는 추가 자본 투자는 총 750 억~1,500 억 달러가 필요할 것이다(이 중 일부는 2020 년 이전에 이미 투자됨). 마찬가지로 제조 시설 비용이 감소하지 않으면 2050 년까지 3 조 달러의 투자가 필요할 수 있다. 이는 추정치에서 가장 높은 수준으로, 몇 가지 요인으로 인해 정확하지 않을 수 있다.

첫째, 앞서 설명한 모든 소재 개선은 생산하는 에너지 밀도의 증가에 비례하여 \$/GWh 공장 비용을 줄인다. 예를 들어, 새로운 음극과 양극이 공장에서 나오는 각 배터리의 에너지를 두 배로 늘리면, 공장의 GWh 용량은 공장에 대한 추가 투자 없이 두 배가 된다. 이는 화학 구성 업그레이드만으로 공장의 \$/GWh 자본 요구량이 절반으로 감소함을 의미한다.

둘째, 앞서 설명한 제조 혁신은 공정 속도를 높여 제조 비용을 줄이는 데 중요한 역할을 할 것이다. 공정 속도가 빨라짐에 따라 동일한 공장에서 더 많은 셀을 생산하여 연간 GWh 용량이 증가한다. 전체 개선 규모를 정확하게 추정하기는 어렵지만, 2030 년 이후에 건설되는 신규 공장의 비용은 \$2,500 만/GWh 미만으로, 각 신규 공장의 학습으로 인해 비용이 추가로 절감되는 등 2030 년까지 현재의 최저 수준보다 최소 2 배 이상의 비용 개선을 가정하는 것이 합리적이라고 본다. 이러한 비용으로 2030 년에서 2050 년까지의 대규모 확장 단계에서 수조 달러가 아닌 7,500 억 달러 미만이 소요되어 전환을 더욱 가속화할 수 있다(그림 12).

**자동차 제조사, 배터리 제조사, 수직 통합.** 모든 기존 자동차 OEM 이 향후 수십 년 동안 모든 승용차를 전기차로 전환할 것이 분명해짐에 따라 차량 제조사가 갑자기 공급 기반, 특히 배터리 셀 제조사에 의존하게 되는 큰 권력 이동이 발생하고 있다. 이것은 지난 세기 동안 기존의 내연 기관에서 견고한 공급망을 구축한 자동차 OEM 으로서는 익숙하지 않은 위치다.

엔진 및 기계 새시 구성 요소와 달리 자동차 규모, 품질, 비용에 맞춰 리튬이온 셀을 제공할 수 있는 리튬이온 공급업체의 수는 앞서 언급한 6~7 개에 불과해 극히 적다. 수요의 급격한 변화는 또한 큰 어려움을 야기하고 있는데, 셀 공급업체는 확고한 계약 없이 공장을 짓지 않는 반면, 자동차 제조사들은 몇 년 후 수요가 어떻게 될 지 모르는 상태에서 계약을 주저하고 있다. EV 에 대한 수요가 셀 공급을 초과할 경우 OEM 은 공급 부족과 셀 가격 상승을 겪게 된다.



그림 12. 왼쪽 상단부터 시계 방향으로 전 세계 리튬이온 공장: 네바다에 있는 Tesla 의 35GWh 공장, 중국 닝더에 위치한 CATL 본사 및 45GWh 공장, 조지아에 있는 SK 의 10GWh 공장, 건설 중인 Northvolt 의 16GWh 시설 렌더링.

그 결과 주요 EV 제조사들은 부분적 수직 통합을 통해 공급망을 더 엄격하게 통제하기 위해 움직이고 있다. 처음에 Nissan 은 Nissan Leaf 를 위해 리튬이온 셀을 자체 생산했지만 10년 후 EV에 대한 의지가 흔들리면서 공장을 매각했다. Tesla 는 Panasonic 과 사업상 가장 가까운 파트너십을 체결하여 Gigafactory 를 공동 건설 및 운영하고 있다. VW 는 Northvolt 에 막대한 투자를 했으며 회사와 합작 공장을 건설하고 있다. Panasonic 과 Toyota 도 합작 공장을 발표하고 수천 명의 엔지니어를 투입해 이러한 방향으로 가고 있다. 마지막으로, 아직 소문일 뿐이지만 Tesla 는 곧 완전히 자체적인 배터리 생산 계획을 발표할 것이다. 통제력 확대를 위한 다른 방법으로는 자동차 제조사가 원자재(흑연, 니켈, 리튬 등)에 대한 계약을 체결하여 배터리 공급업체가 어디인지에 관계없이 배터리 제조사가 필요로 하는 원료를 제공할 수 있도록 하는 것이다.

이러한 파트너십과 수직 통합 이니셔티브가 현재 매우 유리한 몇 가지 이유가 있다. 아직 초기 단계지만 매우 빠르게 성장하는 산업에서 신속하고 조정된 의사 결정은 수요를 정확하게 계획하고 필요한 배터리 공급 비용을 제어하는 선순환을 창출할 수 있다. 또한 핵심 리튬이온 제조 공정이 소비자 산업에서 30년 이상 개발되었기 때문에 주요 셀 제조사는 성공에 필수적인 제도적 지식, 즉 자동차 OEM 이 수직 통합을 위해 습득해야 하는 지식을 보유하고 있다. 2030년 이후 산업이 성숙한 다음에도 이것이 요구될 것인지는 두고 보아야 한다.

기존 배터리 제조사의 제도적 지식은 셀 제조 분야의 신규 진입 업체에게도 장벽이 된다. 자동차 중심의 신생 셀 제조사인 Northvolt 는 기존 글로벌 제조사 출신의 배터리 셀 제조 지식을 갖춘 전문가를 고용하고, 저비용 재생 가능 전력과 니켈에 대한 현지 접근성을 확보하는 등 순조로운 출발을 보였다. 그들은 또한 유럽 시장에 공급하고 BMW 및 VW 와 계약하는 데 있어 주요 구조적 이점을 가지고 있지만 그 결과가 가시화되려면 앞으로 5년 이상이 걸릴 것이다. 또 다른 야심찬 업체인 Farasis 는 기존 배터리 팀과 함께 출발하여 Daimler 와 파트너십을 체결했다. 그러나 필요한 핵심 엔지니어는 현재 세계적으로 희소한 자원이며 중대한 규모의 인재를 얻는 것은 더 어려워질 것이다.

세 번째 이유는 OEM 이 셀 제조사가 차량 응용 분야를 위해 특정한 셀을 설계하는 데 매우 유용한 사용 데이터를 가지고 있다는 점이다. 또한 특정 모듈을 위한 셀을 공동으로 설계할 수 있으므로 셀, 팩, 차량이 안전, 성능, 비용에 대해 더 잘 최적화될 수 있다.

## 운송 및 그리드에 대한 영향

기존 리튬이온 셀에서 첨단 리튬이온 셀로 이동하는 향후 10 년 동안의 혁신은 모든 지상 운송 수단의 전기화를 가속화하는 데 큰 영향을 미칠 것이다. 이미 2011 년부터 연간 30~50% 범위의 글로벌 EV 판매 성장을 목격했으며 이 놀라운 성장이 계속될 것으로 예상된다. 2030 년에 2,000GWh 의 용량으로, 전 세계의 플러그인 자동차 구매 대수는 2,000 만~3,000 만 대에 이를 것이다(팩 크기에 따라 다름). 신차를 100% 전기차로 만드는 데는 더 오랜 시간이 걸리고 이미 유통 중인 가솔린 엔진 자동차를 교체하는 데는 10 년이 더 걸릴 것이기 때문에, 세계 중반까지 도로 위의 차량이 100% EV 가 될 가능성은 거의 없다.

EV 로의 전환을 가속화하는 것으로 수렴될 두 가지 다른 운송 트렌드가 있다. 첫 번째 트렌드는 Uber, Lyft 등 주문형 차량 호출 서비스의 큰 확대, 이러한 차량의 주행 거리가 증가하고 있다. 일반적인 자동차 소유자는 연간 12,000 마일을 운전할 수 있지만 주문형 차량 호출 서비스 운전자는 연간 50,000 마일을 운전할 수 있다. 이는 총 소유 비용을 고정 비용(차량 감가상각)이 아닌 변동 비용(유지보수 및 연료)으로 전환시킨다. 이는 EV 의 장점이 발휘되는 부분이다. 적절한 EV 요금으로 야간에 충전된 EV 의 경우 마일당 비용은 최대 2.5¢/mi 다. 대조적으로, 연비가 25mpg 이고 휘발유 비용이 \$3/갤런(€0.66/리터)인 세단은 12¢/mi 에 달하며 운영 비용이 최대 5 배 더 높다. 이 두 수치가 모두 낮아 보일 수 있지만, 그 차이는 매년 전일제 운전자가 경우 \$5,000, 즉 자동차 수명 동안 \$50,000 를 절약할 수 있는 수준이다. 또한 EV 는 유지보수 비용이 훨씬 적게 든다. 물론 핵심은 EV 의 초기 비용을 일반 가솔린 세단과 경쟁할 수 있을 만큼 낮게 만드는 것이다.

많이 사용할 경우 EV 가 가솔린 차량에 비해 가진 주요 비용 이점은 운송이 자율주행으로 전환됨에 따라 더욱 커진다. 주문형 자율주행차(AV)가 평균적으로 인간 운전자보다 2~3 배 더 많은 거리를 주행하는 것을 상상하기란 쉬운 일이다(일부는 24 시간 운전하지만 수요가 변동하므로 일부 AV 는 주차된 시간이 많을 것임). 주행 거리가 2~3 배 증가하면 자율주행차의 10 년 수명 동안에는 훨씬 더 큰 \$10 만~\$15 만이 절약된다. 이를 가능하게 하려면 위에서 논의한 100 만 마일 이상의 배터리를 가능하게 하는 혁신이 먼저 달성되어야 한다. 이와 유사한 분석을 중대형 트럭으로 확장할 수 있으므로, Amazon 과 Walmart 와 같은 회사에서 이 주제에 대해 보이는 갑작스러운 관심이 어디에서 오는지 명확하게 알 수 있다.

이 분석에서는 거의 지상 운송에만 초점을 맞추고 있지만, 육상 운송보다 훨씬 작은 틈새 시장인 해상 및 항공 운송의 전기화를 위한 의미 있는 기회도 있다는 점에 주목할 가치가 있다. 로컬 페리는 운영 비용이 낮은 전기 운영으로 앞으로도 계속 전환될 것이다. 항공 운송에서는 지역 운송을 위한 전기 수직이착륙(e-VTOL) 시스템의 출현은 전통적인 헬리콥터를 대체할 뿐만 아니라, 시장의 규모를 확대하기 시작했다. 이는 운영 비용을 절감하고 운송 수단에 배터리가 공급될 때 중복 전기 시스템을 갖춘 다중 모터 시스템이 제공할 수 있는 본질적으로 더 안전한 디자인을 제공한다.

그리드에서 예상되는 영향은 분명하다. 여기에서 제시하는 고급 리튬이온 배터리에 대한 2030 년 비전은 대부분의 간헐적 문제를 해결하여 100% 재생 에너지를 가능하게 할 것이다. \$50/kWh 의 초기 비용으로 10,000 회의 사이클과 30 년의 수명이 가능한 배터리 셀은 모든 태양광 및 풍력 발전 설비와 연계될 수 있다. 이렇게 하면 주간 및 아마도 수일 동안 간헐성이 문제가 되지 않을 것이다. 매우 드문 경우지만 재생 가능 에너지가 주간 단위로 간헐성이 발생하지 않도록 해야 할 필요가 있다. 이 경우에는 아마도 다른 장기 에너지 스토리지 화학 기술이 적절할 것이다. 그러나 그리드는 일일 수요가 훨씬 더 많기 때문에 리튬이온이 여전히 스토리지의 대다수를 차지할 것이다.

## 결론

에너지 스토리지, 고급 리튬이온 배터리, 전기차의 미래는 믿을 수 없을 정도로 밝다. 기존 공장과 향후 10 년 동안 전 세계에 건설될 많은 공장에서 훨씬 더 나은 리튬이온 부품을 만들기 위한 화학 및 소재 분야의 혁신에 엄청난 기회가 있다. \$50/kWh 의 비용, 고속 충전, 10,000 회 이상의 사이클, 100 만 마일 이상, 30 년 수명을 동시에 제공할 수 있는 리튬이온 배터리는 전 세계에서 발견되고 재활용되는 풍부한 원자재로 만들어져 향후 10 년 안에 현실이 될 수 있다. 세계가 화석 연료 기반 경제에서 완전한 태양광 및 풍력 발전 경제로 변모함에 따라, 이러한 배터리에 대한 수요는 세기 중반까지 연간 30,000GWh 에 달하는 전례 없는 수준에 도달할 것이다.

이제 실험실과 공장으로 돌아가 이러한 미래를 건설해 보자.

## 보너스: 솔리드 스테이트 또는 리튬 금속에 대한 잘못된 희망

지난 몇 년 동안 10 여 개 이상의 스타트업에 걸쳐 총 수억 달러에 달하는 투자가 이루어진 솔리드 스테이트 배터리에 대해 언론에서 많은 논의가 있었다. 이 기술이 배터리의 성배처럼 보이는 데에는 기술적 이유가 있지만, 현실은 기술이 작동하더라도(이는 40 년 동안 개발된 이후 “만약”임) 시장에서 틈새 시장 이상의 기회를 찾을 수 없을 것이다.

**꿈꾸는 이유.** 이 기술을 “솔리드 스테이트”라고 부르는 것은 실제와는 거리가 멀다. “솔리드 스테이트”라는 용어를 사용하는 이유는 기존의 리튬이온 배터리에서 액체인 전해질을 고체로 대체하기 때문이다. 이렇게 하는 이유는 흑연 음극을 완전히 대체할 리튬 금속 음극을 사용할 수 있게 하기 위해서다. 더 나은 이름은 “리튬 금속 음극” 기술일 것이다. 이 기술은 기존의 리튬이온에 앞서 최대 40 년간 주요 기술 및 상업적 문제에 도전해 왔다.

순수한 리튬 금속을 사용하면 흑연에 저장할 수 있는 리튬보다 극적으로 밀도가 높은 리튬을 저장할 수 있어 셀의 에너지 밀도를 높일 수 있다는 매력이 있다. 순수 리튬 금속의 부피 용량은 2062mAh/cc 로, 최대 600~630mAh/cc(완전 리튬화 후 재료 수준) 등급의 흑연보다 훨씬 높다. 흑연에서 순수 리튬으로 이동하면 에너지 밀도가 50% 향상되어 \$/kWh 비용이 크게 낮아질 수 있다.

**가속한 기술적 현실.** 40 년 간 실패한 리튬 금속 음극 개발 이후, “솔리드 스테이트”라는 브랜딩 외에 근본적으로 다른 무언가가 있다는 것에는 의심해야 하는 많은 기술적 이유가 있다. 리튬 덴드라이트 형성의 위험을 시작으로 극복해야 할 수많은 기술적 과제가 있다. 리튬은 다른 금속과 마찬가지로 전극 필름에 플레이팅할 때 낮은 지점보다는 높은 지점에 붙는 성질이 있다. 이로 인해 음극에 리튬 돌기(덴드라이트)가 형성되어 분리막을 관통하고 양극과 단락되어 배터리의 치명적인 열 폭주(화재)가 발생하게 된다. 이러한 덴드라이트를 완전히 제거하는 것이 리튬 금속 음극의 가장 근본적인 과제다.

리튬 금속 셀의 고장 가능성은 음극의 기질(동박), 고체 전해질 및 침전된 리튬의 화학적, 물리적 균일성에 따라 달라진다. 리튬 금속 플레이팅으로 셀의 부피 변화가 발생하며, 이러한 응력이 불균일성에 집중되면 고장으로 이어지는 응력이 생성된다. 대부분의 세라믹 또는 유리/세라믹 전해질은 매우 고가의 평면 증착 기술을 사용하지 않는 한, 결정 입계, 공극, 불순물, 개재물, 전위 등과 같은 기존의 작은 결함을 포함한다. (i) 고체 전해질의 특성이나 (ii) 고체 전해질과 구리 기질 사이의 접촉 또는 (iii) 구리 전류 수집기의 특성의 작은 변동은 공장에서 결함이 있는 셀이 식별되는 최상의 시나리오의 경우 낮은 생산 수율로 이어지거나 현장에서 조기에 고장이 발생하는 결과를 초래한다. 매우 균일하고 비정형이며 결정 입계가 없는 고체 전해질을 사용하는 몇 개의 소형 셀(전극 표면적 <math><0.01\text{m}^2</math>)에서 긴 사이클 수명이 입증되었다. 이 경우 통계적으로 단일 결함 없이 이러한 소형 셀을 만드는 것이 가능하기 때문이다. 일부 테스트에서는 덴드라이트 형성이 없는 이 작은 배터리에서 긴 사이클 수명이 나타났지만, 이는 일반적으로 매우 낮은 충전율에서 수행된 것으로 실제 EV 사용에는 너무 낮다. 불행히도 EV 에 적절한 속도로 충전하면(4-20mA/cm<sup>2</sup>) 리튬 덴드라이트의 형성이 극적으로 가속화되어 치명적인 고장으로 이어진다. 훨씬 더 어려운 문제는 최대 500m<sup>2</sup>의 고용량 전극이 있는 자동차 배터리에서 생명을 위협하는 결함이 형성되는 것을 방지하는 것이다. 급속 충전을 하면 통계적으로 모든 결함을 피할 수 없다. 이는 완전히 다른 게임이다. 이를 위해서는 나노미터 수준의 정밀한 반도체 등급 장비와 전자 칩 및 실리콘 태양전지 제조에 사용하는 공정이 필요하지만 이는 배터리에 비해 지나치게 비싸다. 이러한 비용을 의미 있게 줄일 수 있는 기술은 아직 없다. 지난 10년 동안 많은 시도가 있었지만 성공하지 못했으며<sup>21</sup> 결함이 없는 우수한 전해질이 개발되더라도 충분하지 않을 수 있다.<sup>22</sup>

이러한 소재 및 설계 문제가 극복되면 제조 문제가 크게 보이기 시작할 것이다. 제조 시 주요 고려 사항은 높은 에너지 밀도와 낮은 비용에 도달하는 데 중요한 양극의 패킹 밀도다. 고체 전해질을 양극 입자와 혼합할 때 전극에서 높은 양극 비율에 도달하려면 공정을 습기가 없는 상태로 유지하면서 전극을 형성하는 데 높은 온도와 압력이 필요하다. 이 처리가 더 낮은 온도에서 압력 없이 수행되면 양극 활성 비율이 낮아져 에너지 밀도 성능이 훨씬 나빠지고 비용이 높아진다. 고체 전해질 셀은 현실적으로 낮은 생산 비용을 위해 수분을 함유한(예: 일반 대기) 환경에서 전극을 생산해야 하지만 공기 중의 수증기와 리튬 금속의 반응성이 매우 높기 때문에 리튬 금속 음극은 셀에 조립하기 전에 완전히 방전된(Li-free) 상태로 생산해야 한다. 이는 사용 가능한 기술 선택권을 제한한다. 리튬 금속으로 충전된 상태에서 고체 셀을 제조하려면 건조한 공기 환경이 필요하며, 이는 현재 전 세계적으로 건설 중인 Giga 규모 공장과 호환되지 않고 비용이 많이 든다.

또한 고체 전해질은 무겁고(액체 전해질의 2~4 배) 유독성이고, 고가이거나 희귀한 물질을 사용하는 경우가 많으며, 가공 과정에서 또는 차량 사용 중 발생하는 작은 스트레스에도 미세한 크랙이 발생하기 쉽다. 이러한 제한은 이러한 솔리드 스테이트 셀을 사용하는 팩에 대한 훨씬 더 엄격한 요건으로 이어진다. 즉, 셀을 일정한 압력 및 매우 단단하게 고정된 상태로 유지하기 위한 주요 기계적 구조를 구축하기 위한 요건이다.

<sup>21</sup> K. Kerman, A. Luntz, V. Viswanathan, Y.-M. Chiang, Z. Chen "Review - Practical Challenges Hindering the Development of Solid State Li Ion Batteries" Journal of The Electrochemical Society, 164(7) A1731-A1744, 2017 (DOI: 10.1149/2.1571707jes); R. Chen, Q. Li, X. Yu, L. Chen, H. Li "Approaching Practically Accessible Solid-State Batteries: Stability Issues Related to Solid Electrolytes and Interfaces" Chem. Rev. 120, p. 6820-6877, 2020 (DOI:10.1021/acs.chemrev.9b00268)

<sup>22</sup> R. D. Schmidt and J. Sakamoto, "In-situ, Non-Destructive Acoustic Characterization of Solid State Electrolyte Cells" Journal of Power Sources, 324, p. 126, 2016 (DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.05.062)

**가혹한 시장 현실.** 솔리드 스테이트 기술의 경우 기술적 장애물이 어려운 만큼 시장 현실은 향후 수십 년 동안 더 나빠질 것이다. 위에서 설명한 바와 같이 고체 전해질은 현재 전 세계적으로 건설되고 있는 배터리 팩터리와 근본적으로 호환되지 않는다. 솔리드 스테이트 기술이 향후 10 년 이내에 GWh 규모에 도달할 가능성은 낮으며 2030 년에는 전 세계적으로 2,000GWh 의 생산 능력을 갖추게 될 것이다. 리튬 금속 음극을 사용하는 고체 전해질의 성능이 특히 \$/kWh 기준으로 훨씬 더 우수하다면 새로운 공장이 건설될 것이 분명하지만, 그러한 이점을 얻을 수 있는 길은 분명하지 않다.

리튬 금속의 \$/kWh 를 낮추는 방법은 에너지 밀도를 높여 비용을 증가시키지 않고 더 많은 에너지를 저장하는 것이다. 하지만 현재 상용화되고 있는 실리콘 음극은 리튬 금속으로 전망되는 수준과 비슷한 에너지 밀도 개선에 도달할 수 있다. 순수한 리튬 금속의 이론적인 밀도는 종종 인용되는데, 직관적으로 순수한 리튬보다 밀도가 높은 리튬 원자는 없다고 생각할 수 있다. 그러나 실리콘은 실제로 순수한 리튬보다 더 가깝게 리튬 원자를 끌어당긴다.  $\text{Si}_4\text{Li}_{15}$  실리콘 합금은 2190mAh/cc 이고 순수 리튬 금속은 2062mAh/cc 다. 미래의 실리콘 음극 기반 셀에 비해 \$/kWh 비용 우위도, 에너지 밀도 우위도 없는 새로운 배터리 기술을 위해 \$1,000 억 규모 이상의 공장을 짓는 것은 시장에서 매력적이지 않을 것이다.

그렇긴 하지만, EV 혁명을 위해서는 솔리드 스테이트에 대한 이 견해가 틀리더라도 기쁠 것이다. 세계는 더 나은 배터리를 필요로 하며, 진취적인 과학자와 엔지니어가 이러한 문제를 극복하고 비용을 \$50/kWh 로 낮추고 에너지 부문을 혁신할 방법을 찾는다면 우리는 시장에서 경쟁하는 가운데 그들의 기술적 성공을 기꺼이 응원할 것이다.

## 저자 소개

### Gene Berdichevsky - 공동 창업자 겸 CEO

Gene Berdichevsky 는 Sila Nanotechnologies 의 공동 창업자이자 CEO 다. Sila 를 공동 설립하기 전에 Gene 은 Tesla Motors 의 7 번째 직원으로 Roadster 배터리의 수석 엔지니어로 근무하면서 세계 최초의 안전한 대량 생산 자동차용 리튬이온 배터리 시스템 개발을 주도했다.

Gene 은 Stanford University 에서 에너지와 소재에 중점을 둔 공학 석사, 기계 공학 학사 등 2 개의 학위를 취득했다. 그는 42 개의 특허와 4 개의 동료 심사 학술 출판물을 공동 저술했다. Gene 은 Forbes 의 30 세 미만 30 인 목록, MIT Technology Review 의 35 세 미만 35 인으로 선정되었으며 Paul and Daisy Soros Fellowship for New Americans 를 수여 받았다.

### Gleb Yushin - 공동 창업자 겸 CTO

Gleb Yushin 은 Sila Nanotechnologies 의 공동 창업자이자 CTO 다. 그는 또한 Georgia Institute of Technology 의 재료공학과 교수이자 Materials Today 의 수석 편집장이다. Gleb 은 110 개 이상의 미국 및 국제 특허 및 특허 출원과 160 개 이상의 동료 심사 학술 간행물을 공동 저술했으며 이는 거의 30,000 번 이상 인용되었다. 에너지 스토리지 재료 개발에 대한 그의 공헌으로 Gleb 은 수많은 상을 받았으며 Electrochemical Society 에서 세계에서 가장 영향력 있는 과학자 중 한 명으로 인정받았다.

그는 재료 및 에너지 스토리지 연구의 발전에 기여한 공로를 인정받아 Materials Research Society, Electrochemical Society, EU Academy of Sciences, National Academy of Inventors 의 펠로우로 선출되었다. Gleb 은 Polytechnic Institute 에서 물리학 학사 및 석사 학위를 취득했으며 North Carolina State University 에서 재료공학 박사 학위를 취득했다.