

리튬 이차전지 시장 및 기술동향 분석과 대응 방향

KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터
조윤상 연구위원 (yscho1@kdb.co.kr)
하태원 전임연구원(taewon.ha@kdb.co.kr)
정승원 연구위원 (jung@kdb.co.kr)

- I. 리튬 이차전지 개요
- II. 리튬 이차전지 시장 현황 및 전망
- III. 핵심소재와 차세대 전지 개발 동향
- IV. 대응 방향

리튬 이차전지는 모바일 IT기기에 사용되는 소형전지와 전기자동차 및 대용량 전기저장 장치에 사용되는 중·대형전지로 구분되며, 최근 전기자동차용을 중심으로 시장이 성장하고 있다. LG화학, 삼성SDI 등 국내 리튬 이차전지 생산업체는 글로벌 경쟁력을 확보하고 있다. 향후 세계시장이 전기자동차용을 중심으로 연평균 10% 이상 성장하고, 당분간 한·중·일 기업이 주도할 것으로 예상된다. 한국 3사는 동유럽, 중국 등 해외 중심으로 증설투자를 진행하고 있다.

리튬 이차전지는 4대 소재인 양극활물질, 음극활물질, 분리막 및 전해질로 구성되며, 소재분야는 이차전지에 비해서는 세계시장점유율이 낮은 등 발전이 미흡하다. 양극 활물질과 분리막은 국산화를 완료하고 일본과 더불어 기술개발을 선도하고 있으며 증설투자가 활발하나, 음극활물질과 전해질은 일본과 중국으로부터 수입 비중이 높은 상황이다.

현재 리튬 이차전지의 안전성을 높이고 용량을 확대하기 위해 4대 소재별로 다양한 개발이 이루어지고 있다. 아울러 전고체 전지, 리튬 공기전지 등 차세대 전지가 개발되고 있으나, 상용화까지는 상당한 기간이 걸릴 것으로 보인다.

앞으로 국내 리튬 이차전지산업이 지속적으로 발전하기 위해서는 소재분야 및 국내 Value Chain을 강화하여야 하며, 국가 간 경쟁이 치열한 상황에서 경쟁력 확보 노력이 필요하다. 업계는 대·중소기업 간 협력 강화를 위한 산업생태계 조성, 소재 업체의 해외 판로 개척 등을 추진할 필요가 있다. 또한, 정부는 외국의 자국산업 육성에 대한 대응, 기술개발 촉진, 전기자동차 충전소 확충 등을 추진하고, 금융부문은 소재 업체의 생산능력 확충을 위한 자금 공급과 함께 다양한 방식의 금융을 제공해나가야 할 것으로 보인다.

* 본고의 내용은 집필자의 견해로 당행의 공식입장이 아님

I . 리튬 이차전지 개요

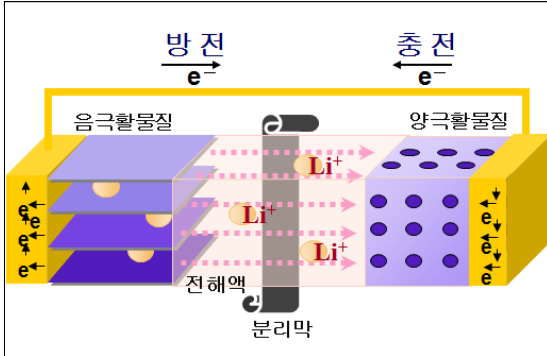
1. 리튬 이차전지의 핵심소재와 원리

□ 전지의 구성과 작동원리

- 리튬 이차전지¹⁾는 양극활물질(Cathode), 음극활물질(Anode), 분리막(Separator), 전해질(Electrolyte) 등으로 구성
 - 양극활물질은 리튬 이온의 공급원이며 충전시 산화반응이 일어나면서 리튬 이온을 방출하며, 방전시 환원반응이 일어나면서 리튬 이온을 흡수
 - 음극활물질은 양극활물질과 반대로 충전시 리튬 이온과 전자(Electron)를 흡수하며, 방전시 리튬 이온과 전자를 방출
 - 분리막은 전지의 양극활물질과 음극활물질을 분리하여 내부단락(닿는 것)을 방지함과 동시에, 충·방전이 일어날 수 있도록 리튬 이온을 통과시키는 기능을 하는 다공성 고분자 필름임
 - 전해질은 양극활물질과 음극활물질에서 산화 또는 환원된 이온이 이동할 수 있는 통로를 제공
- 전지는 양극활물질과 음극활물질 사이의 화학에너지 차이를 이용한 것으로, 방전시 음극활물질에 있는 리튬 이온이 전해질을 통해 화학에너지 준위가 상대적으로 낮은 양극활물질로 자발적으로 삽입되고, 이때 전자가 외부 도선으로 흐르면서 전원 역할을 수행
 - 충전은 방전과 반대로 양극활물질의 에너지 준위를 외부회로(충전기)를 통해 높게 만들어 리튬 이온이 음극활물질로 저장되는 과정임
 - 양극활물질은 리튬 이온을 많이 함유할수록 전지의 용량이 커지며, 장기간 충·방전에 따라 양극활물질의 결정구조가 안정적으로 유지되어야 전지 수명이 길어지는 등 전지 성능에 가장 큰 영향을 미치며, 원재료비에서 차지하는 비중도 가장 큰 핵심소재임

1) 한번 사용 후 폐기하는 전지는 일차전지, 충·방전이 가능한 전지는 이차전지로 분류

<그림 1> 리튬 이차전지 작동원리



<표 1> 리튬 이차전지 원가 구성

(단위 : %)

| 구 성 | 비 중 |
|----------|-----|
| 양극활물질 | 40 |
| 음극활물질 | 10 |
| 분 리 막 | 15 |
| 전 해 질 | 10 |
| 기타(조립 등) | 25 |
| 합 계 | 100 |

○ 리튬 이차전지는 형태에 따라 원통형, 각형 및 폴리머로 구분

- 원통형은 주로 전동공구 등 고출력이 요구되는 기기에 적용되며, 각형과 폴리머는 휴대폰, 전기자동차 등에 주로 사용

<표 2> 리튬 이차전지 Cell 종류

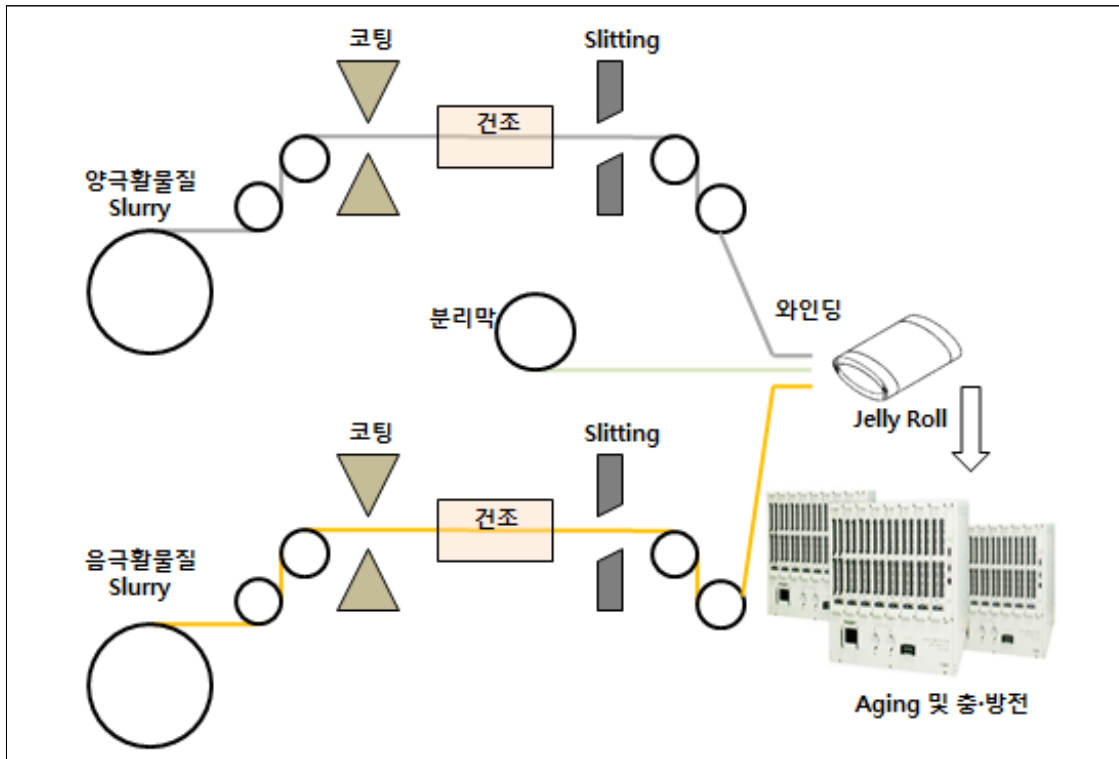
| 구분 | 원통형(Cylindrical) | 각형(Prismatic) | 폴리머(Polymer) |
|-------|---|--|---|
| 외장 소재 | 철 | 알루미늄 | 파우치(Pouch) |
| 특징 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 고용량, 고에너지 밀도 ■ 방전 특성 우수(고출력) | <ul style="list-style-type: none"> ■ 슬림형 ■ 고에너지 밀도 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 초박형, 고에너지 밀도 ■ Size Flexibility 우수 |
| 형태 | | | |

2. 생산공정

□ 극판, 조립, 화성공정을 통해 리튬 이차전지 생산

- 리튬 이차전지 생산공정은 ① 극판공정, ② 조립공정, ③ 화성공정으로 구분됨²⁾
 - 극판공정은 양극활물질과 음극활물질에 유기용매 등을 섞어 Slurry 상태로 만든 후, 양극활물질은 알루미늄박(Al Foil), 음극활물질은 구리박(Cu Foil) 위에 코팅하여 양극재와 음극재를 생산
 - 조립공정은 크기에 맞게 Slitting(절단)된 양극재와 음극재 사이에 분리막을 삽입하고 와인딩하여 Jelly Roll를 만든 후 전해질을 주입하는 공정
 - 화성공정은 양극재와 음극재에 전해질이 잘 스며들도록 Aging 및 충·방전을 통해 전류가 자발적으로 흐를 수 있도록 전지를 활성화시킴

〈그림 2〉 리튬 이차전지 생산공정



2) 변승우·이용민·유명현·이호원(2018)을 참고

II. 리튬 이차전지 시장 현황 및 전망

1. 분야별 시장 현황

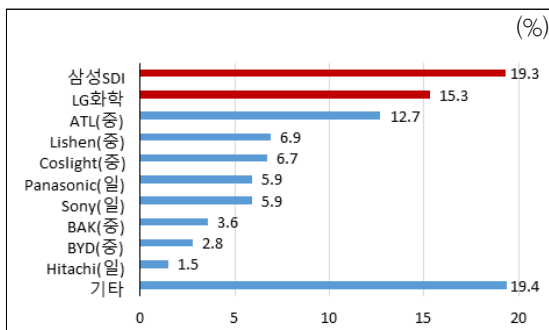
□ 세계 리튬 이차전지 시장은 전기자동차용과 IT용이 대부분을 차지

- 리튬 이차전지는 용도에 따라 모바일 IT기기에 주로 사용되는 소형전지와 전기자동차(xEV) 및 대용량 전기저장장치(ESS) 등에 사용되는 중·대형전지로 구분
- 세계 리튬 이차전지 시장규모는 2017년 187억달러이며, xEV용이 50.3%, IT용 소형전지가 46.0%, ESS용이 3.7%를 차지³⁾

□ 소형전지는 삼성SDI가 세계 1위, LG화학이 세계 2위 점유율 차지

- 삼성SDI와 LG화학은 모바일 IT기기 시장을 기반으로 전동공구, E-Bike 등 사용처가 확대되면서 2017년 시장점유율이 각각 19.3%와 15.3%로 선두권 유지

〈그림 3〉 소형전지 시장점유율(2017년)



주 : 표의 괄호 안은 점유율 순위

자료 : SNE Research(2018a), “글로벌 이차전지 시장 동향 및 산업 전망” 등

〈표 3〉 주요업체 연도별 시장점유율(소형)

(단위 : %)

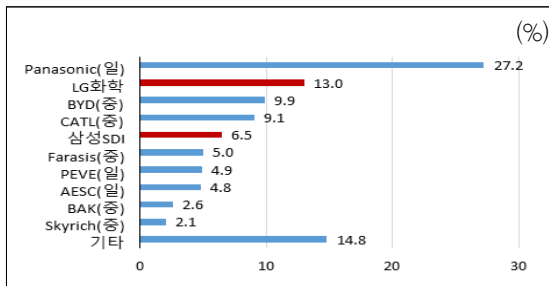
| 구 분 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------|---------|---------|---------|
| 삼성SDI | 23.1(1) | 21.6(1) | 19.3(1) |
| LG화학 | 16.5(2) | 16.1(2) | 15.3(2) |
| 2사 합계 | 39.6 | 37.7 | 34.6 |

3) SNE Research(2018a)를 참고

□ 전기자동차(xEV)용은 LG화학이 세계 2위, 삼성SDI가 세계 5위 수준

- Panasonic은 Tesla 앞 납품으로 점유율 1위를 차지하고 있으며, 전기자동차 산업이 급속히 발전하고 있는 중국의 BYD, CATL, Farasis, BAK, Skyrich 등이 세계 10위권 이내로 강세를 보임
- 국내 업계가 시장점유율을 확대하고 있는 가운데 2017년 LG화학은 세계 2위, 삼성SDI는 5위를 기록
 - SK이노베이션은 후발주자로서 현재 시장점유율은 미미하나, 2022년까지 xEV분야 세계 3위 달성을 목표로 과감한 투자 진행 중

〈그림 4〉 xEV용 전지 시장점유율(2017년)



주 : 표의 괄호 안은 점유율 순위

자료 : SNE Research(2018a), “글로벌 이차전지 시장 동향 및 산업 전망” 등

〈표 4〉 주요업체 연도별 시장점유율(xEV)

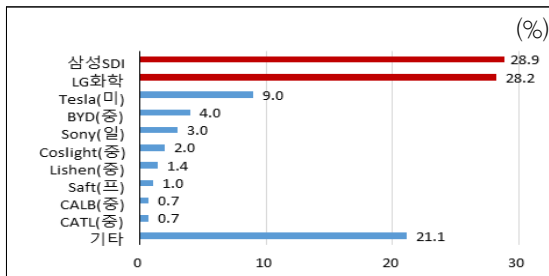
(단위 : %)

| 구 분 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-----------|---------|---------|---------|
| Panasonic | 34.8(1) | 31.3(1) | 27.2(1) |
| LG화학 | 7.7(3) | 7.3(3) | 13.0(2) |
| 삼성SDI | 5.8(5) | 5.4(5) | 6.5(5) |
| 3사 합계 | 48.3 | 44.0 | 46.7 |

□ ESS용은 삼성SDI와 LG화학이 세계시장점유율 50% 이상 차지

- ESS용 시장은 xEV 대비 시장규모가 작아, 업체별 투자가 미미하여 향후에도 삼성SDI와 LG화학이 업계를 주도할 전망

〈그림 5〉 ESS용 전지 시장점유율(2017년)



주 : 괄호 안은 점유율 순위

자료 : SNE Research(2018a), “글로벌 이차전지 시장 동향 및 산업 전망” 등

〈표 5〉 주요업체 연도별 시장점유율(ESS)

(단위 : %)

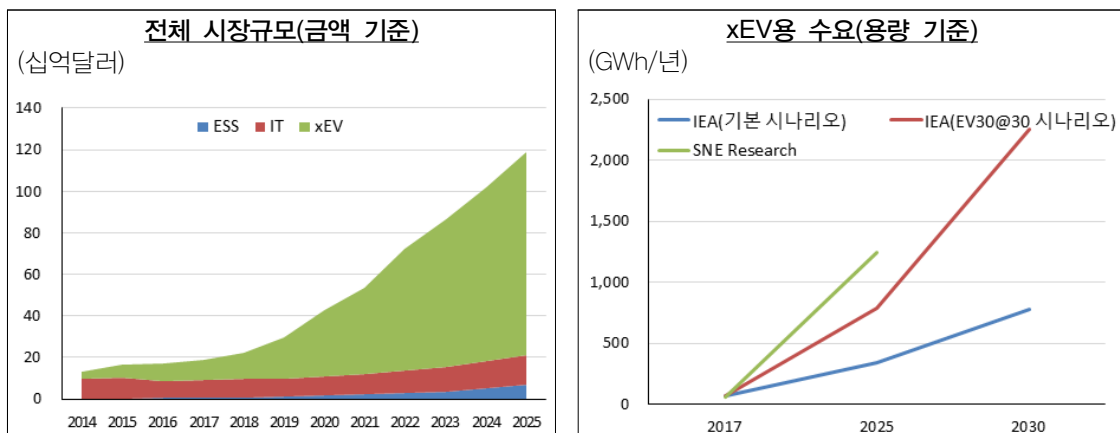
| 구 분 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------|---------|---------|---------|
| 삼성SDI | 16.1(1) | 10.8(3) | 28.9(1) |
| LG화학 | 9.0(3) | 18.2(2) | 28.2(2) |
| Tesla | 3.2(10) | 18.7(1) | 9.0(3) |
| 3사 합계 | 28.3 | 47.7 | 66.1 |

2. 시장 성장 전망

□ 리튬 이차전지 시장은 xEV용 중심으로 연평균 10% 이상 성장 전망

- 소형전지 수요는 휴대폰 시장 성장 둔화 등으로 증가율이 낮은 반면, xEV용은 전기자동차 보급 확대에 급성장 전망⁴⁾
- 전망기관 및 가정에 따라 상이하나 세계 리튬 이차전지 시장은 2017~2025년 중 금액 기준으로 연평균 10% 이상 성장 전망
 - SNE Research(2018a)는 2017~2025년 중 금액 기준으로 연평균 26.0%, 용량 기준으로 37.6% 성장할 것으로 전망
 - xEV용은 각각 연평균 45.7%, 34.0% 성장할 것으로 예상
 - IEA(2018)는 xEV용 이차전지 수요가 2017~2025년 중 용량 기준으로 연평균 약 22% 성장하고, 2025~2030년 중 다시 약 2배로 성장할 것으로 전망
 - EV30@30 시나리오(2030년까지 전기자동차 시장점유율 30% 달성)에서는 2017~2025년 중 용량 기준으로 연평균 약 36% 증가하고, 2025~2030년 중 다시 약 3배로 성장할 것으로 예상

〈그림 6〉 리튬 이차전지 시장 성장 추이 및 전망



주 : 전체 시장규모는 SNE Research 전망치이며, 셀 가격 기준임
 자료 : SNE Research(2018b), “리튬 이차전지 주요 업체 심층 분석” 및 IEA(2018), “Global EV Outlook 2018”

4) SNE Research(2018b)에 따르면 2017년 xEV용이 IT용을 상회하기 시작했으며, 2025년에는 xEV용이 82.3%를 차지할 전망

□ 리튬 이차전지 시장은 당분간 한·중·일 기업이 주도할 전망

- 최대 전기자동차 시장을 보유하고 있는 중국⁵⁾의 증설이 활발하며, 한국 3사도 동유럽, 중국 등 해외 중심으로 증설투자 진행 중
- 일본 Panasonic도 증설 추진 중이나 상대적으로 소규모

〈표 6〉 한·중·일 주요 업체의 생산능력 추이 및 전망

(단위 : GWh)

| 구분 | 제 조 사 | 2016 | 2017 | 2018(F) | 2019(F) | 2020(F) |
|-----|-------------------|------|------|---------|---------|---------|
| 한 국 | LG화학 | 11 | 20 | 35 | 55 | 90 |
| | 삼성SDI | 7 | 7 | 15 | 24 | 35 |
| | SK이노베이션 | 1 | 1 | 5 | 5 | 20 |
| | 계 | 19 | 28 | 55 | 84 | 145 |
| 중 국 | CATL | 8 | 17 | 32 | 54 | 80 |
| | BYD | 12 | 16 | 30 | 45 | 60 |
| | Optimum | 3 | 12 | 14 | 16 | 16 |
| | Lishen | 3 | 7 | 15 | 15 | 15 |
| | Guoxuan High-tech | 1 | 6 | 9 | 9 | 9 |
| | Guoneng | 2 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| | BAK | 3 | 8 | 12 | 12 | 12 |
| | Wanxiang | 3 | 4 | 7 | 7 | 7 |
| | 기타 | 10 | 15 | 13 | 13 | 13 |
| | 계 | 45 | 89 | 140 | 179 | 220 |
| 일 본 | Panasonic | 10 | 20 | 40 | 55 | 65 |

자료 : 이원식·고문영(2018), “2019년 반도체/디스플레이 전망”

〈표 7〉 국내 이차전지 업체의 지역별 생산능력 증가 전망

(단위 : GWh)

| 구분 | LG화학 | | | 삼성SDI | | | SK이노베이션 | | |
|------|------|------------------------------|----|-------|-----------------------|----|---------|---------------------|----|
| | 국내 | 해외 | 계 | 국내 | 해외 | 계 | 국내 | 해외 | 계 |
| 2018 | 10 | 25 (중국 17, 미국 5, 폴란드 3) | 35 | 9 | 6 (중국 6) | 15 | 5 | - | 5 |
| 2020 | 10 | 80 (중국 38, 미국 10, 폴란드 32) | 90 | 11 | 24 (중국 14, 헝가리 10) | 35 | 5 | 15 (중국 7, 헝가리 8) | 20 |
| 증 감 | - | 55 | 55 | 2 | 18 | 20 | - | 15 | 15 |

자료 : 각 사 공시자료 등

5) IEA(2018)에 따르면, 중국의 전기자동차(BEV 및 PHEV) 판매량은 2017년 579천대로서 전 세계 판매량 1,149천대의 50.4%를 차지

- 한국 기업은 고객사를 다양하게 확보하여 시장지위 유지 예상
 - LG화학은 Volkswagen, GM, 현대기아차 등 다양한 고객사를 확보하였으며, 삼성SDI는 Volkswagen, BMW 등과 파트너십을 통해 대규모 수주에 성공
 - 중국 CATL은 중국내 xEV 성장세와 더불어 해외수주도 확장 중이며, Panasonic은 Tesla에 집중되어 있음⁶⁾

〈표 8〉 주요 xEV용 리튬 이차전지업체 수주 현황

| 주요 xEV 제조업체 | LG화학 | 삼성SDI | CATL | Panasonic |
|----------------|------|-------|------|-----------|
| Volkswagen | ● | ● | ● | ● |
| BMW | ○ | ● | ● | |
| Daimler | ● | | ● | |
| Renault-Nissan | ● | ○ | ○ | |
| GM | ● | | ○ | ● |
| 현대기아차 | ● | | ○ | |
| Tesla | | | | ● |

주 : ●는 파트너십 또는 대규모 수주, ○는 납품 협의 또는 소규모 수주를 나타냄
 자료 : 이안나(2019), “LG화학 기업분석 리포트”

- 한편, EU와 미국도 xEV용 리튬 이차전지 투자를 추진하고 있어 향후 한국 기업에게 위협요인으로 작용 가능
 - EU는 2017.10월 European Battery Alliance를 출범시키고 2018.5월 Strategic Action Plan을 발표하였으며, 유럽투자은행(EIB)을 통해 North Volt(스웨덴, 2016년 창업)에 리튬 이차전지 공장 건설을 위한 5,250만유로의 대출을 승인하는 등 지원 추진 중
 - 미국의 Tesla는 Panasonic과 합작하여 2020년까지 전기자동차용 이차전지 생산을 위한 대규모 공장인 Giga Factory를 65GWh 규모로 준공할 계획

6) 최영산·남정미·심의섭(2019)을 참고

3. 4대 소재 생산업체 및 주요 이차전지 업체 Supply Chain

(1) 국내외 4대 소재 생산업체

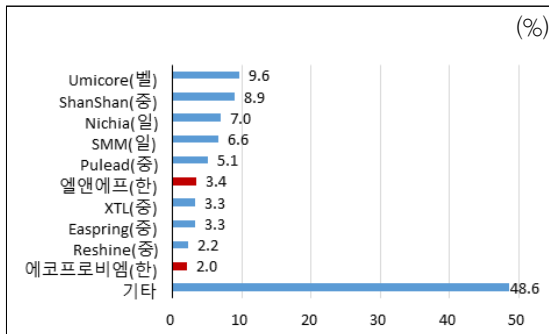
□ 양극활물질의 경우, 국내 엘앤에프와 에코프로비엠이 세계 6, 10위

- 벨기에의 Umicore와 중국 ShanShan이 세계시장점유율 1, 2위
 - Umicore는 전 세계 주요 이차전지 생산업체에 공급하고 있으며, ShanShan은 CATL 등 중국의 이차전지 생산업체 위주로 판매
- 국내 기업으로는 엘앤에프와 에코프로비엠이 세계시장점유율 6위 및 10위이며, 이외에 코스모신소재, 포스코케미칼 등이 있음
 - 엘앤에프와 에코프로비엠은 중·대형전지용 양극활물질을 생산하고 있으며, 코스모신소재는 소형전지용을 주로 생산
 - 포스코케미칼은 2018년부터 중·대형전지용 양극활물질을 생산

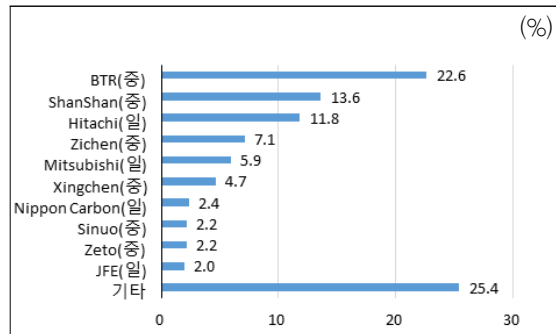
□ 음극활물질은 중국과 일본이 강세이며, 국내 기업은 10위권에 없음

- 음극활물질 시장은 광물자원이 풍부한 중국과 전통적인 탄소산업 강국인 일본이 강세를 보이고 있음
- 국내에는 포스코케미칼, 대주전자재료 등이 있으나, 실제 생산은 포스코케미칼만 하고 있으며, 대주전자재료는 2019년 이후 양산 예정

〈그림 7〉 양극활물질 시장점유율(2017년)



〈그림 8〉 음극활물질 시장점유율(2017년)



자료 : SNE Research(2018b), “리튬 이차전지 주요 소재 업체 심층 분석”

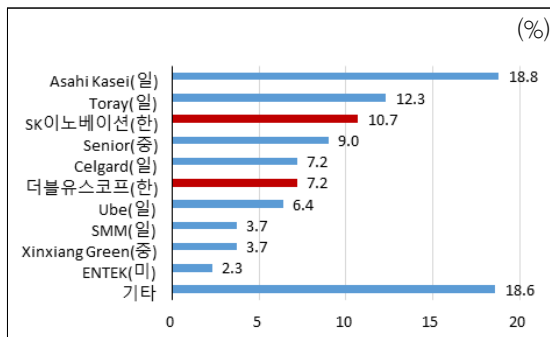
□ 분리막은 SK이노베이션이 세계 3위 등 국내 기업이 강세

- 분리막은 일본의 Asahi Kasei와 Toray, 국내의 SK이노베이션이 시장점유율 Top 3를 형성하고 있으며, 더블유스코프는 6위 수준
 - 분리막은 열적 변화에 따른 발화·폭발 등 안전성 측면에서 중요한 역할을 하는 소재로서 신제품 적용에 있어 대단히 보수적이어서, 다른 소재에 비해 한국과 일본이 강세이고 중국은 약세
- SK이노베이션은 자사와 삼성SDI 등에 공급하고 있으며, 더블유스코프는 삼성SDI와 LG화학에 납품

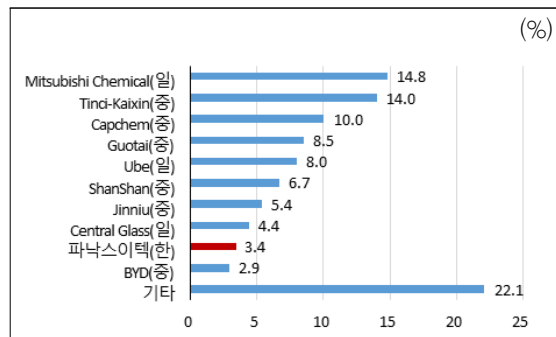
□ 전해질은 일본·중국 업체 비중이 크고, 국내 기업의 점유율이 낮음

- Mitsubishi Chemical이 시장점유율 1위로 일본, 한국 및 중국에도 공급하며, 중국 업체가 2~4위 차지
- 국내 기업으로는 파낙스이텍이 시장점유율 9위이나, 원가절감 추세로 중국산 비중이 증가하여 국내 업체들이 고전하고 있는 분야

〈그림 9〉 분리막 시장점유율(2017년)



〈그림 10〉 전해질 시장점유율(2017년)



자료 : SNE Research(2018b), “리튬 이차전지 주요 소재 업체 심층 분석”

(2) 주요 이차전지 업체 Supply Chain

□ 일본·중국의 이차전지 기업은 소재를 자국 업체들로부터 조달하나, 국내 이차전지 기업은 외국 업체를 포함한 Multi Vendor 체제 유지

- 4대 소재시장은 2000년대 초반까지 일본 업체들이 기술력을 바탕으로 시장을 주도하였으나, 한국과 중국 업체들의 성장으로 이차전지 생산업체별 Supply Chain이 다양화되고 경쟁이 치열해짐
- 일본 Panasonic과 중국 CATL은 주로 자국 업체로부터 소재 조달
 - 단, CATL은 분리막을 한국과 일본 업체로부터 조달하고 있음
- 한국의 삼성SDI와 LG화학은 공급 안정성을 위해 Multi Vendor 체제를 유지하고 있으며, 외국 기업으로부터도 상당부분 수입
 - 국내 소재 업체들은 주로 삼성SDI와 LG화학에 매출이 집중되어 있음

<표 9> 주요 이차전지 생산업체별 Supply Chain

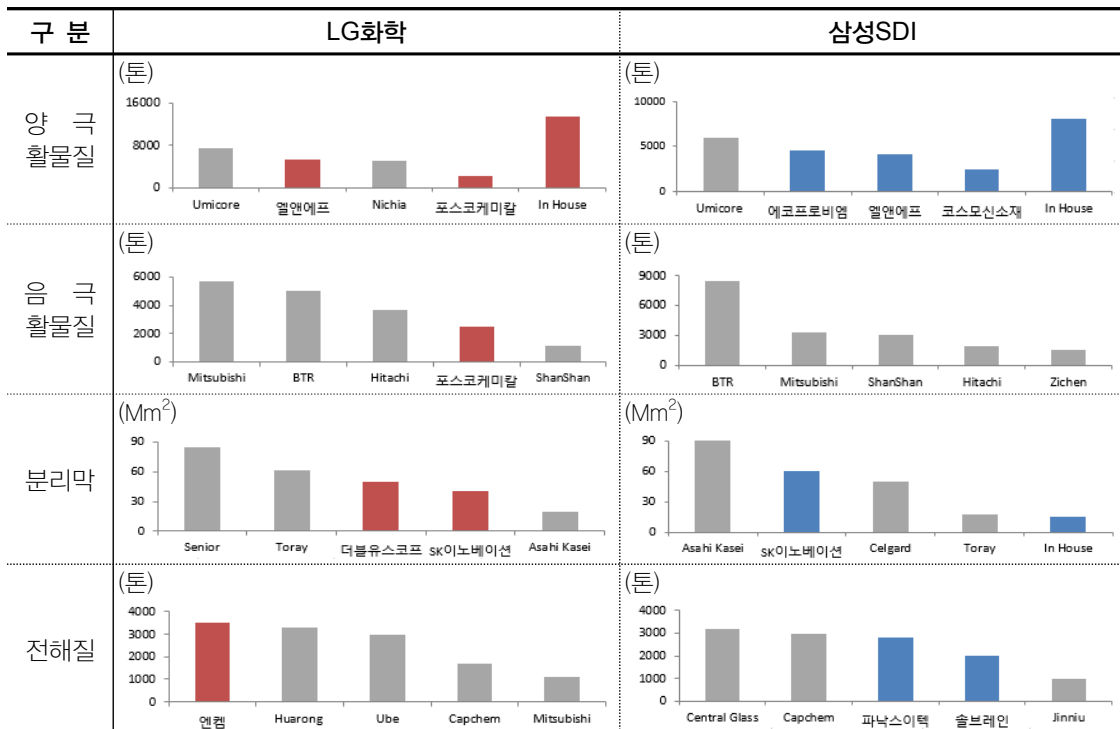
| 구 분 | | LG화학 | 삼성SDI | Panasonic | CATL |
|------------|----|--|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 양 극 활물질 | 자국 | 엘앤에프 포스코케미칼 | 엘앤에프 에코프로비엠 코스모신소재 | Sumitomo(일) Nichia(일) | Pulead(중) Jinhua(중) |
| | 외국 | Umicore(벨기에) Nichia(일) | Umicore(벨기에) Reshine(중) | - | - |
| 음 극 활물질 | 자국 | 포스코케미칼 | - | Hitachi Chem.(일) Nippon Carbon(일) | Zichen(중) BTR(중) |
| | 외국 | BTR(중) ShanShan(중) Mitsubishi Chem.(일) | BTR(중) ShanShan(중) Mitsubishi Chem.(일) | BTR(중) | JFE(일) |
| 분리막 | 자국 | SK이노베이션 | SK이노베이션 | Asahi Kasei(일) Toray(일) | - |
| | 외국 | Asahi Kasei(일) Senior(중) | Asahi Kasei(일) Toray(일) | - | SK이노베이션 Asahi Kasei(일) Ube(일) |
| 전해질 | 자국 | 엔켐 | 파낙스이텍 | Mitsubishi Chem.(일) Ube(일) | Kaixin(중) Capchem(중) |
| | 외국 | Huarong(중) Capchem(중) | Central Glass(일) | - | - |

자료 : 각사 보도자료 등

□ 4대 소재의 국산화가 이루어졌으나, 소재별로 국산화율 상이

- 이차전지 4대 소재는 국산화가 이루어졌으나, 이차전지에 비해 세계시장점유율이 낮은 상대적으로 발전 미흡
- 소재별 국내조달 비중은 양극활물질과 분리막은 높으나, 음극활물질과 전해질은 낮은 수준
 - 양극활물질과 분리막은 과거 대일 의존도가 높았으나, 2010년 이후 국내 업체들이 성장하여 현재 일본과 더불어 기술개발을 선도하고 있으며 생산량 확대를 위한 추가 투자가 이루어지고 있음
 - 전해질과 음극활물질은 일본·중국으로부터 수입비중이 높고 이차전지 생산량이 늘어날수록 해외의존도가 커지고 있음

<그림 11> LG화학 및 삼성SDI의 4대 핵심소재 사용현황(2017년)



주 : 1) 붉은색과 푸른색은 각각 LG화학과 삼성SDI에 납품하고 있는 국내업체

2) In House는 LG화학과 삼성SDI가 자체적으로 생산하고 있는 물량

자료 : SNE Research(2018b), "리튬 이차전지 주요 소재 업체 심층 분석"

Ⅲ. 핵심소재와 차세대 전지 개발 동향

1. 주요 핵심소재별 기술개발 동향

□ 양극활물질의 경우, 중·대형전지용으로 NCM 중심의 개발 추진 중

- 중·대형전지용 양극활물질로 LFP, LMO, NCA, NCM 등이 있으나 NCA와 NCM이 주로 사용되며, 소형전지용으로는 LCO가 주로 사용⁷⁾
- 중·대형전지 양극활물질의 특징은 LCO 대비 표면적이 넓어 출력 밀도가 우수하고, 고가의 코발트(Co) 함량이 적어 가격경쟁력이 우수

〈표 10〉 중·대형전지의 양극활물질 비교

| 항 목 | LFP | LMO | NCA | NCM |
|-----|---------------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| 장 점 | • 열안정성 우수 | • 합성이 용이 • 가격경쟁력 우수 | • 용량 우수 • 수명 우수 | • 순간출력 우수 • 수명 우수 |
| 단 점 | • 수명 열위 • 용량이 낮음 | • 수명 열위 • 용량이 낮음 | • 합성이 어려움 | • 합성이 어려움 |

- NCM은 니켈(Ni)의 함량이 높을수록 용량이 증가하는 특징으로, 니켈 함량을 증가시키는 방향으로 개발이 가속화되고 있음
- 니켈 함량에 따라 532(Ni 50%, Co 30%, Mn 20%), 622(Ni 60%, Co 20%, Mn 20%), 811(Ni 80%, Co 10%, Mn 10%)로 구분
- 국내와 일본 업체들은 NCM 대용량화를 위해 NCM 811을 개발하는 등 High End 제품에 집중하고 있음
- 중국 업체들은 LFP 등 저가 소재 생산에 강점이 있으나, NCA 생산기술은 확보하지 못하였고, 최근 NCM 622를 개발하는 등 기술력 차이가 있음

7) 이현규·김용기·하수진(2018)에 의하면 중·대형전지용으로는 저렴한 가격과 고출력의 장점을 지닌 LFP(LiFePO₄), LMO(LiMnO₂), NCA(Li[Ni_xAl_yCo_z]O₂), NCM(Li[Ni_xCo_yMn_z]O₂) 등이 개발되었으나, 최근에는 합성의 어려움에도 불구하고 용량, 출력 및 수명의 장점으로 NCA와 NCM이 주로 사용됨. 소형전지에는 LCO(LiCoO₂)가 주로 사용되고 있으며, 우수한 방전 및 고용량 특성을 가지고, 단위 부피당 많은 양을 충전하여 밀도를 높게 할 수 있어 크기가 작은 소형 IT기기에 적합함

○ NCA는 기술적 장벽이 높은 제품이며 한국과 일본 업체가 기존 제품의 안정적 생산에 집중하고 있음⁸⁾

〈표 11〉 NCA와 NCM 비교

| 양극활물질 | 주요 조성 | 니켈(Ni) 함량 | | 용량(Wh/kg) | 비 고 |
|-------|------------|-----------|-----|-----------|---------------------|
| NCA | Ni, Co, Al | 80% 이상 | | 270 | NCA와 NCM811의 용량이 유사 |
| NCM | Ni, Co, Mn | 532 | 50% | 205 | |
| | | 622 | 60% | 225 | |
| | | 811 | 80% | 270 | |

주 : NCM의 니켈 함량이 높을수록 용량이 증가하며, 생산 난이도가 높아짐

□ 음극활물질은 실리콘(Si)계를 통한 용량 확대 추진 중

- 음극활물질은 양극활물질과 더불어 리튬 이차전지의 용량, 출력, 안전성 등을 결정하는 주요 소재로, 리튬 이온을 안정적으로 많이 저장하여 방전시 전지 사용시간을 늘릴 수 있는 특성을 부여함
- 일본을 중심으로 탄소에 실리콘을 함유시킨 고용량 음극활물질 사업화가 활발히 이루어지고 있음
 - 음극소재로 사용되고 있는 탄소(Carbon)는 용량이 370mAh/g으로 제한되어 있으나, 탄소에 실리콘(Si)이 함유되면 용량이 430mAh/g으로 증가⁹⁾
 - 현재 개발되고 있는 고용량 음극소재는 실리콘(Si)계, 주석(Sn)계, 안티몬(Sb)계 등이나, 일본을 중심으로 실리콘계 음극활물질의 사업화가 가장 활발하게 이루어지고 있음
 - LG화학 등은 Shinetsu(일)가 개발한 제품을 소량 사용¹⁰⁾하고 있으며, 국내 기업인 대주전자재료가 2020년 상용화를 목표로 개발 중

8) NCA는 NCM 532, 622에 비하여 고난도 합성 및 정밀한 조성제어기술이 요구되는 등 기술적 장벽이 높은 제품임. NCA는 이미 80% 이상의 니켈 함성으로 추가로 니켈 함량을 늘릴 경우, 화학적으로 불안정하기 때문에 용량 확대에는 한계가 있어 기존제품의 안정적 생산에 집중되고 있음. 현재, 일본의 스미토모, 일본화학, BASF토다 3개사와 국내의 예코프로비엠이 주로 생산하고 있으며, 중국은 NCA 생산기술을 확보하지 못한 상태임

9) Woo, et al.(2018)을 참고

10) 실리콘계 음극활물질은 충·방전을 통해 전지가 부풀게 되는 Swelling으로 수명 저하를 개선하지 못하고 있어, 현재는 용량 개선이 필요한 특정 제품군에 대하여 소량 혼합하여 사용 중

□ 분리막은 습식 및 세라믹 코팅 분리막의 대량생산 공정 개발이 추진 중

- 분리막은 제조방법에 따라 건식, 습식 및 세라믹 코팅 분리막으로 구분되며, 기존에는 소형전지에는 습식 분리막이 사용되고 중·대형전지에는 가격경쟁력의 문제로 건식 분리막이 사용되고 있음
- 분리막의 요구특성은 ① 양극재와 음극재의 물리적 접촉 차단으로 단락 방지, ② 리튬 이온이 전극 사이로 전달될 수 있는 통로 제공, ③ 과충전, 과방전 등 이상 작동시 화재·폭발 방지를 위한 높은 열적 안정성 등임

〈표 12〉 분리막 종류 및 특징

| 구 분 | 건식 분리막 | 습식 분리막 | 세라믹 코팅 분리막 |
|-------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 제조공법 | 압출된 P.P Film을 연신하여 가공 형성 | 압출된 P.E Film에 오일을 섞은 후 용제로 가공 형성 | 건식, 습식분리막에 무기물을 코팅 |
| 장 점 | •공정이 단순 •생산단가 낮음 | •기공도 및 강도 특성 양호 •두께 박형화 유리 | •열수축률을 줄여 안전성 강화 |
| 단 점 | •두께 박형화 한계 •기공도 불균일성 | •열수축성 열위 | •코팅 공정 추가로 비용 증가 |
| 용 도 | 중·대형 이차전지 (전동공구, ESS 등) | 소형 이차전지 (스마트폰 등 IT기기) | 중·대형 이차전지 (전기자동차 등) |
| 주요 업체 | Celgard, Ube, Senior 등 | Asahi Kasei, Toray, SK이노베이션 | 삼성SDI, LG화학 등 |

- 최근 중·대형전지의 화재사고 등으로 안전성 문제가 크게 대두되면서 습식 또는 내열성을 향상시킨 세라믹 코팅 분리막의 생산단가를 낮추는 공정 개발이 이루어지고 있음
- 습식 분리막은 두께가 얇아 단위부피당 많은 양극 및 음극활물질을 충전할 수 있어 용량면에서도 건식 분리막 대비 유리
- 세라믹 코팅 분리막은 습식 분리막에 열적 안정성이 높은 세라믹 분말을 코팅한 제품으로, 안전성이 특히 중요한 전기자동차의 고가 모델에 적용되고 있으며, 이차전지 제조업체인 삼성SDI와 LG화학 등에서 자체적으로 코팅하여 생산하고 있음

□ 전해질은 안정성 향상을 위한 첨가제 개발이 주로 추진 중

- 전해질은 유기용매, 리튬염 및 첨가제의 종류에 따라 특성이 결정되며¹¹⁾, 특히 고출력 향상과 폭발 방지 등을 위한 안정성을 개선하기 위해 여러 가지 첨가제가 개발되고 있음
- 기존에는 첨가제로 비닐렌카보네이트(VC), 시클로헥실벤젠(CHB) 등이 수명이나 온도 변화 등에 따른 전지의 폭발 방지를 위해 사용되고 있음
- 전기자동차는 IT기기에 비해 온도차이가 큰 환경에 장시간 노출되고 고용량의 전지가 사용되기 때문에, 전해질의 온도민감성을 개선시킬 수 있고 발화를 억제할 수 있는 첨가제가 개발되고 있음

2. 차세대 리튬 이차전지 개발 동향

(1) 전고체 전지

□ 전지의 모든 구성요소가 고체이며, 안전성이 우수하나 출력·수명 열위

- 전고체 리튬 이차전지(All-Solid-State Li-Battery)는 양극활물질, 음극활물질, 고체 전해질로 구성되며, 핵심기술은 전해질 상태를 고체로 구현하는 것임
- 일반적인 리튬 이차전지 대비 차이점은 전해질이 고체인 것과 분리막이 없는 것이며, 양극·음극활물질의 형태는 동일

〈표 13〉 전고체 전지와 리튬 이차전지 비교

| 구 분 | 전고체 리튬 이차전지 | | 일반 리튬 이차전지 | |
|-------|-------------|---------------------|------------------|------------------|
| 양극활물질 | 고 체 | LCO, NCA, NCM | 고 체 | LCO, NCA, NCM |
| 음극활물질 | 고 체 | Lithium, Carbon(흑연) | 고 체 | Carbon(흑연) |
| 전해질 | 고 체 | 산화물, 폴리머, 황화물 등 | 액 체 | NMP* + Li-Salt 등 |
| 분리막 | 없 음 | | 고체 폴리머(건식 또는 습식) | |

주 : NMP(N-Methylpyrrolidone)는 이온 전도도가 높은 유기용매로, 액체 전해질의 핵심소재임

11) 유기용매로는 에틸렌카보네이트(EC), 프로필렌카보네이트(PC) 등이 사용되며 리튬염은 LiPF₆, LiBF₄ 등이 사용되어, 전지의 구동속도를 향상시킴

- 장점은 전해질이 고체이기 때문에 온도 변화에 따른 증발 및 외부 충격에 따른 누액 위험이 없어 폭발 등으로부터 안전한 것임¹²⁾
- 단점은 ① 고체 전해질이 액체 전해질에 비해 리튬 이온의 이동속도가 낮아 전지의 출력이 낮은 것과, ② 고체인 양극 및 음극과 고체인 전해질이 맞닿은 계면저항이 액체 전해질에 비해 높아 수명이 기존 전지에 비해 열위한 것임¹³⁾

□ 참여업체들의 사업 매각·철수 등으로 상용화에 상당기간 소요 예상

- 전기자동차, 기존 이차전지 및 소재 업체들이 M&A 및 회사보유 기술로 사업화를 추진하였으나, 일부 기업이 최근 매각 또는 철수
 - Bosch는 M&A를 통해 인수한 전고체 전지 업체인 SEEO의 매각을 발표하였으며, Dyson도 최근 전고체 전지 사업에서 철수를 발표
- 향후 전고체 전지 상용화에는 상당기간이 소요될 것으로 예상
 - 일본 업체들도 개발 중이나, 실용화 사례는 아직 보고된 바 없음

〈표 14〉 주요 해외업체 전고체 전지 사업 동향

| 업체별 | 주요 내용 |
|--------|---|
| 전기 자동차 | Toyota(일)는 2011년부터 황화물계 고체 전해질을 개발, 2020년부터 생산 계획 |
| | Volkswagen(독)은 2014년에 전고체 전지 업체 QuantumScape(미)를 인수 |
| | Dyson(영)은 2015년에 전고체 전지 업체 Sakti3(미)를 인수하였으나, 2018년에 전고체 전지 철수(2018.9) |
| | Bosch(독)는 2015년에 전고체 전지 업체 SEEO(미)를 인수하였으나 매각 발표(2018.4) |
| 전 지 | Murata(일)는 자체보유한 세라믹 적층 기술과 2016년에 Sony로부터 인수한 전지 사업부를 융합하여 고체 전해질 개발 중 |
| 소 재 | Applied Materials(미)는 반도체 공정기술과 박막화 소재를 결합하여 Thin Film 고체 전해질 개발 |

자료 : 최정덕·하일곤(2017), “개발 경쟁 가속되는 차세대 2차전지” 등

12) 주대영(2018)을 참고

13) 전해질의 이온 전도도는 전지의 출력에 영향을 주며, 액체 전해질의 이온 전도도는 $10^{-2}(S/cm)$ 수준으로 고체 전해질 대비 10~1,000배 우수함. 한편, 전극과 전해질의 밀착도 등 접촉상태는 전지의 수명에 영향을 미침. 하운철(2019) 및 Kim, et al.(2002)을 참고

(2) 리튬 공기전지

□ 양극활물질로 공기 중 산소를 이용하며, 이론 용량 우위

- 리튬 공기전지는 양극활물질로 공기 중의 산소를 이용하고 음극활물질로는 리튬 금속을 사용하며, 전해질도 사용 물질이 상이
 - 분리막은 일반 리튬 이차전지와 같이 고체 폴리머를 사용

〈표 15〉 리튬 공기전지와 리튬 이차전지 비교

| 구 분 | 리튬 공기전지 | 일반 리튬 이차전지 |
|-------|------------------------------|---------------------|
| 양극활물질 | 고 체 O ₂ (산소), 공기극 | 고 체 LCO, NCA, NCM |
| 음극활물질 | 고 체 Lithium | 고 체 Carbon(흑연) |
| 전해질 | 액 체 유기계, 수계 등 | 액 체 NMP + Li-Salt 등 |
| 분리막 | 고체 폴리머(건식 또는 습식) | 고체 폴리머(건식 또는 습식) |

- 장점은 이론적으로 전기자동차에 적용시 1회 충전으로 가솔린차와 동일한 거리를 주행할 수 있는 대용량 전지 구현이 가능한 것임¹⁴⁾
 - 이는 가벼운 산소를 외부로부터 공급받아 전지를 구성함으로써 높은 에너지 밀도를 구현할 수 있기 때문임

□ 관련 소재 미개발로 상용화에 상당기간 소요 예상

- 아직 ① 양극활물질로 산소를 저장할 수 있는 전도성 소재와 ② 음극활물질로 사용되는 리튬의 안전성과 수명 문제를 해결할 소재가 개발되지 않은 상태임
 - 리튬은 수분을 접하게 되면 발화 및 폭발이 쉽게 일어나는 등 안전성이 취약한 소재
 - 또한, 50회 충·방전에도 표면이 심하게 손상되어 전지의 수명을 단축¹⁵⁾시키는 단점이 있어, 수명 특성을 향상시킬 수 있는 소재 개발이 필수

14) 박용준·김진영·윤선혜(2017)에 의하면 연구되고 있는 차세대 이차전지 중 이론적으로 가장 높은 용량을 구현할 수 있는 것은 리튬 공기전지임

15) Wi, et al.(2017)을 참고

IV. 대응 방향

1. 기본 방향

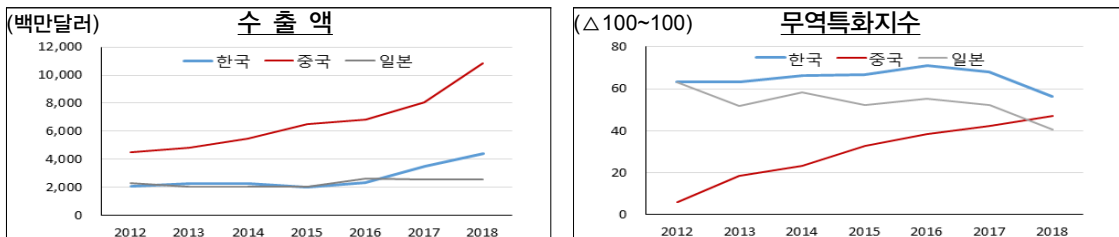
□ 국내 이차전지산업은 소재분야 및 국내 Value Chain 강화

- 국내 이차전지산업은 국내 3사가 글로벌 경쟁력을 확보하였으나 소재분야는 상대적으로 미흡
 - 4대 소재가 국내에서 개발되었으나 해외의존도가 높은 것은 생산능력의 측면에서 한계가 주요 요인으로 작용
 - 4대 소재 중 특히 음극활물질과 전해질의 생산 확대가 필요
- 최근 이차전지 업체의 설비투자는 해외 중심으로 진행되고 있어 국내 산업활동 강화 필요성이 있음
 - 국내 3사의 해외생산 확대는 소재 업체의 해외생산 확대로 이어질 가능성이 있어 국내 산업활동 강화 방안 모색 필요

□ 이차전지 관련 국가간 경쟁이 치열하게 전개되고 있어 경쟁력을 유지·강화하기 위한 노력이 긴요

- 수출액은 한국과 중국이 크게 성장한 반면 일본은 정체되어 있으며, 무역특화지수는 중국이 상승하는 가운데 한국과 일본은 최근 하락

〈그림 12〉 한·중·일의 리튬 이차전지 수출액 및 무역특화지수 추이



주 : 1) HS코드 850760 기준이며, 일본의 2018년 수출액은 월별 엔화 금액을 월평균 엔/달러환율로 나누어 계산된 달러화 금액을 합산하여 계산하였으며, 이전은 UN Comtrade 자료임

2) 무역특화지수는 [(수출-수입)/(수출+수입)]×100으로 계산되는 국제경쟁력 지표

자료 : 한국무역협회, UN Comtrade, 한국은행

- 국내 이차전지산업은 성장률과 세계시장점유율이 높으나, 혁신성장역량은 다른 신산업과 마찬가지로 다소 미흡한 것으로 평가되기도 함¹⁶⁾
- 최근 중국의 전기자동차 및 이차전지산업이 급속히 발전하고 있고 EU도 아시아 의존도 축소를 위해 European Battery Alliance 등을 추진하고 있어 국내 업계의 경쟁력 유지·강화 노력 필요
 - 아울러 정부, 금융부문, 학계 등의 공동 노력도 강화 필요

2. 업계, 정부 및 금융부문의 대응 방향

(1) 업계의 대응 방향

□ 대·중소기업간 협력 강화를 통한 산업생태계 조성

- 국내 이차전지산업이 소재에서부터 최종 완제품까지 효율적인 산업생태계를 조성하기 위해서는 국내 전지 3사(LG화학, 삼성SDI, SK이노베이션)가 소재·장비 협력사와 상생협력 강화 필요
 - 이를 위해 2017.9월 자금, 기술개발 등의 지원방안을 발표한 바 있는데¹⁷⁾, 앞으로도 다양한 방안을 모색·추진하여야 할 것임

□ 소재 업체는 국내 3사 외에 다양한 해외 판로 개척

- 국내 소재 업체는 현재 LG화학 등 전지 3사에 주로 납품하고 있는데, 이로 인해 안정적인 매출처 확보라는 장점은 있으나 향후 종속관계 심화 가능성, 매출 확대 한계 등의 문제점이 존재
- 앞으로 소재 업체는 자체적인 역량 강화를 통해 한국 기업의 해외생산공장뿐 아니라 외국 이차전지 업체에 대한 공급 등 추진 필요

16) 김종기(2019)를 참고

17) LG화학은 협력사에 대한 무이자 직접 대여, 삼성SDI는 협력사의 설비투자자금 직접 투자 또는 대여, SK이노베이션은 협력사와 공동으로 설비·장비 개발 등의 지원을 하기로 하였음. 상세 내용은 2017.9.8.자 산업통상자원부 보도자료 “이차전지 혁신생태계 조성 및 상생협력 적극 추진키로”를 참고

□ 경쟁력 유지 등을 위한 연구개발 투자 지속 확대

- 이차전지 관련 기술발전이 빠르게 진행되고 글로벌 경쟁이 심화되고 있어 품질경쟁력 유지, 차세대 전지 개발 등을 위한 연구개발 강화 필요
 - 필요시 국내 업계 공동으로 연구개발 등을 추진함으로써 효율성 제고 가능¹⁸⁾
- 아울러, 주대영(2018)이 언급한 것과 같이 핵심소재(리튬, 코발트, 니켈, 망간 등)의 해외자원 확보와 전문인력 양성도 추진하여야 할 것임

(2) 정부의 대응 방향

□ 외국의 자국산업 육성에 따른 국내 업계의 불이익 해소

- 중국, EU 등은 유망 성장산업인 이차전지산업 육성을 위해 다양한 정책을 추진 중이며, 중국이 한국 기업의 이차전지에 대해 보조금을 차별하는 등의 사례가 발생¹⁹⁾

□ 국내 이차전지 기술개발 촉진

- 향후 국내 이차전지산업 발전에 기술개발이 중요한 점을 고려하여 WTO협정 등 국제규범이 허용하는 범위 내에서 기술개발 지원방안을 모색·추진
- 아울러, 정부 출연 연구소가 이차전지 관련 기초기술을 중심으로 연구개발을 강화하고, 산학연 공동 연구개발도 촉진할 필요가 있음

□ 전기자동차 충전소 등 인프라 구축을 통한 국내 수요 확대

- 국내의 공공 전기자동차 충전소는 2019년 5월 현재 10,864개이며²⁰⁾, 정부는 대형마트, 고속도로 휴게소 등을 중심으로 확대 계획

18) 2018.11월 국내 3사(삼성SDI, LG화학, SK이노베이션)는 차세대 이차전지 기술 확보 등을 위해 관련 펀드 결성 및 공동 연구개발 협력을 위한 양해각서를 체결한 바 있음. 상세 내용은 2018.11.13.자 산업통상자원부 보도자료 “차세대배터리 주도권 확보를 위해 이차전지 3사가 힘을 합치기로”를 참고

19) 중국의 한국 기업 이차전지의 보조금 제외 문제는 한국 정부의 요구 등으로 2019.4월 해결되었음

20) 2019.5.20일 환경부의 전기차 충전소 홈페이지(www.ev.or.kr)에서 조회한 것임

- 아울러 거주지, 회사 주차장 등 생활공간에서 충전 인프라가 확대될 수 있도록 민간 참여를 활성화하기 위한 유인책이 필요
 - 개인·주택에서 충전 인프라를 확대할 수 있도록 비공용 충전기의 보조금 확대 및 시행기간 연장도 검토 가능

〈표 16〉 민간 충전 인프라 구축 보조금

| 항 목 | 보 조 금 | | 비 고 |
|---------|-------|-------|---------------------------------|
| 공용 충전기 | 1기 | 350만원 | 운영 주체 : 공동주택, 대규모 주차장 소유자 등 |
| | 2~5기 | 300만원 | |
| | 6기 이상 | 250만원 | |
| 비공용 충전기 | 130만원 | | 운영 주체 : 주택, 개인 ※ 2019년까지만 시행 |

자료 : 한국환경공단(2019.1), “전기자동차 완속충전기 보급계획”

(3) 금융부문의 대응 방향

□ 소재 업체의 생산능력 확충을 위한 자금 공급 중심으로 지원

- 국내 이차전지 3사는 외부자금 수요가 크지 않은 반면 소재 업체의 증설을 위한 자금 수요가 큰 것을 고려하여 자금 공급 추진
 - 국내 이차전지 3사는 부채비율이 낮고, 소재 업체는 신증설이 활발하며 외부자금 의존도가 비교적 높음²¹⁾

□ 매칭펀드, 기술개발자금 등 다양한 방식의 금융 제공을 모색·추진

- 소재 업체에 대해 국내 이차전지 3사와 금융기관이 공동으로 매칭펀드를 조성하여 자금을 공급하는 방안 검토 가능
- 중소·중견기업에 대해 설비투자자금뿐 아니라 기술개발자금 등도 적극 추진 필요

21) 2018년말 국내 이차전지 3사의 부채비율은 LG화학 43%, 삼성SDI 42%, SK이노베이션 22% 수준이며, 주요 소재 업체의 경우 엘앤에프 107%, 예코프로비엠 189%, 더블유스코프 45%, 파나스이텍 55% 등임

참고문헌

[국문자료]

- 김종기(2019), “신용합시대 국내 신산업의 혁신성장역량 평가와 과제”, i-KIET산업경제이슈, 제 63호, 산업연구원
- 박용준·김진영·윤선혜(2017), “리튬-공기 이차전지의 원리 및 연구동향”, 한국공업화학회지, 제 20권 제3호, 한국공업화학학회
- 변승우·이용민·유명현·이호원(2018), “리튬 이차전지 제조 및 평가 실험 실습”, 문운당
- 이안나(2019), “LG화학 기업분석 리포트”, BNK투자증권 2019.4.11자 기업분석 리포트
- 이원식·고문영(2018), “2019년 반도체/디스플레이 전망”, 신영증권
- 이현규·김용기·하수진(2018), “리튬이차전지 소재 기술동향”, S&T Market Report, 제62호, 과학기술일자리진흥원
- 주대영(2018), “국내 이차전지산업 현황과 발전과제”, KIET산업경제, 2018년 3월호, 산업연구원
- 최영산·남정미·심의섭(2019), “방향과 속력의 천칭(天秤)”, 유안타증권
- 최정덕·하일곤(2017), “개발 경쟁 가속되는 차세대 2차전지”, LG경제연구원
- 하윤철(2019), “전고체 전지의 문제점(계면저항)과 고체전해질 및 코팅기술을 이용한 해결방안”, 한국미래기술교육연구원 주최 “전고체 전지(Solid-state battery) 소재/공정 기술과 기술향상을 통한 상용화 방안” 세미나(2019.3.29) 자료집
- 한상준·박연주·김철중(2018), “국내에서 쉽게 접하지 못한 글로벌 이차전지 현황”, 미래에셋대우 SNE Research(2018a), “글로벌 이차전지 시장 동향 및 산업 전망”
_____ (2018b), “리튬 이차전지 주요 업체 심층 분석”

[영문자료]

- Kim, Byoungsoo, et al.(2002), “Ion-implantation Modification of Lithium-phosphorus Oxynitride Thin-films”, *Journal of Power Sources*, Vol. 109
- IEA(2018), *Global EV Outlook 2018*
- Wi, Sungun, et al.(2017), “Insights on the Delithiation/Lithiation Reactions of $\text{Li}_x\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4$ Mesocrystals in Li^+ Batteries by in situ Techniques”, *Nano Energy*, Vol. 39
- Woo, Hyungsub, et al.(2018), “Complementary Surface Modification by Disordered Carbon and Reduced Graphene Oxide on SnO_2 Hollow Spheres as an Anode for Li-Ion Battery”, *Carbon*, Vol. 129