

# 리튬 이차전지용 양극소재 개발동향

정경운 선임연구원 조병원 책임연구원(센터장) (KIST 이차전지연구센터)

## 1. 서론

1991년 소니에 의해 리튬 이차전지가 상용화된 이후 리튬 이차전지는 기존의 Ni-Cd 전지가 사용되던 영역을 급속히 대체해 나가기 시작하였다. 이 뿐만 아니라 신규시장을 개척해 나가며 시장규모를 지속적으로 확대시켜 왔다. 현재는 핸드폰, 노트북 컴퓨터, 디지털카메라 등 소형 휴대용 전자기기는 대부분이 리튬 이차전지를 사용하며, 최근에는 하이브리드 전기자동차 (Hybrid Electric Vehicle, HEV) 및 플러그인 하이브리드 전기자동차 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)에 리튬 이차전지를 탑재하기 위한 연구가 진행되고 있으며 궁극적으로는 순수 전기자동차 (Electric Vehicle, EV 또는 Battery Electric Vehicle, BEV)를 개발하기 위한 노력이 부단히 진행되고 있다. 전기자동차에서 리튬 이차전지는 현재 내연기관 자동차의 엔진과 같은 역할을 하며, 궁극적으로 자동차에 에너지를 공급할 수 있는 유일한 장치이므로 리튬 이차전지의 개발 없이는 전기자동차 또한 개발할 수 없다. 따라서 리튬 이차전지의 중요성은 더욱 부각이 되고 있는 현실이다. 이와 더불어 최근 녹색성장 및 환경문제가 중요한 이슈로 떠오르면서 신재생에너지 저장용 대형 이차전지에 대한 관심도 고조되고 있으며, 이에 대한 연구개발 투자도 점진적으로 증가하고 있다.

리튬 이차전지 분야에서 세계 1위의 기술력 및 시장점유율을 확보하고 있는 것으로 평가되는 일본의

경우 2008년도에 NEDO의 주도 아래 중장기적인 개발계획 (Cool Earth Program-에너지혁신 21개 기술)을 수립하고 전기·전자, 수송차량 (HEV, EV, 전철), 신재생 에너지시스템 등에 공통 핵심기기로 기반성이 있는 고성능 에너지 저장기기인 리튬 이차전지와 슈퍼커패시터의 연구개발을 집중지원하고 있다. 또한 일본의 자동차 업체인 Honda, Toyota 등은 Ni-MH 전지를 이용하여 세계 최초로 HEV를 출시하고, 현재는 이를 리튬 이차전지로 대체하기 위한 연구개발에 투자하고 있는 실정이다.

리튬 이차전지 소재 관련 원천기술을 대부분 보유하고 있는 미국의 경우 오바마 정권이 들어선 후 플러그인 하이브리드 전기자동차에 대한 중요성을 인식하고 이를 개발을 위해 핵심부품인 리튬 이차전지에 대한 투자가 증가하고 있다. 그러나 미국이 리튬 이차전지에 대한 연구개발 투자를 시작한 것은 근래의 일이 아니며 1990년대 초반부터 미국 에너지성 (USDOE, United States Department of Energy)의 주도로 자동차에 적용하기 위해 Ni-MH 전지로부터 현재는 리튬 이차전지까지 계속과제로써 R&D 자금 지원을 하고 있다. 2007년 4월에는 Basic Research Needs for Electrical Energy Storage 조사 및 분석에 따라 리튬 이차전지와 슈퍼커패시터를 전기에너지저장을 위한 집중연구개발 분야로 선정하였으며 [1], 최근에는 미국 국가 정보위원회 (NIC : National Intelligence Council)에서 선정된 6대 와해성 기술 분야에 이차전지, 슈퍼커패시터, 수소저장으로 대표되는 에너지저장소재가 포함되어 국가 경

쟁력에 큰 파급효과를 가지는 기술로 전망하며 집중적인 투자를 계획하고 있다 [2]. 또한, 2007년 1월 미 정부 (DOE)는 배터리기술개발에 1억4천만 불 투자를 발표하였으며 2008년 5월 플로리다 주 탐파에서 열린 AABC (Advanced Automotive Battery Conference)에서 DOE 서기관 Tien Duong은 '08년도에 자동차용 이차전지 개발에만 \$4,800만 불을 투자할 것을 발표하였으며, 상기투자를 통해 아르곤, 로렌스버클리, 부록헤븐 등 미국 주요 국립연구소에서 연구개발을 주도하고 있으며 니켈-망간-코발트 음극물질 개발의 3M社, 나노 철인산 양극물질 개발의 A123 Systems社, 망간 스핀넬 개발의 Compact Power社, 나노 리튬-티타늄과 니켈-망간 음극물질 개발의 EnerDel社, Nickelate/layerde 화학 분야의 Johnson Controls-Saft社 등의 5개社를 우선 협상자로 선정하여 기술개발을 진행하고 있다.

국내의 경우 1990년대 중반 경부터 삼성SDI와 LG 화학을 비롯한 여러 기업들이 리튬 이차전지사업을 준비하였으나 1998년의 외환위기에 의해 삼성SDI 및 LG화학을 제외한 다른 기업들은 중도하차하였다. 외환위기 하에서도 상기 2개社는 꾸준히 생산설비에 대한 투자를 진행하였으며, 출연연 및 대학들은 관련소재 및 기반기술에 대한 연구개발을 진행해왔다. 2008년 현재 삼성SDI와 LG화학은 각각 세계 2위 및 4위의 시장점유율을 보이고 있으며, 최근 SK 에너지와 몇몇 중소기업들이 리튬 이차전지 생산을 확대해 나가고 있고 국내 리튬 이차전지산업은 세계 2위의 경쟁력을 확보한 것으로 평가되고 있다. 그러나 그 이면에는 대부분의 부품 및 소재를 일본과 유럽으로부터의 수입에 의존하는 취약한 기반을 가지고 있는 것도 현실이다. 2000년대 중반부터는 지식경제부 (구 산업자원부) 차세대전지 성장동력사업단의 지원 하에 리튬 이차전지 및 양극, 음극소재를 개발하기 위한 연구개발 투자가 확대되었다. 최근에는 저탄소 녹색성장의 기조 아래 전기에너지 저장을 통해 에너지사용의 고효율화를 이루기 위해 리튬 이차전지의 연구개발에 대한 투자가 확대되고 있다. 지식경제부에서는 PHEV-10 및 PHEV-20용 리튬 이차전지를 개발하기 위한 프로그램을 2008년에 착수하였으며, 이중 PHEV-20 과제인 경우 1단계에서 리

튬 이차전지의 핵심소재인 양극 및 음극을 개발하는 것을 주요 목표로 하고 있다. 상기 두 프로그램에는 국내 주요 전지업체 및 소재 업체, 출연연과 대학들이 다수 참여하여 개발 중에 있다. 또한 교육과학기술부의 지원 하에는 생체내장형 이차전지, Wearable 이차전지, 플렉시블 필름전지 등 미래 IT 산업 및 특수 용도로 사용되며 고부가가치를 창출할 수 있는 이차전지개발을 위한 프로그램이 곧 착수될 예정이다.

리튬 이차전지란 리튬이온이 양극과 음극에 전기화학반응에 의해 삽입, 탈리되며 이때 발생하는 전자를 외부의 도선을 이용하여 전기에너지를 사용하는 장치이다 (그림 1). 리튬 이차전지의 4대 핵심부품은 양극, 음극, 전해질, 분리막을 꼽을 수 있다. 충전 시에는 리튬이온이 양극에서 음극으로 이동을 하며 이때 전류는 음극에서 양극 쪽으로 흐르게 된다. 방전 시에는 이와 반대로 리튬이온이 음극에서 양극으로 이동을 하며 전류는 양극에서 음극 쪽으로 흐르게 되며 이때 외부도선을 이용하여 전류를 방전 중 흐르는 전류를 활용하게 된다. 4대 핵심부품 중 실제로 전기화학반응에 참여하며 용량 및 수명 등을 결정짓는 중요한 부품은 양극 및 음극소재이다. 리튬 이차전지의 상용화 이후로 주로 사용된 양극 및 음극 소재는  $\text{LiCoO}_2$ 와 탄소이다. 이중 양극소재인  $\text{LiCoO}_2$ 는 원료로써 상대적으로 고가인 Co를 사용하며, 실제용량은 이론용량인 273 mAh/g의 절반정

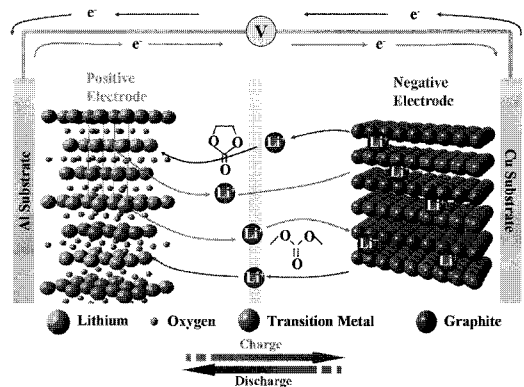


그림 1. 리튬 이차전지의 작동원리.

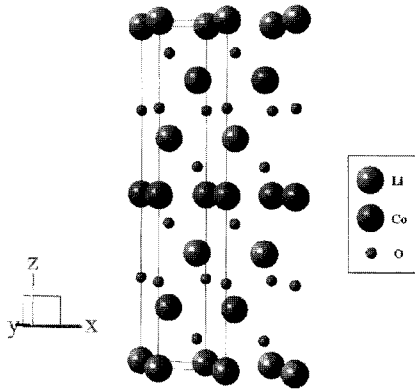


그림 2. LiCoO<sub>2</sub> 및 LiNiO<sub>2</sub> 등 R-3 m 구조를 가지는 층상계 양극소재의 구조.

도 밖에 사용하지 못하며, 독성을 가지고 있고, 안전성 측면에서 일부 문제점을 보이는 단점으로 인해 이를 대체하기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 그동안 LiCoO<sub>2</sub>와 동일한 구조를 가지는 LiNiO<sub>2</sub>, LiCo<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub> 및 Spinel 구조를 가지는 LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 올리빈구조를 가지는 LiFePO<sub>4</sub> 등 다양한 소재들이 후보군으로써 개발되어 왔다.

## 2. 층상계 양극소재 개발동향

LiCoO<sub>2</sub>는 1981년 J. B. Goodenough 박사에 의해 최초로 리튬의 삽입, 탈리에 의해 전지소재로써 사용되는 것이 특허 출원 되었다 [3]. 상기소재는 그 후 10여 년이 지난 1991년 일본의 Sony社에 의해 리튬 이차전지의 양극재료로써 사용이 되었으며 이때 처음으로 리튬 이차전지가 상용화 되었다. 그림 2는 LiCoO<sub>2</sub> 및 LiNiO<sub>2</sub> 등 층상구조를 가지는 소재들의 구조를 나타내고 있다. LiCoO<sub>2</sub>는 다른 소재보다 상대적으로 높은 용량과 우수한 수명특성을 보여 현재 까지도 가장 많이 사용되는 양극소재이나 원료물질의 가격이 비싸고 독성이 있으며 이론 용량의 약 50% 내외밖에 사용하지 못하는 점 때문에 이를 대체하기 위한 연구와 더불어 LiCoO<sub>2</sub>의 가용용량을 증대시키며 수명특성을 유지하기 위한 연구개발이 동시에 진행되어왔다. LiCoO<sub>2</sub>의 가용용량을 증대시키는

방법으로는 충전종단전압을 현재의 4.2 V 이상으로 증대시키는 방법이 있으나 이러한 경우 사이클 수명 특성이 급격히 열화되는데 이는 구조적인 불안전성, 전극표면에서 전해질과의 부반응 등 다양한 원인에 의한 것으로 알려지고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Co를 이중원소로 치환하는 방법과 ZrO<sub>2</sub>, AlO<sub>2</sub> 등의 산화물로 코팅하는 방법 등이 시도되었으며 ZrO<sub>2</sub> 코팅 층을 포함한 일부 코팅 층이 효과를 보이고 있다 [4-6] (그림 3). 또한, 이의 개선효과의 원인을 규명하기 위해 여러 가지 실험방법이 사용되고 있으며 최근 미국 Brookhaven National Lab.과 KIST 간의 공동연구에서 방사광 가속기를 이용한 in situ X-선 회절 분석법을 이용한 결과에 의하면 코팅 층은 전극표면에서의 부반응 억제에 더 큰 역할을 하는 것으로 해석이 되고 있다 [7].

층상계 양극소재로써 LiCoO<sub>2</sub>를 대체하기 위한 소재로 최근 주목을 받은 것은 LiCo<sub>1/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> 및 LiNi<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub>가 있다. 상기소재들은 2001년경 일본의 Ohzuku 교수 그룹 등에서 제안이 된 이후 심도 있는 연구가 진행되어 왔으며, 이 중 LiCo<sub>1/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>에 대해서는 일부 소재업체에서는 이를 상용화하기 위한 연구를 진행하였다 [8]. 최근에는 이의 변종인 LiCo<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub>가 일부 상용화되어 사용되고 있다. 리튬 이차전지 양극소재의 경우 리튬이온이 삽입, 탈리될 때 리튬 량의 변화에

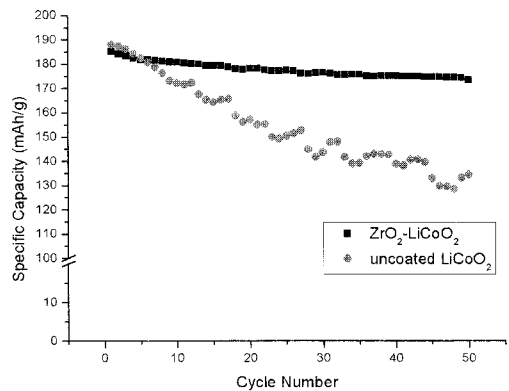


그림 3. LiCoO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub>-coated LiCoO<sub>2</sub>의 사이클 수명특성비교 (Cutoff Voltage : 3.0~4.5 V).



그림 4. KIST에서 개발한 표면개질된 M-LiCo<sub>1/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>.

다른 산화가 변화를 전이금속에서 보존을 하게 되는데 LiCo<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub>의 경우 Mn은 산화가 변화가 없이 고정되어 구조적인 안정성을 확보하며 Co 및 Ni이 서로 다른 전위영역에서 산화가 보존을 하게 된다. 이에 따라 LiCo<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub>는 LiCoO<sub>2</sub>보다 우수한 용량 및 수명특성을 나타낼 수 있어 차기 양극 활물질로써 기대되고 있다. 또한 이의 전기화학특성을 더욱 향상시키기 위해 LiCoO<sub>2</sub>와 유사하게 산화물에 의한 Coating, 입자크기 및 형상제어 등의 방법이 다양하게 시도되고 있다. 특히 최근 KIST에서는 표면개질을 통해 500 Cycle 이상의 우수한 수명특성을 가지는 M-LiCo<sub>1/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>를 개발한 바 있다 (그림 3).

### 3. 스피넬계 양극소재 개발동향

스피넬계 양극소재로는 LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>가 대표적이다. 상기 소재는 M. M. Thackeray 박사와 J. B. Goodenough 박사에 의해 리튬 이차전지용 양극소재로써 1985년 특허가 출원된 소재로써 리튬 이차전지 양산초기부터 주목을 받았다 [9]. 당시 LiCoO<sub>2</sub>의 실제용량과 유사한 148 mAh/g의 이론용량을 가지며 실제용량 또한 120~130 mAh/g를 나타내고 작동전압이 높았으며, 무엇보다도 원료물질인 Mn이 Co에 비해 저가이며 환경 친화적이라는 점이 매우 매력적이었다.

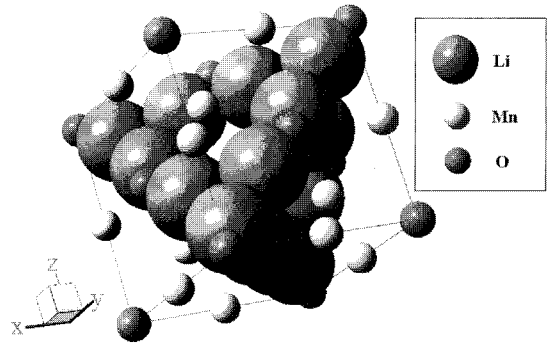


그림 5. Fd-3m 구조를 가지는 스피넬계 LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 양극소재의 구조.

그러나 LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>는 수명특성, 특히 고온에서의 수명특성이 열악하여 이를 개선하기 위한 연구개발이 꾸준히 진행되어왔다. 수명특성이 열악한 원인으로서 대표적으로 꼽히는 것은 고온에서의 충·방전과정 중 활물질 내의 Mn<sup>3+</sup>가 Mn<sup>2+</sup>와 Mn<sup>4+</sup>로 분해가 되면서 Mn<sup>2+</sup>가 전해질로 용해되기 때문인 것으로 알려져 있다 [10-11]. 이를 막기 위해 Mn을 이중원소로 치환하는 방법이 많이 시도되었으나 상용화단계까지는 도달하지 못하였었다.

스피넬계 양극소재에 대한 관심은 한동안 주춤하다가 최근 환경 및 에너지문제가 부각되면서 리튬 이차전지를 탑재한 HEV, PHEV 및 EV에 대한 관심이 고조되면서 다시 한 번 주목을 받고 있다. 자동차의 경우 이차전지가 대량으로 사용되기 때문에 가격과 특히 안전성문제가 매우 중요한데 스피넬계 양극소재인 LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>가 이를 충족시킬 가능성이 있다. 최근 LG화학은 스피넬계 양극소재인 LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>와 층상계 양극소재인 LiCo<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub>를 혼합한 혼합형 양극소재를 일부 사용하는 것으로 알려졌다.

### 4. 올리빈계 양극소재 개발동향

올리빈계 LiFePO<sub>4</sub> 양극소재는 1997년 미국 텍사스 대학의 J. B. Goodenough 박사팀에 의해 원천특허가 발표된 이후 수년간 많은 연구자들이 관심을

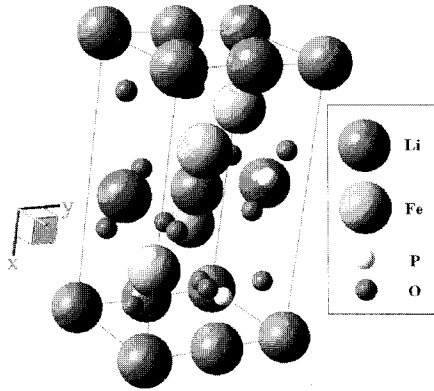


그림 6. Pnma 구조를 가지는 올리빈계 LiFePO<sub>4</sub> 양극 소재의 구조.

보였으나 물질 자체의 낮은 전기전도도로 이론용량인 170 mAh/g에는 현저히 못 미치는 특성을 보였다 [12]. 그러나 2002년 미국 MIT의 Yet-Ming Chiang 교수 그룹이 Fe 이온을 Nb, Mg, Zr 등의 원소로 치환을 하면 Li<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub>의 전기전도도가 비약적으로 향상될 수 있다고 Nature Materials지에 발표를 하고 [13] 2001년 정부에서 캐나다의 Waterloo 대학의 Nazar 교수 등이 LiFePO<sub>4</sub> 나노 입자에 탄소코팅을 하여 전기전도도를 향상시키면서 다시 한 번 많은 주목을 받게 되었다 [14].

LiFePO<sub>4</sub>는 층상계 양극 활물질과는 달리 매우 안정적인 구조를 가지고 있으며 이는 강한 P-O 결합력 으로부터 기인한 것으로 예측을 하고 있다. 또한 LiFePO<sub>4</sub>는 LiCoO<sub>2</sub>에 비해 안전성이 매우 우수하며 이론용량에 근접하는 160 mAh/g 이상의 초기용량을 나타내고 수명특성이 우수하다는 장점 때문에 리튬 이차전지의 양극재료로서 2000년대 중반 이후 가장 주목을 받은 소재이다. 캐나다의 Phostech Lithium에서는 탄소 코팅기술을 이용하여 상용 LiFePO<sub>4</sub>를 출시하고 있으며 미국의 A123Systems社에서는 LiFePO<sub>4</sub>를 양극으로 사용한 전지를 출시하고 있다.

국내에서는 (주)L&F 신소재 등에서 올리빈계 LiFePO<sub>4</sub>를 상용화하기 위해 연구개발에 투자하였으며, 현재는 지식경제부 사업 및 출연연 기관 고유 사업 등으로 다수의 출연연 및 대학들이 LiFePO<sub>4</sub> 및

이의 변형체인 LiCoPO<sub>4</sub>, LiMnPO<sub>4</sub> 등에 대한 연구를 진행하고 있다.

## 5. 기타 양극소재 개발동향

상기소재 이외에도 새로운 고용량, 장수명, 고출력, 고안전성특성을 가지는 양극소재를 개발하기 위한 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 최근 일부 연구자들에 의해 연구가 진행되고 있는 소재로는 Silicate 계열을 소재를 들 수 있다. 이는 LiMSiO<sub>4</sub> (M=Fe, Co, Mn, 등)를 지칭하는 것으로 300 mAh/g 이상의 매우 높은 이론용량을 보이며, SiO<sub>4</sub>의 구조적 안정성 때문에 매우 우수한 안전성을 나타내리라 기대된다. 그러나 Silicate 계열 소재는 기존 올리빈 계열의 소재보다 더 열악한 전기전도도 특성을 나타내며, 또한 첫 번째 충전과정 중 일부 상변화에 의해 결정성이 퇴화되며 매우 큰 초기 비가역용량을 보이고 수명특성이 열악한 점을 극복해야 한다. 이를 극복하기 위한 방법으로 Fe와 Mn을 1:1로 사용한 Li<sub>2</sub>Fe<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>SiO<sub>4</sub>의 합성이 대표적으로 시도되었으며, 나노 입자의 합성, 형상제어, 탄소코팅 등을 이용하여 열악한 전기전도도 특성을 개선하기 위한 노력이 많이 진행되고 있다.

Silicate 계열 양극소재를 연구하고 있는 대표적인 그룹은 슬로베니아 National Institute of Chemistry 의 Dominko 박사 그룹과 중국 Xiamen 대학의 Yong Yang 교수 그룹 등을 들 수 있다. 국내의 경우 최근 KIST 이차전지연구센터가 지식경제부의 지원 하에 연구에 착수하였다. 상기소재 이외에도 최근 일부관심을 끌고 있는 것으로 Conversion Material 등 다양한 소재가 있으나 아직은 추가적인 연구를 통해 가능성을 더 확인해야 한다.

## 6. 결론

리튬 이차전지의 개발초기부터 현재까지 리튬 이차전지의 4대 핵심소재 중 하나이며 실제 전기화학 반응을 통해 리튬 이차전지의 용량 및 수명에 결정

표 1. 대표적인 양극소재의 특성 비교.

	LiCoO <sub>2</sub>	LiNiO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	Li <sub>2</sub> MnSiO <sub>4</sub>
구조	층상	층상	스피넬	올리빈	사방정계
이론용량 (mAh/g)	273	274	148	170	333
실제용량 (mAh/g)	140~160	130~180	100~130	100~160	80~160
수명특성	좋음	나쁨	나쁨	매우 좋음	매우 나쁨
평균전압 (Li/Li+)	3.9	3.8	4.1	3.4	4.1
안정성	취약	매우 취약	양호	매우 양호	양호
원료물질 가격	매우 높음	높음	낮음	매우 낮음	낮음
환경 친화성	나쁨	나쁨	좋음	좋음	좋음

적인 영향을 미치는 양극소재에 대한 연구는 꾸준히 진행되어왔다. 아래의 표는 현재까지 개발된 양극소재 중 대표적인 것들의 특성을 비교해 놓은 것이다.

현재까지는 LiCoO<sub>2</sub> 및 LiCo<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub>로 대표되는 층상계 양극소재들이 가장 많이 사용되고 있으며, 스피넬계 및 올리빈계 또한 일부 사용되기 시작하였다. 그러나 국내전지산업은 여전히 대부분의 양극소재를 수입에 의존하며, 원천기술을 확보하지 못해 전지산업의 기반이 취약한 문제점을 드러내고 있다. 이를 극복하기 위해서는 정부의 집중적인 연구개발 투자와 출연연 및 대학, 그리고 소재업체의 부단한 노력이 필요하다 사료된다. 향후 차세대 이차전지의 개발 및 세계 시장 1위의 기술력 및 시장점유율을 확보하기 위해서는 양극 및 음극소재 관련 원천기술의 개발이 가장 핵심적인 요인으로 작용할 것이다.

## 참고 문헌

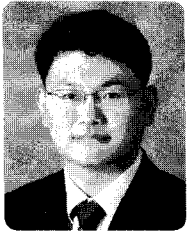
[1] [http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/EES\\_rpt.pdf](http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/EES_rpt.pdf)  
 [2] 「Disruptive Civil Technologies: Six Technologies with Potential Impacts on US Interests out to 2025」, SRI CBI(Consulting Business Intelligence)

발간.

[3] J. B. Goodenough, K. Mizushima, "Electrochemical Cell with New Fast Ion Conductors", US pat. 4,302,518, 1981.  
 [4] J. Cho, Y. J. Kim, B. Park, "Novel LiCo<sub>2</sub> Cathode Material with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating for a Li Ion Cell", Chemistry of Materials, Vol. 12, 3788, 2000.  
 [5] Z. Chen, J. R. Dahn, "Effect of ZrO<sub>2</sub> Coating on the Structure and Electrochemistry of Li<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> When Cycled to 4.5 V", Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. 5, A213, 2002.  
 [6] K. Y. Chung, W.-S. Yoon, H. S. Lee, J. McBreen, X.-Q. Yang, S. H. Oh, W. H. Ryu, J. L. Lee, W. I. Cho, B. W. Cho, "In situ XRD studies of the structural changes of ZrO<sub>2</sub>-coated LiCoO<sub>2</sub> during cycling and their effects on capacity retention in lithium batteries", Vol. 163, 185, (2006).  
 [7] K. Y. Chung, W. S. Yoon, J. McBreen, X. Q. Yang, S. H. Oh, H. C. Shin, W. Il Cho, B. W. Cho, "In situ X-ray diffraction studies on the mechanism of capacity retention improvement by coating at the surface of LiCoO<sub>2</sub>", Journal of Power Sources, Vol. 174, 619, 2007.  
 [8] T. Ohzuku, Y. Makimura, "Layered lithium insertion material of LiCo<sub>1/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> for lithium-ion batteries", Chemistry Letters, Iss. 7, 642, 2001.  
 [9] M. M. Thackeray, J. B. Goodenough, "Solid State Cell Wherein a Anode, Solid Electrolyte and Cathode Each Comprise a Cubic-Close-Packed Framework Structure", US pat. 4,507,371, 1985.  
 [10] D. H. Jang, Y. J. Shin, S. M. Oh, "Dissolution of Spinel Oxides and Capacity Losses in 4 V Li/Li<sub>x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Cells", Journal of Electrochemical Society, Vol. 143, 2204, 1996.  
 [11] D. H. Jang, S. M. Oh, "Electrolyte Effects on Spinel Dissolution and Cathodic Capacity Losses in 4 V Li/Li<sub>x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Rechargeable Cells", Journal of Electrochemical Society, Vol. 144, 3342, 1997.  
 [12] J. B. Goodenough, A. K. Padhi, K. S. Nanjundaswamy, C. Masquelier, "Cathode Materials for Secondary (Rechargeable) Lithium Batteries", US pat. 5,910,382, 1999.  
 [13] S.-Y. Chung, J. T. Bloking, Y.-M. Chiang, "Electronically conductive phospho-olivines as lithium storage electrodes" Nature Materials, Vol. 1, 123, 2002.

[14] H. Huang, S. C. Yin, L. F. Nazar, "Approaching theoretical capacity of LiFePO<sub>4</sub> at room temperature at high rates", Electrochemical and Solid State Letters, Vol. 4, A170, 2001.

저|자|약|력



성 명 : 정경운

- ◆ 학 력
- 1998년 연세대 금속공학과 공학사
- 2003년 연세대 대학원 금속공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 2003년 - 2004년 연세 나노과학기술연구단 박사 후 연구원
- 2004년 - 2006년 미국 Brookhaven National Laboratory, Post-doc.
- 2006년 - 현재 KIST 이차전지연구센터 선임연구원



성 명 : 조병원

- ◆ 학 력
- 1980년 서울대 화학공학과 공학사
- 1982년 한국과학기술원 화학공학과 공학석사
- 1987년 한국과학기술원 화학공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
- 1982년 - 1987년 한국과학기술연구원 화공연구부 연구원
- 1987년 - 1994년 한국과학기술연구원 화공연구부 선임 연구원
- 1994년 - 2001년 한국과학기술연구원 환경·공정연구부 책임연구원
- 2002년 - 2005년 한국과학기술연구원 나노환경연구센터 책임연구원(센터장)
- 2005년 - 현재 한국과학기술연구원 이차전지연구센터 책임연구원(센터장)

