

새로운 양극소재인 LiFePO₄의 도전과 성공

조원일(KETI 센터장)

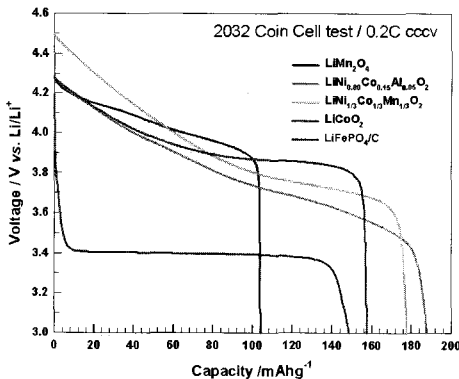
1. 서론

전지의 구조를 이루는 4대 핵심 부품을 꼽자면, 양극, 음극, 전해액, 분리막을 들 수 있다. 흔히 양극을 말하면 단일의 물질을 생각하게 되나, 실제로 전지에서 양극을 구성하는 것은 전기화학적인 양극활성을 갖는 활물질, 활물질의 전기전도도를 높여 주는 도전재, 활물질 사이 그리고 활물질과 집전체 사이의 결합력을 강하게 하는 바인더, 양극에서 일어나는 전자를 외부회로에 전달하거나 역으로 공급하며, 또한 양극이 본래의 모양을 잘 유지하도록 지지하는 금속 집전체로 구성되어 있으니, 하나의 부품

이라고 지칭해도 그다지 틀린 말은 아니다.

리튬이차전지는 지난 세기 말인 1991년 일본회사인 SONY EnergyTech에서 상용제품을 출시함으로써 세상에 알려졌으나, 그 근본 기술은 미국의 국립연구소인 ANL(Argonne National Laboratory)를 중심으로 진행된 리튬금속을 음극으로 사용하는 것이다. 리튬음극에서 충방전 과정의 반복에서 나타나는 dendrite(수지상 조직)를 없애지 못하였기 때문에 이 리튬전지 시스템의 상용화는 실패하였지만, 아직도 일부 연구자들에 의하여 지속적인 개발이 이루어지고 있다. SONY에서는 바로 리튬금속을 탄소계 물질로 대체함으로써 리튬수지조직의 억제에 성공하여 리튬이차전지의 상용화가 가능하였던 것이다.

리튬이차전지의 양극으로는 LiV₆O₁₃, LiMn₂O₄, LiCoO₂와 같은 전기화학적인 양극성질을 나타내는 물질이 검토되었으나, 현재 주류를 이루고 있는 것은 LiCoO₂이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 위에 열거한 물질 외에도 많은 후보가 있지만, 용량, 수명, 제조의 용이성 등의 이유로 LiCoO₂ 소재가 주로 사용되고 있다. LiCoO₂는 육각 기둥형태의 Rhombohedral structure를 가지며 각 층을 Co-



〈그림 1〉 다양한 양극재료의 방전 특성

O-Li-O-Co-O-Li-O의 순서로 차곡차곡 쌓여져 있다. 여기서 재미있는 사실은 전지의 충방전시 리튬의 거동인데, 충전시에는 리튬이 빠져나가고 방전시에는 반대로 리튬이 밖에서 내부로 들어오는데, 원자가 들어오면 수직방향으로 압력이 가해져 다소 늘어나고, 반대로 빠져나가면 줄어드는 것이 일반적이지만, 이 구조에서는 반대로 산소와 산소 사이의 척력 때문에 리튬이 빠져나가면 오히려 수직방향의 길이, 즉 c-축의 길이가 늘어나고 리튬이 들어오면 감소하는 현상이 나타난다.^[11]

LiCoO₂가 많은 장점 때문에 현재 가장 많이 쓰이고 있지만, 가격이 저렴하면서 열안정성이 우수한 소재에 대한 요구에 부응하여 LiNiCoO₂계, LiNiCoMnO₂계, 그리고 LiFePO₄계 양극소재가 개발되었으며, 아직도 가장 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다. 이 가운데 LiFePO₄는 가장 최근에 알려진 양극 소재로써 가격이 싸고, 친환경적이며, 열안정성이 높을 뿐만 아니라 빠른 속도의 충방전에도 비교적 좋은 성질을 나타내기 때문에 많은 주목을 받고 있다.^[12] 본 특집에서는 LiFePO₄ 소재의 개발과 응용에 관련한 실제 데이터 중심의 설명과 해석을 통하여, 전동공구용 전지뿐만 아니라 장차 하이브리드자동차 및 전기자동차용 전지의 소재로서의 가능성을 살펴보고자 하였다.

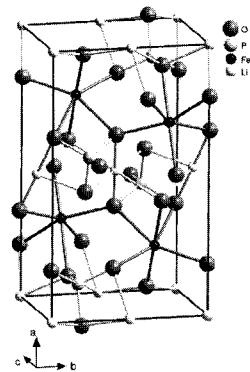
II. 본 론

1. 올리빈의 물리, 화학적 성질

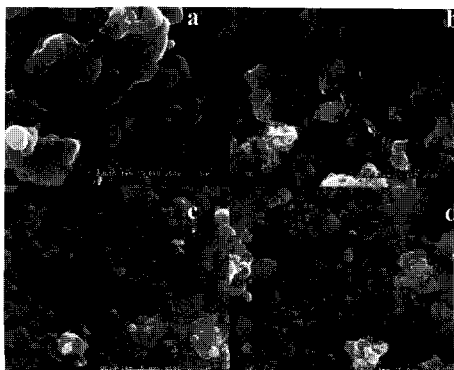
LiMPO₄ (M = Co, Ni, Mn, Fe, Cu)로 표현되는 올리빈구조의 리튬전이금속인산계 (Lithium

Transition Metal Phosphates) 양극재료는 그 고유 안전성을 화두로 하여 최근 리튬이차전지용 차세대 재료로서 각광을 받고 있다. 이러한 고유의 안전성은 물질의 구조자체의 안정성에 기인하는데, 이 물질은 그림 2에서와 같이 orthorhombic 단위셀 (D_{2h}¹⁶-space group Pmnb)을 갖고 있으며, 모든 산소이온은 P⁵⁺ 이온과 강한 공유결합을 통해 PO₄³⁻의 tetrahedral polyanion을 형성하여 물질의 3차원적인 구조를 안정화시킨다.^[13]

이러한 구조는 보다 고온에서의 안정적인 전기화학적 반응을 확보하여 가혹조건에서도 거의 완벽한 안전성을 시스템에 부여할 수 있다. 예를 들어 각 양극재료별로 가능한 수준까지 충전한 이후의 DSC를 이용한 양극물질의 열안정성을 측정하여 보면, Li_{0.5}CoO₂ 양극재료의 경우 -220℃ 정도에서 발열이 나타나며, Li_{0.20}Ni_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂의 경우는 <200℃에서, Li_{0.15}Mn₂O₄의 경우에는 -280℃에서 발열이 나타난다. 이에 반해 Li_{0.1}FePO₄ 올리빈 양극재료는 300℃ 이상의 온도에서도 발열반응이 측정되지 않을 정도로 우수한 열적 안정성을 확보하고 있는 물질이다.



〈그림 2〉 LiFePO₄ 올리빈 구조



(그림 3) 첨가하는 카본소스에 따른 LiFePO_4/C 복합체의 입자 크기 변화 SEM 이미지 ; a. none, b. Graphite, c. carbon black, d. Acetylene Black

2. 올리빈 제조방법 - 고상법

최근까지 commercial base까지 접근된 올리빈 구조의 양극물질은 철을 기본으로 하는 LiFePO_4 물질로서 대부분 고상법을 통해 제조할 수 있다. Li_2CO_3 , $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, Li_3PO_4 등과 같은 Li-source 및 Fe-acetate, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, Fe_2O_3 , $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 등과 같은 Fe-source, 그리고 Li_3PO_4 , $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$, Li_3PO_4 등과 같은 P-source를 물리적으로 혼합한 후 질소 또는 아르곤 분위기에서 열처리를 통해 제조하는 것이 일반적이다.

제조방법의 용이성 측면에서 접근할 때, 이렇게 나열된 여러 가지 원료물질 중 가장 중요한 Fe-source를 두 가지로 나누어 볼 수 있으며 합성 원료 물질의 상태가 Fe^{2+} 이기 때문에 출발물질의 철의 상태를 Fe^{2+} 출발물질과 Fe^{3+} 출발물질로 구분하여 접근하여야 한다.

또한 LiFePO_4 물질 자체의 전기전도도가 10^{-9} - 10^{-10} s/cm 수준으로 리튬이차전지 양극소재로 사용되기 위해서는 많이 부족하며 이의 해결을 위한 새로운 합성공정을 디자인하

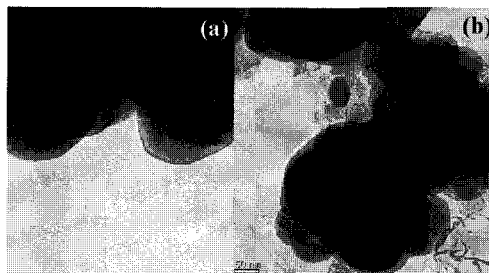
여야 한다. 이에 대한 여러 가지 대안 중에 입자크기를 최소화하는 공정 및 LiFePO_4 양극표면을 적당한 카본으로 surface-coating을 통해 전기전도도를 10^{-4} s/cm 이상 향상시킬 수가 있다. 그림 3을 보면 원재료 혼합공정상에 적절한 카본소스를 첨가함으로써 입자크기를 작게 할 수 있으며, 이는 전기화학적 특성에도 결정적인 영향을 미친다.^[4]

첨가하는 카본소스의 역할로는 일반적으로 다음의 세 가지 정도로 요약할 수 있다.

1. Particle size control : 카본 소스를 첨가함에 따라 열처리 조건에 따른 입자 성장을 억제함으로써 보다 나노 크기 수준의 LiFePO_4/C 복합체 양극재료 제조가 가능해진다.

2. Enhancing electronic conductivity : 열처리 이후 잔존하는 카본이 LiFePO_4 입자 주위 및 계면 사이에 존재함으로써 LiFePO_4 자체의 전도성 저하부분을 개선하여 전체 복합체 양극재료의 전기전도도를 월등히 향상시킬 수 있다.

3. Reducing agents : Fe 물질은 3가 상태가 일반적이며, 원료자체를 Fe^{3+} 상태 원료를 사용하거나 또는 열처리 조건에서 완벽한 비활성 상태가 유지되지 않는다면, 합성 이후 Fe^{2+} 이상의 산화수를 갖는 불순물상(Fe_2P , Li_3PO_4 , etc.)



(그림 4) 카본소스 첨가유무에 따른 TEM 이미지 ; (a) without carbon source, (b) with carbon source

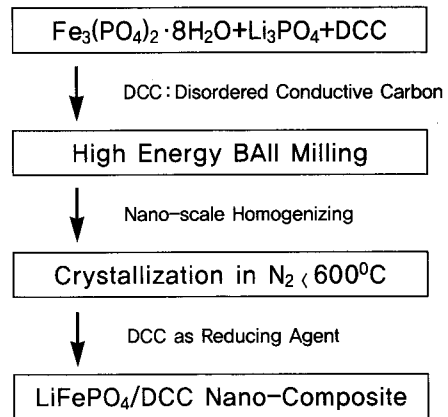
이 존재할 수 있다. 카본 소스를 적당량 첨가함으로써 열처리 분위기를 일부 환원분위기로 치환함으로써 보다 완벽한 합성이 가능해진다.

실제로 카본이 첨가되었을 경우, 이렇게 합성된 양극재료의 복합체 상태는 TEM 분석을 통해 확인할 수 있는데 대표적인 경우를 그림 4에 나타내었다.^[5] 그림 4에서 보면 카본을 첨가하지 않았을 경우와 첨가하였을 경우에 있어서의 LiFePO_4 와 카본이 어떠한 상태로 존재하고 있는지를 확인할 수 있다. 카본이 적당히 LiFePO_4 를 코팅하고 있음으로 해서 LiFePO_4 입자성장을 억제하였을 뿐만 아니라 이로 인해 전기전도도 또한 향상될 것임을 충분히 예상할 수가 있다.

다음의 그림 5에 가장 대표적인 합성 공정흐름을 나타내었다. 본 합성법은 일본 SONY사가 논문에서 제시한 대표적인 제조방법으로 합성을 보다 용이하게 하기 위해 Fe^{2+} 를 출발물질로 사용하였으며, 입자성장 억제 및 in-situ carbon-coating을 위해서 DCC(Disordered Conductive Carbon)을 원료 혼합수준에서 첨가하였다.^[3] 고상법을 근간으로 디자인한 것이기 때문에 원료 간의 균일한 혼합이 반응완결에 있어서 가장 중요한 척도가 되며, 이를 위해 본 공정에서는 고에너지 Ball Milling 공정을 통하여 가능한 나노 수준의 균일성을 확보하고자 하였다.

3. 올리빈 제조방법 - 새로운 합성법

지금까지 대부분 적용되었던 합성법은 고상법을 근간으로 하고 있으며, 이는 물론 가장 양산성이 우수할 것이라는 예상 때문이지만, 실제 LiFePO_4 를 대표로 하는 올리빈계 양극재료의 경우에는 기존 LiCoO_2 , LiNiCoMnO_2 와



〈그림 5〉 대표적인 LiFePO_4/C 합성 공정도

같은 일반 산화물계 양극재료와는 다르게 나노 수준의 입자크기를 구현함과 동시에, in-situ 방식으로 carbon coating까지 가능한 합성이 되어야 하므로 새로운 합성법을 적용하는 방식이 최근 많이 대두되고 있다.

물론 새로운 합성법 자체는 기존 양극재료의 합성 시에도 많이 거론되어 왔지만, 입자성장이 어렵다라든지 첨가제가 추가되어야 한다든지 라는 이유 등으로 인해 양산공정에 적용하기가 복합수산화물 전구체 공정 부분 (solution chemistry)을 제외하고는 어려운 것이 현실이었다. 그러나 LiFePO_4/C 복합체 양극재료 제조에 있어서는 위에 언급된 대다수의 단점이 장점으로 바뀌어 질 수 있기 때문에 이에 대해 언급하고자 한다.

가. Sol-Gel method

특히 망간스피넬계 양극재료 합성에 많이 적용되었던 제조법으로 Citric acid와 같은 첨가제를 사용하는 방식이 대부분이다. 이러한 첨가제는 기존 양극재료 합성 시에 CO_2 , H_2O 로 산화되어 제거되지만 올리빈계 양극재료

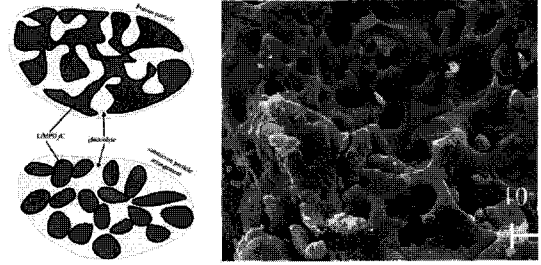
합성 시에는 비활성분위기에서 제조하기 때문에 원료 내의 O₂와 반응하여 제거되는 부분을 제외하고는 카본이 잔존하게 되어 환원제 및 카본코팅제의 역할을 수행하게 된다.

Sol-Gel 합성법의 예를 들면 다음과 같다. LiNO₃, Fe(NO₃)₃ · 9H₂O, NH₄H₂PO₄ 정량을 수용액 상태로 혼합한 후 Citric acid를 추가하여 Sol을 만든 후 65°C에서 0.1atm의 감압조건에서 10h유지하여 Gel을 형성시킨다. 이러한 과정을 통해 Li, Fe, P등의 원소들이 분자적인 수준에서 균일한 혼합이 유지될 수 있도록 하는 것이다. 이러한 Gel상태의 전구체를 300°C에서 5분간 air분위기에서 태워 NO_x등을 제거한 후 700°C, Ar or N₂ (5% H₂)분위기에서 4h 열처리를 통해 최종 LiFePO₄/C를 합성한다.^[6]

이러한 합성과정 중에 복합체 카본함량 조절 등을 위해 추가적으로 카본소스를 첨가할 수 있으며, 이러한 방식 중에서 그림 6과 같은 특이한 형태의 porous carbon소스를 첨가함으로써 합성된 재료의 고흡특성을 향상시킬 수 있었다.^[7]

나. Hydrothermal method

본 합성법은 아직 실험실 수준에 머물러 있지만 가장 작은 수준의 나노 크기의 재료 합성이 가능하다. 합성시 공정조건의 조절을 통해 입자 크기 조절이 가능하며, 카본소스의 첨가를 최소화하더라도 높은 수준의 고흡특성을 발현한다는 보고가 있다. 최근에 개최되었던 제48회 일본 전지토론회에서는 본 합성법을 적용하여 합성 조건 최적화를 통해 이론용량의 95%수준인 163mAh/g의 방전용량을 확인한 결과가 발표되었으며, 이는 입자를 plate형태로 제조함으로써 plate의 넓은 면을 통한 리튬이온의 탈/삽입이 가능하게 유도하였다.^[8]



〈그림 6〉 Porous carbon이 첨가된 LiFePO₄/C 복합체 양극재료의 SEM 이미지

다. Freeze-Drying method

본 합성법은 Li, Fe, P를 포함하는 액상 혼합물에서 각 원소간의 균일한 혼합을 유지하면서 용매만을 제거함으로써 고상법에서의 고에너지 볼밀공정을 대체할 수 있는 방식을 제시하고 있다. 단순히 액상 혼합물에서 온도를 올려 용매를 제거하는 것은 다시 각 원소별로 고체화됨으로써 균일한 혼합상태가 깨어지지만, 본 합성법에서는 액상 혼합물을 얼린 후 이를 승화시킴으로써 각 원소별로 재결정되는 것을 최대한 막아줌으로써 균일한 혼합상태를 유지한 고체상의 원료혼합물을 열처리 전구체로 얻을 수가 있게 된다.^[9]

라. Spray-Pyrolysis method

Spray-Pyrolysis 합성법은 Li, Fe, P를 포함하는 액상 혼합물을 노즐을 이용하여 분사시켜 수마이크론에서 수십마이크론 수준의 액적을 생성시키고, 생성된 액적이 바로 건조, 열처리되어 비교적 짧은 시간에 LiFePO₄/C 복합체 양극재료를 제조할 수 있게 한다.

4. 고전압용 비철계 올리빈

LiFePO₄/C 복합체 양극재료는 여러 가지

〈표 1〉 리튬이차전지용 양극재료의 특성 비교

cathode material	discharge capacity (V vs. Li/Li ⁺)	Theoretical capacity (mAh/g)	True density (g/cm ³)
LiMnPO ₄	4.1	171	3.43
LiFePO ₄	3.4	170	3.60
LiCoPO ₄	4.8	167	3.70
LiNiPO ₄	5.1	167	3.89
Li _{1.07} Mn _{1.93} O ₄	3.9	117	4.15
LiNi _{0.80} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	3.6	265	4.73
LiCoO ₂	3.8	274	5.05

면에서 충분히 차세대 양극재료로서의 입지를 다져가고 있지만 평균 방전전압이 3.4V(vs. Li/Li⁺)라는 특성으로 인해 에너지밀도 측면에서 기존의 산화물계 양극재료의 대체재로서의 역할은 다소 미흡한 실정이다. 따라서 보다 고전압의 평균방전전압을 갖는 비철계 올리빈계 양극재료에 대한 접근 또한 필요한 시점이라 할 수 있다. 다음의 표 1에 다양한 올리빈계 양극재료의 평균방전전압 및 이론용량 등에 대한 특성을 나타내었다.^[10]

기존의 LiCoO₂ 양극재료의 평균방전전압인 3.8V이상의 방전전압을 갖는 비철계 올리빈 양극재료는 LiMPO₄ (M = Ni, Co, Mn)이 대표적이며, 이 중에서 해당 전이금속의 가격 등을 고려해 볼 때 LiMnPO₄ 양극재료가 가장 가능성이 높은 재료로 판단된다.

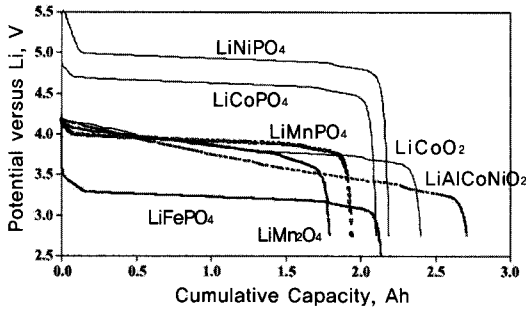
LiMnPO₄ 양극재료의 합성은 기존의 고상법에 기초를 두고 몇몇 연구자들에 의해 결과가 보고되어 왔으나 방전용량이 이론용량 대비 많이 부족한 것이 현실이었다. 이에 최근 연구에서는 기존 고상법에 PVA를 첨가하여 방전용량을 65mAh/g에서 111mAh/g으로 향상시켰을 뿐만 아니라 Mn자리에 Mg²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺와 같은 2가의 이종원소를 치환함으로써 최종 144mAh/g의 방전용량을 실현하였다.^[11]

5. 올리빈의 전기화학적 특성 및 양극특성

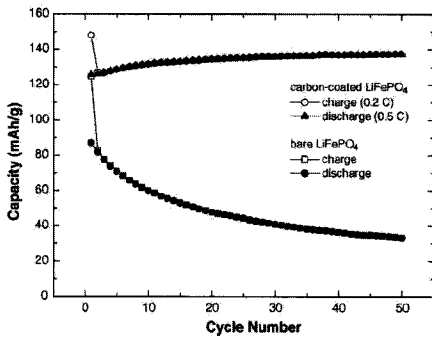
올리빈구조의 양극재료의 전기화학적 특성은 일반적으로 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 대표적인 LiFePO₄의 경우에는 리튬 대비 3.4V의 평균방전전압을 갖는 반면에 이론적으로 LiNiPO₄는 5.1V의 평균방전전압을 갖는다.^[10]

실제 제조된 올리빈계 양극재료의 전기화학적 특성에 대해 논하기 위해서는 양극재료 단독인 경우와 양극재료와 카본간의 복합체인 경우를 기본으로 하여 접근하여야 하는데, 이는 양극재료 단독인 경우에는 앞서 언급한 것처럼 전기전도도가 너무 낮아 원하는 수준의 방전용량을 구현할 수가 없기 때문이다.

Mechanical Alloying법을 이용하여 제조한 LiFePO₄의 경우에 있어 카본 코팅 유무에 따른 복합체 양극재료의 방전용량 및 사이클 특성에 대한 결과를 그림 8에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 카본코팅이 되지 않은 양극재료의 경우 겨우 90mAh/g 정도의 방전용량이 발현되었으며, 이 또한 사이클이 반복됨에 따라 지속적인 용량감소를 보여주고 있다^[6]. 반면에 카본 코팅이 된 복합체 양극재료의 경우에는 거의 140mAh/g에 근접하는 방전용량을 발현함을 알 수 있으며, 사이클 특성 또한 매우 우수한



〈그림 7〉 올리빈 구조 양극재료의 이론 방전곡선



〈그림 8〉 카본 코팅 유무에 따른 올리빈 양극재료의 사이클 특성

결과를 보여주고 있다. 물론 카본 코팅의 효율성 측면에서 국부적으로 너무 많은 카본이 코팅됨에 따른 초기 방전용량에서의 약간의 저하 부분이 확인되지만 이는 사이클이 수회 반복됨에 따라 회복되는 양상을 보여주고 있으며, 이러한 문제 해결을 위해서는 보다 균일한 카본

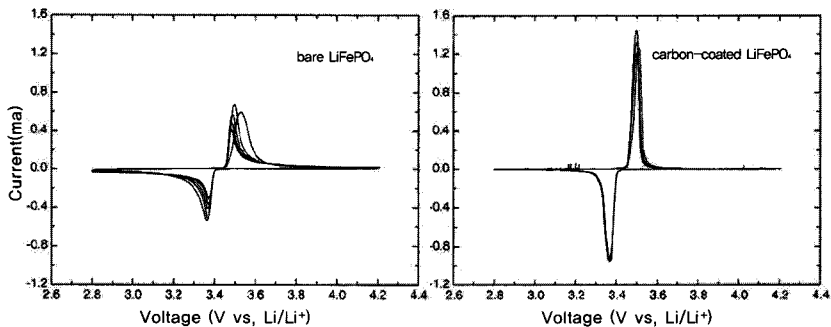
코팅이 가능한 합성 공정 디자인이 필요하다.

또한 카본 코팅 유무에 따른 산화환원반응의 가역성 여부를 그림 9에 도시하였으며, Cyclic Voltametry 측정 결과 카본 코팅의 경우에 보다 가역성이 우수한 양극재료 성능을 구현하고 있음을 확인할 수 있다.^[5]

III. 결 론

본문부분에서 언급한 바와 같이 수많은 방법들이 올리빈계 양극물질의 합성에 적용되었으며, 지금도 연구가 계속되고 있다. 이렇게 하여 개발된 소재를 양극판으로 만들고, 또 적합한 전지 설계를 통하여 음극물질 및 음극판의 설계·제조를 통한 최종 양산 전지에 이르는 길은 여전히 험난한 여정을 남겨 두고 있다. 현재까지 대부분의 양극극판 제조는 마이크로 수준에서의 양극재료에 대한 양산성 확보 정도이며, 수십에서 수백 나노미터 수준의 복합양극재료의 경우 기존의 양극극판 제조 공정으로는 한계가 있음이 알려지고 있다.

A123 systems 등에서 일부 양극극판제조공정을 적합하게 개발하여 상용 전지에 쓰이고 있다는 전언이 있으나, 아직 완전히 양산성이 확



〈그림 9〉 카본 코팅 유무에 따른 올리빈 양극재료의 Cyclic Voltametry 측정 결과

보되었다고 판단하기에는 다소 이른 감이 있다. 이와는 별도로 국내에서 LiFePO_4 등과 같은 올리빈계 양극재료 개발을 위해서는 지금 원천성을 주장하고 있는 기존 특허를 어떻게 회피하거나 돌파할 것인가에 대한 부분도 고려대상이 되고 있다. 앞에서 언급한 것처럼 본 올리빈계 양극재료는 재료 자체만으로는 원하는 수준의 전기화학적 특성을 발현할 수가 없으며, 가장 적은 카본 함량을 만족시키면서 가장 효율적으로 표면 코팅을 하는 공정 개발을 통해 우수한 성능의 올리빈 / 카본 복합체 양극재료를 개발하느냐가 관건이 될 것이다. 물론 고전압 구현을 위해 비철계 복합체 양극재료 개발도 새로운 이슈가 될 수 있을 것으로 판단한다.

리튬이차전지는 바야흐로 IT기기의 전원 역할을 담당했던 비교적 작은 크기의 형태에서 전동공구, E-bike에 적용되고 있으며, 머지않아 HEV(Hybrid Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)과 같은 미래형 친환경 자동차의 전원으로서의 역할을 기대하고 있다. 리튬이차전지 시스템의 크기가 중·대형과 함에 따라서 전지의 가격과 안전성이 보다 큰 핵심 사안이 되고 있으며, 당연히 전지의 저가격화, 고안전성화에 대한 이유로 올리빈계 양극재료의 역할론이 크게 요구되고 있다.

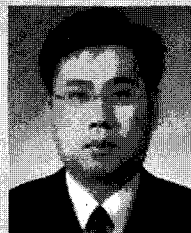
참고문헌

- [1] T. Ohzuku and R. J. Brodd, J. Power Sources 174 (2007) 449-456
 [2] A. K. Padhi, K. S. Nanjundaswamy and J. B. Goodenough, J. Electrochem. Soc. 144 (1997) 1188
 [3] A. Yamada, M. Hosoya, S. Chung, Y. Kudo, K.

Hinokuma, K. Liu and Y. Nishi, J. Power Sources 119-121 (2003) 232-238

- [4] H. C. Shin, W. I. Cho and H. Jang, Electrochimica Acta 52 (2006) 1472-1476
 [5] H. C. Shin, W. I. Cho and H. Jang, J. Power Sources 159 (2006) 1383-1388
 [6] T. Abe, K. Matsuda, K. Tachibana, T. Endo and T. Nishina, The 48th battery Symposium in Japan (2007) 2A02
 [7] A. Kuwahara, S. Suzuki and M. Miyayama, The 48th battery Symposium in Japan (2007) 2A05
 [8] H. Tannai, S. Koizumi, K. Dokko, H. Nakano and K. Kanamura, The 48th battery Symposium in Japan (2007) 2A09
 [9] V. Palomares, A. Goni, I. G. Muro, I. Meatza, M. Bengoechea, O. Miguel and T. Rojo, J. Power Sources 171 (2007) 879-885
 [10] W. F. Howard and R. M. Spotnitz, J. Power Sources 165 (2007) 887-891
 [11] H. Ohmae, Y. Furuta, M. nagao, M. Fujita and M. Sano, The 48th battery Symposium in Japan (2007) 2A13

저자소개



조 원 일

1988년 9월-2002년 2월 고려대학교 금속공학과 (공학박사)

1993년 7월-1994년 7월 Northwestern대학 Post Doc. Fellow

1984년 8월-현 재 한국과학기술연구원 책임연구원
 2004년 1월-현 재 한국전기화학회 총무이사/사업이사
 2004년 6월-현 재 차세대전지성장동력사업단 운영위원
 2006년 1월-현 재 차세대전지성장동력사업단 운영위원

주관심 분야 : 전지소재 합성 및 평가, 전지연구 기획