

# 3차원 구조 고용량 박막 이차전지용 전극 소재

글 \_ 임해나, 최지원  
KIST 전자재료연구센터

## 1. 서론

휴대용 전자기기의 소형화 및 경량화에 따라 그의 전원으로서 사용되는 리튬 이차 전지의 고용량화 및 소형화, 안정화에 대한 필요성이 끊임없이 요구되고 있다. 또한 최근 반도체 회로의 집적도 향상, MEMS, 반도체 등의 미세 소자 및 초소형 기기에 대한 기술의 첨단화가 가속화 되어 이러한 소자의 구동을 위한 에너지원으로 초소형 전지의 필요성이 더욱더 대두되고 있다. 시스템의 소형화 및 경량화로 인해 요구되는 전력의 수준이 크게 낮아 짐에 따른 초소형 전원소자에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 이러한 기기에 적용되어 그 가능성을 인정받은 대표적인 전원소자로 박막 이차전지가 있다. 박막 이차전지는 반도체 제조 기술에 기반하여 반도체 제

조기술과 전지기술이 결합된 전지로 박막 가공기술을 이용하여 소형화된 고체 전지를 제작하는 경우 고체 전지가 가지고 있는 일반적인 장점인 안정성과 장수명성뿐만 아니라 다양한 크기와 모양으로 전지 설계가 용이하고 극소형 전지의 제작이 가능하다는 점이 있다<sup>1)</sup>. 또한 일반 이차전지와 달리 고체 전해질의 사용으로 폭발의 위험성이 없고 다양한 온도 범위에서 작동이 가능하다. 박막 전지를 얇고 투명한 기판에 구현하는 경우에는 쉽게 구부러짐이 가능하여 플렉서블 소자에도 응용이 가능하다. 따라서 박막 이차전지는 마이크로 센서<sup>2)</sup>, 바이오 캡슐의 전원<sup>3)</sup>, MEMS 등 그 응용 분야가 광범위하게 열려 있는 미래형 전지라고 할 수 있다. 이와 관련해 박막 전지의 재료에 대한 주요 연구 결과와 3차원 구조 박막 전지에 관련한 최근의 연구 성과에 대하여 고찰하였다.

## 2. 본론

### 2.1. 박막전지의 구조 및 원리

리튬 이온 이차전지는 두 개의 전극 사이에 유기전해질을 넣어서 가역적 리튬 이온의 탈삽입을 가능하게 하여 활물질의 화학적 에너지를 전기화학적 산화환원 반응을 통하여 전기적 에너지를 얻는 원리로 구동된다. 양극과 음극의 화학전위차 때문에 방전 시 리튬이온은 음극에서 전해질을 통해 양극으로 이동하며 충전 시 가역적으로 리튬이온이 양극에서 음극으로 이동한다. Fig. 1은 리튬 이온 이차전지의 충방전 과정을 보여준다.

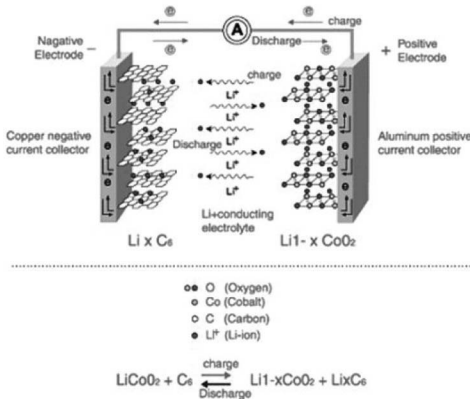


Fig. 1. 리튬 이온 전지의 충방전 모식도.

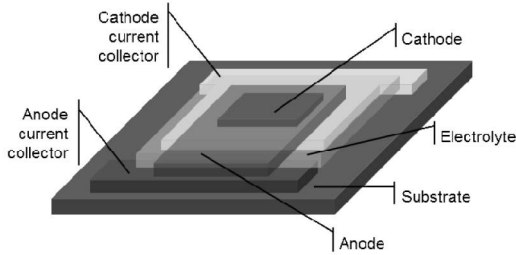


Fig. 2. 박막전지의 구조

박막 이차전지는 주로 금속전이 산화물 양극 물질과 세라믹 고체 전해질, 음극 물질을 스퍼터링(Sputtering) 법이나 화학기상증착(Chemical Vapor Deposition)법을 사용하여 성막하는 방법으로 제작된다. 이러한 증착 방식의 박막전지는 1990년대 초부터 Oak Ridge National Lab.(ORNL, 미국)의 Bates 그룹이 본격적으로 시작하였다.

Fig. 2는 박막 전지의 단면 구조를 보여주는 것으로 기판, 양극 전류 집전체, 양극, 전해질, 음극, 음극 전류 집전체의 구조를 가진다. 여기서 양극 전류 집전체는 주로 Pt, Au, Pd 등을 사용하며 음극 전류 집전체는 Cu, Ni 등 리튬과의 반응성이 없는 금속을 일반적으로 사용한다. 양극으로는 주로  $\text{LiCoO}_2$ 나  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ 가 많이 사용되고 음극으로는 기본적으로 Li 금속 박막이 사용된다.

박막전지의 두께는 일반적으로 기판을 제외하고  $10\mu\text{m}$  이하로 설계되며 기기의 내부 또는 회로를 구성하는 기판에 형성되어 기기에 전원을 공급한다. 이러한 전지의 전극은 박막이기 때문에 전극 물질의 이용률이 높아 기존의 벌크형 전지에 비하여 단위부피나 단위무게 당 용

량이 크지만 두께가 얇으므로 실제로 구현가능한 전지의 방전용량은  $100\sim 200\ \mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ 으로 매우 낮다<sup>4)</sup>.

전지의 고용량화를 위하여 전극의 증착두께를 두껍게 하는 경우 오히려 비용량 값이 감소하게 되는데 이는 전해질과 전극의 사이의 표면적의 한계로 인하여 리튬이온의 이동도는 저하되게 되고 이것이 전지의 성능저하로 이어지기 때문이다<sup>5)</sup>. 따라서 전지의 고용량화와 빠른 리튬이온의 이동을 위하여 3차원 구조의 박막 전극이 주목을 받고 있으며 전지의 성능을 향상시키기 위하여 새로운 전극 물질들이 연구되고 있다.

## 2.2. 박막전지용 양극소재

박막전지의 용량은 양극에서 음극으로, 또한 음극에서 양극으로 이동하는 리튬 이온의 양에 의해서 결정된다. 박막전지에서의 용량은 전극 소재의 특성 뿐 아니라 전해질과 전극간의 계면의 특성에도 의존한다. 박막전지의 양극으로 가장 널리 사용되는 재료는 Fig. 3에 나타나 있는  $\text{LiCoO}_2$ 로 높은 전위와 용량( $\sim 60\ \mu\text{Ah}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ )을 나타낸다<sup>6)</sup>. 이러한  $\text{LiCoO}_2$ 는 R-3m 능면전계 구조를 가지고 있고 제조가 쉬워 대량 생산이 용이하고 신뢰성이 높아서 현재 주요 양극재로 사용되고 있다. 그러나 Co가 고가이고 환경친화적이지 못하며 4.25 V 이상의 과충전 또는 과방전 시에 상변이가 발생하여 불안정해지면서 성능저하를 가져오기 때문에 상변이를 억제하기 위하여 Mg, Al, Ni, Mn 등의 금속 치환 및 코팅에 관한 연구가 활발하게 연구되었다.

고가의  $\text{LiCoO}_2$ 를 대체하기 위한 재료로 값이 싸고 안

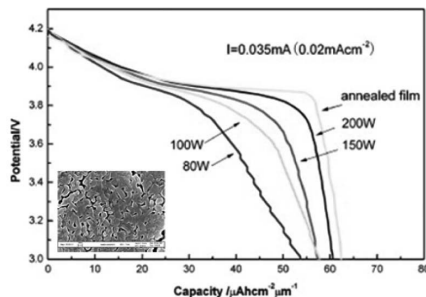


Fig. 3. RF sputtering법으로 증착 된  $\text{LiCoO}_2$  양극 박막의 방전 특성.

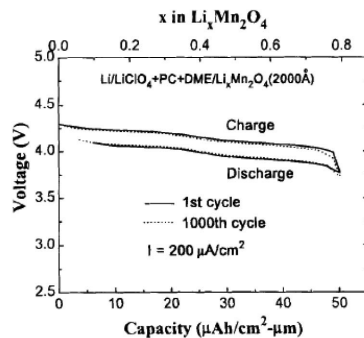


Fig. 4. RF sputtering법으로 증착 된  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ 의 충방전 곡선.

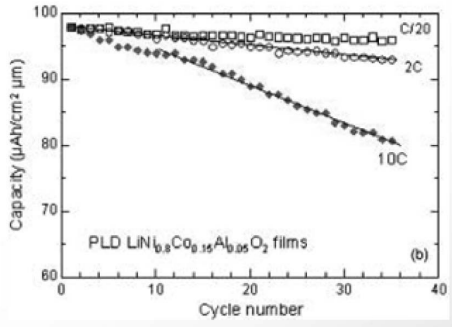


Fig. 5. PLD법으로 증착 된  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  양극 박막의 방전 특성.

정성이 높은 스피넬 구조인  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  양극의 박막화 연구도 많이 진행되었다.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  박막은 electron-beam evaporation 이나 sputtering 등의 방법으로 제작되어 왔다. 박막의 증착 후에는  $400^\circ\text{C}$  이상의 후열 처리를 통하여 양질의 결정화 된 양극 박막을 얻을 수 있고 4.3 V 이상의 구동이 가능하다.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ 의 방전용량 특성이 Fig. 4에 나타나있다. 비록  $50 \mu\text{Ah}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^2$ 로  $\text{LiCoO}_2$  박막보다는 낮은 초기 용량을 보이거나 낮은 가격과 우수한 안정성을 갖고 있기 때문에 용량 개선을 위한 양이온 치환이나 도핑 등의 연구가 계속되고 있다.

또한 다른 단일계 박막으로  $\text{LiCoO}_2$ 와 같은 구조를 가진 양극재인  $\text{LiNiO}_2$ 가 연구되고 있다.  $\text{LiNiO}_2$ 의 경우 단위계 재료에서 가장 높은 방전 용량의 전지 특성을 나타내고 3.7 V의 작동 전압을 가지고 있으며 Co와 비교하여 낮은 원재료 가격으로 관심을 받았다. 하지만 리튬이온과 니켈이온의 자리바꿈 현상으로 인하여 제조가 어렵고 구조가 불안정하여 사이클 특성, 고온안정성이 크게

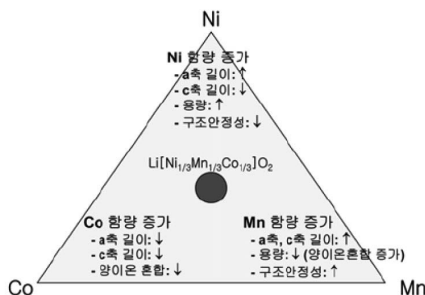


Fig. 6. 3성분계의 조성비와 조성비 따른 특징<sup>10)</sup>.

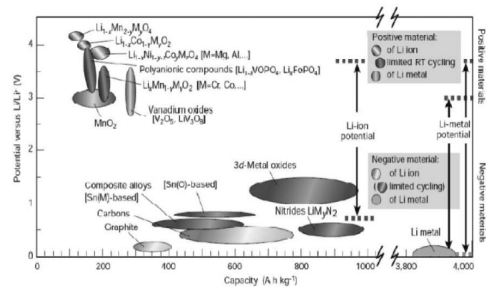


Fig. 7. 리튬 이차 전지용 전극 재료의 전위와 용량<sup>11)</sup>.

떨어진다는 점에서 상용화에는 문제점이 있다. 따라서 양이온 혼합을 억제하기 하여 Al, Co 등이 치환된 전극의 연구가 이루어지고 있다. Fig. 5는 소량의 Co와 Al을 치환한  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  양극 박막으로 Ni을 다른 이온으로 치환하여 양이온혼합을 줄이고 높은 용량( $\sim 100 \mu\text{Ah}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ )을 구현 하였다<sup>8)</sup>.

최근에는  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiMnO}_2$ , 및  $\text{LiCoO}_2$ 의 장점을 지닌 재료로서 Ni, Mn, 및 Co를 바탕으로 삼성분계 화합물이 활발하게 연구되고 있다. 이 재료는  $\text{LiCoO}_2$ 와 같은 구조를 가지지만 superlattice의 거대 구조로 이루어져 있어서 구조적으로 안전하여 4.5 V 이상의 높은 전압에서 구동하여도 성능이 좋다. Fig. 6은 재료의 구성 비율에 따른 특성을 보여준다. 이러한 삼성분계 화합물의 경우 현재 벌크상태로는 다양한 조성비를 갖는 화합물의 특성이 평가되어 보고되었으나 박막의 경우에는 정확한 조성비로 증착이 어렵다는 점에 있어 아직 연구가 진행되고 있는 상태이다. 현재 보고 되어 있는 삼원계 박막으로 aerosol deposition법으로 상온 상태에서 증착된  $\text{LiNi}_{0.4}\text{Co}_{0.3}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ 의 경우  $44.7 \mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ 의 초기용량을 갖는다고 보고 되어 있다<sup>9)</sup>.

Fig. 7은 벌크형 전지를 위한 대표적인 전극 물질들의 전위와 용량 특성을 보여준다. 전지의 에너지밀도, 내구성 및 안정성의 경우에는 내부 전극의 특성이 전지 성능을 좌우하기 때문에 박막 전지에 적합한 전극의 재료개발이 핵심적이라고 할 수 있으므로 다양한 전극 재료의 박막화에 대한 연구가 앞으로 진행 되어야 할 것이다.

### 2.3. 박막전지용 음극소재

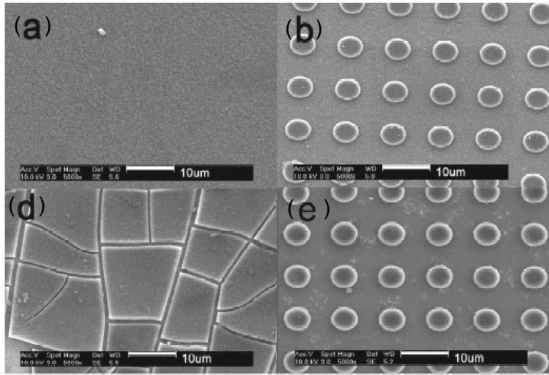


Fig. 8. 충방전 과정 전의 (a) 실리콘 박막 전극과 (b) 필러 구조를 가지는 실리콘 박막 전극, 충방전 과정 후의 (d) 실리콘 박막 전극과 (e) 필러 구조를 가지는 실리콘 박막 전극.

음극소재의 경우, 벌크형 전지는 최고의 비전력과 충분한 비에너지 및 긴 사이클 특성을 가지고 있는 카본계 음극이 주로 사용되고 있다<sup>12,13</sup>. 그러나 박막형 전지의 경우 카본계의 음극 박막을 사용하는 경우 오염 문제 때문에 카본계 전극을 대체 가능한 리튬계, 산화물계 전극에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 리튬계의 경우에는 화학적 활성이 매우 커서 습도에 민감하여 셀 조립공정을 하기가 어렵고 리튬의 높은 반응성 때문에 안정성의 문제가 대두된다.

박막전지용 음극소재로 모체 금속 중 전기 화학적으로 리튬 합금을 형성하는 Al, Si, Sn, Pb, In, Ag 및 알루미늄 합금이 면밀히 연구되었다<sup>14</sup>. 또한  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ <sup>15</sup>,  $\text{WO}_3$ <sup>16</sup>,  $\text{TiS}_2$ <sup>17</sup> 등의 전이 금속을 포함한 음극재료들도 주목을 받고 있다. 이러한 재료들은 리튬의 삽입/탈리에 따른 체적변화가 아주 적고 안정성이 높다는 큰 장점을 갖고 있다. 그러나 전자 전도도가 비교적 낮고 용량이 작다는 불

리한 점이 있어 전극 재료 입자의 나노화, 전극 구조의 3차원 구조화, 전도성 물질과의 복합화 등을 통하여 성능을 개선하려는 연구가 진행되고 있다. 박막 전지용 음극 박막의 예로, 리튬-실리콘 전극의 경우 Li이 완전히 삽입되는 경우  $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$  형태로 이론적 용량이 4200 mAh/g에 달한다. 하지만 강한 이온결합을 하고 있는 리튬 합금 ( $\text{Li}_x\text{M}$ )의 경우 리튬 이온의 탈삽입으로부터 오는 부피 변화에 의하여 기계적 스트레스를 받아 전극이 부서지고 만다. 따라서 박막 전지용 음극 박막으로 가장 중요하게 여겨지는 요인 중 하나는 박막의 부피팽창을 감소시키는 것이다.

부피 팽창으로 오는 전극의 균열 현상을 극복하기 위하여 다양한 3차원 구조로 전극을 제작하거나 부피 팽창을 완충시켜 줄 수 있는 재료를 코팅하는 방법 등에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. X. Huang 그룹에서는 높은 이론 용량을 갖는 실리콘 박막전극을 이용하여 3차원 구조로 전극을 제작한 연구를 보고하였다. 실리콘 박막전극(a)에 리튬이온이 삽입되면 부피팽창에 의하여 전극에 균열이 생겨(d) 박막의 용량이 현저하게 감소하는 것이 나타나 있다. 그러나 (b)의 형태로 실리콘 필러 구조를 제작하는 경우 리튬이 삽입되어 부피가 증가하더라도 필러 사이에 존재하는 빈 공간이 박막의 균열을 막아준다(e)<sup>18</sup>. 이와 마찬가지로 C. Buddie Mullins 그룹에서도 경사각 형태의 실리콘 전극을 만들면 사이클 수에 따라 감소하는 용량 문제를 해결할 수 있고 그 위에 산소와 술폰옥사이드의 표면 처리를 통하여 수십 사이클 이후에도 용량의 감소가 거의 없는 박막 전극을 만들 수 있다고 보고하였다<sup>19</sup>.

또한 리튬의 삽입/탈리 과정동안 부피 변화가 적은 리튬 전이금속 산화물의 경우에는 낮은 전도성이 해결해야 할 가장 큰 과제이다. 따라서 이를 극복하기 위해 전도성이 높은 물질과 함께 적층을 하거나 코팅하는 방법으로 연구가 진행되고 있다. Fig. 10과 같이 전도성이 높은 그래핀과  $\text{MnO}_2$ 를 적층하여 전극을 만들어 전극의 저항을 감소시켜 초기 용량 감소가 심한  $\text{MnO}_2$  음극 박막의 한계를 극복하였다<sup>20</sup>.

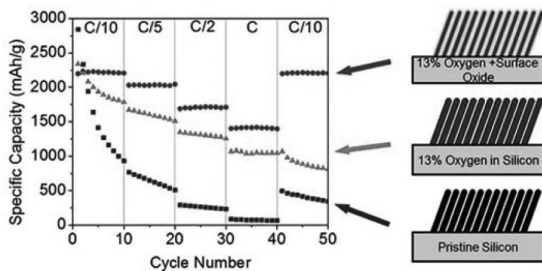


Fig. 9. 경사각 형태의 실리콘 박막의 모식도와 그의 충방전 특성.

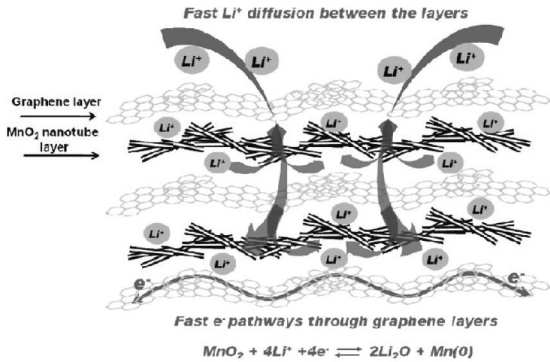


Fig. 10. 그래핀과 MnO<sub>2</sub> 적층 구조의 모식도.

### 2.4. 3차원 구조의 박막전지

고용량을 위한 3차원 구조의 박막전지는 전지의 에너지 밀도를 증가시킬 뿐만 아니라 리튬이온의 이동거리를 좁혀 고출력의 특성도 가질 수 있다. Fig. 11은 2차원 구조의 평면 박막 전지와 3차원 구조의 기둥 형태의 박막 전지를 나타낸다. 2차원 평면 형태의 전지의 경우 리튬이온이 두 극 사이의 거리인 L 만큼 확산 하는 과정을 거쳐 충방전 반응이 일어나게 된다. 따라서 박막전지의 용량을 증가시키기 위하여 전극 물질을 두껍게 만드는 경우 리튬 이온의 이동속도에 제약이 따르게 된다. 따라서 리튬 이온 이동속도의 제약을 최소화 하려면 L의 두께는 한계를 갖게 되고 이는 용량의 한계로 이어진다. 그러나 3차원 구조의 전지는 2차원 구조의 전지와 달리 두께인 L이 증가해도 전극 계면의 표면적이 함께 증가하기 때문

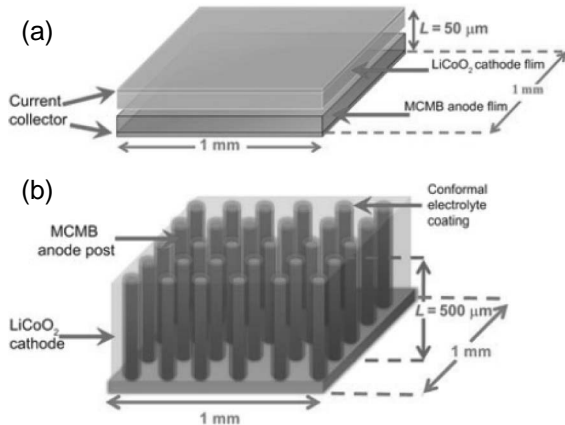


Fig. 11. (a) 2차원 구조의 박막전지와 (b) 3차원 기둥 구조의 박막전지의 모식도.

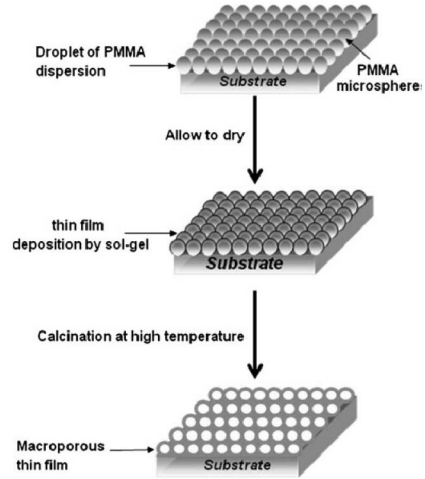


Fig. 12. 3차원 엠보싱 구조 공정 모식도.

에 리튬 이온의 이동거리는 일정하게 유지시킬 수 있으므로 전지 용량의 증가를 고출력과 함께 동반한다<sup>21)</sup>.

3차원 구조의 전극을 만드는 방법에는 크게 화학적 방법을 사용하여 공극을 형성한 뒤 그 공극에 sputtering법, sol-gel법, electrodeposition법, CVD법 등을 사용하여 전극물질과 전해질을 채우는 방법 (Fig. 12,13)과 보다 정교하고 균일한 3차원 구조를 제조할 수 있는 Micro-machining법 (Fig. 14)을 사용하여 기판을 제작한 뒤 그 위에 전극 물질을 증착하는 방법 등이 있다.

화학적 방법을 사용하는 대표적인 공정으로 Fig. 12와 같이 PS 등의 polymer sphere를 사용하여 엠보싱 모양

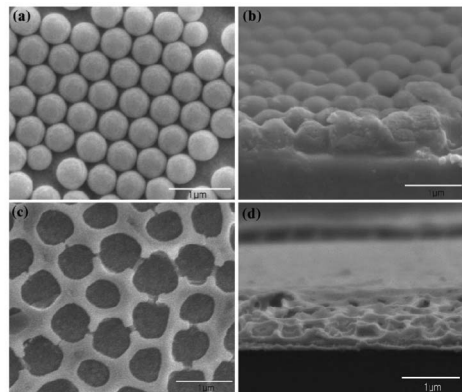


Fig. 13. 화학적 방법을 통하여 제작된 Li-Mn-O 양극 박막의 모습.

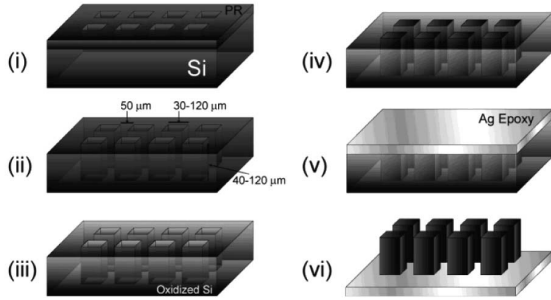


Fig. 14. micro-machining법을 이용하여 실리콘 어레이를 제작 후 전극 물질을 증착하여 3차원의 전극을 얻는 방법.

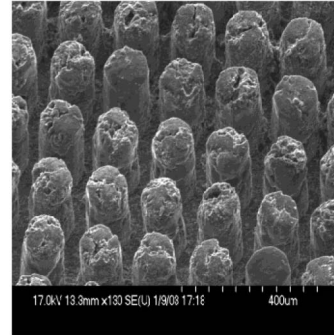


Fig. 15. Fig. 14의 공정을 통하여 얻어진 3차원 구조의 기둥형 박막 전극.

의 구조를 제작한 뒤 Sol-gel법 등으로  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiCoO}_2$  등의 양극 활물질을 증착하는 방법이 있다. 증착된 활물질은 RTA 등의 열처리를 통하여 결정화 과정을 거쳐 제작된다. Fig. 13에 Fig. 12를 통하여 얻어진 3차원 구조의 양극 박막이 나타나있다<sup>22)</sup>. 이러한 화학적 방법을 통한 3차원 구조의 제작은 공정이 간단하고 다양한 형태의 구조를 제작할 수 있다는 장점이 있기 때문에 화학적 방법을 통하여 나노로드, 나노튜브 등 3차원 구조를 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Micro-machining법을 통하여 박막 전극을 제조하는 과정은 Fig. 14에 나타나 있다. 이 방법은 화학적 방법과 달리 박막의 선택적인 식각과정을 거치는 반도체 제조공정에서 주로 사용되어 온 방법을 이용한다. 공정이 복잡하고 비용 상승의 문제가 있지만 정교하고 균일한 3차원 구조를 제작할 수 있다는 점에서 각광을 받고 있다. 식각을 하고자 하는 기판 위에 positive photoresist를 올린 후 UV light를 이용하여 원하는 형태의 패턴을 제작한다. UV에 노출된 photoresist 부분은 녹아내리게 되고 적당한 용액을 사용하여 실리콘 기판을 식각하면 원하는 구조로 패턴된 전극을 얻을 수 있다<sup>23)</sup>. 그 후 빈 공간에  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ 와 같은 전극 물질을 채워 넣어 사용한다.

화학적 방법을 사용하여 3차원 구조를 만드는 경우에는 정교하고 균일한 사이즈로 3차원 구조를 제어하기가 어렵지만 어레이 제작의 공정이 더 간단하고 다양한 구조의 어레이를 제작할 수 있다는 장점이 있다. 반면, micro-machining법을 이용하여 3차원 구조를 만드는 경

우 공정은 복잡한 반면 Fig. 15와 같이 균일하고 정교한 전극을 얻을 수 있다.

지금까지 3차원 구조를 갖는 박막전지의 개념과 제작 방법을 살펴보았다. 완벽한 3차원 구조 박막전지의 제작을 위해서는 양극 또는 음극의 한 부분만을 제조하는 것이 아니라 양극/전해질/음극으로 이어지는 3차원 Full-cell의 연구가 함께 진행되어야 한다. 하지만 아직까지 이 부분의 연구는 초기단계이며 해결해야 할 많은 과제들이 있다.

최근 Masashi Kotobuki는 3차원 구조를 가지는 Honeycomb 형태의  $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{LLT}/\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$  full-cell을 보고하였다. 박막 전지의 양극이나 음극을 먼저 형성시키는 대신 고체 전해질인 LLT를 Honeycomb 구조로 제작하여 그 공극속에 Sol-gel법을 이용하여  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (양극)와  $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$  (음극)을 채워 넣는 방식으로 제작하였다. 이렇게 제작된 박막 전지의 SEM 단면 사진이 Fig. 16에 나타나 있다<sup>24)</sup>. LLT의 양쪽 공극 사이에 전극을 채워 넣어 Full-cell을 구현하기는 하였으나 전극이 전해질에 완전하게 밀착하여 구현되지 않아 완전한 박막전지를 구현하지는 못하였기 때문에 앞으로 후속연구가 필요하다.

또 다른 3차원 박막전지로 Yi Cui 그룹에서 구현한 Fig. 17에 나타나 있는 아주 미세한 그리드형태의 구조를 사용하여 제작한 투명한 full-cell이 있다<sup>25)</sup>. 배터리의 핵심 물질인 활물질이 투명하지 않기 때문에 크기는 인간의 눈이 갖는 최대 분해능인 50마이크론 이하로 그리드 구조를

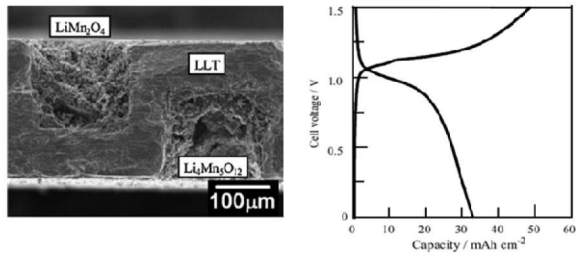


Fig. 16. Honeycomb 구조를 사용하여 제작 된 3차원 구조의 박막 전지의 SEM 사진과 전기적 특성.

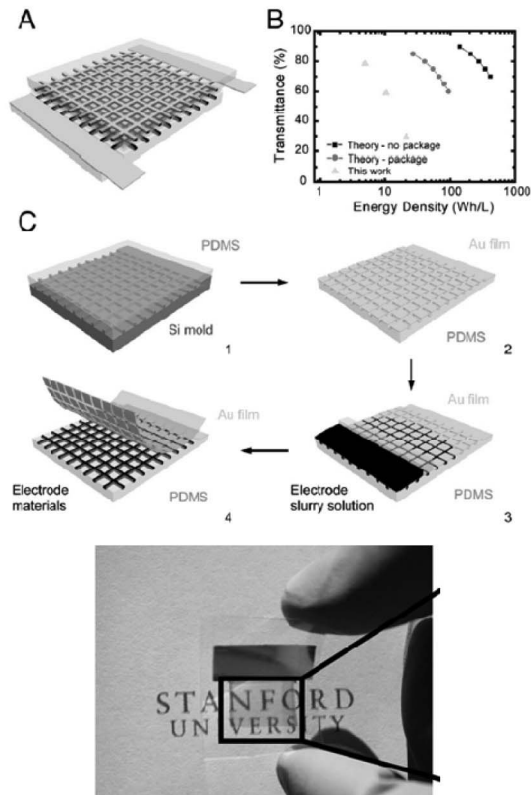


Fig. 17. 미세한 그리드 형태의 구조를 갖는 박막전지의 제조 과정 및 구현 된 투명박막전지.

형성하여 배터리를 투명하게 보이게 제작하였다.

최근에는 이러한 3차원의 박막 전지 뿐만 아니라 Fig. 18나 Fig. 19와 같은 나노 선 형태의 박막 전지분야도 활발하게 연구가 진행되고 있다. Fig. 18의 경우 Au를 촉매로 하여 VLS법으로 실리콘 나노선을 성장 시키고 그 위에 전류 집전체와 LiCoO<sub>2</sub>(양극), LiPON(전해질), Si(음극)의 순서로 증착하였다. 그 후 FIB를 통하여 전극을 분

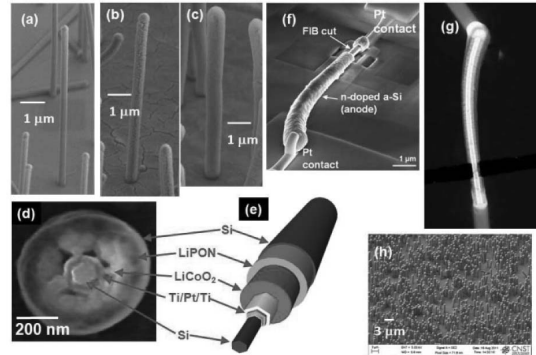


Fig. 18. ALS법으로 성장 된 Si nanowire를 기판으로 한 나노 선 전지<sup>26)</sup>.

리시키고 텅스텐 tip을 사용하여 전기 화학적 특성을 측정하였다. 이 나노 선 박막 전지의 경우 충전 시 전해질에 생기는 기공 때문에 3회 이상의 충방전은 불가능 하였지만 앞으로 나노 박막 전지가 바이오 등에 쓰이는 나노 소자의 에너지원으로 응용 가능 하다는 것을 보여 주었다. 또한 Fig. 19의 나노 선 전지는 Anodic Aluminum Oxide (AAO) 기판을 이용하여 양극물질과 전해질, 음극 물질을 차례대로 채워 넣어 10 µAh/cm<sup>2</sup>의 용량을 갖는

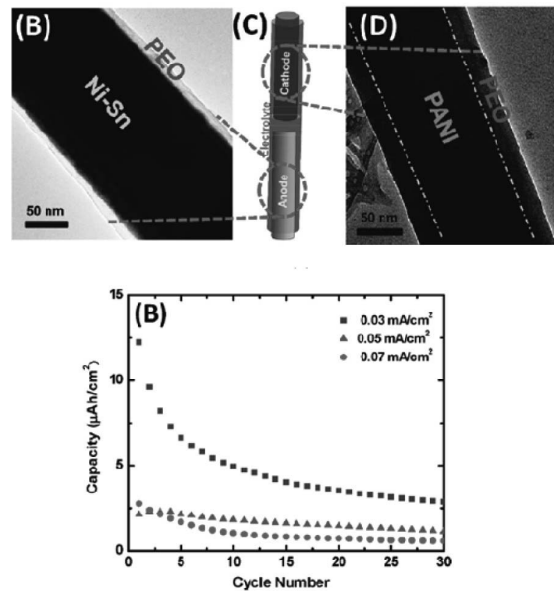


Fig. 19. AAO 기판을 이용하여 제작한 기둥 형태의 물드에 양극, 전해질, 음극을 채워 넣어 만든 나노 선 전지<sup>27)</sup>.

전지를 구현하였다.

최근에는 이러한 3차원의 박막 전지 뿐 아니라 Fig. 18 이나 Fig. 19 같은 나노 선 형태의 박막 전지분야도 활발하게 연구가 진행되고 있다. Fig. 18의 경우 Au를 촉매로 하여 VLS법으로 실리콘 나노선을 성장 시키고 그 위에 전류 집전체와 LiCoO<sub>2</sub>(양극), LiPON(전해질), Si(음극)의 순서로 증착되었다. 그 후 FIB를 통하여 전극을 분리시키고 텅스텐 Tip을 사용하여 전기 화학적 특성을 측정 하였다. 이 나노 선 박막 전지의 경우 충전 시 전해질에 생기는 기공 때문에 3회 이상의 충방전은 불가능 하였지만 앞으로 나노 박막 전지가 바이오 등에 쓰이는 나노 소자의 에너지원으로 응용 가능 하다는 것을 보여 주었다. 또한 Fig. 19의 나노 선 전지는 AAO 기판을 이용하여 양극물질과 전해질, 음극 물질을 차례대로 채워 넣어 10  $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ 의 용량을 갖는 전지를 구현하였다.

### 3. 결론

박막 이차전지에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어 오고 있지만 아직까지는 상용 전지로서 상품화된 것이 많지 않다. 박막 전지는 양극, 전해질, 음극의 기본 구조로 적층되어 구성되므로 각 구성물질 사이 계면의 최적화된 특성과 최적화된 물질을 이용한 전지의 설계로 고성능의 전지를 구현해야 한다. 또한 3차원 구조 박막전지의 구현을 위해서는 양극, 전해질, 음극을 3차원 구조 기판위에 균일하게 형성시켜 제조해야 하는데 아직까지는 공정상의 많은 어려움을 가지고 있는게 사실이다. 그렇지만 3차원 구조 박막전지는 고용량을 위해 전극의 두께를 두껍게 하더라도 높은 이온 및 전자 전도성을 가지기 때문에 2차원 박막전지가 가지고 있던 한계를 해소하여 앞으로 마이크로 소자의 에너지원 문제를 해결 할 수 있을 것으로 보인다. 앞으로 전지 구성요소 물질뿐 아니라 전극간의 계면 현상의 규명과 안정적인 전극 제조 기술이 발전하여 당면화되어 있는 MEMS, 나노 바이오 소자 등의 에너지원 문제를 해결하여 박막 이차전지의 실용화와 개발이 촉진 될 것으로 기대해 본다.

### 참고문헌

1. C. Yada, Y. Iriyama, T. Abe, K. Kikuchi, and Z. Ogumi, *Electrochem. Comm.*, **11** 413 (2009).
2. H. Mazor, D. Golodnitsky, L. Burstein, and E. Peled, *Electrochem. Solid-state Lett.*, **12** A232 (2009).
3. W. Greatbatch, J.H. Lee, W. Mathias, M. Eldridge, J.R. Moser, and A.A. Schneider, *IEEE Trans. Bio-Medic. Eng.*, **18** 317 (1971).
4. S.-C. Nam, and H. Y. Park, *News & Information for Chemical Engineers*, **25** 1(2007).
5. Y. G. Lee, K. M. Kim, and J. D. Kim, *Electronics and Telecommunications Trends*, **23** 32 (2008).
6. H. Pan, and Y. Yang, *J. Power Sources*, **189** 633 (2009).
7. B. J. Neudecker, R. A. Zuhr, J. D. Robertson, and J. B. Bates, *J. Electrochem. Soc.*, **145** 4160 (1998).
8. C. V. Ramana, K. Zaghbi, and C. M. Julien, *Appl. Phys. Lett.*, **90** 21916 (2007).
9. I. Kim, T.-H. Nam, K.-W. Kim, J.-H. Ahn, D.-S. Park, C. Ahn, B. S. Chun, G. W., and H.-J. Ahn, *Nanoscale Research Letters.*, **7** 64 (2012).
10. H.-K. Park, *J. Kor. Electrochem. Soc.*, **11** 197 (2008).
11. J.W. Fergus, *J. Power Sources*, **195** 939 (2010).
12. K. Brandt, *Solid State Ionics*, **69** 713 (1994).
13. B. Scrosati, *Nature*, **373** 557 (1995).
14. D.W. Shin, S.-J. Yoon, and J.-W. Choi, *Bull. KIEEME*, **20** 30 (2007).
15. Y. H. Rho, and K. Kanamura, *J. Surface Sci. Soc. of Japan*, **24** [7] 423 (2003).
16. E.J. Plichta, W.K. Behl, *J. Electrochem. Soc.*, **140** 46 (1993).
17. B. Scrosati, *J. Electrochem. Soc.*, **139** 2776 (1992).
18. Y. He, X. Yu, Y. Wang, H. Li, and X. Huang, *Advanced Materials*, **23** 4938 (2011).
19. P. R. Abel, Y.-M. Lin, H. Celio, A. Heller, and C. B. Mullins, *ACS Nano*, 10.1021/nn204896n (2012).
20. A. Yu, H. W. Park, A. Davies, D. C. Higgins, Z. Chen, and X. Xiao, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2** 1855 (2011).
21. T. S. Arthur, D. J. Bates, N. Cirigliano, D. C. Johnson, P. Malati, J. M. Mosby, E. Perre, M. T. Rawls, A. L. Prieto, and B. Dunn, *MRS Bulletin*, **36** 523 (2011).
22. B. G. Park, S. Kim, I.-D. Kim, Y. J. Park, *J. Mater Sci.*, **45** 3947 (2010).
23. J. W. Long, *Chem. Rev.*, **104** 4463 (2004).
24. M. Kotobuki, Y. Suzuki, H. Munakata, K. Kanamura, Y. Sato, K. Yamamoto, and T. Yoshida, *Electrochim. Acta*, **56** 1023 (2011).
25. Y. Yang, S. Jeong, L. Hu, S. W. Lee, and Y. Cui,



PNAS, 10.1073 (2011).  
 26. D. Ruzmetov, V. P. Oleshko, P. M. Haney, H. J. Lezec, K. Karki, K. H. Baloch, A. K. Agrawal, A. V. Davydov, S. Krylyuk, Y. Liu, J. Y. Huang, M. Tanase, J. Cumings, and A. A. Talin, *Nano Lett.*,

dx.doi.org/10.1021/nl204047z, (2012)  
 27. S. R. Gowda, A. L. M. Reddy, X. Zhan, and P. M. Ajayan, *Nano Lett.*, **11** 3329 (2011).

●● 임해나



- 2012년 경희대학교 화학공학과 공학사
- 2010년~현재 KIST 전자재료연구센터 학생연구원

●● 최지원



- 1989년 연세대학교 요업공학과 공학사
- 1994년 연세대학교 세라믹공학과 공학석사
- 2002년 연세대학교 세라믹공학과 공학박사
- 2004년~2005년 코넬대학교 재료공학과 연구원
- 1994년~현재 KIST 전자재료연구센터 책임연구원