

Special

# Thema | 박막전지의 국·내외 기술개발 현황

## 1. 서론

남상철 대표이사  
(주)누리셀

디스플레이, 반도체와 함께 인간의 심장이라고 불리는 전지는 3대 국가 주요 산업의 하나로서, 1700년대 말 Alessandro Volta에 의해 처음 개발된 이후 1800년대 후반부터 망간전지, Ni/Cd, Alkaline, Zinc/Air 등 여러 가지 전지에 대한 개념이 성립되어 지난 200여 년간 괄목할만한 성장을 이룩하여 왔다. 특히, 1991년 Sony社에 의해 처음 상용화된 리튬이온전지의 출현은 Cell phone, Note PC에서 최근의 MP3, PMP 등과 같은 개인용 전자기기의 급속한 성장을 가능하게 함으로서 본격적인 mobile 시대의 장을 여는 계기가 되었다. 이와 동시에 반도체 및 MEMS 기반기술 발전에 힘입어 전자 디바이스의 크기가 매년 빠른 속도로 작아지고 있으며, 따라서 이에 소모되는 전력 또한 점차적으로 감소하고 있는 추세에 따라 필요한 소요전력 및 공정에 부합한 전원소자의 개발 또한 필요하게 되었다. 박막전지는 이러한 요구에 맞춰 개발이 진행되어 온 새로운 개념의 전지시스템으로서 전지를 구성하는 양극, 전해질, 음극 등을 물리적기상증착법(PVD), 화학적기상증착법(CVD) 및 레이저증착법(PLD) 등 고전적인 의미의 박막증착공정을 활용하여 제조하는 에너지 저장장치의 하나이다. 박막전지는 1982년 일본 Hitachi社에서 CVD법에 의한  $TiS_2$  양극과 스퍼터링법에 의한  $Li_{3.6}Si_{0.6}P_{0.4}O_4$  고체전해질 및 진공증착에 의한 리튬음극을 사용한 prototype을 시작으로[1] 일본 NTT 및 미국 Eveready社에 의해 실질적인 의미에서의 개발이 시작되었다고 볼 수 있다[2~3]. 초창기에 개발된 박막전지의 경우 제조공정이 어려워 이를 재현성 있게 구현하기가 쉽지 않았으며, 안정하지도 않았을 뿐만 아니라 전지가 발휘할 수 있는 용량의 한계로 인해 이를 적용할 수 있는 응용제품군을 발견하지 못함으로써 박막전지에 대한 개발이 정체기를 맞이하기도 하였으나, 대기 및 리튬음극과의 계면이 매우 안정된 Lipon(Lithium Phosphorous Oxynitride) 고체전해질 박막이 미국 Oak Ridge 국립연구소에서 개발됨에 따라 비교적 안정한 형태의 박막전지가 본격적으로 개발되게 되었다[4~5]. Lipon 고체전해질은  $Li_3PO_4$  타겟을 질소분위기 하에서 스퍼터링 하여 일부 산소 원자를 질소로 치환시킨 형태로 다른 고체전해질에 비해 넓은 전압사용

범위를 가지며 리튬 이온전도도 또한 우수하다고 할 수 있다. 이에 대한 기술은 현재 미국내 박막전지 제조회사들이 라이선스 계약을 통해 상업화를 도모하고 있으며, 기존의 많은 연구자들에 의해 부정적인 요인으로 작용되어져 왔던 낮은 용량 등에 대해서는 Stacking 기술 등을 통해 점차적으로 극복되고 있을 뿐만 아니라 이와 더불어 안전성이 극대화된 리튬전지 형태로 그 응용분야를 넓혀가고 있다.

## 2. 박막전지의 제조

박막전지의 구동원리는 기본적으로 리튬이온전지와 동일하게 양극에서의 인터칼레이션 반응과, 리튬음극을 사용할 경우 전기도금에 의해 충전되며, 세라믹계 고체 전해질내에서의 리튬이온은 일종의 Hopping 효과에 의해 구동되어 진다. 박막전지는 그림 1과 같이 세라믹, 금속 혹은 플라스틱 기판 상에 양극 전류집전체 및 양극, 고체전해질을 순차적으로 스퍼터링법에 의해 증착한 후, 리튬 금속박막을 진공 열증착법에 의해 증착하는 형태가 가장 일반적인 제조 방법이라 할 수 있다. 이때, 양극 전류집전체와 기판과의 접착력을 증가시키기 위해 기판 상에 특수한 표면처리 혹은 접착층을 별도로 삽입하며, 양극전류집전체로는 백금이 가장 일반적으로 사용되어 지나, 전지의 제조단가를 증가시키므로 최근 이를 대체하기 위한 노력들이 행하여지고 있다.  $LiCoO_2$ ,  $LiMn_2O_4$ ,  $LiNiO_2$  등과 같은 4 V급 양극재료는 증착 직후에 비정질 특성을 나타내어 일반적인 전지성능을 발휘하지 못하므로 양호한 양극특성을 나타내기 위해서는 별도의 열처리 과정을 거치게 되는데, 열처리에 의한 결정화도는 전지의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 3 V급 양극재료로서 일반적으로 알려져 있는  $V_2O_5$ 는 양극박막 증착 후 별도의 열처리공정을 필요로 하지 않기 때문에 제조공정 측면에서는 매우 유리하나, 박막의 두께를 증가시키기가 용이하지 않고 리튬이온의 낮은 확산계수로 인해 출력밀도가 낮아 저전류, 저용량을 필요로 하는 소자위주로만 응용이 가능하다. 고체전해질의 경우에는 완벽한 형태의 비정질 화합

물을 제조하는 것이 중요한데, 이는 결정화된 박막의 Grain Boundary를 따라 전자가 이동할 확률이 높기 때문에 전해질을 통해 전자가 이동할 경우 전지의 단락을 야기시키게 된다. 음극으로는 기본적으로 리튬금속박막을 사용하나, 300 °C 정도의 고온에서도 사용이 가능하기 위해서는 리튬대신 산화물 혹은 질화물등과 같은 재료를 사용하기도 한다. 이렇게 제조된 박막전지는 대기 중에서 수분과의 반응으로 인해 사용이 불가능하므로 이를 방지하기 위해 별도의 패키징 과정이 필요한데, 고분자 / 금속 혹은 고분자 / 산화물 등과 같은 다층막 구조가 일반적으로 사용되고 있다.

박막전지를 제조하기 위한 장비 또한 개발이 진행되고 있는데, 그림 2는 프랑스 Hydromé Canique Et Frottements(HEF)사에서 제안하고 있는 박막전지 제조 시스템으로서 중앙에 Glove Box가 있어 수분에 의한 영향을 차단하는 방식을 채택하고 있다. 총 6개의 챔버로 구성되어 있는데 전류집전체, 양극, 고체전해질은 4개의 챔버를 통해 각각 사용되는 재료에 맞추어 DC 스퍼터링, 반응성 DC 스퍼터링 및 RF 마그네트론 스퍼터링을 선택적으로 사용하도록 설계되어 있다. 기판 Holder는 중앙에 장착된 로봇에 연결되어 각각의 공정이 완료된 후 다음 단계로 이송되도록 되어 있으며, 챔버 5에서 진공열증착에 의한 리튬음극을 증착한 후, 마지막 챔버에서 PECVD 공정을 이용하여 Polysiloxane 코팅으로 패

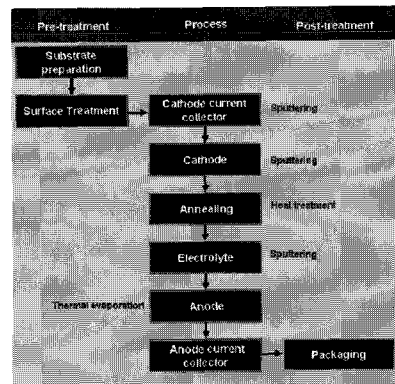


그림 1. 박막전지의 제조공정도.



해질 연구에도 주력하고 있다. 강원대는 NRL사업을 통해 많은 연구를 수행하였는데, 음극활물질인 Si과 Fe, Co, Zr과 같은 다른 이종 금속과 co-sputtering법에 의해 합금 및 다층막구조가 박막전지의 음극으로서의 사용 가능성을 발표하기도 하였다. 박막전지의 상용화에 대한 개발은 2000년대 초 애니셀과 누리셀에 의해 시작되었는데, 애니셀은 광주과학기술원과 함께 박막전지에 대해 여러 가지 연구를 수행하였으나 자금압박으로 인해 개발이 중단된 상태이며, 누리셀은 현재 GS칼텍스와 공동으로 상용화 연구를 진행하고 있다. 그림 4는 누리셀에 의해 제조된 박막전지로서 기판을 제외한 전지자체의 두께는 10  $\mu\text{m}$  이내이며, 4  $\text{cm}^2$ 의 전극면적에서 0.5 mAh의 방전용량을 나타내고 있는데 플렉시블 기판을 사용함

에 따라 전지 또한 플렉시블한 것을 특징으로 하고 있다. 박막전지는 양극활물질의 양 자체가 매우 적기 때문에 용량 또한 이에 비례한데, 용량을 증가시키기 위한 양극의 두께를 증가시키는 기술들이 개발되어 그림 5와 같이 최근에는 4  $\text{cm}^2$ 의 전극면적 기준 1 mAh이상의 방전용량도 가능하다. 박막전지는 고체전해질의 두께가 1~2  $\mu\text{m}$  두께로 매우 얇기 때문에 출력특성 또한 우수한데, LiCoO<sub>2</sub>를 양극으로 사용할 경우 30 C rate에서도 3 V 이상 동작이 잘 일어나는 것으로 알려져 있다.

#### 4. 국외 기술동향

박막전지의 초기 시제품은 1980년대에 설계되었으며, 현재까지 4개의 대형 프로젝트가 진행된 것으로 알려져 있다. 첫 번째는 Hitachi社에서 개발한 Li/Li<sub>3.6</sub>Si<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>O<sub>4</sub>/TiS<sub>2</sub> 구조의 박막전지로 CVD법에 의해 TiS<sub>2</sub>양극박막을 증착한 후 그 위에 스퍼터링에 의해 고체전해질을 증착하는 방법을 사용하였다. 진공증착에 의한 리튬을 음극으로 사용한 전지는 2.5 V의 OCV를 가지며 2,000회의 안정된 충방전 사이클을 나타내었으나, 회로단락전류가 1.3 mA/cm<sup>2</sup>으로 출력밀도측면에서는 그다지 양호한 특성을 나타내지는 못하였다. 두 번째는 프랑스의 Bordeaux 대학과 HEF社가 공동개발한 TiS<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> 타겟을 이용한 스퍼터링법에 의해 TiO<sub>0.2</sub>S<sub>1.4</sub> 및 MoO<sub>1.6</sub>S<sub>1.8</sub> 양극을 사용한 전지 시스템으로서 연구팀은 증착 증착 챔버에 남아있던 산소가 일부 치환하여 순수한 형태의 양극 황화물을 얻지는 못하였지만 일부 치환된 산소가 전기화학특성을 개선시키는 것으로 보고하였다. 그 위에 유리질계의 전해질을 증착한 후 4~5  $\mu\text{m}$ 의 리튬금속을 진공증착에 의해 적층하였으며, 특수 고분자 필름으로 보호하여 전지를 구성하였는데, 전지층의 총 두께는 10  $\mu\text{m}$  이하로 패키지를 포함해서 0.1 mm 이하였다. 구성된 전지의 표면적은 2  $\text{cm}^2$ 으로 평균전압 2 V에서 10분간 200  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 전류를 방출하였으며, 10,000회 이상 충·방전이 가능하였다. 비슷한 프로젝트가 미국 Eveready社에 의해 진행되었는데, 스퍼터링을 이용하여 Li/6Li-4Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



그림 4. 누리셀에 의해 개발된 플렉시블 박막전지.

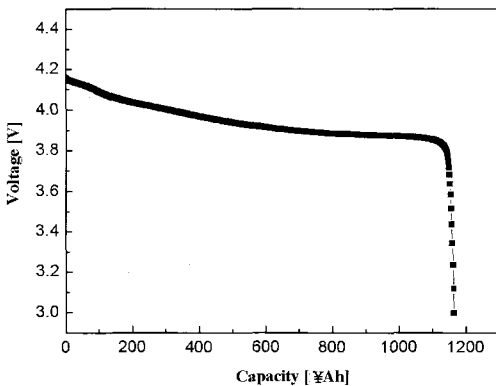


그림 5. 누리셀에 의해 개발된 박막전지의 방전곡선.

$P_2S_5/TiS_2$  구조의 박막전지를 제작하였으며, 이때 전해질의 전도도는  $2 \times 10^{-5} S/cm$ 였다. 이때, 리튬 음극은 전해질과 반응하여  $Li_2S$ 의 저항층을 형성함으로써 이를 방지하기 위해서  $LiI$ 층을 증착하였다.  $LiI$ 층을 포함한 전체 고체 전해질의 이온전도도는  $2 \times 10^{-6} S/cm$ 라고 보고되었다. 마지막으로 Oak Ridge National Laboratory에서 개발한 박막전지를 들 수 있는데, 양극으로  $LiCoO_2$ ,  $LiMn_2O_4$  및  $LiV_2O_5$ 를 스퍼터링법에 의해 박막화 하였으며,  $Li_3PO_4$ 타겟을  $N_2$ 분위기하에서 스퍼터링함으로써  $LiPON$  고체 전해질 박막을 제조하였는데, 이때 이온전도도는 약  $10^{-6} S/cm$ 였다.  $LiPON$  전해질은 양극박막 및 리튬음극과의 접촉에도 안정한 것이 가장 큰 특징이라 할 수 있다.  $LiCoO_2$   $1 cm^2 \times 2 \mu m$ 을 사용할 경우  $1 mA/cm^2$ 의 전류밀도로  $4.2 \sim 3 V$ 영역에서  $100 \mu Ah$ 의 용량, 40,000회 이상의 충·방전이 가능하며, 리튬금속 대신 구리박막을 전해질위에 직접 증착하는 방식의 Li-free 전지는 전지의 제조공정을 한층 더 향상시킨 것으로 알려지고 있다. 박막전지는 미국내 회사들에 의해 상용화가 진행 되고 있는데, 1994년 설립된 FET社는 지난 10년간 지속적인 연구개발을 통해 0.1 mm 두께 이하, 0.7 mAh급 박막전지를 판매하고 있으며, 최근 응용분야를 넓혀 의료 및 군수 분야로의 시장을 개척해 나가고 있다. 콜로라도에 위치한 Infinite Power Solutions社는 결정질의  $LiCoO_2$  양극박막을 사용하여  $cm^2$ 당 약  $200 \mu Ah$ 급 용량을 나타내는 전지를 개발하였다. 이 전지는 최대 5 mA의 일정전류를 사용할 수 있으며, 펄스전류( $\sim 100 msec$ )시에도 3.0 V 이상 40 mA의 전류를 사용할 수 있다. 이 회사는 작년말부터 약 300억원의 자금을 투입하여 생산라인을 구축 중에 있으며 올해말 준공을 목표로 하고 있다. Excellatron社는 Advanced Technology Program을 통해 Lipon고체전해질박막을 CVD에 의해 제조함으로써 기존 스퍼터링법에 비해 수배 빠른 공정기술을 특징으로 하고 있다. 특히 150 °C 이상의 고온에서 작동되는 박막전지를 개발하였는데, 이 온도에서 10 C의 고출방전을 수행할 경우에도 200회 이상 작동이 잘 됨을 보여주고 있다. 그림 6은 Excellatron社에서 개발한 박막전지 제품으로서 고분자, 세라믹, 금속 Foil 등 다양한 기판 상에

전지가 구성되어 있음을 알 수 있다.

일본의 경우에는 2차원적 평면구조와 같은 기본 형태를 유지하면서 전지재료만 변경된 박막전지가 Tohoku대학에서 개발되었다. 그림 7은 이에 대한 모식도로서 Quartz 기판 상에  $LiCoO_2$ 를 양극으로 비정질의  $Li_2O-V_2O_5-SiO_2$ 와 SnO를 각각 고체 전해질과 음극으로 사용하여 전지를 구성하는 형태를 가지고 있다. 기존의 스퍼터링 시스템과는 달리 전 공정을 Nd:YAG 레이저가 장착된 PLD(Pulsed Laser Deposition)법에 의해 제조되며  $0.23 cm^2$ 의 전극면적과  $2 \mu m$ 의 전지두께의 경우 3.0 V-0.7 V 영역에서 약  $8 \mu Ah/cm^2$ 의 방전용량을 나타냄을 특징으로 하고 있다. 이때, 고체 전해질로 사용된

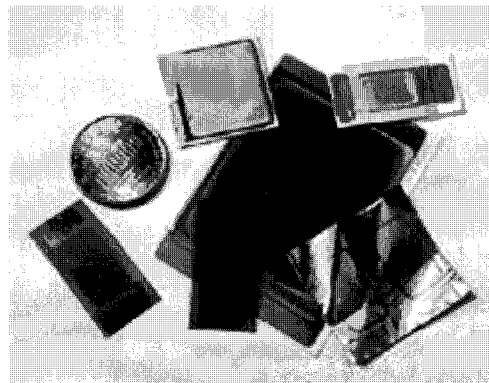


그림 6. Excellatron社에서 개발한 박막전지[8].

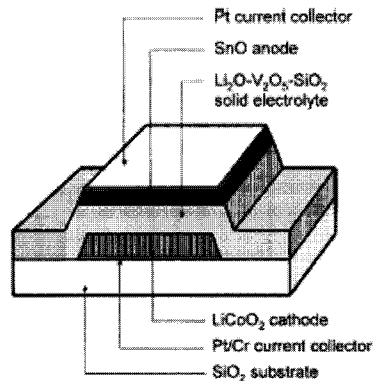


그림 7.  $Li_2O-V_2O_5-SiO_2$ 와 SnO를 고체전해질과 음극으로 사용한 박막전지의 개념도[9].

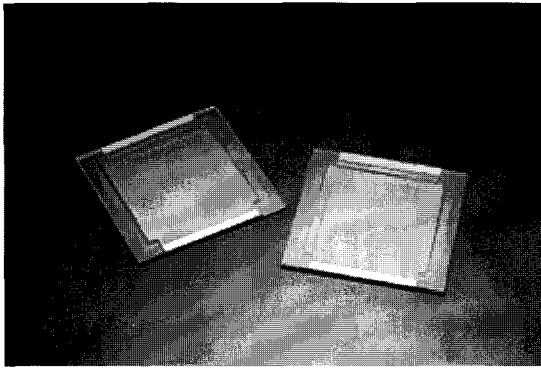


그림 8. Geomatec에서 개발한 박막전지.

$\text{Li}_{2.2}\text{V}_{0.54}\text{Si}_{0.46}\text{O}_{3.4}$ 의 이온전도도는  $2.5 \times 10^{-7} \text{ S/cm}$ 을 나타내고 있다.

Geomatec은 Iwate대학과 공동으로 스테인리스 스틸 기판을 사용한 박막전지를 개발하여 임베디드 회로 기판, 플렉시블 디스플레이 및 120 °C의 고온에서 사용되는 전원으로로서 그 응용분야를 발굴하고 있으며 전지 후면에 박막태양전지를 연결하여 반영구적인 전원으로로서의 가능성을 보여주고 있다. 그림 8에 Geomatec에서 개발한 박막전지를 나타내고 있으며, 이밖에 NASA의 제트추진연구소, 독일 Kiel 대학, 일본 Kyoto대학 등 선진국을 중심으로 활발한 연구개발이 진행되고 있으며, 최근 수년 동안 발표 논문 또한 급속히 증가하고 있는 추세이다.

### 5. 기타 박막전지

고체세라믹 전해질을 사용하는 박막전지의 경우 전해질 자체의 낮은 이온전도도로 인해 출력밀도 측면에서 다소 제약이 있을 것으로 예상됨에 따라 이온전도도가 큰 액체를 전해질로 사용한 박막전지도 보고되었다. 그림 9는 미국 Brigham Young대학의 한 연구팀이 개발한 액체상태의 전해질을 사용하는 박막전지 시스템으로서, 평탄한 기판 상에 15 μm 두께의 아연 금속박막을 음극으로, 600 nm 두께의 니켈 박막 상에 형성된 50~75

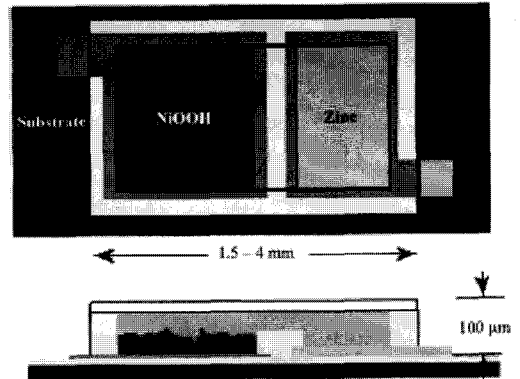
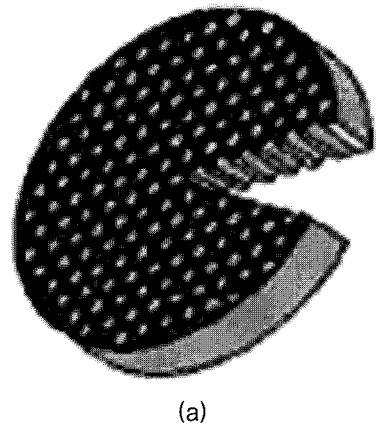
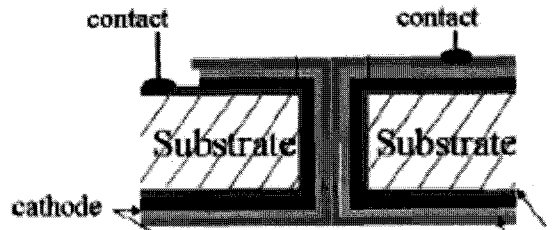


그림 9. 액체전해질을 사용하는 Zn-NiOOH 박막전지의 개념도[10].



(a)



(b)

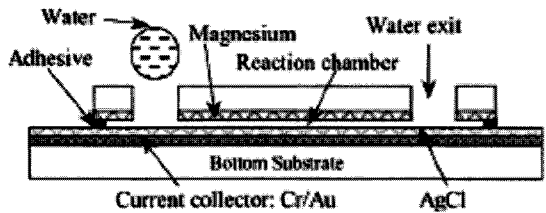
그림 10. 다공성 기판 상에 구현된 3차원 박막전지의 개념도[11].

um 두께의 다공성 수산화 니켈층을 양극으로서 분리시킨 상태에서 두 전극사이와 외벽을 에폭시 재질의 구조물을 삽입한 후, 상부에 Zinc Oxide로 포화된 20 wt%의 KOH 용액을 채워 이를 전해질로 사용하는 것을 특징으로 하는 전지이다. 이 전지는 1~3.5 C/cm<sup>2</sup>의 용량을 나타내며 100 mA/cm<sup>2</sup>이상의 전류밀도에서도 1.2V 이상의 전압을 유지하는 등 2 mm<sup>2</sup>의 전체면적에서 1-2 mW의 출력을 나타냄으로서 펄스형태의 고출력을 요구하는 Autonomous Remote Sensor용 전원으로 적당하다고 할 수 있다.

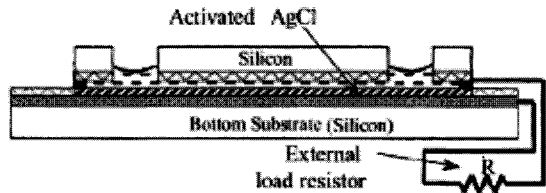
액체전해질을 사용하는 시스템이 출력밀도 측면에서 매우 유리하다면, 기존 평면구조의 박막전지의 단점으로 지적되어 온 용량을 획기적으로 증가시키기 위한 3차원 박막전지 또한 주목하지 아니할 수 없다. 이스라엘 Tel Aviv대학의 연구팀에서 수년전부터 개발에 몰두하고 있는 3차원 박막전지는 3D 마이크로전지라고도 불리며 그림 10(a)와 같은 다공성의 기판 상에 그림 10(b)와 같이 양극, 고체전해질, 음극을 순차적으로 증착하여 전지를 구성하는 형태로 되어 있는데, 이때 다공성의 기판은 실리콘, 유리, 플라스틱과 같은 재질이 가능하며 전지의 성능은 일정한 크기의 미세 홀(Hole)과 종횡비(Aspect Ratio)에 의해 결정되어 진다. 이러한 3차원 박막전지는 약 50 um의 직경과 500 um정도의 길이를 갖는 미세 홀을 갖는 실리콘과 유리기판상에 전기도금법에 의해 증착된 MoOS양극을 사용한 반전지의 경우 3.5 mAh/cm<sup>2</sup>의 방전용량을 나타내었으며, 하이브리드 고체 고분자 전해질(HPE)과 Graphite 음극을 사용한 Full-cell의 경우 2 mAh/cm<sup>2</sup>의 전지용량을 나타내는 등 기존 2차원 구조의 전지에 비해 용량이 크게 증가하였음을 보고하고 있다[12].

장기보존성(Shelf Life)을 극대화 시킨 일종의 비축전지(Reserve Battery)와 같은 박막전지 형태의 개발 또한 진행되고 있다. 그림 11은 캘리포니아 대학에서 개발하고 있는 박막전지 혹은 마이크로전지의 개념도로서 양극과 음극 박막이 각각 증착된 두 개의 실리콘 기판을 서로 접합하여 미세한 반응 챔버를 구성함을 기본 형태로 갖는다. 즉, 전지를 사용하지 않는 동안에는 양극과 음극이 서로 분리되어 전

지가 구성되지 않으나 전지를 사용할 경우에는 상부 기판에 형성된 전해질 주입구를 통해 전해질인 물을 공급해 줌으로서 전자의 흐름을 발생시키는 구조가 되는 것이다. 이때 하부 실리콘 기판에 형성된 양극은 20 um 두께의 Ag를 스퍼터링법에 의해 증착한 후 이를 Chlorination공정에 의해 형성된 AgCl을 사용하며, 음극으로 사용되는 Mg는 진공증착법에 의해 15 um 두께로 코팅되어진다. 이렇게 제조된 전지는 1.65 V의 전압과 12 mm × 12 mm 면적의 전극면적에서 1.86 mAh 이상의 방전용량을 나타내며 BioMEMS Chip과 진단용칩 등 주로 바이오 분야를 응용분야로 하고 있다.



(a) Before Activation



(b) After Activation

그림 11. 물에 의해 활성화되는 박막전지의 개념도[13].

## 6. 결론

각종 초소형 전자 디바이스의 출현 및 저 전력 소비형 chip의 개발에 힘입어 박막전지가 이들 소자의 동력원으로서 재평가 받고 있으며, 미국을 중심으로 이에 대한 사업화가 진행되고 있다. 작년에 발표된 박막전지 해외 시장조사보고서에서도 나타난 바와 같이 현재의 박막전지 시장은 미약하나, 향후 6년 내 100억불 이상의 세계시장을 형성할 것으로 예측되는 등 박막전지는 비로소 시장형성에 접어들었다고 볼 수 있다. 박막전지는 Battery Embedded Card, SoC, MAV, Zigbee, Smart Dust, Micro Robot, 플렉시블 디스플레이 및 인공와우 등을 구동하기 위한 전원으로서 매우 적합하며, 군사/우주항공용으로 그 응용 가능성이 매우 높다. 최근 들어 리튬전지의 안전성 문제가 이슈로 부각됨에 따라 상대적으로 안전한 박막전지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이와 같은 특성으로 인해 인체 부착형 혹은 삽입형 전지로도 그 응용가능성이 증대되고 있다.

## 참고 문헌

[1] K. Kanehori, K. Matsumoto, K. Miyauchi and T. Kudo, Solid State Ionics, 9&10, 1445(1983).  
 [2] H. Ohtsuka, S. Okada and J. Yamaki, Solid State Ionics, 40-41, 964(1990).  
 [3] S. D. Jones and J. R. Akridge, Solid State Ionics, 53-56, 628(1992).  
 [4] J. B. Bates, N. J. Dudney, G. R. Gruzalski, R. A. Zuhr, A. Choudhury, C. F. Luck and J. D. Robertson, Solid State Ionics, 53-56, 647(1992).  
 [5] J. B. Bates, G. R. Gruzalski, N. J. Dudney, C. F. Luck and X. Yu, Solid State Ionics, 70-71, 619(1994).  
 [6] M. Martin and F. Faverjon, Thin Solid Films, 398-399, 572(2001).  
 [7] W. Y. Liu, Z. W. Fu, Q. Z. Qin, Thin Solid Films, 515, 4045(2007).  
 [8] www.excellatron.com  
 [9] N. Kuwata, J. Kawamura, K. Toribami, T. Hattori and N. Sata, Electrochem. Commun., 6, 417(2004).

[10] P. H. Humble, J. N. Harb and R. LaFollette, J. Electrochem. Soc., 148, A1357(2001).  
 [11] D. Golodnitsky, M. Nathan, V. Yufit, E. Strauss, K. Freedman, L. Burstein, A. Gladkikh and E. Peled, Solid State Ionics, 177, 2811(2006).  
 [12] M. Nathan, D. Golodnitsky, V. Yufit, E. Strauss, T. Ripenbein, I. Shechtman, S. Menkin and E. Peled, J. MEMS, 14, 879(2005).  
 [13] F. Sammoura, K. B. Lee and L. Lin, Sensors and Actuators, A111, 79(2004).

## 저자|약력



성명 : 남상철

◆ 학력

- 1995년 인하대 화학공학과 공학사
- 1997년 인하대 대학원 화학공학과 공학석사
- 2000년 고려대 대학원 화학공학과 공학박사

◆ 경력

- 2000년 - 2001년 KIST post doc.
- 2004년 - 2006년 경기대 겸임교수
- 2004년 - 현재 한국산업기술대 겸임교수
- 2006년 - 현재 (주)누리셀 대표이사

