

박막형 2차 전지의 연구 개발 동향

윤영수, 조원일*

한국과학기술연구원

박막기술연구센터, *전지, 연료전지 센터

1. 서 론

최근 반도체 산업의 고도화 및 미세화에 따라 이를 기본으로 한 초소형 정밀 기계 부품 소자와 같은 미세 소자의 제작을 위한 마이크로 공정 기술 개발이 세계적으로 급격하게 진행되어지고 있으며 이러한 마이크로 공정 기술을 이용한 초소형 정밀 기계 부품 소자는 메모리 소자를 주축으로 해오던 반도체 분야에 버금갈 것으로 예상되어지는, 2000년대의 성장산업으로 미개척 분야이고, 현재까지는 선진국이 독점하고 있는 고부가가치 기술중의 하나이다. 특히 메모리 소자용 반도체 일변의 국내 부품 산업의 다각화와 고 부가가치의 소자 개발 및 생산에 대한 관심이 고조되고 있는 시점에서 마이크로 공정을 이용한 초소형 정밀 기계 부품 소자의 개발은 필수적이다. 메모리용 반도체 산업에 지나칠 정도로 편중되어 있는 국내 반도체 산업에서의 탈피와 초정밀 고부가가치 부품 산업의 장기적 발전과 국제 경쟁력의 확고한 확보를 위하여도 우리 고유의 마이크로 공정 기술의 확보의 필요성이 강조되고 있으며, 그 중에서도 초소형 정밀 기계 기술의 개발은 지난 20 여 년에 걸친 반도체 메모리 소자 제작을 위한 고도의 연구 개발 등의 경험을 갖고 있어, 세계적으로도 아직 초기 연구단계에 있는 마이크로 공정을 이용한 초소형 정밀 기계 제조기술이야말로 메모리 반도체에 이어 다시 이 분야에서 세계 최고의 선진국이 될 수 있는 유망한 분야이다.

마이크로 공정을 이용한 초소형 정밀 기계 부품 소자 제조 기술은 크게 마이크로 머신 및 마이크로 시스템 연구로 분류될 수 있으며 마이크로 머신의 경우 Microelectromechanical System (MEMS) 공정이 가장 대표적으로 알려져 있다. MEMS 공정에 의하여 실리콘 또는 화합물 반도체 상에 메모리 소자와는 다른 3차원의 형태를 갖는 기능성 구조물을 제작할 수 있으며 이 때문에 이차원적인 구조로는 구현할 수 없는 다양한 기능과 더불어 높은 성능 지수를 갖는 소자의 제작이 가능하게 되어 주로 센서와 액츄에이터 등에 응용될 수 있다. 마이크로 공정을 이용한 초소형 정밀 기계는 공정 기술과 재료 기술의 발전에 의하여 더욱 소형화되고 있으며 특히 기능을 갖는 부분과 이 부분을 제어하는 주변회로의 on-chip화의 요구가 증가되기 시작하였다. 이와 같은 추세에 있어서의 문제점은 초소형 정밀 기계 부품 소자의 구동을 위한 에너지원의 개발이다. 즉, 소자의 크기가 작아진 것에 부합되는 초소형의 전지가 필요하게 된 것이다. 따라서 보다 완전한 초소형 정밀 기계 및 마이크로 소자의 구현을 위하여 마이크로 소자와 혼성 (Hybrid)되어 이용될 수 있는 고성능 및 초소형의 전지의 개발이 필수적이다. 현재의 박막 및 마이크로 공정 기술을 응용하여 초소형의 고성능 마이크로 박막 전지를 제작한다면 이상의 요구 조건을 만족할 수 있게된다. 전지에는 일회성의 일차 전지와 충, 방전이 가능한 이차 전지로 분류되는데

마이크로 소자용 박막 전지라함은 후자인 이차전지를 의미한다. 즉, 박막 전지의 경우 전지의 용량이 벌크의 그것보다 작으므로 재충전이 가능한 이차 전지가 바람직하다. 현재 이차 전지는 오늘날의 정보 통신 분야에서 휴대용 기기 부분에서 많이 사용되어지고 있으나 아직 이를 박막화한 마이크로 박막 전지의 상용화는 전무한 실정이다. 박막형 마이크로 전지는 환경 안정성, 소형, 경량화, 넓은 작동 온도, 긴 저장 수명 및 자원의 풍부성과 무공해 물질로부터 제작 가능하다는 같은 장점으로 인해 초소형 정밀 기계에 응용될 것으로 예측되며 아직 전세계적으로 상용화가 되지 않은 현재의 단계에서 이의 개발을 통한 기술의 우위 확보와 실용화는 국가 부품 산업 및 차세대 기술 집약적인 초소형 정밀 기계 부품 소자 산업의 선진화에 크게 기여할 것이 틀림없을 것으로 사료된다.

2. 박막형 마이크로 전지란

박막형 마이크로 전지란 말 그대로 전지를 구성하는 요소를 박막화하여 그 크기를 작게 만든 것을 의미한다. 박막이란 특수성으로 인하여 모든 구성 요소는 고상을 의미하며 따라서 박막형 마이크로 전지라 함은 고상의 박막 전지를 의미하게 된다. 그림 1은 최근에 미국의 Ork Ridge National Laboratory (ORNL)의 J. Bates 그룹에서 발표한 박막 전지의 단면을 보여주고 있다. (U.S. Patent 5,567,210) 이외에도 다른 몇 가지의 박막 전지의 구조가 발표되었지만 공통적으로 기판/하부 콜렉터/Cathode/Electrolyte/Anode/상부 콜렉터/Encapsulation의 구조를 갖는다. 이때 하부 콜렉터는 주로 바나듐 또는 Pt, Ru, Pd 등의 귀금속을 사용하며 상부 콜렉터는 알루미늄이 가장 일반적이다. 기판을 제외한 전지의 전체 두께는 5 μ m 이하이다. 그러나 기판에 평행한 방향으로 수mm 이상의 크기도 갖을 수 있게된다. 따라서 전체적인 전지의 크기는 평면적으로 볼 때 마이크로라는 용어를 사용할 수 없지만 (1) 두께 방향으로의 크기가 마이크로 단위이며 (2)박막형 전지가 마이크로 소자의 에너지원으로 응용되어지므로 박막형 마이크로 전지라 부를 수 있게 된다. 즉, 박막형 마이크로 전지는 초소형의 전력원으로 제작이 가능하므로 반도체 메모리 소자의 스텐바이 및 백업으로 뿐 아니라 마이크로 센서와 마이크로 액츄에이터 등과 혼성하여 초소형의 의료 소자, 에너지원을 내장한 스마트 카드, FM 송. 수신기 등과 패키징화 한 원거리 유해 가스 감지기 등 그 응용의 폭과 가능성은 매우 높다.

3 박막 전지의 사용할 수 있는 실질적인 예

3-1. 메모리 소자의 스텐바이 또는 백업 전력원

현재 ORNL에서 소자의 Package 상에 전지를 위치하는 방식을 특허 등록하였으나 본 발표자는 소자의 상부에 전지를 바로 적층하는 방식을 선택하여 메모리 또는 전자 소자의 집적도의 저하를 막는 것이 가능하도록 하였음(한, 미, 일 특허 출원). 기전력 및 에너지 밀도 : 3.8-4.2 V, 150-200 Wh/L, 자가 방전 : <3%/년, 작동 온도 :-25 $^{\circ}$ C - 60 $^{\circ}$ C

3-2. 스마트 카드

미국 Battery Engineering사는 이 응용을 위하여 Li-polymer 전지를 제안하였으며 그 사양은 다음과 같음. 에너지 밀도 : 125 Wh/Kg, NiCd의 1/5무게, 500회의 안정한 충. 방전, 기전력 3.7V, 자가방전

(5%/월). 박막 전지의 경우 Li-polymer 전지의 1/5 무게, 1000회 이상의 안정한 충·방전, 넓은 기전력 범위(3.2-4.2V), 충·방전당 낮은 용량 손실(0.01%/사이클) 및 낮은 자가 방전(3%/년)의 장점을 갖는다.

3-3. MEMS 소자

MEMS 소자의 경우 그 다양성에 의하여 전지의 특성을 국한시켜 제안하는 것이 다소 무리가 따르므로 강유전체를 이용한 센서(예 : 비냉각 적외선 센서, 마이크로 칸틸레버 빔)의 경우 국내의 메모리 생산 및 공정 기술의 세계적 우위에 의하여 강유전체의 박막합성 기술이 세계적이며 따라서 다음의 성능을 갖는 박막전지를 강유전체를 갖는 MEMS 소자와 하이브리드할 경우 국제적 선도가 가능할 것으로 생각됨. 기전력 : 5.0 -6.0 V 이 기전력은 본과제의 3차년도 목표인 다중셀의 제작에 의하여 구현 가능함(특히 출원 가능), 에너지 밀도 : 300 - 400 W/L, 전지 총 두께 : < 10 μ m, 전지의 크기 : No limit.

4 지금까지의 연구개발 실적

4-1 국내

현재 국내에서 박막 전지와 관련되어 연구하고 있는 기관은 서울대 재료 공학부, KAIST 재료공학과 및 연세대 금속 공학과 등이다. 현재 이 각 기관의 연구 성향은 벌크형의 이차 전지의 개발을 주목적으로 하고 있으며 이러한 연구 과정에서 하나의 세부적인 주제로서 박막 전지를 연구하고 있다. 3개의 기관은 공통적으로 박막전지의 연구와 관련하여 전지의 Cathode에 관한 연구를 주로 하고 있다. 서울대와 KAIST의 경우 각각 스퍼터링과 Sol-gel 공정을 기초로하여 Li(Mn, Co)₂O₄를 연세대의 경우 스퍼터링을 이용한 LiNiVO₄에 대하여 연구를 하고 있다. 그러나 아직 박막전지의 본격적인 실용화 연구에 관한 결과는 발표되지 못하고 있으며 서울대의 경우만 리튬망간산화물 박막 증착에 관련되어 현재 국내에 1건의 특허를 출원 중에 있다. KIST의 경우 최근에 박막전지와 관련되어 한국, 미국 일본에 고전류 밀도를 갖는 박막전지의 제작 기술 (전지 합성을 위한 기판에 기존의 반도체 공정에서만 그 응용 가능성이 제시되고 있는 Trench를 도입, 그림 3)과 박막전지의 마이크로 소자와의 하이브리드 (Vertical hybrid)에 관한 특허를 출원하였다. 표 1에 국. 내외의 기술 수준의 비교를 나타내었다.

표 1 국내. 외 박막전지 제작 기술 평가표

항 목	선진국 대비 국내 수준 (%)	선진국
Cathode 제작 기술	70	실용화 단계
Cathode 평가 기술	60	완성 단계
고체 전해질 제작 기술	50	개발 및 완성 단계
단위 전지 제작 기술	50	개발 및 완성 단계
복합전지 제작 기술	-	개발중
고용량 전지 제작 기술	-	개발예정
응용 시스템 설계 및 제작 기술	10	개발예정

4-2 국 외

전세계적으로 박막형 마이크로 전지의 상용화는 1998년 현재 보고되고 있지 않고 있다. 현재 가장 이 분야에서 앞서고 있는 연구팀은 미국의 ORNL (Oak Ridge National Laboratory)의 J. Bates 그룹이며 이 그룹은 박막 전지와 관련하여 미국 내에 많은 특허를 출원한 상태이다. 이 그룹 이외에 일본과 유럽에서 산발적으로 박막전지에 관해서 연구를 하고 있지만 그의 연구 수준은 응용을 위한 수준에는 크게 미치지 못하고 있다. J. Bates 그룹의 대표적 특허로는 박막 전지에 사용되는 고체 전해질로 LIPON의 사용과 고온용 Anode로서 Li-Mg 합금에 관한 것이다. 특히 LIPON의 경우 기존에 제시된 대부분의 Cathode 물질 및 Li Anode와 그 계면에서 매우 안정한 열역학 및 전기적 상태를 가지므로 당분간 박막전지에 확실한 전해질로 쓰여질 것으로 예측된다. 고온용 Anode의 경우 그 용도의 특수성으로 인하여 그 특허의 파급도는 LIPON에 미치지 못할 것으로 생각된다. J. Bates 그룹은 1998년 하반기를 기점으로 미국내의 MEMS 관련 연구 그룹 (예 : UCLA의 Prof. C. J. Kim's 그룹)에 실험적으로 마이크로 박막 전지를 공급하기 시작하고 있으며 특히 미국 내 기업과 조만간 사업화를 전제로한 연구를 착수할 계획이다.

5 앞으로의 전망

마이크로 박막 전지가 연구 개발되어 실용화되면 현재의 반도체 및 마이크로 공정에 기초한 초소형 정밀 기계 소자의 광범위한 응용을 위하여 그 수요가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 또한 이의 연구 개발 기간 동안 축적된 박막합성 기술, 마이크로 공정 기술을 이용하여 보다 더 고 용량의 전지의 개발한다면 고상의 마이크로 박막 전지 분야에서 선진국으로 확실히 자리잡을 수 있으며 특히 제품 수출은 물론이며 기술 계약에 따른 많은 수입이 예상된다. 표 2에 세계 2차 전지의 생산액 추이를 나타내었다. "0"으로 표시된 부분은 전지생산이 되지 않고 개발 중이었던 상태를 의미한다. 표에 의하면 세계 전체 이차전지 생산액은 매년 16.3% 이상의 증가율을 보이고 있으며 최근의 자료에 의하면 5조 3600 억 원 (1997), 6조 2090 억 원(1998), 7조1740 억 원(1999), 9조9530 억 원 (2005)으로 평가 또는 예측되고 있다. 특히 박막전지에 관련된 리튬이온전지는 MH보다 늦게 개발되었지만, 그 성능 때문에 현재 그 생산액이 MH를 추월한 상태이며, MH전지 생산은 담보 상태이다. 이러한 것을 종합할 때, 박막전지는 리튬이온의 생산액 중 일부를 점유하게 될 것으로 사료된다. 만일 1996년 기준으로 Li 박막 전지가 전체 Li 박막 전지에서 점유하는 비율이 1 또는 5% 이라 할 때 총 생산 액은 1,350 x 1% = 135 억 원 또는 1,350 x 5% = 675 억 원 의 잠재 생산액을 가지게 된다.

표 2 세계 이차전지 생산액 추이

(단위 : 10억원)

전지종류	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Ni-Cd	1,520	1,820	2,140	2,050	2,130	2,160	2,070	1,950
Ni-MH	0	20	50	130	330	810	990	1,010
Li-Ion	0	0	0	10	60	150	360	1,350
합계	1,520	1,840	2,190	2,190	2,530	3,120	3,420	4,310

-노무라종합연구소

현재, Li-Ion 전지의 예상 생산액은 $7,174 \times 70.9\% = 5,086.0$ 억 원 (1999년 예상)이며, 2005년에 80.4%의 시장을 점유할 것으로 예상된다. 특히 세계적으로 마이크로 공정을 이용한 초소형 정밀 기계 소자에 대한 개발과 그에 대한 요구가 증가하는 것과 관련하여 초소형 소자를 구동하는 마이크로 박막 전지에 대한 수요는 급격히 증가할 것으로 예측된다. 마이크로 박막전지의 Li계 이차 전지의 시장에서 예상 점유율은 1% - 5%가 향후 10년 내에 기대되며, 장기적으로 초소형 정밀 기계의 응용이 가시화 될 경우 최고 20%까지 그 점유율이 상승할 것으로 기대된다.

5. 결 론

현재 국내의 반도체 공정 기술은 이미 세계 최고의 수준에 올라와 비록 생산성에서는 뒤질지라도 Li계 벌크 전지에 관련된 기술도 세계적 수준에 있다. 이러한 상황에서 일본, 미국에 뒤쳐진 벌크형 2차 전지와는 다르게 새로운 분야로서 박막전지를 개발한다면 박막전지 분야에서 한국이 세계적 우위를 점할 것은 틀림없다고 판단된다. 박막전지는 그 출발이 MEMS 소자 또는 기억용 소자의 작동을 위한 전력원으로 관심을 끌면서 개발되기 시작하였지만 보다 우수한 박막 공정 기술 및 2차 전지의 개발 역량을 도입한다면 수동적인 의미의 이용이 아닌 21세기의 가장 유망한 응용 연구 분야이며 능동적 응용이 가능해질 것이다. 21세기의 정보 통신 분야, 우주 산업 및 의료용 분야와 연계되어 박막 전지의 응용 가능성은 더욱 높아지고 있다.