국산 FE-SEM 개발과 제품화 현황

구정회

주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; 이하 SEM이라 칭함)은 1965년 Cambridge Instrument(영국)에서 상용화된 이후로 반도체산업의 성장과 더불어 비약적으로 발전해 왔다. 즉, 반도체 소자의 급격한 Packing Density 증가로 인하여 광학현미경은 이미 분해능 한계에 직면하게 되었고, 보다 미세한 영상관찰 및 측정/분석을 위한 필요성이 대두되었다. 이에 대한 대안으로 전자 빔을 소스로 사용하는 SEM이 핵심 장치기술로 사용되고 있다. SEM은 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope)과는 달리 시료 전처리 과정이 복잡하지 않고, 광범위한 시료표면의 상태를 실시간으로 모니터링 할 수 있으므로 폭 넓은 수요 확산과 더불어 기술적인 진보도 크게 이루어져 왔다. 일반적으로 SEM은 열전자방사형 주사전자현미경과(Thermionic Electron Emission; 이하 Thermal SEM이라 칭함)과 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission; 이하 FE-SEM으로 칭함)으로 분류된다. 이들은 성능면에서 큰 차이를 보여 주듯이 기술구현 측면에서 FE-SEM은 높은 기술적 난이도를 요한다. 즉, FE-SEM은 Thermal SEM과는 달리 전자총에서 전자를 방출하기 위하여 초고 진공상태를 유지해야만 하고, 전자 총의 구조도 상이하기 때문에 이에 따른 전자 빔을 집속하는 초점거리(Focal length), 집속점(Cross-over Point)의 위치도 달라져야하므로 경통 구조도 새롭게 설계가 되어야 한다. 또한 다양한 영상처리를 위한 집속 미케니즘에 대한 제어기술과, 초고 해상도 구현을 위한 S/W 처리 기술 등이 진일보 되어야만 하는 제품이다.

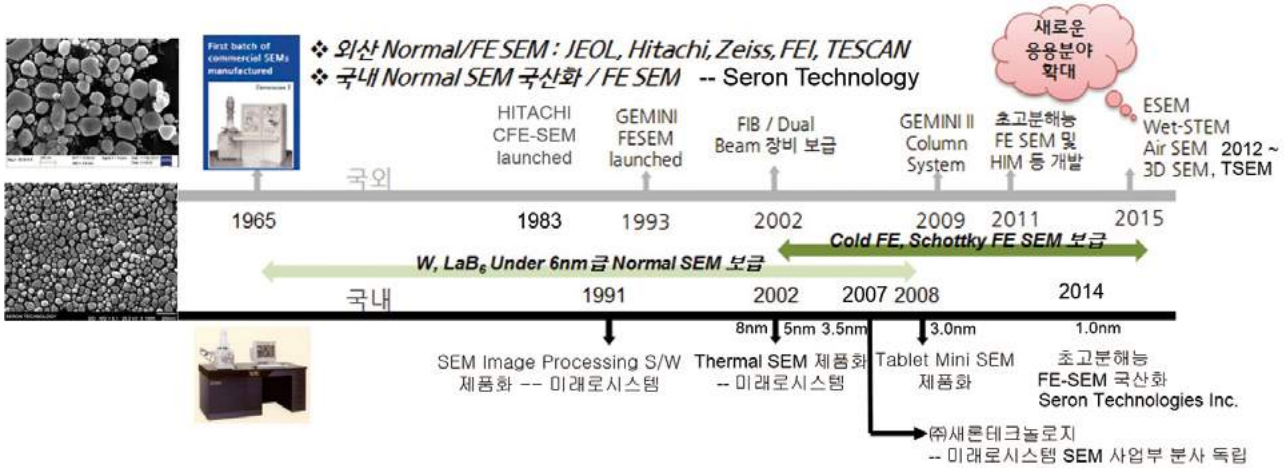
Thermal SEM의 경우, 국내에서는 해외에서 최초 상용화한 시점 대비 36년이 뒤처진 2001년 국산화가 이루어져 다양한 분야에서 사용되고 있다. 최근에는 국내산업의 특성상, 고부가가치의 FE-SEM 수요가 크게 증가하고 있지만 전량을 수입에 의존하고 추세이다. 더욱이 고가의 장비가격과 높은 유지/보수 비용으로 인하여 수요대비 투자부담이 높다는 현실적인 문제가 있다. 즉, 나노기술의 발전으로 인하여 대부분의 국내 산업분야에서 2000년대에는 주로 80,000배 내외의 영상관찰이 요구되었다면, 최근에는 10만배 이상의 고배율에서 영상관찰을 요구하는 수요가 크게 증가하고 있기 때문에 Thermal SEM의 Resolving Power를 넘어선 FE-SEM의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 따라서 Thermal SEM은 시장에서 경제적인 가격대 및 편의성 위주의 제품화로 변모해 가고 있는 추세이고, FE-SEM은 다양한 선행기술들이 축적되어 고부가가치화 되고 있다. 과거에는 자국 내에 갖추어진 인프라들을 중심으로 몇몇의 해외 선진 대기업들의 전유물로만 인식되어 왔기 때문에 반도체, 디스플레이, 나노소재 산업 등을 기반산업으로 세계 3위의 전자현미경 수요국인 국내의 실정으로 FE-SEM의 국산화는 하루속히 해결해야만 하는 당면 과제중의 하나였다.

전계방사형 주사전자현미경 기술의 발전

FE-SEM은 Hitachi(일본)에서 초기 반도체 산업의 성장기인 80년대 초반에 완성도를 갖춘 상온전계방사형 주사전자현미경(Cold FE-SEM)을 최초로 제품화하였다.

〈저자 약력〉

구정회 대표이사는 홍익대학원에서 석사학위를 받았으며, 1990년부터 현대전자(현 SK HYNIX) 메모리연구소와 ㈜미래로시스템에서의 SEM개발 및 사업본부장을 거쳐서, 현재 ㈜새론테크놀로지 대표이사로 재직 중이다. (jhkoo@serontech.co.kr)



[Fig. 1] 주사전자현미경 발전 단계

초기 상온형 FE-SEM은 실온에서 전계방식으로 전자빔을 방출하는 원리로서 당시에는 장시간 작동에 따른 FE-Tip 끝에 형성되는 오염원들이 문제가 되었는데, 이를 순간적으로 탈착시키는 플러싱 기술이 보완되어 제품화가 되었다. 이를 기반으로 CD-SEM제품을 출시하여 반도체 산업의 성장세와 더불어 막대한 기술적 진보를 이룩해 왔다. 반면에 초기 유럽 및 미국에서 주로 제품화 되었던 쇼트키 전계방사형 주사전자현미경(Schottky FE-SEM) 경통은 분해능 보다는 안정된 빔 전류를 기반으로 다양한 성분분석기의 소스(Source)로 주로 사용되어 오다가 실질적으로 90년대에 FE-SEM의 필요성이 대두되면서 영상을 위한 제품화가 출시되었다고 볼 수 있다. 따라서 당시에는 영상관찰 관점에서 상온형 FE-SEM보다는 분해능이 다소 떨어지는 단점이 있었다. 그러나 90년대 말 쇼트키 FE-SEM의 기술적 진보로 인하여 이러한 격차를 크게 줄였다. 즉, 반도체, 디스플레이분야의 생산공정에서 사용되는 대면적 Inspection 장비들은 별도의 코팅처리 없이 관찰해야 하고, 극저가속 전압에서 장시간을 관찰해야 하기 때문에 상온형 FE-SEM보다는 쇼트키 FE-SEM 위주로 기술적 진보가 크게 이루어진 것이 계기가 되었다. 2000년대에는 수차감소 기술이 주요 관심사로 이슈화되어 EXBs filter, In-Lens 및 Retarding 전압 적용기술 등이 탑재되어 저가속 전압에서의 분해능 향상과 대전효과 감소, 그에 따른 해상도 및 운영체계 자동화 등의 기술집약으로의 제품 최적화가 이루어졌다. 또한 바이오산업, 섬유, 세라믹, 분말, filter 및 다양한 나노소재 산업의 동반 성장으로 인하여 다양한 부도체 시료들을 대상으로 코팅처리 없이 고분해능으로 관찰 및 측정/분석을 하고자 하는 수요가 늘어나면서 저진공 SEM과 같은 응용기술들이 제품화되었다. 2010년대에는 메모리 반도체 소자의 design rule이 약 10 nm로 축소화되었고, 3차원 구조의 형상으로 변모하면서 이에 대한 측정/분석 기술이 요구되고 있고, 따라서 수차보정 기술과 3차원적인 영상구현의 필요성이 크게 대두되고 있다. 실질적으로 선진 경쟁국에서는 수차보정 기술 확보를 위하여 이미 막대한 연구비를 투자하여 선행기술을 확보하기 위한 전쟁이 가시화되고 있다. 일차적으로 일부 확보된 수차보정 기술들은 이미 투과전자현미경에 적용되어 분해능 개선의 효과들이 검증되고 있고, 또한 제품화가 이루어지고 있으나, 가중되는 가격부담과 유지/보수 차원에서 비실용적인 문제로 인하여 보급화에는 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 일부 고안된 요소기술들을 이미 주사전자현미경에 적용하고자 하는 시도들이 있지만, 정상적으로 제품화에 따른 보급화가 이루어지기까지는 다소 시간이 소요될 것으로 예상된다. 그러나 궁극적으로는 조만간 현실화될 것이므로 이에 대한 대책이 시급한 상황이다.

[Fig. 2] 세계 최초로 상용화된 S800(FE-SEM, 좌), S-6000(CD-SEM; 가운데) 및 Leica FE-SEM

국산 전계방사형 주사전자현미경의 제품화 현황

국내에서는 ㈜새론테크놀로지가 2014년 쇼트키 FE-SEM 국산화 개발에 성공하여 2015년 하반기 제품 출시를 앞두고 있다. 제반 인프라가 열악한 조건하에서 막대한 재원 확보 및 외산 브랜드와 비교해 제품 경쟁력을 갖춘 차별화 기능을 구현하는 과정에 현실적인 어려움들이 있었다. 즉, 분해능을 구현하기 위한 해상도 개선, 주사 처리속도, 새로운 제어기능들의 알고리듬 개발과 자동화, 영상처리 S/W 개선 및 UI 플랫폼 개선 등의 기존 Normal SEM 구현 기능에는 없는 다양한 제어 기술들의 업그레이드가 가시화되어 제품경쟁력 확보를 위한 개발들이 진행되고 있다. 한편으로는 Global 보급화를 위하여 Compact FE-SEM과 Tablet FE-SEM 제품화도 병행하여 진행하고 있으며 제품화 후에는 국내 기술 수준을 한 단계 끌어올리는 계기가 될 것으로 기대된다. 그러나 아쉬운 점은 이러한 노력에도 불구하고 현실적으로는 Thermal SEM 국산화가 이루어진 시점이 해외 선진 경쟁사에 비하여 36년이 뒤쳐진 상태에서 시작하였다면, FE-SEM도 국산화하는데 기존 해외 경쟁사의 제품출시 시점 대비 동일하게 약 36년이 뒤쳐진 상황에서 출시되므로 기술적 격차를 줄이지 못하였다는 점이다. 이는 후발업체가 지니는 기술적 가속화 현상을 보이지 못하였다는 점에서, 국내의 기술적 진보가 그만큼 정체되어 경쟁력을 확보하고 있지 못하고 있는 정황으로도 볼 수 있다. 더욱이 중국에서도 이미 국가 지원정책하에 FE-SEM 개발을 착수하였기 때문에 향후 시장전망에 대한 심각성도 가중되고 있다. 아직은 중국제품에 대한 인지도와 신뢰성 측면에서 다수의 문제점들이 드러나고 있지만, 실질적으로 일부 아시아 지역에서는 Thermal SEM의 경우, 국내 일부 제품과 동일 수준으로 평가되고 있는 실정이다. 이미 중국의 경우, 90년대에 주사전자현미경과 투과전자현미경을 제품화하였으나, 당시의 자체정보 폐쇄성의 한계로 인하여 기술적 진보를 이룩하지 못하고 경쟁력을 잃게 되면서 도태되어 왔다. 그러나 2000년대 이후부터 개방화 정책으로 선진 제조업체들의 중국 내에 생산기지 거점화 유치와 고압 및 제어부의 기술이전 도입 등이 추진되면서 낙후된 인프라와 기술수준을 점차적으로 향상시키고 있는 상황이다. 이는 가격경쟁으로 심화되고 있는 국산 제품의 시장판도에 많은 영향을 끼칠 것으로 판단되기 때문에 세계 최저 가격대의 제품으로 인식되어 있는 국산 제품의 자체 이미지 개선이 필요하며, 이를 위해서는 고부가가치의 제품 전환이 시급한 상황이다. 이러한 차원에서 FE-SEM 보급화는 고부가가치 장비에 대한 국내 기술력의 신뢰성 향상과 더불어 시장 확보 및 경쟁력 확보 차원에서 매우 중요한 이슈가 될 것으로 기대된다.

경통 설계의 지침

W. D. Riecke가 저술한 문헌에는 전자현미경의 디자인에 필요로 하는 가장 중요한 요인들을 언급해 놓았다. 이러한 내용들을 함축적으로 표현하기는 어렵지만, 경통을 설계하는데 있어서 개발자들이 필수적으로 고려해야 되는 사항들로 구성되어 있다. 즉, ① 렌즈에 적용되는 Field와 결과적으로 발생되는 렌즈들의 working mode에 대한 세부사양이 고려되어야 하고, ② 요구되는 Focal length와 기하학적인 렌즈 수차에 대한 허용할 수 있는 한계치에 대한 사양도 설정되어야 한다. 또한 ③ 인가되는 빔 전압조건에서 상기 1항에 따라 선택되는 working mode와 2항에서의 광학적 요구 조건이 구체화되는 형태 및 강도를 고려하여 자장을 발생시키는 Pole-piece system의 간극 폭 "S" 와 Bore직경 "D" 및 ampere-turns의 수를 선정한다. 이 때, 요구되는 렌즈 Quality는 렌즈의 구조물 내의 재질 특성 및 물리적인 기본원리에 기인한다. ④ Pole-piece에서 렌즈 코일을 밀폐시키고 코일내의 전류에 의해 발생되는 전자기적 potential을 특정한 곳으로 집중시키는 자기인가를 위한 회로도를 설정한다. 이러한 자기인가 회로(magnetic circuit)는 전자기적 포화 및 빔 축으로부터의 편향을 줄이기 위해 충분한 공간을 확보해야 하며, ⑤ 고정 조리개, 얼라인 조리개, stigmator및 편향코일 등으로 인하여 기대하는 실행능력에 영향을 주지 말아야 한다. ⑥ Vacuum system도 sealing 문제를 충분히 고려하여 설계가 진행되어야 한다. 전자 총(Electron Gun)부 및 경통(electron Optic)부는 초고진공 하에서 전자기장이 적용되는 영역이므로 경통 내부의 진공에 문제가 발생하지 않도록 공간 설정 및 공간 차폐 등이 고려되어야 한다. ⑦ 렌즈의 제작은 환경간섭으로 인하여 영상에 영향을 미치지 않도록 일련의 규칙들을 준수해야 한다. 즉, 렌즈의 경우, fluctuation 및 AC magnetic stray 등에 대하여 적당히 차단할 수 있는 설계 구조가 고려되어야 하고 Pole-piece 및 시료 스테이지도 경통으로부터 진동 등을 완화 시킬 수 있게 고

[Fig. 3] 국산화된 FE-SEM 외형과 Conical Lens

안되어야 한다. 상기에 언급한 전자현미경부의 경통 설계 지침은 이미 국내 몇몇 기업에서 고유의 모델들을 제품화하고 있기 때문에 매우 기초적인 기반기술로 무시될 수 있으나, 시장에서 요구하는 기술융합 및 특정 목적의 제품화에 대한 수요에 대비하기 위해서는 자체적으로 반드시 숙지되어야만 하는 요소기술이다. 즉, 신기술을 통한 제품경쟁력 확보도 필요하지만, 기존의 판매하고 있는 제품의 특성치들을 숙지하게 되면, 그 제품을 통하여 다양한 용도의 응용기술 및 파급기술들을 구현할 수 있는 전문적인 시야가 형성되기 때문이다.

국산화된 전계방사형 주사전자현미경의 특징

범용 Thermal SEM 국산화 이후 지난 15년간 꾸준한 준비와 실패를 거듭한 끝에 FE-SEM 국산화라는 가시적인 성과를 달성할 수 있었다. 초기에는 기존 해외 경쟁사의 제품분석을 통하여 확보된 기술들을 적용하여 구현하고자 하였으나, 대부분 해당 경통의 특징에 따라서 집적화된 기술이므로 철저한 기술적 숙지 없이는 제품구현에 한계가 있다는 점을 깨달았다. 또한 자체적으로 보유하고 있는 Normal SEM 제품을 기반으로 한 FE-SEM 개발은 궁극적으로는 제품화에 이르기가 어렵다고 판단하여 신규 경통 설계가 진행되었다. 다양한 실험과 전문가들의 도움으로 오랜 기간 점진적인 보완 설계를 거쳐서 자체 고유의 FE-SEM 경통을 확보할 수 있었다. 이번에 국산화된 FE-SEM은 다양한 분석기기 장착과 국내 산업 분야의 수요를 고려하여, 대면적 시료 관찰을 위한 65° Conical Lens와 초고해상도 및 초고속 주사 제어기술을 적용하여 다양한 분야에서 적용될 수 있도록 설계 고안하였다. 이러한 기술개발은 선진 기술의 발전 추세에 대응하여 진행되었다. 또한 자체 고안된 Auto-Stepping기능과 표면 및 투과영상을 동시에 구현할 수 있는 기능 등의 특허기술들을 장착하여 제품 차별화에 따른 경쟁력을 확보하고자 하였다. 앞으로도 국내 실정에 맞는 고객사양의 장비제작에 초점을 두어 고부가가치 FE-SEM장치를 제품화하고자 한다.

맺음말

"기술은 알고 나면, 쉽다". 그러나 처음 개척하는 입장에서 많은 시행착오를 거쳐서 난제들을 극복해 나아가는 과정은 매우 힘이 든다. 2000년 Thermal SEM개발을 착수하던 시점을 돌이켜 보면, 그 당시에는 국내에서 할 수 있는 것이 별로 없었으나 지금의 국내 인프라는 어느 정도 도약할 수 있는 환경이 조성되었다고 판단된다. 기술은 럭비공과 같아서 어느 방향으로 튀어 오를지 모르기 때문에 기술을 확신하는 것은 어리석다고 생각한다. 그러나 그동안 반복해서 던져온 1세대의 경험을 바탕으로 이를 수용하고 방향을 예측하며 튀어 오르는 공을 잡겠다는 의지를 가진 인재들이야말로 지금의 역량을 넘어서 글로벌 제품경쟁력을 일구어 낼 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 이를 발판으로 다양한 시장의 수요에 부합하는 응용제품을 구현해 내는 것이 과제이다. 마지막으로 국내 전자현미경 기술이 nm에서 Å 분해능 시대로 진입하는데, 미약하나마 기여할 수 있으면 하는 바람이다. 그동안 해외 선진 경쟁사들과의 심화된 기술격차를 좁히기 위하여 정진해 왔다면, 이제는 자체적으로 선행 요소기술들을 고안해 내야 하는 시기가 필연적으로 도래하였다고 판단된다. 이제 그 몫은 다음 세대 여러분이 풀어야 할 숙제이다.