

초고전압 투과 전자현미경 4월 가동

물질의 3차원 구조, 원자까지 본다

글_ 정진익 본지편집위원 · 자료제공_ 김윤중 KBSI 연구원

세 계 처음으로 1000 전자볼트(kV) 이상가속전압을 이용, 무기·생체 물질의 3차원 구조를 원자 수준(0.12nm)까지 꿰뚫어 볼 수 있는 ‘초고전압투과 전자현미경(UHV-TEM)’이 4월부터 한국기초과학지원연구원(KBSI) 대덕본원에서 본격 가동된다.

이 현미경은 지난 1998년 말 정부의 UHV-TEM 설치 기본 계획이 수립된 이후 140억 원의 사업비를 투입, 지난해 2월부터 설치에 착수하여 현재 성능시험을 마쳤다. 이 현미경은 지금까지 선진국에 설치된 동급의 현미경보다 월등한 기능을 가진 것으로, 0.12nm 크기의 원자 수준까지 분석할 수 있으며, ±60°의 높은 경사각까지 투시할 수 있어서 물질의 3차원 구조를 꿰뚫어 볼 수 있다. 이같은 기술력은 세계 처음으로 갖게 되는 것이어서 무기물 및 생체물질을 연구하는 해외 과학기술자의 관심을 고조시키고 있다.

또, 최신 에너지 여과장치(HV-GIF)와 다양한 변온시료 지지대(액체 헬륨온도 1,500℃)를 사용할 수 있고, 장비를 원격 운용할 수도 있으며, 원자로나 핵 융합로의 재료 등 극한물질 개발에 필요한 이온빔 가속장치를 부착하여 사용하는 등 세계적인 특징을 갖고 있다. 그리고 최고 1,300kW의 에너지를 낼 수 있어서 1.3마이크로미터를 투과할 수 있다. 이 기능은



건물 1층에 있는 본체



건물 2층에 있는 가속탱크

일반적인 200kV 투과현미경의 성능을 6배 이상 능가하는 것이다.

원자분해능과 고경사각 동시 실행

이 초고전압 투과 전자현미경은 기초과학과 응용과학분야는 물론, 차세대 반도체와 나노구조의 신소재 개발에 유용하다. 실리콘 반도체 원자간 간격이 0.136나노미터로 반도체를 이루는 원자구조를 직접 관찰하기 위해서는 이런 현미경과 같은 뛰어난 해상도가 필수적이었다. 또, 3차원 구조분석을 통한 기능연구가 가능해져 뇌세포 연구, 단백질 구조분석 등 생명과학의 핵심분야 연구에 활용이 기대된다.

이와 함께 소재의 역동적인 구조와 물성 변화 연구에 이용할 수 있어 신소재·

신공정 개발과 항공우주 소재, 핵융합로 물질 등 극한 상황에서도 견딜 수 있는 신물질 개발에도 활용될 것으로 예상된다. 이 현미경은 포항가속기나 하나로 시설과 같이 국가적인 공동연구시설의 개념으로 운영될 예정이다. 즉, 장비이용 신청서의 접수-적격심사-이용시간 배정의 절차를 밟아야 하며 적격심사는 장비운영회에서 수행하게 된다.

한국기초과학지원연구원 대덕본원이 지난해 10월까지 성공적으로 이뤄낸 초고전압투과 전자현미경의 시험결과는 최근 일본, 독일 및 미국에 설치된 동급장비와 비교하여 아래와 같은 월등한 특성을 가지고 있다.

첫째는 원자분해능(0.12nm)과 고경사각

($\pm 60^\circ$)의 동시 실행이 가능하다는 것이다.

실리콘 웨이퍼를 이용한 장비의 성능시험에서 3차원적인 원자분해능력의 기능을 확인하였다(그림 1). 즉, 실리콘 [110] 시료를 이용하여 먼저 아령구조(0.136nm)를 관찰한 다음, 이축경사 시료지지대를



지하층에 있는 제진대

이용하여 [100]과 [111] 방향으로 경사하여 원자분해능 이미지를 획득하였다. 세 방향 모두 실리콘 원자의 기둥을 잘 보여주고 있다(그림 2). 에너지 여과장치를 이용한 실리콘 [100] 시료의 원자분해능 이미지를 보여주는데, 여과되지 않은 이미지와 비교해 무손실 피크를 이용한 이미지는 분해능의 향상을 뚜렷이 보여준다. 원자분해능은 실리콘의 플라즈몬 손실 피크를 이용한 이미지에서도 가능하였는데 이런 경우 정량적인 작업을 수행한다면 서로 다른 원자의 종류까지도 직접 구별할 수 있는 새로운 길을 열 수 있다.

본장비의 가장 중요한 활용 분야로는 신물질의 3차원 구조를 원자분해능, 고투과력 및 에너지 여과기능을 이용하여 정

량적으로 분석하는 것으로 전망된다. 이러한 분석 기능은 국제적인 경쟁이 치열한 차세대 반도체의 개발과 뇌세포의 선진 연구에 기여하리라 기대된다.

이같은 기능은 세계적으로도 처음 갖는 기능으로서 무기 및 유기 신물질의 3차원적 구조를 원자 수준으로 분석할 수 있게

된다. 분해능력만을 보면 현재 일본의 도호쿠대와 도쿄대, 그리고 독일 슈투트가르트에 있는 막스플랑크 연구소에 설치된 동급 장비의 0.10nm

에 미치지 못하나 이들 장비는 $\pm 40^\circ$ 이상의 경사가 불가능하기 때문에 3차원적 구조분석이 크게 제한된다. 이러한 새로운 기능은 21세기 국가 전략사업이 될 나노미터 단위의 다층 복합구조 반도체의 평가 및 개발은 물론, 최근 프린티어 사업

등을 통해 국내에서도 본격화하고 있는 뇌세포 및 뇌질환과 관련된 연구개발에도 획기적으로 기여하리라 기대한다.

둘째는 최첨단 에너지 여과장치를 부착했다는 것이다.

에너지 여과장치는 명암대비가 약한 시료, 특히 생물시료의 관찰에 효과적이다. 또한, 시료의 화학성분, 화학분포 및 전자구조를 정밀 분석할 수 있어 차세대 소재로 주목되고 있는 경원소 신소재의 분석에 유용하다.

본체에 부착된 에너지 여과장치는 가장 최근에 개발된 기종으로서 독일의 MPI와 일본의 국립재료연구소(NRIM)에 부착된 기종에 비해서 모든 기능이 향상되었으며 특히 플라즈몬 손실 영역에서도($\Delta V \sim 20\text{eV}$) 원자분해능 관찰이 가능함을

초고전압투과 전자현미경

확인하였다. 이런 경우 정량적인 작업을 수행한다면 신물질의 분석

에서 원자의 위치뿐만 아니라 서로 다른 원자의 종류까지도 직접 구별할 수 있는 새로운 길을 열 수 있기 때문에 장비의 시험가동 기간에 이 분야를 집중적으로 점검할 예정이다.



세계 세 번째로 원격 운영방식 시도

셋째, 역동적 연구에 필요한 다양한 시료지지대를 구비했다는 것이다.

넓은 범위의 변온 실험과 변형 실험을 역동적으로 할 수 있는 시료지지대를 갖추고 있다. 저온 시료지지대는 단백질 구조분석, 초전도물질 연구 등에 필수적이

며 고온 및 변형 시료지지대는 고온 소재 연구 및 역동적인 상변이 연구 등 신물질 및 신공정 개발에 활발히 이용할 수 있다. 특기할 사항은 고온 시료지지대의 성능시험 중 1,100℃에서도 원자분해능 이미지를 얻었는데 이는 동급 장비에서 얻은 원자분해능 이미지 중 가장 고온에서 얻은 것이다. 고온 가열실험시에 시편의 유동을 막기 위해 새롭게 개발, 제작된 물의 재순환 시스템을 사용하였다.

넷째는 원격제어로 기기를 운용한다는 것이다.

세계에서 세 번째로 시도되는 원격운용

방식이다. 일본 히타치사에서 오사카 대학과 히타치 중앙연구소에 각각 설치한 동급 장비는 워크스테이션급으로 운용되며 원격운용만이 가능함에 비해 본 장비는 사용이 일반화된 PC급으로 운용되며 직접운용도 가능하다. 특히, 세계적으로도 선진화된 국내의 IT 기술과 접목하면 사용자에게 접근이 용이하고 친근한 운용 환경을 제공하여 초고전압 투과 전자현미경의 활용도를 극대화할 수 있고 급속히 발달하는 컴퓨터 산업에 발맞추어 필요시 기기의 성능을 손쉽게 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

다섯째, 이온빔 가속기의 장착이 가능하다는 것이다.

장래에 꼭 필요하다고 생각되는 이온빔 가속기의 부착을 위하여 장비의 본체에 접속부위를 제작하였으며 전자현미경동에 이온빔 가속기를 설치할 수 있는 공간 및 부대시설을 확보하였다. 이온빔 가속기의 부착은 일본의 국립재료연구소와 홋카이도 대학, 그리고 미국의 국립아르곤연구소(ANL)의 장비를 대표적으로 들 수 있는데 전통적인 원자분해능과 핵융합로의 재료연구에 활용하는 외에도 최근 신소재 개발에도 활용이 증가하고 있다. 국내의 원자력연구소는 이온빔 가속기를 자체 제작할 수 있는 기술력을 가지고 있기 때문에 우리 나라의 현실에 필요한 사양의 이온빔 가속기를 적절한 시기에 국내에서 제작하고 본체에 부착하면 장비의 활용성을 더욱 넓힐 수 있다.

초고전압 투과 전자현미경은 지난해 10월 한국기초과학지원연구원에 장비를 재조립하고 성능시험을 완료하였다. 그 모습은 가속탱크 부분은 2층에 있고, 본체(column) 부분은 1층에, 지하층에는 제진대가 위치하기 때문에 장비의 전체 모습을 한꺼번에 볼 수는 없다. 이렇게 가속장치-본체-제진대는 각 층에 따로 위치하지만 실제로는 하나로 연결되어 일체를 이룬다.

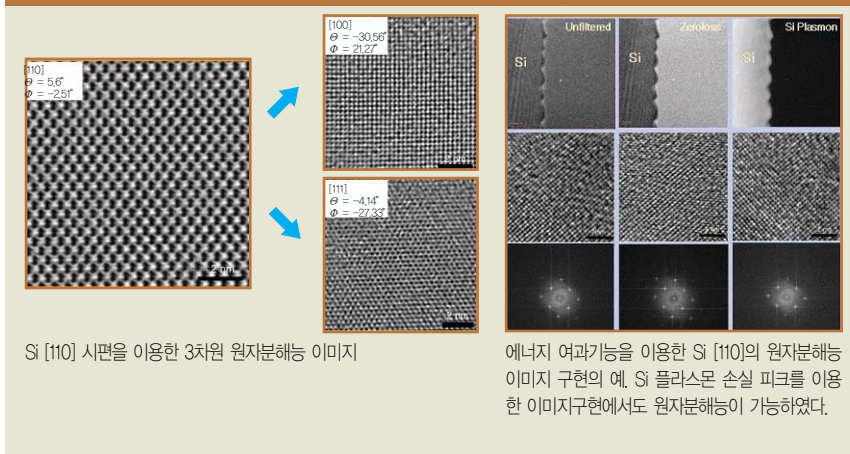
초고전압투과 전자현미경의 활용

장비의 기본 성능인 원자분해능, 고투과력, 고에너지 기능은 기초과학 및 응용과학의 여러 분야에서 다양한 활용이 가능하다. 원자분해능 분석기능을 이용한 탄소나노튜브 등 차세대반도체 개발, 나노구조 신소재 개발과 3차원적 구조분석

〈그림 1〉 장비 성능시험 결과(KBSI 현지시험, 2003.9)



〈그림 2〉 장비 성능시험 결과(일본 공장시험, 2002.11)



〈표 1〉 초고전압투과 전자현미경의 주요 사양

항 목 (Item)	사 양 (Specification)
Resolution (at 1,250kV)	Point Resolution: 0,12nm Lattice Resolution: 0,10nm Energy Resolution (HV-GIF): 1,3eV
Accelerator	Accelerating Voltage: 1250/1000/800/600/400kV (max. 1300kV) Minimum Variable Step: 500V DC Stability: 7.8×10^{-7} (at 1,250kV) HT Ripple: 4.8×10^{-7} (at 1,250kV) Maximum Beam Current: 10 μ A (at 1,250kV)
Objective Lens	Exciting Current Stability: DC: 3.0×10^{-7} (at 1,250kV) AC: 6.4×10^{-7} (at 1,250kV) Cs: 2,65mm Cc: 4,1mm Minimum Focus Step: 4,0nm
Specimen Chamber	Tilting Angle(Goniometer): $\pm 60^\circ$ Specimen Movement: ± 1 mm (X, Y); $\pm 0,5$ mm (Z)
Magnification	LOW MAG Mode: 200~1,500x (9 step) MAG Mode: 2,000~2,000,000x (30 step) SA MAG Mode: 20,000~150,000x (10 step) MM MAG Mode: 200,000~500,000x (5 step) GIF MAG Mode: 400~400,000x (30 step)
Electron Diffraction	SA DIFF Mode: 1,2~10,0 nm · mm (10 step) MM DIFF Mode: 0,6~1,0 nm · mm (3 step) GIF DIFF Mode: 0,3 · 2,5 nm · mm (10 step)
Ultimate Pressure	Bottom of Acceleration Tube: 8×10^{-6} Pa or less Specimen Chamber: 5×10^{-6} Pa or less



기능을 이용한 뇌세포 연구, 단백질 구조 분석 등 생명과학의 핵심분야 연구에 활용한다. 고투과력의 전자빔과 다양한 시료지지대를 이용한 소재의 역동적인 구조 및 물성 변화의 연구를 통해 신소재 및 신공정의 개발에 활용한다. 고에너지의 전자빔과 부착 예정인 이온빔을 이용하여 항공우주소재, 핵융합로 물질 등 극한 상황에서 견딜 수 있는 신물질의 개발에 활용한다.

초고전압투과 전자현미경의 핵심 응용 분야는 다음과 같이 정리할 수 있다.

차세대 반도체소자 개발 분야

차세대 극미세, 다층 복합구조 기본소자의 정밀한 분석과 평가 능력을 확보함

으로써 21세기 국가 경쟁력을 확보하는 지름길을 열 수 있다. 앞으로 반도체 기본소자의 극미세화(submicrometer 단위에서 nanometer 단위로) 및 집적 방식의 복합화(2차원적인 단순 다층구조에서 3차원적인 다층 복합구조로)가 반도체 기술 개발의 핵심이 될 것이다. 따라서 새롭게 개발된 반도체 소자의 정밀한 분석 및 평가는 21세기 국가 경쟁력 향상의 핵심요소가 될 것이다.

또한, 3차원적 다층 복합구조는 초고전압투과 전자현미경의 고투과력과 원자분해능의 활용이 최적의 분석 방법이 된다. 즉, 투과력이 약한 일반 투과 전자현미경을 이용하여 이러한 신소재를 분석하려면 시료를 0,3 μ m 이하의 두께로 절단하는 방

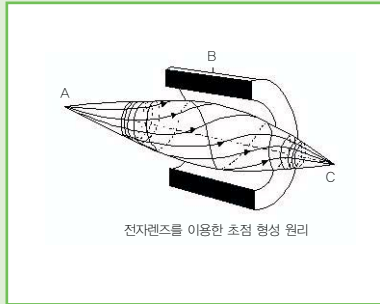
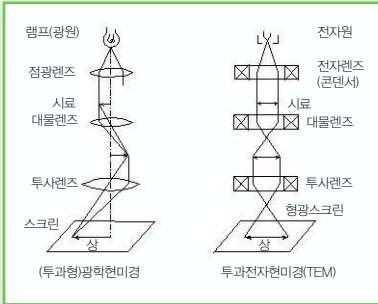
법이 유일하다. 그럴 경우 정보를 얻을 수 있는 깊이의 제한과 함께, 가공시 시료의 손상으로 정확한 정보를 얻기가 힘들어서 이러한 정보의 손실은 반도체 소자 개발에 큰 걸림돌이 될 수 있다.

따라서, 초고전압투과 전자현미경의 우수한 투과력을 이용하면 두꺼운 시료(1 μ m 이상)를 절단없이 관찰할 수 있기 때문에 상기한 문제점을 해결할 수 있다. 또한 우수한 분해능(0,12nm 이하)을 활용하면 차세대 반도체 소자의 기본단위가 될 nm 단위 소자의 분석은 물론, 궁극적으로 개발하고자 하는 원자 단위 소자의 분석도 쉽게 수행할 수 있게 된다.

신물질 개발 분야

나노구조 신소재, 경원소 신소재, 고온

투과 전자현미경(TEM)이란?



투과전자 현미경 구조도
투과전자현미경은 (투과형)광학현미경과 기본 구조가 같으며 시료의 내부 구조를 1천배 이상의 고배율로 관찰하는 것을 주기능으로 함

전자렌즈를 이용한 초점 형성 원리
파장이 긴 빛 대신 파장이 짧은 전자빔을 이용하여 분해능을 높이며 전자의 자기적 성질을 이용하여 광학렌즈처럼 초점을 맞출 수 있는 전자렌즈를 이용함

〈표 2〉 일반투과 전자현미경과 초고전압투과 전자현미경의 비교

	일반 투과전자현미경	초고전압 투과전자현미경	참고사항
가속전압	200kV	1,300kV	원자분해능 요건: - 가속전압 1천kV 이상 - 전압오차: 100만분의 1 이하
분해능	0.2nm	0.12nm	- 분해능: 0.15nm 이하 *원자간 간격(0.1~0.2nm)보다 작은 분해능 필수
투과력	0.2 μ m	1.3 μ m	소재의 물성 측정을 위해서는 1 μ m 이상의 시료 두께 필요
에너지	200keV	1,300keV	방사능 파괴효과의 실험을 위해서는 1천kV 이상의 에너지 필요

초전도체, 고온용 고강도 소재 등 차세대 신소재의 연구 및 개발에 활용된다. 초고전압 투과 전자현미경의 원자분해능과 본체에 부착된 에너지 여과장치를 이용하면 새롭게 개발된 소재의 초미세구조 및 화학은 물론 전자 구조까지 정밀한 분석이 가능하다. 부수 장비로 확보된 변온 시료 지지대(1,500 $^{\circ}$ C에서 액체 헬륨 온도)와 인장 시료지지대를 이용하면 물질의 구조 및 화학의 변화를 역동적으로 연구할 수 있기 때문에 신물질 및 신공정 개발에 효과적으로 활용할 수 있다.

항공우주소재, 핵융합로 재료 등 극한 물질의 개발과 집속이온 빔을 이용한 재

료 가공 및 원자층 접합 등 새로운 개념의 물질 연구와 개발에 활용할 수 있다. 즉, 초고전압의 전자빔과 함께 추가로 부착 예정인 이온빔을 이용하면 방사능 조사, 초고진공, 초고온 등 극한 상황에서 견딜 수 있는 신물질을 원자 수준에서 연구, 개발할 수 있다. 특히, 한국기초과학지원연구원의 핵융합 연구와 연계하여 초고전압 투과 전자현미경을 이용한 핵융합로 재료의 연구, 개발을 수행하면 해당 분야의 국제적인 경쟁력 확보가 가능해진다.

뇌과학 연구 분야

21세기 생명과학 연구의 초점이 될 뇌

과학 연구에 활용할 수 있다. 초고전압투과 전자현미경의 고투과력을 이용하여 복잡한 구조를 가진 뇌신경세포를 여러 편으로 절단하지 않고 전체적으로 관찰함으로써 정밀하고 신뢰도 높은 3차원적인 구조 정보를 획득할 수 있다.

세계적으로도 뇌신경세포의 연구에 초고전압투과 전자현미경을 본격적으로 이용하고 있는 곳은 일본 오카자키의 생리학연구소가 유일하는데 이 현미경에 비해 분해능과 부대 장비가 크게 향상된 초고전압투과 전자현미경은 앞으로 우리나라가 지향하는 뇌과학 연구의 활성화와 선진화를 이룩하는데 중요한 역할을 기대할 수 있다.

단백질 구조분석 분야

현대 생명과학 연구의 화두인 단백질 구조분석에 활용할 수 있다. 단백질구조의 분석이 학문적인 면에서나 기술개발면에서나 생명과학 분야의 가장 중요한 분야로 대두되고 있다. 단백질구조의 3차원적 구조분석의 최근 연구 결과는 노벨상 수상 후보로 자주 거론되고 있고 그 분야를 전공하는 한국인 신진연구자들도 증가하는 추세에 있다. 현재 단백질 구조분석은 세계적으로 대부분 300kV급의 투과전자현미경을 이용하여 이루어지고 있으며 분해능을 높이기 위하여 최저온 상태에서 작업할 수 있도록 장비를 전용화하는 추세다.

분해능과 투과력이 우수한 초고전압투과 전자현미경을 이용한 이 분야의 연구는 아직까지는 세계적으로도 본격적인 시도가 이루어지지 않았기 때문에 체계적인 노력을 한다면 앞으로 국제적인 경쟁력을 확보할 수 있다. ㉓