

차세대 고분해능 현미경 기술 현황

이 글에서는 다양한 측정 대상에 따른 분석/특성평가 장비의 종류 및 핵심 기술, 그리고 연구 동향에 대해서 간단히 소개한다.

송 인 천 / 한국과학기술원 기계공학과, 박사과정
권 대 갑 / 한국과학기술원 기계공학과, 교수

e-mail : icssong@kaist.ac.kr
e-mail : dggweon@kaist.ac.kr

최근 나노기술의 발전 및 신기술 개발로 여러 가지 새로운 분석 대상물이 나타나게 되었고, 이러한 대상물은 기존의 분석장비로는 분석이 불가능한 영역까지 분포해 있다. 따라서 이에 관련된 분석장비 기술에 대한 관심이 커지고 있다. 예를 들어, 기존의 반도체나 정밀기계뿐만 아니라 DNA나 단백질 같은 생화학 분야의 다양한 유기/무기를 또한 분석 대상에 포함되고, 대상물의 분석한계 또한 매우 높아지고 있다. 특히 나노기술 분야에서는 대상물의 분석가능 여부에 따라 연구의 성패가 좌우될 정도로 분석장비에 대한 의존도가 매우 높는데, 이에 따라서 분석장비의 성능을 획기적으로 향상시켜 관련기술을 보유하려는 연구가 세계적으로 활발히 진행 중이다. 전세계적으로 분석장비 시장은 연간 약 500억 달러(2002년)에 달하며, 국내시장의 분석기기 수요는 연간 약 10억 달러 규모로 매년 20%의 성장률을 유지하고 있다.

대표적인 분석장비로는 전자빔현미경, 원자현미경, 공초점현미경, X선현미경, 그리고 타원편광분석기가 있으며, 각 분석장비의 특성에 따라 분석대상물과 분석 항목 그리고 분석 속도 및 분해능이 달라지게 된다. 이 글에서는 위에서 언급한 여러 가지 분석장비의 특징, 응용 및 최근의 연구 방향에 대해 알아보도록 한다. 표 1은 각 분석장비에 따른 기술적 특성을 비교한 것이다.

공초점현미경

공초점주사현미경은 광학적인 측정 방법으로서 1957년 Minsky Patent에 의해서 제안되었다. 공초점현미경의 가장 큰 특징은 광검출기 앞에 핀홀을 위치시켜서 시편의 초점 평면상의 데이터만을 검출기에서 받아들이고 그 외의 평면에서 들어오는 잡

34

표 1 분석/특성평가 기술의 특성 비교

	전자선 현미경(SEM)	Ellipsometer	X-선 현미경	CSM/Raman	AFM	IR-Raman
물리적 특성; 영률, 전하량, 유전율, 광학특성, 구조, 선폭	◎	◎	△	△	◎	×
생화학적 특성; 단백질성분, 세포성분, 약물성분, 분자구조	△	×	○	◎	×	○
장 점	고분해능 (sub-nano)	고분해박막측정 (sub-nano)	투시검사	시편 내부 측정 BT분야 활용 생화학분석 탁월	최고 분해능 구조적, 물리적 특성분석 탁월	화학분석 탁월
단 점	고진공 필요 시편가공 어려움 시편 방사 손상	시스템이 복잡 고가	고진공 필요 시편 방사 손상	분해능 한계 (10nm 수준)	측정 속도 최저	낮은 분해능 (μm 수준)

◎ 우수 ○ 양호 △ 보통 × 불가

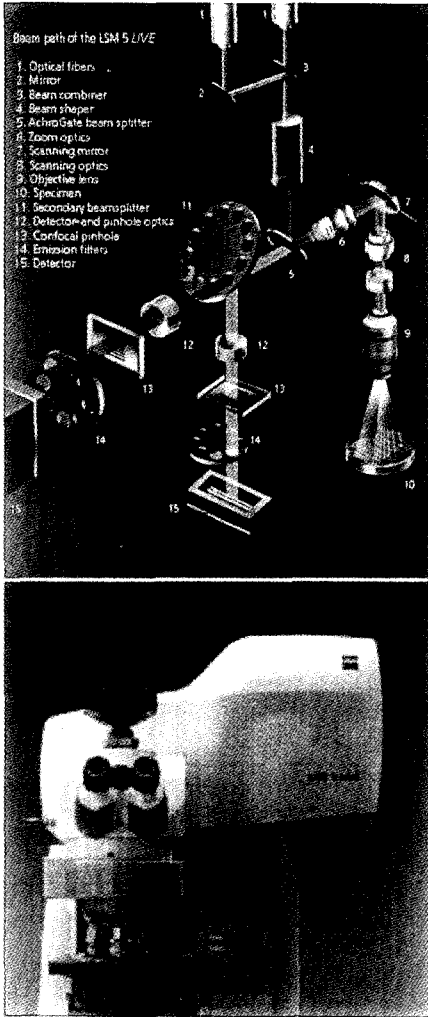


그림 1 Carl Zeiss 사의 공초점현미경 [LSM5 LIVE]

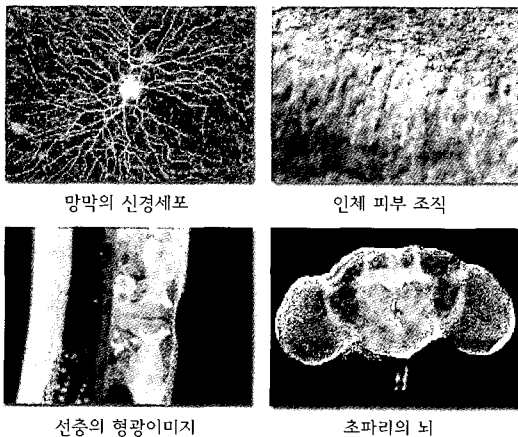


그림 2 공초점현미경으로 측정된 이미지

광은 제거할 수 있다는 것이다. 이로써 시편에 손상을 입히지 않고도 내부 단면을 관찰할 수 있으므로 DNA나 단백질과 같은 다양한 생물 시편의 관찰에 광범위하게 사용된다.

공초점현미경은 작동모드에 따라 형광현미경과 반사현미경으로 구분될 수 있다. 형광현미경은 생체에서 채취된 시료에 형광물질을 염색시키고 특정영역에서 발생하는 형광빛을 검출하여 시료의 영상을 얻을 수 있으며 일반적으로 가장 많이 사용된다. 반사현미경은 사람의 피부와 같이 형광물질을 사용할 수 없는 곳에 사용되며, 생체물질에 따라 빛의 난반사율이 다른 원리를 사용하여 영상을 얻어낼 수 있다.

공초점현미경은 측정도구로서 빛을 사용하기 때문에 회절한계로 인한 분해능의 한계를 갖는다. 따라서 최근에는 이러한 분해능을 향상시키기 위한 여러 가지 연구가 진행 중이다. 대표적인 예로서 시편에 입사되는 레이저의 초점형상을 제어하는 STED기법이 있으며, 형광시편을 측정하여 28nm의 횡방향 분해능을 얻은 연구결과가 있다. STED기법에서는 레이저를 이용하여 형광물질의 전자를 여기시키고, 도넛형태의 STED 레이저 빔을 다시 조사한다. 도넛모양의 STED 레이저를 받은 전자들은 먼저 유도 방출되고, 중심부분의 매우 좁은 영역의 전자들만 여기상태로 남아 있으면서(~수nm초 동안) 형광빛을 발하게 되므로 고분해능 측정이 가능한 것이다.

위와 같은 STED기법은 펨토초 레이저의 발달로 인해 구현될 수 있었는데, STED기법 이외에 펨토초 레이저와 이광자 흡수현상을 이용한 이광자현미경에 대한 연구도 진행되고 있다. 공초점현미경의 성능을 향상시키기 위해서 디콘볼루션과 같은 영상처리 방법을 이용하기도 하고, 4Pi 공초점현미경이나 자가간섭 공초점현미경과 같은 기법도 많은 연구가 진행되어 있다. 또한 시편의 이미지뿐만 아니라 화학적 성분분석 위하여 라만분광분석을 병행하기도 한다.

이와 같은 공초점현미경은 의료용 진단기기로 가장 널리 사용되고 세계적으로 약 130억 달러의 시장을 형성하며 매년 약 10%의 성장률을 보이고 있다.

전자빔현미경

전자현미경은 광학현미경에서 사용되는 광원인 가시광선 보다 매우 짧은 파장을 사용하여 분해능을 향상시킨 현미경이다. 광학현미경은 자외선에서 가시광선 영역인 200~700nm의 파장을 가지는 빛을 사용하지만, 전자현미경은 파장이 1nm 이하인 전자를 사용하게 된다. 여기서 전자에 가하는 에너지를 증가시키면 파장이 짧아지는 경향을 가지므로, 높은 에너지를 가진 전자는 고분해능을 가질 수 있으며 세계적으로 최고성능을 갖는 전자현미경은 0.5nm 수준이다. 전자현미경에서는 전자를 제어하기 위해 전자렌즈를 사용해서 전자를 제어, 집광하게 되는데, 이 전자렌즈는 여러 겹의 전극판에 전압을 가하여 전기장현상과 자성을 발생시켜 나타나는 자기장 현상을 이용한 것이다. 광학현미경과 달리 전자는 진공 속에서만 소멸되지 않고 운동할 수 있기 때문에 전자현미경은 진공상태의 시편만 측정이 가능하며, 살아있는 세포의 관찰이 불가능하다는 단점이 있다.

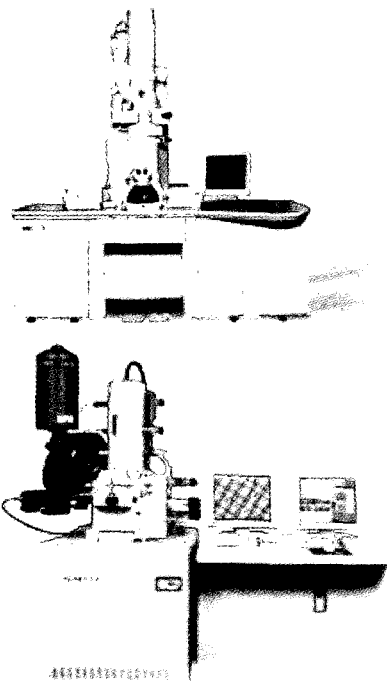


그림 3 JEOL 사의 TEM(위) 및 SEM(아래) 장비

전자현미경은 투과전자현미경(TEM)과 주사전자현미경(SEM)으로 구분된다. 투과전자현미경은 1931년에 독일의 언스트 루스카에 의해 발명되었으며, 루스카는 1986년에 노벨 물리학상을 수상하게 된다. TEM은 높은 에너지의 전자빔이 전자렌즈들을 거쳐 시편에 집광되면 시편을 투과하여 확대된 영상이 형광판이나 사진필름에 나타나게 된다. 전자가 시편을 투과해야 하므로 얇은 시편만 측정이 가능하다.

주사전자현미경은 1930년대 중반부터 개발이 시작되어 1960년 초에 영국 캠브리지 대학에서 연구 개발된 SEM이 처음으로 상업화가 되었다. 주사전자현미경은 시편에 전자를 주사시킨 후 시편에 주사된 전자선이 표본의 한 점에 집중되면 일차전자는 굴절되고 표면에서 이차전자가 발생된다. 이러한 이차전자를 검출기로 수집해서 시편의 정보를 얻을 수 있다. SEM은 TEM과 달리 박막형태의 시편 제작이 필요 없고, 3차원 영상을 얻을 수도 있다.

나노 및 바이오 기술이 점점 발전함에 따라 Hitachi, FEI, LEO, JEOL 등의 전자현미경 업체에서 nm 이하의 분해능을 갖는 고분해능 SEM을 차세대 주력상품으로 활발히 개발하고 있다. 고분해능 전자현미경을 위한 연구는 탄소나노튜브 등을 이용한 고휘도 전자빔원의 개발과 전자광학렌즈의 성능향상에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 현재 전 세계에서 가장 높은 분해능을 가지는 전자현미경은

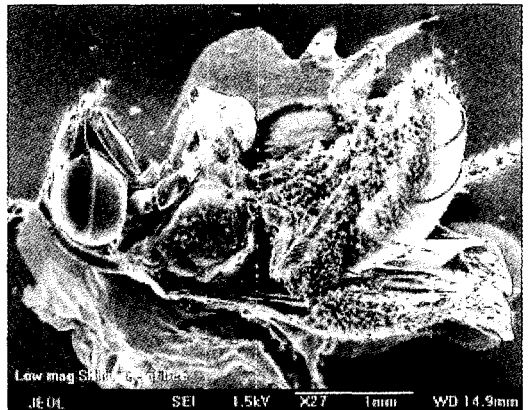


그림 4 SEM으로 찍은 벌의 모양

법 등이 연구 중이다. 이 외에도 탄소나노튜브 탐침을 이용한 고분해능 원자현미경에 관한 연구나 넓은 영역을 측정할 수 있는 광대역 원자현미경에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 또한 평면방향 분해능을 높이기 위해서 X선 간섭계와 원자현미경을 융합한 시스템에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.

대표적인 연구기관으로는 독일의 PTB, 미국의 NIST, 일본의 AIST, 영국의 NPL, 한국의 표준과학연구원 등 각 나라의 표준연구기관에서 많은 연구가 진행 중이고, Veeco, PSIA, NT-MDT 등의 회사에서 상용품을 판매 중이다.

X선현미경

윈트겐에 의해 1985년 최초로 X-선이 발견된 이후 X-선은 의료용 방사선 진단 및 치료, 신약제조, 물질연구를 포함한 신소재 제조 및 비파괴 검사 등 산업체의 응용에서 매우 다양하고 중요한 역할을 해오고 있다. 1952년에 독일의 Wolter는 2.3~4.4nm 파장영역(물의 창)에서 물과 단백질 간의 흡수계수 차이가 매우 크다는 사실을 밝히고, 이를 이용하면 살아있는 생물체의 영상을 높은 대비로 얻을 수 있는 X-선현미경을 제안하였다. 즉, '물의 창' 영역에서 탄소의 흡수 계수가 산소에 비해서 10배 정도 크므로 이 영역의 X-선을 이용하여 영상을 얻는 경우 탄소와 산소를 쉽게 구분해 낼 수 있다. 이런 성질은 살아 있는 세포 내의 여러 조직 및 기관의 기능적 본질을 연구하는 데 매우 중요하게 이용될 수 있다.

X-선현미경은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데 초정밀 나노가공기술을 이용한 반사거울, 굴절렌즈, 회절렌즈 등과 같은 X-선 광학계를 이용하여 X-선을 집속시켜 시료의 상을 확대하여 얻는 방법(imaging microscopy), 시료의 국부위치에 X-선을 조사하여 그 투과도를 검출하면서 시료를 스캐닝하고 전자장치를 이용하여 시료의 상을 실시간으로 얻을 수 있는 방법(scanning microscopy), 시료를 레지스트 위에 밀착시켜 시료의 2차원 영상을 1:1 배율로 얻는 방법(contact microscopy) 등이 있다.

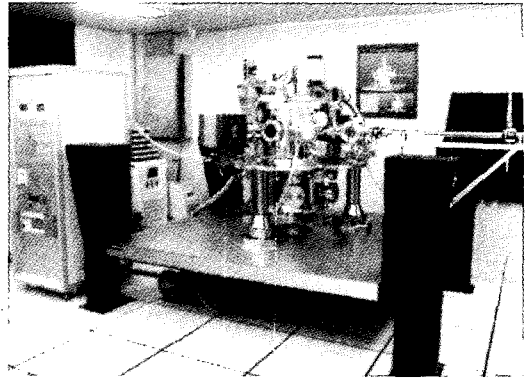


그림 7 실험실 규모의 레이저 플라즈마 연 X-선현미경 시스템(원광대학교 XMRC)

세계적으로는 일본에서 1996년에 일본 문부성의 지원으로 쓰쿠바 대학과 니콘 사가 50nm 해상도의 X선현미경을 제작하였고, 현재 일본의 가와사키 중공업(주)에서 원자력연구소와 공동으로 X-선광전자현미경을 개발하는 중이다. 미국에서는 1970년부터 National Science Foundation으로 SUNY Stony Brook에서 IBM과 공동으로 방사광가속기를 이용한 X-선현미경을 연구하였다. 유럽에서는 스웨덴의 Royal Institute of Technology, 영국의 King's college, 독일의 Gottingen 대학, BESSY연구소, 덴마크의 ISA, 이태리의 ELETTRA 등에서 방사광가속기를 이용한 X-선현미경 연구에 박차를 가하고 있다.

국내에서는 현재까지 X-선현미경에 대한 연구는 매우 미미한 실정이며, 주로 방사광가속기를 이용한 연구가 진행 중이다. 포항공대와 포항가속기연구소에서는 연구용 목적으로 방사광 가속기 8A1 빔라인을 이용하여 50nm의 공간분해능을 갖는 연 X-선현미경을 개발하여 운영 중이며, 세포와 신소재 연구 등으로의 응용에 적용할 계획이다. 레이저 플라즈마를 이용한 실험실 규모의 X-선현미경은 최근 원광대학교 X-선현미경 연구센터에서 생물의학적 적용을 위한 시제품을 개발 중이다.(그림 7)

타원편광분석기

타원편광분석기술(ellipsometry)은 빛의 편광

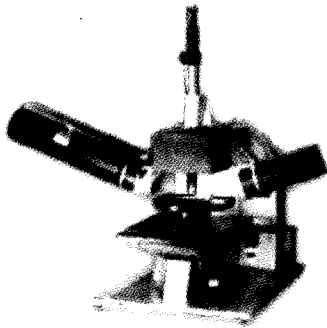


그림 8 Jobin Yvon 사의 타원편광분석기(PZ2000-LE)

현상을 이용하는 광분석 기술의 하나로 P. Drude에 의해 1887년에 개발이 되었고 현재의 명칭은 1945년에 A. Roehen이 제안하였다. 편광은 진동하는 전기장의 방향이 일정한 한 무리의 빛을 말하며 형광등과 같은 일반 광원에서 발생하는 빛은 그 전기장의 진동 방향이 마구 섞여 있어 편광방향이 없다고 볼 수 있다. 직선편광이나 좌·우원편광 등 어떤 편광상태의 빛이 시편과 작용하게 되면 반사 또는 투과된 빛은 입사광과는 다른 편광상태를 가진다. 이는 물질마다 편광에 대한 반사 특성이 다르기 때문인데 타원편광분석기술에서는 바로 이 점을 이용하고 있다. 빛이 시편의 표면에 비스듬히 입사할 경우 반사 또는 투과 후에 그 편광상태가 주로 타원편광으로 변하는데 타원편광분석기술에서는 이 타원의 모양과 기울기 때로는 그 크기를 분석함으로써 시편이 지닌 특성을 찾아내게 된다.

타원편광분석기는 일반적으로 투과 또는 반투과성 박막의 두께나 광특성을 측정하는 데 많이 사용되어 왔다. 수nm 정도의 산화막 두께를 손쉽게 측정할 수 있는 방법으로는 타원편광분석법 밖에 없기 때문에 초박막 연구에 각광을 받고 있다. 현재 반도체 표면측정용으로 가장 널리 사용되는데, 반도체 공정중의 광특성을 모니터링하고, 패턴크기를 측정하는 데 사용된다. 특히 측정속도향상으로 실시간 측정이 가능함에 따라 공정의 모니터링용으로 더욱 널리 사용될 수 있다. 또한 고전적 물리량인 두께나 광특성의 측정 말고도 표면 흡착, depth profile, 표면온도, 물질 구성비, 액정 고분자의 기울기 측정까지 다

양한 물리량을 연구하는 데 사용되고 있다.

일반적인 발전 경향은 파장영역의 확장, 측정 속도의 개선, 측정변수의 일반화, 특수목적용 개발 등으로 나눌 수가 있겠다. 속도의 개선은 실시간 측정 및 분석을 통하여 실시간으로 공정변수를 조절하게 할 수 있게 된다. 또한 광노광 공정용 파장이 deep UV(DUV), 진공자외선(VUV), 극자외선(EUV)로 점차 짧아짐에 따라 해당 파장영역에서 작동이 가능한 타원편광분석기 개발에도 많은 투자를 하고 있다. 그리고 일정한 입사각을 갖는 단파장 타원편광분석기로는 측정할 수 없는 복잡한 구조의 분자층을 측정하기 위해 모든 파장의 빛을 쏘여 주는 분광학적 측정법 또한 연구되고 있다.

맺음말

앞에서 살펴본 바와 같이 측정하고자 하는 대상에 따라 다양한 분석/측정 방법이 존재하므로 사용자가 원하는 물리량을 정확하게 측정하기 위해서는 적합한 분석법을 사용해야 할 것이다. 일반적으로 공초점 현미경은 생물시편의 관찰에 매우 적합하고 빠르지만 분해능은 전자현미경이나 원자현미경에 비해 떨어진다. 대신에 전자현미경은 살아있는 시편의 측정이 어렵고, 원자현미경은 측정속도가 느리다는 단점이 있다. X-선현미경은 다양한 시편에 적용이 가능하고 분해능도 높지만 아직 광학계의 개발에 문제를 안고 있고 측정시간도 매우 길다. 타원편광분석기는 주로 반도체 시편의 측정에 적합하다. 물론 다양한 물리량을 분석하기 위해서는 여러 가지의 분석법을 사용하여 비교/분석하는 경우도 있다. 또한 분석장비의 성능을 향상시키기 위해서 장비 자체의 성능향상을 위한 노력뿐 아니라 공초점/라만분광기와 같은 다양한 기술의 융합기술도 개발되는 추세이다.

마지막으로, 위와 같은 분석 기술은 주로 선진국에 의해 독점되고 있으며 나노기술에서 기본장비의 기술중속은 관련 산업 전체의 중속으로 이어질 수도 있다. 부가가치가 매우 크어도 불구하고 대부분 해외 기술에 의존하고 있는 분석기기 분야에 이제는 많은 관심이 모였으면 하는 바람이다.