

전자현미경을 이용한 나노물질 분석

(Recent Technology for the Characterization of Nanomaterials by Electron Microscopy)

글 _ 윤준도 || 경남대학교 나노공학과
jdyun@kyungnam.ac.kr

1. 서론

나노가 유행이다. 가전제품 마트에 가도 나노 붙인 제품이 인기이고 회사이름에 붙이면 주가가 뛴다. 심지어 의료기 상점이나 횃집에도 나노가 등장했다. 이런 것을 보면 나노가 대단한 것처럼 보인다. 하지만, 나노는 단지 십억분의 일 크기를 뜻하는 접두어일 뿐이다. 나노는 어떤 특별한 분야나 학문을 뜻하는 것이 아니다. 자연계의 어떤 물질이건 어떤 현상이건 나노스케일에서 이루어지면 나노라 칭할 수 있다. 따라서 물리학, 화학, 생물학, 의학, 재료공학, 화학공학, 전자공학, 기계공학, 생명공학, 환경공학, 등 모든 분야가 나노과학기술에 관여를 하고 있다. 이것은 나노과학기술이 태생적으로 학제간 또는 퓨전 학문이 될 수 밖에 없음을 의미한다.

과학과 공학의 전 분야가 참여하여 나노 현상과 특성을 조사하고 연구하여 이해를 높이고 나노 물질 제조 공정을 개발하고 그 구조와 특성을 평가하여야 실생활과 산업에 응용할 수 있게 된다. 나노연구의 개발에서 상용화까지의 전과정에서 나노물질의 특성평가는 특히 중요하다. 나노 크기는 너무 작아서 그 존재를 감지하기 힘들기 때문이다. 과학사적으로 원자의 존재를 감지하지 못하였을 때 열역학이 발전할 수 없었듯이 나노 크기를 감지하지 못하고 나노 과학이 발전할 수 없는 것이다. 나노 과학기술은 1980년대 초 주사터널링 현미경(STM)과 원자간력 현미경(AFM)의 발명과 함께 시작되었다고 하여도 과언이 아니다. 나노크기의 프로브를 사용하여 서브

옹스트롬의 분해능을 구현하고 최초로 개별 원자의 영상을 실제 공간에서 관찰하면서 나노개념을 갖기 시작했으며, 또한 나노 프로브로 개별 원자를 다룰 수 있게 되면서 에릭 드렉슬러가 '창조의 엔진'에서 예언했던, 한 때 허황된 이야기로만 생각되었던 분자기계들에 대한 가능성을 확신할 수 있었던 것이다.^{1,2)}

2000년 미국으로부터 시작된 나노과학기술의 국가간 경쟁이 이제 8년째 계속되고 있다. 그 동안 수많은 연구가 진행되었으며 수많은 나노물질이 만들어졌다. 상향식(바텀업)과 하향식(탑다운)의 두 가지 나노물질 제조공정 가운데, 반도체 공정과 같이 큰 것을 깎아나가 작은 것을 만드는 방식인 하향식 공정이 현재는 주류이다. 하지만, 미래에는 원자를 조립하여 큰 물건을 만드는 상향식 공정이 주류를 이룰 것이다. 집을 지으려면 벽돌이 필요하듯이 상향식 공정에서는 요소에 해당하는 나노브릭이 필요하다. 나노브릭에 해당하는 것이 나노 분말, 나노튜브, 나노와이어, 나노휘스커 등이다. 나노 브릭을 잘 만들려면 이들에 대한 특성평가를 잘 해야 한다. 나노 브릭의 크기, 형상, 결정구조, 결합, 성분 등을 분석하고 나아가 분포, 연결성, 계면, 분율 등을 분석해 내는 것이 중요하다.

전자현미경 분석은 오랫동안 재료공학에서 중요한 기술로 자리 잡아 왔으며 특히 최근 나노과학기술에서 더욱 중요성을 더해가고 있다. 나노과학기술에서는 영상관찰에서 서브옹스트롬의 높은 공간분해능을 요구하고 있으며 결정구조분석이나 성분분석에서도 나노미터 스케일의 분해능을 요구하고 있다. 또한 나노스케일에서는

무한공간이 아니므로 이를 고려한 시뮬레이션 등 전산능력이 요구되고 있다. 기존의 주사전자현미경, 투과전자현미경, 주사투과전자현미경, 고각환형명시아상 검출기, 전자에너지손실 분광분석 등을 이용하여 서브옹스트롬 고분해능 전자현미경 분석, 나노회절, 삼차원 토모그래피 분석 등의 기술이 활용되고 있다. 본 기사에서는 이같은 최근의 전자현미경 기술을 이용한 나노물질 분석 몇 가지를 소개하고자 한다.

2 나노 영상, 구조, 및 성분 분석

주사전자현미경(SEM)의 전자총과 렌즈 기술이 나날이 발전해 현재 분해능이 서브나노미터 수준이 되었고 백만 배 배율의 현미경이 상용화되었다. 투과전자현미경(TEM)의 경우에는 분해능이 전자파의 파장에 비례한다는 아베 방정식에 근거하여 메가볼트 급의 고전압을 사용하여 파장을 최대한 짧게 하려고 하였으나 결과는 예상만큼 크게 높아지지는 않았다. 사용하는 전자 렌즈의 불완전성을 나타내는 구면수차가 분해능의 한계로 작용했기 때문이었다. 최근 투과전자현미경의 구면수차를 보정하는 장치가 개발되어 전자현미경 컬럼의 중간에 설치되면서 1 옹스

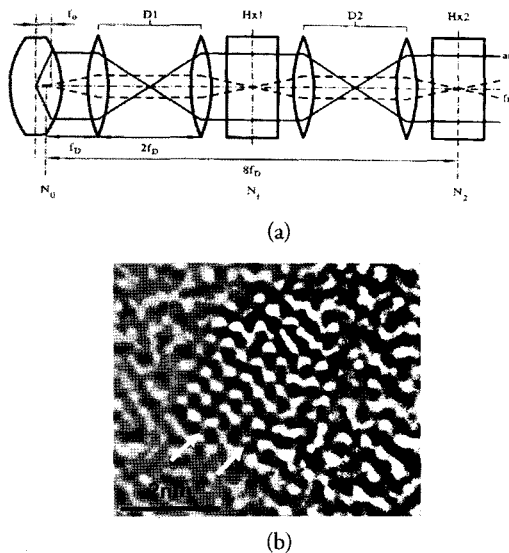


Fig. 1. (a) TEM에 장착되는 수차보정기의 구조와 (b) 수차보정기를 장착한 TEM으로 관찰한 CdSe 나노분말의 고분해능 영상³⁾

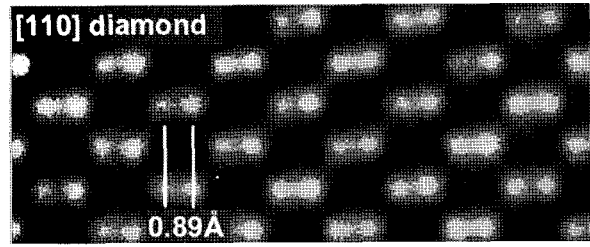


Fig. 2. <110> 방향에서 본 다이아몬드 격자에 대하여 수차보정기를 장착한 STEM으로 관찰한 고분해능 HAADF-STEM 영상

트롬 이하의 높은 분해능을 얻을 수 있게 되었다. 구면수차 계수(Cs)를 보정한다는 의미로 씨에스 코렉터(Cs corrector)라고 이름을 붙인 이 수차보정기는 투과전자현미경 값 이상의 높은 가격 때문에 도입이 쉽지 않았는데 최근 국내에도 도입되어 설치되었다. 수차보정기는 Fig. 1과 같이 2개의 핵사폴 렌즈, 4개의 렌즈, 그리고 또다른 부속 렌즈로 되어 있어서 핵사폴간 상호 수차를 상쇄토록 하면서 음의 수차를 만들어 대물렌즈의 구면수차를 상쇄토록 하는 원리로 되어 있으며 이를 장착한 TEM으로 얻은 고분해능 영상을 Fig. 1에 보이고 있다.^{3,4)}

수차보정기를 주사투과전자현미경(STEM)에 사용한 미국 리하이 대학교의 예를 들면⁵⁾, 대물렌즈 아래에 설치되는 템(TEM)용과는 달리 대물렌즈 윗면에 설치되었고 구면수차 계수(Cs)값이 설치전 0.5 mm로부터 설치 후 3.8 μ m로 약 120분의 일 비율로 크게 줄일 수 있었다. 따라서 시편 상에 놓이는 전자 프로브의 크기를 대폭 줄일 수 있었고 서브옹스트롬의 공간 분해능을 얻을 수 있었다. Fig. 2는 고각환형 암시아(HAADF) 영상에서 0.9 옹스트롬의 분해능을 얻은 모습을 보여주고 있다. 또한, 스템(STEM)에서는 분해능을 저하시키지 않으면서 프로브 전류량을 10 배 가량 높일 수 있어서 고분해능의 엑스선 분석과 일스(EELS) 분석이 가능하게 되었다.

다음으로, 나노물질에 대한 나노회절 분석 기술을 소개한다. 나노 부위에 대한 결정구조 분석에는 나노프로브를 이용한 CBED, STEM을 이용한 회절분석, 또는 나노부위 회절분석 기술 등이 사용된다. 나노부위 회절분석(nano-area diffraction)은 템에서 보통 2개의 집속렌즈를 사용하는 것과는 달리 제3의 집속렌즈를 장착하여

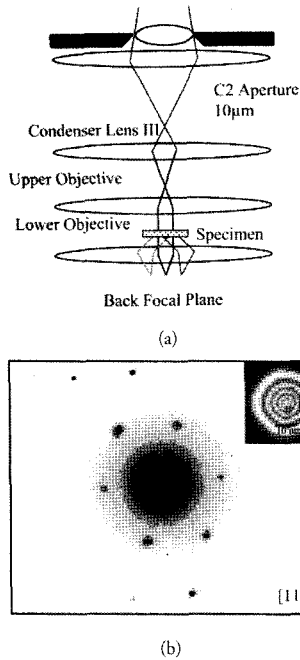


Fig. 3. (a) 나노부위 전자회절법의 광경로도와 (b) 나노부위 전자회절법으로 얻은 4nm 금입자의 전자회절도형⁶⁾.

대물렌즈 왼쪽의 전방초점면에 전자 프로브를 형성하고 이를 대물렌즈를 통과시켜 시편상에 평행빔을 투과시키는 방법이다. 주오 등은⁶⁾ 이를 이용하여 50nm 직경의 프로브를 얻고 4nm 크기의 금입자를 분석하였다 (Fig. 3).

또 다른 방법으로, 시편 표면에 스템(STEM) 장치로 서브나노미터의 프로브를 형성하여 전자나노회절(END: electron nanodiffraction) 도형을 얻을 수 있다. 평행빔이



Fig. 4. TEM 상에서 1 nm 프로브를 사용하여 얻은 산화망간 나노휘스커에 대한 나노회절도형⁸⁾

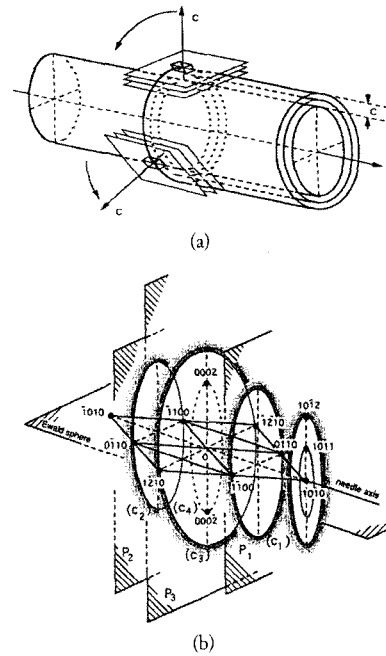


Fig. 5. 탄소나노튜브의 (a) 그래핀 (0001)면의 방향과 (b) 역격자 벡터와 에발트 구면⁹⁾

아닌 약간의 수렴성 빔을 사용하므로 회절도형은 점과 디스크의 중간 크기를 갖는 점들로 이루어져 있으나 점의 크기가 크다는 것 이외에는 점도형과 동일하게 처리할 수 있다. 이 방법은 나노 결정의 면간거리가 너무 클 경우 회절점이 검출 수 있다는 단점이 있으나, 프로브를 정초점에서 벗어나도록 하여 프로브의 크기를 약간 크게 함으로써 해결할 수 있다. 텀(TEM)으로도 전계방사형 전자총과 미니렌즈를 써서 나노미터크기의 나노프로브를 형성시킬 수 있고 나노회절도형을 분석할 수 있다. 윤 등은⁸⁾ 1 nm의 텀 나노프로브를 사용하여 산화 망간 나노휘스커의 전자회절도형을 분석하였다 (Fig. 4)

나노회절로 탄소나노튜브를 분석한 예를 들어보자. 탄소나노튜브는 층상 구조 흑연의 한 층에 해당하는 그래핀(graphene)이 말려 있는 구조로 이루어져 있다. Fig. 5에서와 같이 튜브의 단면원주를 따라 돌아가면서 연속적으로 육방정의 c축이 존재하므로 튜브 방향으로의 면을 제외하고는 각 면의 역격자 벡터는 원뿔을 이루게 된다¹³⁾. 전자빔 방향에 따라 형성된 에발트(Ewald) 구면과의 교점에 회절점이 형성되는데 튜브의 길이방향 이외의 방향

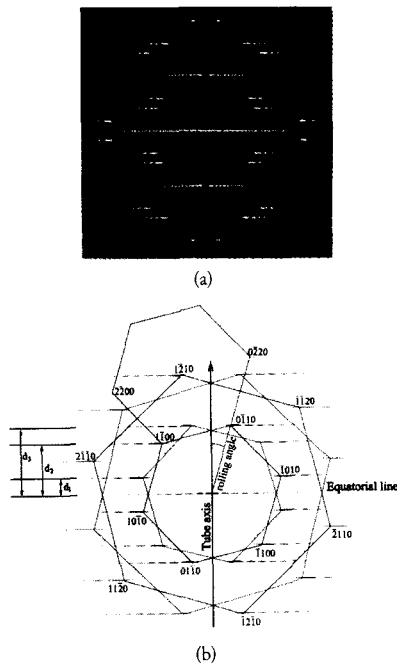


Fig. 6. 키랄형 탄소나노튜브에 대하여 (a) 시뮬레이션한 전자회절도형과 (b) 그에 대한 면지수. 두 개의 도형이 겹쳐져 있는 모습이다^[10,11)].

으로는 격자가 유한하므로 역격자점은 늘어지고 회절점은 Fig. 6(a)와 같이 스트리크를 형성하게 된다. 그래핀 시트가 비스듬히 말린 키랄형 탄소나노튜브의 경우에는 튜브의 윗면과 아랫면의 격자 방향이 일정 각도로 비틀어져 있으므로 윗면에서의 회절도형과 아랫면에서의 회절도형도 같은 각도로 비틀어져 있다. 나노튜브 방향에 수직으로 전자빔을 조사할 경우 회절도형은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 윗면과 아랫면의 두 회절도형이 겹친 모습을 보인다.

전자빔을 펼쳐서 시편에 쬐이는 템과는 달리 스템은 전자빔을 모아서 작은 프로브로 만들어 시편에 쬐인다. 프로브를 시편에 주사하면서 시편을 투과하며 회절되지 않는 빔과 회절되는 빔을 각각 명시야 검출기와 암시야 검출기로 검출하면 각각의 명시야상과 암시야상이 얻어진다. 특히 고각의 환형 암시야 (하디프 HAADF: high angle annular dark field) 검출기를 사용하면 시편 투과 시 러더포드 탄성산란을 하는 전자들을 검출할 수 있고 시편내 원자의 종류에 따라 발생하는 이른바 지 콘트라

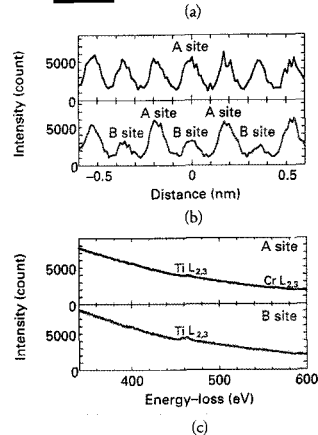
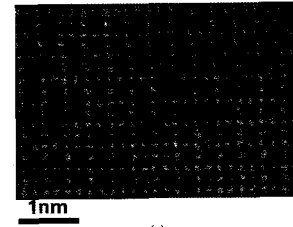


Fig. 7. 나노 석출물에 대하여 STEM으로 얻은 (a) 고분해능 HAADF 영상, (b) 영상 신호 프로파일, (c) EELS 스펙트럼. A자리는 면심자리로 니켈이, B자리는 꼭지점 자리로 알루미늄이 존재한다. EELS 곡선은 고용체 원소인 티타늄과 크롬이 자리에 따라서 선택적으로 존재함을 보여주고 있다^[9].

스트(Z-contrast)라고 부르는 성분 콘트라스트를 얻을 수 있게 된다. 이는 러더포드 탄성산란 강도가 원자번호의 제곱에 비례하기 때문이다. 약 50 mrad(약 2.9도) 이상의 고각에서는 브래그 회절 전자가 배제되기 때문에 결맞은(coherent) 빔에 의해 발생하는 위상콘트라스트가 나타나지 않으며 원자의 실 영상을 얻을 수 있다. Fig. 7은 나노 석출물에 대한 스템 하디프 영상을 보여주고 있다^[9]. 석출물은 면심입방구조체로서 면심자리인 A자리에는 니켈이, 꼭지점 자리인 B자리에는 알루미늄이 놓이는데 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)와 같이 원자 위치에 따라서 산란강도가 다르게 나타나는 성분 콘트라스트를 보이고 있다. 일스(EELS) 곡선에서는 A자리에서는 티타늄과 크롬이 B자리에서 티타늄이 선택적으로 검출되어 원자 분해능으로 성분 분석을 할 수 있다는 점을 보여주고 있다.

스템을 사용하는 또 다른 이점은 나노스케일에서의 EDS나 EELS로 정량 분석이 가능하다는 점이다. 빔이

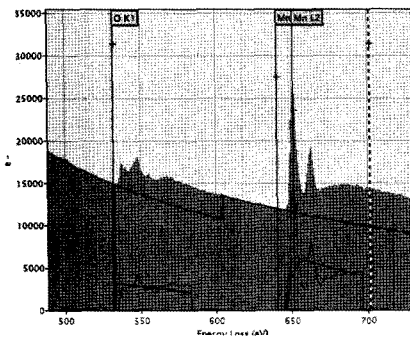


Fig. 8. STEM-EELS를 이용한 산화망간 나노와이어의 정량분석의 예⁹⁾.

주사를 멈춘 상태에서 시편의 일정 부분을 투과한 빔을 EELS 분광분석기에 넣으면 정량 화학 분석을 할 수 있다 (Fig. 8).

3. 3차원 토모그래피

전자현미경으로 얻는 영상은 2차원에 속하는 것으로 실제 시편이 갖고 있는 3차원 정보를 얻을 수 없는 것이 불만사항이었다. 3차원 정보의 부족은 종종 구조를 잘못 해석하는 오류를 야기시키기도 하였기 때문이다. 생물학 분야에서는 20여년 전부터 전자현미경으로부터 3차원 정보를 얻기 위한 연구가 진행되어 최근에는 바이러스나 세포내 기관, 초분자 집합체, 등에 대한 좋은 3차원 영상을 얻을 수 있게 되었다. 재료공학 분야에서도 연구가 진행되고 있고 특히 나노분말, 퀀텀 닷, 나노기공의 형상과 연결성, 나노크기의 귀금속 촉매 입자의 분포 위치와 형태, 나노 입자의 생체내 유착 분포, 등이 최근 관심이 집중되는 부분이다.

3차원 형상과 그 단면을 볼 수 있는 토모그래피(tomography) 기술은 엑스선을 이용하는 법, 이온절단을 이용하는 법, 그리고 투과전자현미경을 이용하는 법이 있다. 이 세가지 방법은 각각 적용되는 크기 영역이 다르다. 엑스선을 이용하는 엑스선 토모그래피는 10 μm 이상의 크기를 갖는 물질을 대상으로 하고 있고 이온빔으로 절단(FIB)하고 섀(SEM)으로 관찰하는 이온절단법은 10 μm 에서 10nm까지의 크기 영역을 해결할 수 있으며, 투과전자현

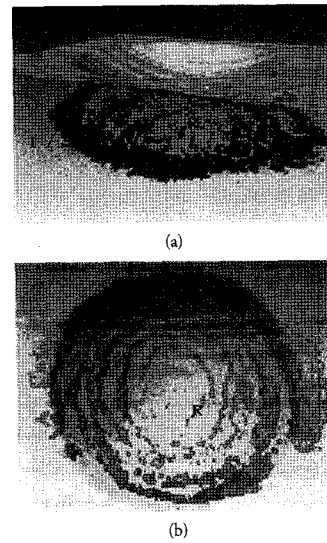


Fig. 9. TiN 코팅위에 나노인덴테이션을 하였을 때 발생하는 피하 균열에 대하여 이온절단법으로 구한 삼차원 영상. 시각이 (a) 비스듬한 방향, (b) 수직방향이다¹⁵⁾.

미경에 의한 전자 나노토모그래피는 100 나노미터 이하의 나노물질을 대상으로 하고 있다⁴⁾.

이온절단과 주사전자현미경을 이용한 3차원 분석법은 이전에는 이온총만을 이용하여 절단도 하고 영상 관찰도 하는 방식이었으나 근래에는 섀 내부에 이온총을 설치하여 절단과 영상 관찰을 각각 이온빔과 전자빔으로 하도록 하고 있다. 이온빔으로 시편을 연속 깎아나가면서 간간히 단면의 영상을 관찰하는 것으로, 입자, 이차상이나 기공의 모양, 특히 내부 균열의 형상과 분포를 관찰할 수 있다. 맥그루터(McGrouther) 등은¹⁵⁾ 합금강에 피복된 4 μm 두께의 질화티타늄(TiN) 코팅에 500mN의 하중으로 나노인덴테이션을 하고 피하 균열의 발생 상태를 3차원을 구현하였다. 압흔 부위를 계속적으로 이온절단하면서 100-200 나노미터 간격으로 관찰하여 최대 200층의 단면영상을 얻고 이를 3차원 영상 소프트웨어 아미라(Amira)를 이용하여 3차원 형상을 조합한 것이다. 그 결과 Fig. 9와 같은 3차원 균열 집합체를 얻었고 경사 균열과 환형 균열이 존재하며 박막 내부의 주상 입자의 입계에 전단이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

템(TEM)으로 관찰한 영상으로부터 삼차원을 구현하는 방법은 다음과 같다. 시편을 $\pm 70^\circ$ 정도의 큰 각도범위

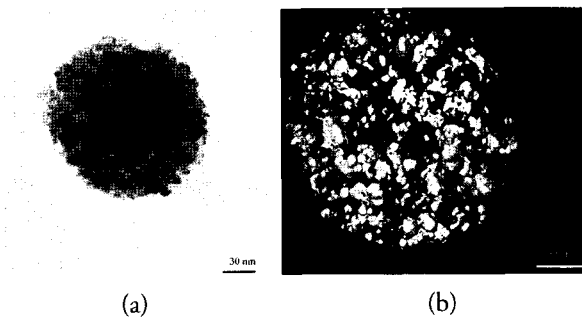


Fig. 10. 120 nm 크기의 TiO_2 -Ag 나노복합 분말에 대하여 (a) TEM 명시야 영상과 (b) 이를 처리하여 만든 삼차원 영상.

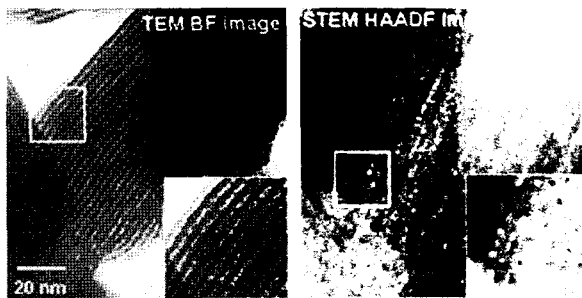


Fig. 11. 같은 부위에 대하여 (a) TEM 명시야상, (b) STEM 암시야상의 두 가지 방법으로 본 나노기공 실리카 내부의 $Ru_{10}Pt_2$ 나노입자의 영상⁸⁾.



Fig. 12. STEM의 HAADF를 이용하여 얻은 나노기공체 금박의 삼차원 영상⁹⁾.

내에서 매번 1도씩 경사시키면서 각각 2차원 영상을 기록한다. 이는 자동 시스템으로 이루어진다. 얻은 영상들을 전문 컴퓨터 소프트웨어로 정렬을 시키고 조합하여 삼차원 영상을 구현한다. 생물학 시편에서는 질량두께 콘트라스트가 주로 일어나므로 템의 명시야상을 이용하여 경사 영상을 얻는다. 템의 명시야상은 무기질 재료 시편에도 적용되어 나노기공 제올라이트, 나노기공 실리카 상의 귀금속 촉매의 분포 연구 등에서 만족할만한 삼차원 정보를 얻을 수 있다고 보고되었다^{16,17)}. Fig. 10에 100nm 크기의 TiO_2 -Ag 나노복합 분말에 대한 삼차원 영상을 실었다. (a)의 명시야상에서는 은이 어두운 콘트라스트로 보이고 (b)의 삼차원 영상에서는 밝은 콘트라스트로 보인다⁸⁾.

하지만, 결정질이 대부분인 재료공학 시편의 경우에는 위상 콘트라스트 효과로 콘트라스트 반전, 프레넬 프린지, 영상 비국소화(delocalization), 등의 문제가 발생하므로 이를 피하기 위하여 스템에서 하디프(HAADF) 상을 이용하는 경우가 많다. Fig. 11의 예에서 나노기공 실리카 내부에 존재하는 루테튬-백금($Ru_{10}Pt_2$) 나노입자가 템 명시야상에서는 전혀 보이지 않으나 스템 암시야상에서는 뚜렷이 보이고 있어서 스템 영상의 이점을 보여주고 있다. Fig. 12에는 스템-하디프 영상을 이용하여 나노기공체인 나노 금박(gold leaf)의 경사 영상을 얻고 이를 처리하여 얻은 삼차원 영상을 실었다⁹⁾. 특히 이 방법의 장점은 스템 기능을 이용하므로 삼차원 정보 이외에도 EDS나 EELS 등 나노 성분 분석이 동시에 가능하다는 점이다.

한편 시료내 각 위치에서 나노구조의 일관성이 충분한 경우에 푸리에 변환(FFT)을 이용하는 전자 결정학적 방법이 제시되었는데²⁰⁾ 이차원 영상을 푸리에 변환하여 이차원 푸리에변환 영상을 얻고 이를 삼차원 조합하여 삼차원 푸리에 변환 영상을 얻은 뒤 이 영상을 역푸리에 변환하여 삼차원 영상을 얻는 방법이다 (Fig. 13). 이를 이용하여 메소기공체(mesoporous) SBA-6의 기공구조를 삼차원적으로 밝혔는데 Fig. 14(a)에 고분해능 템 영상을 실었으며 Fig. 14(b)에 삼차원 구조물의 일부를 입방체 단위포로 표시하였다. 삼차원으로 본 구조는 이차원 영상

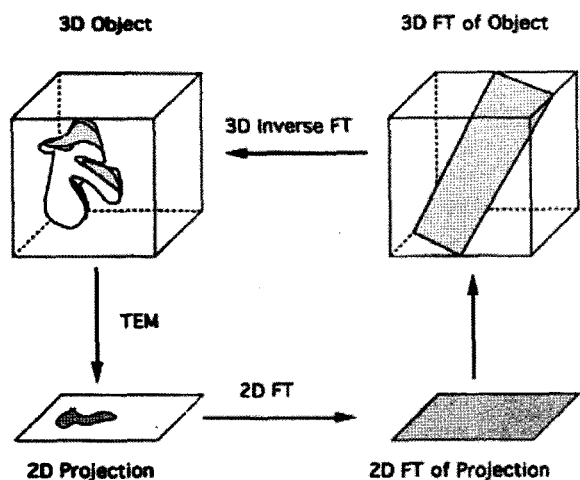


Fig. 13. TEM의 이차원 영상을 푸리에 변환하여 삼차원 영상을 만드는 방법²⁰⁾.

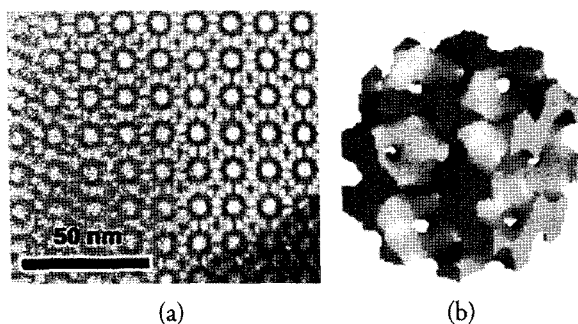


Fig. 14. 나노기공체 SBA-6의 (a) 고분해능 영상과 (b) 푸리에변환을 이용하여 얻은 삼차원 나노기공 구조의 입방형 단위포²⁰⁾.

에서 전혀 예상치 못하던 것으로 크기가 두 가지의 둥근 기공들이 작은 연결기공으로 연결되어 있는 모습을 보이고 있다. 이는 나노토포그래피 기술의 중요성을 보여주는 좋은 예가 될 것이다(Fig. 14).

4. 결론

전기한대로 전자현미경 기술은 나노물질 분석에 효과적으로 사용되고 있으며 분광분석 기술, 시뮬레이션 기술 등 주변 기술과 결합하여 빠른 속도로 발전하고 있다. 서브나노 스케일에서 영상분석, 구조분석 및 성분 분석

이 이루어지고 있으며 수차보정기의 개발로 1 옹스트롬 이하의 높은 분해능으로 TEM과 STEM 분석이 이루어지고 있다. 또한, 삼차원 토포그래피 기술이 빠르게 진보하여 생물 의학 분야를 넘어서서 재료 분야에서도 삼차원 영상을 구현해 내면서 나노분석의 강력한 도구로 등장하고 있다. 지금은 이같은 빠른 분석기술의 발전에 대비하여 재료공학을 비롯한 나노과학기술 연구자들이 나노 특성평가 기술에 대한 관심과 투자를 높이지 않을 수 없는 상황이다.

참고문헌

1. 나노테크놀로지, 에드 레지스 지음, 노승정 옮김, (도)한승, 서울, 1998.
2. Nanotechnology for dummies, written by R. Booker and E. Boysen, Wiley Publishing Inc., USA 2005.
3. A. I. Kirkland, L-Y. Chang, and J. L. Hutchison, "Application of aberration corrected transmission electron microscopy to materials science" JEOL news, 41[1] 8-11 (2006).
4. J. L. Hutchison, J. M. Titchmarsh, D. J. H. Cockayne, G. Mobus, C. J. D. Hetherington, R. C. Doole, F. Hosokawa, P. Hartel, and M. Haider, "A Cs corrected HRTEM: initial application in materials science" JEOL news, 37[1] 2-5 (2002)
5. M. Watanabe, D. W. Ackland, C. J. Kiely, D. B. Williams, M. Kanno, R. Hynes, and H. Sawada, "The aberration corrected JEOL JEM-2200FS FEG-STEM/TEM fitted with an omega electron energy filter: performance characterization and selected application", JEOL news, 41[1] 2-7 (2006).
6. J. M. Zuo, M. Gao, J. Tao, B. Q. Li, R. Twesten, and I. Petrov, "Coherent nanoarea electron diffraction", Microscopy Research and Technique, 64 347-355 (2004).
7. J. M. Cowley, "Scanning Transmission Electron Microscopy" in Handbook of Microscopy for Nanotechnology, Ed. by N. Yao and Z. L. Wang, 455-491 (2005).
8. J. Yun, C. Du, N. Pan, and N. Browning, "Preparation and characterization of manganese oxide nanowires", paper submitted (2007).
9. X. F. Zhang, X. B. Zhang, G. Van Tendeloo, S. Amelinckx, M. Op de Beeck, and J. Van Landuyt, "Carbon nano-tubes: their formation process and observation by electron microscopy", J. Crystal Growth, 130,

- 368-382 (1993)
10. G. Van Tendeloo, and S. Amelinckx, "Electron microscopy of fullerenes and related materials", in Characterization of Nanophase Materials, Ch. 12, edited by Z. L. Wang, Wiley-VCH, (2000)
 11. J. C. Meyer, M. Paillet, G. S. Duesberg, and S. Roth, "Electron diffraction analysis of individual single-walled carbon nanotubes", Ultramicroscopy 106[3] 176-190 (2006).
 12. Z. Liu, and L-C. Qin, "Symmetry of electron diffraction from single-walled carbon nanotubes", Chem. Phys. Lett., 400, 430-435 (2004).
 13. J. M. Cowley, P. Nikolaev, A. Thess, and R. E. Smalley, "Electron nano-diffraction study of carbon single-walled nanotube ropes", Chem. Phys. Lett., 265, 379-384 (1997).
 14. A. Velichko, C. Holzappel and F. Mucklich, "3D characterization of graphite morphologies in cast iron", Advanced Engineering Materials, 9[1-2] 39-45 (2007).
 15. D. McGrouther and P. R. Munroe, "Imaging and analysis of 3-D structure using a dual beam FIB", Microscopy Research and Technique, 70, 186-194 (2007).
 16. J. M. Thomas, P. A. Midgley, T. J. V. Yates, J. S. Barnard, R. Raja, I. Arslan, and M. Weyland, "The chemical application of high resolution electron tomography: bright field or dark field?" Angew. Chem. Int. Ed., 43, 6745-6747 (2004).
 17. K. P. de Jong, L. C. A. van den Oetelaar, E. T. C. Vogt, S. Eijssbouts, A. J. Koster, H. Friedrich and P. E. de Jongh, "High-resolution electron tomography study of an industrial Ni-Mo/Al₂O₃ hydrotreating catalyst", J. Physical Chemistry Lett. B, 110, 10209-10212 (2006).
 18. K. Kaneko, W-J. Moon, K. Inoke, Z. Horita, S. Ohara, T. Adschiri, H. Abe, and M. Naito, "Characterization of TiO₂-Ag nanocomposite particles prepared by spray pyrolysis process using transmission electron microscopy and three-dimensional electron tomography", Mater. Sci. Eng. A403, 32-36 (2005).
 19. H. Rosner, S. Parida, D. Kramer, C. A. Volkert and J. Weissmuller, "Reconstructing a nanoporous metal in three dimensions: an electron tomography study of dealloyed gold leaf", Advanced Engineering Materials, 9[7] 535-541 (2007).
 20. K. P. de Jong, and A. J. Koster, "Three dimensional electron microscopy of meso-porous materials: recent strides towards spatial imaging at the nanometer scale", Chemphyschem., 3, 776-780 (2002).

●● 윤준도



- 1975-1982 서울대학교 요업공학 학사
- 1982-1984 서울대학교 무기재료공학 석사
- 1984-1987 산업연구원(KIET) 연구원
- 1988-1994 미국 리하이대학교 재료과학공학 박사
- 1994-현재 경남대학교 나노공학과 교수
- 2006- 미국 유씨데이비스 방문연구교수