

전자현미경을 이용한 나노섬유의 분석기술

박수진, 정광운¹, 김학용²

전북대학교 헬스케어기술개발사업단, ¹전북대학교 고분자나노공학과, ²전북대학교 섬유소재시스템공학과

1. 서론

나노기술의 급속한 발전과 산업 현장에서의 응용이 가속화되면서, 최근에 시장 점유율이 급성장하고 있다. 나노기술 관련 시장규모는 올해 130억 달러에 이르는 것으로 예상되며, 특히 미국과학재단(NSF)은 나노기술의 성장이 가속화되어 2015년 경에는 시장규모가 1조 달러를 넘을 것으로 예상하고 있다[1]. 나노기술은 나노미터($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) 크기의 나노물질을 만들어 그 물리적 성질을 제어함으로써 마이크로 길이 단위에서 구현할 수 없는 새롭고 향상된 물리, 화학 그리고 생물학적 특성을 나타내는 신소재나 시스템을 만들어 내는 종합적 기술이라 할 수 있다. 이러한 신소재 나노기술의 개발과 산업화를 활성화시키기 위해서는 화학적, 전기적, 물리적 정보 및 구조에 대한 연구 개발이 중요하다. 따라서 나노미터 이하의 물질들의 결정구조와 나노물질을 구성하는 성분의 분석이 필수적이다. 하지만 연구소 및 학계에서 개발된 나노소재 기술을 산업화하는데 있어 나노 분석기술의 취약함이 큰 애로사항이 되고 있다[2].

지금까지 수많은 나노소재가 소개되었다. 그 중에서도 수백 나노미터 이하의 직경을 갖는 고분자 나노섬유를 살펴보면, 단위 무게당 큰 표면적을 가지고 있고, 표면의 기능화를 쉽게 할 수 있기 때문에 나노섬유와 나노섬유매트는 필터, 조직 배양용 지지체(scaffold), 방호복, 복합재료의 보강제 및 센서 등에 널리 이용되고 있다. 이와 같은 나노섬유의 특성을 분석하는 분석기술로서는 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM), 그리고 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)과 같은 전자현미경이 널리 사용되고 있다. 나노섬유의 표면 형태(morphology)를 관찰할 수 있는 주사현미경의 소개는 여러 총설에서 소개되었으나 나노섬유 내부의 형태와 결정구조, 그리고 그 결정과 구성 분자들의 배열을 관찰할 수 있는 투과전자현미경에 대한 소개는 미비한 상태이다. 따라서 본문에서는 다량의 나노섬유를 저렴한 가격에 제조할 수 있는 나노기술의 하나인 전기방사에

대한 간단한 소개와 투과전자현미경의 원리, 시료준비, 그리고 투과전자 현미경을 이용한 나노섬유 구조분석의 몇 가지 예를 소개하고자 한다.

2. 나노섬유의 제조

나노섬유(nanofibers) 제조를 위한 방법으로는 템플레이트를 이용한 방법, 분자의 자기 조립성을 이용한 자기조립 방법, 상분리 현상을 이용하는 상분리 방법, 그리고 직접방사에 의한 나노섬유를 제조하는 방법 등이 있다[3]. 직접방사법인 전기방사(electrospinning) 나노섬유 제조 방법은 고분자용액 또는 용융체를 이용하여 수 나노미터에서 마이크로미터의 직경을 갖는 섬유를 손쉽게 대량으로 제조할 수 있기 때문에 기초 연구뿐만 아니라 산업화의 시도가 급격히 증가하고 있다. 전기방사에 의한 나노섬유의 제조 방법은 1934년 Formhals에 의해 처음으로 소개되었으며, 최근에 Reneker와 그 연구진들에 의해 많은 기초 연구가 진행되었다[4]. 현재까지 수백 가지의 다양한 고분자 및 세라믹 나노섬유들이 전기방사법을 이용하여 제조되었다. 전기방사를 위해서는 주사기, 고전압, 그리고 집전판이 필요하며 간략한 모식도를 Figure 1에 나타내었다. 전기방사법에 의한 나노섬유의 제조 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다. 주사기 또는 모세관의 끝에 있는 고분자 용액이 중력과 표면장력 사이에 평형을 이루면 반구형 방울을 형성한다. 전기장이 부여될 때 이 반구형 방울 표면에 전하 또는 쌍극자 배향이 공기층과 용액의 계면에 유도되어 전하 또는 쌍극자의 반발로 표면장력과 반대되는 힘을 발생시킨다. 따라서 모세관 끝에 매달려 있는 용액의 반구형 표면은 테일러 콘(taylor cone)으로 알려진 원추형 모양으로 늘어나게 된다. 임계 전기장 세기 이상에서는 이 반발정전기력이 표면장력을 극복하게 되면서 하전된 고분자 용액의 젯(jet)이 테일러 콘 끝에서 방출된다. 이 젯은 점도가 낮은 용액의 경우에는 표면장력 때문에 미세방울로 붕괴된다. 그러나 점도가 높은 용액의 경우, 젯이 붕괴되지 않고 집전판을 향하

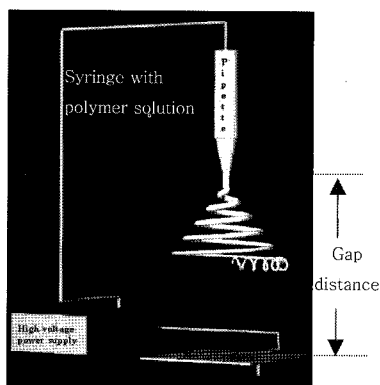


Figure 1. Schematic diagram of a standard laboratory electrospinning set up.

여 공기 중을 날아가면서 용매가 증발하게 되고 집전판에는 하전된 고분자의 연속상 섬유가 쌓이게 된다[5]. 전기방사법을 이용한 나노섬유 제조에 있어서는 여러 가지의 인자가 있으며, 주요 인자로서는 용액의 농도, 주사기와 집전판 간의 거리(gap distance), 용액의 유속, 그리고 전압 등이 있다. 따라서 전기방사법에 영향을 미치는 주요 인자들을 최적화 함으로써 나노섬유의 크기를 조절할 수 있다. 전기방사에 미치는 자세한 원인과 그 영향들을 Table 1에 나타내었다.

3. 전자현미경의 이해

나노섬유의 분석기술 중에 주사전자현미경은 시편의 표면

Table 1. Cause and effect of electrospinning process parameters[6]

Parameters	Effects
Gap distance	Inversely proportional to bead formation density Inverse to the electric field strength Inversely proportional to fiber diameter
Flow rate	Directly proportional to the electric current Directly proportional to the fiber diameter Inversely related to surface charge density Inversely related to volume charge density
Voltage	Inversely proportional to surface charge density Direct effect on bead formation AC potential improved fiber uniformity Inversely related to fiber diameter
Concentration of polymer	Directly proportional to the fiber diameter Power law relation to the fiber diameter Cube of polymer concentration proportional to diameter
Ionic strength	Directly proportional to charge density Inversely proportional to bead density
Solvent	Effects volume charge density Directly related to the evaporation and solidification rate
Temperature	Inversely proportional to viscosity Uniform fibers with less beading Viscosity parabolic relation to diameter and spinning ability

을 전자로 주사하여 표면의 형태를 관찰할 수 있으며, 이는 전자선이 시편에 충돌하면서 생성되는 여러 전자와 전자기파 중에서 이차전자(secondary electron), 후방산란전자(back scattering electron)의 신호를 이용하여 시편표면의 입체적 상을 얻는 나노분석장치 중 하나이다[7]. 또한 EDS (energy dispersive spectrometer) 및 WDS(wavelength dispersive spectrometer)를 통한 특정 X선을 이용하여 수 마이크로미터(μm) 크기의 국부 영역까지 시료에 분포한 화학성분의 정성 및 정량적인 정보를 얻을 수 있다.

투과전자현미경은 수 피코미터(pm) 정도의 매우 짧은 파장의 전자선이 투과할 수 있도록 수백 나노미터 정도의 두께로 얇게 만든 시료(metal, ceramic, semiconductor 등의 bulk, thin film, powder 형태의 시편)에 투과시킨 후, 자계렌즈를 이용하여 수백만 배 이상으로 확대하여 미세형상, 두께, 결정립, 전위, 쌍정, 석출물, 적층 결합, 계면 등의 각종 결정 결합의 크기와 형태를 관찰할 수 있다. 얻어진 전자회절상을 이용하여 결정성, 격자상수 및 결정면 간격 측정, 대칭성 분석을 통하여 결정 구조를 분석할 수 있다. 또한 전자선을 시편에 쬐일 때 나오는 특정 X선이나 전자를 분광분석기를 사용하여 그 에너지의 크기와 세기를 분석하면 전자선이 쬐이는 미소 영역의 구성 원소의 종류와 그 농도를 측정할 수 있다. 물질의 미세조직과 관련하여 고분해능 투과전자현미경(high resolution transmission electron microscope, HRTEM)으로는 원자크기 정도의 미세조직과 약 $1,000 \text{ nm}^3$ 이하의 작은 부피를 구성하고 있는 미세조직 구성성분에 대하여 구조와 화학성분을 정량화 할 수 있다. 최근 EELS(electron energy loss spectrometer)를 부착한 분석용 TEM의 발달은 회절을 이용한 전통적인 구조분석을 뛰어 넘어 재료의 화학결합 및 전자 구조를 밝히는 단계에 이르고 있다[2]. 또한 EELS와 병행하여 HRTEM을 이용할 경우 나노미터 길이단위보다 더 작은 길이 단위에서의 구조분석이 가능하다. 하지만 고분자와 같은 유기물의 경우에는 전자선에 그 안정성이 취약하기 때문에 특별한 시료의 전처리가 필요하다. 따라서 그 사용이 금속이나 세라믹에 비해서 제한적이다.

SEM과 TEM 분석기기의 주요구성 및 장비의 차이를 Figure 2에 나타내었다[8]. Figure 2의 모식도에서 보여주듯이, 전자선이 TEM의 경우 시료를 투과하여 대물전자렌즈에 의해 형상화 되지만, SEM의 경우 전자선이 시료를 투과하지 않고 시편의 표면과 충돌하면서 생성되는 이차전자와 후방산란전자를 감지하여 이를 영상화한다. 따라서 TEM은 시편 전체의 형태 정보를 포함하고 있지만, SEM은 시편의 표면 형

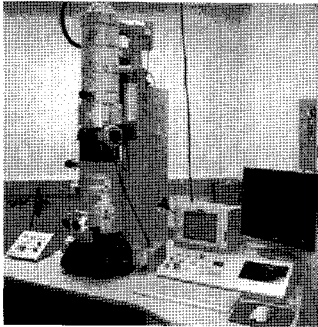


Figure 2. TEM apparatus and schematic diagram between TEM and SEM[8].

태에 대한 정보를 제공한다. 300 nm 이상의 직경을 갖는 고분자 나노섬유의 경우에는 TEM의 사용이 제한되는데 그 이유는 전자선이 두꺼운 부분은 투과하지 못하기 때문이다. 이에 반해 SEM은 시편의 두께와 상관없이, 손쉽게 시편을 준비할 수 있기 때문에 수백 나노미터 직경의 나노섬유의 관찰에 많이 사용되고 있다.

4. TEM 시편 준비

투과전자현미경의 관찰에 있어서는 시료의 제작이 매우 중요하다. 양호한 상을 얻기 위해서는 시료의 형상, 경도, 그리고

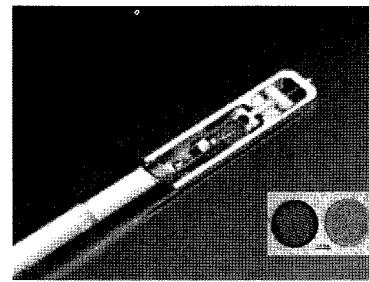


Figure 3. TEM grid holder and copper grid with and without carbon coating [10,11].

관찰목적 등을 고려하여 전자선이 충분히 투과할 수 있는 얇은 시료를 준비할 필요가 있다. 시료에 따라서 화학적인 고정과 염색이 필요한 경우도 있다. 시편은 대개 무결정 탄소 박막으로 코팅된 구리(Cu)로 만들어진 그리드(grid)에 부착시킨 뒤 시편 지지대를 공기 잠금장치(air lock)를 통하여 TEM 기둥(column)내로 넣고, 다시 진공을 유지시킨 뒤 현미경의 시편판(specimen stage)으로 이동시킨다(Figure 3). 시편판은 x, y 방향으로 약 10 nm 단위로 이동이 가능하며, 회전 및 기울기 변화가 가능하다. 유기물인 고분자를 포함한 세라믹스, 금속, 광물들의 시편에서는 확대된 영상만이 중요하지 않고 영상과 함께 원자의 배열에 따른 전자회절 패턴이 중요하므로 이중 뒤틀기 시편판(double-tilt specimen stage)이 필요불가결하며, 또한 전자빔과 시편과의 상호작용에 의하여 열이 발생하기 때문에 열적 진동에 따른 이미지(image) 및 회절패턴의 흐려짐(blurring)을 방지하기 위하여 저온 이중뒤틀기 시편지지대(cold-stage double-tilt specimen holder)를 사용하면 좋다[9].

Table 2. Sample preparation for TEM[12]

박막시편의 구분		시편준비 방법
단면시편		박막을 직사각형 모양으로 두 개씩 잘라낸 후 초음파 세척기로 세척한 후 에폭시(epoxy)를 이용하여 분석하고자 하는 단면이 서로 마주보도록 접착시킨다. 에폭시가 굳으면 접착된 시편을 슬라이드 글라스 위에 부착하여 앞면과 뒷면을 각각 기계적으로 연마(polishing)한다. 다음으로는 기계적 연마가 끝난 시편을 구리 그리드에 붙인 뒤 시편을 슬라이드 글라스에서 떼어낸 후 이온 연마한다.
평면시편	화학적 방법	<ol style="list-style-type: none"> 1. 시편을 그리드의 크기로 잘라 박막면을 슬라이드 글라스에 부착한다. 2. 기판쪽을 연마한 뒤 미세한 분말로 마무리 연마한다. 3. 에폭시로 그리드에 부착한 후 슬라이드 글라스에서 떼어낸다. 4. 랙커를 테프론 봉에 바른 후 연마된 면이 노출되도록 시편을 올려놓고 그리드 및 시편의 가장자리를 랙커로 발라 보호하면 시편의 중앙부분만 노출된다. 5. 에칭용액으로 에칭한다. 6. 용액에 담궈 테프론에서 제거한 다음 충분히 세척한다.
	이온연마	<ol style="list-style-type: none"> 1. 시편을 그리드의 크기로 잘라 박막면을 슬라이드 글라스에 부착한다. 2. 기판쪽을 기계적으로 연마한 뒤 미세한 분말로 마무리 연마한다. 3. 에폭시로 그리드에 부착한 후 슬라이드 글라스에서 떼어낸다. 4. 이온빔을 기판쪽 한 방향에서만 가해서 이온연마한다.
	금속시편	금속의 두께가 수 마이크로미터가 되도록 롤링을 하여 직경이 3 mm가 되는 디스크로 만든다. 이 디스크의 양면을 가볍게 샌딩한 후 에칭 용액을 사용하여 제트 연마기 등 다양한 전해연마방법으로 적절한 온도를 선택하여 전해 연마한다.
	분말시편	미세한 분말을 만들어 엉기지 않도록 분산매에 잘 분산시킨 뒤, 그리드에 코팅하여 관찰한다.
고분자 나노섬유 시편	서로 다른 2가지 이상의 고분자 혼합물이나 블록 공중합체 고분자를 이용하여 나노섬유를 제작하였을 때는 이미지의 명함을 주기 위해서 선택적으로 특정 고분자 블록을 OsO ₄ 나 RuO ₄ 등으로 스테인잉(staining)하여야 한다.	

재료에 따른 자세한 시편준비는 크게 단면(cross section)과 평면(plan view) 시료로 나누어 준비될 수 있으며, 박막 재료의 평면시편은 화학적 방법, 이온연마, 금속 및 분말시편으로 나누어 준비될 수 있다. 이중 화학적 방법은 이온 연마 과정에서 생기는 오염을 줄일 수 있으며 시편 준비 시간을 단축할 수 있는 방법으로 Si 기판을 사용한 박막 시편은 기판을 에칭(etching)하여 박막만 얻는 방법이다. 특히 고분자와 같은 유기 물질은 농도가 낮은 용액을 비결정성 탄소가 코팅된 구리 그리드에 올려 시료를 준비할 수 있다. 자세한 시편준비 과정은 Table 2에 나타내었다.

5. 나노섬유의 전자현미경 및 투과전자현미경을 이용한 응용의 예

5.1. SEM을 이용한 형태 연구

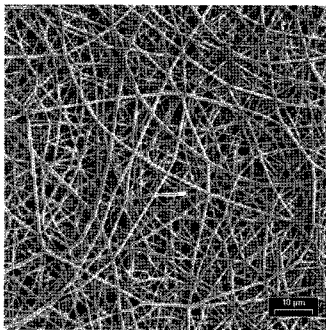


Figure 4. Scanning electron microscopy (SEM) of poly(ε-caprolactone) nanofibers by electrospinning[13].

Figure 4는 주사전자현미경(SEM)의 한 예를 보여주는 이미지로 전기방사법을 이용해서 만든 PCL 나노섬유이다. 일반적으로 시료의 미세조직을 관찰할 때 SEM을 이용하면 시료표면의 형태만을 보게 된다(Figure 4). 이를 통해서 나노섬유의 크기와 표면의 형태를 분석할 수 있다.

5.2. SEM을 이용한 성분분석

SEM에 부수적으로 정착된 EDX(energy dispersive X-ray microanalysis)를 이용하여 시료의 표면에 있는 원소들의 성분을 정량적으로 분석할 수 있다. Figure 5에 catalytic converter의 성분을 EDX로 분석한 결과를 나타내었다[14].

5.3. TEM을 이용한 형태 및 SAED

Figure 6은 TEM을 이용하여 전자선이 시료를 통과한 주 전자선을 영상화하여 나타낸 사진(bright-field TEM image)이다. 알루미늄 나노섬유에 팔레디움옥사이드(PdO) 나노입자가 분포된 것으로 나노섬유의 직경과 나노 입자의 크기 및 분포를 보여주고 있다.

Figure 7에서는 알루미늄 나노섬유에 균일하게 분포된 PdO 나노입자가 결정성을 갖는지 만약 결정이라면 어떠한 형태의

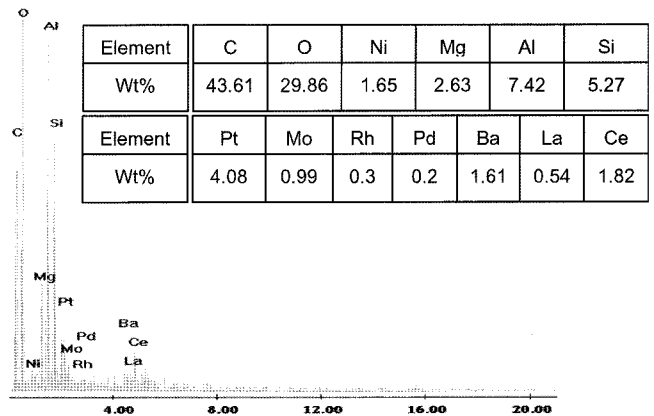


Figure 5. EDX analysis of the conventional honey-comb catalytic converter.

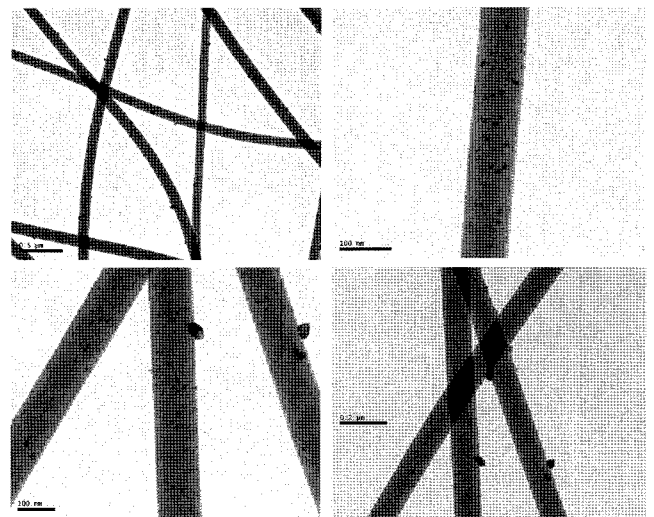


Figure 6. TEM images at different magnifications of palladium oxide doped alumina nanofibers calcined at 600 °C[15].

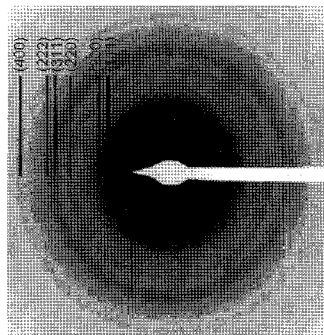


Figure 7. Selected area electron diffraction(SADE) pattern of palladium oxide doped on amorphous alumina nanofibers calcined at 600 °C and hydrogenated.

결정인지를 분석하기 위해서 TEM의 기술 중의 하나인 SAED(selected area electron diffraction)를 이용한 분석이다. 이는 X선 회절에 비해서 수십 나노미터 단위의 국부 면적에서 시료의 결정성과 분자들의 배열을 볼 수 있다는 장점이 있어 최근 그 사용이 급증하고 있다. 회절의 원리는 X선 회절과 동일하며, 단지 X선 대신에 전자선을 사용한

다. 이 SAED 패턴은 TEM의 관찰모드를 회절모드로 변환시켜 TEM 스크린 위에서 특별한 조작 없이 자연스럽게 볼 수 있다. 그러나 좀 더 정확한 분석을 하고자 하면 먼저 원하는 시료에서 낮은 지수(low index)의 정대축(ZA, zone axis)을 맞추어 특정 정대축에서의 SAED 사진을 얻는 것이 중요하다. 이 SAED 사진의 정대축은 키구찌선(kikuchi line)을 이용하면 좀 더 쉽게 찾을 수 있다. Figure 7은 PdO 결정성 나노입자를 함유한 비결정 알루미늄 나노섬유에서 측정된 SAED 사진이다. 결정성인 PdO로부터 회절된 회절원선이 나타나는데 이때 면간거리(d-spacing)는 0.225, 0.195, 0.138, 0.117, 0.112과 0.097 nm이고 이들의 밀러지수(miller index)는 (111), (200), (220), (311), (222)와 (400)으로 나타내어진다. 이러한 데이터로부터 격자상수(lattice constants)인 a, b, 그리고 c는 0.389 nm이고 α , β , 그리고 γ 는 모두 90° 임을 알 수 있다[15]. 이러한 SAED의 결과들은 X선회절(X-ray diffraction, XRD)로부터 측정되는 값과 일치함을 알 수 있다. X선($\text{CuK}\alpha$, 0.154 nm)에 비해 TEM(200 kV, 0.0025 nm)은 극히 짧은 파장을 이용하게 되므로 매우 작은 회절각을 가지게 된다[2].

5.4. Bright field와 dark field TEM 영상

가장 일반적으로 사용되는 TEM의 사진 기술은 bright-field image이다. bright-field image는 전자선이 TEM 시편에서 산란과 굴절을 하지 않고 똑바로 관통한 주 전자선을 이용하여 영상을 만드는 방법으로 그 이름이 말하여 주듯이 사진이 밝게 나온다. 이에 반해서 사진 영상에 분자의 배열결정구조를 동시에 이미지로 분석할 수 있는 TEM 기술이 있는데 이를 dark-field image이다. bright-field image와는 상반되게 짙은 사진이 어둡게 나오고 특정 부분만 밝게 나온다. bright-field image는 시료를 관통한 전자선을 이용하여 사진 영상을 구현하는 반면에 시료의 결정 격자에 의해서 회절된 전자선을 이용하여 사진 영상을 만들어 낸다. dark-field image가 어둡게 나오는 이유는 bright-field image보다는 상대적으로 적은 양의 전자선을 사용하기 때문이다. 따라서 회절 현상이 일어나지 않는 비결정성 물질에서는 dark-field image를 얻어 낼 수 없으며, 선택된 회절 전자선은 dark-field image에서 어둡게 나타난다. 이와 같은 dark-field image를 이용하면 특정 결정 격자의 배향이 사진 영상에서 어떻게 위치해 있는지를 역공간(reciprocal space)이 아닌 삼차원의 실제공간(real space)에서 직접적으로 관찰할 수 있다. bright-field image와 dark-field image의 한 예를 Figure 8에 나타내었다[16,17].

고분자의 유기물질은 고배율을 사용하면 에너지가 높은 전

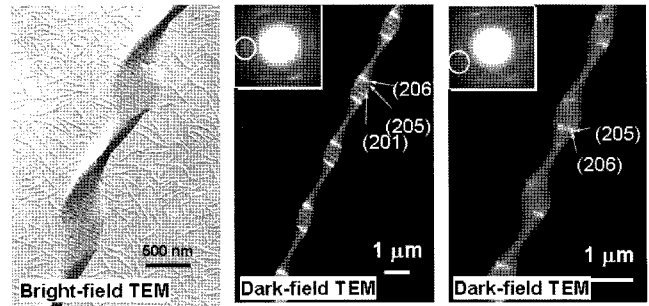


Figure 8. Helical structures from chiral polyesters.

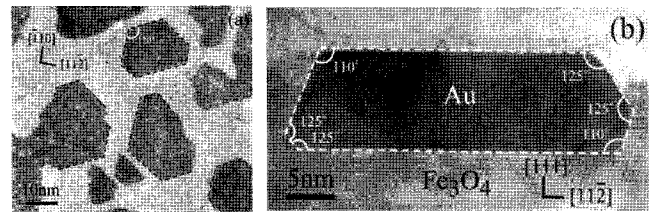


Figure 9. (a) TEM plane view micrograph, and (b) cross-sectional HRTEM micrograph of Au grains grown at 750°C on the $\text{Fe}_3\text{O}_4(111)$ surface.

자선에 의해서 유기 분자 사슬이 깨어지기 때문에 HRTEM의 사용이 매우 제한적이지만 전자선에 상대적으로 안정한 금속이나 세라믹의 경우는 HRTEM을 사용하여 1 nm 이하의 시료 구성원소들의 결정구조와 배열을 직접 실제공간(real space)에서 관찰할 수 있다. 그 한 예로 사삼산화철(Fe_3O_4)에 분포된 금가루(gold grain)의 HRTEM bright-field 이미지를 Figure 9에 나타내었다[18].

6. 맺음말

나노구조분석 기술은 나노재료의 디자인 및 제조기술 개발 등 신소재 구조의 특성을 해석하는데 중요한 기술 기반이 되고 있다. 위에서 소개한 최첨단의 전자현미경들을 이용한 분석법을 적극적으로 활용함으로써 신소재 전반에 걸친 기술개발을 더욱 발전시키고 산업화하는데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글 : “이 총설은 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행되었음”

(지역거점연구단육성사업/헬스케어기술개발사업단)

참고문헌

1. KOTEF, 기술과 미래, 4, (2006).
2. J. P. Ahn, J. K. Park, *Polymer Science and Technology*, 17, 493, (2006).

3. G. H. Lee, I. T. Jung, S. H. Shim, K. B. Yoon, *Polymer Science and Technology*, **19**, p.25, (2008).
4. J. Doshi, PhD dissertation, University of Akron, (1994).
5. 이민석, 전기방사에 의한 나노섬유 제조 방법.
6. K. M. Sawicka, P.Gouma, *Journal of Nanoparticles Research*, **8**, p.769, (2006).
7. <http://user.dankook.ac.kr/~enerdine/sem.htm>
8. http://mic.nichd.nih.gov/graphics/jeol_1010_tem.jpg
9. <http://super.gsnu.ac.kr/lecture/microscopy/temart-3c.html>
10. http://www.vcbio.science.ru.nl/images/10-tem_grid_zoom.jpg
11. <http://www.gatan.com/knowhow/knowhow12/images/nanoprobe.jpg>
12. http://hrtem.kaist.ac.kr/lab_homepage/characterization.htm
13. C. M Hsu, S. Shivkumar, *J. of Materials Science*, **39**, p.3003, (2004).
14. S. J. Park, S. Bhargava, G. G. Chase, *Applied Catalysis A: General* (submitted).
15. S. J. Park, S. Bhargava, E. T. Bender, G. G. Chase, R. D. Ramsier, *Journal of Materials Research*, **23**, p.1193, (2008).
16. C. Y. Li, S. Z. D. Cheng, J. J. Ge, F. Bai, J. Z. Zhang, I. K. Mann, F. W. Harris, L. C. Chien, D. Yan, T. He, B. Lotz, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, p.4558, (1999).
17. C. Y. Li, S.Z.D. Cheng, J. J. Ge, F. Bai, J. Z. Zhang, I. K. Mann, F. W. Harris, L. C. Chien, B. Lotz, *J. Am. Chem. Soc.*, **122**, p.72, (2000).
18. C. Gatel, E. Snoeck, *Surface Science*, **601**, p.1031, (2007).

● 박수진 -----

1996. 전남대학교 정밀화학과 졸업
 2001. 광주과학기술원 환경공학과(석사)
 2008. University of Akron, 화학공학과(박사)
 2008-현재. 전북대학교 헬스케어기술개발사업단 Post Doc.
 e-mail : psj0905@gmail.com

● 정 광 운 -----

1998. 전남대학교 정밀화학과 졸업
 2000. 광주과학기술원 신소재공학과(석사)
 2005. University of Akron, Polymer Science(박사)
 2006-2007. Massachusetts Institute of Technology, Post doc.
 2007-현재. 전북대학교 고분자나노공학과 전임강사

● 김 학 용 -----

1981. 전북대학교 섬유공학과 졸업
 1983. 서울대학교 섬유공학과(석사)
 1993. 서울대학교 섬유공학과(박사)
 1995-1997. 삼양그룹 의약연구소 실장
 1997-1998. 삼양그룹 섬유연구실 실장
 2004-2005. Univ. of Massachusetts(Amherst), 교환교수
 1998-현재. 전북대학교 섬유소재시스템공학과 부교수
 2004-현재. 지방연구중심대학 헬스케어기술개발사업단 사업단장