

투과전자현미경과 전자회절을 이용한 고분자 구조분석

정광운

1. 서론

최근 나노 기술의 연구와 응용이 활발히 진행되고 있는 가운데 나노미터 길이 단위에서의 분자배열과 결정구조를 규명하고 제어하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 이러한 욕구를 충족시켜주고 연구자의 눈이 되어줄 수 있는 분석기기 중의 하나가 전자현미경이다. 현미경으로는 가시광선을 사용하는 광학 현미경(optical microscope), 시료의 표면 형태를 분자단위에서 관찰할 수 있는 원자간력현미경(atomic force microscope), 그리고 전자선을 사용하는 주사전자현미경(scanning electron microscope)과 투과전자현미경(transmission electron microscope) 등이 있다.

광학현미경은 일반적으로 가시광선(visible light)을 이용하여 마이크로미터 길이 단위에서 시료의 표면뿐만 아니라 용적(bulk)에서의 구조형태(morphology)와 분자배열 등의 정보를 제공할 수 있다. 고정밀 scanning probe의 원리를 이용하는 원자간력현미경은 물질표면의 이차원적 표면 구조형태 정보뿐만 아니라 옹스트롬(Å) 길이 단위에서의 표면 원자배치 정보를 제공한다. 또한 원자간력현미경은 시료의 표면을 처리하지 않고 자연 상태 그대로 관찰이 가능하다는 장점이 있다. 전자선을 사용하는 주사전자현미경은 이차전자(secondary electron), 후방 산란전자(back-scattered electron), X-선, 가시광선, 그리고 적외선 에너지(infrared energy) 등의 서로 다른 전자선에 의해 유도된 신호로부터 표면의 이차원적 구조형태 정보를 제공할 수 있기 때문에 시료의 표면관찰, 화학물질의 조성, 전기적 성질, 그리고 물질의 구조와 특성의 상호관계를 규명할 수 있다.

투과전자현미경은 시료를 투과한 전자선으로부터 명암대비 이미지를 얻는 것으로 분해능은 0.3~0.1 nm이다. 이때 투과전자현미경의 분해능은 가속 전압으로 결정되며 전자선의 파장과 가속전압의 관계는 식 (1)로 나타낼 수 있다.¹

$$\lambda(\text{nm}) = 1.23/\sqrt{V} \quad (1)$$

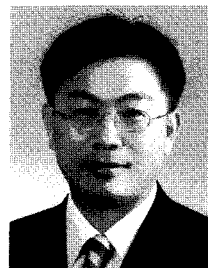
가속전압이 높을수록 파장은 짧아지고 이 결과로 분해능은 향상된다. 가속전압이 높으면 투과능이 향상되어 보다 두꺼운 시료를 관찰

할 수 있지만, 높은 전압으로 가속된 전자선과의 상호작용으로 고분자 물질은 쉽게 분해될 수 있다. 일반적으로 고분자와 생체 물질을 관찰하기 위해서 100~200 kV을 가속전압으로 사용하는 투과전자현미경을 사용하며, 전자선의 에너지에 의해 분해되지 않는 금속과 같은 무기재료 물질은 200~300 kV의 가속전압으로 유도된 전자선을 이용하는 고분해능 투과전자현미경(HRTEM)을 주로 사용한다. 각 현미경들의 특성들은 표 1에 나타내었다.

투과전자현미경의 구조는 그림 1에서 보는 바와 같이 기본적으로 네 가지의 구성요소와 기타 구성요소로 되어있다. 기본적인 네 가지의 구성요소는 광원, 집속렌즈, 대물렌즈, 그리고 대안렌즈(투사렌즈)가 있으며 기타 구성 요소로는 집속조리개, 대물조리개, 중간조리개, 감지기, 시편실, 그리고 기록장치 등이 있다.

투과전자현미경 기능에는 미세 구조형태 분석을 위한 영상분석(명시야상(bright field image), 암시야상(dark field image)), 결정구조 분석을 위한 전자회절 분석(selected area electron diffraction, SAED), 화학성분 분석을 위한 에너지 분산 분광법(energy dispersive spectroscopy, EDS), 그리고 에너지 손실 전자 분광법(electron energy loss spectroscopy, EELS) 등이 있다. 결정구조 분석을 위해 사용되는 SAED는 XRD(X-ray diffraction) 등과 상호 보완적으로 사용될 수 있다.

SAED와 XRD는 산란 파동을 이용한다는 점에서 유사하다. SAED의 전자 파장(0.0037 nm, 100 kV)은 X-선(0.154 nm, Cu)의 파장



정광운

1998 전남대학교 정밀화학공학과(학사)
 2000 광주과학기술원 신소재공학과(석사)
 2005 University of Akron, Polymer Science (박사)
 2005~2006 Maurice Morton Institute of Polymer Science (박사후연구원)
 2006~2007 MIT 재료공학과(박사후연구원)
 2007~2009 전북대학교 고분자나노공학과(전임강사)
 2009~현재 전북대학교 고분자나노공학과(조교수)

Polymer Structure Analysis Utilizing TEM and SAED

전북대학교 고분자나노공학과 (Kwang-Un Jeong, Department of Polymer-Nano Science and Technology, Chonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea) e-mail: kujeong@chonbuk.ac.kr

표 1. 현미경들의 주요 특성²

기구	광학현미경	전자투과현미경	주사전자현미경	원자간력현미경
Lateral resolution	300 nm	0.5 nm	4 nm	4 nm
Magnification	2~2,000	200~2×10 ⁶	20~1×10 ⁵	1,000~2×10 ⁶
Observation	표면, 투명한 bulk	bulk, 얇은 필름 (300nm 이하)	표면	표면
Specimen environment	투명한 액체/필름	높은 진공	높은 진공	고체/액체
Radiation damage	없음	매우 심함	심함	없음
Specimen preparation	간단	매우 어려움	간단	간단
Chemical analysis	X	O	O	X
Detect molecular orientation	O	O	X	X

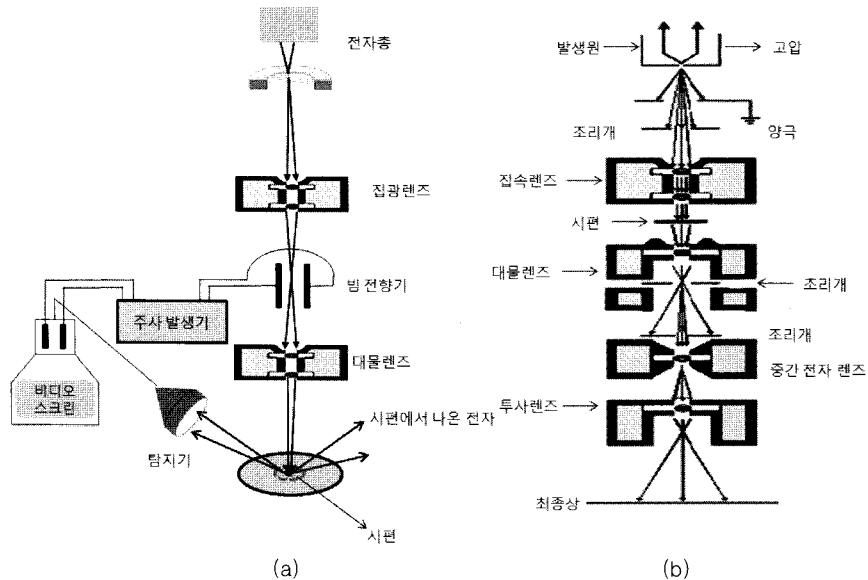


그림 1. 주사전자현미경(a)과 투과전자현미경(b)의¹ 구조 모식도.

보다 짧기 때문에 SAED에서의 Ewald sphere 반지름은 더 크며, SAED($0 \sim 2^\circ$)의 회절각은 XRD($0 \sim 180^\circ$)의 회절각에 비하여 작다. XRD에 사용되는 X-선은 전자구름과 상호작용하는 반면 SAED에 사용되는 전자선은 전자구름과의 상호작용뿐만 아니라 양성자와도 상호작용을 하기 때문에 XRD 보다 많은 정보를 얻을 수도 있다. 하지만, 전자선은 X-선 보다 높은 에너지를 가지고 있기 때문에 고분자의 결정구조와 고분자 사슬을 쉽게 분해한다. 또한, 고분자는 수백 마이크로미터 크기의 결정을 만들 수 없기 때문에 고분자의 긴축방향으로 연신하여 결정을 한축 방향으로 정렬시킨 후 XRD를 이용하여 결정구조와 분자배향을 분석한다. 이때 보정 시편을 이용하여 측정하고자 하는 결정의 격자간격(d-spacing)을 매우 정확하게 측정할 수 있다. 반면 SAED는 극소 시료 영역(수백 나노미터의 지름) 분야에서 이미지가 관찰되기 때문에 고분자 결정구조와 대칭구조의 정보를 실험적으로 얻을 수 있다. 또한, SAED 이미지는 투과전자현미경에 보이는 명시야상을 통하여 어느 부분을 관찰하고 있는지 알 수 있으며 관찰된 영역의 시편에서 분자들의 배향이 어떻게 이루어졌는지를 알아낼 수 있다. 따라서, SAED와 XRD, 광학현미경, 주사전자현미경, 그리고 투과전자현미경 등의 정보를 융합하여 해석함으로써 다양한 길이 단위에서의 고분자 물질의 구조형태와 배열구조를 규명하고 제어할 수 있다. 본고에서는 나노미터 길이 단위에서 고분자 물질의 구조형태와 분자배열 상태를 규명하는데 널리 사용되고 있는 투과전자현미경과 SAED에 관하여 알아보려 한다.

2. 영상 분석

2.1 명시야상(Bright Field Image)

텅스텐으로부터 방출된 전자는 여러 방향으로 산란된다. 산란된 모든 전자는 대물렌즈 뒤쪽에 있는 초점면의 한 곳에 모이게 된다. 그림 2(a)에 나타난 것과 같이, 대물조리개가 중앙에 놓이면 광축에 인접한 전자만이 통과하고, 산란된 전자는 대물조리개에 의해 차단되어 산란되지 않은 전자만이 시료를 투과한다. 이때 얻어지는 상이 밝게 나타나기 때문에 명시야상이라 불린다. 명시야상은 나노미터 길이 단위에서 시료의 실상(real space) 구조형태(morphology) 정보를 보여주기 때문에 고분자를 이용한 BT, IT, 그리고 NT의 모든 분야에서 가장 광범위하게 이용되고 있는 기술이다. 또한, 실상을 보여주는 명시야상은 전자가 시료를 투과하기 때문에 시료 표면의 정보를 포함하는 용적(bulk)의 구조형태에 대한 정보를 제공한다. 그림 2(b), (c)에서 보여주는 것처럼 두꺼운 시료 부분이 얇은 부분과 인접해 있을 때 두꺼운 부분을 투과한 전자들은 산란되어 조리개를 통과하지 못해 그 부분이 어두운 상을 띄는 반면에 얇은 부분을 투과하는 대부분의 전자는 진행 방향을 벗어나지 않고 밝은 상을 띄게 된다. 즉, 명시야상에서의 대비는 시료의 국지적 두께와 전자밀도에 의해서 결정된다. 고분자의 비결정영역은 결정보다 전자밀도가 낮기 때문에 비결정영역이 약간 밝게 보이는 경향이 있다. 하지만, 고분자의 경우에는 비결정영역과 결정영역의 전자밀도차가 크지 않기 때문에 전자밀도가 높은 물질을 사용

하여 선택된 영역만을 얼룩지게(staining) 하는 방법을 사용하기도 한다.

2.2 암시야상(Dark Field Image)

암시야상은 **그림 3(a)**에 나타난 것과 같이 시료가 결정체일 때 조리개가 회절된 전자선의 중앙에 놓이면 광축에 가까운 전자는 조리개에 의해 막히고 회절되어 선택된 전자만이 통과하게 된다. 이렇게 선택된 회절 전자를 이용하여 상을 만들기 때문에 어두운 이미지를 얻게 되고 이를 암시야상 이라고 한다(**그림 3**). 암시야상은 상대적인 상(reciprocal space)에 나타난 결정 분자배열 구조의 정보를 실상의 이미지로 나타낼 수 있기 때문에 시료의 구조형태와 관찰하고 있는 시료 영역 내에서의 분자배열 구조 정보를 동시에 나타낼 수 있다. 암시야상은 상세하게 보기 어려운 구조를 분석할 때 그 대비를 선명하게 나타내기 위해서도 사용되며, 시편의 전위나 적층결함과 같은 결함 구조를 분석할 때 또한 유용하게 사용된다. 하지만, 비결정체의 경우 전자가 회절이 되지 않기 때문에 암시야상은 결정을 함유한 시편에서만 사용될 수 있다.

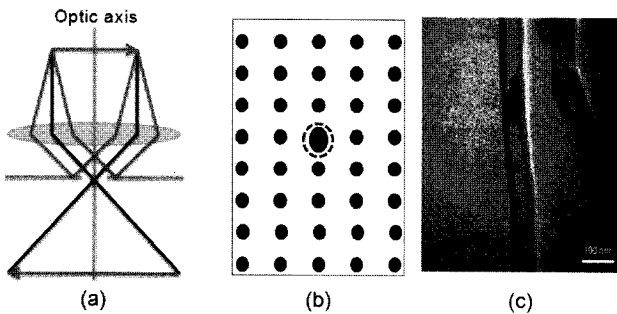


그림 2. 명시야상 원리(a); SAED 이미지 (b); 명시야상 이미지(c).⁵

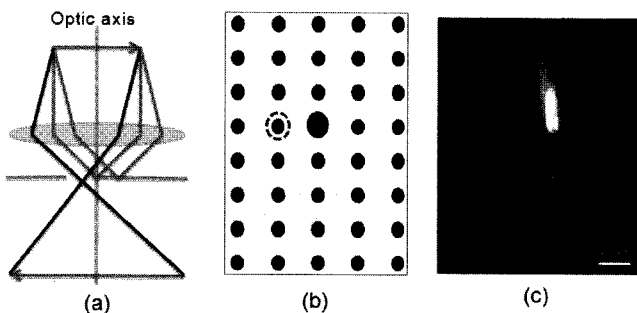


그림 3. 암시야상 원리(a); SAED 이미지 (b); 암시야상 이미지(c).⁵

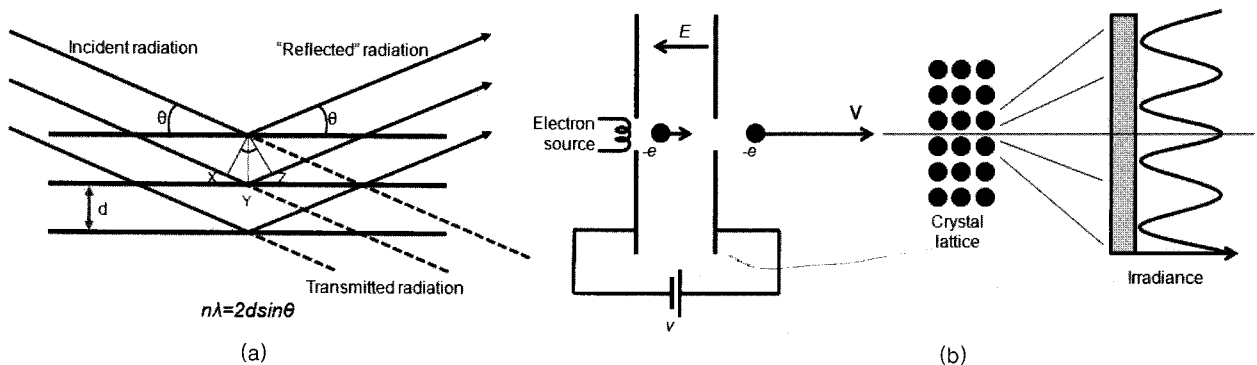


그림 4. Bragg의 법칙(a)과¹ 전자회절의 일반적 개념 모식도(b).

3. 전자회절(Electron Diffraction) 분석

3.1 전자회절의 원리

고분자 결정체와 전자와의 간섭작용으로 형성된 전자회절 이미지의 분석을 통해 고분자들이 실상의 특정한 결정 단위격자 안에서 어떻게 배열되어 있는지를 알아낼 수 있다. 전자회절 격자는 상대적인 정보를 제공하고 시료가 고분자 결정을 포함하고 있을 때 전자회절 이미지는 실상의 명시야상 이미지보다 더 중요한 구조형태 및 결정구조의 정보를 제공한다. **그림 4**에 나타난 것과 같이 전자회절의 원리는 Bragg의 법칙으로 간단히 설명될 수 있다.

그림 4(a)에 나타난 것과 같이, 단위격자를 기준으로 한 입사각과 반사각은 동일하며 전자의 최초 진행 방향을 고려하면 전자는 20만큼 산란된다. 이때 시료의 한 면과 가장 인접한 다른 면 사이의 거리는 d 로 명시하고 n 은 전자를 방출하는 물질의 고유 숫자이며 λ 는 전자의 파장이다. Bragg식에서 입사각(θ)과 파장(λ)을 알면 알고자 하는 시료의 인접한 면과 면 사이의 거리 d 를 구할 수 있다. SAED에서 Ewald sphere의 반지름이 $1/\lambda$ 로 매우 크기 때문에 회절된 많은 전자선이 동시에 관측되며, SAED에서 산란되는 전자각(2θ)은 XRD의 회절각 보다 매우 작기 때문에 **그림 5**에서 보는 바와 같이 s 값은 무시될 수 있다.³

여기서 회절된 전자선의 편차는 2θ 이고, 회절 무늬는 시료로부터 L 만큼 떨어진 상태에서 회절 이미지가 나타난다. 또한, 회절 전자선과 입사 전자선은 x 만큼 위상차를 보이므로 아래와 같이 식 (2)로 쓸 수 있다.

$$x = L2\theta \cong L \frac{\lambda}{d} \quad (2)^3$$

x 값, L 값을 측정하면 결정체의 면과 면 사이의 거리 d 를 구할 수 있다. SAED의 회절 이미지는 주로 고분자 단결정의 이차원 구조를 이차원의 형태로 나타내기 때문에 삼차원 고분자 결정구조의 정보를 이차원 검출기에 나타내는 XRD 이미지보다 간단하다. 따라서, SAED의 해석은 XRD의 해석보다 상대적으로 간단하다. 다양한 방향에서 측정된 이차원 SAED의 결정 정보를 종합함으로써 완벽한 삼차원 고분자 결정구조의 분석이 가능하다. 하지만, 이러한 과정은 전자선의 에너지가 높기 때문에 수 초 내에 고분자 결정 이미지 관찰을 완료해야 하는 어려움이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 다음과 같은 세 가지 방법으로 시료를 준비한다. 첫째는 전도성이 우수한 금(gold), 탄소(carbon), 파라듐(Pd), 그리고 백금(Pt) 등을 이용하여 시료를 코

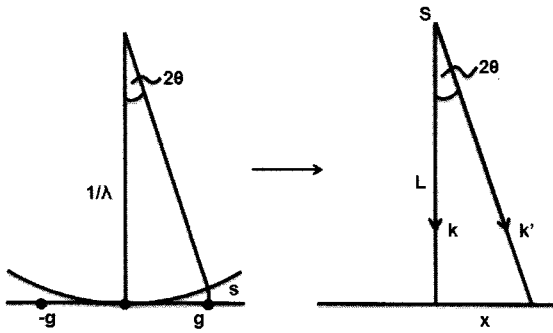


그림 5. 전자회절 조건.³

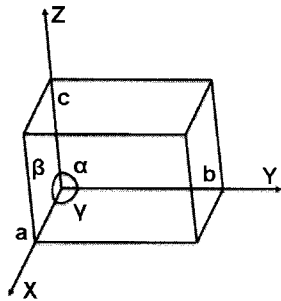
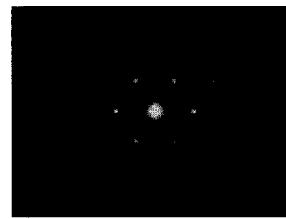
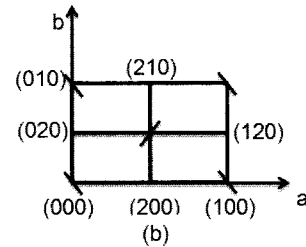


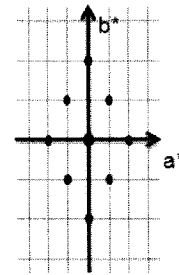
그림 6. [abc] zone의 3차원 모식도.³



(a)



(b)



(c)

그림 7. 폴리에틸렌 단결정의 [001] zone SAED 이미지(a), [001] zone 실상(b)과 역격자상(c)의 분자구조 모식도.²

탕한다. 이와 같은 전도성 코팅물질들은 전기 전도도가 크기 때문에 전자선에 의해 쉽게 손상될 수 있는 고분자 시편의 손상을 최소화할 수 있다. 둘째, 고분자 물질은 전자선에 수 초 동안 노출되면 분해되기 때문에 SAED 이미지를 얻기 위해서는 로우도스(low dose) 기술을 이용하여야 한다. 이 방법은 시편이 있는 영역이 아닌 다른 영역에서 모든 SAED 촬영 준비를 끝낸 후 전자선의 초점을 흐리게(defocusing) 한 후 고분자 시편이 있는 영역으로 옮겨 전자선의 초점을 순간적으로 맞춤으로써 전자회절 이미지를 얻는 방법이다. 마지막으로 고분자 결정 시편의 분해를 최소화하기 위해서 에너지가 낮은 전자선을 사용하는 방법이 있다. 하지만, 이와 같은 방법은 명시야상 관찰시 분해능이 떨어지는 단점이 있다.

3.2 전자회절 분석(Interpretation of Electron Diffraction)

고분자를 이루는 한 단위 격자면에 대하여 삼차원적으로 x, y, z축을 a, b, c 방향이라고 하면 전자 회절에 의해서 보여지는 면을 [a, b, c] zone이라 한다(그림 6).^{2,3}

결정체는 여러 겹의 면으로 이루어져 있으며 결정체에 전자가 입사되면 전자는 회절되어 결정체의 면에 수직 방향으로 일련의 점으로 나타난다. 실제 영역과 역격자 영역은 Miller Index에 의해서 좌표상 그 역수 관계를 보인다. 즉, (h, k, l) → (1/h, 1/k, 1/l)이 된다. 실례로 그림 7(a)는 사방정계 단위 셀을 갖는 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 단결정의 [001] zone SAED 이미지를 나타낸 것이다. 이 좌표에선 a와 b방향의 좌표만 표시되고 c방향은 보는 방향과 평행하여 모두 상쇄된다. 실상의 단위 시료에서는 그 좌표가 가장 바깥쪽을 1로 하고 안쪽으로 들어 갈수록 큰 숫자를 취한다. 그러나, 역격자 영역에서는 바깥으로 갈수록 큰 숫자를 쓴다. 예를 들어 실상에서는 a방향이 b방향보다 길지만 역격자 영역에서는 b방향이 a방향보다 길어진다. 또한, (200)지점에서는 회절점이 나타나고 (100) 영역에서는 회절점이 나타나지 않는다. 그 이유는 (200)와 (100)의 전자 밀도가

같기 때문에 그림 7(a)에서 (100)의 회절은 소멸된다(그림 7).

4. 고분자 재료의 TEM 시편 제작

투과전자현미경에서 사용하는 전자선은 에너지는 크지만 투과도가 낮기 때문에 고분자 시편을 제작하는데 있어 300 nm 이하의 균일한 두께를 갖는 고분자 시편이 요구된다. 투과전자현미경을 이용한 고분자 관찰시 주로 사용되는 시편의 제작 방법으로 solution grown crystal, solution cast film, 그리고 ultramicrotome 등이 있다.²

먼저, solution grown crystal은 희박용액에서 고분자 결정이 성장하는 방법으로 균일한 모양과 크기의 단결정을 얻기 위해서 self-seeding 방법이 주로 사용되고 있다(그림 8). 예를 들면, 결정성이 높은 high density polyethylene(HDPE)을 120 °C의 자일렌(xylene) 용매에 녹인 후, 용매를 빠른 속도로 식히면 얇은 막형태의 작은 고분자 결정이 형성된다. 고분자 결정을 함유한 용액을 T_S (self-seeding 온도)까지 높이면 고분자 결정의 씨(seed)만을 남긴 채 모두 용해된다. 이러한 용액을 다시 T_C (결정화 온도)까지 낮추어 고분자를 성장시키면 균일한 형태의 단결정을 만들어 낼 수 있다. 결정의 두께와 형태는 결정화 온도, 용액농도, 그리고 분자량에 의해 결정된다.^{4,5}

Self-seeding 방법을 이용하여 형성된 고분자 단결정의 예로 PEO(poly(ethylene oxide))와 PLLA(poly(L-lactic acid))의 명시야상

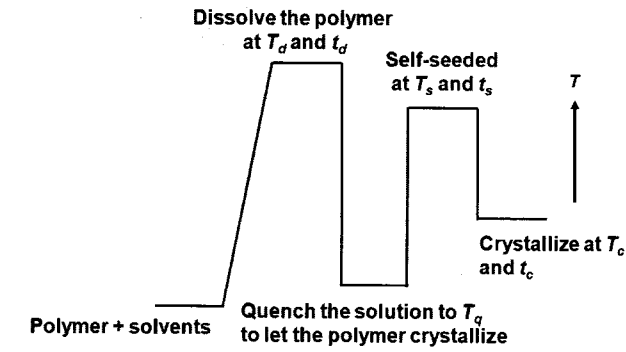


그림 8. Self-seeding 방법을 이용한 고분자 단결정 형성 모식도.

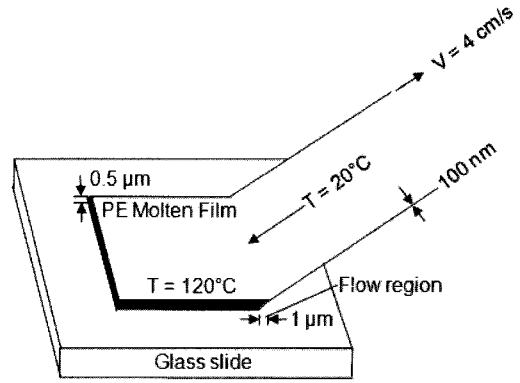


그림 11. 연신에 의해 배향된 고분자 박막의 제작 모식도.²

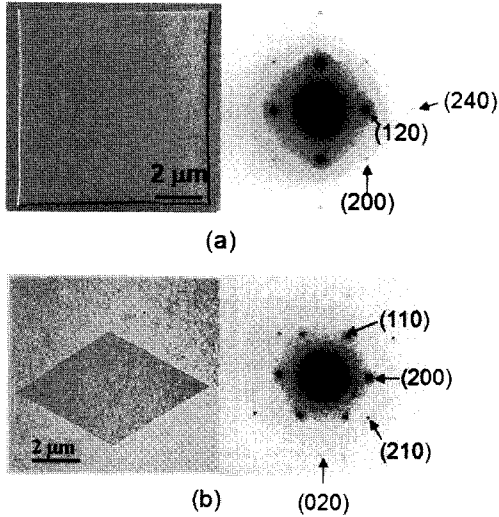


그림 9. Self-seeding 방법으로 형성된 PEO(a); PLLA(b) 단결정 명시야상과 각각의 SAED 이미지.^{4,6}

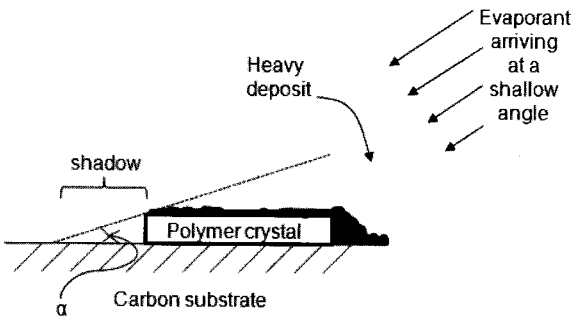


그림 10. Shadowing 방법 모식도.²

을 그림 9에 나타내었으며, 이들의 SAED을 또한 각각 나타내었다.^{4,6} 희박용액에서 형성된 고분자 결정은 지지 필름이 코팅된 그리드(grid) 위에 있어 투과전자현미경 관찰을 하게 된다. 코팅 재료로는 탄소가 많이 사용되고 있으며, 그리드 위에 코팅된 5~20 nm 두께의 얇은 비결정 탄소 박막은 전자가 잘 투과하고, 전자 회절이 일어나지 않아 투과전자현미경의 야상과 회절상에 영향을 미치지 않는다. 또한, 탄소는 전도도가 우수하기 때문에 전자선에서 고분자 결정의 수명을 연장시키는데 도움이 된다. 고분자 단결정의 두께가 수십 나노미터 이하이기 때문에 명암이 뚜렷한 명시야상 이미지를 얻기 힘들다. 이러한 문제를 해결하고, 높은 에너지의 전자선에서 고분자 결정의 수

명을 최대화하기 위해서 shadowing 방법이 주로 사용된다. 팔라듐이나 탄소를 그림 10에 나타낸 것과 같이 특정 증발각도로 고분자 결정 위에 코팅한다.² 여기서 shadow 길이와 증발 각도(α)로부터 결정의 두께($L = \text{shadow 길이} \times \tan \alpha$)를 계산할 수 있다.

두 번째 투과전자현미경 시료의 준비 방법으로는 solution cast film (그림 11)이 있다. 300 nm 이하의 얇은 고분자 박막을 만든 후 열처리기를 통하여 고분자 결정화를 하는 방법이다. 결정화된 고분자 시료를 연신함으로써 특정방향으로 분자들을 배향하여 관찰하기도 한다. 하지만, 고분자의 경우 100% 결정화가 이루어질 수 없기 때문에 대부분의 고분자는 비결정과 결정으로 이루어져 있다. 결정과 비결정의 전자밀도차가 크지 않기 때문에 결정과 비결정 영역의 명암대비를 향상시키기 위해서 전자밀도가 높은 금속화합물을 이용하여 특정 영역을 선택적으로 얼룩지게(staining)함으로써 명암대비를 향상시킬 수 있다.

녹는점(T_m)이 낮은 비결정의 고분자 시료의 경우 투과전자현미경으로 결정과 비결정을 구분하는 데에는 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 staining 방법이 또한 사용될 수 있다. 녹는점이 낮은 cis-polyisoprene을 결정화하고 osmium tetroxide(OsO_4)로 비결정 영역만을 선택적으로 staining함으로써 결정과 비결정 영역의 전자밀도차를 높일 수 있다. 또한, 녹는점 이상에서 결정 영역이 녹아 비결정화된 후에도 녹는점 이하에서 비결정 영역이었던 곳에 얼룩이 남아 있기 때문에 구조형태의 분석이 가능하다.

마지막으로 예리한 칼을 이용하여 용적의 고분자 시료를 300 nm 이하의 얇은 박막으로 절단하여 투과전자현미경 시료를 준비하는 ultramicrotome 방법이 있다. 고분자 복합체나 용적이 큰 고분자 시료의 내부 구조형태와 결정구조의 정보를 얻고자할 때 많이 이용되는 투과전자현미경 시편 제작 방법이다. 유리전이온도가 낮은 고분자의 투과전자현미경 시편을 준비하기 위해서 고분자 시편과 칼을 냉각시켜 절단하기도 한다. 결정성을 보이는 고분자는 결정과 비결정 영역으로 구성되어 있기 때문에 얇은 박막으로 자르는데 어려움이 있다. 또한, 자르는 동안에 시료의 구조형태와 결정구조가 변하지 않도록 특별한 주의가 요구된다. 일반적으로 시편을 자르는데 사용되는 칼은 가격이 저렴한 유리칼이지만 유리는 공기 중에서 산화가 일어나기 때문에 시간이 지난 후에는 칼이 무뎠다는 단점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 다이아몬드 칼을 사용하기도 한다. 시편을 자르기 위해 고정시키는데 어려움이 있을 경우는 경도를 조절할 수 있는 예폭시 수지로 고분자 시편을 감싼 후 원하는 두께의 박막으로 절단하여

투과전자현미경 시편을 제작하기도 한다.

5. 결론

고분자 재료는 무기 재료에 비하여 역사가 짧지만, 많은 발전과 연구가 지속되어 왔으며 최근에는 전자공학, 광학, 기계공학, 화학공학, 나노공학, 의학 등과 융합하여 그 쓰임새가 광범위하게 확산되고 있다. 고분자 재료의 용적, 계면, 그리고 표면의 삼차원 구조형태와 분자배열을 분석하고 제어함으로써 원하는 특성을 분자단위에서 조절하고자 하는 연구가 최근에 집중되고 있다. 고분자 결정의 분자배열과 결정구조를 규명하는데 가장 널리 사용되고 있는 기기는 투과전자현미경이다. 투과전자현미경을 이용한 미세 구조형태의 정보를 제공

하는 실상으로는 명시야상과 암시야상이 있다. 명시야상은 나노미터 길이 단위에서의 시료의 실상의 구조형태 정보를 제공하며, 암시야상은 상대적인 상에 나타난 결정 분자배열 구조의 정보를 실상의 이미지로 나타낼 수 있다. 투과전자현미경의 기능 중에 많이 사용되는 또 다른 기능은 SAED이다. SAED는 마이크로미터 크기의 국부적인 영역에서의 회절 이미지를 얻을 수 있고, 회절 정보로부터 고분자 결정의 분자배열과 대칭구조를 알아낼 수 있다. 이와 같은 SAED

의 장점과 결정격자 간격을 매우 정확하게 측정할 수 있는 XRD의 장점을 동시에 활용함으로써 다양한 길이 단위에서 고분자 구조형태와 결정구조를 규명하고 제어할 수 있다. 투과전자현미경과 전자회절의 분석 방법을 고분자 연구에 효과적으로 활용함으로써 그 응용 범위를 넓히고 있는 고분자 재료의 연구와 개발을 가속화할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. J.-P. Ahn and J.-K. Park, *Polymer Science and Technology*, **17**, 493 (2006).
2. Linda C. Sawyer and David T. Grubb, *Polymer Microscopy*, Chapman & Hall, London, 1987.
3. D. Campbell, R. A. Petrick, and J. R. White, *Polymer Characterization*, Chapman & Hall, London, 1989.
4. Bernard Lotz, *Ph.D. Dissertation*, Institute Charles Sadron, (1968).
5. <http://www.optics.rochester.edu/.../chris/fig%206.jpg>.
6. Stephen Z. D. Cheng, *Phase Transitions in Polymers: The Role of Metastable States*, Elsevier, Amsterdam, 2008.