

AFM을 이용한 Tribology 연구동향

문 승 호[†]

Trend of Tribology Studied Using Atomic Force Microscopy

Seung-ho Moon[†]

1. 서 론

현재 Scanning Probe Microscopy (SPM)를 이용한 물질의 표면 및 계면의 기계적 성질에 대한 연구는 나노과학에서 매우 중요한 부분을 차지하는데 흔히 나노메카닉스 또는 나노트리볼로지라고 불리운다. 이는 팁과 표면의 접촉면적이 물질의 기계적성질에 따라 수 나노에서 작게는 Å까지 가능하기 때문이다. 일반적으로 SPM 이라함은 미세 탐침과 시료표면의 물리 또는 화학적 상호관계를 이용하는 기술을 통칭하는데 크게 Scanning Tunneling Microscopy (STM)와 Atomic Force Microscopy (AFM)로 나눌 수 있다. 두 물체의 거리가 양자역학이 적용되는 거리까지 가까워질때 두 점 사이로 전류가 흐르기 시작하며 이때 전류의 세기는 거리에 지수함수적으로 변한다는 사실에 기초하여 이를 이미지화하는 STM 기술이 개발되었다. 하지만 이 경우 표면은 어느 정도 전도성을 가지고 있어야하므로 고분자와 같은 대부분의 비전도성 유기물의 경우에는 적용할 수 없다는 단점을 가지고 있었다. 이를 극복하기 위하여 AFM이 개발되었으며 현재 이들 두 방법은 고체표면의 고화상도 이미지를 얻는데 아주 유용하게 사용되고 있다. 특히 AFM을 바탕으로 하는 기술들은 탐침과 시료 표면이 직접 접촉을 하기 때문에 시료의 modulus, stiffness 등을 구하는데 사용 될 뿐만 아니라 접착 및 마찰 등과 같은 기계적 특성들을 연구하는

데 아주 유용하다. 현재까지 여러 변형된 방법들이 개발되어 표면의 물리화학적 특성 연구에 응용되고 있는데 이를 Table 1에 요약하였다.^[1-55]

고분자의 경우 시료자체의 점탄성특성으로 인해 접촉상태가 이상적인 조건(탄성접촉)에서 크게 벗어 날 뿐만 아니라 실험 결과들이 온도, 습도, 진동수와 같은 실험조건에 민감하므로 AFM을 이용한 고분자 표면의 기계적 특성에 대한 연구의 중요성이 점차 강조되고 있다. 따라서 본고에서는 어떠한 AFM 기술들이 고분자 물성분석에 응용되어지고 있고 이를 통해 어떠한 정보들을 얻을 수 있는지에 대해 알아보하고자 한다.

2. 본 론

일반적으로 AFM 연구에서 가장 광범위하게 적용되는 식들은 contact stiffness, 접촉반경 그리고 modulus 간의 관계식이다.^[24]

$$k_{contact, normal} = 2aE^* \quad (1)$$

$$k_{contact, lateral} = 8aG^* \quad (2)$$

여기서, $E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$,
 $G^* = \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right)^{-1}$ 이며
 E_1, E_2, G_1, G_2 는 팁과 시료의

• 2004년 7월 1일 접수(received)

[†] The University of Akron, Department of Polymer Science

[†] 주저자(Corresponding author): e-mail: seung-ho.moon@nist.gov

Table 1. AFM 기술분류 및 응용

Technique	연구내용	참고문헌	
Indentation	Force-distance	Elastic modulus Humidity effect on $F_{capillary}$ Loading/unloading velocity effect Temperature effect Model adhesive blend Particle deformation Dynamic adhesion Glass Transition	1,2 3-5 6-8 9 10,11 12,13 7,14 9
	Nanoindentation	Oliver-Pharr theory Elastic modulus	15 16
	기타 F-d 관련 technique	IFM PFM Adhesion map F-V CFM	17 19 20 21 22,23
FFM	Friction anisotropy Effect of Topography on friction Stick-slip Force calibration Glass transition	25 24,26 27,28,30 29 26	
Modulation	Z-modulation	Theory Elastic modulus E' , E'' , $\tan \delta$ Surface segregation Surface morphology Molecular weight effect Glass transition SLAM (UFM)	31,32 33,34 35-38 36 37 38 39 32 (40)
	X-modulation ^[28,41,45] (LM-AFM, ^[42] SMFM, ^[43] DSFFM ^[44])	Elastic modulus Shear modulus Viscoelastic modulus (E' , E'') Relaxation time Adhesion study Surface Segregation Glass transition	45 46 47 48 28,49,50 51 43
Hybrid	ac-FD (Z+F-d)	Zero-shear rate storage modulus Elastic modulus	52 33
	Nanoindentation+Z	E' , E'' , $\tan \delta$	16,53
	PFM+DSFFM	Adhesion, (static/dynamic friction)	54,55
	X-F-D	Dynamic adhesion	7,49

Young's moduli 및 shear moduli이며 ν_1 과 ν_2 는 Poisson's 상수이다. $k_{contact, normal}$ 은 normal contact stiffness로서 Force-distance (F-d)^[1-14] 또는 Z-modulation^[31-39]으로 얻을 수 있으며 $k_{contact, lateral}$ 은 lateral contact stiffness로

Friction Force Microscopy (FFM)^[24-30] 또는 X-modulation^[28,41-51]으로 얻을 수 있다. 즉, 시료의 특성값인 modulus를 구하기 위해서는 우선 contact stiffness를 AFM 실험으로 얻어야 함을 알 수 있다.

위 식으로부터 접촉 반경 “ a ”가 아주 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있는데 AFM의 경우 Probe Tack Test 및 Surface Force Apparatus (SFA)와는 달리 contact 반경을 직접 구할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 가능한 방법 중의 하나는 Hertz^[56], JKR^[57] 또는 DMT^[58] 이론식들을 이용하여 가해진 힘에 대한 접촉반경을 계산하는 방법이다. JKR 이론은 표면에너지가 크고 접촉시 큰 접촉면적을 가지는 물질에 잘 맞는 반면 DMT 이론은 표면에너지가 낮고 작은 접촉면적을 가지는 물질에 적합하다. AFM 실험 결과로부터 접촉특성이 JKR 또는 DMT에 적합한지 판단 할 수도 있지만(Carpick,^[59] Troyon^[60]) 고분자의 경우 일반적으로 JKR 이론이 적합하다고 알려져 있으며, 따라서 JKR 식을 이용하여 접촉면적을 계산하기도 한다. 또 다른 방법으로 indentation 방법을 이용하여 침투깊이 (penetration depth, δ)를 얻은 후 간접적으로 “ a ”를 계산할 수도 있다. 만약에 시료가 전도성을 가지고 있을 경우 전도도(contact conductance)를 측정하여 접촉반경에 대한 정보를 얻을 수도 있는데 이는 일반적으로 전도도가 접촉면적에 비례하기 때문이다.

마찰력의 경우 식 (3)에 의해 기술될 수 있는데,^[24]

$$F_{friction} = \tau A = \mu F_n + F_o \quad (3)$$

여기서 A 는 contact area (대개 $A=\pi a^2$)이며 (엄밀히 말하면 multiple asperity contacts의 경우나 wear가 발생하는 경우 $A=\pi a^2$ 이 성립되지 않는다), τ 는 shear strength, μ 는 마찰계수, F_n 은 수직방향에서 가해지는 힘, 그리고 F_o 은 접착력(adhesion force)이다. 위 식은 여러 가지 방법으로 사용 될 수 있는데 가령 접촉면적과 마찰력의 관계로부터 shear strength를 구하기도 하고, 또는 가해진 힘과 마찰력의 관계로부터 마찰계수 및 접착특성을 얻는데도 사용된다. FFM의 경우 실험자체는 매우 간단하지만 응용분야 및 해석방법은 매우 광범위하다. 실제로 트리볼로지라고 불리우는 마찰에 대한 연구는 매우 역사가 깊은 데 현재 FFM 및 SFA의 출현에 힘입어 나노트리볼로지는 영역으로 확대되었다. 이들 분야의 주 연구 목적 중의 하나는 전통적인 개념의 마찰이론들이 나노영역에 어떻게 적용 되어지느냐 그리고 나노 및 마이크로 영역에

서 측정된 값들이 어떠한 상관성을 가지고 있는 나이다.

흔히 pull-off force ($F_{pull-off}$)라고 불리우는 접착력의 경우 아래 식 (4)에 의해서 기술되어 있는데,^[61]

$$F_{pull-off} = F_{interfacial} + F_{capillary} \quad (4)$$

여기서 $F_{interfacial}$ 과 $F_{capillary}$ 는 각각 계면 및 모세관 현상에 의해 생기는 힘에 해당한다. $F_{interfacial}$ 은 팁과 시료표면 사이의 표면에너지에 해당하며 대부분의 고분자의 경우 크기는 6 nN 정도이다. 대기중에 존재하는 물분자로 인해 팁과 시료표면 사이의 메니스커스가 존재하고 이로 인해 또다른 인력인 $F_{capillary}$ 가 존재하는데 상온상압의 경우 9 nN 정도의 크기를 가진다. $F_{pull-off}$ 는 주로 F-d를 이용하여 간단히 측정할 수 있는데 생체고분자의 접착특성, 접착제 표면의 성질 등 두 물체의 접착연구에 가장 활발히 사용되고 있는 기술 중 하나이다.

F-d, FFM, Z-modulation 등의 경우 모두 상용화가 되어 있지만 하드웨어 및 소프트웨어의 보안을 통하여 여러 형태의 변형된 시험들 또한 가능하다. 또한 2~3개의 독립적인 방법들을 효과적으로 합쳐서 여러종류의 정보를 동시에 얻고자 하는 방법들(Hybrid techniques)^[16,33,52-55]도 제시되었는데 이들 각각의 실험방법들의 특징 및 응용방법들을 개략적으로 살펴보기로 한다.

2.1. Force-distance (F-d)

F-d는 nanoindentation^[15-16]의 한 방법으로 이용되는데 AFM을 이용한 nanoindentation의 경우 고화상도의 이미지를 함께 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면에 AFM 자체가 indentation을 위해 특별히 제작된 것이 아니므로 정확도에 있어서는 다소 떨어진다 하겠다. 그럼에도 불구하고 현재 고분자 물성분석에 다양하게 적용되고 있는데 대부분의 모든 경우 Oliver와 Pharr^[15]에 의해 기술된 식들을 이용한다. AFM을 이용한 nanoindentation 분석의 일종으로 Interfacial Force Microscope (IFM)^[17]이라는 방법도 사용되고 있는데 이 경우 반경 100 nm 이하인 유리섬유가 탐침으로 사용된다. 이 방법의 경우 시스템 전체가 기계적으로 매우 안정하기 때문에 훨씬 작은 영역의 힘 및 침투깊이 분석이

가능하게 된다. 한편 F-d 방법을 이용하여 modulus를 구하고자 할 경우(특히 박막시료의 경우) 시료두께에 대한 고려가 반드시 필요한데 일반적으로 시료의 정확한 물성을 측정하려면 침투 깊이가 시료 두께의 10% 미만이어야 한다고 알려져 있다.^[62-63]

F-d를 이용해서 얻을 수 있는 $F_{pull-off}$ 의 경우 그 크기가 실험조건에 아주 민감한데, 따라서 많은 연구자들이 온도^[9] 및 습도^[3-5] 그리고 속도^[6-8]가 접촉특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이때 이들 효과는 매우 크기 때문에 F-d의 전체적인 모양자체도 크게 변하게 되는데 이를 이용하여 고분자의 점탄성거동에 연구들이 가능하게 된다. 예를 들면 PSA 표면연구,^[10-11] 입자 변형,^[12-13] 유리전이,^[9] 그리고 동적(dynamic) 접촉특성^[7,14] 등의 연구들이 보고 되었다.

F-d의 경우 기본적인 원리 자체가 Probe tack 방법과 유사하므로 두 방법들로부터 얻은 결과들을 비교하여 사용하기도 한다. 현재 생체고분자에 널리 적용되고 있는 Single Molecule Force Microscopy^[18] 및 접촉세기를 이미지화 할 수 있는 Pulsed Force Mode (PFM)^[19]의 경우도 F-d 방법을 기초로 하고 있는데 PFM의 경우 다음절의 hybrid technique에서 다시 설명하기로 한다. 팁을 hydrophilic 또는 hydrophobic 말단기를 가지는 alkanethiol $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{-SH}]$ 또는 alkyltrichlorosilane $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{-SiCl}_3]$ 으로 코팅하기도 하는데 이를 Chemical Force Microscopy (CFM)^[22-23] 이라고 한다. 이들 팁을 이용하여 F-d 측정을 할 경우 팁-시료간의 인력에 따라 $F_{pull-off}$ 가 매우 크게 달라지게 된다. 어떤 종류의 유기물을 사용하느냐에 따라 코팅방법도 달라지는데 예를 들면 Si_3N_4 팁에 thiol을 사용할 경우 우선 2~5 nm 정도의 Cr을 코팅한 후 25 nm 정도의 두께로 Au를 코팅하여야 한다. 따라서 이 경우 팁의 크기가 커진다는 단점이 있다. 하지만 silane의 경우 팁표면의 산화물층(SiO_2)에 쉽게 흡착이 됨으로 Au 코팅과 같은 절차는 필요하지 않다. 아주 최근에 산화물층이 필요없는 매우 간단한 silane 코팅방법도 보고 되었다.^[23]

2.2. Friction Force Microscopy (FFM)

FFM은 접촉시 발생하는 캔틸레버의 휨정도가 시료의 기계적 성질에 의존한다는 점을 이용하는

데^[24,30] 일반적으로 토포그래피와 FFM 이미지는 동시에 얻을 수 있다. SFA와 비교할 때 FFM의 가장 큰 장점 중의 하나는 마찰특성에 관한 정보를 고화상도의 이미지와 함께 얻을 수 있다는 점이다. 예를 들면 FFM을 이용하여 friction anisotropy (배향방향에 따른 마찰 변화)를 조사할 수 있는데, Carpick 등은^[25] 폴리디아세틸렌 필름을 이용, 스캔방향이 고분자 주사슬 방향과 수직일때 마찰이 최대가 됨을 보여 주었다. FFM을 이용해 마찰계수 등을 구할 때 사용되어지는 가장 흔한 방법은 friction loop를 이용하는 방법이다.^[24] 시료표면의 굴곡이 lateral force 값에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 최소화 하기 위해서 팁이 (우→좌)로 움직일 때 얻은 이미지에서 (좌→우)로 이동시 얻은 이미지를 빼는 방법도 있다.^[26] Friction 이미지를 이용하여 마찰계수를 얻기도 하는데 스캔하는 동안 수직방향으로 가해지는 힘을 증가 또는 감소시키면서 이미지를 얻은 후 이를 재분석 하면 된다.^[64]

FFM에서 $F_{lateral}$ 값이 극한값(F_c) 값보다 클 경우 sliding이 일어난다. 만약 팁이 움직이는 변위가 매우 작아 $F_{lateral}$ 값이 F_c 보다 작을 경우 팁은 "stick" 조건에 있게 되는데 이때 캔틸레버의 휨정도는 시료(또는 팁)의 변위에 비례한다.^[27] 이 경우 $F_{lateral}$ 와 변위 사이의 기울기($dF_{lateral}/dx$)로부터 $k_{contact}$ 를 계산할 수 있으며 따라서 식 (2)를 이용할 수 있게 된다. 다음 절에서 기술할 X-modulation이 바로 이 방법을 이용하는 것인데 X-modulation을 이용하면 $k_{contact}$ 값을 보다 정확하게 측정할 수 있다.

$F_{lateral}$ 의 경우 대부분의 AFM에서 전압값으로 표시되므로 원하는 물성값들을 계산하기 위해서는 우선 전압값을 힘(Newton)으로 바꾸어 주어야 한다. 이를 위해서는 우선 캔틸레버의 lateral (또는 torsional) 스프링상수 값을 알아야 하며 또한 검출기에서 측정된 전압값을 캔틸레버의 변위값으로 바꾸어 주어야 한다.^[23] 하지만 이러한 작업들은 그리 쉬운일이 아니며 따라서 보다 간편하고 직접적인 방법들이 제시되었다. SrTiO_3 를 이용한 *in situ* 방법^[65] 및 마찰계수를 알고 있는 Si ($\mu_{Si} = 0.18 \pm 0.03$, nN/nN)을 이용하는 방법이 사용되고 있다.^[26]

2.3. Modulation Techniques

Force Modulation Mode (FMM)은 일반적

으로 Z-modulation을 의미하는데 스캔을 하는 동안 팁(또는 시료)을 Z 방향으로 아주 빠르게 (통상 5~20 kHz) 낮은 진폭(10 nm 이하)으로 움직여 준다. 이때 주파수는 스캐닝 주파수보다는 훨씬 빠르지만 캔티레버의 공명주파수보다는 훨씬 아래이다. FMM의 경우 팁이 시료표면과 접촉한 상태에서 진동하므로 캔티레버의 움직임 정도는 시료의 기계적 성질에 따라 크게 좌우된다. FMM에서는 적정 캔티레버의 선정이 중요한데 만약 캔티레버가 시료에 비해 너무 compliant할 경우 시료의 변형은 일어나지 않고 오직 캔티레버의 변형만 일어나게 된다. 반대로 캔티레버가 너무 stiff한 경우 시료의 손상이 일어난다. 일반적으로 고분자의 경우 0.01~1.0 N/m 정도의 스프링상수 값을 가지는 캔티레버가 적합하다. Z-modulation에 대한 상세한 해석은 Burnham에 의해 수식적으로 잘 설명되어 있다.^[31-32] 아주 큰 정밀도를 요하는 실험의 경우 시료 및 캔티레버의 변형에 따른 마찰효과가 실험결과에 큰 영향을 미치는데 이러한 효과는 GHz 정도의 아주 빠른 주파수를 이용하여 최소화할 수 있다. 이를 Scanning Local Acceleration Microscopy (SLAM)^[32] 이라 불리는데 이와 아주 유사한 방법으로 Ultrasonic Force Mode (UFM)^[40] 이라는 방법이 있다. 일반적으로 FMM에서는 시료의 토포그래피 뿐만 아니라 output 신호의 RMS 진폭 및 input과 output 신호사이의 위상차를 얻을 수 있다. 이때 이들 output 값은 시료의 물성에 따라 변하는데 이를 이용하여 elastic modulus^[33-34] 뿐만 아니라 storage/loss modulus, $\tan \delta$ 및 점도와 같은 점탄성 성질들을 구할 수 있다.^[35-38] Kajiyama 등이 이 방법을 이용해 고분자 시료에 대한 많은 연구를 하였는데 예를 들면 고분자블랜드의 surface segregation,^[36] 상분리된 고분자블랜드의 표면연구,^[37] 그리고 분자량에 따른 surface mobility^[38] 등에 대한 연구를 하였다.

또 다른 modulation 방법 중의 하나는 X-modulation^[28,41,45]인데 이는 여러 다른 이름으로도 불리운다. 예를 들면 Lateral Force Modulation AFM (LM-AFM),^[42] Shear Modulation Force Microscopy (SMFM),^[43] 또는 Dynamic Scanning Friction Force Microscopy (DSFFM)^[44]라고 부르기도 한다. X-modulation의 기본 원리는 FFM에 바탕을 두는데 팁(또는 시료)을 X 방향으로 nm 정도의 진폭을 가지고

움직이며 이때 발생하는 캔티레버의 휨 정도를 분석한다. 이 방법은 현재 상용화된 AFM에서는 불가능한데 이를 위해서는 약간의 하드웨어 및 소프트웨어의 보완이 필요하다. X-modulation은 Z-modulation에 비해 몇 가지 장점이 있는데 우선 팁이 표면과 접촉한 후 X 방향으로 oscillation을 하므로 접촉면적이 항상 일정하게 유지되고 있다는 점이다. 따라서 표면의 기계적인 물성값을 계산하고자 할 때 Z-modulation보다는 훨씬 덜 복잡하며^[27,30] Z-modulation에 비해 팁의 침투깊이가 훨씬 작으므로 표면의 물성 분석에 유리하다. 기본적으로 X-modulation은 FFM을 기본원리로 하고 있으므로 마찰 및 접촉 연구에 아주 유용하다. 예를 들면 팁 또는 시료가 움직이는 변위의 크기 정도에 따라 팁은 stick 또는 slip 영역에 있게 되는데 이때 stick에서 slip으로 전환되는 변위의 크기 및 그때의 $F_{lateral}$ 값의 크기는 시료의 modulus 및 팁과 시료간에 작용하는 인력에 의해 결정된다. Lock-in amplifier를 연결하여 진폭($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$) 및 위상차 ($\Theta = \tan^{-1}(Y/X)$)에 관한 정보를 얻을 수 있는데 여기서 X, Y는 각각 in-phase 그리고 out-of-phase 진폭에 해당한다. Z-modulation에 비해 이론적으로 완전히 정립되지 않은 상태이고 따라서 실험의 정확도 및 해석에 있어 다소의 문제점들을 가지고 있지만 X-modulation은 현재 물성분석(elastic modulus,^[45] shear modulus,^[46] viscoelastic modulus^[47]) 뿐만 아니라 유리전이,^[43] surface segregation,^[51] 접착^[28,49-50] 등과 같은 다양한 분야에 적용되고 있다.

2.4. Hybrid Techniques

두 개의 독립된 방법을 동시에 적용할 경우 훨씬 더 정교한 실험이 가능하게 된다. Overney 등은 일반적인 F-d와 Z-modulation를 합한 ac-FD mode라는 방법을 이용하여 confined polystyrene 용액의 zero-shear-rate storage modulus를 구하였으며^[52] Gracias와 Somorjai^[33]도 유사한 방법을 사용하여 polyolefin들의 elastic modulus에 미치는 압력효과를 연구하였다. Modulation 방법은 nanoindentation과 함께 적용되기도 하는데^[16,53] low-density polystyrene의 $\tan \delta$ 및 carbon fiber-epoxy composite의 storage/loss modulus 이미지를 얻는

데 사용되었다. PFM의 경우 스캔하는 동안 아주 빠른 F-d가 연속적으로 진행된다(통상 100 Hz-2 kHz, 10~500 nm). 이때 각각의 지점 (pixel)에서 $F_{pull-off}$ 를 측정하고 이 값을 이용하여 시료의 adhesion map을 얻게 된다. 이를 위해서는 piezo 스캐너를 움직이며 또한 필요한 전기적 신호값들을 실시간으로 기록할 수 있는 추가의 제어장치가 필요한데 현재 상업적으로 실용화 되어 있다. 이 방법의 장점 중의 하나는 각각의 지점에서 팁과 표면의 접촉시간이 매우 짧기 때문에 sticky한 접촉제표면의 mapping이 가능하다고 알려져 있다. 이와 유사한 방법으로 adhesion maps^[20] 및 force-volume mode^[21]가 있는데 어떤 값들을 이용하여 이미지화 하느냐의 차이만 있을 뿐 기계장치 및 실험방법의 기본 개념은 거의 동일하다. 예를 들면 F-V에서는 각 지점에서 얻는 F-d curve의 loading시 경사를 이용하여 modulus mapping을 한다. PFM과 DSFFM(X-modulation)의 결합도 가능한데^[54-55] 이를 이용해 접착 및 static/dynamic friction 등의 여러 정보를 동시에 얻는데 사용되었다. X-modulation과 F-d를 함께 사용하여 adhesive의 특성연구에 이용되기도 하였다.^[7,49] Hybrid 기술의 경우 실험방법이 복잡해짐으로 인해 발생하는 추가의 전기적 잡음 및 piezo의 X와 Z 움직임이 동시에 일어남으로 인해 발생하는 상호간섭 등의 문제가 존재하지만 여러종류의 정보를 동시에 얻을 수 있다는 매우 큰 장점을 지니고 있으므로 아주 유용하다.

3. 향후 연구 동향

AFM은 현재 나노세계를 탐구하는데 있어 가장 유용하게 사용되고 있는 기술 중 하나인데 크게 세 가지 영역으로 구분할 수 있다. 결점(defect) 및 에러(artifact)가 없는 고해상도의 이미지를 얻는 기술 및 시료의 미세 영역에 대한 물리화학적 특성 분석, 그리고 nanofabrication이다. 본고에서 기술한 내용들은 주로 두 번째 영역에 해당하는데 구체적으로 어떠한 AFM 기술들이 사용되어지고 있고 이를 통해 어떠한 정보들을 얻을 수 있는지에 대해 살펴보았다. 대부분의 모든 경우 팁과 시료 사이의 미세접촉을 바탕으로 하므로 시료의 기계적 물성값 뿐만 아니라 접착 및 마찰 특성 등이 주요 연구 대상이 된다. 따라서

이제까지 접근하기 어려웠던 분자수준에서 물리적 이해가 가능해지고 이를 바탕으로 새로운 연구 및 개발 영역이 급속히 생겨나고 있다. 궁극적으로는 실험결과를 정확히 해석할 수 있는 이론적 모델들이 필요하며 또한 기계장치 자체로부터 발생하는 에러요인들을 최소화시켜야 하는 기술들이 필요하다 하겠다. 한편 앞서 기술한 대부분의 방법들은 기본적으로 물리적 힘 또는 특성에 민감한 방법이기 때문에 화학적 정보를 얻을 수 있는 CFM 및 Near Field Scanning Optical Microscopy (NSOM)의 역할이 매우 중요해 질 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. S. A. Chizhik, Z. Huang, V. V. Gorbunov, N. K. Myshkin, and V. V. Tsukruk, *Langmuir*, **14**, 2606 (1998).
2. V. V. Tsukruk, Z. Huang, S. A. Chizhik, and V. V. Gorbunov, *J. Mater. Sci.*, **33**, 4905 (1998).
3. M. He, A. S. Blum, D. E. Aston, C. Buenviaje, and R. M. Overney, *J. Chem Phys.*, **114**, 1355 (2001).
4. L. Xu, A. Lio, J. Hu, D. F. Ogletree, and M. Salmeron, *J. Phys. Chem. B* **102**, 540 (1998).
5. D. L. Sedin and K. L. Rowlen, *Anal. Chem.*, **72**, 2183 (2000).
6. S. Jia and M. D. Foster, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 400 (2002).
7. S. Moon, S. Swearingen, and M. D. Foster, *Polymer*, **45**, 5951 (2004).
8. J. P. Pickering, D. Kruger, B. Anczykowski, H. Fuchs, and G. J. Vancso, *Poly. Prep.*, **41**, 1478 (2000).
9. O. K. C. Tsui, X. P. Wang, J. Y. L. Ho, T. K. Ng, and X. Xiao, *Macromolecules*, **33**, 4198 (2000).
10. A. Paiva, N. Sheller, M. D. Foster, A. J. Crosby, and K. R. Shull, *Macromolecules*, **33**, 1878 (2000).
11. A. Paiva, N. Sheller, M. D. Foster, A. J. Crosby, and K. R. Shull, *Macromolecules*, **34**, 2269 (2001).
12. M. Giri, D. B. Bousfield, and W. N. Unertl,

- Langmuir*, **17**, 2973 (2001).
13. G. Gillies, C. A. Prestidge, and P. Attard, *Langmuir*, **18**, 1674 (2002).
 14. J. P. Pickering and G. J. Vancso, *Macromol. Symp.*, **166**, 189 (2001).
 15. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **7**, 1564 (1992).
 16. J. L. Loubet, W. C. Oliver, and B. N. Lucs, *J. Mater. Res.*, **15**, 1195 (2000).
 17. R. Burns, J. E. Houston, R. W. Carpick, and T. A. Mechalske, *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 1181 (1999).
 18. T. Hugel, M. Grosholz, H. Clausen-Schumann, A. Pfau, H. Gaub, and M. Seitz, *Macromolecules*, **34**, 1039 (2001).
 19. H.-J. Krottil, T. Stifter, H. Waschipky, K. Weishaupt, S. Hild, and O. Marti, *Surf. Interface Anal.*, **27**, 336 (1999).
 20. P. J. De Pablo, J. Colchero, J. Gomez-Herrero, A. M. Baro, D. M. Schaefer, S. Howell, B. Walsh, and R. Reifengerger, *J. Adhes.*, **71**, 339 (1999).
 21. H. Shulha, X. Zhai, and V. V. Tsukruk, *Macromolecules*, **36**, 2825 (2003).
 22. N. J. Brewer and G. J. Leggett, *Langmuir*, **20**, 4109 (2004).
 23. J. E. Headrick and C. L. Berrie, *Langmuir*, **20**, 4124 (2004).
 24. R. W. Carpick and M. Salmeron, *Chem Rev.*, **97**, 1163 (1997).
 25. A. R. Burns and R. W. Carpick, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 317 (2001).
 26. J. A. Hammerschmidt, W. L. Gladfelter, and G. Haugstad, *Macromolecules* **32**, 3360 (1999).
 27. W. N. Unertl, *J. Vac. Sci. Technol.*, A **17**, 1779 (1999).
 28. S. Moon and M. D. Foster, *Langmuir*, **18**, 1865 (2002).
 29. J. L. Hazel and V. V. Tsukruk, *J. Tribology*, **120**, 814 (1998).
 30. M. A. Lantz, S. J. O'Shea, M. E. Welland and K. L. Johnson, *Phys. Rev. B*, **55**, 10766 (1997).
 31. N. A. Burnham, G. Gremaud, A. J. Kulik, P.-J. Gallo, and F. Oulevey, *J. Vac. Sci. Technol.*, B **14**, 1308 (1996).
 32. N. A. Burnham, A. J. Kulik, G. Gremaud, P.-J. Gallo, and F. Oulevey, *J. Vac. Sci. Technol.*, B **14**, 794 (1996).
 33. D. H. Gracias and G. A. Somorjai, *Macromolecules*, **31**, 1296 (1998).
 34. R. M. Overney, E. Meyer, J. Frommer and H.-J. Gntherodt, *Langmuir*, **10**, 1281 (1994).
 35. M. Radmacher, R. W. Tillmann, and H. E. Gaub, *Biophys. J.*, **64**, 735 (1993).
 36. K. Tanaka, A. Takahara, and T. Kajiyama, *Macromolecules*, **31**, 863 (1998).
 37. T. Kajiyama, K. Tanaka, I. Ohki, S. Ge, J. Yoon, and A. Takahara, *Macromolecules*, **27**, 7932 (1994).
 38. K. Tanaka, A. Taura, S. Ge, A. Takahara, and T. Kajiyama, *Macromolecules*, **29**, 3040 (1996).
 39. T. Kajiyama, K. Tanaka, and A. Takahara, *Macromolecules*, **30**, 280 (1997).
 40. K. Yamanaka, H. Ogiso, and O. Kolosov, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 178 (1994).
 41. S. Moon and M. D. Foster, Scanning, accepted.
 42. K. Yamanaka and E. Tomita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 2879 (1995).
 43. S. Ge, Y. Pu, W. Zhang, M. Rafailovich, J. Sokolov, C. Buenviaje, R. Buckmaster, and R. M. Overney, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2340 (2000).
 44. H.-U. Krottil, E. Weilandt, Th. Stifter, and S. Hild, *Surf. Interface Anal.*, **27**, 341 (1999).
 45. P. Mazeran and J. Loubet, *Tribol. Lett.*, **7**, 199 (1999).
 46. Y. Zhang, S. Ge, M. Rafailovich, J. Sokolov, and R. H. Colby, *Polymer*, **44**, 3327 (2003).
 47. C. Basire and C. Frtigny, *Eur. Phys. J. AP.*, **6**, 323 (1999).
 48. K. J. Wahl, S. V. Stepnowski, and W. N. Unertl, *Tribol. Lett.*, **5**, 103 (1998).
 49. S. Moon and M. D. Foster, *Langmuir*, **18**, 8108 (2002).
 50. C. Basire and C. Frtigny, *Tribol. Lett.*, **10**, 189 (2001).
 51. Y. Pu, S. Shouren, M. Rafailovich, J. Sokolov, Y. Duan, E. Pearce, V. Zaitsev, and S. Schwarz, *Langmuir*, **17**, 5865 (2001).

52. R. M. Overney, D. P. Leta, C. F. Pictroski, M. H. Rafailovich, Y. Liu, J. Quinn, J. Sokolov, A. Eisenberg, and G. Overney, *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 1272 (1996).
53. S. A. Syed Asif, K. J. Wahl, R. J. Colton and O. L. Warren, *J. Appl. Phys.*, **90**, 1192 (2001).
54. H.-U. Krottil, Th. Stifter, and O. Marti, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3857 (2000).
55. H.-U. Krottil, Th. Stifter and O. Marti, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 150 (2001).
56. H. Hertz, *J. Reine Angew. Math.*, **92**, 156 (1882).
57. K. L. Johnson, K. Kendall and A. D. Robert, *Proc. Roy. Soc. London, A* **324**, 301 (1971).
58. B. V. Derjaguin, V. M. Muller and Yu. P. Toporov, *J. Colloid Interface Sci.*, **53**, 314 (1975).
59. R. W. Carpick, D. F. Ogletree, and M. Salmeron, *J. Colloid Interface Sci.*, **211**, 395 (1999).
60. O. Pitrement, M. Troyon, *J. Colloid Interface Sci.*, **226**, 166 (2000).
61. S. S. Sheiko, *Adv. Polym Sci.*, **151**, 61 (2000).
62. B. B. Akhremitchev and G. C. Walker, *Langmuir*, **15**, 5630 (1999).
63. J. Xu, J. Hooker, I. Adhietty, P. Padmanabhan and W. Chen, *Mat. Res. Soc., Symp. Proc.* **522**, 217 (1998).
64. R. Lthi, E. Meyer, H. Haefke, L. Howald, W. Gutmannsbauer, M. Guggisberg, M. Bammerlin and H.-J. Gntherodt, *J. Surf. Sci.*, **328**, 247 (1995).
65. D. F. Ogletree, R. W. Carpick, and M. Salmeron, *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 3298 (1996).