

AFM측정에 미치는 모세관힘의 영향

최성림, 최호, 최경수

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《수학, 물리학, 화학, 생물학과 같은 기초과학부문에서 과학기술발전의 원리적, 방법론적기초를 다져나가면서 세계적인 연구성과들을 내놓아야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 40페이지)

원자힘현미경(AFM)이 대기속에서 동작할 때 탐침은 반 데르 왈스힘, 모세관힘, 튜힘을 받는다.

선행연구[1-3]에서는 나노척도에서 반 데르 왈스힘의 모형을 세우고 주사탐침현미분석에 주는 힘의 영향을 분석하였지만 탐침에 작용하는 캔티레버의 튜힘이나 탐침과 시편 사이에 형성된 모세관에 의한 힘과의 관계속에서 고찰하지 못했기때문에 습기있는 환경에서 AFM화상분해능이 떨어지는 원인을 정확히 해명할수 없었다.

논문에서는 원자힘현미경에서 탐침에 작용하는 힘모형을 세우고 각이한 힘들의 크기 관계를 모의하는 과정에 측정에 부정적인 영향을 주는 모세관힘을 기본측정힘인 반 데르 왈스힘과의 관계속에서 고찰하고 실지측정화상을 통하여 대비분석하였다.

1. 접촉상태에서 탐침에 작용하는 힘모형

탐침과 시편이 접촉할 때 탐침에 작용하는 힘모형은 그림 1과 같다.

그림 1에서 F_N 은 시편이 탐침에 주는 힘, F_{VDW} 는 반 데르 왈스힘, F_0 은 모세관힘, F_C 는 탐침에 작용하는 캔티레버의 튜힘이다.

평형상태에서 탐침에 작용하는 이 4개 힘의 합은 령이다. 즉 $F_N = F_C + F_0 + F_{VDW}$ 이다.

반 데르 왈스힘(F_{VDW})은 다음과 같이 표시된다.[2]

$$F_{VDW} = \frac{AR}{D_0^2} \cdot \frac{1}{(1 + D_0/(2R))^2}$$

여기서 D_0 은 탐침의 유효접촉면과 시편계면사이의 거

리(탐침-시편유효거리), R 는 탐침의 곡률반경, A 는 Hamaker상수[3]로서 다음과 같다.

$$A = \frac{3k_B T}{4} \left[\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right] \left[\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \right] + \frac{3\hbar\omega}{8\sqrt{2}} \left[\frac{(n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{\sqrt{n_1^2 + n_3^2} \sqrt{n_2^2 + n_3^2} (\sqrt{n_1^2 + n_3^2} + \sqrt{n_2^2 + n_3^2})} \right]$$

여기서 k_B 는 볼츠만상수, T 는 절대온도, $\varepsilon_i, n_i (i=1, 3)$ 는 탐침과 시편 그리고 탐침과 시편 사이에 있는 모세관물질의 유전률과 굴절률이다.

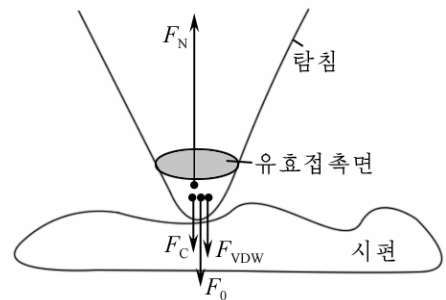


그림 1. 탐침에 작용하는 힘모형

진공속에서 탐침과 시편사이에 작용하는 반 데르 왈스힘 ($\varepsilon_3 = n_3 = 1$) 은 $A > 0$ 이므로 끌힘이다. 임의의 분위기속에서 서로 다른 물질분자들사이에 작용하는 힘은 $n_1 < n_3 < n_2$, $\varepsilon_1 < \varepsilon_3 < \varepsilon_2$ 인 경우와 $n_2 < n_3 < n_1$, $\varepsilon_2 < \varepsilon_3 < \varepsilon_1$ 인 경우 $A < 0$ 이므로 밀힘이다. 그러나 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 < \varepsilon_3$, $n_1, n_2 > n_3$ 인 경우와 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 < \varepsilon_3$, $n_1, n_2 < n_3$ 인 경우 $A > 0$ 이므로 끌힘이다.

우리의 측정조건은 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 < \varepsilon_3$, $n_1, n_2 > n_3$ 인 경우에 해당되므로 반 데르 왈스힘은 끌힘으로 작용한다.

모세관힘(F_0)은 다음과 같다.[1]

$$F_0 = 4\pi R\gamma(1 - D_0/2r_k)$$

여기서 γ 는 결면장력, r_k 는 모세관에서 액체오목면의 반경이다.

캔티레버의 변위에 의하여 생기는 톱힘의 크기는 다음과 같다.[1]

$$F_C = k_C \Delta z$$

여기서 k_C 는 캔티레버의 톱성결수, Δz 는 캔티레버의 변위이다.

이로부터 탐침이 받는 힘은 다음과 같이 표시된다.

$$F_N = \frac{AR}{D_0^2} \cdot \frac{1}{(1 + D_0/2R)^2} + 4\pi R\gamma(1 - D_0/2r_k) + k_C \Delta z$$

이와 같이 탐침이 시편으로부터 받는 힘의 크기는 탐침의 곡률반경, 캔티레버의 톱성결수, 탐침-시편유효거리, 모세관의 직경, 액체의 결면장력, 탐침, 시편재료의 유전률과 굴절률 등에 관계된다.

2. 모의결과 및 분석

논문에서는 MATLAB응용프로그램으로 탐침-시편유효거리에 따르는 힘들을 모의하였다.(그림 2) 계산에서는 탐침의 곡률반경을 100nm, 결면장력결수(방안온도)를 0.07N/m, 액면의 곡률반경은 약 200nm, 캔티레버의 톱성결수는 0.1N/m로 설정하였다.

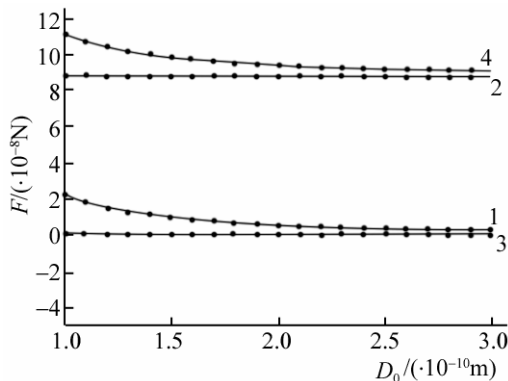


그림 2. 탐침-시편유효거리에 따르는 힘의 크기

1- F_{VDW} , 2- F_0 , 3- F_C , 4- F_N

그림 2에서 보는바와 같이 캔티레버가 탐침에 주는 톱힘은 반 데르 왈스힘보다 100배 작다. 그리고 모세관힘은 반 데르 왈스힘보다 4~20배 크다. 이로부터 캔티레버의 톱힘에 의한 영향은 매우 작으며 기본적으로 모세관힘이 측정화상의 분해능을 높이는데 부정적역할을 논다는것을 알수 있다. 모세관힘의 거리에 따르는 변화률은 반 데르 왈스힘에 비하여 약 1/100정도이다.

탐침과 시편사이의 힘가운데서 모세관힘이 가장 크지만 거리에 따르는 변화률이 매우 작으므로 거리가 가까울수록 탐침이 받는 힘의 변화곡선은 반 데르 왈스힘의 변화곡선과 모양이 같다.

그러므로 유효거리가 작으면 모세관힘의 영향이 반 데르 왈스힘에 비하여 무시될수 있다는것을 알수 있다. 그러나 유효거리가 멀면 반 데르 왈스힘의 영향이 모세관힘과 비슷해지므로 측정가능성이 희박하다.(그림 3)

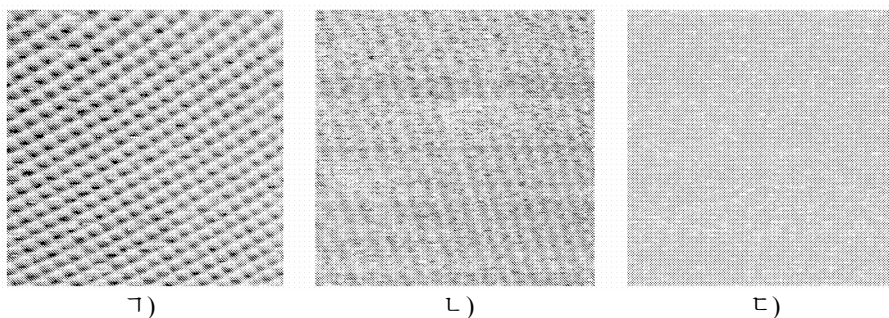


그림 3. 여러가지 조건에서 찍은 화상들
ㄱ) 건조한 환경, ㄴ), ㄷ)는 유효거리가 작은 경우와 큰 경우

그림 3에서 보는바와 같이 모세관힘이 작용하지 않는 경우에는 화상의 해상도가 명백하다. 그러나 모세관힘이 작용할 때 유효거리가 작은 경우에는 잡음이 있기는 하지만 결면 굴곡을 알아볼수 있으며 유효거리가 큰 경우에는 거의나 결면굴곡을 알아볼수 없다.

맺는 말

AFM에서 탐침과 시편이 접촉하였을 때 탐침이 시편으로부터 받는 힘모형을 세우고 MATLAB로 모의하여 모세관힘이 AFM측정에 미치는 영향을 분석하였다. 캔티레버가 탐침에 주는 튜힘은 반 데르 발스힘에 비하여 100배 작고 모세관힘은 4~20배 크지만 거리에 따르는 변화율은 반 데르 발스힘의 약 1/100정도로서 매우 작다. 이로부터 측정화상의 분해능을 높이자면 측정환경이 건조하고 시편결면과 탐침이 정결하여 모세관힘을 없애야 한다.

참고 문헌

- [1] 최경수; 전자공학, 2, 63, 주체105(2016).
- [2] H. A. Ahn et al.; Springer Handbook of Nano-Technology, 北京科学出版社, 916~1014, 2009.
- [3] K. V. Gogolinskii et al.; Nanotechnologies in Russia, 8, 5, 337, 2013.

주체106(2017)년 9월 5일 원고접수

The Effect of Capillary Force on the AFM Measurement

Choe Song Rim, Choe Ho and Choe Kyong Su

We made a force modal that the tip was given by sample when the tip contacted the sample in AFM and simulated the effect of capillary force using MATLAB and analyzed it.

The elastic force that the cantilever gives to the tip is 100 times smaller than Van der Waals force and the capillary force is 4~20 times larger than it. Its changing rate through distance is 1/100 of Van der Waals force, so it is too small.

Key words: Van der Waals force, cantilever, capillary force