

## AFM측정에서 PSD신호와 캔티레버변위사이의 관계해석

최성림, 최호, 최경수

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《나라의 과학기술을 세계적수준에 올려세우자면 발전된 과학기술을 받아들이는것과 함께 새로운 과학기술분야를 개척하고 그 성과를 인민경제에 적극 받아들여야 합니다.》  
(《김정일선집》 증보판 제11권 138~139페이지)

원자힘현미경에서 탐침은 시편을 주사할 때 시편으로부터 힘을 받아 캔티레버를 변위시킨다. 선행연구들[1~3]에서는 캔티레버의 휨변형과 꼬임변형이 시편의 굴곡과 마찰 특성을 반영한다는것을 수학적으로 고찰하였지만 탐침이 받는 구체적인 힘과의 관계속에서 물리적으로 고찰하지 못하였다.

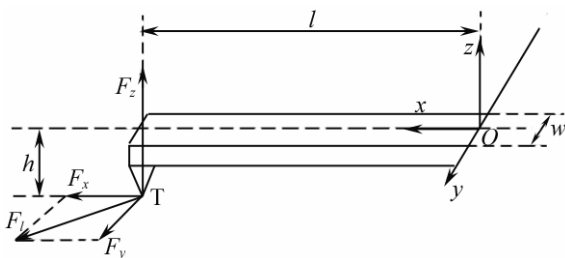
우리는 PSD의 출력신호와 탐침이 받는 힘, 캔티레버의 변위사이의 관계를 해석적으로 밝힘으로써 AFM이 표면미세구조를 관찰할뿐아니라 분석도구로서도 응용될수 있다는 이론적기초를 마련하였다.

AFM탐침에 작용하는 힘의 법선성분은 캔티레버의 용수철모형으로부터 다음과 같이 구할수 있다.

$$F_n = k\delta_z \quad (1)$$

여기서  $F_n$ 은 법선힘,  $k$ 는 캔티레버의 휨성결수,  $\delta_z$ 는  $z$ 방향변위이다.

그림 1에서 탐침끝에 작용하는 힘의 성분들을 각각  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 라고 하면 점  $O$ 에 대한 캔티레버의 회전모멘트 ( $T_x, T_y, T_z$ )는 다음과 같다.



$$\left. \begin{aligned} T_x &= F_y h \\ T_y &= -F_z l - F_x h \\ T_z &= F_y l \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

그림 1. 캔티레버에 작용하는 힘  
 $O$ -기준계의 자리표원점,  $w$ -너비,  $l$ -길이,  
 $h$ -높이,  $T$ -탐침끝

$T_x$ 는 캔티레버끝을  $x$ 축을 회전축으로 각  $\theta_x$ 만큼 회전시키며  $T_y$ 는 캔티레버를  $z$ 축방향으로  $\delta_z$ 만큼 변위시키고  $T_z$ 는 캔티

레버를  $y$ 축방향으로  $\delta_y$ 만큼 변위시킨다.

위치검출기(그림 2)를 리용하면  $\theta_x$ 와  $\delta_z$ 는 다음과 같이 구할수 있다.

$$\theta_x = K_l S_l \quad (3)$$

$$\delta_z = K_n S_n \quad (4)$$

여기서  $K_l$ 과  $K_n$ 은 교정상수들이고  $S_n$ ,  $S_l$ 은 출력신호의 수직성분과 수평성분으로서 다음과 같이 표시된다.

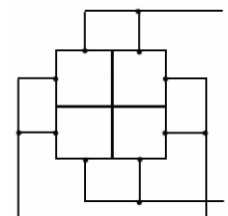


그림 2. 4상한빛전기  
위치검출기

$$S_n = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D}, \quad S_l = \frac{(A+C)-(B+D)}{A+B+C+D}$$

$T_y$ 는  $F_z$ 와  $F_x$ 에 의하여 생기므로  $z$ 방향의 힘  $F_n$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$F_n = -\frac{T_y}{l} = F_z + \frac{h}{l}F_x \quad (5)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하면

$$F_n = kK_n S_n. \quad (6)$$

AFM에 자리표원점을 둔 자리표계와 캔티레버에 자리표원점을 둔 자리표계사이의 관계는 다음의 회전행렬로 결정된다.

$$R = \begin{bmatrix} -\cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & -\cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $\varphi$ 는 AFM상이 측정될 때의 주사각이다. 주사각은 탐침의 대칭축이 AFM에 둔 자리표계의  $z$ 축과 이루는 각이다. AFM에 둔 자리표계에서 탐침의 운동방향의 단위벡터를  $\mathbf{v}_{AFM}$ ,  $R$ 를 캔티레버의 속도크기라고 하면 캔티레버에 둔 자리표계에서 그것의 운동속도는 다음의 식에 의해 구할수 있다.

$$\mathbf{v}_C = R\mathbf{v}_{AFM}$$

캔티레버에 둔 자리표계에서의  $x$ 축에 대한 탐침의 수평방향운동각을  $\phi$ 라고 하면 수평힘  $F_l$ 은 운동방향과 반대이고 그 크기는

$$F_l = F_y / \sin\phi \quad (8)$$

이다. 여기서  $F_y$ 는

$$F_y = \frac{k_l}{h} \theta_x = \frac{k_l K_l}{h} S_l \quad (9)$$

이며  $k_l$ 은 캔티레버의 꼬임결수이다. 이때  $x$ 방향의 수평힘은 다음과 같다.

$$F_x = F_y \tan\phi \quad (10)$$

캔티레버에 둔 자리표계에서 탐침에 작용하는 힘의 성분들은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{k_l K_l}{h} S_l \\ F_y &= -F_y \tan\phi \\ F_z &= kK_n S_n - \frac{h}{l} F_x \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

AFM에 둔 자리표계에서 탐침에 작용하는 힘의 성분들은 다음과 같다.

$$[F_{px}, F_{py}, F_{pz}]^T = R^{-1}[F_x, F_y, F_z]^T \quad (12)$$

이 힘은 캔티레버에 작용하는 실제적인 힘이며 AFM의 힘수감부는 바로 이 힘을 수감한다.

캔티레버의 튜닝결수  $k$ , 꼬임결수  $k_l$  그리고 교정상수들인  $K_n$ ,  $K_l$ 을 구하면 PSD의 출력신호로부터 식 (6)과 (9)에 의하여 탐침에 작용하는 실제힘을 구할수 있다. 튜닝결수는 캔티레버제작자에 의하여 제공되거나 실험적으로 구할수 있다. 교정상수  $K_n$ 은 계산하여 구할수 있고 꼬임결수  $k_l$ 과 교정상수  $K_l$ 은 독립적으로 주어지는것이 아니라 수평힘

과 PSD출력신호사이의 관계식으로부터 얻어진  $\frac{k_l K_l}{h}$ 로부터 구할수 있다.

우에서 고찰한 PSD출력신호  $S_n$ ,  $S_l$  과 탐침에 작용하는 힘, 캔티레버의 변위사이의 관계를 종합적으로 보면 다음과 같다.

$$\delta_z = -\frac{F_z}{k} - \frac{F_x h}{k_l} = K_n S_n \quad (13)$$

$$\theta_x = \frac{F_y h}{k_l} = K_l S_l \quad (14)$$

## 맺는 말

원자힘현미경에서 리용하는 AFM탐침에 작용하는 힘성분들을 분석하여 탐침이 받는 힘과 캔티레버의 변위, PSD신호사이의 관계를 밝혔다. 캔티레버의  $z$ 방향변위는 탐침에 작용하는 힘의  $x, z$ 성분에 의하여 생기며 PSD출력신호의 법선성분  $S_n$ 에 반영된다. 캔티레버의  $x$ 방향회전은 탐침에 작용하는 힘의  $y$ 성분에 의하여 생기며 PSD출력신호의 접선성분  $S_l$ 에 반영된다.

## 참고 문헌

- [1] 최경수; 조선민주주의인민공화국 과학원통보, 3, 33, 주제102(2013).
- [2] A. V. Zablotskii et al.; Measurement Techniques, 56, 3, 122, 2013.
- [3] 赵健; 纳米技术与精密工程, 2, 9, 233, 2011.

주제107(2018)년 6월 5일 원고접수

## Analysis of the Relationship between the PSD Signal and the Displacement of Cantilever in AFM Measurement

Choe Song Rim, Choe Ho and Choe Kyong Su

We investigated the relationships between the forces exerting on the tip, the displacements of cantilever and the PSD signal. The displacement of cantilever in  $z$ -direction is made by the  $x$  and  $z$  components of the forces on the tip and it is reflected by the normal part  $S_n$  of the PSD output signal. The twisting of cantilever in  $x$ -direction is made by the  $y$  component of the forces on the tip and is reflected by the tangential part  $S_l$  of the PSD output signal.

Key words: cantilever, twisting, tip