

주파수응답 분리방법을 이용한 비접촉식 AFM

이성규(ETRI 원천기술연구소), 염우섭*, 박기환(광주과학기술원 기전공학과), 송기봉, 김준호, 김은경, 박강호(ETRI 원천기술연구소)

Non-contact type AFM using frequency separation scheme

Sung-Q Lee (Basic Research Lab., ETRI), WooSub Youm*, Kyihwan Park (K-JIST Mechatronics), Ki-Bong Song, Jun-Ho Kim, Eun-Kyoung Kim, and Kang-Ho Park (Basic Research Lab., ETRI)

ABSTRACT

In this paper, the frequency response separation scheme is proposed for high scanning speed and simple structure of non-contact type of AFM. A self-sensing cantilever is attached on the actuator for detect the atomic force between tip and the media surface. VCM or PZT are used for actuator. This paper presents the method to simplify the actuator structure and the performance of each actuator for non-contact type AFM. Based on the frequency response separation scheme, the only one actuator plays roles following low frequency surface and modulating self-sensing cantilever tip in contrast with convention non-contact type AFM. 10 μm standard grid sample imaged to verify proposed scheme. This result shows the possibility simplifying the actuator structure and reducing cost of non-contact type AFM.

Key Words: AFM, Frequency response separation (주파수응답 분리), Cantilever tip, Gap control (간극 제어)

1. 서론

측정대상의 재질에 관계없이, 그리고 대기 중에서 측정이 가능한 AFM은 시료 준비의 간편성으로 인해 개발된 이후로 지금까지 정보저장장치나 SPL(Scanning probe lithography)과 같이 다양한 분야로의 응용이 지속적으로 시도되고 있다. 특히 정보저장장치 분야에서는 AFM의 단순함과 원자수준의 해상도로 인해 AFM을 정보저장기술에 응용하고자 하는 연구가 활발하다. 그러나 AFM을 정보저장장치에 응용하기 위해서는 우선 데이터의 기록 및 재생을 위한 충분한 속도^(1,2)와 대량생산에 적합한 구조에 대한 연구가 선행되어야 한다.

기존의 비접촉식 AFM은 LD와 PD장치를 이용하므로 광학적인 정렬이 필요하다. 따라서 팁을 고유진동수로 가진 해주는 구동기와 표면을 추종하는 스캐너가 별도로 구비되어야 하고 이 때문에 장치가 복잡해지는 단점을 가지고 있다⁽³⁾. 광학적인 복잡함을 피하기 방법으로 piezo-resistive 재료를 이용해 캔틸레버에 센서를 장착하는 방법이 보고되었지만 이러한 구조에서도 AFM 캔틸레버 팁을 자신의

고유진동수로 가진하는 구동기와 팁과 측정표면간의 간극을 제어하는 구동기가 따로 있었다. 따라서 응답속도에 있어서 한계를 가지고 있었으며 대상체의 표면을 측정하기 위해 다수의 구동기를 구동하기 위한 복잡한 시스템을 구성해야만 했다. 물론 이 두 구동기가 하는 역할을 하나의 구동기로 실현하여 간극을 측정하기 위한 센서와 함께 캔틸레버 팁에 집적시키기 위한 연구⁽⁴⁾가 진행되고 있으나 그 변위가 1 μm 정도의 작은 범위이므로 실용적인 응용에 많은 제한이 있다.

정보저장장치로의 응용을 위해 고속의 주사속도와 대량생산을 위한 단순구조를 가지는 비접촉식 AFM을 달성하기 위해 본 연구에서는 캔틸레버 팁과 측정표면 사이의 간극을 측정하기 위한 센서로 팁에 piezo-resistive 재료가 포함된 self-sensing 팁을 사용하였다. 그리고 하나의 구동기로서 센서인 팁을 가진하는 동시에 팁과 측정표면의 형상을 추종하도록 하기 위해 주파수응답 분리방법을 제안한다 이 방법을 VCM(voice coil motor), PZT에 적용하여 주파수응답 성능으로 AFM 성능을 파악하고 최종적으로 10 μm 표준격자의 표면형상 측정결과를 비교

하여 각 구동기가 AFM 에 적용될 경우의 성능을 비교 한다.

2. 주파수응답 분리방법

기존의 비접촉식 AFM 은 캔틸레버 팁과 측정 표면의 간극제어를 위해서 팁을 가진하는 구동기와 별도의 구동기를 사용해 왔다. 그러나 캔틸레버 팁을 고유진동수로 가진하기 위한 신호는 간극제어를 위한 신호에 비해서 월등히 높은 주파수를 가지고 있다. 따라서 구동기에 팁을 자신의 공진주파수로 가진하는 신호와 팁과 측정표면 사이의 간극을 조절하기 위한 신호를 합하여 동시에 하나의 구동기에 가하게 된다면 구동기는 주로 간극제어를 위한 변위를 가지면서 캔틸레버 팁의 공진주파수로 미세한 변위를 함께 가지게 될 것이다. 동시에 구동기의 캔틸레버 팁의 공진주파수에 해당하는 미세변위로 인해 캔틸레버 팁은 공진되어 팁과 측정표면 사이의 간극을 측정하게 된다. 이것을 본 논문에서는 ‘주파수응답 분리방법’ 이라고 정의한다.

구동기와 캔틸레버 팁을 Fig. 1 과 같이 모델링 하여 수학적 모델을 구해 보면 주파수응답 분리방법을 사용한 시스템의 운동방정식과 전달함수는 다음 식과 같다.

$$M\ddot{x}_a + b_a\dot{x}_a + k_a x_a + b_c(\dot{x}_a - \dot{x}_c) + k_c(x_a - x_c) = F \quad (1)$$

$$m\ddot{x}_c + b_c(\dot{x}_c - \dot{x}_a) + k_c(x_c - x_a) = 0$$

$$\frac{X_a(s)}{F(s)} = \frac{ms^2 + b_c s + k_c}{mMs^4 + (Mb_c + m(b_c + b_a))s^3 + (Mk_c + b_a b_c + m(k_a + k_c))s^2 + (b_a k_c + k_a b_c)s + k_c k_a} \quad (2)$$

$$\frac{X_c(s)}{F(s)} = \frac{b_c s + k_c}{mMs^4 + (Mb_c + m(b_c + b_a))s^3 + (Mk_c + b_a b_c + m(k_c + k_a))s^2 + (b_a k_c + k_a b_c)s + k_c k_a}$$

$$\frac{X_a(s) - X_c(s)}{X_a(s)} = \frac{ms^2}{ms^2 + b_c s + k_c}$$

여기서 F 는 구동기에 가해지는 힘을, x_a, M, b_a, k_a 는 각각 구동기의 변위, 질량, 감쇄계수, 스프링 강성계수이다. 그리고 x_c, m, b_c, k_c 는 각각 캔틸레버 팁의 변위, 질량, 감쇄계수, 스프링 강성계수이다. f_L 은 캔틸레버 팁과 측정표면 사이의 간극을 조절하기 위한 신호이고 f_R 는 캔틸레버 팁을 팁의 공진주파수로 가진하기 위한 신호이다. Fig. 1 에서 나타난 것과 같이 두신호가 합하여진 신호가 시스템에 입력되며 저주파인 f_L 은 주로 구동기의 변위에

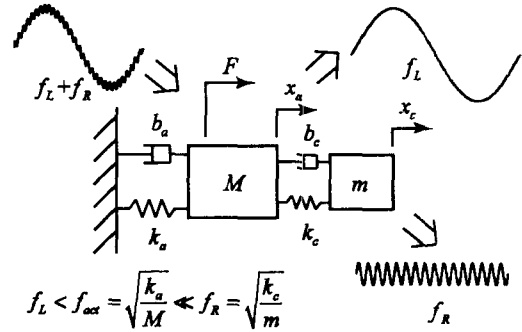


Fig. 1 Dynamic modeling and frequency separation effect by frequency separation scheme

영향을 미친다. f_L 에 비해 상당히 고주파인 f_R 은 캔틸레버 팁의 공진에 영향을 주게 된다. 이렇게 구동기와 캔틸레버 팁의 운동 특성의 차이로 주파수응답이 분리가 되는 것이다.

식 (2)를 통하여 시뮬레이션한 주파수 응답함수가 Fig. 2 에 나타나 있다. 첫 번째 그래프는 구동기의 주파수 응답특성이고 두 번째 그래프는 캔틸레버 팁의 주파수 응답이다. 구동기의 응답과 캔틸레버 팁의 응답이 중첩되어 있는 것은 캔틸레버 팁이 변위의 최종단이기 때문이다.

마지막 그래프는 구동기에 대하여 캔틸레버 팁의 상대적인 변위로 본 주파수 응답이다. 여기서 캔틸레버 팁이 자신의 공진 주파수인 고주파 대역에 대해서만 응답한다는 것을 알 수 있다.

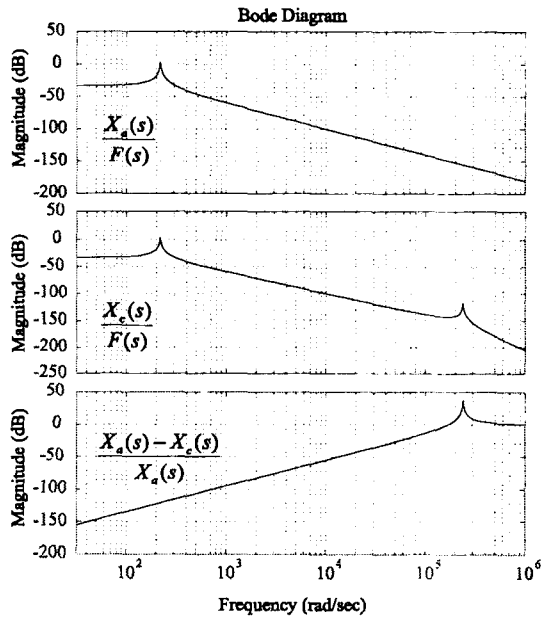


Fig. 2 The simulation result of dynamic modeling

구동기의 특성에 따라서 물론 주파수 응답이 달라질 수는 있겠지만 구동기는 상당부분의 캔틸레버 공진주파수의 신호를 억제하여 캔틸레버만 공진시키고 자신은 이에 대하여 미소한 진동만을 하여 구동기와 캔틸레버 팁이 서로 분리된 주파수 응답을 보여주는 것을 알 수 있다.

3. 실험 장치 구성 및 결과

앞에서 소개된 주파수 응답 분리방법을 실험적으로 확인하기 위하여 Fig. 3 과 같이 실험장치를 구성했다. 캔틸레버 팁과 측정표면 사이의 간극을 측정하기 위해 piezo-resistive 재료가 내장된 캔틸레버 팁을 사용하였고 이를 Wheatstone bridge 회로에 연결, 팁의 변위에 따른 piezo-resistive 재료의 저항 변화를 전기적 신호로 증폭하였다. 이렇게 self-sensing 캔틸레버를 사용하게 되면 기존의 AFM 에서 많이 사용되던 광학적 방법보다 훨씬 단순하게 또한 광학적 정렬에 어려움 없이 캔틸레버 팁과 측정표면 사이의 간극을 측정할 수 있게 된다.

캔틸레버에 직접 연결된 Wheatstone bridge 회로의 신호를 증폭하고 lock-in amp 에서 팁과 측정표면의 간극을 계산하게 된다. Lock-in amp 에서 나오는 신호는 단순 PI 제어기의 입력이 된다. PI 제어기를 거친 lock-in amp 의 출력은 z 방향 구동기에 캔틸레버 팁과 측정표면 사이의 간극을 일정하게 유지하기 위한 신호가 된다. 또한 이 PI 제어기의 출력신호의 역상이 바로 측정하고자 하는 표면의 이미지가 되는 것이다. PI 제어기의 출력과 캔틸레버 팁을 공진시키기 위해 편이상 function generator 로부터 얻어진 팁의 공진주파수에 해당하는 정현파가 구동기용 앰프에서 합하여져 구동기에 들어가게 되고 바로 이 신호가 앞에서 언급한 주파수 응답 분리방법에 의해 캔틸레버 팁의 공진과 팁과 측정표면 사이의 일정간극을 위한 z 방향 변위를 하나의 구동기에서 얻게 되는 것이다.

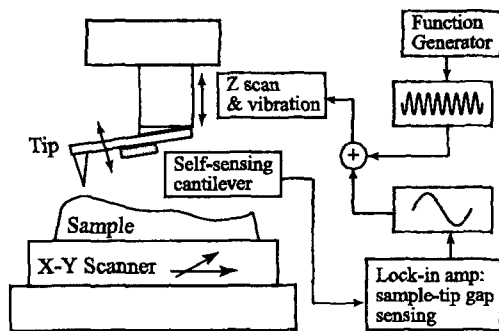


Fig. 3 The schematic diagram of AFM that is composed with self-sensing cantilever and actuator

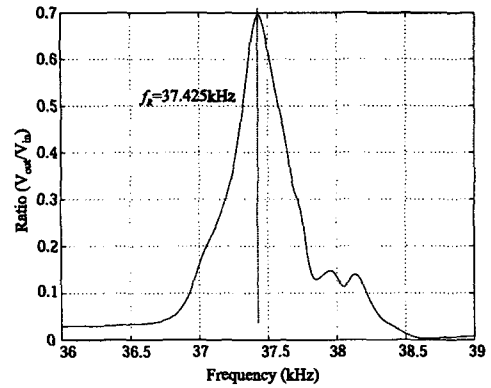


Fig. 4 The experiment result of self-sensing tip frequency response test

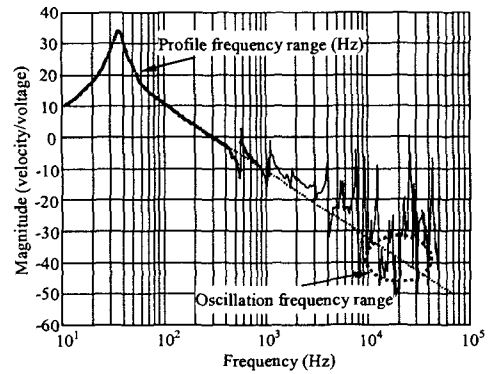


Fig. 5 The experiment result of VCM frequency response test

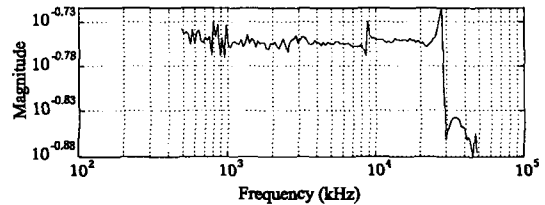


Fig. 6 The experiment result of piezo actuator frequency response test

실제로 캔틸레버 팁과 VCM 그리고 piezo-actuator 의 주파수 응답을 얻은 결과는 Fig. 4, 5, 6 과 같다. Fig. 4 에서 볼 수 있는 것과 같이 캔틸레버 팁은 자신의 고유진동수에 근처의 영역에서 높은 반응을 나타낸다. 실제로 측정된 캔틸레버 팁의 고유진동수가 34.425kHz 인데 이것은 캔틸레버 팁을 non-contact mode 용 팁에 비하여 비교적 낮은 고유진동수를 가지는 contact mode 용 캔틸레버 팁을 사용하였기 때문이다. 다음으로 VCM 의 주파수 응답은 앞에서 시뮬레이션으로 계산한 구동기의 특성과 유사한 결과를 보여준다. 고주파 부분에서의

공진은 것은 VCM 이 4 개의 wire 스프링으로 지지되고 있으므로 실제적으로 고주파 대역에서도 2 차적 공진이 일어나기 때문이다. 그러나 여전히 고주파 성분은 감쇄시키므로 주파수 응답이 분리될 수 있다. Fig. 6 은 piezo 구동기의 주파수 응답이다. 실제로 piezo 구동기의 주파수 응답은 VCM 에 비해 상당히 고주파에서도 응답이 감쇄되지 않는다. 그러나 piezo 구동기는 전압에 대한 계인이 VCM 에 비해 월등히 낮으므로, 즉 일정전압에 대한 변위가 작으므로 캔틸레버 팁을 가진하기에 무리가 없다. 그리고 piezo 구동기와 간극 제어기 사이에 의도적으로 low-pass 필터를 삽입하여 간극 제어를 위한 신호에서 고주파 성분을 감소시켜 주파수 응답 분리 방법을 적극적으로 응용할 수 있다. 하지만 넓은 범위의 간극 조절을 위해서는 높은 전압을 걸어야 한다는 단점을 안고 있다.

실제로 VCM 과 piezo 구동기를 사용하여 10 μm 표준격자의 표면형상을 측정한 결과가 Fig. 7 과 8 이다. VCM 의 경우 캔틸레버 팁이 측정표면에 접근하면 비교적 먼 거리에서도 atomic force 를 이기지 못하고 끌려가는 현상을 보였다. 그래서 비교적 atomic force 가 약한 영역에서 이미지를 얻을 수 밖에 없었고 이에 따라 측정샘플의 단차가 확실히 나타나는 섬세한 이미지를 얻기가 어려웠다. piezo 구동기를 사용한 경우에는 VCM 이 원자력을 이기지 못하고 끌려가는 현상이 없었기 때문에 비교적 atomic force 가 강한 영역까지 접근해서 간극을 제어 할 수 있었고 Fig. 8 에서 보는 것과 같이 상당히 섬세한 이미지를 얻을 수 있었다. 그러나 이 결과들은 단순히 PI 제어기를 사용했고 제어기의 loop-rate 가 1kHz 에 불과했기 때문에 앞으로 상당히 개선의 여지가 있을 것이다. 특히 atomic force 가 작용하는 구간에서는 약간의 변위만으로도 캔틸레버 팁에 작용하는 힘이 크게 변화하므로 이러한 시스템 파라미터의 광범위한 변화에도 강인한 제어를 설계 적용한다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

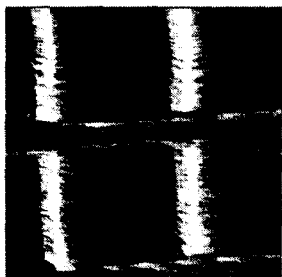


Fig. 7 The AFM image of 10 μm standard calibration sample using VCM

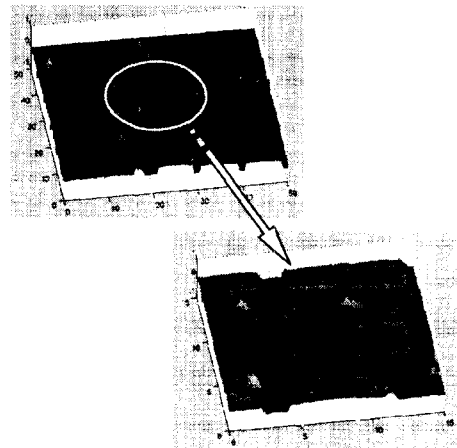


Fig. 8 The AFM image of 10 μm standard calibration sample using piezo actuator

4. 결론

본 연구에서는 빠른 주사속도와 단순한 구조를 가지는 AFM 을 위해 self-sensing 캔틸레버 팁을 사용한 주파수 응답 분리방법을 제안하고 실험적으로 팁과 구동기가 제안한 방법대로 작동하는지를 주파수 응답특성을 구함으로서 확인했다. 그리고 실제로 표준격자의 이미지를 얻어 VCM 과 piezo 구동기가 AFM 에 적용됨에 있어서 가지는 장점과 단점을 고찰해 보았다.

후기

이 연구는 정보통신부의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Youngho Seo and Wonho Jhe, Rev. Sci. Instr. Vol.73 No.5, pp. 2057-2059, 2002.
2. Hyung Bok Lee, Motonbu Kourugi, Takashi Yatsui, Kazuo Tsutsui, Nobufumi Atoda and Motoichi Ohtsu, Applied optics, Vol.38. No16, pp. 3566-3571, 1999.
3. PSIA Corp., "Scanning Probe Microscopy," pp. 1-14.
4. Young-Sik Kim, Hyo-Jin Nam, Seong-Moon Cho, Dong-Chun Kim, and Jong-Uk Bu, "A Self-Actuating PZT Cantilever Integrated with Piezoresistor Sensor for AFM with High Speed Parallel Operation," The Fifteenth IEEE International Conference on 2002, pp. 689 -692, 2002.