

주사 현미경용 평면 스캐너 Part 2 : 정·동 특성 평가

A Flexure Guided Planar Scanner for Scanning Probe Microscope; Part 2: Evaluation of Static and Dynamic Properties

이 동 연* · 이 무 연* · 권 대 갑**

Dong-Yeon Lee, Moo-Yeon Lee and Dae-Gab Gweon

(2005년 9월 9일 접수 ; 2005년 10월 18일 심사완료)

Key Words : Nano-Positioning Planar Scanner(나노 평면 스캐너), Flexure Guide(유연 가이드), Piezoelectric Actuator(압전 소자 구동기), Natural Frequency(고유진동수), Scanning Probe Microscope(주사 현미경), Atomic Force Microscope(원자현미경)

ABSTRACT

This paper shows experimental evaluation results of the nano-positioning planar scanner used in the scanning probe microscope. The planar scanner is composed of flexure guides, piezoelectric actuators and feedback sensors as like explained in detail in Ref. (5). First, the fabrication methods were explained. Second, as the static properties of the planar scanner, we evaluated the maximum travel range & crosstalk. Also, we presented the correcting method for crosstalk using electric circuits. Finally, as the dynamic properties of the planar scanner, we evaluated the first resonant frequency. Also, we presented the actual AFM(atomic force microscope) imaging results with up to 2Hz imaging scan rate. Experimental results show that properties of the proposed planar scanner are well enough to be used in SPM applications like AFM.

1. 서 론

최근 나노 기술 분야의 "창" 역할을 하는 주사현미경(scanning probe microscope, SPM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(1~2) SPM의 구성 요소 중 주사 헤드와 샘플 스캐너가 핵심 역할을 하며, 샘플 스캐너는 정해진 이송 거리를 나노 미터 수준의 분해능으로 평면 주사 한다.^(3~4) 스캐너의 설계 시 중요 설계 기술은 나노 가이드 기술이며, 현재까지 제안된 방법 중 재료의 탄성 변형을 이용한 유연 가이

드기술이 가장 진보된 형태의 가이드 기술이다. 또한, 스캐너의 운동 방향 분해능을 높이기 위해 나노 미터 수준의 분해능을 갖는 PZT 구동기를 이용한다.^(4~6)

이 연구에서는 참고문헌 (5)에서 제시한 평면스캐너에 대한 제작, 정특성 평가 및 전자 회로를 이용한 연성(crosstalk) 저감 방법 실험을 수행하였고, 동특성 실험으로서 시스템의 응답 속도를 평가 시 중요한 첫 번째 공진 주파수를 측정하였다. 주사 현미경에 대한 적용 가능성을 타진하기 위하여, 상용 원자 현미경(AFM) 헤드와 이 연구의 평면 스캐너를 조립하여 표준 시편(standard grating)의 실제 AFM스캐닝 실험을 하였다.

2. 평면 스캐너의 제작

이 연구에서 사용된 평면 스캐너의 개략도는 Fig. 1(a)와 같고, 나노 정밀도를 위해 유연 가이드를 사용

† 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : ldymav@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-8763, Fax : (042) 869-8763

* (주) LG전자 DA연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

하였다. 스캐너 제작시 밀링 가공으로 전체적인 모양을 가공한 후, 유연 가이드와 몸체의 형상을 제작한다. 재료는 AL6061-T6를 사용하였고, 모든 홀 및 탭 작업을 완료 후, 표면 잔류 응력의 최소화를 위해 줄방전 가공(wire electro-discharge machining)을 하

였다. 또한 유연 가이드는 두께에 민감하므로, 가공 오차는 10 μm 이내로 제한하였다.

평면 스캐너의 가진원으로서 다층 압전 구동기(multilayered piezoelectric actuator)를 사용하였다. 압전 구동기는 특성 상 인장력에 취약하다. 따라서 조립 시 예압이 가해진 상태에서 점 접촉이나 선 접촉을 해서 원하는 구동력(압전 구동기의 팽창)을 전달해 주어야 한다. 점 접촉시에는 접촉 부위에서 고압의 압축응력이 발생하여, 압전 구동기에 국부적 소성 변형과 피로 파괴 등의 문제점을 발생시킨다. 따라서 이 연구에서는 국부적 압축 응력을 최소화시키는 방법으로서, Fig.2(a)와 같이 소경의 핀을 이용하여 선 접촉을 하였다. 선 접촉시 문제점은 원하는 구동축 외의 힘을 전달할 가능성이 있다는 것이다. 이를 해결하기 위해 Fig.2(a)와 같이 인장 봉(tension rod)을 이용하여 원하는 구동 방향인 축 방향 힘 성분만을 전달하도록 하였다.

Table 1 Design specifications of the planar scanner

Design specifications	Target value
Stiffness of the flexure guide(k)	$< 0.6 \text{ N}/\mu\text{m}$
Natural frequencies of the planar scanner(f_n)	$> 200 \text{ Hz}$
Maximum Von-Mises stress(σ_{max})	$< 160 \text{ Mpa}$
Preload(q_0)	$50 \mu\text{m}$
Travel range with mechanical lever & preload	$> 120 \text{ N}/\mu\text{m}$

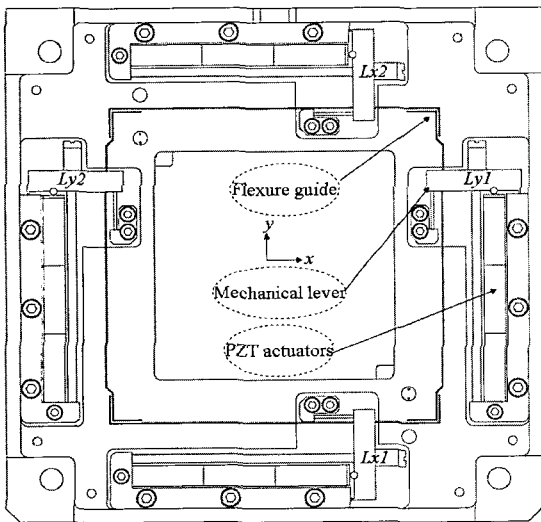


Fig. 1(a) Schematic diagram of the planar scanner

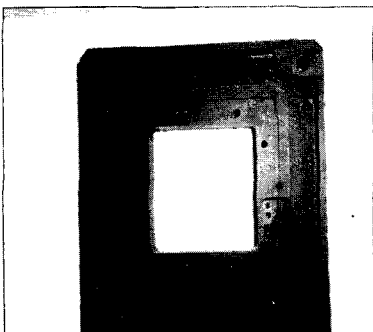


Fig. 1(b) Main body of the planar scanner

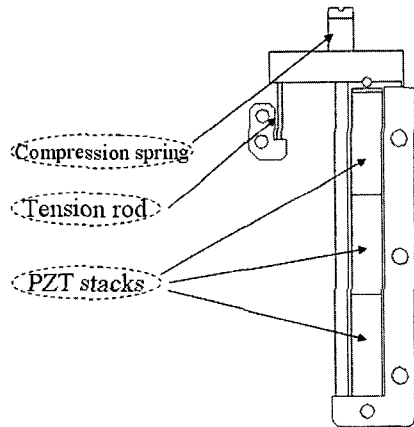


Fig. 2(a) Mechanical lever for motion amplification

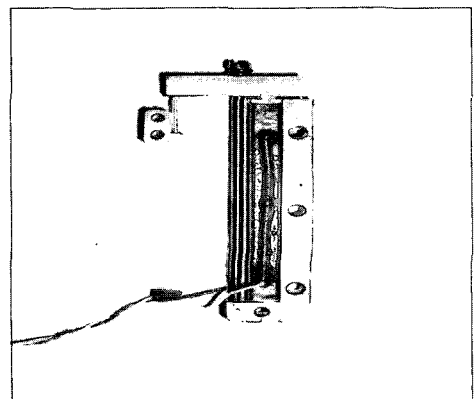


Fig. 2(b) Assembled mechanical lever

일반적인 압전 구동기는 소재의 특성 상 적절한 압축력을 받아야 원하는 성능이 나온다. 따라서 압전 구동기 조립 시 외부적인 압축력을 줄 수 있도록 조립해야 한다. Fig. 2(a)에서 보는 바와같이 변위 증폭 기구에 압축 스프링을 장착하여, 압전 구동기에 원하는 압축력을 가하였고, 더불어 유연 가이드의 강성을 이용하여 조립시 압전 구동기에 압축력을 가할 수 있도록 하였다. 이 연구에서는 유연 가이드와 기계 레버 조립 시 최대 이송거리의 절반인 50 μ m 정도의 예압을 가하였다.⁽³⁾

이 연구에서 제작한 평면 스캐너의 최종설계 목표는 Table 1과 같다.

3. 평면 스캐너의 정특성 평가

3.1 행정 거리(travel range)

이 연구에서, 평면 스캐너는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 상용 원자현미경 헤드(www.psia.co.kr)에 결합하여, 원자 현미경 시스템을 구성하였다. 설계 시의 행정 거리는 120 m 이상이 목표였으며, 실험은 Fig. 4(a)와 같이 LVDT 센서(LBB375PA-020, www.schaevitz.com)를 사용하여, PZT에 최대 전압(150 V)을 인가하여, 변위를 측정하였다. Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이, 최대 전압 인가 시 125 m 정도의 변위가 발생하는데, 이 결과는 설계 목표를 달성하는 범위에 있다. Fig. 4(b)의 결과는 최대 변위를 측정하기 위해, 개루프 상태에서 측정한 결과로, Ch1과 Ch2는 스캐너 이동부의 양 끝점을 측정하였다.

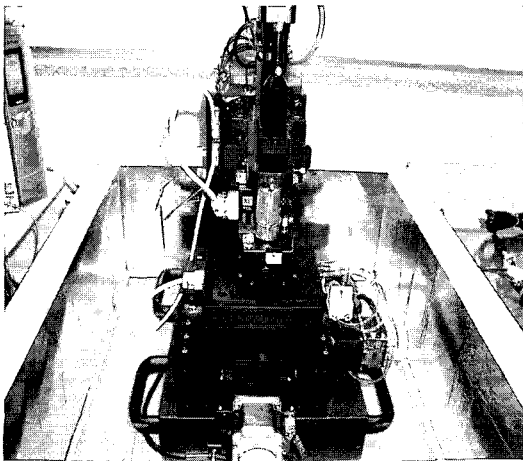


Fig. 3 AFM using the planar scanner

또한, Fig. 4(b)의 결과에서 압전 가진기의 이력특성(hysteresis)을 관찰할 수 있다.

이력 특성이란 압전 가진기에 최소에서 최대 전압 인가 시 변위 특성과 최대에서 최소 전압 인가시의 변위 특성이 다른 압전체 고유의 성질로서, 이러한 이력 특성은 적절한 제거기를 사용하여 제거 할 수 있다.

이 연구에서는 설계시와 실험시의 변위 차이가 존재하는데, 그 이유로는 다음과 같은 것이 있다. 첫째, 해석 시 사용한 변위 계산에 있어 예압의 크기가 중요한 요소인데, 설계 시 예압의 크기와 실험시 예압의 크기가 서로 다르기 때문이다. 둘째, 변위 계산시 압전 가진기의 제작사에서 제시한 최대 변위가 공칭 최대 변위와 약 10% 정도의 편차가 발생할 수 있기 때문이다. 셋째, 유연 가이드의 강성은 가이드 두께에 민감한데, 가공 시 에러가 20 m 정도 발생하여 변위

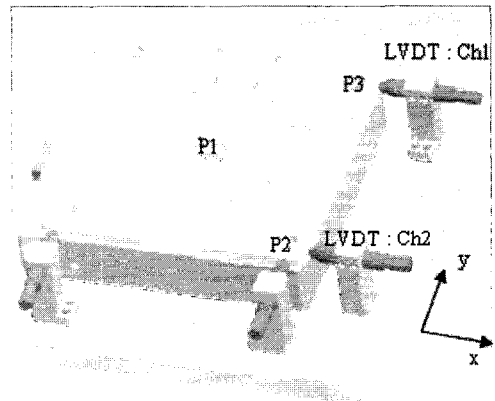


Fig. 4(a) AFM imaging point : showing LVDT sensors

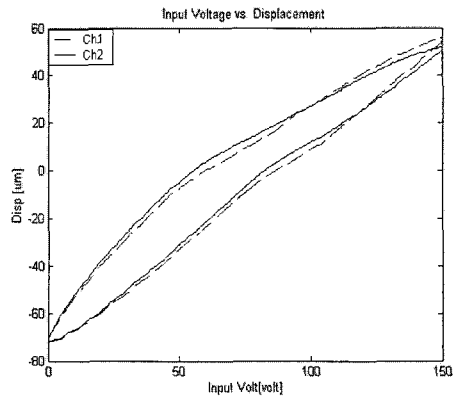


Fig. 4(b) Displacement of the planar scanner : open loop test using LVDT sensors

차이가 존재한다. 이러한 이유로 설계시와 실험시 변위 차이를 보인다.

3.2 연성 제거(crosstalk elimination)

Fig. 4에서 LVDT 센서의 Ch1과 Ch2의 변위가 다른 것을 관찰할 수 있는데, 그 원인은 다음과 같다.

첫째, 축당 압전 가진기가 2개가 존재하고, 각 압전 가진기마다 변위 출력이 다르기 때문이다. 즉, 2개의 압전 가진기에 동일한 전압을 가하여도 변위는 달라진다. 둘째, 유연 가이드의 줄 방전 가공 시 완전 대칭으로 가공이 안 되기 때문이다. 즉, 줄 방전 가공 시 20 μm 정도의 가공 에러가 발생하므로, 가이드가 비대칭적으로 가공되기 때문이다. 이러한 문제점으로 인해 X축 이송 시 Y축으로의 연성(crosstalk)이 발생하여, AFM 측정 시 이미지의 정확도가 저하된다. 이러한 연성을 분석하기 위하여 다음과 같이 실제 AFM 이미지를 수행하였다.

이 연구에서 사용한 시료는 Fig. 5(a)에서 보는 바

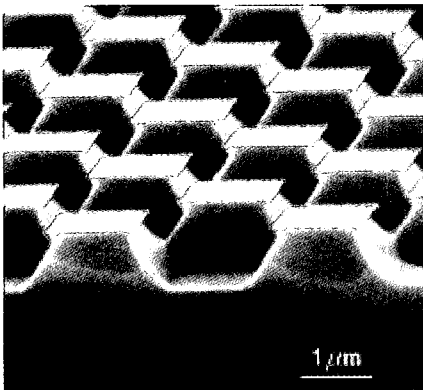


Fig. 5(a) SEM image of the standard grating

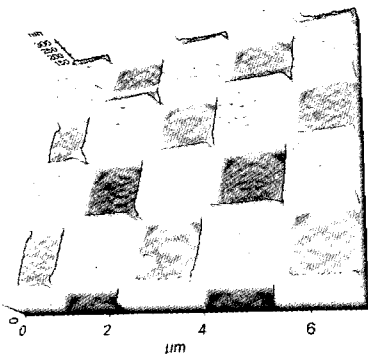


Fig. 5(b) AFM image of standard grating

와 같은 Mikromasch사의 표준 시편으로, 2차원 직각 격자 형상이 균일하게 분포된 시료이다. 이 시료는 일반적으로 원자현미경의 보정 및 스캐너의 특성 평가용으로 사용되는데, 만약, 원자 현미경의 이미지가 직각 격자 형상이 나오지 않는다면, 주된 원인으로

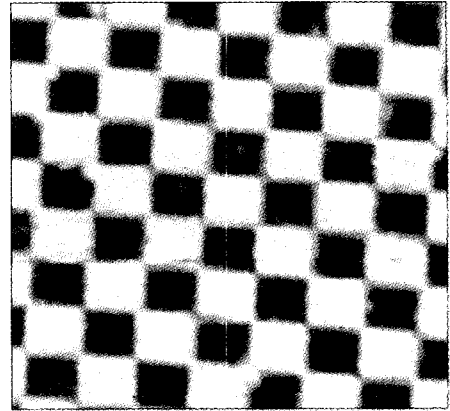


Fig. 6(a) AFM image of standard grating at P1

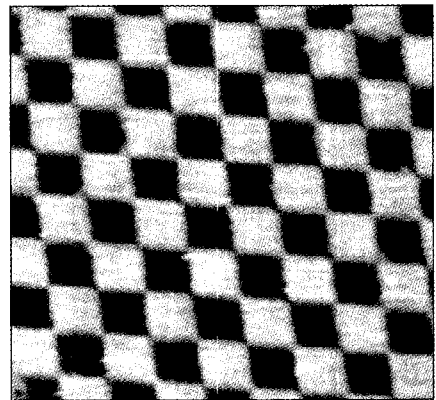


Fig. 6(b) AFM image of standard grating at P2

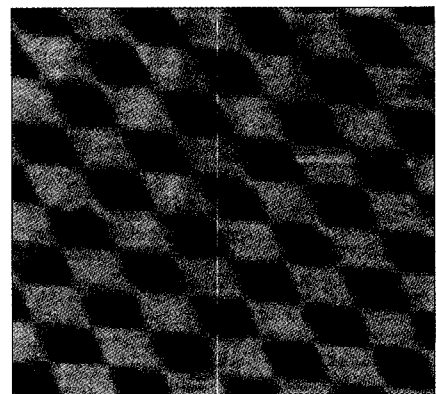


Fig. 6(c) AFM image of standard grating at P3

평면 스캐너의 연성을 들 수 있다. 이러한 특성을 평가하기 위하여 평면 스캐너 조립 후 원자 현미경을 이용하여 Fig. 4(a)에 표시되어 있는 것처럼, P1(중앙), P2(우상단), P3(우하단)의 위치에서 표준 시편의 표면 형상을 측정 하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 먼저, Fig. 6(a)에서는 표준 시편 이 직각으로 관찰되어 평면 스캐너의 연성이 거의 나타나지 않았지만, Fig. 6(b~c)에서는 표준 시편 형상이 직각이 아니게 나타남으로서 연성을 관찰할 수 있었다. 이러한 연성은 X축 이송시 Y축 가진기를 이용하여 피드백 보정을 할 수 있으나, 이 연구에서는 평면 스캐너의 특성을 파악하고자, 피드백 보정 없이 실험적으로 연구를 수행하였다. 평면 스캐너에 연성이 발생하는 이유는 각 축당 압전 가진기가 2개이고, 동일 전압하에서도 상이한 변위가 발생하기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 7과 같이 각 축에 조립되는 압전 가진기(Y1 & Y2 : X축, Y3 & Y4 : Y축)에 최대 전압의 10% 정도를 변화시킬 수 있는 회로를 제작하여 변위를 조절 할 수 있도록 하였다. 여기서 X축의 경우 Y1의 전압은 변하지 않으나, Y2의 전압을 변화시

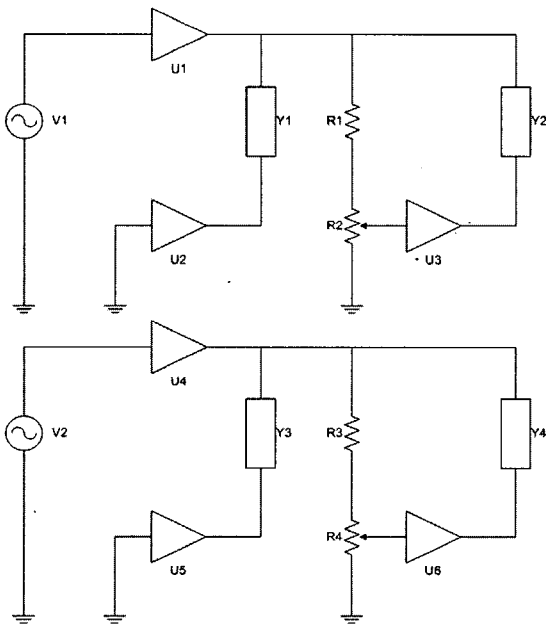


Fig. 7 Schematics of the correction circuit for output voltage of the Op-Amp: Y1 and Y2 are for x-axis motion, Y3 and Y4 are for y-axis motion. Here, Input voltages of Y2 and Y4 are changing with respect to Y1 and Y2 actuators

킬 수 있다. 따라서, Y2의 압전 가진기의 변위가 Y1의 변위보다 크다면, 회로를 이용하여 전압을 강하시켜 최종 Y2의 변위를 Y1의 변위와 동일하게 조절할 수 있어 연성을 제거 할 수 있다. 연성 제거를 위한 흐름도는 Fig. 8과 같다. 만약, X축 제어 전압이 150 Vp-p 정현파일 때, Y2의 전압을 변화시키면 한 사이클에서의 P1과 P2의 변위차는 Fig. 9와 같다. 즉, 정현파의 시작점과 끝점에서는 변위 차가 적으나, 그 중간에서는 변위 차가 크게 존재한다. 또한, 75 V 정현파의 경우, 0~75 V 구간에서는 변위 차가 적으나, 75 volt 이상에서는 변위 차가 크다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 보는 바와 같이 연성 제거 실험시 각축의 제어 전압에 따라 변위 차가 다름을 알 수 있다. Fig. 10에서는 제어 전압을 150 V로 고정하고, 보정 회로를 이용하여 변위차를 제거한 후 원자 현미경을 이용하여 Fig. 6과 동일한 이미지를 수행하였다. 연성을 제거하지 않은 Fig. 6의 결과와 연성을 제거한

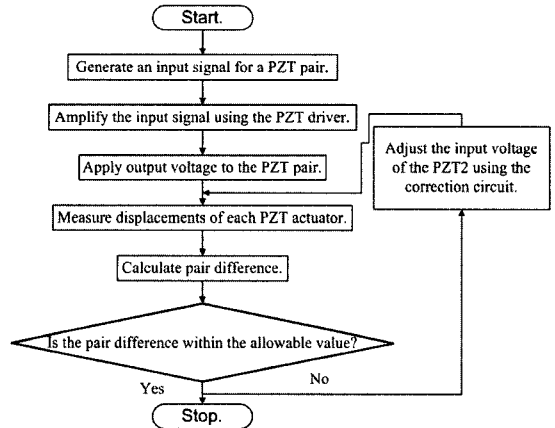


Fig. 8 Flowchart for the crosstalk elimination process

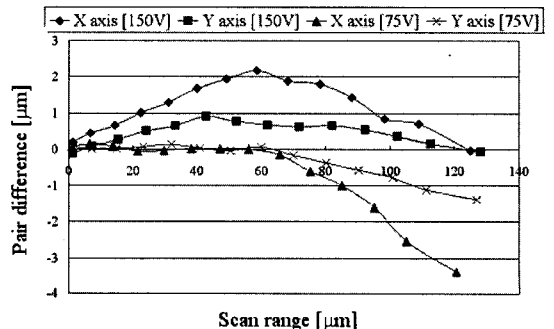


Fig. 9 Adjustment of the input voltage of Y2

Fig. 10의 결과를 비교해 보면, Fig. 10에서 표준 시편이 거의 직각 형상임을 알 수 있는데, 이것은 연성이 제거되었음을 의미한다.

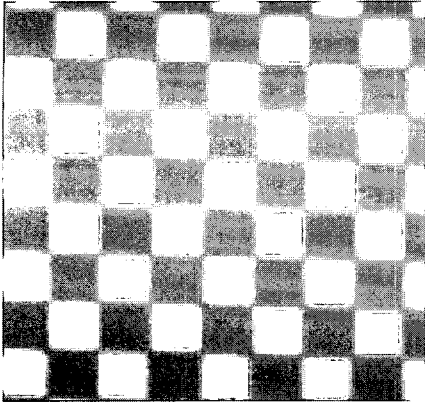


Fig. 10(a) AFM image at P1 after crosstalk elimination

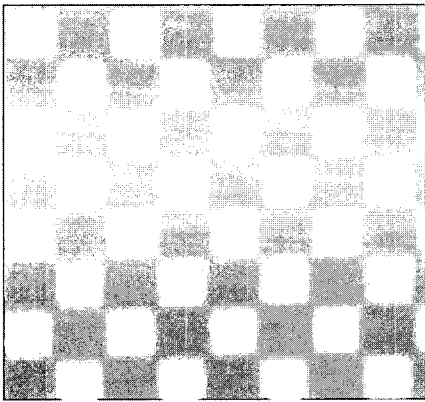


Fig. 10(b) AFM image at P2 after crosstalk elimination

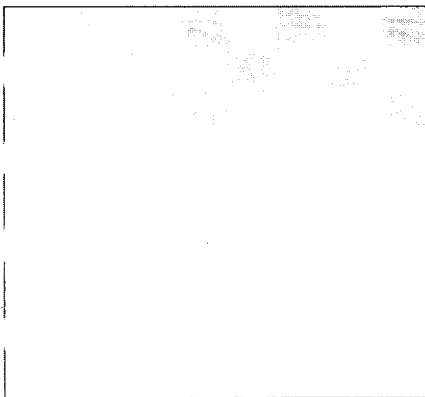


Fig. 10(c) AFM image of the standard grating at P3 after crosstalk elimination

따라서 이 연구에서 제시한 회로가 연성을 제거하는데 도움이 되었다.

4. 평면 스캐너의 동특성 평가

일반적으로 AFM 측정시 '안정적인' 스캔 주파수는 1 Hz 이하이다. 스캔 주파수를 증가시키지 못하는 이유로는 다음과 같다. 첫째는 AFM 외팔보의 피드백 속도의 한계, 둘째는 스캐너의 공진 주파수가 충분히 높지 않아서, 셋째는 시료의 보호 등이다. 이 연구에서는 위의 요인 중 스캐너의 동특성에 대해서 실험적으로 평가를 하였다.

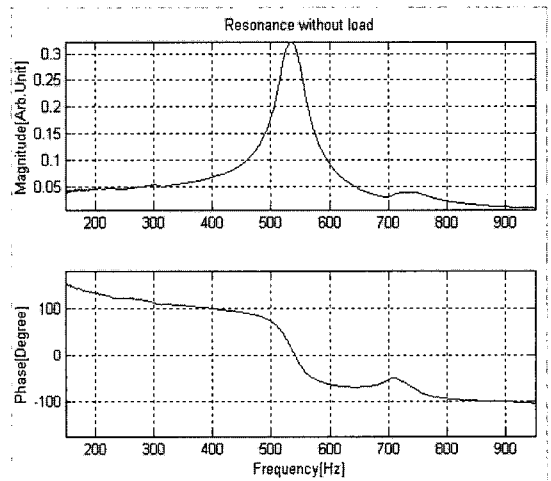


Fig. 11(a) Resonance of the planar scanner without loading mass

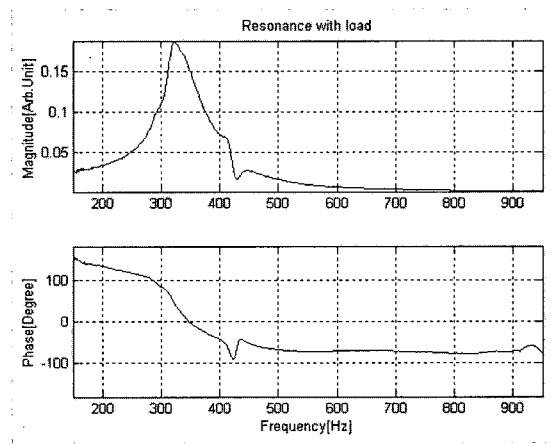


Fig. 11(b) Resonance of the planar scanner with loading mass

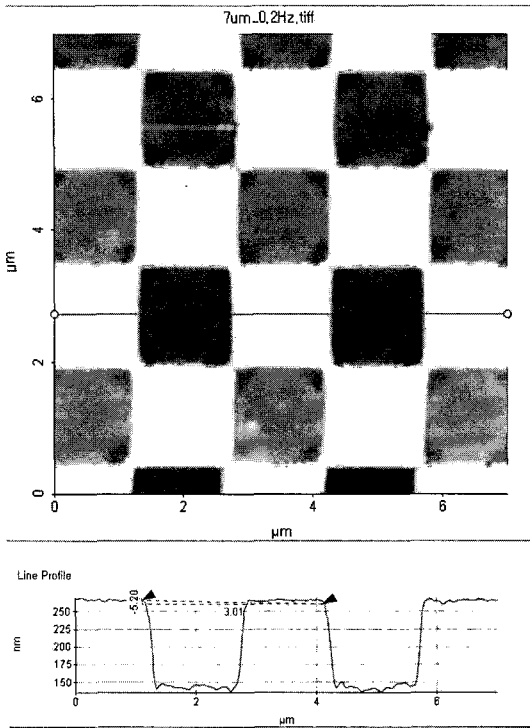


Fig. 12(a) AFM image at 0.2 Hz scan speed

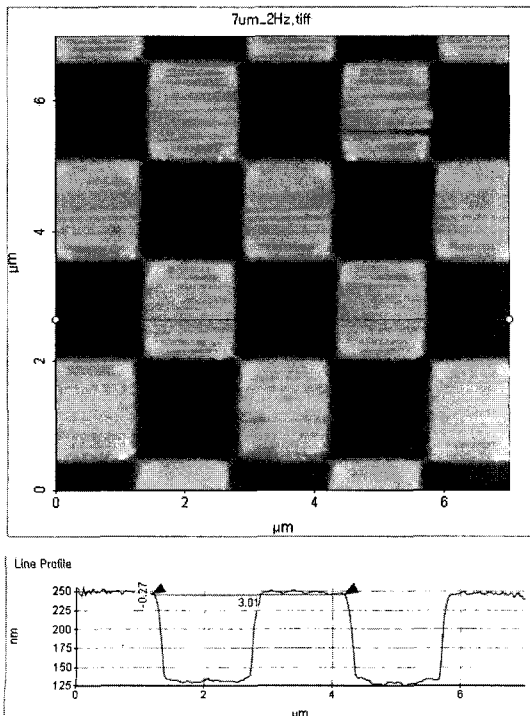


Fig. 12(b) AFM image at 2 Hz scan speed

4.1 공진 주파수

AFM 측정 시 스캐너의 고속 응답을 위해서는 스캐너의 첫 번째 공진 주파수가 높아야 한다. Fig. 11(a)의 결과는 시료를 장착하는 샘플 척(sample chuck)이 조립되지 않은 상황에서 평면 스캐너 자체의 공진 주파수를 측정하였다. 실험은 950 Hz까지 일정한 간격으로 정현파 가진을 하여 입력과 출력의 크기비와 위상차를 측정하였다. 측정 결과 1차 공진 주파수는 530 Hz로 측정되었다. Fig. 11(b)의 결과는 샘플 척을 조립하여 질량을 가한 상태에서 공진 주파수를 측정하였는데, 예측된 것처럼 주파수는 320 Hz 정도로 측정되었다. 실제 AFM 측정 시에는 샘플 척이 조립되므로, Fig. 11(b)의 결과가 중요하다. AFM의 최대 스캔 주파수를 결정할 때, 현장에서 “어림셈(rule of thumb)”으로 평면 스캐너의 1차 공진 주파수의 약 1/100 정도로 정한다. 따라서 이 연구에서 평면 스캐너 사용시의 최대 AFM 스캔 주파수는 3.2 Hz 정도가 된다. 최대 스캔 주파수의 의미는 다소 모호할 수 있으나, AFM 이미지의 정확도가 손상되지 않은 범위 내에서의 최대 측정 속도로 정의 할 수 있다.

4.2 스캔 결과

이 연구에서는 AFM의 고속 측정을 위해 2 Hz 정도의 스캔 주파수를 달성하는 것이 목표이다. 따라서, 평면 스캐너가 장착된 AFM에서 이미징 스캔 주파수를 0.2 Hz와 2 Hz로 구동하면서 표준시편의 스캔 결과를 비교하였다. 이때, 스캔 영역은 6.5 × 6.5 m 범위로 하였고, 평면 스캐너 구동 시 압전 구동기의 이력 특성 및 비선형성을 제거하기 위하여 피드백을 하면서 구동하였다. Fig. 12(a)와 (b)의 횡 단면선(line profile) 결과를 보면, 거의 동일함을 알 수 있는데, 이는 이 연구에서 제작된 평면 스캐너가 연구 목표를 성공적으로 달성할 수 있도록 제작되었음을 의미한다. AFM 스캐닝에는 헤드의 수직 피드백 속도, 수평 스캔 속도, 캔틸레버의 형상에 의한 이미지 왜곡, 외부 진동, 소음 등의 여러 요인이 있으나, 이 연구에서는 다른 요인은 최대한 동일하게 유지하면서, 수평 스캔 속도의 차이점을 측정하였고, Fig. 12와 같은 결과를 얻었다.

5. 결 론

이 연구에서 참고문헌 (5)에서 제시한 평면 스캐너에 대한 제작, 조립, 정특성 평가 및 전자 회로를

이용한 연성(cross-talk) 저감 방법 실험을 수행하였고, 동특성 실험으로서 시스템의 응답 속도 평가시 중요한 요소인 첫 번째 공진 주파수를 측정하였다. 또한, 상용 원자 현미경 헤드와 이 연구에서 개발한 평면 스캐너를 조립하여 표준 시편(standard grating)의 실제 AFM스캐닝 실험을 수행하여 다음과 같이 정리하였다.

(1) 이 연구는 참고문헌 (5)에서 설계된 스캐너의 제작 및 특성 평가를 수행하였으며, 이 연구 내용을 바탕으로 원하는 스캐닝 범위 등을 갖는 주사 현미경용 스캐너를 개발하는데 도움이 된다.

(2) 제작 및 조립된 스캐너의 행정 거리는 125 μm 이다.

(3) 축당 2개의 압전 가진기의 변위 차로 인해, 연성이 발생함을 실험적으로 검증하였고, 연성 제거 회로를 이용하여 연성을 성공적으로 제거하였다.

(4) 제작된 스캐너의 공진 주파수는 320 Hz이고, 상용 AFM 헤드와 조립하여, 이 연구 목표인 2 Hz AFM 스캔 스피드를 달성함을 실험적으로 측정하였다.

참고문헌 (5)와 이 연구에서 제시된 평면 스캐너의 설계 및 실험 내용은 반도체 및 LCD산업 등의 계측용 원자 현미경으로 응용가능 할 것이다. 또한, AFM의 Z 방향 피드백 속도를 높이면, 수평 스캐닝 속도를 더욱 높일 수 있다. 향후 연구 계획은 이 연구 내용을 바탕으로 AFM의 Z-스캐너의 공진 주파수 및 성능 향상을 수행하는 것이다.

참고 문헌

- (1) Binning, G. and Quate, C. F., 1986, "Atomic Force Microscope", *Physical Review Letters*, Vol. 56, No. 9, pp. 930~933.
- (2) 박준기 등, 2004, "비접촉 원자간력 현미경의 탐침 캔틸레버 진동 특성 및 측정 성능 평가", *한국소음진동공학회논문집*, 제 14 권, 제 6 호, pp. 495~502.
- (3) Holman, A. E., Scholte, P. M. L. O. et al, 1995, "Analysis of Piezo Actuators in Translation Constructions", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 66, No. 5, pp. 3208~3215.
- (4) Lee, D. Y., Kim, D. M. and Gweon, D. G., 2006, "Design and Evaluation of a Two-dimensional Metrological AFM using a Planar Nano-scanner" *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 3B, (Accepted and to be Published).
- (5) 이동연, 이무연, 2005, "주사 현미경용 평면 스캐너 Part 1 : 설계 및 정·동특성 해석," *한국소음진동공학회논문집*, 제 15 권, 제 6 호, pp. 667~673.
- (6) Ryu, J. W., Lee, S. Q., Gweon and D. G., Moon, K. S., 1999, "Inverse Kinematic Modeling of a Coupled Flexure Hinge Mechanism", *Mechatronics*, Vol. 9, pp. 657~674.
- (7) Beer, F. P. and Johnston, R. JR., 1992, "Mechanics of Materials"(2nd edi.), McGrawHill, Inc., London.
- (8) Smith, S. T., 2003, "Flexure : Elements of Elastic Mechanics", Taylor & Francis, Inc., London.
- (9) Chang, S. H. and Du, B. C., 1998, "A Precision Piezodriven Micropositioner Mechanism with Large Travel Range", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 4, pp. 1785~1791.