

# 원자 현미경용 샘플 스캐너의 개발

## Development of a Sample Scanner for Atomic Force Microscope

이동연<sup>†</sup>·이무연\*·권대갑\*\*

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

**Key Words :** Nano-positioning Planar Scanner(나노 평면 스캐너), Flexure Guide(유연 가이드), Piezoelectric Actuator(압전소자 구동기), Natural Frequency(고유진동수), Atomic Force Microscope(원자현미경)

### ABSTRACT

This paper shows a method for design 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. In the design of flexure guides, the Castigliano's theorem was used to find the stiffness of the guide. The motion amplifying mechanism was used in the piezoelectric actuator to achieve a large travel range. We found theoretically the travel range of the total system and verified using the commercial FEM(Finite element method) program. The maximum travel range of the planar scanner is above than 140  $\mu\text{m}$ . The 3 axis positioning capability was verified by the mode analysis using the FEM program. Moreover, we presented the actual AFM(Atomic Force Microscope) imaging results with up to 2Hz imaging scan rate. Experimental results show that the properties of the proposed planar scanner is well enough to be used in SPM applications like AFM.

## 1. 서론

최근 나노 기술 분야의 “창” 역할을 하는 주사현미경(Scanning probe microscope, SPM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1-2)</sup> SPM의 구성 요소 중 주사 헤드와 샘플 스캐너가 핵심 역할을 하며, 샘플 스캐너는 정해진 이송 거리를 나노미터 수준의 분해능으로 평면 스캐닝(Scanning)한다. 이때, 수직 방향의 기생 운동(Parasitic motion error) 또한 나노미터 수준으로 제한되어야 한다. 스캐너의 설계 시 중요 설계 기술은 Nano-guiding 기술이며, 현재까지 제안된 방법 중 재료의 탄성 변형을 이용한 Flexure guide 기술이 가장 진보된 형태의 가이드 기술이다. 또한, 스캐너의 운동 방향 분해능을 높이기 위해 나노미터 수준의 분해능을 갖는 PZT 구동기를 이용하였다.

본 연구에서는 SPM에 사용되는 140  $\mu\text{m}$  이상의 이송 거리를 갖는 Flexure guided planar scanner를 설계하였다. Castigliano's theorem을 이용하여 스캐너 가이드의 정적 해석을 수행하였고, 140  $\mu\text{m}$  이송 거리 달성을 위해 레버 구조를 갖는 PZT

actuator를 설계하였다. 또한, 정, 동특성 해석 및 설계의 검증을 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 주사 현미경에 대한 적용 가능성을 타진하기 위하여, 상용 원자 현미경(AFM) 헤드와 본 연구의 평면 스캐너를 조립하여 표준 시편(Standard grating)의 실제 AFM 스캐닝 실험을 하였다.

## 2. 평면 스캐너의 설계 및 해석

### 2.1 평면 스캐너의 구조

본 연구에서 사용된 평면 스캐너의 개략도는 Fig.1과 같다. 나노 정밀도를 위해 유연 가이드를 사용하였다. 유연 가이드는 재료의 탄성 변형을 이용하고, 재료의 내부 마찰을 제외하면 외부적 마찰이 없으므로, 나노 분해능 및 정밀도를 가진다. 또한 유연 가이드는 특성상 수직 방향의 기생 운동이 정밀하게 제한되어 있기 때문에, 주사 현미경의 샘플 이송 구동기로 사용할 수 있다. 본 연구의 가이드는 평면 방향의 3축 자유도를 갖고 있으므로, 3축 제어가 가능하다. 구동기로서 압전 구동기(PZT actuator)를 사용하였고, 대행정 달성을 위해 변위 증폭기를 사용하였다. 축당 2개의 압전 구동기가 동작하고, X축의 경우 2개의 압전 구동기(Lx1 & Lx2)에 동일한 입력이 가해져서 병진 운동을 얻는다. Y축의 경우 각각의 구동기(Ly1 & Ly2)에

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : ldymav@kaist.ac.kr  
Tel : (042) 869-8763, Fax : (042) 869-8763

\* (주) LG 전자, DA 연구소

\*\* 한국과학기술원, 기계공학과

다른 입력이 가해져서 원하는 병진 및 회전 운동을 달성한다. 각각의 압전 구동기의 대행정을 위해 레버 구조형 변위 증폭기를 Fig.2 와 같이 사용하였다. 압전 구동기와 변위 증폭기의 결합시 XY 방향의 간섭 효과를 제거하기 위해, 선형 접촉 방법과 소경 인장바(Tension rod)를 사용하였다. 또한 압전 구동기에 예압을 가하기 위해 압축 스프링을 사용하였다. 압전 구동기는 적절한 압축 예압이 가해져야 원하는 성능을 얻을 수 있고, 압축 예압시 압축력의 크기에 따라 평면 스캐너의 구동 범위가 달라진다.

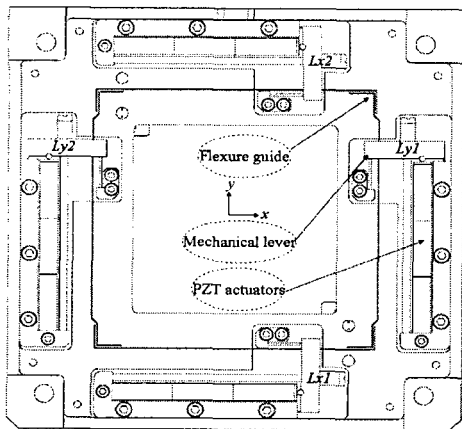


Fig. 1 Schematic diagram of the planar scanner

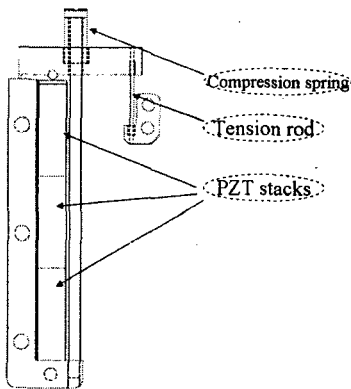


Fig. 2 A motion amplifying mechanism

## 2.2 유연 가이드의 강성[1]

4 개의 유연 가이드에 수평 방향 힘( $F$ )이 가해지면 변위가 발생하며, 힘과 변위비인 강성을 이론적으로 구하기 위하여 Castigliano's theorem 을 사용하였다.

$$k = \frac{F}{q} = \frac{30EI}{l^3} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 유연 가이드의 강성을 구하며, 또한, 평면 스캐너의 구동 범위를 정할 수 있다.

## 2.3 압전 구동기와 예압을 고려한 가이드 변위

압전 구동기를 유연 가이드에 조립시 압전체에 압축력( $f_0$ )을 가하기 위해 조립 시 예압( $q_0$ )을 사용한다. 압전 구동기의 구동 범위를 증폭시키기 위해 Fig. 3 과 같은 레버 구조의 변위 증폭기를 사용하고, 예압과 변위 증폭비가 고려된 유연 가이드의 변위량을 이론적으로 계산하였다. 이때 PZT 의 변위( $\delta_p$ ) 특성을 고려해야 하는데, 압축이 없을 때의 최대 변위량( $\delta_{p,max}$ )과 압축이 최대일 때의 최대 발생력( $f_{p,max}$ ) 사이의 관계는 식 (2)과 같다.

$$\delta_p = -\frac{\delta_{p,max}}{f_{p,max}} f_p + \delta_{p,max} \quad (2)$$

이때,  $f_p = \frac{c}{a} f_2 = A_m f_2$  는 PZT 에 걸리는 힘이다.

여기서  $A_m = c/a$  은 변위 증폭비,  $f_2$  는 유연 가이드에 의해 변위 증폭기에 걸리는 힘이며, 예압을 고려하면 다음과 같다.

$$f_2 = \frac{k}{2}(q_0 + q) \quad (3)$$

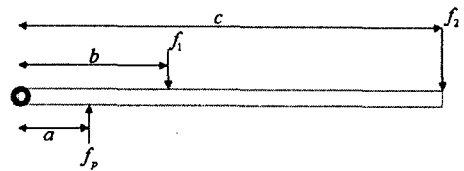


Fig. 3 Schematic diagram of the mechanical lever

구하고자 하는 가이드 변위는 다음과 같다.

$$q = \frac{2A_m \delta_{p,max} f_{p,max}}{2f_{p,max} + A_m^2 k \delta_{p,max}} - \frac{A_m^2 \delta_{p,max} k q_0}{2f_{p,max} + A_m^2 k \delta_{p,max}} \quad (4)$$

식 (4)에서, 조립시 예압( $q_0$ )의 효과는 유연 가이드 변위의 감소에 기인한다.

### 2.4 평면 스캐너의 설계

평면 스캐너 설계시 구속 조건 및 설계 목표는 Table 1 과 같다. 유연 가이드의 공진 주파수를 늘리기 위해서 질량을 줄이고, 강성을 높여야 한다. 그러나, 가이드 강성을 높이면, 평면 스캐너 이동부의 변위가 작아지므로, 공진 주파수와 최대 변위 사이의 타협점이 필요하다. 실제 현장에서 어림셈(Rule of thumb)으로서 유연 가이드의 강성을 PZT 의 약 1/100 로 한다. 평면 스캐너의 재질은 알루미늄 합금(Al 6061-T6)이고, 이 재료의 항복 응력은 약  $\sigma_y = 240Mpa$  이고, 안전율을 고려하여 PZT 에 최대 전압을 인가시 평면 스캐너에 걸리는 최대 응력은 항복 응력의 약 67%인  $\sigma_{max} = 160Mpa$  로 제한한다. 또한 평면 스캐너의 최대 높이는 SPM 의 제품 적용시 30 mm로 제한한다. Table 1 의 사양을 맞추기 위하여 유연 가이드를 Table 2 와 같이 설계 하였고, 설계 결과는 Table 1 의 사양을 만족한다. 설계 결과에서 유연기구의 강성은 약  $0.572N/\mu m$  이고, 설계 기준인  $<0.6N/\mu m$  조건을 만족한다. 또한, 유연 기구의 강성과 이동 질량의 비인 1 차 공진 주파수는 설계 결과에서 216Hz 으로, 설계 스펙의  $>200Hz$  를 만족한다. SPM 에 적용시 샘플 이송 기구인 평면 스캐너의 공진 주파수가 클수록 SPM 측정 속도가 향상되며, 고속 스캔시 발생하는 기생 운동의 저감을 위하여 평면 스캐너의 약 1/10 정도로 구동 주파수를 정한다. 따라서 본 논문에서 설계된 평면 스캐너의 구동 주파수는 약 20Hz 까지 가능하다.

### 3. 평면 스캐너의 유한 요소 해석

PZT 에 최대 전압(150Volt) 인가시 발생하는 힘( $f_s$ )은 42.5N 이다. 축 당 2 개의 압전 구동기가 있으므로, 가이드에 걸리는 힘은 85N 이다. 따라서 85N 이 가이드에 작용할 때 설계 결과의 검증을 위해 유한요소 해석 상용 프로그램인 Pro/mechanica™을 이용하여 해석을 수행하였다. 이때 예압은 없다고 가정하였다. 변위 결과는 Fig. 4 와 같고, 유연 가이드(Region 1) 부분을 확대한 결과는 Fig. 5 과 같다. 최대 변위는 약 144.8  $\mu m$ 이고, 설계 결과와 약 5.1% 차이를 보이고, 주 원인은 설계시의 물성치와 해석시의 물성치가 다르기 때문이다. 그러나, SPM 적용시 요구 조건인 100um 이상의 조건에 대해서는 이론 해석 및 유한 요소 해석 결과 모두 만족한다. 또한, 응력 해석 결과는 Fig. 6 과

같으며 최대 응력은 유연 가이드의 고정부 근처에서 발생한다. 최대 응력( $\sigma_{max}$ )은 약 120Mpa 이고, Table 1 의 최대 항복 응력 조건( $<160Mpa$ )을 만족한다. 본 연구에서의 평면 스캐너의 최종 조립도는 Fig. 7 과 같다.

Table 1 Design specifications of the planar scanner

Stiffness of the flexure guide ( $k$ )	$<0.6N/\mu m$
Natural frequencies of the flexure guide ( $f_n$ )	$>200Hz$
Maximum Von-Mises Stress( $\sigma_{max}$ )	$<160Mpa$
Preload ( $q_0$ )	50 $\mu m$

Table 2 Design results of the planar scanner

Length ( $l$ )	8.10mm
Thickness ( $t$ )	0.41mm
Width ( $b$ )	24.5mm
Mechanical amplification factor ( $A_m$ )	4
Stiffness of the flexure guide ( $k$ )	0.572 $N/\mu m$
1 <sup>st</sup> Natural frequency ( $f_n$ )	216Hz
Maximum displacement of the flexure guide with the preload	142.3 $\mu m$

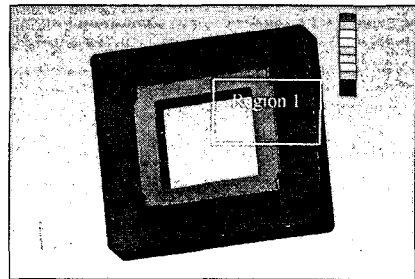


Fig. 4 Displacement of the planar scanner

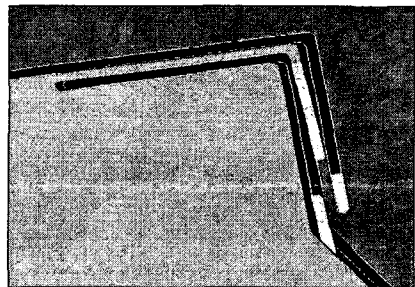


Fig. 5 Displacement of the flexure guide (magnified)

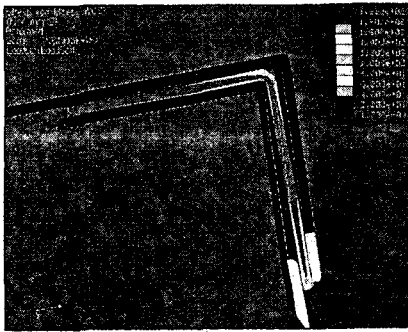


Fig. 6 Stress of the flexure guide

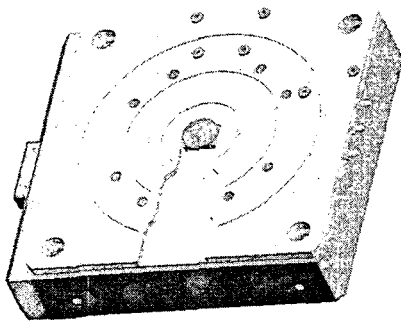


Fig. 7 Total assembly of the planar scanner: showing PZT actuators

#### 4. AFM Image

상용 원자 현미경 헤드와 본 연구에서 개발한 평면 스캐너를 조립하여 표준 시편 (standard grating)의 실제 AFM 스캐닝 실험을 Fig. 8 과 같이 성공적으로 수행하였다. 사용한 표준 시편의 피치(pitch)는  $3\mu\text{m}$  (Fig. 8(a))이고, 약 2Hz 까지 성공적으로 스캐닝이 (Fig. 8 (b)) 가능하다.

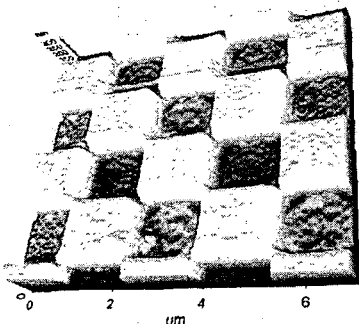


Fig. 8(a) AFM image of the standard grating

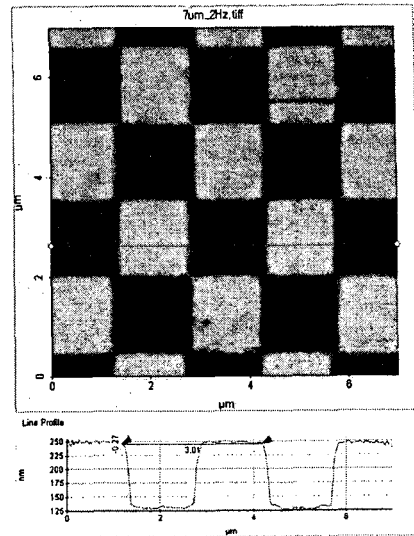


Fig. 8(b) AFM image at 2Hz Scan speed

#### 5. 결론

본 연구에서는 주사 현미경에 사용되는 평면 스캐너를 설계 및 해석하였다. 또한, 상용 원자 현미경 헤드와 본 연구에서 개발한 평면 스캐너를 조립하여 표준 시편 (standard grating)의 실제 AFM 스캐닝 실험을 수행하였고 다음과 같이 요약하였다.

(1) 설계 목표와 제약을 만족하는 유연 가이드의 이론 해석을 위해 Castigliano's theorem을 이용하였고, 대행정 이송 거리를 위해 레버 구조의 변위 증폭기를 이용하였다.

(2) 본 연구의 평면 스캐너는 약 150 mm 크기의 샘플까지 이송 가능하며, 최대 이송 변위는 유한 요소 해석 및 이론 해석 결과 약  $142.3\mu\text{m}$ 이다.

(3) 제작된 스캐너의 공진 주파수는 320Hz 이고, 상용 AFM 헤드와 조립하여, 본 연구 목표인 2Hz AFM 스캔 스피드를 달성 함을 실험적으로 측정하였다.

#### 참고문헌

- (1) Dong-Yeon, Lee, M.Y. Lee, 2005, "A Flexure Guided Planar Scanner for Scanning Probe Microscope Part1: Design and Analysis of Static and Dynamic Properties" Trans. of the KSNVE, Vol. 15, No. 6, pp.667~673.
- (2) Dong-Yeon Lee, D.M. Kim and D.G. Gweon, 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).