

주사 현미경용 평면 스캐너 Part1 : 설계 및 정·동특성 해석

A Flexure Guided Planar Scanner for Scanning Probe Microscope; Part1 : Design and Analysis of Static and Dynamic Properties

이 동 연* · 이 무 연*

Dong-Yeon Lee and Moo-Yeon Lee

(2004년 12월 29일 접수 : 2005년 5월 26일 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)

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 μm . The 3 axis positioning capability was verified by the mode analysis using the FEM program.

기 호 설 명

- A : 유연가이드의 단면적
- A_m : 변위 증폭비
- δ_p : PZT의 변위
- E : 탄성 계수
- f : 힘
- H : 수평 방향의 가상 힘
- I : 관성 모멘트
- k : 유연 가이드 강성
- l : 유연가이드의 길이

- M : 가상의 회전 모멘트
- q : 유연 가이드 변위
- U : 변형 에너지
- V : 수직 방향의 가상 힘

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 나노미터 수준의 분해능으로 평면 스캐닝(scanning)한다.⁽³⁾ 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

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

guide 기술이 가장 진보된 형태의 가이드 기술이다. 또한, 스캐너의 운동 방향 분해능을 높이기 위해 나노미터 수준의 분해능을 갖는 PZT 구동기를 이용하였다.⁽⁴⁻⁵⁾

이 연구에서는 SPM에 사용되는 140 μm 이상의 이송 거리를 갖는 flexure guided planar scanner를 설계하였다. Castigliano's theorem⁽⁶⁻⁷⁾을 이용하여 스캐너 가이드의 정적 해석을 수행하였고, 140 μm 이송 거리 달성을 위해 레버 구조를 갖는 PZT actuator를 설계하였다. 또한, 정·동특성 해석 및 설계의 검증을 위해 유한요소 해석을 수행하였다.

2. 평면 스캐너의 설계 및 해석

2.1 평면 스캐너의 구조

이 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. 이 연구의 가이드는 평면 방향의 3축 자유도를 갖고 있으므로, 3축 제어가 가능하다. 구동기로서 압전 구동기(PZT actuator)를 사용하였고, 대행정 달성을 위해 변위 증폭기를 사용하였다.⁽⁸⁾ 축당 2개의 압전 구동기가 동작하고, X축의 경

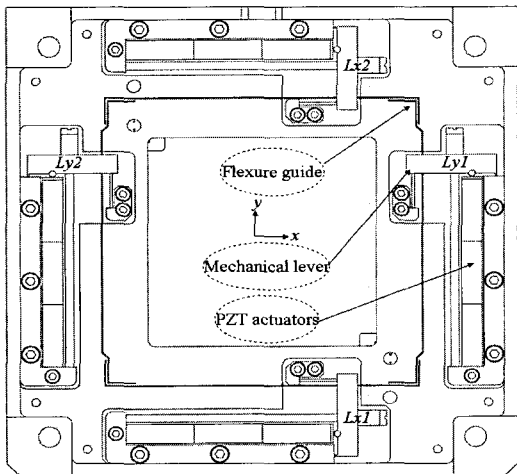


Fig. 1 Schematic diagram of the planar scanner

우 2개의 압전 구동기(Lx1 & Lx2)에 동일한 입력이 가해져서 병진 운동을 얻는다. Y축의 경우 각각의 구동기(Ly1 & Ly2)에 다른 입력이 가해져서 원하는 병진 및 회전 운동을 달성한다. 각각의 압전 구동기의 대행정을 위해 레버 구조형 변위 증폭기를 Fig. 2와 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.

2.2 유연 가이드의 강성

4개의 유연 가이드(Fig. 3)에 수평 방향 힘(F)이 가해지면 변위가 발생하며, 힘과 변위비인 강성을 이론적으로 구하기 위하여 Castigliano's theorem을 사

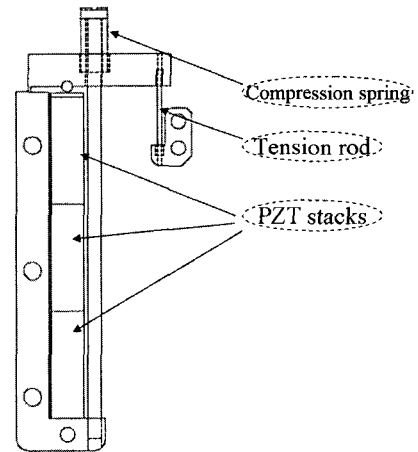


Fig. 2 A motion amplifying mechanism

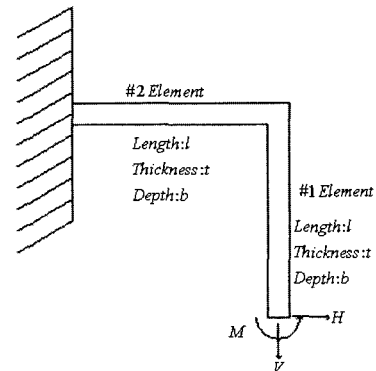


Fig. 3 Schematic diagram of a flexure

용하였다. 여기서 H 는 수평력으로 4개의 유연 가이드가 있으므로 $H=F/4$ 이다. F 각 축에 작용하는 힘, V 와 M 은 각각 수직 방향의 가상 힘과 가상의 회전 모멘트이고, Castigliano's theorem을 사용 하여 결정하였다. 수직 요소(#1)에 작용하는 strain energy 및 수직 요소(#2)에 작용하는 strain energy는 식 (1)~(2)와 같다.

$$U_1 = \frac{V^2 l}{2AE} + \int_0^l \frac{[M + H(l-y)]^2}{2EI} dy \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{H^2 l}{2AE} + \int_0^l \frac{[M + Hl - V(l-x)]^2}{2EI} dx \quad (2)$$

따라서 1개의 유연 가이드에 작용하는 total strain energy는 식 (3)과 같이 표현된다. 이때, 인장 및 압축에 의한 변형량은 굽힘에 의한 변형량 보다 작으므로 식 (4)~(5)와 같이 단순화 할 수 있다.

$$U = U_1 + U_2 \quad (3)$$

$$U \approx \int_0^l \frac{[M + H(l-y)]^2}{2EI} dy + \int_0^l \frac{[M + Hl - V(l-x)]^2}{2EI} dx \quad (4)$$

$$U = \frac{l^3}{EI} \left[\frac{M^2}{l^2} + \frac{3MH}{2l} - \frac{MV}{2l} + \frac{2H^2}{3} - \frac{HV}{2} + \frac{V^2}{6} \right] \quad (5)$$

수직 및 회전 모멘트 가상력에 의한 변위가 없는 구속 조건, 식 (6)~(7)을 식 (5)에 대입하면 식 (9)와 같이 정리된다.

$$\delta_v = \frac{\partial U}{\partial V} = 0 \quad (6)$$

$$\delta_M = \phi_M = \frac{\partial U}{\partial M} = 0 \quad (7)$$

$$-\frac{M}{2l} - \frac{H}{2} + \frac{V}{3} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{2M}{l^2} + \frac{3H}{2l} - \frac{V}{2l} = 0 \quad (8)$$

$$H = \frac{F}{4}, M = -\frac{3Fl}{20}, V = \frac{3F}{20} \quad (9)$$

이때, 실제 힘($H=F/4$)에 의한 변위비인 유연 가이드의 강성은 식 (10)~(11)로 정의된다.

$$q = \delta_H = \frac{\partial U}{\partial H} \quad (10)$$

$$q = \frac{l^3 F}{30EI} \quad (11)$$

$$k = \frac{F}{q} = \frac{30EI}{l^3} \quad (12)$$

식 (12)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. 4와 같은 레버 구조의 변위 증폭기를 사용하고, 예압과 변위 증폭비가 고려된 유연 가이드의 변위량을 이론적으로 계산하였다. 이때 PZT의 변위(δ_p) 특성을 고려해야 하는데, 압축이 없을 때의 최대 변위량($\delta_{p,max}$)과 압축이 최대일 때의 최대 발생력($f_{p,max}$) 사이의 관계는 식 (13)과 같다.

$$\delta_p = -\frac{\delta_{p,max}}{f_{p,max}} f_p + \delta_{p,max} \quad (13)$$

이때, $f_p = \frac{c}{a} f_2 = A_m f_2$ 는 PZT에 걸리는 힘이다. 여기서 $A_m = c/a$ 는 변위 증폭비, f_2 는 유연 가이드에 의해 변위 증폭기에 걸리는 힘이며, 예압을 고려하면 다음과 같다.

$$f_2 = \frac{k}{2}(q_0 + q) \quad (14)$$

여기서 q 는 압전체에 의해 발생하는 유연 가이드의 변위이다. f_1 은 추가적인 압축력으로 크기가 다른 힘보다 작아 계산시 제외한다. 따라서 식 (13)~(14)는 식 (15)~(16)로 정리되며, 압전체의 변위를 계산할 수 있다.

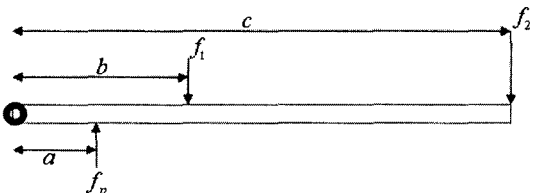


Fig. 4 Schematic diagram of the mechanical lever

$$f_p = \frac{A_m k}{2} (q_0 + q) \quad (15)$$

$$\delta_p = -\frac{\delta_{p,max}}{f_{p,max}} \left(\frac{A_m k}{2} (q_0 + q) \right) + \delta_{p,max} \quad (16)$$

이때, $q = \delta_p A$ 이므로, 구하고자 하는 가이드 변위는 다음과 같다.

$$q = \frac{2A_m \delta_{p,max} f_{p,max}}{2f_{p,max} + A_m^2 k \delta_{p,max}} - \frac{A_m^2 \delta_{p,max} k q_0}{2f_{p,max} + A_m^2 k \delta_{p,max}} \quad (17)$$

식 (17)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 1과 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 PZT의 약 1/100로 한다. 평면 스캐너의 재질은 알루미늄 합금

Table 1 Design specifications of the planar scanner

Stiffness of the flexure guide (k)	<0.6 N/ μ m
Natural frequencies of the flexure guide (f_n)	>200 Hz
Maximum Von-Mises stress (σ_{max})	<160 Mpa
Preload (q_0)	50 μ m
Height of the planar scanner	30 mm

Table 2 Design results of the planar scanner

Length (l)	8.10 mm
Thickness (t)	0.41 mm
Width (b)	24.5 mm
Mechanical amplification factor (A_m)	4
Stiffness of the flexure guide (k)	0.572 N/ μ m
1 st Natural frequency (f_n)	216 Hz
Maximum displacement of the flexure guide without the preload	152.6 μ m
Maximum displacement of the flexure guide with the preload	142.3 μ m

(Al 6061-T6)이고, 이 재료의 항복 응력은 약 $\sigma_Y = 240$ Mpa이고, 안전율을 고려하여 PZT에 최대 전압을 인가시 평면 스캐너에 걸리는 최대 응력은 항복 응력의 약 67%인 $\sigma_{max} = 160$ Mpa로 제한한다. 또한 평면 스캐너의 최대 높이는 SPM의 제품 적용시 30 mm로 제한한다. Table 1의 사양을 맞추기 위하여 유연 가이드를 식 (12)~(17)를 이용하여 Table 2와 같이 설계 하였고, 설계 결과는 Table 1의 사양을 만족한다. 설계 결과에서 유연기구의 강성은 약 0.572 N/ μ m이고, 설계 기준인 <0.6 N/ μ m조건을 만족한다. 또한, 유연 기구의 강성과 이동 질량의 비인 1차 공진 주파수는 설계 결과에서 216 Hz으로, 설계 스펙의 >200 Hz를 만족한다. SPM에 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 이 논문에서 설계된 평면 스캐너의 구동 주파수는 약 20 Hz까지 가능하다.

3. 평면 스캐너의 유한 요소 해석

3.1 강성 해석

PZT에 최대 전압(150 Volt) 인가시 발생하는 힘(f_0)은 42.5 N이다. 축 당 2개의 압전 구동기가 있으므로, 가이드에 걸리는 힘은 85 N이다. 따라서 85 N이 가이드에 작용할 때 설계 결과의 검증을 위해 유한요소 해석 상용 프로그램인 Pro/mechanica⁽⁹⁾을 이용하여 해석을 수행하였다. 이때 예압은 없다고 가정하였다. 변위 결과는 Fig. 5와 같고, 유연 가이드 (region 1) 부분을 확대한 결과는 Fig. 6과 같다. 최

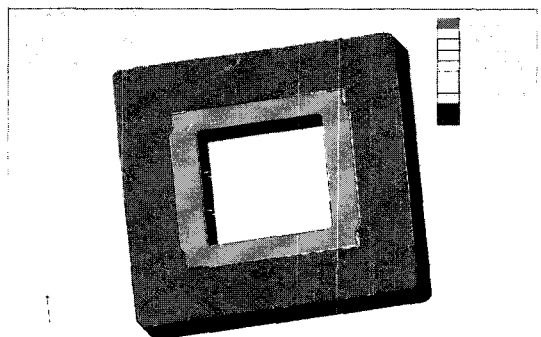


Fig. 5 Displacement of the planar scanner

대 변위는 약 $144.8\mu\text{m}$ 이고, 설계 결과와 약 5.1% 차이를 보이고, 주 원인은 설계시의 물성치와 해석시의 물성치가 다르기 때문이다. 그러나, SPM 적용시 요구 조건인 100 μm 이상의 조건에 대해서는 이론 해석 및 유한 요소 해석 결과 모두 만족한다. 또한, 응력 해석 결과는 Fig. 7과 같으며 최대 응력은 유연 가이드의 고정부 근처에서 발생한다. 최대 응력

(σ_{max})은 약 120 Mpa이고, Table 1의 최대 항복 응력 조건(<160 Mpa)을 만족한다.

3.2 모드 해석(Modal Analysis)

이 연구의 평면 스캐너는 3축 자유도를 갖고, 설계 결과 등을 검증하기 위하여 모드 해석을 시뮬레이션 하였다. 공진 주파수는 Table 3에 나타내었으며, 설계시 첫 번째 모드(Fig. 8, X축)의 공진 주파수와 약 3.2% 차이를 보인다. 첫 번째, 두 번째 모드(Fig. 9, Y축)는 병진 운동에 관련된 모드이고, 세 번째 모드(Fig. 10)는 회전에 관련된 모드이다. 설계시 완전하게 대칭 구조를 가정하면, 첫 번째와 두 번째의 병진

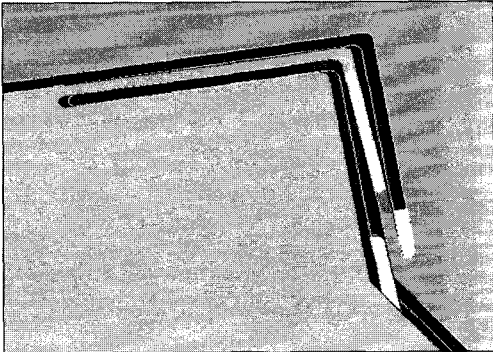


Fig. 6 Displacement of the flexure guide (magnified)

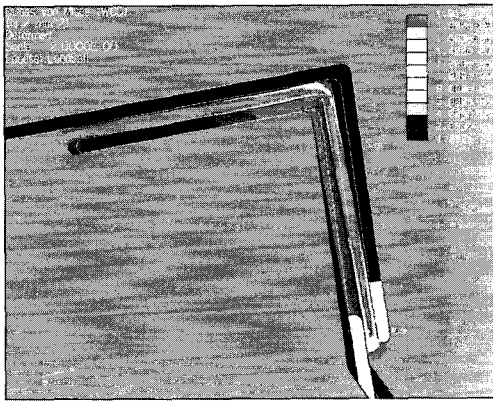


Fig. 7 Stress of the flexure guide

Table 3 Results of the mode analysis

Mode	Axis	Natural frequency(f_n)
1 st mode	Translational X axis	209 Hz
2 nd mode	Translational Y axis	234 Hz
3 rd mode	Rotational θ_z axis	373 Hz

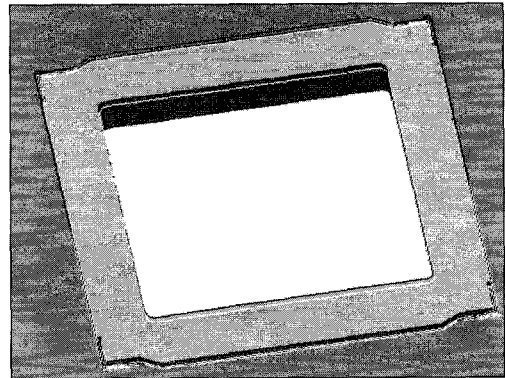


Fig. 9 2nd Mode: translational Y axis (234 Hz)

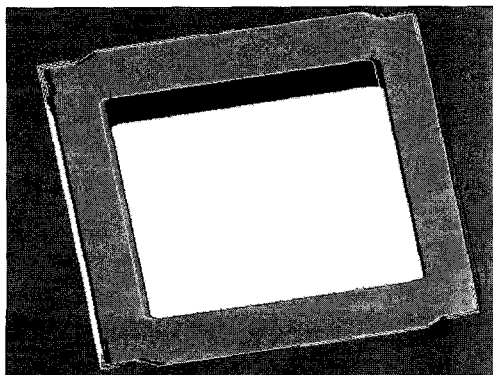


Fig. 8 1st Mode: translational X axis (209 Hz)

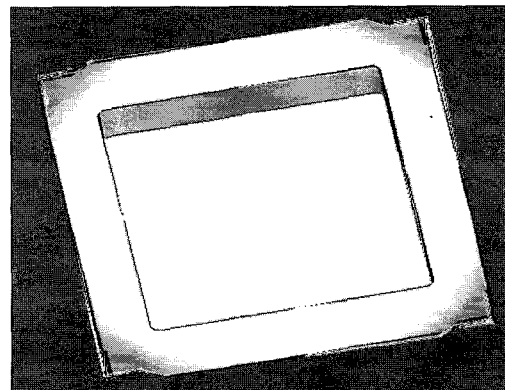


Fig. 10 3rd Mode: rotational θ_z axis (373 Hz)

모드 공진 주파수는 일치할 것이다. 그러나, 간섭 (interference) 등 설계시 여러 제약 조건들 때문에 X축과 Y축의 유연 가이드의 강성이 다르게 나타난다. 그러나 이러한 차이들은 실제 평면 스캐너의 구동시 큰 문제를 발생시키지는 않는다. 설계된 유연 가이드의 특성 상 회전 모드가 존재하며 회전 모드 공진 주파수는 2개의 병진 모드 공진 주파수보다 매우 크게 나타난다. 실제 구동시 각 축(X & Y axes)에 2개의 압전 구동기가 설치되는데 구동기에 들어가는 입력 전압이 동일하더라도 PZT의 특성상 출력 변위가 달라진다. 이러한 에러를 보상하기 위해 세 번째 모드인 회전 모드를 사용하는데, 이 때 Y축에 설치된 2개의 압전 구동기에 서로 다른 독립적인 입력 전압을 가함으로써 회전에 기인한 에러를 보상할

수 있다. 따라서 이 연구의 평면 스캐너는 3개의 입력과 3개의 센서를 통하여 평면 변위를 제어할 수 있다. 제어시의 특성 결과는 입력 노이즈, 피드백 센서 등의 노이즈에 따라서 달라진다.

3.3 조립도

이 연구의 평면 스캐너의 최종 조립도는 Fig. 11과 같다.

4. 결 론

이 연구에서는 주사 현미경에 사용되는 평면 스캐너를 설계 및 해석하였고, 다음과 같이 요약된다.

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

(2) 이론 해의 결과인 유연 가이드 강성과 공진 주파수등과 3축 이송의 가능성을 검증하기 위해 유한 요소 해석을 수행하였고, 수행 결과 유연 가이드 강성은 약 5.1%, 공진 주파수는 약 3.2% 오차로 비교적 잘 일치하고, 모드 해석을 통하여 3축($XY\theta_z$) 이송 가능성을 검증하였다.

(3) 이 연구의 평면 스캐너는 약 150 mm 크기의 샘플까지 이송 가능하며, 최대 이송 변위는 유한 요소 해석 및 이론 해석 결과 약 142.3 μm 이다.

참 고 문 헌

- (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. and 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) Ryu, J. W., Gweon, D. G. and Moon, K. S., 1997, "Optimal Design of a Flexure Hinge Based $XY\theta$ Wafer Stage", Precision Engineering, Vol. 21,

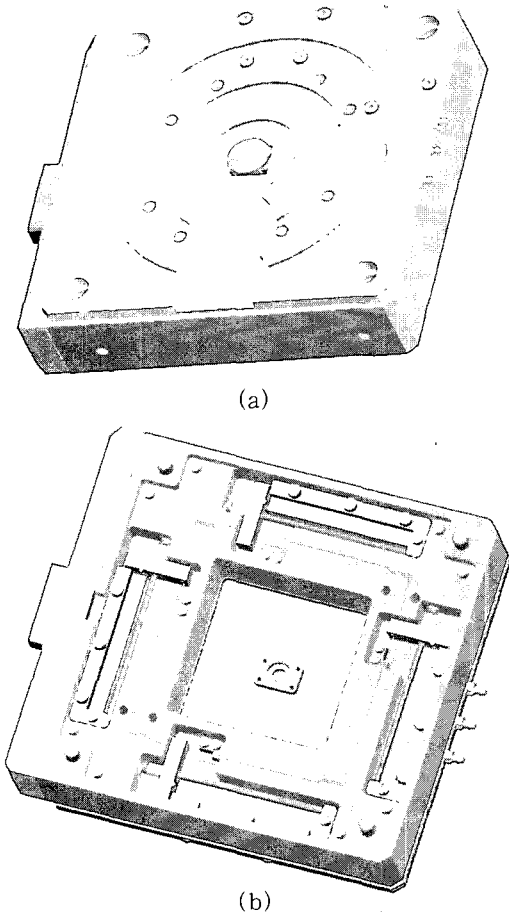


Fig. 11 (a) Total assembly of the planar scanner: showing the vacuum compatible sample chuck (b) Total assembly of the planar scanner: showing PZT actuators

pp. 18~28.

(5) Ryu, J. W., Lee, S. Q., Gweon, D. G. and Moon, K. S., 1999, "Inversekinematic Mechatronics, Vol. 9, pp. 657~674.

(6) Beer, F. P. and Johnston, R. JR., 1992, "Mechanics of Materials"(2nd edi.), McGrawHill, Inc., London.

(7) Smith, S. T., 2003, "Flexure : Elements of

Elastic Mechanics", Taylor & Francis, Inc., London.

(8) 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.

(9) Toogood, R., 2001, "Pro/MECHANICA Tutorial: Structure (Integrated Mode)", SDC Publications, Alberta.