

## 진공용 나노 스테이지 개발을 위한 고찰

홍원표\* , 강은구\* , 이석우\* , 최헌중\*

\* 한국생산기술연구원 나노가공팀

### ABSTRACT

Miniaturization is the central theme in modern fabrication technology. Many of the components used in modern products are becoming smaller and smaller. The direct write FIB technology has several advantages over contemporary micromachining technology, including better feature resolution with low lateral scattering and capability of maskless fabrication. Therefore, the application of FIB technology in micro fabrication has become increasingly popular. In recent model of FIB, however the feeding system has been a very coarse resolution of about a few  $\mu$  m. It is not unsuitable to the sputtering and the deposition to make the high-precision structure in micro or macro scale. Our research is the development of nano stage of 200mm strokes and 10nm resolutions. Also, this stage should be effectively operating in ultra high vacuum of about  $1 \times 10^{-7}$  torr. This paper presents the concept of nano stages and the discussion of the material treatment for ultra high vacuum.

### 1. 서론

최근 대두하고 있는 NT, IT, BT 등 소위 신기술의 경향은 크게 극미세화, 극초정밀화로 요약할 수 있으며, 이의 신산업 시장이 형성됨에 따라 이들 제품을 생산 및 가공할 수 있는 극미세/극초정밀 가공 장비의 사용 여부가 향후 국가 경쟁력 확보의 핵심요소가 될 것으로 예상하고 있다. 또한, 전자 산업이 기계 산업과 불가분의 관계를 가지게 되면서 컴퓨터를 이용한 고속 생산성, 고속도가 요구되는 극미세/극초정밀 기계-전자부품을 생산하기 위해서 기계설비 및 산업 장비의 자동제어가 이루어지고 있다.

정밀 가공, 정밀 제어, 정밀 계측 등의 분야에서는 고정도, 고발생력, 고변위의 요구사항이 적절히 조합되어 필요로 하는 기능을 원활히 수행할 수 있는 정밀 위치 이송 구동부 및 부품 조립부가 필수적으로 요구되며 그 수요가 급증하고 있는 추세이다. 특히 초정밀 기계와 리소그래피, 스테퍼 등의 반도체 제조 장비에 적용하기 위한 나노이송계의 개발이 요구되고 있다.

수백 mm 정도의 긴 변위의 이송계에 나노수준의 분해능을 갖기 위한 방법 중의 하나로 coarse 스테이지와 fine 스테이지를 동시에 구동하는 방식이 많은 연구자에 의해 연구되었다.[1-3] coarse 스테이지는 수 마이크로 정도의 정밀도를 가지며, 수백 mm 정도의 스트로크가 구동 가능하게 제작된다. 반면 fine 스테이지는 수백 nm 정도의 정밀도를 가지며 수십  $\mu$  m 정도의 스트로크로 제작되어진다. 이처럼 두 개의 스테이지를 동시에 구동하기 위해서는 하드웨어적인 문제 해결뿐만 아니라 적절한 제어알고리즘 개발이 필요하다. Sakuta et al.[1]는 마찰구동기와 PZT 액츄에이터로 구동되는 듀얼 서보 메카니즘을 연구하였다. PZT 액츄에이터는 마찰 구동부의 슬라이드면에 부착되었으며, 인치웜(inch-worm) 구동방식을 이용한 정밀 위치제어가 수행되었다. Okazaki et al.[2]는 fine/coarse 서보 시스템을 이용하여 정밀위치결정 시스템을 구성하였으며, 레이저 인터페로미터와 갠센서를 이용한 피드백을 수행하였다. 서보시스템의 제어방식은 스트로크와 주파수 대역에 따라 분할하여 제어가 수행되어 진다. Lee and Kim[3]은 듀얼 서보 스테이지를 제작하였으며, 구성은 3축의 리니어 모터에 의한 대변위 이송과 3축의 PZT에 의한 미세 이송부로 되어 있다. 또한 이 시스템의 제어알고리즘은 PID를 이용하였다.

본 연구과제에서 개발하고자 하는 나노 스테이지는  $10^{-7}$  torr 정도의 초고진공 내에서 작동되어 진다. 따라서 요구되는 이송 정밀도를 만족시키는 스테이지 이송부의 설계뿐만 아니라 스테이지부의 재료선정 및 가공 표면에 대한 표면 처리 기술 그리고 가공시 남아있는 잔유물 등의 세정이 특히 중요하다. 이에 본 연구과제에서 설계한 나노 스테이지의 소개와 스테이지를 진공 환경에 적용하기 위한 재료 선정, 표면처리 기술 및 세정기술에 대한 개략적인 기술을 조사하여 정리하였다

## 2. FIB 장비

본 연구과제에서 개발되는 진공용 나노 스테이지를 최종적으로 적용 시험하기 위한 장비는 SEIKO 사의 SMI-8800 FIB 장비로 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나타내었다.

FIB 장비는 이온 소스인 Ga<sup>+</sup> 를 이용하여 Sputtering 또는 Deposition 효과로 TEM 시편 제작, 반도체 패턴 유지 및 보수 등에 사용되고 있다. Table 1 과 같이 각각의 진공 챔버 부분에 따라서 10<sup>-7</sup> - 10<sup>-8</sup> torr 정도의 진공도 유지가 요구되는 장비이다.

Fig. 1 은 챔버내에 있는 X, Y, Z, Tilting 과 회전축에 대한 모터 및 스테이지 사진을 나타내고 있다. 본 장비는 회전 모터만 제외하고 모두 대기중에 노출이 되어 있으며, 동력 전달은 기어류 및 링크 구조를 이용하여 전달되고 있다.

Fig. 2 는 웨이퍼 등 시편의 진공 챔버내 입출시에 보다 효과적인 진공유지를 위한 load-lock 장치 및 웨이퍼가 장착될 수 있는 시편전달 장치에 대한 사진이다. load-lock 장치는 시편의 입출에 따른 Main 챔버의 진공도 파기를 최소화할 목적으로 Sub 챔버만의 진공 파기를 위한 장치이다.

Table 2 는 Fig. 1 의 이송스테이지 관련 사양으로 앞에서 기술한 바와 같이 기어류 및 링크 구조연결에 의한 동력 전달 구조로 인해 백래쉬 등의 다양한 오차가 수반되기 때문에 초정밀 기계 및 반도체 제조 장비에서 요구되는 나노정밀도를 가지기 어렵다

Ultimate Vacuum	Main Chamber	5×10 <sup>-7</sup> torr or less (3×10 <sup>-7</sup> torr or less using liquid N <sub>2</sub> trap)
	Ion Chamber	5×10 <sup>-7</sup> torr or less
	Electron Gun Chamber	1×10 <sup>-8</sup> torr or less(SE)
	Sub Chamber	5×10 <sup>-6</sup> torr or less

Table 1. Specifications of evacuation ventilation system

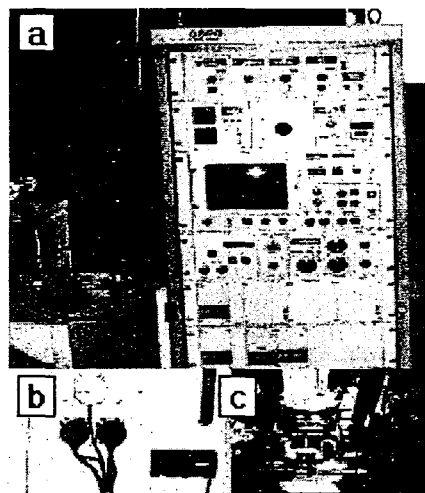


Fig. 1 FIB controller, feeding motors and stage

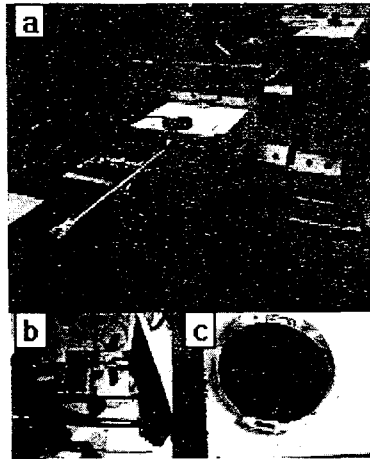


Fig. 2 Load-lock system and sample table

	Stroke	Resolution	Max. Feedrate
X	200mm	0.125 $\mu$ m/step	5mm/sec
Y	200mm	0.125 $\mu$ m/step	5mm/sec
Z	20mm	0.5 $\mu$ m/step	2.5mm/sec
$\Theta$	360°	0.0013°/step	
T	60°	0.0001°/step	

Table 2. Specifications of sample drive system

### 3. 진공용 나노 스테이지 설계

현재 상용 스테이지 제품의 종류는 크게 인치웜 방식과 듀얼 방식으로 구분할 수 있다. 또한 듀얼 방식은 독립형과 일체형으로 나눌 수 있다.

Fig. 3 은 인치웜 방식 스테이지의 예이다. 인치웜 방식의 특징은 하나의 액츄에이터로 비교적 큰 변위를 정밀하게 이송할 수 있다는 장점이 있지만, 최대 변위가 수십 mm 정도로 제한되어 있다는 단점이 있다.

듀얼 방식 스테이지는 인치웜 방식과 달리 하나의 축 이송을 위해 대변위와 미세변위 2 개의 액츄에이터를 사용하는 방식이다. 인치웜 방식의 가장 큰 단점인 이송변위 제한의 문제는 없지만, 설계/조립시의 복잡성과 제어시의 어려움 등에서 단점이 있다. 독립형과 일체형 듀얼 방식의 구분은 Fig. 4 와 같이 대변위 이송부와 미세변위 이송부가 구분되어 있는지, Fig. 5 와 같이 대변위 이송부에 미세변위 이송부가 통합되어 있는지에 따라 구분할 수 있다.

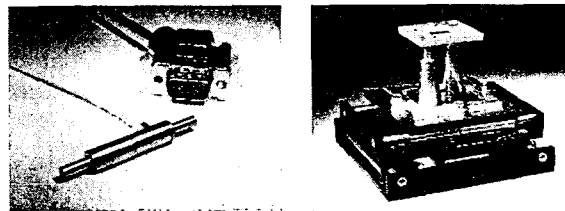


Fig. 3 Inch-worm type nano stage (Kleindiek, Germany)

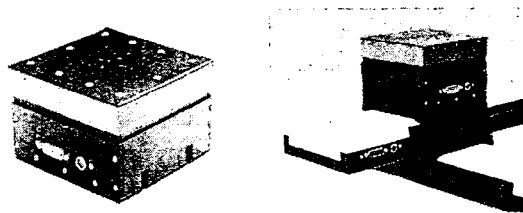
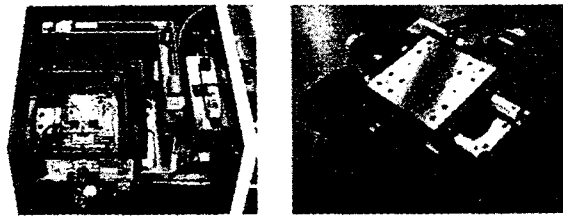


Fig. 4 Separate-dual type nano stage (PI, Germany)



(a) RAITH, Germany (b) Nano control, Japan  
Fig. 5 Integrated-dual type nano stage

본 연구과제의 최종 목표는 집속도 10nm 이하 FIB 장비에 적용하기 위한 5 축 나노 스테이지이다. 이를 통해 향후 NT, IT, BT, ET, ST 분야 극미세/극초정밀 제품의 제조가 가능한 나노 가공 및 측정 장비의 구축에 활용하고자 하였다.

이의 시작단계로 회전 2 축을 제외한 3 축 나노 스테이지 개발을 위한 이송 및 구동부를 설계 및 제작하고자 하였다. 진공, 진동 및 열적인 특성을 고려한 설계가 요구되며, 이송계의 특징으로는 대변위의 나노정밀도를 가지는 특징이 있다. 이를 위해서는 마이크로정도의 대변위를 갖는 이송계와 나노정도의 미세변위 이송부를 결합하여 동작하는 듀얼 서보 액츄에이터 방식을 취하고자 한다. 따라서 재반적인 구조 관련 요소의 설계기술 및 제작기술 그리고 제어기술을 결합하며, 특히, 초고진공용 요소부품 제작기술을 개발하고자 하였다.

Fig. 6 은 본 연구과제에서 개발될 일체형 듀얼 방식 3 축 이송계에 대한 개념도이다. Z 축의 안정성을 유지하기 위해 양측구동 방식을 채택하였으며, 향후 추가될 회전 2 축(회전 및 틸트 구동부)을 고려하여 설계하였다. Table 3 에 개발될 대변위 이송부 및 미세변위 이송부에 대한 대략적인 사양을 나타내었다. 대변위부의 경우 분해능이 대략 0.1 $\mu$ m 정도이며, 미세변위부는 대략 1nm 정도를 가지도록 제작하고자 한다.

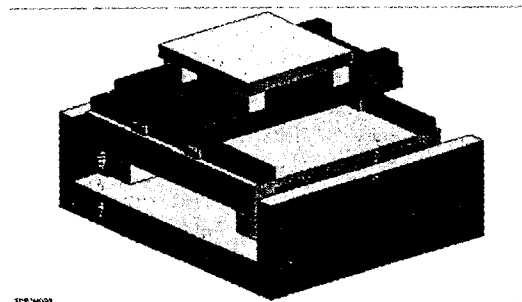


Fig. 6 Concept drawing of the prototype nano stage in UHV

	Coarse stage	Fine stage
Stroke	200mm	about 10 $\mu$ m
Resolution	about 0.1 $\mu$ m	about 1nm
Degree of Freedom	3	3
Sensor	Laser scale	Strain gage

Table 3. Specifications of the nano stage

#### 4. 진공 재료 및 표면처리 기술

본 연구과제에서 제작되는 나노 스테이지는 10<sup>-7</sup> torr 정도의 초고진공 내에서 작동되어진다. 따라서 스테이지의 재료선정 및 가공 표면에 대한 표면 처리 기술 그리고 가공시 남아있는 잔유물 등의 세정이 중요하다. 이에 진공 재료 및 표면 처리 기술 그리고 세정기술에 대한 개략적인 기술을 조사하여 정리하였다.

진공 시스템을 구성하는 진공부품의 제작은 적절한 재료를 선택하고 가공과 표면처리 및 세정을 거쳐 완성되어진다. 진공용 재료로는 기체방출률(outgassing rate)이 낮고 탈 기체 처리

(baking)를 위한 가열온도에서 견딜 수 있으며 구조적으로 강한 재질이 요구된다.

기체방출을 낮추기 위해서는 표면에 두꺼운 산화층이 형성되지 않고 재료 내부에 용해되어 있는 용존 기체량이 적은 재료가 좋다. 이 밖에도 재료를 선택할 때는 내식성, 가공성, 용접성 등도 고려할 필요가 있다.

진공용기에서 방출되는 기체는 재료 표면에 화학흡착 또는 물리흡착되어 있거나, 재료내부에서 용존 기체가 확산해 나오거나 표면의 오염물질로부터 생성된다. 표면처리는 흡착(adsorption) 또는 흡수(absorption)되어 있는 기체를 강제로 탈리시켜 장치 가동 중에 온도상승이나 빛 또는 하전입자의 충돌에 의한 기체방출을 줄이고, 재료표면에 근본적으로 기체흡착이 어렵도록 만들며, 표면에 확산을 억제하는 층을 형성하는 것이 목적이다. 표면의 오염물질을 제거하는 세정작업도 넓게는 표면처리의 일종이라고 볼 수 있다.

대표적인 진공용 재료는 스테인리스강과 알루미늄 합금을 들 수 있으며 티타늄재료는 진공용기의 유용성이 높다는 것이 알려져 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

스테인리스강의 특징으로 녹이 슬지 않으며 구조적 강도가 높고 비교적 저렴할 뿐 아니라 진공특성도 매우 우수하기 때문에 과거부터 진공용기 및 도관용 구조재료로 널리 사용되고 있다. 스테인리스강 중에서도 304 와 316 및 304L 과 316L 이 가장 흔하게 쓰이고 있다. 316L 은 투사율(permeability)이 낮기 때문에 핵융합 실험장치, 플라즈마 발생장치, 가속기 등 자장의 영향 안에 놓이는 진공용기의 재료로 많이 사용한다.

알루미늄은 가볍고 연하면서 내식성이 높고 매우 좋은 전기적, 열적 도체이며, 광반사율이 매우 높다. 또한 성형성이 뛰어나며 여러 가지 표면처리가 가능하므로 가정용품이나 건축물의 내외장재로 널리 쓰이고 있다. 알루미늄은 거의 완벽한 비자성체이며 독성이 전혀 없고 폐기물의 재생이 용이하다. 알루미늄은 유연하고 점성이 좋으나 용도에 따라 좀더 강도를 높인다든지, 내식성을 높인다든지 하는 물성 개선이 필요한 경우에는 적절한 원소를 첨가한 알루미늄 합금을 사용하여 첨가원소의 종류와 양에 따라 영향을 받는다.

순 티타늄(Ti) 또는 티타늄 합금도 초고진공(ultrahigh vacuum: UHV)이나 극고진공(extremely high vacuum: XHV)의 재료의 용기재료로 검토되고 있다. 티타늄은 가볍고 비자성이며 용접 부분의 기계적 성질이 나빠지지 않는다. 또 정련 과정에서 산화물, 질화물 등의 부동태막(passivation film)이 형성되어 내식성이 좋을 뿐 아니라 기체흡착에 대해서 불활성이어서 낮은 기체방출 특성을 가진다. 질화 티타늄(TiN)을 피복한 티타늄 재료는 순 티타늄 및 TiN 이 증착된 스테인리스강 또는 전해연마 처리된 스테인리스강보다 기체 방출률을 줄일 수 있다.

따라서 알루미늄 합금재료는 매우활성이 높은 금속이어서 대기 중의 산소, 특히 수분과는 순식간에 반응하기 때문에 두꺼운 산화층이 형성되고 많은 기체흡착이 일어난다. 그리고 티타늄(TiN) 재료는 진공부품으로 유용성이 높다는 것을 알지만 가격이 비싸다는 단점을 가지고 있다.

결국 향후 제작될 나노 스테이지의 재료로는 진공만을 고려할 경우 스테인리스강이 좀더 유리한 것처럼 보인다. 그러나 이송계의 경우 이송부하가 작을수록 유리한 특성을 보이므로 이를 충분히 검토하여 알루미늄이나 스테인리스강을 제작에 이용하고자 한다.

스테인리스강의 표면처리방법으로는 세정과 표면 평탄화를 겸한 화학연마(chemical polishing)가 널리 활용되고 또한 초고진공 용기에서는 전해연마(electro-polishing:EP)가 거의 필수적으로 시행되며, 전해연마 처리결과  $2 \times 10^{-9}$ Pa 의 진공을 얻을 수 있다.

그리고 재료내부에 용해되어 있는 수소량을 감소시키기 위한 진공고온가열(vacuum firing)도 널리 이용되며, 가장광범위하게 사용하는 것은 가열 탈기체 처리(baking)하는 것이다. 이밖에 스테인리스 강 자체의 청정도가 기체방출률에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 재료의 용존기체나 비금속 개재물의 양을 매우 낮은 초청정 강을 만들거나, 표면에 크롬 산화막을 생성시켜 기체방출을 감소시키는 연구가 진행되고 있다.

진공재료의 세정은 표면에서의 기체방출을 최소화하기 위함으로, 세정은 그리스 및 절삭유와 같은 표면의 오염을 비롯해 흡착된 탄화수소와 불순물 원소, 또는 산소나 황과 같은 반응성 원소와의 화합물 등을 제거하는 것이다.

세정공정은 습식세정(wet cleaning)과 건식세정(dry cleaning)으로 구분되며 화학세정은 습식세정의 대표적인 방법이며, 화학 약품 조에 부품을 담가 초음파나 공기 폭기(air bubbling)를 사용해 오염물질을 제거 하는 방법이다.

건식세정은 용기 내에 산화질소(NO), 산소(O<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>)과 같은 반응성 기체를 채워 200℃ 정도로 가열하거나, 재료를 고진공에서 800℃ 이상의 고온으로 가열(vacuum firing)하거나, 플라즈마를 발생하고 플라즈마 입자에 의한 출격탈리(stimulated desorption)를 이용해 오염물질을 제거하는 방법이다.

세정은 그 효과도 중요하지만 환경친화적이며 효율적인 하수처리가 가능한 세정제를 사용하는 것이 점차 중요해지고 있다.

## 5. 결론

본 연구과제의 최종 목표는 집속도 10nm 이하 FIB 장비의 나노 스테이지를 개발함으로써 향후 이를 통해 NT, IT, BT, ET, ST 분야의 극미세/극초정밀 제품의 제조가 가능한 나노 가공 및 측정 장비의 구축에 적용하고자 하는 것이다.

이의 세부적인 목표는 200mm의 변위를 가지며 10nm 이하의 분해능을 가지는 초진공용 나노 스테이지의 제작이다. 이를 위해 일체형 듀얼 방식 나노 스테이지 시제품의 개념도를 완성하였으며, 제품제작에 필요한 주변 부품선정을 수행 중이다. 또한 제품제작을 위한 재료선정 및 표면 처리방법을 향후 적절히 고려하여 설계 및 제작의 완성도를 높이고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Sakuta, S., Okawa, K., and Ueda, K., "Experimental Studies on Ultra-Precision Positioning - An Inchworm Movement Method using and Coarse Positionings," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng, Vol. 27, No. 3, pp. 235-240, 1993.
- [2] Okazaki, Y., Asano, S., and Goto, T., "Dual-Servo Mechanical Stage or Continuous Positioning," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng, Vol. 27, No. 2, pp. 172-173, 1993.
- [3] Lee, C. W., and Kim, S. W., "An Ultraprecision Stage for Alignment of Wafers in Advanced Microlithography," Precision Engineering, Vol. 21, pp. 113-122, 1997.
- [4] Pahk, H. J., Lee, D. S., and Park, J. H., "Ultra Precision Positioning System for Servo Motor - Piezo Actuator using the Dual Servo Loop and Digital Filter Implementation," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 51-63, 2001.
- [5] Woronko, A., Huang, J., and Y. Altintas, Y., "Piezoelectric Tool Actuator for Precision Machining on Conventional CNC Turning Centers," Precision Engineering, Vol. 27, pp. 335-345, 2003.
- [6] Sasaki, M., Suzuki, T., Ida, E., Fujisawa, F., Kobayashi, M., and Hirai, H., "Track-following Control of a Dual-Stage Hard Disk Drive using a Neuro-Control System," Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 11, pp. 707-716, 1998.
- [7] Li, Y., and Horowitz, R., "Design and Testing of Track-following Controllers for Dual-Stage Servo Systems with PZT Actuated Suspensions," Microsystem Technologies, Vol. 8, pp.194-205, 2002.
- [8] Liu, H., Lu, B., Ding, Y., Tang, Y., and Li, D., "A Motor-Piezo Actuator for Nano-scale Positioning based on Dual Servo Loop and Nonlinearity Compensation," J. of Micromech. Microeng, Vol. 13, pp. 295-299, 2003.