

자기 베어링으로 지지 되는 직선운동 테이블의 초정밀 위치제어에 관한 연구

Micropositioning of a Linear Motion Table with Magnetic Bearing Suspension

김의석*,안형준*,정윤**,장 인배***,한 동철****

Oui-Serg Kim*, Hyeong-Joon Ahn*(서울대 기계설계 대학원), Yoon Joung**, (삼성전자 기반 기술센터),
In-Bae Chang*** (강원대 정밀기계) and Dong-Chul Han**** (서울대 기계설계)

Abstract

This paper presents a design and performance of the 6 D.O.F. linear motion table with a magnetic bearing suspension. The linear positioning of the table with a 150 mm stroke is driven by a brushless DC Linear motor and the other attitudes of the stage are controlled by the analog PD controller with magnetic bearing actuators. Each magnetic bearing unit which consists of 3 electromagnets, 3 capacitance probes and 3 backup bearings affords controlled forces by detecting the air gap between the probes and guideways.

An integral type capacitance probe amplifier is equipped on the upper plate of the table so that the probe line to the probe amplifier can be shorter therefore the problems due to the stray capacitance and noise can be reduced.

From the pitch-yaw errors measured by the autocollimator, the vertical and horizontal straightness errors of the table are derived that they are maintained below 1 μm over 100 mm stroke. The positioning accuracy of the linear motion is maintained below 2 μm and the repeatability error is below 1 μm .

Keywords : magnetic bearing(자기 베어링), linear motion table(직선 운동 테이블), straightness(진직도), micropositioning(초정밀 위치제어), capacitance probe(정전 용량 센서)

1. 서론

현재 반도체 제조 공정 시스템에서 초정밀 장비에 대한 요구가 높아지고 있으며, 특히 직선 이송 위치 제어는 필수적이라 할 수 있다. 직선 위치 제어 시스템에서는 구동 및 지지 기구에 의해 정밀도가 결정되며, 다양한 기구들이 개발 중에 있다. 직선 이송 기구의 지지 기구로서 자기 베어링을 사용할 수 있으며, 견인식 자기 부상 시스템은 원래 불안정한 시스템이지만 귀환 제어를 통하여 계를 안정화시킬 수 있다. 자기 베어링은 윤활 시스템이 필요 없으며, 따라서 반도체 제조에서 항상 요구되는 진공 또는 청정환경에서 사용되어질 수 있다.

본 논문에서는 센서 검사장비의 개발을 위하여 자기 부상되는 직선 이송 테이블 시스템을 적용하였으며, 최종 제조공정 단계에서 웨이퍼의 검사를 수행하는 것을 목표로 하고 있다.

본 시스템은 기존의 2축 X-Y 테이블 시스템을 자기 부상 테이블 시스템으로 대체함으로써 높은 이송 정밀도를 갖고 마찰을 줄일 수 있으며, 윤활에 의한 오염을 없애고 롤-피치-요잉 운동을 조절하는 정밀 이송 기구를 없앨 수 있다. 자기 부상 테이블 시스템은 테이블의 부상뿐만 아니라 공칭 공간내에서 정밀한 자세 제어도 가능케 하고 있다. 이러한 시스템에 대한 연구는 적게 이루어지고 있으며, Trumper¹,

Kuzin² 과 정윤^{3,4} 은 자기 베어링으로 지지 되는 직선 이송 테이블을 개발하였으며, Tieste⁵ 는 주파수 응답 특성을 실험하였으며, Eisenhaure⁶ 는 자기 부상되는 테이블 시스템의 정밀 설계에 대한 제안을 하였다.

본 논문에서는 150mm 이송거리를 갖는 BLDC 리니어 모터와 이송 위치는 리니어 스케일에 의하여 검출하며, 테이블은 4개의 자기 베어링 유닛과 본체로 구성되어 있다. 각각의 자기 베어링 유닛은 3개의 전자석과 3개의 정전 용량형 센서로 구성되어 있다. 테이블 시스템의 성능 특성은 오토콜리미터와 레이저 인터페로미터로써 측정되었다.

2. 시스템 설계

테이블 시스템 Fig.1 에서는 6개의 가이드면과 4개의 자기 베어링 유닛, 테이블 본체, 리니어 모터, 리니어 스케일, 12개의 센서를 제어하는 센서 앰프, 웨이퍼 홀더등으로 구성된 테이블 시스템의 개략도를 보이고 있다. 각각의 자기 베어링 유닛은 3개의 전자석과 3개의 정전 용량형 센서로 구성되어 있으며, Fig.2 와 같이 하나의 유닛으로 볼딩하였다. 사용되어진 전자석의 사양은 정윤⁴ 의 것과 같다.

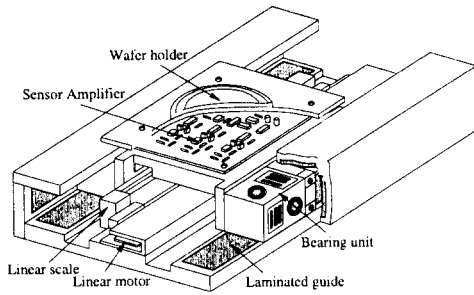


Fig. 1 Schematics of the table system

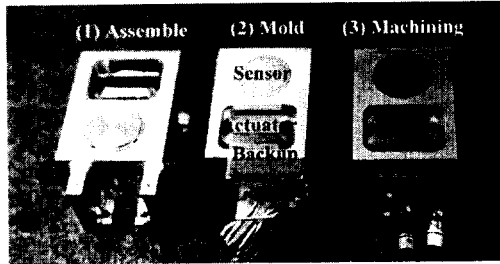


Fig. 2 Magnetic bearing units

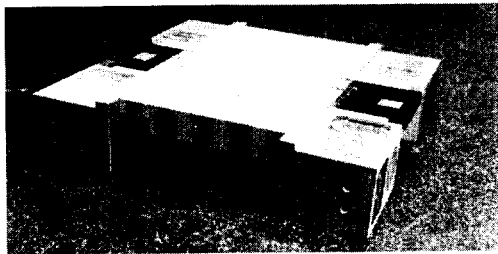


Fig. 3 Assembled table body

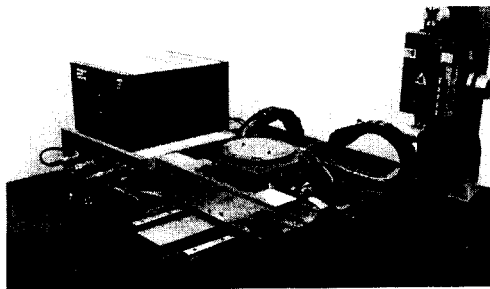


Fig. 4 X-Y micropositioning stage for probe station

4 개의 자기 베어링 유닛들은 Fig.3 과 같이 테이블 본체에 장착되어 있다. 테이블은 가이드면과 리니어 모터, 리니어 스케일로 조립되며, 가이드 면은 대상체의 히스테리시스 문제를 줄이기 위하여 실리콘 스틸을 적층하여 만들었다. 12 개의 정전 용량형 센서를 위한 센서 앰프는 기생 정전 용량과 잡음을 없애기 위하

여 테이블 본체 위에 장착하였다. 웨이퍼 홀더는 Fig.4 와 같이 테이블 본체 위에 최종적으로 장착하였다. 또한 Y 축 지지를 위하여 상용 LM 가이드를 사용하였다.

센서⁶ 5 자유도의 테이블 변위 신호를 제어기로 귀환 제어시키기 위하여 12 개의 정전 용량형 센서를 이용하였으며, 센서와 가드는 실험과 수치적으로 최적화된 구성을 갖게 되었다.⁷ 5 자유도의 테이블 변위 신호를 제어기로 귀환 제어시키기 위하여 12 개의 정전 용량형 센서를 이용하였으며, 센서와 가드는 실험과 수치적으로 최적화된 구성을 갖게 되었다. 센서 가드는 기생 정전 용량을 없애기 위하여 센서부를 감싸며 3 축 동축선을 이용하였다. 테이블의 변위를 얻기 위하여 서로 마주보는 방향의 센서로부터 나오는 2 개의 신호는 비선형성과 기준 신호의 섭동을 최소화 시키면서 OP 앰프에 의해 차동 증폭되어진다.

전하 전달 방식을 사용하는 센서 앰프는 CMOS 아날로그 스위치와 전류 적분 앰프로 구성되어진다. 이 앰프는 4MHz 의 샘플링 주파수와 가드 전환법을 사용하여 기생 정전 용량을 제거할 수 있다. 기본 회로 구성은 Fig.5 에서 나타내었고, 이 앰프의 정상 상태 방정식은 매우 단순하여 식(1)과 같이 주어진다.

$$V_{so} = -C_x V_c f R_f \quad (1)$$

여기서 C_x 는 미지의 센서 정전 용량이며, V_c 는 전하 전압, f 는 샘플링 주파수, R_f 는 귀환 저항이다.

Fig.6 는 하나의 센서에 대한 보정 결과이다 이 센서와 앰프 시스템의 선형성은 200 μm 범위 에 걸쳐 0.03 % 이하이며, 1 mV/ μm 의 감도를 갖는다.

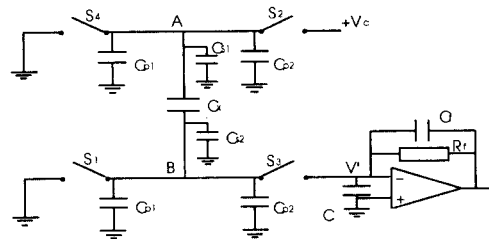


Fig. 5 Basic circuits of the sensor amplifier

제어기 Fig.7 에서 테이블 시스템의 제어 루프를 보여 주고 있다. 센서 앰프로 부터의 6 개의 신호들은 옵셋조절, 비례 미분 제어, 위상 보상기, 저역 통과 필터, 전류 증폭기를 갖는 6 개의 아날로그 비례 미분 제어기로 변환되어진다. Fig.8 에서 회로판을 보여 주고 있다.

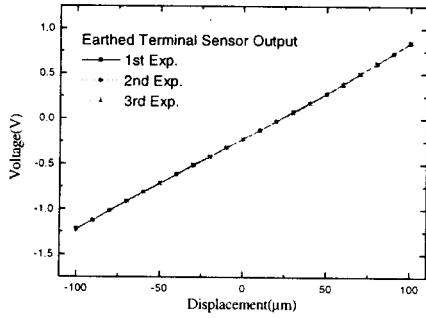


Fig. 6 The calibrated data of one sensor

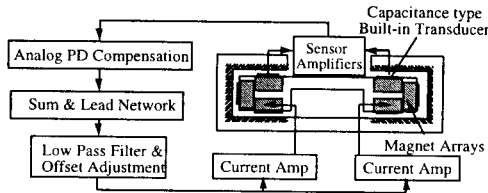


Fig. 7 Block diagram of the control system

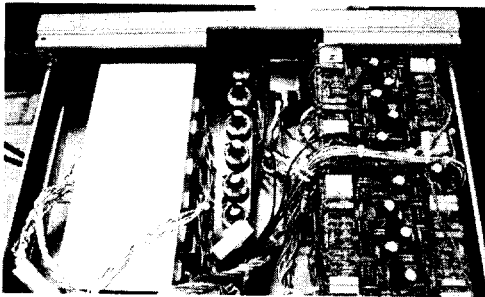


Fig. 8 Controller system with current amplifiers

리니어 모터와 리니어 스케일 150mm의 이송거리를 확보하기 위하여 NORMAG BLC004-18 리니어 BLDC 모터를 사용하였으며, 이송 방향이외의 다른 축으로는 어떤 견인력도 갖지 않는 모델로서 자기 베어링으로 외란을 주지 않는 모터이다. 또한 리니어 스케일은 10 μm의 눈금을 갖는 RSF MSA6703을 사용하여 0.05 μm의 분해능을 갖는 위치 귀환 제어 검출 기구로 사용하였다.

3. 실험 결과

직선 운동 테이블의 성능을 3가지 방식으로 측정하였다.

테이블 강성 테이블의 강성은 Fig.9 과 같이 45N 까지 테이블의 중앙에 하중을 올려 더해 가면서 측정된 결과 1.65N/μm의 강성을 얻었다.

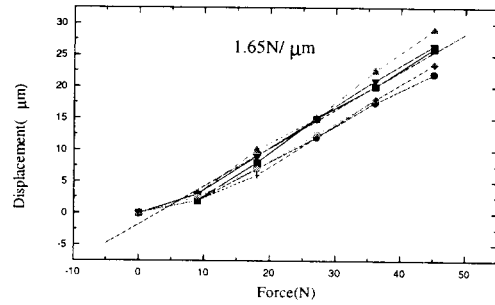


Fig. 9 The stiffness of the table

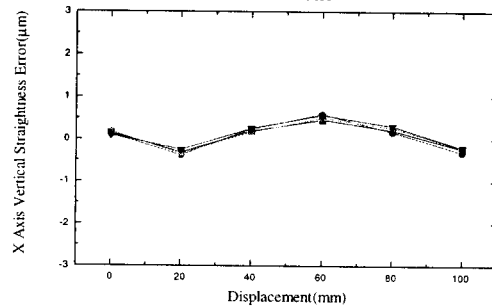
테이블 진직도 테이블 시스템의 진직도는 오토콜리미터를 사용하여 간접적으로 측정하였다. 오토콜리미터는 테이블의 피치 요 운동을 측정할 수 있으며, 테이블의 수직,수평 진직도를 얻어서 간단한 식(2)를 사용하여 각 변위를 직선 변위로 변환하여 나타내었다.

$$L[\mu m] = 4.8l[m] \cdot \theta[\text{sec}] \quad (2)$$

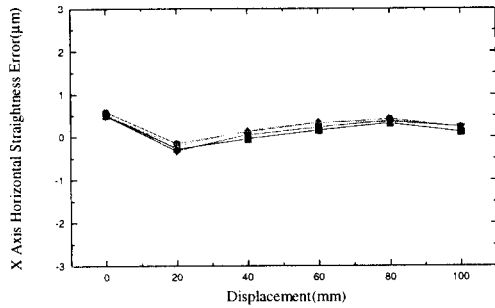
식(2)에서 L은 수직,수평 방향 변위를 나타내며, θ 는 측정된 각 변위, l은 각 스텝마다의 이송 길이를 나타낸다. Fig.10에서는 실험장치의 구성과 Fig.11에서는 수직,수평 진직도 오차 그래프를 보여 준다. 진직도 오차 그래프로부터 최대 오차는 100mm의 이송거리 범위에서 각 방향으로 1 μm 이하임을 보여 준다.



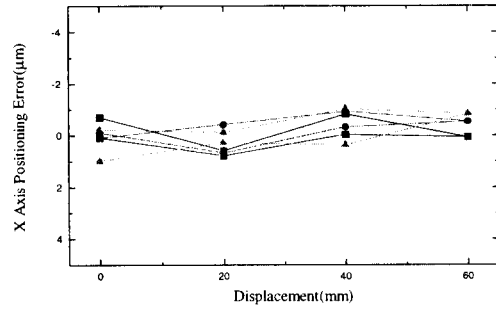
Fig. 10 Experimental set-up for straightness measurement



(a) Vertical straightness error of the table



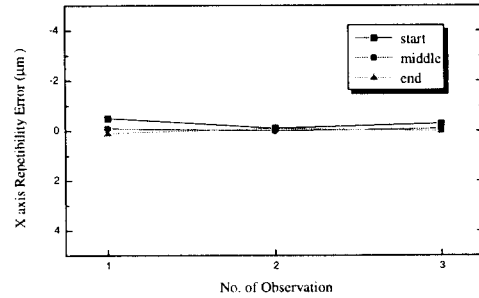
(b) Horizontal straightness error of the table



(a) Positioning accuracy of the table

Fig. 11 Straightness error of the table system

테이블의 반복 정밀도 테이블의 위치 결정 정밀도는 리니어 모터뿐만 아니라 베어링 지지 조건과 리니어 스케일의 정도에 의해 영향 받으며, 레이저 인터페로미터를 사용하여 측정하였다. Fig. 12.에서 실험 구성을 보여 주고 있으며, Fig. 13(a)에서 60mm 구간에 걸쳐 $\pm 1 \mu\text{m}$ 이하임을 보여 주며, Fig. 13(b)에서 테이블의 반복 정밀도를 나타내었다. 테이블은 20mm 씩 전진과 원위치로의 후진을 하여 반복정밀도를 3 회에 걸쳐 측정하였다. 반복 정밀도는 전 이송거리에 걸쳐 양쪽 끝 단과 중앙에서 $1 \mu\text{m}$ 이하임을 알 수 있다.



(b) Repeatability error of the table

Fig. 13 Positioning error of the table with longitudinal direction

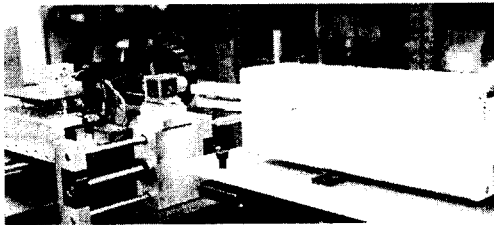


Fig. 12 Experimental set-up for the positioning error measurement

4. 결론

6 인치 웨이퍼 검사 장비시스템을 위하여 전자기적으로 부상된 직선 운동 테이블 시스템을 개발하였으며, 테이블의 성능들을 측정하였다. 자기 베어링용 적분형 정전용량형 센서와 비례 미분 제어기로서 향상된 부상 특성을 얻을 수 있었으며, 직선 이송 테이블의 성능 계측을 수행할 수 있었다.

후기

본 연구는 삼성 전자 기반 기술 센터와 서울대학교의 터보 동력 기구 연구소와 정밀 기계 설계 공동 연구소의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] M.E.Williams, D.L.Trumper, "Precision magnetic bearing six degree of freedom stage", *3'rd Int'l Symp. on Magnetic Suspension Tech.*, July, 1995, pp.453.
- [2] A.Kuzin, "Precision magnetically suspended XY stage", *4'th Int. Symp. on Magnetic bearings*, 1994, 177-182
- [3] Y.Joung, S.C.Jung, I.B.Chang, D.C.Han, "An experimental study on the high-precision linear motion table with magnetic bearing suspension", *Proceedings of ASPE 10'th Annual Meeting*, Oct., 1995, pp.328.
- [4] Y.Joung, H.J.Ahn, O.S.Kim, I.B.Chang and D.C.Han "A Study on a High-Precision Linear Motion Table with Magnetic Bearing Suspension", *Proceedings of ASPE 11'th Annual Meeting*, Oct., 1996, pp.328.
- [5] K.Tieste, K.Popp, "Dynamical behavior of a linear maglev support unit for fast tooling machines", *4'th Int. Symp. on Magnetic Bearings*, 1994, 269-274
- [6] D.Eisenhaure, A.Slocum, A.R.Hockney, "Magnetic Bearings for Precision Linear Slides", *1'st Int. Symposium on Magnetic Bearings*, 1988, pp. 67.
- [7] H.J.Ahn, " A Study on a Cylindrical Capacitance Displacement Sensor for the Measurement of small rotor motion", M.D. diss., Seoul National University, 1997, Seoul, Korea