

전자빔 미세패턴 가공을 위한 진공용 회전테이블 개발

Development of a Vacuum-Compatible Rotation Table for Fine Pattern Machining using Electron beams

*#김경호¹, 박천홍¹, 송창규¹, 이후삼¹

**G. Khim(gyungho@kimm.re.kr)¹, C. H. Park¹, C. K. Song¹, H. Lee¹

¹ 한국기계연구원 지능기계연구센터

Key words : Rotation table, Air bearing, Electron beam, Blu-ray, Mastering, Fine pattern

1. 서론

DVD(Digital Versatile Disc) 이상의 용량을 갖는 고밀도 광디스크의 마스터링(mastering)을 위해서는 기존의 레이저 광 대신 파장이 짧은 전자빔을 이용해야 한다.^{1,4} 25 GB 용량의 블루레이(blue-ray) 디스크인 경우, 트랙피치가 320 nm, 최단피트길이가 149 nm로, 이를 실현하기 위해서는 대기환경 이상의 성능을 지닌 회전테이블이 진공환경에서 작동해야 하는 어려움이 부가적으로 존재한다. 본 논문에서는 광디스크의 마스터링 장비와 같은 전자빔 미세패턴 가공장비에서 이용가능한 진공환경용 초정밀 회전테이블의 설계 및 실험결과에 대해 소개하고자 한다.

2. 전자빔 미세패턴 가공장비의 개요

개발하고자 하는 전자빔 응용 차세대 광디스크 마스터링 장비의 개념도를 그림 1에 나타내었다. 이 장비는 스탬퍼(stamper)를 위한 디스크 원판을 제작하는 장비로써, 크게 직선테이블과 회전테이블, 전자빔 경통으로 이루어져 있으며, 모든 공정은 진공환경에서 이루어진다. 직선테이블은 직선베어링과 리니어모터 및 고분해능의 리니어스케일에 의해 피드백되며, 스케일과 웨이퍼의 높이 차이에서 오는 아베(Abbe)오차를 제거하기 위해 웨이퍼와 동일한 높이에서 레이저 피드백을 추가하였다. 회전테이블의 틸트 오차 등에서 기인한 웨이퍼의 평면오차는 별도의 높이센서를 설치하여 전자빔에 의한 보상이 가능토록 하였다. 전자빔 경통은 30 keV의 파워를 지닌 전자빔이 마그네틱 렌즈에 의해 편향되어 웨이퍼에 도달하며, 경통 하단부에 빔 블랭커(blanker)를 장착하여 5 MHz 이상의 속도로 미세패턴을 생성할 수 있다.

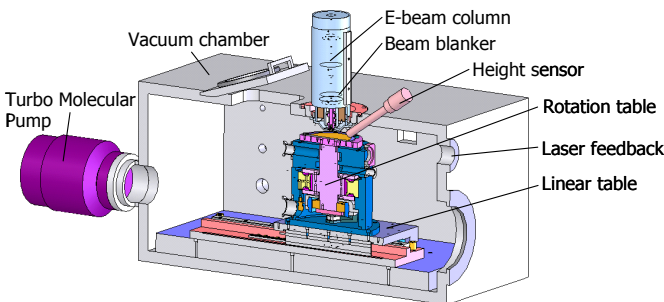


Fig. 1 Structure of a blu-ray mastering device under development

3. 진공용 회전테이블의 설계

회전테이블은 고정도의 회전정밀도를 요구하므로 다공질 공기베어링을 이용하여 비접촉으로 구동하는 방식을 채택하였다. 이때 가장 큰 문제가 되는 것은 공기베어링으로부터 누출된 공기가 챔버의 진공도를 저하시킨다는 점이다. 이를 해결하기 위하여 차동배기(differential exhaust)가 도입되었는데, 이는 다공질 공기베어링 패드 주위에 여러단계의 배기슬롯을 두고 각각에 진공펌프를 연결하여 순차적으로 배기하는 것을 의미한다.^{5,6} 각 배기슬롯 사이의 랜드부는 간극이 5~10 μm에 불과할 정도로 매우 작기 때문에 이

곳으로의 유량의 흐름은 거의 발생하지 않고, 대부분은 진공펌프에 연결된 배관을 통해 외부로 배출된다.⁷

3 단계의 차동배기가 적용된 회전테이블의 구조는 그림 2와 같다. 회전모터 및 엔코더 전원, 신호선, 공기베어링에 공급되는 압축공기라인은 회전테이블 하단 옆면에 설치된 벨로즈(bellows)를 통하여 진공챔버 외부로 직접 연결되어 있다. 따라서 이 벨로즈 내부는 진공이 아닌 대기압 상태로서 공기베어링에서 발생된 고압의 공기가 배출되는 1차 배기라인이 된다. 따라서 이런 구조에서는 회전테이블에 사용되는 모터나 엔코더가 진공용이 아닌 일반 대기용을 사용해도 되며, 베어링 상부에서만 차동배기를 수행해도 되는 장점이 있다. 만약 이런 구조를 택하지 않으면, 베어링의 하단부에서도 추가적인 시일(seal) 구조가 필요하여, 이는 회전테이블이 높이 방향으로 커지게 하여 비틀림(wobble) 오차 및 동적 불안정성의 원인을 제공한다.

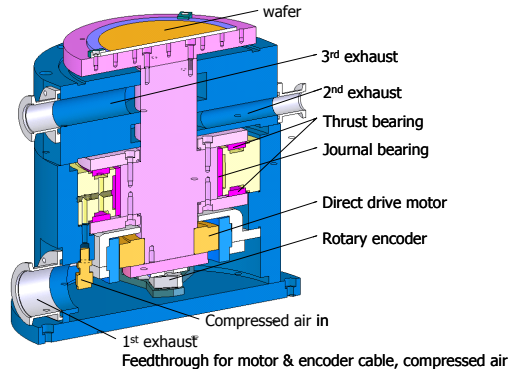


Fig. 2 Structure of a vacuum-compatible rotation table

2차와 3차 배기는 진공펌프를 이용하여 강제적으로 배기가 이루어진다. 차동배기시스템을 구성하는 설계변수들(배관직경, 펌프용량 등)은 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 최적설계를 통해 결정되었다.^{8,9} 최적화를 통해 결정된 챔버의 압력은 그림 3과 같이 10⁻⁵ Pa대의 진공도를 달성할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 이는 공기베어링에서의 누출량만을 대상으로 한 것이며, 실제 시스템에서는 진공챔버 내부와 직선-회전테이블의 표면 및 각종 케이블에서의 기체방출(outgassing)에 의한 영향과 실제 배관의 크기에 의한 영향이 추가되므로 이보다는 진공도가 저하될 것으로 예상된다. 현재 그림 1과 같이 모든 요소가 고려된 진공챔버가 제작중이며, 진공도 실험이 곧 수행될 예정이다.

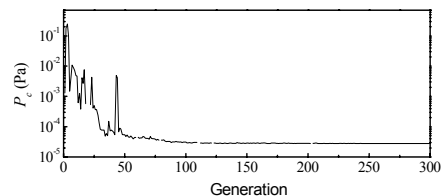


Fig. 3 Chamber pressure after optimization

회전테이블의 구동을 위하여 Aerotech 사의 슬롯이 없는 다이렉트 드라이브 (S130-39) 모터를 채택하여 코깅(cogging)에 의해 발생하는 회전정밀도 저하 현상과 속도변동을 최대한 제거할 수 있도록 하였다. 제어기는 Delta Tau 사의 Turbo PMAC2 보드를, 피드백은 Sony 사의 각도엔코더(BH-20)를 이용하였다. 고속구동을 위하여 제어기는 엔코더 신호를 sine 파로 입력받으며, 엔코더 자체의 신호피치에 의해서는 최소분해능이 4.3 arcsec (302,400 cnts/rev)이며, 128 정수 체제를 할 수 있는 PMAC의 옵션보드(ACC-51P)를 이용해서는 0.03 arcsec 까지의 분해능을 얻을 수 있도록 하였다. 이로부터 회전테이블은 고분해능하에서 500 rpm 이상의 속도를 얻을 수 있다. 그림 4 는 제작된 진공용 회전테이블을 보여주고 있다.

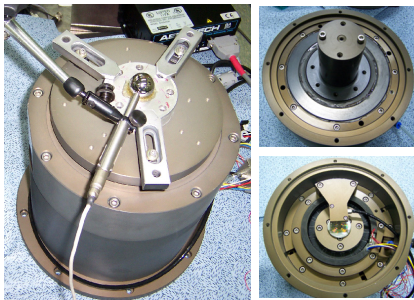


Fig. 4 Fabricated vacuum-compatible rotation table

4. 실험

회전테이블의 반경방향과 축방향 정밀도는 광디스크의 기록 정밀도에 직접적인 영향을 미치므로 상당히 중요한 평가항목이다. 25 GB 용량인 광디스크의 트랙피치는 320 nm 이므로 미세패턴시 전자빔의 편향에 의한 보정을 최대한 피하기 위해서는 기계적인 정밀도가 적어도 0.3 μm 이하여야 한다. 회전테이블의 반경방향과 축방향의 정밀도는 마스터볼과 정전용량형 센서(ADE 5810), 16bit A/D(Wavebook 516)보드를 이용하여 측정하였다. 사용된 마스터볼의 친구도는 40 nm 이하로 무시할 만한 수준이므로 마스터볼의 형상정밀도를 제거하지 않고 런아웃(runout) 오차만으로 정밀도를 평가하였다. 측정된 결과는 그림 5 와 같이, 반경방향 오차는 0.23 μm, 축방향 오차는 0.14 μm 로 비교적 양호한 결과를 보이며, 특히 전자빔의 편향에 의해 보상이 불가능한 랜덤오차가 0.04 μm 로 만족할만한 수준이었다.

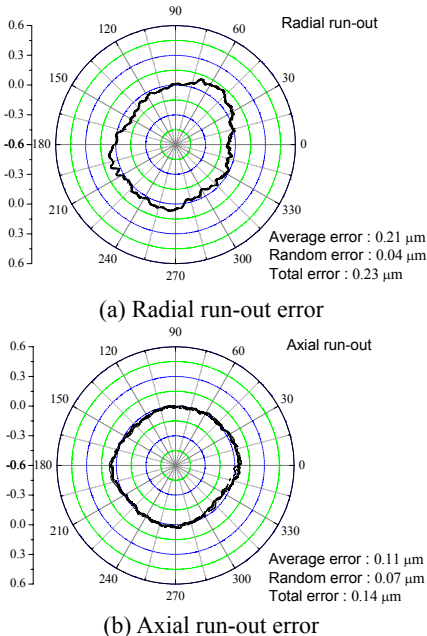


Fig. 5 Measured accuracy of the rotation table

그림 6 은 100 rpm 으로 구동시 속도 및 추종오차를 측정한 것이다. 추종오차는 PMAC 제어기 내에서 엔코더 신호를 최대 샘플링 주파수인 2.27 kHz 로 받은 것이며, 속도는 이를 미분하여 얻은 값이다. 엔코더의 노이즈 성분에 의한 고주파의 영향을 배제하면, 추종오차는 대략 100 cnts (3 arcsec), 속도변동은 0.03 % (3×10^{-4}) 수준으로 나타났다. 추종오차와 속도변동을 보다 향상시키기 위해서는 기준클럭에 의한 엔코더신호의 PLL(Phase Locked Loop) 제어가 필요하며, 이는 광디스크의 나선형 미세패턴 가공을 위하여 직선테이블과의 동기제어시에도 필요할 것으로 판단된다.

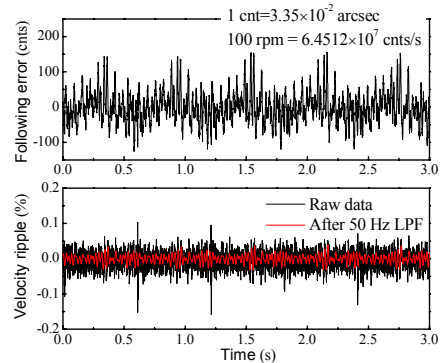


Fig. 6 Following error and velocity ripple

5. 결론

진공환경에서 전자빔을 이용한 차세대 광디스크의 마스터링을 위한 초정밀 회전테이블의 설계 및 간단한 기초 실험을 수행하였다. 진공용 회전테이블은 다공질 공기베어링을 사용하여 0.23 μm 의 회전정밀도를 얻을 수 있었고, 차동배기방법을 적용하여 진공도를 10⁻⁴ Pa 이내로 낮출 수 있음을 이론적으로 확인하였다. 향후, PLL 제어 등을 통한 속도변동특성 향상과 직선테이블과의 동기제어 및 진공챔버가 제작된 후의 진공환경에서의 진공도 실험에 관한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Kojima, Y., et al., "High Density Mastering Using Electron Beam," Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 37, pp. 2137-2143, 1998.
2. Furuki, M., et al., "Electron Beam Recording with a Novel Differential Pumping Head Realizing More than 50 GB/Layer Capacity Disc," Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 42, pp. 759-763, 2003.
3. Wada, Y., "Electron Beam Lithography with Rotation Stage," JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 318-321, 2004.
4. Takeda, M., "Future Optical Disc Technology Electron Beam Lithography," JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 322-325, 2004.
5. Ohtsuka, M., Furukawa, M. and Higomura, M., "The Vertical Traverse Stage in Vacuum Condition," JSME International journal series III, Vol. 33, No. 1, pp. 61-64, 1990.
6. Yokomatsu, T., Furukawa, M., "Static pressure bearing," US Patent No. US 4,749,283, 1988.
7. Khim, G., Park, C. H., Lee, H., and Kim, S. W., "Performance Analysis of a Vacuum-Compatible Air Bearing," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 10, pp. 103-112, 2006.
8. Khim, G., Park, C. H., Lee, H., and Kim, S. W., "A Vacuum-Compatible Air Bearing: Design Analysis and Optimization," Key Engineering Materials, Vol. 339, pp. 37-44, 2007.
9. Khim, G., Park, C. H., Lee, H., and Kim, S. W., "Optimal Design of an Exhaust System of a Vacuum-Compatible Air Bearing," Journal of KSPE, Vol. 24, No. 6, 2007.