

차세대 광저장매체 마스터링을 위한 전자빔 가공용 진공환경 초정밀스테이지의 평가 및 제어

Precision Linear Stage Characteristics and Control for Electron Beam Mastering of Next Generation Data Storage

*#심종엽¹, 김경호¹, 황주호¹, 송창규¹, 박천홍¹

*#Jongyoup Shim (jyshim@kimm.re.kr)¹, Gyungho KHIM¹, Jooho HWANG¹, Chang-Kyu SONG¹, Chun-Hong PARK¹
¹ 한국기계연구원

Key words : Next generation DVD, Electron-beam Mastering, Linear stage, Ball bearing, Vacuum

1. 서론

대용량 광저장매체 시장은 디지털컨슈머마켓의 혁신적인 발전으로 인하여 더 빠르게 성장할 것으로 예상되고 있다. 25기가바이트의 블루레이 디스크는 이미 시장에 선보이고 있으며 디지털기기의 요구는 더욱 대용량의 저장매체에 대한 요구를 필요로 하고 있다. 차세대 DVD 규격의 광저장디스크에서는 광학계의 회절한계 등의 영향으로 기존의 마스터링 방법이 쓰이기 어렵다. 전자빔을 이용한 리소그래피 방법으로 마스터링을 수행하는 방식이 차세대 DVD에 적용될 것으로 예상되고 있다. 일반적으로 전자빔이용 마스터링 시스템에는 진공환경에 사용 가능한 직선운동 스테이지와 회전운동 스테이지가 사용된다. 직선운동 스테이지를 위해서 긴 마스터링 시간 및 스테이지의 강성 요구도를 고려하여 볼베어링 가이드 스테이지를 결정하였다. 베어링의 볼과 레일은 진공에서 사용 가능한 스테인리스 스틸로 제작 되었으며 진공에서의 증발 등의 문제를 없애기 위하여 윤활막을 모두 제거하였다. 상대적으로 느린 직선 스테이지의 모션속도로 인하여 진공에서의 열문제 등을 야기할 수 있는 가능성은 적다고 할 수 있다.

그림 1은 전자빔 이용 마스터링 시스템의 시작품을 보이고 있다. 전체 시스템은 진공챔버, 진공 펌프, 직선운동 스테이지, 회전스테이지, 전자빔 컬럼으로 구성된다. 기 설계 및 제작된 전자빔 컬럼은 전자현미경 사진을 찍어봄으로서 성능을 검증하였다. 회전스테이지는 마스터링 공정의 특성상 진동이 없어야 하며 매우 정밀한 회전속도제어가 중요하므로 진공용 공기베어링을 사용한 설계를 진행하였다. 직선운동 스테이지는 리니어모터를 구동기로 사용하며 볼베어링 가이드를 채용하였다. 직선운동 피드백 센서로는 현재 하이덴하인사의 리니어엔코더(Heidenhain LIP481)을 사용하고 있으나 레이저스케일로 대체될 예정이고 리니어엔코더의 분해능은 5 nm로 설정되었다.

2. 스테이지 특성 실험 및 제어

전자빔 이용 마스터링공정에서 직선스테이지는 한 방향으로 천천히 움직여주는 역할을 수행한다. 직선스테이지의

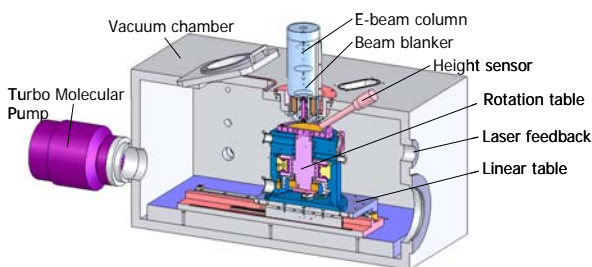


Fig. 1. Schematic of proto-type e-beam mastering system

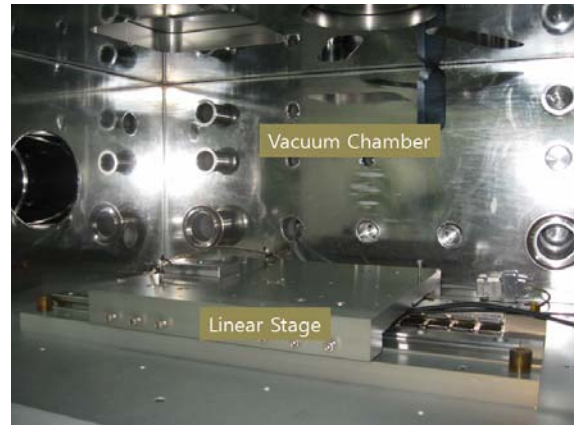


Fig.2. Picture of the linear stage. Linear motor, linear encoder and roller guides are shown

이송속도는 가공전자빔의 마스크상 위치에 따라서 선형적으로 변하게 된다. 보통 가공시 직선스테이지의 이송속도는 약 5 $\mu\text{m/s}$ 이하의 속도로 이송하게 된다. 마스크상에 나선형 모양의 트랙으로 비트데이터를 가공하게 되고 25기가바이트의 경우 트랙간의 거리는 160 nm 정도의 크기를 가지고 있으므로 채생시의 지터링의 최소화를 위해서는 직선스테이지의 운동정밀도가 중요하게 된다.

전자빔의 경로특성 등을 위해서 진공챔버의 진공도는 10^{-5} Torr 정도를 유지하여야 한다. 진공에서 사용할 수 있는 특수한 진공그리스가 존재하나 이러한 그리스는 베어링 및 레일의 셋업을 난이하게 만들고 스테이지의 운동에 마찰력을 추가하는 단점을 보인다. 따라서, 1 mm/s 이하의 느린 이송속도를 고려할 때 베어링과 가이드면의 직접 접촉 방식은 열문제나 마모문제를 발생하지 않고 마스터링공정에 사용될 수 있다. 베어링 및 레일의 표면은 솔벤트를 이용하여 닦아내어 그리스 및 불순물을 제거하였다. 스테인리스스틸 재료의 진공상태 직접 접촉방식 베어링에서 저온용접의 현상이 발견되지 않는다는 연구결과를 참고하면 진공중에서 오히려 마찰이 줄어들 수 있음을 예상할 수 있다.

운동정밀도에는 진직도, 평탄도 및 각도오차의 성분들이 있다. 그림 2에 보이는 직선스테이지의 베어링-가이드는 초정밀급의 가공으로 제작되었으므로 마스터링 공정의 직선운동 특성상 고주파의 외란성분이 적다는 가정을 하게 되면 각도 오차 및 진직도 등의 오차는 보정이 가능하거나 마스터링 공정에 큰 영향을 주지 않을 것임을 쉽게 유추할 수 있다. 그림 3에는 직선 스테이지의 진직도 및 평탄도 측정결과를 보이고 있고 Agilent 레이저측정 시스템을 사용하였다. 마스터링 공정의 특성상 약 60 mm 이하의 영역만 이송하면 되므로 붉은색 박스로 표시된 영역만큼의 오차만 고려하면 되고 전체 마스터링 영역에서 1~2 μm 의 크기를 보인다면 이송거리 약 60 mm 및 트랙피치 약 160 nm를 고려하면 이러한 오차의 영향은 미미할 것을 알 수 있다.

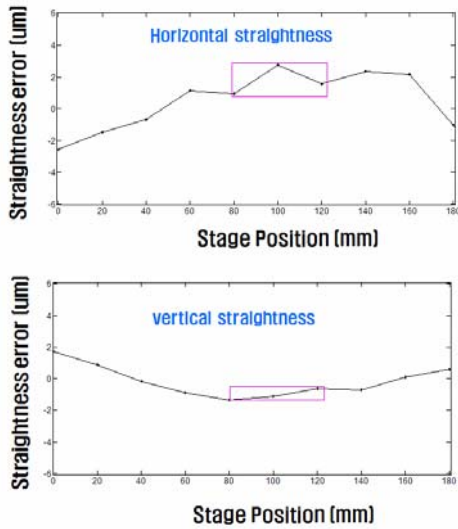


Fig. 3. Straightness and flatness measurement results

그림 4 에는 멀티스텝입력 제어결과를 보이고 있다. 제어기는 일반적인 PID 제어기를 사용하였으며 제어계인은 스텝입력의 크기에 따라서 다르게 튜닝하였다. 기존 여러 연구에서 밝혀졌듯이 운동영역이 특정 변위를 기점으로 변함에 따라서 지배적인 물리현상이 변하여 물리적 모델이 변하게 된다. 일반적으로 미소한 영역의 운동시에 스프링 요소와 같은 에너지 저장모델이 추가되고 현재 시스템에서는 수 μm 이하의 영역에서 발생하고 제어기의 계인을 올려 주어 튜닝하는 것이 필요하다. 하지만, 이러한 미소영역의 스텝입력제어에서 제어정착시간이 증가하게 되는데 이것은 제어기계인을 올리는 것과 제어 모델이 변하는 것의 상충으로 야기된 제어의 한계라 판단된다.

마스터링 공정에서 직선스테이지는 속도를 가공반경에 따라서 변화 시키게 되므로 제어시스템의 트래킹 성능이 중요하게 된다. 일반적으로 트래킹 성능에는 여러가지 시스템 성능이 영향을 끼치나 구동기 성능, 피드백센서 성능 및 구동마찰 등이 중요한 역할을 하게 된다. 여기에서 진공중에서 볼베어링과 가이드의 직접 접촉 방식 메커니즘은 상기 상술한 바와 같이 마찰력이 상대적으로 줄어들어 트래킹 성능을 향상 시킬 것으로 예상할 수 있다. 그림 5 에서는 진공중과 공기중에서의 트래킹제어 성능 비교를 한 결과를 보여준다. 이송속도를 현재는 두가지에 대해서만 보여주고 있고 특히 커다란 차이는 상대적으로 빠른 속도인 5 mm/s 트래킹속도에서 볼 수 있다. 진공중에서의 트래킹 제어결과가 훨씬 우위의 결과를 가진다. 이것은 가이드레일과 볼베어링 사이의 표면흡착물의 영향에 의한 차이인 것으로 판단된다. 결과에서 스파이크들은 리니어모터의 커뮤테이션오차로서 향후 개선될 예정이다.

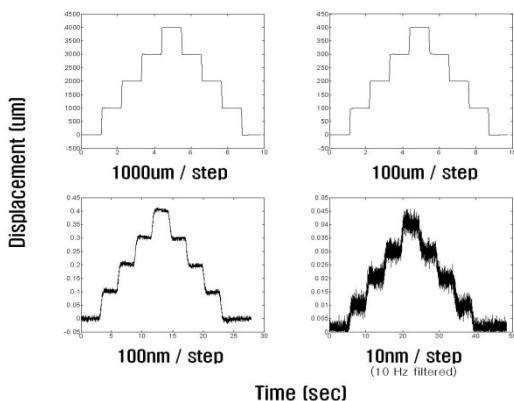


Fig. 4. Multi-step control results with varying step size

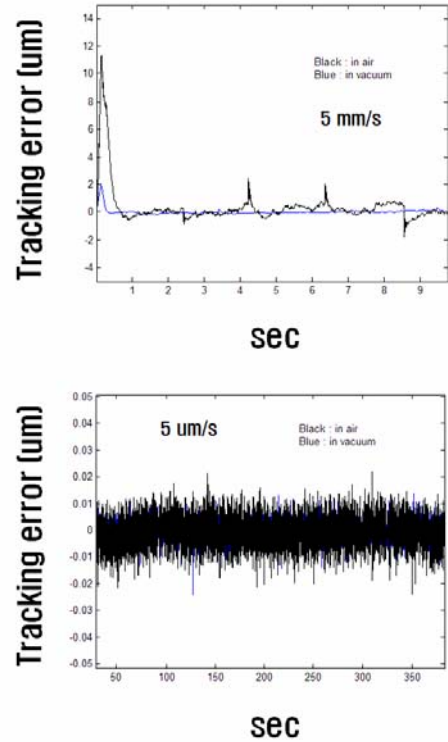


Fig. 5. Tracking control experiment results : tracking speed is 5 mm/s and 5 $\mu\text{m/s}$ respectively

3. 결론

전자빔 이용 마스터링장비의 시작품을 설계하고 성능을 실험하였다. 본 연구의 직선스테이지 성능은 분해능으로 나노미터 단위의 결과를 보이고 트래킹 성능은 20 nm (one sigma) 정도의 성능을 가짐을 보였다.

참고문헌

1. Takashi Ogawa et al, " Development of Ball Bearings with Solid Film for High-Vacuum, High Temperature, High-Speed Applicationl," Lubrication Engineering, **49**, 291-299, 1993