

진동 및 제어 부문 특별세션

DLC 코팅된 가이드레일을 이용한 볼베어링 직선 이송 스테이지의
진공환경 제어 특성 분석심종엽^{a*}, 김경호^a, 황주호^aExperimental Control Characteristic Investigation of Ball Bearing Guided Linear
Motion Stage with Diamond-like Carbon Coated Guide RailJongyoup Shim^{a*}, Gyungho Khim^a, Jooho Hwang^a^a *Ultraprecision Systems Lab., Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Republic of Korea*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	21 July	2014
Revised	28 July	2014
Accepted	29 July	2014

Keywords:

DLC(Diamond-like Carbon) Coating
Ball Bearing
Vacuum
Precision Linear Stage
Control Characteristic Investigation

ABSTRACT

Recently, there is an increase in the need for precision linear stages with vacuum compatibility in such areas as lithography equipment for wafer or mask manufacturing, mask mastering equipment for optical data storage and electron beam equipment. A simple design, high stiffness and low cost can be achieved by using ball bearings. However, a ball bearing have friction and wear problems just as in ambient air. In order to decrease the friction, a special finish, a diamond-like carbon (DLC) film coating, is applied to the surface of a guide rail by sputtering deposition. This paper presents the result of an experimental investigation on the control performance of a ball bearing-guided linear motion stage under two environmental conditions: in air and vacuum. A comparison between the results with and without the DLC coating was also considered in the experimental investigation.

1. 서 론

최근 차세대 광저장장치용 마스터링 장비^[1-5] 및 전자빔/이온빔^[6-10]을 이용한 가공장비 등 첨단 가공장비 분야에서 진공환경에서 사용할 수 있는 초정밀 이송장치의 요구가 점점 커지고 있다. 25 기가바이트의 블루레이 디스크는 이미 시장에 선보이고 있으며 디지털기기의 요구는 더욱 대용량의 저장매체에 대한 요구를 필요로 하고 있고 2014년 소니 및 파나소닉은 1 TB가 저장 가능한 광학적 재생방식 이용 Archival Disc 기술 개발에 대하여 발표하였다. 이러한 차세대 광저장 디스크에서는 광학계의 회절한계 등의 영향으로 기존의 광학적 마스터링 방법이 쓰이기 어려워지고 있어 전자빔을 이용한 리소그래피 방법으로 마스터링을 수행

하는 방식이 추후 적용될 것으로 예상되고 있다. 또한, 전자빔/이온빔을 이용한 가공장비는 최근 나노/바이오 산업 핵심 부품 연구/개발에서의 요구로 인하여 꾸준한 성능 향상이 지속되어지고 있다. 이러한 장비들은 가공방법으로 전자빔/이온빔 등을 사용함에 따라 진공환경에서 사용할 수 있는 정밀하고 신뢰도가 높은 이송계에 대한 요구가 점점 커지고 있다. 일반적으로 진공환경에서 나노미터급 이송계 베어링으로는 진공환경 대응 공기베어링^[11] 및 자기베어링^[12]이 무마찰특성 등의 이유로 고려되고 있으나 복잡한 구조, 가공/제작의 어려움 및 비용 등의 문제로 인하여 적용이 어려운 점이 존재한다.

본 논문에서는 볼베어링 가이드(LM 가이드)를 진공환경에서 직선 이송 스테이지에 적용하여 그 제어특성에 대하여 분석하였다.

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7112

Fax: +82-42-868-7180

E-mail address: jyshim@kimm.re.kr (Jongyoup Shim).

마스터링 장비 및 전자빔/이온빔 이용 가공장비는 대부분 가공 대상 시편을 원하는 경로를 따라서 이송하는 경우가 많으며 마찰 등의 주요 물리적 특성을 관찰하기 위하여 스테이지의 추종제어 특성을 분석하였다. 진공환경에서 일반적인 윤활유는 휘발성 문제로 인하여 사용할 수 없고 진공환경에서 구름베어링을 이용할 경우 수명 문제를 고려하여 진공용 윤활제를 사용하나 초정밀 제어가 요구되는 응용에는 큰 마찰력의 존재로 적용에 어려움이 있다. 또한, 윤활제를 사용하지 않고 베어링과 가이드 사이에 건마찰(dry friction)이 존재할 경우 베어링의 수명 문제 및 진공환경에서의 제어 특성에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 따라서, 볼베어링 레일면에 DLC(Diamond Like Carbon) 층을 코팅하여 그를 이용한 이송 스테이지 시스템의 제어특성을 실험적으로 분석하여 적용 가능성을 검토하였다. 공기 및 진공 중에서 DLC 코팅 전/후의 스테이지 제어 특성 실험 결과를 분석하여 제어 특성 및 마찰력의 관점에서 DLC 코팅의 효과에 대하여 논하였다.

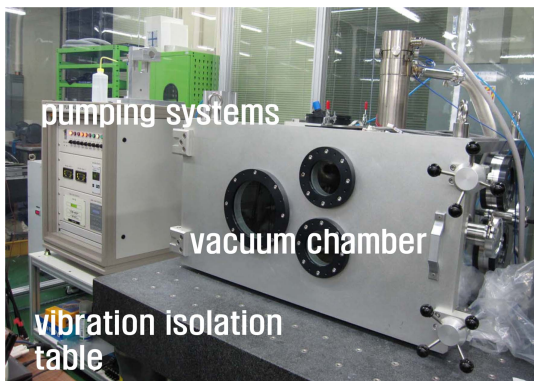
2. 진공환경용 볼베어링 직선 이송 스테이지

Fig. 1에서 진공 챔버 및 챔버 내부의 직선 스테이지를 보이고 있다. 본 시스템은 전자빔을 이용한 광학디스크 마스터링 장비로 개발된 것이며 진공을 형성하기 위한 펌프 시스템, 진공 챔버,

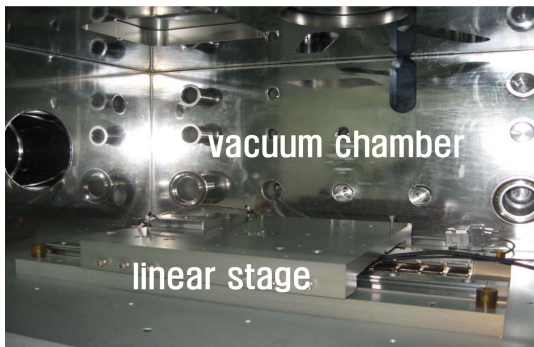
전자빔 컬럼 및 진동절연 테이블로 구성된다. 직선운동 스테이지를 위해서 긴 마스터링 시간 및 스테이지의 강성을 고려하여 볼베어링 가이드 스테이지를 결정하였다. 볼베어링 가이드로는 THK사의 HR2555M LM(Linear Motion)가이드가 채택되었고 직선운동 스테이지는 리니어모터(Trilogy 210-4)를 구동기로 채용하여 최대 추력 110 N 및 피크 추력 494 N의 성능을 갖도록 하였다. 피드백 센서로는 하이덴하인사의 리니어엔코더(Heidenhain LIP481)를 사용하였고 1 nm의 분해능을 갖는다. 직선스테이지는 마스터링을 위한 35 mm의 이송거리와 로딩/언로딩을 위한 추가 여유 공간을 포함하여 총 250 mm의 이송거리를 갖도록 설계하였다. 직선스테이지는 진공환경에서 동작이 이루어져야 하므로 직선베어링 및 리니어스케일, 리니어모터는 모두 진공과 호환되는 제품을 사용하여 설계 및 제작하였다. 설계된 직선테이블은 알루미늄 계열 중 상대적으로 강도가 큰 AL 7075T6를 사용하였으며, 표면 경도 향상을 위하여 아노다이징(anodizing) 처리하여 제작하였다. 일반적으로 구름베어링의 사용에서 진공환경을 고려하여 증기압이 높은 진공용 그리스(Dupont, Krytox)^[13]로 윤활처리하여 사용하나 진공 중에서의 큰 마찰 현상 및 정밀 세팅의 어려움 등이 존재한다. 따라서, 베어링의 볼과 레일은 진공에서 사용 가능한 스테인레스 스틸로 제작되었으며 진공에서의 휘발성 문제를 없애기 위하여 일반 재료 윤활막을 모두 유기용매를 이용하여 제거하였다. 상대적으로 느린 직선스테이지의 운동 속도로 인하여 정밀도 측면에서 진공에서의 마찰로 인한 발열문제를 야기할 수 있는 가능성은 적다고 할 수 있다. 그러나, 진공환경에서 금속 대 금속의 직접 접촉 및 계면 이물질 특히 수분 및 유분의 진공으로 인한 제거로 마찰력이 증가할 것으로 예상된다^[14]. 따라서 고체윤활로서 DLC 코팅을 레일면에 적용하여 이러한 부정적 영향의 감소 및 성능 향상에 대한 실험적 평가를 수행하였다.

3. 초정밀 추종제어 특성 실험 및 분석

DLC 코팅을 수행하기 전 스테인레스 스틸 재질의 베어링으로 구동되는 스테이지의 추종제어 특성을 먼저 살펴보았다. 전자빔을 이용한 광학디스크 마스터링 가공 공정을 고려하면 가공 시 직선 스테이지의 이송속도는 $< 5 \mu\text{m/s}$ 이며 한 면당 510 GB 저장용량의 경우 트랙피치를 70 nm 정도로 요구하고 있으므로 재생 시 지터링(jittering)의 최소화를 위해서는 직선스테이지의 추종제어 성능이 중요하고 저속의 이송에서 30 nm 정도의 추종제어 성능이 추후 대용량 마스터링을 위하여 필요하다 하겠다. 추종제어 입력으로는 0초에서 해당 이송속도로 미리 정해진 가속구간 및 속도 커브를 추종하며 일정 속도로 스테이지를 가동시키며 제어의 외란에 대한 영향을 판단하기 위하여 일정 구간마다(리니어 모터의 커뮤



(a) Electron beam patterning system



(b) Ball bearing guided linear stage

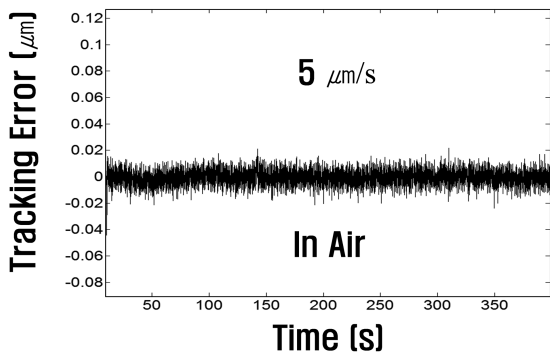
Fig. 1 Ultraprecision stage in high vacuum

테이션 주기) 인위적으로 리니어 엔코더 신호에 외란을 부여하는 방법을 사용하였다. 실험에 사용한 제어기로는 Delta Tau사의 Umac 제어기를 사용하였으며 제어기 내부에서 지원하는 PID 제어기를 이용하였다.

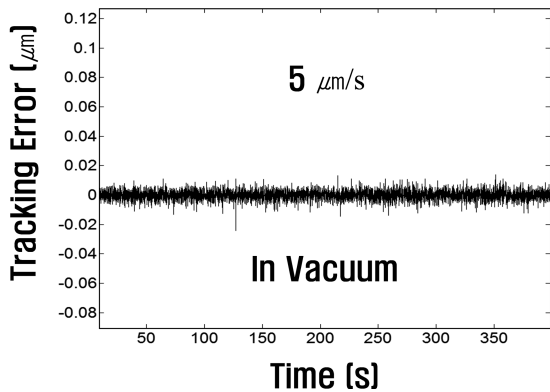
Fig. 2는 5 $\mu\text{m/s}$ 의 이송속도로 공기 및 진공 중에서의 추종제어를 수행한 결과를 보이고 있다. 진공환경에서의 실험은 10^{-5} Torr의 진공도를 유지하였으며 로터리 펌프를 1차, 터보분자펌프를 2차 펌프로 사용하여 구현하였다. 추종제어 결과를 관찰하면 공기환경과 진공환경에서의 제어 성능은 큰 차이를 보이지는 않으며 추종오차 측면에서는 진공환경에서의 결과가 더 우수함을 알 수 있다. 그러나, 실험 수행에 있어서 중요한 차이점은 공기환경에서의 제어기 파라미터 값들과 진공환경에서의 값들이 크게 다르게 튜닝이 되었다는 것이다. 실험적으로 진공환경 상태에서 제어기 파라미터 값들을 공기환경에서의 값들로 사용하게 되면 제어의 성능이 크게 떨어져 추종오차가 상당히 커지거나 불안정한 제어 결과를 초래하기도 하였다. 따라서, 진공환경에서의 제어기 파라미터 값들은 공기 중에서의 값보다 아주 크게 재튜닝되었다. 이러한 현상은 마찰력의 증가로 설명할 수 있다. 실험 전에 유기용매를 이용하여 볼베어링의 볼과 레일면의 이물질들을 모두 제거하였으나 공기 중에서는 일반적으로 대략 50 nm 정도의 물 흡착층이 존재하게 된다. 이러

한 흡착층은 공기 중에서 마찰의 특성에 영향을 주게 되며 10^{-5} Torr의 진공에서 이러한 물 흡착층은 물의 증발로 인하여 사라지게 되고 물과 같은 중간층이 없이 스테인레스 스틸-스테인레스 스틸의 금속 대 금속 접촉의 상태가 된다. 이러한 직접 접촉상태가 됨에 따라서 마찰력은 진공상태에서 크게 증가할 수 있음을 알 수 있다. 루프게인(loop gain)의 크기로 계산하면 약 10배 정도 큰 제어기인 값을 갖도록 진공상태에서 튜닝되었고 이러한 결과는 공기 중의 경우와 진공 중의 경우가 제어시스템 입장에서 제어 대상 모델이 변한다고 추론할 수 있다. 5 $\mu\text{m/s}$ 의 이송속도를 고려할 때 스테이지 이송을 안내하는 볼과 가이드면의 물리적 현상은 거시적인(macroscopic) 관점에서의 구름 현상이 아니고 미시적인(microscopic) 관점에서의 볼과 가이드면의 탄성변형의 물리적 현상으로 접근해야 한다^[15]. 스테이지가 일정 위치를 통과하여 인위적 외란이 가해지면 공기 중에서는 0.13 μm 정도의 추종오차가 발생하고 진공 중에서는 4~5배 정도 추종오차가 감소하나 더 빠른 속도에서 확연한 차이를 관찰하고자 인위적 외란에 대한 영향은 5 mm/s 이상의 속도 결과에서만 도시하였다. 5 $\mu\text{m/s}$ 의 추종제어 결과에서 진공상태의 결과가 다소 향상된 추종오차 성능을 보인 것은 공기 중에서는 이러한 탄성변형에 의한 기계적 모델에 물 흡착층 등 중간층 이물질의 영향이 스테이지 위치에 따라 일정하지 않은 감쇠형태의 물리적 성질을 부여함으로써 제어특성에 영향을 주는 원인에서 발생한다고 판단된다.

이러한 경향은 스테이지의 이송 속도가 증가하면 더욱 크게 부각될 것으로 예상할 수 있고 이러한 실험 결과를 Fig. 3에서 보이고 있다. 5 mm/s 이송속도 추종제어 결과를 비교하면 진공상태에서 제어 성능이 공기 중에서의 실험결과와 비교하여 월등하게 향상됨을 알 수 있다. 특히, 공기 중의 실험결과를 관찰하면 초기 속도가 가속되는 구간에서 10 μm 이상으로 크게 추종오차가 발생하는 것



(a) Experiment in air



(b) Experiment in vacuum

Fig. 2 Tracking control experiment results (5 $\mu\text{m/s}$, w/o DLC coat)

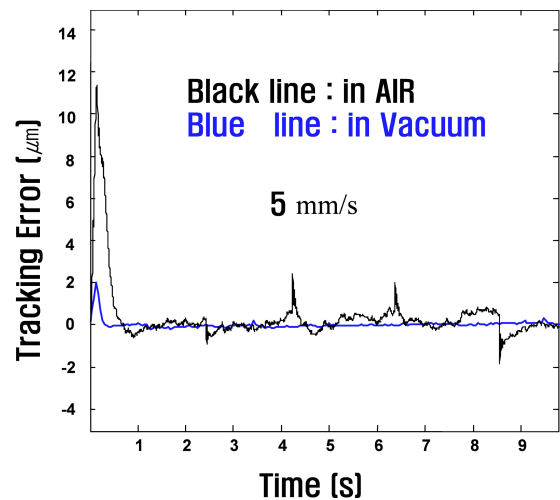


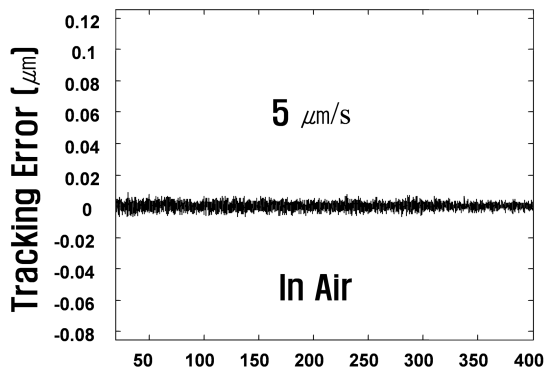
Fig. 3 Tracking control experiment results (5 mm/s, w/o DLC coat)



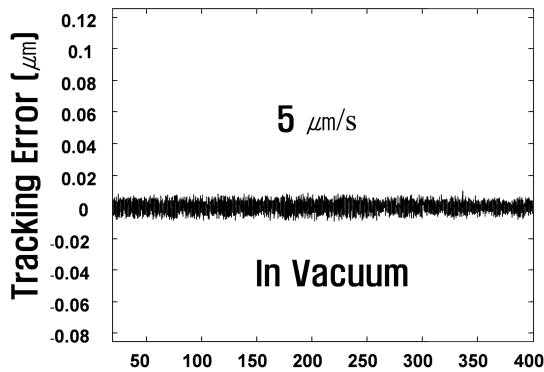
Fig. 4 Pictures of guide-rails for experiment

을 알 수 있으며 또한 엔코더 신호에 가해진 외란신호가 발생할 때 크게 추종오차가 발생함을 알 수 있다. 진공 중에서의 추종제어 결과를 관찰하면 이러한 초기 가속구간 및 외란신호 존재 구간에서의 추종오차가 크게 감소하였고 전체적인 추종제어 성능도 크게 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 4에서 DLC 코팅을 적용하기 전/후의 가이드레일 사진을 보이고 있다. DLC 코팅은 진공 중에서 PVD(Physical Vapor Deposition) 방법으로 증착하였으며 증착 두께는 약 $5 \mu\text{m}$ 이다. 진공 중에서 DLC 코팅면의 마찰계수는 0.01 이하로 내려가는 것으로 보고되어 있으므로 진공 중 성능 실험에 있어 향상된 결과를 얻을 수 있으리라 예상할 수 있다. Fig. 5에서 DLC 코팅을 적용한 가이드레일을 이용하여 실험한 $5 \mu\text{m/s}$ 추종제어 결과를 보이고 있다. DLC 코팅 전의 경우와 크게 다른 것은 DLC 코팅 후 공기 중에서 튜닝된 제어기 파라미터 값들을 변경하지 않고 진공상태에서 제어를 수행한 것이다. 이러한 결과는 DLC 코팅 후 공기 중에서의 제어대상 모델이 진공 중에서 거의 변하지 않았다는 것을 의미한다. 추종제어 오차를 비교하면 공기 중에서의 결과가 상대적으로

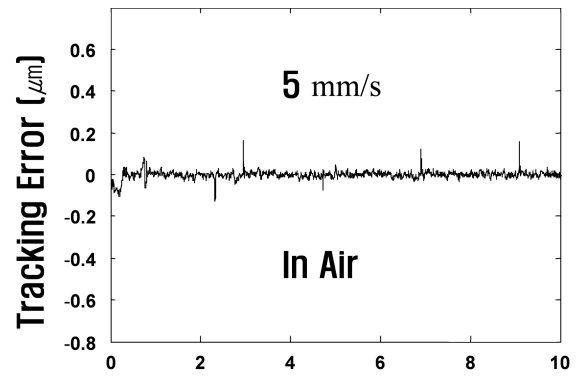


(a) Experiment in air

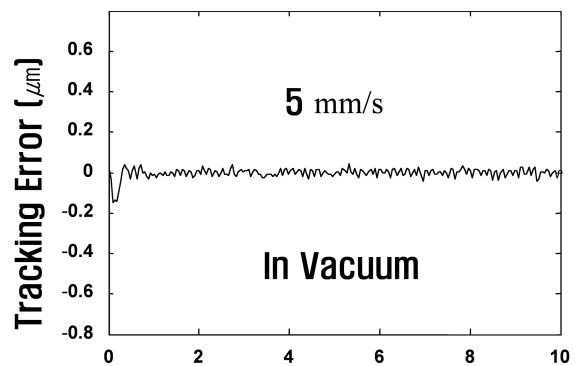


(b) Experiment in vacuum

Fig. 5 Tracking control experiment results ($5 \mu\text{m/s}$, w/ DLC coat)



(a) Experiment in air



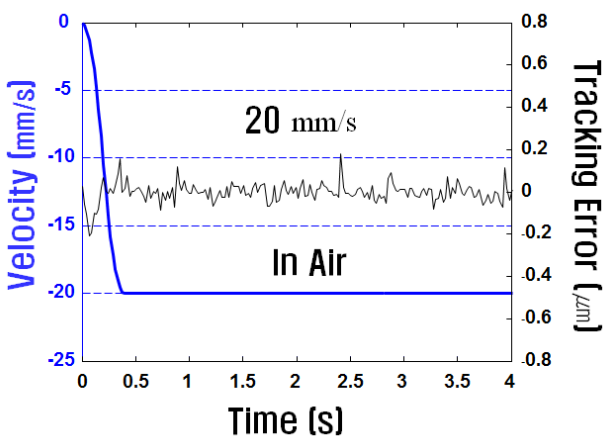
(b) Experiment in vacuum

Fig. 6 Tracking control experiment results (5 mm/s , w/ DLC coat)

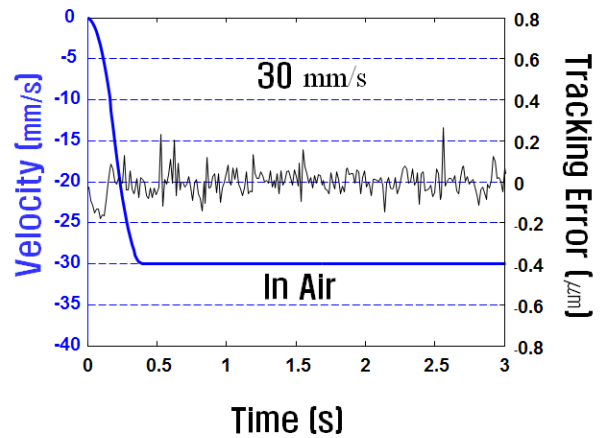
로 더 좋으나 두 환경에서의 결과가 크게 다르지 않다고 할 수 있다. 이러한 결과들에서 DLC 코팅된 경우 물흡착층 등 중간층의 영향이 적고 진공 중에서의 마찰력이 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. DLC 층은 화학적으로 상당히 안정된 성질을 갖고 있으므로 공기 중에서 물 성분이 흡착되어 계면에서 베어링 압력이 가해지는 상황에서 물리적인 역할을 하기 어렵다. 또한 DLC 재료의 경도는 일반적으로 스테인레스 스틸보다 상당히 크므로 베어링 볼과의 접촉에서 더욱 큰 압력의 형성으로 물 흡착층 등의 영향을 더욱 적게 하는 성질을 가질 수 있다^[16].

더욱 높은 이송속도에서의 성능을 비교하기 위하여 Fig. 6에 5 mm/s의 이송속도에 대한 추종제어 결과를 보이고 있다. DLC 코팅 전의 경우와 크게 다른 점은 두 가지 환경상태에서 제어성능이 DLC 코팅 후 모두 향상되었다는 것이다. 공기 및 진공 중에서의 추종제어 성능이 비슷하나 추종오차 크기 및 지터크기에서 진공 중에서의 성능이 다소 더 우수해 보이며 공기 중 실험결과와 경우 엔코더 신호에 가해진 외란에 의하여 미소한 추종오차 영향이 발생

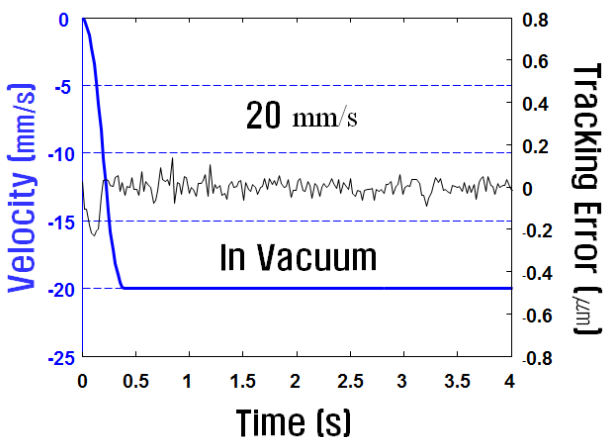
함(DLC 코팅 전과 비교하여 1/10 크기. 5 $\mu\text{m/s}$ 실험에서는 공기/진공 중에서 모두 외란 영향이 발견되지 않음)을 알 수 있으나 진공 중에서의 실험에서는 상대적으로 관찰되지 않는다. 이러한 경향성은 DLC 코팅이 존재하여도 미소하게 진공 중에서의 제어모델이 변하여 추종제어 성능 향상이 이루어짐을 의미한다. 마스터링 장비 및 전자빔/이온빔을 이용한 가공장비 등에서의 응용으로는 빠른 속도이나 더 높은 속도에서의 특성을 파악하고자 Fig. 7 및 Fig. 8에서 20 mm/s 및 30 mm/s의 이송속도 추종제어 성능 비교 결과를 보이고 있다. 결과 그래프에서 왼쪽 수직축은 속도이며 오른쪽 수직축은 추종오차를 나타내어 두 개의 물리량을 동시에 그래프로 표시하였다. 결과를 관찰하면 추종해야 할 이송속도가 커질수록 추종오차는 커지는 일반적인 양상을 보이고 있고 두 가지 환경에서의 결과가 크게 차이가 나지 않음을 역시 알 수 있다. 또한, 이송속도가 커짐에 따라 추종오차도 증가하여 엔코더 신호에 가해진 외란의 영향이 존재하여도 전체적인 추종오차 데이터에 묻혀서 관찰되지 않고 있음을 알 수 있다.



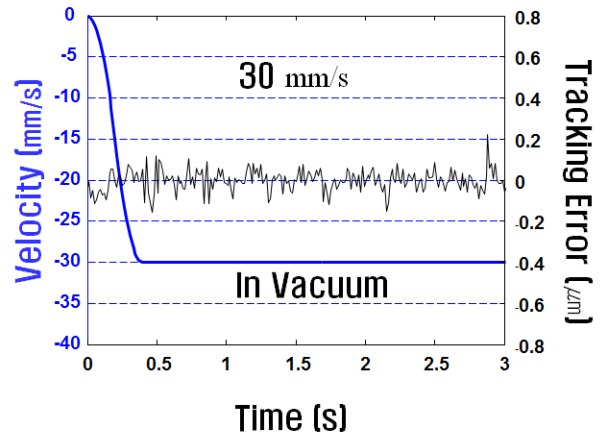
(a) Experiment in air



(a) Experiment in air



(b) Experiment in vacuum



(b) Experiment in vacuum

Fig. 7 Tracking control experiment results (20 mm/s, w/ DLC coat)

Fig. 8 Tracking control experiment results (30 mm/s, w/ DLC coat)

4. 결론

진공환경 적용을 위하여 여러 가지 조건에서 볼베어링을 채용한 직선 스테이지의 추종제어 성능을 실험적으로 분석하였다. 진공환경에서 사용 가능한 스테인레스 스틸 재질의 볼 및 가이드를 채용한 직선 스테이지의 경우 공기 중의 제어 특성과 진공 중의 제어 특성이 크게 변함이 관찰되었고 이것은 공기 중에서 존재하는 표면 흡착층(물 흡착층 등)의 존재 및 금속과 금속의 직접 접촉에 의한 마찰 증가 등이 원인으로 판단된다. 그리고 표면 흡착층은 공기 중에서 추종제어 성능을 저하시키는 외란 요인으로 작용함을 알 수 있었다. 결론적으로 DLC 코팅 전의 일반적인 볼베어링이 채용된 상태에서는 공기 중의 경우와 진공 중의 경우 제어 대상 모델이 크게 변함을 알 수 있었다. 이러한 현상들이 DLC 코팅 후에는 전혀 다른 양상을 보이게 되는데 첫째로 두 가지 환경에서의 제어 대상 모델이 거의 변화가 없음이 확인되었고 둘째로 DLC 코팅 전보다 추종제어 성능이 훨씬 향상되었음을 알 수 있었다. 이러한 제어 성능 향상은 DLC 코팅 층의 재료적 특성(고 경도, 저 반응성, 저 마찰)에 의하여 표면 흡착층 및 표면 마찰력 등의 특성이 제어 시스템에 긍정적으로 변화된 것이 원인으로 판단되었다.

따라서, DLC 코팅된 가이드레일을 이용한 직선 스테이지의 추종제어 성능 실험 및 분석 결과에서 고체윤활인 DLC 코팅을 적용하여 진공환경에서 볼베어링 가이드를 사용함에 있어서 저마찰 특성을 구현할 수 있고 공기 중에서의 제어에서도 일관되고 향상된 제어 성능을 구현할 수 있음을 알 수 있었다. 그러므로, 진공환경에서 사용하는 초정밀 이송계의 베어링 시스템으로 DLC 코팅의 가능성을 확인할 수 있었으며 추후에는 상대적으로 저속의 응용범위를 넘어 1,000 mm/s까지의 고속에서의 제어 특성 및 수명에 대한 추가적 실험이 필요하다 하겠다.

References

- [1] Moneck, M. T., Okada, T., Fujimori, J., Ksuya, T., Katsumura, M., Lida, T., Kyriyama, K., Lin, W. C., Sokalski, V., Powell, S., Bain, J. A., 2011, Fabrication and Recording of Bit Patterned Media Prepared by Rotary Stage Electron Beam Lithography, *IEEE Trans. Magn.* 47:10 2656-2659.
- [2] Kitahara, H., Uno, Y., Suzuki, H., Kobayashi, T., Tanaka H., Kojima Y., Kobayashi, M., Katsumura, M., Wada, Y., Lida, T., 2010, Electron Beam Recorder for Patterned Media Mastering, *Jpn J. Appl. Phys.* 49:6s 1-9.
- [3] Katsumura, M., Sato, M., Hashimoto, K., Hosoda, Y., Kasono, O., Kitahara, H., Kobayashi, M., Lida, T., Kuriyama, K., 2005, Electron Beam Recording beyond 200 Gbit/in² Density for Next Generation Optical Disk Mastering, *Jpn J. Appl. Phys.* 44:5B 3578-3582.
- [4] Boamfa, M. I., Neijzen, J. H. M., 2005, Two-Dimensional Optical Storage Mastering: Adding a New Dimension to Liquid Immersion Mastering, *Jpn J. Appl. Phys.* 44:5B 3583-3586.
- [5] Neijzen, J. H. M., Meinders., E. R., Santen, H., 2004, Two-Dimensional Optical Storage Mastering: Adding a New Dimension to Liquid Immersion Mastering, *Jpn J. Appl. Phys.* 43:7B 5047-5052.
- [6] Nadzeyka, A., Peto, L., Bauerdick, S., Mayer, M., Keskinbora, K., Grevent, C., Weigand, M., Hirscher, M., Schutz, G., 2012, Ion beam lithography for direct patterning of high accuracy large area X-ray elements in gold on membranes, *Microelec. Eng.* 98 198-201.
- [7] Basith, M. A., Vitie, S. M., McGrouther, D., Chapman, J. N., Weaver, J. M. R., 2011, Direct comparison of domain wall behavior in permalloy nanowires patterned by electron beam lithography and focused ion beam milling, *J. Appl. Phys.* 110:8 (083904)1-8.
- [8] Reyntjens, S., Puers, R., 2001, A review of focused ion beam applications in microsystem technology, *J. Micromech. Microeng.* 11 287-300.
- [9] Maile, B. E., Henschel, W., Kurz, H., Rienks, B., Polman, R., Kaars, P., 2000, Sub-10nm Linewidth and Overlay Performance Achieved with a Fine-Tuned EBPG-5000 TFE Electron Beam Lithography System, *Jpn. J. Appl. Phys.* 39:12B 6836-6842.
- [10] Nielsen, E. H., Greibe, T., Mortensen, N. A., Kristensen, A., 2014, Single-spot e-beam lithography for defining large arrays of nano-holes, *Microelec. Eng.* 121 104-107.
- [11] Schenk, C., Buschmann, S., Risse, S., Eberhardt, R., Tunnermann, A., 2008, Comparison between flat aerostatic gas-bearing pads with orifice and porous feedings at high-vacuum conditions, *Prec. Eng.* 32:4 319-328.
- [12] Peijnenburg, A. T. A., Vermeulen, J. P. M., Eijk, J. V., 2006, Magnetic levitation systems compared to conventional bearing systems, *Microelec. Eng.* 83 1372-1375.
- [13] Gill, S., Rowntree, A., 2010, *Liquid Lubricants for Spacecraft Applications*, Springer, Netherlands.
- [14] Bowden, F. P., Tabor, D., 1971, *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press, London.
- [15] Fukada, S., Fang, B., Shigeno, A., 2011, Experimental analysis and simulation of nonlinear microscopic behavior of ball screw mechanism for ultra-precision positioning, *Prec. Eng.* 35:4 650-668.
- [16] Wulp, H., With, E., Pistecky, P. V., Spronck, J. W., 1995, Compact, piezo-driven, vacuum compatible rotation device, *Rev. Sci. Instrum.* 66:11 5339-5343.