

고진공 환경용 공기베어링이 적용된 직선, 회전스테이지의 구동에 의한 압력증가 특성분석

Analysis on the Pressure Rise Characteristics Caused by Movement of Linear and Rotary Stages using Air Bearings in High Vacuum Environment

김경호^{1,✉}, 박천홍¹
Gyungho Khim^{1,✉} and Chun-Hong Park¹

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing Systems Research Division, KIMM)
✉ Corresponding author: gyungho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7105

Manuscript received: 2009.3.2 / Accepted: 2009.5.22

A pressure rise is generated while air bearing stages are moving in high vacuum environment. This study analyzed this pressure rise phenomenon theoretically and verified it experimentally using two different kinds of stages - linear and rotary air bearing stages. Results indicate that the pressure rise was caused by additional leakage resulting from stage velocity, along with adsorption and outgassing of gas molecules from the guide rail surface. Though tilting of the stage due to acceleration and deceleration reached several micrometers, it had a negligible effect on pressure rise because the tilting time was very short. Therefore, a rotary air bearing stage showed much less pressure rise than a linear stage because the rotary stage theoretically has nothing to do with the above causes. Additional leakage caused by stage velocity was inevitable if the stage had movements, but pressure rise caused by adsorption and outgassing could be suppressed by improving the surface quality to reduce real surface area, and by coating the guide rail surface with titanium nitride (TiN) which has less adhesion probability of gas molecules. The results also indicate that the pressure rise increased when the air bearing stage operated under high vacuum conditions.

Key Words: Air Bearings (공기베어링), Vacuum (진공), Pressure Rise (압력증가), Linear Stage (직선스테이지), Rotary Stage (회전스테이지), Outgassing (기체방출)

1. 서론

전자빔을 이용한 블루레이(Blu-ray) 디스크 마스터링 장비나 차세대 반도체 노광장비 등에서는 진공환경에서 전자빔에 대해 시편의 정밀한 이송을 담당하는 초정밀 스테이지가 필요하다. 따라서 이러한 장비에 사용되는 초정밀 스테이지는 대부분 마찰이 거의 없어 정밀도면에서 유리한 공기베어링을 이용하려는 연구가 진행되고 있다.¹⁻⁴ 진공

환경에서의 공기베어링은 차동배기(Differential exhaust)라 불리는 방법을 적용함으로써, 베어링 간극에서 누출된 공기를 고진공 환경인 챔버에 도달하기 전에 진공펌프를 이용하여 미리 순차적으로 배출시켜 챔버 내부를 충분히 낮은 압력으로 유지할 수 있게 되었다. 그러나 공기베어링이 정지해 있는 동안에는 진공챔버의 압력이 거의 변동없이 일정하게 유지되는 반면, 공기베어링이 구동하게 되면 이에 따라 챔버의 압력이 증가하고, 공기베

어링이 정지하면 다시 원상태로 압력이 회복되는 현상이 발생하였다.^{5,6} Ohtsuka⁵는 이에 대한 자세한 원인분석 없이 실험결과만을 그의 논문에서 밝히고 있으며, Shinohara⁶는 이에 대한 원인으로 가이드 레일 표면에서의 공기분자의 흡착(adhesion) 및 방출(discharge)로써 설명하여 특허로 발표하였다. 저자 등은 진공환경용 공기베어링이 적용된 직선스테이지를 대상으로 하여 이에 대한 추가적인 원인들을 분석하고 실험을 통하여 검증한 바 있다.⁷ 이에 따르면 직선스테이지와 같이 가이드레일이 노출되는 스테이지는 구동 중 불가피하게 압력증가 현상이 발생하게 된다. 따라서 이러한 현상이 발생하지 않을 것으로 예상되는 회전스테이지에 대한 실험을 추가로 수행하면 압력증가 현상에 대한 보다 명확한 검증을 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 이전 직선스테이지를 통해 얻은 압력증가 현상에 대한 결과를 정리하고, 회전스테이지에 대한 압력증가 실험을 추가로 수행하여 비교 분석함으로써, 진공환경에서 공기베어링이 구동할 때 발생하는 압력증가현상에 대한 원인을 보다 확실하게 하고자 하였다.

2. 직선스테이지에 대한 압력증가 특성분석

2.1 직선스테이지 실험장치

Fig. 1은 공기베어링을 이용하여 구성된 직선스테이지를 진공챔버 안에 설치한 모습을 보여주고 있다. 공기베어링은 다공질 재료를 이용하여 수직, 수평방향에서 각각 양면패드 방식으로 지지되고 있으며, 사용된 재료는 알루미늄 7075로 표면경도 향상을 위해 아노다이징처리하였다. 공기베어링은 총 3 단계의 차동배기를 이용하여 진공도를 유지하였으며, 1차 배기는 외부대기로의 자연배기, 2, 3차는 진공펌프를 이용한 강제배기로 구성하였다.⁸ 공기베어링 스테이지의 구동을 위하여 스테이지 하단부에 리니어모터 및 스케일을 설치하고, PMAC 제어기를 이용하여 구동하였다.

2.2 압력증가 특성분석

Fig. 2는 직선스테이지의 속도를 100mm/s에서 300mm/s로 증가시 발생하는 압력증가를 측정된 결과이다. 압력은 진공챔버에 설치된 폴레인지 진공계이지(PFEIFFER Vacuum, TPG 261, atm. ~ 5×10^{-7} Pa)에 A/D 보드(Wavebook516)를 연결하여 100 Hz의 샘플링 속도로 측정하였다.

베어링 정지시 유지된 초기 압력(P_0 , 이후 기저 압력이라 표현)은 4.3×10^{-3} Pa이었으며, 속도가 증가함에 따라 압력증가도 크게 나타나고 있다. 속도가 300mm/s인 경우, 정지시에 비해 3×10^{-4} Pa의 압력이 증가한 4.6×10^{-3} Pa로 나타났으며, 이를 로그함수를 이용하여 무차원으로 표현하면 3% 정도 증가한 수치이다. 로그함수를 이용하여 무차원으로 표현한 방법은 기저압력 P_0 에 대하여 구동시 증가하는 압력 P 의 상대적인 비에 로그함수를 취한 것이다.

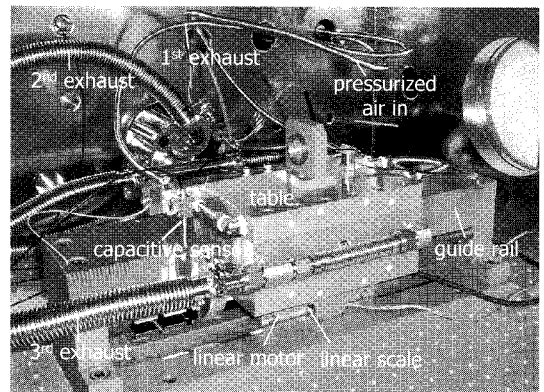


Fig. 1 Linear stage using air bearings

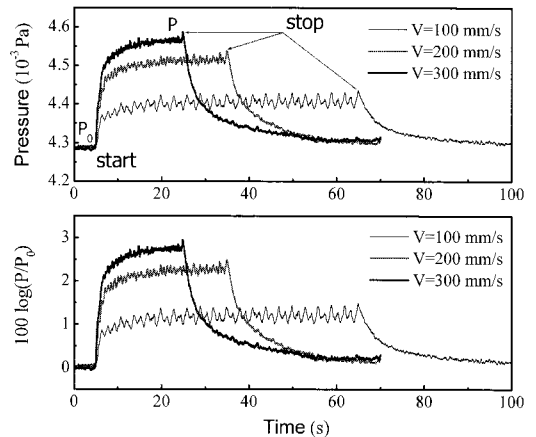


Fig. 2 Pressure rise while a linear stage is moving

저자 등은 이에 대한 원인으로 3 가지 가능성을 가정하여 각각에 대하여 이론적, 실험적으로 분석하였다. 첫째, 베어링 구동시 가감속에 의한 스테이지의 흔들림으로 간극의 변화가 발생하고 이에 따라 공기의 누출량 및 챔버 압력이 증가하는 것이다. 공기베어링으로부터의 누출량은 Knudsen

number 에 의해 결정되는 유동상태에 따라 베어링 간극의 제곱이나 세제곱에 비례하여 커지기 때문에 약간의 간극 증가도 누출량에 크게 영향을 주게 된다.^{9,10} 이를 이론적으로 분석하기 위하여 스테이지의 한쪽 끝에서 발생하는 틸트량(δ)에 따른 챔버의 압력증가를 이론적으로 계산하였다. Fig. 3 은 베어링 간극(h_0)이 서로 다른 세 개의 시스템에서 틸트량에 따른 압력증가를 계산한 것으로, 틸트량에 따라 압력증가가 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 여기서 P_0 는 베어링의 간극 변화가 없을 때의 정지 상태에서의 압력, 즉 기저압력을 의미한다.

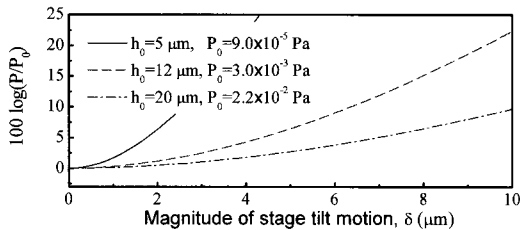


Fig. 3 Pressure rise due to the tilting motion of the stage

그러나 실제 스테이지에서 이렇게 항상 한쪽으로 틸트되어 구동하는 경우는 거의 없으며, 스테이지가 틸트되는 경우는 처음 출발 및 정지시에 가감속에 의해서만 발생한다.

실험적으로 이를 확인하기 위해서, 스테이지의 구동시 가감속도를 변화시켜가며 이에 따른 압력 변화를 측정하였다. 가감속도는 0.1g(=0.98m/s²), 0.5g, 1g 로 변화시켰으며, 이때 발생하는 틸트량은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 정전용량형 센서(ADE 2805)를 이용하여 이송테이블에 대한 가이드 레일의 상대적인 변위량으로써 측정하였다. Fig. 4 는 이송속도가 100mm/s 일 때 가감속에 따른 스테이지의 틸트량을 측정한 결과로, 150mm 의 행정거리를 총 5 번 왕복이동하면서 얻은 결과이다. 가감속도 (Acc)가 증가할수록 테이블의 틸트량이 크게 증가해 1g 의 경우 최대 6 μ m 까지도 나타나고 있다.

이때 측정된 압력변화를 Fig. 5 에서 보여주고 있다. 가감속도가 증가하더라도 압력증가는 거의 발생하지 않고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4 의 결과에 따르면 가감속도가 증가할수록 스테이지의 틸트량이 크게 발생하므로 공기누출량 증가에 따른 압력증가도 크게 나타나야 하지만, 실험결과 틸트량에 의한 압력증가는 거의 무시할만한 수준

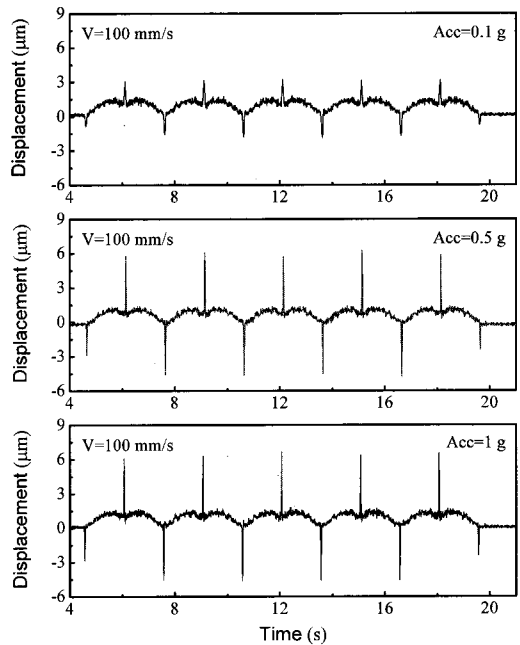


Fig. 4 Tilt of air bearing table measured according to different accelerations (velocity : 100mm/s)

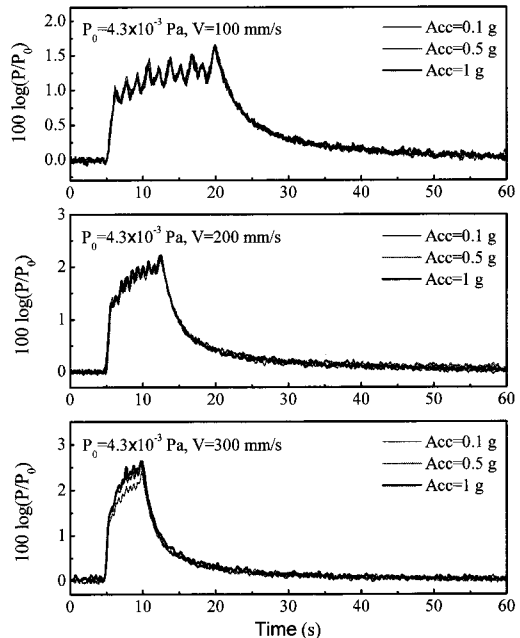


Fig. 5 Pressure rise measured according to acceleration

으로 나타났다. 이는 가감속도에 의해 스테이지의 틸트량이 증가하기는 하지만 그 시간이 매우 짧기 때문에 공기의 누출량 증가에 의한 압력증가로

지는 연결되지 않은 것으로 판단된다. 다른 속도에서 실험한 경우도 같은 결과를 보이고 있다. 다만, 300mm/s의 속도와 0.1g의 가속도에서는 압력증가가 다소 작게 나타나고 있는데, 이는 이송거리에 비해 속도가 너무 빠르고, Fig. 6에서 보는 바와 같이 제어기로 사용된 PMAC의 블렌딩(blending) 이송명령으로 인해 실제로 이송한 거리가 150mm보다 짧은 것에 원인이 있는 것으로 생각된다. 즉, 압력증가가 작게 나타난 이유는 가감속에 의한 틸트량이 작아서가 아니라 이송거리와 관련되어 이후에 설명할 다른 원인에 의해 영향을 받은 것으로 설명할 수 있다.

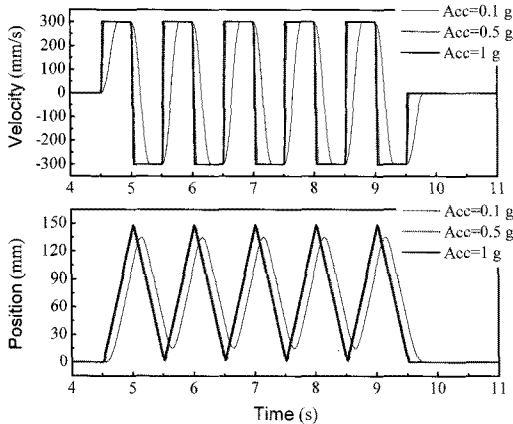


Fig. 6 Motion profiles with blending motion (V=300mm/s)

둘째, 베어링의 구동에 의한 동압효과로 압력이 증가하는 것이다. 베어링 내부에서 상대적으로 고압 상태에 있던 공기가 베어링 구동시 공기점성에 의해 이끌려 나와 추가로 유량이 증가하게 된다. 이는 가이드 레일이나 테이블의 가공 및 조립 오차로 인해 좌우 간극에 편차가 발생한다면 더욱 커질 것이다. Fig. 7은 구동 중 이송속도에 의한 압력증가현상을 나타낸 그림으로, 진행방향에서는 점성에 의해 끌린 양만큼 유량이 증가하고 반대방향에서는 유량이 감소하지만, 진행방향으로 존재하는 진공 시일(seal) 영역에서의 압력이 반대방향에 비해 상대적으로 높기 때문에 전체적으로 보면 유량도 증가하게 된다. q_p 는 외부에서 가압된 공기에 의해 발생하는 Poiseuille 유동에 의한 유량으로써 포물선 속도 형태로써 나타나며, $q_c (= \rho \cdot V \cdot h_0 / 2, \rho$: 밀도)는 베어링 구동에 따라 추가적으로 발생하는 Couette 유동에 의한 유량으로써 선형 속도 형태로

나타나고 있다.

Fig. 8은 베어링 이송속도에 의한 압력증가를 계산한 결과로, 속도가 증가할수록 압력도 증가하는 것을 볼 수 있다. 한 예로, 베어링 간극이 5 μ m인 경우 300mm/s의 속도하에서 대략 4% 이상의 압력증가를 보이고 있으며, Fig. 2에서 보여주는 실험결과 또한 속도가 증가할수록 압력도 증가하는 것을 확인하였다.

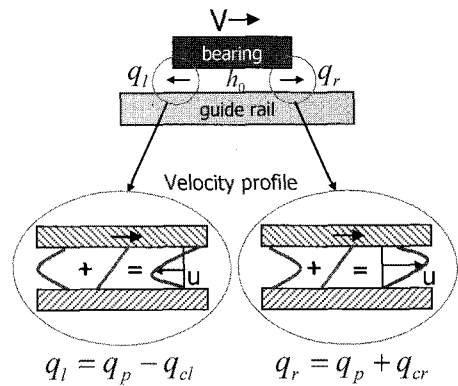


Fig. 7 Additional leakage due to stage velocity

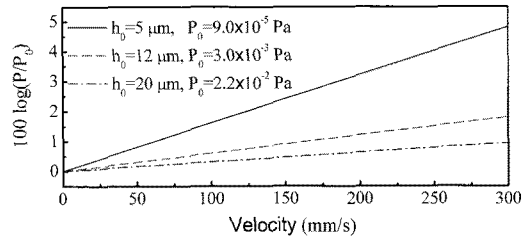


Fig. 8 Pressure rise due to stage movement

셋째, 베어링이 정지시에 베어링과 마주보고 있는 가이드 레일 표면에 흡착되어 있던 공기분자들이 베어링이 구동하면서 갑자기 고진공 환경에 노출되어 방출됨으로써 챔버의 압력이 증가하는 것이다.⁶ 이에 대한 이론적인 해석은 여러가지 난해한 점들이 많아 실험을 통해서만 분석하였다. 실험적 분석을 위하여 기체흡착력이 서로 다른 재질로 구성된 레일을 준비하여 레일의 재질에 따른 압력증가현상을 살펴보았다. 준비한 레일 중 하나는 가장 일반적인 재료중 하나인 SM45C로 된 레일이며, 다른 하나는 기체흡착에 대해서 불활성이라고 알려진 질화티타늄(TiN)^{9,10}을 STD-11 레일에 증착시킨 레일이다. STD-11 재료를 사용한 이유는 질화티타늄 증착시 고온에 의해 뒤틀리는 것을 방

지하기 위해서이다. 실험은 두 레일의 재질을 제외한 나머지 조건은 최대한 비슷한 상태가 되도록 한 후 수행하였다. 이때 진공도에 가장 큰 영향을 미치는 베어링의 간극을 동일하게 유지하기 위해 두 레일의 정밀도를 최대한 맞추어 가공하고 조립하였다.

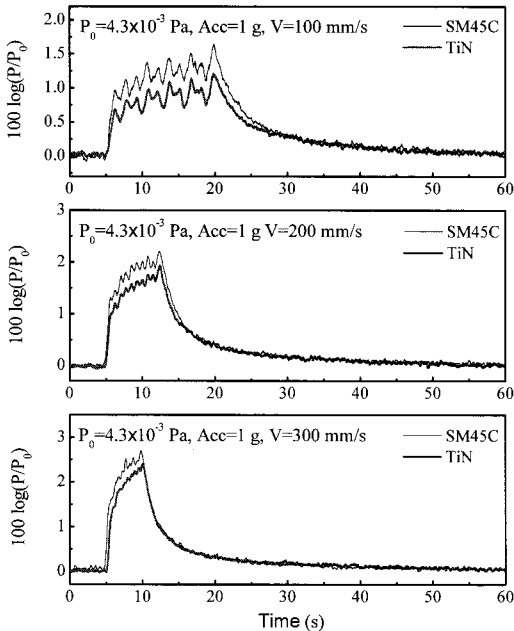


Fig. 9 Pressure rise with the guide rail surface

기저압력(P_0)이 4.3×10^{-3} Pa, 이송 가속도가 1g 인 상태에서 5 번 왕복이송하였을 때 수행한 실험 결과를 Fig. 9 에서 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 질화티타늄을 코팅한 레일에서 압력증가가 작게 발생하고 있다. 즉 공기분자와의 친화력이 떨어지는 재료의 레일 사용시 베어링 구동에 따른 압력증가가 작게 나타나고 있는 것이다. 그러나 이 둘의 차이가 크게 나타나고 있지는 않은데, 이는 질화티타늄 재료라 할지라도 공기분자와 어느 정도는 반응할 것이며, 또한 두번째 원인으로 밝힌 베어링 구동에 따른 동압효과가 동시에 나타나고 있기 때문이다. 그러나 베어링 구동에 따른 동압효과와 가이드 레일에서의 기체방출에 의한 영향이 동시에 나타나므로 이 둘을 명확히 구분짓기는 불가능하였다.

또 한가지 이유는 두 레일의 표면거칠기 차이

에서 오는 절대 기체방출량에 의한 영향을 받았을 것이다. 레일 표면에서의 기체방출량은 실표면적에 비례하므로 표면거칠기가 클수록 실표면적이 증가하여 진공도에는 악영향을 주게 된다. Fig. 10 은 레일의 표면거칠기 측정사진을 보여주고 있다. Mitutoyo 사의 휴대용 표면거칠기 측정기(SJ-201)를 사용하여 레일 표면 10 곳을 임의로 선정하여 측정하고 이를 평균화하여 Table 1 에 나타내었다. 질화티타늄 코팅레일의 Ra(Arithmetic mean deviation)는 $0.39\mu\text{m}$, SM45C 는 $0.13\mu\text{m}$ 로, 질화티타늄을 코팅한 레일의 표면거칠기가 3 배나 크게 나타났다. 즉, 질화티타늄을 코팅한 레일이 표면에서의 기체방출률은 작지만 증착시의 불균일성 등에 의해 실표면적이 커져 기대만큼의 압력증가 억제효과를 볼 수 없었던 것이다.

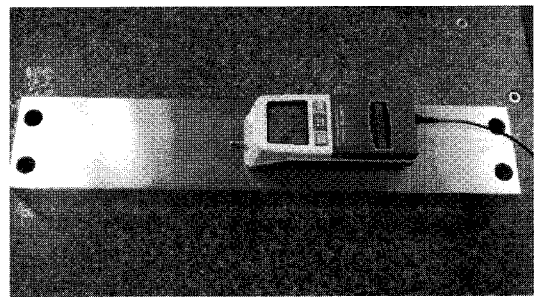


Fig. 10 Surface roughness measurement of guide rail

Table 1 Measurement result of surface roughness

	Ra (μm)	Ry (μm)	Rq (μm)
TiN Coating rail	0.39	2.22	0.47
SM45C rail	0.13	0.89	0.17

Fig. 11 은 기저압력(P_0)에 따른 압력증가현상을 실험한 결과로써, 기저압력을 변화시키기 위하여 베어링 간극 및 베관 사이드를 변화시켰다. 실험 결과, 기저압력이 낮아질수록 베어링 구동에 따른 압력증가가 크게 나타나고 있으며, 이는 고진공 환경으로 갈수록 베어링 구동에 따른 압력증가 현상이 큰 문제로 작용할 수 있다는 것을 의미한다.

3. 회전스테이지에 대한 압력증가 특성분석

3.1 회전스테이지 실험장치

공기베어링을 이용한 직선스테이지 실험결과, 구동시 발생하는 압력증가현상은 동압효과 및 가

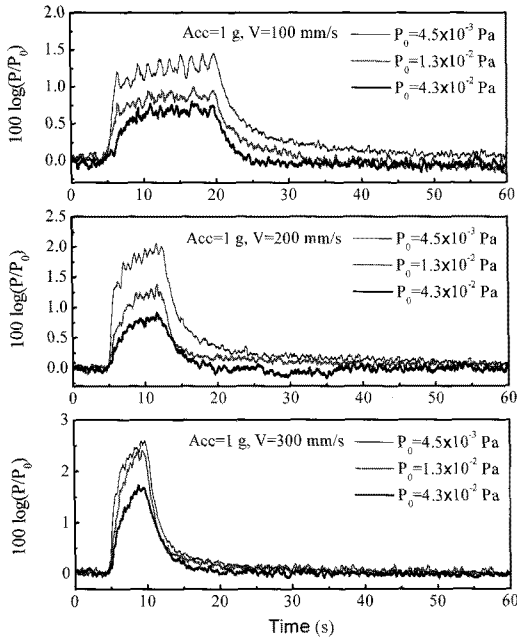


Fig. 11 Pressure rise with base pressure

이드 레일 표면에서의 기체방출에 의한 영향이 동시에 작용하여 나타나고 있다. 만약 공기베어링이 적용된 회전스테이지가 사용된다면, 회전스테이지는 로터와 스테이터가 서로 마주보고 회전하는 형태이므로 이송에 따른 동압효과와 가이드 레일 표면에서의 기체방출에 의한 압력증가 현상이 거의 발생하지 않을 것으로 생각된다. 따라서 회전스테이지에 대해서 위와 같은 실험을 수행하여 그 결과를 분석해 보면 압력증가에 대한 원인을 보다 명확히 할 수 있을 것이다.

Fig. 12 는 실험에 사용한 회전스테이지를 보여 주고 있다. 직선스테이지와 마찬가지로 다공질 공기베어링 및 아노다이징 표면처리한 알루미늄 7075 을 이용하였으며, 총 3 단계의 차동배기로 구성하였다. 구동을 위하여 다이렉트 드라이브 모터와 각도엔코더, PMAC 제어기를 사용하였다. 이 회전스테이지는 Blu-ray 디스크 마스터링 장비에 사용할 목적으로 설계/제작되었으며, 이에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌¹¹에 나타나 있다.

3.2 압력증가 특성분석

Fig. 13 은 회전스테이지의 속도를 100rpm 에서 300rpm 으로 증가시키면서 압력증가 특성을 측정 한 결과이다. 회전속도가 빨라짐에 따라 압력이

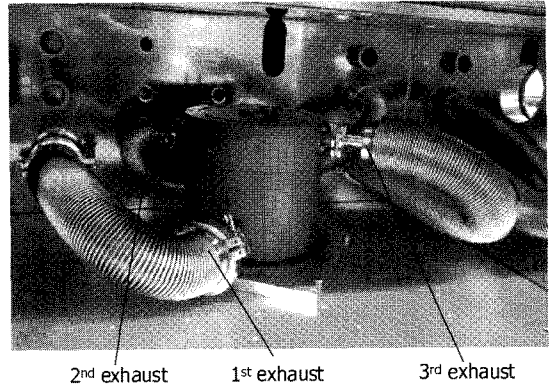


Fig. 12 Rotary stage using air bearings

다소 증가하고는 있지만, 속도가 300rpm 이라 하더라도 챔버 압력은 7.59×10^{-4} Pa 에서 겨우 8×10^{-6} Pa 정도만 증가하고 있으며, 로그함수를 이용한 수치에서도 단지 0.5%만 증가했을 뿐이다. 회전속도 300rpm 은 로터와 스테이터가 마주보는 경계 지점에서 대략 900mm/s 의 선속도에 해당하는 것으로, 직선스테이지의 구동속도와 비교해 볼 때 매우 빠른 속도이다. 그럼에도 Fig. 2 의 직선스테이지 실험결과와 비교해 볼 때 압력증가가 매우 작게 발생하고 있다. 또한 기저압력(P_0)이 7.6×10^{-4} Pa 로써 직선스테이지의 4.3×10^{-3} Pa 보다도 한 차수 정도 낮은데, Fig. 11 의 결과에 따르면 기저압력이 낮으면 압력증가가 더 크게 발생해야 함에도 불구하고 압력증가가 훨씬 작게 발생한 것을 볼 때, 회전스테이지에서의 압력증가는 직선스테이지와 비교하면 거의 무시할만한 수준이라는 것을 알 수 있다. 단, 회전스테이지에서의 압력증가는 이론상 발생하지 않아야 하지만, 미소하나마 나타나는 것은 회전축 등의 가공오차나 조립오차로 인해 베어링 간극이 불균일하고 이로 인해 회전시 wobbling 운동 및 동압효과가 나타난 것으로 판단된다. Fig. 14 는 직선스테이지와 회전스테이지에서 나타난 압력증가를 정리한 것으로, 상대적인 압력증가를 쉽게 비교할 수 있다. 여기서 회전스테이지의 속도는 선속도로 변환하여 나타내었다.

기존의 직선스테이지에 대한 압력증가 실험과 더불어 회전스테이지에 대한 실험결과로부터 공기베어링 구동시 발생하는 압력증가의 원인은 이송시 속도에 따른 동압효과와 가이드 레일 표면에서의 기체방출에 의한 영향이라는 것이 보다 명확히 검증된 것으로 판단된다.

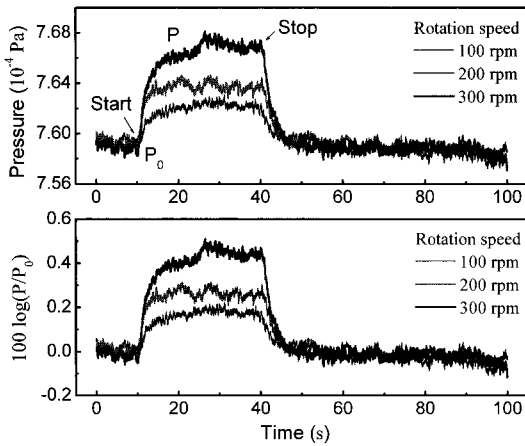


Fig. 13 Pressure rise while a rotary stage is moving

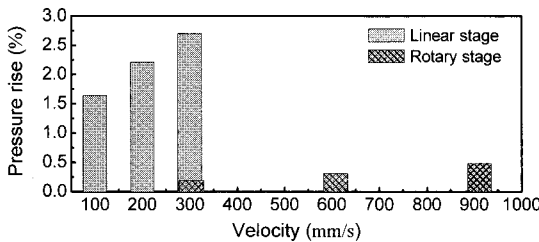


Fig. 14 Comparison of pressure rise between linear and rotary stages

4. 결론

진공환경에서 공기베어링 구동시 발생하는 압력증가 현상을 분석하고 실험을 통해 검증하였다. 압력증가현상은 이송속도에 따른 동압효과 및 가이드 레일의 표면에서 발생하는 기체방출에 의한 영향이 복합적으로 작용한 결과이며, 따라서 회전스테이지보다는 직선스테이지에서의 압력증가 현상이 훨씬 크게 나타나고 있다. 또한 이러한 압력증가 현상은 저진공보다는 고진공 환경에서 상대적으로 크게 나타나고 있다.

공기베어링 구동시 이송속도에 의해 추가적으로 발생하는 압력증가는 베어링이 구동하면 항상 발생하는 것으로 이를 억제할 수 있는 방법이 없지만, 가이드 레일 표면에서의 기체방출에 의한 압력증가는 가이드 레일을 기체흡착에 대해서 불활성인 질화티타늄과 같은 재료로 증착하여 사용하고, 정밀연삭이나 래핑을 통해 실표면적을 감소시키는 방법을 통해 압력증가를 억제할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Kojima, Y., Kitahara, H., Kasono, O., Katsumura, M. and Wada, Y., "High Density Mastering Using Electron Beam," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, No. 4B, pp. 2137-2143, 1998.
2. Furuki, M., Takeda, M., Yamamoto, M., Aki, Y., Kawase, H., Koisumi, M., Takashima, S., Miyokawa, T. and Date, N., "Electron Beam Recording with a Novel Differential Pumping Head Realizing More than 50 GB/Layer Capacity Disc," Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol. 42, No. 2B, pp. 759-763, 2003.
3. Kitahara, H., Ozawa, Y., Asai, M., Nishida, T. and Wada, Y., "Electron Beam Recorder with Nanometer-Scale Accuracy for 100Gbit/in² Density Mastering," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 7B, pp. 5068-5073, 2004.
4. Miura, T., Sato, T., Miyazaki, M., Hada, K., Sato, Y. and Tokunaga, M., "Nikon EPL Tool Development Summary," Proc. SPIE, Vol. 4688, pp. 527-534, 2002.
5. Ohtsuka, M., Furukawa, M. and Higomura, M., "The Vertical Traverse Stage in Vacuum Condition," JSME Int. J. Series III, Vol. 33, No. 1, pp. 61-64, 1990.
6. Shinohara, S., Tsuda, T. and Hayashida, T., "Hydrostatic Gas Bearing, Hydrostatic Gas Bearing Device for use in Vacuum Environment, and Gas Recovering Method for the Hydrostatic Gas Bearing Device," US Patent, No. US 2003/0002756, 2003.
7. Khim, G., Park, C.-H., Lee, H. and Kim, S.-W., "Analysis of Additional Leakage Resulting from the Feeding Motion of a Vacuum-Compatible Air Bearing Stage," Vacuum, Vol. 81, No. 4, pp. 466-474, 2006.
8. Khim, G., Park, C.-H., Lee, H. and Kim, S.-W., "Performance Analysis of a Vacuum-Compatible Air Bearing," Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 10, pp. 103-112, 2006.
9. Bac, S. H., In, S. R., Jung, K. H., Lee, Y. B. and Shin, Y. H., "Vacuum Engineering," The Korea Economic Daily Business Publication, pp. 61-116, 2000.
10. Roth, A., "Vacuum Technology," North-holland, pp. 62-88, 1990.
11. Khim, G., Song, C.-K. and Park, C.-H., "Design and Evaluation of a Rotation Table using Air Bearings for Electron Beam Mastering," Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 12, pp. 132-138, 2008.