

진공환경용 공기베어링의 Leakage 해석

김경호*(한국과학기술원 기계공학과), 박천홍, 이후상(한국기계연구원 지능형정밀기계연구부),
김승우(한국과학기술원 기계공학과)

Leakage Analysis of Air Bearing for Vacuum Environment

G. Khim (KAIST), C. H. Park, H. Lee (KIMM), S. W. Kim (KAIST)

ABSTRACT

A vacuum environment is very important for NGL(Next Generation Lithography) apparatuses such as EUVL(Extreme Ultra Violet Lithography) or EPL(Electron Projection Lithography) and so on. The performance of these systems is dominated by vacuum level of processing and positioning accuracy of a stage. So, ultra-precision stage usable in a high vacuum level is needed for the improved performance of these devices. In contrast to atmospheric condition, a special attention must be paid to guide bearing, actuator and other elements. In this paper, air bearing is adopted because of its very high motional accuracy. So, air bearing is designed to be vacuum compatible using differential exhaust method, which prevents air from entering into vacuum chamber. For this, leakage analysis is performed theoretically and verified from experiment.

Key Words : Vacuum Environment(진공환경), Air Bearing(공기 베어링), Leakage Analysis(누설량 해석), Vacuum Pressure(진공압력), Ultra-Precision Stage(초정밀 스테이지)

1. 서론

진공환경은 극자외선 노광장비(EUVL), 전자빔 노광장비(EPL)와 같은 차세대 리소그래피 장비나, 주사전자현미경(SEM) 등에 있어 매우 중요하다. 공정에 필요한 극자외선이나 전자들이 진공에서만 주변환경에 흡수되지 않고 평균자유행로가 길어져 에너지 손실 없이 잘 움직일 수 있기 때문이다. 따라서 진공환경에서 구동 가능한 스테이지가 필요한데, 기본적으로 고정도와 고진공도를 유지해야만 하므로, 베어링이나, 구동원, 센서, 재료 선택에 있어 많은 어려움이 따른다. 현재까지, 진공 스테이지에서 주로 사용되고 있는 베어링은 플링 베어링으로, 구현하기가 가장 간편하지만, 진공에서는 마찰저항이 대기상태보다 증가하기 때문에 고속이나 고정도를 달성하는 데 어려움이 있다. 또한 사용되는 윤활제로 인해 진공도가 저하되고, 시간이 지나면 윤활제가 기화되어 없어지는 문제점도 발생하기도 한다. 따라서 현재는, 고속과 고정도 측면에서 유리한 공기베어링과 마그네틱 베어링에 대한 연구가 시도되

고 있는 중이다.

본 연구에서는 진공에서 구동되는 스테이지를 개발하는데 있어, 현재 많은 초정밀 스테이지에 채택되어 있는 공기베어링을 사용하고자 하였다. 그러나 공기베어링을 진공환경에서 사용하는 것은 큰 문제점을 지니는데, 베어링에서 발생한 공기가 진공도를 저하시키는 것이 그것이다. 이 문제를 해결하기 위하여 진공펌프를 통한 차등배기(differential exhaust) 방식을 이용하여 공기베어링에서 발생하는 공기가 진공챔버에 도달하기 전에 배기하는 방식을 도입하였다.¹ 이를 위해, 공기베어링에서 발생하는 공기가 베어링 간극을 통해 얼마나 진공챔버로 리크되는지를 해석할 필요가 있다. 즉, leakage 해석을 통해 공기베어링을 진공환경에서 사용할 수 있는가의 가능성을 살펴보고, 실험장치를 제작하여 이론적 해석과 비교, 검증하였다.

2. Leakage 해석

2.1 공기베어링의 유량 해석

공기베어링은 강성과 부하용량, 안정성 면에서 유리한 카본 다공질 재료를 사용한 베어링을 이용하였으며, leakage 해석을 위해서는 다공질 패드에서 유출되는 유량부터 알아야 한다. 다공질에서 배출되는 유량은 레이놀즈 방정식으로부터 쉽게 구할 수 있다.^{2,3}

여기에서 다공질 베어링에서 방출되는 유량을 Q_0 라 정의하면, Q_0 는 공급압력, 다공질 재료의 투과율, 베어링의 간극뿐만 아니라, 베어링 주위의 경계압력에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 대기환경용 베어링인 경우는 경계압력을 보통 대기압으로 놓고 해석하나, 진공용 베어링인 경우는 경계압력이 대기압이 아니라 주변 배기 포트의 압력에 따라 달라지므로 경계압력을 대기압이 아닌 미지수로 설정하여 레이놀즈 방정식과 2.2 절의 유량 평형방정식을 동시에 풀어야만 해석이 가능하다.

2.2 Leakage 해석

진공 환경용 공기베어링은 Fig.1 에서 보는 것처럼 다공질 공기베어링 주위에 대기로 통하는 포트와, 그 옆에서 1 차와 2 차의 두 단계로 진공펌프를 이용하여 공기를 배기시키는 구조로 되어 있다. 챔버에는 직접 터보분자펌프를 연결하여 챔버 내부의 진공도를 유지한다.

Leakage 해석을 수행하기 위하여 다공질베어링의 간극과 배기 저항요소(C_1, C_2, C_3)의 간극은 전 영역 내에서 일정하며, 각 배기포트 내부의 압력은 일정하다고 가정한다.

Fig.1 에서 S_i 와 S_{i_eff} 는 각 진공펌프의 배기속도와 컨덕턴스를 고려한 유효배기속도이며, Q_{load} 는 진공내벽과 스테이지 재료 등 챔버 내부에서 방출되는 기체방출량(outgassing)을 나타낸다. C_i 는 도관의 컨덕턴스(conductance), P_i 는 각 포트와 펌프 입구부에서의 압력, 그리고 챔버 내부에서의 압력을 의미한다.

여기에서, 다공질 패드의 경계압인 P_0 는 챔버 밖의 대기와 대기포트를 통해 직접 연결되어 있기 때문에 대기압으로 볼 수 있을 수도 있지만, 이 경우에는 다공질 패드의 유량이 전체 시스템의 해석 시 전혀 고려가 되지 않으므로, 2.1 절에서 설명한 바와 같이 미지수로 놓고 해석을 수행하였다.

Leakage 해석 시 사용되는 기본적인 이론은 유량 보존법칙이다. 즉, Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 다공질 공기 패드에서 방출되는 유량은 대기포트를 통하여 일차적으로 챔버 밖으로 배출되고, 나머지는 간극 C_1 을 통하여 1 차 포트에 들어가게 된다. 2 차 배기에서도 같은 방식이 적용되며, 결국, 챔버와 가장 근접해 있는 간극 C_3 를 통과하는 유량만이 챔버의 진공도에 영향을 미치게 된다. 이는 식

(1)에서 $C_3(P_2 - P_c)$ 로 표현한 것과 같다.

한편, 공기 베어링에서 리크되는 유량과는 별도로, 챔버 내부에서 방출되는 기체방출량 또한 챔버의 진공도에 영향을 주게 된다. 이렇게 리크된 공기는 챔버에 부착된 펌프를 통해 배기되어 챔버내의 진공도가 결정된다.

Leakage 해석 시 가장 중요한 것은 각 도관과 저항요소의 컨덕턴스를 구하는 것인데, 컨덕턴스는 점성류와 분자류와 같은 기체유통의 상태, 도관의 기하학적 치수에 의존하는 값이며, 특히 점성류일 경우 도관의 양 끝단에서의 압력차에도 영향을 받는다. 따라서 Knudsen 수에 따라 점성류와 천이류, 분자 유통 상태를 구분하고, 각 유통상태에서의 기하학적 형태에 맞는 수식을 이용하여 컨덕턴스를 구해야 한다.^{4,5,6,7}

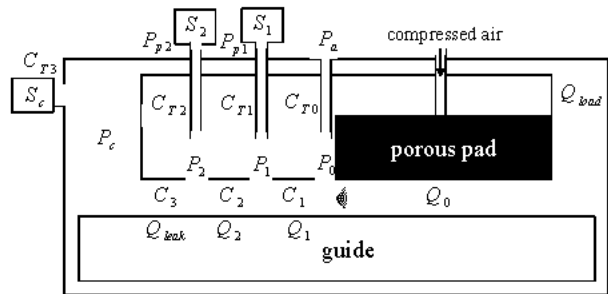


Fig.1 Exhaust system for vacuum compatible air bearing

$$\begin{aligned}
 Q_0 &= C_{r0}(P_0 - P_a) + C_1(P_0 - P_1) \\
 C_1(P_0 - P_1) &= S_{1_eff} \cdot P_1 + C_2(P_1 - P_2) \\
 C_2(P_1 - P_2) &= S_{2_eff} \cdot P_2 + C_3(P_2 - P_c) \\
 C_3(P_2 - P_c) + Q_{load} &= S_{c_eff} \cdot P_c
 \end{aligned} \tag{1}$$

where,

$$\begin{aligned}
 S_{1_eff} &= \frac{S_1 \cdot C_{r1}}{S_1 + C_{r1}} \\
 S_{2_eff} &= \frac{S_2 \cdot C_{r2}}{S_2 + C_{r2}} \\
 S_{c_eff} &= \frac{S_c \cdot C_{r3}}{S_c + C_{r3}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

식 (1)과 2.1 절의 다공질 유량 Q_0 에 대한 식을 동시에 뉴튼-랩슨(Newton-Raphson)법, 유한차분법(Finite Difference Method) 등과 같은 수치해석법을 이용하여 반복적으로 구하면 leakage 의 양과 각 포트에서의 압력을 구할 수 있다.

결국, 진공챔버로 리크된 양은 식 (3)과 같이 표현되며, 챔버의 진공도에 영향을 주는 요소는 다공질 공기베어링에서의 leakage 양과 챔버 내의 재료 표면에서 발생하는 기체방출량이다. 즉, 챔버내 진

공도는 식 (4)와 같이 Q_{leak} 와 Q_{load} 에 의해 결정된다.

$$Q_{leak} = C_3(P_2 - P_e) \quad (3)$$

$$\sum_{i \rightarrow \infty} P_e = \frac{Q_{leak} + Q_{load}}{S_{e_eff}} \quad (4)$$

3. 이론적 분석

3.1 유효배기속도의 영향

Fig.2 는 펌프 1 과 2 의 유효배기속도에 따른 leakage 양을 보여주고 있다. 유효배기속도가 증가할수록 leakage 의 양은 줄어들고 있는데, 여기서 유효배기속도는 식 (2)에서 보는 바와 같이, 펌프 자체의 배기속도와 도관의 컨덕턴스에 의존하는 값이다.

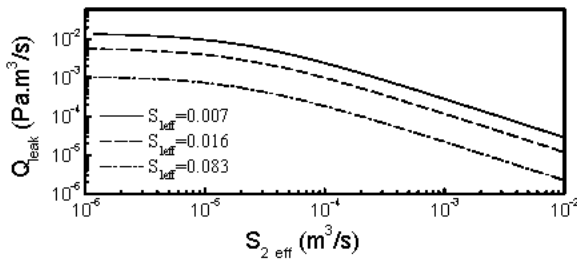


Fig.2 Relation between leakage rate and effective pumping speed

Fig.3 은 펌프 자체의 배기속도, 도관의 컨덕턴스와 유효배기속도와의 관계를 나타내는 그래프로, 유효배기속도를 증가시키기 위해서는 펌프 자체의 배기속도뿐만 아니라, 이에 대한 도관의 컨덕턴스 비율이 적어도 1 은 넘어야 50 %의 효율을 기대할 수 있다는 것을 말해준다.

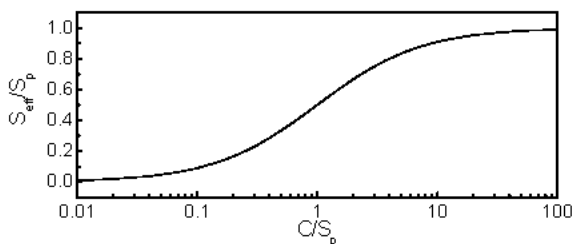


Fig.3 Relation between effective pumping speed and conductance

3.2 공급압력 및 베어링 간극의 영향

Fig.4 는 공급압력에 따른 각 배기포켓에서의 유량을 보여주고 있다. 공급압력이 증가할수록, 다공

질 패드에서 유출되는 유량은 증가하는데 반해, 대기포트를 통과한 후의 유량은 거의 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 다공질을 통과한 공기가 대기포트를 통해 대부분이 외부로 배출되었기 때문이다. 게다가, 1 차와 2 차 배기를 거치면서 이 차이는 현저하게 줄어들어 챔버 내부로의 leakage 의 양은 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 한편, 공급압력이 4bar 일때, 간극이 20mm 이상 되면, Q_I 의 양이 오히려 Q_0 보다도 커지게 되는데, 이는 대기 포켓의 압력이 상대적으로 낮아져서 대기포트를 통해 외부에서 공기가 들어오는 것을 의미한다. 결국, 대기포트는 다공질 패드에서 유출되는 유량에 관계없이 1 차포켓으로 거의 비슷한 유량이 흐르도록 하며, 이는 결국 대기포켓의 압력이 대기압에 근사하다는 것을 말해준다.

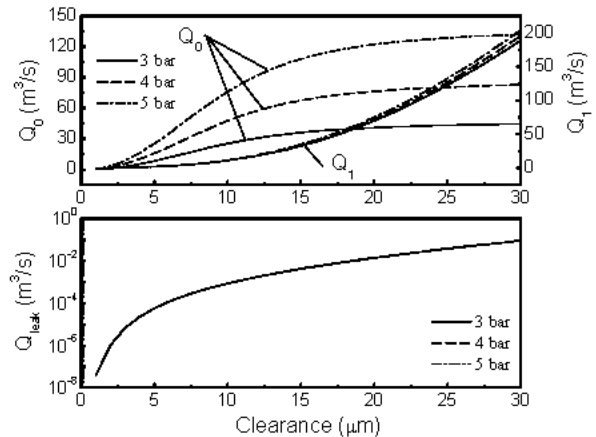


Fig.4 Relation between leakage rate and supply pressure by bearing clearance

결국, 공기베어링에서 챔버 내부로 유출되는 leakage 의 양을 최소화 하기 위해서는 다공질 베어링의 유량과는 관계없이 유효배기속도를 향상시키고, 베어링의 간극을 줄이는 것이 가장 효과적인 방법이다.

4. 실험결과

4.1 챔버 및 진공용 베어링 제작

이론적 검증을 위하여 진공챔버와 진공용 공기베어링을 제작하였다. Fig.5 는 챔버 내부에 장착된 진공환경용 공기베어링 가이드를 보여주고 있다. 진공용 가이드는 동특성 향상을 위해 상대적으로 가벼운 알루미늄 재료를 이용하였으며, 박스타입의 양면 패드형으로, 수직방향에 8 개, 수평방향에 4 개로 구성하였으며, 향후 구동 테스트를 위하여 리니어 모터와 피드백 장치를 장착하였다.

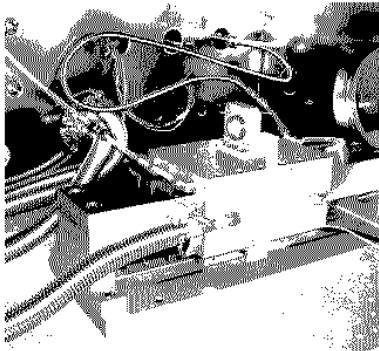


Fig.5 Air bearing guide for vacuum environment

4.2 진공도 실험

Fig.6 은 각 배기포켓과 챔버내부의 압력을, 공기베어링에 공기를 넣어 부상시키기 전과 후의 진공도 변화를 보여준다. 베어링에 4bar 의 공급압력으로 부상시킨 후, 10 여분간 배기시켰을 때, 챔버의 진공도는 3.5×10^{-2} Pa 을 얻을 수 있었다.

Fig.7 은 공급압력이 4bar 일 때, 간극에 따라 이론적으로 해석된 압력과 실제 측정된 값을 비교한 것으로, 각 배기포켓에서의 이론치와 실험치는 비교적 잘 일치하고 있다. 베어링 간극이 12mm 일 때 챔버의 진공도는 5.7×10^{-3} Pa 의 진공도를 달성할 수 있는 것으로 해석되었으며, 챔버의 진공도는 3.5×10^{-2} Pa 로 측정되었다. 오차원인 중 가장 큰 부분은 베어링의 간극인데, 실제로 간극을 측정해 보면 8mm 에서 15mm 까지 존재하며, 이는 실제, 가공면의 상태나, 조립상태에 따라 간극이 달라진 것으로, 본 논문에서는 계산의 편의상 베어링의 간극을 평균간극인 12mm 로 고정하여 계산한 것이 오차원인으로 작용한 것으로 생각된다. 또한 1 차와 2 차 배기포켓에서의 압력은 진공계이저를 이 위치에 설치하는 것이 불가능하므로, 배기 도판의 중간부분에서 측정을 하여 다소 낮게 측정되었다.

각 베어링에 대해 간극을 달리 적용하여 해석하면 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 생각되며, 향후, 가이드면의 정밀가공에 의해 간극을 줄이고, 유효배기속도를 향상시킴과 동시에 챔버 내 기체방출량 등을 개선해 나갈 때, 좀 더 향상된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

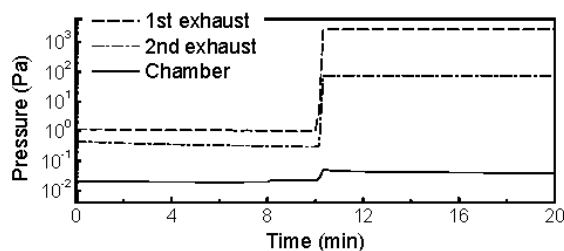


Fig.6 Vacuum pressure variation before and after air bearing on

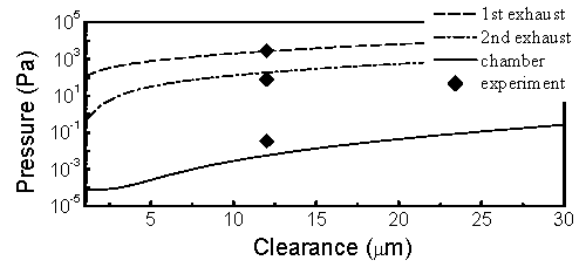


Fig.7 Comparison of vacuum pressure between theoretical and experimental data

5. 결론

진공환경용 초정밀 스테이지의 베어링으로 공기 베어링을 채택하고, leakage 해석을 통하여 그 사용 가능성을 살펴보았다. 진공용 공기베어링은 일반 대기용 공기베어링과는 달리, 유출된 공기를 배기하기 위한 추가 구조가 필요하며, 이를 진공멤프로 배기하여 챔버 내로 공기가 리크되는 것을 최소화하여 유지하게 된다. 이를 위해, leakage 해석을 하였으며, 실험장치를 제작하고 진공도 실험을 통하여 이론적 해석의 타당함과 진공 내에서 공기베어링의 사용 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. Masaru OHTSUKA, Motomu FURUKAWA and Makoto HIGOMURA: The vertical traverse stage in vacuum condition, JSME International Journal, series III, Vol.33, No.1, pp.61-64, 1990
2. K. C. SINGH and N. S. RAO, "Static characteristics of aerostatic porous rectangular thrust bearings," Wear, 77, pp.229-236, 1982
3. K. H. Wu and C. Cusano, "Analysis of externally pressurized, double-pad, gas porous thrust bearing," Journal of lubrication technology, Vol.105, pp.113-119, 1983
4. A. Roth: Vacuum Technology (2nd, revised edition), pp. 62-88, North-holland, 1982
5. 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, "진공공학," 한국경제신문, pp.61-116, 2000
6. Ping Fan: A stratified flow model for calculating the conductance of long tubes with constant cross section, Vacuum, pp.347-354, 2001
7. Ping Fan, Ji-guo Chu, Jian-da Shao: Conductance calculation of long tubes with rectangular cross section and annular cross section in the full pressure range, Vacuum, pp.373-378, 2003