

2,500 l/s 급 복합분자펌프를 위한 자기부상계 구동특성 Dynamic Characteristics of Magnetic Bearing System for A Compound Turbomolecular Vacuum Pump

**노승국¹, 신우철¹, 박용배²

*S. K. Ro¹(cniz@kimm.re.kr), W. C. Shin¹, Y. T. Park²
¹ 한국기계연구원 초정밀기계시스템실, ² 제일진공(주)

Key words : Turbomolecular vacuum pump, Magnetic bearings, Digital control system, ISO-14839

1. 서론

반도체 공정 등에서 10^{-6} ~ 10^{-8} Torr의 고진공 환경을 제공하기 위하여 사용되는 고진공 터보 분자펌프 (Turbomolecular Pump, TMP)는 다층의 회전깃을 갖는 로터를 회전시켜 기체 분자를 배출시키는 진공펌프이다. 최근에는 디스플레이 및 반도체 공정에서 높은 배기속도를 요구하는 추세에 따라, 터보 펌프와 드래그 펌프부분을 동시에 가지고 있어 상대적으로 작동 진공도 영역이 넓은 복합 분자펌프(Compound Turbomolecular Pump, CMP)의 활용도가 넓어지고 있다. 이러한 분자펌프가 장시간의 고속회전에 적합하도록 비접촉 방식인 자기부상 방식의 적용이 최근 거의 표준화 되어있으며, 일본, 유럽 등의 선진 제조사에서 상품화되고 있으며, 최근에는 일부 중국의 업체들도 개발을 추진하고 있는 것으로 보고되고 있다.

이러한 자기부상형 복합분자펌프의 개발에 있어서 자기부상시스템의 각 요소의 실용화와 안정성 확보가 기본적으로 중요한 부분이라 할 수 있다. 논문에서는 현재 개발중인 2,500~3,000 l/s 급의 복합분자펌프의 자기부상 구동시스템을 설명하고, 자기부상 시스템의 제어를 위해 구성된 DSP 기반 디지털 제어시스템을 이용하여 시험로터를 포함한 실험장치의 25,000 rpm까지의 구동 특성을 나타내었다. PID 및 유연모드 제어를 위한 필터를 포함한 제어시스템의 안정성을 평가하고 튜닝하기 위하여 ISO-14839의 민감도 함수법을 적용하였다.

2.5 축 자기베어링 시스템

다음의 Fig. 1은 5축 자기베어링이 적용된

복합분자펌프의 개요를 나타내고 있다. 자기베어링은 상부와 하부의 반경방향을 지지하도록 4개의 축이 필요하고, 축방향을 지지하는 축방향 베어링까지 포함하여 5축의 능동제어가 필요하다. 자기베어링 이외에 축의 회전을 위한 모터와 전체 펌프의 구동을 제어하는 제어시스템으로 구성된다.

각 반경방향 및 축방향 자기베어링은 자기회로 해석을 기반으로한 설계 프로그램을 이용하여 설계되었으며, 설계된 각 베어링의 제원은 Table 1과 같다.

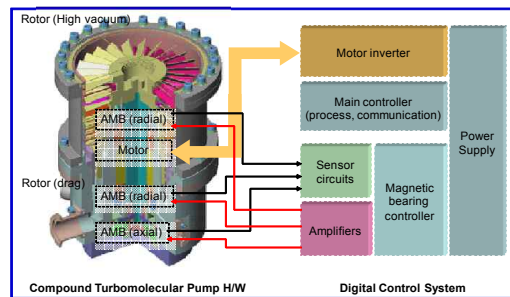


Fig. 1 A compound turbomolecular pump system

Table 1 Design specifications of magnetic bearings

Item	Top Radial	Down Radial	Axial
Magnetic bearing			
Load capacity	402 N	275 N	460 N
Air gap	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm
Position stiffness	3.5×10^5 N/m	2.4×10^5 N/m	2.6×10^6 N/m
Current stiffness	188 N/A	129 N/A	1,113 N/A
Bias current	0.5 A	0.5 A	0.5 A
Sensor			
Type	Differential	Differential	Single
Sensitivity	17 V/mm	17 V/mm	7 V/mm

제어시스템의 경우 기본적으로는 각 축의 위치를 직접제환하는 방식을 적용하며, 자기베어링계의 안정화를 위하여 PID 제어기를 적용하였다. 본 주축의 경우 유연모우드가 약 700Hz 정도로 제어 시스템 대역폭내에 위치하고 있으며, 이에 따라 공진이 일어날 수 있다. 또한 회전시에 주파수가 변하는 특성이 있으므로 위상 보상기를 추가하여 감쇠를 증가시키도록 하였다.

3. 실험결과

제작된 구동계 시작품에 Fig. 2 와 같이 실제 회전체와 등가의 관성을 갖는 로터를 장착한 실험 시스템을 구축하였으며, 기본적인 회전실험을 수행하였다. 디지털 제어시스템은 DSP 기반의 제어기 (DS1104, dSPACE)를 사용하고, 약 30 kHz의 샘플링 주파수를 갖는다.



Fig. 2 Experimental setup for magnetic bearing system for CMP

Fig. 3 는 제어기의 계인에 따라 시스템의 안정성을 평가한 결과로 ISO-14839.3의 민감도 함수 (Sensitivity Function)을 이용하여 나타난 결과이다. 유연모우드 및 강체모우드의 안정성이 리드필터의 조합에 따라 향상되고 있는 것을 확인할 수 있다.

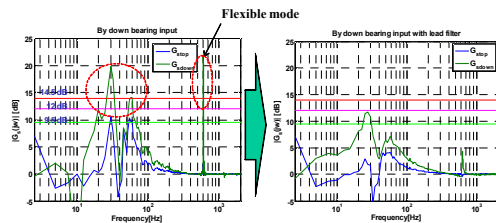


Fig. 3 Closed loop sensitivity function (ISO-14839.3)

Fig. 4는 25,000 rpm까지 회전시 상하부 베어링 센서의 응답을 나타낸 것으로, 10,000 rpm 이상 고속회전에서 회전 성분 이외의 신호들이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 5에 나타난 복소 변위에 대한 FFT 결과에서 확인할 수 있다. 상부의 경우 회전수 성분이 주를 이루는 반면 하부 베어링은 유연모드 및 강체모드의 전방향 선회 성분이 포함되어 차후 이를 저감하는 제어알고리즘의 개선이 필요하다고 할 수 있다.

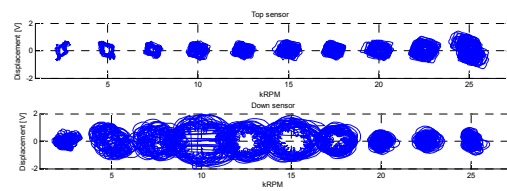


Fig. 5 Rotational response of the radial magnetic bearings

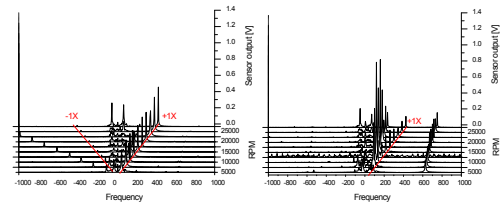


Fig. 6 Frequency spectrum of the complex radial response of the magnetic bearings

4. 결론

본 논문에서는 복합 터보분자펌프용 자기베어링 시스템의 제어시스템을 구축하고 제작된 시스템에 대하여 25,000 rpm까지의 안정한 회전실험을 수행한 결과를 나타내었다. 디지털 PID를 기본으로 하고, 위상보상과 노치필터를 적용한 제어기를 적용하였으며, 향후 회전동기 성분 이외의 성분에 대한 제어 안정성 향상을 위한 연구 보완이 필요하며, 실제 로터를 포함한 복합 분자펌프 안정성 및 신뢰성을 중심으로 연구개발이 진행될 예정이다.

참고문헌

1. 노승국, 경진호, 박종권, 남우호, "고진공 터보 분자펌프용 자기베어링 시스템의 디지털 선형 제어시스템," 한국진공학회지, 19, 4, 256-264, 2010