

# 복합 터보분자펌프의 자기부상 구동계 제어 Control of a Magnetic Bearing System for a Compound Turbomolecular Vacuum Pump

\*#노승국<sup>1</sup>, 신우철<sup>1</sup>, 이흥균<sup>2</sup>

\*#S. K. Ro(cniz@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, W. C. Shin, H. K. LEE<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀기계시스템실, <sup>2</sup> 제일진공㈜

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

## 1. 서론

반도체 공정 등에서  $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$  Torr 의 고진공 환경을 제공하기 위하여 사용되는 고진공 터보분자펌프(Turbomolecular Pump, TMP)는 다층의 회전깃을 갖는 로터를 회전시켜 분자를 배출시키는 방식을 사용하는 진공펌프이다. 또한 최근에는 디스플레이 및 반도체 공정에서 높은 진공도뿐만 아니라, 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 표준화되어 있다.

자기베어링 시스템은 전자기력을 이용하여 자성체인 회전축을 부상시켜 함으로써 비접촉 고속 회전이 가능하여 윤활이 용이하지 않은 진공 환경 등 가혹한 환경에 적합하며, 터보분자펌프는 자기베어링이 가장 널리 사용되고 있는 분야이기도 하다. 자기베어링 시스템의 설계는 크게 하드웨어와 소프트웨어로 나누어질 수 있는데, 하드웨어의 경우 전체 로터 시스템의 특성을 고려하여 설계되어야 하며, 주로 자기베어링 코어와 코일, 변위센서 및 전력 증폭 시스템 등의 기전적인 요소들이 이루어져 있다. 하드웨어 설계와 함께 제어시스템의 설계도 매우 중요하며, 이는 자기베어링 시스템이 불안정한 특성을 갖는 개루프계를 갖고 있으므로 안정화를 위한 능동제어 시스템이 필수적이며 진동제어 등 여러 가지 기능이 요구되기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 자기부상형 고진공 복합분자펌프의 제어를 위한 선형제어시스템의 구성을 실제 시스템의 적용을 통하여 설명하였다. 각 제어기는 DSP 를 이용한 디지털 제어시스템으로 구성되었으며, 2,500 1/s 급의 복합 분자펌프 시작품에 적용하여 10,000 rpm 까지의 기본 성능시험을 수행하였다.

## 2. 5 축 자기베어링 시스템

다음의 그림은 5 축 자기베어링이 적용된 복합분자펌프의 개요를 나타내고 있다. 자기베어링은 상부와 하부의 반경방향을 지지하도록 4 개의 축이 필요하고, 축방향을 지지하는 축방향 베어링까지 포함하여 5 축의 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 1 과 같다. 자기베어링에 있어서 회전체의 위치를 검출하여 제어하기 위한 센서의 경우 축방향 및 반경방향에 대하여 유도형 센서를 적용하였으며, 설계된 센서의 감도에 대한 해석결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 차동증폭형인 반경방향의 경우에는 선형도가 우수한 반면, 단일 프로브를 사용하는 축방향의 경우에는 비선형성을 나타남을 알 수 있다. 다만 전체 로터의 작동범위는

약 0.2 mm 이므로, 상대적으로 감도가 높은 위치에서 적용하도록 하였다.

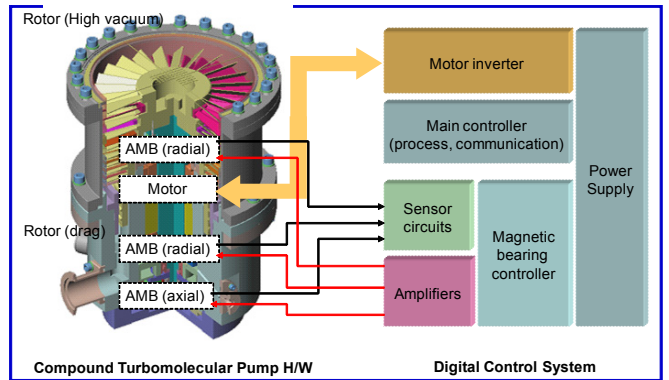
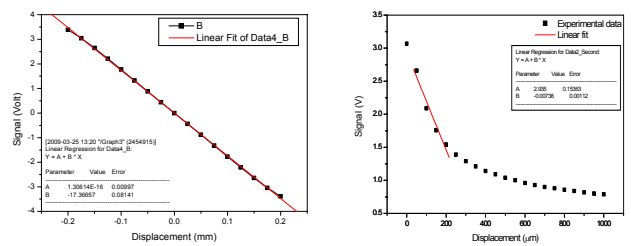


Fig. 1 A compound turbomolecular pump system

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	$3.5 \times 10^5$ N/m	$2.4 \times 10^5$ N/m	$2.6 \times 10^6$ 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



a. radial sensors  
b. axial sensor  
Fig. 2 Characteristics of inductive positioning sensors

설계된 시스템의 로터를 포함한 축의 고유진동수 및 회전시의 주파수 변화를 나타낸 것이 Fig. 3 와 같다. 고유진동수의 경우, 크게 자기베어링계의 강성에 영향을 받는 강체진동 모드와 축의 유연모드로 나눌 수 있다. 강체 모드인 경우 자기베어링의 고감쇄 특성에 따라 회전시 극복이 가능한 반면, 유연 모드의 경우에는 후방향 및 전방향 원추모드에 의한 위험속도가 존재하며, 하부 베어링 부분에서 접촉이 발생할 우려가 있어, 대체적으로 제한 속도로 여겨진다. 설계된 시스템이 26,000 rpm 이 목표인 것을 감안할 때, 1 차 유연모드의 고유진동수는 정지상태에서 약 747 Hz 이며, 회전시 후방향 위험속도는 30,000

rpm 이상으로 예상되어, 26,000 rpm 까지 안정적인 회전이 가능할 것으로 예측된다.

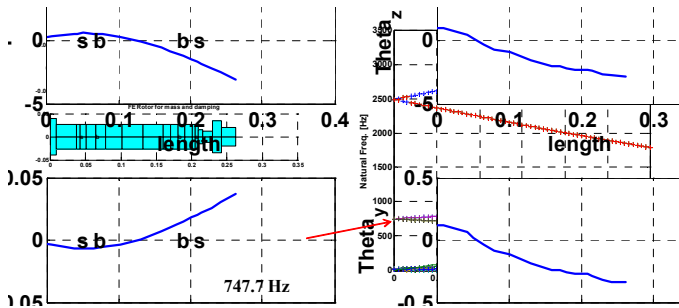


Fig. 3 Natural frequencies of the rotor-shaft

제어시스템의 경우 기본적으로는 각 축의 위치를 직접 제한하는 방식을 적용하며, 자기베어링계의 안정화를 위하여 PID 제어기를 적용하였다. PID 제어에 있어서 안정성 확보를 위해서는 비계개인과 미분개인이 일정값 이상 이어야 하며, 각각 상부베어링의 경우 2.5, 0.003, 하부 베어링의 경우 2.0, 0.0025 의 값으로 실험을 통하여 결정되었다. 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 보상을 추가하여 감쇠를 증가시킬 수 있다.

### 3. 실험결과

제작된 구동계 시작품에 실제 회전체와 등가의 관성을 갖는 로터를 장착한 실험 시스템을 구축하였으며, 기본적인 회전실험을 수행하였다. 다음의 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 5 축의 PID 및 위상 앞섬 보상기, 정속 회전시의 회전 진동을 제거해주는 노치필터, 강제 후방향 원추모드의 진동 저감을 위한 교차제한제어기를 포함하도록 구성된 디지털 제어시스템을 적용하였다. 디지털 제어시스템은 DSP 기반의 제어기 (DS1104, dSPACE)를 사용하고, 약 30 kHz 의 샘플링 주파수를 갖는다.

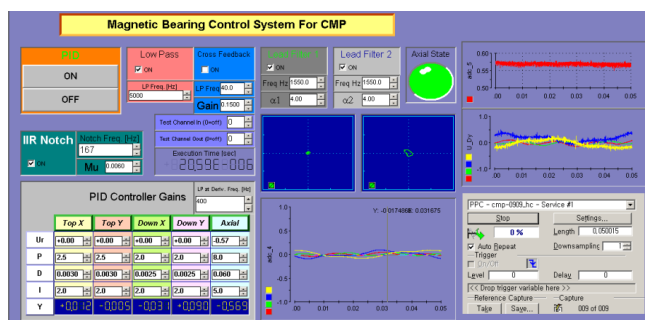


Fig. 4 Control systems panel

Fig. 5 는 10,000 rpm 까지 회전할 때의 응답을 나타내고 있다. 상부 베어링의 경우 속도에 따라 회전크기는 감소하고 있으나, 하부 베어링의 경우에는 진폭이 상대적으로 크고, 4,000 rpm 부근에서 커지는 것을 알 수 있다. 이는 베어링 강성에 의한 공진주파수를 통과하기 때문이다. 이후의 속도에서는 진폭은 작아지며, 특히 노치필터가 적용된 10,000 rpm 에서는 하부 베어링의 진폭은 1V 이하로 나타나고 있다. 보조베어링의 유격에 대한 응답이 약 5V 인 것을 감안하면, 약 30 μm 정도의 변위를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6 는 이러한 센서의 응답을 주파수 성분으로 분석한 것으로, 회전 동기성분이 주를 이루고 있음을 알 수 있다.

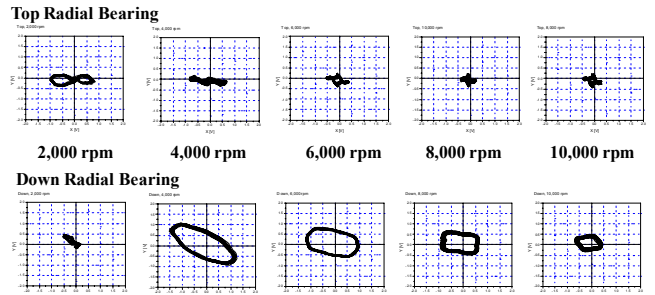


Fig. 5 Rotational response of the radial magnetic bearings (0.2 V/div)

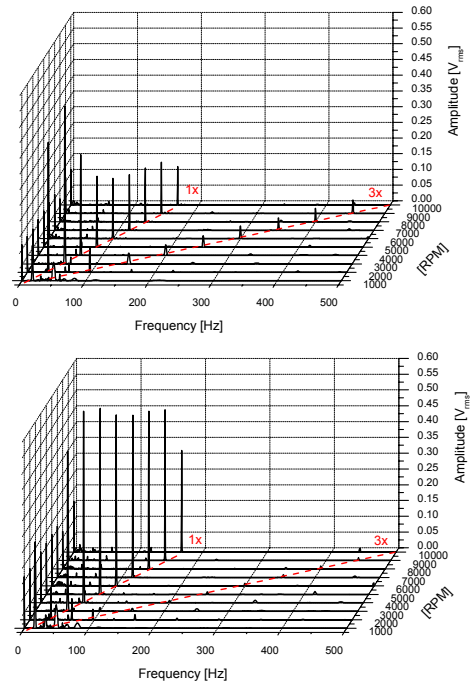


Fig. 6 Frequency spectrum of the radial magnetic bearings

### 4. 결론

본 논문에서는 복합 터보분자펌프용 자기베어링 시스템의 제어시스템을 구축하고 해석 및 설계, 제작된 시스템에 대하여 10,000 rpm 까지의 안전한 회전실험을 수행한 결과를 나타내었다. 설계된 시스템의 제어를 위하여 디지털 PID 를 기본으로 하여, 위상보상과 노치필터를 적용하였으며, 고속회전시 추후 제한제어 등이 적용될 수 있도록 구성하였다. 향후 연구 보완을 통하여 26,000 rpm 의 디지털 드라이버 및 제어시스템을 통합하여 다양한 공정의 지원이 가능한 복합 분자펌프로 개발될 예정이며, 안정성 및 신뢰성을 중심으로 연구개발이 진행될 예정이다.

### 후기

본 연구는 지식경제부 지원 전략기술개발사업의 일환으로 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 노승국, 경진호, 박종권, 배완성, 이훈균, “고진공 터보 분자펌프용 자기베어링 시스템의 디지털 제어기 설계,” 한국정밀공학회 춘계학술대회, 2004
2. 노명규, 박병철, 노승국, 경진호, 박종권, “자기베어링기술을 이용한 유도형 변위센서 개발,” 한국정밀공학회지, 21, 4, 72-28, 2004