

## 수평형 5축 자기 베어링 시스템 설계

김종문\*, 강도현\*, 박민국\*\*  
한국전기연구원 Mechatronics그룹\*, 계측제어그룹\*\*

### A Design of Horizontal-Type 5DOF Magnetic Bearing System

Jong-Moon, Kim\*, Do-Hyun Kang\*, and Min-Kook, Park\*\*  
Mechatronics Group\*, I&C Group\*\*, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In this paper, a design of horizontal-type 5DOF magnetic bearing is presented. To implement the non-contact bearing, an active magnetic bearing using electromagnet is used and finite element method(FEM) is chosen to design the bearing magnet. Two radial bearing and one thrust bearing is designed to implement 5DOF operation. And three-phase induction motor is used as a driving motor. The design method for the magnetic bearing system is described.

## 1. 서 론

1980년대 이후 기존의 회전기계의 접촉식 베어링을 개선하고자 많은 연구가 이루어져 왔다. 그 이유는 기존의 접촉식 베어링은 마모 및 마찰로 인하여 소음이 크고, 보수, 유지에 어려움이 있을 뿐 만 아니라 윤활 장치를 필요로 하기 때문에 환경오염을 일으키기도 한다. 그래서 이러한 문제를 해결하기 위하여 비접촉식 베어링에 관심을 갖기 시작하였다. 그 중의 하나가 자기 베어링이다. 자기 베어링은 베어링 내에서 회전축 중심의 위치 변화에 따라 자기 베어링에서 가하는 전인 자기력을 능동적으로 변화시켜 회전축의 위치를 항상 베어링의 중심에 위치시키는 회전축 지지 요소이다.[1] 그러나 자기 베어링은 축 방향에 따라 종축형과 횡축형으로 나누어지고, 자기력을 발생시키는 액추에이터에 따라 능동형, 수동형 및 혼합형으로 나눌 수 있다.

자기 베어링은 밀링 스피들, 터보 분자펌프, 터빈, 플라이 휠, 원심분리기 등에 적용할 수 있으며 최근에는 클린룸에서 동작되는 반도체 장비에도 많은 연구를 하고 있다.[2]

이 논문에서는 수평, 능동형 자기 베어링에 의해 지지되는 5축 시스템의 설계 및 제작에 대해 언급을 한다. 제작된 자기 베어링 시스템은 레이디얼 방향으로 회전축의 동작을 제어하는 두 개의 레이디얼 베어링, 스러스트 방향의 운동을 제어하는 한 개의 스러스트 베어링, 축을 회전시키는 구동모터, 회전 축, 센서, 전력변환 장치 및 피드백 제어기 등으로 이루어져 있다. 레이디얼 베어링은 모터 양쪽에 각각 한 개씩 배치되어 있고, 베어링 고정자와 회전축 사이의 공극은 0.5mm이다. 그리고 스러스트 베어링은 축 끝에 놓여져 있고, 공극은 0.6mm이다. 구동 모터로는 1.5kW의 유도전동기를 채택하였고, 이 모터의 양 끝부분의 불베어링은 제거를 하였다.

이 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 자기 베어링 마그네트를 설계하기 위한 관련 사항에 대해 언급하고, 설계 사양에 따라 마그네트 파라미터를 결정한다. 다음 결정된 파라미터를 이용하여 설계된 마그네트에 대한 유한요소법을 이용하여 전자장 해석을 하여 자속 및 자속밀도를 확인하였다. 그 다음 설계된 자기 베어링 시스템을 실제로 제작한 후, 그 결과를 보였고, 마지막으로 결론을 맺었다.

## 2. 본 론

### 2.1 시스템 설계

#### 2.1.1 전체 시스템 설명

이 절에서는 능동형 5축 자기 베어링 시스템에 대한 전체적인 구조에 대해 설명한다. 5축은 공중에 떠있는 자유체의 6개 운동 모드 중, 축 회전방향 축, 롤링 운동을 제외한 나머지 운동인 3개 병진 운동 및 2개 회전 운동을 의미한다.

그림 1은 능동형 5축 자기 베어링 시스템으로서, 레이디얼 베어링 2개, 스러스트 베어링 1개, 구동 모터, 회전축 및 센서로 이루어져 있으며, 각 요소의 자세한 기능 및 설계 사양은 다음 절에서 언급한다.

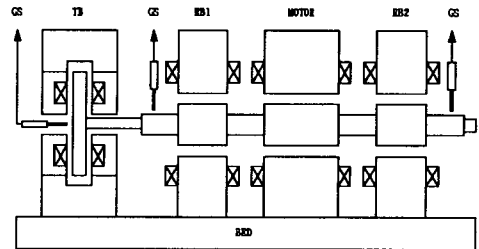


그림 1 능동형 5축 자기 베어링 시스템

#### 2.1.2 레이디얼 베어링

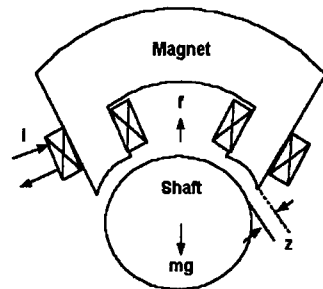


그림 2 레이디얼 베어링 마그네트

레이디얼 베어링은 기존의 모터의 불 베어링을 대체하는 것으로서, 비접촉식이기 때문에 소음, 마모 및 마찰이 없고, 별도의 윤활 장치를 필요로 하지 않는다. 따라서 이러한 장점을 충분히 이용할 수 있는 응용 분야에 적용을 하면 경쟁력을 가질 수 있다고 본다.

레이디얼 베어링은 5축 운동 중, 레이디얼 방향의 각각 두 개의 병진 운동과 회전 운동을 제어하는 역할을 한다. 이것을 설계할 때, 정상상태 전류, 공극, 권선 수 및 자극의 단면적은 베어링이 지지하는 부하용량과 직접적인 관련이 있다. 즉, 레이디얼 베어링에 의해 발생하는 힘  $f$ 는 부하용량과 같고, 전류의 자승에 비례하게 된다.

그림 1은 레이디얼 베어링에 대한 그림이며, 부상력  $f(t)$ 와 전류  $i(t)$  및 공극  $g(t)$  사이의 관계는 식 (1)과 같다.

$$f(t) = k_1 \left( \frac{i(t)}{g(t)} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $k_1$ 는  $\cos(22.5)\mu_0 N^2 S/4$ 이고,  $\mu_0$ 는 공기 중의 투자율( $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ),  $N$ 는 코일 권선수,  $S$ 는 자극 단면적( $m^2$ )이 된다.

이 논문에서는 정상상태에서 레이디얼 베어링의 상, 하, 좌, 우측 마그네트의 바이어스 전류의 크기는 각각 1.0A, 0.3A, 0.5A, 0.5A이고, 공극은 모두 0.5mm이다. 그리고 레이디얼 베어링의 강성 계수  $K(N/m)$ 는  $f/g$ 에 의해서 주어지게 된다.

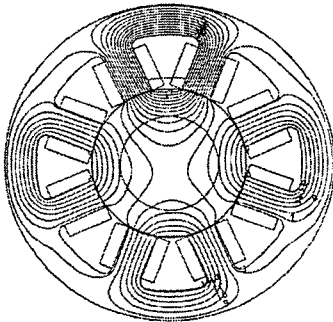


그림 3 레이디얼 베어링의 자속패턴

그림 3은 유한요소법에 의해 레이디얼 베어링을 분석한 결과이며, 정상상태에서의 자속패턴을 보여 준다. 상측 마그네트의 바이어스 전류가 제일 크기 때문에 자속의 간격이 제일 좁고, 하측의 간격이 제일 넓다는 것을 알 수 있다. 이 때, 자속의 포화는 없고, 공극에서의 자속밀도는 0.5T 정도 된다.

### 2.1.3 스러스트 베어링

스러스트 베어링은 5축 운동 중, 스러스트 방향의 병진 운동을 제어하는 역할을 한다. 스러스트 베어링이 없을 경우에도 레이디얼 베어링에 의해 부상이 가능하지만 축이 회전하게 되면 스러스트 방향으로 능동적으로 제어를 못하게 되어 이 진동으로 인해 결국 결국 레이디얼 베어링 쪽도 불안정하게 된다.

레이디얼 베어링은 회전 축을 수직 방향으로 지지하기 위하여 큰 힘을 필요로 하지만, 스러스트 베어링은 자중과 관계가 없으므로 큰 힘을 요구하지는 않는다.

### 2.1.4 회전 축

회전 축은 레이디얼 베어링과 스러스트 베어링에 의해 지지되며, 구동 모터에 의해 회전력을 발생한다. 이 동력은 자기 베어링에 연결된 다른 기계 요소에 전달된다. 이 축에는 레이디얼 베어링, 스러스트 베어링 및 구동 모터의 회전자 부분이 연결되어 있다. 회전 축의 레이디얼 베어링의 회전자는 자속의 방향이 계속 바뀌기 때문

에 와전류손이 발생하게 된다. 따라서 이 손실을 줄이기 위하여 얇은 철판을 성층한다.

### 2.1.5 구동 모터

구동 모터는 회전 축을 구동하며, 이 축을 통하여 동력을 다른 회전계에 전달한다. 이 논문에서는 구동 모터로서, 1.5kW, 3상 농형 유도 전동기를 사용하였으며, 모터의 용량은 축의 구동 토크에 따라 결정한다.

## 2.2 시스템 제작

이 절에서는 앞의 2.1절에서 언급된 자기 베어링 설계를 이용하여 실제로 제작한 결과에 대해 언급한다.

### 2.2.1 레이디얼 베어링

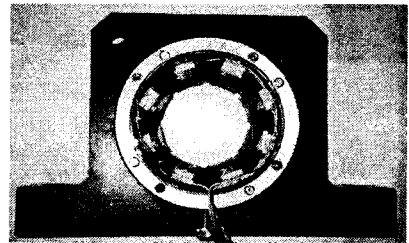


그림 4 레이디얼 베어링의 사진

그림 4는 제작된 레이디얼 베어링의 사진이다. 레이디얼 베어링의 고정자와 회전자 모두 0.35mm 두께의 규소 강판을 사용하여 성층하였다. 고정자의 자속 방향은  $NNSS$   $NNSS$ 로 하였고, 하우징은 알루미늄으로 만들었다.

### 2.2.2 스러스트 베어링

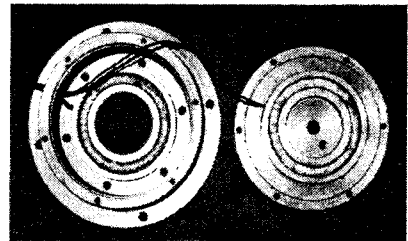


그림 5 스러스트 베어링의 사진

그림 5는 스러스트 베어링의 사진이며, 레이디얼 베어링과 달리, 통체로 제작하였고, 베어링의 모양은 원형이다.

### 2.2.3 회전 축

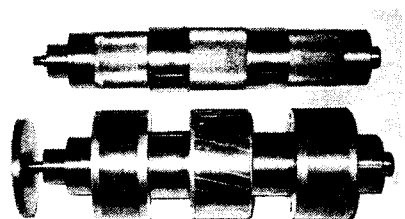


그림 6 회전 축의 사진

## 2.1.4 구동 모터

그림 7은 구동 모터의 고정자의 사진이다. 기존의 유도 전동기의 고정자를 알루미늄 하우징으로 감싼 형태이다.

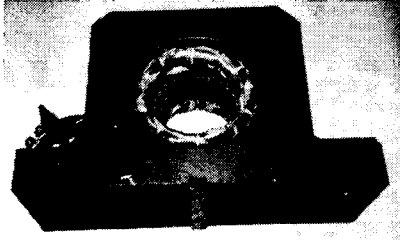


그림 7 구동 모터의 사진

## 2.3 전체 시스템 통합

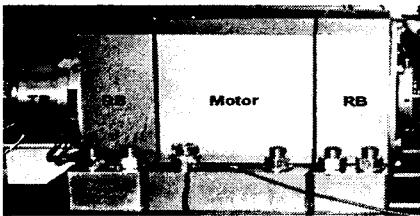


그림 8 능동형 5축 자기 베어링 전체 사진

2.1절과 2.2절은 능동형 5축 자기 베어링 시스템의 설계 및 제작에 언급을 하였다. 그림 8은 제작된 각 요소를 통합한 전체 자기 베어링의 사진이다. 전체적으로 하우징은 알루미늄으로 제작하였다. 자기 베어링은 회전체를 지지하기 때문에 제일 중요한 것은 얼라인이고, 회전체의 질량 불균형도 매우 작게 해야 한다.

## 3. 결 론

이 논문에서는 수평, 능동형 5축 자기 베어링에 의해 지지되는 5축 시스템의 설계 및 제작에 대해 언급을 하였다. 시스템의 각 요소에 대해 설계 및 제작 과정에 대해 자세한 설명을 하였고, 시스템 통합에서도 주의해야 할 사항도 부연 설명을 하였다.

자기 베어링은 고속으로 회전하는 기계 시스템이므로 각 요소를 잘 제작하였다 하더라도 실제 통합 과정에서 오차가 생기면 회전할 때 큰 진동을 유발할 뿐만 아니라, 더 심한 경우 불안정해질 수가 있기 때문에 주의를 기울여야만 한다.

앞으로는 제작된 자기 베어링 시스템의 실제 동작을 위하여 각 요소의 특성을 실험을 통하여 파악한 후, 부상 알고리즘을 설계하여 디지털 부상 실험을 할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 대용량 회전기의 진동제어에 관한 연구, 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소, 1997.
- [2] Schweitzer, G, et al, Active Magnetic Bearing, ETH Zurich, 1994.