

300마력급 초고속 전동기의 스러스트 자기 베어링/댐퍼 설계 및 특성해석

장석명*, 최장영*, 박지훈*, 이용복**, 이희섭**
 충남대학교*, 한국과학기술연구원**

Design and Analysis of Thrust Magnetic Bearing/Damper for 300HP Class High Speed Motor

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, Ji-Hoon Park*, Yong-Bok Lee**, Hee-Sub Lee**
 Chungnam National University, KIST**

Abstract - This paper deals with design and analysis of thrust magnetic bearing for 300HP class high speed motor. Using the solutions obtained from equivalent magnetic circuits, we predicts the electromagnetc characteristics such as thrust, time constant and power loss according to design parameters. And then, using non-linear finite element analysis, a detailed design is performed considering saturation in order to meet requirements.

1. 서 론

초고속 회전기술은 고속 공작기계 스펀들을 비롯한 고진공 펌프 및 각종 터빈 압축기 등에 실용화 시키는 단계일 뿐만 아니라 점차 고정밀, 고속화 되어가는 추세에 있다. 모터의 초고속화를 위해 지금까지 사용해 왔던 베어링들이 어느 정도 한계에 이르렀고, 이들은 모터의 소음과 발열문제, 수명저하를 야기하고 있다. 이에 대한 해결방법인 자기베어링은 전자석의 흡인력, 반발력을 이용하여 회전체를 공기 중에 부상함으로써 마찰을 없애주는 반경방향 베어링과 회전축을 정위치에 지지하게 하는 축방향 베어링으로 종래의 구름 베어링과 비교하여 기계적 접촉부를 가지지 않기 때문에 고속, 저 토크, 저소음, 긴 수명의 특징을 가지는 장점이 있다.[1]

따라서, 본 논문은 300마력급 초고속 전동기의 스러스트 자기베어링의 설계 및 특성해석을 다룬다. 자기동가회로부터 얻어진 특성식을 사용하여 설계변수에 따른 추력, 시정수 및 손실과 같은 전자기적 특성을 조사하여 초기설계를 한 후, 비선형 유한요소 해석을 수행하여 포화 및 요구 추력에 부합하는 자기회로를 상세설계한다. 마지막으로 비선형 유한요소해석을 이용하여 정전압 펄스파를 인가한 경우 요구하는 출력에 도달하는 시간을 조사함으로써 설계의 타당성을 입증하였다.

2. 특성방정식

2.1 해석 모델

그림 1(a) 및 (b)는 각각 스러스트 자기베어링의 구조 및 해석모델을 보여준다. 그림 1(a)에서 알 수 있듯이, 스러스트 자기베어링은 양쪽에 원모양의 코일이 감긴 하우징과 가운데에 디스크로 구성되어있다.

2.2 특성 방정식

권선에 여자 전류를 인가했을 때 고정자와 가동자 사이에 작용하는 자기력을 구하기 위해 다음과 같이 가정한다. 1) 하우징과 디스크의 투자율은 진공 투자율에 비하여 충분히 크다. 즉, 고정자와 가동자에서의 자기저항을 무시한다. 2) 하우징 슬롯 및 주변에서의 누설자속을 무시한다.

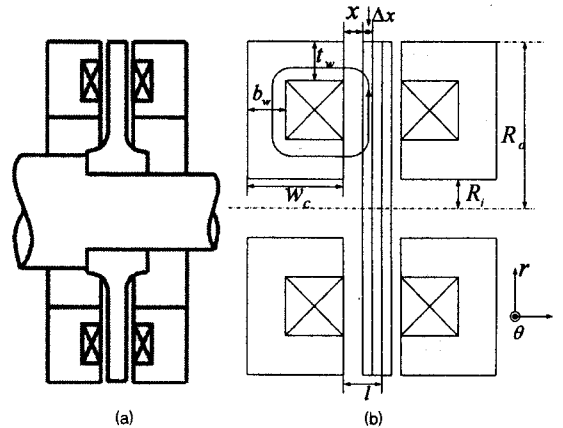


그림 1. 스러스트 자기베어링 : (a) 구조 및 (b) 해석 모델.

코일에 전류 i 를 인가했을 때 공극 x 의 변화에 따른 인덕턴스를 $L(x)$ 라 하면, 가상변위의 원리로 부터 하우징과 디스크 사이에 작용하는 자기력 F_{em} 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$F_{em}(i, x) = -\frac{\partial W_m}{\partial x} = -\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} [N] \quad (1)$$

여기에서 W_m 은 자계에 저장된 에너지이다. 그림 1(b)에서 자기회로를 따라 암페어의 주회법칙(Ampere's circuital law)을 적용하면 식 (2)로 표현된다.

$$H = \frac{1}{2} \frac{Ni}{x} [AT/m] \quad (2)$$

한편, 인덕턴스 $L(x)$ 는 식 (3)으로 표현된다.

$$L(x) = N \frac{\Phi}{i} = \frac{NSB}{i} \quad (3)$$

식 (2)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 인덕턴스 $L(x)$ 는 식 (4)로 정리된다.

$$L(x) = \frac{1}{2} N^2 \frac{\mu_0 S}{x} [N] \quad (4)$$

여기서 S 는 자극의 면적이다. 결과적으로 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 정리하면, 하우징과 디스크 사이에 작용하는 자기력 F_{em} 는 식 (5)와 같게 된다.

$$F_{em}(i, x) = \mu_0 \left(\frac{Ni}{2x} \right)^2 S [M] \quad (5)$$

그림 1(b)의 구조에서 권선의 저항은 식 (6)으로 간단히 계산할 수 있다.

$$R = 4\rho N(R_o + R_i)/(d_c^2) \quad (6)$$

여기서 ρ , N 및 d_c 는 각각 저항률, 턴 수 및 코일의 직경을 나타낸다. 식 (4)와 (6)으로부터 시정수 $\tau=L/R$ 로 계산할 수 있으며 저항 손실은 I^2R 로 간단히 계산할 수 있다.

3. 초기 설계

3.1 설계 요구 조건

표 1은 축방향 자기 베어링의 설계를 위한 구속 조건으로 최대추력 150kf, 하우징 외반경 75mm 및 축의 외반경 25mm로 주어졌다.

표 1. 설계 요구조건

항목	요구 값
최대 축방향 지지력 F	1500 [N]
하우징 외반경 R_o	75mm
축 내반경	25mm

3.2 설계변수에 따른 특성 해석

그림 2는 표1의 구속조건 하에서 코일두께 및 코일이 감기는 면적에 따른 슬러스트 베어링의 전자기력, 동손 및 시정수 특성을 보여준다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 슬러스트 자기베어링의 성능은 전적으로 자기회로의 형상에 의존함을 알 수 있다. 코일 두께에 따른 특성에 변화가 없는 이유는 코일두께 증가에 따라 턴 수는 감소하고 이로 인해 저항 및 인덕턴스 역시 감소하나 전류는 증가하기 때문에 자기회로의 형상이 정해진 후에는 코일두께 변화에 따른 성능개선은 기대할 수 없는 것으로 사료된다.

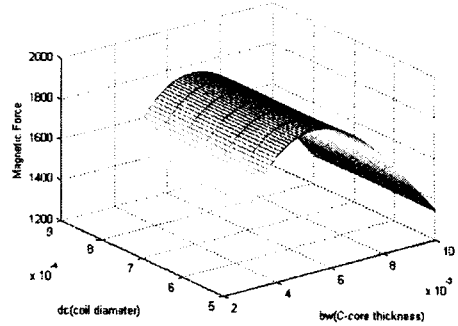
그림 2의 결과를 토대로 표 2로 주어지는 초기 설계변수를 정하고 정해진 설계변수에서의 전자기적 특성을 식 (1)~식 (6)을 이용하여 표 3과 같이 정리되었다. 하지만 이 결과는 어디까지나 초기 설계결과이기 때문에 코어의 재질 등을 고려한 비선형 해석이 수행되어야 한다. 따라서 4장에서는 이 결과를 토대로 비선형 유한요소 해석을 수행하고자 한다.

표 2. 초기 설계 결과

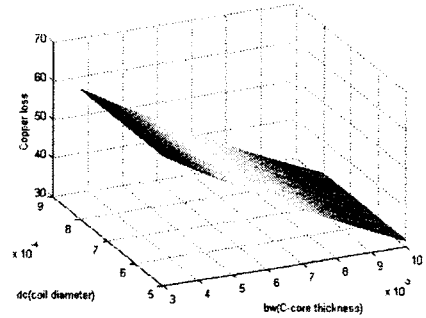
설계 변수	설계값
하우징 외반경 R_o	75mm
하우징 내반경 R_i	26mm
공극길이 x	1mm
하우징 너비 w_c	30mm
코어 두께 t_w	7mm

표 3. 초기 설계된 슬러스트 베어링의 성능

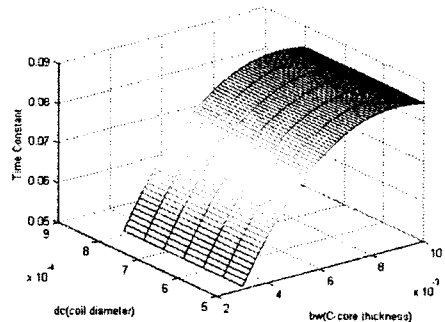
항목	값
최대 축방향 지지력 [N]	1530
턴 수 (점적률 : 0.4)	840
코일 직경 [mm] (전류=2A)	0.7
시정수 [sec.]	0.08
Power loss [W]	40W



(a)



(b)



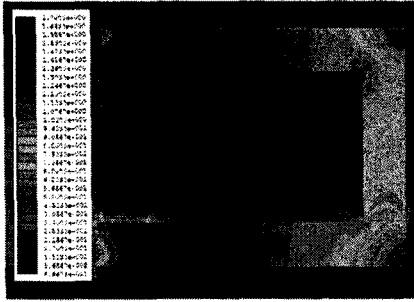
(c)

그림2. 코일 두께 및 코일이 감기는 면적에 따른 특성 해석: (a)전자기력, (b) 동손 및 (c)시정수.

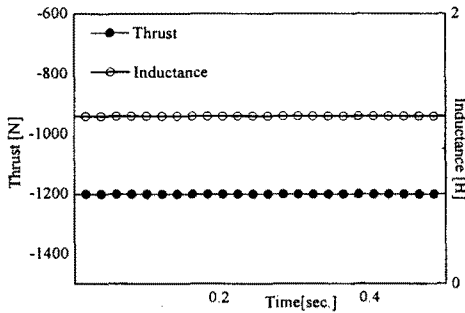
4. 유한요소해석을 이용한 초기설계 검증 및 상세 설계

4.1 초기설계 검증

이번 장에서는 3장에서 도출된 초기설계변수를 비선형 유한요소 해석에 적용하여 포화 및 설계 요구사항에 부합하는지를 알아보려고 한다. 그림 3(a) 및 (b)는 각각 표 3에 제시된 설계변수에 대한 포화 및 요구 추력/인덕턴스의 비선형 유한 요소 해석결과를 보여준다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이, 디스크 및 하우징의 원편에 포화가 일어남을 알 수 있고, 축방향 지지력은 약 1200N정도로 요구 값에 미달된다. 따라서 포화가 발생하지 않도록 디스크 및 하우징 코어의 두께를 늘린다면 요구 추력에 부합함은 물론 포화가 발생하지 않도록 설계가 가능할 것으로 보인다.

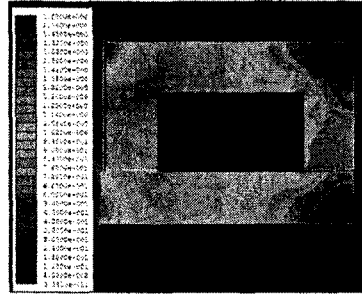


(a)

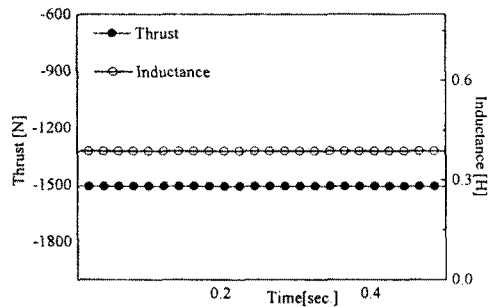


(b)

그림 3. 표 2에 제시된 초기설계변수에 대한 비선형 유한요소 해석결과: (a) 포화 및 (b) 축방향 추력 및 인덕턴스.



(a)



(b)

그림 4. 표 4에 제시된 최종설계변수에 대한 비선형 유한요소 해석결과: (a) 포화 및 (b) 축방향 추력 및 인덕턴스.

표 4. 최종 설계 결과

설계 변수	설계값
하우징 외반경 R_o	75mm
하우징 내반경 R_i	28mm
공극길이 x	0.5mm
하우징 너비 w_c	25mm
코어 두께 t_w	8mm

4.2 상세 설계 결과

표 4는 4.1절의 초기설계 검증결과를 토대로 비선형 유한요소해석에 의해 얻어진 최종설계결과를 보여준다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 최종설계결과는 최대 하중지력 1500N을 만족함을 동시에 디스크와 하우징 쪽에서 포화가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그림 5는 최종 설계된 스톱퍼스트 마그네틱 댐퍼에 시비율이 0.5이고 크기가 24V인 펄스 전압을 인가하였을 경우 전류 및 추력 특성을 보여준다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 0.032초에 전류는 3.2A가 코일에 인가되고 그때의 추력이 1500N을 만족함을 보이므로 최대하중지력을 내기위한 시간은 0.032초임을 알 수 있다. 사실상 이 시간은 인가전압이 높을수록 커질 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 논문은 300마력급 초고속 전동기의 스톱퍼스트 자기베어링의 설계 및 특성해석을 다루었다. 자기동기회로부터 얻어진 특성식을 사용하여 설계변수에 따른 추력, 시정수 및 손실과 같은 전자기적 특성을 조사하여 초기설계를 하였고, 비선형 유한요소 해석을 수행하여 포화 및 요구 추력에 부합하는 자기회로를 상세설계 하였다. 마지막으로 정전압 펄스파를 인가한 경우 정적전류에서 요구하는 추력에 도달함을 확인함으로써 설계의 타당성을 입증하였다.

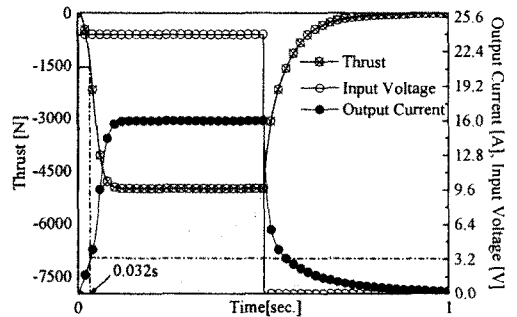


그림 5. 비선형 유한요소해석을 이용한 전류 및 추력 특성.

[참 고 문 헌]

- [1] 장규홍, "50,000rpm급 초고속 소형 정밀모터용 능동 자기베어링 시스템 제어 및 설계," 전기학회 논문지, 55B권, 8호, 408-415, 8, 2006.