2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

축방향 자기 베어링/댐퍼의 전자기적 특성해석

장석명,이운호,최장영
충남대학교

Electromagnetic Characteristics Analysis of Thrust Magnetic Bearing/Damper

Seok-Myeong Jang, Un-Ho Lee, Jang-Young Choi
Chungnam National University

Abstract - This paper deals with design and analysis of thrust magnetic bearing. Using the solutions obtained from equivalent magnetic circuit, we predict the electromagnetic 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

본 논문은 축방향 자기 베어링의 전자기적 설계 및 특성해석을 다룬다. 자기등가회로로부터 얻어진 특성식을 사용하여 설계 요구 조건을 만족하는 추력, 시정수 및 손실과 같은 전자기적 특성을 도출한다. 이로부터 초기 설계를 진행하고 비선형 유한요소 해석을 이용하여 상세 설계를 수행하였다. 최종적으로 도출된 설계변수들을 이용하여 축방향 자기 베어링을 제작한 후, 특성실험을 수행하여 본 논문에서 제시된 설계방법의 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1 (a)와 (b)는 각각 축방향 자기 베어링의 구조와 해석 모델을 보여준다. 그림에서 축방향 자기 베어링은 양쪽에 코일이 감긴 하우징과 디스크로 구성되고 코일에 전류를 인가하여 디스크와 결합된 축을 잡아주는 구조로 되어있다.

2.1 자기력과 인덕턴스

코일에 여자 전류를 인가하였을때 고정자와 가동자 사이에 작용하는 자기력을 구하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

1) 하우징, 축 및 디스크의 투자율은 진공의 투자율에 비해 충분히 크다. 따라서 고정자와 가동자에서의 자기저항은 무시한다.

2) 하우징 슬롯 및 주변에서 발생하는 누설 자속은 무시한다.

코일에 인가되는 전류 i와 공극 x에 따른 인덕턴스를 $L(x)$라 하면 이는 식 (1)과 같이 정리된다.

$$L(x) = \frac{1}{2}N^2\frac{v_0 S}{x}[N] \qquad (1)$$

이때 디스크와 하우징 사이에 작용하는 자기력은 식(2)로 표현된다.

$$F_{em}(i,x) = u_0(\frac{iN}{2x})^2 S\,[N] \qquad (2)$$

그림 1(b)의 구조에서 권선의 저항은 식 (3) 로 계산할 수 있다.

$$R = 4\rho N(R_0 + R_i)/(d_c)^2 \qquad (3)$$

여기서 ρ, N 및 d_c 는 각각 저항률, 턴 수, 코일의 직경을 나타낸다. 식 (1)과 식 (3)으로부터 시정수는 $\tau = L/R$ 로 계산할 수 있으며, 저항 손실은 I^2R 로 간단히 계산할 수 있다.

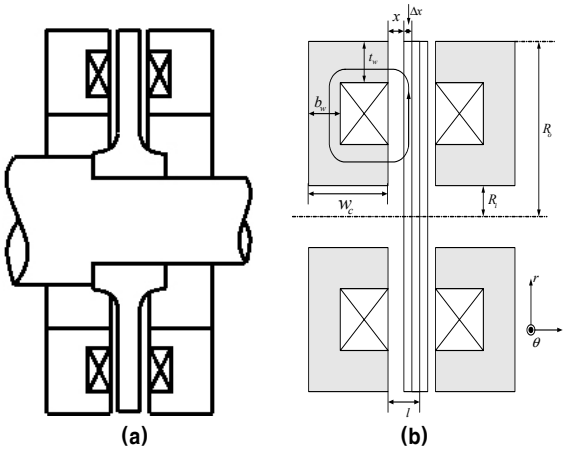
3. 초 기 설 계

3.1 설계 요구 조건

표 1은 축방향 자기 베어링의 설계를 위한 구속 조건으로 최대추력, 하우징 외반경 및 축의 외반경이 주어졌다.

〈표 1〉 설계 요구 조건

조건	구속 조건
최대 축 방향 지지력 F	300 [N]
하우징 외반경 R_0	75 [mm]
축 내반경	31 [mm]



〈그림1〉 축방향 자기 베어링의 구조와 해석 모델

3.2 설계 변수에 따른 해석

그림 2와 그림 3은 표 1의 구속조건 하에서 코일의 두께 및 코일이 감기는 면적에 따른 축방향 베어링의 전자기력, 동손 및 시정수의 특성을 보여준다. 그림 2에서 알 수 있듯이 축방향 자기 베어링의 자기력은 코일이 감기는 면적에 따라 크게 좌우 된다는 것을 알 수 있다. 코일의 두께에 따라서는 특성의 변화가 거의 없는데 이는 코일의 두께가 증가함에 따라 턴 수는 감소하게 되고 이로 인해 인덕턴스 역시 감소하고 전류는 증가하기 때문에 자기회로의 형상이 정해진 이후에 코일의 두께에 따른 자기 베어링의 성능 개선은 기대 할 수 없는 것으로 사료된다.

반면 일정 전류 구속조건에서 코일두께 및 코일이 감기는 면적에 따른 축방향 자기 베어링의 전자기적 특성은 그림 3과 같다. 여기서 전자기력과 동손이 코일 두께의 감소 따라 증가하는 특성은 코일 두께의 제곱에 비례하여 증가하던 전류의 값이 고정되면서 턴수에 반비례하는 코일의 단면적이 추력에 영향을 주기 때문이다. 즉, 전류가 고정된 경우에는 코일의 두께를 감소시키면 추력이 급상승함을 알 수 있다.

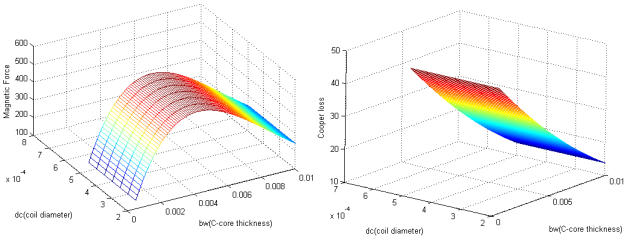
따라서 그림 2와 3의 결과로부터 표 1의 설계요구조건을 만족하는 초기설계 결과를 표2에 제시하였다.

〈표 2〉 초기 설계 결과

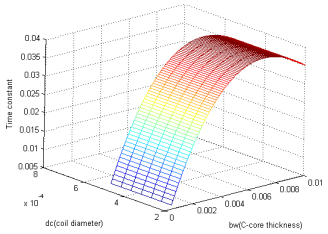
설계변수	값[mm]
하우징 외반경 R_0	75
하우징 내 반경 R_i	34.5
공극의 길이 x	2
하우징 너비 w_c	30
코어 두께 t_w	5

〈표 3〉 초기 설계된 축방향 베어링의 성능

항목	값
축방향 최대 지지력 [N]	314.17
턴 수 (점적률:0.4)	388
코일직경[mm] (전류3.9A)	1
시정수[sec]	0.0277
Power loss[W]	2.93

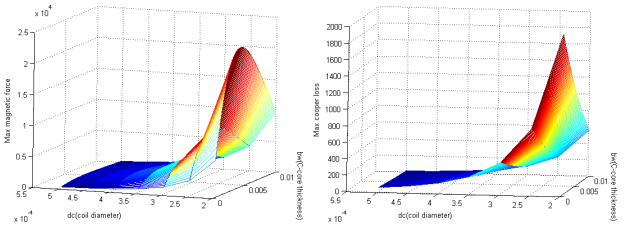


(a) (b)

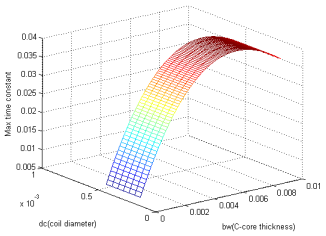


(c)

<그림 2> 코일의 두께 및 면적에 따른 특성 해석: (a) 전자기력, (b)동손, (c) 시정수



(a) (b)



(c)

<그림 3> 최대 전류 인가에 따른 코일의 두께 및 면적에 따른 특성 해석: (a) 전자기력, (b)동손, (c) 시정수

이처럼 정해진 설계변수에서의 전자기적 특성을 식 (2), (3)를 이용하여 초기 설계된 자기 베어링의 성능을 표 3과 같이 정리하였다. 축 방향 최대 지지력이 314.17[N]으로 최초 설계 하고자했던 300[N]에 만족되는 해석 결과가 도출 되었다.

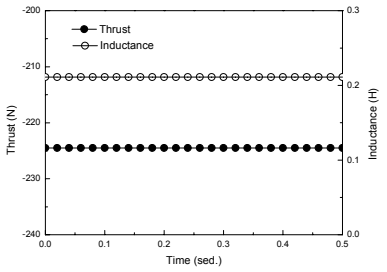
4. 유한요소 해석을 이용한 상세 설계 및 실험

4.1 초기 설계 검증

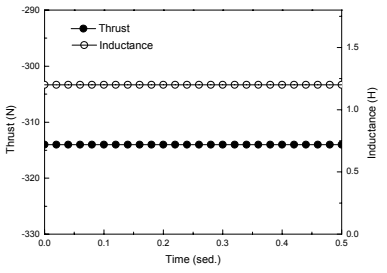
3장에서 초기 설계 변수에 따른 결과를 비선형 유한 요소 해석법으로 해석하여 그림 4(a)에 도시하였다. 그림에서 표 3 에 제시된 초기 설계 결과에 따른 유한 요소 해석의 결과는 초기설계 당시의 300[N]에 미치지 못하고 약 225[N]의 값이 도출되었다. 초기 설계의 해석적 기법에서는 철심코어의 비선형으로 인한 포화를 고려하지 않았기 때문에 선형적 특성을 바탕으로 한 초기 설계에 의한 추력과 유한 요소 해석에 의한 실제 추력에 오차가 발생했다. 이를 고려하여 포화가 발생하지 않도록 축과 하우징의 두께를 늘려주고 공극의 길이를 줄여준다면 초기 설계의 추력에 부합한 추력이 발생 될 것으로 보인다. 따라서 초기 설계 값에 유한 요소해석에 의한 결과를 반영한 최종 설계결과는 표 4와 같다.

<표 4> 최종 설계 결과

설계변수	값[mm]
하우징 외반경 R_0	75
하우징 내 반경 R_i	34.5
공극의 길이 x	1
하우징 너비 w_c	23
코어 두께 t_w	6

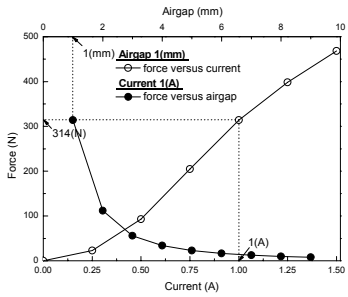


(a)



(b)

<그림 4>초기 설계 변수에 의한 비선형 유한요소 해석 결과(a)와 최종변수에 의한 비선형 유한 요소 해석 결과(b)의 추력과 인덕턴스



<그림 5>설계된 자기베어링의 전류와 공극에 따른 특성변화

4.2 상세 설계

그림 4(b)는 최종설계 변수에 의한 비선형 유한 요소 해석 결과로 추력과 인덕턴스를 나타내고 있다. 그림4(a)에서 초기 요구 추력에 만족하지 못했던 추력이 유한요소 해석에 의한 상세 설계를 통하여 설계 요구 조건에 부합함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 축방향 자기 베어링 및 댐퍼의 설계 및 특성 해석을 다루었다. 자기등가회로로부터 얻어진 특성식을 사용해서 추력, 시정수, 손실 등과 같은 전자기적 특성들을 조사하여 해석적으로 초기설계가 이루어졌고 유한요소 해석을 통한 검증으로 철심코어의 비선형적 성질을 고려하여 초기설계 값에 부합되는 상세설계를 하였다. 마지막으로 이 설계를 바탕으로 축방향 자기 베어링을 설계하여 인가 전류의 변화와 공극에 따른 추력의 변화를 측정한 실험 데이터를 통해 설계의 타당성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 강규홍, “5,000rpm급 초고속 소형 정밀모터용 능동 자기 베어링 시스템 제어 및 설계”,전기학회 논문지, 55B권, 408-145, 2006 .8