

축방향 베어링 통합 회전 구동기의 개발

허진혁*(연세대학교 기계공학과), 정광석(충주대학교 기계공학과), 백윤수(연세대학교)

Development of Rotary Actuator Including Function of Axial Bearing

J. H. Huh(Mech. Eng. Dept. YSU), K. S. Jung(Mech. Eng. Dept., CJU), Y. S. Baek(Mech. Eng. Dept. YSU)

ABSTRACT

Recently, the study on bearingless motors which integrate both motor and magnetic bearing function in one stator is very active, as many machines have high rotational speed, high precision, smaller size and lighter weight. In this paper, we propose a novel rotary actuator including function of axial bearing using Lorentz force as a preceding research for development of a bearingless motor. As using Lorentz force, this type has some merits such as the linearity of control force, freedom from flux saturation and high efficiency unlike conventional rotary actuators using a reluctance force. This type is controlled independently in levitation and rotational directions respectively. It shows by mathematical expression of levitation force and torque in the proposed rotary actuator. And also, the levitation force is generated by magnetic interaction between the magnetic materials and the rotational torque is generated by Lorentz force. Finally, for verification of this proposed system, a prototype is made and some experiments will be performed in the near future.

Key Words : Rotary actuator(회전 구동기), Bearingless motor (베어링 통합형 모터), Magnetic circuit(자기 회로), Lorentz force(로렌츠 힘)

1. 서론

모터는 높은 속도와 큰 힘을 내고, 크기 및 가격을 줄이고, 유지를 오래 할 수 있는 방향으로 발전 되어 왔다. 그러나 큰 힘과 고속화를 모두 만족하는 데 있어서 여전히 남아 있는 문제 중의 하나는 기계베어링의 불충분한 특성 문제이다. 기계 베어링은 모터의 회전속도를 떨어뜨리고, 유효성을 필요로 한다. 이러한 기계 베어링의 문제를 극복하기 위해서 많은 응용들에 자기베어링을 이용하고 있다. 그러나 자기베어링에서의 문제점 중에 하나는 자기베어링이 아주 긴 축 길이를 요구한다는 것이다. 축의 길이가 증가하면 축의 임계속도는 감소되기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 많은 연구가 이루어 졌다. 그 해법중의 하나는 자기베어링을 가진 모터를 자기적으로 조합하는 것이다. 이것이 바로 베어링 통합형 모터의 형태이다. 다시 말해서, 베어링 통합형 모터란 모터자체에서 발생된 힘에 의해 회전자가 자기적으로 지지 되어 있고, 자기 베어링 시스템이 분리되지 않은 전자기계로 정의 될 수

있다. 현재 베어링 통합형 모터의 여러 형태들이 제안되고 연구되어 지고 있다. 베어링 통합형 모터는 회전체의 기계적인 마찰 접촉이 없어 유효성이 필요 없고 소음이 없는 청정 환경적이며 생체 친화적이어서 주로 CD-ROM 드라이브, 하드 디스크 드라이브, 폴리곤 미러 드라이브 같은 컴퓨터 주변기기 및 사무기기, 고속 스핀들 드라이브, 터보 분자 펌프, 진공, 우주, 초저온, 원자로 및 독성이나 가연성 환경 등 특수환경에 사용되는 기계와 혈액 펌프 등 여러 분야에 적용될 수 있다.

본 연구에서는 베어링 통합형 모터의 개발을 위한 선행 연구로서 로렌츠 힘을 이용하는 축방향 베어링 통합 회전 구동기를 제안한다. 로렌츠 힘을 이용함으로써 다음과 같은 이점을 가진다. 잘 알려진 바와 같이 로렌츠 힘은 제어 전류에 선형적으로 비례하며, 이를 이용하게 되면 코어가 없어도 되므로 자기 포화 문제가 사라지고, 재료의 히스테리시스 특성과 와전류 효과 등의 문제가 사라지므로 효율적이고 안정된 고속 회전에 유리하다. 또한, 두꺼운 영구 자석을 사용할 수 있으며, 설계와 제작이 상대적으로 용이한 장점을 지닌다.

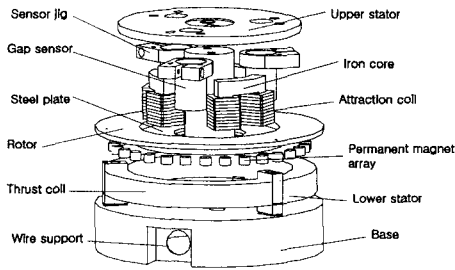


Fig. 1 Perspective layout of the suggested rotary actuator

본 논문에서는 새롭게 제안된 회전 구동기의 구조와 원리에 대하여 간단히 소개하고, 모터 토크와 부상력을 이론적으로 계산하여 부상력과 회전력을 각각 독립적으로 제어 가능함을 보인다. 그리고, 제안된 시스템의 설계 및 제작과정을 소개하고, 끝으로 향후 과제로 제안된 시스템의 실험적 검증을 통한 시스템 원형에 대한 고찰과 베어링 통합형 모터 형태의 시스템 전환을 위한 과제들을 남긴다.

2. 시스템의 구동 원리와 모델링

2.1 구조 및 원리

제안된 로렌츠 힘을 이용한 자기 부상 모터의 전체적인 구조는 Fig.1 에서 보는 바와 같다. 전체구조는 크게 운동을 하게 되는 회전자와 회전자를 부상시키는 상부 고정자와 회전자에 회전토크를 걸어주는 하부 고정자로 구성된다. 이는 각각 독립된 제어가 가능해진다. 상부 고정자는 3 자유도 부상이 가능하도록 전류를 인가해 주면 회전자의 강자성 평판에 흡인력을 발생시키는 3 개의 철심 전자석이 120° 등간격으로 배열되어 있고, 마찬가지로 전자석 사이 사이에 같은 등간격으로 3 개의 캐패시턴스(capacitance) 갭센서가 배열되어 전자석의 철심 코어와 강자성 평판 사이의 공극을 감출하게 된다. 하부 고정자는 회전자에 회전 토크를 가해줄 목적으로 토로이드 형태에 권선을 감은 형태를 취한다.

제안된 시스템의 구동력은 부상력과 회전 토크의 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 회전자를 부상시키는 힘은 상부 고정자에 부착된 전자석에 전류를 인가해 주어 발생하는 자성체들간의 흡인력(attraction force)을 이용한 자화력(magnetized force)이다. 둘째, 회전 토크의 발생은 하부 고정자에 놓인 토로이드 형태의 솔레노이드에 유기된 전류와 회전자 아래 부분에 배열된 영구자석에 의해 생성되는 자기장과의 상관관계를 이용한 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의한다.

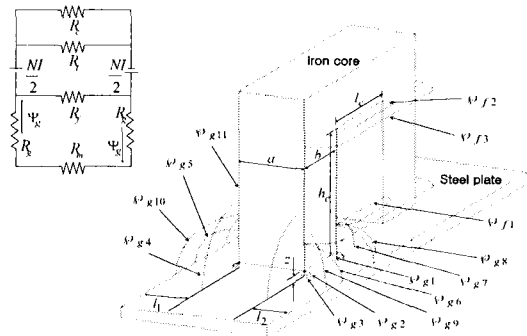


Fig. 2 Magnetic flux path and its permeance / Magnetic equivalent circuit

2.2 구동력 모델링

앞서 언급한 것과 같이 제안된 시스템은 철심 전자석과 강자성 평판 사이의 공극 조절을 위해 흡인력을 이용한다. 이 같은 자기 조합을 구성함으로써 회전자의 회전운동에 상관없이 공극이 일정하게 유지되므로 회전자의 안정성 유지 측면에서 바람직한 형태라 할 수 있다. 그리고, 회전 운동을 위해서 사각 단면의 중첩된 공심 솔레노이드와 영구 자석과의 상호 작용에 의한 로렌츠 힘을 이용한다. 이러한 구동력의 모델링 작업은 자기 회로(magnetic circuit)방법과 중첩(superposition)의 원리를 이용하여 수행된다.

2.2.1 부상력 모델링

상부 고정자에 부착된 철심 전자석에 전류를 인가하면 강자성 평판에 대해 흡인력을 발생시킨다. 흡인력을 정량화 하기 위하여 철심 전자석과 강자성 평판에 대해 자기 회로를 구성하고, 자기 회로를 흐르는 자기 에너지를 구해 가상 일의 원리를 적용하면 흡인력을 정량화 할 수 있다.

Fig.2 에서 주어진 전자석과 철판의 기하학적 형상으로부터 자기 퍼미언스가 구해진다. 여기서 첵자 g 는 프린징(fringing)된 자속이고, f 는 누설(leakage)된 자속을 의미한다. 단, 여기서 둥근 형태의 전자석을 굽은 'ㄷ'자 형태의 전자석으로, 아래 원관형태의 강자성 평판을 직선형태로 근사화해서 모델링 했다.

자기 저항(magnetic reluctance)은 퍼미언스의 역수로 나타내어지며, Fig.2 에서와 같이 등가 자기 회로를 구성하여 회로법칙을 적용하면 각 공극에서의 자속은 다음과 같다. 단, 철심 전자석과 강자성 평판의 자기저항은 공극에서의 자기저항에 비해 아주 작으므로 무시되었다.

$$\Psi_g = \frac{NI}{2R_g} \left(\because R_g = \left(\sum_{i=1}^{11} \rho_{gi} \right)^{-1} \right) \quad (1)$$

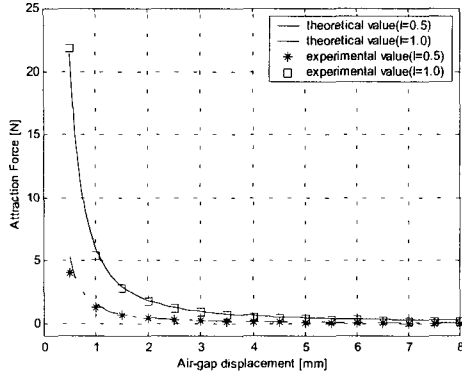


Fig.3 Variation of the attraction force according to the variable air-gap

따라서 철심 전자석 하나에 대한 흡인력은 다음과 같이 가상일의 원리를 적용하여 계산된다.

$$F_z = \frac{\partial W_m}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{N^2 I^2}{4R_g} \right) \quad (2)$$

Fig.3 에 철심 전자석 하나에 대하여 공극에 따른 흡인력의 변화를 유도식과 실제 실험값을 비교하여 나타내었다.

2.2.2 회전토크 모델링

토로이드 형태의 슬레노이드에 전류를 인가하면 회전자의 영구자석에 의해 원둘레 방향으로 로렌츠 힘이 발생한다. 이를 정량화하기 위해 먼저 비오사바르(Biot-savart) 법칙을 이용하여 임의의 점에서의 사각형 코일 하나에 대한 자기장을 구하고, 이를 반경방향과 원둘레 방향으로 확장해 다음과 같이 전체 자기장을 구한다.

$$B_k(r, \theta, z) = \frac{\mu_0 I N}{4\pi^2 (D-d) R} \int_0^{2\pi} \int_{l/2}^{D/2} B_k|_l dt d\theta \quad (3)$$

여기에서 k 는 r, θ, z 를 나타내고, $B_k|_l$ 는 사각형 코일 루프 하나에서의 자기장의 k 성분을 의미한다. 자기력을 구하기 위하여 변형된 로렌츠 법칙을 이용한다. 회전자 하부에 강한 응집력과 보자력을 가지는 네오뎴(Neodymium-Boron-Iron)계열의 영구자석을 써서 비자화를 고려할 필요가 없기 때문에 영구자석을 자기 쌍극자 모멘트로 가정하고 발생하는 힘을 변형된 로렌츠 법칙으로 구할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \nabla \mathbf{B} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{m} 은 자기 쌍극자 모멘트를 의미하고, 자기 쌍극자가 z 방향으로 놓여 있다고 가정하고 식(3)를 식(4)에 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_k(r, \theta, z) = \frac{\mu_0 m_z I N}{4\pi^2 (D-d) R} \int_0^{2\pi} \int_{l/2}^{D/2} \frac{\partial}{\partial z} B_k|_l dt d\theta \quad (5)$$

$$T_z = r_l \times F_\theta \quad (6)$$

따라서, 회전토크는 식(6)과 같이 식(5)에 표현된 원둘레 방향으로 작용하는 추력 F_θ 와 토로이드의 평균 반경 r_l 의 벡터적으로 나타내어진다.

2.3. 운동 방정식

앞서 언급한 것처럼 제안된 자기 부상 모터는 부상운동과 회전운동이 별도의 구동요소로 이루어지기 때문에 두부분으로 나뉘 볼 수 있다.

먼저 부상 운동에 대해서 보면, 흡인력은 작동점 부근의 작은 범위에서 전류와 공극의 함수로 선형화 할 수 있고, 선형화 된 자기력을 이용하여 운동 방정식을 이끌어 낸다. 공칭위치에서 회전자에 작용하는 세개의 힘들은 그 작용점과 기하적인 형상으로부터 간단하게 유도되고, 이 힘들과 이를 이용해 구한 모멘트를 운동방정식에 대입하면 미소변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (7)$$

여기서, $\mathbf{M} = \text{diag}[m \ I_{xx} \ I_{yy}]$ 은 관성행렬, $\mathbf{K} = \text{diag}[-3K_z \ -\sqrt{3}/2 r_m^2 K_z \ -3/2 r_m^2 K_z]$ 은 강성행렬, $\mathbf{q} = [z \ \alpha \ \beta]^T$ 는 위치벡터, $\mathbf{F} = [K_i(i_1 + i_2 + i_3) \ r_m/2 K_i(i_2 - i_3) \ r_m K_i(-i_1 + 0.5i_2 + 0.5i_3)]^T$ 는 힘 인가 벡터를 의미한다. 부가적으로 r_m 은 좌표계 중심에서 작용하는 힘까지의 거리이고, K_z, K_i 는 각각 축방향에 대해 발생한 힘의 기울기와 축방향의 공칭전류에 대해 발생한 힘의 기울기이며, i_1, i_2, i_3 는 각각 고정자 상부의 전자석에 인가되는 전류를 나타낸다. 이 운동방정식은 회전자의 면외운동에 대한 운동방정식으로 평형위치에서의 각 자유도의 미소운동이 비연성화 되어 있어 각각 독립적임을 알 수 있고, z, α, β 방향은 내부적으로 불안정하여 폐회로 제어가 필요함을 알 수 있다. 운동방정식에 쓰인 상수들은 공칭위치에서 계산되어진다.

다음으로 회전자의 면내운동에 대한 운동방정식은 회전토크에 대한 식으로 나타내어진다.

$$I_z \ddot{\theta} = r_l F_\theta \quad (8)$$

여기서 반경방향의 힘들은 대칭성에 의해 모두 상쇄되며, 부상력과는 달리 스프링 특성이 존재하지 않는다. 또한, 회전자가 회전할 때 역기전력이 발생되는데, 이는 전류앰프를 사용하여 전류를 공급한다고 가정하여 역기전력 효과는 무시한다.

3. 시스템 설계 및 구성

3.1 시스템 설계

시스템의 설계에 있어서, 충분한 회전력을 발생시키고, 시스템 전체 크기를 줄이는데 중점을 두었다. 먼저 회전자의 형상을 결정하기 위하여 회전자에 부착될 강자성 평판과 영구자석의 크기를 정하였

Rotor			
Outer diameter / Inner diameter	145 mm / 50 mm	Thickness of PM / PM Diameter	5 mm / 7 mm
Thickness	11 mm	No. Of PM	30
Rotor mass	227.9 g	Mass moment of inertia [kg·cm ²]	$I_{xx}=3.268$ $I_{yy}=3.268$ $I_{zz}=6.485$
Stator (upper)		Stator (lower)	
No. Of coil turns	560×3(No. Of EM)	No. Of coil turns	1670
Coil diameter	0.4 mm	Coil diameter	0.6 mm
Nominal current	0.4320 A	Motor current	1 A
Nominal gap	1 mm	Outer diameter / Inner diameter	136 mm / 106 mm
Cross section area of pole	96 mm ²	Thickness	15 mm

Table. 1 Design parameter of the prototype

다. 강자성 평판의 두께는 충분한 회전력을 얻도록 회전자의 무게를 가볍게 줄이기 위해 2mm 정도로 정하였고, 영구자석의 크기는 로렌츠 힘에 의한 추력의 발생을 크게 하고, 강자성 평판과의 간섭을 피하기 위하여 그 부착위치를 고려하여 가능한한 영구자석에서 발생하는 자기장이 추력코일에 영향을 주는 면적을 크게 해 주도록 가능한한 크게 결정되었다. 또한 추력코일의 중심은 영구자석과 아랫면에 감긴 코일방향에 의해 추력의 반대 방향으로의 힘의 발생을 줄이기 위해 적절한 두께를 주었다. 흡인 코일의 권선수는 회전자의 무게를 고려해 부상제어가 용이하도록 계산되어 정하였으며, 추력 코일의 권선수는 회전력을 가능한한 크게 하도록 하되 기하적인 간섭이 이뤄지지 않도록 결정되어 졌다.

회전자의 형상은 캡센서의 크기와 영구자석과 철펠의 배치를 고려하여 결정되었으며, 회전자가 공칭 위치에서 회전시에 발생하는 섭동을 줄이기 위하여 회전시에 회전자에 부착된 강자성 평판의 상면과 하부 고정자의 상면이 영구자석과 강자성 평판의 상호작용을 고려해 적당한 거리를 두었다. 또한, 회전자의 초기위치를 정해주기 위해 다음과 같은 방법을 제시한다. 반경방향의 초기위치는 회전자에 낸 홀(hole)과 하부 고정자 위에 낸 홀(hole)을 일치시켜 줌으로써 위치를 정해주고, 부상방향의 초기위치는 회전자 아래에 틈을 부착시켜 하부 고정자 위에 균일한 높이로 놓여지도록 설계하여 초기위치를 정해준다.

이상과 같이 설계된 시스템의 제원을 Table. 1에 제시한다.

3.2 시스템과 서보 장비의 구성

제작된 회전 구동기는 구동을 위하여 Fig.4 에서 보여지는 바와 같이 구성된다. 부상의 공극 정보는 캐패시턴스 센서 S600-2(Micro-Epsilon)로 측정되고, 측정된 위치 정보는 PC 의 아날로그-디지털 변환기(Darim system)에서 디지털 신호로 변환되고, 다

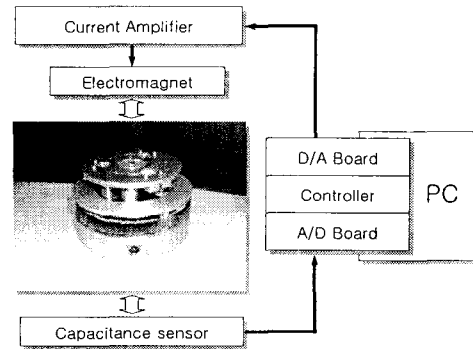


Fig.4 Configuration of entire system including hardware setup

시 디지털-아날로그 변환기(Darim system)를 통해 나온 아날로그 신호에 해당하는 전류가 전류 증폭기 Glentek GA455P 를 통해 전자석과 토로이드 솔레노이드의 각 코일에 인가된다. 코일에 인가된 전류는 회전자에 부상력과 회전력을 발생시킨다.

4. 결론

베어링 통합형 모터 개발을 위한 선행 연구로서 제안된 시스템의 구동력 모델링을 통하여 부상력과 회전 토크간 독립제어가 가능함을 수학적으로 검증할 수 있었다. 근시일 안에 실험적 검증을 통한 시스템 원형에 대한 고찰을 수행하고, 향후 회전변위를 측정하여 폐회로 제어를 통한 고속회전시의 특성 실험과 서보특성 향상을 위한 로터의 슬립화와 더불어 6축에 대해 모두 안정성을 확보할 수 있는 형태로의 시스템 전환을 위한 연구를 진행할 예정이다.

후기

본 연구는 2002년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제(R01-2000-00304)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Tadashi Fukao, "The Evolution of Motor Drive Technologies : Development of Bearingless Motors" Proceedings. PIEMC 2000. The Third International , Vol. 1 , pp. 33 -38, 2000.
2. Kwang-Suk Jung, 2001, "Contact-Free Precision Stage Using Magnetic Levitation." Thesis of Doctor of Philosophy, Yonsei Univ..
3. Rotors, H. C.,1941,Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons.
4. 최기봉, 박기환, 김수현, 박윤근, "자기력을 이용한 비접촉 6 자유도 미소위 치결정 기구의 개발 : 설계, 모델링 및 제어." 대한기계학회논문집(A), 제 20 권, 제 4 호, pp. 1164~1176. 1996.