

부상용 2극과 회전용 4극 자속 분포를 갖는 로렌쯔형 자기 부상 모터

Lorentz Force Type Self-Bearing Motor with 2-Pole Flux Distribution for Levitation and 4-Pole for Rotation

김 승 종* Yohji Okada**
Seung-Jong Kim and Yohji Okada

Key Words : Self-Bearing Motor(자기 부상 모터), Active Magnetic Bearing(능동 자기 베어링), Magnetic Levitation(자기 부상), Synchronous Permanent Magnet Motor(동기형 영구 자석 모터)

ABSTRACT

This paper introduces a Lorentz force type four-pole self-bearing motor, where the new pole arrangement of a stator is intended to function both as a synchronous PM motor and as a magnetic bearing. The Lorentz force type has some good points such as linearity of control force, freedom from flux saturation, and high efficiency unlike conventional self-bearing motors. Mathematical expressions of torque and radial force are derived to show that they can be separately controlled regardless of rotational speed and time. To verify the proposed theory, a prototype is made, where a ring-shape outer is actively controlled in two radial directions while the other motions are passively stable supposing the radial stability. Through some experiments, it is shown that the proposed scheme can provide high capability and feasibility for a small high-speed self-bearing motor.

1. 서론

능동 자기 베어링(active magnetic bearing; AMB)과 모터를 기능적으로 결합한 형태로써 축이 자기 부상되어 회전하는 특징을 갖는 자기 부상 모터는 1990년대 중반에 최초로 제안된 이래 현재까지 일본과 미국을 중심으로 활발한 기술 선점 경쟁이 이루어지고 있으며 다양한 구조와 구동 원리들이 개발되고 있다⁽¹⁻⁵⁾. 보고된 바에 의하면, 기존에 사용되고 있는 대부분의 모터들은 자기 부상식으로 전환이 가능한데, 이러한 자기 부상 모터는 인공 심장의 혈류 펌프와 같이 AMB의 장점인 비접촉 지지, 무윤활, 가(可)제어성 등의 특성이 요구되는 회전기에 적합하며, 특히 소형화가 필수적인 경우에 유리하다.

그 동안 개발된 거의 모든 자기 부상 모터에서는 부상력을 얻기 위해 서로 다른 자극 사이에 발생하는 흡인력을 이용한다. 그래서, 이러한 모터들은 비선형성과 코어(core)에서의 자기 포화(magnetic saturation), 히스테리시스와 같은 성질에 의해 고속에서의 제어 효율이 상대적으로 낮다. 이러한 단점을 해결하기 위해서, 로렌쯔 힘을 이용하는 자기 부상 모터가 소개되었다^(6,7). 로렌쯔

힘은 제어 전류에 선형적으로 비례하고, 코어가 없어도 되므로 자기 포화 문제가 해결되며, 두꺼운 영구 자석을 사용할 수 있어 설계와 제작이 상대적으로 간편하다.

본 논문에서는 4극 로렌쯔형 자기 부상 모터를 위한 새로운 권선 구조를 제안한다. 이미 Okada 등에 의해 개발된 8극 자기 부상 모터⁽⁷⁾와 기본 원리는 동일하지만, 고속 회전에 유리하도록 모터 극수를 줄이기 위한 독특한 권선 방법을 개발한 것이다. 제안된 자기 부상 모터는 영구 자석 및 회전용 권선은 4극이지만 부상용 권선은 2극으로서, 집중권으로 감겨진 6개의 코일에 의해 각각 구현된다. 이론 검증을 위해서 제작된 시작품은, 소형화에 유리한 외부 회전자(outer rotor) 형태로 제작하였고 두께를 얇게 하여 축 방향 및 경사 방향으로 수동 안정성(passive stability)이 확보되도록 설계하였다. 이 실험 장치는 간단한 비례-미분 제어를 써서 안정된 완전 자기 부상 및 회전에 성공하였는데, 그 결과와 함께 장단점, 실용화를 위한 개선 방안 등을 제시한다.

2. 이론 해석

2.1 회전 토크

로렌쯔형 자기 부상 모터의 회전 원리는 Fig.1(a)에 나타내었듯이 일반 영구 자석 모터와 동일하다. 회전체의 안쪽 면에 부착된 4개의 영구 자석들 앞에 마주 보는 코일 한 쌍이 있을 때, 그림

* 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

E-mail : sjongkim@kist.re.kr

Tel : (02) 958-5610, Fax : (02) 958-5659

** Dep. of Mechanical Engineering, Ibaraki Univ., Japan

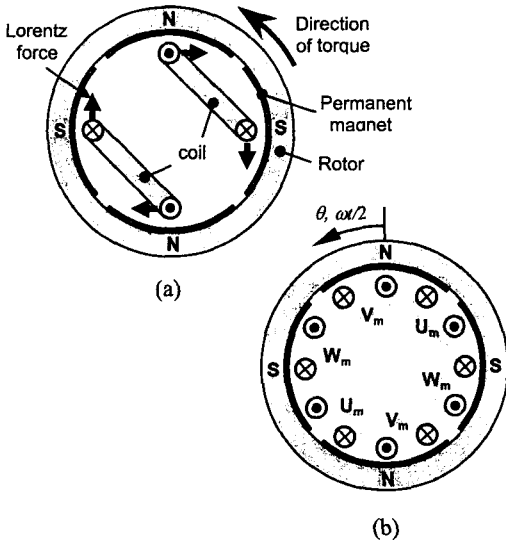


Fig.1 Principle of torque generation

에 표시한 것과 같은 방향으로 전류가 흐르면 시계 방향으로 로렌즈력이 발생하고, 그 반작용으로 회전체는 반시계 방향으로 토크를 받는 원리이다. 고정자는 도시하지 않았으나 코일은 고정자에 균계 고정되어 있다고 가정한다. Fig.1(a)를 3상 권선에 대한 경우로 확장한 것이 Fig.1(b)이다. 6개의 코일이 반시계 방향으로 $U_m, V_m, W_m, U_m, V_m, W_m$ 상의 순으로 배치되어 4극을 이루고 있다. 이와 같은 영구 자석과 권선 배열 구조에서 얻을 수 있는 회전 토크는 다음과 같이 계산된다. 먼저, 영구 자석에서 발생하는 자속 밀도 B_g 는 정현파 형태로 분포된다고 가정한다.

$$B_g = B \cos(\omega t + 2\theta) \quad (1)$$

여기서, B 는 B_g 의 최대값이고, ω 는 회전체의 회전에 따른 공간상의 자속 변화율로서 회전체의 실제 회전 속도는 $\omega t/2$ 이며, θ 는 회전체 위에서의 상대 각위치이다. 다음으로, 고정자 권선에 흐르는 모터 구동용 3상 전류는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{U_m} = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.a)$$

$$I_{V_m} = A \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \quad (2.b)$$

$$I_{W_m} = A \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi\right) \quad (2.c)$$

여기서, A 와 φ 는 모터 전류의 진폭과 위상각이다. 또한, 코일이 Fig.1(b)와 같이 배열되었을 때, 전류 밀도는 Dirac-Delta 함수를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} i_m = & I_{U_m} \left\{ \delta(\theta) - \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + \delta(\theta - \pi) - \delta\left(\theta - \frac{3\pi}{2}\right) \right\} \\ & + I_{V_m} \left\{ \delta\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) - \delta\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right) + \delta\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) - \delta\left(\theta - \frac{11\pi}{6}\right) \right\} \\ & + I_{W_m} \left\{ -\delta\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) + \delta\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - \delta\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) + \delta\left(\theta - \frac{5\pi}{3}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

그러면, 회전 토크는 플레밍(Fleming)의 왼손 법칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} T = & 2rl_e \int_0^\pi B_g i_m d\theta \\ = & 6rl_e AB \cos \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, r 은 고정자의 반지름이고 l_e 는 자속을 가로지르는 코일의 유효 길이이다. 식(4)에서 회전 토크는 ω 및 시간 t 에 무관하게 일정한 값을 가지며 A 와 φ 에 의해서 조절 가능함을 알 수 있다.

2.2 반경 방향 부상력

자기 부상을 위한 반경 방향 전자기력의 생성 원리는 Fig.2(a)에 나타내었다. Fig.1(a)와 비교하면 한 쪽 코일의 전류 위상이 반대가 된 경우이다. 이 때, 힘의 작용선은 그림처럼 두 코일의 대칭 기준선상에 놓이게 되며, 힘의 크기는 회전체의 위치에 따라 180도를 주기로 달라지게 된다. 따라서 부상용 코일의 전류는 모터용 전류와 동기화(synchronizing)해야 함을 알 수 있다. Fig.2(b)는 이를 3상 권선 구조로 확장한 것이다. 권선 구조는 Fig.1(b)와 같으나 코일이 $U_b, -W_b, V_b, -U_b, W_b, -V_b$

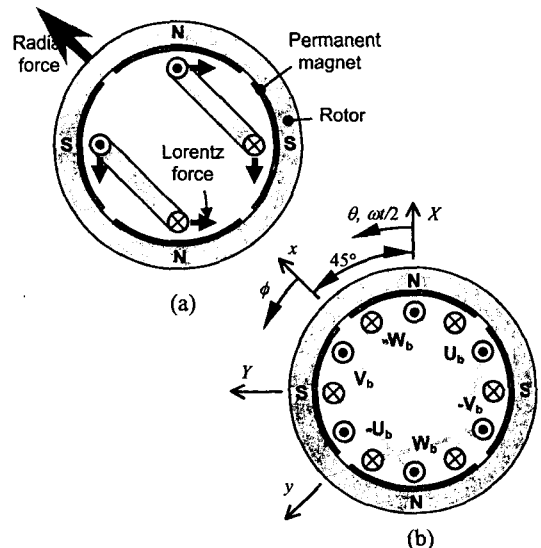


Fig.2 Principle of radial force generation

상의 순으로 배치되어 2극 분포를 이룬다. 각 상 전류(phase current)를 회전용 전류와 동기화하여 표현하면 다음과 같다.

$$I_{U_s} = C \cos(\omega t + \phi) \quad (5.a)$$

$$I_{V_s} = C \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \quad (5.b)$$

$$I_{W_s} = C \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \quad (5.c)$$

여기서 C 와 ϕ 는 부상용 전류의 진폭과 위상이다. Fig.2(b)에서의 전류 밀도 i_b 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_b = & I_{U_s} \left\{ \delta(\theta) + \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - \delta(\theta - \pi) - \delta\left(\theta - \frac{3\pi}{2}\right) \right\} \\ & + I_{V_s} \left\{ -\delta\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) + \delta\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \delta\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) - \delta\left(\theta - \frac{5\pi}{3}\right) \right\} \\ & + I_{W_s} \left\{ -\delta\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) - \delta\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right) + \delta\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \delta\left(\theta - \frac{11\pi}{6}\right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

로렌츠 원리에 의하여, 식(6)의 전류는 식(1)의 자속 밀도 아래에서 다음과 같은 반경 방향 전자기력을 생성한다.

$$\begin{aligned} F_x = & - \int_0^{2\pi} B_g i_b l_e \sin \theta d\theta \\ = & - \frac{3\sqrt{2}}{2} l_e B C \sin\left(\phi - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (7.a)$$

$$\begin{aligned} F_y = & \int_0^{2\pi} B_g i_b l_e \cos \theta d\theta \\ = & \frac{3\sqrt{2}}{2} l_e B C \cos\left(\phi - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (7.b)$$

식(7)은 회전체에 가해지는 반작용력으로서 반경 방향 전자기력도 역시 모터 회전각 ωt 와 무관하며, C 와 ϕ 에 의해 크기와 방향이 각각 제어될 수 있음을 보여준다. 제어 시 주의할 점은, $\phi = 0^\circ$ 인 경우의 힘의 작용 방향은 Fig.2(b)의 X - Y 회전 좌표계에서 $\theta = 45^\circ$ 의 방향, 즉, x 방향이라는 것이다. 그러므로, x, y 축이 제어를 위한 주축이 된다.

본 논문에서 제안하는 핵심 아이디어는 바로 Fig.1(b)와 Fig.2(b)에 도시한 권선 배열이다. 두 그룹의 권선 구조가 동일하므로 단일 권선을 공용할 수 있다. 즉, 미리 제어기 내에서 각 코일에 필요한 회전용 전류와 부상용 전류를 합산한 후 인가하는 것인데, 이 경우, 전류 소비가 줄어들고 권선을 위한 공간이 축소되므로 소형화에 유리하며 제작이 간편한 장점이 있다.

3. 실험 장치

3.1 시작품 제작

Fig.3은 제안된 권선법에 의한 자기 부상 모터의 개략도이다. 반지 모양의 회전체의 안쪽 표면에는 4개의 영구 자석이 붙어 있고, 그 가운데에 위치한 12개의 슬롯(slot)을 가진 고정자에는 6개의 코일이 각각 슬롯 3개에 걸쳐서 감겨 있다. 서론에서 언급했듯이, 로렌츠형 자기 부상 모터의 경우는 코어가 없어도 무방하다. 코어가 없으면 자기 포화, 재질의 히스테리시스 특성과 와전류 효과 등의 문제가 사라지므로 효율적이고 안정된 고속 회전에 유리하지만, 권선 작업이 까다롭다. 반면에 Fig.3과 같이 자성체 코어가 있는 고정자를 사용하는 경우에는 권선수를 늘일 수 있고 공극이 작으므로 상대적으로 큰 힘을 낼 수 있지만, 자기 포화 문제가 발생할 수 있고 영구 자석에 의한 흡인력도 함께 증가하는 단점이 있다.

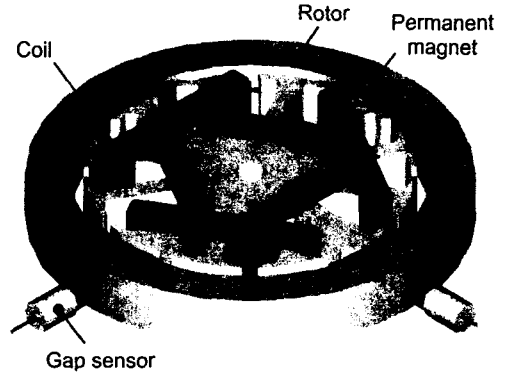


Fig.3 Schematic view of the Lorentz force type 4-pole self-bearing motor

Fig.4는 제작된 시작품 사진으로서 그 설계 사양은 Table 1에 정리하였다. 고정자는 와전류 효과를 줄이기 위하여 두께 0.1 mm의 규소 강판을 적층하여 제작하였고, 회전체의 재질은 연강이다. 회전체에 부착된 4개의 영구 자석은 $Nd_2Fe_{14}B$ 계열로서, 원주 방향으로 정편파에 가까운 자속 밀도 분포를 얻기 위하여 사다리꼴 형태로 제작하였다. 회전체와 아크릴 하우징 사이의 간극은 0.5 mm로 하여 비상시에 회전체의 영구 자석과 고정자가 직접 충돌하지 않도록 하였다. 그리고, 모터의 두께를 직경에 비해 얇게 설계하여 회전체의 축 방향 및 경사 방향 거동에 수동 안정성을 부여하였다. 즉, 두 반경 방향으로만 능동 제어가 이루어지면, 회전체는 완전 부상이 가능하게 된다.

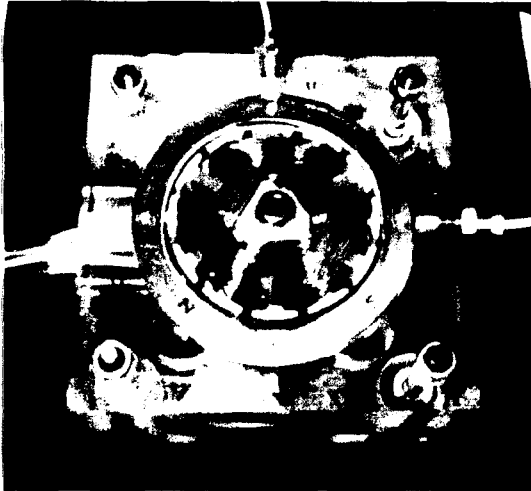


Fig.4 Photograph of the prototype self-bearing motor

Table 1. Design parameters of the prototype

Rotor			
Outer diameter	81 mm	Thickness of PM	1 mm
Inner diameter	65 mm	No. of PM	4
Thickness	10 mm	Rotor mass	135 g
Stator			
Diameter	60 mm	No. of slots	12
Thickness	10 mm	No. of coil turns	70
Air gap to PM	1.5 mm	Coil diameter	0.6 mm
Gap between cores	2.8 mm	Motor current (Amp.)	1.5 A

3.2 제어 시스템

본 시스템에서 편의상 회전 제어는 별도의 엔코더(encoder)를 장착하지 않는 개회로(open loop) 방식으로 하였다. 즉, 식(2)에서 $\phi=0^\circ$ 로 놓고, 전류 I 는 1.5 A로 고정하였으며, 사용자가 입력하는 구동 주파수 ω 에 따라 각 상 전류를 계산하였다.

Fig.5에 나타낸 부상 제어계의 구성은 일반적인 AMB 시스템과 동일하다. 각 방향 변위 신호에 대한 제어 연산은 DSP(dSPACE Inc., DS1103)에서 이루어지는데, 여기서 비례-미분 제어기가 이용되었으며, 각 제어 이득은 실험적으로 얻은 위치 강성 및 전류 강성 계수 등에 근거하여 $K_p=7$, $K_d=0.007$ 로 선정하였다.

x, y 방향에 대해서 계산된 제어 신호들은 다음 식에 의해 모터 구동 주파수를 갖는 3상 전류를 변환된다.

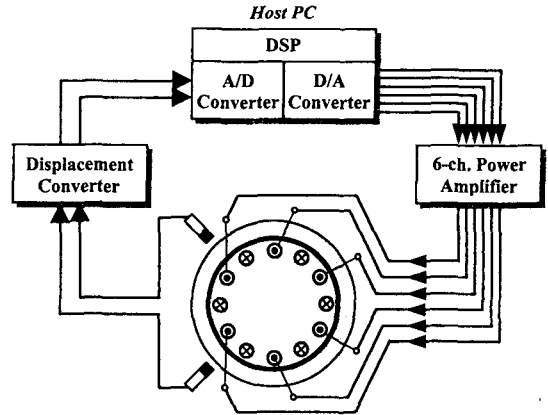


Fig.5 Schematic of the controlled system

$$\begin{Bmatrix} I_{U_b} \\ I_{V_b} \\ I_{W_b} \end{Bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 4\pi/3) & -\sin(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} \quad (8)$$

위에서 구한 부상용 전류와 회전용 전류를 이용하여 각 코일에서 요구하는 전류, 즉, $I_{U_a} + I_{U_b}$, $I_{V_a} - I_{V_b}$, $I_{W_a} + I_{W_b}$, $I_{U_a} - I_{U_b}$, $I_{V_a} + I_{V_b}$, $I_{W_a} - I_{W_b}$ 등을 계산하고, 이들을 6 채널의 전력 증폭기를 거쳐 각 코일에 인가하면 회전체의 회전 및 부상 제어가 동시에 가능하게 된다.

4. 실험 결과

4.1 자속 분포와 부상력 특성

Fig.6은 균일한 공극에서의 자속 분포를 가우스 메타(Gaussmeter)를 이용하여 측정된 결과이다. 실선은 각 측정치들을 정현파로 근사한 경우로서, 이로부터, 식(1)의 가정이 타당함을 확인할 수 있다. Fig.7은 식(5)의 ω 와 ϕ 는 0으로 두고 C 를 증가시키면서 계산한 전류를 코일에 흘릴 때 x 방향으로 발생하는 전자기력을 측정된 결과이다. 결과는 예측대로 선형 관계를 보이며 그 근사선의 기울기는 3.15 N/A 인데, 이것이 전류 강성 계수에 해당한다. 또한, C 가 0일때, 회전체의 변위에 따른 영구 자석에 의한 흡인력의 변화는 Fig.8에 나타내었다. 이 경우는 이론적으로 선형 관계가 아니지만, 그림에 나타낸 범위에서는 직선으로 잘 근사됨을 볼 수 있다. 이 근사선의 기울기가 위치 강성 계수로서 28.7 N/mm로 측정되었다. 이들은 제어기 설계와 동특성 해석을 위해 중요한 지표를 제공한다.

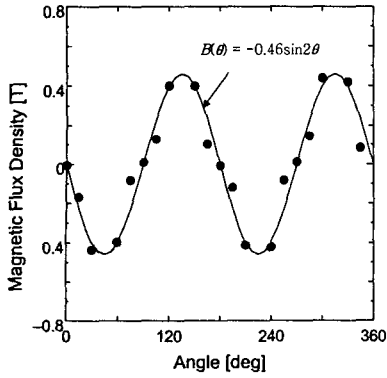


Fig.6 Measured flux density distribution

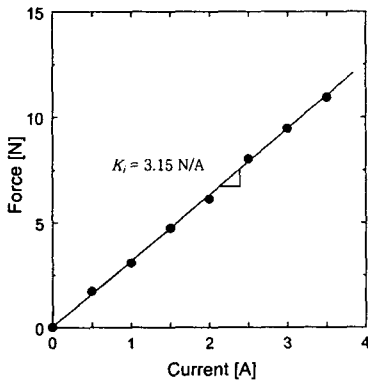


Fig.7 Radial attractive force versus current

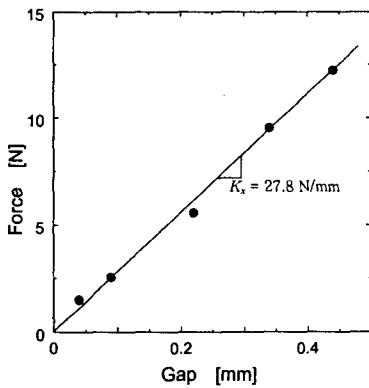


Fig.8 Radial attractive force versus rotor displacement

4.2 부상 회전 실험

Fig.9는 회전하지 않는 상태에서 초기 부상 시의 반경 방향 응답이다. 회전체는 안정되게 부상하였으며, 경사 모드에 기인하는 약 13 Hz의 잔류 진동이 남아서 약 0.4 sec 간 지속되었다. 부상 시의 경사 방향 수동 안정성을 확인하기 위해서 실시한 충격 시험의 결과를 Fig.10에 나타내었다.

Fig.10(a)는 $\theta = 0^\circ$ 의 위치에서 축 방향으로 회전체를 가진하고 180° 지점의 축 방향에서 측정된 응답으로서, 안정한 상태이긴 하지만 감쇠가 작다는 수동 안정성의 단점이 그대로 나타나 장시간(10 sec 이상) 잔류 진동이 지속되는 모습을 보인다. Fig.10(b)는 0° 의 위치에서 가진하고 90° 위치에서 측정된 것으로서, 경사 모드보다 축 방향 모드가 지배적인 것으로 보인다. 진동 주파수는 약 24 Hz이며, 이 성분이 감쇠되어 사라진 이후(약 1.2 sec)에도 경사 모드에 의한 작은 진동은 남아있음을 볼 수 있다.

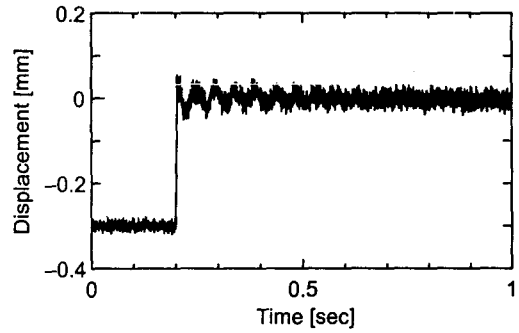
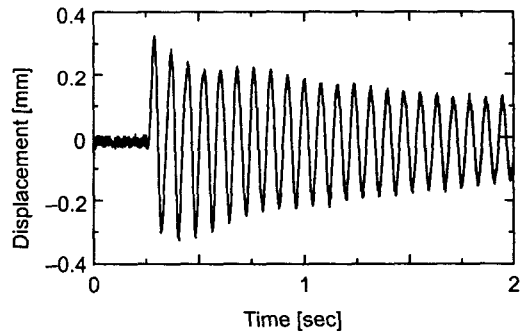
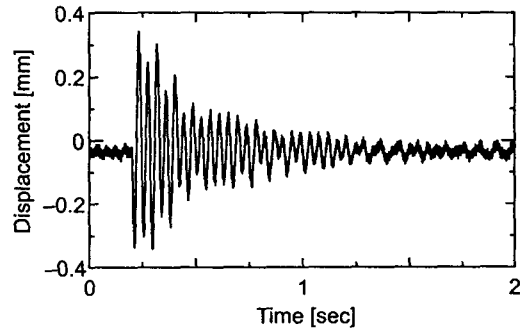


Fig.9 Start-up test in x-direction



(a) impacting at $\theta = 0^\circ$ and measuring at 180°



(b) impacting at $\theta = 0^\circ$ and measuring at 90°

Fig.10 Impulse responses in axial direction

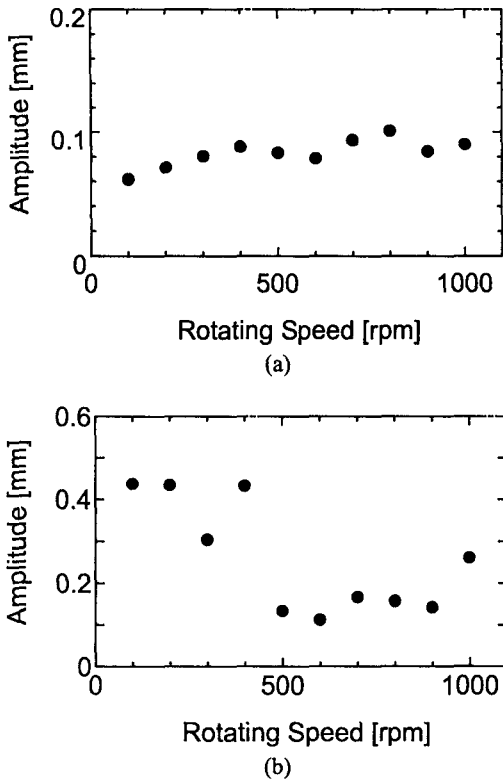


Fig.11 Unbalance response in (a) radial and (b) axial directions

Fig.11은 회전체를 부상 상태에서 회전시켰을 때, 회전 속도에 따른 각 방향 진동의 진폭 변화이다. 불균형량과 런아웃(runout)을 보상하지 않았으므로 정밀 회전을 기대할 수는 없지만, Fig.11(a)에서 보이듯이 1000 rpm까지 반경 방향 진동의 진폭이 약 0.1 mm 내에서 제어되었다. Fig.11(b)에 나타난 축 방향 진동은 회전체가 기본적으로 부상 시에 조금 기울어져 있는 이유로 낮은 회전 속도에서는 0.4 mm가 넘는 진폭을 보이다가 500 rpm 이상에서는 회전 관성이 증가하여 진폭이 0.2 mm 이하로 감소하는 현상을 보인다. 실험을 1000 rpm까지만 수행한 것은, 엔코더가 없는 개회로 회전 제어에서는 고속에서 갑자기 불안정해질 가능성이 있기 때문이다. 또한, 본 실험의 목적인 4극 자기 부상 모터의 회전 및 부상 성공 여부를 확인하기에는 1000 rpm까지도 충분하다고 판단된다.

5. 결론

각종 비선형성과 손실이 적어 고속 회전에 유리한 4극 로렌츠형 자기 부상 모터를 제안하였다. 이는 기존에 소개된 8극형에 비해서 코일이 서로 엇갈리게 감기게 되어 공간을 조금 더 차지하는 구조적 단점은 있지만, 제어가 간단하고 영구 자석의 두께와 공극을 키울 수 있다는 장점은 유지된다. 제작된 실험 장치에서는 반경 방향으로 2축만을 제어함으로써 회전체를 완전 부상시키고 1000 rpm까지의 회전에 성공하여 제안된 원리는 증명하였으나, 개회로식 회전 제어를 하였기에 고속 회전에서의 특성 실험은 불가능하였고 경사 방향으로의 낮은 감쇠가 단점으로 노출되었다. 향후, 엔코더와 축 방향 자기 베어링을 추가하여 고속에서의 동특성 파악 실험이 수행될 것이며, 슬롯이 없는 로렌츠형 자기 부상 모터를 새로이 제작하여 소형 고속 모터를 위한 실용화 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

- (1) Schöb, R. and Barletta, N., 1996, "Principle and Application of a Bearing Slice Motor," Proc. of the 5th Int'l Symp. on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, pp. 313-318.
- (2) Chiba, A. et. al., 1994, "An Analysis of Bearingless AC Motors," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, pp. 61-68.
- (3) Okada, Y., Miyamoto, S. and Ohishi, T., 1996, "Levitation and Torque Control of Internal Permanent Magnet Type Bearingless Motor," IEEE Trans. on Control System Tech., Vol. 4, No. 5, pp. 565-570.
- (4) 김승중, Okada, Y., 2001, "소형 수직형 축류 펌프를 위한 축방향 자기 부상 모터," 한국소음진동공학회 논문집, 제 11 권, 제 6 호, pp. 223-232.
- (5) 김승중, Masuzawa, T. Okada, Y., 2001, "인공 심장용 무축 원판형 자기 부상 모터," 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 559-564.
- (6) Han, W. S. and Lee, C. W., 2001, "Runout Identification and Precision Control of Integrated Motor-Bearing System," Proc. of the 8th Int'l Congress on Sound and Vibration, Hong Kong, China, pp. 1849-1856.
- (7) Okada, Y. et. al., 2000, "Lorentz Force Type Self-Bearing Motor," Proc. of the 7th Int'l Symp. on Magnetic Bearings, Zurich, Switzerland, pp. 353-358.