

수동형 마그네틱 베어링이 결합된 스텝 모터의 설계

Design of a Step Motor with a Passive Magnetic Bearing

곽 호 성* · 김 승 종* · 최 동 훈**

Ho-Seong Kwak, Seung-Jong Kim and Dong-Hoon Choi

(2006년 5월 1일 접수 ; 2006년 11월 20일 심사완료)

Key Words : Step Motor(스텝 모터), Passive Magnetic Bearing(수동형 자기 베어링), Self-bearing Motor(셀프-베어링 모터), Magnetic Levitation(자기 부상), Halbach Array(할바크 배열)

ABSTRACT

This paper introduces a step motor with a passively levitated rotor which comprises a homopolar step motor and a passive magnetic bearing. Compared with conventional self-bearing motors which are mostly based on the active magnetic bearing technology, the proposed motor has a very simple structure and operating principle. For the levitation, it works just like passive magnetic bearings which use the repulsive force between permanent magnets. Halbach array is used to increase the bearing stiffness. On the other hand, its rotation principle is just the same with that of conventional motors. In this paper, we introduce the design scheme to avoid the flux interference possibly produced by electromagnets and permanent magnets, and show some results of FEM analysis to predict the performance of the proposed motor.

1. 서 론

1990년대 중반부터 활발한 연구가 이어지고 있는 셀프-베어링 모터(self-bearing motor)는 마그네틱 베어링과 모터가 기능적으로 결합되어 일체화된 것으로, 주로 마그네틱 베어링의 기능이 절실히 요구되는 소형 모터 시스템(예: 인공심장)에의 적용을 목표로 하고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 즉, 기존의 구름 베어링이나 저널 베어링에 비해 탁월한 장점이 있지만, 소형 경량화가 어려운 마그네틱 베어링의 단점을 극복하기 위한 대안으로서 개발된 것이다. 그런데, 이러한 셀프-베어링 모터들은 대부분 능동형 마그네틱 베어링(active magnetic bearing, AMB)의 원리를 이용

한 것으로서, 이를 위하여 비접촉 변위 센서와 전류 증폭기가 필요할 뿐만 아니라, 고정자와 회전자 사이의 공극에 부상 제어용 자속(flux)과 회전용 자속이 함께 흐르므로 자속밀도 분포를 고려한 제어 시스템 구현이 상대적으로 복잡하다. 이론적으로는 부상력과 회전 토크가 각각의 제어 전류에 의해 독립적으로 제어되지만, 실제 고속 회전 시에는 두 제어 전류 사이에 연성 효과(coupling effect)가 발생하므로 회전자의 안정성과 시스템의 신뢰성 개선을 위한 연구가 더 필요하다 하겠다.

이에 이 논문에서는 수동형 마그네틱 베어링(passive magnetic bearing, PMB)을 적용한 자기 부상(magnetic levitation) 모터를 제안한다. 이와 관련된 대표적 연구사례로서, Jarvik이 발명한 영구 자석 베어링을 이용한 혈류 펌프시스템⁽⁵⁾에서는 두 쌍의 영구자석 사이의 반발력을 사용하여 회전축을 부상시키고, 중앙부에 별도의 모터를 장착하여 축을 회전시킨다. 이러한 구조에서는 부상용 영구자석과 모터 사이의 자속 간섭을 피하기 위해 일정한 거리

* 책임저자; 정회원, 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

E-mail : sjongkim@kist.re.kr

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

* 정회원, 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

를 두어야 하므로 시스템의 소형화에 한계가 있고, 시스템 설계 시 영구자석에 의한 자속의 차폐를 고려해야 하며, 모터부에 장착된 회전용 영구자석은 시스템에 음강성(negative stiffness)을 제공하므로 회전 토크를 증가시키려면 양쪽 부상용 영구자석이 함께 커져야 하는 단점이 있다. 이에 비해 이 논문에서 제안하는 모터의 구조는 반발 부상용 영구자석의 자속과 회전용 코일에 의한 자속이 동일한 모터 코어를 통해 흐르지만 서로 영향을 끼치지 않도록 설계되어, PMB 유닛과 모터 유닛이 일체화될 수 있으므로 소형화에 유리한 장점이 있다. 부상력 증가와 자속 차폐효과를 위해 PMB부에는 할바크 배열(Halbach array)을 적용하였고, 모터는 일반적인 스텝 모터와 동일한 구조와 원리의 적용이 가능하지만 힘 균형(force balancing)을 위해 서로 마주보는 코어가 동일한 상(phase)을 갖도록 하는 것이 유리하다. 다음 장들에서는 수동형 자기부상 모터의 구조와 원리를 설명하고, FEM 해석을 통한 부상 특성 및 토크 특성 해석 결과를 소개한다.

2. 수동형 자기부상 모터의 구조와 원리

2.1 구조와 특징

이 논문에서 제안하는 수동형 자기부상 모터는, 기본적으로 고정자와 회전자에 장착된 영구자석들 사이의 반발력으로써 자기부상을 구현하는 점은 기존 기술과 동일한 원리이지만, 고정자 및 회전자 영구자석들의 양쪽 옆면에 모터용 강자성 코어가 부착되어 있는 점이 특징이다. Fig. 1은 그 개략적인 구조

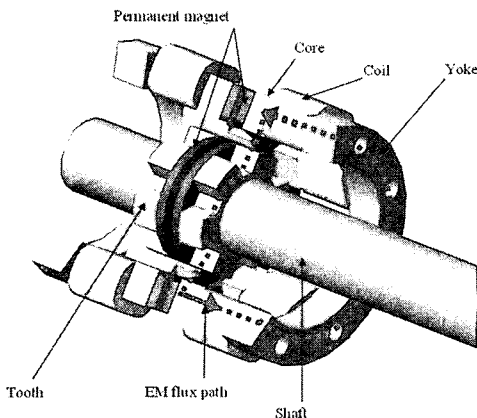


Fig. 1 Prototype of the proposed motor

로서, 양쪽 코어들은 영구자석을 사이에 두고 대칭적인 모습을 보인다. 이들은 회전용 코일 자속의 경로는 물론, 영구자석의 자속을 위한 경로를 제공하여 자기 저항을 줄임으로써 반발력을 증가시킨다. 즉, 고정자와 회전자의 영구자석들에 의한 자속은 각각 자신의 양쪽 코어를 모두 지나 축을 포함하는 평면 상을 흐르며, 고정자 측의 코어에 감긴 코일에 의한 자속은 회전자 측의 코어를 포함하는 축에 수직인 평면 상을 흐르게 된다. 그리고 각 코어들은 스텝 모터의 코어와 같이 치(teeth)가 형성되어 있다.

이 수동형 자기부상 모터의 특징으로는 비접촉 변위 센서와 제어기, 앰프들이 필수적인 기존의 능동형 셀프-베어링 모터에 비해 시스템이 간단하고 저렴하여 소형화에 유리하고, 피드백 제어 없이도 안정된 부상이 가능하므로 고장 및 오동작의 가능성이 낮다는 장점이 있다. PMB를 별도 장착하는 기존의 자기부상 모터⁽⁵⁾에 비해서도 소형 제작이 가능하고, 영구자석 자속의 차폐가 용이하며 지지 강성이 높다는 장점이 있다.

한편, Fig. 1에 보이지는 않았지만, 이러한 구조에서는 축 방향으로 불안정한 특성이 있으므로, 모든 영구자석 반발형 PMB가 그렇듯이⁽⁶⁾ 축방향으로는 별도의 지지 수단이 필요하다.

2.2 할바크 배열에 의한 자기부상

서론에서 언급하였듯이 제안된 자기부상 모터에서는 할바크 배열을 채용하였다. Fig. 2는 한 쌍의 할

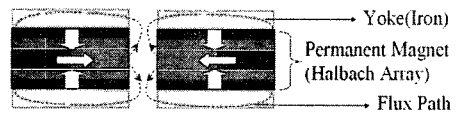


Fig. 2 Basic structure of Halbach array

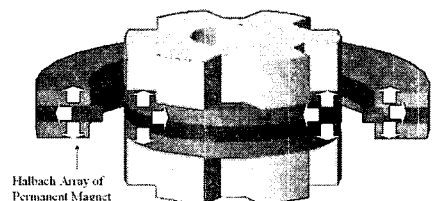


Fig. 3 Schematicview of the stacked permanent magnets in the proposed motor

바크 배열이 마주보는 구조로서, 반발력을 발생시킨다. 이러한 배열의 효과로는 크게 세 가지를 들 수 있는데, 우선 배열의 좌우에서 자속의 세기를 비대칭화할 수 있으므로 같은 크기의 영구자석으로 공극에서의 자속밀도를 증가시킬 수 있고, 공극의 반대쪽, 즉 외곽 쪽의 자속밀도는 감소하므로 자속차폐가 쉽다^(7,8). 그리고, 직접적으로 반발력을 일으키는 중앙부의 영구자석과 양쪽 요크부(Fig. 1에서는 코어부) 사이에 거리를 유지함으로써 공극을 거치지 않고 직접 요크부로 흐르는 누설 자속을 제거하여 반발력을 증가시키는 효과가 있다.

Fig. 3은 Fig. 1에 적용된 회전자 코어를 포함한 영구자석 부를 확대한 그림이다. 이와 같은 구조로써 회전자를 반경방향으로 자기부상시키는 것이 가능하다. 할바크 배열의 정량적 효과는 다음 장의 FEM 해석을 통해서 소개한다.

2.3 회전 원리

제안된 모터의 회전자 및 고정자의 코어 모습을 펼친 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같이 일반 스텝 모터의 구조와 동일하다. 소형화를 고려하여 편의상, 치의 개수는 회전자 측은 6개, 고정자 측은 8개로 하였다. 이 모터의 회전 원리는 기존의 스텝 모터 회전 원리와 유사하다. 다만, 총 14개의 회전자와 고정자의 치들이 영구자석에 의해 모두 같은 자극을 띠고 있다는, 즉 서로 반발하고 있다는 점에 유의해야 한다. 기존의 호모폴라 스텝 모터의 경우에는 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 바이어스 자속(bias flux)이 공극에서 일정한 방향으로 흐르므로 그림처럼

코일 자속을 인가하면 바이어스 자속과의 가감에 의해 회전 토크가 발생하지만, 제안된 모터의 경우는 회전자와 고정자의 코어에서 바이어스 자속밀도가 같을 때, 토크는 코일 자속의 방향과 관계가 없다. 단순하게 생각하면, 한 쌍의 마주보는 회전자와 고정자 코어의 치 표면이 모두 N극이고 초기 자속 밀도가 0.5 Tesla라고 가정할 때, 코일 전류에 의해 생성되는 자속밀도가 0.2 Tesla라면 두 코어의 표면 중 자속이 더해지는 쪽은 0.7 Tesla, 자속 방향이 반대인 쪽은 0.3 Tesla가 된다. 즉, 이들 사이의 상호작용에 의한 토크 발생은 코일에 의한 자속 방향과 관계가 없다. 여기서 주목할 점은 영구자석 사이의 반발력과는 달리 강자성 코어 사이의 반발력은 양쪽 자속밀도의 차이가 커질수록 감소한다는 점이다. 극단적으로 코일에 의한 자속이 바이어스 자속보다 커질 경우 한쪽은 극성이 바뀌게 되어 반발력이 인력으로 바뀌게 된다. 따라서, 제안된 모터의 경우는 Fig. 4(b)와 같이 전류 자속을 인가해야 효과적으로 토크가 발생한다. 이후, 회전자가 반시계 방향으로 회전하여 상하 방향에서 치가 일치하게 되면 상하 방향 코일 대신 좌우 방향 코일에 전류를 인가함으로써 회전자를 지속적으로 회전시킬 수 있다.

다음 장에서는, 이론적으로는 예측하기 매우 어려운 자속 중첩 효과와 반발력 변화 사이의 관계를 FEM 해석을 통해 예측해본다.

3. FEM 해석에 의한 성능 분석

3.1 부상력 해석

Fig. 5는 양쪽 면에 강자성체가 부착된 동일한 두 개의 영구자석이 반발할 때와 할바크 배열을 갖는 같은 크기의 영구자석 조합이 반발할 때의 자속 흐름도를 보여준다. 할바크 배열의 경우 공극에서의 자속밀도가 증가하고 바깥쪽 자속밀도는 감소하였음을 확인할 수 있다. Fig. 6은 두 가지 경우에 대한 반발력을 FEM 결과로써 비교한 그림이다. 영구자석의 총 두께가 3 mm와 6 mm인 경우로서, 0.3 mm의 공극에서는 2배 이상의 반발력이 얻어지며 공극이 증가하여도 그 비율은 유지되고 있는 할바크 배열의 효과를 보여준다. 또한, 다른 조건이 동일할 때 공극이 0.3 mm일 경우 영구자석 총 두께가 2배가 되면

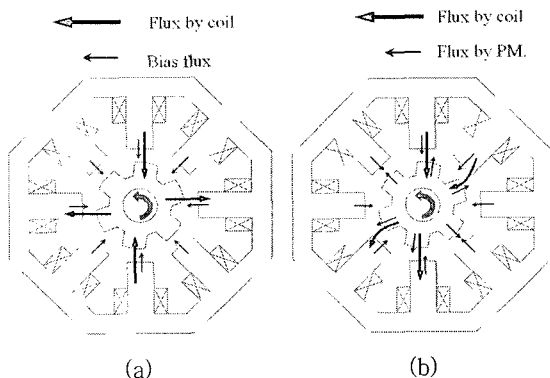


Fig. 4 Rotation principles of (a) a homopolar step motor and (b) the PSBM

반발력도 거의 2배가 되지만 공극이 증가할수록 그 비율이 증가하므로, 설계 공극에 따라 적절한 영구 자석 두께를 선정해야 함을 알 수 있다. 이 논문의 해석에서는 공극을 1.5 mm로 선정하였다.

한편, 이제까지 알려진 할바크 배열은 정방형 영구자석들로 구성된 것이 대부분이었으나, Fig. 5와 같이 영구자석의 두께가 제한적일 경우, 반발력을 최대화할 수 있는 세 영구자석의 두께 비율을 검토할 필요가 있다. Fig. 7은 영구자석 두께가 총 6 mm로 제한되었을 경우, 영구자석의 두께 비율에 따른 반발력의 세기를 비교한 것이다. 세 영구자석의 두께 비율이 1.7 : 2.6 : 1.7일 때 반발력이 가장 큰 것으로 나타났지만 큰 차이는 없고, 가운데 영구자석의

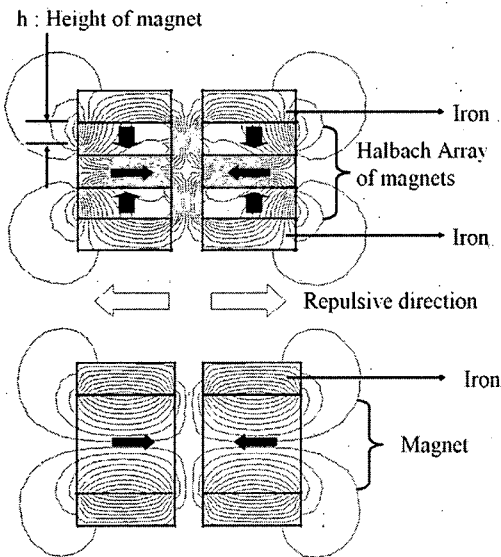


Fig. 5 Comparison of the flux flow patterns

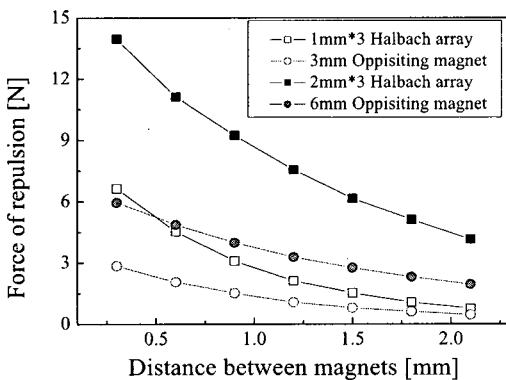


Fig. 6 Repulsive force increased by Halbach array

두께가 총 두께의 1/3~1/2 사이에서 결정되면 무난함을 알 수 있다.

Fig. 8은 영구자석들의 위아래 장착된 코어의 두께가 반발력에 미치는 영향을 나타낸 것이며, 코어에서 자속 포화(flux saturation)가 발생하지 않은

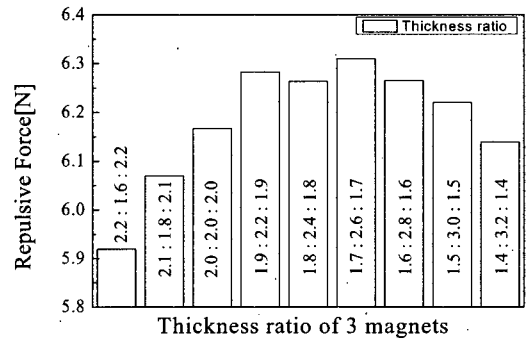


Fig. 7 Repulsive force according to the thickness ratio of permanent magnets in Halbach array

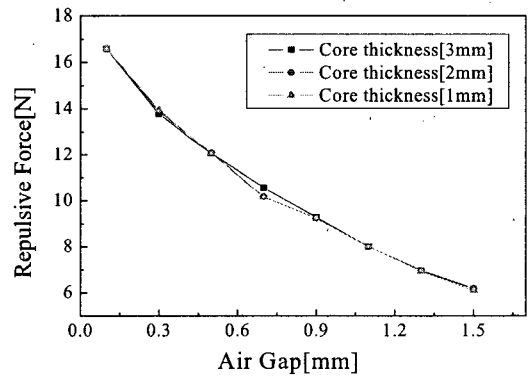


Fig. 8 Repulsive force vs. the thickness of ferromagnetic core

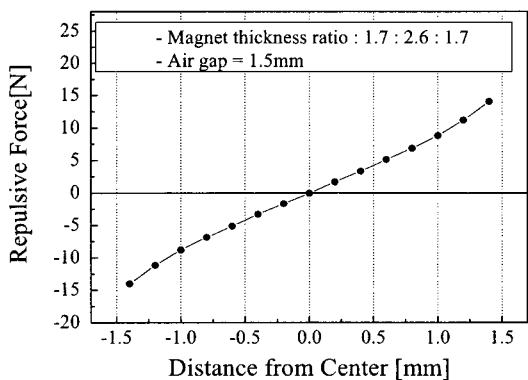


Fig. 9 Bearing stiffness of the proposed PSBM

한, 코어 두께의 영향은 없음을 알 수 있다. 다만, 코어의 표면에서 영구자석에 의한 자속밀도가 균일하지 않고 영구자석과 가까운 모서리 부분에 집중되는 현상이 있어, 코일에 의한 자속 인가 시 부분적으로 와류 자속이 발생하여 회전 성능을 저하시킬 우려가 있으므로 코어는 너무 두껍지 않아야 한다. 이하 이 논문의 해석에서는 코어의 두께를 공극과 같은 1.5mm로 하였다.

Fig. 9는 최종적으로 설계된 모터의 자기부상 성능을 나타내는 지지강성계수를 나타낸다. 양 끝의 10~20% 구간을 제외하고는 매우 선형적인 특성을 보이며, 그 기울기인 지지강성계수는 약 8.8 N/mm이다.

3.2 회전 토크 특성 해석

이 논문에서 제안하는 모터의 회전 특성을 해석하기 위해서는 영구자석과 코일의 자속을 동시에 고려해야 하므로 3차원 해석이 불가피하다. Fig. 10은 FEM해석용 소프트웨어(Maxwell ver.10)를 이용하여 계산된, 회전자의 회전 각도에 따른 토크 변화를 나타낸다. 최대 토크는 12° 위치에서 약 1.6 Nmm로 계산되었는데, 이 경우는 마주보는 한 쌍의 고정자 코어에만 전류가 인가되는 경우로서, 인가된 기자력(magneto-motive force, mmf)은 800 Aturn이며, 이는 공극 단면에서 약 0.67 Tesla의 자속밀도를 형성할 수 있는 세기이다. 그림에서 토크는 회전 각도에 따라 다소 편차를 보이는데, 이는 고정자와 회전자의 치 표면에서 영구자석에 의한 자속밀도가 서로 다를 뿐만 아니라 축 방향 및 원주 방향으로 균일하지 않고, 그조차도 회전 각도에 따라 달라지는 것이 주요한 원인으로 사료된다. 즉, 고정자와 회전자에서 영구자석에 의한 자속밀도가 서로 다르면,

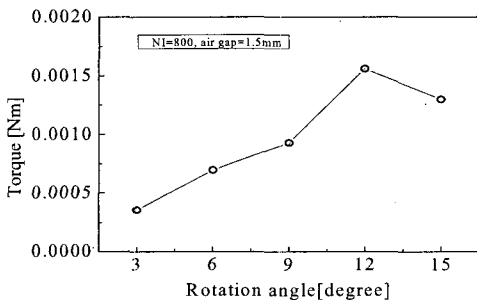


Fig. 10 Torque vs. rotation angle

Fig. 4(b)에서 마주보는 고정자 치에서 생성하는 토크의 크기가 달라지며, 심한 경우 토크 방향이 반대가 될 수도 있다. 게다가 각 치에서의 영구자석에 의한 자속밀도가 고정자와 회전자의 상대 위치에 따라 달라진다는 것은 회전 각도에 따른 토크의 변화 예측이 더욱 어려움을 의미한다. 이러한 토크 특성을 개선하기 위해서는 각 코어에서 영구자석에 의한 자속밀도를 균일하게 하기 위한 구조 제안이 필요하고, 무엇보다도 넓은 공극과 작은 코어 면적에 기인하는 약한 토크를 증가시키기 위해서 설계 개선이 요구된다.

3.3 모터 코어 형상 개선

Fig. 11은 영구자석에 의한 고정자 코어(두께 2mm) 표면에서의 자속밀도 분포이다. 영구자석과 가까운 모서리에서 최대 0.76 Tesla, 먼 쪽 모서리에서

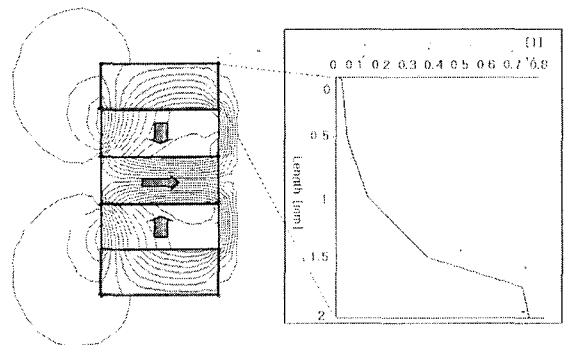


Fig. 11 Flux density distribution on the core surface

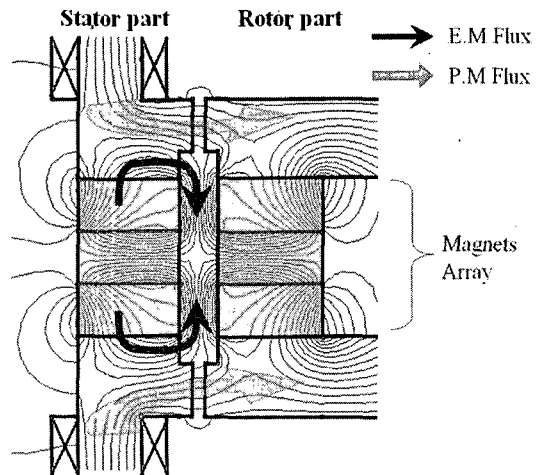


Fig. 12 Flux flow at modified cores

최소 0.04 Tesla까지의 분포(평균 약 0.4 Tesla)를 보이는데 대부분의 자속은 영구자석에 가까운 1mm 영역에 집중되고 있다. 이 점에 착안하여 코어 형상을 Fig. 12와 같이 수정하였다. 즉, 코어의 두께를 3mm로 늘이고, 영구자석에서 가까운 1mm는 그대로 둔 채, 나머지 2mm 부분에는 높이 0.5mm의 단을 각각 형성하여 고정자와 이동자 코어 사이의 공극이 0.5mm가 되도록 하였다. 이로써 동일한 코어 내에서 영구자석 자속과 코일 자속의 경로를 분리할 수 있고, 코일 자속 경로 상의 공극을 감소시켜 토크를 증가시킬 수 있다. 물론 단 부분의 두께를 늘여서 토크를 더 증가시키는 것도 가능하다. 한편, 단이 없는 1mm 부분에는 치를 제거하여 회전 각도에 따른 영구자석 자속밀도의 변화를 최소화하였다. Fig. 12에 도시한 자속의 흐름도(FEM 해석결과)로부터 상하 코어 내에서 두 가지 자속의 경로가 분리되고 있음을 확인할 수 있다.

3.4 수정된 코어의 토크 특성

Fig. 12와 같이 수정된 모터 코어에는 더 이상 바이

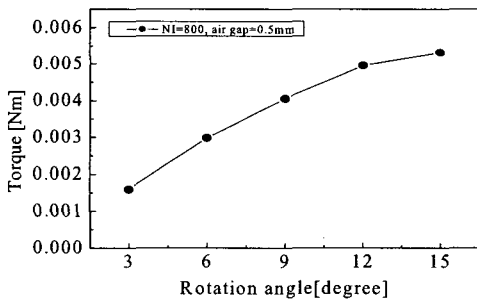


Fig. 13 Torque vs. rotation angle(after modification)

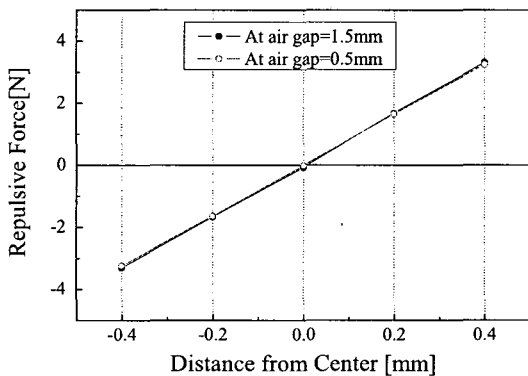


Fig. 14 Levitation force comparison

어스 자속이 흐르지 않으므로 Fig. 4에 나타난 회전원리도 역시 수정되어야 한다. 즉, 영구자석이 없는 일반 스텝 모터와 동일한 원리의 적용이 가능하다. 따라서 회전 시 토크의 섭동을 최소화하는 모터 제어가 용이하게 된다.

Fig. 13은 수정된 모터에 대한 상대 각(angle) 위치에 따른 토크의 변화이다. 최대 토크는 약 5.3Nmm로서 Fig. 10과 비교하여 약 3.3배 증가하였고, 토크의 변화 형태가 사인(sine) 곡선에 가깝게 되었음을 알 수 있다.

한편, 코어 형상 수정 전후의 반경방향 반발력의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 수정 후에도 바이어스 자속 경로에는 거의 변화가 없었으므로 반발력도 거의 동일하게 유지되고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 PMB와 스텝 모터를 결합시킨 소위 수동형 자기부상 모터를 새로이 제안하였고 FEM해석을 통하여 그 가능성을 확인하고 성능을 예측하였다. 구조적으로는 할바크 배열의 양단에 요크를 붙여 모터의 코어로서도 활용하는 것이 주요한 특징이고, 성능 해석 결과 8.8 N/mm의 강성 계수와 최대 5.3 Nmm의 토크 성능을 얻을 수 있었다. 제안된 모터가 목표로 하는 적용분야는 고정밀성과 고토크를 요구하지 않는, 작고 값싸고 안정적으로 자기부상을 구현할 필요가 있는 회전 시스템이다. 예를 들면 청정실에서 사용하는 저소음 팬(fan) 등에 적용이 가능하다.

상용화를 위해 필수적이지만 이 논문에서 고찰하지 않은 부분은 회전자의 축방향 지지요소이다. 가장 간단하게는 점접촉 방식이 있지만 비접촉 회전이라는 취지에 부합하려면 1-자유도 능동형 자기 베어링이나 회전 자계를 이용하는 수동형 자기 베어링 방법이 바람직하다. 여기서 주목할 점은 회전자의 축방향 상대 위치에 따라 반경방향 지지 강성이 변한다는 점인데, 이는 곧 고유진동수의 조절이 가능함을 의미하며, 감쇠가 작다는 단점을 가진 수동형 자기 부상 시스템에는 대단히 중요한 장점이 되리라 기대한다. 이와 관련된 연구를 비롯하여 향후 진행될 설계 개선 작업, 시작품 제작을 통한 실험적 규명 등은 후속 논문에서 소개하기로 한다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, S.-J. and Okada, Y., 2001, "An Axial-type Self-bearing Motor for Small Vertical Axial-flow Pump", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 223~232.
- (2) Kim, S.-J. and Okada, Y., 2001, "A Small Disk-type Hybrid Self-bearing Motor", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 8, pp. 338~348.
- (3) Kim, S.-J. and Okada, Y., 2002, "4-pole Lorentz Force Type Self-bearing Motor with a New Winding Configuration", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 73~81.
- (4) Han, W. S., Lee, C. W. and Okada, Y., 2002, "Design and Control of a Disk Type Integrated Motor-bearing System", IEEE/ ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 7, No. 1, pp. 15~22.
- (5) Jarvik, R., "Artificial Hearts with Permanent Magnet Bearings", U. S. Patent, No. 5507629.
- (6) Tonks, L., 1940, "Note on Earnshaw's Theorem", Electrical Engineering, Vol. 59, No. 3, pp. 118~119.
- (7) Yonnet, J.-P., 1978, "Passive Magnetic Bearings with Permanent Magnets", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 14, No. 5, pp. 803~805.
- (8) Yonnet, J.-P., 1991, "Stacked Structures of Passive Magnetic Bearings", J. Applied Physics, Vol. 70, No. 10, pp. 6633~6635.