

자기 차폐를 이용한 전방향 자기차륜

Omni-Directional Magnet Wheel using Magnetic Shield

심기본¹, 이상현², 정광석^{3,✉}

Ki Bon Shim¹, Sang Heon Lee² and Kwang Suk Jung^{3,✉}

1 충주대학교 기계공학과 대학원 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chungju National Univ.)

2 안동대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Andong National Univ.)

3 충주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungju National Univ.)

✉ Corresponding author: ksjung@cju.ac.kr, Tel: 043-841-5135

Manuscript received: 2009.1.20 / Accepted: 2009.5.28

When the magnet wheel rotates over a conducting plate, it generates the traction torque as well as the repulsive force on the conducting plate. Partially-cut traction torque results in the linear force into the tangential direction. To cut the traction torque, the concept of magnetic shield is introduced. The direction change of the linear force is realized varying the shielded area of magnetic field. That is, the tangential direction of non-shielded open area becomes the direction of the linear thrust force. Specially, a shape of permanent magnets composing the magnet wheel leads to various pattern of magnetic forces. So, to enlarge the resulting force density and compensate its servo property, a few simulations are performed under various conditions such as repeated pattern, pole number, radial width of permanent magnets, including shape of open area. The theoretical model of the magnet wheel is derived using air-gap field analysis of linear induction motor, compared with test result and the sensitivity analysis for its parameter change is performed using common tool; MAXWELL. Using two-axial wheel set-up, the tracking motion is tested for a copper plate with its normal motion constrained and its result is given. In conclusion, it is estimated that the magnet wheel using partial shield can be applied to a noncontact conveyance of the conducting plate.

Key Words: Electro-dynamic Force (동전기력), Magnetic Field Analysis (자기장 해석), Magnetic Shield (자기 차폐), Magnet Wheel (자기 차륜), Noncontact Conveyance (비접촉 반송)

1. 서론

원주방향으로 순차적으로 정렬된, 이웃하는 극성이 서로 다른 영구자석 배열을 전도판 위에서 회전시키면 전도판에는 반발력과 함께 영구자석의 회전 방향으로 강한 견인 토크가 발생한다. 이러한 자기력 발생 시스템을 일반적으로 마그네트 휠 (Magnet wheel) 또는 자기차륜이라 하는데, 유사한 동전기력 발생 원리이지만 유도 방식에 비해 힘

밀도가 월등히 높기 때문에 비교적 정밀한 응용을 필요로 하지 않는, 단순한 전도성 패널의 반송¹ 혹은 자기 부상 열차의 부상/추진 통합 구동기로의 응용 가능성²이 모색되어 왔다. 이에 저자들은 마그네트 휠을 이용하여 선형 추력을 얻는 방법의 일환으로 마그네트의 회전 자기장을 차폐하여 공극 자기장을 부분적으로 단락하는 방법을 제안한다. 이러한 방법은 기존 접근 방법과는 달리 반발 부상력과 추력 사이에 존재하는 강한 연성을 어느

정도 완화시킴과 동시에 차폐되지 않은 개방 영역을 변화시켜 추력의 방향을 제어할 수 있는, 즉 마그네트 휠에 전방향 추력 특성을 갖게 한다. 이러한 특성은 결국 마그네트 휠의 적용 분야를 크게 확대시킬 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 전방향 추력 조절 특성을 갖는 제안된 모델을 대상으로 이론적 모델 전개와 이에 추가하여 여러 제변수 변화에 따른 자기력 변화 특성에 대한 전산모의시험 결과를 소개하고 이를 검증하기 위해 구축된 진도판의 2 축 이송 시스템을 대상으로 수행된 시험 결과를 소개한다.

2. 외전류를 이용한 유도 방식 구동법

동전기력 효과를 이용하는 외전류 구동방식으로 가장 널리 이용되는 것이 유도 원리이다. 즉, 시변(time-variant) 자기장에 의해 전도판에 발생하는 와전류와 자기장간의 자기 결합을 이용하여 구동력을 발생시키는 방법이 유도 원리인데 이러한 시변 자기장이 AC 전원에 의해 생성되는지 아니면 기계적 거동을 하는 교번 영구자석에 의한 것인지에 따라 일반적인 유도기와 마그네트 휠이 대별된다. 본 장에서는 마그네트 휠을 이용하여 선형 추력을 얻는 기존 방법에 대한 소개와 함께 전방향 추력 특성을 갖는 유도기의 개념을 응용한, 제안된 자기차폐를 이용한 마그네트 휠의 추력 발생 방법에 대해 논의한다.

2.1 기존 자기 차륜의 고찰

전술한 바와 같이 전도판 위에서 교차 극성을 갖는 영구자석이 회전한다면 영구자석 프레임에는 Fig. 1 에서와 같이 반발 부상력 F_N 이 생성되고 이와 동시에 전도판에는 회전 방향으로 강한 견인 (traction) 토크 T 가 생성된다. 따라서 전도판이 고

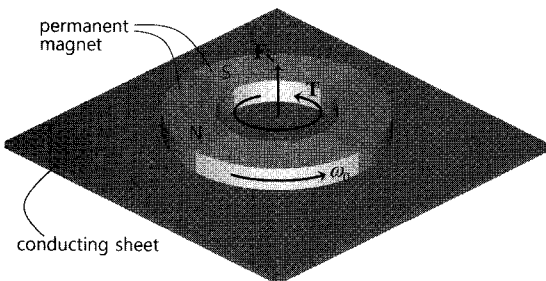


Fig. 1 Physical concept of general magnet wheel

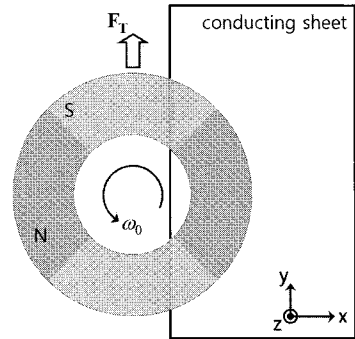


Fig. 2 Force generating principle of magnet wheel using partial overlap with conducting plate

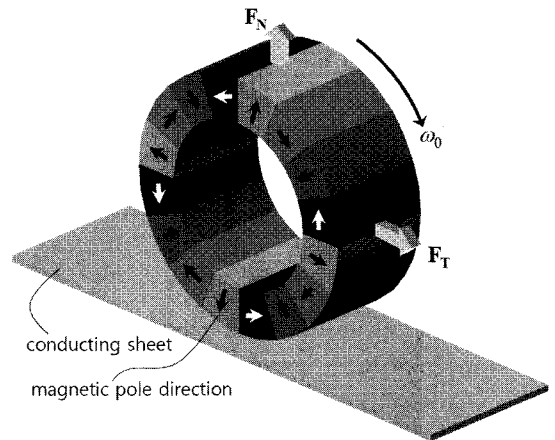


Fig. 3 Two-axial force by magnet wheel with Halbach permanent magnet array

정되어 있다면 이러한 견인 토크는 영구자석의 회전 부하로 작용할 뿐이다. 이러한 마그네트 휠의 추력 발생을 위해 휠 축을 기울여 벡터적으로 부상력의 추력 방향 성분을 이용하는 방법³과 Fig. 2 와 같이 휠을 전도판 모서리와 부분적으로 겹치게 하여 견인 토크를 항력(drag force) 형태의 추력으로 전환하는 방법⁴ 등이 제안되었다. 또한 Fig. 3 에서와 같이 휠을 수직으로 세워 원주방향으로 Halbach 배열을 갖는 영구자석 프레임을 회전시키면 휠에는 부상력 F_N 과 추력 F_T 가 동시에 생성된다.² 이러한 방법은 자기부상 열차의 통합 구동 원리로 제안되었는데 휠 부피 대비 접합 면적의 제한으로 축방향 마그네트 휠에 비해 힘밀도가 상대적으로 열악하다. 앞서 언급한 원리의 공통 특성은 휠 회전속도 변화에 따라 두 힘이 모두 연성되어 가변되기 때문에 부상력에의 영향없이 추력

만을 제어하는 혹은 그 역의 과정 역시 거의 불가능하다는 점이다. 이러한 추력의 제어성 결함은 기존 마그네트 휠의 응용에 큰 제약이 되어 왔으며 따라서 단순히 부상 목적으로만 그 이용이 제한되기도 하였다.⁵

2.2 부분 자기차폐를 이용한 전방향 자기차륜의 개념

마그네트 휠에서 영구자석 회전에 의해 생성되는 원주방향으로의 시변 자기장을 회전축을 기준으로 펼쳐놓으면 등가(equivalent) 선형 구동기가 되는데 원주방향 자기장의 단락 위치를 가변시킬 수 있다면 임의의 추력 방향을 갖게 할 수 있다. 이러한 개념의 서피스 유도기 구조를 Fig. 4 에 나타내었다.⁶ 원주방향으로 다상 코일이 감겨있고 a, a' 영역에 전원을 인가하면 전도체 위에서 코일 프레임은 y 방향으로 추진되며 b, b' 영역에 전원이 인가되면 x 방향으로 추진되는 등 전원 스위칭에 의해 평면상에서 임의의 추력 방향을 갖게 하는 것이 가능하다.

이를 응용하여 자기차폐 개념을 도입한 마그네트 휠의 기본 구조를 Fig. 5 에 나타내었다. 기본적으로 마그네트 휠의 회전자기장은 기 형성되어있고 따라서 Fig. 4 의 전원 스위칭 효과를 내기 위해서는 그림과 같은 자기차폐 방법이 효율적이다. Fig. 1 의 기존 마그네트 휠과 제한된 모델의 유일한 차이는 영구자석 프레임과 전도판 사이에 위치한 자기 차폐판인데, 차폐되지 않고 개방되어있는 영역의 접선 방향이 Fig. 6 에서와 같이 전도체에

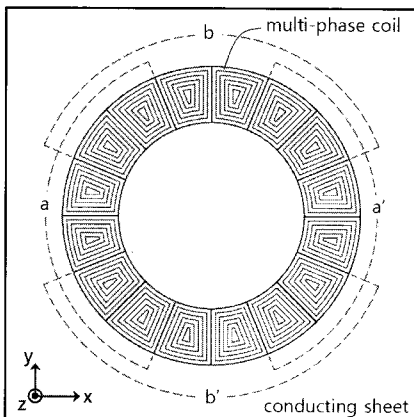


Fig. 4 Omni-directional driving methodology of circular wounded induction motor by power switching

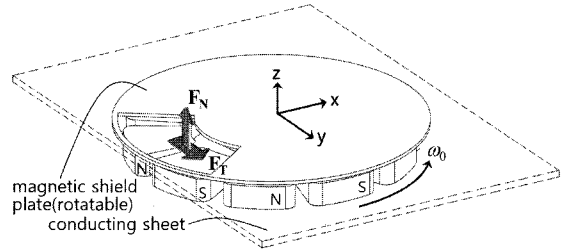


Fig. 5 Concept diagram describing a change of direction by magnetic shield plate in magnet wheel

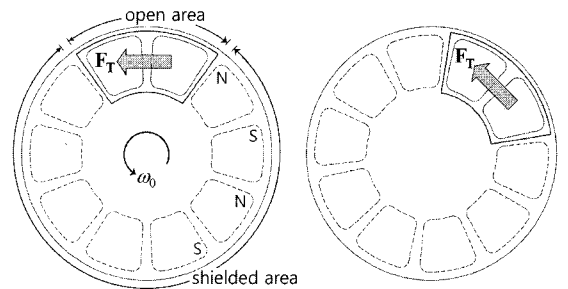


Fig. 6 Direction change of thrust force by variation of open area

인가되는 추력 F_T 의 방향이 된다. 이와 동시에 개방 영역의 절대 크기는 추력의 크기를 조절할 수 있게 하므로 추력과 동시에 생성되는 부상력 F_N 에 관계없이 독립적으로 제어 가능한 이축력 특성을 갖는다. 물론 개방 영역의 확대 혹은 축소는 부상력을 동시에 변화시키지만 후술하는 바와 같이 특정 회전 속도 이상에서는 추력이 일정 수준으로 제한되기 때문에 마그네트 휠의 회전 속도로 부상력을, 동시에 개방 영역의 크기로 추력의 크기를 그리고 개방 영역의 위치로 추력 방향을 조절하는 것이 가능하다.

3. 자기차륜의 이론적 모델

마그네트 휠은 전술한 바와 같이 시변 자장이 기계적 거동에 의해 생성된다는 점을 제외하면 유도기와 동일하므로 휠의 축방향으로 펼쳐놓은 Fig. 7 과 같은 등가 모델로 단순화시켜 해석할 수 있다. 본 장에서는 차폐판에 의한 자기 왜곡에 대한 고려없이 단순히 마그네트 휠에 의해 발생하는 자기력을 분산변수 해석 방법에 의해 정량화하는 과정을 논의한다.^{7,8}

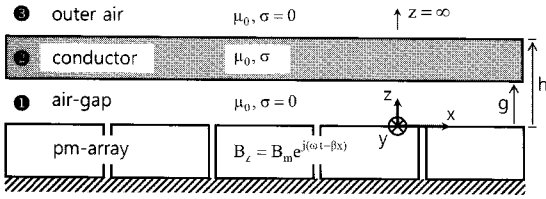


Fig. 7 Coordinate frame for linear equivalent model of magnet wheel

마그네트 휠과 유사한 편측(single-sided) 유도기의 일차측 코일에 의한 $z=0$ 에서의 자기장은 시공간상에서 조화함수의 형태를 갖도록

$$B_z = B_m e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (1)$$

로 표현하는 것이 가능하다. 그러나 영구자석 윗면에서의 자기장 패턴이 자석의 기하학적 형상과 유사하므로 기존 다상 코일에서와 달리 상대적으로 큰 공극(air-gap)이 아니라면 이러한 가정에 무리가 따르지만 고차 주기를 갖는 조화 함수를 이용해도 자기력 크기 편차는 몇 퍼센트에 불과하다. 위 식에서 β 는 파수를 의미하며 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 로 표현되는 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 를 도입하면 Fig. 7의 각 영역 ①, ②, ③에서 다음 라플라스(Laplace) 방정식이 성립한다.

$$\frac{d^2 A_y}{dz^2} - \alpha^2 A_y = 0 \quad (2)$$

위 식은 \mathbf{A} 의 성분이

$$A_y(x, z, t) = A(z) e^{j(\omega t - \beta x)} \hat{y} \quad (3)$$

와 같이 y 성분만 있다고 가정하여 도출된 결과이며 계수 α 는

$$\alpha^2 = \beta^2 (1 + j\sigma \frac{\mu_0 s U_s}{\beta}) \quad (4)$$

의 관계식을 갖는다. 여기에서 σ, μ_0, s, U_s 는 각각 도전율, 진공에서의 투자율, 슬립률, 슬립속도를 나타내므로 영역 ①, ③과 같이 도전율이 0인 영역에서는 α, β 는 같은 값이 된다. 위 라플라스 방정

식을 풀면 각 영역 i 에서 벡터 포텐셜과 자기장은 각각

$$A_{y_i} = (c_i e^{\alpha z} + d_i e^{-\alpha z}) e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_i = -\alpha (c_i e^{\alpha z} - d_i e^{-\alpha z}) e^{j(\omega t - \beta x)} \hat{x} - j\beta (c_i e^{\alpha z} + d_i e^{-\alpha z}) e^{j(\omega t - \beta x)} \hat{z} \quad (6)$$

로 표현이 가능한데, 위 식에 각 영역의 경계에서의 x 방향 자기장도(magnetic intensity; H)와 z 방향 자기장이 일치해야 한다는 경계조건을 대입하면 관심 영역인 전도체 ②에서의 x, z 축 방향 자기장의 폐형해를 얻을 수 있다.

$$B_{x2} = \frac{j\alpha(\beta \cosh[(h-z)\alpha] + \alpha \sinh[(h-z)\alpha]) B_m}{\Delta} \\ B_{z2} = \frac{\beta(\alpha \cosh[(h-z)\alpha] + \beta \sinh[(h-z)\alpha]) B_m}{\Delta} \quad (7) \\ \Delta = e^{\alpha\beta} \alpha\beta \cosh[w\alpha] + \sinh[w\alpha](\beta^2 \cosh[g\beta] + \alpha^2 \sinh[g\beta])$$

위 자기장 식을 로렌츠 법칙

$$\mathbf{F} = \sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} \times \mathbf{B}) \quad (8)$$

에 대입하면, 추력 F_x 와 부상력 F_z 는

$$F_x = \sigma(E_{y2} B_{z2} - U_x B_{z2} B_{z2}) \quad (9)$$

$$F_z = \sigma(-E_{y2} B_{x2} + U_x B_{z2} B_{x2}) \quad (10)$$

로 정리될 수 있고 여기에서 $E_{y2} = -j\omega A_{y2}$, $B_{z2} = -j\beta A_{y2}$ 의 관계를 이용하여 식 (9), (10)을 자기장 식으로 치환한 후 시평균(time-average) 값을 구해보면

$$\hat{F}_x = \frac{\sigma s U_s}{2} \text{Re}(B_{z2} B_{z2}^*) \\ \hat{F}_z = -\frac{\sigma s U_s}{2} \text{Re}(B_{z2} B_{x2}^*) \quad (11)$$

와 같다. 위 식의 실험적 검증과 논의는 다음 장에서 다루기로 한다.

4. 변수 변화에 따른 자기력의 정적 거동 특성

앞서 전개한 선형 등가 모델을 이용한 마그네트 휠의 이론 모델은 다양한 가정들로 인해 주요한 제변수 변화 등에 의한 휠의 자기적 거동을 상세한 부분까지 묘사하지는 못한다. 물론 실험과의 비교를 통해 알 수 있듯이 휠의 자기력 정량화를 위한 근사화된 선형 분석 과정이 될 수 있지만 추가된 자기차폐판에 의한 자기력 왜곡과 기하학적 형상 변화에 따른 민감도 등까지 담아내기에는 무리가 있다. 이에 본 장에서는 상용화된 자기 해석 툴인 MAXWELL v11.1 을 이용하여 얻어진, 대상 자기차폐된 마그네트 휠의 여러 변수 변화에 따른 거동 특성을 묘사하고 초기 설계 스펙을 결정한다. 모의 시험에 이용된 기준 모델의 전체 반경은 Fig. 8 좌상측 그림에서와 같이 R60 이며 휠 회전 속도는 3000RPM 이다. 또한 변수 p1, p2, p3 는 각각 24mm, 5mm, 120°로 초기화되어 있다.

우선, 마그네트 휠은 극성이 다른 영구자석이 순차적으로 정렬되어있는 형태를 가지므로 반복되는 영구자석의 형상이 자기력에 미치는 영향을 조사하였다. 반복 형상 대상 해석 모델은 Fig. 8 의 6 가지 패턴이며 그 결과를 Fig. 9(a), (b)에 나타내었는데 부상력의 경우 case 1, 4, 5 는 다른 경우에 비해 그 크기가 월등한 것을 알 수 있으며 case 2, 3 은 부상력의 크기가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 또한 case 2 는 추력외에 추력의 법선 방향으로 발생하는, 즉 Fig. 8 에서 점선으로 표시된 개방 영역의 반지름 방향으로의 힘이 상대적으로 크게 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 추력 발생 측면에서 보면 case 2 는 자기장이 반경 방향으로도 큰 변화를 일으킴을 알 수 있다. 추력의 경우 대상 모델 모두 큰 편차가 없음을 확인할 수 있다.

또한 가장 바람직한 반복 패턴을 찾기 위해 휠 회전에 따른 회전 부하 로드를 Fig. 9(b)를 통해 살펴보면, 전도체 회전에 따른 부하는 추력이 크다면 동시에 비례하여 커지지만 전체 부하는 자기차폐판의 개방 유무에 따른 정적 흡인력으로 인한 부분도 고려되어야 하는데 결과에서 보듯이 case 1, 4, 5 모두 비슷한 수준에 있는 것을 알 수 있다. 특히 절대 크기에 추가하여 부하의 편차 역시 구동기 입장에서 보면 중요한 요소인데 case 2 의 전체 토크 편차가 상대적으로 작았지만, 이는 추력, 부상력 자체의 크기가 작은 것에 연유한 것으로 판단된다. 이를 기초로 회전 부하가 크지만 추력,

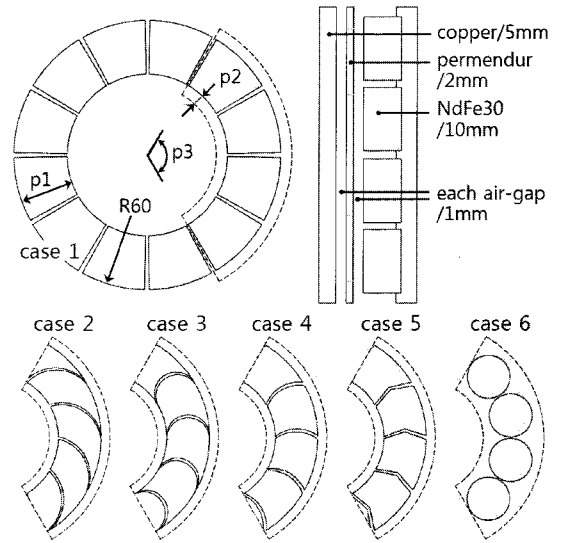


Fig. 8 Repeated patterns of permanent magnet composing magnet wheel

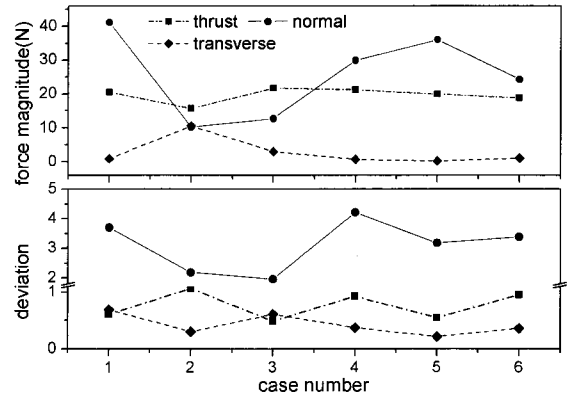


Fig. 9(a) Variation of magnetic forces according to repeated patterns of Fig. 8

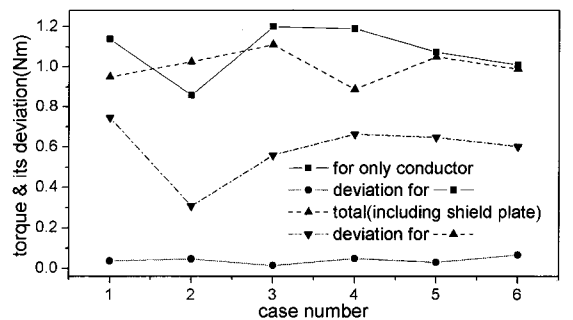


Fig. 9(b) Variation of torsional load for repeated patterns

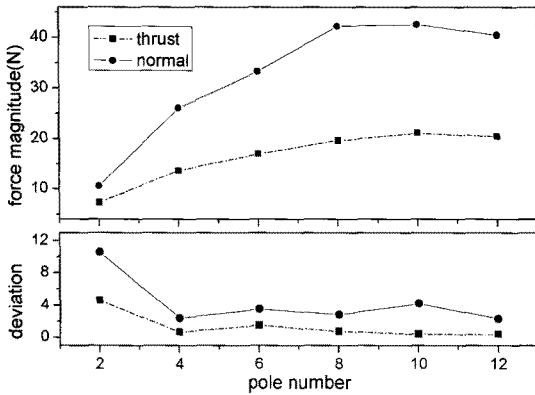


Fig. 10 Variation of two-axial forces for pole number

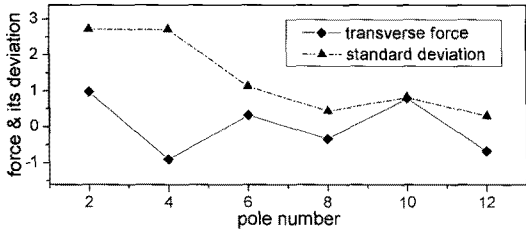


Fig. 11 Variation of transverse force normal to thrust force in Fig. 10

특히 부상력의 크기가 가장 크고 상대적으로 제작이 용이한 case 1 을 대상 모델의 반복 패턴으로 선택하였다.

반복되는 휠의 영구자석 수는 일반 구동기에서와 같이 생성되는 자기력의 균일함에 큰 영향을 미치는데 극수 선정을 위해 2 극에서 12 극을 대상으로 모의시험을 수행하였다. 예상대로 Fig. 10 에서와 같이 극 수 증가에 따라 추력, 부상력 모두 증가되는데 8 극 이상이 되면 큰 변화없이 수렴되어감을 알 수 있다. 절대 크기의 변화는 8 극 이상에서 거의 보이지 않지만 그 편차는 극수 증가에 따라 더욱 작아짐을 알 수 있고 그 이상의 극수에서는 부상력의 크기가 오히려 감소하기 시작한다. 이와 동시에 추력의 부수적 반경 방향 힘은 Fig. 11 에서와 같이 극 수가 많아짐에 따라 크기와 편차 모두 작아지는데 8 극과 12 극은 거의 유사함을 알 수 있다. 이를 통해 8 극 이상이 되면 자기력 특성 변화가 거의 정체되어가므로 본 연구에서는 더욱 작은 편차를 갖는 12 극으로 극 수를 선정하였다.

영구자석의 강도가 체적에 비례함을 고려하면 영구자석의 형상 중 반경 너비(Fig. 8 에서 p1)는

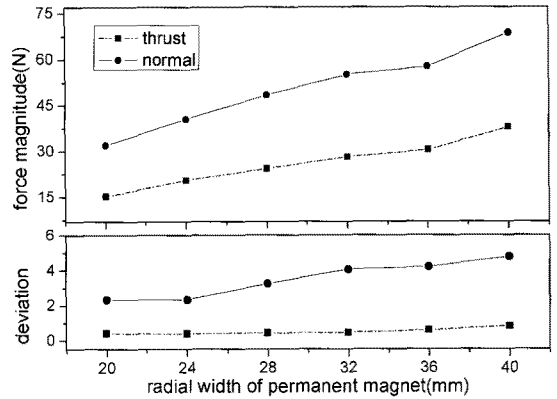


Fig. 12 Variation of magnetic force for radial width, p1, of permanent magnet

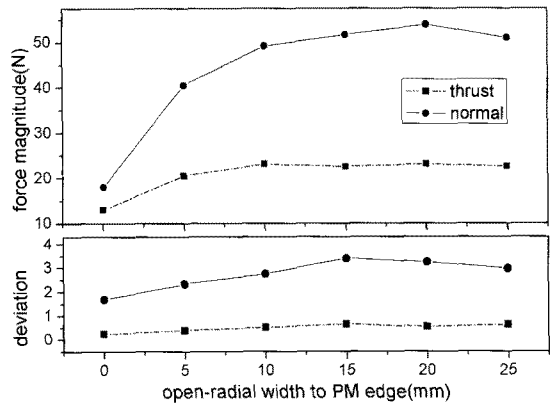


Fig. 13 Variation of magnetic force for open radial width, p2, to permanent magnet

크면 클수록 자기력에의 영향이 비례하여 증가됨을 예상할 수 있는데, 이는 Fig. 12 에서도 확인할 수 있다. 그러나 휠 회전에 따른 지지 축수의 기계적 강성을 고려해야 하므로 일정한 정도의 공간 확보는 필수적이므로 28mm 로 결정하였다.

자기차폐판 개방 영역의 기하학적 형상에 따른 자기력 변화 해석의 일환으로 개방 에지까지의 반경 방향 거리(p2)를 대상으로 해석을 수행하였다. 예상대로 거리가 멀어질수록 개방 영역이 확대되는 것이므로 자기력이 계속 확대되지만 어떤 임계치를 넘어서는 추력의 경우 변화가 없지만 부상력은 오히려 감소해가는 경향을 갖는다. 수치상으로는 약 20mm 일 때 가장 이상적인 경향을 갖는 것으로 나타났는데, 이처럼 반경 방향으로의 과도한 개방은 차폐판을 회전시키기 위한 구동 요소를 구비해야 하는 점에서는 일정 부분 제약이 있을 수

밖에 없다. 또한 자기 차폐된 부분과 영구자석간의 강한 흡인력으로 인해 이처럼 과도한 개방 영역으로 인한 불균형은 구조적인 측면에서도 바람직하지 못하다. 따라서 본 모델의 경우 10mm 로 설정하였다.

5. 이축 자기력의 독립 제어 특성

전 장에서의 시뮬레이션 결과에 기초하여 결정된 자기차폐된 마그네트 휠을 이용하여 전도판을 일정 높이로 부상시켜 안내할 수 있는 2 축 시스템은 Fig. 14 와 같다. 전도판은 우측 상단 그림에서와 같이 전도체 우측 하단에 선형 부쉬와 회전 조인트를 결합시켜 x 방향으로 안내되면서 동시에 가이드 축을 기준으로 회전할 수 있도록 하였다. 본 장에서는 대상 시스템을 이용하여 수행된 이론 모델과의 자기력 비교 시험에 대한 결과와 이축력의 독립 제어 시험 결과를 소개한다.

5.1 이축 자기력의 비연성화

구축된 마그네트 휠의 영구자석 프레임 회전 속도에 따른 추력과 부상력의 시험 결과를 FEM 해석 및 이론 해석 결과와 비교하여 Fig. 15 에 나타내었다. 결과 모두 정성적 측면에서 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있는데 이론 결과는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 자기차폐판의 부분적으로 개방된 영역의 입출구 효과(entry, exit effect)에 기인한다. 간접적으로 약 120 도 개방된 차폐판을 갖는 휠의 전도체 부분 회전 부하는 차폐판이 없을 경우 대비 약 25-6% 정도이다. 산술적으로는 120 도 개방이므로 33% 정도가 맞지만 위 입출구 효과로 인해 8% 추가 감소가 발생된다. 따라서 Fig. 15 의 이론 해석에서 약 0.75(25/33)배를 취하면 실험 결과에 근접해 가는 것을 확인할 수 있다.

비교 결과에서 휠의 회전 속도가 1200 RPM 이상이 되면 추력의 경우 더 이상 증가하지 않고 수렴하거나 그 값이 약간씩 감소해 감을 알 수 있다. 이에 반해 부상력은 시험 영역의 회전 속도 전 구간에서 계속 증가해 가는 것을 확인할 수 있다. 따라서 일정 RPM 이상에서는 추력에의 영향없이 회전 속도를 증가시켜 부상력을 높이는 것이 가능함을 알 수 있다.

개방 영역의 기하학적 형상 변화 즉, 부채꼴 모양의 영역 p3 를 증가시켜가며 해석한 힘의 변

화를 Fig. 16 에 나타내었는데 예상대로 선형화된 형태를 보이며 증가하는 것을 알 수 있다. 물론 180 도 이상이 되면 추력은 오히려 감소한다. 따라서 개방각을 확대하고 동시에 휠 회전 속도를 감소시키면 부상력을 고정시킨 상태에서 추력만을 증가시키는 것이 가능하다.

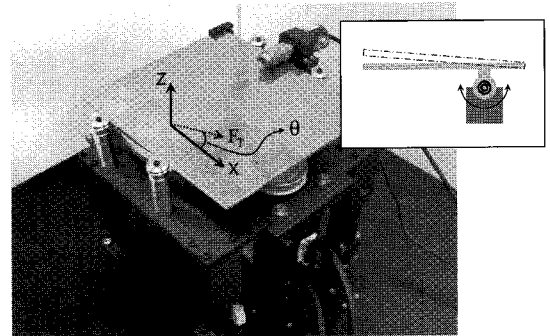


Fig. 14 Conveyance system of copper plate using magnet wheel

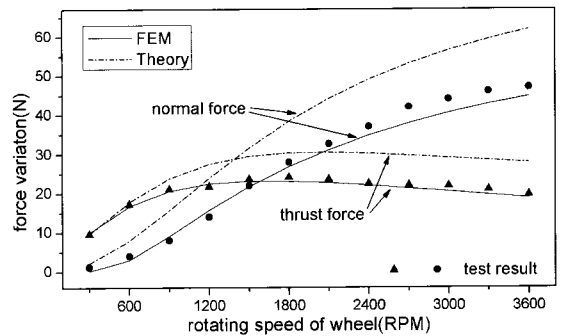


Fig. 15 Comparison result of theoretical model, FEM, and test for magnetic force

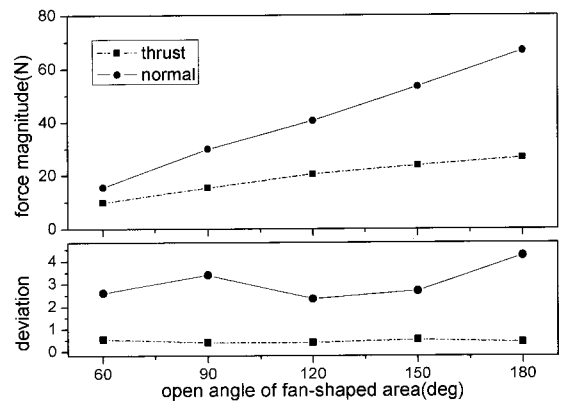


Fig. 16 Force variation for open angle, p3, of shield plate

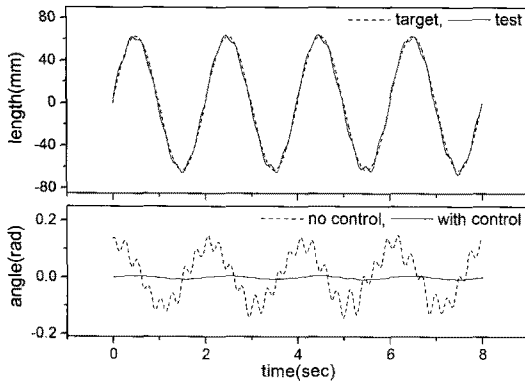


Fig. 17 Two axial test of conductive sheet; no control vs. with control of repulsive force

5.2 전도성 평판의 이송 시험

전술한 이축력 비연성 개념을 이용하여 구리판의 반송 시험을 수행하였다. 개방 위치의 변경에 의해 추력은 음, 양의 값을 모두 취할 수 있기 때문에 개방 영역의 크기를 조절하는 대신 개방 영역이 고정되어있는 차폐판(120°)을 회전시켜 추력 변화를 모색하였다. Fig. 14 에서 개방 영역의 중심 축 위치각 θ 에 따라 추력 F_T 는 벡터적으로 성분이 나뉘어지고 따라서 실제 추력의 크기는 주기적으로 변화한다. 즉, θ 가 0 도 일 때 추력은 최대가 되고 90 도 일 때 0, 그리고 -90 도 일 때 음의 방향으로 최대가 된다.

개방각 위치를 조절하여 조화 함수 패턴에 대한 추종 성능 시험을 수행한 결과를 Fig. 17 에 나타내었다. 구동 범위는 x 축 방향으로 $\pm 60\text{mm}$ 이며, 이 때 반발 부상력의 크기는 일정하고(개방영역 크기 일정) 공극 방향으로 양의 강성을 갖기 때문에 전도판은 일정 범위 내에서 안정되게 부상되며 단지 하단 그림의 점선으로 표시된 것처럼 가이드 축을 기준으로 모멘트 암의 크기 변화에 따른 회전 운동만을 한다. 그림에서 회전 각은 추진 제어 량에 따라 개방 각 위치가 연속적으로 변화하므로 이에 연동되며 전도판이 +60mm 위치를 지날 때 그 크기가 음의 값으로 스위칭된다.

추진 운동에 더해 휠 회전 속도를 변화시켜 부상력을 동시에 제어한 결과를 Fig. 17 의 하단 그림에 실선으로 나타내었는데 와전류력의 상승 시간 제약으로 인해 약간의 시간 지연 현상은 불가피하다. 그러나 전술한 바와 같이 휠 속도의 제한된 변화는 추력에의 영향이 거의 없으므로 추진 운동에 대한 연성없이 부상력만을 임의로 조절하는 것

이 기술적으로도 가능한 것을 알 수 있다.

6. 결론

마그네트 휠은 시변 자기장에 의한 와전류 힘을 이용한다는 점에서 유도기와 유사하지만 영구 자석의 강한 자기장을 이용한다는 점에서는 힘 밀도가 상대적으로 월등하다. 본 논문에서는 이러한 마그네트 휠에 자기차폐 개념을 도입하여 회전 자기장을 중간에서 단락시키고 이를 이용하여 선형 추력을 얻는 동시에 차폐되지 않고 개방된 영역을 가변시켜 이러한 추력의 방향을 조절할 수 있는 전방향 마그네트 휠을 소개하였다.

마그네트 휠을 구성하는 요소의 제변수 변화에 따른 민감도 해석을 통해 영구자석의 반복 패턴, 극 수, 너비 등이 자기력에 미치는 영향을 분석하여 휠의 설계 방향을 제시하였고 또한 차폐판 개방 영역의 기하학적 형상 등의 구동 조건에 따른 해석을 통해 특정 회전 속도 이상에서 추력이 일정해지는 특성과 함께 개방 영역의 크기를 가변시켜 부상력과 추력의 비연성 제어 가능성을 보였다. 이를 기반으로 구리판의 반송 시스템을 설계하여 차폐판의 위치 조절만으로도 반송이 효율적으로 구현될 수 있음을 보였다. 이러한 휠의 서보 능력 향상은 전도체의 비접촉 반송 시스템 등에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008 년 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-314-D00018).

참고문헌

1. Fujii, N., Chida, M. and Ogawa, K., "Three dimensional force of magnet wheel with revolving permanent magnets," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 5, pp. 4221-4223, 1997.
2. Bird, J. and Lipo, T. A., "An electrodynamic wheel : and integrated propulsion and levitation machine," IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Vol. 3, pp. 1410-1416, 2003.
3. Fujii, N., Ogawa, K. and Matsumoto, T., "Revolving magnets wheels with permanent magnets," Electrical

- Engineering in Japan, Vol. 116, No. 1, pp. 106-118, 1996.
4. Fujii, N., Nonaka, S. and Hayashi, G., "Design of magnet wheel integrated own drive," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 4013-4015, 1999.
 5. Park, J. H., Choi, J. H., Kim, D. H. and Baek, Y. S., "Parametric design of the levitation mechanism for maglev planar transportation vehicle," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No. 4, pp. 3069-3071, 2004.
 6. Fujii, N. and Fujitake, M., "Two-dimensional drive characteristics by circular-shaped motor," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, pp. 803-809, 1999.
 7. Han, Y. H., Yoon, H. J., Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Compensation algorithm of couple between levitation and thrust force for transverse flux linear induction motor with imbedded bearing function," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 480-483, 2004.
 8. Jung, K. S., "Couple compensation of magnetic forces of transverse flux linear induction motor," Mechatronics, Vol. 15, No. 8, pp. 919-931, 2005.