

자기차륜을 활용한 이송 장치의 공간 안정성과 제어

이상현^a, 정광석^{b*}

Spatial Stability and Control of Transport Devices using Magnetic Wheels

Sang Heon Lee^a, Kwang Suk Jung^{b*}^a Department of Mechanical Robotics Engineering, Andong National University^b Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	March	2022
Revised	4	April	2022
Accepted	5	April	2022

Keywords:

Electromagnetic analysis
Magnetic levitation
Magnetic wheel
Non-contact transfer
Self stability

ABSTRACT

When the magnetic wheel facing a conductive plate is rotated at high speed, three-axis magnetic forces are generated. Among them, the levitation and lateral forces have self-stability and do not require a separate controller to be stable. In this study, we introduce a device that moves in space by controlling only the transfer position in a transport device comprising four magnetic wheels. The relationship between the design value of individual magnetic wheels and the range of spatial stability is explained using finite element analysis. In particular, the change in the levitation force according to the overlapping distance from the edge of the conductive plate to the center of the magnetic wheel is described using the induced current density. Because the only control variable in the developed system is the wheel speed, we present a simple logic and test results to transfer the system only by controlling the speed.

1. 서론

원주방향으로 자화 방향이 서로 반대인 영구자석(이하 PM)을 배열형태로 늘어놓은 자기차륜(magnetic wheel)은 대항하는 전도판과의 상대적인 자세에 따라 래디알 혹은 액시얼 자기차륜이라 불린다^[1,2]. 자기차륜을 전도판 위에서 일부분만을 중첩시킨 상태에서 고속으로 회전시키면 전도판에 동전기 전류(electrodynamic current)가 유기되는데 이러한 유도 전류로 인해 자기차륜에는 3축 자기력이 발생한다^[3]. 특히 유도 전류의 특성으로 인해 래디알 혹은 액시얼 차륜 모두 부상 방향으로 자기 안정성을 갖는 부상력이 발생하며 그 외 자기력을 추력으로 활용하여 공간상에서 기계적인 접촉없이 이동할 수 있는 자기부상 이송 장치의 여러 구조가 제안

되었다^[4,5,6]. 흥미로운 점은 부상 레일의 형상에 따라 부상 방향의 횡방향으로의 안정성까지 담보할 수 있는 구조의 토폴로지 역시 제안되어 실험적으로 검증되었다^[7].

본 연구에서는 직립 전도성 레일과 횡방향으로 접하는 액시얼 자기차륜을 활용하여 공간상에 부상되어 이동하는 자기부상 이송 장치의 토폴로지를 제안하고 실험적으로 검증한다. 이때 구동력으로서 자기차륜에 발생하는 3축 자기력을 이용하는데 이러한 토폴로지는 전통적인 이중 레일 위에 놓인 래디알 구조가 갖는 낮은 자기력 밀도를 보완할 수 있는 형태이며^[7] 기존 구조에서와 마찬가지로 부상방향, 횡방향으로의 자기 안정성(self stability)이 담보되는 구조이다. 따라서 동 시스템은 추진 방향으로의 제어만으로 안정되게 이송될 수 있다. 특히 제안된 토폴로지는 기존 방식 대비

* Corresponding author. Tel.: +82-43-841-5135

E-mail address: ksjung@ut.ac.kr (Kwang Suk Jung).

전도성 레일의 측면과 대항하는 액시얼 방식이고 따라서 레일 위에서 작동하는 차륜과 달리 급격한 방향전환이나 횡방향 안정성이 확보되는 형태로서 전술한 바와 같은 향상된 자기력 밀도 등으로 실제 응용 시 강건한 동적 특성이 담보되는 구조적 장점을 갖고 있다. 본 논문에서는 해당 시스템의 공간 안정성과 자기 차륜의 설계 변수간의 관계를 유한요소 해석을 통해 기술하였으며 부상 높이를 조절을 통해 간접적으로 추진 방향으로의 이송 위치를 제어할 수 있는 간단한 로직을 소개한다. 특히 자기차륜 구동원의 유일한 능동 제어 변수가 차륜의 속도이므로 차륜 속도 제어를 통해 시소 형태로 이동하는 시스템의 실제 시험 결과를 제시한다.

2. 시스템의 구동원리 및 자기력 특성

고속으로 회전하는 네 개의 자기차륜을 이용하여 부상하고 이송되는 시스템의 전체 사진을 Fig. 1에 그리고 각 차륜에 발생하는 3축 자기력 선도를 Fig. 2에 각각 나타내었다. 수직으로 놓인 전도성 구리 평판과 일정한 공극을 두고 회전하는 네 개의 자기차륜은 액시얼 타입에 해당하며 자기차륜의 일부 영역과 구리판이 중첩되어있는 형태를 취하고 있다. 각각의 차륜이 회전하면 고정되어있는 레일에 대항하여 각 차륜에는 3축의 자기력이 발생하는데 3축 자기력중 네 개의 F_y 로 시스템이 부상하고 동시에 F_x 에 의해 이송되는데 횡방향 안정성은 레일에 대항하여 반발하는 방향의 힘 F_z 에 의해 유지된다. 이처럼 일부만 중첩된 대항 구조로 인해 후술하는 바와 같이 차륜의 y 축 방향 자기 안정성이 보장된다. 본 장에서는 자기차륜이 갖는 3축 자기력 특성을 비롯하여 자기차륜의 설계 변수와 안정 영역간의 상관관계를 논의한다.

2.1 자기차륜에 의한 3축 자기력

전도판과 대항하는 액시얼 자기차륜을 구성하는 PM의 자화 방향

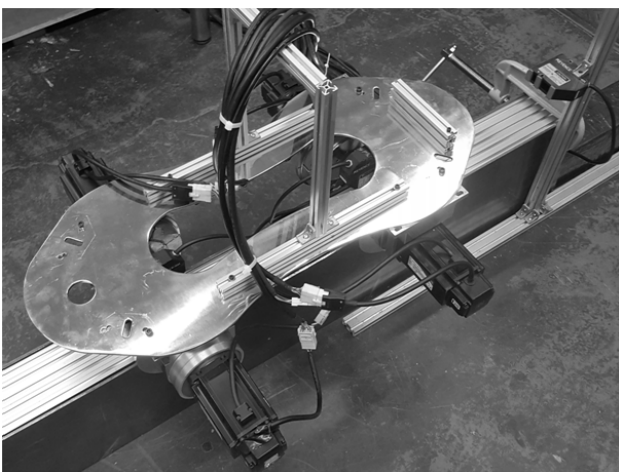


Fig. 1 Photograph of the non-contact conveying system using four magnetic wheels

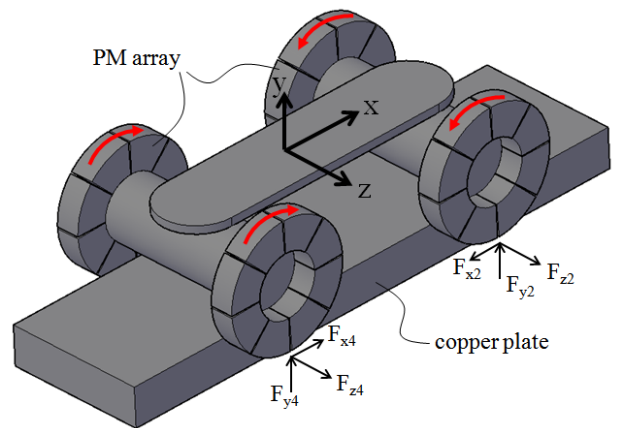


Fig. 2 Overall force diagram of the guided levitation system

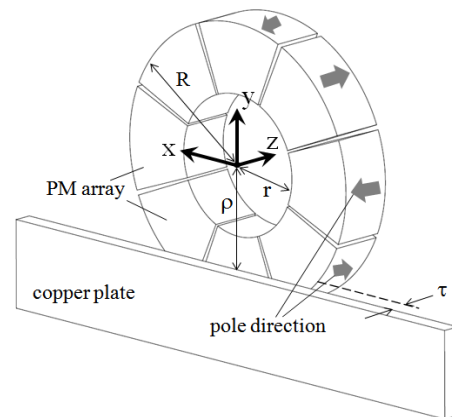


Fig. 3 Coordinate frame of the magnetic wheel composed of permanent magnets magnetized axially

과 공극 변수 등을 Fig. 3에 나타내었다. PM은 이웃하는 극이 서로 교번되어 반복되고 있으며 이러한 극수(number of pole)는 자기력의 크기나 형태에도 큰 영향을 미친다. 또한 그림에서와 같이 자기차륜의 중심에서 전도판 모서리까지의 거리 ρ 역시 안정 영역의 크기에 영향을 주는 인자이다. 이러한 자기차륜이 회전할 때 자기차륜에 발생하는 자기력 특성을 평가하기 위해 상용 툴인 Maxwell v18.0을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 이용된 차륜의 제원은 Table 1에서와 같이 4극쌍, NdFeB 35계열의 PM을 선택했으며 도넛모양의 전체 외관의 경우 내경, 외경, 두께는 각각 40 mm, 80 mm, 25 mm이다. 이러한 수치는 실제 제작된 시스템 수치와도 일치하는데 초기 해석 조건으로 공극 τ 는 5 mm, 차륜의 회전 속도는 3000 rpm으로 설정하였다. 우선, Fig. 3에서 자기차륜을 $-z$ 축 방향으로 회전시킬 때 ρ 를 변화시켜가며 자기차륜에 작용하는 3축 자기력을 시뮬레이션하면 Fig. 4와 같다. 그림에서 ρ 가 0일 때는 자기차륜의 중심이 전도판 모서리에 걸쳐 있을 때이며 80 mm는 차륜이 온전히 드러날 때에 해당된다. 그림 안에 점선으로 표시된 영역은 각각 y 방향과 z 방향으로 음의 강성(negative

Table 1 Specification of the magnet wheel used in finite element analysis

Part	Specification
PM	Outer, inner radius: 80, 40 mm
	Height : 25 mm Pole pairs number : 4 Material : NdFeB35
Track guide	Thickness : 5 mm Material : copper
Operating condition	Wheel rotating speed : 3000 rpm Air gap length : 5 mm

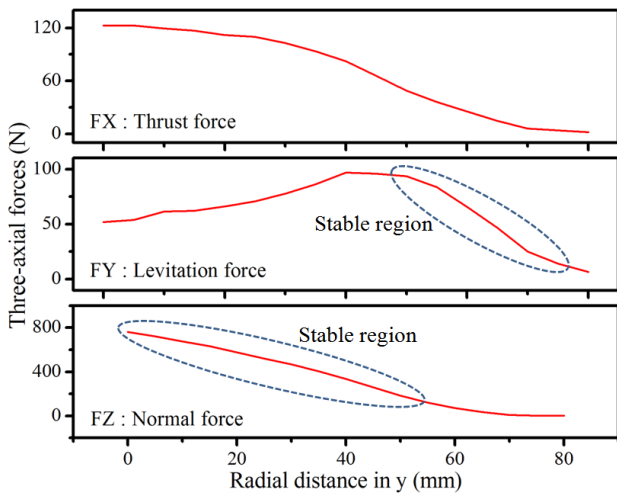


Fig. 4 Force variation according to distance from center of the magnetic wheel to edge of conductive plate

stiffness)을 갖는 즉, 자기 안정성이 담보되는 영역을 나타낸다. 이러한 힘은 y축으로의 부상력과 공극 방향인 z축으로의 수직력이다. y축 방향 부상력의 경우 대략 40 mm 근방에서 극점을 갖는데 이를 경계로 좌측과 우측에서 기울기가 바뀌는 것을 알 수 있다. 이러한 특징을 이해하기 위해 ρ 가 0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm일 때 각 경우에 대해 전도강판에 유기되는 x 방향 동전기 전류 밀도를 Fig. 5에 나타내었다. 이러한 유기 전류 E는 회전하는 PM의 공극 자기장 B와 작용하여 PM에 다음과 같은 자기력을 발생시킨다.

$$F = (E_x i + E_y j) \times (B_x i + B_y j + B_z k) \quad (1)$$

그림에서 y축 방향 자기력에 한정시켜 위 식을 고려하면 PM에 의한 자기장은 B_z 가 지배적이므로 y축력은 $E_x B_z$ 가 주된 요소이다. 이에 근거해서 Fig. 5에 나타낸 전류 벡터의 x방향 성분을 통해 힘의 크기를 예측해 볼 수 있다^[8,9]. 그림에서는 예상대로 ρ 가 커질수록 즉, 중첩 영역이 작아질수록 전류 밀도가 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전류 밀도외에 벡터 방향을 고려하면 ρ 가 0일 때는 위아래 영역에서 크게 발생된 전류 성분에 따른 자기력

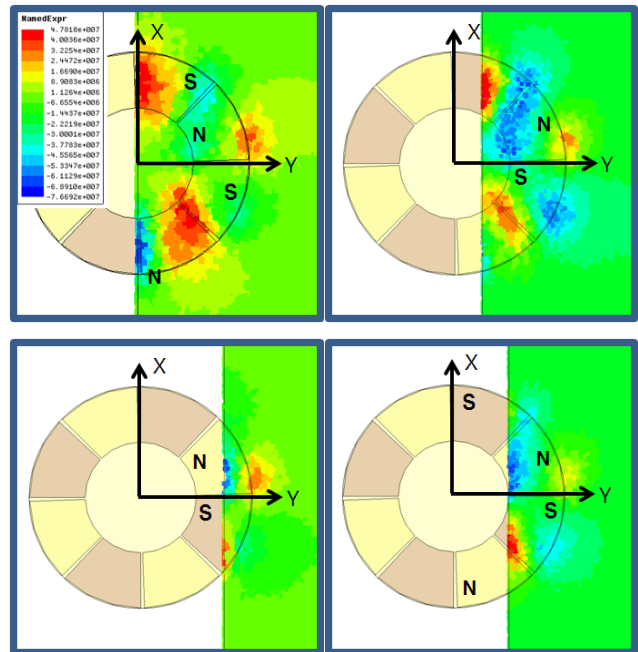


Fig. 5 Vector diagram of current density J induced in the conductive plate ($\rho=0$ mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm clockwise from the top left)

이 서로 상쇄되는 것을 알 수 있으며 이로 인해 y축력이 상대적으로 작고 이러한 상반 구조가 조금씩 보완되다가 ρ 가 40 mm가 되면 전류 밀도 자체는 크지 않으나 발생한 전류가 모두 동일한 방향으로의 자기력 생성에 기여하므로 해당 위치에서 자기력이 가장 크게 되는 것이다. ρ 가 40 mm보다 더욱 커지면 힘의 발생 방향은 유사하나 전류 밀도 자체가 더 빠른 속도로 감소하므로 힘의 크기도 마찬가지로 줄어들게 된다. 따라서 이러한 해석 결과를 통해 Fig. 4에서 y축 방향 부상력이 극점을 갖는 현상을 이해할 수 있다.

2.2 자기차륜의 설계 변수에 따른 자기 안정성

전절에서 자기차륜의 중심에서 전도판 모서리까지의 길이 ρ 가 자기력의 기울기 방향을 전환시키는 경계값이 되는 것을 확인하였다. 이러한 극점에 해당하는 ρ 의 길이 40 mm는 Table 1에서 알 수 있듯이 자기차륜의 내경에 해당한다. 따라서 자기차륜의 내경을 변화시키면 극점의 위치가 이에 연동하여 변할 것이라는 것을 예측할 수 있다. PM의 내경 r을 변화시켜가며 ρ 의 변화에 따른 y축 부상력을 구하면 Fig. 6을 얻을 수 있다. 그림에서 r이 작아질수록 음의 강성을 갖는 자기안정 영역이 커지는 것을 확인할 수 있는데 단순히 극점의 위치만 좌측으로 옮기는 것이 아니라 힘의 절대 크기도 동시에 증가하는 것을 알 수 있다. 결과에서 r이 0 mm라 하는 것은 도넛 모양을 갖는 PM의 내경이 없는 즉, 속이 차있는 형태이므로 절대적으로 전도판과 상호작용하는 영역이 커지고 이로 인해 자기력의 절대 크기가 커지는 것으로 판단된다.

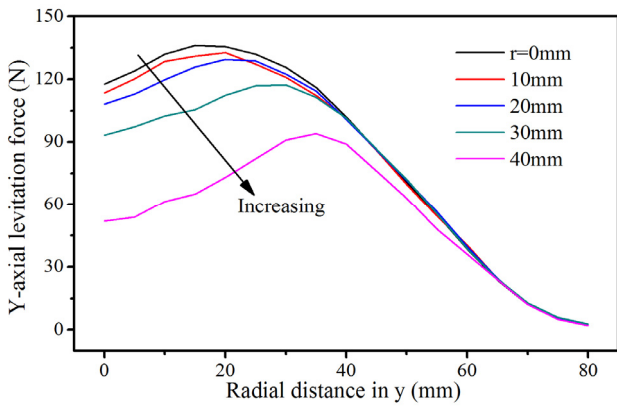


Fig. 6 Variation of y-axis levitation force for inner radius of the magnetic wheel

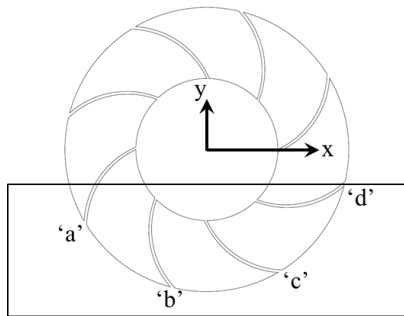


Fig. 7 Magnetic wheel with another repetitive PM pattern

설계 제원인 r 이 40 mm일 때와 비교해 r 이 0인 경우 대략 1.5배 정도 힘이 커짐을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 7에 단위 PM의 형상이 부채꼴이 아닌 형태를 갖는 자기차륜을 제시하였다. 기준이 되는 PM 형상은 이외에도 다양한 사례를 고려할 수 있는데 논의의 초점은 자기 안정성에 미치는 형상의 영향이다. 이러한 형상에 따른 자기력을 구해 기존 부채꼴 형상과 비교해 보면 Fig. 8과 같다. 그림에서 부채꼴 형상은 Type 'A'로 그리고 Fig. 7의 형상은 Type 'B'로 묘사하였다. 전도판 모서리까지의 거리 ρ 가 40 mm 이상인 구간에서 두 형상간의 차이는 거의 없으나 40 mm보다 작은 구간에서 y방향 부상력은 Type 'B'의 경우 크기가 감소하지 않고 거의 일정한 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있으며 추력이나 공극력의 경우에는 'A'보다 감소하는 경향을 알 수 있다. 특히 ρ 가 작아짐에 따라 발생하는 부상력의 차이가 추력과 공극력에서 보상되는 것으로 판단된다. 부상력이 커지는 이유는 Fig. 7에서 이웃하는 PM간의 경계선을 통해 유추할 수 있는데 자기차륜에서 자기력의 발생 메커니즘은 앞선 PM에 의해 발생한 유도전류와 이를 뒤따르는 PM간의 상호작용에 기인하므로 결국 PM의 스위칭이 중요하고 PM간 경계선이 부채꼴에서보다 길게 늘어난 형태의 경우 이처럼 y축 부상력이 커지는 것으로 판단된다. 이러한 특성을 보면 기준이 되는 반복

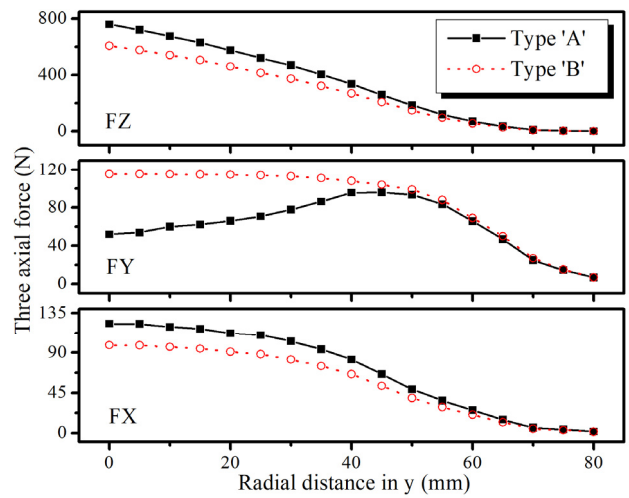


Fig. 8 Comparison of three-axial forces for PM patterns

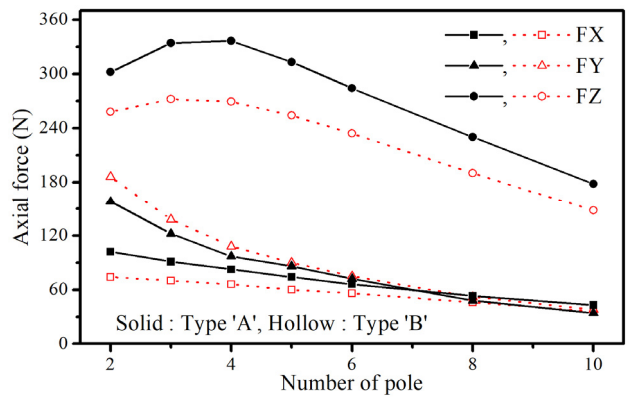


Fig. 9 Influence of pole number in magnetic wheel

형상에 따라 부상력 대신 추력을 극대화한 조합도 가능할 것으로 보인다.

추가로 자기차륜의 극수에 따른 영향을 분석하여 Fig. 9에 나타내었다. 비교 모델로는 Type 'A'와 Type 'B'를 선택하였다. 두 모델 모두 극수가 작아짐에 따라 x, y축 자기력은 증가하지만 대신 z축 자기력은 4극 부근에서 최대가 된 후에 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 앞서 Fig. 7에서와 마찬가지로 y축 부상력은 Type 'B'가 좀 더 크지만 x, z축력은 그 반대인 것을 확인할 수 있다. 4극 이상에서 극수가 증가함에 따라 3축 자기력 모두 감소하는 것은 단위 PM의 에너지적이 크기 감소의 자승에 비례해서 감소하기 때문이다. 극수에 따른 영향은 도넛 모양 PM의 내경에 따라 조금씩 달라지는 경향을 갖는데 Fig. 9에 제시한 결과가 극수의 최적화를 의미하는 것은 아니다. Fig. 9에 제시한 해석 결과는 모두 ρ 가 40 mm일 때의 결과이며 자기차륜의 작동조건 역시 Table 1에 묘사된 것과 동일하다. 어쨌든 4극 이상의 극수 조합에서는 3축 공칭 자기력에서 모두 불리한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 본 시스템에서와 같이 y축 동전기력을 부상력으로 설정하고 동축

방향으로의 안정 영역을 극대화하기 위해서 PM의 기본 형태는 Type 'B'가 유리하고 또한 극수 역시 2극일 때가 가장 유리한 것을 알 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 본 연구는 제한한 토폴러지의 검증에 주안점을 두고 있으며 시스템 설계 제한은 Table 1에 제안된 것과 같이 구성하였다.

3. 부상 시스템의 다축력 연동 제어

앞서 언급한 것처럼 고속으로 회전하는 자기차륜의 제어 인자는 차륜의 속도뿐이다^[10]. 이러한 속도 변화에 따른 자기차륜에 발생하는 3축 자기력의 변화선도를 Fig. 10에 나타내었다. 추력으로 활용되는 x축 힘은 대략 1000 rpm 부근에서 극값을 갖은 후에 서서히 감소되는 것을 알 수 있으며 부상력으로 활용되는 y축 힘은 1500 rpm까지 증가하다가 서서히 수렴해 가는 형태를 갖는다. 이와 대조적으로 안내력을 활용되는 z축 힘은 그래프 상에서는 3000 rpm까지 계속 증가하지만 이 이후 영역에서는 y축 힘과 마찬가지로 유도 전류의 포화로 점차 수렴해 간다. 이러한 힘 중에서 z축력은 안내력이고 외란에 대한 강성 역할을 하므로 3000 rpm까지 증가시켜도 무방하지만 추력은 일정 속도 이상에서는 오히려 감소하기 때문에 자기차륜의 작동 속도 범위는 1500 rpm으로 제한하여 시험을 수행하였다. 또한 그림상에 제작된 단동 차륜에 의해 발생하는 축력을 측정하여 표시하였는데 해석과 시험 결과가 유사

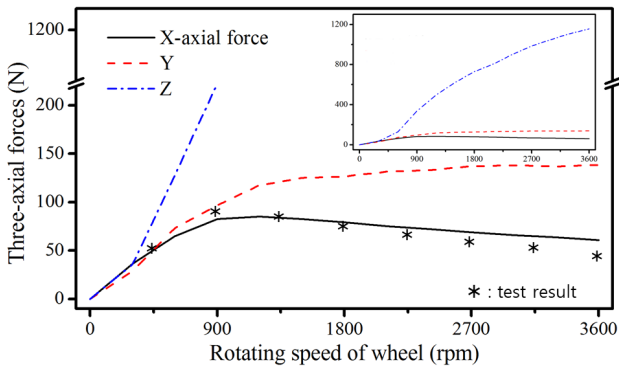


Fig. 10 Variation of three-axial forces for rotating speed of the magnetic wheel

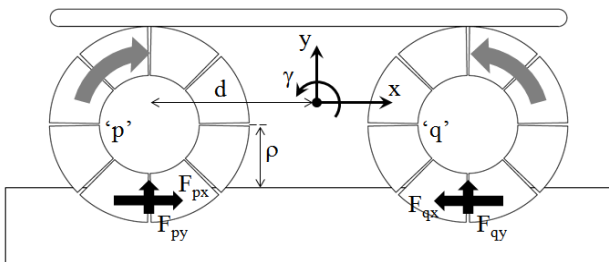


Fig. 11 Base coordinate and notation of the conveying system

함을 확인할 수 있다.

이송 시스템의 기준 좌표계를 Fig. 11에 나타내었다. 제이기 없이도 만족되는 z축 응답과 달리 시스템의 공간상에서의 위치 x가 주요 제어 대상이지만 이와 연동하여 y축 변위, z축에 대한 회전인 롤(roll) 각도 γ 역시 고려해야할 변수이다. 시스템의 중심에서 이러한 세가지 모드에 대한 운동 방정식을 세워보면

$$m\ddot{x} = 2F_{px} - 2F_{qx} \quad (2)$$

$$m\ddot{y} = 2F_{py} + 2F_{qy} - mg \quad (3)$$

$$I\ddot{\gamma} = -2dF_{py} + 2dF_{qy} \quad (4)$$

와 같은데 식 (2)에서 x축 운동을 제어하면 y축력이 연동되어 변화되므로 (3), (4)는 이에 연계하여 반응한다. 이러한 특징은 Fig. 12를 통해 이해할 수 있다. 예시로, 부상체의 무게와 상쇄되도록 차륜의 y축 공칭 위치 r_n 을 900 rpm에서 55 mm가 되도록 튜닝한 후에 어떤 이유로 차륜의 속도를 낮추면 차륜은 새로운 공칭 위치인 r_α 의 위치로 좌측 이동하지만 이 때 공칭 위치가 변화되므로 y축력의 크기는 변함이 없다. 이에 반해 추력의 경우 그림 예시와 같이 ρ 가 50 mm인 위치로 변화되므로 오히려 추력이 커지는 결과를 낳는다. 반대로 차륜의 속도를 높이면 차륜은 새로운 공칭 위치 r_β 로 이동하는데 부상력은 무게와 상쇄되는 힘이므로 변함이 없지만 추력은 속도가 증가되에도 불구하고 오히려 낮아지는 결과를 낳는다. 이러한 특징을 고려하면 이러한 토폴러지를 갖는 시스템의 이송은 Fig. 13과 같이 시소 운동 형태가 불가피하다. 물론 정지 운동을 위한 타 수단이 있다면 차륜을 동일한 방향으로 회전시킬 수 있고 따라서 차륜을 가감속시켜 속도를 줄이거나 높일 수 있다.

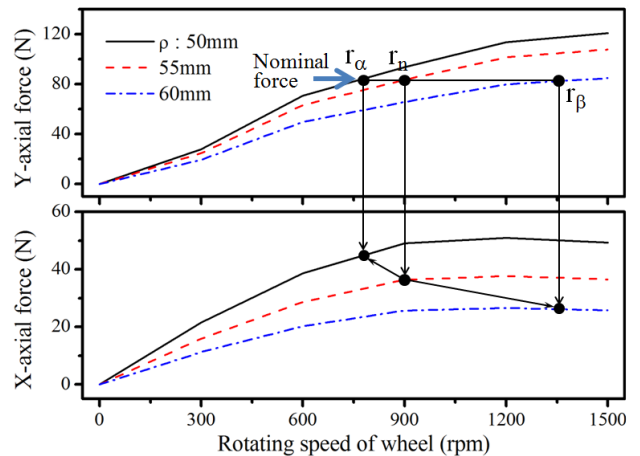


Fig. 12 Variation of a nominal position due to speed change of the magnetic wheel

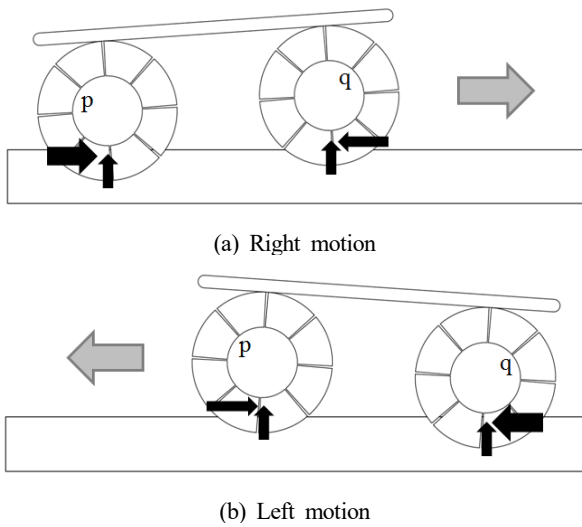


Fig. 13 Transfer of the levitated object through seesaw motion of front and rear magnetic wheels

이에 반해 프로토타입에서는 별도의 정지 수단없이 마주하는 차륜을 서로 반대로 회전시키는 방식을 취하므로 Fig. 13과 같이 진행되는 방향이 틀리는 형태로 전진하는 제어 방식을 선택하였다. 이러한 방법을 플로우차트로 나타내면 Fig. 14와 같이 정리할 수 있다. 공칭 위치 y_n 에서 공칭 속도 ω_n 으로 회전하는 두 차륜에 의해 이동체가 부상, 추진되고 목표위치 x_d 와의 비교를 통해 제어 입력이 발생하는데 이 때 각 차륜의 속도는 오차 부호에 따라 정반대로 변화된다. 실증 시험에서 좌우측의 차륜 속도 ω_p, ω_q 는 단순히 비례 제어만을 고려하여 아래와 같이 설정하였다. 이처럼 간단한 제어를 고려한 이유는 휠의 속도만을 조절하는 bang-bang

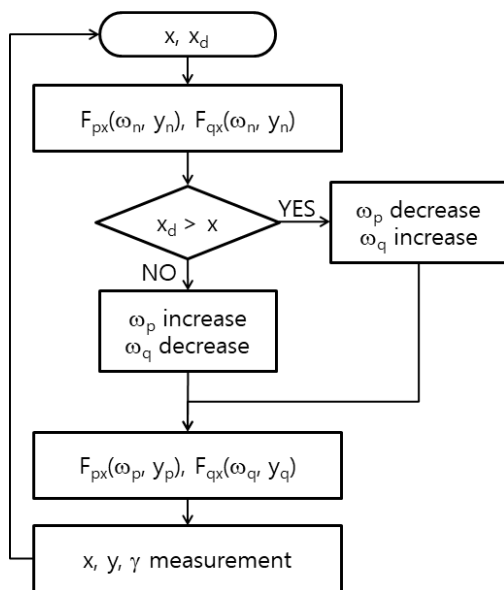


Fig. 14 Operation flowchart for x-axis motion

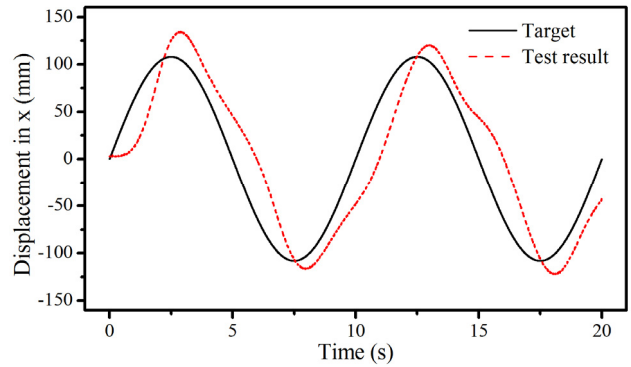


Fig. 15 Sinusoidal test result with amplitude of 100 mm

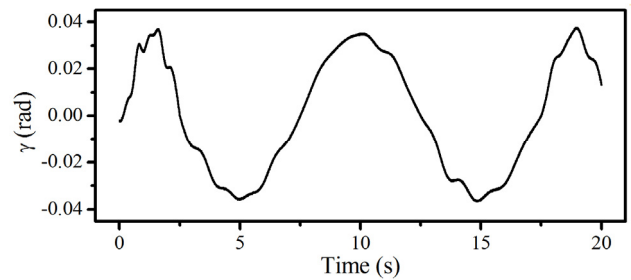


Fig. 16 Roll motion accompanied by the sinusoidal motion of Fig. 15

제어만으로도 자기 안정성이 담보된 자기 차륜 시스템의 성능 구현에 무리가 없음을 입증하기 위해서이다.

$$\omega_p = \omega_n - k_p(x_d - x) \tag{5}$$

$$\omega_q = \omega_n + k_p(x_d - x) \tag{6}$$

상기 제어 로직을 이용하여 Fig. 1에 구축된 이송 시스템을 시험한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 시험은 100 mm의 진폭을 갖는 조화 경로 추종 시험이며 주파수는 0.1 Hz 즉, 10초의 주기를 갖는 경로에 관한 시험 결과이다. 이때 부상체의 이동 변위와 부상 높이 측정을 위해 레이저 변위계를 활용하였다. 앞서 Fig. 12에 예시한 것처럼 ρ 의 공칭 위치는 대략 55 mm로 설정하였으며 공칭 높이의 변화는 ± 5 mm 이내가 되도록 하였다. 초기에 회전하는 모든 차륜의 힘 평형에 의해 정지해 있는 상태에서 차륜의 속도 차에 의한 추력으로 이동하는 방식이므로 응답 지연 특성이 다소 과다한 것을 알 수 있으며 방향 전환시에도 이러한 지연은 보상되지 못하고 지속적으로 누적되는 것을 알 수 있다. 특히 유도 전류에 의한 동전기력의 느린 반응도 이러한 지연에 일조하는 것으로 판단된다. 실제 이득값 k_p 는 최소 오차 검출량이 약 0.1 mm이고 최소 오차에 따른 제어력이 공칭추력의 1/20에 해당하도록 튜닝한 값이며 약

19 정도이다. 이러한 시소 운동에 연동하여 이송 객체의 앞뒤가 들리는 양을 측정하여 Fig. 16에 나타내었다. 값의 최대 크기는 2도 내외에 불과하나 실제 제작된 시스템에서 d는 대략 150 mm 정도이므로 2도 정도의 꺾임 운동만으로도 실제 부상체의 롤 운동은 현저한 형태로 나타난다. 이러한 시소 운동은 마그네틱 차륜만을 이용하여 추진과 정지가 반복되는 자기력 구조의 불가피한 특성이므로 실제 응용을 고려한다면 차륜은 가속과 부상을 위해 동일한 방향으로 회전하는 것이 적절하고 동시에 선형모터와 같은 별도의 수단에 의한 반력 구조를 활용하여 정지 운동을 구현하는 것이 바람직하다.

4. 결론

전도판과 일부 영역만을 중첩시켜 고속으로 회전하는 자기차륜에는 3축 자기력이 발생한다. 이러한 자기차륜 네 쌍을 구동원으로 하는 자기부상 이송 시스템을 제안하여 실증 시험을 수행하였다. 자기차륜의 회전에 따라 발생하는 자기력의 경우 차륜과 전도판간의 공극 방향과 중첩 영역의 수직 방향으로 자기 안정성을 갖기 때문에 별도의 제어가 필요 없음을 보였다. 특히 중첩 영역의 수직 방향으로 발생하는 부상력의 경우 차륜의 중첩 길이에 따라 양의 강성과 음의 강성이 교차되는 극점이 존재하고 이러한 특성을 유한요소 해석을 이용해 규명하였다. 또한 자기차륜의 단위 PM 형상과 극수 역시 자기력의 크기와 이로 인한 자기 안정 영역의 범위에 큰 영향을 주는 인자임을 논의하였다.

제안된 토폴로지서서 유일한 제어 변수는 자기 차륜의 속도이므로 이러한 차륜 속도를 가변시켜 시소 형태로 부상체를 이송하는 방법론을 제안하여 검증하였다. 시스템의 이송 위치나 이송 속도를 제어하기 위해 앞열의 자기차륜과 뒷열의 자기차륜을 서로 반대 방향으로 회전시켜 얻는 부수적인 효과로 이처럼 부상체의 롤 운동은 불가피한 특성이며 차륜의 공칭 부상 위치 조절을 통해 부상체의 조화 응답 운동을 실험적으로 검증하였다.

References

[1] Fujii, N., Ogawa, K., Matsumoto, T., 1996, Revolving Magnet Wheels with Permanent Magnets, *Electr. Eng. Jpn.*, 116:1 106-118, <https://doi.org/10.1002/eej.4391160110>.
 [2] Jung, K. S., 2013, Non-contact Manipulation of Conductive Rod using Axial Magnet Wheels, *J. Inst. Control. Robot. Syst.*, 19:7 626-632, <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.13.1881>.
 [3] Bird, J., Lipo, T. A., 2008, A 3D Magnetic Charge Finite-element Model of an Electrodynamic Wheel, *IEEE Trans. Magn.*, 44:2

253-265, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.911597>.
 [4] Jung, K. S., 2012, A Spatial Stability of the Conductive Rod Conveyed by Double Electrodynamic Wheels, *J. Korea Soc. Precis. Eng.*, 29:8 873-878, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2012.29.8.873>.
 [5] Fujii, N., Ito, Y., Yoshihara, T., 2005, Characteristics of a Moving Magnet Rotator over a Conductive Plate, *IEEE Trans. Magn.*, 41:10 3811-3813, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.854930>.
 [6] Park, S. J., Jung, K. S., 2011, Design of an Electrodynamic Wheel for Transfer of Conductive rod, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 20:3 251-256.
 [7] Jung, K. S., 2017, Transfer System using Radial Electrodynamic Wheel over Conductive Track, *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, 18:11 794-801, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.794>.
 [8] ANSYS, n.d., viewed 20 December 2021, Low Frequency EM Field Simulation, <<https://www.ansys.com/ko-kr/products/electronics/ansys-maxwell>>.
 [9] Kang, Y. S., Jung, W. K., Seo, Y. H., Kim, B. H., 2017, On Large Area Aluminum Anodic Oxidation Process using Electric Field Simulation, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 26:6 599-604, <https://doi.org/10.7735/ksmt.2017.26.6.599>.
 [10] Jung, K. S., Shim, K. B., 2010, Noncontact Conveyance of Conductive Plate using Omni-directional Magnet Wheel, *Mechatronics*, 20:4 496-502, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.04.007>.



Sang Heon Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering & Robotics Engineering. His research interest is the design and control of mechatronics systems..
 E-mail: shlee@andong.ac.kr



Kwang Suk Jung

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation. His research interest includes electromagnetic energy conversion device, magnetic gear, power transmission of electric vehicle, and magnetic levitation application.
 E-mail: ksjung@ut.ac.kr