

< 논문 >

# 동전기력에 기초한 자기 부상 평면 운송 시스템의 부상 메커니즘에 관한 연구

박준혁<sup>†</sup> · 백윤수<sup>\*</sup>

(2005년 7월 1일 접수, 2006년 7월 3일 심사완료)

## A Study on the Levitation Mechanism Based on the Electrodynamic Force for a Maglev Planar Transportation System

Joon Hyuk Park and Yoon Su Baek

**Key Words :** Electrodynamic Force(동전기력), Magnetic Levitation(자기 부상), Magnetic Wheel(마그네틱 휠), Permanent Magnet(영구 자석), Transportation System(운송 시스템)

### Abstract

This paper describes the levitation mechanism using magnetic wheel for a maglev planar transportation system. Rotation of the magnetic wheel where the permanent magnet array is embedded produces the time varying traveling magnetic flux density and the generated magnetic flux density creates the induced levitation force and drag force with the conductor. Because the net drag force is zero, magnetic wheel can only generate the levitation force. Thus, it always guarantees the stability in levitation direction and it does not disturb other directional motion. In this paper, levitation principle of the magnetic wheel is analyzed using distributed field approach and dynamic characteristics of the levitation in the magnetic wheel system are estimated. The feasibility of the proposed levitation mechanism is verified through the several experimental works.

### 1. 서론

자기 부상 시스템은 여러 측면에서 많은 장점을 가지고 있어 계속적으로 연구가 진행되어 오고 있다. 이들 연구 분야는 크게 조정밀 위치 결정 기구와 자기 부상 열차로 나누어 질 수 있다. 전자의 경우는 비접촉 구동 방식에 기인한 고정밀성을 이용한 경우이고, 후자의 경우는 비접촉 구동 방식에 의한 고속 이송을 극대화 시킨 경우라 할 수 있다. 그러나 이들 두 분야는 각각의 장점을 극대화 시키기 위한 특화된 구동 방식을 가지고 있기 때문에 이외의 다른 분야로 이를 적용하기가 어렵다. 일례로, 조정밀 위치 결정 기구의 경우에는 고정밀성과 다자유도 운동이 가능하도록 개발되었지만, 다른 분야로 활용 되기에는 작업 영역

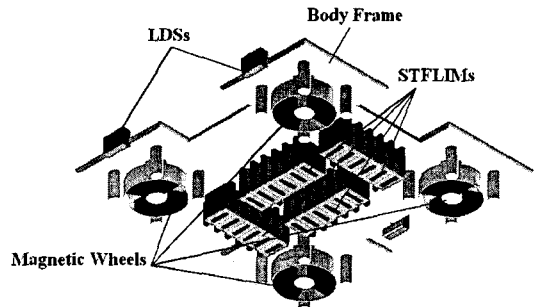


Fig. 1 Concept view of Maglev planar transportation system

이 극히 작은 단점이 있다. 자기 부상 열차의 경우에는 고효율, 고속 이송이 가능하지만, 트랙이나 벽면을 따라 이송하여야 하는 단점이 있다. 그러므로 이들 두 분야의 중간 단계에 있어, 두 분야의 장점을 유지하며, 단점을 최소화 할 수 있는 새로운 자기 부상 시스템에 대한 연구가 필요하다

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전 연구본부

E-mail : jhpark74@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5276 FAX : (031)460-5279

<sup>\*</sup> 회원, 연세대학교, 기계공학부

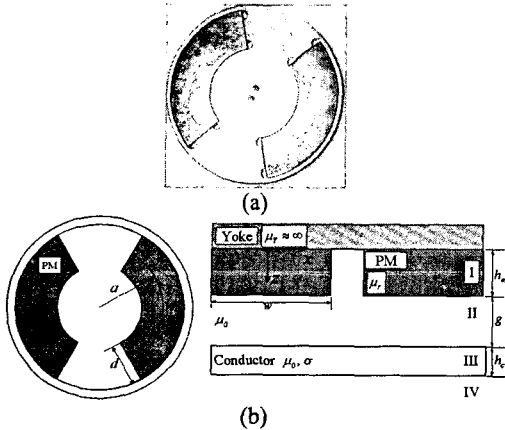


Fig. 2 Magnetic wheel: (a) magnetic wheel and (b) geometric modeling for theoretical analysis

따라서 본 논문에서는 새로운 자기 부상 평면형 운송 시스템을 위한 부상 메커니즘을 제안하고 이의 실현 가능성을 타진하고자 한다. 이를 위하여 맥스웰 방정식(Maxwell's Equation)에 기초한 전기 역학 시스템의 지배 방정식의 해를 이론적으로 구하고, 이를 실험을 통하여 검증한다. 그리고, 본 논문에서 제안한 부상 시스템을 실제 시스템에 적용하여 그 가능성을 타진한다.

## 2. 자기 부상 평면형 운송 시스템

Fig. 1 은 본 연구에서 제안한 평면형 자기 부상 운송 시스템 (Maglev planar transportation System, MPTS)의 개념도이다. 4 개의 마그네틱 휠과 마그네틱 휠을 회전 시키기 위한 구동 모터에 의하여 부상하게 되고 추력을 위한 별도의 선형 모터 메커니즘이 구성되어 있다. 마그네틱 휠에는 각각 두 개의 영구자석이 서로 다른 극으로 배치되어 있어 폴(pole)의 역할을 하게 되고 자기 차륜이 회전하게 되면 시변 이동 자계(time varying traveling magnetic flux density)가 형성 된다. 이 이동 자계는 MPTS 의 아래에 위치 되어 있는 비자성 도체판(non-magnetic conductor)에 작용하여 유도 전류를 발생시키고 이 유도 전류와 이동 자계에 의하여 부상력이 발생한다. 본 연구에서는 비자성 도체판으로서 구리판을 사용하도록 한다.

평면 운동을 위한 선형 모터 또한 LIM(Linear Induction Motor) 원리를 이용하여 선형 코일에 의하여 발생하는 자기장이 유도하는 도체판의 유도 전류를 이용하도록 한다. 4 개의 LIM 이 격자형으로 배열되며, 이 4 개의 LIM 의 조합에 의해 MPTS 가 직선 운동(rectilinear motion) 및 곡선 운동(curvilinear motion) 그리고 회전 운동(rotation)이 가능하도록 구현된다.

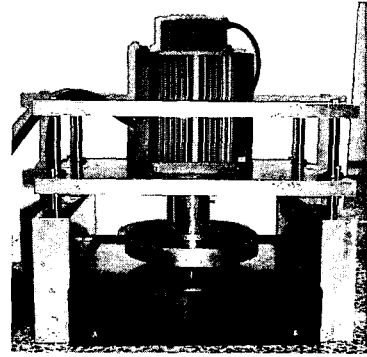


Fig. 3 Experimental setup for measuring the levitation force

MPTS 의 부상 및 이송은 도체판에 발생하는 유도 전류를 이용하고, 구동부는 모두 MPTS 에 장착되기 때문에 MPTS 의 평면 운동 범위는 도체판의 면적에만 비례한다. 즉, 도체판을 확장 함으로써 간단하게 작업 영역을 확장 시킬 수 있다.

MPTS 의 몸체 아랫면에는 3 개의 변위 센서가 부착되어 MPTS 의 부상 높이 및 기울어짐을 측정하도록 되어 있다.

## 3. MPTS 의 부상 메커니즘

### 3.1 자기 부상 방식의 종류

일반적으로 전자기력을 이용하여 동적 시스템을 지지하는 방법은 크게 9 가지로 나뉘어진다.<sup>(1)</sup> 이 중에서 가장 활발히 사용되는 것으로는 반발식 전자기력(repulsive electromagnetic force)와 흡인식 전자기력(repulsive attraction force) 그리고 동전기력(electrodynamic force)이 있다. 반발식은 영구자석과 DC 코일의 반발력을 이용하는 방법으로 부상 방향으로는 안정하고, 상대적으로 에너지 효율이 좋지만 나머지 방향으로는 불안정하여 제어가 반드시 필요하다는 단점이 있으며, 비접촉식 초정밀 위치 결정 기구 등에 이용된다.<sup>(2)</sup> 흡인식의 경우에는 이와는 반대로, 부상 방향으로는 불안정하지만, 다른 방향으로는 안정하다. 주로 DC 코일과 강자성체 사이의 흡인력을 이용하여 자기 베어링(magnetic bearing), 자기 부상 열차 등에 사용되며 최근에는 위치 결정 기구로도 응용되고 있다.<sup>(3),(4)</sup> 동전기력을 이용하는 방법은 유도 전류에 의한 반발력을 이용하는 방법으로 부상 방향으로는 대부분의 경우에서 안정하며, 나머지 방향으로도 단순한 관성 시스템의 거동을 갖는 반면에 에너지 효율이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 위의 세가지 방식 중, 부상 방향으로 안정한 동전기력에 의한 반발식을 부상 메커니즘으로 선택하였다. 특히 동전기력에 의한 반발

**Table 1** Specification of test magnetic wheel

Magnetic Wheel	Poles: 2 Radius: 50mm Thickness of yoke: 15mm Weight: 4 kg
Permanent magnets	Br: 1.195T Hcb: 914kA/m Thickness: 30mm Depth: 50mm

식은 2 차축이 단순한 도체판으로 구성되기 때문에, 전자기력에 의한 반발식보다 동적 범위의 확장성에 큰 장점을 가지고 있다.

3.2 마그네틱 휠의 부상력 발생 원리

MPTS 는 부상 및 평면 운동에 있어 모두 전자기 유도 시스템을 사용하기 때문에, 이 두 시스템에서 발생하는 시변 이동 자계의 방향을 서로 수직인 방향으로 구성하여야 두 시스템의 상호 간섭을 배제할 수 있다. 따라서 평면 운동 시스템의 시변 이동 자계가  $x, y$  축을 따라 이동하기 때문에, 부상 시스템의 시변 이동 자계는  $z$  방향이어야 한다. 따라서 부상 시스템은  $z$  축 방향의 시변 이동 자계인 시변 회전 자계를 발생 시킬 수 있는 마그네틱 휠을 적용하였다.

마그네틱 휠은 복수 개의 영구자석으로 구성되어 있으며, 이 영구자석이 회전함에 따라 발생하는 시변 이동 자계를 이용하게 된다. 마그네틱 휠을 이용한 부상 방법은 전통적인 방법 중의 하나지만, 효율이 낮아 연구가 활성화 되지 못했던 방법으로 최근에 고강도의 영구자석이 개발됨에 따라 그 실용성이 점차 확대 되어 이를 이용한 여러 시스템들이 제안 되고 있다.<sup>(5,6)</sup>

Fig. 2(a)는 마그네틱 휠을 나타낸 것으로 본 논문에서는 2 개의 영구자석이 배치된 마그네틱 휠을 사용하였다. 영구자석은 요크에 부착되어 알루미늄 휠에 고정된다. Fig. 2(b)는 자기 해석을 위한 마그네틱 휠의 기하학적 모델링을 나타낸다.  $a, w, d$  는 각각 마그네틱 휠의 반경, 영구자석의 너비와 깊이를 나타내고,  $x$  축 방향은 마그네틱 휠의 접선 방향,  $z$  축 방향은 영구자석의 자화 방향이다. 도체판은 비자성체이기 때문에 자기 투자율은 공기와 같다고 가정한다.

영구자석은 자화 밀도,  $\mathbf{M}$  으로 표시할 수 있으며, Fig. 2(b)와 푸리에 급수에 의해 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\mathbf{M}_z = \sum_{n=1,3,5,\dots} 4/(n\pi)M \sin(\beta w/2)\cos(\beta x)\hat{z}, \quad (1)$$

여기서  $\beta = n/\tau$ ,  $\tau$ 는 유효 폴 피치를 의미한다. 식 (1)에서 첫번째 항이 가장 지배적이므로, 계산상의 편의를 위해서  $n=1$  로 가정하고, 마그네틱 휠의 회전을 감안하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_z = M_p e^{j(\omega t - \beta x)} \hat{z} \quad (2)$$

여기서,

$$M_p = (4/\pi)M \sin(\beta w/2), \beta = \pi/\tau. \quad (3)$$

맥스웰 방정식으로부터, 마그네틱 휠의 지배 방정식은 자기 벡터 포텐셜,  $\mathbf{A}$  에 대한 편미분 방정식으로 표현할 수 있는데, 이는 다음과 같다.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu\sigma \left[ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right] - \mu_0 \nabla \times \mathbf{M}, \quad (4)$$

이때,  $\mu$ 는 매질의 자기 투자율,  $\sigma$ 는 매질의 유효 전기 전도도,  $\mathbf{v}$  는 매질의 이동 속도 그리고  $\mu_0$  는 자유 공간에서의 자기 투자율을 나타낸다. 식 (4)의 해를 구하기 위해서 다음과 같은 가정을 한다. 1) 요크의 투자율은 무한하다. 2)  $y$  방향으로의 변화는 없다. 3) 모든 영역들은  $x$  방향으로 무한하다. 영구자석 및 공극 영역에서는 전기 전도도가 '0' 이므로 각 영역에 대한 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 A_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_I}{\partial z^2} = -j\mu_0 \beta M_p e^{j(\omega t - \beta x)}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 A_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{II}}{\partial z^2} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 A_{III}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{III}}{\partial z^2} = \mu_0 \sigma \left( j\omega A_y + U_x \frac{\partial A_{III}}{\partial x} - U_z \frac{\partial A_{III}}{\partial z} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 A_{IV}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{IV}}{\partial z^2} = 0, \quad (8)$$

여기서 I, II, III 그리고 IV 는 각각 영구자석, 공극, 도체판, 도체판 아래 영역을 나타내며,  $U_x$  는 접선 방향으로의 도체판과 마그네틱 휠의 상대 속도 그리고  $U_z$  는 수직 방향으로의 상대 속도를 나타낸다. 식 (5)~(8)의 해는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_I = \left( C_I e^{\beta z} + D_I e^{-\beta z} + j \frac{\mu_0}{\beta} M_p \right) e^{j(\omega t - \beta x)}, \quad (9)$$

$$A_{II} = (C_{II}e^{\beta z} + D_{II}e^{-\beta z})e^{j(\omega t - \beta x)}, \quad (10)$$

$$A_{III} = (C_{III}e^{\lambda_1 z} + D_{III}e^{\lambda_2 z})e^{j(\omega t - \beta x)}, \quad (11)$$

$$A_{IV} = (C_{IV}e^{\beta z} + D_{IV}e^{-\beta z})e^{j(\omega t - \beta x)}, \quad (12)$$

여기서,

$$\lambda_{1,2} = \left( \gamma \pm \sqrt{\gamma^2 + 4\alpha^2} \right) / 2, \quad \gamma = \mu_0 \sigma U_s,$$

$$\alpha = \sqrt{\beta^2 (1 + j\mu_0 \sigma s U_s / \beta)}. \quad (13)$$

$s$  는 슬립(slip)을 의미하고,  $U_s$  는 동기 속도로  $s$  가 '1'일 때  $U_x$  와 같다. 위 식의 미정계수를 구하기 위한 경계 조건은 다음과 같다.

$$B_{Ix}|_{z=0} = 0, \quad B_{IVz}|_{z=\infty} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{B_{Ix}}{\mu_r} \Big|_{z=h_m} = \frac{B_{IIx}}{\mu_0} \Big|_{z=h_m}, \quad B_{Iz}|_{z=h_m} = B_{IIz}|_{z=h_m}, \quad (15)$$

$$B_{IIIx}|_{z=h_m+g} = B_{IIIx}|_{z=h_m+g}, \quad B_{IIIz}|_{z=h_m+g} = B_{IIIZ}|_{z=h_m+g}, \quad (16)$$

$$B_{IIIx}|_{z=h_m+g+h_c} = B_{IVx}|_{z=h_m+g+h_c},$$

$$B_{IIIz}|_{z=h_m+g+h_c} = B_{IVz}|_{z=h_m+g+h_c}. \quad (17)$$

경계 조건으로부터, 각 미정 계수는 식 (18)-(21) 과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$\mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{Q}, \quad (18)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ e^{\beta h_m} & -e^{\beta h_m} & 0 & 0 & e^{-\beta h_m} & e^{-\beta h_m} & 0 & 0 \\ e^{\beta h_m} & -e^{\beta h_m} & 0 & 0 & -e^{-\beta h_m} & e^{-\beta h_m} & 0 & 0 \\ \mu_0 & \mu_r & & & \mu_0 & \mu_r & & \\ 0 & e^{\beta(h_m+g)} & -e^{\lambda_2(h_m+g)} & 0 & 0 & e^{-\beta(h_m+g)} & -e^{-\alpha(h_m+g)} & 0 \\ 0 & \beta e^{\beta(h_m+g)} & -\lambda_1 e^{\lambda_1(h_m+g)} & 0 & 0 & -\beta e^{-\beta(h_m+g)} & -\lambda_2 e^{\lambda_2(h_m+g)} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 e^{\lambda_1(h_m+g+h_c)} & -e^{\beta(h_m+g+h_c)} & 0 & 0 & e^{\lambda_2(h_m+g+h_c)} & -e^{-\beta(h_m+g+h_c)} \\ 0 & 0 & \lambda_1 e^{\lambda_1(h_m+g+h_c)} & -\beta e^{\beta(h_m+g+h_c)} & 0 & 0 & \lambda_2 e^{\lambda_2(h_m+g+h_c)} & \beta e^{-\beta(h_m+g+h_c)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{X} = [C_I \quad C_{II} \quad C_{III} \quad C_{IV} \quad D_I \quad D_{II} \quad D_{III} \quad D_{IV}]^T, \quad (20)$$

$$\mathbf{Q} = \left[ 0 \quad -\frac{j\mu_0}{\beta} M_p \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T. \quad (21)$$

마그네틱 휠에 의한 부상력 및 견인력은 맥스웰 응력 텐서(Maxwell's stress tensor)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{lev} = \frac{d\tau_g}{2\mu_0} (|B_z|^2 - |B_x|^2)$$

$$F_{drag} = \frac{d\tau_g}{\mu_0} \text{Re}(B_x^* B_z)$$
(22)

여기서,  $\tau_g$  는 기하학적인 폴 피치를 의미하며, 각 자기장은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_x = -\frac{\partial A_{II}}{\partial z}, \quad B_z = \frac{\partial A_{II}}{\partial x}. \quad (23)$$

위의 이론적 해석을 토대로 주요 설계 변수의 특성을 분석하여 최대 효과를 낼 수 있는 마그네틱 휠이 설계 되었으며<sup>(7,8)</sup> 그 설계 결과는 Table 1 과 같다.

Fig. 3 은 마그네틱 휠의 부상력을 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸 것이다. 마그네틱 휠과 구리로 이루어진 도체판 사이의 공극을 조절할 수 있도록 슬라이드 구조 및 고정 장치로 이루어져 있으며, 도체판 아래에는 로드셀이 장착되어 도체판이 받는 힘을 측정하도록 되어 있다. 구동 모터는 OTIS-LG 의 FMA-CN50A 를 사용하였으며 마그네틱 휠은 앞서 설계된 사양을 사용하였다.

Fig. 4 는 회전속도에 따른 마그네틱 휠의 부상력을 이론치와 비교한 것이다. 전 구간에 걸쳐 이론이 실험과 잘 부합되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4 에서 유리된 데이터는 마그네틱 휠을 구동하기 위한 모터의 PWM 신호 잡음이다. 공극이 10mm 인 경우 3000rpm 에서 약 620N 으로 높은

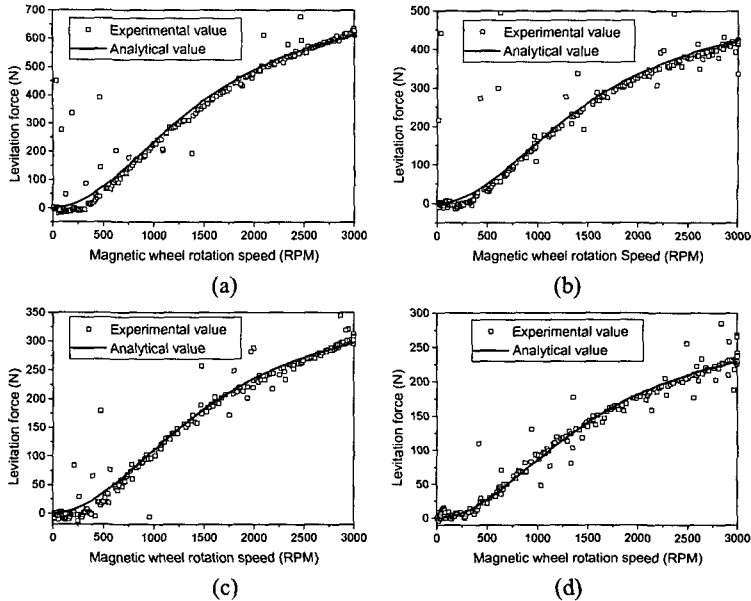


Fig. 4 Levitation force along the various rotation speeds with 50mm depth two poles magnetic wheel at (a) 10mm, (b) 15mm, (c) 20mm and (d) 25mm air gap

부상력을 가지고 있어, 자기 부상 평면형 운송 시스템에 적용 가능하다는 것을 확인 할 수 있다.

3.3 부상 메커니즘의 동특성

마그네틱 휠이 수직 방향으로 움직일 때, 즉,  $U_z$  가 존재하는 경우에는 그 상대 속도에 의해 동적 힘이 발생하며, 이 힘은  $z$  축 속도의 함수가 된다.

Fig. 5 는  $z$  축 속도와 이 속도에 의해 유도된 동적 힘과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이 회전 속도가 낮은 경우,  $z$  축 속도에 대한 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 고속 회전의 경우에는  $z$  축 속도에 따른 동적 힘의 변화가 전체 부상력에 비해 매우 낮아서 그 영향이 매우 작으므로 마그네틱 휠의  $z$  축 속도 변화에 따른 효과를 거의 기대할 수 없다. 회전 속도가 일정한 경우에는  $z$  축 속도에 따른 힘의 변화가 비례해서 나타나므로, 감쇠 시스템으로 모델링 할 수 있다. Fig. 6 은 다양한 마그네틱 휠의 회전 속도에 대한 공칭 점에서의 감쇠계수를 나타낸 것이다.

감쇠 계수는 앞서 언급한 바와 같이 마그네틱 휠의 회전 속도가 감소할수록 증가하며 특히, 1000rpm 이하에서 높은 값을 갖는다. 따라서 충분한 감쇠 효과를 얻기 위해서는 마그네틱 휠의 작동 속도를 1000rpm 이하로 유지해야 한다. Fig. 7 은

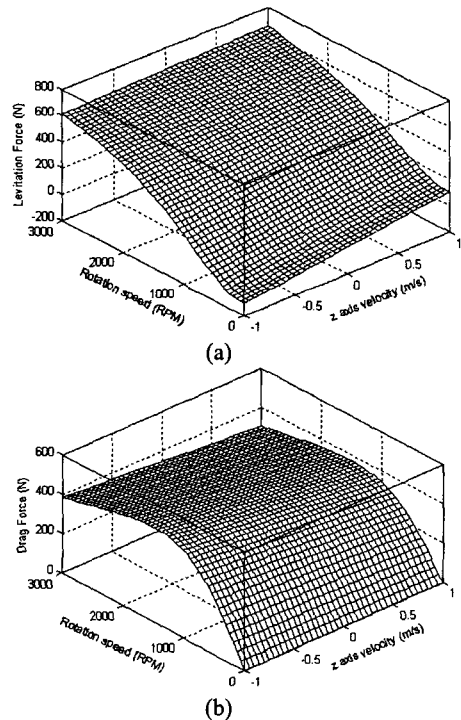


Fig. 5 The relationship between the electrodynamic force and the vertical velocity: (a) levitation force and (b) drag force

충격응답에 대한 모의 실험 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)는 마그네틱 휠의 3000rpm 으로 회전하고 있을

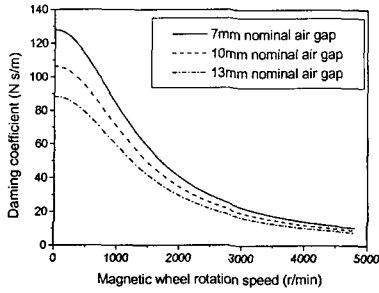
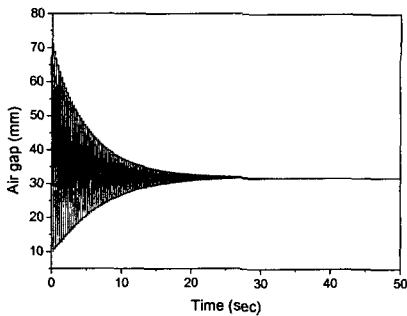
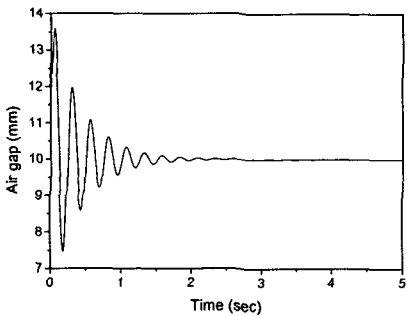


Fig. 6 Equivalent damping force with various magnetic wheel rotation speeds



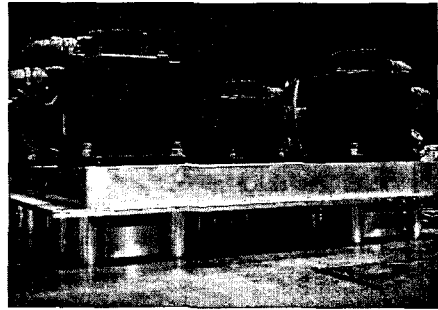
(a)



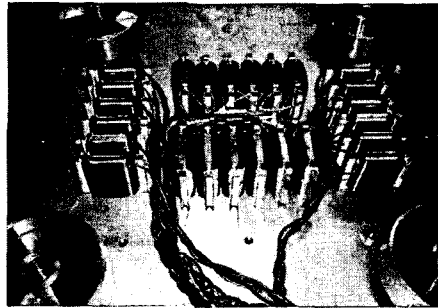
(b)

Fig. 7 Simulation for impulse response of the magnetic wheel in the vertical direction: (a) 3000 r/min and (b) 800 r/min

때의 충격응답을 나타낸 것이다. 모의 실험에서 부상력이 마그네틱 휠과 구동 모터의 무게 보다 더 크기 때문에 공칭점인 10mm 에서 30mm 까지 부상하게 된다. 충격입력 후 약 40 초까지 진동이 계속되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 마그네틱 휠의 회전속도가 800rpm 인 경우에 대한 모의 실험으로 감쇠 효과가 뚜렷하여 약 3 초 후에는 정상 상태로 도달한다. 이의 결과로부터, 회전 속도에 따라 감쇠 효과가 크게 차이가 나지만, 마그



(a)



(b)

Fig. 8 Maglev planar transportation system with the magnetic wheels: (a) side view and (b) bottom view

Table 2 Characteristics of MPTS

Weights	Total weight: 170 kg Motors: 20kg×4 Magnetic wheels: 4.5kg×4 LIM: 9kg ×4 Body: 14.5kg Reinforcement: 21.3kg Sensors: 0.1kg×3
Sizes	Total size: 770×770×384mm Magnetic wheel: R50mm LIM: 185×98×83mm
Max. Payloads	79kg at 10mm air gap 122kg at 8mm air gap
Materials	Body: Duralumin Reinforcements: Duralumin Yokes: Soft iron Permanent magnets: NdFeB(N35)
Propulsion	Starting linear acceleration w/o payloads: 0.36m/s <sup>2</sup> w/ full payloads: 0.24m/s <sup>2</sup> Starting angular acceleration w/o payloads: 0.61rad/s <sup>2</sup> w/ full payloads: 0.41rad/s <sup>2</sup>

네틱 휠은 안정한 시스템이며, 또한 대체적으로 저감쇠 시스템인 것을 확인할 수 있다.

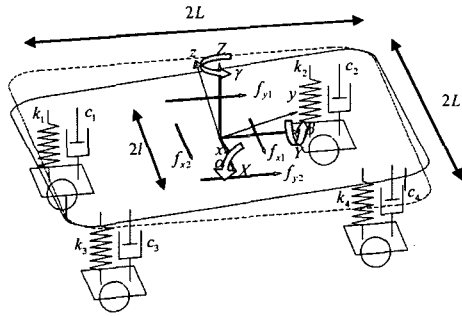


Fig. 9 Dynamic model of MPTS using equivalent stiffness and damping coefficient at the nominal position

#### 4. 실험

앞서 얻은 결과를 토대로, Fig. 8 과 같이 4 개의 마그네틱 휠을 제작하여 자기 부상 평면형 운송 시스템에 적용하였다. 마그네틱 휠을 구동하기 위한 모터로 앞서 사용한 5kW 급인 OTIS-LG 의 FMA-CN50A 를 사용하였다. MPTS 의 전체적인 특성은 Table 2 와 같다.

MPTS 의 동역학적 모델은 마그네틱 휠의 공칭 높이 및 공칭 회전 속도에서의 등가 감쇠 계수 및 등가 강성을 이용하여 Fig. 9 와 같이 간단히 나타낼 수 있으며 이에 대한 운동 방정식은 식 (24)-(29)와 같다.

$$m\ddot{X} - (f_{x1} + f_{x2})\cos\gamma + (f_{y1} + f_{y2})\sin\gamma = F_X \quad (24)$$

$$m\ddot{Y} - (f_{x1} + f_{x2})\sin\gamma + (f_{y1} + f_{y2})\cos\gamma = F_Y \quad (25)$$

$$m\ddot{Z} + c_{eq}\dot{Z} + k_{eq}Z = F_Z \quad (26)$$

$$J_X\ddot{\alpha} + c_{eq}L\dot{\alpha} + k_{eq}L\alpha = M_X \quad (27)$$

$$J_Y\ddot{\beta} + c_{eq}L\dot{\beta} + k_{eq}L\beta = M_Y \quad (28)$$

$$J_Z\ddot{\gamma} - (f_{y2} - f_{y1}) \cdot l = M_Z \quad (29)$$

여기서  $c_{eq}$  는 공칭 높이 및 공칭 회전 속도에서의 등가 감쇠 계수의 합,  $k_{eq}$  는 등가 강성 계수의 합이다. 또한  $m$  은 MPTS 의 질량,  $J_X, J_Y, J_Z$  는 각각  $X, Y, Z$  축 회전에 대한 관성 모멘트,  $\alpha, \beta, \gamma$  는 각 축에 대한 회전을 나타낸다.  $2L$  은 MPTS 의 길이,  $2l$  은

$y$  방향 LIM 사이의 거리를 의미한다.

부상을 제어하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수가 있다. 하나는 4 개의 마그네틱 휠을 같은 회전 속도를 갖도록 제어하는 방법이며 다른 하나는 MPTS 가 수평을 유지하며 부상이 되도록 4 개의 마그네틱 휠의 속도를 각각 제어하는 방법이다. 전자의 경우에는 제어기를 쉽게 설계할 수 있고, 마그네틱 휠의 회전에 의한 반작용으로 발생하는 MPTS 의 자전을 마그네틱 휠의 회전 방향을 두 방향으로 나누어 설정함으로써 상쇄 시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 도체판의 평편도에 따라 MPTS 의 수평 유지가 어려운 단점이 있다. 만약 도체판이 평평하다면, 이 방법이 이상적일 수 있다. 후자의 경우에는 각 마그네틱 휠의 회전 속도가 서로 다르기 때문에, 마그네틱 휠의 회전에 의한 MPTS 의 자전이 발생할 가능성이 크다. 그러나 MPTS 의 수평을 언제나 유지할 수 있으며, 도체판의 온도 상승에 의한 부상력 저하를 보상할 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 3 개의 출력( $z$  축 이동, 피칭(pitching), 롤링(rolling))에 대하여 4 개의 마그네틱 휠을 제어해야 하는 여자유도 시스템이므로 제어기를 설계하는 것이 복잡하다. 또한 전자기 유도를 이용한 부상 시스템은 앞서 언급한 바와 같이 부상 방향으로 안정성을 보장하므로 복잡한 제어기를 설계하여 적용한다는 것은 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 전자의 방법을 이용하여 MPTS 를 제어하였다.

전자의 방법을 이용하는 경우, 원하는 부상 높이에 따른 마그네틱 휠의 회전 속도는 식 (22)를 통하여 구하였으며, PI 제어기를 사용하여 원하는 회전 속도에 도달하도록 구동 모터를 제어하였다. Fig. 10 은 초기 높이로부터 15 초 이내에 6mm 부상하도록 하는 제어를 수행한 결과이다.

3 개의 레이저 변위 센서를 사용하여 부상 높이를 측정 하였다. 제어는 약 4.5 초부터 시작되었으며 MPTS 는 12.5 초에서 부상하고 약 18 초에 정상 상태로 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 모터의 급격한 가속을 배제하기 위하여 제어 이득을 작게 준 결과이며, 수렴 속도는 제어 이득을 높임으로써 쉽게 빨라 질 수 있다.

약 30 초 후에는 부상 높이가 약간씩 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 도체판의 온도 상승에 의한 전기 전도도의 손실에 의한 결과이다.

Fig. 11 은 MPTS 의 무부하시 최대 부상 높이를 측정한 결과이다. 이 때, 마그네틱 휠의 회전 속도는 3000rpm 이다. 무부하시 MPTS 는 공칭 높이로부터 12mm 부상을 하는 것을 확인할 수 있다.

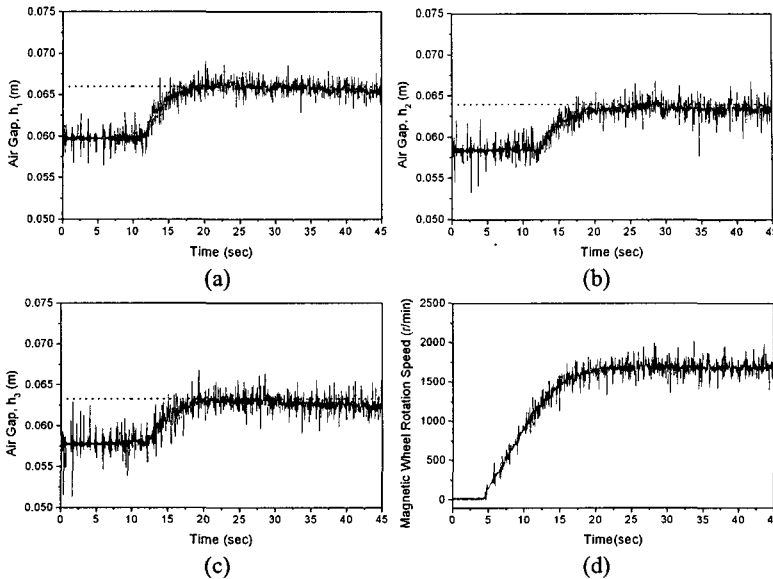


Fig. 10 Experiment results for levitation performance: (a) the first LDS sensor, (b) the second LDS sensor, (c) third LDS sensor and (d) magnetic wheel rotation speed

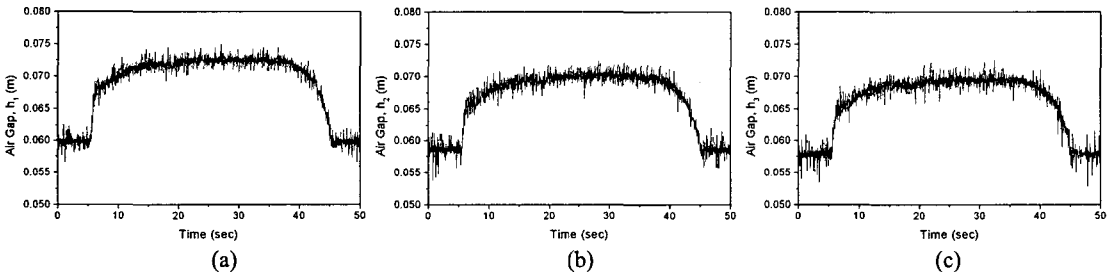


Fig. 11 Experiment results for maximum levitation without payloads: (a) the first LDS sensor, (b) the second LDS sensor, (c) third LDS sensor

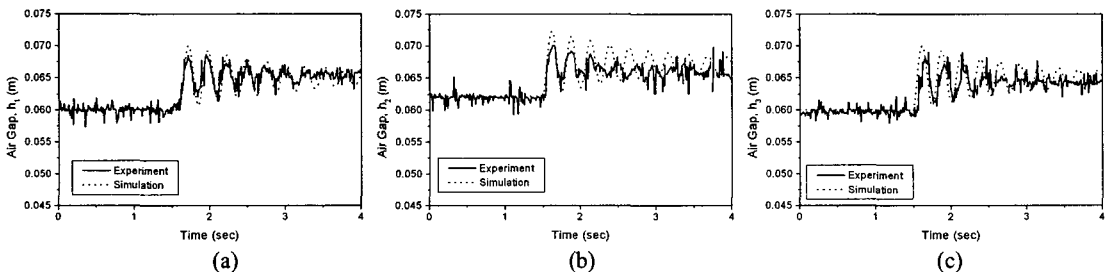


Fig. 12 Experiment results for vibration test of MPTS: (a) the first LDS sensor, (b) the second LDS sensor, (c) third LDS sensor

MPTS의 공칭 높이가 7mm 이므로 도체판으로부터 19mm 부상하였다. 이론적인 최대 부상 높이는 19.3mm로 실험과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

MPTS의 동특성을 확인하기 위하여 초기위치 변화에 대한 응답을 실험하였다. 이를 위해 MPTS를 초기 위치로부터 5mm 부상 시키고 강제적으로 다시 초기 위치까지 누른 후 MPTS의 자유 진동을 측정

하였다. 이 때, 마그네틱 휠의 회전속도는 일정하게 유지하였다. Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이, 약 3초 후에 정상 상태로 도달하는 것을 확인할 수 있다 이론치 보다 측정치가 약간 더 빨리 정상 상태로 도달하며, 오버슈트(overshoot)도 약간 작다. 그러나 전체적으로 모의 실험 결과와 실험 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.



## 5. 결 론

본 논문에서는 자기 부상 시스템의 보다 많은 응용 분야를 확보하기 위하여 자기 부상 평면형 운송 시스템의 부상 메커니즘에 대하여 연구하였다.

자기 부상 시스템은 오랫동안 여러 분야에서 중요한 이슈로 연구되어 왔으나 기존의 부상 메커니즘은 매우 훌륭한 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 여러 응용 분야로 확장하기 어려운 면이 있다. 따라서 고효율의 평면 운송 시스템을 위한 부상 메커니즘도 또 하나의 중요한 이슈가 될 수 있다.

본 논문에서는 고효율 자기 부상 메커니즘으로 마그네틱 휠을 이용하여 동전기력을 발생시킴으로써 반발력이 생기는 마그네틱 휠을 이용한 자기 부상 시스템을 제안하였다. 또한 이를 이론적으로 해석하고 여러 실험을 통해 검증함으로써 마그네틱 휠을 이용한 방법이 자기 부상 메커니즘의 또 다른 대안으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

향후, 평면 운동을 포함한 MPTS의 전체 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하고, 이 결과를 이용하여 보다 최적화된 자기 부상 평면형 운송 시스템을 개발하여 그 적용 가능성을 검증하고자 한다. 또한 마그네틱 휠의 단점이라 할 수 있는 건인 토크에 의한 낮은 에너지 효율을 개선할 수 있는 방법을 연구하고, 마그네틱 휠을 구동하기 위

한 모터를 보다 경량화하고 소형화하기 위한 연구를 진행하고자 한다.

## 참고문헌

- (1) Jayawant, B. V., 1980, *Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques*, Edward Arnold, pp. 1-9.
- (2) Jung, K. S. and Baek, Y. S., 2001, "Precision Stage Using A Novel Contact-Free Planar Actuator Based on Combination of Electromagnetic forces," *Transactions of the KSME A*, Vol. 25, No. 11, pp. 1863-1872.
- (3) Lee, S. H. and Baek, Y. S., 2003, "Feasibility Study of Positioning Device Using Magnetic Suspension System of Out of Plane Direction Forces," *Transactions of the KSME A*, Vol. 27, No. 11, pp. 1941-1948.
- (4) Powell, J. R. and Danby, G. T., 1996, "Maglev Vehicles," *IEEE potentials*, Oct./Nov., pp. 7-12.
- (5) Fujii, N., Hayashi, G. and Sakamoto, Y., 2000, "Characteristics of Magnetic Lift, Propulsion and Guidance by Using Magnet Wheels with Rotating Permanent Magnets," *Industry Applications Conference, IEEE*, Vol. 1, pp. 257-262.
- (6) Bird, J. and Lipo, T. A., 2003, "An Electrodynamical Wheel: an Integrated Propulsion and Levitation Machine," *Electric Machines and Drives Conference, IEEE*, vol. 3, pp. 1410-1416.
- (7) Park, J. H., Choi, J. H., Kim, D. H. and Baek, Y. S., 2004, "Parametric Design of The Levitation Mechanism for Maglev Planar Transportation Vehicle," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, Issue: 4, pp.3069-3071.
- (8) Park, J. H. and Baek, Y. S., 2004, "Levitation Characteristics of Magnetic Wheel," *IEEE Transactions on Magnetics*, submitted for publication.