

부분 차폐된 동전기 휠의 개방 영역 크기 조절을 통한 전도성 평판의 제어

Control of Conductive Plate Through Varying the Open Area Size of the Partially, Magnetically Isolated Electrodynamic Wheel

정 광 석*
(Kwang Suk Jung¹)

¹Korea National University of Transportation

Abstract: Shielding the air-gap magnetic field of the electrodynamic wheel below a conductive plate and opening the shielding plate partially, a thrust force and a normal force generate on the conductive plate at the open area. But, as only the variable controlling both forces is a rotating speed of the electrodynamic wheel, it is very difficult to control the forces independently by the speed. So, we discuss a novel method controlling the forces effectively through manipulating a size of the open area. The independent control is made possible by virtue of the feature that the relative ratio between both forces is irrelevant to an air-gap length and determined uniquely for a specific rotating speed of the wheel. Therefore, the rotating speed and the size of open area become new control variables. The feasibility of the method is verified experimentally. Specially, the controllable magnetic forces are used in a noncontact conveyance of the conductive plate.

Keywords: conveyance of conductive plate, electrodynamic wheel, independent control, magnetic levitation

1. 서론

전도체와 대면하여 고속으로 회전할 때 발생하는 동전기력(electrodynamic force)을 이용하는, 주기적으로 극성이 반복되는 영구자석(PM: Permanent Magnet) 어레이를 동전기 휠(electrodynamic wheel) 혹은 마그네트 휠(magnet wheel)이라 하는데 일반적인 회전 모터와 같이 축형(axial type)과 레디알형(radial type)으로 구분된다[1-3]. 축형 동전기 휠은 그림 1과 같이 동일 평면상에서 원주방향으로 정렬되고 동시에 극성면에 수직인 방향으로 형성되어 회전하는 PM 어레이를 의미하며 이에 대별되는 레디알형은 극이 반경 방향으로 형성되어 회전하는 어레이를 의미한다. 이러한 동전기 휠은 동일한 동전기 원리를 갖는 다상 전원(multi-phase power)에 의한 이동 자기장(traveling magnetic field) 생성을 PM 어레이의 기계적인 회전에 의존하기 때문에 부수적인 구동 장치가 추가되지만 발생하는 힘 밀도가 상당히 높기 때문에 다양한 응용이 모색되고 있다.

동전기 휠은 전도체의 반송에 효과적으로 이용할 수 있는데 그림 1에서와 같이 전도체에는 휠의 회전에 따라 반발력 F 뿐만 아니라 회전 방향으로 강한 견인토크 T 가 동시에 발생된다. 따라서 전도체에 이동 방향성을 부여하기 위해 견인토크를 추력으로 이용하는 방법과 이러한 추력을 반발력 F

에 독립적으로 제어할 수 있는 방법이 필요하다. 견인토크의 추력 전환은 전도체와 휠을 부분적으로 중첩시키거나[4] 휠에 의해 생성되는 공극 자기장을 차폐시키고 일부분만 개방시켜 해결하는 방법이 제안되었다[5,6]. 이때 전자의 경우 중첩 영역을 가변시켜도 생성된 추력은 부상력에 강하게 연성되어있으며 따라서 전도판의 이동 속도를 줄이기 위해 휠 속도를 줄이면 부상 높이가 같이 감소하는 제약이 있다. 후자의 경우 개방 영역의 위치를 회전시켜 추력을 독립적으로 제어할 수 있는 방법이 제안되었지만 휠의 공칭 회전 속도 근방에서 추력은 속도 변화에 둔감하고 따라서 휠을 더욱 고속으로 회전시켜도 추력의 크기 변화에 미치는 영향이 상당히 작기 때문에 전도판의 속도 가변 구간이 대단히 협소한 단점이 있다. 본 논문에서는 부분 차폐된 축형 동전기 휠을 대상으로 동전기 휠의 이축 자기력을 독립적으로 제어할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 이를 전도성 평판의 비접촉 반송에 적용하여 검증한다.

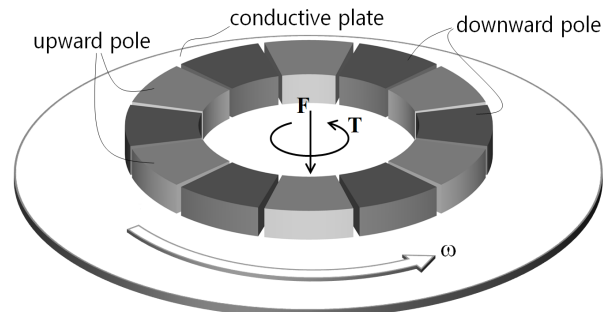


그림 1. 축형 동전기 휠의 자극 패턴 개념도.
Fig. 1. Periodical pole pattern of the axial electrodynamic wheel.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 12. 5., 수정: 2012. 1. 9., 채택확정: 2012. 1. 11.

정광석: 한국교통대학교 기계공학과(ksjung@cjnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

※ 이 논문은 부분적으로 2009년 정부재원(교육과학기술부 학술연구 조성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(2009-0071607).

II. 동전기 휠의 부분차폐 개념 및 이론적 모델링

동전기 휠을 구성하는 PM 어레이의 공극 자기장을 차폐시키고 일부분만 개방시켜 추력을 얻는 방법은 회전 모터를 원주 방향으로 펼쳐놓으면 선형 모터가 되는 원리와 유사하다. 그림 2에서와 같이 차폐되지 않고 개방된 영역(120°)과 대항하는 전도판에는 PM 어레이의 회전에 따라 부채꼴의 접선 방향으로 추력이 생성되는데 따라서 이러한 개방 영역의 크기를 조절하면 추력과 부상 반발력의 크기를 가변시킬 수 있음을 쉽게 알 수 있다. 이 때 그림의 상부 개방 영역은 과도하면 생성 추력이 오히려 감소하므로 180° 이내여야 하고 PM 어레이의 강한 흡인력에 따른 상부 프레임의 구조적인 변형을 고려하여 일정 수준으로 제한되어야 한다.

동전기 휠의 회전에 의해 대면하는 전도성 평판에 발생하는 자기력은 휠을 원주 방향을 따라 펼쳐놓은 등가 선형 모델에 분산 변수 장 이론(distributed parameter field theory)을 적용하여 유도할 수 있다. 그림 3에 묘사된 선형 모델의 좌표계를 기준으로 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 이용하여 추력 F_x 와 반발 부상력 F_z 를 유도하면[7]

$$F_x = \frac{\sigma \lambda L U_s}{2} \int_g^h \text{Re}(B_z \cdot B_z^*) dz \quad (1)$$

$$F_z = -\frac{\sigma \lambda L U_s}{2} \int_g^h \text{Re}(B_z \cdot B_x^*) dz \quad (2)$$

위 식에서 σ, L, λ, U_s 는 각각 이차측 전도체의 도전율과 y축으로의 너비 그리고 PM 어레이의 전체 파장 길이와 선속도를 나타낸다. 또한 적분식 안의 Re와 상첨자 *는 실수

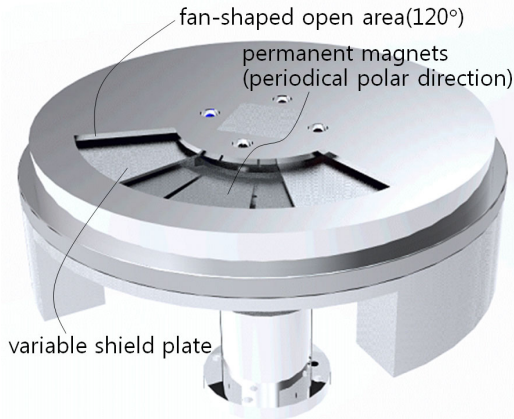


그림 2. 동전기 휠의 공극 자기장의 부분차폐를 통한 선형 추력 발생과 크기 조절 메커니즘.

Fig. 2. Concept of variable linear thrust force generation through a partial shield of air-gap field for the electrodynamic wheel.

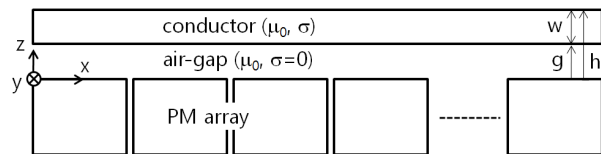


그림 3. 자기력 해석을 위한 동전기 휠의 선형 등가 모델.

Fig. 3. Linear equivalent model of the axial electrodynamic wheel for its force analysis.

표 1. 전도성 평판의 반송 시험을 위한 동전기 휠의 제원.

Table 1. Specification of the electrodynamic wheel for a conveyance test of conductive plate.

ITEM		Specification
Permanent magnet (PM)	Pole number	12
	Section	fan-shape
	Radius	36mm×60mm
	Height	10mm
Radial distance to pm from open area		5mm
Range of open area		0°~120°
Nominal air-gap length		4mm

부(real part)와 공액(conjugate) 복소수를 의미한다. 결국 자기력 계산은 전도체 영역에서의 자기장 B_x, B_z 의 계산으로 귀결된다. 공극 자기장 방정식에 경계조건을 대입하여 유도된 z축 위치에 따른 자기장에 대한 이전 결과를 참조하면[8,9].

$$B_x = \frac{j\zeta B_m (\xi \cosh[(h-z)\zeta] + \zeta \sinh[(h-z)\zeta])}{\Delta} \quad (3)$$

$$B_z = \frac{\xi B_m (\zeta \cosh[(h-z)\zeta] + \xi \sinh[(h-z)\zeta])}{\Delta} \quad (4)$$

여기에서 B_m, ξ 는 전도체 하면에서의 자기장 피크 값과 파수(propagation constant) 즉, π/τ 를 나타내는데 τ 는 PM 어레이의 한 파장 길이이다. 또한 위 식에서 ζ, Δ 은

$$\zeta = \sqrt{\xi^2 + j\mu_0 \sigma \xi U_s}$$

$$\Delta = e^{g\xi} \zeta \xi \cosh[w\zeta] + \sinh[w\zeta] (\xi^2 \cosh[g\xi] + \zeta^2 \sinh[g\xi])$$

이다. (3), (4)와 같은 자기장 식을 대입하여 유도된 자기력 (1)과 (2)는 후술하는 전도성 평판의 반송 시험에 이용된 표 1의 제원을 갖는 동전기 휠에 대한 실제 실험 결과와 비교하면 약간의 차이가 있다. 이러한 오차를 야기하는 인자는 다양하지만 본 연구에서는 휠의 곡률에 의한 영향과 표피 효과(skin effect)를 고려하여 자기력을 보정하였다. 우선, 12극 어레이에 대해 120°가 개방되어 있다면 4극의 PM이 이에 해당되고 따라서 이웃하는 PM간의 중심선은 4극 원호의 접선 방향에 대해 45°와 15°씩 어긋나있다. 따라서 추력에 대한 보정 인자 Q는

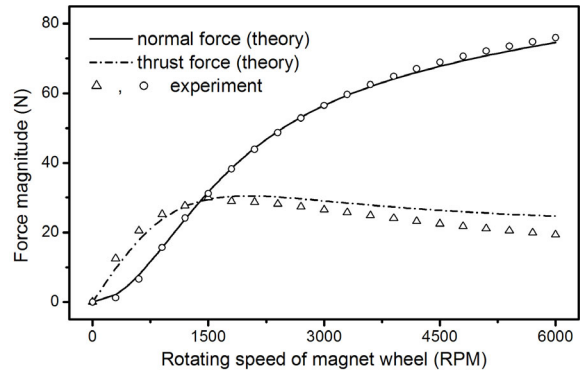


그림 4. 유도된 자기력 이론식과 실험 결과와의 비교.

Fig. 4. Comparison between the derived theoretical formula for magnetic force and experimental result.

$$Q = \frac{(2\cos(\pi/4) + 2\cos(\pi/12))}{4} = 0.837 \quad (5)$$

가 되며 표피 효과는 휠의 속도에 연관되어 전도성 평판의 전도도 σ 에 영향을 미치므로 이를 고려한 보정된 전도도 σ_c 는 다음과 같다[7].

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\sigma}{\mu_0 w^2 \omega} \left[\frac{\cosh(w\sqrt{2\mu_0 \omega \sigma}) - \cos(w\sqrt{2\mu_0 \omega \sigma})}{\sinh(w\sqrt{2\mu_0 \omega \sigma}) + \sin(w\sqrt{2\mu_0 \omega \sigma})} \right]} \quad (6)$$

위 식에서 ω 는 동전기 휠의 회전 각속도를 나타내는데 표 1의 제원을 갖는 동전기 휠에 대해 위 보정 계수를 이용하여 이론 결과와 실험 결과를 비교하면 그림 4와 같다. 추력의 경우 회전 속도가 커짐에 따라 오차가 증가하는 경향을 보이지만 실제 전도판의 열적인 문제로 휠의 회전 속도는 3-4000RPM 이내로 제한되므로 유도된 이론식은 전체적으로 제어 시험 시 속도에 따른 힘 이득(gain)으로 이용하기에 적합한 수준으로 판단된다.

III. 동전기 휠의 이축 독립 제어 방법론

전술한 바와 같이 제안된 방법론에서 동전기 휠의 자기력 제어는 휠의 회전 속도와 개방 영역의 크기 조절을 통해 가능하다. 그러나 추력과 수직력의 이축력은 두 변수에 모두 밀접하게 연관되어있기 때문에 이축력을 독립적으로 제어할 수 있는 방법이 필요하다.

우선, 표 1에 묘사된 동전기 휠의 바깥 차폐판은 120° 개방되어있고 이 영역에서 부분 차폐판이 실제 개방 영역을 결정하므로 개방 영역에 따른 추력 F_T 와 수직력 F_N 을 전 영역에서의 추력 f_T 와 수직력 f_N 을 기준으로 표현하는 것이 필요하다. 단순히 기하학적 비율 η 만을 고려하면

$$F_T = \eta f_T(g, \omega) \quad (7)$$

$$F_N = \eta f_N(g, \omega) \quad (8)$$

과 같은데 위 관계의 타당성을 그림 5에 묘사하였다. 그림 5는 개방각을 0°에서 120°까지 변화시켜가며 측정된 자기력 값을 60°에서의 값으로 무차원화한 것이다. 그림에서 점선은 단순히 개방 영역 크기의 기하학적 관계를 나타낸 선인데 전 영역에 걸쳐 일정 오차 내에 있음을 알 수 있으며 따라서 기하학적 비율 η 만을 고려하여 전장의 자기력 이론식 (1), (2)를 이용하는 것이 가능함을 알 수 있다. 식 (7), (8)의 자기력 크기는 우측 독립 변수에서와 같이 공극 길이 g 에도 영향을 받지만 공극 변화에 관계없이 (7), (8)의 결과가 유효함을 실험을 통해 확인할 수 있다. 이론 결과를 이용하여 실제 공극 변화에 따른 f_T, f_N 을 시뮬레이션하면 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있는데 (7), (8)의 두 관계식에서 η 를 소거하기 위해 수직력을 추력으로 나누면 다음의 흥미로운 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{F_N}{F_T} = \frac{f_N}{f_T} = \Gamma(\omega) \quad (9)$$

즉, 상대 비 Γ 를 결정하는 변수에서 공극 g 가 제외되었다.

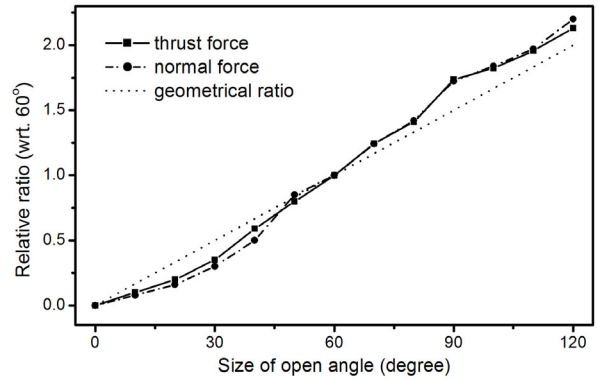


그림 5. 60° 개방각을 기준으로 한 개방 영역 변화에 따른 자기력의 상대 비.

Fig. 5. Relative ratio of magnetic forces according to a size of open area wrt. 60°.

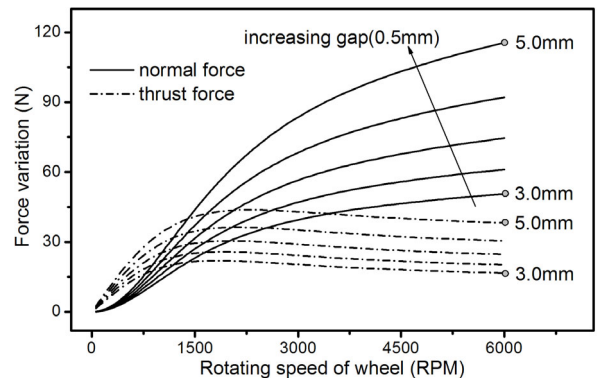


그림 6. 휠 속도와 공극 변화에 따른 힘 변화선도.

Fig. 6. Force variation for an air-gap length as well as a rotating speed of the electrodynamic wheel.

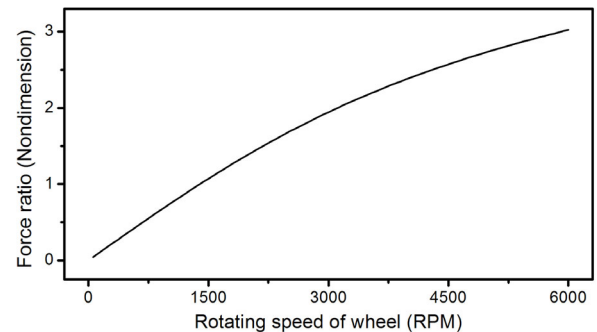


그림 7. 동전기 휠의 회전 속도 변화에 따른 자기력간의 상대 비.

Fig. 7. Relative ratio between normal force and thrust force for a rotating speed of the electrodynamic wheel.

이러한 결과는 그림 6의 공극 위치에 따라 수직력을 추력으로 실제 나눈 결과를 도시한 그림 7에서도 확인할 수 있는데 동전기 휠의 회전 속도 변화에 따른 자기력 상대 비 선도는 공극 변화에 상관없이 일정한 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 두 자기력의 독립 제어를 위한 중요한 단초를 제공하는데 특히 공극에 무관함과 더불어 힘의 상대 비의 특정 값에 해당하는 휠의 속도가 고유하게 결정되는 것을 알 수 있다.

실제 이론식 (1)과 (2)의 상대 비를 구해보면

$$\Gamma = \frac{\sinh[2wp_1]p_2 - \sin[2wp_2]p_1 + \mu_0\sigma\chi U_s/2}{\sinh[2wp_1]p_1 + \sin[2wp_2]p_1 + \xi\chi} \quad (10)$$

$$\chi = \cosh[2wp_1] - \cos[2wp_2]$$

인데 p_1, p_2 는 ζ 의 실수부와 허수부를 나타낸다. 위 식에서 공극에 관련된 변수는 전부 제거된 것을 알 수 있으며 따라서 Γ 는 공극과 무관함을 알 수 있다. 결론적으로 목표 추력과 수직력이 결정되면 두 힘간의 상대 비를 통해 휠의 목표 속도가 결정되는 방식으로 두 힘간의 독립 제어가 가능하다. 물론 특정 상대 비를 낚는 자기력 조합은 고유하게 결정되지 않기 때문에 F_N, F_T 에 대해 (10) 혹은 그림 7로부터 결정된 휠의 회전 속도 ω 와 측정된 공극 g 를 (7) 혹은 (8)에 대입하여 개방각 비율 η 를 계산한다.

IV. 전도성 평판의 반송 시험

제안된 제어 방법론의 실효성을 검증하기 위해 표 1의 제원을 갖는 복수개의 동전기 휠로 구동되는 전도성 평판의 반송 시스템을 그림 8과 같이 구축하였다. 각 유닛은 휠 회전을 모터와 차폐판 회전 모터로 구성되어있으며 동일한 응답 속도를 갖는 모터가 이용되었다. 또한 전도판에 유기된 유도력이 갖는 큰 시상수로 인해 모터 자체의 응답 특성은 시험 결과에 큰 영향을 주지는 않는다. 각각의 휠에 의한 이축 자기력은 전장에서 논의한 방법론을 적용하여 독립적으로 제어된다. 따라서 평판은 4개의 추력과 4개의 수직력에 의해 공간상에 부상되어 추진되는 시스템이며 본 장에서는 시스템 구현 과정과 주요한 시험 결과를 소개한다.

반송 개체인 전도성 평판의 재질은 구리이고 차폐판 재질은 강한 응집력을 갖는 퍼말로이로 제작되었다. 평판의 면내 위치(In-plane position; x, y, γ)는 레이저 변위계로 측정하고 면외 위치(Out-of-plane position; z, α, β)는 평판 아래의 캡센서로 측정한다. 측정된 위치와 목표 변위간의 오차에 간이한 선형 제어기를 적용하여 얻어진 평판 중심에서의 제어력은 역동역학 해석(inverse-dynamic analysis)을 통해 각 동전기 휠의 자기력으로 변환된다. 실제 평판의 목표 경로를 x 축으로 Δx 만큼 이동시킨 경우에 대해 평판 무게 중심에서 그림 9

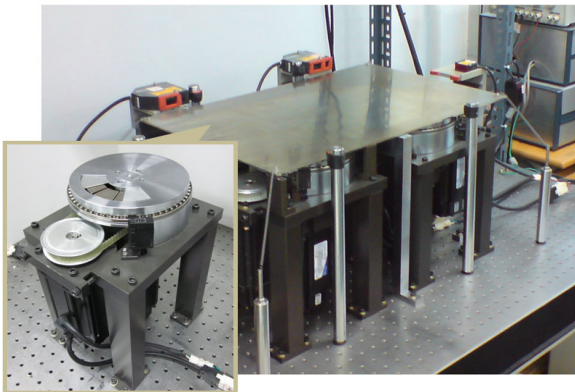


그림 8. 전도성 평판의 비접촉 반송 시스템 사진.
Fig. 8. Photograph of the noncontact conveyance system of conductive plate.

의 힘 다이어그램을 통해 힘 변환 관계식을 구해보면

$$\begin{pmatrix} F_{1T} \\ F_{2T} \\ F_{3T} \\ F_{4T} \end{pmatrix} = \mathbf{H}_1^{-1} \begin{pmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ I\ddot{\gamma} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \begin{bmatrix} -1 & -1 + \frac{\Delta x}{2\rho} & \frac{1}{2\rho} \\ -1 & 1 - \frac{\Delta x}{2\rho} & -\frac{1}{2\rho} \\ 1 & -1 - \frac{\Delta x}{2\rho} & -\frac{1}{2\rho} \\ 1 & 1 + \frac{\Delta x}{2\rho} & \frac{1}{2\rho} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ I\ddot{\gamma} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} F_{1N} \\ F_{2N} \\ F_{3N} \\ F_{4N} \end{pmatrix} = \mathbf{H}_0^{-1} \begin{pmatrix} m\ddot{z} \\ I\ddot{\alpha} \\ I\ddot{\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 - \frac{\Delta x}{\rho} & \frac{1}{\rho} & \frac{1}{\rho} \\ 1 - \frac{\Delta x}{\rho} & -\frac{1}{\rho} & \frac{1}{\rho} \\ 1 + \frac{\Delta x}{\rho} & \frac{1}{\rho} & -\frac{1}{\rho} \\ 1 + \frac{\Delta x}{\rho} & -\frac{1}{\rho} & -\frac{1}{\rho} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} m\ddot{z} \\ I\ddot{\alpha} \\ I\ddot{\beta} \end{pmatrix} \quad (12)$$

와 같다. 각각의 동전기 휠에 요구되는 제어 입력 F_{iT}, F_{iN} 이 결정되면 전장에서 논의한 바와 같이 식 (10)을 이용하여 추력, 수직력간의 상대 비 Γ_i 에 따라 휠의 회전 속도 ω_i 가 결정되고 측정된 면외 위치를 통해 계산된 공극 정보와 함께 식 (7) 또는 (8)을 이용하여 각 동전기 휠의 개방각 비율 η_i 가 결정된다. 실제 제어 입력 변수 ω_i, η_i 를 통해 휠 회전 모터와 차폐판 모터가 구동되고 생성된 자기력으로 평판이 이동된다. 이러한 제어 흐름 선도를 그림 10에 나타내었다.

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 그림 10의 블록선도에 기초하여 평판의 반송 시험을 수행하였다. 입력 프로파일은 평판의 x 축으로의 조화 함수이며 진폭은 30mm, 주기는 4초로 하였다. 동전기 원리의 상대적으로 느린 응답 특성을 고려하여 입력 패턴을 선정하였으며 시험 결과는 x 축에 대해 그림 11, 나머지 축에 대해서는 그림 12와 같다. 평판은 하부 하우징 사각 모서리에 안착된 지지대와 스프링으로 연결되

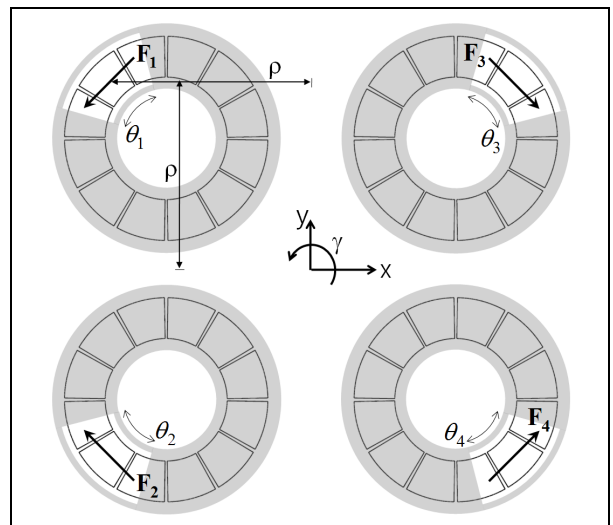


그림 9. 반송 시스템의 힘 다이어그램.
Fig. 9. Force diagram of the noncontact conveyance system.

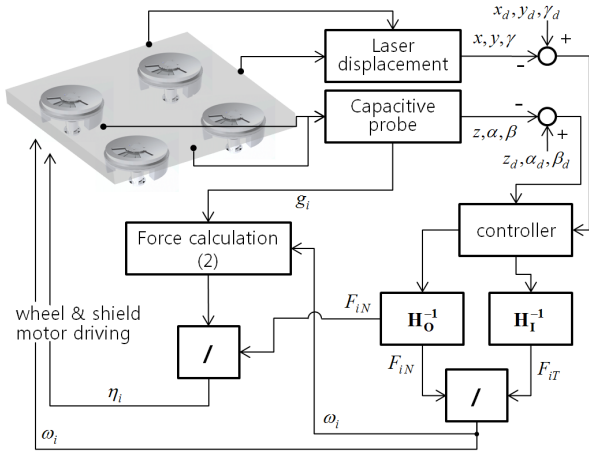


그림 10. 자기력의 독립 제어 알고리즘을 포함한 시스템의 제어 블록 선도.
 Fig. 10. Control block diagram including an independent control algorithm of two-axis magnetic forces.

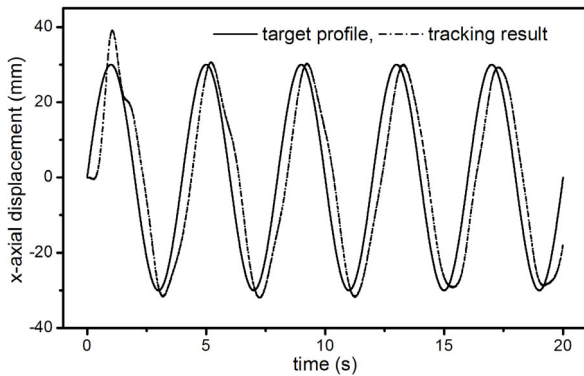


그림 11. 조화 입력에 대한 x축의 응답 시험 결과.
 Fig. 11. Tracking result into x-axis for a sinusoidal input.

어있고 일정 속도로 휠 모터를 구동시켜 4mm만큼의 공극으로 부상시킨 상태를 초기상태로 하였다. 따라서 그림 12의 z 축 변위의 0 mm는 공극 4 mm를 의미한다. x축으로의 응답 곡선 결과를 통해 목표 입력 전 구간에서의 시간 지연을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 유도기에 내재된 특성과 개방 각의 기계적인 조절을 통한 시간 상승에 기인한다. 특히 이러한 시간 지연으로 인한 오차는 다른 축으로의 제어 결과에도 영향을 주어 설계 입력을 모두 0으로 설정한 다른 모든 축에서의 응답 곡선에 x축으로의 조화함수 입력 패턴 형상이 진폭은 다르지만 동일한 주기로 반복되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 측정 프레임간의 배치 오차에 기인하는 바가 가장 크지만 그림 9에서와 같이 각 동전기 휠의 추력이 모두 접선 방향을 향하고 있고 따라서 면내 운동의 경우 축간에 강한 연성이 나타남은 불가피한 것으로 판단된다. 이에 반해 수직력의 경우 이러한 추력 방향에 덜 민감하고 따라서 면외 운동의 응답 오차 수준이 면내 운동에 비해 훨씬 작으리라는 것을 충분히 예측 가능하다.

그림 11의 x축 추종 성능 시험시 실제 제어 변수인 각 휠의 회전 속도 ω_i 와 개방 각 변위 θ_i 를 나타내면 각각 그림 13, 그림 14와 같다. 추종 시험의 초기 상태는 전술한 바와

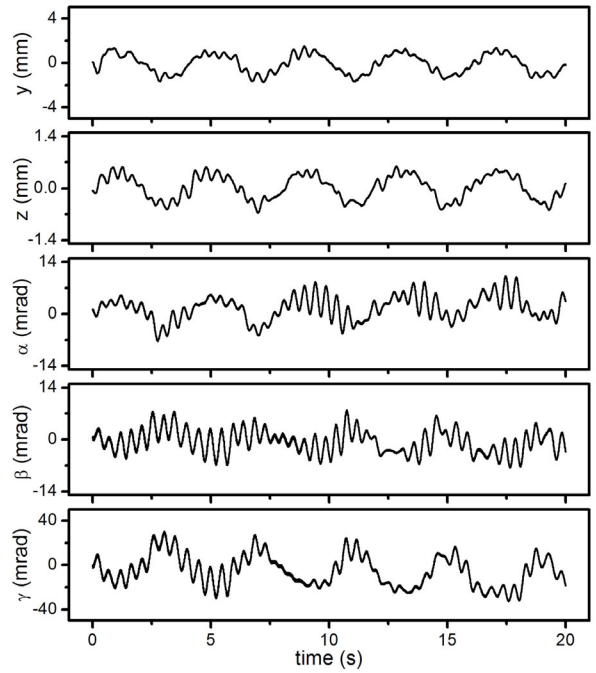


그림 12. x축으로의 조화함수 추적 시험시 다른 축으로의 응답 시험 결과.
 Fig. 12. Regulation test result of the other axes for x-directed tracking with a sinusoidal input profile.

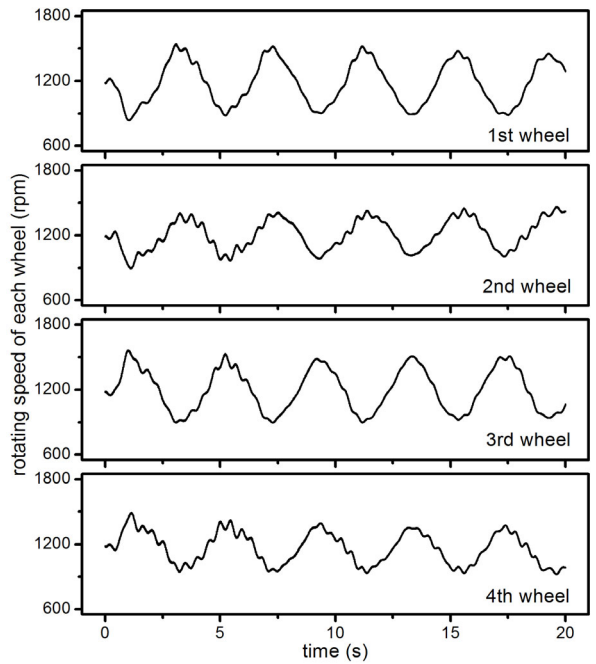


그림 13. x축으로의 조화함수 추적 시험시 각각의 동전기 휠 모터의 회전 속도 변화.
 Fig. 13. Variation of rotating speed of each electrodynamic wheel for x-directed tracking with a sinusoidal input profile.

같이 공칭 위치에서 단순히 부상되어있는 상태이며 그림 13의 초기 회전 속도와 그림 14의 초기 개방 각은 공칭 위치에서 평형 상태를 이루는 동전기 휠의 상태 변수이다. 회전 속도의 경우 전체적으로 900 rpm에서 1500 rpm 사이를 왕복 운

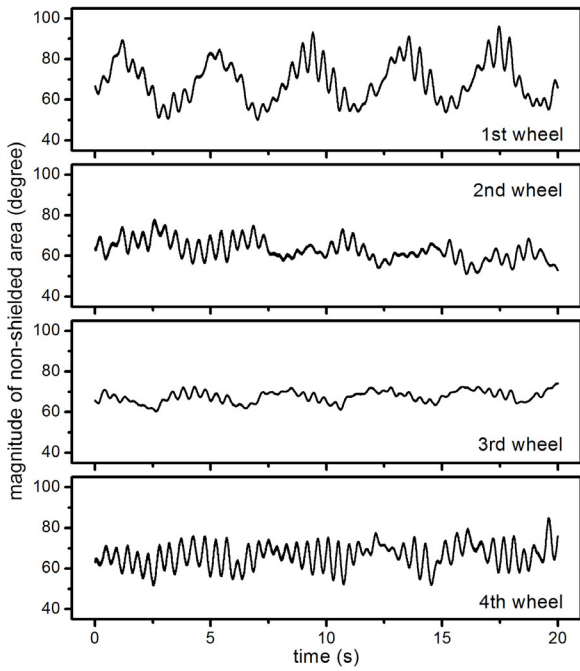


그림 14. x축으로의 조화함수 추적 시험시 각 동전기 휠의 개방 각 변화.

Fig. 14. Variation of non-shielded area for x-directed tracking with a sinusoidal input profile.

동하는 유사한 경향을 나타내지만 첫 번째, 두 번째 휠 모터와 세 번째, 네 번째 휠 모터는 각각 동기화 된 것처럼 구동되며 각 휠 모터간에 90도 정도의 위상 차(phase shift)가 존재함을 알 수 있다. 각 휠의 차폐판의 개방 각 변화는 그림 14와 같이 더욱 차별화된 특성을 나타내는데 회전 속도의 주기적인 특성이 두 번째, 네 번째 휠 차폐판의 경우 전혀 나타나지 않는 것을 알 수 있으며 개방 각의 전체 진폭도 첫 번째 차폐판의 경우(θ_1) 40° 정도이지만 세 번째 차폐판의 경우 12~13°에 불과하다. 특히, 동일한 시험을 반복할 경우 평판 위치에 대해서는 그림 11과 크게 다르지 않은 결과를 얻지만 개방각의 경우 그림 14와 상당히 상이한 결과를 확인할 수 있는데 이는 초기 상태에서의 오차에 크게 의존한다. 평판이 공간상에 완전히 부상되어있는 상태를 초기 상태로 갖지만 이때의 각 축 오차가 시험 전 기간에 걸쳐 영향을 주기 때문에 이러한 제어 변수의 반복된 특성이 나타나지 않는 것으로 판단된다.

앞서 시험 결과의 주요한 한계는 여러 관점에서 논의될 수 있다. 우선, 시스템의 제어 이득을 제한하는 인자는 휠 모터의 최대 속도가 아니라 평판의 무게이다. 각 동전기 휠의 수직력과 평형을 이루는 힘은 평판의 무게이기 때문에 수직력에는 제한이 있을 수 밖에 없고 또한 휠은 고속으로 회전하기 때문에 휠의 회전 방향을 순간적으로 바꾸는 것은 불가능하다. 휠의 회전 방향이 항상 일정하게 유지되므로 추력 역시 항상 공칭력이 있는 바이어스 상태에 놓여 있고 따라서 평판의 면내 운동은 각 휠 단독의 양방향 제어가 아니라 공칭력에 의해 동적 평형 상태에 있는 각 휠의 추력을 조합하여 제어되기 때문에 제어 응답에 한계가 있을 수 밖에 없다. 이러한 연유로 각 축의 응답 속도와 일정 수준의 오차는 불

가피하다. 그러나 동전기 휠을 이용한 상기 시스템과 알고리즘은 평판의 초정밀 제어를 위한 것이 아니라 단순히 비접촉 반송을 위해 제안되었고 따라서 묘사된 시험 결과를 통해 제안된 동전기 휠의 제어 알고리즘과 이를 이용한 동전기 휠 구동 시스템이 전도성 평판의 반송 목적으로는 허용 가능한 수준인 것으로 판단된다.

V. 결론

동전기 휠의 강한 견인 토크를 추력으로 전환하고 이를 효과적으로 제어하여 전도성 평판의 반송에 이용할 수 있는 방법론을 논의하였다. 동전기 원리에 의해 고속으로 회전하는 PM 어레이의 공극 자기장을 부분 차폐하여 얻어진 추력은 수직력과 강한 연성을 갖기 때문에 수직력과 선형화된 추력간의 독립 제어를 위해 두 힘간의 상대 비가 휠의 특정 회전 속도에 관계함을 이론적으로 유도하고 이러한 특성을 이용하여 새로운 제어 변수로 휠의 회전 속도와 차폐판의 개방각 크기로 전도성 평판을 제어할 수 있음을 보였다.

연속 웹 공정에 의해 생산되는 선재 혹은 판재의 경우 롤러와의 기계적인 접촉으로 인해 기계적인 덴트(dent)나 스크래치, 먼지나 파티클에 의한 오염으로 인해 최종 제품의 표면 품질에 대대한 영향을 미치는 바 제조 공정 상에서 이러한 기계적인 지지 혹은 이송 방법을 대체할 수 있는 효과적인 기술의 개발이 절실한 실정이다[10-12]. 동전기 휠은 PM 어레이의 전기 동역학적 원리를 이용하여 대상 개체에 자기력을 발생시키는 방식이고 힘 밀도가 대단히 높기 때문에 현실적인 대안이 될 수 있으나 제어성의 문제로 제한된 트랙이나 가이드에 의해 구속되는 환경에서의 이송 장치에 일부 이용될 뿐이었다. 따라서 본 연구에서 제안된 개별적인 동전기 휠의 이축력 독립 제어 방법론은 전도성 평판의 비접촉 반송에 국한되지 않고 다양한 응용을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J. Bird and T. A. Lipo, "An electrodynamic wheel : integrated propulsion and levitation machine," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, vol. 3, pp. 1410-1416, 2003.
- [2] N. Fujii, K. Ogawa, and T. Matsumoto, "Revolving magnets wheels with permanent magnets," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 116, no. 1, pp. 106-118, 1996.
- [3] J. H. Park, J. H. Choi, D. H. Kim, and Y. S. Baek, "Parametric design of the levitation mechanism for maglev planar transportation vehicle," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 40, no. 4, pp. 3069-3071, 2004.
- [4] N. Fujii and M. Chida, "Three dimensional force of magnet wheel with revolving permanent magnets," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, no. 5, pp. 4221-4223, 1997.
- [5] K. B. Shim, S. H. Lee, and K. S. Jung, "Omni-directional magnet wheel using magnetic shield," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 26, no. 9, pp. 72-80, 2009.
- [6] K. S. Jung, K. B. Shim, and S. H. Lee, "Contact-less conveyance of conductive plate by controlling permalloy sheet for magnetic shield of air-gap magnetic field from magnet wheels," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 27, no. 7, pp. 109-116, 2010.

- [7] S. A. Nasar and I. Boldea, *Linear Motion Electric Machines*, JOHN WILEY & SONS, New York, 1976.
- [8] K. S. Jung and S. H. Lee, "Integrated driver for the full rotation using six-axial forces by the induction type of axial-gap motor," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 12, no. 8, pp. 798-804, 2006.
- [9] K. S. Jung, "Screw motion and control of conductive rod by rotating a spiral electrodynamic wheel," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 9, pp. 882-887, 2011.
- [10] T. Ohji, T. Shinkai, K. Amei, and M. Sakui, "Application of Lorentz force to a magnetic levitation system for a non-magnetic thin plate," *Journal. of Material Processing Technologies*, vol. 181, pp. 40-43, 2000.
- [11] C. W. Lee, H. J. Kim, H. K. Kang, and K. H. Shin, "A study on the mathematical tension model for a non-contact transfer of a moving web in R2R e-printing systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 9, pp. 894-898, 2009.
- [12] H. Hayashiya, D. Iizuka, H. Ohsaki, and E. Masada, "A novel combined lift and propulsion system for a steel plate conveyance by electromagnets," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, pp. 2093-2095, 1998.



정 광 석

1995년 연세대학교 기계공학과(공학사).
 1997년, 2001년 연세대학교 기계공학과
 (공학석사/공학박사). 1997년 LG산전.
 2001년~2002년 LG생산기술원. 2003년~
 현재 한국교통대학교 기계공학과 교수.
 관심분야는 초정밀 계측 및 제어, 서피
 스 모터 및 엔코더, 광메카트로닉스, FPD/태양광 제조장비 등.