한국정밀공학회지 제 27권 7호 pp. 109-116 July 2010 / 109
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 27, No. 7, pp. 109-116

마그네트 휠의 공극 자기장 차폐판 조절에 의한 도전성 평판의 비접촉 반송

Contact-less Conveyance of Conductive Plate by Controlling Permalloy Sheet for Magnetic Shield of Air-gap Magnetic Field from Magnet Wheels

정광석 [1,✉], 심기본 [2], 이상헌 [3]
Kwang Suk Jung[1,✉], Ki Bon Shim[2] and Sang Heon Lee[3]

1 충주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungju National Univ.)
2 충주대학교 기계공학과 대학원 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chungju National Univ.)
3 안동대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Andong National Univ.)
✉ Corresponding author: ksjung@cjnu.ac.kr, Tel: 043-841-5135

Manuscript received: 2009.12.29 / Revised: 2010.4.27 / Accepted: 2010.5.13

The magnet wheel which generates on its interfacing conductive part a repulsive force and a traction torque by rotation of permanent magnets is used to manipulate the conductive plate without mechanical contact. Here, the air-gap magnetic field of the magnet wheel is shielded partially to convert the traction torque into a linear thrust force. Although a magnitude of the thrust force is constant under the fixed open region, we can change the direction of force by varying a position of the shield sheet. So, the spatial position of conductive plate is controlled by not the force magnitude from each magnet wheel but the open position of shield sheet. This paper discusses non-contact conveyance system of the conductive plate using electromagnetic forces from multiple magnet wheels.

Key Words: Decouple Control (비연성 제어), Electrodynamic Force (동전기력), Magnet Wheel (자기차륜), Magnetic Shield (자기차폐), Non-contact Conveyance (비접촉 반송)

1. Introduction

평판(sheet or plate) 혹은 스트립(strip)의 압연생산공정에서 가공 장치간의 이송은 롤러를 다수 배치한 롤러 궤도를 이용하여 반송하는 방법이 채용되고 있다. 판 혹은 스트립의 이송시 판과 지지롤(supporting roll)간의 마찰 구동은 지지롤의 지지력과 접촉각에 의해 구동상태가 결정되는데 이 때 판과 롤 사이에 이물질의 개입으로 인해 사행이 발생할 수 있고 기계적 접촉에 의해 표면에 긁힘 자국(scratch)이나 패인 자국(dent)이 발생할 수도 있으며 롤의 열팽창 만곡(roll thermal crown)과 같은 원인으로 다양한 표면 결함이 발생할 수 있어 제품의 최종 품질에 직접적인 악영향을 주고 있다.[1] 따라서 수많은 세정 공정에 의해 이물질을 중간 단계에서 필터링하고 있으나 해당 작업의 열악한 환경으로 인해 근본적인 차폐는 불가능하며 고속 이송시 이러한 문제는 더욱 커진다. 따라서 이러한 공정에서 모재를 접촉없이 핸들링하는 것은 매우 이로울 수 있다.[2-4] 본 논문에서는 이전 연구 [5] 에서 논의된 전기동역학적(electrodynamic) 원리에 기초한 마그네트 휠을 대상으로 휠의 공극 자기장을 부분 차폐하여 선형 추력을 얻는 방법을 확장하여 복수개의 마그네트 휠을 이용하여

도전성 평판을 비접촉으로 반송하는 시스템을 논의한다.

2. Generation mechanism of two-axial forces from magnet wheel

마그네트 휠은 Fig. 1 에서와 같이 원주 방향으로 교차 극성을 갖는 PM(Permanent Magnet, 영구자석) 배열을 기계적으로 회전시켜 공극(air-gap)을 두고 마주하는 전도판에 반발 부상력을 발생시키는 장치를 일컫는다. 이 때 동전기 효과로 인해 휠의 회전 방향으로 강한 견인 토크(traction torque), 즉 유도력이 발생하는데 다상(multi phase) 코일에 의한 유도력에 비해 힘밀도(force density)가 월등히 높기 때문에 다양한 응용이 시도되어왔다.[2-4,6-8]

2.1 Partial magnetic shield of air-gap magnetic field from magnet wheel

도전성 평판의 구동기로서 마그네트 휠을 이용하기 위해서는 반발 부상력외에 견인 토크를 추력으로 전환하는 방법이 필요하다. 이를 위해 휠을 평판 모서리에 걸쳐놓고 오버랩 면적을 조절하여 추력을 얻는 방법 [4,7] 그리고 휠의 PM 을 Halbach 배열 형태로 구성하고 이를 평판과 수직하게 놓고 이축력을 발생시키는 방법 [2,8] 이 제안되었으나 생성된 추력과 부상력이 강하게 연동되어있어 판의 단순한 이송에는 적용이 가능하지만 특정 위치에서 판을 정지시킨다던가 아니면 특정 속도로 구동시키는 등의 제어 성능이 요구될 때에는 적용에 무리가 있다. 이를 보완하기 위해 저자들은 이전 연구에서 단동 마그네트 휠로부터 선형 추력을 얻기 위한 방법으로서 휠의 공극 자기장을 부분 차폐하여 차폐되지 않는 영역에서 선형화된 그리고 제어 가능한 추력을 얻는 방법을 제안하였는데 기본 개념은 다음과 같다.[5]

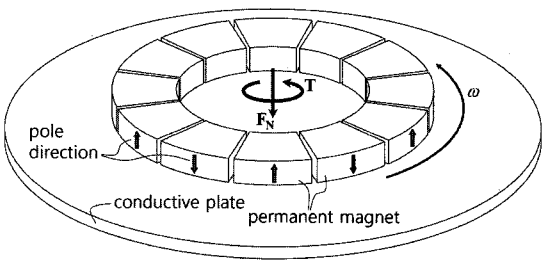

Fig. 1 Concept diagram of magnet wheel

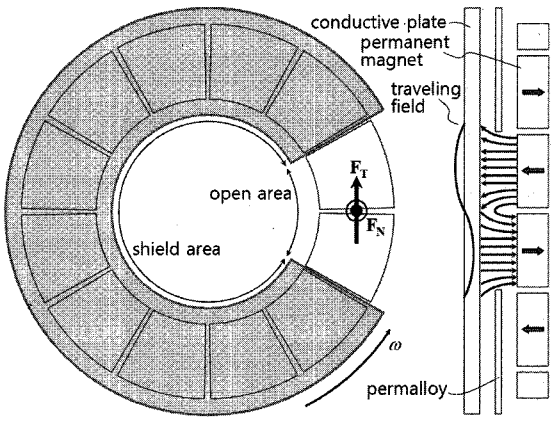

Fig. 2 Generation of linear thrust force through magnetic shield sheet opened partially

마그네트 휠의 PM 배열을 Fig. 2 에서와 같이 반시계 방향으로 ω 의 속도로 회전시키면 원주 방향으로 강한 이동 자기장(traveling field)이 생성되는데 이를 부분 차폐하면 차폐되지 않은 개방 영역에서는 일반 유도 모터와 동일한 원리로 전도판에는 접선 방향으로 $\mathbf{F_T}$ 의 추력과 반발 부상력 $\mathbf{F_N}$ 이 생성된다. 위의 그림 예시와 같이 12 극의 PM 배열 중 60°가 개방된 형태에서는 2 극 자기장이 이동하는 형태를 갖는다.

2.2 Independent control parameters for two-axial forces

마그네트 휠로부터 부분 차폐 개념을 이용하여 생성된 추력은 Fig. 3 의 case 'b'에서와 같이 개방 영역의 위치를 바꿔 그 방향을 바꿀 수 있다. 동

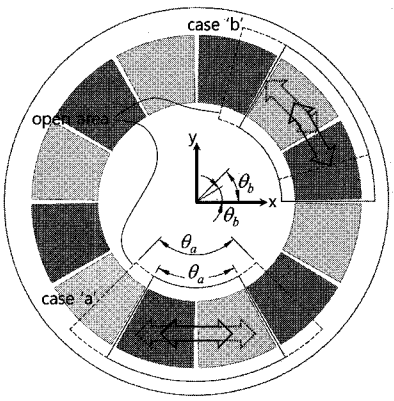

Fig. 3 Manipulation of force direction by change of open area

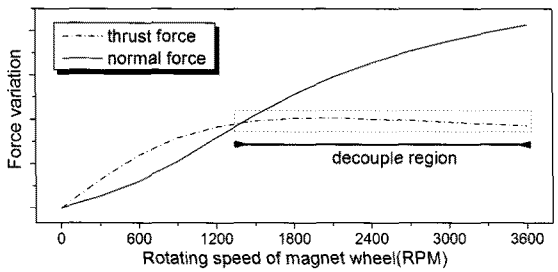

Fig. 4 Variation of two-axial forces according to rotating speed of magnet wheel

시에 case 'a' 에서와 같이 개방 영역의 크기를 바꾼다면 그에 따라 추력의 크기도 바꿀 수 있다. 하지만 영역의 크기가 180 도를 초과하면 자기장의 방향이 역전되기 때문에 추력의 크기는 오히려 감소한다. 복수개의 마그네트 휠을 조합하여 전도판을 구동시킬 때 추력 제어는 Fig. 3 의 두 방법 모두 적용할 수 있다.

Case 'a'와 같이 개방 영역의 크기 θ_a 를 통해 추력을 제어하는 경우 추력과 부상력이 휠의 회전 속도에 모두 강하게 연성되어있기 때문에 개방 영역의 크기가 바뀐다면 부상력 역시 연동되어 변화하기 때문에 회전 속도를 가변시켜 이를 보상해 주어야 한다. 이에 반해 case 'b'에서와 같이 추력의 방향 θ_b 를 통해 추력을 조절할 때에는 휠의 회전 속도가 일정하다면 추력의 크기 역시 일정하지만 회전 속도가 변화해도 일정 영역에서는 추력의 크기가 변하지 않는다. Fig. 4 는 Fig. 3 과 같은 12 극 마그네트 휠에 대한 휠 회전 속도 변화에 따른 자기력 변화 선도이다. 회전 속도 증가에 따라 부상력은 일정한 비율로 증가하지만 1200RPM 이상 영역에서 추력은 특정 값에 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 회전 속도 영역에서는 추력에의 영향없이 속도를 증감시켜 부상력을 독립적으로 제어할 수 있다. 이와 동시에 Fig. 3 에서 x 방향의 추력을 제어할 때에는 추력은 접선력의 벡터 성분 즉, $F\cos\theta_b$ 가 되므로 θ_b 를 조절하여 추력의 크기를 간접적으로 제어할 수 있다. 따라서 회전 속도로 부상력을 그리고 개방 영역의 위치로 추력의 크기를 독립적으로 제어할 수 있다. 물론 이러한 이축 제어는 단동 마그네트 휠의 경우 축 방향으로 안내 기구가 있을 경우에 한정되지만 후술하는 바와 같이 복수개의 휠을 대칭으로 배치한 도전판의 비접촉 반송 시스템에서도 효과적으로 이용할 수 있다.

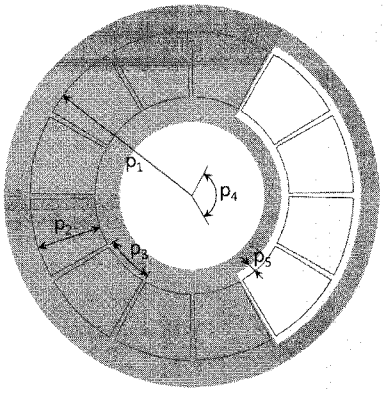

Fig. 5 Design parameters of single magnet wheel

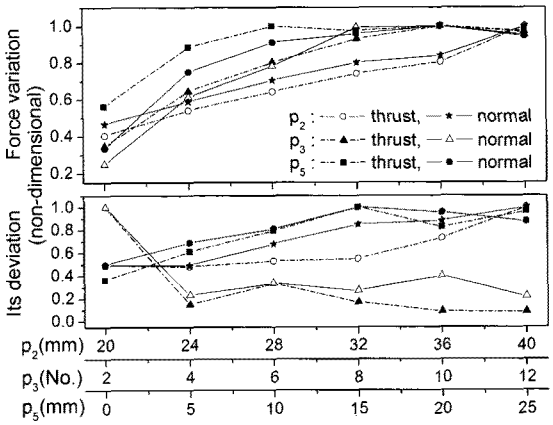

Fig. 6 Two-axial forces and their deviation for parameter change[5]

3. Force characteristic of magnet wheel

자기 차폐판을 포함한 마그네트 휠의 주요 설계 변수는 자기력에의 영향과 지지 프레임 강성 등을 고려하여 결정되는데 본 장에서는 범용 해석 툴인 *Maxwell v11.0* 의 모의 시험 결과를 기초로 하여 수행한 변수 결정 과정을 논의한다.

3.1 Design process of main parameters

마그네트 휠의 자기력에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 Fig. 5 에 도시한 바와 같이 PM 의 외경, 너비, 극수(pole number)를 나타내는 p_1, p_2, p_3 이다. 휠의 전체 반경 p_1 은 휠의 전체 부하를 결정하는 변수인데 본 연구에서는 네 개의 마그네트 휠로 550mm×360mm×4mm 의 동판을 7 mm 공극을 두고 안정되게 부상시킬 수 있도록 반복 시험을 통해

60mm 로 결정하였다. 외경에 기초한 기준 모델을 대상으로 주요 변수 변화에 따른 이축 자기력과 힘의 오실레이션 양을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 우선, p_2 의 경우 자기력 오실레이션에 큰 영향을 미치는 변수이며 너비와 폭이 균일할수록 오실레이션 크기가 작아진다. p_3 는 휠의 PM 극수에 의해 결정되는 값인데 8 극 이상에서는 자기력 크기에 거의 변화가 없으나 14 극 이상에서는 오히려 감소한다. 오실레이션 크기를 고려하여 12 극으로 결정하였으며 따라서 p_2, p_3 는 각각 24mm, 30°로 하였다. 자기 차폐판으로 인한 변수 p_4, p_5 는 개방 영역의 크기와 PM 모서리로부터의 반경 방향 거리를 나타내는데 p_4 의 경우 전술한 바와 같이 180°를 초과하면 오히려 추력의 크기가 감소되고 또한 두께 2mm 인 퍼말로이(permalloy) 재질의 차폐판을 중심과 외곽에서 지지해야 하기 때문에 구조적인 강성을 고려하여 120°로 하였다. p_5 의 경우 다른 제 변수값을 기준으로 대략 7-8mm 에서 자기력이 수렴해 가는데 역시 구조적인 문제로 인해 5mm 로 결정하였다.[5]

기준 모델인 Fig. 5 에서 PM 은 원주 방향으로 N, S 극이 반복되는데 이러한 조합 외에 PM 에 의한 자기장의 누설을 최소화하도록 폐형 구조를 갖는 Halbach 배열(자극 방향이 ↑, →, ↓, ←로 반복되는 형태)간의 비교 시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 예상한대로 N, S 극은 12 극을 기준으로 3 번 반복되므로 Fig. 5 모델에 비해 주기는 반으로 줄었지만 자기장이 닫힌 구조를 갖기 때문에 자기력의 평균치에는 거의 차이가 없다. 그러나 힘의 AC 오실레이션은 기존 모델에 비해 두 배 정도 커진 것을 확인할 수 있다.

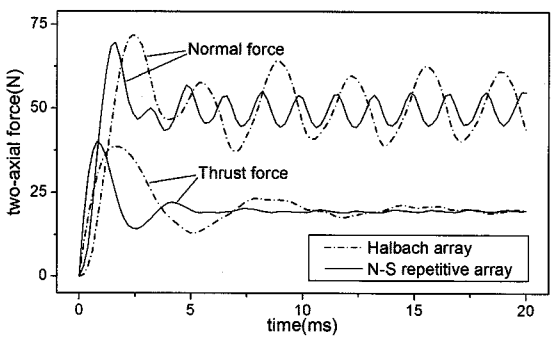

Fig. 7 Comparison of magnetic forces for Halbach array and Fig. 5

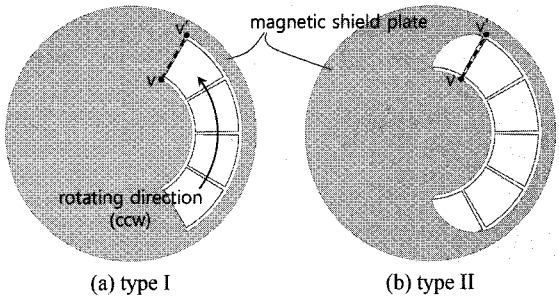

Fig. 8 Two types of shapes for open area of magnetic shield sheet

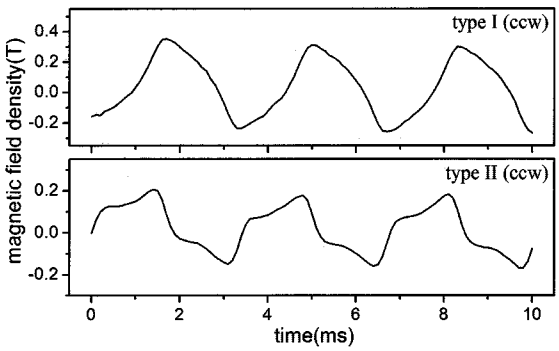

Fig. 9 Variation of magnetic field at line vv' for rotation of PM in Fig. 8

3.2 Minimization of AC force amplitude through reshape of open area

동전기 효과에 기초한 마그네트 휠의 자기력은 유도력이므로 AC 력이고 따라서 Fig. 7 에서와 같이 정상상태에서도 주기적으로 일정 진폭으로 오실레이션한다. 그러나 차폐판 개방 영역의 형상 변화를 통해 이러한 오실레이션을 축소시키는 것이 가능하다. 이는 선형 유도 모터에서의 입, 출구 효과(entry, exit effect)를 역으로 이용하는 개념인데 기존 형상은 Fig. 8(a)와 같은 부채꼴 모양인데 반해 주기적인 AC 리플을 저감할 수 있는 형상은 Fig. 8(b)와 같이 초승달 모양 형태를 갖는다. 이러한 형상은 반복된 모의 시험을 통해 얻어진 결과이며 리플의 저감 이유는 Fig. 9 와 같이 Fig. 8 의 vv'에서 측정된 자기장 값을 묘사한 선도로부터 예측해 볼 수 있다. Fig. 9 는 PM 배열이 3000RPM 의 속도로 반시계 방향으로 회전할 때 직선 vv'을 따라 측정된 자기장을 평균한 값인데 type I 의 경우와 달리 type II 에서는 두 개의 성분이 주기적으로 반

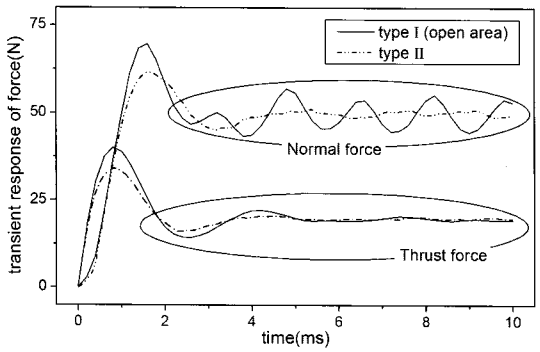

Fig. 10 Decrease of AC amplitude due to shape change of open area

복되는 것을 알 수 있다. 즉, type I 의 경우엔 자기장이 사인 형태를 갖기 때문에 이를 통한 와전류력도 동일한 주기의 조화 성분을 갖지만 type II 의 경우엔 90°의 위상차를 갖는 두 개의 자기장 성분이 생성되는 리플을 서로 상쇄시키는 것으로 판단된다. 이는 두 형상에 대한 자기력의 과도 응답 선도인 Fig. 10 에서 확인할 수 있다. 특히 부상력의 경우엔 리플이 거의 사라진 것을 알 수 있는데 이러한 리플의 저감은 마그네트 휠로부터의 자기력을 제어 성분으로 이용할 때에는 상당한 이점이 될 수 있음을 충분히 예측할 수 있다.

4. Non-contact conveyance of conductive plate

전술한 설계 스펙과 차폐판 형상을 갖는 복수개의 마그네트 휠을 구동원으로하는 동판의 비접촉 반송 시스템을 구축하였는데 시스템 외관은 Fig. 11 과 같다. 각각의 마그네트 휠은 휠 회전용 모터와 차폐판 회전용 모터로 구동되며 동판의 공간 위치는 세 개의 레이저 변위계와 세 개의 정전용량 방식 공극 센서로 측정된다.

4.1 Operating algorithm through rotation of magnetic shield sheet

공간상에서 동판의 안정된 부상과 반송을 위해서는 6 축(x, y, z, α, β, γ) 제어가 필요한데 단동 마그네트 휠로부터 2 축 자기력이 생성되므로 총 8 개의 힘으로 6 자유도 제어를 수행한다. 그러나 각 휠로부터의 수직력 조합으로 동판의 면외(out-of-Plane) 운동을 그리고 추력 조합으로 면내(in-plane) 운동을 제어하므로 네 개의 힘으로 3 축 제어를 수행하는 형태를 취한다. 면외 운동의 경우 휠의

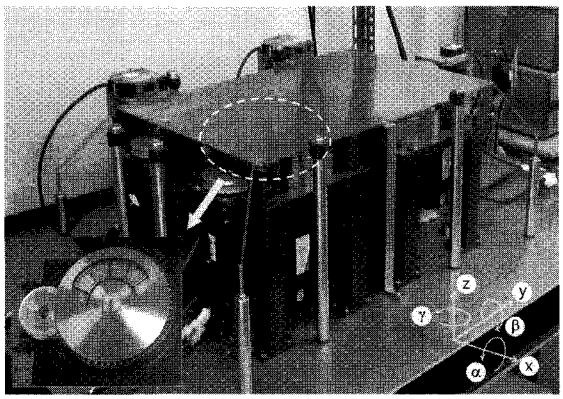

Fig. 11 Photograph of non-contact conveyance system using multiple magnet wheels

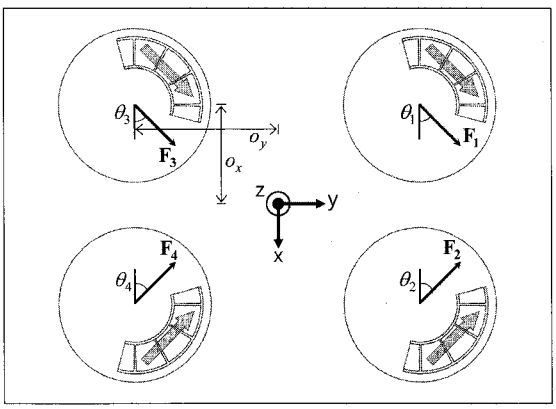

Fig. 12 Force diagram of the constructed system

수직력이 반발 부상력이므로 자기 안정성(self stability)을 갖고 있고 전술한 바와 같이 일정 영역에서는 추력에의 영향없이 휠의 회전 속도 가변만으로 부상력을 조절하는 것이 가능하므로 면외 지배 방정식에서 각 휠의 중심으로부터 동판의 무게중심까지의 거리만 고려하면 제어하는 데에 어려움이 없다. 그러나 시스템의 힘 선도를 나타낸 Fig. 12 에서와 같이 면내 운동은 추력의 크기가 고정되어있고 단지 추력의 방향($\theta_1 \sim \theta_4$)만을 조절하여 제어하기 때문에 그 과정이 간단하지 않다. 우선 면내 운동에 대해서, 평판의 무게 중심에서 힘 평형 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = c_x = F(\cos\theta_3 - \cos\theta_4) \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = c_y = F(2\sin\theta_1 + \sin\theta_3 + \sin\theta_4) \quad (2)$$

$$I\ddot{\gamma} = c_\gamma = F(o_y + \Delta y)(\cos\theta_3 - \cos\theta_4) - Fo_x(\sin\theta_3 - \sin\theta_4) \quad (3)$$

위 식은 y 축 방향의 운동만($\Delta x = \Delta\theta = 0$)을 고려하고 각 휠의 선형 추력은 F 로 동일하며 휠의 중심에서 발생한다고 가정하여 얻어진 식이다. 특히 면내 운동의 평형 방정식은 세 개이고 각 휠의 개방 영역의 위치는 네 개이므로 간단히 θ_1과 θ_2는 쌍으로 움직인다고 가정하여 미지 변수의 수를 줄였다. 위 평형 방정식으로부터 해 $\theta_1, \theta_3, \theta_4$는 상당한 조작을 거쳐 다음과 같이 얻어진다.

$$\theta_1 = \csc^{-1}\left[\frac{2q_1q_2F}{q_2^3c_y + o_x^2q_2c_x^2c_y - c_xq_3}\right] \quad (4)$$

$$\theta_3 = \sec^{-1}\left[\frac{2o_xq_1F}{o_x^3c_x^3 + o_xq_2^2c_x + q_3}\right] \quad (5)$$

$$\theta_4 = \sec^{-1}\left[\frac{-2o_xq_1F}{o_x^3c_x^3 + o_xq_2^2c_x - q_3}\right] \quad (6)$$

여기에서

$$q_1 = c_\gamma^2 - 2(o_y + \Delta y)c_\gamma c_x + c_x^2\left(o_x^2 + (o_y + \Delta y)^2\right)$$
$$q_2 = c_\gamma - (o_y + \Delta y)c_x$$
$$q_3 = \sqrt{q_1q_2^2[o_x^2(4F^2 - c_x^2) - q_2^2]}$$

위 결과 식 (4)~(6)으로부터 $-\pi/2$ 에서 $\pi/2$ 의 구간에서 θ_1은 참의 값이 얻어진다. 그러나 θ_3, θ_4는 sec 함수가 기함수이므로 해의 부호를 포함하여 진위에 대해 논하기 위해 다른 접근 방법이 필요하다. (4)로부터 얻어진 θ_1을 (2)에 대입하면 다음 방정식을 얻을 수 있다.

$$\hat{c}_x = m\ddot{x} = F(\cos\theta_3 - \cos\theta_4) \quad (7)$$

$$\hat{c}_y = m\ddot{y} - 2F\sin\theta_1 = F(\sin\theta_3 + \sin\theta_4) \quad (8)$$

위 식을 통해 (5), (6)에서 얻어진 복수해($-\pi/2$ 에서 $\pi/2$ 의 구간) θ_3, θ_4에 대해 다음의 중간 결론을 얻을 수 있다. 우선, 식 (8)로부터 $\hat{c}_y$가 음이면 θ_3, θ_4 중 절대값이 큰 쪽은 음이고 $\hat{c}_y$가 양이면 절대값이 큰 쪽이 양이다. 또한 식 (7)로부터 $\hat{c}_x$가 양이면 $|\theta_3| < |\theta_4|$ 이고, 음이면 $|\theta_3| > |\theta_4|$ 이다. 이 내용들을 조합하면 Table 1 과 같은 두 각의 부호 판별 조건을 얻을 수 있다.

Table 1 Criterion to evaluate truth or false of θ_3, θ_4

$\hat{c}_y$ \ $\hat{c}_x$	≥ 0		< 0	
≥ 0	$\theta_4 \Rightarrow +$	$\theta_3 = ?$	$\theta_3 \Rightarrow +$	$\theta_4 = ?$
< 0	$\theta_4 \Rightarrow -$	$\theta_3 = ?$	$\theta_3 \Rightarrow -$	$\theta_4 = ?$

따라서 (5), (6)으로부터 얻어진 복수개의 θ_3, θ_4 중 어느 한 각의 부호가 확실히 얻어지면 나머지 한 각은 다음 식을 통해 얻는다. 즉, θ_3가 얻어지면

$$\theta_4 = \sin^{-1}\left(\frac{\hat{c}_y - F\sin\theta_3}{F}\right) \quad (9)$$

이고 θ_4가 얻어지면

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{\hat{c}_y - F\sin\theta_4}{F}\right) \quad (10)$$

이다. 결론적으로 각 축의 오차를 기반으로 비례-적분(PI) 제어기에 의해 제어 입력량 c_x, c_y, c_γ가 결정되면 전술한 방법에 의해 각 휠 차폐판의 회전 목표값 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$이 계산되고 이 값은 차폐판 조절용 모터에 의해 제어된다. 이때 차폐판 회전각 제어를 위해 비례-미분-적분(PID) 제어기를 이용한다.

4.2 Test result

전 절에서 논의된 구동 알고리즘을 이용하여 동판의 반송 시험을 수행하였다. 주요한 시험 결과로 조화 함수 입력에 대한 추종 시험과 계단 응답 시험 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. 마그네트 휠에 의한 자기력은 동전기력이므로 정지상태에서도 반발 부상력 생성을 위해 휠은 계속 회전해야 한다. 또한 휠의 회전 방향을 전환해서 추력의 방향을 역전시키는 것은 느린 시상수로 인해 시스템

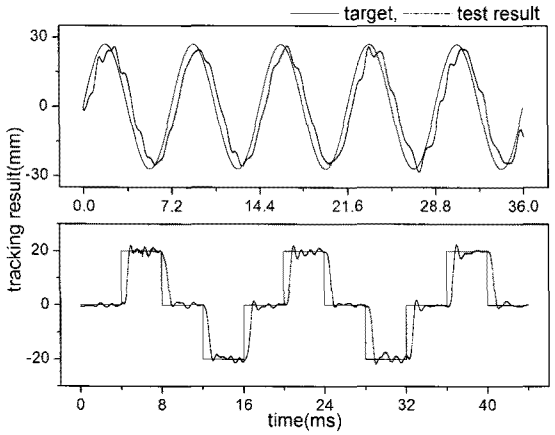

Fig. 13 Tracking results for sinusoidal and step profile input

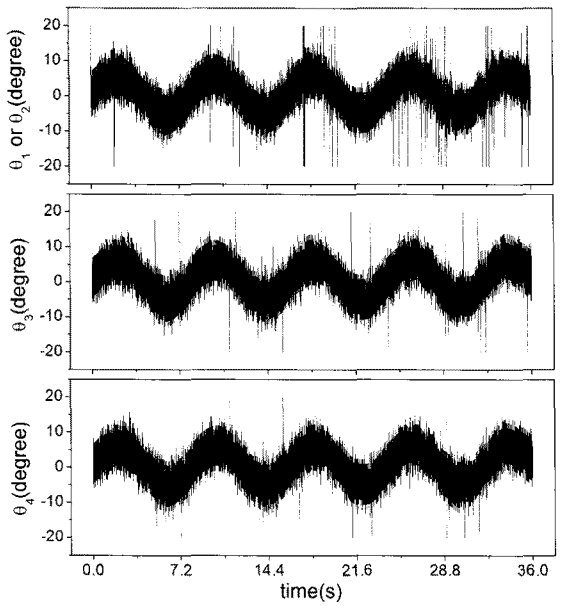

Fig. 14 Rotating angles of magnetic shield plates in the sinusoidal profile test of Fig. 13

불안정을 초래한다. 따라서 휠은 항상 한 방향으로만 회전하기 때문에 단동 휠에 의한 추력은 두 개의 휠에 의해 항상 동적 평형 상태에 놓여 있다. 더욱이 차폐판 회전에 의해 추력의 크기가 아니라 추력 방향을 변화시켜 가며 면내 운동을 제어하는 시스템 특성상 조화함수 입력에 대한 응답과 계단 입력시 일시적인 정지 상태에서의 응답은 극명한 차이를 나타낸다.

우선 조화함수 입력은 7.2 초의 비교적 큰 주기와 25mm 의 진폭을 갖는데 예상한 바와 같이 방향이 전환될 때 제어 성능이 쳐지는 것을 확인할 수 있다. 또한 와전류력의 느린 동특성은 전 구간에 걸쳐 약간의 위상 지연을 일으키는 것을 알 수 있다. 계단 입력은 20mm 의 크기와 4 초마다 정지와 구동을 반복하는 형태로 주어졌는데 정지상태에서 4 초의 시간 동안 동판은 계속 오실레이션하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 동적 불평형을 보상하기 위해 정지상태에서도 계속 구동되는 차폐판 회전에 따른 것으로 해석된다. 따라서 이러한 차폐판 회전을 이용한 마그네트 휠의 추력 제어는 그 특성상 정지 상태보다 연속 구동에서 훨씬 효과적임을 알 수 있다. 정지 상태에서 3~4mm 에 달하는 오버슈트에도 불구하고 도전판의 비접촉 반송에 마그네트 휠은 효과적으로 이용될 수 있다.

Fig. 13 의 조화 함수 입력에 대한 추종 시험시 마그네트 휠 각각의 차폐판 회전각 $\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4$ 의 변화 선도를 Fig. 14 에 나타내었다. 차폐판의 회전각 목표값은 각 축의 제어 값 (1), (2), (3)을 기준으로 결정되므로 축 오차에 상당히 민감히 반응하여 심하게 오실레이션하는 것을 알 수 있으나 값의 범위는 일정 영역 이내로 제한되고 뚜렷한 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 오실레이션 역시 와전류 구동 원리의 느린 시상수에 기인하는 것으로 판단된다.

5. Conclusion

다상 전류 혹은 PM 배열의 회전에 의해 발생하는 이동 자장에 의한 동전기력은 마주하는 도전판에 자기장의 이동 방향뿐만 아니라 수직 방향으로도 작용하는 이축력이다. 그러나 이러한 이축력의 독립 제어는 일반 선형 유도 모터에서는 활발히 연구되고 응용되어왔지만 [9,10] 본 논문에서 논의된 것과 같이 마그네트 휠을 대상으로 수행된 연구는 단순한 이송 응용이 대부분이었다. 이는 마그네트 휠로부터 생성되는 강한 견인 토크를 추력으로 전환할 수 있는 효과적인 방법이 없었기 때문이다. 마그네트 휠의 PM 배열로부터 생성되는 공극 자기장을 부분 차폐하여 개방된 영역을 통한 단락된 토크 즉, 선형 추력은 본문에서 언급한 바와 같이 개방 영역의 크기를 조절하여 제어할 수도 있지만 휠의 회전 속도에 따른 자기력의 거동 특성상 추력 방향을 제어하는 것이 독립 제어 측

면에서 훨씬 유리하다는 것을 보였다. 또한 복수개의 마그네트 휠을 이용하여 바이어스 강성을 부여하는 것은 마그네트 휠의 자기력이 결국 휠의 회전에 의해 발생되는 점을 고려하면 불가피한 일이며 따라서 동전기력의 느린 동특성에도 불구하고 정지 상태에서도 동적 평형을 유지해야 하는 이유로 마그네트 휠은 연속 구동시 더욱 좋은 제어 성능을 보이는 것을 확인하였다.

마그네트 휠을 이용한 도전판의 비접촉 반송 시스템 구현은 전술한 동전기력의 이축력 제어를 가장 효과적으로 적용할 수 있는 응용 분야이며 도전판의 제조 공정뿐만 아니라 도전판의 도색이나 다양한 기능성 코팅 작업에서 요구되는 저수준의 서보 필요성에도 용이하게 이용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2009년 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(2009-0071607).

참고문헌

1. Ohji, T., Shinkai, T., Amei, K. and Sakui, M., "Application of Lorentz force to a magnetic levitation system for a non-magnetic thin plate," J. of Materials Processing Technology, Vol. 181, No. 1-3, pp. 40-43, 2007.
2. Fujii, N., Ito, Y. and Yoshihara, T., "Characteristics of a moving magnet rotator over a conducting plate," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No. 10, pp. 3811-3813, 2005.
3. Hayashiya, H., Ohsaki, H. and Masada, E., "A combined lift and propulsion system of a steel plate by transverse flux linear induction motors," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 4019-4021, 1999.
4. Fujii, N., Ogawa, K. and Matsumoto, T., "Revolving magnet wheels with permanent magnets," Electrical Engineering in Japan, Vol. 116, No. 1, pp. 106-118, 1996.
5. Shim, K. B., Lee, S. H. and Jung, K. S., "Omni-directional magnet wheel using magnetic shield," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 9, pp. 72-80, 2009.
6. Park, J. 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.
7. Fujii, N., Hayashi, G. and Sakamoto, Y., "Characteristics of magnetic lift, propulsion and guidance by using magnet wheels with rotating permanent magnets," IEEE Industry Applications Conference, Vol. 1, pp. 257-262, 2000.
8. Bird, J. and Lipo, T. A., "Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 43, No. 8, pp. 3395-3405, 2007.
9. Takahashi, I. and Ide, Y., "Decoupling control of thrust and attractive force of a LIM using a space vector control inverter," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 161-167, 1993.
10. Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Decoupling of thrust force and levitation force of transverse flux linear induction motor by the active compensation of magnetic force across the air-gap," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 91-98, 2004.