

## 자기차륜을 이용한 전도성 평판 이송 시스템에서 평판 위치 제어를 위한 새로운 방법 정광석<sup>a\*</sup>

### Novel Methods for Spatial Position Control of a Plate In the Conductive Plate Conveyance System Using Magnet Wheels

Kwang Suk Jung<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, Daehakro 50, Chungju, Chungbuk, 380-702, Republic of Korea

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received	13	August	2013
Revised	28	October	2013
Accepted	5	November	2013

##### Keywords:

Electrodynamical force  
Force decoupling  
Magnetic force model  
Magnetic shield plate  
Magnet wheel

#### ABSTRACT

Two-axial electrodynamic forces generated on a conductive plate by a partially shielded magnet wheel are strongly coupled through the rotational speed of the wheel. To control the spatial position of the plate using magnet wheels, the forces should be handled independently. Thus, three methods are proposed in this paper. First, considering that a relative ratio between two forces is independent of the length of the air-gap from the top of the wheel, it is possible to indirectly control the in-plane position of the plate using only the normal forces. In doing so, the control inputs for in-plane motion are converted into the target positions for out-of-plane motion. Second, the tangential direction of the open area of the shield plate and the rotational speed of the wheel become the new control variables. Third, the absolute magnitude of the open area is varied, instead of rotating the open area. The forces are determined simply by using a linear controller, and the relative ratio between the forces creates a unique wheel speed. The above methods were verified experimentally.

## 1. 서론

다상 전원에 의한 이동(traveling) 자기장의 발생을 영구자석(PM) 어레이의 기계적 운동으로 대체한 자기 차륜(magnet wheel)은 상대적으로 우수한 힘 밀도 특성으로 인해 전도성 시트(sheet), 평판의 이송에 효과적으로 이용될 수 있다<sup>[1-3]</sup>. 이러한 응용에 있어 관건은 자기차륜의 회전에 의해 생성되는 자기력의 제어성(controllability)에 있다. 일반적으로 축형(axial) 자기차륜의 경우 전도성 평판에 대면하여 회전 토크와 반발력을 생성시키는데 반해 래디알형(radial)의 경우 반발 부상력에 더해 추력을 동시에

생성시킨다<sup>[4-6]</sup>. 후자의 경우 평판과의 대향 면적이 작아 힘밀도 측면에서는 상당히 불리하며 평판 이송보다는 자기부상 열차와 같은 대용량 시스템에의 응용이 모색되었다<sup>[5]</sup>. 축형 차륜을 이송력으로 이용하기 위해 회전 토크는 추력으로 전환되어야 하는데 이를 위해 차륜을 평판 모서리와 일정 부분 중첩시키거나 차륜의 축을 기울여 부상력을 분할해서 사용하는 방법이 제안되었다<sup>[1]</sup>. 그러나 발생한 추력이 부상력과 강하게 연성되어있고 이러한 힘들을 독립적으로 제어할 수 있는 방법에 대해서는 연구된 사례가 없다<sup>[4]</sup>. 저자는 이전 연구에서 자기차륜의 공극 자기장을 일정 부분 차폐하여 회전 토크를 선형 추력으로 전환시키고 차폐판의 개방 영역을 회전시켜

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

Fax: +82-43-841-5120

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

전도성 평판의 면내(in-plane) 운동을 제어하는 방법을 제안하였으며<sup>[2]</sup> 면외(out-of-plane) 운동까지 포함하는 전체 공간 운동의 제어를 위해 차폐판의 개방 영역 크기를 조절하는 방법을 제안하였다<sup>[7]</sup>. 특히 후자의 경우 평판의 공간 포지셔닝이 가능하지만 전자의 구동 방법과 마찬가지로 단동 구동 유닛으로서 차폐판 서보 기구의 제어 이득이 평판의 3차원 동적 특성에 미치는 영향을 직관적으로 알 수 없다는 단점이 있었다.

본 연구는 부분 차폐된 자기차륜을 이용한 전도성 평판 이송 시스템에서 평판 위치를 제어하는 다양한 방법론에 관한 것으로 개방 영역 자체의 크기를 가변시켜 평판을 제어하는 데에 적용되었던 차륜에 의한 추력과 수직력간의 상대비가 공극에 무관하다는 특성을 확대 적용하여 선형 제어를 통해 결정된 이축력으로 차륜의 회전 속도와 개방 영역의 방향을 결정하는 제어 알고리즘을 제안하고 이를 기존 개방 영역의 크기를 조절하는 방법에 비교하여 논의한다. 특히 위 특성을 이용하여 추력의 고려없이 수직력 제어만으로도 평판이 안정되게 반송될 수 있음을 실험적으로 검증한다.

## 2. 부분 차폐된 자기차륜에 의한 동전기력

원주 방향을 따라 주기적인 극성 배열을 갖는 PM 어레이 즉, 축형 자기차륜의 공극 자기장을 부분 차폐하여 차륜에 의한 강한 회전 토크를 선형 추력으로 변환하고 이를 이용하여 전도성 평판의 이송을 제어하는 시스템을 Fig. 1에 제시하였다. 각 자기차륜을 구성하는 12개의 PM은 내경, 외경, 높이가 각각 34 mm, 60 mm, 10 mm인 Nd35계열의 영구자석이다. 차폐되지 않고 개방되어있는 영역은 이전 연구에서와 달리 회전되지 않는 대신 그 절대 크기를 가변시킬 수 있다. 따라서 각 자기차륜은 PM 어레이를 회전시키기 위해 그리고 개방 영역의 회전 혹은 크기를 가변시키기 위해 별도의 서보 모터가 장착되어있다.

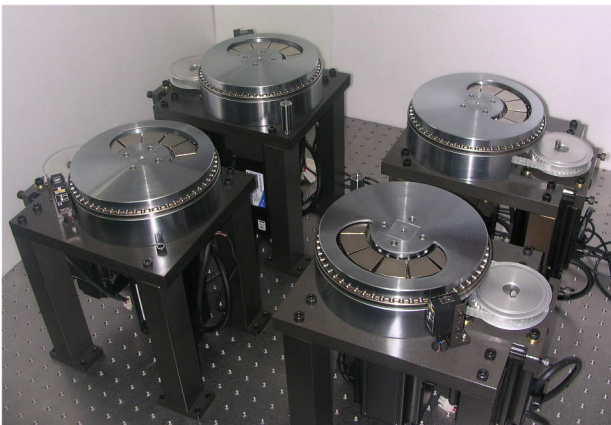


Fig. 1 Photograph of the conveyance system for a conductive plate using magnet wheels shielded partially

본 장에서는 차륜에 의한 이축 자기력의 독립 제어를 위해 동전기력의 이론 모델을 참조하여 두 힘간의 상대비가 공극에 무관함을 이론적으로 제시한다<sup>[6]</sup>. 이러한 제특성은 다음 장에서 논의될 평판의 공간 위치 제어 시 이축력을 별도로 다룰 수 있는 주요한 근거가 된다.

자기차륜이 전도판 아래에서 공극 g를 사이에 두고 회전할 때 차폐되지 않은 영역에서의 접선 방향 x와 수직방향 z로 발생하는 자기력  $F_T$ 와  $F_N$ 은 연속 방정식을 통해 얻어진 공극 자기장에 로렌츠 법칙을 이용하여 폐형 해로 구할 수 있다.  $U_s$ 의 속도로 이동하는 자기 강도  $B_m$ 이고 전체 파장  $\lambda$ 인 PM 어레이에 의해  $\sigma$ 의 전도도를 갖는 너비  $L$ , 두께  $w$ 인 전도판에 발생하는 자기력은<sup>[4,8]</sup>

$$F_T = \frac{\sigma \lambda L \xi^2 U_s B_m^2 (\xi p_1 + p_2)}{\Sigma} \quad (1)$$

$$F_N = \frac{\sigma \lambda L \xi U_s B_m^2 (\xi p_3 + \rho \eta p_1)}{\Sigma} \quad (2)$$

와 같다. 위 식에서  $\xi$ 는 파수(propagation constant)를 그리고  $\rho, \eta$ 는  $\sqrt{\xi^2 + j\mu_0 \sigma \xi U_s}$  인  $\zeta$ 의 실수부와 허수부를 나타내며  $\mu_0$ 는 자유공간에서의 투자율이다. 이축력의 공통 분모인  $\Sigma$ 는

$$\Sigma = 4 \{ e^{2g\xi} (\xi p_4 + p_5) - \xi \rho \eta p_3 - \rho^2 \eta^2 p_1 (1 + \sinh [2g\xi]) \} \quad (3)$$

와 같고 계수  $p_1 \sim p_5$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_1 &= \cosh [2w\rho] - \cos [2w\eta] \\ p_2 &= \rho \sinh [2w\rho] + \eta \sin [2w\eta] \\ p_3 &= \eta \sinh [2w\rho] - \rho \sin [2w\eta] \\ p_4 &= \rho^3 \sinh [2w\rho] - \eta^3 \sin [2w\eta] \\ p_5 &= \rho^4 \cosh [2w\rho] - \eta^4 \sin [2w\eta] \end{aligned}$$

유도된 이축력 모델 (1), (2)에 대해 가변 변수인 차륜의 회전 속도  $\omega$ 와 공극을 변화시켜 가며 시뮬레이션하면 저속 구간에서는 속도 증가에 따라 추력, 부상력이 모두 증가하지만 추력의 경우 일정 속도 이상이 되면 오히려 감소하고 속도 분기점은 공극이 증가함에 따라 점점 작아지는 것을 알 수 있다. 수직력의 경우 공극이 작아질수록 속도가 커짐에 따라 더욱 가파르게 증가하며 공극이 커짐에 따라 고속 구간에서는 특정 값에 수렴해가는 특성이 현저해진다. 공극 변화에 대해서는 이축력 모두 와전류 힘의 특성상 지수함수의 비율 혹은 1/공극의 비율로 감소하며 특히 감소율은 고속 구간에서 더욱 뚜렷해진다.

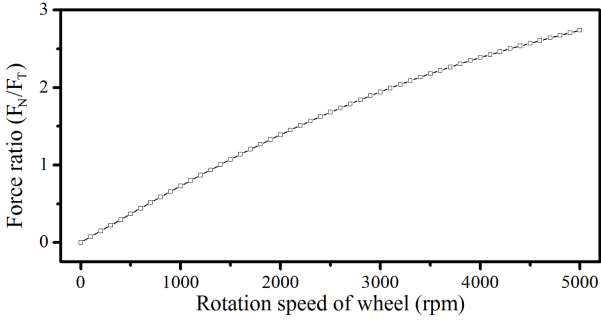


Fig. 2 Relative ratio between thrust force and normal force according to wheel speed

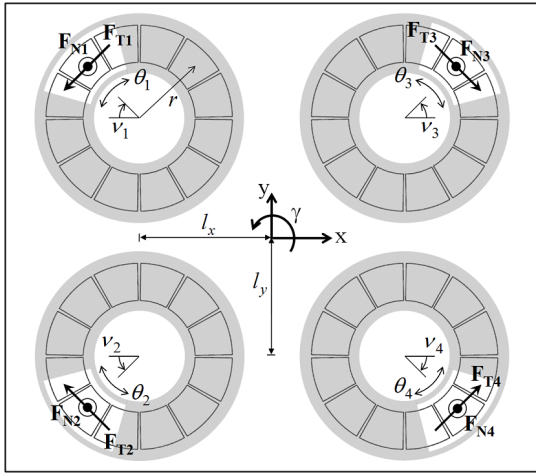


Fig. 3 Coordinated frame of the conveyance system using magnet wheels

유도된 이축력의 이론 식 (1)과 (2)을 참조하면 흥미로운 특성을 알 수 있다. 즉, 두 식에서 공극 변수는 (3)에서와 같이 (1)와 (2)의 분모에만 존재하므로 두 힘의 상대 비를 구하면 공극에의 영향을 제거할 수 있다. 두 힘을 결합함에 있어 독립 변수 하나를 제거할 수 있기 때문에 이러한 특성은 두 힘을 독립적으로 제어하는 데에 주요한 단초를 제공한다. 두 힘간의 실제 상대 비는

$$\Pi(\omega) = \frac{F_N(\omega, g)}{F_T(\omega, g)} = \frac{\rho p_1 + \xi p_3}{\xi^2 p_1 + \xi p_2} \quad (4)$$

인데 위 식을 차륜 속도 변화에 따라 도시하면 Fig. 2와 같다<sup>[7]</sup>. 따라서 두 힘의 상대 비가 결정되면 공극 정보에 관계없이 차륜의 회전 속도가 고유하게 결정된다.

### 3. 공극 조절을 통한 간접 이송 제어

전장에서 논의된 이론 모델과 동전기력 거동 특성을 이용하여

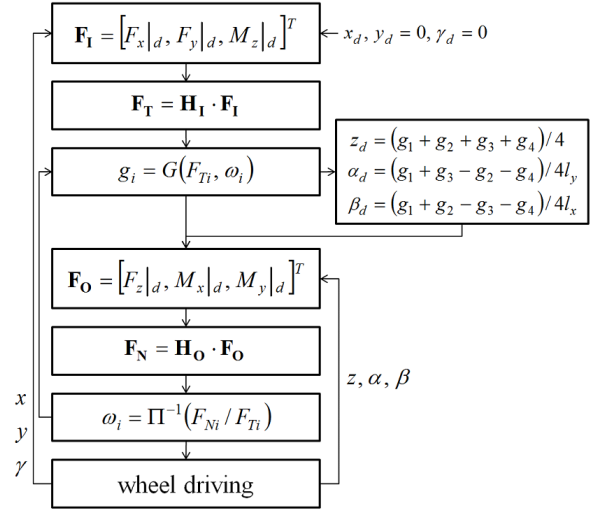


Fig. 4 Indirect control of in-plane motion through air-gap control in the conveyance system

전 도성 평판의 제어 알고리즘을 구성한다. 평판의 6자유도 제어를 수행하기에 앞서 차륜의 이축력 연성 관계를 이용하여 공극 조절을 위한 수직력 제어만으로 평판을 반송할 수 있는 방법을 제안한다.

우선, 면내 운동 자유도  $x, y, \gamma$ 의 위치 오차로 제어력  $F_{x|d}, F_{y|d}, M_{z|d}$ 가 결정되면 Fig. 3을 기초로 평판 중심과 차륜 힘 중심 사이의 변환 행렬  $H_1$ 를 이용하여 즉, 역동역학(Inverse-dynamics) 해석을 통해 각 차륜의 목표 추력  $F_{Ti}$ 를 얻는다. 공칭 공극에서 평판의 무게 보상을 위한 각 차륜의 공칭 회전 속도와 추력  $F_{Ti}$ 가 결정되면 각 차륜에서의 공극 목표 값은 식 (1)의 방정식을 풀어 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$g_i = G(F_{Ti}, \omega_i) = \frac{1}{2\xi} \log \left[ \frac{q_1 - (q_3 + q_4)F_{Ti} + \sqrt{q_5}/2}{(2q_2 + q_4)F_{Ti}} \right] \quad (5)$$

여기에서  $q_1 \sim q_5$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_1 &= \sigma \lambda L \xi^2 U_s B_m^2 (\xi p_1 + p_2), q_2 = 4(\xi p_4 + p_5) \\ q_3 &= -4\rho \eta \xi p_3, q_4 = -4\rho^2 \eta^2 p_1 \\ q_5 &= 4q_4(2q_2 + q_4)F_i^2 + (2q_1 - 2(q_3 + q_4)F_i)^2 \end{aligned}$$

각 차륜의 네 개의 공극이 결정되면 이 값은 면의 운동을 위한 제어 목표 값으로 한다. 즉,  $z_d, \alpha_d, \beta_d$ 를 네 개의 공극을 통해 결정하면 제어력  $F_{z|d}, M_{x|d}, M_{y|d}$ 가 계산되고 다시 Fig. 3에 기초한 좌표계 변환  $H_0$ 를 이용하여 각 차륜의 목표 수직력  $F_{Ni}$ 를 얻는다. 추력과 수직력 목표 값이 결정되면 식 (4)를 통해 각 차륜의 회전 속도  $\omega_i$ 가 얻어지고 이 속도로 차륜을 회전시킨다. 이 속도 값은 다음 루프에서 (5)의 공극 계산을 위한 입력 값으로 사용된다. 결국

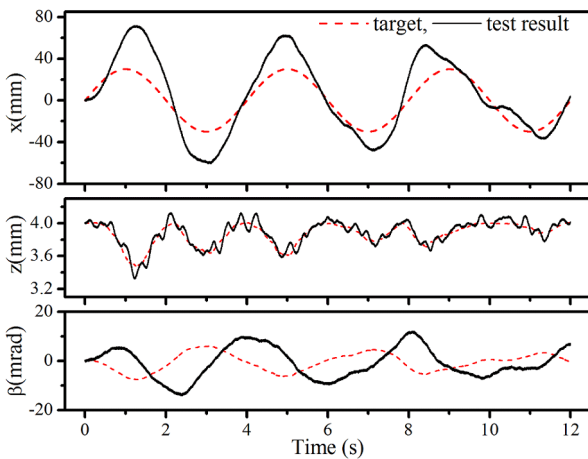


Fig. 5 Indirect tracking test result for the conductive plate

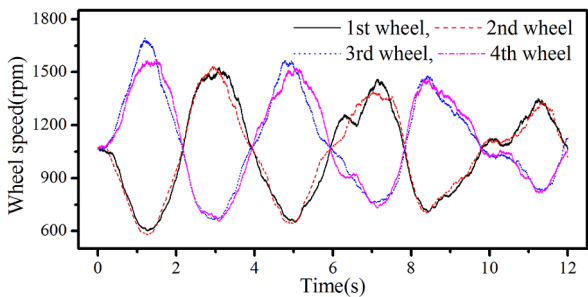


Fig. 6 Variation of rotation speed for each wheel motor

면내 운동의 제어력을 기초로 얻어진 목표 공극 제어를 통해 즉, 수직력 제어만으로 면내 이송 위치를 간접적으로 제어하고 있음을 알 수 있다. 따라서 차륜의 회전 속도만으로도 면내, 외 운동을 모두 제어할 수 있다. 이 때 면내 위치는 제어력 연산을 위해 측정되어야 한다. 상기 알고리즘을 Fig. 4에 나타내었다.

공극 제어를 통한 면내 이송 위치의 간접 제어는 Fig. 1을 이용하여 실험적으로 검증하였다. Fig. 3에서 개방 영역의 크기는 120°로 고정되어있으며 공칭 공극은 4 mm이고 이 때의 공칭 속도는 대략 1,070 rpm이다. 30 mm의 진폭과 0.25 Hz의 주기를 갖는 조화 함수 프로파일에 대한 추종 시험을 수행 하여 Fig. 5에 나타내었다. 면내 운동의 제어력은 공극에 반영되고 실제 공극을 포함한 면의 운동만이 직접적인 제어 대상이며 실험 결과에서도 면의 운동의 경우 목표 값을 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 주의해야 할 점은 평판의 좌우 기울임에 의해 추력 차가 발생하고 이를 통해 평판이 구동되는 형태이므로 이러한 간접 제어 특성을 반영하여  $\beta$ 의 경우 목표 값 대비 상당한 위상 지연이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 점은 면내 운동의 결과에도 직접적인 영향을 주지만 x축 결과에서 보듯이 시간이 경과함에 따라 이러한 오차가 점차 감소되는 것을 알 수 있다.



Fig. 7 Magnet wheel shielded partially with a separate actuator varying the open area of the shield plate

각 차륜의 회전 속도 변화를 묘사한 Fig. 6에서도 속도 변화의 폭 감소를 통해 오차 감소를 확인할 수 있다. 제어 입력의 수가 자유도보다 작음에도 불구하고 전체적으로 목표 궤적을 근사적으로 추종할 수 있는 이유는 부상력이 반발력이고 따라서 면의 운동의 경우 각 차륜을 연결한 다각형 안에 평판의 무게 중심이 놓여있으면 안정성이 확보되고 따라서 일정 속도 이상에서는 제어기 없이도 면의 운동의 안정성은 보장되기 때문이다. 단순히 평판의 반송이 목적이라면 서보 모터의 개수를 의미하는 제어 입력의 수를 가급적 줄이는 것이 바람직하다.

#### 4. 공극 자기장 차폐판의 개방각 크기 또는 방향 조절을 통한 평판의 위치 제어

자기차륜에 의한 자기력 제어의 가장 큰 난제는 결국 가변 입력 수단이 차륜의 속도뿐이라는 점이다. 유사한 동전기 원리 기반인 유도기의 경우 다상 전원의 AC 크기와 주파수를 독립적으로 가변시킬 수 있고<sup>[9]</sup> AC 크기 역시 DC 전원을 바이어스시킬 수 있다<sup>[10]</sup>. 또한 주파수 역시 고주파와 저주파를 중첩시키는 등<sup>[11]</sup> 입력 요소에 다양한 가변 요소가 있기 때문에 이를 적절히 조화시켜 이 축력을 제어하는 방법이 다각도로 연구되어왔다. 그러나 자기 차륜의 경우 AC 크기에 해당하는 자기장 강도가 고정되어있기 때문에 유일한 가변 요소는 유도기의 주파수에 해당하는 차륜의 속도에 불과하다. 따라서 차륜에 의한 자기장을 부분 차폐하여 구동력을 얻는 제안된 시스템에서 제어 입력 수단으로 Fig. 7과 같이 차폐판

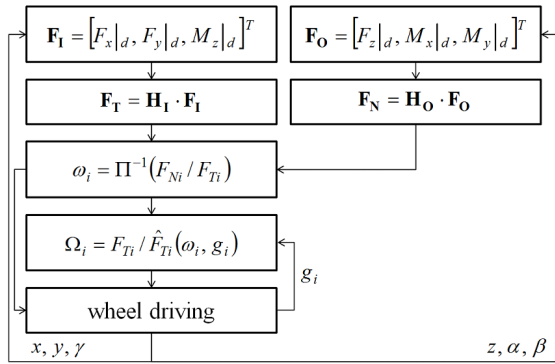


Fig. 8 Operating flowchart of the overall control by a magnitude of the open area and a wheel speed

개방 영역의 크기를 조절하거나 또는 개방 영역 위치를 회전시키는 방법을 고려할 수 있는데 본 장에서는 이러한 가변 제어 변수를 갖는 시스템에 대해 2장에 기술한 이축 동전기력의 상대 비가 공극에 무관함을 이용하여 각 시스템의 독립 제어 방법을 단계별로 비교기술하고 이의 실험 결과를 고찰한다.

#### 4.1 개방 영역의 절대 크기 조절

개방각의 변화는 추력과 수직력을 모두 변화시키지만 2장에서 논의한 바와 같이 두 힘의 상대 비가 차륜 속도에 일대일로 대응하기 때문에 효과적인 입력 수단이 될 수 있다<sup>[7]</sup>. 60°의 개방 각에서의 이축력을  $\hat{F}_T$ ,  $\hat{F}_{Ni}$ 라 하면 임의의 각도에서의 힘은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Ti} \text{ or } F_{Ni} = \Omega_i \hat{F}_{Ti} \text{ or } \Omega_i \hat{F}_{Ni} \quad (6)$$

개방 영역에서의 힘의 크기는 (1), (2)에서와 같이 PM의 파장 길이에 비례하므로 계수  $\Omega_i$ 는 단순히 기하학적 비율만을 고려하여 결정한다. 개방 각과 차륜의 속도를 이용한 평판 이송 알고리즘은 Fig. 8의 흐름도와 같이 요약될 수 있으며 구체적인 내용은 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

우선, 면내의 위치 측정값과 목표 값을 기준으로 간단한 선형 제어기를 이용하여 6축 제어 입력  $\mathbf{F}_I$ ,  $\mathbf{F}_O$ 를 계산한다. 이 값은 역동역학 해석을 위한 좌표 변환 행렬  $\mathbf{H}_I$ ,  $\mathbf{H}_O$ 를 이용하여 각 차륜의 국부 좌표계에서의 값으로 변환된다. 각 차륜의 목표 추력  $F_{Ti}$ 와 목표 수직력  $F_{Ni}$ 가 결정되면 식 (4)를 이용하여 차륜의 회전 속도를 구한다. 차륜 속도가 결정되면 실제 목표 값 구현을 위한 개방각의 크기를 식 (6)을 이용하여 결정한다.

$$\Omega_i = \frac{F_{Ti}}{\hat{F}_{Ti}}(\omega_i, g_i) \quad (7)$$

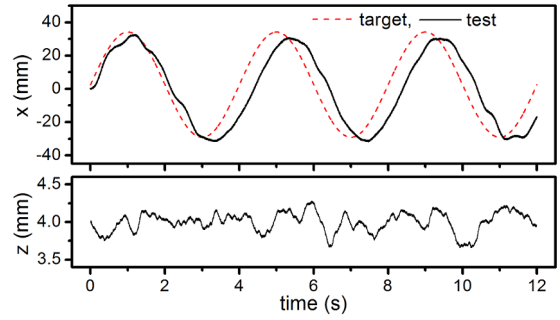


Fig. 9 Tracking test result of conductive plate by varying a magnitude of open area of the shield plate

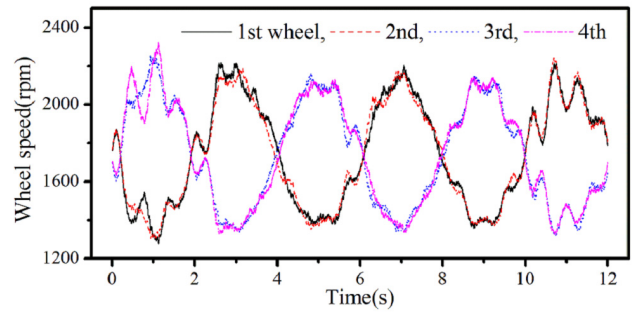


Fig. 10 Speed variation of each wheel motor for the test result in Fig. 9

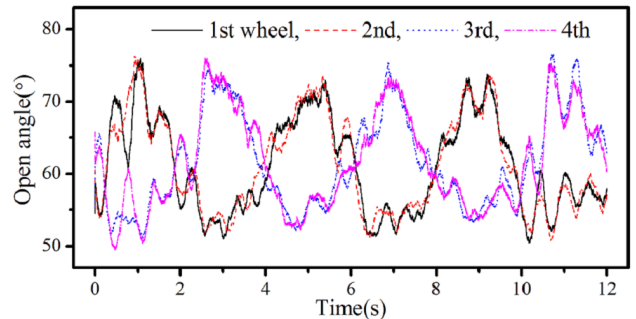


Fig. 11 Variation of magnitude of open area for the test result in Fig. 9

위 식에서 공극  $g_i$ 는 초기 값으로 공칭 공극 값을 대입하고 다음 루프에서는 측정된 값을 이용한다. 연산된 회전 속도와 개방 각으로 각 차륜이 구동되고 이러한 입력 변수에 의해 제어 입력  $F_{Ti}$ 와  $F_{Ni}$ 가 구현된다. 결국 면내의 제어력은 독립적으로 설정하고 이를 구현하기 위한 차륜의 속도와 개방각의 크기를 결정하는 형태이다. 따라서 이축력과 각 입력 변수를 독립적으로 대응시키는 일반적인 의미의 독립 제어가 아니라 입력 변수를 적절히 조화시켜 목표 출력을 생성시키는 방법이며 결국 입력 변수의 절대 크기나 방향을 통해 목표 출력의 응답 특성을 예측하는 것이 직관적이지 않고 대단히 난이함을 알 수 있다.

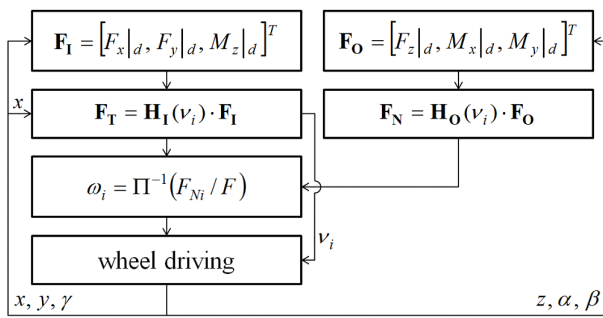


Fig. 12 Operating algorithm varying a tangential direction of open area and a wheel speed

개방 각 크기를 조절하여 평판의 위치를 제어하는 시험을 전장에서 수행된 시험과 동일한 조건과 입력 궤적에 대해 수행하였다. 전장에서와는 달리 각각의 자유도가 모두 제어되므로 평판의 선형 변위를 나타내는 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 x축의 경우 목표 궤적을 비교적 잘 추종하는 것을 알 수 있고 0으로 설계된 y축 변위 역시 3 mm 수준에서 제어되고 있다. 약간의 오차는 와전류력의 상대적으로 느린 응답특성에도 연유하지만 측정 프레임과 구동 프레임간의 배치오차에 의한 영향도 무시할 수 없다. 4 mm로 설정된 공극 변위 역시 최대 1.8 mm 수준에서 제어되고 있는데 반발 부상력에 대응하는 z축 방향 힘은 평판의 무게가 유일하고 가변될 수 없기 때문에 -z축으로는 강성이 전혀 없는 동특성을 갖는다. 이는 결과에서와 같은 z축 방향의 빈약한 응답특성을 낳는다. 평판의 크기가 y 방향으로 550 mm에 달하기 때문에 전체적으로는 평판 자체가 출렁거리는 형태의 거동을 나타낸다.

제어 시험시 각각의 차륜 모터의 회전 속도 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 차폐판 개방 각  $\theta_1 \sim \theta_4$ 의 크기 변화를 나타내는 Fig. 11에서 알 수 있듯이 기준 개방각의 크기가 60°로 설정되었기 때문에 120°로 고정되어있던 전장의 시험 결과보다 상당히 높은 수준에서 회전 속도가 가변됨을 쉽게 예측할 수 있다. 전장의 경우 대략 600~1,500 rpm 범위를 나타내는 데에 반해 Fig. 10의 경우 최대 2,200 rpm에 달함을 알 수 있다. 이에 대응하는 개방 각은 약 50°와 75° 사이에서 변하는 것을 알 수 있는데 평판 무게를 보상하기 위한 기준 공칭력 생성을 위해 개방 각이 작아지면 차륜 속도는 증가하고 개방 각이 커지면 차륜 속도는 감소하는 것을 알 수 있다. 평판의 목표 궤적이 x축으로 설정되어있으므로 첫번째 차륜과 두번째 차륜이 그리고 세번째 차륜과 네번째 차륜이 거의 동기되어 구동되는 것을 알 수 있다. 특히 평판의 국부적인 열 발생 등에 의해 Fig. 10과 Fig. 11의 결과는 동일한 목표 궤적과 조건하에서도 반복 수행할 때 마다 약간씩 상이한 결과를 나타내지만 이에 상관없이 x축 추종 결과만은 거의 일정하다.

#### 4.2 개방 영역 접선 방향 조절

전절에서 논의한 개방 영역의 크기를 조절하는 대신 개방각의 접선 방향을 가변시켜 즉, 추력의 방향을 변수로 설정하고 차륜의 회전 속도와 조합하여 평판의 공간 위치를 제어할 수 있다<sup>[2]</sup>. 면내 운동과 면외 운동 각각에 대한 제어력을 각 차륜에서의 국부 제어력으로 변환하는 것은 전술한 알고리즘과 동일하나 이때 면내 운동의 경우 각 차륜의 추력을 계산하는 것이 아니라 추력의 절대값은 상수로 설정하고 대신 각 차륜의 개방 영역의 방향 즉, Fig. 3에서  $v_i$ 의 값을 구한다. 첫째 차륜과 둘째 차륜의 접선 방향각이 같다고 가정하고 실제 면내 자유도에 대한 운동 방정식을 구하면

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -2F\sin v_1 + F\sin v_3 + F\sin v_4 & (8) \\ m\ddot{y} &= -2F\cos v_3 + F\cos v_4 \\ I_z\ddot{\gamma} &= Fl_y(\sin v_4 - \sin v_3) + F(l_x - x)(\cos v_4 - \cos v_3) \end{aligned}$$

이다. 위 식에서 각 차륜의 추력은 F로 고정된 것을 알 수 있는데 이러한 가정은 (8)을 통해  $v_i$ 를 얻기 위한 설정이다. 위 식을  $v_i$ 에 대해 연립하여 풀면

$$\begin{aligned} v_1 \text{ or } v_2 &= \csc^{-1} \left( \frac{-2\delta_1\delta_2 F}{m\ddot{x}\delta_1\delta_2 + m\ddot{y}\sqrt{\delta_1^2\delta_2^2(4F^2l_y^2 - \delta_2^2)}} \right) & (9) \\ v_3 &= \sin^{-1} \left( \frac{ml_y\ddot{x} + 2Fl_y\sin v_1 - \delta_1}{2F} \right) \\ v_4 &= \sin^{-1} \left( \frac{ml_y\ddot{x} + 2Fl_y\sin v_1 + \delta_1}{2F} \right) \end{aligned}$$

와 같다. 여기에서  $\delta_1 = I_z\ddot{\gamma} - ml_x\ddot{y}$ ,  $\delta_2 = \delta_1^2 + m^2l_y^2\ddot{y}^2$ 이다. 각 차륜의 추력 방향은 이렇게 결정되고 동시에 추력 F와 수직력  $F_{Ni}$ 의 상대비를 통해 각 차륜의 회전 속도를 구한다. 이를 정리하여 Fig. 12에 나타내었다.

전술한 방법을 이용한 평판의 거동 시험을 Fig. 9와 동일한 조건 하에서 수행하여 Fig. 13에 그리고 각 차륜 개방 영역의 접선 방향 각과 차륜 속도를 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 평판의 추종 오차 수준은 Fig. 9와 비교하여 이해될 수 있다. 즉, 차륜 속도 외에 입력 변수로 개방각의 크기를 가변시킬 때보다 x축으로 더 심한 요동을 확인할 수 있으며 동시에 공극 방향으로의 오차 진폭도 더 큰 것을 알 수 있다. 개방 영역의 회전 변화 폭은 Fig. 14에서 약 25도 수준인 것을 알 수 있는데 이는 Fig. 11에 제시된 개방각의 크기 변화폭과 비슷한 수준이다. 각 차륜의 회전 속도는 개방각의 절대 폭이 120도로 설정되어있으므로 Fig. 10의 경우보다 훨씬 작은 1,050 rpm를 기준으로 약 650 rpm 수준의 변화를 보인다. 특히 차륜의 속도는 이전 경우보다 더욱 심하게 요동치는 것을 알

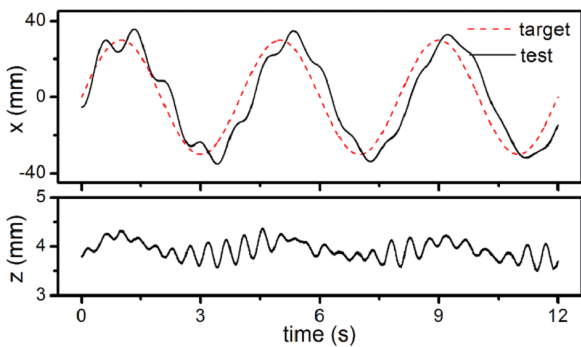


Fig. 13 Tracking test result of the plate using Fig. 12

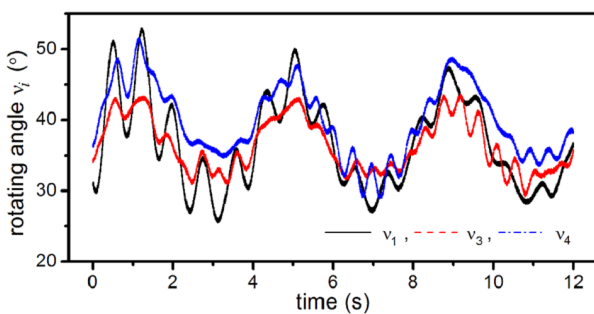


Fig. 14 Variation of tangential direction of open area for the test result in Fig. 13

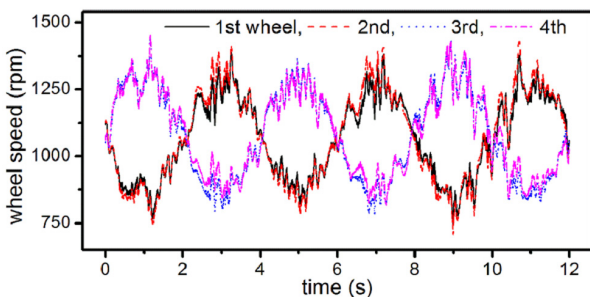


Fig. 15 Variation of wheel speeds in Fig. 13

수 있는데 이는 개방 영역의 기준 위치가 계속 변화되어 면의 제어기에서 이를 계속 보상하기 때문이다. 개방각의 절대 크기를 가변시키는 방법과 개방 영역의 크기를 고정시킨 상태에서 이를 회전시키는 방법 간의 현저한 차이를 실험적으로 확인할 수는 없으나 알고리즘 상에서는 전자의 경우 현재 공극 정보를 반영하여 제어기에 의해 연산된 제어력이 정확하게 구현될 수 있기 때문에 더 엄격한 시험 조건이라면 이러한 부분의 차이를 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 반복 재현에 있어 한계를 갖는 실험 결과임에도 불구하고 제어 방법론 측면에서 비교해보면 다음과 같은 장단점 분석이 가능하다.

우선, 차폐판의 위치를 가변시키는 방법은 공극에 관계없이 추력을 일정하다고 가정하여 제어 변수를 도출하기 때문에 실제 공극

변화에 따른 자기력 변화가 제어기에 전혀 반영되지 않으므로 제어 오차가 훨씬 커짐을 예측할 수 있다.

둘째, 두 방법 모두 평판 동특성이 제어 입력 변수와 일대일 관계를 통해 폐형 형태로 연결되지 않지만 차폐 위치를 변화시키는 방법은 힘의 방향이 가변되기 때문에 과도 응답 특성 즉, 차륜을 회전시키는 서보 모터의 속도 구간이 훨씬 넓게 분포됨을 예측할 수 있다. 이는 정상상태 구간에서 평판의 오실레이션으로 귀결된다.

셋째, 차폐 위치 조절 방법의 경우 수직력 조절에 모멘트 암의 위치 변화가 수반되기 때문에 이 역시 제어 변수의 변화량을 확대시킨 결과를 낳고 결국 면의 운동 응답의 상대적인 열악함을 야기한다.

## 5. 결론

자기차륜의 공극 자기장을 차폐시키고 일정 부분만 개방시켜 선형 추력을 얻는 개념은 평판의 이송에 자기차륜의 강한 회전토크를 유용하게 활용할 수 아이디어이다. 관건은 자기차륜의 이축력을 제어할 수 있는 유일한 입력 변수가 차륜 속도뿐이므로 자기력을 가변시킬 수 있는 별도의 방법을 도입해야만 평판을 안정되게 부상시켜 이송시킬 수 있다는 것이다. 이를 위해 개방 영역의 절대 크기를 가변시키는 기존 연구에서 제어 원리로 제안되었던 차륜에 의한 이축력간의 상대비가 차륜의 속도에만 관련되고 공극과 무관함을 면내 제어에 이용된 개방 영역의 위치를 가변시키는 방법론에 적용하여 평판의 공간 제어를 수행하였다. 평판의 공간 포지셔닝을 위해 도입된 개방 영역의 크기나 위치 모두 평판의 6축 거동과 직관적으로 관련되어있는 변수이기 보다는 목표 출력을 위해 협업하는 입력 변수이므로 제어 방법론의 실험적 비교는 무리가 있지만 제어력 계산에 있어 공극 정보의 사용 여부에 의해 입력 변수의 구동 범위가 큰 차이가 있고 이에 따라 현재 평판의 공극이 차륜 모터 속도 계산에 이용되지 않을 때에는 간접 제어의 영향이 출력의 과도한 오실레이션으로 귀결됨을 확인하였다.

공칭 속도 이상으로 구동되는 차륜 위에서 평판은 면의 방향으로 항상 안정되므로 평판의 면내 위치 제어력을 면의 제어의 목표 위치로 설정하여 면내 위치를 간접 제어할 수 있음을 보였다. 진행 방향으로의 피치 운동으로 평판이 이송될 수 있으므로 단순한 이송에 국한된다면 개방 영역을 조절하는 서보 모터의 추가없이 네 개의 자기차륜만으로도 평판 반송이 가능함을 실험적으로 보였다.

## 후기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A4A01005675).

## References

- [1] Fujii, N., Ogawa, K., Matsumoto, T., 1996, Revolving magnet wheels with permanent magnets, *Electrical Engineering in Japan*, 116:1 106-118.
- [2] Jung, K. S., Shim, K. B., Lee, S. H., 2010, 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*, 27:7 109-116.
- [3] Fujii, N., Ito, Y., Yoshihara, T., 2005, Characteristics of a moving magnet rotator over a conducting plate, *IEEE Trans. on Magnetics*, 41 3811-3813.
- [4] Shim, K. B., Lee, S. H., Jung, K. S., 2009, Omni-directional magnet wheel using magnetic shield, *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, 26:9 72-80.
- [5] Bird, J., Lipo, T. A., 2007, Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model, *IEEE Trans. on Magnetics*, 43:8 3395-3405.
- [6] Park, S. J., Jung, K. S., 2011, Design of an electrodynamic wheel for transfer of conductive rod, *J. of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 20:3, 251-256.
- [7] Jung, K. S., 2012, Control of conductive plate through varying the open area size of the partially, magnetically isolated electrodynamic wheel, *J. of Institute of Control, Robotics and Systems*, 18:3 230-236.
- [8] Nasar, S. A., Cid, Jr. L., 1973, Propulsion and levitation forces in single-sided linear induction motor for high-speed ground transportation, *Proc. IEEE*, 61 630-644.
- [9] Wai, R., Duan, R., Liu, W., Yu, S., 2001, Nonlinear decoupled control for linear induction motor servo drive, *The 27th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society*, 635-640.
- [10] Jung, K. S., Lee, S. H., 2008, The modified two-axis vector controller of linear induction motor to apply to the non-contact stage with large workspace, *J. of Institute of Control, Robotics and Systems*, 14:4 385-391.
- [11] Morizane, T., Kimura, N., Taniguchi, K., 2000, Simultaneous control of propulsion and levitation of linear induction motor in a novel maglev system, *Proc. of Power Electronics and Motion Control Conf.*, 1 127-131.