

래디얼 동전기 휠을 이용한 전도성 트랙 위에서의 이송 시스템

정광석
한국교통대학교 기계공학과

Transfer System using Radial Electrodynamic Wheel over Conductive Track

Kwang Suk Jung

Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 전도성 평판의 모서리에 래디얼 동전기 휠을 부분적으로 중첩시켜 회전시키면 휠에는 부상력과 모서리 방향의 추력 그리고 중첩 영역을 감소시키는 방향으로의 횡력이 발생한다. 이러한 휠을 조합하면 진행 방향을 제외한 나머지 축에서의 자기 안정성이 담보되는 시스템 구현이 가능하다. 실증차원에서 래디얼 동전기 휠을 이용한 자기 부상 방식 이송 시스템을 제안한다. 시스템은 네 개의 동전기 휠에 의해 부상, 추진되며 앞뒤 휠에 의한 추력이 서로 상쇄되도록 대항하는 구조로 배치되어있다. 휠의 동적 안정성과 동전기력에 미치는 휠 극수의 영향이 유한요소법을 이용하여 분석된다. 단동 휠에 의한 추력과 부상력은 강하게 연성되어있고 이를 가변시킬 수 있는 인자는 휠의 회전속도뿐이다. 따라서 두 힘을 독립적으로 제어하기 위해 추력과 부상력간의 비율이 속도에 비례하고 공극의 크기와 무관하다는 사실을 이용한다. 이러한 제어 방법으로 시스템의 면내, 면외 운동 제어를 수행하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 실험 결과는 휠의 속도만으로 연성된 자유도를 효과적으로 제어할 수 있음을 보여준다.

Abstract When a radial wheel is placed so as to partially overlap a conductive plate and rotated, a lift force is generated on the wheel, a thrust force along the edge, and a lateral force which tends to reduce the overlap region. When several of these wheels are combined, it is possible to realize a system in which the stability of the remaining axes is ensured, except in the traveling direction. To validate the overall characteristics of the multi-wheel system, we propose a transfer system levitated magnetically using radial electrodynamic wheels. The proposed system is floated and propelled by four wheels and arranged in a structure that allows the thrusts generated by the front and rear wheels to offset each other. The dynamic stability of the wheel and the effect of the pole number on the three-axial forces are analyzed by the finite element method. At this time, the thrust and levitation force are strongly coupled, and the only factor affecting them is the wheel rotation speed. Therefore, in order to control these two forces independently, we make use of the fact that the ratio of the thrust to the levitation force is proportional to the velocity and is independent of the size of the gap. The in-plane and out-of-plane motion control of the system is achieved by this control method and compared with the simulation results. The experimental results show that the coupled degrees of freedom can be effectively controlled by the wheel speed alone.

Keywords : Dynamic stability, Electrodynamic wheel, Finite element analysis, Independent control, Magnetic levitation, Parameter sensitivity analysis

본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2016R1D1A1B03930283).

*Corresponding Author : Kwang Suk Jung(Korea National Univ. of Transportation)

Tel: +82-43-841-5135 email: ksjung@ut.ac.kr

Received October 11, 2017

Revised November 2, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

자화방향이 특정 축에 대해 원주방향을 따라 주기적으로 교번, 정렬된 영구자석(이하 PM) 배열을 전도판 위에서 회전시킬 때 발생하는 동전기력을 이용하는 메커니즘을 동전기 휠(Electrodynamic wheel) 혹은 자기 차륜(Magnet wheel)이라 한다[1-3]. 동전기 휠은 영구자석의 자화 방향과 대항하는 전도체와의 상대적인 조합에 따라 축형 휠(Axial wheel)과 라디얼 휠(Radial wheel)로 구분할 수 있다. 축형 휠의 경우 휠과 전도체와의 대항 면적이 크기 때문에 자기력 밀도가 훨씬 우수하여 도전성 빔이나 시트의 반송 등 다양한 응용에 대한 연구가 수행되어왔다[4-6]. 이에 반해 라디얼 휠의 경우 특정 순간에 일부 PM만이 전도체와 자기 결합하므로 자기력 밀도가 열악하여 이론적인 해석 연구만이 수행되어왔으나[7,8] 초전도 자성체를 이용할 경우에는 이러한 물리적인 제약을 극복할 수 있기 때문에 도심형 열차의 추진 원리로 주목받고 있는 전자기 구조이다.

이송 시스템 구동원으로서 라디얼 휠의 적용시 난제는 휠에 발생하는 다축력 특히 부상력과 추력이 휠의 회전 속도에 강하게 연성되어있어 독립 제어가 어렵다는 것이다. 본 연구에서는 이러한 부상력과 추력간의 비가 동전기 휠의 속도에 비례하고 동시에 공극에 무관한 점을 시뮬레이션을 통해 도출하고 이를 기반으로 새로운 방식의 독립 제어 알고리즘을 제안한다. 물론, 개별적인 제어기를 통한 제어 입력은 결국 휠의 속도 형태로 출력되므로 두 힘간의 불가피한 연성은 잔존하지만 각 축의 입력 계산시 다른 축에의 영향을 고려할 필요가 없다. 이러한 알고리즘은 구축된 동전기 휠 기반 이송 시스템을 대상으로 실험적으로 검증되며 이는 시뮬레이션 결과와도 비교된다. 개별 동전기 휠의 3축 자기력 거동 특성과 안정성 등이 유한요소해석을 통해 분석되며 자기력에 영향을 미치는 지배 인자에 관해 논의한다.

2. 다축력 발생 토폴로지

일정한 간격으로 분리되어있는 전도성 레일 위에서 회전하는 라디얼 휠의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다[7]. 레일 상면과 휠의 회전 축이 나란하고 휠의 중심을 향해 원주 방향으로 PM의 자화 방향이 주기적으로 반복되고 있는 것을 알 수 있다. 그림에 묘사된 PM은 4극쌍(Four

pole-pairs)이며 이러한 배열을 회전시키면 휠에는 묘사된 좌표축 방향으로의 3축력이 발생한다. z축 힘은 반발 부상력이고 휠이 x축에 대해 시계 방향으로 회전하면 y축 방향으로 추력이 발생하므로 이는 롤링 모션과 흡사하다. x방향으로는 좌우측 레일에 의해 횡력이 발생하는데 중심 위치에서는 크기가 동일하므로 동적 평형상태에 있다. 특히, 횡력은 휠과 레일의 중첩 영역이 감소하는 방향으로 발생한다. 따라서 휠이 회전할 때 x, z축 안정성이 담보될 수 있는 구조이다. 이러한 다축 자기력은 휠의 회전에 전적으로 의존하는 힘이며 서로 강하게 연성(couple)되어있다. 다만, 전술한 바와 같이 이러한 휠이 회전할 때 레일 위에서 와전류에 의한 자기장과 자기 결합하는 PM의 수는 특정 순간에 1~2개에 불과하므로 자기력 밀도 측면에서는 축형 휠보다 열위에 있다[9].

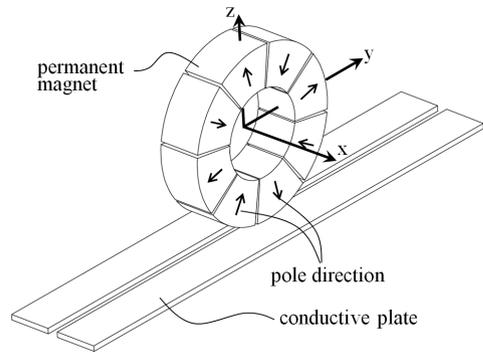


Fig. 1. The concept configuration of the radial electrodynamic wheel with lateral stability

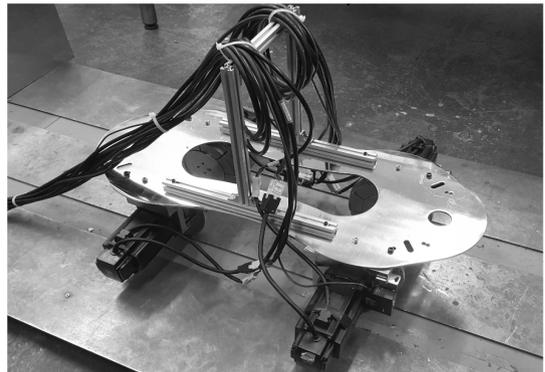


Fig. 2. Photograph of the transfer system using four electrodynamic wheel over the conductive track

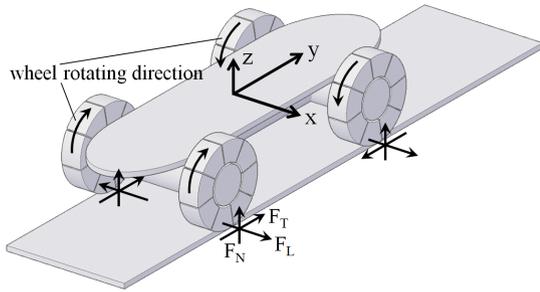


Fig. 3. Force layout by each rotating wheel of the transfer system shown in Fig. 2

상기 래디얼 동전기 휠 네 개를 이용하여 전도성 트랙 위에서 부상하여 이송될 수 있는 시스템 사진을 Fig. 2에 그리고 시스템을 구성하는 각 휠에 의한 다축력을 Fig. 3에 도시하였다. 네 개의 휠을 전부 동일한 방향으로 회전시키면 공간상에서 시스템의 이송 방향을 전환할 수 있는 방법이 없으므로 전후 휠은 각각 반대로 회전하도록 하였다. 따라서 실제 시스템 이송은 각 추력의 차분량에 의해 가능하며 정지한 상태에서 부상도 가능한 방식이다. 전술한 바와 같이 동 시스템의 각 휠은 트랙의 에지와 부분적으로 오버랩되어있고 이러한 중첩 영역으로 인해 Fig. 3에서와 같이 F_L 이 발생하고 이러한 힘은 좌우측 휠로 인해 x방향으로의 안정성을 담보해주며 따라서 트랙의 너비가 일정하다면 시스템은 트랙을 따라 횡방향의 되먹임 제어 없이도 안정되게 안내될 수 있다. 휠의 횡방향 안정성은 Fig. 4의 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있다. Fig. 4는 Fig. 5에 주어진 개별 휠의 좌표계에서 ρ , w 가 각각 40mm, 25mm이고 공극이 2mm일 때 x방향 사이 거리 τ 의 변화에 따른 휠에 발생하는 x축 힘 즉, 횡력을 나타낸다. 실제 휠의 회전속도는 3000rpm이고 이용한 PM 재질은 NdFeB이며 PM의 Grade는 35로 설정하였다. 결과에서 유의미한 특성은 τ 가 커짐에 따라 즉, PM과 레일간의 중첩 영역이 커질수록 복원 특성을 갖는 힘의 크기가 커지는데 이는 x 방향으로 휠에는 음의 강성이 형성된다는 의미와 동일하다. 그러한 구간은 그림 안에 점선으로 표시한 것과 같이 상대적으로 큰 영역에 걸쳐있는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 나란한 레일 위에 놓인 래디얼 휠이나 Fig. 3과 같이 트랙 위에서 좌우측에 걸쳐 있는 한 쌍의 래디얼 휠 모두 횡방향 안정성이 담보되는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에 나타낸 이송 시스템의 제어 대상 모드를 y, z축으로만 한정시켜준다.

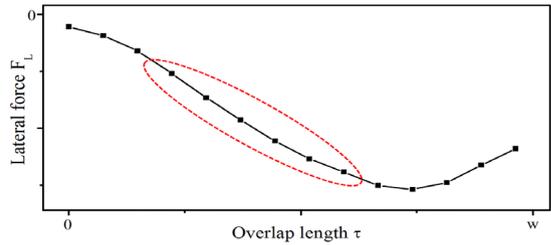


Fig. 4. Stable range guaranteeing the lateral stability of the radial electrodynamic wheel

3. 동전기 휠의 자기력 특성

자기력의 크기에 영향을 미치는 래디얼 휠을 구성하는 주요 인자로는 우선, 직관적인 추론이 가능한 너비 w (Fig. 5 참조)를 들 수 있다. 너비가 클수록 3축력의 절대 크기뿐만 아니라 Fig. 4에서와 같이 안정 영역의 크기도 동시에 커지는 것을 알 수 있다. 물론 역기전력 저항도 동시에 증가되어야 한다. 다음으로 동작 조건 중 추론이 가능한 것은 공극의 크기이며 다른 자기 시스템에서와 같이 공극의 크기는 작을수록 힘은 증가한다. 이러한 기하학적 측면외에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 휠을 구성하는 PM의 극수(pole number)이다. 극수가 커지면 제한된 영역에서의 스위칭률이 증가되는 것을 알 수 있지만 이러한 증가가 반드시 자기력 증가를 담보하는 것은 아님을 상용 유한요소해석 툴을 통해 확인할 수 있으며 극수 변화에 따른 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에 근거하여 해석에 사용된 휠의 제원을 나타내면 전장에서와 마찬가지로 ρ , w 가 각각 40mm, 25mm이고 공극은 2mm이며 PM 재질은 NdFeB이다. 휠의 회전속도는 3000rpm로 설정하였다. 극수는 1극쌍(one pole-pair)부터 8극쌍까지 변화시켰으며 이 때 PM 수는 각각 2개와 16개에 해당한다. 해석 결과로부터 4극쌍 즉 극수가 8개일 때 3축력 모두 가장 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있는데 1극쌍으로부터 극수가 커짐에 따라 힘도 같이 증가하다가 4극쌍 이상이 되면 다시 값이 감소해가는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 실제 힘의 과도 응답 특성을 보면 극이 작으면 힘의 편차가 커지고 극수가 커지면 편차가 작아지는 것을 알 수 있는데 4극쌍의 경우 힘의 크기뿐만 아니라 힘의 편차도 적절한 수준으로 수렴해가는 것을 알 수 있다. 따라서 구축된 Fig. 2의 동전기 휠은 모두 4극쌍 PM으로 구성되어있다.

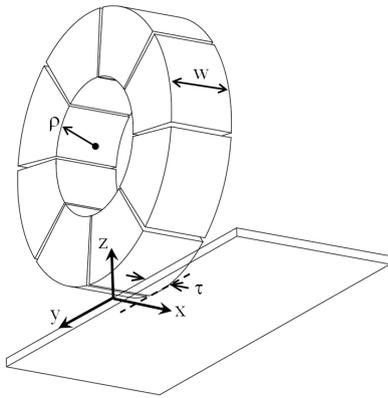


Fig. 5. Coordinate frame of the radial wheel

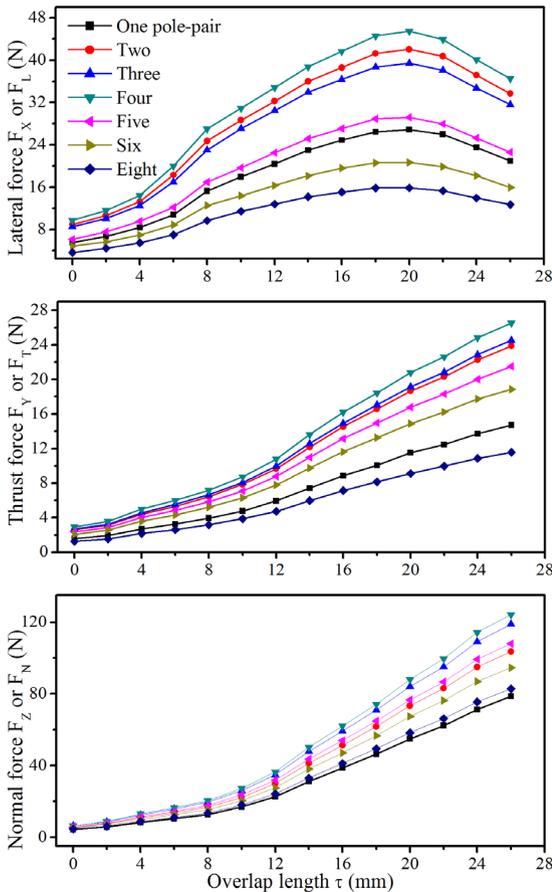


Fig. 6. Force variation according to the pole numbers of permanent magnets

전술한 바와 같이 전도성 트랙 위에서 고속 회전하는 휠에는 3축 자기력이 발생한다. 따라서 유일한 동전기 휠의 동작 조건은 휠의 회전 속도뿐이며 이러한 속도 변

화에 따라 자기력이 가변되고 결과적으로 공극이 변화된다. 휠의 회전 속도와 공극 크기 변화에 따른 3축 자기력의 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 해석에 사용된 휠의 제원은 전술한 해석 체원과 동일하며 이는 실제 시스템 설계 변수와 동일하다. 회전 속도는 300rpm에서 3900rpm까지 300rpm씩 변화시켰으며 공극은 1.5mm에서 3.5mm까지 0.5mm의 간격으로 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 부상력은 속도 증가에 따라 완만히 증가하다가 5000rpm을 초과하면 일정한 값에 수렴하며 추력의 경우에는 1200rpm 부근에서 정점을 찍은 후 조금씩 감소하는 경향을 보인다. 특히 저속 구간에서는 추력의 상승시간이 부상력보다 더 짧은 것을 확인할 수 있다. 두 힘간의 흥미로운 특성은 속도 변화에 따른 두 힘의 상대비를 묘사한 Fig. 8에서 확인할 수 있다. Fig. 8을 통해 공극에 관계없이 두 힘의 비와 휠의 회전 속도가 선형 비례 관계를 갖는 것을 확인할 수 있으며 이를 근사적으로 다음과 같이 수식화할 수 있다.

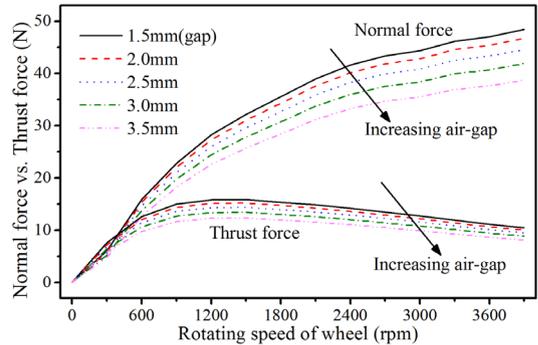


Fig. 7. Three-axial forces according to a rotating speed of wheel

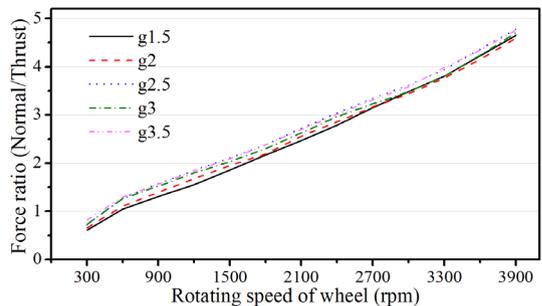


Fig. 8. Ratio between normal force and thrust force according to the wheel rotating speed

$$\begin{aligned} \frac{f_N}{f_T} &= \Gamma(\omega) \\ &= 0.00105\omega + 0.454 \end{aligned} \quad (1)$$

위 식은 휠의 속도만으로 이축력 즉, 부상력과 추력을 독립적으로 제어할 수 있는 단초를 제공한다. 목표값과 현재값간의 위치 오차를 기반으로 f_N, f_T 의 제어 입력이 계산되면 위 식을 통해 휠의 해당 속도 ω 를 얻을 수 있다. 이러한 ω 는 두 힘의 비에 대해 고유하게 결정되며 휠이 ω 로 회전하면 휠의 위치가 가변되고 이를 다시 궤환하여 위의 알고리즘을 반복한다.

4. 이송 시스템의 시험 결과

Fig. 2에서와 같이 구축한 이송 시스템은 네 개의 휠 회전에 의해 공간상에서 6자유도 운동을 하는데 각 휠에 의해 3축 자기력이 발생하므로 총 12개의 힘이 6개의 운동 모드를 만든다. 그러나 전술한 바와 같이 트랙의 횡방향으로는 자기 안정성을 갖기 때문에 별도의 제어가 필요없고 따라서 x, γ 의 2축 면내 운동(In-plain motion)과 z, α, β 의 3축 면외 운동(Out-of-plain motion)만을 고려한다. 본 장에서는 전술한 이축 독립 제어 방식을 확대 적용하여 전체 시스템을 대상으로 한 부상운동과 추진운동 제어 시험 절차에 관하여 논의한다.

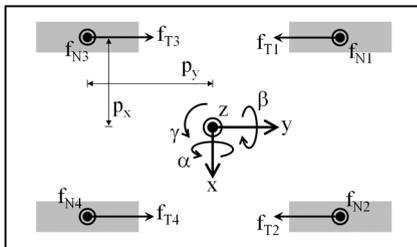


Fig. 9. Force diagram and coordinate frame on the moving plate of the wheel-based transfer system

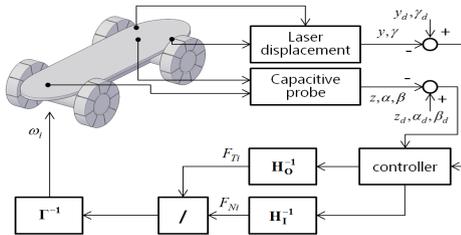


Fig. 10. Block diagram for the overall motion control of the transfer system

우선, 공간상에서 이송 개체의 면내 위치는 전면부에 장착된 레이저 장변위계를 통해 측정되고 면외 위치는 하단부에 장착된 정전용량 센서를 통해 측정한다. 시스템의 목표값 대비 현재 위치와의 오차를 기준으로 계산된 각 축의 제어 입력과 개별 휠의 2축력간의 동역학식은 Fig. 9를 이용하면 다음과 같다.

$$m\ddot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \\ p_x & -p_x & -p_x & p_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{T1} \\ f_{T2} \\ f_{T3} \\ f_{T4} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$m\ddot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ p_y & p_y & -p_y & -p_y \\ p_x & -p_x & p_x & -p_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{N1} \\ f_{N2} \\ f_{N3} \\ f_{N4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 두 식의 좌변은 이송 적분기 구조인 시스템의 특성상 간단한 비례-미분 제어를 통해 결정되며 실제 개별 휠의 2축력은 부상 개체의 하중을 고려하면 공칭 입력을 포함하는 형태를 취하며 위 동역학 식의 역변환을 고려하여 첫 번째 휠의 설계 힘을 구하면 다음과 같이 계산된다.

$$f_{T1} = -\frac{1}{4}m\ddot{y} + \frac{1}{4p_x}I_z\ddot{\gamma} \quad (4)$$

$$f_{Ni} = \frac{1}{4}(m\ddot{z} + mg) + \frac{1}{4p_y}I_x\ddot{\alpha} + \frac{1}{4p_x}I_y\ddot{\beta} \quad (5)$$

식 (5)에서와 같이 부상력 f_{Ni} 은 시스템의 무게를 보상할 수 있도록 공칭값을 고려해야 하고 이에 따라 추력에도 공칭값이 포함되어야한다. 특히 추력의 경우 전후 방향 휠에 의한 힘이 서로 상쇄되는 구조이므로 제어 입력은 면내 운동의 섭동만을 고려하는 형태이지만 공칭값을 고려하면 식 (4)는 다음과 같이 변형되어야 한다.

$$f_{T1} = -\frac{1}{4}m\ddot{y} + \frac{1}{4p_x}I_z\ddot{\gamma} + f_{TN} \quad (6)$$

위와 같이 각 휠의 추력과 부상력이 설계되면 식 (1)을 통해 해당 휠의 회전 속도 ω_i 가 결정된다.

$$\omega_i = \Gamma^{-1} \left(\frac{f_{Ni}}{f_T} \right) \quad (7)$$

설계 목표 속도 ω_i 로 휠이 회전하면 시스템의 위치는 변동되고 위 알고리즘이 반복 적용된다. 이러한 방법으로 ω_i 만을 가변시켜 시스템의 공간 운동을 제어할 수 있다.

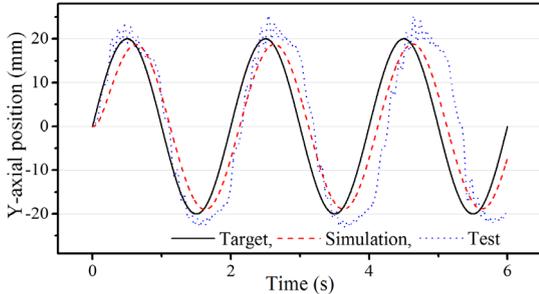


Fig. 11. Y-axis response of the transfer system for a sinusoidal input($\pm 20\text{mm}$)

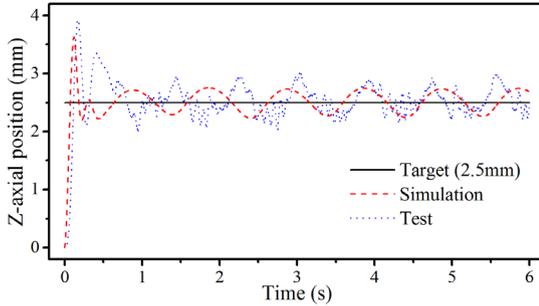


Fig. 12. Z-axis response for a step input of 2.5mm

우선, 시스템의 질량 m 은 14.78kg이고 질량관성모멘트 I_x, I_y, I_z 는 각각 2.36, 0.38, 1.16kg·m²이다. 공칭 공극의 크기는 2.5mm이고 이 위치에서 부상체 무게를 보상하기 위한 개별 휠의 부상력은 36.2N이다. 이에 대응하는 개별 휠의 공칭 속도를 2100rpm로 설정하면 개별 휠의 추력은 대략 13.3N이다. 이러한 공칭 값에 근거하여 진행 방향인 y 축 방향으로 $\pm 20\text{mm}$ 의 조화 입력 목표에 대한 제어 시험을 수행하면 Fig. 11과 같다. 이 때 바닥에 놓인 상태에서 2.5mm의 공칭 위치만큼의 계단 입력 목표에 대한 z 축으로의 추종 결과는 Fig. 12와 같다. 시험 결과는 시뮬레이션 결과와도 비교되는데 두 결과 모두 목표 값 대비 약간의 시간 지연 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있으며 방향이 전환되는 부분에서의 체터링이 상당 수준으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 전후방 휠 간의 추력 차만으로 해당 축 제어를 수행하는데 따른 불가피한 현상이며 방향 전환이 없는 일방 운동에 대해서는 동일한 현상이 거의 발생하지 않는다.

Fig. 11과 Fig. 12 모두 정지 상태에서 동시에 진행된 시험 결과인데 반발력의 특성상 다소 과한 2.5mm의 계단 입력에도 짧은 시간 안에 목표 위치에 수렴되는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 결과에서 주의 깊은 고찰이 필요한 부분은 목표 값에 수렴한 후에 발생하는 조화형태의 지속적인 출렁거림이다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 휠의 회전속도를 매개로 강하게 연성되어있는 추력과 부상력간의 상호 간섭에 기인한다. 실제 공극위치에서 부상되고 있는 시스템을 특정 방향으로 이송시키기 위해서는 전후방 휠 간의 추력 평형을 깨야 하는데 이를 위해서는 휠의 속도를 가변시켜 순간적으로 공극의 위치를 변화시킬 수 밖에 없다. 이러한 특성은 시스템의 롤링 운동 결과인 Fig. 13과 개별 휠의 속도 변화 선도인 Fig. 14를 통해 간접적으로 확인할 수 있다.

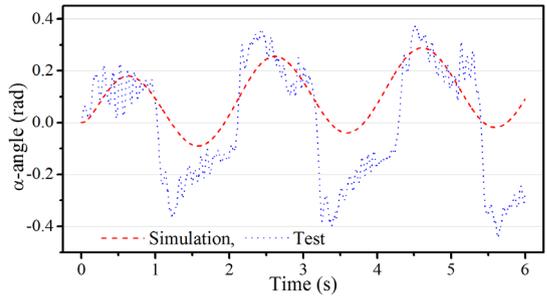


Fig. 13. α -axis response meaning a roll motion of the upper plate

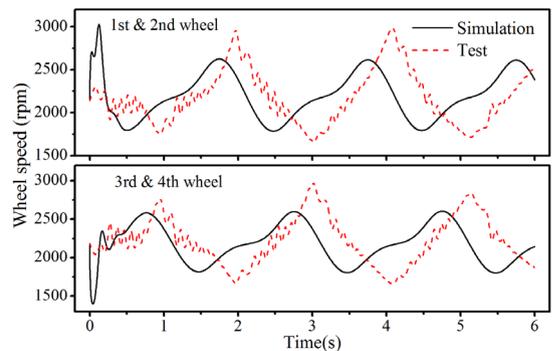


Fig. 14. Rotating speed of each wheel obtained by ratio of normal force to thrust force

Fig. 13과 Fig. 14는 Fig. 11에 묘사된 y 축 방향으로의 조화입력 시험시 α 축의 응답 선도와 각 휠의 회전 속도 ω 의 변화 선도이다. 이 때 α 축의 목표 값은 0°이며 α 축에 대한 운동은 시스템의 롤링 운동 형태를 취한다.

우선, Fig. 11에서 양의 y 방향으로 이동하기 위해서는 후방 3, 4번째 휠의 추력이 공칭 값보다 커져야 하고 따라서 Fig. 8을 참조하면 부상력 대비 추력이 커지므로 이축력간의 비율이 감소하고 결과적으로 후방 휠의 회전 속도는 감소하고 반대로 전방 휠의 회전 속도는 증가한다. 결국 1, 2번째 휠의 속도 증가로 시스템의 앞쪽이 살짝 들리는 형태가 되며 이러한 결과가 Fig. 13에 묘사되어 있다. 물론 반대로 이동할 때에는 뒤쪽이 들리는 형태가 되므로 전체적으로 시스템은 시소 형태의 운동을 한다. 특정 방향으로 계속 진행하기 위해서는 전방이 살짝 들린 상태가 된다. Fig. 14에서 시험 초기에 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 큰 차이를 보이는 것은 정지 상태에서 공칭 위치에 도달하는 동안의 제한된 자기력 상승시간이 기인하는 것으로 판단되며 공칭 위치에 수렴한 후에는 정성적인 경향은 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이처럼 휠의 속도만으로 부상력과 추력을 각각 제어해서 시스템의 공간 운동을 구현할 수 있지만 두 힘을 실험적으로 완전히 분리하는 것은 불가하며 불가피하게 시스템의 롤링 운동이 수반된다.

5. 결론

래디얼 동전기 휠을 구동원으로 하는 이송 시스템을 구축하여 시스템의 공간 이송이 가능함을 실험적으로 검증하였다. 개별 휠의 회전에 따른 3축 자기력 중 수직력과 추력외에 전도성 트랙간의 부분 중첩에 따라 휠의 축 방향으로 발생하는 횡력의 자기 안정성을 활용하여 트랙 위에서 안정되게 부상하여 이송할 수 있음을 보였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 래디얼 휠의 수직력과 추력간의 상대 비는 휠의 회전 속도에 선형 비례한다.

둘째, 각각의 제어 로직에 의해 상호 연성을 고려할 필요없이 계산된 수직력과 추력간의 비를 통해 이에 해당하는 유일한 휠의 회전 속도를 얻을 수 있으며 따라서 휠의 회전 속도만을 가변시켜 독립 제어할 수 있다.

셋째, 이송 시스템의 이송 운동 제어시 휠 속도 가변에 따른 롤링 형태의 불가피한 섭동이 발생한다.

단동 래디얼 휠 자체는 자기 결합 영역이 상대적으로 협소하므로 휠 자체의 자기력 밀도를 증가시켜야만 실질적인 활용이 기대되는데 여러 인자들 중에서 휠을 구성

하는 PM 극수가 자기력 크기에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 직경 160mm의 휠의 경우 4극쌍 모델이 가장 우수한 특성을 갖는 것을 확인하였으며 휠의 직경에 따라 최적의 조합이 존재한다.

References

- [1] N. Fujii, T. Ogawa, T. Matsumoto, "Revolving magnet wheels with permanent magnets", *Electrical Engineering(in Japan)*, vol. 116, pp. 106-118, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1002/ej.4391160110>
- [2] N. Fujii, Y. Ito, T. Yoshihara, "Characteristics of a moving magnet rotator over a conducting plate", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 3811-3813, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.854930>
- [3] K. S. Jung, K. B. Shim, "Noncontact conveyance of conductive plate using omni-directional magnet wheel", *Mechatronics*, vol. 20, pp. 496-502, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.04.007>
- [4] J. H. Park, Y. S. Baek, "Parametric design of the levitation mechanism for maglev planar transportation vehicle", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, pp. 3069-3072, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.829262>
- [5] K. S. Jung, "A novel method transferring the copper rod without contact by axial magnet wheels", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 47, pp. 187-197, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-140026>
- [6] K. S. Jung, "Contactless conveyance of conductive rod by rotating the radial electrodynamic wheel with a spiral structure", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 46, pp. 569-582, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-141956>
- [7] J. Bird, T. A. Lipo, "Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model", *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 43, no. 8, pp. 3395-3405, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.900572>
- [8] J. Bird, T. A. Lipo, "Calculating the forces created by an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state finite-element method", *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 44, no. 3, pp. 365-372, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.913038>
- [9] K. S. Jung, "Parametric design of contact-free transportation system using the repulsive electrodynamic wheels", *J. of the Korea Academia- Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 3, pp. 310- 316, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.3.310>

정 광 석(Kwang Suk Jung)

[정회원]



- 1995년 2월 : 연세대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 연세대학교 공과대학 원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 연세대학교 공과대학 원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : LG 전자 생산기술원 선임연구원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

초정밀계측제어, 서피스엔코더, 전기에너지변환기기, 마그네틱기어, 자기부상, FPD 제조장비