

# 반발식 동전기 휠을 이용한 비접촉 반송 시스템의 변수 설계

정광석\*

<sup>1</sup>한국교통대학교 기계공학과

## Parametric Design of Contact-Free Transportation System Using The Repulsive Electrodynamic Wheels

Kwang Suk Jung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

**요약** 도전성 평판에 부분적으로 걸쳐 회전하는 축형 동전기 휠을 구동원으로 이용하는 비접촉 반송 시스템을 제안한다. 회전하는 동전기 휠에는 3축력이 발생하는데 이 중 중력방향 힘과 횡방향 힘은 자기안정성을 갖고 있으므로 공간상에서 반송 시스템의 동적 안정성을 확보하기 위해서는 길이 방향 힘만을 제어하는 것으로 충분하다. 동전기 휠은 원주 방향을 따라 주기적으로 반복되는 극성을 갖는 영구자석으로 구성되어있으므로 기본 극의 기하학적 형상이나 극수 등은 안정성 여유에 큰 영향을 미친다. 또한 휠과 전도판간의 중첩된 영역 역시 횡방향으로의 강성을 결정하는 주요 인자이므로 본 논문에서는 안정성을 성능 지표로 휠을 구성하는 주요 설계 변수에 대한 민감도 해석을 수행한다. 얻어진 설계 값을 이용하여 제작된 시스템으로 휠을 포함하는 이동 개체의 수동적인 안정성을 실험적으로 검증한다.

**Abstract** We propose a novel contact-free transportation system in which an axial electrodynamic wheel is applied as an actuator. When the electrodynamic wheel is partially overlapped by a fixed conductive plate and rotates over it, three-axis magnetic forces are generated on the wheel. Among these forces, those in the gravitational direction and the lateral direction are inherently stable. Therefore, only the force in the longitudinal direction needs to be controlled to guarantee spatial stability of the wheel. The electrodynamic wheel consists of permanent magnets that are repeated and polarized periodically along the circumferential direction. The basic geometric configuration and the pole number of the wheel influence the stability margin of a transportation system, which would include several wheels. The overlap region between the wheel and the conductive plate is a dominant factor affecting the stiffness in the lateral direction. Therefore, sensitivity analysis for the major parameters of the wheel mechanism was performed using a finite element tool. The system was manufactured based on the obtained design values, and the passive stability of a moving object with the wheels was verified experimentally.

**Keywords** : Contact-free conveyance, Electrodynamic wheel, Magnetic levitation, Self-stability, Sensitivity analysis

### 1. 서론

동전기 휠(Electrodynamic wheel)은 Fig. 1에서와 같이 원주 방향으로 교차되는 극성을 갖는 영구자석(Permanent magnet; 이하 PM)이 주기적으로 반복되어 정렬되어있는 자기 구조를 일컫는데 PM의 자화 방향과

대항하는 전도체와의 상대적인 자세에 따라 축형(Axial) 또는 레디알형(Radial)으로 대별될 수 있다[1]. 이중 힘 밀도 측면에서 유리한 축형 동전기 휠을 이용하여 반송 시스템에 적용하고자 하는 시도가 다수 있었다[2-6]. 그러나 기존에 제안된 시스템에서는 전도판 위에서 회전하는 휠에 의해 발생하는 반발력만을 이용하거나[2] 또는

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

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

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

Received February 3, 2016

Revised (1st February 25, 2016, 2nd March 2, 2016)

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

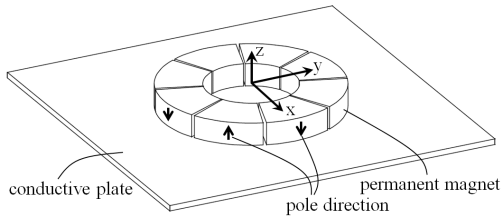


Fig. 1. Basic configuration of the electrodynamic wheel rotating over the conductive plate

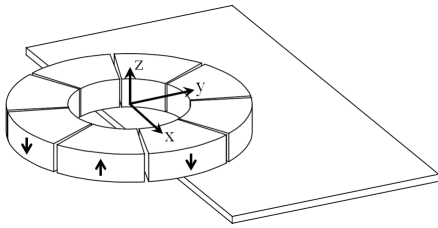


Fig. 2. The electrodynamic wheel overlapped partially with the conductive plate, resulting in the lateral force

휠에 의한 자기장을 부분적으로 차폐하여 개방된 영역에서의 부상력과 접선 추력을 구동력으로 이용하였다[3,4]. 전자의 경우 복수의 선형 유도 전동기를 두어 추력을 얻었으므로 시스템이 대단히 복잡해지는 단점이 있었고 후자의 경우 개방 영역을 회전시키거나[3] 개방 영역의 크기 자체를 조절하여 추력을 제어하므로[4] 시스템 제어 방법이 대단히 복잡하고 공극 자기장을 일부 차폐하므로 가반 하중 혹은 힘 밀도가 작아지는 단점이 있었다. 전도판을 레일로 이용하여 반송되는 시스템이나 전도판 자체를 반송하는 시스템과 별도로 전도성 로드를 반송하기 위해 서로 마주하는 동전기 휠의 일부 영역을 이용한 사례도 보고되었다[5,6].

본 논문에서는 동전기 휠의 자기 접합 영역의 제한이 없고 복잡한 제어가 필요없는 새로운 방식의 반송 시스템을 제안한다. 시스템은 단위 동전기 휠에 의해 발생하는 회전 토크를 제어 가능한 선형 추력으로 변환하기 위해 Fig. 2에서와 같이 동전기 휠의 일부 영역만이 전도판과 중첩되도록 하였고 이를 통해 발생하는 3축력을 이용하여 구동된다. 이러한 구조는 전도판 위에서 동전기 휠의 y, z축 안정성을 담보해 주는 토폴로지이며 다축 제어없이 단순히 진행 방향으로의 이송 속도만을 제어하는 것만으로 부상 개체의 공간 안정성을 확보할 수 있으므로 서보 구조가 대단히 간단한 이점이 있다. 본

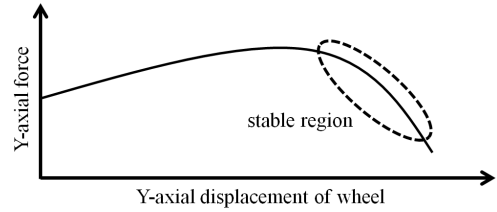


Fig. 3. The operating range with a negative stiffness guaranteeing the stability in the y-direction

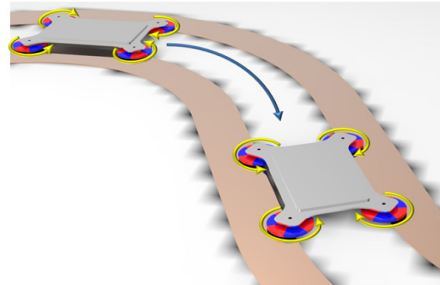


Fig. 4. The concept configuration of the electrodynamic wheel-based conveyance system moving along the conductive rail

논문에서는 이러한 반송 시스템을 구성하는 동전기 휠의 다축력 특성을 분석하고 시스템의 안정 영역을 극대화할 수 있도록 주요 인자에 대한 민감도 분석을 수행한다. 이를 토대로 동전기 휠의 설계 방향을 제시한다. 부상 개체의 안정성은 실 제작된 시스템을 대상으로 실험적으로 검증된다.

## 2. 동전기 휠의 다축력 특성

전도판 위에서 동전기 휠의 일부 영역만이 중첩되어 반시계방향으로 회전하는 Fig. 2와 같은 구조에서 전도판에는 -z축으로의 즉, 중력 방향으로의 반발력, x축으로의 추력(thrust force), y축으로의 횡력(lateral force)이 발생한다. 이중 z축 반발력과 y축 횡력은 자기 안정성을 갖는 음의 강성력이며 y축 힘의 경우 휠의 y 방향 이동에 따른 변화 선도는 Fig. 3과 같다. 그림에서 점선으로 표시한 영역에서는 y축 이동에 따른 음의 기울기를 확인할 수 있는데 이 영역에서는 제어가 없이 안정성이 담보된다. 따라서 상기 휠의 이축 안정성을 이용하여 고품위 제어가 없이도 이동 개체의 공간 안정성을 확보할 수 있는, 복수개의 동전기 휠을 이용한 반송 시스템의 개념 형

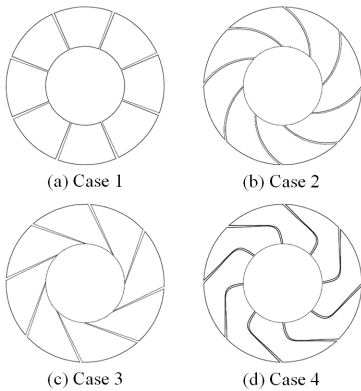


Fig. 5. The various configurations of the electrodynamic wheel with a repetitive pattern

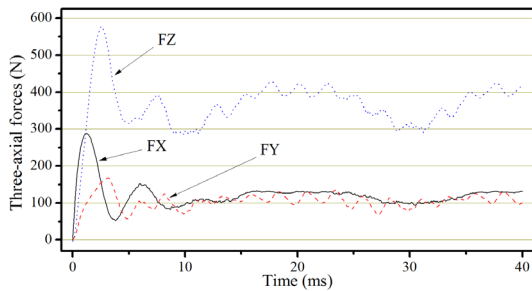


Fig. 6. Transient responses of three-axial magnetic forces by a rotation of the electrodynamic wheel

상을 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 구조는 Fig. 2에서 제안한 단동 동전기 휠의 3축력 특성을 전체 자유도에 걸쳐 확장한 구조이며 서로 대칭이 되어 휠이 회전하므로 개체가 정지한 상태에서도 부상이 가능하고 횡방향으로도 안정성이 담보된다. 특히 진행 방향으로의 속도는 전후방 각각의 휠에 의한 추력간의 차를 통해 제어할 수 있다. 또한 전도성 레일을 따라 이동하는 형태를 취하며 일반적인 반송 시스템과 달리 곡면 레일 선택이 가능하므로 임의의 방향 전환이 가능한 메커니즘이다. 본 장에서는 이러한 부상 시스템의 단위 동전기 휠의 자기력 해석을 통해 구성 인자의 영향력을 분석하고 바람직한 설계 방향을 도출한다.

### 2.1 동전기 휠의 반복 형상

전장에 기술한 것처럼 휠을 구성하는 원주 방향으로 반복되는 형상의 PM은 부채꼴 형태가 가장 일반적이다. 그러나 이러한 휠이 전도판의 단면에 진입하는 대항 조건은 Fig. 5에서와 같이 PM의 기본 형상에 따라 상당히

Table 1. Nominal specifications of the electrodynamic wheel used in simulation

Spec.		Values
PM	Material	NdFeB35
	Pole pairs	4
	Outer radius	80mm
	Inner radius	40mm
	Height	25mm
Conductive plate	Height	5mm
	Overlapped length from wheel center	40mm
Operating condition	Rotation speed	3000rpm
	Air-gap length	5mm

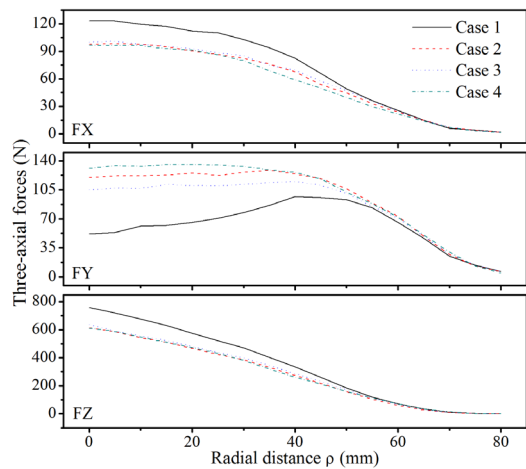


Fig. 7. Force comparisons for the repetitive pattern of PM array constituting the electrodynamic wheel

다르다. Fig. 2에서 이웃하는 PM간의 경계 영역 중 y방향 요소가 결국 y축력을 생성하므로 이러한 y방향 인자를 휠의 단위 회전당 최대도 확보할 수 있는 형상이 y축력을 더욱 크게 만들 수 있다. 기준 형상은 Fig. 5에 제시된 사례 외에도 다양하게 설정될 수 있으나 본 연구에서는 이러한 네 가지경우를 대상으로 3축력 분석을 수행하였다.

부채꼴 형상을 갖는 Case 1의 중심이 전도판 단면에 걸쳐있을 때 휠을 고속으로 회전시키면 시간 변화에 따른 3축 자기력의 거동 특성은 Fig. 6과 같다. 그림에서 FX, FY, FZ는 Fig. 2에 묘사된 좌표계를 이용하여 얻어진 x, y, z축으로의 자기력 값을 나타낸다. 해석은 상용 자기 해석 툴인 Maxwell v11.0을 이용하였다. 해석에 이용된 휠을 구성하는 PM은 NdFeB 재질의 Gr35 자석이며 적절한 중형비를 갖는 4극쌍(pol e-pairs)을 선택하였다. 구체적인 휠의 공칭 값과 운전 조건을 Table 1에

제시하였다. Fig. 6의 과도응답곡선에서 휠의 1회전에 소요되는 20ms의 시간 범위 내에서 4극쌍의 요동 특성을 확인할 수 있으며 이하 분석 결과는 휠이 초기 과도 상태를 지나 정상 상태에 도달하는 20ms 이후의 값을 평균하여 비교하였다.

동전기 휠을 구성하는 PM의 각 형상별 3축 자기력은 Fig. 7과 같다. 특히 휠의 y축 방향 거동 특성은 공칭 안정성에 큰 영향을 미치므로 휠의 중심과 전도판 모서리 간의 y축 방향 사이 거리  $\rho$ 를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 결과로부터 y축 자기 안정성을 담보하는 영역인 35~80mm에서 FX, FZ의 경우 부채꼴 형상의 Case 1이 나머지 경우보다 대략 1.2배, 1.3배 가량 큰 것을 알 수 있다. 그러나 y축 횡력 즉, FY의 경우 Case 1이 다른 세 가지 경우보다 크기는 10% 그리고 강성을 나타내는 구배는 5% 정도 작고 자기 안정성을 담보하는 영역도 55~80mm에 불과한 것을 알 수 있다. 즉, 네 가지 경우 모두 FX, FZ 즉, 추력과 부상력에서는 크기와 감소를 등에서 유의미한 차이가 없지만 y축력은 부채꼴형상만이 상대적으로 열악한 결과를 나타내고 있다. 이러한 이유는 부채꼴 형상의 경우 이웃하는 영구자석간의 경계면이 전도판의 모서리를 가로지를 때의 인입각에 의해 결정되는 y축 방향 성분이 나머지 경우보다 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 나머지 형상은 휠의 작동 영역이 아닌 사이 거리  $\rho$ 가 작은 구간이나 큰 구간에서 거의 유사한 결과를 보인다. 따라서 실 제작시 금형 제작이 용이한 Case 2를 기준 모델로 선정하였다. Case 3, Case4의 경우 내경이 작아질 때 뿔모양의 에지와 곡률이 작은 구간에서의 소결 난이도로 선정에서 제외되었다. 이하 모든 해석 결과는 Case 2를 대상으로 수행한 결과이다.

### 2.2 PM의 극수와 내경의 영향

전절에서 수행한 Fig. 7의 해석 결과는 4극쌍 모델에 대한 결과이지만 PM의 극수가 많아질수록 Fig. 6에 제시된 과도 응답의 힘 편차가 줄어든다는 것은 쉽게 예측할 수 있다. 이러한 극수 변화에 따른 3축 자기력의 크기와 힘의 편차를 Fig. 8에 나타내었다. 영구자석은 부피 감소에 따라 잔류 자기 강도가 그 재료로 감소하므로 최대 극수는 8극으로 제한하였다. 예상대로 편차의 경우 극수 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있지만 x, y축의 경우 평균값 즉, 힘의 크기 역시 극수 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 축형 휠의 경우 z축

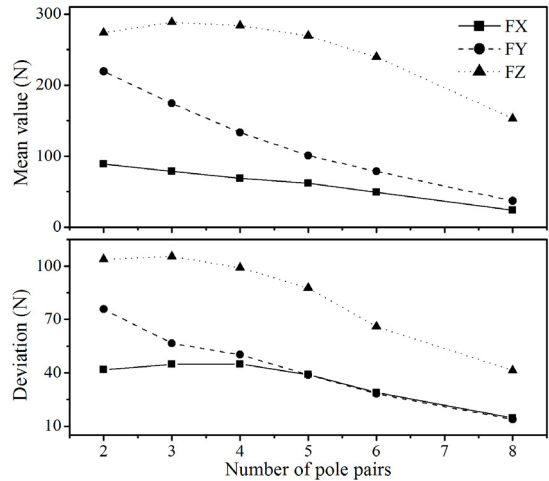


Fig. 8. Magnitudes and standard variations of forces according to pole-pairs of the electrodynamic wheel

평균값의 그래프에서와 같이 특정 극수에서 자기력의 크기가 가장 커지는 역포물선의 자기력 형태를 갖는 것으로 알려져 있지만[7,8] 전도판에 일부만이 걸쳐있는 경우 x, y축 추력과 횡력에서는 극수가 작을수록 힘의 절대 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 참조하여 단위 휠의 PM 배열은 2극쌍 즉, 4극으로 구성하였다.

다음으로 분석되는 변수는 PM의 내측 반경 r이다. 단순히 자기력의 크기만이 고려된다면 PM의 단면적을 크게 가져가는 것이 전도체와의 대향 면적 증가로 유리하지만 본 연구에서와 같이 휠의 일부만이 걸쳐있는 상황에서도 마찬가지로의 결과가 도출되는지 확인하였다. Fig. 9에 동전기 휠의 중심이 전도체 단면으로부터 멀어짐에 따라 즉, 대향 면적이 감소함에 따라 3축력 모두 일관되게 감소하는 것을 확인할 수 있으며 휠의 내경 변화가 힘의 크기에 절대적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히 y축 횡력의 경우 내경 선정에 따라 자기 안정성을 담보할 수 있는 영역이 크게 확대되는 것을 알 수 있는데 내경 0mm의 경우 음의 강성을 갖는  $\rho$ 의 영역이 20mm에서 60mm 이상에 달하는 것을 알 수 있다. 실제 공칭력외에 곡선의 공칭점에서 접선의 기울기에 의해 결정되는 강성값은 r에 관계없이 거의 비슷한 크기를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이는 단위 자석의 형상이 동일하므로 r의 변화에 관계없이 휠의 인입각도가 거의 동일하고 따라서 힘의 절대 크기는 대향 면적에 따라 변화

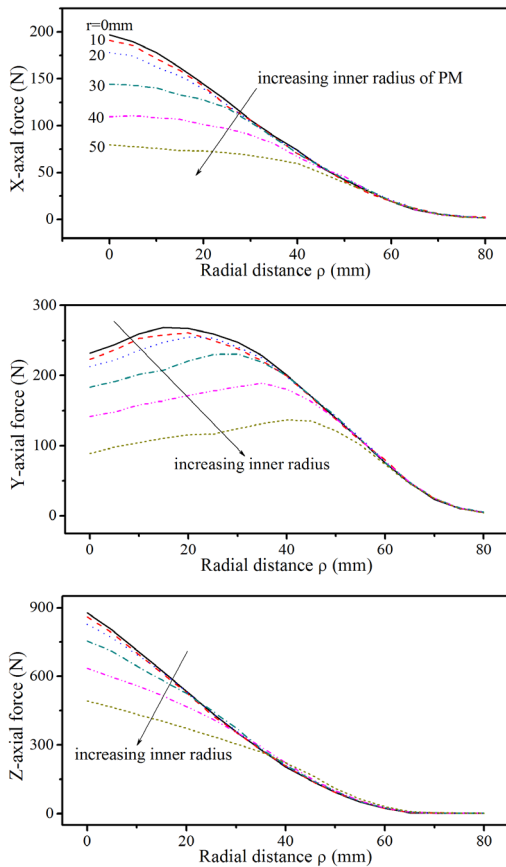


Fig. 9. Variations of three-axial forces for an inner radius of the electrodynamic wheel

되지만 그 기울기에는 별다른 영향을 주지 않는 것으로 보인다. 음의 강성 영역에서는 휠의 횡방향 안정성이 확보되므로 동전기 휠의 거동 시 횡으로의 큰 방해 인자로부터의 안정성 여유를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 추가로 z축 반발 부상력의 경우에도 내경이 작아지면 공칭 위치에서 부상체의 무게와 상쇄되는 공칭력외에도 초기 위치로의 빠른 궤환 특성을 담보하는 큰 강성을 얻을 수 있다. 따라서 동전기 휠의 내경은 0mm로 설정하였다.

### 3. 동전기 휠을 이용한 반송 시스템

동전기 휠을 구성하는 주요 변수에 대한 민감도 분석을 통해 얻어진 설계 값에 기초하여 전도성레일 위에서 부상되어 이동하는 반송시스템을 제작하였다. 시스템의 실제 외관은 Fig. 10과 같다. 이러한 반송 시스템을 구동



Fig. 10. Photograph of the conveyance system using electrodynamic wheels

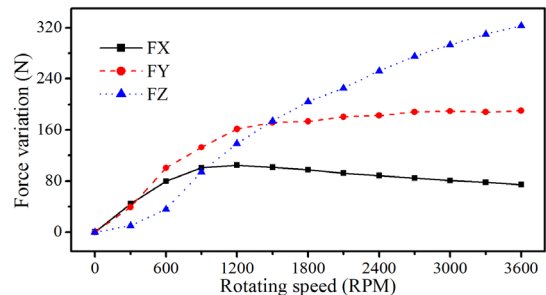


Fig. 11. Force variation according to a rotational speed of the electrodynamic wheel

하기 위한 입력 변수로는 구동원으로 이용되는 동전기 휠을 회전시키는 서보 모터의 회전 속도가 유일한데 이러한 휠 회전 속도에 따라 계산된 3축 자기력의 거동 특성은 Fig. 11과 같다. 일반적인 유도 전동기에서와 같이 x축 추력의 경우 상대적으로 저 rpm 영역 이상에서는 속도가 오히려 감소하는 경향을 보이며 y축력의 경우 1200rpm 이상에서는 증가율이 확연히 작아지는 것을 알 수 있다. z축 부상력의 경우 제시된 3600rpm까지는 급격히 증가하는 것으로 나타났지만 이 힘 역시 5000rpm 이상이 되면 수렴해 가는 것을 알 수 있는데 이러한 수렴 현상은 와전류 포화와 관련된 제약 때문이다. 이러한 속도 그래프를 참고하면 동전기 휠의 구동 속도 범위는 1000rpm 이내에서 조절되어야만 속도 변화에 따른 응답 특성이 현저해 짐을 예상할 수 있으며 특히 과도한 회전 속도는 대항하는 전도판의 국소 발열 문제를 일으키므로 가급적 저속에서 운용하는 것이 유리하다. 본 연구에서는 동전기 휠의 공칭 속도가 750rpm 수준이 되도록 부상체의 관성 값을 결정하였다.

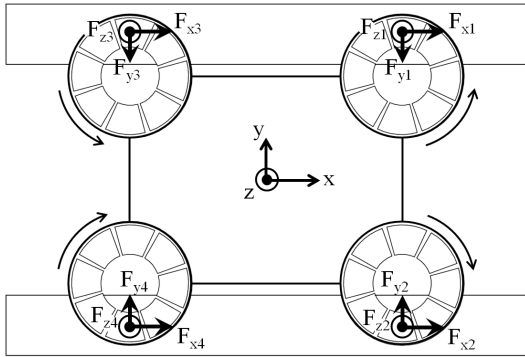


Fig. 12. Force diagram of the constructed conveyance system

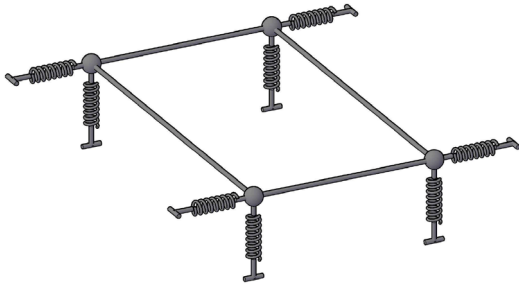


Fig. 13. Supporting mechanism equivalent to the conveyance system linearized at the nominal position

구축된 시스템은 Fig. 10에서와 같이 4각 모서리에 네 개의 동전기 휠이 있고 이를 회전시키기 위한 800W 급 서보 모터가 장착되어있다. 부상체 전체의 중량은 24.46kg이고 전술한 바와 같이 공칭 높이 5mm의 위치에서 750rpm의 공칭 속도로 휠을 회전시킬 때 발생하는 공칭 부상력은 상기 무게와 상쇄된다. 구축된 시스템의 힘 선도는 Fig. 12와 같이 간략화할 수 있는데 공칭 위치에서 서로 상쇄되는 대칭의 공칭력을 제외시키고 얻어진 선형화된 시스템 운동 방정식의 강성은 유한 요소 해석 결과와 보정 시험 결과를 이용하여 계산하면 y축의 경우 10.9kN/m이고 z축은 12.6kN/m이며 x, y, z축의 회전축인  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 축에 대해서는 각각 2.5kN/rad, 4.03kN/rad, 3.5kN/rad과 같다. Fig. 12에서 x축은 이동 축이고 따라서 시스템 구조상 이중 적분기 형태의 동특성을 갖는 축이므로 강성이 존재하지 않고 단순히 목표값에 따라 제어되는 성분이다. 결국 x축을 제외한 나머지 축에 대해 시스템은 전술한 바와 같이 자기 안정성을 갖는 시스템이며 이를 도식화하면 Fig. 13에서와 같이 앞서 구한 강

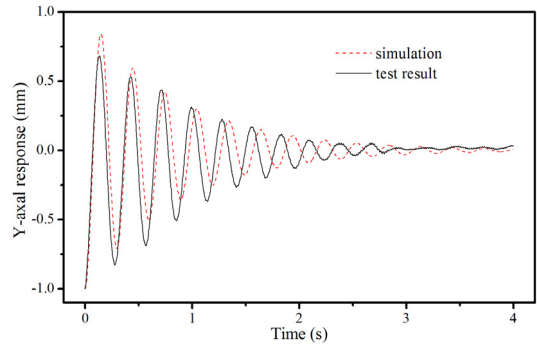


Fig. 14. Supporting mechanism equivalent to the conveyance system linearized at the nominal position

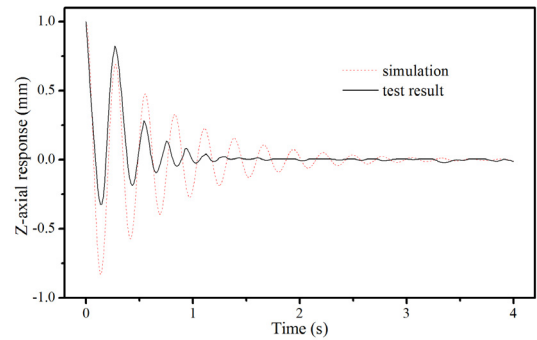


Fig. 15. Supporting mechanism equivalent to the conveyance system linearized at the nominal position

성 값을 갖는 스프링에 의해 지지되는 형태와 동일한 동특성을 갖는다. 물론 이러한 동특성은 공칭 위치가 변화해감에 따라 약간의 변동이 있을 수 있지만 x축을 제외한 나머지 축으로의 운동량은 섭동량(perturbation)에 불과하므로 Fig. 13으로 가정해도 무방하다.

공간상에 부상되어있는 이동 개체의 자기 안정성을 검증하기 위해 공칭 위치 근방에서의 궤환 응답 특성 시험을 수행하여 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. 시험은 모두 부상체의 초기 위치를 변경하여 자유단으로 놓았을 때 공칭 위치로 되돌아가는 과도 응답 특성을 측정하는 형태로 진행하였다. 면내, 외 운동을 대표하는 축으로 y, z축을 각각 선정하여 결과를 제시했으며 나머지 회전 축의 경우 얻어진 시험 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 시험 결과와 비교된 시뮬레이션의 경우 비례 템핑으로 가정하여(비례 상수 0.005) 전술한 강성값을 이용하여 계산된 결과이며 일반적인 저감쇠 선형 진동 시스템의 응

답 특성을 보이고 있다. 그러나 측정된 y, z축 응답은 시물레이션 결과와 다른 경향을 보이고 있는데 첫째, 응답의 감쇠 특성이 예상보다 더욱 큰 것을 알 수 있으며 둘째 z축의 경우 공칭 위치 아래에서는 과도한 댐핑으로 마치 달라붙는 듯한 응답 특성을 나타내고 있다. 따라서 이러한 현상은 일반적인 선형 응답 특성으로 묘사하기에는 상당히 괴리감이 있는 것을 알 수 있다. 두 축의 응답 모두 감쇠가 커짐에 따라 감쇠 고유 진동수가 시물레이션보다 모두 큰 것을 알 수 있다. 다만, 시험 결과 모두 시스템이 일정 시간 후에 정상 상태로 수렴해가는 것을 알 수 있으며 이는 Fig. 13에 제시한 것과 같이 시스템이 제어기 없이도 평형 상태에 놓여 있다는 것을 나타낸다.

#### 4. 결론

축형 동전기 휠을 구동원으로 이용하는 새로운 구조의 반송 시스템을 제안하였다. 시스템은 축형 동전기 휠이 전도판 위의 일부 영역에 걸쳐 회전할 때 발생하는 3축력 발생 메커니즘을 확장하여 고품위 제어기 없이도 진행 방향을 제외한 나머지 자유도의 공간 안정성을 담보할 수 있다. 본 논문에서는 전도판과 동전기 휠간의 상대 운동에 따라 가변되는 다축력을 지배하는 주요 변수를 대상으로 변수 변화가 힘 거동 특성과 시스템의 안정성에 미치는 영향을 분석하여 반송 시스템을 구성하는 동전기 휠의 설계 방향을 제시하였다. 제한된 휠의 반경 하에서 휠과 전도판간의 중첩 영역은 클수록 부상력과 추력은 증가하지만 횡방향으로의 안정성을 담보하는 음의 강성은 대략 휠 반경의 25~75%의 중첩 영역에서 극대화되는 것을 확인하였다. 또한 휠의 내측 반경은 작을수록 접합 면적이 증가하여 힘의 크기뿐만 아니라 음의 강성 값 역시 커지는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 정해진 트랙을 따라 가동되는 비접촉 반송 시스템의 경우 복잡한 제어기를 내장하고 곡률 반경이 제한되어 방향 전환이 용이하지 않는 단점이 있어 그 사용이 특정 영역으로 국한되어왔지만 제안된 방법의 경우 전도성 트랙 위에서 휠의 중첩 영역만 담보되면 부상되어 추진하는 데에 제약이 없으므로 다양한 응용을 기대할 수 있다.

#### References

- [1] 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: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.900572>
- [2] J. H. Park, Y. S Baek, "Parametric design of the levitation mechanism for maglev planar transportation vehicle", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 4, pp. 3069-3071, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2004.829262>
- [3] K. S. Jung, "Noncontact conveyance of conductive plate using omni-directional magnet wheel", *Mechatronics*, Vol. 20, pp. 496-502, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.04.007>
- [4] K. S. Jung, "Spatial transfer of conductive plate through decoupling of two axial electrodynamic forces generated by magnet wheel", *Mechatronics*, Vol. 23, pp. 1044-1050, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.07.012>
- [5] K. S. Jung, "A novel method transferring the copper rod without contact by axial magnet wheels", *International J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 47, pp. 187-197, 2015.
- [6] K. S. Jung, "Contactless conveyance of conductive rod by rotating the radial electrodynamic wheel with a spiral structure", *International J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 46, pp. 569-582, 2014.
- [7] K. C. Kim, "Analysis on driving performance of linear induction motor for maglev system by finite element method", *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 7, pp. 4469-4474, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.7.4469>
- [8] K. S. Jung, K. B. Shim, 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 Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 109-116, 2010.

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 : LG전자 생산기술원 선임연구원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

초정밀계측제어, 서피스엔코더, 전기에너지변환기기, 마그네트기어, 자기부상, FPD 제조장비