

이중 동전기 휠에 의해 반송되는 도전성 환봉의 공간 안정성

A Spatial Stability of the Conductive Rod Conveyed by Double Electrodynamic Wheels

정광석^{1,✉}Kwang Suk Jung^{1,✉}

1 한국교통대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation)

✉ Corresponding author: ksjung@cjnu.ac.kr, Tel: 043-841-5135

Manuscript received: 2011.12.6 / Accepted: 2012.2.27

Putting a conductive rod between rotating axial electrodynamic wheels composed of repetitive permanent magnets, three-axial magnetic forces generate on the conductive rod. It is possible to levitate and transfer the rod on space with the forces. However, the forces vary in direction and magnitude for a position of the rod between the electrodynamic wheels. Thus, the position influences the stability of the rod also. To guarantee the stability of a levitated object, the force acting on the object should have negative stiffness like a spring. So, we analyze the stable operating range of the conductive rod levitated by the axial wheels with the commercial finite element tool in this paper. Specially, as the pole number and the radial width of permanent magnets has much influence on the generated force and thereby the stable region, their sensitivities are analyzed also. The analytic result is compared with experimental result.

Key Words: Contactless Conveyance (비접촉 반송), Dynamic Stability (동적 안정성), Electrodynamic Wheel (동전기 휠), Induction Principle (유도 원리), Magnetic Levitation (자기 부상)

1. 서론

일정한 주기의 규칙적인 자기 정렬을 갖는 영구자석(Permanent Magnet; 이하 PM) 배열은 능동요소와의 조합을 통해 특정한 방향 혹은 조합의 다축력 발생을 위해 널리 이용되어 왔다.¹⁻³ 이때 자기 소스(Magnetic source) 역할을 하는 PM 배열을 전도체에 대항하여 고속으로 회전시키면 유도 원리에 의해 동전기력이 발생되는데 이러한 PM 배열을 동전기 휠(Electrodynamic wheel)이라 한다.^{4,6} 원판 형태의 동전기 휠은 휠을 구성하는 PM의 자극 방향에 따라 축형(axial type)과 레디알형(radial type)으로 나눌 수 있는데⁶ 본 논문에서는 축형 동전기 휠을 이용하여 도전성 환봉을 반송할 수 있는 자기 조합에 관하여 논의한다.

축형 동전기 휠을 전도판 아래에서 회전시키면 전도판에는 부상력과 강한 견인 토크가 발생하는데^{6,7} 전도판을 도전성 환봉으로 대체하면 환봉의 원주 방향 돌레를 따라 360도 회전하는 표면 전류로 인해 기존 이축력 외에 동전기 휠의 반경 방향으로 자기력이 추가로 생성된다. 따라서 이러한 3축력을 이용하여 전도성 환봉을 부상시켜 반송시키는 것이 가능하다. 그러나 이러한 자기력은 환봉과 동전기 휠간의 상대 위치에 따라 그 크기나 방향이 바뀌기 때문에 환봉의 안정성을 항상 보장하는 것은 아니다. 본 논문에서는 이중 동전기 휠을 이용하여 전도성 환봉을 비접촉으로 반송할 수 있는 자기 조합을 대상으로 여러 설계 인자를 분석하고 이를 통해 환봉의 안정 영역을 도출한다.

2. 동전기 휠에 의한 다축력 발생 메커니즘

다상 전원(Multi-phase power)에 의한 이동 자기장(Traveling magnetic field)을 PM의 기계적인 회전으로 생성하는 동전기 휠은 유도기에 비해 힘 밀도가 월등하고 따라서 다양한 응용이 모색되고 있다.^{4,6} 이러한 동전기 휠을 이용하여 도전성 환봉을 반송하는 방식으로 나선형 휠(Spiral wheel)을 들 수 있는데 본 장에서는 이러한 나선형 휠의 힘 구동 원리와 이에 비교하여 이중 동전기 휠 기반의 3축력 발생 원리를 논의한다.

2.1 나선형 휠에 의한 반송

원주 방향(θ)으로 주기적인 자기 패턴을 갖는 PM 어레이의 이웃하는 PM 간에 Fig. 1 에서와 같이 축 방향(z) 읍셋을 두고 이를 환봉 주위에서 회전시키면 환봉에는 회전 방향으로의 토크 F_T 와 중심($-\rho$)을 향한 반발력 F_N 그리고 축 방향 읍셋에 의한 추력 F_C 가 동시에 발생한다.⁸ 이러한 힘

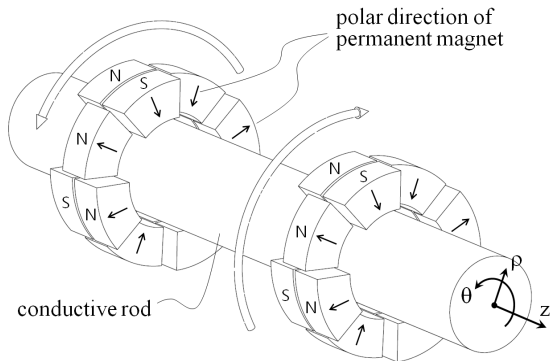


Fig. 1 Conveyance system of conductive rod using a spiral electrodynamic wheel

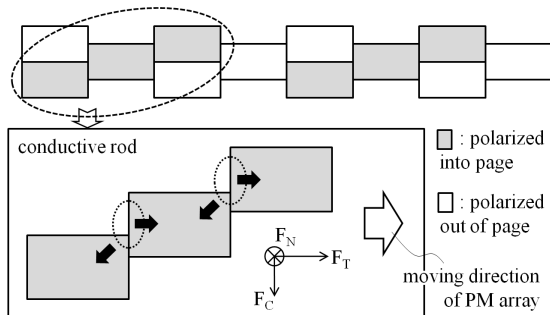


Fig. 2 Generating principle of three-axial forces by the spiral electrodynamic wheel

을 조합하면 환봉을 안정되게 부상시켜 이송하는 것이 가능한데 이 때 θ 방향으로의 회전 운동을 억제하기 위해 Fig. 1 에서와 같이 두 개의 휠을 서로 반대 방향으로 회전시켜 이러한 상반된 토크를 서로 상쇄시킨다.

나선형 휠의 자기력 발생 원리는 휠을 원주 방향으로 펼친 Fig. 2 를 통해 이해할 수 있다. 전도성 환봉과 공극을 사이에 두고 PM 배열(지면 안쪽으로 N 극)이 우측으로 진행하면 각 PM의 후미에는 와전류에 의해 S 극이 생성되고 따라서 환봉에는 우측 방향으로 F_T 가 그리고 아래 PM에 의한 인력으로 F_C 가 발생한다. 대각선 방향 인력의 수평 성분은 F_T 에 의해 상쇄되며 각 PM의 전면에서 형성되는 동일 극 성분으로 환봉에는 수직 반발력 F_N 이 생성된다. 이러한 3축 자기력을 발생시킬 수 있는 자기력 조합은 Fig. 2에 제시된 형태 외에도 다양하게 구성될 수 있으며 중요한 점은 이웃하는 PM 사이에 나선의 피치로 알려진 축간 읍셋이 요구된다는 것이다. 이러한 피치의 크기는 Fig. 2에서 대각선 화살표의 경사를 결정하므로 F_C 의 크기에 큰 영향을 미친다. 이러한 조합에서 PM의 회전 방향으로 발생하는 F_T 는 불가피하게 발생하는 억제되어야 하는 힘인데 Fig. 1에서와 같이 휠을 서로 상반되게 회전시켜 일정 부분 상쇄시킬 수 있지만 환봉에는 과도한 비틀림 모멘트에 의한 비틀림 응력이 작용한다.⁹

2.2 이중 축형 동전기 휠의 레이아웃

전술한 나선형 휠의 단점을 보완할 수 있는 자기 조합으로 Fig. 3과 같은 이중 축형 동전기 휠을 고려한다. 원주 방향으로 N, S, N, S, ...의 자기 패턴을 갖는 원판 형태의 축형 휠 사이에 전도성 환봉을 배치시킨 형태인데 그림과 같이 휠을 회전시키면 환봉에는 x, y, z 방향으로 동전기력이 발생한다. 3축 자기력 발생 원리는 휠 단면 QQ'에서의 자기장 방향을 묘사한 Fig. 4를 통해 쉽게 이해할 수 있다. 우선 PM에 의한 자기장은 자화 방향대로 B_x 이지만 페루프 형성을 위해 상면에서 멀어질수록 그리고 외곽에서는 B_y, B_z 성분도 두드러지게 나타난다. 또한 회전하는 PM으로 환봉의 표면에는 와전류가 흐르는데 PM의 상면과 평행한 평판과는 다르게 와전류가 원주 방향으로 흐르기 때문에 i_y 뿐만 아니라 상단에서는 i_z 성분도 있다. 따라서 $i_z \times B_x$ 에 의해 y 방향 힘 F_y 즉, 환봉을 부상시킬 수 있다. 마찬가지로 $i_y \times B_z$ 에 의해

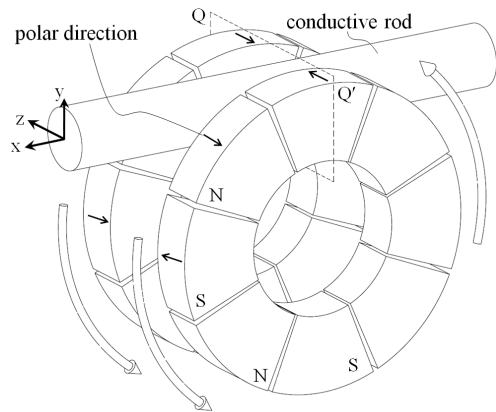


Fig. 3 Overall layout of conductive rod conveyed by using double electrodynamic wheels

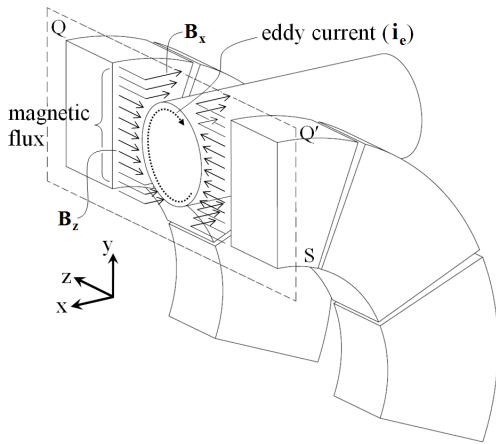


Fig. 4 Magnetic flux and eddy current by rotation of PM array at the cross section QQ' of Fig. 3

x 방향 추력 F_x 가 그리고 $\mathbf{i}_y \times \mathbf{B}_x$ 에 의해 환봉의 중심을 향하는 수직력 F_z 가 발생한다. 따라서 나선형 휠과는 달리 이러한 자기력에는 뚜렷한 비틀림 성분이 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4 의 단면도에서 알 수 있듯이 환봉의 위치 특히 휠의 중앙으로부터의 y 축 거리는 환봉에 발생하는 힘의 크기나 방향에 큰 영향을 미치므로 이러한 상기 이중 축형 휠을 환봉의 반송에 이용하기 위해서는 영역별로 힘의 거동 특성을 분석해야 한다. 또한 동전기 휠의 주요 인자에 관한 민감도 해석을 통해 이들 인자가 환봉의 공간 안정성과 자기력에 미치는 영향을 분석하는 것도 상당히 중요하다.

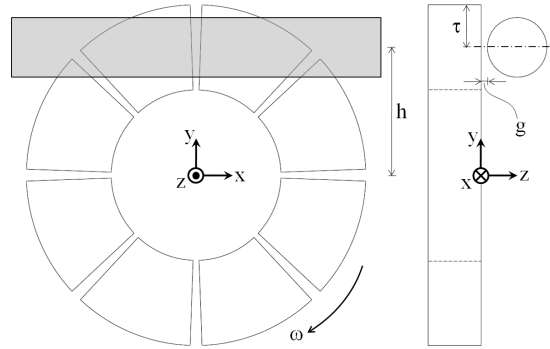


Fig. 5 Coordinate frame of the suggested conveyance system

3. 전도성 환봉의 공간 안정성

Fig. 3 의 시스템은 개체들간의 상대 자세가 규칙화 되어있지 않기 때문에 잘 알려진 분산 변수 공극 자기장 해석법에 의해 이론적으로 분석하는 것이 대단히 난해하다.¹⁰ 따라서 동전기 휠에 의해 부상되는 환봉의 공간 안정성 해석을 위해 상용 유한요소 툴인 Maxwell v.11.1 을 이용하였다.¹¹ 해석에 이용된 초기 모델로 Fig. 5 에서와 같이 Nd35 계열의 PM 극 수는 8 극으로 하였으며 안내경, 바깥내경, 높이는 각각 40, 80, 25 mm 로 하였다. 공칭 공극 g 는 3 mm 이고 휠의 회전 속도는 3000 rpm 이다. 또한 환봉 직경은 28 mm 이고 재질은 순동으로 하였다. 제시한 초기 제원 중 PM 의 극 수는 자기력의 크기에 지배적인 영향을 미치는 인자이며 이에 대한 언급은 추후 논의된다.

우선, Fig. 5 에 묘사된 변수 중에 환봉의 y 방향 위치 h 는 환봉의 무게를 보상하는 F_y 에 관련된 중요한 인자인데 h 의 변화에 따른 3 축 자기력을 Fig. 6 에 나타내었다. 그림에서 추력 F_x 와 PM 과의 공극 방향으로의 반발력 F_z 의 경우 크기는 변화하지만 모두 동일한 방향을 나타내는 것에 반해 부상력 F_y 는 역 사인함수의 형상으로 음과 양의 값이 반복되는 것을 알 수 있다. 환봉이 y 축 방향으로 안정되게 부상하기 위해서는 무게를 보상할 수 있는 크기의 양의 힘뿐만 아니라 외란에 대응할 수 있도록 부상력은 음의 강성을 가져야 한다. 따라서 그림에서 이러한 조건에 해당하는 구간은 70 mm 이상에서이며 F_y 만 확대하여 Fig. 7 에 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시한 영역이 음의 강성 영역이며 전체 구간 중 이 구간에서만 환봉의

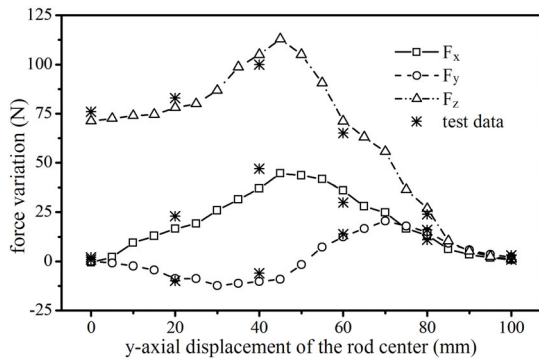


Fig. 6 Variation of three-axial electrodynamic forces according to y-axis displacement of rod

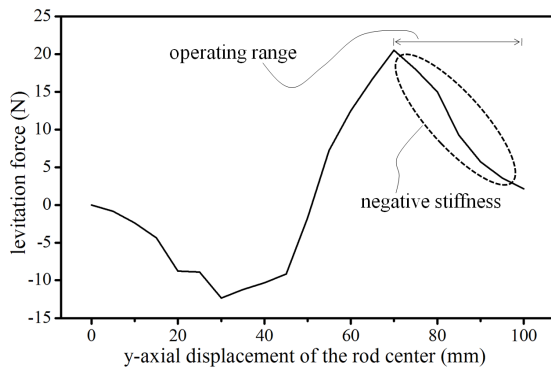


Fig. 7 Operating range guaranteeing negative stiffness of y-axis levitation force

y 축 방향 안정성이 보장된다. 유한요소 해석 결과는 Fig. 6 에서와 같이 정적 시험 결과와 비교되는데 유의미한 차이는 보이지 않는다. 특히 3 축력 모두 PM 의 안내경인 40 mm 근방에서 변곡점을 갖는데 따라서 안내경을 조절하여 힘의 형상을 전체적으로 좌우로 이동시킬 수 있음을 예상할 수 있다. 휠의 회전 방향이 바뀌면 3 축력 중 추력 F_x 만의 방향이 바뀌고 나머지 힘의 방향은 일정하다.

F_y 에 추가하여 환봉의 공간 안정성은 공극 수직력 F_z 에 의해 완성된다. 의미있는 y 축 구동 범위에서 공극 변화에 따른 F_z 의 변화를 Fig. 8 에 나타내었다. 예상한대로 일반적인 반발력 특성에서와 같이 h 에 상관없이 공극 변화에 대해 음의 강성을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 공칭력 (nominal force)의 크기는 다르지만 기울기로 결정되는 강성의 크기는 비슷한 범주에 있는 것을 알 수 있다. 전술한 해석 결과를 정리하면 특정 영역

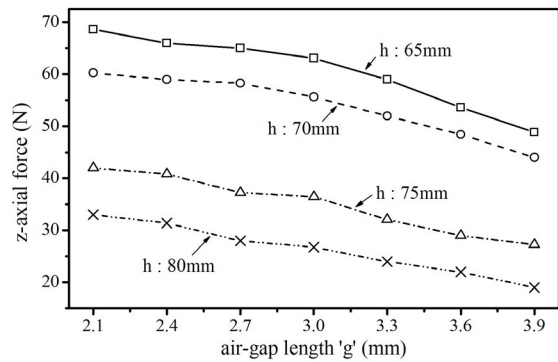


Fig. 8 Variation of z-axis repulsive force for a change of air-gap length

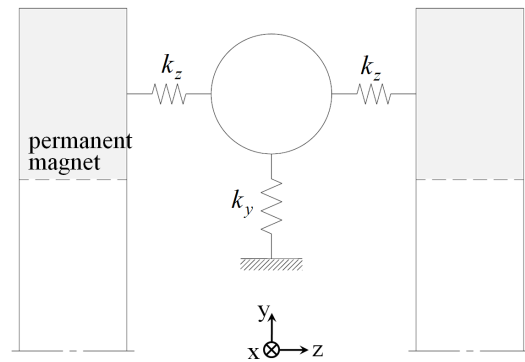


Fig. 9 Equivalent model of double electrodynamic wheels with a force characteristic like spring

에서 환봉은 Fig. 9 에서와 같이 가상의 스프링에 의해 지지되는 것과 동일한 특성의 자기력 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 환봉의 동작 영역을 특정 범위로 한정하면 환봉의 공간 안정성이 확보됨을 알 수 있다.

동일한 조건에서 환봉에 작용하는 자기력에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자는 동전기 휠을 구성하는 PM 의 극 수다. 일반적으로 유도기에서 단위 길이당 극 수가 증가하면 힘의 균일성이 향상되는 것과 마찬가지로 동전기 휠에서도 극 수가 증가하면 AC 력의 힘 리플이 줄어드는 것을 알 수 있는데 이에 더해 Fig. 10 에서와 같이 힘의 절대 크기에서도 큰 차이를 나타낸다. PM 의 반경 대비 환봉 반경의 크기에 따라 약간의 차이는 보이지만 초기 제원을 기준으로 8 극에서 3 축력 모두 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 특히 8 극 이하에서는 힘의 오실레이션 폭이 절대 크기보다 커지는 경우가 발생한다.

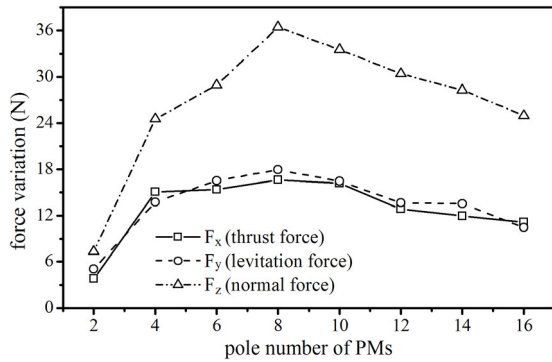


Fig. 10 Variation of force magnitude for pole number of PMs constituting the electrodynamic wheel

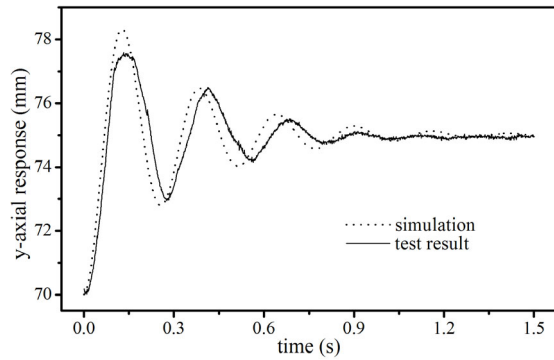


Fig. 12 Y-axial transient response of the conductive rod compared with simulation

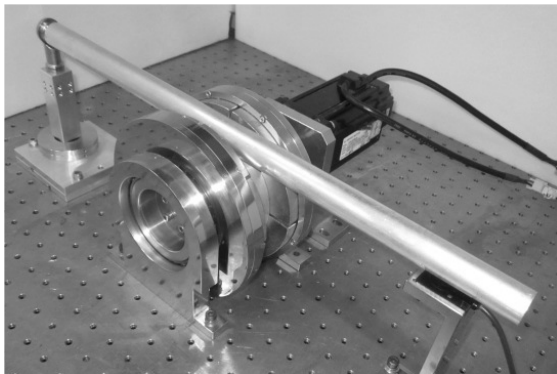


Fig. 11 Photograph of test setup for verifying a spatial stability of the conductive rod

4. 시험 결과 및 고찰

유한 요소 틀에 의해 해석적으로 확인된 전도성 환봉의 공간 안정성을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 11 과 같은 시험 장치를 구축하였다. 시스템은 해석 모델의 제원대로 구성하였으며 75 mm의 h에서 그리고 휠의 회전 속도가 3000 rpm 일 때 평형 상태에 있도록 환봉의 길이를 668 mm로 하였다. 환봉의 한쪽 끝은 구면 베어링에 의해 지지되고 있으며 다른 쪽 끝단에서 근접 센서에 의해 공극 변위를 측정한다.

휠을 정지 상태에서 3000 rpm 까지 증가시켜 환봉이 정상 상태에 도달할 때 y 축 방향으로 -5 mm의 초기 변위를 주었을 때 환봉의 응답을 Fig. 12에 나타내었다. 환봉의 시험 응답과 비교되는 시뮬레이션 데이터는 Fig. 7에 묘사된 힘 선도를 기준으로 작동 영역에서 선형 보간법을 이용하여 공칭력 식과 기울기인 강성값을 이용하여 얻어진 결

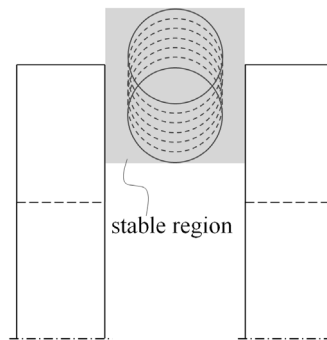


Fig. 13 Visualized stable region of double electrodynamic wheels

과이다. 실제 75 mm 근방에서의 공칭력 값은 약 36 N 이고 강성값은 1.1 N/m 이다. 공기 저항이나 모델링되지 않은 유기 진류에 의한 해석적으로 구하기 힘든 댐핑에 관련된 값은 시험 결과에 근거하여 강성값의 1/50로 설정하였다. 시험 결과와 시뮬레이션 결과가 상당히 유사함을 알 수 있는데 중요한 점은 두 데이터의 고유 주파수가 오차 범위 내에서 일치한다는 것과 정상 상태로 완전히 복귀한다는 것이다. 특히 z 축의 공극 방향으로의 공칭력이 y 축 부상력 보다 훨씬 크기 때문에 환봉은 Fig. 13 과 같이 안내 기구에 의해 구속된 것처럼 상하운동을 하며 따라서 시험 결과에서도 z 축으로의 섭동에 의해 거의 영향을 받지 않는다.

Y 축으로 60 mm를 기준으로 Fig. 5의 τ 에 해당하는 PM 반경 너비에 따른 안정 영역을 Fig. 14에 나타내었다. τ 가 20 mm인 해석 모델의 경우 전술한 바와 같이 70 mm 이상에서 음의 강성 영역이 나타나므로 40 mm인 전체 너비의 약 3/4 위치에서 변곡점이 존재한다. 수치 해석 오차를 감안하면

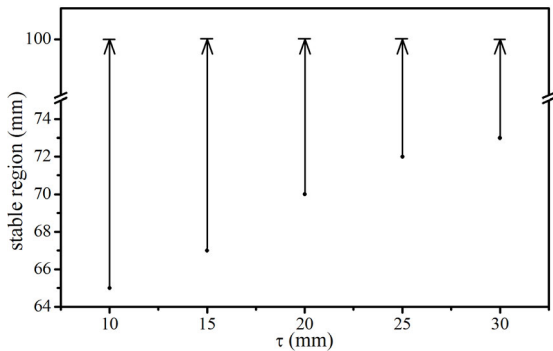


Fig. 14 Variation of stable region according to radial width of PM

Fig. 14 의 결과는 대략 비슷한 수준에서 안정 영역의 하한 값이 결정되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

주기적인 자극 패턴을 갖는 PM 배열로 이뤄진 동전기 휠을 회전시키는 것만으로 전도성 환봉을 공간상에 부상시켜 안정되게 반송할 수 있는 방법을 제안하였다. 이중 동전기 휠 사이에서의 환봉의 위치는 이러한 공간 안정성을 지배하는 가장 주요한 동작 변수이며 PM 너비의 약 75% 이상인 위치에 놓인 환봉은 중력 방향으로 음의 강성을 갖는 것을 해석적으로 그리고 실험적으로 입증하였다. 이러한 시스템의 가장 큰 특장은 강건하고 간단한 구조 외에 시스템 전체를 자기장이 투과할 수 있는 재료로 밀봉시켜 열악한 환경에서도 용이하게 활용할 수 있다는 점이다.

제안된 이중 동전기 휠 시스템에서 환봉의 이송 속도를 결정하는 추력의 크기는 휠의 회전 속도에 달려있는데 문제는 이러한 속도가 추력뿐만 아니라 부상력 등에도 지배적인 영향을 미친다는 점이다. 따라서 환봉의 이송 속도를 제어하기 위해서는 복수개의 시스템을 이용하여 개별 시스템의 회전 속도를 가변시켜 환봉에 작용하는 두 힘을 비연성화시키는 방법 등이 필요하다.

후 기

이 논문은 2012 년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

1. Kim, W. J. and Trumper, D. L., "High-precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography," Precision Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 66-77, 1998.
2. Jung, K. S., Lee, S. H., and Baek, Y. S., "Repulsive & Attractive Type Magnetic Levitation for Mechanical Isolation of the Planar Stage Mover," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 4, pp. 76-83, 2003.
3. Ebihara, D. and Watada, M., "Study of a Basic Structure of Surface Actuator," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 25, No. 5, pp. 3916-3918, 1989.
4. Fujii, N., Ogawa, K., and Matsumoto, T., "Revolving Magnets Wheels with Permanent Magnets," Electrical Engineering in Japan, Vol. 116, No. 1, pp. 106-118, 1996.
5. Bird, J. and Lipo, T. A., "A 3-D Magnetic Charge Finite-element Model of an Electrodynamic Wheel," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 44, No. 2, pp. 253-265, 2008.
6. Jung, K. S., Shim, K. B., and Lee, S. H., "Contactless Conveyance of Conductive Plate by Controlling Permalloy Sheet for Magnetic Shield of Air-gap Magnetic Field from Magnet Wheels," J. of the KSPE, Vol. 27, No. 7, pp. 109-116, 2010.
7. Park, J. H. and Baek, Y. S., "Parametric Design of the Levitation Mechanism for Maglev Planar Transportation Vehicle," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 40, No. 4, pp. 3069-3071, 2004.
8. Jung, K. S. and Won, K. M., "Contactless Transfer of Conductive Rod Using an Electrodynamic Wheel," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 12, No. 4, pp. 741-744, 2011.
9. Jung, K. S., "Screw Motion and Control of Conductive Rod by Rotating a Spiral Electrodynamic Wheel," J. of Institute of Control, Robotics, and Systems, Vol. 17, No. 9, pp. 882-887, 2011.
10. Nasar, S. A. and Boldea, I., "Linear Motion Electric Machines," John Wiley & Sons, pp. 90-105, 1976.
11. ANSYS Inc., <http://www.ansoft.com>