

래디알 동전기 휠의 다축력 특성

정 광 석*

한국교통대학교 기계자동차항공공학부 기계공학전공

Multi-axial Force Characteristics of Radial Electrodynamic Wheel

Kwangsuk Jung*

School of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering, College of Fusion Technology,
Korea National University of Transportation, Daehak-ro 50, Chungju 27469, Korea

(Received 2017.10.16 / Accepted 2017.11.10)

Abstract : The rotating electrodynamic wheel over a conductive plate produces thrust force as well as normal force. Specially, separating the conductive plate and spacing apart each part, the lateral stability of the rotating wheel is guaranteed due to the restoring force into neutral position. In this paper, the force characteristics of the electrodynamic wheel rotating over the conductive plate is analyzed using the finite element tool. First, the dominant parameters are identified considering the geometric configuration and the operating condition. And the sensitivity for the parameter deviation is quantified for the high force density. The above topology can be applied as an actuating principle for inter-city train as well as contact-free transfer device.

Key words : Electrodynamic wheel, Finite element method, Magnetic field analysis, Parameter sensitivity analysis

1. 서 론

래디알 동전기 휠은 전도체 위에서 고속으로 회전할 때 발생하는 동전기력을 이용하는 자기 요소이다. 래디알이라는 표현은 동전기 휠을 구성하는 영구자석의 자화 방향이 도넛 모양을 하는 휠의 중심을 향하여 형성되어있음을 나타낸다. 동전기 휠은 이러한 자화 방향을 갖는 영구자석이 원주 방향으로 교번되어 분포되어있는 일련의 영구자석 어레이를 의미하는데 자화 방향 측면에서 축형 동전기 휠과 대별된다¹⁾. 축형 동전기 휠은 대향하는 전도체와의 접합 면적이 크기 휠 전체이므로 상대적으로 발생하는 동전기력이 큰 장점이 있지만 반발력외에 특정 방향의 추력을 얻기 위해서는 별도의 방법을 고려할 필요가 있다²⁾. 이에 반해 래디알 휠은 전도체와의 접합 영역이 작은 반면에 회전하는 방향으로의 추력이 동시에 발생하는

흥미로운 특성을 갖기 때문에 초전도 자석과 같은 자화밀도가 높은 자기 요소의 채택으로 제한된 자기력 밀도의 한계를 극복할 수 있는 가능성이 대두되어왔다^{3,4)}.

본 연구에서는 래디알 휠의 응용 사례로서 래디알 휠을 이송 시스템의 구동원(Actuator)으로서 이용하고자 전도성 레일 위에서 회전하는 래디알 휠의 다축력 특성을 논의한다. 특히 별도의 가이드 구조 없이 래디알 휠의 공간상에서의 자기 안정성을 담보할 수 있도록 단순한 전도성 레일이 아니라 서로 일정한 간격으로 분리되어있는 이중의 레일을 설정하여 이러한 레일 위에서 회전하는 래디알 휠의 공간 안정성을 조사한다. 이를 기반으로 래디알 휠의 자기력 특성을 지배하는 주요 설계인자를 도출하고 지배 인자에 따른 래디알 휠에 의해 발생하는 다축력의 민감도를 분석한다. 자기력 해석은 상업용 해석 툴인 Maxwell ver11.0을 이용하여 수행한다.

*Corresponding author, E-mail: ksjung@ut.ac.kr

2. 다축력 발생 토폴러지

일정한 간격으로 분리되어있는 전도성 레일 위에서 회전하는 래디알 휠의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 레일 상면과 휠의 회전 축이 나란하고 휠의 중심을 향해 원주 방향으로 영구자석의 자화 방향이 주기적으로 반복되고 있는 것을 알 수 있다. 그림에 묘사된 영구자석은 4극쌍(Four pole-pairs)이며 이러한 배열을 회전시키면 영구자석에는 묘사된 좌표축 방향으로의 3축력이 발생한다. 이러한 다축 자기력은 휠의 회전에 전적으로 의존하는 힘이며 서로 강하게 연성(couple)되어있다. 다만, 전술한 바와 같이 이러한 휠이 회전할 때 레일 위에서 자기 결합하는 영구자석의 수는 1~2 개에 불과하므로 자기력 밀도에서는 축형 휠보다 열악하다.

래디알 휠을 단순히 전도성 도체 위에서 회전시킬 때 발생하는 자기력의 방향은 회전 방향에 따라 다르게 나타난다. Fig. 1(a)는 휠이 시계방향으로 회전할 때

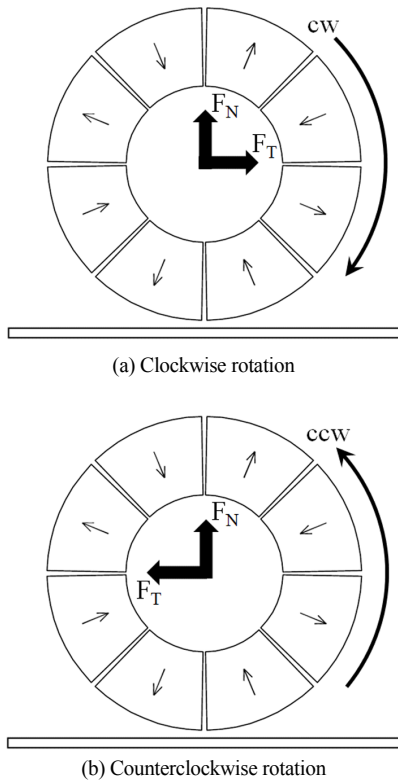


Fig. 1 Two-axial forces according to rotating direction of the wheel over the conductive plate.

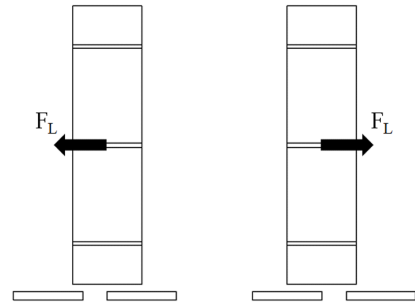


Fig. 2 Restoring forces guaranteeing the lateral stability of the wheel for a lateral misalignment of wheel.

그리고 Fig. 1(b)는 반시계 방향으로 회전할 때 도전체에 유기된 유도 전류에 의해 휠에 발생하는 자기력의 방향을 나타내는데 회전 방향에 관계없이 반발 부상력 F_N 은 동일하게 발생하지만 추력 F_T 의 경우에는 휠이 마치 굴러가는 것과 같은 방향으로 생성된다. 이러한 차이를 제외하면 나머지 특성은 모두 동일하다. 이중 레일의 도입 이유는 Fig. 2와 같은 측면 방향 안정성에서 찾을 수 있다. 그림에 레일 위에서 휠의 좌우 편향에 따른 측면 힘 F_L 의 방향을 도시하였는데 편향에 따라 휠의 중심으로의 복원력 특성을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 후술하는 바와 같이 이중 레일 위에서 힘 프로파일을 통해 입증된다. 이러한 측면 방향으로의 복원 특성 때문에 래디알 휠은 레일 위에서 피드백 제어의 도움 없이도 중력 방향으로 그리고 횡방향으로의 안정성이 담보되는 자기 요소이다.

3. 래디알 휠의 제변수 변화에 따른 자기력 특성

래디알 휠을 구성하는 주요 인자의 변화에 따른 다축력 거동 특성을 분석하기 위해 고려되는 휠의 좌표계를 Fig. 3에 도시하였다. 전도성 레일을 고정시킬 경우 회전하는 휠에 발생하는 자기력에 영향을 미칠 수 있는 인자는 우선 휠의 기하학적 형상을 들 수 있는데 대표적으로 휠을 구성하는 영구자석의 극수, 내경 ρ , 너비 w 등이다. 또한 휠의 운전조건인 회전 속도는 힘에 영향을 미치는 가장 지배적인 인자이고 일반적으로 알려진 것과 같이 휠과 레일간의 공극도 중요한 인자이다. 본 장에서는 상기 언급한 다양한 인자의 변화에 따른 자기력의 거동 특성을 분석한다.

회전하는 동전기 휠을 해석하기 위해 본 연구에서

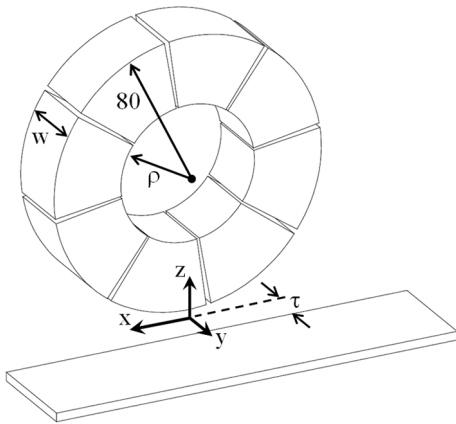


Fig. 3 Coordinate system of the radial electrodynamic wheel.

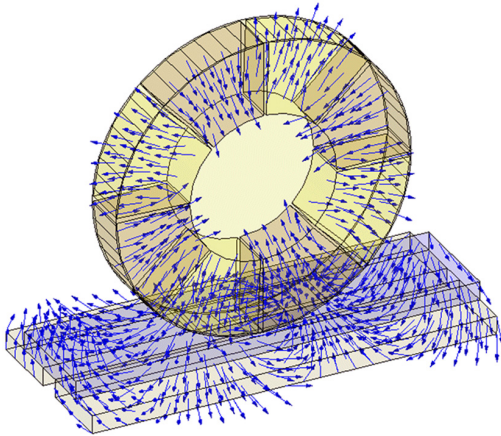


Fig. 4 Vector plot due to magnetic flux by permanent magnet array.

는 상용 유한요소 툴인 Maxwell ver11.0을 이용하였는데 일반적으로 자기 요소의 기계적인 회전을 등가의 다상 전원으로 변화시키는 것 없이 밴드 설정을 통해 간편하게 해석할 수 있는 이점이 있는 툴이다. 영구자석 배열에 의해 발생하는 자기장의 벡터 선도를 Fig. 4에 나타내었다. 전도성 레일 위에서는 이러한 교번하는 자기장에 따라 유도 전류가 생성되고 이러한 전류에 의한 와전류 자기장은 영구자석의 회전에 따라 주기적으로 반복되는데 실제 형상은 Fig. 5와 같다. 이러한 와전류 자기장으로 인해 휠에 다축력이 발생한다.

우선 분리된 레일 위에서의 레디알 휠의 측면 안정성을 확인하였다. Fig. 6은 Fig. 3에서 ρ , w 가 각각 40mm, 25mm이고 공극이 3mm일 때 y방향 사이 거리

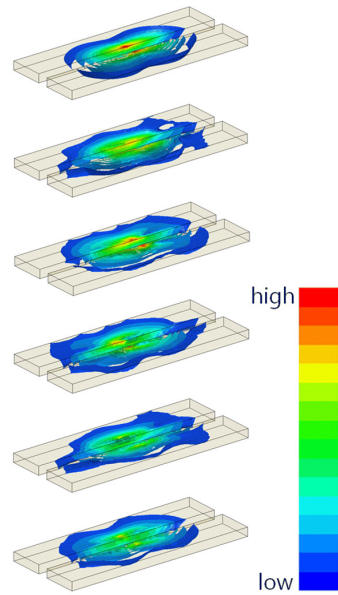


Fig. 5 Eddy current magnetic field on the conductive rail induced by rotation of permanent magnet array.

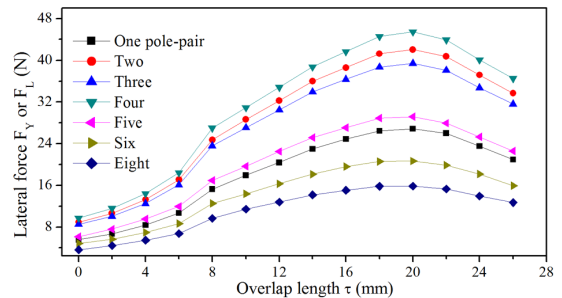


Fig. 6 Variation of the transverse force according to the pole numbers of permanent magnets.

τ 의 변화와 휠을 구성하는 극수에 따른 레일에 발생하는 y축력의 변화를 나타낸다. 실제 영구자석에 발생하는 힘은 결과 값에 음의 부호를 붙인 값이다. 휠의 회전속도는 3000rpm이고 이용한 영구자석의 재질은 NdFeB이며 자석의 Grade는 35로 설정하였다. 결과에서 유의미한 특성은 τ 가 커짐에 따라 즉, 영구자석과 레일간의 중첩 영역이 커질수록 반복 특성을 갖는 힘의 크기가 커지는데 이는 y 방향으로 휠에는 음의 강성이 형성된다는 의미와 동일하다. 그러한 구간은 그림 안에 점선으로 표시한 것과 같이 상대적으로 큰 영역에 걸쳐있는 것을 알 수 있다. 따라서 레일 위에 레디알 휠을 부분적으로 중첩시켜 걸쳐 놓으면 횡방향

안정성이 담보되는 것을 알 수 있다.

다음으로, 휠에 의한 자기력에 영향을 미치는 주요한 인자로 휠을 구성하는 영구자석의 극수(pole number)를 달리해가며 수행한 자기 해석 결과를, 전술한 측면 안정성을 설명하는 Fig. 6을 통해 추론할 수 있다. 극수는 1극쌍(one pole-pair)부터 8극쌍까지 변화시켰으며 자석 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 크기 뿐만 아니라 힘의 편차도 적절한 수준으로 수렴해가는 것을 알 수 있다. 따라서 이하 민감도 해석은 모두 휠의 극수가 8개 일 때 즉, 4극쌍에 대해 수행하였다.

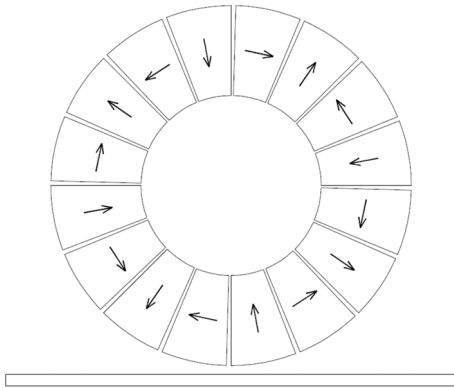


Fig. 7 Halbach magnet array with 4 pole-pairs.

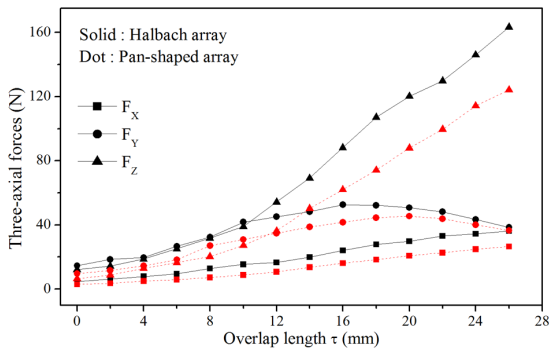


Fig. 8 Comparison between pan-shaped magnet array and Halbach magnet array.

4극쌍과 동일하지만 Fig. 7에서와 같이 극수가 16개인 특별한 자기 배열인 Halbach 배열에 대해 자기력 해석을 수행하여 Fig. 8에 나타내었다. 상기 배열은 반경 방향으로의 교번 자화 방향외에 접선 방향으로도 극성이 형성되어 있는 배열인데 이러한 배열은 4극쌍에 의한 영구자석의 자기장을 모으는 효과를 갖는다. 따라서 Fig. 8의 결과에서 알 수 있듯이 3축력 모두 단순히 부채꼴 모양(pan-shaped)의 4극쌍보다 힘의 크기가 큰 것을 알 수 있다.

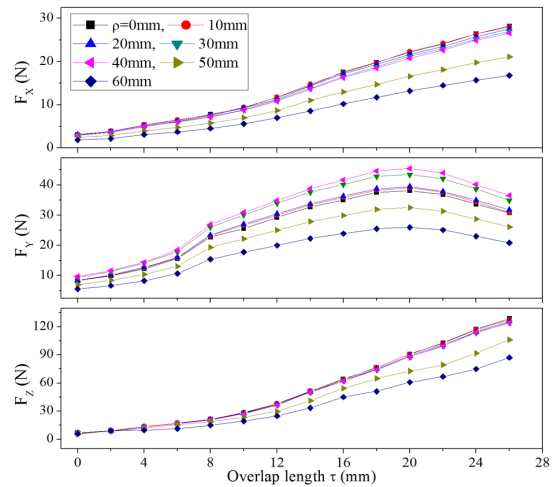


Fig. 9 Three-axial forces according to a radial length of magnet array.

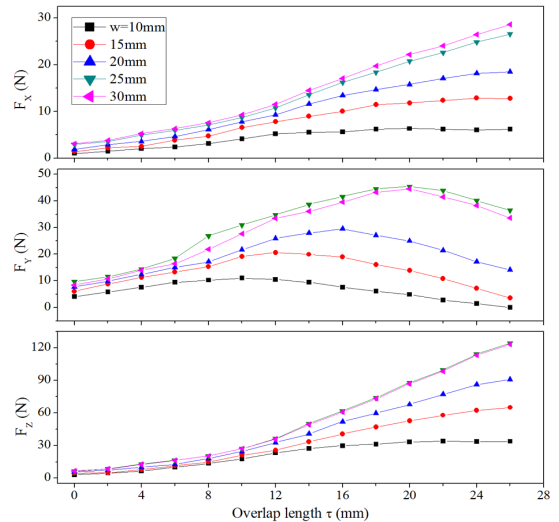


Fig. 10 Three-axial forces according to a width of magnet array.

자기 배열의 기하학적 요소인 내경 ρ , 너비 w 의 변화에 따른 3축력의 변화 특성을 해석하여 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다. 예상할 수 있듯이 ρ 가 작을 때 그리고 w 가 클 때 3축 자기력의 값이 큰 결과를 얻었는데 두 가지 변수 모두 일정 범위까지는 결과 값에서 해석 오차라 판단할 수 있는 범위 이내의 차이를 나타내었다. ρ 의 경우 50mm 이상이 되면 현저한 자기력의 감소를 확인할 수 있고 w 의 경우 20mm 이하가 되면 역시 자기력의 감소를 확인할 수 있었다. 따라서 두 변수 모두 특정 값 이하나 이상에서는 유의미한 차이가 없음을 알 수 있다. 물리적으로 ρ 의 경우 특정값 이하에서는 자석 표면에서의 자기 강도에 변화가 없고 또한 자기력에 더욱 지배적인 영향을 미치는 인자는 자기 강도보다는 자기장의 스윙칭률이기 때문에 특정값 이하에서는 유사한 결과가 나온 것으로 이해할 수 있다. 너비의 경우에는 레일과의 중첩 영역의 차이를 불러일으키는 인자이므로 크면 클수록 자기 강도의 균일성 측면에서 우수하고 따라서 힘의 크기가 큰 것을 알 수 있으며 너비가 적어질수록 힘은 기하급수적으로 적어지는 결과를 낳는다. 전술한 바와 같이 이러한 동전기 휠에서 자기력에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 기하학적 형상이 아닌 운전 조건 즉, 휠의 회전 속도이다. 회전 속도를 6000rpm까지 변화시켜가며 해석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 3축력 중 x축 힘의 경우 1000rpm 이상에서는 오히려 감소하지만 다른 이축력은 6000rpm까지 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 3000rpm까지는 급격히 증가하므로 힘의 절대 크기에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 다른 기하학적 인자에 의해 힘의 크기를 변화시키는 것 보다 운전 조건을 통해 힘을 변화시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.

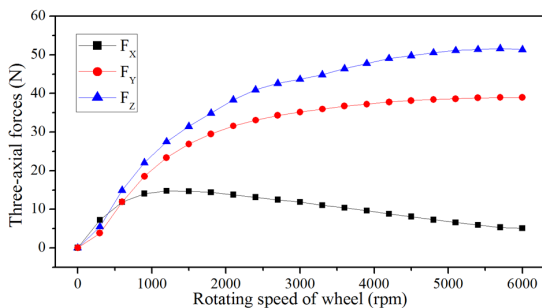


Fig. 11 Three-axial forces according to a rotating speed of magnet array.

4. 결론

본 연구에서는 횡방향으로 일정 간격을 두고 평행하게 놓여있는 전도성 레일 위에서 고속으로 회전하는 레디알 동전기 휠에 의해 생성되는 3축 자기력의 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 분석하였다. 해석으로 얻어진 유의미한 결과는 다음과 같다.

첫째, 레디알 휠과 레일을 중첩시키면 휠에는 음의 강성 특성을 갖는 횡방향으로의 복원력이 발생하고 이는 휠의 횡방향 동적 안정성을 낳는다.

둘째, 3축 자기력의 크기를 극대화할 수 있는 극수가 있으며 이러한 극수를 초과하면 자기력의 크기는 오히려 적어진다.

셋째, Halbach 배열을 갖는 동전기 휠은 동일한 극수의 부채꼴 형상 휠보다 자기력의 크기가 훨씬 크다.

넷째, 레디알 휠의 자석 내경은 특정 값 이하에서는 자기력의 크기에 큰 차이가 없으며 너비 또한 특정 값 이상에서는 큰 차이를 발생시키지 않는다.

현재 상기 휠을 이용한 시험 설비를 이용하여 거동 특성의 정량적인 검증 작업을 수행하고 있으며 이를 통해 새로운 방식의 자기 부상 구동 장치 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- 1) N. Fujii, Y. Ito, and T. Yoshihara, "Characteristics of a moving magnet rotator over a conducting plate", IEEE Trans. on Magnetics, 41 (10), p.3811-3813, 2005.
- 2) K.S. Jung and K.B. Shim, "Noncontact conveyance of conductive plate using omni-directional magnet wheel", Mechatronics 20, p.496-502, 2010.
- 3) J. Bird and T.A. Lipo, "Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model", IEEE Trans. on Magnetics 43(8), p.3395-3405, 2007.
- 4) J. Bird and T.A. Lipo, "Calculating the forces created by an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state finite-element method", IEEE Trans. on Magnetics 44 (3), p.365-372, 2007.