

## 자기 차륜의 선형 추력 특성 비교

심기본<sup>†</sup>, 정광석<sup>\*</sup>

(2009년 7월 13일 접수, 2009년 9월 1일 수정, 2009년 9월 2일 심사완료)

### Characteristic Comparison of Linear Thrust Forces for Magnet Wheels

Ki Bon Shim and Kwang Suk Jung

**Key Words :** Magnetic Shield(자기 차폐), Magnet Wheel(자기 차륜)

#### Abstract

As a method obtaining linear thrust force for the magnet wheel producing a strong traction torque, the concept of magnetic shield is suggested and compared with the existing approaches. Specially, as the magnet wheel, in which the permanent magnets rotate mechanically instead of ac driving to make traveling field, is physically similar with the rotary induction motor, there is a periodical force ripple in tangential direction as well as normal direction. But, the force ripple can be suppressed from a shape change of the shield plate. Namely, the change brings out a change of entry and exit effect of the circumferential field for the magnet wheel. The feasibility of the shield concept is verified from simulation and experiment.

#### 1. 서론

마그네트 휠(magnet wheel)은 전도성 평판 위에서 마그네트 어레이를 고속으로 회전시켜 평판에 작용하는 반발 부상력을 얻는 장치를 의미한다. 이때 부상력과 동시에 어레이의 기계적인 회전 방향으로 발생하는 강한 트랙션 토크를 추력으로 이용하려는 시도가 있어왔다.<sup>(1-3)</sup> 본 논문에서는 마그네트 휠로부터 선형 추력을 얻는 방법의 일환으로 자기차폐를 이용하는 방법을 소개한다. 특히 회전 유도 모터와 원리적으로 동일한 휠의 특성상 발생하는 자기력에는 회전 주파수와 동기하는 주기적인 힘의 리플이 생성되는데, 이를 제거할 수 있는 방법으로서 차폐판의 형상 변화를 이용하여 휠 자기 플럭스의 입출구 효과(entry and exit effect)를 변경시키는 방법을 제안한다. 차폐 개념의 타

당성은 전산모의시험과 실험으로 검증된다.

#### 2. 마그네트 휠의 추력 생성 원리 비교

원주방향으로 극성이 서로 교차되는 영구자석 배열을 Fig. 1 에서와 같이 z 축을 중심으로 회전시켜 이동 자기장을 생성시키면 자기 유도 원리에 의해 전도성 평판에 자기력이 발생된다. 본 장에서는 기존 마그네트 휠의 추력 발생 메커니즘을 정성적으로 비교 평가한다.

##### 2.1 추력 발생 메커니즘의 비교

마그네트 휠로부터 추력을 얻는 가장 용이한 방

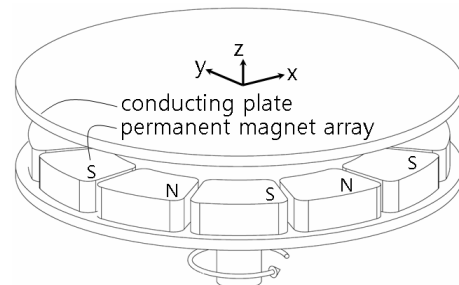
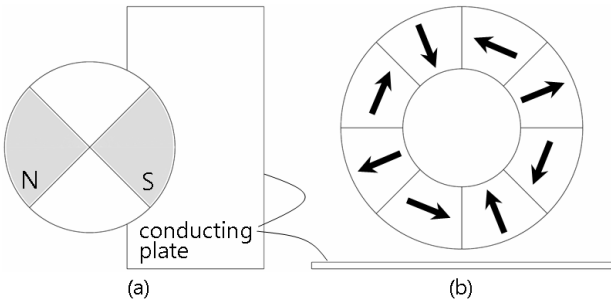


Fig. 1 Concept diagram of the rotating magnet wheel

[이 논문은 2009년도 동역학 및 제어부분 춘계학술대회(2009. 5. 21-22, BEXCO) 발표논문임]

<sup>†</sup> 책임저자, 충주대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : ultraparia@naver.com  
TEL : (043)841-5135 FAX : (043)841-5120

<sup>\*</sup> 충주대학교 기계공학과



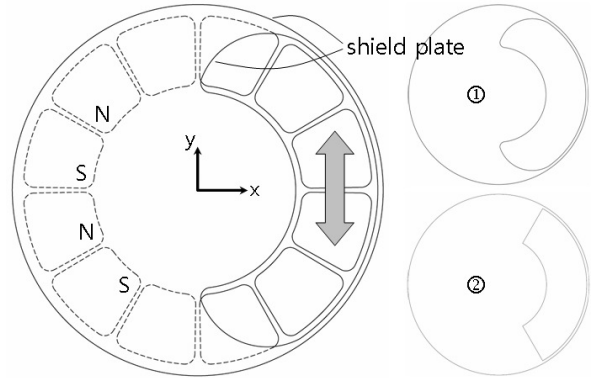
**Fig. 2** Various mechanisms producing thrust force (a) Partial overlapping of interfacing area (b) Tire type of magnet wheel using Halbach magnet array

법은 휠의 강한 반발 부상력을 벡터적으로 분해하여 이용하는 것이다.<sup>(1)</sup> 즉, Fig. 1에서 휠을 z축에 대해 기울이면 z축이 가리키는 방향으로 추력이 발생하는데 이 때 전술한 바와 같이 부상력 외에 평판에 강한 견인 토크가 작용하기 때문에 휠은 쌍의 형태로 이러한 견인 토크를 상쇄시킬 수 있는 구조여야 한다.

실제 응용 가능한 추력 메커니즘을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 전도성 평판에 부분적으로 휠을 중첩시킬 때 발생하는 항력을 이용하는 원리이다.<sup>(2)</sup> 좌우로의 섭동에 의해 중첩되는 면적을 가변시켜 추력을 조절할 수 있는 구조이기는 하지만 동시에 부상력 역시 가변되기 때문에 이축력(two-axial forces)간에 강한 연성이 상존하는 형태이다. Fig. 3은 기존 휠을 직립시키고 원주 방향으로 할바(Halbach) 형태의 마그네트 어레이를 이용하는 메커니즘이다.<sup>(3)</sup> 기존 축방향 휠이 휠의 단면 전체를 사용하기 때문에 이러한 직립 형태보다 힘의 밀도가 상대적으로 크지만 특이한 마그네트 어레이 조합에 의해 휠의 회전만으로 추력과 부상력을 동시에 얻을 수 있는 구조이다. 기존 메커니즘들에서 공통적으로 확인할 수 있듯이 마그네트 휠로부터 발생하는 추력은 기본적으로 부상력과 강하게 연성되어있고 이로 인해 그 응용에 많은 제약이 존재한다.

2.2 자기 차폐 개념의 도입

이전 연구에서 본 저자들은 원주 방향으로 회전하는 휠과 평판 사이의 이동 자기장을 부분적으로 절개하는 자기 차폐의 개념을 이용하여 추력을 얻는 방법을 제안하였다.<sup>(4)</sup> 회전 모터를 펼쳐 놓으면 선형 모터가 되는 것과 유사하게 Fig. 3에서와 같이 이러한 방법을 자기 차폐판으로 구현하는 것이다. 즉, 원주 방향으로 발생하는 토크를 부분적으로 절개하여 추력으로 이용하는 단순한 개념이다. 그림에서와 같이 우측의 일부만을 개방하고 나머



**Fig. 3** Generation principle of thrust force using magnet shield plate and various shapes of the shield plate

지 공극 자기장을 차폐시키면 회색 화살표 방향으로의 추력이 생성된다. 따라서 차폐판을 적절히 조절하면 추력의 방향 역시 가변시킬 수 있음을 알 수 있다.

3. 선형 추력 특성

전술한 바와 같이 기존 연구에서 마그네트 휠의 추력은 반발 부상력과 강하게 연성되어 있기 때문에 휠의 기계적 회전 속도와 비례 관계를 갖는다. 따라서 차폐 개념을 이용하여 이러한 연성을 제거하고 독립적인 제어성을 확보하는 방법을 논한다.

3.1 자기력 리플 저감

Fig. 3의 우측 ①, ②는 차폐판의 실제 형상을 나타내는데 단순히 ②와 같이 영구자석의 극성 전환이 일시에 이루어지게 개방 영역을 구성하면 휠의 자기력 발생이 유도 원리에 기반하기 때문에 부상력과 추력은 특정 모델에 대한 상용화된 툴을 이용한 시뮬레이션 결과인 Fig. 4의 점선으로 나타난 것과 같이 회전 속도에 동기한 ac 력의 형상을 갖는다. 그러나 선형 유도 원리의 입출구 효과를 고려하여 극 전환이 연속적으로 이루어질 수 있도록 ①과 같은 형상을 갖게 하면 Fig. 4에서 실선으로 묘사된 것처럼 리플이 현저히 감소됨을 확인할 수 있다. 그래프에서 ②의 결과는 개방 영역이 ①에 비해 작기 때문에 비교를 위해 스케일링한 결과이다. 유사한 이러한 개방 영역의 첨단 프로파일 형상은 다양한 차수를 갖는 경계선을 대상으로 비교 검증한 결과이다.

개방 영역의 크기, 특히 개방 각은 음의 추력 생성으로 인한 상쇄 현상 때문에 180도에서 최대값을 나타내는데 실제 경우에는 차폐판의 구조적인 안정성과 지지문제를 고려하여 120도로 선정

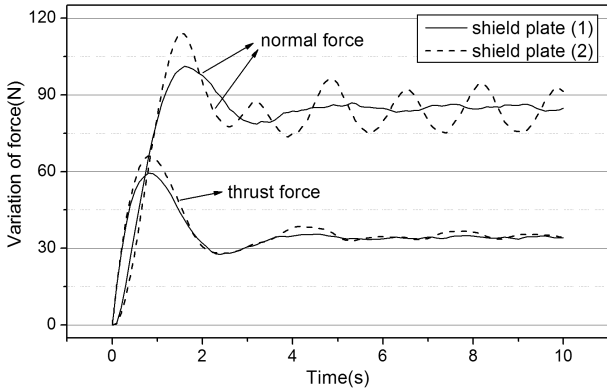


Fig. 4 Variation of magnetic force for two shield plates

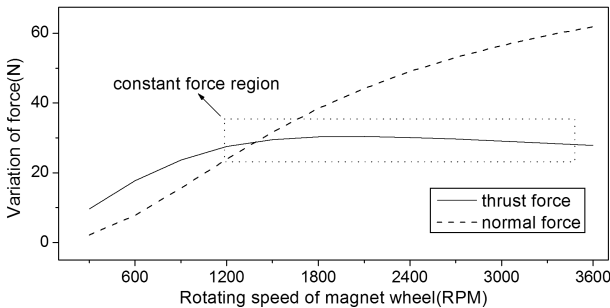


Fig. 5 Variation of two-axial forces for wheel speed

하였다. 이외에도 극수의 수, 너비, 주기적인 배열 단면적 패턴 등 다양한 변수가 힘의 크기에 깊이 관련되어있다.

### 3.2 자기력 비연성화 가능성

전술한 바와 같이 제안된 방법은 개방 영역이 일정한 상태에서 자기차폐판을 회전시켜 추력의 방향 전환을 용이하게 구현할 수 있다. 동시에 개방 영역의 크기를 조절하면 추력의 크기 역시 가변시키는 것이 가능하다. 그러나 개방 영역의 크기는 부상력 크기에도 관련되기 때문에 두 힘간의 연성은 여전히 상존한다.

자기력을 조절할 수 있는 또 하나의 방법은 휠의 기계적 회전 속도(RPM)를 조절하는 것이다. 회전 속도 변화에 따른 자기력의 변화 선도를 Fig. 5에 나타내었다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이 부상력은 회전 속도와 정비례 관계를 갖지만, 추력의 경우 1200RPM에서 3600RPM의 구간에서 속도와 무관하게 균일한 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 이 구간에서는 추력의 변화없이 부상력의 크기를 휠의 회전 속도 변화를 통해 구현할 수 있다. 역으로, 개방 영역의 크기 조절을 통해 추력의 크기를 변화시킬 수 있고 이 때 회전 속도를 가변시켜 부상력을 일정하게 유지시키면 두 힘을 독립적으로 제어할 수 있다. 물론, 휠의

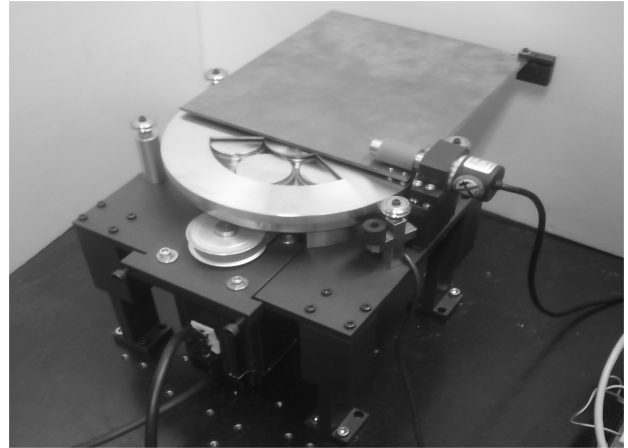


Fig. 6 Conveyance setup of copper plate using magnet wheel (with its air-gapping constrained)

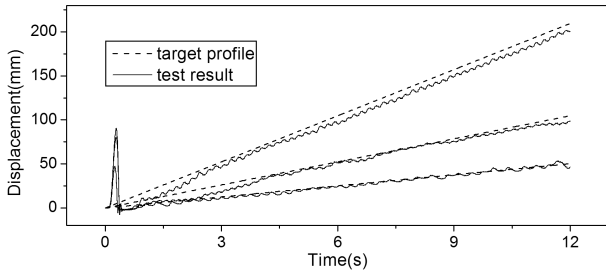
자기력 자체가 유도력이므로 일정한 시간 지연은 피할 수 없으며 따라서 고속의 서보 시스템에의 응용은 다소 무리가 있다. 그러나 기존 연구에서 제안된 바와 같이 특수한 코팅 혹은 표면처리를 위해 약간의 서보 특성이 요구되는 전도체의 비접촉 반송에는 언급된 방법을 효율적으로 이용할 수 있다.

### 3.3 시험 결과

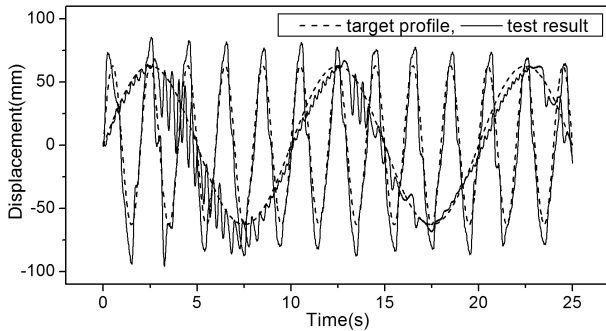
마그네트 휠에 자기차폐 개념을 도입하여 생성된 추력을 이용한 구리 평판 반송 장치를 Fig. 6에 나타내었다. 시스템은 좌우 롤러에 의해 안내되고 따라서 공극 방향으로의 운동은 구속되어있다. 또한 개방 면적을 조절하지 않아도 1축 운동만이 가능하므로 개방 위치를 변경하여 추력의 크기를 조절하였다.

추력을 제어하여 수행된 다양한 프로파일 추종 성능 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전술한 바와 같이 유도 원리의 느린 동특성 응답으로 인해 주기적으로 반복되는 오차가 전 구간에 걸쳐 나타나는데, 본 실험에서는 이러한 오차의 영향을 더욱 두드러지게 하기 위해 상당히 느린 속도로 프로파일을 추종하도록 하였다. 물론 이러한 오차는 이동 개체의 속도가 일정 수준 이상일 경우에는 거의 0에 수렴한다. 특히 제안된 시스템에서 방향 전환을 위해서는 개방각의 위치가 다른 사분면으로 이동해야 하기 때문에 일정 방향으로 이동되는 Fig. 7(a)보다 (b)에서 오차의 크기가 더욱 큰 것을 알 수 있다.

결론적으로, 이러한 위치 오차들이 저속에서 상존함에도 불구하고 마그네트 휠에 차폐개념을 도입하여 선형 추력을 얻는 것은 기존 연구에서처럼 단순한 반송에 국한되지 않는, 추력의 서보 특성



(a) Translational profile-following test



(b) Sinusoidal profile-following test

Fig. 7 Tracking test result of magnet wheel-based conveyance system

을 부여할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다. 부상력을 동시에 고려한 2 축력 제어 시험 결과 역시 비슷한 경향을 보인다.

#### 4. 결론

마그네트 휠은 ac 전원 대신 영구자석의 기계적인 회전으로 이동 자기장을 생성하여 유도력을 발생시키는 장치이다. 따라서 와전류 생성 밀도가 일반적인 유도 모터에 비해 월등히 크기 때문에 많은 연구자들이 주목해 온 시스템이다. 이러한 장점에도 불구하고 반발력과 동시에 발생하는 강한 견인 토크를 추력으로 전환하는 데에 따른 제약으로 그 응용은 시스템이 갖는 내재 가치에 비해 많은 제한이 있어온 것도 주지의 사실이다. 본 저자들은 서피스 유도 모터라 명명된 스위칭 방식의 축방향 모터의 개념을 응용하여 부분적으로 공극 자기장을 차폐판을 이용하여 절개한 형태의 추력 이용 방법을 제안하였는데, 이는 회전 모터를 펼쳐놓으면 선형 모터가 되는 것과 비슷한 개념이다. 그러나 와전류기가 갖는 많은 공통적인 특성들이 마그네트 휠에도 상존하는 바, 본 연구에서는 생성되는 자기력 특히 선형 추력을 대상으로 서보 성능의 부여를 목적으로 수행한 결과들을 소개하였다.

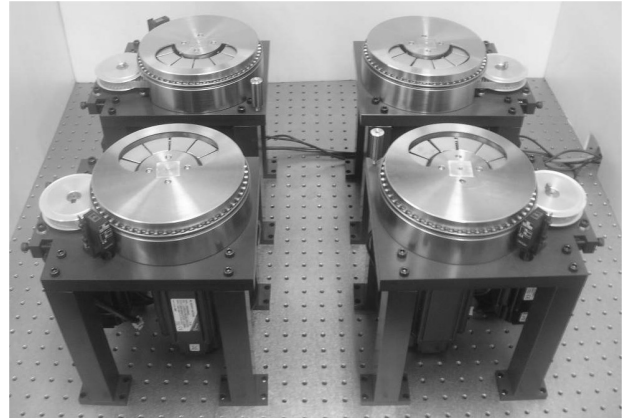


Fig. 8 Base actuating units of the conveyance system based on magnet wheels

현재 다중 휠을 이용한 전도성 평판의 6 자유도 반송 시스템을 Fig. 8 과 같이 구축하여 전술한 이 축력간의 독립 제어 방법을 응용한 시험을 수행하고 있다. 특히 마그네트 휠은 가반 하중(payload)이 대단히 높고 반발력으로서의 물리적 안정성이 담보되기 때문에 적절한 서보 성능을 갖출 수 있다면 다양한 응용을 기대할 수 있다.

#### 후기

이 논문은 2009 년 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(2009-0071607).

#### 참고문헌

- (1) Fujii, N., Ogawa, T. and Matsumoto, T., 1996, "Revolving Magnets Wheels with Permanent Magnets," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 116, No. 1, pp. 106~118.
- (2) Fujii, N. and Chida, M., 1997, "Three Dimensional Force of Magnet Wheel with Revolving Permanent Magnets," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4221~4223.
- (3) Bird, J. and Lipo, T. A., 2003, "An Electrodynamics Wheel : Integrated Propulsion and Levitation Machine," *Proceedings of IEEE*, pp. 1410~1416.
- (4) Shim, K. B., Park, J. K., Lee, S. H. and Jung, K. S., 2008, "Linear Actuator Using Magnetic Shield of Rotating Magnet Wheel," *Proceeding of KSME conference*, pp. 923~925.