

## 전도성 환봉 이송용 동전기 차륜의 설계

박성준\*, 정광석†

(논문접수일 2010. 12. 28, 심사완료일 2011. 03. 03)

### Design of an Electrodynamic Wheel for Transfer of Conductive Rod

Sung-Jun Park\*, Kwang-Suk Jung†

#### Abstract

Instead of multi-phase ac current, the magnetic field travels spatially through mechanical rotation of permanent magnets at the electrodynamic wheel (EDW). Traveling of magnetic field generally leads to a generation of inductive force in the traveling direction. In this paper, we suggest a spiral EDW to travel the magnetic field in the axial direction of the conductive rod. So, it is possible to levitate and transfer the rod through multi-axial forces by the spiral EDW. However, physical dimensions of permanent magnets constituting EDW influence relative ratios between three-axial forces generated on the rod. Therefore, the sensitivity analysis for design parameters is performed using FEM analysis. The stable operation is verified experimentally.

**Key Words** : Contactless conveyance(비접촉반송), Electrodynamic wheel(동전기 휠), Magnetic levitation(자기부상), Spiral motion(나선 운동)

### 1. 서론

차륜의 원주방향으로 주기적인 자화 패턴을 갖는 영구자석 (PM; permanent magnet) 어레이를 전도체와 일정 간극을 사이에 두고 회전시켜 동전기력(electrodynamic force)을 얻는 장치를 전동차륜(EDW; electrodynamic wheel) 혹은 자기차륜(Magnet wheel)이라한다<sup>(1-4)</sup>. EDW는 이동 자기장 즉, 시변(time-traveling) 자기장에 의한 유도력이라는 측면에서 일반적인 유도 전동기와 유사하지만 동일 체적 대비 힘의 밀도가 월등히 높기 때문에 다양한 분야에 적용되어왔다.

EDW는 전도체와의 상대 자세에 따라 Fig. 1의 axial 타입 또는 Fig. 2의 radial 타입으로 나눌 수 있는데 이러한 구분은 원주방향으로 주기적인 PM의 자화 방향에도 적용된다. axial

타입의 경우 상호 접합 영역(interaction area)이 커서 전도성 시트, 평판의 반송 등에 적용되었는데<sup>(1,3)</sup> Fig. 1에서와 같이 평판의 부상에 이용되는 반발력 외에 차륜의 회전 방향 즉, 접선 방향으로 생성되는 견인 토크를 평판의 이송력으로 변환시키기 위해 차륜을 평판 모서리에 걸쳐놓고 중첩된 영역을 조절시키는 방법<sup>(3)</sup>, PM에 의한 회전 자기장을 자기 차폐판으로 부분 단락하여 선형화된 추력으로 변환하는 방법<sup>(4)</sup> 등이 제안되었다. 이에 반해 radial 타입은 Fig. 2에서와 같이 접합 영역이 상대적으로 작지만 PM 어레이가 z축을 중심으로 회전하면 접선 방향(x축)과 평판에 수직인 방향(y축)으로 힘이 발생되며 대형화하기 쉽다. 이 때 y축 중심의 회전에 따라 진행 방향을 가변시킬 수 있는 이점이 있다. 특히 radial 타입은 자기 부상 철도의 다축력 발생 수단으로의 응용이 모색되어왔다<sup>(2)</sup>.

\* 충주대학교 기계공학과

† 교신저자, 충주대학교 기계공학과 (ksjung@cjnu.ac.kr)

주소: 충북 충주시 대학로 50 충주대학교 기계공학과

EDW를 이용한 판류 이송에 관한 연구와 대별되어 선재류 혹은 봉류에 대한 이송은 지금까지 보고된 바가 없으며 본 논문은 전도성 환봉의 비접촉 반송을 다룬다. 제안된 방법론에서 환봉의 비접촉 반송에 필요한 부상력과 축력 모두 변형된 형태의 radial 타입 EDW를 통해 얻는다<sup>(5)</sup>. 본 논문에서는 제시된 EDW의 작동 원리에 대한 설명과 더불어 환봉에 생성되는 3축 자기력의 특성과 상대 비에 큰 영향을 미치는 EDW의 형상 변수에 관한 분석 과정이 제시되어 있다. 특히 반송 시스템의 유일한 가변 작동 조건인 EDW의 회전 속도에 따른 자기력 분석과 반송 시스템의 타당성이 간략하게 실험적으로 검증된다.

## 2. 나선형 동전기 치륜의 자기력 생성 원리

기존 radial 타입의 EDW를 환봉의 반송에 이용하기 위해서는 환봉의 축 방향으로 이송력이 생성되어야 하는데 이는 Fig. 3과 같은 나선형 구조에 의해 해결할 수 있다. 이러한 구조의 의해 단지 원주 방향으로만 반보된 극성을 갖던 기존 PM 어레이의 주기성이 이웃 PM간의 단차(또는 피치)로 인해 환봉의 축 방향으로도 형성된 것을 알 수 있다. 이는 PM 어레이에 의한 자기장이 원주 방향뿐만 아니라 축 방향으로도 이동할 수 있게 하는 요인이다. 따라서 축방향 이동 자기장에 의해 환봉에는 축방향 이송력이 생성된다. Fig. 3의 EDW에 의한 다

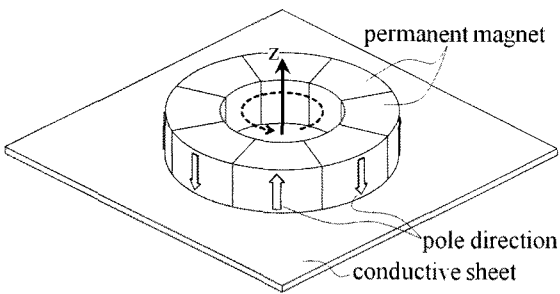


Fig. 1 Axial electrodynamic wheel

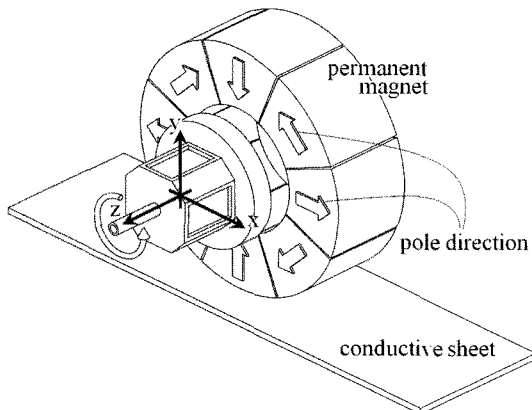


Fig. 2 Radial electrodynamic wheel

축력 발생은 전기 동역학적 원리를 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있다.

우선, Fig. 3의 원통 구조를 원주 방향으로 펼쳐놓으면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 x, y, z축은 Fig. 2의 r,  $\theta$ , z에 해당한다. 선형 등가 모델에서의 자기력이 원통 모델에서의 자기력과 다른 점은 원통 모델에서  $F_r$ 은 대칭 구조로 인해 상쇄되지만 선형 모델에서의 반발력  $F_x$ 는 방향이 모두 동일하여 상쇄되지 않는다는 것이다. 그러나  $F_x$ 는 후술하는 바와 같이 작동 조건에 따른 자기 안정성 판별 기준이 되는 항목이며  $F_y$ 와 비교된다. 이외의 부분은 두 모델에서 모두 동일하다. Fig. 4에서 PM 어레이가 우측으로 이동하면 N극(+x축 방향으로 자화된) PM의 후미에는 와전류에 의해 S극이 그리고 S극 PM의 경우엔 후미에 N극이 유도된다. 따라서 전도판에는 PM 어레이를 따라 이동하려는 힘  $F_y$ 가 발생하고 동시에 점선 영역에서와 같이 유도된 자극 하단의 PM으로 인해 북동쪽으로 척력이 생성되어 이러한 힘이 합쳐져 전도판에는  $F_z$ 의 힘이 발생한다. 또한 PM이 진행하는 방향으로 하단에 생기는 각 PM과의 동일한 극성 때문에 반발력이 발생하는데 이 힘은 PM과 PM의 후미에 생성되는 유도 극과의 흡인력보다 훨씬 크기 때문에 결국 PM 어레이에는  $F_x$ 의 힘이 발생한다. 이러한 개념으로 전도판에는 3축력의 자기력이 발생하며 이러한 힘  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 는 각각 Fig. 3의 원통 모델에서 반경 방향 힘, 원주 방향 회전 토크,

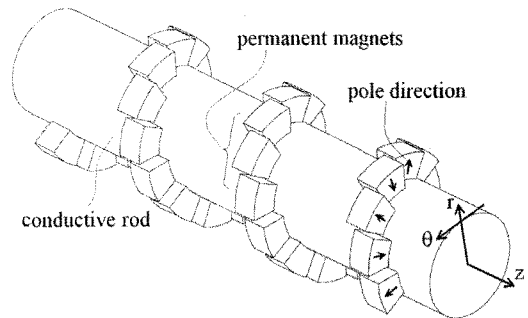


Fig. 3 Conveyance of conductive rod using a spiral EDW

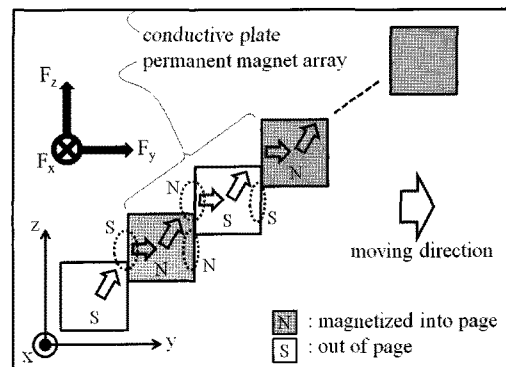


Fig. 4 Generating principle of three axial forces using the spiral EDW

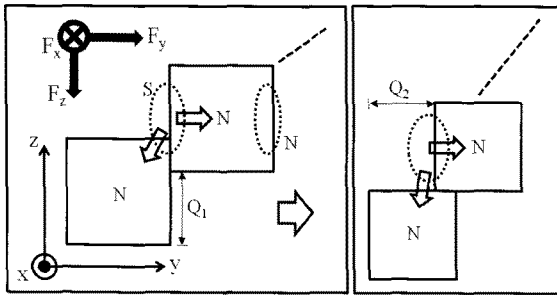


Fig. 5 Force direction for another repetitive pattern of PM array

축 방향 이송력으로 나타난다.

전도판에 3축력을 발생시키는 PM 어레이의 극 패턴으로 Fig. 4와 같이 공극의 수직 방향으로 교번 극성인 N, S, N, S,...의 자기 조합 외에도 Fig. 5와 같이 모두 동일한 극성(N, N,... 또는 S, S,...)의 조합도 가능하다. 그러나 동일한 극성 조합의 경우 각 PM 후미의 유도 극에는 PM으로부터 남서쪽으로 인력이 작용하며 따라서  $F_z$ 의 방향은 Fig. 3의 경우와 반대이다. 이러한 인력은 Fig. 4에서의 PM과 유도 극사이의 척력보다 큰데 이는 유도된 극과 우측, 아래쪽 PM간에 폐 자기 루프(closed magnetic loop)가 형성되기 때문이다. 특히 후술되는 것처럼 이웃하는 PM간의 상대 위치를 결정하는  $Q_1, Q_2$  등은 3축 자기력간의 상대 크기에 큰 영향을 미친다<sup>(5)</sup>.

### 3. EDW의 설계 변수의 영향 분석

제안된 나선형 EDW에서 PM의 형상 수치 등 자기력에의 영향을 직관적으로 유추할 수 있는 변수를 제외한 지배적인 설계 변수로 y축, z축 방향으로 이웃하는 PM간의 단차와 PM 어레이의 극수(pole number)를 들 수 있다. PM의 위치 변화에 따라 가변되는 동전기력에의 영향은 자기장 소스가 기계적으로 변하기 때문에 수치해석 시간이 상당히 소요된다. 때문에 자기장 소스를 등가의 다상 코일로 변환하여<sup>(6)</sup> 혹은 전류 시트(current sheet)로 전환시켜<sup>(7)</sup> 해석하는 방법 등이 제안되었는데 본 연구에서는 이러한 과정을 모두 포함하여 제공하는 상용화된 툴인 Maxwell v.11.1을 이용하여 상기 변수의 영향을 분석하였다. 해석에 이용된 모델은 Fig. 4와 같은 선형 등가 모델을 대상으로 하였으며 Table 1에서와 같이 8극의 교번 혹은 동일 극 패턴을 갖는다. 특히 PM 어레이의 이동 속도 12 m/s는 동일한 PM 어레이를 갖는 원통 모델에서의 3000RPM에 해당한다. Fig. 4에 주어진 모델에 대해 3차원의 기하학적 형상을 구성하고 Table 1의 물성치를 대입한 후 적절한 경계조건을 인가하여 FEM 해석을 수행하는데 이 때 전술한 바와 같이 PM의 기계적인 회전에 의한 영향은 상용 툴인 Maxwell 프로그램 안의 Band 영역 설정에 의해 해결하였다. 와전류 구

Table 1 Initial specifications used in FEM analysis

Component	Item	Spec.
PM	material	NdFe35
	dimension	30×30×20mm <sup>3</sup>
	number of pole	8
	periodic pattern of PM	1) N,S,N,S,N,S,N,S 2) N,N,N,N,N,N,N,N
	moving speed	12m/s
Copper plate	thickness	5mm
Air gap	length	3mm

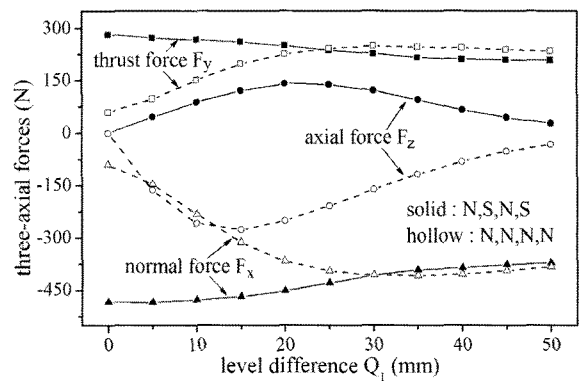


Fig. 6 Variation of force with respect to  $Q_1$

동에 의한 해석은 일반적으로 조화해석만으로도 합리적인 결과를 얻을 수 있으나 다상 전원이 아닌 PM의 기계적인 거동 특성을 고려해야하고 이를 통해 발생하는 와전류의 상승 시간까지 종합적으로 고려하기 위해 과도 응답 해석을 수행하였다. 그 결과를 본 장에 나타내었다.

#### 3.1 단차 혹은 피치

나선형 EDW의 나선 형상을 결정하는 변수는 이웃하는 PM간의 단차를 결정하는  $Q_1$ 이다. 이는 나사 등의 피치에 해당하는 변수인데 단차의 변화에 따라 가변되는 3축 자기력을 해석하여 Fig. 6에 나타내었다. 반복되는 자기 조합에 따라 부호가 서로 반대인 축력  $F_z$ 를 제외하고는 수직력  $F_x$ 와 접선력  $F_y$ 는  $Q_1$ 이 PM의 길이에 비해 작을 때에는 힘 변화선도가 자기 조합에 따라 극명하게 다른 것을 알 수 있다. 특히 동일 극성일 때가 교번 극성일 때보다 수직력, 접선력 등이 작은 대신에 축력의 경우에는 배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이러한 차이는  $Q_1$ 이 30mm 보다 커짐에 따라 거의 소거됨을 알 수 있는데 이는 PM이 서로 분산되어 이웃하는 PM간의 영향이 없어지기 때문이다. 아무튼 y축 방향으로의 이동에 가장 큰 주안점을 둔다면 15mm 근방의 단차 그리고 동일한 극성 조합일 때가 가장 유리한 것을 알 수 있다.

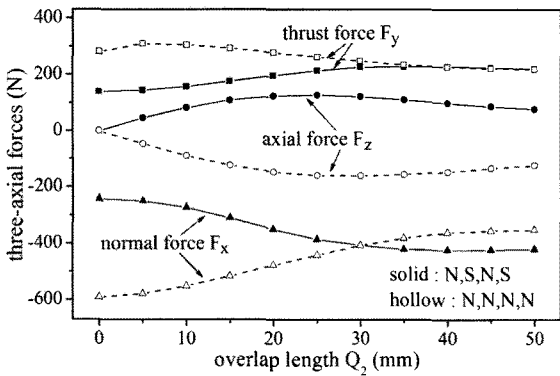


Fig. 7 Variation of force with respect to  $Q_2$

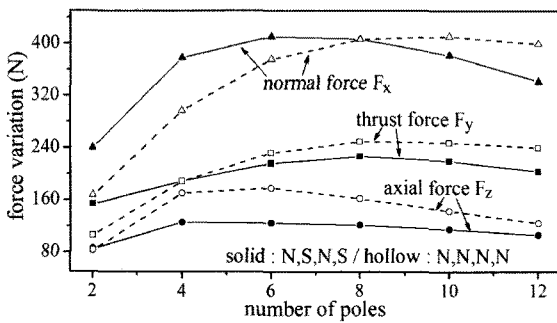


Fig. 8 Variation of force for pole number

### 3.2 중첩 길이

나선 형상에 관련된 또 하나의 변수가 Fig. 5에서와 같이 이웃하는 PM간의 중첩 길이  $Q_2$ 이다.  $Q_2$ 가 0이면 일렬 형태의 PM 어레이를 수직 방향으로 움직이는 것을 의미한다.  $Q_2$ 를 0부터 50mm까지 변화시켜가며 교차 극성, 동일 극성 조합에 대해 해석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞서 단차의 경우에는 달리 중첩 길이가 단일 PM의 너비보다 작을 때에는 3축 자기력 모두 동일 극성일 때가 월등히 큰 것을 알 수 있다. 물론 기존 모델의 PM 너비인 30mm 보다 커지면 단차에서와 같이 두 모델 모두 비슷한 값으로 수렴해간다. Fig. 7의 결과만 보면  $Q_2$ 는 10~20mm내외일 때가 가장 유리해 보이지만 축력의 경우에는 Fig. 6의  $Q_1$ 이 10mm일 때의 축력보다 50% 이상 작은 것을 알 수 있다. 특히, 접선력  $F_y$ 의 경우 원통 모델에서는 환봉의 회전을 야기하는 힘인데 이는 다른 이축력 생성을 위해 불가피하게 발생하는 힘이다. 따라서 가급적 작은 것이 바람직하다. PM 너비보다 지나치게 큰  $Q_2$ 는 PM 길이보다 훨씬 큰  $Q_1$ 에서와 같이 PM 어레이를 구성하는 PM이 서로 분산되어 있는 것과 동일하다.

### 3.3 PM 어레이의 극수

일반적으로 PM 동기 모터에서 PM의 극수는 자기력의 균일성(uniformity)에 큰 영향을 미치는 인자이다. 극수의 영향을

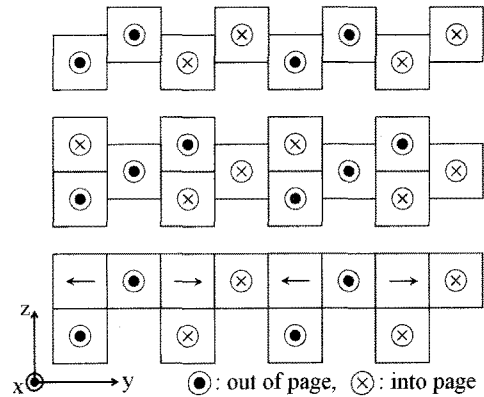


Fig. 9 Recommended PM array for a spiral EDW

분석하기 위해 EDW를 구성하는 PM 어레이의 극수를 2극에서 12극까지 변화시켜가며 해석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 동기 모터에서와는 달리 자기력의 시변 특성 대신에 그 절대 크기만을 고려대상으로 삼았다. 해석 결과를 통해 3축력 모두 극수가 증가하면 커지지만 8극 이상에서는 수렴하거나 오히려 작아진다. 극수가 작은 경우 동일 극성 조합일 때가 교번 극성일 때보다 축력이 더욱 큰 것을 알 수 있으며 극수가 증가함에 따라 접선력, 수직력 모두 동일 극성일 때가 자기력이 모두 큰 것을 알 수 있다.

전술한 해석 결과를 통해 Fig. 9의 상단과 같은 자기 조합을 고안하였다. 해당 모델에서 중첩 길이  $Q_2$ 는 30mm로 하는 대신 축력을 극대화하기 위해  $Q_1$ 을 15mm로 하였다. 특히 동일 극성 구현을 위해 PM을 z축으로 늘어놓는 대신 2극씩 주기적으로 배치한 이유는 PM 어레이를 회전 구동시키는 휠 모터의 회전 부하를 최소화하기 위해서이다. 즉, z축으로의 PM 지지 프레임 길이를 최소화하기 위한 방안이다. 이러한 조합은 8극이 일렬로 배치되어 있을 때와 자기력 특성에 있어 큰 차이가 없다. Fig. 9 상단의 자기 조합 외에도 3축력을 발생시키기 위한 다양한 조합이 있을 수 있다. 중간 그림은 상단 그림의 변형된 형태이며 이런 식으로 행을 늘여가며 동일한 효과를 얻는 것이 가능하다. 추가로 그림의 하단에서와 같이 할바(Halbach) 어레이를 들 수 있는데 이는 진행 방향으로의 자극이  $\uparrow \rightarrow \downarrow \leftarrow$ 와 같이 반복된다. 이러한 조합은 극수가 더 작음에도 불구하고 상단 조합에 의한 자기력과 크기가 비슷한데 이는 할바 어레이에서의 각 PM간에 형성되는 자기 폐회로 덕분이다. 그러나 본 연구에서는 실제 원통 모델에 장착될 PM의 착자 난이도를 고려하여 그림 상단의 극 패턴을 대상으로 논의를 전개한다.

## 4. 동작 조건의 고찰 및 시험

전술한 자기 조합으로 이뤄진 두 개의 나선 EDW를 이용한

구리 환봉 구동 시스템을 Fig. 10과 같이 제작하였다. 시작 시스템에서는 환봉의 동적 안정성을 검증하기 위해 축 방향으로 환봉의 한쪽 끝단이 볼 접촉에 의해 구속되도록 하였다. 각각의 EDW는 휠 서보 모터에 의해 6000RPM까지 회전할 수 있는데 이 때 환봉은 다음 관계식과 같이 휠 회전 속도  $\omega_s$ 에 동조해서 회전한다<sup>(8)</sup>.

$$\omega_m = (1 - s)\omega_s \quad (1)$$

위 식에서  $s$ 는 슬립률(slip ratio)을 나타내는데 이 값이 와전류 시스템에서는 부하에 따라 그리고 동작 개시 시점, 과도 상태(transient state) 그리고 정상 상태(steady state)에서 각기 다르기 때문에 환봉이 휠 모터의 회전에도 불구하고 회전하지 않도록 하기 위해서는 환봉 회전 속도의 정확한 계측이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 두 개의 EDW를 서로 반대로 회전시켜 회전력이 근사적으로 상쇄되게 하였다.

EDW의 회전에 의해 생성되는 자기력  $F$ 의 크기를 결정짓는 동작 조건은 다음 식에서와 같이 휠의 회전 속도  $\omega_s$ 와 공극  $g$ 의 크기이다<sup>(5)</sup>.

$$F_i = F_i(\omega_s, g) \quad (2)$$

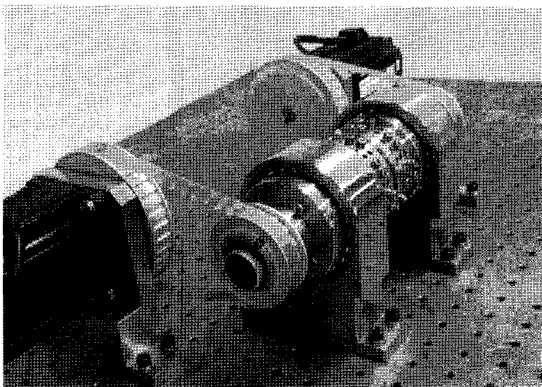


Fig. 10 Photograph of test setup (consisting of two spiral EDWs)

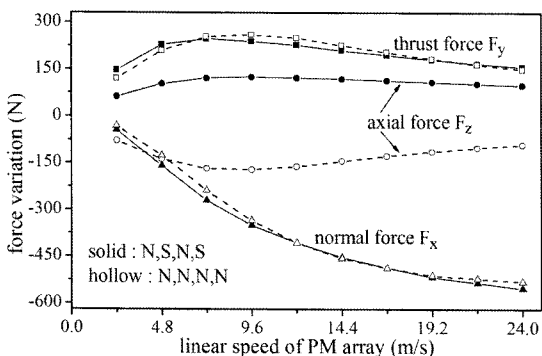


Fig. 11 Force variation for moving speed of PM array

위 식에서 하첨자  $i$ 는  $x, y, z$ 를 나타낸다. 회전 속도를 선형 증가 속도로 변환시켜 Fig. 10의 선형 모델을 대상으로 해석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 또한 동일한 모델에서 교번 극성 조합을 고려한 경우를 결과에 추가하였다. 그래프에서 속도가 증가함에 따라 수직력은 계속 증가하지만 추력 즉, 접선력과 축력은 증가하다가 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 횡축 인덱스 12 m/s가 3000RPM에 해당하므로 대략 1800 RPM에서 접선력과 축력의 증감방향이 전환되는 것을 알 수 있다. 물론 수직력도 7000RPM 이상이 되면 수렴해가는 것을 확인할 수 있는데 위의 속도에 따른 자기력 선도를 통해 EDW의 회전 속도가 증가할수록 환봉의 반경 방향 힘이 증가하고 따라서 공극 강성 증가로 환봉 중심의 섭동량(perturbation)이 줄어들 것을 예측할 수 있다. 이러한 동특성과 대별되어 수직력은 환봉의 안정성과 관련된 항목인데 기본적으로 환봉의 관성을 수직력으로 보상할 수 있어야하므로 환봉의 물성치를 통해 EDW의 최소 회전 속도는 이미 결정되어 있는 값이다. 또한 자기력에 미치는 공극의 영향은 엄밀하게 표현하면 동작 조건 보다는 이송되어야 할 환봉의 외륜에 의해 결정되는 부하 변수이다. 결국 대상 환봉의 크기에 따라 공극이 결정되면 최소 회전 속도 이상으로 EDW는 회전해야만 환봉은 안정되게 구동될 수 있다.

Fig. 10의 두 개의 나선형 EDW를 서로 반대 방향으로 각각 3000RPM으로 회전시킬 때 환봉의 공극 크기를 두 지점에서 측정한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서  $x$ 축,  $y$ 축은 수평, 수직 위치를 각각 나타낸다. 중심선상에 놓여있는 수평 변위와는 달리 수직 변위의 경우 자중에 의해 처짐이 있다. 공극의 크기는 두 축 모두 3mm이므로 환봉은 안정되게 부상되어 있는 것을 확인할 수 있다. EDW의 회전 속도가 감소하거나 혹은 증가하면  $y$ 축의 변위는 진폭이 증가하거나 감소하는데 이는 전술한 바와 같이 수직력 증가와 무관하지 않다. 환봉의 실제 이송시 이송 속도 역시 두 EDW의 회전 속도를 가변시켜 조절할 수 있는데 따라서 이와 연동되어 환봉의 회전 속도는 소거되지 않기 때문에 스크류 운동을 하게 된다.

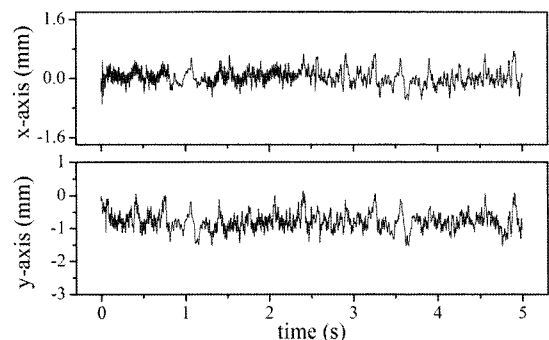


Fig. 12 Radial positions of copper rod

## 5. 결론

전도성 환봉의 반송 응용으로 제안된 나선형 전동 차륜을 구성하는 여러 변수 중 이웃하는 PM간의 상대적인 위치, 자세의 변화와 더불어 극수에 따른 자기력 특성 규명을 통해 단동 차륜의 차원 결정 방법을 제시하였다. 물리적 제 변수와 함께 논의된 환봉의 안정성을 파악하는 동작 조건은 전술한 바와 같이 제어되지 않는 전동차륜을 통한 환봉의 입출력 상황을 토대로 도출되었으며 이를 통해 특정 동작 범위에서는 제어기 없이도 안정된 부상이 가능함을 알 수 있다. 공기력을 대신할 수 있는 제안된 환봉 이송 방법이 갖는 이점은 이송을 위한 구동 유닛을 통합 구현할 수 있다는 것 외에 환봉을 지지 유닛으로부터 비금속 차폐판 등을 이용하여 기계적으로 완전히 절연(isolation)시킬 수 있다는 데에 있다. 이러한 비접촉 조작 특성을 이용해 전도성 환봉을 대상으로 표면의 도색, 코팅 등과 같은 작업을 기계적인 접촉 없이 구현할 수도 있다.

수동적인 자기력만으로 부상 개체의 자체 안정성을 확보하는 것은 불가능하다. 본 논문에서 논의한 전도성 환봉의 안정성은 반경 방향 안정성에 국한된 것이며 만약 환봉을 공간상의 특정 위치 혹은 영역 내에 안정적으로 위치시키기 위해서는 각각의 전동 차륜의 속도 제어 장치가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

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

## 참 고 문 헌

- (1) Fujii, N., Ito, Y., and Yoshihara, T., 2005, "Characteristics of a Moving Magnet Rotator over a Conducting Plate," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 41, No. 10, pp. 3811~3813.
- (2) Bird, J., and Lipo, T. A., 2003, "An Electrodynamic Wheel : An Integrated Propulsion and Levitation Machine," *Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf.*, Vol. 3, No. 1-4, pp. 1410~1416.
- (3) Fujii, N., Chida, M., and Ogawa, K., 1997, "Three Dimensional Force of Magnet Wheel with Revolving Permanent Magnets," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4221~4223.
- (4) Jung, K. S., and Shim, K. B., 2010, "Noncontact Conveyance of Conductive Plate Using Omni-directional Magnet Wheel," *Mechatronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 496~502.
- (5) Won, K. M., and Jung, K. S., 2010, "Characteristic Study of the Spiral Magnet Wheel Devised for Multi-axial Generation," *Proc. of KSMTE Autumn Conf.*, pp. 473~477.
- (6) Ogawa, K., Horiuchi, Y., and Fujii, N., 1997, "Calculation of Electromagnetic Forces for Magnet wheels," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2069~2072.
- (7) Bird, J., and Lipo, T. A., 2008, "A 3-D Magnetic Charge Finite-element Model of an Electrodynamic Wheel," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 44, No. 2, pp. 253~265.
- (8) Nasar, S. A., and Boldea, I., 1976, *Linear Motion Electric Machines*, John Wiley & Sons, USA, pp. 3~18.