

# 동전기 휠을 이용한 전도성 환봉의 나선형 운동과 제어

## Screw Motion and Control of Conductive Rod by Rotating a Spiral Electrodynamic Wheel

정 광 석\*

(Kwang Suk Jung<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Chungju National University

**Abstract:** A spiral electrodynamic wheel is proposed as an actuator for the contactless conveyance of a conductive rod. When rotating the wheel around the rod, a radial force, a tangential force, and an axial force are generated on the rod and cause a screw motion of the rod. The rotation of the rod is the inevitable result due to traction torque of the wheel and the unintended motion to be excluded. However, the rotating speed of the rod should be measured without mechanical contact to be cancelled out through the controller, so the electrodynamic wheel is used as a sensor measuring the rotating speed of the rod indirectly as well as an actuator. In this paper, we model the magnetic forces by the proposed wheel theoretically and compare the derived model with simulation result by Maxwell, and analyze influences on the magnetic forces by key parameters constituting the wheel. The feasibility of the conveyance system is verified experimentally.

**Keywords:** contactless conveyance, electrodynamic wheel, magnetic levitation, magnetic analysis, screw motion

### I. 서론

전도성 선재, 판재 등 연속 웹 공정(continuous web process)에 의해 생산되는 소재의 경우 오염 방지 혹은 표면 품질 향상을 위해 기계적인 접촉을 배제하는 것이 때때로 이로울 수 있다[1-3]. 이때 대상 전도성 소재를 비접촉으로 이송시키기 위한 방법으로 전자기 유도 등을 고려할 수 있다. 즉, 전자기력(electromagnetic force)이 아닌 동전기력(electrodynamic force)을 이용해야 하는데 이는 도전체에 강자성이 없기 때문이며 일반적으로 동전기력의 경우 소 용량에서는 힘 밀도가 영구자석(PM: Permanent Magnet) 기반의 로렌츠력이나 전자기력에 비해 열악하다. 이는 입력 전류용 코일 장착 공간의 제한과 입력 전원의 제한 그리고 이로 인한 이동 자기장(traveling field)의 제한에 기인한다[4]. 물론 자기장의 주파수를 높여 와전류의 크기를 증가시킬 수 있지만 생성된 고주파력은 저주파 필터로 작용하는 이동 개체 때문에 대부분 필터링 된다. 그러나 동전기력의 크기 제약은 코일 가진(excitation) 대신 기계적으로 구동되는 PM 어레이(array) 혹은 동전기 휠(electrodynamic wheel)에 의해 일정 부분 해결할 수 있다.

원주 방향으로 주기적인 극 패턴을 갖는 동전기 휠은 큰 자기 강도를 갖는 PM의 기계적인 회전에 의해 이동 자기장을 발생시키기 때문에 힘 밀도가 같은 체적의 일반 유도에 비해 상당히 크다[5-8]. 본 연구에서는 동전기 휠을 전도성 환봉의 비접촉 이송에 적용하기 위해 축 방향으로 피치를 갖는 나선형 조합의 휠을 제안하고 이를 이용한 이송 시스템을

실험적으로 검증한다. 이때 휠의 회전에 따른 견인 토크로 인해 환봉은 고속으로 회전하는데 환봉의 유도 회전을 소거하기 위한 디먹업 수단으로 동전기 휠을 구동기뿐만 아니라 트랜스듀서로도 이용할 수 있는 가능성을 논의한다.

### II. PM 어레이 회전에 의한 다축력 통합 구현 원리

환봉을 지지 프레임과 기계적인 접촉 없이 이송하기 위해서는 환봉의 반경 방향 안정성 확보를 위한 외력이 필요하고 동시에 축력(axial force)이 필요하다. 이러한 다축력 시스템을 코일 유도 방식으로 구현하면 그림 1과 같다. 이는 횡자속(transverse flux) 축형(axial-gap) 유도 모터와 유사한 고정자(stator)를 갖는데 코일의 외곽 반경에 비해 환봉의 무게를 보상할 수 있는 반경 방향 힘(radial force)이 작아서 실제 응용에는 무리가 있다. 그림 1의 다상(multi-phase) 전원에 의한 이동 자기장을 PM 어레이의 기계적인 회전으로 구현할 수 있는 자기 조합으로 그림 2와 같은 동전기 휠을 고려할 수 있다[8,9]. 그림 2는 이웃하는 PM간에 단차가 있어 그림 1과 뚜렷이 대별되며 단차로 인해 기존 동전기 휠과 달리 나선 형상을 갖는다. 이는 z축 중심의 회전만으로도 환봉에 축력을 만들기 위함이다. 제안된 형태의 PM 어레이가 환봉 주위에

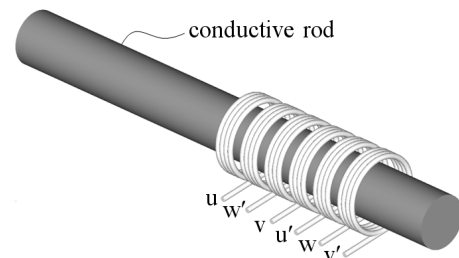


그림 1. 다상 전류에 의한 전자기 유도.  
Fig. 1. Electromagnetic induction by multi-phase current.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 3. 30., 수정: 2011. 5. 31., 채택확정: 2011. 6. 30.

정광석: 충주대학교 기계공학과(ksjung@cjnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

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

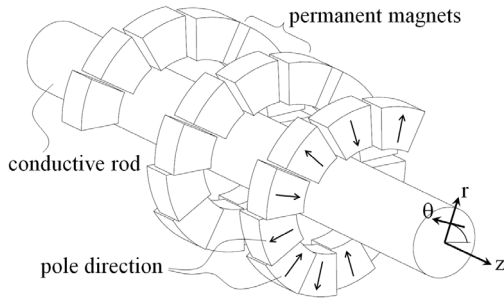


그림 2. 전도성 환봉의 반송을 위한 나선형 동전기 휠의 개념도.  
Fig. 2. Concept layout of a spiral electrodynamic wheel for conveyance of conductive rod.

서 회전하면 자기장은  $\theta$ 축,  $z$  축으로 각각 이동하는데 환봉에는  $\theta$  축으로의 이동 자기장에 의해  $r$  축 방향 힘과  $z$  축 중심의 토크가 발생되고 동시에  $z$  축으로의 이동 자기장에 의해  $z$  축 방향의 축력이 발생된다. 이를 선형 등가 모델로 나타내면 환봉과 PM 어레이를 원주 방향으로 펼친 그림 3과 같다 [8]. 그림에서  $F_x, F_y, F_z$ 는 원통 모델에서의 반경 방향 힘, 접선력 그리고 축력에 해당된다. 특히 반경 방향 힘  $F_x$ 는 와전류에 의한 반발력이며 따라서  $x$  축으로는 자기 안정성(self stability)이 성립한다. 제안된 동전기 휠은 환봉에 3축력을 발생시키며 따라서 다수 개의 동전기 휠에 의해 환봉은 공간상에 부상되어 이송될 수 있다.

제안된 동전기 휠에서는 PM 어레이의 반복 회전으로 다상 코일 혹은 선형 모터에서처럼 공극 자기장을 축 방향으로 이동시킬 수 있지만 이를 위해 원주 방향으로 동시에 이동되는 자기장에 의해 발생하는  $\theta$  축 방향의 견인 토크 혹은 그림 3에서의  $F_y$ 는 의도되지 않은 불가피한 힘이며 이로 인해 환봉은 고속으로 PM 어레이를 추종하여 슬립(slip) 회전하며 축 방향 이송과 결합되어 결국 환봉은 나선 운동을 한다. 환봉의 회전 운동을 소거하기 위해서는 환봉의 회전 속도를 되먹임 받아 제어기에서 보상해야 하며 따라서 접촉 없이 회전 속도를 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 이는 후술하는 바와 같이 제안된 동전기 휠을 액추에이터가 아닌 트랜스듀서로 이용하여 해결할 수 있다.

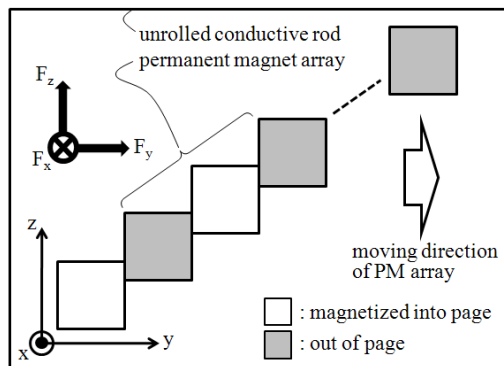


그림 3. 나선형 동전기 휠의 선형 등가 모델과 생성된 자기력 방향.  
Fig. 3. A linear equivalent model of the spiral electrodynamic wheel and a direction of the generated magnetic forces.

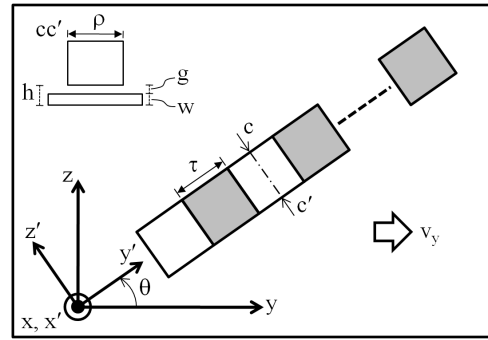


그림 4. 나선형 휠의 이론 해석을 위해 간략화한 모델.  
Fig. 4. Simplified model for theoretical analysis of the spiral wheel.

### III. 선형화된 나선형 동전기 휠의 이론적 모델링

이웃하는 PM간의 상대적 위치에 따라 동전기 휠은 상이한 자기력 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 본 장에서는 공극 자기장에 대한 분산 변수 해석 방법을 이용하여 선형화된 모델의 3축력을 이론적으로 유도하고 이를 이용하여 이송 시스템에 대한 설계 변수에의 영향을 논의한다.

그림 3에 나타낸 동전기 휠의 선형 모델은 이웃하는 PM간에 계단형 옴셋이 있으므로 이를 그림 4와 같이 그림 3의 각 PM의 중심을 연결한 선상에서 연속화된 모델로 변경하여 해석을 수행한다. 우선, 그림 4에서  $y'$  방향으로 이동하는 PM 어레이에 의해 정지해 있는 전도성 평판에 유도되는  $x'$  방향의 반발력과  $y'$  방향의 추력 밀도는 다음과 같다[10,11].

$$\hat{F}_{x'} = -\frac{\sigma U_s}{2} \text{Re}(B_{x'} \cdot B_{y'}^*) \quad (1)$$

$$\hat{F}_{y'} = \frac{\sigma U_s}{2} \text{Re}(B_{x'} \cdot B_x^*) \quad (2)$$

여기에서  $\sigma, U_s, *$  는 평판의 도전율과 PM 어레이의 선속도 그리고 공액 복소수를 나타낸다. 위 식에서 PM 어레이의 하단을 기준으로 공극  $x'$ 에서의 자기장은

$$B_{x'} = \frac{\beta(\alpha \cosh[(h-x')\alpha] + \beta \sinh[(h-x')\alpha])B_m}{\Delta} \quad (3)$$

$$B_{z'} = \frac{j\alpha(\beta \cosh[(h-x')\alpha] + \alpha \sinh[(h-x')\alpha])B_m}{\Delta} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있는데 여기에서  $\beta, B_m$ 은 파수(propagation constant) 그리고 PM 하단면의 중심에서의 자기장이다. 또한  $\alpha$  는  $\alpha^2 = \beta^2 + j\sigma\beta\mu_0 U_s$ 의 관계를 갖는 변수이며  $\Delta$  은

$$\Delta = e^{g\beta} \alpha \beta \cosh[w\alpha] + \sinh[w\alpha](\beta^2 \cosh[g\beta] + \alpha^2 \sinh[g\beta])$$

와 같다. 실제 평판에 유기된 기준 과장  $\tau$ 에 대한 자기력은 (1), (2)를  $x', y'$ 축으로 PM의 너비  $\rho$  그리고 평판의 두께  $w$ 까지 적분하여 얻을 수 있다.

$$F_{x'} = -\frac{\sigma U_s}{2} \tau \int_g^h \int_{-\rho/2}^{\rho/2} \text{Re}(B_{x'} \cdot B_{y'}^*) dz' dx' \quad (5)$$

$$F_{y'} = \frac{\sigma U_s}{2} \tau \int_g^h \int_{-\rho/2}^{\rho/2} \text{Re}(B_{x'} \cdot B_x^*) dz' dx' \quad (6)$$

자기력 (5), (6)은 PM 어레이가  $y'$ 축으로 이동할 때 생성되

는 힘이다. 그러나 그림 4에서와 같이 PM 어레이는 y축 방향으로  $v_y$ 의 속도로 이동하기 때문에 y'축으로는  $v_y \cos\theta$ , z'축으로는  $-v_y \sin\theta$  속도 성분이 있다. 따라서 실제 자기력은 두 축 방향의 속도 성분을 모두 고려해야 한다.  $v_y$ 에 의한 반발력과 추력을  $F_M, F_P$ 라 하고  $v_z$ 에 의한 반발력과 추력을  $F_N, F_Q$ 라 할 때 x, y, z축 방향의 자기력은 좌표계 변환 관계를 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ F_Q \\ F_M + F_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식에서 휠의 길이 방향으로의 구동에 의한 자기력  $F_M, F_P$ 는 (5), (6)과 동일하고 수직 방향 구동에 의한 자기력  $F_N, F_Q$ 는 (5), (6)에서 단 과장의 선형 휠을 극 수만큼 고려하여 구한다. (7)을 이용하여 8극의 PM ( $30 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$ ) 어레이를 대상으로 어레이의 경사각을 변화시켜가며 구한 값과 그림 3의 선형 등가 동전기 휠을 상용용 툴인 Maxwell v11.1을 이용하여 시뮬레이션한 값을 비교하였다. 유한요소해석에 이용된 동전기 휠의 메쉬 예를 그림 5에 나타내었는데 그림에서 PM 어레이의 기계적인 운동은 가동 전 영역에 걸쳐 밴드를 설정하여 구현하였다. 결과 값 모두 5 mm 두께의 구리 평판을 대상으로 하였으며 PM과 평판 사이의 공극은 3 mm이다.

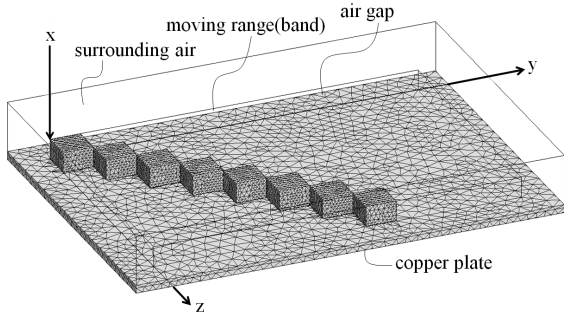


그림 5. 맥스웰 유한요소해석에 이용된 선형 휠의 메쉬 선도.  
Fig. 5. Mesh plot of linear equivalent wheel used in finite element analysis by Maxwell.

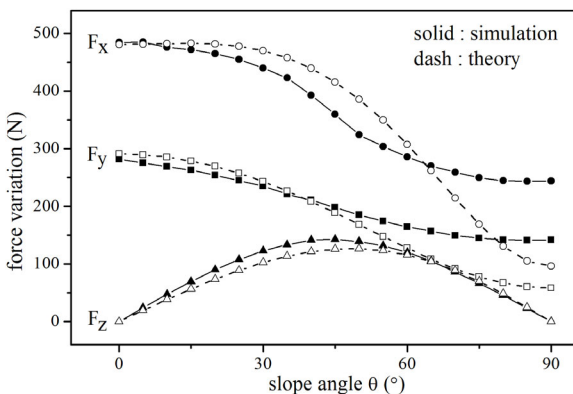


그림 6. 이론 해석과 그림 3의 선형 모델에 대한 시뮬레이션 결과와의 비교.

Fig. 6. Comparison between theoretical analysis (7) and simulation for the linear equivalent model of Fig. 3.

또한 PM 재질은 Nd35 계열로 설정하였으며 이웃 PM 간의 경사각은 y축을 기준으로 PM 중심간의 연결선 각도로 산정하였다. 그림 6의 비교결과를 통해 세 축의 자기력 모두 경사각이 작은 영역에서는 이론 해석과 시뮬레이션 결과가 거의 유사함을 알 수 있으나 경사각이 커짐에 따라 오차가 점점 커지고 휠이 완전히 수직 방향을 가리키는 90°에서는  $F_z$ 를 제외하고는 오차가 50%에 근접하는 것을 알 수 있다. 이는 선형 휠을 수직 방향으로 이동시킬 때 단일 극에 의한 입출구 효과(entry & exit effect)를 (7)에서는 전혀 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 실제 고려되는 휠에서는 축력  $F_z$ 가 일정 수준 이상 필요하므로 경사각은 45°를 넘지 않는다. 따라서 이 범위 내에서는 이론식 (7)로 계단형인 실제 휠을 모사하는 것이 가능하다.

그림 6에 나타낸 결과는 제안된 동전기 휠의 나선 피치 설계를 위한 단초를 제공한다. 그림에서 축력  $F_z$ 는 대략 40~50에서 최댓값을 갖지만 접선력  $F_y$ 는 경사각과 함께 계속 감소한다. 접선력의 경우 환봉의 불필요한 회전만을 야기시키므로 가능한 한 작은 것이 바람직하지만 반발력  $F_x$ 도 경사각 증가에 따라 감소하기 때문에 환봉의 무게를 고려해서 결정해야 한다. 그러나 휠의 회전 속도를 증가시키면 반발력을 증가시킬 수 있으므로 접선력과 축력만을 기준으로 판단하면 45° 근처가 가장 이상적이다. 하지만 과도한 경사각은 후술하는 바와 같이 휠 회전 모터의 부하를 가중시킨다. 그림에서 경사각이 0°일 때가 피치가 없는 일반적인 동전기 휠의 경우이다.

앞서 해석 그래프는 이동 자기장 속도 즉, 동전기 휠의 회전 속도가 3000 RPM일 때의 결과이다. 휠의 회전 속도는 동전기 휠의 동작 조건을 결정짓는 거의 유일한 변수이며 따라서 환봉의 목표 이송 동특성에 맞게 조절한다. 그림 6의 해석 모델을 대상으로 휠의 회전 속도에 따라 자기력을 계산하면 그림 7과 같다. 그래프는 휠의 경사각을 변화시켜가며 얻은 결과인데 그림 6에서와 같이 경사각이 증가함에 따라 반발력  $F_x$ 와 접선력  $F_y$ 는 감소하지만 축력  $F_z$ 는 증가함을 확인할 수 있다. 속도가 증가함에 따라 3축력 모두 경사각에 상관없이 일정한 비율로 증가하는 것을 알 수 있는데 추력에 해당하는  $F_y$ 와  $F_z$ 는 선형유도모터에서와 같이 부상력  $F_x$ 보다 빨리 수렴해 간다. 특히 6000 RPM 이상에서는  $F_y, F_z$ 는 최댓값을 지나 오히려 감소한다.

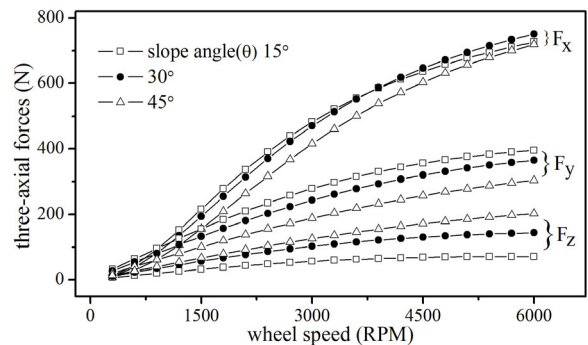


그림 7. 동전기 휠의 회전 속도에 따른 3축 자기력 변화.

Fig. 7. Force variation according to traveling speed of magnetic field.

IV. 환봉의 나선 운동 제어

전도성 환봉의 비접촉 이송만이 주된 관심사라면 환봉의 무게를 보상할 수 있을 정도로만 동전기 휠을 회전시켜도 무방하다. 그러나 동전기 휠의 회전 속도는 이송에 관련된 자기력에 모두 관련되어있는 연성(coupling) 변수이므로 복수 개의 휠을 이용할 때에 정밀한 서보 성능은 필요하지 않더라도 환봉에 작용하는 다축력을 조절하는 방법이 필요하다. 본 장에서는 환봉의 나선 운동을 제어할 수 있는 방법을 논의한다.

1. 환봉의 이송 제어 방법론

환봉에 축력과 부상력을 발생시키기 위해서 환봉 주위에서 자기장은 계속 이동되어야 하지만 동전기 휠에서 유일하게 반복되는 운동은 PM 어레이의 환봉 원주 방향으로의 회전뿐이다. 그러나 전술한 바와 같이 동전기 휠을 구성하는 PM 어레이의 회전에 따른 강한 견인 토크로 인해 환봉은 슬립(slip) 주파수로 회전하는데 따라서 환봉의 회전은 불가피한 측면이 있다.

일반적으로 환봉 혹은 파이프는 원주 방향으로 물리적인 변화가 없기 때문에 축 방향 주위의 회전에 따라 가변되는 인자 도출이 대단히 어렵다. 또한 웹 공정을 통과한 환봉의 표면에 인위적으로 인코딩을 위한 식별 표시를 하는 것도 현실적이지 못하기 때문에 본 연구에서는 앞서 구동기로서의 동전기 휠을 트랜스듀서(transducer)로 이용하는 방법을 고안하였다. 즉, PM 어레이가 회전하여 환봉이 회전하는 것과 반대로 내륜 안쪽의 환봉이 회전하면 동일한 유도 원리에 의해 PM 어레이가 회전하고 이 때 PM 어레이의 회전 위치와 회전 속도는 바깥 원주 상에 놓인 홀 센서에 의해 측정한다. 이는 환봉의 회전을 간접 측정하는 개념인데 차동 트랜스포머의 원리가 액추에이터와 센서에 모두 이용되는 것이다. 그러나 홀 센서에 유기된 신호는 유도 작용을 통한 PM 어레이의 결과 값이므로 정확성은 차치하더라도 검출 감도와는 상관없이 슬립으로 인해 환봉의 실제 회전 속도 대비 지연(time delay)이 있을 수 있다.

기본적으로 환봉의 출력 변수는 두 개이지만 동전기 휠의 축력과 회전 토크가 휠의 회전 각속도를 매개 변수로 하여 서로 강하게 연성되어있다. 특히 동전기 휠의 제어 입력 변수는 PM 어레이의 회전 속도뿐이다. 따라서 환봉의 이송 속도 제어를 위한 그림 8의 가상 힘 다이어그램에서와 같이 좌우 동전기 휠로 축 방향 속도를 그리고 가운데 휠로 회전 속도를 제어한다. 그러므로 가운데 동전기 휠은 피치가 없는 일반적인 휠이다. 그림 8의 힘 다이어그램에 제시된 구동 조건에서 환봉의 지배 방정식은

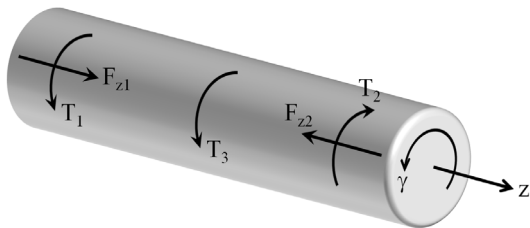


그림 8. 환봉의 회전, 이송 속도를 제어하기 위한 휠 배치.  
Fig. 8. Layout for controlling a rotational and translational speed of the rod.

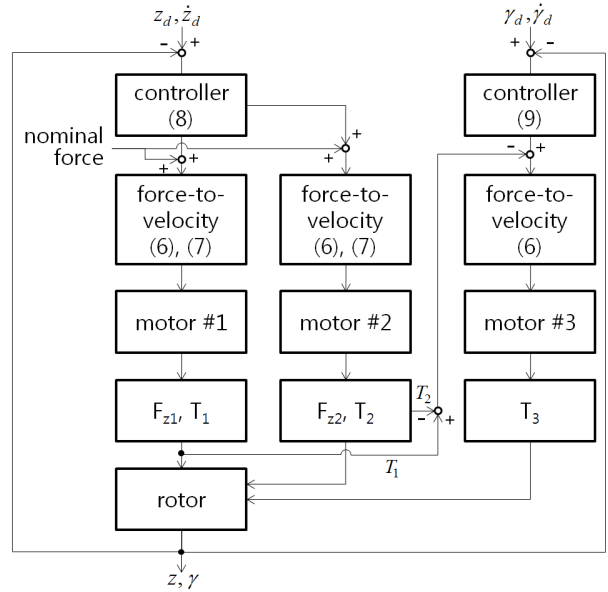


그림 9. 환봉의 회전, 이송 속도를 제어 위한 제어 흐름도.  
Fig. 9. Flowchart for controlling a rotational and translational speed of the rod.

$$m\ddot{z} = F_{z1} - F_{z2} = -k_{pz}(z_d - z) - k_{dz}(\dot{z}_d - \dot{z}) \quad (8)$$

$$I\ddot{\gamma} = T_1 - T_2 + T_3 = -k_{p\gamma}(\gamma_d - \gamma) - k_{d\gamma}(\dot{\gamma}_d - \dot{\gamma}) \quad (9)$$

로 표현할 수 있다. 여기에서 하첨자  $k_p, k_d$ 는 제어기의 비례, 미분이득을 나타낸다. 이송 제어 방법을 그림 9에 제시된 제어 흐름도를 이용해 설명하면 우선, 식 (8)에 의해 각 휠의 축력이 결정되면 식 (6), (7)을 통해 각 휠의 회전 속도가 결정되고 이에 따라 토크  $T_1, T_2$ 는 자동으로 결정된다. 두 휠의 토크 불균형에 의한 환봉의 각속도는 홀센서를 통해 측정되고 환봉의 목표 각속도  $\dot{\gamma}_d$ 가 0이므로 식 (9)를 통해 중간 동전기 휠의 가 결정된다. 이 값을 식 (6)에 대입하면 중간 휠의 입력 속도가 결정된다. 이와 같은 과정을 반복하여 환봉의 축 방향 속도와 회전 각속도를 제어할 수 있다.

2. 나선형 동전기 휠을 이용한 실험 검증

전술한 환봉의 회전 속도 제어 과정을 실험적으로 검증하기 위해 그림 10과 같은 시스템을 제작하였다. 환봉의 축 방향 속도는 외부 장치로부터 측정하는 것이 용이하지만 회전

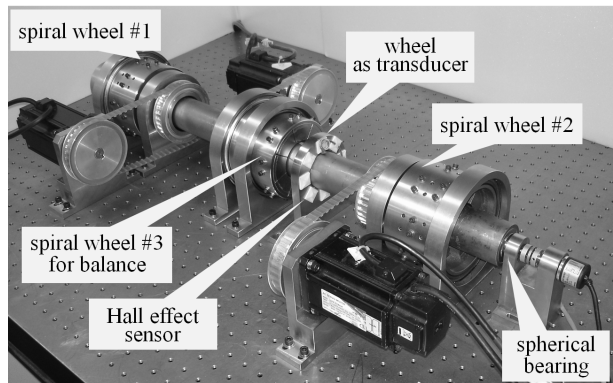


그림 10. 구리 환봉의 이송 시스템 사진.  
Fig. 10. Photograph of transferring system for conductive rod.



표 1. 동전기 휠을 이용한 구리 환봉의 이송 시스템 제원.

Table 1. Specifications of transferring system for copper rod using electrodynamic wheels.

Part	Item	Specification
Spiral electrodynamic wheel #1, #2	Inner radius, outer radius, and height of PM	30, 50, 30 mm
	Material of PM	NdFe35
	Number of poles	8
	Slope angle ( $\theta$ )	$27^\circ$
Spiral wheel #3	Slope angle ( $\theta$ )	$0^\circ$
Copper rod	Outer radius	26 mm
Wheel as transducer	PM	30, 40, 10 mm
	Number of poles	8

속도는 참조할 수 있는 방법이 없으므로 우측 단을 구면 베어링으로 지지하고 베어링 구의 중심축을 인코더와 연동시켜 비교하도록 하였다. 시스템을 구성하는 동전기 휠의 제원을 표 1에 제시하였다. 환봉의 길이 방향으로 양단에 두 개의 나선형 동전기 휠이 있고 중앙에 회전 운동을 보상하기 위한 일반적인 동전기 휠이(경사각  $0^\circ$ ) 놓여있다. 또한 1번, 2번, 3번 휠 보다 작은 외경의 휠이 환봉의 회전 속도를 측정하기 위한 트랜스듀서로 이용된다. 시스템에 이용되는 휠의 PM 어레이는 모두 8극인데 영구자석형 동기 모터에서와 유사하게 극이 많을수록 힘의 연속성에서 우수하지만 너무 많은 극 수는 착자(magnetization)에 어려움이 있다. 1번, 2번 나선형 휠의 경사각은  $27^\circ$ 로 설정되었는데 경사각이 클수록 PM 어레이의 축방향 길이가 증가하고 이는 PM 어레이를 지지하는 유닛의 크기를 증가시킨다. 따라서 PM 어레이 회전용 모터의 부하를 가중시키므로 본 실험에서는 발생하는 축력이 다소 감소되지만 경사각을  $27^\circ$ 로 하였다.

이송 시스템에서 환봉의 축 방향 구동은 제약되므로 그림 10의 실험 장치에서 제어 대상 변수는 환봉의 회전 속도뿐이다. 특히 공극 관련 변수는 자체 안정성을 갖기 때문에 고려하지 않았다. 우측 단의 기계적인 구속으로 인해 축 방향으로의 오차가 없으므로 식 (9)만을 고려하여 환봉의 회전 운동에 초점을 두어 시험을 수행하였다. 시험 조건으로 그림 8의 좌표계를 기준으로 2번 휠을 1100 RPM으로 회전시키고 동시에 1번 휠을 1150 RPM과 1300 RPM으로 회전시켰다. 이때 구리 환봉에 유기된 회전 운동을 간략한 비례-적분제어기로 보상하여 그 결과를 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 특히 제어기 내에서 환봉의 회전 속도는 전술한 바와 같이 또 하나의 동전기 휠을 이용하여 계측하는데 이를 통해 측정된 속도와 실제 환봉에 연동된 인코더에 의한 결과를 그래프 상단에서 각각 비교하였다. 예상한대로 휠의 회전을 기초로 홀센서를 통해 측정된 값은 실제 값 대비 시간 지연과 상대적으로 작은 출력 감도 특성이 양쪽 그래프에서 공통적으로 나타남을 알 수 있다. 이는 환봉과 측정용 휠 사이의 슬립 때문이며 이러한 슬립은 정적 구동보다 동적 구동에서 훨씬 심각하게 나타날 수 있다. 특히 (9)에서와 같이 이중 적분기 구조의 기계적 전달 함수와는 구리 환봉 표면에 실제 전류가 흐르는 영역(skin depth)이 상대적으로 협소하여 일반 코일 구조보다 시상수가 크고 이로 인해 가감속 전환이 되는 구간에 서는 위상 지연이 두드러진다. 그러나 경로 제어가 아닌 환

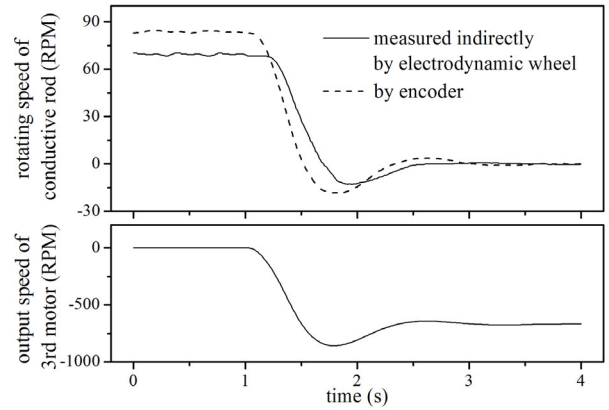


그림 11. 속도 센서로 동전기 휠을 이용한 구리 환봉의 회전 보상 시험 (1번 휠 1150 RPM, 2번 휠 1100 RPM).

Fig. 11. Compensation test of rotation of conductive rod using electrodynamic wheel as a feedback sensor measuring rotating speed.

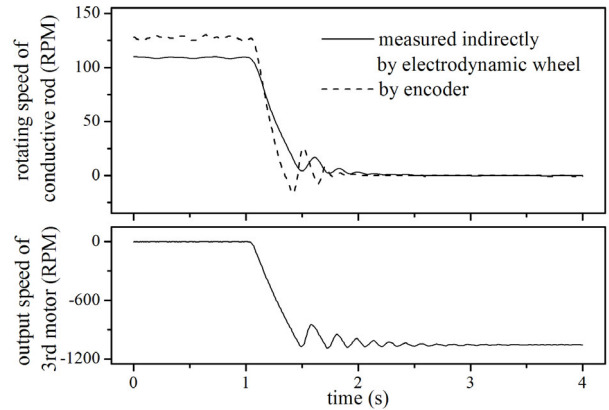


그림 12. 구리 환봉의 부상 시험 (1번 휠 1300 RPM, 2번 휠 1100 RPM).

Fig. 12. Stationary levitation test of conductive rod.

봉의 속도 보상에 한정된 시험에서는 이러한 동특성 제한이 큰 문제가 되지는 않는 것으로 판단된다. 그림 11과 그림 12에서 1번, 2번 휠과의 동적 평형을 통해 속도 오차를 보상하는 세 번째 휠 모터는 트랜스듀서 휠에 의해 측정된 신호를 되먹임 받지만 오히려 측정용 휠이 휠 모터 출력 속도보다 지연된 신호 특성을 보이는데 이 또한 휠 센서의 느린 동특성에 기인한다. 모터 출력 속도는 대략적으로 그림 11의 경우 670 RPM 근방에서 그리고 그림 12의 경우 1050 RPM 근방에서 정상상태를 이루는데 이 값은 시간이 증가함에 따라 미미하지만 조금씩 줄어드는 경향을 보인다. 이는 와전류에 따른 환봉 표면의 온도 상승으로 인한 저항값 상승으로 불평형 회전력 값이 저하되기 때문이다. 아무튼 그림 10에 제시된 자기 조합으로 동전기 휠 회전에 따른 환봉의 나선 운동에서 환봉의 회전 운동을 제거하는 것이 가능함을 알 수 있다. 실제 자기력을 이용하여 환봉을 공간상에 안정적으로 부상시키기 위해서는 전기동역학적 원리상 환봉을 둘러싼 동전기 휠은 끊임없이 회전해야한다. 따라서 동전기 휠내로 환봉이 인입하기 이전부터 휠은 가만 하중에 맞춰 일정 속도로 회전해야만 환봉과 휠 내륜간의 기계적인 접촉을 미연에 방

지할 수 있다. 본 실험에서 최종 기동시 환봉은 유연 패드 위에 놓여 일시적으로 기계적인 접촉을 한 후 안정 상태로 수렴해간다.

**V. 결론**

자성 계열이 아닌 전도성 환봉을 접촉 없이 지지하기 위해 PM 어레이의 고속 회전을 이용한 동전기력 장치를 제안하였다. 자성 축의 비접촉 지지에 널리 이용되고 있는 자기 베어링의 경우 축의 반경 방향 위치에 따라 전자석의 입력 전류를 조절하여 각 전자석과 축 간의 사이 거리를 제어하는 반면에 제안된 방법의 경우 환봉을 둘러싼 PM 어레이의 회전 속도에 비례하여 환봉을 지지하는 힘이 가변되고 환봉의 중심 위치는 회전 속도 증가에 따라 PM 어레이의 중심에 근접해 간다. 또한 반경 방향 힘에 수반되는 회전 토크를 제어하기 위해서는 서로 역으로 회전하는 두 개의 휠이 필요하고 슬립 회전하는 환봉의 각속도도 접촉 없이 측정되어야 한다. 이는 단동의 동전기 휠로 3축력을 발생시키는 구조이기 때문이며 이러한 휠이 쌍으로 조합되어야만 환봉의 설계된 운동 구현이 가능하다. 특히, 동전기 휠의 내륜 대신 환봉 외곽의 원주 상에 대칭으로 휠이 놓여야만 환봉 중심 위치의 정밀한 제어가 가능하겠지만 단순히 환봉의 반송에만 국한시키면 단순한 구조와 자기 안정성 측면에서 적절한 방법인 것으로 판단된다.

본 논문에서는 동전기 휠을 이용하여 환봉을 이송시킬 수 있는 방법을 제안하고 이에 수반되는 환봉의 나선형 운동과 이를 제어할 수 있는 방법을 논의하였다. 특히 구리 환봉의 불연속적인 각속도를 동전기 휠로 간접 측정하는 방법은 약간의 시간 지연에도 불구하고 효과적으로 이용될 수 있음을 보였다.

**참고문헌**

[1] T. Ohji, T. Shinkai, K. Amei, and M. Sakui, "Application of Lorentz force to a magnetic levitation system for a non-magnetic thin plate," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, pp. 40-43, 2007.

[2] K. C. Lee, J. W. Moon, D. H. Koo, and M. C. Lee, "Magnetic levitated electric monorail system for flat panel display glass delivery applications," *Journal of Institute of Control, Robotics*

*and Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 566-572, Jun. 2011.

[3] K. S. Jung, K. B. Shim, and S. H. Lee, "Contact-less conveyance of conductive plate by controlling permalloy sheet for magnetic shield of air-gap magnetic field from magnet wheels," *Journal of Korea Society of Precision Engineering (in Korean)*, vol. 27, no. 7, pp. 109-116, Jul. 2010.

[4] D. F. Spicer, J. N. Sackett, and C. T. Black, "Precision X-Y positioning systems using linear induction motors," *IEEE Colloquium on Limited Motion Electrical Actuation System*, pp. 6/1-3, 1998.

[5] N. Fujii, K. Ogawa, and T. Matsumoto, "Revolving magnet wheels with permanent magnets," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 116, no. 1, pp. 106-118, 1996.

[6] J. Bird and T. A. Lipo, "Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 43, no. 8, pp. 3395-3405, 2007.

[7] J. H. Park and Y. S. Baek, "Parametric design of the levitation mechanism for maglev planar transportation vehicle," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 40, no. 4, pp. 3069-3072, 2004.

[8] K. S. Jung, "Contact-less conveyance of conductive rod using a screw motion of permanent magnet array," *Korea Patent 10-1003219*, 2010.

[9] K. S. Jung and K. M. Won, "Methods for noncontact conveyance of conductive rod," *Proc. of ICROS Annual Conference*, pp. 596-597, May 2010.

[10] S. A. Nasar and I. Boldea, *Linear Motion Electric Machines*, John Wiley & Sons, USA, 1976.

[11] K. S. Jung, J. K. Park, and H. J. Kim, "Improvement of dynamic characteristic of large-areal planar stage using induction principle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 7, pp. 675-682, Jul. 2009.



**정 광 석**

1995년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1997년, 2001년 연세대학교 기계공학과(공학석사/공학박사). 1997년 LG산전. 2001년~2002년 LG생산기술원. 2003년~현재 충주대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 초정밀 계측 및 제어, 서피스

모터 및 엔코더, 광메카트로닉스, FPD/태양광 제조장비 등.