

자기변형모터의 임의의 축에 대한 회전의 실험적 검증

An Experimental Verification of Rotation about an Arbitrary Axis of Magnetostrictive Motor

이하균¹, 박영우^{2,#}, 노명규²
Ha Gyun Lee¹, Young Woo Park^{2,#}, and Myounggyu Noh²

¹ 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Graduate School, Chungnam National University)
² 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)
Corresponding Author / E-mail: ywpark@cnu.ac.kr, TEL: +82-42-821-6874
ORCID :0000-0002-6460-0473

KEYWORDS: Magnetostrictive motor (자기변형모터), Magnetic intensity ratio (자기 강도 비율), Twist angle (비틀림각), Tilt angle (경사도), Arbitrary axis (임의의 축)

This paper presents an experimental observation of the rotation of a magnetostrictive motor about an arbitrary axis using a Terfenol-D rod and a helical magnetic field. Magnetostrictive motors consist of a solenoidal coil that generates a longitudinal magnetic field, a toroidal coil that generates a circumferential magnetic field, a Terfenol-D rod, a stator, a rotor, and so on. Two experiments were conducted in order to confirm the motors rotation about an arbitrary axis. The first measures the twist angle of the Terfenol-D rod and the second measures the tilt angle of the rotor with respect to the z-axis. The twist angle can be determined by the strain value of the strain gauge attached to the Terfenol-D rod. The tilt angle was obtained using a new trajectory tracking method with five cameras. When the ratio between the circumferential magnetic field and the longitudinal magnetic field changes, the twist and tilt angles also change.

Manuscript received: May 22, 2017 / Revised: June 21, 2018 / Accepted: June 23, 2018

NOMENCLATURE

H_R = Helical magnetic field
 λ_L = Magnetostriction along the longitudinal magnetic field
 λ_C = Magnetostriction along the circumferential magnetic field
 r = Radius of Terfenol-D rod
 H_L = Longitudinal magnetic field
 H_C = Circumferential magnetic field

1. 서론

자기변형(Magnetostriction)은 자성체의 자화와 관련된 현상으로 강자성체 주변에 자기장이 인가되었을 때 인가된 자기장의 방향으로 자성체의 크기가 변화하는 현상을 말한다. 이러한 현상을

일으키는 재료를 자기변형재료라고 하며 대표적으로 터페놀-디(Terfenol-D), 갈페놀(Galfenol)이 있다. 현재 자기변형재료는 줄 효과(Joule Effect), 빌라리 효과(Villari Effect)를 이용한 하나의 자기장 혹은 위드만 효과(Wiedemann Effect), 매튜시 효과(Matteuci Effect)와 같은 이차원 자기장을 이용하여 각종 구동기나 센서에 쓰이고 있다.^{1,2}

자기변형 현상을 이용한 자기변형모터는 1991년부터 연구를 진행하고 있다. 초창기에 개발된 자기변형모터는 두 개 이상의 자기변형재료를 사용하여 인가된 자기장에 따라 길이가 변하는 줄 효과를 발생시켰다. 미국 NASA에서는 2조의 선형 자기변형 구동기를 이용한 최초의 자기변형모터를 개발하였다.³ 1조는 디스크의 클램핑을 On/Off 시키는 역할, 나머지 1조는 길이 방향의 변위를 발생시켜 회전력을 발생시키며 토크는 12.2 N·m, 회전속도는 0.5 rpm을 보여주었다.

국내에서는 인하대학교에서 4개의 구동기를 회전체 주위에 설치하여 마찰력과 관성력에 의하여 스테핑 작용을 일으키는 자기

변형모터를 개발하였다.⁴ 정밀 스테핑에 초점을 맞춘 연구로 높은 스테핑 정밀도를 가지고 있으나 회전속도는 0.07 rpm 으로 극히 떨어진 단점을 가지고 있다.

갈페놀 4개를 이용하여 2자유도 운동을 구현하는 초소형 구형 (Spherical) 모터는 자기 바이어스(Magnetic Bias)를 걸어주기 위한 영구자석이 갈페놀의 길이를 변화시키며, 갈페놀 로드(Galfenol Rod)에 감겨있는 코일에 위상차 180°의 전류를 인가하여 한쪽은 늘어나고 반대편은 줄어들게 된다. 이에 따라 갈페놀 로드는 스틸 볼을 스틱-슬립(Stick-Slip)원리에 의해 회전시킨다.⁵ 소형화라는 장점을 가지고 있으며 회전속도는 6 rpm을 보여주었다.

지금까지 개발된 자기변형모터는 2개 이상의 자기변형재료와 구동기를 사용해 왔다. 이러한 구동방식은 시스템 크기의 증가, 제어의 어려움, 높은 전류의 인가 필요성, 구동기와 회전자(Rotor) 간의 마찰에 의한 마모 및 소음 등 자기변형모터의 원가를 상승시키고 상용화에 어려움을 가지고 있었다. 또한, 다자유도 회전 방향에 대한 연구가 전무하였다.

이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 이차원 자기장을 이용하여 하나의 자기변형재료를 가진 자기변형모터를 개발하여 임의의 축에 대한 회전 운동을 실험적으로 검증하였다. 알루미늄 고정자 상단에 위치한 밀리미터 크기의 구형 금속 회전자와 축방향 자기장을 생성하는 솔레노이드 코일, 원주방향 자기장을 생성하는 토로이드 코일과 이 두 코일에 둘러싸인 고정된 터페놀-디, 자기 회로, 하우징으로 구성되어 있다. 인가되는 두 자기장의 비율(H_C/H_L)의 변화를 통해 터페놀-디의 비틀림각과 회전자의 경사각을 관찰하였으며 이를 통해 다자유도 운동의 가능성을 검증하였다.

2. 프로토타입

이차원 자기장을 인가하는 방법에는 자기변형재료에 직접적으로 전류를 인가하는 방식과 토로이드 코일을 사용하는 방식이 있다. 자기변형재료에 직접적으로 전류를 인가하는 방식은 솔레노이드 코일을 이용하여 축방향 자기장을 생성하고 원기둥 형태의 자기변형재료인 터페놀-디에 직접 전류를 인가하여 원주방향 자기장을 생성, 결과적으로 이차원 자기장을 생성하는 시스템을 가지고 있다.⁶ 회전 속도는 최대 16 rpm인 것을 확인하였으나 터페놀-디에 높은 전류를 인가할 수 없어 결과적으로 원주방향 자기장 생성 범위가 작을 수 밖에 없었다. 따라서 원주방향 자기장을 생성하는 방법의 변화를 모색하게 되었고 토로이드 코일을 이용한 새로운 자기변형모터를 고안하게 되었다.

솔레노이드 코일을 이용하여 축방향 자기장을 생성하는 것은 앞선 자기변형모터와 동일하나 토로이드 코일을 이용하여 원주방향 자기장을 생성하여 이차원 자기장을 이용한 자기변형모터를 개발한 사례가 있다.⁷ 자기변형모터를 제작하기 전에 이론적 검증을 위해 3차원 시뮬레이션을 이용하여 터페놀-디로부터 이차원 자기장이 생성되는 것을 확인하고 회전 방향을 예측하였다.

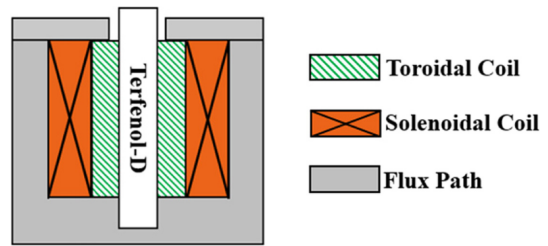


Fig. 1 Prototype of magnetostrictive motor

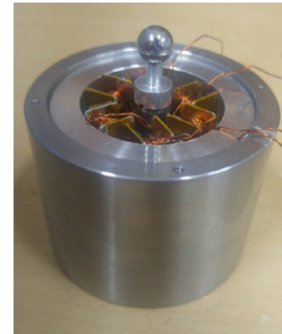


Fig. 2 Stator and rotor

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 한쪽 끝이 고정된 터페놀-디 로드를 중심으로 솔레노이드 코일과 토로이드 코일을 배치하여 이차원 자기장이 터페놀-디 로드에서 인가되도록 하였다. 솔레노이드 코일은 500 턴, 토로이드 코일은 400 턴 감겨 있으며, 토로이드 코일은 6개의 솔레노이드를 합쳐놓은 형태로 구성하였다. 터페놀-디 로드는 스프링과 나사를 이용하여 클램핑하고 지름 10 mm, 높이 50 mm이다.

또한, Fig. 2와 같이 회전 방향을 파악하기 위해 터페놀-디 로드 위에 고정자(Stator)와 구형의 회전자를 위치하였다.

3. 실험 절차

다자유도 회전 운동의 검증을 위해 두 가지 실험을 진행하였다. 첫번째로 터페놀-디 로드의 비틀림각을 측정하였고 두번째로 z 축에 대한 회전자의 경사각을 측정하였다. 각각 실험에서는 솔레노이드 코일과 토로이드 코일에 전류를 인가해주기 위해 DAQ 보드(DAQ Board)로부터 Fig. 3과 같이 톱니파 파형의 전압을 전류 앰프(Current AMP)로 인가하여 두 가지의 전류를 만들어낸다.

자기변형재료는 아주 미세한 회전 운동이 일어났다가 다시 원래의 모양으로 되돌아오는 성질을 가진다. 즉, 재료가 직접적으로 회전하는 것이 아니기 때문에 미세한 비틀림 변위를 측정시킬 필요가 있다. 따라서 Fig. 3과 같이 톱니파 형태의 전압을 인가하여 회전자와 고정자 사이의 마찰력과 관성력, 즉 스틱-슬립 원리를 이용한다. 인가 전압 주파수는 400 Hz로 고정하였고, 원주방향 자기장은 고정된 상태에서 축방향 자기장을 변화시켜가며 H_C/H_L 값을 변화시켰다.

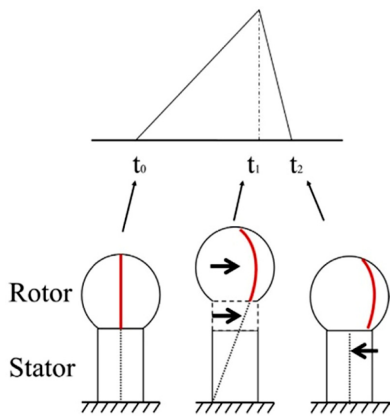


Fig. 3 Stick-slip principle

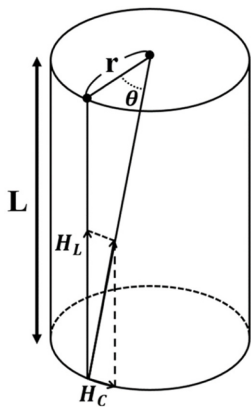


Fig. 4 Twist angle

3.1 비틀림각 측정 실험 절차

비틀림각은 Fig. 4와 같이 원기둥 모양의 강자성체에서 축방향 자기장(H_L)과 원주방향 자기장(H_R) 사이에 생기는 각을 말하며, 터페놀-디 로드 의 반지름, 두 방향의 자기장 값, 스트레인 값들을 포함한 식(1)을 통해서 계산이 가능하다.^{8,9} 식(1)을 통해서 이차원 자기장 중 어느 하나 자기장이 발생하지 않으면 위드만 효과는 발생하지 않는다.

$$\theta = \frac{2}{r} (\lambda_L(H_R) - \lambda_C(H_R)) \left(\frac{H_L H_C}{H_R^2} \right) \quad (1)$$

비틀림각을 측정하기 위해서는 자기장에 의해 변화하는 터페놀-디 로드의 스트레인 값이 필요하다. Fig. 5(a)는 비틀림각 측정 실험 장치 모식도이다. PC와 연결된 DAQ 보드에서 톱니파 형태의 전압이 발생하고 전류 앰프로 들어가 전류로 바뀌게 된다. 바뀐 전류는 각각 솔레노이드 코일과 토로이드 코일에 인가된다. 터페놀-디 로드 표면에는 4축 스트레인 게이지를 부착하였는데 1번은 축방향, 2번과 3번은 대각선방향, 4번은 원주방향으로 스트레인 측정이 가능하다. 각 게이지의 두 개의 구리선은 스트레인 게이지 앰프(Strain Gauge AMP)에 연결이 되어 데이터는 PC를 통해 실시간으로 확인 가능하다. Fig. 5(b)는 비틀림각 측정 실험 실

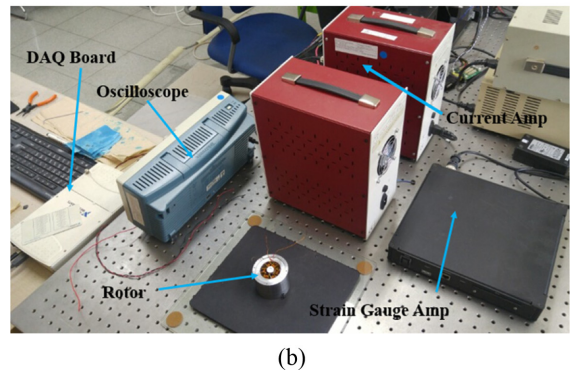
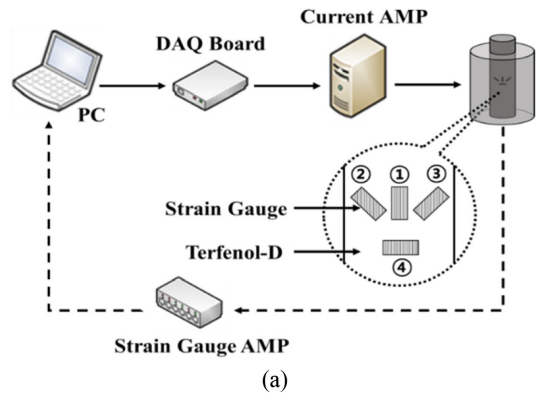


Fig. 5 (a) Schematic diagram of twist angle experiment, (b) Photo of twist angle experiment

실험 사진을 나타낸 것이다. 오실로스코프(Oscilloscope)에서는 DAQ 보드에서 나오는 전압값과 전류 앰프로 통해서 나오는 전류 값을 확인할 수 있다.

3.2 경사각 측정 실험 절차

회전자의 회전 방향에 대한 실험을 진행하기 위해 경사각을 이용하였다. 경사각은 회전자가 궤도를 따라 움직일 때 z 축과 이루는 각도를 말하며 식(2)와 같이 점 P₁(x₁, y₁, z₁), P₂(x₂, y₂, z₂), P₃(x₃, y₃, z₃)가 있다고 가정할 때, 벡터의 외적을 이용하여 구할 수 있다.

$$(\alpha, \beta, \gamma) = \overrightarrow{P_1 P_2} \times \overrightarrow{P_1 P_3} = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

여기서 S는 식(3)과 같이 구할 수 있고, 최종적으로 경사각은 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$s = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \quad (3)$$

$$\text{tilt angle} = \arccos \left(\frac{r}{s} \right) \quad (4)$$

벡터 외적 계산에 필요한 점 데이터를 얻기 위해 Fig. 6과 같이 구형의 스틸 볼에 점을 찍어 점이 움직이는 궤도를 관찰 가능하게 하였다.

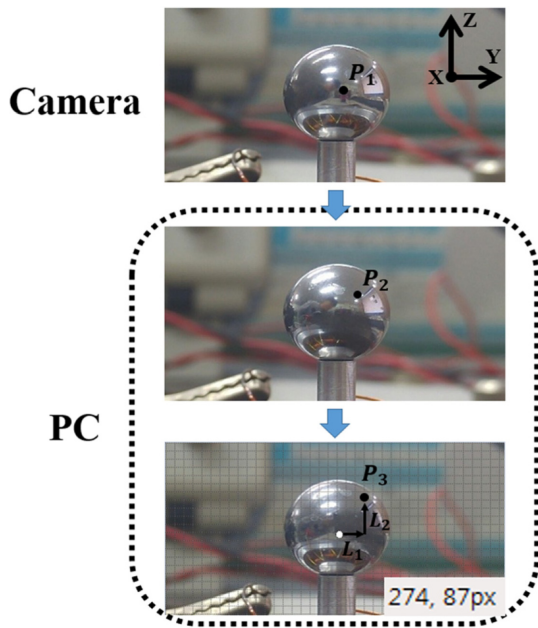


Fig. 6 Conversion from a captured image into the x, y, and z coordinates

공간 좌표 상에서 구형의 물체가 제자리에서 회전하는 모습을 관찰할 수 있는 장비가 조사 결과 현재 국내에 존재하지 않다. 따라서 카메라 5대를 이용한 새로운 트래킹(Tracking)방법을 고안하였다. 5대의 카메라는 공간 좌표 상에서 x, y, z축 상에 위치하며 회전자는 원점에 위치하게 된다. 회전자에 찍힌 점이 궤적에 따라 이동할 때, 동영상 촬영을 진행한다. 10개의 이미지가 5초동안 저장되며 찍힌 이미지는 USB 포트를 통해 PC로 전달, 픽셀 단위로 화면을 나누게 된다. 회전자의 반경에 해당하는 픽셀 수는 150개이므로, 하나의 픽셀은 0.037 mm × 0.037 mm의 크기를 가진다. 이를 통해 점이 얼마만큼 이동했는지 구할 수 있다. 카메라는 1300만 화소 CMOS 이미지 센서를 가지고 있으며, 최대 1080p Full HD급, 30 fps급 동영상 촬영이 가능하다. 카메라와 회전자 사이의 거리는 200 mm로 고정시켰다. 카메라 이외의 실험 장비는 비틀림각 측정 실험 때와 동일하다.

4. 결과 및 분석

4.1 비틀림각 측정 실험 결과 및 분석

Fig. 7은 H_c/H_L 에 따른 비틀림각의 변화를 나타내는 그래프이다. 원주방향 자기장을 고정시킨 상태에서 축방향 자기장을 증가시키면 비틀림각은 증가하여 H_c/H_L 가 1일 때, 최대 약 800 sec/m에 도달하고 이후로는 감소하는 경향이 있다. 이는 축방향 자기장의 변화가 비틀림각에 영향이 있다는 것을 의미하며, 두 자기장의 값이 같을 경우에 대각선 방향으로 더 길게 뻗어 비틀어진다 것을 의미한다. H_c/H_L 가 3.2일 때는 비틀림각은 196 sec/m이다.

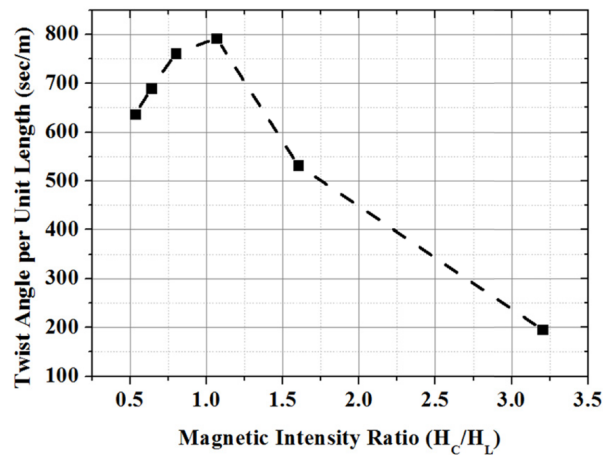


Fig. 7 Variation of twist angle per unit length according to the change of magnetic intensity ratio

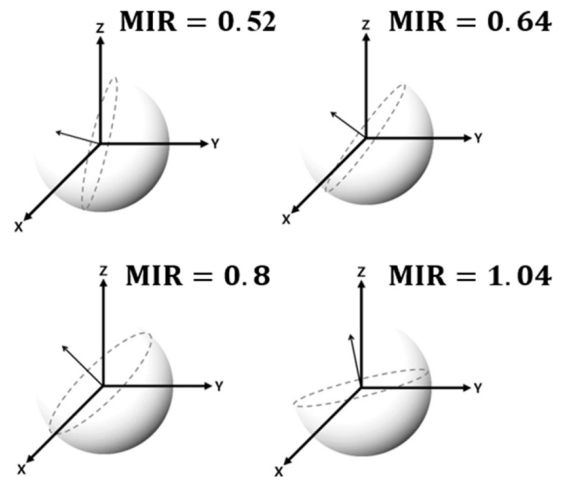


Fig. 8 Trajectories reconstructed from the captured images according to the change of the magnetic intensity ratios

4.2 경사각 측정 실험 결과 및 분석

Fig. 8은 H_c/H_L 에 따른 경사각의 변화를 나타낸 것이다. 각 자기장 비율마다 10개의 점을 획득하여 재구성된 궤적을 통해 경사각 변화를 알아보았다. 모든 임의의 축은 회전자의 중심을 통과하는 것으로 가정한다. 자기장 비율이 1.04일 때, 회전자는 xy평면과 약 14°를 이루면서 회전하였다. 축방향 자기장을 증가시켜 자기장 비율이 0.8일 때는 xy 평면과 약 32°, 자기장 비율이 0.52 일 때는 약 76°를 이루면서 회전하였다. 원주방향 자기장을 반대로 증가하게 되면 회전자는 반시계 방향에서 시계 방향으로 회전 방향이 바뀐다. 이를 통해 자기장 비율을 조정하여 회전자를 원하는 방향으로 돌리는 것이 가능하다는 것이 입증되었다.

5. 결론

본 연구에서는 자기변형모터의 다자유도 회전 운동 가능성을

검증하기 위해 회전 방향 검증 파라미터로 터페놀-디 로드의 비틀림각과 임의의 축에 대한 회전자의 경사각을 정하였고 이를 측정하는 실험을 수행하였다. 한 개의 터페놀-디 로드와 이차원 자기장을 이용, 비틀림 변위를 이끌어내어 터페놀-디 로드의 비틀림을 발생시키고 스틱-슬립 원리를 이용해 회전자의 회전을 이끌어낸다. 인가되는 두 자기장의 비율 값을 변화시켜가며 비틀림각과 경사각을 측정하였고 그 결과, 자기장 비율이 1일 때, 비틀림각이 최대 800 sec/m, 경사각은 수평 방향으로 약 14°를 이루면서 회전하였다. 비틀림각은 자기장 비율 1 기준으로 증가하였다가 감소하며, 경사각 측정 실험에서는 자기장 비율이 작아질수록 z축을 중심으로 회전하는 것을 관찰할 수 있었다. 향후에는 인가 전압 주파수를 변화시켜 회전 속도 관점에서 실험을 진행할 것이며, 회전 속도와 회전 방향을 종합적으로 검증 가능한 알고리즘을 개발할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A1A2057895).

REFERENCES

1. Shin, B.-H. and Park, Y.-W., "Proof-of-Concept of Magnetic Wheel-Based Magnetostrictive Energy Harvester," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 32, No. 5, pp. 483-490, 2015.
2. Oh, O. K. and Park, Y.-W., "Study on the Highly Viscous Fluid Ejection Pressure of Magnetostrictive Inkjet Head," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 369-375, 2015.
3. Vranish, J., Naik, D., Restorff, J., and Teter, J., "Magnetostrictive Direct Drive Rotary Motor Development," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5355-5357, 1991.
4. Kim, J. and Lee, H., "High Precision Stepping Motor Using Terfenol-D Actuators: Its Performance Test," Journal Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 220-226, 2000.
5. Ueno, T., Saito, C., Imaizumi, N., and Higuchi, T., "Miniature Spherical Motor Using Iron-Gallium Alloy (Galfenol)," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 154, No. 1, pp. 92-96, 2009.
6. Park, Y.-W., Lee, H.-G., and Noh, M. D., "Rotary Magnetostrictive Motor Using Helical Magnetic Field," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 17, No. 5, pp. 659-663, 2016.
7. Park, J., Oh, O., Park, Y., and Wereley, N., "A Novel Concept and Proof of Magnetostrictive Motor," IEEE Transactions on

Magnetics, Vol. 49, No. 7, pp. 3379-3382, 2013.

8. Yamamoto, M., "Theory of the Wiedemann Effect," Science Reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, Chemistry and Metallurgy, Vol. 10, No. pp. 219-239, 1958.
9. Smith, I. and Overshott, K., "The Wiedemann Effect: A Theoretical and Experimental Comparison," British Journal of Applied Physics, Vol. 16, No. 9, p. 1247, 1965.



Ha Gyun Lee

M.S. in the Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University. His research interest is Smart sensing and actuation.
E-mail: lhg1817@hanmail.net



Young Woo Park

Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University. His research interest is Smart sensing and actuation.
E-mail: ywpark@cnu.ac.kr



Myounggyu Noh

Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University. His research interest is Magnetic bearings and control systems.
E-mail: mnoh@cnu.ac.kr