

# 영구자석 바이어스 자기부상 구동기 설계 및 해석

## Design and Analysis of a Permanent Magnet Biased Magnetic Levitation Actuator

나 언 주<sup>†</sup>  
Uhn Joo Na

(Received November 4, 2016 ; Revised November 29, 2016 ; Accepted November 29, 2016)

**Key Words :** Maglev(자기부상 시스템), Active Vibration Control(능동 진동제어), Magnetic Levitation(자기부상)

### ABSTRACT

A new hybrid permanent magnet biased magnetic levitation actuator (maglev) is developed. This new maglev actuator is composed of two C-core electromagnetic cores separated with two permanent magnets. Compared to the conventional hybrid maglev actuators, the new actuator has unique flux paths such that bias flux paths are separated with control flux paths. The control flux paths have minimum reluctances only developed by air gaps, so the currents to produce control fluxes can be minimized. The gravity load can be compensated with the permanent magnet bias fluxes developed at off-centered air gap positions while external disturbances are controlled with control fluxes by currents. The consumed power to operate this levitation system can be minimized. 1-D magnetic circuit model is developed for this model such that the flux densities and magnetic forces are extensively analyzed. 3-D finite element model is also developed to analyze the performances of the maglev actuator.

### 기 호 설 명

- $a_0$  : 전자석 코어의 표면면적
- $D$  : 공극의 에너지 행렬
- $g_j$  :  $j$ 번째 공극
- $h_c I_{pm}$  : 영구자석의 기자력
- $i_c$  : 제어전류
- $n$  : 코일 권선수
- $R_j$  :  $j$ 번째 공극의 릴럭턴스
- $\mu_0$  : 공기 투자율
- $\zeta$  : 가장자리 자속인자
- $\phi_b$  : 영구자석 바이어스 자속

- $\phi_c$  : 전자석 제어자속
- $\phi_j$  :  $j$ 번째 공극의 자속

### 1. 서 론

자기부상추진시스템(maglev)은 자기력을 제어하여 일정 공극에 부상시키고 선형전동기를 이용하여 추진시키는 시스템으로 자기부상열차나 반도체공정의 자기부상 운송시스템 등에 응용된다. 자기부상시스템은 부상방식에 따라 상전도 흡인식(EMS, electromagnetic suspension)과 초전도 반발식(EDS, electrodynamic suspension)으로 나뉜다. 전자석을 이용한 상전도 흡인식 부상방식은 부상력을 유지하기 위

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, School of Mechanical Engineering, Kyungnam University  
E-mail : uhnjoona@kyungnam.ac.kr

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

해 바이어스 DC전류와 제어전류를 사용하므로 많은 전력이 소비된다. 전력소비를 줄이고자 전자석과 영구자석을 함께 사용하는 하이브리드 자기부상시스템 (HEMS, hybrid electromagnetic suspension)에 대한 많은 연구가 이루어 졌다<sup>(1-8)</sup>.

하지만 이 방식은 자기경로에 영구자석이 위치하고 있어 투자율이 공기와 동일한 영구자석이 자기경로에 틸력턴스를 증가시켜 제어자속을 형성하는데 많은 전류를 필요로 한다<sup>(2)</sup>. 현재까지 전통적인 하이브리드 자기부상 시스템의 해석, 설계 및 제어 기법이 많이 개발되어 자기부상 열차에 적용되고 있다<sup>(6-9)</sup>.

이 논문에서는 기존에 제시된 영구자석 바이어스 자기부상구동기<sup>(1-5)</sup>와 달리, 전자석 C-코어와 영구자석을 결합한 새로운 형태의 자기부상 구동기를 제시한다. 이 방식은 영구자석 바이어스 자속의 자기경로와 전자석의 자기경로를 분리한 모델로 제어자속 경로에 공극의 자기저항만 위치하기 때문에 제어자속을 형성하는데 필요한 전류를 크게 줄일 수 있고 진동을 최소화할 경우에 제로 전력 소모에 가깝게 구동 전력을 줄일 수 있다. 본문에서는 C-코어 전자석을 이용한 영구자석 바이어스 자기부상 구동기의 구조, 원리, 해석방법이 설명되고, 1D 자기회로 모델과 3D 유한요소 해석을 통하여 자기부상 구동기를 설계하고 성능을 검증한다.

2. 자기부상 구동기 모델

C-코어 전자석을 이용한 영구자석 바이어스 자기부상 시스템은 Fig. 2와 같이 2개의 C자형 코어를 이루고 있는 전자석 코어와 2개의 코어 사이에 위치하는 영구자석으로 구성된 구동기와 가이드 레일로 구성된다. 전통적인 하이브리드 Maglev 시스템은 가이드 레일의 하부에서만 하중의 반대방향으로 흡인력이 작용하지만 Fig. 2에서 제시된 모델은 C-코어 전자석이 가이드 레일의 상하부에 공극을 갖는 구조로 자속의 방향에 따라 양방향 모두 흡인력을 발생시킨다.

Fig. 3과 같이 C-코어의 상하부에 위치한 2개의 영구자석은 공극에 바이어스 자속을 공급하고 한쪽 C-코어 전자석에 코일을 시계방향으로, 다른쪽 C-코어 전자석에 코일을 시계 반대방향으로 감고 전류를 인가하면 가이드 레일(guide rail)과 C코어 전자석의

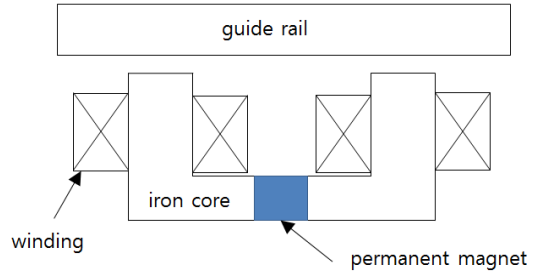


Fig. 1 U-shaped hybrid magnetic actuators

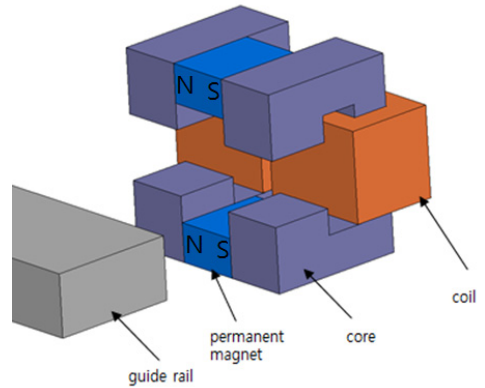


Fig. 2 C-core magnetic actuator model

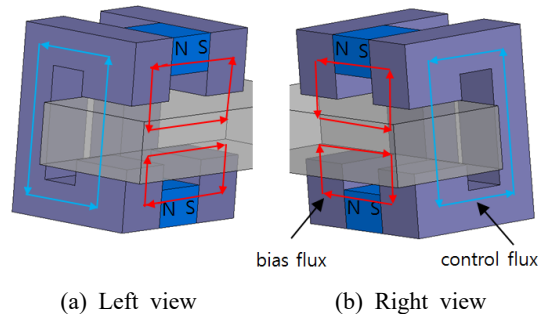


Fig. 3 Flux flow schematic of the magnetic actuator

로 이어지는 자기 경로로 제어자속을 공급한다. 전류의 방향에 따라 가이드 레일의 위쪽 공극에서는 제어자속과 바이어스 자속이 빠지고 아래쪽 공극에서는 제어자속과 바이어스 자속이 합쳐지는 형태로 자기력을 발생시킨다. Fig. 3과 같이 바이어스 자속과 제어 자속의 경로는 분리되고 기존의 하이브리드 자기부상 시스템과 달리 제시된 구동기 모델은 제어자속의 경로에 영구자석이 없으므로 틸력턴스를 최

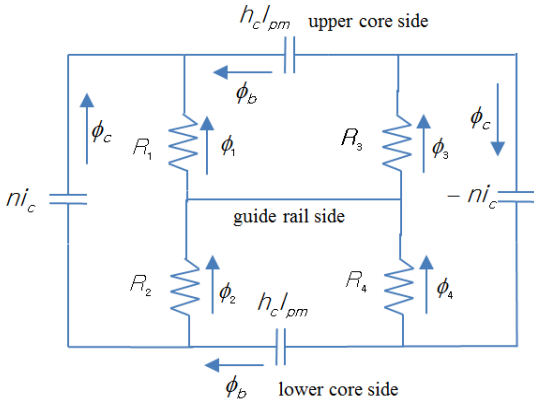


Fig. 4 Equivalent magnetic circuit

소화 할 수 있다.

와전류 효과와 경로 자기저항을 무시하면 맥스웰 방정식은 등가 자기회로로 단순화 된다. 자기부상 구동기의 자기회로는 Fig. 4에 표시된다. 자기부상 구동기의 공극에서의 톨력턴스는 다음과 같다.

$$R_j = \frac{g_j}{\mu_0 a_0} \tag{1}$$

자기회로에 암페어 법칙과 가우스 법칙을 적용하면 반경반향 자속과 전류와의 관계는 식 (2)와 같이 계산된다. 또는

$$R\Phi = N\tilde{i}_c + H \tag{3}$$

공극에 흐르는 자속밀도는 자기누설에 의해 감소 되고 자성체의 포화에 의해 제한된다. 자기부상 구동기의 공극 자속밀도 벡터는 다음과 같다.

$$B = \zeta A^{-1} R^{-1} (N\tilde{i}_c + H) \tag{4}$$

여기서,

$$A = \text{diag}([a_0, a_0, a_0, a_0])$$

자기부상 구동기의 자기력은 식 (5)와 같다.

$$F_y = B^T \frac{\partial D}{\partial y} B \tag{5}$$

여기서,

$$D = \text{diag}([g_j a_0 / (2\mu_0)])$$

### 3. 수치해석

#### 3.1 자기회로 모델

제시된 영구자석 바이어스 자기부상 구동기의 자속과 자기력은 1D 자기회로 모델을 통하여 시뮬레이션 되었다. 자기부상 시스템의 공극은 Fig. 5와 같이 레일 상부 공극과 레일 하부 공극으로 설정하고 공극의 변화에 따른 자속밀도와 자기력을 구하였다.

첫째로 레일의 상하부 공극을 동일하게 유지시킨 상태 즉  $g_1 = g_2 = 0.5 \text{ m}$ ,  $a_0 = 2500 \text{ mm}^2$ ,  $n = 200$ ,  $h_c/p_m = 596.2$ ,  $\zeta = 0.8$ 로 설정한 후 자속밀도와 자기력을 구하였다. 이 경우 자기부상 시스템의 하중과 진동을 보상하기 위해서는 DC와 AC 전류가 필요하다. 자기부상 시스템의 하중을 약 1000 N으로 가정하고 하중을 보상하기 위한 DC 전류를 -1.25 A로 진동에 의한 동하중을 보상하기 위한 AC 전류를  $1.25\sin(\omega t)$ A로 설정하였다.

따라서 구동기에  $i_c = -1.25 + 1.25\sin(\omega t)$ A의 전류를 인가했을 때 공극의 자속밀도와 자기부상 구동기에 가해지는 자기력은 식 (4)에서 식 (5)에 의해서 Fig. 6과 같이 한 주기의 공극 자속밀도와 자기력이 계산된다.

둘째로 영구자석 바이어스 자속으로만 자기부상 시스템의 하중을 보상하는 DC 자기력을 발생시키기 위해 편심 공극(off-centered air gap)을 이용하였다. 레일 하부의 공극을 0.5 mm로 유지하고 레일 상부 공극을 증가시키면 톨력턴스 차이에 의해 상/하부 공극에서 바이어스 자속밀도 차이가 발생하고 DC 자기력이 발생한다. 상부 공극이 증가하면 톨력턴스도 증가하므로 비슷한 바이어스 자속을 형성하기 위

$$\begin{bmatrix} -R_1 & -R_2 & 0 & 0 \\ -\frac{3R_1}{2} - \frac{R_2}{2} & \frac{R_1}{2} + \frac{3R_2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_3 & -R_4 \\ 0 & 0 & -\frac{3R_3}{2} - \frac{R_4}{2} & \frac{R_3}{2} + \frac{3R_4}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \\ 0 \\ -n \\ 0 \end{bmatrix} i_c + \begin{bmatrix} 0 \\ 2h_c/p_m \\ 0 \\ -2h_c/p_m \end{bmatrix} \tag{2}$$

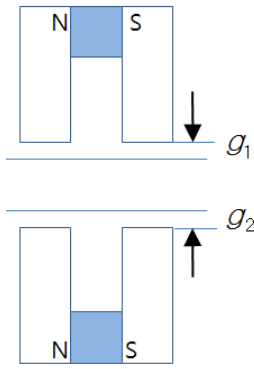


Fig. 5 Schematic of magnetic actuator

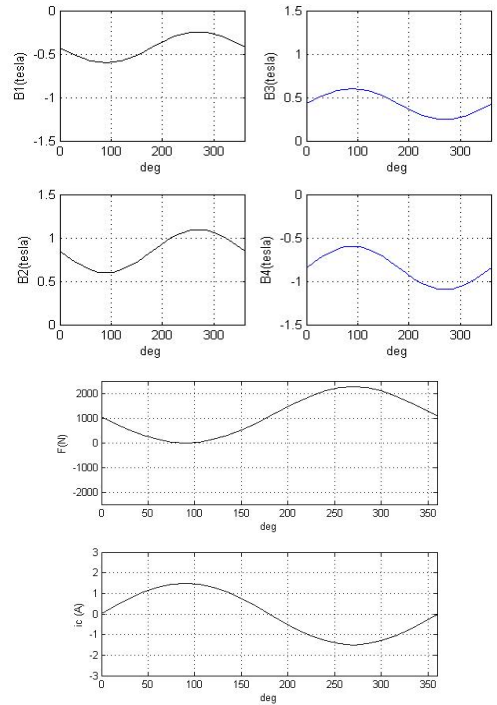


Fig. 7 Magnetic 1D simulation with AC currents at off-centered air gap

Fig. 7에서 편심 공극과 AC 전류만으로 형성된 각 공극의 자속밀도는 Fig. 6의 DC 전류와 AC 전류로 형성된 자속밀도와 유사하게 형성되었다. 이 결과는 편심공극으로 인한 DC 자기력만으로 하중을 충분히 보상할 수 있음을 보여준다. 하지만 레일 상부 공극의 증가로 인하여 자기경로의 릴럭턴스가 증가하였고 Fig. 6의 자기력과 비슷한 자기력을 구현하기 위하여 영구자석의 기자력이 50%, 제어전류가 20% 증가하였다.

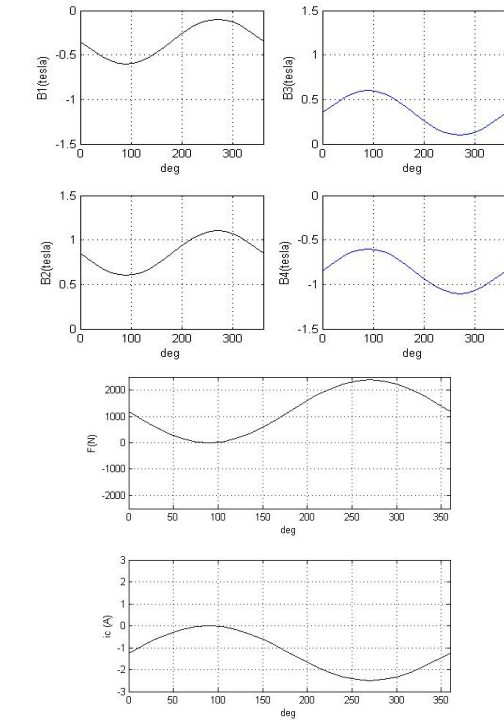


Fig. 6 Magnetic 1D simulation with DC and AC currents

해서는 영구자석의 기자력을 증가시켜야 한다. 상부 공극을 증가시켜  $g_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $g_2 = 0.5 \text{ mm}$ 로 유지하고  $a_0 = 2500 \text{ mm}^2$ ,  $n = 200$ ,  $h_{clpm} = 895$ 으로 설정하고  $i_c = 1.5\sin(\omega t)\text{A}$ 의 전류를 인가했을 때 공극의 자속밀도와 자기부상 구동기에 가해지는 자기력은 식 (4), (5)에 의해서 Fig. 7과 같이 한 주기의 공극 자속밀도와 자기력이 계산된다.

### 3.2 유한요소 모델

3.1절에서 제시된 자기부상 구동기의 자속밀도 및 자기력은 또한 3D 유한요소 수치해석(MAXWELL3D)을 통하여 시뮬레이션 되고 검증되었다.

첫째로 Fig. 6에서 제시된 자기력과 유사한 결과를 얻기 위해  $g_1 = g_2 = 0.5 \text{ mm}$ ,  $a_0 = 2500 \text{ mm}^2$ ,  $n = 200$ , 사마륨-코발트 영구자석(smco24)의 크기는  $50 \times 50 \times 30 \text{ mm}$ 로 설계하였다.

코일에 제어전류  $i_c = -1.25\text{A}$ 의 DC전류를 인가하고 MAXWELL3D 유한요소 해석을 수행한 결과가

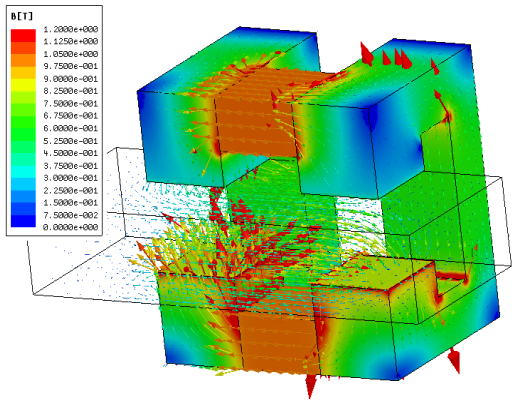


Fig. 8 Flux densities with  $i_c = -1.25A$

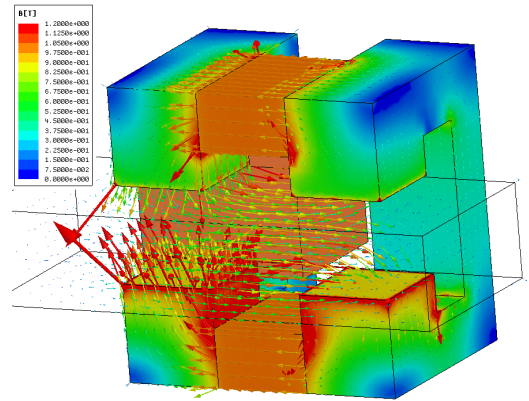


Fig. 10 Flux densities with offset air gap position

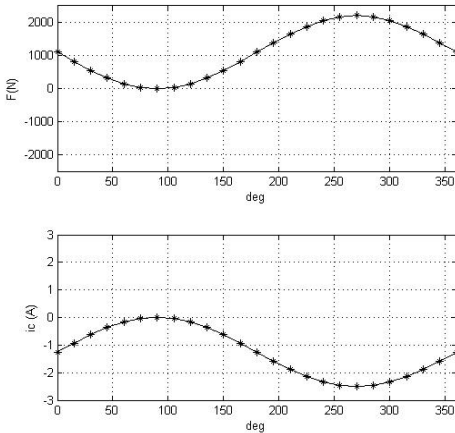


Fig. 9 Magnetic forces with DC and AC currents

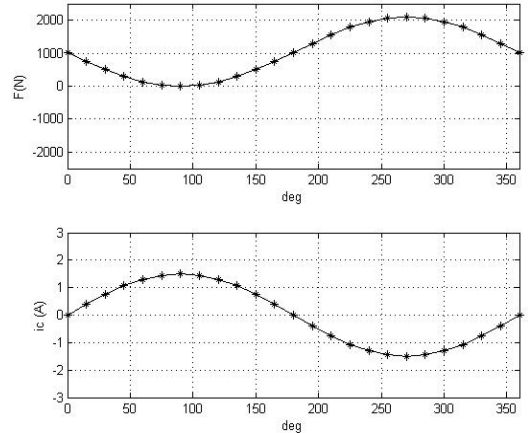


Fig. 11 Magnetic forces with offset air gap position

Fig. 8에 보여진다.

3D 유한요소 모델에 DC전류와 AC전류를 포함한  $i_c = -1.25 + 1.25\sin(\omega t)A$ 의 전류를 인가했을 때 Fig. 9와 같이 24개의 전류 입력에 대해 자기력이 계산되었다.

둘째로 하중을 보상하는 DC 자기력을 얻기 위하여 편심된 공극 즉  $g_1 = 1mm, g_2 = 0.5mm$ 으로 설정하고 사마륨-코발트 영구자석의 크기를  $50 \times 75 \times 30 mm$ 으로 증가시켰다. 전류를 인가하지 않고 편심된 공극으로 계산된 자속밀도는 Fig. 10에 보여진다.

Fig. 7에서 계산된 자기력과 유사한 결과를 얻기 위해 편심 공극 모델에  $i_c = 1.5\sin(\omega t)A$ 를 인가하고 자기력 변화를 계산하였다. 자기부상 구동기 3D 모델에 입력된 24개의 제어전류에 따른 자기력의 변화는 Fig. 11에 보여진다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 C-코어 전자석을 가진 영구자석 바이어스 자기부상 시스템의 구조와 원리를 제시하고 1D 자기회로 모델과 3D 유한요소 모델의 수치 해석을 통하여 설계와 성능 해석을 수행하였다.

제시된 자기부상 시스템은 기존의 하이브리드 자기부상 시스템과 달리 바이어스 자속의 자기경로와 제어자속을 공급하는 전자석의 자기경로를 분리하여 제어자속 경로에 공극의 자기저항만 위치하기 때문에 제어자속을 형성하는데 필요한 전류를 크게 줄일 수 있다.

하중을 보상하는 DC 자기력을 구현하고 제로전력 제어를 실현하기 위하여 편심 공극에서의 자기부

상을 이용하였다. 자기부상 구동기의 1D 자기회로 모델과 3D 유한요소 모델로 계산된 자기력은 유사한 결과를 보여주었다.

제시된 자기부상 시스템은 효율적인 에너지 절감형 자기부상시스템으로 반도체 공정의 비접촉 이송 시스템이나 자기부상열차에 적용될 수 있다. 향후 연구계획은 이 논문에서 제시된 영구자석형 자기부상 시스템의 시험기를 제작하고 제어시스템의 성능 실험을 할 예정이다.

## 후 기

이 연구는 경남대학교 연구사업의 지원에 의한 것이며 관계자 분들께 감사드립니다.

## References

(1) Atherton, D., 1980, Maglev Using Permanent Magnets, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 16, No. 1, pp. 146~148.

(2) Han, H., Yim B., Lee, N., Hur, Y. and Kwon, J., 2008, Effects of Guideway's Vibration Characteristics on Dynamics of a Maglev Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 299~306.

(3) Morishita, M., Azukizawa, T., Kanda, S., Tamura, N. and Yokoyama, T., 1989, A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 38, No. 4, pp. 230~236.

(4) Onuki, T. and Toda, Y., 1993, Optimal Design of Hybrid Magnet in Maglev System with Both Permanent and Electro Magnets, IEEE Transactions on Magnetics,

Vol. 29, No. 2, pp. 1783~1786.

(5) Wang, T. C. and Tzeng, Y. K., 1994, A New Electromagnetic Levitation System for Rapid Transit and High Speed Transportation, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 6, pp. 4734~4736.

(6) Zhang, Z., She, L., Zhang, L., Shang, C. and Chang, W., 2011, Structural Optimal Design of a Permanent-electromagnetic Suspension Magnet for Middle-low-speed Maglev Trains, IET Electrical system in Transportation, Vol. 1, No. 2, pp. 61~68.

(7) Kim, K. J., Han, H. S., Kim, C. H. and Yang, S. J., 2013, Dynamic analysis of a Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Magnet, Journal of Engineering Technology, Vol. 8, No. 6, pp. 1571~1578.

(8) Safaei, F., Suratgar, A. A., Afshar, A. and Mirsalim, M., 2015, Characteristics Optimization of the Maglev Train Hybrid Suspension System Using Genetic Algorithm, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 3, pp. 1163~1170.

(9) Lee, H. W., Kim, K. C. and Lee, J., 2006, Review of Maglev Train Technologies, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp. 1917~1925.



**Uhn Joo Na** received Ph.D. in mechanical engineering at Texas A&M University, College Station in 1999. He worked at KIMM as a senior researcher in 2002 before he joined Kyungnam University in 2004. He is a professor at School of Mechanical Engineering. His research interests are magnetic suspension, vibration control, haptic teleoperation.