https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.435

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

# 소형 물류 분류용 자기부상 시스템 개발

김재열<sup>ª</sup>, 안다훈<sup>b\*</sup>, 이학준<sup>c\*</sup>

# Development of Magnetic Levitation System for Small Logistics Sorting

Jae-Yeol Kim<sup>a</sup>, Dahoon Ahn<sup>b\*</sup>, Hak-Jun Lee<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

<sup>b</sup>Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>c</sup>Smart Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

#### **ARTICLE INFO**

Article history:					
Received	20	November	2022		
Revised	2	December	2022		
Accepted	6	December	2022		
<i>Keywords:</i> Magnetic levitation					
Small logistics					
Optimal design					
Lorentz force					

#### ABSTRACT

Owing to recent technological developments and diversification of consumer needs, the need for small-scale distribution centers is increasing as the frequency of small batch shipments of various products increases. Therefore, in this study, a magnetic levitation logistics transportation system was designed considering the space efficiency and maintenance cost of a small distribution center. A basic characteristic analysis was performed using an FEM analysis, and the system was manufactured by predicting power and power consumption based on this. To verify the basic performance of the fabricated system, an experiment was conducted based on real-time position feedback control, and the results were analyzed.

### 1. 서 론

#### 1.1 스마트 물류 센터

과거의 물류센터는 소품종 대량 출고 형태로 적재, 보관, 출하와 같이 단순한 기능을 하는 창고의 개념이었으나 최근의 물류센터는 경제 활동의 글로벌화 및 기술의 고도화에 따른 소비자의 요구가 다양화되고 개성화 되면서 물류 운송, 입고, 보관, 출고 등 물류 센터 전 분야에 걸쳐 IT 기술, 센서, 정보통신 및 제어기술이 상호 간 유기적으로 연동하여 관리되는 하나의 자동화 프로세스로서 '스마트 물류센터'의 관심이 고조되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 또한 빠른 배송에 대한 시장 수요가 증대됨에 따라 최종 소비자가 원하는 방식으로 제품을 빠르게 공급하기 위하여 배송 리드타임을 단축하고 서비스 품질을 높이는 것에 대한 관심이 커지고 있어 소규모의 도심형 라 스트마일(last mile) 물류센터의 필요성이 높아지고 있다. 이러한 소규모 물류 창고에서는 적은 공간을 효율적으로 활용할 필요가 있으나 기존 물류 분류 시스템에서 많이 활용하는 분류기와 컨베 이어 벨트의 조합의 분류 시스템은 분류 부분과 컨베이어 부분이 따로 존재하여 큰 면적이 필요하여 소규모 물류 창고에는 적합하 지 않으며 초기 구성비용이 높고 컨베이어 벨트 사용으로 인한 안 전 문제, 마모 및 부식 부품 교체, 수리 등 관리 비용 문제 등이 발생하게 된다.

E-mail address: dhahn@seoultech.ac.kr (Dahoon Ahn).

<sup>\*</sup> These authors contributed equally to this work.

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6532

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +82-42-589-8553 *E-mail address: hak1414@kitech.re.kr* (Hak-Jun Lee).

#### 1.2 자기부상 물류 이송 시스템

평판형 자기부상 기술을 이용한 이송 및 분류 시스템은 컨베이어 벨트를 이용한 이송 시스템의 단점을 보완할 수 있는 기술로 모듈 형식의 스테이터로 공간에 구애 받지 않고 원하는 이송 경로를 구현 할 수 있어 소규모 물류 창고에서 효율적인 공간활용이 가능하며, 다중 이송체 구성을 통해 많은 물량을 동시에 처리할 수 있고, 장비 고장이나 노후화 등과 같은 유지 관리 비용 문제도 해결할 수 있다. 또한 자기부상 물류 이송 시스템은 자기부상을 활용하여 청정 물류 에 사용될 수 있으며, 고정밀성을 바탕으로 정밀 핸드폰 제조 공정 에도 적용될 수 있다. 이미 해외 시장에서는 자기부상 물류 시스템 인 독일 Beckhoff 社의 XPlanar, 캐나다 Planar Motor 社의 XBot 등의 제품이 개발되어 판매 중이며, 이러한 기술의 국산 시스템의 개발을 통한 경쟁력 확보가 필요하다. 이러한 자기부상 시스템은 유도 전자기 방식과 동기 모터 방식이 있는데, 본 연구에서는 정밀 제조 공정에도 적용할 수 있게 범용성을 높이고자 더 정밀한 방식인 동기 모터 방식을 채택하여 개발을 수행하였다.

자기부상 시스템은 이송체를 전자기력으로 부상시키고 동시에 추진하는 시스템으로, 저중량의 단일 몸체와 가이드 등의 연결부 가 없어 비접촉 및 무마찰 구동이 가능하기 때문에 고정밀을 구현 하기에 적합하고 행정거리 확장에도 적합한 시스템이다. 자기부상 시스템은 크게 권선이 움직이는 이동 권선형(moving coil) 방식<sup>[4]</sup> 과 자석이 움직이는 이동 자석형(moving magnet) 방식<sup>[5]</sup>으로 나 눌 수 있다. 이 중 이동 권선형 방식은 권선의 스위칭이 없어 제어 가 쉬우며 권선의 수가 적기 때문에 증폭기가 적게 필요한 장점이 있으나, 이송체의 권선에 연결된 케이블이 움직이므로 외란이 심 하여 정밀도 향상이 어렵고 행정거리 확장이 힘들다는 단점이 있 다. 반면에, 이동 자석형 방식은 상대적으로 제어가 어려워 구현하 기에 어려움이 있으나 부상 및 추진하는 이송체 부분이 자석이므 로 케이블에 의한 외란 전달이 없고 권선 배열을 확장하는 것만으 로 행정거리를 쉽게 확장할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 FEM 해석을 통하여 이동 자석형 방식의 평판형 자기부상 이송 시스템의 기초 특성 분석을 분석하고, 해석 결과를 토대로 권선이 위치하는 고정부의 확장 및 제거가 용이하도록 하 여 요구되는 행정거리를 확보할 수 있고, 다양한 형태의 이송 경로 에 대응할 수 있는 권선 모듈과 영구자석으로 이루어진 이송체 설 계를 수행하였다.

### 2. 평판형 자기부상 이송 시스템 설계

### 2.1 평판형 자기부상 이송 시스템 구조 및 구동 원리

평판형 자기부상 시스템은 매우 간단한 구조를 가지고 있으며, 크게 이송부와 고정부로 나뉜다. 이송부는 자속을 생성하는 영구 자석과 공극에서 자속을 집중시키기 위한 백 요크로 구성되며, 고정부는 전류를 인가하여 힘을 발생시키는 권선과 권선을 고정 시키는 프레임으로 구성된다. Fig. 1은 본 연구에서 설계한 자기 부상 이송시스템의 구조를 나타내며, Fig. 2는 2차원 영구자석 배열과 권선 배열의 전류 인가 시 부상 및 추진 원리에 대해 나타 낸다.

평판형 자기부상 시스템은 Fig. 2와 같이 X 방향에 따라 변하는 자속 밀도와 권선 배열의 각 권선에 흐르는 전류와의 로렌츠 힘을 이용하고, 권선 배열의 각 권선은 자속 밀도에 따라서 120°의 위상 간격을 갖도록 하는 다상의 선형 동기 모터의 원리를 기본으로 한 다. 동기 모터는 원하는 방향으로의 힘을 얻기 위해서 각 권선의 위상에 따라 전류를 제어하여 시스템을 구동할 수 있으며, 3상 권 선 배열에서 x 방향 및 z 방향으로의 추진력의 크기는 식 (1)과 (2) 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{x} = l \sum_{k=1}^{3} i_{k} B_{zk}$$
  
=  $l \sum_{k=1}^{3} \left[ l \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{(k-1)\pi}{\tau}\right) B_{z} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{(k-1)\pi}{\tau}\right) \right]$  (1)  
=  $l \left(\frac{3}{2} I B_{z}\right)$ 

$$F_{z} = l \sum_{k=1}^{3} i_{k} B_{xk}$$
  
=  $l \sum_{k=1}^{3} \left[ lcos(\frac{\pi}{\tau}x + \frac{(k-1)\pi}{\tau}) B_{x} sin(\frac{\pi}{\tau}x + \frac{(k-1)\pi}{\tau}) \right]$  (2)  
=  $l \left(\frac{3}{2} I B_{x}\right)$ 



Structure of maglev stage Fig. 1 Structure of planar maglev transport system



Fig. 2 Principle of levitation and thrust of planar maglev system

식 (1)과 (2)에서 *l*은 각각 권선의 길이, *I*는 전류의 세기, *r*는 자석의 극 피치, *B*는 권선에서의 자속 밀도이다. 선형 동기 모터에 서 z 방향 자속 밀도만 사용하는 반면에, 평판형 자기부상 시스템 은 x와 z의 두 방향 자속 밀도를 사용하여 추진력과 부상력을 얻는 다. 식 (1)과 (2)를 이용해 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 *K*<sub>z</sub>와 *K*<sub>x</sub>는 힘 상수이며, 권선의 *l*길이 과 자속 밀도 *B*는 각 위치 에 따른 정현파 관계의 함수로서 상수화 할 수 있다. 전류 *I*는 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \left(\frac{3}{2} IB_z\right) \cos\theta \\ l \left(\frac{3}{2} IB_x\right) \sin\theta \end{bmatrix} = \left(\frac{3}{2} I\right) \begin{bmatrix} K_z \cos\theta \\ K_x \sin\theta \end{bmatrix}$$
(3)

$$I = \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{F_x}{K_z}\right)^2 + \left(\frac{F_z}{K_x}\right)^2} \tag{4}$$

이를 통해, 3상 권선 배열에서 목표로 하는 추진력과 부상력을 발생시키기 위한 필요 전류 및 전력을 계산하여 시스템의 전원 공 급 장치를 구성하는데 사용할 수 있다.

# 2.2 평판형 자기부상 이송 시스템 설계 2.2.1 권선 및 자석 배열 설계

영구자석과 권선의 배열에 따른 구동력에 관련된 연구는 이전부 터 진행되어 왔으며<sup>[4]</sup>, 영구자석의 극 피치를 결정함에 따라 권선 의 크기와 3상 배열 사이의 간격을 결정할 수 있는 연구<sup>[6]</sup>에 따라 서 Fig. 3과 같이 크기를 결정할 수 있다. m은 9피치의 영구 자석 배열과 백요크를 합한 두께가 10 mm 라고 가정했을 때의 이송체 의 무게,  $w_s$ 는 3상 권선 배열의 너비,  $w_c$ 는 권선의 두께,  $g_c$ 는 권선 두께 사이의 공간 너비,  $g_s$ 은 같은 방향으로 놓이는 3상 권선 배열 사이의 거리를 나타낸다.  $\tau$ 는 정사각형 영구자석의 한 변의 길이이 며  $\tau_m$ 은 45° 회전된 영구자석의 극 피치이다. 영구자석 극 피치에



Fig. 3 Shapes and parameters of the winding arrangement of the stator

따른 권선에서의 각 변수들의 크기와 이송체 무게를 Table 1에 정리하였다. 계산했던 결과를 이용하여 목표 중량에서 부상 및 가 속 작동을 구현하기 위하여 자석의 극 피치를 결정하기 위하여 시 스템의 목표 스펙을 고려해야 한다. 본 연구에서는 정밀 핸드폰 조립 물류에 적용과 기존 연구에서 진행한 목표와 동일하게 최대 6 kg의 부상력과 최대 20 m/s<sup>2</sup>의 가속력의 사양을 목표로 설계를 진행하였다<sup>[7]</sup>. 자석은 Mover의 무게를 3 kg 이하로 가져가기 위 해 20 mm의 영구 자석으로 결정하였다.

영구 자석의 피치에 따라 정해진 권선의 평면 크기가 정해졌으 므로, 권선의 높이를 정하기 위하여 이송체의 2-D 자석 배열 표면 으로부터의 높이에 따른 각 방향 자속의 평균값을 Fig. 4와 같이 이송체를 단순화시킨 모델의 FEM 해석을 통하여 확인하였다. FEM 해석에는 Ansoft 社의 Maxwell 프로그램이 사용되었다. 그 결과는 Fig. 5에 그래프로 도시하였으며, 세 방향의 자속 모두 13 mm 높이를 지나며 0에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구 에서는 권선의 높이를 10.5 mm로 결정하였다.

앞에서 정해진 권선의 크기에 따라서 하나의 권선을 제작할 때 사용하는 도선의 굵기에 따라서 감은 수, 총 도선의 길이, 저항을 계산할 수 있다. 권선은 충진율이 높고 감은 수가 많은 직교 권선 제작 방식으로 제작된다고 가정하였다. 사용된 변수는 Fig. 4에 나타냈다. *d*는 구리 도선의 굵기, *l<sub>e</sub>*은 권선의 직선 구간 길이, *h<sub>c</sub>* 는 권선의 높이를 나타낸다. 변수들을 이용하여 도선의 굵기에 따 른 도선의 총 턴 수, 총 길이, 권선의 저항을 Table 2에 정리하였

Table 1 Winding size and mover weight according to pole pitch

$\tau$ [mm]	$w_s  \mathrm{[mm]}$	$w_c  \mathrm{[mm]}$	$g_c \; [{ m mm}]$	$g_s [{ m mm}]$	<i>m</i> [mm]
18	25.46	16.97	2.83	31.82	2.23
19	26.87	17.91	2.98	33.59	2.48
20	28.28	18.85	3.14	35.36	2.75
21	29.70	19.80	3.30	37.13	3.03
22	31.11	20.74	3.46	38.90	3.33
23	32.53	21.69	3.61	40.66	3.64



Fig. 4 FEM analysis model with simplified mover



Fig. 5 Average value of magnetic flux in each direction according to the height above the surface of the PM



Fig. 6 Shape and variables of rectangular winding

Table 2 Number of turns and resistance of windings according to the diameter of the conductor

d [mm]	turns	Total length [m]	Resistance $[\Omega]$
0.2	1860	306.80	174.81
0.3	793	130.80	33.12
0.4	428	70.60	10.06
0.5	278	45.86	4.18
0.6	189	31.18	1.97
0.7	138	22.76	1.06

다. 본 시스템에서 사용하는 구리도선은 2종 폴리에스테르이미드 도선을 활용하였으며, 0.2~0.7 mm 범위에서 평균적으로 10% 정 도로 피막두께가 형성되기 때문에 구리도선의 직경의 10%를 추가 하여 코일 감은수를 계산하였다.

### 2.2.2 권선의 힘 상수

앞의 해석 결과를 통해 정한 권선의 높이를 적용하여 권선에 전 류를 인가하여 이송체 위를 이동할 때, 단위 전류 당 추진력 및 부상력을 통해 권선에서의 힘 상수를 구할 수 있다. 이를 위하여 이송체 위를 권선이 1 mm 부상할 때를 가정하여 이송체 및 코일 모델을 만들고, FEM 해석을 통하여 부상력 및 추진력을 확인할 수 있다. 도선은 절연된 구리 도선을 사용하며, 영구 자석은 NdFeB 계열 자석, 백요크는 1010 탄소강의 물성치를 이용하여



* Material	
Coil : copper	•
<ul> <li>Magnet : NdFeB-N-45</li> </ul>	

Percent error : 1% Refinement Per Pass : 30 %

Yoke : steel-1010

Fig. 7 Force analysis model and analysis setting values



Fig. 8 Result of levitation and thrust force analysis



Fig. 9 Generated force from each winding set for 6-DOF motion

Fig. 7의 해석 모델과 같이 3 피치를 이동하는 동안의 부상력 및 추진력 해석을 진행하였다.

해석은 100 A의 전류를 인가하여 진행하였다. 이에 따라 Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 이송체의 양 끝의 단부 효과를 제외하고 정현파 형태의 결과에서 힘 상수를 얻을 수 있다.

해석 데이터를 정현파 형태로 피팅하여 나타내면 3상 권선 세트 의 단위 전류 당 힘 상수를 구할 수 있다. 각 힘 상수를 이용하여 필요한 힘을 내기 위한 최대 전류 및 전력을 다음과 같이 구할 수 있다. Fig. 9와 같이 총 2개의 권선 세트에 전류가 인가되면 수평으 로 놓인 4개의 권선 세트에서는 x 방향 추진력과 부상력을 만들고, 수직으로 놓인 2개의 권선 세트에서는 y 방향 추진력과 부상력을 만든다. 이를 통하여 단순 부상 시 필요 전류 및 전력량과 부상 및 추진이 동시에 이루어 질 때의 필요 전류 및 전력량을 구할 수 있다.

### 2.2.3 필요 전류 및 전력 예측

이송체를 단순 부상시킬 때는 일정한 전류를 지속적으로 공급해 주어야 한다. 목표한 부상력을 구현하기 위해서 하나의 권선에 지 속적으로 인가되어야 할 전류는 식 (5)와 같으며, 3상 권선 세트 하나에 필요한 전력량은 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 여기서 시스 템은 3상 권선 세트 4개에 의해 부상하므로, 시스템의 부상만을 위한 총 전력은 식 (7)과 같다.

$$I_c = \frac{2}{3} \times \frac{F_z}{K_x} / Total \ coil \ turns$$
<sup>(5)</sup>

$$P_c = \frac{3}{2} I_c^2 R \tag{6}$$

$$Total P_c = \left(\frac{2}{3}I_c^2 R\right) \times 4 \tag{7}$$

이송체의 부상 및 추진이 동시에 이루어지기 위해서는 일정한 전류 를 지속적으로 공급해 주어야 할 뿐만 아니라 목표한 가속도에 도달 하기 위해 가속 시간 동안 최대 전류를 공급해 주어야 한다. 목표한 부상력과 추진력을 동시에 구현하기 위해서 권선의 도선에 인가해야 할 전류는 식 (8)과 같으며, 3상 권선 세트 하나에 필요한 전력량은 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 여기서 시스템은 4개의 3상 권선 세트 중 2개의 권선 세트는 부상력만을 생성하고, 나머지 2개의 권선 세트 는 부상력과 추진력을 동시에 생성해야 하므로 목표 부상력 및 추진 력을 구현하기 위한 시스템의 총 전력은 식 (10)과 같다.

$$I_{p} = \frac{2}{3} \times \sqrt{\left(\frac{F_{z}}{K_{x}}\right)^{2} + \left(\frac{F_{x}}{K_{z}}\right)^{2}} / Total \ coil \ turns \tag{8}$$

$$P_p = \frac{3}{2} I_p^2 R \tag{9}$$

$$Total P_p = P_{p,1set} \times 2 + P_{c,1set} \times 2$$
(10)

### 3. 평판형 자기부상 이송 시스템 제작

앞선 내용의 설계 결과에 따라서 Fig. 10~11와 같이 코일 스테이터 모듈, 영구자석배열 이송체, 전력 공급을 위한 전장, 여러



Fig. 10 Manufactured coil stator and mover



Power supply / AmpTerminal BlockFig. 11 Manufactured electrical devices and terminal blocks

개의 코일과 전류 증폭기의 원활한 연결을 위한 단자대 등을 제작 하고 전체 하드웨어를 결합하여 시스템을 구성하였다. 코일은 0.5 mm 직경의 Self-bonding wire로 제작되었으며, 이송체는 NdFeB 계열 N52 등급의 자석을 사용하여 제작되었다. 또한, 전 장 구성에 사용된 전류 증폭기는 앞의 식 (5)-(10)을 사용하여 계 산된 최대 필요 전류량을 고려하여 Advanced motion control 社 의 Ab15a100 모델을 선정하였으며, 전류 증폭기 구동을 위한 파 워공급모듈은 Glentek 社의 GP8600-50 모델을 선정하여 전장 및 단자대를 구성하였다.

## 4. 자기부상 이송 시스템 제어 및 실험

앞서 제작한 자기부상 이송 시스템의 구동 및 기초 성능 평가를 위하여 실험을 진행하였다. 실험은 접촉식 변위 센서를 이용한 실시 간 위치 피드벡 제어를 기본으로 진행되었으며, 시스템의 위치안정 성, 최대 속대 성능, 세틀링 시간 평가의 항목으로 평가를 진행하였 다. 실시간 제어를 위하여 dSPACE SCALEXIO 어플리케이션을 구성하여 사용하였다. 변위센서는 LVDT(AX/2.5/S, Solartron)를 사용하였으며, ±2.5 mm의 측정 범위를 가지고 있다. 실험 세팅 전경은 Fig. 12과 같다. 12개의 코일로 6자유도를 제어하기 위해 Fig. 13과 같이 Inverse kinematics model을 통해 시스템 제어 Block diagram을 구성 후 제어 실험을 수행하였다.



Fig. 12 Lab view in basic performance test setting



Fig. 13 Control block diagram

#### 4.1 시스템 위치안정성

위치 안정성은 제어기 위치 피드백을 활용하여 1 mm 부상시킨 이송체가 6 자유도 방향으로 정지 상태일 때, 변위 센서로 측정한 이송체의 위치 데이터를 이용하여 테스트하였다. 측정 결과는 Fig. 14와 Table 3에 나타냈다.

위치 정밀도는 10 초 동안의 위치 오차 움직임의 RMS 값과 30



Fig. 14 Result of position stability test of transport system

Table 3	Position	stability	of	the	transport	system
---------	----------	-----------	----	-----	-----------	--------

	RMS	3σ
х	±7.423	±22.266
у	±6.737	±20.210
Z	±7.136	±21.407
$\theta_{\mathbf{x}}$	±0.035	±0.104
$\theta_{\mathtt{y}}$	$\pm 0.007$	$\pm 0.020$
$\theta_z$	±0.012	±0.036

값을 이용하여 측정하였으며, 총 3회 측정값의 평균으로 결과값을 평가하였다. 구성한 평면형 자기부상 시스템의 위치 정밀도는 약 20 μm로 평가하였다.

#### 4.2 시스템 최대 속도 성능

최대 속도 성능은 제어기 위치 피드백을 활용하여 1 mm 부상시 킨 이송체를 x 방향으로 500 µm 이동시켰을 때의 위치 변화를 측정한 뒤, 변위 센서로 측정한 이송체의 위치 데이터의 미분 값을 이용하여 최대 속도를 테스트하였다. 측정 결과는 Fig. 15와 Table 4에 나타냈다.

실험을 총 5회 반복하여 실행한 뒤 계산된 최고 속도의 평균값으 로 평가하였다. 평가 결과, 평균적으로 약 0.8362 m/s의 최대 속도 로 구동할 수 있는 것으로 평가되었다.



Fig. 15 Result of maximum speed test of transport system

Table 4 Maximum speed of the transport system

	Max velocity [m/s]
Exp. 1	0.8472
Exp. 2	0.8667
Exp. 3	0.8246
Exp. 4	0.8335
Exp. 5	0.8089



Fig. 16 Result of settling time test of transport system

Table 5 Settling time of the transport system

Settling time [sec]
0.898
0.917
0.919
0.933
0.864

### 4.3 시스템 세틀링 시간

세틀링 시간은 제어기 위치 피드백을 활용하여 1 mm 부상시킨 이송체를 x 방향으로 500 µm 이동시켰을 때의 위치 변화를 측정 한 뒤, 제어 명령을 내린 시점부터 이송체의 위치가 최종 제어 명령 값의 2% 이내로 들어가는 시점까지의 시간을 계산하여 테스트한 다. 측정 결과는 Fig. 16와 Table 5에 나타냈다.

실험을 총 5회 반복하여 실행한 뒤 계산된 세틀링 시간의 평균값 으로 평가하였다. 평가 결과, 평균적으로 약 0.9 초의 세틀링 시간 을 갖는 것으로 평가되었다.

## 5. 결 론

소형 물류 이송용 평판형 자기부상 및 추진 구동부의 이송체와 권선의 평면상 크기는 자석의 극 피치에 따라 자석의 크기, 3상 권선 세트와 각 세트 사이의 간격이 결정되어 권선 모듈의 크기를 결정하며, 이송체의 무게와 크기를 고려하여 자석의 피치를 결정 하였다. 결정된 크기의 영구 자석 및 권선의 FEM 해석을 통하여 이송체의 영구자석배열 위의 공간에서 코일 높이 만큼의 자기장 분석을 통하여 코일의 높이를 최적화하는 방법을 제시하였으며, 1개의 권선에서의 로렌츠 힘 해석을 통해 전체 권선 세트에서의 부상력과 추진력에 필요한 전류 및 전력량을 계산하는 방법으로 시스템의 전원 공급장치를 구성할 수 있는 방법을 소개하였다. 설 계된 시스템을 제작 및 구성한 후 ,제작된 시스템의 실시간 위치 피드백 제어를 dSpace를 통해 구동 및 기초 성능을 평가하였다. 제어 결과 약 0.9초의 Settling time과, 최대속도 0.8362 m/s, 위 치정밀도 ±22.27 μm(X), ±20.21 μm(Y) 성능을 확보하였다. 향후 본 시스템을 활용하여 여러 Mover에 대한 실험을 수행 예 정이며, 물류 적용 평가를 수행할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 정부 산업통상자원부의 'PIM인공지능반도체 핵심기 술개발 사업'의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다[과제명: HBM 제조를 위한 초박형 웨이퍼 핸들링용 본딩 장비 개발/과제 고유번호: RS-2022-00154701].

#### References

- [1] Lee, C. K., Lv, Y., Ng, K. K. H., Ho, W., Choy, K. L., 2018, Design and Application of Internet of things-based Warehouse Management System for Smart Logisticsm, Int. J. Prod. Res., 56:8 2753-2768, https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592.
- [2] Ding, Y., Jin, M., Li, S., Feng, D., 2021, Smart Logistics based on the Internet of Things Technology: An Overview, Int. J. Logist. Res. Appl., 24:4 323-345, https://doi.org/10.1080/1367 5567.2020.1757053.
- [3] Wen, J., He, L., Zhu, F., 2018, Swarm Robotics Control and Communications: Imminent Challenges for Next Generation Smart Logistics, IEEE Commun. Mag., 56:7 102-107, https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700544.
- [4] Kim,C.-H., Lee, H.-J., Joung, H.-K., 2022, Time-delay Controller Design for MagLev Conveyor System in Smart Factory based on 6G/Beyond 5G Network Communication, Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., 71:2 111-116, https://doi. org/10.5370/KIEEP.2022.71.2.111.
- [5] Ha, C.-W., Kim, C.-H., Lim, J., 2018, Development of a High-accuracy Magnetic Levitation Transport System for OLED Evaporation Process, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., 42:12 1111-1118, https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018. 42.12.1111.
- [6] Sung, S. Y., Choi, J.-Y., Sung, H.-K., Cho, H.-W., Jang, S.-M.,2008, Development of Maglev Vehicle for Semiconductor Transport System in Small Scale, Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference, 616-618.
- [7] Beckhoff, n.d., viewed 2 Dec. 2022, Xplanar/ Planar motor system <https://www.beckhoff.com/en-en/products/motion/xplanar-pl anar-motor-system/>.



## Jae-Yeol Kim

Master in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University of Science and Technology. His research interest is magnetic levitation system E-mail: jaeyeol0511@kitech.re.kr



### Dahoon Ahn

Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is precision motion mechanism and energy harvesting. E-mail: dhahn@seoultech.ac.kr



### Hak-Jun Lee

Senior researcher in the Department of Smart Manufacturing R&D System, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision motion mechanism and semiconductor/display equipment. E-mail: hak1414@kitech.re.kr