

초정밀 자기부상 물류 이송장치의 제어 및 공극 센서 오프셋 추정 연구

A Study on the Control and Estimation of Gap Sensor Offset in High-Precision Magnetic Levitation Transport System

김민* · 김창현** · 하창완** · 원문철†
(Min Kim · Chang-Hyun Kim · Chang-Wan Ha · Mooncheol Won)

Abstract - The high-precision magnetic levitation transport system is a transport device applying the principle of magnetic levitation. So it is preferable for manufactory process of semiconductor and display industries. In this system, the gap sensors are arranged discontinuously and turned on or off when the tray moves in the running direction. Therefore, precise gap data is important for precise control of the carrier. However, a slight error occurs in the process of installing the gap sensor. So, in this paper, we introduce the high-precision magnetic levitation transport system for OLED evaporation process. Also, we propose a strategy for stable flight control and an offset algorithm for tracking installation errors transport system. The performances of the proposed algorithm are validated through simulation.

Key Words : High-precision magnetic levitation transport system, OLED, Gap sensor

1. 서론

유기발광다이오드(OLED : Organic Light Emitting Diode)는 LCD에서 백라이트 유닛과 액정을 빼고 자체 발광하는 형광성 유기화합물을 넣은 제품이다. 자체발광하기 때문에 LCD보다 화면이 밝고 화질이 우수하며, 응답속도가 빠르고 소비전력이 낮다. 특히, 투명하고 유연(flexible)하다는 장점으로 차세대 디스플레이로 주목을 받으며 점차 시장 규모가 증가하고 있다[1].

유기발광다이오드 디스플레이는 보통 수 백 nm의 두께를 가지며 다층 박막으로 구성되는데, 전체 박막은 생산 공정 과정에서 다양한 요구조건을 모두 만족해야 한다. 대표적인 4가지의 요구조건은 다음과 같다. 첫째, 전체 박막의 균일도는 $\pm 5\%$ 범위 내에서 제어되어야 한다. 둘째, 섀도우 마스크(shadow mask)는 $\pm 5\text{ nm}$ 이내, 공통 유기 박막 층은 $\pm 200\text{ nm}$ 이내로 정렬(alignment)되어야 한다. 셋째, 미세한 분진이나 수분은 유기물질에 매우 취약하기 때문에 고청정 진공 환경(zero particle)이 요구된다. 넷째, 공정과정에서 발생하는 열이 트레이의 면적을 열팽창시킬 수 있기 때문에 어떠한 발열 요소도 포함되어서는 안 된다[1].

위와 같은 조건이 만족되면 디스플레이 생산성 향상이라는 기

대효과가 있지만, 공정 과정을 모두 만족하기 위해서는 매우 정밀한 시스템이 필요하다. 분진 발생을 줄이기 위한 비 접촉 이송 방식으로는 공기부상과 자기부상이 대표적이다. 공기부상 방식을 이용하여 LCD 제조용 컨베이어, 분배(distribution) 모듈, 리프터(lifter), 드라이 크리닝 등 다양한 장비가 개발된 바가 있다. 하지만, 진공 상태에서 동작이 불가능하기 때문에 위의 조건을 만족하여 고 성능을 보일 수 있는 방식은 자기부상을 적용한 방식이다[2][3].

자기부상 방식은 마찰이나 마모가 발생하지 않기 때문에 유지 보수 비용을 절감할 수 있다. 또한, 무분진(zero particle) 조건을 만족하며, 소음 및 진동의 최소화가 가능하고 진공 상태에서도 적용이 가능하다. 현재 자기부상 기술은 흡인식 부상 원리를 사용한 자기부상 열차로 이미 수 톤 이상의 부상 능력을 검증받았다. 하지만, 흡인식 자기부상 기술은 보통 수 mm의 평균 공극으로 동작하기 때문에 원하는 정밀도를 만족시키기가 어렵다. 더욱이 이송 시스템은 트레이에 필요 전원을 적재하여 움직이는 시스템이기 때문에 발열 문제가 발생할 수 있다. 따라서 자기부상 기술을 사용하여 이송장치를 개발하려면 흡인식 자기부상의 정밀 스테이지 기술에 사용된 제어 기술이 필요해진다[3-6].

자기부상 방식은 기존의 롤러 컨베이어 방식에 비해 초기 설치비용이 높으나 전체 장비 가격에서 이송 부분이 차지하는 비중이 10~20% 수준으로 낮아 과도한 가격상승을 초래하지 않는다. 무엇보다 무분진(zero particle) 조건을 만족하여 불량률을 현저히 낮출 수 있어 투자비용 대비 그 효용이 크다 할 수 있다. 또한, 구동부의 마찰이나 마모가 발생하지 않기 때문에 소음 및 진동의 최소화가 가능하고 유지보수 비용을 절감할 수 있다는 장점

† Corresponding Author : Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Korea.
E-mail: mcwon@cnu.ac.kr

* Bosch Electrical Drives Co.,Ltd (RBKB)

** KIMM(Korea Institute of Machinery and Materials)

Received : October 16, 2017; Accepted : November 19, 2017

이 있다.

이 제어 시스템의 핵심은 캐리어가 안정하게 지면 또는 전자석으로부터 일정 간격을 유지하며 부상 및 추진하는 것이다. 캐리어의 안정성 향상은 공극 센서 데이터와 밀접한 관계가 있다. 공극 정보는 부상 전자석에 가해지는 전류를 결정하는 요소이기 때문이다. 하지만 실제 장비는 센서를 설치하는 과정에서 설치 편차(약 $\pm 50\mu\text{m}$)가 발생하게 된다. 마이크로에서 나노 단위로 정밀하게 캐리어를 제어해야 하는 본 시스템에서의 설치 편차는 제어 정밀도를 떨어뜨리고 안정성을 나쁘게 하는 원인이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시스템 안정성 향상을 위해 적용된 제어기 소개와 정밀한 공극 센서 데이터를 위한 센서 설치 편차 추정치에 대해 소개한다. 취득한 공극 데이터를 사용하여 센서 설치 과정에서 발생하는 편차를 추정하고, 추정된 설치 편차를 오프셋(offset)으로 사용하여 알고리즘의 정확도를 판단한다.

2. 초정밀 자기부상 물류 이송장치

2장에서는 이송장치의 구조와 부상 제어기에 대해 소개한다. 구조는 전체 구성된 시스템과 불연속적으로 설치된 센서 및 전자석을 중심으로 보여주며, 단일 전자석 모델링과 전류 제어기를 통해 본 시스템의 제어 전략을 소개한다.

2.1 구조

Fig. 1에 나타난 초정밀 자기부상 물류 이송장치는 5세대 유리 기판(1,100mm × 1,300mm)을 대상으로 하는 디스플레이 증착 공정이 가능한 장비이다. 본 시스템의 캐리어 무게는 400kg이 되도록 설계하였으며, 기존의 이송장치와 달리 레일과 물리적인 접촉이 없어 OLED 증착 공정과 같은 생산 공정에 적합하다. 제어 시스템에 자기부상 원리를 적용하므로 저소음 및 저진동으로 동작하며, 진공 환경에서도 동작이 가능하므로 고정정의 이송장비라고 할 수 있다. 캐리어의 상면에서 부상/안내/추진 기능이 구현되며, 하면에서 디스플레이 증착 공정이 수행되는 구조이다. 캐리어의 팽창과 화재 가능성을 최소화하기 위해 발열이 될 만한 요소들을 Fig. 1(b)처럼 레일 상단에 부착한 것이 특징이며, 이로 인해 캐리어에는 직접적으로 전력이 공급되지 않는다[3].



그림 1 초정밀 자기부상 물류 이송장치

Fig. 1 High precision magnetic levitation transport system

자기부상 원리를 사용하여 부상하는 열차와 이송장치는 구조적으로 차이점이 있다. 캐리어에 부상 전자석과 추진 전동기를 부착하지 않는 것은 자기부상 열차와 비교할 때 가장 큰 차이점이다. 본 시스템에서는 추진 전동기는 요(yaw) 모션을 최소화하기 위해 캐리어 상단의 중앙에 위치한다. 또한, 열차가 가속도 및 공극 센서를 모두 사용하여 부상하는 것과 달리 이송장치는 공극 센서만으로 부상을 유지한다. 단순한 구조와 저렴한 가격, 편리한 유지보수, 별도의 장치 미 탑재의 이유로 가속도 센서를 사용하지 않는다[3].

Fig. 2는 실제 설치된 이송장치 시스템의 부상 시스템을 고려한 2D 형상이며, 불연속적으로 설치된 14개의 전자석에 의해 캐리어가 부상된다. 부상 전자석은 캐리어의 자중을 나누어 부담할 수 있도록 설계되었으며, 이는 개별 부상 전자석의 용량을 낮추는 효과와 함께 주행 시 부상 전자석의 켜고 꺼짐에 따른 스위칭 효과를 최소화하기 위함이다.

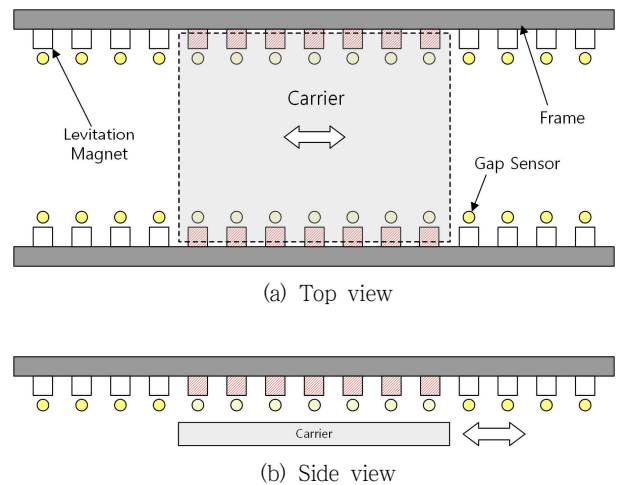


그림 2 이송장치의 개략도

Fig. 2 Schematic diagram of high precision magnetic levitation transport system

2.2 부상 제어기

캐리어의 안정성 향상에 가장 밀접하게 연결된 것은 부상 전자석에 인가되는 전류의 세기이다. 전류 값은 부상 전자석에 의해 발생하는 부상력을 결정하기 때문이다. 정밀한 전류 값으로 계산된 부상력은 캐리어가 공극 센서와 일정한 간격을 유지하여 공중에 뜰 수 있게 한다. Fig. 3은 레일 면에 부착되어있는 공극 센서와 부상 전자석을 보여준다.

2.2.1 부상력

시스템의 제어에 앞서 대상 시스템의 모델과 운동방정식을 구해야 한다. Fig. 4는 시스템에 적용된 부상 시스템의 단순화 모델을 나타내고 있다. Fig. 3과 같이 부상 전자석이 이송장치 레일 하단에 부착된 형태이며, 전류가 가해지면 부상력이 발생하고 캐



그림 3 초정밀 자기부상 물류 이송장치의 부상 전자석 및 공극 센서

Fig. 3 Levitation electromagnet and gap sensor of high precision magnetic levitation transport system

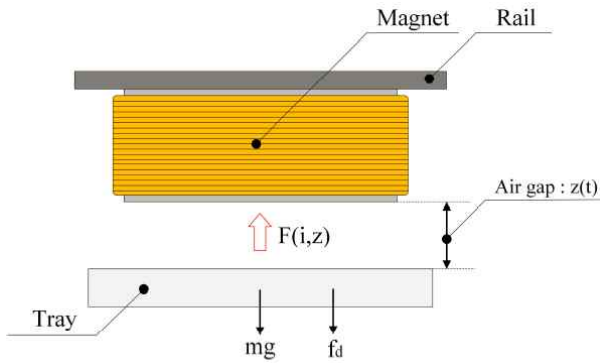


그림 4 부상 전자석 모델링

Fig. 4 Model of the levitation electromagnet system

표 1 부상 전자석 모델 파라메타

Table 1 Parameters of the levitation electromagnet model

Items	Parameter	Weight (kg)
Resistance	R	3.5 [Ω]
Number of turn	N	512 [Ω]
Area	A	0.0015 [Ω]
Permeability	μ	$4\pi \times 10^{-7}$
Nominal current	i_0	1.505 [A]
Nominal gap	z_0	1 [mm]
Nominal voltage	v_0	5.269 [V]
Nominal inductance	L_0	0.247
System mass	m	28.57 [kg]
Gravitational cceleration	g	9.8 [m/s^2]

리어를 위로 끌어 올리는 구조이다. 부상력 $F(i, z)$ 을 함께 표시 하였으며, 이를 통해 전자석의 운동 방정식과 전압 방정식을 구할 수 있다[6].

자기부상 부상력 $F(i, z)$ 는 식 (1)과 같이 공극과 전류에 관한 식으로 표현할 수 있다. 이때, $i(t)$ 는 전류, $z(t)$ 는 공극, B 는 공극에서의 자속 밀도, A 는 극의 단면적이다. μ_0 는 공기의 투자율,

N 은 코일의 턴수, 코일 저항 R 과 코일 인덕턴스 L 이며 자세한 수치는 Table 1에 나타내었다.

$$F(i, z) = \frac{B^2 A}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 본 시스템의 전압, 전류 방정식을 수식 (2)와 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} v(t) &= R i(t) + \frac{d}{dt} [L(z, i) i(t)] \\ &= R i(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dt} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right] \\ &= R i(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2 z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 A i(t)}{2 [z(t)^2]} \frac{dz(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

본 시스템의 운동 방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, m 은 부상 대상의 질량, $f_d(t)$ 는 시스템의 외란, g 는 중력 가속도이다.

$$m \ddot{z}(t) = -F(i, z) + f_d(t) + mg \quad (3)$$

정상 상태로 수렴하였을 때의 전류, 공극, 전압을 i_0, z_0, v_0 라고 하면 각각의 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = i_0 + \Delta i, z = z_0 + \Delta z, v = v_0 + \Delta v \quad (4)$$

부상전자석의 정상상태 동작점 부근에서 식 (2)와 (3)을 선형화 하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다. 이때,

$$k_z = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2 z_0^3}, k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2 z_0^2}, L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2 z_0} \text{이다.}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \ddot{z} \\ \Delta \dot{z} \\ \Delta \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_z/m & 0 & -k_i/m \\ 0 & i_0/z_0 - R/L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta \dot{z} \\ \Delta i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/m \\ 1/L_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ f_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

4장에서 식 (5)을 사용하여 시뮬레이션 모델을 구현하고, 이를 사용하여 본 논문에서 확인하고자 하는 알고리즘의 성능을 평가한다.

2.2.2 부상 제어

캐리어의 정밀 부상을 위한 제어기는 Fig. 5와 같이 구성된다. 기존 자기부상 시스템의 공극 제어 시스템에 전류 제어가 삽입되어 있는 형태이다. 외부 루프(outer loop)에 위치한 공극 제어기와 내부 루프(inner loop)에 위치한 전류 제어기로 구성되며, 본 논문에서 이 둘을 부상 제어기라고 칭한다. 이는 기존의 제어 시스템보다 정밀한 제어를 목표로 안정적으로 공정이 진행되도록 한다.

부상 제어는 공극 지령과 캐리어의 위치 정보를 받아 제어할

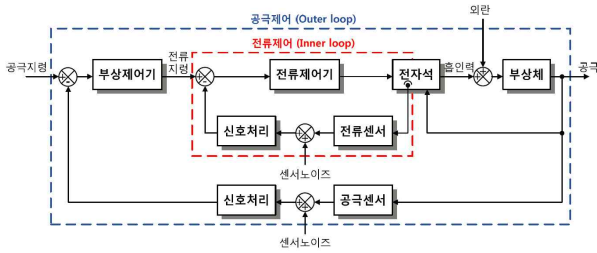


그림 5 부상 제어 블록 다이어그램
 Fig. 5 Conceptual block diagram of levitation control

수행하며, 공극 제어기는 PD(Proportional - Derivative) 제어기에 가속도(Acceleration)를 추가한 PDA 제어를 사용하여 내부 루프의 전류 지령을 생성하고, 전류 제어기는 부상 제어기가 요구하는 전류를 PI(Proportional-Integral) 제어를 통해 정밀하게 생성한다. 가속도를 추가로 사용한 이유는 전자석 프레임의 진동이 발생하는 경우 이를 줄여주기 위함이다. 부상 제어기를 구성하는 부분에서는 전류 제어기와 공극 제어기가 구현되어 있으며, 캐리어의 위치 및 측정되는 센서 값, 목표 공극 등의 정보를 받아 제어 신호를 출력한다[2].

전류 제어기는 전자석의 인덕턴스(L)에 의한 지연을 최소화하여 제어 응답 특성을 높이는 용도로 설계되었다. 디스플레이 패널 사이즈가 증가할수록 캐리어의 크기도 증가하는데, 결국 캐리어의 무게 증가로 이어진다. 보다 무거운 캐리어를 안정하게 이송하기 위해서는 높은 부상력을 필요로 하는데, 전자석의 코일을 많이 감으면 부상력은 커진다. 하지만 코일 턴수가 늘어날수록 인덕턴스(L)도 증가시키고 이는 전기적 시정수(time constant, L/R)를 높이는 효과가 있어 제어 입력 전압과 실제 코일에 흐르는 전류 사이에 위상 지연을 심화시켜 시스템을 불안정하게 한다. 코일에 흐르는 전류가 실제 부상력으로 나타나므로 전류 제어를 통해 부상 제어기의 출력된 전압과의 위상 지연을 최소화해야 한다[3].

전류 제어기를 설계할 때 가장 주의해야 할 점은 이중 루프로 설계되어있기 때문에 내부 루프의 응답이 외부 루프에 비해 적어도 5배 이상 크게 설계되어야 한다는 것이다. 또한, 전류 제어기의 대역폭을 PWM(Pulse Width Modulation) 스위칭 주파수(50kHz)의 최소 1/20이하로 설정하여 안정적인 동작을 할 수 있도록 하는 것이 바람직하다[3].

3. 오프셋(offset) 추정 알고리즘

3.1 알고리즘의 필요성 및 성립 조건

실제 개발 장치에서는 다양한 영향으로 정밀한 제어를 하는데 어려움이 있다. 그 중 하나의 원인으로 공극 센서 설치 과정에서 발생하는 편차가 있다. 이송장치에 센서를 부착하는 과정에서 발행하는 미세한 편차는 마이크로 단위로 정밀하게 동작해야 하는 본 시스템의 안정성 및 정밀도를 저감시키는 영향이 되기 때문이

다. 센서 데이터는 부상을 위해 전자석에 필요한 전류 값을 결정하는 기준이 되므로, 설치 편차를 보정한 센서 데이터가 필요하다.

현재 시험 장치에서의 편차 보정은 캐리어를 착지시키고 전자석 간격에 해당하는 길이만큼 한 칸씩 수동으로 이동하며 측정된 센서 값의 평균으로부터 설치 편차로 추측한다. 하지만 이와 같은 과정은 정확한 편차를 알아낼 수 없으며, 환경이 바뀔 때마다 보정해야 한다는 단점이 있다. 또한, 센서의 측정 범위가 착지 상태에서의 공극 범위보다 작거나 동일하다면 측정값의 신뢰도가 떨어진다. 실제 산업 현장에 본 시스템이 적용되어 디스플레이 이송 거리가 늘어나면 지금과 같은 방식으로는 보정에 어려움이 있기 때문에 비용 및 시간 절감 효과를 위해서는 캐리어를 부상시킨 상태에서 측정된 데이터를 사용하여 자동으로 보정하는 방법이 필요하다.

센서는 좌우 각각 20개씩 총 40개이며, 캐리어를 부상하는데 필요한 센서는 좌우 7개씩이다. 캐리어는 부상이 된 상태에서 추진 전동기에 의해 주행방향으로 이동하며, 센서 설치 편차가 이동과정에서 피치 운동의 원인이 되므로 제안된 알고리즘을 사용하여 편차를 추측한다. 캐리어를 주행 방향으로 1회 움직이며 활성화 된 7개의 센서 중 가운데 위치한 센서가 캐리어 중심에 놓일 때 오프셋 추정에 필요한 데이터를 취득하게 되며, 주행이 끝나면 오프셋 알고리즘으로 취득한 편차를 보상하고 다시 캐리어를 처음부터 주행하여 보상된 정도를 확인한다.

Fig. 6은 캐리어가 부상/안내/추진하는 방향을 보여주며, 그에 해당하는 롤/피치/요의 운동을 보여준다. 실제 시스템에서 이와 같이 6자유도 형태의 캐리어 움직임이 발생하지만, 본 논문에서는 부상 제어와 관련된 수직 방향에 대한 피치와 롤을 주로 고려한다.

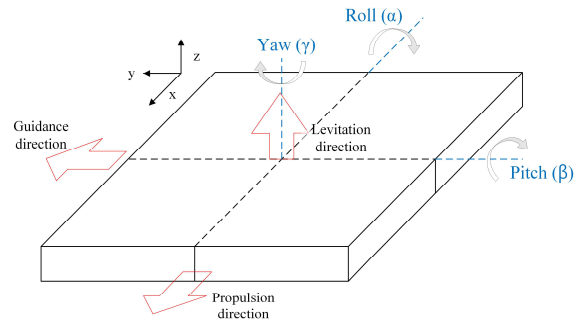


그림 6 캐리어의 6자유도
 Fig. 6 6 degrees of freedom motion of the carrier

알고리즘을 적용하기 위해 3가지의 가정이 필요하다. 첫째, 캐리어의 표면이 선형(linear)적이고 평탄(flat)해야 한다. 현재 캐리어의 측정 평탄도는 ±15μm 수준으로 정밀하게 제작되어 있기 때문에 이 가정은 어느 정도 만족한다. 둘째, 좌/우 센서 간의 배치 간격은 알고 있으며 일정해야 한다. 캐리어를 부상시킨 상태에서 측정되는 공극 값을 사용하기 때문에 총 14개의 데이터가 스위칭되며 입력되고 추정 알고리즘 상의 계산의 편의성을 위해 이와 같은 가정을 하였다. 셋째, 센서 데이터는 7개의 센서 중 가운데 센서가 캐리어 중앙에 위치했을 때 습득한다. 이 위치일

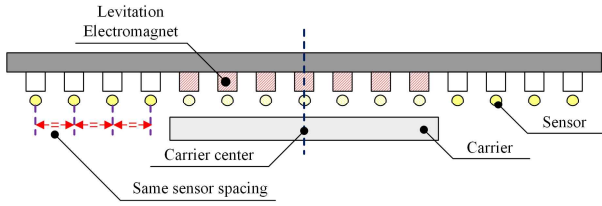


그림 7 부상 전자석 및 센서의

Fig. 7 Electromagnet and sensor activation according to the carrier position

때 캐리어가 스위칭의 영향을 비교적 적게 받기 때문에 취득한 데이터 중 중앙부 센서가 캐리어 중앙에 위치하는 데이터를 사용한다. Fig. 7은 동일한 전자석과 센서 간격을 가지는 배치에서 중앙 센서가 캐리어 중심에 있는 경우를 보여준다.

3.2 오프셋 추정 알고리즘

초정밀 자기부상 물류 이송장치는 왼쪽 부상 센서를 기준으로 부상 단계에서 #1-7번 센서가 입력되고, 주행 방향으로 1번이 스위칭하면 #2-8번 센서 데이터가 입력된다. 그리고 2번 스위칭하면 #3-9번 센서 데이터가 입력되며, 센서는 좌, 우 각각 20개이므로 스위칭은 총 13번을 하게 된다. 이 과정에서 설치 편차는 센서와 캐리어 사이의 공극을 불규칙하게 만들고, 이에 따라 캐리어에 피치 운동이 발생하게 된다. 그러므로 설치 편차를 추정하기 위해서는 캐리어의 설치 편차(e , error)와 피치 운동에 의해 기울어진 상태(d)를 모두 고려해야 한다.

본 알고리즘을 사용하는 공극적인 목표는 계산되어지는 오프셋(offset)이 실제 설치 편차(e)를 추종하는 것이다. 오프셋과 설치 편차의 차이가 적을수록 추종이 잘 된 것이며, 계산된 오프셋을 시뮬레이션에 입력하여 부상 결과를 통해 추종된 결과가 부상 정밀도에 미치는 결과를 확인할 수 있다.

다음은 step 1-5를 통해 알고리즘을 수식으로 나타내었다. 알고리즘의 원리 설명의 편의를 위해 Fig. 8과 같이 7개의 센서가 아닌 3개의 센서만 사용하여 나타내며, 공극적인 목표 공극 지령치는 사용자가 설정하는 절대 기준 목표 공극(tg , target gap)이다.

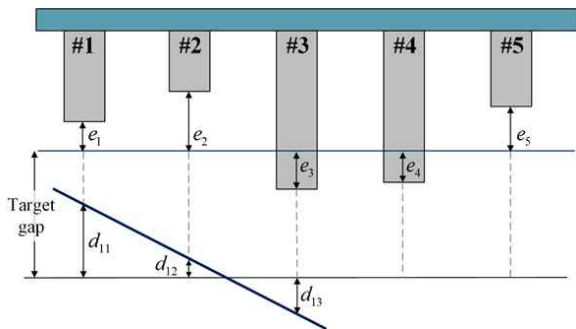


그림 8 Step 1의 부상 상태

Fig. 8 Static levitating state of step 1

(1) step 1

센서 설치 편차는 부상 전자석에 가해지는 전류 변화의 원인이 되기 때문에 부상 안정성에 영향을 미치게 된다. 이는 또한 캐리어가 기울어지는 것으로 이어진다. 수식에서 e_j 는 j 번째 센서의 설치 편차이고, d_{ij} 는 캐리어가 i 번째 측정 위치에 놓였을 때 j 번째 센서 위치의 기울어진 값을 의미한다. 절대 공극(tg)은 모든 센서가 동일하게 추구하는 공극적인 값이기 때문에 모두 같은 값이다.

식 (6)은 Fig. 8과 같이 정지부상 상태에서 공극 센서(#1-3)이 측정하고 있는 공극 데이터를 나타낸 것이다. 수식에서 측정 데이터 m_{ab} 는 a 번째부터 b 번째 센서까지 측정된 공극 데이터이며, 기본 절대 공극(tg)에서 설치 오차(e_j)와 기울어진 정도(d_{ij})를 합하여 나타내었다.

$$m_{13} = \begin{bmatrix} tg + e_1 - d_{11} \\ tg + e_2 - d_{12} \\ tg + e_3 - d_{13} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) step 2

캐리어가 주행을 하면 Step 1에서 #1-3번 센서 아래에 있던 캐리어가 #2-4번 센서로 스위칭 한다. 그러므로 식 (7)은 식 (6)과 동일하게 데이터가 측정된다. 이때, 설치 편차와 추진력에 의한 외란 등에 의해 캐리어의 기울어진 값(d_{ij})은 변화가 발생한다.

$$m_{24} = \begin{bmatrix} tg + e_2 - d_{22} \\ tg + e_3 - d_{23} \\ tg + e_4 - d_{24} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) step 3

Step 3에서는 Step 1, 2에서 취득한 데이터를 사용하여 임시 설치 오차(ie , install error)를 계산하는 과정이다. 실제 실험 과정에서는 공극 데이터를 빼주는 과정만므로 오차와 기울어진 정도를 구분할 수 없으므로 캐리어가 정지 부상한 상태에서 취득한 데이터에서 절대 공극을 뺀 후 나오는 값을 임시 설치 오차(ie_{ab})라고 가정한다. 여기서 a 와 b 는 센서 번호로 m_{ab} 에서의 a , b 와 동일하다.

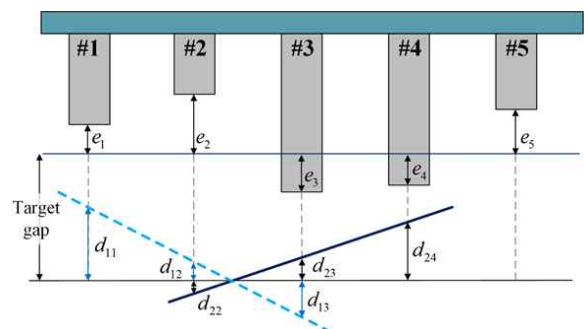


그림 9 1번 스위칭 후의 부상 상태(step 2)

Fig. 9 Static levitating state of step2

식 (8)과 (9)는 #1-3, #2-4 센서의 측정 데이터(m_{ab})에서 절대공극(tg)을 뺀 결과이며, 그 값(ie_{ab})이 설치 편차(e_j)와 기울어진 정도(d_{ij})인 것을 확인할 수 있다.

이때 식 (8)은 센서 #1-3번의 오프셋(offset)으로 설정할 수 있다. 실제 데이터에는 센서 편차(e)뿐만 아니라 기울어진 정도(d)가 포함되어 있지만, 이를 #1-3번 데이터의 오프셋이라고 설정한다.

$$ie_{13} = m_{13} - tg \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} tp + e_1 - d_{11} \\ tp + e_2 - d_{12} \\ tp + e_3 - d_{12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} tg \\ tg \\ tg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 - d_{11} \\ e_2 - d_{12} \\ e_3 - d_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} offset_1 \\ offset_2 \\ offset_3 \end{bmatrix}$$

$$ie_{24} = m_{24} - tg \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} tg + e_2 - d_{22} \\ tg + e_3 - d_{23} \\ tg + e_4 - d_{24} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} tg \\ tg \\ tg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_2 - d_{22} \\ e_3 - d_{23} \\ e_4 - d_{24} \end{bmatrix}$$

(4) step 4

step 4는 Step 3에서 측정된 데이터를 사용하여 기울어진 정도의 합(ds)을 구한다. step 1과 2는 각 #1-3, #2-4번 센서의 데이터를 측정된 결과이기 때문에 #2, 3번 센서 측정 결과가 중복된다. 그러므로 식 (10)와 같이 공동으로 측정되는 센서들의 기울어진 정도 합(ds_c)을 구할 수 있다. 여기서 c는 #c번째의 센서를 나타낸다.

식 (10)는 step3에서 측정된 데이터를 사용하여 나타낸 ds_2, ds_3 의 합 결과이다.

$$ds_2 = e_2 - d_{22} - (e_2 - d_{12}) \quad (10)$$

$$= e_2 - d_{22} - offset_2 = d_{12} - d_{22}$$

$$ds_3 = e_3 - d_{23} - (e_3 - d_{13})$$

$$= e_3 - d_{23} - offset_3 = d_{13} - d_{23}$$

(5) step 5

센서 #2, 3번의 ds_2, ds_3 는 step 3-4와 같은 방식으로 계산했지만, step 5에서는 #4-20번의 $ds_4 - ds_{20}$ 를 비례를 사용하여 구한다. 센서 간의 설치 간격이 동일하고, 캐리어의 상면이 수평(flat)하다는 조건이 있기 때문이다.

먼저 ds_4 를 비례 원리를 적용하여 구하기 위해서는 Fig. 10처럼 #2, 3번 센서의 ds_2, ds_3 데이터가 필요하다. ds_2, ds_3 의 차이

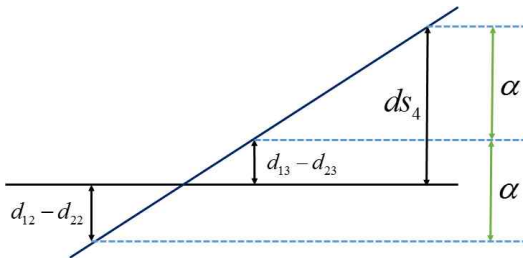


그림 10 4번째 센서의 기울어진 정도 계산
Fig. 10 Calculation of ds_4 (#4th sensor)

가 ds_3, ds_4 의 차이와 동일하기 때문이다. step 3-4를 통해 이미 알고있는 데이터 ds_2, ds_3 의 차이를 Fig. 10의 α 라고 가정하면, 이는 수식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며 이 값은 ds_3, ds_4 의 차이와 동일하다. 차이로 구한 α 는 ds_4 를 예측하는 데이터로 사용된다. Fig. 10과 수식 (12)와 같이 ds_4 는 ds_3 에 α 를 더한 결과이기 때문이다. 이와 같은 방식을 사용하면 ds_5 는 ds_3 과 ds_4, ds_6 는 ds_4 과 ds_5 를 사용하여 구할 수 있고, 마지막 ds_{20} 도 동일하게 ds_{18} 과 ds_{19} 를 사용하여 구할 수 있다.

$$\alpha = ds_3 - ds_2 = d_{13} - d_{23} + d_{22} - d_{12} \quad (11)$$

$$ds_4 = \alpha + (d_{13} - d_{23}) \quad (12)$$

$$= 2d_{13} - 2d_{23} + d_{22} - d_{12}$$

식 (10)을 응용하면 ds_4 는 식 (13)처럼 정리할 수 있으며, 식 (14)와 같이 $offset_4$ 를 계산할 수 있다. $offset_5 \sim offset_{20}$ 도 같은 계산으로 사용하여 구할 수 있다.

$$ds_4 = e_4 - d_{24} - offset_4 \quad (13)$$

$$offset_4 = e_4 - d_{24} - 2d_{13} + 2d_{23} + d_{12} - d_{22} \quad (14)$$

오프셋(offset)은 설치 편차(e)와 유사하게 추종하는 것이 궁극적인 목표이다. 그러므로 $offset_4$ 는 e_4 와 유사한 결과로 계산되어야 한다. 하지만 수식 (14)는 설치 편차 e_4 에 $-d_{24} - 2d_{13} + 2d_{23} + d_{12} - d_{22}$ 값이 추가되어 있다. 이는 초반 오프셋을 #1-3 센서 기울어진 정도가 포함되어 식 (8)과 같이 가정하고, 이 데이터를 사용하여 비례 원리로 다른 센서의 오프셋을 계산했기 때문에 오차가 누적된 결과이다.

마찬가지로 #5번 센서의 오차는 #4번 센서의 오차를 포함하여 누적되고, 이는 #6 - 20번 센서도 동일한 방식으로 계산하기 때문에 앞에서 누적된 오차가 계속해서 쌓여서 마지막까지 남게 된다. 결과적으로 #1-20번 센서의 오프셋(offset)은 불필요한 데이터가 누적되어 남은 상태가 된다. 이는 4장의 시뮬레이션의 Fig. 14를 보면 오차가 계속해서 누적된 것을 그래프로 확인할 수 있다.

4. 시뮬레이션

Fig. 11은 시뮬레이션 모델의 구조이다. 각 모델은 크게 두 부분으로 나뉘는데 위쪽 부상 제어기(Levitation Controller)를 구성하는 부분이며, 아래는 초정밀 자기부상 시스템을 구성(Tray System)하는 부분이다.

이송장치를 구성하는 부분에서는 여러 정보를 이용하여 계산된 부상 제어기 출력 데이터를 고려하여 전자석에 흐르는 전류를 계산하는 부분, 전류가 전자석에 인가하여 만들어내는 부상력에 관한 부분, 그리고 캐리어의 동역학적 움직임을 계산해주는 부분 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 부상 안정성 향상을 위한 부상 제어기 부분의 데이터와 부상 정밀도 향상을 위한 공극, 캐

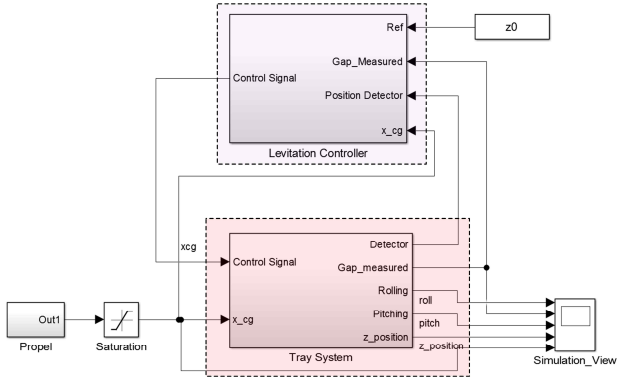


그림 11 초정밀 자기부상 물류 이송장치 MATLAB 모델링
 Fig. 11 MATLAB/Simulink simulation model of maglev transport control system

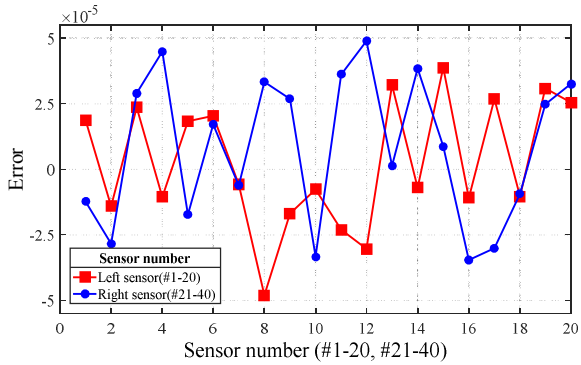


그림 12 랜덤하게 생성한 센서 설치 편차
 Fig. 12 Randomly generated sensor installation errors

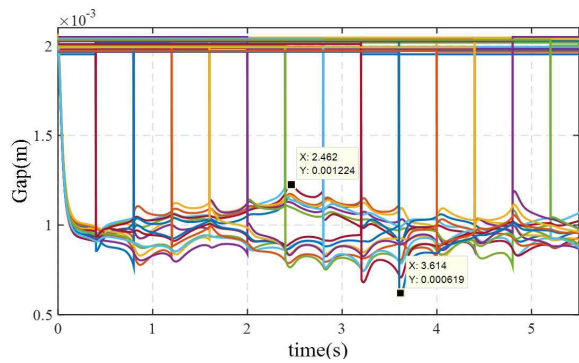


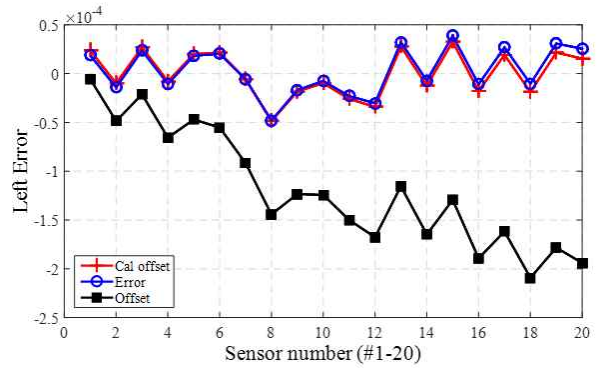
그림 13 랜덤 설치 편차를 적용한 시뮬레이션 결과
 Fig. 13 Simulated levitation results with random sensor offsets

리어의 높이를 각도 데이터를 사용하여 공극의 변화를 중점적으로 분석하였다.

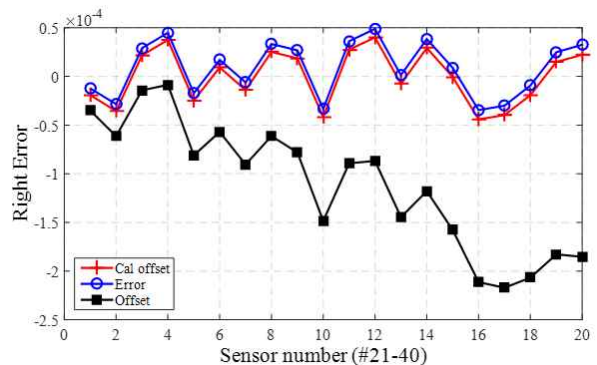
Fig. 12은 본 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 입력한 설치 편차이다. 실제 측정된 설치 편차를 이용할 수 있으나 측정된 값

은 캐리어를 이동시키며 측정하여 롤과 피치의 영향이 없는 절대 값이라고 판단할 수 없다. 그러므로 설치 편차 값은 프레임과 센서의 설치 편차가 $\pm 50\mu\text{m}$ 임을 고려하여 랜덤 함수를 사용하여 생성하였다. Fig. 13은 Fig. 12의 랜덤 편차를 적용하여 나온 시뮬레이션 결과이다. 설치 편차의 영향으로 캐리어에 피치 및 롤 운동이 발생하여 부상 정밀도와 안정성이 매우 낮은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 오프셋 추정 알고리즘을 적용하여 구한 설치 오차 (Offset, Cal offset, Error)를 비교한 그림이다. 본 알고리즘 적용 초기에는 센서 설치 편차를 정확하게 알지 못하기 때문에 편차와 기울기의 예측 값이 실제 값에 차이가 발생하게 된다. 이 차이는 #20번의 센서로 갈수록 증가하는 것을 확인할 수 있고, 이는 앞의 센서에서 발생한 오차가 누적되어 마지막 오프셋의 결과까지 영향을 미치고 있다는 것을 보여준다. 이는 잘못된 초기 편차와 기울기에 대한 영향으로 발생하기 때문에 추정된 오프셋의 선형적 경향(linear trend)을 줄여줌으로써 최소화할 수 있다. 실제 선형적 경향은 MATLAB에서 제공하는 detrend 함수를 사용하여 보정하였으며, 이는 측정 데이터로부터 최소자승법(Least Square Method)에 의해 직선식을 추정하여 제거하는 역할을 하여 추정 오프셋 데이터의 시작점과 끝점 기울기를 찾아 보정해주는 역할을 한다. 알고리즘을 통해 구한 #1-20번 Offset의 시작과 끝 데



(a)



(b)

그림 14 오프셋 추정 결과 (a)왼쪽 (b)오른쪽
 Fig. 14 Offset estimation results (a)left (b) right

이터를 사용하여 기울기를 계산하고, 이를 수평하게 보정하여 경향성을 제거한다. 경향성이 제거되면 피치 운동의 영향을 줄일 수 있다. 이때 경향성을 제거한 데이터가 편차를 추정한 값(cal offset)이며, 보정한 오프셋(cal offset)은 실제 오차(e)와 매우 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 랜덤 함수로 주어진 오프셋과 오프셋 추정 및 경향성을 제거하여 구한 최종 오프셋(Cal offset)의 오차 값이다. 10 μm 이내의 오차를 가지고 오프셋이 추정되었음을 확인할 수 있고 오른쪽보다 왼쪽의 정확도가 조금 더 높게 나타났다.

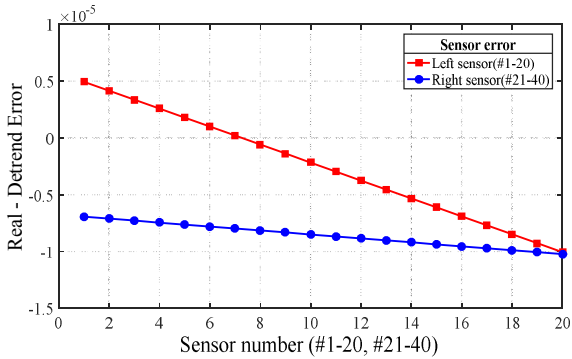


그림 15 선형성을 제거한 센서 오프셋 추정 값의 오차
Fig. 15 Sensor offset estimation error after removing the linear detrend

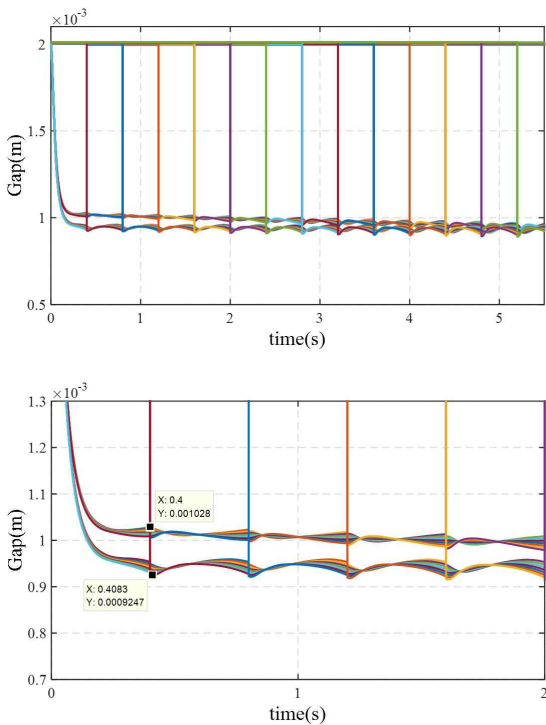


그림 16 오프셋 보정 후의 시뮬레이션 결과
Fig. 16 Simulation results after offset compensation

표 2 알고리즘 적용 전과 후의 공극 값 비교

Table 2 Comparison of results before and after offset estimation algorithm.

	Gap (mm)		Peak - to - peak
	Max	Min	
Before	1.2240	0.6190	0.6050
After	1.0280	0.9247	0.1033

Fig. 16은 동일한 랜덤 오프셋을 가지는 상황에서 추정된 센서 오차를 보정한 후의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 13과 비교하면 캐리어 공극의 변동은 많이 감소하여 롤 운동과 피치 운동이 많이 없어진 것을 확인할 수 있으며, Table 2에 적용 전과 후의 공극의 최댓값, 최솟값과 첨두값(peak - to - peak)를 정리하였다. 다만 시뮬레이션 초기에 좌우 공극 값이 벌어진 것을 확인할 수 있는데 이는 좌, 우측 추정 오프셋의 오차에 기인하는 것으로 보인다. 시간이 지남에 따라 캐리어가 #20번 센서 쪽으로 이동하면서 좌우 공극 값의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 15에서 좌우 오프셋 추정 값의 오차가 #20번 센서로 갈수록 비슷해지는 경향과 일치 한다. 즉, 비례 알고리즘을 사용하여 센서 오차 값과 피치 운동을 줄일 수 있지만 좌우 추정 오프셋의 오차에 의해 롤 운동이 발생할 수 있음을 의미한다. 10μm이 내의 미세한 좌우 오프셋 오차에도 공극 값에 큰 차이가 나타남을 확인할 수 있으며 선형 경향성을 보다 정밀하게 줄일 수 있으면 성능은 더 좋아질 것으로 기대된다.

실제 적용에 있어서는 #1번과 #20번의 설치 오차를 가능한 줄여서 오차가 없는 상태로 만든 후 알고리즘을 적용할 수 있다. 센서가 장비의 바깥쪽에 위치하기 때문에 설치 과정에서 세밀한 조정이 가능하며, 알고리즘 적용 후 #1번과 #20번 센서를 연결하는 가상의 직선을 따라가는 방식으로 오프셋이 보정될 수 있다.

3. 결 론

조정밀 자기부상 물류 이송장치는 분진과 수분에 취약한 OLED 생산 공정에 적합하다. 진공환경에서 캐리어 하단에 디스플레이 패널을 부착한 형태로 공정이 가능하기 때문이다. 본 논문에서는 이송장치의 보다 안정적인 디스플레이 생산 공정을 위해 부상력 증가에 따른 인덕턴스의 영향을 최소화하여 응답속도를 증가할 수 있는 부상 제어를 소개하였다. 또한, 공극 오프셋 추정 연구는 시스템 설치 과정에서 나타나는 편차를 줄이기 위해 MATLAB/Simulink를 사용하여 해석적인 방법으로 설치 편차를 추정했다. 추정한 편차는 다시 시뮬레이션에 입력하여 부상 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 비교하였다. 그 결과 오프셋 추정 알고리즘을 사용한 부상 안정성이 약 6배 향상된 것을 확인하였다. 추후에는 알고리즘의 정확성을 확인하기 위해 실험을 통해 비교할 계획이다. 레이저 간섭계를 사용하여 실제 시스템의 부상 정밀도를 측정하고, 알고리즘으로 추정한 오프셋을 입력하여 얼마나 개선되었는지 비교 및 분석할 예정이다.

감사의 글

김민과 원문철은 충남대학교 학술연구비 지원으로 본 연구를 수행하였습니다.

References

- [1] K.C. Lee (2014) Section control of the electromagnetic levitation conveyor (EMLC) for a FPD glass carrying robot, PhD Dissertation, Pusan University.
- [2] H.S. Han, D.S. Kim (2016) Magnetic Levitation: Maglev Technology and Applications, Springer, New York, USA.
- [3] C.W. Ha, C.H. Kim, J.W. Lim (2016) Development of Levitation Control for High Accuracy Magnetic Levitation Transport System, Journal of Institute of Control, Robotics and System, 22(7), pp. 1-1.
- [4] C. W. Ha, C. H. Kim, J. W. Lim, D. Y. Kim (2016) Development of High accuracy magnetic levitation transport system, Prof. of the 31st ICROS Annual Conference(in Korean), Seoul, pp. 41-42.
- [5] C.H. Kim, J.M. Lee, H.S. Han (2011) Development of a Maglev LCD glass conveyor, Transactions of the KSME A, 47(4), pp. 581-587.
- [6] M. Kim, J.H. Jeong, J.W. Lim, C.H. Kim, M.C. Won (2017) Design and Control of Levitation and Guidance Systes for a Semi-High-Speed Maglev Train, Journal of Electrical Engineering& Technology, 12(1), pp. 117-125.

저 자 소 개



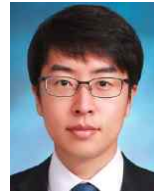
김민(Min Kim)

2015년/2017년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업(공학학사/공학석사), 2017년~현재 보쉬전장 재직 중. 관심분야는 모터 제어, 메카트로닉스 시스템 제어, 자기부상 제어.



김창현 (Chang-Hyun Kim)

2000년/2002년/2009년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학학사/공학석사/공학박사). 2009년~현재 한국기계연구원 자기부상연구실 선임연구원 재직 중. 관심 분야는 자기부상 열차, 자기부상 물류 이송장치 부상/추진 제어, 지능 제어.



하창완 (Chang-Wan Ha)

2008년 한동대학교 기계제어공학부 졸업(공학학사). 2010년/2014년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사/공학박사). 2014년~현재 한국기계연구원 자기부상연구실 선임연구원 재직 중. 관심분야는 자기부상 열차, 자기부상 기술을 활용한 물류이송장비, 모션 제어, 강인 제어, 고속주행 시 발생하는 진동 저감 제어.



원문철 (Mooncheol Won)

1983년 서울대학교 조선공학 학사/1985 서울대학교 조선공학과 석사/1995 U.C. Berkeley 기계공학 박사/1995~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수, 관심분야는 메카트로닉스 시스템 제어 및 신호처리, 인공지능 알고리즘을 이용한 시계열 데이터 예측.