

자기부상 물류이송시스템 설계에 관한 연구

A Study on the Design of Logistics Transportation System using Magnetic Levitation

최대규* · 조재훈** · 김용태***†

Dae-Gyu Choi, Jae-Hoon Cho and Yong-Tae Kim†

*국립 한경대학교 전기전자제어공학

† Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

**국립 한경대학교 스마트물류기술연구소

Smart Logistics Technology Institute, Hankyong National University

요 약

본 논문에서는 이동할 때 마찰이 없고 소음이나 먼지가 발생하지 않는 자기부상 물류이송시스템의 설계 방법을 제안한다. 제안된 자기부상 이송시스템은 크게 부상시스템과 추진시스템으로 구분된다. 자기부상시스템은 레일로 전자석을 끌어당기는 흡인식 부상시스템으로 구현하였으며, PID 제어를 사용하여 전자석 공급 전류를 제어하였다. 자기부상 이송시스템의 추진시스템에는 바퀴의 마찰과 모터의 회전이 없고 소음이 최소화 되는 선형 유도전동기를 사용하였다. 추진시스템의 제어 방법은 입력되는 직류전압에서 큰 교류전압을 얻을 수 있는 공간벡터 펄스폭 변조방식을 적용하였다. 제안한 자기부상 물류이송시스템은 부상 및 추진 제어 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

키워드 : 자기부상, 이송시스템, PID제어, 전자석, 선형 유도전동기

Abstract

In the paper, we propose a design method for the logistics transportation system using magnetic levitation that has a good characteristics without mechanical friction, noise and dust. The proposed transportation system consists of a levitation control system and a propulsion control system. Magnetic levitation system is an electromagnetic suspension system in which electromagnet generates magnetic attractive force and the attractive force pulls the rail. We design a PID controller for the current control of electromagnets. We use linear induction motors for propulsion of the proposed logistics transportation system and adapt the space vector PWM method for the propulsion control system. The proposed transportation system using magnetic levitation is verified performances through levitation and propulsion experiments.

Key Words : Magnetic Levitation, Transportation System, PID control, Electromagnet, Linear Induction Motor

1. 서 론

국내 반도체 제조기술은 높은 경쟁력을 보유하고 있으나,

접수일자: 2014년 3월 23일

심사(수정)일자: 2014년 4월 9일

게재확정일자 : 2014년 4월 9일

† Corresponding author

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [GRRC 한경2011-B01, 스마트물류기술연구소]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

반도체 공정 및 이송 장비들은 그에 비해 낙후되어 있으며, 대부분의 장비들은 수입 제품에 의존하고 있다. 또한 많은 국내 반도체 업체들은 생산성 향상과 원가절감을 목표로 다양한 기술들의 연구 개발이 진행되어지고 있으며, 경쟁력 향상을 위해서는 장비의 국산화와 반도체 생산 및 이송공정 기술의 개발을 통한 단가 경쟁력 및 고품질 생산이 필수적으로 요구되어 지고 있다[1-2]. 특히 반도체 공정 중 먼지의 발생과 유입이 최소화되도록 요구되는 클린룸에서의 이송공정에 적용 가능한 자기부상식 반도체 이송장치에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[3-4].

자기부상기술은 기계적인 접촉에 의해 발생하는 마찰, 열, 소음 등을 거의 없앨 수 있다는 장점들로 인하여 자기 베어링, 플라이 휠, 산업용 액추에이터 등에 널리 사용되고 있다. 자기부상시스템의 부상력을 얻는 방법으로는 흡인부상(electromagnetic levitation), 반발부상(electrodynamic levitation)으로 구분할 수 있으며, 흡인 부상 방식이 반발

부상방식보다 구조가 간단하고, 단거리 운송에 장점이 있어서 실제 산업 적용을 위한 실용화 연구가 많이 진행되어지고 있다[5]. 자기부상시스템의 추진 제어는 회전형 기기와 달리 교류의 이동자계를 이용하여 직접 직선추력을 발생시키는 선형 유도전동기를 사용하여 제어하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 바퀴 등과 같은 별도의 기계적 동력 전달장치를 필요로 하지 않아서 진동과 소음 측면에서 우수하며, 상대적으로 큰 추진력을 얻을 수 있기 때문에 가속 및 제동 등과 같은 우수한 특성을 나타낸다.

흡인식 자기부상시스템은 반발식 자기부상시스템과 달리 시스템의 자체 불안정성과 비선형성이 크다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점으로 인해 실제 산업현장 적용을 위해서는 자기부상시스템의 안정화를 위한 효과적인 제어기 설계가 필요하다. 현재까지도 비선형 시스템의 제어분야에서 성능이 우수하고 다양한 제어기의 연구들이 진행되어지고 있으나, 이러한 제어기들은 대부분 구조가 복잡하고 실제 산업현장에 적용을 위해서는 비용 및 하드웨어의 구현 등의 어려운 점들이 있어 실제 산업현장에서는 비교적 신뢰성이 높고 구현이 용이한 PID제어기를 이용한 부상제어 연구들이 많이 진행되어지고 있다[6].

본 논문에서는 PID 제어기를 적용한 흡인식 부상제어시스템과 직선 추진력을 발생시키는 선형 유도전동기를 사용한 자기부상 이송시스템을 설계하였으며, 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 초기 공극 0mm에서 정격 공극 3mm로 부상한 후 목표 위치까지 반복 운전하는 실험을 수행하였다. 실제 실험을 통해서 제안된 시스템의 성능이 만족할만한 성능을 보임을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 자기부상 물류 이송시스템의 구성을 설명하고, 3장에 전자석을 이용한 자기부상제어기 설계에 대하여 설명하였다. 4장에서는 선형유도전동기를 사용한 추진제어시스템에 관해 설명하고, 5장에서는 자기부상 물류이송시스템의 성능을 실제 실험을 통하여 검증하고, 6장에서 결론을 맺었다.

2. 자기부상 이송시스템의 설계

자기부상 물류이송시스템의 구성은 그림 1과 같이 선형 유도전동기, 4개의 공극 센서, 4개의 전자석, 레일로 구성하였다. 선형 유도전동기는 자속의 흐름이 이동자의 진행 방향과 같은 방향으로 형성되는 중자속형 선형 유도전동기로 선정하였고, 도전성 금속 목표물의 유기된 와전류에 의한 임피던스 변화를 이용하는 와전류 형태의 공극 센서를 사용하였다. 전자석의 부상력은 500N으로 초기 공극 0mm에서 정격 공극 3mm로 자기부상이 가능하게 설계하였다.

자기부상 이송시스템의 제어 구조는 그림 2와 같다. PC에서 실시간으로 각 구성부의 상태 모니터링을 할 수 있고, 조이스틱을 이용한 부상 및 추진 명령을 각 제어기에 전송하여 자기부상 이송시스템의 제어가 가능하다. PC와 각 추진 및 부상 제어시스템은 RS232 시리얼 통신으로 데이터를 송수신한다. 전체 제어시스템은 부상제어시스템과 추진제어시스템으로 이루어져 있다. 부상 제어기는 실시간으로 전자석과 레일 사이의 공극 정보를 피드백 받아서 부상 제어기를 통해 목표 공극까지 PID제어를 이용하여 부상하며, PWM 펄스폭 비율을 조절하여 공급 전류를 제어한다. 자기부상을 위해서는 전자석이 부상하는데 필요한 안정적인 전

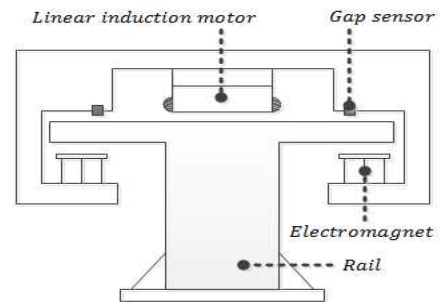


그림 1. 자기부상 이송시스템의 구성
Fig. 1. The structure of magnetic levitated transportation system

원을 공급해주는 전원장치가 필요하기 때문에 자기부상 전원장치는 초파(chopper)의 형태로 구성되어져 있다. 추진 제어기는 공간벡터 펄스폭 변조방식을 이용한 PWM 신호를 발생하여 선형 유도전동기를 제어한다. 인버터는 전력 변환부이며 DC전원을 원하는 주파수의 AC전원으로 변환시켜 주는 장치이고, 고주파수로 스위칭 할 수 있는 IGBT를 사용하였다.

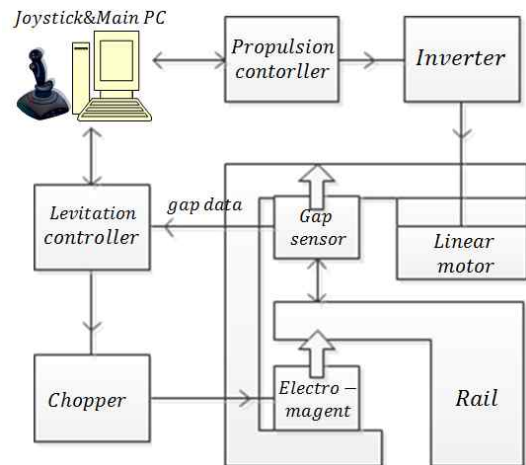


그림 2. 자기부상 이송시스템의 제어 구조
Fig. 2. Control architecture of the magnetic levitated transportation system

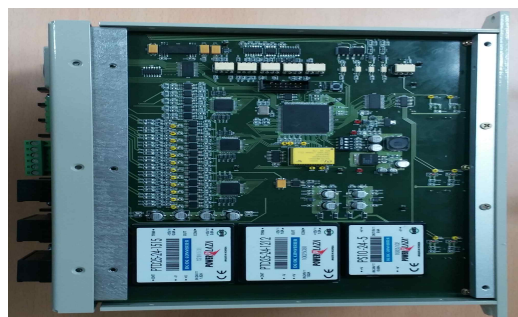


그림 3. DSP28335 기반의 부상제어기
Fig. 3. DSP28335-based levitation controller

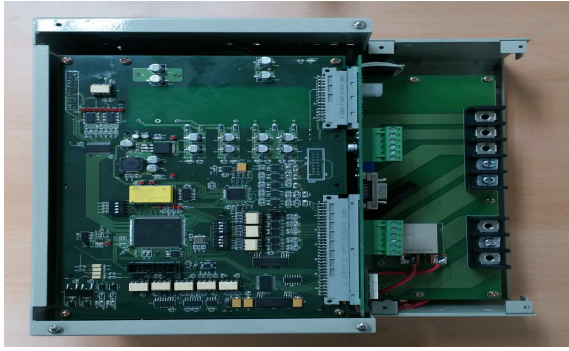


그림 4. DSP28335 기반 추진 제어기
Fig. 4. DSP28335-based propulsion controller

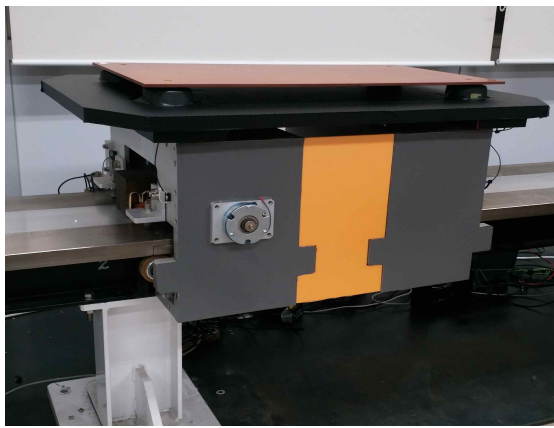


그림 5. 개발된 자기부상 이송시스템의 사진
Fig. 5. Photo of the developed magnetic levitated transportation system

3. 자기부상제어기 설계

3.1 자기회로법을 이용한 전자석의 설계

자기부상시스템의 전자석 설계 단계는 일반적으로 초기 시스템 사양 결정, 설계 변수 계산, 전자석 형상 결정, 검증으로 나눌 수 있다. 초기 사양결정에서는 차량의 중량, 전자석의 길이 및 수량, 초기 공극 및 정격 공극 등을 설정하고, 설계 변수 계산에서는 초기 사양 값들을 이용하여 기자력, 자속밀도 및 코일의 전류밀도 등을 계산한다. 형상 결정에서는 앞에서 계산된 변수의 값들을 이용하여 코어 및 전자석의 형상을 결정하게 되고 최종적으로 전자장 해석 도구나 실험 등을 통하여 초기 사양 값에 대한 성능 만족을 검증하게 된다[7-9].

부상 전자석의 수학적 해석을 위하여 그림 6에서 나타낸 자기 등가회로법을 적용하였다. 그림 6에서 누설자속이 없고, 자로(magnetic flux path)는 철심의 중심을 통과한다고 가정하면 부상 전자석의 힘은 다음의 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = 2R_\delta + R_r + R_c \quad (1)$$

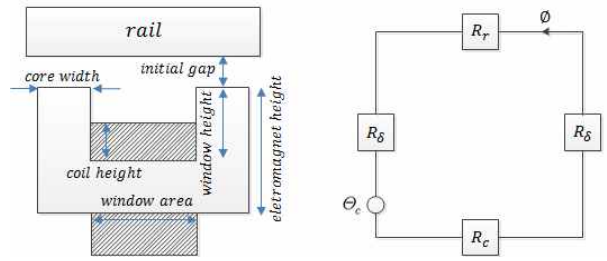


그림 6. 전자석의 형상도 및 자기등가회로
Fig. 6. Schematic diagram of electromagnet and the magnetic equivalent circuit

$$\Phi_\delta = \frac{Ni}{R_t} \quad (2)$$

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{A_g} \quad (3)$$

$$F_0 = \frac{\partial W}{\partial g_0} = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} S = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} 2A_g \quad (4)$$

$$= \frac{B_\delta^2}{\mu_0} A_g = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{4} \left(\frac{i_0}{g_0} \right)^2$$

여기서, θ_c 는 기자력, Φ 는 자속, R_t 는 전체 자기저항, R_r 는 레일의 자기저항, R_c 는 코어의 자기 저항, R_δ 는 공극의 자기 저항, Φ_δ 는 공극에서의 자속, B_δ 는 공극의 자속밀도, A_g 는 전자석의 단면적, μ_0 는 진공투자율, F_0 는 흡인력을 나타낸다. 자기부상 이송시스템의 전자석 설계를 위하여 초기 사양을 선정하고, 자기회로법을 통해 계산된 설계 값을 다음의 표 1에 나타내었다. 다음으로 부상력과 권선수, 정격전류, 권선의 직경을 초기 값으로 선정하여 전자석 설계를 하였다.

표 1. 자기회로법에 따른 설계 값

Table 1. Design values by magnetic circuit method

Specifications	Value	Unit
Total weight[T_{mass}]	200	kg
Number of electro-magnet[N_m]	4	ea
Levitation force per electromagnet[F_0]	500	N
Current density[J]	2.94	A/mm ²
Current rating[i_0]	3.6	A
Number of coil[N]	700	turn
Maximum magnetic flux density[B_{max}] Core (SM20C)	1	Tesla
Gap rating[g_0]	3	mm
Coil diameter[d]	1.25	mm
Space factor[F_f]	0.6	

전체 중량과 전자석 수를 이용하여 부상 전자석 1개에서 요구되는 부상력을 다음의 식 5로 계산할 수 있다.

$$F = \frac{T_{mass}}{N_m} \times G[M] \quad (5)$$

여기서, T_{mass} 는 총 중량, N_m 은 자기부상 이송시스템의 전자석 수, G 는 중력가속도를 나타낸다. 전자석의 코일의 권선 수를 700회로 선정하면 식 6으로 작동점(operating point, (i_0, d_0))에서의 자속밀도 B_0 를 구할 수 있다.

$$B_0 = \frac{\mu_0 N i_0}{2g_0} [T] \quad (6)$$

선정된 코어(SM20C)의 자기포화 특성을 고려한 최대자속밀도 1[Tesla]와 정격전류를 3.6A로 결정하고 권선수를 선정하였다. 전자석의 단면적을 구하기 위하여 식 4와 식 6을 이용하면 식 7과 같이 나타낼 수 있다. 전자석의 단면적 길이와 폭의 제한 조건들을 고려하여 전자석의 크기를 요구에 맞게 결정할 수 있다.

$$A_g = F \frac{\mu_0}{B_0^2} [mm^2] \quad (7)$$

권선이 감겨지는 창 면적(window area, WA)을 선정하기 위해 식 8을 이용하여 전자석의 기자력과 식 9를 이용하여 전류밀도를 계산하고, 최종적으로 식 10을 이용하여 창 면적을 구한다.

$$M = N i_0 = \frac{2g_0}{\mu_0} B_0 [AT] \quad (8)$$

$$J = \frac{4 \times i_0}{\pi d^2} [A/mm^2] \quad (9)$$

$$WA = \frac{N i_0}{F_j^* J} \quad (10)$$

3.2 PID 부상제어기

흡인식 자기부상시스템에서 부상제어기의 목적은 외부의 하중 외란과 레일외란에 대하여 안정한 부상력을 발생시켜 공극이 일정히 유지되도록 전자석에 가해지는 전압을 제어하는 것이다. 본 논문에서는 그림 7과 같이 공극 센서로부터 DSP로 아날로그 입력을 받아 디지털 값으로 변환한 후에 PID제어 알고리즘을 수행한다. PID 연산된 값으로 PWM 펄스폭 비율을 조정하고 초퍼로 신호를 입력한다. 그림 8은 PID제어기를 포함하는 선형화된 자기부상시스템의 블록도이다. PID제어기의 제어 변수들을 선정하기 위하여 비선형 모델을 작동점에서 선형화한 모델을 이용한다[7]. 초퍼는 부상 시에 급격하게 변화하는 전류의 흐름으로 생기는 불안정한 과전류 보호를 위해 10A이상일 때 고장 신호(fault)단자를 구성하였다. 또한 초퍼 파손을 막기 위해서 전자석 당 전류 제한을 20A로 설정하였다. PWM 스위칭을 위해서 600V, 40A급 H-브릿지 타입의 IGBT를 4개 사용하였다. PWM에 의한 전압이 인가되면 부상 전자석 단방향에 전류가 흐르게 되어 스위칭이 된다. 제어 주기는 5kHz로 PWM 스위칭 주파수는 10kHz로 설정하였다. PID 제어기의 파라미터는 오버슈트 15%와 정착시간 0.5초를 설계 사

양으로 선정하고 극배치 기법을 이용하여 구할 수 있다. PD 제어기에서 요구된 극점들을 선정하고 미분 이득을 적절히 변경하여 설계사양을 만족하는 PID 제어기 파라미터를 결정하였다.

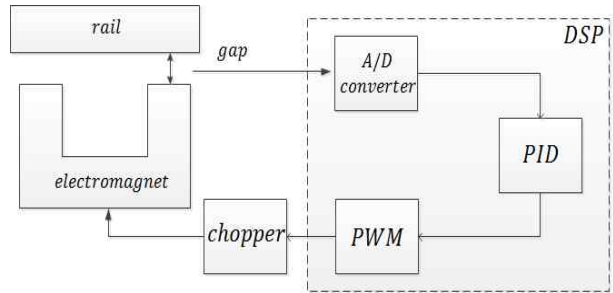


그림 7. DSP를 이용한 자기부상 제어시스템의 블록선도
Fig. 7. Block diagram of magnetic levitation control system using DSP H/W

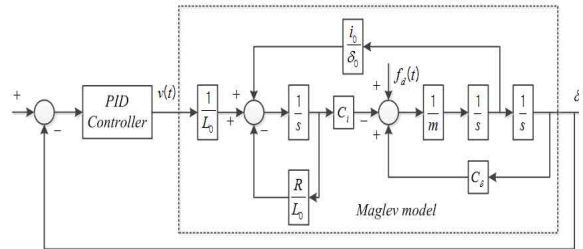


그림 8. PID제어기를 포함하는 자기부상 선형화 모델
Fig. 8. Linearized maglev model with PID controller

4. 추진제어기 설계

자기부상 이송장치의 추진시스템은 회전기와 달리 기계적 동력 변환 장치 없이 직선 추진력을 직접 얻을 수 있도록 그림 9과 같은 구조를 갖는 선형 유도전동기를 사용하였다. 선형 유도전동기의 구조는 1차측 이동자와 2차측 고정자로 구성되어 있다. 1차측은 구조강판으로 된 적층 철심과 슬롯 및 전류를 흘릴 수 있는 권선으로 되어 있다. 2차측은 알루미늄 도체판과 철심으로 구성되어 있고, 자속의 투과를 방해하는 방향으로 자속을 급속히 증가시키는 성질을 지니고 있으며, 공극 내의 자속밀도를 점진적으로 포화시키는 역할을 한다.

선형 유도전동기의 동작 원리는 1차측의 입력 전류에 의하여 발생하는 이동자계와 발생된 자계에 의하여 2차측 도체에 유도되는 와전류와의 상호작용으로 추력을 발생한다[10]. 선형 유도전동기의 추진 제어는 공간벡터(space vector) 전압변조방식을 적용하였다. 공간벡터 전압변조방식은 3상 지령 전압을 복소수 공간에서 하나의 공간 벡터로 표현하여 이를 변조하는 기법으로 주어진 직류 전압 하에서 가장 큰 교류 전압을 얻을 수 있는 고효율 방식이다. 또한 변조된 전압을 전동기에 인가할 경우 출력 전류나 토크에 포함된 고조파가 다른 변조 방식보다 적다는 장점이 있다[11].

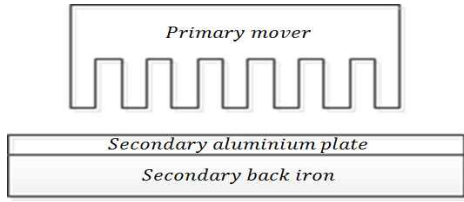


그림 9. 선형 유도전동기의 구조
Fig. 9. Configuration of linear induction motor

본 논문에서는 DSP를 이용한 추진 제어기를 그림 10과 같이 설계하였다. 공간벡터 전압변조 방식으로 선형 유도전동기의 3상의 신호를 제어하기 위해서는 총 6개의 PWM 신호가 필요하다. 3개의 PWM 신호는 정상의 신호를 출력하기 위하여 사용된다. 나머지 3개의 PWM 신호는 역상의 신호가 출력된다. 첫번째 PWM 신호와 네번째 PWM 신호는 한 쌍을 이루어 세 쌍으로 구성되고, 제안된 시스템에서 추진제어를 위한 PWM 신호는 20kHz의 스위칭 주파수를 갖는다. DSP에서 출력되는 PWM 신호를 IGBT 구동회로에 의해 0~5V에서 -15V~+15V로 변환되어 인버터에 인가되며, 출력되는 신호에 의해 선형 유도전동기가 구동된다. 선형 유도전동기를 구동하기 위해 에너지를 공급하는 전력회로는 단상 브리지 다이오드와 평활용 직류 콘덴서로 이루어진 정류회로와 빠르고 안정적인 스위칭 특성을 얻기 위하여 IGBT로 인버터 회로를 구성하였다. 또한 DSP 추진제어기와 메인 PC는 시리얼 통신을 하여 조이스틱으로 선형 유도전동기의 추진을 제어할 수 있고 상태를 실시간 모니터링 할 수 있다.

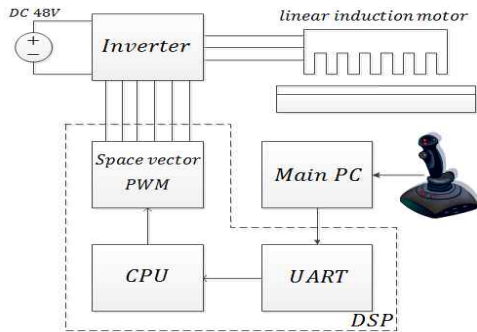


그림 10. DSP를 이용한 추진 제어의 블록 선도
Fig. 10. Block diagram of propulsion control system using DSP board

5. 실험 결과

실제 제작된 자기부상 이송시스템의 모습과 실험 환경은 그림 11과 같다. 왼쪽의 그림은 부상 및 추진 제어기와 전원 공급 모듈이고, 오른쪽은 레일과 자기 부상 물체 프레임에 부착된 선형 유도전동기와 전자석이다. 그림 12는 PC 모니터링 프로그램 화면을 나타낸다. PC 프로그램은 각 제어기에 자기부상 및 추진 동작을 명령하는 역할을 하며, 전자석과 레일사이의 공극을 실시간 그래프로 나타낸다.

자기부상 이송시스템의 성능 평가를 위하여 PID 제어기를

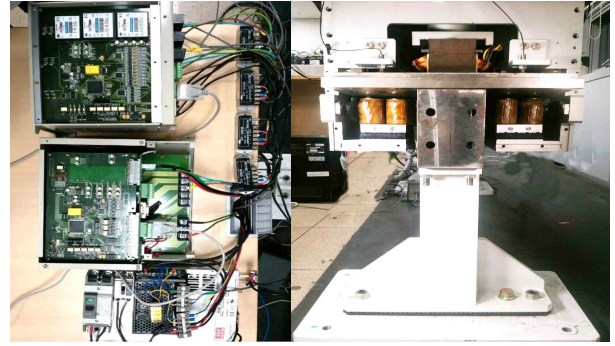


그림 11. 성능평가를 위한 자기 부상 이송시스템
Fig. 11. Transportation system of logistics using magnetic levitation for the performance test

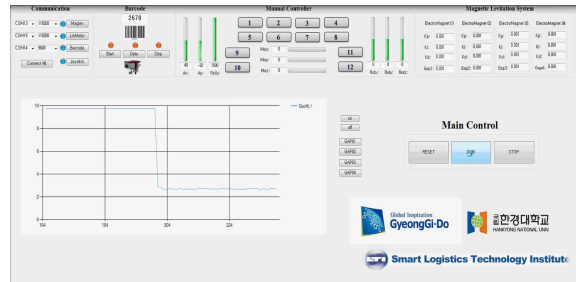
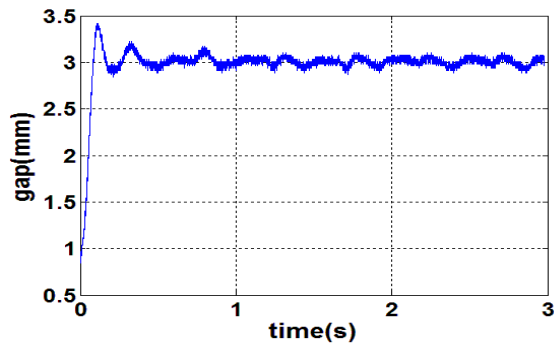


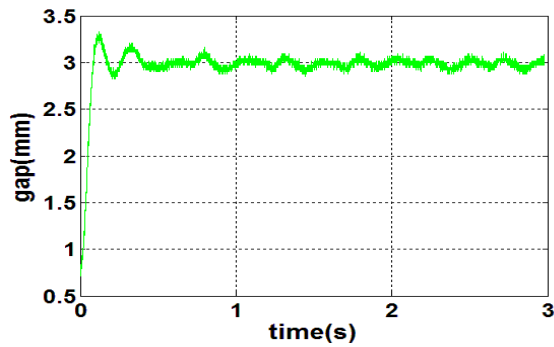
그림 12. PC 모니터링 프로그램
Fig. 12. PC monitoring program

적용한 자기부상 실험을 진행하였다. 그림 13은 각각의 전자석에 대한 부상실험 결과이다. 실험은 PID제어기를 이용하여 초기 공극 0mm에서 공극 3mm로 부상하며, 오버슈트 15%이내, 정착시간은 0.5초를 목표로 하였다. 공간벡터 변조방식을 적용한 선형 유도전동기의 추진 실험의 결과는 그림 14와 같다. 공간벡터 전압변조 방식으로 출력된 인버터의 선간전압과 한 상에 흐르는 전류의 파형을 나타내고 있으며 정상적인 출력 특성을 보임을 확인할 수 있다.

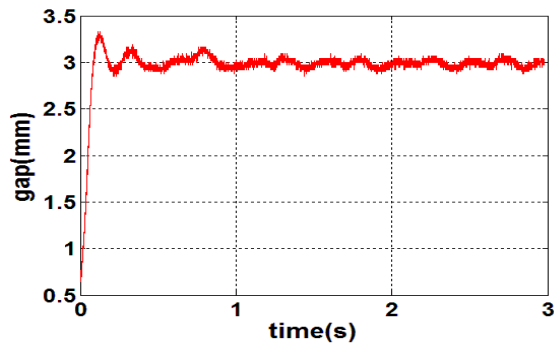
자기부상 이송시스템에 적용된 공극 센서의 측정 범위는 0mm부터 6mm까지이며, 출력은 -5V에서 +5V이며 측정된 전압을 이용하여 실제 공극으로 환산하였다. 표 2는 각각의 전자석에 대한 시간응답 성능 지표들의 결과들을 나타낸다. 오버슈트를 계산하기 위하여 정상상태 도달 후 측정된 데이터의 평균값을 이용하여 계산하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 각각의 전자석들 중 오버슈트는 최소값 10.33%과 최대값은 12.81%를 보였다. 각각의 전자석에 대한 상승시간은 평균 0.0592초로 빠른 응답을 보였으며 정상상태 도달 후 오차의 최대값은 평균 0.362mm, 최소값은 -0.24mm의 성능을 보였다. 정착시간의 경우 정상상태값의 2% 범위 내로 계산하면 정상상태값의 2%는 실제 공극 값으로 환산하면 0.06mm의 오차 내에서 정상상태를 유지해야 된다. 그러나 센서의 분해능과 측정오차 등을 고려하면 실제 취득데이터로는 정확히 계산하기는 어려운 점이 있다. 제안된 부상시스템은 설계 목표였던 오버슈트 15%를 만족하며 정착시간은 취득데이터를 이용한 계산은 어려우나, 그림 13에서 볼 수 있듯이 거의 0.5초 이내에서 정상상태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 따라서 설계된 자기부상시스템의 동작 성능은 정격공극 3mm에서 전체적으로 만족할 만한 성능을 보임을 확인하였다.



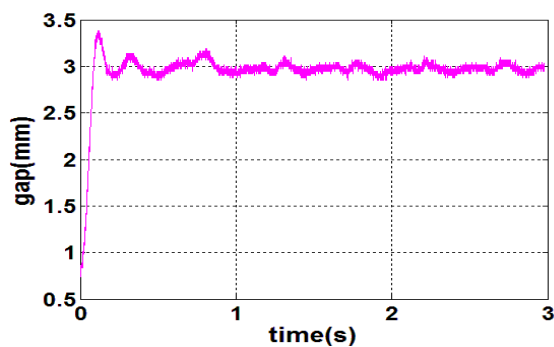
(a) Electromagnet 1



(b) Electromagnet 2



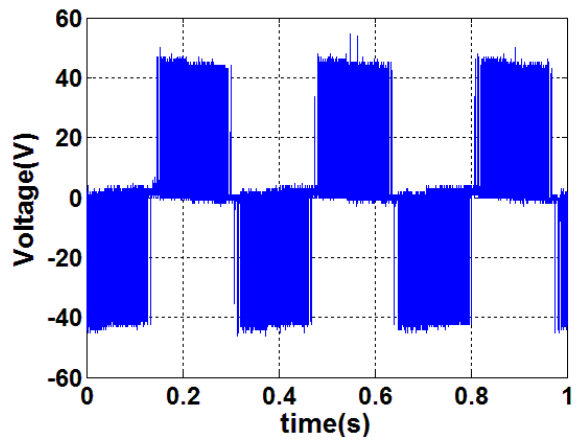
(c) Electromagnet 3



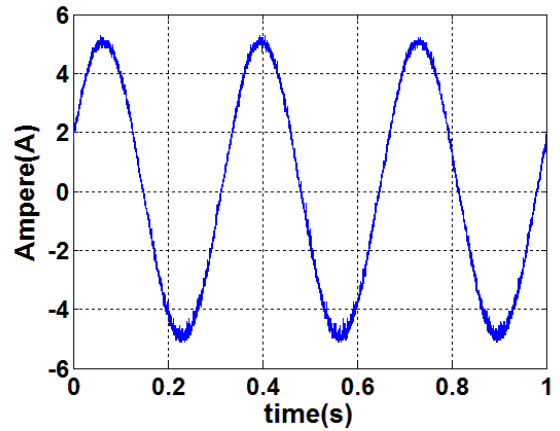
(d) Electromagnet 4

그림 13. 자기부상제어 실험 결과

Fig. 13. Experimental results of magnetic levitation control



(a) Voltage



(b) Current

그림 14. 선형 유도전동기 실험 결과

Fig. 14. Experimental results of linear induction motor

표 2. 전자석 부상제어 실험 성능

Table 2. Experimental performances of magnet levitation control

	Overshoot (%)	Steady state(mm)		Rise time (sec)
		Maximum value	Minimum value	
Electro-magnet 1	12.40	3.41	2.76	0.0587
Electro-magnet 2	10.33	3.33	2.80	0.0580
Electro-magnet 3	11.33	3.33	2.78	0.0598
Electro-magnet 4	12.81	3.38	2.70	0.0602

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 흡인식 부상방식으로 부상제어를 하고, 직선추력을 발생시키는 선형 유도전동기를 적용한 자기부상 이송시스템의 설계 방법을 제안하고, 실제 제작하여 검증하

였다. 실제 실험을 통하여 PID제어기를 이용한 4개의 전자석을 3mm로 자기부상 제어를 수행하였고, 공간벡터 펄스폭 변조방식을 적용한 선형 유도전동기의 추진 제어를 하였다. 실제 실험을 통하여 제안한 자기부상 이송시스템의 부상과 추진이 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 자기부상 이송시스템의 위치 제어 및 속도 제어 연구를 통하여 실제 산업현장에 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] C. H. Kim, H. S. Han, "Control of an EM-PM Hybrid Maglev LCD Glass Conveyor", *Conference on The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 2010, No. 11, pp. 1522-1527, 2010.
- [2] H. J. Ko, Y. K. Kim, "A Study on Chip Transferring System", *Conference on The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 2010, No. 11, pp. 1820-1821, 2010.
- [3] W. Wang, I. J. Busch-Vishniac, "An Automated Loading and Unloading System for a Maglev Wafer Transport Path", *IEEE Trans. semiconductor manufacturing*, Vol. 6, No. 3, pp. 276-279, 1993.
- [4] M. Y. Chen, L. C. FU, "Dual-axis Maglev guiding system modeling and controller design for wafer transportation", *Proceedings of the 38 IEEE conference decision and control*, pp. 2623-2628, 1999.
- [5] Kortum, W, Utzt, A., "Control Law Design and Dynamic Evaluatons for a Maglev Vehicle with a ComBined Lift and Guidance Suspension Systems", *Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 106, pp. 286-292, 1984.
- [6] J. D. Kim, "A Design of Optimal PID Controller to a Magnetic Levitation System Using RCGA", *Masters Thesis of Pukyong National University*, 2004.
- [7] J. H. Cho, Y. T. Kim, "Design of PID Controller for Magnetic Levitation RGV Using Genetic Algorithm Based on Clonal Selection", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 22, No. 2, pp. 238-245, 2012.
- [8] B. H. Lee, Y. T. Kim, "Modeling of Magnetic Levitation Logistics Transport System Using Extreme Learning Machine", *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 50, No. 1, pp. 269-275, 2013.
- [9] S. H. Lee, Y. H. Cho, "Magnetic Force Characteristics Analysis of Magnet for Magnetic Levitation Conveyor", *Symposium of The Korea Institute of Electrical Engineers*, Vol. 2008, No. 10, pp. 99-101, 2008.
- [10] D. H. Im, W. S. Kim, "A Study on the Starting Characteristic Analysis of L.I.M. in Auto-Conveyor

System", *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 38, No. 6, pp. 393-400, 1989.

- [11] B. H. Kwon, H. T. Kim, "Space Vector Modulation in PWM Inverters and PWM Rectifiers", *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 41, No. 7, pp. 742-752, 1992.

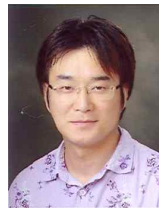
저 자 소 개



최대규(Dae-Gyu Choi)

2013년 : 한경대학교 정보제어공학과 졸업(학사)
2014년 : 한경대학교 대학원 석사과정

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 물류 자동화
E-mail : choedaegy@hknu.ac.kr



조재훈(Jae-Hoon Cho)

2002년 : 한밭대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사)
2004년 : 한밭대학교 제어계측공학과 졸업 (공학석사)
2011년 : 충북대학교 제어계측공학과 졸업 (공학박사)

2011년~현재 : 한경대학교 스마트 물류기술 연구센터 연구 교수

관심분야 : 지능형 최적화 알고리즘, 물류시스템
Phone : +82-31-670-5674
E-mail : jhcho@hknu.ac.kr



김용태(Yong-Tae Kim)

1991년 : 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
1993년 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)
1998년 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)
1998년~2000년 : (주)삼성전자

2006년 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문연구
2002년~현재 : 국립 한경대학교 전기전자제어공학과 교수

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 물류 자동화
Phone : +82-31-670-5292
E-mail : ytkim@hknu.ac.kr