

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.2.213>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

피치 운동을 고려한 자기부상 수동형 이송자 제어

이영학*·김창현*·하창완*·박도영*·양석조**·임재원*†

* 한국기계연구원, ** 충남대학교 메카트로닉스공학과

Passive Maglev Carrier Control with Consideration of Pitch Motion

Younghak Lee*, Chang-Hyun Kim*, Chang-Wan Ha*, Doh-Young Park*, Seok-Jo Yang**
and Jaewon Lim*†

* Korea Institute of Machinery and Materials

** Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received July 21, 2015 ; Revised December 9, 2015 ; Accepted December 16, 2015)

Key Words: Maglev(자기부상), Passive Maglev Transfer System(자기부상 수동형 이송 시스템), Passive Maglev Carrier(자기부상 수동형 이송자), Pitch Motion(피치운동), Pitch Control(피치 제어)

초록: 자기부상 수동형 이송 시스템이란 이송자에 부상, 안내, 추진과 관련된 전원장치가 없어 고정정, 무분진이 요구되는 환경에서 사용 가능한 시스템으로써 대면적 디스플레이 공정산업, 반도체 이송장비 등에 활용 가능하다. 이 시스템은 이송 대상물의 안정적 운반을 위하여 이송자의 정밀한 자세 제어가 필요하다. 하지만 이송자의 구조적 특징 및 공극 센서 설치 오차에 의해 이송자의 피치운동이 발생하며 이를 해결하기 위한 제어기 설계가 필요하다. 본 논문에서는 자기부상 수동형 이송 시스템의 이송자 피치 운동을 감소시키는 제어에 목적이 있다. 이를 수행하기 위하여 해석적으로는 PDA 제어 모델과 피치제어를 추가한 제어 모델의 피치 각도를 비교한다. 실험적으로는 제어기 변경이 이송자의 피치 각도 및 부상 정밀도에 미치는 영향을 분석한다. 이러한 제어기 설계 변경이 피치 운동에 미치는 영향을 분석하고 부상 정밀도 향상을 위한 방법을 제시한다.

Abstract: This research aims to develop core technologies for passive carrier (no power in carrier itself) transfer system. The technologies are passive levitation, propulsion, and guidance, which can be great benefits for semiconductor and display manufacturing industries. Passive maglev carrier is necessary to precise position control for quiet and stable transfer operation. However, the structural characteristics of carrier and the installation errors of gap sensors cause the pitch motion. Hence, the controller design in consideration of pitch motion is required. This study deals with the reduction control of carrier pitch motion. PDA controller and PDA controller with pitch control are proposed to compare the pitch angle analysis. The pitch angle and the levitation precision are measured by experiment. Finally, the optimized design of pitch controller is presented and the effects are discussed.

-기호설명-

A : 코어의 단면적(m^2)
i : 전자석의 전류(A)
 μ_0 : 공기 투자율(H/m)
N : 코일 턴 수
R : 저항(Ω)
v : 전압(V)

x : 부상 전자석과 전자석 사이의 공극(m)
 F_0 : 이상적인 부상력(N)
 ΔF_c : 제어된 전자석 힘(N)
 i_0 : 공칭점 전류(A)
 x_0 : 공칭점 공극(m)
 F_x : 부상력(N)
x : 부상 공극(m)
 ω_m : 전자석 폭(m)
m : 이송자 질량(kg)
 $k_p, k_d, k_a, k_{pp}, k_{pd}, k_{pi}$: 제어 게인

† Corresponding Author, einses@kimm.re.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

최근 디스플레이 산업의 생산성 향상을 위해 디스플레이 패널과 공정 장비의 대형화는 가속화되고 있다. 기계적 접촉에 의해 발생한 작은 입자에도 생산성에 영향을 받는 대형 디스플레이 공정장비의 개발을 위해서는 기존의 바퀴식 또는 컨베이어 이송 방식보다 고정정 상태에서도 활용 가능한 자기부상 수동형 이송 방식이 적합하다. 기존 운반 시스템인 컨베이어 방식은 접촉부분마다 마찰이 발생하여 분진, 진동, 소음을 유발하며, 이는 제품 수율 저하의 직접적인 원인으로 파악되고 있다. 자기부상 수동형 이송 방식은 진공 상태에서 구현이 가능하며 마찰에 의한 먼지 발생 요인이 없어 무분진 청정 시스템 구현에 가장 적합하다.⁽¹⁻³⁾

자기부상 수동형 이송 시스템은 부상, 추진, 안내를 위한 전원 장치가 이송자에 포함되어 있지 않고 영구자석, 강자성체와 같은 수동형 부품만 위치한다. 전원 장치가 외부에 있기 때문에 이송자의 무게는 감소하고 적재용량은 증가한다. 또한 공극 측정 등의 연산과정은 프레임의 제어기에서 수행되어 이송자 내부에는 제어기의 생략이 가능하다.

기존 연구를 보면 자기부상 수동형 이송 시스템의 이송자에 설계에 관한 연구를 하였고,⁽⁴⁾ 진동 및 수평운동을 개선시키는 연구를 하였다.⁽⁵⁾ 또한 자기부상 수동형 이송 프레임의 처짐이나 진동을 고려한 제어기 설계를 통해 부상안정성을 향상시키는 연구가 진행된 바 있다.⁽⁶⁾ 또한 자기부상 열차에서 사용하는 여러 개의 전자석의 개별 제어를 통한 강인 제어에 관한 연구가 진행된 바 있다.⁽⁷⁾ 자기 베어링과 영구자석을 전류 bias 에 의한 제어 실험 연구를 하였고,⁽⁸⁾ 자기부상 기술을 이용한 운송 시스템에 포함된 이송자의 직선 및 곡선 운동을 제어하는 연구가 진행된 바 있다.⁽⁹⁾ 또한 자기 부상 무전원 트레이 시스템의 부상제어 전략 및 자세제어 알고리즘에 관한 연구가 진행된 바 있다.⁽¹⁰⁾ 하지만 자기부상 기술을 이용한 수동형 이송자 시스템의 제작과정에서 설치 오차를 고려해 이송자의 운동 및 안정성에 관한 해석 및 실험 연구는 진행된 바 없다.

본 논문에서는 Fig. 1 과 같은 자기부상 수동형 이송 시스템의 부상 안정성 향상을 위하여 이송자의 피치 운동을 고려한 제어기 설계가 부상 안정성에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있다.

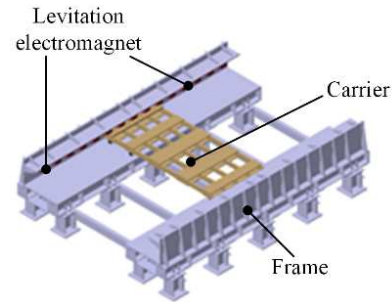


Fig. 1 The modeling of passive maglev carrier transfer system

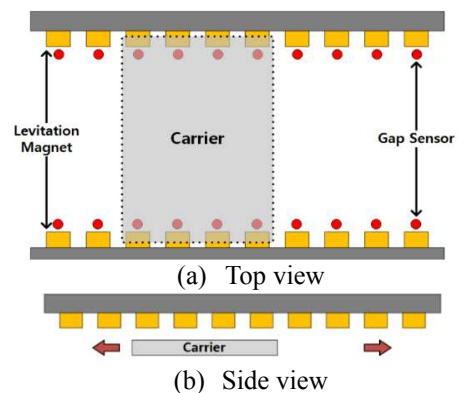


Fig. 2 Schematic diagram of the passive maglev carrier transfer system

Fig. 2 와 같이 이송자는 한쪽에 4 개, 총 8 개의 전자석에 의해 부상 된다. 부상 전자석은 공간적, 비용적 제약에 의해 불연속적으로 배치되어 있는데 전체 시스템의 조립시 부상 전자석과 공극 센서의 설치오차 등에 의해 각 전자석에 불균형 부하가 발생하고 이로 인한 이송자의 피치 운동이 발생한다. 특히 센서 설치시의 오차는 미세한 오차라 할지라도 고정밀 제어가 필요한 이송자의 부상 공극 정밀도를 저해하는 요인이 되며 전체 시스템 제어에 영향을 준다. 본 연구에서는 이송자의 피치 운동을 제어하기 위해 기존 PDA (Proportional-Differential-Acceleration) 제어에 피치 제어를 추가하여 각각의 부상특성을 비교하며 요구되는 성능을 만족하는 최적의 시스템 구성을 제안한다.

2. 자기부상 수동형 이송자 시스템

2.1 시스템 구성

Fig. 3 은 자기부상 수동형 이송 시스템 시제품으로 프레임, 이송자, 부상전자석, 공극 센서 등으로 구성되어 있다. 프레임은 지면에 강하게 고정하여

진동과 제어 노이즈를 최소화 하였다. 또한 센서 브라켓은 비자성체로 제작하여 전자기 잡음에 의한 센서 간섭을 최소화 하였다.

2.2 전자석 부상 시스템

단일 전자석 부상시스템은 Fig. 4 와 같다. 전자석에 전류를 인가하면 자속으로 인한 자속밀도가 발생하고, 공극과 전류에 의해 흡인력이 발생한다.⁽¹¹⁾

이 흡인력에 의해 부상력이 발생하고 부상력은 식 (1)과 같이 표현 가능하다.

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 공극과 전류 세기의 변화에 따라 전자석의 힘이 결정되는데 자성체의 비선형적 특성 때문에 발생하는 부상력도 비선형 특성을 갖게 된다.⁽¹²⁾ 이를 선형화하기 위해 시스템이 평형상태가 되는 공칭점(i_0, x_0)에서 선형화하였다. 공칭점에 대한 부상력과 제어된 전자석의 힘의 합을 통해 식 (2)와 같은 전체 힘을 구할 수 있다.⁽¹³⁾

$$F = F_0 + \Delta F_c = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i_0}{x_0} \right) + k_z \Delta x(t) - k_i \Delta i(t) \quad (2)$$

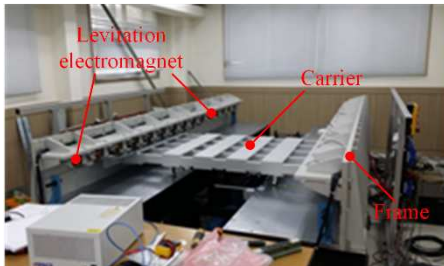


Fig. 3 The passive maglev carrier transfer system

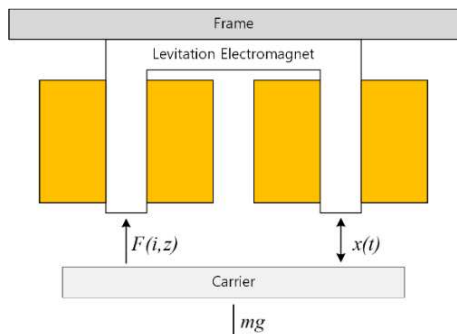


Fig. 4 Single magnet model for passive carrier system

또한 식 (3)과 같은 전압방정식에서 Taylor 급수를 이용하여 2 차항까지 선형화하였다. 선형화한 식을 통해 식 (4)와 같은 전류 미분 방정식을 구할 수 있다.^(14,15)

$$v = Ri + L \frac{d}{dt} i \quad (3)$$

$$\Delta i(t) = \frac{k_c}{k_i} + \Delta \dot{x}(t) - \frac{R}{L_0} i(t) + \frac{1}{L_0} \Delta v(t) \quad (4)$$

여기서,

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2x_0}, k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2x_0^2}, k_x = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_0^3}$$

3. 부상 제어

자기부상 수동형 이송 시스템의 이송자는 정속 및 안정적 운전을 위하여 정밀한 자세제어가 필요하다. 하지만 시스템의 구조적 특징 및 부상 전자석의 불연속 배치에 의해 이송자에 피치 운동이 발생하는데 이를 해결하기 위한 제어기 설계가 필요하다. 본 연구에서는 자기부상 수동형 이송 시스템의 부상 안정성 향상을 위하여 PDA 제어에 피치 제어를 추가 설계하여 이송자의 피치 운동을 제어한다.

3.1 부상 제어기 구조

부상 제어기는 Fig. 5 와 같이 기본 부상력을 발생시키는 부분과 부상을 안정시키는 부분으로 구성되어 있다. 기본 부상력을 발생시키는 부분은 이송자 위치에 따른 요구 부상력을 계산하여 전류(i_{bias})를 전자석에 인가해 이송자가 기본적으로 부상할 수 있는 힘을 제공해 준다. 부상을 안정시키는 부분은 실측한 공극값을 피드백 받아 안정적인 부상을 구현하는 역할을 수행하며 부상 제어는 식 (5)와 같이 입력값을 결정한다.

$$u = i_{pda} + i_{pitch} \quad (5)$$

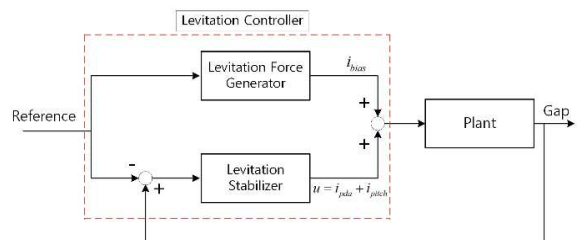


Fig. 5 Configuration of Levitation controller

3.2 PDA 제어 알고리즘

수동형 이송자의 질량(m)과 부상력(F_x)의 운동 방정식을 통해 식 (6)과 같이 시스템 모델링 할 수 있다.

$$m\ddot{x} = mg - F_x = mg - k\left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (6)$$

식 (6)에서와 같이 수동형 이송 시스템은 비선형 시스템이기 때문에 출력인 공극 x 와 입력인 전류 i 를 동작점 (x_0, i_0) 에서 선형화하여 제어를 설계하였다. 동작점 주변에서 선형화된 시스템은 식 (7)과 같다.

$$m\Delta\ddot{x} = -k_i\Delta i + k_x\Delta x \quad (7)$$

여기서, $\Delta i = i - i_0$, $\Delta x = x - x_0$, $k_i = 2ki_0 / x_0^2$, $k_x = 2ki_0^2 / x_0^3$

입력(전류)과 출력(공극) 간의 관계를 전달 함수형 태로 표현하면 식 (8)와 같다.

$$\frac{\Delta X(s)}{\Delta I(s)} = \frac{-k_i}{ms^2 - k_x} \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 자기부상 수동형 이송 시스템은 기본적으로 불안정한 시스템이다. 하지만 피드백 제어를 이용하면 부상 공극을 안정적으로 유지시킬 수 있다. 이를 위해 부상 공극 정보를 활용하여 식 (9)와 같은 PDA 제어를 설계하였다.

$$\Delta i = k_p\Delta x + k_d\Delta\dot{x} + k_a\Delta\ddot{x} \quad (9)$$

제어를 적용한 폐루프 특성방정식은 식 (10)과 같다.

$$(m+k_a k_i)s^2 + k_d k_i s + (k_p k_i - k_x) = 0 \quad (10)$$

식 (10)에서 알 수 있듯이, PDA의 이득(k_p, k_d, k_a)에 의해 폐루프 특성방정식의 극점이 결정되며, 폐루프 시스템이 안정화 되려면 아래 조건을 만족해야 한다.

$$k_p > k_x / k_i \quad \text{and} \quad k_a > m / k_i \quad (11)$$

식 (11)을 만족하면서 시스템의 대역폭과 감쇠비를 고려하여 PDA의 이득(k_p, k_d, k_a)을 선정한다.

3.3 피치 제어 알고리즘

이송자의 피치운동을 제어하기 위한 전류는 PID

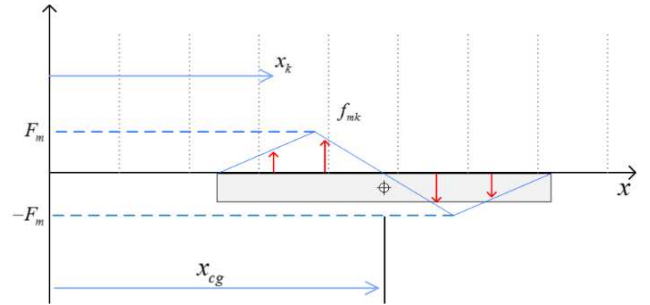


Fig. 6 Calculated levitation force of carrier

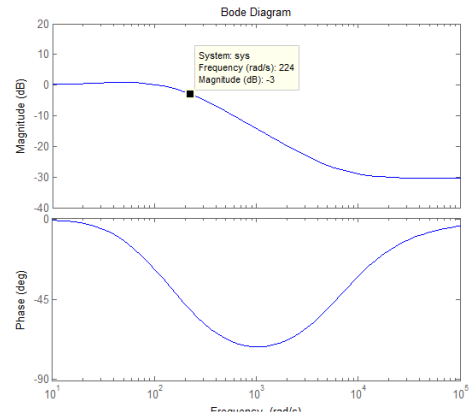


Fig. 7 Bode plot analysis for closed loop system

제어를 통해 결정되며 이는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{pitch} = k_{pp}q + k_{pd}\dot{q} + k_{pi}\int(q)dt \quad (12)$$

여기서, q : pitch angle

이송자의 각각 4개 점의 위치 및 부상력은 Fig. 6 및 식 (13)과 같이 생성한다. 이송자의 위치와 관계 없이 총 힘의 합은 F 로 항상 일정하고 모멘트의 합도 $F_m \times (L/2)$ 을 유지하기 위한 부상력을 생성한다.

$$F_m = -k_{IFm}\int(q_{ref} - q)dt \quad (13)$$

여기서, k_{IFm} : integral gain

q_{ref} : target pitch angle (0deg)

q : measured carrier pitch angle

$$f_{mk} = \begin{cases} F_m \times \left(2 + \frac{x_k - x_{cg}}{L/4}\right) & \text{if } -\frac{L}{2} \leq x_k - x_{cg} < -\frac{L}{4} \\ F_m \times \left(-\frac{x_k - x_{cg}}{L/4}\right) & \text{if } -\frac{L}{4} \leq x_k - x_{cg} < \frac{L}{4} \\ F_m \times \left(\frac{x_k - x_{cg}}{L/4} - 2\right) & \text{if } \frac{L}{4} \leq x_k - x_{cg} < \frac{L}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

여기서, x_k : 이송자 이동 변위
 x_{cg} : 이송자 중심점

Fig. 7 과 같은 Bode 선도를 통해 페루프 시스템의 주파수응답특성을 분석하였다. 전자석 드라이버 등의 대역폭을 고려하여 해석 모델을 설계하였을 때 시스템의 대역폭(bandwidth)은 35.66Hz 로 해석되었다. 또한 감쇠비(damping ratio)는 0.33 으로 나타났다. 해석된 대역폭 및 감쇠비를 고려하여 PDA의 이득(k_p, k_d, k_a)을 선정하였다.

Fig. 8 은 부상 제어기를 Table 1 과 같이 튜닝한 후 스텝 응답 해석을 한 결과로 0.3sec 의 정착 시간과 최대오버슈트가 6%인 감쇠 특성을 보임을 확인할 수 있었다.

4. 해석

자기부상 수동형 이송 시스템의 부상정밀도를 저하시키는 원인 중 하나는 센서 설치 오차이다. 정밀하지 않은 센서 설치는 이송자의 피치운동을 발생시키며 이는 시스템의 부상 정밀도 저하로 이어진다. 따라서 해석을 통하여 센서 설치 오차에 따른 피칭각도를 우선적으로 분석하였다. Fig.9 와 같이 이송자의 중심점에서의 피칭 운동축 각도 변화를 분석하였다.

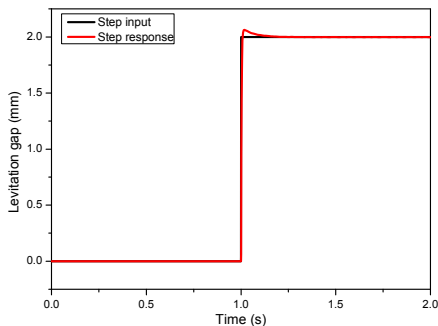


Fig. 8 Step response analysis for closed loop system

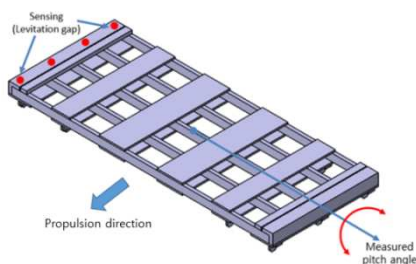


Fig. 9 Location of sensing point

피치제어기의 시뮬레이션을 위하여 센서 설치 오차가 Fig. 10 과 같이 발생하였다고 가정하였다. 이송자 부상에 관여하는 4 개의 센서 중 첫번째 센서와 네번째 센서의 오프셋을 ± 0.5 mm 로 설정 하였다.

Fig. 11 은 센서 오프셋 설정에 따른 이송자의 피칭각도 해석 결과이다. 해석 결과를 비교해 보면 센서 오프셋을 설정하지 않은 모델보다 센서 오프셋을 ± 0.5 mm 로 설정한 모델의 피칭각도가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 센서 설치 오차가 이송자의 피칭운동을 발생시키는 원인이 되며 시스템 제작 및 설치 시의 오차는 시스템의 제어에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 실제 시스템 제작 및 설치 시에도 오차는 존재하며 이에 따른 이송자의 피치 운동을 피치제어를 통해 보완하여야 한다.

센서 설치 오차에 따른 이송자 피치운동을 제어하기 위해 Table 1 과 같은 튜닝 변수를 설정하고 PDA 제어만 사용한 해석 모델과 PDA+pitch 제어를 사용한 해석 모델의 이송자 피치 각도를 비교하였다.

Table 1 Simulation control parameters

Parameters	PDA Control	PDA+Pitch Control
k_p	1.3	1.3
k_d	0.042	0.042
k_a	6.4e-7	6.4e-7
k_{pp}	0	1.2
k_{pd}	0	0.001
k_{pi}	0	0.001

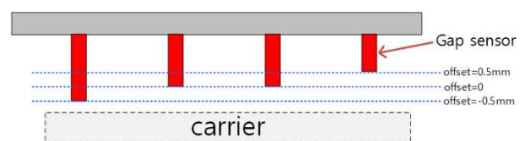


Fig. 10 Definition of sensor offset

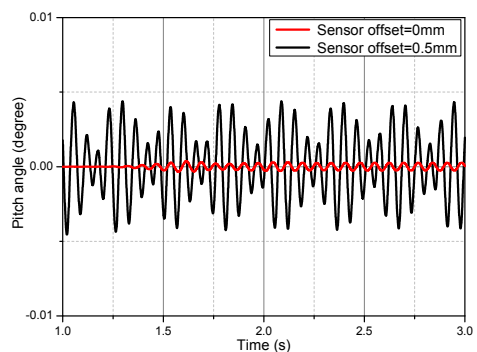


Fig. 11 The analysis result of pitch angle by sensor offset

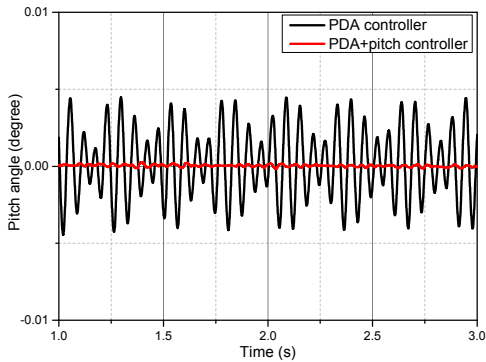


Fig. 12 The analysis result of carrier pitch angle

Fig. 12는 Fig. 10에서 제시된 센서 오프셋에 대하여 피치제어를 적용하여 피치 각도를 시뮬레이션한 결과이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 피치제어를 추가한 제어가 이송자 피치운동제어에 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 실험

제안한 피치제어 알고리즘의 효용성 여부를 확인하기 위해 자기부상 수동형 이송 시스템에 적용하여 보았다. 기본 PDA 제어기와 PDA 제어기에 피치 제어 알고리즘을 추가한 제어기의 실험을 통한 부상공극 비교를 통해 피치 제어 효용성 여부를 확인하였다. 좌우각각 4개의 공극센서에서 부상공극을 측정하였다.

Table 2와 같은 튜닝 변수를 설정하고 PDA 제어만 사용한 제어기 모델과 PDA+pitch 제어를 사용한 제어기 모델의 이송자 피치 각도 및 부상 정밀도를 비교 하였다. 앞장의 해석과 실험의 튜닝 변수에 차이가 존재하는데 이는 제작과정에서의 설치오차가 해석에서 설정한 오프셋과 정확히 일치하지 않는 영향으로 생각한다. 또한 해석 과정에서는 노이즈에 대한 영향을 고려하지 않았지만 실험 과정에서는 발생한 노이즈에 대한 영향으로 인해 튜닝 변수의 차이가 발생한 것으로 생각한다.

실험을 통해 튜닝한 제어 이득값으로 Fig. 13과 같은 Bode 선도를 도출하였다. 시스템의 대역폭은 31.02Hz로 해석결과와 비슷한 값으로 나타났다. 또한 감쇠비는 0.64로 나타났다.

Fig. 14는 부상 제어기를 Table 2와 같이 튜닝한 이후 스텝 응답 실험을 한 결과로 정착시간은 0.95sec로 해석결과에 비해 다소 크게 나타났고, 최대오버슈트는 7%로 높은 감쇠 특성을 보임을 확인하였다.

Table 2 Experiment control parameters

Parameters	PDA Control	PDA+Pitch Control
k_p	2.03	2.03
k_d	0.027	0.027
k_a	0.00001	0.00001
k_{pp}	0	1.25
k_{pd}	0	0.018
k_{pi}	0	0.00001

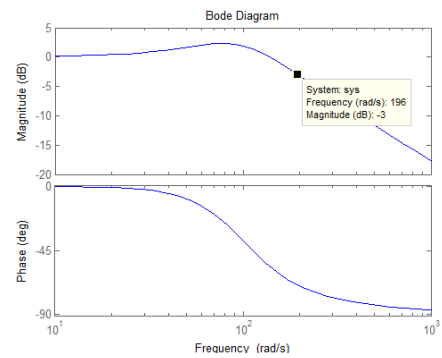


Fig. 13 Bode plot of experiment

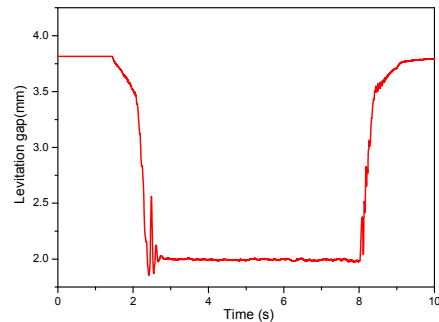
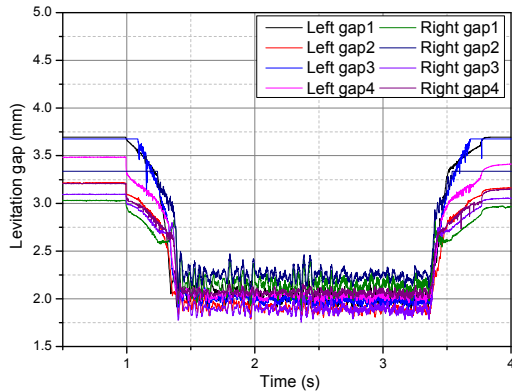
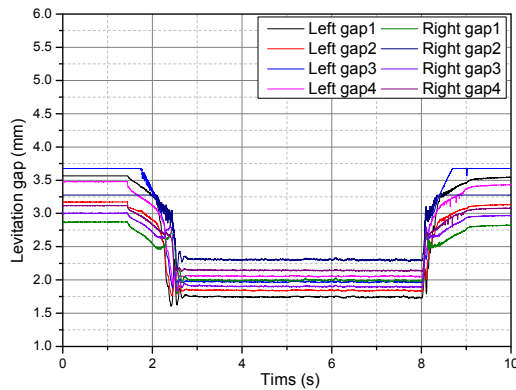


Fig. 14 Step response of experiment

Fig. 15는 목표공극을 2mm로 입력하였을 시 공극 센서에서 측정한 부상 공극 실험 결과이다. (a)는 PDA 제어기만 사용한 실험 결과 그래프이다. 결과를 보면 목표공극 2mm에서 약간의 오차를 두고 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이 오차는 센서 설치 오차로써 제어기에서 센서 오프셋으로 설정하였지만 완벽히 동일한 센서 설치 조건을 만족시킬수 없었음을 의미한다. (b)는 PDA 제어에 피치제어를 추가한 제어기를 사용한 실험 결과 그래프이다. (a)와 마찬가지로 목표공극 2mm에서 약간의 오차를 두고 제어되는 것을 확인할 수 있다.



(a) The experiment result of levitation gap by PDA controller



(b) The experiment result of levitation gap by PDA + pitch controller

Fig. 15 The experiment result of levitation gap

부상공극 실험 결과 센서 설치 오차에 따라 약간의 공극 오차는 존재하지만 위의 두 경우 모두 목표공극에서 안정적이 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 목표공극을 2mm로 입력하였을 시 왼쪽 1번 전자석의 부상 정밀도 실험 결과를 비교한 그래프이다. PDA 제어기만 사용한 부상 정밀도는 $\pm 200\mu\text{m}$ 수준이며 피치제어를 추가한 제어기를 사용한 실험에서는 $\pm 15\mu\text{m}$ 의 부상정밀도를 보인다. 이는 부상정밀도 측면에서도 PDA 제어기에 피치제어를 추가한 제어기가 더 안정적임을 의미한다. 또한 해석에서는 비교할 수 없었던 부상 정밀도를 비교해 봄으로써 제어기 설계 변경이 부상 안정성에 미치는 영향을 분석할 수 있었다.

Fig. 17은 이송자 피칭 각도 실험 결과이다. 실험 결과를 비교해 보면 PDA 제어기만 사용한 결과 보다 피치제어를 추가한 제어기를 사용하였을 때 이송자의 피칭 각도가 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이는 해석 결과와 마찬가지로 실제 실험 상에서도 PDA 제어에 피치제어를 추가한 제어기가

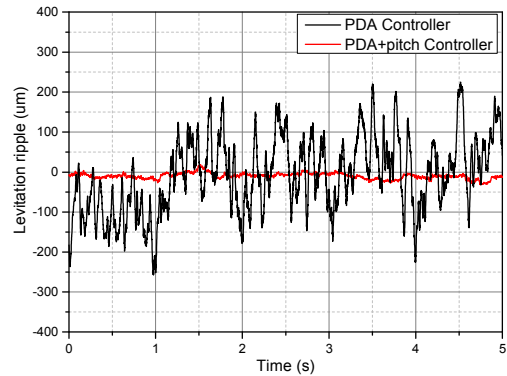


Fig. 16 The experiment result of levitation precision

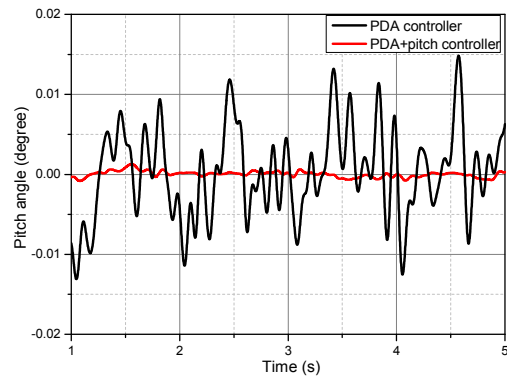


Fig. 17 The experiment result of pitch angle

이송자의 피치 각도를 줄이는데 효과적임을 의미한다.

6. 결론

본 논문에서는 자기부상 수동형 이송 시스템의 제어기 설계 변경에 따른 부상안정성을 피치 각도 및 부상정밀도 비교를 통해 분석하였다. 센서 설치 오차에 따라 이송자의 피치 운동이 발생하며 이를 PDA 제어기와 피치 제어기를 추가한 모델의 해석 및 실험을 통해 비교하였다. 실제와 유사한 해석을 위해 MATLAB Simulink 기반의 해석 모델을 개발하였고, 제어기 설계 변경에 따른 피칭 각도 및 부상 정밀도 해석을 수행하였다. 그 결과 센서 설치 오차에 따라 이송자의 피치 운동은 증가하며 이를 피치 제어를 통해 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 해석을 통해 도출된 결과를 실제 시스템에 적용하고 실험을 통해 검증하였다. 그 결과 PDA 제어기만 사용한 모델의 부상정밀도 보다 PDA 제어기에 피치제어를 추가한 제어기 모델의 부상정밀도가 우수한 것을 확인하였으며, 이송자의 피치 운동도 감소 시키는 효과가 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 주요사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참고문헌
(References)

- (1) Kim, C. H., Lee, J. M. and Han, H. S., 2011, "Development of a Maglev LCD Glass Conveyor," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.47, No.4, pp. 581~587.
- (2) Kim, C. H., Kim, K. J., Lee, Y. H., Han, H. S. and Park, D. Y., 2013, "Dynamic Simulation of Discontinuously Arranged Electromagnets for Passive Tray Levitation," *Applied Mechanics and Materials*, Vol.10, No.57, pp. 341~344.
- (3) Morishita, M., Azukizawa, T., Kanda, S., Tamura, N. and Yokoyama, T., 1989, "A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.38, No.4, pp. 230~236.
- (4) Ebihara, D., Kawaguchi, H., Muraguchi, Y. and Watada, M., 1993, "Transportation Technique for Magnetically Levitated Thin Iron Plates," *IEEE J. Magnetism*, Vol.29, No.6, pp. 274.
- (5) Hayashiya, H., Arika, N., Paddison, J.E., Ohsaki, H., and Masada, E., 1996, "Magnetic Levitation of a Flexible Steel Plate with a Vibration Supperessing Magnet," *IEEE J. Magnetism*, Vol. 32, No. 5
- (6) Park, J. W., Kim, C. H., Park, D. Y. and Ahn, C. S., 2011, "Controller Design with High Fidelity Model for a Passive Maglev Tray System," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.15, No.8, pp. 1521~1528.
- (7) Park, J. S., Kim, J. S. and Lee, J. K., 2001, "Robust Control of Maglev Vehicles with Multimagnets Using Separate Control Techniques," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. International Journal*, Vol.15, No.9, pp. 1240~1247.
- (8) Lee, A. C., Hsiao, F.Z. and Ko, D., 1994, "Analysis and Testing of Magnetic Bearing with Permanent Magnets for Bias," *JSME International Journal*, Vol.37, No.4, pp. 774~782.
- (9) Son, Y. W., Park, K. H. and Lee, S. K., 1996, "Magnetically Levitated Transport System for Linear & Curvilinear Motion Using Freecontroller Carrier," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, pp. 527~532.
- (10) Ahn, C. S., 2015, "Control Strategy and Algorithm for Levitation of Over-Actuated Passive Maglev Tray System," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.32, No.6, pp. 553~562.
- (11) Ha, C. W., Kim, C. H., Cho, J. M., Lim, J. W. and Han, H. S., 2015, "Magnetic Levitation Control Through the Introduction of Bogie Pitch Motion into a Control Law," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.18, No.3, pp. 175~185.
- (12) Sinha, P. K., 1987, *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, pp. 53~72.
- (13) Han, J. B., Kim, K. J., Han, H. S. and Kim, S. S., 2014, "Parametric Study of Curved Guideways for Urban Maglev Vehicle," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.38, No.3, pp. 329~335.
- (14) Han, J. B., Lee, J. M., Han, H. S., Kim, S. S., Yang, S. J. and Kim, K. J., 2014, "Study on Running Safety of EMS-Type Maglev Vehicle Traveling over a Switching System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.38, No.11, pp. 1309~1315.
- (15) Han, H. S., 2003, "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle," *JSME International*, Vol.46, No.4, pp. 1497~1501.