

이산형 칼만필터를 이용한 자기부상시스템의 공극외란 감쇄

論 文

53B-7-6

Air-gap Disturbance Attenuation of Magnetic Levitation Systems using Discrete Kalman Filter

成 鎬 慶* · 丁 炳 秀** · 張 錫 明***

(Ho-Kyung Sung · Byung-Su Jung · Seok-Myeong Jang)

Abstract - Conventional magnetic levitation systems could show unsatisfactory performance under air-gap disturbance due to rail irregularities. In this paper, we propose a feedback control system with discrete Kalman filter for air-gap disturbance attenuation. It is shown that excellent system performance can be obtained with the use of discrete Kalman filter, and that results from experiments agree well with those of simulations.

Key Words : Magnetic levitation systems(MLS), Discrete Kalman filter, Air-gap disturbance, Rail irregularities.

1. 서 론

자기부상시스템은 전자기적인 힘을 이용하여 부상하려는 대상을 일정공극으로 안정하게 부상시키는 시스템이다. 현재 상전도 방식의 자기부상시스템은 본질적으로 높은 비선형성과 개루프 불안정한 시스템으로 외란에 대하여 안정한 페루프 제어시스템의 설계가 필요하다.[1] 이때 제어대상 상태변수를 얻기 위하여 실제로 측정 가능한 공극센서와 가속도센서를 사용한다. 자기부상열차는 주행 시 레일 불규칙으로 인해 공극의 외란 및 잡음신호가 혼합되어 센서를 통하여 제어 시스템 안으로 들어온다. 이러한 외란이 섞인 신호들은 부상제어기가 일정한 공극을 유지하는데 어려울 뿐 아니라 부상제어시스템 성능을 약화시킨다. 일반적으로 2차 저역필터를 사용하는데 높은 주파수의 외란이나 전기적 잡음은 제거하나 레일 불규칙으로 발생한 낮은 주파수의 외란은 제거하거나 감소시키지 못하므로 제어시스템을 불안정하게 할 수도 있다.

따라서, 공극에서 발생한 시스템 고유의 외란잡음이 있고 제어를 위한 센서의 측정 잡음이 있는 시스템으로 가정하여 관측기로부터 원하는 값을 예측하고, 예측치와 측정치의 오차를 최소화하여 최적의 예측치를 뽑아내는 최적 예측기로서의 칼만필터(Kalman filter)[2]를 적용한다. 현재 칼만필터는 위성항법시스템[3]-[5]에서 외란이 포함된 정밀한 위치정보를 추정하는데 매우 많이 쓰이고 최근엔 유도 전동기[6] 제어시 피드백 데이터의 외란을 추정하는데 사용 되고 있으며 자기부상 시스템에선 공극외란의 추정[7]뿐만 아니라 비선형시스템에서의 확장 칼만필터를 설계하여 제어에 필요한

전 상태를 추정할 수 있도록 연구가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 먼저 레일불규칙을 갖는 자기부상시스템을 모델링한 후 이산형 칼만필터를 자기부상시스템에 적용시 필터구성에 대해 알아보고 이들의 성능을 여러종류의 시물레이션과 실제 단일자석모델의 실험을 통하여 그 성능을 확인하고 검증한다.

2. 자기부상시스템 모델링

자기부상시스템은 전압방정식 식(2.1)과 운동방정식 식(2.2)로 모델링 될 수 있으며 힘의 평형조건의 식은 식(2.3)과 같다.[8]

$$e = Ri + L_0 \frac{z_0}{z_g} \left(\frac{di}{dt} - \frac{i}{z_g} \frac{dz_g}{dt} \right) \quad (2.1)$$

$$F = - \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{z_g} \right)^2 = - \frac{1}{2} L_0 z_0 \left(\frac{i}{z_g} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \frac{F}{m} + g + \frac{\Delta f}{m} = - \frac{L_0 z_0}{2m} \left(\frac{i}{z_g} \right)^2 + g + \frac{\Delta f}{m} \quad (2.3)$$

여기서

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2z_0} \quad (2.4)$$

F 는 흡인력, μ_0 는 진공상태의 투자율, N 은 코일의 감은 수, A 는 유효 단면적, L_0 와 z_0 는 공칭동작점에서의 공칭인덕턴스와 공칭공극, m 은 전자석의 질량, g 는 중력가속도, Δf 는 힘의 외란이다. R 은 전자석 코일의 저항, z 는 절대공극, z_g 는 상대공극, h 는 공극외란, $L(z_g)$ 는 상대공극에서의 인덕

* 正 會 員 : 韓國機械硏究員 先任硏究員

** 學生會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 敎授

接受日字 : 2004年 4月 1日

最終完了 : 2004年 5月 20日

턴스이며 i 는 코일에 흐르는 전류이고 e 는 코일에 인가되는 전압이다. 실제와 거의 유사한 레일불규칙을 갖는 자기부상 시스템을 그림2.1에 도시한다.

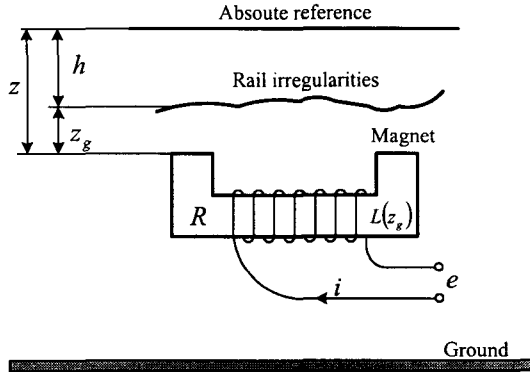


그림 2.1 전자석과 레일간의 구조도
Fig. 2.1 Structure of gap between Magnet and Rail

식(2.1)과 식(2.3)을 이용하여 공극 및 속도와 전류를 상태 변수로 하여 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{2.5.1}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{L_0 z_0}{2m} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 + g + \frac{\Delta f}{m} \tag{2.5.2}$$

$$\dot{x}_3 = \frac{x_2}{x_1} \cdot x_3 - \frac{R}{L_0 z_0} \cdot x_1 x_3 + \frac{x_1}{L_0 z_0} \cdot u \tag{2.5.3}$$

x_1 은 z_g , x_2 는 \dot{z}_g , x_3 는 i , u 는 v 를 나타내는 상태변수와 제어입력이다. 공극의 변화는 식(2.6)과 같이 미분형태로 나타내어진다. 식(2.5)를 선형화하면 식(2.7)과같이 되고 공칭 운전점에서의 변수들은 식(2.8)으로 나타낸다.

$$\frac{dz_g}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{dh}{dt} \tag{2.6}$$

$$\dot{x}_{\delta 1} = x_{\delta 2} \tag{2.7.1}$$

$$\dot{x}_{\delta 2} = \frac{k_z}{m} x_{\delta 1} - \frac{k_i}{m} x_{\delta 3} + \frac{\Delta f}{m} \tag{2.7.2}$$

$$\dot{x}_{\delta 3} = \frac{k_z}{k_i} x_{\delta 2} - \frac{R}{L_0} x_{\delta 3} + \frac{1}{L_0} u_{\delta} \tag{2.7.3}$$

여기서

$$\begin{pmatrix} x_{\delta 1} = x_1 - x_{1_0} \\ x_{\delta 2} = x_2 - x_{2_0} \\ x_{\delta 3} = x_3 - x_{3_0} \\ u_{\delta} = u - u_0 \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

$$k_z = \frac{L_0 N i_0^2}{z_0^2}, k_i = \frac{L_0 N i_0}{z_0} \tag{2.9}$$

식(2.1)과 식(2.3)을 이용하여 공극외란을 갖는 자기부상 시스템의 블록선도를 그림2.2로 나타낼 수 있다.

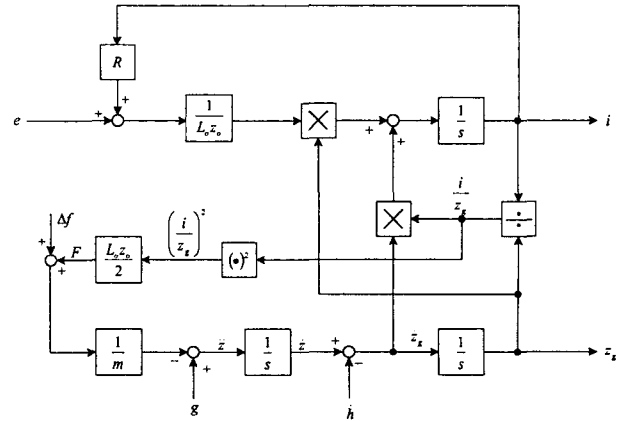


그림 2.2 자기부상시스템의 블록선도
Fig. 2.2 Block diagram of the MLS system

3. 이산형 칼만필터 구성

3.1 이산형 칼만필터

이산형 칼만필터는 순환적인 최적필터(Recursive Optimal Filter)로서 불규칙적인 외란을 포함하는 동적시스템에 적용되는 최적 상태추정기라고 할 수 있다.[9] 이 필터는 구체적으로 이산적인 실시간 구간마다 측정되는 잡음이 실린 데이터로부터 동적시스템의 미지의 상태변수를 최적으로 추정하는 것으로 오차의 분산을 최소화하는 통계학적 반복 알고리즘을 가지고 있다.[9] 일반적인 이산형 상태방정식은 식(3.1)과 같이 표현되어진다.

$$x(k+1) = Fx(k) + Bu(k) + Gw(k) \tag{3.1.1}$$

$$y(k) = Hx(k) + v(k) \tag{3.1.2}$$

여기서 상태 $x(k)$, 확정입력 $u(k)$, 출력 $y(k)$, 시스템잡음 $w(k)$ 및 측정잡음 $v(k)$ 는 각각

$$x(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_n(k)]^T$$

$$u(k) = [u_1(k) \ u_2(k) \ \dots \ u_m(k)]^T$$

$$y(k) = x_i(k)$$

$$w(k) = [w_1(k) \ w_2(k) \ \dots \ w_l(k)]^T$$

$$v(k) = v(k)$$

F 는 $n \times n$, B 는 $n \times m$, G 는 $n \times l$ 행렬이며, $H = [0 \dots 1_i \dots 0]$ 이다.

칼만필터는 잡음이 실린 데이터로부터 오차의 분산을 최소화하는 반복 알고리즘으로서 시스템 고유의 잡음 공분산과 센서장치로부터의 측정 잡음의 공분산 선정은 매우 중요한 부분이다. 하지만 이러한 잡음은 예기치 못한 데서 오는 수가 많으며 잡음의 성질이 백색잡음이어야 한다는 조건에 부합하여야 하기 때문에 정확한 값을 선정하는데 여러모로 어려운 점이 많다. 측정잡음으로 인한 공극의 경우 단일자석 자기부상시스템의 초기공극이 z_0 라면 측정 잡음으로 인한 오차의 최대편차는 z_0 를 넘지 못할 것이다. 따라서, 확률적으로 접근하여 공분산을 정한 후, 경험적인 시행착오에 의해 공분산을 선정하는 방법을 고려한다. 잡음 프로세스 x 가 식(3.2)와 같은 분포를 갖는다고 가정하자. 확률밀도함수 $f(x)$ 는 다음과 같다.[10]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{(b-a)} & a \leq x \leq b \\ 0 & x < a, b < x \end{cases} \quad (3.2)$$

식(3.2)와 같은 분포를 갖는 확률프로세스가 평균(mean) 및 분산(variance)을 가질 때 자기공분산함수를 갖는 평균이 '0'인 무상관 백색잡음(uncorrelated zero-mean white-noise)[11]이라는 칼만필터의 잡음 전제조건을 고려하여 평균, 분산 및 공분산(covariance)을 나타내면 식(3.3)과 같다.

$$E[x] = 0 \quad (3.3.1)$$

$$v(x) = E[(x - E[x])^2] = E[x^2] - (E[x])^2 = E[x^2] \quad (3.3.2)$$

$$E[(x - E[x])(x - E[x])^T] = E[xx^T] = E[x^2] \quad (3.3.3)$$

$E(x)$ 는 평균, $v(x)$ 는 분산이다. 공분산은 잡음의 자기상관관계를 나타내는 식으로 표현할 수 있기 때문에 자기공분산관계는 식(3.3)에서의 분산의 의미로 쓰일 수 있을 것이다. 따라서, 시스템 잡음공분산은 식(3.2)의 함수를 갖는 확률분포에서의 분산과 동일한 값을 취할 수가 있으며 잡음 공분산행렬의 비상관 관계에 있는 비대각 요소를 '0'으로 가정하여 연속시간에서의 시스템 잡음공분산행렬을 나타내면 다음과 같다.

$E[w(t)] = 0$ 일 때,

$$Q = E[w(t)w(t)^T] = \begin{bmatrix} E[u_1^2(t)] & 0 & 0 \\ 0 & E[u_2^2(t)] & 0 \\ 0 & 0 & E[u_3^2(t)] \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$w_1(t)$ 는 공극잡음, $w_2(t)$ 는 속도잡음이며 $w_3(t)$ 는 전류잡

음이다. 연속시간에서의 측정 잡음공분산 또한 같은 방법으로 정리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = E[v(t)v(t)^T] = E[v^2(t)] \quad (3.5)$$

오차 공분산 행렬은 식(3.6)과 같이 정하며 이산시간에서의 잡음 공분산 행렬은 연속시간과 이산시간의 공분산관계 식인 식(3.7)을 통해 구할 수 있다.

$$P_k = \begin{bmatrix} \sigma_{1k}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2k}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3k}^2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$Q_k \approx \Delta t \Phi_k G(k\Delta t) Q(k\Delta t) G^T(k\Delta t) \Phi_k^T \quad (3.7.1)$$

$$R_k \approx R(k\Delta t) / \Delta t \quad (3.7.2)$$

그림3.1은 자기부상시스템에 적용하기 위한 칼만필터의 흐름도이다.

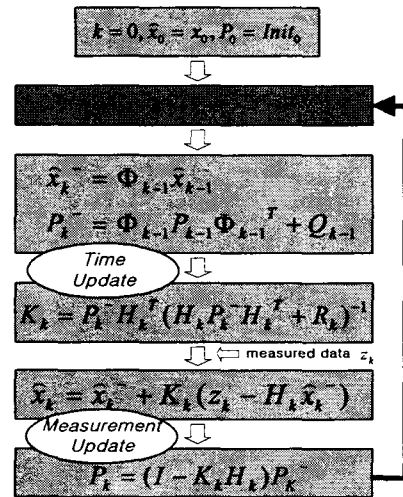


그림 3.1 칼만필터의 흐름도

Fig. 3.1 Flow chart of Kalman filter algorithm

여기서 Φ 는 상태전이행렬, P 는 오차공분산 행렬, σ 는 최대 편차, Q 는 시스템 잡음공분산 행렬, R 은 측정 잡음 공분산 행렬, K 는 칼만게인, Z_k 는 센서 측정치를 나타내며 \hat{x}_k^- 는 k 시간의 사전 추정자 이고 \hat{x}_k 는 k 시간의 사후 추정자이다.

3.2 단일자석 자기부상시스템의 이산상태방정식

식(2.7)~식(2.9)로부터 표1과 같이 자기부상모델의 파라미터를 이용하여 계산한 결과 다음과 같은 상태방정식을 얻었다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1.000 & 0 \\ 971.4 & 0 & -3.427 \\ 0 & 283.336 & -12.396 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 8.26 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0] x(t)$$

여기서 자기부상모델의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 자기부상모델 파라미터

Table 1 MLS model parameter

Symbols	Means	Value	Unit
m	Suspension mass	10	Kg
g	Gravity Constant	9.8	m/s^2
A	Sectional Area of Magnet	$2 \cdot 10^{-3}$	m^2
μ_0	Permeability	$4\pi \cdot 10^{-7}$	
N	Number of coil turns	380	
R	Magnet Resistance	1.5	Ω
z_0	Nominal Airgap	0.003	m
i_0	Nominal Current	0.85	A
L_0	Nominal Inductance	0.121	H
K_i	Current Constant	34.2755	
K_z	Airgap Constant	$9.7114 \cdot 10^3$	

시 불변 시스템에서 $(t-\tau)$ 는 샘플링 주기이므로 Δt 로 나타낸다. 주기를 4KHz로하고 계산상의 편의를 위해 3번째 스텝까지만 계산을 하면 상태전이행렬은 다음과 같다.

$$\Phi(t, \tau) = e^{F(t-\tau)} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(t-\tau)^i}{i!} F^i$$

$$= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0002 & -0.000 \\ 0.1942 & 1.0000 & -0.0007 \\ 0.0055 & 0.0566 & 0.9975 \end{bmatrix}$$

입력계수행렬 B 는 칼만필터의 입력을 없는 경우로 시뮬레이션 할 것이기 때문에 무시하며, 센서 반영 행렬 H 와 시스템잡음의 계수행렬 G 는 잡음의 스케일이 그대로 전달된다고 가정하고 다음과 같이 결정한다.

$$H = [1 \ 0 \ 0] \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

따라서, 칼만필터에 전제조건인 잡음조건을 포함시켜 이산시간 상태방정식의 형태로 표현하면 아래와 같다.

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0002 & -0.000 \\ 0.1942 & 1.0000 & -0.0007 \\ 0.0055 & 0.0566 & 0.9975 \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} u_k$$

$$y_k = [1 \ 0 \ 0] x_k + v_k$$

여기서 $k=0, 1, 2, \dots$ 이고 최종값은 시뮬레이션시간과 샘플링시간에 의해 결정된다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션은 Matlab Simulink를 사용하였으며 칼만필터 알고리즘의 구현은 S-function기능을 이용하여 C언어로 프로그램 하였다. 피드백 계인은 고정된 값을 사용하였으며 공극의란은 크기가 $\pm 1mm$ 이며 10초 동안에 1~500Hz의 주파수 변화를 갖는 노이즈를 인가하였다. 그림4.1은 단일자석 자기부상시스템의 공극신호에 의한 인가시 칼만필터를 적용한 시뮬레이션 블록다이어그램이다.

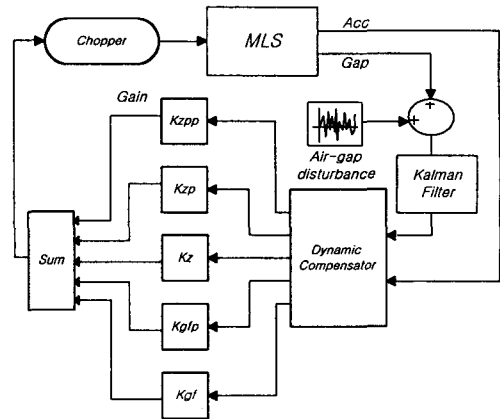


그림 4.1 시뮬레이션 블록선도

Fig. 4.1 Block diagram of Simulation

식(3.6)에 의해 계산된 이산시간에서의 공분산 초기값 결과 표 2에 나타내었다. 오차 공분산 초기값은 각 상태오차값의 최대편차의 제곱값을 사용하였고 측정잡음 공분산과 시스템잡음 공분산의 초기상태값 또한 각 상태값의 최대편차값으로 시작하여 여러번 반복 실험을 거쳐 적절한 값을 선택하여 결정한 값이다.

표 2 공분산 초기값

Table 2 Covariance initial value

P_0	Q_0	R_0
$\begin{bmatrix} 0.000002 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.001 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.044 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.062 \end{bmatrix}$	1.0

그림 4.2는 2차저역통과필터와 제어기의 주파수응답을 나타내고 있으며 제어기에 영향을 주지 않는 범위에서의 필터 설계를 위해 제어기 주파수 대역의 4배정도 떨어진 저역통과필터를 설계하였다. 그림4.3은 설계된 2차저역통과필터로 아래 칼만필터 시뮬레이션시의 잡음조건을 인가하여 시뮬레

이전한 것이며 결과는 잡음에 의한 영향을 감쇄시키지 못하고 제어기의 입력으로 들어오고 있음을 알 수 있다. 그림 4.4는 칼만필터를 사용했을 때의 응답과 하지 않았을 때의 응답으로서 단일자석 자기부상시스템에 칼만필터의 적용 시 공극외란감쇄에 효과가 있음을 확인하였고 그림 4.5는 부상 후 5초후에 스텝인가시 응답을 나타내고 있다. 그림 4.6의 (a)는 칼만필터 적용시 측정잡음 공분산 R 의 초기값을 변화했을 때의 결과로서 R 의 크기가 클수록 외란감쇄가 커짐을 볼 수 있으며 (b)는 공분산초기값의 변화에 따른 속도 및 전류 응답이다. 그림 4.4의 (c)는 시스템 잡음공분산 초기값의 대각요소 Q_{11} 값을 크게 했을 때 외란감쇄에 좋지 않은 성능을 보였다가 다시 측정잡음 공분산 초기값 R 을 크게 하였더니 외란감쇄성능이 향상됨을 보이고 있으며 (d)는 그에 따른 속도 및 전류 응답이다.

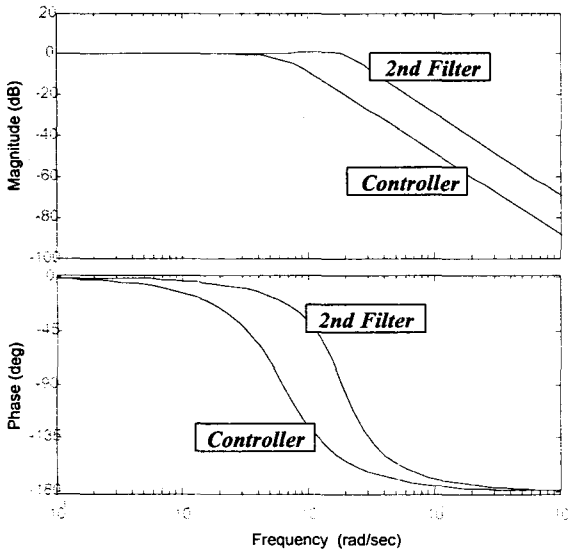


그림 4.2 제어기와 2차 저역통과필터의 주파수응답
Fig. 4.2 Frequency response of Controller and 2nd Low Pass Filter

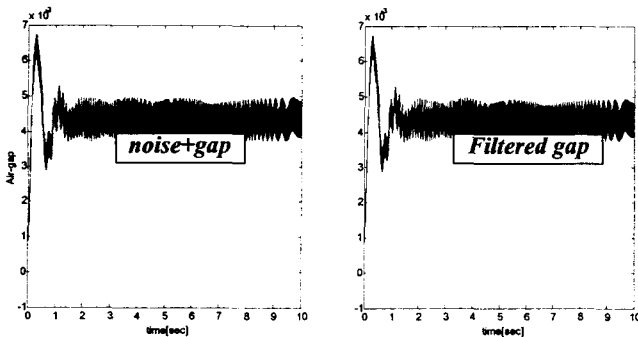


그림 4.3 2차저역통과필터를 사용하지 않았을때와 사용했을 때의 응답
Fig. 4.3 Step response with 2nd Low Pass Filter and without 2nd Low Pass Filter

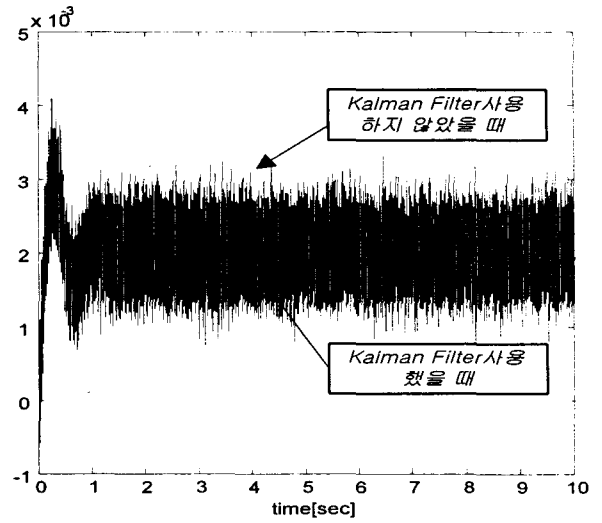


그림 4.4 칼만필터를 사용했을때와 사용 안했을때 응답
Fig. 4.4 Step response with KalmanFilter and without KalmanFilter

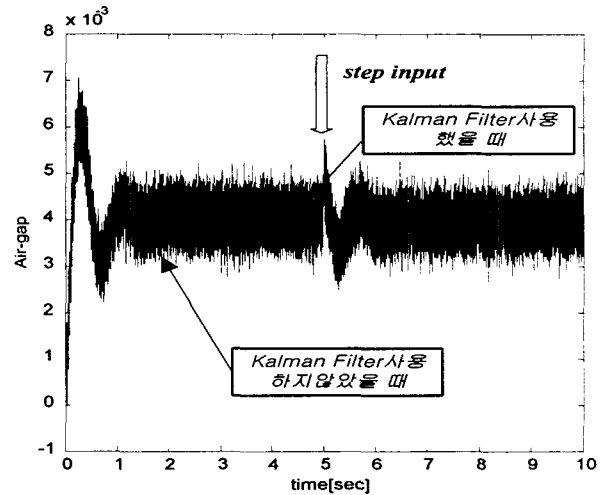
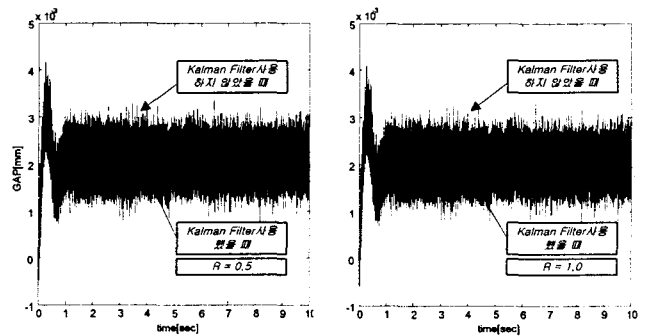
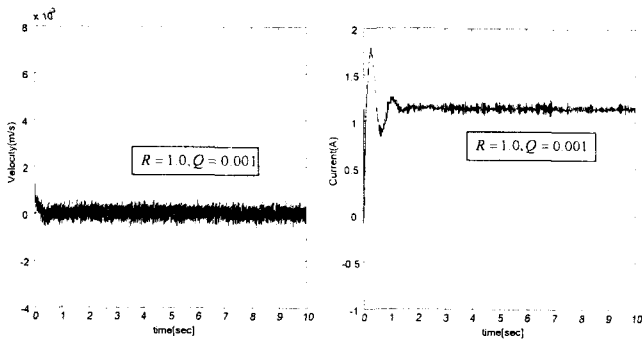


그림 4.5 스텝 인가시 응답
Fig. 4.5 Response for step input



(a) ($R = 0.5, Q_{11} = 0.001$), ($R = 1.0, Q_{11} = 0.001$)



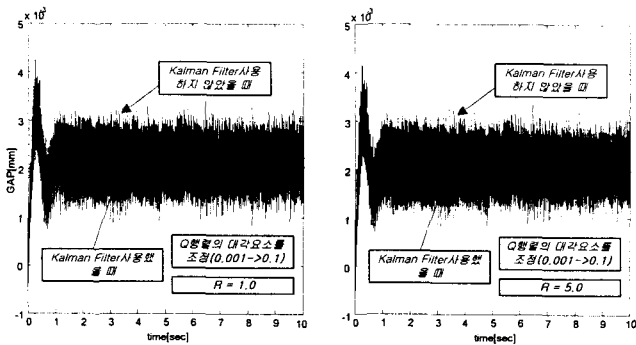
(b) 속도 및 전류 응답



그림 4.7 단일 자석 모델

Fig. 4.7 Single magnet model.

그림4.8는 실험에 관련한 하드웨어의 구성도로서 부상제 어기는 실시간운영체제(RTOS)를 사용하여 신뢰성있는 제어 연산을 수행하며 PC를 통하여 모니터링 할 수 있다.



(c) ($R = 1.0, Q_{11} = 0.1$), ($R = 5.0, Q_{11} = 0.1$)

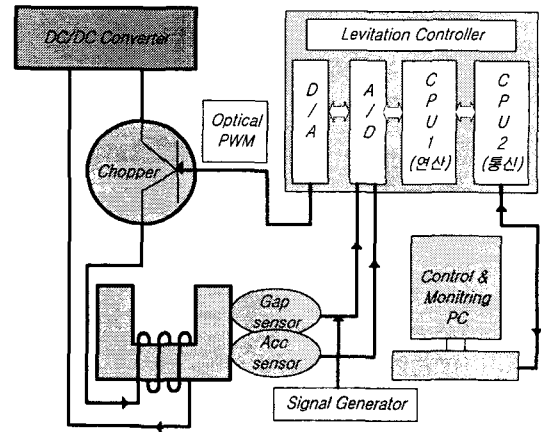
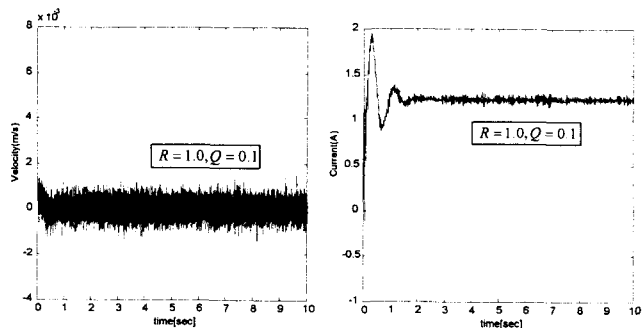


그림 4.8 단일자석 자기부상 시스템 관련 하드웨어 구성도

Fig. 4.8 Hardware structure of the MLS



(d) 속도 및 전류 응답

그림 4.6 공분산 초기값의 변화에 따른 응답

Fig. 4.6 Response for changing covariance initial value

4.2 실험 및 결과

실험시 동특성보상기의 피드백 게인은 고정된 값을 사용 하였으며 신호발생기를 이용하여 시뮬레이션에서와 같이 노이즈를 인가하였다. 그림4.7는 실험에 사용된 단일자석 자기 부상 모델을 나타내고 있다.

실험 결과 그림4.9는 칼만필터를 사용하지 않았을 때와 사용 하였을 때의 응답으로서 실험 결과 또한 시뮬레이션과 비슷하게 단일자석 자기부상시스템에 칼만필터를 적용시 외란 감쇄성능을 확인할 수 있었으며 그림 4.10의 (a)를 통해 측정잡음공분산의 초기값 R 의 크기에 따라 외란감쇄성능이

크게 변화함을 알 수 있었으며 그림 (b)와 (d)는 공분산변화에 따른 속도 및 전류 응답을 나타내었다. 그림 (c)에서는 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 측정잡음 공분산 R 과 시스템잡음 공분산 Q 의 상대적인 관계도 확인하였다. 공극외란의 감쇄효과가 나타나긴 했지만 외란이 완전하게 제거되지 않음을 알 수 있다. 이는 측정잡음 및 시스템 잡음을 너무 작게 설정한데서 기인하는 실제 통계학적 잡음치와 설정치의 오차가 너무 크기 때문으로 예상된다. 즉 실제 실험을 통한 시스템 및 측정 디바이스에 대한 잡음 프로세스의 통계학적 성질이 정밀하게 파악되지 않은 상태에서 시행착오적인 방법을 사용하였기 때문에 Q 와 R 을 크게 한다는 것은 원하는 상태를 추정하는데 있어 오차를 더 크게 할 수 있다는 것이다.

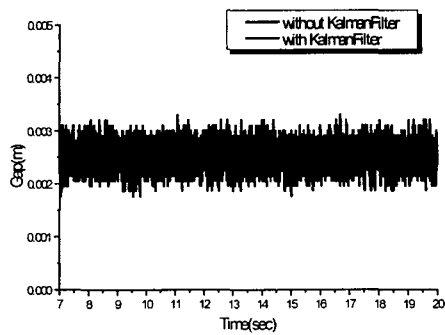
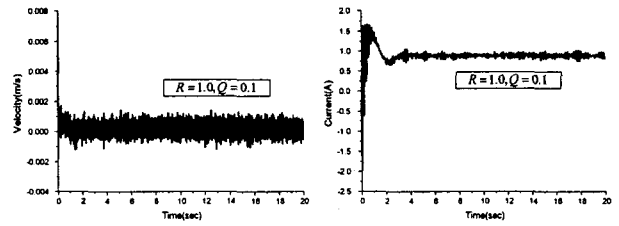
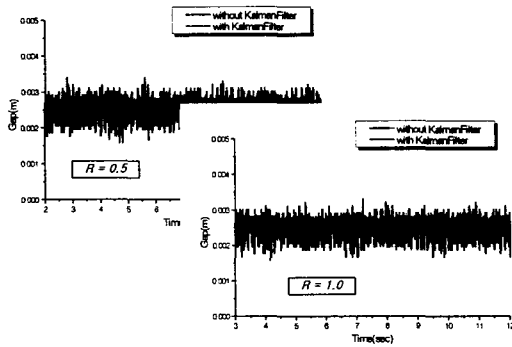


그림 4.9 칼만필터를 사용했을때와 사용 안했을때 응답
Fig 4.9 Step response with KalmanFilter and without KalmanFilter

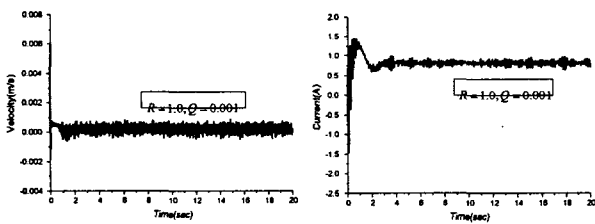


(d) 속도 및 전류 응답

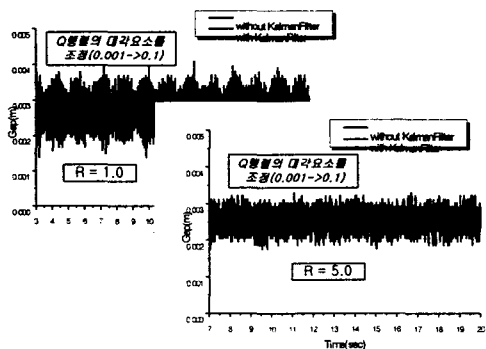
그림 4.10 공분산 초기값의 변화에 따른 응답
Fig. 4.10 Step response for changing covariance initial value(Experiment)



(a) ($R = 0.5, Q_{11} = 0.001$), ($R = 1.0, Q_{11} = 0.001$)



(b) 속도 및 전류 응답



(c) ($R = 1.0, Q_{11} = 0.1$), ($R = 5.0, Q_{11} = 0.1$)

5. 결 론

본 논문에서는 자기부상열차 주행 시 레일의 불규칙으로 인해 나타나는 공극의란을 감쇄하도록 하는 제어시스템 문제를 다루었다. 첫째, 실제와 유사한 레일 불규칙을 갖는 자기부상시스템을 모델링하여 공극의란이 시스템에 어떻게 영향을 주는지에 대해 분석하였다. 둘째, 시스템 잡음과 측정 잡음을 가지는 이산형 칼만필터를 일반적인 자기부상시스템의 공극의란을 감쇄 할 수 있도록 설계하였다. 이 칼만필터는 공극에서 발생하는 외란 및 모델링 오차를 시스템 잡음으로, 측정 시에 발생하는 오차를 측정 잡음으로 각각 고려하여 전 상태와 현재의 출력으로부터 현재의 상태를 추정하도록 하였다.

이러한 이산형 칼만필터를 이용한 자기부상제어시스템의 성능은 실제 레일불규칙으로 나타난 외란을 그대로 적용하여 시뮬레이션과 실험을 실시하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 공극의란을 감쇄시키는 우수한 성능을 확인하고 검증하였다. 차후, 동작점 부근에서의 선형화의 문제점을 해결하기위해 비선형모델에 확장 칼만필터를 적용해 보고 시스템의 안정도에 대한 고찰도 필요하다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 도움을 주신 한국기계연구원 자기부상열차 개발팀에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. K Shina, "Electromagnetic suspension dynamics and control", pp52-58, 1987.
- [2] Kalman. R. E, "A New Approach to Filtering and Prediction Problems", Transaction ASME-Journal of Basic Engineering, pp35-45, 1960.
- [3] 서홍석, 이재호, 성태경, 이상정, "이중모드 GPS/DR 통합 칼만필터", 한국자동차제어학술회 논문집, Vol. 7, No. 3, pp269-275, 2001.

- [4] 홍현수, 박찬국, 한형석, 이장규, "확장칼만필터를 이용한 스트랩다운 관성항법시스템의 수평축 정렬알고리즘", 한국자동제어학회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp90-98, 2001.
- [5] 이태규, 김광진, 제창해, "INS/GPS 결합 칼만필터의 측정치 스무딩 및 예측", 한국자동제어학회 논문집, Vol. 7, No. 11, pp944-952, 2001.
- [6] 신두진, 허욱열, "이산형 칼만필터를 이용한 서보시스템의 추정자 설계", 대한전기학회 논문지, Vol. 48A, No. 8, 1999.
- [7] 장석명, 성소영, 성호경 "칼만필터를 이용한 자기부상 시스템의 강인제어기 설계", 대한전기학회 하계학술대회, 2000.
- [8] 성호경, "자기부상 시스템을 위한 강인 및 신뢰제어기 설계에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, pp6-13 2001.
- [9] Brown and Hwang, "Introduction to random signals and applied Kalman Filtering", 3rd Edition, p214-220, Wiley.
- [10] 진년강, "랜덤변수와 랜덤과정", 연학사, pp139-152 1997.
- [11] Mohinder S. Grewel, Angus P. Andrews, "Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB", 2nd Edition, pp88-127, Wiley.

저 자 소 개



성 호 경 (成 鎬 慶)

1982 인하대학교 전기공학과 공학사
 1998 한국과학기술원 전기및전자공학 박사
 1994~현재 한국기계연구원 신교통시스템그룹 선임연구원
 Tel. (042) 868-7191
 E-mail: sung-hk@kimm.re.kr



정 병 수 (丁 炳 秀)

1978년 7월 17일생.
 2003년 한밭대학교 제어계측공학과 학사
 2003년~현재 충남대 전기공학과 석사과정
 Tel : (042) 868-7195
 E-mail: acid1999@kimm.re.kr



장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공학박사), 1989년 미국 Univ. of Kentucky(Post-doc), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수
 Tel : (042) 821-5658
 E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr