

IFT와 L_1 적응제어기법을 이용한 풍동실험용
자기부상 비접촉식 밸런스의 제어시스템 설계이동규^{1,†}¹현대중공업Position and Attitude Control System Design of Magnetic Suspension and
Balance System for Wind Tunnel Test using Iterative Feedback Tuning and
 L_1 Adaptive Control SchemeDong-Kyu Lee^{1,†}¹Hyundai Heavy Industries

Abstract

Magnetic Suspension and Balance System (MSBS) demonstrates the capacity to levitate an experimental model absent any mechanical contact using magnetic forces and moments. It allows precise control of position and attitude of the model, and measures external forces and moments acting on the model. For the purpose of acquisition of reliable experimental results under stable and safe conditions, the performance and robustness of the position and attitude control system of MSBS needs to be improved. To this end, Iterative Feedback Tuning (IFT) and L_1 adaptive output feedback algorithm were employed to automatically increase command following performance and to ensure robust operation of MSBS with failure of electric power supply. The applicability was validated using computational simulation.

초 록

자기부상 비접촉식 밸런스(MSBS: Magnetic Suspension and Balance System)는 자기력 및 자기모멘트를 이용하여 기계적 접촉 없이 시험 대상체의 위치 및 자세각을 정밀하게 변경하며 외력을 측정하는 것이 가능하다. MSBS를 활용한 풍동실험의 신뢰도 및 안정성을 확보하기 위해서는 위치 및 자세각 제어시스템의 명령 추종 성능과 구성장비의 고장에 대한 강건성을 높일 필요가 있다. 본 연구에서는 실제 개발된 풍동실험용 MSBS의 시뮬레이션을 통해 Iterative Feedback Tuning (IFT) 과 L_1 adaptive output feedback 알고리즘을 활용하여 제어 이득값을 자동적으로 최적화하고 전류공급장치의 고장에 강건한 제어시스템을 설계하는 방법의 유효성을 검증하였다.

Key Words : Magnetic Suspension and Balance System(자기부상 비접촉식 밸런스), Iterative Feedback Tuning, Adaptive Control(적응제어), Optimal Gain (최적제어이득), Fault Tolerant System (고장허용시스템)

1. 서 론

다양한 형상의 물체 주변에 인위적인 공기의 흐름을 발생시키고 물체에 작용하는 공력 및 공기 흐름 변화를 관찰하기 위해 풍동실험을 수행한다[1]. 시험 대상

체를 풍동의 시험부 내에 고정하기 위해 여러 가지 기계적 지지장치를 사용하며, 이를 통해 시험 대상체에 작용하는 공력 측정이 가능하다. 하지만 이와 같은 기계적 지지장치들은 시험 대상체 주변에 원하지 않는 공기 흐름 변화를 가져오기 때문에 높은 정밀도의 실험 결과를 얻는데 방해가 되며, 특히 초음속 풍동의 경우 기계적 지지장치에 의해 충격과가 발생하기 때문에 지지장치의 존재가 풍동실험 결과에 미치는 영향이 더욱 크다.

Received: Sep. 11, 2017 Revised: Sep. 23, 2017 Accepted: Sep. 26, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-10-3249-8883, E-mail: dkle0306@gmail.com

© The Society for Aerospace System Engineering

한편 풍동실험을 통해 시험 대상체의 공기역학적 특성을 정확히 파악하기 위해서 다양한 자세각에 대해 반복적인 계측을 수행하는데, 대부분의 기계적 지지장치는 자세각을 수동적으로 변경해 줘야 하므로 실험의 효율성과 정확도가 낮아지게 된다.

자기부상 비접촉식 밸런스(이하 MSBS: Magnetic Suspension and Balance System)는 풍동실험 중 기계적 지지장치에 의한 영향을 제거하고 자세각 변경의 정확성과 효율성을 높이기 위해 고안되었다. 시험 대상체 내부에 영구자석이 내장되어 있거나 대상체 자체가 자화된 경우 기계적 접촉 없이 MSBS로부터 생성되는 자기장을 이용하여 시험 대상체를 부상시키는 것이 가능하다. 생성되는 자기장을 변화시켜 시험 대상체의 위치 및 자세각을 변경할 수 있으며, 자기장 발생에 소요되는 전류량을 통해 시험 대상체에 작용하는 외력을 측정하는 것이 가능하다. 이와 같은 장점을 바탕으로 유동 가시화 혹은 초음속 풍동실험과 같이 기계적 지지장치에 의한 영향을 많이 받는 풍동실험에 MSBS를 활용한 연구 결과가 다수 보고되었다[2~4].

한편 MSBS를 활용하여 무인비행체를 위한 ‘안전이 보장된 비행시험 환경’을 구현하고 이를 무인기 개발에 활용하고자 하는 연구도 수행 되었다. MSBS의 자기력 및 자기모멘트의 크기와 방향은 제어시스템으로부터 계산된 제어명령에 의해 생성되기 때문에 이를 임의로 조절하는 것이 가능하다. 만약 시험 대상체의 특정 자유도를 위한 제어시스템으로부터 계산된 제어명령이 항상 0이 되도록 한다면 시험 대상체는 해당 자유도 방향으로 자유운동상태에 놓이게 되며, 원하는 순간에 제어명령을 복구시키면 시험 대상체의 해당 자유도는 복구된 자기력 혹은 자기모멘트에 의해 구속되게 된다. 이러한 특징을 활용하면 MSBS를 활용한 풍동실험을 통해 무인기의 안전이 보장된 상태에서 비행시험을 수행하는 것이 가능하다[5].

MSBS를 활용한 풍동실험을 안정적으로 진행하고 결과의 정확도를 높이기 위해서는 시험 대상체의 움직임을 제어하기 위한 MSBS 위치 및 자세각 제어시스템의 명령 추종 성능을 높일 필요가 있으며, 장비 고장과 같은 주변환경변화에 강건한 제어시스템을 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 Iterative Feedback Tuning (IFT) 을 통해 MSBS 제어시스템의 제어이득

을 자동적으로 최적화하는 방법을 고려하였고, L_1 adaptive output feedback controller를 적용하여 전류공급장치의 고장에 강건한 제어시스템을 설계하였으며 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증하였다.

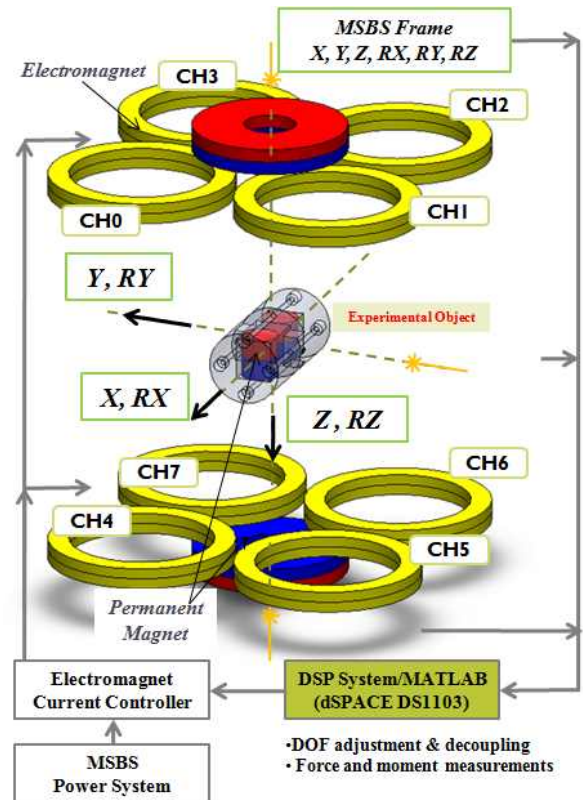


Fig. 1 Configuration of Magnetic Suspension and Balance System

2. 자기부상 비접촉식 밸런스

2.1 시스템 구성 및 작동 원리

Figure 1은 KAIST에서 개발된 국내에서 유일한 풍동실험용 자기부상 비접촉식 밸런스의 구성도를 나타낸다. MSBS 본체는 30 cm × 30 cm의 시험부를 사이에 두고 상, 하로 나누어져 있으며 각각에 외경 150 mm, 내경 50 mm, 두께 50 mm의 대형 영구자석 한 개와 외경 200 mm, 내경 128 mm, 두께 40 mm, 권선횟수 317 회의 전자석 네 개가 위치해 있다. 대형 영구자석 두 개는 시험 대상체의 자중 대부분을 상쇄하여 사용 전력을 줄이기 위한 목적으로 설치되어 있고, 전자석 여덟 개는 시험 대상체의 위치 및 자세각을 제어하는

데 사용되며, 시험부 외부에 설치된 레이저 계측 장치를 통해 위치 및 자세각을 비접촉식으로 계측한다.

시험 대상체를 시험부 내에 부양시키기 위해 6개의 독립적인 비례-미분 제어시스템이 적용되었으며, 전류 공급장치를 통해 각 전자석으로 원하는 크기와 방향의 전류를 공급하여 자기력 및 자기모멘트를 만들어내고 Fig. 1에 표기된 3개의 병진 자유도 (X, Y, Z)와 3개의 회전 자유도 (RX, RY, RZ) 를 동시에 제어한다.

2.2 전자석 전류공급장치

MSBS에 의해 생성되는 자기력 및 자기모멘트의 크기는 전자석에 공급되는 전류의 크기에 비례하며, 정밀한 위치 및 자세각 제어를 위해서는 각 전자석에 정확한 크기의 전류가 입력되어야 한다. MSBS의 각 전자석에 전류를 공급해주는 8 개의 양방향 전류공급장치는 각각 독립적으로 동작하며, 높은 전류를 정확하게 공급하기 위해 두 개의 Darlington 회로가 return-line current sensing 회로에 연결되어 있는 구조로 이루어져 있다. Darlington 회로는 출력단에서 매우 높은 전류 증폭률을 얻을 수 있고, return-line current sensing 회로를 통해서도 출력 전류의 크기를 정밀하게 제어할 수 있다[6].

MSBS 전자석 전류공급시스템의 Darlington 회로를 구성하고 있는 파워트랜지스터에는 높은 전류가 흐르기 때문에 발열에 의해 손상이 될 수 있으며, 이 경우 전자석에 공급되는 전류의 크기가 달라지거나 바이어스가 될 수 있다. MSBS 전자석에 정확한 전류가 입력되지 않게 되면 오직 자기장에 의존해 공중에 부양되어 있는 시험 대상체의 위치 및 자세각 상태변수가 불안정해지고 추락의 가능성도 있기 때문에 정밀한 풍동 실험을 안정적으로 수행하기 위해서는 전류공급장치 고장에 강건한 제어시스템 설계가 필요하다.

2.3 제어기 설계 방법

위치 및 자세각 제어를 위한 6개의 독립적인 비례-미분 제어시스템 최적화를 위해 각 자유도별로 독립적인 시행착오시험(trial-and-error test)이 수행된다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 각 자유도에 알맞은 지그를 설계하여 관심 자유도만을 남기고 나머지 자유도를 모두 구속시킨 상태에서 제어이득 최적화가 진행되는데,

수동적 방법을 통해 이루어지기 때문에 많은 시간이 소요되고 최종적으로 얻어진 제어이득이 최적의 값인지 확인하기 어렵다[7].

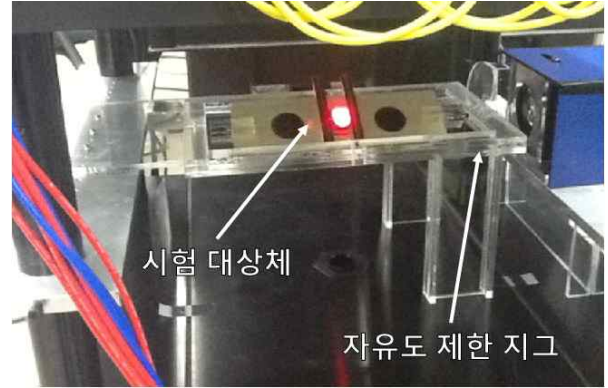


Fig. 2 Limited degree of freedom experiment for gain tuning of MSBS control system

2.4 MSBS 시뮬레이터

KAIST에서 운용되고 있는 풍동실험용 MSBS의 개발 초기에 대형 영구자석 및 전자석의 크기와 위치를 결정하는 단계에서 설계치의 타당성 검증을 위해 MSBS 시뮬레이터가 개발되었다. 전자석 및 영구자석에 의해 생성되는 자기장 모델링은 실측값과의 비교를 통해 검증되었고 시험 대상체의 질량 및 관성모멘트는 3D CAD 프로그램을 통해 추정되었으며 시험 대상체가 평형상태에 있는 조건에서 미소 교란 이론을 바탕으로 시험 대상체의 운동방정식을 선형화 하였다. 위치 및 자세각 제어 시스템은 실제와 마찬가지로 6개의 독립적인 비례-미분 제어시스템으로 구성되었고, 각 자유도 별로 수차례의 시뮬레이션 수행을 통해 제어이득값들이 구해졌다[8]. 본 연구에서는 위와 같이 개발된 MSBS 시뮬레이터를 이용하여 MSBS 제어시스템의 제어이득 최적화 방법 및 전류공급장치 고장에 강건한 제어시스템 설계 방법을 검증하였다.

3. IFT for design of baseline controller

3.1 Iterative Feedback Tuning (IFT) 알고리즘

피드백 제어의 주요 목적은 시스템 파라미터 변화나 주변 외란과 무관하게 시스템이 주어진 명령을 잘 따

르게 하는 것이다. 피드백 제어시스템을 잘 설계하기 위해서는 대상 시스템의 정보를 파악하여 모델링 하는 것이 필수이지만 모델링 된 시스템의 응답이 실제 시스템의 그것과 정확히 일치할 수 없기 때문에 그 차이를 줄이는 것이 제어시스템 최적화를 위해 해결해야 할 주요 이슈 중 하나이다. 제어시스템의 설계에 모델링된 시스템으로부터 얻어지는 정보 대신 실제 시스템으로부터 얻어지는 정보를 사용하는 것이 이러한 문제를 해결할 수 있는 한 가지 방법이 될 수 있으며, iterative feedback tuning (IFT) 기법을 이용하면 실제 시스템의 응답을 바탕으로 선형 및 비선형 시스템의 응답성능 개선이 가능하다.

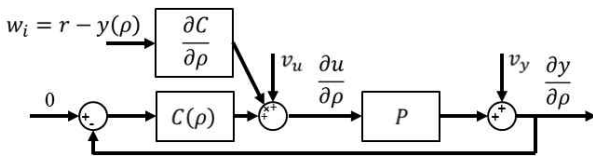


Fig. 3 Block diagram for gradient experiment of iteration feedback tuning

MSBS 시험부 내에 위치한 시험 대상체의 6자유도 움직임을 제어하기 위해 6개의 독립적인 비례-미분 제어시스템이 적용되었으므로 각각의 자유도를 단일 입출력 시스템으로 가정하고 각 자유도에 대한 IFT 시뮬레이션이 독립적으로 수행되었다. 단일 입출력 시스템의 출력값 및 제어명령은 다음과 같이 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(\rho) &= Pu(\rho) + v_y \\ u(\rho) &= C(\rho)\{r - y(\rho)\} + v_u \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 r 은 입력값, y 는 출력값, u 는 제어명령, P 는 제어 대상 시스템, C 는 제어시스템, v_y , v_u 는 각각 계측잡음과 공정잡음을 나타내며 ρ 는 제어시스템에서 최적화가 이루어질 제어 이득값이다. 원하는 응답 파형을 생성하기 위한 필터를 T^d 라 할 경우 이에 대한 출력값의 예러 \tilde{y} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{y}(\rho) = y(\rho) - T^d r \quad (2)$$

한편, 제어시스템의 성능을 평가할 함수 J 는 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서 $\lambda > 0$ 은 가중치 계수, Δ 는 차분 오퍼레이터를 나타낸다.

$$J(\rho) = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N \{(\tilde{y}(\rho))^2 + \lambda(\Delta u)^2\} \quad (3)$$

Eq. 3의 평가 함수를 최소화하는 제어 이득값을 찾아가기 위한 업데이트 공식 및 헤시안 근사값, 제어 이득값에 대한 평가함수의 구배는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho^{k+1} &= \rho^k - \gamma^k H^{-1} \frac{\partial J}{\partial \rho} \\ H_{ij}(\rho^k) &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left\{ \frac{\partial y}{\partial \rho_i} \frac{\partial y}{\partial \rho_j} + \lambda \frac{\partial \Delta u}{\partial \rho_i} \frac{\partial \Delta u}{\partial \rho_j} \right\} \\ \frac{\partial J(\rho^k)}{\partial \rho_i} &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left\{ \tilde{y} \frac{\partial y}{\partial \rho_i} + \lambda \Delta u \frac{\partial \Delta u}{\partial \rho_i} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

상기 Eq. 4의 업데이트 공식을 이용하면 시뮬레이션 반복횟수가 증가함에 따라 평가 함수를 최소화하는 제어 이득값을 구할 수 있지만, \tilde{y} , Δu 와 달리 $\partial y / \partial \rho_i$, $\partial \Delta u / \partial \rho_i$ 를 구하기 위해서는 별도의 gradient experiment를 수행해야 하며, Fig. 3의 w_i 위치에 다음과 같은 신호를 입력하면 $\partial y / \partial \rho_i$, $\partial \Delta u / \partial \rho_i$ 를 구할 수 있다[9].

$$w_i = \frac{\partial C}{\partial \rho_i} (r - y) \quad (5)$$

즉 우선 normal experiment 수행을 통해 r 과 y 를 구하고 이를 이용해 w_i 를 계산하여 gradient experiment에 입력을 해 주면 평가 함수값을 최소화하기 위한 제어 이득값 업데이트를 수행할 수 있다.

3.2 Update 알고리즘

Equation 4의 가우스-뉴턴법은 많은 경우에 대해 최적의 해를 찾아주지만 제어시스템의 초기 성능이 최적해와 멀리 떨어져 있을 경우에는 제어 이득값에 대한 평가함수의 구배 형태가 복잡해지므로 조금 더 조심스러운 알고리즘이 필요하다. 이를 위해 Levenberg 등은 헤시안 근사값을 구하는 과정에 댐핑 팩터 μ 를 도입하였으며 다음과 같은 공식으로 나타낼 수 있다.

$$R_i = H_i + \mu_i I \quad (6)$$

Eq. 6의 댐핑 팩터를 업데이트 하는 방법은 여러 연구자들에 의해 제시 되었으며, 본 연구에서는 Nielsen 등이 제시한 부등식을 사용하였다[10].

$$\xi < 0 \begin{cases} \mu_{i+1} = \mu_i v_i \\ v_{i+1} = 2v_i \end{cases} \quad (7)$$

$$\xi \geq 0 \begin{cases} \mu_{i+1} = \mu_i \max(1/3, 1 - (2\xi - 1)^3) \\ v_{i+1} = 2 \end{cases}$$

또한 댄핑 팩터의 초기값 u_0 , v_0 및 계인비율 ξ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_0 = \tau \max(\text{diag}(H_0)) \quad (8)$$

$$v_0 = 2$$

$$\xi = \frac{J_{i-1} - J_i}{0.5 \left(\gamma_i R_i^{-1} \frac{\partial J}{\partial \rho_i} \right)^T \left(\mu_i \gamma_i R_i^{-1} \frac{\partial J}{\partial \rho_i} + \frac{\partial J}{\partial \rho_i} \right)}$$

τ 값의 경우 제어시스템의 초기성능이 최적해와 어느 정도 떨어져 있다고 가정하여 10^{-3} 을 사용하였다.

3.3 시뮬레이션 결과

IFT 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 각 자유도 별로 원하는 응답 과정을 생성하기 위한 레퍼런스 필터를 선정하였다. JAXA에서는 10cm×10cm의 시험부를 갖는 자기부상 비접촉식 밸런스의 이상적인 응답으로서 고유진동수 5.0 Hz, 감쇠율 0.8의 2차 진동계 스텝 응답을 선정하였다[11]. 본 연구에서도 감쇠율 0.8의 2차 진동계 스텝 응답을 이상적인 응답으로 선정하였으나 수평방향 위치 (X, Y) 및 자세각 (RX, RY) 자유도에서는 더욱 빠른 응답속도를 가질 수 있도록, 전자석의 배열방식에 의해 구속력이 약한 수직방향 위치 (Z) 및 자세각 (RZ) 에 대해서는 상대적으로 낮은 응답속도를 가질 수 있도록 각 자유도 별 레퍼런스 필터의 고유진동수를 Table 1과 같이 선정하였다.

Table 1 Natural Frequencies of Reference Filters

DOF	X	Y	Z	RX	RY	RZ
Natural Freq. (Hz)	10	5	20			3

Figure 4는 X 방향 자유도에 대해 IFT를 수행한 결과이다. 다섯 번의 업데이트 과정을 거치면서 응답성능이 이상적 응답에 가까워진 값으로 수렴한 것을 알 수 있다. Fig. 5는 RY방향 자유도에 대해 IFT를 수행하는 과정에서 비례 제어이득과 미분 제어이득의 변

화를 보여주고 있다. IFT 알고리즘에 의해 평가 함수가 최소값을 갖는 방향으로 제어이득값이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

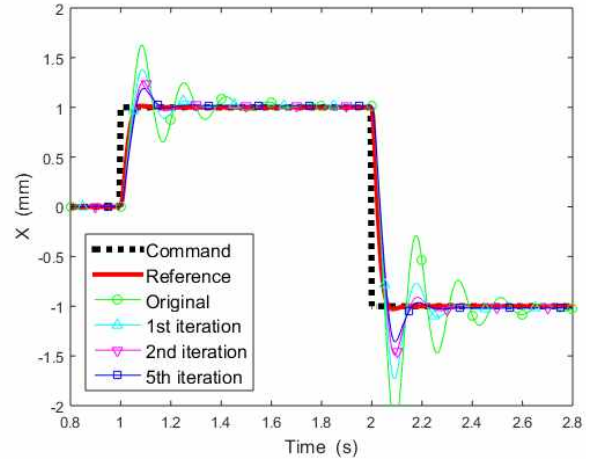


Fig. 4 Step responses of X degree of freedom according to number of automatic iteration

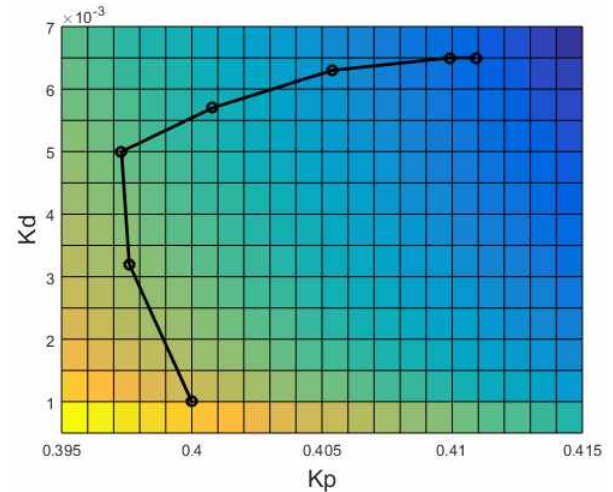


Fig. 5 Trace of control gain values on performance index for pitch rotation (RY) attitude angle

MSBS의 6자유도에 대해 IFT를 수행한 결과 모든 자유도에서 반복횟수 5회 이내에 응답 성능이 이상적 응답에 가까워지면서 평가함수값이 최소값에 수렴하는 것을 확인하였으며, 반복 횟수에 따른 평가함수값 및 제어 이득값 변화를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Performance Index (J) and Control Parameters (K_P and K_D) at Each Iteration

DOF	Val.	Initial	Iteration				
			1st	2nd	5th	10th	15th
X	J	0.0082	0.0022	0.0012	0.0009	0.0009	0.0009
	K_P	1.2000	1.1896	1.1860	1.2011	1.2118	1.2186
	K_D	0.0100	0.0199	0.0267	0.0314	0.0312	0.0311
Y	J	0.0084	0.0020	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011
	K_P	1.2000	1.1920	1.1953	1.2138	1.2138	1.2138
	K_D	0.0100	0.0225	0.0306	0.0350	0.0350	0.0350
Z	J	0.0055	0.0023	0.0020	0.0019	0.0019	0.0019
	K_P	0.9000	0.8927	0.9027	0.9439	0.9446	0.9452
	K_D	0.0200	0.0369	0.0432	0.0460	0.0458	0.0457
RX	J	0.0072	0.0049	0.0035	0.0020	0.0020	0.0020
	K_P	0.5000	0.5000	0.5001	0.5008	0.5008	0.5008
	K_D	0.0015	0.0024	0.0034	0.0053	0.0053	0.0053
RY	J	0.0045	0.0010	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
	K_P	0.4000	0.3983	0.3996	0.4063	0.4064	0.4064
	K_D	0.0010	0.0038	0.0050	0.0058	0.0058	0.0058
RZ	J	0.0097	0.0017	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
	K_P	0.3000	0.2983	0.2954	0.2949	0.2961	0.3020
	K_D	0.0100	0.0179	0.0235	0.0263	0.0267	0.0285

4. L_1 Adaptive Output Feedback Controller

4.1 Output Predictor와 저역 통과 필터의 선정

적응제어(adaptive control)는 시스템의 작동 환경이나 시스템 자체가 변화하는 문제에 주로 적용되는 기법으로, 제어 대상 시스템의 모델링 시 발생하는 수학적 불확실성을 극복하기 위해 제어시스템의 구조 또는 파라미터를 변경하여 주어진 요구성능을 만족시킨다. 하지만 파라미터 적응을 위해 높은 샘플링 주파수가 요구되며 과도한 제어 입력으로 인해 작동기가 포화상태에 이를 수 있다. L_1 adaptive output feedback control은 제어 대상 시스템의 모델이 필요하지 않으며 저역 통과 필터를 사용하기 때문에 과도한 제어입력이 방지되어 시스템의 안정성이 좋다는 장점이 있다 [12]. 본 연구에서는 MSBS 위치 및 자세각 제어시스

템의 안정성 증대라는 목적에 맞추어 L_1 adaptive output feedback control 기법을 적용하였다.

L_1 adaptive output feedback controller의 output predictor와 저역 통과 필터는 선형시스템 이론을 바탕으로 선정될 수 있지만 가장 적합한 조합을 선정하기 위해서는 경험에 바탕한 직관이 필요하다. Output predictor 선정 시 제어 대상 시스템의 동특성을 고려해야 하며, 저역 통과 필터의 대역폭 선정 시 직관적인 하한값은 없지만 상한값의 경우 작동기의 대역폭을 넘어서는 안된다[13, 14]. 본 연구에서는 각 자유도의 output predictor로 IFT에서 사용된 레퍼런스 필터를 사용하였으며 저역 통과 필터로는 고유진동수 15Hz, 감쇠율 0.8의 1차 진동계를 선정하였다.

4.2 적응제어 시뮬레이션 결과

기존 MSBS 시뮬레이터에 사용된 6개의 독립적인 비례-미분 제어기를 baseline controller로 하여 각각의 단일 입출력 시스템에 대해 L_1 adaptive output feedback controller를 구성하였다. Baseline controller의 제어 이득값은 IFT를 통해 찾아진 값을 사용하였고, 앞절에서 선정된 output predictor와 저역 통과 필터를 적용하여 Fig. 6과 같이 MSBS 시뮬레이터를 다시 구성하였다.

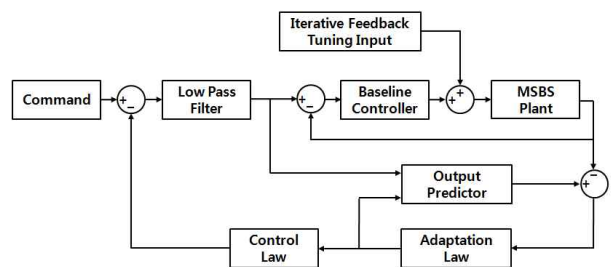


Fig. 6 Block diagram of MSBS simulator including IFT and L_1 adaptive output feedback control scheme

L_1 adaptive output feedback controller가 적용된 MSBS 제어시스템의 기본적인 제어명령 추종 성능을 검증하기 위해 먼저 doublet 신호를 입력값으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 개발된 MSBS는 사용전력량을 낮추기 위해 대형 영구자석을 이용하여 시험 대상체의 자중을 대부분 상쇄하는데, 이 대형 영구자석의

존재로 인해 X 방향과 RY 방향, Y 방향과 RX 방향의 운동이 서로 커플되어 있다. 이에 따라 각 자유도 별 독립적인 비례-미분 제어기만을 사용할 경우 X 방향 위치가 기준점에서 멀어질 경우 필연적으로 RY 방향 자세각에도 변화가 발생한다.

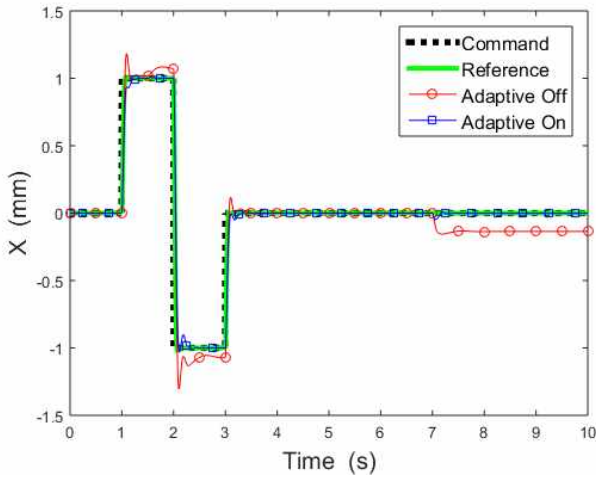


Fig. 7 Responses of X position for doublet command in X direction

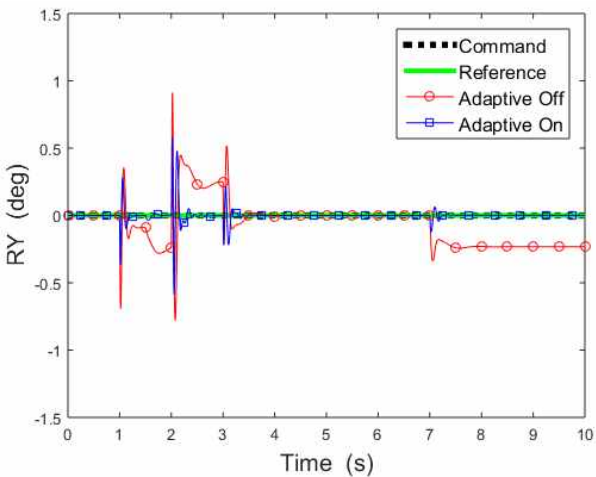


Fig. 8 Responses of RY attitude for doublet command in X direction

Fig. 7과 Fig. 8의 0 ~ 5초 구간은 각각 X 방향 doublet 시뮬레이션 중 X 방향 위치 및 RY 방향 자세각을 나타낸다. 기존의 baseline controller만을 사용할 경우 X 방향 위치 및 RY 방향 자세각에 정상상태 오차가 발생하지만 설계된 적응제어 알고리즘을 적용

할 경우 X 방향 위치와 RY 방향의 자세각이 항상 기준값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 전류공급장치 고장에 대한 강건성을 확인하기 위해 고장 시뮬레이션을 수행하였다. 전자석에 높은 전류를 공급해주는 전류공급장치의 특성 상 높은 온도에 의한 파워트랜지스터 열화 등의 이유로 고장이 발생할 수 있다. 고장 시뮬레이션에서는 Fig. 9과 같이 1번 전자석 전류공급장치에서 특정 시점($t = 7$ s)부터 추가적인 바이어스 전류(+5 A)가 출력되도록 하였고 이에 대한 응답을 Fig. 7과 Fig. 8의 5 ~ 10초 구간에서 확인할 수 있다. Baseline controller만을 사용할 경우 고장 시점부터 6자유도 위치 및 자세각에 정상상태 오차가 발생하지만 적응제어 알고리즘이 적용된 경우에는 Fig. 9과 같이 고장 발생 시점 직후에 곧바로 각 전자석에 공급되는 전류량이 변화하여 정상상태 오차를 보정하고 6자유도 모두 기준값을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

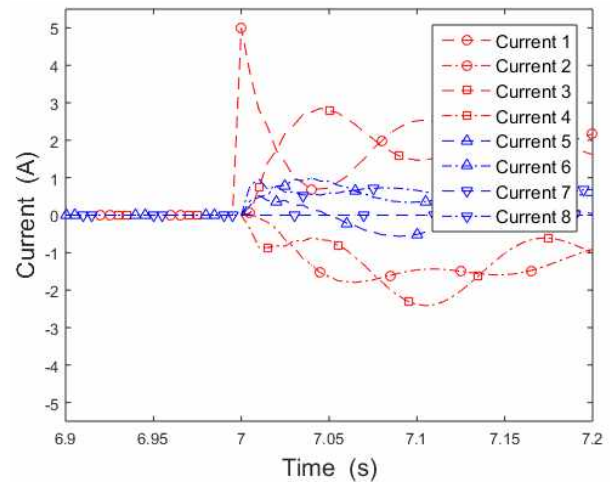


Fig. 9 Electric currents for each electromagnet generated by MSBS power supplier with bias failure on channel no.1

5. 결 론

자기부상 비접촉식 밸런스(MSBS)는 풍동실험 중 기계적 접촉 없이 시험 대상체를 시험부 가운데에 고정시킬 수 있고 위치 및 자세각의 정밀한 변경이 가능하며 공력 등 시험 대상체에 작용하는 외력을 계측할 수 있다. 시험 대상체는 오직 자기장에 의존하여 공중에

부양되므로 정밀한 시험을 안정적으로 수행하기 위해서는 MSBS 위치 및 자세각 제어시스템이 높은 명령 추종 성능과 함께 구성장비 고장에 대한 강건성을 확보해야 한다. 본 연구에서는 iterative feedback tuning 기법을 이용하여 MSBS 위치 및 자세각 제어시스템의 baseline controller 제어 이득값들을 최적화하고, L_1 adaptive output feedback 알고리즘을 적용하여 전류공급장치 고장에 대해 강건한 명령 추종 성능을 확인하는 시뮬레이션을 수행하였다. 향후 KAIST에서 개발된 풍동실험용 MSBS의 위치 및 자세각 제어시스템에 적용하여 명령 추종 성능 및 구성장비 고장에 대한 강건성을 실험을 통해 확인할 것이다.

후 기

본 연구논문은 KAIST 대학원 재학 당시 수행된 결과를 바탕으로 작성되었습니다.

References

- [1] C. Han, "Aerodynamic Characteristics of a Variable Span Wing Flying Inside a Channel I (Effects of Wing Aspect Ratio and Guideway)," *Journal of the Society for Aerospace System Engineering*, Vol.10, No.4, pp.11~16, 2016.
- [2] M. H. Tuttle, D. L. Moore and R. A. Kilgore, "Magnetic Suspension and Balance System; A Comprehensive, Annotated Bibliography," *NASA Technical Memorandum*, No.4318, 1991.
- [3] R. W. Boom, Y. M. Eyssa, G. E. McIntosh, M. K. Abdelsalam, R. G. Scurlock, Y. Y. Wu, M. J. Goodyer, K. Balcerak and J. Eskins, "Superconducting Electromagnets for Large Wind Tunnel Magnetic Suspension and Balance Systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-21, No. 2, pp. 444~447, 1985.
- [4] D.-K. Lee, J.-S. Lee, J.-H. Han and Y. Kawamura, "Dynamic Calibration of Magnetic Suspension and Balance System for String-free Measurement in Wind Tunnel Tests," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.27, No.7, pp.1963~1970, 2013.
- [5] D.-K. Lee and J.-H. Han, "Safety-Guaranteed Flight Test Environment for Micro Air Vehicles," *AIAA Journal*, Vol.54, No.3, pp.1014~1025, 2016.
- [6] D.-K. Lee and J.-H. Han, "Development of a Multi Channel Push-Pull Power Supply for a Magnetic Suspension and Balance System," *Proceedings of KSAS Conference*, Fall, 2012.
- [7] J. Jin and J.-H. Jo, "A Test Bench with Six Degrees of Freedom of Motion for Development of Small Quadrotor Drones," *Journal of the Society for Aerospace System Engineering*, Vol.11, No.1, pp.41~46, 2017.
- [8] D.-K. Lee, J.-S. Lee, J.-H. Han, Y. Kawamura and S.-J. Chung, "Development of a Simulator of a Magnetic Suspension and Balance System," *International Journal of Aeronautical and Space Science*, Vol. 11, No. 3, pp. 175~183, 2010.
- [9] H. Hjalmarsson, "Iterative Feedback Tuning - an Overview," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol.16, pp.373~395, 2002.
- [10] J. K. Huusom, "Improving Convergence of Iterative Feedback Tuning," *Journal of Process Control*, Vol.19, No.4, pp.570~578, 2009.
- [11] S. Suda, H. Sawada and T. Kunimasu, "Auto-Tuning System of Control Parameters for Magnetic Suspension System," *47th Proceedings of Japan Joint Automatic Control Conference*, 2005.
- [12] Y. Jung and D. H. Shim, "Design the Flight Control System against Model Uncertainty," *Proceedings of KSAS Conference*, Fall, 2012.
- [13] N. Hovakimyan and C. Cao, "L1 Adaptive Control Theory," SIAM, 2010.
- [14] B. Michini and J. P. How, "L1 Adaptive Control for Indoor Autonomous Vehicles: Design Process and Flight Testing," *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 2009.