

# 자기 부상 비접촉식 밸런스의 동적 교정

## Dynamic Calibration of Magnetic Suspension and Balance System

이동규\* · 이준성\* · 한재홍† · Y. Kawamura\*\*

Dong-Kyu Lee, Jun-Seong Lee, Jae-hung Han and Yoshiyuki Kawamura

### 1. 서 론

풍동실험은 여러가지 형상을 갖는 실험 대상체 주위에 인위적으로 공기의 흐름을 발생시키고 이에 따른 실험 대상체 주변의 유동장 변화를 관찰하는 실험이며, 지주(支柱) 등의 지지장치 및 밸런스를 사용해 실험 대상체의 각 축 방향으로 작용하는 힘과 모멘트를 측정할 수 있다. 이 때 지지장치에 의한 영향으로 높은 정밀도를 요구하는 실험을 수행하기 어려운 문제점이 있고, 이를 해결하기 위해 고안된 것이 자기 부상 비접촉식 밸런스(이하 MSBS: Magnetic Suspension and Balance System)이다[1]. MSBS는 자기력을 이용하여 영구자석이 내장된 실험 대상체를 공중에 부상시킬 수 있는 장치이다. 뿐만 아니라 전자석에 의해 발생하는 자기장을 제어하여 실험 대상체의 움직임을 조종할 수 있으며, 제어 명령에 따라 전자석에 입력되는 전류의 양을 측정하면 각 축 방향의 힘을 측정할 수 있다[2]. 따라서 MSBS를 이용하여 풍동실험을 수행하면 지지장치에 의한 영향을 차단한 상태에서 초소형 비행체의 자세각을 다양하게 변화시키며 작용하는 공력을 정밀하게 측정하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 MSBS를 이용하여 실험 대상체의 위치 및 자세각을 제어하였고, MSBS를 이용한 실험 대상체 가진 실험을 통해 실험 대상체에 작용하는 외력을 측정하기 위한 동적 교정을 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용하고자 하는 MSBS는 40cm×33cm의 풍동 시험부에 삽입 가능하며, 크게 MSBS 본체, 전원 공급 시스템, 디지털 신호처리장치(dSPACE社 ds1103)로 이루어져 있다(Fig. 1). MSBS 본체의 상·하에 각각 외경

150mm, 내경 50mm, 두께 25mm의 대형 영구자석 한 개와 외경 180mm, 내경 140mm, 두께 20mm, 감은횟수 255번의 전자석 네 개가 위치해 있다. MSBS에 장착된 대형 영구자석 두 개는 실험 대상체의 자중을 상쇄하고 전자석 여덟 개는 실험 대상체의 위치 및 자세각을 제어하는데 사용된다.

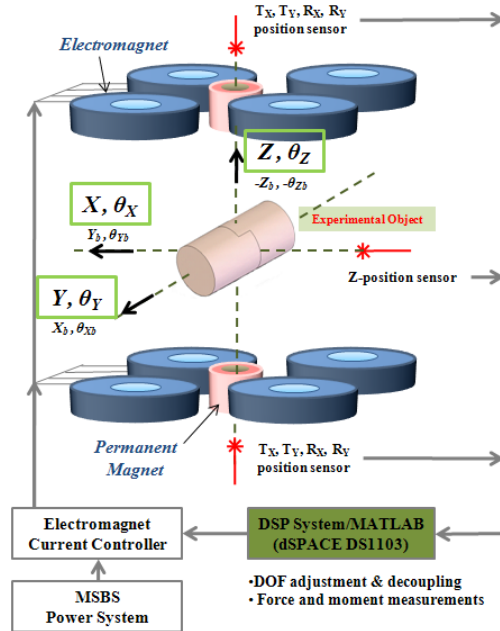


Fig. 1. Configuration of Magnetic Suspension and Balance System in KAIST

#### 2.2 실험 대상체의 위치 및 자세각 제어

MSBS에 장착된 전자석에 입력되는 전류의 크기를 조절하면 실험 대상체에 작용하는 자기력이 달라지며, 이를 이용하여 위치 및 자세각을 제어할 수 있다. 이를 위한 제어 알고리즘으로 비례-미분 제어가 사용되었고 위치 및 자세각 명령어 입력에 대한 추종 여부를 알아보기 위해서 step response 실험을 수행하였다. X, Y, Z,  $\theta_X$ ,  $\theta_Y$ ,  $\theta_Z$ 의 6자유도 각각에 대해 step input을 입력하고 그에 따른 실제 실험 대상체의 위치 및 자세각을 측정하였다. 명령 추종에 대한 평가를 위해서 실험구간에 대해 오차의 제곱평균근(RMS; Root Mean Square)을 계산하였으며, X방향 위치 실험에서는 오차의 RMS값이 0.0687mm로 계산되었다.

† 교신저자; KAIST 항공우주공학전공  
E-mail : jaehunghan@kaist.edu  
Tel : (042) 350-3723, Fax : (042) 350-3710

\* KAIST 항공우주공학전공  
Fukuoka Institute of Technology,

\*\* Japan

### 2.3 동적 교정 실험

MSBS가 실험 대상체에 가해주는 자기력은 위치 및 자세각 제어를 위한 제어 명령과 비례한다. 따라서 자기력과 제어 명령 사이의 비례상수를 파악하면 실험 대상체에 가해지는 자기력을 제어 명령으로부터 계산할 수 있게 된다.

$$m\ddot{x}_{i,t} = F_{i_{MSBS},t} = K_i U_{i,t}$$

$m = \text{mass or moment of inertia}$

$i = X, Y, Z, \theta_X, \theta_Y, \theta_Z \quad t = \text{time}$

위의 식은 MSBS를 이용하여 실험 대상체를 특정 자유도 방향으로 가진할 경우의 운동방정식이다. 실험 대상체의 운동은 MSBS에 의해 가해지는 자기력에 의한 것이며 이 자기력은 위치 및 자세각 제어 명령과 비례한다. 따라서 실험 대상체를 가진하는 동안 측정된 가속도에 질량 혹은 관성모멘트를 곱해주게 되면( $m\ddot{x}_{i,t}$ ) MSBS가 실험 대상체에 가해준 자기력을 계산할 수 있고( $F_{i_{MSBS},t}$ ), 이를 이용하면 자기력과 제어 명령( $U_{i,t}$ ) 사이의 비례상수( $K_i$ )를 구할 수 있다. 실험 대상체의 X축 방향 위치 명령으로 정현파를 입력한 결과를 (Fig. 2)에 나타내었다.

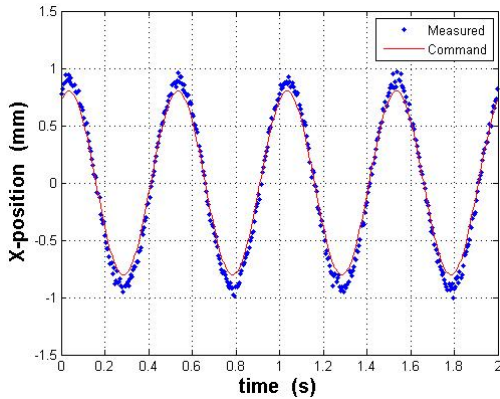


Fig. 2. Measured X-position under X-directional sinusoidal position command

위의 실험에서 얻어진 실험 대상체의 X축 방향 위치를 시간에 대해 두 번 미분하면 실험 대상체의 X축 방향 가속도를 구할 수 있고, 여기에 실험 대상체의 질량을 곱하면  $F_{X_{MSBS},t}$ 를 계산할 수 있다. 같은 실험에서  $U_{X,t}$ 를 얻을 수 있으므로  $F_{i_{MSBS},t} = K_i U_{i,t}$ 로부터  $K_i$ 를 구할 수 있게 된다. 하지만 실제 실험을 수행하면 실험 대상체의 가속도와 그에 해당하는 제어 명령 모두 이상적인 정현파가 아니기 때문에 한 가지 실험조건에 대한 결과만으로는  $F_{X_{MSBS},t}$ 와  $U_{X,t}$  사이의 직접적인 비례관계를 파악하기 어렵게 된다. 따라서 위치 명령으로 입력되는 정현파의 진폭을 변화시키면서 동일한 실험을 반복 수행하였고, 그 결과를 각각 시간 영역에 대해 제곱평균을 취하는 통계적 방법을 이용해 두 신호 사이의 비례관계를 파악하였으며 이

를 (Fig. 3)에 나타내었다.

$$F_{i_{MSBS},rms} = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^n F_{i_{MSBS},t}}{n}} = \sqrt{\frac{K_i^2 \sum_{t=0}^n U_{i,t}^2}{n}} = K_i U_{i,rms}$$

$n = \text{No. of Data}$

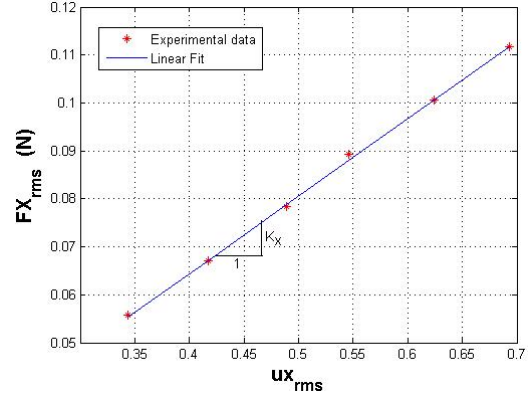


Fig. 3. Dynamic calibration of X-direction ( $K_X=0.16136$ )

### 3. 결론

MSBS를 이용하여 실험 대상체에 작용하는 외력을 측정하기 위해 교정 실험을 수행하였다. MSBS를 이용하여 실험 대상체를 가진함으로써 생성되는 실험 대상체의 움직임을 이용하는 동적인 방법을 적용하였고 X, Y, Z,  $\theta_X$ ,  $\theta_Y$ ,  $\theta_Z$ 의 6자유도 각각에 대해 실험을 수행하였으며, 실험 결과 본 연구에서 사용된 MSBS를 이용하여 힘을 측정하는 것이 가능함을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD090082JD)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며 제 1저자와 제 2저자는 두뇌한국(BK)21 사업의 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] J. Eskins, "An investigation into force/moment Calibration Techniques Applicable to A Magnetic Suspension and Balance System", NASA Contractor Report, 1988.
- [2] Y. Kawamura, "Wind Tunnel Experiments Using a Low-Electric Power 40cm-Class Magnetic Suspension and Balance System in Fukuoka Institute of Technology", *ながれ*, vol.22, pp. 309-315, 2003.