

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(8), 757-764(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.8.757

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

소형위성 광학탑재체의 영상안정화를 위한 초점면부 보정장치의 실험적 모델링에 관한 연구

강명수*, 황재혁**, 배재성**, 박진호*

On the Experimental Modeling of Focal Plane Compensation Device for Image Stabilization of Small Satellite

Myoung-Soo Kang*, Jai-Hyuk Hwang**, Jae-Sung Bae** and Jean-Ho Park*

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU*,
Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**

ABSTRACT

Mathematical modeling of focal plane compensation device in the small earth-observation satellite camera has been conducted experimentally for compensation of micro-vibration disturbance. The PZT actuators are used as control actuators for compensation device. It is quite difficult to build up mathematical model because of hysteresis characteristic of PZT actuators. Therefore, the compensation device system is assumed as a 2nd order linear system and modeled by using MATLAB System Identification Toolbox. It has been found that four linear models of compensation device are needed to meet 10% error in the input frequency range of 0~50Hz. These models describe accurately the dynamics of compensation device in the 4 divided domains of the input frequency range of 0~50Hz, respectively. Micro-vibration disturbance can be compensated by feedback control strategy of switching four models appropriately according to the input frequency.

초 록

본 논문에서는 소형 지구관측 위성의 광학카메라에 들어가는 미소진동을 보상하기 위한 초점면부 보정장치 시스템의 실험적 모델링을 수행하였다. 미소진동 외란을 보상하는 초점면부 보정장치의 구동기로 PZT 압전작동기를 적용하였다. 압전작동기는 히스테리시스 고유 특성을 갖게 되므로 보정장치 시스템의 정확한 수학적 모델링을 얻는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 보정장치 시스템을 2차 선형시스템으로 가정하고 MATLAB의 시스템 식별 툴박스(System Identification Toolbox)를 이용하여 실험적으로 모델링을 수행하였다. 외란의 주파수 범위인 0~50Hz에서 응답 오차 10%를 만족하기 위해 단일 선형 모델로는 불가능하며 총 4개의 선형 모델이 필요하다. 각각의 모델은 0~50Hz 입력범위를 4개의 구간으로 나눈 영역에서 실제 동역학을 잘 표현하고 있다. 미소진동 외란의 보상은 입력주파수에 따라 모델 스위칭 기법을 적용한 초점면부 보정장치 제어를 통해 이루어진다.

Key Words : PZT Actuator(압전작동기), Satellite Camera(위성카메라), Image Stabilization (영상안정화), Focal Plane Compensation Device(초점면부 보정장치)

† Received : April 4, 2015 Revised : July 16, 2015 Accepted : July 21, 2015

** Corresponding author, E-mail : jhhwang@kau.ac.kr

I. 서 론

세계의 지구 관측위성은 위성의 개발기간 단축과 개발비용 절감을 위해 점차 소형화되고 있다. 또한 위성이 점점 소형화되고 있음에도 불구하고 소형위성에서 고해상도의 영상을 획득하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

고해상도 영상은 1m 이하 급의 해상도를 갖는 영상을 말하며, 고해상도 영상을 얻기 위해서는 일반적으로 위성의 크기가 대형이고, 운용되는 위성의 고도가 낮으며, 위성 광학 탑재체의 주 반사경이 커져야 한다. 미국의 록히드 마틴 사가 개발한 해상도 15cm 급 정찰위성인 키홀-11을 예로 들면, 궤도의 고도는 약 240~400km, 주 반사경의 직경이 2.4m, 무게가 13톤-20톤, 위성체 길이는 약 20m인 초대형 위성이다[4]. 그러나 초대형 위성의 천문학적 개발비용을 감당할 수 있는 경제력을 지닌 국가는 많지 않다. 미국 역시 이런 문제들로 인해 고해상도 소형위성의 개발에 몰두하고 있다. 우리나라도 민간 위성개발 사업자를 비롯하여 국책 연구원에서 국책 사업으로 소형위성 개발에 많은 비용과 노력을 기울이고 있다.

보통 해상도 1m 이하 급의 영상을 촬영하는 위성들은 지상 600~700 km에서 0.6~0.8m 직경의 주 반사경을 이용하고 있는 실정이다. 그러나 소형위성 개발 선두 업체에서는 점점 위성카메라의 주경 직경을 작게 하여 해상도 1m 급 영상을 얻고 있는 추세이다. 2013년 11월에 발사되어 운용되는 (주)썬트랙아이의 Dubai-sat 2호는 기존의 주반사경 직경보다 매우 작은 0.42m의 주 반사경을 이용하여 고해상도 영상을 획득하는데 성공하였다[5].

광학식으로 영상을 얻는 위성카메라는 반사경을 통해 촬영물체로부터 반사된 빛을 초점면부 영상센서로 모은 후 영상을 획득한다. 따라서 광학 탑재체는 주 반사경이 커질수록 영상센서의 노출시간이 짧아도 촬영에 필요한 충분한 광량을 획득할 수 있다. 그러나 반사경의 크기가 작은 소형위성의 경우, 촬영에 충분한 광량을 확보하기 위해 대형위성보다 영상센서의 노출시간이 길어져야 한다. 노출시간이 증가됨에 따라 센서가 영상을 얻는 동안 자세제어 시스템을 비롯하여 위성 본체에서 발생하는 다양한 유형의 진동에 의해 영상의 품질이 저하될 수 있다[6-8].

위성체의 미소진동의 영향에도 영상의 고품질을 유지하기 위한 기법에 대한 다양한 연구도 국내외적으로 많이 진행되고 있다. 예를 들면, 위성

의 정밀자세제어를 통해 자세안정화를 통한 방법과 광학 탑재체와 위성 본체를 분리시키는 진동절연장치를 설치하여 탑재체로 입력되는 진동을 차단하는 방법이 대표적인 경우이다[9,10]. 그러나 위 방법들은 진동절연 대상 물체의 크기가 커지고 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 초점면부 제어기법은 위성 카메라의 초점면부 진동외란을 직접 제어하여 위성영상 안정화를 구현하는 기법으로 매우 효과적인 방법이다. 기존의 진동절연 방법과 비교했을 때, 구현하려는 시스템의 크기도 작고 카메라 내부의 작은 질량(초점면부의 영상센서 어셈블리)을 구동하기 때문에 구성도 간단하며 비용이 적게 드는 장점이 있다. 초점면부 제어기법은 위성카메라가 소형화될수록 더 효과적인 방법으로 위성체의 미소진동에 의해 영상품질이 저하되는 것을 방지하는 기법이다.

본 논문에서는 소형위성 카메라의 영상안정화에 적용할 수 있는 초점면부 보정장치를 설계하고 모델링을 실험적으로 수행하였다. 보정장치의 구동기로는 입력전압 0~150V에서 최대 100 μ m 구동이 가능한 적층형 압전작동기(Piezoelectric actuator)를 적용하였다. 압전작동기는 마이크로 단위의 극소 변위제어가 가능하고 응답속도가 빠른 장점을 갖기 때문이다. 그러나 압전작동기는 개루프(Open-loop)에서 히스테리시스 특성을 보인다. 이 특성 때문에 수학적 모델을 얻기에 어려움이 있어 실제 실험을 통하여 초점면부 보정장치의 전달함수를 얻었다. 가진되는 입력주파수의 범위에 따라 총 4개의 전달함수를 얻었으며, 위성카메라에 가해지는 미소진동 외란을 보상시키는 제어 시스템을 구성할 때 입력주파수의 범위에 따라 4개의 모델을 스위칭하여 사용하면 효과적인 제어를 수행 할 수 있다.

II. 초점면부 보정장치의 모델링

2.1 압전작동기와 초점면부 보정장치

압전효과(Piezoelectricity)는 압전소자에 압력을 가했을 때, 유전 분극을 일으키는 현상을 말한다. 즉, 기계적인 압력을 가하면 전압이 발생하게 되는 현상이다. 초점면부의 보정장치에 적용되는 압전작동기(PZT actuator)는 전압을 인가하여 변위를 발생시키는 역 압전효과를 이용한다. 압전작동기의 특징은 출력되는 변위가 작고 정밀하여 마이크로 또는 나노 단위의 정밀 위치제어가 가능하고, 응답이 매우 빠르다. 또한 압전작동기는

Table 1. Specification of PZT actuator

	Value	Unit
Length	100	mm
Driving voltage	-30~150	V
Max. stroke	100/130	μm
Blocked force	800	N
Capacitance	4000	nF
Stiffness	5	N/μm
Resonance frequency	10	kHz

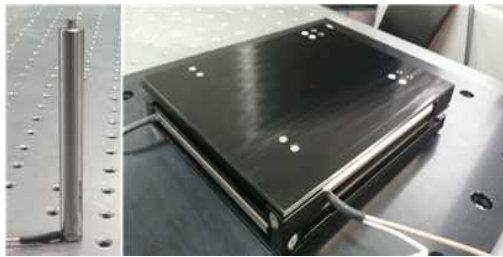


Fig. 1. PZT actuator(left) and focal plane compensation device(right)

기어열을 사용하지 않고 직선운동을 얻을 수 있기 때문에 백래시 현상 없이 구동할 수 있다. 이런 압전효과를 나타내는 지배방정식은 식(1)과 같고, 역 압전효과는 식(2)로 표현된다[11].

$$S = s^E T + dE \tag{1}$$

$$D = dT + \epsilon^T E \tag{2}$$

여기서, S 는 변형률, s^E 는 일정한 전기장 내에서의 탄성용량(Elastic compliance), T 는 응력, D 는 전속밀도(Electric displacement), d 는 압전소자 상수이며 ϵ^T 는 일정한 응력하의 유전율이다. 압전작동기를 구동할 때, 압전소자 고유의 강유전성 때문에 히스테리시스라는 비선형특성이 나타난다. 히스테리시스는 입력전압이 반복적으로 증가하고 감소할 때 주로 나타나며, 입력 전압이 같아도 전압이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 압전작동기의 변위가 서로 다른 현상을 말한다. 이 현상은 시스템에 정현파 형태의 전압입력을 줌으로써 명확히 확인할 수 있다.

본 연구에 사용된 압전작동기는 피에조메카닉사의 PSt 150/5/100 VS10이며, 작동기의 제원은 Table 1에 나타내었으며 형상은 Fig. 1의 좌측에 나타내었다. 압전작동기는 Fig. 1의 우측과 같은 초점면부 보정장치에 구동기로 적용되었다. 초점면부 보정장치는 3개의 층(Stage)로 구성되어 있

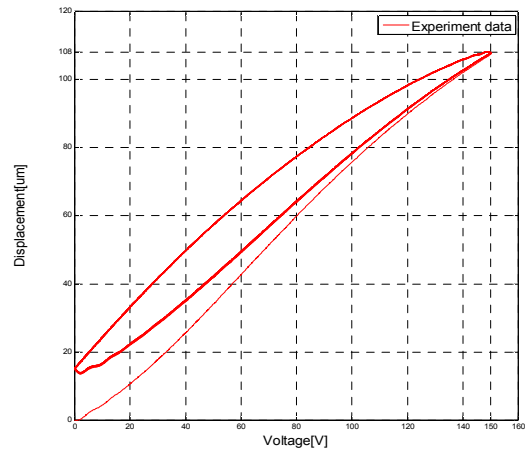


Fig. 2. Displacement characteristics of compensation device with PZT actuator for an input voltage range

으며, 위에서 첫 번째 층은 x방향, 두 번째 층은 y방향으로 움직이도록 구성되어 있다. 마지막 층은 z 방향으로 움직이며 디스페이싱을 조절할 수 있다. x, y방향 운동은 스테이지 사이의 4개의 선형 구동 가이드를 따라 상대운동을 하도록 설계되었다.

Figure 2는 압전작동기에 가해지는 구동전압 범위(0V~150V)에서 전압과 변위의 관계를 나타내고 있다. 총 20번의 반복되는 0V~150V의 전압 입력에 대한 Fig. 2의 응답은 압전소자가 갖고 있는 전형적인 히스테리시스의 특성을 보여 주고 있다. 이는 주기적인 전압 입력에 대해 보이는 특성으로, 같은 전압을 인가하여도 변위가 항상 같지 않음을 보여준다. 이러한 히스테리시스 특성으로 인해 초점면부 보정장치를 수학적으로 모델링하는 과정이 매우 어렵게 된다. x, y방향 스테이지 구동이 독립적으로 이루어지므로, 본 논문에서는 먼저 x방향 보정장치의 수학적 모델링을 실험적으로 수행하였다.

2.2 실험구성

초점면부 보정장치의 개루프 실험 구성은 아래의 Fig. 3과 같다. DSP는 d-SPACE DS1103을 이용하였으며, 일련의 과정을 MATLAB Simulink로 블록 다이어그램을 구성하였다. DSP에서 명령신호가 나와 증폭기를 거쳐 보정장치의 압전작동기로 들어가고, 압전작동기는 전압입력을 받아 기계적인 변위를 출력하게 된다. 출력변위는 작동기에 부착된 스트레인 게이지로 측정되어 그 값을 얻는다. 스트레인 게이지는 레이저 측정기를 사용하여 정밀도를 검증한 후 사용하였다.

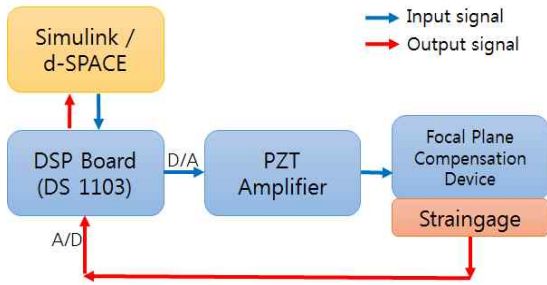


Fig. 3. Experimental setup

2.3 보정장치 시스템의 모델링

절 2.1에서 기술한 압전작동기의 히스테리시스 현상 때문에 초점면부 보정장치의 정확한 수학적 모델을 얻기는 힘들게 된다. 따라서 압전작동기의 수학적 모델을 다루기 쉬운 2차 선형시스템으로 가정하고, MATLAB의 시스템 식별 툴박스(System Identification Toolbox)를 이용하여 모델링을 실험적으로 수행하였다. 얻어진 상태공간 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3}$$

$$y = Cx \tag{4}$$

MATLAB의 시스템 식별 툴박스는 실험으로 취득한 입력과 출력 데이터를 이용하여 원하는 차수의 수학적 모델을 얻을 수 있는 방법이며 그 결과는 전달함수, 상태공간방정식 등으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용한 입력 데이터는 압전작동기에 들어가는 전압입력이고, 출력 데이터는 압전 작동기에 내장된 스트레인 게이지에서 출력되는 변위이다. 상태공간 방정식 행렬들을 얻기 위해 툴박스에서 2차, 연속시스템에서 추정했으며, 계산될 모델 구조는 정규형(Canonical form)으로 선택하였다. 또한 추정초점은 출력의 시뮬레이션으로 설정하였고, 초기값 설정은 실제 실험과 같도록 0으로 하였다. 추정계산은 부분공간 시스템 식별방법(Subspace method)를 선택하여 시스템 모델을 추정하였다. 실험적 모델링에 사용되는 입력은 위성의 주 외란으로 가정된 50Hz(3,000 rpm) 정현파 전압입력이다. MATLAB으로 얻은 시스템의 상태공간 방정식의 행렬들은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 \times 10^7 & -4.242 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.006552 \\ 15.5225 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

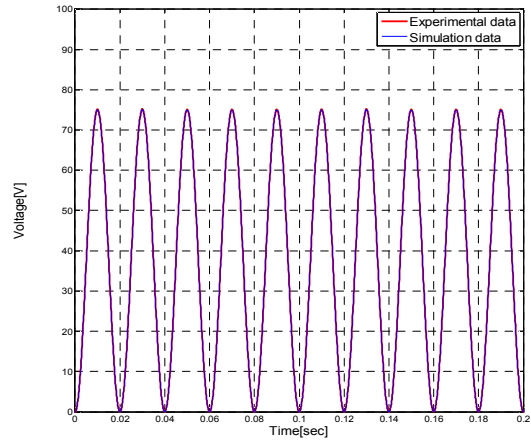


Fig. 4. Input voltage to focal plane compensation device (50Hz input, x-axis)

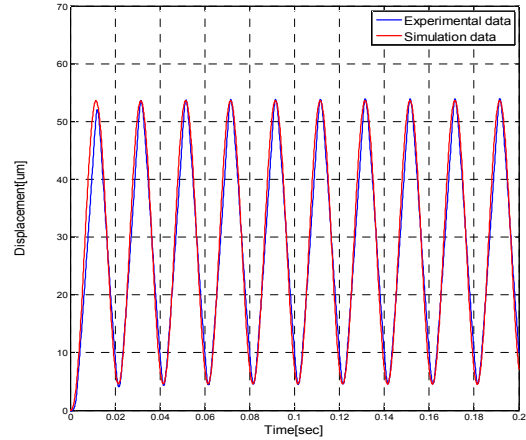


Fig. 5. Output displacement of focal plane compensation device (50Hz input, x-axis)

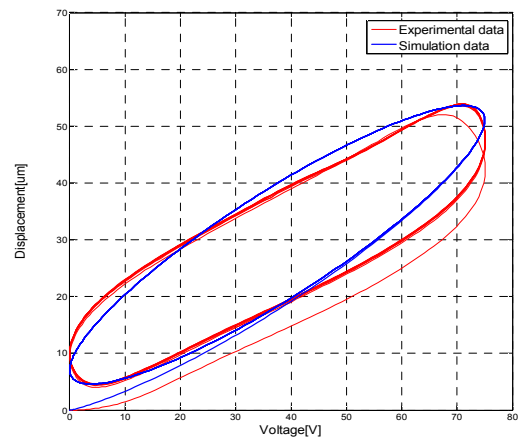


Fig. 6. Output hysteresis of focal plane compensation device(50Hz input, x-axis)

위의 행렬들을 전달함수로 변형하면 다음 식(6)이 된다.

$$G_1(s) = \frac{0.006552s + 15.5225}{s^2 + 4.242 \times 10^4 s + 2 \times 10^7} \quad (6)$$

식(5) 또는 식(6)으로 얻은 모델의 시뮬레이션 결과와 실제 실험데이터를 비교한 결과를 Fig. 4~6 에서 나타내었다. Fig. 4는 실험과 시뮬레이션에서 사용한 전압입력을 나타내었다. 전압입력 범위는 0V~75V로 보정장치의 요구도인 $\pm 50\mu m$ 의 절반에 해당하는 $\pm 25\mu m$ 를 고려하여 설정하였다. Fig. 5는 시뮬레이션 출력변위를 실험결과와 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이 실험결과와 시뮬레이션 결과의 차이가 최대 0.89% 오차를 나타내고 있어, 보정장치 수학적 모델인 식(6)이 실제 장치를 매우 정확하게 표현하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 전압과 변위 관계를 나타내는 그림이며 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 히스테리시스 현상 역시 실험과 시뮬레이션에서 유사하게 나타나는 것을 Fig. 6에서 확인 할 수 있다.

III. 다중 스위칭 모델 정립과 실험

3.1 정현파 입력에 대한 모델링 오차

50Hz 정현파 입력에 대해 실험적으로 얻어진 모델이 50Hz가 아닌 입력주파수에 대해서도 적용될 수 있는지 검증이 필요하다. 50Hz에서 주파수가 낮아질수록 수학적 모델의 응답 오차가 증가하였다. Table 2는 50Hz 정현파 입력에 기반을 둔 수학적 모델에 대해 입력주파수를 35~50 Hz 범위로 변경했을 때, 실험 결과 대비 시뮬레이션 응답의 오차를 정리한 표이다. 시뮬레이션 결과와 실험값의 차이로 표시되는 응답오차의 허

Table 2. Output error of mathematical model (50Hz) for input frequency range

Input frequency	Output error		Note
	μm	%	
35Hz	6.722	14.50	
38Hz	4.365	9.10	less than 10%
40Hz	2.730	5.56	less than 10%
45Hz	1.094	2.12	less than 10%
50Hz	0.441	0.89	model

용치를 10%로 설정하면, 응답 오차가 10% 이하가 되는 입력주파수는 38Hz~50Hz 사이가 되므로, 50Hz 모델을 적용할 수 있는 미소진동 외란의 입력주파수는 38Hz~50Hz가 된다.

3.2 다수의 스위칭 모델의 정립

절 3.1의 결과를 토대로 분석하면 초점면부 보정장치의 수학적 모델은 입력되는 정현파의 주파수 범위에 따라 바뀌어야 한다고 판단된다. 50Hz 기준 모델을 적용하기 힘든 38Hz 미만의 주파수범위에서 모델을 얻기 위해, 우선 25Hz 정현파 입력에 대한 모델을 구하였다. 모델을 얻는 방법은 절 2.3에서와 같이 MATLAB 시스템 식별 툴박스를 이용하였다. 25Hz 정현파에 대한 초점면부 보정장치의 새로운 모델의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{0.13894s + 15.6307}{s^2 + 2.50176 \times 10^5 s + 2 \times 10^7} \quad (7)$$

25Hz 모델도 역시 스위칭 모델이며, 적용될 수 있는 타당한 입력주파수 범위를 확인해야 한다. Table 3은 25Hz 정현파 입력을 기반으로 얻어진 모델에 대해 입력주파수를 10~37 Hz 범위로 변경했을 때의 응답 오차를 정리한 표이다. Table 3을 검토한 결과, 25Hz 정현파 입력을 기반으로 얻어진 모델에 적용 가능한 외란 입력주파수는 15~37Hz 범위가 됨을 알 수 있다. 이 주파수 적용범위는 전과 같이 실험결과 대비 수학적 모델의 응답오차 크기(10% 이내)를 적용하여 결정하였다.

세 번째로, 식(7)으로 기술되는 수학적 모델(25Hz 기반)이 적용될 수 없는 15 Hz 미만에서 적용 가능한 새로운 모델을 정립해야 한다.

Table 3. Output error of mathematical model (25Hz) for input frequency range

Input frequency	Output error		Note
	μm	%	
10Hz	6.461	13.95	
13Hz	5.382	11.88	
15Hz	3.749	8.20	less than 10%
20Hz	1.301	2.84	less than 10%
25Hz	0.144	0.31	model
30Hz	1.635	3.53	less than 10%
35Hz	2.73	5.56	less than 10%
37Hz	3.924	8.23	less than 10%

15Hz의 약 절반인 7Hz 정현파를 입력으로 하고, 보정장치의 실험결과 데이터를 활용하여 수학적 모델을 만들면 전달함수는 다음 식(8)과 같다.

$$G_3(s) = \frac{0.45308s + 15.6096}{s^2 + 8.04767 \times 10^5 s + 2 \times 10^7} \quad (8)$$

식 (8)으로 표현되는 수학적 모델은 7 Hz 입력에서 실험결과 대비 시뮬레이션 응답의 차이가 약 1.65% 발생하며, 이 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 7 Hz 기준 모델도 역시 스위칭 모델로서 적용될 수 있는 타당한 입력주파수 범위를 확인해야 한다. Table 4는 7Hz 정현파 입력에 기반을 둔 수학적 모델에 입력주파수를 3~14 Hz 범위에서 변경했을 때의 응답 오차를 정리한 표이다. Table 4의 내용을 검토하면 7Hz 정현파 입력을 기반으로 얻어진 모델에 적용 가능한 외란 입력주파수 범위는 5~14Hz가 됨을 알 수 있다.

마지막으로 4Hz 미만의 정현파 외란 입력에

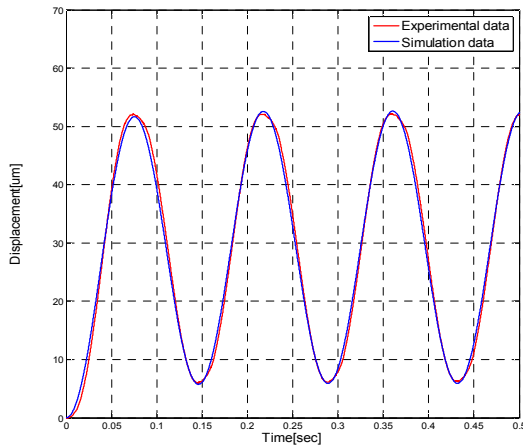


Fig. 7. Output displacement of focal plane compensation device (25Hz input, x-axis)

Table 4. Output error of mathematical model (7Hz) for input frequency range

Input frequency	Output error		Note
	μm	%	
3Hz	6.417	13.73	
5Hz	2.973	6.44	less than 10%
7Hz	0.76	1.65	model
9Hz	0.76	0.69	less than 10%
11Hz	1.055	2.32	less than 10%
14Hz	3.146	6.71	less than 10%

대한 실험적 모델을 얻어야 한다. 2Hz의 정현파 입력에 대한 실험을 토대로 전과 동일한 방법으로 수학적 모델의 전달함수를 구하면 식(9)와 같다.

$$G_4(s) = \frac{1.51135s + 15.63351}{s^2 + 2.60338 \times 10^6 s + 2 \times 10^7} \quad (9)$$

$G_4(s)$ 를 이용하여 2Hz 정현파 입력에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 실험 데이터와를 Fig. 8에서 비교하였으며, 모델링이 정교하게 이루어졌음을 확인할 수 있다. 식(9)로 기술되는 수학적 모델에 대해 입력주파수 1~4Hz 범위에 대해 시뮬레이션 응답오차를 Table 5에 정리하였다. Table 5의 결과에서, 2Hz 정현파 입력을 기반으로 한 모델이 1~4Hz의 외란 입력 주파수범위에서 응답오차 10%이내를 유지하며 실제 보정장치 시스템을 잘 표현하고 있음을 확인하였다. 지금까지 기술한 다중 스위칭 모델의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 검토해 보았을 때, 초점면부 보정장치 시스템은 미소진동 외란의 입

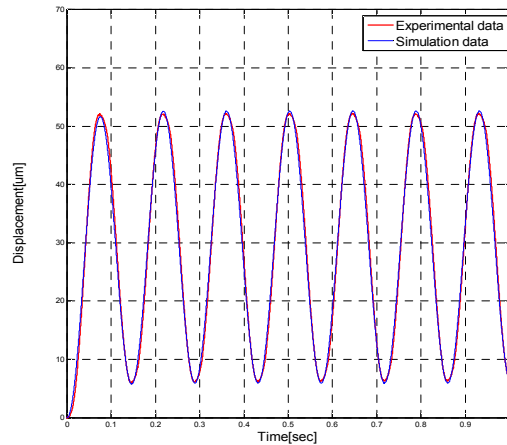


Fig. 8. Output displacement of focal plane compensation device (7 Hz input, x-axis)

Table 5. Output error of mathematical model (2 Hz) for input frequency range

Input frequency	Output error		Note
	μm	%	
1Hz	5.031	10.0	approx. 10%
2Hz	0.55	1.04	model
3Hz	0.547	1.17	less than 10%
4Hz	1.941	4.13	less than 10%

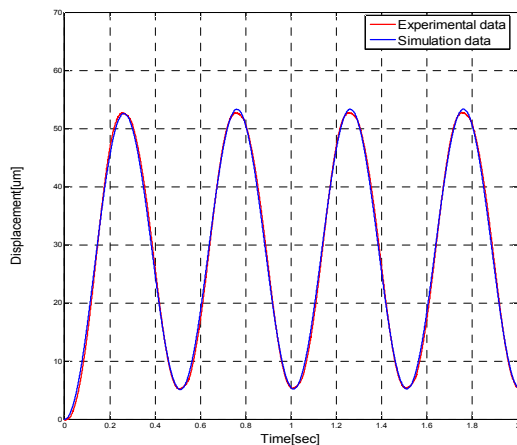


Fig. 9. Output displacement of focal plane compensation device (2 Hz input, x-axis)

력주파수 범위에 따라 모델링이 바뀌어야 한다. 0~50Hz 범위에서 실제 실험결과와 비교해 시뮬레이션 응답오차가 10% 이내로 만족하는 수학적 모델 4개를 결정하였으며, 이는 각각 50Hz, 25Hz, 7Hz, 2Hz에서 얻어진 모델이다. 향후 적용될 적응제어 기법에서는 각 모델에 맞는 제어 이득의 스위칭이 이루어져야 하는 필요성을 확인하였다.

IV. 결 론

초점면부 제어기법은 소형 위성카메라에서 고품질 영상을 얻기 위해 초점면부에 미소진동 보상장치를 장착하여 미소진동을 제어하는 기법이다. 위성카메라 초점면부에 작용하는 미소진동은 주로 리액션 휠에서 발생하는 조화함수 형태의 외란이다. 따라서 초점면부 보정장치의 개루프 모델링은 정현파의 전압입력을 통한 출력변위 데이터를 이용하여 실험적으로 구하였다. 압전작동기에 주기적인 전압 입력이 작용하면 입력주파수에 관계없이 고유의 히스테리시스 특성을 실험을 통해 확인하였고, 시뮬레이션 모델은 MATLAB 시스템 식별 툴박스를 이용하여 2차 선형시스템으로 얻었다. 그러나 보정장치에 입력되는 주파수 범위에 따라 실험적 모델이 바뀌어야 하며, 0~50Hz 내에서 4개의 개루프 모델을 실험적으로 구하였다. 4개로 구성된 개루프 모델에서 각각 해당 주파수 범위에서 실험결과와 약 10% 내외의 응답오차를 갖음을 확인하였다. 이 정도의 오차는 강인성을 갖는 피드백 제어를 통해 처리할

수 있다고 판단하였다. 향후 본 연구의 진행에는 미소 진동외란 주파수에 따라 실험적 모델을 스위칭 해주는 적응제어 기법이 필요하다고 판단된다. 모델을 스위칭 할 때 초점면부 보정장치 응답에서 채터링(Chattering)이 최소화 되도록 적절한 스위칭 기법을 구현해야 한다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF2013MIA3A3A02042321).

References

- 1) Young-Keun Chang, 'Trend and Prospect of Small Satellite Research and Development,' *02' Autumn Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2002*, pp.440-455.
- 2) Eung-Shik Lee, "Development of High Resolution Observation Satellite," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.48, No.7, 2008, pp. 44~48.
- 3) Jun-Ho Lee, Yong-Min Kim, Eung-Shik Lee, Sang-Keun Yoo, Ee-Eul Kim, Yong-Wan Choi and Dong-Cho Park, "An Optical Design of a high resolution Earth Observation Camera for Small Satellite," *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 11, No. 1, 2000, pp. 6~12.
- 4) Gyu-Sun Kim, "Development Trends in Super High Resolution Earth Observation Optical Satellite," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 11, No. 2, 2013, pp. 101~110.
- 5) Sang-Hyun Lee, "Present Development Status of Small Satellite," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.48 No.7, 2013, pp. 49~53.
- 6) Sung-Dong Park, Byung-Jin Kim, Won-Kyu Park, Ee-Eul Kim, Hyon-Sock Chang and Jong-Ho Seon, "New Horizon over 1-meter Resolution Commercial Remote Sensing Satellite Era," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 30 No. 2 2002, pp. 130~135.
- 7) Gee-yong Park, Dae-Oen Lee, Jae-San

Yoon and Jae-Hung Han, "Analytical & Experimental Study on Microvibration Effects of Satellite," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 24, No. 1, 2014, pp. 5~13.

8) Shi-Hwan Oh and Seung-Wu Rhee, "Micro-Vibration Measurement, Analysis and Attenuation Techniques of Reaction Wheel Assembly in Satellite", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 30, No. 8, 2002, pp. 126~132.

9) Hong-Bae Kim, Won-Beom Lee and Gyu-Sun Kim, "Vibration Suppression Techniques

Adopted in Spacecraft Development," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 9, No. 2, 2011, pp. 90~97.

10) Dong-Gi Kwag, Jae-Sung Bae and Jai-Hyuk Hwang, "Dynamic Characteristics of a Piezoelectric Driven Stick-Slip Actuator for Focal Plane Image Stabilization," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2009, Vol. 37, No. 4, 2009, pp. 399~405.

11) Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society, "IEEE Standard on Piezoelectricity," IEEE, New York, 1987, p. 17.