

소형 위성 카메라의 영상안정화를 위한 초점면부 보정장치의 제어

강명수¹ · 황재혁^{2,†} · 배재성²

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Control of Focal Plane Compensation Device for Image Stabilization of Small Satellite Camera

Myoungsoo Kang¹, Jaihyuk Hwang^{2,†} and Jaesung Bae²

¹Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU,

²Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract : In this paper, position control of focal plane compensation device using piezoelectric actuator is conducted. The focal plane compensation device installed on earth observation satellite camera compensates micro-vibration from reaction wheels. In this study, four experimental models of the open-loop compensation device are derived using MATLAB system identification toolbox in the input range of 0~50Hz. Subsequently, the PID controller for each model is designed and the performance test of each controller is conducted through MATLAB/Simulink. According to frequency response analysis of the closed-loop compensation device system, the PID controller designed for 38~50Hz input range has enough tracking performance for the whole 0~50Hz input range. The maximum output error is about $1\mu m$ for the input range. The simulation results has been verified by the experimental method.

Key Words : Focal Plane Control, Satellite Camera, PZT Actuator, Image Stabilization

1. 서 론

소형 지구관측위성은 기존의 대형위성에 비해 개발비, 운용비가 적게 들고 개발시간도 짧아 관측 위성의 시장 확대를 가져오고 있다[1-3]. 미국의 구글은 최근 고해상도 위성영상업체 스카이박스 이미징을 인수하여 구글 디지털지도 서비스의 수준을 한 단계 진화시키게 되었다. 스카이박스 이미징의 소형위성들은 해상도 0.9m급으로, 무게가 91kg, 운용고도 300km에서 영상

을 촬영하고 있고 앞으로 2018년까지 총 24대의 소형 위성 운용을 목표로 하고 있다. 그러나 스카이박스의 위성들처럼 운용고도가 낮으면 고해상도 영상을 촬영하기 유리하지만 비교적 수명이 짧다는 단점이 있다.

일반적으로 지구관측위성의 광학탑재체는 카세그레인 천체망원경과 유사한 구조를 갖는다. 카세그레인식 망원경의 구조는 크게 몸체인 경통, 피사체에서 반사된 빛이 평행으로 입사되어 주반사경, 부반사경을 거친 뒤 관측자의 눈 또는 촬영기기의 영상센서에 도달하도록 되어있다. 이런 형태의 광학탑재체에서 지면해상도(Ground Sampling Distance)를 높일 수 있는 방법은 두 가지가 있다. 첫째는 주반사경의 직경을 키우는 것이고, 두 번째는 경통의 길이를 길게 하는 것이

다. 하지만 두 경우 모두 위성체의 부피 및 무게 증가에 따른 큰 비용을 발생시킨다. 따라서 소형 지구관측 위성을 사용하면서 고해상도 영상을 얻을 수 있는 방향으로 연구가 활발히 진행 중이다.

소형위성의 경우, 빛을 받는 주반사경의 직경이 작아 촬영 시 영상센서를 긴 시간 동안 노출시켜야 한다. 그 동안, 자세제어 시스템을 비롯하여 위성 본체에서 발생하는 미소진동이 유입될 시간적 여유가 발생하므로 영상의 품질이 저하될 수 있다[5-9].

미소진동외란에 의한 영상의 흔들림을 초점면부의 운동으로 보상하기 위해, 압전작동기를 이용하여 영상센서가 탑재된 초점면부를 마이크로미터 단위로 정밀하게 제어하는 것이 필요하다. 압전작동기는 능동재료인 압전소자를 적층시킨 형태인 PZT 작동기로, 적층방향 직선운동이 가능하다. 압전작동기는 고신뢰성, 반영구적인 내구성 등의 장점 때문에 우주응용에서 많이 활용되고 있다.

본 논문에서는, 압전작동기가 적용된 초점면부 보정장치를 모델링하고, 피드백 제어를 설계하여 정밀 위치제어를 수행하였다. 압전작동기를 이용하여 정밀 위치제어를 할 때 어려움은 압전작동기의 개루프(Open-loop)의 수학적 시뮬레이션 모델을 얻는 것이다. 압전재료는 비선형 특성인 히스테리시스가 존재하여 영점(Zero)없는 선형 2차식으로 모델링하기 어렵다. 압전작동기의 개루프 모델링에 대해 기 수행된 연구로 단순한 선형 2차 시스템이 아닌 다소 복잡한 프라이자흐(Preisach) 모델링을 이용한 경우가 있다[13]. 그러나 모델의 복잡도가 증가하여 단순한 선형 제어를 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 실제 개루프 실험을 통하여 얻은 데이터를 근거로 MATLAB 시스템 식별 툴박스를 활용하여 초점면부 보정장치의 전달함수를 얻었다. 초점면부 보정장치의 개루프 전달함수는 0~50Hz 정현파 입력범위에 대해 총 4개의 전달함수로 표현될 수 있다[14]. 즉 외란 입력범위에 따라 적용되는 전달함수가 각각 다르며, 0~50Hz 입력범위를 4개로 나눈 영역에서 각각의 수학적 모델을 얻었다.

본 연구에서는 0~50Hz의 정현파 미소진동외란이 들어온다고 가정한 뒤, 4개의 전달함수에 대한 PID제어를 각각 설계하였다. 그러나 피드백 제어 해석 및

실험을 수행한 결과, 50Hz 입력 부근에서 얻어진 한 개 모델의 PID제어를 입력주파수 전 범위 0~50Hz에 대해 적용하여도 추적성능이 매우 우수한 보정장치 제어시스템을 얻을 수 있었다. 피드백 제어 시뮬레이션 결과를 토대로 초점면부 보정장치의 위치제어 실험을 수행하였고, 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교한 결과 $\pm 1\mu m$ 오차 이내의 성능을 갖고 있음을 검증하였다.

2. 초점면부 영상안정화 보정장치의 모델링

2.1 초점면부 보정장치

위성카메라의 초점면은 위성체의 미소진동에 의해 요잉(Yawing)과 피칭(Pitching)이 발생한다. 먼저 미소진동에 의해 발생하는 μrad 단위의 지향 오차각을 고려하여 초점면의 x, y방향으로의 선형 보상 요구도를 $\pm 50\mu m$, 허용오차 2~3 μm 를 선정하였다. Fig. 1처럼 3층 형태의 스테이지를 구성하여 x, y성분의 진동을 제어할 수 있다[14]. 보정장치에 사용한 압전작동기의 제원은 Table 1과 같다.

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 focal plane compensation device(left) and PZT actuator(right)

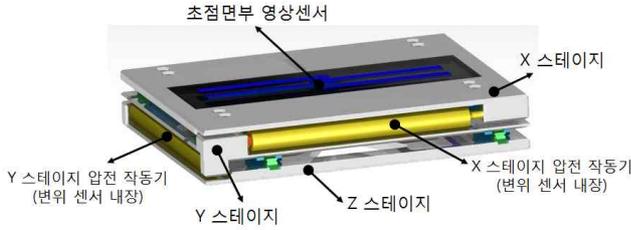


Fig. 2 Conceptual Design of Focal Plane Compensation Device

Figure 2에서 볼 수 있듯이, 작동기는 한쪽은 고정되어있고, 다른 쪽이 선형운동을 하여 스테이지를 움직이게 한다. 양쪽은 각각 스테이지와 볼트로 체결되어 있다.

2.2 보정장치의 모델링

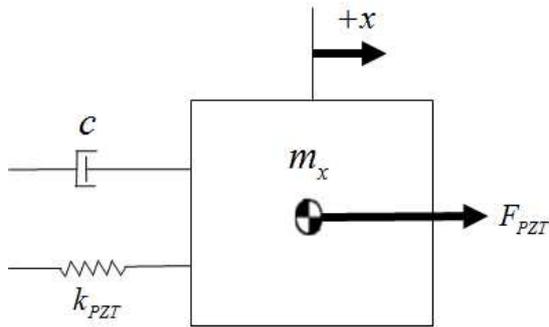


Fig. 3 Free body diagram of x stage

Figure 3은 초점면부 보정장치를 질량-스프링-댐퍼의 등가 모델이다. 이를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$m_x \ddot{x} + c \dot{x} + k_{PZT} x = F_{PZT} \quad (1)$$

여기서, m_x 는 x 스테이지 질량, c 는 감쇠상수, k_{PZT} 는 압전작동기의 구조강성, F_{PZT} 는 압전작동기에서 발생하는 제어력이다. 이 제어력은 작동기의 입력전압과 식 (2)와 같은 관계가 있다[15].

$$\alpha V(t) = \beta \frac{d}{dt} F_{PZT} + F_{PZT} \quad (2)$$

여기서 β 는 시상수, α 는 상수이다. 식 (1)과 식 (2)를 라플라스 변환하고 서로 연립하여, 전달함수의 형

태를 얻으면 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{X(s)}{V(s)} &= \frac{\beta s + 1}{\alpha(m_x s^2 + cs + k_{PZT})} \\ &= \frac{ws + v}{s^2 + as + b} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 a, b, v, w 는 임의의 상수가 되는데, 이 값들은 압전작동기의 대표적인 비선형 특성인 히스테리시스 현상에 의해 보정장치의 정확한 수학적 모델을 얻기 힘들게 한다. 따라서 각 계수값의 추정은 개루프에서 정현파 전압입력에 따른 출력변위 데이터를 이용하여 Matlab 시스템식별 툴을 사용하여 수행하였다.

다음 Fig. 2은 보정장치에 사용된 압전작동기에 총 20번 반복되는 0~150V 1Hz의 전압입력을 주었을 때, 압전작동기의 출력변위를 그래프로 나타낸 것이다. 0V에서 시작하여 150V일 때, 최대변위를 내지만 다시 0V로 전압을 제거해도 변위는 0이 되지 않고 약 15 μm 에 머무르게 된다. 이러한 히스테리시스 특성으로 인해 수학적 모델링이 쉽지 않아 실험적으로 전달함수의 계수를 추정하여 모델링을 수행하였다.

일반적으로 위성본체의 미소진동 외란 중 대부분이 3000rpm(50Hz) 이하로 동작하는 반작용 휠에서 나온다[16]. 따라서 보정장치에 외란신호로, $\pm 25 \mu\text{m}$ 에 해당하는 0~75V범위에서 50Hz 정현파를 만들어 적층형 압전작동기에 입력하였다. 시뮬레이션 모델은

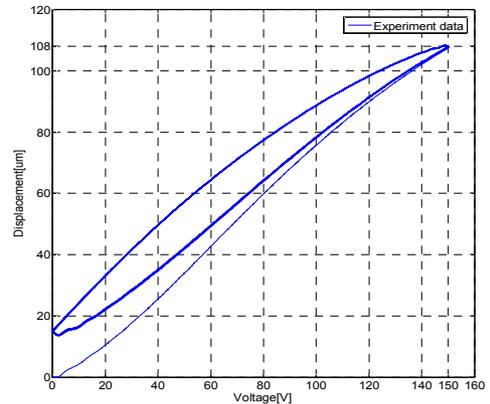


Fig. 2 Displacement characteristics of compensation device with PZT actuator for an input voltage range

Table 2 Output errors of 50 Hz mathematical model for several input frequencies

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

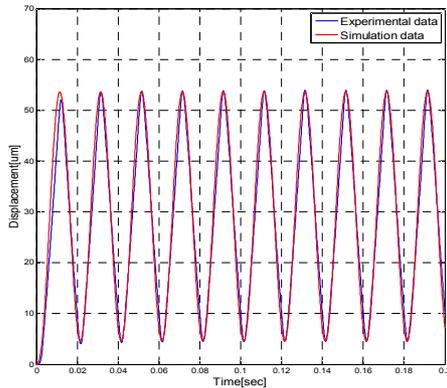


Fig. 3 Output displacement of focal plane compensation device (50Hz input, x-axis)

MATLAB의 시스템 식별 툴박스를 사용하여 전달함수를 도출하였다. 추정 방법은 부영역방법(Subspace method)을 이용하였으며 초기조건은 실험과 같이 0으로 두고, 시스템 추정초점은 시뮬레이션으로 설정하였다[17]. 그 결과 50Hz 정현과 입력에 기반한 시스템은 다음 Fig. 3과 같은 응답을 통해 식 (4)과 같은 시스템 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G_1(s) = \frac{0.015457s + 14.9556}{s^2 + 5.3523 \times 10^4 s + 2 \times 10^7} \quad (4)$$

Fig. 3에서는 50Hz 정현과 입력에 대한 보정장치의 응답과 모델링한 전달함수로 시뮬레이션 한 결과를 비교하였다. 식 (4)의 시뮬레이션 모델로 50Hz가 아닌 다른 입력주파수에 대한 응답과 실험결과를 Table 2

에서 비교하였다. 응답오차를 10%로 설정하면 0~38Hz범위에서는 다른 시뮬레이션 모델이 필요함을 알 수 있다. 38Hz 미만의 입력주파수를 기반으로 한 새로운 모델을 유도하여 응답오차를 비교하는 과정을 반복하면, 0~50Hz의 입력주파수에 대해 총 4개의 시뮬레이션 모델이 필요함을 확인할 수 있다[14]. 식 (5)~(7)은 37Hz미만의 정현과 입력에 대한 추가로 설정된 시뮬레이션 모델로서, 각각 15~38 Hz, 5~15 Hz, 1~5 Hz정현과 입력에 적용할 수 있는 초점면부 보정장치의 전달함수이다.

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

$$G_3(s) = \frac{0.45308s + 15.6096}{s^2 + 8.04767 \times 10^5 s + 2 \times 10^7} \quad (6)$$

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

3. 제어기의 설계 및 실험

3.1 제어기의 설계

전절에서 관심 입력범위인 0~50Hz 외란에서 초점면부 보정장치의 개루프 모델링은 4개로 기술해야 함을 확인하였다. 상의 흔들림을 보상해 주는 영상안정화를 수행하기 위해서는 보정장치의 정밀 제어가 필요하다. 제어기는 산업 전반에서 일반적으로 사용되는 PID제어기로 설계하였다. PID제어기는 구조가 단순해 구현하기 쉽고, 제어성능이 우수한 장점을 갖는다. 제어 시뮬레이션의 플로우차트는 Fig. 4에 나타내었다. 실험적으로 얻은 시뮬레이션 모델이 4개이므로, 각각의 모델을 제어할 수 있는 제어기를 설계하였고, 구현이득을 정리하면 Table 3과 같다. Table 3으로 부터

Table 3 PID gain set of four models

Modeling frequency	Gain value-added reseller			Applicable input range
	P	I	D	
2Hz	1	400	0.001	0~5 Hz
7Hz	1.2	800	0.0016	5~15 Hz
25Hz	1.5	1250	0.0018	15~38 Hz
50Hz	1.4	1500	0.00186	38~50 Hz

Table 4 Maximum output errors for 4 input frequencies(simulation results)

Input frequency	Maximum output error(μm)	Applicable input range
2Hz	0.43	0~5 Hz
7Hz	0.51	5~15 Hz
25Hz	0.53	15~38 Hz
50Hz	1.28	38~50 Hz

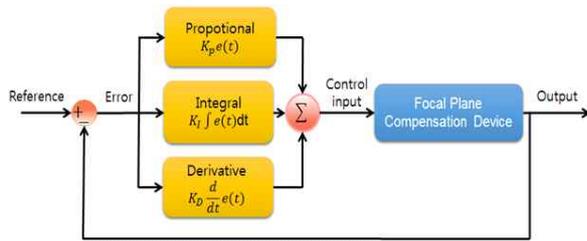


Fig. 4 Configuration of PID control flowchart

제어해야 하는 외란의 입력 주파수가 높아질수록 해당 모델의 각 제어이득은 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 일반적으로 P 이득이 커지면 오버슈트가 증가하지만 반응시간이 짧아지게 된다. 또한 I 이득이 커지면 정상상태 오차를 더 작게 만들어 줄 수 있고, D 이득은 출력변위의 급격한 변화에 제동을 거는 역할을 한다. 입력주파수가 2Hz에서 50Hz로 증가할수록 짧은 반응시간에 입력과의 오차를 따라잡아야 하므로 P와 I 이득 역시 증가해야 함을 알 수 있다. 각각 설계된 제어 시스템의 제어성능을 시뮬레이션을 통해 수행하였고, 그 결과를 Table 4에 정리하였다. 2Hz의 입력주파수에서 첫 번째 제어시스템은 최대 응답오차 0.43 μm 를, 50Hz의 입력주파수에서 네번째 제어시스템은 1.28 μm 의 최대 응답오차를 보여 주고 있다. 이 결과는 일반적인 위성 영상센서 픽셀크기인 10 μm 와 비교할 때, 우수한 영상안정화 효과를 가져 올 수 있는 것으로 판단된다. 또한 초점면부 보정장치의 요구도 2~3 μm 를 만족하는 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 제어 시뮬레이션 결과의 타당함을 보이기 위해 실험을 통한 검증을 다음절에서 기술하고자 한다.

3.2 실험구성

본 연구에서 적용된 초점면부 보정장치의 위치제어 실험 구성은 Fig. 5와 같다. MATLAB/Simulink와

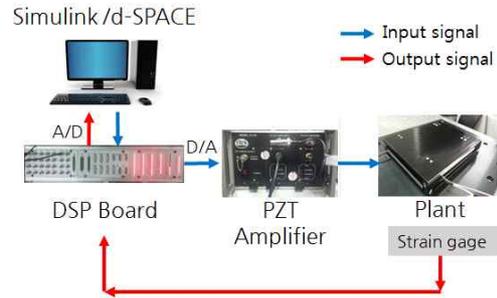


Fig. 5 Experimental setup

d-SPACE DS1103을 사용하여 제어 블록을 구성하고, 센서를 통해 보정장치의 변위를 실시간으로 전송받으며 설계된 제어 입력전압을 출력시킨다. d-SPACE에서 제어 입력신호가 나와 증폭기를 거친 뒤 보정장치의 압전작동기로 들어가고, 압전작동기는 전압입력을 받아 기계적인 변위를 출력한다. 출력변위는 작동기에 부착된 스트레인 게이지로 측정되어 전압의 형태로 d-SPACE에 들어가게 된다. 레이저 측정기를 사용하여 스트레인 게이지의 정밀도를 검증한 후 실험을 진행하였다.

3.3 설계된 PID제어기의 실험

설계된 제어기를 적용해 실제 초점면부 보정장치를 제어하는 실험을 입력주파수 2Hz, 7Hz, 25Hz, 50Hz에서 수행하였다. 각 입력에 대해 실험결과 최대 응답오차를 Table 5에 나타내었다. 아울러 Fig. 6~Fig. 7에서 각각 2 Hz 입력 및 50 Hz 입력에 대한 시뮬레이션 결과와 실험응답 결과를 비교하여 나타내었다. Table 4 및 5에서 나타낸 시뮬레이션 결과와 실험결과의 차이를 볼 때, 시뮬레이션 모델을 이용한 제어기의 응답이 실험결과와 매우 근접하므로 제어기의 설계

Table 5 Maximum output errors for 4 input frequencies(experiment results)

Input frequency	Maximum output error(μm)	Applicable input range
2Hz	0.60	0~5 Hz
7Hz	0.82	5~15 Hz
25Hz	0.92	15~38 Hz
50Hz	1.04	38~50 Hz

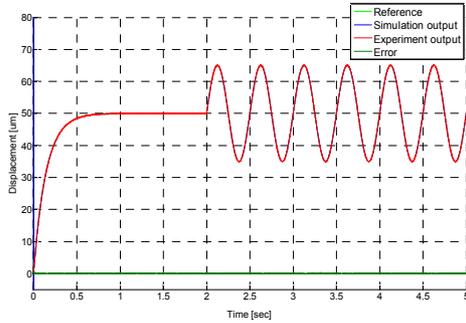


Fig. 6 Comparison of responses between experiment and simulation for 2 Hz model control system at 2 Hz input

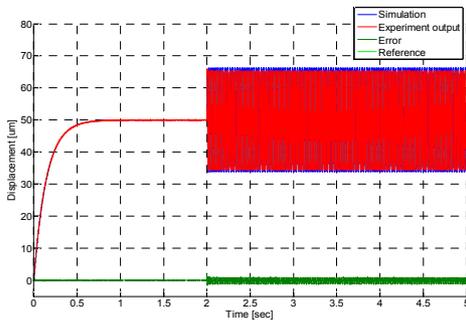


Fig. 7 Comparison of responses between experiment and simulation for 50 Hz model control system at 50 Hz input

가 적절함을 확인할 수 있다.

본 절의 앞부분에서 기술된 바와 같이, 4개의 보정장치 모델과 그에 따른 4개의 제어기로 총 4개의 제어 시스템을 구성 할 수 있다. 따라서 0~50Hz 입력주파수 범위에서 보정장치의 제어를 수행하려면 제어 시스템의 스위칭이 일어나야 한다. 그러나 4개의 제어 시스템의 주파수 특성을 나타내는 보데 선도(Bode plot)를 확인하면 다른 결과를 예측 할 수 있다. Fig. 8에서 4개 제어시스템의 보데 선도 크기를 나타내었다. 이 그림으로부터, 50Hz 모델 제어시스템은 0~50Hz 범위의 외란 입력을 잘 추적하는 특성(진동보상 운동특성)을 갖고 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 다른 제어 시스템은 높은 주파수 입력 외란에 대해 추적성능이 만족스럽지 못함을 Fig. 8 으로부터 확인할 수 있다. 50Hz 모델 제어시스템의 성능은 Fig. 9에서 나타낸 실험을 통해서도 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 50Hz 모델과 PID제어기로 구성된 1-제어

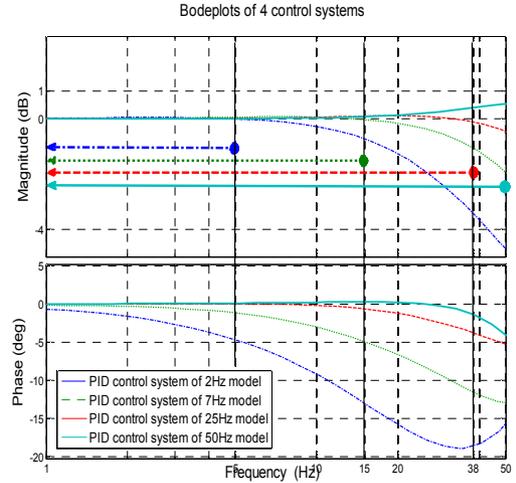


Fig. 8 Frequency responses of 4 control systems

시스템에 0~50Hz 사인입력을 넣고 응답의 추적여부를 실험으로 수행한 결과와 각 구간별 모델과 PID제어기로 구성된 4-제어시스템을 사용한 실험결과를 비교하여 나타내었다. 4-제어시스템을 이용하여 실험을 할 경우 외란 입력주파수에 따라 해당 제어시스템이 스위칭 되도록 프로그램 하였다. 4개의 제어시스템을 사용했을 때, 각각의 제어기가 적용되는 구간인 0~5Hz, 5~15Hz, 15~38Hz, 38~50Hz의 입력주파수 범위에서 응답 오차는 50Hz 제어기만 적용된 시스템의 오차와 거의 같은 수준이다. 이는 피드백 제어시스템인 PID제어기의 강인성 때문이라고 할 수 있다. 입력주파수에 따른 비선형성이 강한 개루프에서 보정장치 시스템은 반드시 1개가 아닌 다수의 전달함수 모델이 필요했지만, 피드백을 시켜 제어할 때에는 그 강인성 때문에 1개의 제어시스템만으로도 충분히 0~50Hz의 입력을 추적할 수 있다. 또한 Table 6은 4개의 입력주파수 구간별로 1-제어시스템과 4-제어시스템의 실제 제어 입력 양을 비교한 표이다. 제어입력량은 전기에너지 형태로 고려하여 다음 식(6)과 같이 추정하였다.

$$P = \frac{1}{2} \int_{t_i}^{t_f} u^2(t) dt \quad (6)$$

여기서 P 는 전력소모량 형태가 되고, $u(t)$ 는 제어입력전압이다. 4-제어시스템의 제어입력량이 1-제어시스템보다 수치는 작지만 그 차이는 매우 미미함을 알

Table 6 Comparison of control power between 1-control system and 4-control systems for 4 frequency ranges ($10^7 J$)

Frequency range	1-Control system	4-Control systems	Difference (%)
0~5Hz	2.5797	2.5794	0.0126
5~15Hz	4.6484	4.6478	0.0125
15~38Hz	11.311	11.308	0.0313
38~50Hz	5.2714	5.2713	0.00041

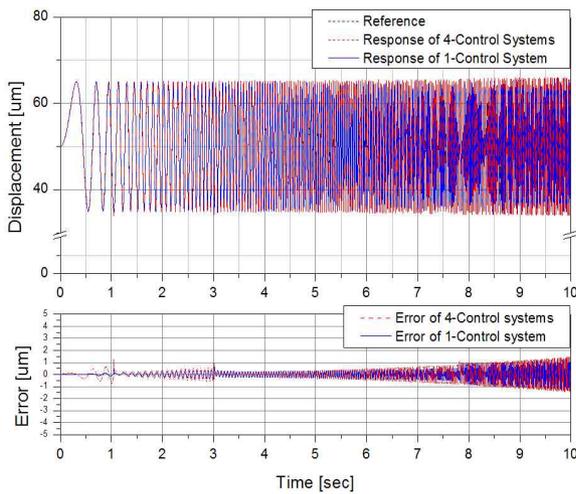


Fig. 9 Comparison of responses between 1-control system and 4-control systems

수 있다.

Fig. 10은 0~50Hz의 사인 스위프(sine sweep) 입력이 보정장치에 주어지는 동안 4-제어시스템과 1-제어시스템을 사용할 경우, 압전작동기에 가해지는 전압입력의 시간선도와 응답오차의 시간선도를 나타낸 그래프이다. 압전작동기의 전압입력은 거의 동일함에 비해 응답오차는 1-제어시스템의 경우가 더 작음을 알 수 있다. 또한 50Hz 모델 제어시스템인 1-제어시스템을 사용하여 사인 스위프 입력에 대한 시간응답 시뮬레이션을 수행하면 실험결과와 일치된 결과를 얻을 수 있음을 Fig. 11에서 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 소형위성에서 반작용 휠 등의 구동기

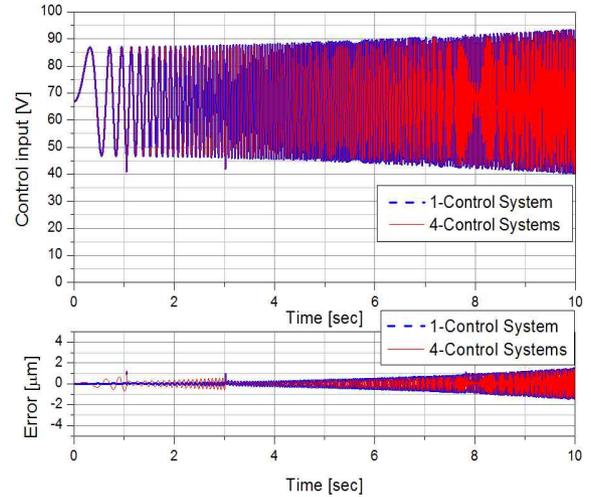


Fig. 10 Comparison of control inputs and response errors

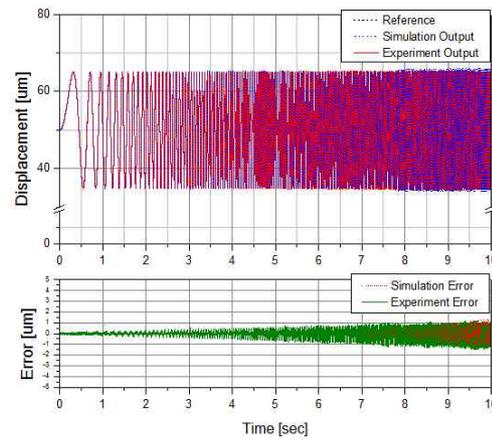


Fig. 11 Comparison of responses between simulation and experiment for 1-control system

에서 발생하는 미소진동이 위성카메라의 영상품질에 영향을 줄 때, 이를 상쇄하는 보정장치의 능동진동제어를 수행하였다. PID 제어기를 설계하고 실험을 통해 설계된 제어기의 성능을 검증하였다. 보정장치에 사용한 압전작동기는 특유의 비선형성인 히스테리시스 현상을 보여 표준 2차 시스템으로 모델링하기 어렵다. 따라서, 실험적 모델링 기법인 MATLAB 시스템 식별 툴박스를 사용하였고 입력전압에 대한 출력 변위의 실험적인 데이터를 통해 모델링을 수행하였다. MATLAB 시스템 식별 툴박스를 적용하여 0~50Hz의 입력주파수 범위에서 총 4개의 보정장치의 개루프 모

델을 얻었다. 개루프 상에서는 보정장치 시스템이 입력주파수에 따라 총 4개로 모델링 되어야 하지만, 페루프를 구성하고 PID제어기를 적용하면 강인성에 의해 1개의 제어시스템으로도 보정장치의 제어가 충분히 가능함을 주파수응답 특성과 시간 영역 실험을 통해 확인하였다. 50Hz 정현파 입력에 기반한 모델에 PID 제어기로 구성된 제어시스템은, 나머지 3개의 제어시스템보다 대역폭이 넓어 전 입력 범위 0~50Hz에서 제어가 가능하다. 또한 입력주파수 범위 별로 나눈 4개의 제어시스템을 스위칭하여 사용할 때와 거의 유사한 제어 입력량이 사용되면서도 오차가 더 적게 발생하기 때문에 1개의 제어시스템을 사용해도 보정장치의 제어성능에 문제가 발생하지 않는다고 판단된다. 제어 실험을 통한 최대 응답오차는 $\pm 1.04 \mu\text{m}$ 로, 보정장치의 제어 요구도인 $2\sim 3 \mu\text{m}$ 를 만족하였다. 본 연구에서 설계된 초점면부 보정장치의 제어가 실험적으로 검증됨에 따라 소형관측위성에서 미소진동 보상에 본 연구의 초점면부 보정장치를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF2013MIA3A3 A02042321).

참 고 문 헌

- [1] S. D. Park, B. J. Kim, H. S. Chang, E. E. Kim, H. G. Lee, H. J. Woo, D. S. Shin and W. K. Park, "Market Trend and Future Perspectives of Earth Observation Satellites," 8th Conference on national Defense Technology, 2012, pp.517~523.
- [2] Y. K. 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.
- [3] E. S. Lee, "Development of High Resolution Observation Satellite," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.48, No.7, 2008, pp. 44~48.
- [4] S. H. Lee, "Present Development Status of Small Satellite," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.48 No.7, 2013, pp. 49~53.
- [5] FAS, "Resolution Capability," Intelligence Reform Report.
- [6] S. D. Park, B. J. Kim, W. K. Park, E. E. Kim, H. S. Chang and J. H. 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] G. y. Park, D. O. Lee, J. S. Yoon and J. H. 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] S. W. Lee, D. H. Kim, D. I. Cheon, H. S. Oh, E. H. Kim and G. S. Kim, "RWA Disturbance Effects on the LOS stability," Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 2, No. 1, 2008, pp. 13~16.
- [9] D. H. Kim, D. I. Cheon, H. S. Oh, S. C. Lee, H. C. Bang and S. W. Rhee, "Analysis of STSAT-3 Jitter due to the Reaction Wheel Disturbance," Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 1, No. 3, 2007, pp. 32~36.
- [10] S. H. Oh and S. W. 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.
- [11] H. B. Kim, W. B. Lee and G. S. Kim, "Vibration Suppression Techniques Adopted in Spacecraft Development," Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 9, No. 2, 2011, pp. 90~97.
- [12] D. G. Kwag, J. S. Bae and J. H. 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.

- [13] C. Y. Chung, D. H. Lee and H. S. Kim, "Hysteresis Compensation in Piezoceramic Actuators Through Preisach odel Inversion," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, 2005, pp.1074~1078.
- [14] M. S. Kang, J. H. Hwang, J. S. Bae and J. H. Park, "On the Experimental Modeling of Focal Plane Compensation Device for Image Stabilization of Small Satellite," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 43, No. 8, 2009, pp. 635~640.
- [15] J. Y. Yook, K. G. Sung, S. J. Moon and S. B. Choi, "Design of Hybrid Mount Using Rubber Element and Piezoelectric Actuator with Application to Vibration Control", Transactions of thr Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 5, 2007.5, pp. 391-397.
- [16] 김대관, "미소진동 측정 데이터 기반의 반작용 휠의 미소진동 모델링 기술", 항공우주매거진, Vol. 7, No. 2, 2009, pp. 70~77.
- [17] Wills, Adrian George, Mills, Adam, Ninness and Brett, "A MATLAB Software Environment for System Identification", 15th IFAC Symposium on System Identification, Vol. 15, Part. 1, 2009, pp. 741~746.

저자 소개



강명수

2014년 한국항공대학교 항공우주공학과 졸업. 2014년~현재 한국항공대학교 대학원 석사과정. 관심분야는 영상안정화 초점면부 보정장치 설계 및 제어.



황재혁

1980년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학 석사. 1990년 미국 UC Berkeley 박사. 1991년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수. 관심분야는 진동제어, 동역학 시스템 제어.



배재성

1996년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 항공우주공학과 석사. 2001년 동 대학 박사. 2007년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수. 관심분야는 공탄성 및 진동제어.