

技術論文

초점면부 영상안정화를 위한 압전형 마찰구동기의 동특성 연구

곽동기*, 배제성**, 황재혁**

Dynamic Characteristics of a Piezoelectric Driven Stick-Slip Actuator for Focal Plane Image Stabilization

Dong-Gi Kwag*, Jae-Sung Bae** and Jai-Hyuk Hwang**

ABSTRACT

The focal plane image stabilization for a satellite camera is one of the an effective method which can increase the satellite camera's image quality by removing the motion disturbance of a focal plane. The objectives of this article are to introduce the concept of the focal plane image stabilization and determine the best driving conditions of the actuator for the response and thrust. Under various driving condition the experiments have been performed to investigate the response and thrust characteristics of the piezoelectric driven stick-slip actuator of the focal plane image stabilizing device. From experiments, the best driving frequency and duty ratio for the magnesium slider are 70 kHz and 27%, respectively.

초 록

위성 카메라를 위한 초점면부 영상 안정화 장치는 영상이 맺히는 초점면부의 운동외란을 제거함으로써 위성 카메라의 영상 품질을 향상 시킬 수 있는 효율적인 방법 중 하나이다. 본 연구의 목적은 초점면부 안정화 기법을 소개하고 초점면부 영상 안정화 장치 액츄에이터의 응답 및 추력에 대한 최적의 구동 조건을 결정하는 것이다. 이를 위해 다양한 구동 조건에 따른 영상화 안정화 장치의 마찰 구동형 압전 액츄에이터의 응답성과 추력을 실험적으로 조사하였다. 실험결과로부터 마그네슘 슬라이더에 대한 최적의 구동 주파수는 70 kHz, 듀티비는 27% 였다.

Key Words : Focal plane (초점면부), Image stabilization(영상 안정화), Piezoelectric driven stick-slip actuator(마찰구동형 압전 액츄에이터)

1. 서 론

센서를 탑재하고 우주공간에서 지구를 관측하는 인공위성을 원격탐사 위성 또는 지구관측위성(Earth Resources Satellite)이라고 한다. 일반적으로

† 2009년 1월 5일 접수 ~ 2009년 3월 2일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학과
교신저자, E-mail : jsbae@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

로 관측위성을 포함한 인공위성의 중요한 탑재체 중 하나는 위성카메라이다. 지구관측위성은 고해상도의 위성 카메라를 탑재하여 위성의 궤도에 따라 지상의 영상을 획득한다. 1980년대 말 해상도 10m의 SPOT1이 발사된 이래 많은 지구관측용 상업위성이 발사되어 운용되고 있다. 지구관측위성의 위성 카메라는 임무의 종류에 따라 다양한 해상도, 관측폭, 관측주파수 대역의 특성을 지닌다.

위성 카메라로부터 획득한 영상의 품질은 위

성 카메라의 GSD(Ground Sampled Distance)와 SNR(Signal to Noise Ratio), MTF (Modulation Transfer Function)로 표현된다. 고해상도의 영상을 획득하기 위해 위성탑재 카메라는 카메라가 탑재되는 플랫폼(planform)의 자세(altitude)에 대한 매우 높은 안정성이 요구한다. 선형의 영상 센서(linear image sensor)를 가진 푸쉬브room(push-broom) 형태의 위성 카메라는 비행 방향을 따라 위성의 궤도 운동(orbital motion)에 의해 초점면(focal plane)에 맺히는 지구 영상을 스캔한다. 따라서, 영상을 획득하는 동안의 초점면의 자세에 대한 안정성은 영상의 품질에 매우 큰 영향을 주게 된다. Fig. 1과 같이 궤도운동, 자세의 미소변화, 진동과 같은 외란 등은 초점면의 영상 운동(image motion)을 교란시켜 MTF 성능을 떨어뜨리고, 획득된 영상의 기하학적인 왜곡(geometrical distortion)을 발생시킨다. 이는 TDI(Time Delayed Integration)을 가진 1m 이하의 고해상도 푸쉬브room 카메라에 더욱 민감하다 [1].

궤도 운동에 따른 영상 시프트는 보통 TDI 영상 센서를 이용하여 TDI 기법으로 보상되고 있으나, TDI 영상 센서는 여러 가지 단점을 갖고 있으며, 특히 위성 자세 불안정성 등 진동의외란을 보상할 수는 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 영상센서의 흔들림을 보상하기 위한 초점면부 안정화에 대한 연구가 필요하다.

초점면부 안정화(focal plane stabilization) 기법(Fig. 2)은 위성 본체 운동으로부터 카메라 초점면부의 운동을 분리시키는 방법이다. 이 방법은 초점면부 운동을 측정후, 영상이 맺히는 CCD 센서가 실시간으로 이에 상응하는 운동을 함으로써 영상왜곡을 보상시키는 기법이다. 이 기법은 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 위성카메라에서 가장 중요한 부분, 즉 영상이 맺히는

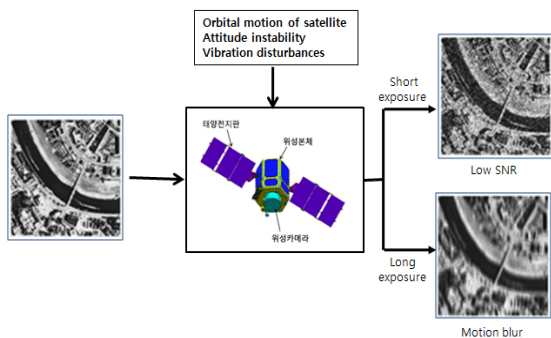


Fig. 1. Camera imaging disturbances



Fig. 2. Focal plane stabilization

초점면부의 운동외란을 제거할 수 있다. 둘째, 가장 작은 구성 요소를 움직여 주기 때문에 에너지 소모가 작으며, 비용적인 면에서도 매우 효율적이다.

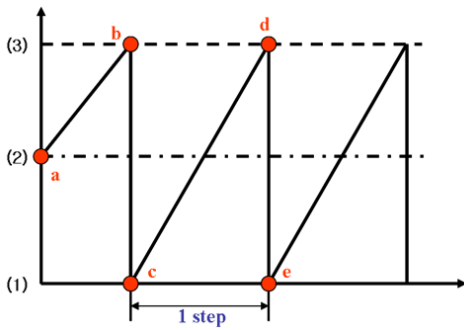
해외 연구 사례로 독일의 Klaus Janschek 연구팀은 카메라 초점면부의 운동을 영상센서를 이용하여 측정후 기전방식을 통해 실시간으로 측정된 운동 외란을 보정해주는 기법을 개발하였으며, 연구실 수준급 HILS 모델을 제작한 후 개발된 기법을 적용하여, 고 해상도 영상을 얻을 수 있음을 증명하였다[2].

본 논문에서는 초점면부 안정화 장치에 적용된 단순하고, 소형이며, 저전력 소모 및 높은 반응속도의 특성을 가진 마찰 구동형 압전 액츄에이터(piezoelectric driven stick-slip actuator)의 작동원리에 대해서 기술하였고, 실험적으로 미끄럼(slip) 현상을 규명하였다. 또한 초점면부 안정화 장치를 포함한 마찰 구동형 압전 액츄에이터의 응답성 및 추력(thrust force)을 실험적으로 연구하여 최적의 작동조건을 찾았다.

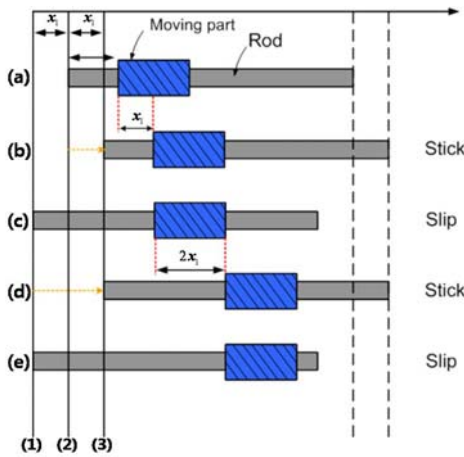
II. 마찰 구동형 압전 액츄에이터

2.1 작동원리

마찰 구동형 압전 액츄에이터(piezoelectric driven stick-slip actuator)는 압전소자, 탄성판, 샤프트로 구성된 공진형이다. 압전소자는 탄성판 양쪽에 바이모프(bimorph)형으로 부착이 되어 있고, 압전소자의 떨림에 의한 굴곡운동은 샤프트로 전달되는 구조로 되어 있다. 압전소자는 입력 전압(input voltage), 주파수(frequency), 듀티비(duty ratio)의 값에 따라 성능이 좌우된다. 압전소자의 굽힘 운동(bending motion)에 의해 샤프트에 부착된 이동자의 표면 마찰력(surface friction)에 의해 고착-미끄럼(stick-slip) 현상이 발생하게 되고, 이동자는 움직이게 된다. Fig. 3은



(a) Input voltage



(b) Inertia sliding principle

Fig. 3. Principle of piezoelectric driven stick-slip actuator

마찰 구동형 압전 액츄에이터의 작동원리를 보여 준다[3]. Rod의 왼쪽에 압전 액츄에이터가 연결되어 있으며, 액츄에이터 변형에 의해 Rod의 운동이 발생하게 된다.

마찰 구동형 압전 액츄에이터에 압전소자의 공진 주파수로 구형파를 인가하면 샤프트는 고착-미끄럼(stick-slip)에 의해 이동하게 된다. (2)지점을 중심으로 마찰력이 관성력보다 큰 경우 고착(stick)에 의해 이동자는 샤프트와 같이 움직이게 된다. (a) → (b), (c) → (d) 마찰력이 관성력보다 작은 경우 slip 현상에 의해 이동자는 움직이지 않는다. (b) → (c), (d) → (e). 따라서, 압전소자의 굽힘운동에 의해 이동자는 직선운동을 하며, 듀티비(duty ratio) 50%를 기준으로 왕복운동을 한다.

2.2 Stick and Slip 현상

Fig. 4는 듀티비(duty ratio) 11%, 27%에서 시간에 따른 이동자의 변위를 나타낸다. 듀티비

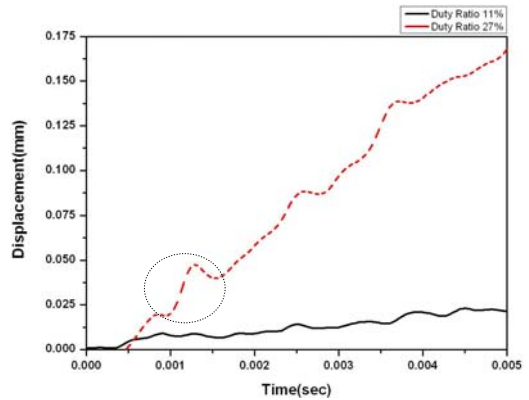


Fig. 4. Stick and slip by duty ratio

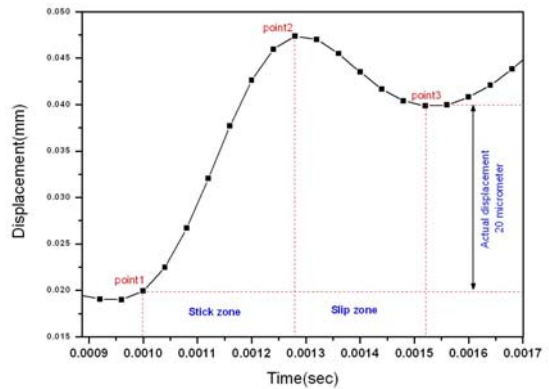


Fig. 5. Stick and slip zone at duty ratio 27%

(duty ratio) 27%에서는 시간에 따른 고착-미끄럼(stick-slip)이 일정하지 않지만 변위의 증가폭이 뚜렷하다. 듀티비(duty ratio) 11%에서는 고착-미끄럼(stick-slip)이 원활하지 않아 이동자의 움직임이 작다. 그리고 고착-미끄럼(stick-slip) 현상이 일정하지 않고, 그 크기 역시 다르다. 그 원인으로 샤프트와 이동자 간의 표면 거칠기가 일정하지 않기 때문이다.

Fig. 5는 듀티비 27% 임의의 지점에서의 고착-미끄럼(stick-slip) 영역을 나타낸다. Point 1 → point 2 영역은 고착(stick) 구간이며, point 2 → point 3는 미끄럼(slip) 구간을 나타낸다. Slip 현상이 일어날 때 이동자가 뒤로 밀리는 현상을 볼 수 있으며, 실제 이동한 변위는 약 20μm 이다. 원인으로 관성력이 마찰력 보다 충분히 크지 못하기 때문이다. 미끄럼(slip) 구간에서 뒤로 밀림 현상을 줄일 수 있다면 이동자의 속도 및 초점면부 안정화 장치의 정밀도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

III. 초점 면부 안정화 장치의 동특성 실험

3.1 초점 면부 안정화 장치

초점 면부 안정화 장치는 외란을 보상하기 위해서 피치(pitch), 요(yaw) 방향으로 초점면부를 움직여, 시선안정화를 이룬다. Fig. 6은 초점면부 안정화 장치의 구조를 나타낸다. 운동부(moving part)는 CCD가 장착된 CCD 베이스(base)와 슬라이더(slider)로 구성되며, 샤프트와 이동자 간의 마찰력을 유지하기 위해서 슬라이더와 V-커넥터(V-connector)로 구속시킨다. 또한 초점 면부안정화 장치에서 슬라이더의 재질은 마찰력과 관련되기 때문에, 초점 면부 안정화 장치에 적합한 PPS(Poly-Phenylene Sulfide), Mg로 실험을 수행하였다.

3.2 실험 장치

초점 면부 안정화 장치에 사용된 구동기는 Piezo-tech에서 개발한 마찰 구동형 압전 액츄에이터(Tiny Ultrasonic Linear Motor; Model : TULA 50 FPCB)를 사용하였다[4]. TULA는 초소형, 무소음, 빠른 응답성, 고 정밀도를 가진 구동기로, 시선 안정화를 위한 초점 면부 안정화 장치에 적합한 구동기이다. 압전소자의 bending motion에 의한 이동자의 움직임을 측정하기 위해서 레이저 변위계 (laser displacement sensor, KEYENCE Model : Lk-G155)를 사용하였으며, 센서의 분해능은 $0.5\mu\text{m}$ 이다. 센서의 노이즈 및 교정은 컨트롤러(controller)를 이용하여 데이터의 신뢰성을 높였다. 압전구동기 앰프는 다양한 조건에서 마찰 구동형 압전 액츄에이터를 구동하기 위해 입력전압, 주파수, 듀티비를 사용자 환경에 맞게 변경이 가능하다. Matlab을 이용하여 입력전압, 주파수, 듀티비 변경이 가능하도록 작성하였으며, DS1104 보드(board) 단자대에서 나오는 신호는 오실로스코프를 이용하여 검증 후 초점 면부 안정화 장치에 인가하였다. Fig. 7은 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다.

3.3 실험 방법

초점 면부 안정화 장치의 동특성 실험 방법은 특정 구간에 제한을 두었다. 마찰 구동형 액츄에이터 구동조건 및 제약 사항은, 샤프트와 이동자 간의 미끄럼(sliding)이 원활하게 일어나야 하며, 소비전류를 고려해서 작동조건을 선정해야 한다. 주파수 범위는 압전 액츄에이터 사양 및 시물레

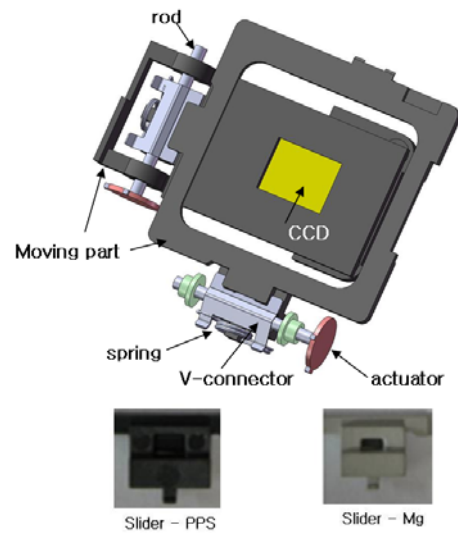


Fig. 6. Construction of focal plane stabilization device

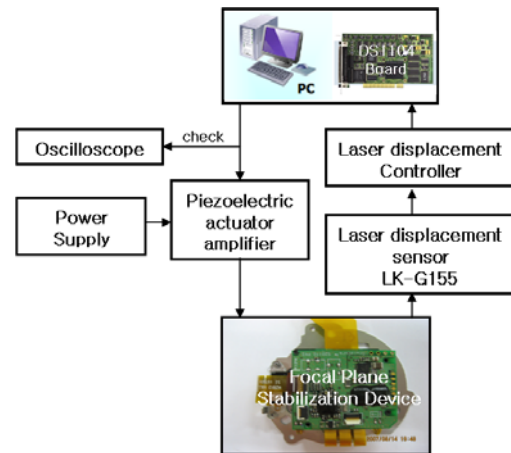


Fig. 7. Schematic of experimental setup

이션에 근거하여 주파수 범위는 60 ~ 70kHz로 하였다. 또한 입력전압(input voltage)은 초점 면부 안정화 장치 구동 조건에 맞게 28 ~ 30V로 정했다. 듀티비(duty ratio)는 미끄럼이 잘 일어나는 15 ~ 35% (역 65% ~ 85%) 구간으로 정했다. 마찰 구동형 압전 액츄에이터의 방향 전환은 듀티비 50%를 기준으로 정·역 방향이 바뀌며, 방향성에 따른 표면 마찰력(surface friction) 차이는 무시할 수 있기 때문에 정방향의 속도 결과만을 언급하기로 한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 피에조 액츄에이터의 공진 주파수 및 공진 주파수에서 압전체의 굽힘 운동을 보여주고 있다. 공진주파수는 약 67.6 kHz이다.

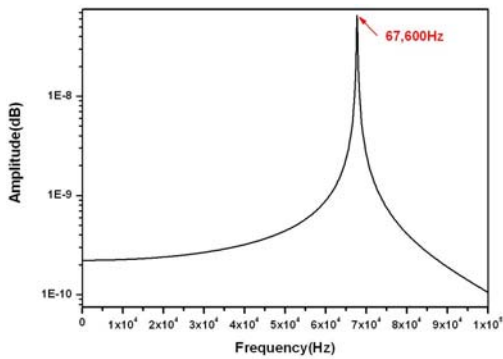


Fig. 8. Frequency response of piezoelectric actuator

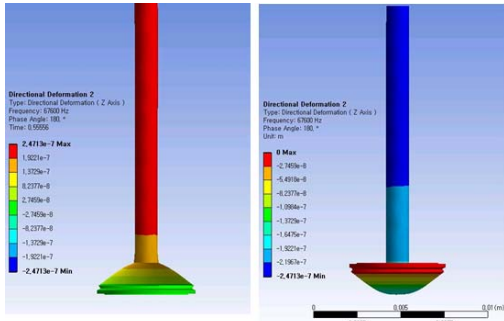


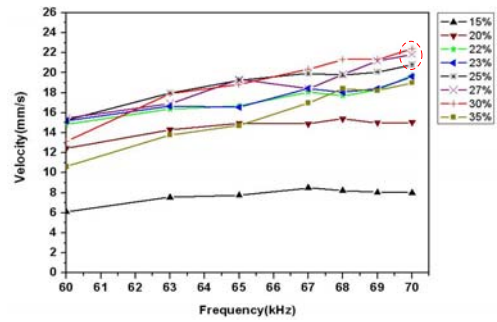
Fig. 9. Deformation shape of a piezoelectric actuator

3.4 동특성 실험 결과

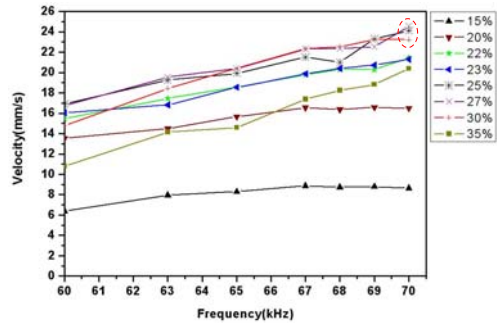
이동자의 응답성이 가장 우수한 조건을 알아보기 위해서 슬라이더 재질, 입력전압, 주파수, 듀티비의 변수를 바꿔서 실험을 실시하였다.

Fig. 10은 입력전압에 따른 주파수와 듀티비 변화에 의한 이동자의 속도를 보여준다. Fig. 10(a)와 (b)의 슬라이더(slider) 재질은 Mg이고, (c)와 (d)는 PPS 재질이다. 초점 면부 안정화 장치에 사용된 압전 액츄에이터는 전반적으로 듀티비에 의한 속도 증가 현상이 뚜렷함을 알 수 있다. 특히 주파수 범위가 65 → 67kHz로 증가함에 따라 속도 증가 폭이 상대적으로 커짐을 알 수 있다. Fig. 10의 슬라이더 재질에 따른 주파수 67 ~ 70kHz, 듀티비 22~30% 영역에서의 속도 특성은 <Mg - 20~25mm/s>, <PPS - 11~ 16mm/s>로 슬라이더 재질이 중요한 변수로 작용하며, 이를 통해 표면 거칠기에 따른 마찰구동형 압전 액츄에이터 및 초점 면부 안정화 장치 설계시 고려될 중요한 사항이다.

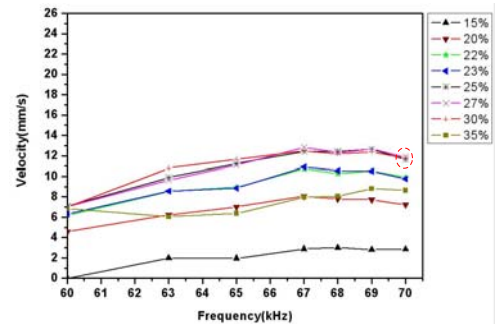
Fig. 11은 Fig. 10의 결과 중 70kHz에서 듀티비에 대한 속도 변화를 보여준다. 대체적으로



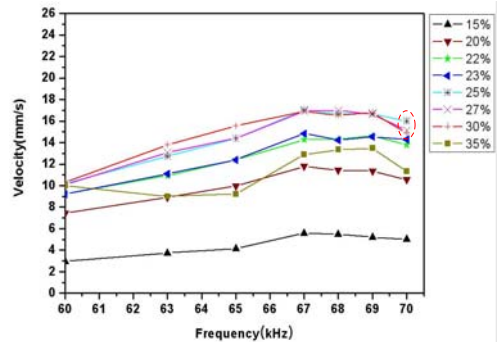
(a) Input Voltage 28V - Mg



(b) Input Voltage 30V - Mg



(c) Input Voltage 28V - PPS



(d) Input Voltage 30V - PPS

Fig. 10. The velocity according to a frequency, duty ratio of the moving part

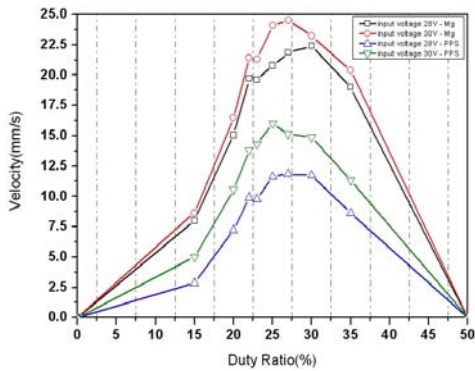
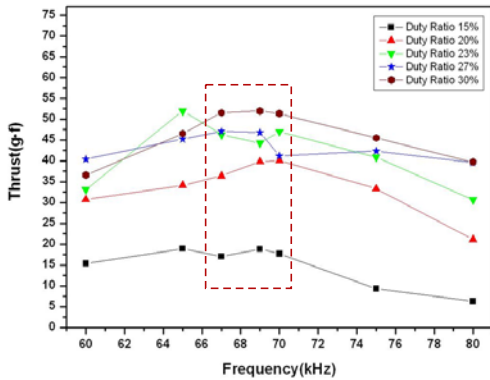
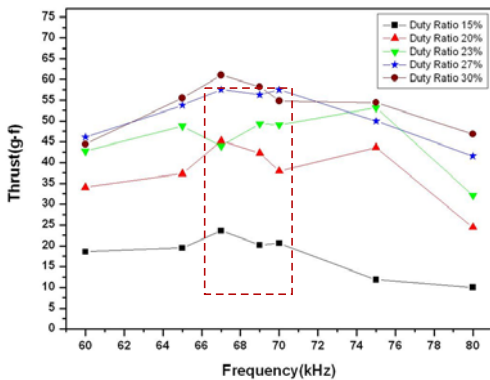


Fig. 11. The velocity according to duty ratio of the moving part - 70kHz



(a) Input Voltage 28V - Mg



(b) Input Voltage 30V - Mg

Fig. 12. The thrust force according to a frequency, duty ratio of the moving part

25~27% 부근에서 빠른 응답 성능을 보이며, 그 이외의 영역에서는 속도의 감소를 보이고 있다. 이 결과로부터 마찰 구동형 압전 액추에이터의 최적 동작점을 알 수 있다. 특이점은 듀티비가

27→30% 증가시 전반적으로 속도는 감소 하지만 입력전압 28V - Mg 에서는 증가하고 있다. 마지막으로 속도가 가장 빠른 영역은 입력전압 30V, 슬라이더 - Mg재질의 70kHz, 듀티비 27%이며, 24.6mm/s의 속도를 보인다.

이동자의 추력은 PPS 재질에 비해 응답성이 좋은 Mg 재질의 슬라이더와 인가전압 28, 30V에 대해서 실험을 실시하였으며, 응답성 곡선과 다르게 80kHz까지 경향을 알아보기 위해서 임의의 두 점 75kHz, 80kHz에 대해서 실험을 하였다.

Fig. 12는 입력전압 28, 30V에서 주파수 및 듀티비에 따른 추력을 보여주고 있다. 듀티비 증가에 따른 전반적인 경향은 대략적으로 주파수가 67kHz를 기준으로 최대의 추력(peak thrust force)가 생기다가 감소한다. 응답성이 우수한 구간의 입력전압 증가에 따른 추력의 증가는 대략 10gf 미만이다. 이동자의 무게(<7g)와 전압 증가에 따른 소비전력을 감안 한다면 28V에서도 충분한 성능을 얻을 수 있다.

IV. 결론

초점면부 영상안정화 장치에 사용된 마찰 구동형 압전 액추에이터는 구조적으로 샤프트, 슬라이더(slidebar), V-커넥터(V-connector)간의 표면 거칠기 및 스프링(Spring)의 강성에 따라 성능이 좌우 되며, 미끄럼(sliding)에 의해 이동자는 움직인다. 본 연구에서는 실험적 방법으로 압전소자에 인가되는 전압(voltage), 주파수(frequency), 듀티비(duty ratio)의 변화에 따른 이동자의 응답성 및 추력 변화를 조사하였다. 적절한 주파수를 인가한 상태에서 듀티비는 액추에이터의 작동 성능에 큰 영향을 미치며, 최적 동작점은 Mg 재질의 70Khz, 입력전압 30V, 듀티비 27%에서 가장 우수한 성능을 보였다. 이동자의 추력은 이동자의 무게를 고려한다면 Mg 재질의 67Khz, 입력전압 30V, 듀티비 30%에서 우수한 성능을 보였고, 이동자의 무게를 고려한다면, 듀티비 23~30% 조건에서도 구동하는데 무리가 없음을 알 수 있다.

마지막으로 본 연구의 결과는 마찰구동형 압전 액추에이터 및 초점면부 영상 안정화 장치의 성능 향상 및 제어에 있어 효율적으로 활용될 수 있는 자료라고 판단된다.

참고문헌

- 1) 장영준, 공종필, 허행팔, 김영선, 박종억, "고해상도 위성카메라의 성능 향상을 위한 CCD

불균일 보정 장치개발”, 항공우주산업기술동향, 3권 2호, 2005, pp. 49-55.

2) K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko, "Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera", Control Engineering Practice, Vol. 15,

2007, pp. 333-347.

3) Hyun-Phill Ko, Sangsig Kim, Sergius N. Borodinas, "A novel tiny ultrasonic linear motor using the radial mode of a bimorph", Sensors and Actuators A 125 (2006) 477 - 481.

4) www.piezo-tech.co.kr