Transactions of the KSNVE, 22(11) : 1042~1048, 2012.
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.11.1042 ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

스텝핑 모터 특성에 따른 2축 짐발 안테나 시스템의 미소진동 측정 시험

Micro-vibration Test on a Two-axis Gimbal Antenna System with Stepping Motors

김 대 관†·용 기 력*·최 홍 택*·박 지 용**
Dae-Kwan Kim, Ki-Lyuk Yong, Hong-Taek Choi and Gee-Yong Park

(Received May 16, 2012 ; Revised November 5, 2012 ; Accepted November 5, 2012)

Key Words : Jitter(지터), Micro-vibration(미소진동), Satellite(인공위성), 2-axis Gimbal System(2축 짐발 시스템), Stepping Motor(스텝핑 모터)

ABSTRACT

A 2-axis gimbal system is one of main disturbance sources affecting image jitter response of a satellite. The gimbal system comprises azimuth stage and elevation stage, and these pointing mechanism can be rotated by stepping motors about its azimuth and elevation axes simultaneously. Because of the complex and coupled dynamic motion of the gimbal system, its moment of inertia and structural modes can be changed according to the system configuration, and thus the gimbal system generates complicated and non-linear disturbance characteristics. In order to improve the jitter response of a spacecraft, it is an indispensable process to reduce the micro-vibration disturbance level of the antenna system. In the present research, a 2-axis gimbal system was manufactured and then its micro-vibration test was performed in terms of two types of stepping motors(2-phase and 5-phase). The test results show that the disturbance level of the gimbal system can be reduced by replacing the 2-phase stepping motor with the 5-phase one, and the average disturbance attenuation ratio is 56 % in peak level and 48 % in standard deviation level. The experimental results confirm that it is an efficient jitter reduction method to adopt a high-phase stepping motor.

1. 서 론

인공위성에서 발생되는 지터(Jitter)[1] 현상은 탑재체의 성능저하의 주요 원인 중 하나이다. 특히 관측용 탑재체의 경우 영상품질을 결정짓는 중요한 요인이 된다. 따라서 최근 위성설계의 주요한 연구 분야로서, 이러한 지터성능에 대한 보다 정밀한 예측 및 제어 기술이 부각되고 있다. 인공위성의 지터현상을 발생시킬 수 있는 위성 내부의 진동원들은 대표적으로 위성 자세제어를 위해 사용되는 반작용휠(reaction wheel assembly, RWA)또는 제어모멘트자이로(control moment gyro, CMG), 지향 조정 장치로 사용되는 2축 짐발 시스템(2-axis gimbal system), 그리고 적외선

† Corresponding Author ; Member, KARI, Satellite Control System Team
E-mail : dkk@kari.re.kr
Tel : +82-42-870-3751, Fax : +82-42-860-2898
* KARI, Satellite Control System Team
** KAIST, Dept. of Aerospace Engineering

A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

영상 촬영을 위한 극저온 냉각기(cryogenic cooler) 등이 있다. 위성의 지터 특성 향상을 통한 영상품질 확보를 위해서는 이러한 주요 진동원들에 대한 진동 특성 분석 및 모델링 연구가 필수적이라 할 수 있다[2~3].

이 연구의 대상이 되는 2축 짐발 시스템은 주로 안테나의 지향 조정장치[4]로서 사용되고 있으며, 위성의 자세각과 안테나의 지향각에 따라 임의의 방위각(azimuth) 축과 고각(elevation) 축으로 동시에 기동운영이 가능하며, 각 축에 대해서 다양한 회전 속도영역에서 운영이 가능하도록 설계되어 있다. 이러한 2축 짐발 시스템의 구동을 위해서 주로 스텝핑 모터(stepping motor) 타입의 구동장치가 사용되고 있다. 이러한 스텝핑 모터의 사용은 불연속적인 진동특성을 발생시키는 원인이 되며[5~6], 또한 짐발 시스템의 구동에 의해 시스템의 관성모멘트가 시간에 따라 변화하는 매우 복잡한 비선형 진동 특성을 보이게 된다[7]. 이러한 2축 짐발 안테나 시스템의 진동 특성에 대한 연구는 아직까지 부족한 실정이며, 단지 유사한 2축 짐발 시스템에 대한 연구가 수행되었으나 주로 구조적 진동특성 해석[8~10] 위주의 연구로 제한적인 상태이다.

이 연구는 2축 짐발 시스템 개발을 위한 선행연구로서 2축 짐발 시스템을 제작하고 짐발 구동을 위해 사용된 스텝핑 모터의 종류에 따른 2축 짐발 시스템의 교란력을 측정하였으며, 모터 종류에 따른 2축 짐발 시스템의 진동특성 및 저감성능을 분석하였다.

2. 2축 짐발 시스템 진동 시험

2.1 2축 짐발 시스템

위성 안테나의 지향 조정 장치로 사용되고 있는 2축 짐발 시스템의 임의의 지향각은 방위각 축과 고각 축에 대한 회전각으로 구현될 수 있다. 이 연구에서는 스텝핑 모터를 이용하여 2축 구동이 가능한 짐발 시스템을 제작하였으며, 제작된 2축 짐발 시스템의 구성은 Fig. 1과 같이 크게 antenna, elevation stage 그리고 azimuth stage로 구성된다.

일반적으로 2상과 5상 스텝핑 모터는 Fig. 2와 같이 각각 8개(상 당 4극)와 10개의(상 당 2극)의 극을 기지며, 각각의 상으로 치 피치의 1/4과 1/10만큼

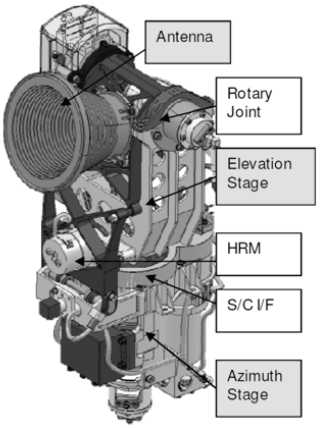


Fig. 1 2-axis gimbal system configuration[4]

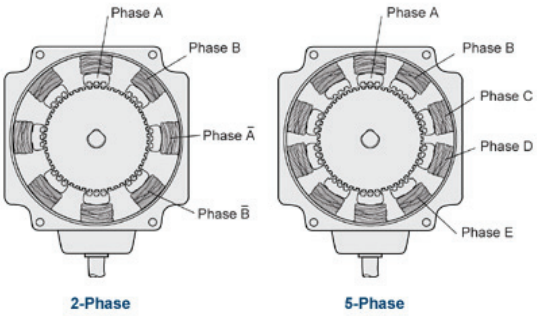


Fig. 2 Cross-sectional views of 2-phase and 5-phase stepping motors.

이동한다. 따라서 50개의 치를 갖는 로터(rotor)는 2상 모터의 경우 1회전 당 200 스텝(스텝 당 1.8도)을 가지며, 5상 모터의 경우 500 스텝(스텝 당 0.72도)을 가지게 된다. 이러한 스텝 각의 차이는 2상과 5상 스텝핑 모터의 위치 정확도, 반복성 및 토크 등의 성능차이를 발생시키는 주요 인자이다. 특히, 2상 모터에 비해서 작은 스텝 각을 갖는 5상 모터는 상대적으로 작은 토크 리플(torque ripple)이 발생되며, 따라서 모터로부터 보다 작은 진동이 발생하게 된다. 이러한 저 진동 특성을 갖는 5상 스텝핑 모터의 적용은 2축 짐발 시스템의 기본적인 진동저감 설계방안이라 할 수 있다.

Fig. 3에는 실제 제작된 2축 짐발 시스템의 형상을 보이고 있으며, 2축의 구동을 위해 2개의 스텝핑 모터를 장착하였다. 이 연구에서는 방위각과 고각의 구동을 위해 동일한 스텝핑 모터를 적용하였으며,

사용된 모터의 종류는 2상 스텝핑 모터(Phytron, VSS42.200.2.5-FV)와 5상 스텝핑 모터(Oriental, RK543AA-H50)를 사용하였다.

이 모델의 경우 방위각 축에 대해서는 회전의 제한이 없으며, 고각 축에 대해서는 15°~145°의 제한된 회전영역이 존재한다. 각 축에 대한 회전은 스텝핑 모터에 의해 구동되며, 스텝핑 모터의 출력축은 1:50 기어비의 하모닉드라이브(harmonic drive)와 바로 연결되어 있다. 또한 각 회전축은 1:1.6 기어비를 갖는 스퍼기어(spur gear)를 통해서 구동 축 변환이 이뤄진다. 따라서 스텝핑 모터의 출력은 총 1:80의 감속비를 통해서 elevation stage와 azimuth stage를 구동시킨다.

각 모터의 하나의 스텝은 8개의 micro-step들로 구성되며, 1회전(360°) 당 총 스텝 수는 각각 200과 500이 된다. 따라서 감속비와 회전속도 ω(deg/sec)를 활용하여 다음과 같이 각각의 1차 구동 주파수(H1 harmonic frequency)를 계산할 수 있다.

$$H_{2phase} = (200 \times 80 \times \omega)/360 \quad (1)$$

$$H_{5phase} = (500 \times 80 \times \omega)/360 \quad (2)$$

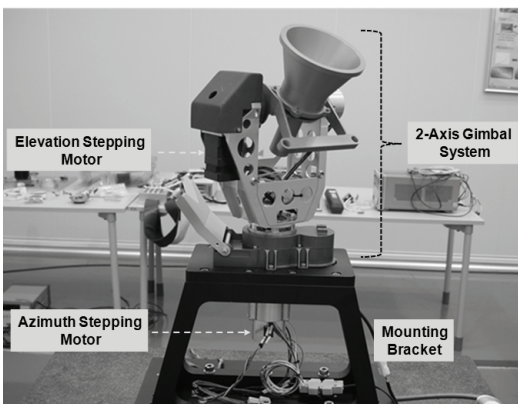


Fig. 3 2-axis gimbal system(KARI)

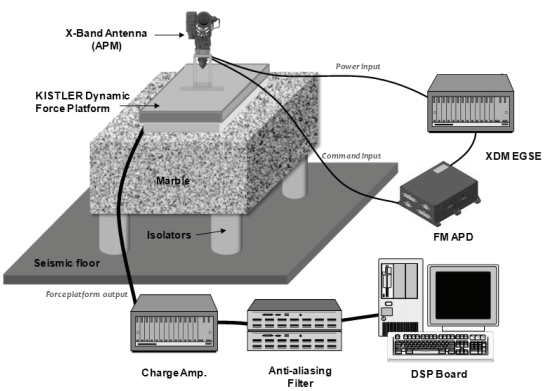


Fig. 4 Experimental setup for micro-vibration test

2.2 미소진동 시험

2 종류의 스텝핑 모터에 대한 2축 짐발 시스템의 진동특성 측정을 위하여 다음과 같이 미소진동 시험을 수행하였다. 수행된 미소진동 시험은 Fig. 4와 같이 KISTLER platform 위에 2축 짐발 시스템을 고정시킨 상태에서 6축에 대한 진동을 동시에 측정하는 방식으로 진행되었으며, 데이터 저장은 DAQ 장비(dSPACE-DS1103)를 이용하였다.

데이터 샘플링 속도는 관심주파수(0~200 Hz)의 2배 이상에 나이키스트 주파수(nyquist frequency)가 존재하도록 1024 Hz로 저장하였으며, KISTLER로부터 측정된 데이터의 앨리어싱(aliasing) 방지를 위해서 저주파 필터(KROHN-HITE, Model 2284)를 사용하였다.

이 연구에서 수행된 2축 짐발 시스템의 미소진동 시험은 Table 1과 같이 총 5개의 구동 프로파일에 대해서 방위각과 고각으로 동시에 구동되었다. Fig. 5에는 TPF-1(azimuth high)에 해당되는 프로파일의 회전각, 각속도, 각가속도를 나타내고 있다.

각각의 구동기 프로파일은 크게 3가지 구동 영역으로 나누어진다. 1) 장착위치(parking position)에서 기준위치(reference position)로 이동하는 영역-I, 2) 주요 프로파일을 구동하는 영역-II, 3) 최종 구동위치에서 장착위치로 이동하는 영역-III으로 구성된다.

Table 1 Stepping motor driving profiles

Profile	Rotating angle	Max speed
TPF1	AZ: 0-300deg (120 sec) EL: 25 deg (120 sec)	Azimuth: 5 deg/sec Elevation: 0 deg/sec
TPF2	AZ: 0-100 deg (400 sec) EL: 25 deg (400 sec)	Azimuth: 0.5 deg/sec Elevation: 0 deg/sec
TPF3	AZ: 0 deg (40 sec) EL: 25-125 deg (40 sec)	Azimuth: 0 deg/sec Elevation: 5 deg/sec
TPF4	AZ: 0 deg (400 sec) EL: 25-125 deg(400 sec)	Azimuth: 0 deg/sec Elevation: 0.5 deg/sec
TPF5	AZ: 123-294 deg (309 sec) EL: 25-89-40 deg (309 sec)	Azimuth: 4.03 deg/sec Elevation: 0.48 deg/sec

Fig. 5와 같이 TPF-1(azimuth high)의 경우 각 영역의 시간간격은 영역-I: 10~70 sec(60 sec), 영역-II: 130~250 sec(120 sec), 영역-III: 310~430 sec(120 sec)으로 구분되며, 각 영역 사이에서는 정지 상태를 유지하게 된다.

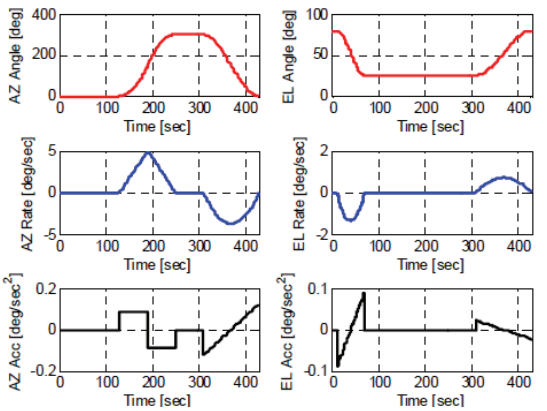


Fig. 5 Stepping motor driving profiles(TPF-1)

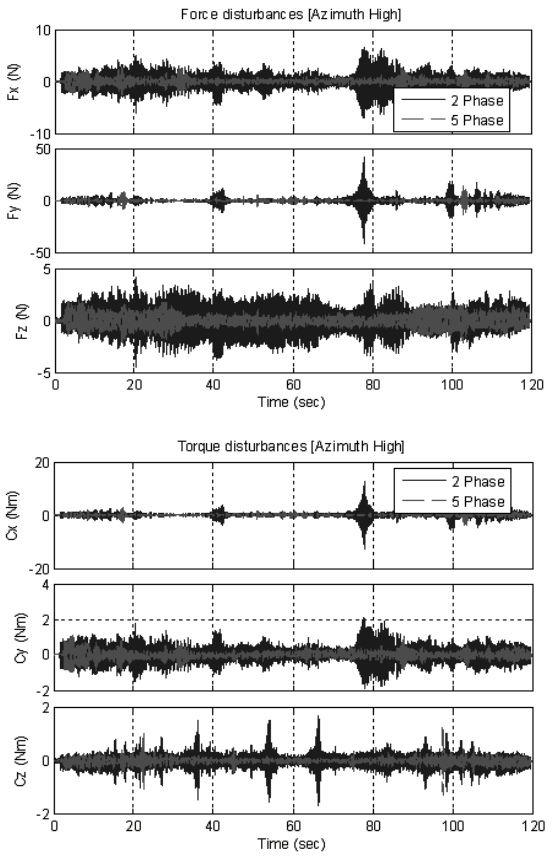


Fig. 6 Time histories of disturbance measured in the main driving motion for TPF-1(azimuth high)

3. 시험결과 및 분석

2축 짐발 시스템에 대한 미소진동 시험은 방위각 축과 고각 축 구동기로서 동일한 2개의 2상 또는 5상 스텝핑 모터를 적용한 2가지 조건에 대해서 수행되었다. TPF-1 프로파일에 대해서 KISTLER platform을 통해 측정된 6자유도 진동 신호 중에서 주요 프로파일을 구동하는 영역-II에 해당하는 총 120sec 시간영역의 교란력 신호는 Fig. 6과 같다. 전반적인 진동측성은 2상 스텝핑 모터사용의 경우에 비해서 5상 스텝핑 모터를 사용할 경우가 진동크기가 감소됨을 확인할 수 있다.

식 (1)과 식 (2)에서 확인할 수 있듯이 2상 스텝핑 모터에 비해서 5상 스텝핑 모터의 구동 스텝수가 2.5배 더 많음을 알 수 있으며, 이러한 스텝수의 증가는 스텝 당 회전각의 감소를 의미한다. 따라서 2상에 비해 5상 스텝핑 모터의 스텝 각 감소가 전체 시스템의 진동특성을 감소하는 주요 원인이 됨을 예측할 수 있다. 이러한 진동저감 특성의 보다 세부적인 분석을 위하여 각 구간별 피크(peak) 감소율과 표준편차(standard deviation) 감소율을 분석하였다. 감소율 분석은 Fig. 7과 같이 구동영역 I~III 모두에 대해서 수행되었으며, X방향 교란력에 대해서 최대 피크 감소율을 보면 최대 감소율은 93.2 %이고 평균 감소율은 64.1 %로 나타났다. 또한 표준편차는 최대 감소율이 91.9 %이고 평균 감소율이 57.8 %의 감소율을 보임을 확인할 수 있다. 스텝핑 모터의 종류에 따른 이러한 진동 저감 특성은 Table 2와 같이 다른 구동 프로파일의 경우에서도 매우 유사하게 나타났음을 확인하였다.

스텝핑 모터의 구동 속도와 주파수에 대한 교란력의 진동 특성 분석은 Fig. 8과 같은 교란력 waterfall을 통하여 확인할 수 있다. 주요 교란력을 발생시키는 가진원은 스텝핑 모터의 구동 주기인 H1.0 속도와 모터의 micro-step에 의한 하모닉 주기인 H8.0 속도에서 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 주요 가진 속도성분과 다양한 하모닉 속도 성분이 구조물의 공진 주파수와 일치함으로써 교란력 크기가 증폭됨을 확인할 수 있다.

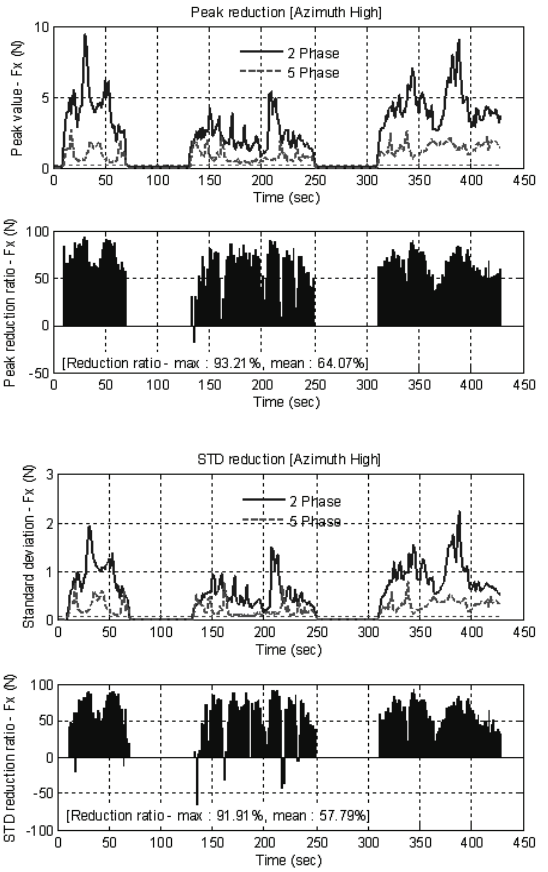
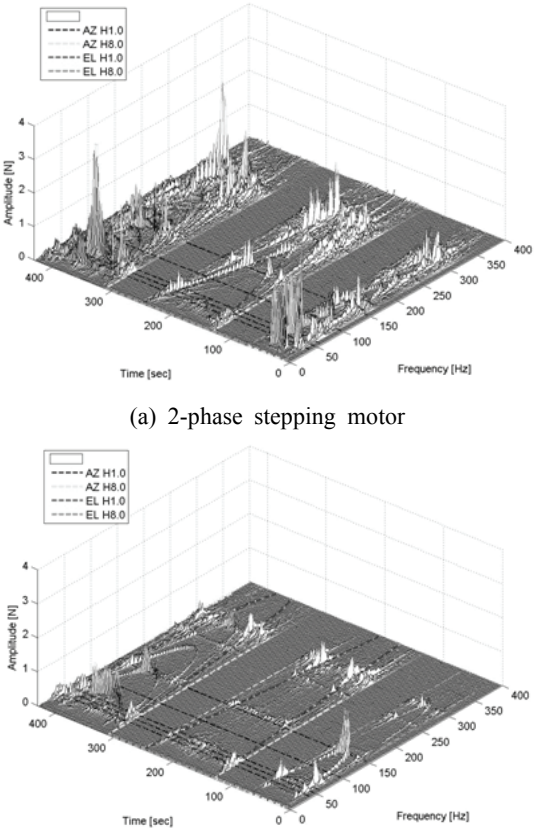


Fig. 7 Radial force reduction ratio(peak and STD) for TPF-1(azimuth high)



(a) 2-phase stepping motor

(b) 5-phase stepping motor

Fig. 8 Radial disturbance force(Fx) waterfall plots for TPF-1(azimuth high)

Table 2 Disturbance reduction ratio of Fx

Fx	Peak reduction(%)		STD reduction(%)	
	Max	Mean	Max	Mean
AZ_High	93.21	64.07	91.91	57.79
AZ_Low	91.95	40.47	90.03	14.96
EL_High	94.14	70.62	94.89	61.78
EL_Low	92.62	62.52	90.29	48.67
Sample	91.85	60.68	93.34	55.60
Total mean	92.75	59.67	92.09	47.76

Table 3 Total reduction ratio of all disturbances

Total mean	Peak reduction(%)		STD reduction(%)	
	Max	Mean	Max	Mean
Fx	92.75	59.67	92.09	47.76
Fy	96.34	56.20	97.70	48.82
Fz	89.02	59.28	90.66	50.72
Cx	96.14	55.49	97.37	47.84
Cy	93.58	56.31	92.43	42.93
Cz	79.74	32.41	73.96	12.60

Fig. 8에 나타나 것과 같이 2상 스테핑 모터를 사용한 경우(Fig. 6(a))에 비해서 5상 스테핑 모터에 의한 교란력(Fig. 6(b)) 성분이 전체적인 주파수 영역에서 크게 감소됨을 보이고 있다. 이러한 진동 저감의 원인은 2축 짐발 시스템의 구조적 변화에 의한 특징이 아니며, 스텝핑 모터에 의해 발생하는

진동 가진원의 크기가 감소하여 발생한 결과라고 할 수 있다.

Table 3에서는 측방향 교란력인 Fx에 대한 전체 평균 감소율(Table 2 - total mean 참조) 이외에 다른 5개 진동성분의 모든 TPF 프로파일에 대한 전체 평균 감소율을 요약하고 있다. 스텝핑 모터 종류에 따른 교란력 저감 현상은 수직방향 토크(Cz)를 제외하고 다른 교란력들에서도 매우 유사한 진동저감 특성으로 나타남을 확인할 수 있으며, Cz를 제외한 피크 감소는 최대 94 %, 평균 56 % 그리고 표준편차 감소는 최대 92 %, 평균 48 %로 나타났다. 수직방향 토크(Cz)의 낮은 감소율은 Cz의 교란력 크기가 다른 교란력에 비하여 매우 작기 때문에 교란력 감소율 또한 작게 나타났다고 판단된다.

이러한 진동저감 현상은 2상 스텝핑 모터에 비해 작은 토크 리플을 발생시키는 5상 스텝핑 모터의 진동특성에 의한 결과이며, 5상 스텝핑 모터의 사용으로도 2축 짐발 시스템을 사용하는 인공위성의 지터 성능을 향상시킬 수 매우 효과적인 방법임을 증명하는 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 인공위서의 지터성능의 주요 진동원 중 하나인 2축 짐발 시스템에 대한 진동 특성 분석을 수행하였다. 2축 짐발 시스템의 구동기로 사용되는 스텝핑 모터의 종류에 따른 짐발 시스템의 교란력을 측정하여 진동특성을 분석하였다. 이를 위하여 방위각과 고각에 대해 동시 구동이 가능한 2축 짐발 시스템을 제작 하였으며, 2 종류의 2상과 5상 스텝핑 모터를 적용하여 KISTLER platform에서 6개의 교란 진동을 측정하였다. 측정된 교란력 데이터의 진동 감소율은 최대 피크 감소와 표준편차 감소율로 분석되었으며, 2상 스텝핑 모터를 5상 스텝핑 모터로 교체함에 따라서 피크 감소는 평균 56 %로 나타났으며 표준편차 감소는 평균 48 %로 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 스텝핑 모터에 따른 교란력 저감 결과는 매우 효과적으로 지터성능을 향상시킬 수 있는 방법 중 하나임을 의미하며, 향후 인공위성의 2축 짐발 시스템 개발에 중요한 설계 기준으로 활용될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

(1) Holst, G. C., 1996, CCD Arrays Cameras and Displays, SPIE Press and JCD Publishing.

(2) Kim, D. K., Oh, S. H., Yong, K. L. and Yang, K. H., 2010, Numerical Study on a Reaction Wheel and Wheel-disturbance Modeling, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 38 No. 7, pp. 702~708.

(3) Kim, D. K., Oh, S. H., Lee, S. H. and Yong, K. L., 2011, An Experimental Study on Micro-vibration Measurement Methods of a Reaction Wheel, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 828~833.

(4) Schmid, M., Yong, S. S. and Lee, S. G., 2009, Extremely Compact Two-axis X-band Antenna Assembly, The 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Session 2: Pointing & Development Mechanism.

(5) Lee, J. H., Ahn, H. S., Wang, S. M. and Choi, S. J., 2011, A Study on Efficient TPF Approximation for Low-orbit Satellites, Proceedings of the KSAS Annual Spring Conference, pp. 1221~1224.

(6) Choi, S. J., Jung, O. C., Kang, C. H., Kim, Y. W. and Jung, D. W., 2009, An Algorithm to Eliminate TPF Discontinuity for LEO Satellite, Proceedings of the KSAS Annual Spring Conference, pp. 904~907.

(7) Kim, D. K., Oh, S. H., Kim, H. B., Lee, W. B. and Yong, K. L., 2010, Micro-vibration Test of X-band Antenna with Two-axis Gimbal System, Proceedings of the KSAS Annual Autumn Conference, pp. 927~930.

(8) Kim, M. D., Lee, Y. D. and Kim, S. K., 2005, Study for Verification of Analysis Modeling with Investigating Dynamic Characteristic about 2 Axies Gimbals System, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 180~183.

(9) Baek, J. H., 2006, Modeling on a Gimbal with an Antenna and Investigation on the Influence of Backlash, JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 3, pp. 804~813.

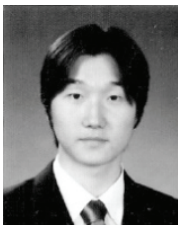
(10) Lee, S. E. and Lee, T. W., 2011, Vibration Characteristic Analysis of Gimbal Structure System with Observation Reconnaissance Camera Module, Transac-

tions of the KSME A, Vol. 35, No. 4, pp. 409~415.

Dae-Kwan Kim received Ph.D. degree in aerospace engineering at KAIST in 2008. He is a senior researcher in satellite control team at KARI. His research interests are satellite attitude control, micro-vibration, satellite image jitter, and vibration control and design.

Hong-Taek Choi received Ph.D. degree in mechanical engineering at Univ. of Idaho in 1994. He is a principal searcher and head of satellite control system team at KARI. His research interests are satellite attitude control, and vibration control and design.

Ki-Lyuk Yong received Ph.D. degree in aerospace engineering at KAIST in 2012. He is a senior researcher in satellite control team at KARI. His research interests are satellite attitude control, image navigation and registration, and control system design.



Gee-Yong Park received M.S degree in aerospace engineering at University of Michigan, Ann Arbor in 2010. He is a Ph.D. candidate in aerospace engineering at KAIST. His research interests are satellite micro-vibration, isolation system, vibration control and design.