

자기부상을 적용한 구체 반작용휠 구동기 개발 및 성능 시험

Development and Performance Test of a Spherical Reaction Wheel Actuator with Magnetic Levitation

김대관*, 윤형주*, 김용복*, 강우용*, 최홍택*

Dae-Kwan Kim*, Hyung-Joo Yoon*, Yong-Bok Kim*, Woo-Yong Kang* and Hong-Taek Choi*

요 약

새로운 개념의 인공위성 자세제어 작동기에 대한 타당성 연구를 수행하였다. 구체구동기는 단일장치로써 위성의 3축 자세제어가 가능한 구동기이며, 구체 플라이휠과 자기부상 및 회전구동을 위한 전자석으로 구성된다. 구체구동기에 대한 수학적 모델링 및 설계를 통하여 시제품을 제작하였으며, 자기부상이 적용된 조건에서 1축에 대한 구동성능 시험을 수행하였다. 구동성능은 최대속도 7,200rpm 그리고 최대토크 0.7Nm로 측정되었으며, 속도-토크 특성곡선을 이용한 개루프 속도제어를 통하여 우수한 가속 및 감속 속도제어 결과를 확인하였다. 본 구체구동기는 속도 및 토크 제어를 위한 추가적인 연구를 통하여 성능이 개선될 예정이다.

Abstract

In the present study, a feasibility study on an innovative satellite attitude control actuator is performed. The actuator is specially designed to generate the reaction torque in an arbitrary axis, so that a satellite attitude can be controlled by using itself. It consists of a spherical flywheel and electromagnets for levitation and rotation control of the ball. As the earlier study, a rotating performance test on the spherical actuator is conducted in a single rotating axis and vertical levitation condition. From the test results, it can be confirmed that the maximum speed and torque of the innovative device are 7,200rpm and 0.7Nm, respectively. Using a velocity-voltage characteristic curve of the spherical motor, an open-loop control (V/f constant control) is performed, and the test results show excellent control performance in acceleration and deceleration phases.

Key words : Satellite, Attitude Control, Reaction Wheel, Spherical Actuator, Levitation, Electromagnet

I. 서 론

최근 개발되고 있는 인공위성들은 다양한 임무를 수행하기 위하여 보다 정확한 자세제어와 더불어 더욱 빠른 기동성능을 필요로 한다. 기존의 자세제어시스템에서는 정밀자세제어를 위하여 반작용휠(RWA)

이나 제어모멘트자이로(CMG)와 같은 구동장치들을 사용하고 있다[1]. 이러한 장치들은 모두 하나의 구동장치에서 단일 회전축 방향의 제어토크를 발생시키기 때문에 인공위성의 3축 자세제어를 위해서는 최소한 3개 이상의 구동기 조합을 사용해야 한다. 본 연구의 개발 대상인 구체구동기(Spherical actuator)는

* 한국항공우주연구원 위성제어팀(Korea Aerospace Research Institute, Satellite Control System Department.)

· 제1저자 (First Author) : 김대관

· 투고일자 : 2012년 9월 24일

· 심사(수정)일자 : 2012년 9월 24일 (수정일자 : 2012년 10월 19일)

· 게재일자 : 2012년 10월 30일

새로운 개념의 자세제어 작동기로서, 하나의 구체 플라이휠(spherical flywheel)을 이용하여 임의의 방향으로 회전이 가능한 구동장치이다. 특히 하나의 구동장치만으로 3차원방향의 제어토크 또는 모멘텀을 발생시킬 수 있으므로 단일장치로써 위성의 3축 자세제어가 가능하다는 장점이 있다. 따라서 이러한 새로운 개념의 구체구동기를 사용하게 되면 3개 이상의 조합을 사용하는 기존의 구동시스템과 비교하여 무게와 부피의 감소가 가능해지므로 위성의 소형화 및 경량화가 가능해진다.

이러한 새로운 형태의 구체구동기에 대한 연구는 아직까지 몇몇 대학 및 연구소에서만 수행되고 있다. 특히 국내의 경우 기존형태의 자세제어용 구동장치인 반작용휠 및 제어모멘트자이로에 대한 연구만이 대학과 연구원에서 수행되고 있으며, 구체구동기에 대한 연구는 전무한 상태이다. 외국의 경우 일본에서 Tokai 대학 및 JAXA에서 2000년 이후 연구를 수행하여 10 ~ 50mm 직경의 구체구동기에 대한 1자유도 설계 및 시험평가를 수행하였다[2]. 유럽에서는 구체구동기에 대한 연구결과가 발표된 것이 없는 것으로 파악되지만, 다른 연구목적으로 유사한 연구가 수행된 바가 있다. 스위스의 EPFL 및 ETH에서는 2000년 이후부터 1 ~ 4mm 직경의 구체에 대한 구동 시험을 수행하여 수백만 RPM의 초고속 회전시험을 수행하였다 [3], [4]. 벨기에 Catholique de Louvain 대학에서는 2006년도에 2 자유도를 갖는 50mm 직경의 구형 유도 모터를 개발하여 시험평가를 수행하였다 [5].

본 연구에서는 3축 방향으로 임의의 회전이 가능한 위성 자세제어용 구체구동기의 개발을 연구목표로 하고 있다. 현재까지 구체구동기 반작용휠에 대한 제작과 자기부상 조건을 적용한 1축 회전 시험평가를 수행하였다. 또한 구동성능 결과로부터 구체구동기 모터의 속도-토크 특성곡선을 도출하였으며, 이를 활용한 개 루프(open loop) 속도제어 시험을 완료하였다. 본 논문에서는 한국항공우주연구원에서 개발한 구체구동기에 대한 개발과 주요 시험결과에 대해서 기술하였다.

II. 구체구동기 원리 및 설계

2-1 구체구동기 작동 원리

구체구동기의 작동원리는 그림 1에 나타나 있는 것과 같이 기본적으로 유도모터와 같은 작동원리에 의해서 구동을 하게 된다. 그림에서 보듯이 정지한 구체 주위에 회전하는 자기장이 형성되면, 금속의 구체표면에 전류가 유도되는데 이를 에디전류(Eddy current)라고 한다. 이렇게 발생한 유도기전력은 다시 회전자기장과 상호작용을 통하여 구체 표면에 로렌츠힘(Lorentz force)을 발생시키게 되고 이는 구체 플라이휠의 회전토크로 작용하게 된다.

만일 구체 플라이휠 주위에 회전하는 자기장의 회전축이 바뀌게 되더라도 새로운 회전축을 기준으로 유도전류가 발생하게 되므로 여전히 회전자기장과 상호작용에 의해 회전력이 발생하게 된다. 따라서 회전자기장의 회전속도와 자기장의 크기 그리고 회전축 방향 등을 변화시켜 구체 플라이휠을 원하는 방향과 속도로 회전시킬 수가 있게 된다.

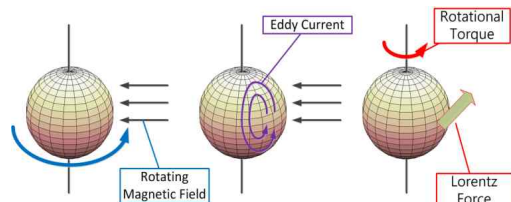


그림 1. 회전 구동 원리 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of rotational driving mechanism

2-2 구체구동기 설계

구체구동기에 대한 설계는 전도체 재료의 구형 플라이휠에 대한 자기부상 자기장과 회전 자기장 모델링을 통하여 수행되었으며, 설계에 사용된 회전체 자기장 모델 및 설계변수 등은 참고문헌[6]을 통해 확인할 수 있다.

성능해석을 통해 결정된 설계변수들을 기반으로 그림 2와 같이 수직방향으로 자기부상 제어가 가능한 1차원 회전용 구체구동기 시제품을 제작하였다. 회전구동은 총 4개의 전자석에 의해 구현되며, 플라이휠은 100mm 직경의 중공타입으로서, 철 층과 구리

총의 2중 구조를 가지며, 질량 및 관성 모멘트는 각각 $m = 3.448\text{Kg}$ 과 $I = 0.0042 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ 이다.

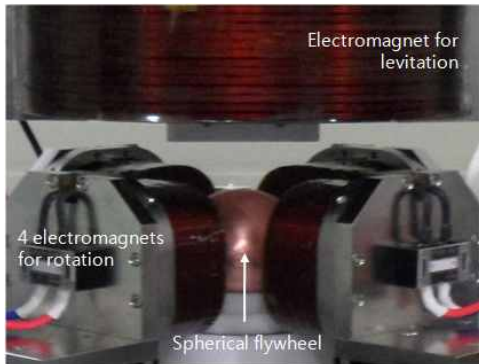


그림 2. 자기부상 조건의 구체 반작용휠 구동기
Fig. 2. Spherical reaction wheel actuator under magnetic levitation system

III. 구체구동기 성능시험 및 평가

3-1 성능시험 시스템

구체구동기의 구동시험을 위한 시험평가 시스템은 그림 3과 같이 구동기와 제어 장치로 구성된다. 구동기(Spherical Reaction Wheel)는 자기부상을 위한 1개의 수직방향 전자석과 회전 자기장 발생을 위한 4개의 수평방향 전자석 그리고 구형의 플라이휠로 구성된다. 제어 장치(SRW Control System)는 전자석 구동용 드라이버와 속도 측정을 위한 타코미터(tachometer) 그리고 자기부상 및 회전구동 제어와 속도 측정을 위한 실시간 RTI/DAQ 장비로 구성되며, 세부사항 정보는 표 1과 같다.

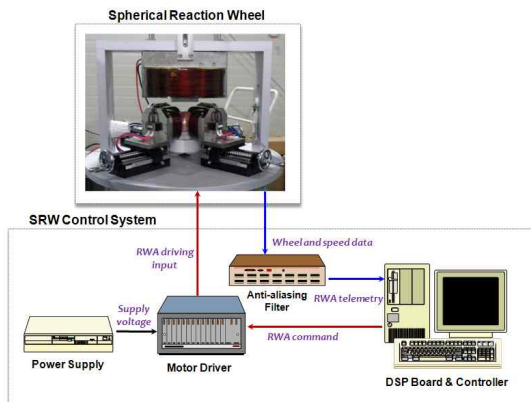


그림 3. 시험장치 개념도

Fig. 3. Schematic diagram of test system

표 1. 시험장치 세부 정보

Table 1. Test equipment specification

Equipment	Specification
RTI/DAQ	- Model: dSPACE-1103 (fs = 2024 Hz) - Input: tacho-pulse, PWM volt & current - Output: driving frequency, phase, PWM
Driver	- Model: electromagnet driver - Levitation input: DC control power - Rotation input: frequency, Amplitude, phase (PWM1 and PWM2)
Tachometer	- Model: ACT-3X - RPM range: 5~999,990rpm - Pulse output: +5V

3-2 성능 시험

구체구동기의 성능 측정 시험은 자기부상 전자석을 이용하여 구체 플라이휠을 수직방향으로 부상시킨 상태에서 수평방향의 회전구동 전자석을 이용하여 회전시키며, 측면 방향에 설치된 타코미터를 이용하여 속도를 측정하는 방식으로 수행되었다.

구체구동기 성능시험의 각 시험조건에서 적용된 입력변수 값들은 표 2에 정리하였다. 모든 구동시험은 플라이휠이 정지된 상태에서 고정된 PWM의 크기(A)와 주파수(f)를 인가하여 최대 속도에 이르기까지 가속시키면서 속도를 측정하였다. 이러한 성능시험은 아래와 같이 총 41개의 시험조건에 대해서 수행되었다.

표 2. 성능시험 입력 변수 및 시험조건

Table 2. Input parameter and test condition for performance test

Parameter	Input value
PWM Phase	- 90 deg for all test cases
Rotation Frequency(f)	- 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz
PWM Amplitude(A)	- 30V ~ 120V for 20Hz (7set) - 30V ~ 120V for 30Hz (7set) - 45V ~ 150V for 40Hz (8set) - 90V ~ 150V for 50Hz (11set) - 108V ~ 150V for 60Hz (8set)
Total test case	41 set

3-3 속도 측정 및 토크 계산

구체구동기의 성능시험을 통해서 측정된 타코신호를 이용한 속도 검출방법에는 대표적으로 펄스카운트 방식(M-method)과 샘플링 방식(T-method)이 사용된다. 본 시험에서는 샘플링 방식을 적용하여 속도를 측정하였다. 샘플링 방식은 속도 데이터의 샘플링이 일정하지 않고, 데이터에 잡음이 발생하며, 또한 저속 영역에서 데이터가 충분하지 않다는 문제점이 있다. 특히, 이러한 속도 오차들은 속도 데이터의 미분을 통해 계산되는 회전 가속도에 매우 큰 오차를 발생시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 구체구동기의 성능분석을 위하여, 연속적인 속도 함수를 이용하여 속도 데이터를 추정하였으며, 추정된 속도 함수의 미분을 통하여 회전 토크를 계산하였다.

구체구동기 성능시험의 속도 데이터 특성은 그림 4와 같이 연속적인 2개의 함수(f_1 과 f_2)와 상수(constant)로 구성된다고 가정되었다. 여기서 함수 f_1 과 f_2 는 다음과 같이 각각 m 차와 n 차의 다항식으로 표현될 수 있다.

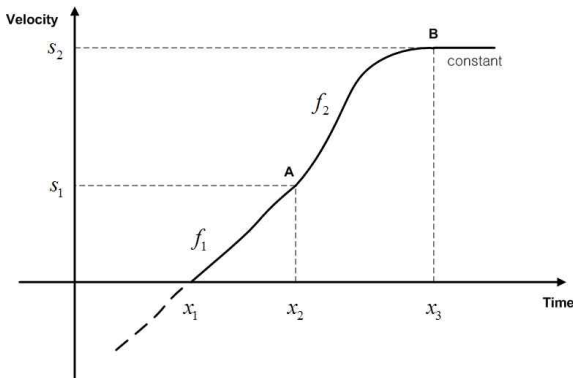


그림 4. 구체 반작용휠의 속도 곡선

Fig. 4. Velocity curve of spherical reaction wheel

$$f_1(x) = A_1x^m + A_2x^{m-1} + \dots + A_{m+1} \quad (1)$$

$$f_2(x) = B_1x^n + B_2x^{n-1} + \dots + A_{n+1} \quad (2)$$

두 함수에 대한 연속 조석은 아래의 접합 방정식을 통하여 보장될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_1(x_2) &= f_2(x_2), f_2(x_3) = s_2, f_2'(x_3) = 0, \\ f_1'(x_2) &= f_2'(x_2), f_1''(x_2) = f_2''(x_2) \end{aligned} \quad (3)$$

본 연구에서는 $m = 3, n = 4$ 를 적용하였으며, 전체 변수는 9개의 함수 계수와 두 함수의 접점위치 x_2 , 함수와 상수의 접점위치 x_3 , 상수 값 s_2 가 된다. 식(3)의 접합 방정식을 적용하면 최종적으로 7개의 미지수가 존재하게 된다. 이러한 미지수들은 속도 함수와 측정된 속도 데이터를 이용한 곡선 접합 방식으로 결정될 수 있으며, 이를 위하여 Matlab의 최적화 툴인 "fminsearch" 함수를 사용하였다. 이러한 최적화 방식으로 추정된 속도 모델은 그림 5와 같이 실제 측정데이터와 일치하는 결과를 보이고 있으며, 추정된 속도 함수의 미분을 통하여 그림 6과 같이 회전속도에 따른 가속도를 계산할 수 있다.

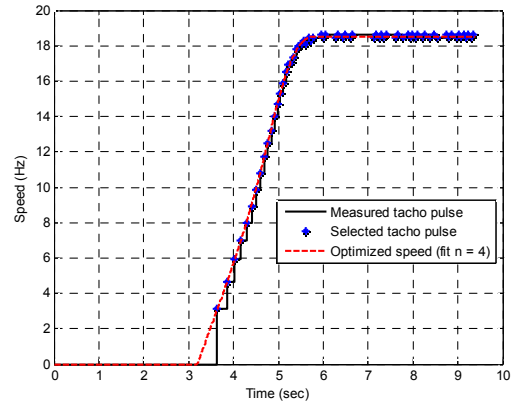


그림 5. 회전 속도 데이터 ($f = 20\text{Hz}, A = 75\text{V}$)
Fig. 5. Rotation speed data ($f = 20\text{Hz}, A = 75\text{V}$)

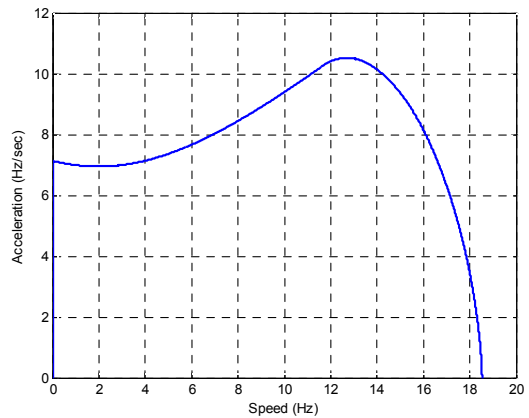


그림 6. 회전 가속도 데이터 ($f = 20\text{Hz}, A = 75\text{V}$)
Fig. 6. Acceleration data ($f = 20\text{Hz}, A = 75\text{V}$)

3-4 성능 평가

구체구동기 성능 시험으로부터 측정된 타코 신호에 대한 속도 함수화를 통하여, 각 시험조건에 대한 토크를 계산하였으며, PWM의 구동 주파수(f)에 따른 토크결과는 그림 7과 같다.

일정한 구동 주파수에서 PWM의 크기에 따라 토크가 증가되며, 각 구동 주파수에 대한 슬립(slip)은 PWM의 크기의 증가에 따라 감소함을 보이고 있다. 최대 토크는 그림 8과 같이 약 0.7Nm로서 50Hz까지 유지되며, 그 이상의 주파수에서 감소함을 확인할 수 있다. 이러한 속도-토크 특성은 전형적인 유도전동기의 구동특성과 일치하는 결과이다.

본 연구에서 개발된 구체구동기는 무부하 조건에서 구동되며, 최대 토크가 정격토크의 약 175%가 되도록 가정하여 50Hz의 정격주파수와 0.4Nm의 정격토크를 구동조건으로 결정하였다.

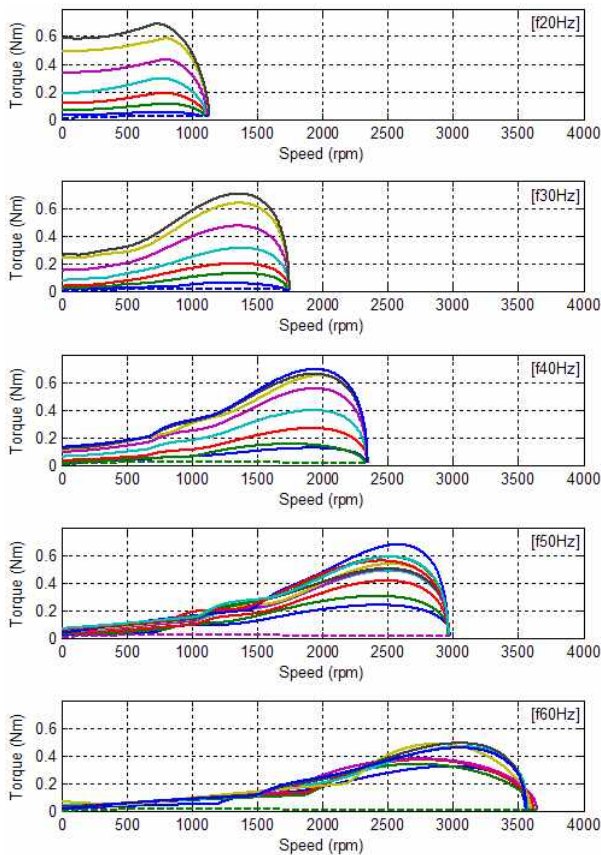


그림 7. 속도-회전토크 곡선
Fig. 7. Speed vs. rotation torque curves

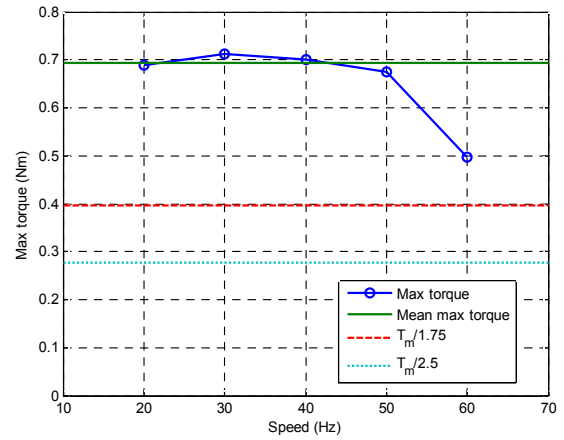


그림 8. 최대 토크 곡선
Fig. 8. Maximum torque curve

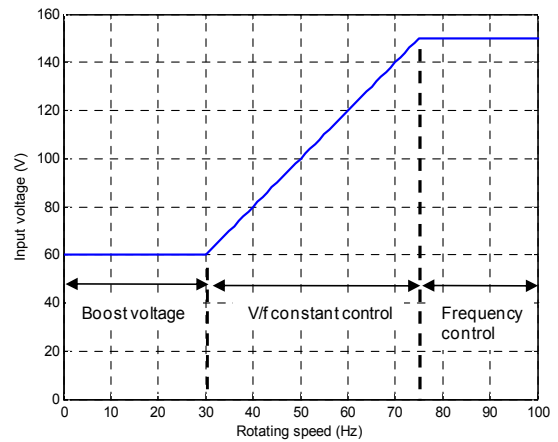


그림 9. V/f 일정제어 입력 전압 곡선
Fig. 9. Input voltage curve for V/f constant control

IV. 개루프 속도 제어

유도전동기의 속도 제어법에는 크게 평균토크를 제어하는 스칼라제어와 순시토크를 제어하는 벡터제어로 구분할 수 있다[7]. 본 연구에서는 위치센서가 필요하지 않고 제어가 단순하여 적용하기 쉬운 스칼라제어를 적용하였으며, 특히 속도제어범위가 넓고 효율이 높아서 가장 광범위하게 사용되고 있는 V/f일정제어를 사용하였다.

구체구동기의 정격 구동조건으로부터 V/f 일정제어 전압이득을 $V/f = 2.0$ 으로 결정하였다. 이렇게 정해진 제어조건은 그림 9와 같이 주파수 영역에 따라서 3개의 구동영역으로 구분하여 적용되었다. $0 \sim 30\text{Hz}$ 까지는 저속 구동 구간으로서 초기 기동

을 가속화시키기 위한 Boost 전압제어가 적용되며, 30 ~ 75Hz 까지는 속도명령에 비례하여 전압명령이 생성되는 V/f일정제어가 적용되며, 75Hz 이상에서는 구체구동기의 최대 구동전압(150V)에 해당하는 제한영역으로서 주파수제어가 적용된다. 이러한 속도-전압 이득 곡선을 적용하여 구체구동기 1축에 대한 개루프(open-loop) 속도 제어를 수행하였다.

본 연구에서 수행된 개루프 구동제어는 10 ~ 40Hz에 해당하는 다중 스텝 명령에 대해 수행되었다. 이 중 20Hz와 30Hz의 다중 스텝 명령에 대한 개루프 제어 응답은 그림 10에 나타나 있다. 각 스텝에 대해서 작은 슬립에 의한 오차가 존재하며, 모든 가진 주파수 영역에 대해서 속도명령과 잘 일치함을 확인하였다. 또한 최대속도는 120Hz(7,200rpm)까지 측정되었다. 특히, 회생제동을 통해 구현되는 감속 구간의 속도제어는 가속구간의 속도제어보다 빠른 응답반응을 보이고 있다. 이러한 회생제동 특성 또한 유도전동기의 일반적 특성과 일치하는 결과이다.

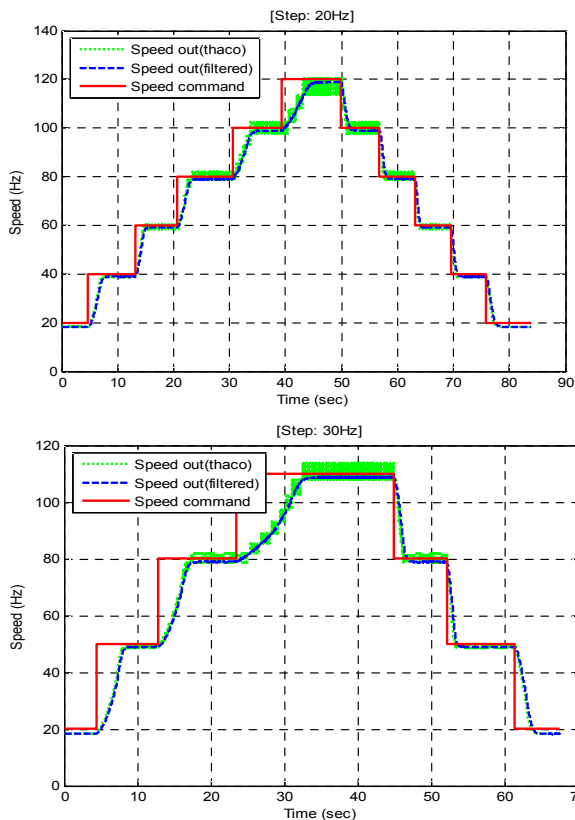


그림 10. 다중 스텝 응답 곡선(20Hz, 30Hz input)
Fig. 9. Multiple step responses (20Hz, 30Hz input)

본 연구에서 확인된 구체구동기의 최대 토크(0.7Nm) 및 최대속도(7,200rpm)는 기존 상용위성들에서 사용되고 있는 반작용휠의 최대 토크영역(0.01 ~ 2Nm)과 최대 속도영역(600 ~ 6,000rpm)에 부합되는 결과이며, 해외에서 수행된 유사한 연구[2]의 최대속도 보다 6배 이상의 최대 회전속도를 갖는 결과이다.

V. 결 론

본 연구에서는 새로운 형태의 자세제어용 구동장치인 구체구동기에 대한 설계 및 성능평가를 수행하였다. 자기부상 및 1축 회전이 가능한 구체구동기에 대한 설계 및 시제품 제작을 수행하였으며, 1축 회전에 대한 구동성능 시험과 속도제어를 수행하였다. 특히, 측정된 타코 데이터에 대한 속도 함수화를 적용하여 회전토크 계산과 구동성능 특성을 도출하였다. 현재까지 구체구동기의 최대속도는 7,200rpm이며, 최대토크는 0.7Nm로 측정되었다. 또한 속도-토크 성능특성 그래프로부터 속도-전압 이득을 결정하여 개루프 속도제어를 수행하였으며, 명령 속도에 대해서 가속 및 감속을 통한 속도제어가 성공적으로 이뤄졌음을 확인하였다. 이러한 성능결과는 상용 반작용휠의 성능에 근접하는 결과이며, 구체구동기와 관련된 국외연구 사례에 비해 우수한 결과라고 판단된다. 본 구체구동기는 폐루프(closed-loop) 속도 제어 및 3차원 회전구동 등의 후속연구를 통하여 추가적인 성능 개선이 이뤄질 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 김대관, 오시환, 이선호, 용기력, “반작용휠의 미소 진동 측정법에 관한 실험적 연구,” *한국소음진동 공학회논문집*, 제 21권, 제 9호, pp. 828~833, 2011.
- [2] Iwakura, A., Tsuda S. and Tsuda T, “Feasibility Study on Three Dimensional Reaction Wheel,” *Proceedings of the School of Science of Tokai University, Series E*, Vol.33, pp.51~57, 2008.
- [3] Boletis, A., Sache, L., Menot, S. and Bleuler, H.,

“Magnetic Levitation and Rotation of Sub-millimetric Spherical Rotors,” *International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (MAGLEV2002), Lausanne, Switzerland.2002.*

- [4] Wildmann, C., Nussbaumer, T. and Kolar, J. W., “10 Mrpm Spinning Ball Motor - Preparing the next generation of ultra-high speed drive systems,” *International Power Electronics Conference*, 2010.
- [5] Dehez, B., Galary, G., Grenier, D. and Raucent, B., “Development of a Spherical Induction Motor With Two Degrees of Freedom,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL.42, NO.8, pp.2077~2089, 2006.
- [6] Park, G., Yoon, H., Kim, D. K., Yong, K. L. and Sergei, E., “Feasibility Study and System Conceptual Design for the Spherical Actuator,” *11th International Conference on Control, Automation and Systems*, Oct. 26~29, KINTEX, Korea, pp. 1875~1879, 2011.
- [7] 이주, “전기기기”, *홍릉과학출판사*, 2011.

김 용 복 (金容福)



2001년 2월 : 연세대학교 전기공학과 (공학사)
2003년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부(공학석사)
2003년 3월~현재 : 한국항공우주연구원 위성제어팀 선임연구원
관심분야 : 구동기제어, RTOS 구동장치

강 우 용 (姜右勇)



2004년 2월 : 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부(공학석사)
2006년 2월~2007년 7월 : 현대자동차 연구원
2007년 7월~현재 : 한국항공우주연구원 위성제어팀 선임연구원
관심분야 : 위성제어, 관성항법

김 대 관 (金大寬)



2001년 2월 : 한국항공대학교 항공 기계공학과(공학사)
2003년 8월 : 한국과학기술원 항공 우주공학과(공학석사)
2008년 2월 : 한국과학기술원 항공 우주공학과(공학박사)
2007년 12월~현재 : 한국항공우주연구원 위성제어팀 선임연구원

관심분야 : 자세제어, 미소진동, 영상지터, 진동제어

최 홍 택 (崔洪澤)



1982년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
1991년 6월 : University of Idaho, Mechanical Engineering(공학석사)
1994년 6월 : University of Idaho, Mechanical Engineering(공학박사)
1994년 10월~현재 : 한국항공우주 연구원 위성제어팀 책임연구원

관심분야 : 자세제어, 진동제어

윤 형 주 (尹炯柱)



1994년 2월 : 한국과학기술원 항공 우주공학과(공학사)
1996년 2월 : 한국과학기술원 항공 우주공학과(공학석사)
2004년 12월 : Georgia Tech, Aerospace Engineering(공학박사)
2010년 2월~현재 : 한국항공우주연구원 위성제어팀 선임연구원

관심분야 : 자세제어, 지터제어, 제어 모멘트 자이로(CMG)