

# 구체 반작용휠 구동기의 성능 시험 및 특성 분석

## Performance Test and Characteristics Analysis of a Spherical Reaction Wheel

김대관† · 윤형주\* · 김용복\* · 강우용\* · 최홍택\*

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

**Key Words :** Satellite(인공위성), Reaction Wheel(반작용휠), Spherical Actuator(구체구동기), 자기부상(Levitation), 전자석(Electromagnet), Attitude Control Actuator(자세제어 작동기)

### 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 torque-voltage characteristics 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.

### 1. 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. 이러한 장치들은 모두 하나의 구동장치에서 단일 회전축 방향의 제어토크를 발생시키기 때문에 인공위성의 3 축 자세제어를 위해서는 최소한 3 개 이상의 구동기 조합을 사용해야 한다. 본 연구의 개발 대상인 구체구동기(Spherical actuator)는 새로운 개념의 자세제어 작동기로서, 하나의 구체 플라이휠(spherical flywheel)을 이용하여 임의의 방향으로 회전이 가능한 구동장치이다. 특히 하나의 구동장치만으로 3 차원방향의 제어토크 또는 모멘텀을 발생시킬 수 있으므로 단일장치로써 위성의 3 축 자세제어가 가능하다는 장점이 있다.

그러므로 이러한 새로운 개념의 구체구동기를 적용하게 되면 3 개 이상의 조합을 사용하는 기존의 구동시스템과 비교하여 무게와 부피의 감소가 가능해지므로 위성의 소형화 및 경량화를 이룰 수 있다.

현재까지 구체구동기에 대한 연구는 국내에서는 전무한 상태이며, 외국의 경우 일본에서 Tokai 대학 및 JAXA 에서 2000 년 이후 연구를 수행하여 1 자유도에 대한 10~50mm 직경의 구체구동기에 대한 시험평가를 수행하였다[1]. 유럽에서는 자세제어 작동기로서 구체구동기에 대한 연구결과가 발표된 것이 없는 것으로 파악되지만, 다른 연구목적으로 유사한 연구가 수행된 바가 있다. 스위스의 EPFL 및 ETH 에서는 1~4mm 직경의 구체에 대한 구동 시험을 수행하여 수백만 RPM 의 초고속 회전시험을 수행하였다[2,3]. 또한 벨기에 Catholique de Louvain 대학에서는 2 자유도를 갖는 50mm 직경의 구형 유도모터 개발을 수행하였다[4].

본 연구에서는 3 축 방향으로 임의의 회전이 가능한 위성 자세제어용 구체구동기의 개발을 목표로, 한국항공우주연구원에서 개발한 1 축 구동이 가능한 구체구동기에 대한 시험평가 및 개 루프 속도제어 시험을 수행하였으며, 그 결과를 기술하였다.

† 교신저자; 정회원, 한국항공우주연구원 위성제어팀  
E-mail : dkk@kari.re.kr  
Tel : 042-870-3751 , Fax : 042-860-2898  
\* 한국항공우주연구원 위성제어팀

## 2. 구체구동기 원리 및 설계

### 2.1 구체구동기의 작동 원리

구체구동기의 작동원리는 Fig. 1 에 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 플라이휠을 회전시키는 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 회전자기장 회전속도와 자기장의 크기 그리고 회전축 방향 등을 변화시켜 구체 플라이휠을 원하는 방향과 속도로 회전시킬 수가 있게 된다.

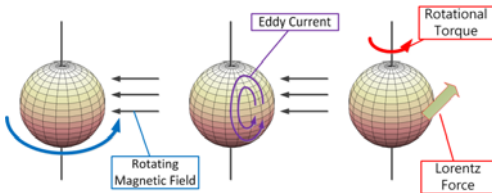


Fig. 1. Schematic diagram of rotation mechanism

### 2.2 구체구동기의 설계 제작

구체구동기에 대한 설계는 전도체 재료인 구형 플라이휠에 대한 회전 자기장과 자기부상 자기장을 모델링 하여 수행되었으며, 설계에 사용된 회전체 자기장 모델 및 설계변수에 대한 세부 정보는 참고 문헌[5]를 통해 확인할 수 있다.

성능해석을 통해 결정된 설계변수들을 기반으로 Fig. 2 와 같이 수직방향으로 자기부상이 가능한 1 차원 회전용 구체구동기 시제품을 제작하였다. 자기 부상 및 회전구동은 전자석에 의해 구현되며, 플라이휠은 중공타입으로서, 철 층과 구리 층의 2 중 구조를 가지며, 질량 및 관성 모멘트는 각각  $m = 3.448\text{Kg}$  과  $I = 0.0042\text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ 이다.

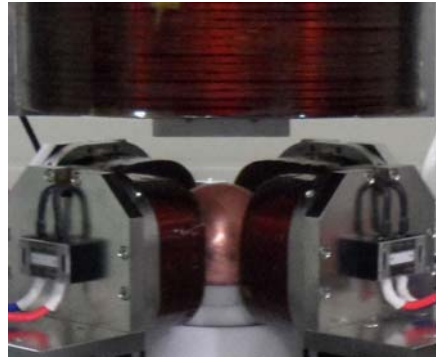


Fig. 2. Magnetic levitation spherical actuator (KARI)

## 3. 구체구동기 시험 및 성능평가

### 3.1 구체구동기 시스템

구체구동기 구동 및 성능분석을 위한 시험평가 시스템은 구동기와 제어 장치로 구성된다. 구동기는 자기부상을 위한 1 개의 수직방향 전자석과 회전 자기장 발생을 위한 4 개의 수평방향 전자석 그리고 구형의 플라이휠(직경 100mm)로 구성된다. 제어 장치는 전자석 구동 드라이버와 속도 측정을 위한 타코미터(tachometer) 그리고 구동 제어 및 속도 측정을 위한 실시간 DAQ 장비로 구성되며, 세부사항 정보는 Table 1 과 같이 정리하였다.

Table 1. Equipment specification of the spherical actuator system.

Equipment	Specification
DAQ	- Model: dSPACE-1103 (2024 Hz) - Analog input: tacho-pulse, PWM1 volt & current, PWM2 volt & current - Analog output: driving frequency, phase, PWM1 and PWM2
Electromagnet and Driver	- Model: levitation electromagnetic and rotation electromagnets(EM) - Levitation EM input parameters: electric DC power - Rotation EM input parameters: driving frequency, phase, PWM1 and PWM2
Tachometer	- Model: ACT-3X - RPM range: 5 ~ 999,990rpm - Pulse output: +5V

### 3.2 구체구동기 성능 시험

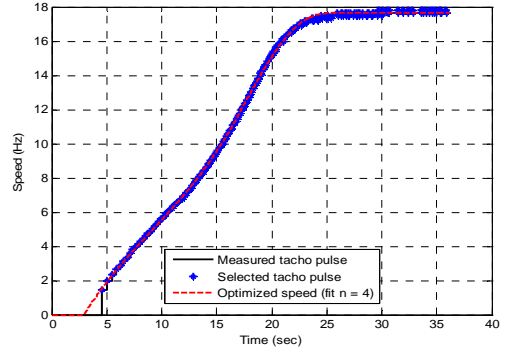
구체구동기 성능 측정 시험은 자기부상 전자석을 이용하여 구체 플라이휠을 수직방향으로 부상시킨 상태에서 동시에 수평방향의 회전구동 전자석을 이용하여 회전시키며, 측방향에 설치된 타코미터를 이용하여 속도를 측정하는 방식으로 수행되었다. 구체 플라이휠의 자기부상을 위하여 구동기 윗면에 장착된 자기부상 전자석에 직류전류를 인가하여 자기부상 조건을 구현하였다. 또한 구동기 회전을 위하여 수평으로 장착된 2 쌍의 회전 전자석에 90deg의 위상 차이를 갖는 교류전류를 인가하여 회전기전력을 발생시켰다.

플라이휠의 회전속도는 4 개의 회전 전자석에 인가되는 PWM 과 주파수에 따라서 변화된다. 또한 구체 플라이휠의 1 축 방향 회전속도를 측정하기 위하여 1 개의 타코미터를 플라이휠 표면과 수직이 되도록 장착하였으며, 플라이휠 표면에 부착된 반사부에 의해 발생하는 타코신호를 직접 데이터 측정 장비로 저장하였다. 이렇게 측정된 타코신호는 PC에 설치된 실시간 데이터측정 프로그램을 통하여 속도 (rpm)로 환산하여 저장하였다.

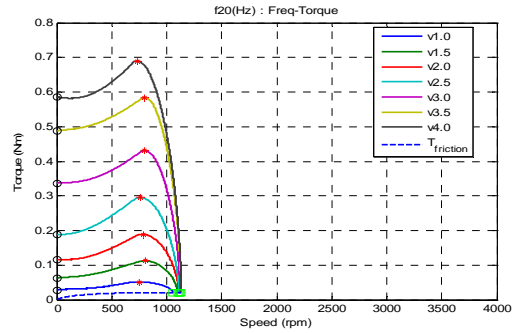
본 구체구동기 성능시험 조건 및 적용된 입력변수 값들은 Table 2에 정리하였다. 각 구동시험은 플라이휠이 정지된 상태에서 회전 주파수 및 PWM 크기를 인가하여 각각의 구동조건에서 최대 속도에 이르기까지 가속시키면서 속도를 측정하였다. 이러한 성능시험은 다음과 같이 총 41 개의 시험조건에 대해서 수행되었다.

**Table 2. Parameter input values for performance test**

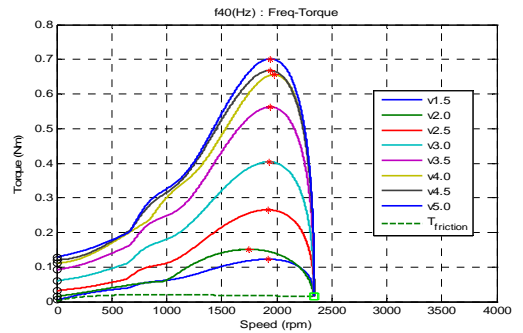
Parameter	Input value
PWM Phase	- 90 deg for all test cases
Rotation Frequency	- 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz
PWM Amplitude	- 30V ~ 120V for 20Hz (7set) - 30V ~ 120V for 30Hz (7set) - 45V ~ 150V for 40Hz (8set) - 90V ~ 150V for 50Hz (11set) - 108V ~ 150V for 60Hz (8set)
Total test case	41 set



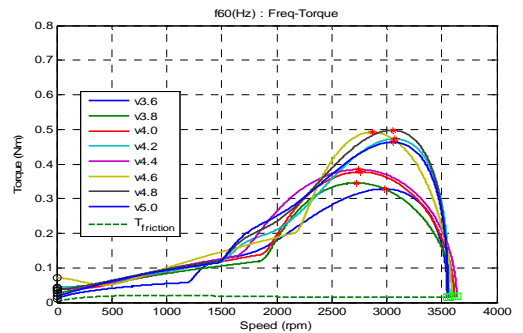
**Fig. 3. Rotation speed measurement of 20Hz (30V)**



**Fig. 4. Torque vs speed graphs for 20Hz rotation**



**Fig. 5. Torque vs speed graphs for 40Hz rotation**



**Fig. 6. Torque vs speed graphs for 60Hz rotation**

### 3.3 구체구동기 성능평가

구체구동기 성능시험을 통하여 인가된 PWM 크기 (V)와 주파수(f)에 따른 속도 변화를 측정하였으며, Fig.3 에는 30V 의 크기와 20Hz 주파수의 PWM 입력조건에 대한 속도응답을 보이고 있다. 이러한 속도 데이터들에 대한 미분을 통하여 구동조건에 대한 속도-토크 그래프를 산출할 수 있으며, 계산된 20Hz~60Hz 의 속도-토크 특성곡선은 Fig.4 ~ Fig. 6 에는 나타나 있다.

산출된 속도-토크 특성곡선으로부터 구체구동기의 1 축 방향 구동특성을 분석할 수 있다. 구동성능은 Fig. 7 과 같이 최대 토크가 0.7Nm 으로 50Hz 까지 발생이 가능하며, 그 이상의 주파수에 대해 최대토크가 감소함을 확인하였다. 구체구동기의 입력 주파수(f)에 대한 입력 전압(V) 결정은 특성그래프를 통하여 계산하였으며, 50Hz 의 정격주파수와 0.4Nm 의 정격 토크로 결정하였다.

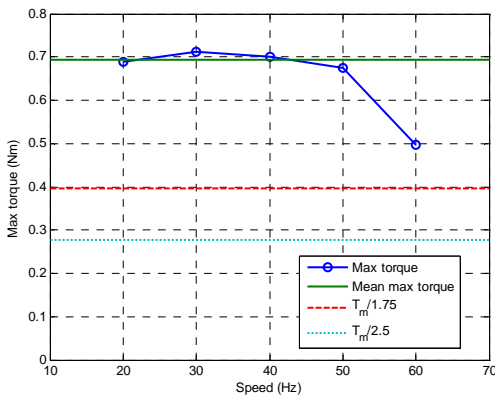


Fig. 7. Maximum torque curve

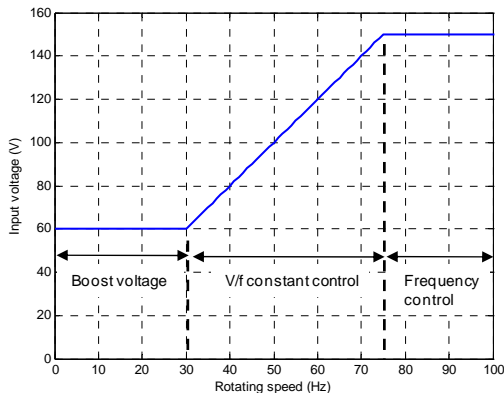


Fig. 8. PWM input voltage profile (for V/F constant control).

### 3.4 개루프 스칼라 제어

유도전동기의 속도 제어법에는 크게 평균토크를 제어하는 스칼라제어와 순시토크를 제어하는 벡터 제어로 구분할 수 있다[6]. 본 연구에서는 위치센서가 필요하지 않고 제어가 단순하여 적용하기 쉬운 스칼라제어를 적용하였으며, 특히 속도제어범위가 넓고 효율이 높아서 가장 광범위하게 사용되고 있는 V/f 일정제어를 사용하였다.

계산된 속도-전압 이득을 이용하여 회전구동 입력조건이 정해지며, 현재의 시험조건에서는 이득이  $V/f = 2.0$  으로 결정되었다. 이렇게 정해진 구동조건은 Fig. 8 과 같이 주파수 영역에 따라서 3 개의 구동영역으로 구분하여 적용되었다. 0~30Hz 까지는 저속 구동 구간으로서 초기 기동을 가속화 시키기 위한 Boost 전압이 적용되며, 30~75Hz 까지는 속도명령(fs)에 비례하여 전압명령(Vs)이 생성되는 V/f 일정제어가 적용되었다. 또한 75Hz 이상에서는 구체구동기의 최대 구동전압(150V)에 해당하는 제한영역으로서 주파수제어가 적용되었다. 이러한 속도-전압 이득 곡선을 적용하여 1 축에 대한 구체구동기의 개루프 속도 제어를 수행하였다.

본 연구에서 수행된 개루프 구동제어는 10Hz ~ 40Hz 에 해당하는 다중 스텝 명령에 대해 수행되었다. 이중 20Hz 의 다중 스텝 명령에 대한 개루프 제어 응답은 Fig. 9 에 나타나 있다. 각 스텝에 대해서 낮은 슬립에 의한 오차가 존재하며, 모든 주파수 영역에 대해서 속도명령과 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 특히, 회생제동을 통해 구현되는 감속구간의 속도제어는 가속구간의 속도제어보다 빠른 응답반응을 보이고 있다.

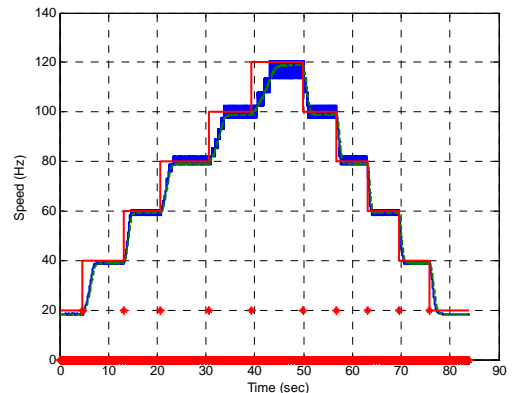


Fig. 9. Multiple step response (20Hz step input)

#### 4. 결 론

새로운 형태의 자세제어용 구동장치이며, 단일장치로써 위성의 3 축 자세제어가 가능한 구체구동기에 대한 설계 및 성능평가를 수행하였다. 자기부상 및 1 축 회전이 가능한 구체구동기에 대한 수학적 모델링 및 설계를 통하여 시제품을 제작하였으며, 자기부상 조건에서 1 축 회전에 대한 구동성능 시험을 수행하였다. 현재까지 측정된 성능결과는 최대속도는 7,200rpm 이며, 최대토크는 0.7Nm 로 나타났으며, 이러한 성능은 기존에 연구된 다른 국외연구 사례에 비해 가장 좋은 성능이라 판단된다. 또한 속도-토크 성능특성 그래프로부터 속도-전압 이득을 결정하여 개루프 속도제어를 수행하였으며, 명령 속도에 대해서 가속 및 감속을 통한 속도제어가 성공적으로 이뤄졌음을 확인하였다. 이러한 결과는 성능결과는 상용 반작용휠의 성능에 근접하는 결과이며, 또한 3 축 구동으로 확장하기 위해 충분한 구동성능이라고 판단된다. 본 구체구동기는 속도 및 토크 패루프 제어를 위한 추가적인 연구를 통하여 성능이 개선될 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Iwakura, A., Tsuda S. and Tsuda T., 2008, "Feasibility Study on Three Dimensional Reaction Wheel," *Proceedings of the School of Science of Tokai University, Series E*, Vol. 33, pp. 51~57.
- (2) Boletis, A., Sache, L., Menot, S. and Bleuler, H., 2002, "Magnetic Levitation and Rotation of Sub-millimetric Spherical Rotors," *The 17th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives(MAGLEV2002)*, Lausanne, Switzerland.
- (3) Wildmann, C., Nussbaumer, T. and Kolar, J. W., 2010, "10 Mrpm Spinning Ball Motor - Preparing the next generation of ultra-high speed drive systems," *The 2010 International Power Electronics Conference*.
- (4) Dehez, B., Galary, G., Grenier, D. and Raucant, B., 2006, "Development of a Spherical Induction Motor With Two Degrees of Freedom," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 42, NO. 8, pp. 2077~2089.
- (5) Park, G., Yoon, H., Kim, D. K., Yong, K. L. and Sergei, E., 2011, "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.

(6) 이주, "전기기기", 홍릉과학출판사, 2011.