

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(2), 172-178(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.2.172

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

100Nm급 산업용 제어모멘트자이로 개발

이선호*, 김대관*, 김용복*, 용기력*, 최동수**, 박도환**, 김일중**

Development of 100Nm-class Control Moment Gyroscopes for Industrial Applications

Seon-Ho Lee*, Dae-Kwan Kim*, Yong-Bok Kim*, Ki-Lyuk Yong*,

Dong-Soo Choi**, Do-Hwan Park** and Il-Jong Kim**

Korea Aerospace Research Institute*, Justek Inc.**

ABSTRACT

The control moment gyroscope(CMG) which is well known as an effective high-torque-generating device is applicable to space vehicles, airplanes, ships, automobiles, robotics, etc. for attitude stabilization and maneuver. This paper deals with the overall details of 100Nm-class CMG development for various industrial applications, and provides the activities and results associated with the CMG system-level requirement analysis, the motor subsystem design/manufacturing/integration, the construction of ground support equipment, and the performance test and evaluation. The performance test reveals that the CMG generates the torque output more than 120Nm in as-designed operation of spin motor and gimbal motor.

초 록

제어 모멘트 자이로(control moment gyroscope, CMG)는 고평크 발생 장치로서 인공위성 뿐만 아니라 항공, 선박, 자동차, 로봇 등의 다양한 산업분야의 자세안정화와 기동 시스템에 적용될 수 있다. 본 논문은 여러 산업분야에서 적용할 수 있는 100Nm급 CMG 개발 전반에 대한 내용을 다룬다. 이를 위해서 CMG 시스템레벨 요구사항 분석, 모터 서브시스템 설계/제작/조립, 시험장치 구성, 성능시험 및 평가에 대한 개발과정과 결과를 제시한다. 스피너모터와 김벌모터를 설계조건에서 구동하여 CMG의 토크출력이 120Nm 이상 생성됨을 성능시험을 통해 확인한다.

Key Words : Control Moment Gyroscope(CMG, 제어모멘트자이로), Attitude Stabilization & Maneuvering(자세 안정화 및 기동), Ship Anti-Rolling System(선박 동요제어 시스템), Flywheel(플라이휠), Spin Motor(스핀 모터), Gimbal Motor(김벌모터)

† Received : August 21, 2014 Revised : January 21, 2015 Accepted : January 23, 2015

* Corresponding author, E-mail : shlee71@kari.re.kr

I. 서 론

자이로스코프(gyroscope)의 원리를 응용한 안정화장치(stabilizer)/구동기(actuator)는 전기모터 구동으로 높은 정밀도의 큰 토크를 발생시킨다. 이러한 특성은 인공위성, 수송용/여객용/레저용/군사용 고부가가치 선박, 석유/가스 시추선이나 풍력/조력 발전시설 등의 해상 플랫폼, 항만 물류 시설 (mobile harbor), 잠수함/수중탐사선, 로봇의 동요제어 시스템에 적합하여 관심이 증대되고 있다[1-8](Fig.1). 세계는 해양 물동량의 증가, 해양 자원/에너지 개발의 가속화로 인해 고성능 조선 및 해양 플랫폼 산업의 가파른 성장이 예상된다. 특히 고부가가치의 레저용/군용 특수선박과 해양 플랫폼시장에서의 자세 안정화 성능의 중요성이 증대되고 있는 실정이다.

선박은 해상에서 운항되기 때문에 선원, 화물, 그리고 선박 자체의 안전에 영향을 주는 동요(rolling)를 안정화하는 것이 중요하다. 이러한 동요는 선박 탑승자의 안락함을 방해하고 해상 작업의 사고를 유발하며 심할 경우 선박이 전복(parametric rolling)되는 대형 사고를 초래한다. 현재 가장 보편적인 대응방법은 선박의 하부를 유체역학적으로 설계하고 선체 내부에 안정화 물탱크(anti-rolling tank) 또는 선체 외부현측에 안정화핀(fin stabilizer)을 장착하는 방법이 있다. 이러한 방법은 응답속도가 낮거나 정선 중에 요구되는 복원력이 발생하지 않는 한계가 있기에, 선박의 주행/정선 시에도 능동적/효과적으로 동요를 제어하기 위한 자이로스코프 기반의 자이로안정기(gyro-stabilizer)/제어모멘트자이로(control moment gyroscope, CMG)에 대한 요구가 증대되고 있다[4-8].

CMG는 1973년부터 주로 대형위성인 SkyLab, MIR, ISS 등의 자세안정화를 위한 대용량 토크

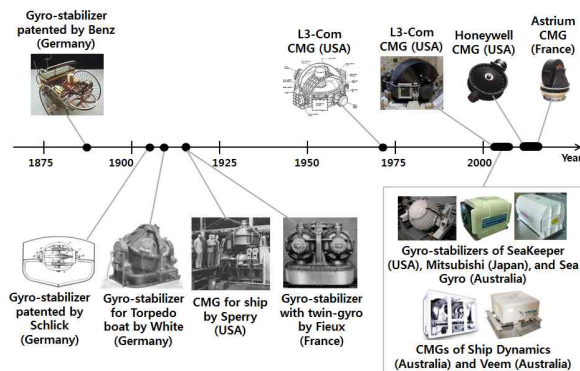


Fig. 1. History of gyro-stabilizer and CMG

발생 구동기로 적용되었다. 이후 2000년대 후반부터는 소형/고정밀 제어기술이 접목된 CMG가 개발되어 Worldview/Pleiades 등의 고기동성(high agility)이 요구되는 중소형급 상용위성에 적용되고 있다. 국내의 경우, 학연 협력을 통해 1Nm 이하 소형급 CMG와 10Nm 이하 중형급 CMG의 자체적인 설계/제작/시험을 수행하여 향후 위성용 CMG 개발과 활용을 위한 선행기술을 확보하였다[9-11].

본 논문은 선박, 해양플랫폼, 잠수정, 항공기, 자동차 등의 산업분야에서 실용화할 수 있는 자세 안정화/기동용 100Nm급 CMG 개발을 다루며, 시스템 요구사항 분석, 하드웨어 설계/제작, 시험장치 구성, 성능 시험/평가 등 전반적인 개발 과정을 제시한다. 특히 스핀모터의 3,000rpm 속도제어와 김벌모터의 위치제어 및 1rad/s 속도 제어 성능을 시험하고 최종적으로 CMG가 100Nm급 토크를 생성함을 시험적으로 검증한다. 본 논문의 구성으로 2장에서 CMG 시스템의 요구사항 분석과 서브시스템 설계/제작을 다루고, 3장에서 성능시험장치 구성과 시험/평가 결과를 다루고, 마지막으로 4장에서 본 연구의 결론을 제시한다.

II. CMG 시스템 설계 및 제작

2.1 CMG 개요

CMG는 자이로스코프의 원리를 이용한 토크 발생장치로서 Fig. 2와 같이 플라이휠(flywheel), 스핀모터(spin motor), 김벌모터(gimbal motor)로 구성된다. 스핀모터가 플라이휠을 구동시키면 모멘텀(\vec{H})이 발생하며, 이때 김벌모터에 의해서 스핀모터 회전축이 김벌축 중심으로 회전(\vec{w})하면 두 축에 수직인 축에 토크(\vec{T})가 발생한다[1].

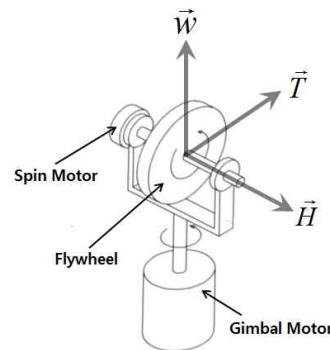


Fig. 2. Torque generation of CMG($\vec{T} = \vec{w} \times \vec{H}$)

Table 1. Major specification of CMG

Level	Item	Value
CMG System	Angular Momentum	> 100Nms
	Momentum Tolerance	< 4%
	Output Torque	> 100Nm
Spin Motor	Flywheel Inertia	> 0.32kgm ²
	Nominal Speed	> 3,000rpm
	Speed Ripple	< 0.02%
	Output Axis Alignment	< 2deg
	Flywheel Balancing	< 0.5g-cm
	Run-up Time	< 10min
	Rotation Range	Unlimited
Gimbal Motor	Control Bandwidth	> 10Hz
	Max Rate	> 1rad/sec
	Max Acceleration	> 3rad/sec ²
	Position Indication Acc.	< 0.01deg
	Zero Rate Drift	< 0.02rad/s
	Rate Accuracy	< 3% or 0.02rad/s
Mass	CMG	54kg
	Inverter	0.7kg
Size	CMG	360x459x571mm
	Inverter	73x144x60mm
Power	Peak Power	235W
NSF	Structural Natural Freq.	56Hz

2.2 CMG 요구사항

본 연구에서는 CMG 설계를 위해 시스템, 스핀모터부, 김벌모터부, 전력부, 기계 기구부, 구동 드라이버에 대한 주요 요구사항을 Table 1과 같이 분석하였다. 단, Table 1에 기술된 CMG 시스템 질량, 크기, 소모전력, 공진주파수 등은 실제 성능시험을 결과를 반영하여 작성되었다.

2.3 CMG 서브시스템 설계

본 연구에서 개발하는 CMG는 3,000rpm으로 정속/고속 회전하는 플라이휠 부분과 플라이휠

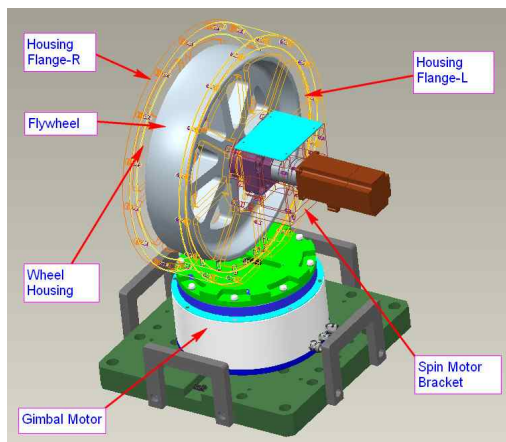


Fig. 3. Configuration of CMG system

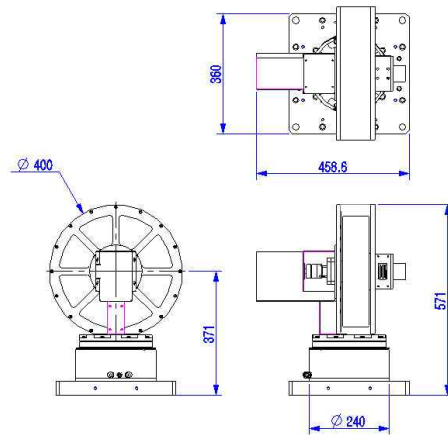


Fig. 4. Outline drawing of CMG

을 회전 구동시키기 위한 스핀모터부, 그리고 하부의 김벌모터부로 구성된다.

플라이휠은 김벌모터의 최대 속도 1rad/s와 플라이휠 속도 3,000rpm 조건에서 100Nm 이상의 토크를 발생시키기 위하여 관성모멘트 (moment of inertia)를 0.35kg-m²로 설계하였다. 김벌모터의 회전시 플라이휠의 회전축에 자이로 효과에 의한 토크가 가해지는데 이를 고려하여 축과 베어링의 규격을 설계하였다.

김벌모터는 상부의 플라이휠과 커버(cover) 등 기구부의 관성을 감안하여 1rad/s로 구동이 가능하도록 역기전력(back electromotive force) 특성을 지닌 모터로 선정하였다. 선정된 모터는 24V 전압 제한 하에서 11Nm이상의 토크를 얻을 수 있도록 설계하였다.

스핀모터는 BLDC(brushless DC) 모터로서 정격 전원은 24V이고 정격 전류는 11A급 90각 모터로 선정하였다. 플라이휠을 포함한 스핀모터부의 배치는 김벌모터의 중심축에서 비대칭이 되도록 설계하여 김벌모터 회전시 회전 관성을 최소화할 수 있도록 설계하였고, 정밀 속도제어를 위하여 플라이휠의 반대편에 엔코더를 추가하였다.

그 밖에 스핀모터와 플라이휠의 기계적 결합을 위한 커플러(coupler)와 스핀모터부의 무제한 회전시 원활한 전기접속을 위해서 슬립링(slip ring)을 설계하였다.

플라이휠이 큰 관성을 가지면서 고속 회전하기 때문에 김벌모터의 회전시 플라이휠의 회전축에 미치는 토크에 의한 시스템 성능 저하를 미연에 방지하는 것은 CMG 구조 설계에 있어서 가장 중요한 부분중 하나이다. 설계된 플라이휠과 스핀모터의 구조적 안정성을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 유한요소 해석을 수행하였다. 유한

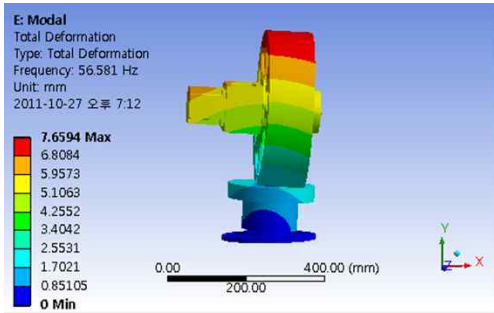


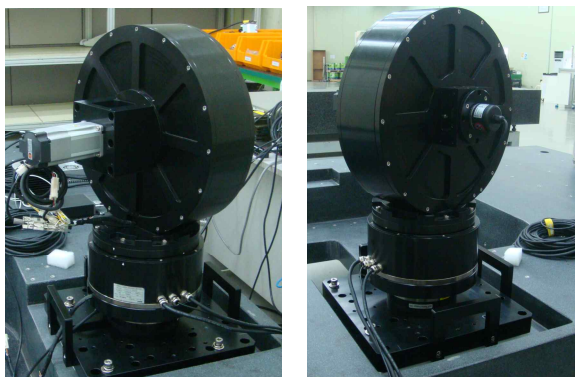
Fig. 5. FEM analysis of CMG

요소 모델(finite element model, FEM) 분석결과, 설계된 CMG가 공진주파수 56Hz이상의 구조강성을 가짐을 확인하였다.

인버터(inverter)는 1kW급으로서 김발모터와 스핀모터의 구동을 위해 50V이하의 직류 전원을 사용하도록 설계하였다. 일반적인 인버터가 지능형 전력반도체 모듈(intelligent power module)을 사용하는 것과는 달리 본 연구에서는 개별소자 트랜지스터(MOSFET)를 사용하였고, 전류제어 특성을 향상시키기 위해 전류 출력타입의 고정밀 전류 감지기(sensor)를 적용하였다. 메탈 인쇄회로기판(printed circuit board)을 적용하여 전력소자의 냉각효율을 높일 수 있도록 설계하여 열 발생을 최소화하였으며, 3개의 인쇄회로기판이 적층된 구조로 설계하여 전체 사이즈를 소형화하였다. 개발된 인버터는 상위제어기로부터 펄스폭변조 신호를 인가받아 전력소자를 직접 구동하는 직접 펄스폭변조 방식을 적용하였으며 모션 컨트롤러와 핀 배열이 호환성 있도록 설계하였다.

2.4 CMG 서브시스템 제작

스핀모터부 조립을 위해서 커플러를 이용하여 플라이휠을 스핀모터와 결합시키고 스핀모터의 반대쪽에는 속도 측정용 엔코더를 장착하였다.



(a) Left side (b) Right side

Fig. 6. Photo of Manufactured CMG



(a) Outside (b) Inside

Fig. 7. Inverter for CMG

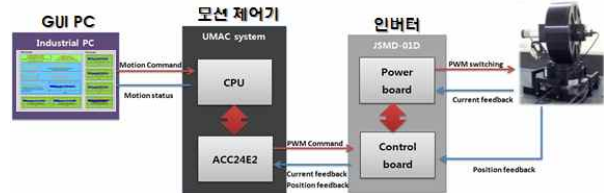


Fig. 8. Configuration of CMG Operation

이렇게 구성된 스핀모터부의 하부에 김발모터의 회전축이 결합되는 형태로 제작되었다. 플라이휠의 엔코더와 스핀모터의 케이블은 김발모터의 중공축 안쪽에 장치된 슬립링을 통하여 인버터에 연결될 수 있도록 제작하였다. 최종 조립된 CMG의 외형 사진은 Fig. 6과 같다.

인버터는 파워 소자부, 스위칭 회로 및 전류감지부, 전원 및 제어부의 인쇄회로기판을 3층으로 적층하여 제작되었으며, 기판들 간의 정확한 정렬을 위한 기구 구조물을 제작하였다. 인버터 케이스는 알루미늄 재질을 판금 처리하여 제작하였고, 파워소자부의 메탈 인쇄회로기판과 직접 결합되어 방열이 극대화 되도록 하였다. 제작된 인버터의 외형 및 내부 사진은 Fig. 7과 같다.

CMG 구동을 위해서 Fig. 8과 같이 구동 시스템을 구성하였다. CMG 구동 시스템은 상위 제어기와 통신하여 모션을 제어하고 데이터를 획득하는 GUI(graphic user interface) PC, 스핀모터와 김발모터를 제어하는 모션 컨트롤러와 앰프(amplifier)로 구성되는 인버터, 그리고 CMG로 구성된다.

III. CMG 시스템 시험 및 평가

3.1 CMG 성능시험장치

제작된 CMG에 대한 성능평가 및 향후 수행할 수명시험을 위하여 CMG 성능시험장치를 제작하였다. 성능시험장치는 Fig. 9와 같이 CMG, 인버터(motor driver), 토크측정기(torquemeter & charge amplifier), 모션제어기, DAQ(data acquisition) PC, 전원공급기(power supplier), 하니스 케이블

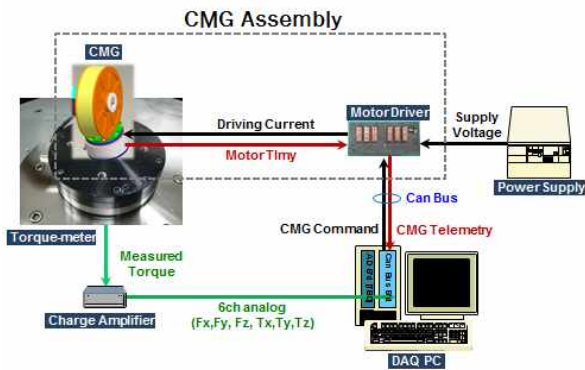


Fig. 9. Configuration of CMG test

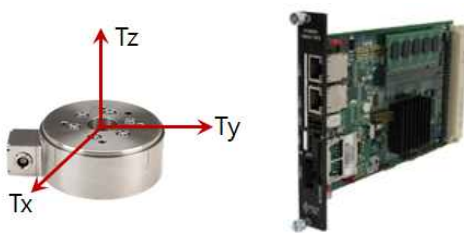


Fig. 10. Photos of Torquemeter (in left) and motion controller (in right)

(harness cable) 등으로 이루어져 있다.

CMG는 플라이휠과 2축 구동모터(스핀모터와 김벌모터)로 구성되어 2축 앰프로부터 부과된 입력신호에 대하여 구동되어 자이로스코프 원리에 의해 토크를 발생한다.

인버터는 CMG의 스핀모터와 김벌모터의 구동용 드라이브로서 모션 제어기로부터 입력받은 토크명령에 따라 모터의 구동 전압을 생성하며 CMG 모터의 위치, 속도, 전류, 온도 등의 신호를 받아 모션 제어기로 출력한다.

토크측정기는 CMG 구동에 의해 물리적으로 발생하는 3축 힘(N)과 토크(Nm)를 동시에 측정할 수 있으며 측정신호를 전압으로 출력한다.

모션제어기는 외부 제어와 DAQ PC를 통해서 운영자가 생성한 위치와 토크명령 신호에 대하여 CMG의 스핀모터와 김벌모터 구동에 필요한 구동 입력신호를 생성하고, CMG 모터의 출력신호(위치, 전류, 전압, 온도)와 토크측정기로부터 측정된 CMG 발생토크를 저장하고 DAQ PC에 전달한다.

DAQ PC는 시험장치 전체에 대한 전원공급과 시험/측정 기능을 제어할 수 있게 하고 CMG 모터의 위치와 속도명령 신호를 모션 제어기에 전달한다. 또한 CMG 모터의 출력신호와 토크측정기 출력신호를 저장하고 각 측정신호와 구동 토

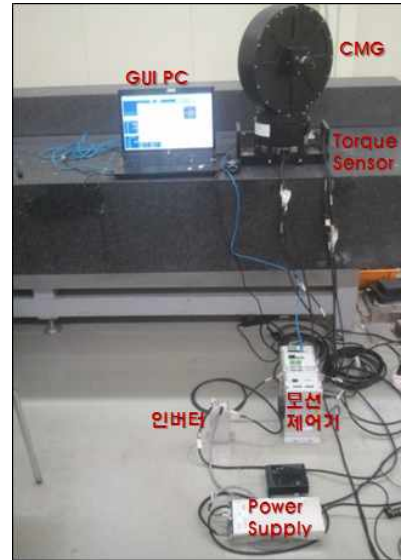


Fig. 11. Photo of CMG test setup

크신호의 가시화기능을 가진다.

3.2 CMG 성능시험 및 평가

스핀모터 단독 구동시험을 위해 정지상태에서 가속하여 3,000rpm의 정상상태 속도를 유지하는 시험을 수행하였다. 시험결과에 의하면 10분 이내에 3,000rpm에 도달하였으며 정상상태 속도오차가 0.5rpm이하로서 속도리플(speed ripple) 0.02%이내의 속도 제어 성능을 확인하였다.

김벌모터 단독 구동시험을 위해 우선 0deg의 위치명령에 대해서 0.01deg의 위치제어 정밀도 그리고 0rad/s의 속도명령에 대해서 0.015rad/s의 제어정밀도 성능을 확인하였다 (Fig. 13). Fig. 14와 같이 김벌속도가 정지상태에서 1rad/s까지 도달하는데 약 0.3sec가 소요되어 3.3rad/s²의 각가속도 성능을 확인하였다.

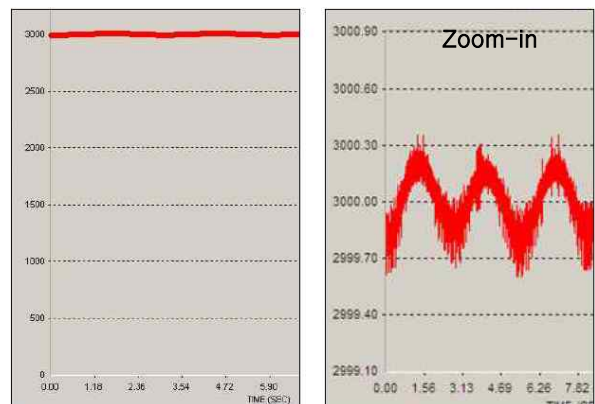
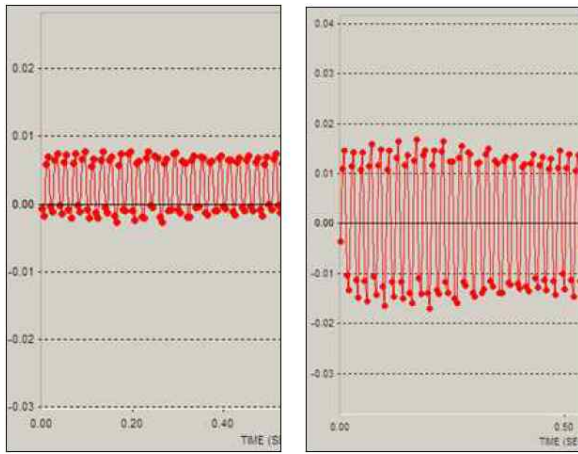


Fig. 12. Speed control at 3,000rpm of spin motor (y-axis: speed in rpm)



(a) Position (deg) (b) Speed (rad/s)

Fig. 13. Position control at 0deg and speed control at 0rad/s of gimbal motor

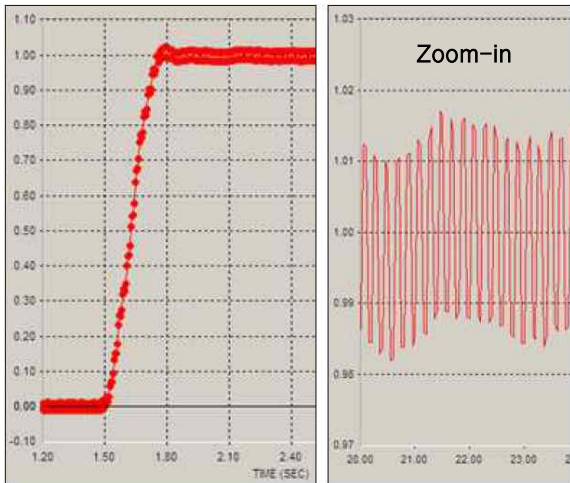
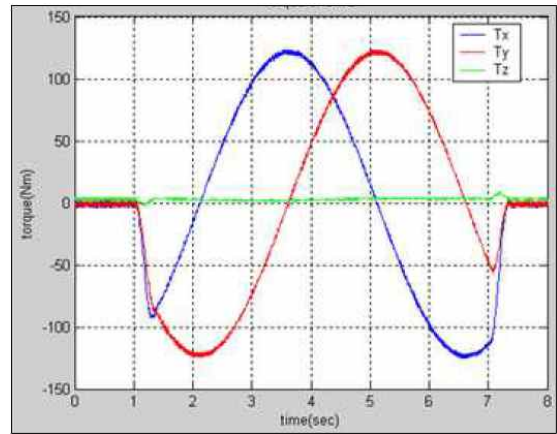


Fig. 14. Speed control at 1rad/s of gimbal motor (y-axis: speed in rpm)

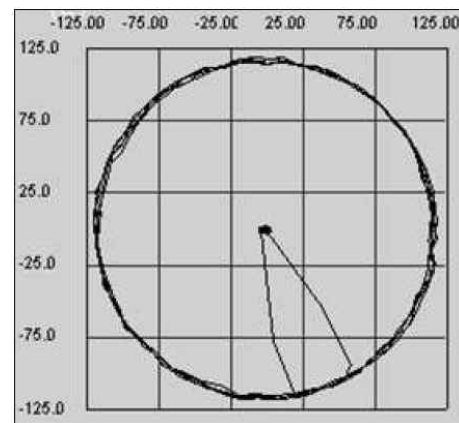
스핀모터와 김벌모터의 동시 구동시험을 위해 스핀모터 속도를 3,000rpm으로 유지한 상태에서 김벌모터를 1rad/s의 속도로 일정하게 회전시키면서 CMG에서 발생하는 3축 토크를 토크측정기를 통해 측정하였다. Fig. 15와 같이 김벌모터 회전축에 수직인 평면상 (X-Y)에서 CMG 토크가 120Nm이상 생성되는 것을 확인하였다. 이때 김벌모터가 1rad/s의 속도로 회전하는 동안 스핀모터가 여전히 3,000 +/- 0.5rpm의 속도를 유지하여 속도리플을 만족함을 확인하였다(Fig. 16).

IV. 결 론

본 연구를 통해 산업용으로 실용화될 수 있는



(a) Y-axis: Tx, Ty, Tz in Nm



(b) Y-axis: Ty in Nm, x-axis: Tx in Nm

Fig. 15. Generated torque with spin motor at 3000rpm and gimbal motor at 1rad/s

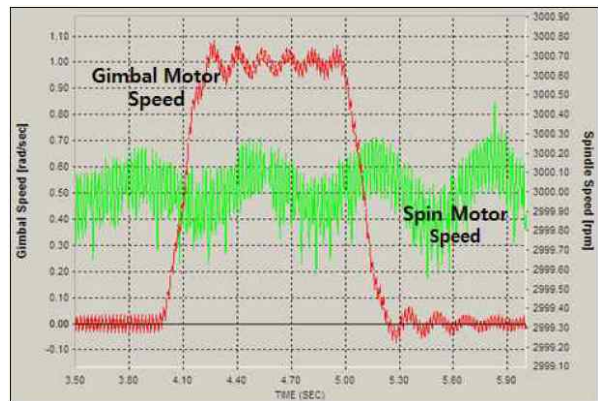


Fig. 16. Speed stability with spin motor at 3000rpm and gimbal motor at 1rad/s

자세 안정화/기동용 100Nm급 CMG의 프로토타입 모델(prototype model)을 개발하였다. 개발된 CMG의 성능시험을 통해 스핀모터를 3,000rpm 정속으로 제어하고 김벌모터를 1rad/s 속도로 구

동할 경우, 120Nm이상의 토크출력이 생성됨을 시험을 통해 확인하였다. CMG 모터의 개발을 위해서는 구조, 진동, 전자, 제어, 가공, 시험 등 다양한 분야의 통합 최적설계기술이 필요하다. 이에 본 연구개발을 통하여 대형 모멘텀휠 및 김발 지지용 기계구조물 설계/제작, 고성능/대용량 DD(Direct Drive) 모터 개발 및 필드버스 지원 드라이브 설계 및 구동 제어, 베어링/윤활시스템의 진동/소음 저감 설계, 제어 모멘트 자이로의 시제품 제작/공정 등 CMG 시스템 전반에 대한 기술을 확보하였다.

본 연구는 국내 연구기관의 축적된 인공위성 CMG 시스템설계 및 시험검증 기술과 모터전문 국내업체의 산업용 정밀모터 설계/제작 보유기술을 접목한 융복합(convergence and integration) 연구개발사업의 성공적 사례이다. 이러한 다양한 관련분야의 기술적 기여도를 바탕으로 이루어진 CMG 모터 개발은 향후 높은 안정성과 임무 수행능력을 요구하는 관련 산업시장에서 경쟁력을 강화시키는 주요한 역할을 할 것으로 기대된다. 또한 그 동안 국내 연구소와 학계에서 수행한 소형급 CMG 기초연구([9-11]) 성과를 실용화하여 향후 대용량 CMG의 산업화 기틀을 다지는 초석으로 활용될 것으로 기대된다.

References

- 1) S. H. Lee, "Technology of Control Moment Gyroscope and its Industrial Trend" *J. of Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 40, No. 1, 2012, pp. 86-92
- 2) D. Brown and M. Peck, "Energetics of

Control Moment Gyroscopes as Joint Actuators" *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 33, No. 6, 2009, pp.1871~1883.

- 3) B. Thornton, T. Ura, and Y. Nose, "Combined Energy Storage and Three-axis Attitude Control of a Gyroscopically Actuated AUV" *Proc. of OCEANS MTS/IEEE*, 2008, pp. 1-9

- 4) SeaKeeper, Inc., www.seakeeper.com

- 5) Ship Dynamics Pty Ltd., www.shipdynamics.com

- 6) Misaki Engineering, www.antirollinggyro.com

- 7) Sea Gyro, www.seagyro.com

- 8) Veem Ltd., www.veemgyro.com

- 9) S. H. Lee, S. W. Rhee, S. H. Oh, K. L. Yong, K. W. Kim, and H. H. Seo "Development of Miniature CMG for Satellite Attitude Control (I): Design & Manufacture" *J. of Korea Society for Aeronautical & Space Sciences Fall Conference*, 2005, pp. 878-881

- 10) H. S. Oh and et al., "Preliminary Study of CMG (Control Moment Gyro) Development Technology for Satellite Attitude Control" NRF Core Space Technology Development Report, 2005

- 11) H. H. Seo, S. W. Rhee, H. S. Oh, D. I. Cheon, H. C. Bang, and J. H. Park, "Development Status of Control Moment Gyro for Middle-Sized Satellite" *J. of Korea Society for Aeronautical & Space Sciences Spring Conference*, 2008, pp. 1004-1007