

제어모멘트자이로 김블의 토크 외란 모델링 검증 및  
피드포워드 제어를 이용한 토크 리플 저감이준용<sup>†</sup> · 오화석

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Verification of Torque Disturbance Modeling of CMG Gimbal  
and Its Torque Ripple Reduction using Feed-Forward ControlJunyong Lee<sup>†</sup> and Hwasuk Oh

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

## Abstract

In this study, the generating of torque regarding the Control Moment Gyro (CMG) is proportional to the angular velocity of gimbal. This is the case because gimbal affects the attitude control of the satellite directly, and it is necessary to reduce the incidence of torque ripple of gimbal. In this paper, the cause of the torque ripple of gimbal is reviewed and mathematically modeled by assuming the friction imbalance of bearing, the magnetic field and the phase current imbalance of the motor. We are able to confidently estimate the modeling parameters of gimbal disturbance using a constant speed test, and then analyze the influence of applying feedforward control to our modeling. Additionally, the simulation results show that the torque ripple and angular velocity fluctuations are reduced when apply this modeling to the identified study parameters. Finally, we present the disturbance reduction technique using our disturbance modeling.

## 초 록

CMG의 발생 토크는 김블의 각속도에 비례하고 위성의 자세제어에 직접적인 영향을 미치기 때문에 김블의 토크 리플 저감이 필요하다. 본 논문에서는 토크 리플의 발생 원인을 베어링에 의한 마찰 불균형, 모터의 자기장과 상전류 불균형으로 가정하여 이를 수학적으로 모델링한다. 김블의 정속 구동 데이터를 통해 모델링의 파라미터를 추정하고 이를 이용하여 피드포워드 제어로 적용할 경우 영향성을 분석한다. 시뮬레이션을 통해 토크 리플과 각속도 변동이 저감되는 것을 확인하여 외란 모델링을 이용한 외란 저감 기법을 제시한다.

**Key Words** : CMG(제어모멘트자이로), Gimbal(김블), Disturbance Modeling(외란 모델링), Feed-Forward Control(피드포워드 제어), Torque Ripple(토크 리플)

## 1. 서 론

제어모멘트자이로(CMG)는 고속 회전체의 각운동량을 김블이라는 구조물로 회전시켜 자이로스코픽 토크를 발생시킨다. CMG는 일반적인 위성용 구동기로 사용되어 왔던 반작용 휠에 비해 고토크 발생이 가능하

기 때문에 고기동을 위한 구동기로서 주목받고 있다.[1] 김블은 특이점 및 구조적 안정성 문제로 보통 최대 3rad/s의 저속에서 운용되며 CMG의 토크 크기는 김블의 각속도에 비례한다. 따라서 김블의 저속 정밀 제어에 대한 연구가 필요하며 저속에서 정밀제어하기 위해서는 토크 리플 저감이 필수적이다. CMG의 김블 시스템에는 Backlash가 없는 직접 구동 형태로 BLDC 타입을 적용한다.[2] 속도 및 위치 정확도의 향상을 위해 코어리스 모터가 유리하지만 이 또한 모터의 구조적 특성에 의해 토크 리플은 발생한다.[3] 따

Received: Dec. 15, 2017 Revised: Dec. 31, 2017 Accepted: Jan. 03, 2018

<sup>†</sup> Corresponding Author

Tel: +82-10-2732-2032, E-mail: @profound@kau.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

라서 저속 모터의 토크 리플 저감에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다.

국내에서는 일반 BLDC 모터에 대해 외란 관측기나 Back-emf의 관측을 통한 피드백 제어에 대한 연구도 수행되었다.[4, 5] 국외의 경우 일반적인 BLDC 모터의 전류 제어를 통한 토크제어[6], 모터 드라이버의 전기적 모델링 적용 제어 시뮬레이션[7, 8], 자석 공극에 의한 토크 리플의 분석[9], 전자기적 외란 모델링[10] 등에 대한 연구가 있다.

피드백 제어의 시간 지연을 최소화하고 김블의 반응성을 높이기 위해 외란 모델링을 통한 피드포워드 제어를 고려해야 한다. 본 논문에서는 김블에서 발생하는 외란을 베어링 마찰과 자기장 및 상전류의 불균일에 대한 모델링으로 추정하고, 이를 피드포워드 제어로 적용할 경우 외란 저감을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 제어 모멘트 자이로 구조 및 원리

CMG는 회전하는 휠이 가지는 각운동량이 크기나 방향이 변화할 때 이를 보상하기 위한 방향으로 토크가 발생하는 자이로스코픽 효과를 적용한 구동기이다. Fig. 1처럼 MWA(Momentum Wheel Assembly)의 내부에 휠이 고속으로 회전하고 이를 GMA(Gimbal Module Assembly)가 저속으로 회전시키는 구조로 되어있다.

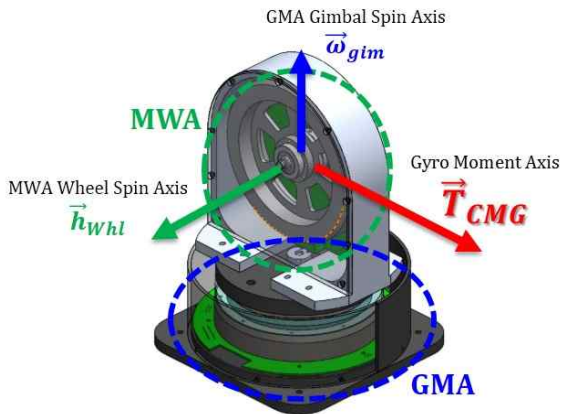


Fig. 1 Structure and Torque Generation of CMG

CMG에서 발생하는 토크는 김블의 각속도와 MWA의 각운동량을 외적인 벡터와 MWA의 각운동량 변화율 벡터의 합으로 나타나며 식은 다음과 같다.

$$\dot{a}_{CMG} + w_{gim} \times a_{CMG} = d_{CMG} \quad (1)$$

$a_{CMG}$  는 MWA의 각운동량 벡터이고  $w_{gim}$  은 GMA의 각속도 벡터이므로 CMG에 의해 발생하는 토크는 MWA의 각운동량과 GMA의 각속도의 크기에 비례한다.

### 2.2 김블 외란 모델링

김블의 외란은 베어링 마찰과 모터 발생 토크의 불균일에 의해 발생한다. 베어링 마찰의 불균일성은 베어링이 회전할 때 자체적으로도 발생하지만 Fig. 1처럼 중심축과 회전축이 일치하지 않는 축 정렬 불량에 의한 영향이 더 크다.[11, 12] 따라서 외란은 불규칙한 주기가 아니라 회전 당 1주기로 발생하게 된다. 모터에서 발생하는 토크는 주어진 전기각에서 자기장의 변화율과 상전류에 비례한다.[13] 자기장은 일반적으로 Fig. 3과 같이 정현파의 절대치나 사다리꼴 형상을 가지게 되며 상전류는 Fig. 4와 같이 전류의 방향 변화 시점에서 불균일이 발생한다. 따라서 각도에 따라 모터에서 발생하는 토크가 불균일하게 되어 입력이 일정하여도 각속도의 변동이 생긴다.[14] 김블에 토크 외란을 유발하는 요소로는 MWA와의 조합에 따른 구조모드와 모멘텀 휠의 외란에 의한 공진 등이 있다.[15]

김블에서 발생하는 외란을 각 원인별로 각도에 따라 주기를 분석하여 이를 푸리에 급수 형태로 모델링하였다. 베어링 회전 시 축 정렬 불량에 의해 180도 회전에 따라 베어링의 내륜과 외륜의 회전 축 최대 오차  $\beta_{BM}$ 이 발생한다. 따라서 베어링 외륜이 베어링에 가하는 압력에 변화가 생기고 이는 마찰력에 영향을 주므로 1회전 당 1주기의 마찰 불균일이 발생한다. 베어링 마찰의 불균일에 의한 마찰 토크를  $T_{BM}$ 이라고 할 때  $K_{BM}$ 은 베어링 마찰 불균일 크기에 해당하는 상수,  $\alpha_{BM}$ 는 불균일 위상각으로 식 (2)과 같이 표현한다.

$$T_{BM} = K_{BM} \sin(\theta + \alpha_{BM}) \quad (2)$$

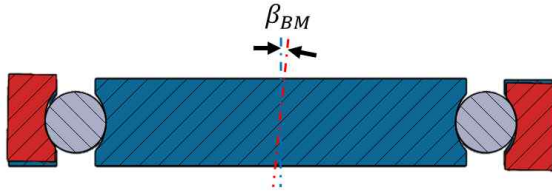


Fig. 2 Misalignment of Bearing

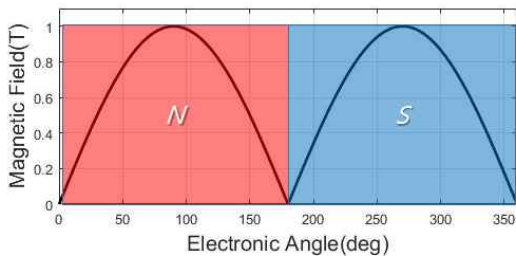


Fig. 3 Fluctuation of Magnetic Field

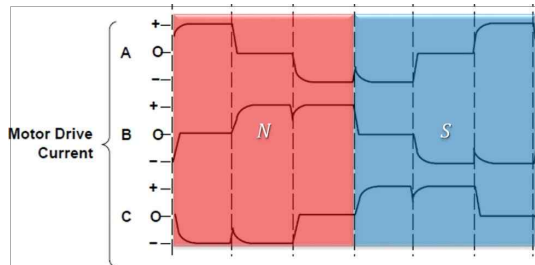


Fig. 4 Fluctuation of Input Current

자기장  $B$ 는 모터에 따라 고유의 형상을 가지며 토크 발생 원리에 의해 N, S극이 나란히 배치된다. 이상적으로는 극이 변화하는 구간에서 사각파형처럼 비선형적으로 자기장 크기가 일정하다고 생각할 수 있다. 하지만 실제로는 정현파나 사다리꼴의 형상을 가지기 때문에 극 변화 구간에서 자기장의 불균일이 존재하게 된다. 1회전에 대해 극의 수는 모터에 따라 다르며 설계에 따라 다양하다.  $K_M$ 은 자기장 불균일 상수,  $\tau_M$ 은 푸리에 계수,  $p$ 는 총 극수,  $\alpha_M$ 는 자기장 불균일 위상각으로 식 (3)와 같이 표현할 수 있다.

모터 드라이버에 따라 극과 상의 수를 다양하게 조합할 수 있고 이에 따라 입력 전류의 주기도 달라진

다. 본 논문에서는 일반적인 2극 3상에 대해 다루고 있으며 이 경우 1극을 지나가는 동안 3회의 전류 변동이 발생한다.  $K_C$ 는 전류 불균일 상수,  $\tau_C$ 는 푸리에 계수,  $n_p$ 는 상의 수,  $\alpha_C$ 는 전류 불균일 위상각으로 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$B = [K_M + \sum_{k=1}^n \tau_{Mk} \sin(pk\theta + \alpha_{Mk})] \quad (3)$$

$$I = [K_C + \sum_{k=1}^n \tau_{Ck} \sin(pn_p k\theta + \alpha_{Ck})] \quad (4)$$

모터에서 발생하는 토크는 자기장 내 중심에서  $r$ 만큼 떨어진 도선  $l$ 에 전류가 흐를 때 받는 로렌츠 힘으로 식(5)처럼 표현할 수 있다.[16, 17] 이를 이용하여 각각의 외란에 대한 모델링을 식 (6)처럼 통합하면 김블의 외란 토크에 대한 모델링이 된다.

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{r} \times (\vec{l} \times \vec{B})I \quad (5)$$

$$T_D = K_{BM} \sin(\theta + \alpha_{BM}) + lr [K_M + \sum_{k=1}^n \tau_{Mk} \sin(pk\theta + \alpha_{Mk})] \cdot [K_C + \sum_{k=1}^n \tau_{Ck} \sin(pn_p k\theta + \alpha_{Ck})] \quad (6)$$

### 2.3 외란 모델 파라미터 추정 및 모델링 검증

김블 모델에 따라 외란 특성이 다르기 때문에 모델링의 계수가 달라진다. 본 연구실에서 설계, 제작한 김블의 외란 모델링을 추정하기 위해 정속으로 회전시켜 장시간 동안 데이터를 저장하였다. 김블의 각속도와 발생 토크를 시간에 따라 측정한 결과 Fig. 5, 6과 같다. 김블 각도와 각속도를 측정하는 샘플링 속도는 10 Hz이다. 시간에 대한 샘플링이 10 Hz이기 때문에 FFT를 통한 주파수 분석에 한계가 있다. 따라서 시간에 대한 각도, 각속도, 토크의 데이터들에 대해 긴 시간동안 저장하고 이를 각도에 대해 리샘플링한다. 리샘플링 속도는 외란 주기 분석이 가능하도록 정한다. 김

블의 1회전 시 주기 CPR(Cycle per Revolution) 대  
 해 FFT를 통해 외란의 주기에 대한 분석이 가능하다.  
 시간에 대해 축적된 데이터를 1/4096 rev 간격으로  
 각도에 따라 리샘플링하여 Fig. 7, 8과 같은 결과를  
 도출하였다.

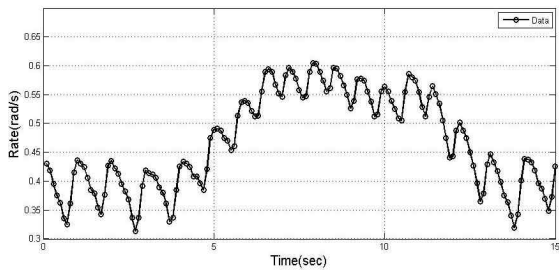


Fig. 5 Angular Speed with Time for Gimbal 1 rev

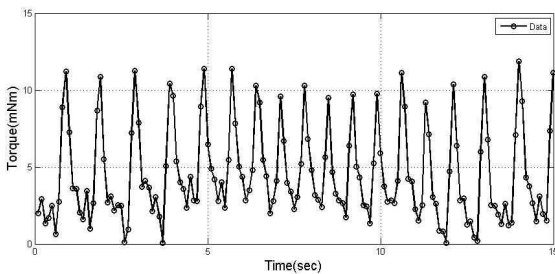


Fig. 6 Generated Torque with Time for Gimbal 1 rev

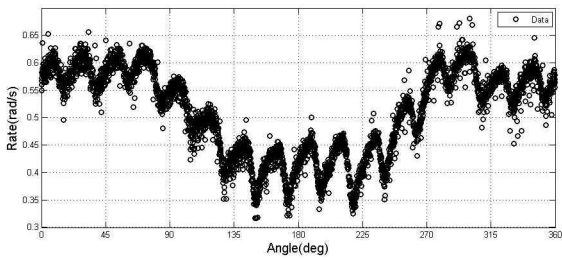


Fig. 7 Angular Speed Re-sampling with Gimbal Angle

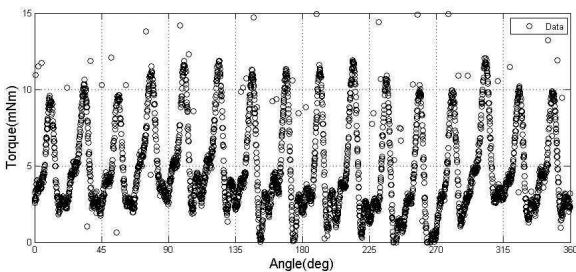


Fig. 8 Generated Torque Re-sampling with Gimbal Angle

이를 통해 각도에 따라 외란이 주기적으로 발생하는  
 것을 도식적으로 확인하였다. 이를 수치적으로 확인하  
 기 위해 CPR의 단위로 FFT 하는 방법을 사용하여  
 Fig. 9와 같이 외란의 주기와 크기를 도출하였다.  
 16×n주기의 푸리에 급수형태의 외란임을 확인할 수  
 있고 외란 모델링에 의하면 16주기의 외란은 자기장  
 불균일에 의한 영향임을 예측 할 수 있다. 이를 확인  
 하기 위해 Fig. 10과 같이 Magnetometer를 사용하여  
 코일이 위치하는 공극에서의 자기장을 김블의 각도에  
 따라 측정하였다. Fig. 11은 각도별 자기장의 크기이  
 고 이를 CPR에 대하여 FFT한 결과가 Fig. 12이다.

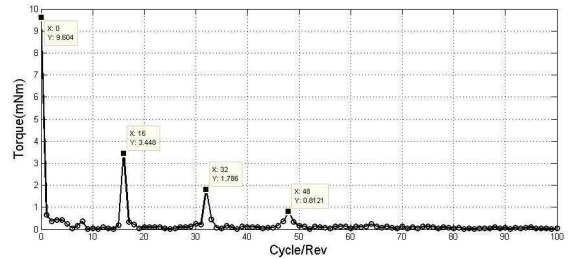


Fig. 9 Generated Torque FFT of Gimbal CPR



Fig. 10 Magnetic Field Measurement of Gimbal

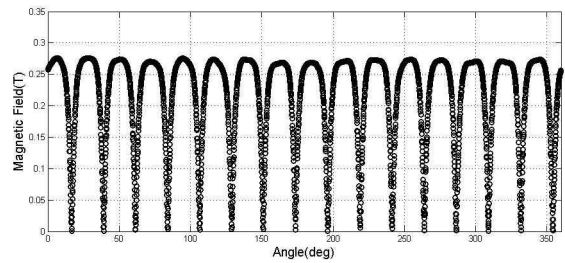


Fig. 11 Magnetic Field Magnitude with Gimbal Angle

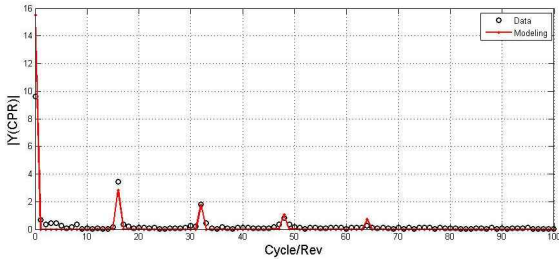


Fig. 12 Comparing CPR of Torque and Magnetic Field

Fig. 12에서 외란 토크와 자기장의 CPR FFT 결과를 비교해 보았을 때 자기장의 불균일이 외란에 주요한 영향을 주는 원인임을 예상할 수 있다. 또한 FFT 결과로 자기장의 불균형 파라미터를 추정하여 식 (7)과 같이 모델링하였다. 또한 각도에 따른 발생 토크 데이터를 통해 베어링 마찰과 전류의 불균일 파라미터를 추정하여 식 (8), (9)과 같이 모델링 하였다.

Fig. 13, 14, 15는 각각의 불균일 모델링 추정 결과를 발생 토크와 비교한 그래프이고 각각의 외란 원인 별 주기로 도출되는 것을 확인할 수 있다.

$$B(\theta) = 0.22 + 0.08\sin(16\theta + 0.1) + 0.05\sin(32\theta + 1.78) - 0.03\sin(48\theta + 0.31) - 0.02\sin(64\theta + 2) \quad (7)$$

$$T_{BM}(\theta) = 0.67\sin(\theta + 0.39) \quad (8)$$

$$I(\theta) = 0.65 + 0.4\sin(16\theta - 0.29) - 0.12\sin(48\theta + 0.4) + 0.04\sin(64\theta - 0.22) \quad (9)$$

최종적으로는 모든 불균일 모델링을 외란 토크 모델링으로 통합하여 식 (10)와 같이 도출하였고, 측정 토크와 비교하면 Fig. 16와 같다. 이에 대한 오차 그래프는 Fig. 17으로 나타내었고 표준편차는 1.6mNm으로 발생 토크의 진동 폭의 약 15%로 토크 계산 시의 미분 오차를 고려하였을 경우 낮은 수준임을 확인하여 외란 모델링을 검증 확인하였다. Table 1에 추정된 외란 모델링의 파라미터를 정리하였다.

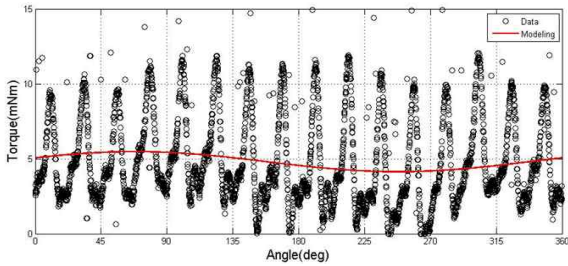


Fig. 13 Estimation of Bearing Friction Fluctuation Modeling

$$T_D = 0.67\sin(\theta + 0.39) + [0.22 + 0.08\sin(16\theta + 0.1) + 0.05\sin(32\theta + 1.78) - 0.03\sin(48\theta + 0.31) - 0.02\sin(64\theta + 2)] \cdot 1.35[0.48 + 0.3\sin(16\theta - 0.29) - 0.09\sin(48\theta + 0.4) + 0.03\sin(64\theta - 0.22)](mNm) \quad (10)$$

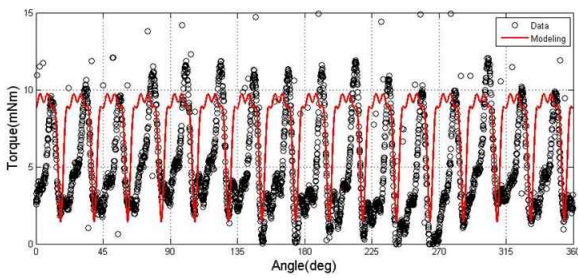


Fig. 14 Estimation of Magnetic Field Fluctuation Modeling

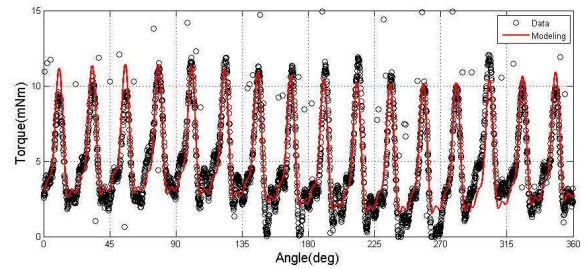


Fig. 16 Estimation of Disturbance Modeling

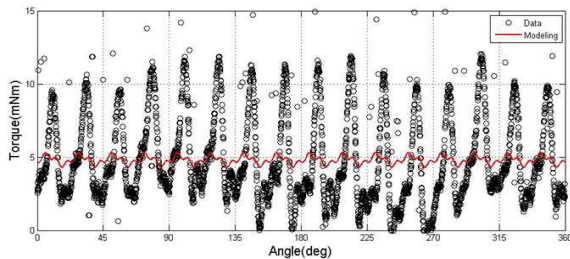


Fig. 15 Estimation of Current Fluctuation Modeling

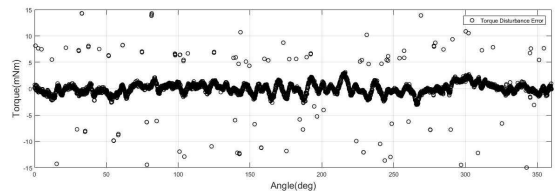


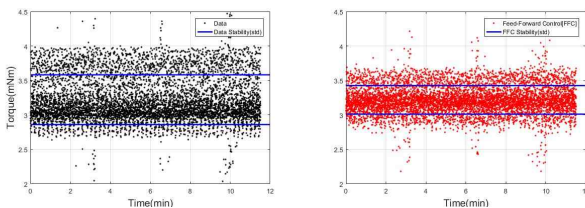
Fig. 17 Torque Disturbance Error of Gimbal

**Table 1** Estimation Results of Disturbance Modeling Parameter

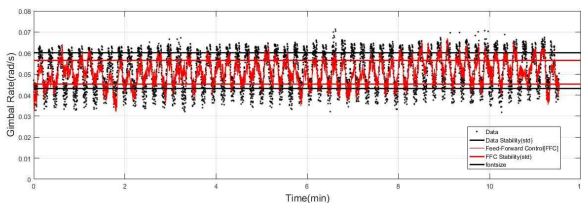
Parameter	Estimation Result			
$K_{BM}$	0.67			
$\alpha_{BM}$	0.39			
$K_M$	0.22			
$\tau_M \sim \tau_{MA}$	0.08	0.05	-0.03	-0.02
$\alpha_M \sim \alpha_{MA}$	0.1	1.78	0.31	2
$K_C$	0.48			
$\tau_{C1} \sim \tau_{C4}$	0.3	-0.09	0.03	
$\alpha_{C1} \sim \alpha_{C4}$	-0.29	0.4	-0.22	
$l$	0.02			
$r$	0.0675			

**2.4 외란 모델링의 피드포워드 제어 시뮬레이션**

위 결과를 통해 김블의 각도에 대한 토크 외란의 모델링을 추정하였다. 김블에 발생하는 외란의 저감 가능성을 확인하기 위해 도출한 모델링을 김블 제어에 적용하여 이에 대한 영향성을 분석한다. 김블 각도에 따른 토크 외란이 예측되므로 이를 실제 데이터에 피드 포워드 제어를 적용하여 시뮬레이션한다. 도출한 토크 외란 모델링을 피드포워드로 원래의 데이터에 적용하면 Fig. 18, 19에서 각각 시간에 따라 발생 토크와 각속도의 표준편차가 감소한 것을 확인할 수 있다.



**Fig. 18** Generated Torque with Feed-Forward Control



**Fig. 19** Gimbal Speed with Feed-Forward Control

**Table 2** Torque & Speed Fluctuation with Feed-Forward Control

	Torque (mNm)[std]	Gimbal Rate (rad/s)[std]
Data	3.22 [0.36]	0.052 [8.5e-3]
Feed-Forward Control	3.22 [0.21]	0.051 [5.6e-3]
Fluctuation Reduction(%)	42%	34%

각각의 결과를 Table 2에 정리하였고, 발생 토크와 각속도의 변동이 표준편차를 기준으로 각각 42%, 34% 저감될 것으로 예상된다.

**3. 결 론**

위성의 자세제어 구동기로 적용되고 있는 제어 모멘트 자이로는 김블 각속도에 비례하는 토크를 발생시킨다. 따라서 김블의 제어외란은 위성의 정밀한 자세제어를 방해하므로 이를 해결하기 위해서는 외란의 근본적인 원인 파악과 모델링 연구가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 김블의 제어외란 원인을 베어링의 마찰과 모터 자기장 및 상전류 형상의 불균형으로 인해 발생 토크에 변동이 유발된다고 가정하였다. 베어링 축 정렬 오차로 인한 1회전 당 1주기 정현파로 마찰 불균형을 모델링하였고 자기장은 극 수 주기, 전류는 상 변화 주기의 푸리에 급수 형태로 각각 모델링하였다. 각각의 모델링을 외란 토크에 대한 통합 모델링으로 구성하고 이를 실제 데이터를 통해 검증하였다. 일정한 입력으로 김블을 구동하고 긴 시간 동안 저장된 데이터를 김블의 각도에 따라 리샘플링하였다. 이 데이터를 CPR영역으로 FFT하여 외란의 주기를 관측하고 모델링과 비교하였으며 추정된 파라미터를 통합 모델링으로 적용하여 추정한 모터 발생 토크와 비교한 결과 85%의 유사성을 보여 제어외란 모델링이 적합함을 보였다. 나아가 통합 모델링을 시간에 따라 피드포워드 제어로 적용할 경우 토크 리플과 각속도의 변동이 각각 42%, 34% 저감되는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 김블 외란 모델링의 적합성과 모델

링을 통한 토크 리플의 저감 가능성을 보였다. 향후 외란 모델링을 실제 제어기에 적용하여 외란 저감에 대한 검증이 필요하다. 이를 통해 김블 각속도의 변동 저감에 의한 위성의 자세 안정성 영향 분석 연구에도 활용될 수 있다.

## 후 기

본 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행된 과제번호 UD150046CD 순수기초연구과제 “우주용 저속 직접 구동모터 및 구동기 적용 기반기술연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] S. H. Lee. “Technology of Control Moment Gyroscope and its Industrial Trend,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 40(1), 86-92. 2012.
- [2] J. Fang, H. Li, and B. Han, “Torque Ripple Reduction in BLDC Torque Motor With Nonideal Back EMF,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.27, 4630-4637, 2012.
- [3] G. H. Kang, J. P. Hong, and G. T. Kim, “A Novel Design of an Air-Core Type Permanent Magnet Linear Brushless Motor by Space Harmonics Field Analysis,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.37, 3732-3736, 2001.
- [4] S. H. Jang and N. H. Jo, “A Study on the Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motors using Disturbance-Observer Controller,” *The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 64.8 : 1217-1223, 2015.
- [5] K. S. Lee and I. Choy, “Torque ripple reduction in Brushless DC Motor(BLDCM) using back-EMF observer,” *Proc. of the KIEE summer annual conference 41th*: 952-953, 2010.
- [6] B. J. Paul, “A Systems Approach to the Torque Control of a Permanent Magnet Brushless Motor,” Master’s Thesis, M.I.T., Dept. of Mechanical Engineering, 1985.
- [7] Y. Mandel and G. Weiss, “Adaptive internal model based suppression of torque ripple in brushless DC motor derives,” *Systems Science and Control Engineering*, vol.3, pp. 162-176, 2015.
- [8] N. Lakshmipriya, S. Manivel, and N. Sadeesh. “Modeling of SEPIC Fed PMBLDC motor for torque ripple minimization,” *International Journal of Research and Engineering*: 10, 2015.
- [9] J. S. Hsu, B. P. Scoggins, M. B. Scudiere, L. D. Marlino, D. J. Adams, and P. Pillay, “Nature and measurements of torque ripple of permanent-magnet adjustable-speed motors,” No. CONF-9503180-1. Oak Ridge National Lab., TN (United States), 1995.
- [10] S. John and C. M. Ong. “Modeling of electromechanical and electromagnetic disturbances in DC motors,” *Electromagnetic Compatibility, IEEE National Symposium on*. IEEE, 1989.
- [11] J. Kim, J. Yoon, J. Lee and H-S. Oh. “Performance Analysis of Reaction Wheel according to Bearing Preload and Oil Quantity,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 10, no. 1, pp.35-42, Mar 2016.
- [12] J. Lee, “Gimbal Control Disturbance Modeling of Control Moment Gyro,” Master’s thesis, Korea Aerospace University, 2016.
- [13] D. Hanselman, “Brushless Motors:Magnetic Design, Performance, and Control,” *E-Man Press LLC*, 2012.
- [14] B. Bialke, “Microvibration Disturbance Sources in Reaction Wheels and Momentum Wheels,” *ESA SP Spacecraft Structures Materials and Mechanical Testing*, Vol. 386, No. 2, pp.765-770, 1996.
- [15] J. Kim, H. Lee, J. Yoo, and H-S. Oh. “Experimental Study on Effects of Speed Error Disturbance on Reaction Wheel Control,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 10, no. 1, pp.95-102, Mar 2016.
- [16] I. Boldea and S. A. Nasar, *Linear Motion Electromagnetic Systems*, 1st Ed, John Wiley and Sons, 1985.

- [17] T. Mizuno and H. Yamada, "Magnetic Circuit Analysis of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 28, pp.3027-3029, 1992.
- [18] J. Lee, J. Lee and H-S. Oh, "Control Disturbance Reduction using Gimbal Modeling of CMG," *Proc. of the Fall conference of SASE*, 2017.