

반작용 휠 외란의 시야선 안정성 영향

이상욱* · 김동훈* · 전동익* · 오화석** · 김용현† · 김규선†

RWA Disturbance Effects on the LOS stability

Sang-Wook Lee* · Dong-Hoon Kim* · Dong-Ik Cheon* · Hwa-Suk Oh** · Eung-Hyun Kim† · Gyu-Sun Kim†

ABSTRACT

The line of sight(LOS) is affected by the vibration of spacecraft. It is necessary to predict the effect of disturbance on LOS stability. Reaction wheel assembly is anticipated to be the largest disturbance source on spacecraft. The disturbance which is occurred mainly due to the mass imbalance is analyzed with harmonic numbers. The accuracy and stability are verified by probability density function with dynamic equation of the satellite motion.

Key Words: Reaction Wheel(반작용 휠), Imbalance(불균형), Harmonic(조화), Stability(안정성)
Line of Sight(시야선)

1. 서 론

산업 혹은 군사적 필요에 의해 고해상도 위성 영상에 대한 수요가 증대되고 있으며 이에 따라 우주개발 선진국에서는 점점 더 높은 해상도의 영상을 제공할 수 있는 위성 기술 개발에 힘쓰고 있다. 국내에서도 다목적 위성 1, 2호를 통해 중형 위성 본체 개발 기술 및 위성 영상촬영 탑재체 기술과 영상 활용에 대한 기초연구가 진행되고 있으며, 이를 바탕으로 고해상도 위성 기술 선진국에 진입하려 하고 있다.

고해상도 영상획득을 위해 필수적으로 동반되어야 하는 기술이 시야선의 안정화이다. 자세 제어 시스템 및 위성체상의 다양한 유형의 진동에 의해 영상의 질은 광학 탑재체의 성능과 무관하

게 저하될 수 있다. 단순한 영상이 아닌 고해상의 영상획득을 위해서는 광학 탑재체의 다양한 주변 저해 요인들을 분석하고, 이를 수학적으로 모델링하여 분석하는 기법에 대한 연구가 필요하다. 따라서 외란측정에 대한 기술뿐만 아니라 이를 분석할 수 있는 소프트웨어의 개발이 필요하다.

본 논문은 위성에 가장 움직임이 큰 반작용 휠의 외란 중 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진[1] 반작용 휠의 질량 불균형이 시야선 안정성에 미치는 영향을 하나의 휠에서 진동 조화수와 휠의 배치 형상을 고려하여 분석하였다.

2. 반작용 휠의 외란

모멘텀형 구동기의 외란은 주로 모멘텀 저장을 위한 휠의 회전운동으로부터 발생되며, 외란의 크기는 휠의 회전수에 제곱에 비례하는 특성

* 학생회원, 한국항공대학교 제어 및 동역학 전공
** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
† 한국항공우주연구원 다목적3호체계팀
연락처, E-mail: ls0722@kau.ac.kr

을 보인다. 관성 휠이 회전하는 모멘텀형 구동기는 휠의 질량 불균형, 베어링의 마모, 모터의 회전과동 등에 의한 진동 외란이 발생하는데, 이 중에서 가장 큰 원인으로서는 휠의 정적 불균형과 동적 불균형을 들 수 있으며, 반작용 휠의 질량불균형에 의한 외란 힘과 토크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$F_x(t) = F_{x_i} \Omega^2 \sin(h_i \Omega t + \alpha_x) \quad (1)$$

$$F_y(t) = F_{y_i} \Omega^2 \cos(h_i \Omega t + \alpha_y)$$

$$T_x(t) = T_{x_i} \Omega^2 \cos(h_i \Omega t + \alpha_x) \quad (2)$$

$$T_y(t) = T_{y_i} \Omega^2 \sin(h_i \Omega t + \alpha_y)$$

여기서 $F(t)$ 와 $T(t)$ 는 외란 힘과 토크, F_i 와 T_i 는 각각 i 번째 조화진동의 힘과 토크 외란 파라미터, Ω 는 휠 속도, h_i 는 i 번째 조화수이다.[3] 외란은 반경 방향 힘과 토크만 발생한다고 가정하였고, 축 방향 외란은 고려하지 않았다. 조화함수 계수 h_i 가 1일 경우, F_i 와 T_i 는 각각 정적, 동적 불균형과 같다.[1]

3. 휠 배치에 따른 외란 영향

반작용 휠은 위성의 3축 구동을 위해서는 최소한 3개의 휠을 필요로 하게 되나 휠의 고장을 대비하여 4개의 휠을 배치하여 사용한다. 배치

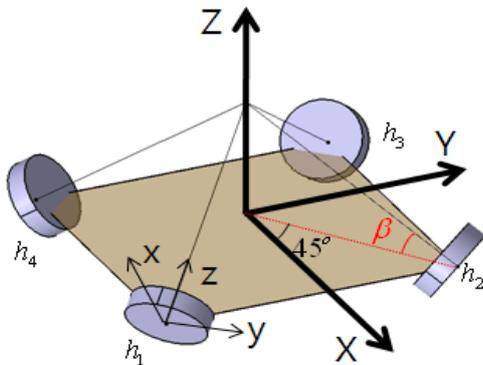


Fig. 1 Installation configuration

형상은 위성의 구조와 휠의 성능에 따라 각기 다르게 장착된다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 휠 배치 형상이 피라미드 구조로 된 위성의 질량 중심에 휠 배치 평면 중심이 위치되어 있다고 가정을 하여 분석하였다.

반작용 휠에서 발생하는 외란이 위성의 자세에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같은 간단한 강체 위성 동역학 방정식과 운동학 방정식을 사용하였다.

$$I\dot{\omega} + \omega^\times I\omega + \omega^\times h = G_0 \quad (3)$$

$$\dot{\alpha} = S^{-1}(\alpha)\omega \quad (4)$$

여기서 I 는 위성의 관성모멘트, G_0 는 휠의 외란 토크, α 는 3-2-1 오일러 각, h 는 휠의 각 운동량이다.[4]

4. 시뮬레이션 분석

제 i 번째 조화의 크기 계수는 반작용 휠의 종류에 따라 그 값이 다르기 때문에 실험적으로 구해야한다. 이에 문헌[1]에서 그 값을 참고하여 시뮬레이션 수행 시 이용하였다.

반작용 휠 하나에서 발생하는 정적 불균형에 의한 외란 힘과 동적 불균형에 의한 외란 토크를 휠의 배치 형상을 고려한 후, 조화함수 계수에 따라 위성에 전달되는 토크를 Fig. 2와 3에 각각 나타냈다. 정적 불균형에 의해 발생하는 외란 힘이

Table 1 Empirical Model Parameters [1]

Harmonic Number (h_i)	Radial Force Amplitude Coefficient (c_i) ($N/rpm^2 \times 10^{-7}$)	Radial Torque Amplitude Coefficient (c_i) ($Nm/rpm^2 \times 10^{-7}$)
1	0.4155	0.2205
2	0.0832	0.0609
3	0.0543	0.0242
4	0.0621	0.0243
5(4.42)	0.1097	0.0485

()값은 실험에서 나온 조화수이고, 시뮬레이션 구현 시 5로 사용하였음.

위성에 미치는 영향은 X, Y 축보다 Z 축에 더 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이는 외란 힘을 위성 좌표계로 변환할 때 반작용 휠 좌표계에서 x축의 힘은 위성 좌표계에서 X, Y 축으로 발생하는 토크로 나뉘는데 반해 y 축으로 발생하는 힘은 모두 Z 축으로 발생하는 토크로 변환되기 때문이다.

외란 토크는 외란 힘과는 다르게 위성 좌표계에서 X, Y 축에서의 값이 Z 축에서의 값보다 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 휠 좌표계에서 위성 좌표계로 변환되는 과정에서 반작용 휠의 좌표계에서 y 축으로 발생하는 토크는 모두 위성 좌표계 X, Y 축에 영향을 미치고, x 축으로 발생하는 토크는 Z 축 뿐만 아니라 X, Y 축에 모두 영향을 주기 때문이다.

Fig. 4는 Fig. 2,3에서 나타난 외란 힘과 토크가 위성에 미치는 총 영향을 조화함수 계수에 따라서 나타난 그래프로 X, Y 축보다 Z 축에 미치는 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2, 3에서 확인할 수 있듯이 Z 축 방향으로 작용하는 토크는 위상 차이 없이 같은 주기로 토크가 발생하여 크기가 합해지는데 반해, X 축과 Y 축에서 발생하는 토크는 위상 차이가 존재하여 크기가 줄어들기 때문이다.

다목적 실용위성 2호의 관성모멘트 값을 Eqs. (3), (4)에 대입하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. Fig. 5에서 보면 Z 축에서 발생하는 토크의 영향으로 그 값이 X축과 Y축에서의 값보다 크게 나타난 것을 알 수 있고, Fig. 6은 조화함수 계수에 따른 각속도와 각도를 각각 더한 그래프로 크기가 10^{-9} 으로 매우 작은 범위에서 흔들리는 것을 확인할 수 있다.

반작용 휠 4개의 배치를 고려하고, 질량 불균형의 위상차를 45도로 네 개의 휠에서 고려했을 때 얻을 수 있는 정확성과 안정성을 Fig. 7에서 확률밀도로 나타내었다. 시야선의 정확성을 표준편차로 나타냈을 때, ϕ , θ 가 각각 $0.5227 \times 10^{-8}(1\sigma)$, $0.5011 \times 10^{-8}(1\sigma)$ 이고, 안정성은 ω_x 와 ω_y 에서 각각 $0.1657 \times 10^{-5}(1\sigma)$, $0.1588 \times 10^{-5}(1\sigma)$ 를 얻었다.

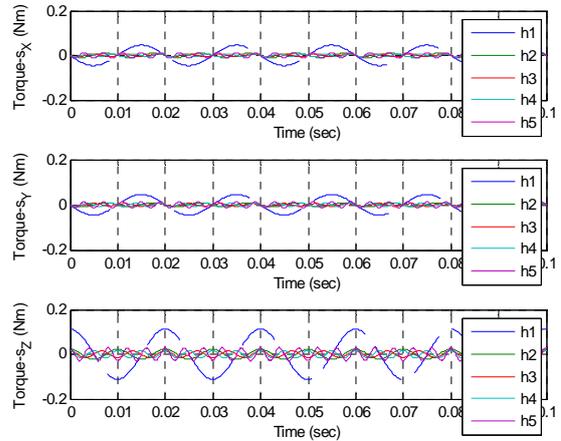


Fig. 2 Torque by static imbalance. in body frame

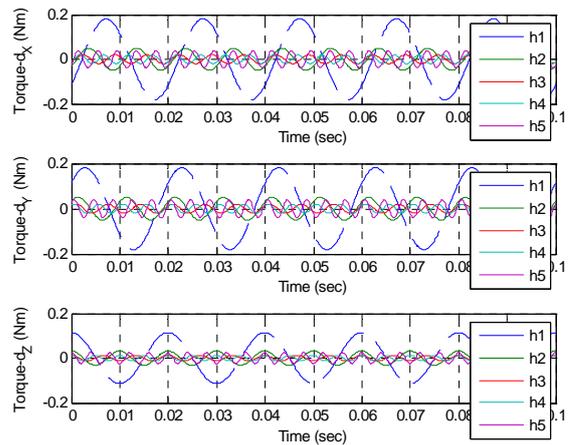


Fig. 3 Torque by dynamic imbalance. in body frame

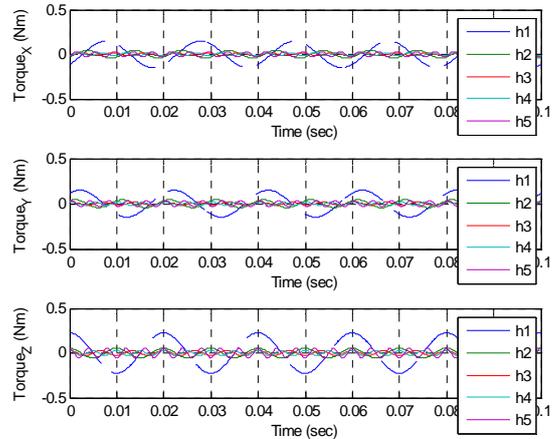


Fig. 4 Torque by static and dynamic imbalance in body frame

3. 결 론

반작용 휠 1개의 질량 불균형에 의한 외란이 위성에 미치는 영향을 진동 조화함수 계수에 따라 분석한 결과 동적 불균형의 영향이 위성의 X, Y축으로 크게 작용하고, 위성의 자세에는 Z축 토크의 영향이 크게 미치는 것을 확인하였다.

4개의 반작용 휠의 배치와 질량 불균형의 위상 차이를 45도 간격으로 시뮬레이션을 하여 얻은 각속도와 오일러 각을 확률분포로 나타내어 안정성과 정확성을 분석하였고, 질량 불균형이 시야선의 안정성과 정확성에 미치는 영향이 매우 작은 것을 확인하였다.

본 연구에서는 반작용 휠에 분포되어있는 질량 불균형에 의한 영향이 가장 큰 경우를 가정하여 분석하였다.

후 기

본 연구는 다목적실용위성 3A호 개발사업에 의해 진행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Masterson, R. A. and Miller, D. W., "Development and Validation of Empirical and Analytical Reaction Wheel Disturbance Models", *SERC #4-99*, SSL, MIT, Cambridge, June, 1999

[2] 전동익, 이현호, 오화석, "고속회전구동기의 힘 및 토크 외란 3차원 측정과 파라미터 추정", *대한기계학회논문집 A권*, 제 31권, 제 4호, pp. 406~416, 2007.

[3] Hwa-Suk Oh, Dong-Ik Cheon, "Precision Measurements of Reaction Wheel Disturbances with Frequency Compensation Process," *JMST*, Vol. 19, No. 1, pp.136-143, 2005.

[4] Sidi, M. J., *Spacecraft Dynamics and Control*, Cambridge University Press, 1997

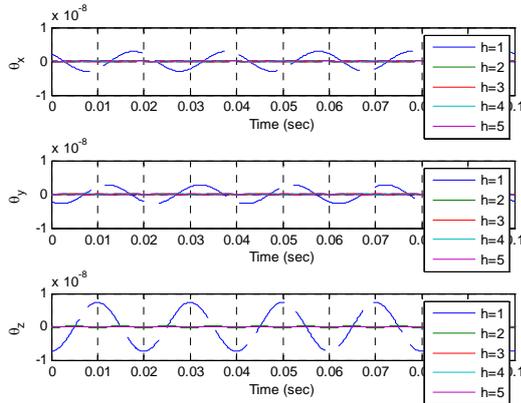


Fig. 5 Euler angle variation in harmonic number

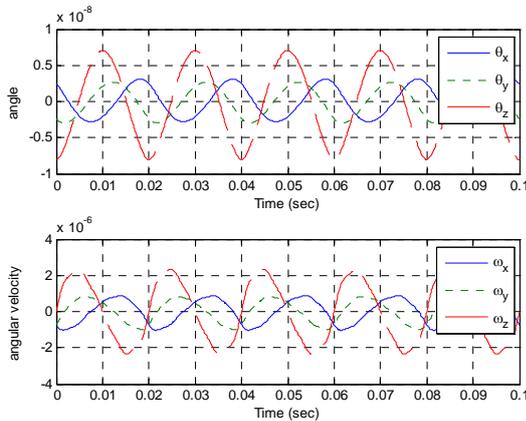


Fig. 6 Total Euler angle and angular rate variation

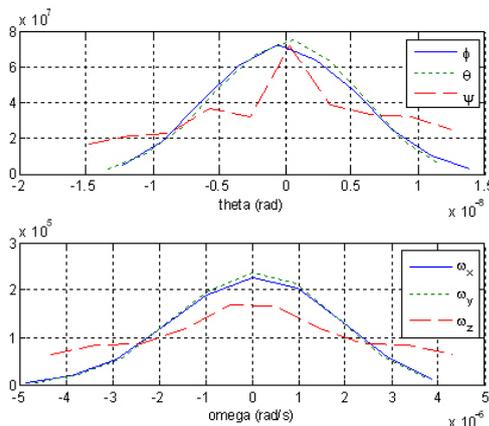


Fig. 7 PDF of Angle and Angular rate