

저궤도 위성의 외란 토크 해석

임조령*, 김용복**, 용기력***

Analysis of External Disturbance Torque on a LEO Satellite

Jo Ryeong Yim*, Yong-Bok Kim**, Ki-Lyuk Yong***

Abstract

The external disturbance torque acting on a low earth orbit spacecraft was analyzed. For the Earth pointing attitude, the maximum torque to the spacecraft is about 8.3×10^{-4} Nms and the momentum accumulated for an orbit is about 1.4 Nms and for the Sun pointing attitude, the maximum torque to the spacecraft is about 1.6×10^{-3} Nms and the momentum is accumulated about 3.0 Nms in the spacecraft body reference frame. The analysis results confirm that the size of magnetic torquer selected previously for the satellite is sufficient to manage the accumulated momentum by considering the dumping capacity for an orbit.

초 록

본 연구는 저궤도의 태양동기궤도 위성에 미치는 외란 토크의 크기와 영향을 해석하였다. 위성체 좌표계에서 보았을 때, 지구 지향 자세에서 최대 토크는 약 8.3×10^{-4} Nm로 한 궤도당 약 1.4 Nms 의 모멘텀이 축적되고, 태양지향 자세에서의 최대 토크는 약 1.6×10^{-3} Nm로 한 궤도당 약 3.0 Nms 의 모멘텀이 축적된다. 한 궤도당 축적되는 모멘텀의 양은 토커의 크기를 결정하는 설계 기준 자료로 사용되는데, 현재 사용 가능한 자기 토커의 한 궤도당 모멘텀 덤핑 용량을 고려했을 때, 위성의 임무 수행을 위해 적절한 선택임을 확인하였다.

키워드 : 궤도(orbit), 외란(disturbance), 중력경도토크(gravity gradient torque), 공기역학(aerodynamics), 태양 복사(solar radiation), 자기 외란(magnetic disturbance), 모멘텀 덤핑(momentum dumping)

1. 서 론

지구 주위를 도는 인공위성은 지구와 상호작용하는 힘 이외에도 외부로부터 다양한 힘들이

작용한다. 이러한 힘들을 외란이라 하고 힘으로 작용하면 위성의 궤도에 영향을 주고, 토크로 작용할 때는 위성의 자세에 영향을 주게 된다. 외란 토크의 크기는 자세 제어를 위해 필요한 구동

접수일(2011년 5월 2일), 수정일(1차 : 2011년 6월 1일, 게재 확정일 : 2011년 7월 1일)

* 위성제어팀/jryim@kari.re.kr *** 위성제어팀 /yong1973@kari.re.kr *** 위성제어팀/klyong@kari.re.kr

기의 크기와 용량을 선정하는 기초 자료로 사용된다. 또한 자세 제어 로직 설계에 중요한 입력 변수로 사용되므로 위성 개발 초기에 주어진 궤도상에서 위성의 외란 토크의 최대 크기를 해석하는 것은 필수적이다. 본 연구에서 해석에 사용한 저궤도 위성 모델은 이전 연구 [1]에서 사용한 위성과 동일한 형태에 적외선 탑재체가 추가된 형태를 가지고 있다.

본 연구는 위성에 작용하는 네 개의 주요 외란 토크를 저궤도 위성에 적용하여 위성에 미치는 외란 토크의 영향과 위성에 축적되는 모멘텀의 크기를 해석하였다. 그리고 위성에 장착될 구동기의 크기와 용량 요구사항을 산출하고 선택한 구동기들의 적합성을 확인하였다. 본 연구는 기존 연구에서 위성 모델 부분의 변경을 적용하여 새롭게 해석한 내용을 정리하였다.

2. 외란 토크 해석과 적용

2.1 외란 토크의 종류

외란 토크에 대한 해석을 위해 먼저 위성에 미치는 외란 토크의 종류를 구분하고 모델을 정의해야 한다. 위성에 작용하는 토크는 크게 4개로 중력 경도 토크(gravity gradient torque), 공기역학 토크(aerodynamics torque), 태양 복사 토크(solar radiation torque), 자기 외란 토크(magnetic disturbance torque)가 있다.

2.2 외란 토크의 특성

각 토크의 수학적 모델을 알아보면 다음과 같다 [2]. 중력 경도 토크와 자기교란 토크는 지구로부터의 거리에 대해 $1/r^3$ 의 비율로 비례하며 35,000 km 까지 영향을 미친다. 중력 경도 토크는 지구 지향 위성에는 상수 토크로 작용하고 관성지향 위성에서는 사인파 형태의 주기 토크로 작용하며 주로 위성의 관성 모멘트와 궤도 고도에 영향을 받는다. 중력 경도 토크의 크기는

$$T_{gg} = \frac{3\mu}{R_S^3} [\hat{R}_S \times (I \cdot \hat{R}_S)] \quad (1)$$

로 표현되며 I 는 관성모멘트, R_S 는 지구로부터 위성까지의 거리, \hat{R}_S 는 지구로부터 위성까지의 위치 벡터의 단위벡터이다. 자기 외란 토크는 주기적인 경향의 토크로 작용하고 궤도의 고도와 위성의 여분 자기 쌍극자, 궤도 경사각에 주로 영향을 받는다. 자기 외란 토크의 크기는

$$T_{mag} = m \times B \quad (2)$$

로 표현된다. m 은 위성의 자기 여분 모멘텀이고 B 는 지구의 자기장 벡터이다. 공기 역학 토크는 주로 고도가 500 km 이하인 위성에서 큰 영향을 미치며 고도에 대해 e^{-ar} 로 감소한다. 지구 지향 위성에서는 상수 형태로 작용하고, 관성 지향 위성의 경우에는 변수 토크로 작용하며 위성의 고도와 위성의 형태와 무게 중심의 위치에 많은 영향을 받는다. 공기 역학 토크는

$$T_{aero} = \int r_s \times df_{aero} \quad (3)$$

로 표현된다. r_s 는 위성체의 무게 중심으로부터 위성면 요소까지의 벡터이고 df_{aero} 는 위성면 요소에 작용하는 공기 역학 힘이다. 태양 복사 토크는 저궤도 위성에서는 큰 영향을 미치지 못하지만 정지궤도 위성과 행성 탐사 위성에 가장 큰 영향을 주는 토크이다. 지구 지향 위성에는 주기 토크로 작용하며, 태양 지향 위성에는 상수 형태로 작용하고 주로 위성의 기하형태와 표면 반사율에 영향을 받는다. 태양 복사 토크는

$$T_{solar} = \sum_{i=1}^n R_i \times F_i \quad (4)$$

로 표현된다. R_i 는 위성체 무게 중심으로부터 i 번째 요소의 압력 중심까지의 거리이고 F_i 는 그 면에 작용하는 태양 복사 힘이다.

각 외란 토크에 영향을 미치는 요인들은 위성의 궤도나 주어진 자세, 위성의 기하학적 형태 외에도 위성의 관성 모멘트와 무게 중심의 위치 등이 있다. 따라서 위성체 모델과 관련된 관성 모멘트와 무게 중심의 위치 결정 값의 불확정도가 외란 토크의 크기에 미치는 영향을 알아보기 위해 모델 결정에 오차가 포함되어 있다고 가정할 경우의 해석도 수행되어야 한다.

2.3 외란 해석의 적용

앞서 외란 해석은 위성의 구동기 요구 사항을 결정하기 위해 필수적으로 필요한 단계라고 설명했다. 외란 해석 결과는 자세제어계 하드웨어인 반작용휠과 자기토크의 용량과 크기를 결정하는데 중요한 기본 자료로 사용된다. 외란 해석으로 얻은 모멘텀의 크기와 경향을 주기(cyclic)항과 단조증가(secular) 항으로 나누고 주기항은 반작용휠의 모멘텀 크기를 결정하는 기본 자료로 사용하고, 단조증가 항은 자기 토크의 용량을 결정하는 기본 자료로 사용한다. 각 사이즈 결정 방법을 자세히 알아보면 다음과 같다 [3].

반작용휠의 사이즈 결정을 위한 요구사항 중 외란 제거를 위한 반작용휠의 토크 크기는 최악으로 예상되는 외란 토크의 크기에 일정 부분 여분을 두어 계산한다. 즉

$$T_w = T_d \cdot f_m \quad (5)$$

이고 T_w 는 반작용휠의 토크이고, T_d 는 위성에 작용하는 최대 외란 토크, f_m 은 여분 비율이다. 반작용휠이 내주어야 하는 기동 토크는 최대 가속도 기동을 고려하여 1/2 시간내에 1/2의 기동각을 움직이므로

$$\frac{\theta}{2} = \frac{1}{2} \frac{T_S}{I} \left(\frac{t}{2}\right)^2 \quad (6)$$

이고, 기동 토크에 대해 풀면

$$T_S = 4\theta \frac{I}{t^2} \quad (7)$$

가 되고, θ 는 기동각, T_S 는 기동 토크, t 는 기동 시간이다. 기동시 요구되는 반작용휠의 최대 모멘텀은 식 (6)을 적분하여 식 (8) 과 같이 계산된다.

$$H_{\max} = 2\theta \frac{I}{t} \quad (8)$$

반작용휠의 저장 모멘텀 크기는 최악의 외란 토크를 한 궤도에 대해 적분하여 계산하는데, 예를 들어 사인 주기 함수의 토크인 경우

$$H = T_d \frac{P}{4} (0.637) \quad (9)$$

와 같이 계산된다. T_d 는 사인 주기의 외란 토크

크기이고 P 는 위성의 주기, H 는 반작용휠의 모멘텀 크기, 0.637은 사인 함수의 제곱평균제곱근 평균이다.

자기 토크의 용량은 자기 쌍극자 모멘트 D 를 계산하여 구하게 된다. 지구의 자기장 B 와 위성에 작용하는 토크 T 의 관계를 사용하여

$$D = \frac{T}{B} \quad (10)$$

자기 쌍극자 모멘트를 구할 수 있다.

3. 외란 해석

이 장에서는 저궤도의 태양 동기 궤도를 사용하여 시간에 따라 외란 토크의 크기를 계산한 시뮬레이션 결과를 보여주고 결과로 얻은 토크 크기를 이용하여 하드웨어 구동기의 요구사항을 분석하였다.

3.1 시뮬레이션 입력 조건

외란 토크의 특성에서 보였듯이 위성의 궤도는 외란 토크의 중요한 입력 변수 중 하나이다. 분석을 위해 사용한 위성의 궤도 요소는 표 1과 같다. 위성의 고도는 528 km 태양 동기 궤도 위성이고 승교점 경도는 승교점 지방시를 오후 1시 30분으로 가정하여 22.5 deg를 사용하였다.

표 1. 위성의 궤도 요소

궤도요소	궤도요소 값
장반경, a	6906.1310km
이심율, e	0.0
궤도경사각, i	97.5137 deg
승교점 경도, Ω	22.5 deg
근지점 경도, ω	0 deg
t_0 에서의 평균 근점이각 M_0	0 deg

위성은 고정된 3개의 태양 전지판을 사용하며, 위성의 몸체는 원기둥 모양이라고 가정하였다. 적외선 탐재체가 추가로 들어감에 따라 위성의

원기둥 길이는 3.205 m로 증가하였고, 원기둥의 지름은 1.58 m, 태양전지판 넓이는 2.205 m²로 가정하였다. 위성체의 관성 모멘트는

$$I = \begin{bmatrix} 989.09 & -11.56 & -12.33 \\ -11.56 & 1018.61 & 0.21 \\ -12.33 & 0.21 & 544.83 \end{bmatrix} \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

을 사용하였고 위성체의 무게 중심은 X-Y-Z로 -0.00776 m, 0.00120 m, 0.96641 m에 있다고 가정하고 위성체의 표면 반사율은 0.28을 사용했다.

위성의 자세는 크게 두 가지 경우를 고려했는데, 위성체 좌표계에서 +Z축이 지구를 지향하는 지구지향 자세와 -Z축이 태양을 지향하면서 관성 좌표계에 대해 고정된 자세를 유지하는 경우이다.

자기 교란 토크의 계산에 사용되는 위성의 자기 여분 모멘텀의 크기는 각 축당 10 Am²를 가정하였다. 대기모델은 jacchia 모델을 이용하였고, 태양의 복사압은 4.4×10⁻⁶ N/m²을 가정하였다. 태양 활동 극대기를 고려하여 시뮬레이션 시작 시점은 2013년 3월 21.0일을 사용하였다. 이때 사용한 태양의 플럭스 값과 지자기 계수는 F10.7은 330, Fb10.7은 240, Kp 는 8₀을 사용하였다[4].

3.2 외란 토크 해석

3.2.1 지구지향 자세 외란 토크 해석

그림 1부터 5는 지구지향 자세에서 얻은 외란 토크 결과이며, 총 1번의 궤도를 모사하였다. 그림에서 점으로 된 선은 X-축, +로 된 선은 Y-축, *로 이루어진 선은 Z-축을 나타낸다. 지구지향 자세이므로 그림 1에서 위성체 좌표계로 표현된 중력 경도 토크는 위성에 항상 일정한 양의 토크를 작용하고 있음을 알 수 있다. 토크의 크기는 작지만 Y-축에서 계속 일정한 토크를 작용하고 있다. 그림 2는 공기 역학 외란 토크 결과를 나타냈는데, 위성의 고도가 약 528 km인 저궤도에 있으므로 공기 역학 토크의 크기는 다른 토크에 비해 상대적으로 큰 편이며, 지구 지향 위성으로 위성의 속도 방향은 항상 +X축이 되므로 공기

역학 토크의 양은 +Y축에서 크게 나타나고 있다. 저궤도 위성이므로 그림 3에서 태양 복사 토크는 거의 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 그림 4에서 외란 토크 중 자기 외란 토크가 가장 크게 나타나고 있는데, 이것은 위성체의 자기 여분 모멘텀을 10 Am²으로 비교적 큰 값으로 가정했기 때문이다. 그림 5는 총 외란 토크의 벡터 합을 나타내고 있는데, 가장 큰 영향을 미치는 자기 외란 토크의 경향과 비슷하게 나타난다.

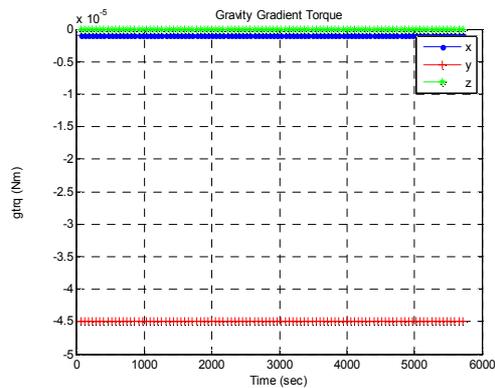


그림 1. 지구 지향 중력 경도 외란 토크

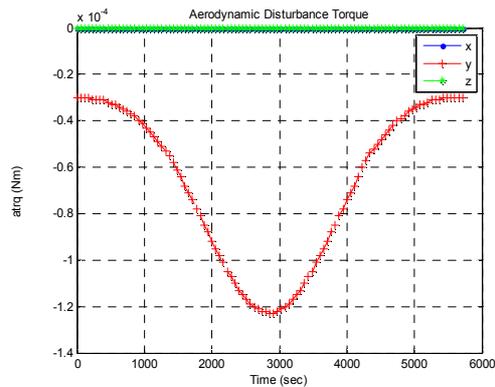


그림 2. 지구 지향 공기 역학 외란 토크

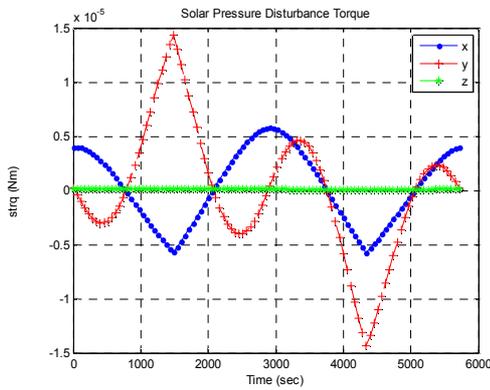


그림 3. 지구 지향 태양 복사 외란 토크

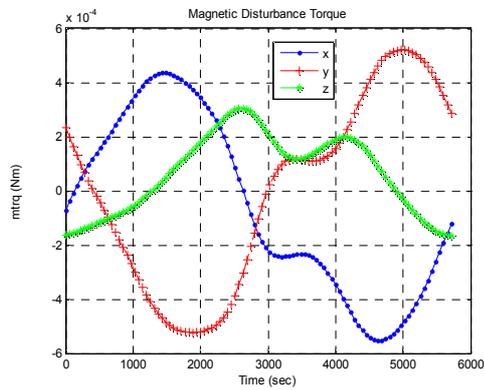


그림 4. 지구 지향 자기 외란 토크

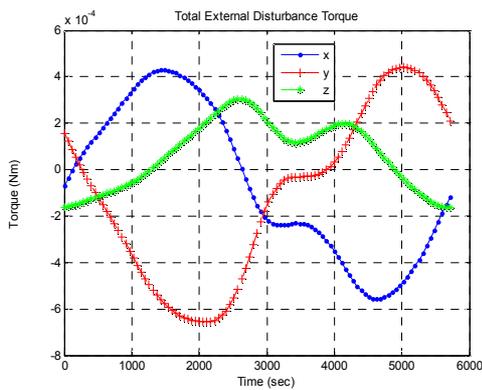


그림 5. 지구 지향 총 외란 토크

3.2 태양 지향 자세 외란 토크 해석

그림 6부터 10까지는 태양 지향 관성 기준계 자세에서의 외란 토크 해석 결과이다. 위성체의 +Y 축은 관성계의 +Y와 일치하고, 위성체의 +X 축은 관성계의 +Z축과, 위성체의 -Z축은 관성계의 +X축과 일치한다. 따라서 위성체의 토크 경향은 관성계의 토크 결과에 이 좌표계 변환을 그대로 적용한 결과로 나타난다. 태양 지향 자세의 경우 중력 경도 토크(그림 6)와 자기 외란 토크(그림 9)가 큰 영향을 미치고 있다. 태양에 대해 고정된 자세로 지구 주위를 공전하므로, 위성체 좌표계에서 표현한 중력 경도 토크는 주기적인 경향을 보인다. 그림 1과 비교하면 크기가 10배 정도 증가했음을 알 수 있다. 그림 7에서 공기역학 토크의 크기는 지구지향과 비슷하게 나타난다. 태양 복사는 항상 일정한 방향에서 들어오는데 위성체 기준으로 태양풍은 춘분날 -Z 축에서 +Z축 방향으로 들어오므로 그림 8에서 +Z축 방향의 태양 복사 토크는 0으로 나타나고 있고, 태양에 대해 고정된 자세를 유지하므로 궤도에 따라 변하지 않고 일정한 값을 갖는다. 태양 복사 토크는 위성체 질량중심의 작은 편이에 의해 발생하게 되는데, 다른 토크에 비해서는 무시할 만한 작은 양만 나타나고 있다. 그림 9의 자기 외란 토크의 크기는 지구 지향과 유사하지만 주기가 두 배로 빨라지고, 태양 지향 총 외란 토크(그림 10)는 지구지향(그림 5)에 비해 전체적으로 증가했음을 알 수 있다.

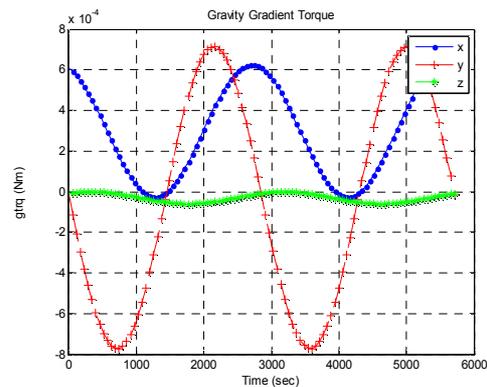


그림 6. 태양 지향 중력 경도 외란 토크

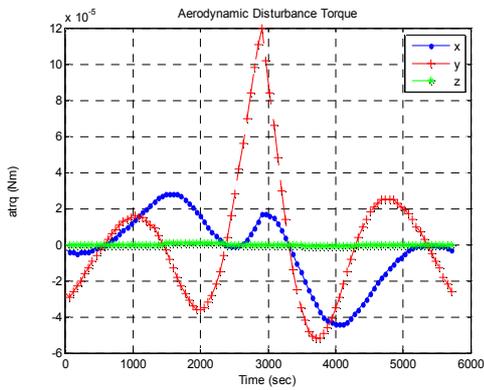


그림 7. 태양 지향 공기 역학 외란 토크

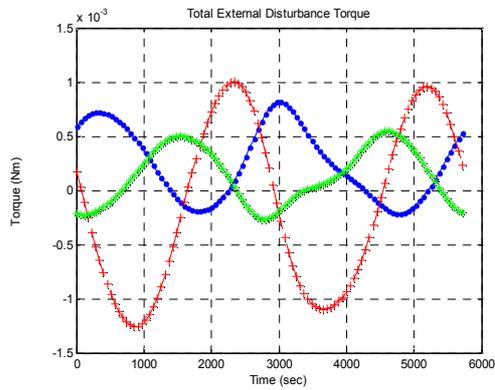


그림 10. 태양 지향 총 외란 토크

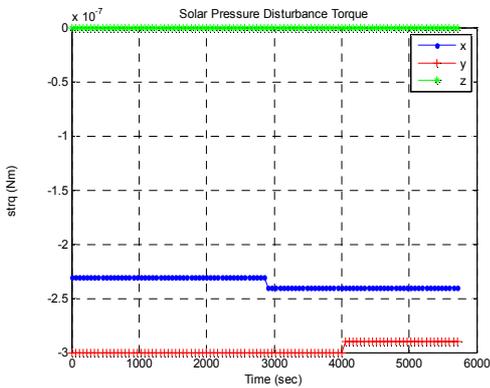


그림 8. 태양 지향 태양 복사 외란 토크

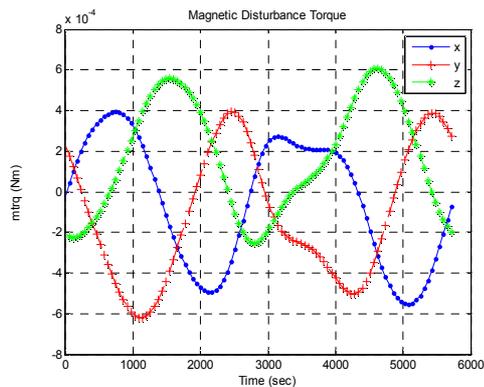


그림 9. 태양 지향 자기 외란 토크

3.3 외란 모멘텀 해석

지구 지향에서 얻은 총 외란 토크(그림 5)와 태양 지향에서 얻은 총 외란 토크(그림 10)는 각 토크의 벡터합을 구한 후 제곱합의 제곱근 (RSS) 을 구한 것으로 위성체 좌표계에서 작용하는 외란의 총 크기이다. 그림 11은 각 토크의 크기를 구한 후 선형 합을 구한 결과로 지구 지향 자세의 총 외란 토크 레벨은 최대 약 8.3×10^{-4} Nm이고 태양 지향의 총 외란 토크는 최대 1.6×10^{-3} Nm로 지구 지향의 경우보다 두 배 정도 크다.

위성체에 작용하는 외란 모멘텀은 위성체 좌표계의 토크를 직접 적분하여 계산할 수 없고, 위성체 좌표계로 얻은 각 외란 토크를 먼저 관성 좌표계로 변환한 후 적분하여 관성 좌표계의 외란 모멘텀으로 계산해야 한다. 그림 12는 관성 좌표계의 외란 모멘텀을 위성체 좌표계의 외란 모멘텀으로 변환한 후 각 외란 모멘텀의 크기를 구한 후 선형적으로 합한 결과이다. 시간이 지남에 따라 점점 모멘텀의 크기가 증가하고 있다. 위성이 한 궤도를 공전하는 동안 위성에 축적되는 총 외란 모멘텀은 지구 지향의 경우 한 궤도당 최대 약 1.4 Nms씩 증가해 가는 모습을 보인다. 그림 11에서 태양 지향 자세의 경우 외란 토크가 지구 지향 보다 두 배 정도 크게 나왔는데 마찬가지로 위성체에 작용하는 외란 모멘텀의 크기도 약 2배 정도 증가하여 한 궤도 동안 위성에 축적되는 모멘텀의 크기는 약 3.0 Nms로 나타나

고 있다. 그림 12를 자세히 살펴보면 위성에 쌓이는 총 외란 모멘텀 중 주기 항은 잘 나타나지 않고 단조증가 항만 있는 것처럼 보인다. 이것은 지구 지향 자세는 최악의 상황을 고려하여 한 궤도당 약 1.5 Nms의 모멘텀을 위성으로부터 제거해 주어야 하고, 태양 지향의 경우는 약 3.0 Nms를 제거해 주어야 함을 의미한다.

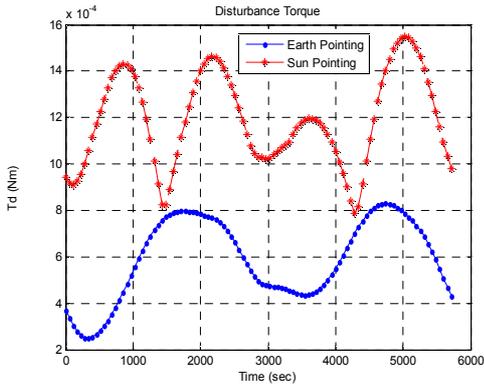


그림 11. 외란 토크: 지구 지향 vs. 태양 지향

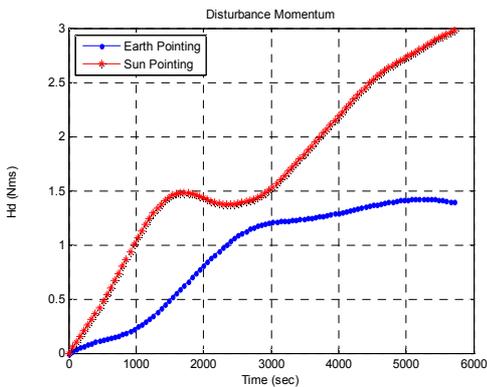


그림 12. 외란 모멘텀: 지구 지향 vs. 태양 지향

지구지향 자세와 태양지향 자세의 경우에 대해 외란 토크 해석 결과 얻은 위성에 미치는 외란 토크의 크기와 모멘텀을 표2에 정리하였다.

표 2. 외란 토크와 모멘텀

외란	지구지향자세	태양지향자세
중력 경도	$4.5 \times 10^{-5} \text{Nm}$	$8.5 \times 10^{-4} \text{Nm}$
공기 역학	$1.2 \times 10^{-4} \text{Nm}$	$1.2 \times 10^{-4} \text{Nm}$
태양 복사	$1.6 \times 10^{-5} \text{Nm}$	$3.0 \times 10^{-7} \text{Nm}$
자기 외란	$7.4 \times 10^{-4} \text{Nm}$	$7.4 \times 10^{-4} \text{Nm}$
총 토크	$8.3 \times 10^{-4} \text{Nm}$	$1.6 \times 10^{-3} \text{Nm}$
총 모멘텀	1.4 Nms	3.0 Nms

3.4 모델 불확정성 효과

위성체 모델의 불확정도가 외란 토크 해석에 미치는 영향성을 알아보기 위해 위성의 관성모멘트와 무게 중심의 위치 결정에 각각 10% 오차가 있다고 가정하고 위성의 외란 토크를 계산하였다. 태양 지향 자세의 경우 외란 모멘텀이 더 크게 축적되므로 태양지향 자세만을 고려하였다. 그림 13은 태양지향 모드에서 위성의 관성모멘트가 10% 증가하거나 10% 감소했다고 가정했을 경우 위성에 축적되는 총 외란 모멘텀의 크기를 보여주고 있는데, 관성모멘트가 10% 증가 했을 때 3.2 Nms까지 약간 더 증가함을 알 수 있다. 그림 14는 불확실한 무게 중심 위치에 대한 결과인데, 무게 중심 위치에 각각 10% 증가와 감소를 가정해도 결과는 거의 차이가 없다. 무게 중심 위치의 불확정도는 외란 해석 결과에 큰 영향을 주지 않고 있다.

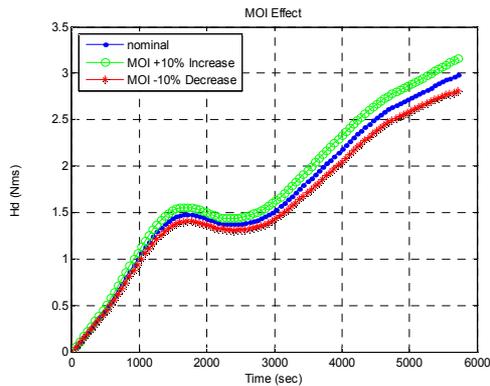


그림 13. 관성 모멘텀 불확정도

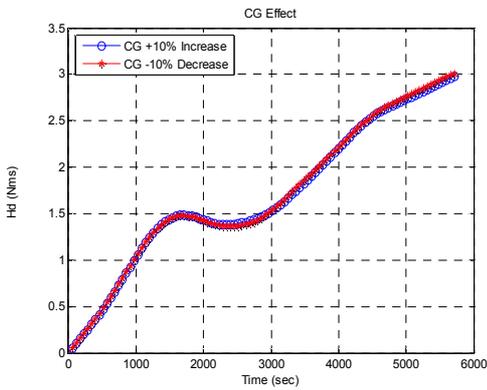


그림 14. 무게 중심 불확정도

3.5 반작용휠과 자기토크 선택

지구 지향 자세보다는 태양 지향 자세가 외란의 영향을 더 많이 받고 있고, 주기적으로 증가/감소하는 토크가 아니라 단조 증가하는 토크로 한 궤도당 최대 3.0 Nms의 모멘텀이 축적되므로 반작용휠의 정상속도가 포화되는 것을 방지하기 위해 지속적으로 자기 토크를 이용하여 위성에 쌓이는 모멘텀을 제거해 주어야 한다. 현재 사용 가능함 모델로 채택되어 있는 자기 토크는 한 궤도당 약 18 Nms의 모멘텀을 제거할 수 있으므로 자기 토크의 용량은 충분함을 알 수 있다[1].

반작용휠의 토크 크기는 식 (6)을 사용하여 계산할 수 있는데, 3A호의 요구조건인 관성모멘트 1015 kg·m²인 위성을 58초 동안 30도 회전하는 경우를 고려해 보면 기동 토크는 최소 0.6318 Nm가 필요하게 되고, 반작용휠을 4개 사용한다고 가정하고 장착 경사각을 고려하면 한 개의 반작용휠은 적어도 0.2747 Nm의 토크를 낼 수 있어야 한다. 반작용휠의 기동 최대 각운동량은 식 (8)을 사용하여 계산할 수 있는데, 18.35 Nms로 계산되고 반작용휠 한 개 당 적어도 7.98 Nms를 내주어야 한다. 반작용휠에 저장되는 모멘텀은 작용하는 최대 토크를 한 궤도에 걸쳐 적분하여 계산하는데 최대 외란 토크 1.6×10⁻³ Nm를 약 6,000 sec 동안 적분하면 9.6 Nms로 계산된다. 이것은 앞서 그림 12에서 얻은 결과보다 훨씬 크

게 나타나는데, 그림 11의 외란 토크는 주기적인 경향을 보이는 반면에 계산에서는 일정한 토크가 지속적으로 한 궤도 동안 작용한다고 가정했기 때문이다.

4. 결 론

위성 개발 초기 단계에서 자세 제어 로직 설계와 적합한 구동기 사양 선택을 위한 기본 자료로 사용할 수 있도록 저궤도 위성의 외란 토크에 대한 해석을 수행하였다. 외란 토크의 관점에서 보면 지구지향 자세에서보다는 태양지향 자세에서의 외란 토크가 2배 더 크게 작용하며 한 궤도 동안 위성에 축적되는 모멘텀의 크기도 더 큰 것으로 나타났다. 한 궤도당 축적되는 모멘텀의 양은 토크의 크기를 결정하는 설계 기준 자료로 사용되는데, 현재 선택된 자기 토크의 용량은 평균 한 궤도당 적어도 18 Nms의 모멘텀을 덤핑할 수 있으므로 적절한 선택임을 확인하였다. 이 연구는 경제적이고 성공적인 위성 개발을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 임조령, 태양 동기 궤도 위성의 외란 효과 해석, KARI-SC-TN-2006-006, 한국항공우주연구원, 2006.
2. Wertz, J. R., Spacecraft Attitude Determination and Control, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1978, pp. 566-576.
3. Larson, W. J., and Wertz, J. R., Space Mission Analysis and Design, Microcosm, Inc and Kluwer Academic Publishers, California, USA and The Netherlands, 1992, pp. 352-357.
4. Montenbruck, O., and Gill, Eberhard, Satellite Orbit, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2001, pp. 86-89.