

비대칭 태양전지판 형상의 천리안위성 휠배치와 휠모멘텀조정에 관한 연구

박영웅*, 최홍택**

Study on the wheel allocation and the wheel momentum off-loading for COMS having asymmetric solar array configuration

Young-Woong Park*, Hong-Taek Choi**

Abstract

The mission of a lot of satellites on geostationary orbit is the communication and/or the broadcasting. These satellites need a big power, so these have a large solar array. Recently, the new satellite for Earth environment monitoring is developing on geostationary orbit. The payload of Earth monitoring satellite requires better thermal condition on detector. Therefore this satellite uses a boom for the attitude stability instead of rejecting one-side solar array as a heat source. The other hand, it uses some momentum wheels being a more momentum capacity to control the large disturbance by solar pressure due to the asymmetric solar array configuration. In this paper, the analysis on the wheel allocation and the wheel off-loading for COMS is summarized and the results are verified by telemetry of COMS. COMS has no boom and a perfectly asymmetric solar array configuration, and it is operating well on geostationary orbit.

초 록

정지궤도에서 운용되는 많은 위성들이 통신방송을 목적으로 하고 있기 때문에 전력 요구량이 크고 이에 따라 대용량의 태양전지판이 필요하다. 최근에는 정지궤도에 통신방송 이외에 기상을 비롯한 지구환경 관측을 목적으로 하는 위성들이 개발되는 추세이다. 이러한 관측 위성의 탑재체는 감지기의 열환경 조건이 매우 중요하기 때문에 열원으로 작용되는 태양전지판을 제거하고 대신에 자세안정도를 확보하기 위해 봄을 사용한다. 다른 방법으로 모멘텀 용량이 큰 휠을 장착하여 비대칭 태양전지판 형상으로 인해 태양에 의한 외란을 휠이 흡수하는 자세제어 방식을 사용하고 있다. 본 논문에서는 완벽한 비대칭 태양전지판 형상의 천리안위성에서 사용하고 있는 휠배치와 그에 적합한 휠모멘텀조정에 관하여 분석하고 현재 운용되고 있는 텔레메트리를 통해 그 결과를 검증하였다.

키워드 : 천리안위성(COMS, Communication Ocean Meteorological Satellite), 휠배치(Allocation), 휠모멘텀조정(Wheel Off-loading), 휠모멘텀기준(Momentum Set-point), 텔레메트리(Telemetry)

접수일(2013년 8월 28일),
* 위성제어팀/ywpark@kari.re.kr

수정일(1차 2013년 10월 18일),

게재 확정일(2013년 11월 1일)

** 위성제어팀/hongtaek@kari.re.kr

1. 서 론

정지궤도위성의 경우에는 발사 비용이 많이 요구되기 때문에 위성의 임무수명을 크게 하는 것이 경제적이다. 따라서 통신/방송 임무 위성의 경우는 최근에 대형화하는 추세이지만, 관측탑재체를 장착하는 경우에는 탑재체 수명이 크게 향상되지 않는 단점이 있었다. 그러나, 최근에는 탑재체의 수명도 10년 정도까지 크게 향상되고 있고 특히 자국의 기상변화 및 환경변화에 매우 민감해지면서 항시 관측을 목적으로 하는 정지궤도 관측위성들이 개발되고 있는 상황이다.

임무수명을 크게 하기 위해서는 위성의 크기와 그에 비례한 소비 전력량의 증가가 필수적이다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해서는 태양전지판의 크기가 증가해야 한다. 관측탑재체를 장착하는 위성의 경우에는 탑재체 감지기 온도를 저온으로 유지하기 위해 효과적으로 열을 외부로 방출해야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 탑재체의 방열판이 장착된 패널 주위에서 열원으로 작용되는 태양전지판을 제거하고 대신 불을 달아 자세안정도를 제어해야 한다. 반면 최근에는 방열판 주위 온도를 절대온도로 형성하고자 불도 제거한 완전한 비대칭 태양전지판 형상을 갖는 정지궤도위성들이 개발되고 있다. 그 대표적 예로 천리안위성과 시기적으로 조금 뒤에 발사될 GOES-R 위성이 있다.

본 논문에서는 이러한 비대칭 태양전지판을 갖는 정지궤도위성의 경우에 태양복사압에 의해 증가된 외란을 효과적으로 제어하기 위한 방법을 소개한다. 그 방법으로 대용량모멘텀 휠을 장착하고 누적된 휠모멘텀을 효과적으로 조정해야 하는 문제점을 제시하고, 천리안위성에서 수행한 휠배치 및 휠모멘텀조정 설계에 대하여 분석한 것을 설명하고 그 결과를 텔레메트리를 통해 검증한다.

본 논문의 구성은 2장에서 천리안위성에 미치는 외란을 분석하고, 3장에서 외란을 제어하기 위한 휠배치와 휠모멘텀조정 전략을 소개하며, 4장에서 효과적인 휠모멘텀조정을 위한 휠모멘텀

기준을 선정하기 위한 해석결과를 정리한 후, 5장에서 텔레메트리를 통해 그 결과를 검증한다.

2. 비대칭 형상에 따른 외란 분석

그림 1은 천리안위성의 외부형상을 보여주며, 그림 2는 태양복사압이 천리안위성의 비대칭 태양전지판에 미치는 외란으로 분석된 누적모멘텀 결과를 보여준다[1].

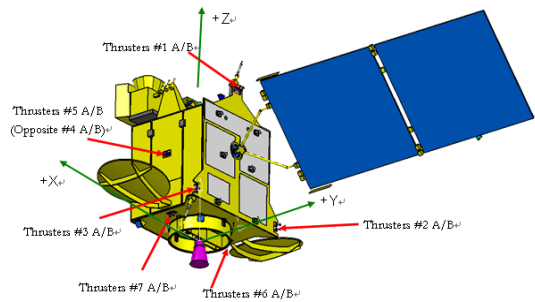


그림 1. 천리안위성 외부형상

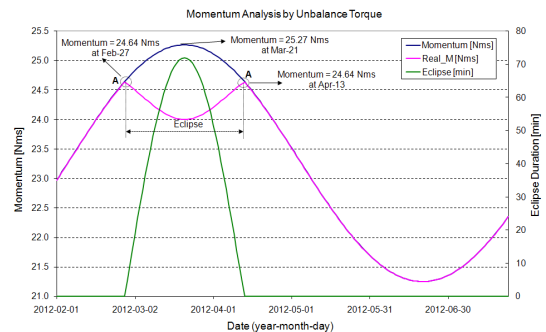


그림 2. 천리안위성 태양복사압에 의한 누적모멘텀

그림 2에서 태양전지판이 태양과 수직으로 놓이게 되는 춘추분 때에 최대 누적모멘텀이 형성되는 것을 알 수 있고, 해당 시기에는 지구에 의한 식(Eclipse)이 발생하므로 실질적인 최대 누적모멘텀은 식의 발생 전후 시점 즉, 2월 27일 또는 3월 13일 경에 약 24.64 Nms로 예측된다.

이러한 결과는 참고문헌 [1]에서 천리안위성 텔레메트리를 통해 확인하였고, 태양복사압에 의

한 누적모멘텀이 정지궤도위성 특성상 피치축과 독립되어 롤/요축으로만 분석하였다.

3. 휠배치 및 휠모멘텀조정

3.1 휠배치

앞 장에서도 설명한 것과 같이 태양복사압에 의한 누적모멘텀이 롤/요축으로 형성되므로 제어기로 사용되는 휠 모멘텀을 최대한 활용하기 위해서는 롤/요축(X/Z)으로 그림 3과 같이 배치하였다. 그리고 피치축(Y)으로는 여유분을 고려하여 2개를 동일하게 배치하는 방법을 천리안위성에서 사용하였다.

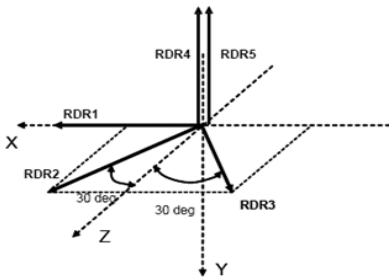


그림 3. 천리안위성 휠배치

일반적으로 사용하는 휠배치에는 피라미드 방식을 사용하는데, 이 경우에는 기동을 용이하게 하기 위해 제로모멘텀 방식을 사용하게 된다. 즉, 각각의 휠에 모멘텀이 존재하더라도 전체 시스템에서는 모멘텀이 제로로 형성되는 것으로 기동을 하는 경우에 코리올리스 힘이 작용하지 않아 원하는 방향으로 제어가 쉽다는 장점이 있다. 그러나, 안정된 자세유지를 위해서 외란에 대해 항상 제어를 수행해야 하는 단점이 있다.

천리안위성의 경우에는 롤/피치 자세를 감지하는 지구센서와 요축으로는 정밀태양센서를 장착하고 있지만 요축 자세에 대한 정밀제어 수행에 부담이 존재한다. 따라서 피치축으로 바이어스 모멘텀을 주어 수동적 안정화 방식을 결합하면서 롤/요축으로 누적되는 모멘텀에 대해 휠모멘텀을 효과적으로 적용하였다.

그러나, 태양복사압에 의한 누적모멘텀은 항상 관성좌표계에 대해 일정한 방향으로 모멘텀이 누적되는 반면 휠은 위성에 장착되어 그림 4와 같이 하루에 1회전하게 된다. 여기에서 관성좌표계와 몸체좌표계가 일치하는 시점이 자정 0h를 의미한다.

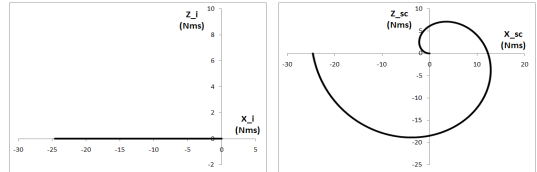


그림 4. 천리안위성 누적모멘텀 변화 (좌: 관성좌표계, 우: 몸체좌표계 - 0시 휠모멘텀조정)

따라서 롤/요축에 장착되는 모든 휠은 반드시 그림 5와 같이 회전속도 방향전환이 필요하게 된다. 즉, 휠 자체에서 볼 때 영속도 위치를 지나기 때문에 양방향 휠을 사용해야 하고 영속도 위치에서의 마찰력 전환에 따른 휠내란이 위성 자세에 영향을 줄 수 있는 단점을 갖게 된다[2,3].

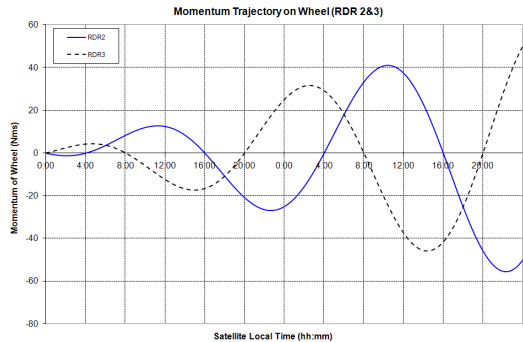


그림 5. 천리안위성 누적모멘텀에 의한 휠모멘텀 변화 (RDR 2, 3 사용시)

3.2 휠모멘텀조정 전략

천리안위성은 휠모멘텀조정을 위해 사용할 수 있는 추력기가 남쪽 패널에 3개가 그림 1처럼 장착되어 있다. 이 형상으로부터 휠모멘텀 조정의 최적시간을 그림 6과 같이 개략적으로 설계할 수 있었다(그림에서 'Thruster 1~3'에 연결된 화살표

는 추력벡터가 아니고 추력기 위치를 알려주는 표식). 관성좌표계에 대해 누적모멘텀 방향과 반대의 방향으로 추력을 이용한 토크를 발생시키면 추력에 의한 외란을 제어하기 위해 휠에 누적된 모멘텀이 조정을 받게 된다. 이때, 3개의 추력기를 모두 사용할 수 있지만 추력기 On/Off 횟수 제한사항이 있고 효율적인 측면에서도 효과적이지 않기 때문에 그림 6과 같이 한 개의 추력기만으로 동일 효과를 얻을 수 있는 3번의 시간대를 선택하였다.

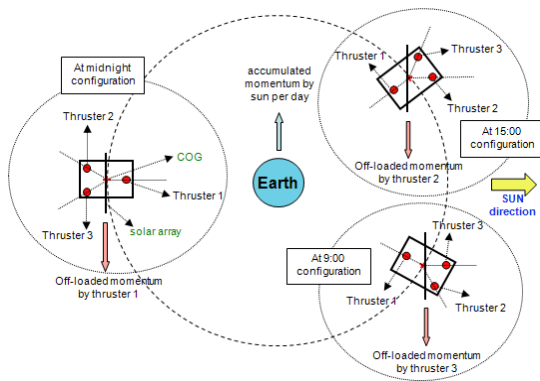


그림 6. 천리안위성 휠모멘텀조정 최적시간

3번의 휠모멘텀 최적 조정시간대에 대해 대양복사압에 의한 누적모멘텀 변화를 몸체좌표계에 대해 그려보면 0시의 경우는 그림 4의 우측과 같고, 9시와 15시 경에 수행하는 경우는 그림 7과 같이 다른 경향을 보이게 된다.

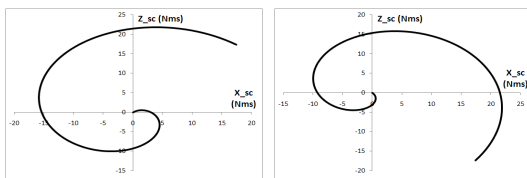


그림 7. 천리안위성 휠모멘텀조정 - 몸체좌표계 (좌: 9시, 우: 15시)

위의 결과는 천리안위성 전체 모멘텀 변화량을 몸체좌표계에 대해 표현한 것이다. 초기 모멘텀 또는 휠모멘텀조정을 통해 실제적으로 도달해

야 하는 모멘텀을 해석해야 휠모멘텀조정을 위한 알고리즘에 반영할 수 있다. 즉, 휠모멘텀 기준값이 필요하게 된다. 휠모멘텀조정을 통해 항상 초기 휠모멘텀을 제로로 유지하는 경우가 그림 7의 형태를 갖게 된다.

4. 휠모멘텀기준 선정 해석

4.1 해석을 위한 제한조건들

천리안위성에 사용된 휠(RDR)은 휠베어링 내부에 존재하는 윤활제가 휠과 같이 밀폐되어 있지 않고 베어링 외부로부터 순환하는 방식이며 순환속도는 휠 회전속도에 비례하는 것으로 파악된다. 따라서, 저속에서는 윤활제가 원활하게 공급되지 않는 경우가 발생하고 이 결과는 베어링 마모를 야기하기 때문에 휠사양에 마모회전수를 제한하고 있다.

천리안위성 개발 당시 저속의 기준을 +/-150 [rpm]로 선정하고 각각의 휠이 최대한 영속도 부근에 오래 머물지 않도록 휠모멘텀조정에 의한 기준값을 해석하였다. 마모회전수는 그림 8처럼 저속의 기준에 해당하는 면적을 구하면 1일 마모회전수가 된다. 이를 임무설계 기간인 10년으로 환산하여 휠사양에 제한된 값 이하에 들어오도록 휠모멘텀 기준값을 해석하였다.

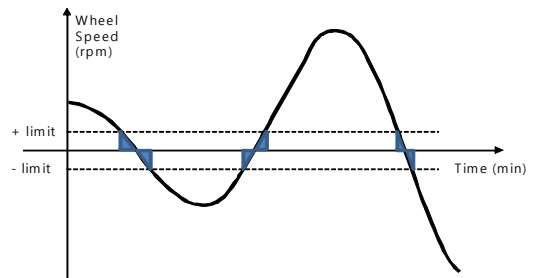


그림 8. 마모회전수 해석 개념도

또한, 1일 2회 휠모멘텀조정을 수행하면서 각각의 휠이 갖게 되는 최대 모멘텀을 최소화하여 휠모멘텀 용량을 효과적으로 운영해야 하는 제한조건도 고려하였다.

4.2 휠모멘텀기준 해석 수행

휠모멘텀기준에 해당하는 모멘텀을 그림 9와 같이 크기(H_c)와 방향(α)의 2개 변수로 정의하고, 기준값 크기는 8 ~ 15 [Nms] 범위에 대해 정수로 한정하였으며 방향은 0 ~ 360 도 전구간에 대해 해석을 수행하였다.

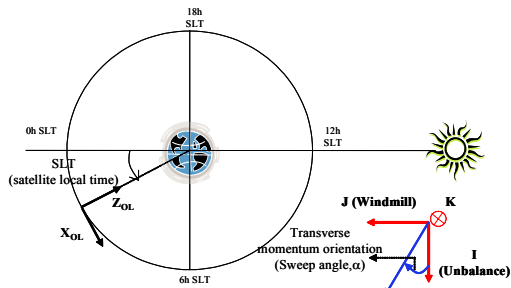


그림 9. 휠모멘텀 기준값 해석을 위한 변수 정의

또한, 천리안위성의 휠모멘텀조정은 참고문헌 [4]에서 알 수 있듯이, 1일 2회의 휠모멘텀조정이 수행되고 4개월마다 추력기 효율을 고려하여 휠모멘텀조정 조합을 변경하여 운영한다. 물/요 평면에 장착된 RDR 1~3 휠 중에 1개의 휠은 여유분으로 평상시에는 운영되지 않고 2개만 사용된다. 따라서, 본 논문에서는 휠조합에 따른 휠모멘텀 기준값에 대해 각각 별도로 해석하되, 휠모멘텀조정 시간은 그림 9와 같은 해석에 대해 모든 가능한 조합을 고려하였다. 그중에서 기준값의 최대 모멘텀을 선택하였으며 마모회전수는 4개월 단위로 환산하여 10년을 적용하였다.

4.3 휠모멘텀기준 해석 결과

앞 절에서 수립한 해석 기준을 통해 수행한 결과가 그림 10 ~ 12를 통해 확인할 수 있다. 10년을 고려한 마모회전수는 값이 매우 커서 단위를 메가(Mega)로 치환하였다. 가운데가 불룩하게 그려진 그림이 사용되는 2개의 휠에 대해 최대 모멘텀을 보여주고 있고 그 값은 오른쪽에서 읽을 수 있다.

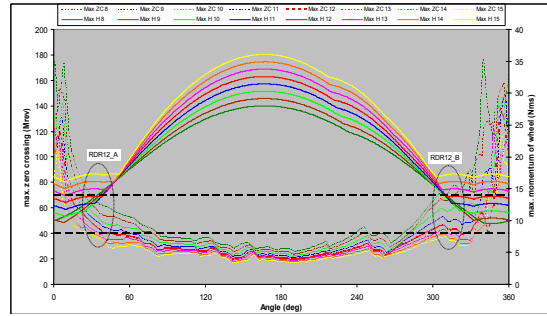


그림 10. 휠모멘텀 기준값 해석 결과 (RDR 1_2)

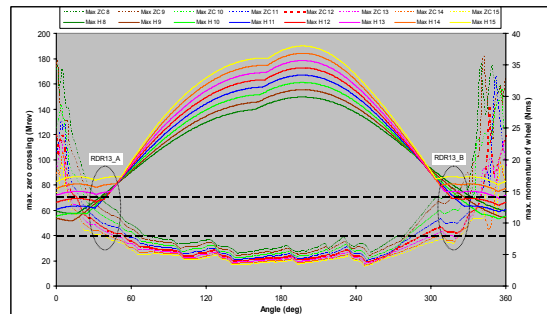


그림 11. 휠모멘텀 기준값 해석 결과 (RDR 1_3)

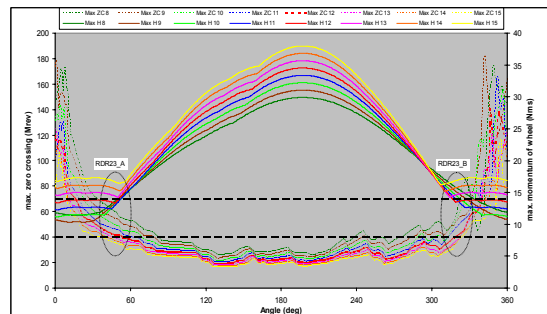


그림 12. 휠모멘텀 기준값 해석 결과 (RDR 2_3)

위의 결과에서 회전마모수 제한조건을 만족하면서 휠모멘텀을 최소로 운영할 수 있는 영역이 60도 이전(A-case)과 300도 이후(B-case) 2곳이 있음을 알 수 있다. 그러나, 이 경우에 대해 실제 휠모멘텀 거동을 보면 그림 13과 그림 14에서 상이한 결과를 확인할 수 있다.

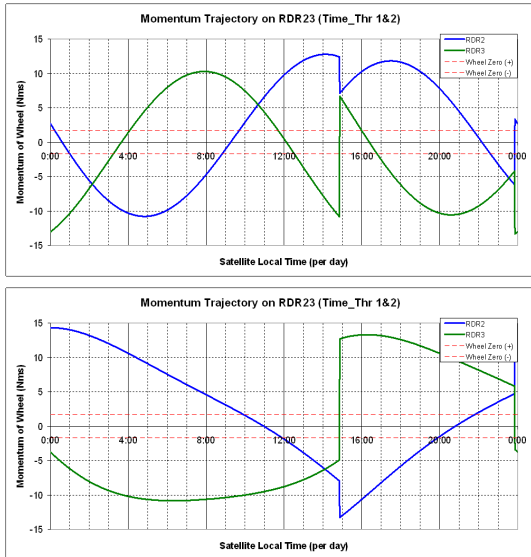


그림 13. 휠모멘텀 프로파일 (RDR 2_3, 추력기 1_2)
(상: A-case, 하: B-case)

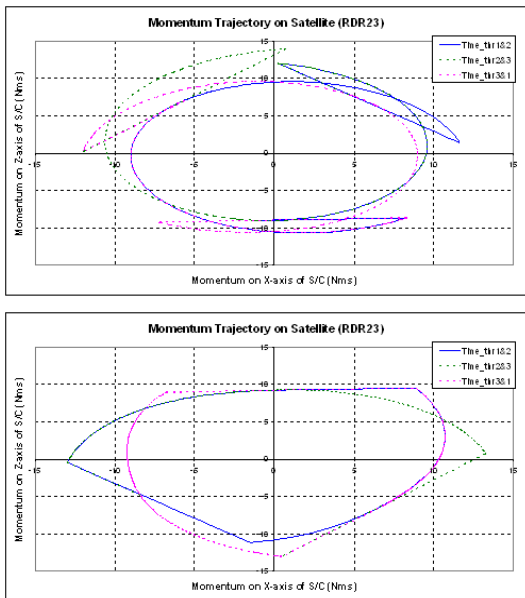


그림 14. 몸체좌표계 휠모멘텀 (RDR 2_3)
(상: A-case, 하: B-case)

A-case와 B-case 차이를 보여주기 위해 RDR 2_3 휠조합과 0시-15시 휠모멘텀조정 시간 조합만을 도시하였다. 그림 6을 통해 0시는 1번 추력

기가 15시는 2번 추력기가 휠모멘텀조정 주제가 된다. 위의 결과에 제시된 A-case 기준값은 크기가 12[Nms], 관성좌표계에 대한 방향으로 48[deg], B-case 기준값은 크기가 13[Nms], 관성좌표계에 대한 방향으로 315[deg]를 선정하였다.

위의 휠모멘텀 프로파일을 통해 B-case는 휠의 저속 영역을 지나는 시간이 길게 나타나므로 빠르게 지나가는 A-case에 비해 위성 자세제어 측면에서 좋지 않은 결과를 야기할 수 있어, 최종적으로 A-case로 결정하였다.

5. 텔레메트리를 통한 검증

4.3절을 통해 RDR 2_3 조합의 A-case에 대한 휠모멘텀조정의 기준값은 그림 15의 관계와 식 (1)을 통해 계산하여 표 1과 같이 얻을 수 있다.

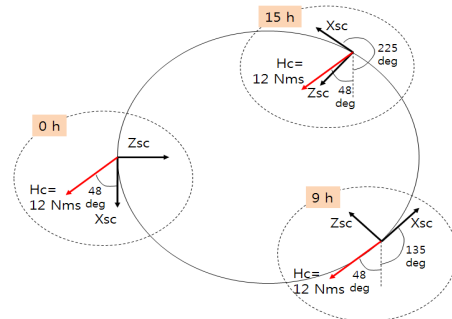


그림 15. 휠모멘텀 기준값 변환 관계

$$\begin{bmatrix} RDR\ 2 \\ RDR\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin 30^\circ & -\sin 30^\circ \\ \cos 30^\circ & \cos 30^\circ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{sc} \\ Z_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

표 1. 천리안위성 휠모멘텀 설계 기준값 (정수화)

[Nms]	Xsc	Zsc	RDR 2	RDR 3
0시	8	-9	3	-13
9시	-12	0	-12	12
15시	0	12	7	7

표 1.에 정리된 값 중 0시와 15시에 대한 결과를 그림 13과 그림 14에서 확인할 수 있다.

다음 그림들은 천리안위성의 텔레메트리를 통

해 RDR 2_3 조합을 고정하고 휠모멘텀조정 시간의 3가지 조합에 대해 그 결과를 도식화한 것이다. 4개월마다 휠모멘텀조정 시간이 변경됨에 따라 적절한 날짜를 선정하였다.

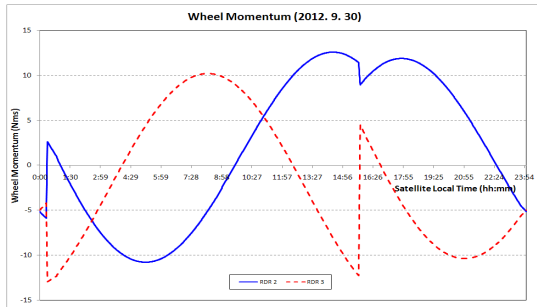


그림 16. 천리안위성 실제 휠모멘텀 (2012. 9. 30)

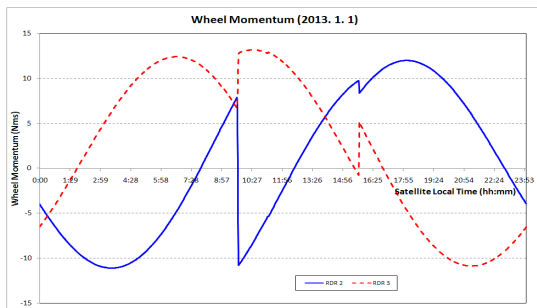


그림 17. 천리안위성 실제 휠모멘텀 (2013. 1. 1)

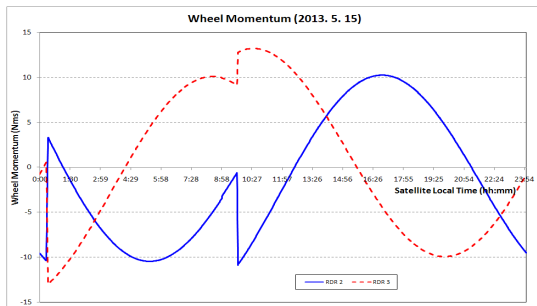


그림 18. 천리안위성 실제 휠모멘텀 (2013. 5. 15)

텔레메트리를 통한 천리안위성 휠모멘텀조정 시간은 탑재체 촬영시간을 고려하여 앞 장에서 설명하고 있는 시간과 약간의 차이가 발생하고

있지만 표 1에 정리된 설계값과 거의 동일한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 천리안위성의 휠모멘텀조정에 관한 휠배치와 수행시간 등을 설명하고 휠모멘텀 조정에 따른 휠의 제약조건을 고려한 최적의 기준값(Set-point)을 선정하는 과정을 소개하였다. 또한, 설계에 의한 결과를 실제 운영하고 있는 상태에서 획득한 텔레메트리를 통해 그 결과를 확인하여 설계와 동일한 결과임을 검증하였다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부에서 지원하는 특정 연구개발 사업의 일환으로 천리안위성을 개발한 '통신해양기상위성 개발사업' 후속인 '정지궤도복합위성 개발사업'의 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

1. 박영웅, 최홍택, 김방엽, "텔레메트리를 이용한 천리안위성 휠모멘텀 설계결과 검증," 2012추계학술대회, 한국항공우주학회, 라마다플라자호텔, 제주, 2012, pp.767-770.
2. 박영웅 외, "천리안위성의 텔레메트리를 이용한 휠 내부외란에 의한 자세영향 분석," 2011춘계학술대회, 한국항공우주학회, 코오롱호텔, 경주, 2011, pp.1062-1066.
3. 박영웅, 박봉규, "정상모드에서 수신된 텔레메트리를 이용한 외란에 의한 천리안위성 자세영향 분석," 항공우주기술지, 제11권 제1호, 2012, pp.27-41.
4. 박영웅 외, "정지궤도위성의 휠모멘텀 제어에 의해 발생하는 3축 궤도병진 속도에 관한 분석," 항공우주기술지, 제7권 제2호, 2008, pp.88-94.