

통신해양기상위성 1호의 남북방향 위치유지 기법 분석

김해연^{1†}, 이병선¹, 황유라¹, 김영록², 박상영², 김재훈¹
¹한국전자통신연구원 위성관계기술연구팀
²연세대학교 천문우주학과

ANALYSIS OF COMS-1 NORTH-SOUTH STATION KEEPING METHOD

Hae-Yeon Kim^{1†}, Byoung-Sun Lee¹, Yoola Hwang¹, Young-Rok Kim²,
Sang-Young Park², and Jaehoon Kim¹

¹Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, Korea

²Dept. of Astronomy and Space Science, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: specialk@etri.re.kr

(Received July 5, 2005; Accepted November 4, 2005)

요 약

태양과 달에 의한 섭동력은 정지궤도 위성 궤도 평면의 수직 방향으로 영향을 미쳐 궤도경사각과 승교점 적경을 변화시킨다. 궤도경사각의 변화는 정지궤도 위성의 직하점 위도를 변화시키며 그 크기는 궤도경사각 크기와 같다. 따라서 추력기를 사용하여 위성의 궤도경사각과 승교점 적경을 조정함으로써 직하점 위도를 일정한 범위 내에서 유지시킬 필요가 있으며 이것이 정지궤도 위성의 남북방향 위치유지(North-South station keeping)이다. 본 연구에서는 Track-Back Chord Target(TBCT), Maximum Compensation Target(MCT), Minimum Fuel Target(MFT) 기법의 비교 분석을 통해 통신해양기상위성 1호에 가장 적합한 남북방향 위치유지 기법을 결정하였다. 비교분석을 위해 세 가지 기법을 이용하여 2008년 12월부터 1년간 남북방향 위치유지 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 통신해양기상위성 1호의 남북방향 위치유지 기법으로 1년간 필요한 속도증분이 가장 적은 MFT 기법과 위치유지시 궤도경사각 진화 범위가 가장 작은 TBCT 기법이 적합하다고 판단하였다.

ABSTRACT

The perturbations caused by the Sun and the Moon are predominantly out-of-plane effects causing a change in the inclination and in the right ascension of ascending node of a geostationary satellite. Due to the change of the inclination, subsatellite latitude of the geostationary satellite has a daily variations of the same magnitude of the inclination. Therefore we need a facility to control the orbital inclination and right ascension of ascending node for maintaining the satellite position in specified subsatellite latitude boundary using thrusters. In this paper we studied North-South station keeping strategies of the COMS-1 such as Track-Back Chord Target (TBCT) method, Maximum Compensation Target (MCT) method and Minimum Fuel Target (MFT) method. We accomplished those North-South station keeping maneuvers for one year

[†]corresponding author

starting from December 2008. The required velocity increments to maintain the satellite are estimated as MCT 52.6065m/s, TBCT 52.2383m/s, MFT 51.5428m/s, respectively. We demonstrated that TBCT and MFT methods are proper to North-South station keeping for COMS-1. MFT method showed the minimum required velocity increments whereas TBCT traced narrow inclination boundary area for North-South station keeping.

Keywords: COMS-1, north-south station keeping, box-limit, TBCT, MCT, MFT

1. 서 론

통신해양기상위성 1호는 ‘국가 우주개발 중장기 기본계획’에 따라 2008년 발사를 목표로 개발 중인 국내 최초의 복합임무 정지궤도 위성으로 고도 35,786km 상공에서 위성통신, 해양관측, 기상관측 서비스를 수행하게 된다. 통신해양기상위성 1호의 궤도주기는 지구의 자전주기와 같은 23시간 56분 4.09초이며 이심률과 궤도경사각이 거의 0에 가까운 원궤도를 돌게 된다. 하지만 지구 비구형 포텐셜과 태양과 달의 중력섭동 그리고 태양의 복사압에 의해 위성의 궤도 위치가 계속 변화하므로 이 변화를 방지하면 위성이 지상국 추적범위를 벗어나 제어할 수 없는 상황에 이를 수도 있다(Shrivastava 1978). 따라서 위성의 정상적인 임무수행을 위해서는 Box-limit으로 정의되는 일정한 경도와 위도 내에서 위성을 유지시키는 위치유지(station keeping) 기능이 필요하다.

본 연구에서는 동서/남북 방향 위치유지 중 연료 소모가 월등히 큰(95% 이상) 남북방향 위치유지 기법에 대해 다루었다. 남북방향 위치유지 기능은 궤도경사각 및 승교점 적경을 조정하여 위성의 직하점 위도를 일정 범위 내에서 유지시키는 방법으로 지속적인 통신을 위해 필수적이다. 따라서 통신, 해양, 기상의 세 가지 서비스를 제공하는 통신해양기상위성 1호의 남북방향 위치유지 기능은 매우 중요하며 연료량을 최소화하면서 적은 범위 내에서 위치유지가 가능한 기법을 찾아내는 과정은 안정적인 위치유지를 위해 매우 중요한 임무라 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 Maximum Compensation Target(MCT), Track-Back Chord Target(TBCT), Minimum Fuel Target(MFT) 기법을 사용하여 남북방향 위치유지 시뮬레이션을 수행하고 통신해양기상위성 1호에 가장 적합한 남북방향 위치유지 기법을 결정하였다. 본 연구는 그동안 시도되었던 남북방향 위치유지 알고리즘에 대한 연구와 달리 남북방향 위치유지의 다양한 기법들을 시뮬레이션 하여 비교, 분석하고 이를 통해 통신해양기상위성 1호에 적합한 기법을 결정하였다는 점에서 큰 의미가 있다. 또한 본 연구를 통해 정지궤도 위성의 남북방향 위치유지 기법 선정에 대한 지표를 제시할 수 있다는 점에서 큰 의의를 갖는다.

2. 정지궤도 위성의 남북 방향 위치유지

태양과 달에 의한 섭동력은 위성의 궤도경사각과 승교점의 적경을 변화시켜 결국 위성의 직하점 위도를 변화시킨다. 만일 정지궤도 위성을 궤도경사각이 0°인 상태에서 그대로 놓아두면 27.5년 후 궤도경사각이 최대 15°까지 증가하며, 55년이 경과하면 다시 0°으로 돌아온다. 그동안 승교점 적경은 180° 변하게 된다(Pocha 1987). 따라서 위성의 궤도경사각과 승교점 적경을 조정하여 위성의 직

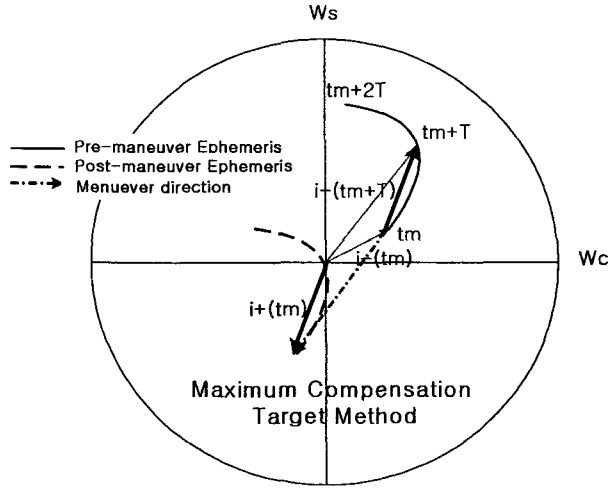


그림 1. Maximum Compensation Target(MCT) 기법. 그림의 가로축은 궤도경사각 벡터의 x 성분인 W_c , 세로축은 궤도경사각 벡터의 y 성분인 W_s 를 나타낸다.

하점 위도를 일정한 범위 내에서 유지시킬 필요가 있으며 이것이 정지궤도 위성의 남북방향 위치유지(North-South station keeping)이다. 본 연구에서는 동서방향 위치유지를 고려하지 않고 남북방향 위치유지에 대해서만 시뮬레이션 하였다.

정지궤도 위성은 이심률과 궤도경사각이 거의 0에 가깝기 때문에 섭동함수의 분모가 0이 되는 특이점이 발생한다. 따라서 특이점을 제거하기 위해 다음과 같은 새로운 궤도 요소를 정의하여 사용한다.

$$\begin{aligned}
 a & \\
 e_c &= e \cos(\omega + \Omega) \\
 e_s &= e \sin(\omega + \Omega) \\
 W_c &= \sin i \cos \Omega \\
 W_s &= \sin i \sin \Omega \\
 \lambda &= \omega + \Omega + M
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 a 는 궤도장반경, e 는 이심률, ω 는 근지점 인수, Ω 는 승교점 적경, i 는 궤도경사각, λ 는 위성의 평균 적경, M 는 평균근점이각이다. 정지궤도 위성의 경우에는 궤도경사각이 매우 작으므로 식 (2)와 같이 근사하여 사용하기도 한다. 근사시킨 궤도경사각 벡터 W_c, W_s 는 2차원 평면상에 궤도경사각의 변화를 나타내는 요소로 사용된다.

$$\begin{aligned}
 W_c &= \sin i \cos \Omega \doteq i \cos \Omega \\
 W_s &= \sin i \sin \Omega \doteq i \sin \Omega
 \end{aligned} \tag{2}$$

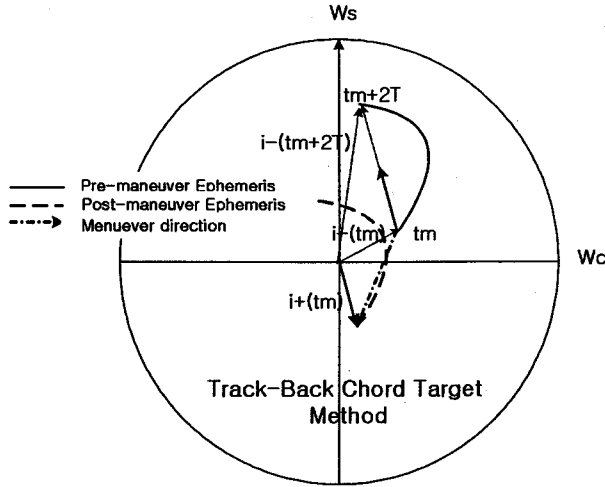


그림 2. Track-Back Chord Target(TBCT) 기법. 그림의 가로축은 궤도경사각 벡터의 x 성분인 W_c , 세로축은 궤도경사각 벡터의 y 성분인 W_s 를 나타낸다.

3. 남북방향 위치유지 기법

3.1 Maximum Compensation Target(MCT) 기법

MCT 기법은 위치유지 조정 후 궤도경사각 벡터가 원점을 지나게 함으로써 위치유지 주기를 최대로 하는 방법으로 궤도경사각의 추가적인 장주기 변화를 감소시킬 수 있다(Gartrell 1983). 이 기법은 위치유지 조정 주기를 $2T$ 라고 할 때, T 시간 후($t_m + T$)의 궤도경사각 벡터를 예측하여 현재(t_m)의 궤도경사각 벡터와의 차를 계산한다. 그리고 원점으로부터 계산된 궤도경사각 벡터 차만큼 뺀 지점으로 위치유지 조정시킨다. 즉, 위치유지조정 T 시간 후에는 그림 1과 같이 궤도경사각 벡터가 원점을 지나게 되며 식 (3)과 같이 표현된다. 식 (3)에서 -, +는 궤도조정 전후를 나타내는 기호로써 $i^+(t_m)$ 은 궤도조정 후 t_m , $i^+(t_m + T)$ 는 궤도조정 후 $t_m + T$, $i^-(t_m)$ 은 궤도조정 전 t_m , $i^-(t_m + T)$ 는 궤도조정 전 $t_m + T$ 시각에서의 궤도경사각 벡터를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 i^+(t_m) = i_{\otimes} &\implies i^+(t_m + T) = 0 \\
 i_{\otimes} &= i^-(t_m) - i^-(t_m + T)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3.2 Track-Back Chord Target(TBCT) 기법

TBCT 기법은 위치유지조정 전과 후의 궤도 진화가 유사하도록 맞추는 기법이다(Lee & Eun 1995). 이 기법에서는 현재(t_m)의 궤도경사각 벡터와 $2T$ 시간 후($t_m + 2T$)의 궤도경사각 벡터를 예측하여 그 차이의 절반을 계산한다. 그리고 원점으로부터 계산된 궤도경사각 벡터 차의 절반만큼 뺀 지점으로 위치유지 조정시킨다. 즉, 위치유지조정 이후에는 그림 2와 같이 원점을 중심으로 대칭적인 진화를 거듭하도록 하며 이는 식 (4)와 같이 표현된다. 식 (4)에서 -는 궤도조정 전을 나타내는 기호로써 $i^-(t_m)$ 은 궤도조정 전 t_m , $i^-(t_m + T)$ 는 궤도조정 전 $t_m + T$ 시각에서의 궤도경사각 벡터를

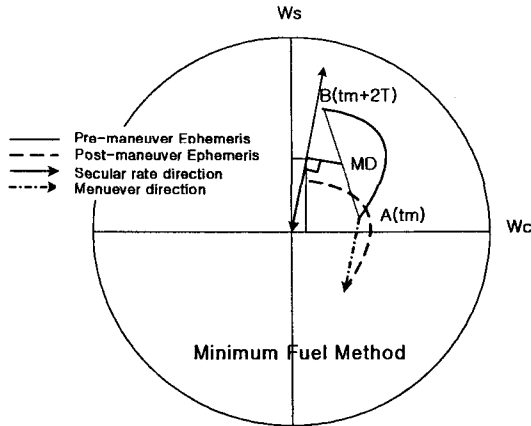


그림 3. Minimum Fuel Target(MFT) 기법. 그림의 가로축은 궤도경사각 벡터의 x 성분인 W_c , 세로축은 궤도경사각 벡터의 y 성분인 W_s 를 나타낸다.

나타낸다. 궤도경사각 위치유지 조정 주기가 짧을 경우에는 TBCT 기법과 MCT 기법이 거의 유사한 양상을 보이므로 구분하기 힘들다.

$$\begin{aligned} \Delta i &= i^-(t_m + 2T) - i^-(t_m) \\ i_{\oplus} &= \frac{i^-(t_m) - i^-(t_m + 2T)}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 Minimum Fuel Target(MCT) 기법

MFT 기법은 영년변화 방향과 평행한 방향으로 일어나는 장주기 변화의 보정을 통해 궤도경사각을 조정하여 기동 연료량을 최소화 시키는 기법으로 연료소비를 2.3~4.0% 정도 감소시킨다(Slavinskas et al. 1998).

궤도경사각 벡터가 A에서 B로 이동된다고 가정하고 $\hat{i}_x, \hat{i}_y(W_c, W_s)$ 방향에 대한 영년변화 요소(secular drift component)가 v_x, v_y 라고 정의하면 MFT 기법을 이용한 궤도경사각 벡터의 변화량은 식 (5)와 같다. 여기서 a_x, a_y 는 t_m 시각에서의 궤도경사각 벡터(그림 3의 점 A)의 x,y 성분을 나타내고 b_x, b_y 는 $t_m + 2T$ 시각에서의 궤도경사각 벡터(그림 3의 점 B)의 x,y 성분을 나타낸다.

$$\Delta i = -\frac{1}{2}(\hat{i}_x v_x + \hat{i}_y v_y) \frac{[(a_x + b_x)v_x + (a_y + b_y)v_y]}{(v_x^2 + v_y^2)} \quad (5)$$

MFT 기법은 영년변화 방향의 장주기 변화만을 보정하는 방법이다. 따라서 일년 중 방향 태양의 주기적 섭동향이 최대가 되는 시기에 MFT 기법을 사용하면 방향의 주기적 섭동향의 영향으로 궤도경사각 벡터가 위치보존 한계각을 이탈할 수도 있다. 따라서 적당한 시기에 초기화가 필요하며 초기화 방법으로는 TBCT, MCT 기법이 주로 사용 된다(Slavinskas et al. 1998, 안용영과 김천휘 1997).

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

현재 통신해양기상위성은 동경 128.2°E에 위치할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 MCT, TBCT, MFT 기법을 이용하여 통신해양기상위성 1호의 남북방향 위치유지를 수행하였다. 시뮬레이션을 위

표 1. 남북방향 위치유지 시뮬레이션을 위한 초기조건.

		Value	Unit
COMS	Longitude	128.2	°E
Orbit	a	42164.806	km
Elements	e	0.0001142	-
	i	0.037512	Deg
	Ω	118.423	Deg
	ω	253.708	Deg
	M	186.275	Deg
Simulation	Epoch	2008.12.01 00:00:00	YYYY.MM.DD hh.mm.ss (UTC)
Condition	N/S maneuver cycle	14	Days
	Box Limit (for i)	0.05	Deg

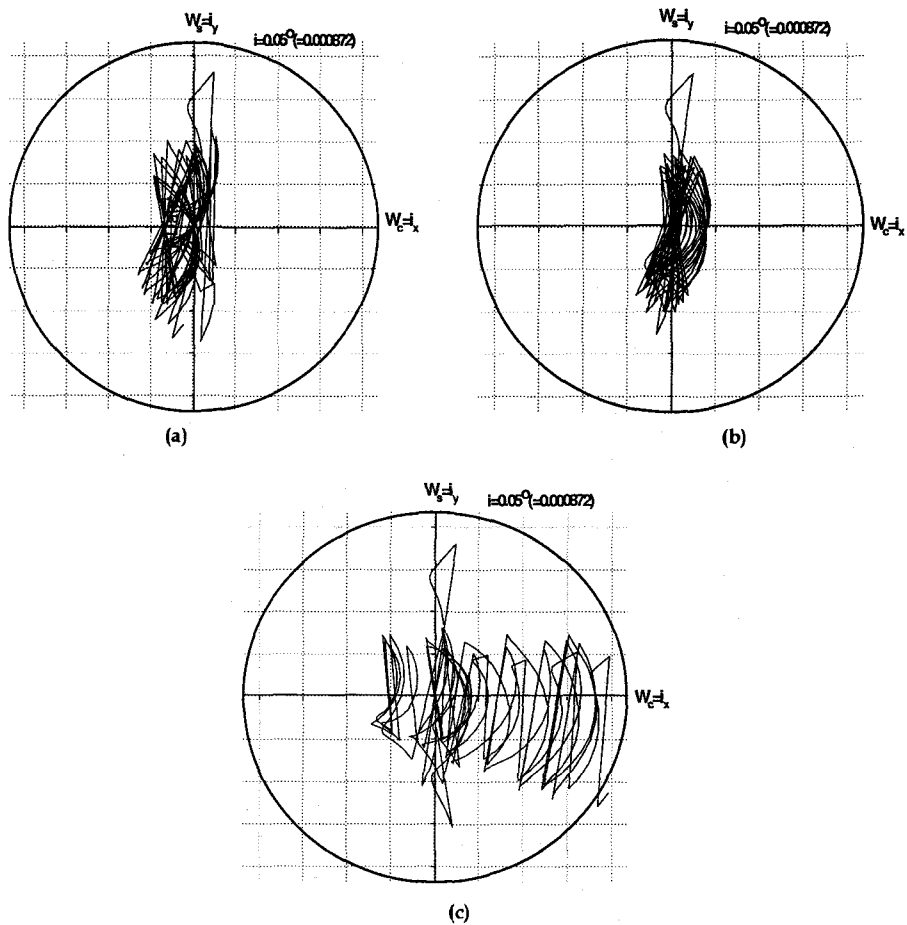


그림 4. 시뮬레이션 기간 내 궤도경사각 벡터의 변화. 그림의 가로축은 궤도경사각 벡터의 x 성분인 W_c , 세로축은 궤도경사각 벡터의 y 성분인 W_s 를 나타낸다. (a) MCT 기법, (b) TBCT 기법, (c) MFT 기법

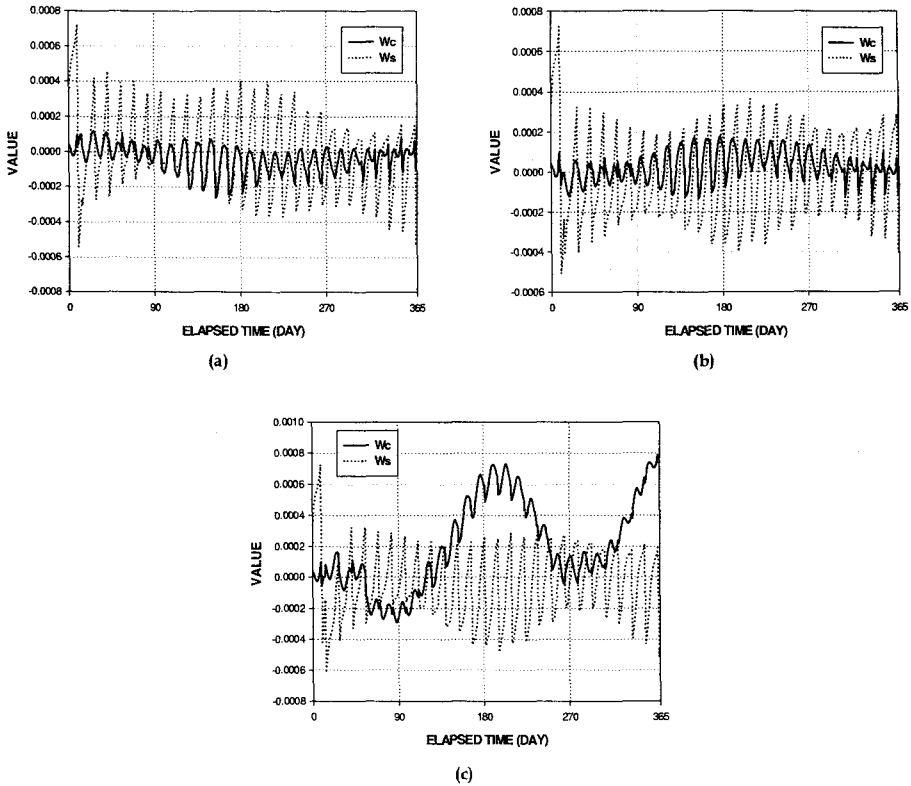


그림 5. 시뮬레이션 기간 내 궤도경사각 벡터의 변화. 그림의 가로축은 경과시간, 세로축은 궤도경사각 벡터의 크기를 나타낸다. (a) MCT 기법, (b) TBCT 기법, (c) MFT 기법

한 초기조건은 표 1과 같고 각 기법에 대해 동일한 조건을 적용하였다. 표 1의 초기조건을 바탕으로 2008년 12월 1일부터 1년 동안 남북방향 위치유지를 수행하였다. 위치유지 주기는 14일로 고정하였고 궤도경사각 한계(Box limit)는 0.05° 로 가정하였다. 남북방향 위치유지에 필요한 속도를 계산하기 위해서 태양과 달의 중력 그리고 지구 비구형 포텐셜에 의한 섭동력을 포함시켰다.

그림 4는 3가지 방법으로 구현된 궤도경사각 벡터 W_c , W_s 의 비교 그림이며 한계원의 사이즈는 0.05° (0.000872 rad)로 모두 동일하다. MCT 기법은 원점을 중심으로 대칭적으로 진화하고 있으며 TBCT 기법은 궤도조정 전의 진화를 반복함으로써 궤도진화의 범위가 가장 작은 이상적인 방향으로 진화하고 있다. 반면 MFT 기법은 시간이 지날수록 한쪽 방향으로 치우치는 경향을 보이고 있는데 이는 초기화 과정이 생략되었기 때문이다. 이와 같은 양상은 시간에 따른 궤도경사각 벡터의 변화를 나타내는 그림 5에서도 확인 할 수 있다. MCT, TBCT 기법은 비슷한 양상을 보이며 상대적으로 y 축 즉, W_s 방향으로의 이동이 크지만 MFT 기법은 W_s 방향의 변화는 MCT, TBCT 기법과 유사하고 W_c 방향의 변화가 이보다 더 크게 나타난다.

그림 6은 시간에 따른 궤도경사각 크기의 변화를 나타낸다. 시뮬레이션 시작부터 첫 번째 위치유지 수행 전까지의 궤도경사각이 유독 큰 이유는 초기 궤도경사각이 0.02° 가 넘기 때문이다. 이러

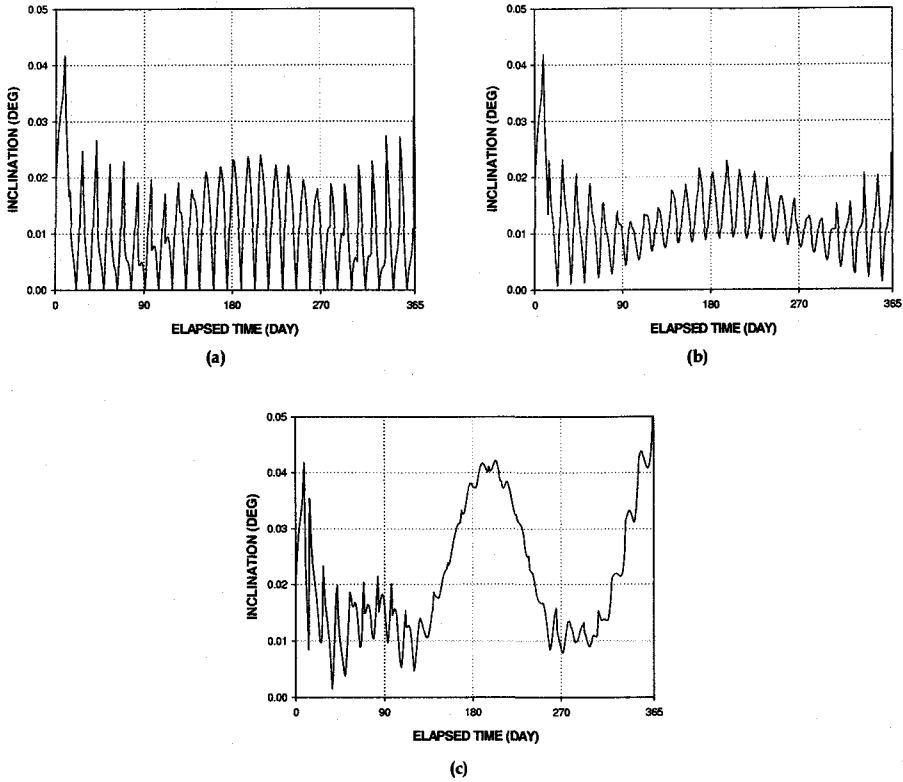


그림 6. 시뮬레이션 기간 내 궤도경사각 벡터의 변화. 그림의 가로축은 경과시간, 세로축은 궤도경사각 벡터의 크기를 나타낸다. (a) MCT 기법, (b) TBCT 기법, (c) MFT 기법

표 2. 남북방향 위치유지 기법에 따른 속도증분의 차이.

남북방향 위치유지 기법	1년간의 남북방향 위치유지에 필요한 총 속도증분
MCT	52.6065 m/s
TBCT	52.2383 m/s
MFT	51.5428 m/s

한 이유로 시뮬레이션 시작 10일 후에 첫 위치유지 조정을 수행하였다. 시뮬레이션 초기를 제외하고 MCT, TBCT 기법을 사용하였을 때는 궤도경사각이 0.03° 내에서 잘 유지가 되지만 MFT 기법을 사용하였을 때는 시간이 갈수록 궤도경사각이 커지면서 0.05° 범위 내에서 겨우 유지되는 모습을 볼 수 있다. 이는 MFT 기법 사용시 초기화를 고려하지 않아 궤도경사각 벡터의 진화가 한쪽으로 치우치는 것으로 초기화 기법을 고려하면 해결될 것이다. 그림 7은 1년간 남북방향 위치유지 조정시 필요한 속도증분의 변화를 나타낸다. 아래선은 각 기동시 필요한 속도증분을 나타내고 윗선은 시뮬레이션 초기부터 그 기동까지의 누적 속도증분을 나타낸다. 1년간 3가지 기법 모두 총 27회의 위치유지

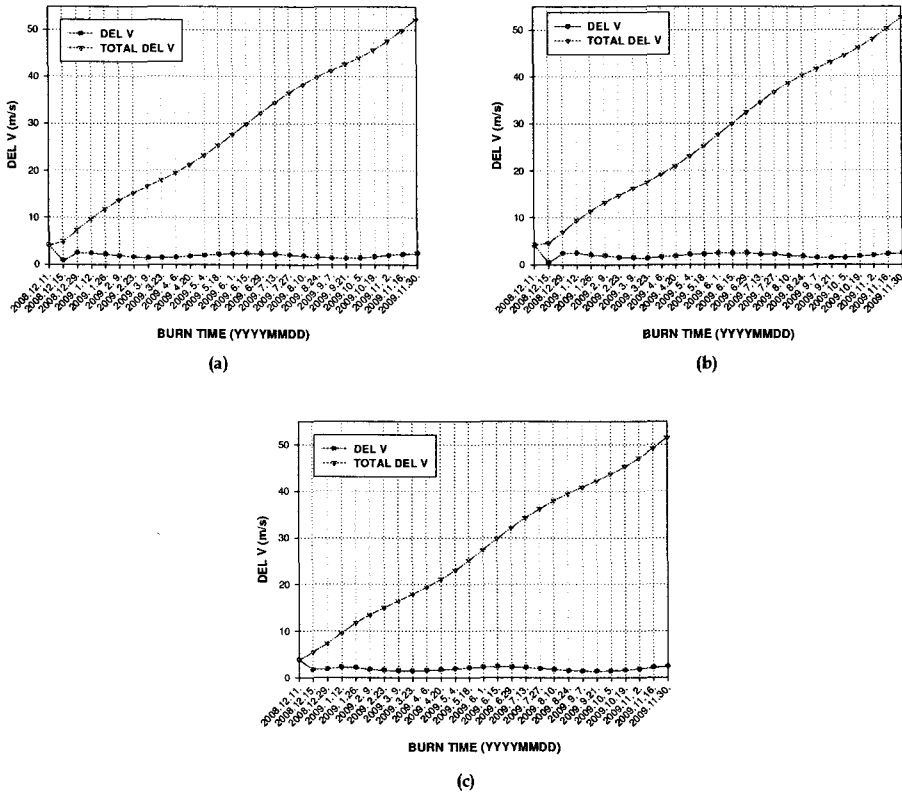


그림 7. 남북방향 위치유지 조정시 필요한 속도증분 변화. 그림의 가로축은 남북방향 위치유지 조정날짜, 세로축은 속도증분을 나타낸다. (a) MCT 기법, (b) TBCT 기법, (c) MFT 기법

기동을 수행하였고 각 기동시 필요한 속도 증분은 2-3m/s 정도이다. 세 가지 기법을 사용하여 1년간 남북방향 위치유지를 수행할 경우 필요한 속도증분은 MCT 기법 사용시 52.6065m/s, TBCT 기법 사용시 52.2383m/s, MFT 기법 사용시 51.5428m/s이며 표 2에 나타내었다. MFT기법 사용시 1년간 필요한 속도증분이 가장 작다는 것을 알 수 있다. 이병선(2000)에서 계산된 ‘남북방향 위치유지에 필요한 연도별 속도증분’은 2008년 51m/s, 2009년 49.5m/s로 이 결과를 2008년과 2009년에 걸쳐 수행된 본 연구의 결과와 정확히 비교하기는 어렵다. 하지만 본 연구 결과의 적합성을 판단하는 잣대로 활용할 수 있으며 이 과정을 통해 본 연구의 결과가 적절함을 확인하였다.

본 연구에서는 남북방향 위치유지 기법의 적합성 여부 판단에 1년간 필요한 속도증분과 위치유지시 궤도경사각 진화 범위를 고려하였다. TBCT 기법은 궤도경사각 진화범위가 가장 작았으나 필요한 속도증분이 MFT 기법보다 컸다. 반면에 MFT 기법은 필요한 속도증분이 가장 적었으나 궤도경사각 진화 범위가 TBCT 기법보다 컸다. 이러한 결과를 바탕으로 통신해양기상위성 1호의 남북방향 위치유지 기법으로 1년간 필요한 속도증분이 가장 적은 MFT 기법과 위치유지시 궤도경사각 진화 범위가 가장 작은 TBCT 기법이 적합하다고 판단하였다.

5. 결론

본 연구에서는 세 가지 남북방향 위치유지 기법을 통해 통신해양기상위성 1호에 적합한 남북방향 위치유지 기법을 결정하였다. 참고문헌의 결과와 비교하여 구현된 세 가지 기법(MCT, TBCT, MFT)의 시뮬레이션 결과가 적절함을 검증하였고, MFT 기법 사용시 필요한 속도증분이 51.5428m/s로 가장 적고 TBCT 기법 사용시 궤도경사각 진화의 범위가 가장 작음을 확인하였다. 결과적으로 필요한 속도증분과 위치유지시 궤도경사각 진화의 범위를 고려한다면 통신해양기상위성 1호의 남북방향 위치유지 기법으로 MFT 기법과 TBCT 기법이 적합하다. 본 연구에서 수행된 남북방향 위치유지 기법은 통신해양기상위성 1호에 적용될 예정이며 추후 초기화 과정이 적용된 MFT 기법에 대한 결과 도출 작업이 추가적으로 수행될 것이다.

참고문헌

- 안용영, 김천휘 1997, 한국우주과학지, 14, 150
 이병선 2000, 박사학위논문, 연세대학교
 Gartrell, C. F. 1983, J. Guidance, 6, 220
 Lee, B. -S. & Eun, J. W. 1995, JA&SS, 12, 102
 Pocha, J. J. 1987, An Introduction to Mission Design for Geostationary Satellite (Dordrecht: D. Reidel), pp.103-129
 Shrivastava, S. K. 1978, J. Spacecraft and Rockets, 15, 67
 Slavinskas, D. D., Dabbaghi, H., Henden, W. J., & Johnson, G. K. 1998, J. Guidance, 11, 584