

접촉궤도요소로 부터 변환된 NORAD TLE를 이용한 정지위성의 안테나 포인팅

이병선[†], 김해연, 황유라, 김재훈
한국전자통신연구원 위성관제기술연구팀

ANTENNA POINTING TO THE GEO SATELLITE USING CONVERTED NORAD TLE FROM OSCULATING ORBITAL ELEMENTS

Byoung-Sun Lee[†], Hae-Yeon Kim, Yoona Hwang, and Jaehoon Kim
Satellite Ground Control Technology Team, ETRI, Daejeon 305-350, Korea
E-mail: lbs@etri.re.kr

(Received May 8, 2007; Accepted May 23, 2007)

요 약

접촉 케플러 궤도요소로부터 변환된 NORAD TLE를 정지궤도 위성의 안테나 포인팅에 직접 사용하기 위한 분석을 수행하였다. 일주일에 한번씩 동서방향과 남북방향의 위치유지를 위한 궤도 조정을 수행하고 하루에 두 번씩 추력기를 이용한 모멘텀 덤핑을 통해서 궤도가 계속 변하는 통신해양기상 위성에 대해서 변환된 NORAD TLE를 이용한 안테나 포인팅 오프셋 각을 계산하여 위성신호를 수신할 수 있는지 검토하였다. 이를 통해 변환된 NORAD TLE를 사용하여 위성 관제시스템의 안테나 포인팅에 관련된 인터페이스를 간단하게 수행할 수 있음을 보였다. 또한 이심률이 큰 천이궤도에 있어서 위성의 평균 근점각에 따른 변환된 NORAD TLE 값의 차이를 분석하여 천이궤도의 원지점 근처에서의 NORAD TLE 변환 값이 더 좋은 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Antenna pointing analysis for a geostationary satellite has been performed for using the NORAD Two-Line-Elements (TLE) converted from osculating Keplerian orbital elements. In order to check the possibility of the reception of the satellite signal, the antenna offset angles have been derived for the Communications, Ocean, and Meteorological Satellite (COMS) which carries out weekly East-West and North-South station-keeping maneuvers and twice a day thruster assisted momentum dumping. Throughout the analysis, it is shown that the use of converted NORAD TLE simplifies the antenna pointing related interfaces in satellite mission control system. For a highly eccentric transfer orbit cases, further analysis presents that the converted NORAD TLE from near apogee gives more favorable results.

Key words: NORAD TLE, COMS, antenna pointing

[†]corresponding author

1. 서 론

NORAD Two Line Element(TLE)는 북미 방공사령부에서 전세계적인 추적망을 이용해서 지구 상공의 약 8,500여개의 우주물체에 대한 궤도결정을 수행하여 만들어내는 평균 궤도요소이다(Kelso 1997). 이에 따라 자체적인 위성 추적시스템과 궤도결정 프로그램을 가지고 있지 않은 위성운영 기관에서는 NORAD TLE를 이용하여 위성의 궤도를 예측하고 임무를 계획한다. 이와 같은 이유로 대부분의 위성 안테나 제어유닛에서는 NORAD TLE를 기본적인 입력으로 사용할 수 있다. NORAD TLE를 입력으로한 궤도예측은 해석적인 궤도 방정식을 이용하여 수행할 수 있으며 이때 궤도주기 225분을 기준으로 SGP4 또는 SDP4를 사용할 수 있다(Hoots & Roehrich 1980).

한편, 자체적인 궤도결정 시스템을 갖추고 있는 위성운영기관에서는 위성의 추적자료를 이용하여 직접 NORAD TLE 형식의 궤도요소를 계산하여 위성운영에 사용할 수도 있다(Jochim et al. 1996). 이와 같은 연구는 국내에서도 저궤도 위성에 대해서 수행되었다(Cho et al. 2002). 일반적으로 NORAD TLE가 주어지면 궤도주기에 따라서 SGP4 또는 SDP4를 이용하여 어떤 시각에 대한 접촉궤도 요소를 얻을 수 있는데 이와 같은 관계식을 역으로 이용하면 접촉 케플러 궤도요소로부터 NORAD TLE를 구할 수 있다. 이에 따라 위성의 추적자료를 이용한 궤도결정을 수행하여 어떤 시각에 있어서 접촉 케플러 궤도요소를 결정했을 때 이로부터 NORAD TLE 형식의 평균궤도요소를 계산하는 방법도 계속 연구되었다(Ernandes 1994, Lee 2002, Lee & Park 2003).

지상의 안테나로 위성을 추적하는 방법으로는 시간에 따른 위성의 방위각과 양각을 예측한 데이터를 사용하는 프로그램 추적방식과 위성의 신호를 직접 추적하는 자동 추적방식이 있다. 다목적 실용위성과 같은 저궤도 위성의 경우 미리 예측해서 저장해 놓은 시간에 대한 방위각과 양각 데이터를 사용해서 위성이 떠오를 때 프로그램 추적모드로 위성을 추적하고 위성의 신호가 수신되면 자동 추적모드로 전환시키는 방식을 사용하고 있다. 그렇지만 정지궤도 위성의 경우에는 위성이 지상국을 기준으로 떠오르고 지는 것이 아니라 항상 접촉할 수 있는 위치에 있다. 그렇기 때문에 매일 24시간에 대한 시간별 방위각과 양각 데이터를 여러 개의 지상 안테나에 대해서 예측해서 보내주는 것은 지상국 인터페이스를 복잡하게 할 수가 있다. 그렇지만 안테나 포인팅 데이터를 보내주지 않는다면 위성추적 안테나에 대한 자동추적 모드의 고장시에 위성의 관제운영에 문제가 될 수 있다.

따라서 이 논문에서는 정지궤도 위성의 접촉 케플러 궤도요소를 NORAD TLE 형식으로 변환해서 SDP4에 의한 궤도예측을 수행해서 위성의 방위각과 양각을 계산했을 경우 위성의 운영에 문제가 없음을 보이고자 한다. 이와 같은 방법을 통해서 안테나 포인팅을 위한 지상국 인터페이스를 NORAD TLE로 단순화 시킬 수 있다. 먼저 접촉 케플러 궤도요소를 NORAD TLE 형식으로 변환시키는 과정을 Lee(2002)의 방법으로 보여준다. 그리고 2008년에 발사될 정지궤도 위성인 통신해양기상 위성에 대해서 접촉 케플러 궤도요소를 이용한 안테나 포인팅과 변환된 NORAD TLE를 이용한 안테나 포인팅 각도의 차이를 분석한다. 통신해양기상위성은 일주일에 한번씩 동서방향과 남북방향의 위치유지 조정을 수행하며 하루에 두번씩 위성의 자세제어를 위해 추력기를 사용한 휠오프로딩을 수행한다. 따라서 통신해양기상 위성의 궤도는 매일 변화하게 되는데 이와 같은 환경에서도 변환된 NORAD TLE에 의한 안테나 포인팅이 제대로 수행될 수 있는지를 분석한다. 또한 통신해양기상 위성이 정지궤도에서 운영될 때 뿐만 아니라 천이궤도에 있을 경우에 변환된 NORAD TLE에 의한 안테나 포인팅은 어떤 결과를 보이는지도 분석한다.

2. NORAD TLE 형식으로의 변환식

케플러 궤도요소는 어떤 시각에 대해서 6개의 요소로 표시되며 NORAD TLE 역시 관련된 6개의 궤도요소로 표시될 수 있다.

$$y_i = f_i(x_1, \dots, x_6), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

여기에서 y 는 케플러궤도요소이고 x 는 NORAD 평균궤도요소이다.

식 (1)에 대한 테일러 급수로의 전개는 식 (2)와 같이 나타난다(Walter 1967).

$$\begin{aligned} f_i(x_1, \dots, x_6) = & f_i(x_1^{(a)}, \dots, x_6^{(a)}) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1^{(a)}} (x_1 - x_1^{(a)}) + \frac{\partial f_i}{\partial x_2^{(a)}} (x_2 - x_2^{(a)}) + \dots \\ & + \frac{\partial f_i}{\partial x_6^{(a)}} (x_6 - x_6^{(a)}), \quad \text{higher order terms, } i = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 고차항을 무시하면 NORAD TLE인 $x_i^{(a)}$ 를 얻을 수 있다. 식 (2)는 NORAD TLE의 여섯개 궤도요소에 대해서 식 (3)과 같은 식이 성립된다(Lee 2002).

$$\Delta y_i = M \cdot \Delta x_i \quad (3)$$

여기에서, Δy_i 와 Δx_i 는 실제값과 근사값과의 차이이며 M 은 식 (4)와 같은 여섯개의 NORAD 요소 $x_i^{(a)}$ 에 대한 f_i 의 편미분인 6×6 행렬로 나타난다.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1^{(a)}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2^{(a)}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_6^{(a)}} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_1^{(a)}} & \frac{\partial f_6}{\partial x_2^{(a)}} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial x_6^{(a)}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (3)은 NORAD TLE 요소에 대해서 식 (5)로 변환될 수 있다. 여기에서 $M^{-1} = c_{ij}$ 이다.

$$x_i = x_i^{(a)} + \sum_{j=1}^6 c_{ij} (y_j - y_j^{(a)}), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (5)$$

각각의 편미분항은 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1^{(a)}} = \frac{f(x_1^{(a)} + \Delta x_1^{(a)}, x_2^{(a)}, \dots, x_6^{(a)}) - f(x_1^{(a)}, x_2^{(a)}, \dots, x_6^{(a)})}{\Delta x_1^{(a)}} \quad (6)$$

이에 따라 NORAD 궤도요소는 아래와 같은 반복계산에 의해서 구해진다.

$$x_i^{(a+1)} = x_i^{(a)} + \sum_{j=1}^6 c_{ij} (y_j - y_j^{(a)}), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (7)$$

반복계산은 $(y_j - y_j^{(a)})$ 값이 충분히 작을 때까지 계속되며 이 논문에서는 1.0×10^{-8} 을 사용하였다.

표 1. 접촉 케플러 궤도요소(2008/12/12 00:00:00.0 UTC).

a(km)	e(-)	i(deg)	Ω (deg)	ω (deg)	M(deg)
42165.30200	0.0002725	0.0319	352.8810	290.7593	285.6002

표 2. 변환된 NORAD 평균궤도요소(8347.0000000).

n (rev/day)	e(-)	i(deg)	Ω (deg)	ω (deg)	M(deg)
1.00273636	0.0002649	0.0318	352.8800	298.6746	277.6859

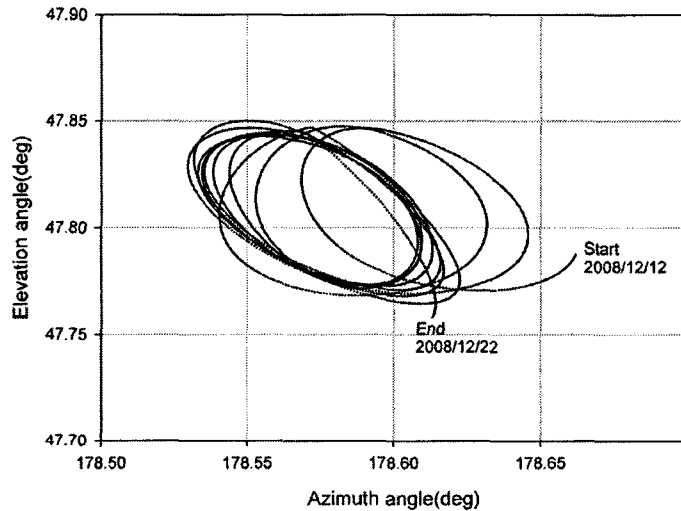


그림 1. 지상 안테나의 방위각과 양각의 10일간 변화.

3. 정지궤도에 대한 TLE 변환

정지궤도에 위치한 통신해양기상위성의 접촉 케플러 궤도요소는 표 1과 같으며 이에 대해서 NORAD TLE 변환을 수행하여 얻은 값은 표 2와 같다. 2008년 12월 12일 0시 0분 0초는 TLE 형식으로 8347.000000으로 변환되고(2008년 347일) 궤도장반경 42165.302km는 평균 운동값 1.00273636rev/day으로 변환될 수 있으며 이값은 평균 궤도장반경 42164.215249km와 같다.

변환된 NORAD TLE를 이용한 안테나 포인팅의 정확도를 분석하기 위해서 표 1의 케플러 궤도요소를 10일간 궤도예측하여 이 값을 기준값으로 사용하였다. 통신해양기상위성은 일주일에 한번씩 동서방향과 남북방향으로 위치유지를 위한 궤도조정을 수행하고 하루에 두번씩 자세제어를 위해서 추력기를 사용한 휠오프로딩을 수행한다. 이에 따라서 통신해양기상위성의 궤도는 매일 추력기에 의한 섭동을 받아서 변화하게 된다. 이와 같은 이유로 통신해양기상 위성의 기준값을 위한 궤도예측을 수행할 때에는 표 3과 같이 하루에 두 번 수행되는 휠오프로딩(WOL)과 일주일에 한번씩 수행되는 동서방향 위치조정(EWSK)과 남북방향 위치조정(NSSK)을 포함시켰다.

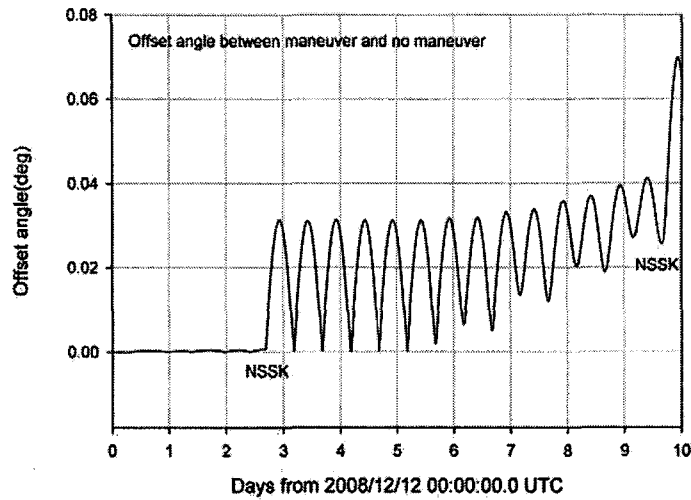


그림 2. 궤도조정을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대한 안테나 오프셋 각의 변화.

표 3. 통신해양기상 위성의 10일간의 추력기 사용에 의한 속도변화.

No.	Type	Maneuver Date & Time(UTC)	Delta V (m/sec)	No.	Type	Maneuver Date & Time(UTC)	Delta V (m/sec)
1	WOL	20081212 070712	North -0.0125	11	EWSK	20081217 095156	East -0.02300
2	WOL	20081212 152212	North -0.0125	12	WOL		North -0.0125
3	WOL	20081213 070712	North -0.0125	13	WOL	20081217 152212	North -0.0125
4	WOL	20081213 152212	North -0.0125	14	WOL	20081218 070712	North -0.0125
5	WOL	20081214 070712	North -0.0125	15	WOL	20081218 152212	North -0.0125
6	NSSK	20081214 162709	North -1.5	16	WOL	20081219 070712	North -0.0125
7	WOL	20081215 070712	North -0.0125	17	WOL	20081219 152212	North -0.0125
8	WOL	20081215 152212	North -0.0125	18	WOL	20081220 070712	North -0.0125
9	WOL	20081216 070712	North -0.0125	19	WOL	20081220 152212	North -0.0125
10	EWSK	20081216 215352	East 0.00571	20	WOL	20081221 070712	North -0.0125
	WOL		North -0.0125		NSSK	20081221 162709	North -1.5

그림 1은 표 1에 있는 접촉 케플러 궤도요소와 표 3에 있는 10일 간의 추력기에 의한 속도변화를 포함시켜서 얻은 안테나 방위각과 양각의 변화로서 대전을 기준으로 한 것이다. 그림을 보면 남북방향의 궤도조정에 의한 꺾임현상을 볼 수 있다.

그림 2는 표 1의 케플러 궤도요소를 가지고 안테나 포인팅을 예측할 때 표 3의 각종 궤도조정을 고려한 경우와 이를 고려하지 않은 경우에 있어서 안테나 오프셋 각을 나타낸다. 2일까지는 아주 작은 WOL에 의한 변화만 보이지만 2일에서 3일사이에 일어난 NSSK에 의해서 그 이후로는 오프셋 각의 변화가 크게 나타난다.

그림 3은 그림 2와 같은 경우에 있어서 시선거리의 차이를 보여 준다. NSSK에 의해서 시선거리가 ±2km 정도 나타남을 알 수 있다.

그림 4는 표 1의 케플러 궤도요소와 표 3의 궤도조정을 포함시켜서 얻은 기준궤도의 안테나 포

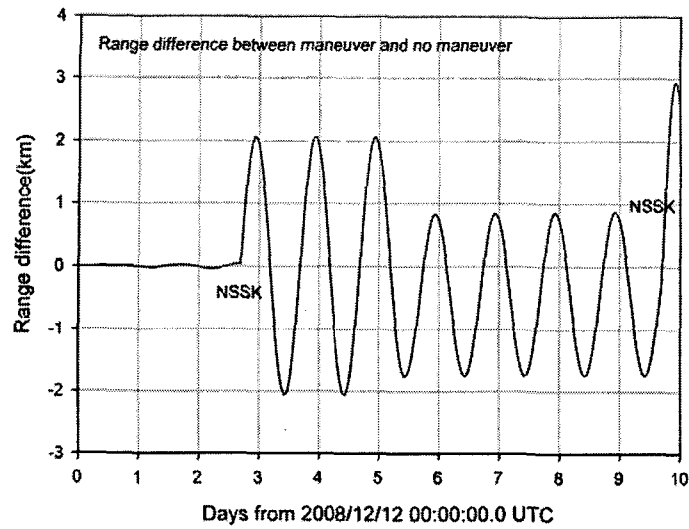


그림 3. 궤도조정을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대한 시선거리의 차이.

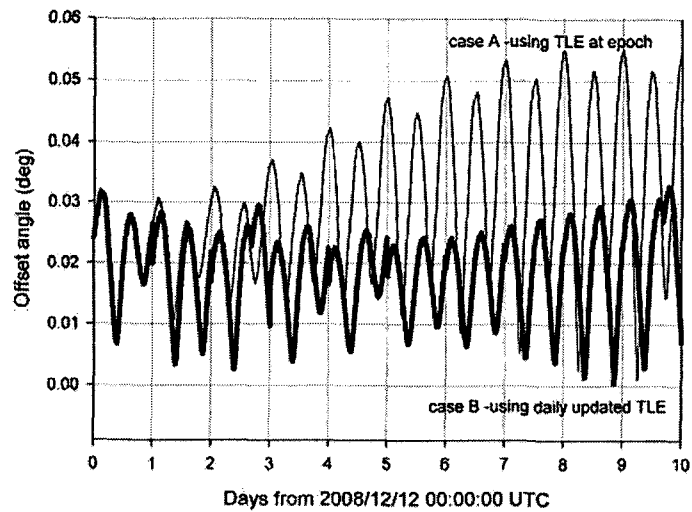


그림 4. 기준궤도를 이용한 안테나 포인팅과 변환된 NORAD TLE를 이용한 경우의 오프셋각 변화(진한 선으로 표시된 오프셋 각은 매일 새롭게 변환된 NORAD TLE를 사용한 경우이고 흐린 선으로 표시된 오프셋 각은 표1의 값을 변환시켜서 10일간 사용한 경우임).

인팅과 표 2의 변환된 NORAD TLE를 사용해서 얻은 안테나 포인팅간의 오프셋 각을 표시한다(흐린 선으로 표시된 그림 - case A. 기준시각에서의 TLE를 사용한 경우). 그림 4에 있는 또다른 오프셋 각은 기준궤도로부터 매일 0시에 대한 NORAD TLE를 변환시켜서 얻은 안테나 포인팅으로부터 얻은 오프셋 각이다(진한 선으로 표시된 그림 - case B. 매일 갱신한 TLE를 사용한 경우). Case A의 경

표 4. 천이궤도에서의 접촉 케플러 궤도요소(2008/12/30 21:50:00 UTC).

a(km)	e(-)	i(deg)	Ω (deg)	ω (deg)	M(deg)
24487.2009	0.729383	7.002442	182.13000	178.273364	0.0

표 5. NORAD TLE 변환 시험을 위한 각종 case.

Case	Epoch(UTC)	Mean anomaly(deg)	Comments
6	2008/12/30 21:50:00	0.0	Perigee
5	2008/12/31 03:00:00	176.566	Near Apogee
4	2008/12/31 08:25:00	1.668	Near Perigee
3	2008/12/31 13:40:00	181.098	Near Apogee
2	2008/12/31 18:55:00	0.516	Near Perigee
1	2008/12/31 23:55:00	171.39765	Near Apogee

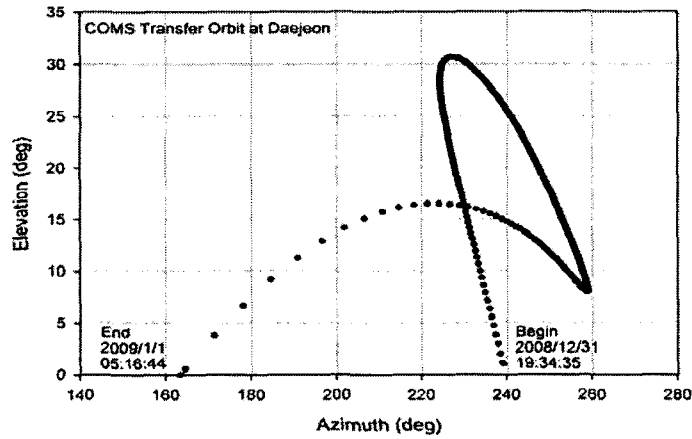


그림 5. 대전에서의 천이궤도 안테나 포인팅 프로파일.

우에 NORAD TLE는 표 3에 있는 궤도조정 값이 전혀 고려되지 않은 것이며 이경우에 10일 간의 안테나 오프셋은 0.06도 이하로 나타난다. Case B의 경우에는 NORAD TLE를 매일 갱신하기 때문에 궤도조정 값이 포함된 것으로 볼 수 있다. 이경우에는 오프셋 각이 0.03도 이내로 유지되는 것을 볼 수 있다. 통신해양기상 위성에서 사용하는 안테나는 13미터 급이고 텔레메트리 주파수는 S-대역으로 2.2GHz이다. 이에 대한 안테나 Half-Power-Beam-Width(HPBW)는 약 0.734도이며 그림 4에 있는 안테나 오프셋 각은 HPBW의 1/10 수준으로 위성의 신호를 추적하는데는 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 실제로 위성을 운영할 때에는 궤도결정을 매일 수행하고 이에 따라 NORAD TLE도 매일 갱신할 수 있다.

4. 천이궤도에 대한 TLE 변환

앞에서는 정지궤도 위성에 대해서 케플러 궤도요소를 TLE형식으로 변환시킨 궤도요소를 사용

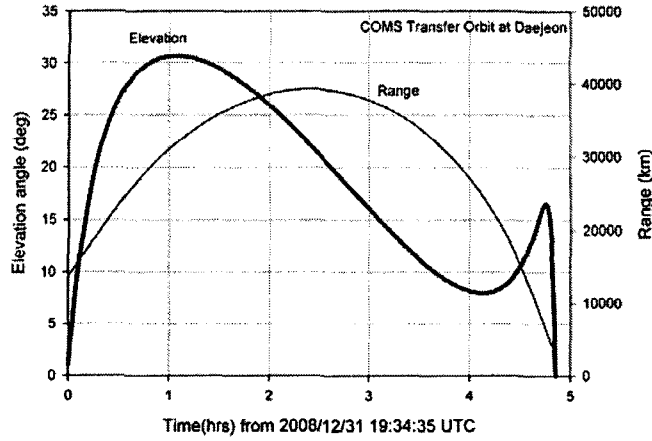


그림 6. 대전에서의 천이궤도 양각 및 시선거리 프로파일.

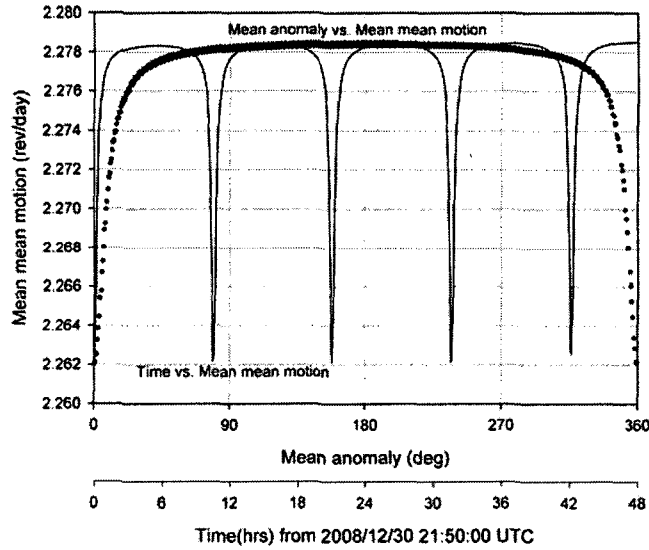


그림 7. 평균근점각에 대한 평균운동 값의 프로파일.

하여 안테나 포인팅을 수행하는데 문제가 없음을 보였다. 여기에서는 위성의 발사초기 단계인 천이 궤도에 대해서 TLE형식으로 변환된 궤도요소를 사용할 수 있는가에 대해서 분석한다. 표 4는 천이 궤도 요소로서 아리안 발사체를 이용한 경우이다. 표 4의 천이궤도요소로부터 궤도예측을 수행하여 표 5에 있는 테스트 case에 해당하는 시각에 대해서 케플러 궤도요소를 TLE 형식으로 변환시켰다. 표 5의 시각들은 각각 천이궤도의 근지점과 원지점에 해당되는 시각이다. 이를 통해서 천이궤도의 위성위치에 따른 TLE 변환의 정밀도를 분석할 수 있다.

궤도예측에 의한 안테나 포인팅은 2008/12/31 19:34:35로부터 2009/1/1 05:16:44까지 수행하였

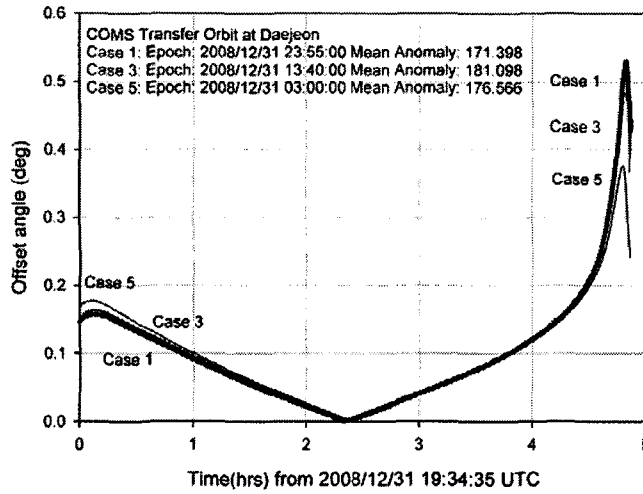


그림 8. 원지점 근처의 case에 대한 오프셋 각 프로파일(case 1, 3, and 5).

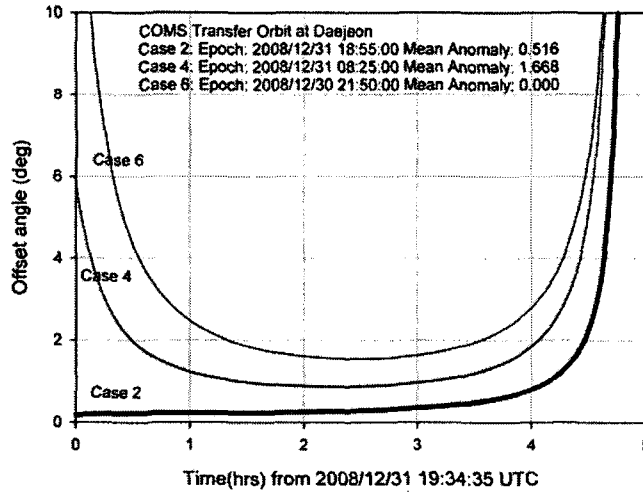


그림 9. 근지점 근처의 case에 대한 오프셋 각 프로파일(case 2, 4, and 6).

다. 궤도예측에 의한 대전 지상국에서 위성을 바라본 방위각과 양각은 그림 5와 같다. 그림 6은 시간에 따른 양각과 시선거리를 보여준다.

표 5에 있는 6가지 case에 대해서 각각 TLE 형식으로 변환시키는데 이때 궤도의 위치는 근지점 또는 원지점 근처이다. 천이궤도와 같은 이심률이 큰 타원궤도에 있어서 근지점과 원지점은 양극단으로 볼 있다. 또한 TLE 형식의 궤도요소에는 궤도장반경을 사용하지 않고 평균운동 값이 사용되는데 그림 7은 위성의 궤도를 예측한 후 이것을 TLE 형식으로 변환시킨 평균운동값을 보여준다. 그림을 보면 동일한 궤도에 대해서도 근지점의 평균운동값과 원지점의 평균운동값이 아주 다르게 나타

남을 알 수 있다. 이에 따라 천이궤도에 있어서 TLE 형식으로 변환시킨 궤도요소를 사용할 때 주의해야 함을 알 수 있다. 이후로는 TLE 형식으로의 변환에 있어서 근지점 때의 값과 원지점 때의 값 중에 어떤 것이 실제의 궤도에 가까운지에 대한 분석을 수행한다.

그림 8은 표 5에 있는 case 중에서 위성이 원지점 근처에 있는 경우에 대한 궤도요소를 TLE 형식으로 변환하여 안테나 포인팅을 위한 방위각과 양각을 계산한 후에 이를 기준궤도의 방위각과 양각과 비교해서 얻은 오프셋 각이다. 대체적으로 오프셋 각은 0.5도 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 또한 위성과의 접촉초기 오프셋 각이 0.2도 정도로 안테나로 위성의 신호를 획득하는데 큰 문제가 없음을 알 수 있다.

그림 9는 위성이 근지점 근처에 있는 경우에 대한 TLE 변환의 결과로서 오프셋 각이 case 2를 제외하고는 위성의 신호를 획득할 수 없을 정도로 크게 나타났다. Case 2의 경우에는 TLE 기산일이 위성과의 접촉시간과 비교적 가까운 시간이었다. 따라서 천이궤도의 궤도요소로부터 TLE 변환을 수행할 때에는 근지점 근처가 아닌 원지점 근처의 기산일에 대한 궤도요소를 사용해야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

정지궤도 위성의 안테나 포인팅을 위해 궤도결정을 통해서 얻은 접촉 케플러 궤도요소를 NORAD TLE 형식으로 변환하여 사용할 수 있는지 분석해 보았다. 정지궤도 위성의 경우에 있어서는 통신해양기상위성과 같이 하루에 두번씩 추력기를 이용한 월오프로딩을 수행하고 일주일에 한번씩 동서방향과 남북방향의 위성위치 유지를 위한 궤도조정을 수행하는 경우에도 변환된 NORAD TLE를 이용한 안테나 포인팅에 문제가 없음을 알 수 있었다. 천이궤도의 경우에 있어서는 NORAD TLE 형식으로의 변환을 수행할 때 위성의 위치가 근지점 근처일 경우에는 잘못된 평균운동값을 얻기 때문에 위성의 위치가 원지점인 경우에 대해서 변환 시킨 값을 사용하는 것이 타당함을 알 수 있었다. 이 논문의 결과에 따라서 통신해양기상위성과 같은 정지궤도 위성의 관제운영에 있어서 안테나 포인팅은 NORAD TLE로 변환된 값을 사용해서 지상 안테나와의 인터페이스를 간단히 할 수 있겠다.

감사의 글: 이 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장 동력 핵심기술개발 사업의 일환으로 수행되었음(2005-S-301-03, 통신해양기상위성 위성통신 시스템 기술개발).

참고문헌

- Cho, C.-H., Lee, B.-S., Lee, J.-S., Kim, J.-H., & Choi, K.-H. 2002, JA&SS, 19, 197
- Ernandes, K. 1994, AMSAT Journal, 17, 26
- Hoots, F. R. & Roehrich, R. L. 1980, Models for Propagation of NORAD Element Sets- Project Space Track Report No.3 (Peterson AFB: Aerospace Defense Command)
- Jochim, E. F., Gill, E., Montenbruck, O., & Kirschner, M. 1996, Acta Astronautica, 39, 912
- Kelso, T. S. 1997, Satellite Times, 4, 68
- Lee, B.-S. 2002, JA&SS, 19, 395
- Lee, B.-S. & Park, J.-W. 2003, JA&SS, 20, 11
- Walter, H. G. 1967, AJ, 72, 994