

해석적 방법에 의한 장기 위성궤도 예측¹

윤재철 · 최규홍

연세대학교 천문대기학과

이병선 · 은종원

한국전자통신연구원

LONG-TERM PREDICTION OF SATELLITE ORBIT USING ANALYTICAL METHOD¹

Jae-Cheol Yoon and Kyu-Hong Choi

Department of Astronomy and Atmospheric Science, Yonsei University, Seoul 120-749

email: yjch@galaxy.yonsei.ac.kr, khchoi@galaxy.yonsei.ac.kr

Byoung-Sun Lee and Jong-Won Eun

Korea Electronics and Telecommunications Research Institute

email: bslee@kepler.etri.re.kr, jweun@kepler.etri.re.kr

(Received October 31, 1997; Accepted November 25, 1997)

요 약

해석적 방법을 이용한 정지위성의 장기 궤도예측 알고리즘을 개발하였다. 적용된 섭동모델에는 5×5 지구중력포텐셜, 달과 태양의 중력, 태양복사압에 의한 섭동들이 포함되었으며, 모든 섭동들은 장반경, 이심률 벡터, 궤도경사각 벡터, 평균경도의 구성요소로 이루어진 춘분점 궤도요소의 영년변화, 단주기 변화, 장주기변화 섭동항들로 급수 전개되었다. 해석적 방법에 의한 무궁화위성의 궤도예측의 결과를 코웰방법을 이용한 궤도예측의 결과와 비교하였다. 이 비교를 통해서 새로 개발된 해석적 방법을 이용한 궤도예측 알고리즘은 3개월동안 약 $\pm 35\text{m}$ 이내로 장반경을 정밀하게 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

ABSTRACT

A long-term prediction algorithm of geostationary orbit was developed using the analytical method. The perturbation force models include geopotential upto fifth order and degree and luni-solar gravitation, and solar radiation pressure. All of the perturbation effects were analyzed by secular variations, short-period variations, and long-period variations for equinoctial elements such as the semi-major axis, eccentricity vector, inclination vector, and mean longitude of the satellite. Result of the analytical orbit propagator was compared with that of the cowell orbit propagator for the KOREASAT.

¹이 연구는 한국전자통신연구원의 연구비 지원으로 수행되었음.

The comparison indicated that the analytical solution could predict the semi-major axis with an accuracy of better than ± 35 meters over a period of 3 month.

1. 서 론

인공위성의 궤도를 예측하는 방법에는 특수섭동론과 일반섭동론이 있다. 특수섭동론은 우주공간에서 위성이 받는 힘을 가속도성분으로 나타낸 후 이를 위성의 초기위치로부터 임의의 위치까지 시간에 대해 직접 수치적분하여 미래의 어느 시각에서의 위성의 위치와 속도를 구하는 방법이며, 대표적으로 코웰방법이 많이 사용된다. 일반섭동론이 장기간 인공위성의 궤도를 예측하는 것과는 달리, 특수섭동론은 상대적으로 짧은 기간의 궤도를 예측하는데 적용되며 매우 정밀한 예측이 가능하다. 일반섭동론은 각 궤도요소에 대한 단주기, 장주기, 영년섭동항들을 급수전개시켜 해석적으로 해를 구하는 방법인데, 특수섭동론에 비해서 급수전개되는 함수가 수백개의 항으로 이루어져 있어 아주 복잡하고, 현실적으로 모든 항들을 전개하는 것에 한계가 있기 때문에 계산의 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 그러나, 계산속도가 빠르고 영년변화와 장주기변화를 점검해서 궤도의 상태를 분석할 수 있기 때문에 임무를 해석 및 계획하고 특히 정지위성의 collocation 방법을 연구할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서 일반섭동론의 해석적 방법을 이용한 정지위성의 궤도예측 알고리즘을 개발하였다. 5×5 지구중력포텐셜, 달과 태양의 중력, 태양복사압에 의한 섭동들을 적용하였으며, 달과 태양의 중력에 의한 섭동의 계산을 위해 컴퓨터에 의한 수식처리기인 Algebraic Manipulation(Dasenbrock 1973, 1982)이 사용되었다. 정지위성은 궤도의 이심률이 거의 영에 가깝고, 궤도가 적도면에 가까운 원궤도로 지구주위를 돌고 있기 때문에 특이점이 발생할 수 있으며, 이를 제거하기 위해 궤도장반경, 이심률 벡터(e_C, e_S), 궤도경사각 벡터(W_C, W_S), 평균적경으로 구성된 춘분점 궤도요소를 사용한다(Taff 1985). 모든 섭동들은 춘분점 궤도요소의 영년, 단주기, 장주기 섭동항들로 급수전개되었으며, 섭동에 의한 궤도요소의 변화를 영년, 단주기, 장주기변화로 구분하여 무궁화 2호 위성에 적용시켰으며, 이로부터 나온 결과를 장반경의 오차가 ± 10 cm 이내의 정밀도를 가지는 코웰 궤도예측 프로그램의 결과와 비교해 보았다. 사용한 초기입력 기산일과 접촉궤도요소는 다음과 같다.

기산일 = 1997년 2월 7일 12시 0분 0.0초 UTC

궤도장반경 = 42164.497369 km 이심률 = 9.113399×10^{-5}

궤도경사각 = 3.4764431×10^{-2} deg 승교점적경 = 116.01800 deg

근지점인수 = 293.57698 deg 평균근점각 = 24.07816 deg

2. 궤도요소의 변화

정지위성의 장반경은 장주기 변화는 거의 없고, J_2 와 달과 태양의 중력 때문에 발생하는 단주기 변화와 지구의 3축성(Triaxiality)에 영향을 받는 tesseral 조화항에 의해 영년변화가 생긴다. J_2 의 단주기 섭동항의 영향으로 하루에 두번씩 약 7.6×10^{-2} m 정도의 매우 작은 진폭으로, 달과 태양의 단주

기 섭동항에 의해서는 하루에 두번씩 976m와 434m 이상의 큰 진폭이 합해진 단주기 변화를 하게 된다(최규홍 1997). 그리고 tesseral 조화항에 의한 궤도장반경의 영년변화로 인해 경도상 동경 110° 의 적도상공 약 35,800 km에서 정지위성은 궤도장반경이 하루에 약 148 m씩 증가하게 된다(최규홍 등 1987).

W_C 와 W_S 의 단주기 변화는 지구중력장에 의한 섭동력과 달과 태양의 섭동력 때문에 생기는데, 상대적으로 달과 태양의 영향이 크다. 장주기 변화는 달과 태양의 중력에 의한 섭동 때문에 생기며, 영년변화는 J_2 , 달의 중력, 태양의 복사압에 의한 섭동력의 영향을 받으며, 그중에서 달의 중력에 의한 섭동력이 가장 크다. 달과 태양의 섭동력은 12시간을 주기로 궤도경사각을 $\pm 0.0006^\circ$ 크기 정도 단주기 변화시키며, 6개월 주기로 $\pm 0.035^\circ$ 장주기 변화를 일으킨다(최규홍 등 1990).

정지위성에 관한 e_C 와 e_S 의 단주기 섭동항은 지구 중력장의 J_2 항, 달과 태양, 그리고 태양복사압의 섭동력 때문이며, 장주기 변화는 달의 중력의 출차(Evection)에 의한 영향을 받고, 영년변화는 달의 섭동과 태양복사압의 영향을 받는다. 단주기 섭동의 영향으로 인해 달과 태양이 일직선상에 놓여 있을 경우 이심률이 약 8×10^{-5} 정도의 최대값을 갖게 되고, 달과 태양이 90° 위치에 있을 때는 이심률이 3×10^{-5} 정도의 최소값을 갖게 된다(최규홍 등 1989).

위성위치를 경도상에 나타내기 위해서는 지구의 자전에 의한 그리니치의 위치변화를 보정해 주어야 한다. 위성평균경도의 단주기 변화는 지구중력장 J_2 , 달과 태양의 중력에 의한 섭동력, 태양복사압으로 인해 생기며, 장주기 섭동은 달과 태양의 중력 때문이다. 위성경도의 영년변화는 속도성분과 가속도 성분의 합으로 나타나는데, 위성경도의 가속도 성분은 지구중력장의 tesseral 섭동의 영향 때문에 발생하고, 이것은 장반경의 영년변화와 밀접한 관계가 있으며, 정지궤도상에 있는 위성이 안정점을 향해 표류하도록 한다(Zee 1989). 단주기 섭동은 정지위성의 경도를 12시간 주기로 $\pm 0.005^\circ$ 변화시키며, 장주기 섭동은 6개월 주기로 $\pm 0.019^\circ$ 변화시킨다(최규홍 등 1990).

3. 평균궤도요소의 산출

지상관제소에서는 인공위성에 대한 관측자료를 이용해 궤도를 결정하는데, 이때 최종적으로 나온 자료가 기산일에서의 인공위성이 갖는 위치와 속도벡터이다. 그리고 이를 다시 그 시각에서의 6개의 케플러 궤도요소로 변환할 수 있고, 이러한 궤도요소를 접촉궤도요소(Osculating orbital elements)라 한다. 접촉궤도란 임의의 시점에서 인공위성이 실제궤도에 접하는 케플러 궤도를 말한다. 접촉궤도에는 우주공간에서 인공위성이 받는 모든 섭동력들이 포함되어 있으므로 기산점이 변할 때마다 접촉궤도요소 또한 변하게 된다. 반면에 인공위성에 영향을 준 모든 섭동력을 실제궤도로부터 제거시키면 그 시간에서 지구중심의 인력에 의해서만 영향을 받는 케플러 궤도를 갖게 되는데, 이를 평균궤도라 하고 그 궤도요소를 평균궤도요소라고 한다. 본 연구에서 개발한 해석적 방법을 이용한 궤도에 측 알고리즘에서 입력되고 계산되는 궤도요소는 평균궤도요소이다. 가상의 평균궤도요소를 직접 구하는 것은 불가능하기 때문에 관측을 통해 얻을 수 있는 접촉궤도요소를 이용해서 초기 입력 평균궤도요소를 구해야 한다.

4. 결과 비교

그림 1에서 알 수 있듯이 장반경의 차이는 90일동안 최대 ± 35 이내의 차이를 보이고 있는데, 그 차이가 시간에 따라 계속 증가하지 않고 일정한 경향의 주기성을 가지고 있기 때문에 해석적 방법에 적용한 섭동 모델, 특히 tesseral 조화항에 의한 섭동모델이 정밀하다는 것을 알 수 있다. 그림 2의 이심률 차이의 경우 2×10^{-5} 차수이내에서 잘 일치하고 있으며, 그 차이가 시간에 따라 약간씩 증가하는 경향이 있는데, 이는 태양복사압의 장주기 섭동의 영향으로 해석적 방법의 알고리즘에 적용하지 않은 섭동항이다. 그림 3의 궤도경사각의 차이는 최대 0.002° 이내에서 잘 일치하고 있으며, 이 차이를 보정하기 위해서는 해석적 방법에 달과 태양의 중력에 의한 장주기 섭동항을 더 추가해야 한다. 그림 4의 평균경도의 차이는 10^{-3} 차수를 갖는데, 이 차이의 원인은 해석적 방법에서 좌표변환시 precession과 nutation의 보정을 하지 않았기 때문이다.

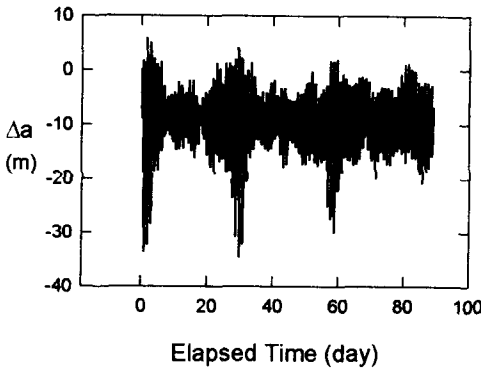


그림 1. 장반경 차이.

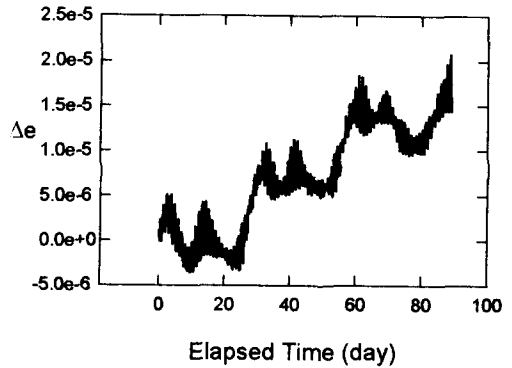


그림 2. 이심률 차이.

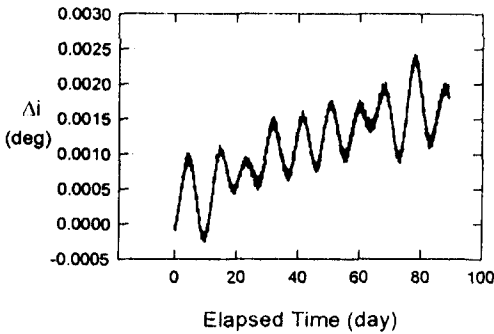


그림 3. 궤도경사각 차이.

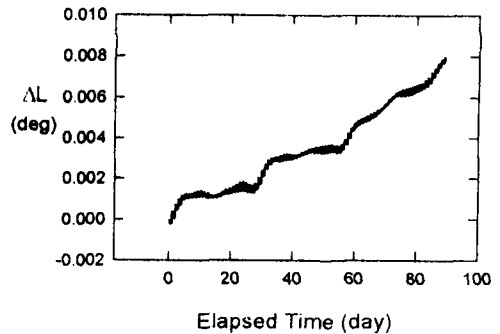


그림 4. 평균경도 차이.

5. 결 론

특수섭동론의 코웰방법을 이용한 궤도예측 알고리즘은 단기간에서는 매우 정밀한 계산을 할 수 있다고 알려져 있지만, 궤도의 정성적, 정량적인 변화 즉, 단주기, 장주기, 영년변화들에 대한 경향들을 수식자체만으로는 전혀 알 수 없으며 장기간의 궤도예측에서는 수치적분시 끝자름 오차의 누적으로 인하여 계산결과가 부정밀하다는 단점이 있다. 이에 비해 해석적 방법을 이용한 궤도예측 알고리즘은 기본 수식자체에서 이미 궤도의 단주기, 장주기, 영년변화들의 정량적인 값들을 알 수 있고, 장기간의 예측에서 수치적분시 발생하는 오차의 누적이 없기 때문에 임무를 해석하고 두 개 이상 정지위성의 collocation 계획을 결정하는데 주요한 역할을 할 수 있다. 본 논문에서 개발한 해석적 방법을 이용한 궤도예측 알고리즘의 정밀성은 코웰방법과의 비교에서 알 수 있듯이 장반경에 약 $\pm 35m$ 정도의 오차를 가지고 있다고 할 수 있다.

참고문헌

- 최규홍 1997, 천체역학 (민음사: 서울), p.228
 최규홍, 박재우, 김경미 1987, 한국우주과학회지, 4, 25
 최규홍, 이정숙, 박종욱, 문인상 1989, 한국우주과학회지, 6, 91
 최규홍, 박종욱, 문인상, 배성구 1990, 한국우주과학회지, 7, 11
 Dasenbrock, R. R. 1973, NRL Report 7564 (NRL: Washington D.C.), pp.1-67
 Dasenbrock, R. R. 1982, NRL Report 8611 (NRL: Washington D.C.), pp.1-71
 Taff, L. G. 1985, Celestial Mechanics (John Wiley & Sons: New York), pp.308-309
 Zee, C. H. 1989, Theory of Geostationary Satellites (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), p.72