

METEOROID STREAM 입자들의 궤도 운동 시뮬레이션 TOOL 개발

김방엽
한국항공우주연구소 무궁화위성그룹

DEVELOPMENT OF SIMULATION TOOL FOR ORBITAL MOTION OF METEOROID STREAM PARTICLES

Bang-Yeop Kim
Koreasat Department, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 305-606, Korea
E-mail: kby@kari.re.kr

(Received October 20, 1999; Accepted March 20, 2000)

요 약

본 연구는 지구 공전 궤도 근처의 Leonid의 출현 빈도와 속도 등을 예측하기 위한 연구의 초기 단계로서 meteoroid에 대한 기초 자료 조사와 더불어 기존에 알려져 있는 meteoroid 입자의 분출 속도 모델과 섭동 모델로부터 meteoroid의 운동 방향과 속도를 컴퓨터로 계산하기 위한 프로그램을 개발하고 이것을 Leonid stream에 적용해 보았다. 입자의 초기 속도 모델로는 Jones의 분출속도 분포모델을 사용하였으며, meteoroid의 궤도 운동 모델에는 태양과 달, 지구를 비롯한 각 행성들의 섭동 모델이 포함되었다. 태양계 천체들의 Ephemeris를 구하기 위해 JPL (Jet Propulsion Laboratory)의 SSD (Solar System Dynamics) Laboratory에서 개발된 DE405 Solar System Ephemeris 데이터 파일을 사용하였다. 이외에 중요한 섭동 요소로써 태양 복사압을 고려하였으며, 적분 알고리즘으로는 8차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

ABSTRACT

This paper presents the preliminary survey and simulation results of the prediction of Leonid stream's orbital motion. Based on the model survey on eject velocity and perturbation of meteoroid particles, a simulation program was developed and applied to orbital motion of Leonid stream. The Jones ejection distribution model was used to describe the particle's eject velocity and the orbital dynamics model includes perturbations of major planet's gravity. DE405 ephemeris file generated by Solar System Dynamics Group at Jet Propulsion Laboratory in NASA was used for the planet's ephemeris calculations. Solar radiation pressure were also considered in the simulation and 8th order Runge-Kutta algorithm was used as a numerical integration method.

1. 서 론

태양 주위를 공전하는 혜성으로부터 떨어져 나온 부스러기로 이루어진 meteoroid (유성체)가 지구 대기로 들어오면서 만들어 내는 유성 (meteor)과 유성우 (meteor shower)는 인공위성이 보편화 되기 전까지는 밤하늘을 수놓으며 우리의 눈을 즐겁게 해주는 천문 현상의 하나에 지나지 않았다. Leonid (사자자리 유성우)가 장관을 이루었던 1965년에는 지구 궤도를 도는 인공위성이 수십 개에 불과했고, 위성과 meteoroid 입자의 충돌은 아주 가능성이 희박한 일이었다.

그로부터 30여년이 지나는 동안 인공위성의 숫자는 급격히 증가했고, 그에 따라 meteoroid 입자와의 충돌가능성도 증가하고 있다. 실제로 1993년 8월에 ESA (European Space Agency)의 OLYMPUS 위성이 남쪽 태양전지판에 Perseid 입자가 충돌하여 Roll-축 스핀이 생겼고 자세를 바로잡는 과정에서 과다한 연료를 소모하여 폐기된 예가 있다 (Caswell 1998). 일반적으로 meteoroid의 출현 밀도는 시간당 출현 개수를 의미하는 ZHR (Zenith Hourly Rate)로 표시하는데, Leonid의 경우에 평년의 ZHR이 15 정도인 반면, 모 혜성인 Tempel-Tuttle이 근일점을 통과한 직후에는 이 수치가 200 ~ 5,000 정도로 급상승하게 된다. 1965년에 모 혜성이 지나간 후의 Leonid의 ZHR 최고 관측치는 150,000이었다 (Jenniskens & Butow 1997). 그리고 1993년의 Perseid의 ZHR 예측치는 400 ~ 1,000 이었으나 OLYMPUS 위성사고 당시의 실제 ZHR 값은 100 정도에 불과했다 (Caswell 1998). 이러한 배경에서 앞으로 점점 숫자가 늘어날 인공위성이 meteoroid 입자의 피해를 받을 가능성에 대한 연구가 필요하게 되었다.

인공위성이 meteoroid 입자의 피해를 받을 가능성에 대한 연구는 입자들의 궤도 운동에 대한 계산 프로그램 개발로부터 시작하여야 한다. 혜성의 화학적 구성 물질에 따른 분출 속도 모델은 Whipple (1951)의 연구 결과가 별다른 이견 없이 표준적인 모델로 받아들여지고 있으며, Jones (1995)는 Whipple의 모델을 개선한 분출속도 모델을 제안한 바 있고, Brown & Jones (1998)는 이러한 Jones 모델을 Perseid Stream 연구에 적용하였다. 한편 Jones (1985)는 행성의 섭동력이 Geminid Stream에 미치는 영향에 대해서도 연구한 바 있다. 그리고 Cooke (1999)는 Leonid의 발생 빈도와 인공위성에 미치는 영향에 대해 연구한 바 있다.

본 연구에서는 Leonid meteoroid가 지구 정지궤도 상의 인공위성에 미치는 영향을 알아보기 위한 기초단계 연구로서 태양 주위를 회전운동하는 meteoroid 입자들의 궤도 운동을 시뮬레이션하기 위한 프로그램을 개발하였다. Leonid meteoroid는 33년의 주기로 태양 주위를 타원 운동하는 Tempel-Tuttle 혜성에서 떨어져 나온 입자들이 혜성의 궤도를 따라 움직이는 흐름이 되어 공간상을 움직이는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 meteoroid stream의 궤도 운동을 모사하기 위해 태양 복사압과 태양계 행성들의 섭동력을 포함하는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며 개발된 프로그램을 Leonid stream에 적용하였다. 행성들의 천체력 (Ephemeris)을 구하기 위해 NASA의 JPL에서 제공하는 DE405 Ephemeris 데이터 파일을 사용하였다. SSD에서 개발한 DE200, DE403, DE405, DE406 Ephemeris 데이터 파일은 Astronomical Almanac 및 각종 Space Program에서의 기준 Ephemeris 프로그램으로 사용되고 있다. Jones ejection distribution model을 속도 모델로 사용하였고 적분 알고리즘으로는 8차 Runge-Kutta method를 사용하였으며 입자의 크기와 질량에 대해서는 Gaussian 분포를 적용하였다.

표 1. Tempel-Tuttle 혜성의 궤도 요소 (1965).

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Epoch | 1965 April 30.0 |
| Perihelion Distance | 0.981623569 AU |
| Semi Major Axis | 10.2720547 AU |
| Eccentricity | 0.904437467 |
| Inclination | 162.7062774 deg |
| Longitude of Ascending Node | 235.1155534 deg |
| Argument of Perihelion | 172.5657724 deg |
| Mean Anomaly | 359.9996856 deg |
| Time of Perihelion | 1965 April 30.0105019 |

(Solar System Dynamics Group at JPL, <http://ssd.jpl.nasa.gov>)

2. Leonid와 Tempel-Tuttle 혜성

현재 매년 주기적으로 나타나는 유성우의 종류는 40여가지가 있는데, Leonid가 여러 가지 유성우 중에서 대표적으로 뽕히게 된 것은 1833년에 미국에서 관측되었던 사상 최대 규모의 유성우 현상 때문이었다. 역사 기록을 통해 추측해보면 이 때의 유성우 현상은 ZHR 240,000 정도로 무려 9시간 가까이 계속되었던 것으로 추정되고 있다 (Jenniskens & Butow 1997). 이 사건이 바로 유성우 현상에 대한 체계적인 관측과 연구를 시작하게 만든 계기가 되어 meteoroid의 구성 물질과 궤도 운동에 대한 연구가 시작되었다. Leonid stream 입자들은 주로 Silicate, 탄소함유물로 구성되어 있으며 인공위성에 부딪치게 되면 충돌로 인한 위성체 파손 및 자세 흐트러짐이나 Plasma 및 electric noise 발생, 전류 및 전압 변화, EMP (Electrical Magnetic Pulse), 소프트웨어의 비정상적인 작동 등을 야기한다.

Leonid stream의 모체가 되는 Tempel-Tuttle 혜성은 1865년에 그 궤도가 처음으로 계산되었다. 표 1과 표 2는 Tempel-Tuttle 혜성이 1965년 4월과 1998년 2월에 근일점을 통과했을 때의 각각의 궤도요소로써 JPL의 Solar System Exploration Division에서 웹사이트를 통해 제공하는 것이다.

3. Leonid Stream의 운동 모델

Meteoroid Stream 입자들의 기본적인 궤도 운동은 다음에 보인 것처럼 일반적인 케플러 궤도 운동 방정식과 Cowell method를 적용하여 모사 한다 (Bate et al. 1971). 입자들의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{r}}_{particle} = \mathbf{V}_{particle} \tag{1}$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{particle} = -\frac{GM_{sun}}{r^3}\mathbf{r}_{particle} + \mathbf{a}_{planet} + \mathbf{a}_{srp} \tag{2}$$

위에서 $\dot{\mathbf{r}}_{particle}$ 과 $\ddot{\mathbf{r}}_{particle}$ 은 각각 입자의 속도와 가속도 벡터이며, $\mathbf{r}_{particle}$ 은 입자의 위치 벡터, G 는 중력상수, M_{sun} 은 태양 질량, \mathbf{a}_{planet} 과 \mathbf{a}_{srp} 는 각각 행성의 인력에 의한 섭동과 태양 복사압에 의한 섭동으로써 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다(Taff 1985).

표 2. Tempel-Tuttle 혜성의 궤도 요소 (1998).

| Epoch | 1998 March 8.0 |
|-----------------------------|--------------------------|
| Perihelion Distance | 0.97658525 AU |
| Semi Major Axis | 10.33464978 AU |
| Eccentricity | 0.9055038 |
| Inclination | 162.48614 deg |
| Longitude of Ascending Node | 235.258654 deg |
| Argument of Perihelion | 172.4971303 deg |
| Mean Anomaly | 0.2344614 deg |
| Time of Perihelion | 1998 February 28.0966548 |

(Solar System Dynamics Group at JPL, <http://ssd.jpl.nasa.gov>)

$$\mathbf{a}_{planet} = -GM_{planet} \left(\frac{\mathbf{r}_{particle} - \mathbf{r}_{planet}}{|\mathbf{r}_{particle} - \mathbf{r}_{planet}|^3} + \frac{\mathbf{r}_{planet}}{|\mathbf{r}_{planet}|^3} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_{srp} = \frac{S}{c} \left(C_R \frac{A}{m_{particle}} \right) \frac{\mathbf{r}_{particle}}{|\mathbf{r}_{particle}|^3} \quad (4)$$

위에서 $\mathbf{r}_{particle}$ 과 \mathbf{r}_{planet} 은 각각 태양을 기준으로한 meteoroid 입자와 행성의 위치 벡터이고 M_{planet} 은 행성질량, A 는 입자의 단면적, S 는 1AU에서의 태양의 평균복사압, c 는 빛의 속도, C_R 은 표면반사율 계수, $m_{particle}$ 은 입자 질량에 각각 해당한다.

Meteoroid Stream 입자들의 운동을 시뮬레이션할 때 가장 중요한 요소의 하나는 모 혜성으로부터 분출되는 초기 속도 모델이라 할 수 있다. 이 분출 속도 모델은 여러 가지가 있으며 대부분은 Whipple's formula model에 기반을 두고 있다. Whipple (1951)은 혜성의 핵 크기와 구성 물질의 특성 등으로부터 다음과 같은 입자 분출 속도 모델을 제안한 바 있다.

$$V_{eject} = \left(\frac{1}{nsr^{9/4}} - 0.052R_c \right)^{1/2} R_c^{1/2} \times 328cm/sec \quad (5)$$

위에서 s 는 cm 단위의 입자 크기, r 은 AU단위로 나타낸 태양까지의 거리, R_c 는 kilometer단위로 나타낸 혜성 핵의 크기이며 $1/n$ 은 혜성의 얼음이 태양풍에 의해 기화되는 양에 관계된 수치이다. Brown & Jones (1998)는 Whipple의 모델을 변형하여 다음과 같은 Jones ejection distribution 모델을 제안하였다.

$$V_{eject} = 10.2r^{-1.038} \rho^{-1/3} R_c^{1/2} m^{-1/6} f \quad (6)$$

위에서 r 은 태양과 혜성간 거리, ρ 는 Bulk Density of Meteoroid, R_c 는 모 혜성의 핵의 크기, m 은 분출 입자의 질량, f 는 태양풍에 노출되었을 때의 기화율을 각각 의미한다. 본 프로그램에서 적용한 Leonid Stream의 예에서는 $f = 1$ 로 가정하였고, R_c 는 5 km, ρ 는 $800kg/m^3$ 을 각각 적용하였는데, 이는 혜성의 종류에 따라 선택적으로 적용되는 값이다.

4. Numerical Simulation 및 결과

본 연구에서 개발된 시뮬레이션 Tool은 입력 데이터의 선택에 따라 태양복사압과 태양계의 9개 행성들의 섭동을 모두 포함하거나 선택적으로 포함할 수 있게 하였으며, 입자의 개수는 제한이 없도록 하였다. 그러나 실제로 프로그램을 실행해 본 결과, 펜티엄급 개인컴퓨터에서, 모든 행성의 섭동을 포함하면서 입자 개수를 10,000개로 하고 9개 행성의 섭동 모두를 포함하면서 적분 간격 5일, 적분기간을 33년으로 했을 경우에 계산 시간이 두 달이 넘게 되어 충분한 사전 준비 없이는 원하는 결과를 얻을 수 없는 경우가 있었다. 따라서 계산 시간을 단축하고 프로그램의 성능 확인을 위해서 입자의 개수를 최소한으로 줄여야 했다.

본 시뮬레이션에서는 입자 개수를 100개로 하였으며 그 질량 분포는 0.001g부터 10g까지 0.1g을 중심으로 Logarithmic Gaussian 분포를 갖도록 하였다. 입자들의 크기 역시 0.01 mm부터 10 cm까지의 범위에서 1 mm를 중심으로 Logarithmic Gaussian 분포를 하는 것으로 가정하였다.

앞에서 설명한 바와 같은 조건하에서 meteoroid의 운동을 수치적으로 시뮬레이션하기 위한 프로그램을 작성하였다. 적분 간격은 5일로 하였고 수치적분 방법으로는 8차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다 (최규홍, 윤재철 1996). 시뮬레이션 수행 결과에 따른 간략한 그림들을 그림 1에서 그림 7에 보였다.

우선 Leonid Stream의 모 혜성인 Tempel-Tuttle의 대략적인 궤도를 그림 1a에 보였다. 그림 1a는 1998년에 근일점을 통과한 혜성의 궤적으로써 지구 궤도면과 혜성의 궤도면이 이루는 각도는 약 18° 이다. 그림 1b는 그림 1a의 지구 근접 부분을 확대한 것인데, 이 때 혜성의 궤적과 지구 궤도가 가장 근접했을 때의 거리는 약 0.02 AU 정도이고, 혜성의 궤적이 지구보다 태양 쪽에 더 가깝게 위치한다.

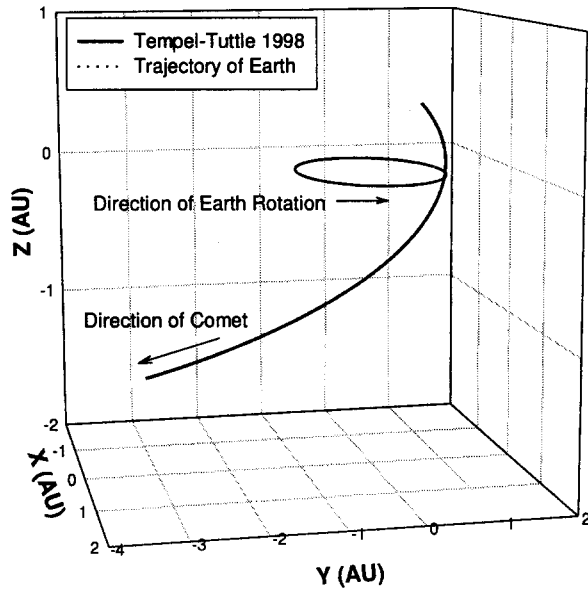
그림 2에서 그림 7까지는 시간에 따른 Meteoroid 입자들의 확산 형태를 보였다. 대부분의 입자들이 혜성의 궤도를 따라 stream을 형성하지만 몇 개의 질량이 아주 작은 입자들은 속도 변화나 섭동에 의해 궤도로부터 멀리 이탈되는 형태를 보이고 있다. 특히 혜성 궤도의 원일점 부근에서 이러한 이탈형태가 더욱 심해짐을 볼 수 있다.

5. 결 론

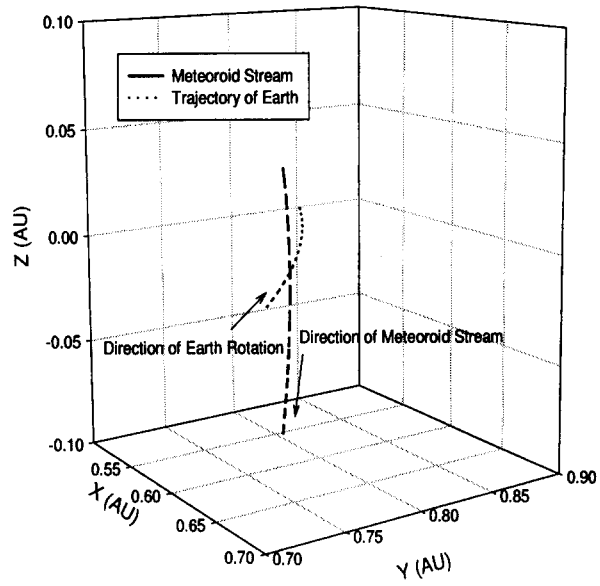
본 연구는 Meteoroid Stream의 궤도 운동을 모사하기 위한 시뮬레이션 Tool 개발 연구로써 meteoroid stream 입자의 운동을 시뮬레이션 하기 위해 기존의 초기 속도 모델과 태양계 행성들의 섭동, 태양복사압 등을 포함하여 수치적인 방법으로 궤도 운동을 모사하기 위한 프로그램을 제작하였으며 이를 Leonid 입자에 적용해 보았다.

Meteoroid stream에 대한 시뮬레이션을 수행할 때 간과할 수 없는 점은 지구에서 관측되거나 궤도상의 위성들에 영향을 주는 입자들이 해당 연도에 지나간 혜성의 입자들만은 아니라는 사실이다. 즉, 33년마다 돌아오는 Tempel-Tuttle 혜성이 수백년 내지 수천년 전에 지나가면서 뿌려 놓은 입자들이 현재에도 우주 공간을 떠돌면서 위성에 영향을 미치고 있는 것이다. 따라서 더욱 정밀한 시뮬레이션을 위해서는 훨씬 이전에 지나간 혜성의 입자들도 시뮬레이션에 포함시켜야 하며 이로 인한 계산량도 당연히 증가할 수밖에 없다.

본 연구를 통해 개발한 궤도 운동 프로그램은 태양복사압과 9개 행성의 섭동을 선택적으로 포함



(a)



(b)

그림 1. (a) 1998년의 Tempel-Tuttle 혜성의 궤도, (b) (a)의 지구 궤도 근접 부분을 확대한 것.

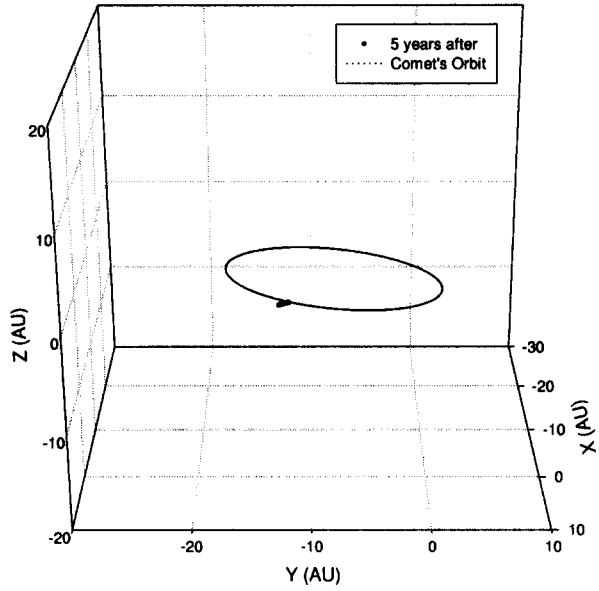


그림 2. 분출 5년 후의 입자들의 위치.

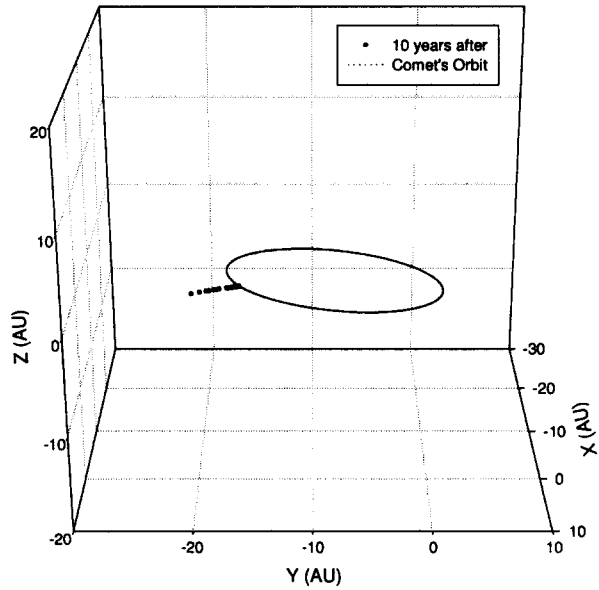


그림 3. 10년 후의 입자들의 위치.

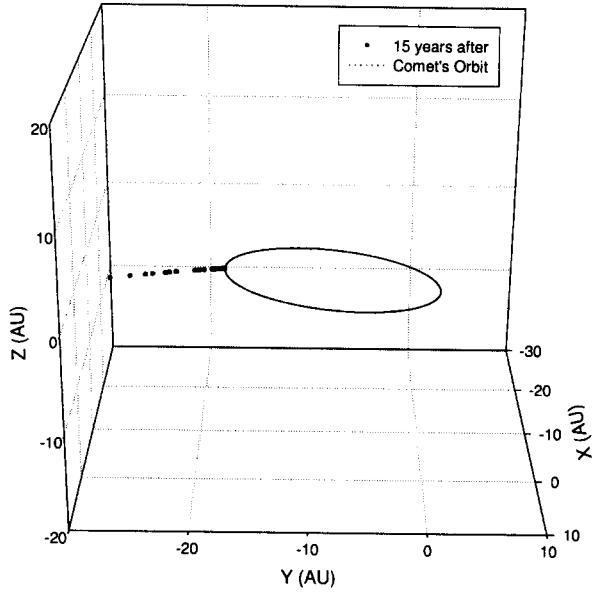


그림 4. 15년 후의 입자들의 위치.

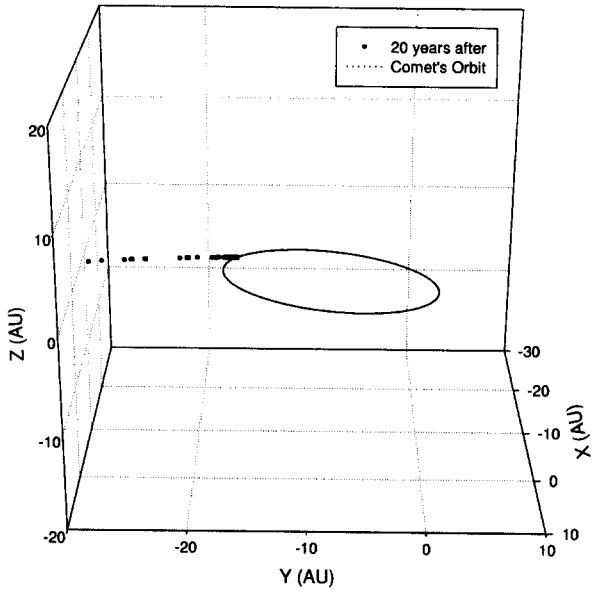


그림 5. 20년 후의 입자들의 위치.

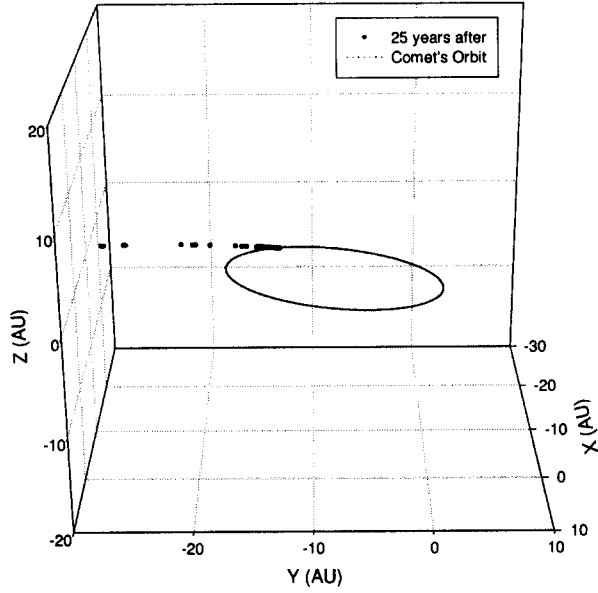


그림 6. 25년 후의 입자들의 위치.

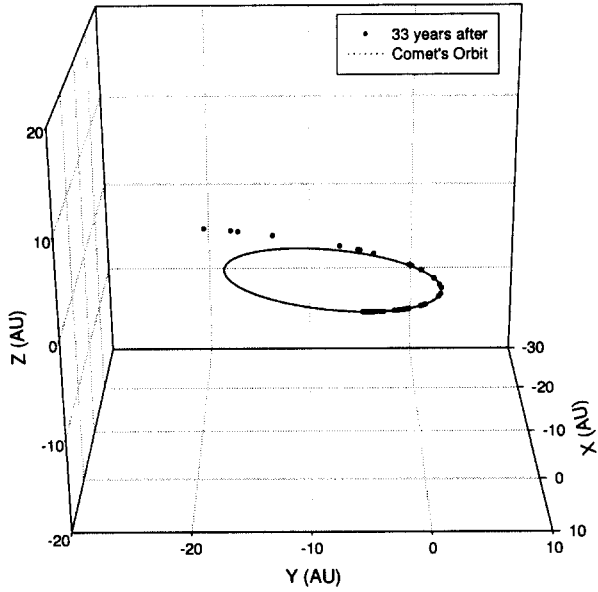


그림 7. 33년 후의 입자들의 위치.

할 수 있게 제작되었고, 입자의 개수는 제한이 없도록 하였다. 그러나 실제로 펜티엄급 PC에서 단 시간에 계산 결과를 보기 위해서는 입자 개수를 최소로 줄일 수밖에 없었다. 본 연구에서 보였듯이 33년간 100개의 입자를 시뮬레이션 하는데 걸린 계산 시간은 약 8시간이었다. 참고로 Brown & Jones (1998)의 연구에서도 계산에 소요된 시간은 10,000개의 입자에 대해 1862년부터 2000년까지 5일 간격으로 계산했을 경우에 넉 달이 소요된 것으로 나타나 있다 (Brown & Jones 1998).

차후에 수행할 시뮬레이션은 이러한 계산 소요 시간을 감안하여 충분한 사전 준비와 함께 입자의 개수를 늘리고, 1965년 이전에 통과한 혜성에서 분출된 입자들까지 포함하는 시뮬레이션이 수행되어야 할 것이다. 그리고 지구 정지궤도 위성의 관점에서 날아오는 meteoroid 입자의 속도 분포 등을 정량적으로 계산하여 예측하는 연구가 뒤따라야 할 것이다.

감사의 글: 본 연구는 한국통신의 지원으로 수행된 "무궁화위성 3호 BUS 시스템 분석 연구"의 일부입니다. 연구 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

- 최규홍, 윤재철 1996, 궤도결정 및 궤도예측 소프트웨어 프로그래밍 사양서 (한국통신 수탁 과제 연구보고서)
- Bate, R. R., Mueller, D. D., & White, J. E. 1971, *Fundamentals of Astrodynamics* (New York: Dover Publications, Inc), 389
- Brown, P., & Jones, J. 1998, *ICARUS*, 133, 36
- Caswell, D. 1998, *OLYMPUS and the 1993 Perseids Lessons for the Leonid (Leonids Threat Conference, Manhattan Beach April 26/27 1998)*
- Cooke, W. 1999, *Estimation of Meteoroid Flux for the Upcoming Leonid Storms*, <http://see.msfc.nasa.gov/see/mod/leonids.html>
- Jenniskens, P., & Butow, S. 1997, <http://web99.arc.nasa.gov/~leonid/history.html>
- Jones, J. 1985, *MNRAS*, 217, 523
- Jones, J. 1995, *MNRAS*, 275, 773
- Taff, L. G. 1985, *Celestial Mechanics* (New York: John Wiley & Sons), pp.297-298
- Whipple, F. L. 1951, *ApJ*, 113, 464