

한국의 고대 혜성 기록 분석 ANALYSIS OF KOREAN HISTORICAL COMET RECORDS

박소연^{1,2}, 채종철²

¹고등과학원

²서울대학교 물리·천문학부

SO-YEON PARK^{1,2} AND JONGCHUL CHAE²

¹Korea Institute for Advanced Study, 207-43 Cheongnyangni 2-dong, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-722, Korea

²Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul, 151-747, Korea

E-mail: nina9087@hanmail.net

(Received November 23, 2007; Accepted December 31, 2007)

ABSTRACT

We have analyzed the comet records in the Korean history books: Samguksagi, Goryeosa, and Joseonwangjosillok. For a comparison, the Chinese and Japanese comet records collected by Kronk (1999) have also been analyzed. Power spectrum of the time series of the comet records is used to find periodic comets. Statistically significant periodicities in the power spectrum are detected at the periods of 38–40 years, about 76 years, and 300–400 years for all Korean, Chinese, and Japanese comet records. We have also calculated the past orbits of some comets that have been recently observed, to check whether or not they were recorded in the history books. We use a multistep method to numerically integrate the comet's orbital motion backward in time to 51 B.C. The gravitational force due to the Sun and the nine planets, non-gravitational force, and the relativistic effects have been considered. Comparison of comet's perihelion passage time and the position on the sky with the historical records shows that the comet Halley were recorded at every passage in both Goryeo and Joseon periods. The orbital motion of the comet Pons-Brooks has also been compared with the Korean records. For the comet Tempel-Tuttle, Swift-Tuttle, and Ikeya-Zhang, we have compared our calculation of the orbital motions with those of the previous studies.

Key words: comet: general — comet: individual (Halley, Pons-Brooks, Tempel-Tuttle, Swift-Tuttle, Ikeya-Zhang) — method: data analysis — method: N-body simulations

1. 서론

우리나라에서 천문 현상에 대한 공식 기록은 서기전 1세기부터 찾아 볼 수 있다. 사서에 기록된 천문 현상으로는 일식과 월식을 비롯하여 행성들이 하늘에 모이는 현상, 달이 행성의 앞을 가리거나 행성이 다른 행성이나 항성을 가리는 현상, 행성이 어느 별자리를 지나가거나 머무는 현상, 유성이나 운석이 떨어지는 현상, 행성이나 별이 낮에 보이는 현상, 객성이 나타나거나 혜성이 보이는 현상, 오로라, 태양의 흑점 출현 등이 있다.

우리나라의 혜성 기록은 서기전 49년을 시작으로 꾸준히 사서에 나타난다. 그 중에는 혜성이 나타난 사실만 단순히 기록한 자료뿐만 아니라 관측 시간, 위치, 출현 기간, 혜성의 모양 등을 보고한 기록도 있다.

지금까지 고대 혜성 기록에 대한 연구는 대부분 헬리 혜성을 중심으로 이루어져 왔는데, 주기를 이용하거나 혜성의 궤도를 계산하여 사서에 기록된 혜성 중에서 헬리 혜성을 확인하고 있다. 1705년 Halley는 관측이 비교적 잘 이루어진 24개의 혜성들 중 궤도가 비슷한 1682년, 1607년, 1531년 혜성들이 같은 혜성임을 주장하고 세 혜성으로부터 찾은 주기를 이용해서 이 혜성의 다음 근일점 통과시기를 예측하였다 (Yeomans & Kiang 1981). Cowell & Crommelin (1907)은 금성, 지구, 목성, 토성, 천왕성, 해왕성의 섭동 효과를 고려하여 헬리 혜성의 운동 방정식을 직접 적분하였다. Kiang (1972)은 Cowell & Crommelin의 방법을 사용하여 헬리 혜성의 궤도를 계산하고 중국의 혜성 관측 기록을 바탕으로 헬리 혜성의 근일점 통과 기간을 알아내었다.

Brady & Carpenter (1971)는 혜성의 운동방정식을 수치 적분하고 비중력 효과를 고려하여 헬리 혜성의 위치를 계산하였다. 그 후 Marsden, Sekanina & Yeomans (1973)는 혜성의 핵이 얼음으로 되어 있다고 가정하고 얼음의 승화 모형을 사용하여 혜성의 얼음 핵이 승화하여 생긴 수증기 분출이 혜성의 가속도에 미치는 영향을 거리에 대한 함수로 나타내었고, 헬리 혜성의 근일점 통과 시간을 계산하는 데 사용하였다. Sitarski & Ziolkowski (1987)는 1835년, 1910년, 1986년에 나타난 헬리 혜성의 궤도 요소와 근일점 통과 시간을 사용하여 그 이전 시기에 찾아온 헬리 혜성의 근일점 통과 시간을 알아내었다.

다른 혜성에 대한 연구는 헬리 혜성의 연구 방법과 비슷한 방법으로 이루어지고 있으며, Swift-Tuttle 혜성(Yau, Yeomans, & Weissman 1994), Ikeya-Zang 혜성(Hasegawa & Nakano 2003) 등이 연구되었다.

본 연구에서는 우리나라 혜성 기록을 사용하여 사서에 기록된 혜성들이 어떤 주기를 가지고 있는지 알아보고, 현재 관측이 가능한 혜성들이 과거에도 관측되었는지 확인하여 보았다. 제 2절에서는 우리나라 사서에 수록된 혜성 기록의 날짜 변환 방법과 특징에 대해 기술하였다. 제 3절에서는 혜성 기록의 분포로부터 파워스펙트럼을 계산하고 혜성 기록의 주기성을 조사하였다. 제 4절에서는 제 3절에서 알아낸 주기와 비슷한 주기를 가진 혜성들의 궤도를 구현하고, 과거에 관측이 가능했던 시기와 위치를 알아보았다. 그리고 그와 비슷한 시기에 기록된 혜성의 위치와도 비교하여 보았다. 마지막으로 제 5절에서는 본 연구의 결과에 대해 토의하였다.

2. 혜성 기록 정리

우리나라의 혜성 기록은 Sekiguchi (1917)에 의해 처음 정리되었다. 그 후 Ho (1962)가 중국의 혜성과 신성 기록을 정리하면서 이것과 비교할 목적으로 우리나라와 일본의 혜성과 신성 자료를 수집하였다. Kronk (1999)는 서기전 675년 바빌로니아 돌판에 새겨져 있는 혜성 기록을 시작으로 서기 1900년대까지 전 세계의 혜성 기록들을 정리하였는데 17세기 이전에는 중국, 우리나라, 일본의 기록이 대부분을 차지한다. 이 중 우리나라 혜성 기록은 Sekiguchi와 Ho가 정리한 목록과 Ho가 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록, 증보문헌비고에서 찾아 번역한 혜성 기록을 포함하고 있다.

Kronk의 혜성 목록과 본 연구에서 정리한 혜성 목록을 비교함으로써 기존 연구에 쓰인 우리나라 혜성 목록이 어떤 특징을 가지고 있는지 확인할 수 있다. 중국과 일본은 우리와 지리상으로 가까워서 비슷한 시기에 혜성의 관측이 가능하다. Kronk의 혜성 목록에 있는 중국과 일본의 혜성 자료를 따로 분석하여 우리나

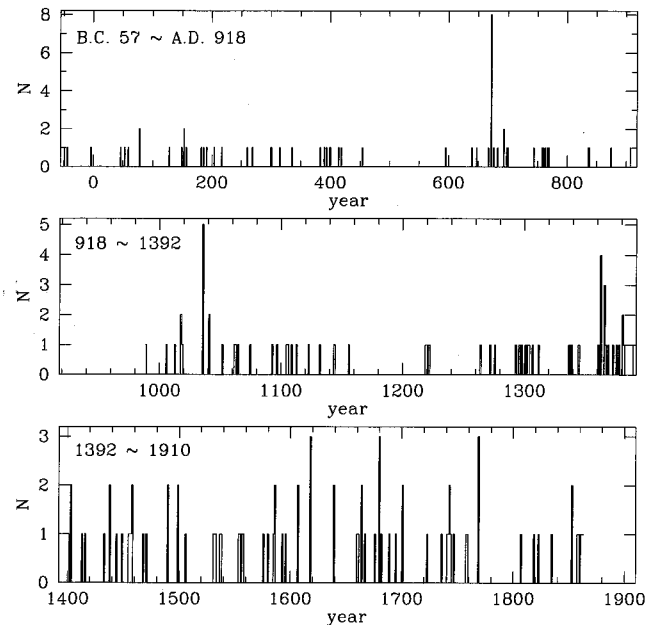


그림 1.— 삼국/하대신라 시대(서기전 57년 - 918년; 60개), 고려 시대(918년 - 1392년; 63개), 조선 시대(1392년 - 1910년; 83개)의 혜성 기록 분포.

라 혜성 자료의 분석 결과와 비교해 보고자 한다.

2.1. 우리나라의 혜성 기록

우리나라 사서에는 많은 혜성 기록들이 있다. 혜성은 전체 모습이나 꼬리 개수에 따라 요성, 혜성, 치우기, 장성, 패성으로 불렸다. 꼬리가 잘 보이지 않는 혜성은 객성으로 기록되기도 하였다. 그러나 객성은 혜성 뿐 아니라 신성이나 초신성, 불규칙한 변광성을 표현하는 말이기도 하므로 혜성 목록에 포함시킬 때는 검증이 필요하다. 혜성은 짧게는 하루에서 길게는 몇 십일 동안 관측되므로 새롭게 나타난 혜성의 관측 시기와 겹치는 경우가 있다. 이때에는 기록을 꼼꼼히 살펴 혜성이 나타난 위치 등을 비교하여 혜성의 개수를 세어야 한다.

우리는 우리나라의 혜성 기록을 삼국사기와 삼국유사, 고려사, 조선왕조실록에서 수집하였다. 각 시대별로 자료를 정리한 후 혜성 기록의 날짜를 변환하였다. 사서에는 혜성 출현 날짜가 60간지로 표현한 일진으로 표기되어 있다. 이것을 먼저 음력 날짜로 변환한 뒤 시대별 연력표를 참고하여 서력 날짜로 변환하였다(안영숙 등 2000; 심경진 등 1999; 한보식 1987).

삼국사기와 삼국유사에는 서기전 49년부터 908년까지 혜성 기록이 있으며, 그 개수는 신라 38개, 고구려 8개, 백제가 15개이다(박창범 & 라대일 1994). 그 중 고구려와 신라가 동시에 관측한 기록을 하나로 보아 삼국/하대신라 시대(앞으로 삼국시대라 지칭함)에는 총

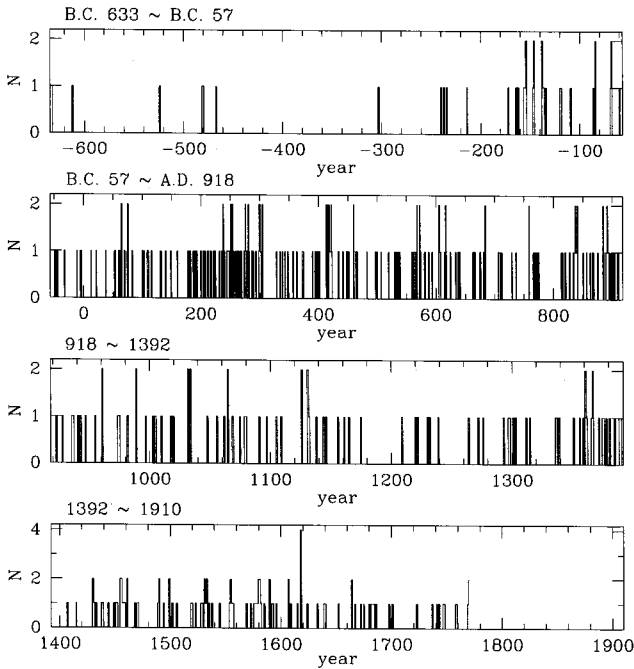


그림 2.— 중국의 혜성 기록 분포(서기전 633년 - 1771년; 총 439개)

60개의 혜성 기록이 있음을 확인하였다. 고려사에서 수집한 고려 시대의 혜성 기록은 989년에서 1392년에 걸쳐 총 63개가 있다. 조선 시대에 관측한 혜성은 조선 왕조실록에 실린 혜성 기록을 중심으로 정리하였으며, 혜성이라고 표기한 것뿐만 아니라 이미 혜성으로 알려진 객성 기록도 포함해 1402년부터 1863년까지 총 83개를 확인하였다(박창범 1999; Yang 2004). 그림 1에 우리나라의 고대 혜성 기록을 시간에 따라 막대그래프로 보였다.

본 연구에서는 객성 기록의 경우 혜성으로 판별된 것들만 목록에 수록하여 사용하였다. 반면 Kronk는 객성 기록 외에 백색 기운(白氣云), 유성으로 표기된 기록들도 목록에 포함시켰었다. Kronk는 서기전 49년부터 1744년까지 182개의 한국 기록을 혜성으로 판단하여 정리하였다. Kronk의 혜성 목록에서 객성과 유성 등을 제외하면 삼국 시대에 49개, 고려 시대에 57개, 조선 시대에 42개, 총 148개의 혜성 기록이 정리되어 있다. 그러나 본 연구에서 정리한 혜성 기록의 개수는 삼국 시대에 60개, 고려 시대에 63개, 조선 시대에는 1744년까지 65개로 총 188개이며 Kronk의 것보다 40 개가 더 많다. 본 연구에서 정리한 우리나라 고대 혜성 기록은 서기전 49년부터 1863년까지 총 206개이다.

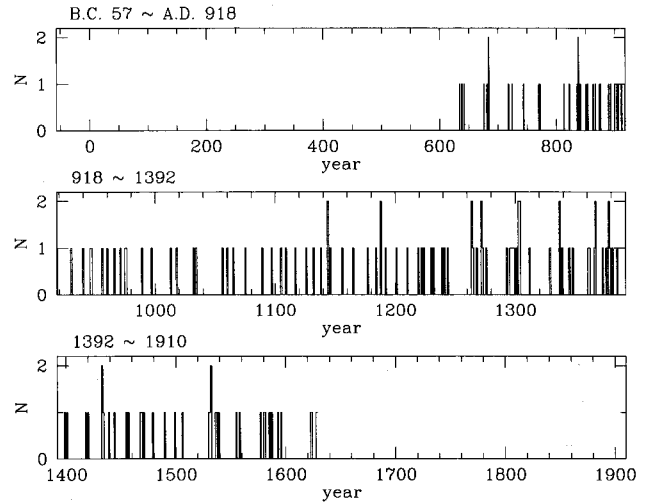


그림 3.— 일본의 혜성 기록 분포(634년 - 1630년; 총 154개)

2.2. 중국과 일본의 혜성 기록

Kronk (1999)는 ‘논형교석(論衡校釋)’에 수록된 서기전 633년 혜성 기록을 시작으로 1771년까지 총 439개의 중국 혜성 기록을 정리하였다. Kronk의 목록에는 634년부터 1630년까지 총 154개의 일본 혜성 기록이 있다. 이 기록들은 일본천문사료(日本天文史料)와 대일본사(大日本史) 등의 사서에서 수집된 것이다. 그림 2와 3은 각각 중국과 일본 사서에 나타난 혜성 기록의 시간에 따른 분포이다.

3. 혜성 기록의 파워 스펙트럼(power spectrum)

혜성은 크게 주기가 200년 이상인 장주기 혜성과 그 미만인 단주기 혜성으로 나뉘며, 단주기 혜성은 다시 주기가 20년보다 긴 핼리형 혜성과 Encke와 같이 주기가 20년보다 짧은 목성족 혜성으로 나뉜다. 우리 사서에 기록된 혜성들도 이처럼 다양한 주기를 가지고 있을 것으로 예상되며 이를 고대 혜성 출현의 주기성 연구에 활용할 수 있다. 예를 들어 양홍진, 박창범, 박명구 (1998)는 고려 시대 흑점과 오로라 기록의 분포로부터 1차원 파워 스펙트럼을 구하여 태양의 활동 주기를 조사하였다. 이 장에서는 혜성 기록에 대한 1차원 파워 스펙트럼을 계산하여 혜성 기록이 어떤 주기성을 가지고 있는지 찾아보고자 한다.

3.1. 파워 스펙트럼

파워 스펙트럼은 각진동수 또는 주기에 따른 파동의 진폭을 보여준다. 특정 주기의 파워가 클수록 그 주기를 가진 혜성이 많이 출현했다고 해석할 수 있다. 우리는 유한한 시구간에서 파워 스펙트럼을 계산한다. 사서에 기록된 혜성이 주기적으로 나타난 것으로 확인되려면

그 혜성이 시구간 내에 적어도 두 번 근일점을 통과해야 한다. 따라서 유한한 시구간에 나타난 의미 있는 혜성의 주기는 시구간의 절반보다 짧은 주기이다.

우리는 파워 스펙트럼을 구하기 전에 혜성 자료에 가우시안 문지름(Gaussian smoothing)을 가하여 연속적인 혜성 기록의 밀도 분포를 얻었다. 가우시안 문지름을 하는 이유는 조화 진동(harmonic oscillation)이 파워 스펙트럼을 오염시키는 것을 줄여주기 때문이다. 이때 혜성 기록 간 평균 거리 $l = (T_{\text{end}} - T_{\text{start}})/N$ 를 재어 $\sigma = l/3$ 을 가우시안 함수의 너비로 사용하였다. T_{start} 와 T_{end} 는 혜성 기록의 시작과 끝 시각이며, N 은 전체 시구간 $T = T_{\text{end}} - T_{\text{start}}$ 내에 있는 혜성 기록의 수이다.

혜성은 근일점을 통과할 때마다 질량을 많이 잃어 버리므로 파워 스펙트럼에서 알아낸 목성주기 혜성을 현재에도 관측할 가능성은 훨씬 떨어진다. 혜성 기록 분포에 문지름을 가하면 σ 보다 짧은 주기를 가진 혜성의 정보는 사라지고, 파워스펙트럼에서 극단주기 혜성의 영향이 줄어든다. 우리는 문지름을 가한 혜성 기록의 밀도 분포에서 평균을 뺀 값을 $\delta(t)$ 로 정의하고 다음과 같이 푸리에 변환하였다.

$$\begin{aligned}\tilde{\delta}(\omega) &\equiv \frac{1}{T} \int_{T_{\text{start}}}^{T_{\text{end}}} \delta(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{T} \sum_j \delta(t_j) e^{-i\omega t_j} \Delta t \\ &= \frac{1}{T} \sum_j [\delta(t_j) \cos \omega t_j - i \delta(t_j) \sin \omega t_j] \\ &= \frac{1}{T} [\tilde{\delta}_c(\omega) - i \tilde{\delta}_s(\omega)]\end{aligned}\quad (1)$$

여기에서 시간에 대한 적분은 시구간 $\Delta t = 1$ 년인 푸리에 성분의 합으로 근사되어 사용되었다. $\tilde{\delta}_c(\omega)$ 와 $\tilde{\delta}_s(\omega)$ 는 전체 푸리에 변환 성분 중 각각 코사인파와 사인파 변환 성분이다.

혜성 기록의 파워 스펙트럼 $P(\omega)$ 는 각진동수 ω 에서 푸리에 성분 $\tilde{\delta}(\omega)$ 의 복소 제곱 평균으로 다음과 같이 정의된다.

$$P(\omega) \equiv T \langle |\tilde{\delta}(\omega)|^2 \rangle \quad (2)$$

3.1.1. 혜성의 기록 빈도가 미치는 영향 보정

혜성 기록의 분포는 관측 빈도의 영향을 받을 수 있다. 정치·사회적 변화, 기상·기후 변화, 체계적인 관측부서의 존부(存否), 관심 있는 천문 현상의 변화 등이 혜성 기록의 시간에 따른 분포를 왜곡할 것으로 생각된다. 정확한 혜성 자료 분석을 위해서는 혜성 관측 빈도에 영향을 미치는 효과를 제거해야 한다.

우리나라의 혜성 기록을 살펴보면, 크게 삼국 시대와 고려·조선 시대로 나뉘어 혜성 기록 수에 차이가 날 수 있다. 혜성 기록은 삼국 시대부터 조선 시대

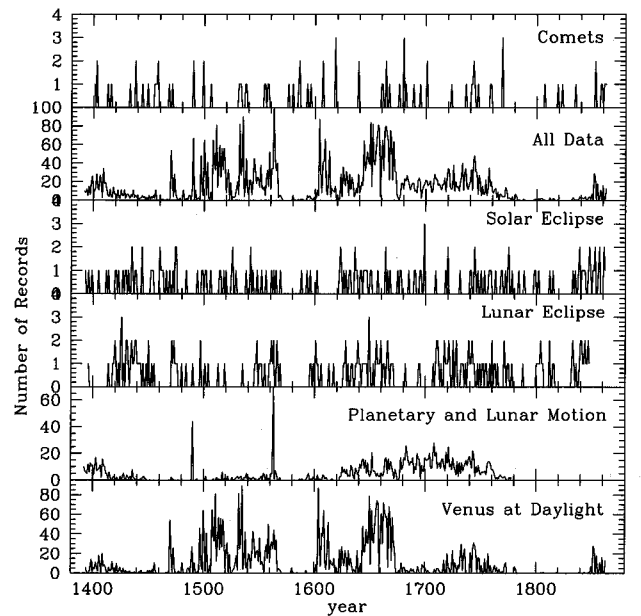


그림 4.— 조선 시대 혜성(첫째 상자)과 천문 현상 기록의 분포 비교. 둘째 상자는 일식(셋째 상자), 월식(넷째 상자), 행성과 달의 운행(다섯째 상자), 태백주현(여섯째 상자)을 모두 합쳐 나타낸 천문 현상 기록의 분포이다.

까지 평균 9.27년마다 나타난다. 시대 별로 나누어 살펴보면, 삼국 시대에는 평균 15.97년마다, 고려 시대에는 평균 6.41년마다, 조선시대에는 평균 5.57년마다 혜성 관측 기록이 나타난다.

파워스펙트럼을 정확히 계산하기 위해 혜성 기록의 시간별 분포에 천문 관측 활동을 대변하는 가중치를 부여할 필요가 있다. 본 연구에서는 혜성 이외의 천문 현상을 이용하여 혜성 자료에 가중치를 주도록 하였다. 이러한 천문 현상에는 여러 가지가 있으나 천문 관측 기록이 상대적으로 많은 조선시대의 경우 일식, 월식, 행성과 달의 운행, 태백주현 등이 있다(그림 4). 이 중 월식은 삼국 시대 사서에는 기록이 없으므로 가중치 자료에서 제외되었다. 태백주현도 조선 시대로 오면서 특정 시기에 그 기록이 집중적으로 몰려 있는 현상이 나타나 혜성의 시간에 따른 분포를 대변하는 데 어려움이 있어 가중치 자료에서 제외되었다. 우리는 혜성의 분포와 각각의 천문 현상의 분포를 비교하여 혜성과 비교적 비슷한 분포를 갖는 일식, 행성과 달의 운행에 관한 기록을 혜성 자료 분석을 위한 시대적 가중치 자료로 선택하였다.

그림 5은 가중치 자료로 쓸 천문 현상 기록의 시간에 따른 분포를 보여 준다. 삼국 시대에는 혜성의 분포(그림 1의 첫째 상자)와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다(그림 5의 첫째 상자). 고려 시대의 혜성 분포에는 한 가지 특징이 있다. 1150년대 후반부터 1210년대 후반까지

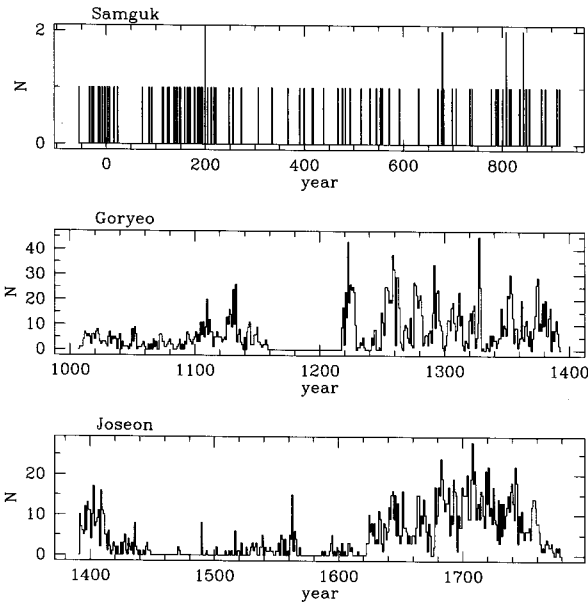


그림 5.—삼국 시대 가중치(첫째 상자), 고려 시대 가중치(둘째 상자), 조선 시대 가중치(셋째 상자)의 시간에 따른 기록 분포. 고려 시대의 경우, 혜성 기록이 60여년 동안 없었던 1150년대 후반부터 1210년대 후반까지의 가중치는 “0”으로 조정되었다.

천문 관측 활동은 활발하게 이루어져 왔으나 혜성 기록은 존재하지 않는다. 고려 시대의 경우 평균 6.41년마다 한 번씩 혜성이 기록된 것을 생각하면, 천문 현상 기록이 많았던 약 60년 동안 혜성 기록이 없다는 것은 자연스럽지 않으며 혜성 기록이 인위적으로 배제되었을 가능성이 높다. 따라서 우리는 이 시기의 가중치를 “0”으로 조정하여 파워 스펙트럼을 계산하였다. 그림 5의 두 번째 상자는 (파워 스펙트럼 계산에 사용된) 고려 시대의 혜성 관측 빈도를 대변하는 가중치의 분포이다. 조선 시대 천문 현상 기록을 정리할 때에는 특정 천문 현상이 짧은 기간 동안 연달아 기록되어 있으면 하나의 기록으로 간주하여 가중치 자료를 정리하였다(그림 5의 셋째 상자).

표 1은 사서에 기록된 천문 현상 중 혜성 기록과 혜성 분석에서 가중치로 사용한 다른 천문현상 관측 기록 수를 시대별로 요약한 것이다. 우리는 단위 시간 당 기록된 혜성의 개수 밀도와 가중치의 개수 밀도가 같도록 가중치 자료의 기록 수를 조정한다. 다음, 혜성 기록과 마찬가지로 가중치 기록도 같은 방법으로 가우시안 함수로 문지름을 가한 뒤 푸리에 변환하였다. 이 때 문지름 함수의 너비(σ), 시작 시간(T_{start}), 끝 시간(T_{end})은 혜성 자료를 분석할 때와 같은 값을 사용하였다. 푸리에

표 1.— 시대 별로 기록된 혜성과 가중치 비교

	기록의 개수		기록의 시구간(년)	
	혜성	가중치	혜성	가중치
삼국 시대	60	93	-48 ~ 908	-54 ~ 917
고려 시대	63	2914	989 ~ 1392	1009 ~ 1392
조선 시대	83	1577	1402 ~ 1863	1392 ~ 1862

에 변환을 한 가중치 기록 분포

$$\tilde{\delta}'(\omega) \equiv \frac{1}{T} [\tilde{\delta}'_c(\omega) - i\tilde{\delta}'_s(\omega)] \quad (3)$$

는 다음과 같이 푸리에 변환을 한 혜성 분포 자료의 실수부와 허수부를 보정하는 데 사용한다.

$$\tilde{\delta}(\omega) = \frac{1}{T} [\tilde{\delta}_c(\omega) - \tilde{\delta}'_c(\omega)] - i\frac{1}{T} [\tilde{\delta}_s(\omega) - \tilde{\delta}'_s(\omega)] \quad (4)$$

이러한 보정이 가능하기 위해서는 가중치 자료의 시구간 안에 혜성 자료의 시구간이 포함되어야 한다. 고려 시대의 경우, 혜성 기록은 989년부터 1392년까지 있지만 가중치 자료는 1009년부터 1392년에 걸쳐 분포하고 있다. 따라서 989년과 1008년 사이에 기록된 2개의 혜성 기록을 제외하고 총 61개의 혜성 기록을 이번 분석에 사용했다. 조선시대를 보면, 혜성 기록은 1402년에서 1863년까지 존재하지만 가중치 자료는 1392년에서 1862년까지 존재한다. 따라서 혜성 기록 중 1863년의 기록은 제외되어 이번 분석에는 총 82개의 기록이 사용되었다.

3.1.2. 유한한 시구간이 미치는 영향 보정

우리는 푸리에 변환을 무한한 시구간에서 수학적으로 정의한다. 그러나 실제 혜성 자료는 유한한 시구간 내에 존재하므로 파워 스펙트럼을 재기 위해 수행하는 푸리에 변환도 유한한 시구간에서 행해질 수밖에 없다(식 1). 유한한 시구간에서 푸리에 변환하는 것은 그 시구간에 해당하는 너비를 갖고 높이가 1인 사각형 모양의 창(window)을 무한한 자료에 곱한 후 푸리에 변환하는 것과 같다. 실공간에서 두 함수의 곱은 푸리에 공간에서 상호 포깁(convolution) 효과로 나타난다. 혜성 기록 밀도 분포의 푸리에 성분은 사각 창의 푸리에 성분에 의해 문질러져 왜곡되며, 특정 각진동수에 해당하는 파워 스펙트럼의 값에는 다른 각진동수의 파워도 일부 끌려와 포함되므로 파워 스펙트럼의 모양과 진폭이 왜곡된다. 그러므로 정확한 파워 스펙트럼을 계산하기 위해 창 효과를 완화해 주어야 한다. 본 연구에서는 실공간에서 사각형 모양의 창 대신 시구간의 중심에서 양 끝으로 갈수록 진폭이 줄어드는 모양의 창인 ‘웰치 창(Welch window)’을 사용하였다. 시구간 범위

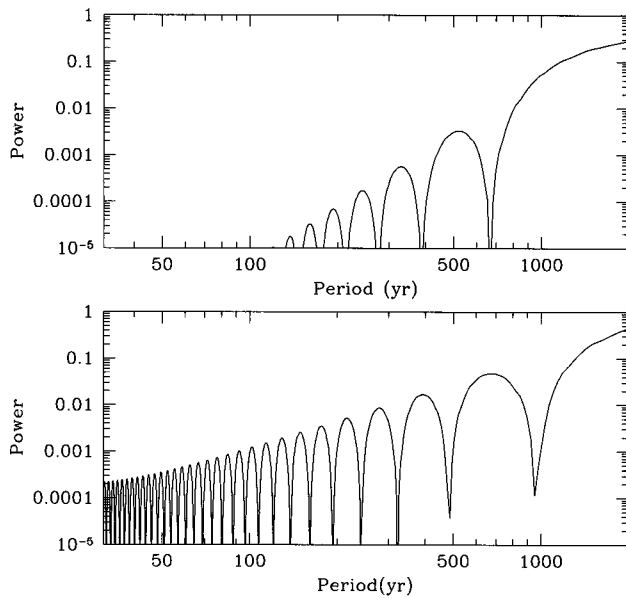


그림 6.— 웰치 창(위)과 사각 창(아래)의 파워 스펙트럼. 각 창의 너비는 956년이다.

가 $0 \leq t \leq T$ 인 웰치 창은 수학적으로

$$W(t) = 1 - \left(\frac{t - T/2}{T/2} \right)^2 \quad (5)$$

과 같이 정의된다.

그림 6의 첫째 상자는 너비가 956년인 웰치 창의 파워 스펙트럼이고, 둘째상자는 너비가 웰치 창과 같으나 높이가 일률적으로 1인 사각 창의 파워 스펙트럼이다. 혜성 기록 분포에 웰치 창을 곱하면 창의 양 끝에 존재하는 혜성의 정보를 잃게 되는 단점이 있지만, 푸리에 변환 후 계산하고자 하는 각진동수에서 멀어질수록 창에 의해 혜성 자료가 문질러지는 효과가 급격히 떨어지는 장점이 있다.

3.2. 우리나라 혜성 기록의 파워 스펙트럼

우리는 혜성 기록의 파워 스펙트럼을 계산할 때, 파워가 왜곡되는 것을 줄이기 위해 혜성의 분포를 대변하는 가중치와 웰치 창을 사용하였다. 우리가 사용한 가중치 자료가 파워스펙트럼에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해, 가중치 없이 구한 혜성 기록의 파워 스펙트럼을 가중치를 써서 구한 파워 스펙트럼과 비교해 보았다.

혜성 자료에서 파워 스펙트럼을 구해 보면 특정 주기에서 높은 봉우리가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 이로부터 그 봉우리에 해당하는 주기를 가진 혜성이 존재하였다고 단정할 수는 없다. 유한한 시구간 내에서 유한한 자료가 무작위로 분포해도 특정 주기의 파워가 유발될 수 있기 때문이다. 또한 혜성의 기록 빈도가 파

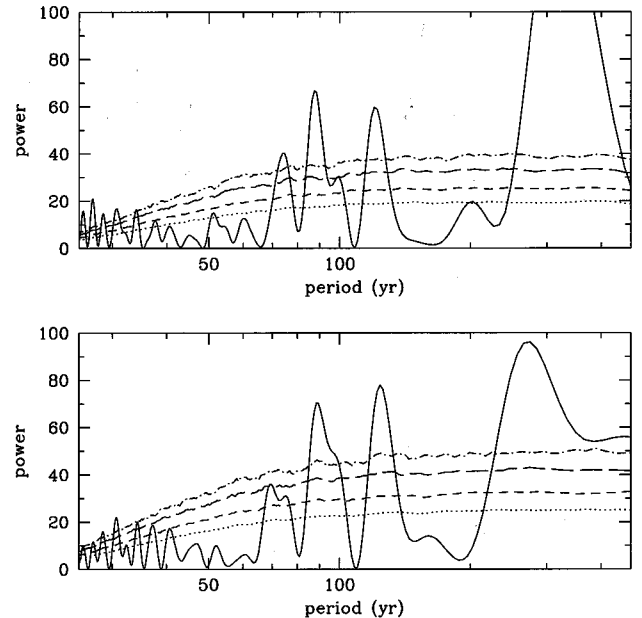


그림 7.— 삼국 시대 혜성 기록의 파워 스펙트럼. 위 상자는 가중치를 보정하고 웰치 창을 사용하여 구한 파워 스펙트럼을, 아래 상자는 가중치 보정 없이 웰치 창만 사용하여 구한 파워 스펙트럼이다. 위에서부터 아래로 99%, 98%, 95%, 90% 신뢰수준이 점선으로 표시되어 있다.

워 스펙트럼에 미치는 영향을 보정하여 파워 스펙트럼을 구한 경우에는 보정이 완벽하게 이루어졌다고 확신하기 힘들기 때문이다. 따라서 혜성 기록의 파워 스펙트럼에 대한 신뢰도를 정량화할 필요가 있다. 우리는 혜성 기록이 있는 시구간 내에서 가중치 분포를 확률 밀도 함수로 사용하여 가상의 혜성을 실제 혜성 기록 수 만큼 무작위로 출현시켜 가상의 혜성 기록 자료를 10,000개씩 만들었다. 가중치 분포로 보정을 하지 않는 경우에는 혜성 출현의 확률 밀도를 전 시구간에서 일정하게 두고 혜성 자료를 만들었다. 이렇게 만들어진 자료 속에는 주기성을 가진 혜성이 없으므로 가상 자료의 파워 스펙트럼 값은 가상 혜성의 무작위적 분포에 의해 유발된 포아송 잡음의 파워와 천문 기록 빈도의 변화 효과만을 포함한다. 따라서 이보다 높은 파워 봉우리는 기록의 빈도와는 무관하게 주기성을 지닌 혜성 기록에 의해 만들어졌을 확률이 상대적으로 높다고 해석할 수 있다. 이 확률을 정량화하기 위해 10,000 번 측정된 가상 자료의 파워 스펙트럼들을 각 진동수에서 크기 별로 정렬하고 그 순서에 따라 90%, 95%, 98%, 99% 신뢰구간을 구하였다.

그림 7은 삼국 시대 혜성 기록으로부터 웰치 창을 사용하고 가중치로 보정하여 구한 파워 스펙트럼(위)과 웰치 창만을 사용해 구한 파워 스펙트럼(아래)을 보여 준다. 두 파워 스펙트럼에서 봉우리들의 높이는 다르

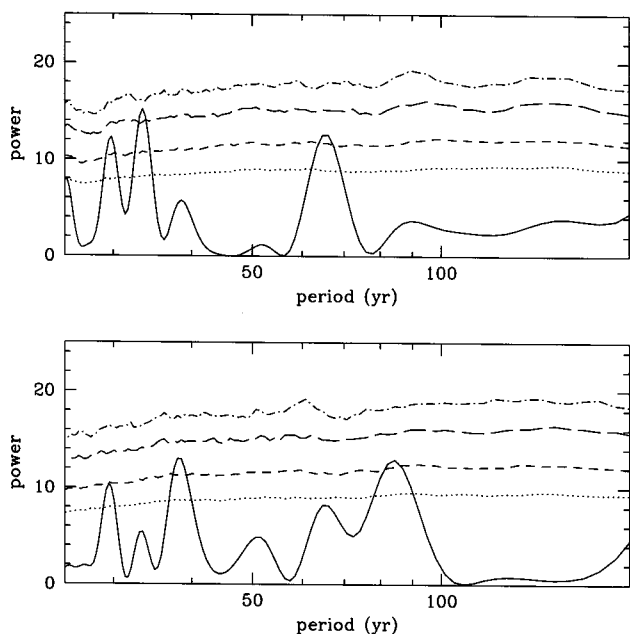


그림 8.— 고려 시대 혜성 기록의 파워 스펙트럼(그림 7과 같은 형식).

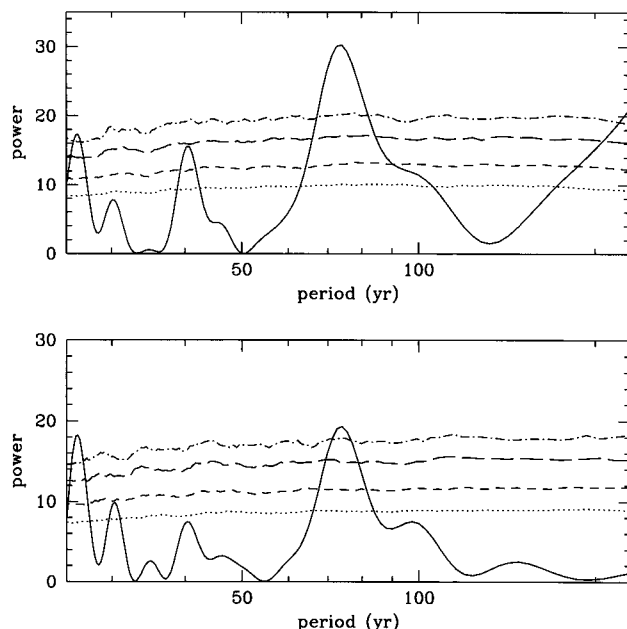


그림 9.— 조선 시대 혜성 기록의 파워 스펙트럼(그림 7과 같은 형식).

지만 봉우리가 나타나는 주기는 대체로 비슷하다. 삼국시대 혜성 기록으로부터 구한 두 파워 스펙트럼에서 신뢰수준이 98% 이상의 높은 봉우리는 200 - 300년 사이, 약 120년, 약 90년, 70 - 80년 사이, 30 - 40년 사이, 30년 이하 주기에서 여러 군데 나타난다. 이 중 70년 - 80년 사이의 봉우리가 헬리 혜성(주기 약 76년)의 주기적 출현에 의해 나타난 것으로 추측해 볼 수 있다. 그러나 헬리 혜성의 근일점 통과 시기를 연구한 결과에 의하면(Yeomans, Rahe, & Freitag 1986), 삼국시대에는 헬리 혜성이 근일점을 통과한 시기 근처에는 관측 기록이 없고, 다만 헬리 혜성이 근일점을 통과한 시기보다 1년 앞선 기록이 4개 있다.

고려 시대 혜성 기록은 378년에 걸쳐 나타난다. 따라서 고려 시대 혜성의 파워 스펙트럼에서는 약 190년 이하의 주기만 의미를 가진다. 우리가 계산한 파워 스펙트럼에서 신뢰수준이 95% 이상인 주기는 대략 80 - 90년 사이, 30 - 40년 사이이다(그림 8, 아래). 고려 시대에는 헬리 혜성이 5번 근일점을 통과하며, 79년 주기로 근일점을 통과하는 것으로 알려져 있다(Yeomans & Kiang 1981). 따라서 80년 - 90년 사이에 최고점을 갖는 주기에 헬리 혜성의 주기도 포함될 수 있다. 우리는 고려 시대의 혜성 기록에서 헬리 혜성이 근일점을 통과한 시기와 비슷한 시기의 기록이 있는지 확인하여 근일점을 통과한 헬리 혜성 기록 5개를 모두 찾았다.

조선 시대의 혜성 기록에서 구한 파워 스펙트럼을 살펴보면, 신뢰수준이 98% 이상의 봉우리는 70 - 80년

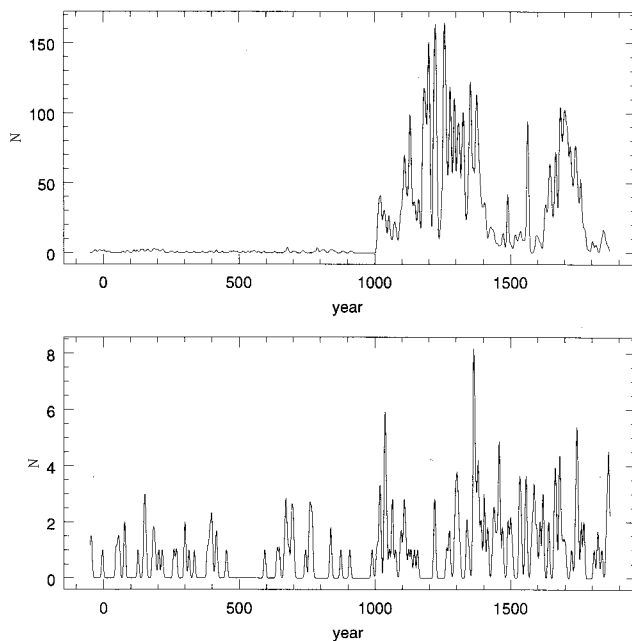


그림 10.— 삼국, 고려·조선 시대 전체 가중치(위)와 혜성(아래) 기록의 분포

사이, 30년 부근 주기에서 나타난다(그림 9). 조선 시대 혜성 목록에는 헬리 혜성의 근일점 통과 시기와 비슷한 시기의 기록들이 모두 포함되어 있다.

우리는 좀더 긴 혜성의 주기를 확인하기 위해 각 시대별 혜성 기록을 합쳐 분석하기로 하였다. 그런데 그

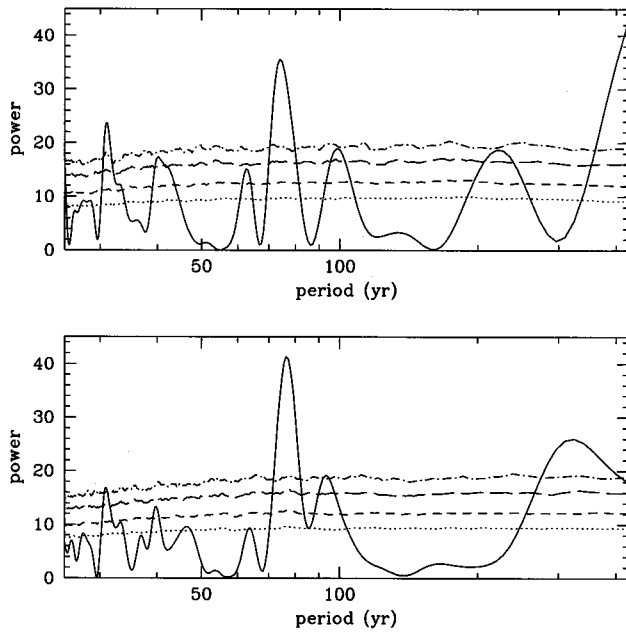


그림 11.— 고려·조선 시대 혜성 기록의 파워 스펙트럼(그림 7과 같은 형식).

림 10에서 보는 것과 같이 가중치로 사용될 천문 관측 기록의 수가 고려와 조선 시대에 비해 삼국 시대에 지나치게 적다. 따라서 혜성의 기록 빈도가 파워 스펙트럼에 미치는 영향을 효율적으로 보정하기 위해 삼국 시대의 기록은 제외한 채 고려와 조선 시대의 혜성 기록만을 합쳐서 파워 스펙트럼을 구하고 혜성의 주기를 살펴보기로 하였다. 이 때 고려 시대와 조선 시대의 혜성 기록을 합치고 두 시대의 가중치 분포를 각 시대 혜성 기록 수를 기준으로 높이를 재조정 한 다음 파워 스펙트럼을 구하였다(그림 11). 고려·조선 시대 혜성의 시구간은 848년으로 약 420년보다 짧은 주기만 의미가 있다. 우리는 새로 구한 파워 스펙트럼에서 헬리 혜성의 주기 외에도 각 시대별 파워 스펙트럼에서는 확인할 수 없었던 90 - 100년 사이, 그리고 약 300년의 주기를 확인하였다.

3.3. 중국과 일본 혜성 기록의 파워 스펙트럼

표 2는 우리나라, 중국, 일본의 혜성 기록 개수와 기록 시구간을 비교하고 있다. 중국과 일본의 자료는 Kronk가 정리한 것으로 마지막 기록의 연도가 우리나라보다 이른다. 그 이유는 18세기 이후의 혜성 기록은 서양 기록 중심으로 수집됐기 때문이다. 중국의 혜성 기록은 오랜 기간 동안 많은 수가 존재하기 때문에 장주기 혜성을 연구하는 데 유리할 것으로 보인다.

그림 12는 중국과 일본의 혜성 기록 분포에 웰치 창을 적용하여 구한 파워 스펙트럼이다. 이 때 혜성 기

표 2.— 세 나라의 혜성 기록 비교

나 라	혜성의 개수	시구간(년)
한 국	206	-48 ~ 1863
중 국	439	-632 ~ 1771
일 본	154	634 ~ 1630

한국의 자료는 본 연구에서 정리한 혜성 자료이며 중국과 일본의 자료는 Kronk (1999)가 정리한 자료이다.

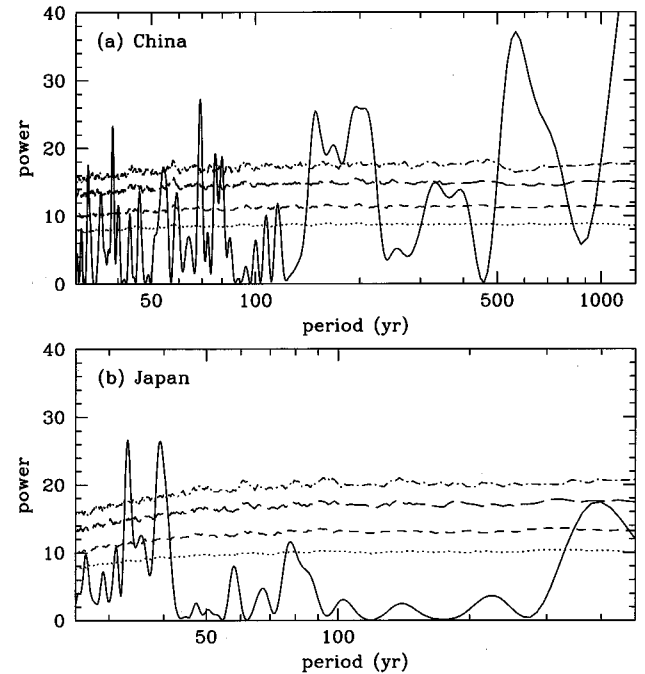


그림 12.— (a) 중국 혜성 기록의 파워 스펙트럼. (b) 일본 혜성 기록의 파워 스펙트럼.

록의 빈도 변화는 고려되지 않았다. 중국 혜성 기록의 파워 스펙트럼에서는 200년 이상의 장주기에서도 높은 봉우리가 많이 나타나는 반면, 일본 혜성 기록의 파워 스펙트럼에서는 장주기 혜성의 출현이 상대적으로 적을 뿐만 아니라 봉우리의 신뢰수준도 비교적 낮게 나타난다. 그림 13는 그림 12과 비교할 목적으로 삼국·고려·조선 시대의 혜성 자료를 시대별 혜성 기록의 빈도 변화에 대한 고려 없이 일률적으로 합친 다음 웰치 창을 적용하여 구한 파워 스펙트럼이다.

한국, 중국, 일본 세 나라 혜성 기록의 파워 스펙트럼에서 95% 신뢰수준보다 높은 봉우리를 가진 주기는 중국이 14개, 우리나라는 8개, 일본은 3개이며, 공통으로 나타나는 주기는 약 38 - 40년 사이, 약 76년, 300 - 400년 사이이다. 헬리 혜성의 주기인 약 76년의 경우, 파워 스펙트럼 봉우리의 높이가 우리나라와 중국의 경우 95% 신뢰 수준을 넘는 반면, 일본의 경우 90% 신뢰 수준만 넘고 있다. 고대 사서에서부터 그 기록을 찾

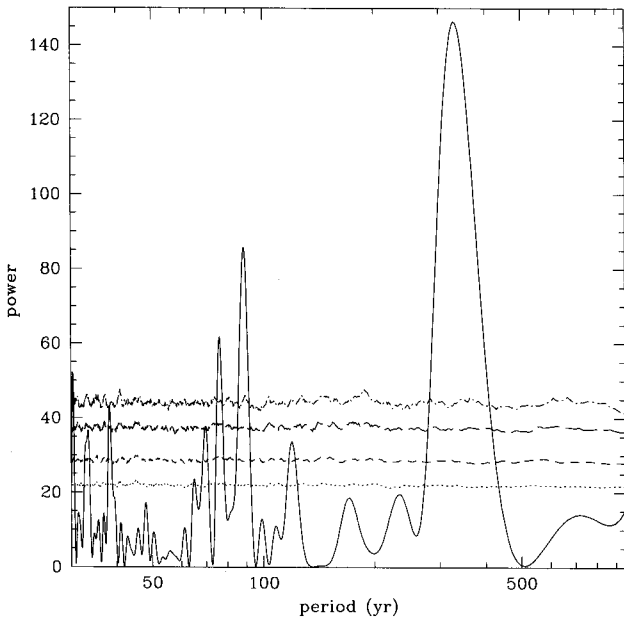


그림 13.— 우리나라(삼국 · 고려 · 조선) 혜성 기록의 파워 스펙트럼

아볼 수 있는 사자자리 유성우와 페르세우스자리 유성우(Yang, Park, & Park 2005)는 Tempel-Tuttle 혜성(약 70년 주기)과 Swift-Tuttle 혜성(약 120년 주기)에 의해 만들어진다고 한다. 이 두 혜성의 주기는 한국과 중국의 혜성 기록에서만 확인된다.

4. 혜성의 궤도 운동 구현

고대 사서의 혜성 기록이 실제 관측을 바탕으로 이루어진 것인지 여부를 판가름하기 위해서는 현재 알려진 혜성들의 정보를 바탕으로 혜성의 과거 궤도 운동을 구현하고 사서의 기록과 비교할 필요가 있다.

기존 연구는 대부분 헬리 혜성 중심으로 이루어져 왔으며 혜성의 운동 방정식을 현재에서 과거로 수치 적분하여 혜성의 궤도를 계산하였다. 이 때, 그 혜성의 최근 위치 자료를 바탕으로 최소제곱법(least square method)을 사용하여 혜성의 궤도가 정확히 계산되도록 궤도 요소와 초기 조건을 보정하기도 한다(Sitarski & Ziolkowski 1987; Yeomans & Kiang 1981). 본 연구에서는 이와 같은 인위적 보정 없이 혜성 운동의 초기 조건, 태양계 천체의 중력 효과, 혜성의 비중력 효과만을 고려하여 혜성의 궤도 운동을 구현하고자 한다.

4.1. 다중 구간 방법을 사용한 태양계 천체의 궤도 운동 계산

태양계 내 천체의 궤도 운동은 태양과 행성의 중력에 의한 가속도를 운동 방정식에 넣고 적분하여 얻

어진다. 이 때, 룬게-쿠타(Runge-Kutta) 방법과 뛰어넘기(leapfrog) 방법이 자주 사용된다. 본 연구에서는 Quinlan & Tremaine (1990)이 고안한 다중구간 방법(multistep method)을 사용한다. 이 방법의 장점은 특정 시각 천체의 위치를 계산할 때 천체들의 과거 시간별 위치 정보를 10개 이상 사용하기 때문에 4차 룬게-쿠타 방법이나 뛰어넘기 방법에 비해 천체의 위치를 더 정확하게 얻을 수 있다는 것이다.

천체의 과거 위치 정보를 k 개 사용하여 그 천체의 위치를 예측하는 k 차 다중구간 방법에 의하면, $n+1$ 번째 시점에서 천체의 공간적 위치는 다음과 같이 간단히 표현된다(Quinlan & Tremaine 1990; Quinn, Tremaine, & Duncan 1991).

$$x_{n+1} = -\sum_{j=1}^k \alpha_{k-j} x_{n-j+1} + h^2 \sum_{j=1}^k \beta_{k-j} f_{n-j+1}. \quad (6)$$

여기에서 x_n 은 n 번째 시점에서 천체의 위치, h 는 수치 적분의 시구간 너비, f_n 은 n 번째 시점에서 천체의 가속도이다. α_k 와 β_k 는 Quinlan & Tremaine (1990)의 ‘대칭적 다중구간 방법’에서 정의된 계수이다. 이 계수들은 $\alpha_j = \alpha_{k-j}$, $\beta_j = \beta_{k-j}$, $\alpha_0 = 1$, $\beta_0 = 0$ 인 성질을 지닌다. 표 3에 다중구간 방법의 차수에 따른 α , β 계수들이 정리되어 있다. 이 방법의 특징은 시구간 h 동안 움직인 천체의 위치를 계산할 때마다 이전 시점의 위치 정보를 포함한 k 개 위치 정보를 초기 조건으로 사용한다는 것이다. 본 연구에서는 12개의 초기 조건을 사용하는 12차 다중구간 방법으로 태양계 천체의 궤도를 계산하였다.

태양 중심 좌표계에서 뉴턴의 운동 방정식은

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -\frac{G(M_\odot + m_i)}{r_i^3} \mathbf{r}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^9 \frac{Gm_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^9 \frac{Gm_j}{r_j^3} \mathbf{r}_j \quad (7)$$

와 같이 표현된다. 여기에서 우변의 첫째 항은 태양과 i 번째 행성 사이에 미치는 중력에 의해 생긴 가속도의 차이이고, 둘째 항은 $j(j \neq i)$ 번째 행성들이 i 번째 행성에 미치는 중력 가속도이다. 셋째 항은 $j(j \neq i)$ 번째 행성들이 태양에 미치는 중력 가속도와 관련된 항이다. 우리는 혜성과 행성들의 정확한 위치를 계산하기 위해 태양에 의한 상대론적 중력 효과를 고려하였다. 다른 행성에 의한 상대론적 중력 효과는 태양에 비해 10^3 배 이상 작으므로 무시한다(Quinn 등 1991). 태양 질량에 의한 상대론적 추가 가속도는

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \frac{GM_\odot}{r_i^3} \left(\frac{4GM_\odot}{c^2 r_i} \mathbf{r}_i - \frac{(\dot{\mathbf{r}}_i \cdot \dot{\mathbf{r}}_i) \mathbf{r}_i}{c^2} \right)$$

표 3.— 대칭적 다중구간 방법의 α, β 계수(Quinlan & Tremaine 1990)

i	8차		10차		12차		14차	
	α_i	$12,096\beta_i$	α_i	$241,920\beta_i$	α_i	$53,222,400\beta_i$	α_i	$237,758,976,000\beta_i$
0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	-2	17,671	-1	399,187	-2	90,987,349	-2	433,489,274,083
2	2	-23,622	1	-485,156	2	-229,596,838	2	-1,364,031,998,256
3	-1	61,449	-1	2,391,436	-1	812,627,169	-1	5,583,113,380,398
4	0	-50,516	1	-2,816,732	0	-1,628,539,944	0	-14,154,444,148,720
5			-2	4,651,330	0	2,714,971,338	0	28,630,585,332,045
6					0	-3,041,896,548	0	-42,056,933,842,656
7							0	48,471,792,742,212

$$+ \frac{4GM_{\odot}}{c^2 r_i^3} (\mathbf{r}_i \cdot \dot{\mathbf{r}}_i) \dot{\mathbf{r}}_i \quad (8)$$

이고, 여기에서 c 는 빛의 속도이다(Newhall, Standish, & Williams 1983). 총 가속도의 양은 뉴턴의 중력 효과와 일반상대론에 의한 추가 중력 효과를 더한 값이 된다.

천체 궤도 운동의 수치 적분에는 다음과 같이 네 가지 오차가 누적되어 나타난다. 첫째는 절단 오차(truncation error)로서 적분 시간 간격의 값이 0보다 커서 유발되는 오차이다. 둘째는 반올림 오차(round-off error)로서 컴퓨터가 일정한 유효 숫자까지만 실수 연산을 수행하기 때문에 생기는 오차이다. 셋째는 초기 조건의 부정확성으로 생기는 오차이며, 마지막으로 물리적 모형에서 유발된 오차로서, 예를 들어 태양 질량의 손실을 무시하여 발생하는 오차가 여기에 속한다. 본 연구에서는 물리적 모형에 따른 오차는 생각하지 않기로 한다.

컴퓨터 성능의 향상으로 절단 오차와 반올림 오차를 크게 줄일 수 있다. Quinn 등 (1991)은 행성 궤도 운동의 수치 적분에서 시구간 너비로 $h = 0.75$ 일을 채택하였으나, 본 연구에서는 시구간의 너비를 $h = 30$ 분으로 짧게 설정하여 절단 오차의 누적 효과를 최소화하고자 하였다. 우리는 수치 적분 시 반올림 오차의 누적 효과를 줄이고자 64 비트 배정도 실수의 정밀도(double precision)로 계산을 수행하였다. 또한 128 비트 장기 배정도 실수의 정밀도(long double precision)로도 궤도 운동 계산을 수행하여 수천 년의 시구간 내에서 천체의 궤도 운동은 배정도 실수의 정밀도로 계산해도 충분함을 확인하였다.

행성 궤도 운동 구현의 정밀도는 행성과 혜성의 초기 조건에 크게 좌우된다. 본 연구에서는 태양계 천체의 정확한 위치와 질량 정보, 혜성의 비중력 계수(4.2절) 등을 NASA JPL의 HORIZONS¹에서 제공받아 사용하였다. 이 때, 행성의 부정확한 질량 값 대신 중력상수와 행성 질량을 곱한 값 Gm_i 를 사용하였고, 행성과 그

¹<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

표 4.— 행성 궤도 운동 구현 결과의 정확도

JD=1703213.8333

행성	경험적 맞춤공식으로 구한 값과의 차			
	적경(deg)	적위(deg)	d_{\odot} (AU)	d_{\oplus} (AU)
수성	3.87×10^{-1}	1.47×10^{-1}	-0.001	0.002
금성	1.37×10^{-1}	6.63×10^{-2}	0.000	0.002
지구	-	-	0.000	0.000
화성	8.40×10^{-2}	1.49×10^{-2}	0.000	0.000
목성	2.01×10^{-3}	2.69×10^{-2}	0.000	0.001
토성	2.30×10^{-3}	1.27×10^{-3}	0.000	0.001
천왕성	1.39×10^{-2}	5.88×10^{-3}	0.000	0.000
해왕성	1.54×10^{-2}	8.42×10^{-4}	0.000	0.001
명왕성	6.99×10^{-1}	1.77×10^{-1}	-0.026	0.014

d_{\odot} 는 행성과 태양 사이의 거리이며, d_{\oplus} 는 행성과 지구 사이의 거리이다.

행성에 딸린 위성의 질량 중심을 행성의 위치로 사용하였다. 지구의 경우도 다른 행성과 마찬가지로 지구와 달의 질량 중심의 위치 정보를 제공 받아 사용하였다. 천체의 위치 표시를 위해 적도 좌표계의 원점을 태양 중심으로 평행 이동시켜 얻은 좌표계가 사용되었다. HORIZONS에서 제공 받은 행성들의 초기 위치 정보는 2004년 1월 2일 0시(CT; Coordinate Time)부터 30분 간격으로 12개이다.

표 4는 서기전 50년 2월 23일 08시(JD = 1703213.8333)에 행성의 적경, 적위, 행성-태양 거리, 행성-지구 거리를 다중구간 방법과 Meeus (1998)의 경험적 맞춤 공식에서 각각 구하여 그 차를 정리한 것이다. 다중구간 방법으로 얻은 행성들의 위치가 경험적 맞춤공식의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.2. 혜성의 비중력 효과

혜성의 비중력 효과란 혜성의 핵에 있는 얼음이 태양 복사에 의해 승화하여 수증기로 분출하고 그 수증기가 혜성의 궤도 운동에 미치는 영향을 말한다. 비중력 효과를 기술하는 대부분의 모형들은 혜성의 핵이 대부분

얼음으로 이루어져있다고 가정하고 있다. 우리는 태양으로부터 혜성까지 거리에 따른 얼음의 승화 비율을 이용하여 비중력 효과로 인한 혜성의 가속도 변화량을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 Marsden 등 (1973)의 비중력 효과 모형을 사용하였다. 얼음 승화에 의해 생기는 혜성의 비중력적 가속도는

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = (A_1\hat{\mathbf{r}} + A_2\hat{\mathbf{T}})g(r) \quad (9)$$

로 주어진다. 이 때, $g(r)$ 은 거리 r 에만 의존하는 항으로서

$$g(r) = \alpha \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-m} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^n\right]^{-l} \quad (10)$$

로 표현되며, $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r$ 은 태양에서 본 혜성의 시선 방향 단위벡터, $\hat{\mathbf{T}} = (\mathbf{r}\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}\mathbf{r})/h$ 는 혜성의 진행 방향 단위벡터, $\dot{\mathbf{r}}$ 는 혜성의 속도이고 $\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}/r$, $h^2 = (y\dot{z} - z\dot{y})^2 + (z\dot{x} - x\dot{z})^2 + (x\dot{y} - y\dot{x})^2$ 이다. $\alpha = 0.111262$ 는 1 AU에서 $g(r)$ 이 일정한 값을 가지도록 하는 상수이다. 태양의 복사를 받은 혜성의 얼음 핵이 재복사하는 반응보다 승화하는 반응이 우세해지는 거리 r_0 는 2.808 AU이고, m, n, l 은 각각 2.15, 5.093, 4.6142이다. 비중력 효과 식에서 A_1 과 A_2 는 각각 1 AU 거리에서 시선 방향과 진행 방향으로 혜성이 가속되는 정도를 나타내는 양이다. A_1 과 A_2 는 혜성마다, 또는 같은 혜성이라 할지라도 근일점을 통과하는 시기마다 다른 값을 가지며, 잘 알려진 혜성의 경우에는 그 값이 결정되어 있으나 장주기 혜성이나 잘 알려지지 않은 혜성의 경우에는 거의 결정되어 있지 않다. 혜성의 궤도 운동 연구에서 비중력 효과를 고려할 때에는 A_1 과 A_2 가 상수라고 가정하거나 시간에 따라 선형적으로 변한다고 가정한다. 본 연구에서는 A_1 과 A_2 를 상수라고 가정하고 혜성의 위치를 계산하였다.

4.3. 혜성의 궤도 운동 계산 결과

4.3.1. Halley 혜성

헬리 혜성은 지금까지 가장 많이 연구된 혜성이다. 본 연구에 사용된 혜성 궤도 운동 계산법의 정확도를 확인하기 위해 헬리 혜성의 궤도 운동을 계산하고 기존 연구 결과와 비교하였다. 우리는 헬리 혜성의 궤도 운동을 계산할 때, JPL HORIZONS에서 얻은 헬리 혜성의 비중력 계수 A_1 과 A_2 중 궤도 운동에 더 큰 영향을 미치는 A_2 를 조금씩 변화시켜 가면서 천문 기록과 관측에서 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시간을 가장 잘 맞추는 비중력 상수를 찾아내었다. 비교에 사용된 헬리 혜성의 근일점 통과 시간은 Kiang (1972)과 Yeomans & Kiang (1981)이 중국 사서의 기록과 궤도 계산을 바탕으로 정리한 것이다. 최종적으로 궤도 계산에 사용된 헬리 혜성의 비중력 계수는 $A_1 = 2.696464 \times 10^{-10}$ 과

표 5.— 관측과 궤도 운동 계산으로 얻은 헬리 혜성의 근일점 통과 시간 비교

헬리혜성의 근일점 통과 시간 (년 월 일)			궤도 운동 구현 결과	
			[가](일)	[나](일)
1986	2	9.46	0.00	0.00
1910	4	20.18	0.06	4.10
1835	11	16.44	0.09	7.69
1759	3	13.05	0.11	6.76
1682	9	15.27	0.04	3.17
1607	10	27.56	0.19	13.86
1531	8	25.80	-0.33	19.01
1456	6	9.10	-0.40	22.70
1378	11	9.02	-1.88	25.44
1301	10	24.53	-1.47	15.07
1222	9	30.80	1.70	-8.72
1145	4	21.25	2.65	-26.58
1066	3	23.50	2.94	-23.23
989	9	9.00	4.13	-19.83
912	7	9.50	-8.40	-6.20
837	2	28.27	-0.23	30.14
760	5	22.50	1.67	4.54
684	9	28.50	-4.13	-22.52
607	5	13.00	-2.33	-16.67
530	9	26.70	-0.34	4.39
451	6	24.50	-3.63	21.50
374	2	17.40	1.17	37.11
295	4	20.50	-0.10	21.44
218	5	17.50	-0.13	35.21
141	3	22.35	0.24	24.18
66	1	26.50	1.67	17.12
-11	10	5.50	-4.40	-5.02

천문 기록과 관측에서 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시간(표 왼쪽; Kiang 1972, Yeomans & Kiang 1981)은 Sitarski & Ziolkowski (1987)의 표 2에도 수록되어 있다. [가]는 관측으로부터 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시간과 비중력효과를 고려하여 구한 근일점 통과 시간과의 차이를 나타낸다. [나]는 관측으로부터 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시간과 비중력 효과를 고려하지 않고 구한 근일점 통과 시간과의 차이이다.

$A_2 = 1.74507332 \times 10^{-10}$ 이다. 우리는 과거의 근일점 통과 시간에 대한 정보가 없는 혜성의 경우를 위해 비중력 효과를 고려하지 않은 궤도 운동 계산도 병행하여 비중력 효과가 혜성의 궤도 운동에 얼마나 영향을 미치는지 알아보았다.

표 5는 관측으로 알려진 헬리 혜성의 근일점 통과 시간과 혜성의 궤도 운동 구현을 통해 얻은 근일점 통과 시간을 비중력 효과를 고려했을 경우와 안했을 경우에 대해 각각 비교하고 있다. 헬리 혜성의 궤도 운동을 서기전 12년까지 구현한 결과, 비중력 효과를 고려하지 않는 경우 관측 기록에서 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시간으로부터 최대 37.11일 차이가 나며, 비중력 효과를 고려하면 최대 8.4일 차이가 남을 알 수 있

었다. 따라서 비중력 계수가 알려지지 않은 다른 혜성의 경우, 궤도 운동 계산에서 얻어낸 근일점 통과 시기에 약 한 달가량 오차가 생길 수 있다고 판단된다.

표 6은 헬리 혜성의 근일점 통과 시간에 관한 기존 연구 중, Sitarski & Ziolkowski (1987)와 Yeomans & Kiang (1981)의 결과를 본 연구의 결과와 비교하고 있다. Sitarski & Ziolkowski (1987)는 1986년부터 서기전 12년까지의 헬리 혜성의 관측 기록으로부터 비중력 계수와 궤도 요소를 구하고 헬리 혜성의 근일점 통과 시기를 예측하였다. Yeomans & Kiang (1981)은 행성의 초기 조건을 JPL Planetary Development Ephemeris (DE97)에서 얻어 혜성의 궤도 운동을 계산하였다. 이때 비교적 정확하게 관측된 1301년, 837년, 374년의 헬리 혜성 기록에서 추정된 근일점 통과 시간과 궤도 운동 계산의 결과를 비교하여 관측에서 얻은 근일점 통과 시간을 맞추도록 궤도 운동의 초기 조건을 조정하였다. 또한 800년에 헬리 혜성의 이심률을 인위적으로 조정하여 374년과 141년의 관측과 궤도 운동 계산에서 얻은 근일점 통과 시기의 차를 줄였다.

본 연구에서는 근일점 통과 전후 시기에 헬리 혜성이 그린 천구 상 궤적을 그려 보고, 그 당시 우리나라 사서의 기록과 비교하여 보았다 (그림 14-18). 각 그림에서 별의 적경(R.A.), 적위(DEC), 등급은 밝은 별 목록(The Bright Star Catalogue; Hoffleit & Warren 1991)의 정보를 기초로 지구의 세차운동을 고려하고 등급에 따라 크기 차이를 두어 나타내었다. 성경(星鏡)에 나오는 주요 별자리는 실선으로 연결하여 표시하였다(안상현, 박창범, 유경로 1996). 혜성이 6등급보다 밝게 보이면 천구 상의 궤적을 실선으로 나타내고, 100시간 간격으로 원을 그려 혜성의 등급과 위치를 표시하였다. 세 날짜는 6등급보다 밝은 혜성이 출현하고 사라진 시기와 근일점 통과 시기(P)를 나타내며, 별표는 근일점 통과 시기의 혜성 위치이다.

그림 14는 궤도 운동을 수치 적분하여 얻은 1222년 헬리 혜성의 천구 상의 궤적을 보여준다. 이 시기 우리나라 사서에 적힌 혜성 기록은 다음과 같다.

고종 9년 7월 임신일(서기 1222년 9월 3일)에 혜성이 삼태 성좌에서 나타났는데 꼬리는 서쪽으로 향하였고 길이는 3척쯤 되었다. [고려사]

삼태 성좌는 그림 14에서 북두칠성 아래 적경 9시30분, 적위 45도 쯤에 위치하는 별자리이다. 헬리 혜성이 9월 3일 경 삼태 성좌에 정확히 위치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 15는 1301년에 근일점을 통과한 헬리 혜성의 궤적을 천구 상에 표시한 것이다. 고려사의 1301년에 나타난 혜성 기록을 살펴보면 다음과 같다.

표 6.— 헬리 혜성의 궤도 운동 구현 결과 비교

T_O (년 월 일)		$T_O - T_C$	$T_O - T_S$	$T_O - T_Y$
1986	2 9.46	0.00	0.00	-
1910	4 20.18	0.06	0.00	0.00
1835	11 16.44	0.09	0.00	0.00
1759	3 13.05	0.11	0.45	-0.01
1682	9 15.27	0.04	0.48	-0.01
1607	10 27.56	0.19	1.49	0.02
1531	8 25.80	-0.33	1.04	-0.44
1456	6 9.10	-0.40	0.49	-0.53
1378	11 9.02	-1.88	-0.90	-1.67
1301	10 24.53	-1.47	-0.51	-1.05
1222	9 30.80	1.70	1.62	1.98
1145	4 21.25	2.65	1.45	2.69
1066	3 23.50	2.94	1.39	2.57
989	9 9.00	4.13	1.70	3.31
912	7 9.50	-8.40	-9.73	-9.17
837	2 28.27	-0.23	-0.10	0.00
760	5 22.50	1.67	1.93	1.83
684	9 28.50	-4.13	-3.96	-4.27
607	5 13.00	-2.33	-2.11	-2.48
530	9 26.70	-0.34	-0.82	-0.43
451	6 24.50	-3.63	-4.11	-3.75
374	2 17.40	1.17	0.81	1.06
295	4 20.50	-0.10	0.56	0.10
218	5 17.50	-0.13	0.43	-0.22
141	3 22.35	0.24	0.21	-0.08
66	1 26.50	1.67	0.02	0.54
-11	10 5.50	-4.40	-6.57	-5.35

T_O 는 관측 기록에서 추정된 헬리 혜성의 근일점 통과 시간이고(표 5의 값과 동일), T_C 는 본 연구에서 계산한 헬리혜성의 근일점 통과 시간이다. T_S 는 Sitarski & Ziolkowski (1987)가 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시기(Ia 경우)이며, T_Y 는 Yeomans & Kiang (1981)의 계산 결과이다. $T_O - T_C$, $T_O - T_S$, $T_O - T_Y$ 의 단위는 일(日)이다.

충렬왕 27년 8월 무인일(서기 1301년 9월 14일) 혜성이 북두 성좌와 자미원에 나타났다.

충렬왕 27년 8월 임오일(서기 1301년 9월 18일) 혜성이 북두성좌에 나타났다.

충렬왕 27년 8월 을미일(서기 1301년 10월 1일) 혜성이 삼태 성좌에 나타났다가 천시원으로 들어갔다. [고려사]

궤도 계산에 따르면, 헬리 혜성은 1301년 9월 15일 경 삼태 성좌 위를 지나며 자미원에 들어갔다. 자미원은 적위 약 50도 이상의 천구 영역을 지칭한다. 헬리 혜성은 9월 18일 북두 성좌(적경 12시, 적위 60도) 바로 옆에 위치하며 10월 초에는 천시원에 들어서 있다. 천시원은 그림 15에서 적경 14시 - 18시, 적위 -10도 - +30도 부근의 영역이다. 즉, 고려사의 1301년 혜성 기록은 헬리 혜성에 대한 지속적 관찰에 근거한 것임을 알 수 있다.

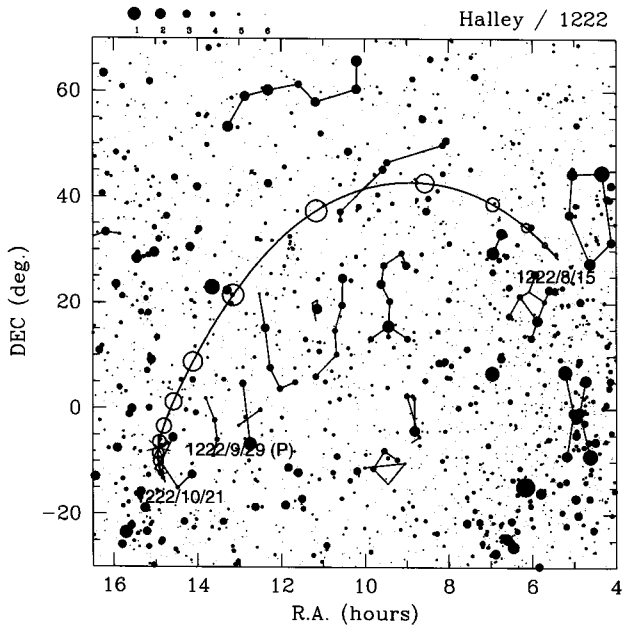


그림 14.— 1222년에 나타난 헬리 혜성의 천구 상 궤적(본문 설명 참조).

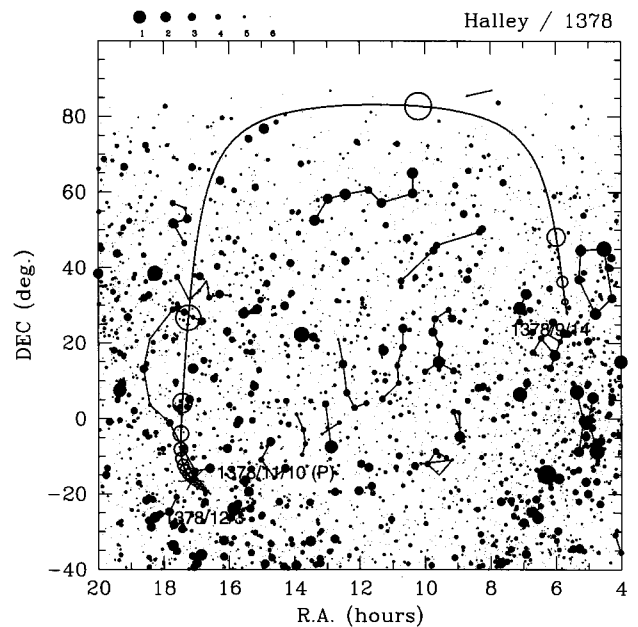


그림 16.— 1378년에 나타난 헬리 혜성의 천구 상 궤적.

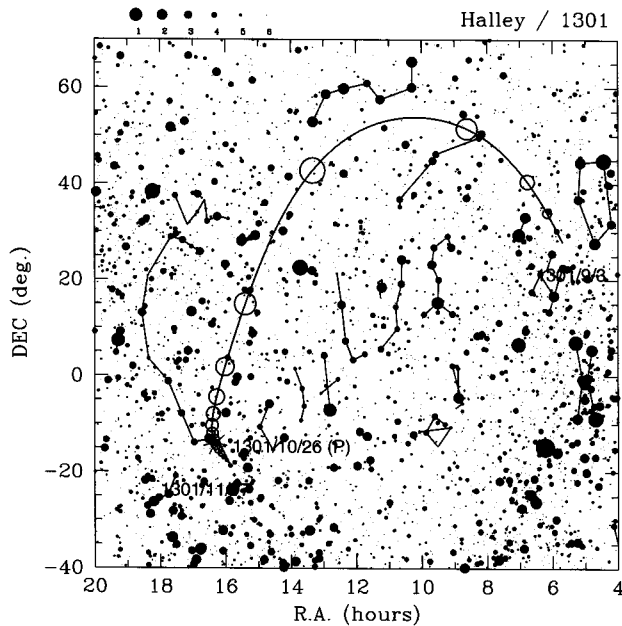


그림 15.— 1301년에 나타난 헬리 혜성의 천구 상 궤적.

그림 16은 1378년에 근일점을 통과한 헬리 혜성의 궤적을 천구 상에 표시한 것이다. 이 시기 고려사에 나타난 혜성 기록은 다음과 같다.

우왕 4년 9월 기묘일(서기 1378년 10월 1일) 하나의 혜성이 자미원의 서번 성좌에서 나타나 사보 성좌와 북극성에 접근한 다음 동번 성좌로 나가 천방 성좌 및 천기 성좌에 접근하였다. [고려사]

사보 성좌는 북극성을 에워싼 매우 어두운 별자리, 천방 성좌는 적경 17시30분, 적위 50도에 위치한 별자리, 천기 성좌는 적경 17시, 적위 35도에 위치한 톱니바퀴 모양의 별자리이다. 궤도 계산에 따르면, 헬리 혜성은 고려사의 기록과 유사하게 10월 1일 북극성과 가까운 적위 80도 영역에 이른 다음, 천방 성좌와 천기 성좌를 거쳐 천시원으로 들어간다.

4.3.2. Pons-Brooks 혜성

제 3절의 파워 스펙트럼 계산 결과에 따르면, 60년과 70년 사이 주기를 갖는 파워 봉우리가 있음을 확인할 수 있다. 이와 비슷한 주기를 가진 혜성 중 Pons-Brooks 혜성이 있다. Pons-Brooks 혜성은 1812년 7월 21일 프랑스의 Jean Louis Pons에 의해 처음 발견되었다(Kronk 1999). 발견 당시 이 혜성은 육안 관측이 불가능하였으나 9월 중순 경 약 4등급까지 밝아져 육안 관측이 가능하였다. Johann Encke는 이 혜성의 궤도를 결정하여 주기가 70.68년이며 1883년에 다시 나타날 것으로 예측하였으며, 1883년 9월 2일 William R. Brooks가 이 혜성을 다시 발견하였다. Pons-Brooks 혜성은 헬리 혜성과 달리 연구가 많이 이루어지지 않아 근일점 통과 시기를 기존의 연구와 비교할 수 없었다. 본 연구에서는 Pons-Brooks 혜성의 궤도 운동을 구현하여 이 혜성

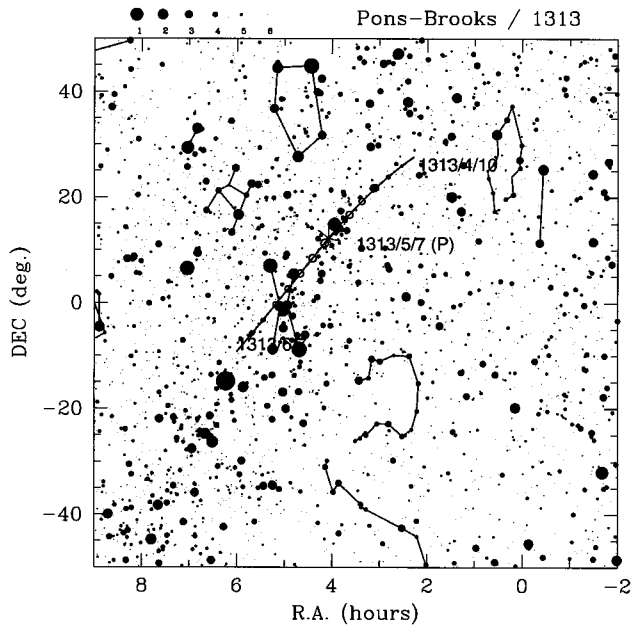


그림 17.— 1313년에 나타난 Pons-Brooks 혜성의 천구 상 궤적.

의 근일점 통과 시기와 천구 상의 궤적을 사서의 혜성 기록과 비교하였다. Pons-Brooks 혜성의 궤도 운동 계산에서는 비중력 효과가 고려되지 않았으며, 이 혜성의 실제 근일점 통과 시간과 추정된 근일점 통과 시간이 최대 한 달가량 차이 날 수 있다. 또한, 혜성의 천구 상 궤적에도 오차가 발생할 것으로 예상된다.

다음은 1313년 근일점을 통과한 Pons-Brooks 혜성 일 것으로 추정되는 사서의 혜성 기록이다.

충선왕 5년 3월 정미일(서기 1313년 4월 13일) 혜성이 동정 성좌에 나타났다. [고려사]

그림 17에서 혜성이 지나가는 자리 위쪽에 우물정(井) 자 모양의 별자리가 동정 성좌(적경 6시, 적위 20도)이다. 궤도 계산에서 얻은 혜성의 궤적은 동정 성좌를 약간 벗어나 지나며 근일점 통과 시기인 5월 7일 부근에서 3-4등급으로 가장 밝다. 이는 고려사의 기록 내용과 정확히 일치하지는 않으므로 기록 속의 혜성이 Pons-Brooks 혜성이라고 단정하는 것은 무리이다.

한편, 조선왕조실록에는 다음과 같은 혜성 기록이 있다.

현종 9년 2월1일 경오일(서기 1668년 3월 11일) 밤에 혜성이 나타나 천원성(天圓星)을 지나 삼수(參宿) 내의 병성(屏星) 위로 향하였다. [조선왕조실록]

서기 1668년은 서양의 망원경 발명 이후 시기에 해당하나, Pons-Brooks 혜성이 서양에서 1812년 처음 발견되

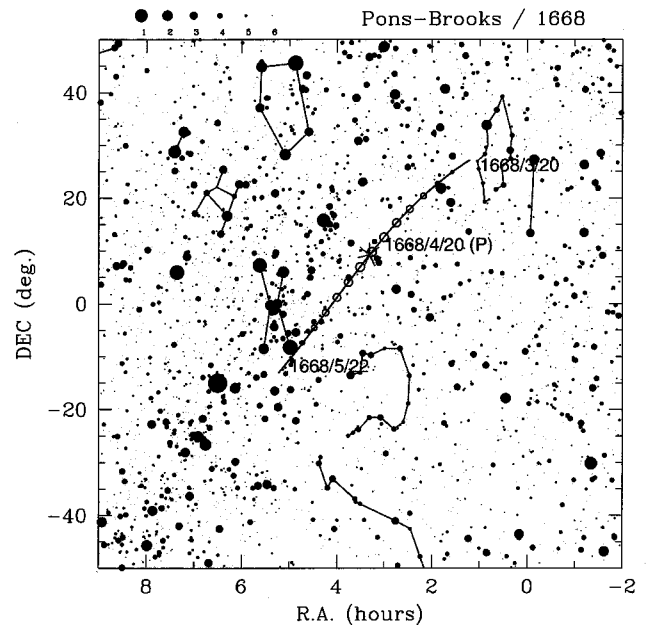


그림 18.— 1668년에 나타난 Pons-Brooks 혜성의 천구 상 궤적.

기 이전이므로 사서 기록과 비교할 만한 가치가 있다. 그림 18은 궤도 운동을 수치 적분하여 예측한 1668년 Pons-Brooks 혜성의 천구 상 궤적을 나타낸 것이다. 그림에서 서양의 오리온자리가 삼수(적경 5시30분, 적위 0도)이며, 적경 3시, 적위 -15도 부근에 있는 별자리가 천원성이다. 1668년 3월에 나타난 혜성 기록과 궤도 계산으로부터 얻은 Pons-Brooks 혜성의 근일점 통과 시기에는 40일 정도 차이가 존재하나, 이 혜성이 사서에 기록된 바와 같이 천원성 부근과 삼수 위를 지나감을 확인할 수 있다.

이와 같이 Pons-Brooks 혜성의 출현 시기와 예상 궤적은 고려사와 조선왕조실록에 실린 두 혜성 기록의 내용과 비교하였을 때 완벽히 일치하지는 않으나, 혜성의 궤도 계산에서 비중력 효과를 고려하지 않았을 경우 혜성의 근일점 통과 시기와 위치에 오차가 유발될 수 있음을 감안하면, 사서 기록 속의 혜성이 Pons-Brooks 혜성일 가능성이 상당히 높다.

4.3.3. Tempel-Tuttle 혜성

우리나라 사서에는 유성우에 대한 기록 또한 많이 남아 있다(Yang 등 2005). 그 중 사자자리 유성우는 현재에도 관측되는 유성우이며, Tempel-Tuttle 혜성이 지나간 후에 쌓인 티끌에 의해 생긴다. Tempel-Tuttle 혜성은 태양으로부터 거의 1 AU 지점에서 근일점을 통과하는 혜성으로, 지구가 혜성이 지나간 위치를 지나가면서 유성우가 많이 만들어진다.

표 7.— Tempel-Tuttle의 근일점 통과 시간

T_c (년 월 일)			T_c (년 월 일)		
1998	2	28.10417	968	1	28.10417
1965	4	29.70833	934	11	30.60417
1932	7	11.89583	901	8	1.70833
1899	6	30.39583	867	12	3.10417
1866	1	9.22917	834	4	12.91667
1832	12	30.83333	801	1	14.20833
1800	2	27.29167	767	12	17.79167
1767	2	20.06250	734	9	20.89583
1733	9	27.25000	701	2	11.68750
1699	10	2.60417	666	10	30.31250
1666	5	26.47917	633	4	18.25000
1633	6	9.60417	600	4	18.97917
1600	6	20.14583	567	4	23.45833
1567	1	25.77083	534	1	11.35417
1533	1	4.29167	500	4	5.29167
1499	7	5.68750	466	10	10.16667
1466	5	26.50000	433	10	5.31250
1433	6	1.20833	400	12	15.16667
1400	4	3.14583	368	1	9.62500
1366	9	22.64583	334	10	14.31250
1333	8	19.81250	302	2	14.00000
1300	10	29.27083	269	9	5.91667
1267	12	28.62500	237	1	25.87500
1234	10	30.91667	204	1	20.58333
1201	1	25.56250	171	10	17.68750
1167	12	18.81250	139	10	26.12500
1135	3	27.79167	107	9	15.52083
1102	7	21.62500	75	1	29.06250
1069	3	11.66667	42	12	27.81250
1034	12	25.02083	11	2	8.16667
1001	5	7.93750	-22	10	29.35417

표 8.— 사자자리 유성우의 최대기

T_Y (년 월 일)			T_Y (년 월 일)		
1999	11	17.8	1601	11	6.3
1998	11	17.5	1566	10	26.4
1997	11	17.4	1554	10	26.3
1969	11	17.0	1538	10	25.0
1966	11	17.4	1533	10	24.6
1965	11	17.0	1466	10	24.9
1961	11	17.3	1433	10	24.3
1932	11	16.5	1400	10	23.5
1903	11	16.4	1366	10	22.4
1901	11	15.9	1333	10	22.0
1900	11	15.7	1300	10	21.4
1899	11	15.4	1267	10	21.5
1868	11	13.2	1238	10	20.4
1867	11	13.8	1237	10	20.0
1866	11	13.7	1202	10	18.7
1836	11	13.2	1168	10	18.8
1833	11	13.4	1135	10	19.6
1832	11	13.2	1102	10	18.8
1831	11	13.9	1069	10	15.0
1799	11	12.5	1037	10	12.7
1798	11	12.2	1035	10	13.2
1767	11	11.8	1034	10	13.1
1733	11	10.0	1002	10	13.7
1698	11	7.8	967	10	14.0
1666	11	8.0	934	10	13.5
1633	11	7.5	931	10	13.6
1625	11	7.5	902	10	12.7
1602	11	6.7			

T_Y 는 Yeomans (1981)가 관측 기록을 바탕으로 계산한 사자자리 유성우의 최대기이다.

Tempel-Tuttle 혜성과 태양 사이의 거리가 0.9 AU 이내로 가까워지는 시기는 매우 짧기 때문에 이 혜성을 맨눈으로 관측하기가 쉽지 않았을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Tempel-Tuttle 혜성의 궤도 운동을 계산하여 얻은 근일점 통과 시기와 사자자리 유성우가 나타난 시기를 비교하였다. 표 7은 궤도 운동을 수치 적분으로 계산한 Tempel-Tuttle 혜성의 근일점 통과 시간이며, 표 8은 Yeomans (1981)가 관측 기록을 바탕으로 계산한 사자자리 유성우의 최대기이다. 유성우의 최대기는 혜성이 지나간 후 약 1, 2년 이내 이므로 근일점 통과 시간과 유성우의 최대기를 1, 2년 오차 내로 비교 가능하다. 표 7과 8에 보인 바와 같이, Tempel-Tuttle 혜성의 근일점 통과 시기(T_c)는 사자자리 유성우의 최대기(T_Y)와 오차 범위 내에서 잘 일치한다.

4.3.4. Swift-Tuttle 혜성

사자자리 유성우와 함께 옛 기록에 남아 있는 유성우가 바로 페르세우스자리 유성우이다. 페르세우스자리 유

성우 역시 우리나라 사서에 그 기록이 남아 있다(Yang 등 2005). 페르세우스 자리 유성우는 Swift-Tuttle 혜성이 지나가면서 남겨놓은 티끌에 의해 생기는 천문현상 으로, 이 유성우가 오랜 세월 관측된 만큼 Swift-Tuttle 혜성도 장기간에 걸쳐 근일점을 통과했을 것으로 추측 된다.

Yau 등 (1994)은 1862년과 1737년에 관측된 Swift-Tuttle 혜성의 정보를 바탕으로 궤도 운동을 계산하여 근일점 통과 시기를 구하였다. 본 연구에서는 Swift-Tuttle 혜성의 궤도 운동을 구현하여 근일점 통과 시기(T_c)를 구하고 Yau 등 (1994)의 결과(T_Y)와 비교하였다(표 9). 두 근일점 통과 시기는 서기 316년까지는 비교적 일치하나, 서기 188년 이전에서는 그 차이가 점점 커짐을 알 수 있다.

4.3.5. Ikeya-Zhang 혜성

Hasegawa & Nakano (2003)는 2002년에 근일점을 통과한 Ikeya-Zhang 혜성의 궤도 운동을 계산하고 사서의 기록과 비교하였다. 그들은 혜성의 근일점 통과 시간의

표 9.— Swift-Tuttle 혜성의 근일점 통과 시간 비교

T_c (년 월 일)			T_Y (년 월 일)		
1992	12	12.32	1992	12	12.33
1862	8	23.42	1862	8	23.42
1737	6	15.85	1737	6	15.88
1610	2	15.85	1610	2	6.77
1479	10	18.29	1479	10	18.46
1348	5	2.32	1348	5	2.63
1212	11	6.14	1212	11	6.58
1079	9	17.61	1079	9	17.44
950	4	19.45	950	4	18.29
826	4	19.49	826	4	18.31
698	9	6.42	698	9	5.10
569	3	1.09	569	2	27.44
441	11	3.07	441	10	22.10
316	10	27.23	316	10	16.81
188	7	10.55	188	6	27.13
59	5	17.98	58	8	9.88

T_c 는 본 연구에서 구한 Swift-Tuttle 혜성의 근일점 통과 시기이며, T_Y 는 Yau 등(1994)이 구한 결과이다.

표 10.— Ikeya-Zhang 혜성의 근일점 통과 시간 비교

T_c (년 월 일)			T_I (년 월 일)					
			(가)			(나)		
2002	3	18.98	2002	3	19.00	2002	3	18.98
1661	6	13.42	1661	1	29.05	1661	1	29.00
1267	1	14.58	1273	1	25.06	1273	1	1.73
887	12	17.79	877	2	14.72	876	11	23.70
505	10	9.98	459	4	18.09	463	3	31.40
165	1	7.42	77	12	31.04	-9	12	18.08

T_I 는 Hasegawa & Nakano (2003)가 계산한 Ikeya-Zhang 혜성의 근일점 통과 시기이다. 본문 설명 참조.

오차가 2-3년 정도라고 언급하며 궤도 운동 계산으로부터 구한 Ikeya-Zhang 혜성의 근일점 통과 시간과 비슷한 시기의 사서 기록 중 혜성의 궤도 요소가 Ikeya-Zhang 혜성의 것과 유사한 것들을 찾아내었다. 특히 Hasegawa & Nakano (2003)는 1661년 1월에 근일점을 통과한 Hevelius 혜성이 Ikeya-Zhang 혜성인 것으로 단정하고 연구를 수행하였다. 그 이유는 Nakano가 수행한 궤도 계산에서 Ikeya-Zhang 혜성이 1659년 근일점을 통과하고 이는 1661년과 비슷했기 때문이다(Green 2002).

표 10은 Ikeya-Zhang 혜성의 근일점 통과 시기를 본 연구의 궤도 운동 계산법으로 구한 것(T_c)과 Hasegawa & Nakano (2003)가 구한 것(T_I)을 서로 비교하고 있다. 표에서 (가)는 1661년, 877년에 나타난 혜성이 Ikeya-Zhang 혜성이라고 가정한 경우, (나)는 1661년에 나타난 혜성만 Ikeya-Zhang 혜성으로 가정한 경우의 결과이다. 본 연구에서 계산한 Ikeya-Zhang 혜성의 근일점

통과 시기는 혜성이 발견된 2002년을 제외하고는 과거로 갈수록 Hasegawa & Nakano (2003)의 결과와 크게 다르다.

Ikeya-Zhang 혜성의 비중력 효과가 제대로 고려되지 않아 이러한 불일치가 생겨났을 수도 있다. Yeomans (1994)는 혜성의 궤도 운동에 더 큰 영향을 미치는 A_2 계수의 시간에 따른 변화를 조사하였는데, 헬리 혜성의 경우는 비교적 안정적인 A_2 를 가지고 있지만, A_2 가 불안정한 값을 가지는 혜성도 있음을 보였다. 만약 Ikeya-Zhang 혜성이 불안정한 A_2 값을 가지고 있다면 궤도 계산의 오차가 예상보다 더 커질 수도 있을 것이다. 그러나 비중력 효과를 고려하지 않은 헬리 혜성의 근일점 통과 시기와 비중력 효과를 고려하여 구한 헬리 혜성의 근일점 통과 시기가 약 한 달의 오차를 보이므로 비중력 계수의 불안정한 변화가 주요 요인이 될 수는 없다. 또 다른 이유는 1661년, 877년에 나타난 혜성이 Ikeya-Zhang 혜성이 아닐 가능성이 있다. JPL HORIZONS에서 제공받은 2002년 Ikeya-Zhang 혜성의 비중력 계수 중 A_2 를 조금씩 변화시켜 이 혜성의 근일점 통과 시기의 변화를 살펴본 결과, Ikeya-Zhang 혜성은 877년에 근일점을 통과하지 않았던 것으로 판단된다.

Ikeya-Zhang 혜성은 주기가 340년 이상인 장주기 혜성이므로 다른 나라 사서에 Ikeya-Zhang의 근일점 통과 시기에 해당하는 기록이 있는지 찾아보고 궤도 운동 구현 결과와 비교해 볼 필요가 있다.

5. 토의 및 결론

본 연구에서는 삼국, 고려, 조선 시대에 기록된 천문 현상 중 혜성 기록을 분석하였다. 이를 위해 삼국사기, 삼국유사, 고려사, 조선왕조실록에서 혜성 관련 기록들을 분류하고 정리하였다. 우리는 정리된 혜성 기록의 분포로부터 파워 스펙트럼을 측정하였다. 이 때, 웰치 창을 사용하여, 창 효과로 인해 파워가 왜곡되는 효과를 줄이고자 하였고, 혜성 기록의 빈도 변화가 파워 스펙트럼을 왜곡할 수 있으므로 일식, 행성과 달의 운행 등 혜성 이외의 천문 현상들을 모아 혜성 기록을 분석할 때 가중치로 사용하였다. 그러나 이러한 천문 현상들이 혜성의 기록 분포를 정확히 대표하지 않으므로 혜성 기록 분포에서 기록 빈도의 시간적 변화 효과를 완전히 제거하지는 못하였을 것으로 생각된다.

우리는 헬리 혜성의 주기가 세 시대의 혜성 기록 파워 스펙트럼에서 모두 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 고려, 조선 시대에는 헬리 혜성이 근일점을 통과할 때마다 빠짐없이 관측되어 사서의 기록으로 남아있음을 확인하였다. 그러나 삼국시대의 경우, 헬리 혜성의 기록을 찾을 수 없었다. 다만 헬리 혜성이 근일점을 통과하는 시기보다 1년 정도 빠른 기록이 4개 존재한다. 측정된 파워 스펙트럼에서 삼국 시대와 고려, 조선 시

대에 걸쳐 눈에 띄는 파워 봉우리는, 약 30년, 60-70년, 75-80년, 90-100년, 약 120년 주기에 해당하는 것들이다.

우리는 파워 스펙트럼에서 높은 파워가 나타나는 주기와 비슷한 주기를 갖는 현존 혜성을 찾아내고, 그 혜성의 궤도 운동을 대칭적 다중구간 방법을 사용하여 계산하였다. 혜성의 궤도 운동 구현에는 뉴턴의 중력, 상대론적 중력, 비중력 효과가 고려되었다. 우리는 많은 연구가 이루어진 헬리 혜성의 궤도를 수치 적분하여 기존 연구 결과와 비교하였으며, 본 연구에서 구현한 헬리 혜성의 운동이 혜성의 출현 시기, 운동 방향, 특정 별자리 접근 등에서 고려사의 1222년, 1301년, 1378년 혜성 기록과 잘 일치함을 확인하였다.

파워 스펙트럼으로 찾아낸 70년 부근 주기에 해당하는 혜성을 찾은 결과, Pons-Brooks 혜성에 주목하고 이 혜성의 궤도 운동을 구현하였다. 그 결과, Pons-Brooks 혜성은 1378년과 1668년 사서 기록의 내용과 유사하게 운동했음을 확인하였다. 그 밖에 유성우와 밀접한 관련이 있는 Tempel-Tuttle 혜성과 Swift-Tuttle 혜성의 궤도 운동을 구현하였다. 계산 결과, Tempel-Tuttle 혜성의 근일점 통과 시기는 사자자리 유성우 최대기와 1-2년 오차 내에서 잘 맞았으며, Swift-Tuttle 혜성의 근일점 통과 시기도 Yau 등 (1994)의 결과와 서기 188년까지 일치하였다.

마지막으로 2002년 발견된 Ikeya-Zhang 혜성의 근일점 통과 시기를 본 연구의 방법으로 계산하여 Hasegawa & Nakano (2003)의 연구 결과와 비교하였다. 그 결과, 1661년 근일점 통과 시기만 5개월 차이로 비슷할 뿐 과거로 갈수록 근일점 통과 시기가 크게 차이 나는 것을 확인하였다. 우리가 얻은 헬리 혜성, Tempel-Tuttle 혜성, Swift-Tuttle 혜성의 궤도 운동 계산 결과가 다른 연구자들의 것과 매우 높은 정밀도로 일치하는 점과 비중력 계수가 고려되지 않았을 경우에도 헬리 혜성의 근일점 통과 시기의 오차가 한달 정도로 작은 점으로 미루어 볼 때, 본 연구의 궤도 운동 계산은 매우 정확하다. 따라서 Hasegawa & Nakano (2003)의 Ikeya-Zhang 혜성의 궤도 운동 계산 결과는 상당히 부정확한 것으로 판단된다. 이와 같은 부정확성은 1661년, 877년에 출현한 혜성을 Ikeya-Zhang 혜성으로 단정 짓고 혜성의 궤도 요소에 제한을 가하였기 때문에 생겨난 것으로 보인다.

본 연구에서는 삼국 시대에 나타난 혜성을 확인하는 작업이 제대로 이루어지지 못했다. 삼국 시대의 경우 혜성의 위치를 구체적으로 언급한 기록이 거의 없고 혜성을 관측한 날짜만으로 그 혜성이 어느 혜성인지 확인하는 데에 큰 어려움이 있기 때문이다. 삼국사기에 기록된 일식과 행성과 달의 운동, 태백주현 등이 실제 일어났던 천문 현상임이 밝혀졌으므로(박창범 &

라대일 1994; 박창범 2002), 앞으로 한국의 고대 천문 현상 기록에 대한 과학적 검증이 좀더 활발히 이루어지기를 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구가 이루어질 수 있도록 천문관련 사료를 주시고 아낌없는 지도와 조언을 해주신 고등과학원의 박창범 선생님께 깊이 감사드립니다. 박소연은 연구 과정 중 대한민국 정부가 주도하는 BK21 사업의 지원과 고등과학원의 지원을 받았습니다.

이 논문의 발간은 학술진흥재단의 지원(KRF-2005-070-C00059)을 받았습니다.

참고문헌

박창범, 1999, 조선시대의 천문관련 기록표, 미발표
 박창범, 2002, 하늘에 새긴 우리역사, 김영사
 박창범, 라대일, 1994, 삼국시대 천문현상 기록의 독자관측사실 검증, 한국과학사학회지, 16, 167
 심경진, 안영숙, 한보식, 양홍진, 송두중, 1999, 고려시대 연력표, 한국천문연구원
 안상현, 박창범, 유경로, 1996, 星鏡에 실린 별들의 同定, 한국과학사학회지, 18, 3
 안영숙, 심경진, 송두중, 한보식, 2000, 조선시대 연력표, 한국천문연구원
 양홍진, 박창범, 박명구, 1998, 고려시대 흑점과 오로라 기록에 보이는 태양활동주기, 천문학논총, 13, 181
 한보식, 1987, 한국연력대전, 영남대학교출판부
 Brady, J. L. & Carpenter, E., 1971, The orbit of Halley's comet and the apparition of 1986, AJ, 76, 728
 Cowell, P. H. & Crommelin, A. C. D., 1907, The perturbations of Halley's comet in the past, MNRAS, 68, 111
 Green, D. W. E., 2002, Comet C/2002 C1 (Ikeya-Zhang), IAUC, No. 7843
 Hasegawa, I. & Nakano, S., 2003, Orbit of periodic comet 153P/Ikeya-Zhang, MNRAS, 345, 883
 Ho, P. Y., 1962, Ancient and mediaeval observations of comets and novae in Chinese sources, Vistas in Astronomy, 5, 127
 Hoffleit, D. & Warren, Jr., W. H., 1991, The Bright Star Catalogue, 5th revised ed. (Preliminary Version), Astronomical Data Center, NSSDC/ADC (1991)
 Kiang, T., 1972, The Past Orbit of Halley's Comet, Mem. R. astr. Soc., 76, 27
 Kronk, G. W., 1999, Cometography: a catalog of comets, Cambridge Univ. Press, Cambridge

- Marsden, B. G., Sekanina, Z., & Yeomans, D. K., 1973, Comets and nongravitational forces. V., AJ, 78, 211
- Meeus, J., 1998, *Astronomical Algorithms*, 2nd ed., Willmann-Bell, Inc.
- Newhall, X. X., Standish, E. M., & Williams, J. G., 1983, DE102: a numerically integrated ephemeris of the Moon and planets spanning forty-four centuries, A&A, 125, 150
- Quinlan, G. D. & Tremaine, S., 1990, Symmetric multistep methods for the numerical integration of planetary orbits, AJ, 100, 1694
- Quinn, T. R., Tremaine, S., & Duncan, M., 1991, A three million year integration of the earth's orbit, AJ, 101, 2287
- Sekiguchi, R., 1917, Report on Survey of Ancient Korean Observation (朝鮮古代觀測記錄調査 in Japanese), 朝鮮總督府觀測所(조선총독부 관측소)
- Sitarski, G. & Ziolkowski, K., 1987, A new approach to investigations of the long-term motion of comet P/Halley, A&A, 187, 896
- Yang, H.-J., 2004, Analysis of Korean historical astronomical records, Ph.D. thesis, Kyungpook National Univ.
- Yang, H.-J., Park, C., & Park, M.-G., 2005, Analysis of historical meteor and meteor shower records: Korea, China, and Japan, Icarus, 175, 215
- Yau, K., Yeomans, D. K., & Weissman, P., 1994, The past and future motion of comet P/Swift-Tuttle, MNRAS, 266, 305
- Yeomans, D. K., 1981, Comet Tempel-Tuttle and the Leonid meteors, Icarus, 47, 492
- Yeomans, D. K., 1994, A review of comets and non gravitational forces, in *Asteroids, comets, meteors 1993: proceedings of the 160th International Astronomical Union*. ed. Andrea Milani, Michel Di Martino, and A. Cellino (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), IAU Symp., 160, 241
- Yeomans, D. K. & Kiang, T., 1981, The long-term motion of comet Halley, MNRAS, 197, 633
- Yeomans, D. K., Rahe, J., & Freitag, R. S., 1986, The history of comet Halley, J. Roy. Astron. Soc. Can., 80, 62