

전천 카메라를 이용한 2001 사자자리 유성우 관측: 1. 유성 등급 분포

김정한^{1†}, 정종균^{1,2}, 김용하¹, 원영인², 천무영³, 임홍서³

¹충남대학교 천문우주과학과

²한국해양연구원 극지연구소

³한국천문연구원

ALL-SKY OBSERVATION OF THE 2001 LEONID METEOR STORM: 1. METEOR MAGNITUDE DISTRIBUTION

Jeong Han Kim^{1†}, Jong-Kyun Chung^{1,2}, Yong Ha Kim¹, Young-In Won²,
Moo-Young Chun³, and Hong-Suh Yim³

¹Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-335, Korea

²Polar Sciences Laboratory, Korea Ocean R & D Institute, Ansan, Gyeonggi 426-744, Korea

³Korea Astronomy Observatory, 61-1 Hwaam, Yusung, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: jh_kim02@cnu.ac.kr

(Received October 16, 2003; Accepted November 10, 2003)

요 약

2001년 사자자리 유성우는 수십년 이래 최대 빈도로 많은 유성이 발생하여 전세계적으로 관측되며 많은 관심을 불러 일으켰다. 특히 유성우 극대기 시간이 동아시아의 11월 19일 새벽으로, 달의 위상과 보현산의 날씨가 관측하기에 최적인 조건을 보였다. 본 논문은 보현산 천문대에 고층대기 관측용으로 설치된 전천 카메라를 이용해서 유성우 극대기가 예측된 2001년 11월 19일 01:00 ~ 05:40(KST) 동안 관측한 68장의 전천 화상을 분석하였다. 이 기간 동안 전천 화상에 모두 172개의 유성이 기록되었다. 이 관측 개수에 International Meteor Organization에 육안 관측으로 보고된 천정 시간율(Zenith Hourly Rate, ZHR), 3000과 등급 분포 지수, 2를 적용하면, 전천 화상에 나타난 유성의 한계 등급이 약 3등급으로 추정된다. 이 중 화상 밝기가 분명한 83개의 유성에 대해 근처 표준성의 밝기와 비교하여 등급을 결정하였다. 이 때 유성 통과 시간의 계산에 필요한 유성의 각속도는 유성 진입의 기하학적 성질을 이용하여 유성과 사자자리 방사점과의 사이각을 변수로 하는 간단한 식으로 유도하였다. 이렇게 결정된 83개의 유성이 -1 ~ -6등급 사이에 분포하며, -3등급 근처에서 최대를 보인다. 그러나 이 등급 분포는 육안 관측과 비교하여 추정된 전천 카메라의 한계 등급보다 상당히 작은(밝은) 범위에 있다. 이런 차이는 순간적인 육안 관측과 노출시간이 긴 CCD 관측과의 특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이 특성 차이를 분석하기 위해 육안 관측과 합치하도록 유성 지속 시간을 조절 변수로 하여 등급을 재 결정하였다. 재 결정된 등급의 상대적 분포는 원리적으로 결정된 등급 분포와 유사하며, 약 0등급 근처에서 최대를 가진다. 이 상대 분포는 육안 관측에 민감한, 희미한(1 ~ 6 등급) 유성들이 등급이 감소함에 따라 일률적으로 개수가 감소하는 것과는 상당히 다른 분포이다. 따라서 우리의 관측 결과는 2001년 사자 자리 유성우의 극대 시간 전후 2시간에 적어도 0등급 이하의 밝은 유성이 상대적으로 많이 발생하였을 것으로 해석된다. 이런 밝은 유성의 빈도는 유성우 특성 연구에 중요한 의미를 가진다. 그러나 표준성만을 이용해 결정된 유성 등급은 유성의 지속 시간에 대한 불확실성과 전천 카메라 감응도의 비선형성에 의한 불확실성을 내포하고 있음을 지적해 둔다.

[†]corresponding author

ABSTRACT

The 2001 Leonid meteor storm has been observed all over the world, and its most intense flux since the last few decades has caused great interest among both laymen and experts. Especially, its maximum hours occurred at dawn hours of Nov. 19 in the east Asia, during which moonless clear night at the Mt. Bohyun allowed us near perfect condition of observation. Observation was carried out in the period of 01:00 ~ 05:40(KST), which include the predicted maximum hours, with all-sky camera installed for upper atmospheric airglow research. In this paper we analyze 68 all-sky images obtained in this period, which contain records of 172 meteors. Utilizing the zenith hourly rate(ZHR) of 3000 and magnitude distribution index of 2, which were reported to International Meteor Organization by visible observers in the east Asia, we estimate the limiting magnitude of about 3 for meteors detected in our all-sky images. We then derive magnitudes of 83 meteors with clear pixel brightness outlines among the initially detected 172 meteors by comparing with neighbor standard stars. Angular velocities of meteors needed for computing their passing times over an all-sky image are expressed with a simple formula of an angle between a meteor head and the Leonid radiant point. The derived magnitudes of 83 meteors are in the range of $-6 \sim -1$ magnitude, and its distribution shows a maximum near -3 mag. The derived magnitudes are much smaller than the limiting magnitude inferred from the comparison with the result of naked-eye observations. The difference may be due to the characteristic difference between nearly instantaneous naked-eye observations and CCD observations with a long exposure. We redetermine magnitudes of the meteors by adjusting a meteor lasting time to be consistent with the naked-eye observations. The relative distribution of the redetermined magnitudes, which has a maximum at 0 mag., resembles that of the magnitudes determined with the in-principle method. The relative distribution is quite different from ones that decrease monotonically with decreasing magnitudes for meteors(1 ~ 6) sensitive to naked-eye observations. We conclude from the magnitude distribution of our all-sky observation that meteors brighter than about 0 mag., appeared more frequently during the 2001 Leonid maximum hours. The frequent appearance of bright meteors has significantly important implication for meteor research. We noted, however, considerably large uncertainties in magnitudes determined only by comparing standard stars due to the unknown lasting time of meteors and the non-linear sensitivity of all-sky camera.

Keywords: 2001 Leonids, Meteor Magnitude Distribution, all-sky-camera

1. 서 론

우리가 흔히 별뚱별(shooting star)이라고 부르는 유성(meteor)은 혜성이나 소행성으로부터 떨어져 나온 작은 알갱이들이 지구 대기 중 진입하면서 대기 분자와의 마찰로 빛을 내는 현상이다. 이런 유성들이 짧은 시간 동안 아주 많이 떨어지는 현상을 유성우라 하며, 보통 주기 혜성과 관련이 있다. 즉, 혜성이 태양계 내로 들어오면 태양열에 의해 먼지나 가스들이 분출되어 혜성 궤도상의 특정 지역에 밀집되어 남아 있다가, 이 먼지 밀집 지역(dust trail)을 지구가 지날 때 유성우가 발생하는 것이다. 이런 많은 양의 유성들이 지구로 떨어질 때, 여러 가지 방법의 관측으로부터 우리는 혜성으로부터 떨어져 나온 먼지가 공간상에서 어떻게 분포하고 어떤 특성을 가지는지, 또 먼지 알갱이들의 입자 크기가 어떻게 분포하는지에 대한 신뢰할 수 있는 정보들을 얻을 수 있다. 또한, 유성 물질들이 지구 대기로 들어올 때, 생명의 기원이나 지구와 우주 공간과의 상호 작용, 그리고 오존 감소 문제에 관계가 있는 새로운 분자들이나 고체 입자들을 형성하기 때문에 유성은 좋은 연구 대상이 된다(Jenniskens et al. 2000).

사자자리 유성우를 일으키는 먼지 밀집 지역의 모체는 Tempel-Tuttle 혜성이다. Tempel-Tuttle 혜성은 주기가 33.3년인 단주기 혜성으로서 가장 최근의 근일점 통과는 1998년 2월 28일에 있었다(Beech, Hughes, & Murray 2001). Tempel-Tuttle 혜성의 근일점은 0.97AU이고, 지구 궤도 근처에서 황도면을 통과하기 때문에 지구가 매년 11월 16일경 이 지역을 지나갈 때 유성우 현상이 일어나는 것이다. 이 Tempel-Tuttle 혜성은 1865년 12월에 Wilhelm Tempel과 1866년 1월에 Horace Tuttle에 의해 처음으로 직접 관측되었으나, 이 혜성에 대한 정보는 1366년에 최초로 기록되어 있고 Tempel-Tuttle 혜성으로 인한 유성우로 추정할 만한 자료는 902년에도 나타나 있다(Yeomans, Yau, & Weissman 1996).

매년 사자 자리 유성우의 활동을 결정하는 가장 큰 요인은 지구 공전 궤도와 혜성이 남기고 간 먼지 밀집 지역과의 교차 여부이다. Tempel-Tuttle 혜성은 33.3년의 주기 동안 이심률이 0.9인 타원 궤도를 따라 운동하면서 주변에 위치한 행성들의 섭동으로 인해 궤도가 약간씩 변하기 때문에, 근일점의 위치 및 먼지 밀집 지역의 형성 위치가 일정하지 않다. 게다가 형성된 먼지 밀집 지역도 시간이 지나면 공간상으로 퍼지기도 하고, 밀도가 높은 지역은 태양이나 주변 행성의 영향을 받으면서 위치가 변해가기 때문에 정확한 유성우 예측을 위해서는 매년 지속적인 관측이 필요하다.

2001년 사자자리 유성우의 경우, 지구의 공전 궤도가 1767년과 1866년에 Tempel-Tuttle 혜성에 의해 형성된 먼지 밀집 지역을 차례로 지나가기 때문에 천정시간율(Zenith Hourly Rate, ZHR)이 각각 3000개와 10000개 이상으로서 폭발적인 사자자리 유성우가 발생할 것이라고 예측된 바 있다(McNaught & Asher 2001). 그러나 McNaught & Asher(2001)의 예측을 비롯해서 여러 연구자들이 예측하는 ZHR은 이상적인 대기 상태를 가정하는 각기 다른 모델 계산으로부터 나온 것이기 때문에, 실제 관측시의 ZHR은 여러 가지 환경적인 요인에 의해 더 적을 것으로 판단된다. 그렇지만 예년에 비해 아주 많은 유성들이 떨어진다는 예측은 대체로 믿을만하다. 특히 2001년 사자 자리 유성우의 경우, International Meteor Organization(IMO)에서 극대 시각을 각각 11월 18일 19시 01분, 19일 02시 31분, 19일 03시 19분(KST) 등으로 예측함으로써 외국 유성우 관측팀이 보현산에 방문하여 관측하기도 하였다. 2001년 사자자리 유성우가 끝난 뒤 IMO에 보고된 바에 의하면, 최대 ZHR은 시간당 평균 3500개를 기록했다(Arlt et al. 2001).

본 논문은 2001년 사자 자리 유성우 기간동안, 전천 CCD 카메라를 이용하여 관측한 자료를 분석한 첫번째 결과이다. 관측 당시 기상 조건이 매우 좋았고, 근래 보기드문 매우 강한 유성우 현상을 보였기 때문에, 이 관측 자료는 과학적으로 상당한 가치가 인정된다. 또한, 전천 CCD 관측은 보통의 유성 관측과는 매우 다른 특성을 가지기 때문에, 이 전천 자료의 분석은 유성 연구에 독특한 기여를 할 것으로 기대된다. 따라서 앞으로 더욱 자세한 분석들을 수행함으로써 본 논문에서 구한 유성 등급 분포를 확인할 뿐만 아니라, 유성의 꼬리 길이 특성, 유성 등급과 꼬리 길이와의 관계 등을 연구할 것이다. 이 자료의 일부는 Kim, Chung, & Won(2003)에서 따로 분석되어, 고층 대기의 바람 패턴과 중량파와의 관계를 연구하는데 사용된 바 있다.

2. 유성우 전천 관측

본 논문에서 분석한 2001 사자자리 유성우 자료는 현재 보현산 천문대에 해양연구원 극지역 연구소가 설치하여 운영하고 있는 전천 카메라로 관측되었다. 이 전천 카메라는 액체 냉각 방식의 1024×1024 CCD로서 지난 2001년 7월에 보현산 천문대에 설치되어, 네 개의 협대역 대기광 선택 필터(630.0nm(OI), 557.7nm(OI), 589.7nm(Na), 720-910nm(OH))를 사용하여 전천 대기광 관측을 지속적으로 함으로서 상공 고층대기 중량파(gravity wave) 연구에 중요한 역할을 하고 있다(Chung et al. 2003).

전천 카메라를 이용한 유성 관측의 장점은 전 하늘을 동시에 관측할 수 있어서 유성 발견 확률을 증가시키고, 유성흔 진화 과정의 광시야 이미지 포착이 가능하며, 또 무인 지속 관측이 가능하다는 점들이다. 특히 유성흔 진화 과정을 광시야로 추적하는 연구는 전천 카메라만이 가지는 장점이다(Kim, Chung, & Won 2003). 그러나 카메라 렌즈의 광시야와 감응도의 한계로 인해 육안으로 보이는 대부분의 희미한 유성은 관측할 수 없는 단점이 있다. 2001년 사자 자리 유성우 관측에는 Na 필터(노출 시간 180초), 무필터(40초), OI 630 필터(180초) 그리고 다시 무필터 노출(40초)을 순환적으로 사용하였다. 본 논문에서는 유성우 최대 기간인 11월 19일 01:00 ~ 05:40(KST) 동안 필터를 순환하며 관측한 화상 중 전체 무필터 화상 68장을 분석하였다. 무필터 화상 노출 시간은 전체 시간의 약 1/6에 해당한다.

CCD 카메라의 읽기 시간을 줄이고, 신호대 잡음비를 좋게 하기 위해 화소를 2×2로 합하여 관측하였다. 따라서 전천 화상의 1화소는 $180^\circ/512 = \text{약 } 0.35^\circ$ 에 해당한다. 카메라 읽기 시간은 약 10초이며 암잡음은 화소당 10개 미만이었다. 전천 화상 분석시, 표준성과 유성이 밝고, 또한 전천 카메라의 특성상 평판(FLAT) 화상을 얻을 수 없어, 보통 천문 관측에서 사용하는 화상 처리 과정(FLAT, BIAS, DARK)을 생략하고, 표준성과 유성의 화소값을 구할 때 근처 배경값을 빼주는 방식으로 대신하였다.

그림 1은 2001년 11월 19일 새벽에 관측된 사자자리 유성우 전천 화상 중 대표적인 것을 보여준다. 그림에서 은하수가 전천 화상 중앙을 가로지르고 있고, 천정 근처 목성이 밝게 나타나 있다. 그림에 나타난 밝은 점들은 대부분 육안 관측되는 별들로서, 노출 시간 40초 동안 전천 화상에는 거의 이동이 없게 보인다. 이 별들을 별자리로 동정하여 전천 화상의 각 화소들을 하늘의 방향각으로 대응시키는 전환 행렬이 이전 연구로 개발되었다(Chung et al. 2003). 또한, 이 별들은 유성의 밝기를 등급으로 환산하는 표준성으로 사용된다. 노출 시간동안 진입한 네 개의 유성들이 내는 빛이 사선 형

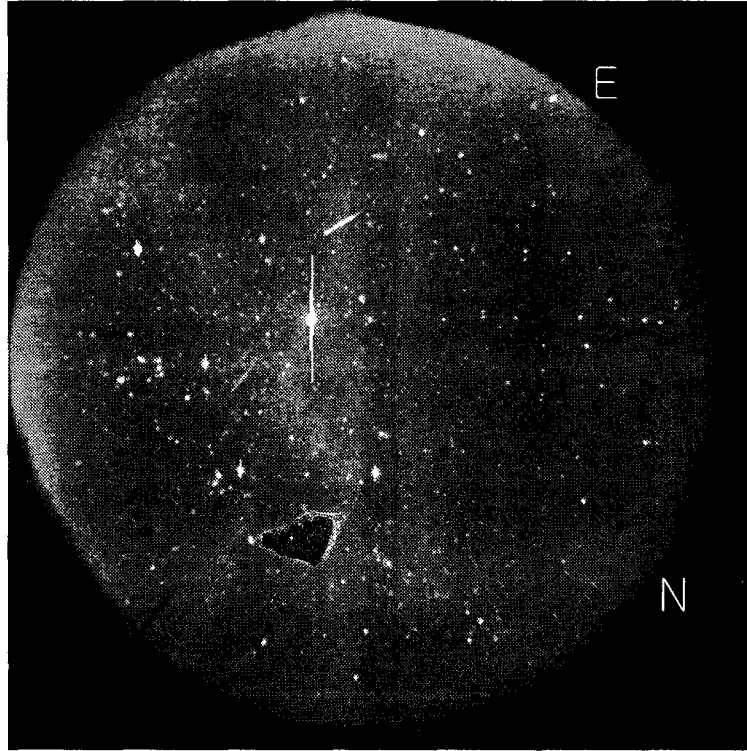


그림 1. 2001년 11월 19일 03시 19분 05초 전천 화상. 은하수가 남북 방향으로 가로지르며, 중앙 근처에 목성이 밝게 나타나 있다. 사진 형태로 네 개의 유성이 보이며, 이들의 방향이 한 점(사자 자리 방사점)으로 모인다.

태로 화상 오른쪽 상단에 나타나 있으며, 이 유성들의 진입 방향은 관측 시각의 사자 자리 유성우 방사점(고도 = 47.7° , 방위각 = 96.6°)에 모아짐을 알 수 있다.

표 1에 2001년 11월 19일 01:00 ~ 05:40(KST) 사이에 전천 화상에 나타난 유성의 개수를 시간대 별로 수록하였다. 여기에 전천 카메라의 임무율(duty rate)과 방사점의 고도각을 고려하여, 유효 천정 개수(개수/ $\sin(\text{hr})$ /임무율, hr: 방사점의 고도각)를 함께 수록하였다. 여기서 유효 천정 개수는 각 시간대의 중간 시각에서의 사자 자리 방사점 고도각을 사용하여 계산하였다. 일반적으로 관측되는 유성의 개수는 유성 진입 각도가 경사짐으로 인해 방사점 고도각의 \sin 값에 반비례한다. 전천 화상에서의 유성 식별 기준은 주변의 별과 구분되는 흔적 길이를 가지고, 그 흔적이 직선 형태일 것으로 삼았다. 또한 바로 전의 화상이나 바로 뒤의 화상에 중복된 것은 제외하였다. 표 1에서 보듯이 IMO에서 예측한 유성우 극대기 시간(03:19) 전후인 3시와 4시 사이에 가장 많은 유성이 발견되었다. 아시아 지역에서 육안 관측에 의해 5.8등급 이하로 보고된 최대 ZHR 3000개와 등급 분포지수 2를 채택하면(Arit et al. 2001), 표 1의 시간당 최대 유효 천정 개수, 423은 약 3등급 이하의 밝은 유성에 해당하는 것으로 추정된다. 여기서 등급 분포 지수는 1등급 차이의 유성 개수 비($n(m+1)/n(m)$)를 뜻한다.

표 1. 시간별로 관측된 유성의 개수.

관측 시간	개 수	유효 천정 개수
01:00 ~ 02:00	13	185
02:00 ~ 03:00	41	375
03:00 ~ 04:00	54	423
04:00 ~ 05:00	43	292
05:00 ~ 05:40	21	132
합 계	172	

3. 유성우 전천 화상 분석

관측한 전천 화상 자료로부터 유성의 등급을 결정하기 위해서는, 먼저 관측된 유성의 밝기를 비교할 수 있는 표준성을 정해야 한다. 모두 77개의 표준성을 별자리를 비교하여 동정하였으며, 이들의 등급과 좌표는 2001년 Almanac의 bright star catalogue에서 구하였다. 이 표준성들의 좌표는 전천 화상 상의 각 화소들의 위치를 고도각과 방위각으로 환산하는데 사용되었다(Chung et al. 2003, Garcia 1999). 전천 화상의 밝기를 등급으로 환산하기 위해 표준성의 등급과 전천 화상에서의 화소 밝기와의 관계를 천정 거리에 따라 구해보았다. 이 관계를 구하기 위해서 관측 시간 전반에 걸쳐 6장의 이미지를 선정하였다. 그림 2에 표준성들의 등급을 네 단계로 구분하여, 관측에서 구한 화소 밝기를 세로축에, 대기투과량(airmass)을 가로축에 나타내었다. 이 그림에서 각 등급 범위 내에서의 표준성 등급을 2등급, 3등급, 4등급, 5등급을 기준으로 각각 보정하여 나타내었다.

표준성의 화소 밝기는 프로그램을 이용해서 다음과 같은 방법으로 구했다. 먼저 구하고자 하는 표준성을 포함하는 일정한 영역을 선택하는데, 그 영역의 선택 기준은 대상 표준성 지름의 3배 길이를 가지는 정사각형으로 정하였다. 다음으로 선택 영역 내에서의 중간값을 구한다. 일반적으로 선택 영역 내에서 표준성을 구성하는 위치의 화소값은 중간값보다 큰 값을 가지고, 배경에서는 중간값보다 작은 화소값을 가지게 된다. 그러나 선택한 영역에는 표준성 이외에 다른 희미한 별들도 있기 때문에 배경 영역에서도 중간값보다 큰 화소값이 나타날 수 있다. 따라서 배경 별들의 영향을 가능한 줄이기 위해, 표준성 구분 기준을 중간값의 1.1배로 정하고, 선택 영역에서 중간값의 1.1배보다 큰 화소값의 총 합에서 배경을 빼준 값을 표준성 화소 밝기로 정의하였다.

그림 2a는 2.5등급보다 밝은 별들로, 화소 밝기 분포의 폭이 매우 크다. 이는 밝은 별의 경우 CCD 화소상에서 밝기가 포화되어, 화소 밝기가 별 고유의 등급을 제대로 반영하지 못하기 때문이다. 그림 2b와 2c의 경우 화소 밝기가 대기투과량이 커짐에 따라 비교적 적은 폭을 유지하며 일정한 율로 감소하고 있어, 이 별들의 경우 화소 밝기가 별의 등급을 비교적 제대로 반영함을 알 수 있다. 그림 2d는 자료수가 적어 화소 밝기의 분포 폭을 추정하기 어렵고, 대기투과량에 따른 관계도 신뢰하기 어렵다. 따라서 유성 등급 결정 과정에서는 2.5 ~ 4.5등급 범위의 표준성만을 사용하였다. 그림 2b와 2c의 화소 밝기 분포의 평균 표준편차는 평균값의 0.36배 정도이다. 이는 이 별들의 화소값으로 등급을 정할 때 $2.5 \log(1 + 0.36) = 0.33$ 등급의 오차를 줄을 의미한다. 이 정도의 등급 오차는 다른 천문 관측에 비해 상당히 커 보이지만, 전 하늘을 대상으로 5시간에 걸쳐 관측한 자료를 통합하여 얻은 것

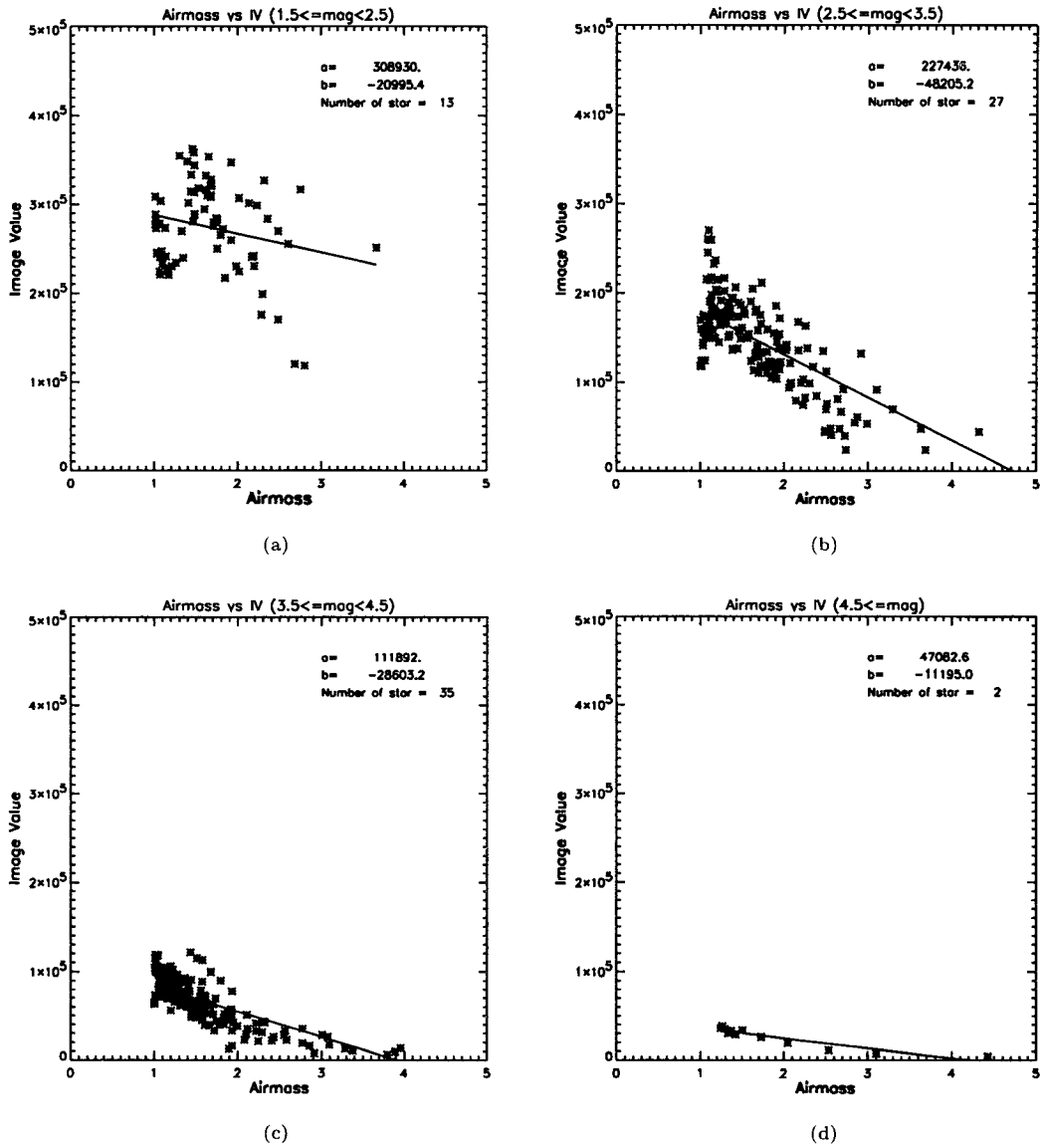


그림 2. 표준성의 천정거리에 따른 화소 밝기 변화. (a) 1.5등급 ~ 2.5등급, (b) 2.5등급 ~ 3.5등급, (c) 3.5등급 ~ 4.5등급, (d) 4.5등급 이상. 6장의 천천 화상을 사용하였으므로, 각 그림에서의 자료수는 표준성 개수의 6배이다.

을 감안하면, 관측 당시 기상 상태와 천천 카메라가 매우 안정적이었다고 판단할 수 있다. 실제로 유성 등급 결정시에는 동일한 화상에서 근처에 있는 표준성의 화소값과 비교하였으므로, 결정된 등급의 오차가 그림 2에서 추정된 오차보다는 훨씬 작을 것으로 예상된다.

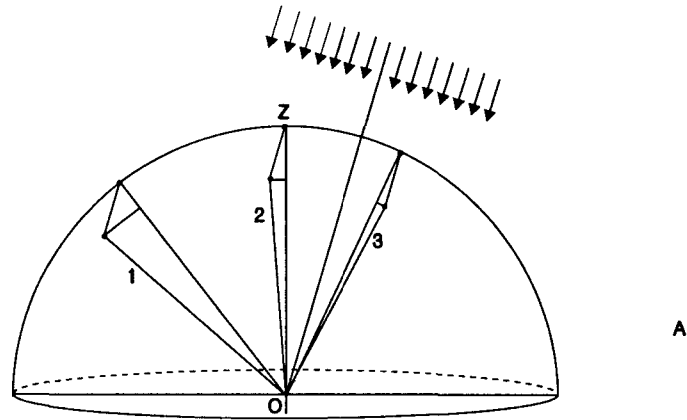


그림 3. 방사점 방향에서 유성체가 진입할 때 관측되는 유성의 길이와 방향.

4. 유성의 기하학적 특성

사자자리 유성우는 Tempel-Tuttle 혜성이 태양을 돌아 나가면서 뿌려놓은 먼지 덩어리들 중, 지구 공전 궤도면과 교차하는 지역을 지구가 통과할 때 발생하는 현상이다. 이때 떨어져 나온 먼지들간의 상대 속도는 7m/s 정도로 혜성 궤도 속도, 42km/s에 비해 매우 작으므로(Jenniskens et al. 1998), 혜성 궤도를 따라 서로간에 거의 평행한 운동을 할 것이며, 따라서 이들은 그림 3과 같이 서로 평행한 경로로 지구 대기에 진입할 것이다. 그러나 이런 평행 운동의 유성체들을 지상에서 관측할 때는 천구상의 한 점을 중심으로 방사상으로 퍼져나가는 것처럼 보인다. 이때 이 가상의 한 점을 방사점(radiant)이라 부르며, 사자자리 유성우의 경우 방사점은 1995년에 R.A=153.63°±0.11°, DEC=+21.97°±0.03°에 위치하는 것으로 관측되었다(Betlem et al. 1997). 방사점 위치는 매년 조금씩 다르긴 하지만, 이 관측치로부터 수십분의 일도 이상 벗어나지는 않는 것으로 알려졌다(Jenniskens et al. 1998). 그림 3은 유성체들이 방사점 방향에서 지구로 진입할 때, 지상의 한 지점에서 관측되는 유성들의 방향과 길이가 어떻게 다른지를 보여준다. 이 그림에서 유성의 방향은 방사점을 중심으로 퍼져나가고, 유성흔의 길이는 방사점에 가까울수록 짧아지며, 멀어질수록 더 길게 관측되는 것을 알 수 있다(유성 1의 길이 > 유성 2의 길이 > 유성 3의 길이). 또한 방사점의 고도가 낮을 때는 지평선 부근과 지평선 아래로 떨어지는 유성의 관측이 불가능하기 때문에, 유성의 flux는 방사점의 고도가 높아질수록 더 커지게 된다.

관측된 유성의 화소 밝기로부터 유성의 등급을 결정하기 위해서는, 유성이 전천 화상에 얼마나 빠른 속도로 지나 갔는지를 알아야 하기 때문에, 관측자가 보는 유성의 각속도가 필요하다. 유성의 각속도를 계산하기 위해서 유성 실제 길이와 각 길이간의 관계식을 구하였다. 그림 4는 유성 실제 길이와 각 길이간의 기하학을 보여준다. 이 그림에서 유성 길이와 각 길이 사이에 식(1)이 성립함을 삼각형 sine 법칙으로부터 구할 수 있다.

$$\sin \Omega = \frac{l}{d} \sin(De - \Omega) \tag{1}$$

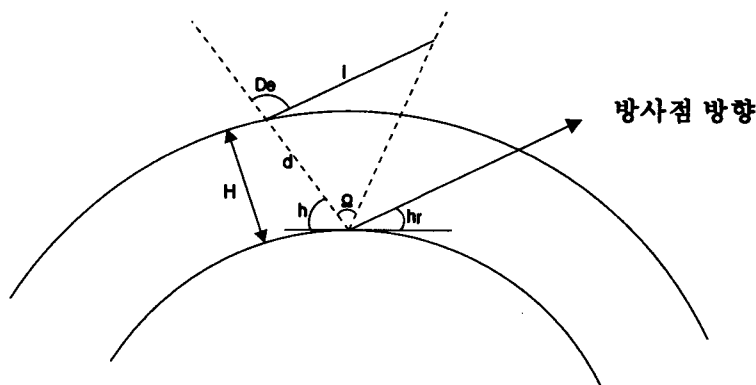


그림 4. 유성의 실제 길이와 각 길이와의 관계. 여기서 표시된 파라미터는 다음과 같다. De: 유성 머리와 방사점 사이각, Ω : 유성 길이의 각 크기, l: 유성의 실제 길이, H: 유성 머리의 높이, d: 관측자와 유성 머리 사이의 거리, hr: 방사점의 고도각, h: 유성 머리의 고도각.

이 식을 Ω 와 l에 대해 미분해서 정리하면

$$\left\{ \cos \Omega + \frac{l}{d} \cos(De - \Omega) \right\} \Delta \Omega = \frac{\Delta l}{d} \sin(De - \Omega) \quad (2)$$

가 되고, 유성 머리의 가장 앞부분에서는 $\Omega \rightarrow 0$, $l \rightarrow 0$ 이므로

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta l} = \frac{\sin De}{d} \quad (3)$$

가 된다. 따라서 유성 머리 부근에서 유성의 각속도는

$$\omega \cong V \cdot \frac{\sin De}{d} \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 V는 유성 머리 부근에서 유성의 속도이지만, 유성의 속도가 진입시 속도로부터 거의 줄어들지 않았다고 가정하면 진입속도로 근사할 수 있다. 유성은 육안으로 밝게 보이는 영역에서는 대기 마찰에 의해 속도가 수 퍼센트 정도밖에 줄지 않기 때문에 이런 근사가 가능하다(Hawkes 2002). 본 논문에서는 Jenniskens et al.(1998)이 Tempel-Tuttle 혜성의 궤도 요소로부터 계산한 유성의 진입속도 71.7km/s를 사용하였다.

식(4)에 필요한 관측 지점에서 유성 머리까지의 거리 d는 지구 중심에 대한 삼각형 기하를 사용하여 유성 머리의 고도각, h로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{R + H}{\cos(h)} \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{R \cdot \cos(h)}{R + H} \right) - h \right\} \quad (5)$$

여기서 R은 지구 반경이고, 유성 머리의 높이 H는 과거 사자 자리 유성우 관측을 통해 얻은 경험식

$$H = 93 - 6.0 \cdot \sin(hr) \quad (6)$$

을 사용하였다(Jenniskens et al. 1998).

5. 유성우 등급 분포

육안 관측시 유성의 등급은 순간적으로 지나가는 유성의 최대 밝기를 주변 별과 비교하여 대략적으로 결정한다. 이 등급 결정은 관측자가 얼마나 숙련되었느냐에 많이 좌우되지만, 많은 개수의 희미한 유성을 여러 명의 숙련된 관측자가 관측할 경우 중요한 과학적 의미를 가진다. 본 연구에서는 전천 화상에 나타난 유성으로부터 유성의 등급을 결정하기 위해서 유성 머리 부분의 화소 밝기와 그 근처의 표준성을 비교하는 방법을 택하였다.

구체적으로 유성 머리 부분의 길이를 주변 비교 표준성 크기의 5배로 정하고, 이 길이 내에 있는 화소들의 밝기 합을 화상 자료로부터 구하였다. 이는 전천 카메라의 화상 한계로 인해 유성 머리의 폭이 표준성의 상처럼 퍼졌을 것이므로, 충분히 유성 길이를 감지하기 위한 목적이다. 이때 앞에서 분석한대로 전천 카메라의 특성을 고려하여 2.5 ~ 4.5 등급 사이의 표준성만을 선택하여 비교하였다.

표 1에서 보였듯이 2001년 11월 19일 01:00 ~ 05:40(KST) 동안 172개의 유성이 확인 가능했지만, 그 중에서 위와 같은 방법으로 등급을 구할 수 있었던 유성은 83개였다. 이는 관측된 전천 화상에서, 앞서 설명한 기준으로 주변의 표준성과 구분되는 유성이라 할지라도, 그 유성의 시작 부분이 별과 겹쳐서 나타나거나 구분이 불가능한 유성들은 등급 결정 대상에서 제외시켰기 때문이다. 또한 유성을 구성하는 유효 화상값의 기준이 선택 영역 중간값의 1.1배이기 때문에, 관측 화상에서 유성의 끝은 흔적이 식별은 되지만 화소 밝기가 유효 화상값보다 작은 것들은 화소 밝기를 구할 수 없기 때문에 그런 유성들도 대상에서 제외시켰기 때문이다.

유성 등급은 주변에 있는 표준성과 비교하여 다음 식을 사용하여 결정하였다.

$$m_M = m_s - 2.5 \log \left(\frac{F_M/T_p}{F_s/T_{exp}} \right) \quad (7)$$

여기서, F_s 는 표준성 화소값, F_M 은 유성 머리의 화소값, m_s 는 표준성 등급이다. 또한 T_p 는 앞에서 정한 표준 유성 머리의 통과 시간으로 표준 유성 머리의 각 길이를 각속도로 나누어 구해지며, T_{exp} 는 전천 화상 노출 시간이다. 유성 각속도는 유성 머리와 방사점 사이각 De 와 유성 머리의 고도각에 따라 다르기 때문에, 결정되는 유성의 등급도 전천 화상의 위치와 관측 시각에 직접적으로 영향을 받는다.

표 2의 두번째 열에서 이미지 번호가 같은 것은 한 개의 이미지에 두 개 이상의 유성이 포함된 경우이다. 전천 화상에서 분석된 유성 머리의 각도 길이가 $1.4^\circ \sim 6.1^\circ$ 범위에 분포하며 상호간 최대 약 4.4배 차이가 있으나, 유성 통과시간은 0.07 ~ 0.53초 범위에 최대 약 7.6배의 상호 차이가 있다. 유성 통과시간과 노출 시간 40초와 비교하면, 같은 화소 밝기값에 대해 비교 표준성과 유성 사이에 6.9 ~ 4.7 등급 차이를 초래한다. 따라서 관측기간 중 유성의 위치와 관측 시각에 따라 변화하는 유성 통과 시간의 차이가, 최대 2.2 등급의 영향을 미침을 알 수 있다. 최종적으로 결정된 유성 등급은 -6.2 ~ -1.2 등급 사이에 분포하므로, 유성 통과 시간 차이에 따른 등급 폭보다는 유성들의 겹보기 밝기 차이에 의한 등급 폭이 더 큼을 알 수 있다.

표 2에 수록된 83개의 유성 등급의 분포를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보여주는 등급 분포는 육안 관측에 의한 희미한 유성의 등급 분포와는 상당히 다르다. 우선 표 2에 수록한 최대 등급은 -1.2등급으로 표 1에서 추정된 한계 등급, 3등급에 비하여 매우 밝다. 표 2의 유성은 표 1에서 언급한 172개 유성의 약 1/2에 해당하는 밝고 분명한 것만으로 선정되었으므로 유성 등급 분포 지수가 2임

표 2. 유성 자료(유성 번호, 관측 이미지 번호, 관측 시간, 유성 머리 시작점의 고도각과 방위각, 표준성 화소 밝기, 유성 화소 밝기, 유성 머리와 방사점 사이각, 관측지에서 유성 머리 시작점까지의 거리, 유성 각속도, 표준 유성 머리 통과 시간, 표준성 각 크기의 5배, 유성 등급).

No	Image No	Time (hhmmss)	Meteor Head Alt	Meteor Head Azi	Star IV	Meteor IV	De (Deg)	D (km)	w (deg/s)	T _p (s)	ΔΩ (deg)	Mag
1	29678	012847	32.6	344.9	127458	363569	80.9	164.9	24.7	0.11	2.7	-4.3
2	29682	013639	19.7	307.5	53856	196120	115.4	254.4	14.6	0.13	2.0	-3.7
3	29686	014432	33.2	111.8	121212	57992	25.5	162.0	11.0	0.24	2.6	-1.2
4	29686	014432	52.6	209.8	61700	164764	86.8	113.1	36.4	0.13	4.7	-3.2
5	29686	014432	18.3	341.0	80502	1077240	91.0	271.3	15.2	0.21	3.2	-5.0
6	29692	015621	23.0	183.8	35364	226566	86.1	221.5	18.6	0.18	3.3	-4.8
7	29696	020413	28.7	61.0	120859	96475	21.1	182.9	8.1	0.53	4.3	-1.4
8	29696	020413	26.7	50.6	128926	69692	30.5	194.8	10.8	0.42	4.6	-1.2
9	29696	020413	24.9	275.9	68941	204952	121.7	206.8	17.0	0.15	2.6	-3.6
10	29698	020810	54.2	122.8	65798	57497	33.3	110.2	20.6	0.07	1.4	-2.8
11	29706	022355	56.5	215.1	115379	288185	76.8	106.9	37.6	0.08	2.9	-4.0
12	29706	022355	33.0	241.8	59013	186186	106.3	161.4	24.5	0.18	4.3	-3.4
13	29706	022355	19.7	317.8	59418	167666	106.7	252.6	15.6	0.16	2.5	-3.5
14	29708	022751	31.3	145.3	37836	1265920	46.6	168.7	17.8	0.18	3.2	-5.3
15	29708	022751	40.1	8.9	120558	82364	59.9	137.5	26.0	0.17	4.4	-1.6
16	29710	023148	26.2	144.4	36940	284446	47.6	197.0	15.5	0.17	2.7	-3.7
17	29710	023148	64.7	329.3	85947	72698	67.0	98.6	38.5	0.09	3.3	-2.4
18	29712	023544	26.1	320.2	61337	364257	99.7	197.3	20.6	0.15	3.2	-4.4
19	29714	023941	39.6	42.8	125333	117994	36.1	138.6	17.5	0.27	4.7	-1.5
20	29714	023941	57.0	210.4	113332	82615	71.0	106.0	36.8	0.08	2.9	-2.6
21	29718	024734	22.1	233.0	27543	30304	107.2	227.5	17.3	0.19	3.2	-1.5
22	29718	024734	19.2	1.8	71442	426666	77.2	257.0	15.7	0.27	4.3	-4.3
23	29720	025130	27.1	196.2	111272	362909	81.7	190.4	21.4	0.28	6.1	-3.4
24	29720	025130	15.7	334.3	59932	154182	98.7	304.1	13.4	0.24	3.2	-3.0
25	29722	025527	37.9	221.0	60874	96695	86.6	143.2	28.8	0.15	4.4	-2.5
26	29722	025527	38.8	260.9	108291	98224	97.6	140.4	29.1	0.10	2.8	-2.9
27	29722	025527	24.5	307.9	19101	39906	105.2	207.6	19.2	0.10	1.9	-3.4
28	29724	025923	59.1	211.3	54201	264132	65.3	103.3	36.3	0.09	3.3	-3.8
29	29726	030320	23.9	129.0	148049	416640	35.1	211.8	11.2	0.25	2.8	-3.1
30	29726	030320	16.0	322.4	52151	357291	105.2	298.6	13.3	0.32	4.3	-3.8
31	29728	030716	27.5	160.6	55762	245556	54.4	187.3	17.9	0.16	2.9	-3.6
32	29728	030716	39.7	282.5	61735	325639	94.7	137.5	29.9	0.08	2.4	-5.1
33	29730	031113	59.9	136.9	139204	776705	28.0	102.3	18.9	0.15	2.8	-4.4
34	29730	031113	46.1	272.4	102667	225719	87.7	122.2	33.7	0.13	4.5	-3.5
35	29730	031113	14.4	308.9	38381	356463	112.3	325.6	11.7	0.19	2.2	-4.9
36	29732	031509	36.9	227.8	109725	1746920	85.8	145.9	28.2	0.16	4.6	-5.2
37	29734	031905	29.0	131.5	162047	437979	32.7	178.6	12.5	0.34	4.2	-2.7
38	29734	031905	50.2	126.4	193479	435069	19.6	114.8	12.1	0.34	4.2	-3.0
39	29734	031905	63.2	147.5	162158	1561680	31.6	99.1	21.8	0.19	4.2	-4.7
40	29734	031905	60.1	230.7	168101	406340	65.9	101.9	37.0	0.16	6.0	-3.9
41	29736	032301	44.5	121.5	178922	125551	17.1	125.4	9.7	0.46	4.4	-1.4
42	29736	032301	49.0	64.8	218138	125306	27.6	116.6	16.4	0.36	6.0	-2.0
43	29736	032301	27.6	24.8	82932	58747	58.4	186.7	18.8	0.23	4.3	-2.1
44	29738	032658	61.7	69.4	83901	685797	20.1	100.3	14.2	0.23	3.3	-3.8
45	29738	032658	37.0	20.0	298388	632680	55.6	145.4	23.4	0.26	6.1	-4.2
46	29740	033054	76.7	117.3	88147	1030900	27.6	90.8	21.1	0.16	3.3	-4.7
47	29740	033054	22.9	245.0	121441	643027	101.2	219.0	18.5	0.32	5.9	-4.0
48	29740	033054	42.7	311.1	82046	182408	83.0	129.3	31.7	0.10	3.0	-3.6
49	29742	033451	79.9	159.9	102932	3585180	35.1	89.7	26.4	0.11	2.9	-6.2
50	29748	034640	32.7	223.0	147493	1277400	80.1	160.8	25.3	0.23	5.8	-5.3
51	29748	034640	40.5	303.1	79250	614408	84.5	134.7	30.5	0.09	2.6	-5.1
52	29752	035432	62.4	143.0	90941	180092	21.6	99.2	15.3	0.19	2.9	-2.6
53	29752	035432	41.2	226.9	51869	245769	72.6	132.5	29.7	0.15	4.4	-4.4
54	29752	035432	26.0	18.9	308382	460082	65.9	195.4	19.3	0.32	6.1	-3.6
55	29756	040225	74.0	143.0	93587	98115	23.0	91.5	17.6	0.16	2.9	-1.9
56	29762	041414	50.2	52.3	243749	743677	32.4	113.8	19.4	0.22	4.4	-4.3
57	29768	042603	33.4	199.4	62018	152385	60.5	157.2	22.8	0.13	2.9	-3.2
58	29768	042603	47.9	286.9	211267	1872270	71.2	117.7	33.2	0.12	4.0	-5.9
59	29770	043000	35.0	36.0	245614	2029380	53.3	150.7	21.9	0.20	4.4	-5.6
60	29770	043000	48.6	246.2	48621	307478	63.7	116.3	31.8	0.10	3.2	-4.0
61	29772	043356	36.8	77.9	205333	577527	33.6	144.8	15.8	0.27	4.3	-3.5
62	29772	043356	28.2	14.9	306324	195444	69.0	181.1	21.3	0.27	5.8	-2.8
63	29772	043356	24.6	260.6	77835	1303960	89.2	204.1	20.2	0.20	4.1	-5.0
64	29772	043356	34.1	303.3	162439	93916	83.2	154.1	26.6	0.11	2.9	-2.9
65	29774	043752	19.4	279.7	56222	743784	96.7	251.3	16.3	0.19	3.1	-5.1
66	29776	044149	55.8	170.9	149098	1716530	27.8	105.6	18.2	0.16	2.9	-5.1
67	29776	044149	18.7	305.6	56225	570210	97.2	259.3	15.8	0.15	2.4	-4.7

(표 2. 계속)

No	Image No	Time (hhmmss)	Meteor Head		Star IV	Meteor IV	De (Deg)	D (km)	w (deg/s)	T _p (s)	ΔΩ (deg)	Mag
			Alt	Azi								
68	29778	044545	58.4	181.3	151698	659561	29.8	102.5	20.0	0.22	4.4	-3.7
69	29778	044545	44.2	217.9	57657	1413790	55.1	124.7	27.1	0.16	4.3	-5.1
70	29780	044941	52.5	357.9	134314	118350	53.8	110.0	30.3	0.11	3.3	-2.8
71	29782	045338	43.3	218.2	63389	185800	54.2	126.6	26.4	0.12	3.2	-3.3
72	29782	045338	30.9	3.1	324015	269482	71.9	167.2	23.4	0.25	5.8	-3.2
73	29784	045734	39.6	14.3	319647	270126	60.4	136.0	26.4	0.22	5.8	-3.3
74	29788	050527	40.3	316.6	110994	159906	71.4	134.1	29.2	0.14	4.1	-2.8
75	29790	050923	39.8	57.3	242253	163850	45.9	135.1	21.9	0.20	4.4	-2.8
76	29794	051716	29.4	26.5	131641	498402	67.1	174.5	21.8	0.28	6.1	-3.7
77	29794	051716	35.1	265.8	175313	258238	70.2	150.0	25.9	0.16	4.0	-3.4
78	29796	052112	47.8	159.2	184964	172477	26.0	117.3	15.4	0.28	4.3	-2.3
79	29800	052905	79.3	89.8	108639	227601	13.5	88.8	10.8	0.13	1.5	-3.1
80	29800	052905	42.9	14.9	322449	1575790	58.4	127.3	27.6	0.21	5.8	-5.3
81	29800	052905	50.4	321.7	113380	142958	57.9	112.8	31.0	0.14	4.2	-2.7
82	29800	052905	20.8	281.2	211400	166380	84.4	235.4	17.4	0.14	2.5	-3.1
83	29804	053658	35.4	70.2	237050	403544	50.9	148.6	21.5	0.22	4.6	-3.8

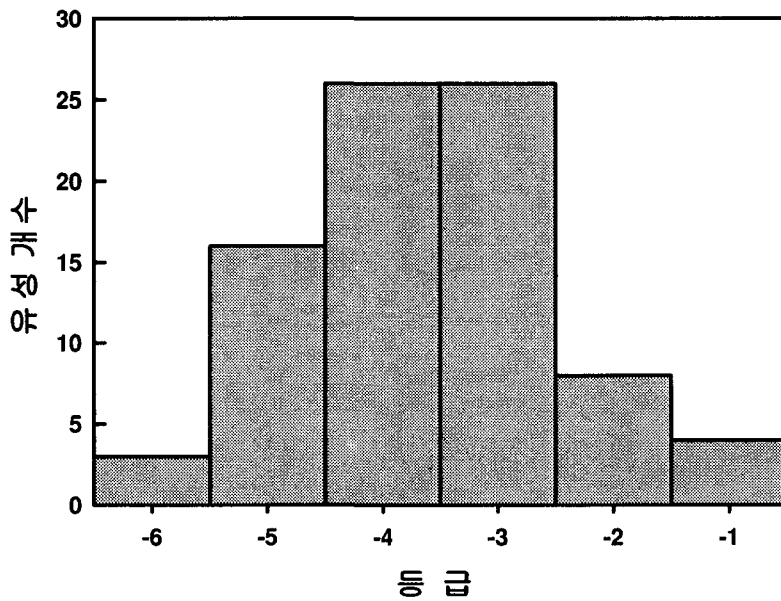


그림 5. 등급별 유성 개수.

을 가정했을 때, 표 2의 최대 등급은 표 1의 추정 한계 등급인 3등급보다 1등급 작은 약 2등급이 예상되었다. 따라서 표 2의 등급이 전체적으로 밝게 결정되었을 가능성이 있다. 또한, 육안 관측에 의한 분포는 한계 등급이 1등급씩 증가함에 따라 등급 분포 지수 배 만큼 계속 증가하는데 반하여, 그림 5의 경우는 -3 ~ -4등급에서 최대값을 보이는 형태이다. 이런 분포의 차이를 다음의 3가지 가능한 이유로 나누어 분석해 볼 수 있다.

첫째, 밝은 유성이 선택적으로 더 잘 관측되었을 가능성이 있다. 보통 육안 관측의 경우 방사점 고도각이 낮을 때, 밝은 유성이 관측자의 주위를 떠 끌어 선택적으로 더 잘 관측되는 경향이 있다. 또

한 방사점 고도각이 낮은 시간에는 유성들의 경로가 낮은 각도로 진입하기 때문에, 대기 소광 효과가 커져 희미한 유성들이 잘 관측되지 않는 사실이 알려져 있다(Jenniskens et al. 1998). 전천 카메라는 전 하늘을 기계적으로 관측하기 때문에 관측자의 오류로 인한 선택 효과는 없을 것이다. 우리의 전천 카메라 관측에서 방사점 고도각에 따른 선택 효과를 알아 보기 위해 시간 별로 -3등급보다 밝은 유성과 어두운 유성의 개수를 시간별로 비교해 보았다. 관측 시간동안 방사점 고도각 범위는 25°에서 72°까지 증가했지만, 이에 따른 밝은 유성 비율이 5 ~ 1.2 사이에서 체계적으로 감소하지 않았다. 따라서 전천 카메라 관측에 민감한 밝은 유성의 경우, 적어도 우리가 관측한 방사점 고도각 범위에서 밝은 유성의 선택 효과가 크지 않은 것으로 추정된다.

둘째, 여기서 결정된 유성 등급의 불확실 정도가 커서 유성 등급 분포를 왜곡하였을 가능성이 있다. 이 가능성을 상세히 검토하기 위해, 등급 결정에 대한 불확실 정도를 상대 오차와 체계적 오차로 나누어 다음에 분석하였다. 유성 등급 결정의 최대 상대 오차는 식(7)을 미분한 식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta m = 2.5 \log \left(1 + \frac{\Delta F_M}{F_M} \right) + 2.5 \log \left(1 + \frac{\Delta F_s}{F_s} \right) + 2.5 \log \left(1 + \frac{\Delta T_p}{T_p} \right) \quad (8)$$

여기서, 표준성 등급(m_s), 노출 시간(T_{exp})의 오차는 무시할 수 있을만큼 정확히 알려져 있기에 포함시키지 않았다. 유성의 화소 밝기의 통계적 상대오차, $\Delta F_M/F_M$ 은 최대 0.01정도이고, $\Delta F_s/F_s$ 에는 그림 2에서 구한 표준성 밝기 폭의 상대 표준 편차, 약 0.3을 사용할 수 있다. 유성 통과시간의 상대 오차는

$$\frac{\Delta T_p}{T_p} = \frac{\Delta(\Delta\Omega)}{\Delta\Omega} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{1}{\tan De} \frac{\Delta De}{De} \quad (9)$$

로 표현된다. 여기서 유성 머리 각 크기 $\Delta\Omega$ 를 전천 화상에서 측정할 때의 오차는 10% 이내이고, 또한 방사점까지의 각 De 의 측정 오차도 10% 이내이다. 유성 고도각의 측정 오차도 10% 이내이므로 식(5)를 이용해 계산한 유성까지 거리의 상대 오차도 10%이내에 있음을 알 수 있다. 그러나 방사점으로부터 45° 이내에 있는 유성의 경우, De 의 측정오차가 10% 이내라도 통과 시간에 미치는 오차는 $1/\tan De$ 배로 증가하기 때문에 유의해야 한다. 표 2에 De 가 45° 이내에 있는 유성은 23개 있다. 방사점에 가까이 있는 이런 유성을 모두 포함해도, 유성 통과 시간의 최대 상대 오차는 약 0.3 정도이다. 따라서 표 2에 수록한 유성 등급에 대한 최대 상대오차는, 대략 $2.5(\log(1 + 0.01) + \log(1 + 0.3) + \log(1 + 0.3)) = 0.6$ 정도이다.

그러나 우리가 결정한 유성의 등급에 대한 체계적 오차는 이보다 클 수 있다. 체계적 오차의 주요인은 유성 등급 결정식 (7)에 전천 카메라의 감응도의 비선형성을 반영하지 못한 데 있다. 즉 관측된 표준성이나 유성의 화소값이 입사한 광자수에 대해 비선형적으로 반응할 수 있기 때문이다. 이는 점광원인 표준성이 카메라 CCD에 상이 맺힐 때 제한된 영역의 화소에 걸쳐 비선형적으로 감응시키기 때문이다. 그러나 이런 비선형 특성이 직선으로 퍼진 유성의 경우에도 같이 나타날지 여부는 확인할 수 없다. 아마도 직선형 상의 감응도가 점광원 상보다 좀더 선형적 특성에 가까울 가능성이 크다. 이럴 경우, 유성 등급 결정식 (7)은 실제보다 등급을 더 작게(즉 더 밝게) 계산한다. 이는 사용된 표준성의 화소값이 비선형 특성에 따라 실제보다 작게 대입되었을 것이므로, 등급차이가 실제보다 더 커지게 되기 때문이다. 따라서 표 2에 결정된 유성 등급은 전체적으로 실제보다 작게 결정되었을 가능성이 크다.

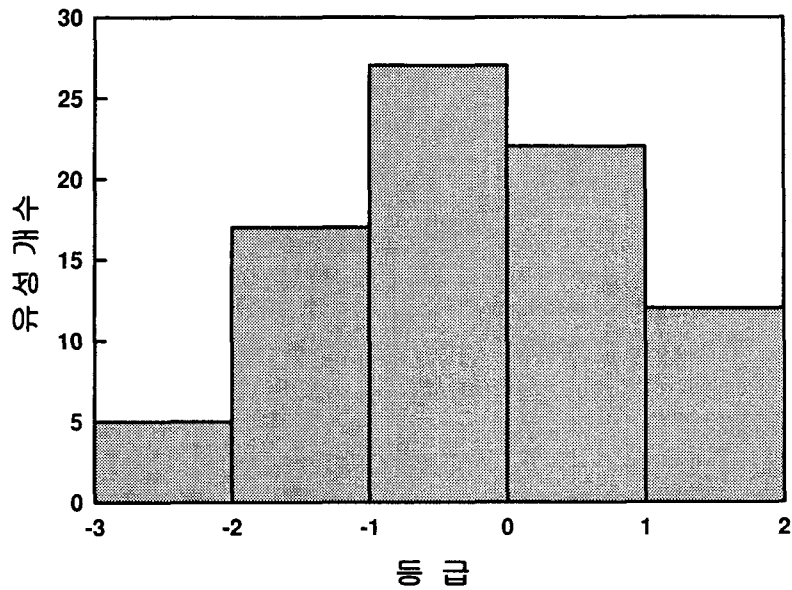


그림 6. 유성 지속 시간을 4초로 가정한 유성의 등급 분포.

셋째로, 전천 카메라로 관측시 유성의 지속 시간이 여기서 계산한 유성 통과 시간에 비해 길 가능성이 있다. 육안 관측은 거의 순간의 유성 밝기를 주변 별과 비교하여 결정하나, 전천 카메라는 노출 시간내에 지속적으로 밝기를 누적하는 차이가 있다. 따라서 실제 유성 지속 시간이 계산된 통과 시간 보다 길 경우에는 표 2에 결정된 등급이 육안 관측 등급보다 작을(밝을) 수 있다. 이 경우 식(7)에 유성 통과 시간 대신 유성 지속 시간을 대입하여 등급을 결정해야 한다. 그러나 유성 지속 시간은 대기 속에서 유성의 화염이 소멸되는 과정에 관련되어 있어서 계산하기가 어렵다. 간접적으로 Hawkes(2002)의 비디오 카메라 관측에 나타난 희미한 유성이 1/15초 간격의 다음 화상에서 사라지는 사실로부터 지속 시간이 대략 0.1초 이내일 것으로 추정할 수는 있다. 그러나 밝은 유성은 수 분 동안 희미한 유성흔이 화상에 남아 있기도 한다. 만약에 표 2의 유성이 밝아서 지속 시간이 계산된 통과 시간 보다 길고 일정하다면, 최대 등급이 육안 관측과 비교하여 추정대로 약 2등급이 되도록 식(7)에 T_p 를 4.0초로 조절하여 유성 등급의 분포를 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

이 세가지 가능성을 종합하면, 표 2의 등급과 그림 5의 분포는 유성 등급의 하한 값(lower limit)으로, 그림 6의 등급 분포는 상한 값으로 볼 수 있어 실제 등급 분포는 이 사이에 있을 것으로 판단된다. 그림 6의 분포는 그림 5의 분포를 약 2.5등급 크게 평행 이동한 것과 비슷하며, 상대 등급 분포는 별 변화없이 중간 등급에서 최대가 됨을 보인다. 따라서 2001년 사자 자리 유성우 기간 중 극대시간(아시아 지역, 11월 18일 18시 16분 UT) 전후 2시간 동안에는, 적어도 0등급 이하의 밝은 유성이 실제로 많이 발생하였을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 사자자리 유성우를 해양연구원 극지연구소가 보현산 천문대에 설치한 전천 카메라로 2001년 11월 19일 01:00 ~ 05:40(KST)에 관측한 68장의 전천 화상을 분석하였다. 2001년 사자자리 유성우는 아시아 지역에서 19일 03시 16분(KST)에 극대를 이루며 천정 시간율, $ZHR = 3000$ 이 육안 관측되는 동안(Arlt et al. 2001), 전천 카메라의 관측으로 3시 ~ 4시 사이에 유효 천정 개수 423이 추정되었다. 이 극대 시간에 IMO 육안 관측 결과인 등급 분포 지수, 2를 우리의 전천 카메라 관측으로 추정된 유효 천정 개수에 적용하여, 전천 카메라가 관측한 유성의 등급 한계가 약 3등급임을 추정하였다. 관측된 유성 중 화상 배경값의 10% 이상의 밝기를 가지는 83개의 유성흔 머리에 대해 근처에 위치한 표준성과 화소 밝기를 비교하여 유성의 등급을 결정하였다. 이 기간 동안 관측한 전천 화상의 측광학적 오차는 77개 표준성의 화소 밝기와 천정거리와의 관계를 통해 확인한 결과, 최대 0.3등급으로 추정되었다. 유성 등급 결정에 필요한 유성의 각속도는 유성 진입의 기하학적 성질을 이용하여 유성과 사자자리 방사점과의 사이각을 변수로 하는 간단한 식으로 유도하였다. 계산된 유성 각속도, 화상의 노출 시간, 표준성의 화소 밝기, 유성의 화소 밝기를 사용하여, 유성의 등급을 결정하였다. 이렇게 결정된 83개의 유성들이 $-1.2 \sim -6.4$ 등급 사이에 분포하며, -3 등급 근처에서 최대를 보인다. 그러나 이 등급 분포는 육안 관측과 비교하여 추정된 전천 카메라의 한계 등급보다 상당히 작은(밝은) 범위에 있다. 이런 차이는 순간적인 육안 관측과 노출 시간이 긴 CCD 관측과의 특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이 특성 차이를 분석하기 위해 육안 관측과 합치하도록 유성 지속 시간을 조절 변수로 하여 등급을 재 결정하였다. 재 결정된 등급의 상대적 분포는 원리적으로 결정한 등급 분포와 유사하며, 약 0등급 근처에서 최대를 가진다. 이 상대 분포는 육안 관측에 민감한, 희미한(1 ~ 6등급) 유성들이 등급이 감소함에 따라 일률적으로 개수가 감소하는 것과는 상당히 다른 분포이다. 따라서 우리의 전천 카메라 관측 결과는 2001년 사자 자리 유성우의 극대 시간 전후 2시간에 적어도 0등급 이하의 밝은 유성이 상대적으로 많이 발생하였을 것으로 해석된다. 이런 밝은 유성의 빈도는 유성우 특성 연구에 중요한 의미를 가진다. 그러나 표준성만을 이용해서 결정된 유성 등급은 유성의 지속 시간에 대한 불확실성과 전천 카메라 감응도의 비선형성에 의한 불확실성을 내포하고 있음을 지적해 둔다. 본 연구는 전천 카메라를 이용해 처음으로 시도되는 유성 관측 연구로서, 현 단계에서는 이러한 불확실성을 정량적으로 분리해 낼 수 없었다. 향후 다른 측광 자료와 비교하는 추가 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글: 본 연구는 과학재단 선도기초연구실(R14-2002-043-01000-0) 지원을 받았음. 전천 카메라는 해양연구원 극지연구소(PP03105)의 지원으로 운영됨.

참고문헌

- Arlt, R., Kac, J., Krumov, V., Buchmann, A., & Verbert, J. 2001, WGN, Journal of the IMO, 29, 187
- Beech, M., Hughes, D. W., & Murray, I. 2001, Earth, Moon and Planets, 84, 143
- Betlem, H., ter Kuile, C., van't Leven, J., de Lignie, M., Bellot, L. R., Koop, M., Angelo, C., Wilson, M., & Jenniskens, P. 1997, Planet. Space Sci., 45, 853

- Chung, J. -K., Kim, Y. H., Won, Y. -I., & Lee, B. Y. 2003, *J. of Korea Meteo. Soc.*, 39, 359
- Garcia, F. J. 1999, PhD Thesis, Cornell University
- Hawkes, R. L. 2002, in *Meteors in the Earth's Atmosphere*, ed. E. Murad & I. P. Williams (Cambridge: Cambridge Univ. Press), p.97
- Jenniskens, P., de Lignie, M., Betlem, H., Borovicka, J., Laux, C. O., Packan, D., & Kruger, C. H. 1998, *Earth, Moon and Planets*, 80, 311
- Jenniskens, P., Wilson, M. A., Packan, D., Laux, C. O., Kruger, C. H., Boyd, I. D., Popova, O. P., & Fonda, M. 2000, *Earth, Moon and Planets*, 82, 57
- Kim, Y. H., Chung, J. -K., & Won, Y. -I. 2003, submitted to *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*
- McNaught, R. H., & Asher, D. J. 2001, *WGN, Journal of the IMO*, 29, 156
- Yeomans, D. K., Yau, K. K., & Weissman, P. R. 1996, *Icarus*, 124, 407