

원자외선 분광기(FIMS)의 감도 측정

김일중^{1†}, 선광일², 육인수², 남옥원², 진호², 박장현², 유광선¹,
이대희², 한원용², 민경옥¹, Jerry Edelstein³, Eric Korpela³

¹한국과학기술원

²한국천문연구원 우주과학연구부

³Space Sciences Lab., Univ. of California, Berkeley

SENSITIVITY CALIBRATION OF FAR-ULTRAVIOLET IMAGING SPECTROGRAPH

I.-J. Kim^{1†}, K.-I. Seon², I.-S. Yuk², U.-W. Nam², H. Jin², J.-H. Park²,
K.-S. Ryu¹, D.-H. Lee², W. Han², K.-W. Min¹, J. Edelstein³, and E. Korpela³

¹Korea Advanced Institute of Science and Technology

²Space Science Research Division, Korea Astronomy Observatory

³Space Sciences Lab., Univ. of California, Berkeley

E-mail: urania@space.kaist.ac.kr

(Received October 26, 2004; Accepted November 15, 2004)

요 약

2003년 9월에 발사되어 현재 임무수행중인 과학기술위성1호의 주탑재체 원자외선 분광기의 감도 측정을 수행하였다. 이를 위하여 2003년 11월부터 2004년 5월의 기간 동안 백색왜성 G191B2B와 O형 별인 Alpha-Cam, HD93521을 관측하였으며, 그 관측 데이터와 HUT(Hopkins Ultraviolet Telescope) 데이터를 비교하여 원자외선 분광기의 전 과정영역에 대한 유효면적을 계산하고, 그 결과를 비교 분석하였다.

ABSTRACT

We describe the in-flight sensitivity calibration of the Far ultraviolet Imaging Spectrograph (FIMS, also known as SPEAR) onboard the first Korean science satellite, STSAT-1, which was launched in September 2003. The sensitivity calibration is based on a comparison of the FIMS observations of the hot white dwarf G191B2B, and two O-type stars Alpha-Cam, HD93521 with the HUT (Hopkins Ultraviolet Telescope) observations. The FIMS observations for the calibration targets have been conducted from November 2003 through May 2004. The effective areas calculated from the targets are compared with each other.

Keywords: far-ultraviolet, white dwarf, effective area

1. 서 론

원자외선 분광기(FIMS; Far-ultraviolet IMaging Spectrograph, 또는 SPEAR)는 2003년 9월 27일 발사된 과학기술위성 1호(STSAT-1)의 주 탑재체로서 주 목적은 우리은하에 분포하는 고온의 성간

[†]corresponding author

물질로부터 발생하는 원자외선 영역의 방출선을 관측하는 것이다(유광선 외 1998, 선광일 외 2000). 다른 광학 검출기와 마찬가지로 FIMS의 경우에도 검출한 빛의 세기에 대한 절대적인 값을 얻기 위해서는 감도 측정(sensitivity calibration)을 하여야 한다. 하지만 FIMS는 지구 밖의 인공위성에 탑재되어 있는 우주망원경이라는 점과 원자외선 영역의 빛을 검출하는 분광기라는 점에서 보통의 가시광 영역의 지상망원경과는 다른 방법으로 감도 측정이 이루어진다.

본 연구의 목적은 이러한 FIMS의 전체 파장 영역에 대한 감도 측정을 하는데 있다. 이를 위하여 표준광원이 될 3개의 별을 관측 대상으로 선정하여 2개의 관측 대상은 2003년 11 ~ 12월에, 나머지 하나의 관측 대상은 2004년 3 ~ 5월에 관측하였으며, 그 관측 데이터를 처리 분석하고 이미 감도 측정이 잘 되어 있는 것으로 알려진 HUT(Hopkins Ultraviolet Telescope) 데이터와 비교하여, 그로부터 FIMS의 전체 파장 영역에 대한 유효면적(effective area)을 계산하였다.

2. 원자외선 영역에서의 감도 측정

가시광 영역의 일반적인 지상망원경의 경우, 감도 측정의 방법은 하늘의 별과 근처 산 위에 위치시킨 실험실 표준 광원을 동시에 직접 비교 관측하는 것이다. 이 때 발생할 수 있는 부정확성의 요인은 하늘의 별과 산 위의 표준광원의 빛이 망원경까지 도달하는데 지나게 되는 대기량에 차이가 있다는 데서 온다. 빛이 지구 대기를 통과하는 경로가 길수록 더 많은 소광이 일어나기 때문이다. 그 부정확성의 양은 1.5% 이내로 알려져 있다(Kruk 1998).

이에 반해 원자외선 영역을 관측하는 망원경의 경우는 대기소광 효과가 가시광 영역에 비해 훨씬 더 크기 때문에 지상에서의 관측보다는 셔틀이나 인공위성을 이용한 우주망원경이 대부분이다. 따라서 우주에서 표준광원이 될만한 광원을 찾기 힘들고, 셔틀이나 인공위성에 실리기 전에 미리 감도 측정을 한다고 하더라도 일반적으로는 원자외선영역에서 충분한 빛을 낼 수 있는 실험실 표준광원을 구하기 힘들다는 어려운 점이 있다. 1990년대 이전까지 원자외선 영역의 감도 측정은 미국에 있는 SURF(Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility)의 electron synchrotron을 광원(light source)으로 이용하여 감도를 측정한 광다이오드를 다단계로 간접 비교 측정하는 방법을 사용하였다. 따라서 그 누적 부정확성이 15% 정도로 가시광 영역과 비교해 보았을 때 매우 부정확한 감도 측정을 할 수 밖에 없었다. 또한 이러한 방법은 망원경이 셔틀이나 인공위성에 실리기 이전에 행하여지는 것이므로, 발사 후나 미션 수행 중에 감도가 변할 수 있기 때문에 더욱 더 큰 부정확성이 발생할 수 있다(Kruk 1998).

1990년대 이후에 원자외선 영역의 감도 측정에 대한 새로운 방법으로 백색왜성을 표준광원으로 이용하는 방법이 개발되었다. 백색왜성은 별의 대기이론모델에 의한 플럭스 밀도(flux density)의 이론값과 가시광 영역에서 실제로 관측된 플럭스 밀도의 측정값이 1%범위에서 매우 잘 일치한다는 것이 알려져 있다. 따라서 원자외선 영역에 있어서도 백색왜성 플럭스 밀도 이론값은 실제 관측된 플럭스 밀도의 값을 대신할 수 있으며, 백색왜성은 원자외선 영역에서 표준광원의 역할을 하게 된다. 실제로 1994년에 HST FOS(Hubble Space Telescope, Faint Object Spectrograph)가 1150 ~ 8000Å영역에서 4개의 백색왜성을 관측하였으며, 관측된 전 파장영역에서 모델이론과 2% 이내의 차이를 보임을 확인하였다. 또한 HUT의 경우에도 820 ~ 1840Å영역에서 7개의 백색왜성을 관측하여 912 ~ 1840Å파장영역에서 모델이론과 5% 이내의 차이를 얻었다. 따라서 백색왜성모델을 이용한 원자외선 영역의

표 1. FIMS 데이터 로그.

관측 대상	관측 밴드영역	관측 시기	사용 데이터 양
G191B2B	S	2003.11.22 ~ 2003.12.12	13개 궤도
G191B2B	L	2003.11.22 ~ 2003.12.12	13개 궤도
Alpha-Cam	S	2003.11.22	1개 궤도
HD93521	S	2004.3.4 ~ 2004.5.4	16개 궤도
HD93521	L	2004.3.18 ~ 2004.3.19	3개 궤도

감도 측정은 기존의 방법에 비하여 훨씬 향상된 정확성을 주는 방법이 된다(Kruk 1998).

3. FIMS 관측 데이터 처리와 감도 측정 방법

FIMS의 감도 측정을 위하여 원자외선 영역에서 가장 중요한 표준광원 대상으로 알려진 G191B2B라는 백색왜성을 선정하여 양 밴드 영역(S-밴드, L-밴드)에서 모두 관측하였다. 그러나 G191B2B는 FIMS의 S-밴드영역에서 검출기의 감도에 비해 빛의 세기가 약하기 때문에 S-밴드 영역에서 보다 정확한 감도 측정을 위하여 별의 스펙트럼형 중에서 가장 뜨거운 O형의 별에 해당하는 Alpha-Cam과 HD93521을 추가로 관측하였다. Alpha-Cam은 S-밴드 영역에서만 관측하였으며, G191B2B와 Alpha-Cam의 관측시기와 4 ~ 5개월의 차이가 나는 HD93521의 경우에는 양 밴드 영역 모두 관측하여 두 기간 사이의 감도 측정 결과의 차이를 비교해 볼 수 있도록 하였다. 본 연구에서의 FIMS 감도 측정은 백색왜성의 이론모델을 통해 계산된 플럭스 밀도 값을 이용하지 않고, 여러 백색왜성의 관측과 실험실 감도 측정을 통하여 감도 측정이 매우 잘 되어 있다고 알려진 HUT의 데이터를 이용하였기 때문에, 위 3개의 관측 대상이 HUT에서 잘 관측되어 플럭스 밀도 값이 이미 계산되어 있다는 점이 관측 대상으로의 선정의 또 다른 이유가 된다. 표 1에 FIMS 관측 데이터 로그가 정리되어 있다.

FIMS는 자체적인 자세정보를 갖고 있지 않으며 위성체에서 제공하는 자세정보를 이용한다. 그런데 위성체의 자세정보는 2 ~ 4초 정도의 시간차(time offset)를 가지고 있으며, 그 값은 관측 궤도마다 조금씩 변한다. 이렇게 FIMS가 어떤 광자를 검출한 시각과 위성체의 자세정보 시각 사이의 차이는 실제로 광자가 입사된 방향과 FIMS에 기록되는 광자의 입사방향이 서로 달라지는 현상으로 나타나게 된다. 따라서 기록된 이벤트(event) 데이터와 자세정보 데이터를 그대로 이용하여 영상(image)을 그리면 실제 천체의 모습과 다른 왜곡된 영상을 얻게 된다. 크기가 없는 점광원(point source)인 별을 여러 번 반복 스캔하여 관측한 궤도 데이터의 경우에는 스캔 방향에 따라 별의 위치가 다르게 기록되어 결국 하나의 별이 두 개의 별로 나타나게 된다. 이러한 현상을 보정하기 위하여 image folding의 방법을 이용하여 각 관측 궤도 별로 시간차 값을 계산하고 그 값을 데이터 처리와 분석에 이용하였다(선광일 외 2004).

그림 1은 G191B2B의 L-밴드 영역 이미지상에서 G191B2B가 포함되는 별 지역(작은 직사각형)의 total count 스펙트럼 $F_S(\lambda)$ 와 밝은 별이 포함되어 있지 않은 배경 지역(큰 직사각형)의 total count 스펙트럼 $F_B(\lambda)$ 를 뽑아낸 지역범위를 보여준다. 별 지역에서 뽑아낸 스펙트럼에는 G191B2B 자체만의 count rate 스펙트럼 $S(\lambda)$ 외에도 전체 이미지상에 균일하게 포함되어 있는 배경의 count rate 스펙트럼 $B(\lambda)$ 도 포함되어 있기 때문에 이를 제거하기 위하여 밝은 별이 보이지 않는 배경 지역을

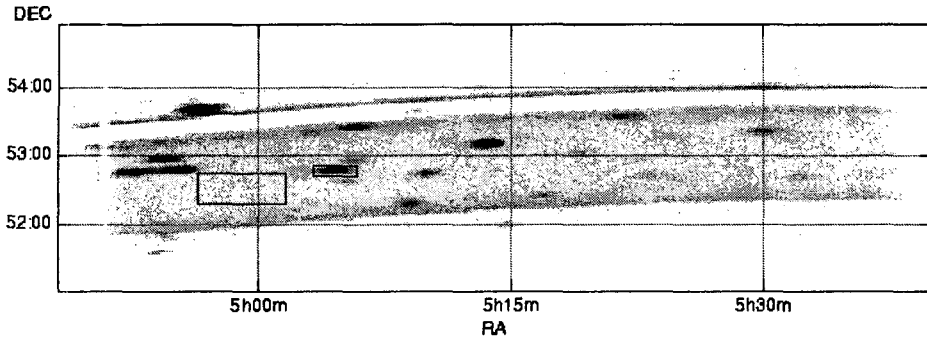


그림 1. FIMS 감도 측정을 위한 지역 선택의 예(G191B2B 관측).

선택하여 따로 배경의 스펙트럼을 뽑아낸 것이다. 별 지역의 평균 노출시간을 $\langle T_S \rangle$, 입체각을 Ω_S , 배경 지역의 평균 노출시간을 $\langle T_B \rangle$, 입체각을 Ω_B 라 하면 각 지역의 total count 스펙트럼은

$$F_S(\lambda) = S(\lambda) \times \langle T_S \rangle + B(\lambda) \times \langle T_S \rangle \times \Omega_S \quad (1)$$

$$F_B(\lambda) = B(\lambda) \times \langle T_B \rangle \times \Omega_B \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 감도 측정에 필요한 정보는 $S(\lambda)$ 이므로 위 두 식에서 $B(\lambda)$ 를 소거하여 $S(\lambda)$ 에 관해 정리하던

$$S(\lambda) = \frac{F_S(\lambda)}{\langle T_S \rangle} - \frac{F_B(\lambda) \times \Omega_S}{\langle T_B \rangle \times \Omega_B} \quad (3)$$

가 된다. 각 지역의 평균 노출시간은 FIMS가 슬릿의 너비방향으로 하늘을 스캔하였다는 사실을 이용하여 계산할 수 있다. 어느 지점의 노출시간은 그 지점이 슬릿 간격 안에 머문 시간으로 생각할 수 있으므로 슬릿의 너비방향 간격(5 arcmin)을 그 지점에서 슬릿이 통과할 때의 스캐닝 속도값으로 나누어준 값이 그 지점의 노출시간이 된다. 따라서 각 지역의 평균 노출시간은 슬릿이 각 지역을 지나 는 동안의 스캐닝 속도값을 평균하여 슬릿 간격을 그 평균 속도값으로 나누어 계산하면 된다. 이러한 방법으로 각 스캔에 대한 평균 노출시간을 모든 궤도관측에 대해서 전부 더하여 그 지역의 총 평균 노출시간을 계산하였다. 각 지역의 입체각 값은 그림 1과 같은 적경-적위 좌표평면상에 나타나는 해당지역의 면적값으로 근사하였다. 이렇게 구한 평균 노출시간과 입체각을 식 (3)에 대입하여 $S(\lambda)$ 를 계산하고, 이것을 HUT 데이터의 광자 밀도 스펙트럼 $S_{HUT}(\lambda)$ 로 나누어주면 최종적으로 계산하고자 하는 파장에 따른 유효면적

$$A_{\text{eff}}(\lambda) \text{ cm}^2 = \frac{S(\lambda) \text{ count/sec}}{S_{HUT}(\lambda) \text{ photons/cm}^2/\text{sec}} \quad (4)$$

을 얻을 수 있다. 유효면적 값은 단위시간 동안 단위면적에 떨어지는 광자의 수와 그러한 세기의 빛에 대해 검출기가 검출해내는 총 이벤트 수(count)의 비율을 나타내는 값으로, 그 값이 클수록 그 검출기의 감도가 더 좋다고 생각할 수 있다. 또한, 어떤 관측으로부터 얻은 단위시간당 count 값을 이렇게 계산된 유효면적 값으로 나누어주면 그 관측된 빛의 절대적인 세기 값인 광자밀도 값을 얻을 수 있게 된다.

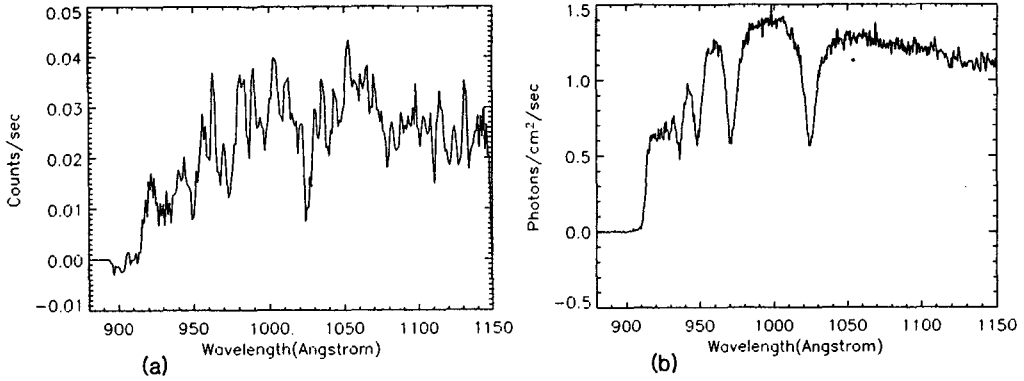


그림 2. G191B2B, S-밴드영역에서 (a) $S(\lambda)$, (b) $S_{HUT}(\lambda)$.

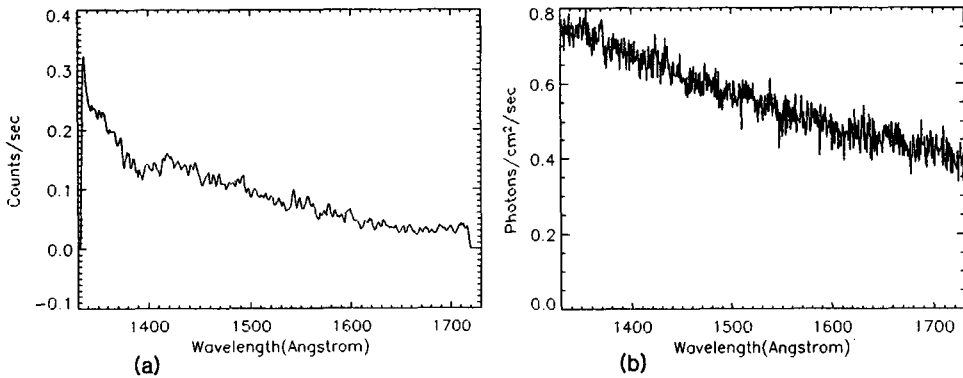


그림 3. G191B2B, L-밴드영역에서 (a) $S(\lambda)$, (b) $S_{HUT}(\lambda)$.

4. FIMS 감도 측정 결과

각 관측 대상에 대하여, 표 2는 각 지역의 총 평균 노출시간과 면적 계산 결과를, 그림 2~그림 6은 $S(\lambda)$ 계산 결과와 HUT 데이터의 광자 밀도 스펙트럼 $S_{HUT}(\lambda)$ 를 보여준다. 그림 7은 이를 통해 계산된 유효면적의 결과를 보여준다. 그림 7(a)의 S-밴드 영역의 경우, G191B2B와 Alpha-Cam으로부터의 계산된 유효면적 결과는 서로 비슷한 수준으로 나타나지만 HD93521로부터 계산한 유효면적은 전체적으로 작음을 알 수 있다. G191B2B와 Alpha-Cam은 2003년 11~12월의 비슷한 시기에 관측하였고 HD93521은 2004년 3~5월에 관측하였다는 점을 감안한다면, 두 관측시기 사이의 기간 동안 FIMS의 S-밴드 영역에서 검출기의 감도가 감소한 것으로 생각할 수 있다. 정량적으로 보았을 때 1000~1150Å 파장 영역에서 4~5개월 동안 대략 25~30%의 감소가 나타났다.

그림 7(b)의 L-밴드의 결과에서도, S-밴드 경우보다는 그 감소량이 작은 편이지만 HD93521의 결

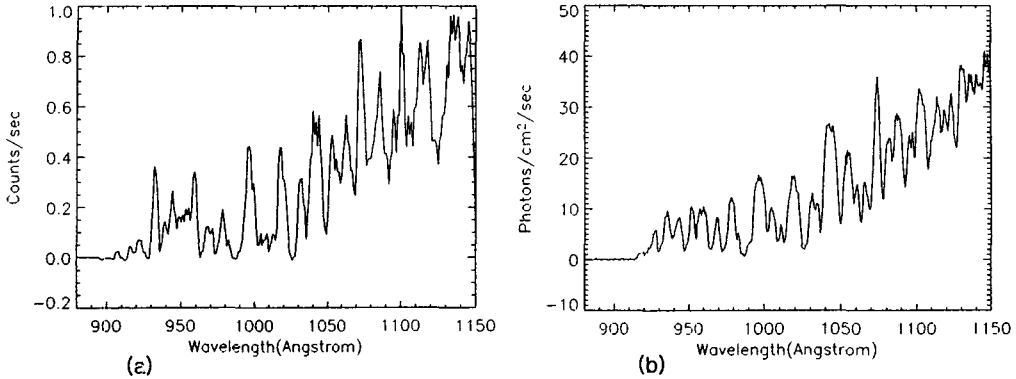


그림 4. Alpha-Cam, S-밴드영역에서 (a) $S(\lambda)$, (b) $S_{HUT}(\lambda)$.

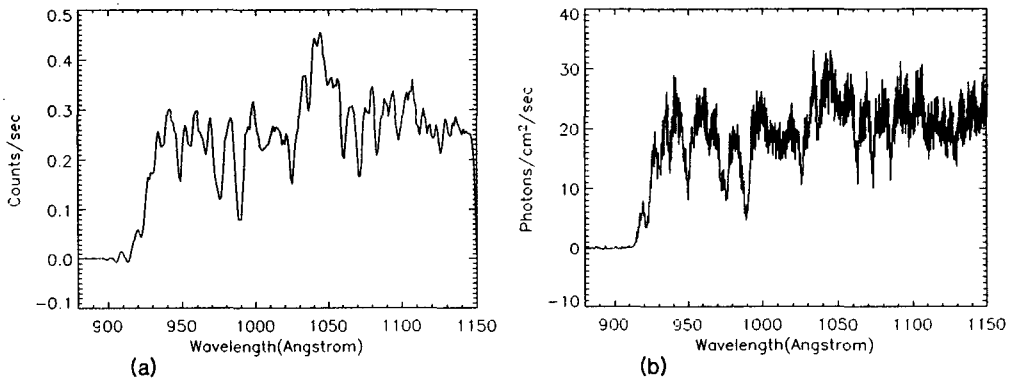


그림 5. HD93521, S-밴드영역에서 (a) $S(\lambda)$, (b) $S_{HUT}(\lambda)$.

과가 G191B2B보다 전 파장범위에서 작은 유효면적 값을 나타낸다. HD93521의 L-밴드 영역 관측은 2004년 3월에만 이루어졌으므로 3 ~ 4개월 동안 1400 ~ 1700Å 파장 영역에서 대략 15 ~ 25% 정도의 감소가 나타났다고 볼 수 있다.

5. 토의 및 결론

FIMS의 감도 측정의 결과로, S-밴드영역에서 검출기는 1000 ~ 1150Å 파장 범위에서 2003년 11 ~ 12월에는 0.02 ~ 0.025cm², 2004년 3 ~ 5월에는 0.013 ~ 0.015cm² 정도의 유효면적 값을 얻었다. 이에 반해 L-밴드영역에서 검출기는 1400 ~ 1700Å 파장 범위에서 2003년 11 ~ 12월에는 0.07 ~ 0.22cm², 2004년 3월에는 0.06 ~ 0.17cm² 정도의 유효면적 값을 얻었다. L-밴드영역이 S-밴드영역에 비해 5 ~ 10배 정도로 큰 유효면적 값을 가짐을 알 수 있으며, 두 밴드 영역 모두에서 관측

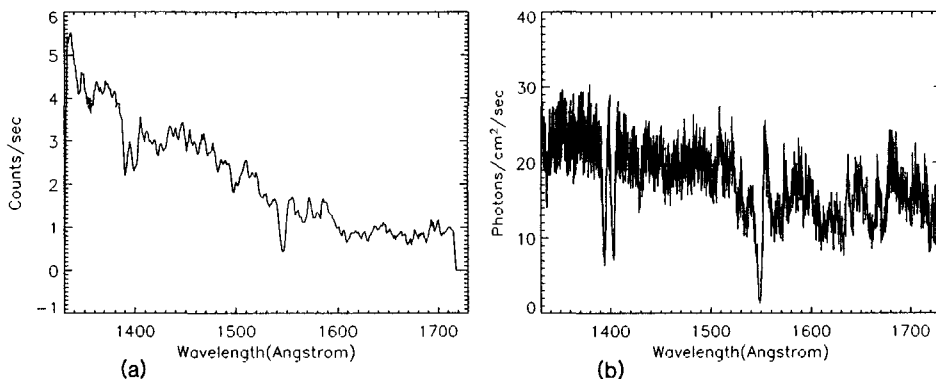


그림 6. HD93521, L-밴드영역에서 (a) $S(\lambda)$, (b) $S_{HUT}(\lambda)$.

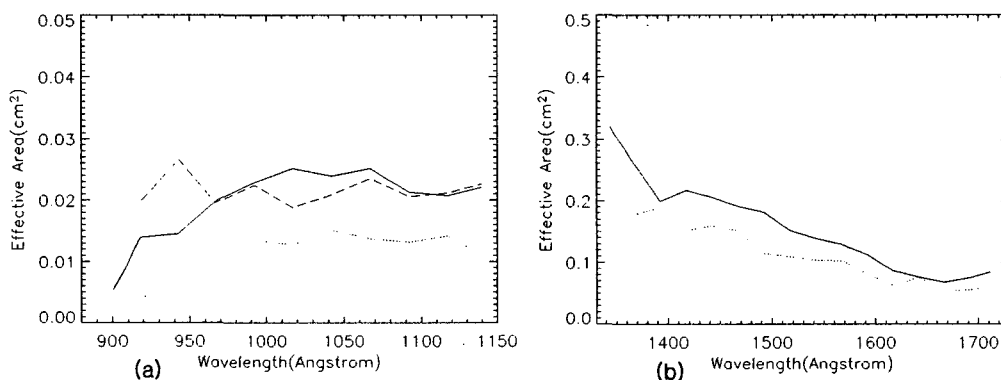


그림 7. FIMS 유효면적 계산 결과. (a) S-밴드영역, (b) L-밴드영역(실선: G191B2B, 굵은 점선: Alpha-Cam, 가는 점선: HD93521).

시기에 따라 유효면적 값의 감소가 나타났음을 확인하였다. S-밴드에서는 1000 ~ 1150Å 파장 범위에서 4 ~ 5개월 동안 대략 25 ~ 30%의 감소가 나타났고, L-밴드에서는 1400 ~ 1700Å 파장 범위에서 3 ~ 4개월 동안 15 ~ 25% 정도의 감소가 나타났다. 검출기의 감도 감소의 원인으로 위 관측기간 사이에 FIMS의 지구 오로라 관측 시 강한 빛에의 노출을 생각해 볼 수 있다. 앞으로도 감도 측정을 위한 추가적인 관측을 수행하여 검출기의 감도 감소를 재확인해 볼 필요성이 있다고 생각되며, 향후 FIMS의 운용에 있어서도 고려해야 할 점으로 생각된다.

본 연구의 감도 측정은 파장에 따라 세밀한 유효면적 값을 주지 못한다. FIMS의 파장 분해능은 1.8 ~ 3Å이며 HUT의 파장 분해능은 3Å이지만, 본 연구의 파장별 유효면적 값은 25Å 간격으로 평균하여 계산한 값이다. 파장에 대해 세밀한 계산을 할 수 없었던 이유는 FIMS의 파장에 대한 눈금 조절(calibration)이 아직 이루어지지 않아 파장 값의 틀어짐을 보정하지 못했기 때문이다. 그림 2, 그림

표 2. 각 지역의 총 평균 노출시간과 면적.

관측 대상	관측 밴드영역	$\langle T_S \rangle$	$\langle T_B \rangle$	Ω_S	Ω_B
G191B2B	S	450.9	457.4	0.14	0.70
G191B2B	L	452.9	469.8	0.14	0.52
Alpha-Cam	S	13.5	11.9	0.14	1.26
HD93521	S	248.0	246.8	0.27	0.99
HD93521	L	41.7	42.0	0.24	2.20

4, 그림 5, 그림 6의 스펙트럼을 자세히 살펴보면, FIMS 데이터에 나타나는 흡수선의 위치가 HUT에 나타나는 위치와 최대 3\AA 까지 차이가 남을 확인할 수 있다. 이렇게 급격하게 값이 변하는 흡수선의 위치에서는 두 데이터의 약간의 차이에도 유효면적의 계산 결과 값이 매우 크게 변하게 된다. 따라서 파장에 대해 25\AA 간격의 평균값으로 계산하여 이런 큰 변화가 나타나지 않도록 했다. 앞으로 FIMS의 파장에 대한 조절이 이루어진다면 그 보정을 통하여 파장에 대해 좀 더 세밀하고 정확한 감도 측정 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 HUT 데이터 대신에 FIMS에 적합한 백색왜성 대기모델을 결정하고 이로부터 계산한 백색왜성 이론값으로부터 직접 감도 측정을 한다면 더욱더 정확한 감도 측정을 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 선광일, 유광선, 육인수, 박장현, 남옥원, 한원용, 선종호, 민경욱, Edelstein, J., & Korpela, E. 2000, 한국우주과학회지, 17, 77
- 선광일, 육인수, 유광선, 이대회, 박장현, 진호, 선종호, 남옥원, 한원용, 민경욱, Korpela, E., Nishikida, K., & Edelstein, J. 2004, 한국우주과학회지, 21, 399
- 유광선, 선광일, 민경욱, Edelstein, J. 1998, 한국우주과학회지, 15, 359
- HUT data, <http://archive.stsci.edu/>
- Kruk, J. W. 1998, IAU Symp. No.189, p.67