

대기광 관측을 통한 과학기술위성 1호 원자외선분광기(FIMS)의 파장 보정

이대희^{1†}, 선광일¹, 박장현¹, 진호¹, 육인수¹, 남옥원¹, 한원용¹, 박재우², 이지나², 유광선², 민경욱²
¹한국천문연구원, ²한국과학기술원

FIMS WAVELENGTH CALIBRATION VIA AIRGLOW LINE OBSERVATIONS

Dae-Hee Lee^{1†}, Kwang-Il Seon¹, Jang-Hyun Park¹, Ho Jin¹, In-Soo Yuk¹, Uk-Won Nam¹,
Wonyong Han¹, Jae-Woo Park², Jina Lee², Kwang-Sun Ryu², and Kyoung-Wook Min²

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

²Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

E-mail: dhlee@kao.re.kr

(Received October 27, 2004; Accepted November 24, 2004)

요 약

2003년 9월 27일 과학기술위성 1호가 성공적으로 발사된 이래, 주탑재체인 원자외선분광기(Far-ultraviolet Imaging Spectrograph, FIMS)는 초기 운용 모드를 거쳐 현재까지 정상 관측을 수행하고 있다. FIMS는 전천관측을 통해 우리은하의 뜨거운 가스의 분포를 측정하고 있으며, 초신성 잔해 및 성간운의 수소 방출선, 그리고 지구 대기의 대기광 등에 대한 관측을 수행하고 있다. FIMS의 광학계 및 검출기는 지상에서 특성 평가 및 보정을 마쳤지만, 우주 발사 과정의 진동에 의한 효과, 우주 환경에의 노출 등에 의한 효과로 인해 궤도상 보정이 필수적이다. 한편, 지구 대기에는 수소 및 질소 분자 등이 태양빛을 받아 강한 방출선들을 내는데 이들은 파장 보정의 좋은 기준선들이 된다. 이 논문에서 우리는 FIMS로 대기광 방출선들을 관측하였고, 관측된 방출선을 검출기의 위치에 따라 모델 스펙트럼과 비교하여 그 차이를 구하였으며, 이것을 보정시킴으로써 FIMS의 장파장에서의 분해능 및 정확도를 향상시키는데 기여하였다.

ABSTRACT

Far-ultraviolet Imaging Spectrograph (FIMS) is the main payload of the Korea's first scientific micro satellite STSAT-1, which was launched at Sep. 27 2003 successfully. Major objective of FIMS is observing hot gas in the Galaxy in FUV bands to diagnose the energy flow models of the interstellar medium. Supernova remnants, molecular clouds, and Aurora emission in the geomagnetic pole regions are specific targets for pointing observation. Although the whole system was calibrated before launch, it is essential to perform on-orbit calibration for data analysis. For spectral calibration, we observed airglow lines in the atmosphere since they provide good spectral references. We identify and compare the observed airglow lines with model calculations, and correct the spectral distortion appeared in the detector system to improve the spectral resolution of the system.

Keywords: spectral calibration, airglow, FIMS

[†]corresponding author

1. 서 론

FIMS(Far-ultraviolet Imaging Spectrograph)는 2003년 9월 27일 발사된 과학기술위성 1호(STSAT-1)의 주탑지체로 우리은하에 분포하는 고온($10^{4.5} - 10^6$ K)의 플라즈마로부터 발생하는 원자외선 영역의 방출선 관측을 주 목적으로 하고 있다(KAO/KAIST 2003). 고온의 성간 플라즈마 연구는 다양한 이온화 상태로 존재하는 원소들이 식으면서 방출되는 주요 방출선(C III 977Å, O VI 1035Å, C IV 1550Å, He II 1640Å 등)을 관측함으로써 이루어지는데 지금까지 이들을 모두 포함하는 파장 대역으로 우주 전천 관측을 시도한 예가 없기 때문에 FIMS는 매우 독보적이라 할 수 있다(이대회 2001). 한편 우주의 보다 차가운 지역 관측으로는 성간운의 광해리지역(photodissociation region, PDR)에서 방출되는 수소분자의 형광방출선 등을 관측함으로써 PDR 지역의 물리적 현상 및 형상을 연구할 수 있다(Pak et al. 2003).

이러한 과학 연구를 정밀히 수행하기 위해 다른 광학 검출기와 마찬가지로 FIMS도 보정 과정을 거쳐야 한다. 일차적으로 지상에서 실험실 광원을 이용해 FIMS의 광학계와 검출기의 특성 및 사양을 결정하였다(KAO/KAIST 2003). 이에 관한 자세한 내용은 2장에서 기술하였다. 한편 FIMS는 우주용 검출기이므로 위성체에 실려 우주로 발사되어 우주 환경에 노출된 채로 작동하게 되어 있으므로 진동, 열, 및 우주방사선 효과 등에 의해 발생한 오차를 측정, 수정하는 궤도상 보정(on-orbit calibration)이 필수적이다. FIMS의 특성 보정으로는 크게 감도 보정(sensitivity calibration), 파장 보정(spectral calibration), 그리고 시야 보정(boresight calibration)이 있다. 감도 보정은 표준광원으로 이용되는 백색 왜성을 관측함으로써 수행된다(김일중 2004). 파장 보정은 지구의 대기광 방출선을 이용하여 수행될 수 있다. 대기의 수소 및 질소 분자는 태양빛을 받아 원자외선 영역에서 수많은 준위의 방출선을 내게 되는데 이 방출선들이 훌륭한 파장의 기준을 제공한다. 본 연구에서는 FIMS로 지구의 대기광 방출선을 관측하고, 이를 대기광 모델 스펙트럼과 비교함으로써 FIMS의 장파장 영역의 보정 과정과 그 결과를 제시하였다.

2. FIMS 시스템 성능

그림 1은 FIMS의 광학적 개념도를 그린 그림이다. 동일한 두개의 분광기를 수직으로 겹쳐놓은 모양으로 윗부분이 단파장(900~1150Å), 아랫부분이 장파장(1330~1730Å)이다. 2차원 검출기의 수평 방향으로는 파장 별로 초점이 맺히고 수직 방향으로는 1차원의 공간 이미지가 맺히는 새로운 개념의 분광기라 할 수 있다. 이러한 광학계를 설계하기 위해 광경로 및 spot diagram을 계산하였으며(유광선 외 2001), 제작 오차에 의한 성능의 감소를 계산하기 위해 한계 연구(tolerance study)를 수행하였다(선광일 외 2001, 2002). 최종적으로 완성된 FIMS는 오차 보정을 거쳐 특성 평가를 수행하였는데 그 결과는 표 1과 같다(KAO/KAIST 2003).

3. 대기광 관측 및 결과

FIMS의 파장 보정 분석을 위해 2003년 12월부터 2004년 8월까지 362개 orbit에 걸쳐 관측한 대기광 스펙트럼 데이터를 이용하였다. 관측된 데이터는 일차적으로 *stim correction*, *derotating*, *dewarping*, *masking* 등의 과정을 거쳐 파장(λ)과 슬릿각도(ϕ)에 따른 좌표로써 기록이 된다. 만약 천문학적 관측을 수행한 데이터라면 위성의 자세제어 결과와 결합하여 자세 정보까지 수록된 최종

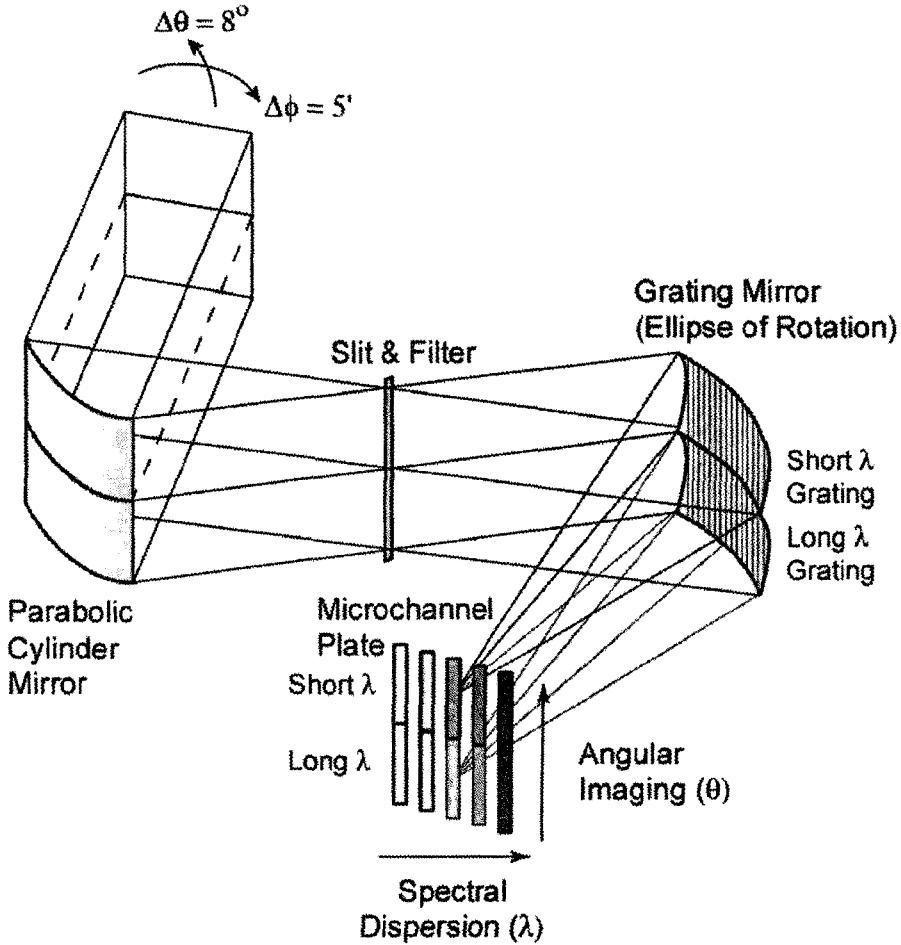


그림 1. FIMS 광학적 개념도.

데이터로 기록되게 된다. 이때 거치는 data processing은 미국 버클리 대학교의 공동 연구진과 한국의 FIMS 팀이 직접 개발한 IDL pipeline program을 사용하였다. FIMS 데이터는 일반적인 천문학 용 범용 software package를 사용하여 처리하기에는 특별히 고려해야하는 사항이 많기 때문에 자체 개발한 소프트웨어를 이용할 수 밖에 없다. 위에서 stim correction은 온도의 변화 등에 따른 photon drift의 보정, derotating은 anode 상의 좌표에서 detector 상의 좌표로의 변환, dewarping은 지상 calibration에 근거하여 detector 좌표(x, y)를 파장과 슬릿각도(λ, ϕ)에 따른 좌표로 변환, masking은 detector 가장자리 제거 및 단파장, 장파장의 분리 등의 역할을 한다. 다음 그림은 이러한 모든 과정을 거친 한 개의 orbit data 중 장파장 영역을 detector 상의 최종 좌표로 그린 것이다.

그림 2에서 뚜렷한 L band 영역의 대기광 스펙트럼이 보이는 것을 알 수 있다. 이들 방출선들은 대체적으로 선형적이나 y축, 즉 슬릿각도에 따라 조금씩 휘어져 있는 선들이 보임을 알 수 있다. 한

표 1. FIMS Optics design specifications.

Instrument Parameters	Short Wavelength Band	Long Wavelength Band
Band Pass	900 - 1150Å	1330 - 1730Å
Spectral Resolution	1.8Å($\lambda/\Delta\lambda \sim 750$) at 1035Å	3.0Å($\lambda/\Delta\lambda \sim 750$) at 1550Å
Angular Resolution	5' - 10'	5' - 10'
Field of View	4° × 5'	8° × 5'
Effective Grasp	$0.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ sr}$	$1.25 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ sr}$
Mirror Figure	Off-axis Parabolic Cylinder	Off-axis Parabolic Cylinder
Mirror Focal Length	125mm (F/2.2)	125mm (F/2.2)
Slit Height	2.75cm	2.75cm
Slit Width	150 μm	150 μm
Grating Figure	Ellipse of Rotation	Ellipse of Rotation
Ellipse Axis A	180.0mm	180.0mm
Ellipse Axis C	242.6mm	242.6mm
Toroidal Radius ρ	326.97mm	326.97mm
Ruling Constant G	2250 lines/mm	3000 lines/mm
Diffraction Order	Second Inside	First Inside
Slit to Grating	177.4mm	177.4mm
Grating to Detector	170.0mm	170.0mm
Input Angle α	21.9°	21.9°
Central Output Angle	-5.28°	-5.28°
Detector Size	2.5 × 2.5 cm^2	2.5 × 2.5 cm^2
Detector Pixels	512 × 512	512 × 512
Mirror Coating	B ₄ C	MgF ₂
Grating Coating	B ₄ C	MgF ₂
Photocathode	KBr	CsI + Grid
Fixed Filter	MgF ₂	CaF ₂

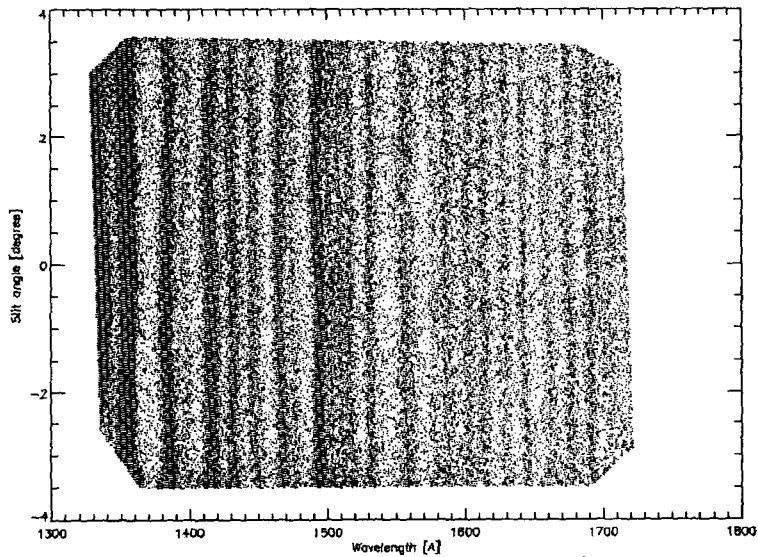


그림 2. FIMS로 관측한 대기광 스펙트럼의 L band detector 상의 이미지.

표 2. 슬릿각도에 따른 각 대기광 선의 FIMS 관측값과 AURIC 계산값과의 차이(단위: Å).

AURIC														
Wavelength	ϕ -3.5	ϕ -3.0	ϕ -2.5	ϕ -2.0	ϕ -1.5	ϕ -1.0	ϕ -0.5	ϕ 0.0	ϕ 0.5	ϕ 1.0	ϕ 1.5	ϕ 2.0	ϕ 2.5	ϕ 3.0
1356.0	-0.2	-2.6	-2.0	-1.5	-0.7	0.3	0.4	0.0	-0.8	-1.0	-1.6	-1.5	-1.6	-1.4
1385.3	0.8	0.0	-0.5	-1.4	-1.9	-2.1	-1.8	-1.2	-1.3	0.0	1.2	0.8	1.2	0.3
1398.0	0.1	-0.3	0.0	-0.7	-0.5	-1.3	0.7	-1.6	-2.9	-1.4	1.3	0.2	1.4	0.4
1431.2	0.4	-0.8	-0.7	-0.1	0.5	0.7	0.8	0.2	-0.1	-0.5	-0.7	-1.4	-0.7	0.0
1445.5	2.5	0.7	-0.2	-0.2	0.1	0.5	0.8	0.4	-0.1	0.8	0.3	0.6	0.9	-0.8
1465.4	2.5	1.7	1.1	0.3	-0.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-0.4	1.0	0.7	0.9	1.2
1475.5	0.7	0.0	0.2	-0.1	-0.4	-1.6	-1.5	-2.8	-2.3	-2.1	0.0	-1.0	-1.5	0.4
1493.1	0.4	-0.2	0.0	0.3	0.8	1.2	0.7	-0.7	-0.9	-1.8	0.3	-0.3	0.3	0.8
1509.4	0.9	0.1	-0.8	-1.2	-0.5	0.1	-0.2	-0.6	-0.1	-1.7	-1.0	-1.7	-1.0	1.2
1531.5	0.0	-0.4	-0.7	-1.0	-1.0	-1.1	-1.3	-0.8	0.2	0.4	-0.1	0.7	0.0	-0.4
1556.5	-0.2	-0.7	-1.0	-0.9	-0.5	-0.5	-1.5	-1.6	-1.5	-1.9	1.0	0.1	0.9	1.1
1577.4	0.7	-0.1	-0.8	-0.5	-0.1	-0.4	-0.8	-0.6	-0.2	-0.5	-0.5	-0.7	-0.5	0.8
1586.5	0.0	-0.3	0.1	-0.7	-0.1	-0.1	-1.1	-0.3	0.0	0.0	-0.5	-0.6	0.2	-0.6
1601.5	-0.6	-0.2	-0.5	-0.1	-0.1	-0.5	-0.9	-0.3	-0.8	-0.5	1.0	0.9	1.2	1.1
1628.1	0.2	-0.9	-1.0	-0.8	-0.6	-0.2	-0.3	-0.4	-0.9	-0.7	-0.5	0.5	0.2	0.8
1659.0	0.9	1.3	1.1	1.1	0.5	-0.4	-0.7	-1.0	-0.7	0.3	0.2	-0.2	0.2	0.2
1674.9	-0.6	-1.2	-0.8	0.0	0.1	-0.8	-1.7	-2.3	-2.5	-2.1	-0.2	-0.5	-0.2	-0.3
1691.1	-2.0	-2.5	-2.6	-2.5	-2.2	-2.0	-1.8	-0.4	-0.6	-1.2	-2.3	-1.2	-1.1	-2.1
1704.3	-	-0.3	-1.3	-2.0	-3.1	-1.3	-1.3	-0.7	-0.1	0.2	-1.2	-0.8	-1.2	-

orbit 관측에서 모든 시간에 걸쳐 대기광이 관측되는 것은 아니며 백색 잡음이 들어올 때도 있다. 그래서 우리는 각각의 orbit 데이터 중 그림 2와 같이 뚜렷한 대기광 선들이 보이는 부분만 선택하여 사용하였으며 나머지는 일일이 다 제거하여 신호대 잡음비를 높이게 하였다. 다음 그림 3은 이렇게 하여 더해진 데이터를 binning을 1Å으로 하여 파장에 따른 histogram으로 그린 것이다. 점선으로 그려진 스펙트럼은 대기광 시뮬레이션 프로그램 AURIC을 이용하여 계산한 것이다. AURIC의 input parameter로서 방출선의 FWHM을 3Å으로 설정하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 FIMS로 관측한 방출선과 AURIC 모델 계산 방출선이 아주 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 다만 O I 1356Å이나 N₂ 1691Å선이 약간 왜곡되어 중심에서 벗어나 있음을 알 수 있다. 우리는 이러한 spectral distortion을 보정하기 위해 다음과 같은 작업을 수행하였다.

4. 파장 보정 및 결과

Spectral distortion이 y축, 즉 슬릿각도 ϕ 에 따라 나타남으로 각각의 슬릿각도 ϕ 에 따른 파장의 왜곡을 구하기 위하여 우리는 detector를 ϕ 가 0.5도 씩 총 14섹션으로 나누었다. 각각 ϕ -3.5(-3.5 ~ -3.0), ϕ -3.0(-3.0 ~ -2.5), ϕ -2.5(-2.5 ~ -2.0), ϕ -2.0(-2.0 ~ -1.5), ϕ -1.5(-1.5 ~ -1.0), ϕ -1.0(-1.0 ~ -0.5), ϕ -0.5(-0.5 ~ 0.0), ϕ 0.0(0.0 ~ 0.5), ϕ 0.5(0.5 ~ 1.0), ϕ 1.0(1.0 ~ 1.5), ϕ 1.5(1.5 ~ 2.0), ϕ 2.0(2.0 ~ 2.5), ϕ 2.5(2.5 ~ 3.0), 그리고 ϕ 3.0(3.0 ~ 3.5)을 나타낸다. 이렇게 나뉘어진 각 섹션 별로 그림 3처럼 다시 histogram을 구하고 각각의 대기광 스펙트럼 라인들의 중심 파장을 Gaussian fitting 방법을 이용하여 측정한 후 AURIC의 모델 결과와 그 값을 비교하였다(표 2).

표 2에 따르면 ϕ 에 따라 최대 2.8Å까지 차이가 남을 알 수 있다. FIMS 데이터의 특성상 기존의 IDL이나 IRAF package에서는 필요에 꼭 맞는 파장 왜곡 보정 프로그램을 찾을 수 없었기 때문에 우

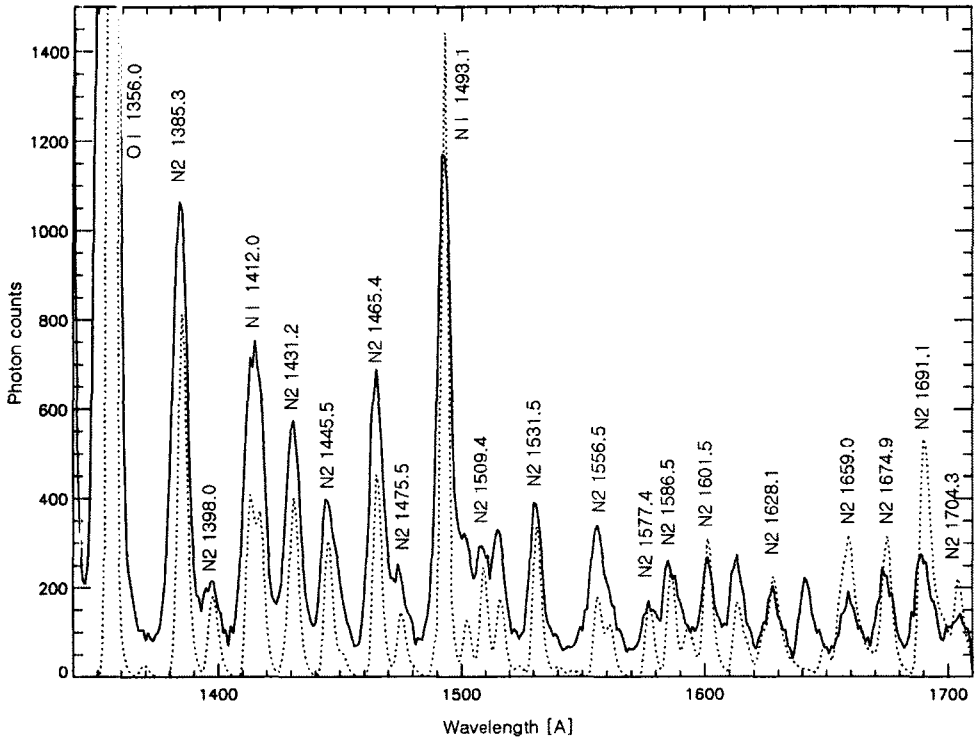


그림 3. FIMS로 관측한 대기광 방출선들(실선)과 AURIC 모델로 계산한 방출선들(점선).

리는 표 2이 근거하여 ϕ 에 따른 파장 왜곡을 보정해주는 IDL 프로그램을 직접 개발하여 데이터를 보정해 주었다. 이 프로그램에서 ϕ 에 따른 각 색선 별로 위의 표를 이용하여 파장에 따른 distortion을 polynomial fitting을 한 후에, 그 값이 0이 되도록, 즉 AURIC 모델 값과 FIMS 관측 값의 차이가 0이 되도록 data를 inverse interpolation 하는 작업을 수행한다. 그림 4는 이렇게 보정된 데이터를 다시 더하여 그림 3과 같이 histogram을 그린 것이다. 보정된 데이터가 뚜렷이 달라졌음을 알 수 있다. O I 1356Å과 N₂ 1691Å선이 모델과 같은 중심 파장을 갖도록 바뀌었으며 N₂ 1398Å, N₂ 1475Å, N₂ 1509Å선이 보정전보다 확실히 구별되어지는 것을 볼 수 있다. 또한 보정 전에는 분해할 수 없었던 N₂ 1556Å선과 그 옆의 선을 보정 후에는 분해됨을 알 수 있다. 그림 4에서 파장이 짧은 쪽으로 갈수록 방출선의 FWHM이 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 FIMS가 1600Å 근처에서 제일 좋은 분해능을 갖기 때문이다(KAO/KAIST 2003).

5. 결 론

우주에서 관측하는 탑재기기는 그 특성상 지상에서의 calibration 뿐만 아니라 우주 공간에서의 on-orbit calibration이 매우 중요하다. 특히 spectral calibration이 선행되어야지만 sensitivity calibration이 수행될 수 있으므로 파장의 보정 작업은 더욱 중요하다고 할 수 있다. 우리는 과학기술위

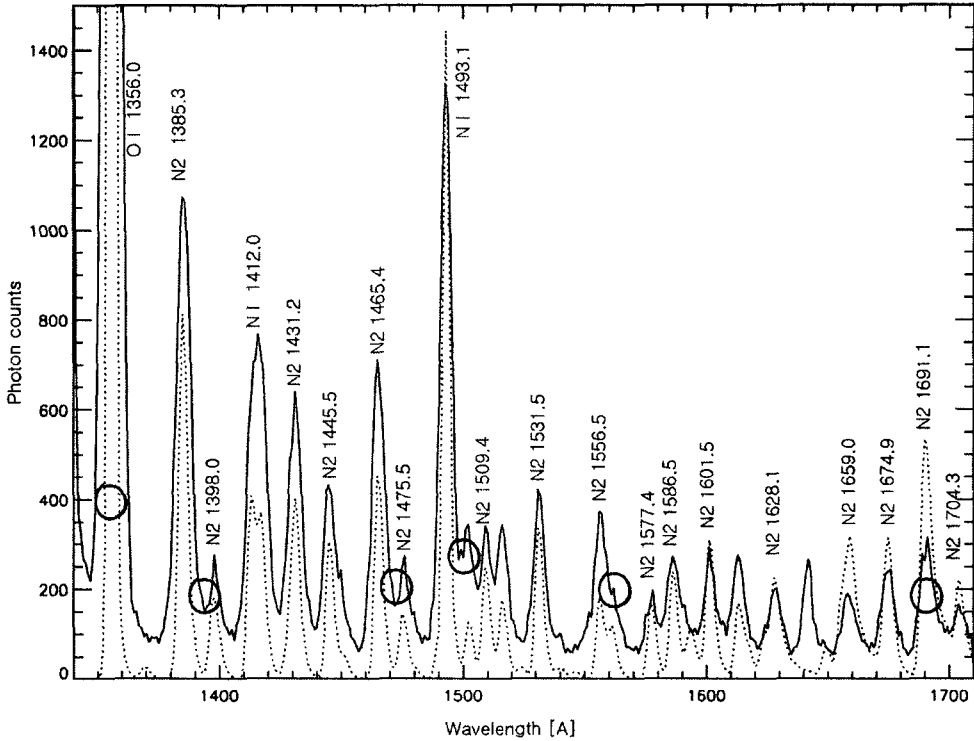


그림 4. 파장 보정된 대기광 선들(실선)과 AURIC 모델로 계산한 선들(점선). 보정된 후 차이가 확연히 드러난 곳을 원으로 표시하였다.

성 1호의 과학탑재체 원자외선분광기를 이용해 대기광을 관측함으로써 원자외선분광기의 장파장에 대한 보정을 수행하였다. FIMS detector의 슬릿각도에 따라 관측된 대기광 선과 모델 선을 비교함으로써 슬릿각도에 따른 왜곡을 보정하고 파장의 절대적인 값을 결정할 수 있었다. 파장 보정 전과 보정 후의 L band의 파장에 따른 FWHM, 즉 분해능을 비교해본 결과, 파장 보정 전에 FIMS의 파장 분해능이 $\lambda = 1400\text{\AA}$ 근처에서 4.1\AA 이고, 파장 보정 후에는 3.8\AA 이며, $\lambda = 1500\text{\AA}$ 근처에서 3.8\AA 에서 3.5\AA 으로, 그리고 1600\AA 근처에서 3.5\AA 에서 3.3\AA 으로 향상되어 전체적으로 약 10%의 파장 분해능이 향상되었음을 알 수 있다.

참고문헌

김일중 2004, 석사학위논문, 한국과학기술원
 선광일, 육인수, 유광선, 박장현, 진호, 선종호, 오승한, 이진근, 이대희, 남옥원, 한원용, 민경욱, 이우백, Edelstein, J., & Korpela, E. 2001, 한국우주과학회지, 18, 219
 선광일, 육인수, 남옥원, 진호, 박장현, 이진근, 유광선, 이대희, 오승한, 공경남, 한원용, 민경욱, Edelstein, J., & Korpela, E. 2002, 한국우주과학회지, 19, 283

- 유광선, 육인수,선광일,이운우,남옥원,신종호,홍소진,이대회,진호,오승한,민경욱,한원용,박장현, Edestein, J., & Korpela, E. 2001, 한국우주과학회지, 18, 239
- 이대회 2001, 박사학위논문, 한국과학기술원
- KAO/KAIST 2003, FIMS User Guide
- Pak, S., Yu, Y., Lee, D.-H., Min, K. W., & van Dishoeck, E. F. 2003, JKPS, 42, S88