

## STP78-1 위성의 극자외선/원자외선 낮대기광 관측자료를 이용한 AURIC 모델의 검증

강미지, 김정한, 김용하<sup>†</sup>  
충남대학교 천문우주과학과

### VALIDATION OF AURIC MODEL WITH EUV/FUV DAYGLOW OBSERVATION OF STP78-1 SATELLITE

Mi Ji Kang, Jeong-Han Kim, and Yong Ha Kim<sup>†</sup>

Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-335, Korea  
E-mail: mirha@cnu.ac.kr

(Received November 22, 2006; Accepted December 19, 2006)

#### 요 약

STP78-1 위성이 관측한 낮대기광 중에서 OII 834Å, OI 989Å, OI 1027Å, NII 1085Å, NI 1134Å, NI 1200Å, OI 1304Å, OI 1356Å 대기광을 사용하여 AURIC 모델의 EUV/FUV 대기광 계산을 검증하였다. 관측값과 모델 계산값을 비교한 결과, OII 834Å, OI 1027Å, NI 1200Å, OI 1304Å 대기광은 약 20% 이내로 일치하였다. 그러나 OI 989Å, NII 1085Å, NI 1134Å 대기광은 각각 관측치의 42%, 74%, 45%에 그쳐, 심각한 차이를 보였다. 그 원인으로 AURIC 모델이 OI 989Å 대기광의 경우 복사 전달 효과를 제대로 계산하지 못한 것으로, NI 1134Å 대기광은 원천 과정이 실제 대기의 상태를 반영하지 못한 것으로 판단되었다. NII 1085Å 대기광에 대해서는 AURIC 모델 자체의 결함보다는 입력된 태양 극자외선 플럭스의 변화에 기인하는 것으로 추정된다. 또한 STP78-1 위성의 위방향 대기광 관측값과 비교했을 때 AURIC 모델값이 전반적으로 작게 계산되는데, 이는 위성 고도 아래에서 입사하는 대기광의 기여를 AURIC 모델이 포함시키지 않았기 때문으로 판단된다. 이런 효과는 특히 OI 989Å, NI 1134Å, NI 1200Å 대기광에 크게 나타났다. 한편 STP78-1 위성이 관측한 위도별 OII 834Å 대기광과 비교했을 때, AURIC 모델의 계산 값은 관측된 위도별 변화와 특히 중위도 지역에서 상당한 차이를 보였다. 이는 AURIC 모델 계산 시 사용되는 중성대기 모델 MSISE-90이 관측 당시에 진행된 오로라 폭풍에 의해 변화된 산소원자 밀도를 제대로 반영하지 못한 것으로 추정된다. 이 논문에서 밝혀진 AURIC 모델의 EUV/FUV 대기광 계산의 문제점들은 향후 AURIC 모델의 개선에 반영되어야 할 것이다.

#### ABSTRACT

We carried out a validation study on AURIC FUV/EUV dayglow calculation with OII 834Å, OI 989Å, OI 1027Å, NII 1085Å, NI 1134Å, NI 1200Å, OI 1304Å, OI 1356Å dayglows observed by STP78-1 satellite. Comparison between calculated and observed values indicates that they are in agreement within about 20% for dayglows of OII 834Å, OI 1027Å, NI 1200Å, OI 1304Å. However, the calculated intensities of OI 989Å, NII 1085Å and NI 1134Å are only 42, 74 and 45% of the observed values, respectively, showing serious differences from the observation. It was surmised that

<sup>†</sup>corresponding author

the differences in OI 989Å and NI 1134Å are due to incomplete calculation of radiative transfer and uncertain photochemical processes in AURIC model, respectively. The difference in NII 1085Å is conjectured to be due to variation of the input solar EUV flux rather than due to AURIC model itself. For up-looking dayglows from the satellite, the calculated values from AURIC are all less than those of STP78-1, which may imply that AURIC model does not include dayglow contribution from regions below the satellite altitude when it computes dayglows in up-looking direction. The differences are particularly serious for OI 989Å, NI 1134Å, NI 1200Å dayglows. The calculated latitudinal variation of OII 834Å dayglow is also significantly different from the observed one, especially at mid-latitude regions. This may be due to inability of MSISE-90 (in input of AURIC) to simulate oxygen atom densities at mid-latitudes during auroral storms at those days of STP78-1 observations. Our findings of the validation study should be resolved when AURIC model is revised in future.

*Keywords:* airglow, thermosphere, extreme ultraviolet, far ultraviolet

## 1. 서 론

열권은 산소나 질소 분자들이 태양 극자외선(Extreme Ultraviolet, EUV)을 흡수하여 고도가 증가함에 따라 온도가 급격히 상승하는 대기층이다. 태양 극자외선의 세기는 태양활동에 따라 수시로 변화하기 때문에 열권의 상태도 그에 따라 민감하게 변화한다. 열권을 구성하는 주요 구성 성분은  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O$ 이며 그 외 미량 성분으로  $NO$ ,  $N$ ,  $H$ ,  $He$ ,  $Ar$ , 그리고  $CO_2$  등이 있다. 이들 원자나 분자는 오로라나 대기광을 방출하는데, 직접적인 측정이 어려운 열권 내의 화학적 과정이나 열수지, 동역학적 특성 등에 대한 중요한 단서를 제공한다.

대기광에 대한 연구는 1920년대 Rayleigh에 의해 개척되었으며 이를 기리기 위해 대기광의 세기 단위로  $10^6 \text{ photon/cm}^2/\text{s}$ 을 1Rayleigh(R)로 정의하여 사용하고 있다(cf. Rees 1989). 열권에서 방출되는 대기광을 구체적으로 계산하는 여러 가지 대기 복사 모델 중에서 AURIC(Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code)은 가장 최근에 Strickland et al.(1999)에 의해 주로 자외선 영역의 대기광을 계산할 수 있도록 개발된 이론적 수치 모델이다. 하지만 이론적인 모델은 실제 자연현상을 얼마나 정확히 반영하는지에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 관측자료와 비교하는 과정이 반드시 필요하다. 특히 극자외선 영역(1200Å보다 짧은 파장)에서의 대기광 이론은 잘 정립되지 않은 상태이다(Meier 1991).

극자외선(Extreme Ultraviolet) 영역의 대기광은 1970년대에 처음 관측된 이래, 1990년대에 미국 우주왕복선에 탑재된 Hopkins Ultraviolet Telescope(HUT)에 의해 단시간 관측되었고(Bishop & Feldman 2003), Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer(FUSE)에 의해 한 지점에서 관측된 바 있다(Feldman et al. 2001). 또한 Advanced Research and Global Observation Satellite(ARGOS) 위성이 1999년 발사되어 이 영역의 대기광을 관측하였으나 그 자료는 공개되지 않고 있다. 이외에 분광

계를 탑재한 몇몇 로켓 실험이 있었지만, 좁은 관측 영역과 짧은 관측 시간으로 인한 낮은 신호 대 잡음비 때문에 관측 자료의 활용이 매우 제한될 수밖에 없다(Feldman et al. 2001). 이에 반해 1979년에 STP78-1(Space Test Program 1978-1) 위성이 관측한 극자외선 대기광 자료는 전지구에 걸쳐 여러 방향의 대기광 세기가 자세히 포함되어 있다(Chakrabarti et al. 1983).

이 논문에서는 AURIC 모델을 검증하기 위해 1979년 3월 22일 STP78-1 위성의 관측 자료 중에 800 ~ 1400Å 파장영역의 밝은 8개의 대기 방출선 자료를 비교 대상으로 사용하였다. 이 논문은 먼저 극자외선/원자외선(EUV/FUV) 대기광들의 생성 기작을 구체적으로 조사한 다음, 검증 대상인 AURIC 모델의 구조와 연산과정을 파악하고 이를 검증하는 데 사용된 미공군 STP78-1 위성의 관측이 어떻게 수행되었는지에 대해 기술하였다. 그 다음 AURIC 모델의 검증은 두 단계로 수행되었다. 첫 단계로, 태양 극자외선 플럭스와 열권 산소원자 밀도를 변화시켜 OI 1356Å 대기광에 대한 AURIC 모델의 결과를 STP78-1 위성의 관측 자료와 일치시켰다. 이는 OI 1356Å 대기광의 생성과정이 가장 잘 알려져 있기 때문에 이를 기준으로 관측 당시의 열권 산소원자 밀도와 태양 극자외선 플럭스값을 추정하기 위한 것이다. 둘째 단계로, 이 추정된 입력값을 사용하여 나머지 7개 파장의 대기광 계산 값들과 STP78-1 위성의 관측 자료를 비교하였다. 이 대기광들의 비교 결과는 AURIC 모델의 불확실 정도를 나타내주는 척도로 해석하여, 이를 바탕으로 이 논문의 결론에서 AURIC 모델의 개선방향을 제시하였다.

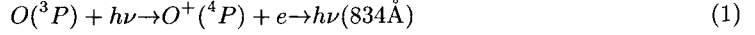
## 2. 극자외선/원자외선 대기광(EUV/FUV Airglow)

대기광은 대기 중의 원자나 분자가 태양 에너지에 의해 높은 에너지 상태로 들뜬 후 다시 가라앉을 때 방출하는 복사선이며, 가시광선, 적외선, 자외선에 속하는 다양한 파장의 대기광이 고층대기에서 희미하게 방출되고 있다. 오로라는 지구 자기권으로부터 유입되는 고에너지 입자에 의해 발생하므로 극지방에 국한되지만, 대기광은 일반적으로 태양 복사를 에너지원으로 하기 때문에 전지구적인 현상이다. 태양 자외선이나 극자외선 등 고에너지 광자들이 열권에서 흡수되면서 구성 원자나 분자를 여기시키는데, 희박한 밀도로 인해 이들이 대부분 복사천이로 되가라 앉으면서 대기광이 방출된다. 대기광은 방출 시간에 따라 낮대기광(dayglow), 박명대기광(twilightglow), 밤대기광(nightglow)으로 구분한다. 그 중 열권과 이온권의 특징, 외부에너지 유입에 대한 반응을 포함하는 낮대기광 스펙트럼은 중성 열권 대기의 광전자 충돌 여기, 태양빛의 공명산란, 광이온화/광해리 여기과정에 의해 방출된다.

산소원자(OI)와 산소 이온(OII), 질소 원자(NI)와 질소 이온(NII)에서 방출되는 대기광 스펙트럼은 800 ~ 1400Å 사이의 자외선 영역에서 N<sub>2</sub> Lyman-Birge-Hopfield(LBH) band system 다음으로 가장 중요한 낮대기광들이다. 이 논문에서 AURIC 모델의 검증을 위해 사용한 8개 대기광의 주요 생성기작을 파장 순으로 다음에 정리하였다.

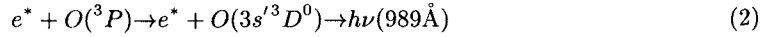
(1) OII 834Å은 산소 이온(OII)에서 600R 이상의 세기로 방출되는 밝은 낮대기광이다. OII의 바닥상태는  $2s^2 2p^3 \ ^4S^0$ 이며 OII 834Å 대기광은  $2s 2p^4 \ ^4P$  상태에서 바닥 상태로 떨어질 때 방출되는 삼중선(triplet; 834.462, 833.332, 832.762Å)이다. STP78-1 분광계는 삼중선을 분해하지 못하고 통합 세기만을 측정하였다. OII 834Å 대기광을 방출하는 주요 원천은 태양 극자외선이 산소원자에 흡수

되면서 여기된  $O^+$ 를 생성하는 광이온화이고(Feldman et al. 1981),



이로 인한  $O^+(^4P)$ 의 초기 생성은 고도 200km 아래에서 주로 일어난다. 두 번째 원천은 광전자 충돌에 의한 이온화이며, 태양 방출선의  $O^+$ 에 의한 공명산란이 세 번째 원천으로 아주 약하다.

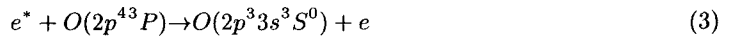
(2) OI 989Å 대기광은 각각 잘 구분되는 단일선(singlet), 이중선(doublet), 삼중선(triplet)으로 구성된 육중선(sextuplet)이다. OI 989Å 다중선은  $2p^3 \ ^2D^0 \ 3s' \ ^3D^0$ 의 여기된 산소원자가 바닥상태인  $2p^4 \ ^3P$ 로 천이하면서 방출된다. 태양빛이 989Å에서는 약하기 때문에 공명산란의 양은 매우 적고, 989Å 낮대기광의 중요한 여기 원천은 광전자 충돌



이다. 광전자에 의한 산소원자  $3s' \ ^3D^0$  준위의 초기 체적 생성률은 150 ~ 200km 고도에서 최대가 되는 Chapman profile과 유사하다. 처음 생성된 989Å 광자는 주변 열권의 산소원자로 인해 공명 산란된다. 989Å 대기광 광자는 보통 대기의 꼭대기에서 탈출하거나, 대기 중의  $O_2$ 에 의해 흡수되어 다른 상태로 분기되기 전에 약 5000번 공명 산란될 것으로 추정된다(Gladstone et al. 1987).

(3) 파장 1027Å에서의 대기광은 산소원자 다중선이나 수소  $L_\beta$ 로 확인되어 왔는데, Meier et al.(1987)의 연구로 그 대부분이  $3d \ ^3D^0$  산소원자에서 바닥상태로 떨어질 때 방출된다는 것을 알게 되었다. 대기광에서 관측된 OI 1027Å 대기광은  $2p^3 \ 3d \ ^3D^0 \rightarrow 2p^4 \ ^3P$ 의 천이과정으로 발생하며 단일선, 이중선, 삼중선으로 이루어진 육중선이다. 하지만 OI 989Å 대기광과는 달리 그 구분이 명확하지 않다. OI 1027Å의 주요 생성 과정은 광전자 충돌에 의한 산소원자의 여기와 열권의 산소원자에 의한 태양 수소  $L_\beta$ 의 산란이다. 낮 동안의 광전자 충돌 여기는 산소원자에 의한 실질적인 다중 산란이 일어나는 고도 200km보다 아래 지역에서 일어난다.

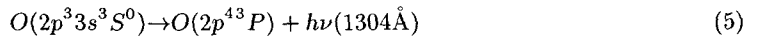
(4) OI 1304Å은 지구의 낮대기광과 오로라 스펙트럼에서 가장 친숙한 분광선의 하나이다. 전자 충돌 여기 과정에서 나오는 1304Å 대기광은  $2p^3 \ 3s \ ^3S^0 \rightarrow 2p^4 \ ^3P$ 의 천이로 방출되는 삼중선으로 원자외선 영역에서 가장 밝은 10 ~ 15kR의 세기를 가진다. 1304Å 대기광은 광전자 충돌 여기과정



으로 바닥상태의 산소원자가 여기되거나,



과정으로 산소분자  $O_2$ 가 해리되어 생성된  $2p^3 \ 3s \ ^3S^0$  상태의 산소원자가 바닥상태로 천이되면서 방출된다(cf. Tayal 2004).

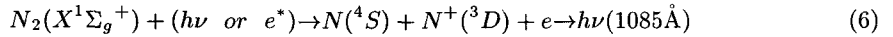


광전자 충돌로 여기된 산소원자의 90%는 FUV 영역의 대기광으로 방출된다(Kanik et al. 2003). FUV 스펙트럼에서 1304Å 대기광이 가장 두드러지기 때문에, 1304Å 삼중선은 산소원자의 밀도를 추정하는 데 사용될 수 있을 것으로 오랫동안 생각되었다(Meier 1991).

(5) OI 1356Å( $2p^4 \ ^3P - 2p^3 \ 3s \ ^5S^0$ ) 방출선은 연구가 가장 활발했던 대기광 중 하나이다. OI 1356Å 대기광은 주로 대기에서 광전자 충돌에 의해 생성되며 다중 산란의 기여는 적다(Huffman

1992). OI 1356Å은 약 1kR의 세기로 관측되며, 이 과정에서 태양빛의 형광 현상은 낮대기광에서의 광전자 충돌 여기에 비해 약하다. O<sub>2</sub> 흡수 고도, 약 110km 위의 열권에 산소원자가 풍부하기 때문에 OI 1356Å 대기광의 광학적 깊이는 선 중심에서 거의 1에 달한다. 따라서 정확한 복사 전달 계산을 위해서는 다중산란을 고려해야만 한다. 하지만 다른 대기광에 비해 다중산란 효과가 가장 적기 때문에 관측된 대기광 분석이 용이하다.

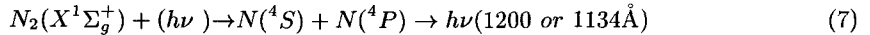
(6) 질소 이온(NII)의 가장 밝은 낮대기광은 2143, 1085, 916Å에서 방출된다. N<sup>+</sup>의 밀도는 이온권에서 매우 낮아 NII 방출선들의 모델링에서는 다중산란은 완전히 무시된다. NII 1085Å 대기광은 2s 2p<sup>3</sup> <sup>3</sup>D<sup>0</sup> 상태에서 바닥상태인 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup> <sup>3</sup>P로 떨어지면서 방출된다. N<sup>+</sup>(<sup>3</sup>D) 상태는 광전자 충돌이나 태양빛에 의해 N<sub>2</sub> 분자가 해리되어 생성되며,



약 500R의 세기를 가지고 방출된다(Meier 1991).

(7) 질소 원자는 FUV 영역에서 몇 개의 밝은 대기광(1493, 1200, 1134Å)과 EUV 영역에서 약하지만 많은 대기광을 가진다. FUV 영역에 있는 밝은 대기광들은 N과 N<sub>2</sub>의 광전자 충돌과 N<sub>2</sub>의 광해리 여기에 의해 생성된다. 태양 스펙트럼은 1200Å과 1134Å에서 약하기 때문에 태양빛의 공명산란은 중요한 원천이 아니다. 그러나 열권의 질소 원자 밀도가 이 두 과정의 광학적 깊이를 충분히 두껍게 하기 때문에 다중산란은 중요하다. 질소 원자의 바닥상태는 2s<sup>2</sup> 2p<sup>3</sup> <sup>4</sup>S이다. NI 1134Å 대기광은 삼중선이며, 2p<sup>4</sup> <sup>4</sup>P → 2s<sup>2</sup> 2p<sup>3</sup> <sup>4</sup>S의 천이과정에서 생성된다. 이 삼중선들의 복사천이 문제는 N<sub>2</sub>로부터 해리되어서 생성되는 부분 때문에 복잡해진다.

(8) NI 1200Å 대기광은 NI 1134Å과 마찬가지로 N<sub>2</sub>의 해리여기 과정을 거쳐 발생하는데 천이 과정이 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup> 3s <sup>4</sup>P → 2s<sup>2</sup> 2p<sup>3</sup> <sup>4</sup>S으로 약간 다르다.



N<sub>2</sub> 분자가 해리될 때 생성되는 N 원자는 수만 도로 뜨거워서 이들이 방출하는 선의 도플러 폭은 매우 넓다. 이런 해리에 따른 선폭이 주위의 대기 흡수폭보다 훨씬 크기 때문에, 결과적으로 광학적 깊이가 얇아져서 다중 산란은 중요하지 않다. N<sub>2</sub> 해리로부터 생성되는 방출은 열권 N<sub>2</sub> 밀도의 높이척도가 적용되어 광학적 깊이가 얇은 고도 프로파일을 갖는다. NI 1200Å 대기광은 질소 원자에서 방출되는 가장 밝은 대기광으로서 1.5kR 이상일 때도 있지만, 근처에 20kR 이상의 매우 강한 수소 L<sub>α</sub> 1216Å이 있기 때문에 정확한 측정이 어렵다.

### 3. STP78-1 탑재 극자외선 분광계

이 논문에 사용된 관측 자료는 미국 캘리포니아 대학 버클리 캠퍼스에서 개발하여 STP78-1 위성 탑재된 극자외선 분광계로부터 얻어졌다(Bowyer et al. 1981). 이 분광계는 폭이 0.5mm인 직사각형 슬릿, 오목한 반사 회절격자, Rowland 원통에 놓인 두 개의 EUV 탐지기로 이루어져 있다. EUV 탐지기는 모두 Rowland 원통 선상에 놓여 있지만, 하나는 위, 하나는 아래에 있다. 안쪽에 있는 첫 번째 스펙트럼은 10.4Å/mm의 역분산과 8Å의 분해능을 제공한다. 슬릿 높이 17.4mm와 직경 48mm 회절격자의 조합은 7° × 9° 순간 시야를 확보하고, 인공위성의 회전(spin)을 고려하면 전체 폭

$18^\circ \times 9^\circ$  관측 시야를 갖는다. 탐지기의 길이가 분산축을 따라서 65mm이기 때문에 650Å 영역의 스펙트럼을 동시에 측정할 수 있다. 이 분광계는 비행 전 실험실에서 영점조정되었고 500 ~ 700Å 범위에서 약  $10^{-1}$  count/sec/R의 최대 감도를 가지는 것으로 측정되었고, 이 감도는 350Å과 1350Å에서 약  $10^{-2}$  count/sec/R까지 천천히 줄어든다. 감도측정의 절대 영점 오차는 20%가 된다고 판단되었다(Chakrabarti et al. 1983). 분광 분해능은 8Å과 16Å 모두 선택가능한데 이 논문에서 사용한 위성 관측자료는 8Å의 분광 분해능을 사용한 것이다.

분광계는 위성의 회전축에 설치되었고, 이 축은 11RPM의 속도로 궤도면과 수직으로 회전한다. 분광계의 시선방향은 회전축에 대해  $120^\circ$  기울어져 있기 때문에, 정오 자정 극궤도 상에서 분광계의 시선 방향은 태양으로부터 최소  $30^\circ$  이상 떨어지게 된다. 또한 위성의 회전 축이 궤도축과 나란하므로 분광계의 시선 방향은 천정각이  $30^\circ$ 와  $120^\circ$  사이의 원뿔 형태로 지구와 우주를 교대로 지향하게 된다. 이 분광계가 탑재된 미공군 STP78-1 위성은 1979년 2월에 발사되었고 정오-자정 면(1200-0000LT)에 놓여 하루에  $1^\circ$ 씩 옆으로 움직이는 태양동기궤도를 선회하고 있다. 이 위성의 고도는 600km이며, 궤도경사각은  $97.7^\circ$ 로 극궤도에 가깝고 96분의 궤도 주기를 가진다. 위성에 탑재된 분광계는 1979년 3월에서 1980년 3월까지 지구의 UV 영역 대기광을 관측하였다(Chakrabarti et al. 1983, Galand et al. 2002). 이 논문에서는 Chakrabarti et al.(1983)에 발표된 대기광 중에서 800 ~ 1400Å 파장영역의 8개 대기광에 대해 AURIC 모델 결과와 비교하였다.

#### 4. AURIC MODEL

AURIC 모델은 광전자 플럭스의 계산과 낮대기광 및 밤대기광과 관련된 화학반응, 분광복사의 발생 등을 계산한다. 모델 계산 결과는 광전자 플럭스와 체적방출률, 선택된 방출선의 limb profile, 분광복사, 이온과 중성입자의 밀도 등을 포함한다. AURIC 모델은 대기광의 원천인 준안정 상태의 입자 밀도를 광화학 모듈과 밤대기광 화학 모듈들을 사용하여 계산한다. 모델의 낮대기광 부분은 Computational Physics Inc.(CPI)와 Naval Research Laboratory(NRL)에 의해 개발된 코드를 현재의 프로그래밍 표준에 따라 다시 쓴 것이다. 이 과정에서 전지구적인 수소  $L_\alpha$  복사모델의 추가, 광학 깊이가 두꺼운 산소 FUV 선들에서 다중산란의 특정 진동수 재분배 조각, 전자충돌 단면적, 화학 반응을 계수, 분자분광 상수의 종합적인 데이터베이스에 대한 대폭적인 수정이 이루어졌다.

최근에 AURIC 모델의 계산 결과들을 이용한 많은 발표가 있었다. Siskind et al.(1995)과 Swaminathan et al.(1998)은 열권 하부에서 산화질소(NO)의 화학작용에 관심을 가졌고 생성물을 연구하기 위해 AURIC 모델을 사용했다. Strickland et al.(1995)은  $N_2$ 에 관하여 열권의 O 밀도를 유도하는 것과 태양의 극자외선(EUV) 플럭스를 적분한 값에 대한 알고리즘을 개발하기 위해 AURIC 모델로 계산한 OI 1356Å과  $N_2$  LBH 낮대기광 세기를 사용했다. AURIC 모델의 개발 동기는 여러가지 조건(낮, 밤, 높고 낮은 태양활동, 지평선 관측, 원반시야 관측 등)에서 대기광의 광학적 배경에 대한 분석 도구를 제공하기 위한 것이다. 현재의 AURIC 모델은 원자외선에서 근적외선까지의 파장 영역에 해당하는 분광학 및 광화학적인 연구에 사용될 수 있다. 즉 광화학적인 입자와 방출선에 대한 생성과 손실 기작의 중요한 과정들을 확인하고, 태양의 EUV 플럭스, 전자 충돌 단면적, 반응을 계수, 분할비, 천이율과 같은 기본적인 물리화학 상수를 가지고 열권의 화학과정과 대기광 방출이 어떻게 변하는지에 대한 연구가 가능하다.

표 1. AURIC 모델의 주요 모듈들.

모 들	주요 출력값
GEOPARM	(데이터베이스로부터 검색되거나 계산된) 선택된 지구물리학적 변수들
ATMOS	모델대기(MSISE-90 + SAMM)
IONOS	모델이온권(초기설정은 FAIM)
SOLAR	태양의 EUV 스펙트럼( $SZA < 90^\circ$ )
COLDEN	$N_2, O_2, O, NO, O_3$ 태양의 사선 기동밀도( $SZA > 90^\circ$ )
PESOURCE	광해리생성률, 광이온화 생성률과 방출률, 광전자 원천함수( $SZA < 90^\circ$ )
PEFLUX	총 광전자 플럭스( $SZA < 90^\circ$ )
E-IMPACT	전자 충돌 여기 체적 생성률과 방출률( $SZA < 90^\circ$ )
DAYCHEM	광화학 종의 밀도 프로파일(이온, 준안정 원자, $N(4^4S)$ ), 준안정 원자 체적방출률( $SZA < 90^\circ$ )
MERGEVER	단일 파일에 축적된 체적방출률 프로파일( $SZA < 90^\circ$ )
NITEGLO	야간의 F2층과 중간권 상부로부터 나온 O, O <sub>2</sub> 준안정 원자 밀도와 체적방출률( $SZA > 90^\circ$ )
LOSDEN	시선방향 기동밀도( $N_2^+$ 와 $NO$ , $SZA < 90^\circ$ ; O <sub>2</sub> 와 O, $SZA > 90^\circ$ )
LOSINT	시선방향 세기(분자방출에 대한 시스템 세기)
RADTRANS	OI 1304Å과 1356Å의 총 원천함수와 시선방향 세기
LYMAN	HI 1216Å 원천함수와 시선방향 세기
MERGEINT	단일 파일에 축적된 시선방향 세기
Synthetic spectral routines	파장에 걸쳐 분할된 분자시스템 세기
MERGESYN	원자 방출선을 모두 포함한 총 스펙트럼

이 논문에서 사용한 프로그램은 Air Force Research Laboratory의 후원 아래 CPI가 개발한 소프트웨어 패키지 version 1.2이다. 이 프로그램은 약 4만행의 코드를 가진 총 27개의 FORTRAN-77 모듈로 이루어져 있으나, 원천 프로그램은 공개되지 않고 실행 프로그램만 배포되고 있다. 이 프로그램은 사용자의 목적에 맞게 활용할 수 있도록 텍스트를 기본으로 한 사용자 인터페이스를 제공한다. AURIC 모델의 실행에 사용되는 많은 파일들 중 대부분은 일반 사용자가 수정할 필요가 없는 것들이며, 기본적인 물리화학적 값(예, 전자충돌 단면적, 광이온화 단면적, 분자 분광 상수들)들은 데이터베이스에, 그리고 실행에 관련된 자료들(예, 온도에 의존하는 화학반응률 계수)은 코드에 저장되어 있다. AURIC 모델은 전자 에너지 손실률, 광화학적으로 활발한 입자들의 체적생성률, 허락된 천이에 대한 체적 방출률 등을 계산하기 위해 각각의 전자 충돌 단면적 데이터 세트를 사용한다. 특별한 경우 AURIC 모델의 실행을 제어하기 위해 사용자가 직접 변수를 입력할 때는 인터페이스 루틴을 이용하거나, 독립적으로 입력 파일을 생성 편집하여 설정할 수 있다. 첫번째 변수 입력 파일에서는 모델대기를 설정하기 위한 변수들(고도 간격의 수, 상부 경계 고도, MSISE-90 모델의 구성 성분 프로파일에 적용하는 scaling 변수 등)과, 모델링 상황을 특성화 하는 기본날짜(YDDD), 시간(sec UT), 지리적 위도와 경도, 관측자의 고도와 관측 천정각, 분광 구간과 분해능 등을 설정한다. 다른 AURIC 모듈들을 실행하는 데 필요한 많은 변수들의 초기설정 값(예, 지자기 위도와 경도, 태양지방시, 태양 천정각)은 입력변수로부터 계산되고, 배경이 되는 열권 이온권 모델은 MSISE-90(Hedin 1992)과 FAIM(Fully Analytic Ionospheric Model; Anderson et al. 1989)을 사용한다. 이 배경 모델에 필요한 태양활동지수, F10.7과 지자기활동지수, Ap는 NOAA 데이터베이스(<http://www.sec.noaa.gov>)로부터 읽어 올 수 있다.

표 1은 AURIC 모델의 각 모듈의 이름과 주요 출력 값을 계산 순서에 따라 보였다. 첫 모듈(GEOP

ARM)의 출력값을 사용하여 다음 세 모듈을 차례로 수행할 수 있는데, 이 과정에서 대기광 계산에 기본적으로 필요한 고층 중성대기모델(ATMOS), 이온권 전자밀도 프로파일의 평가에 필요한 이온권 모델(IONOS), 광이온화와 광해리율을 계산하기 위해 필요한 태양의 극자외선 스펙트럼(SOLAR)이 계산된다. 이 출력결과를 그대로 다음 모듈의 입력으로 사용하거나, 필요에 따라 편집하여 사용할 수 있다. 또한 다른 열권 모델, 이온권 모델, 태양 스펙트럼 등을 대체하여 사용할 수도 있다. 이 연구에서는 AURIC 모델에서 사용하는 MSISE-90 열권 모델의 산소원자 밀도에 상수 값을 곱하여 변화시켰으며, 태양 극자외선 스펙트럼 중에서 200Å보다 짧은 파장에 대해 2배 증가시킨 경우도 계산하였다. 이는 열권 산소원자 밀도가 매우 가변적이며, 또한 최근의 연구에서 제안된 태양 극자외선 스펙트럼의 변화를 반영시키기 위함이다. 이에 대해 다음 장에 자세히 언급할 것이다. 각 모듈의 물리 화학적 과정은 Strickland et al.(1999)에 발표되었으며, AURIC 모델의 구체적인 실행 방법은 AURIC User's Guide(Evans et al. 2002)와 강미지(2006)에 자세히 기술되어 있다.

AURIC 모델의 최종 결과값은 천정에서 천저까지, 각 관측 방향에 대해서 파장별로 대기 복사의 세기를 원하는 파장 해상도로 출력한다(단위는  $RA^{-1}$ ). 이를 위해, 먼저 각 방출선, 방출 밴드, 방출 밴드 시스템의 총 세기가 계산된 후, 각 분자 별로 방출 밴드 시스템의 세기가 별도의 루틴으로 파장에 따라 나누어 지고, 모든 분자와 원자의 대기광 세기를 최종적으로 파장에 따라 종합한다. 이 연구에서 사용하는 STP78-1 위성의 분광기는 파장 해상도가 낮기 때문에 각 원자 또는 이온의 다중 방출선들이 서로 분해되지 않고 한꺼번에 측정되었다. Chakrabarti et al.(1983)에 의해 보고된 STP78-1 극자외선 대기광 세기는 주변 분자선들의 기여를 배경으로 간주하여 제외시켰기 때문에, 여러 대기광 성분이 합쳐 만들어진 AURIC 모델의 최종 결과 스펙트럼과 비교하기에 적합하지 않다. 따라서 이 논문에서는 대기광 방출선의 세기를 파장에 따라 나누기 전 단계인, MERGEINT 모듈이 출력하는 대기광 기동방출률 값과 비교하였다. 이 값은 비교하려는 대기광의 총세기로 단위는  $10^6 \text{ photon/cm}^2/\text{sec}(=1R)$ 로 표현되어 STP78-1 위성의 대기광 측정값과 직접 비교될 수 있다.

## 5. 비교 결과 및 토의

Chakrabarti et al.(1983)이 보고한 STP78-1 위성의 낮대기광 세기는 1979년 3월 5일부터 15일 까지 자기위도  $\pm 50^\circ$  사이에서 관측한 값의 평균이다. 여기에는 관측 방향 천정각이  $30^\circ \sim 50^\circ$ 인 위 방향과  $120^\circ \sim 150^\circ$ 인 아래방향 대기광으로 나누어 수록되어 있다. 이런 위성의 관측 조건과 맞는 AURIC 모델 계산을 위해 입력파일(param.inp)에 이 기간 동안의 날짜와 시간, 위성의 위치정보(지리학적 위도와 경도)를 입력하였다. AURIC 모델은 이 입력변수들을 사용하여 MSISE-90 모델에서 중성대기 밀도를 불러오며 NOAA의 데이터베이스에서 태양활동의 정도를 나타내는 F10.7 지수와 지자기 변화를 대변하는 Ap 지수를 가져온다. 또한 관측조건을 지정하는 view.inp 파일에 관측위성의 고도 600km를 입력하고 관측 천정각  $27.5^\circ \sim 152.5^\circ$  범위를  $2.5^\circ$  간격으로 설정하였다. spect.inp 파일에는 STP78-1 분광계의 관측 파장대  $800\text{\AA} \sim 1400\text{\AA}$ 과 분해능  $8\text{\AA}$ 을 입력하였다. 그리고 광학적으로 두꺼운 대기를 통과하는 경우의 계산을 포함하는 radtrans.opt 파일을 생성시킨 다음, AURIC 모델을 실행하였다.

### 5.1 STP78-1 평균 대기광세기와 AURIC 기동방출률 비교

이와 같은 표준 입력을 사용한 AURIC 모델의 계산 결과를 STP78-1 아래 방향 평균 대기광 세기



표 2. 아래방향 평균 EUV/FUV 낮대기광의 관측과 모델 비교.

Transition	$\lambda(\text{\AA})$	STP78-1(R)	AURIC model(R)			
			표준	0.5O	2EUV	0.5O 2EUV
$2s\ 2p^4\ ^4P \rightarrow 2s^2\ 2p^3\ ^4S^0$	OII 834	420	471	333	544	375
$3s'\ ^3D^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 989	850	577	355	694	426
$3d\ ^3D^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 1027	235	247	247	248	248
$2p^3\ ^3D^0 \rightarrow 2p^2\ ^3P$	NII 1085	500	295	372	432	533
$2p^4\ ^4P \rightarrow 2p^3\ ^4S$	NI 1134	400	143	180	209	258
$2p^2\ 3s\ ^4P \rightarrow 2p^3\ ^4S^0$	NI 1200	1500	1118	1441	1492	1891
$3s\ ^3S^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 1304	10498	18176	11626	19772	12378
$3s\ ^5S^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 1356	1068	2054	1067	2383	1228

표 3. 위방향 평균 EUV/FUV 낮대기광의 관측과 모델 비교.

Transition	$\lambda(\text{\AA})$	STP78-1(R)	AURIC model(R)			
			표준	0.5O	2EUV	0.5O 2EUV
$2s\ 2p^4\ ^4P \rightarrow 2s^2\ 2p^3\ ^4S^0$	OII 834	150	159	126	176	136
$3s'\ ^3D^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 989	204	61	26	74	32
$3d\ ^3D^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 1027	38	124	102	124	102
$2p^3\ ^3D^0 \rightarrow 2p^2\ ^3P$	NII 1085	< 5	0.005	0.005	0.006	0.006
$2p^4\ ^4P \rightarrow 2p^3\ ^4S$	NI 1134	36	0.002	0.002	0.002	0.002
$2p^2\ 3s\ ^4P \rightarrow 2p^3\ ^4S^0$	NI 1200	220	0.02	0.02	0.02	0.02
$3s\ ^3S^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 1304	2080	2494	1654	2591	1695
$3s\ ^5S^0 \rightarrow 2p^4\ ^3P$	OI 1356	< 17	1.2	0.4	1.4	0.4

와 비교하였다. 이 표준입력을 사용한 결과는 관측값들과 상당한 차이를 보였다. 이런 차이는 AURIC 모델의 결함이라기보다 입력된 열권의  $N_2, O_2, O$ 의 밀도 차이나 입사하는 태양 EUV 플럭스의 차이에 기인할 수 있다. 따라서 입력파일에서 열권의 상태에 따라 쉽게 변화하는 산소원자의 밀도를 0.5배로 변화시켜 계산하여 보았다. 또한 태양활동에 따라 큰 폭으로 변하는 EUV 세기를 Strickland et al.(2004)의 제안에 따라 200Å보다 짧은 파장영역의 값들에 대해 2배한 경우를 계산하였다. 이로써 표준입력 경우를 포함하여 산소원자 밀도의 0.5배와 EUV 세기 2배를 조합한 네 가지 경우를 위성의 관측 자료와 비교하였다. 표 2와 3에서 각각 아래 방향 및 위방향에 대한 STP78-1 위성의 평균 낮대기광 관측값과 네 가지 경우의 AURIC 모델 계산값을 보여준다.

표 2에서 OI 1356Å 대기광의 AURIC 모델 결과가 산소원자의 밀도를 0.5배한 경우(0.5O)에 STP78-1 위성의 관측결과와 가장 유사하다. 하지만 다른 대기광들은 이와 같은 조건에서 관측 자료와 상당한 차이를 보인다. 이는 AURIC 모델에 사용된 각 대기광의 방출 기작에 관련된 각종 물리 화학 자료(광화학 과정 단면적, 화학반응계수, 방출단면적 등)가 실제와 다르거나, 복사 전달 효과를 제대로 반영하지 못했기 때문이라 생각할 수 있다. AURIC 모델에 산소원자 밀도를 0.5배한 열권을 적용했을 때 OI 989Å, NII 1085Å, NI 1134Å 등을 제외한 나머지 대기광은 관측값과 모두 분광계의 절대 영점 오차인 20% 이내로 일치하였다. 그러나 OI 989Å은 관측값의 44%, NII 1085Å은 74%, NI 1134Å은 45%로 작게 계산되었다.

OI 989Å 대기광은 AURIC 모델에서 생성고도부터 관측 고도까지의 복사 전달 효과가 고려되어

계산되었지만 관측치보다 상당히 작다. 이는 복사 전달 효과 계산시에 산소원자에 의한 흡수만이 고려되고, 산소원자에 의한 공명산란이 제대로 계산되지 않았기 때문으로 보인다. 공명 산란을 제대로 계산하기 위해서는 파장 해상도가 높은 정교한 복사 전달 루틴이 필요하다. 이 대기광은 우주로 탈출할 때까지 약 5000회 정도의 공명 산란이 일어나는 것으로 추정되었다(Gladstone et al. 1987).

NII 1085Å 대기광은 태양 극자외선이 질소 분자를 해리 이온화(dissociative ionization) 한 후 질소 원자 이온에서 방출되는 것으로, 이온권에 질소 원자 이온이 매우 희박하여 광학적 깊이가 매우 얇기 때문에 복사 전달 효과는 거의 없다. AURIC 모델에서도 복사 전달 효과를 계산하지 않았다. 따라서 관측치와의 차이는 극자외선에 의한 해리 이온화 단면적이 실제보다 작게 입력되었거나, 태양 극자외선 플럭스가 STP78-1 위성의 관측 당시 AURIC 모델이 사용한 표준 EUV 플럭스보다 약 25% 정도 컸을 수 있다. 표 2에서 태양 EUV 플럭스를 2배한 NII 1085Å 대기광 밝기는 관측치보다 크게 나타난다. EUV 플럭스가 태양 활동에 따라 수시로 변화함을 고려할 때, AURIC 모델에 실제 태양 EUV 플럭스를 입력해서 계산할 경우 NII 1085Å 대기광의 관측치와 일치할 수 있다.

NI 1134Å 대기광은 열린 질소 원자가 광전자에 의해 여기되어 방출되거나, 질소 분자가 태양 극자외선에 의해 광해리되어 방출하는 것으로 알려져 있다. 광전자에 의한 질소 원자의 여기로부터 방출되는 대기광은 열린 질소 원자에 의해 여러번 공명산란 될 가능성이 있다. 따라서 이 과정에서의 복사 전달 효과는 정교한 루틴으로 계산할 필요가 있다. 질소 분자의 광해리에 의해 방출되는 대기광의 경우, 광해리 시 질소 원자의 운동 속도가 매우 빨라서 방출선의 도플러 폭이 매우 넓기 때문에, 주변 질소 원자에 의한 공명 산란 가능성은 매우 낮다. 따라서 이 부분에 대해서는 복사 전달 효과가 미미할 것으로 판단된다. AURIC 모델은 NI 1134Å 대기광에 대해 복사 전달 효과를 전혀 고려하지 않았다. 일반적으로 복사 전달 효과를 전혀 고려하지 않을 경우, 복사 전달 효과를 고려한 경우보다 계산된 대기광의 밝기가 크게 나와야 한다. 그러나 표 2의 NI 1134Å AURIC 모델의 결과는 관측치보다 모두 현저히 작게 계산되었다. 이러한 차이는 AURIC 모델이 복사 전달 계산을 하지 않은 단점 뿐만 아니라, NI 1134Å 대기광의 원천 계산에 대해 결함을 가지고 있음을 의미한다. 따라서 AURIC 모델은 NI 1134Å 대기광에 대해 전면적인 개선이 필요하다고 판단된다.

표 3은 STP78-1 위성의 관측과 AURIC 모델이 계산한 극자외선 영역 낮대기광의 위방향 세기를 수록하였다. AURIC 모델 계산은 표 2와 같이 네 가지 경우에 대해 수행하여 비교하였다. 표 3에서 보면 OI 1027Å 대기광을 제외한 모든 대기광에 대해 AURIC 모델 계산값이 관측값보다 작게 나타난다. 이는 AURIC 모델이 STP78-1 위성 고도 600km에서 위방향으로 보는 대기광을 계산할 때 아래에서 올라오는 대기광의 기여를 고려하지 않았기 때문이다. 이는 현재의 AURIC 모델이 가지고 있는 분명한 단점 중의 하나로 지적될 수 있다. 이 단점이 NI 1134Å과 NI 1200Å 대기광에서 가장 두드러지게 나타나는데, 이들 대기광의 원천이 고도 600km 이하에 존재하고, 위 방향 대기광은 결국 아래에서 오는 대기광의 공명 산란에 기인하는 것이 거의 대부분이기 때문이다. OI 1027Å 대기광의 경우 관측치가 계산값보다 상당히 작게 나타난 것은 STP78-1 위성의 관측치 분석에서 바로 옆 파장에 있는  $H L_{\beta}$ 의 영향을 과하게 제거했기 때문으로 추정된다.

## 5.2 지자기 위도에 따른 극자외선 대기광 세기 비교

Chakrabarti et al.(1983)은 OII 834Å과 OI 989Å에 대해, 위방향 낮대기광 세기가 지자기 위도에 따라 어떻게 변하는지를 그림 1, 2와 같이 나타냈다. 이 그림의 대기광 세기는 STP78-1 위성이

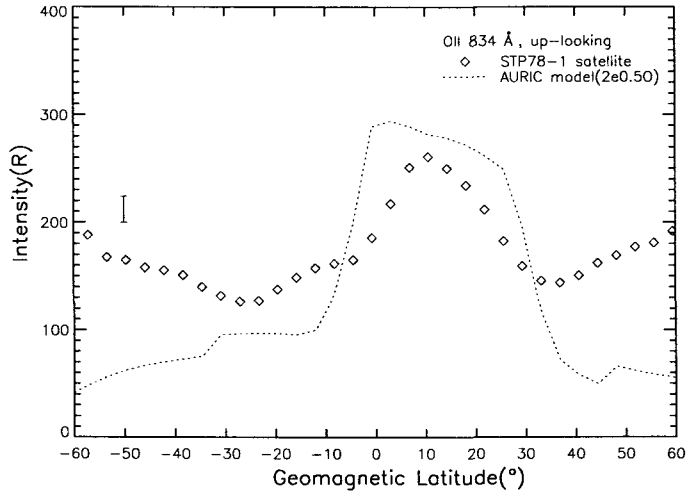


그림 1. STP78-1 위성이 관측한 위도별 OII 834Å의 위방향 세기와 AURIC 모델의 계산 결과 비교.

1979년 3월 22일 40500 ~ 43500sec(UT) 동안 극궤도로 지구의 낮면을 지나면서 관측한 자료이다. 이 때의 F10.7과 자기 활동 지수  $A_p$ , 위성의 위치와 관측 방향을 적용하여 AURIC 모델을 계산하였다. 그림 1과 2는 각각 OII 834Å과 OI 989Å의 관측 세기와 모델 값을 비교하여 보여준다. 마름모는 STP78-1 위성의 관측값을 보여주고, 점선은 AURIC 모델에 사용되는 산소원자 밀도를 0.5배, 태양 EUV 플럭스를 2배한 입력으로 계산한 값을 나타낸다. 왼쪽의 수직 바는 관측 값의 오차 크기를 뜻한다. 고위도 지역에서는 오로라의 영향으로 대기광이 제대로 관측되지 않기 때문에 60°S ~ 60°N 사이에서만 비교하였다.

그림 1에 나타낸 OII 834Å 대기광 관측 값은 지자기 위도 10°N 부근에서 최대가 되며 약 ±30° 근처에서 최소 값을 보인다. 이 지역은 Appleton Anomaly가 일어나는 위도와 일치하는데, 이 위도의 이온권 F2층 주이온인  $O^+$ 가 적도로부터 이동해 와서 증가되는 곳이다. 이렇게 증가된 F2층  $O^+$  이온이 열권 하부 고도에서 발생된 OII 834Å 광자를 중간에서 더 많이 산란시켜 그 세기를 약화시키는 것으로 추정된다. 이렇게 AURIC 모델이 OII 834Å 대기광의 위도에 따른 변화와 상당한 차이를 보이는 것은 입력으로 사용된 이온권 모델(FAIM; Fully Analytic Ionospheric Model)이 부정확하기 때문으로 판단된다.

그림 2에 나타낸 AURIC 모델의 OI 989Å 대기광 계산값은 약 30R 정도로 위도에 따라 거의 변동이 없으나, STP78-1 관측 값은 전반적으로 모델 값의 약 6 ~ 7배이며, 고위도에서 증가하는 추세를 보인다. 앞에서 언급했듯이 OI 989Å 대기광의 주요 생성 기작은 광전자의 충돌로 여기된 산소원자가 방출하는 것으로, 이런 광전자 충돌은 주로 고도 150 ~ 200km의 낮은 고도에서 많이 일어난다. 그리고 열권 하부에서 발생한 OI 989Å 방출선은 열권 상부의 산소원자에 의해 효율적으로 공명 산란되기 때문에, STP78-1 위성이 고도 600km에서 위방향으로 측정된 OI 989Å 대기광의 대부분은 이런 공명 산란에 기인한 것으로 판단된다. AURIC 모델은 광학적 깊이가 큰 대기광의 경우 RADTRAN

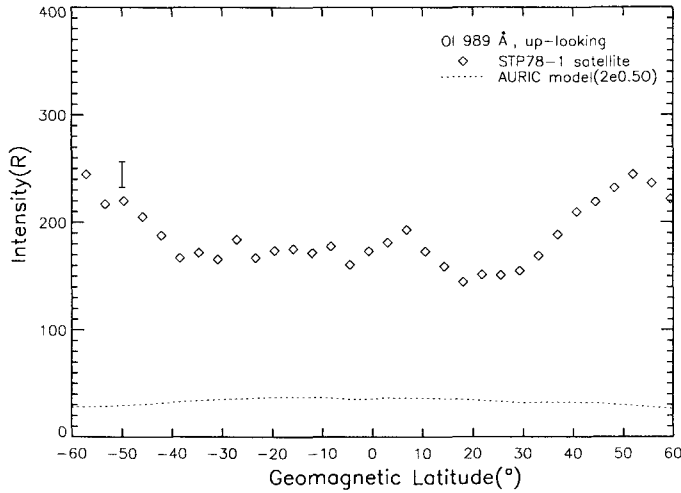


그림 2. STP78-1 위성이 관측한 위도별 OI 989Å의 위방향 세기와 AURIC 모델의 계산 결과 비교.

모델은 사용하여 시선방향 내에 있는 물질에 의한 흡수와 산란을 고려하는 복사 전달 계산을 수행한다. OI 989Å 대기광의 경우 이 RADTRAN 모델을 사용하여 복사 전달 효과를 계산하지만, 위성 고도 600km에서 위방향 대기광을 계산할 때 고도 600km 아래로부터 입사하는 OI 989Å 광자를 포함시키지 않은 것으로 추정된다. 즉 RADTRAN 모델이 위에서 입사하는 대기광 세기를 고려하지 않고 단순히 시선 방향 쪽에 있는 광원과 흡수 및 산란만을 포함시키기 때문에, AURIC 모델 계산 값이 STP78-1 위성이 위방향으로 관측한 대기광보다 현저히 작은 것으로 판단된다. 이런 결함은 향후 AURIC 모델의 새로운 버전에서 꼭 개선되어야 할 부분임을 지적한다.

그림 2로부터 STP78-1 위성이 관측한 OI 989Å 대기광은 AURIC 모델 값보다 전반적으로 클 뿐만 아니라, 위도에 따른 변화도 상당히 다른 것을 알 수 있다. 특히 남북위도 40° ~ 60° 근처에서 위도가 증가할수록 관측된 OI 989Å 대기광이 증가하는 경향을 보인다. 이는 이날 열권 상부의 산소원자 밀도의 분포가 입력으로 사용된 MSISE-90 모델값과 상당히 달랐음을 의미한다. 즉 아래 고도에서 발생한 OI 989Å 광자가 열권 상부의 산소원자의 밀도에 따라 공명산란되는 정도가 변화하면서 위방향 대기광 세기가 변화되었을 것으로 추정된다. 따라서 이날 극지방의 오로라 영향이 고위도 지역까지 확장되어 산소원자 밀도를 평소보다 크게 증가시켰을 것으로 추측할 수 있다. 실제로 1979년 3월 22일에는 세 번의 오로라 폭풍이 있었는데, STP78-1 위성이 이 논문에 사용된 자료를 관측하던 시간인 대략 1100UT와 1400 ~ 1500UT에도 오로라 폭풍이 발생했었다(Parish et al. 1994).

## 6. 결 론

STP78-1 위성의 낮 대기광 관측 자료를 사용하여 AURIC 모델의 EUV/FUV 대기광 계산을 검증하였다. 검증에 사용된 대기광은 OII 834Å, OI 989Å, OI 1027Å, NII 1085Å, NI 1134Å, NI 1200Å, OI 1304Å, OI 1356Å 등으로, 각 대기광의 생성 기작을 여러 문헌으로부터 찾아서 정리하였다. 다음

으로 AURIC 모델의 각 모듈을 설명하고, 입력 자료와 출력 자료를 기술한 후, STP78-1 위성의 관측 시간과 방향을 설정하였다. AURIC 모델 계산은 표준 입력과 플럭스 밀도를 0.5배 하거나 태양 EUV 중 200Å 이하의 플럭스를 2배 하는 경우를 조합하여 모두 네 가지 경우에 대해 수행하였다. 선정된 STP78-1 위성의 8개 대기광 중에서 가장 연구가 많이 되어 신뢰성이 높은 OI 1356Å 대기광 평균 관측값과 AURIC 모델 계산값을 비교하였을 때, 산소원자 밀도를 표준 입력보다 0.5배 한 경우에 가장 잘 일치하였다. 이 경우를 기준으로 비교한 결과, OII 834Å, OI 1027Å, NI 1200Å, OI 1304Å 대기광은 20% 이내로 아래 방향 대기광 관측값과 AURIC 모델 계산 결과가 일치하였다. 그러나 OI 989Å, NII 1085Å, NI 1134Å 대기광은 각각 관측치의 42%, 74%, 45%에 그쳐, 심각한 차이를 보였다. AURIC 모델은 OI 989Å 대기광에 대해 복사 전달 효과를 제대로 계산하지 못한 것으로, NI 1134Å 대기광에 대해서는 원천 과정이 실재를 반영하지 못한 것으로 판단되었다. NII 1085Å 대기광에 대해서는 AURIC 모델 자체의 결함보다는 입력된 태양 극자외선 플럭스의 변화에 기인하는 것으로 추정된다. 또한 STP78-1 위성의 위방향 대기광 관측 값과 비교했을 때 AURIC 모델 값이 전반적으로 작게 계산되는데, 이는 위성 고도 아래에서 입사하는 대기광의 기여를 AURIC 모델이 포함시키지 않았기 때문으로 판단된다. 이런 효과는 특히 OI 989Å, NI 1134Å, NI 1200Å 대기광에 크게 나타났다. STP78-1 위성이 관측한 위도별 OII 834Å 대기광과 비교했을 때, AURIC 모델 계산 값은 관측된 위도별 변화와 중위도 지역에서 특히 잘 일치하지 않았다. 이는 MSISE-90 모델이 관측 당시 진행된 오로라 폭풍에 의한 플럭스 밀도의 변화를 제대로 반영하지 못한 것으로 추정된다. 이 논문에서 밝혀진 AURIC 모델의 EUV/FUV 대기광 계산의 문제점들은 향후 AURIC 모델의 개선에 반영되어야 할 것이다.

### 참고문헌

- 강미지 2006, 석사학위논문, 충남대학교
- Anderson, D. N., Forbes, J. M., & Codrescu, M. 1989, JGR, 94, 1520
- Bishop, J. & Feldman, P. D. 2003, JGR, 108, 1243
- Bowyer, S., Kimble, R., Paresce, F., Lampton, M., & Penegor, G. 1981, Applied Optics, 20, 477
- Chakrabarti, S., Paresce, F., Bowyer, S., Kimble, R., & Kumar, S. 1983, JGR, 88, 4898
- Evans, J. S., Strickland, D. J., & Bishop, J. 2002, AURIC User's Guide Version 1.2 (Springfield: Computational Physics, Inc.), p.105
- Feldman, P. D., Anderson, D. E., Jr., Meier, R. R., & Gentieu, E. P. 1981, JGR, 86, 3583
- Feldman, P. D., Sahnou, D. J., Kruk, J. W., Murphy, E. M., & Moos, H. W. 2001, JGR, 106, 8119
- Galand, M., Lummerzheim, D., Stephan, A. W., Bush, B. C., & Chakrabarti, S. 2002, JGR, 107, 1129
- Gladstone, G. R., Link, R., Chakrabarti, S., & McConnell, J. C. 1987, JGR, 92, 12445
- Hedin, A. E. 1992, Planetary and Space Sci., 40, 556
- Huffman, R. E. 1992, Atmospheric ultraviolet remote sensing (London: Academic Press)
- Kanik, I., Noren, C., Makarov, O. P., Vattipalle, P., Ajello, J. M., & Shemansky, D. E. 2003, JGR, 108, 5126

- Meier, R. R. 1991, *Space Science Reviews*, 58, 1
- Meier, R. R., Anderson, D. E., Jr., Paxton, L. J., McCoy, R. P., & Chakrabarti, S. 1987, *JGR*, 92, 8767
- Parish, H. F., Gladstone, G. R., & Chakrabarti, S. 1994, *JGR*, 99, 6155
- Rees, M. H. 1989, *Physics and chemistry of the upper atmosphere* (Cambridge: Cambridge Univ. Press), p.169
- Siskind, D. E., Strickland, D. J., Meier, R. R., Majeed, T., & Eparvier, F. G. 1995, *JGR*, 100, 19687
- Strickland, D. J., Bishop, J., Evans, J. S., Majeed, T., Shen, P. M., Cox, R. J., Link, R., & Huffman, R. E. 1999, *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 62, 689
- Strickland, D. J., Evans, J. S., & Paxton, L. J. 1995, *JGR*, 100, 12217
- Strickland, D. J., Meier, R. R., Walterscheid, R. L., Craven, J. D., Christensen, A. B., Paxton, L. J., Morrison, D., & Crowley, G. 2004, *JGR*, 109, A01302, 10.1029/2003JA010220
- Swaminathan, P. K., Strobel, D. F., Kupperman, D. G., Kumar, C., Krishna, C., Acton, L., DeMajistre, R., Yee, J.-H., Paxton, L., Anderson, D. E., Strickland, D. J., & Duff, J. W. 1998, *JGR*, 103, 11579
- Tayal, S. S. 2004, *JGR*, 109, A08301, 10.1029/2004JA010389