

인공위성 탑재용 소형 극자외선 태양망원경 공학 모형 설계

한정훈[†], 장민환, 김상준
¹경희대학교 우주과학과

DESIGNING A SMALL-SIZED ENGINEERING MODEL OF SOLAR EUV TELESCOPE FOR A KOREAN SATELLITE

Jung-Hoon Han[†], Min-Hwan Jang and Sang-Joon Kim

Department of Astronomy and Space Science, Kyunghee University Yongin, 449-701, Korea
E-mail: jhhan@hvcam.kyunghee.ac.kr

(Received October 2, 2001; Accepted October 27, 2001)

요 약

태양의 극자외선 복사를 연구하기 위한 인공위성 탑재용 소형 극자외선 태양망원경의 공학 모형을 설계하였다. 극자외선 태양망원경은 584.3\AA (He I)과 629.7\AA (O V)의 두 파장대역에서 태양을 관측하기 위한 목적으로 설계되었다. 광학계는 Ritchey-Chrétien 방식이고, 망원경의 유효 구경과 유효 초점 거리는 각각 80mm, 640mm이다. 회전 필터 휠을 사용하여 He I과 O V 방출선을 관측할 수 있도록 하였다. 검출기의 MCP (MicroChannel Plate)는 채널 길이 대 직경의 비가 40:1인 Z-stack 타입이고, photocathode로서 KBr이 MCP 초점면에 코팅되며, MCP와 CCD는 fiber optic taper로 연결되도록 디자인하였다. 광학계 설계에 대한 분석은 광학계산용 상용 소프트웨어를 이용하였다.

ABSTRACT

For the research of solar EUV (extreme ultraviolet) radiation, we have designed a small-sized engineering model of solar EUV telescope, which is suitable for a Korean satellite. The EUV solar telescope was designed to observe the sun at 584.3\AA (He I) and 629.7\AA (O V). The optical system is an $f/8$ Ritchey-Chrétien, and the effective diameter and focal length are 80mm and 640mm, respectively. The He I and O V filters are loaded in a filter wheel. In the detection part, the MCP (MicroChannel Plate) type is Z-stack, and the channel-to-diameter ratio is 40:1. MCP and CCD are connected by fiber optic taper. A commercial optical design software is used for the analysis of the optical system design.

Key words: solar instruments, space-based ultraviolet telescopes

[†]corresponding author

1. 서 론

극자외선 (70 ~ 900Å) 영역의 관측은 지구 대기의 오존층에 의한 흡수로 인해 지상에서의 관측이 불가능하므로 sounding rocket이나 인공위성을 이용하여야 한다. 그러므로 이 영역의 관측은 로켓 개발이 본격화된 1960년대 이후부터 비로소 가능하게 되었다. 우주에서 극자외선 영역의 복사를 내는 물체들은 활동적인 코로나를 가진 낮은 온도의 별들과 백색 왜성들, 격변 변광성 그리고 활동은하핵 등이 있으며 가까운 태양의 경우에도 채층 코로나와 플레어, 코로나와 태양풍의 경계면에서 극자외선 영역의 복사를 내는 등 이 파장대의 복사는 우주 물체의 거의 전 영역에 걸쳐있기 때문에 극자외선 관측은 우주연구에 매우 중요한 위치를 점하고 있다. 태양의 광자들은 파장의 함수에 따라 지구의 대기와 상호 작용한다. 짧은 파장일수록 높은 고도에서 흡수되고, 긴 파장일수록 더 낮은 고도에서 흡수된다. 지구의 고도 90km 이상의 열권의 온도와 화학적 상태는 태양의 극자외선 광자의 흡수에 의한 중성 대기의 이온화 정도에 좌우된다. 극자외선 복사의 변화는 열권에서의 극심한 변화를 야기시킨다. 예를 들어, 태양 극소기 동안에 전형적인 상층 열권의 온도는 약 750K인데 반해, 태양 극대기 동안에는 1350K를 초과한다. 이 온도 변화로 생기는 밀도 변화는 상층 대기를 확장시킨다. 플레어와 같은 영역에서 나오는 극자외선 복사는 지구 전리층을 교란시켜 무선통신에 큰 영향을 끼치기 때문에, 극자외선 관측이 시작된 초기 단계부터 중요한 연구대상이 되어왔다.

본 연구에서는 태양관측이 가능한 위성탑재용 소형망원경의 자체 제작을 위한 공학 모형을 설계하였다. 이 논문에서는 과학적 연구 배경, 광학 설계 요소, 기타 광학계 세부 구성 요소를 기술하였고, 마지막으로 Selectron 사의 광학 설계 소프트웨어인 ZEMAX-XE를 이용하여 광학계 성능 분석을 하였다 (Zemax 2001).

2. 망원경의 설계

2.1 관측 목표

이 논문에서는 위성에 탑재되어 태양의 서로 다른 두 영역을 관측하기 위해 584.3Å(He I)과 629.7Å(OV)의 두 파장대역을 관측할 수 있는 극자외선 태양 망원경 공학모형을 설계하였다. 584.3Å(He I)과 629.7Å(OV)으로 태양을 관측하면 온도가 각각 $2 \times 10^4\text{K}$ 인 채층과 $2.5 \times 10^5\text{K}$ 인 전이 영역의 영상을 얻을 수 있다. 결과적으로 극자외선 파장에 대한 채층과 전이 영역의 상관 관계를 연구할 수 있도록 디자인하였다. SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)의 CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer) 수직 입사 분광기로 1997년 5월 15일에 관측한 자료 (Brekke, Thompson, & Woods 2000)에서 584.3Å과 629.7Å은 매우 밝은 극자외선 방출 영역으로 나타나 있지만, 외국의 다른 태양 관측 미션에서 관측이 많이 되지 않은 파장 영역이다. 따라서, 본 연구를 통해 공학 모형을 설계하기에 적합하다.

2.2 시스템 개요 및 사양

그림 1은 망원경의 Entrance pupil이다. 여기서 구경의 유효 직경은 80mm이고, 경통 두께까지 86mm이다. 부경의 유효 직경은 40mm이다. 검출기 부분에서 MCP는 생성된 전자를 손실 없이 CCD에 이

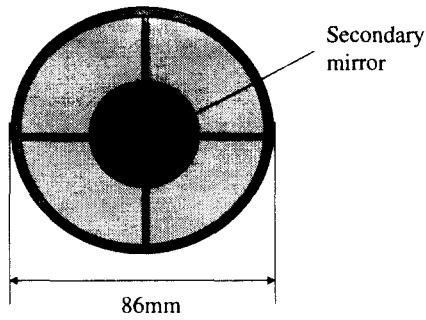


그림 1. 망원경 (앞모습), 구경 80mm, 부경 40mm, 차광막 50mm, 경통의 두께 3mm. 점선은 차광막 뒤의 부경을 나타낸 것임.

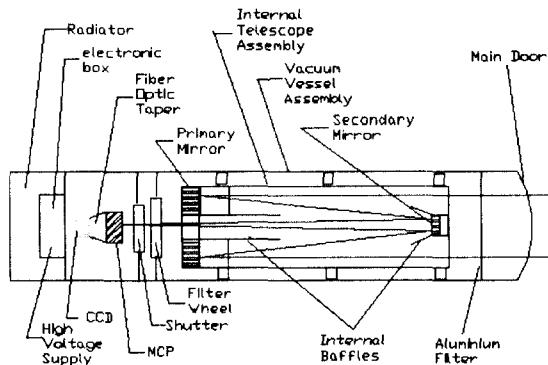


그림 2. 망원경 전체 개요도.

동시키기 위해서 Fiber optic taper로 연결되도록 디자인하였다. 그림 2는 망원경의 전체적인 개요도를 나타낸다.

광학계 방식은 인공위성용 망원경이라는 점을 감안해서 짧은 총 망원경 길이에서도 긴 유효 초점거리를 얻을 수 있는 Ritchey-Chrétien 방식을 적용했다. FOV (Field Of View)는 태양의 영상을 한 프레임에 관측할 수 있도록 34' × 45'으로 설정했다. 관측 파장은 584.3Å(He I)과 629.7Å(OV) 두 곳을 선택했다. 검출기 부분은 MCP가 3겹으로 겹쳐진 Z-Stack MCP와 CCD를 전자 손실을 줄이기 위해 fiber optic taper로 서로 결합된 구조로 하였다. Entrance door의 용도는 먼지나 화학적 침전물들에 의한 오염과 태양 자외선 복사 활동에 의해 중합화 되는 이차 효과를 막음으로써 필터 광학계를 보호하는 것이다. 이 door는 스테핑 모터에 의해 열리고 닫힌다. 이 door는 발사할 때에는 닫혀있고, 임무 수행중에 때때로 개방되는 기능을 한다. 부경의 바로 앞부분에는 빛의 난반사를 막기 위한 직경 50mm인 차광막이 있다. 발사하는 동안 thin-film 필터의 청정을 유지하고, 음파에 의한 충격을 줄이기 위해 망원경을 진공 펌프로 10⁻⁷ torr 이하의 진공상태로 만든다. Internal baffle의 소재인 알루미늄은 산소와 만나면 바로 산화막을 형성하여 절연체가 되기 때문에 가볍고 부식이 적은 알루미늄에 검은 아노다이징 (anodizing)을 한다. 셔터의 최소 노출 시간은 5nsec이다. 필터 휠은 스테핑 모터로 제어되는 원형의 회전 필터 휠을 사용하며, 필터 I [584.3Å(He I)]과 필터 II [629.7Å(OV)]로 구성된다. HVPS (High Voltage Power Supply)는 13.5VDC를 입력받아 MCP에 3000VDC에서 5000VDC를 공급한다. 전체 크기는 5.7 × 11.4 × 2.9cm이다. 표 1은 본 설계에서 요구되는 FOV와 분해능을 만족시키기 위해 광학 설계 소프트웨어를 이용하여 계산된 광학 설계 파라미터이다.

2.3 광학 부품

알루미늄 필터는 태양으로부터의 강한 열복사를 완화시켜주고, 장파장 영역의 복사를 차단시켜주는 solar blind의 역할을 한다. 설계 사양에서 알루미늄 필터의 유효 직경은 80mm이고, 총 직경은 83mm이다. 그림 3은 Luxel 사의 알루미늄 필터에 대한 파장 대 투과율을 나타낸다. Visible Blocking 필터중 알루미늄이 관측 파장에 대하여 높은 투과율을 보이고, 긴 파장에 대하여는 높은 차단율을 보이므로 본 연구를 위해 적당하다 (Powell 1992).

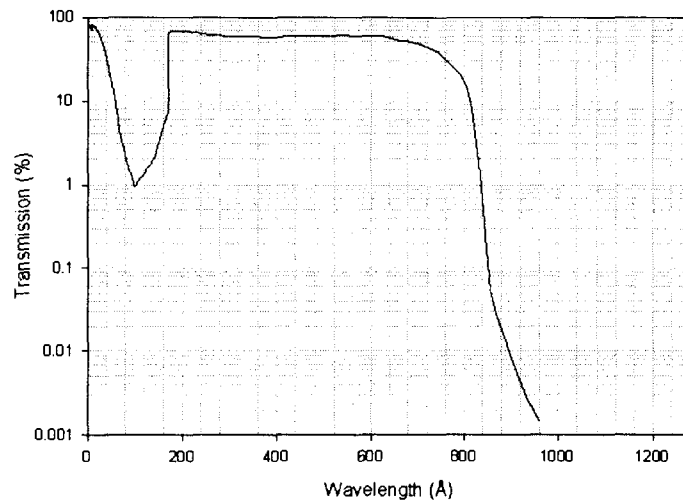


그림 3. Luxel 사의 알루미늄 필터에 대한 파장 대 투과율 곡선 (Luxel 2000).

표 1. 극자외선 태양 망원경 광학 설계 파라미터.

광학 설계 요소	파라미터
Telescope type	Ritchey-Chrétien telescope
Primary mirror diameter	80mm
Primary mirror f/#	3.5292
Primary mirror conic constant	-1.046192
Secondary mirror diameter	40mm
Secondary mirror f/#	8
Secondary mirror conic constant	-2.915001
Effective Focal length	640mm
FOV	about 34' × 45'
Effective F/#	8
CCD pixel size	23μm
Detector pixels	288 × 384
Wavelength	584.3Å(HeI)과 629.7Å(OV)
Total Track	243mm
Back focal length	53mm

반사경의 재질은 Zerodur이며, Al/MgF₂/DLC (Diamond-Like Carbon)/B₄C/SiC의 순으로 다층 코팅 (multilayer coating)한다. Larruquert & Keski-Kuha (2000)에 의하면 Hot-pressed B₄C는 490보다 높은 극자외선 파장 영역에서 높은 수직 입사 반사도를 가진다는 것이 발견되었다. 그 반사도는 49nm에서 92nm까지의 파장 영역에서 화학적 증발 침전된 SiC와 비슷하거나 더 높다. 인공위성이 빠른 속도로 궤도 운동을 하므로 단위 시간당 위성 탑재체에 부딪치는 산소의 플럭스(flux)가 커서, SiC는 산소에 오랫동안 노출되면, SiO_x (x=1, 2,...)로 변질되어 반사경의 반사도가 떨어진다. 이런 이유로 지구와 우주 과학에 적용되는 극자외선 관측을 위한 반사경은 미션을 수행하기 위해 충분히 긴 시간동안 이 환경에서 견딜 수 있어야 한다. 또한, B₄C가 SiC와 비교하여 극자외선 영역에서 반사도가 높고, 저 지구 궤도 환경에서도 산소와 덜 반응하기 때문에 극자외선 관측 망원경을 위하여 SiC를 단독으로 코팅하기 보다는 B₄C 등을 이용하여 다층 코팅하는 것이 적합하다. 그림 4에

표 2. MCP specification.

MCP 인자	재원
Photocathode material (coating)	KBr
Type	Z-stack
Effective diameter	12mm
Pore size	10 μ m
Bias angle	8
Aspect Ratio	40:1 (standard)
Maximum voltage	3000V
Gain	> 3 \times 10 ⁷
Pulse height	< 120%

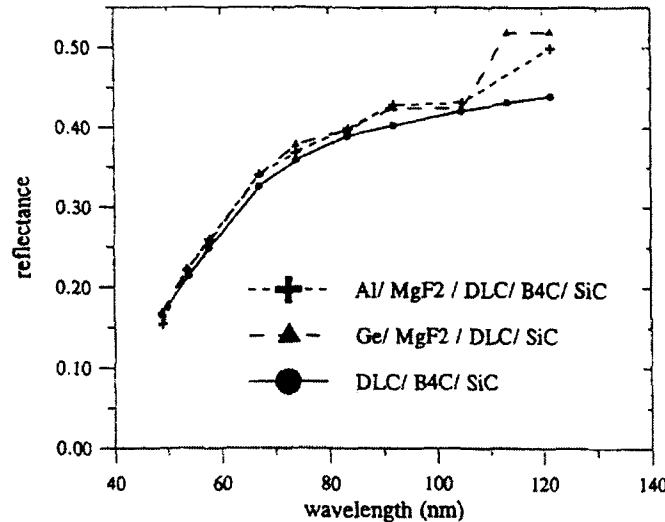


그림 4. Al/MgF₂/DLC/B₄C/SiC, Ge/MgF₂/DLC/SiC와 DLC/B₄C/SiC 다층코팅의 극자외선에서 수직 입사 반사도 (Larruquert & Keski-Kuha 1996).

서와 같이 584.3Å과 629.7Å에서 Al/MgF₂/DLC/B₄C/SiC의 반사도가 0.25이상으로 다른 물질보다 약간 높게 나타난다.

2.4 MCP (MicroChannel Plate)

MCP의 표면은 여러 채널의 Pore 위의 초점면을 덮고 있는 얇은 금속성의 피막과 각각의 채널의 glass로 구성되어 있으며, MCP의 QDE (Quantum Detection Efficiency)는 금속 피막과 MCP glass QDE의 결합이다. Siegmund et al. (1987)은 본 연구에서 사용된 KBr (Potassium bromide)이 공기 중의 노출 상태에서도 오랫동안 걸쳐서 QDE가 안정함을 보였다. 또한, EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer)의 검출기에 KBr을 사용함으로써, 300Å에서 600Å의 영역에서 QDE를 증가시켰다. 관측 파장이 584.3Å과 629.7Å인 인공위성 탑재용 극자외선 태양 망원경의 공학 모형에서는 KBr의 QDE 곡선이 500Å 근처에서 피크를 보이며, 600Å 부분에서도 높게 나타난다. QDE의 최소치가 450Å에서 900Å 파장 영역에서 20% 이상이므로 모든 운용 파장 영역에서 무난히 사용할 수 있는 물질로 보여진다. 표 2는 본 설계에서 채택된 MCP에 대한 세부 사양이다.



그림 5. 표 1에 기초한 solid model 분석, 주경에서 초점면까지의 거리는 53mm이고, exit pupil diameter는 20mm이다(ZEMAX-XE 사용).

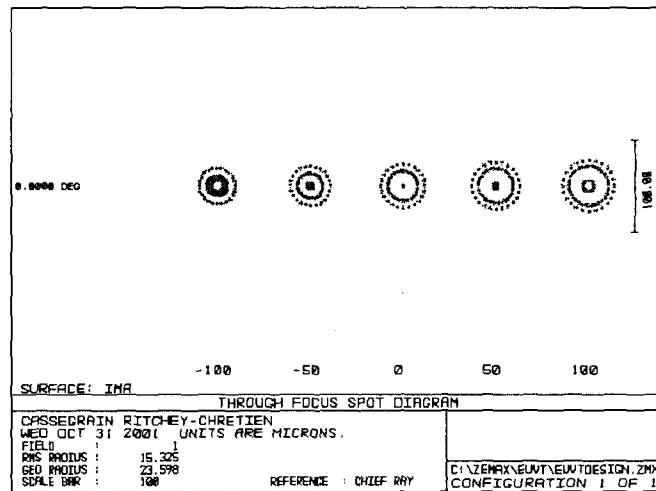


그림 6. Spot diagram through focus. Scale bar는 마이크론 단위이며, 진하게 표시된 점은 584.3Å이고, 연한 점은 629.7Å이다. 초점면의 이동에 따른 영상의 변화를 통해 비점수차를 판단하거나, 최상의 초점을 분석한다.

3. 광학계 분석

표 1의 광학 파라미터를 기초로 광학설계 소프트웨어인 ZEMAX-XE를 사용하여 solid model 분석을 수행하였다. 그림 5는 본 연구에서 수행된 solid model 분석을 보여주며, 왼쪽부터 차광막, 부경, 주경 순으로 배열되어있다. Solid model 분석을 통해서 빛의 경로 및 초점면의 위치를 예측할 수 있으므로, 검출기를 정확히 초점면에 설치할 수 있다. 각각의 직경은 차광막이 50mm, 부경이 40mm, 주경이 80mm이다. 차광막에 의해서 입사광이 39%감소되나, 관측 대상이 태양의 강한 극자외선 영역이며, MCP의 electron gain이 3×10^7 이므로 본 연구의 설계에 큰 영향을 주지는 않는다. Exit pupil diameter는 20mm이고, 주경의 두께와 셔터 및 필터 휠의 배열 공간을 감안하여 주경에서 초점면까지의 거리는 53mm로 정했다. 초점면에는 MCP가 놓이게 된다. 그림 6은 584.3Å과 629.7Å 두 파장에 대해 through focus spot diagram을 보여준다. through focus spot diagram은 초점면의 이동에 따른 영상의 변화를 통해 비점수차를 판단하거나, 최상의 초점을 분석한다 (Zemax 2001). 그림에서 scale

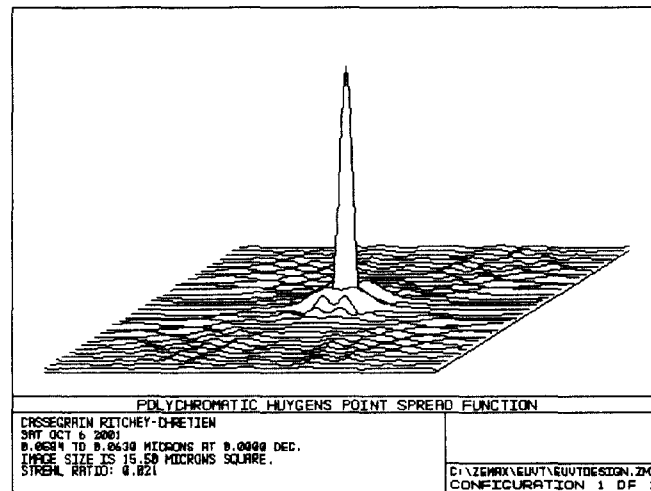


그림 7. Huygens point spread function. 두 관측 파장에 대한 linear intensity로 계산한 값이다.

bar는 마이크론 단위이며, 진하게 표시된 점은 584.3\AA 이고, 연한 점은 629.7\AA 이다. 다섯 개의 이미지 가운데 0인 위치가 최상의 초점면에서의 through focus spot diagram이다. 그림 7은 초점면에서 영상의 세기를 나타낸 huygens point spread function이다. 이것은 이미지 평면의 경사나 빛의 입사 각에 의해 생기는 이미지 표면의 부분적으로 기울어진 정도를 평가한다. 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 설계된 광학계 배열은 tilt나 큰 수차없이 정렬된 것으로 나타난다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 광학계의 주요 요소들의 사양을 결정하기 위해 여러 문헌 자료들을 조사하고, 광학 설계 프로그램인 ZEMAX를 사용하여 광학계 분석을 하였다. 주.부경의 직경, 초점비, 위치는 ZEMAX로 시뮬레이션해서 결정했다. 관측 파장에 적절한 MCP 타입과 극자외선에서 양자효율이 20%인 photocathode 물질로 KBr이 채택되었고, 550\AA 이상에서 반사도가 25% 이상인 Al/MgF₂/DLC/B₄C/SiC로 주.부경의 다층 코팅 (multilayer coating) 물질을 정하였다. 표 1에 기초한 Solid model 분석으로 주경과 초점면과의 거리를 53mm로 조정하였다. 주경의 두께와 셔터 그리고 필터 휠이 주경과 초점면 사이에 위치하므로 53mm의 공간이 필요하였다. 초점면에서의 초점의 질 (Quality)을 분석하는 작업도 수행되었다. 본 논문의 설계에서 태양 전체를 한 프레임으로 관측하기 위해 FOV를 $34' \times 45'$ 로 결정함으로써 태양의 전체적인 극자외선 영상을 관측할 수 있도록 했다. 본 공학 모형 망원경의 설계에서 분해능은 7 arcsec이며, 검출기의 QDE는 584.3\AA 과 629.7\AA 에서 30%이다. 채층과 전이 영역에 대한 태양의 전체 프레임을 동시에 관측함으로써 극자외선 파장에서 태양 활동의 상관 관계를 연구할 수 있다. 또한 극자외선 영역의 태양 활동과 지구 대기의 상관 관계 연구도 기대된다. 본 설계를 바탕으로 인공위성 탑재용 극자외선 태양 망원경 공학 모형을 성공적으로 제작하면 향후 실용적인 모델의 제작에 기반이 되는 기술을 습득할 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 연구의 수행과정에서 광학 시스템에 대한 조언을 해주신 김주현, 한제희, 민상웅 세 분

에게 감사드립니다. 이 논문은 한국과학기술평가원 (KISTEP) 과학기술국제화사업(I-00-039)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Brekke, P., Thompson, W. T., Woods, T. N., & Eparvier, F. G. 2000, AJ, 536, 959
Larruquert, J. I., & Keski-Kuha, R. A. M. 1996, SPIE, 3445, 86
Larruquert, J. I., & Keski-Kuha, R. A. M. 2000, Applied optics, 39, 1537
Luxel 2001, Luxel corporation Homepage(<http://www.luxel.com/>)
Powell, F. 1992, SPIE, 1848, 503
Siegmond, O. H. W., Everman, E., Vallerger, J. V., Sokolowski, J., & Lampton, M. 1987, Applied optics, 26, 3607
Zemax 2001, Zemax Optical Design Program User's Guide (Arizona: Focus Software), 78