

## 원자외선 영상/분광 측정기 광학설계

유광선<sup>1</sup> · 선광일<sup>2</sup> · 민경욱<sup>1,2</sup> · Jerry Edelstein<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원 물리학과

<sup>2</sup>한국과학기술원 인공위성연구센터

<sup>3</sup>Space Sciences Lab., University of California, Berkeley

### OPTICAL DESIGN OF THE FAR ULTRAVIOLET IMAGING SPECTROGRAPH

K. S. Ryu<sup>1</sup>, K. I. Seon<sup>2</sup>, K. W. Min<sup>1,2</sup>, and J. Edelstein<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

<sup>2</sup>Satellite Technology Research Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology

<sup>3</sup>Space Sciences Lab., University of California, Berkeley

email: ksryu@space.kaist.ac.kr, kiseon@satrec.kaist.ac.kr, kwmin@space.kaist.ac.kr

(Received October 23, 1998; Accepted November 11, 1998)

#### 요 약

본 연구에서는 원자외선 영역(900~1750Å)에서 오로라, 주/야간 대기광 관측 및 천문학적 관측을 동시에 수행하기 위한 FUVS (Far Ultraviolet Spectrograph)를 설계하고, 그 성능을 평가하였다. FUVS의 설계는 에돌이발(grating)의 광학적 특성과 비구면 광학을 충분히 고려하여 이루어졌으며, 분해능 계산을 위해 ray-trace 방법과 파면수차 계산에 의한 방법을 사용하여 설계의 검증을 시도하였다. 두 가지 방법에 의한 결과가 오차범위 안에서 일치하여 분석 방법에 큰 문제점이 없다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었고, 천 영역에 걸쳐 대략 2~5Å의 분해능을 얻었다. 또한, FUVS의 수행 임무 중 가장 검출이 힘들 것으로 생각되는 고온의 성간 플라즈마에서 방출되는 선 방출의 검출 가능성을 타진하기 위하여 FUVS의 최소 검출가능 플럭스(MDF)를 계산하였다. 이 계산을 위하여 지금까지 알려진 반사물질, MCP 등의 특성을 충분히 고려하였으며, 선의 세기에 따라 하루에서 일주일에 걸친 관측을 통해 고온의 성간 플라즈마에서 방출되는 선방출을 검출할 수 있다는 결론을 얻었다.

#### ABSTRACT

We present the design specifications and the performance estimation of the FUVS (Far Ultraviolet Spectrograph) proposed for the observations of aurora, day/night airglow and astronomical objects on small satellites in the spectral range of 900~1750Å. The

design of FUVS is carried out with the full consideration of optical characteristics of the grating and the aspheric substrate. Two independent methods, ray-tracing and the wave front aberration theory, are employed to estimate the performance of the optical design and it is verified that both procedures yield the resolution of  $2\sim 5\text{\AA}$  in the entire spectral range. MDF (Minimum Detectable Flux) is also estimated using the known characteristics of the reflecting material and MCP, to study the feasibility of detection for faint emission lines from the hot interstellar plasmas. The results give that the observations from 1 day to 1 week, depending on the line intensity, can detect such faint emission lines from diffuse interstellar plasmas.

## 1. 서 론

1950년대 로켓 실험에 의해 처음으로 시작된 자외선 천문학은, 수소에 의한 흡수로 관측이 어려울 것이라는 이전의 예상과는 달리 비약적인 발전을 한 분야이다. 1964년에 Smith (1967)에 의해 인공위성을 이용하여 처음으로 UV photometric 관측이 이루어진 후, TD-1 (Boksenberg 1973), IUE (Boggess 1978), EUVE (Bowyer & Malina 1991) 등 수 많은 mission에 다양한 목적을 가진 자외선 관측 장비가 실려졌다. 이들의 관측대상은 태양계에 속해있는 행성을 비롯하여 우리 은하 내부의 O, B형 별이나, 백색왜성, 외부은하에서 발견되는 H I hole (Brinks & Bajaja 1986, Kamphuis *et al.* 1991)이나 초신성 폭발에 의해 형성된 것으로 추정되는 Cygnus Loop (Blair *et al.* 1991) 등의 고온의 성간물질을 관측하는 천문관측과 태양 복사에 의해 여기(excitation), 해리(dissociation), 및 이온화(ionization) 등의 물리적 현상을 일으키며 빛을 방출하는 상층대기의 대기광(Meier 1991)을 관측하는 우주과학 분야로 크게 나누어 생각할 수 있다.

본 연구에서 제안되는 FUVS는 100kg급 소형위성에의 탑재를 목표로 디자인 되었으며, 2개의 파장대역( $900\sim 1150/1335\sim 1750\text{\AA}$ )과  $8^\circ \times 5'$ 의 FOV(Field of View)를 갖도록 디자인 되었다. 위성이 dayside와 극지방을 지날 때에는 대기광과 오로라 관측을 수행하며, nightside에 위치해 있을 때에는 태양복사에 의한 영향이 없으므로 천문관측을 수행할 수 있도록 고려되었다. 위성이 dayside와 nightside를 반복적으로 교차하면서 관측 대상의 방출세기가 달라지는데 따르는 문제점을 보완하기 위해서 슬릿 부분에 filter wheel을 달아 검출기에 도달하는 빛의 세기를 능동적으로 변화시켜, 너무 큰 노출에 의한 검출기, 특히 MCP(Micro Channel Plate)의 성능을 보호하도록 하였다.

본 논문에서는 FUVS의 사양 중 특히 광학부의 설계요소와 이에 따라 추정되는 예상 성능을 검토하였다.

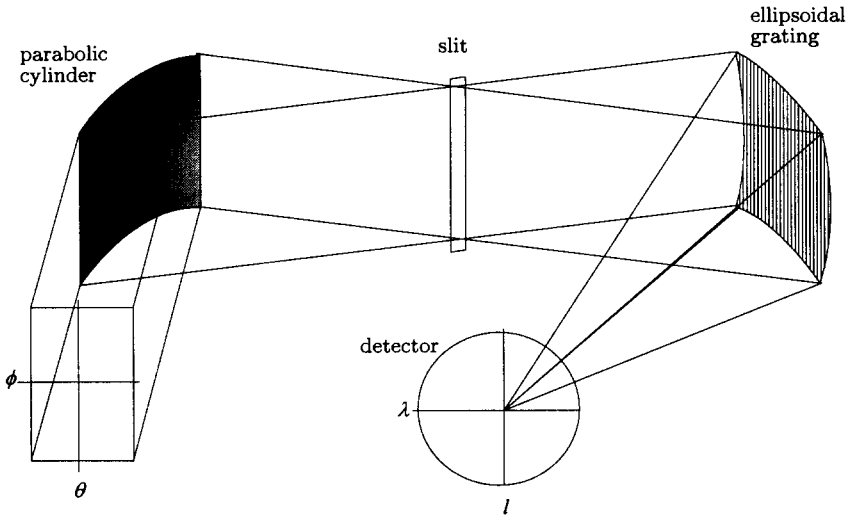


그림 1. FUVS의 개념도. 실제로는 이와 같은 분광기 두개(장파장 대역과 단파장 대역, 본문 참조)가 포개져 있다.

## 2. FUVS의 설계 및 수차 분석

그림 1에는 FUVS 광학부의 개념도가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초점 평면 상에서 한 축은 분광 정보를, 나머지 한 축으로는 영상정보를 얻게된다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 처음으로 빛을 받는 것은 parabolic cylinder로 구성된 거울이다. 거울에서  $\pm 4^\circ$ 의 방향을 바라보고, 그에 수직인 축의 초점에 슬릿이 위치하여 일차적으로 상이 형성된다. 넓은 스펙트럼 영역에서 큰 분해능을 얻기 위해서 grating을 둘로 나누어 각각 다른 영역의 스펙트럼을 얻도록 하였으며, 실제로 FUVS는 이러한 두 개의 분광기가 포개져 있는 형태를 하고 있다.

표 1에는 FUVS의 잠정적인 사양이 나타나 있다. 이 값들은 우리별 3호를 기준으로 위성의 크기, 전력, 관측하고자 하는 대상의 밝기 등 환경적인 제약 조건에서 관측 목표를 달성할 수 있도록 설계된 것이다. 또 이러한 광학 요소들간의 정밀한 위치와 각도 등은 수차 계산이나 ray-trace를 통해 최적의 영상을 얻을 수 있도록 설계되었다.

자외선 분광에 가장 널리 쓰여지는 반사형 에돌이발은 1882년 Rowland(Hutley 1982)가 고안한 구형 반사 거울에 groove를 새긴 형태로서 분산과 결상을 동시에 해결해 주는 방식이며 반지름  $2R$ 의 원형 substrate에 단면에 수직인 방향으로 ruling을 한 에돌이발의 경우 입사 슬릿과 검출기의 위치가 모두 반지름  $R$ 인 Rowland circle상에 위치할 때, 분광 평면의 상이 멩히게 된다. 그러나, 이러한 형태의 원형 에돌이발은 비점수차(astigmatism)가 크기 때문에 공간분해를 전혀 할 수 없는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 제안된 것이 토로이드 에돌이발과 타원 에돌이발이다. 비점 수차를 보정하기 위하여 토로이드 에돌이발을 사용하는 방법은 Haber(1950)에 의해 제안되었고,

표 2. FUVS의 잠정적인 사양

Field of View	$8^{\circ} \times 5'$
Grasp	$2 \times 10^{-5} / 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{sr}$
Effective Area	0.06/0.3 $\text{cm}^2$
Band Pass	900~1150/1335~1750Å
Resolution	2~5Å
Mirror	
f/no	2.2
focal length	12.5 cm
shape	parabolic cylinder
Slit	
distance to grating	17.74 cm
slit width	150 $\mu\text{m}$
slit height	2.75 cm / 1 mm
Substrate	
shape	ellipse of rotation
A axis radius	18.00 cm
C axis radius	24.26 cm
Ruling	
ruling type	Blazed Holographic
Long wave band	1500 lines/mm
Short wave band	2250 lines/mm
Diffraction Order	2 inside
Input angle	21.9 $^{\circ}$
Central diff. angle	-5.28 $^{\circ}$
Detector	
distance to grating	17.00 cm
tilt angle	10.33 $^{\circ}$
width	2.5 cm
background rate	0.1 c/s/ $\text{cm}^2$
resolution	1024×512
Long wave band	MgF <sub>2</sub> for mirror and grating CsI for photocathode CaF <sub>2</sub> fixed filter
Short wave band	SiC for mirror and grating MgF <sub>2</sub> for photocathode
Filter	
Open	Survey
Closed	Detector Background
Aperture	Bright Target

Chrisp(1983)는 홀로그래픽 기법으로 새겨진 토로이드 에돌이발에서 수차를 기술하는 방법을 제안하였으며, Choi *et al.*(1997)에 의해 실제로 분광기에 응용된 바 있다. Chrisp(1983)에 따르면 수평면에서의 반경이  $R$ , 수직면에서의 반경이  $\rho$ 인 토로이드 에돌이발을 사용한 경우 입사각이  $\alpha$ , 회절각이  $\beta$ 일 때 비점수차를 최소로 하기 위해서는 다음의 관계가 성립해야 한다.

$$\frac{\rho}{R} = \cos \alpha \cos \beta \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 Rowland 조건( $r = R \cos \theta$ ,  $r' = R \cos \beta$ , 여기에서  $r$ 과  $r'$ 은 광원 슬릿과 에돌이발 사이의 거리와 검출기와 에돌이발 사이의 거리)을 만족하고, 슬릿과 수평 초점은 Rowland circle 상에 위치한다. 타원 에돌이발의 수차 이론은 Namioka(1959)에 의해 유도되어, Bowyer *et al.*(1997)에 의해 실제 응용된 바 있으며, 초점 평면에서 초점이 형성될 조건은 다음과 같다.

$$r = \frac{b^2}{a} \cos \alpha, \quad r' = \frac{b^2}{a} \cos \beta \quad (2)$$

이 조건은 지름이  $b^2/a$ 인 Rowland원 위에 슬릿과 에돌이발, 그리고 관측기가 위치함을 뜻하며, 비점 수차가 보정되려면(Namioka 1959), 입사각과 회절각이 다음의 조건을 동시에 만족해야만 한다.

$$\frac{c^2}{b^2} = \cos \alpha \cos \beta \quad (3)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 타원을 이루고 있는 세축의 반경을 의미하는데,  $c$ 는 슬릿과 나란한 방향, 즉 에돌이발 무늬가 새겨진 방향으로의 반경,  $c$ 는 광축상에서의 반경,  $b$ 는 이 두축에 모두 수직인 방향으로의 반경을 의미한다. 위의 비점 수차의 보정식은 타원 에돌이발의 곡률반경(radius of curvature)을 고려하면, 토로이드의 경우와 일치하며 문제는 비점 수차 이외의 수차가 결상에 어떠한 영향을 미치는가이다. 이러한 효과를 더 자세히 고려하기 위해서 이 논문에서는 토로이드 에돌이발을 파면수차 계산 방법과 ray-tracing을 사용하여, 실제로 FUVS의 분광 성능을 평가하였다.

에돌이발의 수차를 계산하기 위해서 우선 그림 2와 같이 몇 개의 좌표를 도입하였다. 먼저, 토로이드의 중심을 기준으로 하는  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $z$ 축을 정의한다. 토로이드는 이 좌표를 중심으로 하여  $z = f(\chi, \eta)$ 를 만족하는 점으로 이루어진 표면으로 생각할 수 있다. 또, 수차를 계산할 때에는 주광선(principal ray)을 중심으로 기술하는 것이 일반적이는데, 주광선이 토로이드를 중심으로 한 좌표와 만나는  $\eta$ 축 상의 좌표를  $\bar{y}$ 라고 하면, 일반광 P의 좌표는  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $z$ 축을 기준으로 하였을 때,  $P(x, \bar{y} + y, z)$ 로 주어진다. 여기서 에돌이발의 substrate는  $z = f(\chi, \eta)$ 로 주어지는 토로이드 방정식을 만족한다. 파면 수차를 그림 2에 나타난 기하학적인 거리만으로 표현하면 다음과 같다.

$$W = S\bar{P}S - SP_yS + MP_yM - MPM' \quad (4)$$

여기에 에돌이발에 의한 효과를 나타내는 항인  $n\lambda$ 를 빼주면(여기서,  $n$ 은 임의의 점과 principal ray가 지나는 곳까지의 groove 수를 나타낸다.) 파면수차를 기술할 수 있다. 이와 같은 방법으로 하여

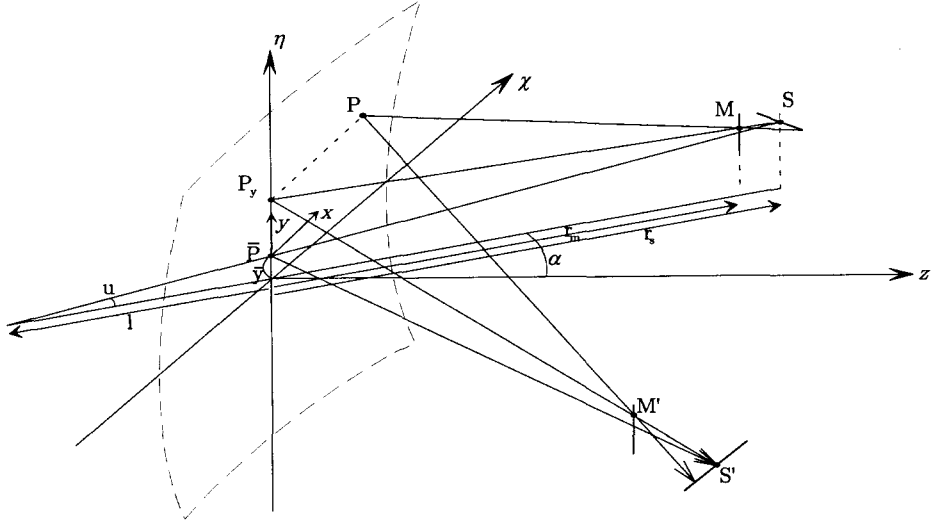


그림 2. 수차 분석 방법에 사용된 좌표계. 슬릿에 빛이 입사하기 전에 parabolic cylinder에 의해 이미 한축으로는 결상을 이루기 때문에  $r_s$ 는 무한대가 되며,  $r_m$ 은 슬릿에서 에돌이발까지의 거리가 된다.

모든 기하학적 거리와 토로이드 혹은 타원 방정식을 그림 2에서 정의한 좌표를 이용, 지수 전개하여 파면수차를 계산하게 되면, 결과적으로 다음과 같은 수열을 얻게된다.

$$W = \sum_{j,k}^4 K_{ijk} W_{ijk} x_n^i y_n^j u_n^k$$

$$W_{ijk} = [-a_{ijk}U^k - b_{ijk}U^{2k} - \frac{m\lambda}{\lambda_0}(d_{ijk}U_d^k - c_{ijk}U_c^k)]X^iY^j \tag{5}$$

여기서  $K_{ijk}$ 는 numerical constant를 나타내고,  $a_{ijk}$ 와  $b_{ijk}$ 는  $\alpha$ (슬릿이나 결상점이 grating normal 방향과 이루는 각도),  $r_m$  (distance to meridional focus),  $r_s$  (distance to saggital focus),  $l$  (principal ray가 분산면과 만나는 지점까지의 거리)에 대한 함수로 주어지는 값으로서, 모든 광선의 경로차를 에돌이 발 상의 임의의 지점( $x, y$ )에 대해 표현할 수 있도록 해주며, groove의 수가 일정한 값을 갖는 경우  $d_{ijk}U_d^k - c_{ijk}U_c^k$ 은 에돌이발 상수  $G$ 의 값으로 생각할 수 있다. 앞의 파면수차 중 결상에 결정적인 역할을 하는 4차항까지의 수차를 모두 써 보면 다음과 같다.

$$W = W_{100}x_n$$

$$+1/2W_{200}x_n^2 + 1/2W_{020}y_n^2 + W_{011}y_nu_n$$

$$+1/2W_{300}x_n^3 + 1/2W_{120}x_ny_n^2 + W_{111}x_ny_nu_n + 1/2W_{102}x_nu_n^2$$

$$+1/8W_{400}x_n^4 + 1/8W_{040}y_n^4 + 1/4W_{220}x_n^2y_n^2 + 1/2W_{031}y_n^3u_n$$

$$+1/2W_{211}x_n^2y_nu_n + 1/4W_{202}x_n^2u_n^2 + 1/4W_{022}y_n^2u_n^2 + 1/2W_{013}y_nu_n^3 \quad (6)$$

여기에서,  $x_n, y_n, u_n$  은 출사동의 구경  $X, Y$ 와 최대 field angle  $U$ 에 대해 임의의 좌표를 0과 1 사이의 값으로 규격화 한 값들이다. 이로부터, 실제 파면이 reference sphere로부터 어느 정도 벗어났는가를 구할 수 있다. 출사동(exit pupil)의 작은 단위 면적을 하나의 광속으로 생각할 수 있는데, 이 광속의 진행방향은 그 지점에서의 수차의 변화가 reference sphere와 이루는 각에 의해 결정됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서, 이상적인 초점에서 횡방향으로 어느정도 벗어나 있는가를 다음의 식(이상수 1985)으로 구할 수 있으며 이를 횡수차라 한다.

$$\begin{aligned} \delta_x &= -r'_m \frac{dW}{dx_1} = -\frac{r'_m}{X} \frac{dW}{dx_n} \\ \delta_y &= -r'_s \frac{dW}{dy_1} = -\frac{r'_s}{Y} \frac{dW}{dy_n} \end{aligned} \quad (7)$$

이와 같은 식을 이용하면 입사동에 고르게 입사하는 광원에 대해 실제로 초점 평면 상에 어떤식으로 분포하는가를 계산할 수 있다. 이러한 파면수차 이론을 이용한 방법과 ray-tracing 방법을 이용한 FUVS의 광학 성능 계산 결과가 그림 3에서 그림 5에 걸쳐 나타나 있다. 그림 3은 ray-trace 방법을 사용하는 상업용 프로그램인 Code V를 이용하여 구한 FUVS의 spot diagram을 나타낸 것으로서, focal plane에서의 광자의 분포로 생각할 수 있으며, Spot diagram 상에서  $x$ 축은 angular information을 나타내고,  $y$ 축은 spectral information을 나타낸다. 앞에서 언급한 수차 이론에서도 이와 유사한 결과(그림 4, 5 참조)를 얻을 수 있었다. 그림 3의 결과는 detector를 tilt시키지 않았을때의 결과로서 장파장대(long wave band, 1335~1750 Å)의 155nm의 파장에서 field angle이 각각 0도와 2도 일때의 spot diagram을 나타내고 있다. 중앙파장인 155nm에서 가장 좁은 영역에 상이 맺히며, 135nm보다는 175nm에서 상이 더 퍼지며, field angle이 증가함에 따라서 상이 퍼진다.

이러한 spot diagram으로부터 분해능(resolution)을 결정하기 위해서는 결상면에서 상이 퍼지는 정도를 나타내는 parameter를 결정한 후, 이를 결상면의 단위 길이에 맺히는 분광 범위로 정의되는 선형 분산(linear dispersion)과 곱하면, 분광 분해능(spectral resolution)을 구할 수 있고, 이와 유사한 방법으로 각 분해능(angular resolution)을 구할 수 있다. 본 논문에서는 전체 광자의 50%를 포함하는 영역의 최소 너비(MHEW: Minimum Half Energy Width)를 사용하였으며, 이 MHEW를 앞에서 말한 선형 분산의 값과 곱해주면 각 파장에서의 분해능을 구할 수 있다.

이와 같은 방법으로 구한 분광 분해능과 각 분해능이 그림 4에 나타나 있다. 이 그림은 파면 수차이론을 프로그램화 하여 얻은 결과로서, detector가 tilt되지 않았을 때의 결과이며, 실선으로 나타낸 것은 field angle이 0일 때이며, 위로 갈수록 field angle이 커지는데 spot diagram에서 알 수 있듯이 field angle이 증가함에 따라 분해능이 나빠짐을 알 수 있다. 동일한 시스템에 대한 분석이므로 두 가지 방법으로 행한 결과가 일치해야 하지만, 그림에서 볼 수 있듯이 파장이 긴쪽의 field angle이 큰 쪽에서 값의 차이를 보이는데, 이는 광학 요소의 구경에 의해 빛의 일부가 가려지는 vignetting에 의한 영향으로 생각된다. 지금까지의 결과는 모두 장파장대의 결과로서, 비록 grating constant는 다르

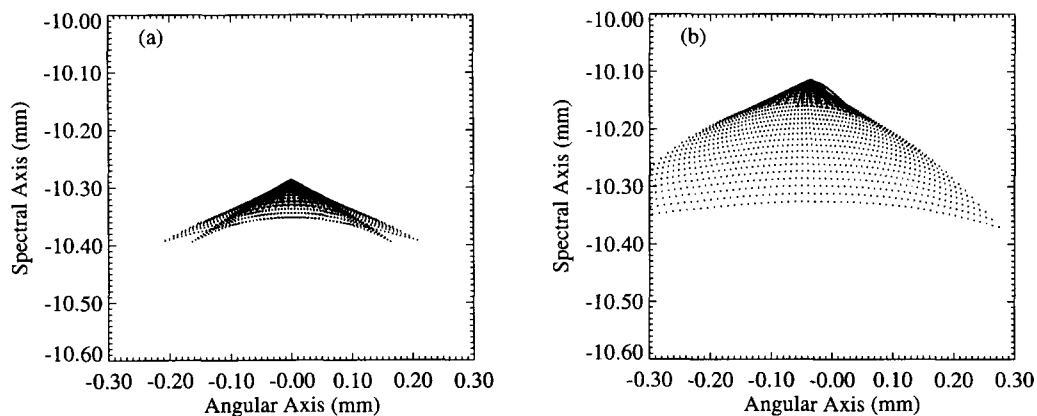


그림 3. Code V를 이용하여 구한 검출기 상에서의 spot diagram. 155nm에서 field angle이 0도(a)일 때와 2도(b)일 때의 결과를 나타내었다. 이 광자 분포의 MHEW를 구한 뒤 이를 선형 분산과 곱하여 분해능을 얻게 된다.

지만 같은 substrate를 사용하였기 때문에 단파장대(short wave band, 900~1150 Å)에서도 이에 준하는 결과를 얻었다. 앞에서 말한 바와 같이 결상이 Rowland circle 상에 이루어지기 때문에 검출기를 구면으로 제작하는 것이 가장 이상적이지만, 실제로 MCP의 단면을 구면으로 제작하는 것은 그리 용이하지 않다. 대신 detector를 Rowland circle에 접하도록 각도를 tilt 해주면 파장이 긴쪽에서 분해능이 떨어지는 문제를 어느정도 보완할 수 있다.

그림 5는 검출기를 긴 파장 쪽에서 에돌이발과 더 멀어지는 방향으로 10도 tilt해 주었을 때, 분해능의 변화를 장파장대와 단파장대에서 각각 보여주고 있다. 양 파장대역 모두에서 tilt를 하지 않았을 경우에 비해 두드러지게 분해능이 향상된 반면 파장이 짧은 쪽에서는 약간 나빠지는 결과를 보인다. FUVS의 경우 잠정적으로 약 10도 tilt 하는 것으로 정해져 있지만 연구의 방향에 따라 변경이 가능한 parameter 중 하나이다.

### 3. 검출 성능 분석

Grasp는 실제 물리적인 광도(intensity)와 검출기에서 발생하는 신호 사이의 관계를 나타내는 척도로서 자료 분석에 있어서 필수적인 특성값이다. Grasp는 검출기가 광학부의 초점 평면에 위치한다는 가정하에서 검출기의 면적과 검출기가 바라보는 광학부의 입체각을 곱해서 얻는 값이다. 그러나, 실제로 검출기에서는 광학계로 입사하는 모든 광자를 검출하지는 못하는데, 이러한 현상을 모두 고려한 것이 유효 grasp(effective grasp)의 개념으로 광도와 최종적으로 검출기에서 발생하는 신호 사이



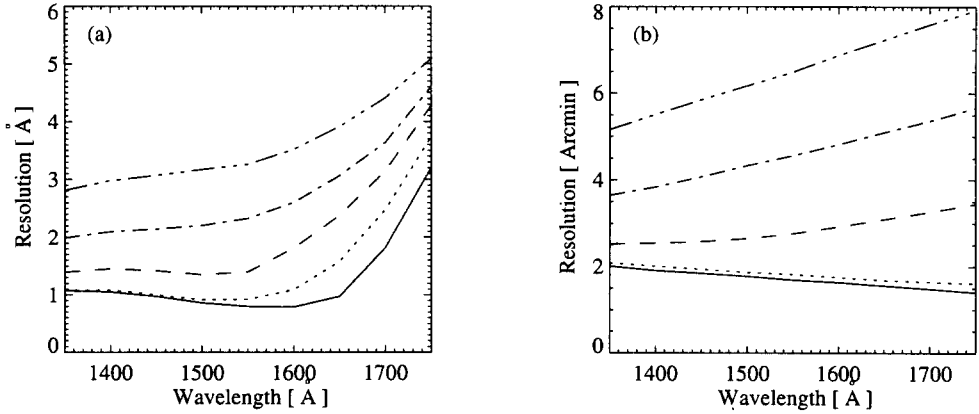


그림 4. 파면수차 방법에 의해 구한 장파장 대역에서의 분광 분해능(a)과 각 분해능(b). 검출기를 tilt시키지 않았을 때의 결과이다. 그림 상에서 실선은 field angle이 0도일때이며, 위로 갈수록 field angle이 각각 1, 2, 3, 4 도로 증가한다.

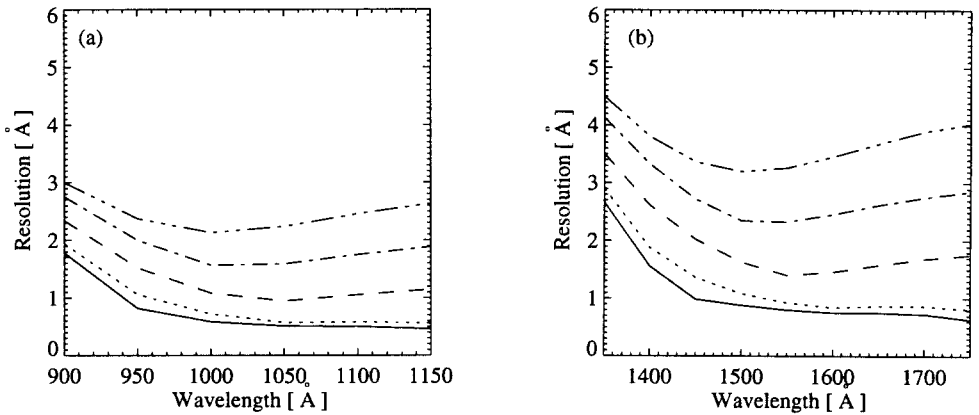


그림 5. 검출기를 tilt(10도) 시켰을 때, 단파장 대역(a)과 장파장대역(b)에서의 분광 분해능. 두 결과 모두 파면수차 방법에 의해 구한 분해능이다. 그림 상에서 실선은 field angle이 0도일때이며, 위로 갈수록 field angle이 각각 1, 2, 3, 4 도로 증가한다.

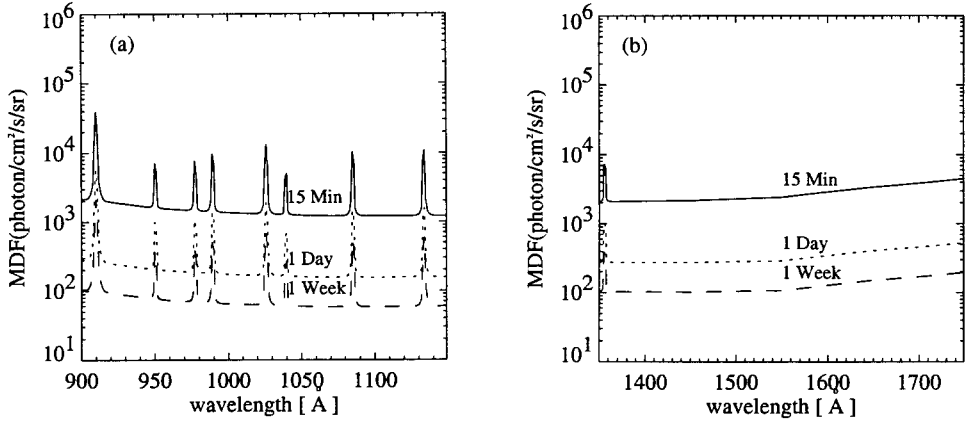


그림 6. 천문관측시(위성이 night side에 위치해 있을 경우)의 MDF. 단파장(a)과 장파장(b) 대역에서의 MDF가 모두 나타나 있으며, 그래프에 표시된 시간은 위성의 운행 시간이다.

의 관계를 나타내는 factor이며, FUVS에 광도  $I_\lambda$ 의 빛이 입사할 때,  $\Delta t$ 의 시간동안 노출로  $\Delta\lambda$ 의 파장영역에서 측정을 하면 결과적으로 MCP에서는 다음 식에 의해 주어지는 count를 검출할 수 있다.

$$\text{Counts} = I_\lambda \times \Gamma_{eff} \times \Delta\lambda \times \Delta t \tag{8}$$

여기서,  $\Delta\lambda$ 는 광학부와 검출기 특성에 의해 정해진 분해능에 해당하는 파장 영역을 의미하며, 물론 파장에 따라 다른 값을 갖지만 FUVS의 경우 대체로 2 ~ 5Å의 값을 갖는다. 또,  $\Delta t$ 는 측정이 행해지는 시간을 의미한다.  $\Gamma_{eff}$ 를 계산할 때에는 기하학적인 면적과, 이 면적에 광학부의 반사, 투과 효율 그리고, 검출기의 양자효율 등을 곱해서 얻어지는 유효 면적으로 나누어 생각하는 것이 훨씬 더 용이하다. 또한 회절에 의해 만들어지는 다른 order의 빛이나 Lyman  $\alpha$ 와 같은 강한 geocorona 방출선들을 제거하기 위해서 검출기나 슬릿 앞에 filter를 놓아야 하므로 filter의 투과율도 계산에 포함되어야 한다. 또, 예돌이발이나 거울이 유한한 크기를 갖기 때문에 경우에 따라 (field angle의 변화) 빛의 일부가 검출기에 도달하지 못하는 정도를 나타내는 vignetting factor도 포함 해야 하는데, 여기서는 고려하지 않았다.

검출기는 원자외선 영역에 주로 쓰이는 방식대로, MCP 위에 CsI(Martin et al. 1981, Martin & Bowyer 1982)를 코팅하게 되며, MCP에서 발생한 전자 빔은 delay line readout system(Siegmund et al. 1989)에 의해 최종적으로 검출된다. CsI 코팅을 하게되면, 사용 가능한 파장영역이 1900Å이상으로 연장된다. 거울의 반사율은 75%로, 예돌이발의 반사율과 회절효율을 각각 64%, 25%로 두었

다. 광학계의 성능을 평가하는 데 있어서 기하 광학적인 측면 이외에도 어느정도의 광량을 측정할 수 있는가를 나타내는 MDF(Minimum Detectable Flux)는 광도가 낮은 대상을 관측하는 경우에 관측기의 효율성을 판단하는 중요한 척도가 된다. MDF는 순전히 통계적인 불확실성만을 고려하여 검출된 총 광자의 수가 잡음의 3배가 된다는 조건으로부터 구할 수 있다. 다시 말하면 Signal to Noise Ratio(SNR)가 3일때의 signal 값을 MDF라 정의한다. 실제 신호(net signal)  $S_n$ 은 총 신호(total signal)  $S_t$ 에서, 검출기에 광자가 들어오지 않도록 한후 측정된 배경 신호(background signal)  $B$ 를 빼 줌으로써 얻게 된다. 이 때, 각 변수의 단위는 counts이고, 각각에 대응하는 표준편차를  $\sigma_n, \sigma_t, \sigma_b$ 이라고 했을 때, 광자는 Poisson 분포를 가정할 수 있으므로 표준편차는 광자수의 제곱근으로 주어지며 net signal의 표준편차는 다음과 같다.

$$\sigma_n^2 = \sigma_t^2 + \sigma_b^2 = S_t + B = S_n + 2B \quad (9)$$

따라서, SNR이 3 이상인 조건은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{S_n}{\sigma_n} = \frac{S_n}{\sqrt{S_n + 2B}} \geq 3 \quad (10)$$

실제로 연속 스펙트럼  $I_\lambda$  [ $\text{ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{\AA}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ]에 대해 이 요구조건이 어떻게 주어지는 지 알아보기 위해 표 2와 같이 변수들을 정의하였다. 이때, net signal은  $I_\lambda \Delta \lambda A_{eff}(\lambda) \Omega T$ 가 되고 background는 검출기 상에서 단위 면적당 검출 수로 주어진다. 따라서, MDF  $I_\lambda^{MDF}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$I_\lambda^{MDF} = \frac{9}{2} \frac{1 + \left(1 + \frac{8}{9} [B_d f^2 \Omega T (1 + (T/T_B)^2) + \sum_i I_i \varepsilon_{grat}(\lambda_i, \lambda) A_{eff}(\lambda_i) T \Omega \Delta \lambda]\right)^{1/2}}{A_{eff}(\lambda) T \Omega \Delta \lambda} \quad (11)$$

더 작은 광도를 측정하기 위해서는 관측시간  $T$ 와 background 관측시간  $T_B$ 를 동시에 높여야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 유효면적을 최대로 하는 것이 가장 중요하고 입체각을 증가시키는 것은 제곱근만큼의 이득이 있다는 것을 알 수 있다.

지금까지는 연속 스펙트럼에 대해서만 생각을 했고, 연속 스펙트럼에 대해 line feature를 검출하고자 할 경우에는 연속 스펙트럼 자체가 background 역할을 하게 되므로 MDF가 다음과 같이 계산된다.

$$I_i^{MDF} = \frac{9}{2} \left[ 1 + \left( 1 + 8/9 [B_d f^2 \Omega T (1 + (T/T_B)^2) + I_\lambda \Gamma_{eff}(\lambda) T \Delta \lambda + \sum_i I_i \varepsilon_{grat}(\lambda_i, \lambda) \Gamma_{eff}(\lambda_i) T \Delta \lambda] \right)^{1/2} \right] / (\Gamma_{eff}(\lambda) T \Delta \lambda) \quad (12)$$

여기에서의  $\Delta \lambda$ 는 분광 분해능을 의미한다.

논문에서는 몇가지 경우로 나누어 MDF를 계산하였다. 계산에 쓰여진 파라미터들 중 아직까지 정해지지 않은 특성들의 경우 대략적인 값만을 사용하였는데, 이렇게 하여도 시스템의 전체적 성능을 근사적으로 평가하는 데는 문제가 없을 것으로 생각된다. 또, 계산은 광도가 낮아 문제가 될 수 있는 diffuse source의 천문관측(총 8°의 FOV 중에서 분해능이 크게 떨어지지 않는 6°까지 고려)을 기준

표 2. MDF 계산에 사용된 parameter들.

변수	정의
$A_{eff}(\lambda)$	$A_{geo}r_{mir}(\lambda)r_{grat}(\lambda)t_{filt}(\lambda)\epsilon_{det}(\lambda)$
$\Delta\lambda$	bin size (can be greater than resolution limit)
$\Omega$	field of view(sr)
$T$	observation time(s)
$T_B$	internal background measurement time(s)
$I_i$	geocoronal line $i$ emission intensity
$\epsilon_{grat}(\lambda)$	grating scattering efficiency
$r_{mir}(\lambda)$	mirror reflectivity
$r_{grat}(\lambda)$	grating reflectivity
$t_{filt}(\lambda)$	filter transmission
$\epsilon_{det}(\lambda)$	detector quantum efficiency
$B_d$	detector internal background( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
$f$	objective focal length(cm)

으로 행하여 졌으며, 각각의 계산에는 대기광의 광도(Meier 1991)를 고려하여 최종 MDF를 계산하였다. 그림 6은 인공위성이 지구에 가려져 있는 상황에서 천문관측을 행할때의 MDF를 나타낸 것으로서, Civ( $\lambda 1663$ )의 경우 4000LU(line unit;  $\text{ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ), OIII( $\lambda 1401$ )의 경우 3000LU, OIV( $\lambda 1401$ )의 경우 <2500LU, 그리고 NIII( $\lambda 1750$ )의 경우 <1100LU 등 이전에 검출된 diffuse emission의 선방출 세기를 검출할 수 있는 가능성을 타진할 수 있는 중요한 척도가 된다. 4000LU를 갖는 Civ( $\lambda 1663$ )의 경우 15분의 관측으로는 검출이 불확실하며, 하루(위성의 운용 시간)를 관측하면 검출이 확실하며, 광도가 가장낮은 NIII( $\lambda 1750$ )의 경우 대략 2일 이상을 관측해야 검출이 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 FUVS의 설계와 광학적 성능을 평가하였다. ray-trace 방법과 수차이론을 통한 설계의 검증을 시도하여, 전 영역에서 2 ~ 5Å의 분해능을 얻을 수 있었으며, field angle이 작은 경우 1Å미만의 분해능을 얻었다. 두 가지 방법의 분석이 대체로 일치함을 알 수 있었으며, 검출기를 tilt 함으로써 전 파장 영역에서 고른 분해능을 얻을 수 있다는 사실을 알았다. FUVS는 고분산 분광기는 아니지만, 대신 넓은 FOV를 가지고 image를 얻을 수 있는 장점을 가진다. 영상 정보 축으로는 대략적으로 5' 이내의 각분해능 얻을 수 있었으며, 우주과학 관측에 유용히 사용할 수 있을 것으로 고려된다. 또, FUVS의 검출 성능을 분석하기 위해 최소 검출 가능 플럭스(MDF)를 계산하여 FUVS의 유용성을 조사하였다. 지금까지 알려진 diffuse emission source의 광도와 비교하였을 때, 현실적인 관측 시간내에 검출이 가능할 것으로 생각된다. 앞으로는 광학시스템과 검출기의 성능뿐 아니라, 관측 대상으로 생각할 수 있는 SMC(Staveley-Smith et al. 1997), LMC(Kim et al. 1997)등 각각의 관측대상에 따른 특성분석과 노출시간 등을 결정하는 연구가 필요할 것이며, 본 논문의 결과가 유용하게 쓰여

질 것이다. 광학적으로는 각각의 parameter가 광학적 성능을 어떻게 변화시키는지에 대한 좀 더 깊은 연구가 있어야 할 것이다.

### 참고 문헌

- 이상수 1985, 기하광학 (교학 연구사: 서울)
- Blair, W. P., Long, K. S., Vancura, O. & Holberg, J. B. 1991, *ApJ*, 374, 202
- Boggess, A. 1978, *Nature*, 275, 372
- Boksenberg, A. E. 1973, *MNRAS*, 163, 291
- Bowyer, S., Edelstein, J. & Lampton, M. 1997, *ApJ*, 485, 523
- Bowyer, S. & Malina, R. F. 1991, *Extreme Ultraviolet Astronomy* eds, R. F. Malina, S. Bowyer (Pergamon Press, New York)
- Brinks, E. & Bajaja, E. 1986, *A&A*, 169, 14
- Choi, I. W., Lee, J. U. & Nam, C. H. 1997, *Appl. Opt.*, 36, 1457
- Chrisp, M. P. 1983, *Appl. Opt.*, 22, 10
- Haber, H. 1950, *J. Opt. Soc. Am.*, 40, 153
- Hutley, M. C. 1982, *Diffraction Grating* (Academic Press: London)
- Kamphuis, J., Sancisi, R. & van der Hulst, T. 1991, *A&AL*, 244, 29
- Kim, S., Steveley-Smith, L., Sault, R. J., Kesteven, M. J., McConnell D. & Freeman K. C. 1997, *Pub. Astron. Soc. Aust.*, 14, 1
- Martin, C., Jelinsky, P., Lampton, M., Malina, R. F. & Anger, H. O. 1981, *Rev. Sci. Inst.*, 52, 1067
- Martin, C. & Bowyer, S. 1982, *Appl. Opt.*, 21, 4206
- Meier, R. R. 1991, *Space Sci. Rev.*, 58, 1
- Namioka, T. 1959, *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 446
- Siegmund, O. H. W., Lampton, M. L. & Raffanti, R. 1989, *SPIE Proc.*, 1159, 476
- Smith, A. M. 1967, *ApJ*, 147, 158
- Staveley-Smith, L., Sault, R. J., Hatzidimitriou, D., Kesteven, M. J. & McConnell, D. 1997, *MNRAS*, 289, 225