

**FIMS 타입의 우주관측용 원자외선분광기 광학설계**  
**OPTICAL DESIGN OF FIMS TYPE FAR ULTRAVIOLET SPECTROGRAPH FOR SPACE**  
**OBSERVATION**

선광일<sup>1</sup>, 육인수<sup>1</sup>, 유광선<sup>2</sup>, 이대회<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국천문연구원 우주과학연구부

<sup>2</sup>한국과학기술원 인공위성연구센터

KWANG-IL SEON<sup>1</sup>, IN-SOO YUK<sup>1</sup>, KWANG-SUN RYU<sup>2</sup>, AND DAE-HEE LEE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Astronomy Observatory, Daejeon 373-1, Korea

<sup>2</sup>Satellite Technology Research Center, KAIST, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: kiseon@kao.re.kr

(Received November 25, 2004; Accepted December 29, 2004)

**ABSTRACT**

An imaging spectrograph concept optimized for extended far-ultraviolet emission sources is presented. Although the design was originally developed for FIMS aboard the first Korean science satellite STSAT-1 launched on September 27, 2003, no rigorous theoretical background of the spectrograph design has been published. The spectrograph design employs an off-axis parabolic cylinder mirror in front of a slit that guides lights to a diffraction grating. The concave grating provides moderate spatial resolution over a large field of view. This mapping capability is absent in most astronomical instruments but is crucial to the understanding of the nature of a variety of astrophysical phenomena. The aberration theory presented in this paper can be extended to holographic gratings in order to improve the spatial as well as the spectral resolutions.

*Keywords:* instrumentation: spectrographs – techniques: spectroscopic

**1. 서론**

자외선 특히, 원자외선 및 극자외선 파장대역에 민감한 검출기의 에너지분해능은 극히 제한적이기 때문에  $\lambda/\Delta\lambda > 50$  수준의 분해능조차도 회절격자를 이용해야만 원하는 분해능을 얻을 수 있다. 또한 광학망원경과는 달리 narrow band 필터가 알려져 있지 않기 때문에 회절격자를 이용한 분광기의 이용은 필수적이다.

최초로 개발된 자외선 분광기는 구(sphere)형의 오목 회절격자를 광원과 검출기와 함께 하나의 원(circle)위에 배치한 것으로써 Rowland 분광기라고 불리우며 이때 원을 Rowland circle 이라고 한다(Hutley 1982). 그러나 Rowland 분광기는 비점수차(astigmatism)로 인해 공간분해를 전혀 할 수 없다는 단점이 있다.

공간분해를 하기위해 구형이 아니라 토로이드 또는 타원체 모양의 오목 회절격자를 이용한다. 이때 수차를 줄이고 공간 및 분광 분해능을 향상시키기 위해 가변(variable) 격자상수(ruling constant)를 갖는 구, 토로이드 또는 타원체의 오목 회절격자를 사용하기도 한다(Cash

1991). 그러나 이러한 전통적인 분광기들은 모두 한 점에서 방사형으로 입사하는 광원을 이용하고 있으므로 실험실용 분광기로는 적합하지만 천문관측용으로는 감도(sensitivity)가 좋지 못하다. 따라서 이를 위해 분광기의 앞단에 또 다른 반사경을 이용하기도 한다.

우리 은하 및 외부은하의 넓은 영역으로부터 방출되는 빛을 검출하기 위해서는 유효단면적을 관측시야각에 대해 적분한 값으로 정의되는 grasp 값이 커야한다. 그러나 현재까지 개발되어온 분광기는 대부분 좁은 시야각 관측을 위해서 연구되었기 때문에 grasp 값을 크게 하기 어렵다. 더군다나 자외선관측은 인공위성을 이용해야하는데 위성체의 크기 및 무게에 제한을 받기 때문에 분광기의 감도(sensitivity)를 높이기 어렵다.

FIMS(Far-ultraviolet IMaging Spectrograph, 또는 SPEAR)는 2003년 9월 27일에 러시아 플라세츠크에서 발사된 과학기술위성 1호(STSAT-1)의 주탑재체로써 주요임무는 우리 은하의 고온성간물질 및 수소 분자운을 연구하는 것이다(선광일 외 2000, Seon et al. 2003). FIMS 광

학계는 기존의 자외선분광기와 비교했을 때 매우 독특한 분광기이며 작은 크기로 광시야 관측이 가능한 분광기이다. 따라서 국내 독자적으로 확보 가능한 기술이라는 측면과 국제경쟁력 측면에서 지속적인 연구 가치가 있다.

FIMS의 기초설계는 미국 (버클리 소재) 캘리포니아 대학교의 J. Edelstein에 의해 수행되었다. 한국은 미국측으로부터 제공된 기본 광학사양을 바탕으로 광학계 성능 분석과 허용오차 및 오차예산 분석을 수행하였다(유광선 외 2000, 선광일 외 2001). 유광선 외 (1998)가 FIMS 광학계의 초기설계를 다루고 있지만, 실제 FIMS 광학계와는 다른 Rowland 타입 회절격자를 토로이드 모양의 회절격자에 적용한 이론(Namioka 1959)만을 소개하고 있으며 Chrisp (1983)의 수차이론을 바탕으로 설계검증을 시도하였다. 그러나 실제 FIMS 광학계는 Namioka (1959)의 이론을 따르지 않으며 적용할 수도 없다.

FIMS는 스페인 미션인 EURD (Bowyer, Edelstein, and Lampton 1997)를 기반으로 하고 있으며 포물원통형 반사경을 사용하여 EURD보다 감도를 높이도록 하였다. 그러나 FIMS뿐만 아니라 EURD의 광학계 설계이론은 어디에도 발표된 적이 없다. 따라서 미국과는 독자적으로 FIMS 광학계의 기초설계를 위한 분광기 이론 연구를 수행하였으며 FIMS보다 발전된 분광기가 가능함을 발견하였다. 이 논문은 이러한 연구의 첫 번째 결과로써 FIMS 타입의 우주관측용 광시야 자외선분광기의 기초가 되는 설계 이론을 소개하고자 한다.

## 2. 타원체 회절격자 분광기 설계

그림 1은 FIMS 타입의 광시야 자외선분광기의 개념도를 보여준다. 외부로부터 입사한 빛은 포물원통형(parabolic cylinder, 그림 2에서  $zx$ 평면위의 포물선을  $y$ 축 방향으로 잡아 뽑은 모양) 반사경에 의해서 슬릿위치에서 일직선으로 모이게 된다. 슬릿을 통과한 빛은 회절격자에 의해 분산되어 1차원으로는 분광정보를 주게 되며 동시에 다른 한쪽방향으로는 공간이미지가 맺히게 된다.

### 2.1. 포물원통형 반사경

FIMS의 전신이라고 할 수 있는 EURD에는 포물원통형 반사경이 없으며 슬릿을 통해 입사하는 빛을 회절격자를 통해 분광 및 영상정보를 얻을 수 있도록 하고 있다 (Bowyer, Edelstein, and Lampton 1997). 따라서 EURD의 기하학적인 유효면적은 슬릿의 면적에 해당한다. 또한, 슬릿이 회절격자를 바라보는 각도로부터 입사하는 모든 빛이 영상방향의 한 지점으로 모이게 되므로 실질적으로 1차원 이상의 영상정보는 기대하기 어렵다.

FIMS는 슬릿 앞에 포물원통형 반사경을 놓음으로써 유효면적을 늘리면서 동시에 시야각을 좁힐 수 있었다.

따라서 영상축에 수직인 방향으로 스캔 관측을 수행함으로써 2차원 영상을 얻을 수 있게 된다. 이를 위해서는 그림 2와 같이  $zx$ 평면위의 포물선의 초점이 슬릿의 위치에 놓여야 한다. 이것은 포물선에 평행으로 입사한 빛은 한

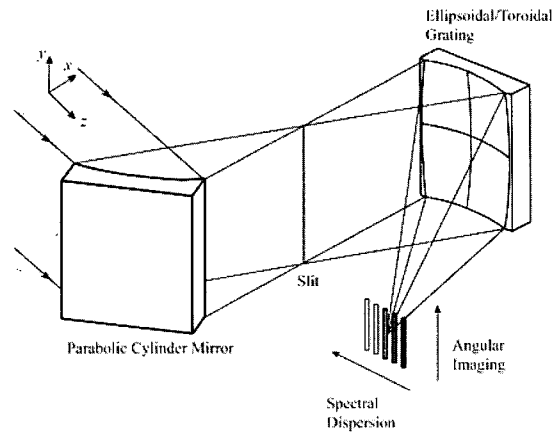


그림 1.- FIMS 타입의 자외선분광기의 개념도

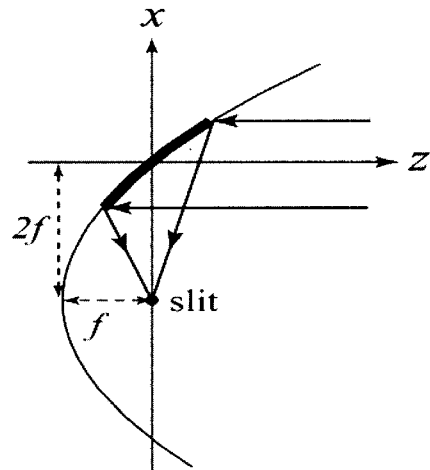


그림 2.- 포물원통형 반사경의 단면

점으로 모인다는 성질을 이용한 것으로서 포물원통형 반사경은 국내 자체적으로 제작되었다(유광선 외 2001, Ryu et al. 2003). 그림 2에서 굵은 곡선이 반사경의 단면을 나타낸 것이며 반사경에서 슬릿사이의 거리는 포물선의 초점거리의 2배가 되어야 한다.

### 2.2. 타원체 회절격자 수차이론

분광기 설계에 있어서 가장 기본은 광원과 회절격자와의 위치관계 및 회절격자와 검출기와의 위치관계를 Fermat

의 원리를 이용하여 계산하는 것이다(Hutley 1982). Fermat 원리로부터 오목 반사형 회절격자에 대한 수차이론을 전개하기 위하여 그림 3과 같은 좌표계를 정의하였다. Rowland 분광기 등에서 사용되는 일반적인 점광원

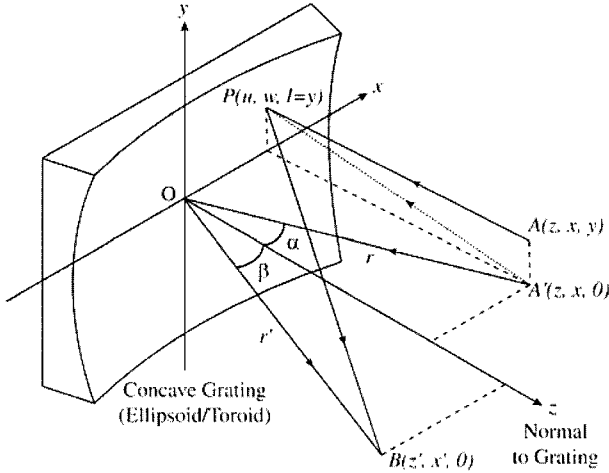


그림 3.- 회절격자 수차이론을 위한 좌표계

(point source)을 고려하면 점 A'으로부터 입사하는 빛은 회절격자위의 점 P에서 반사되어 점 B의 검출기 위치로 가게 된다. 따라서 광경로함수(light path function)는 다음과 같이 주어진다.

$$F = A'P + PB + \frac{w}{d}m\lambda \quad (1)$$

$$= \sqrt{(u-r\cos\alpha)^2 + (w-r\sin\alpha)^2 + l^2}$$

$$+ \sqrt{(u-r'\cos\beta)^2 + (w-r'\sin\beta)^2 + l^2} + \frac{w}{d}m\lambda.$$

이때,  $\alpha$ 는 입사광의 입사각이며  $\beta$ 는 파장  $\lambda$ 에 대한 분산각(diffraction angle)이다. 또한  $m$ 은 회절차수(diffraction order),  $d$ 는 회절격자의 홈(groove) 간격이다.

그러나 FIMS와 같이 포물원통형 반사경에 의해 반사되어 입사하는 빛은 일직선상에 초점을 맺기 때문에 경로 A'P를 지나가지 않고 경로 AP를 지나간다. 따라서 광경로함수는 다음과 같으며 경로 AP의 y축 방향의 성분 이 사라지게 된다.

$$F = AP + PB + \frac{w}{d}m\lambda \quad (2)$$

$$= \sqrt{(u-r\cos\alpha)^2 + (w-r\sin\alpha)^2}$$

$$+ \sqrt{(u-r'\cos\beta)^2 + (w-r'\sin\beta)^2 + l^2} + \frac{w}{d}m\lambda.$$

회절격자의 모양은 타원체 또는 토로이드가 가능하지

만 여기서는 FIMS와 같이 다음 식으로 주어지는 타원체로 가정한다.

$$\frac{(u-a)^2}{a^2} + \frac{w^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} = 1.$$

이 식으로부터  $u$ 를  $w$ 와  $l$ 에 대하여 풀어쓰면 다음과 같다.

$$u = a - a\sqrt{1 - \left(\frac{w^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}\right)}. \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1) 또는 식 (2)에 대입하고 경로함수를 다음과 같이 급수전개하여 각 항의 계수를 3차항까지 나타내면 표 1과 2와 같다.

$$F = \sum_{i,j} F_{ij} w^i l^j$$

표 1은 비교를 위해 점광원인 경우의 광경로함수를 급수전개한 결과이며 표 2는 FIMS 타입과 같은 선광원(line source)에 대해 급수전개한 결과이다. 광원과는 관계없이 0차항은  $F_{00} = r + r'$ 으로 주어지며 회절격자의 원점 O를 지나는 경로에 해당한다. 표의 나머지 항은 전부 영(zero)이다. 표 1과 2에서 1차항은 회절관계식을 나타내며 2차항부터가 수차(aberration)를 나타낸다.

표 1과 2로부터 점광원과 선광원에 대하여 비초점 수차(defocus)를 나타내는  $F_{02}$  항과 비축 수차(coma)를 나타내는  $F_{12}$  항이 있음을 알 수 있다. 원하는 중심파장  $\lambda_0$ , 회절차수  $m$ , 입사각  $\alpha$ 가 주어지면 분산관계식으로부터 분산각  $\beta_0$ 를 구할 수 있다. 중심파장에서 분광방향과 영상방향의 초점을 만들기 위해서는 각각  $F_{02}$  항과  $F_{20}$  항이 없어지도록 해야 한다. 이 조건으로부터 슬릿에서 회절격자사이의 거리  $r$ 과 회절격자에서 검출평면까지의 거리  $r'$ 을 구할 수 있다.

선광원에 대하여 비점수차(astigmatism)를 없애기 위한 조건  $F_{02} = 0$ 로부터  $r'$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$r' = \frac{c^2}{a} \frac{1}{(\cos\alpha + \cos\beta_0)}. \quad (4)$$

이 값을 다시  $F_{20} = 0$ 에 대입하여 정리하면 다음과 같이  $r$ 을 구할 수 있다.

$$r = r' \frac{\cos^2\alpha}{(c^2/b^2 - \cos^2\beta_0)}. \quad (5)$$

표 1.- 점광원에 대한 광경로함수의 급수전개

(i, j)	$F_{ij}$ for point source
(1,0)	$\frac{m\lambda}{d} - (\sin\alpha + \sin\beta)$
(2,0)	$\cos\alpha \left( \frac{\cos\alpha}{r} - \frac{a}{b^2} \right) + \cos\beta \left( \frac{\cos\beta}{r'} - \frac{a}{b^2} \right)$
(0,2)	$\frac{1}{r} - \frac{a}{c^2} \cos\alpha + \frac{1}{r'} - \frac{a}{c^2} \cos\beta$
(3,0)	$\frac{3\sin\alpha\cos\alpha}{r} \left( \frac{\cos\alpha}{r} - \frac{a}{b^2} \right) + \frac{3\sin\beta\cos\beta}{r'} \left( \frac{\cos\beta}{r'} - \frac{a}{b^2} \right)$
(1,2)	$\frac{3\sin\alpha}{r} \left( \frac{1}{r} - \frac{a}{c^2} \cos\alpha \right) + \frac{3\sin\beta}{r'} \left( \frac{1}{r'} - \frac{a}{c^2} \cos\beta \right)$

표 2.- 선광원에 대한 광경로함수의 급수전개

(i, j)	$F_{ij}$ for line source
(1,0)	$\frac{m\lambda}{d} - (\sin\alpha + \sin\beta)$
(2,0)	$\cos\alpha \left( \frac{\cos\alpha}{r} - \frac{a}{b^2} \right) + \cos\beta \left( \frac{\cos\beta}{r'} - \frac{a}{b^2} \right)$
(0,2)	$\frac{1}{r'} - \frac{a}{c^2} \cos\alpha - \frac{a}{c^2} \cos\beta$
(3,0)	$\frac{3\sin\alpha\cos\alpha}{r} \left( \frac{\cos\alpha}{r} - \frac{a}{b^2} \right) + \frac{3\sin\beta\cos\beta}{r'} \left( \frac{\cos\beta}{r'} - \frac{a}{b^2} \right)$
(1,2)	$-\frac{3\sin\alpha}{r} \left( \frac{a}{c^2} \cos\alpha \right) + \frac{3\sin\beta}{r'} \left( \frac{1}{r'} - \frac{a}{c^2} \cos\beta \right)$

유광선 외 (2000)의 표 2에 제시된 광학사양은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

### 2.3. 초점평면의 방정식

슬릿, 회절격자, 검출기의 중심위치가 결정되면 이제는 회절격자의 법선벡터에 대해 검출기가 놓이는 초점평면의 기울기를 결정하여야 한다. 초점평면은 중심파장  $\lambda_0$ 뿐만 아니라 다른 파장의 초점들로 만들어지는 곡면과 가장 잘 일치하는 평면을 선택하여야 한다. 즉, 초점평면은 중심파장  $\lambda_0$ 에서 초점곡면에 접하는 평면이 된다.

회절격자의 원점으로부터 거리가  $p$ 이고 법선벡터의 각도가  $\theta$ 인 평면의 방정식은 다음과 같다.

$$z \cos\theta + x \sin\theta = p.$$

이때  $z = r' \cos\beta$  와  $x = r' \sin\beta$  를 만족하므로 평면의 방정식은

$$r' \cos(\beta - \theta) = p = r_0' \cos(\beta_0 - \theta) \quad (5)$$

이 된다. 두 번째 등식은 초점평면이 중심파장의 초점  $(r_0', \beta_0)$ 을 지난다는 조건을 이용한 것이다. 중심파장의 초점  $(r_0', \beta_0)$  근방에서의 기울기를 식 (5)로부터 구하면 다음과 같다.

$$\frac{dr'}{d\beta} = r_0' \tan(\beta_0 - \theta). \quad (6)$$

한편, 식 (4)로부터 중심파장의 초점에서의 초점곡면의 기울기는 다음과 같다.

$$\frac{dr'}{d\beta} = \frac{c^2}{a} \frac{\sin\beta_0}{(\cos\alpha + \cos\beta_0)^2} = r_0' \frac{\sin\beta_0}{(\cos\alpha + \cos\beta_0)}. \quad (7)$$

초점곡면의 기울기와 초점평면의 기울기가 같아야 한다는 조건, 즉, 식 (6)과 식 (7)의 오른쪽변이 같아야 한다는 조건으로부터 초점평면의 회절격자에 대한 상대적인 기울기  $\theta$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta = \beta_0 - \tan^{-1} \left( \frac{\sin\beta_0}{\cos\alpha + \cos\beta_0} \right). \quad (8)$$

FIMS에 대해서는 약 -2.54도를 얻을 수 있다.

### 3. 타원체와 토로이드 회절격자와의 관계

구형의 회절격자대신 비점수차를 줄이기 위해 처음으로 제안된 오목거울의 형태는 타원체가 아니라 토로이드 모양이다. 현재도 타원형보다는 토로이드 모양의 회절격자

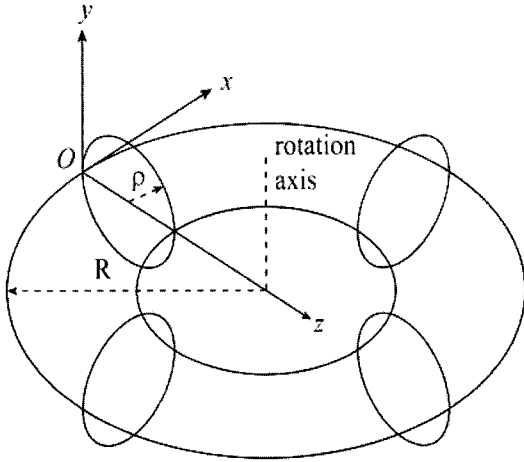


그림 4.- 토로이드의 곡률반경 정의

를 선호하는 경우가 많이 있으므로 타원체 회절격자와 토로이드 회절격자와의 기하학적인 관계를 아는 것은 의미가 있다.

토로이드의 곡률은 그림 4와 같이 정의되는  $\rho$ 와  $R$ 에 의해 표현되며 토로이드의 표면을 기술하기 위한 방정식은 아래와 같다.

$$(u - R)^2 + w^2 = (\rho - R - \sqrt{\rho^2 - l^2})^2.$$

이 식으로부터 타원체와 마찬가지로  $u$ 를  $w$ 와  $l$ 에 대해 풀어쓰면 다음과 같다.

$$u = R - R \left[ 1 - \frac{(w^2 + l^2)}{R^2} + \frac{2\rho}{R} \left( \frac{\rho}{R} - 1 \right) \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{w^2}{\rho^2}} \right) \right].$$

위의 방정식을 4차항까지 급수전개하면 다음과 같다.

$$u = \frac{w^2}{2R} + \frac{l^2}{2\rho} + \frac{w^4}{8R^3} + \frac{l^4}{8\rho^3} + \frac{w^2 l^2}{8R^3} + \dots \quad (9)$$

마찬가지로 타원체의 표면을 나타내는 식 (3)을 4차항까지 급수전개하면 다음과 같다.

$$u = \frac{aw^2}{2b^2} + \frac{al^2}{2c^2} + \frac{aw^4}{8b^4} + \frac{al^4}{8c^4} + \frac{aw^2 l^2}{4R^2 \rho} + \dots \quad (10)$$

따라서 두 식 (9)와 식 (10)의 2차항까지만 비교하면 타원체와 토로이드는  $R = b^2/a$ ,  $\rho = c^2/a$  에 대응함을 알 수 있다. 또한,  $a = c$  인 경우는 4차항들 중에서  $l^4$  항만 동일하고,  $a = b$  인 경우는  $w^4$  와  $w^2 l^2$  항이 동일함을 알

수 있다. 즉,  $a = c$  인 경우보다  $a = b$  인 경우 타원체가 토로이드와 더 유사한 모양을 가지고 있으며, 당연한 결과이지만  $R = \rho$  인 토로이드는  $b = c$  인 타원체와 완전히 동일하다.

표 1과 2에서 3차항까지만 수차항을 고려했으므로 동일하게 식 (9)와 식 (10)에서도 3차항까지만 고려하면 토로이드는 타원체와 동등함을 알 수 있다. 따라서 3차항까지만 고려한다면 토로이드에 대해 수차이론을 전개할 필요가 없으며 타원체로부터 얻어진 결과에  $R = b^2/a$  와  $\rho = c^2/a$  을 치환하면 된다.

#### 4. 결론 및 토의

이 연구에서는 원자외선관측을 위한 광시야 분광기에 대하여 Fermat의 원리를 이용하여 수차이론을 전개하였다. 2003년 9월 발사된 FIMS는 미국측의 공동연구자에 의해 기초 설계가 수행되었으며 한국측에 설계이론이 제공되지는 않았다. 또한 FIMS의 전신인 EURD 뿐만 아니라 FIMS 타입의 분광기 설계에 대한 수차이론은 발표된 적이 없다. 따라서 독자적으로 FIMS 타입의 분광기 설계이론에 대한 연구를 수행하였다.

FIMS 타입의 광학계는 넓은 시야에 걸쳐 관측이 필요할 때 적합한 시스템이며 소형화가 가능하다. 그러나 FIMS 관측결과로부터 은하평면 근방에서는 O 또는 B형의 별이 많아 별에 의한 영향으로 성간물질의 연구에 어려움이 있다. 원자외선을 이용한 전천관측의 중요성은 성간물질관련 국제학술회의에서 여러 번 언급된 바 있다 (예를 들면, Cox 1995, Heiles 2004). 따라서 이 연구의 결과를 발전시켜 높은 공간분해능을 갖는 자외선분광기의 연구가 필요하다.

최근에 이 연구의 결과를 기반으로 하여 영상 및 분광 모두에 대해 FIMS보다 고분해능의 자외선분광기의 설계가 가능함을 발견하였고, 자세한 분석과 함께 발표될 것이다 (Seon et al. 2005, 준비 중). 또한, 포물면통형 반사경이 아닌 포물면 반사경을 이용하거나 홀로그래름을 이용한 광시야 자외선분광기의 설계 연구를 수행하고자 한다.

#### 참고 문헌

선광일, 유광선, 육인수, 박장현, 남옥원, 한원용, 선종호, 민경욱, Edelstein, J., Korpela, E. 2000, 한국우주과학회지, 17, 77  
 선광일, 육인수, 유광선, 박장현, 진호, 선종호, 오승환, 이진근, 이대회, 남옥원, 한원용, 민경욱, 이우백, Edelstein, J., Korpela, E. 2001, 한국우주과학회지, 18,

- 219
- 유광선, 선광일, 육인수, 선종호, 남옥원, 이대회, 민경옥, 한원용, Edelstein, J., Korpela, E. 2000, 한국우주과학회지, 17, 67
- 유광선, 선광일, 민경옥, Edelstein, J. 1998, 한국우주과학회지, 15, 359
- 유광선, 육인수, 선광일, 이윤우, 남옥원, 신종호, 홍소진, 이대회, 진호, 오승환, 이진근, 민경옥, 한원용, 박장현, Edelstein, J., Korpela, E. 2001, 한국우주과학회지, 18, 239
- Bowyer, S., Edelstein J., & Lampton, M. 1997, ApJ, 485, 523
- Cash, W. 1991, Adv. Space Res., 11, 171
- Chrip, M. P. 1983, Appl. Opt., 22, 10
- Cox, D. P. 1995, in ASP Conf. Ser. 80, The physics of the Interstellar Medium and Intergalactic Medium, eds. A. Ferrara, C. F. McKee, C. Heiles, & P. R. Shapiro (San Francisco: ASP), p.317
- Heiles, C. 2004, talk in Diffuse Matter in the Galaxy: Observations Confront Theory, A Meeting in Honor of the 65th Birthday of Carl Heiles
- Hutley, M. C. 1982, Diffraction Gratings, (London: Academic Press)
- Namioka, T 1959, J. Opt. Soc. Am., 49, 446
- Ryu, K., Nishikida, K., Edelstein, J., Seon, K., Yuk, I., Min, K., Han, W., Korpela, E., Chung, R., McKee, K. 2003, in Future EUV/UV and Visible Space Astrophysics Missions and Instrumentation, ed. J. C. Blades, O. H. W. Siegmund, Proceedings of SPIE Vol. 4854, p.457
- Seon, K.-I., Park, S., Park, J.-H., Yuk, I.-S., Jin, H., Nam, U.-W., Han, W., Ryu, K.-S., Lee, D.-H., Oh, S.-H., Park, Y.-S., Korpela, E., Edelstein, J., Nishikida, K. 2003, J. of Korean Phys. Soc., 43, 565