

과학위성 1호 원자외선 분광기 광학부의 TOLERANCE 분석¹

유광선², 선광일³, 육인수³, 선종호², 남육원³, 이대회², 민경욱², 한원웅³,
Jerry Edelstein⁴, Eric J. Korpela⁴

²한국과학기술원 인공위성연구센터

³한국천문연구원

⁴Space Sciences Lab., University of California, Berkeley

TOLERANCE ANALYSIS OF FIMS OPTICAL SYSTEM¹

K.-S. Ryu², K.-I. Seon³, I.-S. Yuk³, J.-H. Seon², U.-W. Nam³,
D.-H. Lee², K.-W. Min², W. Han³, J. Edelstein⁴, E. J. Korpela⁴

²Satellite Technology Research Center, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

³Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-348, Korea

⁴Space Sciences Lab., University of California, Berkeley, CA, U.S.A.

E-mail: ksryu@satrec.kaist.ac.kr

(Received March 31, 2000; Accepted May 15, 2000)

요 약

2002년에 발사 예정인 과학 위성 1호의 주 탑재체로 원자외선 분광기가 실릴 예정이다. 원자외선 분광기는 영상과 함께 분광의 기능을 함께 수행을 하게 되는데, 이를 위해 광학적인 요소로서 포물 원통 반사경, 슬릿, 타원형 회절 반사경, 그리고 MCP가 사용된다. 천문학적 관측 목표의 달성을 위한 각 광학 요소의 생산 오차와 위치 오차의 허용 한계를 구하였으며, 이 과정에서 도식적 단순화를 통해 민감도표를 해석하여 각 광학 요소의 조작 범위와 정밀도 등을 구하였다. 선형 오차의 경우 $15 \mu\text{m}$, 각 오차의 경우 $2'$ 이내의 정밀도로 광학적 요구 조건을 만족할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Far-ultraviolet IMaging Spectrograph (FIMS) is the main payload of the first Korean scientific satellite, KAISTSAT-4, which will be launched in 2002. The optical system of FIMS consists of parabolic cylinder mirror, slit, ellipsoidal reflection grating, and MCP to get spatial information as well as spectral information. Allowed ranges of manufacturing and positioning error are derived for each optical components to achieve the astronomical goals. In the procedure, graphical simplification is dedicated to understand sensitivity table and to derive range and precision of manipulation for each optical component. The result shows that precision of $15 \mu\text{m}$ for linear and of $2'$ for angular manipulation fulfills optical requirements.

¹이 연구는 과학기술부 과학위성 1호 연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

1. 서 론

Far ultraviolet IMaging Spectrograph (FIMS)는 2002년에 발사 예정인 과학 위성 1호의 주 탐재체로서 원자외선 영역에서 천문관측과 지구의 상층 대기 관측을 수행하는 역할을 한다 (유광선 2000). 이를 위해 개념적인 설계가 이루어진 바 있으며 (유광선 외 1998), 이후 천문학적 관측 목표에 대한 좀 더 체계적인 연구가 이루어 졌다. 선광일 외 (2000)는 FIMS의 주요 관측 목표라 할 수 있는 은하 내부와 주변의 고온 플라즈마에서 방출되는 C IV와 O VI선에 대한 이전의 관측을 토대로 광학 시스템에 요구되는 제한 조건을 도출한 바 있다.

FIMS의 광학계는 기본적으로는 Espectrografo Ultravioleta extremo para la observacion de la Radiacion Difusa (EURD) (Bowyer et al. 1995, Bowyer, Edelstein & Lampton 1997)의 형태를 유지하면서 슬릿 앞 부분에 90°의 각도로 빛을 꺾어 주는 포물 원통 반사경 (parabolic cylinder mirror)을 추가 함으로써 집광력을 크게 향상 시켰으며, 분광 정보와 함께 영상 정보를 획득할 수 있도록 하여 자외선 영역에서 밝은 빛을 내는 O, B형 별이나 백색왜성으로부터 diffuse emission source를 분리할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 천문학적인 목표 달성을 위해 주어진 광학적 성능의 요구 조건을 만족시키기 위한 기계-광학적 (opto-mechanical) 오차 허용범위를 구하였으며, 미세 조정이 필요한 조작의 경우에는 필요한 조정 범위와 정밀도를 유도하여 실제 기계 제작에 활용할 수 있도록 하였다. 특히, 이 과정에서 광학 시스템의 시각적 도식을 이용하여, 복잡한 tolerance의 문제를 단순화하는 방법을 시도하였다. 이를 통해 실제로 민감도표 (sensitivity table)를 이해하는데 큰 효과를 거두었으며, FIMS 이외의 광학 시스템에서도 응용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 광학부 설계 및 관측을 위한 성능의 한계

광학 장치를 제작하기 위해서는 일단 관측하고자 하는 목표를 명확히 해야 하며, 목표가 정해지면 그 목적을 달성하기 위해 거쳐야 하는 몇 가지 단계를 거쳐야 한다. Ginsberg (1981)와 Olson (1977)은 광학 디자인과 제작을 위한 tolerance 작업을, 광학적 목표와 기계적 제한을 고려한 사양, 마운팅 (mounting)과 보상자 (compensator)를 고려한 광학 디자인, 광학적 개략도와 기계-광학적 배치도, 민감도표를 얻기위한 tolerance 분석, 기계-광학적 오차예산 (error budget), 오차예산에 따른 시스템의 성능 분석, 그리고 마지막으로 tolerance 분석의 결과를 디자인에 다시 반영시키는 단계 등으로 구분하여 정리한 바 있다. 물론 이러한 단계를 정확히 따라가는 것이 가장 이상적인 방법이지만, 실제로는 정확히 순서를 지켜가면서 작업이 이루어지지 않는 것이 일반적이다. 그러나, 주어진 제한 조건 하에서 과학적 목표를 달성하기 위해서는 위에서 나열한 단계는 적어도 한번씩은 거쳐야 하고, 한 단계씩 순차적으로 진행 되는 경우도 있지만 동시에 두 단계나 세 단계의 작업을 생각해야 하는 경우도 있으며, 한번의 순차적 작업만으로 끝나는 것이 아니라 주어진 시간 동안 가능한 한 많은 반복 작업으로 확인해야 한다. FIMS의 경우도 이러한 작업 단계를 거치면서 최종적인 기계 조정의 정밀도와 한계 등이 구해진 상태이다. 본 논문에서는 이러한 순서를 최대한 따라가면서 그 동안 이루어진 광학적 설계 요소의 변화와 주요 결과를 소개 하려 한다.

앞에서 언급한 바와 같이 FIMS의 설계 단계 중 가장 우선이 되는 것은 관측 대상과 목표를 정하고 이로부터 광학계의 성능을 정의하는 작업이 필요하다. FIMS의 광학적 성능에 대한 조건은 표 1에

표 1. 과학적 임무 완성을 위한 FIMS 광학부의 성능 제한 조건.

Performance characteristics	Criteria	Comments
Spectral Resolution	<1.8Å at 1035Å	^a For O VI line detection
	<3.0Å at all short wavelength band	
Spatial Resolution	< 10' at all wavelength and all θ	To get same spatial resolution as ϕ
Bore Sight Error in ^b θ	< $\pm 1^\circ$	Half of FOV overlap in θ
Bore Sight Error in ^c ϕ	< $\pm 2.5'$	Half of FOV overlap in ϕ
Wavelength Shift	< 30Å	~ 1/10 shift in a band

^a선광일 외(2000)

^b θ field angle along slit direction

^c ϕ off-axis angle along scan direction

나타나 있다. 가장 우선적인 제약조건은 O VI(1035Å) 선의 검출 가능성에 의해 정의되는 1.8Å의 가장 분해능이며, 이보다 성능이 나빠지면 근접해 있는 Ly β 선이나 O I 선에 묻혀 검출이 힘들다 (선광일 외 2000). 나머지 조건 중 공간 분해능 (spatial resolution)이 실제로 중요한 제약을 주며, 특히 ϕ 방향으로의 시각 방향 오차 (bore sight error)는 두 밴드간의 FOV (Field Of View)가 정렬되어야만 동시에 같은 대상을 관측할 수 있다는 조건으로서, 미세 조정이 불가피한 조건이다.

그림 1에는 FIMS의 관측 원리를 나타내는 구성도가 나타나 있다. 유광선 외 (1998)에 의해 소개된 바와 같이 FIMS는 두 개의 파장 대역 (long wavelength band: 900-1150Å, short wavelength band: 1335-1750Å)을 가지며, 그림과 같이 두 파장 대역이 수직 방향으로 나란히 포개져 있는 형태를 가진다. 슬릿과 나란한 방향에 대해서는 8°의 FOV와 5'의 해상도를 가지며 슬릿의 너비 방향으로서는 5'의 영상을 얻게 된다. 단파장 대역의 경우 4°×5'은 관측과 동시에 Ly α 등의 산란을 측정하게 되므로 실제 FOV는 4°×5'이 된다. 위성 주변의 입자가 검출기로 사용되는 MCP (Micro Channel Plate)에 입사하는 것을 방지해 주는 Ion Rejection Magnet과 관측 대상의 밝기에 따라 입사량을 조절해 주는 shutter 부를 지난 빛은 슬릿을 통과하여 grating에서 반사와 동시에 분산되어 분광 정보를 제공한다. 촛점 평면에는 MCP가 장착되어 있으며, 전자 신호로 변환되어 위성으로 관측 자료를 전달해 준다.

FIMS의 광학계 개발 과정에서 광학적인 사양은 최근의 광학 제작 기술 동향을 최대한 고려하여 몇 차례의 수정을 거쳤으며, 현재 고려되고 있는 사양이 표 2에 정리되어 있다. 앞으로도 미세한 수정이 있을 수 있으나, 여기에 소개된 사양에서 큰 변화는 없을 것이다. 주목할 만한 변화로는 장파장 대역 (long wavelength band)의 줄그음 상수 (ruling constant)를 두 배로 하었는데, 이렇게 하면 다른 order로 분산되는 빛과 각거리가 커져 다른 order에서 산란되어 들어오는 빛의 양을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이는 최근 holographic ruling의 방법을 사용하여 4000 lines/mm 이상의 미세한 줄그음 까지도 가능해진 상황을 최대한 반영한 것이다. 영상 정보와 분광 정보를 함께 얻기 위한 grating의 substrate로는 ellipse of rotation (Namioka 1959)을 사용하는 방법과 toroid (Chrisp 1983)를 사용하는 방법이 사용되어 왔는데, ray-trace 실행 결과에 따르면 FIMS의 두 가지 경우 성능의 차이가 없으며, tolerance는 toroidal surface를 가정하여 이루어 졌다. 단파장 대역 (short wavelength band)의 반사 코팅 물질로는 위성 주변의 입자와의 충돌에, 상대적으로 광학적 성능의 변화가 적은 B₄C (Keski-Kuha *et al.* 1998)를 사용할 예정이다.

표 2. FIMS 광학부의 사양.

Instrument Parameters	Short Wavelength Band	Long Wavelength Band
Band Pass	900-1150 Å	1335-1750 Å
Field of View	^a 4° × 5'	8° × 5'
Mirror Figure	Off-axis Parabolic Cylinder	Off-axis Parabolic Cylinder
Mirror Focal Length	12.5 cm (F/2.2)	12.5 cm (F/2.2)
Slit Height	2.75 cm / $\frac{1}{33}$ for bright target	2.75 cm / $\frac{1}{33}$ for bright target
Slit Width	150 μm	150 μm
Grating Figure	Ellipse of Rotation	Ellipse of Rotation
Ellipse Axis A	180.0 mm	180.0 mm
Ellipse Axis C	242.6 mm	242.6 mm
Toroide Radius ρ	326.97 mm	326.97 mm
Ruling Constant G	2250 lines/mm	3000 lines/mm
Diffraction Order	Second Inside	First Inside
Slit to Grating	177.4 mm	177.4 mm
Grating to Detector	170.0 mm	170.0 mm
Input Angle α	21.9°	21.9°
Central Output Angle β ₀	-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
Effective Grasp	0.6 × 10 ⁻⁴ cm ² sr	1.25 × 10 ⁻⁴ cm ² sr

^a 4° × 5' for background observation

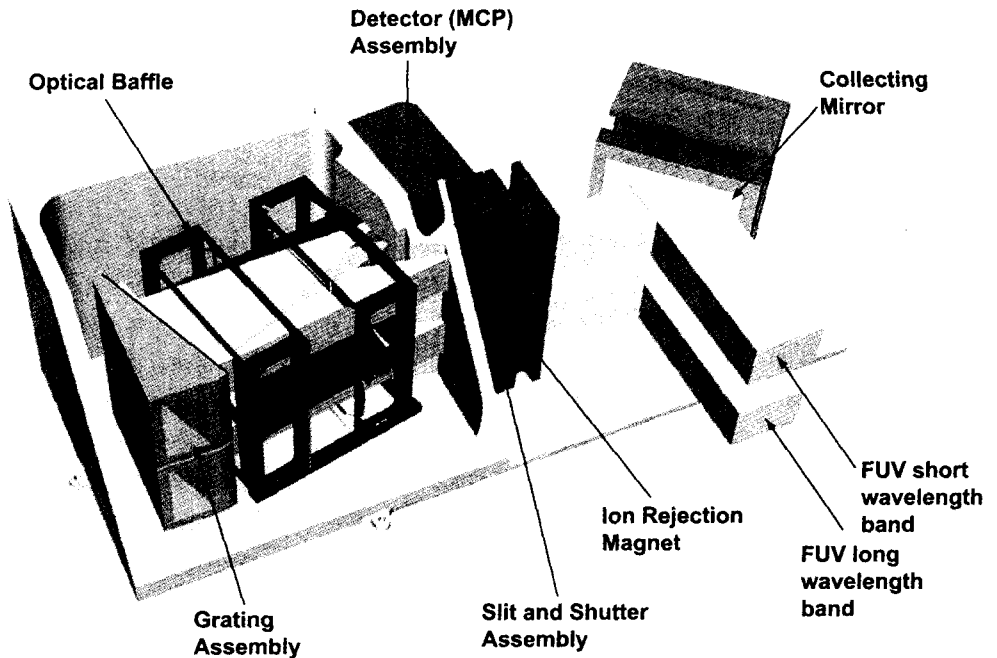


그림 1. FIMS의 관측 원리를 나타내는 3차원 개념도.

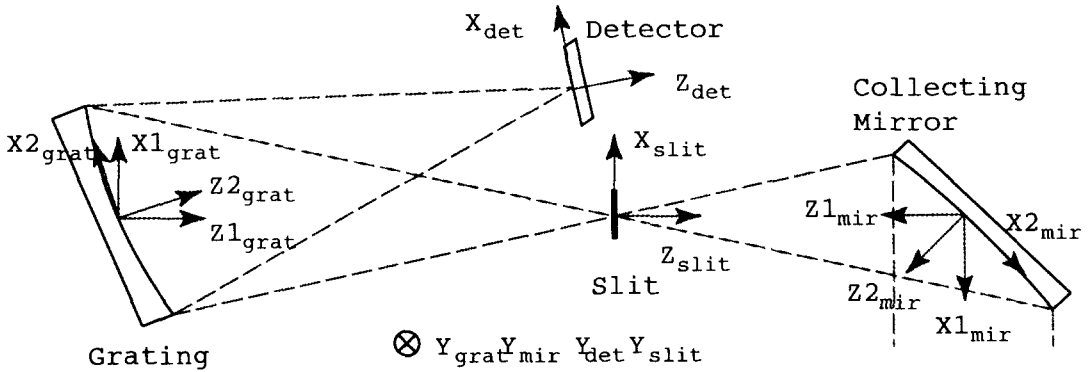


그림 2. FIMS 광학부의 tolerance 분석을 위해 사용된 좌표계.

3. Tolerance 분석 및 결과

Tolerance의 분석은 크게 광학 부품의 생산 오차 (manufacturing error)와 생산된 부품의 조립과 마운팅 (mounting)에서 생길 수 있는 오차로 분리해서 수행하는 것이 일반적이다. 최종적으로는 두 가지 오차를 함께 고려해야 광학 시스템의 성능을 정확히 기술할 수 있으나, tolerance 분석 과정에서 이들을 동시에 다루는 것은 쉽지 않은 일이며, 일반적으로 따로 분석을 한 뒤 최종적으로 오차 예산 (error budget)을 할 때, 함께 고려하게 된다. 먼저 조립과 마운팅에서 생길 수 있는 오차를 고려하기 위해 FIMS 광학계를 구성하는 광학 부품을 나열해 보면, 포물 원통 반사경, 슬릿, grating, 그리고 MCP 등이 있다. 물론 filter나 baffle 등의 부품들도 있지만 실제로 광학적 성능을 좌우할 정도는 아니므로 tolerance 분석에서 고려할 필요는 없다. 4개의 부품에 대해 X, Y, Z 축으로의 선형적 오차와 회전 오차가 있을 수 있으므로 $4 \times 6 = 24$ 종류의 오차가 있을 수 있으며, 각각의 오차에 대해, 2장에서 언급한 성능 제약 조건이 어떻게 변화하는지를 모두 분석해야 하므로 $24 \times 6 = 144$ (표 1에 나타나 있는 5가지의 성능 제약 조건 중 공간 분해능의 경우 θ 와 ϕ 방향을 독립적으로 고려해야 하므로 모두 6가지의 성능 제약 조건을 가짐)가지의 경우에 대한 분석을 해야 광학적 성능을 완벽하게 분석할 수 있다. 이를 간단히 하기 위해 슬릿을 기준으로 생각을 하게 되면, 슬릿 자체에 대한 오차는 없으므로 생략할 수 있다.

그림 2에는 FIMS 광학계의 단면도와 함께 tolerance 분석에 사용된 좌표축이 나타나 있다. 반사경과 grating의 경우 마운팅과 조정 (adjusting) 방법에 따라 두 가지의 축을 생각할 수 있는데, 반사경, 슬릿, 그리고 grating을 연결하는 FIMS의 주요 광축을 Z축으로 삼는 방법과 각 부품의 수직 방향을 기준으로 삼는 방법이 있다. 두 가지 방법 모두에 대해 tolerance 분석을 수행하여 장점을 가진 축으로 미세 조정을 선택하기로 하였다. 분광 분해능이나 공간 분해능과 같이 광학적 성능을 표현하는 요소를 tolerance 분석의 경우 merit function (Zemax 1999)이라고 하며, 2장에서 언급한 성능 조건을 merit function으로 하여 각각의 오차에 따른 민감도 (sensitivity)의 변화를 그래프로 표현하고 이를 분석하는 방법을 사용하였다.

이러한 과정을 거쳐 얻어진 모든 가능한 오차에 대한 민감도표 (sensitivity table)가 표 3에 나타

표 3. Tolerance 분석 결과: 각 축과 광학적 요소에 대한 민감도표.

Component	Operation	Spec. Res.	Spat. Res.	θ shift	ϕ shift	ϕ width	λ shift
Mirror	^a ΔZ_1	.	.	.	$\pm 2.20\text{mm}$	$\pm 0.44\text{mm}$	.
	ΔZ_2	.	.	.	$\pm 0.12\text{mm}$	Δ	.
	ΔX_1	.	.	.	$\pm 0.10\text{mm}$	Δ	.
	ΔX_2	.	.	.	$\pm 0.14\text{mm}$	$\pm 0.36\text{mm}$	.
	ΔY	.	.	.	.	.	.
	Z_{1R}	.	$\pm 17'$	$\pm 61'$	.	$\pm 29'$	.
	Z_{2R}	.	$\pm 24'$	.	.	$\pm 31'$	.
	X_{1R}	.	.	$\pm 61'$	$\pm 27'$	$\pm 75'$	.
	X_{2R}	.	$\pm 23'$	$\pm 45'$	$\pm 25'$	$\pm 40'$	.
	Y_R	.	.	.	$\pm 1.3'$	Δ	.
	ΔFoc	.	.	.	$\pm 3.00\text{mm}$	$\pm 5.00\text{mm}$	.
Grating	ΔZ_1	$\pm 0.22\text{mm}$	.	.	.	.	.
	ΔZ_2	$\pm 0.25\text{mm}$	.	.	.	.	Δ
	ΔX_1	$\pm 2.40\text{mm}$	.	.	.	.	$\pm 1.3 \text{ mm}$
	ΔX_2	$\pm 0.53\text{mm}$	.	.	.	.	Δ
	ΔY	$\pm 3.75\text{mm}$	$\pm 1.9\text{mm}$	$\pm 3.00\text{mm}$	.	.	.
	^b Z_{1R}	$\pm 28'$	$\pm 15'$	Δ	.	.	.
	Z_{2R}	$\pm 35'$	$\pm 18'$	Δ	.	.	.
	X_{1R}	$\pm 79'$	$\pm 45'$	$\pm 31'$	.	.	.
	X_{2R}	$\pm 41'$	$\pm 23'$	$\pm 32'$	.	.	.
	Y_R	$\pm 18'$	.	.	.	.	$\pm 25'$
	ΔR	$\pm 0.22\text{mm}$	.	.	.	.	.
$\Delta \rho$	.	$\pm 10.0\text{mm}$	.	.	.	.
Detector	ΔZ	$\pm 0.42\text{mm}$	.	.	.	.	.
	ΔX$	.	.	.	.	.	\pm 2.40\text{mm}$
	ΔY	$\pm 5.40\text{mm}$	.	$\pm 3.00\text{mm}$	.	.	.
	Z_R	$\pm 61'$	.	.	.	.	.
	X_R	.	.	.	.	.	.
	Y_R	$\pm 160'$	.	.	.	.	.

^a ΔZ_1 linear error along Z_1 axis^b Z_{1R} angular error about Z_1 axis

나 있다. 표에 나타난 숫자는 광학 부품이 임의의 조작 오차가 merit function, 즉 광학적 성능을 나타내는 6개의 척도의 한계 내에 있는 범위를 나타낸다. 표에서 공백으로 표시된 경우는 민감도가 사실상 거의 없는 경우를 나타내며 Δ 는 민감도가 존재하지만 시스템에 영향이 거의 없는 경우를 나타낸 것이다. 표에 나타난 숫자만으로 시스템의 광학적 상황을 정확히 이해하기는 어려우며 가장 눈에 띄는 점은 슬릿을 중심으로 반사경과 grating을 분리하여 생각할 수 있다는 점이다. 공간 분해능과 θ shift 등에서는 반사경과 grating 모두 성능에 관계하지만 분광 분해능 (spectral resolution), λ shift의 경우에는 grating과 detector만 관계가 있고, ϕ shift와 ϕ width의 경우 반사경만이 관계한다. 이러한 민감도표가 실제로 광학 시스템을 구성하는데 직접 사용될 수는 없다. 각각의 오차는 다른 모든 오차가 없다는 가정 하에서 계산된 값이기 때문이다.

민감도표를 분석하면서 경험적으로 알 수 있었던 사실은 민감도표를 해석하는 일반적인 방법은 없으며, 다만 일종의 원칙으로 생각할 수 있는 점은 동일한 merit function에 민감한 오차 (예를 들면, ϕ shift에는 ΔZ , ΔX , X_R , Y_R , 그리고 ΔFoc 등이 민감하다)들은 서로 독립적이거나 서로 연관 (coupled)되어 있다는 것이다. 두 가지 경우에 대해 오차 예산 (error budget)의 방법이 달라지는데, 오차가 독립적인 경우에는 tolerance의 효과가 R.S.S. (square Root of the Sum of the Squares)로 주어지는 점을 이용하여 분석이 가능하며 (Smith 1985) 오차가 서로 연관되어 있는 경우에는 서로 보상자 (compensator)로 사용될 수 있는데, 이 때는 오차가 R.S.S.로 계산되지 않으며, 각각을 대략적

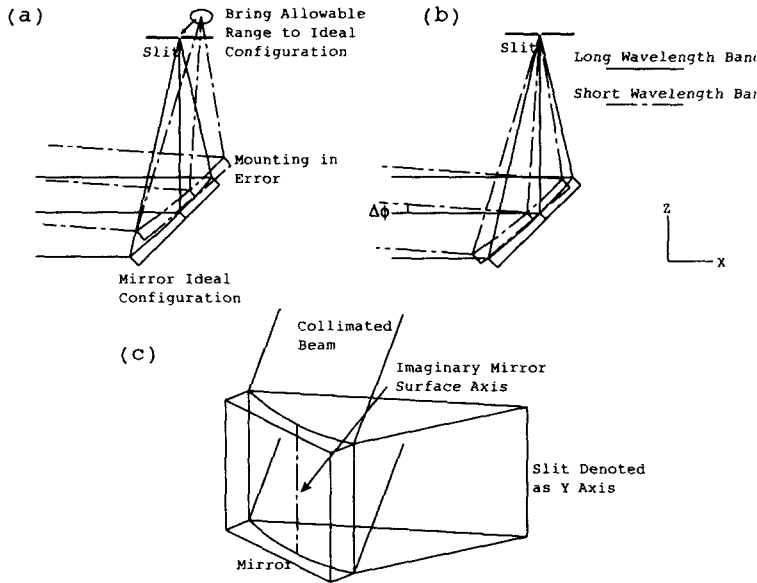


그림 3. 포물 원통 반사경의 광학적 목적의 단순화.

인 조정 (rough adjusting)과 미세 조정 (fine adjusting) 등의 역할로 분리시키거나, 어느 하나를 고정시키고 나머지 조작으로 이를 보정하는 방법 등의 가능성을 생각할 수 있다.

FIMS의 경우 슬릿을 중심으로 반사경과 grating을 나누어 생각하는 것이 용이하다. 또, 민감도표에만 의존하는 것보다는 직관적인 분석과 함께 고려하는 것이 문제를 쉽게 해결하는 방법이다. 그림 3는 포물 원통 반사경의 제한 조건을 도식적으로 나타낸 것이다. 포물 반사경이 만족해야 하는 조건은 세 가지로 나누어 생각할 수 있는데, 첫번째 조건은 그림 3(a)에 나타낸 바와 같이 디자인 된 이상적인 위치로 허용된 초점 범위를 이동 시키는 것이다. 이는 주로 ϕ 방향으로의 공간 분해능과 관계된 것으로 X 축 (linear movement along X axis), Z 축, 그리고 Y 회 (rotation about Y axis) 만이 관계한다. 앞의 민감도표를 만들 때에는 반사경과 grating의 경우 두 가지 가능한 좌표축을 제시한 바 있으며, 조정의 민감도가 작은 $X1$ 과 $Z1$ 축을 사용하기로 결정하였으며, 앞으로는 별도의 언급이 없으면 $X1$ 과 $Z1$ 을 X 와 Z 로 표기 하겠다. 이 세가지 조작 중 Y 회와 X 축는 서로 보상을 할 수 있으며, Y 회는 대략적인 조정, X 축는 미세조정을 하는것이 기계적인 문제를 발생시키지 않을 것으로 생각된다.

두번째로, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 장파장 대역의 반사경과 단파장 대역의 반사경이 동일한 방향을 바라볼 수 있도록($\Delta\phi \leq 2.5'$) 조정하는 것이 조건이 된다. 이는 Y 회와 X 축에 의해 가능하며, 이 중 미세 조정에 유리한 X 축 조작에 의해 조정을 하도록 하였다.

마지막으로, 세번째 조건은 그림 3(c)에 나타난 바와 같이 반사경의 원통 축과 슬릿의 축을 평행이 되도록 하는 것이다. 이는 슬릿 전체에서 동일한 성능을 갖도록 조정하는 것으로 설명할 수 있다. 민감도표에서 알 수 있듯이 X 회, $Z2$ 회($Z2$ 축을 중심으로 회전시키는 것이 $Z1$ 축을 중심으로 회전시키는 것보다 기계적으로 용이함) 등의 조작과 관련되어 있다.

표 4. 포물 원통 반사경의 생산과 조작 오차의 허용 한계와 정밀도.

	Manipulation or Optical Parameters	Range of Motion or Allowable Range of Manufacturing	Precision	Comments
Adjustable	Z \bowtie	$\pm 3\text{mm}$	$70\mu\text{m}$	.
	X \bowtie	$\pm 1\text{mm}$	$14\mu\text{m}$	Range > Y \circ precision
	Z \circ	$\pm 1^\circ$	5'	$73\mu\text{m}$ precision assuming lateral dimension is 50mm
	X \circ	$\pm 1.0^\circ$	3.5'	$73\mu\text{m}$ precision assuming lateral dimension is 50mm
	Y \circ	$\pm 3^\circ$	2.12'	$30\mu\text{m}$ precision assuming lateral dimension is 50mm
Manufacturing	ΔFoc	$\pm 2.0\text{mm}$	.	compensated by Z \bowtie
	Off-axis angle	$\pm 2^\circ$	.	compensated by Y \circ
	Figure quality	λ per 2.5 cm @ 633nm	.	Peak to Valley
	Roughness	25Å RMS	.	Scattering

이러한 분석을 통해 반사경의 조작 범위 (adjusting range)와 정밀도 (precision)를 표 4와 같이 구하였다. 정밀도의 경우는 민감도표의 허용범위를 정밀도 비례 상수 (precision scaling factor)로 나누어 주었으며, 이 과정에서 오차 예산도 함께 고려하였다. 모든 결과에 대해 소개하는 대신 Z \bowtie 조작을 예로 들면 조작의 정밀도 (조작 가능한 최소 단위)는 다음과 같이 구하였다.

$$\text{Precision of Z} \bowtie \sim \frac{500\mu\text{m}}{\sqrt{2} \cdot 5} = 70\mu\text{m} \quad (1)$$

이 때, $\sqrt{2}$ 로 값을 나누어 준 이유는 Y \circ 와 X \bowtie 조작이 연관된 동시에 Z \bowtie 와 독립적으로 ϕ width에 영향을 주므로 R.S.S.로 오차가 발생함을 고려하여 허용 오차를 분산시킨 것이다. 실제로는 위와 같이 허용범위 자체를 나누어 주는 것이 아니라 ϕ width의 오차를 $\sqrt{2}$ 로 나누어 준 뒤 다시 허용 범위를 구해야 하지만, 본 논문에서는 ϕ width 오차가 조작 오차에 선형 비례한다고 가정을 하였다 (대략 10 ~ 20 %의 차이가 생길 수 있음).

생산 오차 (manufacturing error)의 경우 기하적인 조작에 의해 보상이 가능한 경우와 (ΔFoc , off-axis angle 등) 그렇지 않은 경우 (figure quality와 roughness)가 있다. Figure quality의 경우 결상의 질에 직접적인 영향을 주며, 최대 오차가 발생했을 때, 빛의 진행 방향이 $150\mu\text{m}$ 의 너비를 갖는 슬릿 밖으로 벗어나지 않도록 충분한 여유를 두었으며, roughness의 경우 반사경 표면에서의 산란과 관계 되는데, 구체적인 모형을 세워 분석하는 대신 문헌 조사를 통해 간단히 고려하였다 (Geary 1993). 산란되는 빛의 비율 (TIS: total integrated scatter)과 반사경의 단면이 갖는 profile이 기준면에서 벗어난 정도를 통계적으로 나타내는 RMS (root mean square)의 값은 다음의 관계를 갖는다.

$$\text{RMS roughness} \sim \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\text{TIS}} \quad (2)$$

위 식에서 알 수 있듯이 동일한 표면의 경우 파장이 짧아질수록 산란되는 빛의 양이 증가한다. FIMS의 관측 영역이 원자외선 영역임을 고려할 때, X-ray 영역 보다는 덜하지만 문제가 될 가능성이 있다. 현재의 폴리싱 (polishing) 기술로는 대략 5\AA 이내로 폴리싱이 가능하지만 FIMS의 반사경과 같이 대칭성이 없는 경우에는 고정밀의 폴리싱이 곤란한 점이 있다. FIMS의 경우 90% 가량의 빛

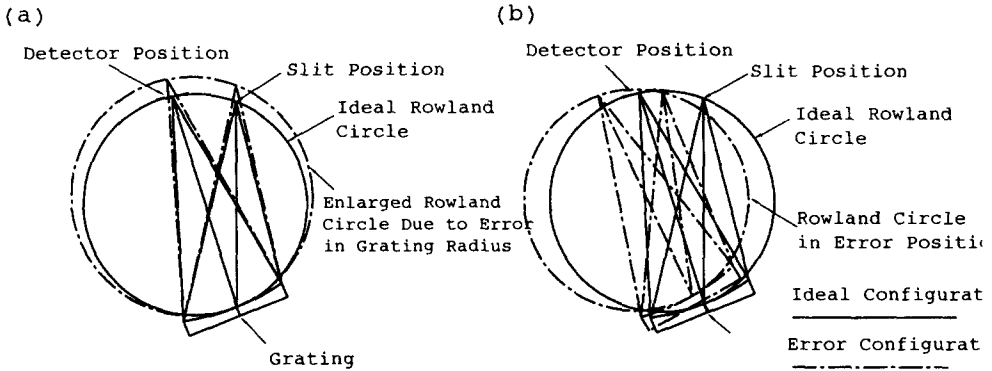


그림 4. 반사형 회절격자의 광학적 목적의 단순화.

표 5. FIMS에 사용된 반사형 회절 격자의 생산과 조작 오차의 허용 한계와 정밀도.

	Manipulation or Optical Parameters	Range of Motion or Allowable Range of Manufacturing	Precision	Comments
Adjustable	Z \leftrightarrow	$\pm 4\text{mm}$	$30\mu\text{m}$	
	Z \odot	$\pm 1^\circ$	$3'$	$44\mu\text{m}$ precision assuming lateral dimension is 50mm
	X \odot	$\pm 1.0^\circ$	$6'$	$88\mu\text{m}$ precision assuming lateral dimension is 50mm
	Y \odot	$\pm 1.5^\circ$	$2.5'$	$35\mu\text{m}$ precision assuming lateral dimension is 50mm
Manufacturing	X \leftrightarrow	$\pm 0.5\text{mm}$	.	$\pm 1.0/2$
	Y \leftrightarrow	$\pm 0.5\text{mm}$	.	$\pm 2.0/4$
	ΔR	$\pm 2.0\text{mm}$	.	.
	$\Delta \rho$	$\pm 5.0\text{mm}$	.	$\pm 10.0/2$
	$\Delta G(L)$	± 20	.	.
	$\Delta G(S)$	± 20	.	.
	Ruling Tilt	$\pm 20'$	.	$\pm 120'/6$
	Grating Normal	$\pm 1^\circ$	.	Range can be thought as a cone

이 원하는 방향으로 반사되도록 25\AA RMS 값을 제한 조건으로 두었으며, 현재 quality test mirror를 제작 중이다.

Grating의 경우에도 반사경과 마찬가지로 분석을 할 수 있다. 그림 5에는 grating이 만족해야 하는 기하적인 조건이 나타나 있다. 반사형 grating의 경우 광원과 초점 평면이 Rowland 원 상에 위치할 때 결상이 이루어지며, 그림 4(a)와 같이 grating 가공 시에 곡률 반경 (radius of curvature)의 오차가 생기면 Rowland 원의 반경도 변하는데, 이 오차는 Z \leftrightarrow 에 의해 보상 (compensation)이 가능하다. 그림 4(b)는 그림 3(a)와 유사한 오차로 생각할 수 있으며, 단면 상에서 grating이 잘못된 위치와 각에 놓여 있을 때, 분광 분해능이 저하되는 상황을 나타내고 있다. 반사경의 경우와 마찬가지로, Z \leftrightarrow 는 독립적으로, Y \odot 과 X \leftrightarrow 는 서로 연관되어 있다. Grating은 반사경처럼 각에 대해 미세 조정이 필요하지는 않으므로 X \leftrightarrow 를 조작하는 대신 X \leftrightarrow 오차를 Y \odot 만으로 보상하는 것이 가능하며, 실제로 ray-trace를 통하여 분광학적 성능의 보상이 가능함을 확인하였다. Grating의 경우에도 그림 3(c)와

같이 평행성 (parallelism)이 중요하며 분석에 포함되었다.

반사경과 마찬가지로 오차 예산을 고려한 각 조각의 이동 범위와 조작 정밀도를 구하였으며, 그 결과가 표 5에 정리되어 있다. X축과 Y축의 경우 허용 범위가 비교적 크고, 다른 조각에 의해 보상이 가능하기 때문에 제작 오차에 포함시켰으며, ΔR 의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 Z축에 의해 보상된다. ΔG 는 독립적으로 ray-trace를 실행하여 허용 범위를 구하였다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 최근에 정해진 FIMS의 광학적 사양을 소개하였으며, 천문학적 관측 목표로부터 정해지는 광학적 성능의 한계에 근거하여 기계-광학적 오차를 제시하는 tolerance 연구가 수행되었다.

각각의 오차에 대한 광학적 성능의 변화를 나타내는 민감도표를 만들었으며, 이를 실제 제작에 응용하기 위하여 도식적 단순화 방법을 사용하여 민감도표를 재해석 하였다. 도식적 단순화 방법은, 민감도표만을 이용하는 방법에 비해, 보상자의 분리, 오차의 예산, 결과의 정리 등 여러 가지 면에서 유용하게 사용되었다. 이 과정에서 오차 예산과 함께 광학 부품의 제작 오차를 구하였으며, 마운팅을 최대한 단순화 하기위하여 보상자에 대한 분석을 수행하였다. 미세 조정의 경우, 선 정밀도 15 μm , 각 정밀도 2' 이내의 조정으로 천문학적 목적을 충분히 달성할 수 있을 것으로 고려된다.

지금까지의 연구는 실제로 제작에 들어가기 전 수치적 해석에 의한 광학 성능의 예측을 수행한 것이며, 향후 테스트를 하기 위한 반사경이나 grating이 제작되면 각각의 성능 테스트와 실제로 미세 조정을 통해 목표로 하는 성능을 만족하는 가에 대한 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

- 선광일, 유광선, 육인수, 박장현, 남옥원, 한원용, 선중호, 민경욱, Edelstein, J., & Korpela, E. J. 2000, 한국우주과학회지, 17, 77
- 유광선 2000, 박사학위논문, 한국과학기술원
- 유광선, 선광일, 민경욱, & Edelstein, J. 1998, 한국우주과학회지, 15, 359
- Bowyer, C. S., Edelstein, J., & Lampton, M. 1997, ApJ, 485, 523
- Bowyer, C. S., Edelstein, J., Lampton, M., Morales, L., Perez-Mercader, J., & Gimenez, H. 1995, in *Astrophysics in the EUV*, ed. S. Bowyer, & R. F. Malina (Dordrecht: Kluwer), 611
- Chrisp, M. P. 1983, Appl. Opt., 22, 10
- Geary, J. M. 1993, *Introduction to Optical Testing* (Washington: SPIE), 136
- Ginsberg, R. H. 1981, *Optical Engineering*, 20, 175
- Keski-Kuha, R. A. M., Blumenstock, G. M., Fleetwood, C. M., & Schmitt, D. 1998, Appl. Opt., 37, 8038
- Namioka, T. 1959, J. Opt. Soc. Am., 49, 446
- Olson, V. 1977, in *Optics News*, Fall
- Smith, W. J. 1985, in Proc. SPIE, 531, 196
- Zemax 1999, *Zemax Optical Design Program User's Guide* (Arizona: Focus Software), 269