

FIMS에 사용되는 비축 포물 원통형 반사경의 제작과 성능 시험 결과

유광선^{1†}, 육인수², 선광일², 이운우³, 남옥원², 신중호¹, 홍소진¹, 이대희¹, 진 호²,
오승한¹, 이진근^{1,2}, 민경욱¹, 한원웅², 박장현², J. Edelstein⁴, E. J. Korpela⁴

¹한국과학기술원 인공위성연구센터, ²한국천문연구원
³한국표준과학연구소, ⁴Space Sciences Lab., U.C. Berkeley

MANUFACTURING AND TEST RESULTS OF OFF-AXIS PARABOLIC CYLINDER MIRROR FOR FIMS

K.-S. Ryu^{1†}, I.-S. Yuk², K.-I. Seon², Y.-W. Lee³, U.-W. Nam², J.-H. Shin¹,
S.-J. Hong¹, D.-H. Lee¹, H. Jin², S.-H. Oh¹, J.-G. Rhee^{1,2}, K.-W. Min¹,
W. Han², J.-H. Park², J. Edelstein⁴, E. J. Korpela⁴

¹Satellite Technology Research Center, KAIST, Tae-jeon, 305-701, Korea

²Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-348, Korea

³Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, 305-600, Korea

⁴Space Sciences Lab. U.C. Berkeley, CA, U.S.A

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

(Received November 10, 2001; Accepted November 30, 2001)

요 약

2002년에 발사 예정인 과학 위성 1호의 주 탑재체로 원자외선 분광기가 실릴 예정이다. 원자의 선 분광기는 영상과 분광의 기능을 함께 수행하게 되는데, 광학 부품 중 포물 원통 반사경의 경우 천문 관측 용으로는 제작된 바가 없어 제작과 이에 관련된 측정 방법을 새로이 고안하여 제작 시험이 이루어 졌다. 관측 목표로부터 도출된 사양 중에서 성능과 가장 밀접한 관계가 있는 형상 오차의 경우 $\sim \lambda/cm$ 의 한계를 만족하였으며, 산란광과 연관된 표면 거칠기의 경우 새로이 고안된 비구면 pitch polishing의 방법으로 R_q 의 값이 1 nm 이하로 감소하였으며, 이로써 전체 파장 영역에서 0.02, 즉 2% 미만의 빛이 산란됨을 간접적으로 확인하였다.

ABSTRACT

Far-ultraviolet IMaging Spectrograph (FIMS) is the main payload of the first Korean scientific satellite, KAISTSAT-4, which will be launched in 2002. Among the optical parts, parabolic cylinder mirror does not have any heritage from previous astronomical missions, so the manufacturing and testing process itself is a challenging issue. We describe the method of manufacturing and measuring of the off-axis parabolic cylinder mirror and our initial experiments to establish the entire manufacturing process. Using the method, the profile error can meet the specification of $\sim \lambda$ per cm which is closely related with the astronomical performances. In case of the surface roughness, temperature controlled pitch polishing reduces R_q under 1 nm implying

[†]corresponding author

that scattering in the entire spectral range of FIMS is less than 2% of the incident UV light.

Keywords: Interstellar Matter, Parabolic Cylinder Mirror, Far Ultraviolet

1. 서 론

FIMS(Far-ultraviolet IMaging Spectrograph)는 2002년에 발사 예정인 과학 위성 1호의 주 탑재체로서 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 좀더 체계적인 연구가 이루어 졌다. 선광일 외(2000)는 FIMS의 주요 관측 목표라 할 수 있는 은하 내부와 주변의 고온 플라즈마에서 방출되는 CIV와 OVI 선에 대하여, 이전의 관측을 토대로 광학 시스템에 요구되는 제한 조건을 도출한 바 있다. 광학적 성능의 요구 조건을 만족시키기 위한 기계-광학적(opto-mechanical) 오차 허용범위를 구하였으며, 미세 조정이 필요한 조작용의 경우에는 필요한 조정 범위와 정밀도를 유도하여 실제 구조물 제작에 활용할 수 있도록 하였다(유광선 외 2000).

FIMS의 광학계는 기본적으로는 EURD(Espectrografo Ultravioleta extremo para la observacion de la Radiacion Difusa)(Bowyer et al. 1995, 1997)의 형태를 유지하면서 슬릿 앞 부분에 90°의 각도로 빛을 반사시켜 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 백색왜성 등으로부터 diffuse emission source를 분리할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 새롭게 시도되는 포물 원통 반사경의 제작과 관측 목표로부터 도출된 사양을 만족하기 위해 고안된 측정 방법과 실제 측정 결과를 소개한다. 비축 포물 반사경을 간섭계를 이용하여 측정하기 위한 연구가 진행되었으며, CGH(Computer Generated Hologram)에서 만들어진 기준 포물 파면을 사용하여 측정 및 폴리싱 과정을 수행하였으며, 초점 평면에서의 성능 평가를 위하여 line spread function을 측정하였다.

2. FIMS PARABOLIC CYLINDER MIRROR의 제작

FIMS의 광학 부품 중에서 반사형 타원 회절 격자의 경우 이전의 여러 천문학 미션에서 일반화되어 일부 광학 회사에서 사용자의 사양에 맞추어 제작을 하고 있기 때문에 주문과 제작이 용이한 반면, 비축 포물 원통 반사경은 천문 관측용으로는 처음 시도되는 부품이기 때문에 제작과 이에 수반된 측정 방법까지 새로 고안해야 하는 문제점이 있었다.

먼저 천문학적 목표를 만족하기 위한 포물 원통 반사경의 개념도가 그림 1에 나타나 있으며, 그 광학적 사양이 표 1과 같이 결정되었다. 포물 원통 반사경의 사양이 결정된 후 비구면 가공의 경험이 있는 국내 광학회사에 가공이 의뢰되었으며, 최초로 시도되는 형태의 반사경이기 때문에 가공의 각 단계에서 측정 방법을 시행착오의 과정을 거쳐 결정하였다.

첫 단계에서는 $\sim 5 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 가진 CNC(Computerized Numeric Control) 가공기계를 이용하여 substrate를 만들게 되는데, 이 단계에서는 profilometer(stylus) 혹은 간섭계를 이용한 측정이 불가능하며 실제 오차를 줄여 나가는데 도움이 되지 않는다. 대신, $\sim 1 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 3차

표 1. FIMS에 사용되는 비축 포물 원통형 반사경의 사양

Parameter	Description
General Description	Off-axis parabola of translation (parabolic cylinder) Form a line focus when illuminated with collimated light Active area : 45 × 84.35 mm Working wavelength : 900 - 2000Å
Figure	Off-axis parabola of translation (parabolic cylinder) Optical path focal length $L = 125.0 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ Off-axis angle $\theta = 90^\circ \pm 1.5^\circ$
Dimensions	Substrate size : 50 × 93.35 × 17.5 mm Polished figured area : 50 × 89.35 mm
Substrate Material	Pyrex
Figure Quality (Parabolic dimension)	50 μm 80% and 100 μm 95% energy width for 4.5cm tall line focus from collimated beam input: Corresponding maximum slope : 10" Corresponding maximum slope: $\sim \lambda$ per cm 633nm
Figure Quality (Cylindrical dimension)	Flatness to 30" Corresponding maximum slope error: 30" Corresponding maximum slope: $\sim 3 \lambda$ per cm 633nm
Surface Roughness	Goal 15 Å rms, Maximum allowed 25Å rms

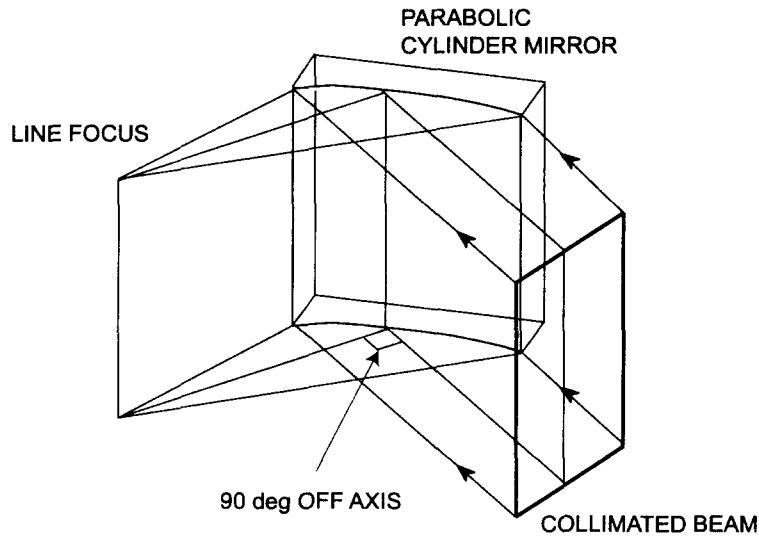


그림 1. FIMS의 포물 원통형 반사경. 평행하게 입사하는 빛이 반사경에서 반사되어 90° 꺾인 곳에 선 모양으로 초점을 형성한다.

원 측정기를 이용하여 substrate의 형상 오차가 $\sim 2 \mu\text{m}$ 이하가 될 때까지 polytex를 이용한 연마를 진행한다. 이 단계에서도 CGH(Computer Generated Holographic) Null을 이용한 간섭계 측정이 어려운데, 이는 substrate 상의 경사가 커서 측정 가능한 간섭무늬가 형성되지 않기 때문이다. 이 때 유용한 측정 방법은 1 cm 당 $\sim 0.1 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 stylus 측정이다. 이 방법은 전체 반사경 면의 표면 오차를 한꺼번에 측정하는 것이 아니라 정해진 경로를 직접 접촉하여 스캔하는 것이라는 단점이 있으나, 3차원 측정기와 함께 측정값을 분석하며 작업을 할 경우 전체 면에 걸쳐 형상오차가 $\sim 1 \mu\text{m}$ 이내가 되도록 할 수 있다.

이후에는 substrate 상의 경사가 충분히 줄어들어 측정 가능한 간섭무늬가 형성되어 간섭계를 사용할 수 있으며, 간섭계 측정을 기준으로 폴리싱의 과정을 진행하게 되며, 형상 오차 뿐 아니라 미세 거칠기도 중요한 요소가 된다. 이 과정에서는 미세 간섭계(micro interferometer)를 이용한 미세 거칠기 측정도 반복적으로 측정한다. FIMS 반사경의 경우 비구면(aspheric)인 동시에 원대칭이 없기(anamorphic) 때문에 기계적인 방법으로는 폴리싱이 불가능하며, 간섭계 측정결과를 바탕으로 기준면보다 튀어나온 부분을, 비구면을 따라 움직일 수 있는 구리판위에 pitch를 입혀 폴리싱을 하였다. 간섭계를 이용하는 경우 이론적으로는 $\lambda/5$ ($\lambda = 6328\text{\AA}$)의 정밀도로 측정이 가능하며, 이는 FIMS의 사양을 검증하는데는 충분한 값이다. 최종적으로는 line spread function을 측정하여 실제 초점 평면상에서의 성능을 점검하였다.

3. PARABOLIC CYLINDER MIRROR의 측정 결과 및 분석

3.1 Stylus를 이용한 측정 결과

Stylus 측정 시스템은 1 cm 당 $\sim 0.1 \mu\text{m}$ 의 정밀도로 광학 표면을 일차원적으로 스캔할 수 있다. FIMS 반사경의 사양에서 볼 수 있듯이 반사경 표면은 cylinder 방향과 포물면 방향으로 각각 측정이 되어야 한다. 먼저, 포물선 방향으로 표면의 형상(profile)을 측정하기 위하여 반사경의 vertex(가장 깊게 들어간 선)를 스캔 축과 수직이 되도록 조정하여야 한다. 선형 스테이지 위에 회전 스테이지를 장치한 후 그 위에 반사경의 substrate를 마운트 시킨 후, stylus 측정기의 최소값을 찾는 기능을 사용하여 vertex를 스캔축과 5'의 오차 범위 내에서 정렬하였으며, vertex를 중심으로 -50 mm에서 50 mm까지 측정을 하였다. 그리고 측정된 형상(profile)은 다음과 같이 주어지는 방정식으로 fitting을 하였다.

$$y = \frac{2x + \sqrt{2}/a - \sqrt{(2x + \sqrt{2}/a)^2 - 4(x^2 - \sqrt{2}x/a)}}{2} \quad (1)$$

여기서, $a = (1/2) \times 125$ 이고, 위의 방정식은 단순한 포물선 방정식 $y = ax^2$ 을 45° 회전시켰을 때 얻어지는 식이다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 stylus를 이용한 측정은 3차원 측정기와 함께 측정값을 분석하면서 전체 면에 걸쳐 형상오차(profile error)가 $\sim 1 \mu\text{m}$ 이내가 될 때까지 반복적으로 수행되었다.

3.2 간섭계를 이용한 측정 결과

간섭현상을 이용하여 원통 광학계(cylindrical optics)를 측정하는 방법 중에서 가장 단순한 방법은 초점 선(focal line) 상에 평면 반사경을 놓아 간섭 무늬를 얻는 방법이다. 이 경우에는 빛이 같은 경로를 따라 돌아오지 않기 때문에 간섭무늬가 중심 면에 대하여 대칭인 오차에 관한 정보만을 얻게

되므로 결과의 분석이 용이하지 않다.

다른 방법으로는 초점선 상에 반사경을 위치시키는 대신 Geary(1995)에 의해 제안된 바와 같이 광섬유(optical fiber)를 기준면(reference surface)로 사용하는 것이다. 포물 원통형 반사경에 대한 간섭무늬 측정을 하기 전에 기존의 on-axis cylinder lens에 대하여 알루미늄이 코팅된 광섬유를 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나, 광섬유의 위치 및 각도에 민감하게 반응하여 안정된 간섭무늬를 얻을 수가 없었으며, 반복된 실험을 통해 광섬유가 직선으로 유지되도록 충분한 장력을 가하기가 어렵다는 것을 알게 되었다.

최근 들어 비구면 광학계를 측정하는데, CGH(Computer Generated Holographic)를 이용하는 방법이 소개 되었다(Arnold *et al.* 1995). 본 실험에서는 Diffraction International 사에서 제작된 "H45F1.5C" Cylinder Null을 이용하여 측정을 시도하였다. 사용된 Cylinder Null은 Feazeu Type 간섭계에서 나오는 평행광을 $f/1.5$ 의 원통형 광속(cylindrical beam)으로 회절 시키며, 광속의 파면 오차는 $\lambda/10$ 이다.

FIMS에 사용되는 비축 포물 반사경을 측정하기 위해서 두단계를 거쳐 실험이 이루어 졌다. 우선은 CGH를 이용하여 on-axis cylinder를 측정하였다. 그 후에 이 cylinder 반사경을 기준(reference)으로 삼아 포물 원통형 반사경의 간섭 무늬를 얻었다. 실험에 직접 CGH를 사용하지 않은 이유는 정렬(alignment)할 때의 자유도와 관계가 있는데, cylinder 반사경을 기준으로 정렬을 하게 되면 포물 원통형 반사경의 간섭무늬를 얻기 위해 미세 조정($\sim 1 \mu\text{m}$ 간격)을 해야 하는 조정 축의 개수가 5개에서 3개로 줄어들게 된다.

그림 2에는 간섭계를 이용하여 측정한 FIMS의 포물 원통 반사경을 간섭계로 측정하는 방법과 그 결과가 나타나 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 CGH를 직접 사용하는 방법으로는 간섭무늬를 얻기가 힘들었으며, 그림 2(c)에 나타난 바와 같이 cylinder mirror를 CGH로 측정한 뒤, 이를 기준면(reference surface)으로 사용하였다. Ryu *et al.*(2000)에 의해 제안된 방법에 따라 CGH를 이용하여 on-axis cylinder mirror에 대한 간섭 무늬 측정이 이루어 졌으며, cylinder 전 영역에 걸쳐 $\lambda/5$ 이하의 표면 오차를 갖는 것을 확인하였다.

그림 2(a)는 초점 선 상에 기준 평면 반사경(reference flat mirror)을 두어 간섭 무늬를 얻는 방법을 나타낸 개념도로서 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 간섭 무늬가 좌우 대칭으로 나타난다. 이는 Fizeau Type 간섭계에서, 기준 평면 반사경에서 반사되어 자신이 지나간 광경로로 다시 돌아 오지 않고 대칭이 되는 반대 방향으로 진행을 하기 때문이며, 이 때문에 반사경의 표면 오차를 정확히 추정할 수 없다. 그림 2(c)에는 기준 원통 반사경(reference cylinder mirror)를 사용하여 포물 원통 반사경의 간섭무늬를 얻기 위한 실험의 개념도가 나타나 있으며, 직접 그림과 같이 정렬하는 것은 불가능하며, 그림 2(a)와 같이 기준 평면 반사경을 이용하여 간섭무늬를 최소화 하도록 포물 원통 반사경을 간섭계의 beam과 90° 가 되도록 정렬한 후, 그림 2(c)와 같은 배열에서는 기준 원통 반사경만을 조정하여 그림 2(d)와 같은 간섭 무늬를 얻는다. 일단 간섭 무늬가 전체 영역에 걸쳐 대략 10개 정도가 되면 간섭계의 phase-shift 측정법에 의해 형상 오차를 측정한다. 이렇게 하면 포물 원통 반사경 전체에 걸쳐, 이상적인 형상 면으로부터 어느정도 벗어나 있는가를 측정할 수 있다.

그림 3에는 간섭계를 이용하여 측정한 표면 형상오차와 stylus로 측정한 형상오차가 함께 나타나 있다. 대부분의 영역에서 $0.2 \mu\text{m}$ 이하의 측정 차이를 보이지만 경사가 커지는 지역에서는 $0.5 \mu\text{m}$ 정

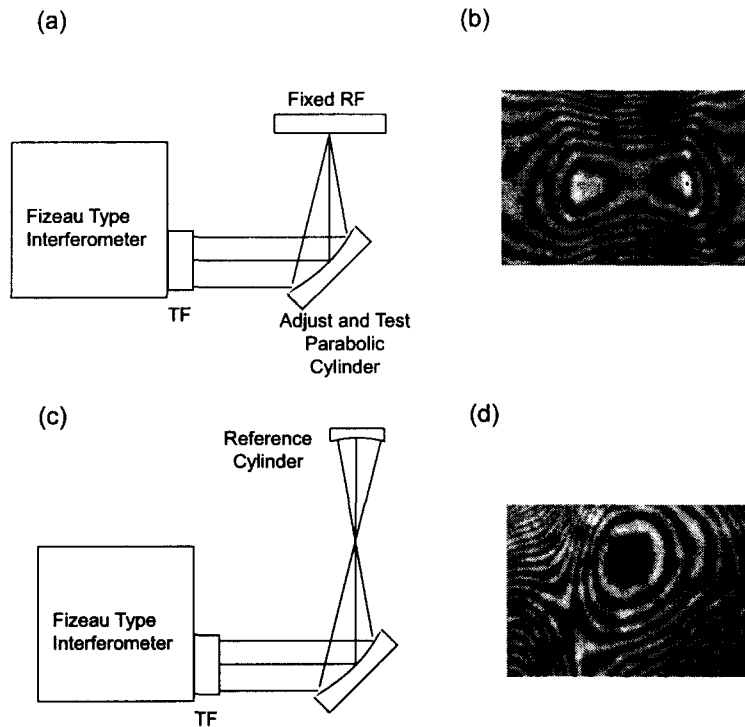


그림 2. Fizeau Type 간섭계를 사용하여 포물 원통형 반사경의 표면 오차를 측정된 결과. (a) 기준 평면 반사경을 이용한 실험의 개념도, (b) (a)의 방법으로 실험을 하였을 때 얻어진 간섭무늬, (c) CGH로 측정된 reference cylinder를 이용한 실험의 개념도, (d) (c)의 방법으로 실험하였을 때 얻은 간섭무늬

도의 차이가 나는데, 이는 간섭무늬를 이용한 측정에서 경사가 급한 지역에서는 측정 오차가 누적되는 현상 때문으로 추정된다. 그림 3의 윗부분에 함께 나타나 있는 값은 그림 2(a)와 같이 기준 평면 반사경을 이용하여 실험 했을 때의 결과다. Stylus 측정 값을 원점에 대해 반사시켜 원래 값과 평균을 취한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

3.3 Line Spread Function 측정 결과

FIMS에 사용되는 비축 포물 원통형 반사경의 line spread function은 칼날 스캔 방식(knife edge scan)으로 측정하였다. Collimator로 부터 입사하는 평행광은 광축에서 45° 틀어진 평면 반사경에 의해 반사되어 시험하고자 하는 포물 원통형 반사경에 입사한다. 초점 평면 상에서 전후 좌우로 미세 조정이 가능한 스테이지 상에 장착된 칼날과 그 뒤에 위치한 현미경을 사용하여 line profile이 최소화 되도록 반사경 마운트를 회전시키고 다시 정렬하는 과정을 반복하여 칼날의 끝부분에 focal line이 평행하게 정렬이 되도록 하였다.

정렬이 된 후에는 1 μm 간격으로 칼날을 이동시키면서 통과된 빛의 세기를 PM tube로 측정하여 적분된 line spread function을 측정하였다. 실린더의 축을 따라서 중앙 부분과 위, 아래 각각 2 cm 떨어진 지점에서 측정이 수행되었으며, 그림에서 볼 수 있듯이 대부분의 에너지가 슬릿 안에 입사함

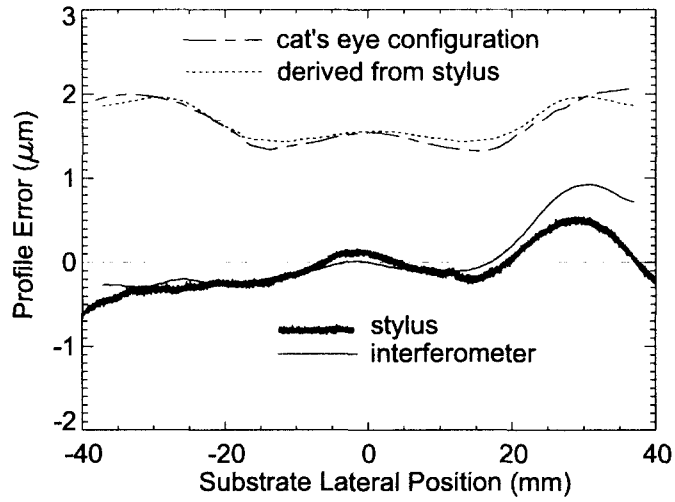


그림 3. Profilometer(stylus)와 간섭계를 사용하여 측정된 형상오차. 위 부분에 함께 나타난 값은 그림 2(a)의 방법(cat's eye configuration)으로 실험했을 때, 얻을 수 있는 형상 오차로 실제 오차를 원점에 대해 반사시켜 원래 값과 평균을 취한 값이다.

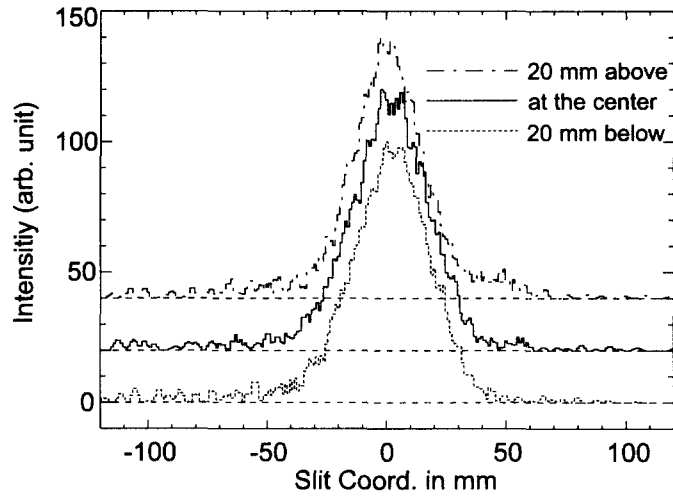


그림 4. 원점을 중심으로 cylinder 축을 따라 각각 중앙, 20 mm 위, 아래 부분에서 측정된 line spread function.

표 2. 실험에 사용된 포물 원통형 반사경의 line spread function으로 부터 유도된 energy width. 전체 반사된 빛의 각각 50%, 80%, 90%, 95%, 그리고 99%가 포함되는 최소 폭을 나타낸 값이다.

Requirement	50 μm 80% and 100 μm 95% energy width				
	50%	80%	90%	95%	99%
20 mm above	22 μm	47 μm	75 μm	107 μm	175 μm
at the center	23 μm	47 μm	65 μm	99 μm	177 μm
20 mm below	23 μm	47 μm	66 μm	100 μm	182 μm

을 알 수 있었다.

또, 표 2에는 칼날 스캔 방식에 의해 측정된 line spread function에 대한 분석 자료가 나타나 있다. 표에 나타난 숫자들은 각각 50%, 80%, 90%, 95%, 그리고 99%의 에너지가 들어가는 최소 간격을 나타낸다. 전체 슬릿의 너비 150 μm 의 약 1/3에 해당하는 47 μm 에 전체 에너지의 80%가 입사하며 전체 슬릿에는 95% 이상의 에너지가 입사함을 확인하였다.

3.4 Micro-Roughness의 측정 결과

표면의 거칠기를 기술하는 다양한 변수 중에서 R_q (Root Mean Square)를 표준으로 선택하였다. 그 이유는 이 값이 반사경 표면의 산란 특성과 직접적으로 관련되어 있기 때문이다. 원자외선 분광기에 사용되는 반사경의 미세 거칠기(micro roughness)의 측정을 위해서 Veeco NT 2000 micro interferometer를 이용하였다. 미세 간섭계 측정은 비접촉 방식이며 0.1 nm의 정밀도를 가진다.

미세 거칠기(micro roughness)때문에 광학적으로 발생하는 현상은 반사경 표면에서 빛이 산란되는 것인데, 빛의 산란을 기술하는 방법은 크게 2가지로 나누어 진다. 첫째는, total integrated scatter(TIS)이고, 다른 하나는 angular resolved scatter (ARS)이다. TIS는 단순히 표면에서 반사되는(specular+diffuse reflection) 에너지와 산란된 에너지의 비이며, 본 논문에서는 TIS만을 고려한다. Geary (1993)는 TIS와 RMS 표면 거칠기(R_q) 사이의 관계식을 다음과 같이 구하였다.

$$R_q = (\lambda/4\pi \cos \theta)\sqrt{TIS} \quad (2)$$

FIMS의 광학적 성능 중에서 반사경의 표면에서 일어나는 산란에 의한 효과는 시야선(field of view) 이외의 방향에서 오는 빛(stray light)이 어떤 효과를 가져 오는지를 분석함으로써 고려될 수 있다. 먼저, 가장 민감한 관측이 되는 천문 관측시 지구 주변에서 나오는 geo corona에 의한 영향을 생각할 수 있는데, 관측 목표가 되는 O_{VI} 방출선 부근에 위치한 Lyman β 방출이 가장 큰 방해가 될 수 있다. 그러나, geo corona의 경우 방출원 자체가 원래부터 퍼져 있는 것이기 때문에 실제로 관측에는 영향이 없을 것으로 생각된다.

둘째로, 천문 관측시 FIMS의 시야선 부근에 위치한 별에서 나오는 빛이 산란되어 슬릿 안으로 들어오는 빛이 diffuse background에 비해 양이 작아야 정확한 관측을 할 수 있다. 선광일 외(2000)는 O_{VI} 의 검출 한계를 도출할 때, 이전의 관측 결과를 바탕으로 하여 UV 영역의 continuum background를 cosmic background (~ 200 photons/s/cm²/sr/Å), detector 잡음 (~ 0.5 photons/s/cm²), 그리고 Lyman α 의 산란 (~ 4000 photons/s/cm²/sr/Å)의 합으로 가정하였으며, 이러한 background 성분 에 의한 count rate은 ~ 500 s⁻¹이 된다.

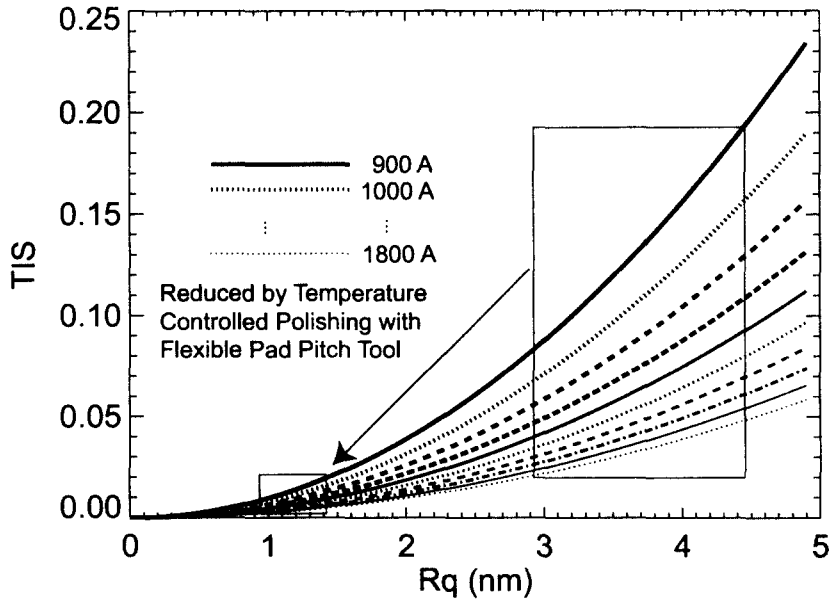


그림 5. R_q 와 TIS사이의 관계. 파장에 따라 달라지며 graph에는 FIMS의 파장 영역에서 100Å간격으로 TIS의 값을 나타내었다. Box로 나타낸 영역은 미세 간섭계를 이용하여 측정된 R_q 값의 범위로서 본문에서 언급한 방법으로 폴리싱 하였을 때 R_q 가 감소하는 현상을 나타내었다.

Korpela & Edelstein(1999)는 FIMS의 운용시 UV flux가 큰 별이 시야선에 위치한 경우 순간적으로 FIMS의 운용을 멈추게 되는데, 이러한 효과가 관측에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 약 31,000개의 별에서 나오는 UV 영역의 스펙트럼을 포함하는 TD1 catalog의 자료를 바탕으로 FIMS의 두 밴드에서의 count rate를 유도한 바 있다. Catalog에 포함된 별들 중 1/10 가량이 반사경 표면에서 산란되어 슬릿 안으로 입사된다면, 이에 의한 count rate는 약 $150 \times$ TIS가 된다. 또, 산란 광에 의한 효과와 더불어 표면이 거칠게 되면, 반사율 자체도 감소 하게 되는데, 표면이 완벽하게 polishing 되었을 때의 반사율이 R_0 라고 한다면, 실제 반사율은 R_0 to $R_0(1 - TIS)$ 로 감소하게 된다.

그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 시험용 포물 원통형 반사경에 대한 TIS는 파장 및 R_q 에 따라 변함을 알 수 있다. 여기서 입사각은 45° 로 가정하였다. 그림에서 R_q 의 최대 및 최소값은 박스로 나타내었다. 또, 그림에 나타난 두개의 박스는 일반적으로 polytex를 이용하여 polishing 하였을 때와, 구리판 위에 pitch를 입힌 후 반사경의 곡률이 변하더라도 pitch가 떨어져 나가지 않도록 온도를 $50^\circ \sim 60^\circ$ 로 유지하는 새로운 방법으로 폴리싱 하였을때의 표면 거칠기 차이를 나타낸다.

반사경의 표면을 고르게 측정하기 위하여 25 지점에서 측정을 하였으며, 일반적인 방법으로 폴리싱 하였을 때, 가장 거친 경우 R_q 값이 4.5 nm이며, 이 경우 FIMS의 파장 영역 중 가장 짧은 파장인 900Å에서 TIS가 0.2까지 증가한다. 즉, 입사하는 빛의 20% 이상이 산란으로 퍼진다. 그러나, 새로이 고안된 방법으로 polishing을 수행하였을 때, R_q 는 1 nm 이하로 감소하였으며, TIS가 전체 파장 영역에서 0.02, 즉 2% 미만의 빛만이 산란된다. 또한 앞에서 언급한 별에서 나오는 자외선의 산란에 의한 count rate의 증가나 반사율의 감소도 무시할 수 있을 정도로 작아진다.

4. 결 론

본 연구에서는 FIMS에 사용되는 비축 포물 원통형 반사경의 제작과 이와 관련된 측정 방법 및 그 결과를 소개한다. 천문관측용으로는 최초로 시도되는 형태의 반사경이기 때문에 제작에 어려움이 있었으며, 특히 간섭계를 이용하여 전체 면에 대한 표면 형상 오차를 측정할 때에는 CGH를 이용하여 검증된 원통 반사경(cylinder mirror)을 기준면으로 하여 측정을 시도하였다. 아울러 제작의 정밀도를 높여가기 위하여 각 단계별 측정 방법을 소개하였다. 결과적으로 $\lambda/5$ 의 정밀도로 측정을 하였으며, 시험 제작된 반사경의 표면 형상 오차가 $\sim \lambda/cm$ 임을 확인하였다. 이는 천문학적 목표로부터 도출된 사양을 만족하는 것이며, line spread function을 측정하여 80% 이상의 에너지가 $50\mu m$ 안에 들어오는 것을 확인함으로써 최종적인 성능평가를 하였다. 또한, 형상 오차와 더불어 광학적 성능의 중요한 척도가 되는 미세 거칠기 측정에서는 산란에 의한 효과가 관측시에는 무시할 수 있을 정도임을 확인하였다.

본 연구의 결과는 FIMS 반사경 및 광학계의 개발 가능성을 확인하는 계기가 되었으며, 앞으로 위성체에 실려질 반사경의 제작에 적용될 것이다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부 과학위성 1호 연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 일부 결과는 기초과학지원센터의 장비를 사용하여 측정을 하였습니다.

참고문헌

- 선광일, 유광선, 육인수, 박장현, 남옥원, 한원용, 선종호, 민경욱, Edelstein, J., & Korpela, E. J. 2000, 한국우주과학회지, 17, 77
- 유광선 2000, 박사학위논문, 한국과학기술원
- 유광선, 선광일, 민경욱, & Edelstein, J. 1998, 한국우주과학회지, 15, 359
- 유광선, 선광일, 육인수, 선종호, 남옥원, 이대회, 민경욱, 한원용, Edelstein, J., & Korpela, E. J. 2000, 우주과학회지, 17, 67
- Arnold, S. M., Maxey, L. C., Rogers, J. E., & Yoder R. C. 1995, Proc. SPIE, 2536, 106
- 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
- Geary, J. M. 1993, Introduction to Optical Testing (Washington: SPIE), 136
- Geary, J. M. 1995, Proc. SPIE, 2536, 68
- Korpela, E. J., & Edelstein, J. 1999, Technical Memo
- Ryu, K. S., Edelstein, J., Song, J. B., Lee, Y. W., Chae, J. S., Seon, K. I., Yuk, I. S., Korpela, E. J., Seon, J. H., Nam, U. W., Han, W., & Min, K. W. 2000, Proc. SPIE, 4231, 312