

## 1. 서론

현대 천문우주관측 분야에 있어서 Space (우주공간)에서의 관측은 매우 중요한 역할을 하고 있다. 1949년 9월 미해군연구소(Naval Research Laboratory)에서 포획된 독일의 V2 로켓을 이용하여 최초로 태양의 X선을 관측하면서 우주천문학(space astronomy)이 시작되었다.<sup>[1]</sup> 지구를 둘러싸고 있는 대기에 의해 차단되어 지상에서는 관측이 불가능한  $\gamma$ 선, X선, 극자외선 및 원자외선 등의 관측은 1960년대에 이르러서야 비로소 인공위성을 통해 본격적인 관측이 가능하게 되었다. 또한 가시광 영역에서도 대기에 의한 빛의 흡수 및 대기 흔들림의 영향을 전혀 받지 않는 우주공간에서의 천문관측은 지상관측만으로 알

고, X선, 자외선, 적외선, 가시광 영역의 대표적인 천문관측용 우주광학계에 대해 간략하게 소개하며, 국내에서 개발되고 있는 원자외선분광기에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 천문관측용 우주광학계의 특성

### 2.1 우주에서의 관측 필요성

지상에서의 천체관측은 지구의 대기에 의해 차단되는데, 그 원인을 크게 세가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 대기는 3,000Å - 10,000Å에 해당하는 '가시광선의 창'(optical window)과 3mm~15m 영역의 '전

# 특집 ┃ SPACE OPTICS

## 천문관측용 우주광학계

선광일\*, 한원웅\*

수 없었던 새로운 지평을 열어주었다.

미국, 일본, 유럽을 비롯한 선진국에서는 천문우주 관측 위성 및 탑재체의 개발을 통해 우주과학 및 우주천문학분야의 발전뿐만 아니라 우주 광학기술, 기계 제어 기술 및 우주급 센서 기술 등의 개발에 선도적인 역할을 해오고 있다. 국내에서도 2003년 발사예정인 과학위성 1호의 주탑재체로 원자외선분광기(Far ultraviolet IMaging Spectrograph: FIMS)를 한국천문연구원과 한국과학기술원, U. C. Berkeley가 공동으로 개발하고 있다. 또한, 국가 중장비 개발계획에 따라 2015년까지 과학위성 6기와 다목적 실용위성 8기 등이 발사될 예정이며, 천문관측용 광학장비들이 계속적으로 개발될 것으로 기대된다.

이 글에서는 이렇듯 중요성이 증대되고 있는 천문관측용 우주광학계의 설계상의 특성 등에 대하여 알아보

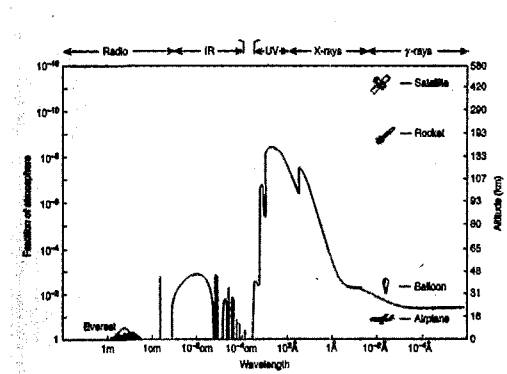
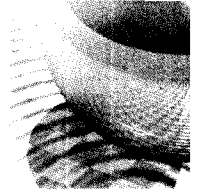


그림 1. 고도 및 파장에 따른 전자기파의 투과 곡선

파의 창'(radio window)을 제외한 거의 모든 파장영역에 대해서 불투명하다.<sup>[2]</sup> 예를 들면, 3,000Å보다 짧은 영역의 경우는 오존에 의한 자외선 흡수 때문에

\* 한국천문연구원 우주과학연구부



대해서는 닫혀있다. 적외선영역은 대부분 대기중의 수증기 및 이산화탄소, 산소분자에 의해 흡수된다. 따라서 지상에서는 1 $\mu$ m - 24 $\mu$ m에 해당하는 영역만 관측이 가능하고, 24  $\mu$ m 이상의 빛은 지구대기를 통과하지 못한다. 15 $\mu$ m보다 긴 파장을 갖는 전파는 지구 이온층의 전자밀도 때문 차단된다. 결국 스펙트럼의 양 끝단이 닫혀 있는 셈이다. 그러나 가시광선의 창보다 짧은 파장영역과 전파의 창보다 긴 파장영역에서 방출되는 복사는 천문학에서 매우 중요하다. 그림 1은 우주공간에서 입사하는 빛의 반이 흡수되는 고도를 파장에 따라 보여준다.<sup>[1]</sup>

두 번째, 지구 상층대기에서 발생하는 대기광(airglow)과 하층대기에서 일어나는 빛의 산란은 어두운 천체를 관측하는데 장애가 된다. 이러한 두 요소는 하늘의 밝기를 결정하는데, 하늘의 밝기는 천체관측의 한계등급을 결정한다. 대기 중에서 일어나는 빛의 산란은 고도가 높아짐에 따라 빠르게 감소하기 때문에 망원경을 기구(balloon)에 탑재할 경우 이러한 효과를 최소화시킬 수 있다. 그러나 상층대기 윗부분에서 일어나는 대기광을 제거하려면 과학로켓이나 관측위성을 이용하는 것 외에는 다른 방법이 없다. 대기광은 특히 자외선영역에서 강하게 나타난다.

세 번째, 지구 하층대기에서 국부적으로 일어나는 산란 및 반사는 특히 광학천문학에서는 그 효과가 치명적이다. 별이 반짝거리는 것처럼 보이게 하는 섬광(scintillation) 현상등은 공간 분해능을 떨어뜨리는 효과를 가져온다. 시상(seeing)을 악화시키는 효과는 대개 15 km 이하의 하층대기에서 일어나기 때문에 기구를 이용하거나 고산지대에 천문대를 건설함으로써 이러한 문제점을 크게 개선할 수 있으나 완전히 제거하기는 어렵다.

## 2.2 우주망원경 설계시 주의사항

천문관측용 광학계를 설계할 때 고려해야 할 요인 중 하나는 위성을 운용하는 고도에 남아있는 잔여 공기(residual atmosphere)이다. 인공위성이 빠른 속도로 궤도 운동을 하므로 단위 시간당 위성 탑재체에 부딪히는 잔여 공기의 양이 커지므로 반사경의 경면이나 필터와 같은 관측기기의 민감한 부분이 잔여 공기

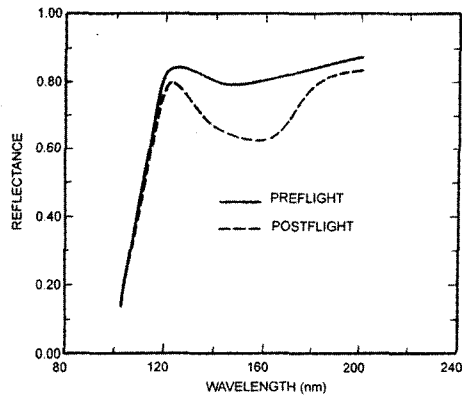


그림 2. 대기의 오염에 의한 자외선 광학계 반사도의 변화

와 화학반응을 일으켜 쉽게 훼손될 수 있다. 또한, 극저온으로 냉각된 적외선 망원경의 부품에 기체가 응결하는 하기도 하며, 모든 인공위성개발에 있어서 주의를 요하는 사항이지만, 진공 속의 고체로부터 기체 분자가 방출되는 outgassing 현상 등에 의한 손상 등이 있을 수 있다.

화학반응에 의한 피해를 꼽는다면, 1979년 6월에 발사된 Ariel VI (UK 6) 위성 에 탑재했던 X선 망원경 반사경 경면의 급격한 반사율 감소를 들 수 있다. 이것은 Ariel VI 위성의 궤도상에 있는 잔여 산소가 금도금을 입힌 반사경에 화학적인 변화를 일으켰기 때문인 것으로 보인다. 금속으로 제작된 EUV(extreme ultraviolet) 망원경용 필터에 급격한 화학변화가 발견되었다는 보고가 있다. 금속필터의 화학적 변질은 잔여 산소원자에 의한 것이라는 사실이 우주왕복선 실험에 의하여 확인된 바 있다.

자외선 파장 영역에서 반사율을 높이기 위하여 알루미늄에  $MgF_2$ 를 코팅하거나 SiC등을 많이 사용한다. 그림 2는 Long Duration Exposure Facility(LDEF) 실험결과로써 대기중의 분자와의 상호작용에 의해 약 150 nm 근방에서 반사율이 감소되었음을 보여준다.<sup>[3]</sup> 또한, CVD (chemical-vapor-deposited) SiC의 경우 산소에 오랫동안 노출되면,  $SiO_x$  ( $x=1, 2, \dots$ )로 변질되어 반사경의 반사도가 떨어진다. 따라서 SiC 대신 극자외선 영역에서 반사도가 높고, 저 지구 궤도 환경에서도 산소와 쉽게 반응하지 않는  $B_4C$ 등을 사용하게

나 광학계가 산소에 노출되지 않도록 설계한다.

가스의 응결은 저온으로 냉각된 망원경의 광학계에서 종종 나타나며, 심지어 1,000 km 상공에서도 적외선 망원경의 냉각된 경면에 응결할 만큼 충분한 양의 산소가 존재한다는 사실이 알려져 있다.<sup>[2]</sup> 20°K 보다 차가운 표면에 있는 산소원자는 이내 결합하여 분자를 형성하는데, 계산에 의하면 인위적으로 특별한 방법을 사용하지 않는 한 1 $\mu$ m만큼의 두께로 산소분자가 응결하는 데 불과한 달도 소요되지 않는다. 이러한 피해로부터 저온으로 냉각된 망원경을 보호하기 위해서는 망원경의 앞 부분을 대기 쪽으로 향하지 않도록 하여야 한다.

그밖에 희박한 지구의 상층대기에서 발생하는 광자에 의한 대기광과 높은 에너지를 갖는 대전입자가 민감한 기기를 뚫고 들어가 오류 신호를 만들어 낼 수 있다. 대기광은 특별히 원자외선 파장대역에서 아주 강하게 나타나는데, 이것은 상층대기의 원자나 이온에 의해서 산란된 태양복사가 특정 파장에서 강한 방출선을 내기 때문이다. 방출선이 강하게 나타나는 파장영역은 3,040Å과 5,040Å이며, 이들은 각각 He<sub>II</sub>와 He<sub>I</sub>에 의한 방출선이다. 그리고 1216Å, 1025Å에서 보이는 수소선과 함께 O<sub>I</sub>에 의한 1304Å, 1356Å의 방출선도 여기에 포함된다.<sup>[4]</sup>

대전입자(charged particle)는 지구의 반알렌대(van Allen belt)에 포획되어 배경잡음을 만들어 내거나 관측기에 심각한 영향을 주기도 한다. 반알렌대는 대부분 지구 자기장을 선회하는 전자와 양성자로 이루어져 있으며 내부 벨트(the inner belt)와 외부 벨트(the outer belt)로 나뉘어 진다. 내부벨트는 약 50 MeV의 양성자와 30 MeV 이상의 고에너지를 갖는 전자로 이루어졌으며, 1,000 km - 5,000 km에 존재한다. 특히 South Atlantic Anomaly와 같은 지역에는 다른 곳보다 대전입자의 양이 아주 많다. 15,000 km - 25,000 km에 있는 외부벨트는 에너지가 비교적 낮은 입자들로 이루어져 있고, 그 세기가 변한다. 반알렌대에 포획된 입자는 위성에 탑재된 전자기에 심각한 영향을 줄 뿐 아니라, 민감한 관측기에는 치명적일 수 있다. 대전입자는 일반적으로 X선, 감마선, 적외선 관측기에 영향을 미친다.

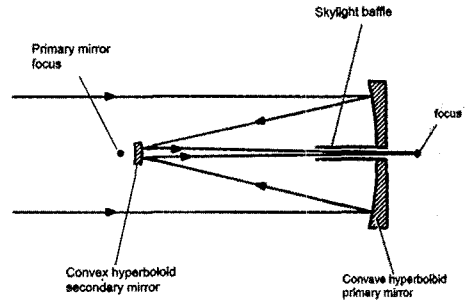


그림 3. Ritchey-Chretien 망원경의 원리

### 2.3 천문관측용 우주광학계

극자외선보다 긴 파장영역에서는 주로 그림 3과 같은 Cassegrain 망원경에서 포물면의 primary mirror 대신 쌍곡면 반사경을 사용한 Ritchey-Chretien 양식의 망원경을 많이 사용한다.<sup>[5]</sup> Cassegrain 망원경 대신 Ritchey-Chretien 망원경을 사용하면 coma와 구면 수차를 줄일 수 있다. IUE(International Ultraviolet Explorer)의 경우 0.45 m의 Ritchey-Chretien 망원경을 사용하고 있다.<sup>[2]</sup>

그러나, 인공위성 탑재체의 무게와 크기는 인공위성 개발 및 발사비용과 직결되기 때문에 무게를 줄이고 크기를 줄이기 위하여 통상적으로 사용하지 않는 디자인을 고안하기도 한다. 예를 들어 off-axis system인 Gregorian 광학계를 사용하거나 inverse Cassegrain 시스템인 Wynne camera를 사용하기도 하였다.

극자외선보다 파장이 짧은 고에너지 광자는 물질을 쉽게 통과하기 때문에 영상으로 나타내는 기술은 결코 간단하지 않고 가시광 영역에서 사용되는 normal incidence 광학계를 사용할 수 없으며 반사경에 거의 평행하게 입사하는 빛을 반사시키는 grazing incidence 광학계를 채용하여야 한다. 그림 4는 대표적인 X선 광학계인 Wolter type I, II, III를 나타내는데, 2 keV에 해당하는 X선의 경우에는 금속 거울의 반사율이 대략 50% 정도된다.<sup>[6]</sup> 이러한 광학계에서 입사된 광선은 포물면, 쌍곡면, 타원면 등에 반사되어 초점을 맺히게 된다. 그러나, grazing incidence 반사

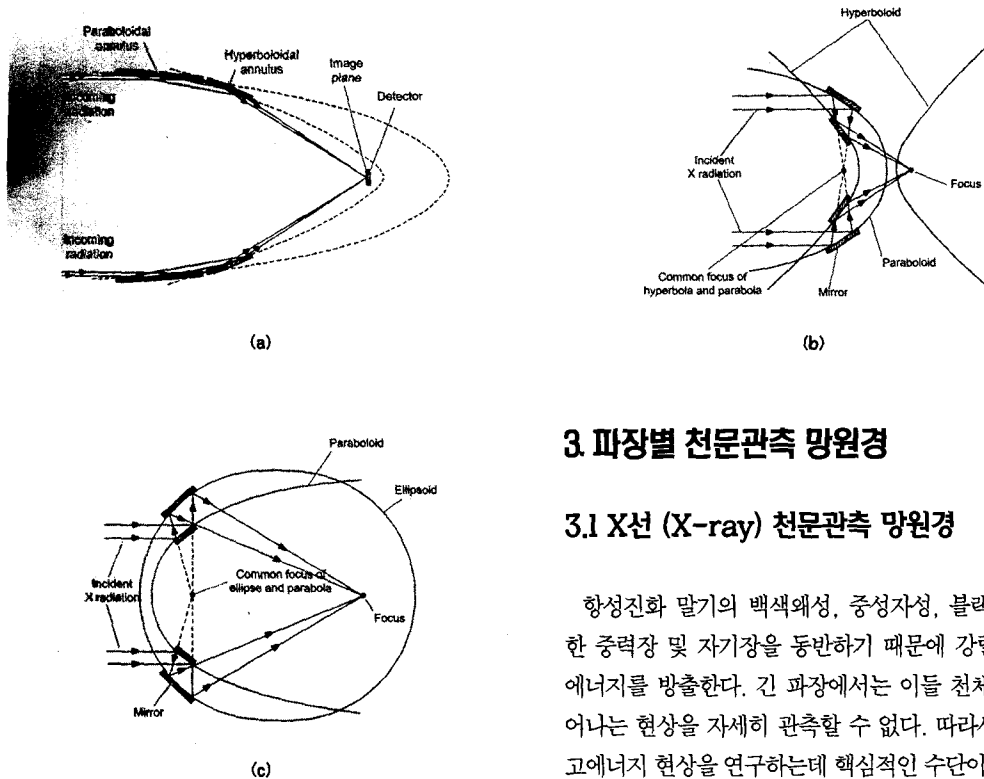


그림 4. grazing incidence 을 이용하는 X선 망원경의 원리  
(a) Wolter type I, (b) Wolter type II, (c) Wolter type III

경을 사용하면 시야(field of view)가 약 1도 정도로 제한된다. 시야를 넓히기 위하여 Lobster-eye 등의 시스템을 사용하기도 한다.

약 10 keV 이상의 에너지 영역 (hard x-ray, 감마선 등)에서는 grazing incidence를 통해서도 영상을 맺기 어렵기 때문에 occultation, collimation 및 coded mask 등이 사용된다. 미리 설계된 모양에 따라 빛이 가려지는 부분과 투과되는 부분의 패턴(mask pattern)을 만들면 마스크 패턴에 의해 일종의 합성(convolution) 영상을 얻게 된다. 이때, 역변환을 통하여 원래의 영상을 찾는 방법을 Coded mask 라고 한다.<sup>[6]</sup> 그밖에 일반적으로 검출기로 사용되는 Microchannel Plate를 이용한 MCP 광학계가 개발되고 있다.<sup>[7]</sup>

### 3. 파장별 천문관측 망원경

#### 3.1 X선 (X-ray) 천문관측 망원경

항성진화 말기의 백색왜성, 중성자성, 블랙홀은 강한 중력장 및 자기장을 동반하기 때문에 강렬한 X선 에너지를 방출한다. 긴 파장에서는 이들 천체에서 일어나는 현상을 자세히 관측할 수 없다. 따라서 X선은 고에너지 현상을 연구하는데 핵심적인 수단이 된다.

대표적인 X선 천문관측 위성으로는 Ginga, ASCA, ROSAT, EXOSAT, Einstein, XTE 등이 있으며, 그림 5는 1999년 7월에 발사된 Chandra를 보여준다.<sup>[8]</sup> Chandra는 4개의 Wolter type I의 grazing incidence X선 반사경을 포개어 영상을 얻도록 하고 있으며 가장 바깥쪽 반사경의 직경은 1.2 m이고, 초점 거리는 10 m에 이른다.

#### 3.2 자외선(Ultraviolet) 천문관측 망원경

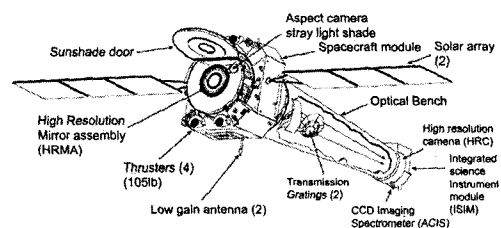


그림 5. X선 천문위성 Chandra의 개념도

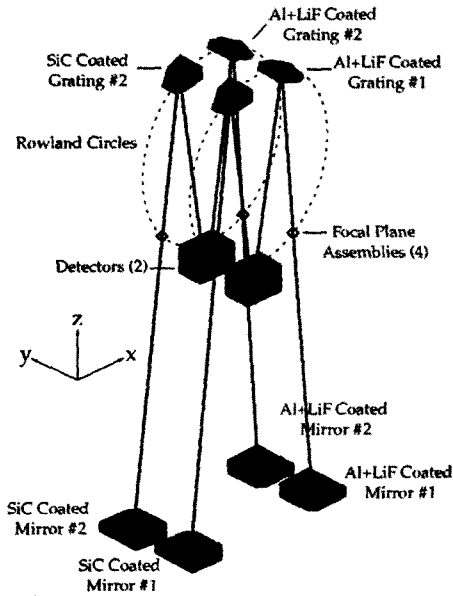


그림 6. FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) 광학계의 개념도

대부분의 자외선 관측은 주로 300 nm 이상의 soft UV 영역에서 이루어져 왔다. Soft UV에서 사용되는 관측기기는 가시광선 영역의 광학계와 거의 비슷하다. 원자외선 (far ultraviolet) 영역에서도 주로 normal incidence 광학계를 사용하지만, 이보다 짧은 파장을 갖는 (10~91.2 nm) 극자외선 (extreme ultraviolet, EUV, XUV) 영역에서는 normal incidence 광학계를 사용할 수 없다.<sup>(9)</sup> 1992년 6월 EUVE(Extreme Ultraviolet Explorer)가 발사되기 이전에는 EUV에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않았다. 특히 EUV는 대기뿐만 아니라 성간 수소(interstellar hydrogen)에 의한 흡수를 심하게 경험하기 때문에 거의 모든 방향에 대해 태양을 중심으로 수백 pc(parsec) 내에서만 관측이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 특정 방향에서는 성간가스의 밀도가 충분히 낮기 때문에 외부는 하늘까지도 관측이 가능하다. EUVE는 2001년 1월 수명이 다할 때까지 수백여 개의 EUV 천체를 관측하였다. 그림 6은 1999년 6월 발사되어 현재 활발하게

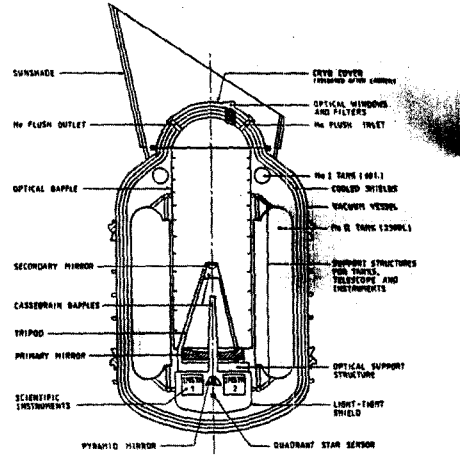


그림 7. 적외선 천문관측위성 ISO의 방각시스템

활동하고 있는 FUSE(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer)의 광학계의 개념도를 보여준다.<sup>(10)</sup>

### 3.3 적외선 천문관측망원경

적외선망원경은 우주초기의 천체들이나 차가운 성간가스와 별탄생 영역 등을 연구하기 위해 사용된다. 1983년 발사된 최초의 적외선 천문위성인 IRAS(Infrared Astronomical Satellite)는 57 cm 구경의 망원경을 탑재하고 있다. 그밖에 1985년 우주왕복선 챌린저호에 탑재된 IRT(Infrared Telescope), 1999년에 발사된 ISO(Infrared Space Observatory) 등이 있으며, 발사 예정인 인공위성은 Astro-F, SIRTR, SPICA 등이 있다.

일반적으로 2차 거울(secondary mirror)에 들어오는 잡광을 차단하기 위하여 baffle tube를 설치하는데 적외선 망원경에서는 그 자체가 열원이기 때문에 특히 5 mm 보다 긴 파장에서는 이 부분의 설계에 주의를 기울여야 한다. 망원경 또는 인공위성으로부터 방출되는 원하지 않는 적외선 빛을 줄이기 위해 반드시 냉각이 필요하며 검출기 자체는 액체헬륨의 온도로 냉각해야만 한다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 ISO는 2000 리터가 넘는 액체 헬륨을 이용하여 망원경을 냉각하였다.<sup>(2)</sup>

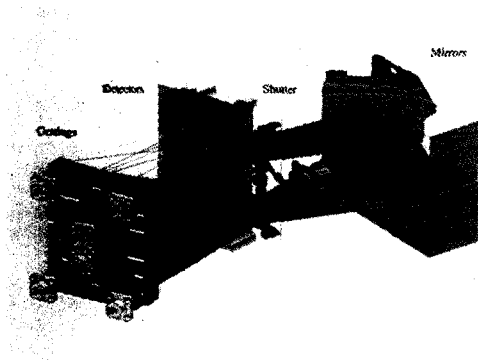


그림 8. 국내에서 개발중인 과학위성 1호 주탑재체 원자외선분광기(FIMS)의 개념도

### 3.4 가시광 (Visible) 천문관측망원경

가시광 영역의 광학천문학은 관측천문학에서 가장 처음 태동하였지만 지상의 관측시설을 탈피, 우주공간에서 연구되어야 할 여지도 그만큼 많은 분야이다. 허블 우주망원경은 지금까지 NASA에서 발사한 관측위성 가운데 가장 규모가 크며, 광학 및 자외선 영역을 관측하는 임무를 수행한다. 허블 우주망원경은 Ritchey-Chretien 양식이며, 2.4 m 구경에 초점비는  $f/24$ 이다. 반사경은 알루미늄 (Al)과 마그네슘( $Mg_2$ )로 코팅되었기 때문에 1,200Å보다 짧은 영역에서는 모든 파장에 걸쳐 높은 반사율을 갖는다.<sup>[11]</sup>

## 4. 국내의 개발 현황

국내에서는 서울대와 연세대에서 각각 Astro-F 와 GALEX (Galaxy Evolution Explorer) 개발에 참여하고 있으며, 국내에서 주도적으로 개발하고 있는 천문관측용 우주광학계로는 과학위성 1호의 주탑재체인 FIMS를 들 수 있다. FIMS는 우리은하에 분포하는 고온( $10^{4.5} - 10^6$  K)의 성간물질로부터 발생하는 원자외선 영역의 방출선 관측을 주목적으로 하고 있다. 발사 후 2년 동안을 기본임무 수행기간으로 설정하여 1년은 전천탐사 (all-sky survey)를, 나머지 1년은 개별천체에 대한 관측을 수행할 예정이다.<sup>[12]</sup>

과학위성 1호의 총 질량은 약 100Kg 이고 주 탑재

체인 FIMS는 약 20Kg 이다. FIMS는  $8^\circ \times 5'$  크기의 구경을 통해 들어온 빛을 포물 원통형 반사경 (parabolic cylinder mirror)를 통해 집광하고 rotation of ellipse 형태의 회절격자로 분산시킨 후 MCP (Micro Channel Plate)를 통해 신호를 검출하는 구조를 가지고 있다. 1차원 영상과 1차원 분광 정보를 얻을 수 있도록 설계되었지만, 스캐닝방식으로 2차원 영상을 얻게 된다. 주 파장영역은 900 - 1150 Å과 1350 - 1750Å이며 각 밴드의 분해능은 각각 1.4Å과 2.2Å이다. 특히 원자외선분광기는 작은 공간에서 높은 sensitivity를 얻기 위하여 세계에서 유일하게 포물 원통형 반사경을 채택하여 한국전광에서 가공하였다.

## 5. 맺음말

최근 들어 천문관측 우주망원경 등의 관측장비의 대형화와 최첨단 관측기술의 개발 등을 통하여 태양계에서 퀘이사 등과 같은 아주 먼 천체를 관측함으로써 인간의 우주에 대한 이해 영역을 넓혀가고 있다. 우주에서 발생하는 미약한 극미광신호를 관측하기 위하여 하는 천문우주관측의 특성상 많은 제약 조건을 가지고 있으나 좀 더 미약한 신호를 높은 분광 및 공간 분해능으로 관측하기 위하여 다양한 검출기와 광학장비들이 개발되어 왔으며, 현재도 STJ(Superconducting Tunnel Junction)등의 신개념 검출기와 MCP 광학시스템 등의 새로운 천문관측용 장비가 개발되고 있다.

국내에서는 1990년부터 인공위성의 개발과 함께 천문관측용 우주광학계의 개발에 관심이 높아지고 있으며, 미국 및 일본 등과 협력하여 천문관측용 우주광학계 개발을 시작한 상태이다. 특히, 과학위성 1호의 주탑재체인 FIMS는 국내 주도로 개발이 진행되고 있으며 현재 비행 모델이 개발되어 시험 및 calibration이 남아 있는 상태이다.

미국 등 선진국에서는 막대한 예산과 인력을 투입하여 대형의 우주망원경을 개발하고 있으나, 국내에서는 소형이지만 국제적인 경쟁력을 갖춘 천문관측용 우주망원경 개발을 통하여 경제적/기술적 실리를 취할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Charles, P. A. and Seward, F. D., Exploring the X-ray Universe, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995.
- (2) Davies, J. K., Satellite Astronomy: The Principles and Practice of Astronomy from Space, Ellis Horwood Ltd, Chichester, 1988.
- (3) H. Herzig, A. Toft and C. M. Fleetwood, Applied Optics, Vol. 32, p. 1798, 1993.
- (4) Huffman, R. E., Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing, Academic Press, Inc., Boston, 1992.
- (5) Kitchin, C. R., Astrophysical Techniques, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984.
- (6) Rando, N., Peacock, A., Andersson, S., Collaudin, B., Gondoin, P., Verveer, J., Verhoeve, P., Goldie, D.J. and Hart, R., Proc. SPIE 3435, 1998.
- (7) Fraser, G. W., The next generation of X-ray observatories, XRA97/02, Leicester University, 1997.
- (8) Chandra X-ray Center, The Chandra Proposers' Observatory Guide, 2001.
- (9) Cash, W., Advanced Space Research, Vol. 11, p. 171, 1991.
- (10) MOOS et al., Astrophys. Journal Letter, 538, 1, 2000.
- (11) STSCI, HST Team, HST Data Handbook, 2002.
- (12) 선광일, 유광선, 육인수, 박장현, 남욱원, 한원용, 선종호, 민경욱, Edelstein, J., and Korpela, E. J., 한국우주과학회지, 17, 77, 2000.

약 령



선광일

2000.3 ~ 현재 한국천문연구원 (우주과학연구부)  
 1997.2 ~ 1998.1 U.C. Berkeley, Post Doc.  
 1996~2000 한국과학기술원 인공위성연구센터 (위축연구원)  
 1996 한국과학기술원, 물리학과, 이학박사  
 1992 한국과학기술원, 물리학과, 이학석사  
 1990 숭실대학교 물리학과, 이학사  
 관심분야 : 우주탐지체, 고에너지 천체물리  
 E-mail : kiseon@kao.re.kr



한원용

1999~현재 한국천문연구원, 우주과학연구부장(現)  
 1993~1999 한국표준연구원 부설 천문대,  
 1m 자동망원경 팀장, 소백산천문대 대장,  
 우주과학연구 그룹장, 보현산천문대 대장 (책임연구원)  
 1993 연건대학교, Dept. Physics & Astronomy,  
 이학박사  
 1992~1993 연건대학교, 광학연구소, 기술자문역  
 1990~1992 연건대학교 천문대, 관측조교  
 1986~1988 천문우주과학연구소, 선임연구원(소백산  
 천문대)  
 1980~1986 국립천문대 천문연구사 (천체물리연구실)  
 1984 연세대학교 대학원, 천문기상학과, 이학석사  
 1980 연세대학교 천문기상학과, 이학사  
 관심분야 : 우주망원경, 우주탐지체, 위성감시시스템  
 E-mail : whan@kao.re.kr