J. Astron. Space Sci. 22(3), 329–352 (2005) [기술논문]

인공위성 탑재용 자외선 태양카메라(LIST) 개발

장민환[1†], 오환섭[2], 임천석[3], 박정선[4], 김진상[5], 손대락[3],
이현수[6], 김상준[1], 이동훈[1], 김성수[1], 김건희[7]
[1]경희대학교 우주과학과, [2]경희대학교 기계공학전공, [3]한남대학교 광전자물리전공,
[4]한국항공대학교 항공우주기계공학부, [5]경희대학교 전자공학전공,
[6]경희대학교 컴퓨터공학전공, [7]한국기초과학지원연구원 초정밀가공실

DEVELOPMENT OF A LYMAN-α IMAGING SOLAR TELESCOPE FOR THE SATELLITE

M. Jang[1†], H.-S. Oh[2], C.-S. Rim[3], J.-S. Park[4], J.-S. Kim[5], D. Son[3], H.-S. Lee[6], S.-J. Kim[1], D.-H. Lee[1], S. S. Kim[1], and K.-H. Kim[7]
[1]Dept. of Astronomy & Space Science, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea
[2]Dept. of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea
[3]Dept. of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejon 306-791, Korea
[4]School of Aerospace and Mechanical Engineering, Hankuk Aviation University, Goyang 412-791, Korea
[5]Dept. of Electronic Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea
[6]Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea
[7]Ultra-Precision Engineering Laboratory, Korea Basic Science Institute, Daejon 305-333, Korea
E-mail: mjang@khu.ac.kr

(Received July 18, 2005; Accepted August 16, 2005)

요 약

자외선 영역에서 최대 세기를 보이는 라이먼 알파(121.6nm)선은 태양 채층과 전이영역의 방출선으로 지구 고층 대기 변화의 주요 원인이 되기 때문에, 태양연구에서 가장 중요한 파장대의 하나이다. 그렇지만, 이전의 라이먼 알파선의 관측은 콜로라도 대학 등 미국의 여러 대학들에서 탐사 로켓에 의해 수행된 단속적인 관측들뿐이었고, 여러 위성에 의한 관측들도 시간 분해능이 아주 떨어지는 장기 관측들뿐이었다. 그러므로 인공위성에 탑재되어 충분한 시간 분해능과 연속적인 관측이 충족될 수 있는 라이먼 알파선 태양망원경의 개발은 세계적으로도 중요한 과학적 의미를 갖고 있으며, 인공위성의 운영에 막대한 영향을 미치는 지구 고층 대기에 대한 태양 자외선 복사의 영향을 연구하기 위한 실용적인 목적도 갖고 있다. 이러한 배경에 의해 본 연구는 과학기술위성2호 탑재용 자외선 태양카메라(LIST: Lyman-α Imaging Solar Telescope)를 개발하기 위한 목적으로 system 규격결정이 이루어졌으며 광학계, 기계구조 및 전자회로의 예비 설계가 완성되었다. 또한 system requirements에 맞춰 광학계, 기계구조 및 전자회로의 예비 구조 설계가 완료되었으며 기계 구조해석 및 열해석, test plan 결정 및 verification test matrix 작성도 완료되었다. 부분별로는 상세설계가 완료되어 제작에 착수하였으며 본 탑재체의 데이터에 맞는 데이터 획득 시스템을 결정하기위한 기반 조사가 완료되었다. 과학적 운영을 위해서는 태양의 진공자외선 복사의 연구 방향과 연구 현황 등 데이터를 수집하고, 수집된 자료로 태양에 대해 지속적인 연구가 이루어졌다. 자외선 태양카메라 연구개발은 산업적인 파급효과가 큰 광학계의 설계와 비구면 광학계의 제작기술, 첨단 측광기의 기본을 이루는 CCD의 제어기술, 탑재체의 통제 제어기술이 요구된다. 확보된 우주 탑재체 개발 기술과 결과물들은 본 사업에 적용되었던 시스템 관리 기법과 함께 향후 유사한 우주기술 사업에 이용될 수 있으며 과학적 시스템과 성과물들도 현재 정부가 지원하여 구축하고 있는 우주환경 감시 시스템에 이용될 수 있다.

†corresponding author

ABSTRACT

Long term observations of full-disk Lyman-α irradiance have been made by the instruments on various satellites. In addition, several sounding rockets dating back to the 1950s and up through the present have measured the Lyman-α irradiance. Previous full disk Lyman-α images of the sun have been very interesting and useful scientifically, but have been only five-minute "snapshots" obtained on sounding rocket flights. All of these observations to date have been snapshots, with no time resolution to observe changes in the chromospheric structure as a result of the evolving magnetic field, and its effect on the Lyman-α intensity. The Lyman-α Imaging Solar Telescope(LIST) can provide a unique opportunity for the study of the sun in the Lyman-α region with the high time and spatial resolution for the first time. Up to the 2nd year development, the preliminary design of the optics, mechanical structure and electronics system has been completed. Also the mechanical structure analysis, thermal analysis were performed and the material for the structure was chosen as a result of these analyses. And the test plan and the verification matrix were decided. The operation systems, technical and scientific operation, were studied and finally decided. Those are the technical operation, mechanical working modes for the observation and safety, the scientific operation and the process of the acquired data. The basic techniques acquired through the development of satellite based solar telescope are essential for the construction of space environment forecast system in the future. The techniques which we developed through this study, like mechanical, optical and data processing techniques, could be applied extensively not only to the process of the future production of flight models of this kind, but also to the related industries. Also, we can utilize the scientific achievements which are obtained throughout the project. And these can be utilized to build a high resolution photometric detectors for military and commercial purposes. It is also believed that we will be able to apply several acquired techniques for the development of the Korean satellite projects in the future.

Keywords: space-based ultraviolet telescope, solar space mission, solar instrument

1. 서 론

태양 활동은 인공위성에서의 태양 전지판, 탑재 전자장비 등에 손상을 입히고, 대기밀도 변화로 인한 궤도 변형으로 운용에 장애를 유발시킨다. 지구에서는 자기폭풍을 야기 시켜 전파통신에 장애가 생기고 전력선, 송유관 등이 손상을 입는다. 또한 전 지구적 기후변화를 촉발시키고 치명적인 우주방사선의 밀도 또한 증가하게 된다. 이 모든 것들이 태양활동에서부터 기인하는 것으로, 태양활동을 연구하여, 미리 예보하는 감시체계를 구축함으로써 피해를 최소화할 수 있다. 이러한 중요성 때

문에 외국에서의 태양에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다.

현재 우리나라의 위성이 많지는 않으나 앞으로 점점 더 고가이고 민감한 고성능의 장비를 탑재한 위성이 많이 발사·운용될 경우, 우리나라 우주개발의 초기단계에서 태양감시체계를 구축하는 것이 앞으로의 큰 피해를 대비하는 우선 과제이다. 저궤도위성의 활동에 영향을 미치고 있는 고층대기의 물리적 제 현상은 주로 200nm보다 짧은 자외선 영역에서의 태양 전표면 복사의 영향을 받는다. 그러므로 태양활동에 대한 연구가 필수적이며, 위성을 다수 보유하고 있는 우주선진국에서는 이에 대한 방대한 양의 관측자료를 수집해서 연구하고 있다. 지구 고층 대기의 변화를 야기시키는 주요한 원인은 자외선 파장에서 관측되는 태양 대기의 채층과 전이 영역에서의 방출선이다. 이 방출선 중에서 최대세기를 갖는 파장인 라이먼 알파선은 강도가 강하여 지구 고도 70km까지 도달하여 에너지를 축적하기 때문에 지구대기 변화를 야기시킨다. 이런 중요성에도 불구하고 이전의 알파선의 관측은 콜로라도 대학 등 미국의 여러 대학들에서 탐사로켓에 의해 수행된 간헐적인 관측들뿐이었고(White 1977, Eparvier et al. 1997, Foing & Bonnet 1984, Allen et al. 1997), SME(Solar Mesosphere Explorer), AE-E(Atmosphere Explorer-E) 등의 위성에 의한 관측도 시간 분해능이 아주 떨어지는 장기 관측들뿐이었다(Woods & Rottman 1997).

탐사 로켓에 의한 관측은 시간 분해능이 충분치 않은 관계로, 자기장의 변화로 인한 라이먼 알파선 세기의 변화가 일으키는 채층 구조의 변화를 관측하는 것은 불가능하였다. 그러므로 인공위성에 탑재되어 충분한 시간 분해능과 연속적인 관측이 충족될 수 있는 자외선 태양망원경의 개발은 세계적으로도 중요한 과학적 의미를 갖고 있으며, 인공위성의 운영에 막대한 영향을 미치는 지구 고층 대기에 대한 태양 자외선 복사의 영향을 연구하기 위한 실용적인 배경도 갖고 있다.

이러한 배경에 의해 개발이 시작된 과학기술위성 2호 탑재용 자외선 태양카메라(LIST: Lyman-α Imaging Solar Telescope)는 2002년 10월부터 과학기술부와 경희대학교의 지원으로 국내 여러 대학 40여명의 관련 연구진이 참여하여 경희대학교 우주탑재체 연구센터에서 주관하였다.

LIST 기기 개발의 최종목표를 크게 4가지로 요약하면 아래와 같다.

1) 라이먼 알파선에서의 태양 전표면 영상 획득을 위한 탑재체 개발
2) 자외선 카메라의 공학 시스템 및 자료 처리 시스템의 자체 기술 개발
3) 향후 우리나라에서 개발되는 위성 등에 활용 가능한 우주 원천기술 확보
4) 우리나라 우주 개발 사업의 성공적 수행을 위한 대규모 인력 양성

과학적으로는 라이먼 알파선 관측을 통하여 다음과 같은 연구들을 목표로 하며 주로 미국 콜로라도 대학의 태양학자들과 국내의 관련 연구진에 의한 연구를 계획하였었다. 연구 항목들은 태양 복사의 변화에 관계되는 채층과 전이영역의 구조 진화 연구, 플라쥐, 강화된 조직, 활동 조직, 그리고 태양의 영상에서 얻어지는 비활동 태양에 의한 자외선 복사변화 모델 연구, 태양 자외선 변화가 지구 고층 대기에 미치는 영향에 대한 연구 등이다.

2. LIST 개요

LIST의 과학 목적은 태양 채층 구조의 진화 이해, 기존의 태양 VUV(vacuum ultraviolet) 방출 변화 모델 검증 및 개선, 라이먼 알파 이미지를 통한 태양활동영역의 물리량과 작용의 연구이다.

LIST 개발에 있어서의 요구조건들 중 중요한 것들로는 1) 관측파장대 121.6nm, 2) 임무수행기간

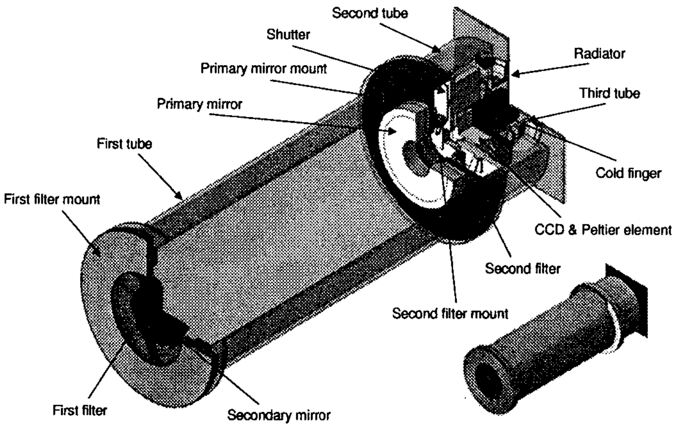


그림 1. LIST 전체 구조도.

표 1. 시스템 규격.

시스템 규격	제 원
Duty Cycle	18 frame/orbit
Volume	130Φ x 430mm - 무게: 15kg
Exposure Time	1~10 sec/frame
FOV(Field Of View)	45 arc minutes
Resolution	2.64 arcsec/pixel

2년, 3) 고도 300km에서 1500km 사이의 타원궤도, 4) 무게 15kg 이하, 5) 발사체의 탑재체 공간에 적합한 크기(구체적인 수치조건은 없음), 6) 최고전력 25watt 이하 7) 궤도당 50% 이상의 duty cycle, 8) 분해능 6arcmin/pixel, 9) 노출 시간 0.1 이상 10초 이하 등이 있다. LIST의 개발을 위한 대원칙은 기기의 단순성과 이로 인한 최대한의 신뢰성 확보를 목표로 하여 개발이 진행되었다.

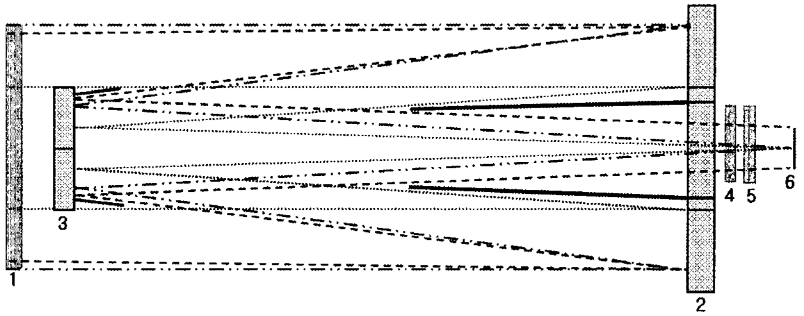
위의 개발 원칙에 의해 설계된 기기의 구성은 1) 라이먼 알파선의 분리를 위한 간섭 필터 3개, 2) 태양 이미지 망원경, 3) CCD 검출기(detector), 4) 기기 조정을 위한 마이크로 프로세서, 5) 위성 본체의 전원을 분배하는 전원조절장치 등이다. 이 구성요소 중 전자부를 제외한 구조적인 상호관계를 보이는 기본 구조는 그림 1과 같다.

과학기술위성 2호의 조건과 과학 목표를 고려하여 LIST를 설계하기 위한 기본 요구조건을 결정하였으며 수행된 개발은 1) 광학계, 기계구조 및 전자회로의 예비설계, 2) 기계 구조해석 및 열해석, 3) 결정된 부품 구매 및 시험, 4) 시험계획 결정 등이고 주요 시스템 규격은 표 1에 정리하였다.

3. LIST 설계 및 제작

3.1 광학계 설계 및 제작

위성 탑재체의 크기 요구조건에 따라 광학계는 카세그레인 형식으로 결정되었다. 그림 2에 광학



1.Entrance filter 2.Primary mirror 3.Secondary mirror 4.2nd filter 5.3rd filter 6.CCD

그림 2. 광학계 기본 구조.

표 2. 반사경 사양.

	Primary	Secondary
Radius of curvature	-916.48 mm	-577.24 mm
Conic constant	-0.758	-5.719
Surface shape	Ellipsoid	Hyperboloid
Clear aperture	76.2 mm	33 mm
Edge aperture	90 mm	38.1 mm

표 3. LIST 광학계의 주요 제원.

광학계 주요 제원	척 도
Effective focal length (EFL)	939.6 mm
Distance primary-secondary	300 mm
Distance secondary-image plane	350 mm
Field of view (FOV)	0.75° (45 arc-min)
Resolution	2.64 arcsec/pixel

계의 기본 구조가 나타나 있다. 반사경의 규격은 표 2와 같다. 반사경의 재질은 제로듀어(Zerodur)로 높은 온도변화에 따른 변형이 거의 없어 우주 관측기기에 적합하다. 설계된 LIST 광학계의 주요 제원은 표 3과 같다.

LIST는 태양 광선 중 특정 파장(121.6nm)만을 관측하기 때문에 이 파장에 맞춰서 반사경 코팅을 하고 필터를 사용한다. 자외선에서의 반사도를 높이기 위해 주경과 부경에 MgF2 코팅을 한다. 그림 3은 코팅의 반사 곡선을 보여준다. 사용된 필터들은 Acton Research사에서 제작하는 122XN 제품이다. 투과율을 통해 과학적 목적에 적합한 필터의 개수는 3개로 하였다. 간섭 필터를 세 개보다 적게 사용하면 가시광선의 강도가 강해서 라이먼 알파선을 측정하는데 어려움이 있기 때문이다. LIST는 라이먼 알파선 영상을 찍는데 다른 파장에서 생기는 태양 빛에 의해 자료 값이 영향을 받지 않도록 최소한 세 개의 간섭 필터를 사용하도록 결정한 것이다. 표 4는 태양 극소기 때의 Acton Research사에서 제작한 122XN 필터 개수에 따른 총 신호의 백분율을 나타내며(Woods 1998), 그림 4는 필터 투

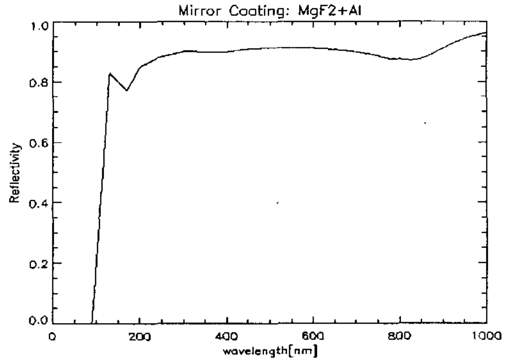


그림 3. "MgF2+Al" 반사경 코팅 반사곡선(한국기초과학지원연구원 초정밀가공실).

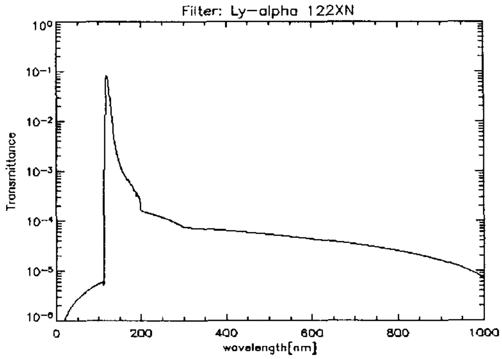


그림 4. 필터 투과율(Acton Research Inc.).

표 4. 태양 극소기 때의 라이먼 알파선 신호 백분율.

필터 개수	Signal from Ly-α(%)	Signal from others(%)
0	0.00003	99.99997
1	0.235	99.765
2	89.37	10.63
3	98.11	1.89

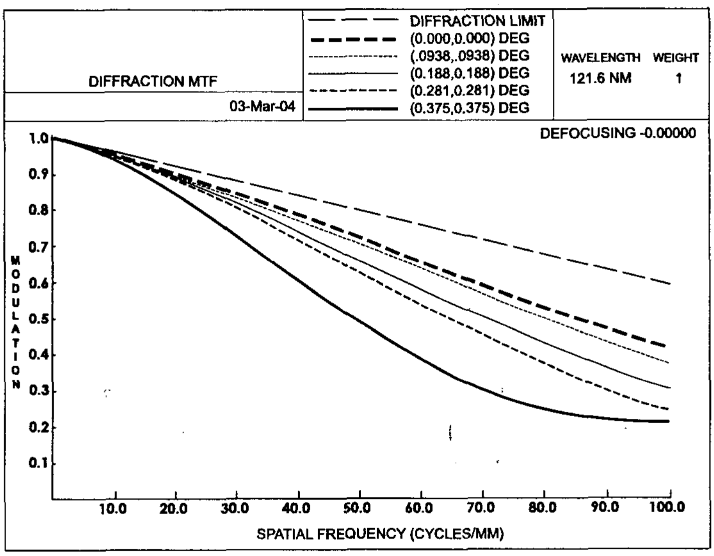


그림 5. MTF 곡선.

표 5. 성능 요약.

Field	Last Field
Frequency (cycles/mm)	38.5
Diffraction limited MTF	0.841
Design MTF	0.618
Design+Tolerance MTF	0.518

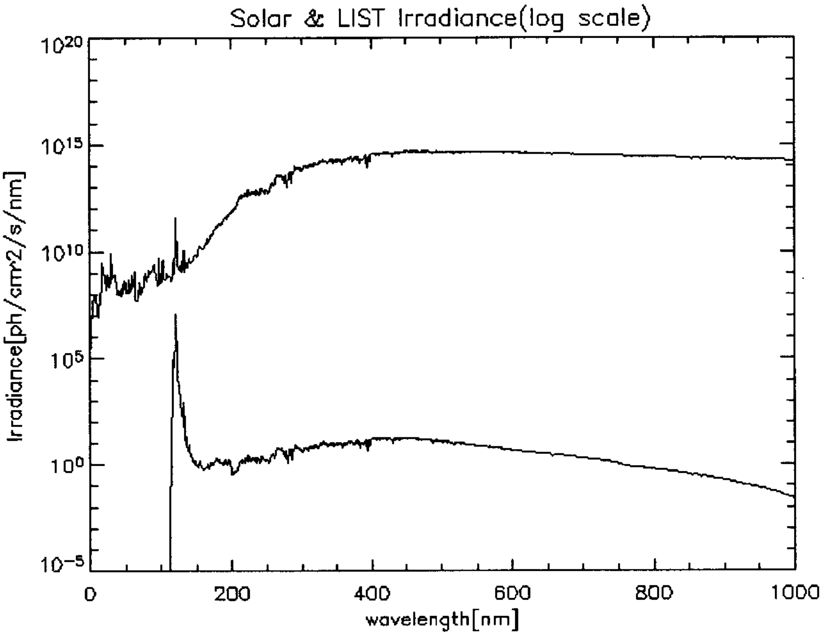


그림 6. 태양 광량과 LIST 감지량 비교.

과율을 보여준다. 필터 투과율은 Acton Research사가 구매 전 단계의 자료로 제공한 것이다. 협대역 간섭 필터는 중심 파장이 122nm이고, Full Width Half Maximum(FWHM)은 8nm이다. 본 개발의 진행단계에서는 이론적인 분석까지만 완료되었기 때문에 검출되는 최종 투과율은 측정되지 못하였다.

광학설계를 검토하기 위해 Modulation Transfer Function(MTF)곡선을 살펴보았다(그림 5). 표 5는 Nyquist frequency를 나타내는데 최종 MTF가 0.518이어서 본 광학설계가 과학적 목적에 적합한 설계임을 알 수 있다.

그림 6은 두 개의 반사경과 3개의 필터를 통과하여 CCD에 들어오게 되는 태양입자들을 수치적으로 계산해 낸 결과이다. 보는 것과 같이 121.6nm 부분에서 최고치를 나타내고 있다. 우리가 관측하고자 하는 파장과 그 외의 파장 영역의 감지량이 약 99.9%: 0.1%의 비율로 매우 좋은 감지율을 보이고 있다. 또한 본 개발의 과학적 목적을 충족시키기 위해서 CCD의 한 화소 당 감지하는 태양광량의 신호대 잡음비를 10 이상으로 설정하였는데, 계산결과 1초 노출일 때 평균 560photons로 만족하

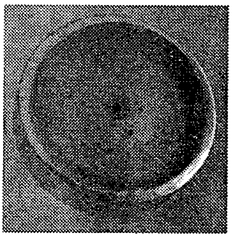


그림 7. 1차 가공된 주경.

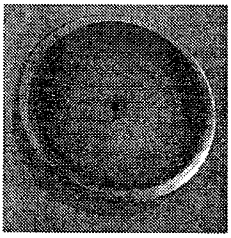


그림 8. 1차 가공된 부경.

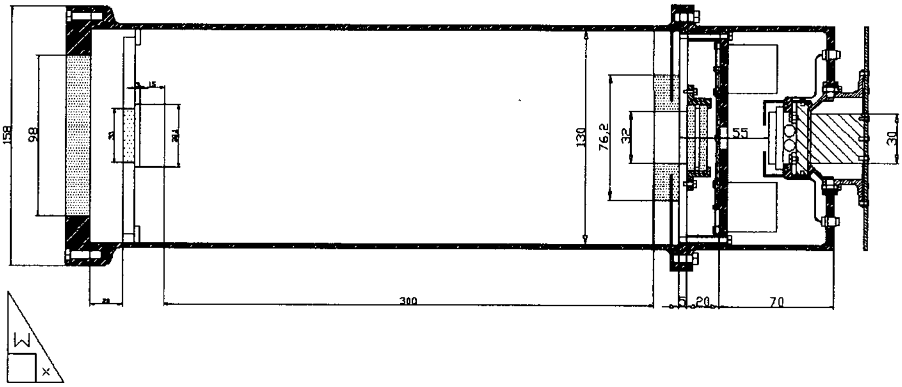


그림 9. LIST 평면 치수 설계.

였다.

망원경에 사용되는 두 개의 반사경은 본 연구개발단의 설계를 바탕으로 일차가공을 완료하였다. 주경과 부경은 Zerodur를 사용하였으며 각각 90mm, 38mm의 직경으로 연삭되었다. 그림 7, 8은 가공된 반사경들의 모습이다.

3.2 기계부 설계

LIST 기계구조는 LIST의 광학적 성능을 최대화 시키고 2년간의 임무수행기간동안 그 성능을 유지할 수 있도록 설계하였다. 이 요구 조건을 만족시키기 위해서 설계에서부터 가공, 조립까지 세심한 주의가 필요하다. 우선 설계과정에서 우주환경에서 LIST광학계가 최적의 성능을 발휘하도록 하기 위하여 정밀한 광학 설계에 기초하여 경통을 설계 하였고, 열팽창/수축이 없는 인바(invar)를 사용하여 제작키로 하였다. 발사 시 변형을 방지하기 위한 분석을 수행하였으며 위성본체의 궤도분석 자료를 이용하여 LIST가 계속적으로 태양을 향하고 있는 조건에서 온도분포 해석 및 열해석에 대한 연구를 수행하였다. 또한 관측시 CCD의 온도를 제어하기 위해 CCD 후면에 펠티어(peltier)를 사용하였으며, 태양광으로부터 CCD를 보호하기 위하여 전면에 셔터를 부착하고 스텝핑 모터를 사용하여 노출 시간을 조절하도록 하였다.

LIST가 태양의 영상을 획득하기 때문에 망원경의 크기와 기기의 구경은 태양의 전표면 복사강도 뿐만 아니라 CCD의 동작범위를 넘지 않도록 태양의 밝기변화에 따른 직경의 가능한 변화 범위

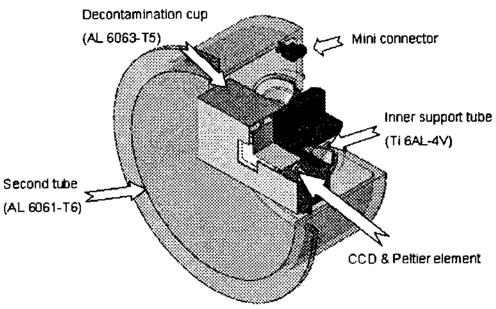


그림 10. 검출기 구조설계.

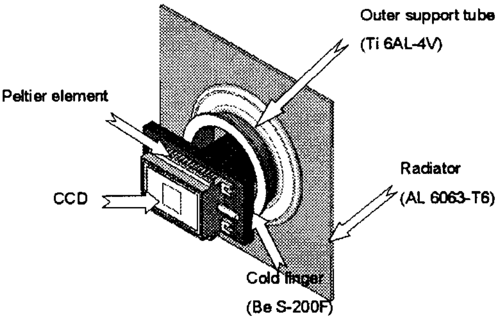


그림 11. CCD 설계도.

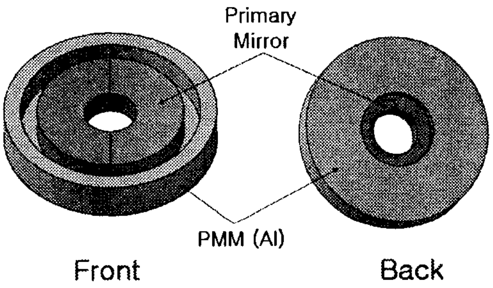


그림 12. Primary Mirror(PM) 마운트 설계.

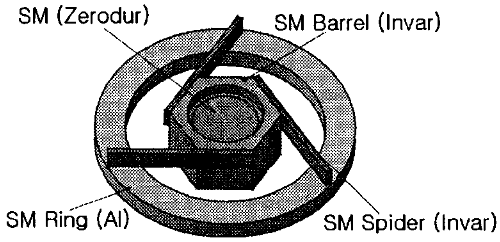


그림 13. Second Mirror(SM) 마운트 설계.

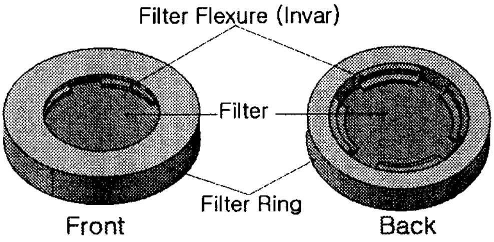


그림 14. First Filter 마운트 구조.

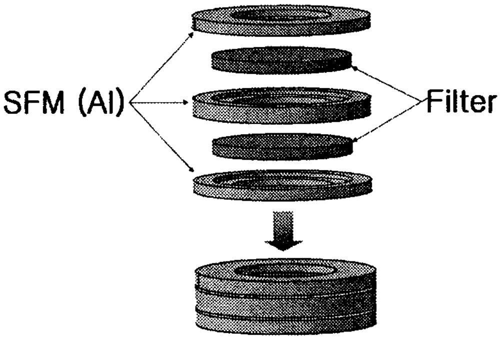


그림 15. Secondary Filter(SF) 마운트 구조.

를 계산에 넣어야 한다. 라이먼 알파선 파장에서 활동기의 태양 표면에서 가장 밝은 플라쥐 영역은 태양 극소기 값(quiet Sun)일 때보다 50배 더 밝다. 그림 9는 LIST의 이차원 설계도이다.

그림 10과 11은 검출기를 고정시키는 부분의 구조설계와 검출기와 검출기에서 발생한 열을 방열시키는 방열판의 설계에 사용되는 재료와 함께 보여준다. 그림 12와 13은 주경과 부경을 경통에

표 6. 재료 특성.

Property	Symbol	Ti-6Al-4V	Be S-200F	6063-T5	6061-T6
Modulus of Elasticity, Mpa	E	$114e^3$	$303.4e^3$	$69e^3$	$69e^3$
Shear Modulus, Mpa	G	-	$135e^3$	$25.8e^3$	$26e^3$
Poisson's Ratio	ν	0.31	0.18	0.33	0.33
Density, g/m^3	ρ	$4.43e^{-6}$	$1.85e^{-6}$	$2.7e^{-6}$	$2.7e^{-6}$
Ult. Tensile strength, Mpa	Ftu	1305	324	184	240
Yield Tensile Strength, Mpa	Fty	965	241	145	215

표 7. LIST 구조설계 해석결과.

Parameter	Requirement	Analysis result
Acceleration	12G[TBD]	-
Max stress	Under yield strength	3.45Mpa(<965Mpa)
Z axial displacement	Under 0.01mm	$2.02e^{-3}$mm < 0.01mm(SM & PM)
	(SM & PM, PM & CCD)	$9.56e^{-3}$mm < 0.001mm(PM & CCD)
Natural frequency	Over 100Hz (1st mode)	1st: 639Hz 2nd: 697Hz
		3rd: 707Hz 4th: 1268Hz

고정시키는 마운트(mount)의 구조를 보여주며, 그림 14와 15는 경통의 입구에 설치되는 전면 필터(entrance filter)의 마운트와 검출기 앞부분에 위치하는 두 개의 필터를 고정시키는 마운트를 보여준다. 이상의 마운트들은 모두 설계해석과 열해석을 거쳐 적절하게 설계되었음이 입증되었다.

재료는 우주환경에서 안전성이 입증된 물질을 사용할 예정이었고 우주환경에서 사용 가능한 재료 선정을 위하여 1) 열진공 환경 장기노출, 2) 낮은 수준 열진공에서의 outgassing, 3) 내산화성, 4) 응력부식과 파괴 인성 한도, 5) 낮은 정도의 환경위험(비독성, 비발화성) 등을 고려하였다. 표 6은 경통재료로서 설계 시에 검토된 여러 재료의 특성을 보여준다.

적절한 재료의 선정과 설계의 적합성을 알아보기 위해 해석 프로그램을 통해 LIST 구조물의 열해석과 구조해석을 수행하였다. 무게 5.5kg에 발사 시 조건인 Z 방향으로 12G의 정하중이 작용한다고 가정하고 그림 9와 같은 형상일 때, 위성체 제작기관인 한국과학기술연구원 인공위성연구센터에서 설계가 마무리되지 않은 관계로 과학기술위성 1호의 사양을 참조한 자연 진동수인 X, Y 방향에서 50Hz보다 크고, Z 방향에서 100Hz보다 크게 나타났다. 또 상기 발사 조건일 때 전체적으로 임무요구조건 중 변위(displacement)는 0.01mm보다 훨씬 작은 수치를 보여 설계의 적합함을 알 수 있었다. 표 7은 이와 같은 내용을 정리한 것이다.

또한, 위성체의 설계가 마무리되지 않은 단계에서 LIST가 본체에 수평으로 놓여지는 경우에서의 해석을 통해 경통에 가해지는 힘에 의한 위험성을 알아보았다. 해석은 12G의 정하중이 작용할 때 간헐적 진동과 충격을 고려하고 1mm의 경통에서 random vibration으로 100G의 압력을 받는 조건에서 이루어졌다. 해석결과 경통에 생기는 최고 응력은 38.9Mpa로 그때의 처짐 변위는 0.244mm이었다. 하지만, 광학구조물의 경우 주경과 부경사이의 Z 방향 뒤틀림은 0.0031로 요구 조건에 충족하였다.

LIST의 열 설계 개요도는 그림 16과 같으며 태양의 열복사는 LIST에서 태양을 향한 유일한 면

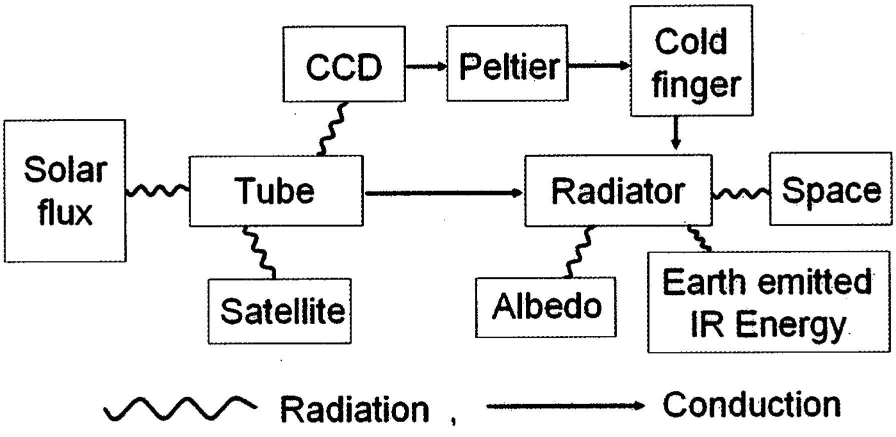


그림 16. 열 설계 개요도.

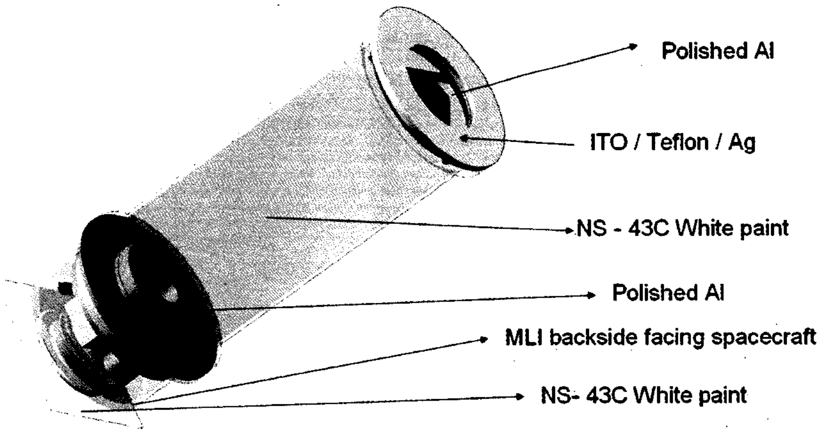


그림 17. 부분별 코팅물질.

인 전면필터와 마운트를 통하여 경통으로 전달된다. 요구조건은 LIST 구조물의 팽창을 최소화하고, 각 부분이 온도 허용 범위 안에 들어가도록 설계하는 것이다. 열해석 조건은 과학기술위성 2호의 예상 운영궤도인 300~1,500km 타원궤도상에서 태양으로부터 1309 ~ 1399W/m^2, 지구방출 적외선 에너지 208 ~ 265W/m^2, 지구의 태양 에너지 반사도 0.25~0.4이며, 각 조건의 전자는 가능한 최저 온도, 후자는 가능한 최고 온도의 경우로 본체의 궤도 해석에 따랐다. 열 조건을 충족시키기 위하여 부분에 따라 적합한 코팅과 물질을 결정했다(그림 17).

열 해석 결과 전면으로부터 2, 3차 필터 부분은 −7°C ~ 16°C, 방열기 부분은 −16°C ~ 2°C였고, CCD는 −16°C ~ 3°C였다. 이 결과 역시 작동범위에 있어 열 조건 역시 충족하였다. 그림 18은 주경 인터페이스 열해석을 보여준다.

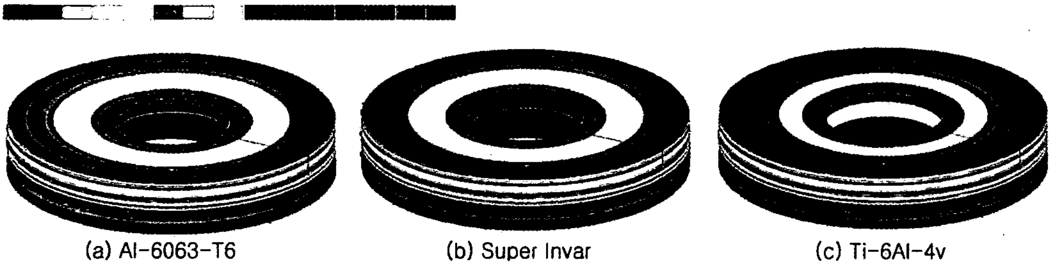


그림 18. 주경 인터페이스 열해석(Von-Mises stress map).

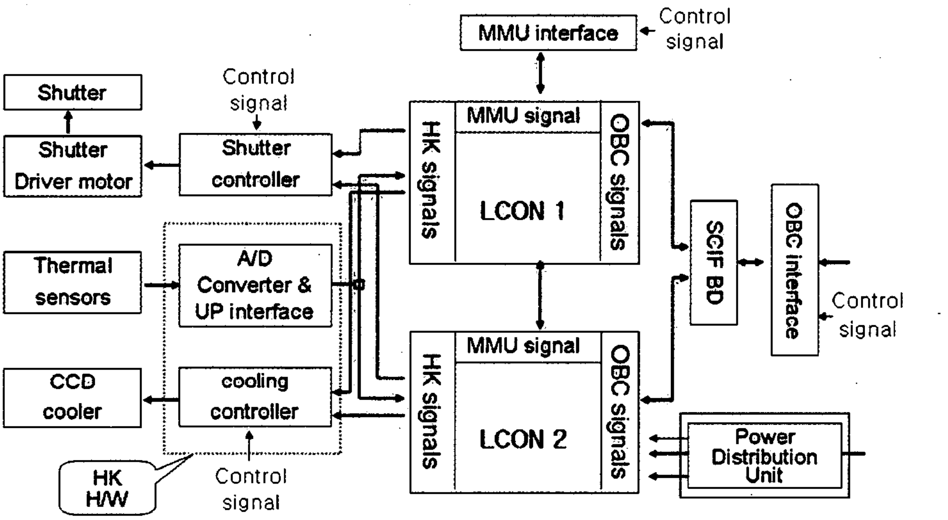


그림 19. LIST 전자부 전체 구성도.

LIST의 기계구조부의 설계와 해석은 위성체와의 인터페이스를 통해 이루어져야 임무를 완성할 수 있다. 초기 설계에 따른 위성체 고유진동수 해석 결과 육각형일 때 1st: 28.3Hz, 2nd: 31.0Hz, 3rd: 91.0Hz이고, 사각형일 때 1st: 28.5Hz, 2nd: 30.0Hz, 3rd: 69.1Hz였다. 이 자료를 통해 탑재체의 Static Load Analysis(Stress, Displacement), Dynamic Load Analysis(Random, Shock), Dynamic Analysis(Natural Frequency)이 이루어졌다. 또한, 위성/탑재체간의 인터페이스에서 Qualification Level의 Sine, Random Vibration 특성 결과와 공진모드 결과를 확인하였다.

3.3 전자부 설계

LIST의 전자부는 LIST CONtrollor(LCON), SpaceCraft InterFace(SCIF), HouseKeeping(HK), Power Distribution Unit(PDU) 그리고 CCD Analog로 구성된다. LIST의 Main controller로서 LCON을, 위성 본체와의 interface를 위해 SCIF를 두었다.

셔터 제어기(shutter controller), A/D converter 그리고 Cooling controller unit을 묶어 하나의

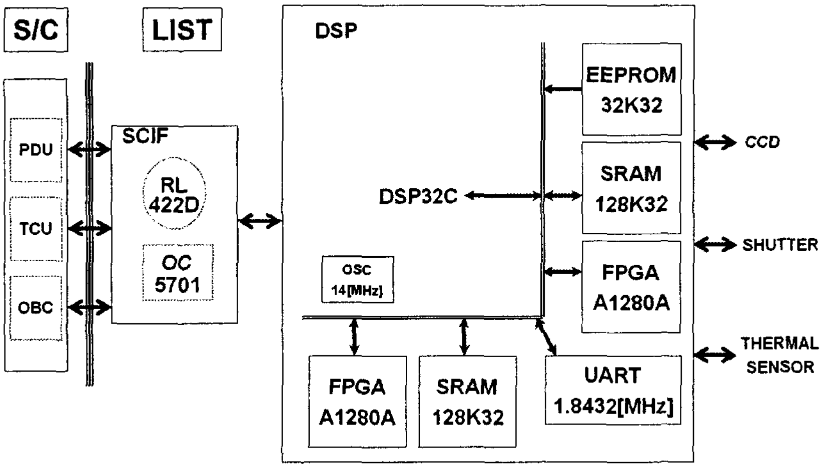


그림 20. LCON1 계통도.

House Keeping board로 구성되며, 태양의 라이먼 알파 복사영역의 전표면 영상을 얻기 위한 요구조건을 만족하도록 CCD Analog를 설계하였다(그림 19). LIST 전자부에는 80C1882B CPU, 80387sx co-processor, C/C++ program development-static RAM, flash EPROM, watch dog timer, real time clock, parallel I/O, 4개의 serial expansion ports, analog I/O가 사용된다.

그림 20은 LCON 1의 Block Diagram을 보여준다. LCON 2는 LCON 1의 작동 이상시 사용되는 예비 장치로 LCON 1과 같은 기능을 수행하도록 설계되었다.

LCON 보드의 구성요소는 다음과 같다.

• Microprocessor

1) UT80CRH196KD(12MHz)

2) 16-Bit Operation

3) Included Watch-Dog

4) 2개의 outer Interrupt;

- INT 7(EXINT): Serial Data Receive

- INT 13(EXINT 1): EDAC Double Bit Error

• Memory

64KB Static Random Access Memory(SRAM) & 64 KB Error Detection and Correction(EDAC) SRAM

• EEPROM & External Programming I/F

32KB Field Electronic Programmable Read Only Memory(EEPROM)

• Control & EDAC Field Programmable Gate Array(FPGA)

1) Address Decoding & Control signal generating

2) EDAC:

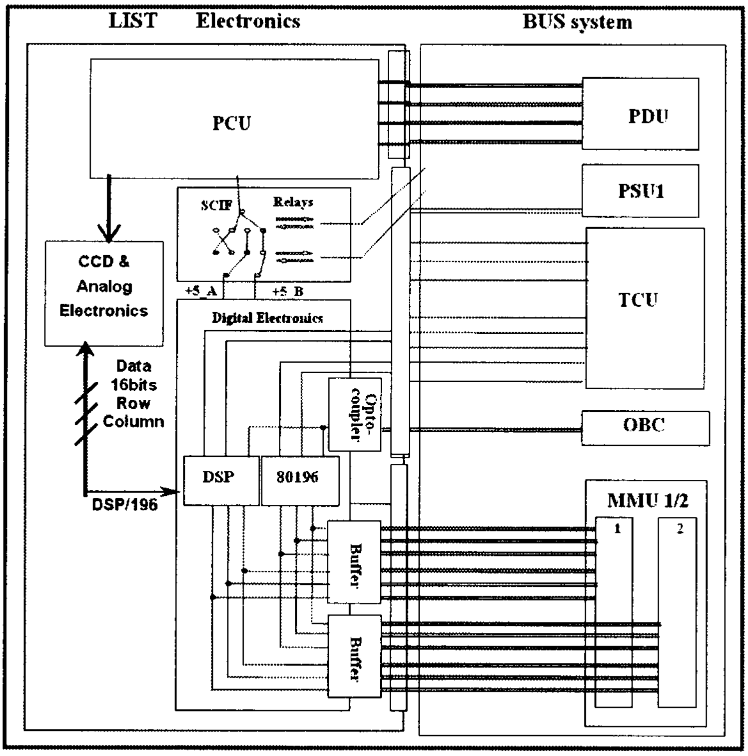


그림 21. 위성-LIST 간의 인터페이스 설계도.

- Single Bit Error Correction, Double Bit Error Detection
- 'Nibble' Wide Structure

3) Actel 1280 FPGA

전자부에 설치될 마이크로프로세서의 임무는 1) LIST 명령의 실행, 2) 관측 중 LIST 상태 점검, 3) 위성 본체 Telemetry 시스템으로 전송을 위한 LIST 자료의 처리, 4) 위성 본체와의 통신 등이다.

자료가 파괴될 위험을 최소화하기 위해서 마이크로프로세서는 태양 영상을 얻고, 영상을 압축하고, 위성 본체로 자료를 전송하기 위해 태양 관측 전후의 최소 시간만 작동시킬 것이다. 그 이외의 시간에 마이크로프로세서는 전원이 꺼진 상태가 되며 위성 본체로부터의 신호에 의해 마이크로프로세서는 다시 작동하게 된다. 위성 본체와의 통신은 과학위성 1호의 경우와 같이 9.6kbps의 속도로 이루어진다면 별 무리가 없을 것이나 RS422 port를 사용할 경우에는 19.2kbps가 필요하다.

그림 21과 22는 위성과의 인터페이스 개요 및 설계도를 보여준다. SCIF의 보드는 Relay Driver에 Mono-stable Multi-Vibrator(54HC4538)과 Relay(Teledyne 422DD-5), Opto-coupler에 HCPL5701 (Agilent Tech.)를 사용하고, 전력은 5V에 10mA이다.

LIST는 하루에 최대 4Gbit인 대용량의 과학적 자료를 전송하기 위해 Mass Memory Unit(MMU)을 사용한다. 두 개의 MMU 중 LIST는 관측 모드가 되면 On Board Computer(OBC)를 통해 신호

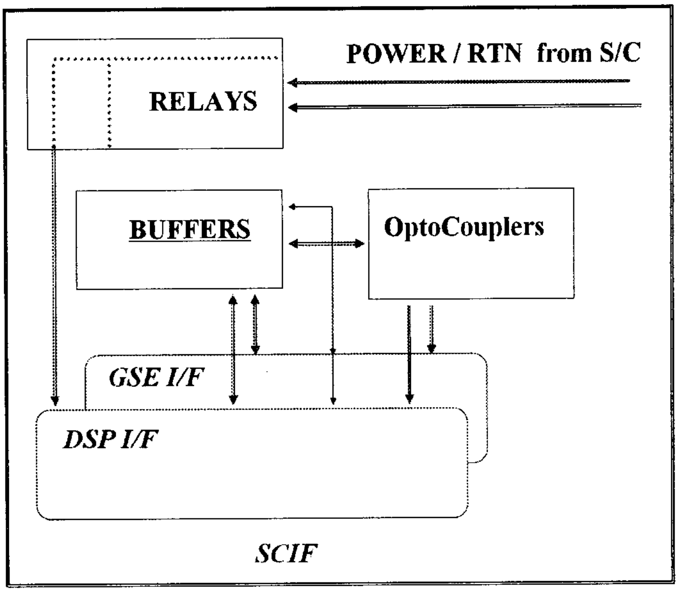


그림 22. SCIF 기능 계통도.

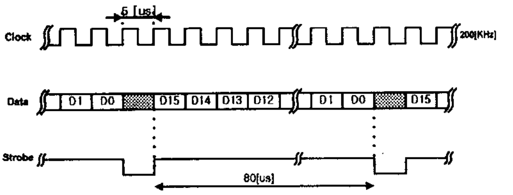


그림 23. MMU serial interface protocol.

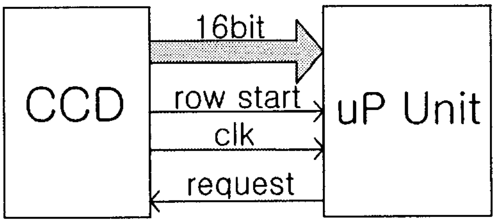


그림 24. CCD 인터페이스.

를 주어 하나의 MMU를 선택한다. 관측 모드 중에는 작동하는 MMU의 선택이 변하지 않는다. 그림 23은 MMU의 신호 과정을 도식화한 것이다.

LIST에서 선택한 CCD는 E2V사의 CCD 47-10; 1024 x 1024 소자(chip)로, 단위 화소(pixel) 크기는 13.3μm x 13.3μm, 121.6nm에서의 양자효율은 약 20%, dark signal은 293K에서 250electrons/pixel/s이며, full-well은 pixel당 100,000electrons이다. CCD가 1개의 화소 정보를 전달하는 최대 속도가 1MHz이고 하나의 영상의 총 화소 수가 약 105만개 이므로 하나의 영상 자료를 읽는 데 걸리는 시간이 약 1초가 되고 관측 가능한 최소 노출 시간은 이러한 CCD의 동작 범위에 따라 1초로 제한되었다. 라이먼 알파선 파장에서 활동기의 태양 원반에서 가장 밝은 플라쥐(plage) 영역은 quiet Sun(태양 극소기 값)일 때보다 50배 더 밝은 것을 고려하여 CCD는 +20°C에서 dark count가 약 1200electrons/sec/pixel이 되도록 계획하였다. 1초의 노출 시간과 2.5inch(6.35cm)의 유효 망원경 직경일 때, 암전류는 1,200electrons/pixel이고, quiet Sun signal은 1,100electrons/pixel, 밝은 플라쥐

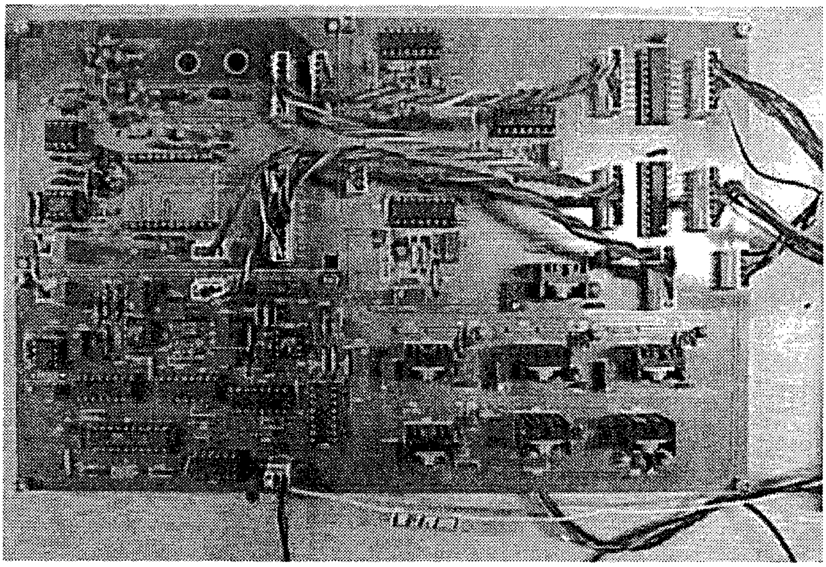


그림 25. CCD 제어 보드.

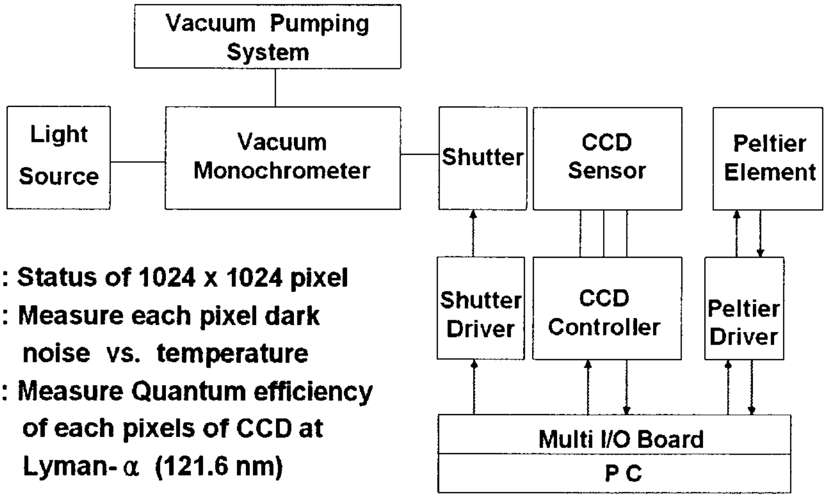


그림 26. CCD 검출기 검증.

신호는 57,000electrons/pixel이다.

그림 24는 CCD의 인터페이스를 도식화 한 것이며, 그림 25는 완성된 CCD 제어 보드의 모습이다. CCD chip은 생산 시에 모든 시험이 이루어지나 본 사업에 사용하기 위해서는 특성에 대한 별도의 검증 절차를 거쳐야 한다. 그림 26은 이 검증을 수행하기 위한 장비의 체계도이다.

전자부 개발을 통해 Digital Signal Processing(DSP) 부분인 LCON과 SCIF의 상세 설계를 위한 위성체와의 인터페이스가 확정되었으며, LUCENT Tech.의 DSP32C를 Core CPU를 사용하기로 하였다. DSP 보드 설계를 위한 중요 소자들이 결정되면서 세부 하드웨어 설계가 완료되었다. LCON 회로도 및 Layout과 DSP의 주 FPGA/EDAC FPGA 개발용 보드 회로도와 Layout이 작성되었고, DSP 시험용 Ground Support Equipment(GSE) 하드웨어 회로도가 작성되었다.

SCIF 부분 중 LCON 1, LCON 2의 전원중계를 위한 Relay 및 구동회로 설계를 완료하고, 위성체의 Telemetry Control Unit(TCU), OBC, MMU와의 명령, Telemetry 그리고 자료의 중계를 위한 하드웨어 설계가 완료되었으며 SCIF 보드 회로도 및 Layout이 작성되었다. 또한 CCD의 구입이 이루어 졌고, 구입된 CCD의 작동검증을 하였으며, 제어회로를 설계하였다. CCD 제어회로 설계 검증은 전압 조정이 가능한 전원공급 장치인 LM317을 이용한 전원공급회로 검토, Image clock의 상세 설계 검토, Micro Control Unit(MCU)에 의한 드라이버 신호 slew rate 조정회로 검토를 통해 이루어 졌다.

3.4 조립 및 시험

LIST는 우주로 발사되기 전에 지상에서 조립되고 초점이 맞춰진다. 기기의 광축 조정 역시 발사 전에 이루어진다. 기기들은 오염을 방지하기 위해 청정하고, hydrocarbon이 제거된 상태로 유지되어야 한다. 환경 및 특성시험으로는 Functional, EMI/EMC, vibration, thermal, bake-out test를 수행할 것을 계획하였다.

그 외의 발사 전에 수행하여야 할 LIST의 기기조정(calibration) 시험은 협력연구기관인 미국 콜로라도 대학교에서 수행을 담당하였으며 계획된 항목은 1) LIST system의 광 누출 여부, 2) Quantum throughput 결정, 3) FOV sensitivity mapping, 4) 검출기 Flat Field 결정 등이다.

3.5 LIST 운영 및 자료 활용

LIST는 태양 라이먼 알파 파장에서 전표면 영상을 획득하고 분석함으로써 채층과 전이영역의 구조와 진화, 'Quiet Sun'의 자외선 복사 변화 모델, 그리고 태양 자외선의 복사로 인한 지구 고층 대기의 변화를 밝혀내는 것이 목표이다. 이러한 목표를 성공적으로 수행하기 위해서는 LIST 운영(operation) 개념의 정립과 철저한 규정이 필요하다. 따라서 본 연구진은 운영을 크게 두 부분으로 세분하였다. 즉, LIST의 각 구성 요소들이 유기적으로 작용, 목적하는 자료의 성공적인 획득을 위한 '기술적 운영(Technical Operation)'과 획득된 자료를 활용하여 효과적으로 분석하고 목적한 과학적 성과를 달성하기 위한 '과학적 운영(Scientific Operation)'으로 구분하여 규정하였다. 또한 효율적인 자료처리 체계(Data System)의 관리를 위해 자료의 흐름을 'LIST 관측 체계(Observing System)', 'LIST 자료획득 체계(Data Acquisition System)', 'LIST 자료분석(Data Analysis)', 그리고 'LIST 자료출판(Data Publication)'의 네 가지 단계로 나누어 자료의 활용 중에 나타날 수 있는 위험들을 최소화하였다.

경희대학교 우주탑재체 연구센터(SPARC: Space Payload Research Center)에서는 LIST의 개발 목표를 충족하고 활용을 극대화하기 위하여 LIST Operation Community(LOC)와 LIST Data Analysis Community(LDAC)를 조직하였다. LIST의 제작 기간 동안에 LOC는 공학적인 목표, 즉 라이먼 알파 파장에서의 태양 전표면 영상 획득과, 자외선 카메라의 공학 시스템 자체 기술 개발, 그리고 향후 우리나라 여타 위성 등에 활용 가능한 우주 원천 기술 확보이며 LDAC는 자료기반(DB:

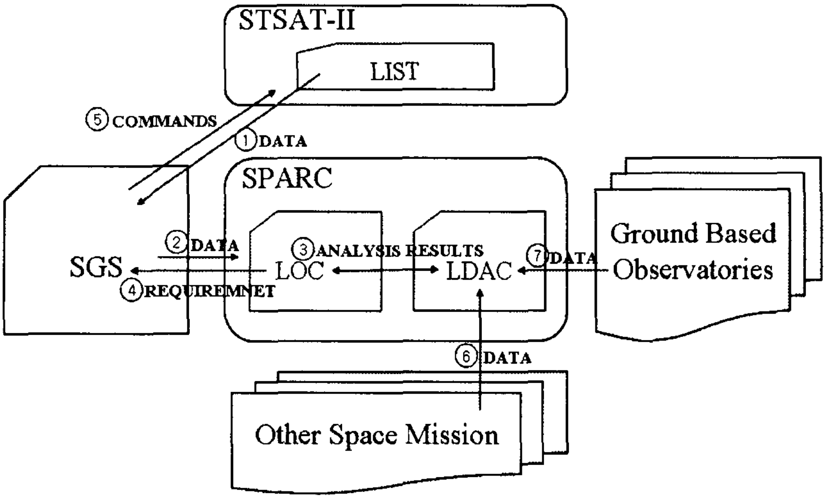


그림 27. LOC와 LDAC 활동 개념도.

Database) 구축 및 자료 처리 시스템 기술을 개발하고, 국내 및 해외의 지상 태양 망원경과 해외 우주관측 위성에서 생산되는 여러 파장대의 태양 자료를 수집하며, 이러한 자료분석을 통해 LIST 자료의 분석과 과학적 성과를 기대하였다.

그림 27은 LOC와 LDAC의 활동 개념도이다. 그림에 나타난 번호에 따른 설명은 다음과 같다.

① LIST에서 얻어진 라이먼 알파선의 태양 이미지(playback data)는 X-band를 이용하여 STSAT-2 Ground Segment(SGS)로 전송되고 저장되어 진다. 초기 자료 전처리가 이루어지게 된다.

- 파일의 개수: 최대 16 frame/orbit
- 자료의 크기: 32 Mbyte/orbit (max, 4Gbit/day)

② SGS에 저장된 자료는 네트워크(LAN or FTP)를 통해 SPARC로 전송되고 SPARC의 자료저장장치에 저장된다.

③ 저장된 자료는 LDAC에 의해 최종처리가 이루어지고, SGS에서 이루어진 초기 자료 전처리의 결과와 함께 과학적으로 충분한 가치를 갖는지 판단하게 된다. 자료 전처리와 최종처리 결과를 바탕으로 LOC와 LIST운영에 관한 정보를 교환하게 되며 그에 따른 요구사항을 SGS에 전달하게 된다.

④ SGS는 요구사항에 따라 과학기술위성(STSAT: Science and Technology Satellite) 2호에 보낼 명령을 결정한다.

⑤ SGS는 Command를 보내고 LIST의 모드(Mode) 및 노출시간 등을 제어한다.

⑥ LADC는 과학적인 성과를 위해 국내외의 지상 망원경과 우주관측 위성의 영상을 LIST의 영상과 비교 분석하게 된다.

LIST 작동은 LIST 운용 모드와 관측 모드를 따른다. 표 8에서는 이와 같은 LIST의 모드에 따른 상태를 간단히 표시하였다.

관측 모드는 태양 전체 원반의 라이먼 알파 파장의 영상을 획득하는 것을 목적으로 한다. 좀

표 8. 운영 모드와 상태.

Mode		Status				
		Subsystem				Power
		CCD	Optics	DSP/SCIF/HK	Shutter	
Launch		Power off				0
Initial		Test	Halt	Test	Test	20W[TBD]
Standby		Peltier Element Power on	Halt	Micro-processor Power on	Power off	5W[TBD]
Observation	Quiet Sun	Power on	Action	Power on	Exposure time $\leq$1sec	20W[TBD]
	Explosive Event					
	Flat Zenith				Exposure time 0.1sec	
	Flat Nadir					
	Dark				Exposure time 1 $\sim$ 10sec	
	Standard Star					
Safe-Hold		Power off	Halt	Heating on	Power off	3W

더 자세히 설명하자면, 1) Observation Mode는 1년 중 8개월은 Quiet Sun 관측, 4개월은 Explosive event 관측이 된다. 이와 같은 구분은 복사강도가 매우 강한 활동영역의 현상 관측 시 나타나는 화소의 포화(saturation)를 피하고 반대로 Quiet Region의 복사강도가 매우 약한 현상의 관측이 가능하도록 하여 과학적 목적을 충족시키기 위함이다. 2) Safe-Hold Mode (Survival Mode)는 온도의 급변등 위성에 비상 상황이 발생할 때 LIST의 각 부품의 손상을 막기 위해 사용하며, 3) Stored images/data Transmission (Playback) Mode는 위성에서 자료를 지상국에 전송할 때 사용하는 모드이다. standard star 모드는 표준성의 관측을 통해 필터에 나타날 수 있는 Degradation현상을, Flat Field 모드는 Geocorona 영상을 획득하여 지구 상층 대기에 의한 산란을 보정하기 위함이다.

LIST가 관측을 시작하게 되면, 많은 양의 자료가 지상으로 전송되게 된다. 이 자료들을 분류하고 모으는 과정을 통해 연구에 활용할 수 있도록 하는 것이 자료 운영의 목적이다. 본 연구진에서 결정된 자료 처리 과정은 다음과 같은 순서로 이루어진다.

1) 태양 관측 자료 분석: 위성에서 관측한 태양 자료를 종류별로 분류하고 이를 과학적 방법으로 분석한다.

2) 분석 결과에 의한 기본 DB 설계: 분석한 자료 형식을 바탕으로 DB의 기본 테이블(table)을 구성한다.

3) DB의 세부 구성 설계: 과학적 분석을 기반으로 기본 테이블에 자료를 저장할 수 있도록 각 필드(field)를 정의한다. 정의한 필드를 바탕으로 자료의 특성과 백업(backup) 등을 고려하여 저장 방법을 결정한다.

4) DB 구축 및 중간 평가: 설계를 바탕으로 자료를 DB에 저장하고, 웹 페이지를 통하여 연동하여 테스트한다. 향후 유지관리를 위해 자료는 파일의 이름만 입력하면 DB에 자동적으로 원하는 위치에 저장될 수 있도록 자동화 도구를 작성한다.

5) DB 구축 완료: 구축된 DB의 중간 평가 결과를 바탕으로 자료를 모두 저장하고 DB 구축을 완료한다. 소장된 모든 자료는 서버(server)의 프롬프트(prompt) 상에서 자동화 도구를 사용하여 입력한다.

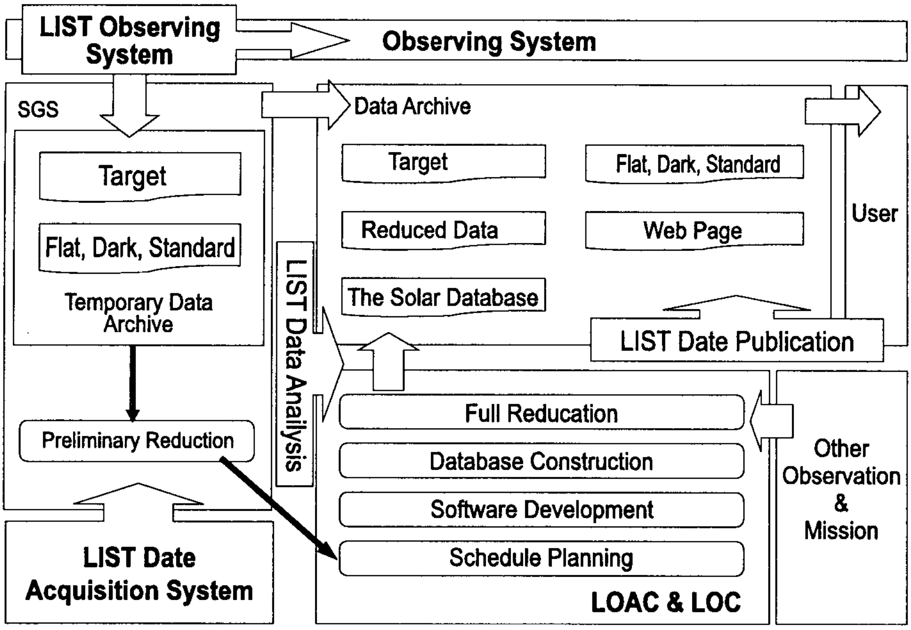


그림 28. 자료 처리 과정도.

이와 같은 과정을 도식화 하면 그림 28과 같다.

또한, LIST 자료 운영 시스템은 자료의 활용도를 높이기 위해 인터넷 망에서 다음과 같은 'Data Archive'를 운영한다.

1) 웹상에서 원하는 자료의 정보를 검색하고 활용할 수 있도록 query와 graphical interface를 제공한다.

2) 운영 중인 각국의 태양 자료와 연계하여 운영한다.

3) 영상을 표시(display), 확대(zoom), 그리고 겹침(overlay) 등을 할 수 있는 기본적인 도구를 제공한다.

4) 웹상에 매일의 대표적인 LIST 태양 영상을 다른 파장, 다른 과제 자료와 함께 게시한다.

5) 해외에서 운영 중인 우주관측 위성들의 태양 자료를 읽을 수 있는 능력을 갖춘다.

4. 형상 관리

본 연구는 여러 연구 집단이 공동으로 참여하고 한 번 위성에 탑재되어 발사되면 수리가 불가능한 과제의 특성을 감안하여 미국 우주산업에서 사용되는 시스템 공학적 기법을 사용하였다. 특히 시스템의 효율적인 운영을 위해 형상관리(Configuration Management) 기법이 도입되었는데 그 목적은 1) 최적의 비용으로 요구 성능 충족 2) 설계 및 생산에 필요한 형상통제를 적시에 적용 3) 형상관리 품목의 인식 체계 확립 3) 형상관리 방침 절차, 자료, 양식, 보고서 등의 통일성 유지 등이다.

형상관리를 위한 형상식별은 프로그램 진행시 요구되는 조건(Requirement)을 만족시키기 위한 기

표 9. 공식문서.

문서번호	제 목	Ver.
STSAT2-310-SPEC-001	LIST Performance Specification	Final
STSAT2-320-SPEC-001	Mechanical Structure Subsystem Specification	Preliminary
STSAT2-330-SPEC-001	Optical Subsystem Specification	Preliminary
STSAT2-340-SPEC-001	CCD Analog Specification	Preliminary
STSAT2-350-SPEC-001	DSP/SCIF/HK Specification	Preliminary

표 10. 내부문서.

문서번호	제 목	Ver.
STSAT2-360-DSD-001	Data System Document	Preliminary
STSAT2-360-DPD-001	Data Publication Document	Preliminary
STSAT2-360-DODT-001	Data Obtaining and Transfer Document	Preliminary
STSAT2-330-SPEC-002	Filter Assembly Specification	Preliminary
STSAT2-330-SPEC-003	Mirror Assembly Specification	Preliminary
STSAT2-320-SPEC-002	Housing Structure Specification	Preliminary
STSAT2-320-SPEC-003	Opto-Mount Structure Specification	Preliminary
STSAT2-320-SPEC-004	Thermal Control Specification	Preliminary
STSAT2-320-ANYS-001	Mechanical Structure Analysis	Preliminary
STSAT2-350-SPEC-002	LCON Specification	Preliminary
STSAT2-350-SPEC-003	PDU Specification	Preliminary
STSAT2-320-ICD-001	Interface Control Document	Preliminary
STSAT2-340-SPEC-002	CCD Detector Specification	Preliminary
STSAT2-340-SPEC-003	CCD Controller Specification	Preliminary
STSAT2-350-SPEC-001	LIST Operation Concept Document	Preliminary

준 및 절차를 제시하고 수행하는 활동으로 1) 형상품목(Configuration Item) 선정 및 식별 2) 형상기준 설정 3) 형상조직(체계) 수립이 있으며 형상품목의 설정이란 개발하고자 하는 최종제품(Product)을 구성하는 Item(구성품: System, Sub-system, Component, Assembly, Part)중 프로그램 요구조건 상 반드시 식별성, 추적성 및 문서화가 이루어져야 하는 구성품을 선정, 관리하는 활동이다.

형상식별은 형상품목(H/W, Document)으로 선정된 형상 Item에 대한 추적성 및 연계성을 확보하기 위한 관리번호 체계를 부여하는 활동으로 제품번호, 부품번호, 시리얼번호와 문서번호(도면, 규격서, 절차서), 변경사항 번호 등이다. 이에 따라 제품에 대한 형상문서의 정식작성(등록) 후 형상품목에 대한 변경사항에 대하여 종합적으로 평가, 조정, 승인 또는 비승인을 수행하는 형상관리를 하였다.

5. 문서 관리

위성 탑재체 개발 과정에서 생산되는 다량의 문서들은 효율적인 관리를 위해 형상관리 차원에서 Baseline이 선언되고 체계적인 문서관리가 되어야 한다.

본 개발 사업에서 작성된 모든 문서는 그림 29의 분류를 따랐다. 본 개발 사업에서 작성된 문서는 총괄관리 기관인 한국항공우주연구원과 공유하는 5개의 공식문서를 포함하여 총 23개의 문서가 작성될 예정이었다. 그림 30은 이 문서들의 계통도를 보여준다. 표 9와 표 10은 본 개발 작성된 문서

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S2 : Project명		Document Type Code		FUNC Code			Sequence Number			Rev. Code	

그림 29. 문서 분류번호.

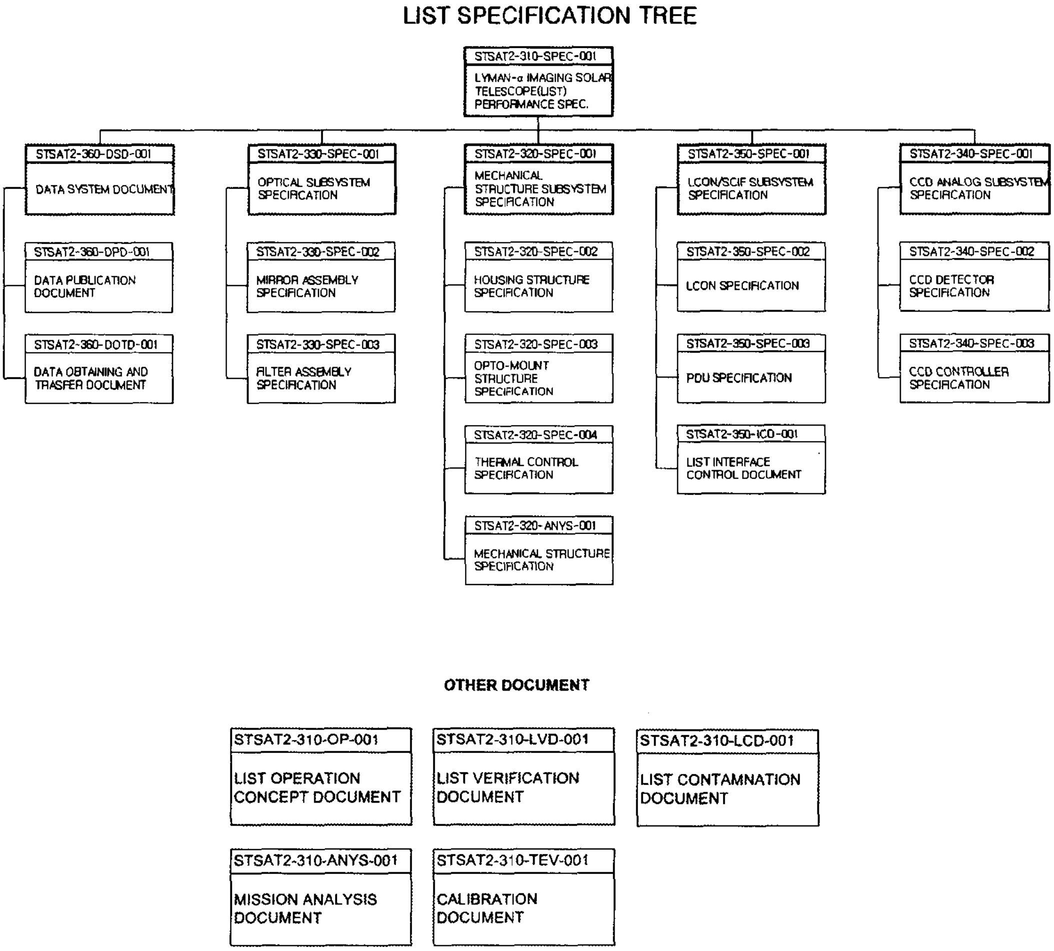


그림 30. LIST Specification Tree.

들을 보여준다.

작성된 문서들은 본 사업의 주무기관인 경희대학교 우주탑재체 연구센터에 문서로 보관하고 전자파일도 본 센터의 분류 기준에 따라 저장매체에 보관하며 정기적인 업데이트를 하였다.

6. 결 론

우주 환경에서 작동하는 실험 기기의 연구개발과 제작에는 최첨단 기술이 요구된다. 전자, 전기, 재료 등의 첨단 기술이 종합되어야 하며 이의 운용에도 연관 분야의 급속한 발전이 활용되어야 한다. 본 연구에서는 자외선 태양카메라를 개발함으로써 과학적 성과를 얻음과 동시에 향후 우리나라에서 개발되는 여러 위성들의 제작에 필요한 원천 기술들을 확보하였으며, 군사, 상업용으로 이용되는 고해상도 측광 장치의 제작 운용에 필요한 기술 축적도 가능하였다.

본 연구에서 개발된 주요 기술은 다음과 같다.

1) 우주환경에 적합한 구조 설계 및 해석 기술
2) 인공위성 탑재용 광학계 설계 기술
3) 인공위성 탑재용 비구면 광학계 제작 기술
4) 검출기 제어 기술
5) 위성자료 시스템 운영기술
6) 우주사업 형상관리 기술

본 연구를 통해 개발한 우주 탑재체 개발 기술과 결과물들은 본 사업에 적용되었던 시스템 관리 기법과 함께 향후 유사한 우주기술 사업에 이용될 수 있으며 과학적 시스템과 성과물들도 현재 정부가 지원하여 구축하고 있는 우주환경 감시 시스템에 이용될 수 있다.

본 연구에서 궁극적으로 추구하고 있는 태양의 자외선 영역 탐사라는 우주과학 기초연구는 연관 기술의 진보를 유도함은 물론 현재 관측되고 있지 않은 파장대의 관측을 함으로써 선진 외국에서 운용하고 있는 우주 망원경들과 상호 보완적 관계를 유지하여 우리나라 위성 산업 기술을 세계에 알리는 계기가 될 것이다. 이는 국제 학계에서 우리의 학문적 위상을 정립함과 동시에 국가적으로 추진하고 있는 우주개발사업에 대한 국민적 자긍심을 높이는 계기가 될 것이다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업(M102DB010001-03D0201-0031)의 지원을 받아 수행된 과학기술위성 2호 개발사업의 자외선 태양카메라 개발 연구결과입니다.

참고문헌

Allen, M. J., Oluseyi, H. M., Walker, A. B. C., Hoover, R. B., & Barbee, T. W. 1997, Solar Physics, 174, 367

Eparvier, F. G., Bailey, S. M., Woods, T. N., Rottman, G. J., Solomon, S. C., Lawrence, G. M., Roble, R. G., White O. R., Lean, J. L., & Tobiska, W. K. 1997, Eos, Trans., AGU, 78, F560

Foing, B. & Bonnet, R. M. 1984, Adv. Space Res., 4, 43

White, O. R. 1977, The Solar Output and Its Variation (Boulder: Colorado Associated University Press), p.85

Woods, T. N. 1998, NASA Proposal AO-98-OSS-01, p.9

Woods, T. N. & Rottman, G. J. 1997, JGR, 102, 8769