

지구관측위성 수동형 마이크로파 라디오미터의 시스템 설계 요구 사항 분석 연구

유상범*, 용상순*, 이상곤*, 이승훈*

System Requirement Analysis of Passive Microwave Radiometer in Earth Observation Satellite

Sang-Burm Ryu*, Sang-Soon Yong*, Sang-Kon Lee*, Seung-Hoon Lee*

요 약

본 연구에서는 지구 관측 위성에서 사용되는 수동형 마이크로파 라디오미터의 최근 기술 및 요구사항에 대하여 서술한다. 최근의 지구 관측 위성에 운영되는 미션에 사용되는 마이크로파 라디오미터 시스템의 종류(total power, Dicke, NIR)와 관측하고자 하는 대상(imager, sounder)과 스캔방식(cross track, conical)에 따라 구분하고 설계 방법에 대하여 논한다. 또한 지구 관측 미션에 필요한 수동형 라디오미터 시스템에 필요한 요구사항에 대하여 최근 사용 및 개발 되고 있는 사례를 통하여 분석한다.

Key Words : Observation of the Earth, Passive Microwave Radiometer System, Sounder, Imager

ABSTRACT

In this research, we describe recent technologies and system requirements of the passive microwave radiometer used in Earth observation satellites. And we classify types of microwave radiometer system for Earth observation satellites according to observation targets and ways to scan and discuss a design method. Also, requirements of passive radiometer for Earth observation missions in the latest practical examples used and developed are analyzed in this research.

I. 서론

1.1 위성 수동형 마이크로파 관측 위성 동향

수동형 마이크로파 원격 탐사는 70년대 중반 이후로 기상학과 기후학에 매우 중요한 공헌을 하였다. 수동형 마이크로파 원격 탐사는 대상에 따라 탐측기와 영상기로 나뉘어진다. 탐측기의 경우 수치 기상 예보를 위하여 주로 사용되며 MSU(Microwave Sounding Unit)를 시작으로 다음 세대인 AMSU-A(Advanced Microwave Sounding Unit-A)와 AMSU-B 그리고 MHS(Microwave Humidity Sounder)에 의하여 매우 기간 동안의 측정 데이터가 축적 되었다. 그리고 기상과 기후를 이해하고 예측하는데 기여를 하고 있다. 영상기는 Nimbus-7의 SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)을 시작으로 하여 미국에서는 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)의 SSM/I(Special Sensor

Microwave/ Imager), SSM/T1, SSM/T2, SSM/IS(Special Sensor Microwave/Imager Sounder)로 발전하였다[1]. Aqua 위성의 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS aqua)가 있으며 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 위성의 TMI(TRMM Microwave Imager)가 있다[2]. 영상기는 해수면 온도 및 지표면 토양 수분 함량, 해빙 분포를 측정하며 TMI의 경우 열대 강우량을 측정한다[3].

차세대 지구 관측 위성 프로그램으로 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 주도하에 DMSP와 NOAA의 후속 프로그램으로 NPOESS(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) 프로그램이 진행 되었으나 프로그램 지연과 예산 부족으로 최근 NPOESS 위성 발사 이후 JPPS(Joint Polar Satellite System) 프로그램으로 바뀌었다[4]. NPOESS 위성에 장착 되는 수동형 마이크로파 탐재 시스템은 ATMS (Advanced

*한국항공우주연구원(sbryu11@kari.re.kr), 교신저자 : 유상범

접수일자 : 2012년 9월 14일, 수정완료일자 : 2012년 9월 17일, 최종게재확정일자 : 2012년 9월 21일

Technology Microwave Sounder)와 CMIS(Conically-scanning Microwave Imager/Sounder)이었으나 CMIS는 MIS(Microwave Imager/Sounder)로 바뀌었다[5]. 유럽은 MetOp (Meteorological satellite program)를 운용 중이며 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 지원하는 AMSU를 탑재하고 또한 AMSU-B를 ESA (European Space Agency)의 주도하에 개발 및 탑재하여 운용 중에 있다[6][7]. 기존 TRMM 프로그램의 후속 프로그램으로 GPM(Global Precipitation Measurement)이 개발 중이며 코어 위성과 준 위성으로 구분하여 코어는 수동형 및 능동형 마이크로파 관측 시스템을 탑재하고 준 위성은 수동형 마이크로파 관측 시스템을 탑재하여 전 지구 3시간 간격의 강우 정보를 지상에 제공하고자 하고 있으며 탑재 예정인 마이크로파 관측 시스템은 GMI(GPM Microwave Imager)이다[8][9]. 미국의 경우 과학적 목적의 위성은 NASA의 주도하에 A-train 프로그램을 운용하고 있으며 유럽의 경우 ENVISAT(Environmental Satellite)과 ERS-2(European Remote-sensing Satellite-2)를 운용하고 있다. 또한 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)를 운용하여 전 지구 염도 분포를 관측하고 있다. 우리나라의 경우 과학 위성 2호에서 Envisat과 비슷한 2채널 마이크로파 관측 시스템을 탑재하였다. 또한 최근 천리안 기상 위성을 정지궤도에서 운용 중에 있으며 가시 및 적외 채널을 통하여 기상 정보를 수집하고 있다. 마이크로파 관측의 경우 AMSU를 통하여 온습도 연직 분포를 활용하고 있으며 영상 정보는 AMSR-E를 통하여 토양 수분 분포 및 식생 정보로 활용하고 있다. 마이크로파 관측의 경우 고도에 따라 지상 관측 해상도에 영향을 주므로 현재 전 세계적으로 극궤도에서 운용 중이다. 현재 수치 기상 모델은 위성 마이크로파 관측 자료를 입력 데이터로 활용하고 있으므로 기상 예보 및 구름 하층의 지표 정보를 얻기 위하여 우리나라 극궤도 위성 운용의 경우 마이크로파 관측 시스템 탑재가 바람직하다고 볼 수 있다. 우리나라 해양 및 기상 관측을 위한 다중 주파수 수동형 마이크로파 라디오미터 설계 및 구현은 아직 없으며 그러므로 위성에서의 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템의 설계 방법 및 요구 사항의 분석을 통하여 최근 동향에 대하여 알아보고자 한다.

1.2 수동형 마이크로파 관측 요구사항

수동형 마이크로파 관측을 위한 미션을 계획하기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다. 관측 대상에 필요한 과학적 요구사항들의 포괄적이고 정확한 파라미터들을 유도하여야 한다. 과학적 요구사항을 만족하는 수동형 마이크로파 라디오미터를 위한 미션과 탑재체 요구사항들의 전체적 파라미터를 정의하고 기존 운용중이거나 계획된 위성 미션들을 보완할 수 있는 선행 미션과 탑재체 개념을 수립한다. 그리고 과학적 요구사항과 미션과 탑재체 규격들 사이에 연결을 검증

하고 실험을 통하여 설명한다. 그러므로 탑재체(instrument)로 사용되는 센서의 설계 및 개발을 위하여 제시된 요구사항들을 평가하고 시스템 모델을 개발하고 필요한 설계 옵션과 대안들을 제시하여야 한다. 그리고 다양한 설계 옵션들의 trade off를 평가하고 선행 설계를 도출하고 개선된 개념을 개발한다. 그림 1은 지구 관측 위성의 마이크로파 관측의 중요 항목들에 대한 전체적 구성도이다.

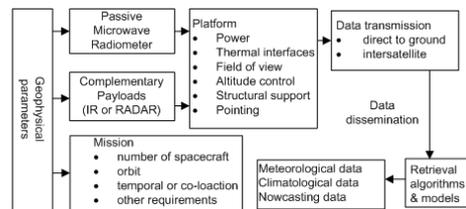


그림 1. 전체적 미션과 센서의 구성도[10]

수동형 마이크로파 관측 미션의 요구사항은 그림 2에 나타난 중요 파라미터들로 구성된다. 먼저 관측 대상에 의하여 궤도와 측정 주파수가 결정하고 공간 해상도와 관측 주파수 해상도가 결정된다. 그리고 복사 측정 정확도와 감도가 정의 되면 교정 구조와 측정 적분 시간이 정의되고 관측 기하학 및 공간해상도와 궤도를 고려한 스캔 프로파일을 정의한다. 관측 주파수와 궤도를 고려하여 측정 안테나의 크기가 결정되고 궤도와 스캔 프로파일과 요구되는 관측 주기를 고려하여 위성의 수를 결정한다.

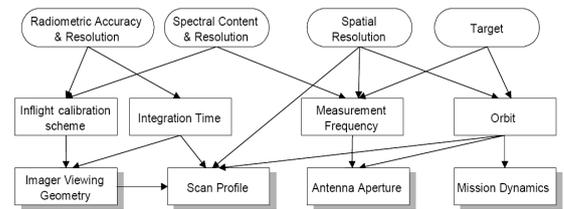


그림 2. 수동형 마이크로파 관측 미션의 요구사항[10]

그림 2의 요구사항이 결정되면 위성 운용에 필요한 잉여(redundancy), 스캔율(scan rate), 안테나 피드 성능, 수신기 잡음, 안테나 관성 등을 고려하고 결과적으로 탑재체의 총 중량 및 볼륨, 수신기의 동작온도와 플랫폼과의 기계적 전기적 인터페이스를 고려한다.

II. 기본적 설계

2.1 수동형 마이크로파 라디오미터 수신기

기본적 설계를 검토하기 위하여 [11]를 참조하였다. 표 1에서와 같이 기본적 수동형 마이크로파 라디오미터의 수신기 종류에는 전전력 방식, Dicke 방식, NIR(Noise Injection

Radiometer) 방식이 있다. 전전력 방식은 구조가 단순하고 전력 소모가 적기 때문에 관측 위성에서 주로 쓰인다. 하지만 라디오미터 시스템의 이득 변동으로 인하여 측정치에 영향이 발생한다. 이러한 이득 변동을 줄이기 위하여 Dicke 방식은 레퍼런스와 안테나 입력을 Dicke 스위치를 사용하여 이득 변동에 대한 이득을 최종적으로 TR 만큼 제거한다. 그러나 시스템 이득 변동은 고정된 값이 아니기 때문에 레퍼런스의 값도 시스템 이득의 변동에 따라 가변함으로써 NIR 방식이 사용되고 있다. 감도(sensitivity)는 전전력방식이 가장 우수하나 교정 방법을 고려한 정확도나 안정도 측면에서 Dicke 방식과 NIR 방식이 사용되는 경우가 있다.

표 1. 수동형 마이크로파 라디오미터 수신기의 종류

시스템의 구조	종류
	Total Power sensitivity $\Delta T = \frac{T_A + T_N}{\sqrt{B \cdot \tau}}$
	Dicke sensitivity $\Delta T = 2 \cdot \frac{T_A + T_N}{\sqrt{B \cdot \tau}}$
	NIR sensitivity $\Delta T = 2 \cdot \frac{T_A + T_N}{\sqrt{B \cdot \tau}}$

그림 3은 위성에서 사용되는 전전력 방식의 수동형 마이크로파 라디오미터 수신기이다. 수신기의 무게와 파워를 줄이기 위하여 수동형 마이크로파 관측 주파수 중에 낮은 주파수는 IF 하향 변환 없이 직접 검출 방식을 사용하며 높은 주파수에서는 직접 변환 방식의 RF 블록을 사용하며 적분기부터는 신호처리 동작을 수행한다. 최근 MMIC 기술이 발전하여 89GHz까지 직접 검출하는 방식이 개발되었다.

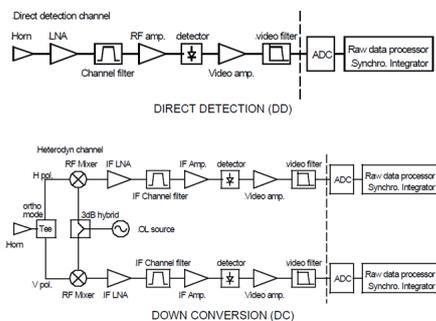
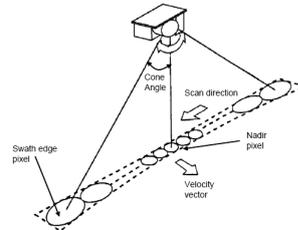


그림 3. 직접 검출 방식과 직접 변환 방식

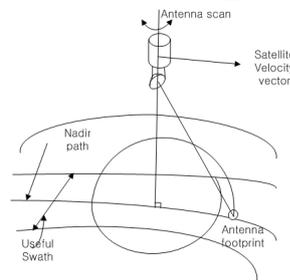
2.2 수동형 마이크로파 관측위성의 파라미터

그림 4는 수동형 마이크로파 관측위성에 사용되는 기계적

스캔 방식을 설명한 것이다. 크로스 트랙 스캔방식은 직하를 기준으로 좌우 방향으로 스캔하기 때문에 지상에서의 풋프린트의 크기가 각도에 따라 변하지만 코니컬 스캔방식은 변하지 않는다. 그러므로 위성에서의 측정 목적에 따라 영상기의 경우 코니컬 스캔이 많이 사용되고 탐측기의 경우 크로스 트랙 스캔 방식이 사용된다.



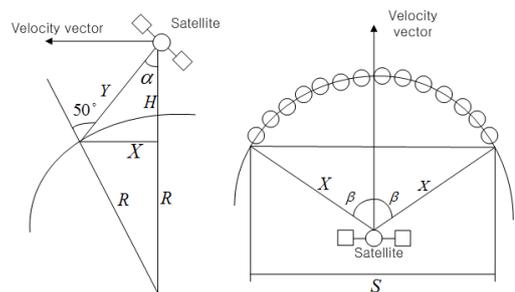
(a) 크로스 트랙 스캔



(b) 코니컬 스캔

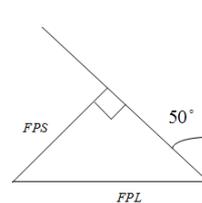
그림 4. 기계적 스캔방식

그림 5는 위성이 지구를 관측할 경우 관측 기하학을 나타낸다. 표 2는 그림 5의 기하학적 구조에서 수동형 마이크로파 관측 위성의 고도가 800km, 입사각이 53°인 경우이며 간단한 예제를 통하여 기본적 파라미터들을 이해하고자 한다. 또한 입사각 53°는 SSM/T나 TMI의 입사각과 동일하다.



(a) 코니컬 스캔 기하학

(b) 스캔폭



(c) 풋프린트 계산

그림 5. 수동형 마이크로파 관측 위성의 기하학

표 2. 기하학적 계산에 의한 파라미터

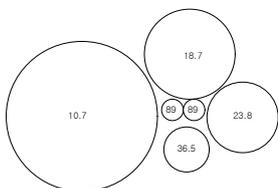
Terminology	calculation	description
Y	1219km	slant range from satellite to footprints
R	6378km	Earth radius
H	800km	satellite height
D	$\frac{660}{F \cdot FP}$	antenna diameter
β	60	half sacn angle
γ	53	incidence angle
α	45.2	
X	865km	radius in the circle on which the footprints are situated
S	$1498\text{km}=2X\sin\beta$	swath width
C	$5435=2\pi X$	scan circle
θ	$1.4 \frac{C}{F \cdot D}$	antenna 3dB beamwidth
FPS	$Y \cdot \theta = \frac{512}{F \cdot D}$	along track direction
FPL	$\frac{FP}{\sin 37^\circ} = \frac{512}{F \cdot D}$	across track direction
FP	$\sqrt{FP \cdot SFPL} = \frac{660}{F \cdot D}$	footprint

표 3은 [11]에 제시된 일반적 수동형 위성 마이크로파 관측의 규격이다. 표 2를 기반으로 하고 수평과 수직 편파를 고려하여 전전력 수동형 마이크로파 라디오미터 수신기를 주파수당 2개씩 사용한다. 또한 안테나 직경은 1m이고 89GHz의 경우 스캔할 때 풋프린트의 중첩율과 스캔율을 고려하여 피드혼을 2개 사용함으로써 수신기의 개수는 4개이다.

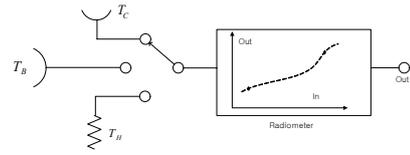
그림 6은 표 3을 고려한 피드 혼의 배치와 교정 방법이다. 가장 높은 주파수의 피드 혼이 포커스에 가장 가깝도록 배치한다. 심우주관측은 피드를 사용하며 흑체타겟과 함께 Dicke 스위치에 연결되어 전전력 방식의 경우 한번 스캔 시 마다 교정하게 된다.

표 3. 일반적 다중 주파수 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템의 규격

F (GHz)	FP (km)	BW (MHz)	NF (dB)	Integration Time(ms)	NEΔT	Feeds	Receivers
10.65	48×80	100	2.5	52.3	0.16	1	2
18.7	27×46	200	2.8	17.0	0.28	1	2
23.8	22×36	200	3.0	10.5	0.36	1	2
36.5	14×23	300	3.1	4.5	0.55	1	2
89.0	5.8×9.6	500	5.0	1.8	1.4	2	4



(a) 안테나 피드혼 배치의 레이아웃



(b) 온보드 교정 구조
그림 6. 피드혼 배치와 온 보드 교정

표 4는 전체적 중량 및 소비 전력을 계산하기 위하여 기존 운용되는 위성 수동형 마이크로파 라디오미터 수신기의 비교이다. 1999년 JASON 위성부터 MMIC 기술을 사용하여 중량 및 소비 전력이 개선됨을 알 수 있다.

표 4. 수신기의 무게와 전력[11]

Year	Name	Number of Receivers	Weight (kg)	Power (w)	Weight and Power Per Receiver
1978	SMMR	10	30	65	3kg and 6.5W
1987	SSM/I	7	24	35	3kg and 5W
1999	JASON	3	1.2	6	400g and 2W
2001	QuinStar	3	0.55	4	180g and 1.3W

표 5는 표 4를 고려하여 표 3의 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템과 다른 위성을 참조하여 계산하면 총 소비 전력은 39W이고 무게는 34kg이다. 하지만 이 경우에는 잉여 등이 고려되지 않았다.

최종적으로 전송하기 위한 데이터 전송율의 계산은 적분 시간과 수신기의 개수와 스캔 범위를 고려한다. 수동형 마이크로파 라디오미터의 출력되는 데이터의 단위는 16bit 데이터 워드이고 측정 데이터의 샘플링은 120°의 스캔 범위 안에서 수행되고, 추가적으로 교정을 고려하여 심우주관측반사기와 흑체 타겟의 위치를 고려하여 스캔 범위의 양끝에서 각각 30°를 추가하여 샘플링을 수행하며 36.5 GHz이하의 주파수는 적분 시간이 같다고 가정하면 총 32Kbps이다.

표 5. power and weight budget[11]

Power	Receivers	18W
	Data handling	5W
	Scan	10W
	Power supply	6W
Total power		39W
weight	Antenna including struts	8kg
	Receivers	3kg
	Feeds	2kg
	Data handling	2kg
	Power supply	2kg
	Calibration	6kg
	Scan motor	5kg
	Deployment	6kg
Total weight		34kg

2.3 복합 탐측기와 서브시스템

그림 7은 전체적 위성 수동형 마이크로파 라디오미터의 블록다이어그램이다. 안테나 서브시스템, 수신기 서브시스템, 전기 서브시스템, 기계 서브시스템으로 구성된다. 안테나 서브시스템은 공간 해상도와 관련 있으므로 3장에서 설명한다.

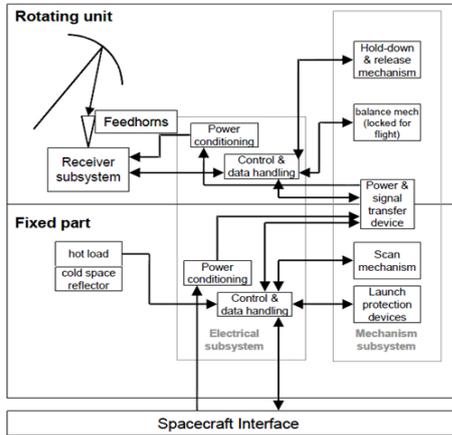
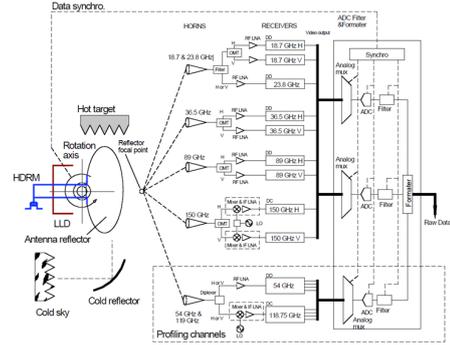
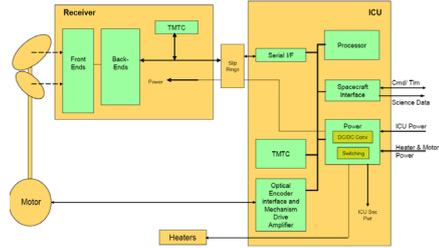


그림 7. 위성 수동형 마이크로파 라디오미터 서브시스템의 개념[10]

최근 위성의 수동형 마이크로파 관측 시스템은 코니컬 스캔 방식을 사용하고 영상기에 탐측기능까지 포함시키는 탑재체가 개발 및 운용되고 있다. 운용 중인 탑재체는 SSM/IS와 MTVZA-GY가 있으며 이러한 추세는 계속되고 있다. 복합 탐측기를 고려한 수신기 서브시스템은 그림 8의 (a)와 같이 구성된다. 그림에서와 같이 영상기를 위한 수신기 서브시스템과 탐측기를 위한 수신 서브시스템이 각각 나뉘어 구성된다. 아래의 프로파일링 채널이 탐측기용 구성이다. 그림 8의 (b)는 전기서브시스템의 구성도이다. 여기서 중요한 고려 사항은 데이터 인터페이스와 백엔드(backend) 신호처리 부분과 TMTC(Telemetry and Telecommand)와 회전 결합(rotating joint) 부분이다. 백엔드 신호처리는 ADC(Analog Digital Converter)와 디지털 적분기와 버스 인터페이스 부분으로 구성되며 수동형 마이크로파 라디오미터 수신 감도를 고려하여 양자화 에러를 줄이고 성능을 향상시킬 수 있는 설계가 필요하다. 회전 결합 부분에는 주로 슬립링을 사용하며 회전 부분과 고정 부분의 전력 명령과 측정 데이터를 전송한다. 백 엔드의 출력 데이터는 다중화 되며 백 엔드와 슬립링의 위치는 스캔 방식과 관측 대상에 따라 달라질 수 있다. 코니컬 스캔의 경우 부하를 줄이기 위하여 슬립링 이전에 백엔드의 출력 데이터를 다중화한다. 데이터 인터페이스를 위한 버스는 관측 대상에 따른 데이터 전송률을 고려하여 선택적으로 설계된다. TMTC는 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템 조절이나 플랫폼을 고려한 선택 사항이 있을 수 있으며 프론트엔드의 출력 데이터 전송 속도를 고려하여 설계된다.

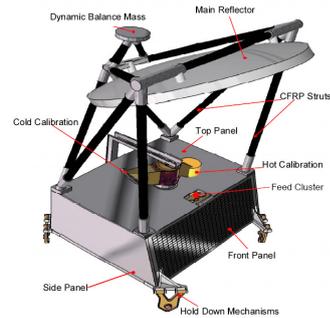


(a) 복합 탐측기를 고려한 수신기 서브시스템

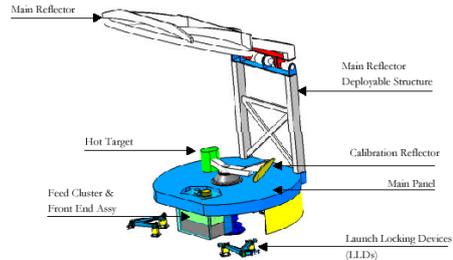


(b) 전기 서브시스템의 구성

그림 8. 수신기 서브시스템과 전기 서브시스템 [10]



(a) 고정 구조



(b) 전개 가능 구조

그림 9. 기계적 설계 방법[10]

그림 9의 (a)와 (b)는 코니컬 스캔 방식을 사용하는 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템의 기계적 구조이다. 반사기를 고려하면 (a)의 고정형과 (b)의 전개가능형으로 구성할 수 있다. 반사기의 중량 버짓을 고려할 경우 전개형이 우수하고 관측 정확도를 고려할 경우 고정형이 우수하다. 전체적으로 회전 부분과 고정부분으로 나뉠 수 있으며 회전 부분을 고려할 때 반사기만 회전하면 RF 성능이 일정하지 못하게 되고 피드 클러스터만 회전하면 빔 효율이 저하된다. 그러므로 반사기와 피드클러스터가 같이 회전하는 방법을 사용한다. 또한 SDM(Scan Drive Mechanism)과 슬립링, 발사 보

호 시스템, 토르크 보상 장치, 반작용 휠 등의 구성을 고려한 설계를 통하여 스캔 성능을 개선할 수 있다.

하임을 알 수 있다.

III. 시스템 설계 요구사항 분석

3.1 스펙트럼 요구사항

3.1.1 스펙트럼의 범위

표 6과 표 7에 크로스 트랙 탐측기와 코니컬 영상기의 현재 사용 및 개발되고 있는 탑재체의 규격을 비교하였다.

표 6. 크로스 트랙 탐측기 비교

instrument	ch no	Freq range (GHz)	Aperture (mm)	Mass (kg)	power(W)
AMSU-A1	2	23.8/31.4	2*150	53	70
AMSU-A2	13	54/89	275	47	27
AMSU-B/MHS	5	89~183.1	210	90	60
ATMS	22	23.8~183.31	150&190	66	85

표 7. 코니컬 영상기 비교

instrument	ch no	Freq range (GHz)	Aperture (m)	rpm	angle (°)	mass (kg)	power (W)
SMMR	5	6.6~37	1.1×0.8		50.3	50	60
SSM/IS	24	19~183	0.61	31.6	53.1	96	135
AMSR-E	12	6.9~89	1.6	40	55	324	350
CMIS	24	6~89	2.06	31.	53.6~58	257	291
		89~183	0.7×0.5	6			

크로스 트랙 탐측기인 ATMS는 23.8 ~183.31GHz의 범위를 사용하여 광대역 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템을 구현한다. 코니컬 복합 탐측기인 SSM I/S는 19GHz ~ 183GHz의 범위로 사용한다. 전체적으로 살펴보면 가장 최근 사용되고 있는 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템은 매우 넓은 주파수 범위를 사용한다.

3.1.2 주파수 해상도, 정확도와 안정도

주파수 해상도 요구사항은 모델과 알고리즘에 의하여 결정되며 대역폭과 관계가 있다. 표 8의 경우를 보면 광대역 대역폭의 경우 예를 들어 183.31GHz의 대역폭은 1.5GHz에서 500MHz의 범위가 요구된다. 60GHz의 경우 대역폭이 1.5MHz에서 30MHz까지 요구되며 비교적 협대역이다. 37GHz를 제외한 그 외의 다른 낮은 주파수들의 대역폭은 250MHz에서 450MHz의 대역폭의 범위를 사용한다.

스펙트럼 정확도는 측정된 주파수와 실제 주파수의 차이이다. 낮은 주파수일수록 IF 없이 직접 검출 방식이 사용되며 높은 주파수일수록 IF를 사용한 직접 하향 변환 방식이 사용된다. 주파수 안정도의 경우에 60GHz는 협대역이므로 높은 주파수 정확도와 안정도가 요구되므로 2개의 IF를 사용하여 하향 변환 된다. 여기서 협대역의 대역폭은 30MHz이

표 8. SSM/IS의 수신기 특성 [1]

Ch	Freq(GHz)	1st IF(MHZ)	2nd IF(MHZ)	BW(MHZ)	Pol
5	55.50	0.	0.	400.	H
6	57.29	0.	0.	350.	RC
7	59.4	0.	0.	250.	RC
8	150.0	1250.	0.	1500.	H
9	183.31	6600.	0.	1500.	H
10	183.31	3000.	0.	1000.	H
11	183.31	1000.	0.	500.	H
12	19.35	0.	0.	400.	H
13	19.35	0.	0.	400.	V
14	22.235	0.	0.	450.	V
15	37.0	0.	0.	1500.	H
16	37.0	0.	0.	1500.	V
17	91.655	900.	0.	1500.	V
18	91.655	900.	0.	1500.	H
19	63.283248	285.271	0.	1.5	RC
20	60.792668	357.892	0.	1.5	RC
21	60.792668	357.892	2.	1.5	RC
22	60.792668	357.892	5.5	3.0	RC
23	60.792668	357.892	16.	8.0	RC
24	60.792668	357.892	50.	30.0	RC

표 9의 경우 57GHz가 표 3의 60 GHz와 비슷한 협대역을 사용한다. 여기서 탐측기는 대기의 연직분포 모델을 사용하며 대기의 고도에 따라 대역폭과 안정도가 결정됨을 알 수 있다. 이 경우 3MHz에서 78MHz의 대역폭을 사용하며 주파수 안정도는 0.5MHz에서 1.6MHz의 협대역의 주파수 안정도이며 2개의 IF를 사용하는 것을 알 수 있다. ATMS는 주요 측정 대상이 온습도 탐측이므로 매우 협대역의 채널이 많으므로 주파수 안정도가 중요하다.

표 9. ATMS의 채널 특성[4]

Ch	Freq (GHz)	MBW (GHz)	FS (MHz)	NEA T(K)	CA (K)	BW (°)	Characterization
5	52.8	0.40	5	0.75	1.5	2.2	Surface air
6	53.596 ±0.115	0.17	5	0.75	1.5	2.2	4km~700 mb
7	54.40	0.40	5	0.75	1.5	2.2	9km~400 mb
8	54.94	0.40	10	0.75	1.5	2.2	11 km~250 mb
9	55.50	0.33	10	0.75	1.5	2.2	13 km~180 mb
10	57.290344 -FO	0.33	0.5	0.75	1.5	2.2	17 km~90 mb
11	FO±0.217	0.078	0.5	1.20	1.5	2.2	19 km~50 mb
12	FO±0.3222 ±0.048	0.036	1.2	1.20	1.5	2.2	25 km~25 mb
13	FO±0.3222 ±0.022	0.016	1.6	1.50	1.5	2.2	29 km~10 mb

14	FO±0.3222 ±0.010	0.008	0.5	2.40	1.5	2.2	32 km~6 mb
15	FO±0.3222 ±0.0045	0.003	0.5	3.60	1.5	2.2	37 km~3 mb
16	87-91	2.0	200	0.5	2.0	2.2	Window H ₂ O 150 mm
17	166.31	2.0	200	0.6	2.0	1.1	H ₂ O 18 mm
18	183.31±7.0	2.0	100	0.8	2.0	1.1	H ₂ O 8 mm
19	183.31±4.5	2.0	100	0.8	2.0	1.1	H ₂ O 4.5 mm
20	183.31±3.0	1.0	50	0.8	2.0	1.1	H ₂ O 2.5 mm
21	183.31±1.8	1.0	50	0.8	2.0	1.1	H ₂ O 1.2 mm
22	183.31±1.0	0.5	30	0.9	2.0	1.1	H ₂ O 0.5 mm

WWW(Window-water vapor), WSE(window-surface emissivity), FS(frequency stability), CA(calibration Accuracy),MBW(Max Bandwidth),BW(Beam width)

3.1.3 통과대역 응답

통과 대역에서 대역 제한을 포함한 대역 내 성능 뿐만 아니라 RF 불균형에 의한 복사 응답의 변동을 고려할 필요성이 있다. 그러나 이들은 보통 기술적 특성들이고 초기 단계들에서 요구되어지는 파라미터 시스템 모델 레벨 평가에서 핵심 사항은 아니다.

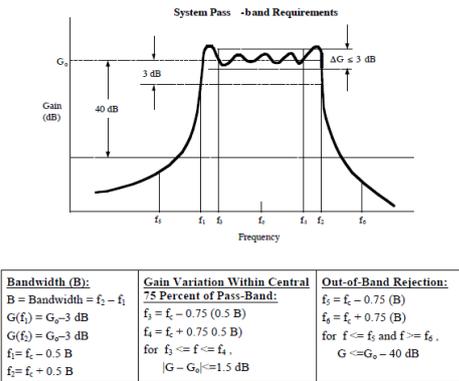


그림 10. GMI의 통과 대역 응답

3.2 복사측정 요구 사항

3.2.1 복사측정 감도

복사 측정 감도는 주요 성능지수이며 탑재체가 분해할 수 있는 관측 온도의 최소 변화량이다. NeΔT(Noise Equivalent Temperature Sensitivity)는 라디오미터의 시스템 잡음 온도에 의하여 결정된다. NeΔT의 증가를 피하기 위하여 전전력 라디오미터를 선호하지만 매 스캔 마다 교정을 해주어야한다. 복사측정 감도의 파라미터 결정은 다음과 같이 수행한다 [12].

$$Ne \Delta T = \sqrt{Ne \Delta T_{RF}^2 + Ne \Delta T_{calnoise}^2 + Ne \Delta T_{gainstability}^2}$$

여기서 NeΔTRF는 안테나와 수신기 잡음 온도인 Trec를

포함한 RF 프론트 엔드의 감도이다. NeΔTgain stability는 교정 기간 사이에 채널 응답 변화 때문에 에러가 발생한다. NeΔTcalnoise는 교정 적분시간과 대역폭과 교정율의 조절에 의하여 결정된다. 채널 이득은 탑재체의 스캔 기간과 비교하여 상대적으로 천천히 변화하도록 주어지고 교정 잡음의 효과는 N 스캔 기간에 걸쳐서 교정 샘플들을 평균을 취함으로써 감소되어질 수 있다. 전전력 라디오미터의 NeΔTRF는 다음 식으로 주어진다.

$$Ne \Delta T_{RF} = \frac{T_{sys} + T_{scene}}{\sqrt{\beta \tau_s}}$$

여기서 Tsys=(L-1)To+Trec·L이며 L은 안테나 피드 손실이고 To는 안테나 피드의 실제 온도이다.

표 10. 주파수 별 Tsys

Freq (GHZ)	Pol	BW (MHz)	Feed Loss(dB)	W/G Loss(dB)	Ant Loss(dB)	Trec (K)	Tsys (K)
18.7	H	200	0.25	0.2	0.45	227	283
18.7	V	200	0.65	0.1	0.75	227	324
23.8	V	400	0.65	0.2	0.85	227	339
36.5	H	1000	0.4	3	3.4	231	850
36.5	V	1000	0.4	3	3.4	231	850
89	H	2500	0.4	0.4	0.8	1079	1356
89	V	2500	0.4	0.3	0.7	1079	1319
89	H	2500	0.4	0.3	0.7	1079	1319
89	V	2500	0.4	0.3	0.7	1079	1319

표 11. 주파수 별 NeΔT

Freq (GHZ)	Tsys (K)	NeΔT(K) frontend	NeΔT(K) cal noise	NeΔT(K) ΔG/G	NeΔT(K) Quant	NeΔT (K) Total
18.7	283	0.36	0.11	0.00	0.04	0.4
18.7	324	0.38	0.12	0.00	0.04	0.4
23.8	339	0.2	0.09	0.00	0.05	0.3
36.5	850	0.44	0.14	0.01	0.08	0.5
36.5	850	0.4	0.14	0.01	0.08	0.5
89	135	0.56	0.18	0.01	0.12	0.6
89	1319	0.56	0.18	0.01	0.11	0.6
89	1319	0.56	0.18	0.01	0.11	0.6
89	1319	0.56	0.18	0.01	0.11	0.6

표 10과 표 11에서와 같이 각 서브시스템에서 복사측정 감도는 RF 주파수에 따라 다르다. 대역폭, 운용 주파수와 적분시간, NeΔTRF등의 요구사항은 성능 평가 지표로서 매우 중요하다.

3.2.2 복사측정 정확도

일반적으로 복사측정 정확도는 관측대상의 실제 밝기 온도와 탑재체에 의하여 측정된 값 사이의 차이이다. 현재 운용 중인 AMSU-A, AMSU-B와 AMSR-E와 같은 탑재체의 복사측정 정확도는 <1K이다.

절대 복사 측정 정확도는 교정을 고려한 선형도, 심우주

측정 에러, 흑체타겟 측정에러, 대역 외 기여정도, 복사측정에 의하여 결정된다.

복사측정 정확도는 수신기의 종류에 따라 달라 질 수 있다. 전전력 라디오미터 수신기는 온도에 따른 이득변화를 정정하기 위하여 주기적 교정을 요구하며 보통 2 포인트 교정 구조가 사용된다. 교정을 위한 측정의 경우 외삽에러를 피하기 위하여 측정 할 수 있는 수신입력범위의 양 끝단에서 하는 것이 바람직하다. 교정을 위한 측정방법은 주 반사기나 중간 반사기를 경유하여 타겟을 측정할 수 있다. 코니컬 스캔 방법에서는 큰 구경을 갖는 주 반사기를 경유하는 교정을 수행하는 것은 성능이 저하된다. 비선형 에러는 탑재체의 복사측정 전달 특성의 선형화를 최대화하기 위하여 고려한다.

3.3 공간 요구 사항

3.3.1 관측 기하학

일반적으로 풋프린트의 크기는 작을수록 좋다. 하지만 작은 풋프린트 크기는 스캔을 위한 회전속도를 높여야 하고 수신 복사 측정의 적분 시간이 짧아지므로 복사 측정의 분해능인 감도가 증가하는 단점이 발생한다. 그러므로 이런 부분은 장단점 비교 검토 후 적절한 선택이 필요하다. 크로스 트랙 스캔 방법은 관측폭의 양 끝으로 갈수록 풋프린트의 크기가 커지므로 풋프린트의 크기가 작은 높은 주파수에서 사용하기 유리하다. 코니컬 스캔 방식은 풋프린트의 크기가 전체적으로 일정하기 때문에 비교적 낮은 주파수에서 사용하기 용이하다. 또한 탐측기 채널도 전체적 성능 지수를 만족하도록 코니컬 관측 기하학 구조로 구현 되어질 수 있다. 크로스 트랙 스캔 관측을 위한 관측폭(swath width)은 안테나의 전기적 설계에 매우 중요한 고려사항이다. 현재 사용되고 있는 AMSU-A와 AMSU-B는 직하점을 기준으로 거의 $\pm 49^\circ$ 이다. 스캔 범위 전체적으로 빔 효율, 빔 폭과 크로스 편파를 포함하는 안테나 성능 변동을 최소화 하는 것이 중요하다.

코니컬 스캔 방식의 관측 각도는 주어진 고도에 의하여 결정되고 고정된다. 그러므로 스캔 과정에서 전체적 성능의 변화가 작다. 다중 주파수 탑재체를 구현하기 위하여 주 포커스로부터 안테나 피드홀들이 옵셋을 가질 필요가 있으므로 서로 다른 채널들을 위한 픽셀들은 지표의 위치가 전체적으로 조금씩 다르게 나타난다. 그러므로 다중 주파수 혼을 사용하는 방법이 이러한 문제를 완화 하거나 감소시키는데 도움이 된다. 그러나 적절한 HPBW(Half Power Beam Width)를 유지하도록 조절하기 어렵다. 옵셋 피드 안테나는 높은 빔 효율과 낮은 크로스 편파를 구현하기 위하여 f/D 비율을 최대화할 필요가 있다.

3.3.2 공간 해상도

일반적으로 요구 사항에서 주어지는 공간해상도는 은 가장 낮은 주파수에서의 최대 픽셀 크기로서 탑재체 설계의 중

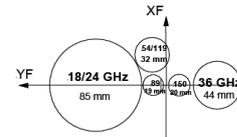
요 파라미터이며 최대 안테나 구경 크기를 결정한다. 표 12에 탑재체에 따른 공간 해상도를 비교하였다. 또한 공간 해상도 역시 각 관측 시스템의 스캔율을 결정한다.

표 12. 평균 공간 해상도

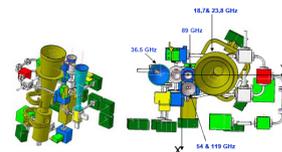
Freq(GHZ)	6	10	19	23	36	50-60	89	150/166	183
AMSR-E(km)	56	38	21	24	12		5		
CMIS(km)	54	38	20	15	14	14	14	14	14
GMI(km)		26	15	12	11		6	6	6
MADRAS(km)			40	40	40		10	6	
SSMIS(km)			59	59	36	22	14	14	14

AMSU-B와 MHS는 크로스 트랙 스캔 방식을 사용하여 풋프린트 크기가 15km이며 스캔 기간이 8/3초이다. 스캔율을 개선하기 위하여 공간 샘플링을 검토 할 필요가 있지만 피드 클러스터 설계에서 가장 높은 주파수의 피드 혼을 두 개 사용함으로써 스캔율이 감소한다. 이 경우에 40 rpm에서 22나 26rpm으로 감소된다. 그러나 피드 혼 중복은 빔 효율이 저하되는 일이 발생할 수 있다.

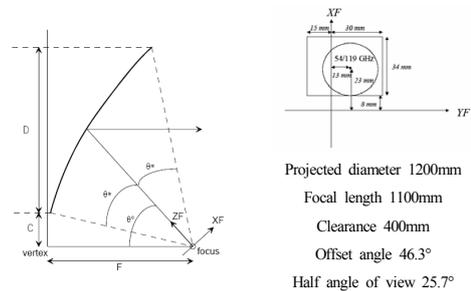
3.3.3 안테나 배치



(a) 안테나 피드 레이아웃



(b) 피드 클러스터 구성



(c) 이중 대역 피드혼과 안테나 기하학
그림 11. 안테나 배치

요구사항을 만족시키기 위하여 다중주파수 피드혼 사용할 수 있으며 그림 11의 (a)의 경우처럼 최적의 피드 클러스터 배치가 고려되어야 한다. 다중 주파수 피드혼의 기하구조가 (c)에 나타나 있으며 (b)에 피드 클러스터의 구성을 나타내었다.

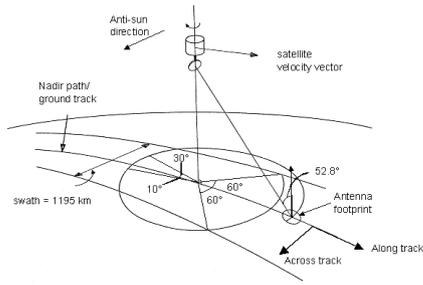


그림 12. 수동형 마이크로파 영상기의 기하학

수동형 마이크로파 라디오미터 시스템의 스캔 기간은 트랙 방향에서 요구되는 공간 샘플링 간격을 만족하기 위하여 충분히 빠른 속도로 안테나가 스캔하도록 요구사항에 의하여 결정된다. 표 13의 결과는 그림 12의 결과이며 스캔율은 31.5 rpm이다.

3.3.4 안테나 성능

최근의 요구 사항들의 빔효율은 탐측기나 영상기 모두 95%가 요구되고 있다. 일반적으로 크로스 트랙 탐측기의 경우 요구 조건을 만족 시킨다. 영상기의 경우 95% 레벨은 안테나의 구성을 크게 제한하게 된다. 그러므로 SSM/IS나 CMIS는 낮은 주파수 범위에서는 좀 더 낮은 레벨의 빔 효율을 사용한다. CMIS의 규격은 10.76GHz 이하에서 92%이고 그 위에는 95%이다. 일반적으로 탐측기를 위한 선행 크로스 트랙 레벨은 2~10% 사이로 제한된다.

표 13. 공간 샘플링

FREQ (GHZ)	Pol.	NEΔT (K)	abs. acc. (K)	IFOV (km)	Int. time (ms)	Along track sampl. interval (km)	Along track overlap factor (%)	Along scan sampl. Interval (km)
18.7	H	0.36	0.44	25.4x14.9	13.2	13.4	47	26
18.7	V	0.39	0.4	24.8x15	6.8	6.7	46	13
23.8	V	0.28		13.6x8.0			1	
36.5	H	0.38	0.43	12.1x6.6	3.3	6.7	-11	6.5
36.5	V	0.38						
50		0.39						
53		0.39						
54		0.39	0.6	4.8x2.8	3.3	6.7	-34	6.5
55		0.39						
89	H	0.7						
89	V	0.7						
89	H	0.7	0.6	5.2x3.0	3.3	6.7	-34	6.5
89	V	0.7						

IV. 맺음말

최근 수동형 마이크로파 관측 시스템의 설계 방법 및 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템의 종류와 위성에서의 스캔 방법에 따라 요구사항을 검토하였다. 결과적으로 최근

의 동향은 탐측기와 영상기를 동시에 수행하는 복합 탐측기가 계획 및 개발되고 있고 또한 이미 운용되고 있다. 따라서 수동형 마이크로파 라디오미터에 요구되는 주파수 범위는 넓어지고 있다. 그러므로 이에 따른 안테나 서브시스템과 수신기 서브시스템의 크기가 증가하므로 이를 보완할 수 있는 시스템 및 신호처리 기술이 요구된다. 또한 더욱더 높은 복사측정 정확도 및 안정도가 요구된다. 그러므로 스캔 및 교정 방법에 대한 시스템 레벨의 모델 평가 및 파라미터 분석이 중요해진다. 또한 가시 및 열적외 뿐만 아니라 강우 레이다와 결합하여 보다 정확한 측정을 하기 위하여 수동형 마이크로파 라디오미터 시스템은 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 수동형 마이크로파 관측 데이터는 수치 기상 예측 모델의 필수 입력 자료이므로 이에 대한 경향 및 개발 상황을 검토하는 것은 지구 관측 위성 개발에서는 매우 중요하다. 그러므로 수동형 마이크로파 관측 시스템의 설계 경향 및 설계 요구 사항을 정리하여 향후 수동형 마이크로파 관측 시스템의 설계 및 개발에 도움이 되고자 하였다.

참고문헌

- [1] Northrop-Grumman, "Algorithm and Data User Manual for the Special Sensor Microwave Imager/Sounder", Tech. Rep., Jul. 29, 2002.
- [2] T. Kawanishi, T. Sezai, Y. Ito, K. Imaoka, T. Takeshima, Y. Ishido, A. Shibata, M. Miura, H. Inahata, and R. W. Spencer, "The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 41, no. 2, pp. 184-194, 2003.
- [3] C. Kummerow, W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue, and J. Simpson, "The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package," J. Atmos. Oceanic Technol., vol. 15, pp. 808 - 816, Nov. 2001.
- [4] C. Muth, P. S. Lee, J. C. Shiue, W. A. Webb, "Advanced Technology Microwave Sounder on NPOESS and NPP," Proceedings of IGARSS 2004, Anchorage, AK, USA, Sept. 20-24, 2004
- [5] NPOESS, "Development of the NPOESS Microwave Imager/sounder(MIS) instrument Concept", American meteorological society, posters, Jan, 2010.
- [6] AIRS Project, Algorithm Theoretical Basis Document Basis Document, Level 1b, Part 3: Microwave Instruments, Ver. 2.1, Nov, 2000.
- [7] NOAA, KLM user's Guide, April, 2007.
- [8] David A. Newell, Gary Rait, Thach Ta, Barry Berdanier, David Draper, Michael Kubitschek, "GPM microwave imager design, predicted performance and status", in Proc. IGARSS, pp. 546~549, 2010.

[9]. Yimin Ji, Steve Bilanow, Erich Stocker, " NASA Global Precipitation Measurement Microwave Imager (GMI) Level 1B algorithm", NASA, Algorithm theoretical Basis Document, Aug. 2010.

[10] ESA, "Pre Phase A Study of LEO Microwave Radiometers for Operational Meteorological applications and climate Research (EADS Astrium) Final Report", Oct, 2005.

[11] Neils Skow, "Microwave Radiometer System: Design& Analysis", Artech House, 1989.

[12] Ulaby F.T, Moore R.K, Fung A.K, "Microwave remote sensing", Vol.1, Addison-Wesley Publishing company, 1981.

이 승 훈(Seung Hoon Lee)



- 1983년 2월 : 서강대학교 물리학과 이학사
- 1985년 : 서강대학교 물리학과 이학석사
- 1994년 : 서강대학교 물리학과 이학박사
- 1995년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성탑재체실장

<관심분야> : 광학기계개발, 항공우주탑재체개발

저자

유 상 범(Sang-Burm Ryu)



- 1996년 2월 : 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 충북대학교 전자공학과 (공학박사)

· 2011년 1월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 근무
 <관심분야> : 지구관측 위성, 마이크로파 원격 탐사, 인공위성, 디지털 통신

용 상 순(Sooyoung Kim)



- 1989년 2월 : 광운대학교 전자공학과 공학사
- 1991년 : 광운대학교 전자공학과 공학석사
- 2008년 : 충남대학교 전자공학과 공학박사

· 1991년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 팀장
 <관심분야> : 인공위성, 우주용탑재체, 전자광학탑재체, 탑재체자료처리/전송시스템

이 상 곤(Sang-Kon Lee)



- 1987년 2월 : 경북대학교 전자공학과 공학사
- 1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과 공학석사
- 2008년 2월 : 충남대학교 전자공학과 공학박사

· 1989년 1월 ~ 1996년 1월 : LG정밀(주) 연구소 선임연구원
 · 1996년 2월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성전자팀장
 <관심분야> : 인공위성 전력계 및 원격측정명령계