

지구관측용 마이크로파 위성센서의 검보정 연구 동향

진경욱*, 양군호**

Research Trend of Calibration Methods on the Satellite Microwave Sensors

Kyoung-Wook Jin*, Koon-Ho Yang **

ABSTRACT

Research trend of calibration methods on the satellite microwave sensors was summarized in this paper. In addition, current operational or following near-future Earth observing satellite missions were introduced. According to these missions, the particular calibration methods on the corresponding microwave instruments were described. The main characteristics of the sensors and their scientific missions were also briefly explained.

초록

이 논문에서는 지구관측용 위성에 장착된 마이크로파 센서들의 검보정법에 대해 조사, 기술하였다. 아울러 현재 운영 중이거나 이러한 미션들을 대체하여 향후 진행될 대표적인 지구관측 미션들을 소개하였다. 보다 효과적인 이해를 위해 지구 관측 미션들을 중심으로 이들 위성에 장착된 마이크로파 센서들의 검보정법을 설명하면서, 센서들의 중요한 특징들과 주요 임무에 대해서 요약 정리하였다.

Key Words : Earth observation(지구관측), Microwave (마이크로파), Sensor (센서),
Calibration/Validation (검보정)

* 진경욱, 한국항공우주연구원 위성연구본부 통신해양기상위성사업단 통폐기체계팀
kwjin@kari.re.kr

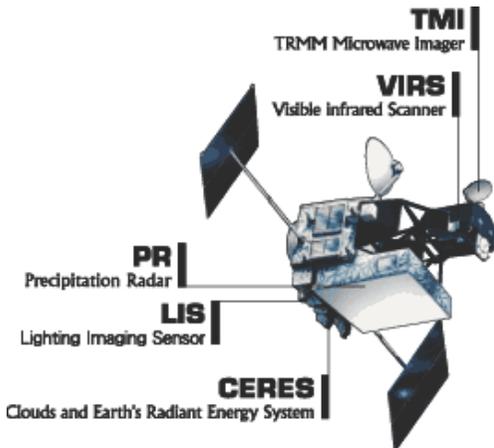
** 양군호, 한국항공우주연구원 위성연구본부 통신해양기상위성사업단 통폐기체계팀
khyang@kari.re.kr@kari.re.kr

1. 서론

마이크로파 센서는 대기, 해양 및 지구물리 연구를 위한 주요 물리변수를 정량적으로 측정하기 위해 저궤도 지구관측 위성에 널리 이용되고 있다. 정확한 지구물리변수의 측정을 위해서 센서의 검보정은 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 1장에서는 이들 마이크로파 센서들이 장착된 주요 지구관측 미션들을 살펴 보고 2장에서는 센서들의 검보정법에 대해 조사, 정리하였다.

1.1 마이크로파 센서를 이용한 주요 미션들

가. TRMM 미션 (1997.11.27 ~ 현재)



자료 : <http://trmm.gsfc.nasa.gov>

그림 1. TRMM 위성 및 탑재체 형상도

TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)은 NASA(National Aeronautics and Space Administration)와 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)에 의해 적도 및 아열대지역의 강수측정을 위해 추진된 공동 미션이다. 1997년 11월 27일 일본의 타네가시마 우주센터에서 H-2발사체에 의해 성공적으로 발사된 이래 현재도 운영중인 나사의 대표적인 지구관측위성 중의 하나이다. 원래는 3년 미션으로 예정되었으나 후속미션의 연기 및 TRMM 데이터의 중요성을 종합적으로 고려하여 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의해 연장운영이 요청되었다.

이 위성에 장착된 센서들 중 핵심적인 두 마이크로파 센서는 TMI (TRMM Microwave Imager)와 PR(Precipitation Radar)이다(그림 1 참조). 적도지역 관측에 유리하도록 경사각은 35도로 태양동기궤도가 아닌 원궤도로 운영되며, 관측고도는 발사시 350km에서 2001년 8월 이후 402.5km로 상승하여 운영중이다.

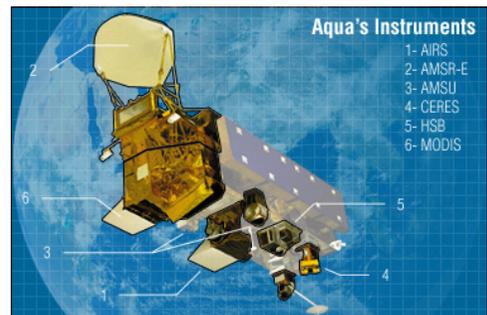
• PR 센서

3차원의 구름 및 강수구조를 밝혀주기 위해 고안된 최초의 위성용 강수 측정용 레이더이며 NASDA (National Space Development Agency)에 의해 제작되었다. 13.8GHz 파장을 이용하는 PR센서의 수직 및 수평해상도는 각각 250m와 5km이며, 센서 관측폭(swath-width)은 247km이다. 레이더의 관측범위는 약한 강수에 대해서는 0.7mm/h 정도까지 감지가 가능하며, 강한 강수의 경우 신호감쇠효과가 강하므로 이 효과를 교정해줄 수 있는 새로운 데이터 처리방법이 적용되었다. 전력사용량은 고체형 전력증폭장치(Solid State Power amplifier(128))가 장착되어서 224watt의 저전력을 사용한다.

• TMI 센서

수동형 마이크로파 라디오미터인 TMI센서는 지표 및 대기로부터 방출되는 마이크로파 복사에너지를 측정하여 수증기와 구름내의 구름입자 및 강수량을 정량적으로 추정하기 위한 센서이다. DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)의 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)센서를 바탕으로 업그레이시킨 모델이다.

나. AQUA 미션 (2002.5.4 ~ 현재)



자료 : <http://aqua.nasa.gov/>

그림 2. Aqua 위성 및 탑재체 형상도

지구의 물순환에 대한 필수적인 데이터(강수, 토양수분, 대기 수증기량 등)을 측정하기 위한 NASA의 EOS(Earth Observing System) 미션들 중의 하나이다. 발사는 2002년 5월 4일 이루어졌으며 현재도 운영 중이다. 나사의 A-train (Afternoon Constellation) 위성그룹 군의 제일 첫번째 위성이기도 하다.

발사된 A-train 위성들을 순서대로 나열하면 Aura(2004.7), PARASOL(2004.12), CloudSat 및 CALIPSO(2005.5)이며 앞으로 발사 예정인 위성으로는 2010년의 Glory 와 JAXA에 의해 추진되는 2011의 GCOM-W1 (Global Change Observation Mission-Water 1)이 있다. Aqua위성에 탑재된 센서는 총 6가지이며 이들 중 마이크로파 센서는 HSB(Humidity Sounder for Brazil), AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit), 및 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) 이다 (그림 2 참조).

• AMSR-E 센서

12채널, 6과장(6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 & 89.0GHz)의 수동형 마이크로파 라디오미터이다. AMSR-E를 통해 강수량, 구름 내의 수분 및 수증기량, 토양 수분, 해수면 온도 및 풍속, 강설, 극지방의 얼음 등 중요한 지구물리변수들이 정량적으로 측정되며 날씨의 영향을 받지 않고 관측이 이루어진다.

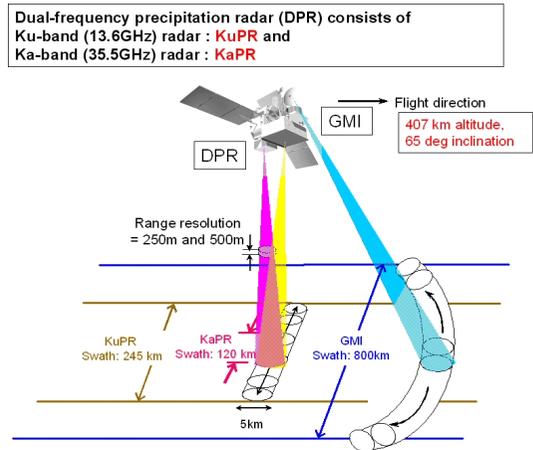
포물형 파라볼라 반사경의 직경은 1.6m이며 분당 40회 회전한다. 센서의 지구면에서의 입사각은 55도이며, 채널들의 해상도는 최고5.4km(89GHz)에서 최저 56km(6.9GHz)이다.

• AMSU-A 센서

15채널 (주파수 범위: 15-90GHz)의 마이크로파 탐측기(sounder)로 대기상층 (특히 성층권)의 온도 프로파일을 얻기 위한 센서이다. AMSU센서는 처음으로 NOAA-K(15)위성(1998년 5월 발사)에 장착된 이후 NOAA K/L/M(15,16,17)등에 계속해서 탑재되어 운영되고 있다. AMSU-A는 Aqua위성에 탑재된 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder), HSB와 함께 세 가지 센서가 시너지효과를 낼 수 있도록 디자인되었다.

다. GPM 미션 (2013년 예정)

GPM(Global Precipitation Measurement)은 2008년 11월 예비설계검토(PDR)를 마치고, 현재 포물레이션 단계(Formulation phase)에 있는 TRMM 위성의 후속미션이다. 코어위성(core spacecraft) 및 저경사각 궤도위성 (low-inclination spacecraft)의 발사예정일은 각각 2013년7월21과 2014년11월로 잡혀 있다. 이 GPM위성의 주 미션목표는 향상된 마이크로파센서들이 장착된 여러 위성 군(Constellation)의 데이터들을 통합적으로 이용하여 전 지구적 강수량 측정의 시·공간정확도를 획기적으로 향상시키는 것이다.



자료 : <http://gpm.gsfc.nasa.gov/>

그림 3. GMI 및 DPR의 스캔 모식도

코어 위성에는 듀얼주파수 레이더 (Dual-Frequency Precipitation Radar, DPR)와 수동형 마이크로파 라디오미터(GPM Microwave Imager, GMI)가 동시에 장착되어 GPM위성 군에 탑재된 라디오미터들의 보정표준(calibration standard) 역할을 담당하게 된다.

• GMI 센서

GMI센서를 통해 측정되는 핵심적인 파라미터는 전지구의 강수량이다. GPM미션의 주 위성(Core satellite)의 핵심센서인 GMI는 GSFC(Goddard Space Flight Center)와 계약을 통해 BATC (Ball Aerospace & Technologies Corp) 에서 제작을 담

당하고 있다. GMI센서는 TRMM위성의 TMI와 유사한 채널들 외에 4개의 추가된 밀리미터 웨이브(166GHz 및 183GHz 주파수대)를 포함한 총 13개의 마이크로파 채널들(주파수대역: 10~183GHz)을 가진 수동형 마이크로파 라디오미터이다. 추가된 고주파수 대의 채널을 통해서 수증기와 빙정 형태의 강수를 보다 효과적으로 측정하게 된다.

안테나의 직경은 1.2m이며 시야각 48.5도로 지구 표면과 만들어지는 입사각은 52.8도를 이룬다. 회전속도는 32 rpm이며 GMI가 스캔(scan)하는 앵글(angle)의 각도는 140도로 이를 통해 지구표면에서의 만들어지는 관측폭 (swath-width)은 대략 800km이다 (그림3 참조).

• DPR 센서

DPR 듀얼레이더는 3차원 구름 및 강수구조를 관측하기 위한 GPM 주위성의 핵심 센서 중 하나이다. Ku-band (13.6GHz) 와 Ka-band (35.55GHz) 레이더의 관측폭은 각각 245km 와 120km이다(그림 3). GMI의 중심 부분과 DPR의 오버랩(overlap) 되는 시간은 관측역과 위성의 운동을 고려할 때 67초 정도이다. 이 동시관측 영역은 GMI라디오미터를 기초로 한 강수추정알고리즘을 향상시키는 데 핵심적인 자료가 된다. 두 채널 중 Ku-band (13.6GHz)는 TRMM위성의 PR의 업그레이드된 모델로 고위도 지역에서의 약한 강수나 강설관측을 위해 감도가 대폭 향상되었다.

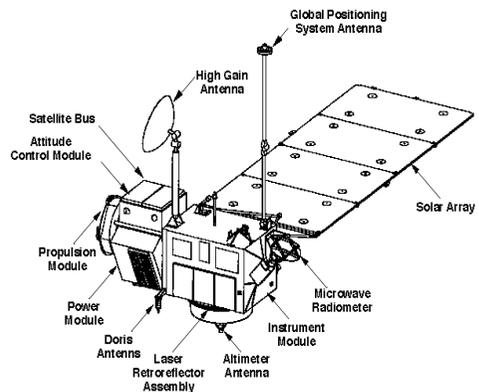
라. SMAP 미션 (2015년 예정)

SMAP (Soil Moisture Active and Passive)은 전 지구의 토양수분측정 및 지면의 결빙 및 해빙상태를 파악을 위한 미션으로 이를 통해 궁극적으로 탄소 및 물순환 과정의 정량적 이해를 높이기 위한 목적을 가지고 있다. 키디시즌포인트(Key Decision Point-B) 리뷰를 2010년 1월 마치고, 현재는 Phase B진행 단계에 있으며, 발사예정일은 2015년이다. SMAP 위성 (690KM 고도의 태양동기궤도)의 탑재체는 L-band 대역의 라디오미터와 L-band 대역의 합성 개구레이더 (SAR)이다. 이들 탑재체는 지표면으로부터 방출되거나 역반사되는 복사량을 동시에 측정하도록 디자인되어 있다. 1000km의 넓은 관측 폭을

이용하여 측정되는 자료들은 적도의 경우 3일, 45° 이상의 고위도 지역의 경우 2일 정도에 전 지구를 커버(cover)하는 자료를 얻을 수 있게 된다. L-band 레이더/라디오미터는 하나의 피드혼(feedhorn)과 파라볼릭(parabolic) 메쉬(mesh)반사경(reflector)을 공유하도록 디자인되어 있다. 오프셋반사경의 회전속도는 14.6rpm이며 지구표면과의 입사각은 40도이다. 6m직경의 대형안테나가 만드는 지표면상의 풋프린트사이즈(footprint size)는 라이오미터가 40km, 레이더의 경우 양방향 안테나 빔폭에 의해 결정되는 실제 레이더 풋프린트 사이즈는 30km이다. 한편 합성개구 레이더모드 (SAR Mode)에 의해 만들어지는 관측해상도는 1-3km로 높아진다.

마. TOPEX/POSEIDON Mission (1992-2006)

해수면 높이의 정확한 측정(정확도: 4~5cm)을 위한 미션으로 1992년 8월 10일 기아나우주센터에서 아리안 42P 발사체에 의해 발사된 이래 2006년까지 10년 이상 성공적으로 운행되었다. 이후 연계된 후속 미션으로 JASON-1 (2001.12.7 ~ 현재), JASON-2 (2008.6.15 ~현재) 미션들이 계속 진행되고 있으며, JASON-3 (2013년 예정)가 계획 중이다. 위성의 형상 및 탑재체는 그림 4에 나타나 있다.



자료 : <http://topex-www.jpl.nasa.gov/>

그림 4. TOPEX/POSEIDON 위성 및 탑재체 형상도

TOPEX/POSEIDON 위성에 의한 해수면 측정은 아래의 3단계를 거쳐 이루어진다.

1단계) 정확한 위성의 고도 측정

위성에 장착된 세 개의 독립적인 트래킹 시스템(tracking system)인 1) NASA laser retro-reflector array, 2) CNES DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) System 및 3) NASA GPS receiver를 이용하여 위성의 정확한 고도 측정이 먼저 이루어진다.

2단계) 위성과 해수면과의 정확한 거리 측정

TOPEX/POSEIDON 위성에는 두 개의 레이더 고도계(NASA TOPEX Nadir Pointing Radar Altimeter: C-band (13.6GHz) & Ku-band(5.3GHz) 및 CNES POSEIDON solid state nadir pointing: Ku-band(13.65GHz))가 장착되어 있다. 레이더 고도계에서 보내는 펄스(pulse)형태의 마이크로파가 해수면에 반사되어 위성으로 되돌아오는 시간을 측정하여, 해수면으로부터 위성까지의 거리를 구한다. 또한 대기 중 수증기로 인한 시스널 딜레이(Atmospheric Wet Path Delay) 측정을 통한 대기 보정을 위해서 18, 21, 및 37GHz 채널의 TOPEX 마이크로파 라디오미터가 장착 되었다.

3단계) 최종 해수면 고도계산

1단계에서 구한 위성의 고도(지구중심으로부터)에서 2단계에서 얻은 위성과 해수면 사이의 거리를 빼면 간단하게 지구중심으로부터의 해수면 고도 값을 얻을 수 있다. 전지구의 해양 관측 자료를 얻는 데는 약 10일 정도가 소요되며, 이 기간 동안 관측한 데이터를 평균하여 전지구의 평균 해수면 고도(정밀도= 수 밀리미터 내외)를 구할 수 있다.

바. Coriolis-WindSat Mission (2003.1.6 ~ 현재)

미 해군연구소에서 개발한 위성용 편파(polarimetric) 마이크로파 라디오미터를 이용하여 해양풍 벡터를 관측하기 위한 미션이다. WindSat/Coriolis mission은 2003년 1월 6일 반덴부르크공군기지에서 Titan II로켓에 의해 성공적으로 발사되어 현재까지 운용되고 있다. WindSat 센서(그림 5)는 향후 개발예정인 NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) 미션의 MIS

(Microwave Imager and Sounder)센서 개발의 위험저감(Risk Reduction) 및 센서 보정에 핵심적인 자료들을 제공해 줄 전망이다.



자료 : <http://www.nrl.navy.mil/WindSat/>
그림 5. WindSat 탑재체 사진

표 1. WindSat Configuration

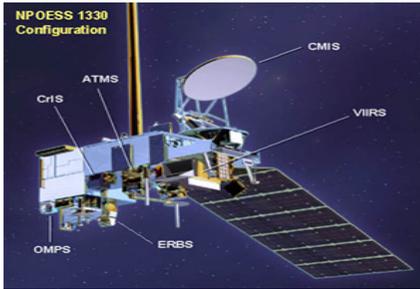
Band (GHz)	Polarization	Bandwidth (MHz)	Earth Incidence Angle (deg)	Horizontal Spatial Resolution(km)
6.8	V, H	125	53.5	40 x 60
10.7	V, H, +45, L, R	300	49.9	25 x 38
18.7	V, H, +45, L, R	750	55.3	16 x 27
23.8	V, H	500	53.0	12 x 20
37.0	V, H	2000	53.0	8 x 13

• WindSat 센서

WindSat 센서는 5개의 마이크로파 밴드(6.8, 10.7, 18.7, 23.8, and 37.0 GHz)로 구성 되어 있다. 이 센서를 통해 측정되는 주 파라미터는 비강수시의 해수면 풍향이다. 그 외에도 해수면 온도, 토양수분, 강수량, 수증기량 등의 측정이 가능하다.

바람에 비해 해수면온도에 더 민감한 6.8GHz 채널과 대기중 수증기에 매우 민감한 23.8GHz 채널은 수평 및 수직편파 채널만을 가지고 있으며, 그 외 다른 채널들은 모든 편파에 대한 관측이 가능하다. 오프셋 반사안테나의 사이즈는 직경 1.8m이며 안테나의 빔과 지표면이 이루는 입사각은 50~55도를 이룬다. 840km에서 태양동기궤도를 도는 코리올리위성의 관측 폭은 전면관측(forward-looking)모드시 1000km, 후면관측모드(aftward-looking)시 350km이다. 탑재체의 주요파라미터들은 표1에 정리 되어 있다.

사. NPOESS Mission (2013년 예정)



자료 : <http://npoess.noaa.gov/>

그림 6. NPOESS 위성과 탑재체 형상도

NOAA-19(NOAA-N Prime)위성을 마지막으로 종료하는 POES (Polar Orbiting Environmental Satellites) 시리즈 및 미 방위청 주관의 DMSP미션을 이을 차세대 위성 사업으로 NPOESS 미션이 진행 중에 있다. 초기 입안한 계획에 비해 현저한 예산 증가 문제가 발생하여 2006년 대규모의 재조정안이 제안되었으며, 2010년 2월, 군사용과 민간용 위성개발의 두 부분으로 나뉘어 미션이 수립되도록 하는 수정안이 백악관에 의해 발표되었다. NPOESS시리즈의 첫 번째 위성 C1 (Charlie 1)의 예상발사년도는 2013경이며, 마이크로파 센서인 CMIS (혹은 MIS)는 C2위성에 장착되어 2016년 발사될 예정이다. (그림 6 참조).

2. 마이크로파 센서들의 검보정법

2.1 능동형 마이크로파센서의 보정

가. TRMM PR 센서

우주로 올려진 최초의 강수측정용 레이더인 PR 센서의 설계 및 제작은 NASDA(현재의 JAXA)가 담당했다. PR의 보정은 크게 두 부분으로 나누어진다. 첫째 PR 시스템파라미터의 중간변화 (intermediate-term change) 에 대한 보정으로 이는 PR내부의 온도변화로 야기되며 위성의 한 주기 (~91min)내에 발생하게 되는 요소이다. 이 오차의 보정은 온도모니터링을 통한 내부보정에 의해 이루어진다. 두 번째는 시스템 성능이 서서히 저하되거나 혹은 능동형 어

이 구성성분의 문제로 인해 발생하게 되는 장기간에 걸친 변화(long-term change)에 대한 보정이다. 이는 안테나 특성의 변화 혹은 텔리미터리센서 (telemetry sensor)의 변화 등을 포함하고 있으므로 외부의 보정타겟을 이용한 보정이 요구된다.

• 내부보정(Internal Calibration)

내부보정알고리즘은 모든 시스템 파라미터들, 즉 카운트(count) 값을 레이더 수신강도로 전환한 뒤 최종 값인 레이더 반사도(reflectivity)로 바꾸는 과정에 관여하는 모든 파라미터들의 온도에 대한 의존도를 계산하는 상세한 PR 시스템 모델(internal-loop model)을 통해 구현된다.

• 외부보정(Absolute External Calibration)

PR센서의 외부보정을 위해 쓰이는 장치는 ARC(Active Reflector Calibrator)로 이는 지상의 보정 사이트에 설치되어 운영된다. ARC는 위성 및 항공용 SAR (Synthetic Aperture Radar)의 보정을 위해 널리 쓰이는 장치이다. 이 ARC는 세 개의 서브 시스템(레이더 송수신기(transponder), 레이더 수신기(receiver) 및 비콘 송신기(transmitter)로 구성되어 있다. ARC의 세 가지 작동모드는 다음과 같다 (그림 7 참조).

수신기모드(receiver mode): PR 전송파라미터 (파워 및 안테나게인 값 등) 를 측정함

전송모드(transmitter mode): PR 수신파라미터 를 측정함

송수신모드(transponder mode): PR 양방향 (2-Way) 파라미터를 측정함

다중의 빔방향에 대해서 얻은 ARC의 에코 레벨은 PR 안테나 포지션에 대한 정확한 측정을 가능하게 한다. 즉 ARC 에코 레벨(echo level)의 최고값은 PR 안테나 포지션(position)의 중심위치에 해당하게 된다. PR시스템의 이득(gain)값의 장기간 변화경향(drift)을 측정하기 위한 이 외부보정법은 매 2주 ~ 매4주 간격으로 시행된다. 외부보정법은 레이더 안테나패턴 측정도 포함한다. 위성의 진행방향(along-track)과 진행방향에 대해 수직인 방향(cross-track)의 안테나 패턴을 모두 측정하게 된

다. 진행방향패턴은 ARC에 의한 연속적인 수신과위로부터 측정이 가능하며, 수직방향의 패턴은 위성의 90도 요기동(yaw maneuver)으로 측정된다.

PR보정을 위한 ARC의 또 다른 중요한 요소는 신호지연(signal delay)을 측정하는 기능이다. PR에 의한 지표면 에코가 강력해서 ARC로부터의 리턴신호와 구분하기가 쉽지 않은 문제가 발생하게 되는데, ARC로부터 반사된 신호에 시간지연을 적용하면 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

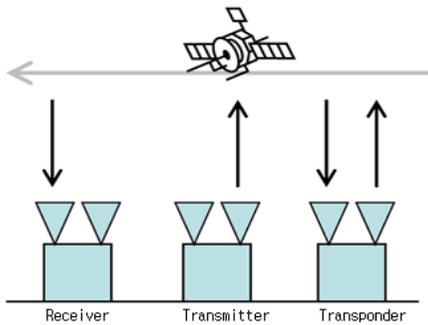


그림 7. ARC를 이용한 TRMM-PR의 궤도상 보정

• 수동형반사체와 능동형반사체의 차이

전통적으로 레이더 보정용 수동형 반사체로 구형, 금속판, 코너반사경(그림 8 참조) 등이 이용되어 왔다. 위성용 레이더의 경우 지상에 설치한 수동형 반사체를 이용해서 충분한 효과를 얻기 위해서는 상당히 큰 사이즈의 반사체를 요구한다. 수동형 반사체는 비용 및 사이즈 뿐만 아니라 무게로 인한 이동 및 필드(field)에서의 이용이 용이하지 않은 제약이 따르게 되는데, 이를 해결할 수 있는 좋은 방법이 능동형 반사체를 사용하는 것이다. 능동형 반사체(ARC)의 장점은 ARC로부터 수신되는 신호를 조정(modulation)함으로써 유효레이더크로스섹션(effective radar cross section)을 배경에 비해 현저하게 크게 만들 수 있다는 점이다. 이 때문에 위성으로부터 ARC로부터 오는 신호를 쉽게 감지하게 되고, 따라서 크기를 작게 만들 수 있다.

또 하나의 커다란 장점은 수동형 반사체의 경우 교차편차(cross-polarization, HV or VH)의 레이더크로스섹션의 크기가 매우 작으므로 능동형 반사

체를 이용하게 되면 교차편차를 이용하는 영상레이더의 보정문제를 해결할 수 있다.



그림 8. 수동형 레이더 보정용 반사체 : Triangular Corner Reflector(위), Sphere Reflector (아래)

2.2 수동형 마이크로파 센서의 보정

가. TRMM TMI 센서의 보정

방법1) 데이터 통계분석법에 의한 위성진행방향의 구조적 에러(systematic along-scan error)계산

날씨 및 해수면의 영향에 의한 영향은 모든 스캔 포지션에 대해 동일하다는 기본적인 가정에서 출발한다. 이 가정이 성립한다는 조건에서 위성의 스캔방향에러(along-scan error)는 TMI의 104개 스캔픽셀에 대해 각각의 관측치들을 모은 뒤 몇 달에 걸친 평균을 취하여 쉽게 구할 수 있다. 104개의 스캔포지션(scan position)에 대한 값들을 그림으로 나타내었을 때 편평(flat)하지 않다면 이는 구조적 오차(systematic error)를 보여주는 것으로 해석할 수 있다. TRMM위성의 경우 태양동기궤도가 아닌 낮은 경사각을 가지고 있기 때문에 스캔시 104개 스캔픽셀의 남북 간 성분의 차이를 무시할 수 없다. 이러한 관측방법으로 기인한 지리적 영향과 스캔포지션에 의해서만 일어나는 효과를 분리해 주는 작업(decoupling of geographical effects)이 필요하다.

또 한 가지 고려할 사항은 TRMM 위성의 경우 대략 한 달에 한번 위성의 일주기(diurnal) 편차를 보사

해주기 위해 시행하는 요기동(yaw maneuver)이다. 이 때 TMI 자료를 각 스캔포지션에 대해 모을 때 두 가지 요방향 (0 와 180)에 따라 관측치들을 분류하게 되면 각각의 요위치(yaw position)에 따른 관측치의 위도와와의 연관성을 계산할 수 있다. 선형회귀분석에 의한 지리적 효과를 제거하게 되면, 이 요기동에 의한 관측의 의존성 또한 제거하는 데 도움을 준다.

방법2) TMI와 SSM/I의 상호비교 분석법에 의한 TMI 고온 바이어스(warm bias) 계산

SSM/I센서의 경우 동일한 센서로 여러 차례의 미션이 이루어졌다(예, F10, F11, F13 등). 이러한 다년간의 미션을 통해 SSM/I는 아주 안정적인 센서로 검증이 되었다 (복사모델계산을 통해 계산된 SSM/I의 절대보정 정확도는 1~2K로 나타남). 따라서 SSM/I센서에 없는 10.7GHz채널을 제외하면 SSM/T데이터는 TMI의 보정자료로써 훌륭한 역할을 담당할 수 있다. SSM/I 데이터와 TMI 데이터를 비교분석하기 위해서는 대기복사모델을 이용하여 SSM/I의 밝기온도 값을 TMI값인 입사각(incidence angle) 52.75°에 대해, 그리고 22.235GHz 주파수를 TMI 채널 값인 21.3GHz으로 표준화하는 작업이 필요하다.

이 때 추가로 고려되어야 할 사항은 SSM/I의 102°에 대해 TMI의 보다 넓은 스캔각(130도) 그리고 DMSP위성(830km)에 대한 TRMM위성의 고도(초기350km에서 2001년 8월 24일 이후 403km로 변경됨), SSM/I의 53.4° +/- 0.3° 입사각에 대한 TMI의 52.75° +/- 0.1° 입사각 등 두 센서가 가지는 조금씩 다른 특성들을 고려해야 한다. 이렇게 TMI에 대해 조정된 SSM/I데이터를 만든 뒤, 각각의 TMI 관측에 대하여 SSM/I데이터베이스 내에서 0.7° 공간 내 그리고 시간차 30분이내로 근접하는 데이터를 매치(match)시키는 작업을 진행한다. 시공간적으로 일치하는 TMI-SSM/I데이터를 2차원 “조인트(joint) 확률분포함수”로 나타내어 두 자료를 비교하면 된다.

방법3) TRMM 위성의 심우주 기동(deep space maneuver)시 TMI데이터 분석에 의한 along-scan error 및 warm bias에러의 동시 계산

CERES (Clouds and the Earth’s Radiant Energy System) 보정을 위해 TRMM 플랫폼은 1998년 1월과 1998년 9월에 지구 대신 심우주(deep space)를 바라볼 수 있도록 피치(pitch) 축을 이동시키는 작업이 진행되었다. 즉 지구직하점(Earth Nadir)에 대해 180방향으로 피치 축을 회전시켜 우주를 바라보게 되면 TMI 주반사경은 거의 균질한 우주복사온도인 2.7도를 가리키게 된다. 이 균질한 배경복사는 센서의 보정오차를 쉽게 감지하게 해준다. 이 심우주 관측법은 방법1과 방법2에서 추정된 보정오차들을 또 다른 독립적인 방법으로 한꺼번에 관측할 수 있게 해주는 이점이 있다. 위에서 기술한 방법들에 대한 자세한 논의는 논문[1]을 참조하기 바란다.

나. Aqua AMSR-E 센서의 보정

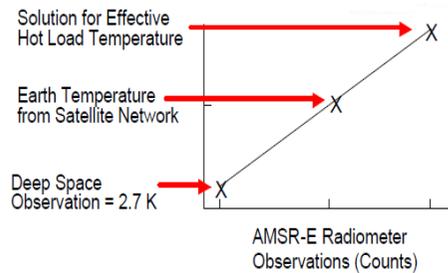


그림 9. Two-point AMSR-E On-Orbit Calibration

AMSR-E의 궤도상 보정 시스템 (on-board system)은 크게 두 부분으로 나누어진다. 저온의 2.7K 우주배경 복사에너지를 측정하는 반사경(Cold Mirror), 그리고 고온의 기준 온도를 측정하기 위해 흑체복사와 같은 역할을 하는 고온기준장치(Hot reference load)가 있다. 이 고온기준장치에는 여덟 개의 정밀 온도계가 부착되어 각각의 온도를 측정하게 되고, 이 측정치들을 바탕으로 유효 평균온도(average effective temperature)를 구한다. 발사 후 이 고온기준장치내에 유입되는 태양광에 의한 온도경도가 예상 외로 크게 나타나 온도계를 통해 정확한 평균유효온도를 구하기 어려운 문제점이 제기되었다.

이에 따라 경험식(empirical calibration method)을 바탕으로 한 새로운 보정법이 고안되었다. 이 방법은 AMSR-E, SSM/I 및 TMI의 각 각 다른 관측

각 및 채널들을 고려하여 라디오미터의 피드혼(feedhorn)으로 유입되는 복사량을 복사전달모델(radiative transfer model)을 이용하여 계산한 뒤, 이 과정을 통해 얻어진 지구 관측치(earth-target calibration points)를 저온 미러 온도와 함께 보정 포인트로 활용하는 것이다. 즉 두지점간의 선형 외삽(two-point linear extrapolation)으로 핫로드(hot load) 유효온도 값을 구하는 것이다 (그림 9).

안테나패턴보정을 제외하고 라디오미터의 보정 정확도 버짓(budget)에 영향을 주는 주요한 세 가지 요소로는 고온기준장치에러(warm load reference error), 저온기준장치에러(cold load reference error) 그리고 라디오미터 전자장치에 의한 에러 및 비선형성을 들 수 있다. (참고로 모든 에러를 고려한 전체 AMSR-E 센서의 바이어스(bias)는 100K에서 0.66K 그리고 250K에서 0.68K로 계산됨)

• 라디오미터의 보정정확도 버짓에 영향을 주는 주요한 세 가지 요소

1) 고온기준장치에러(warm load reference error)

고온기준장치의 주요 에러는 아래 네 가지 성분으로부터 야기된다.

1. PRT(Platinum Resistance Thermistor) 정확도
2. 핫로드(hot load)내의 온도 경도
3. 장치 디자인상의 문제
4. 리시버 전자장치로 인한 피드 혼에서의 반사

2) 저온기준장치에러(cold load reference error)

우주반사경(cold sky reflector)과 피드혼(feedhorn)사이에서 발생하는 에러가 주 오차요인이 된다. 또 다른 요인으로는 리시버전자장치에 의한 피드혼에서의 반사문제 그리고 반사경자체의 손실부분 등을 들 수 있다.

3) 라디오미터 전자장치의 비선형성 및 오차 (Radiometer electronics non-linearities and errors)

전자장치의 비선형성을 야기하는 주요 요인은 디텍터(square law detector)의 불완전한 동작이다. 이 비선형성은 열·진공 보정테스트 중에 측정이 가능

하다. 리시버 전자장치 때문에 야기되는 에러는 한주기 동안의 온도변화 때문에 생기는 이득값 이동(gain drift) 때문에 발생한다.

다. GPM GMI 센서의 보정

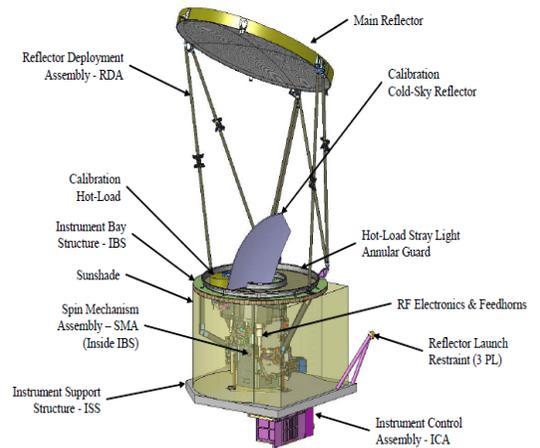


그림 10. GMI 전개시 형상도

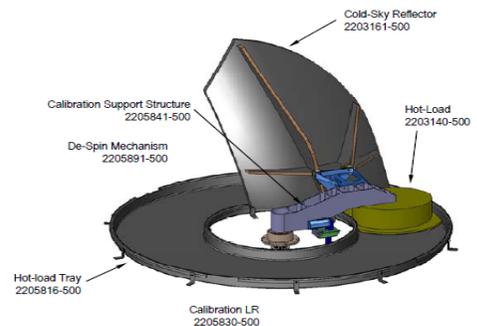


그림 11. GMI 보정 시스템 어셈블리 형상도

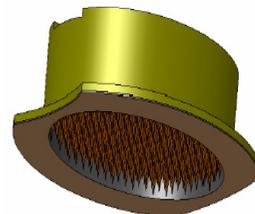


그림 12. GMI 고온흑체복사 보정장치 (Hot Load)

• GMI 궤도상 보정 시스템

GMI센서 (그림 10)는 다른 라디오미터와 유사하게 두 보정값 (저온우주복사온도 및 고온흑체복사온도) 측정에 의한 복사량측정을 통해 보정이 이루어진다. GMI센서보정에 대한 자세한 내용은 [2]에 기술되어 있다.

다른 라디오미터와 차별화되는 점은 센서의 보정을 위해 두 개의 추가적인 측정이 이루어진다는 점이다. 하나는 저온우주복사온도값/노이즈다이오드값 측정 그리고 다른 하나는 고온흑체복사값과 노이즈다이오드값의 측정이다. 라디오미터의 첫 번째 회전시 보정을 위한 저온우주복사온도와 흑체복사온도값을 읽고, 두 번째 회전시 저온우주복사온도값/노이즈다이오드값 그리고 고온흑체복사값/노이즈다이오드값이 동시에 측정된다. 이 과정은 모두 4개의 보정 포인트를 제공하게 되어, 리시버의 정확한 이득 (gain) 및 차감값(offset)계산뿐만 아니라 노이즈다이오드의 노이즈온도값 및 리시버의 비선형성을 계산할 수 있는 장점이 있다. 그림 11 및 12에 보이는 저온복사측정을 위한 반사경(Cold sky reflector) 및 고온보정장치(hot load)는 움직이지 않고 탑재체에 고정되어 있는 구조이다.

• 고온 흑체복사온도 측정(HOT LOAD VIEW)

핫로드(hot load)의 온도는 수동으로 조절된다. 궤도운영 중 핫로드의 온도범위는 240K~330K를 유지하게 되어 있다. 피라미드형태의 금속구조물의 표면은 “eccosorb”라는 물질로 코팅이 되어 있는데 이물질의 흡수율은 거의 1에 가깝다. 핫로드는 주반사경의 1회 회전에 대해 여러 개의 값을 읽게 되며, 수차례의 반복 회전에 대해 읽은 샘플들의 값에 대한 평균을 취하게 되는데, 이는 열적 노이즈를 줄이기 위해서 필요한 과정이다. 핫로드의 방사율 요구조건은 10~89GHz의 경우 0.9992 그리고 165.5GHz 와 183.3GHz 채널의 경우 0.9999보다 큰 값을 가져야 한다. 이는 관측된 밝기 온도값이 핫로드로부터 반사되는 값들로 인해 실제 복사하는 값과 차이가 나는 것을 최소화하기 위해 필요한 요구조건이다. 그리고 핫로드 내에는 최소 11개 이상의 온도계 (PRT)가 장착되어 있으며, PRT와 eccosorb 코팅 표면사이의 온도불확실성을 감소시키기 위해서 이 온도계들은 피라미드구조체내에 위치해 있다.

흑체온도보정 타겟의 일반적인 문제점으로는 어떤 계기로 인해 태양광이 핫로드 내로 유입하여 유효온도 값이 실제 PRT가 읽는 값들로부터 벗어나게 되는 점인데 이러한 문제점은 AMSR, WinSat, SMMIS들의 센서들에서 나타난 바 있다. GMI경우 이러한 문제점이 최소화되도록 디자인 되었지만 발사 후의 검보정 과정은 필요하다.

• 저온 우주복사온도 측정(COLD SKY VIEW)

저온보정기준치는 저온우주복사용 반사경 CSR(Cold Sky Reflector)에 의해 (그림 11) 피드 혼이 읽게 되는 2.7K의 우주복사 온도값이다. 핫로드와 마찬가지로 우주복사온도는 주반사경의 한 번 회전에 대해 수차례의 샘플을 얻게 되며, 주반사경의 수차례 회전에 대해 읽은 샘플 값들에 대해 평균을 취한다. 저온복사온도 측정시에는 핫로드에 비해 더 많은 에러소스들이 관여한다. 주 오차 발생요인은 우주배경복사가 아닌 다른 요인들 즉 센서로부터의 반사나 방출에 의한 오차들 그리고 우주배경복사 측정시 CSR의 후면 돌출부(back lobe)로부터 유입되는 지구관측 복사에너지도 하나의 요인이 된다. 지구복사량이 우주복사측정시 유입되는 것을 방지하기 위해 기본적으로 CSR은 충분한 각을 가지고 기울어지도록 설계가 되어 있다.

또 다른 요인으로 위성궤도와 우주복사측정시의 관측각 때문에 측정시 달빛이 유입(Moon Intrusion)되는 경우가 발생하는 점이다. 이 달빛 유입에 의한 오차발생은 다른 여러 위성들에 장착된 마이크로파 라디오미터에서 관측된 바 있다. (예, SSM/I, SSMIS, TMI, AMSR 및 WindSat 등)

• 노이즈다이오드(Noise Diodes)

GMI센서에 장착되는 노이즈 다이오드는 또 다른 보정기준을 제공한다. 채널 1~7번에 장착되어 있는 이 노이즈다이오드에 의해서 리시버의 노이즈온도값은 220K+/-75K까지 변화된다. 이 노이즈다이오드는 매 2번째 주반사경 회전시 on 과 off를 반복한다. 핫로드 및 우주배경복사 측정값 측정과 연동하여 작동되어 기본적인 2개의 보정 포인트 (저온 및 고온)에 더하여 2개의 추가적인 보정 포인트들(노이즈다이오드값과 함께 측정된 저온우주복사값/ 노이즈다이오드값과 함께 측정된 고온흑체복사값)을 제공해

준다. 이 추가 정보를 통해 측정되는 리시버의 비선형오차 및 노이즈다이오드 결합온도의 시간에 대한 트렌드를 분석하게 된다. 만약 이 값들이 통계적으로 의미있는 변화를 보이게 되면 센서온도에 대해 비선형성 입력값을 업데이트 시켜준다.

이러한 보정과정을 거친 후 최종 GMI 밝기온도 값을 구하기 위해서는 다음 두 단계를 거치게 된다.

1단계) 라디오미터 지구 관측 값의 안테나 온도 값으로의 변환

라디오미터의 지구 관측치, 노이즈 다이오드없이 스캔 평균한 고온 및 저온 값, 고온복사 및 저온우주 배경복사에 대한 유효온도값 및 비선형지수를 모두 종합하여 각각의 GMI 채널에 대한 안테나 온도 값을 구한다. 지구관측 측정값(Earth Count)들 중 마이너스 값이나 제로 값 혹은 물리적으로 비이상적인 큰 값들(out of bound values)은 제거하고 이용하게 된다.

2단계) 안테나 온도 값의 대기상단(top-of-atmosphere) 밝기온도값으로의 변환

교차편파(cross-polarization)에 대한 교정 및 스페일오버(Spillover)교정을 통한 안테나온도값을 밝기온도값으로 변환해 주는 과정이다. 이 교차편파 및 스페일오버교정을 위한 값들은 비행궤도시물레이터(수치예보모델을 통한 환경조건 및 안테나 패턴에 대한 안테나온도값을 시물레이션함)를 통해 발사 전 그 값들이 결정된다.

2.3 기타 마이크로파센서의 검보정법

가. 궤도상보정을 위한 아마존지역 이용법

일반적인 라디오미터의 두 기준점에 의한 궤도상(비행중) 보정에서 고온기준은 흑체복사온도값을 가리키는 보정 타겟을 이용한다. 이와 병행할 수 있는 간접적인 방법(Vicarious Calibration Method)이 Brown 등에 [3] 의해 제안되었다. 이 방법은 기본적으로 아마존지역을 보정 타겟으로 정한 뒤 SSM/I 채널들(19.35, 22.2 & 37.0GHz)에서의 밝기 온도 값을 바탕으로 고안된 방법이다. 아마존지역을 선택한 것은 이 지역이 조밀한 밀림지대로써 이 지역에서 방출되는

복사량은 입사각 및 편파에 의존성이 거의 없기 때문이다.

선택된 영역은 19.35GHz 와 37.0GHz 두 채널의 수직편파와 수평편파의 밝기온도 차가 0.75K 이내 인 식물이 아주 조밀한 지역이다 (그림 13). 선택된 영역을 바탕으로 고온기준의 밝기온도를 결정하는 두 가지 방법이 고안되었는데 첫 번째는 SSM/I 데이터를 이용하는 방법이고, 두 번째는 경험식을 이용하여 SSM/I 데이터가 없이도 이용할 수 있는 보정법이다. 첫 번째 방법은 우선 위성용 라디오미터(SSM/I 센서)로부터 관측되는 밝기온도 값을 파장과 입사각의 함수로 나타내는 복사전달모델을 구성하는 것이다. 다음 단계로 실제 관측치인 SSM/I 데이터를 이용하여 모델들에 필요한 파라미터들을 결정(training)하는 작업을 하게 된다. 이 과정에 쓰이는 SSM/I 데이터는 위에서 언급한 아마존의 조밀한 식생대 지역에서 관측한 강수가 없는 경우의 것으로 한정한다. “비선형 반복 최소 제곱법”(non-linear iterative least square)에 의해 각 파장과 입사각에 대한 기준 밝기온도값을 결정할 수가 있다.

두 번째 방법은 좀 더 일반화된 방법으로 관측한 라디오미터 데이터가 없을 경우를 가정해서 고안된 방법이다. 즉 첫 번째 방법에 이용된 물리모델이 제공하는 기준 파장과 기준 입사각 그리고 시간에 대한 고온기준 밝기온도값들에 대해 가장 근접하는(fitting) 경험식(empirical model)을 유도하는 것이다. 데이터에 대해 최대근접 값을 제공하는 파라미터들을 결정하는 데는 “비선형 반복 최소 제곱 최적화법”을 이용하였다. 이 방법을 이용하면 18-40GHz 과 0-55 입사각을 가진 위성용 마이크로파 라디오미터들에 일반적으로 적용될 수 있다는 장점이 있다.

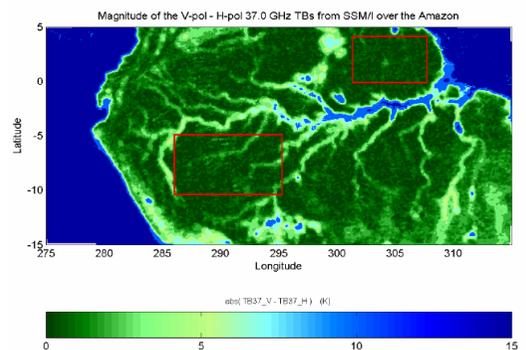


그림 13. 라디오미터 보정용 고온기준점으로 활용을 위해 식생 조밀지역으로 선택된 아마존의 두 지역: (TB37V- TB37H) 0.75K

나. WINDSAT, TMI and SSM/I 를 이용한 라디오미터들의 상호보정법(Cross-Calibration)

GPM미션의 경우 강수측정을 위한 다양한 종류의 라디오미터들이 장착된 여러 대의 위성 군을 이용하는 것으로, 서로 다른 라디오미터들 자체의 보정문제 뿐만아니라 각각의 데이터가 일관성 있는 밝기온도 값을 가지도록 보정하는 것이 아주 중요한 문제로 떠오르게 된다. 따라서 라디오미터들이 조금씩 다른 채널들로 구성되어 약간씩 다른 관측 값들을 가지고 작동될 때 밝기온도를 표준화시키는 작업이 반드시 필요하다. 이들 라디오미터들로 시공간에 걸쳐 거의 동시에 이루어진 관측 값들을 비교하기에 앞서 밝기온도 값을 표준화시키는 두 가지 방법론을 요약하면 아래와 같다.

방법1)

다양한 환경조건하에서 두 라디오미터 채널의 차(Delta TB)를 예측하기 위해 대기복사모델을 이용하는 것이다. 즉 모든 파장 대에 대해서 각 채널의 밴드 폭에 대해 약간의 증가분을 더한 뒤 복사모델을 돌려 두 라디오미터채널간의 값의 차를 구한다. 목표로 하는 파장에 대한 표준화된 예상 값을 만들 때 앞서 구한 예측된 차이 값을 소스채널의 관측 값에 더하게 된다. 이 표준화된 예측 값과 실제 관측치에 차이가 발생하게 되면 이는 목표 채널이 가지는 설명되지 않는(un-explained) 바이어스(bias)로 간주하면 된다.

방법2)

두 번째 방법은 모든 파장 대(수직 및 수평 편광 포함)에 대해서 복사모델 시뮬레이션을 통한 밝기온도값의 “다중변수선형회귀분석”(multi-variable linear regression)을 이용하는 방법이다. 복사모델의 입력 자료로써 지구물리변수들의 앙상블(ensemble)을 이용하여 목표로 하는 센서(target instrument)의 관측 파라미터들로부터 복사량을 계산한다. 그다음 이 복사량 값을 회귀분석의 입력 자료로 이용하는 것이다. 복사량 값과 지구물리변수와의 비선형관계를 없애기 위해 $L=LN(285K-Tb)$ 의 선형화함수를 도입하고 먼저 선형화시킨 뒤 지구물리변수와 복사량과의 회귀식을 유도하게 된다.

3. 결론

지구물리변수의 정량적 측정을 위해 이용되고 있는 대표적인 지구 관측 미션용 마이크로파센서들의 검보정법에 대해서 요약 정리하였다. 현재 추진 중이거나 계획되고 있는 대표적인 지구 관측 미션들을 중심으로 기술하였다. 이들 미션들의 주요한 목적과 아울러 임무 달성을 위해 장착된 마이크로파센서들(능동형 및 수동형)의 주요한 특징들을 간략하게 설명함으로써, 각 탑재체들의 검보정법에 대해 보다 효과적으로 이해할 수 있도록 하였다.

참고문헌

1. Wents F. J., Ashcroft P, Gentemann C, “Post-launch Calibration of the TRMM Microwave Imager”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No 2, 2001, pp. 415-422
2. Meissner T., Wentz F. "GMI Calibration Algorithm and Analysis Theoretical Basis Document", Remote Sensing Systems, 2009, pp.1-110
3. Brown S. T, Ruf C. S., “Determination of an Amazon Hot Reference Targets for the On-Orbit Calibration of Microwave Radiometers”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 22, 2005, pp.1340-1352