

마이크로파 위성 원격탐사기술 : 산란계, 고도계, 복사계



김용훈
광주과학기술원



박경애
서울대학교 지구과학교육과/
해양연구소



우혜진
서울대학교 과학교육과



김태성
서울대학교 과학교육과



이상규
한국항공우주연구원

I. 서론

원격탐사는 원래 카메라를 이용하여 물체를 측정하여 정보를 분석하는 사진술(photography)에서 유래되었다. 그러나 카메라를 이용한 사진 촬영은 날씨가 청명한 경우에만 가능하여 기상상태에 따라 정보 획득에 크게 제약을 받는다는 단점이 있다. 이에 반하여 마이크로파 센서는 기상에 관계없이 지구를 관측할 수 있어 1978년에 세계 최초의 종합 마이크로파 센서를 탑재한 Seasat가 발사되면서 인공위성을 이용한 마이크로파 원격탐사에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다.

원격탐사에 이용되는 마이크로파 센서로는 영상 레이더(SLAR: Side-looking Airborne Radar 또는 SAR: Synthetic Aperture Radar), 산란계(scatterometer), 고도계(altimeter)가 있으며 이러한 센서는 레이더를 이용하고 있다. 원격탐사에 이용되는 레이더는 군사용 레이더와 원리는 같지만 지구 관측이 주 목적이므로 이용되는 신호 및 측정 방법은 다르다. 반면에 전자파를 발신하지 않고 물체로부터 순수하게 방사되는 에너지를 수신하여 측정하는 형태의 센서는 복사계(radiometer), 분광계(spectrometer)가 있으며 주로 지구 표면 및 대기의 복사 특성을 측정할 때 사용되고 있다.

본고에서는 위성에서 사용되는 마이크로파 원격탐사 기술 중 산란계,

카메라를 이용한 사진 촬영은 날씨가 청명한 경우에만 가능하여 기상상태에 따라 정보 획득에 크게 제약을 받는다는 단점이 있다.

원격탐사에 이용되는 마이크로파 센서로는 영상 레이더(SLAR:

Sidelooking Airborne Radar 또는 SAR: Synthetic Aperture Radar), 산란계(scatterometer),

고도계(altimeter)가 있으며 이러한 센서는 레이더를 이용하고 있다.



고도계, 복사계에 대한 측정 방법과 센서 구조 및 형태 그리고 활용 기술에 대하여 간략히 설명하였으며, 세계적 기술 동향과 관련 기술에 대한 국내 기술 개발 동향에 대하여 고찰하였다. 본고 일부는 저자의 출판물^[1]의 6장을 발췌하여 요약 편집하였다.

II. 산란계 원격탐사 기술

2.1. 산란계 측정원리

산란계는 일반적으로 사용하는 레이더와 측정 방법은 거의 같으나, 거리 또는 속도를 측정하는 목적이 아니고 지표면에서 레이더 신호에 의하여 반사되는 신호를 이용하여 지표면의 후방산란계수를 측정하는 장치이다. 산란계는 기존 레이더와 달리 공간 해상도 및 거리 해상도는 중요하지 않으며, 정확한 반사 신호의 수신 세기 측정이 중요하다. 지표면 반사 신호의 세기는 지표면의 굴곡 상태(roughness)와 상관관계가 있으며 산란계는 지표면 굴곡 크기를 측정하여 해양 표면의 굴곡 상태를 측정하거나, 지구 표면의 토양 상태를 측정하게 된다.

해양 표면을 측정하는 산란계의 경우, 해양 표면의 굴곡 상태를 측정하여 해상풍(sea surface wind)과 연관 관계를 추론할 수 있다. 해양 관측에서 산란계는 바다와 기상 관계에 대한 연구 수행을 목적으로 하고 있으며, 인공위성 Seasat에 장착된 초기의 산란계 SASS (Seasat-A Satellite Scatterometer) 경우 4-26 m/s 범위의 해상풍을 측정할 수 있다. 측정 자료는 평균적으로 2 m/s 또는 10%의 정확도를 보인다. 내륙 지역에서의 이용은 지표면에 포함된 수분 (surface soil moisture), 토양 특성 측정을 주목적으로 한다. 지표면 수분 분포는 지표면의 건조 상태, 농작물의 현황, 남극 또는 북극에 분포되어 있는 빙산의 상태 등 지구환경 연구에 많은 정보를 제공할 수 있다. 이와 같은 산란계는 항공기, 위성 또는 근거리 지상 시험용으로 사용되며 위성이나 항공기에서 사용되는 산란계는 기존 레이더에 비하여 아주 큰 측정 범위(large dynamic

range)를 갖도록 설계되어야 하며 반드시 편파 기능이 포함되어야 한다.

해상풍 측정

해수면으로부터 반사된 후방산란계수 σ^0 는 해수면에 대한 레이더 신호의 입사각과 해수면에서 바람속도 V , 바람 방향 X 와 함수 관계가 있으며 아래의 수식으로 표현할 수 있다.

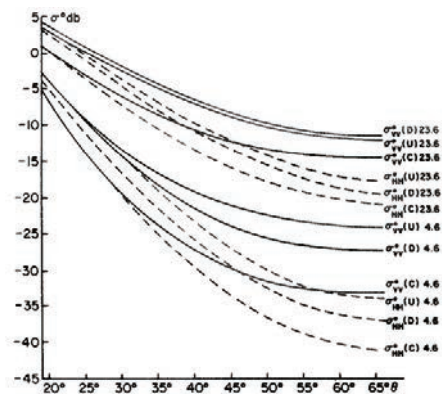
$$\sigma^0(\theta) = \sigma^0(V, X, \theta) \quad (1)$$

여기서 θ 는 레이더 빔과 해수면과의 입사각이다. 바람의 방향이 안테나 FOV(Field of View)에 대하여 위성 관측 방향과 동일한 방향이면 상풍(up-wind: $X=0^\circ$), 반대 방향이면 하풍(down-wind: $X=180^\circ$), 측면 방향이면 측풍(cross-wind: $X=90^\circ$ 또는 $X=270^\circ$)이 되어 바람을 측

정할 수 있다. <그림 1>은 Seasat 위성의 산란계 SASS-1에서 바람의 세기가 각각 23.6 m/s, 4.6 m/s인 경우 이중 편파를 이용한 입사각에 따른 후방산란계수이다^[2].

토양수분 측정

지표면의 수분 함유량 측정은 5 GHz 대역의 주파수와 10° 정도의 입사각을 가지고 지표면의 후방산란계수(backscattering coefficient or normalized radar cross section)를 측정하였을 때 토양



<그림 1> Seasat의 산란계 SASS-1에서 바람의 세기가 23.6 m/s, 4.6 m/s인 경우 이중 편파를 이용한 입사각에 따른 후방산란계수^[2]



수분함량을 가장 정확하게 관측할 수 있다^[3]. 후방산란계수(또는 반사산란단면적)와 지표면의 수분함량과의 관계는 bare soil 경우와 식물이 분포된 토양의 경우 각각

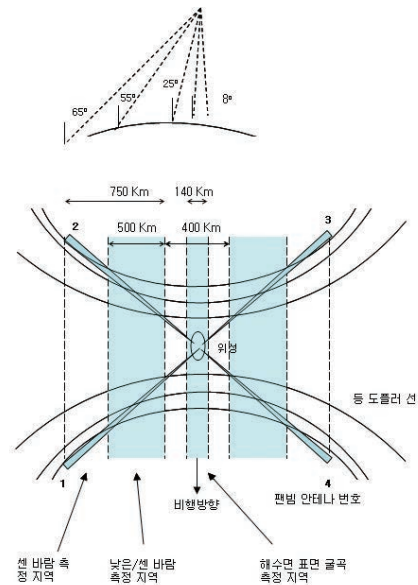
$$\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 0.15M - 16 \quad (2)$$

$$\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 0.13M - 14 \quad (3)$$

이다. 여기서 M은 FOV 내에서 토양수분함량(%)이다. 위성 산란계의 경우 후방산란계수를 1 dB 정확도로 측정할 수 있어서 6~8% 정도의 토양수분함량의 변화를 측정할 수 있다.

2.2. 산란계 구조

산란계는 일반적으로 FM (Frequency Modulated) 레이더나 또는 펄스 레이더를 이용하며, 지상용인 경우 측정 거리가 짧아 FM 레이더를 많이 이용하고 있지만 위성용 산란계의 경우 측정 거리가 멀고 큰 출력을 요구하기 때문에 펄스 레이더를 사용한다. 위성용 산란계의 경우 아주 긴 펄스 신호를 사용하고 있으며, <그림 2>에 위성 Seasat에 장착된 SASS의 구조와 측정 방법을 <그림 3>에 도시하였다.



<그림 3> Seasat SASS 산란계 측정 방법

고도계의 측정 원리는 위성에서 지구 표면으로 펄스를 발신하면, 반사파의 수신 시간을 측정하여 위성과 지표면의 거리를 측정하는 원리이다.

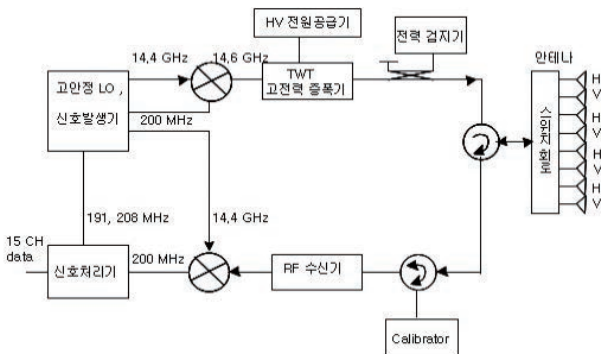
를 측정하는 장치이다. 항공기에서는 기압 고도계와 FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더를 이용한 고도계를 사용하고 있는데 이러한 고도계는 단순히 항공기의 고도만을 측정한다. 그러나 원격탐사에서 이용하는 고도계는 위성과의 고도만 측정하려는 것이 아니라 지구과학 자료를 측정하려는 목적이 있다.

III. 고도계 원격탐사 기술

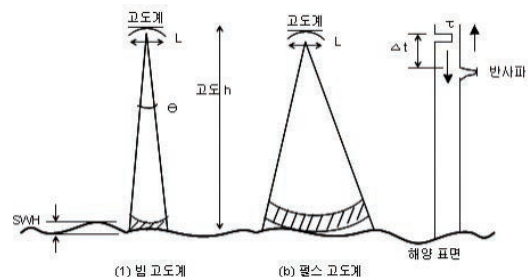
3.1. 고도계 측정 원리

고도계는 항공기 또는 위성에서 지표면과의 거리

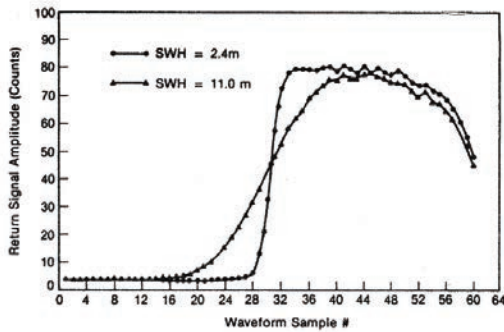
고도계의 측정 원리는 위성에서 지구 표면으로 펄스를 발신하면, 반사파의 수신 시간을 측정하여 위성과 지표면의 거리를 측정하는 원리이다. 그러나 <그림 4>에서 보는 바와 같이 지표면에 투사된 신호가 안테나 반사면적으로



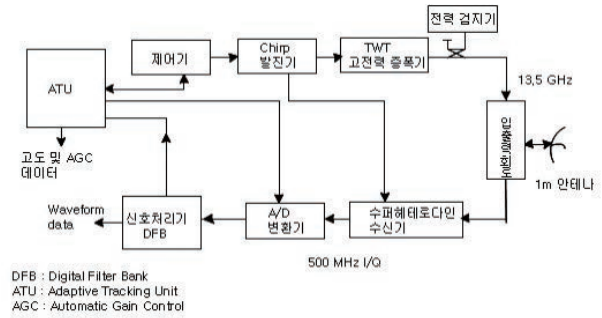
<그림 2> Seasat SASS 산란계 구조 계략도



<그림 4> 레이더 고도계 측정 방법



〈그림 5〉 해수면 유의파고에 따른 반사펄스 형태^[4]



〈그림 6〉 Seasat 레이더 고도계 구조 개략도

부터 반사되는 펄스 신호가 하나가 아니라 전파의 지표면 도래시간 차이로 인하여 여러 개의 펄스 신호가 연속적으로 수신기에 도달하게 되어 정확한 거리 측정이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 위성 레이더 고도계에서는 안테나 빔 고도계 또는 펄스 고도계 방식을 사용하고 있다.

지표면 측정 경우에는 빔 고도계를 주로 사용하며, 해수면의 파고 측정에는 펄스 고도계를 사용한다. 〈그림 5〉와 같이 수신 펄스 신호는 파고의 상태와 상관관계를 가지며, 파고가 높고 낮음에 따라 펄스 신호의 기울기가 변하게 되며, 이 기울기 측정으로 해수면에서의 파고를 측정할 수 있다.

3.2. 고도계 구조

고도계는 펄스 레이더와 유사한 구조를 가지고 있으며 원리도 비슷하다. Seasat 고도계 경우 10 cm 정확도를 갖도록 설계되었고, 사용 주파수는 13.5 GHz Ku밴드 대역이며 1m의 반사경 안테나는 위성에서 지구 수직 방향(nadir)으로 지향하고 있다. 기저 신호 250 MHz에서 PRF (Pulse Repetition Frequency) 1.02 KHz의 반복 주기를 갖는 12.5 nsec 펄스 신호를 발생하여, 이 펄스로 chirp 신호를 생성한다. Chirp 신호를 13.5 GHz, 320 MHz 대역폭을 갖는 신호로 상향 변환하여 2 KW의 침투 출력을 갖는 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)로 증폭시킨 후 출력한다. 해수면에서 반사된 수신 신호는 증폭된 후 500 MHz 중간주파수 IF(Intermediate Frequency)로 하향 변환시킨 후 다시

500 MHz LO로 I-Q (Inphase-Quadrature) 신호로 전환 한 후 A/D (Analog-to-Digital) 변환하여 신호 처리를 한다. 〈그림 6〉에 레이더 고도계의 구조 개략도를 제시하였다.

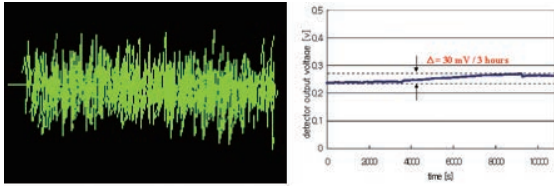
IV. 복사계 원격탐사 기술

4.1. 복사계 측정원리

마이크로파 복사계는 기본적으로 IR (Infrared) 카메라와 같은 원리로 마이크로파 대역에서 물체로부터의 방사 에너지(emission energy)를 측정하여 특성을 분석하는 장치이다. IR은 적외선 대역에서 방사 에너지를 측정하여 열 영상(thermal image)을 획득하는 장비임에 비하여 마이크로파 복사계는 수 GHz부터 수백 GHz 대역까지의 신호를

마이크로파 복사계는 기본적으로 IR (Infrared) 카메라와 같은 원리로 마이크로파 대역에서 물체로부터의 방사 에너지(emission energy)를 측정하여 특성을 분석하는 장치이다.

수신, 밝기온도 또는 휘도온도(brightness temperature)를 획득하는 장비이다. 복사계를 인공위성 원격탐사에 사용한지는 오래되었으며 지표면 수분함량, 염분 (sea salinity), 해수면온도 (sea surface temperature), 해상풍, 대기 중에 포함되어 있는 구름물량 (cloud liquid water), 수증기 (water vapour) 등 아주 다양하게 지구 관측에서부터 대기 관측까지 이용되고 있다. 물체에서 방사되는 복사량은 복사계 수신신호를 적분하여 전압값으로 변환하여 물체의 밝기온도를 측정한다. 〈그림 7〉은 실험실에서 측정한 복사계 수신 전력과 이를 적분한 전압값을 도시하였다. 복사계의 수신 전력은 거의 잡음값



〈그림 7〉 마이크로파 복사계 수신 신호와 이를 적분한 전압값

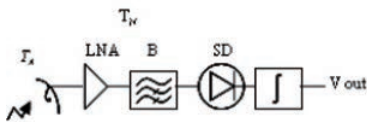
이 보이고 있어 이를 잡음 신호(noise signal)라 한다. 적분한 수신 전력은 수신기 주변의 온도 변화에 아주 민감하게 반응하며, 온도 변화에 따른 수신기 변이를 정확하게 보정하여야만 물체의 밝기온도를 정확하게 측정할 수 있다. 최소한 0.5-1K 정도의 민감도를 가지는 마이크로파 수신기를 이용하여야 물체의 특성을 분석할 수 있으며, 이러한 민감도는 정확한 보정(calibration)을 통하여 구현 가능하다. 마이크로파 복사계에서는 어떠한 보정 방법을 사용하느냐에 따라 Total power, Dicke, Noise injection, Correlation 복사계 등으로 분류할 수 있다.

4.2. 복사계 구조

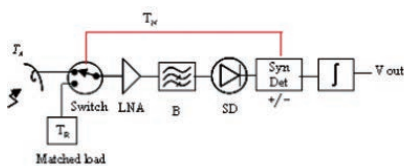
복사계 구조는 위에서 언급한 여러 형태가 있으며, 대표적인 Total power, Dicke 복사계 구조에 대해서만 간단히 설명한다.

Total Power 복사계

Total power 복사계 구조는 수신 안테나, 저 잡음 증폭기, 대역폭 여파기, 검지기 (square law detector), 적분기로 구성되어 있으며 수신기 출력단에서는 안테나에 수신된 신호의 밝기온도를 적분한 전압을 출력하게 된다(〈그림 8〉). 이때 출력된 전압(V_{out})은 안테나에 수신된 밝



〈그림 8〉 Total Power 복사계 개략도



〈그림 9〉 Dicke 복사계 개략도

기온도를 표시하며 출력 전압의 분해도가 입력신호의 온도 민감도를 나타나게 된다.

Dicke 복사계

Dicke 복사계는 Total power 복사계의 온도 변화에 따른 수신기의 변이 문제를 해결하기 위하여 Dicke가 고안한 방법이다. 수신기 입력단에 〈그림 9〉와 같이 스위치와 기준 잡음원(reference noise source)을 장착하여, 안테나로부터 수신되는 밝기온도를 직접 측정하지 않고, 밝기온도값을 알고 있는 기준 잡음원과의 차이를 측정하는 방법을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 수신기의 변위로 인한 측정치의 부정확함을 축소하였다. 검지기 뒷단에 위치한 동기회로로 안테나 밝기를 측정할 때는 (+)로 하고, 기준 밝기를 측정할 때는 (-)로 하여 안테나 밝기와 기준 잡음원의 밝기를 각각 측정한다. Dicke 복사계는 수신기의 온도 변위에 대한 측정 정확도는 많이 향상되지만 스위치로 온도 보정을 하므로 보정시간만큼 수신신호의 적분 시간이 짧아져 결국 Total Power 복사계에 비하여 측정 민감도가 1/2 감소하게 되는 단점이 있다.

V. 자료처리 및 이용 기술

마이크로파 원격탐사 자료처리 기술은 지난 수십 년 동안 비약적으로 발전되어 왔으며, 상기 위성센서 자료를 이용하여 해양, 대기, 육상의 현상들에 대한 변화를 감지하는 데 활발하게 적용되고 있다. 관련된 자료처리 기술의 개요와 활용 분야에 대하여 아래에 간단히 기술하였다.

5.1. 산란계 이용 기술

최근 급변하고 있는 기후변화와 지구환경변화를 감지할 수 있는 해상풍 자료가 인공위성 산란계 자료를 이용하여 매일 실시간으로 생산되고 있다. 이러한 해상풍 자료는 엘니뇨 및 라니냐 시기의 적도 태평양의 바람장의 변화를 관측하고 해양순환 모델, 일기 예측모델, 기후변화 예측 시나리오를 위한 수치모델 등의 입력 자료로 지구과학분야에서 널리 활용되고 있다. 최초의 인공위성 산



란계는 1978년 Seasat에 시범적으로 탑재되었으며, 이후 1991년, 1995년에 각각 발사된 유럽 ESA의 ERS-1과 ERS-2에 5.3 GHz C밴드 AMI 산란계가 탑재되어 전 지구 대양의 해상풍과 육지의 반사도, 해빙 등을 관측할 수 있었다.

해상풍

〈표 1〉에 제시한 바와 같이 1996년 ADEOS-1/NSCAT은 13.9 GHz의 Ku밴드를 활용하여 전구 해수 표면의 바람 벡터를 25×25 km 해상도로 관측할 수 있었다. 1999년 6월 발사된 QuikSCAT/SeaWinds는 13.4 GHz의 Ku밴드를 사용하여 12.5-25 km 해상도로 2009년 11월까지 10년에 걸쳐 하루 2회, 2 m/s, 20° 이내의 정확도를 가진 해상풍 벡터를 장기간 생산하였다. 2006년 MetOp에 탑재된 ASCAT은 ERS-1/2 AMI의 후속 센서로 12.5-25 km 해상도로 전구 해양의 해상풍을 2015년 현재까지 성공적으로 관측하고 있다. 〈그림 10〉은 ASCAT 산란계가 관측한 해상풍과 육상의 반사 정도를

마이크로파 원격탐사 자료처리 기술은 지난 수십 년 동안 비약적으로 발전되어 왔으며, 상기 위성센서 자료를 이용하여 해양, 대기, 육상의 현상들에 대한 변화를 감지하는 데 활발하게 적용되고 있다.

나타내는 후방산란계수의 공간분포를 나타낸다.

위성관측 후방산란계수는 산란계가 방출한 마이크로파의 해수면에 대한 입사각과 풍속에 따라 그 크기가 변한다. 바람이 불지 않는 경우를 제외하고는 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 20°-70°의 입사각 범위에서 입사각이 증가함에 따라 후방산란계수가 선형적으로 감소하는 경향이 있는데 이 관계를 이용하면 해상풍을 산출할 수 있다. QuikSCAT 해상풍은 Ku-2011 지구물리모델함수(GMF)를 사용하여 산출되었고 태풍의 눈과 진행경로도 정확하게 표현할 수 있었다. 이 초기 Ku-2001 모델은 20 m/s보다 강한 바람에 대해 정확도가 떨어지는 문제점이 발견되었으나, 이후 WindSat의 편파 자료를 활용하여

새로운 GMF Ku-2011 모델로 개선되어 기존 알고리즘에 비해 약한 바람과 강한 바람에 대한 풍향과 풍속의 정확도를 향상시킬 수 있었다.

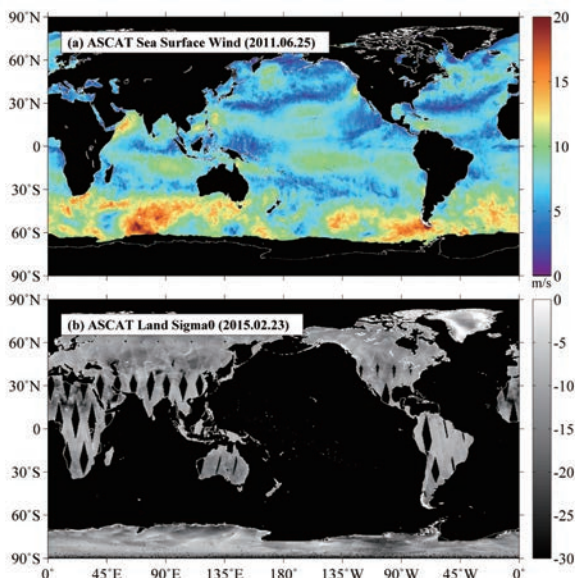
토양수분 및 해빙농도

육상에서는 산란계를 이용하여 바람장을 산출할 수는 없지만 사막

화와 우림화, 토양수분 산출에 산란계 자료가 활용될 수 있다. 또한 산란계 자료는 해빙탐지에도 활용된다. 해빙은 강한 이방성(anisotropic)을 가진 해수면과 달리 표면의 등방성(isotropic)이 뚜렷하며, 입사각에 대한 후방산란계수 변화가 해수면에 비해 작은 특징을 갖는다. 이를 이용해 해빙을 탐지할 수 있으며 모델자료 입력 등에 활용이 가능하다. 최근에는 이러한 산란계 해빙 탐지 기술과 기존 수동 마이크로파센서 및 적외선센서, 가시광선센서를 이용한 기술을 접목하여 다중센서 해빙 탐지 및 분류 알고리즘 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다.

5.2. 고도계 이용 기술

위성 고도계에서 측정된 해수면높이로부터 평균해수면, 조석, 대기압 효과를 제거해 산출한 해수면높이편차(예, 〈그림 11(a)〉) 자료는 이용해 전구 대양 해류의 분포, 지구온난화와 기후변화로 인한 해수면 상승, 해류 및 해수 순환의 변화 등 다양한 해양 및 기상/기후 분야에 활



〈그림 10〉 인공위성 산란계로 산출한 (a) 해상풍과 (b) 육지 후방산란계수의 분포



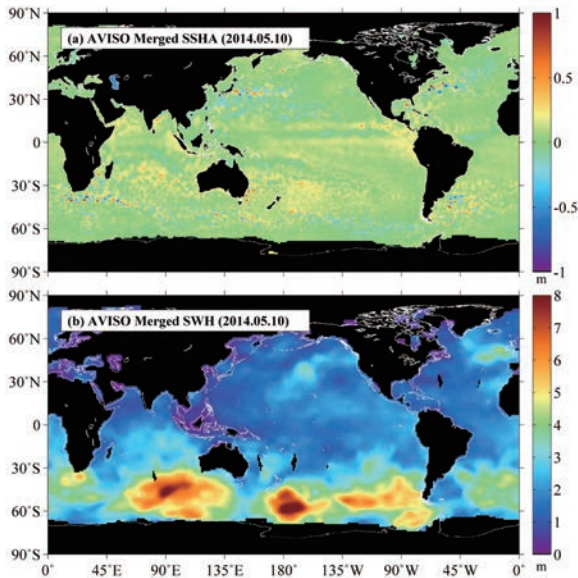
〈표 1〉 인공위성 산란계, 고도계, 복사계의 특징 및 주요 사양

	Sensor	Platform	Agency	Frequency(GHz)	Period	Parameter
Scatterometer	AMI	ERS-1/2	ESA	5,3 (C-band)	1991,9-2003,6	Wind vector(U_{10} , \emptyset)
	NSCAT	ADEOS-1	NASA/JAXA	13,995 (Ku-band)	1996,8-2003,7	Wind vector(U_{10} , \emptyset)
	SeaWinds	QuikSCAT Midori-2	NASA/JAXA	13,4 (Ku-band)	1999,6-2009,11	Wind vector(U_{10} , \emptyset)
	ASCAT	METOP	ESA / Eumetsat	5,255 (C-band)	2006,10-present	Wind vector(U_{10} , \emptyset)
	OSCAT	OceanSat-2	ISRO	13,515 (Ku-band)	2009,10-present	Wind vector(U_{10} , \emptyset)
Altimeter	GRA	GeoSAT	U.S. Navy	13,5 (Ku-band)	1985,3-1990,1	SSHA, SWH
	RA	ERS-1/2	ESA	13,8 (Ku-band)	1991,7-2000,3	SSHA, SWH
					1995,7-2011,6	SSHA, SWH
	Topex Poseidon	TOPEX/Poseidon	NASA/CNES	5,3 (C-band) 13,6 (Ku-band)	1992,9-2005,10	SSHA, SWH
	GFO-RA	GFO	US Navy/NOAA/NASA	13,5 (Ku-band)	1998,2-2008,10	SSHA, SWH
	Poseidon-2	Jason-1	NASA/CNES	5,3 (C-band) 13,6 (Ku-band)	2002,1-2013,7	SSHA, SWH
	RA-2	Envisat	ESA	3,2 (S-band) 13,6 (Ku-band)	2002,5-2012,4	SSHA, SWH
	Poseidon-3	Jason-2	NOAA/NASA/CNES /Eumetsat	5,3 (C-band) 13,6 (Ku-band)	2008,6-present	SSHA, SWH
	-	HY-2A	CAST	5,25 (C-band) 13,58 (Ku-band)	2011,8-present	SSHA, SWH
AltiKa	SARAL	ISRO/CNES	35,75 (Ka-band)	2013,2-present	SSHA, SWH	
Radiometer	SSM/I	F8, F10, F11, F13-F16	ESA/Eumetsat	19,35, 22,235, 37,0, 85,5	1987,6-present	wind speed, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	TMI	TRMM	NASA/JAXA	10,65, 19,35, 21,3, 37,0, 85,5	1997,11-present	SST, wind speed, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	GMI	GPM	NASA/JAXA	10,65, 18,7, 23,8, 36,5, 89,0, 166,0, 183,3	2014,2-present	SST, wind speed, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	AMSR-E	AQUA	NASA	6,93, 10,65, 18,7, 23,8, 36,5, 89,0	2002,5-present	SST, wind speed, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	AMSR	ADEOS-II	NASDA/NASA/CNES	6,93, 10,65, 18,7, 23,8, 36,5, 50,3, 52,8, 89,0	2002,12-2003,8	SST, wind speed, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	AMSR-2	GCOM-W1	JAXA	6,93, 7,3, 10,65, 18,7, 23,8, 36,5, 89,0	2012,5-present	SST, wind speed, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	WindSat	Coriolis	U.S. Navy/NPOESS	6,8, 10,7, 18,7, 23,8, 30,7	2003,1-present	SST, wind speed, wind direction, water vapor, cloud liquid water, rain rate
	MIRAS	SMOS	ESA	1,4 (L-band)	2009,11-present	soil moisture, salinity
	Aquarius	SAC-D	NASA	1,4 (L-band)	2011,6-present	salinity

용되고 있다. 위성 고도계는 직하 방향으로 신호를 쏘아 보낸 후 지구 표면에서 반사되어 돌아오는 신호의 이동 시간과 세기, 형태를 측정하여 해수면높이, 해면 거칠기 및 해상풍, 유의파고(예, 〈그림 11(b)〉)를 추정할 수 있다. 인공위성 고도계를 활용한 해수면높이 산출은 1978년 Seasat으로 처음 시도되었고, 1985년 Geosat을 통

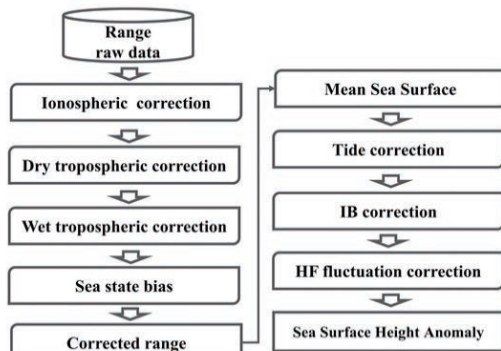
해 해수면높이 관측 기술이 향상되었으며 이후 1991년 ERS-1과 1992년 CNES/NASA의 TOPEX/Poseidon이 발사됨에 따라 장기간의 고도계 자료 취득이 가능해지면서 본격적인 해수면높이 산출 기술개발 및 관련 연구들이 활발하게 이루어지기 시작하였다.

이후 〈표 1〉에 제시한 바와 같이 ERS-2, GFO,



〈그림 11〉 인공위성 고도계로 산출한 전구 대양의
(a) 해수면높이편차와 (b) 유의파고의 분포

Jason-1, Envisat, Jason-2, Cryosat-2, HY-2, SARAL/AltiKa에 이르기까지 많은 고도계가 발사되어 현재까지 해수면높이 산출에 활용되고 있다. 대표적인 위성인 TOPEX/Poseidon, Jason-1/2는 5.3 GHz C밴드와 13.6 GHz Ku밴드를 이용하여 두 파장 영역에서 관측한 두 가지의 해수면높이를 산출하였으며, Envisat은 S밴드와 Ku밴드를 사용하였다. 고도계 위성의 주기는 대표적으로 10일을 가졌으나 35일 주기를 가지는 위성도 있어서 〈그림 11(a)〉에 나타난 바와 같이 여러 위성 자료를 시공간적으로 합성하여 해수면높이 분포를 생산하고



〈그림 12〉 인공위성 고도계 자료를 이용한 해수면높이편차의 산출 과정

지구온난화로 인한 해수면 상승, 해류 및 순환 등 각 연구에 활발하게 활용하고 있다. 현재 운용 중인 Jason-2의 고도계 자료로부터 산출된 해수면높이의 최종 정확도는 2 cm 정도이다.

이러한 정확도를 유지하기 위해서는 〈그림 12〉에 제시한 바와 같이 여러 단계의 보정과정의 정확히 수행되어야 한다.

해수면높이

위성 고도계 측정을 통한 해수면높이(SSH)는 지구 기준 타원체로부터 해수면까지의 높이를 나타내고, 이는 인공위성의 관측 고도(H_{sat})로부터 고도계 측정거리(altimeter range, R)에서 일련의 보정 과정을 거친 보정거리(R_{alt})의 차로 구할 수 있다.

$$SSH = H_{sat} - R_{alt} \quad (4)$$

$$R_{alt} = R - \Delta R_{ion} - \Delta R_{dry} - \Delta R_{wet} - \Delta R_{ss} \quad (5)$$

R_{alt} 은 대류권의 수증기에 의한 오차 (wet tropospheric correction, ΔR_{wet}), 수증기를 제외한 대류권 기체에 의한 오차 (dry tropospheric correction, ΔR_{dry}), 전리층에 의한 오차 (ionospheric correction, ΔR_{ion}) 및 해상 상태에 따른 편향 (sea state bias, ΔR_{ss}) 등을 포함한다.

마이크로파의 전파속도는 이온권 자유전자의 밀도에 비례하여 감소하기 때문에 사용 주파수에 따라 0.2- 20 cm 정도 고도계 측정 오차가 발생하며, 또한 계절과 주야 시간대별로 그 특성이 달라진다. 이러한 전파 속도 차이는 두 개의 주파수를 이용하여 보정 가능하다. 이온권에서는 주파수의 제곱에 반비례하여 신호의 지연을 일으키는 특성이 나타나므로 C밴드(f_1)와 Ku밴드(f_2) 고도계의 관측거리(R_1, R_2)를 이용해서 식 (6)과 같이 ΔR_{ion} 를 보정할 수 있다^[6].

$$\Delta R_{ion} = (R_1 f_1^2 - R_2 f_2^2) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (6)$$

Jason-2와 Envisat은 전리층에서 이온에 대한 오차를 보정하기 위하여 GIM 모델과 Bent 모델을 활용하고 있다.

또한 마이크로파의 전파속도는 대류권의 건조기체에



의해 저하되며, 약 2-3 m의 해수면높이 오차를 발생시킨다. 이러한 오차는 ECMWF의 해면기압자료와 위치정보를 이용하여 보정할 수 있다^[7]. 또한 대류권의 수증기 및 구름 입자도 전파속도의 저하에 영향을 주어 최대 50 cm까지 오차를 유발하므로 복사계 자료를 이용해 동시 관측된 대기층의 수증기와 수직의 연직방향 분포를 이용하여 보정한다.

이러한 보정 이외에도 해상상태에 의해서 발생하는 전자기파 편차(electromagnetic bias), 왜도 편향(skewness bias)을 유의파고와 풍속을 이용하여 보정한다^[8]. 위성 해수면높이 자료는 지형류 근사를 통한 해류의 산출에 활용되므로 해수면의 역학적 고도를 알기 위하여 해수면높이편차(SSHA) 자료가 필요하며 이를 위해서 일정 기간 동안의 평균 해수면높이(h_{mss}), 조석(h_{tide}), 대기 효과에 의한 해수면높이(h_{atm})의 영향을 다음과 같이 보정하여 최종적인 해수면높이편차를 구하게 된다.

$$SSHA = SSH - h_{mss} - h_{tide} - h_{atm} \quad (7)$$

$$h_{tide} = h_{ocean\ tide} + h_{load\ tide} + h_{solid\ earth\ tide} + h_{pole\ tide}$$

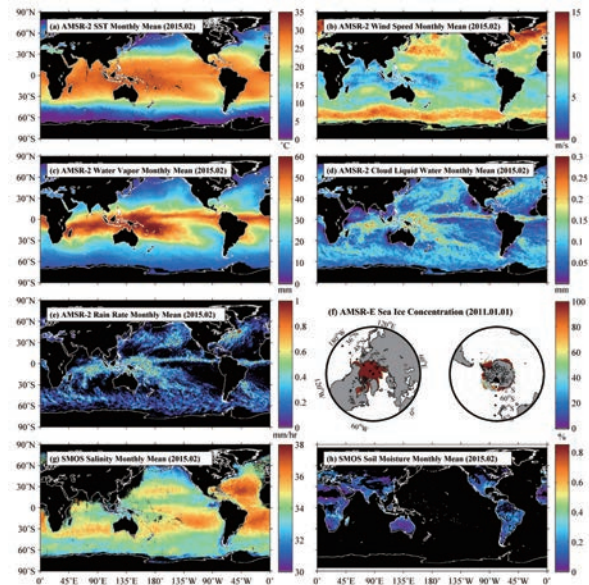
조석에 의한 해수면높이 변동값(h_{tide})은 달과 태양의 인력에 대한 바다의 변동($h_{ocean\ tide}$), 해양조석의 무게에 의한 고체지구의 지역적 연직변화($h_{load\ tide}$), 달과 태양의 인력에 대한 고체지구의 변동($h_{solid\ earth\ tide}$), 지구 회전축의 흔들거림으로 인해 발생하는 원심력의 변화에 따른 바다와 고체지구의 변동($h_{pole\ tide}$)의 합으로 나타낼 수 있으며 이를 적절하게 보정하여야만 정확한 값을 산출할 수 있다.

5.3. 복사계 이용 기술

마이크로파 복사계의 대표적인 센서로는 SSM/I, TMI, GMI, AMSR-E, AMSR, AMSR-2, WindSat, MIRAS/SMOS, Aquarius 등이 있으며 수 GHz부터 수백 GHz까지의 주파수 영역을 활용하여 <그림 13>과 같은 해수면 온도, 해상풍, 수증기, 수직, 강수율, 염분 및 토양수분을 관측한다.

대기 관측

해상풍과 수직적으로 합산된 구름 수직의 양과 수증기



<그림 13> 인공위성 복사계 자료로 산출한 해수면온도, 풍속, 수증기량, 구름물량, 강수율, 해빙, 염분 및 토양수분함량의 분포

량은 9, 23, 37, 86 GHz 주파수대에서 수직, 수평 방향 편파 측정치로부터 산출할 수 있다. 대기 중 수증기량 측정은 22-23 GHz 주파수를 이용하며, 22,235 GHz는 수증기의 흡수/방출선의 중심 주파수이지만 19 GHz는 수증기에 대한 영향을 받지 않기 때문에 19 GHz와 22,235 GHz에서의 측정값의 차를 이용하면 대기 중 수증기량을 추정할 수 있다. 구름물량은 SSM/I의 경우 6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 GHz 주파수에서 측정된 수평/수직 편파 밝기온도 자료에 통계적 선형 회귀분석 알고리즘을 적용하여 산출한다.

해수면온도

해수면온도를 측정하기 위해서는 추가로 4-10 GHz의 밴드가 필요하다. 측정되는 각 변수들은 독립적이지 않고 서로 다른 주파수대에서 상호 영향을 끼치기 때문에 다른 변수들이 정확하게 산출되어야만 해수면온도의 최종 정확도를 유지할 수 있다. AMSR-E의 경우 7, 11, 19, 24, 37 GHz의 주파수에 대해 수평, 수직 편파 관측을 하며, 총 10개의 채널에 대한 관측값을 이용하여 해수면온도, 해상풍, 대기 중 수증기량, 대기 중 수직의 양 및 강수에 대한 정보를 산출한다.



위성관측 밝기온도에는 지구 표면의 방출량뿐만 아니라 대기 중의 수증기, 산소, 수직 등에 의한 흡수 효과도 포함되어 있다. 따라서 복사계 자료로부터 해수면온도를 산출하려면 이러한 대기 복사에 의한 효과를 제거하여야 하며 이를 위하여 관측 지점의 수증기, 산소, 수직의 연직 분포 자료와 염분 등을 복사전달모델(Radiative Transfer Model, RTM)에 입력하여 해수면온도를 추정하게 된다^[9]. 이렇게 산출된 해수면온도는 해안 가까이에서 사용할 수 없는 한계점이 있지만 구름을 관통할 수 있는 특성 때문에 적외선 센서의 부족한 부분을 보완할 수 있는 귀중한 자료로 사용되고 있다. 현재 생산되고 있는 대부분의 해수면온도 합성장에는 AMSR 계통의 센서의 해수면온도가 큰 비중을 차지하고 있다.

염분

염분은 측정기술이 가장 최근에 새로이 개발되기 시작한 변수로서 2009년 11월에 발사된 SMOS와 2011년 6월 발사된 Aquarius/SAC-D의 L밴드 (1.4 GHz) 수동형 마이크로파센서 자료로부터 산출되고 있다. 해수표면의 밝기온도, 유전상수, 풍속 및 풍향, 해면의 거칠기, 입사각, 해수면온도 등의 특성을 측정하여 염분을 산출한다. 이 위성자료로 전구의 표층 염분의 시공간 분포를 파악할 수 있게 되었으며, 위성 염분의 현재까지 측정 정확도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 영역에 대하여 한 달 동안 평균하였을 때 약 0.2 psu 정도의 오차를 가지고 있다. 또한 해수면온도가 낮은 곳에서는 민감도가 낮아서 열대 해상에 비해 고위도 해양에서 염분의 정확도가 낮은 경향이 있다.

해빙농도 및 토양수분

해빙농도도 수동형 복사계 자료로부터 오랜 기간 동안 산출되어 왔다. 거의 모든 주파수대에서 얼음과 눈 표면에서의 마이크로파 영역의 방출율이 해수면보다 일반적으로 높기 때문에 개빙 구역과 완전히 얼음으로 덮인 해역 간의 밝기온도 차와 주파수 및 편파 채널의 서로 다른

특성을 이용하여 해빙농도를 산정할 수 있다. 해빙 알고리즘의 정확도는 계절에 따라 달라지며, 하나 또는 두 가지 종류의 얼음만 존재할 때 정확도가 가장 높다.

L밴드 수동형 복사계 자료를 이용하여 토양수분함량도 산출할 수 있다. 이를 위해서는 토양의 성질과 식생에 대한 통계자료와 함께 지표온도나 적설의 정보 또한 제공되어야 한다^[10]. 모델 수행을 통하여 계산된 밝기온도 정보와 측정된 밝기온도를 비교하여 가장 오차가 작을 때의 토양수분, 토성, 식생, 지표온도, 적설 정보를 찾을 수 있다.

VI. 세계적 기술 동향 및 국내 연구 개발

6.1. 차세대 산란계

해상풍은 전구 지구환경변화 모니터링에 매우 중요한 변수이기 때문에 우주기술 선진국에서는 차세대 산란계를 지속적으로 개발하고 있다. 유럽과 중국우주국은 CFOSAT 위성에 ASCAT과 WindSAT의 관측 기술을 접합한 RFSCAT 산란계(1,000 km 관측폭, 13.256 GHz Ku밴드, 수평/수직 편파)를 탑재하여 2015년에 발사할 예정이다. 중국기상국은 FY-3E에 WindRAD(Wind Radar)를 탑재하여 2017년에 발사할 예정인데, 5.3 GHz(C밴드)와 13.265 GHz(Ku밴드)에서 회전하면서 원추 형태로 해상풍을 관측하며 C밴드와 Ku밴드의 입사각은 각각 35° - 45° , 37° - 43° 이고 관측폭은 약 1,200 km이며 해상도는 각각 20 km와 10 km를 계획하고 있다. 이 센서는 2022년에 발사 예정인 FY-3G에도 탑재될 예정이다. 러시아는 WindSAT 처럼 회전하면서 원추 형태로 해상풍을 관측하는 SCAT을 Meteor-M N3에 탑재하여 2018년에 발사할 계획이고, 이 센서는 2023년에 Meteor-MP N3 위성에도 탑재될 것이다. 유럽의 EUMETSAT과 ESA도 2018년에 MetOp-C에 MetOp-A/B의 ASCAT을 탑재할 계획이며, MetOP 위성의 2세대 위성인 MetOp-SG을 2020년대부터 6대를 발사할 계획을 가지고 있다. MetOp-

해상풍은 전구 지구환경변화 모니터링에 매우 중요한 변수이기 때문에 우주기술 선진국에서는 차세대 산란계를 지속적으로 개발하고 있다.



SG-B1/B2/B3에는 ASCAT보다 공간 해상도가 높고 성능이 뛰어난 SCAT(5.3 GHz C밴드, 양방향 관측, 폭 550 km, 45°, 90°, 135° 관측)을 신규로 탑재할 계획이다^[11].

6.2. 차세대 고도계

해상풍과 같이 해수면높이와 파고도 지구온난화와 기후변화를 모니터링하고 예측하는 데 매우 중요한 역할을 하기 때문에 미국, 유럽에서는 지속적으로 차세대 고도계를 개발하고 있다. 대양의 장기변동 연구를 위해 기존 TOPEX/Poseidon, Jason-1/2와 동일한 사양을 가진 Poseidon-3B도 Jason-3 위성에 탑재하여 2015년에 발사할 계획이다^[12]. 또한 ESA와 NASA는 해양 관측 시에는 전통적인 고도계 관측 기법을 이용하고 해빙 및 육빙을 관측할 때에는 SAR 모드를 이용하는 SRAL(Synthetic aperture Radar Altimeter, 5.3GHz C밴드와 13.38 GHz Ku밴드)를 2015년 Sentinel-3A, 2017년 Sentinel-3B, 2018년 Jason-CS-A, 2024년 Jason-CS-B에 탑재할 예정이다. CNES는 SWIM(Surface Waves Investigation and Monitoring instrument, 13.575 GHz Ku밴드, 다중입사각 (0°, 2.4°, 4°, 6.8°, 10°), 관측폭 180 km)을 개발하여 2018년 CFOSAT에 탑재하여 여러 개의 빔을 사용하여 파랑관측 스펙트럼(파향, 파주기, 파장)을 산출하고 직하방향으로는 유의파고를 관측하려는 계획을 가지고 있다.

한편 일본 JAXA에서는 2019년 COMPIRA 위성예 5.3 GHz(C밴드)와 13.5 GHz(Ku밴드)의 전통적인 고도계 주파수 외에 신규로 9.5 GHz(X밴드)의 주파수를 이용하는 간섭계 형태의 SHIOSAI (SAR Height Imaging Oceanic Sensor with Advanced Interferometry, 5 km 해상도, 50°S-50°N, 7일 주기) 고도계를 개발하여 탑재할 계획이다. 미국 NASA도 2020년 SWOT에 5.3GHz C밴드와 13.58 GHz Ku밴드 고도계로 해수면높이와 유의파고를 산출하고, 하천과 호수 및 지역적인 해양 순환을 관측하기 위해 넓은 관측폭을 갖는 두 개의

평행한 안테나를 가진 35.5 GHz(Ka밴드)의 간섭계 형태의 고도계(KaRIN, Ka-band Radar Interferometer, 관측폭: 60 km, 120 km, 해상도: 50 m (육지) 1 km (해양), 수직해상도: 10 cm (육지) 1 cm (해양), 관측주기: 2주)를 탑재하여 발사할 계획이다.

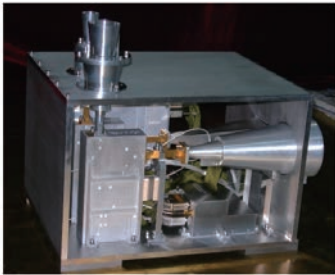
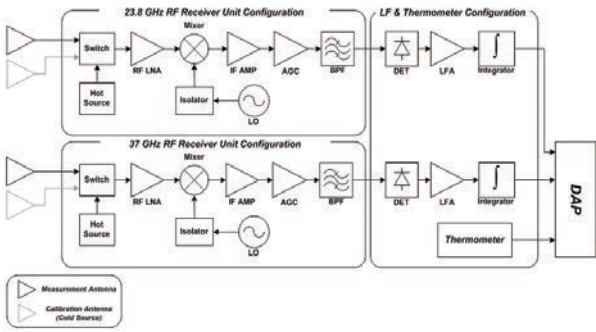
6.3. 차세대 복사계

차세대 복사계 개발도 기존 복사계 방식을 유지하면서 좀 더 많은 채널을 이용하여 다중변수, 정확도를 향상시키는 방식으로 진행되고 있다. GPM의 GMI는 2014년에 발사되어 현재까지 성공적으로 지구 관측을 수행하고 있으며, 2016년에 GPM-Brazil에 동일한 GMI가 탑재되어 GPM보다 높은 고도에서 관측을 수행할 예정이다. Metop-SG-B1/2/3에 탑재될 ICI(Ice Cloud Imager)는 수증기 대역인 181.31 GHz부터 664 GHz까지 다중 주파수를 이용하여 53.1°의 천정각으로 1,700 km의 관측 폭을 가지면서 구름의 빙정을 매일 측정할 것이다. 미국 DoD(Department of Defense)은 DMSP 후속위성인 DWSS-1/2 (Defense Weather Satellite System-1/2)에 실릴 MIS(Microwave Imager/Sounder)를 개발하여 해상풍과 기온, 습도 및 강수량을 1,700 km의 폭으로 매일 관측하는 것을 목표로 하고 있다. Metop-SG-B3에 탑재될 MWI(Micro-Wave Imager)도 18.7-183.31 GHz를 이용하여 구름물량, 수증기량, 강우강도, 빙정, 기온, 풍속 등을 종합적으로 관측할 계획이다^[13].

해상풍과 같이 해수면높이와 파고도 지구온난화와 기후변화를 모니터링하고 예측하는 데 매우 중요한 역할을 하기 때문에 미국, 유럽에서는 지속적으로 차세대 고도계를 개발하고 있다.

6.4. 국내 연구개발

국내에서는 아직 외국에 비하여 마이크로파 센서를 이용한 위성 원격탐사 연구가 활발히 이루어지지 않고 있다. 단지 외국의 위성 자료를 이용한 자료 처리 수준에 머무르고 있다. 광주과학기술원에서 국내 최초로 과학기술 위성 2호 주 탑재체로 2개의 주파수 23.6, 37 GHz 마이크로파 복사계 DREAM(Dual-frequency Radiometer for Earth and Atmosphere Monitoring)를 성공적으



〈그림 14〉 DREAM 탑재체 구성 계략도 및 비행모델 사진

로 개발하였으나 불행하게도 나로호의 2회 연속 발사 실패로 인하여 우주에서의 운용 실험을 수행하지 못하였다. DREAM 복사계의 구조와 실제 발사모델을 〈그림 14〉에 제시하였다.

2015년부터 한국항공우주연구원에서는 마이크로파 원격탐사 기술의 중요성을 인식하고, 광학 관측 센서 개발 뿐만 아니라 마이크로파 센서 시스템 개발을 위한 연구를 착수하였다. 이 연구는 핵심 기술 확보를 위한 것으로 영상레이더 (SAR), 산란계, 고도계 및 복사계 시스템이 포함된 복합 마이크로파 원격탐사용 위성 개발을 목표로 하고 있다.

Ⅶ. 결론

본고에서는 마이크로파 지구관측 위성 탑재체인 산란계, 고도계 그리고 복사계에 대하여 측정 원리, 구성 및 해양 및 지구환경 연구에 어떻게 이용되는지에 대하여 비전문가를 위한 내용으로 서술하였다. 워낙 방대한 내용의 기술이라 지면 제약으로 인하여 간략히 설명하느라 일부 내용에 대하여 설명이 부족할 수 있을 것이나, 좀 더 자세한 내용을 이해하고자 하는 독자는 참고 문헌을 이용하면

부족한 부분에 대하여 더 많은 이해를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

끝으로 국내에서도 마이크로파 원격탐사 기술이 더욱 발전되고, 관련 전문가들이 양성되어 외국의 마이크로파 원격탐사위성과 같이 고도의 기술을 필요로 하는 위성이 머지않아 개발되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 손태호, 김기재, 김용훈, 한석태, 전자파 응용공학, 6장, 220-282, 흥릉과학출판사, 2008.
- [2] Ed by T. D. Allan, Satellite Microwave Remote Sensing, Ellis Horwood Ltd., 1983.
- [3] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. I, II, III, Artech House, Inc. 1981, 1982, 1986.
- [4] C. Elachi, Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing, Wiley, 1987.
- [5] N. Skou, Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis, Artech House, 1989.
- [6] D. A. Imel, "Evaluation of the TOPEX/POSEIDON dual-frequency ionosphere correction", Jour. Geophys. Res., Vol. 99, no. C12, pp. 24895-24906, December 1994.
- [7] D. B. Chelton, J. C. Ries, B. J. Haines, L. Fu, and P. S. Callahan, "Satellite Altimetry and Earth Sciences A Handbook of Techniques and Applications", International Geophysics, pp. 1-131, 2001.
- [8] P. Gaspar, F. Ogor, P. Le Traon, and O. Zanife, "Estimating the sea state bias of the TOPEX and POSEIDON altimeters from crossover differences", Jour. Geophys. Res., Vol. 99, no. C12, pp. 24981-24994, December 1994.
- [9] F. J. Wentz and D. Levine, "Algorithm Theoretical Basis Document Aquarius Salinity Retrieval Algorithm: Final Pre-Launch Version", Remote Sensing Systems, 2011.
- [10] Y. H. Kerr, P. Waldteufel, P. Richaume, J. P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi, and S. Delwart, "The SMOS soil moisture retrieval algorithm", IEEE Trans. Geos. Remote Sens., Vol. 50, no. 5, pp. 1384-1403, May 2012.



- [11] EUMETSAT, <http://www.eumetsat.int>
- [12] JPL/NASA, <http://www.jpl.nasa.gov/>
- [13] WMO-OSCAR, <http://www.wmo-sat.info/oscar/>
- [14] <http://sensor.gist.ac.kr>

약 어

ADEOS-1	Advanced Earth Satellite System-1
AMI	Active Microwave Instrument
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer - EOS
ASCAT	Advanced Scatterometer
CFOSAT	Chinese-French Oceanic Satellite
CNES	Centre National d'études Spatiales
COMPIRA	Coastal and Ocean Measurement mission with Precise and Innovative Radar Altimeter
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS-1/2	European Remote-sensing Satellite-1/2
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FY-3E	Feng-Yun 3E
GFO	Geosat Follow-On
GIM	Global Ionosphere TEC Maps
GMF	Geophysical Model Function
GMI	GPM Microwave Imager
GPM	Global Precipitation Measurement
HY-2A	Hai Yang 2A
ISRO	Indian Space Research Organisation
Jason-1/2/3	Joint Altimetry Satellite Oceanography Network - 1/2/3
Jason-CS	Jason Continuity of Service
MetOp-A/B/C	Meteorological Operational-A/B/C
MIRAS	Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSCAT	NASA Scatterometer
QuikSCAT	Quick Scatterometer
RFSCAT	Rotating Fan Beam Scatterometer
SAR	Synthetic Aperture Radar
SARAL	Satellite with Argos and AltiKa
SCAT	Scatterometer
SeaSAT	Seafaring Satellite
SMOS	Soil Moisture Ocean Salinity
SSH(A)	Sea Surface Height (Anomaly)
SWH	Significant Wave Height
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager
SWOT	Surface Water Ocean Topography
TMI	TRMM Microwave Imager
TOPEX	Topography Experiment



김용훈

- 1974년 2월 경희대학교 전파공학과 학사
- 1976년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
- 1983년 7월 Stuttgart 대학교 공학박사 (Dr. -Ing.)
- 1976년 9월~1980년 7월 공군제2사관학교 전임강사
- 19981년 8월~1983년 9월
Berlin 공대, Inst. of Aerospace 연구원
- 1983년 10월~1990년 7월
Stuttgart 대학교 Inst. of Navigation
선임연구원
- 1990년 10월~1994년 7월
한국항공우주연구원, 전자탐재연구실 실장
- 1995년 2월~현재 광주과학기술원 교수
- 2000년 3월~현재 (주)밀리시스 창립 및 대표이사

〈관심분야〉

mm-wave radar, radiometer system, airspace
microwave remote sensing instrument



우혜진

- 2011년 8월 서울대학교 지구과학교육과 학사
- 2013년 8월 서울대학교 과학교육과 석사
- 2013년 9월~현재 서울대학교 과학교육과 박사과정

〈관심분야〉

physical oceanography, satellite altimeter



김태성

- 2007년 8월 서울대학교 지구환경시스템과학부 학사
- 2010년 8월 서울대학교 과학교육과 석사
- 2010년 9월~현재 서울대학교 과학교육과 박사과정

〈관심분야〉

physical oceanography, satellite SAR,
scatterometer



박경애

- 1987년 2월 서울대학교 지구과학교육과 학사
- 1989년 2월 서울대학교 과학교육과 석사
- 1996년 2월 서울대학교 해양학과 박사
- 1998년 12월~2001년 6월
미국 로드아일랜드대학교 GSO 연수연구원
- 2005년 7월~2006년 7월
서울대학교 해양연구소 연구교수
- 2006년 10월~2007년 2월
서울대학교 지구환경과학부 BK21 연구교수
- 2007년 2월~현재 서울대학교 부교수

〈관심분야〉

satellite oceanography, earth remote sensing



이상규

- 1993년 충남대학교 공학사 (전자공학)
- 1995년 충남대학교 공학석사 (영상통신)
- 2011년 충남대학교 공학박사 (위성통신)
- 1995년 3월~현재
한국항공우주연구원 위성연구본부
탐재체전자팀 팀장, 책임연구원

〈관심분야〉

영상코딩, 안테나 및 전자파전파, EESS 통신시스템,
위성통신