

## SMOS 위성 개발 및 운용 현황

박 혁\*† · 이호진\*\*

\*카탈루냐 공과대학교, \*\*셋트레이

### Review of SMOS Mission and Current Operation

Hyuk Park\*† and Ho-Jin Lee\*\*

\*Remote Sensing Laboratory, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), \*\*Satreci

**Abstract :** The second satellite in ESA's Earth Explorer series, the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission was launched into orbit at November 1, 2009. The SMOS will play a key role in the monitoring of climate change on a global scale using the payload of L-band synthetic aperture radiometer. It is the first ever satellite designed both to map sea surface salinity and to monitor soil moisture on a global scale, and will provide the important data to study the water cycle among oceans, the atmosphere and land. To introduce the operation of the SMOS, this paper shows brief summary of appearance and current operation.

**Key Words :** Soil moisture, Ocean salinity, Synthetic Aperture Radiometer.

**요약 :** 유럽 우주국 (ESA)에서 지구 탐사 계획의 일환으로 개발한 두 번째 위성인 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) 위성이 지난 2009년 11월 발사되어 궤도에 안착, 운행 중에 있다. SMOS는 탑재된 L 대역 합성 개구형 라디오미터를 이용하여 상시 전지구적으로 토양 수분량과 해양 염도를 측정하는 것을 목표로 한다. 이를 통하여 지구의 물순환 및 기상, 기후 연구에 주요한 데이터를 얻을 수 있다. 본 글은 SMOS 발사와 관련된 개괄적인 연구 개발과 현재 운용 현황에 대해 설명한다.

### 1. 서론

지난 2009년 11월 2일 Europeans Space Agency (ESA)의 토양 수분량 및 해양 염도 측정용 인공위성이 북부 러시아에서 발사되었다. Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission 으로 통칭되는 이 인공위성은 저궤도 (LEO)를 돌며 탑재된 마이크로파 라디오미터를 이용하여 지구의 밝기 온도 (Brightness Temperature)를 측정한다. 이 측정된 밝기 온도에서

기후 기상 연구의 중요한 데이터인 토양 수분량과 해양 염도를 추출한다. SMOS는 전지구적으로 토양 수분량 및 해양 염도를 측정할 수 있는 위성으로서, 특히 간섭 합성 개구형 라디오미터 (Interferometric Synthetic Aperture Radiometer)를 이용한 수동형 마이크로파 원격탐사 센서 기술을 위성 최초로 탑재하였다. 본문은 SMOS의 발사를 맞아 그 배경 및 목적, 연구 개발 및 결과, 그리고 현재 운용 현황에 대해서 설명한다.

접수일(2010년 1월 29일), 수정일(1차 : 2010년 2월 26일), 게재확정일(2010년 2월 27일).

† 교신저자: 박혁(park.hyuk@tsc.upc.edu)

## 2. SMOS 배경 및 목적

토양 수분량과 해양 염도는 전지구적 기상/기후 및 생태 연구에 있어 매우 중요한 요소이다. 토양 수분량의 경우, 지표와 대기 간의 물 및 에너지 흐름에 밀접한 연관이 있다. Fig. 1 에서 보듯이, 물순환은 대기, 토양, 해양의 에너지 흐름과 균형에 직접적으로 관련이 있으며, 기상 기후 시스템 연구의 중요한 요소이다. 이에 물순환(water cycle)과 식생(vegetation) 모니터링, 기상/기후 모델링에 있어서 시공간적으로 토양 수분량의 변화를 측정하는 것은 필수적이다(Beljaars *et al.*, 1996; GEWEX/BAHC 2000).

해양 염도는 강수량, 얼음 용해, 대기 증발, 해양 순환 등의 균형에 밀접한 관련이 있다. 표면 해수의 염도 변화는 증발과 강수, 그리고 극해의 얼음 용해로 인한 담수의 증감과 관련이 있다. 온도와 염도에 의해 해양수의 밀도가 영향을 받으므로 이러한 요소들의 데이터가 바탕이 되어 해류 순환 모델링을 가능하게 한다. 즉, 해양 염도의 계절, 연간 변화는 물순환과 해양 대기간 상호작용 모델링의 주요한 파라미터이다. 그러므로, 토양 수분량과 해양 염도의 전 지구적 관측은 기상/기후학, 수문학, 생태학 등 지구 환경 연구 및 홍수, 가뭄 등의 자연재해에 대한 예측에도 필수적이다(Font *et al.*, 2000).

토양 수분량 및 해양 염도를 가장 효과적으로 측정하는 센서시스템은 L 대역 (1.4 GHz) 마이크로파 라디오미터이다. L 대역은 여타 주파수 대역보다 수분량/염도



Fig. 1. The Earth's water cycle; The circulation and conservation of the Earth's water, known as the water cycle, are a crucial component of weather and climate (Wikipedia).



Fig. 2. Instrument of SMOS; L-band Y-shaped synthetic aperture radiometer consists of a central structure and three deployable arms, each of which has three segments. The 69 antenna-receiver elements (LICEFs) are distributed over the three arms and central structure (ESA).

에 대한 민감도가 좋고, 표면 거칠기, 식생에 대한 교란이 적으며, 구름 등을 통과할 수 있는 장점이 있다. 지표 수 센티미터 이내의 수분 함유량은 지표의 방사 밝기 온도와 밀접한 관계가 있으므로, 기타 관계 요소를 포함한 모델링 식의 역산을 통하여 라디오미터로 측정되는 밝기온도에서 지표 수분량을 구할 수 있다. 해양 염도의 경우도 L 대역 라디오미터로 측정된 밝기 온도를 통해 표면 거칠기, 지표 풍속 등의 관계 요소가 포함된 모델링 식을 이용하여 추출이 가능하다(Schmugge, 1998).

SMOS 이전에는 토양 수분량과 해양 염도를 전지구적 범위로 효과적이게 관측할 수 있는 시스템이 없는 상황이었다. 이를 개선하기 위해, 충분한 공간해상도를 가지고 적절한 시간 주기로 전지구적인 관측이 가능한 L 대역 라디오미터 관측 시스템을 구축하는 것이 SMOS의 연구 개발의 주된 임무였다. SMOS는 센서의 인공위성 탑재를 통하여 적절한 시간 주기의 전지구적 관측을 가능하게 하였고, 합성 개구형 라디오미터 개발을 통하여 필요한 공간 해상도를 얻을 수 있었다. 특히, 2차원 합성 개구형 라디오미터를 최초로 인공위성 탑재체로 채택하였는데, 이는 센서 공학적으로도 주요한 연구 개발을 이룬 것으로 평가된다.

### 3. SMOS 임무 운용

#### 1) 주 탑재 센서

SMOS의 주 탑재체는 MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)라 불리는 2차원 합성 개구형 라디오미터로서 120도의 간격을 갖는 3개의 날개에 안테나를 배치하여 Y 형태의 모양을 갖는다. 이 3개의 날개는 각기 3부분으로 나뉘어 접힌 상태로 발사되어 궤도 안착 후 전개되어 큰 합성 개구형 안테나로서 사용된다. 한 날개당 각 23개의 안테나가 장착되어 총 69개의 Y 형태 안테나 배열을 갖는다. 마이크로파 라디오미터로, 지구 저궤도상에서 (LEO) 적절한 공간 해상도를 얻기 위해서는 큰 크기의 안테나가 필요하게 되는데, 이를 실현하기 위한 방법으로서 이와 같은 형태의 안테나 구조가 연구 개발된 것이다(Kerr, 2001).

합성 개구형 라디오미터 구현을 위해서 안테나와 같은 개수의 수신기가 장착되었으며, 복소 신호인 상관값 측정을 위해 I/Q 신호 획득 처리를 가능케 하였고, 제어 신호에 따라 수직/수평 이중 편파 측정이 가능하도록 설계되었다. 수신된 신호는 상관기를 통하여 상관값을 구하는데, 여기에 사용되는 상관기를 디지털로 구현하여 아날로그 상관 회로에서 발생하는 시스템의 부피와 복잡성을 줄였다.

라디오미터 측정 시스템의 가장 중요한 요소인 캘리브레이션을 위해서 두 가지 형태의 캘리브레이션 방법을 사용하였다. 먼저, 잡음 주입(noise injection) 방식으로, 회로상 캘리브레이션을 하기 위해서 두 개의 서로 상관관계가 없는 잡음원을 주기적으로 수신기에 보내어 시스템 편차를 보상 안정화를 시킨다. 또한 정보를 갖고 있는 참조 목표물을 주기적으로 관측하여 밝기 온도 및 영상 캘리브레이션을 수행한다. 부가적으로 발사 후 초기 운영 시 태양/달 관측을 통하여 안테나 패턴 등에 대한 특성 측정 등을 수행한다.

#### 2) 궤도 및 운행 모드

SMOS 궤도는 공간 해상도, 재방문 시간 (revisit time), 데이터 다운링크 여유, FOV (Field Of View) 특성 등을 고려하여 757 km 고도의 태양 동기 궤도(sun-synchronous)로 설정되었다. 국지 시간점은 L 대역 신

호에 대한 환경 영향 요소가 일정해지고 패러데이 효과가 적은 때인 일출 시간에 맞추어 오전 6시 승교점 통과 시간 (ascending equator crossing time)으로 설정하였다. 대기 마찰에 의한 장축 축소는 연간 0.25에서 5 km 사이이다.

SMOS는 25도의 기울임 각으로 지표의 밝기 온도를 측정한다. 각각의 수직/수평 편파영상은 0.3 초 내에 측정되며, 제어부에 의해 각 5 개의 영상을 평균화하여 1 개의 정규화 밝기 온도 영상을 만든다. 각 편파에 대해 총 1.5 초의 적분 시간을 갖게 되므로 두 편파 영상을 얻는 데에는 3초의 시간이 걸리게 된다. 관측도중 매 10개의 영상마다 (15초 간격) 0.6 초 동안 캘리브레이션을 하는 데 0.3 초 동안은 상관 잡음 주입으로 0.3 초 동안의 비상관 잡음 주입 방식으로 수행한다.

#### 3) 데이터 획득 및 후처리

합성 개구형 라디오미터의 실 측정값인 Visibility Sample 에서 1차 정보값인 밝기 온도 영상으로 변환하는 방법은 많은 연구 개발을 통해 고안 향상되어 왔다. 특히, 오류 보정 (error correction), 영상 복원법 (image reconstruction), 캘리브레이션 방법 연구, 프로토타입 (prototype) 제작 실험, 시뮬레이터 개발 등의 작업을 통하여 최적의 방법을 고안하였다. 1차 정보값인 밝기 온도 영상은 과학적 목적을 위해서 후처리 과정을 거치게 된다. 지표의 경우 편파와 입사각 정보를 이용하여 토양 수분량과 식생 수분 함유량을 추출하게 된다. 이때, 측정값에 영향을 주는 지형에 관한 요소에 대한 보정이 필요하게 된다. 또한, 측정 시 혼합되는 관측 성분에 대한 영향은 여타의 보조/부가 정보를 이용하여 보정하게 된다. 이렇게 측정된 데이터는 근지대 (root zone) 수분 함유량 유추 및 수문 모델 연구 등의 정보로 활용된다. 해양 염도의 경우도 이와 같은 과정을 거쳐서 해양 대기간 상호 작용 모델링 및 지구 수문 연구 등에 활용된다.

### 4. 현재 운행 상황

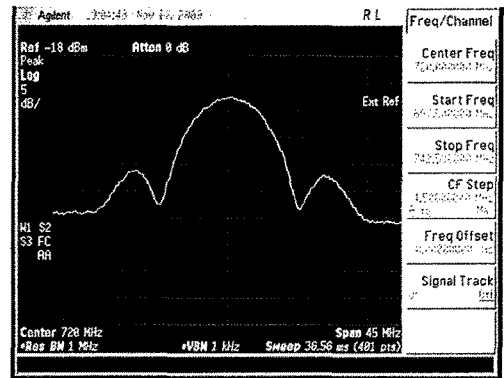
#### 1) 발사 및 궤도 진입, 임무 시작

1999년 정식으로 ESA의 지구 관측 프로그램으로 편

성되어 초기 연구가 시작된 SMOS 임무는 오랜 기간의 연구 개발 과정을 거쳐 2009년 11월 2일 북부 러시아의 Arkhangelsk Oblast에 위치한 Plesetsk Cosmodrome에서 발사되었다. 러시아의 SS-19 대륙간 탄도 미사일(ICBM)을 개조한 Russian Rokot에 탑재되어 발사된 SMOS는 고도상승 후 1단계 분리, 페어링 분리, 2단계 분리, 최종 분리단계를 거쳐 최종 궤도에 진입하였다. 궤도 진입 후 대략 2분 후 남아프리카의 지상국에서 최초 신호를 수신하였고, 그 후 자동 순서 단계에 의해 태양전지판 전개와 기타 지상국 교신을 통하여 대략적 상태 체크를 수행하였다. 전기 및 열/온도 상태 체크를 한 후, 탑재체 모듈이 부분적으로 작동을 시작하였다. 이후, SMOS의 Y 형태 안테나 배열의 3개의 팔이 전개되었고, 전체적인 동작 점검 이후 6개월간의 1단계 임무가 시작되었다. 1단계 기간 동안 위성과 센서장치의 점검과 측정 데이터 교정 및 검증 과정을 수행한다. 1단계 이후 3년간의 실제 위성 임무인 토양 수분량 및 해양 염도 데이터를 측정 임무를 수행한다.

2) 초기 측정 결과

현재 SMOS는 초기의 몇 가지 시스템 오작동 문제를 해결하고 정상적으로 운행하고 있다. 발사 후 6개월 간은 시스템 안정화와 측정값 캘리브레이션 및 토양 수분량/해양 염도 교차확인 등의 1단계 임무를 수행한다. 측정 마이크로파 신호값의 안정화 및 정량화를 위한 센서 하드웨어 캘리브레이션은 정상적으로 작동하고 있으며, 얻어진 마이크로파 신호값을 이용하여, 1단계 측정값인 밝기 온도를 추출하기 위한 캘리브레이션 과정을 진행하고 있다. Fig. 3은 SMOS와 지상국과의 최초 교신 신호와 11월 17일 전송된 SMOS의 최초 측정 데이터 영상이다. 센서 전원 공급 후 초기 동작 확인 테스트 과정에서 측정된 데이터로서 아직 캘리브레이션이 되지 않은 측정 마이크로파 신호의 세기를 색으로 표현한 영상이다. 아직 밝기 온도 캘리브레이션 및 토양 수분량 / 해양 염도 추출 과정을 거치지 않은 영상이지만, 해양 부분의 마이크로파 세기가 약하고 지표상의 세기가 강하게 나타나는 특징을 보이고 있다. 이는, 사전 임무 분석 단계에서 예상한 결과와 일치하는 것으로, SMOS에 탑재된 Y형태 안테나 배열의 합성 개구형 라디오미터의 동작이 정상적이라는 것을 보여주고 있다. 특이한 점으로는 유



(a)



(b)

Fig. 3. (a) The first received signal from SMOS/MIRAS, (b) the first received image data; the image depicts non-calibrated brightness temperature values (SMOS-BEC).

럽지역 및 아시아 지역이 마이크로파 세기가 강하게 측정되고 있다. 이는 인구 밀집, 도시 지역에 해당하는 부분으로서, 정확한 원인은 분석 중에 있으나 인구 밀집지역의 통신 등에 의한 전자파 방출의 영향으로 해석되고 있다.

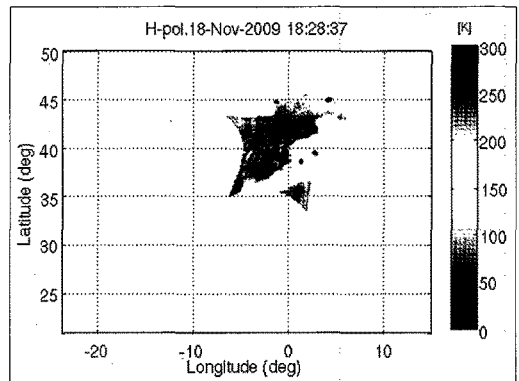


Fig. 4. Brightness temperature image over the Iberian Peninsula and South of France obtained using SMOS/MIRAS L0 measurements (SMOS-BEC).

현재 캘리브레이션 단계가 완료되지는 않았으나, 과정 중의 밝기 온도 값 결과들이 보고되고 있다. Fig. 4는 SMOS 주 데이터 처리기관 중 하나인 스페인 바르셀로나의 SMOS- BEC (Barcelona Expert Center)에서 보고한 최초의 밝기 온도 영상이다. 스페인 카탈루냐 지방을 중심으로 관측된 밝기 온도영상 역시, 임무 분석 단계에서 예상되었던 결과와 유사하여 SMOS의 정상적인 동작을 보여주고 있다.

### 3) SMOS 데이터 검증, 구조 및 배포

현재 SMOS는 시스템 안정 및 점검, 캘리브레이션 데이터 검증의 1단계 과정을 거치고 있다. 초기 계획상 발사 후 6개월간, 즉 2010년 4월까지로 1단계 운용이 예정되어 있다. SMOS의 실질 데이터 값인 토양 수분량과 해양 염도를 정확히 제공하기 위해서는 센서 관측 데이터인 지구 밝기 온도를 통한 토양 수분량과 해양 염도를 정확하게 추출하는 알고리즘과 여타 영향을 미치는 요소에 대한 연구 검증이 필요하다. 즉, 상하층부 식생, 토양 종류, 표면 거칠기, 파도 및 풍랑, 해양 거품 등 여러 영향 요소에 대한 고려가 필요하다. 이러한 연구는 이미 SMOS 개발의 부속 과제로 여러 연구팀에서 진행되었다. 지상용 라디오미터 및 기타 원격 관측 데이터를 활용해 집약적인 연구가 진행되었고, 이를 통해 정밀한 토양 수분량 / 해양 염도 데이터 추출 방법을 개발하였다. 현재 이러한 연구를 검증하기 위해, 실제 SMOS에서 수집된 밝기 온도 영상을 이용하여 토양 수분량 / 해양 염도 추출 및 검증의 작업이 이루어지고 있다.

SMOS의 데이터 구조는 기본적으로 CEOS (Committee on Earth Observation Satellite)의 관례를 따른다. 그 중 특이한 점은, SMOS의 주 탑재체인 합성 개구형 라디오미터의 특성에 의해 세부단계가 발생한다는 것이다. 이는 합성 개구형 라디오미터는 관측 지역 (FOV)의 밝기 온도를 직접적으로 측정하는 것이 아니라, 그 지역 영상의 푸리에 변환값인 Visibility 샘플을 측정하기 때문이다. 밝기 영상을 얻기 위해서는 관측된 Visibility 샘플 데이터를 푸리에 역변환에 기초한 영상 복원 과정을 거쳐야 하므로 이러한 특성에 의하여 데이터 구조의 특이점이 발생한다. 아래에서 SMOS 데이터의 기본 단계를 설명한다.

#### 원시 데이터 (Raw data)

SMOS의 탑재체인 MIRAS 센서의 기본 측정값을 위한 형식으로 측정값, 하우스킵핑 텔레메트리 값 등을 포함하여 지상국으로 송신하는 데이터

#### L0 데이터 (Level-0 data)

송신된 데이터를 지구 탐사 헤더 등의 내용을 포함하여 시간 순으로 정렬한 Source Packet 데이터

#### L1-a 데이터(Level-1a data)

캘리브레이션된 관측값, 즉 calibrated visibilities으로 불리는 데이터로서 공학 단위 등을 통해 물리적으로 정규화된 관측값, 하우스킵핑 (housekeeping) 데이터

#### L1-b 데이터(Level-1b data)

Visibility 측정 샘플을 영상 복원 과정을 거쳐서 각 편파(polarization)에 맞게 표시된 밝기 온도 스냅샷 영상 데이터

#### L1-c 데이터(Level-1c data)

L1-b의 스냅샷 영상을 지표계에 정렬하여 위성 경로 및 swath에 맞게 복원한 밝기 영상 맵 (map) 데이터

#### L2 데이터(Level-2 data)

밝기온도 맵을 이용, 추출 알고리즘을 통한 토양 수분량 / 해양 염도 swath 맵

#### L3, L4 데이터(Level-3 and Level-4 data)

여러 협약 기관 및 단체에서 필요에 맞게 생성하는 데이터로서 대표적으로 SMOS-BEC (Barcelona Expert Center)는 L3, L4 데이터를 다음과 같이 설정. 지구 전체와 지역적인 토양 수분량 / 해양 염도 맵 정보 제공을 위하여, 시공간상 평균치 알고리즘 및 여타 원격 탐사 측정데이터와의 융합을 통한 데이터. 기타 SMOS의 측정데이터를 이용한 여러 분야의 응용 정보 데이터

현재 SMOS 데이터는 지정된 기본 데이터 처리기관 등에서 모니터링 및 검증 단계에 있는데, 특히 ICM-CSIC (Institute of Marine Science) SMOS-BEC에서 L3, L4 데이터 생성 및 응용의 주 임무를 맡고 있다. 1단계 안정화 및 검증이 끝나면, 6월부터 데이터를 일반 공개할 예정이다. 데이터의 배포는 ESA의 주 데이터 배포 서비스인 eoPortal (<http://www.eoportal.org>)

에서 이루어질 예정이다.

### 5. 결 언

지구 온난화 및 지구의 급격한 기후변화 등의 환경 관련 문제가 심각하게 대두됨에 따라, 전지구적인 기상/기후/환경 연구 및 모니터링의 중요성이 더욱 부각되고 있다. SMOS는, 그 중 가장 중요한 관측 요소이자 연구 데이터인 토양 수분량 및 해양 염도의 측정을 전 지구적이며 적절한 시간주기를 가지고 하고자 연구 개발되어, 현재 운용 중에 있다. 이와 같은 과학연구 및 모니터링의 목적과 더불어, SMOS의 탑재체로 개발된 Y 형태 합성 개구형 라디오미터는 수동형 원격 탐사 센서의 큰 진전으로 주목 받았다. 본 글은 SMOS의 개발 및 현재 운용사항 등에 대한 내용을 소개하였다. 본 글을 통해 수동형 마이크로파 원격 탐사 및 우주/위성 기술 연구 개발에 대한 한국 내의 관심이 증진되었으면 한다.

### 감사의 글

본문에 대한 감수 및 자료 제공에 도움을 준 카탈루냐 공과 대학교 Adriano Camps 교수 이하 Remote Sensing Lab 연구원에게 감사한다.

### 참고문헌

Beljaars, A. C. M., P. Viterbo, M. J. Miller, and A. K. Betts, 1996. The anomalous rainfall over the

USA during 1993: Sensitivity to land surface parameterization, *Monthly Weather Review*, 124: 362-383.

Font, J., Y. Kerr, and M. Berger, 2000. Measuring ocean salinity from space: The European Space Agency's SMOS mission, *Backscatter*, 17-19.

GEWEX/BAHC International Workshop on Soil Moisture Monitoring, Analysis and Prediction for Hydrometeorological and Hydroclimatological Applications, Norman, May 16-18, 2000.

Kerr, Y. H., P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J.-M. Martinuzzi, J. Font, and M. Berger, 2001. Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8).

Schmugge, T. J., 1998. Applications of passive microwave observations of surface soil moisture, *Journal of Hydrology*, 212-213: 188-197.

ESA; multimedia gallery, <http://www.esa.int/esa-mm/mmg/mmghome.pl>

ESA; SMOS Home, <http://www.esa.int/SPECIALS/smos/index.html>

ESA; SMOS technical site, <http://www.esa.int/esaLP/LPsmos.html>

SMOS-BEC, SMOS news, <http://www.smos-bec.icm.csic.es/>

Wikipedia, [http://ko.wikipedia.org/wiki/물의\\_순환](http://ko.wikipedia.org/wiki/물의_순환)