

석사학위논문

KOMSPAT-3 광학 영상과  
KOMPSAT-5 SAR 영상정보를  
이용한 토양수분도 제작 연구

2024년

한 성 대 학 교 대 학 원

I T 융 합 공 학 과

I T 융 합 공 학 전 공

이 지 현



석사학위논문  
지도교수 이기원

KOMSPAT-3 광학 영상과  
KOMPSAT-5 SAR 영상정보를  
이용한 토양수분도 제작 연구

The Study on Soil Moisture Mapping using  
KOMSPAT-3 Optical Image and KOMPSAT-5  
SAR Image

2023년 12월 일

한성대학교 대학원

IT 융합 공학과

IT 융합 공학 전공

이 지 현

석사학위논문  
지도교수 이기원

KOMSPAT-3 광학 영상과  
KOMPSAT-5 SAR 영상정보를  
이용한 토양수분도 제작 연구

The Study on Soil Moisture Mapping using  
KOMSPAT-3 Optical Image and KOMPSAT-5  
SAR Image

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2023년 12월 일

한성대학교 대학원

IT융합공학과

IT융합공학전공

이 지 현

이지현의 공학 석사학위 논문을 인준함

2023년 12월 일

심사위원장 박명서 (인)

심사위원 서화정 (인)

심사위원 이기원 (인)

# 국 문 초 록

## KOMSPAT-3 광학 영상과 KOMPSAT-5 SAR 영상정보를 이용한 토양 수분도 제작 연구

한 성 대 학 교 대 학 원  
I T 융 합 공 학 과  
I T 융 합 공 학 전 공  
이 지 현

위성 정보를 이용하여 정확한 토양 수분 상태를 추정하는 방법은 원격탐사 응용 분야에서 중요한 연구 주제 중 하나이다. 이번 연구에서는 국내 고해상도 영상인 KOMPSAT-3A와 KOMPSAT-5 위성 영상을 활용하여 시범 지역에 대하여 보다 정밀한 토양 수분도를 산출하는 것을 목표로 하였다. 또한, 정확도 검증을 위하여 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration: NASA)에서 제공하는 Soil Moisture Active Passive (SMAP) 위성 영상의 토양 수분 자료와 비교 분석하였다. 또한, 농업 및 임업 식생지역을 대상으로 토양 수분도를 산출하기 위하여 환경공간정보서비스에서 제공하는 국내 토지 피복 자료를 연구에 적용하였다. 시범 연구 지역은 김제 평야 지대로 선정하였으며, 수분 구름 모델 (Water Cloud Model)에 기반한 토양 수분 산정 알고리즘을 사용하였다. 이 연구에 활용한 synthetic aperture radar (SAR) 영상은 KOMPSAT-5 위성의 VV 편광 영상과 Sentinel-1 위성의 VH 편광 영상

을 사용하였다. 함께 사용한 광학 영상으로는 KOMPSAT-3A 위성 자료를 사용하였으며 지표반사도 처리를 수행하였다. 산출한 토양 수분도 산정 결과와 SMAP Level-3, Level-4 자료를 비교 분석하였으며 특히, Level-3 영상은 Google Earth Engine (GEE)에서 제공하는 Analysis Ready Data (ARD)를 활용하였다. 비교 결과, 높은 수준의 일치도를 보였으며 이번 연구를 통하여 향후 우리나라 위성 영상과 공공 데이터자료를 이용하여 정확도가 높은 정밀 토양 수분도 제작 가능성을 제시하였다.

**【주요어】** KOMPSAT-3A, KOMPSAT-5, Sentinel-1, SMAP, Soil Moisture Estimation, Google Earth, Engine

# 목 차

<b>제 1 장 서 론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 목적 및 방법 .....	2
<b>제 2 장 토양 수분도 관측 자료</b> .....	<b>5</b>
제 1 절 토양 수분도 관측 방법 .....	5
제 2 절 토양 수분도 관측 위성 .....	7
1) AMSR-2 .....	10
2) ASCAT .....	11
3) ESA CCI .....	12
4) SMOS .....	12
5) SMAP .....	13
6) 천리안 위성 .....	14
<b>제 3 장 정밀 토양 수분도 제작</b> .....	<b>15</b>
제 1 절 연구 자료 및 제작 방법 .....	15
1) 토지 피복 자료 .....	19
2) 지표 반사도 적용 .....	25
3) SAR 영상 처리 .....	32
<b>제 4 장 김제지역 정밀 토양 수분 처리 결과 및 분석</b> .....	<b>34</b>
제 1 절 SMAP 김제 영상 .....	34
제 2 절 SMAP 영상과 정밀 토양 수분도 비교 결과 .....	37

제 5 장 결 론 .....	43
참 고 문 헌 .....	45
ABSTRACT .....	52

## 표 목 차

[표 2-1] 토양 수분 관측 위성과 정보 .....	7
[표 3-1] 정밀 토양 수분도 활용 데이터 .....	17
[표 3-2] 토지 피복 자료 제공 플랫폼 및 정보 .....	20
[표 3-3] 연구에서 적용한 MODIS 파라미터 .....	27

## 그림 목 차

[그림 2-1] AMSR-2 센서 사양 및 제품 .....	11
[그림 2-2] 천리안 위성 2A호 융합 산출물 .....	15
[그림 3-1] 정밀 토양 수분 산출을 위한 제작 절차와 산출물 적용 실험과정 .....	17
[그림 3-2] 정밀 토양 수분 산출을 위한 김제평야 시험 연구 지역 ...	18
[그림 3-3] WCM 산출식 및 매개변수 .....	18
[그림 3-4] 환경공간정보서비스에서 김제 연구지역에 관한 토지 피복 자료 신청 방법 및 신청 자료 .....	21
[그림 3-5] 환경공간정보서비스의 토지 피복 자료 종류와 중분류 토지 피복 자료 항목 .....	22
[그림 3-6] 김제 연구지역의 토지 피복 자료 레이어 .....	23
[그림 3-7] 토지 피복 자료 분류와 김제 연구지역 적용 자료 .....	24
[그림 3-8] 대기 상단 반사도와 지표 반사도 과정 .....	25
[그림 3-9] 지표 반사도 산출 시스템 .....	27
[그림 3-10] MODIS data 검색 및 적용 .....	28
[그림 3-11] 지표 반사도 적용하여 산출한 KOMPSAT-3A NDVI 영상 및 히스토그램 .....	29
[그림 3-12] smooth geometry 적용 벡터 레이어 .....	31
[그림 3-13] 2022년 5월 김제 연구지역 기상 자료 .....	33
[그림 3-14] GEE 제공 Sentinel-1 SAR ARD .....	33
[그림 4-1] GEE ARD 제공 SMAP Level-3 영상 및 NASA 제공 SMAP Level-4 영상 .....	35
[그림 4-2] 김제 연구지역 적용 SMAP Level-3 영상 .....	36
[그림 4-3] NASA Earth data 제공 전 세계 SMAP Level-4 영상 ...	36
[그림 4-4] 김제 연구지역 적용 SMAP Level-4 영상 .....	37
[그림 4-5] 김제 연구지역 토양 수분도 도표 .....	39
[그림 4-6] 김제 연구지역 토양 수분도 래스터 히스토그램 도표 .....	41
[그림 4-7] 김제 연구지역 토양 수분도 box plot 그래프 .....	42

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경

세계적으로 지표면에 내리는 강우의 대부분인 약 76%는 토양에 흡수되어 지속적으로 순환되며 토양 내부의 수분은 증발 및 유출, 지하수 침투 등을 통해 순환한다 (L'vovich, 1979). 토양 수분은 토양에 함유된 수분의 양을 의미하며, 특히 상단 5cm의 지표 토양 수분도는 대기와의 직접적인 상호작용으로 인해 매우 중요하다 (Seneviratne et al., 2010). 지표 토양 수분도는 지구의 수분 순환 과정에 있어 강우를 유출과 침투로 나누어주는 주요한 역할을 한다 (Trenberth et al., 2007). 또한, 에너지순환 관점에서는 증발 및 증산 과정을 통해 태양 복사에너지를 잠열(latent heat)과 현열(sensible heat) 에너지로 나누는 과정에도 기여한다 (지희숙 외., 2022). 이러한 토양 수분도는 지구 시스템의 핵심 요소로서, 대기과 육지 표면 간의 수분, 에너지, 생지화학적 교환에 있어서 필수적인 역할이다. 토양 수분량은 날씨 및 기후 예측의 불확실성을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 홍수 및 가뭄과 같은 자연재해의 모니터링과 예측에도 기여한다. 이러한 이유로 토양 수분도의 실시간 모니터링과 효과적인 측정 기술의 개발 및 연구는 상당히 중요한 연구 주제이다 (Robock et al., 2000; Seneviratne et al., 2010; Ochsner et al., 2013;). 특히, 정확한 토양 수분 정보는 관개 일정, 가뭄 모니터링 및 수확량 예측과 같은 농업 응용 분야에서 가장 주요한 매개 변수 중 하나이다. 이는 건조 및 반건조 지역에서 물 절약 농업을 촉진하고 식량 안보 보장이 가능하다는 장점이 존재한다 (Martinez-Fernandez et al., 2016; Champagne et al., 2019; Dominguez-Nino et al., 2020;). 이러한 이유로 표면 토양 수분도는 대기과 토양 사이의 물 순환에 영향을 미치는 필수 구성 요소 중 하나로 수문학적 요인에 직접적인 영향을 미치며 농업, 관개 관리 및 홍수 예측과 같은 기후 평가에 매우 중요한 요소이다 (Abdikan et al., 2023).

따라서 모니터링을 통한 토양 수분도의 정확한 추정엔 전략적 관리를 위해 매우 중요하다. 지구 온난화에 따른 기후 변화로 지역별 강수 빈도와 강우량의 편차가 점점 심화되는 가운데, 이에 따라 고온 및 건조한 날씨로 토양 표면의 건조함이 악화되면서 가뭄 발생 가능성이 높아지고 있다. 토양 수분도는 지표면의 상태를 직관적이고 효율적으로 파악할 수 있는 필수 수문학적 인자로, 기상이변에 따른 지표 수분 상태 관찰에 있어 매우 유용하다. 이러한 이유로 날씨에 영향을 거의 받지 않는 레이더 영상의 활용이 점점 중요시되고 있으며 레이더 자료를 이용한 토양 수분 매핑 방법 및 모니터링 연구가 대두되고 있다. 토양 수분도 측정 방법으로는 SMOS, SMAP, Landsat 등 중, 저해상도 위성을 이용한 많은 방법들이 개발되고 있는 반면, 우리나라 고해상도 위성인 KOMPSAT을 활용한 연구는 거의 없는 실정이다 (Tao et al., 2022).

## 제 2 절 연구 목적 및 방법

지구 시스템 내에서의 중요성을 고려하여 토양 수분은 기후 변화에 관한 국제 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 작업을 지원하는 지구 기후 관측 시스템(Global Climate Observing System, GCOS)에 의해 54가지 필수 기후 변수(Essential Climate Variables, ECVs) 중 하나로 등재되었다 (Peng et al., 2021). Tao et al. (2022)은 KOMPSAT-5 SAR(Synthetic Aperture Radar) 및 Sentinel-2 영상에서 산출한 토양 수분 결과의 정확도 검증 연구를 수행하였고, Lee et al.(2022)은 KOMPSAT-3 영상 정보와 Sentinel-1 SAR 영상으로부터 토양 수분도를 제작하기 위한 시험 연구를 수행하였다. Wei et al. (2019)는 SMAP의 대규모 토양 수분 제품(36km)과 MODIS 제품에서 집계된 토양 수분 지수를 연결하는 Gradient Boosting 의사 결정 트리 모델을 수립하여 티베트 고원에 대한 1km 공간 해상도의 토양 수분 제품을 생성하였다. Long et al. (2019)는 중국 북부 평야에서 랜덤 포레스트 모

델을 기반으로 하여 시간적, 공간적으로 지속 가능한 1km 해상도의 토양 수분 제품을 생성하였다. Zhang et al. (2022)는 앙상블 학습을 사용하여 국제 토양 수분 네트워크(International Soil Moisture Network, ISMN)의 1,154개 관측소 현장 측정치와 SMAP(Soil Moisture Active Passive) 제품의 토양 수분 함량 교차 검증 및 비교를 수행하였다. 이러한 토양 수분도는 지표면의 CO<sub>2</sub> 교환 과정에서 중요한 구성 요소로 홍수나 가뭄 등과 같은 자연재해와도 밀접한 관련이 있다. 또한, 식물의 광합성 활동에도 결정적인 역할을 하여 작물 수확량 및 생태계에도 큰 영향을 미친다 (지희숙 외., 2022). 이와 같이 토양 수분 관측 자료는 날씨 및 기후 모델링, 농업 관개 계획 등 자연재해 예보의 기초 자료로 널리 활용되고 있으며 (Robock et al., 2000), 적은 양에도 불구하고 전 세계 물 순환에 큰 영향을 미치는 주요 수문학적 변수이다 (McColl et al., 2017). 정확한 토양 수분 추정 은 농업 가뭄 모니터링, 식생 성장 및 수자원 관리에 필수적이며, 진행중인 기후 변화는 더욱 극단적인 기후를 야기하고 (Samaniego et al., 2018), 농업에 홍수와 가뭄의 큰 위험을 초래한다 (Xu et al., 2019). 최근 장기간의 심각한 가뭄이 전 세계 여러 지역에서 발생했으며, 특히 작물 재배 기간동안 막대한 경제적 손실을 초래했다. 따라서 농업 작물 생산 손실을 줄이기 위해 농업 가뭄에 대한 조기 경고를 제공하고 농작물 가뭄 스트레스와 물 수요를 예측하기 위해서는 정확한 토양 수분 함량 모니터링이 필수적이다. 토양 수분도는 지표면 아래의 수분 함량을 나타내는 중요한 지표이며 관측이나 모델 시뮬레이션을 통해 농업 가뭄 조건 및 일기 예보를 추정하는 데 있어 사용 가능한 필수 지표이다. 따라서, 최근 인공 위성 이미지 자료를 이용한 토양 수분 산정에 관한 많은 연구가 세계적으로 활발히 진행중에 있으며, AMSR-2(Advanced Microwave Scanning Radiometer-2), SMOS(Soil Moisture Ocean Salinity), SMAP 등과 같은 토양 수분 관측 위성에서 지속적으로 자료를 생산하고 있다. 그러나, 이러한 위성에서 관측한 토양 수분도는 해상도가 9km 이상으로 넓은 지역의 관측이 목적이며 임의의 특정 지역을 정밀하게 분석하기에는 적합하지 않다. Hajj et al. (2017)과 Jiang et al. (2023)의 토양 수분도 제작 실험에

서도 Sentinel-1과 Sentinel-2 위성 영상을 사용하였으며, Mu et al. (2023)은 Geofen(GF)-2, GF-3 SAR 영상과 GF-5 위성 영상을 사용하여 산출한 토양 수분 함량이 현장 측정 자료와 68.38%의 상관도를 보이는 실험 결과를 제시하였다. 이와 같이 위성 기반의 토양 수분도 제작 알고리즘은 SAR 영상과 광학 영상을 모두 적용하여 산출하기 때문에 국내 고해상도 위성 영상인 KOMPSAT-3/3A와 KOMPSAT-5 자료를 동시에 적용하는 대표적인 사례가 될 수 있으나, 아직 이 두 영상을 적용한 연구는 국내외에서 발표된 경우가 없는 실정이다. 따라서, 이번 연구에서는 국내 고해상도 위성인 KOMPSAT-3/3A 광학 영상과 KOMPSAT-5 SAR 영상을 이용하여 연구 지역의 정밀 토양 수분도를 산출하였다. 또한, 산출물의 정확도 검증 비교를 위해 전파 방사선을 이용하여 토양 수분도를 측정하는 SMAP 위성의 토양 수분 정보와 정량적으로 비교하여 결과를 분석하였다.

## 제 2 장 토양 수분도 관측 자료

### 제 1 절 토양 수분도 관측 방법

수문기상학적 분야에서 재해는 대개 홍수 또는 가뭄을 의미한다. 두 상황 모두에서 토양의 수분 상태는 지표수와 에너지 플럭스의 분포를 조절하는 데 있어서 매우 중요한 역할을 한다 (Koster et al., 2004). 특히, 홍수 예측 분야에서는 홍수 전의 수분 포화도와 관련된 토양 수분 상태와 유역 내의 공간 분포를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 홍수 예측 외에도 가뭄 식별 (Anderson et al., 2012; Nicolai-Shaw et al., 2017; Peng et al., 2019) 및 가뭄 지수 개발 (Martinez-Fernandez et al., 2016; Sadri et al., 2018;)에 사용될 수 있으며, 프로세스 기반 가뭄 예측 모델 평가 및 개선 (Bolten and Crow, 2012; McNally et al., 2017)이 가능하다. 이러한 많은 연구에서 토양 수분 상태를 고려한 재해 예측을 향상시키려는 시도가 이루어지고 있으나, 국내에서는 적합한 토양 수분도 계측기술과 체계화가 부족하여 제한된 지점에서 소극적인 관측만이 이루어지고 있는 실정이다 (이용준 외, 2020). 또한, 지점규모와 대규모 공간 해상도를 가진 토양 수분도를 연계 가능한 중규모 단위 관측망의 관측소 부족으로 다양한 분야에서의 토양 수분도 활용에 있어 많은 어려움이 존재한다.

먼저, 지점규모(Point scale)관측 기술로는 중량법, 유전율식 방법, 장력계나 저항블록을 이용한 방법, 중성자 검출기를 이용한 방법 등이 존재한다 (이용준 외, 2020). 지점규모 관측은 주로 토양과 센서의 직접적인 접촉이나 시료 채취 등을 통하여 조사 지점 부근에서만 토양 수분도를 측정할 수 있는 기술이다. 이러한 지점규모 관측 기술은 개별 지점 또는 소규모 지역에 대한 정보만을 제공하므로 대규모 지역의 수분 상태를 파악하는 데 있어서 제한적이다. 또한, 토양은 지역에 따라 상당한 공간 변동성을 가질 수 있으며 한 지점에서 얻은 결과는 대표성을 갖기 어렵다는 단점이 있다. 지점규모 관측은 특정 지점의 특정 시간에 대한 정보만을 제

공하므로 동적인 변화나 시간 경과에 따른 토양 수분도 변화를 파악하는데 있어서 어려움이 있으며 여러 지점에 관측소를 설치하고 유지하는 것은 비용과 인프라 구축의 어려움이 있다. 그리고 특정 지점규모 관측은 특정 토양 유형에 대해서만 적용이 가능하거나 정확도가 떨어질 수 있으며 수동적인 데이터 수집이 필요할 수 있는 관계로, 실시간으로 데이터 수집, 활용 부분에서 제약이 따른다. 토양은 각기 다른 특성을 가지고 있는 반면, 일부 센서는 특정 환경 조건이나 토양 특성에 민감하여 이로 인해 정확도와 신뢰성에 오차가 존재할 수 있다.

중규모(Field scale) 관측 기술은 위성 영상 검보정 시 생기는 오차를 중규모 관측 자료를 이용하여 차이를 줄이는 방법이다. 중규모 관측 기술로는 우주 중성자(Cosmic-Ray neutron probe, CRNP)를 이용한 방법, GPS(GPS interferometric reflectometry, GPS-IR) 방법, 감마선을 이용하는 방법, 전자기유도방법(Electromagnetic Induction Method, EMI 방법), 자기공명영상법(Magnetic Resonance Imaging, MRI 방법) 등이 존재한다. 이러한 중규모 관측 기술들은 토양 수분 상태를 평가하고 지속적으로 모니터링하여 농업 생산성 향상, 환경 보전, 수자원 관리 등에 기여할 수 있으나, 몇 가지 단점이 존재한다.

일부 중규모 관측 기술은 설치 및 유지보수에 상당한 비용이 소요되며 고가의 센서나 장비, 전력 공급 시스템, 데이터 수집 및 처리 장비에 대한 투자가 필요하며, 전문 지식이 필요한 기술들은 설치 및 운영이 복잡할 수 있으며 특별한 교육이나 기술 지원이 필수적이라는 단점이 존재한다. 또한, 중규모 관측 기술은 공간 해상도의 제한으로 대규모 지역에 대한 상세 정보를 얻기에는 제한적이며 측정된 데이터가 많은 경우 처리와 분석이 복잡할 수 있으며 실시간 데이터를 처리하고 활용하는 데 있어서 인프라가 매우 부족하다. 이러한 단점으로 인해 활용성이 높은 위성 정보를 활용한 토양 수분도 산출 기법인, 전 지구적 규모(Global scale)의 관측 기술이 꾸준히 연구되고 있다. 원격탐사 기술로 얻은 토양 수분도는 장기간 강수량이 없거나 증발산량 증가로 인한 농업 가뭄을 분석하는 데 사용될 수 있다. 지역적 규모에서 가뭄 반응은 식생의 구성과 피복의 차이로 인해 공

간 다양성이 매우 높다. 따라서 고해상도 토양 수분 관측 자료에 대한 수요가 꾸준하며 토양 수분 관측 자료는 농업에 있어 필수적인 기초 자료로 알려져있다. 특히, 고해상도 토양 수분 관측 자료의 가용성은 개별 밭 규모와 같은 정밀 농업의 응용, 작물 수확량 모델링 개선에 있어 필수적이다 (Dabrowska-Zielinska et al., 2007; Varstraeten et al., 2010).

## 제 2 절 토양 수분도 관측 위성

미국이나 유럽과 같은 선진국에서는 오래전부터 원격탐사 기술을 활용한 토양 수분 산출 기법의 중요성을 인지하여 토양 수분도를 관측하는 많은 인공위성들이 개발되었다. [표 2-1]은 전 세계의 토양 수분 관측 위성 정보를 정리한 표이다.

[표 2-1] 토양 수분 관측 위성과 정보

	AMSR-2	ASCAT	ESA CCI	SMOS	SMAP	천리안 위성
<b>제품명</b>	AU_Land_NRT_R02	ASCAT Soil Moisture Products	ESACCI-SOILMOISTURE-L3S-SSMS-ACTIVE	Level 2 Soil Moisture, Vegetation Optical Depth and Ancillary Land product	SMAP L4 Soil Moisture Analysis Update, version7	gk2a_ami_le1b_vi006_ko0051c_skorea_202311230058.nc
<b>설 명</b>	NRT AMSR2 Unified L2B Half-Orbit 25 km EASE-Grid Surface	ASCAT(Advanced Scatterometer) Soil Moisture Products	This dataset was produced with funding of the ESA CCI+ Soil Moisture	SMOS L1 and L2 Science data	Soil Moisture Active Passive Data (SMAP)	gk2a(위성)_ami(센서명)_le1b(자료레벨)-ir087(자료종류)_ea020lc

	Soil Moisture Beta Version 2		project: ESRIN			(영역/해상도/도법) _YYYYM MDDHHM I(관측시간, UTC 기준) .nc (확장자)
<b>데이터 제공 기간</b>	2012-05-- 18 ~현재	2007-01-0 6 ~ 현재	1991-08- 05 ~ 2022-12- 31	2010-01- 12 ~ 현재	2015-03- 31 ~ 현재	2019-07- 25 ~ 현재
<b>공간 해상도</b>	25*25km	25*25km	25*25km	평균 43km	3~36km	가시광선: 1km 적외선: 4km
<b>플랫폼</b>	GCOM -W1	CCM (Climate Change Initiative - Soil Moisture)	ERS-1, ERS-2, METOP-A , METOP-B	ESA (Europea n Space Agency)	GEOS-5, SMAP	국가기상 위성센터
<b>데이터 제공 형식</b>	45MB (HDF-EOS 5), 35MB (NetCDF/ CF)	NetCDF (Network Common Data Form)	NetCDF4	EEF, NetCDF	HDF5	텍스트 (asc), 이 진(bin, h5, he5, NetCDF), 영상(png)

<b>데이터 센터</b>	NASA/MS FC /AMRSIP S /LANCE	CCI Open Data Portal	TU Wien (AUT); VanderSa tB.V. (NL), Planet Labs (NL); CESBIO (FR); EODC GmbH(AU T)	CCI Open Data Portal	National Snow and Ice Data Center	기상청 국가기후 데이터 센터
<b>제공 범위</b>	(89.24°, 180.0°), (-89.24°, -180.0°)	(90.0°, 180.0°), (-90.00°, -180.0°)	(90.0°, 180.0°), (-90.00°, -180.0°)	(90.0°, 180.0°), (-90.00°, -180.0°)	(85.044°, 180.0°), (-85.044°, -180.0°)	전구, 동아시아, 한반도

## 1. AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2)

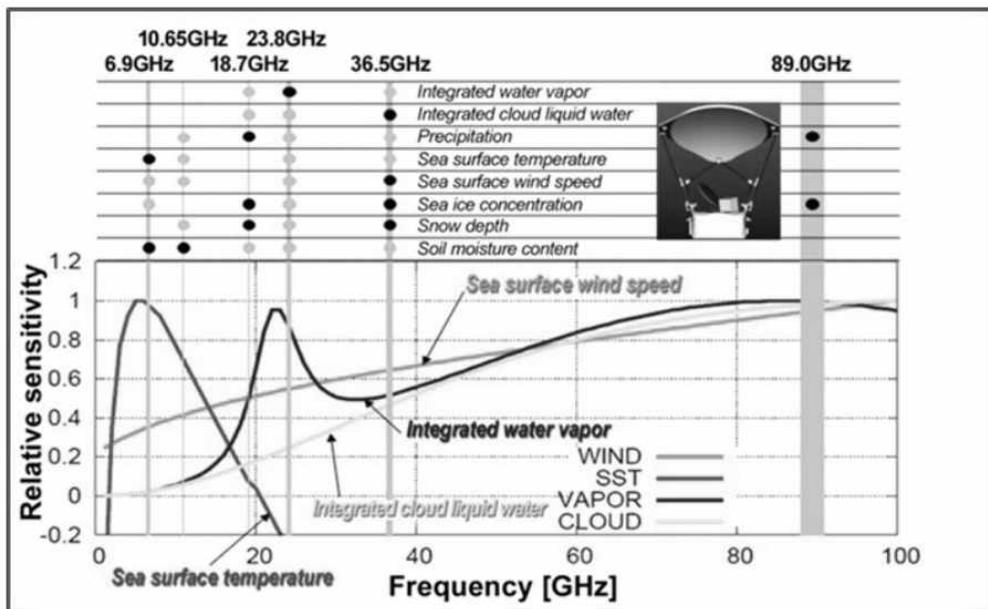
AMSR-2는 일본 항공 우주 탐사국(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)의 GCOM-W1(Global Change Observation Mission-Water 1)에 탑재된 센서 중 하나로 지구의 대기, 수문, 토양, 해빙 등 다양한 환경 요소를 측정하는 데 사용된다. 이 센서는 GCOM-W1 위성이 발사된 2012년 5월 18일 이후부터 지속적으로 운영되고 있으며 AMSR-2는 다양한 주파수에서의 마이크로파를 이용하여 지구의 표면에서 방출되는 복사 세기를 측정한다. 이를 통해 대기 중 수증기, 구름, 강수량, 토양 수분도, 해빙 등의 정보 파악이 가능하다.

AMSR-2는 지구 상공 약 700km에서 마이크로파 방출 및 산란 강도를 정확하게 측정하며 AMSR-2의 안테나는 1.5초에 한 번씩 회전하여 1450km의 범위에 걸쳐 데이터를 수집한다. 이러한 매커니즘을 통해 AMSR-2는 2일마다 지구의 99% 이상을 커버하는 주간 및 야간 데이터 세트의 자료 수집이 가능하다. 또한, AMSR-2 NRT 제품군은 위성 관측 후 3시간 이내에 LANCE를 통해 사용자가 사용 가능하도록 제공되고 있다. AMSR-E/AMSR-2 Unified Level-2B 육상 제품은 AMSR-E와 AMSR-2 데이터를 결합하여 장기 데이터 기록을 제공한다. 이 데이터 세트에는 25km Equal-Area Scalable Earth Grid(EASE-Grid)에 연결된 보조 정보와 함께 정규화 차이 식생 지수(Normalized Difference Vegetation Index, NPD) 및 토양 색인(Soil Color Index, SCA)을 사용하여 L1R(Level-1 Reflectance) 밝기 온도에서 파생된 표면 토양 수분 추정치를 포함하여 제공한다. [그림 2-1]은 토양 수분도를 관측하는 AMSR-2 센서의 사양 및 제품을 설명하는 그림이다.

## 2. ASCAT (Advanced Scatterometer)

ASCAT는 유럽 우주정보국 (European Space Agency ,ESA)에서 운영하는 위성에서 토양 수분 측정에 사용되는 센서이다. ASCAT은 지표면의 육지 및 해수에서 풍속 및 풍향 정보를 수집하는데 사용된다. 이 데이터는 기상 예측, 해양 및 대기 모니터링, 재해 관리, 농업 및 환경 모니터링과 같은 다양한 분야에서 활용이 가능하다.

ASCAT은 ESA의 EUMETSAT 계열의 기상 위성인 Metop 위성 시리즈에 탑재되어 있다. 공간 해상도는 25km로 저해상도 제품군이 존재하며, 특정 간격으로 데이터를 수집한다. 이는 특정 지역의 특정 시간 간격에서 수집되며, 일반적으로 2일에서 3일 주기로 촬영한다.



[그림 2-1] AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) 센서의 사양 및 제품  
([https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about\\_amsr2.html](https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about_amsr2.html))

### 3. ESA CCI (European Space Agency Climate Change Initiative)

ESA CCI는 유럽 우주정보국에서 시작된 기후 변화에 대한 프로젝트이다. 이는 기후 변화와 관련된 여러 지구 관측 데이터를 통합하고 분석하여 기후 변화에 대한 이해를 개선하고자 설계되었다. ESA CCI에서 제공하는 토양 수분도 정보는 v08.1 버전이 가장 최근에 개설되었으며, 이 버전은 2022년 12월 31일까지의 데이터를 포함하고 있다. 또한, Triple Collocation Analysis를 통해 얻은 불확실성 추정 및 병합 가중치가 계절별로 생성되었으며, 토양 수분 검출의 계절적 오류를 더 잘 나타낸다. 이전 버전에서 별도의 실험제품으로 제공되었던 임시 끊김 보정 기능이 Combined에 포함되어 있으며 데이터를 읽고 이미지를 시계열로 변환하여 읽을 수 있는 파이썬 패키지를 제공하고 있다. 파이썬 패키지의 소스 코드와 설치 지침서는 [https://github.com/TUW-GEO/esa\\_cci\\_sm](https://github.com/TUW-GEO/esa_cci_sm) 에서 확인 가능하며, 패키지는 “pip install esa\_cci\_sm”을 사용하여 pip를 통해 설치가 가능하다.

### 3. SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)

SMOS는 ESA가 개발한 위성 기반 지구 관측 모델로 지구의 토양 수분 및 해수 염분 모니터링이 목적이다. 토양 수분과 해수 염분에 대한 정확한 지구 규모의 측정을 제공하여 지구의 수문학적 과정 및 기후 모델링에 기여하는 것을 목적으로 개발되었다. SMOS는 Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis (MIRAS)라는 특수 센서를 사용한다. 이 센서는 69개의 수신기를 사용하여 다양한 각도에서 한 영역의 입사 방사선의 위상차를 측정한다. 단일 수신기에 비해 정밀하게 측정이 가능하며, 지구 표면에서 나오는 마이크로파 방사선을 감지하여 토양 수분과 해수 염분에 대한 정보를 파악할 수 있다. MIRAS는 1.41GHz 주파수의 L-Band 전파를 감지하고 swath wide는 1050km 이상 관찰 가능하다. SMOS는 35~50km의 공간 해상도를 가지지만 지구 대기 모델에 토양 수분 맵을 제공하려면 50km의 해상도가 가장 적합하다.

#### 4. SMAP (Soil Moisture Active Passive)

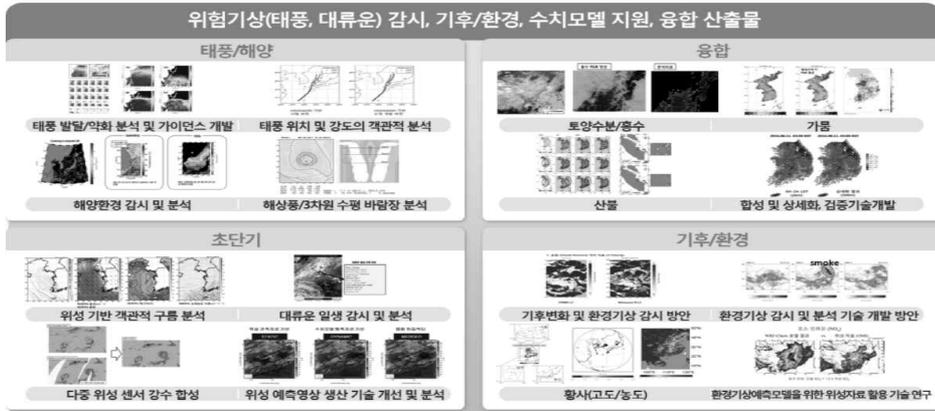
SMAP은 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 운영하는 토양 수분 관측 위성이다. 2015년 1월에 개발되어 2015년 3월 31일부터 작동하였으며 전파 방사선을 이용하여 표면에서의 수분에 따른 신호 변화를 측정함으로써 이를 통해 시간 지구 표면의 토양 수분도를 2~3일마다 측정하도록 설계되었다. 이는 토양규모에 따른 전 세계 변화 관찰이 가능하다. 측정된 데이터는 지구 전체에 걸친 토양 수분의 변동을 추적하고 모니터링이 가능하다. SMAP은 지구 표면의 토양 수분도를 정확하게 측정하여 농업 생산성, 수자원 관리, 홍수 예측, 기후 변화 연구 등 다양한 분야에서 유익한 정보 제공을 목적으로 설계되었다.

SMAP은 3~36km의 제품군을 제공하며 4가지 수준의 데이터 처리를 나타내는 24개의 데이터를 배포한다. Level-1 제품은 기본 원시 데이터를 나타내며 주로 원시 센서 측정값과 같은 물리적인 측정치를 포함하고 있다. Level-2 제품은 Level-1 데이터에서 나온 미처리 데이터를 포함하고 있으며 이는 대부분의 센서 특성 및 오류 수정이나 보정된 데이터를 제공한다. Level-3 제품은 공간, 시각적으로 집계된 데이터를 제공하며 여러 측정값이 결합되어 지역 또는 대역적인 특성을 나타내는 데이터이다. Level-3 제품은 오차율이 4% 이내로 매우 정확한 데이터를 제공하고 있다. Level-4 제품은 표면 토양 수분(0~5cm) 제품과 뿌리 영역 토양 수분(0~100cm) 및 표면 기상을 포함한 추가 연구 제품을 제공한다.

## 5. 천리안 위성 2A호 (Geo-KOMPSAT-2A)

천리안 위성 2A호는 한국 항공 우주연구원 (Korea Aerospace Research Institute, KARI)에서 개발한 위성으로 기상 관측과 환경 모니터링을 위해 설계되었다. 천리안 위성 2A호의 다른 말은 Geo-KOMPSAT-2A 위성으로 대기, 해양, 지구 표면 등의 다양한 환경 요소를 모니터링하고 기상 예측에 필요한 데이터를 수집한다.

다양한 센서 및 장비를 탑재한 천리안 위성 2A호는 대한민국의 기상 위성 중 하나로, 한반도 상공에서 관측을 수행한다. 2018년 12월에 발사된 천리안 위성 2A호는 2분 간격으로 한반도 주변을 관측하고, 10분 간격으로 전구 관측이 가능하며 이를 통해 태풍의 중심 위치, 집중호우 탐지, 산불, 황사 등 다양한 관측정보를 제공하고 있다. 천리안 위성 1호와 비교하였을 때, 기존 5개의 채널에서 16개의 채널로 다양한 관측이 가능해졌으며, 이를 기반으로 총 52종의 기상 산출물을 생산하고 있다. 또한, 천리안 위성 2A호에 탑재된 고성능 기상센서(Advanced Microwave Imager, AMI)를 이용하여 정확한 관측이 가능하다 (<https://nmsc.kma.go.kr/homepage/html/base/cmm/selectPage.do?page=static.satellite.introGk2a>). [그림 2-2]는 천리안 위성 2A호의 산출물 정보를 정리한 것이다.



[그림 2-2] 천리안 위성 2A호 (Geo-KOMPSAT-2A)의 융합 산출물 정보  
<https://nmssc.kma.go.kr/homepage/html/base/cmm/selectPage.do?page=static.satllite.introGk2a>

## 제 3 장 정밀 토양 수분도 제작

### 제 1 절 연구 자료 및 제작 방법

앞서 정리한 토양 수분 관측 위성 및 데이터는 전 지구 모델이나 광역 토양 수분 변화 분석에는 매우 유용한 정보를 제공하지만, 작은 범위의 복잡한 지형을 갖는 지역에서 직접 활용하기에는 어려운 실정이다.

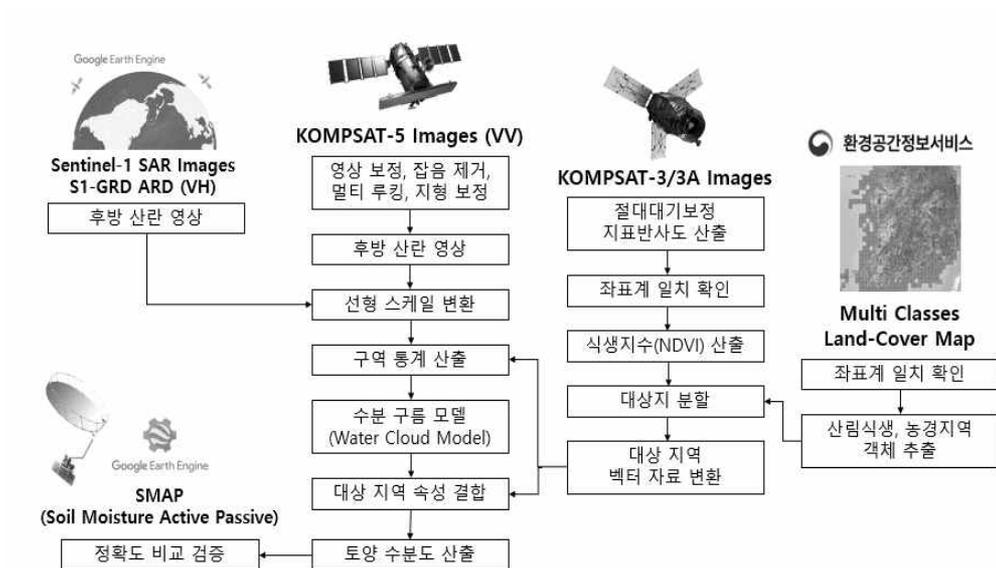
따라서, 이 연구에서는 국내 고해상도 위성 영상인 KOMPSAT-3/3A, KOMPSAT-5 SAR 영상과 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지 피복 자료를 사용하여 정밀 토양 수분도를 제작하고자 하였다. [그림 3-1]은 이 연구에서 적용한 정밀 토양 수분도 제작 절차와 산출물 적용 실험 과정이며, [표 3-1]은 연구에서 활용한 데이터를 정리한 표이다. 기복이 심한 지역에서의 다중 산란 효과 및 감쇠 현상과 비 식생 지역에서의 오차 발생을 최소화하기 위하여 완만한 지표의 농림 식생 지대를 시험 연구 지

역으로 선정하였으며, KOMPSAT-3A와 KOMPSAT-5 SAR 영상이 중복되어 촬영된 지역을 연구 지역으로 선정하였다. 이러한 조건을 만족하는 시험 연구 지역은 벼 재배 지역인 김제평야 지대가 적합한 것으로 나타났다. [그림 3-2]는 시험 연구 지역은 김제평야 연구 지역을 나타낸 그림이다. 이 연구에서 적용한 지표 반사도 산출 소프트웨어 (Kim and Lee, 2021)은 KOMPSAT-3와 KOMPSSAT-3A 영상 모두 처리 가능하나, 동일한 시기에 김제 연구 지역을 촬영한 영상은 KOMPSAT-3A 영상만 존재하므로 KOMPSAT-3 영상은 제외하였다. 이 연구에서는 다른 해외 외부영상 없이, KOMPSAT-3/3A 영상과 KOMPSAT-5 SAR 영상을 활용하여 시범 지역에 대하여 토양 수분도를 제작하고자 하였으며, 토지 피복 자료 또한 국내 환경부에서 제공하는 환경공간정보서비스의 토지 피복 자료를 사용하여 시범 지역에 관한 정밀 토양 수분도를 산출하고자 하였다.

정확도 검증을 위해 산정된 결과를 L-Band의 radiometer와 radar 센서로 관측한 SMAP 토양 수분 자료와 정량적으로 비교하고자 하였다. 비교에 사용한 SMAP 영상은 Level-3, Level-4 영상을 사용하였으며, 공간, 시각적으로 집계된 데이터를 제공하며 여러 측정값이 결합되어 지역 또는 대역적인 특성을 나타내는 데이터와 오차율이 4% 이내로 매우 정확한 데이터를 사용하여, 보다 정확하게 비교하고자 하였다. [그림 3-3]은 Lee et al. (2023)의 연구에서 사용된 SAR 영상 기반으로 토양 수분 산출을 위한 WCM 산출 식과 매개변수를 정리한 것이다. 이 방법은 Attema and Ulaby (1978)와 Baghdadi and Zribi (2016)의 연구를 기반으로 하고 있다.

[표 3-1] 정밀 토양 수분도 활용 데이터

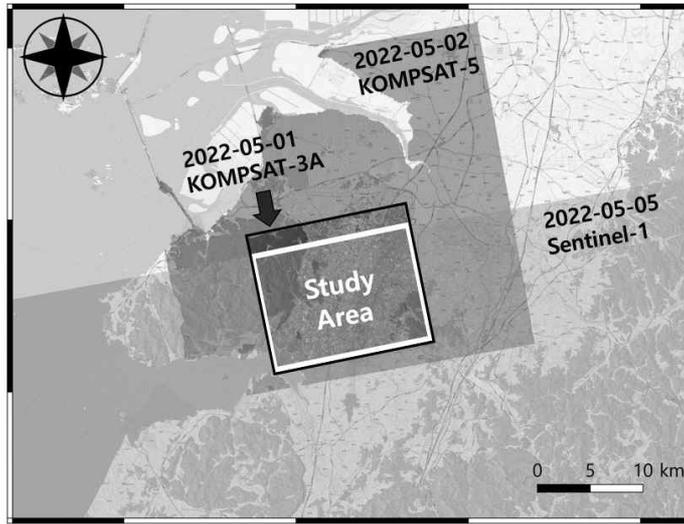
	KOMPSAT-3/3A	KOMPSAT-5	Sentinel-1	Land cover
활용 데이터	2022-05-01 KOMPSAT-3A	2022-05-02 KOMPSAT-5	2022-05-05 Sentinel-1A	환경공간정보서비스 2022년 중분류 토지피복자료



[그림 3-1] 정밀 토양 수분도 제작 절차와 산출물 적용 실험 과정

126.3546620757, 35.8905063125

127.0680474147, 35.8905063125



126.3546620757, 35.4680309044

127.0680474147, 35.4680309044

[그림 3-2] 정밀 토양 수분 산출을 위한 김제평야 시험 연구 지역

**Water Cloud Model (WCM)**

$$\sigma^0_{tot} = \sigma^0_{veg} + T^2 \sigma^0_{soil}$$

$$\sigma^0_{veg} = A.V_1.Cos \theta (1 - T^2)$$

$$T^2 = Exp (-2.B.V_2.sec \theta)$$

$$\sigma^0_{soil} = C(\theta) exp (D.M_v)$$

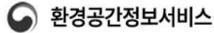
- $\sigma^0_{tot}$ : 총 후방산란 레이더 신호 (선형 단위)
- $\sigma^0_{veg}$ : 식생 성분 요소 (선형 단위)
- $T^2$ : 2 방향 감쇠 요소
- $\sigma^0_{soil}$ : 토양 성분 요소 (선형 단위)
- $V_1 = V_2$ : 식생 자료 (NDVI)
- $\theta$ : 레이더 입사각
- $A, B$ : 식생 성분과 레이더 매개 변수
- $M_v$ : 토양 수분 함량 (Vol.%)
- $C$ : 지표면 거칠기와 입사각 매개 변수
- $D$ : 레이더 구성에 따른 나지 토양 성분의 토양 수분 함량에 대한 레이더 신호 민감도 매개 변수

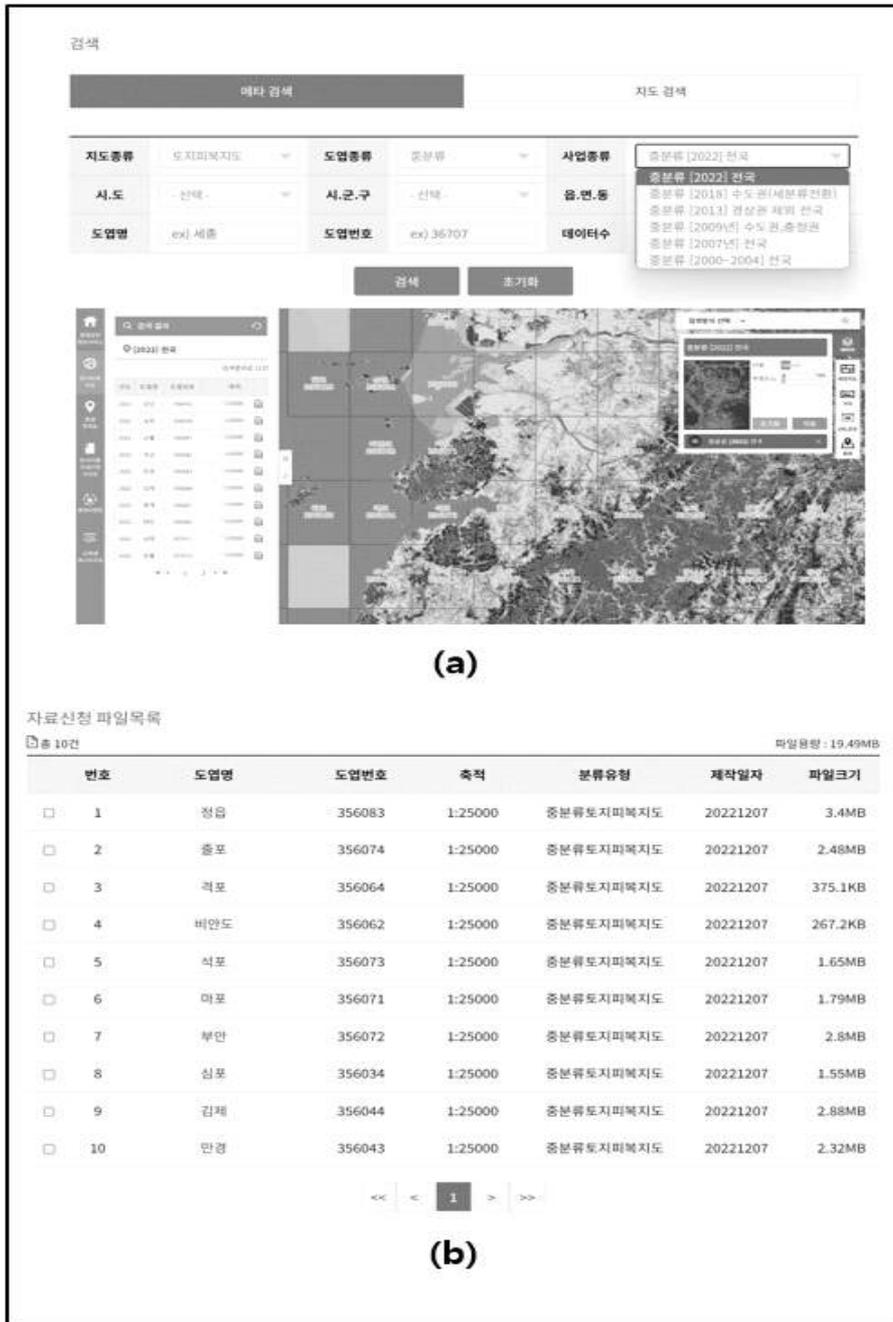
[그림 3-3] WCM (Water Cloud Model) 산출식 및 매개변수

## 1. 토지 피복 자료

연구에 사용한 토지 피복 자료는 환경부에서 제공하는 국내 토지 피복도로 대분류, 중분류, 세분류 세 가지로 제공하고 있다. [표 3-2]는 대표적인 토지 피복 자료를 제공하고 있는 플랫폼 및 정보를 정리한 표이다. 먼저, ESRI에서 제공하는 토지 피복 자료는 Sentinel-2 광학 영상을 사용하여 제작되었으며 2017년부터 현재까지 데이터를 제공하고 있으며 Geotiff 파일 형식으로 제공받을 수 있다. USGS (United States Geological Survey)에서 제공하는 토지 피복 자료는 Landsat-TM 광학 영상을 사용하여 제작되며 2001년부터 2021년도 자료를 제공하고 있다. USGS 자료 또한 Geotiff 형식으로 제공하며 공간 해상도가 30m로 정밀 토양 수분도 제작에는 적합하지 않다. 마지막으로, 이 연구에서 사용한 토지 피복도인 환경공간정보서비스의 자료는 대분류 30m, 중분류 5m, 세분류 1m 급으로 정밀 토양 수분도 제작에 매우 적합하다. 또한, 종류에 따라 Geotiff 파일 또는 Shapefile 형식으로 제공받을 수 있어 편리함도 갖추고 있다. [그림 3-4](a), (b)는 환경공간정보서비스에서 김제 연구지역에 관한 토지 피복 자료를 신청하는 방법을 정리한 것이다. 이번 연구에서 정밀 토양 수분도 제작에 중분류를 적용하였으며, 2022년도 자료를 활용하여 공간, 시간적 오차를 최소화하였다. [그림 3-5](a)는 해상도별 토지 피복 지도 비교를 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr/>)에서 정리한 표이며, (b)는 이 연구에서 사용한 중분류 토지 피복 자료의 22개 항목에 대해 정리한 표이다. 분류 코드를 통해 비 식생 지역을 제외한 식생 지역만을 분류하여 사용하였다.

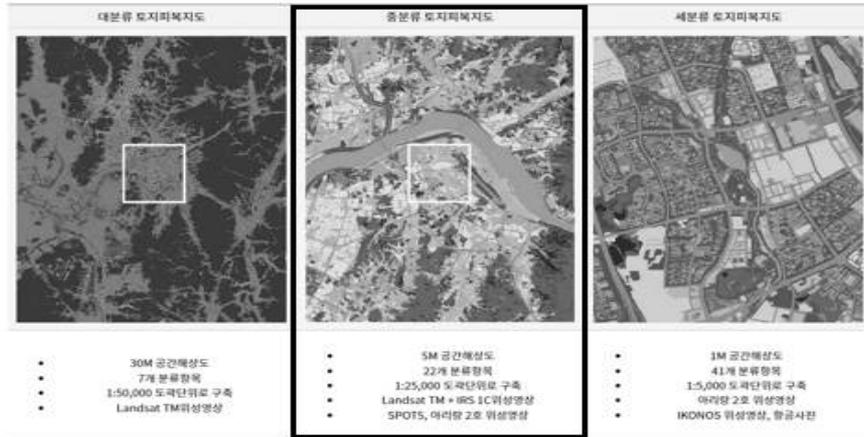
[표 3-2] 토지 피복 자료 제공 플랫폼 및 정보

			
플랫폼	ESRI (Environmental Systems Research Institute)	USGS (United States Geological Survey)	환경공간정보서비스
데이터 제공 형식	GeoTiff file	GeoTiff file	GeoTiff file, Shape file
위성 정보	Sentinel-2	Landsat-TM	대분류: Landsat-TM 중분류: STOT5, 아리랑 2호 Landsat-TM+IRS 1C 세분류: 아리랑 2호 IKONOS, 항공사진
데이터 제공 기간	2017년~현재	2001~2021년	1980년~현재
공간 해상도	10*10m	30*30m	대분류: 30*30m 중분류: 5*5m 세분류: 1*1m



[그림 3-4] 환경공간정보서비스에서 김제 연구지역에 관한 토지 피복 자료 신청 방법 및 신청 자료

해상도별 토지피복지도 비교



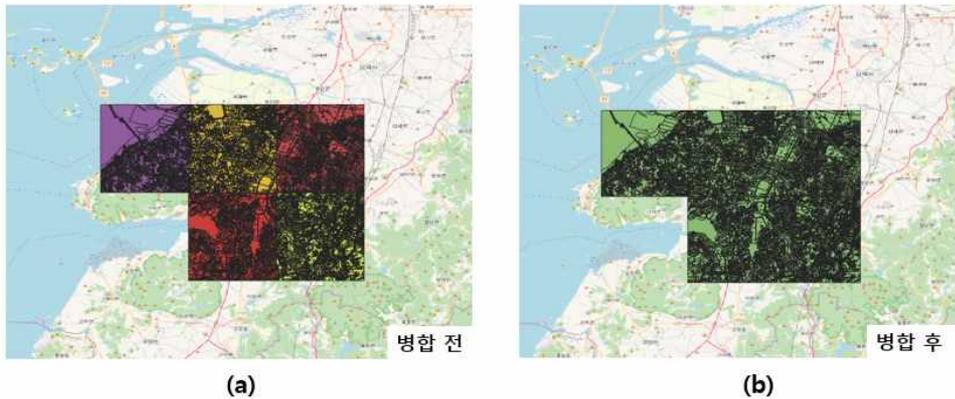
(a)

대분류 (7개 항목)						중분류 (22개 항목)						세분류 (41개 항목)					
분류항목명	분류 코드	분류 색상	색상 코드 R	G	B	분류항목명	분류 코드	분류 색상	R	G	B	분류항목명	분류 코드	분류 색상	R	G	B
시가지-건조지역	100	[Color]	255	0	0	습곡초지	110	[Color]	254	230	194	간동초지	111	[Color]	254	230	194
						농업지역	120	[Color]	192	132	132	농동초지	112	[Color]	233	193	111
						산림지역	130	[Color]	237	131	184	공업지역	121	[Color]	192	132	182
						농산·목축·축양지역	140	[Color]	246	113	136	임·습우지역	131	[Color]	237	131	184
						공용지역	150	[Color]	247	85	42	종합지역	132	[Color]	223	176	164
농업지역	200	[Color]	238	233	7	농산·목축·축양지역	160	[Color]	246	177	18	농림·농림·축양지역	141	[Color]	246	113	150
						논	210	[Color]	255	255	191	농림	151	[Color]	229	36	254
						밭	220	[Color]	247	249	102	밭만	152	[Color]	197	50	81
						사설농장지	230	[Color]	223	220	115	밭도	153	[Color]	252	4	78
						관수원	240	[Color]	184	177	44	도로	154	[Color]	247	85	42
습지 (수변식생)	500	[Color]	124	34	128	거담농장지	250	[Color]	184	145	18	거담·교동	155	[Color]	190	0	0
						농업수역	310	[Color]	51	160	44	관교초지	161	[Color]	246	117	18
						습곡수역	320	[Color]	19	79	64	목·농림지역	162	[Color]	255	122	0
						농포습지	330	[Color]	51	102	51	탄·농림지역	163	[Color]	199	86	27
						자연습지	410	[Color]	161	213	148	경지경리지역 안	211	[Color]	255	255	191
습지	400	[Color]	57	153	36	인공습지	420	[Color]	36	128	51	경지경리지역 안	212	[Color]	244	230	168
						내륙습지 (수변식생)	510	[Color]	180	167	208	경지경리지역 안	221	[Color]	247	249	102
						연안습지	520	[Color]	153	116	153	경지경리지역 안	222	[Color]	245	226	10
						자연 습지	610	[Color]	183	219	236	사설농장지	231	[Color]	223	220	115
						인공 습지	620	[Color]	159	242	255	관수원	241	[Color]	184	177	44
수역	700	[Color]	6	2	250	내륙수역	710	[Color]	62	167	255	농산·양식장	251	[Color]	184	145	18
						해양수역	720	[Color]	23	57	255	거담농장지	252	[Color]	170	100	0
						내륙수역	710	[Color]	62	167	255	농업수역	311	[Color]	51	160	44
						해양수역	720	[Color]	23	57	255	습곡수역	321	[Color]	19	79	64
						해양수역	720	[Color]	23	57	255	농포습지	331	[Color]	51	102	51

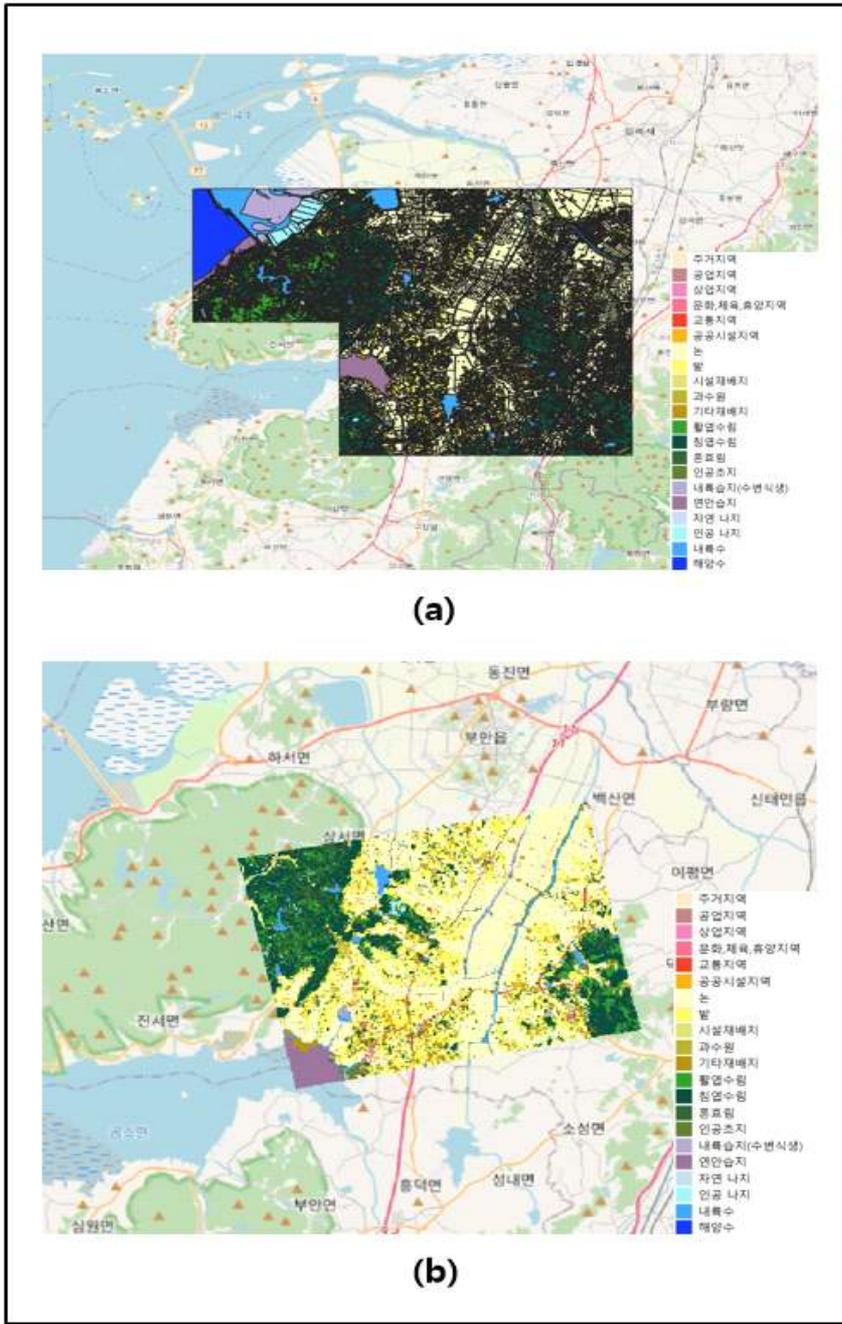
(b)

[그림 3-5] (a) 해상도별 토지 피복 지도 비교, (b) 이 연구에서 사용한 중분류 토지 피복 자료 항목 (환경공간정보서비스 제공 <https://egis.me.go.kr/>)

[그림 3-6]은 김제 연구지역에 포함된 5개의 도엽의 중분류 토지 피복 자료의 모습이다. (a)는 병합 전의 모습이며, (b)는 처리에 사용하기 위해 벡터 레이어 병합을 수행한 모습이다. [그림 3-7](a)는 토양 수분도 산출 전 김제 연구지역의 토지 피복 정보를 정밀하게 보기 위해 환경공간정보서비스에서 지정한 분류 코드를 사용하여 분류 색상 값과 분할 항목명으로 정리한 모습이다. (b)는 김제 연구지역에 해당하는 값만을 사용하기 위해 공통지역으로 Clipping 처리하여 나타낸 것이다. 김제 연구지역으로 자른 후 확인해보았을 때, 김제 연구지역의 토지 피복은 대부분 논과 밭으로 이루어져있는 농림 지역으로 확인되었다. 토양 수분 알고리즘은 기본적으로 농림 지역 및 식생 지역의 토양 수분도 산출에 최적화되어 있어 연구 지역으로 매우 적합하다. 이 연구는 이러한 대상 지역 내 포함된 농림 식생 객체를 추출하여 사용하였다.



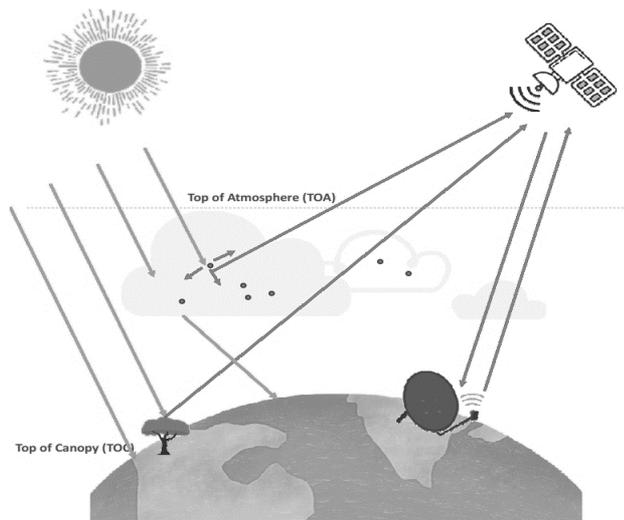
[그림 3-6] (a) 김제 연구지역의 토지 피복 자료,  
(b) 처리에 사용하기 위해 병합한 레이어 그림



[그림 3-7] (a) 다운받은 토지 피복 자료 분할 항목명과 분류 색상 정리, (b) 김제 연구지역으로 Clipping 처리한 토지 피복 모습

## 2. 지표 반사도 (Surface Reflectance) 적용

대기 보정 (Atmospheric correction)은 원격탐사에서 항공기나 위성으로 지표면을 관측할 때, 광파나 전자기파가 대기 입자에 의해 흡수되거나 산란 되면서 영상에 발생하는 왜곡을 보정하는 과정이다. 즉, 대기를 통과 하는 빛의 경로는 빛이 대기를 통해 지구로 이동하면서 파장에 따라 산란을 겪고 변화한다. 빛은 지구 표면에서 확산되어 지구 대기를 통해 다시 이동하여 더 많은 산란 효과를 내는 것을 대기 보정을 통해 제거할 수 있다. 대기 보정에는 대기 상단 반사도 (Top of Atmosphere, TOA)와 지표 반사도 (Top of Canopy, TOC)가 존재한다. [그림 3-8]은 TOA와 TOC 과정을 정리한 그림이다. TOA는 센서 이득, 태양 복사 조도, 분광 반응 수치 등을 고려하여 산출물이 만들어지고 TOC는 TOA의 반사도에 대기의 광학 두께, 대기 압력, 수증기량, 오존량, 에어로졸 가스의 구성 및 양 등의 값들이 추가로 이용된다. KOMPSAT-3/3A 위성과 같은 광학 영상을 이용할 때에는 정밀 처리를 위해 지표 반사도 처리는 필수적이다.



[그림 3-8] 대기 상단 반사도 (Top of Atmosphere, TOA)와 지표 반사도 (Top of Canopy, TOC) 과정

[그림 3-9]는 이 연구에서 적용한 지표 반사도 식을 정리한 그림이다. 이 연구에서 사용한 지표 반사도 산출 시스템 (Kim and Lee, 2021)은 정확도 95% 이상으로 검증 완료된 소프트웨어를 사용하였다. 지표 반사도 처리에 필요한 파라미터 값은 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성이 측정한 값을 사용하였다. MODIS 위성은 대기, 해양, 지표, 구름, 온실가스, 먼지 등 지구의 다양한 환경 변수들을 관측하는 위성이다. MODIS는 NASA가 개발한 광학 센서로 대기 및 지표를 관측하며 Terra 및 Aqua 위성에 장착되어 운용된다. Terra 위성은 1999년, Aqua 위성은 2002년도에 발사되어 현재까지 운용되고 있으며 두 위성은 궤도 고도와 태양 동기 궤도를 갖고 있어 지구의 다양한 지역을 전체적으로 관측할 수 있다. MODIS에서 추출한 값으로는 대기 광학 두께 (Aerosol Optical Depth, AOD), 수증기량 (Water Vapor Amount), 오존량 (Ozone Amount), 대기 압력 (Atmosphere Pressure)이다. MODIS-04와 MODIS-07 위성 데이터를 활용하였으며, 특히 MODIS 04의 대기 광학 두께 데이터는 딥블루 알고리즘 (Deep-Blue algorithm)을 활용하여 산출한 데이터를 사용하였다. 딥블루 알고리즘은 MODIS가 측정한 지구 표면의 센서 데이터에서 적외선과 가시광 대역의 정보를 추출한 후, 대기 중의 다른 성분에 의해 왜곡된 신호를 제거하고 대기 중 에어로졸 특성을 분리한다. 이후, 에어로졸의 광학 두께를 계산하여 대기 중에 미세 먼지의 양을 추정한다. 추정된 에어로졸 양에 대한 평가를 수행하고 보정 작업을 진행하여 정확도를 향상시킨다. 딥블루 알고리즘은 에어로졸의 고도, 크기 분포, 화학적 구성 등에 대한 정보를 산출하며, 이는 대기 연구, 환경 모니터링, 기상 예측 등 다양한 응용 분야에서 활용되며 데이터의 정확도를 향상시킨다. [표 3-3]은 이 연구에서 적용한 MODIS에서 추출한 파라미터 값을 정리한 표이며, [그림 3-10](a),(b)는 MODIS 영상 다운로드 과정을 정리한 그림이다.

$$L_\lambda = Gain \times (DN) + Offset$$

$$\rho_{\lambda, TOA} = \frac{\pi L_\lambda d^2}{(ESUN_\lambda) \cos \theta_s}$$

$$\rho_{TOC} = \frac{\frac{\rho_{TOA} - \rho_{atm}}{T(\mu_s)T(\mu_\gamma)t_g}}{1 + S \frac{\rho_{TOA} - \rho_{atm}}{T(\mu_s)T(\mu_\gamma)t_g}}$$

Gain and Offset are the sensor's characteristics, and DN is the digital number.

$\rho_\lambda$  represents the TOA reflectance on the satellite image band wavelength, and  $d$ ,  $ESUN_\lambda$ , and  $\theta_s$  represent the Earth-sun distances, the mean solar spectral irradiance, and the solar zenith angle, respectively.

$\rho_{TOC}$  and  $\rho_{TOA}$  are the reflectance of TOC and TOA, respectively, and  $\rho_{atm}$  represents the intrinsic atmospheric reflectance.  $S$  is a correction constant, and  $T(\mu_s)$ ,  $T(\mu_\gamma)$ , and  $t_g$  represent downward transmittance, upward transmittance, and the albedo of the atmosphere, respectively.

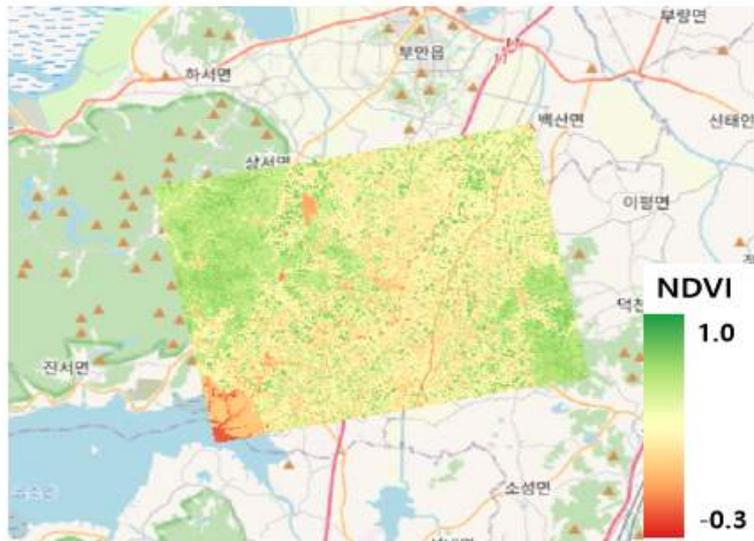
[그림 3-9] 지표 반사도 산출 시스템 (Kim and Lee, 2021)

[표 3-3] 이 연구에서 적용한 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 파라미터

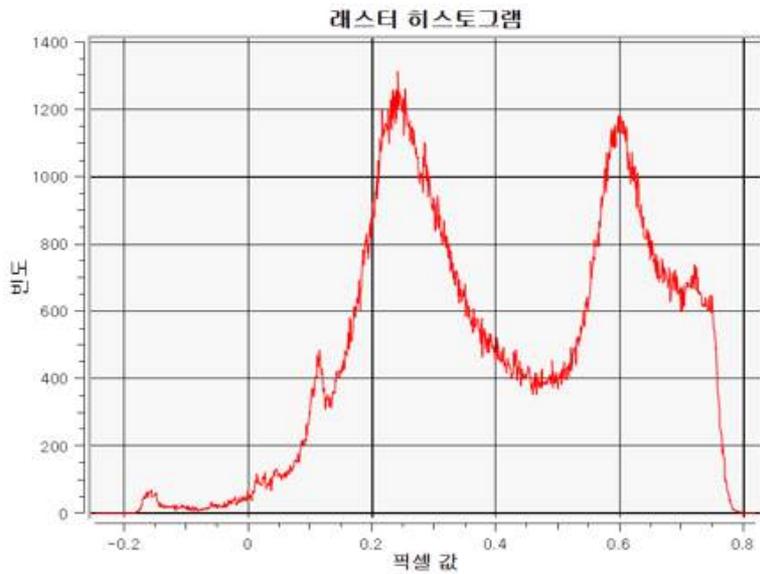
	AOD (Aerosol Optical Depth)	Water Vapor Amount (g/cm2)	Ozone Amount (cm-atm)	Atmospheric Pressure (hPa)
MODIS 04	0.35	-	-	-
MODIS 07	-	0.43	1.2	1016



[그림 3-10] (a) MODIS 데이터 검색 과정, (b) MODIS 데이터 검색에 필요한 검색 연구지역 적용 과정  
 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)



(a)

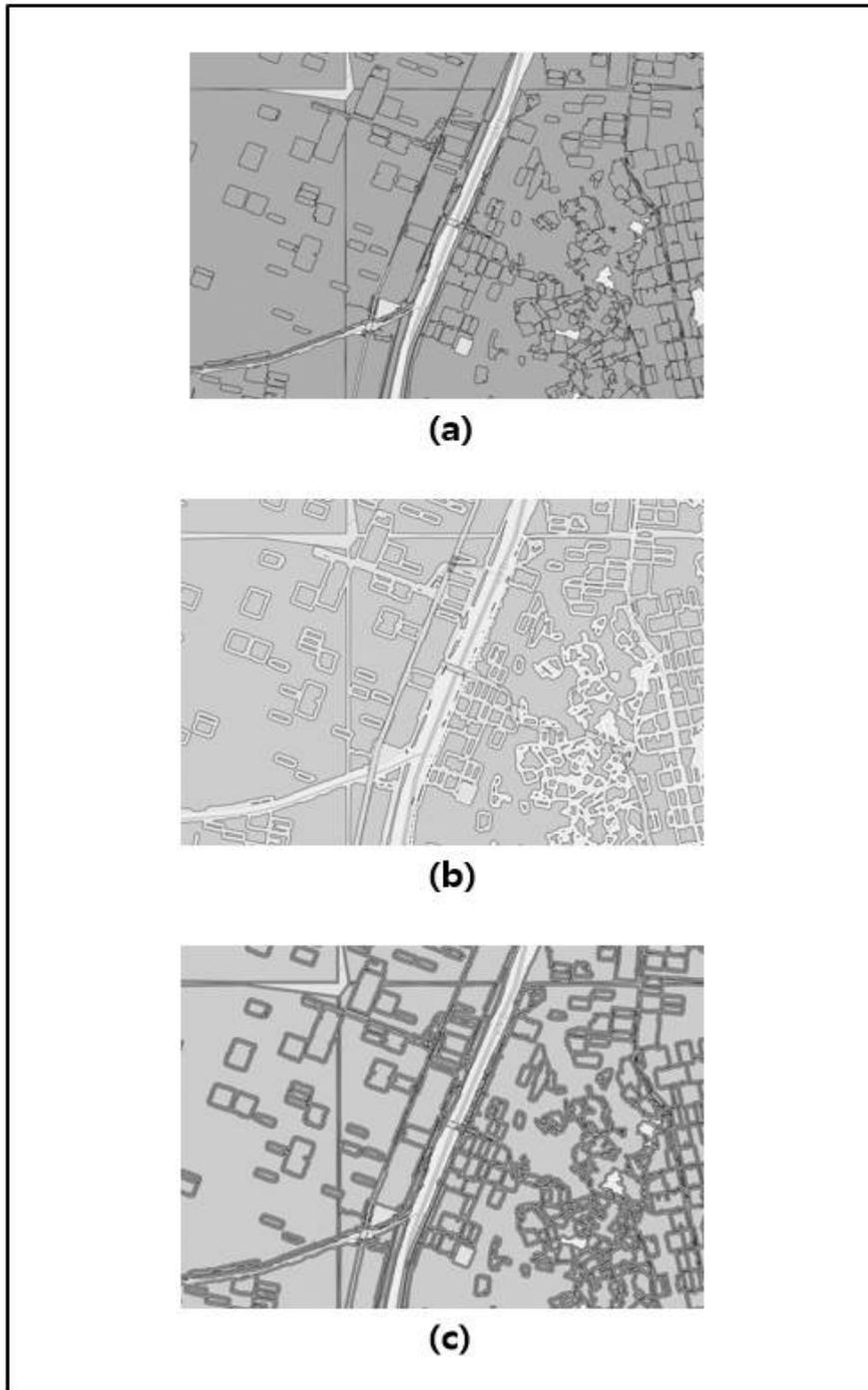


(b)

[그림 3-11] (a) 지표 반사도 적용 완료한 KOMPSAT-3A 영상의 NDVI 산출 모습, (b) KOMPSAT-3A NDVI 영상의 래스터 히스토그램 그래프

[그림 3-11](a)는 2022년 5월 1일에 촬영된 KOMPSAT-3A 광학 영상에 지표 반사도 적용 완료하여 정규 식생 지수 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 산출 완료한 모습이다. NDVI는 -1에서 +1의 값을 가지지만, 김제 연구지역의 경우, 대부분이 농림 식생 지대이기 때문에 -0.2에서 +0.8 사이의 값이 가장 많은 관계로 -0.3에서부터 +1.0의 범례로 나타내었다. [그림 3-11](b)는 산출한 NDVI 영상의 래스터 히스토그램 그래프이다.

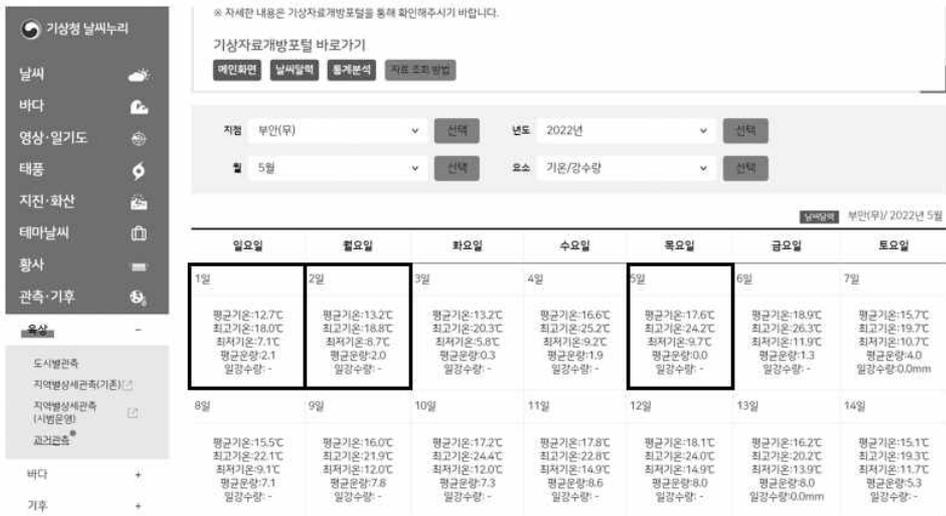
앞서 획득한 2022년도 환경부 토지 피복 자료를 사용하여 식생 지역만을 추출하여 사용하기 위해 분류 작업을 수행하여 Mask 레이어를 산출하였다. 이후, NDVI 영상과 융합하여 벡터 레이어를 산출하였다. 산출한 벡터 레이어의 정밀도를 높이기 위해 도로나 울타리 등 20m 미만의 구역을 제거하기 위해 smooth geometry 작업을 수행하였다. [그림 3-12](a)는 NDVI와 융합한 벡터 레이어의 모습이며, (b)는 smooth geometry 작업 후 도로나 울타리가 제거된 모습이다. 마지막으로, (c)는 (a)와 (b)를 겹쳐놓아 제거된 경계선의 모습이 표시된 그림이다.



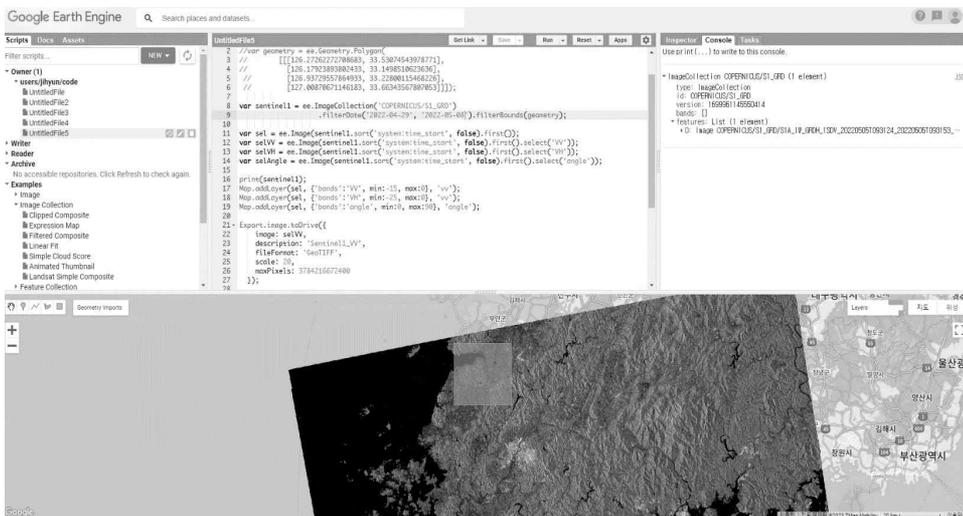
[그림 3-12] (a) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 융합한 벡터 레이어, (b) smooth geometry 작업 후 도로나 울타리 등이 제거된 모습, (c) (a)와 (b)를 겹쳐보았을 때, 제거된 경계선의 모습

### 3. SAR (Synthetic Aperture Radar) 영상

SAR 영상은 위성이나 항공기에서 지표면 정보를 측정하는 데 사용되는 레이더 기술로, 기상 조건에 관계없이 지구 표면을 관찰 가능하다. 이는 구름이나 강우와 같은 기상 조건에 영향을 받지 않음을 의미하며, 따라서 일정기간 동안의 데이터 수집이 가능하여 이는 자연재해 모니터링 및 관리에 매우 유용하다. SAR는 빛이 없는 야간이나 흐린 날에도 지면을 관찰할 수 있어 이러한 특징들로 인해 SAR는 전 지구 관측 및 재해 관리 분야에서 필수적이다. 이 연구에서는 국내 고해상도 위성인 KOMPSAT-5 SAR 데이터를 사용하였으며, 2022년 5월 2일에 촬영된 VV 편광 영상을 사용하였다. 토양 수분 산출 과정에 있어 VH 편광 영상 또한 필요하나, 이 시기에 촬영된 KOMPSAT-5 VH 편광 영상이 존재하지 않는 관계로 Google Earth Engine (GEE)에서 제공하는 2022년 5월 5일에 촬영된 Sentinel-1 SAR VH 편광 영상을 사용하였다. 비슷한 시기에 촬영된 영상을 사용하였고, [그림 3-13]과 같이 기상청에서 제공하는 과거 날씨 자료를 확인해보았을 때, 2022년 5월 1일, 2022년 5월 2일, 2022년 5월 5일 모두 토양 수분도에 영향을 주는 일 강수량이 없는 것으로 확인되어 날씨, 획득조건별 오차를 최소화하였다. [그림 3-14]는 GEE에서 제공하는 Analysis Ready Data (ARD) 데이터를 나타낸 것이며, GEE에서 제공하는 후방산란계수 자료는 기본적인 전처리 과정을 거치 ARD 유형으로 제공되기 때문에 산출과정에 바로 적용 가능하다는 장점이 존재한다 (Mulissa et al., 2021). 또한, 토양 수분 처리 과정에 있어 이 연구와 같이 광학 영상과 후방산란계수 자료를 함께 처리에 사용하는 경우 토양 수분 산출물의 정확도가 향상된다고 알려져 있다.



[그림 3-14] 2022년 5월 김제 연구지역의 기상 자료  
(<https://www.weather.go.kr/w/obs-climate/land/past-obs/obs-by-day.do>)



[그림 3-15] GEE (Google Earth Engine)에서 제공하는 Sentinel-1 SAR Analysis Read Data

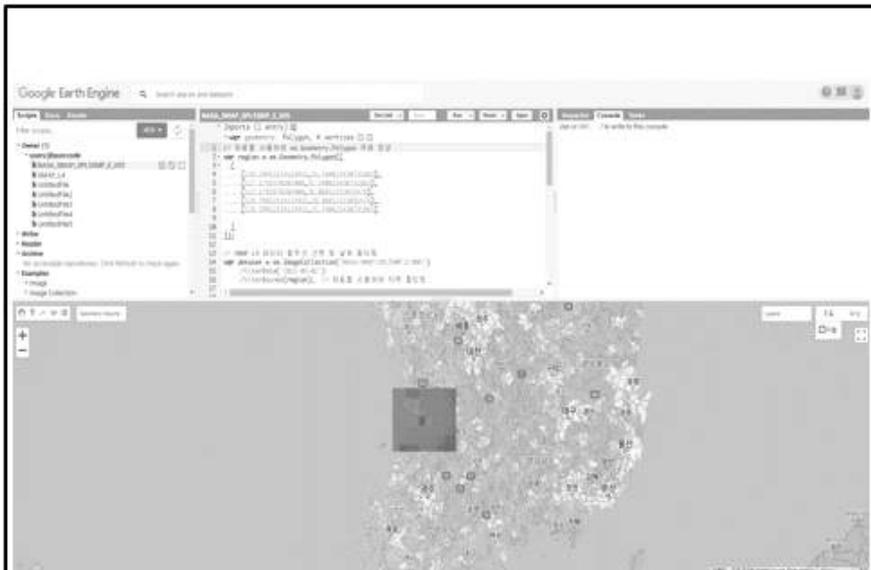
## 제 4 장 김제 연구지역 정밀 토양 수분 처리 결과 및 분석

### 제 1 절 SMAP (Soil Moisture Active Passive) 영상

김제 연구지역의 정밀 토양 수분 산출물 결과와 정확도 비교를 위해 KOMPSAT-5 위성 영상과 동일한 날짜인 2022년 5월 2일에 촬영된 SMAP Level-3 영상과 Level-4 영상을 다운로드하여 산출물과 정량적으로 비교하고자 하였다. 특히, Level-3 영상은 앞서 제공받은 Sentinel-1 SAR 영상과 동일한 형태인 GEE에서 제공하는 ARD 형태로 다운로드하였다. 이는 간단한 코드만으로 원하는 위성 영상을 제공받을 수 있으며, 기본적인 전처리 과정 또한 거쳐 사용자에게 제공되는 관계로 정확성을 보장받을 수 있다. [그림 4-1](a)는 GEE ARD를 사용하여 SMAP Level-3 위성 영상을 검색 및 다운하는 그림이며, (b)는 NASA Earth Data에서 제공하고 있는 SMAP Level-4 영상의 모습이다.

[그림 4-2]는 GEE에서 제공받은 SMAP Level-3 영상을 김제 연구지역에 맞게 표시하여 평균값을 나타낸 그림이다. 김제 연구지역에 해당하는 SMAP Level-3의 평균값은 0.2769로 나타났다.

[그림 4-3]은 NASA Earth Data에서 제공하고 있는 SMAP Level-4 영상의 모습을 전 세계 형태로 나타낸 그림이며, [그림 4-4]는 SMAP Level-4 영상을 김제 연구지역에 맞게 표시하여 평균값을 나타낸 그림이다. 김제 연구지역에 해당하는 SMAP Level-4의 평균값은 0.2682로 Level-3 영상과 거의 동일한 토양 수분 함량값을 나타내고 있다.

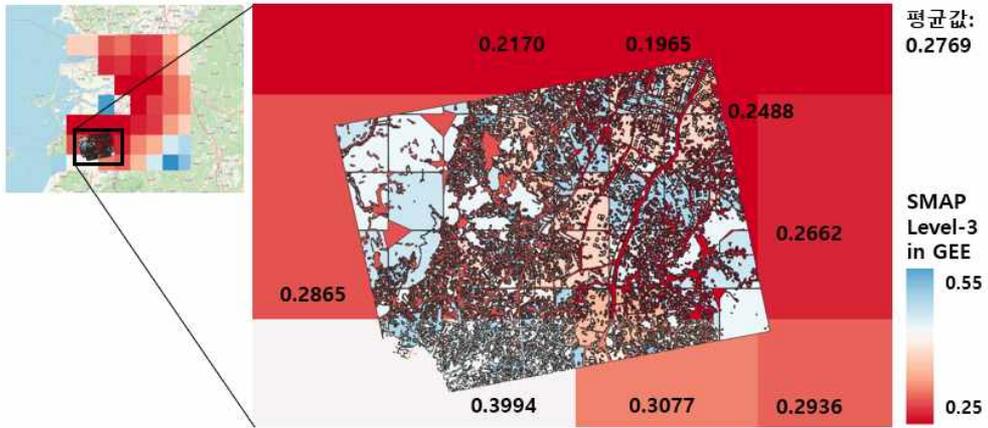


(a)

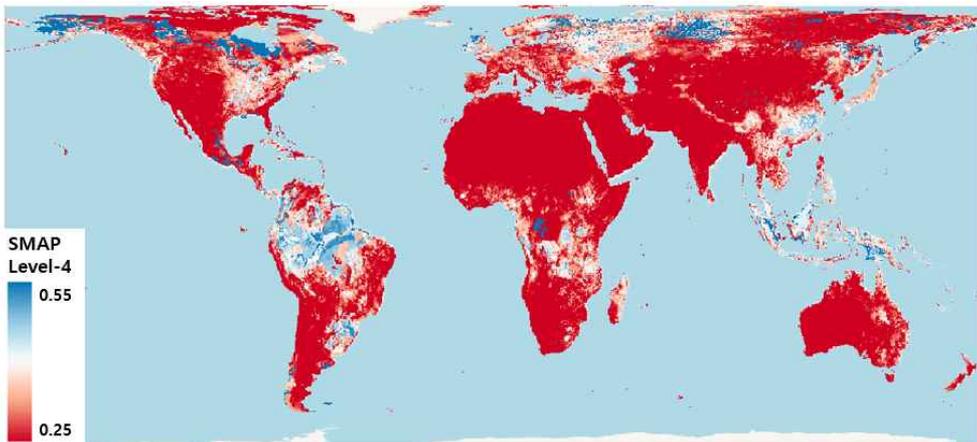
<a href="#"><u>SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7 (SPL4SMAU)</u></a>	9 km x 9 km	ROOT ZONE SOIL MOISTURE   SURFACE SOIL MOISTURE
<a href="#"><u>SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Geophysical Data, Version 7 (SPL4SMGP)</u></a>	9 km x 9 km	ROOT ZONE SOIL MOISTURE   SURFACE SOIL MOISTURE
<a href="#"><u>SMAP L4 Global 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Land Model Constants, Version 7 (SPL4SMLM)</u></a>	9 km x 9 km	SOIL CLASSIFICATION   SOIL DEPTH   SOIL POROSITY   SOIL TEXTURE   TERRAIN ELEVATION
<a href="#"><u>SMAP L4 Global Daily 9 km EASE-Grid Carbon Net Ecosystem Exchange, Version 7 (SPL4CMDL)</u></a>	9 km x 9 km	GROSS PRIMARY PRODUCTION (GPP)   HETEROTROPHIC RESPIRATION (RH)   NET ECOSYSTEM CO2 EXCHANGE (NEE)   SOIL ORGANIC CARBON (SOC)

(b)

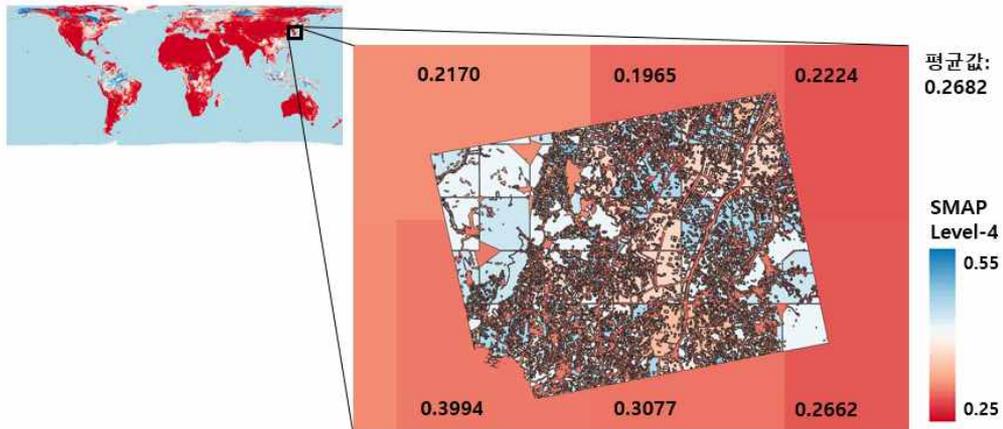
[그림 4-1] (a) GEE ARD를 활용한 SMAP Level-3 위성 영상 검색 및 다운로드, (b) NASA Earth Data에서 제공하는 SMAP Level-4 영상



[그림 4-2] GEE에서 제공받은 SMAP Level-3 영상을 김제 연구지역에 맞게 표시하여 나타낸 토양 수분 자료



[그림 4-3] NASA Earth Data에서 제공하고 있는 SMAP Level-4 전 세계 토양 수분 자료

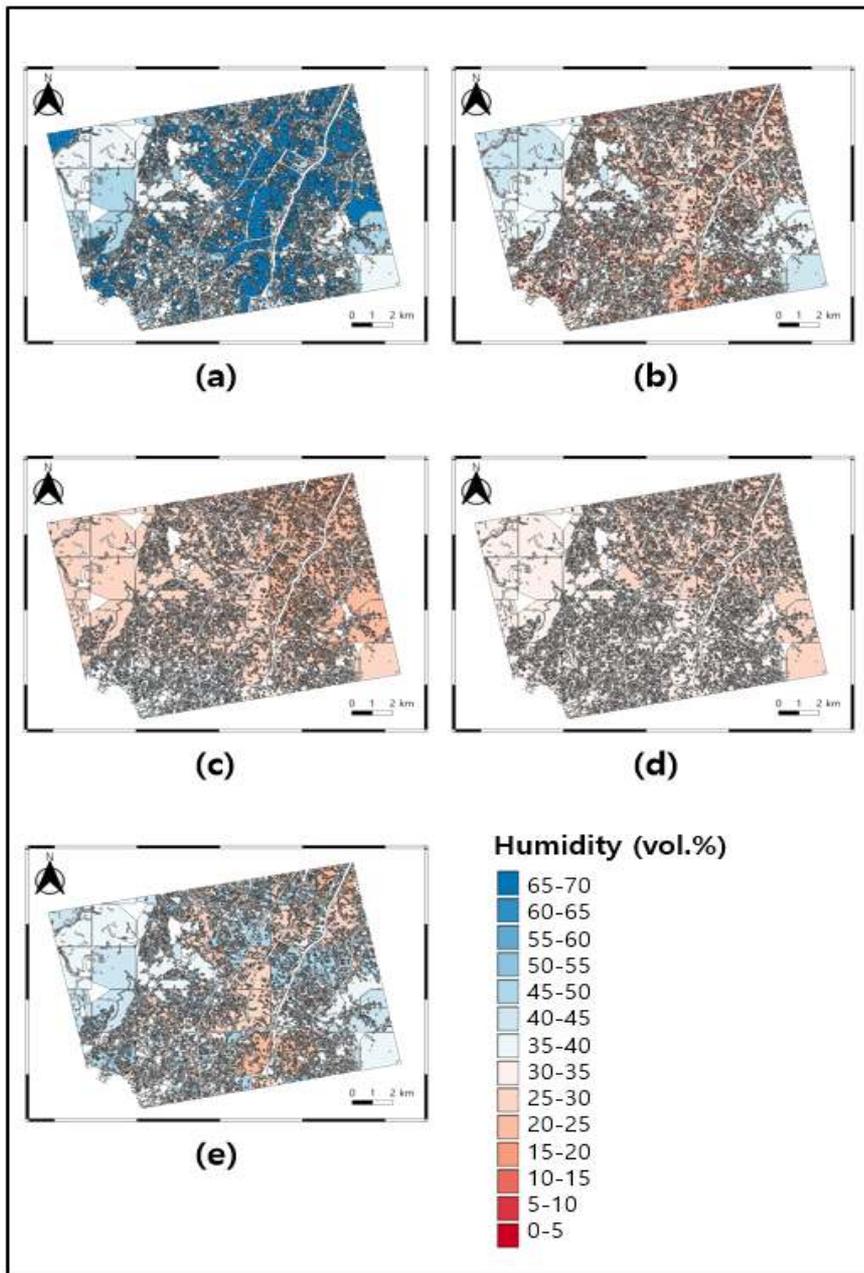


[그림 4-4] NASA Earth Data에서 제공하고 있는 SMAP Level-4 영상을 김제 연구지역에 맞게 표시하여 나타낸 토양 수분 자료

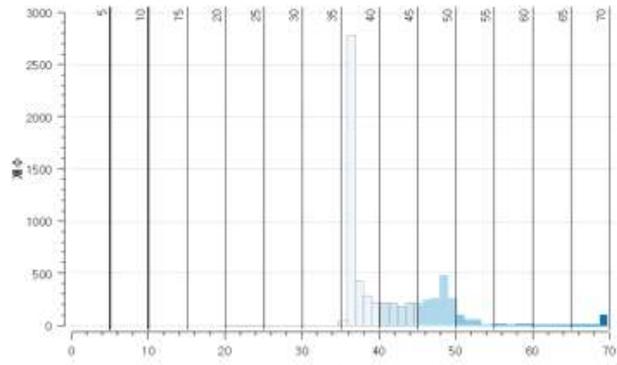
## 제 2 절 SMAP 영상과 정밀 토양 수분도 비교 결과

SMAP Level-3 영상과 Level-4 영상의 평균값은 순서대로 0.2769, 0.2682로 거의 동일한 토양 수분 함량값을 나타내고 있으나, KOMPSAT-5, KOMPSAT-3A 영상을 사용하여 산출한 정밀 토양 수분 결과의 경우 SMAP 영상보다 전체적으로 다소 높은 함량값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 Hajj et al. (2017)의 연구를 기반으로 하고 있어 Sentinel-1 SAR 영상에 맞춰진 레이더 매개변수를 사용하였기 때문이라고 분석 가능하며, 이는 프랑스 남부에 위치한 Montpellier 농업 지역을 대상으로 현장 측정 및 레이더 센서를 통해 표면 거칠기 계산 등에서 얻은 실험 데이터를 사용하여 WCM 보정을 수행하였다. 이 단계에서 레이더 변수가 계산되는데, 김제 연구지역의 KOMPSAT-5 SAR 영상과는 다소 차이가 있어 전체적으로 토양 수분 값이 높게 산출되었다고 판단하였다. 이를 고려하여, Sentinel-1 VV, VH 편광 영상, Angle 값과

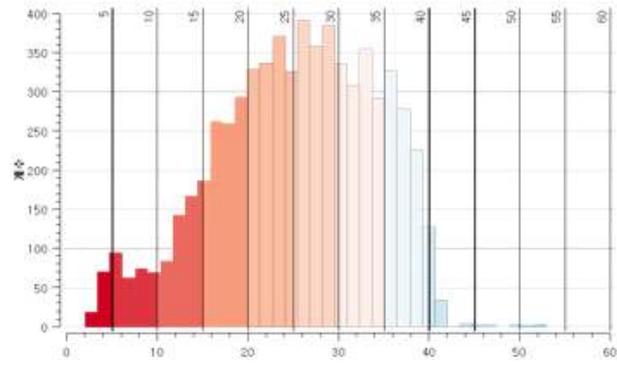
KOMPSAT-3A 고해상도 광학 영상을 활용한 김제 연구지역 토양 수분도 산출을 추가적으로 진행하였으며, KOMPSAT-5 영상의 inf 값에 해당하는 데이터를 채우기 위해 Sentinel 위성과 융합하여 산출한 토양 수분도 또한 제작하였다. [그림 4-5]는 산출한 김제 연구지역 토양 수분도를 차례대로 정리한 도표이며, 순서대로 (a)는 KOMPSAT-3A와 KOMPSAT-5 영상을 활용, (b)는 KOMPSAT-3A와 Sentinel-1 영상을 활용, (c)는 GEE에서 제공받은 SMAP Level-3 영상, (d)는 NASA Earth data에서 제공받은 SMAP Level-4 영상, 마지막으로 (e)는 KOMPSAT-3A, KOMPSAT-5, Sentinel-1 영상을 모두 활용한 토양 수분도 산출물 결과이다. 정확한 분석을 위하여 SMAP Level-3 영상과 Level-4 영상은 토양 수분 함량 단위로 변경하여 나타내었다. [그림 4-6]은 [그림 4-5]에서 정리한 토양 수분도 영상의 순서대로 래스터 히스토그램을 나타낸 표이다. (c), (d)는 SMAP Level-3, Level-4 영상의 김제 연구지역에 대한 히스토그램이며 픽셀 수가 각각 8개, 6개로 히스토그램이 다양한 값의 형태로 나타나지는 않았다. [그림 4-7]은 앞서 산출한 5개의 토양 수분도를 정확하게 비교하고자 값이 있는 객체만을 활용하여 box plot 형태로 나타낸 그림이다. box plot을 확인해보았을 때, KOMPSAT-3A 광학 영상과 KOMPSAT-5 SAR 영상을 활용하여 산출한 토양 수분도가 이상치가 가장 많은 것으로 나타났으며 반면, KOMPSAT-3A 광학 영상과 Sentinel-1 SAR 영상을 활용하여 산출한 토양 수분도가 SMAP Level-3, Level-4 영상과 가장 근접한 값을 나타내고 있는 것을 확인하였다. 추가적으로 산출한 KOMPSAT-3A, KOMPSAT-5, Sentinel-1 영상을 모두 활용한 토양 수분도는 SMAP Level-4 영상과 상당히 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.



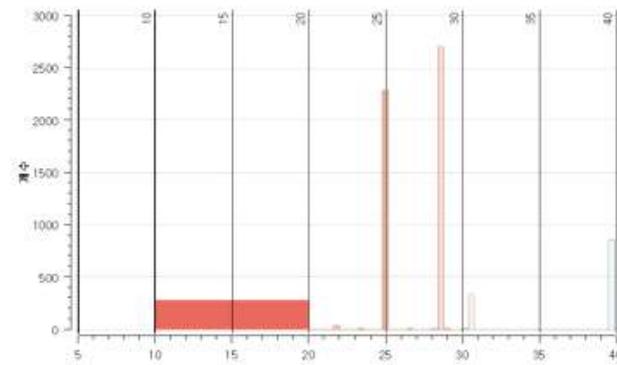
[그림 4-5] 김제 연구지역 토양 수분도를 차례대로 정리한 도표  
 (a) KOMPSAT-3A, KOMPSAT-5 영상 활용, (b) KOMPSAT-3A, Sentinel-1 영상 활용, (c) GEE에서 제공받은 SMAP Level-3 영상, (d) NASA Earth data에서 제공받은 SMAP Level-4 영상, (e) KOMPSAT-3A, KOMPSAT-5, Sentinel-1 영상을 모두 활용한 토양 수분도 산출물 결과



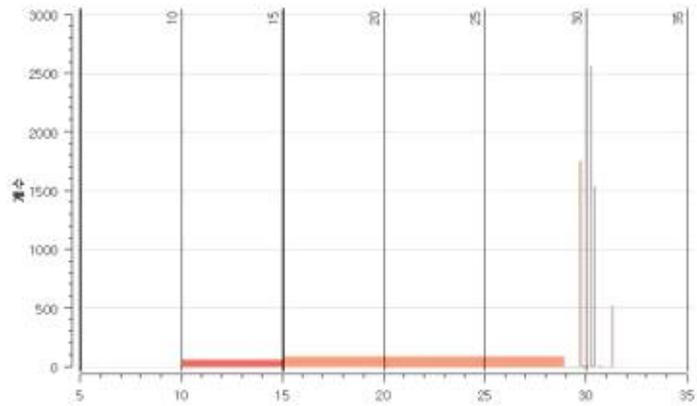
(a)



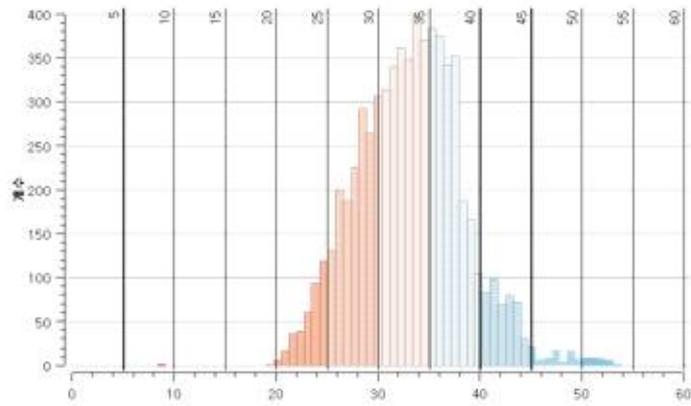
(b)



(c)

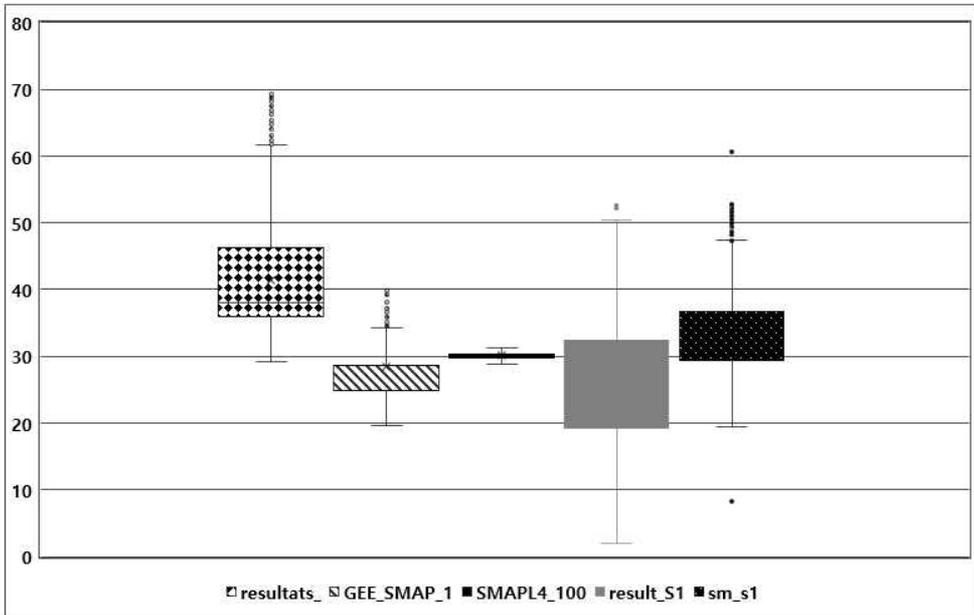


(d)



(e)

[그림 4-6] 그림 21에서 정리한 토양 수분도 영상의 순서대로 래스터 히스토그램을 나타낸 표



[그림 4-7] 앞서 산출한 5개의 토양 수분 자료의 box plot 그래프

## 제 5 장 결 론

토양 수분 자료는 농업 생산성의 중요한 지표가 될 뿐만 아니라, 강수량의 정보와 함께 정확한 날씨와 기후를 예측하는 데 필요한 핵심 자료로 중요도가 점점 증가하고 있다. 이 연구는 김제 연구지역을 시험 지역으로 하여 KOMSPAT-3A와 KOMPSAT-5 SAR 위성 영상을 함께 적용한 토양 수분도를 산출하였다. 또한, 연구 자료로 이용되는 토지 피복 지도의 경우는 환경공간정보서비스에서 제공하는 중분류 토지 피복 지도를 사용하였다. 연구 자료는 과거 영상이기 때문에 현장 측정값을 구할 수 없어 산출한 토양 수분도의 정확도를 검증하기 위하여 SMAP Level-3, Level-4 영상을 사용하여 비교 분석하였다. 고해상도 KOMPSAT 영상을 이용한 토양 수분도의 검증을 위하여 X-Band와 C-Band를 고려한 몇 가지 지표 심도별 현장 측정자료가 필요하다. 이 연구는 토양 수분 산정을 위한 현장 측정 물성 자료를 이용한 모의실험 결과에 대한 분석 연구가 아닌 KOMPSAT-3A와 KOMPSAT-5 SAR 위성 영상을 함께 적용하여 시험 지역 전체에 대한 토양 수분도 산출물을 제시했다는 의미가 있다. 이와 함께 KOMPSAT-3/3A와 KOMPSAT-5 SAR 영상 자료가 고해상도 영상 자료이기 때문에 이로부터 정밀도가 높은 토양 수분도를 산출할 수 있다는 것도 학술적으로 중요하다. 이 연구 방법은 그동안 축적된 과거 영상이나 ARD 유형으로 제공되는 광학 영상과 SAR 영상 정보를 사용하여 임의 지역의 임의 시기에 해당하는 토양 수분도 산출이 가능하기 때문에 정밀 토양 수분도가 필요한 재해 예측, 시계열 분석 등의 연구에 적용될 수 있다. 또한, 이 연구에서 생성된 결과는 Shapefile 형식으로 객체별 공간정보를 생성할 수 있기 때문에 토양 수분 함량의 지역적, 시간적 분석을 위한 추가적인 벡터 기반의 분석이 가능하다. 이는 다른 유형의 수치 공간 정보와의 연계 활용과 통합 분석이 가능하도록 토양 수분도를 GIS 레이어

형태로 제작한 것도 이 연구 방법의 중요한 방법이다. 이를 통해, 관심 지역의 통계적 변화 분석뿐만 아니라, GIS 공간 분석 방법을 통한 파생 연구가 가능할 것으로 기대한다.

# 참 고 문 헌

## 1. 국내문헌

- 지희숙, 황승언, 이조한, 현유경, 류영, 부경은. (2022). 기상청 GloSea 의 위성관측 기반 토양수분 (SMAP) 동화: 예비 실험 분석. *한국기상학회 대기*, 32(4), 395-409.
- Lee, J., Kim, K., and Lee, K., (2022). Comparative analysis of NDWI and soil moisture map using Sentinel-1 SAR and KOMPSAT-3 images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(6-4), 1935-1943. (in Korean)  
<https://doi.org/10.7780/kjrs.2022.38.6.4.7>
- Lee, J., Kim, K., and Lee, K., (2023). An experiment for surface soil moisture mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 image on Google Earth Engine (GEE). *Korean Journal of Remote Sensing*, 39(5), To be published.
- Lee, Y. J., Kim, G. Y., Lee, Y. G., Jeong, J. H., & Choe, M. H. (2020). 다양한 토양수분 측정 방법 소개와 발전 방향. *Water for future*, 53(10), 126-134.

## 2. 국외문헌

- Abdikan, S., Sekertekin, A., Madenoglu, S., Ozcan, H., Peker, M., Pinar, M. O., ... & Sanli, F. B. (2023). Surface soil moisture estimation from multi-frequency SAR images using ANN and experimental data on a semi-arid environment region in Konya, Turkey. *Soil and Tillage Research*, 228, 105646.
- Attema, E. P. W. and F. T. Ulaby, (1978). Vegetation modeled as a water cloud, *Radio Science*, 13(2): 357-364.
- Anderson, W. B., Zaitchik, B. F., Hain, C. R., Anderson, M. C., Yilmaz, M. T., Mecikalski, J., & Schultz, L. (2012). Towards an integrated soil moisture drought monitor for East Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2893-2913.
- Baghdadi, N. and M. Zribi, (2016). Land surface remote sensing in continental hydrology, ISTE Press, Oxford, UK.. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2023.56.3.211>.
- Bolten, J. D., & Crow, W. T. (2012). Improved prediction of quasi-global vegetation conditions using remotely-sensed surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 39(19).
- Champagne, C., White, J., Berg, A., Belair, S., & Carrera, M. (2019). Impact of soil moisture data characteristics on

the sensitivity to crop yields under drought and excess moisture conditions. *Remote Sensing*, 11(4), 372.

Dabrowska-Zielinska, K., Inoue, Y., Kowalik, W., & Gruszczynska, M. (2007). Inferring the effect of plant and soil variables on C-and L-band SAR backscatter over agricultural fields, based on model analysis. *Advances in Space Research*, 39(1), 139-148.

Domínguez-Niño, J. M., Oliver-Manera, J., Girona, J., & Casadesús, J. (2020). Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. *Agricultural Water Management*, 228, 105880.

Hajj, M. E., Baghdadi, N., Zribi, M., and Bazzi, H., (2017). Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for operational soil moisture mapping at high spatial resolution over agricultural areas, *Remote Sensing*, 9(12), 1292. <https://doi.org/10.3390/rs9121292>.

Jiang, Q., Tang, Z., Zhou, L., Hu, G., Deng, G., Xu, M., et al., (2023). Mapping paddy rice planting area in Dongting lake area combining time series Sentinel-1 and Sentinel-2 images, *Remote Sensing*, 15(1), 2794. <https://doi.org/10.3390/rs15112794>.

Kim, K. and K. Lee, (2021). An Implementation of open-source-based software as a service (SaaS) to

Produce TOA and TOC reflectance of high-resolution KOMPSAT-3/3A satellite image,. *Remote Sensing*, 13, 4550. <https://doi.org/10.3390/rs13224550>

Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., ... & Yamada, T. (2004). *Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science*, 305(5687), 1138-1140.

Long, D., Bai, L., Yan, L., Zhang, C., Yang, W., Lei, H., ... & Shi, C. (2019). Generation of spatially complete and daily continuous surface soil moisture of high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111364.

L'vovich, M. I., (1979): World Water Resources and Their Future. *American Geophysical Union*, 415 pp.

Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., & Herrero-Jiménez, C. M. (2016). Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sensing of Environment*, 177, 277-286.

McColl, K. A., Alemohammad, S. H., Akbar, R., Konings, A. G., Yueh, S., & Entekhabi, D. (2017). The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10(2), 100-104.

- McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., ... & Verdin, J. P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific data*, 4(1), 1-19.
- Mullissa, A., Vollrath, A., Odongo-Braun, C., Slagter, B., Balling, J., Gou, Y., Gorelick, N., and Reiche, J., (2021). Sentinel-1 SAR Backscatter Analysis Ready Data Preparation in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13, 1954.
- Mu, T., Liu, G., Yang, X., and Yu, Y., (2023). Soil-moisture estimation based on multiple-source remote-sensing images, *Remote Sensing*, 15, 139. <https://doi.org/10.3390/rs15010139>
- Nicolai-Shaw, N., Zscheischler, J., Hirschi, M., Gudmundsson, L., & Seneviratne, S. I. (2017). A drought event composite analysis using satellite remote-sensing based soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 203, 216-225.
- Ochsner, T. E., Cosh, M. H., Cuenca, R. H., Dorigo, W. A., Draper, C. S., Hagimoto, Y., ... & Zreda, M. (2013). State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 1888-1919.
- Peng, J., Albergel, C., Balenzano, A., Brocca, L., Oliver

- Cartus, O., Cosh, M. H., et al. 2021. A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements, *Remote Sensing of Environment*, 252, 112162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112162>
- Robock, A., Vinnikov, K. Y., Srinivasan, G., Entin, J. K., Hollinger, S. E., Speranskaya, N. A., and Namkhai, A., (2000). The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(6), pp. 1281-1300.
- Sadri, S., Wood, E. F., & Pan, M. (2018). Developing a drought-monitoring index for the contiguous US using SMAP. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6611-6626.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., ... & Marx, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, 8(5), 421-426.
- Seneviratne, S. I and Coauthors, (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth Sci. Rev.*, 99, 125-161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- Tao, L., Ryu, D., Western, A., and Lee, S. G., (2022). Comparison of KOMPSAT-5 and Sentinel-1 radar data

for soil moisture estimations using a new semi-empirical model, *Remote Sensing*, 14(16), 4042. <https://doi.org/10.3390/rs14164042>

Trenberth, K. E., L. Smith, T. Qian, A. Dai, and J. Fasullo, (2007). Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J. Hydrometeorol.*, 8, 758-769.

Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., Wagner, W., Van Roey, T., Heyns, W., Verbeiren, S., & Feyen, J. (2010). Remotely sensed soil moisture integration in an ecosystem carbon flux model. The spatial implication. *Climatic change*, 103, 117-136.

Wei, W., Feng, X., Yang, L., Chen, L., Feng, T., & Chen, D. (2019). The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China. *Science of the Total Environment*, 647, 1323-1332.

Xu, L., Chen, N., Zhang, X., (2019). Global drought trends under 1.5 and 2° C warming. *Int. J. Climatol.* 39, 2375-2385. <https://doi.org/10.1002/joc.5958>.

Zhang, Y., Liang, S., Zhu, Z., Ma, H., & He, T. (2022). Soil moisture content retrieval from Landsat 8 data using ensemble learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 185, 32-47.

# ABSTRACT

## The Study on Soil Moisture Mapping using KOMSPAT-3 Optical Image and KOMPSAT-5 SAR Image

Lee, Ji-Hyun

Major in IT Fusion Engineering

Dept. of IT Fusion Engineering

The Graduate School

Hansung University

The accurate estimation of soil moisture using satellite information is a crucial research topic in the field of remote sensing applications. In this study, the goal was to calculate a more precise soil moisture map for a demonstration area using high-resolution satellite images from KOMPSAT-3A and KOMPSAT-5. Additionally, for accuracy verification, the obtained soil moisture data was compared and analyzed against soil moisture information from the Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite images provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Moreover, to estimate soil moisture in agricultural and forestry areas, domestic land cover data provided by the Environmental Spatial Information Service was applied in the research. The demonstration area was chosen in the flatlands

of Gimje, and a soil moisture estimation algorithm based on the Water Cloud Model was used. Synthetic Aperture Radar (SAR) images used in this study included VV polarization images from KOMPSAT-5 and VH polarization images from Sentinel-1. Optical images from KOMPSAT-3A were also used, and surface reflectance correction was performed. The calculated soil moisture results were compared and analyzed against SMAP Level-3, Level-4 data, with Level-3 images utilizing Analysis Ready Data (ARD) from Google Earth Engine (GEE). The comparison results showed a high level of agreement, and this study suggests the possibility of producing highly accurate precision soil moisture maps in the future using satellite images and public data in South Korea.

**【Keyword】** KOMPSAT-3A, KOMPSAT-5, Sentinel-1, SMAP, Soil Moisture Estimation, Google Earth Engine