

Research Article

KOMPSAT-3와 KOMPSAT-5 SAR 영상을 이용한 토양수분 산정과 결과 검증: 제주 서부지역 사례 연구

이지현¹⁾ · 이하영²⁾ · 김광섭³⁾ · 이기원^{4)*}

Soil Moisture Estimation Using KOMPSAT-3 and KOMPSAT-5 SAR Images and Its Validation: A Case Study of Western Area in Jeju Island

Jihyun Lee¹⁾ · Hayoung Lee²⁾ · Kwangseob Kim³⁾ · Kiwon Lee^{4)*}

Abstract: The increasing interest in soil moisture data from satellite imagery for applications in hydrology, meteorology, and agriculture has led to the development of methods to produce variable-resolution soil moisture maps. Research on accurate soil moisture estimation using satellite imagery is essential for remote sensing applications. The purpose of this study is to generate a soil moisture estimation map for a test area using KOMPSAT-3/3A and KOMPSAT-5 SAR imagery and to quantitatively compare the results with soil moisture data from the Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission provided by NASA, with a focus on accuracy validation. In addition, the Korean Environmental Geographic Information Service (EGIS) land cover map was used to determine soil moisture, especially in agricultural and forested regions. The selected test area for this study is the western part of Jeju, South Korea, where input data were available for the soil moisture estimation algorithm based on the Water Cloud Model (WCM). Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery from KOMPSAT-5 HV and Sentinel-1 VV were used for soil moisture estimation, while vegetation indices were calculated from the surface reflectance of KOMPSAT-3 imagery. Comparison of the derived soil moisture results with SMAP (L-3) and SMAP (L-4) data by differencing showed a mean difference of 4.13 ± 3.60 p% and 14.24 ± 2.10 p%, respectively, indicating a level of agreement. This research suggests the potential for producing highly accurate and precise soil moisture maps using future South Korean satellite imagery and publicly available data sources, as demonstrated in this study.

Keywords: KOMPSAT-3, KOMPSAT-5, Sentinel-1, SMAP, Soil moisture estimation

Received October 13, 2023; Revised November 6, 2023; Accepted November 7, 2023; Published online December 31, 2023

¹⁾ 한성대학교 IT융합공학과 석사과정생(Master Student, Department of IT Fusion Engineering, Hansung University, Seoul, Republic of Korea)

²⁾ 한성대학교 융합보안학과 석사과정생(Master Student, Department of Applied Convergence Security, Hansung University, Seoul, Republic of Korea)

³⁾ 경민대학교 컴퓨터소프트웨어과 조교수(Assistant Professor, Department of Computer Software, Kyungmin University, Uijeongbu, Republic of Korea)

⁴⁾ 한성대학교 정보시스템트랙 교수(Professor, Information System Track, Hansung University, Seoul, Republic of Korea)

* Corresponding author: Kiwon Lee (kilee@hansung.ac.kr)

요약: 위성 영상을 활용하여 정확한 토양 수분도를 산정하는 연구는 원격탐사 응용 분야에 포함되는 중요한 기본 연구 주제 중 하나이다. 이 연구의 목적은 KOMPSAT-3/3A 영상과 KOMPSAT-5 SAR 영상을 적용하여 시험 지역에 대하여 토양수분도를 제작하고 산정된 결과를 정확도 검증 차원에서 미국 NASA에서 제공하는 Soil Moisture Active Passive (SMAP)의 토양수분 자료와 정량 비교하는 것이다. 한편 농림 식생 지대를 중심으로 토양수분도를 산정하기 위하여 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지피복지도를 연구에 적용하였다. 시험 연구 지역은 이 연구에 적용한 수분 구름 모델(Water Cloud Model)에 기반한 토양수분 산정 알고리즘 적용에 필요한 입력 자료가 모두 가용한 제주 서부 지역을 선정하였다. 토양수분도 제작에 사용한 Synthetic Aperture Radar (SAR) 영상은 KOMPSAT-5 HV와 Sentinel-1 VV 영상이며, 식생지수는 KOMPSAT-3 영상의 지표반사도를 사용하였다. 이 연구에서 산출한 토양수분도 산정 결과와 SMAP (L-3) 자료를 차분 연산으로 비교하면 차이 값이 평균 $4.13 \pm 3.60\%$ 의 높은 일치도를 보이는 것으로 나타났고, SMAP (L-4) 자료와의 차분 연산 결과는 평균 $14.24 \pm 2.10\%$ 수준의 일치도를 보였다. 이 연구를 통하여 향후 우리나라 위성영상과 공공 제공자료를 이용하여 정확도가 높은 정밀 토양수분도를 제작할 수 있는 가능성을 제시하였다.

주요어: KOMPSAT-3, KOMPSAT-5, Sentinel-1, SMAP, 토양수분 산정

1. 서론

토양수분도는 지구 생태 환경 시스템을 이해하고 분석하기 위한 중요한 자료이다. 전 세계적이나 지역적 규모의 토양수분도 자료는 날씨 및 기후 예측의 정확도를 향상시킬 수 있으며, 홍수나 가뭄과 같은 자연재해의 모니터링과 예측을 위한 정보로도 활용될 수 있다. 따라서 정확도가 높은 토양수분도의 획득을 위한 체계적인 측정 기술의 개발과 연구에 대한 중요성이 강조되고 있다(Robock et al., 2000; Seneviratne et al., 2010).

Peng et al. (2021)은 토양 수분 산정을 위한 잠재적 위성 활용을 시간 범위와 해상도 별로 구분하면서 Sentinel-1 SAR 영상은 수 일 정도 범위에서 ~100 m 해상도를 요구하는 재해나 농업 분야에 적합하다고 하였다. Zappa et al. (2022)은 1×1 km의 해상도로 나타나는 Copernicus Global Land Service surface soil moisture (CGLS-SSM), $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 해상도를 갖는 European Space Agency (ESA)의 Climate Change Initiative for Soil Moisture (CCI SM)와 36×36 km 해상도의 SMAP 위성 자료를 이용하여 고해상도 자료가 농업 분야의 실제 응용에 적합하다는 근거를 제시하였다.

Tao et al. (2022)은 토양수분 산정에 있어서 KOMPSAT-5 SAR 영상과 Sentinel-2 영상을 사용하여 산출한 토양수분도의 정확성 검증 연구를 수행하였고, Lee et al. (2022)은 KOMPSAT-3 영상과 Sentinel-1 SAR 영상으로 토양수분도를 제작하는 시험연구를 수행하였다. Jeong et al. (2022)은 Sentinel-1 SAR 영상을 기계학습으로 적

용하여 토양수분도를 산정하는 연구를 수행하였고, Chung et al. (2023)은 Sentinel-1과 Sentinel-2 영상을 이용하여 국내 용담댐 유역의 토양수분 산정에 따른 물성 분석을 수행하였다. El Hajj et al. (2017)과 Jiang et al. (2023)의 토양수분도 제작 실험 연구에서도 Sentinel-1과 Sentinel-2 영상을 사용하였다. Mu et al. (2022)은 Gaofen (GF)-2, GF-3 SAR와 GF-5 위성 영상을 사용하여 산출한 토양수분 함량이 현장 측정 자료와 68.38%의 상관도를 보이는 실험 결과를 제시하였다. 이와 같이 위성 기반 토양수분도 제작 알고리즘은 SAR 영상과 광학 영상을 모두 적용하여 산출하기 때문에 KOMPSAT-3/3A와 KOMPSAT-5를 동시에 적용하는 대표적인 사례가 될 수 있으나 아직 이 두 가지 영상을 적용한 연구는 국내외에서 발표된 경우가 없다.

시험 연구 지역은 KOMPSAT-3/3A와 KOMPSAT-5 SAR 영상이 중복으로 촬영된 지역을 대상으로 하였다. 기복이 심한 지역에서 다중 산란 및 감쇠 효과와 비 식생 지역에서의 오차 발생을 최소화하기 위하여 이 연구는 완전한 지표의 농림 식생 지대를 시험 연구 지역으로 선정하였다. 이러한 조건을 만족하는 시험 연구 지역은 제주 서부 지역의 농림 식생 지대가 적합한 것으로 나타났다. 이 지역을 중심으로 토양수분도를 산정하기 위하여 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr/intro/land.do>)에서 제공하는 토지피복지도를 연구에 적용하였다. 한편 이 연구에서 사용한 지표반사도 산출 시스템(Kim and Lee, 2021)은 KOMPSAT-3와 KOMPSAT-3A 영상을 모두 처리할 수 있으나 이 연구 지역에서는

KOMPSAT-3A 영상이 없어 KOMPSAT-3 영상만을 입력 자료로 사용하였다.

이 연구에서 KOMPSAT-3 영상과 KOMPSAT-5 SAR 영상을 적용하여 시험 지역에 대하여 토양수분도를 제작한 뒤, 이렇게 산정된 결과를 정확도 검증 차원에서 L 밴드 radiometer와 radar 센서로 관측한 SMAP의 토양수분 자료와 정량 비교하고 결과를 분석하였다.

2. 연구 방법 및 연구 자료

2.1. 연구 방법

이 연구에서 적용한 연구 방법과 내용은 Fig. 1에 제시하였다. 이 연구에 사용한 가장 중요한 자료는 KOMPSAT-5

SAR 영상 자료이며, 토양수분도 산출 알고리즘에 필요한 식생 지수 자료는 KOMPSAT-3 영상으로부터 산출한 지표반사도로부터 계산하였다. 또한 적용 알고리즘은 기본적으로 농림 지역이나 식생 지역의 토양수분도 산출에 최적화된 것이기 때문에 이러한 지역을 우선 산정 대상 지역으로 고려해야 한다. 이 연구는 이러한 대상 지역내에 포함된 농림 식생 객체를 추출하기 위하여 환경공간정보서비스에서 제공하는 세분류 등급의 토지피복지도를 적용하였다. 한편 이 알고리즘에서 요구하는 SAR 영상에 대하여 KOMPSAT-5 HV 영상을 사용하였고, VV 영상은 KOMPSAT-5에서 제공하지 않기 때문에 Sentinel-1 VV 영상을 적용하였다. 이러한 자료를 이용하여 산출한 토양수분도는 대상 객체에 대하여 벡터 형식의 shapefile 파일 형식으로 생성하였다. 이와 같

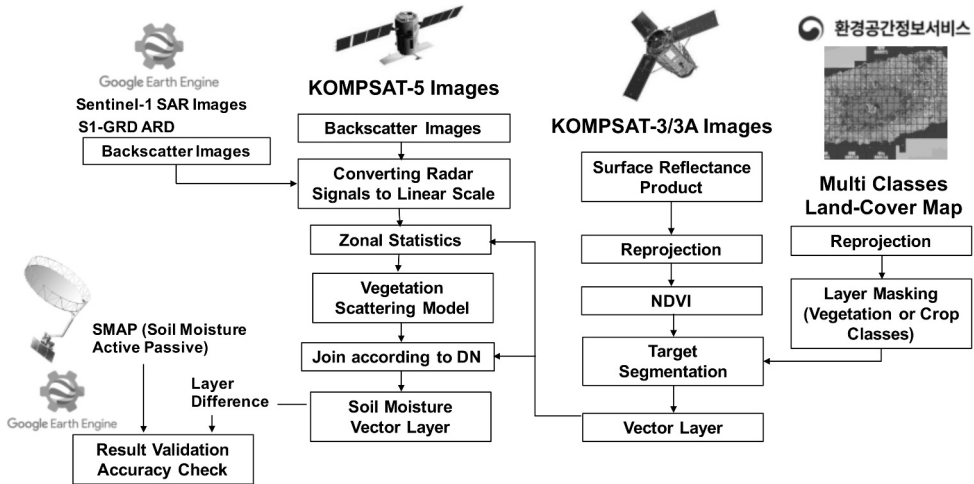


Fig. 1. Workflow for soil moisture estimation and result validation.

Water Cloud Model (WCM) Soil with vegetation

$$\sigma_{\text{tot}}^0 = \sigma_{\text{veg}}^0 + T^2 \sigma_{\text{soil}}^0$$

$$\sigma_{\text{veg}}^0 = A \cdot V_1 \cdot \cos \theta (1 - T^2)$$

$$T^2 = \exp(-2 \cdot B \cdot V_2 \cdot \sec \theta)$$

$$\sigma_{\text{soil}}^0 = C(\theta) \exp(D \cdot M_v)$$

- σ_{tot}^0 : Total backscattered radar signal (linear unit)
- σ_{veg}^0 : Vegetation contribution (linear unit)
- T^2 : Two-way attenuation
- σ_{soil}^0 : Soil contribution (linear unit)
- $V_1 = V_2$: Vegetation descriptors of NDVI
- θ : Radar incidence angle; $\sec(\theta) = 1/\cos(\theta)$
- A, B : Parameters depending on the canopy descriptors and radar configurations
- M_v : Volumetric soil moisture (Vol.%)
- C : dependent on roughness and incidence angle
- D : sensibility of radar signal to M_v in the case of bare soils, depends on radar configurations

Fig. 2. Summary of WCM for soil moisture estimation.

이 생성된 토양 수분도는 SMAP에서 제공하는 토양수분함량 자료를 shapefile 형식으로 변환하여 정량적으로 비교하였다. Fig. 2는 Attema and Ulaby (1978)와 Baghdadi and Zribi (2016)의 연구에 기반한 Lee et al. (2023)의 연구 방법을 따라 SAR 영상으로부터 토양수분도를 산출하는 Water Cloud Model (WCM)의 항목과 매개변수를 정리한 것이다.

2.2. 연구 자료

Fig. 3은 연구 지역을 나타낸 것이다. KOMPSAT-5 SAR 영상은 2019년 4월 2일 촬영 영상을 사용하였고 KOMPSAT-3 영상은 SAR 영상 촬영 일시에 가장 근접하게 촬영된 2019년 4월 8일 영상을 사용하였다. 한편

정확도 비교 검증을 위한 SMAP 영상은 SAR 영상과 같은 2019년 4월 2일 자료를 사용하였다. 기상청 날씨누리 (<https://www.weather.go.kr>)에서 제공하는 과거 강수량 자료에 의하면 연구지역은 4월 2일에서 4월 8일까지 일강수량이 0 mm로 되어 있어 토양수분 함량에 영향을 미칠 수 있는 외부로부터의 수분 유입은 없는 것을 알 수 있었다. 검증에 사용한 SMAP 영상은 Google Earth Engine (GEE)에서 제공하는 자료를 직접 추출하였다(<https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/smap-soil-moisture>). Sentinel-1 SAR 영상은 KOMPSAT-5 SAR 영상과 같은 날짜의 영상을 KOMPSAT-5의 영상에 맞게 조정하여 사용하였다. GEE는 Level-3 (L-3)와 Level-4 (L-4)와 같은 두 가지 유형의 SMAP 자료를 제공

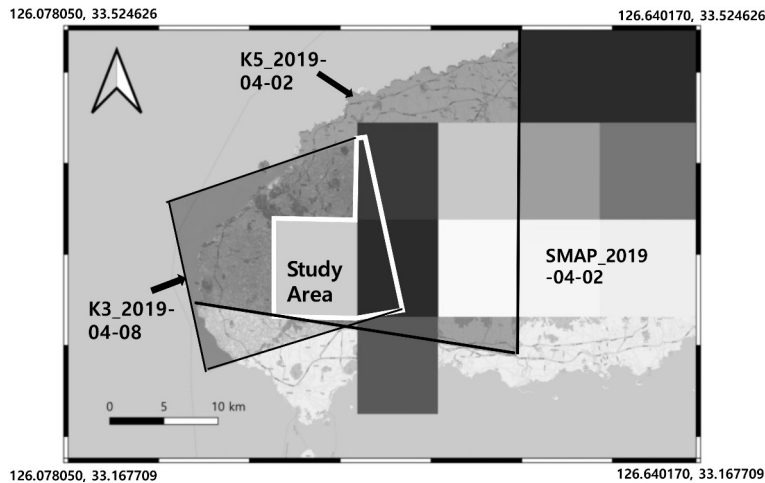


Fig. 3. The study area and the SMAP data coverage.

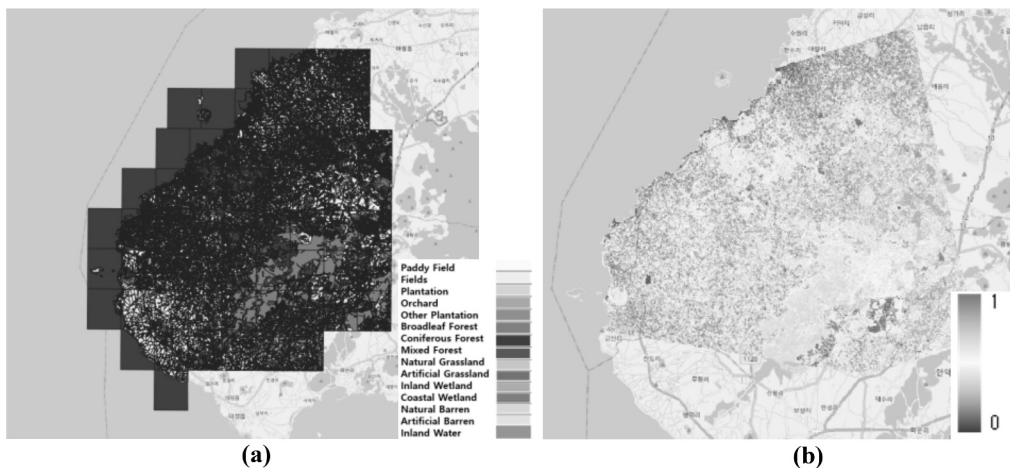


Fig. 4. Input data for soil moisture estimation. (a) Land cover map. (b) NDVI result by KOMPSAT-3.

하는데, SMAP L-3 자료는 9 km의 공간 해상도를 기준으로 일(daily) 단위로 위성에서 측정한 값에 기초하며, SMAP L-4의 경우는 L-3 자료에 기상 변수, 토양 온도, 증발산량 등의 현장 자료를 추가로 적용하여 매 3시간마다 제공하는 11 km의 공간 해상도에 따라 제공되는 자료이다.

SMAP 위성 자료의 정확도에 대하여 Tavakol et al. (2019)의 연구에 따르면 미국 내 현장 자료와의 비교 연구에서 L-3 자료와 L-4의 상관관계수가 큰 차이가 없는 것으로 나타났고 각각의 SMAP 자료의 정확도는 계절별로 차이가 있을 수 있다고 하였다. 한편 Nadeem et al. (2022)의 연구에서는 L-3 자료의 경우 육상 관측소에서 수집한 자료와 비교하여 0~8%까지 오차를 갖는 것으로 나타났고, 이 오차는 목초지에서 정확도가 높고 산림 지

역에서는 비교적 낮다고 하였다. 이 연구에서는 SMAP L-3 자료와 SMAP L-4 자료를 모두 적용하였다. Fig. 4는 토양수분도 작성에 필요한 입력자료를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지피복지도이며, Fig. 4(b)는 KOMPSAT-3 영상의 지표반사도로부터 산출한 식생 지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)를 나타낸다.

3. 연구 결과 및 분석

3.1. 시험 제작 및 결과

Fig. 5는 Fig. 1의 처리 과정과 알고리즘을 적용하여 산출한 토양수분도이다. 여기서 A1, A2, B1, B2, C1과

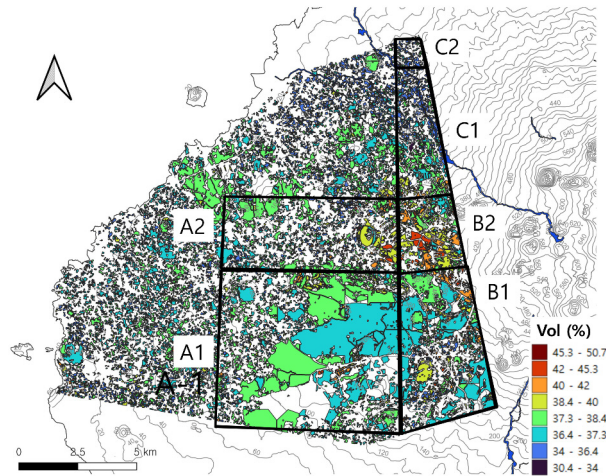


Fig. 5. Soil moisture map generated in the study area including A, B, and C for SMAP data.

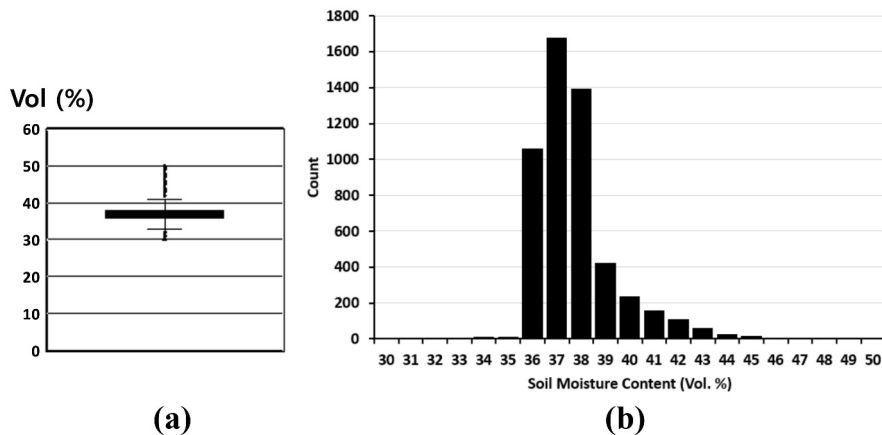


Fig. 6. Statistics of soil moisture estimation: (a) boxplot (37.32–41.70) and (b) histogram.

C2로 표기된 부분은 SMAP 자료가 포함된 지역을 의미한다. 이는 L-3 자료와 L-4 자료의 해상도가 다르기 때문에 연구 지역에 맞추기 위해서 여러 구역으로 구분한 것이다. 연구 지역내에서 SMAP L-3은 A1+A2, B1+B2, C1+C2의 세 개 구역의 자료를 제공하며 각 구역에서 해당 지역의 토양수분 함량은 차례대로 30.70, 37.50, 36.90 값을 갖는다. SMAP L-4의 경우는 A1, A2, B1, B2+C1, C2의 5개의 구역으로 나누어지는데 차례대로 23.79, 23.03,

24.10, 23.23, 22.68의 값을 갖는다. Fig. 6은 전체 연구 지역에서의 토양수분도 산출 결과를 나타낸 것으로, Fig. 6(a)와 (b)는 각각 산출 결과 네모상자 그림(boxplot)과 토양수분 산출 값에 대한 도수분포도를 나타낸 것이다.

3.2. 토양수분도 결과 정확도 분석

Fig. 7에서 토양수분도와 SMAP L-3 토양수분 함량 자료의 차분 연산 결과와 도수분포도를 제시하였다. 이 연

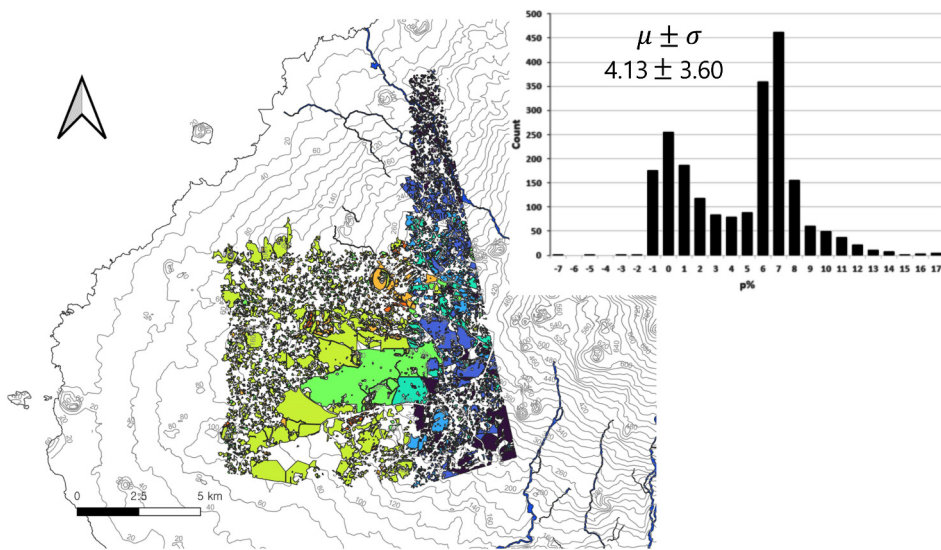


Fig. 7. Result validation of difference between soil moisture estimation and SMAP Level-3 data and its histogram.

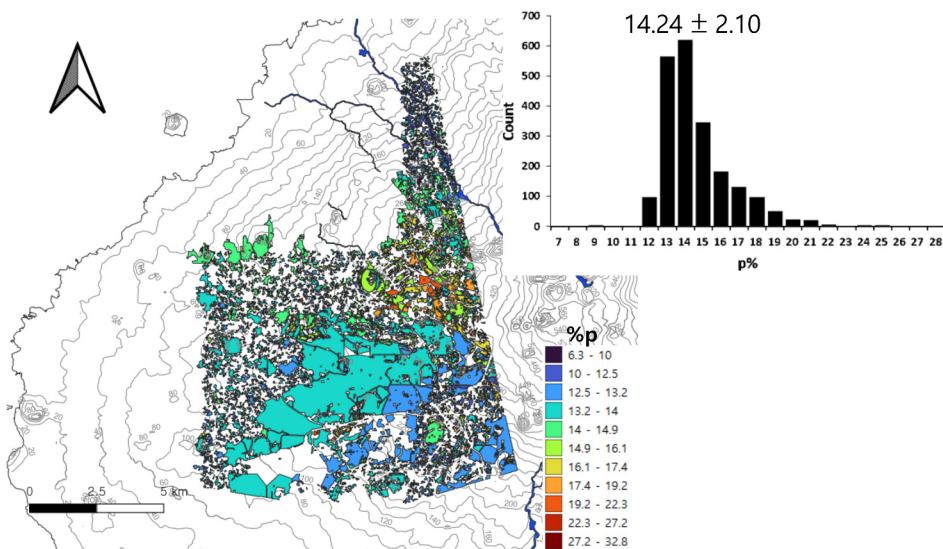


Fig. 8. Result validation of difference between soil moisture estimation and SMAP Level-4 data and its histogram.

구에서 산출한 토양수분도 결과와 SMAP L-3 자료의 차이 값이 작은 범위에서 다봉 분포(bimodal distribution)를 갖으며 평균 $4.13 \pm 3.60\text{p}\%$ 의 아주 높은 일치도를 보이는 것으로 나타났다. 세부적으로는 A1+A2 지역에서는 비교적 차이가 크고, B1+B2와 C1+C2 지역은 거의 일치하는 결과를 보인다. 이 결과는 고해상도 KOMPSAT-3와 KOMPSAT-5 SAR 영상을 이용하여 산정한 정밀 토양수분도 산정 값이 완만한 평지의 농림 식생 지역에서는 국지적 변화를 보이는 지역도 있지만 전반적으로 안정된 값을 나타내기 때문이라고 생각한다.

Fig. 8은 토양수분도와 SMAP L-4 토양수분 함량 자료의 차분 연산 결과를 제시한 것으로, 평균 $14.24 \pm 2.10\text{p}\%$ 의 일치도를 보이며, L-3에 비하여 일치도가 낮게 나타났다. 이는 기본적으로 연구 지역에서 L-3 자료와 L-4 자료가 상관도가 낮기 때문이다. 이는 L-3 자료는 평지를 기준으로 지표면 23 cm 정도의 투과 깊이를 갖는 L 밴드 위성 자료를 중심으로 처리된 것이고, L-4 자료가 이 위성 자료와 함께 토양 수분을 위한 지표면 모델에 따른 현장 측정자료를 같이 융합한 100 cm까지의 심부(root-zone) 토양수분함량을 나타낸 자료이기 때문이다. 이 연구에서 토양 수분도 산정을 위하여 적용 방법은 기본적으로 지표 측정 자료를 사용하지 않고 KOMPSAT 위성영상을 사용하기 때문에 L-3 자료와는 높은 일치도를 보이지만 L-4 자료와는 차이가 발생할 수 있다고 생각한다. 물론 이는 지역적 특성에 따른 차이일수도 있기 때문에 현장 자료들을 이용한 보다 심화된 연구가 필요하다.

4. 결론

토양 수분 자료는 농업 생산성의 중요한 지표가 될 뿐만 아니라, 강수량의 정보와 함께 정확한 날씨와 기후를 예측하는 데 필요한 핵심 자료로 점점 중요도가 증가하고 있다. 이 연구는 제주 서부 지역을 시험지역으로 하여 KOMPSAT-3와 KOMPSAT-5 SAR 위성 영상을 함께 적용하여 토양수분도를 산출하였다. 또한 연구 자료로 이용되는 토지피복지도의 경우는 환경정보서비스에서 제공하는 세분류 토지피복지도를 사용하였다. 연구 자료는 과거 영상이기 때문에 현장 측정값을 구할

수 없어서 산출한 토양수분도의 정확도를 검증하기 위하여 SMAP L-3와 L-4 자료를 사용하였다. 이 연구에서 산출한 토양수분도 결과와 SMAP L-3 자료와 L-4 자료와의 차분 연산의 평균 값은 각각 $4.13 \pm 3.60\text{p}\%$ 와 $14.24 \pm 2.10\text{p}\%$ 의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이처럼 L-3 자료와의 비교를 통하여 산출 값의 정확도가 아주 높게 나타났지만 SMAP 자료는 해상도가 크기 때문에 고해상도 KOMPSAT 영상을 이용한 토양수분도의 검증을 위하여 X-밴드와 C-밴드를 고려한 몇 가지 지표 심도별 현장 측정자료가 필요하다.

특히 이 연구는 토양수분 산정을 위한 현장 측정 물성 자료를 이용한 모의실험 결과에 대한 분석 연구가 아니고 KOMPSAT-3와 KOMPSAT-5 SAR 위성 영상을 함께 적용하여 시험 지역 전체에 대한 토양수분도를 제시했다는 의미가 있다. 이와 함께 KOMPSAT-3/3A와 KOMPSAT-5 영상 자료가 고해상도 영상 자료이기 때문에 이로부터 정밀도가 높은 토양수분도를 산출할 수 있다는 것도 학술적인 중요성이 있다고 생각한다. 이 연구 방법은 그동안 축적된 과거 영상이나 Analysis Ready Data 유형으로 제공되는 광학 영상과 SAR 영상정보를 사용하여 임의 시기의 토양수분도를 산출할 수 있기 때문에 정밀 토양수분도가 필요한 시계열 분석 등에 연구에 적용될 수 있다. 또한 다른 유형의 수치 공간정보와의 연계 활용과 통합 분석이 가능하도록 토양수분도를 GIS 레이어로 제작한 것도 이 연구 방법의 중요한 장점이라고 할 수 있다.

사사

본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임(이기원). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00241346)(이지현, 이하영).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Attema, E. P. W., and Ulaby, F. T., 1978. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*, 13(2), 357–364. <https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357>
- Baghdadi, N., and Zribi, M., 2016. *Land surface remote sensing in continental hydrology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01226-6>
- Chung, J., Lee, Y., Kim, J., Jang, W., and Kim, S., 2023. Soil moisture estimation using the water cloud model and Sentinel-1 & -2 satellite image-based vegetation indices. *Journal of Korea Water Resources Association*, 56(3), 211–224. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2023.56.3.211>
- El Hajj, M., 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>
- Jeong, J., Cho, S., Jeon, H., Lee, S., and Choi, M., 2022. Assessment of stand-alone utilization of Sentinel-1 SAR for high resolution soil moisture retrieval using machine learning. *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(5–1), 571–585. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2022.38.5.1.11>
- 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(11), 2794. <https://doi.org/10.3390/rs15112794>
- Kim, K., and Lee, K., 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(22), 4550. <https://doi.org/10.3390/rs13224550>
- 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. <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. *Korean Journal of Remote Sensing*, 39(5–1), 599–608. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2023.39.5.1.11>
- Mu, T., Liu, G., Yang, X., and Yu, Y., 2022. Soil-moisture estimation based on multiple-source remote-sensing images. *Remote Sensing*, 15(1), 139. <https://doi.org/10.3390/rs15010139>
- Nadeem, A. A., Zha, Y., Shi, L., Ran, G., Ali, S., Jahangir, Z. et al., 2022. Multi-scale assessment of SMAP level 3 and level 4 soil moisture products over the soil moisture network within the ShanDian River (SMN-SDR) Basin, China. *Remote Sensing*, 14(4), 982. <https://doi.org/10.3390/rs14040982>
- Peng, J., Albergel, C., Balenzano, A., Brocca, L., 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. et al., 2000. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(6), 1281–1300. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<1281:TGSMDB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<1281:TGSMDB>2.3.CO;2)
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I. et al., 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/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>
- Tavakol, A., Rahmani, V., Quiring, S. M., and Kumar, S. V., 2019. Evaluation analysis of NASA SMAP L3 and L4 and SPoRT-LIS soil moisture data in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 229, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.006>
- Zappa, L., Schlaffer, S., Brocca, L., Vreugdenhil, M., Nendel, C., and Dorigo, W., 2022. How accurately can we retrieve irrigation timing and water amounts from (satellite) soil moisture?. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 113, 102979. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102979>