



## Evaluation of bias and uncertainty in snow depth reanalysis data over South Korea

Jeon, Hyunho<sup>a</sup> · Lee, Seulchan<sup>b</sup> · Lee, Yangwon<sup>c</sup> · Kim, Jinsoo<sup>d</sup> · Choi, Minha<sup>e,f,\*</sup>

<sup>a</sup>Ph.D Candidate, Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Spatial Information Engineering, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Spatial Information Engineering, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>e</sup>Professor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>f</sup>Professor, School of Civil, Architecture Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 23-029

Received: 23 June 2023; Revised: 17 August 2023; Accepted: 18 August 2023

### Abstract

Snow is an essential climate factor that affects the climate system and surface energy balance, and it also has a crucial role in water balance by providing solid water stored during the winter for spring runoff and groundwater recharge. In this study, statistical analysis of Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS), Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2), and ERA5-Land snow depth data were used to evaluate the applicability in South Korea. The statistical analysis between the Automated Synoptic Observing System (ASOS) ground observation data provided by the Korea Meteorological Administration (KMA) and the reanalysis data showed that LDAPS and ERA5-Land were highly correlated with a correlation coefficient of more than 0.69, but LDAPS showed a large error with an RMSE of 0.79 m. In the case of MERRA-2, the correlation coefficient was lower at 0.17 because the constant value was estimated continuously for some periods, which did not adequately simulate the increase and decrease trend between data. The statistical analysis of LDAPS and ASOS showed high and low performance in the nearby Gangwon Province, where the average snowfall is relatively high, and in the southern region, where the average snowfall is low, respectively. Finally, the error variance between the four independent snow depth data used in this study was calculated through triple collocation (TC), and a merged snow depth data was produced through weighting factors. The reanalyzed data showed the highest error variance in the order of LDAPS, MERRA-2, and ERA5-Land, and LDAPS was given a lower weighting factor due to its higher error variance. In addition, the spatial distribution of ERA5-Land snow depth data showed less variability, so the TC-merged snow depth data showed a similar spatial distribution to MERRA-2, which has a low spatial resolution. Considering the correlation, error, and uncertainty of the data, the ERA5-Land data is suitable for snow-related analysis in South Korea. In addition, it is expected that LDAPS data, which is highly correlated with other data but tends to be overestimated, can be actively utilized for high-resolution representation of regional and climatic diversity if appropriate corrections are performed.

**Keywords:** Snow depth, ASOS, LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land, Triple collocation

## 한반도 적설심 재분석자료의 오차 및 불확실성 평가

전현호<sup>a</sup> · 이슬찬<sup>b</sup> · 이양원<sup>c</sup> · 김진수<sup>d</sup> · 최민하<sup>e,f,\*</sup>

<sup>a</sup>성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 박사수료, <sup>b</sup>성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 박사수료,

<sup>c</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보공학전공 교수, <sup>d</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보공학전공 교수,

<sup>e</sup>성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 교수, <sup>f</sup>성균관대학교 건설환경공학부 교수

### 요 지

눈은 기후계와 지표면 에너지 평형에 영향을 끼치는 필수 기후 인자이며, 겨울 동안 저장한 고체 형태의 물을 봄에 유출, 지하수 함양 등에 제공하여 물 평형에도 결정적인 역할을 한다. 본 연구에서는 Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS), Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2), ERA5-Land 적설심 자료의 통계 분석을 통해 남한에서의 활용 가능성을 평가하였다. 기상청에서 제공하는 Automated Synoptic Observing System (ASOS) 지상관측자료와 재분석자료간의 통계분석 결과, LDAPS와 ERA5-Land의 상관계수가 0.69 이상으로 상관성이 높게 나타났으나 LDAPS는 RMSE가 0.79 m로 오차가 크게 나타났다. MERRA-2의 경우 일부 기간 동안 일정한 값이 연속적으로 산출되어 자료간 증감 추이를 적절하게 모의하지 못하였기에 상관계수가 0.17로 상관성이 낮게 나타났다. LDAPS와 ASOS의 지점별 통계분석 결과 상대적으로 평균 강설량이 높게 나타나는 강원도 인근에서 성능이 높게 나타났으며, 평균 강설량이 낮게 나타나는 남부 지역에서 성능이 낮게 나타났다. 마지막으로, triple collocation (TC)를 통해 본 연구에서 활용된 4개의 독립적인 적설심자료 간의 오차 분산을 산정하였으며, 나아가 가중치 산정을 통해 융합된 적설심 자료를 생산하였다. 재분석자료는 LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land 순으로 오차 분산이 높게 나타났으며, LDAPS의 경우 오차 분산이 높게 산정되어 가중치가 낮게 산정되었다. 또한, ERA5-Land 적설심 자료의 공간 분포가 변동성이 적게 나타나, TC로 융합된 적설심 자료는 저해상도 영상인 MERRA-2와 유사한 공간 분포가 나타났다. 자료의 상관성, 오차, 불확실성을 고려하였을 때, ERA5-Land 자료가 남한의 대상으로 적설 관련 분석을 하기 적합한 것으로 판단된다. 또한, 타 자료와 경향성은 높게 나타나나 과대 산정되는 경향이 있는 LDAPS 자료를 대상으로 적절한 보정이 수행될 시, 지역 및 기후적 다양성을 높은 해상도로 표출할 수 있는 LDAPS 자료를 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 적설심, ASOS, LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land, Triple collocation

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7529

E-mail: mhchoi@skku.edu (Choi, Minha )

## 1. 서론

방사율(emissivity)과 알베도가 높고 전도율이 낮게 나타나는 눈은 지표면 에너지 평형(surface energy balance)과 기후계(climate system)에 영향을 끼치는 필수 기후 인자(Essential Climate Variable, ECV)이다(Wang *et al.*, 2017; Cohen and Rind, 1991). 또한, 눈은 겨울 동안 물을 고체 형태로 저장한 후, 따뜻한 계절에 유출, 지하수 함양 등에 제공하기에 물 평형에도 결정적인 역할을 한다(Mankin *et al.*, 2015). 최근에는 지구온난화의 영향으로 적설 면적과 적설량의 평균이 감소하는 경향이 나타나고 있으나, 일정 기간 내 특정 백분위수 이상의 강설량을 기록하는 극한 강설은 세계 각지에서 지속해서 발생 중이다(O'Gorman, 2014; Hu *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022).

Water year (WY) 2023에는 미국 남부, 동아시아, 유럽 등 북반구 내 평균 강설량이 적은 지역에서 극한 강설이 다수 발생하여 큰 피해가 기록되었다. 한국 또한 아시아 몬순 기후에 속하는 지역으로 눈으로 인한 피해가 적은 지역이지만, WY 2023에는 일부 산간 지역에서 70 cm 이상의 적설심이 관측되었으며 교통사고와 시설물 붕괴로 인한 피해가 다수 발생하였다. 국내 중·남부지역과 같이 한파와 폭설에 대한 대비가 충분하지 않은 일부 지역에서는 폭설로 인한 피해가 극대화 될 수 있으며, 이를 예방하기 위해서는 적설면적, 강설량, 적설심, Snow Water Equivalent (SWE) 등의 눈 관련 데이터의 평가 및 분석이 필수적이다.

적설 자료의 평가 및 분석을 위해 지상관측자료, 인공위성 기반 원격탐사 자료, 재분석자료 등 여러 데이터가 활용되고 있다(Byun and Choi, 2014; Meromy *et al.*, 2013; Dong and Menzel, 2017). 지상관측자료는 관측하는 지점을 대상으로는 신뢰도가 높은 자료를 제공하지만, 넓은 지역을 공간적으로 대표하기 어렵다. 적절한 밀도의 지상관측센서가 분포한 지역에서는 kriging, Inverse Distance Weighting (IDW) 등의 공간 보간법을 통해 적설 분포를 생성할 수 있으나, 산간 지역과 같이 공간적 변동성이 높게 나타나는 지역에서는 적용이 어렵다(Huang *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2017). 이에 대한 대안으로 원격탐사기법이 적용되며, 적설 자료의 시공간적 변동성 모니터링이 가능하게 되었다(Schmugge *et al.*, 2002). 적설 자료의 원격탐사를 위해 가시광선 영역(0.39~0.70  $\mu\text{m}$ )과 적외선 영역(0.70  $\mu\text{m}$ ~1.00 mm)을 탐지하는 optical sensor (OS)와 전자기파 영역(0.1~100 cm)을 탐지하는 microwave sensor (MS)가 대표적으로 사용되고 있다(Painter *et al.*, 1998; Nolin, 2010). OS는 높은 공간해상도를 갖지만 구름과 같은 기상 영향을 크게 받는 반면, MS는 거친 공간해상도를 갖지만 기상

의 영향이 적고 적설 자료의 특성에 민감하게 반응한다(Dong, 2018). 이에, OS와 MS의 데이터를 복합적으로 활용하여 적설 자료를 개선하는 방법이 다수 제공되어 왔다(Gao *et al.*, 2010; Tait *et al.*, 2000). Land Surface Model (LSM) 또는 예보 모델에 지상관측자료와 원격탐사자료 등을 자료동화(data assimilation, DA)하여 제공되는 재분석자료는 적설 자료의 과거 상태에 대한 정보를 제공할 수 있다. 이러한 재분석자료는 다른 모델의 입력자료로 활용되어 직접 관측할 수 없는 적설 정보를 제공할 수 있음에 장점이 있다(Liu *et al.*, 2012). 최근 연구에서는 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2)와 ERA5-Land와 같은 재분석자료를 활용하여 광범위한 지역의 적설 정보 변동성을 분석하는 연구가 다수 수행되고 있으나, 해당 연구들은 눈이 매우 중요하게 작용하는 지역인 히말라야, 유럽, 미국, 러시아 등에서 주로 수행되고 있다(Liu and Margulis, 2019; Faranda, 2020; Fang *et al.*, 2022; Lei *et al.*, 2023). 국내 기상청에서도 영국의 Unified Model (UM)에 기반하여 생성된 재분석자료인 Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS)를 제공하고 있으며, LDAPS에는 적설심, 적설면적과 같은 적설 자료와 온도, 습도, 토양수분과 같은 여러 수문 기상학적 자료들이 포함되어 있다.

관측 및 모의 자료에서는 오차(error)와 잡음(noise) 등이 나타나며, 참값을 대표한다고 가정할 수 있는 지상관측자료에서도 관측 오류(measurement error)가 발생한다. 지구관측 시스템의 평가 및 보정을 위해서는 관측값과 모의값의 평가 및 분석이 필요하며, 이를 위해 root mean squared error (RMSE), 상관계수(r)와 같은 통계기법이 활용되고 있다. 최근에는 여러 가지 데이터를 동시에 분석하기 위해 triple collocation (TC) 이 수문학 분야에서 다수 활용되고 있다(Park *et al.*, 2023; Baik *et al.*, 2022; Qiao *et al.*, 2022). TC는 어느 한 자료도 참값이 아니라는 가정하에 독립적이며 선형적인 3개의 관측 및 모의 자료의 오류 표준 편차를 산정하는 기법이다. TC를 활용하여 3가지 자료 각각의 오차 분산(error variance)을 산출할 수 있으며, 이를 각 자료의 가중치로 연계하여 하나의 새로운 자료를 생성하는 연구들 또한 다수 수행되고 있다(Stoffelen, 1998; Dong *et al.*, 2020). 한반도를 대상으로 증발산량(Baik *et al.*, 2019b), 토양수분(Baik *et al.*, 2019a)과 같이 수문기상인자에 대해 TC를 수행한 연구가 수행된 바 있으나, 적설 자료에 대한 연구는 미비하다.

최근 기후변화로 인해 폭설 관련 피해가 다수 발생하고 있지만 관련 적설 자료의 평가 및 분석이 부족한 남한을 대상으로, 본 연구에서는 TC 및 기타 통계기법을 활용하여 적설심

지상관측자료와 재분석자료의 평가를 수행하였다. 적설심 자료의 평가를 위한 지상관측자료로는 기상청의 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 자료를 사용하였으며, 재분석자료로는 MERRA-2, ERA5-Land, LDAPS를 활용하였다. 국외 선행연구에서 다수 활용된 MERRA-2와 ERA5-Land에 더하여 LDAPS와 ASOS자료를 같이 활용함으로써 남한에서 독자적으로 생성 중인 적설심 자료의 활용성을 동시에 평가하였고, 향후 지형학적 데이터를 연계한 적설 자료 평가 및 융합을 위한 연구 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 데이터 및 방법론

본 연구에서는 ASOS 지상관측자료, LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land를 사용하였으며, 자료의 자세한 설명은 Table 1에서 확인할 수 있다.

### 2.1 종관기상관측자료(ASOS)

남한의 적설 자료 평가를 위해 본 연구에서는 기상청의 ASOS 지상관측데이터를 활용하였다. 연구 지역에는 총 96개 ASOS 지상관측소가 위치하며, 적설심 관측자료는 1시간 단위로 관측된다(Fig. 1). ASOS 적설센서는 일반적으로 레이저식 적설센서가 활용되고 있으며, 3개 이상의 포인트에서 측정된 값의 산술평균을 통해 대푯값을 계산한다. 본 연구에서는 연구 기간인 2013년 1월부터 2022년 12월까지 ASOS 지상관측자료와 재분석자료가 동일한 시간에 획득되어, 상호 비교 가능한 데이터 수가 100개 이상인 39개 지점을 활용하였다. 연구 기간 중 4월부터 9월까지의 자료는 적설 자료 분석 연구에 영향이 적다고 판단하여 제외하였다.

### 2.2 재분석자료

본 연구에서는 적설심 공간자료의 평가를 위해 재분석자료인 LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land를 활용하였다. LDAPS는 영국 기상청의 UM 모델에 기반하여 한국 기상청에서 개발한 수치예측모델 자료이다. LDAPS의 LSM은 Joint UK Land

Environment Simulator (JULES)에 기반하였으며, 단일면 예측자료는  $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$  공간해상도로 총 136개를 제공한다. LDAPS는 Universal Time Coordinated (UTC) 기준 00, 06, 12, 18시에 1시간 단위 예측자료를 48시간 후까지 예측하여 제공하며, 03, 09, 15, 21시에 3시간 후까지 예측하여 제공한다. 3시간 예측자료는 48시간 예측자료의 DA를 위해 생성되는 자료이며, 본 연구에서는 00, 06, 12, 18 UTC 자료를 활용하였다.

MERRA-2는 three-layer snow scheme과 유역 단위 LSM을 활용하여 적설 자료를 생산한다(Reichle et al., 2017). 본 연구에서는  $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ 의 공간해상도를 갖는 1시간 단위 산출물인 MERRA-2 tavg1\_2d\_lnd\_Nx를 활용하였다.

ERA5-Land는 single layer snow scheme과 Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land (H-TESSSEL) LSM을 활용하여 적설 자료를 생산한다. 본 연구에서는 공간해상도와 시간해상도가 각각  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 와 1시간인 ERA5-Land 자료를 활용하였다.

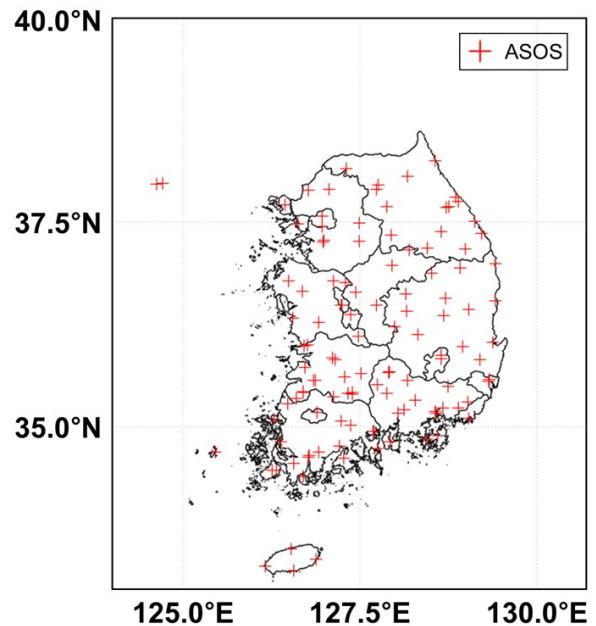


Fig. 1. Study area and distribution of ASOS

Table 1. Detailed information of the snow depth data

Data	Spatial resolution	Temporal resolution	Data source
ASOS	-	Hour	<a href="https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do">https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do</a>
LDAPS	$1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$	6 hour	<a href="https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do">https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do</a>
MERRA-2 tavg1_2d_lnd_Nx	$0.625^\circ \times 0.5^\circ$	Hour	<a href="https://disc.gsfc.nasa.gov/">https://disc.gsfc.nasa.gov/</a>
ERA5-Land	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	Hour	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home</a>

## 2.3 통계분석

본 연구에서는 4가지 적설심 자료 간의 관계성을 평가하기 위해  $r$ 과 RMSE를 활용하였으며, 그 식은 아래와 같다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - G_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Eqs. (1) and (2)에서  $M$ 과  $G$ 는 각각 지상관측자료와 재분석자료를 의미한다.

TC는 세 가지 이상의 선형적이며 독립적인 데이터들의 오류 표준 편차를 계산하는 기법으로, 각 데이터가 참값이 아니라 는 가정하에 수행된다(Stoffelen, 1998). 독립적인 데이터들의 오차 분산을 산정하기 위해 TC는 데이터 간의 공분산 값을 활용한다. TC를 계산하는 식은 아래와 같다.

$$X_i = \alpha_i + \beta_i T + \epsilon_i \quad (3)$$

$$Q_{i,j} = Cov(X_i, X_j) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{Q_{11} - \frac{Q_{12}Q_{13}}{Q_{23}}} \\ \sqrt{Q_{22} - \frac{Q_{12}Q_{23}}{Q_{13}}} \\ \sqrt{Q_{33} - \frac{Q_{13}Q_{23}}{Q_{12}}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Eqs. (3)~(5)에서  $X_i$ ,  $T$ ,  $\epsilon_i$ ,  $Q_{i,j}$ ,  $\sigma_i$ 는 각각 noise, 미지의 참값, zero-mean random error, 공분산, 오차 표준 편차(error standard deviation)를 의미한다. 자료간의 융합을 위해 오차 분산(error variance) 간의 곱을 활용하여 가중치를 계산하였으며, 식은 아래와 같다.

$$\omega_1 = \frac{\sigma_2^2 \sigma_3^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2} \quad (6)$$

$$\omega_2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_3^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2} \quad (7)$$

$$\omega_3 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2} \quad (8)$$

본 연구에서는 TC의 활용을 위해 각 재분석자료의 공간해상도를 1.5 km로 일치시켰으며, 공간해상도의 일치를 위해 최근 이웃(nearest neighbor) 공간 내삽 기법을 활용하였다. 또한, 시간해상도의 경우 데이터 간의 상호비교를 위해 LDAPS 자료를 기준으로 00, 06, 12, 18 UTC의 데이터를 활용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 적설심 자료 오차 및 불확실성 분석

최근 폭설 피해가 다수 보고되고 있는 남한지역을 대상으로 적설심 자료의 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해, 연구기간인 2013년 1월부터 2022년 12월 내에 100개 이상의 적설심 자료를 산출하는 데이터 간의 관계성을  $r$ 과 RMSE로 평가하였다. ASOS 지상관측소가 위치하는 픽셀들을 선정하여 통계분석을 수행하였으며, 분석 결과는 Table 2와 같다.

본 연구에서 사용된 재분석자료의 공간해상도는 LDAPS, ERA5-Land, MERRA-2 순으로, 각각 1.5 km × 1.5 km, 0.1° × 0.1°, 0.625° × 0.5°, 고해상도, 중해상도, 저해상도를 대표한다고 볼 수 있다. 재분석자료 간의 픽셀 크기를 일치시키기 위해 수행한 공간내삽법인 nearest neighbor는 물리적으로 거리가 가장 가까운 픽셀의 값으로 리샘플링하는 기법이다. 자료 간의 상관관계는 해상도가 높은 순서인 LDAPS, ERA5-Land, MERRA-2 순으로 높게 나타났으며, 이는 적설심 재분석자료 간의 공간해상도 차이와 nearest neighbor 내삽 기법의 특성이 ASOS 지상관측자료와 재분석자료의 통계분석에 영향을 끼친 결과인 것으로 판단된다(Table 2). ASOS 지상관측자료와 LDAPS, ERA5-Land 재분석자료는 각각 0.79, 0.69로 높은 상관계수를 보여주었으며, MERRA-2는 0.17로 낮은 상관성이 나타났다. 자료 간의 RMSE는 LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land가 각각 0.42 m, 0.14 m, 0.06 m로 LDAPS의 RMSE가 매우 높게 나타났다. ERA5 적설심 재분석자료는 히말라야, 미국 동부 등 여러 지역을 대상으로 적합성이 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Ma et al., 2023). 남한을 대상으로 수행한 통계 분석에서도 ERA5-Land의 상관계수와 RMSE는 각각 0.69, 0.06 m로 타 재분석자료들 보다 적합성이 높게 나타났다. MERRA-2는 ASOS, LDAPS, ERA5-Land와의 상관계수가 각각 0.17, 0.17, 0.19로 매우 낮게 나타났으며, 남한 적설심 자료와의 선형적인 증감 추이를 적절하게 모의하지 못하는

것으로 판단할 수 있다.

ASOS 지상관측소 39개 지점 중 어느 한 재분석자료와의 상관계수가 0.7 이상으로 나타나는 지점은 속초, 대관령, 북강릉, 서울, 제주, 거창으로 총 6개이다(Table 3). 중해상도 자료인 ERA5-Land는 6개 지점 모두 상관계수가 0.62 이상으로 높은 상관관계가 나타났다. Table 2에서 ASOS 자료와의 상관성이 가장 높게 나타난 LDAPS는 속초, 대관령, 북강릉 지점에서만 높은 상관관계가 나타났다. 속초, 대관령, 북강릉 지점은 강원도에 위치한 관측소로 상대적으로 평균 적설심이 높게 나타나는 지역이다. RMSE 또한 위의 세 지점이 다른 지역들에 비해 높게 나타났으며, LDAPS의 경우 다른 자료들보다 그 차이가 극명하게 나타났다. RMSE가 높게 나타나는 LDAPS와 상관성이 매우 낮게 나타나는 MERRA-2 적설심자료의 분포를 확인하고자 속초 지점의 시계열그래프(Fig. 2)와 히스토그램(Fig. 3)을 활용하였다.

속초 지점은 LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land 모두 ASOS 지상관측자료와 높은 상관관계를 보이는 지점으로, 10년간의 총 관측데이터 수는 543개이다. Fig. 2에서는 2013년 12월부터 2014년 3월까지의 적설심 자료를 시계열 그래프로 나타내었다. 해당 기간 내에 LDAPS의 적설심 값은 지속적으로 과대산정되며 일부 구간에서 다른 자료들에 비해 4배 정도 높게 산출되어 LDAPS의 적설심 값 분포는 0~4 m로, 나머지 자료들의 값 분포는 0~1 m로 지정하였다. 2013년 12월부터 2014년 3월까지 적설심 자료 간의 경향성은 모두 비슷하게 나타났다. ASOS 관측자료 기준 적설심 관측값이 0~0.2 m로 나타나는 비교적 적게 눈이 쌓인 구간에서는 MERRA-2 적설심 자료가 과대산정되는 경향이 나타났으며, 일부 구간에서 동일한 값을 연속적으로 산출되었다. ASOS 관측자료 기준 관측값이 0.2 m 이상인 구간에서는 MERRA-2와 ERA5-Land 모두 과소산정되는 경향을 보였다. 특히 0.4 m 이상의 관측값이 나타나는 구

Table 2. The result of statistical analysis for each snow depth data

Data	ASOS		LDAPS		MERRA-2		ERA5-Land	
	r	RMSE (m)	r	RMSE (m)	r	RMSE (m)	r	RMSE (m)
ASOS	1	0	-	-	-	-	-	-
LDAPS	0.79	0.42	1	0	-	-	-	-
MERRA-2	0.17	0.14	0.17	0.46	1	0	-	-
ERA5-Land	0.69	0.06	0.64	0.45	0.19	0.13	1	0

Table 3. Statistical analysis of reanalysis data by ASOS ground observation station

Site	LDAPS		MERRA-2		ERA5-Land	
	r	RMSE (m)	r	RMSE (m)	r	RMSE (m)
Sokcho	0.84	0.67	0.54	0.14	0.62	0.12
Daegwallyeong	0.80	0.70	0.15	0.13	0.82	0.07
North Gangneung	0.93	1.47	0.45	0.18	0.82	0.13
Seoul	0.14	0.05	0.18	0.14	0.78	0.02
Jeju	0.34	0.04	0.23	0.13	0.73	0.04
Geochang	0.41	0.03	0.29	0.14	0.72	0.07

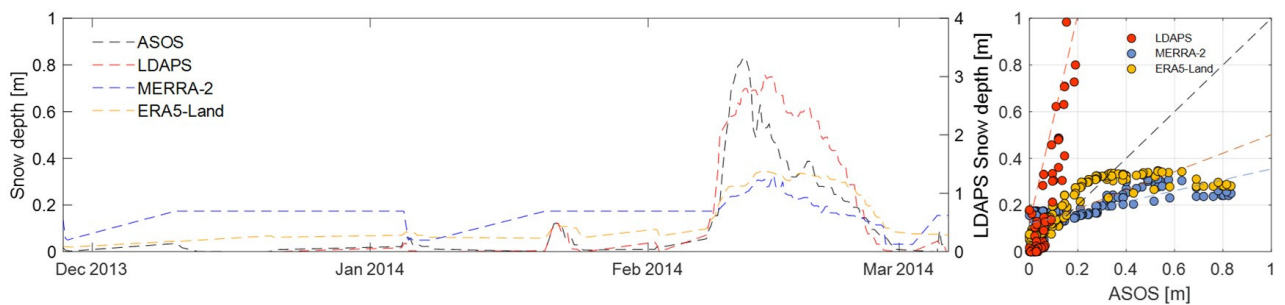


Fig. 2. Time series and scatter plot of snow depth in Sokcho spanning from December 2013 to March 2014

간에서 크기는 0.5 m 정도 과소산정되는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 서술한 바와 같이 중, 저해상도 자료이기에 지점데이터의 세밀한 변동성을 따라가지 못하는 것으로 판단된다. 또한, MERRA-2와 ERA5-Land 모두 0.35 m 이상의 적설심 값을 산출하지 않는 것이 지상관측값에 비해 과소산정되는 원인인 것으로 사료된다. LDAPS의 경우 다른 적설심 자료 값들보다 4배 정도 높은 값이 지속적으로 산출되었으며, 이는 LDAPS 적설심 자료의 보정이 필요함을 시사한다.

적설심 자료간의 값 분포 특성을 확인하기 위해 히스토그램을 활용하였으며, 여러 자료의 분포 특성을 동시에 확인하기 위해 percentage로 나타내었다(Fig. 3). MERRA-2의 경우 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 대다수 픽셀이 0.13~0.17 m의 적설심 값을 나타내었다. 또한, MERRA-2와 ERA5-Land는 적설심 값이 0.35 m 이상인 값을 산출하지 않았다. LDAPS는 1 m 이하의 값만을 추출하여 히스토그램으로 나타내었기에 30% 이상이 0 m로 산출되었으나, 유일하게 0.35 m 이상의 높은 적설심 값을 산출하는 자료이다. 이와 같은 자료 특성에 의해 MERRA-2의 상관관계가 LDAPS보다 낮게 나타나지만 RMSE는 LDAPS가 MERRA-2보다 높게 나타나는 것으로 판단된다.

**3.2 Triple Collocation 기반 자료 오차 분석**

본 연구에서 활용된 3개의 독립된 적설심 재분석자료의 평가를 위해 TC를 활용하였다. Table 3는 데이터 조합별 오차 분

산과 가중치이며 각각 Eqs. (5) and (7)을 통해 산출되었다. ASOS가 포함된 데이터 조합의 경우 지상관측소가 위치한 픽셀들만을 활용하여 TC를 수행하였으며, 재분석자료만으로 구성된 데이터 조합에서는 남한 전역 픽셀으로 TC를 수행하였다.

Figs. 2 and 3에서 나타난 바와 같이 적설심 값이 0.35 m 이하에만 분포하는 MERRA-2와 ERA5-Land 자료의 오차 분산이 가장 낮게 나타났으며, 적설심 값이 0~4 m로 가장 넓게 분포하는 LDAPS의 오차 분산이 가장 높게 나타났다(Table 4). 이러한 특성은 LDAPS가 포함된 자료 조합들에서도 동일하게 나타났다. LDAPS의 오차 분산은 ASOS 자료가 포함되지 않고 재분석자료만을 활용한 L.M.E. (LDAPS, MERRA-2, ERA5-Land) 조합에서 9.546 m로 가장 크게 나타났으며, A.L.M. (ASOS, LDAPS, MERRA-2) 조합에서 4.417 m로 가장 낮게 나타났다. LDAPS를 제외한 ASOS, MERRA-2, ERA5-Land 조합 또한, ASOS 자료의 오차 분산이 유의미하게 큰 값이 나타났다.

오차 분산으로 계산된 가중치에서 LDAPS는 0에 수렴하는 값이 나타났다. 재분석자료만을 활용한 L.M.E 조합에서 각 자료들의 가중치는 0.006, 0.418, 0.576으로 계산되었으며, 이는 TC를 활용하여 융합된 적설심 자료에서 각 자료의 영향을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 2013년부터 2022년까지 10년 동안의 자료 중 남한 지역에서 강설이 발생하는 10월부터 3월까지의 평균 적설 분

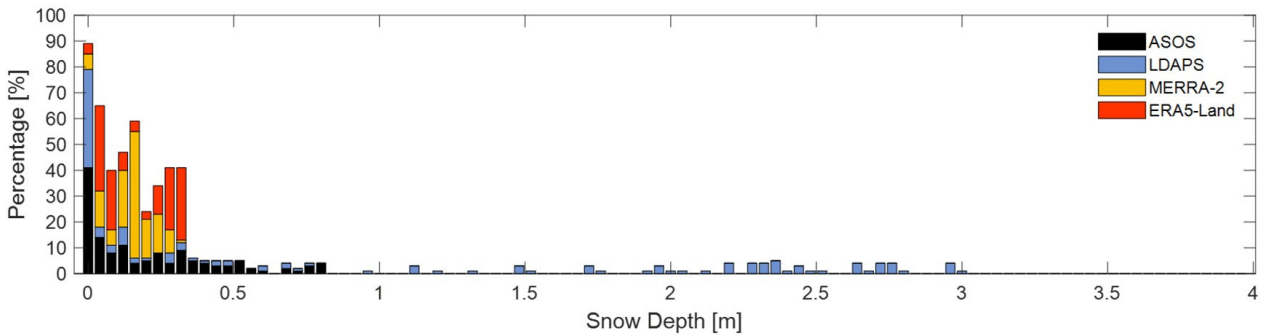


Fig. 3. Percentage histogram of snow depth

Table 4. Error variance and weighting factor of each data set

Data set	Error variance (m)				Weighting factor			
	ASOS	LDAPS	MERRA-2	ERA5-Land	ASOS	LDAPS	MERRA-2	ERA5-Land
A.L.M.	0.132	4.417	0.140	-	0.506	0.015	0.479	-
A.L.E.	0.089	5.843	-	0.162	0.639	0.010	-	0.351
A.M.E	0.244	-	0.138	0.076	0.167	-	0.295	0.538
L.M.E.	-	9.546	0.137	0.100	-	0.006	0.418	0.576

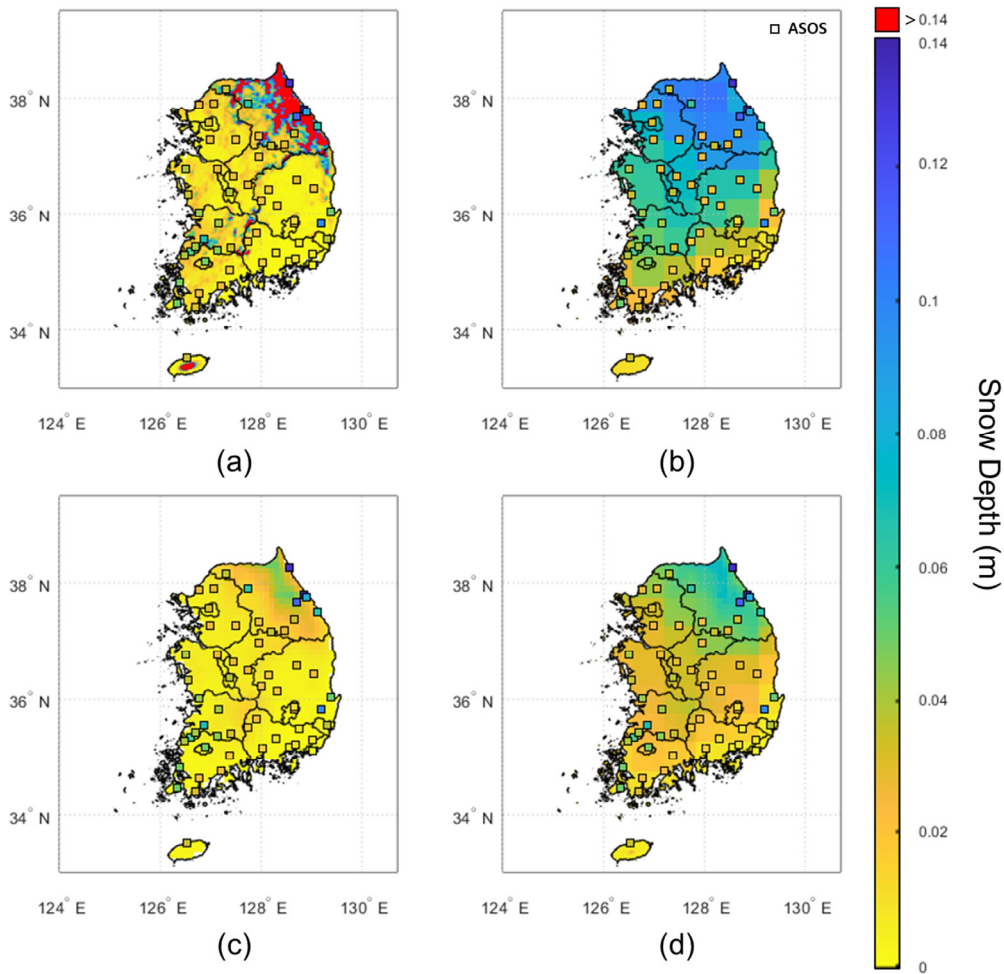


Fig. 4. Spatial distribution of averaged snow depth for the snow season (Oct.~Mar.) from 2013 to 2022 derived from (a) LDAPS, (b) MERRA-2, (c) ERA5-Land and (d) TC-merged snow depth

포를 나타내었다. LDAPS (Fig. 4(a))는 동해 효과로 인해 강설이 다수 발생하는 영동지역부터 고도가 높은 태백산맥을 따라 높은 적설량이 나타났다. 동해 효과는 겨울철 차가운 대기와 따뜻한 동해 해양의 온도차로 인해 발생하는 대기 불안정으로 다량의 강설 구름이 발생하고, 강설 구름이 영동지방으로 유입되며 강설이 발생하는 현상이다(Kim *et al.*, 2021; Cheong *et al.*, 2006). MERRA-2(Fig. 4(b))와 ERA5-Land (Fig. 4(c))는 평균적으로 고도가 높게 나타나는 태백산맥을 따라 적설심 깊이가 높게 분포하고 있다. MERRA-2는 적설심이 가장 높게 관측되는 설악산 인근 픽셀을 기준으로 남해안 해안선까지 적설심 깊이가 균등하게 분포하는 경향을 보였으며, ERA5-Land는 설악산 인근 일부 픽셀을 제외한 나머지 픽셀에서 평균 적설심 깊이가 0~2 cm로 산출되었다. 남한의 지형, 기후, 강설 분포 등과 실제 ASOS 지점별 관측값을 고려하였을 때 기상청의 LDAPS가 다른 재분석자료들보다 다양성을 적합하게 나타

낸다고 사료되나(Fig. 4(a)), 일부 시기에서 매우 과대산정되는 경우에 대한 보정이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 각각 고해상도, 중해상도, 저해상도를 대표하는 LDAPS, ERA5-Land, MERRA-2 자료 중 고해상도 영상의 가중치가 매우 낮게 산정되고 중, 저해상도 영상의 가중치가 비슷하게 산정되어 (Table 4), 융합된 영상의 공간 분포 양상이 저해상도 영상의 분포와 유사하게 나타났다. 또한, LDAPS 자료의 과대 산정되는 경향이 감소하고, 자료의 다양성은 반영되어 실제 관측값과 더 유사하게 거동하는 것으로 나타났다(Fig. 4(d)).

#### 4. 결론

최근 강설 및 적설량의 변화로 파생되는 냉해, 봄가뭄 등에 대한 관심이 전세계적으로 높아지고 있다. 이에 재분석자료를

활용한 적설량 관련 연구가 다수 수행되고 있으나, 한반도를 대상으로 수행된 적설연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 남한을 대상으로 산출되는 적설심 지상관측자료와 재분석자료의 불확실성을 평가하기 위해 통계분석을 수행하였다. 또한, TC를 통해 4개의 적설심 자료 간 오류 표준 편차를 파악하였으며, 재분석자료의 융합을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 적설심 자료간의 통계분석 결과 ASOS 지상관측자료, LDAPS, ERA5-Land 간의 상관계수는 모두 0.64 이상으로 높게 나타났으나 LDAPS의 경우 RMSE가 0.42 m 이상으로 다른 자료들에 비해 크게 나타났다. MERRA-2의 상관계수는 0.19 이하로 매우 낮게 나타났으며, 이는 각 픽셀 별로 일부 기간동안 일정한 값이 연속적으로 산출되어 한반도 내 다른 적설심 자료들과 선형적인 증감 추이를 적절하게 모의하지 못하였기에 낮은 상관계수가 나타난 것으로 파악할 수 있었다.
- 2) ASOS 지상관측자료 지점별 통계분석을 수행한 결과, LDAPS와 MERRA-2는 상대적으로 평균 강설량이 높게 나타나는 강원도 지역에서 높은 성능이 나타났으나, LDAPS의 경우 일부 지역에서 1 m 이상의 RMSE가 나타났다. ERA5-Land는 평균 강설량과 무관하게 상관관계와 오차 분석에 높은 성능이 나타났다.
- 3) 4개의 데이터 조합 간 TC 수행 결과, 적설심 값이 0~4 m로 가장 넓게 분포하는 LDAPS의 오차 분산이 가장 높게 나타났으며, 성능이 가장 높게 나타난 ERA5-Land의 오차 분산이 가장 낮게 나타났다. 높은 오차 분산으로 인해 고해상도 자료인 LDAPS의 가중치가 낮게 산정되었고 ERA5-Land의 공간 분포가 일부 픽셀을 제외하면 모두 유사한 값이 산출되었기에, TC로 융합된 적설심 영상은 저해상도 영상과 유사한 공간 분포가 나타났다.

본 연구를 통해 국외 적설량 연구에서 다수 활용되고 있는 MERRA-2, ERA5-Land 자료와 기상청에서 제공하는 LDAPS, ASOS 자료의 불확실성을 파악할 수 있었다. 자료의 상관성, 오차, 불확실성을 고려하였을 때 ERA5-Land 자료가 적설심 결측시기 및 미관측지를 대상으로 활용하기 적합한 것으로 판단된다. 또한, 타 자료와 경향성은 높게 나타나나 과대산정되는 LDAPS 자료에 대해 Cumulative Distribution Function (CDF) matching 등을 활용하여 보정할 시, 지형, 기후 등의 다양성을 높은 해상도로 표출하는 LDAPS 자료를 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 행정안전부의 “지능형 상황관리 기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-MOIS37-002).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Baik, J., Cho, S., Lee, S., and Choi, M. (2019b). “Analysis on adequacy of the satellite soil moisture data (AMSR2, ASCAT, and ESACCI) in Korean Peninsula: With classification of freezing and melting periods.” *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 35, No. 5, pp. 625-636.
- Baik, J., Jeong, J., Park, J., and Choi, M. (2019a). “A study on the analyzing of uncertainty for actual evapotranspiration: Flux tower, satellite-based and reanalysis based dataset.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 1, pp. 11-19.
- Baik, J., Park, J., Hao, Y., and Choi, M. (2022). “Integration of multiple drought indices using a triple collocation approach.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 36, No. 4, pp. 1177-1195.
- Byun, K., and Choi, M. (2014). “Uncertainty of snow water equivalent retrieved from AMSR-E brightness temperature in northeast Asia.” *Hydrological Processes*, Vol. 28, No. 7, pp. 3173-3184.
- Cheong, S.H., Byun, K.Y., and Lee, T.Y. (2006). “Classification of snowfalls over the Korean Peninsula based on developing mechanism.” *Atmosphere*, Vol. 16, No. 1, pp. 33-48.
- Cohen, J., and Rind, D. (1991). “The effect of snow cover on the climate.” *Journal of Climate*, Vol. 4, No. 7, pp. 689-706.
- Dong, C. (2018). “Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review.” *Journal of Hydrology*, Vol. 561, pp. 573-583.
- Dong, C., and Menzel, L. (2017). “Snow process monitoring in montane forests with time lapse photography.” *Hydrological Processes*, Vol. 31, No. 16, pp. 2872-2886.
- Dong, J., Lei, F., and Wei, L. (2020). “Triple collocation based multi-source precipitation merging.” *Frontiers in Water*, Vol. 2, 1.
- Fang, Y., Liu, Y., and Margulis, S.A. (2022). “A western United States snow reanalysis dataset over the Landsat era from water years 1985 to 2021.” *Scientific Data*, Vol. 9, No. 1, 677.
- Faranda, D. (2020). “An attempt to explain recent changes in European snowfall extremes.” *Weather and Climate Dynamics*, Vol. 1, No. 2, pp. 445-458.
- Gao, Y., Xie, H., Lu, N., Yao, T., and Liang, T. (2010). “Toward



- advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra - Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements." *Journal of Hydrology*, Vol. 385, No. 1-4, pp. 23-35.
- Hu, Z., Dietz, A., Zhao, A., Ureyen, S., Zhang, H., Wang, M., Mederer, P., and Kuenzer, C. (2020). "Snow moving to higher elevations: Analyzing three decades of snowline dynamics in the alps." *Geophysical Research Letters*, Vol. 47, No. 12, pp. 1-11.
- Huang, C.L., Wang, H.W., and Hou, J.L. (2015). "Estimating spatial distribution of daily snow depth with kriging methods: Combination of MODIS snow cover area data and ground-based observations." *The Cryosphere Discussions*, Vol. 9, No. 5, pp. 4997-5020.
- Kim, B.G., Kim, M.G., Kwon, T.Y., Park, G.M., Han, Y.D., Kim, S.B., and Chang, K.H. (2021). "Observation and understanding of snowfall characteristics in the Yeongdong region." *Atmosphere*, Vol. 31, No. 4, pp. 461-472.
- Lei, Y., Pan, J., Xiong, C., Jiang, L., and Shi, J. (2023). "Snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau observed from space in against ERA5: Matters of scale." *Climate Dynamics*, Vol. 60, No. 5-6, pp. 1523-1541.
- Li, Q., Yang, T., and Li, L. (2022). "Evaluation of snow depth and snow cover represented by multiple datasets over the Tianshan Mountains: Remote sensing, reanalysis, and simulation." *International Journal of Climatology*, Vol. 42, No. 8, pp. 4223-4239.
- Liu, Y., and Margulis, S.A. (2019). "Deriving bias and uncertainty in MERRA-2 snowfall precipitation over high mountain Asia." *Frontiers in Earth Science*, Vol. 7, 280.
- Liu, Y., Weerts, A.H., Clark, M., Hendricks Franssen, H.-J., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D.-J., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A.I.J.M., van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S.J., Rakovec, O., and Restrepo, P. (2012). "Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: Progresses, challenges, and emerging opportunities." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 10, pp. 3863-3887.
- Ma, H., Zhang, G., Mao, R., Su, B., Liu, W., and Shi, P. (2023). "Snow depth variability across the Qinghai Plateau and its influencing factors during 1980-2018." *International Journal of Climatology*, Vol. 43, No. 2, pp. 1094-1111.
- Mankin, J.S., Viviroli, D., Singh, D., Hoekstra, A.Y., and Diffenbaugh, N.S. (2015). "The potential for snow to supply human water demand in the present and future." *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 11, 114016.
- Meromy, L., Molotch, N.P., Link, T.E., Fassnacht, S.R., and Rice, R. (2013). "Subgrid variability of snow water equivalent at operational snow stations in the western USA." *Hydrological Processes*, Vol. 27, No. 17, pp. 2383-2400.
- Nolin, A.W. (2010). "Recent advances in remote sensing of seasonal snow." *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 200, pp. 1141-1150.
- O'Gorman, P.A. (2014). "Contrasting responses of mean and extreme snowfall to climate change." *Nature*, Vol. 512, No. 7515, pp. 416-418.
- Painter, T.H., Roberts, D.A., Green, R.O., and Dozier, J. (1998). "The effect of grain size on spectral mixture analysis of snow-covered area from AVIRIS data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 65, No. 3, pp. 320-332.
- Park, J., Baik, J., and Choi, M. (2023). "Triple collocation-based multi-source evaporation and transpiration merging." *Agricultural and Forest Meteorology*, 331, 109353.
- Qiao, D., Li, Z., Zeng, J., Liang, S., McColl, K.A., Bi, H., Zhou, J., and Zhang, P. (2022). "Uncertainty characterization of ground-based, satellite, and reanalysis snow depth products using extended triple collocation." *Water Resources Research*, Vol. 58, No. 4, e2021WR030895.
- Reichle, R.H., Draper, C.S., Liu, Q., Girotto, M., Mahanama, S.P., Koster, R.D., and De Lannoy, G.J. (2017). "Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates." *Journal of Climate*, Vol. 30, No. 8, pp. 2937-2960.
- Schmugge, T.J., Kustas, W.P., Ritchie, J.C., Jackson, T.J., and Rango, A. (2002). "Remote sensing in hydrology." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 8-12, pp. 1367-1385.
- Stoffelen, A. (1998). "Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 103, No. C4, pp. 7755-7766.
- Tait, A.B., Hall, D.K., Foster, J.L., and Armstrong, R.L. (2000). "Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 72, No. 1, pp. 111-126.
- Wang, C.H., Yang, K., Li, Y.L., Wu, D., and Bo, Y. (2017). "Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in eastern China." *Journal of Climate*, Vol. 30, No. 3, pp. 885-903.
- Xu, W.F., Ma, L.J., Ma, M.N., Zhang, H.C., and Yuan, W.P. (2017). "Spatial-temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai-Tibetan Plateau." *Journal of Climate*, Vol. 30, No. 4, pp. 1521-1533.