

기상청 GloSea의 위성관측 기반 토양수분(SMAP) 동화: 예비 실험 분석

지희숙¹⁾ · 황승언¹⁾ · 이조한¹⁾ · 현유경¹⁾ · 류영^{2)*} · 부경은¹⁾

¹⁾국립기상과학원 기후연구부, ²⁾환경부 영산강홍수통제소 예보통제과

(접수일: 2022년 10월 8일, 수정일: 2022년 10월 26일, 게재확정일: 2022년 10월 28일)

Assimilation of Satellite-Based Soil Moisture (SMAP) in KMA GloSea6: The Results of the First Preliminary Experiment

Hee-Sook Ji¹⁾, Seung-On Hwang¹⁾, Johan Lee¹⁾, Yu-Kyung Hyun¹⁾, Young Ryu^{2)*}, and Kyung-On Boo¹⁾

¹⁾Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Forecast and Control Division, Yeongsan River Flood Control Office, Gwangju, Korea

(Manuscript received 8 October 2022; revised 26 October 2022; accepted 28 October 2022)

Abstract A new soil moisture initialization scheme is applied to the Korea Meteorological Administration (KMA) Global Seasonal forecasting system version 6 (GloSea6). It is designed to ingest the microwave soil moisture retrievals from Soil Moisture Active Passive (SMAP) radiometer using the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF). In this technical note, we describe the procedure of the newly-adopted initialization scheme, the change of soil moisture states by assimilation, and the forecast skill differences for the surface temperature and precipitation by GloSea6 simulation from two preliminary experiments. Based on a 4-year analysis experiment, the soil moisture from the land-surface model of current operational GloSea6 is found to be drier generally comparing to SMAP observation. LETKF data assimilation shows a tendency toward being wet globally, especially in arid area such as deserts and Tibetan Plateau. Also, it increases soil moisture analysis increments in most soil levels of wetness in land than current operation. The other experiment of GloSea6 forecast with application of the new initialization system for the heat wave case in 2020 summer shows that the memory of soil moisture anomalies obtained by the new initialization system is persistent throughout the entire forecast period of three months. However, averaged forecast improvements are not substantial and mixed over Eurasia during the period of forecast: forecast skill for the precipitation improved slightly but for the surface air temperature rather degraded. Our preliminary results suggest that additional elaborate developments in the soil moisture initialization are still required to improve overall forecast skills.

Keywords: Soil moisture, Soil Moisture Active Passive (SMAP), Data assimilation, Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF), Global Seasonal forecasting system version 6 (GloSea6)

*Corresponding Author: Young Ryu, Forecast and Control Division, Yeongsan River Flood Control Office, 25, Jukbong-daero 22beon-gil, Seo-gu, Gwangju 61934, Korea.
Phone: [REDACTED], Fax: +82-62-600-8329
E-mail: yubnormal15@gmail.com

1. 서 론

전세계 지표면에 내리는 강우의 약 76%는 토양 내부로 흡수되며, 토양에 존재하는 수분들은 증발산, 유출, 지하수 침투 등을 통해 끊임없이 순환된다(L'vovich, 1979). 토양수분(soil moisture)은 토양에 저장된 수분의 양으로 정의되며, 지표 토양(상단 5 cm)은 대기와 직접 상호작용하기 때문에 매우 중요하다(Seneviratne et al., 2010). 지표 토양수분은 지구의 물순환 측면에서 강우를 유출과 침투로 분할하는 주요 인자이며(Trenberth et al., 2007), 에너지순환 측면에서 태양 복사에너지를 잠열(latent heat)과 현열(sensible heat) 에너지로 분할한다. 또한, 토양수분은 지표면의 CO₂ 교환 과정에서 중요한 구성요소이기도 하다. 한편, 토양수분은 홍수나 가뭄과 같은 물 관련 재해와 밀접한 관련이 있을 뿐 아니라, 식물의 정상적인 광합성 활동에도 결정적인 역할을 하여 작물 수확량 및 생태계 등에도 큰 영향을 미친다.

계절 및 기후예측에 사용되는 기후모델은 내재적인 계통적 오차와 더불어 초기값의 오차로 인한 예보오차가 발생하는데(Stocker et al., 2014), 지면의 열 및 수분 균형에 영향을 미치는 토양수분은 계절예측 정확성의 중요한 요소로 인식되어 왔으며, 이를 초기 자료에 정확하게 반영하기 위한 지면과정 초기화의 중요성도 부각되고 있다(Dirmeyer, 2003; Materia et al., 2014; Yoon and Leung, 2015). 지면 초기상태의 지속기간(memory)은 수개월 이내로서 계절 내에서 계절(sub-seasonal to seasonal, S2S) 시간 규모의 변동성을 잘 표현할 수 있다고 알려져 왔고(Koster and Suarez, 2001; Koster et al., 2010; Paolino et al., 2012), 최근 Seo and Dirmeyer (2022)는 토양수분의 전지구 평균 지속기간은 약 25일이며, 열대지역과 유럽 등지에서는 평균 이상, 유라시아 지역에서는 평균 이하의 지속기간을 보여 지역적 편차가 크다는 것을 정량적으로 산출하기도 하였다. 그렇기 때문에, 폭염, 가뭄, 한파 등에 대한 낮은 예측 정확도의 원인으로 알려진 토양수분의 초기장에 대한 개선은 이들 극한 기상현상의 예측성능을 높이기 위해서 중요하다(Koster et al., 2004; Seneviratne et al., 2010). 따라서, 지면과정 초기화 개선을 통한 예측성능 향상을 위해서 국제적인 프로젝트가 진행되어 왔고(Koster et al., 2006; 2011), 지면모델의 개선, 대기장의 강제력 적용, 지상관측 토양수분 및 수동/능동 원격관측 자료의 활용, 다양한 자료동화 기법 적용 등을 통해 지면초기화를 시도하고 있지만(Reichle et al., 2008, 2017; Seo et al., 2016, 2019, 2020), 대기-지면 상호과정에 대한 낮은 이해도, 관측자료의 큰 불확실성, 자료동화를 포함한 초기화 기법 및 대기모델에 결합된 지면모델의 불안전성 등으로 인해 여전히 많은 기후모델들이 실제에 가까운 지면초

기화를 구현하지 못하고 있다(Dirmeyer et al., 2006; Seneviratne et al., 2010; Reichle et al., 2011).

토양수분에 대한 초기화는 날씨예측모델에서 먼저 시도되었는데, 유럽중기예보센터(European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)는 전통적인 너징(nudging) 방법을 사용하다 1999년에 최적내삽법(optimal interpolation)으로 대체하였으며, 현재는 위성자료를 동화하는 연장 칼만필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 사용 중이다(de Rosnay et al., 2013; Fairbairn et al., 2019). 현업 기후모델의 토양수분 초기화는 대기모델과 재분석자료의 대기강제력 및 강수관측 자료를 사용하여 지면모델(Land Surface Model, LSM)을 구동하여 토양수분을 초기화하는 방법이 대부분이다(Seo et al., 2016; Sospedra-Alfonso and Merryfield, 2018; Kim et al., 2021). 여기에는 지면모델과 결합된 표준 정규화 스케일링 기법(Standard Normal Deviate Scaling, SNDS; Seo et al., 2016, 2019), 변분법(variational method) (Shi et al., 2022), 칼만필터 등이 사용되었으나, 위성에서 원격 관측된 토양수분 자료를 활용하기 시작하면서 사용의 편의성이 높은 칼만필터 기법을 보편적으로 많이 사용하고 있다(Lahoz and De Lannoy, 2014). 현재 Advanced Scatterometer (ASCAT) 및 Soil Moisture and Ocean Salinity 토양수분을 사용하는 ECMWF처럼 관측자료로서 토양수분 위성자료를 직접 동화하는 현업 기관은 영국과 캐나다 기상청 정도로 드물지만(Peng et al., 2021), 위성관측자료를 효과적으로 활용하여 초기화하려는 연구는 꾸준히 진행되고 있으며, 최근에는 앙상블 칼만필터(EnKF; He et al., 2021)나 국지 앙상블 변환 칼만필터(Local Ensemble Transform KF, LETKF; Seo et al., 2021)를 사용한 연구가 시도되고 있다. 최근 Seo et al. (2021)는 Soil Moisture Active Passive (SMAP) 및 ASCAT 위성 관측자료를 LETKF로 동화하여 offline JULES (Joint UK Land Environment Simulator) 지면모델과 결합한 결과, 북미지역에서 토양수분의 초기장이 개선되고, 가뭄에 대한 예측 정확도가 증가함을 보였다. 또한, ASCAT보다는 SMAP을 활용한 동화 결과의 예측성이 상대적으로 더 좋았다.

현재 기상청에서 계절 예측을 위해 2022년부터 현업 운영 중인 앙상블 기후예측시스템(Global Seasonal forecasting system, GloSea)은 S2S 예측성에 점차 더 중요하게 고려되고 있는 토양수분 초기화를 좀 더 실시간에 가깝게 하고자 노력을 기울이고 있다. 과거 기후예측시스템은 ERA-Interim 재분석의 월기후값과 연도별 월평균값을 예측장 및 기후장 초기화에 사용하다가, GloSea version 5 (GloSea5) 운영 중반부터 재분석 대기강제력을 입력자료로 활용한 지면모델 JULES 기반의 토양수분 생산시스템을 구축하여 토양수분을 초기화하여 예측

에 활용하고 있다(Seo et al., 2019; Kim et al., 2021; Lim et al., 2021). GloSea5의 지면초기화를 개선하기 위한 시도로서 Seo et al. (2019)은 offline JULES와 SNDS 기법을 적용하여 1996~2010년 여름철 기간에 대해서 기후장(hindcast) 실험을 실시하여, 주로 건조한 지역에 효과가 있었으나 동아시아에는 큰 영향이 없었고, 지상 기온의 예측성능은 향상되었으나 강수에는 효과가 없다는 결과를 얻었다. 한편, 지면모델 예측자료를 활용하여 초기 자료의 토양수분을 생산하는 방법은 단순함이나 간소함의 측면에서 현업에 적용하기에 장점이 있으나, 방법론의 한계로 인해 현실적인 초기장이 생산되기는 어렵고(Santanello et al., 2019), 실제 현업운영에 있어서도 재분석 대기강제력 자료입수 현황에 따라 3일에서 5일까지 지연이 발생하였다.

본 연구를 통하여 현업 기후예측시스템의 토양수분 초기화과정의 개선을 위해 위성관측 토양수분자료를 활용한 자료동화 기법을 적용한 연구를 수행하였다. 원격 관측자료인 SMAP 위성자료를 LETKF로 동화하는 지면초기화를 적용한 Seo et al. (2021)의 방법을 처음으로 GloSea version 6 (GloSea6) 현업시스템에 적용하였다. 이를 통해 좀 더 현실적인 실시간 토양수분 초기화 시스템을 구축하고자 하였으며, 새로운 시스템의 구축 현황을 이전 시스템과 비교하여 본 기술노트에 제시하였다. 그리고 이 자료동화 기반 지면초기화를 통해 여름철 토양수분에 미치는 장기적 특성을 비교 분석하고, 또한 유라시아의 폭염 기간이었던 2020년 8월 기간 예비 사례실험을 실시하여 GloSea6의 기온과 강수 예측장에 대한 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 본 기술노트의 제2장에서는 현 GloSea6의 지면초기화 과정, 적용된 LETKF 자료동화 체계, 사용된 SMAP 관측자료, 실험 설계 등을 소개하고, 제3장에서는 4년간의 여름철 토양수분과 자료동화 효과의 장기적 특성을, 제4장에서는 사례실험 결과를 바탕으로 토양수분의 정확성, GloSea6의 기온 및 강수 예측성을 기술하고, 제5장에서는 연구 결과를 요약하고, 향후 고려해야 할 사항들에 대해 토의하였다.

2. 지면초기화 시스템 및 자료

2.1 현업 및 개발된 지면초기화 시스템

현업의 지면초기화 과정은 Kim et al. (2021)에 도식적으로 기술되어 있지만, 여기서 좀 더 자세히 설명하도록 한다(Fig. 1a). 지면모델에 의해 모의된 토양수분은 모델 의존도(model-dependent quantity)가 매우 높기 때문에 특정 지면모델에서 생산된 토양수분 정보가 다른 지면모델에서 사용되면 모델의 불일치가 발생될 수 있다(Koster et al., 2009). 기후모델의 계통적 오차를 제어

하기 위해서 기상청에서는 자체 토양수분 생산시스템을 구축하여 GloSea6의 초기값으로 사용한다. 자체 토양수분 생산시스템의 지면모델은 JULES v5.6을 사용하고 있으며, 총 3단계로 구분된다(Fig. 1a).

첫 번째는 전처리 단계이다. JULES 입력자료는 강수, 기온, 습도, 기압, 풍속 자료이며, 6시간 간격의 ECMWF 재분석 자료 ERA5 (the fifth generation of ECMWF Re-Analysis; Hersbach and Dee, 2016)를 사용한다. ERA5는 실시간으로 제공되지 않기 때문에 현업에서는 4-5일 지연된 자료를 활용하고 있다. ERA5 격자 체계를 GloSea6 대기지면 모델 격자해상도 N216 ($0.83^\circ \times 0.56^\circ$)으로 변형하기 위하여 기온, 습도, 기압, 풍속은 선형 보간법으로 내삽하고, 강수 및 장·단파 복사에너지는 mass conserving method를 활용하여 내삽한다. 또한 CMAP (The CPC Merged Analysis of Precipitation; Xie and Arkin, 1997) 강수 관측자료를 활용하여 입력 강수의 월평균이 CMAP과 동일하게 조정하는 선형 비례(linear scaling) 방법 기반의 강수 편차보정을 수행한다.

두 번째 단계는 지면모델 구동이다. 이를 위해 사용한 보조자료(ancillary data)는 GloSea6와 동일하게 사용하였다. Spin-up 과정을 위해 1981년부터 10년간 적분하였다. 하지만, 재분석 자료를 활용하여 생산된 토양수분을 기후모델에 직접 처방하는 경우, 사용된 기후값에 따라 오차가 발생하며, 이는 기후표류(climate drift)를 발생시키는 원인이 된다(Seo et al., 2016). 따라서, 지면모델로부터의 토양수분과 기후모델의 토양수분 값 사이의 큰 불일치를 보정(bias correction)하는 작업이 필수적이다. 이를 위해서 3번째 단계를 수행한다. 이는 후처리로서 두 번째 단계에서 생산된 토양수분의 기후값과 GloSea6를 장기 적분하여 산출된 토양수분 기후값을 CDF (Cumulative Distribution Functions) matching (Reichle and Koster, 2004; Scipal et al., 2008)을 활용하여 오차를 줄인다(Fig. 1a). 본 연구에서는 CDF matching을 위해 offline JULES는 1993.01.01~2020.12.31 자료를 활용하였으며, GloSea6 기후값을 위하여 GloSea6를 8년(1994.01.01~2001.12.31) 장기적분한 자료를 사용하였다. 토양수분은 시공간적 변동성이 매우 크기 때문에 모델에서 나타내는 토양수분의 통계적인 특성을 반영시키기 위해 365일에 대한 CDF 곡선을 생산한다. 이때 다양한 표본이 확보될 수 있도록 현업에서는 적용되는 날 기준으로 앞 뒤 15일, 총 31일에 해당하는 토양수분정보를 확보한다. 즉, CDF 곡선은 일별 및 격자별로 산출되므로, 매일 다른 CDF 곡선을 활용하게 된다.

다음 본 연구에서 GloSea6에 새롭게 적용된 지면초기화 방법에 대해서 기술하도록 한다. 현재의 현업시스템에서 offline JULES에서 생산된 토양수분을 배경장으로 하여 SMAP 위성관측자료를 LETKF 기법에 의해 자

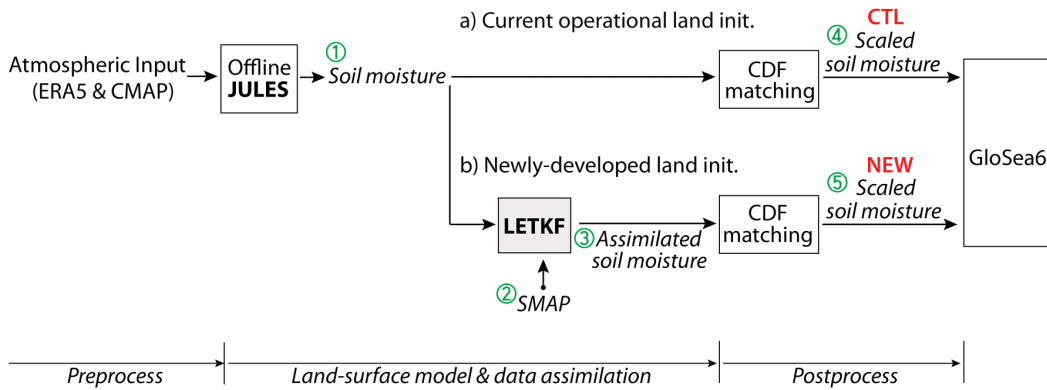


Fig. 1. Schematic diagram of the land-initialization process in (a) current operational GloSea6 and (b) newly-developed data assimilation system in GloSea6. Green circled numbers indicate the product of soil moisture in each step.

료동화하는 체계를 추가하였고, 여기서 생산된 토양수분 분석장은 현업과 마찬가지로 CDF matching을 수행하여 최종적으로 GloSea6의 초기장으로 입력된다(Fig. 1b). 자료동화시스템 LETKF 및 SMAP 관측자료에 대한 설명은 다음 장에서 각각 설명하도록 한다.

2.2 SMAP 자료를 활용한 동화시스템(LETKF)

Offline-JULES 시스템에서 토양수분 생산을 위해 CMAP 자료를 활용하여 강수 보정을 수행하지만, 관측 및 CMAP 자료 생산을 위한 모델의 불확실성 등으로 오차가 발생되며, 이는 추후 GloSea6에 초기장으로 사용될 때 입력 자료의 오차를 발생시킬 수 있다. 이를 경감시키기 위한 한 방법으로 자료동화를 통해 관측 토양수분의 크기와 경향이 토양수분 초기장에 반영될 수 있는 방법들이 사용되는데, 본 연구에서 사용한 자료동화시스템은 LETKF (Hunt et al., 2007; Miyoshi and Yamane, 2007)으로서, Seo et al. (2021)과 동일하다. LETKF는 계산적으로 효율적이고 지점별로 제공되는 관측을 활용하여 고차원 모델 시스템에 쉽게 적용가능한 장점이 있다(Hutt, 2020). LETKF에 대한 상세한 설명은 Seo et al. (2021)을 참고하도록 한다.

본 연구에서는 지면모델 4개층 중에 표층에 대해서만 자료동화를 수행하였다. LETKF에서 사용된 SMAP의 관측 오차는 $0.038 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Chan et al., 2016)로 고정하여 사용하였으며, 별도의 스케일링을 적용하지 않았다. 한편, 배경장 오차 설정을 위해서 GloSea6에서 생산되는 앙상블 퍼짐(spread)을 불확실성으로 반영하였다. GloSea6에서 생산된 1~5일 지연된 4개의 앙상블 예측 토양수분 자료를 활용하였는데, 특정 분석일의 토양수분 배경오차를 산정하기 위해서 그 분석일을 예측한 1일에서 5일 전의 토양수분 예측자료의 앙상블 자료를

활용하였다(Fig. 2). 예를 들어, 2020년 5월 19일에 자료동화를 수행하기 위해 2020년 5월 13일부터 2020년 5월 18일(5일)에 GloSea에서 생산된 4개의 앙상블 멤버에서 산출된 총 20개의 2020년 5월 19일의 예측 토양수분 자료를 확보하여 앙상블 평균값을 제외한 섭동만을 추출한 후 offline JULES의 평균에 더하여 배경 오차를 구축하였다.

2.3 토양수분 SMAP 위성관측자료

미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 2015년에 발사한 SMAP (Entekhabi et al., 2010; 2012)의 복사계는 전지구 토양수분을 관측한다. SMAP은 단일 관측시스템으로 통합된 측정을 위해 L-band 레이더와 L-band 라디오미터(radiometer)를 사용한다. 수동형 마이크로파로 지표 토양수분을 9 km 및 36 km 해상도로 측정하도록 설계되었으며, 2015년 3월 31일부터 1일 간격의 전지구 토양수분 정보를 제공하고 있다. 토양 침투 깊이는 0~5 cm 깊이의 토양을 투과한다. 본 연구에서는 GloSea6에서 사용되는 지면초기장 자료와 유사한 시공간 해상도를 가지는 L-band 라디오미터에서 측정한 36 km 해상도를 가지는 level-3 (L3) 자료를 사용하였으며, 별도의 품질검사(QC) 과정을 수행하지 않았다.

2.4 예비 실험 설계

본 연구에서는 현업 토양수분 생산시스템 대비 새롭게 적용된 지면초기화 과정의 효과를 보기 위해 두가지의 실험을 수행하여 분석하였다. 첫 번째 실험으로서, 가능한 장기간인 2018~2021년 4년간의 여름철에 대해 관측자료와 자료동화 효과의 통계적 특성을 분석하였다. 현업시스템의 offline JULES에서 생산된 토양수분을

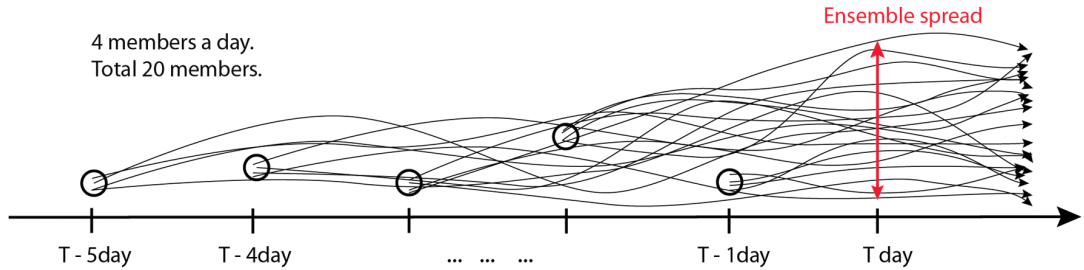


Fig. 2. Schematic figure of ensemble configuration of operational GloSea6 suite for generating background error at time T.

배경장(Fig. 1 ①), SMAP 위성토양수분을 관측장(Fig. 1 ②), 이를 동화한 토양수분을 분석장(Fig. 1 ③)이라 명명하고, 배경장과 관측장의 기후적 특성 및 자료동화의 효과를 분석하였다. 실험은 여름철 기간 동안 일단위로 실시되었다. 이때 위성 관측자료를 활용하여 지면모델 기반의 표층 토양수분이 매일 동화되거나 동화된 정보가 다음 스텝에서 다시 offline JULES에 반영되지는 않는다.

두 번째 실험으로서, 특정 폭염 사례를 선정하여 토양수분이 GloSea6 예측장에 미치는 영향을 분석하였다. 기존 현업과 마찬가지로 새로운 시스템에서 산출된 분석장에서 CDF 과정을 적용한 토양수분(초기장)을 NEW(Fig. 1 ⑤)라 명하였다. 반면, 기존 현업과정에서 생산되는 초기장은 CTL이라 명명하였다(Fig. 1 ④). 사례 선정을 위해 세계적으로 극한 폭염이 오랫동안 지속된 2020년 여름철에 주목하였다. 2020년의 경우 전지구적으로 기준기간(1981~2010년)보다 지면 평균온도가 0.6도 더 높았으며, 유럽과 유라시아 지역에서 기록적인 폭염이 기록되었다(Lopez, 2021). 따라서, 유럽을 포함한 유라시아지역(위도: 30~75°N; 경도: 10~180°E)을 대상으로 초기 토양수분에 따른 예측 변수에 대한 영향을 분석하였다. 이를 위해 현업과 동일한 환경을 설정하여 GloSea6를 구동하였다. 적분 기간은 3개월까지 설정하고 주별로 예측성을 분석하였다. 2020년 5월 19~25일(7일) 적분을 시작하고, 5월 14일부터 20일까지의 초기 토양수분 자료를 사용하였다. 7일간 생산된 예측장 정보는 일별 예측자료를 주별 평균하여 예측 정보의 공간장의 변화를 분석하였다.

3. 여름철 토양수분 장기적 특성

3.1 관측장 및 배경장 정보

본 장에서는 새롭게 개발된 지면초기화 시스템에서 사용된 2018~2021년 여름철 평균 SMAP 관측장을 offline JULES 배경장과 비교하였다(Fig. 3). 관측장(Fig. 3a)과 배경장(Fig. 3b)의 여름철 토양수분 전지구 평균의

차이는 $-0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 으로 나타나 배경장에서 건조 편차가 나타난다(Fig. 3c). 즉, GloSea6의 JULES는 관측보다 지면을 건조하게 모의하고 있다는 사실을 보여준다. 지역적 차이를 보기 위해 Giorgi and Francisco (2000)가 분류한 지역 기준을 사용하여 평균적인 차이를 계산하였다. 관측장과 배경장의 차이가 가장 큰 지역은 동북아메리카(ENA), 그린랜드(GRL), 서북아메리카(WNA) 지역에서 각각 -0.13 , -0.11 , $-0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이다(Fig. 3c). 유럽의 경우 북유럽(NEU)에서 $-0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 아시아의 경우 동남아시아(SEA), 남아시아(SAS), 동아시아(EAS)에서 각각 $-0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $-0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $-0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 차이를 나타냈다. 토양수분의 관측장이나 배경장은 공간적으로 경년 변화를 하나 전체적인 지역적 특성은 유사하게 나타났다.

3.2 자료동화 적용에 따른 토양수분 개선 효과

이 장에서는 LETKF 자료동화를 수행해서 얻어진 분석장(Fig. 1b: ③)을 관측장 및 배경장과 통계적으로 비교하기 위해 4년 분석기간의 토양수분 분포를 확률밀도 함수(pdf)로 도식하였다(Fig. 4). 먼저 전지구적인 분포를 살펴보면, 관측장의 경우 $0.04\text{--}0.70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 범위로 분포되며, 비교적 건조한 구간인 $0.08\text{--}0.22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 의 범위에서 높은 빈도를 나타냈다(Fig. 4a). 반면, 배경장의 경우 매우 건조한 구간인 $0.00\text{--}0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 에서 빈도가 가장 높게 나타났는데, 이렇게 매우 건조한 구간에서의 높은 빈도가 자료동화를 통하여 낮아진 결과를 확인할 수 있다. 유라시아 지역의 경우에서도 자료동화를 통해 분석장이 관측장의 통계적 특성을 유사하게 반영하게 된 것을 알 수 있다(Fig. 4b). 유라시아에서는 $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 전후의 건조한 지역이 많이 분포하는 것으로 나타났고, 이를 중심으로 한 토양수분량 대부분 구간에서 자료동화는 낮은 배경장에 토양수분을 더해주는 효과를 보여주고 있다.

전지구, 유라시아 지역 모두 배경장과 관측장의 차이는 비교적 건조한 곳에서 가장 크게 나타나고 있지만, 비

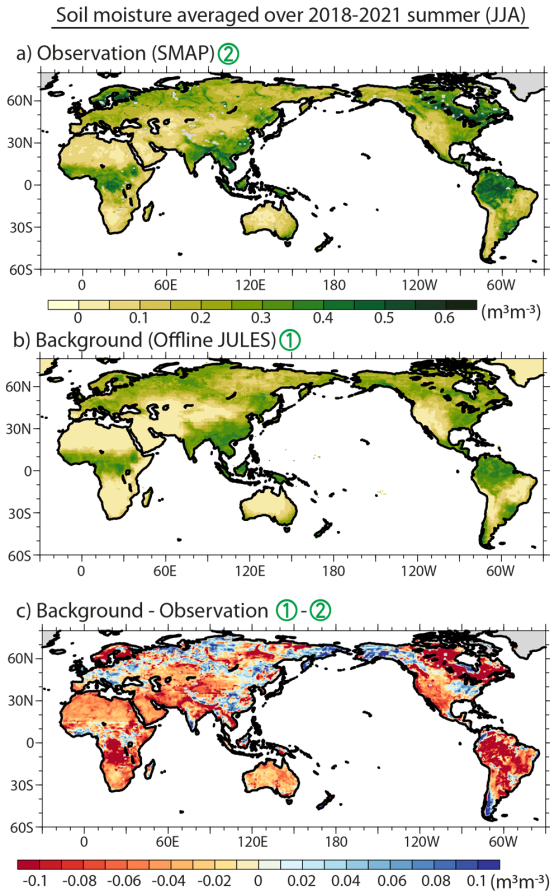


Fig. 3. Global distributions of the averaged soil moisture contents from (a) SMAP observation and (b) background produced by offline JULES during July to August for 2018–2021. (c) denotes the averaged difference between background and SMAP observation. Green circled numbers are referred to those in Fig. 1.

교적 습한 곳에서도 관측장이 배경장보다 높은 빈도를 나타내고 있어서 토양수분의 대부분 구간에서 JULES가 토양수분을 상대적으로 건조하게 모의하고 있다는 것을 알 수 있다. 자료동화를 통해 생산된 분석장은 전지구 평균 $0.13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 으로 배경장보다 8% 증가하여서 SMAP 관측자료의 동화 효과가 잘 반영되고 있음을 보여주며, 가장 빈도가 높게 나타난 구간은 $0.06\text{--}0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이다. 자료동화를 통해 여름철 분석장의 통계 특성이 관측장과 유사해졌으며, 전반적으로 여름철의 토양수분이 증가한 것을 알 수 있다.

SMAP 자료동화를 통해 생산된 분석장에 배경장을 뺀 분석 증분(analysis increments)을 분석해 보면, Fig.

3c에서 나타난 관측 증분의 형태가 대체로 반영되고 있다(Fig. 5a). 유럽, 알래스카, 일부 유라시아 지역에서 건조하게, 사막지역을 포함한 그 외 지역에서는 습윤하게 변화하였는데, 전반적으로 사막이나 산악지대에서는 습하게 변화시키고 있는 것으로 나타났다. 동화 효과는 평균적으로 사막지역에서 $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 북아메리카와 유럽 지역은 $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 아시아는 $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 로 나타났다.

또한, 배경장 토양수분 크기 대비 자료동화를 통한 효과를 분석하기 위하여 different ratio를 계산하였다(Fig. 5b). Different ratio는 변화의 정도를 측정하기 위한 것으로서 배경장 대비 분석장과 배경장의 차이를 비율로 나타낸 값이다. 그 결과, 자료 동화를 통해 배경장과 분석장의 차이는 사막지역을 제외한 지역에서 10%의 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 사막 지역은 배경장 평균 토양수분 자체가 매우 낮기 때문에 different ratio가 50% 이상으로 매우 크게 나타난다. 사막지역 외에 북유럽, 유라시아, 북아메리카 지역에서 그 차이가 크게 나타났으며, 사막 지역과 달리 건조하게 변화되었다.

4. 사례 실험: 2020년 여름철 폭염 사례

본 장에서는 현업시스템에서 산출되는 방법과 동일하게 CDF 과정을 적용한 토양수분(CTL; Fig. 1a: ④)과 자료동화를 적용한 후 CDF 과정을 적용한 토양수분(NEW; Fig. 1b: ⑤)을 비교하고, 이들을 초기장의 토양수분으로 사용한 GloSea6 예측 결과를 비교하고자 한다. GloSea6는 매일 4개의 앙상블 멤버로 예측장을 생산하며, 기상청에서는 매주 생산된 28개, 42개 앙상블을 활용하여 장기예보를 수행하고 있다. 본 연구에서는 7일의 초기장을 활용하여 총 28개(7일 × 4멤버) 모의 결과에 대해서 분석하였다. 분석 기간은 2020년 여름철이며, 5월 19~25일 초기장을 활용하였다. 참고로, 2020년 상반기는 강한 양의 북극 진동에 의해 유라시아 대륙에서 고온 현상이 발생하였으며, 특히 유라시아 지역에서 10월까지 이어지는 강한 고온 현상이 나타났다(Lopez, 2021).

4.1 초기장의 변화

지면초기화의 최종 산출물로서 GloSea6의 초기장으로 사용되는 토양수분의 위성관측 자료동화의 적용 유무에 따라 CTL과 NEW를 비교하였고, 또한 지면초기화 과정 중간 단계에서의 토양수분 변화를 표출하였다(Fig. 6). 이때, 1개월 장기예보에서 사용하는 것과 동일하게 1주일 동안(2020년 5월 14~20일)의 초기장을 분석하였다. 먼저, 현재 현업시스템의 지면초기화 과정을 통한 CTL의 산출 과정을 살펴본다. 유라시아 지역에서 off-line-JULES에서 생산된 토양수분 배경장(Fig. 6a)과 CTL

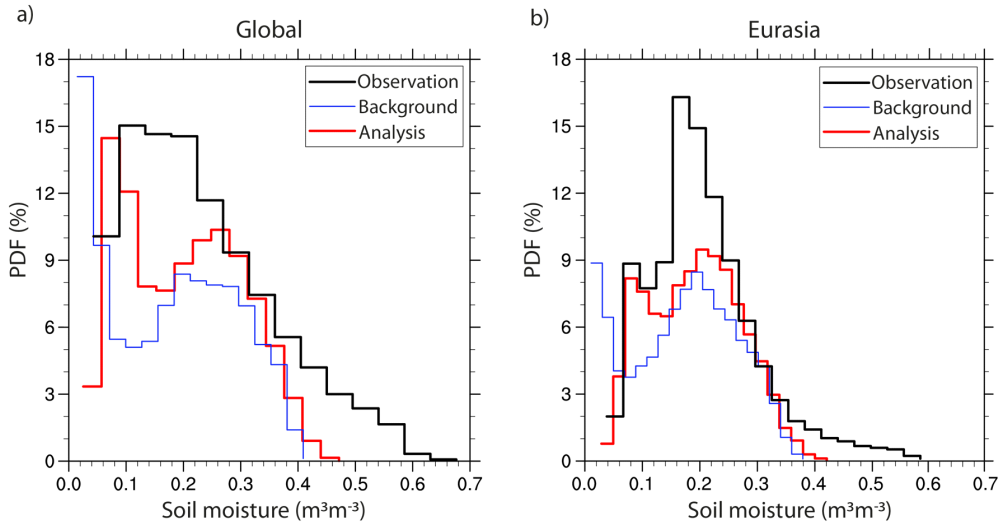


Fig. 4. The probability distribution function of surface soil moisture content as a fraction of saturation from SMAP retrievals (black), background (blue) and analysis (red) during summer season of 2018–2021.

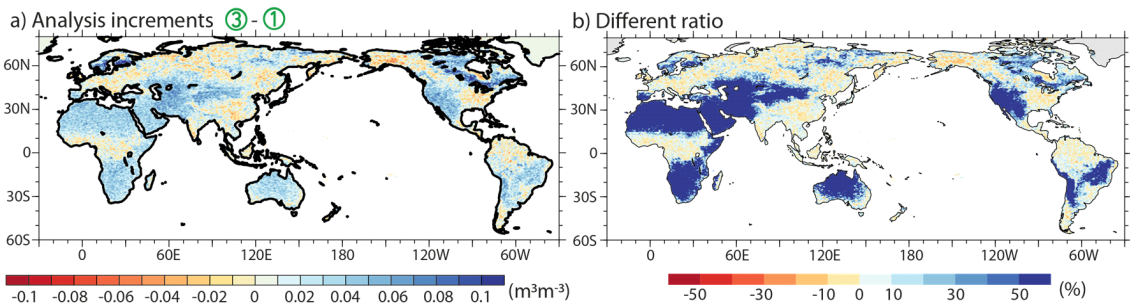


Fig. 5. (a) Analysis increment (analysis – background) and (b) different ratio (analysis increment/background) of soil moisture content averaged during summer season of 2018–2021. Green circled numbers are referred to those in Fig. 1.

(Fig. 6b)을 비교하면, 대부분 지역에서 매우 습윤하게 변화한 모습이 나타난다(Fig. 6c). CDF matching 과정을 거친 결과, 전반적으로 상당히 큰 정도로 토양수분을 더해주는 방향으로 변화시킨 것을 알 수 있는데, 이는 offline JUELS가 GloSea6보다 건조했기 때문에 CDF matching을 통해 보정된 것으로 볼 수 있다.

다음, 새로운 지면초기화 시스템을 통한 NEW의 생산 과정을 살펴본다. LETKF를 통한 분석증분은 티벳고원과 그 북쪽의 중앙아시아 및 북부 동유럽은 습하게, 유럽이나 유라시아 동북부는 건조하게 변화시키고 있음을 나타내며, 증분의 크기는 Fig. 5a의 여름철 평균 분석증분과 지역적 편차만 있을 뿐 거의 비슷하다(Fig. 6d). 또한, 분석장이 CDF matching을 통해 최종적으로 NEW

로 보정될 때, 그 차이(Fig. 6e)는 CTL의 동일한 과정의 결과(Fig. 6c)와 매우 유사한 모습을 보인다. 이들 CDF matching을 거친 크기의 변화들은 LETKF 자료동화 과정을 통해 변화된 분석증분(Fig. 6d)과 비교할 때, 상대적으로 큰 변화라고 볼 수 있다. 즉, CDF matching 과정을 거친 변화가 자료동화과정을 거친 변화보다 정량적인 측면에서 훨씬 크다는 것을 의미한다. 한편, 지면초기화의 최종 산출물인 NEW와 CTL의 차이(Fig. 6f)를 살펴보면, 분석증분(Fig. 6d)보다 평균적으로 크게 나타났는데, 새로운 지면초기화 과정이 티벳고원과 그 북쪽의 중앙아시아 지역의 고산지대는 습하게 만든 반면, 여름철 폭염이 발생한 유럽과 북유라시아 지역은 건조하게 변화시킨 것을 알 수 있다. 이는 초기화과정에서 CDF

A heat wave case initialized in May 14-20, 2020

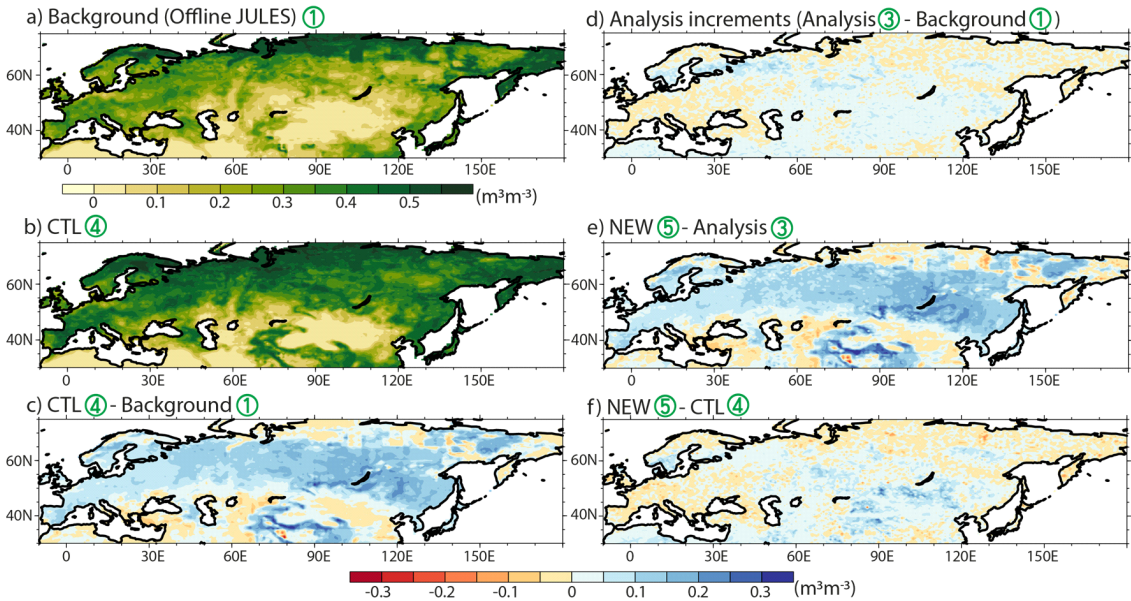


Fig. 6. The initial soil moisture content of (a) background, (b) CTL, (c) the difference between CTL and background, (d) increments from background to analysis (the soil moisture assimilated by LETKF), (e) the difference of NEW from analysis and (f) the difference of NEW from CTL initialized during May 14–20, 2020. Green circled numbers are referred to those in Fig. 1.

matching에 의해 토양수분을 GloSea6의 기후적 분포로 크게 변화시켰지만, 자료동화의 효과가 그만큼 크지는 아니어도 NEW에 잘 반영되어 있다는 것을 보여준다.

한편, NEW와 CTL을 SMAP에 대해 절대오차를 구하면, NEW와 CTL 각각 0.09 및 $0.08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 으로 거의 비슷하게 SMAP보다 습하게 나타나는데, 이는 대부분 CDF matching 과정에 의한 것으로 볼 수 있다. 결과적으로, 두 실험에서 모두 CDF matching으로 크게 습윤하게 변화되지만, NEW는 자료동화를 통해 그 크기는 작지만 중앙아시아와 같이 고도가 높거나 사막지역에서 보다 습윤하게, 유럽 지역 등은 반대로 건조하게 하는 효과를 잘 표현하고 있다. 참고로 유라시아 지역 전체에서의 토양수분은 SMAP은 $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이며, NEW와 CTL은 $0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 로 서로 비슷하였다.

4.2 GloSea6 예측 결과

이 장에서는 CTL과 NEW를 토양수분 초기장으로 한 각각의 GloSea6 3개월 예측 결과에 대해 지상 기온 및 강수량의 예측성에 대해 평가하였다(Fig. 7). 주간별 규모(weekly time-scale)로 두 실험 간의 1, 5, 9, 12주의 예측장의 차이를 나타냈다. 먼저, 1.5 m 기온의 경우 유럽

을 포함한 유라시아 일부 지역 등 NEW가 CTL보다 건조하게 처방된 지역을 중심으로 기온이 높게 나타나 지면의 효과가 1주에서부터 바로 나타나는 것으로 보인다(Fig. 7a). 이 1주 예측장의 차이는 앞 장에서 보인 분석 증분(Fig. 6d) 또는 두 실험의 초기장 차이(Fig. 6f)와 유사한 형태를 갖는 것을 알 수 있다. 예측시간이 길어질수록 NEW와 CTL의 차이 및 그 공간 분포는 유사하지만 편차의 크기는 점점 커지고 있으며, 동유럽을 중심으로 한 지역에서 가장 큰 양의 편차가 나타나며, 동아시아에서도 약하게 양의 편차가 나타난다(Figs. 7b–c). 3개월 예측으로 가면서, 동유럽의 큰 양의 편차 지역은 동편으로 점차 이동하며, 동아시아 지역은 그 편차가 강화되는 모습을 보인다(Fig. 7d). 한편, 초기장에서 습윤 편차를 보인 티벳고원 및 그 북쪽의 중앙아시아에서는 오히려 음의 기온편차를 보이지 않는 것이 특징이다. 양의 기온편차가 나타난 지역은 Lim et al. (2021)에서 제시한 GloSea5에서의 여름철 건조한 토양수분량에 민감한 지역(지중해, 중앙아시아, 티벳고원)에 포함된다. GloSea6에서도 건조한 토양수분의 영향이 크게 나타난 것과 더불어 여름철 습윤하게 처방된 토양수분량에는 민감하지 않은 것을 알 수 있다.

Difference of GloSea6 forecast (NEW - CTL)

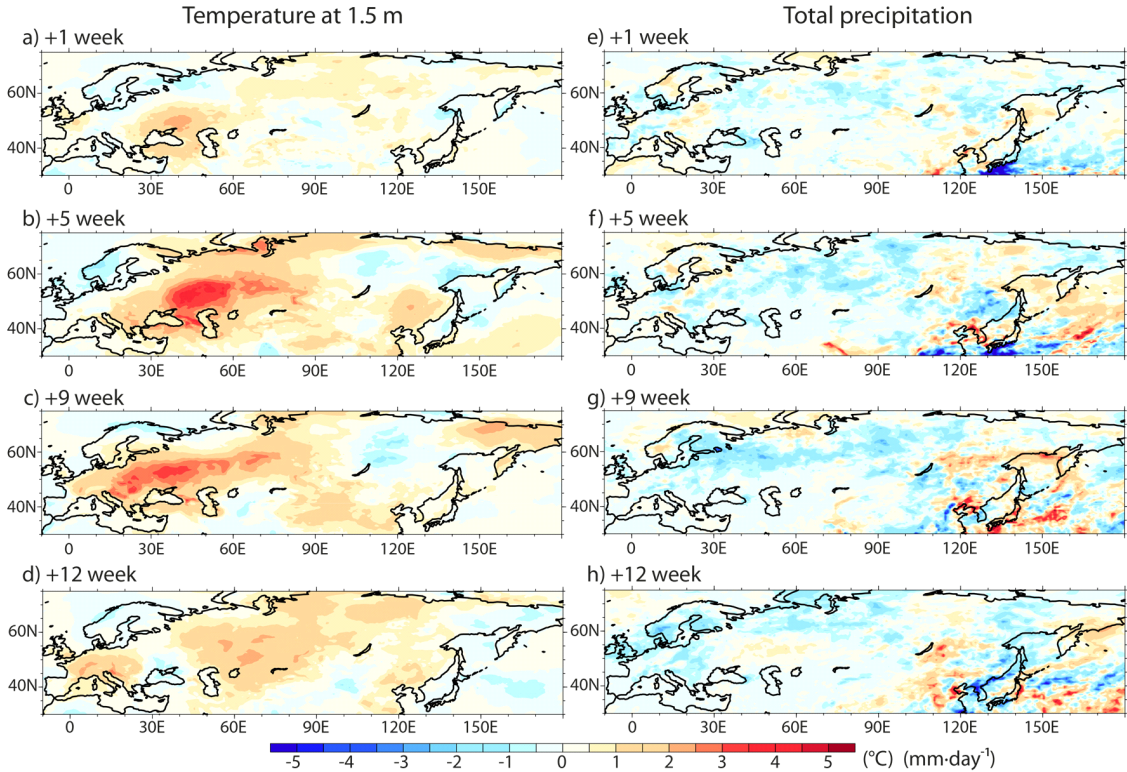


Fig. 7. Difference between the 1.5 m air temperatures of GloSea6 summer 2020 forecasts initiated at late May from NEW and CTL for (a) 1-week, (b) 5-week, (c) 9-week, and (d) 12-week lead times in the left panel. The same as but for precipitation in the right panel.

강수 예측장을 분석한 결과, 1주 예측에서는 지역적 특성이 뚜렷하게 보이지는 않으나, 지상기온이 높게 예측된 지역에서 강수가 적게 나타내는 경향을 보이며, 전체적으로 NEW가 CTL보다 강수량이 적다(Fig. 7e). 예측시간이 길어질수록 NEW가 CTL보다 강수를 더 적게 모의하고 있어서 강수 편차는 시간이 지날수록 대체로 증가한다(Figs. 7e-h). 지역적으로 강수 편차는 기온편차와 반비례 관계를 보여, 유럽지역은 일관되게 강수량이 적은 편차를 보이며, 중앙아시아 지역에서는 대체로 강수의 감소가 나타난다. 동아시아 지역은 몬순지역으로서 강수 편차의 크기가 가장 크지만, 매우 국지적인 규모로 큰 차이를 보인다.

이상에서 예측된 지상기온 및 강수량의 편차 공간분포의 시간에 따른 변화를 분석한 바와 같이, 토양수분의 초기 편차에 의해 대기장에 미치는 영향이 예측기간인 2~3개월까지 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 기후 시스템의 중요한 지속성 요소인 토양수분이 관측을 통

해 2~3개월 정도(Entin et al., 2000), 기후모델에서는 수주에서 수개월 정도(Koster and Suarez, 2001; Seneviratne et al., 2006)의 시간규모를 갖는다는 선행연구와 같이 GloSea6 예측에서도 토양수분 지속성(soil moisture memory)이 잘 나타나고 있다고 볼 수 있다.

두 실험의 예측성능을 평가하기 위해 ERA5 자료를 기준 근거로 활용하여 지상기온과 강수량에 대해 RMSE (Root Mean Square Error)를 계산하였다. 이때, 모델 자체의 체계적 편차(systematic bias)를 제외하기 위해서, 활용가능한 1993~2016년 기간의 GloSea6 hindcast 및 ERA5 자료를 사용하였다. CTL 및 NEW 각각의 예측 결과에 대해서 GloSea6 hindcast에 대한 아노말리를, ERA5에 대해서는 평균장에 대한 아노말리를 계산한 후 아노말리에 대한 RMSE를 계산하여 유라시아 육지 영역에 대한 월별 예측성능(NEW-CTL)을 산출하였다(Fig. 8). 먼저, 기온의 경우 예측기간 대부분 RMSE가 더 커져 예측성능은 안 좋아진 것을 알 수 있는데, 유라시아

서부에서 예측성능이 가장 떨어졌으며 유럽과 동아시아에서도 지속적으로 성능이 좋지 않았다(Figs. 8a-c). 반면, 3개월째인 8월에는 중앙아시아와 티벳고원 등의 반건조 지역에 긍정적인 효과가 나타났다. 두 실험 간의 편차를 나타낸 Fig. 7과 함께 해석한다면, NEW는 유라시아 대부분 지역에 높은 기온을 유도했고(Figs. 7a-d), 그것이 대체로 예측 오차를 크게 한 것으로 나타났다(Figs. 8a-c). 따라서, 본 사례 실험에서 지면초기화를 적용했을 때 기온에 관해서는 예측성능의 이득이 없다고 평가할 수 있다. 한편, 강수의 경우는 반대의 결과를 보여주는데, 예측기간 내내 유라시아 지역에 전반적으로 RMSE가 줄어들어서 예측성능이 좋아진 것을 알 수 있다(Figs. 8d-f). 특히 유럽지역과 유라시아 중부까지 폭넓게 긍정적인 효과가 있었다. 여름철 몬순지역에 위치한 동아시아 지역에서는 그 영향이 매우 국지적으로 혼재되어 나타나고 있어서 단정적으로 평가하기는 어렵다. 따라서, 본 사례 실험에서 적용한 지면초기화의 효과는 기온보다는 강수에 대해서 긍정적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Figure 8에서 계산된 RMSE를 유라시아 육지 지역에서 공간 평균하여 CTL과 NEW에 대해서 각각 주 단위로 표출하였다(Fig. 9). 또한, 계산된 CTL과 NEW 각각

의 RMSE 차이가 통계적으로 유의한 것인지 알아보기 위해서 RMSE 값에 대해서 two-tailed *t*-test 99%의 신뢰도로 검증하여 표시하였다. 1.5 m 기온의 RMSE는 두 실험 모두 4주에서 가장 컸다가, 그 후 대체로 감소하는 추세를 보인다(Fig. 9a). 두 실험의 차이를 보면, NEW가 3개월 예측기간 내내 더 큰 RMSE를 일관되게 나타냈다. 그 차이는 2주 예측에서 0.15°C로 가장 작았고, 9주 예측에서 0.44°C로 가장 컸다. 전체적으로 NEW는 CTL보다 유라시아 지역에서 예측기간 동안 평균적으로 더 높은 기온을 예측한 것으로 나타났고(Fig. 7), 관측과의 오차도 더 클 뿐 아니라, 전 예측기간에서 예측 성능의 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 해당 결과(Fig. 9a)를 통해, 새로운 지면초기화 방법의 적용은 1.5 m 기온 예측에 긍정적인 효과를 보이지 않았다. 반면, 두 실험의 강수에 대한 RMSE의 패턴은 6~7주까지 증가하다가 그 이후 완만히 감소하는 추세를 보이는데, 강수량에 대한 예측성은 지상기온과는 반대의 경향을 보여, NEW의 RMSE가 예측기간 내내 CTL보다 더 적게 나타냈다(Fig. 9b). 두 실험의 RMSE 차이는 첫째 주와 10째 주를 제외한 모든 주에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 한편, 감소된 예측오차의 크기가 적으나, S2S 기간으로 여겨지는 2개월 예보와 그 이후까지

Difference of RMSEs of NEW and CTL forecasts against ERA5

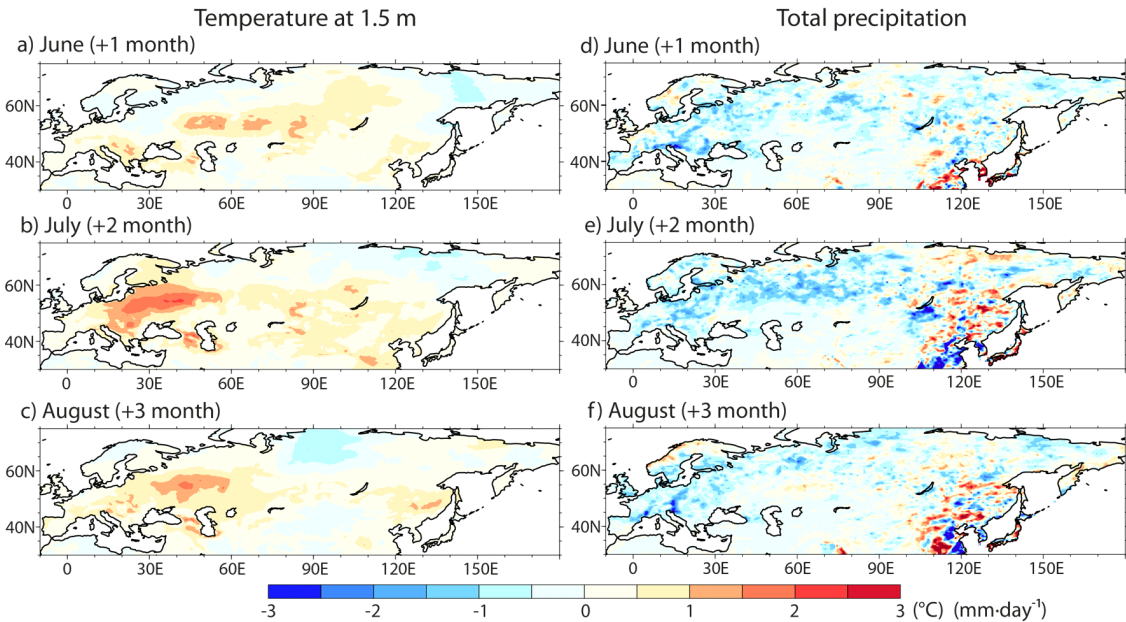


Fig. 8. Difference (NEW – CTL) of RMSEs of GloSea6 summer 2020 forecasts initiated at late May from NEW and CTL on (a) June and (b) July, and (c) August for 1.5 m air temperature anomalies in the left panel. The same as but for precipitation anomalies in the right panel.

GloSea6 forecast skills

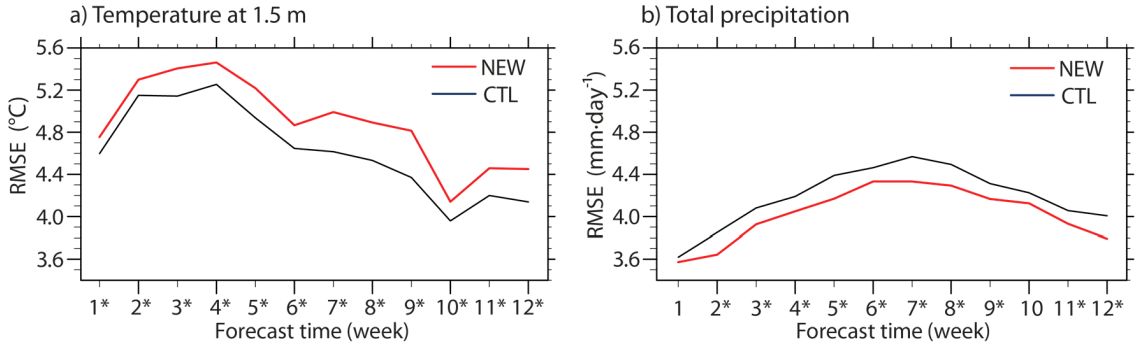


Fig. 9. The weekly RMSEs of the GloSea6 forecasts averaged on Eurasia, initiated from NEW (red) and CTL (black) against ERA5 for (a) 1.5 m air temperature anomalies and (b) precipitation anomalies (include land region). The week numbers with asterisks are significantly exceeding the 99% confidence level.

도 새로운 토양수분 초기화과정이 적용된 효과가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

한편, 이상의 사례실험의 결과는 한 특정 사례의 경우이고, 3개월까지의 계절 예측을 아노말리가 아닌 단정 예측값 자체로서 평가한 결과이다. 따라서, 기후 모델의 전반적인 예측성 평가를 위해서는 향후 hindcast 실험을 통한 기후기간 전체의 성능평가가 필요할 것이다. 또한, 이번 2020년 폭염 사례에 대한 실험에서 기온과 강수량의 예측성 향상이 서로 상반되는 방향으로 나타나는 것은 새로 적용된 토양수분 지면초기화의 각 과정을 면밀히 검토해봐야 할 사항이 있을 것이라는 것을 시사한다.

5. 결론 및 제언

기상청 현업에서는 기후모델에 지면모델을 활용한 토양수분 생산 시스템을 구축하여 지면 초기장을 자체 생산하고 있으며, 보다 정확한 토양수분 자료의 생산을 위해 지면초기화 시스템에서의 전처리 및 후처리 과정의 개선을 지속하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 위성관측 자료 기반의 LETKF 기법을 차용하여 새로운 지면초기화 시스템을 구축하였으며, 그에 따른 초기 예비 실험을 실시하였다. 적용된 지면초기화 시스템에서 생산된 여름철 토양수분의 장기적 특성을 분석하고, 기존 현업시스템의 토양수분과 비교하였다. 또한, 2020년 유라시아 폭염 사례를 선정하여 토양수분 초기화과정 개선에 따른 초기장 및 GloSea6의 예측성 분석을 수행하였다.

SMAP 토양수분과 현재의 GloSea6의 지면모델 JULES의 토양수분을 비교해 보면, JULES 토양수분이 관측 대비 건조 편차를 보이고 있는 것으로 나타났다. 지역적으

로 보면, 북미나 남미 대부분 지역, 그린랜드, 아프리카 남부, 사하라와 호주의 사막지역, 중앙아시아, 세계 여러 높은 산악 지역에서 특히 더 건조하였다. LETKF 자료 동화 기법에 의한 SMAP 위성자료의 동화 결과, 분석장은 배경장보다 전지구적으로 토양수분이 8% 증가하여 JULES의 건조 편차를 개선하였는데, 특히 토양수분이 상당히 낮은 지역인 사막지역과 산악지역에서 크게 개선되었다. 뿐만 아니라 자료동화는 토양수분량 분류 구간 대부분에서 배경장을 더 습하게 만들었다. 또한, 새로 개발된 지면초기화가 GloSea6 예측에는 어떤 변화가 있는지 알아보기 위해 2020년 유라시아에서 발생한 폭염 사례를 선정하여 실험하였다. GloSea6 현업에서 최종적으로 생산된 토양수분 초기장과 본 연구에서 새롭게 생산된 토양수분을 비교한 결과, 지면초기화 과정 중 CDF matching에 의한 변화폭이 LETKF 자료동화에 의한 변화폭보다 훨씬 크긴 했지만, SMAP에 의한 관측장의 특성이 최종 토양수분 초기장에 잘 구현되어 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 자료동화 효과가 반영된 토양수분 초기장을 GloSea6로 예측 모의한 결과, 전반적으로 토양수분 초기장에서 건조(습윤)하게 처방된 지역에서는 지상기온이 증가(감소)하였고 강수량은 감소(증가)하는 공간적 형태를 예측기간 내내 보였다. 그러나, 3개월까지의 예측성 평가에서는, 기온은 예측성이 감소하였고, 강수는 증가하였다. 즉, 기온의 경우 폭염 사례를 과대 모의하여 예측성은 떨어진 반면, 강수의 경우 개선되는 것으로 나타났다. 이는 토양수분의 변화가 증발산을 통해 대기로의 수분 공급에 직접적으로 영향을 미치고, 현열을 변화시켜 강수 분포에 간접적으로 영향을 미친 결과로 추정할 수 있다(Koukoulou et al., 2021).

본 연구에서 적용된 새로운 지면초기화 시스템의 토

양수분을 활용한 GloSea6의 예측 예비실험의 결과는 뚜렷한 개선을 나타내지 못하였고, 예측변수별 일관성을 보이지 못했다. 따라서, 예측성 개선을 위해서는 지면초기화 각 과정에서 보다 면밀한 검토가 더 필요할 것이다. 여기서는 이와 관련하여 고려해봐야 할 몇 가지 사항을 논의해보고자 한다. 첫째, 대기 변수와 달리 토양수분은 공간적 시간적 이질성(heterogeneity)이 매우 큰 변수라는 점이다(Crow et al., 2012). 이 때문에 일반적으로 모델이나 관측에서의 단일 격자 내에서도 많은 토양 정보가 존재하기 때문에 이들을 함께 사용하는 자료동화 시스템에서 관측중분을 표현하는데 주의가 필요하다. 위성자료도 오차를 가지고 있지만, 관측이나 모델의 토양수분을 검토하기 위해 사용하는 지점의 직접관측(in-situ) 토양 자료는 관측 자체가 쉽지 않아 관측지점이 많지 않으며, 나름의 오차를 가지고 있고 또한 매우 국지적인 특징을 반영하고 있어서 지면초기화의 관측자료로서 사용되고 있지 않다(Peng et al., 2021). 이처럼 신뢰할만한 토양수분 자료를 확보하기 어려울 뿐 아니라, 일반적으로 기후모델과 관측자료의 해상도 차이로 기후모델의 입력자료로 가공하는데도 주의가 필요하다. 본 연구에서 지면초기화 각 단계에서 생산되는 토양수분을 지점의 직접관측 자료와 비교한 결과에서도 오차를 나타내고 있다는 점을 확인했기 때문에, 향후 관측 자료를 기후모델에 사용할 때보다 더 면밀한 품질검사 또는 모델과의 적합성을 고려해야 할 것이다.

둘째, 사례실험의 기온 예측성에 관해서 평가해 보면, 현업의 GloSea6 예측은 유라시아 지역에서 평균적으로 양의 기온편차를 보였으나, 새로운 지면초기화를 통한 GloSea6 예측은 그보다 더 큰 양의 편차를 보였기 때문에 예측성이 떨어졌다. 예측을 분석한 결과, 건조하게 처방된 유럽 등지의 지역이 습윤하게 처방된 지역보다 지상기온에 미치는 토양수분의 영향이 훨씬 크게 나타나서, 전체적인 기온의 양의 편차가 나온 것인데 이는 증감된 토양수분으로 인한 모델의 반응이 비선형적일 것이기 때문일 것이다. 이는 Lim et al. (2021)의 여름철 지면초기화에 대한 GloSea5의 영향 결과와 유사한 것으로, GloSea6가 민감하게 반응하는 지역에 대한 초기장 변화와 모델의 반응에 대한 연구가 더 필요할 것이다.

셋째, 본 연구에서는 토양의 4개층 중 표층에 대해서만 동화를 수행했기 때문에, 표층의 동화된 정보가 아래층에 반영되지는 않았다. 따라서, 4개층의 토양수분 상호간 일관성(consistency)을 담보할 수 있는 방안을 고민해야 할 것이다.

넷째, 본 연구에서 새로운 지면초기화 시스템을 이용한 실험은 한 시각의 변화된 토양수분 정보가 다음 스텝의 입력자료로 영향을 주지 않는 독립적인(stand-alone) 체계로 구축되었기 때문에 누적된 자료동화의 효과가

나타나 있지는 않다. 그러므로 가뭄특이 기상연구센터의 가뭄 정보 예측에서의 과정처럼 향후 자료동화의 결과가 시간에 따라 계속 영향을 줄 수 있는 warm-start 실험이 요구된다. 따라서 추후 warm-start를 수행하기 위해서는 일단위로 제공되는 level-3의 위성 관측 자료보다 동일한 공간 해상도에 짧은 시간 해상도로 신속하게 제공되는 SMAP level-2를 사용하여 warm-start에 적합한 설정이 이루어져야 한다.

다섯째, 본 연구에서는 기후모델의 안전성을 위해 지면초기화 과정 중 CDF matching을 가장 마지막 단계에서 수행하도록 설계하였다. 그런데, 실험 결과 CDF matching의 영향이 자료동화의 영향보다 더 큰 결과를 보였을 뿐 아니라, CDF matching으로 인해 자료동화에 사용한 SMAP 관측장파도 더 멀어진 토양수분을 산출해 내기 때문에, 그 전 단계에서 수행되는 LETKF에 의한 자료동화의 효과가 희석될 가능성이 있는 것으로 보인다. Seo et al. (2021)과 ECMWF의 Scipal et al. (2008)의 지면초기화 체계와 같이 CDF matching 후 자료동화를 실시하는 방법도 추후 시도해 볼 만한 것이다.

여섯째, 현 GloSea6의 지면초기화 과정에서 강수 강제력으로 사용되는 CMAP 대신에 Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP; Beck et al., 2017)을 추후 사용하는 방안을 검토해볼 수 있다. MSWEP은 지상관측, 위성관측, 재분석 등의 최근 강수 자료들을 결합하여 만든 자료로서 CMAP보다 더욱 관측에 가깝고 훨씬 고해상도인 0.25° 격자 자료이기 때문에, 지면초기화 과정의 강수 강제력 개선을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 현업 지면초기화의 개선을 위한 토양수분 원격 관측자료의 사용을 시도한 초기 단계에서의 예비 실험으로서 위에서 설명한 바와 같이 보다 정확한 토양수분의 초기장 생산 및 기후모델의 예측성 향상을 위해 더욱 많은 연구가 필요하다. 그러나 전지구적인 온난화가 가속화되고 있는 상황에서 토양수분이 중요한 역할을 하게 되는 폭염과 가뭄 등의 기후예측에 이를 실시간으로 초기화할 수 있는 현업시스템을 구축한 것은 큰 의미가 있겠으며, 또한 시험 결과를 통해 향후 개선점을 도출할 수 있었다. 향후 지면초기화의 각 과정을 보다 더 발전시켜 GloSea6을 활용한 폭염, 가뭄 등 극한 기후에 대한 예측 성능을 개선시키고자 한다.

감사의 글

본 연구를 위해 자료동화시스템을 제공해주신 울산과학기술대학교 도시환경공학과 이명인 교수 연구팀과 서은교 박사님께 감사드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기후예측 현업시스템 개발」(KMA2018-00322)

의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Beck, H. E., A. I. J. M. van Dijk, V. Levizzani, J. Schellekens, D. G. Miralles, B. Martens, and A. De Roo, 2017: MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **21**, 589-615, doi:10.5194/hess-21-589-2017.
- Chan, S. K., and Coauthors, 2016: Assessment of the SMAP passive soil moisture product. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **54**, 4994-5007, doi:10.1109/TGRS.2016.2561938.
- Crow, W. T., and Coauthors, 2012: Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Rev. Geophys.*, **50**, doi:10.1029/2011RG000372.
- de Rosnay, P., M. Drusch, D. Vasiljevic, G. Balsamo, C. Albergel, and L. Isaksen, 2013: A simplified extended Kalman filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **139**, 1199-1213, doi:10.1002/qj.2023.
- Dirmeyer, P. A., 2003: The role of the land surface background state in climate predictability. *Clim. Hydrometeorol.*, **4**, 599-610.
- _____, 2006: The hydrologic feedback pathway for land-climate coupling. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 857-867.
- Entekhabi, D., and Coauthors, 2010: The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proc. IEEE*, **98**, 704-716, doi:10.1109/JPROC.2010.2043918.
- Entekhabi, D., N. Das, E. Njoku, J. Johnson, and J. Shi, 2012: Soil Moisture Active Passive (SMAP) algorithm theoretical basis document L2 & L3 radar/radiometer soil moisture (active/passive) data products [Available online at http://smap.jpl.nasa.gov/files/smap2/L2&3_SM_AP_InitReI_v11.pdf].
- Entin, J. K., A. Robock, K. Y. Vinnikov, S. E. Hollinger, S. Liu, and A. Namkhai, 2000: Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, **105**, 11865-11877.
- Fairbairn, D., P. de Rosnay, and P. A. Browne, 2019: The new stand-alone surface analysis at ECMWF: implications for land-atmosphere DA coupling. *J. Hydrometeorol.*, **20**, 2023-2042, doi:10.1175/JHM-D-19-0074.1.
- Giorgi, F., and R. Francisco, 2000: Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM. *Clim. Dyn.*, **16**, 169-182.
- He, L., J. M. Chen, G. Mostovoy, and A. Gonsamo, 2021: Soil moisture active passive improves global soil moisture simulation in a land surface scheme and reveals strong irrigation signals over farmlands. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL092658, doi:10.1029/2021GL092658.
- Hersbach, H., and D. Dee, 2016: ERA5 reanalysis is in production. *ECMWF Newsletter* [Available online at <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>].
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Phys. D Nonlinear Phenomena*, **230**, 112-126.
- Hutt, A., 2020: Divergence of the ensemble transform Kalman filter (LETKF) by nonlocal observations. *Front. Appl. Math. Stat.*, **6**, 42, doi:10.3389/fams.2020.00042.
- Kim, H., J. Lee, Y. K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021: The KMA global seasonal forecasting system (GloSea6) - part 1: operational system and improvements. *Atmosphere*, **31**, 341-359, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.341 (in Korean with English abstract).
- Koster, R. D., and M. J. Suarez, 2001: Soil moisture memory in climate models. *J. Hydrometeorol.*, **2**, 558-570.
- _____, and Coauthors, 2004: Realistic initialization of land surface states: impacts on subseasonal forecast skill. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 1049-1063.
- _____, and Coauthors, 2006: GLACE: the global land-atmosphere coupling experiment. Part I: overview. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 590-610.
- _____, Z. Guo, R. Yang, P. A. Dirmeyer, K. Mitchell, and M. J. Puma, 2009: On the nature of soil moisture in land surface models. *J. Clim.*, **22**, 4322-4335.
- _____, and Coauthors, 2010: Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: first results from a multi-model experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02402, doi:10.1029/2009GL041677.
- _____, and Coauthors, 2011: The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: soil moisture contributions to subseasonal forecast skill. *J. Hydrometeorol.*, **12**, 805-822, doi:10.1175/2011JHM1365.1.
- Koukoulou, M., C. S. Schwartz, E. I. Nikolopoulos, and E. N. Anagnostou, 2021: Understanding the impact of soil moisture on precipitation under different climate and meteorological conditions: a numerical sensitivity study over the CONUS. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**,

- e2021JD035096, doi:10.1029/2021JD035096.
- Lahoz, W.A., and G. J. M. De Lannoy, 2014: Closing the gaps in our knowledge of the hydrological cycle over land: conceptual problems. *Surv. Geophys.*, **35**, 623-660, doi:10.1007/s10712-013-9221-7.
- Lim, S., Y. K. Hyun, H. Ji, and J. Lee, 2021: Application of land initialization and its impact in KMA's operational climate prediction system. *Atmosphere*, **31**, 327-340, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.327 (in Korean with English abstract).
- L'vovich, M. I., 1979: *World Water Resources and Their Future*. American Geophysical Union, 415 pp.
- Lopez, N., 2021: Copernicus: 2020 warmest year on record for Europe; globally, 2020 ties with 2016 for warmest year recorded [Available online at <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>].
- Materia, S., A. Borrelli, A. Bellucci, A. Alessandri, P. Di Pietro, P. Athanasiadis, A. Navarra, and S. Gualdi, 2014: Impact of atmosphere and land surface initial conditions on seasonal forecasts of global surface temperature, *J. Clim.*, **27**, 9253-9271, doi:10.1175/JCLI-D-14-00163.1.
- Miyoshi, T., and S. Yamane, 2007: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841-3861.
- Paolino, D. A., J. L. Kinter III, B. P. Kirtman, D. Min, and D. M. Straus, 2012: The impact of land surface and atmospheric initialization on seasonal forecasts with CCSM. *J. Clim.*, **25**, 1007-1021, doi:10.1175/2011JCLI3934.1.
- Peng, J., and Coauthors, 2021: A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements. *Remote Sens. Environ.*, **252**, 112162, doi:10.1016/j.rse.2020.112162.
- Reichle, R. H., and R. D. Koster, 2004: Bias reduction in short records of satellite soil moisture. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L19501.
- _____, W. T. Crow, and C. L. Keppenne, 2008: An adaptive ensemble Kalman filter for soil moisture data assimilation. *Water Resour. Res.*, **44**, W03423.
- _____, and Coauthors, 2011: Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates. *J. Clim.*, **24**, 6322-6338, doi:10.1175/JCLI-D-10-05033.1.
- _____, and Coauthors, 2017: Global assessment of the SMAP level-4 surface and root-zone soil moisture product using assimilation diagnostics. *J. Hydrometeorol.*, **18**, 3217-3237, doi:10.1175/JHM-D-17-0130.1.
- Santanello JA Jr., J. A., P. Lawston, S. Kumar, and E. Dennis, 2019: Understanding the impacts of soil moisture initial conditions on NWP in the context of land-atmosphere coupling. *J. Hydrometeorol.*, **20**, 793-819, doi:10.1175/JHM-D-18-0186.1.
- Scipal, K., M. Drusch, and W. Wagner, 2008: Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system. *Adv. Water Resour.*, **31**, 1101-1112.
- Seneviratne, S. I., and Coauthors, 2006: Soil moisture memory in AGCM simulations: analysis of global land-atmosphere coupling experiment (GLACE) data. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 1090-1112.
- _____, 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.
- Seo, E., M.-I. Lee, J.-H. Jeong, H.-S. Kang, and D.-J. Won, 2016: Improvement of soil moisture initialization for a global seasonal forecast system. *Atmosphere*, **26**, 35-45, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.035 (in Korean with English abstract).
- _____, and Coauthors, 2019: Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: mid-latitude surface air temperature and heat wave events. *Clim. Dyn.*, **52**, 1695-1709, doi:10.1007/s00382-018-4221-4.
- _____, _____, S. D. Schubert, R. D. Koster, and H. S. Kang, 2020: Investigation of the 2016 Eurasia heat wave as an event of the recent warming. *Environ. Res. Lett.*, **15**, 114018, doi:10.1088/1748-9326/abbbae.
- _____, _____, and R. H. Reichle, 2021: Assimilation of SMAP and ASCAT soil moisture retrievals into the JULES land surface model using the local ensemble transform Kalman filter. *Remote Sens. Environ.*, **253**, 112222, doi:10.1016/j.rse.2020.112222.
- _____, and P. A. Dirmeyer, 2022: Improving the ESA CCI daily soil moisture time series with physically based land surface model datasets using a Fourier time-filtering method. *J. Hydrometeorol.*, **23**, 473-489, doi:10.1175/JHM-D-21-0120.1.
- Shi, P., and Coauthors, 2022: Contributions of weakly coupled data assimilation-based land initialization to interannual predictability of summer climate over Europe. *J. Clim.*, **35**, 517-535, doi:10.1175/JCLI-D-20-0506.1.
- Sospedra-Alfonso, R., and W. J. Merryfield, 2018: Initialization and potential predictability of soil moisture in the Canadian seasonal to interannual prediction sys-

- tem. *J. Clim.*, **31**, 5205-5224, doi:10.1175/JCLI-D-17-0707.1.
- Stocker, T. F., and Coauthors, 2014: *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1552 pp.
- 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.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 2539-2558.
- Yoon, J. H., and L. R. Leung, 2015: Assessing the relative influence of surface soil moisture and ENSO SST on precipitation predictability over the contiguous United States. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 5005-5013, doi:10.1029/2015GL064139.