

# 위성 기반의 토양 융해 탐지 자료를 이용한 식목일의 적합성 검토\*

박강민<sup>1</sup> · 박선엽<sup>2\*</sup>

## Suitability Assessment of Arbor Day Using Satellite-Based Soil-Thaw Detection and Analyses\*

Kangmin PARK<sup>1</sup> · Sunyurp PARK<sup>2\*</sup>

### 요 약

식목일은 식재를 권장하고 식재 시기가 도래했음을 상징하는 날로서 우리나라의 경우 4월 5일로 정해져 있지만, 지구온난화로 인해 식목일이 실제 식재 시기와 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 1991~2020년 기간을 대상으로 인공위성 기반의 토양 융해 관측 자료(FT-ESDR)를 이용하여 식재 가능 시기의 시작과 현행 식목일 간의 불일치 현상을 확인하고 식재를 위한 대안 시기를 검토하였다. 연구 결과, 한반도의 토양 융해일은 평균적으로 1991~2000년 기간 중 3월 24일이었던 것이 2011~2020년 기간에는 3월 17일로 변화하였다. 토양 융해일을 고려하여 식목일을 변경할 경우, 시·군 수와 면적을 모두 고려할 때 3월 중순을 채택하는 것이 식재 시기의 적합성 측면에서 가장 포괄성이 큰 것으로 분석되었다. 따라서 현행 식목일의 대안으로 적합도가 높은 날은 식수절(3월 14일)과 세계 산림의 날(3월 21일)인데, 이는 시기적으로 한반도 평균 토양 융해일인 3월 19일에 가깝고, 토양 융해일과의 편차가 10일 이내 범위에 놓이는 면적이 한반도 중부를 중심으로 전체의 52.5~58.8%에 달한다는 장점을 갖는다. 기후 변화의 영향으로 토양 융해 시기는 변화할 것으로 예측되기 때문에 식목일 일자를 변경하고자 할 경우에는 미래의 식재 적합 시기가 지속적으로 앞당겨지는 경향을 반영할 필요가 있다.

주요어 : 식목일, 지구온난화, 토양 융해, 식수절, 세계 산림의 날, 기후 변화

### ABSTRACT

Arbor Day is a day that encourages people to plant trees and symbolizes the timing

2023년 08월 13일 접수 Received on August 13, 2023 / 2023년 09월 11일 수정 Revised on September 11, 2023 / 2023년 10월 13일 심사완료 Accepted on October 13, 2023

\* 이 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2020S1A5A2A01043062), 박강민(2023)의 석사학위 청구논문 일부를 수정·보완한 것임.

1 부산대학교, 일반대학원 / Master of Education, Graduate School, Pusan National University

2 부산대학교, 교수 / Professor, Pusan National University

\* Corresponding Author E-mail: spark@pusan.ac.kr

of planting. Arbor Day has been honored on April 5th in Korea, but it often does not agree to actual planting time due to global warming. This study confirmed the discrepancy between Arbor Day and regional soil-thawing times and reviewed alternative dates for tree planting using satellite-based soil-thaw data (FT-ESDR) from 1991 to 2020. Study results showed that the start time of planting on the Korean Peninsula, which was indicated by soil-thaw dates, was March 24 during 1991-2000, and it progressively changed to March 17 during 2011-2020. Should Arbor Day be changed based on soil-thaw periods, mid-March would be the most comprehensive, suitable alternative period considering the number of governmental administration units (cities and counties) and the land area of soil-thaw. Tree-Planting Day (March 14) and International Day of Forests (March 21) were found suitable for alternative dates to Arbor Day because they were close to the average soil-thaw time of Korean Peninsula (March 19) and land area whose soil-thaw time was within 10 days from those two dates ranged from 52.5% to 58.8% centered geographically on the mid-section of the peninsula. Since the periods of soil-thaw will continue to change due to climate change, it is necessary to reflect the trend of advancing planting periods in the future if Arbor Day is changed to an earlier date.

**KEYWORDS** : *Arbor Day, Global Warming, Soil-Thaw, Tree-Planting Day, International Day of Forests, Climate Change*

## 서론

산림은 지구 순환의 중요한 축 중 하나이며 기후 변화에 대응하는 중요한 요소 중 하나다. 지구온난화로 인한 해충, 병원균, 산불, 홍수, 산사태 등 환경적 위협으로 인하여 산림 관리의 어려움이 커지고 있고, 특히 충분히 성장하지 못한 묘목은 기후 변화와 극한 기상 조건에 민감하기 때문에 그 영향은 더욱 크다(Gates, 2012; Seo *et al.*, 2015; Gebeyehu and Hirpo, 2019; Rank *et al.*, 2022). 황폐해진 산림을 복구하기 위한 노력으로 우리나라에서는 전국적으로 묘목을 심는 식목일을 국가적으로 지정하여 산림 확보에 힘쓰고 있다. 한반도에서 나무를 심는 기념일은 일제 강점기였던 1911년에 시작되었다. 조선 후기 온돌 발달로 인한 땀감 채취가 증가하면서 한반도의 산림이 훼손되었고 이로 인한 문제가 일제 강점 초기에 대두되었다. 이에 따라 일본 당국은 수목 보존 의식을 높이기 위해 계몽 녹화 운동의 하나로 신무

천황제(4월 3일)에 기념식수식을 실시했다. 이러한 행사는 매년 전국적인 식수 사업으로 확대 실시되었으며, 4월 첫째 주를 애림(愛林) 주간으로 지정하기도 했다. 산림녹화는 일제의 중요한 정책이었으나, 1930년대 전시체제 수립 이후 별목이 장려되며 한반도 산림은 다시금 황폐화되었다(Choe, 2008; Kim, 2022). 1945년 해방 이후 대다수 산림은 일제에 의한 훼손으로 인해 심각한 황폐화 상태로 유지되었다. 산림에 대한 정책적 관리는 미군정이 1947년 식목일을 제정하면서 시작되었다. 대한민국 정부 수립 후에는 농림부를 중심으로 애림 주간을 제정하는 등 식목에 대한 중요성을 고취시키고자 노력하였다. 1960년에는 식목일이 폐지되어 3월 15일 사방(砂防)의 날로 대체되기도 하였으나 이듬해 식목일은 재지정되었다. 1961년 박정희 정부에서 산림법이 제정되어 산림보호에 대한 의지가 천명되면서 나무의 보호뿐만 아니라 ‘식목’과 ‘조림’을 중심으로 산림정책이 구체화되었다(Kim, 2020). 2000년대 이후, 주 5일제 시행으로 휴일이 늘어남에 따라 2006년부터 식목일

은 공휴일에서 제외되었다.

식재 시기는 나무를 심은 후 식물이 새롭게 뿌리를 내려 생존하는 활착의 정도를 가장 크게 좌우하는 요소다. 그러나 기후 변화로 인하여 식재 적합 시기가 점차 앞당겨짐에 따라 1940 년대에 지정된 식목일을 실제 나무를 심기에 적합한 시기로 보기 힘든 상황이 되었다. 따라서 이러한 환경 변화를 현실적으로 반영하여 식목일 일자를 변경하자는 의견이 1990년대부터 지속적으로 제기되었다. 남한의 식목일에 해당하는 북한의 식수절이 4월 6일에서 현재 3월 14일로 변경된 점과 우리나라에서도 이미 지역적으로 실시하는 식수 행사 시기가 식목일과 적지 않은 차이가 있다는 점도 식목일 일자에 대한 비판 의견의 근거가 되고 있다. 예를 들어, 한반도 남단에 있는 제주시의 경우에는 식목 행사 일자가 식목일과 3주 이상 차이가 난다. 우리나라 정부에서도 식목일 변경에 대한 검토를 진행한 바 있으나, 식목일 변경이 필요할 정도로 기후 변화가 크지 않고, 행정적 비용, 식재기념일의 역사성과 상징성, 그리고 북한 지역에 대한 고려가 필요한 점 등을 이유로 현행 식목일 일자를 유지하고 있다.

식목일 일자 지정의 근거 중 하나로 꼽히는 전통 절기에 관한 최근 연구 보고에 의하면, 주요 절기의 특징이 실제 기후와 부합하지 않고 있으며, 개별 절기가 의미하는 기상 현상이 해당 절기와 시간적으로 근접하는 경우에도 지역적인 절기 부합도는 차별적으로 나타나는 것으로 조사되었다(Jin and Park, 2015). 한반도 전체를 대상으로 한 연구에서도, 1979~2018년 동안의 기상 자료 분석을 통해 식물 성장과 관련된 한반도 절기 기온이 전반적으로 상승함을 확인했다(Park and Lee, 2019). 국내에서 기후 변화로 인한 식물 성장과 개엽 시기의 변화를 확인한 연구는 비교적 다양하게 수행된 바 있으나, 토양의 융해 시기 등 식재 시기에 영향을 미치는 다른 요인의 변화 양상에 주목한 연구는 부족한 형편이다(Lim *et al.*, 2005; Yun, 2006; Kim *et al.*, 2011; Jang, 2012; Cho *et al.*, 2021).

본 연구에서는 미국항공우주국(NASA)이 운영하는 Special Sensor Microwave Imager(SSM/I)와 Special Sensor Microwave Imager/Sounder(SSM/I/S) 기반의 동결/융해 탐지 시스템(Freeze/Thaw Earth System Data Record, FT-ESDR) 자료를 이용해 한반도 대상의 토양 융해 시기를 분석하였다. 동결/융해 탐지 자료(FT-ESDR)를 이용한 연구는 해외에서 여러 차례 수행되었다. Pulliainen *et al.*(2017)의 연구에서는 FT-ESDR을 이용해 북반구 침엽수림 지역의 토양 융해를 추정한 결과를 바탕으로 봄철의 이른 융해와 침엽수림의 탄소 포집 간의 관계를 확인했다. Park *et al.*(2016)는 FT-ESDR 자료를 사용하여 식물의 성장 기간과 생산성에 미치는 영향을 분석하였다. 유럽과 서아시아 지역을 대상으로 한 Metsämäki *et al.*(2018)의 연구는 핀란드 기상연구소 알고리즘과 FT-ESDR을 이용해 지표 동결과 융해일을 추정하였다. 이 연구 결과를 통해 1980~2016년 기간 동안 10년마다 토양 융해일이 3~5일 빨라짐이 확인되었다. Li *et al.*(2021)의 연구 역시 FT-ESDR을 이용해 북반구의 토양 동결 패턴을 분석하였으며, 북반구의 토양 동결 시간과 면적이 감소했다는 결과를 도출하였다. 토양 융해 시기는 기후적 지시자라는 관점에서도 유의미하다. 즉, 토양의 융해 현상을 통해 광합성의 시작 시점을 예측하는 작업이 가능하며(Thum *et al.*, 2009; Böttcher *et al.*, 2014), 북방 침엽수 지역에서의 동물 활동의 추정에도 활용할 수 있다(Pöyry *et al.*, 2018). 또한 지표의 적설 환경은 태양복사에너지의 반사도인 알베도에 중요한 요소로 작용하기 때문에 토양 융해 시점은 지구 열평형과 기후 변화의 측면에서도 매우 중요하다(Barlage *et al.*, 2005).

국내에서도 기상, 기후 및 농업 연구 분야에서 SSM/I와 SSM/I/S 자료를 이용한 연구가 다수 수행되었다. Jee and Lee(2010)의 연구에서는 Multi-Functional Transport Satellite-1 Replacement(MTSAT-1R)의 강우 정확도 검증을 위해 SSM/I, SSM/I/S, Advanced Microwave

Sounding Unit-B(AMSU-B), Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSRE), Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM)의 마이크로파 자료를 이용하였다. Lee *et al.*(2011)의 연구에서는 기상청 전 지구 통합 분석 예측 시스템의 개선을 검증하기 위해 Advanced Tiros Operational Vertical Sounder(ATOVS), Infrared Atmospheric Sounding Interferometer(IASI), SSMIS, Global Positioning System Radio Occultation(GPSRO), Air Craft(CRAFT), Atmospheric Infrared Sounder(AIRS) 자료를 적용했다. Kim *et al.*(2014)의 연구에서는 SSMI와 SSMI/S 기반의 마이크로파 해빙 면적비 자료를 이용해 남극 장보고 과학기지의 항해 경로 분석을 시도하였다. Kim *et al.*(2017)의 연구에서는 광역적이고 연속적인 강수 현상 파악을 위해 원격 탐사 기반의 격자형 강수 자료를 이용하였는데, 다중 위성 기반의 강우 강도 합성장을 산출하고 관측 정확도 개선 효과를 평가하기 위해 SSMI/S 자료를 활용하였다. 반면, 토양 융해 시기의 변동과 관련한 한반도 대상의 연구 성과는 아직 도출되지 못하고 있다. 따라서 본 연구는 원격 탐사 기반의 토양 융해 자료를 이용하여 한반도의 식재 가능 시기의 분포와 변화에 따른 현행 식목일의 적합성을 검토하고, 분석 결과를 바탕으로 식목일의 대안 일자를 평가하고자 한다.

## 연구 방법

### 1. 연구 자료

토양 융해는 지상 기상 관측소의 관측을 통해서 확인할 수 있으나, 관측소의 위치와 수에 의한 물리적 한계로 넓은 지역을 모두 파악하기엔 무리가 있다. 위성 기반의 원격 탐사 자료는 이에 대한 현실적인 대체재로서 광범위한 토양 융해 현상의 탐지에 효과적으로 사용될 수 있다. 원격 탐사 기반의 토양 적설과 융해 자료의 예로는, 미국 항공우주국(NASA)이 운용하는

MODIS 시스템(Dietz *et al.*, 2012)과 동결/융해 관측 자료(Freeze/Thaw Earth System Data Record, FT-ESDR)(Kim *et al.*, 2011), 유럽연합이 지원하는 코페르니쿠스 크라이오랜드 서비스(Copernicus Cryoland Service) 자료(Metsämäki *et al.*, 2005; 2012; Malnes *et al.*, 2015), 핀란드 기상연구소에서 개발한 마이크로파 센서 기반 자료(Takala *et al.*, 2011) 등이 있다. 이 중 본 연구는 취득 가능한 자료 중 지표 관측 기간이 길고 상대적으로 상세한 관측 범위를 가진 미국 NASA의 FT-ESDR Version 5 자료를 분석 대상으로 채택하였다(그림 1). 이 자료는 미국 국방부에서 운영하는 Defense Meteorological Satellite Program(DMSP) 프로그램의 SSMI와 후속 개발한 SSMI/S 마이크로파 센서를 기반으로 한 알고리즘을 통해 토양의 결빙 여부를 산출한다. 마이크로파 센서는 광학 위성과 달리 구름, 안개, 밤, 날씨 등 위성의 관측을 방해하는 요소의 영향을 받지 않고 지구를 관측할 수 있다는 장점을 지닌다.

FT-ESDR 자료는 바다나 호수와 같은 수체 피복이나 국지적 지형의 영향 등으로 관측 정확도에 있어 차이를 보일 수 있다. FT-ESDR 자료는 국지적으로 차별적인 자료의 신뢰도를 확인하기 위해 정확도 평가 결과(Quality Assurance)와 함께 제공되고 있다. 이러한 자료의 정확도는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)가 국가별 지상관측소로부터 수합한 관측 자료와 FT-ESDR의 자료를 상호 비교함으로써 산출된다. 자료 비교의 결과는 Low, Moderate, Good, Best 등 모두 4단계로 정확도가 구분된다. 'Low' 등급은 70% 이하, 'Moderate'는 70~80%, 'Good'은 80~90%, 'Best'는 90% 이상의 정확도를 각각 나타낸다. 본 연구에 사용된 한반도 지역 자료의 정확도는 전체적으로 'Best' 또는 'Good' 등급에 해당해 모든 지역이 최소 80% 이상의 정확성을 보였다(Kim *et al.*, 2017; 2021; 2022; Johnston, 2019).

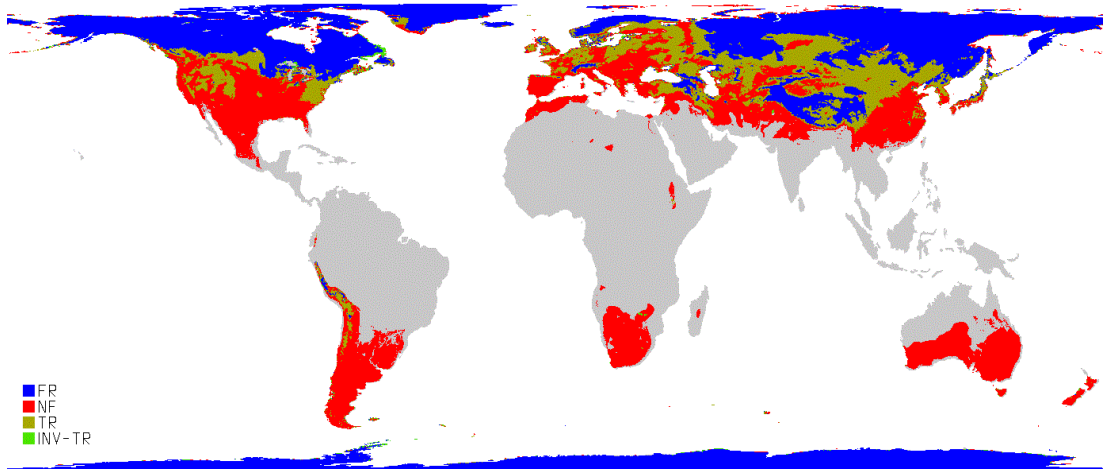


FIGURE 1. FT-ESDR data (Kim *et al.*, 2021)

2. 자료 처리 및 시계열 분석

자료의 연구 기간은 1991~2020년까지로, 해당 시기 한반도의 토양 융해 시기를 분석하여 평균값을 산출하였다. FT-ESDR 데이터는 래스터 자료인 격자(cell) 단위로 제공되며, 전처리 과정은 그림 2와 같다. 첫째, 오전과 오후 단위로 제공되는 FT-ESDR의 자료에서 둘 중 하나라도 동결된 경우 해당 일은 동결로 판정한다. 둘째, 일별 자료는 10일 단위로 동결 또는 융해 상태를 판단하되, 일별 판정 결과의 과반에 따라 동결·융해 상태를 구분하고 10일 단위별로 마지막 날을 해당 순별 자료의 대푯값으로 부여한다. Baik *et al.*(2016)의 연구에서는 동결·융해를 8일 단위로 구분하였으나, 실제

묘목 식재 환경의 고려와 전체적인 추세 그리고 선행 연구된 다수 식재 시기 구분법이 5일 혹은 10일 단위로 되어있다는 점을 반영하여 월별의 시기 구분은 10일 단위의 상순, 중순, 하순으로 분류하였다. 셋째, 순별 판정 결과를 연 단위로 합산하여 연도별 첫 토양 융해일을 산출하였다. 이후 결괏값은 지도화를 위해 1km 단위 공일차(bilinear)내삽법으로 재배열(resample)하였다. 2012년 자료는 위성 점검으로 인하여 관측되지 못하였는데, 해당 자료는 시간적으로 인접해 있는 관측값을 기반으로 결측값을 추정하는 방법의 하나인 선형보간법(linear interpolation)으로 보완하였다. 분석 자료의 통계처리와 시각화를 위해서는 ArcGIS 10.5와 QGIS, SPSS 소프트웨어 프로그램을 사용하였다.

본 연구에서는 토양 융해일의 미래 변동을 예

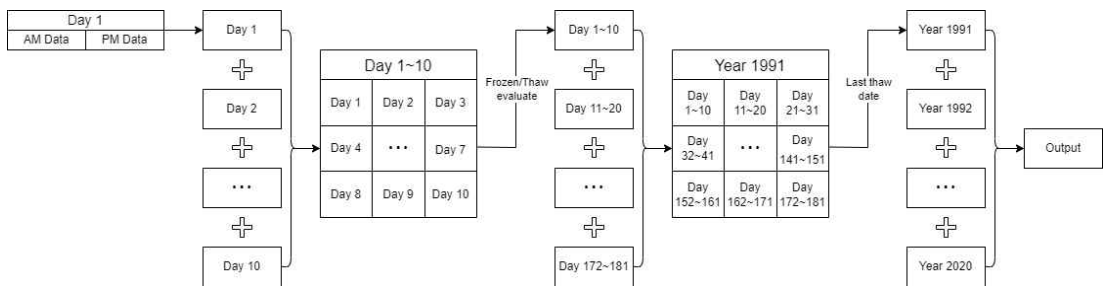


FIGURE 2. Data processing procedures

측하기 위한 시계열 분석법으로 자기회귀누적 이동평균법(Autoregressive Integrated Moving Average, 또는 ARIMA)을 적용하였다. 시계열 자료의 예측의 고전적인 방식은 평활법(smoothing technique) 또는 이동평균법(moving average)인데, ARIMA 모델은 이를 발전시켜 개발된 기법으로서 시계열 예측 분야에서 가장 일반적으로 활용되는 모델이다. 이 방법은 분석 대상이 되는 시계열 자료를 설명하는 잠정 모델 중에서 최적의 모델을 찾아 미래 시점에 대한 예측을 수행하는 것을 목표로 하며 개발자 George Box와 Gwilym Jenkins의 이름을 따라 Box-Jenkins 모형이라 불리기도 한다(Na, 2020). ARIMA 모델은 자료 분석에 필요한 입력 자료의 평균과 분산이 시간의 흐름에 따라 일정한 ‘정상성’ 조건을 필요로 한다. 대부분의 시계열 자료는 정상성을 지니지 못하기 때문에 ARIMA 모델은 정상성을 확보하기 위한 선행 과정으로 ‘차분(differencing)’ 과정을 거쳐 입력 자료를 변환한다. 일정한 시간 간격에 따라 수집된 시계열 자료 중, 시점  $t$ 에서의  $y_t$ 와 시점  $t-1$ 에서의  $y_{t-1}$  간의 차이를 차분  $\nabla y_t = y_t - y_{t-1}$ 로 정의한다. 일차적인 차분 이후에도 자료의 정상성이 확보되지 못하면 2차 차분을 실시하는데, 차분의 차수는 차분을 반복 수행한 횟수를 의미하며 위첨자의 차분 기호로 표시한다. 예를 들어, 1차 차분에 이어 2차 차분을 수행했다면  $\nabla^2 y_t = y_t - 2y_{t-2} + y_{t-2}$ 와 같이 표현한다. 통상, ‘ARIMA(p, d, q)’ 형태로 표현되는 ARIMA 모형은 그 예측 과정에 적용되는 세 가지 계수에 의해 특징 지워진다. ARIMA 모형에 사용되는 계수  $p$ 는 지연 차수(the number of lag observations)를,  $d$ 는 차분하는 횟수를,  $q$ 는 이동평균에 쓰이는 윈도우 크기를 각각 가리킨다. ARIMA 모델은 구조적 복잡성과 분석자의 전문적인 숙련도가 요구된다는 단점이 있지만 예측에 필요한 통계량과 잠정 모델을 검정하여 최적의 모델을 산출함으로써 전반적으로 매우 우수한 예측 결과를 보인다(Park, 2022). 본 연구에서 적용한 모델 산출 방법으로는 Python의 pmdarima 라이브러리 함수인

auto\_arima를 사용하였다. 이 함수는 R에서 일반적으로 사용하는 예측 모형인 forecast의 auto.arima를 이식한 것으로, R의 auto.arima와 동일한 기능을 제공한다. auto\_arima 함수는 상술한 통계량과 같은 모델을 검정하는 다양한 요소를 종합적으로 고려해, 최적의 차수를 산출한다. 자료 특성에 맞는 최적의 차수를 산출하는 auto\_arima를 이용해 차수를 계산한 결과, 한반도 전체 토양 용해일은 (5, 1, 0), 북한 전체 토양 용해일은 (0, 1, 0), 남한 전체 토양 용해일은 (0, 1, 1)의 차수를 각각 적용하였다(Park, 2023).

## 분석 결과 및 논의

### 1. 한반도 전체 용해일 분석

FT-ESDR을 통해 분석한 결과, 토양 용해일 이자 식재 가능 시작일의 한반도 분포는 그림 3과 같다. 한반도의 토양 용해 시기 분포 특징은 겨울 기온과 유사한 패턴을 보이는 것으로 판단된다. 한반도 토양 용해일은 전체적으로 위도 증가에 따라 늦어지지만, 북서풍과 관련된 지형의 영향과 강우 및 강설의 영향, 해류 영향 등이 반영된 것으로 사료된다. 한반도에서 토양 용해일이 가장 빠른 지역은 남해안 지역이며, 가장 느린 지역은 한반도 북단의 개마고원 일대이다. 지리적으로 보아 전라북도 전주 지역을 포함한 우리나라 남서부 일부 지역에서 토양 용해일이 주변 지역보다 상대적으로 늦어지는 것은 특이한 결과로 사료된다. 이는 북서풍과 황해의 영향으로 발생하는 바다 효과(sea effect)와 노령·소백산맥의 지형 장벽의 영향이 반영된 결과로 추정된다. 이 지역은 우리나라 대표적인 다설지역으로서 많은 적설량이 토양 용해일 지연에 영향을 미친 것으로 보인다. 한반도는 시베리아 고기압으로부터 기원한 대륙성 한대 기단인 시베리아 기단의 영향을 받는데, 이 영향권에 드는 시기는 9월 중순부터 오호츠크해 기단이 영향을 끼치기 시작하는 5월 중순까지의 기간이다. 즉, 시베리아 기단에서 남하한 한랭한

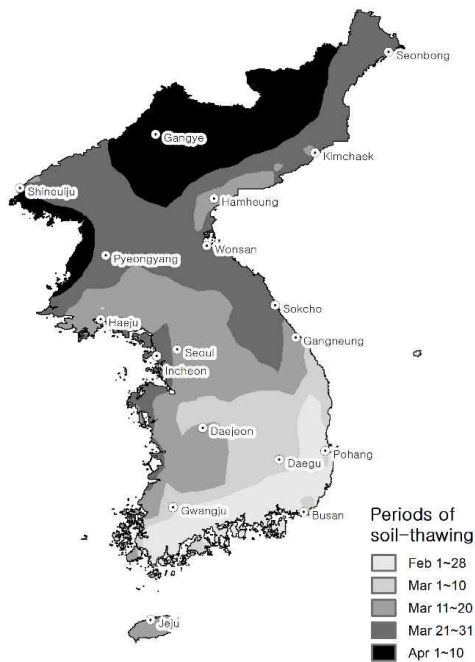


FIGURE 3. Soil-thaw periods for Korean Peninsula

공기가 상대적으로 따뜻한 황해를 지나 남동쪽으로 이동하면서 많은 강설을 내리게 되며, 우리나라를 지나는 이동성저기압과 같은 종관 기후 패턴에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 특히, 노령산맥과 소백산맥 서사면에서는 높은 산지의 영향으로 인해 공기가 사면을 타고 상승하면서 지형성 강설이 발생하는 특징이 나타난다(Lee, 1979; Choi, 1990; Joh *et al.*, 2011).

강원도와 개마고원 지역은 산악 환경으로 인해 주변보다 고도가 높아 토양 융해일은 늦어진다. 제주 지역의 경우 저위도 조건에 비해 상대적으로 토양 융해일이 늦어지는 것으로 나타났는데, 이는 한라산의 높은 고도와 북서풍의 영향을 받은 바다 효과 등이 작용한 결과로 사료된다. 서해안 연안 지역, 특히 서한만(랴오둥반도, 평안도와 황해도의 해안에 이르는 만)과 경기만(황해남도, 경기도, 충청남도의 해안에 이르는

만) 연안 지역의 토양 융해일이 주변보다 현저히 늦게 나타나는 것은 해당 지역의 경사가 완만하여 북서풍의 영향을 직접적으로 받기 때문인 것으로 추정된다. 이와는 대조적으로, 원산만 연안 북부와 울릉도는 주변보다 빠른 토양 융해일을 보인다. 원산만 연안 북부는 주변보다 고도가 낮고 개마고원의 바람그늘 지역에 위치하여 북서풍의 영향이 적고, 울릉도는 동해안 난류의 영향이 상대적으로 크다는 점이 주된 원인으로 각각 추정된다. 위도의 영향으로 남한과 북한의 평균 토양 융해일은 비교적 큰 차이를 보였다. 연구 기간 중 북한 지역의 토양 융해일은 3월 19일~4월 10일 범위로, 전체 기간 평균 토양 융해일은 3월 29일로 각각 조사되었다. 연구 기간 초기 10년 평균 토양 융해일은 4월 1일이었으나 최근 10년 평균 토양 융해일은 3월 25일로 앞당겨져, 변화 속도는 약  $-3.7\text{일}/10\text{년}$ 으로 나타났고 연구 기간 전체에 걸쳐 평균 토양 융해일은 7.3일 빨라졌다. 남한의 경우, 연구 기간 중 토양 융해일은 2월 28일~3월 26일 범위로 조사되었고, 평균 토양 융해일은 3월 8일로 나타났다. 과거 10년(3월 13일, 1991~2000)과 비교하면 최근 10년(3월 5일, 2011~2020)간 평균 토양 융해일은 7일 빨라졌고 변화 속도는  $-3.5\text{일}/10\text{년}$ 으로 나타났다. 시계열 예측 결과, 2030년 한반도의 토양 융해일은 3월 11일에 도달할 것으로 추정되는데, 이는 1991~2000년 한반도 전체 평균 토양 융해일 3월 24일과 비교해 약 13일 빨라지는 것이다. 북한의 2030년 토양 융해일은 3월 25일로 예측되었는데, 과거(1991~2000)에 비해 약 7일 가량 앞당겨지는 결과이다. 남한의 경우, 2030년 토양 융해일은 3월 2일까지 앞당겨질 것으로 예측되었으며, 이는 과거(1991~2000)에 비해 약 11일 앞서는 것이다.

## 2. 토양 융해 면적 및 시군별 분석

국가기념일에 해당하는 식목일은 가능한 많은 범위의 국토에서 식재가 이루어질 수 있도록 적절한 시점을 대표할 필요가 있다. 따라서 국토

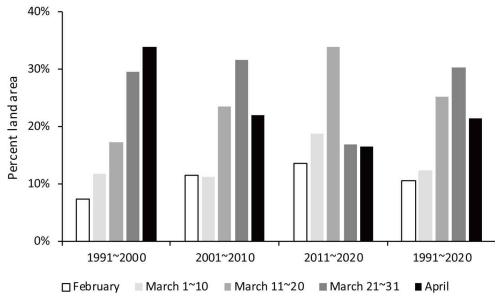


FIGURE 4. Percent land area of soil-thaw by seasons at decadal intervals

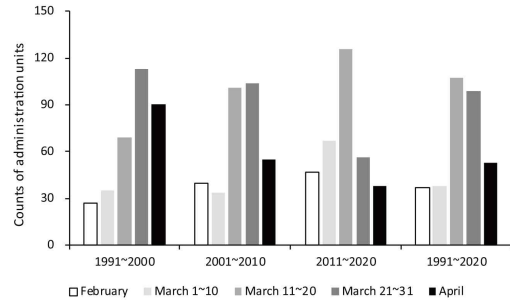


FIGURE 5. The number of administration units under the soil-thaw condition by seasons at decadal intervals

의 면적 혹은 실제 식재 관리가 이루어지는 행정 단위인 시·군의 수 차원에서, 식재가 가능한 토양 융해 조건이 가장 포괄적으로 만족되는 시기가 검토되어야 한다. 분석 결과에 따르면, 연구 기간 초기(1991~2000) 10년을 기준으로, 토양 융해가 시작된 면적(시·군 수)은 2월에 7.3%(27개 시·군), 3월 1~10일에 11.8%(35개 시·군), 3월 11~20일에 17.4%(69개 시·군), 3월 21~31일에 29.6%(113개 시·군), 4월에 34.0%(90개 시·군)로 각각 조사되었다. 2001~2010년 기간 중 토양 융해 면적(시·군 수)은, 2월에는 11.6%(40개 시·군), 3월 1~10일에 11.3%(34개 시·군), 3월 11~20일에 23.5%(101개 시·군), 3월 21~31일에 31.6%(104개 시·군), 4월 중에는 22.1%(55개 시·군)로 각각 나타났다. 가장 최근 시기인 2011~2020년 기간에는, 2월에 13.7%(47개 시·군), 3월 1~10일에 18.8%(67개 시·군), 3월 11~20일에 34.0%(126개 시·군), 3월 21~31일에 17.0%(56개 시·군), 4월에 16.6%(38개 시·군) 면적(시·군 수)이 토양 융해 상태로 조사되었다. 연구 기간 전체(1991~2020) 평균으로 보면, 2월에 10.5%(37개 시·군), 3월 초순(1~10일)에 12.3%(38개 시·군), 3월 중순(11~20일)에 25.3%(107개 시·군), 3월 하순(21~31일)에 30.3%(99개 시·군), 4월에 21.5%(53개 시·군)가 토양 융해에 이른 것으로 분석되었다(그림 4와

5).

토양 융해 시기가 2월, 3월 초순, 3월 중순에 각각 이르게 되는 면적과 시·군의 수는 지난 30년 동안 상승세를 보였으나, 토양 융해일이 3월 하순과 4월 중에 해당되는 면적과 시·군 수는 전반적으로 감소세를 나타내었다. 연구 기간 전체 평균으로 볼 때, 가장 넓은 토양 융해일이 융해되는 시기는 3월 하순이며, 가장 많은 시·군에 걸쳐 토양 융해가 이루어지는 시기는 3월 중순으로 각각 조사되었다. 연구 기간 초기인 1991~2000년 기간 중에 가장 넓은 토양 융해일 면적과 가장 많은 시·군 수가 토양 융해일을 맞은 시기는 각각 4월과 3월 중순이었으나, 2011~2020년에는 면적과 시·군 수 측면에서 모두 3월 중순이 가장 광범위하게 토양 융해가 이루어지는 시기로 조사되었다.

### 3. 식목일 대안 검토

현행 식목일(Arbor Day, 4월 5일)과 대안적 식재기념일로 제시되고 있는 세계 산림의 날(International Day of Forests, 3월 21일)을 기준으로 토양 융해가 나타나는 지역의 분포는 그림 6과 같다. 남한 대부분과 황해도 일부, 동한만(함경남도과 강원도의 해안에 이르는 만) 연안 지역은 3월 21일 이전에 이미 토양 융해가 시작되는 것으로 관측되었다. 반면, 경기만 연안, 강원도 일부, 북한 대부분 지역은 3월 21



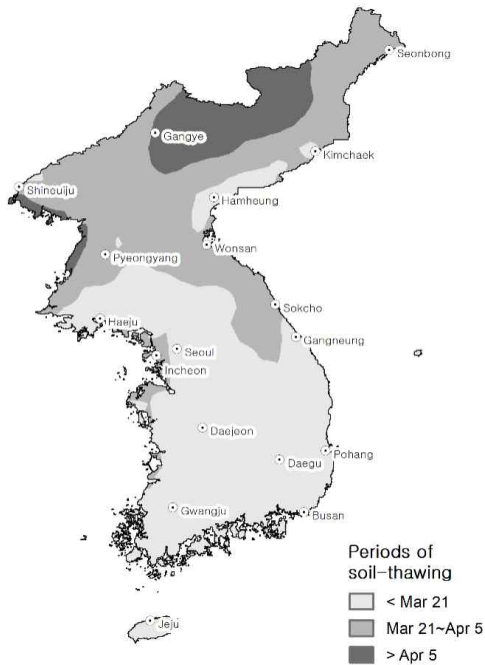


FIGURE 6. Periods of soil-thawing divided by the dates of Arbor Day (April 5) and International Day of Forests (March 21)

일 이후에 토양 융해가 시작된다. 따라서 현행 식목일인 4월 5일을 기준으로 할 때, 서한만 연안과 개마고원 일부를 제외한 한반도 대부분 지역은 토양 융해가 시작되어 묘목 식재에 적합한 시기에 진입하는 것으로 분석되었다.

한반도 전체로 볼 때 토양 융해가 시작된 면적은 세계 산림의 날과 식목일 기준으로 53.7%와 86.5%로 각각 관측되었다. 북한과 남한으로 나누어 살펴보면, 북한 지역은 세계 산림의 날에 14.4%의 면적만이 토양 융해 상태고, 85.6%가 토양 동결 상태다. 식목일에는 75.4% 면적이 토양 융해 상태이고, 24.6%가 토양 동결 상태이다. 즉, 북한은 현행 식목일에 대부분 지역에서 토양 융해가 진행되지만, 세계 산림의 날에는 대부분 지역이 동결 상태에 놓여 있어서 식재가 어렵다. 남한 지역은 세계 산림의 날 기준으로 87.4%의 면적에서 토양 융해가 시작되며, 12.6%의 면적만이 토양 동결 상태로 남는

다. 그 이후 현행 식목일인 4월 5일에 이르러 남한 모든 지역이 토양 융해 상태에 놓이게 된다. 즉, 남한은 세계 산림의 날 기준으로 대부분 지역에서 토양 융해가 시작되어 식재가 가능한 조건에 놓이게 된다.

한반도 전체, 남한, 북한으로 구분한 지역별 토양 융해일 변화는 그림 7-a와 같고, 그림 7-b~d는 각 식재기념일에 대한 지역별 평균 토양 융해일 편차를 나타낸다. 식목일과 비교하여 한반도 평균 토양 융해일은 1991~2020년 평균을 기준으로 15.2일 앞서는 것으로 조사되었다. 1991년에 평균 토양 융해일은 식목일보다 11.3일 빠른 것으로 관측되었으나 2020년에는 20.3일 전으로 크게 앞당겨졌다. 세계 산림의 날과 비교한 한반도 평균 토양 융해일은 1991년 3.7일 늦게 나타났으나, 2020년에는 5.3일 앞으로 빨라졌다. 연구 기간 전체 추세선을 기준으로 볼 때, 세계 산림의 날 이후로 나타나던 한반도 평균 토양 융해일은 2000년대 중반부터 세계 산림의 날에 앞서 나타나기 시작했다. 연구 기간 전체 평균값을 기준으로, 한반도 토양 융해일은 세계 산림의 날보다 0.5일 빠른 것으로 나타났으며, 변화 추세로 볼 때 미래에도 지속적으로 앞당겨질 것으로 추정된다.

우리나라 식목일에 해당하는 북한의 식재기념일은 식수절(Tree-Planting Day)이다. 북한의 식수절은 1947년부터 4월 6일로 제정되어 운영되었으나 1989년과 2022년 두 차례 변경을 거쳐 현재는 3월 14일로 정해져 있다. 북한 식수절과 한반도 평균 토양 융해일의 차이를 살펴보면, 1991~2020년 평균 토양 융해일이 식수절보다 6.5일 늦게 관측되었다. 한반도 평균 토양 융해일은 1991년에 식수절보다 10.7일 늦게 관측되었으나 2020년에는 1.7일 후로 나타났다. 토양 융해 시기가 지속적으로 앞당겨지는 추세를 감안하면, 식수절에 근접해 있는 한반도 평균 토양 융해일은 머지않아 식수절을 앞설 것으로 전망된다(그림 7-b).

북한과 남한의 토양 융해일은 1991~2020년 평균을 기준으로 식목일보다 각각 7.3일과 26.5일 빠른 것으로 나타났다. 시계열적 변화로 볼

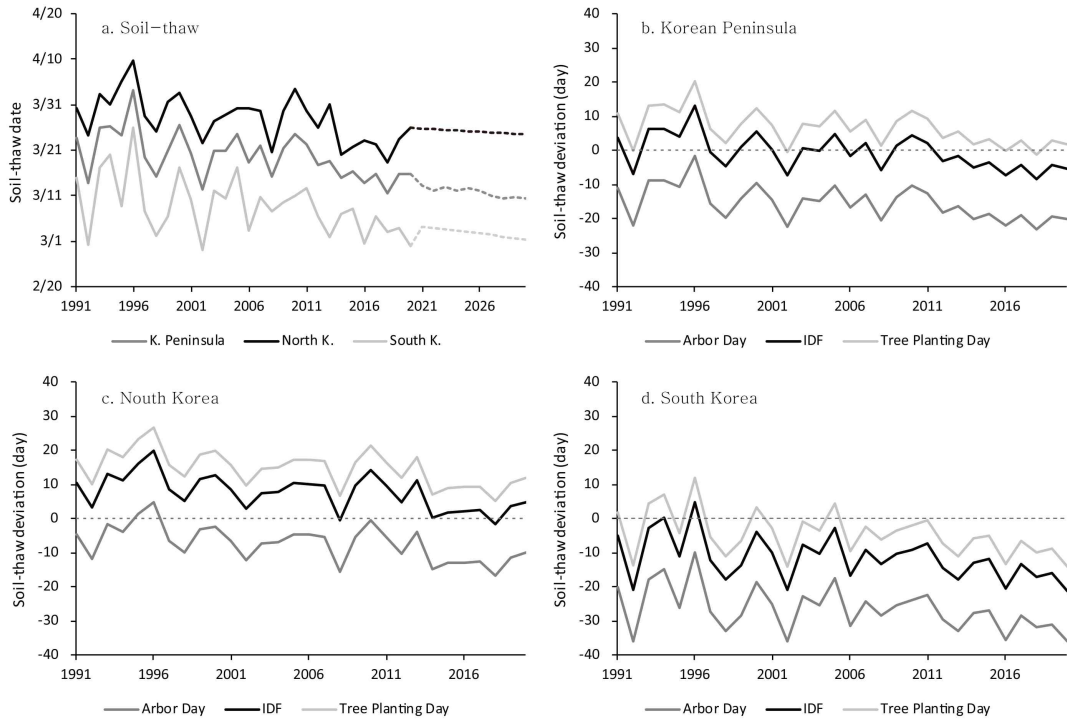


FIGURE 7. Changes of soil-thaw dates with future forecast (dotted lines) (a) and regional soil-thaw deviations from Arbor Day, International Day of Forests (IDF), and Tree Planting Day (b~d)

때, 북한 토양 융해일은 식목일에 비해 1991년에 4.7일, 2020년에는 10일 앞선 것으로 나타났다. 남한 토양 융해일은 1991년에 20.1일, 2020년에는 36.2일 각각 앞선 것으로 나타났다(그림 7-c & 7-d). 북한 북부 및 내륙 지역의 경우, 식목일-평균 토양 융해일 간 차이는 비교적 작게 나타났으나 그 외 대부분 지역의 편차는 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 남한 대부분 지역에서는 식목일로부터의 편차는 20일 이상으로 증가하였으며, 남부와 해안 지역으로 갈수록 그 편차는 벌어지는 경향을 보였다(그림 8-a).

세계 산림의 날과 비교하여 북한과 남한의 토양 융해일은 다소 차이를 보였다. 1991~2020년 기간을 기준으로, 북한 지역 평균 토양 융해일은 세계 산림의 날보다 7.7일 늦게 나타난 반

면, 남한 지역 평균 토양 융해일은 세계 산림의 날보다 11.5일 앞서 나타났다. 북한의 경우, 세계 산림의 날보다 10.3일 늦었던 1991년 토양 융해일은 2020년 5.0일 후로 앞당겨졌다. 남한 토양 융해일은 1991년에 세계 산림의 날보다 5.1일 앞서 나타났으며, 2020년에는 21.2일 전으로 크게 앞당겨졌다(그림 7-c & d). 세계 산림의 날에 대한 평균 토양 융해일의 편차는 남해안을 중심으로 20일 이상 벌어진 반면, 우리나라 중부 지역 이북을 중심으로 북한 북부 내륙을 제외한 대부분 지역에서 10일 이내로 비교적 작게 나타났다(그림 8-b). 연구 기간 전체를 기준으로 할 때, 세계 산림의 날 대비 평균 토양 융해일의 편차가 10일 이내로 좁혀지는 지역은 전체 면적의 58.8%로 조사되었다.

북한의 평균 토양 융해일은 1991~2020년

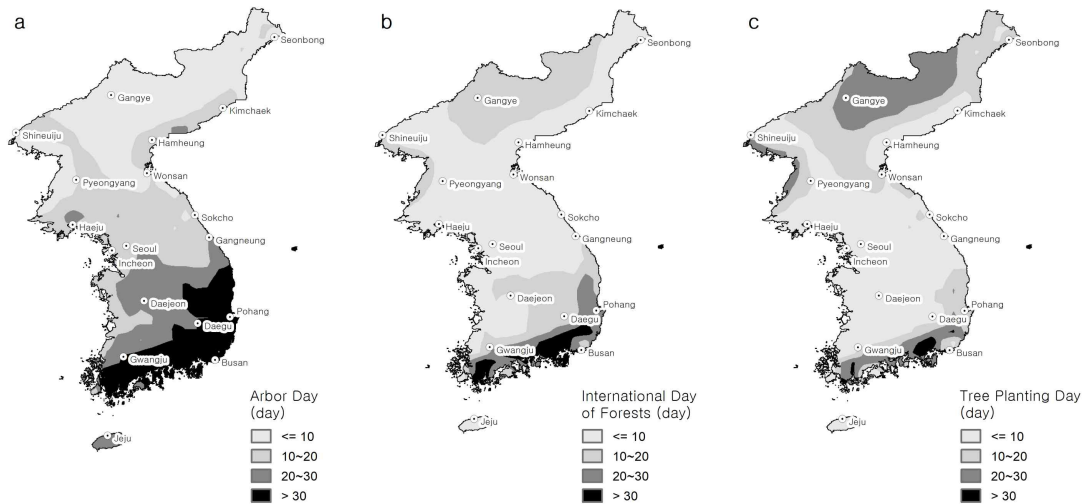


FIGURE 8. Soil-thaw deviations from Arbor Day (a), International Day of Forests (b), and Tree Planting Day (c)

평균을 기준으로 식수절보다 14.7일 늦게 관측되었다. 1991년에 북한 토양 융해일은 식수절보다 17.3일 늦게 나타났으나 2020년에는 12.0일 후로 빨라졌다. 최근 관측된 북한의 평균 토양 융해일은 식수절과 10일 내외의 차이를 보이고 있지만, 예측 추이에 따르면, 북한의 평균 토양 융해일은 앞으로 식수절에 더욱 가깝게 변화할 것으로 예상된다. 한반도 중부 지역을 중심으로 폭넓은 면적에 걸쳐 평균 토양 융해일과 식수절 간의 차이는 10일 이내로 좁혀지는 것으로 조사되었다(그림 8-c). 또한, 2014년 이후 한반도 평균 토양 융해일과 식수절 간의 차이가 4일 미만으로 좁혀진 상태이기 때문에, 북한의 식수절은 과거에 비해 식재 조건에 보다 적합한 시점으로 조정되었다고 볼 수 있다. 식수절 대비 평균 토양 융해일의 편차가 10일 이내로 좁혀지는 지역은 전체 면적의 52.5%로 조사되었다.

세계 산림의 날과 식수절은 식목일을 대신하여 고려해 볼 수 있는 식재기념일이지만, 추가적 대안으로 한반도 전역이 토양 융해 상태에 놓이는 시기를 고려해 볼 수 있다. 하지만, 한반도 모든 지역이 토양 융해 상태에 놓이게 되는

시기는 현행 식목일보다 늦은 4월 11일경으로 관측되는데, 이 시기는 토양 융해일이 빠른 남부 지역에서 식재 시기로 적용하기에는 너무 늦어지는 문제가 있다. 남·북한 간 위도 차이를 고려하여 지리적으로 절충안을 고려한다면, 한반도 평균 토양 융해일인 3월 19일경이 대안이 될 수 있다. 적용 대상을 남한 지역으로 한정하여 전역이 토양 융해 상태에 이르는 시기로 본다면 평균 토양 융해일로 관측된 3월 28일을 택할 수 있다. 또, 남한의 평균 토양 융해일을 적용한다면 3월 8일경을 채택할 수도 있다. 따라서 토양 융해 조건을 식재를 위한 중요 기준으로 삼아 식목일을 선정하고자 할 경우에는 지리적 범위를 어떻게 한정할 것인가에 따라 다양한 일자가 대안으로 모색될 수 있다.

## 요약 및 결론

식재를 위한 중요 조건인 토양 융해일 관측값을 분석한 결과, 식재 가능 시기의 시작은 과거에 비해 꾸준히 빨라지고 있는 것으로 확인되었다. 1991~2020년 평균값을 기준으로 한반도 전체의 토양 융해일은 3월 19일, 북한과 남한은

각각 3월 29일과 3월 8일로 분석되었다. 분석 기간 초기 10년(1991~2000)과 비교한 최근 10년(2011~2020) 토양 융해일의 변화를 살펴 보면, 한반도 평균 토양 융해일은 과거 3월 24일에서 최근 3월 17일로 변화하였다. 이 중 북한과 남한 지역의 토양 융해일은 연구 기간 초기 각각 4월 1일과 3월 13일에서 최근 3월 25일과 3월 5일로 앞당겨졌다. 이러한 한반도의 토양 융해일 변화는 약 3.4일/10년의 속도로 빨라지는 것으로, 북반구, 유럽 및 서아시아를 대상으로 한 선행 연구 사례와 유사한 결과이다. 2021~2030년 기간 동안의 토양 융해일 변화를 추정하기 위해 실시한 시계열 예측 결과에 따르면, 한반도 전체의 평균 토양 융해일은 3월 12일, 북한과 남한의 평균 토양 융해일은 각각 3월 25일과 3월 3일에 도달할 것으로 예측되었다. 현행 식목일의 대안 일자를 탐색하기 위해 시·군의 수와 면적 측면에서 토양 융해 조건을 가장 포괄적으로 만족하는 시기를 분석한 결과, 지난 30년(1991~2020)간의 평균 토양 융해일을 기준으로 시·군 수를 고려한다면 3월 중순(11~20일)을, 면적을 고려한다면 3월 하순(21~31일)을 각각 채택하는 것이 식재 시기의 적합성 측면에서 가장 포괄성이 큰 것으로 분석되었다. 하지만 연구 기간을 구분하여 분석한 결과, 1991~2000년 기간에는 3월 하순(21~31일)에 가장 많은 시·군이 토양 융해 조건을 만족하였고, 가장 넓은 면적이 토양 융해되는 시기는 4월로 조사되었다. 반면, 2011~2020년 기간에는 3월 중순(11~20일)에 가장 많은 시·군과 가장 많은 면적이 모두 토양 융해 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 우리나라 대부분 지역에서 식재 활동이나 관련 행사가 실질적으로 이미 완료되는 식목일을 기준으로 식재 업무를 진행하는 것은 현실적으로 효과적이지 못하다는 의견은 유의미한 지적이라고 판단된다.

지금까지 논의된 식재기념일 중 3월 중순과 하순에 해당하는 것은 각각 식수절(3월 14일)과 세계 산림의 날(3월 21일)이다. 한반도 전체로 보면, 평균 토양 융해일이 식수절과 시기적

으로 근접해 있지만, 북한 내륙, 고위도 지역, 남해안 지역에서의 토양 융해일은 식수절과 아직 2~3주 이상의 차이를 나타내고 있다. 세계 산림의 날은 한반도 평균 토양 융해일인 3월 19일에 가깝고, 토양 융해 상태에 놓이는 면적이 한반도 중부를 중심으로 전체 면적의 절반에 달한다는 장점이 있는 반면, 남해안을 중심으로 토양 융해일과의 차이가 상대적으로 크다는 단점도 있다. 다만 빠르게 진행되는 기후 변화를 감안할 때, 식목일 일자를 변경하고자 할 경우에는 미래의 식재 가능 시기가 지속적으로 앞당겨지는 경향을 반영할 필요가 있다. 또한 남북으로 위도 차가 상대적으로 큰 한반도 전역에 일괄적으로 적용할 수 있는 식재일을 채택하는 것은 현실적으로 어려운 일이며, 기후 변화의 영향이 지역별로 동일하지 않기 때문에 중앙 정부에서 하나의 식재일을 정해 식재 업무를 전국에 걸쳐 일시에 수행하는 일도 적절한 방법으로 보기 어렵다. 따라서 국민 인식과 정책적 측면에서 식목일을 통한 국가 수준의 관리 정책과 함께, 지역 수준에서 보다 적합한 식재 업무 대응과 활동을 중심으로 식재 패러다임의 전환이 필요하다. 나무를 식재하는 기념일은 역사적으로 상징적인 측면이 있고 국토 관리 차원에서의 실효적 기능 역시 현존하기 때문에 현재와 미래의 환경 변화를 고려한 의사 결정에 토양 융해 시기가 준거 요소로 적용될 필요가 있다. **KAGIS**

## REFERENCES

- Baik, J.J., S.K. Cho, S.C. Lee and M.H. Choi. 2019. 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* 35(5):625-636 (백종진, 조성근, 이슬찬, 최민하. 2019. 인공위성 기반 토양 수분 자료들(AMSR2 ASCAT & ESACCI)의 한반도 적절성 분석: 동결과 융

- 해 기간을 구분하여. 대한원격탐사학회지 35(5):625-636).
- Barlage, M., X. Zeng, H. Wei and K.E. Mitchell. 2005. A global 0.05° maximum albedo dataset of snow-covered land based on MODIS observations. *Geophysical Research Letters* 32(17).
- Böttcher, K., M. Aurela, M. Kervinen, T. Markkanen, O.-P. Mattila, P. Kolari, S. Metsämäki, T. Aalto, A.N. Arslan and L. Pulliainen. 2014. MODIS time-series-derived indicators for the beginning of the growing season in boreal coniferous forest—A comparison with CO<sub>2</sub> flux measurements and phenological observations in Finland. *Remote Sensing of Environment* 140:625-638.
- Cho, S.H., H.K. Oh, W. Lee and J.S. Lee. 2021. Study on Phenology Changes Analysis of Indigenous Plant by Climate Change(1). *Biological Resources Research Department National Institute of Biological Resources* (조수현, 오현경, 이웅, 이종성. 2021. 기후 변화에 따른 자생식물의 생물계절 특성 변화 분석 연구(1차년도). 환경부 국립생물자원관).
- Choe, B. 2008. The requisition for timber during the 2nd Sino-Japanese war (1937~1945) by Japanese Government—General in Choson. *The Journal for the Studies of Korean History* 32:267-305 (최병택. 2008. 일제하 전시체제기(1937~1945) 임업동원책과 삼림자원 공출. *한국사학보* 32:267-305).
- Choi, J.S. 1990. The classification of snowfall area and its regional characteristics of South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 25:35-48 (최진식. 1990. 남한의 강설지역구분과 강설의 지역적 특성. *지리학* 25:35-48).
- Dietz, A.J., C. Wohner and C. Kuenzer. 2012. European snow cover characteristics between 2000 and 2011 derived from improved MODIS daily snow cover products. *Remote Sensing* 4(8):2432-2454.
- Gates, D.M. 2012. *Biophysical Ecology*. Courier Corporation.
- Gebeyehu, M.N. and F.H. Hirpo. 2019. Review on effect of climate change on forest ecosystem. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources* 17(4):126-129.
- Jang, G.S. 2012. Comparing a perspective on the leaf burst timing and leaf growth performance of major plants observed in urban forests. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 15:127-136 (장갑수. 2012. 도시녹지 내 주요 식물상의 개엽시기 및 잎의 성장 특성 비교. *한국환경복원기술학회지* 15:127-136).
- Jee, J.B. and K.T. Lee. 2010. Estimation of rainfall intensity for MTSAT-1R data using microwave rainfall. *Korean Journal of Remote Sensing* 26(5):511-525 (지준범, 이규태. 2010. 마이크로웨이브 강수량을 이용한 MTSAT-1R 위성의 강우강도 추정. *대한원격탐사학회지* 26(5):511-525).
- Jin, M. and S. Park. 2015. Temperature changes of climatic solar terms and their spatiotemporal characteristics in South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 50(1):23-36 (진미정, 박선엽. 2015. 우리나라 기후 절기별 기온 변화의 시공간적 특성 분석. *대한지리학회지* 50(1):23-36).
- Joh, H.K., S.B. Kim, H. Cheong, H.J. Shin

- and S.J. Kim. 2011. Projection of future snowfall by using climate change scenarios. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3): 188-202 (조형경, 김셋별, 정혁, 신형진, 김성준. 2011. 기후변화 시나리오를 이용한 미래의 강설량 예측. *한국지리정보학회지* 14(3): 188-202).
- Johnston, J., V. Maggioni and P. Houser. 2019. Investigating the relationship between satellite-based freeze/thaw products and land surface temperature. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12(9): 3247-3271.
- Kim, H.J., J.K. Hong, S.C. Kim, S.H. Oh and J.H. Kim. 2011. Plant phenology of threatened species for climate change in sub-alpine zone of Korea - Especially on the summit area of Mt. Deogyusan. *Korean Journal of Plant Resources* 24(5):549-556 (김혁진, 홍정기, 김상철, 오승환, 김주환. 2011. 한반도 아고산지대내 기후변화 취약식물종의 식물계절성 변화 연구-덕유산 정상 지역을 중심으로. *한국자원식물학회지* 24(5):549-556).
- Kim, H.K. 2022. A Study on Urban Greening in Gyeongseong, Japanese Colonial Era. *The Geographical Journal of Korea* 56(4):397-408 (김해경. 2022. 일제강점기 경성의 도시녹화 고찰. *국토지리학회지* 56(4):397-408).
- Kim, Y., J.S. Kimball, J. Glassy and J. Du. 2017. An extended global earth system data record on daily landscape freeze-thaw determined from satellite passive microwave remote sensing. *Earth System Science Data* 9:133-147.
- Kim, Y., J.S. Kimball, J. Du and J. Glassy. 2021. MEaSUREs global record of daily landscape freeze/thaw status, version 05 [1979 to 2020], Boulder Colorado USA: National Snow and Ice Data Center Digital Media.
- Kim, Y., J.S. Kimball, J. Glassy and K.C. McDonald. 2022. MEaSUREs Global Record of Daily Landscape Freeze/Thaw Status, Version 5, Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- Kim, Y.C., Y.H. Ji, H.S. Han, J.H. Lee and H.Y. Lee. 2014. Analysis of sea route to the Jangbogo Antarctic research station by using passive microwave sea ice concentration data. *Korean Journal of Remote Sensing* 30(5):677-686 (김연춘, 지영훈, 한향선, 이주한, 이훈열. 2014. 수동 마이크로파 해빙 면적비 자료를 이용한 남극 장보고 과학기지로의 항해경로 분석. *대한원격탐사학회지* 30(5):677-686).
- Lee, B.S. 1979. The distribution of the fresh snowfall in South Korea. *Geography - Education* 9:224-235 (이병설. 1979. 남한의 강설분포에 관한 연구. *지리학-지리교육* 9:224-235).
- Lee, J.W., S.W. Lee, S.O. Han, S.J. Lee and D.E. Jang. 2011. The impact of satellite observations on the UM-4DVar analysis and prediction system at KMA. *Atmosphere* 21(1):85-93 (이주원, 이승우, 한상욱, 이승재, 장동연. 2011. 위성자료가 기상청 전지구 통합 분석 예측 시스템에 미치는 효과. *대기* 21(1):85-93).
- Li, T., Y.Z. Chen, L. J. Han, L. H. Cheng, Y.H. Lv, B.J. Fu, X.M. Feng and X. Wu. 2021. Shortened duration and reduced area of frozen soil in the Northern Hemisphere. *The Innovation* 2(3):100146.

- Lim J.H., J.H. Shin and Y.K. Kim. 2005. Earlier leafing of oaks by warmer spring temperature in Korea. *Proceedings of The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology Conference 2005*(2): 147 (임중환, 신준환, 김영걸. 2005. 우리나라 참나무림에서 기온상승에 따른 개엽시기 단축. *한국농림기상학회 학술발표논문집 2005*(2):147).
- Malnes, E., A. Buanes, T. Nagler, G. Bippus, D. Gustafsson, C. Schiller, S. Metsämäki, J. Pulliainen, K. Luojus, H.E. Larsen, R. Solberg, A. Diamandi and A. Wiesmann. 2015. User requirements for the snow and land ice services-CryoLand. *The Cryosphere* 9:1191-1202. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1191-2015>.
- Metsämäki, S.J., S.T. Anttila, H.J. Markus and J.M. Vepsäläinen. 2005. A feasible method for fractional snow cover mapping in boreal zone based on a reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 95(1):77-95.
- Metsämäki, S., K. Böttcher, J. Pulliainen, K. Luojus, J. Cohen, M. Takala, O.P. Mattila, G. Sschwaizer, C. Derksen and S. Koponen. 2018. The accuracy of snow melt-off day derived from optical and microwave radiometer data-A study for Europe. *Remote Sensing of Environment* 211:1-12.
- Metsämäki, S., O.P. Mattila, J. Pulliainen, K. Niemi, K. Luojus and K. Böttcher. 2012. An optical reflectance model-based method for fractional snow cover mapping applicable to continental scale. *Remote Sensing of Environment* 123: 508-521.
- Na, J. 2020. *Applied Time Series Analysis*. Freeacademy (나중화. 2020. R 응용 시계열분석. 자유아카데미).
- Park, K. 2023. Climate Change-Induced Shifts in Soil-Thaw Periods and the Evaluation of Arbor Day's Suitability. The Graduate School. Pusan National University (박강민. 2023. 기후 변화에 따른 토양 융해 시기 변화와 식목일 일자의 적합성 검토. 부산대학교 대학원).
- Park, S. 2022. Assessment of Facebook Prophet-based forecast models applied to atmospheric PM<sub>10</sub> levels in Busan Metropolitan City. *The Geographical Journal of Korea* 56(4):333-351 (박선엽. 2022. Prophet 모형에 기반한 부산광역시 대기 중 PM<sub>10</sub> 농도의 시계열 예측 기법 평가. *국토지리학회지* 56(4):333-351).
- Park, S. and S. Lee. 2019. Climatic changes and geographical characteristics of solar term temperatures in the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 22(3):65-81 (박선엽, 이수경. 2019. 한반도 절기 기온의 기후적 변화와 지리적 특성. *한국지리정보학회지* 22(3):65-81).
- Park, T., S. Ganguly, H. Tømmervik, E.S. Euskirchen, K.A. Høgda, S.R. Karlsen, V. Brovkin, R.R. Nemani and R.B. Myneni. 2016. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters* 11 (8):084001.
- Pöyry, J., K. Böttcher, S. Fronzek, N. Gobron, R. Leinonen, S. Metsämäki and R. Virkkala. 2018. Predictive power of remote sensing versus temperature-derived variables in modelling phenology of herbivorous insects. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*

- 4(2):113–126.
- Pulliainen, J., M. Aurela, T. Laurila, T. Aalto, M. Takala, M. Salminen, M. Kulmala, A. Barr, M. Heimann, A. Lindroth, A. Laaksonen, C. Derksen, A. Mäkelä, T. Markkanen, J. Lemmetyinen, J. Susiluoto, S. Dengel, I. Mammarella, J.P. Tuovinen and T. Vesala. 2017. Early snowmelt significantly enhances boreal springtime carbon uptake. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(42):11081–11086.
- Rank, R., M. Maneta, P. Higuera, Z. Holden and S. Dobrowski. 2022. Conifer seedling survival in response to high surface temperature events of varying intensity and duration. *Frontiers in Forests and Global Change* 221.
- Seo, H.S., J.M. Park, E.S. Kim and J.S. Lee. 2015. Estimation of forest volumes in the ecosystem region using spatial statistical techniques. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(2):149–160 (서환석, 박정묵, 김은숙, 이정수. 2015. 공간통계 기법을 이용한 생태계 관리지역의 산림축적 추정. *한국지리정보학회지* 18(2):149–160).
- Takala, M., K. Luojus, J. Pulliainen, C. Derksen, J. Lemmetyinen, J. P. Kärnä, J. Koskinen and B. Bojkov. 2011. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment* 115(12):3517–3529.
- Thum, T., T. Aalto, T. Laurila, M. Aurela, J. Hatakka, A. Lindroth and T. Vesala. 2009. Spring initiation and autumn cessation of boreal coniferous forest CO<sub>2</sub> exchange assessed by meteorological and biological variables. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 61(5):701–717.
- Yun, J.I. 2006. Climate change impact on the flowering season of Japanese Cherry (*Prunus serrulata* var. *spontanea*) in Korea during 1941–2100. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 8(2): 68–76 (윤진일. 2006. 기후 변화에 따른 벚꽃 개화일의 시공간 변이. *한국농림기상학회지* 8(2):68–76). **KAGIS**