

대규모 기후인자와 관련된 우리나라 봄철 산불위험도 변동

정지윤¹⁾ · 우성호¹⁾ · 손락훈²⁾ · 윤진호²⁾ · 정지훈^{1)*} · 이석준³⁾ · 이병두³⁾

¹⁾전남대학교 지구환경과학부 해양환경전공, ²⁾광주과학기술원 지구환경공학과,
³⁾국립산림과학원 산림보전부 산림방재연구과

(접수일: 2018년 11월 21일, 수정일: 2018년 12월 16일, 게재확정일: 2018년 12월 17일)

Spring Forest-Fire Variability over Korea Associated with Large-Scale Climate Factors

Ji-Yoon Jeong¹⁾, Sung-Ho Woo¹⁾, Rack-Hun Son²⁾, Jin-Ho Yoon²⁾,
Jee-Hoon Jeong^{1)*}, Suk-Jun Lee³⁾, and Byung-Doo Lee³⁾

¹⁾Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

²⁾School of Earth Sciences and Environmental Engineering,
Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea

³⁾National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

(Manuscript received 21 November 2018; revised 16 December 2018; accepted 17 December 2018)

Abstract This study investigated the variability of spring (March-May) forest fire risk in Korea for the period 1991~2017 and analyzed its relationship with large-scale climate factors. The Forest Weather Index (FWI) representing the meteorological risk for forest fire occurrences calculated based on observational data and its relationship with large-scale climate factors were analyzed. We performed the empirical orthogonal function (EOF) analysis on the spring FWI. The leading EOF mode of FWI accounting for about 70% of total variability was found to be highly correlated with total number of forest fire occurrences in Korea. The high FWI, forest fire occurrence risk, in Korea, is associated with warmer atmosphere temperature in midwest Eurasia-China-Korea peninsula, cyclonic circulation anomaly in northeastern China-Korea peninsula-northwest pacific, westerly wind anomaly in central China-Korea peninsula, and low humidity in Korea. These are further related with warmer sea surface temperature and enhanced outgoing longwave radiation over Western Pacific, which represents a typical condition for a La Niña episode. This suggests that large-scale climate factors over East Asia and ENSO could have a significant influence on the occurrence of spring forest fires in Korea.

Key words: Forest fire, climate, climate factors, ENSO, statistical model

1. 서 론

산불은 우리나라에서 발생하는 대표적인 산림재해로서 직접적인 임산물의 손실은 물론 관련된 농업, 축산 활동 뿐 아니라 문화재의 손실 및 대기질 악화 등

사회·경제적으로 광범위한 피해를 야기한다(Choi et al., 2006; Kim et al., 2011). 2000년 4월 발생한 동해안 산불 및 2005년 4월 양양·낙산사 산불의 예에서 볼 수 있듯이 산림 방재에 대한 인력과 기술의 투자에도 불구하고 대형 산불은 지속적으로 발생하고 있으며, 이에 따른 예방 및 방재를 위한 사회적 비용은 줄어들지 않고 있다. 전세계적으로도 2009년 2월 호주, 2017년 12월 미국 캘리포니아의 경우와 같이 초대형 산불발생이 계속 보고되고 있다. 또한 선행연구

*Corresponding Author: Jee-Hoon Jeong, Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea.
Phone: +82-62-530-3466, Fax: +82-62-530-3469
E-mail: jjechoon@jnu.ac.kr

들에서 기후변화에 의해 전지구적 기온 상승과 더불어 수증기의 총량은 증가하지만, 지역적(해들리 순환의 강화에 따른 침강영역 등)인 습도 감소 경향이 일부 지역의 산불발생 빈도를 증가시키는 경향을 유도하고 있음을 밝히고 있다(McCoy and Burn, 2005; Sung et al., 2010).

우리나라에서 산불발생은 자연적 발화보다는 주로 주변 농가에서의 논밭두렁 소각과 등산객이나 성묘객 등에 의한 입산자들의 실화에 의해 발생한다(Kwak et al., 2010). 이러한 실화가 산림에 피해를 줄 정도의 규모로 발화, 연소 및 확산하는 것에는 기상조건이 매우 중요하다(Won et al., 2006). 일반적으로 강수량, 강수지속시간, 최소 습도 및 풍속 등이 산불발생에 가장 중요한 변수로 알려져 있다(Lee et al., 2004). 특히 가장 많은 산불이 발생하는 3월 하순 온도가 6~10°C, 습도가 62~67%인 구간과 4월 초중순 온도가 9~14°C, 습도가 60~67% 구간에서 산불발생빈도가 가장 크게 나타난다(Won et al., 2006). 이러한 기상조건과 산불발생과의 관련성에 대한 선행연구들은 지역적인 산불의 특성이나 대형산불 사례에 대한 기상요소들의 기여 등에 대한 분석이 주를 이루었다(Lee et al., 2004; Won et al., 2006; Kwon et al., 2012).

우리나라 산불발생과 연관되어 있는 이러한 기상조건들은 다양한 규모의 기상-기후현상의 영향을 받는다. 몬순순환이나 엘니뇨/라니냐, 대규모 가뭄 및 지구온난화와 같은 대규모 기후현상은 기상조건에 장기간 영향을 미칠 수 있고, 따라서 산불발생 경년변동 및 장기변화에 필연적으로 영향을 미칠 수 있다. 특히 최근 미국 서부지역의 가뭄과 대규모 산불은 엘니뇨 등에 의한 강수의 감소 및 장기 기후변화에 의한 영향으로 알려지고 있다(Veblen et al., 2000; Brose et al., 2013). 중위도 대륙의 동안에 위치한 우리나라도 계절에 따라 그 영향의 차이가 있지만, 엘니뇨 남방진동 및 열대 대류활동과 같은 열대 기후변동성을 비롯하여 북극진동, 북대서양 진동 및 북극 해빙 등과 같이 극지역의 영향까지, 다양한 대규모 기후변동의 영향을 받으므로 산불발생의 경년변동성 및 장기추세 등에 이러한 대규모 기후변동성의 영향이 존재할 가능성이 있다. 하지만 지금까지 우리나라 산불발생 및 산불위험도와 관련된 기후변동성에 대한 조사는 거의 이루어지지 않았다.

기상학적 산불위험도를 나타내기 위해 많은 나라에서 산불기상지수를 활용하고 있다. 산불기상지수는 강수, 기온, 습도, 풍속, 토양수분 등의 기상 및 지면요소를 활용하여 지역적 특성에 맞게 다양한 방법으로 개발되었으며 산불위험 및 확산위험을 탐지하는데 활용되고 있다(Viegas et al., 1999). 본 연구에서는 캐나다를 비롯하여 전세계적으로 많이 활용되고 있는

산불기상지수(fire weather index, FWI) (Wagner, 1970, 1974)를 이용하여 우리나라에서 산불이 가장 빈번한 봄철에 대해 산불발생과의 상관성 분석을 통해 산불기상지수가 우리나라 산불위험도를 대표할 수 있는지 확인하고 그 산불기상지수의 시공간적 특성에 대해 분석하였다. 뿐만 아니라 산불기상지수와 연관된 대규모 기후인자를 조사하고 그에 기반한 통계예측모델을 구성하여 계절규모 예측 가능성을 테스트하였다.

2장에서는 연구에 사용된 자료 및 분석 방법과 산불기상지수에 대한 상세설명을 제시하였고, 3장에서는 산불기상지수의 주성분 분석을 통한 시공간적 변동 특성에 대해 이해하고 이와 관련된 동아시아 기후장 및 엘니뇨-남방진동(el niño-southern oscillation, ENSO)과의 관련성에 대해 분석하였다. 그리고 기후변수-산불기상지수간의 다중 선형회귀모델을 기반으로 겨울철 기후인자를 이용하여 봄철 산불기상지수의 첫 번째 모드 시계열을 예측한 통계모델의 성능을 평가하였다. 4장에서는 앞선 연구 결과들의 요약 및 토의를 서술하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 산불발생 자료

본 연구에서는 국립 산림과학원이 1991년부터 2016년까지 수집한 전국 17개 광역별 월평균 산불발생 자료를 사용하였다. 수집된 자료에는 산불의 발생일시, 진화일시, 발생장소, 발생원인, 피해면적 및 발생건수 등이 기록되어있다. 본 연구에서는 봄철 평균 산불발생건수와 산불기상지수와의 상관성 분석을 위하여 지역별 월평균 산불발생건수 정보를 분석에 활용하였다. 우리나라 산불발생건수의 기후값을 살펴보면(Fig. 1a), 3~4월에 가장 빈번하게 발생하고 습한 여름철에는 그 빈도가 급격히 줄어 거의 발생하지 않다가, 9월 이후 가을철부터 다시 산불이 발생이 늘어나는 특징을 보여준다. 산불 피해 면적 또한 산불발생과 매우 유사한 양상을 보였다.

2.2 산불기상지수

본 연구에서는 산불발생에 영향을 미치는 대규모 기후인자를 파악하기 위해, 기상변수를 이용해 산출한 산불기상지수를 생산하였다. 산불기상지수는 산불발생 및 확산에 중요한 변수로, 그 위험도를 가늠할 수 있어 산불위험도 또는 산불위험지수로 알려져 있다. 본 연구에서는 전세계적으로 많이 사용되는 산불기상지수(FWI)를 이용하였다. FWI는 캐나다 산불위험 평가시스템(Canadian forest fire danger rating system, CFFDRS)을 구성하는 기본요소 중 하나로 활용되고 있으며 유럽과 멕시코 등지에서도 산불 위험

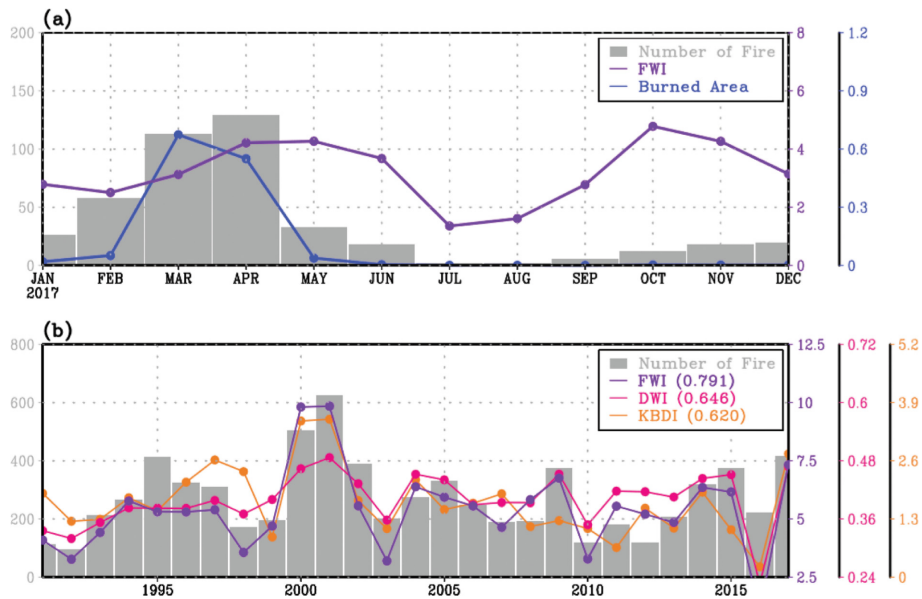


Fig. 1. (a) Climatology of Monthly forest fire occurrences (shading), Burned area (blue line) and FWI (purple line) during 1991~2017 in South Korea. (b) Comparison between forest fire occurrences (shading) and FWI (purple line), DWI (pink line) and KBDI (orange line) over spring (March~May) during 1991~2017 in South Korea.

모니터링에 많이 사용된다. FWI는 습도, 최고온도, 풍속 그리고 강수량을 입력변수로 산불발생과 관련된 세부지수들을 생산하는 과정을 거친다. 먼저, 온도와 강수량으로부터 산불연료지수(fuel moisture codes)가 산출되며, 지표면으로부터 깊이에 따라 불에 타기 쉬운 물질들의 수분함량을 수치화한 미세연료지수(fine fuel moisture code, FFMC), 부패성 유기물의 평균 수분함량 정도를 나타내는 부식층지수(duff moisture code, DMC), 지하 7 cm 이상 깊이에 분포한 부엽토의 수분함량을 정량화한 가뭄 지수(drought code, DC)가 계산된다. 산불행동지수(fire behavior indices)는 1차적으로 계산된 산불연료지수들의 조합을 통해 산불의 확산 속도를 나타내는 초기확산지수(initial spread index, ISI)와 산불의 강도와 관련된 발달지수(build-up index, BI)로 나뉜다. 앞서 설명한 5개 지수들의 조합으로 최종 계산된 FWI가 10.5 이상이면 화재 발생가능성이 높아지며, 29.5 이상인 경우 매우 위험한 수준을 나타낸다. FWI의 기후값을 살펴보면(Fig. 1a), 2월부터 시작하여 5월까지 계속 증가 추세를 보이고, 여름철 7~8월에 최소값을 나타내다 다시 9~11월에 최대값을 나타내는데, 이는 산불발생건수가 봄철에 가장 빈번하다가 여름철 감소하고 다시 가을철 증가하는 특징을 전반적으로 잘 나타내고 있다. 하지만 실제 산불발생건수의 기후값과 비교하면 다소 늦은 4~5월에 가장 높은 값을 나타내고, 가을철에 산불발생건수에 비해

상대적으로 큰 값을 나타내는 것은 봄철 이동성 저기압에 의한 강수와 장마를 비롯한 여름철 많은 강수 이후 지면의 습윤한 정도가 유지되는 특성이 잘 반영되지 못하는 것이 원인으로 판단된다.

FWI 이외에 세계적으로 많이 이용되는 대표적인 산불기상지수로 알려진 keetch-byram drought index (KBDI) (Keetch and Byram, 1968)와 한국 산불위험경보 시스템(Korea forest fire danger rating system, KFFDRS)에서 활용하고 있는 3가지 지수 중 하나인 daily weather index (DWI) (Won et al., 2010)를 우리나라 기상기상관측자료를 이용하여 계산하였으며, 산불발생과의 상관성 분석에 활용하였다. KBDI는 낙엽층 또는 건조한 토양상부층의 누적된 수분정도를 바탕으로 화재 가능성을 가늠하는 지표이다. 일 최고기온, 일평균 강수량 및 연간 평균 강수량이 변수로 사용된다. DWI는 우리나라 전체 및 지역적 특성을 고려하여 8개의 행정구역(경북, 충남, 강원, 경기, 경북, 경남, 전북, 전북)별로 개발된 화재위험 시스템에서 활용 중이며 유효습도(effective humidity), 온도 및 풍속을 이용하여 계산된다. 10개의 등급으로 산불위험도를 표현하고, 최고등급(10등급)의 경우 75% 이상의 화재발생 위험성을 나타낸다.

Figure 1b는 종관기상관측소 기상자료를 이용하여 산출한 봄철 산불기상지수(FWI, DWI, KBDI)들과 산불발생건수의 1991~2017년 기간 동안 경년 변화를 비

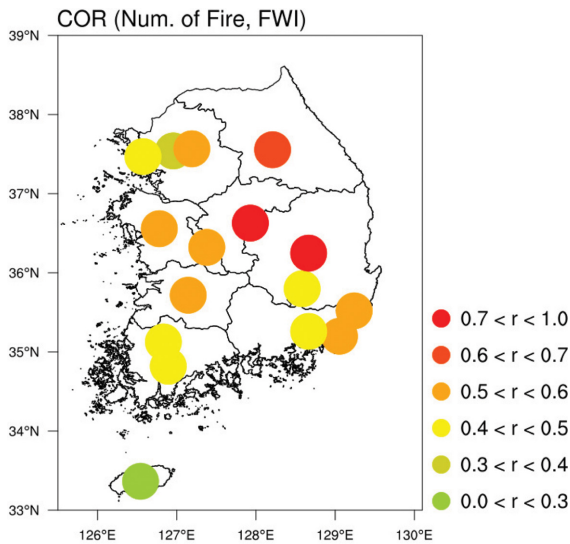


Fig. 2. Spatial Correlation between FWI and occurrence of forest fire over Spring (March~May) in South Korea during 1991~2017.

교한 결과를 보여준다. 남한지역 봄철 평균된 세 가지 산불기상지수들은 모두 통계적으로 99% 유의한 신뢰수준을 보였지만 특히 FWI는 다른 두 산불기상지수에 비해 산불발생건수와 0.791의 높은 상관관계를 보이고 있다. 우리나라 16개 광역별로 FWI와 산불발생건수의 상관관계를 살펴보면(Fig. 2), 경북, 충북, 강원 지역에서 각각 0.76, 0.72, 0.65의 높은 상관관계가 나타나고 서울, 인천지역과 광주, 전남지역에서는 상대적으로 약한 0.37~0.42 상관관계가 나타난다. 다소 낮은 상관관계가 나타나는 지역들은 높은 지역들에 비해 상대적으로 인구가 많아, 산불발생에 인위적인 요인의 영향이 포함되었을 가능성이 높아 상대적으로 상관성이 낮게 나타나는 것으로 추정된다. DWI와 KBDI에 대해서도 같은 분석을 실시하였을 때, 대체로 세 지수 모두 비슷한 패턴의 결과를 보였지만, FWI에 비해 모든 지역에서 상대적으로 낮은 상관관계를 보였다(Not shown). 본 연구는 산불발생에 미치는 기상, 기후학적 인자를 분석하는 것을 목표로 함에 따라 인위적 요인이 크다고 알려져 있는 산불발생건수나 피해면적자료를 직접 활용하는 대신, 이들 어느 정도 반영하고 있으며 기상학적 변수만으로 계산되는 FWI를 선택하여 산불발생위험의 기후학적 요인을 분석하였다.

우리나라 전체 지역에서 산불기상지수 변동의 공간 분포와 그와 연관된 기후인자들을 조사하기 위해, 관측소 중심의 기상청 관측자료로부터 FWI를 계산하는 대신 미국항공우주국(National Aeronautics and Space

Administration, NASA) global fire weather database (GFWD) (Field et al., 2015)에서 제공하는 FWI 자료를 사용하였다. 수집된 자료는 FWI 생산에 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) (Rienecker et al., 2011) 자료가 활용되며, 특히 강수자료는 관측에 대한 평균오차가 보정(bias correction)된 값을 이용하여 생산된다. 수평 해상도는 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ 이며 분석기간은 1981년부터 2016년까지 월평균 자료를 활용하였다.

2.3 기후 자료

우리나라 산불발생과 연관된 동아시아 및 대규모 기후인자들을 탐지하고 그 물리역학적 연관성을 조사하기 위해 European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)에서 제공하는 ERA-interim (Dee et al., 2011) 2 m 대기온도, 500 hPa 지위고도, 평균해면기압을 사용하였다. 뿐만 아니라 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 제공하는 National Centers for Environmental Prediction, AMIP-II Reanalysis (NCEP2) (Kanamitsu et al., 2002) 850 hPa 동서바람, 상대습도 재분석 자료들을 사용하였다.

우리나라 산불기상지수와 열대 대류활동 및 ENSO와의 관련성을 조사하기 위해 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, v5 (ERSST.v5) (Huang et al., 2017) 해수면온도와 상향장파복사(outgoing longwave radiation, OLR) (Liebmann and Smith, 1996) 자료를 사용하였다.

NCEP2 850 hPa 동서바람 및 상대습도, NOAA 상향장파복사 자료의 수평해상도는 2.5° 이며 해수면온도는 2° 간격이다. ERA-Interim 500 hPa 지위고도의 수평해상도는 1.5° 이며, 2 m 대기온도와 평균해면기압 자료는 0.5° 간격이다. 분석기간은 1981년부터 2016년까지 월평균 자료를 활용하였다. 평년편차 계산에 사용되는 기후값은 전체 기간의 평균값으로 하였다.

3. 결 과

3.1 우리나라 FWI의 주성분 분석

우리나라 기상학적 산불위험의 시공간적 변동 특성을 조사하기 위해, 남한 지역에서 봄철 평균 GFWD FWI의 경험적 직교함수(empirical orthogonal function, EOF) 분석을 수행하였다. Figure 3은 우리나라 봄철 FWI의 EOF 분석에 따른 상위 두 모드의 공간패턴 및 시계열을 나타낸다. 첫 번째 EOF 모드는 우리나라 전 영역에서 전반적으로 산불위험이 증가하거나 감소하는 공간패턴을 나타내며, FWI 경년변동성의 대부분(70.3%)을 설명한다. 첫 번째 모드는 특히, 충청남도,

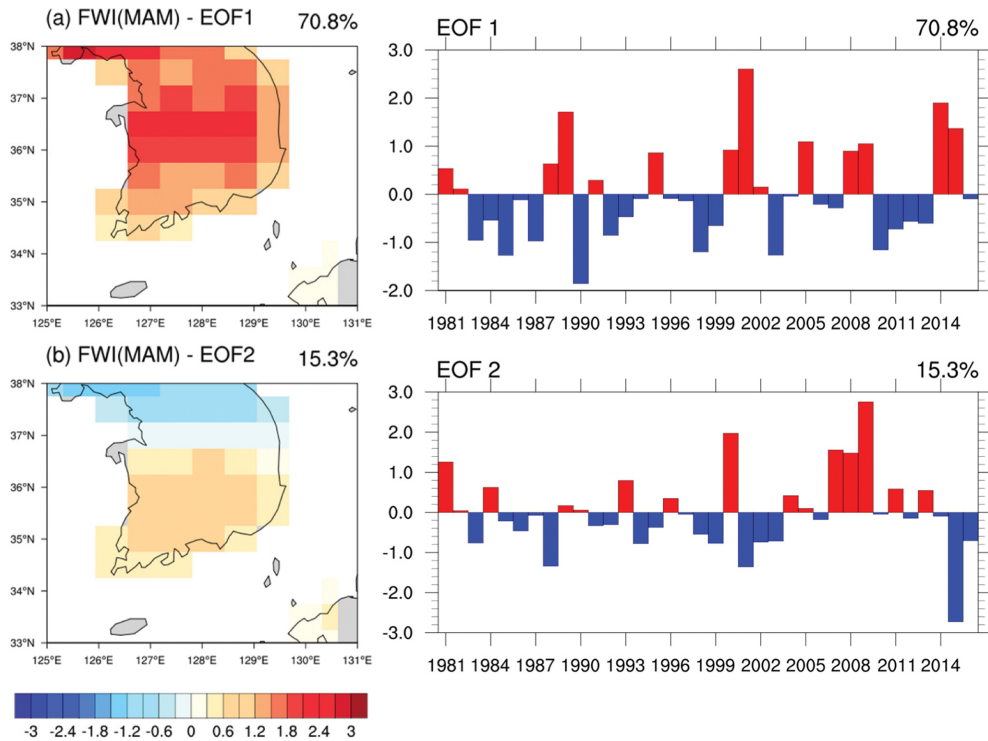


Fig. 3. (a) Spatial Patterns and (b) Principal component (PC) time series of EOF analysis for averaged spring (March-May) FWI in South Korea during 1981~2016.

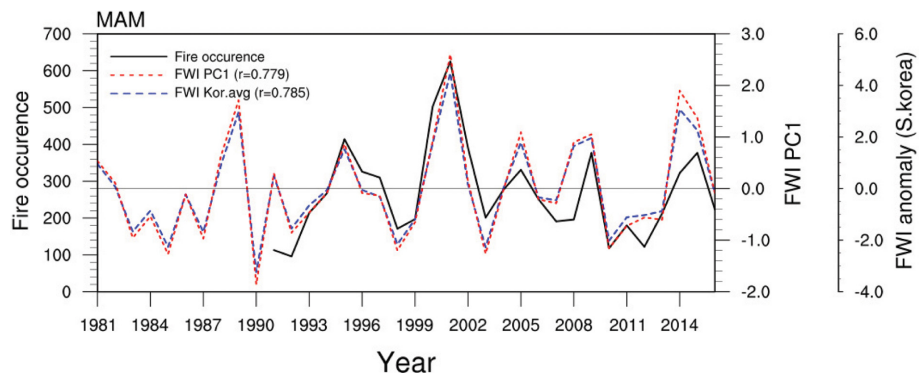


Fig. 4. Time series of occurrence of forest fire (black line) during 1991~2016, FWI 1st PCT (red dashed line) and averaged FWI anomaly (blue dashed line) during 1981~2016 over spring (March-May) in South Korea.

충청북도, 강원도, 경상북도에서 큰 변동성을 나타낸다. 이는 Fig. 2에서 산불발생건수와 산불기상지수간의 관련성이 큰 지역과 대부분 일치한다. 첫 번째 EOF 모드의 강도를 나타내는 시계열(principal component time-series, PCT)을 보면, 경년변동성이 강하게 나타나며 분석기간동안 뚜렷한 경향성은 나타나지 않는다. 두 번째 EOF 모드는 전체변동성의 15.1%를 설명하

며 위도 약 36.5°N를 기준으로 남쪽으로 약한 양의 패턴이, 그리고 북쪽으로 약한 음의 패턴이 나타나, 남북방향 쌍극(dipole) 형태의 변동 특성을 나타낸다. 두 번째 모드 시계열을 보면 1990년대 후반까지 이러한 변동 특성이 매우 약하였지만 그 이후 변동성이 큰 것으로 조사되었다.

홍미롭게도 우리나라 기상학적 산불기상지수 변동

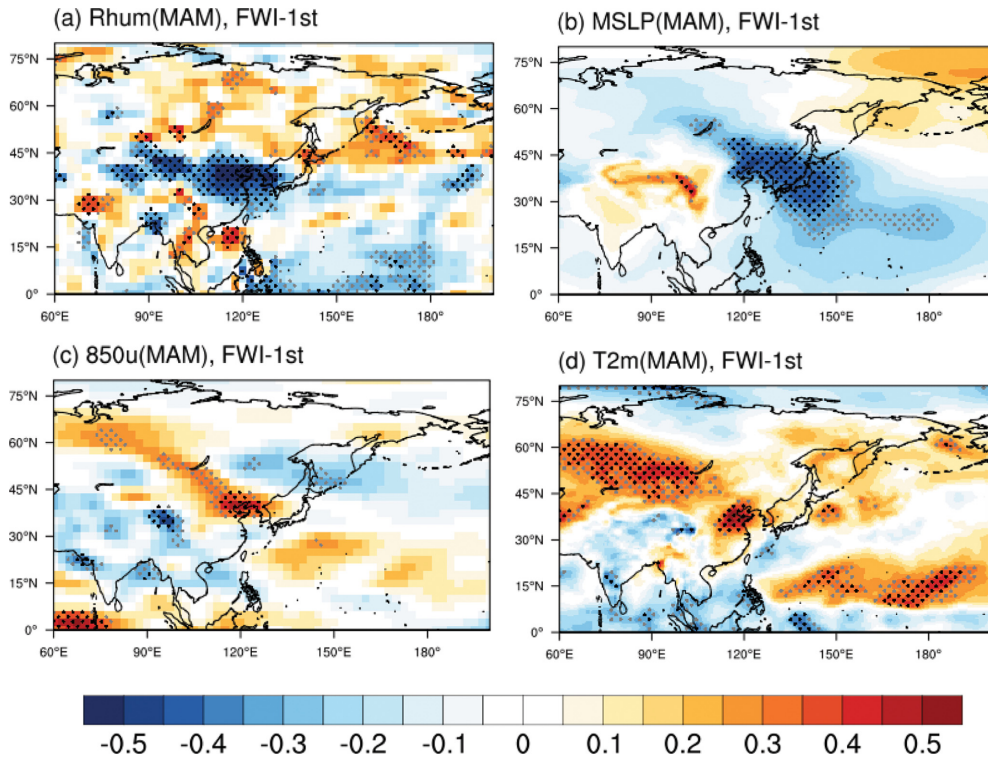


Fig. 5. Spatial correlation between FWI 1st PCT and Relative humidity (a), Sea level pressure (b), 850 hPa zonal wind (c) and 2 m air Temperature (d) over spring (March~May) during 1980/1981~2015/16. Significant at 95% (90%) correlations are indicated with black (gray) dotted pattern. All data were detrended before the analysis.

의 대부분을 설명하는 첫 번째 모드는 우리나라 전체 산불발생건수와 매우 높은 관련성을 보여준다. 첫 번째 EOF 모드 시계열을 우리나라 봄철 평균 FWI 및 산불발생건수와 비교한 결과(Fig. 4), 산불발생건수(1991~2016)는 같은 기간 FWI 첫 번째 EOF 모드와는 0.78의 상관계수를 보였고, 우리나라 봄철 FWI 평균과도 약 0.79의 높은 상관관계 가지고 있음을 확인하였다. 이는 FWI가 실제 산불발생과 깊게 연관되어 있으며 기상학적 요인만으로도 우리나라 봄철 산불발생 경년변동의 상당부분 설명할 수 있음을 의미한다. 특히 계절 평균적인 관점에서 FWI와 봄철 산불발생이 서로 깊게 연관되어 있다는 것은 우리나라 산불발생이 대규모 기후 현상과 연관되어 있을 가능성을 가지고 있음을 의미한다.

3.2 봄철 산불과 관련된 동아시아 기후장

우리나라 산불발생변동과 연관된 기상 및 기후인자를 조사하기 위해 우리나라 산불발생변동의 대부분을 설명하는 FWI 첫 번째 EOF 모드와 대규모 순환장, 기온 및 상대습도와의 동시상관관계를 조사하였다. 첫

번째 모드는 우리나라 산불발생의 증가(감소)는 유라시아 중서부-중국 및 한반도 지역의 평년보다 높은(낮은) 기온, 중국 북동부-한반도-북서태평양 상의 저기압(고기압) 편차, 중국 중부-한반도 지역까지의 서풍(동풍), 그리고 낮은(높은) 습도와 관련이 있다. 상대습도와 동시상관성 결과를 보면(Fig. 5a), 우리나라를 포함한 중국동부지역까지 음의 상관성이 뚜렷하다. 이는 선행연구결과에서 제시된 바와 같이 상대습도가 낮은 건조한 상태가 우리나라 산불발생의 호조건을 잘 보여주는 결과이다(Won et al., 2006; Sung et al., 2010; Kim et al., 2013). 상관성이 높게 나타나는 영역이 우리나라 지역으로 제한되는 것이 아니라 동아시아 지역에서 전반적으로 높게 나타나는 것은 일평균 이상 순환장 또는 대규모 기후현상과 연관되어 있을 가능성이 있음을 의미한다. 첫 번째 모드의 시계열과 해면기압과의 상관성을 보면(Fig. 5b), 우리나라 동쪽을 중심으로 음의 상관성이 높게 나타나는데, 이는 우리나라가 저기압의 영향권에서 북서풍 계열의 바람이 강할 때 산불발생이 빈번한 경향이 있음을 의미한다. 실제 850 hPa 대기하층 동서바람장과

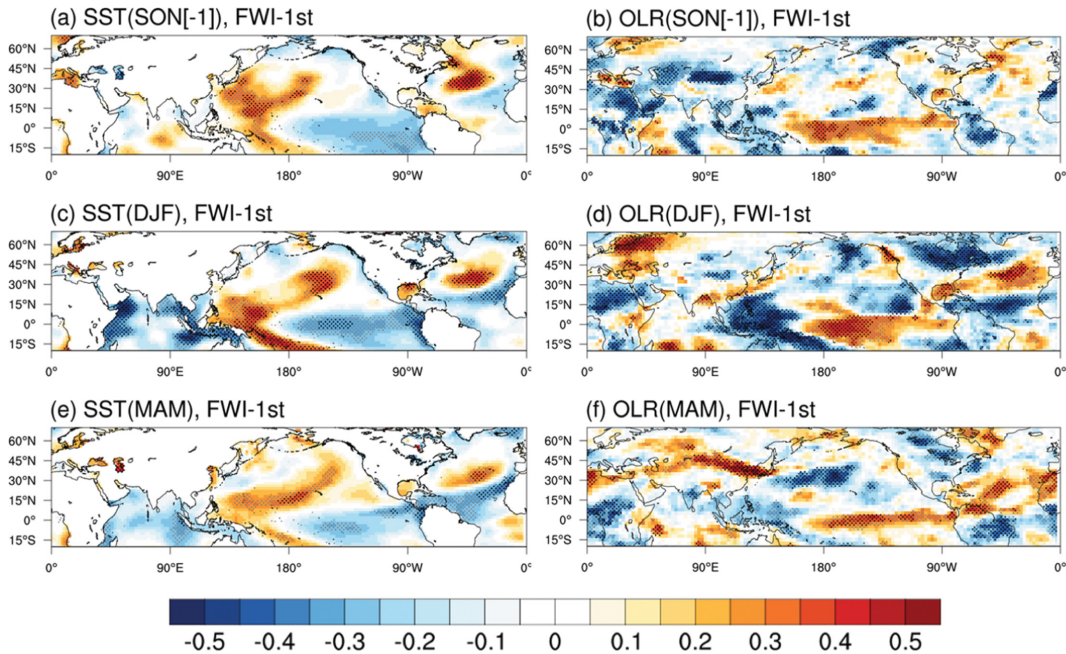


Fig. 6. Spatial correlation between FWI 1st PCT and Sea Surface Temperature (a, c, e) and Outgoing Longwave Radiation (b, d, f) over previous autumn (September~November), winter (December~February) and spring (March~May) during 1980/1981~2015/16. Significant at 95% (90%) correlations are indicated with black (gray) dotted pattern. All data were detrended before the analysis.

의 상관성을 보면(Fig. 5c) 중국에서부터 우리나라까지 양의 상관성이 뚜렷하게 나타난다. 즉, 중국으로부터의 상대적으로 건조한 공기가 우리나라로 유입되는 것이 산발발생의 호조건을 제공하는 것으로 판단된다. 대기 중 습도가 산발발생과 뚜렷한 상관성을 나타내는 반면, FWI 첫 번째 모드와 기온 사이에는 통계적으로 유의한 상관관계가 나타나지 않았다(Fig. 5d). 선행 연구결과에서도 우리나라 산발은 기온과는 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않음을 제시하고 있다(Lee, 2009). 오히려, 우리나라 FWI 첫 번째 모드는 중국 동부지역에서는 기온과 강한 양의 상관관계, 그리고 그 남쪽으로 남중국해의 기온이 약한 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 또한 필리핀 동쪽 북태평양 아열대 지역에서는 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 나타나며, 이는 서태평양과 북서태평양 아열대 지역에서 순환장과 연관된 기후인자가 우리나라 FWI 첫 번째 모드 간에 통계적으로 유의미한 관계가 있음을 의미한다.

3.3 ENSO와의 관련성

앞서 살펴본 바와 같이, Fig. 5d에서 서태평양과 북태평양 아열대 지역에서 기온과 통계적으로 유의한 상관성이 나타나는 것로부터 착안하여, 우리나라 산발위험과 연관된 동아시아 지역 순환장이 열대로부터

의 영향이 있는지 조사하기 위해 해수면온도와 열대 지역 대류활동을 대표할 수 있는 상향장파복사와의 상관관계를 조사하였다(Fig. 6). FWI 첫 번째 모드 시계열과 봄철 해수면온도의 동시상관성을 보면(Fig. 6e), 적도 중태평양부터 동태평양까지 뚜렷한 음의 상관성, 적도 서태평양과 필리핀 동쪽 북태평양 아열대 지역에서 양의 상관성이 통계적으로 유의하게 나타나 전형적인 라니냐 패턴을 보여준다. 즉, 열대 중동태평양 해수면 온도가 낮고 서태평양 및 필리핀 해 부근에서 해수면온도가 높은 라니냐 형태가 되면 우리나라 산발발생 위험이 높아지는 것을 의미한다. 실제, Nino3.4 지수와 FWI 첫 번째 모드 사이의 봄철 동시상관계수는 -0.33 으로 크지는 않았지만, 의미있는 음의 상관성이 나타났다. 상향장파복사와의 상관분석 결과 또한 라니냐와 연관된 전형적인 대류활동 패턴이 뚜렷하다(Fig. 6f). 중동태평양에서 대기의 대류활동이 약화되고 서태평양 및 필리핀 해 부근에서 대류활동이 강화되는 전형적인 라니냐 패턴을 보였다. 일반적으로 엘니뇨/라니냐가 발달하면 그와 연관된 열대·아열대 지역에서의 대류활동이 강제력으로 작용하여 로스비 파 전파에 따른 원격상관에 의한 중위도 지역 대기 순환장의 변화를 유발한다(KMA, 2017). 특히 엘니뇨/라니냐와 연관된 서태평양 지역에서의 대류활동

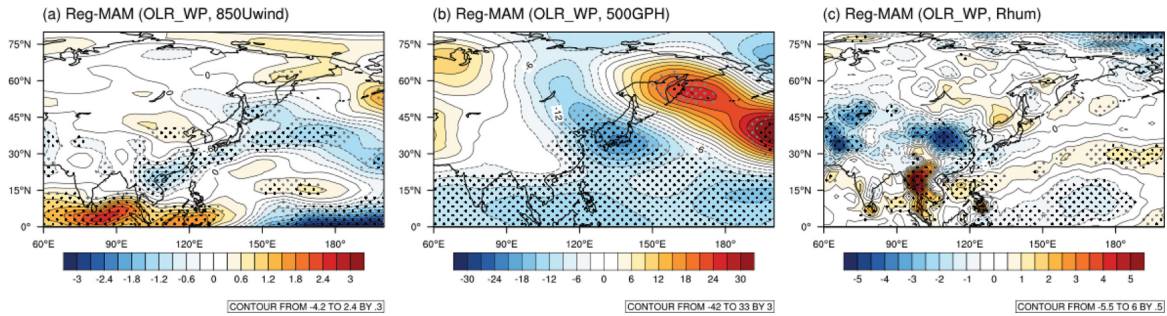


Fig. 7. Linear regression of 850 hPa zonal wind (a), 500 hPa Geopotential height (b) and Relative humidity (c) with respect to averaged western Pacific Outgoing Longwave Radiation over spring (March~May) during 1981~2015. Regressions statistically significant at the 0.05 (0.1) level are indicated by black (gray) dotted pattern. All time-series and data were detrended before the analysis.

은 우리나라를 포함해 동아시아 지역 순환장 변화에 직접적인 영향을 미친다(Son et al., 2014; KMA, 2017). 따라서 라니냐와 연관된 봄철 서태평양 대류활동에 의한 원격상관이 산불위험과 연관되어 있는지 확인하기 위해 서태평양 아열대 지역(위도 $-5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, 경도 $120^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 상향장파복사를 평균한 지수와 동아시아 순환장 및 상대습도와의 회귀 분석을 수행하였다. Figure 7은 산불기상지수와 연관된 순환장과의 비교편의를 위해 서태평양 아열대 상향장파복사 지수가 -1 표준편차, 즉 라니냐 타입일 때의 동아시아 지역 순환장 및 습도를 보여준다. 먼저, 500 hPa 지위고도 패턴을 보면, 통계적으로 유의하지 않지만 중국 남부 지역에서의 고기압성 순환, 우리나라와 일본 지역에서 뚜렷한 저기압성 순환 그리고 캄차카 반도에서의 고기압성 순환이 나타나 라니냐와 연관되어 열대로부터의 중위도로 전파되는 파동패턴이 뚜렷하다(Fig. 7b). 이와 연관되어 중국 동부 지역으로부터 우리나라까지 서풍계열 바람이 뚜렷하고, 중국 동부 지역에서는 강수가 적고 상대습도가 낮은 특징이 나타난다(Figs. 7a, c). 이러한 라니냐와 연관된 동아시아 지역에서의 기상장 패턴들과 FWI 첫 번째 모드간의 동시상관패턴(Fig. 5)을 비교하면 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 특히 우리나라 남동쪽에 중심을 둔 저기압성 순환, 중국 동부지역에서의 건조한 조건과 그 건조 공기를 우리나라로 유입시켜 산불발생 위험을 높이는 서풍계열 바람이 FWI 첫 번째 모드와 연관된 패턴과 라니냐와 연관된 패턴에서 모두 뚜렷하게 나타났다. 이는 봄철 산불위험을 높이는 기후 조건은 라니냐와 연관된 서태평양 지역의 대류활동에 의한 원격상관에 의해 상당부분 설명이 가능함을 의미한다. 실제 서태평양에서 평균된 상향장파복사 지수와 FWI 첫 번째 모드 시계열 간의 상관관계는 -0.341 을 보여 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 결과를 보였다.

3.4 선행 기후인자를 이용한 봄철 기상학적 산불위험 추정 회귀모델

엘니뇨/라니냐 현상은 그 발달 및 소멸 과정의 시간규모가 수개월 이상의 메모리를 가지고 진행된다. 따라서 엘니뇨/라니냐는 계절 예보의 예측성을 확보할 수 있는 상당히 중요한 기후인자 중 하나이다(Larkin et al., 2005; Son et al., 2014). 우리나라 봄철 산불기상지수가 엘니뇨/라니냐 현상과 밀접하게 연관되어 있다는 것은 봄철 산불위험도의 예측성을 확보할 수 있는 가능성을 가지고 있음을 의미한다. 실제로 봄철 FWI 첫 번째 모드와 겨울철 해수면온도와의 상관성을 보면(Figs. 6c, 8b) 여전히 라니냐 타입의 해수면온도 패턴이 뚜렷하게 나타난다. 겨울철 라니냐가 발달해 봄철까지 지속되면서 그와 연관된 열대 서태평양의 대류활동의 영향으로 우리나라는 산불이 발생하기 좋은 기상 조건을 가지는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 엘니뇨/라니냐와 연관된 기후 패턴들을 활용하여 산불기상지수를 어느 정도 예측할 수 있는지 테스트하였다. Figure 8a는 봄철 FWI 첫 번째 모드와 겨울철 850 hPa 대기하층 동서바람장과의 지연상관분석 결과를 보여준다. 겨울철 통계적으로 유의하지는 않지만 중국으로부터 한반도를 거쳐 일본까지 양의 상관성이 나타나고, 남중국해 및 필리핀해 지역에서 뚜렷한 음의 상관성을 확인할 수 있다. 또한 적도 서태평양 동남아시아 지역에서 강한 서풍계열의 바람이 나타나, 동남아시아부터 우리나라까지 공간적으로 남북방향 tripole 형태의 변동 특성과 우리나라 FWI 첫 번째 모드 사이의 지연 상관성이 뚜렷하였다. 뿐만 아니라 겨울철 해수면온도와의 지연상관분석에서는 중동태평양에서 음의 상관, 서태평양에서 양의 상관, 동인도양에서 음의 상관이 뚜렷하게 나타나 전형적인 라니냐와 연관된 패턴이 나타난다. 동서바람장과의 지연상관에서 상관성이 높게 나타난 남중국 지역의 동

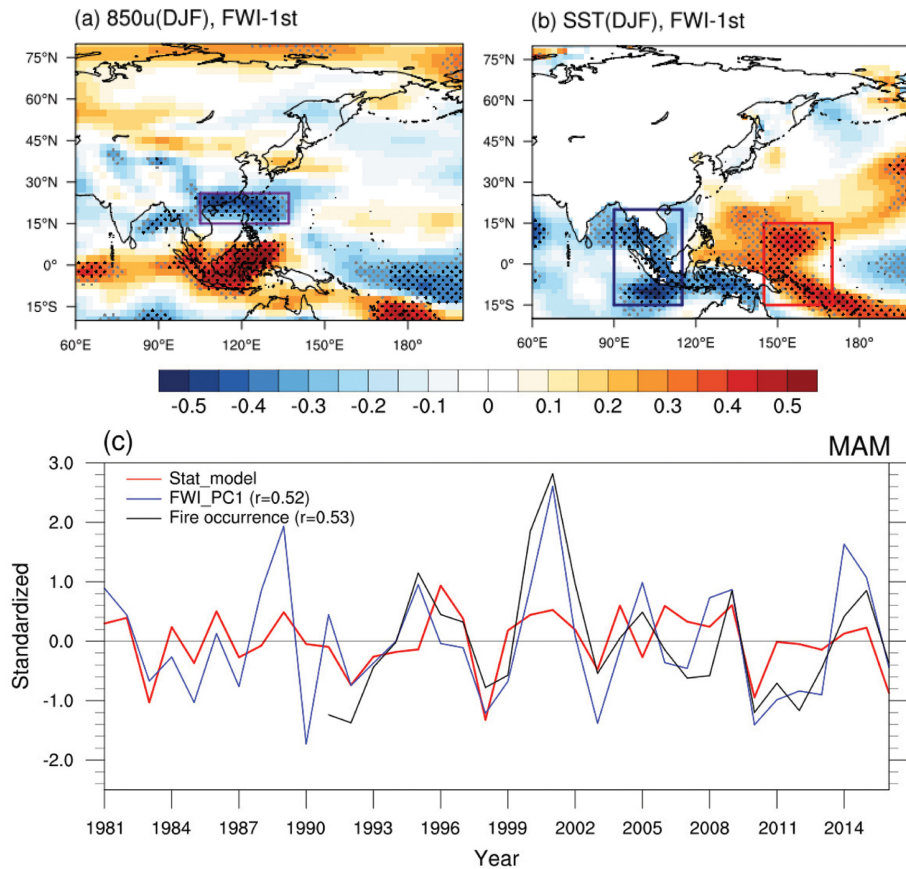


Fig. 8. Spatial correlation between FWI 1st PCT and 850 hPa zonal wind (a) and Sea Surface Temperature (b) over winter (December–February) during 1980/1981~2015/16. (c) Time series of multiple linear regression (MLR) model for predicting FWI 1st PCT (red line), FWI 1st PCT (blue line) and occurrence of forest fire (black line) during 1981~2016 over spring (March–May) in South Korea. Significant at 95% (90%) correlations are indicated with black (gray) dotted pattern. All data were detrended before the analysis.

풍계열 850 hPa 바람(위도 15°N~26°N, 경도 105°E~137°E) (850U_{sc})과 해수면온도와의 지연상관에서 지연상관이 높게 나타난 서태평양과 인도양 지역에서의 해수면온도 차([위도 -15°N~15°N, 경도 145°E~170°E] - [위도 -15°N~20°N, 경도 90°E~115°E]) (SST_{diff})를 예측인자로 선정하였고, 이 두 예측인자에 기반하여 우리나라 봄철 FWI 첫 번째 모드 시계열과의 다중선형 회귀모형을 수식 (1)과 같이 산출하였다. 겨울철 해수면온도 지수는 가중치 약 0.344로 가장 큰 가중치를 보였고 남중국 지역 850 hPa 동서바람은 -0.272의 음의 가중치를 보였다.

$$FWI_{predic} = 0.344 \times SST_{diff} - 0.272 \times 850U_{sc} \quad (1)$$

Figure 8c는 1981-2016년 기간 동안의 우리나라 FWI 첫 번째 모드의 주성분 시계열, 다중선형회귀모형을

기반으로 재생산된 과거 예측값, 그리고 실제 산불발생건수를 비교하여 통계모델의 훈련기간 예측성능을 조사하였다. 겨울철 기후인자들을 이용하여 수행한 통계모델의 결과는 1991~2016년 기간 동안 봄철 산불발생건수와 약 0.53의 상관성을 가지고, FWI 첫 번째 모드와 1981~2016년 기간 동안 약 0.52의 상관관계를 보여, FWI 첫 번째 모드의 약 25% 정도를 겨울철 기후인자들을 이용하여 설명할 수 있었다. 전반적으로 통계모델 결과가 관측의 경년변동성 흐름을 잘 따라가지만, 1988~1989년이나 2000~2001년과 같이 봄철 산불발생건수 및 FWI가 가장 높았던 시기에는 관측보다 과소 모의하는 결과가 뚜렷하였다. 이는 우리나라 산불발생에 영향을 미치는 다른 기후인자가 존재할 가능성 뿐만 아니라 통계모델이 일반적으로 다양한 예측인자들과의 상관관계에 대한 가중평균의 개념

이므로 극한값 모의에 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 통계모델에서 활용한 두 예측인자들은 엘니뇨/라니냐에 의한 서태평양 변동 및 그 원격상관과 연관되어 있을 것으로 판단된다. 실제 두 예측인자 사이의 상관계수는 -0.4 로 과적합의 한계를 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 예측모델을 구축하여 테스트한 것은 엘니뇨/라니냐와 연관된 예측인자만을 활용해서도 일정수준의 예측성을 확보할 수 있음을 확인하고자 하였다. 이는 향후 엘니뇨/라니냐와 독립적이면서 FWI 첫 번째 모드와 지연상관을 가지는 다른 예측인자를 발굴한다면 그에 기반한 안정적인 고 예측성을 가진 통계모델을 구축할 수 있는 가능성을 의미한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 봄철 산불발생과 기상변수로 생산된 산불기상지수(FWI) 사이의 관련성을 파악하고, FWI의 시공간적 변동 특성 및 그와 연관된 대규모 기후인자들에 대해 조사하였다. 우리나라는 봄철인 3-4월에 산불이 가장 많이 발생하고 피해면적도 가장 크다. 봄철 기상자료를 이용하여 산출한 FWI는 산불발생건수와 0.791의 높은 상관관계를 보여 기상자료 기반의 봄철 산불기상지수가 우리나라 산불위험도를 대표할 수 있음을 확인하였다.

우리나라 봄철 산불위험도의 시공간적 변동 특성을 조사하기 위해 FWI의 주성분 분석을 수행한 결과, 전국의 산불위험이 높고 낮음을 설명하는 첫 번째 모드가 우리나라 FWI 경년변동의 대부분(70.3%)을 설명하는 것으로 나타났다. 또한 이 모드는 우리나라 봄철 산불발생건수와 약 0.8의 높은 상관관계를 보여 기상학적 요인만으로 생산된 FWI가 산불발생의 경년변동을 상당부분 설명할 수 있음을 확인하였다. FWI 첫 번째 모드와 대규모 순환장 및 여러 기상 변수들과의 동시상관분석 수행 결과, 우리나라 산불위험도의 증가(감소)는 유라시아 중서부-중국 및 한반도 지역의 평년보다 높은(낮은) 기온, 중국 북동부-한반도-북서태평양 상의 저기압(고기압) 아노말리, 중국중부-한반도 지역의 강한(약한) 동서바람, 그리고 낮은(높은) 습도와 관련이 있다는 결과를 얻을 수 있었다. 반면, 봄철 기온과는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았고, FWI 첫 번째 모드가 선형 경향성이 없는 것으로 보아, 우리나라 산불이 지구온난화와 뚜렷한 상관성은 없는 것으로 판단된다. 오히려 우리나라 봄철 산불발생과 연관된 동아시아 지역에서의 순환장은 엘니뇨/라니냐에 의한 서태평양 대류활동과 연관된 열대-중위도 원격상관에 의해 상당부분 설명될 수 있었다.

본 연구에서는 계절규모에서의 지속성을 가지는 엘니뇨/라니냐와 산불기상지수 사이의 연관성을 바탕으로 겨울철 서태평양 동서바람장 및 해수면온도를 예측인자로 하여 봄철 FWI를 예측하는 다중회귀모델을 구성하였다. 이 모델은 1981~2016년 기간동안 FWI 첫 번째 모드와 0.52 그리고 1991~2016년 사이의 산불발생건수와 0.53의 준수한 예측성능을 보였다. 비록 두 예측인자 사이에 통계적으로 유의한 상관성에 있어 과적합의 문제가 있지만, 엘니뇨/라니냐와 연관된 서태평양 지역의 변동성 만으로도 우리나라 봄철 산불발생을 준수한 수준에서 예측 가능하다는 것은 우리나라 산불발생의 계절예측 가능성을 보여준다 할 수 있다. 향후 엘니뇨/라니냐 이외에 우리나라 봄철 기후장에 영향을 미치는 기후예측인자를 발굴하고 그 물리역학과정에 대한 이해를 높인다면, 우리나라 산불발생의 계절예측에 유용한 정보의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립산림과학원 위탁연구과제(과제명: 기후변화 대비 인공지능을 활용한 산불 패턴변화 시나리오 및 산불위험 계절예보체계 알고리즘 개발)와 2018년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1A2B4007480).

REFERENCES

- Brose, P. H., D. C. Dey, R. P. Guyette, J. M. Marschall, and M. C. Stambaugh, 2013: The influences of drought and humans on the fire regimes of northern Pennsylvania, USA. *Can. J. Forest Res.*, **43**, 757-767, doi: 10.1139/cjfr-2012-0463.
- Choi, S. P., D. H. Kim, and S. K. Lee, 2006: The abstraction of forest fire damage area using factor analysis from the satellite image data. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, **14**, 13-19 (in Korean with English abstract).
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Field, R. D., and Coauthors, 2015: Development of a global fire weather database. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **15**, 1407-1423, doi:10.5194/nhess-15-1407-2015.
- Huang, B., and Coauthors, 2017: Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Cli-*

- mate, **30**, 8179-8205, doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1644.
- Keetch, J. J., and G. M. Byram, 1968: A drought index for forest fire control. U. S. Department of Agriculture Forest Service Research paper SE-38, 33 pp.
- Kim, M.-I., H. B. Kwak, W. K. Lee, M. S. Won, and K. S. Koo, 2011: Study on regional spatial autocorrelation of forest fire occurrence in Korea. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, **19**, 29-37 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-S., J. H. Lee, and M. W. Lee, 2013: Characteristics of forest fires and weathers in domestic over the past 50 years through the statistics. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **13**, 225-231 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2017: *El Niño White Book. 2016 Korea Meteorological Administration*, 280 pp (in Korean).
- Kwon, C. G., S. Y. Lee, and H. P. Lee, 2012: Analysis of forest fire occurrences and damage in Samcheok. In *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference*. Daegu EXCO, Korean Institute of Fire Science and Engineering, 444-447 (in Korean).
- Kwak, H., W. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Won, K. S. Koo, B. Lee, and M. B. Lee, 2010: Cause-specific spatial point pattern analysis of forest fire in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science*, **99**, 259-266 (in Korean with English abstract).
- Larkin, N. K., and D. E. Harrison, 2005: Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16705.
- Lee, S.-Y., 2009: Forest fire and Climate. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **9**, 19-33 (in Korean).
- _____, S.-H. An, M.-S. Won, M.-B. Lee, T.-G. Lim, and Y.-C. Shin, 2004: Classification of forest fire occurrence risk regions using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, **7**, 37-46 (in Korean with English abstract).
- Liebmann, B., and C. A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275-1277.
- McCoy, V. M., and C. R. Burn, 2005: Potential alteration by climate change of the forest-fire regime in the boreal forest of central Yukon Territory. *Arctic*, **58**, 276-285.
- Rienecker, M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *J. Climate*, **24**, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Son, H.-Y., J.-Y. Park, J.-S. Kug, J. Yoo, and C.-H. Kim, 2014: Winter precipitation variability over Korean Peninsula associated with ENSO. *Climate Dyn.*, **42**, 3171-3186, doi:10.1007/s00382-013-2008-1.
- Sung, M.-K., G.-H. Lim, E.-H. Choi, Y.-Y. Lee, M.-S. Won, and K.-S. Koo, 2010: Climate change over Korea and its relation to the forest fire occurrence. *Atmosphere*, **20**, 27-35 (in Korean with English abstract).
- Veblen, T. T., T. Kitzberger, and J. Donnegan, 2000: Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado Front Range. *Ecol. Appl.*, **10**, 1178-1195.
- Viegas, D. X., G. Bovio, A. Ferreira, A. Nosenzo, and B. Sol, 1999: Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *Int. J. Wildland Fire*, **9**, 235-246.
- Wagner, C. E. V., 1970: Conversion of Williams' severity rating for use with the fire weather index, Petawawa Forest Experiment Station, Information Report PS-X-21, 5 pp.
- _____, 1974: Structure of the Canadian forest fire weather index. Petawawa Forest Experiment Station, Environment Canadian Forestry Service publication 1333, 49 pp.
- Won, M. S., K. S. Koo, and M. B. Lee, 2006: An analysis of forest fire occurrence hazards by changing temperature and humidity of ten-day intervals for 30 years in spring. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **8**, 250-259.
- _____, S. Y. Lee, M. B. Lee, and S. Ohga, 2010: Development and application of a forest fire danger rating system in South Korea. *J. Fac. Agr., Kyushu U.*, **55**, 221-229.