

PLS-SEM을 이용한 강원도 산불 발생의 영향 요인 평가: 가뭄 및 기상학적 요인을 중심으로

유지영* · 한정우** · 김동욱*** · 김태웅****

Yoo, Jiyoung* · Han, Jeongwoo** · Kim, Dongwook*** · Kim, Tae-Woong****

Evaluating Impact Factors of Forest Fire Occurrences in Gangwon Province Using PLS-SEM: A Focus on Drought and Meteorological Factors

ABSTRACT

Although forest fires are more often triggered by artificial causes than by natural causes, the combustion conditions that spread forest fire damage over a large area are affected by natural phenomena. Therefore, using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM), which can analyze the dependent and causal relationships between various factors, this study evaluated the causal relationships and relative influences between forest fire, weather, and drought, taking Gangwon Province as our sample region. The results indicated that the impact of drought on forest fires was 27 % and that of the weather was 38 %. In addition, forest fires in spring accounted for about 60 % of total forest fires. This indicates that along with meteorological factors, the autumn and winter droughts in the previous year affected forest fires. In assessing the risk of forest fires, if severe meteorological droughts occur in autumn and winter, the probability of forest fires may increase in the spring of the following year.

Key words : Drought, Structural equation modeling, Meteorological factor, Forest fire, Causal relationship

초록

산불은 대부분 인위적인 원인에 의해 발생되지만, 산불의 피해가 대규모로 확산하는 연소 조건은 자연현상에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 여러 인자 사이의 의존 및 인과관계를 분석할 수 있는 부분최소제곱 구조방정식 모형(PLS-SEM)을 이용하여 기상 및 가뭄이 산불 발생에 미치는 인과관계와 영향 정도를 평가하였다. 그 결과 지난 2015년부터 약 5년 기간 동안 발생한 강원도 산불에 미치는 가뭄의 영향은 27 %, 기상학적 영향은 38 %로 확인되었다. 또한, 강원도에서 발생한 산불 중에서 봄철에 발생한 산불은 약 60 %의 비율을 차지하며, 이는 기상학적 요인과 더불어 이전 연도의 가을과 겨울철 가뭄이 산불 발생에 영향을 미치는 것으로 해석된다. 산불 발생위험을 평가하는 데 있어 극심한 기상학적 가뭄이 가을과 겨울철에 발생했다면, 이듬해 봄에는 산불의 발생확률은 증가할 가능성이 있다.

검색어 : 가뭄, 구조방정식모형, 기상학적 요인, 산불, 인과 관계

* 중신회원 · 한양대학교(ERICA) 공학기술연구소 연구교수, 공학박사 (Hanyang University (ERICA) · jyyoo84@gmail.com)

** 텍사스 A&M 대학교 생명농업공학과 박사과정 (Texas A&M University · han820124@tamu.edu)

*** 정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정 (Hanyang University · midas515@hanyang.ac.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수, 공학박사

(Corresponding Author · Hanyang University (ERICA) · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received September 11, 2020/ revised November 3, 2020/ accepted November 27, 2020

1. 서론

최근 기후변화 등의 원인으로 전 세계적으로 초대형 산불이 자주 발생하여 국가적 재난으로 부각되고 있다(Korea Forest Service, 2020). 이러한 기후변화는 산불 이외에도 가뭄의 발생빈도 및 강도를 점차 증가시키고 있으며, 가뭄의 영향으로 인한 대규모 산불 또는 화재에 대한 또 다른 발생 원인으로 작용할 수도 있다(Barbero et al., 2014; Clarke and Evans, 2019). 최근 들어, 가뭄과 산불은 우리나라를 비롯한 미국과 호주 등 여러 국가에서도 해마다 반복적으로 발생하여 직·간접적인 피해를 일으키고 있다. 우리나라의 경우, 지난 10년(2009~2018년) 동안 평균 432건의 산불이 발생하여 670 ha의 산림이 소실되었다. 따라서, 단기 및 장기적인 기후-가뭄-산불 간의 관계를 이해하기 위한 노력이 필요하다.

현재 우리나라에서 발생하는 산불은 대부분 자연적인 원인보다는 인간의 부주의 등과 같은 인위적인 원인으로 발생하는 것으로 알려져 있다(Korea Forest Service, 2020). 그러나, 이러한 산불이 대규모로 확산하는 연소 환경은 분명히 자연적인 요인(기상학적 요인(바람, 습도, 기온 등), 기상학적 가뭄)에 의해서 영향을 받게 된다. 즉, 산불의 연소 환경에 영향을 끼칠 수 있는 다양한 요인을 확인하고, 가뭄과 같은 또 다른 재해와의 복잡한 연계성을 파악할 수 있어야 대규모적 복합재해를 사전에 대비할 수 있다(Marín et al., 2017).

최근 외국에서는 가뭄으로 인한 산불 발생의 영향을 해석하는 선행연구가 다수 진행되고 있다. 예를 들어, McEvoy et al.(2019)는 캘리포니아-네바다주 지역 내 극심한 가뭄과 산불피해 간의 관계를 분석하고, 가뭄지수를 활용하여 대형산불을 전망할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한, ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 현상으로 인해 상반되는 기후 조건은 멕시코 남부와 북부지역에서 발생하는 산불피해와 가뭄에 영향을 미치며, 이로 인해 지역 간의 발생특성도 대조적으로 나타났다(Zúñiga-Vásquez et al., 2019).

우리나라에서는 기상인자(기온, 습도, 풍속 등)의 변동에 따라 산불 발생확률에 차이가 발생하는 현상을 증명하는 연구(Lee et al., 2004; Won et al., 2006; Won et al., 2010; Sung et al., 2010)가 다수 진행되었다. 최근 들어서는 기후변화로 인한 상대습도 감소 및 기온 상승의 영향을 고려하여 산불위험을 예측하는 연구가 시도되고 있다(Won et al., 2016). 이처럼 국내 선행연구에서는 대부분 산불 발생의 영향 요인을 기상인자에 초점을 맞춰 해석하고 있지만, 산불 발생에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인을 분석하려는 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강원도에서 발생한 산불의 영향 요인을 새롭게 파악하기 위하여 기상학적 요인과 더불어 기상학적 가뭄지수를 고려하여 산불 발생에 대한 영향 분석을 수행하였다.

일반적으로 다변량 인자를 고려하여 영향관계를 추론하기 위해서는 상관성 분석, 주성분 분석, 회귀분석, 요인분석 등의 다양한 통계적 기법을 활용한다(Bifulco et al., 2014; Nogueira et al., 2017; Marín et al., 2017; Urbietta et al., 2015). 그러나 본 연구에서는 요인분석, 경로분석, 회귀분석을 결합하여 복잡한 변수들 사이의 의존성 및 인과관계를 해석하는 것이 가능한 부분최소제곱 구조방정식(Partial Least Squares-Structural Equation Modeling, PLS-SEM)을 활용하였다. 이 모형은 직접 관측이 불가능한 잠재변수를 측정변수들의 선형결합으로 나타내는 가중관계(weight relation)로 해석할 수 있는 장점이 있다(Fornell and Cha, 1994). 최근 외국에서는 PLS-SEM을 기반으로 하여 기후변동성의 영향요인, 홍수 취약성 결정요인 등을 분석하는 연구가 수행된 바 있다(Anh et al., 2018; Djimesah et al., 2018).

본 연구는 PLS-SEM 기반으로 하여 최근 5년 동안 발생한 강원도 산불을 대상으로 하여, 가뭄 및 기상학적 요인이 산불 발생에 미친 영향효과를 평가하였다. 즉, 산불이 발생하기 이전의 가뭄 상태와 기상조건을 산불의 잠재요인으로 가정하여 인과관계를 평가하였다. 이를 위해서는 (i) 강원도에서 발생한 산불 관련 국가위기정보 발령실적과 실제 산불 발생면적 자료를 수집하고, (ii) 다양한 지체시간에 대한 가뭄 및 기상, 그리고 산불과의 인과관계를 설정하고, (iii) PLS-SEM 개발을 통한 강원도 산불 발생의 영향 요인을 해석하였다.

2. 분석자료 및 연구방법

2.1 분석자료

우리나라 산림청에서 지리정보시스템을 기반으로 지역별 기상-지형-입상조건을 실시간으로 분석하여 산불위험도를 4단계(낮음-관심, 보통-주의, 높음-경계, 매우높음-심각)로 예보하는 대국민서비스 시스템을 운영하고 있다. 본 연구에서는 과거 산불 발생기록을 대상으로 지난 2015년부터 2020년 6월 기간 이내에 강원도 18개 시군의 위기경보발령 실적 및 산불 발생면적 자료를 활용하였다. 또한, 행정구역별 가뭄 및 기상 자료를 구축하기 위하여, 기상청의 (유인)중관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 및 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)로 관측된 지점 자료를 티센가중법을 적용하여 행정구역 단위의 자료로 변환하였다. 이를 기반으로 일 단위 강수량 및 온도 자료를 이용한 기상학적 지표를 구축하였다. 또한, 3개월, 6개월 누적 강수량을 이용하여 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 산정하고 누적강수량에서 누적 증발산량을 제외하여 산정한 표준강수증발산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)를 단기 및 장기적 기상학적 가뭄을 나타내는 지표로 활용하였다.

2.2 연구방법

일반적으로 가뭄-기상-산불 간의 인과관계를 밝혀내기 위해서는 분석결과를 신뢰할 수 있는 충분한 사례 수가 필요하다. 본 연구에서는 최근 5년 기간 내 강원도 18개 시군에서 발생한 502개 산불 사례를 수집하여 PLS 구조방정식 모형에 적용하였다. PLS 구조방정식 모형은 경로분석, 회귀분석, 요인분석이 합성되어 발전된 구조방정식모형(Structural Equation Modeling, SEM)을 기반으로 하고 있다. 이러한 구조방정식 모형에서 관계를 추정하는 데에는 크게 두 가지 주요 접근법이 있으며, 이는 공분산 기반의 구조방정식모형(Covariance-based SEM, CB-SEM)과 부분최소제곱 구조방정식(Partial Least Squares- SEM, PLS-SEM)으로 구분된다(Hair et al., 2014). CB-SEM은 여러 변수 간의 체계적인 관계의 집합을 확인(또는 거부)하여 개념적 이론을 검증하는데 주로 활용된다. 반면 PLS-SEM은 주로 탐색적 연구에서 이론을 개발하는 데 사용되며, 특정한 인과관계의 발견 및 예측에 적용된다. 본 연구에서는 산불에 미치는 다양한 영향 요인 중 가뭄과 기상학적 인자 간의 인과관계를 해석하는 것이 주요 목적이기 때문에 PLS-SEM을 활용하였다.

Fig. 1은 PLS-SEM의 변수 관계를 시각적으로 나타내는 개념도이다. 여기서 직접 측정이 되지 않은 변수는 타원(잠재변수)으로 표시되며, 직접 관측된 지표와 관련된 변수는 직사각형(관측변수)으로 표현된다. 또한, 모형 내 변수 사이의 인과관계는 화살표로 나타내었다. 즉, PLS-SEM은 크게 두 가지의 모형(구조모형, 측정모형)으로 구성되며, 잠재변수 간의 구조를 나타내는 구조모형(Structural Model, 내부모형)과 잠재변수를 설명하는 관측변수의 관계를 나타내는 측정모형(Measurement Model, 외부모형)으로 구성된다.

Fig. 1의 outer model A는 외생 잠재변수와 관련한 측정모형이

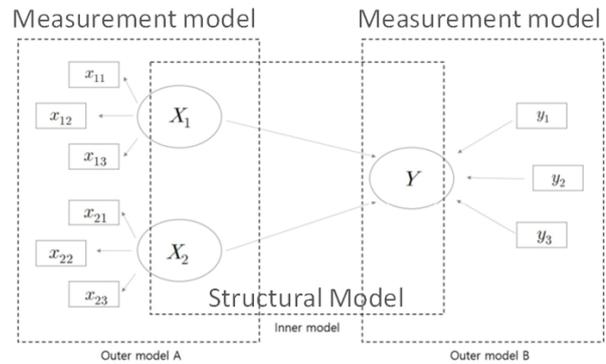


Fig. 1. Conceptual Diagram for PLS-SEM

며, outer model B는 내생 잠재변수와 관련한 측정모형이다. 즉, 독립변수와 관련이 있는 잠재변수(X_1 , X_2)를 외생 잠재변수라고 하며, 반면에 종속변수와 관련이 있는 잠재변수(Y)를 내생 잠재변수라고 한다. 본 연구에서는 가뭄, 기상학적 영향을 나타내는 2가지 외생 잠재변수와 산불을 나타내는 하나의 내생 잠재변수를 구성하였으며, 각각의 잠재변수 내 측정변수(설명변수)를 이용하여 PLS-SEM을 구축하였다. 일반적으로 PLS-SEM에서는 측정변수들이 잠재변수를 얼마나 잘 나타내는지 평가하는 외부모형 평가와 잠재변수들 간의 인과관계의 타당성을 평가하는 내부모형 평가를 수행한다(Nunnally, 1978; Fornell and Larcker, 1981; Hair et al., 1998; Shipley, 2000).

앞 절에서 수집한 분석자료를 대상으로 산불 발생 이전의 기상학적 요인(선행 강수, 선행 기온)과 선행 가뭄조건에 따른 영향을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 임의의 다양한 시간단위 자료를 구축하였다. 예를 들어, 2019년 4월에 발생한 산불 발생의 원인을

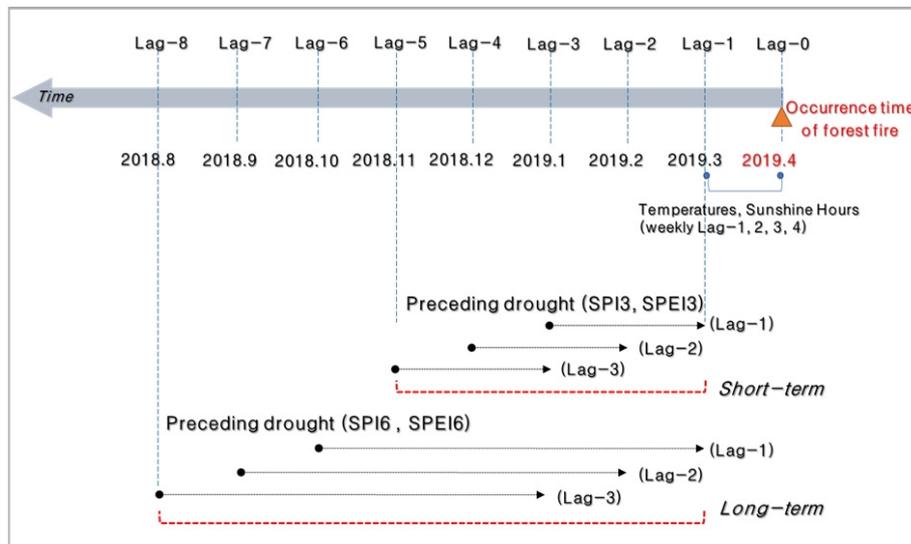


Fig. 2. Example of Data Construction-Related Preceding Drought, Meteorological Conditions, and Forest Fire

검토하기 위해서는 이전 7일, 14일, 21일, 28일의 선행 기상조건과 더불어 선행된 단기 가뭄(SPI3, SPEI3) 및 장기 가뭄(SPI6, SPEI6)의 영향을 검토하였다. 이는 최대 7개월 이전까지의 기상 상황을 반영하여 산정된 기상학적 가뭄지수와 더불어 산불 발생 1개월 이전의 기상학적 요인에 의한 가뭄-기상-산불 간의 인과관계를 평가하는 개념이다. 즉, 봄철에 발생하는 산불에 미치는 영향은 전년도의 여름, 가을, 겨울에 발생한 기상학적 가뭄 및 최근의 기상학적 조건을 고려하였다.

3. 강원도 산불 발생의 영향 요인 평가

3.1 과거 강원도 산불 발생특성 분석

지난 2015년 1월부터 2020년 6월까지 강원도에서는 총 502건의 산불이 발생했으며, 강원도 내 18개 시군구마다 산불 발생 건수의 차이는 매우 큰 것으로 나타났다(Fig. 3(a) 참고). 이 중에서 춘천시(75건)와 홍천군(63건)에서 가장 많은 산불이 발생하였고, 다음으로는 강릉시 48건, 원주시 45건, 횡성군 40건, 인제군 29건, 화천군 25건, 영월군 25건, 삼척시 24건, 평창군 23건, 정선군 22건, 철원군 22건, 고성군 21건, 양구군 16건, 양양군 16건, 동해시 4건, 속초시 2건, 태백시 2건으로 나타났다.

과거 강원도 내 대형산불로 인해 가장 큰 피해면적이 발생한 사례는 지난 2019년 4월의 산불이며, 이로 인해 강릉시, 고성군, 인제군에서는 각각 714.8 ha, 700.0 ha, 342.2 ha의 피해면적이 발생한 바 있다. 이외에도 2017년 5월 삼척시에서 발생한 산불로 인해 765.1 ha의 피해면적이 발생하였으며, 대부분 봄철에 발생하는 산불이 큰 피해 규모를 나타내는 것으로 확인된다. 이처럼 강원도에서 대형산불이 발생하는 이유는 남고북저(南高北低) 형태의 기

압 배치에서 나타나는 강한 서풍 기류와 더불어 태백산맥을 넘으면 서 달라지는 기상 요인(고온 건조)에 의한 영향으로 해석할 수 있다. Fig. 3(b)은 전체 산불자료 기간 내 강원도 18개 시군구별로 발생한 산불피해면적의 총합이다. 여기서 가장 큰 누가 산불 피해면적을 기록한 지역은 고성군(1146.7 ha), 강릉시(1136.0 ha), 삼척시(1092.4 ha) 순으로 확인되었다. 또한, 과거 단일 사상으로 발생한 산불의 경우라도 해당 산불이 대형산불로 확산된 경우(2019년 고성군, 강릉시 산불, 2017년 삼척시 산불)에는 누적된 산불피해 규모가 상당히 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 4는 월별로 강원도 지역 내 산불의 발생빈도를 나타내고 있으며, 전체 502건 중 1월부터 12월까지 발생한 산불은 각각 43건, 39건, 113건, 94건, 94건, 54건, 6건, 10건, 5건, 8건, 17건, 19건으로 확인되었다. 또한, 계절별로는 봄철(3월, 4월, 5월)에 발생한 산불은 60%, 겨울철(12월, 1월, 2월)은 20%, 여름철(6월, 7월, 8월)은 14%, 가을철(9월, 10월, 11월)은 6%로 확인되었다. 이 중에서 봄철의 산불 발생빈도는 매우 큰데, 이것은 산불 발생에 미치는 요인 간의 영향 정도에서도 차이가 난다. 실제로 지난 2014년은 평년 대비 강수량이 50~60% 수준으로 매우 낮아 이듬해 봄철 내내 가뭄이 지속된 바 있다. 2017년 역시 연평균 강수량이 적은 해로 봄철 가뭄이 발생하여 전체 51개 시군에서 제한급수 피해가 발생하였다. 또한, 2018년은 강원 속초 전 지역에서 제한급수를 시행할 정도의 극심한 봄 가뭄이 발생한 바 있다. 2019년 1월~7월에는 예년 대비 75% 수준으로 강원도 지역에도 생활용수 부족으로 인한 피해가 발생했다. 이처럼 과거에 발생한 가뭄의 시점을 살펴보면, 겨울과 봄에 내린 강수량이 평년에 비해 부족할 경우에는 기상학적 가뭄이 산불 발생에 영향을 미칠 가능성이 큰 것으로 나타났다.

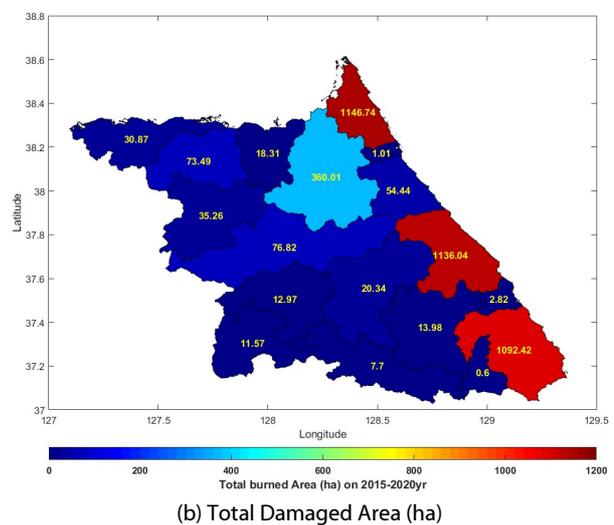
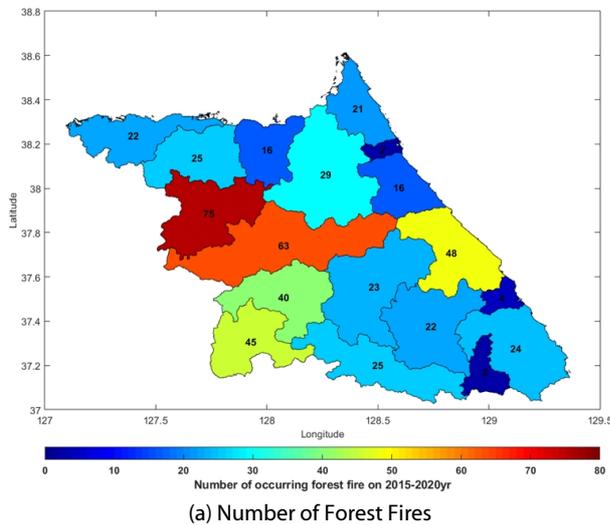


Fig. 3. Records of Forest Fires from January 2015 to June 2020 in Gangwon Province

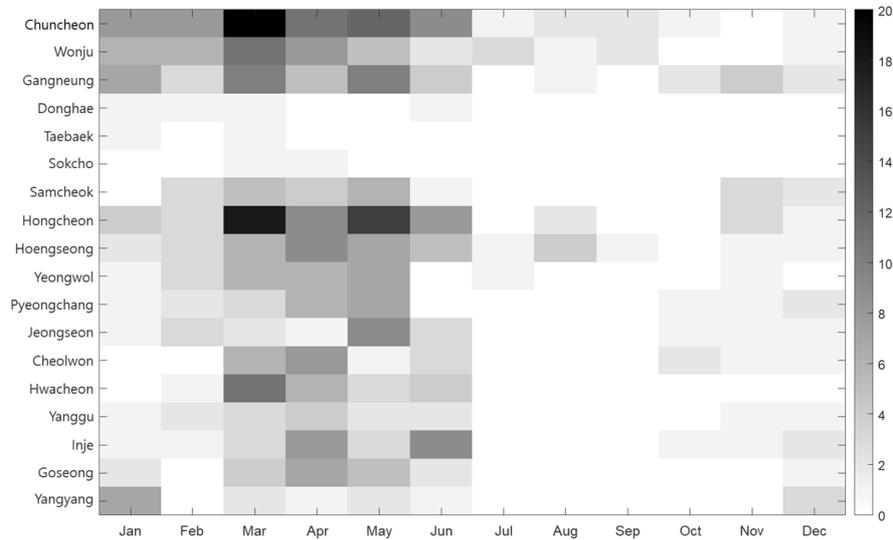


Fig. 4. Monthly Occurrence Frequency of Forest Fires in Gangwon Province

Table 1. Descriptive Statistics for Measured Variables in Latent Variables

Latent variables	No.	Measured variables	Description	Unit	Mean	Median	Standard deviation	Minimum	Maximum
Weather	1	T0D	Daily temperature	°C	17.83	18.89	9.65	-7.66	39.56
	2	T1to7D	Daily average temperature 1 to 7 days before	°C	16.22	16.37	9.04	-4.48	37.33
	3	T8to14D	Daily average temperature 8 to 14 days before	°C	16.71	17.06	9.02	-4.79	38.37
	4	T15to21D	Daily average temperature 15 to 21 days before	°C	16.04	16.18	9.02	-4.79	38.07
	5	SSHR0D	Daily sunshine hour	hr	9.38	9.66	2.65	0.00	13.51
	6	SSHR1to7D	Daily average sunshine hour 1 to 7 days before	hr	8.32	8.30	1.69	3.60	13.17
	7	SSHR8to14D	Daily average sunshine hour 8 to 14 days before	hr	8.51	8.72	2.41	1.80	13.04
	8	SSHR15to21D	Daily average sunshine hour 15 to 21 days before	hr	8.48	8.63	2.23	0.00	13.35
Drought	1	SPI31M	Monthly SPI3 1 month before	—	-0.25	-0.48	1.14	-2.11	2.24
	2	SPI32M	Monthly SPI3 2 months before	—	-0.14	-0.30	1.11	-2.11	2.06
	3	SPI33M	Monthly SPI3 3 months before	—	0.02	-0.06	1.09	-2.15	2.07
	4	SPI61M	Monthly SPI6 1 month before	—	-0.30	-0.38	0.93	-2.24	3.00
	5	SPI62M	Monthly SPI6 2 months before	—	-0.27	-0.36	0.88	-2.22	2.46
	6	SPI63M	Monthly SPI6 3 months before	—	-0.41	-0.44	0.77	-2.54	2.15
	7	SPEI31M	Monthly SPEI3 1 month before	—	-0.28	-0.55	1.05	-2.00	1.98
	8	SPEI32M	Monthly SPEI3 2 months before	—	-0.18	-0.35	1.03	-1.76	1.98
	9	SPEI33M	Monthly SPEI3 3 months before	—	-0.03	-0.15	1.02	-2.06	1.98
	10	SPEI61M	Monthly SPEI6 1 month before	—	-0.38	-0.50	0.88	-1.81	2.19
	11	SPEI62M	Monthly SPEI6 2 months before	—	-0.34	-0.40	0.87	-1.82	2.03
	12	SPEI63M	Monthly SPEI6 3 months before	—	-0.54	-0.56	0.81	-1.93	1.84
Forest fire	1	Area	Damaged area by forest fire	ha	8.16	0.10	62.18	0.01	765.12
	2	Risk Level	Risk level for forest fire	—	2.13	2.00	0.88	1	4

3.2 PLS-SEM 개발 및 모형 적합성 검증

본 연구에서는 강원도에서 발생한 총 502건의 산불에 미치는 영향으로 기상학적 요인과 가뭄에 대한 인과관계를 평가하기 위해 PLS-SEM을 적용하였다. PLS-SEM을 구성하기 위해서 총 3개(기

상, 가뭄, 산불)의 잠재변수를 사용하였으며, 이 중에서 외생 잠재변수와 관련한 설명변수는 기상학적 및 가뭄의 영향을 나타내는 지표를 의미한다. Table 1은 PLS-SEM의 내부모형을 구성하는 잠재변수별 측정모형에 사용되는 설명변수의 통계적 특성을 정리

한 것이다. 여기서 사용된 기상관련 설명변수는 산불 발생 이전의 기상조건을 나타내는 변수(기온 및 일조시간)이며, 가뭄관련 설명변수는 1개월, 2개월, 3개월 선행 가뭄지수(SPI3, SPI6, SPEI3, SPEI6)이다. 내생 잠재변수와 관련한 산불의 설명변수는 산불 발생면적과 산불위험등급(관삼=1, 주의=2, 경계=3, 심각=4)으로 구성되었다.

이처럼 구성된 PLS-SEM의 외부모형 평가를 위해서는 측정변수들에 대한 신뢰도 및 타당도 평가를 통해 모형의 적합성을 검증해야 한다. 본 연구에서는 신뢰도 평가를 위해 크론바흐 알파(Cronbach's alpha, C_α) 계수를 산정하였다. 일반적으로 사용되는 C_α 의 기준치는 0.7 이상 또는 최소 0.6 이상의 값이다(Hair et al., 2011). 본 모형에서 가뭄의 영향을 나타내는 잠재변수의 C_α 는 0.90이며, 가스의 영향을 나타내는 잠재변수의 C_α 는 0.89로 산정되었다. 두 값 모두 기준치 이상의 값이 산정되어 신뢰도 검증은 통과하였다.

또한, 여러 가지 측정변수들이 얼마나 의미 있게 구별되었는지를 검토하는 판별 타당도(discriminant validity) 평가는 측정지표와 잠재변수 간의 교차 적재량(cross loadings)을 기준으로 확인한다. 즉, 연구모형 구축 시에는 측정변수가 잠재변수를 잘 설명하지 못해 낮은 추정치가 나타내거나 통계적으로 유의하지 않은 측정변수(SPEI62M, SPEI63M, SPI33M, SPI63M)를 제외한 후 최종모

형을 결정하게 된다. 그 후 결정된 최종모형에서의 측정지표는 잠재변수 간의 교차 적재량을 비교하여 판별 타당도를 검토한다. 이때 잠재변수의 대상 측정변수는 다른 잠재변수와 비교하여 상대적으로 큰 교차 적재량(굵은 글씨로 표현)을 나타낼 경우 측정변수들이 잠재변수에 따라 구별된다고 판정된다(Table 2 참고).

Fig. 5는 외부모형의 적합도 검증을 통해 최종 결정된 PLS-SEM을 도시한 결과이다. 본 모형 내 잠재변수 간의 인과관계를 나타내는 내부모형에 대한 평가가 필요하다. 이를 위해서는 구조모형에 대한 경로 분석, 모형의 설명력, 모형적합도 기준에 대한 총 3가지 검토를 수행하였다. 첫째, 경로계수 평가항목은 부트스트랩을 사용하여 분석된 $P(<0.05)$ 값을 활용하여 통계적 유의수준으로 평가되었다. 그 결과, 잠재변수 간 경로계수의 유의성은 모두 통계적으로 유의한 정(+)적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 즉, 가뭄 요인이 산불에 미치는 영향력은 0.27, 기상학적 요인이 산불에 미치는 영향력은 0.38인 것으로 나타났다.

둘째, 내생 잠재변수에 대한 외생 잠재변수들의 설명력을 평가하기 위하여, 모형의 설명력을 나타내는 평가항목으로 내생(종속)변수의 f^2 값을 검토하였다. 일반적으로 f^2 값은 0.26 이상인 경우(상), 0.13 이상~0.26 미만인 경우(중), 0.02 이상~0.13 미만인 경우(하)로 구분하여 모형의 설명력을 평가한다(Cohen, 1988). 본 연구모형에서 계산된 내생(종속)변수 f^2 값은 0.28로서, 판단기준 범위에 따르면 가뭄 및 기상학적 영향에 따른 산불 발생의 설명력은 크다고 할 수 있다. 셋째, 모형적합도(GoF, Goodness of Fit) 평가항목은 0.36 이상인 경우(상), 0.25 이상~0.36 미만인 경우(중), 0.1 이상~0.25 미만인 경우(하)로 구분하여 평가하였다(Tenenhaus et al., 2005). 본 연구모형에서 계산된 GoF 값은 0.38로서, 이는 판단기준 범위에 따르면 모형의 적합성은 검증되었다고 판단할 수 있다.

Fig. 6은 봄철의 강원도 산불 발생에 영향을 미치는 요인 평가를 위한 PLS-SEM이다. 여기에는 봄철에 발생한 산불 사상(총 301개)을 기반으로 모형을 구축하였을 뿐 Fig. 5와 동일 조건을 나타내고 있다. 그 결과, 봄철 발생한 산불에 대한 가뭄과 기상학적 영향의 설명력(Fig. 5의 $f^2=0.28$ VS Fig. 6의 $f^2=0.33$)은 증가하는 것으로 확인되며, 이는 봄철 산불에 미치는 가뭄 요인은 이전 연도에 발생한 가을과 겨울 가뭄에 의해 큰 영향을 받은 것임을 알 수 있다(Fig. 2의 지체시간 개념 참고). 또한, 전체 기간 대비 봄철 산불에 미치는 잠재변수의 영향 정도를 비교할 경우, 기상학적 영향이 0.38에서 0.36으로 다소 낮아진 것이 확인된다. 전체 기간에 대한 산불에 미치는 기상학적 영향에는 산불 당일 온도(T0D)와 일조시간(SSHR0D)이 주요 설명변수로 나타나고 있으나, 봄철의 산불에 미치는 기상학적 영향에는 선행 15일~21일의 평균 온도(T15Dto21D) 및 일조시간(SSHR15Dto21D)이 상대적으로 중요한 변수로 확인된다.

Table 2. Cross Loadings of Manifest Variables

Measured variables	Drought	Weather	Forest fire
SPEI31M	-0.45	-0.28	-0.17
SPEI32M	-0.19	-0.11	-0.08
SPEI33M	0.53	0.12	0.21
SPEI61M	0.54	0.07	0.21
SPI31M	-0.43	-0.27	-0.17
SPI32M	-0.20	-0.11	-0.08
SPI61M	0.44	0.03	0.17
SPI62M	0.31	0.11	0.12
T0D	0.30	0.70	0.32
T1to7D	0.29	0.55	0.25
T8to14D	0.29	0.59	0.28
T15to21D	0.27	0.50	0.23
SSHR0D	0.22	0.74	0.34
SSHR1to7D	0.28	0.66	0.30
SSHR8to14D	0.16	0.46	0.21
SSHR15to21D	0.18	0.39	0.18
Area	0.13	0.03	0.23
Risk level	0.38	0.47	0.98

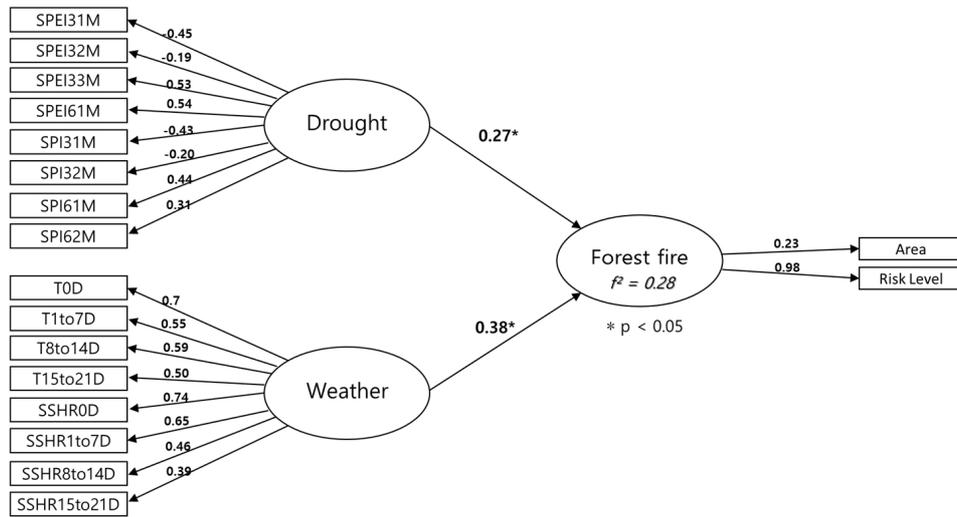


Fig. 5. The PLS-SEM for Forest Fire Impact in Gangwon Province

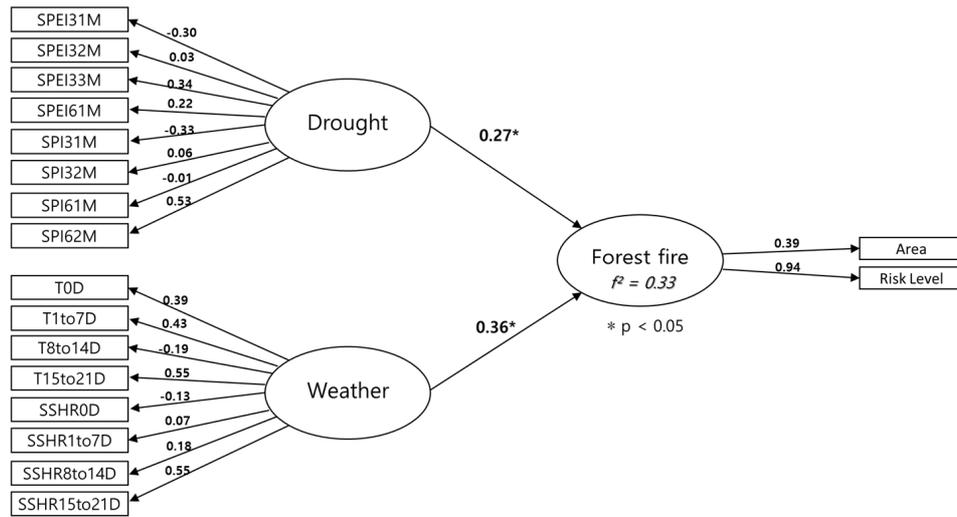


Fig. 6. The PLS-SEM for Forest Fire Impact in Gangwon Province in Spring

4. 결론

본 연구에서는 산불 발생의 요인을 발견하여 인과관계를 해석하기 위해, 지난 2015년 이후 발생한 강원도의 산불을 대상으로 총 502건의 사례를 조사하였다. 해당 기간 내에 발생한 산불 피해면적은 최소 0.01 ha 부터 최대 765.12 ha로 광범위한 규모로 발생하였다. 특히 겨울과 봄에 나타나는 건조기에는 산불발생에 기상학적 영향과 기묘의 영향이 클 가능성이 있어 기상학적 영향-산불, 기묘의 영향-산불 간의 인과분석의 필요성을 확인하였다.

본 연구에서는 기상학적 영향 및 기묘를 산불 발생의 요인으로 가정한 후, PLS-SEM을 이용하여 산불의 영향평가를 수행하기 위한 측정변수를 결정하였다. PLS-SEM의 내부모형을 구성하는데

필요한 잠재변수(기상, 기묘, 산불)를 설명하기 위해 관측이 가능한 측정변수를 구축하였으며, 이를 기반으로 PLS-SEM에 대한 적합도 평가를 수행하여 외부모형과 내부모형의 객관성을 확보하였다.

PLS-SEM을 기반으로 하는 산불 발생의 영향 평가기법은 산불 발생에 원인으로 작용할 가능성이 있는 요인(외생 잠재변수) 간의 인과관계를 해석할 수 있다. 즉, PLS-SEM 내 구조모형을 통해 산불에 미치는 기묘와 기상 요인의 영향 정도는 경로계수(표준화회귀 계수)를 이용하여 정량적 평가가 가능하다. 이에 따라 강원도 502개의 산불 사례를 대상으로 산불에 미치는 요인의 영향력을 평가한 결과, 기묘 요인은 산불에 미치는 영향력이 27 %이며, 기상학적 요인은 산불에 미치는 영향력이 38 %인 것으로 확인되었다. 반면, 강원도에서 발생한 봄 산불에 미치는 요인의 영향력을 평가한 결과에

서는 가뭄 요인에 의한 영향력은 변화가 없는 반면, 기상학적 요인에 의한 영향력은 36 %로 다소 감소하는 것으로 확인되었다.

또한, 봄철에 발생한 산불에 대한 가뭄과 기상학적 영향의 전체 설명력($f^2=0.33$)은 계절의 구분 없이 전 기간을 대상으로 하였을 경우와 비교하여 증가하였다. 특히, 겨울철 강수량을 기반으로 산정된 1개월 선형 단기가뭄(SPI31M, SPEI31M)은 봄철 산불에 미치는 가뭄의 영향 중 큰 비중을 차지하는 것으로 판단되었다. 이외에도 전체 기간 대비 봄철 산불에 미치는 잠재변수의 영향 정도를 비교할 경우 기상학적 영향이 다소 낮아진 것으로 확인되었다.

향후 산불 발생의 위험을 최소화하기 위해서는 사전에 산불을 감지하기 위한 노력이 필요하며, 이를 위해서는 산불의 다양한 발생 원인을 모색하여 요인들 간의 인과관계를 규명하기 위한 다양한 사례연구가 필요할 것이다. 후속 연구에서는 중형 및 대형 산불을 규모 측면에서 그룹화 한 후, 지역별로 나타나는 대형 및 중형 산불의 원인을 규명하기 위해 바람의 영향(순간 최대속도 또는 강풍의 지속시간 등)을 검토할 예정이다. 이처럼 다양한 산불의 영향 요인의 발견은 산불 예·경보를 위한 사전 정보로서 활용 가능성을 기대해 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전 취약핵심역량 도약기술 개발 사업(2020-MOIS33-006)과 한국연구재단의 개인기초연구사업(NRF-2020R1C1C1014636)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Anh, H. H., Hanh, T. M. D., Vi, N. T. T. and Shunbo, Y. (2018). "Examining the interaction of flood vulnerability determinants in Cambodia and Vietnam using partial least squares structural equation modeling." *Water Policy*, Vol. 20, No. 6, pp. 1256-1278.
- Barbero, R., Abatzoglou, J. T., Steel, E. A. and Larkin, N. K. (2014). "Modeling very large-fire occurrences over the continental United States from weather and climate forcing." *Environmental Research Letters*, Vol. 9, No. 124009.
- Bifulco, C., Rego, F., Dias, S. and Stagge, J. H. (2014). "Assessing the association of drought indicators to impacts: The results for areas burned by wildfires in Portugal." *Advances in Forest Fire Research*, pp. 1054-1060.
- Clarke, H. and Evans, J. P. (2019). "Exploring the future change space for fire weather in southeast Australia." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 136, pp. 513-527.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ.
- Djimesah, I. E., Okine, A. N. D. and Mireku, K. K. (2018). "Influential factors in creating warning systems towards flood disaster management in Ghana: An analysis of 2007 Northern flood." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 28, pp. 318-326.
- Fornell, C. and Cha, J. (1994). *Partial least squares*, In R. P. Bagozzi (Ed.), *Advanced Methods of Marketing Research*, Cambridge, pp. 52-78.
- Fornell, C. G. and Larcker, D. F. (1981). "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error." *Journal of Marketing Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-50.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. and Black, W. C. (1998). *Multivariate analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M. and Sarstedt, M. (2014). *A primer on partial least squares structural equation modeling*, Sage, Thousand Oaks, CA.
- Hair, J. F., Ringle, C. M. and Sarstedt, M. (2011). "PLS-SEM: Indeed a silver bullet." *Journal of Marketing Theory and Practice*, Vol. 19, No. 2, pp. 139-152.
- Korea Forest Service (2020). *2019 Statistical yearbook of forest fire* (in Korean).
- Lee, S. Y., Han, S. Y., Won, M. S., An, S. H. and Lee, M. B. (2004). "Developing of forest fire occurrence probability model by using the meteorological characteristic in Korea." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 6, No. 4, pp. 242-249 (in Korean).
- Marín, P. G., Julio, C. J., Dante Arturo, R.T. and Jose, V. N. D. (2017). "Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico." *Chinese Geographical Science*, Vol. 28, pp. 25-37.
- McEvoy, D. J., Hobbins, M., Brown, T. J., VanderMolen, K., Wall, T., Huntington, J. L. and Svoboda, M. (2019). "Establishing relationships between drought indices and wildfire danger outputs: A test case for the California-Nevada drought early warning system." *Climate*, Vol. 7, No. 4.
- Nogueira, J. M., Rambal, S., Barbosa, J. P. R. A. D. and Mouillot, F. (2017). "Spatial pattern of the seasonal drought/burned area relationship across Brazilian biomes: Sensitivity to drought metrics and global remote-sensing fire products." *Climate*, Vol. 5, No. 2.
- Nunnally, J. (1978). *Psychometric theory*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Shipley, B. (2000). *Cause and correlation in biology: A user's guide to path analysis, structural equations and causal inference*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Sung, M. K., Lim, G. H., Choi, E. H., Lee, Y. Y., Won, M. S. and Koo, K. S. (2010). "Climate change over Korea and its relation to the forest fire occurrence." *Atmosphere*, Vol. 20, No. 1, pp. 27-35.
- Tenenhaus, M., Esposito Vinzi, V., Chatelin, Y. and Lauro, C. (2005). "PLS path modeling." *Computational Statistics and Data Analysis*, Vol. 48, No. 1, pp. 159-205.
- Urbietta, I. R., Zavala, G., Bedia, J., Gutiérrez, J. M., San Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Keeley, J. E. and Moreno, J. M. (2015). "Fire activity as a function of fire-weather seasonal severity and antecedent climate across spatial scales in southern Europe and Pacific western USA." *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 114013.

Won, M. S., Jang, K. C. and Yoon, S. H. (2016). "Developing Korean forest fire occurrence probability model reflecting climate change in the spring of 2000s." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 18, No. 4, pp. 199-207 (in Korean).

Won, M. S., Koo, K. S. and Lee, M. B. (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*, Vol. 8, No. 4, pp. 250-259 (in Korean).

Won, M. S., Miah, D., Koo, K. S., Lee, M. B. and Shin, M. S. (2010). "Meteorological determinants of forest fire occurrence in the fall, South Korea." *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 99, No. 2, pp. 163-171 (in Korean).

Zúñiga-Vásquez, J. M., Cisneros-González, D. and Pompa-García, M. (2019). "Drought regulates the burned forest areas in Mexico: the case of 2011, a record year." *Gerocarto International*, Vol. 34, No. 5, pp. 560-573.